修士論文

XRISM 衛星搭載極低温検出器における 微小擾乱干渉の影響評価と低減

愛媛大学大学院 理工学研究科 数理物質科学専攻 物理科学コース 高エネルギー天文学グループ

今村竜太

初版 2022年1月31日 第2版 2022年3月25日

2022年3月25日更新

Abstract

X線天体は、気球やロケットなどを用いて観測機器を大気圏外に打ち上げることで、1962 年に初めて観測された。1970 年に初めて打ち上げられた Uhuru 衛星は比例計数管 (エネルギー分解能: $\Delta E_{\rm FWHM}=1200~{
m eV}$ @ 6keV) を搭載しており、長時間観測によって多くの X線天体を発見し、X線天文学を飛躍させた。1993 年に日米共同で X線 CCD カメラ ($\Delta E_{\rm FWHM}=135~{
m eV}$ @ 6 keV) を搭載した「あすか」衛星が打ち上げられた。近年では、より高い分解能を求めて極低温検出器が搭載されるようになった。2016 年に日米欧共同でマイクロカロリメータを搭載した「ひとみ」衛星が打ち上げられた。「ひとみ」は軌道上で $\Delta E_{\rm FWHM}\sim 5~{
m eV}$ @ 6 keV の超高分解能を達成したが、衛星の不具合により打ち上げ後すぐに運用を断念した。2022 年度に代替の X 線天文衛星 XRISM を打ち上げる予定である。

XRISM 衛星には 50 mK で作動するマイクロカロリメータ (Resolve) が搭載される。マイクロカロリメータは光子のエネルギーを温度変化として検出する装置である。 Resolve は液体 He 冷媒、機械式冷凍機 (2 段スターリング冷凍機 =STC とジュールトムソン冷凍機 =JTC) と断熱消磁冷凍機を用いて、温度を極低温で安定させ高エネルギー分解能を達成している。しかし、マイクロカロリメータでは機械式冷凍機やリアクションホイールなどが発生させる微小擾乱によって、機械的エネルギーが極低温部に浸入することでノイズが発生する。このノイズはマイクロカロリメータの分光性能を著しく低下させるため、ノイズの発生原因の特定と除去が重要な課題である。「ひとみ」衛星でも同様な問題が発生し、原因追求のため装置が受ける振動を加速度として測定するシステムが構築された。しかし、データは間欠的にしか取得されていないため、網羅的な解析がされていない。これを踏まえ、Resolve では、地上試験中センサーが 50 mK に保持される全期間 (1748 時間 =6.3 Ms) を通じて、均質かつ連続的な加速度データを取得した。現代の高感度観測天文学の主流となる極低温センサーにおいて、前例のない質及び量のデータセットである。これを網羅的に解析し、微小擾乱干渉の物理的なメカニズムや長期的なトレンドを追求することが本研究の目標である。

具体的には、以下の3つの課題に取り組んだ。1つ目は、加速度データとマイクロカロリメータのノイズデータを用いた機械式冷凍機による微小擾乱ノイズの特定と干渉メカニズムの解明である。加速度データのスペクトルから冷凍機が発生させる振動を特定し、マイクロカロリメータのノイズスペクトルから同等のものを探した。冷凍機の駆動周波数は JTC が32 段階、STC が256 段階で変化させることができるため、多くの組み合わせでデータを取得した。 その結果、JTC の4 及び7 倍波の周波数で共鳴が起こり、ノイズが大きくなることが分かった。また、冷凍機の周波数に依存した2種類の低周波ノイズが出現し、このノイズのうちの1つは冷凍機高周波が非線形増幅によって熱化することで発生していると推定した。これらが分光性能の大きな劣化をもたらすことを示し、その出現メカニズムについて考察した。

2つ目は、Resolve 外から侵入する微小擾乱を加振機を用いて再現し、擾乱がマイクロカロリメータに与える影響を評価した。加振機で発生させる振動の周波数と振幅を変化させ、マイクロカロリメータの応答を調査した。結果、特定の周波数でのみマイクロカロリメータにノイズが発生した。また、この周波数は冷凍機の4倍と7倍の高調波に近い値であった。加振と応答の関係から、分光性能劣化として許容可能なレベルを新たに求めた。

3つ目は、冷凍機駆動周波数の最適化とその方法の確立である。1つ目の課題からノイズの出現条件が予測できたため、それを避けるように冷凍機駆動周波数を設定すればよい。マイクロカロリメータの温度データとノイズデータから、JTCとSTCの駆動周波数の組み合わせを網羅的に評価し、その中から最適な組み合わせを段階的に見つける方法を確立した。

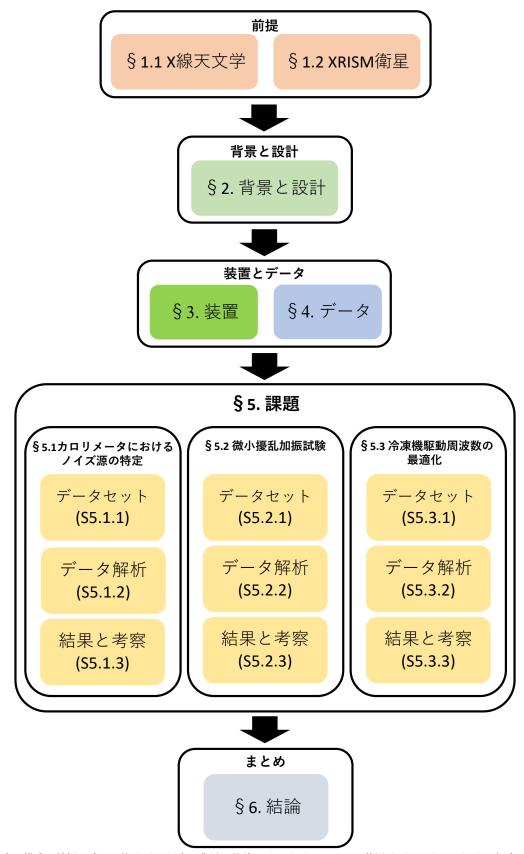


図 1. 本論文の構成。前提を述べた後 (§1)、研究の背景と設計を示す (§2)。 Resolve 装置 (§3) とデータ (§4) を紹介した後、3 つの課題を論ずる (§5)。最後に結論 (§6) をまとめる。章ごとに色分けをしている。

目次

第1章	X 線天	- - - - - - -	19
1.1		文学と X 線天文衛星	19
1.2		M 衛星	23
1.2	1.2.1	*4 開生	23
	1.2.1 $1.2.2$	(円子日保こ安水住肥	_
			24
	1.2.3	バス系機器	29
第2章	研究の	背景と設計	35
2.1	背景.		35
	2.1.1	微小擾乱干涉	35
	2.1.2	ひとみ衛星 SXS 装置における微小擾乱干渉	37
2.2	研究の	設計	38
	2.2.1	節囲	38
	2.2.2	課題	38
	2.2.3	構成	39
	2.2.0	197%	00
第3章	装置		40
3.1	Resolv	ne 装置	40
	3.1.1	検出器	44
	3.1.2	信号処理系	45
	3.1.3	冷却系	49
	3.1.4	クライオスタット	56
3.2	加速度	測定系	58
	3.2.1	- 測定系について	58
	3.2.2	加速度測定系の構成図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	60
	3.2.3	ハードウェア・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	61
	3.2.4	ソフトウェア	63
3.3	加振試		66
0.0	3.3.1	- 測定系について	66
	3.3.2	例と示について	
	3.3.2	ハードワエア・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	66

第4章	データ取得	69
4.1	試験の概要	69
	4.1.1 TC1	70
	4.1.2 TC2	72
	4.1.3 TC1A	73
	4.1.4 TC2A	74
	4.1.5 TC3	77
	4.1.6 TC4	80
	4.1.7 TC5	83
4.2	データセット	85
	4.2.1 HK データ	85
	4.2.2 マイクロカロリメータのデータ	86
	4.2.3 加速度のデータ	92
第5章	課題	106
5.1	カロリメータにおけるノイズ源の特定	106
	5.1.1 データセット	106
	5.1.2 データ解析	107
	5.1.3 結果と考察	131
5.2	微小擾乱加振試験	142
	5.2.1 データセット	142
	5.2.2 データ解析	145
	5.2.3 結果と考察	164
5.3	冷凍機駆動周波数の最適化....................................	168
	5.3.1 データセット	168
	5.3.2 データ解析	170
	5.3.3 結果と考察	180
第6章	結論 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	197
付録 A	データの処理方法	200
A.1	離散フーリエ解析	200
	A.1.1 直交関数系とフーリエ級数	200
	A.1.2 フーリエ変換	201
	A.1.3 離散フーリエ変換	202
A.2	サンプリング	203
	A.2.1 離散フーリエ変換の周波数範囲	
	A.2.2 サンプリングとサンプリング定理	
	A.2.3 サンプリング周波数とレコード長の決定	
A.3		208

目	次	6

A.4	窓関数	208
付録 B	全 run の取得データ	210
付録 C	Dwell 試験の結果	284
C.1	HNS 加振	284
C.2	XBOX 加振	292
C.3	DWR 加振	298
付録 D	Scan strategy	307
D.1	TC2A	308
D.2	TC4	316
D.3	TC5	330
付録 E	加速度センサの較正カーブ	339
謝辞		348
参考文献		350

1	本論文の構成	3
1.1	超新星残骸 SN1006 の 0.4–8 keV の撮像データ	21
1.2	超新星残骸 SN1006 の典型的なスペクトル	22
1.3	XRISM 衛星搭載 X 線望遠鏡 XMA	24
1.4	XRISM 衛星搭載の Xtend	25
1.5	CCD のフォーマット	26
1.6	CCD の配置	26
1.7	X 線マイクロカロリメータの基本構造	28
1.8	X 線光子吸収時の吸収体の温度応答	28
1.9	姿勢制御系のシステムダイアグラム。	30
1.10	ジャイロを Ω で回転。	31
1.11	不釣合いのあるホイールの力学モデル。....................................	32
1.12	リアクションホイールの周波数と発生させる振動の周波数の関係	34
2.1	微小擾乱源と微小擾乱の種類、及び経路。	39
3.1	XRISM 衛星の全体像と Resolve	41
3.2	SXS サブシステム構造のブロックダイアグラム	42
3.3	X 線マイクロカロリメータ検出器の性能実証機	44
3.4	ピクセルマップ。	44
3.5	anti-co 検出器の模式図	45
3.6	重畳イベントにおける、ファーストパルスとセカンドパルスの模式図	46
3.7	セカンドパルスの検出の概要	47
3.8	グレード付けの定義	48
3.9	LO_RES_PH の計算	48
3.10	スターリング冷凍機のサイクルの例	50
3.11	スターリング冷凍機の $p-V$ 図 \dots	50
3.12	断熱壁に囲まれ細孔栓で仕切られたピストン	51
3.13	ADR の冷凍サイクル	55
3.14	1 自由度の振動	56
3.15	$Resolve$ の冷却チェーン(左図)と CAD で書かれたデュワーの断面図 (右図) \dots	57

3.16	QL システムの例	59
3.17	8ch で取得したデータのパースペクトル	59
3.18	冷凍機の振動を変化させた場合の DWR -Y X 軸のヒートマップ	60
3.19	加速度測定系のダイアグラム	61
3.20	ハードウェアの写真	62
3.21	加速度測定系の概観	62
3.22	ハードウェア同士の接続	63
3.23	加振試験系のシステムダイアグラム	66
3.24	ハーネス、XBOX 加振試験系のハードウェア。	67
3.25	デュワー ベースプレート加振試験系のハードウェア。	68
4.1	(a) デュワーのイラスト (b) デュワーの断面の概略図と座標軸の定義 (Dewar axis)	70
4.2	TC1 で設置された加速度ピックアップ	71
4.3	$\mathrm{TC1}$ でのキャリブレーションピクセルの $\mathrm{Mn ext{-}K}lpha$ 線のスペクトル。	72
4.4	TC1A で設置された加速度ピックアップ	73
4.5	TC1A でのキャリブレーションピクセルの Mn-K $lpha$ 線のスペクトル。	74
4.6	TC2A で設置された加速度ピックアップ	75
4.7	$ ext{TC2A}$ でのキャリブレーションピクセルの $ ext{Mn-K}lpha$ 線のスペクトル。	77
4.8	TC3 で設置された加速度ピックアップ (振動試験前)	78
4.9	TC3 で設置された加速度ピックアップ (振動試験後)	78
4.10	TC3 でのキャリブレーションピクセルの Mn-K $lpha$ 線のスペクトル。	80
4.11	TC4 で設置された加速度ピックアップ (加速度測定系)	81
4.12	TC4 で設置された加速度ピックアップ(加振系)	81
4.13	$\mathrm{TC4}$ でのキャリブレーションピクセルの $\mathrm{Mn ext{-}K}lpha$ 線のスペクトル。	83
4.14	TC5 で設置された加速度ピックアップ	84
4.15	${ m TC5}$ でのキャリブレーションピクセルの ${ m Mn ext{-}K}lpha$ 線のスペクトル。	85
4.16	HK プロットの例	86
4.17	1k ノイズスペクトル	88
4.18	8k ノイズスペクトル	88
4.19	WFRB で取得された波形	89
4.20	WFRB で取得された波形をフーリエ変換したもの (32 秒で取得された WFRB)	89
4.21	sample dump で取得された波形	90
4.22	sample dump で取得された波形をフーリエ変換したもの	90
4.23	Noise record で取得されたノイズ波形	91
4.24	Noise record で取得されたノイズ波形をフーリエ変換したもの	91
4.25	TC1 での He tank, DMS middle -Y, DMS top のスペクトルの典型なデータ。	93
4.26	TC1A での He tank, DMS middle -Y, DMS top のスペクトルの典型なデータ。	93
4.27	TC2A での He tank, DMS middle -Y, DMS top のスペクトルの典型なデータ。	94
4.28	TC3 での He tank, DMS middle -Y, DMS top のスペクトルの典型なデータ。	94

4.29	VIS の有無による加速度スペクトルの変化	95
4.30	Spot cooler ON/OFF 、 Cryo Cooler ON/OFF の 4 つの組み合わせのときに取得さ	
	れた加速度スペクトル	97
4.31	(上段) デュワーのベースプレートの加速度データの時空間データ、 (下段) ピクセル 10	
	番の sample dump の時空間データ	99
4.32	(上段) デュワーのベースプレートの周波数空間データ (下段) ピクセル 10 番の sample	
	dump の周波数データ	100
4.33	200.5 Hz のノイズだけを残し逆フーリエ変換をかけて取得した時空間データ	101
4.34	SC-A/B, PC-A/B の加速度データ	103
4.35	各電力のときに取得された加速度スペクトルを SC -A が $39.9~W$ のときの加速度スペク	
	トルで割ったもの (ch03:SC-A)。	104
4.36	各電力のときに取得された加速度スペクトルを SC -B が $39.9~W$ のときの加速度スペク	
	トルで割ったもの (ch04:SC-B)。	104
4.37	各電力のときに取得された加速度スペクトルを PC-A が 39.9 W のときの加速度スペク	
	トルで割ったもの (ch05:PC-A)。	105
4.38	各電力のときに取得された加速度スペクトルを PC-B が 39.9 W のときの加速度スペク	
	トルで割ったもの (ch06:PC-B)。	105
5.1	JTC 駆動周波数 $(f_{\rm JTC})$ の毎の ${ m px}00$ 番の ${ m sample\ dump\ }$ スペクトル。	108
5.2	JTC 駆動周波数と sanome dump スペクトルの関係 $(0-100~{ m Hz})$	110
5.3	JTC 駆動周波数と sanome dump スペクトルの関係 $(100-200~{ m Hz})$	111
5.4	JTC 駆動周波数と sanome dump スペクトルの関係 $(200-300~{ m Hz})$	112
5.5	JTC 駆動周波数と sanome dump スペクトルの関係 (300 – 400 Hz)	113
5.6	JTC 駆動周波数と sanome dump スペクトルの関係 $(400-500~{ m Hz})$	114
5.7	加速度データの 2 次元プロット $(0-500~{ m Hz})$	116
5.8	He tank の加速度スペクトル (50–486 Hz)	118
5.9	ch00 の基本波	119
5.10	STC によるピーク	119
5.11	JTC、STC の倍波でなく、ピークの分布が狭いもの $(ch00)$	120
5.12	JTC、STC の倍波でなく、ピークの分布が広いもの $(ch00)$	120
5.13	左:加速度データ (ch00) 右:8k ns データ (px00)	121
5.14	加速度データの分類のまとめ	121
5.15	応答関数のプロット (He tank (X)、px00) \dots	124
5.16	応答関数のプロット (He tank (X)、全てのピクセル)	125
5.17	マイクロカロリメータの読み出し回路	126
5.18	Anti-co 検出器の読み出し回路	127
5.19	各データのマイクロカロリメータと Anti-co 検出器のノイズスペクトル。	127
5.20	図 5.19 の低周波数側を拡大した図	128
5.21	各ピクセルのノイズスペクトルのピーク (150 Hz)。	129

5.22	各ピクセルのノイズスペクトルのピーク (208 Hz)。	129
5.23	各ピクセルのノイズスペクトルのピーク (355 Hz)。	130
5.24	各ピクセルのノイズスペクトルのピーク (375 Hz)。	130
5.25	各ピクセルのノイズスペクトルのピーク (482 Hz)。	131
5.26	AC 電源周波数とマイクロカロリメータノイズスペクトルの関係。	132
5.27	JTC 駆動周波数 $(f_{\rm JTC})$ の関数で表した ${ m px}00$ 番の ${ m sample\ dump\ }$ スペクトル $(0-30$	
	$\mathrm{Hz})_{\circ}$	134
5.28	左図:マイクロカロリメータデータのスペクトルを JTC 駆動周波数の関数としてプロッ	
	トしたもの。右図:左図で確認できたピークを抜き出しプロットしたもの。	135
5.29	TC1 run1 で確認できる px00 番のうなり	135
5.30	$4f_{\mathrm{JTC}}$ とそれに依存したうなり	137
5.31	非線形効果を適用した波のスペクトル	139
5.32	調査に使用したデータのスペクトル	140
5.33	ビート $(4f_{\rm JTC}-14f_{\rm STC})$ のピクセル依存性	140
5.34	$4f_{ m JTC}$ のピクセル依存 \dots	140
5.35	ビート $(7f_{\mathrm{JTC}}-24f_{\mathrm{STC}})$ のピクセル依存性 \ldots	141
5.36	$7f_{ m JTC}$ のピクセル依存性	141
5.37	加振系の加振機....................................	142
5.38	ハーネス, XBOX, デュワー ベースプレートごとの I/F レベル	143
5.39	XBOX 加振で使用した加速度ピックアップの名前と差表軸の定義	144
5.40	ハーネス加振で使用した加速度ピックアップの名前と差表軸の定義	144
5.41	HNS Micro-vibration frequency vs force	147
5.42	HNS Micro-vibration frequency vs Accel	147
5.43	HNS Micro-vibration frequency vs Temperature standard deviation	148
5.44	HNS Micro-vibration frequency vs $\frac{dI}{dt}$	148
5.45	HNS 加振 (35 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)	150
5.46	HNS 加振 (45 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)	150
5.47	HNS 加振 (55 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)	150
5.48	HNS 加振 (70 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)	150
5.49	HNS 加振 (120 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)	151
5.50	HNS 加振 (170 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)	151
5.51	HNS 加振 (200 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)	151
5.52	XBOX Micro-vibration frequency vs force	152
5.53	XBOX Micro-vibration frequency vs Accel	153
5.54	XBOX Micro-vibration frequency vs Temperature standard deviation	153
5.55	XBOX Micro-vibration frequency vs $\frac{dI}{dt}$	154
5.56	Dwell 周波数と選定理由 (XBOX 加振)	
5.57	XBOX 加振 (25 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)	155
5.58	XBOX 加振 (70 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)	155

5.59	XBOX 加振 (120 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番) 156
5.60	XBOX 加振 $(170~{\rm Hz})$ のときのノイズスペクトル $(ピクセル~00~{\rm \pmb{a}})~\dots~156$
5.61	XBOX 加振 (205 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番) 156
5.62	DWR Micro-vibration frequency vs force
5.63	DWR Micro-vibration frequency vs Accel
5.64	DWR Micro-vibration frequency vs Temperature standard deviation
5.65	DWR Micro-vibration frequency vs $\frac{dI}{dt}$
5.66	Dwell 周波数と選定理由 (デュワー ベースプレート加振)
5.67	DWR Micro-vibration frequency vs Temperature standard deviation 160
5.68	DWR Micro-vibration frequency vs $\frac{dI}{dt}$
5.69	DWR BP 加振 (35 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番) 161
5.70	DWR BP 加振 (70 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番) 161
5.71	DWR BP 加振 (120 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番) 162
5.72	DWR BP 加振 (55 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番) 162
5.73	DWR BP 加振 (170 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番) 162
5.74	DWR BP 加振 (200 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番) 162
5.75	DWR BP 加振 (200.5 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番) 163
5.76	DWR BP 加振 (380.4 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番) 163
5.77	JTC の高調波が取りえる範囲
5.78	ハーネス (HNS) 加振の線形性の確認
5.79	デュワー ベースプレート (DWR BP) 加振の線形性の確認 166
5.80	HNS, DWR BP 加振時にノイズスペクトルに出現する低周波ラインノイズの例 166
5.81	検出器の温度の標準偏差 (TC2A Step0)
5.82	ADR の電流の傾き (TC2A Step0)
5.83	検出器の温度の標準偏差 (TC4 Step0)
5.84	ADR の電流の傾き (TC4 Step0)
5.85	検出器の温度の標準偏差 (TC5 Step0)
5.86	ADR の電流の傾き (TC5 Step0)
5.87	Step1 の検出器面の温度の標準偏差。
5.88	Step1 の ADR のマグネット電流の傾き
5.89	TC2A Step1 で抽出された 1054 点
5.90	TC4 Step1 で抽出された 1200 点
5.91	TC5 Step1 で抽出された 156 点
5.92	Step2 の検出器面の温度の標準偏差。
5.93	Step2 の ADR のマグネット電流の傾き
5.94	Step2 Ø Sample dump
5.95	TC2A Step2 で抽出された 81 点
5.96	TC4 Step2 で抽出された 80 点
5.97	TC5 Step2 で抽出された 10 点

5.98	Step3 の検出器面の温度の標準偏差。	180
5.99	Step3 の ADR のマグネット電流の傾き	181
5.100	Step3 \mathcal{O} Sample dump	182
5.101	TC2A Step3 で抽出された 11 点	183
5.102	TC4 Step3 で抽出された 10 点	183
5.103	Step4 の検出器面の温度の標準偏差 (TC4)。	183
5.104	Step4 の ADR のマグネット電流の傾き (TC4)	184
5.105	Step4 \mathcal{O} Sample dump	184
5.106	TC4 Step4 で抽出された 3 点	185
5.107	TC2A Step0 中の加速度スペクトル	186
5.108	TC2A Step1 中の加速度スペクトル	187
5.109	TC2A Step2 中の加速度スペクトル	187
5.110	TC2A Step3 中の加速度スペクトル	188
5.111	TC4 Step0 中の加速度スペクトル	188
5.112	TC4 Step1 中の加速度スペクトル	189
5.113	TC4 Step2 中の加速度スペクトル	189
5.114	TC4 Step3 中の加速度スペクトル	190
5.115	TC4 Step4 中の加速度スペクトル	190
5.116	2021/07/25 に測定されたマイクロカロリメータのエネルギー分解能	192
5.117	2021/07/28 に測定されたマイクロカロリメータのエネルギー分解能	192
5.118	2021/12/02 に測定されたマイクロカロリメータ (キャリブレーションピクセル) のエネ	
	ルギー分解能	193
5.119	2021/12/13 に測定されたマイクロカロリメータ (キャリブレーションピクセル) のエネ	
	ルギー分解能	193
5.120	Step0 での冷凍機駆動周波数最適化	194
5.121	Step2 での冷凍機駆動周波数非最適化時のノイズスペクトル	194
5.122	Step2 での冷凍機駆動周波数最適化時のノイズスペクトル	195
5.123	Step3 での冷凍機駆動周波数非最適化時のノイズスペクトル	195
5.124	Step3 での冷凍機駆動周波数最適化時のノイズスペクトル	196
)+4+88Wkk. w n+88888 - 2.2	200
A.1	連続関数をある時間間隔でサンプリング・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
A.2	区分求積法	
A.3	波数 2 の離散的な波	
A.4	N 等分された単位円周上の点($N=8$ の場合)	
A.5	くし形関数	
A.6	サンプリングとフーリエ変換	
A.7	エイリアシング・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
A.8	(左) 窓関数をかける前の関数と (右) 窓関数をかけた後の関数	
A.9	(青線) ハニング窓、(赤線)ハミング窓、(緑線) ブラックマン窓	209

B.1	各パラメータの変化 (TC1 run1)
B.2	加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run1)
B.3	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run1)
B.4	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run1)
B.5	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run1)
B.6	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run1)
B.7	He tank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1) 214
B.8	He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1) 215
B.9	He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1) 215
B.10	DMS middle -Y (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1) 216
B.11	DMS middle -Y YX) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1) 216
B.12	DMS middle -Y (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1) 217
B.13	各パラメータの変化 (TC1 run2)
B.14	加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run2)
B.15	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run2)
B.16	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run2)
B.17	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run2)
B.18	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run2)
B.19	He tank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run2)
B.20	He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run2)
B.21	He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run2)
B.22	各パラメータの変化 (TC1 run3)
B.23	加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run3)。
B.24	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run3)
B.25	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run3)
B.26	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run3)
B.27	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run3)
B.28	He tank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run3)
B.29	He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run3)
B.30	He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run3)
B.31	各パラメータの変化 (TC1 run4)
B.32	加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run4)。
B.33	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run4)
B.34	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run4)
B.35	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run4)
B.36	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run4)
B.37	He tank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run4) 231
B.38	He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run4) 232
B.39	He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run4)

B.40	各パラメータの変化 (TC1 run5)	233
B.41	加速度スペクトルのヒートマップ(TC1 run5)。	234
B.42	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run5)	234
B.43	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run5)	235
B.44	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run5)	235
B.45	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run5)	236
B.46	$\operatorname{He\ tank\ }(X)$ の加速度データを使用して作成した応答関数 $(\operatorname{TC1\ run5})$	236
B.47	He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run5)	237
B.48	He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run5)	237
B.49	各パラメータの変化 (TC1 run6)	238
B.50	加速度スペクトルのヒートマップ(TC1 run6)。	239
B.51	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run6)	239
B.52	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run6)	240
B.53	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run6)	240
B.54	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run6)	241
B.55	He tank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 $(TC1 \text{ run6})$	241
B.56	He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run6)	242
B.57	He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run6)	242
B.58	各パラメータの変化 (TC1 run7)	243
B.59	加速度スペクトルのヒートマップ(TC1 run7)。	244
B.60	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run7)	244
B.61	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run7)	245
B.62	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run7)	245
B.63	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run7)	246
B.64	He tank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 $(TC1 \text{ run7})$	246
B.65	He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 $(TC1 \text{ run7})$	247
B.66	He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run7) \dots	247
B.67	各パラメータの変化 (TC1 run8)	248
B.68	加速度スペクトルのヒートマップ(TC1 run8)。	249
B.69	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run8)	249
B.70	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run8)	250
B.71	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run8)	250
B.72	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run8)	251
B.73	He tank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run8)	251
B.74	He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run8)	252
B.75	He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run8)	252
B.76	各パラメータの変化 (TC1A run2)	253
B.77	加速度スペクトルのヒートマップ(TC1A run2)。	254
B.78	各パラメータの変化 (TC1A run3)	255

B.79	加速度スペクトルのヒートマップ(TC1A run3)。
B.80	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run3)
B.81	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run3)
B.82	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run3)
B.83	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run3)
B.84	DMS middle -Y (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run3) 258
B.85	DMS middle -Y YX) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run3) 259
B.86	DMS middle -Y (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run3) 259
B.87	各パラメータの変化 (TC1A run4)
B.88	加速度スペクトルのヒートマップ(TC1A run4)。
B.89	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run4)
B.90	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run4)
B.91	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run4)
B.92	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run4)
B.93	DMS middle -Y (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run4) 263
B.94	DMS middle -Y YX) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run4) 264
B.95	DMS middle -Y (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run4) 264
B.96	各パラメータの変化 (TC1A run5)
B.97	加速度スペクトルのヒートマップ(TC1A run5)。
B.98	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run5)
B.99	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run5)
B.100	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run5)
B.101	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run5)
B.102	DMS middle -Y (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run5) 268
B.103	DMS middle -Y YX) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run5) 269
B.104	DMS middle -Y (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run5) 269
B.105	各パラメータの変化 (TC2A run1)
B.106	加速度スペクトルのヒートマップ(TC2A run1)。
B.107	各パラメータの変化 (TC2A run2)
B.108	加速度スペクトルのヒートマップ(TC2A run2)。
B.109	各パラメータの変化 (TC2A run3)
B.110	加速度スペクトルのヒートマップ(TC2A run3)。
B.111	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run3)
B.112	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run3)
B.113	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run3)
B.114	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run3)
B.115	各パラメータの変化 (TC2A run3)
B.116	加速度スペクトルのヒートマップ(TC2A run4)。
B.117	A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run4)

B.118	A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run4)	280
B.119	B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run4)	280
B.120	B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run4)	281
B.121	各パラメータの変化 (TC3 run1)	282
B.122	加速度スペクトルのヒートマップ(TC3 run1)。	283
C.1	HNS 加振 (35 Hz) のときのノイズスペクトル	285
C.2	HNS 加振 (45 Hz) のときのノイズスペクトル	286
C.3	HNS 加振 (55 Hz) のときのノイズスペクトル	287
C.4	HNS 加振 (70 Hz) のときのノイズスペクトル	288
C.5	HNS 加振 (120 Hz) のときのノイズスペクトル	289
C.6	HNS 加振 (170 Hz) のときのノイズスペクトル	290
C.7	HNS 加振 (200 Hz) のときのノイズスペクトル	291
C.8	XBOX 加振 (25 Hz) のときのノイズスペクトル	293
C.9	XBOX 加振 (70 Hz) のときのノイズスペクトル	294
C.10	XBOX 加振 (120 Hz) のときのノイズスペクトル	295
C.11	XBOX 加振 (170 Hz) のときのノイズスペクトル	296
C.12	XBOX 加振 (205 Hz) のときのノイズスペクトル	297
C.13	DWR BP 加振 (35 Hz) のときのピクセル 00 板尾ノイズスペクトル	299
C.14	DWR BP 加振 (70 Hz) のときのノイズスペクトル	300
C.15	DWR BP 加振 (120 Hz) のときのノイズスペクトル	301
C.16	DWR BP 加振 (55 Hz) のときのノイズスペクトル	302
C.17	DWR BP 加振 (170 Hz) のときのノイズスペクトル	303
C.18	DWR BP 加振 (200 Hz) のときのノイズスペクトル	304
C.19	DWR BP 加振 (200.5 Hz) のときのノイズスペクトル	305
C.20	DWR BP 加振 (380.4 Hz) のときのノイズスペクトル	306

表目次

1.1	Xtend の仕様	25
1.2	姿勢制御系の機器のまとめ。	29
1.3	RW の性能。	31
1.4	図 1.11 で使用している変数	32
1.5	リアクションホイールのロッキングモード関連のパラメータ	34
3.1	Resolve の要求値	41
3.2	Resolve のコンポーネントの概要	43
3.3	ハードウェアの一覧。	61
3.4	HNS,XBOX 加振試験系のハードウェアの一覧。	67
3.5	デュワー ベースプレート加振試験系のハードウェアの一覧。	67
4.1	各 TC のまとめ	70
4.2	TC1 で加速度データを取得した位置と設定	71
4.3	TC1A で取得された加速度データの位置	73
4.4	TC2A で取得した加速度データの位置と設定	76
4.5	TC2A で加速度データを取得した時間とそのときの設定	76
4.6	TC3 で取得した加速度データの位置と設定	79
4.7	TC4 で取得した加速度データの位置と設定	82
4.8	TC4 で加速度データを取得した時間とそのときの設定	82
4.9	TC5 で取得した加速度データの位置と設定	84
4.10	ノイズデータを取得するパラメータ (TC1)	92
4.11	ノイズデータを取得するパラメータ (TC1A)	92
4.12	ノイズデータを取得するパラメータ (TC2A、TC3、TC4、TC5)	92
4.13	加速度データが取得されたときの日付と冷凍機の電力。	92
4.14	加速度の冷凍機パワー依存性を調査するために使用したデータのパラメータ	102
5.1	各 run のまとめ	107
5.2	原因の分からないピークの周波数	122
5.3	バイアス電圧依存性の調査に使用したデータのパラメータ	127
5.4	AC 電源周波数依存性の調査に使用したデータのパラメータ	131

表目次 18

5.5	$7f_{ m JTC}$ によるうなりが出現した周波数 \dots 136
5.6	調査に使用したデータのパラメータ
5.7	XBOX 加振の試験パラメータ
5.8	ハーネス加振の試験パラメータ
5.9	デュワー ベースプレート加振の試験パラメータ
5.10	Dwell 周波数と選定理由 (ハーネス加振)
5.11	HNS Dwell 試験のまとめ
5.12	XBOX Dwell 試験のまとめ
5.13	DWR Dwell 試験のまとめ
5.14	加振周波数とマイクロカロリメータ温度安定性。
5.15	加振時に出現する低周波ラインノイズの擾乱源のまとめ
5.16	Step のまとめ
5.17	TC2A の周波数スキャンの結果のまとめ。
5.18	TC4 の周波数スキャンの結果のまとめ。
5.19	TC5 の周波数スキャンの結果のまとめ。
6.1	データ取得した場所と日時。
6.2	データ取得した場所と日時。
B.1	各 run のまとめ
D.1	Scan strategy (Step0)
D.2	Scan strategy (Step1)
D.3	Scan strategy (Step2)
D.4	Scan strategy (Step3)
D.5	Scan strategy (Step0)
D.6	Scan strategy (Step1)
D.7	Scan strategy (Step2)
D.8	Scan strategy (Step3)
D.9	Scan strategy (Step4)
D.10	Scan strategy (Step0)
D.11	Scan strategy (Step1)
D.12	Scan strategy (Step2)

第1章

X 線天文学

Contents

1.1	X 線天文学と X 線天文衛星 19
1.2	XRISM 衛星
	1.2.1 科学目標と要求性能 23
	1.2.2 ミッション系機器 24
	1.2.3 バス系機器

1.1 X 線天文学と X 線天文衛星

電波、赤外線、可視光、紫外線、X線および γ 線すべてを総称して電磁波と呼ぶ。波長が $\sim 10^{-11}-10^{-8}$ m ほどの電磁波を X 線と呼び、さらに短い電磁波を γ 線と呼ぶ。X 線は地球の大気を透過することができないため、X 線を観測するためには大気圏の外に出なければならない。そこで、用いられたものが気球やロケットなどの飛翔体である。1950 年頃から、H.Freedman らによって太陽からの X 線は観測されていた [1] が、1962 年にアメリカの B.Rossi、R.Giacconi らの比例計数管を用いた観測によって、太陽系外の X 線天体 (Sco X-1) が初めて観測された [2]。こうして、X 線天文学が創始された。

宇宙 X 線の観測は、初期のころには主に観測ロケットや観測気球により行われていたため、1 回の観測時間は短時間に限られていた。しかし、1964 年にかに星雲からの X 線の同定、1966 年に Sco X-1 の光学天体の同定など重要な発見がなされた。1970 年にアメリカによって、最初の X 線天文衛星 Uhuruが打ち上げられた。Uhuru 衛星によって長時間観測が可能になると、多くの X 線放射天体が発見され、X 線天文学は飛躍的に発展した。Uhuru 衛星 [3] には比例計数管と機械的コリメータを組み合わせたものが搭載され、全天サーベイが行われた。Uhuru 衛星は約 400 個の X 線天体を発見した。その中には、X 線パルサー、中性子星、活動銀河核、銀河団が含まれている。

1978 年にアメリカによって、初めて X 線望遠鏡が搭載された Einstein 衛星 [4] が打ち上げられた。搭載された X 線望遠鏡は焦点距離 $3.4~\mathrm{m}$ 、直径 $33-56~\mathrm{cm}$ のウォルター I 型の X 線反射鏡 4 組が同心円状に並んでおり、 $0.1-4~\mathrm{keV}$ のエネルギーの X 線を結像した。視野中心での角度分解能は約 2 秒角、望遠鏡自身の集光面積は $0.25~\mathrm{keV}$ で $400~\mathrm{cm}^2$ 、 $4~\mathrm{keV}$ で $30~\mathrm{cm}^2$ であった。望遠鏡によって、それまでの観測装置に比べ、2 桁高い感度と撮像観測を実現し、銀河団、超新星残骸、活動銀河核の研究など、広い分野で大きな結果をあげ、X 線天文学に大きな発展をもたらした。そして、X 線天文学の創始者として X R.

Giacconi は、2002年にノーベル物理学賞を受賞した。

1979 年に日本初の X 線天文衛星「はくちょう」[5] が打ち上げられた。「はくちょう」には小田稔が考案したすだれコリメータが世界で初めて搭載された。すだれコリメータによって銀河中心領域から新たに 12 個の X 線バースタを発見するとともに、X 線バーストの可視光同時観測から、可視光放射が X 線による降着円盤の加熱によるものだと解明した。また、X 線バーストのスペクトルは黒体放射のスペクトルとよく一致することを発見した。さらに、X 線パルサーの自転周期のふらつきや、ブラックホール候補天体 Cyg X-1 のソフト状態の観測など、X 線天体の多様な時間変動の観測を行った。

1983 年に日本で 2 番目の X 線天文衛星「てんま」[6] が打ち上げられた。「てんま」には蛍光比例計数管が世界で初めて搭載され、これまでの比例計数管より 2 倍ほどよいエネルギー分解能でスペクトルを取得できるようになった。蛍光比例計数管は 10 台搭載され、内 2 台にすだれコリメータが取り付けられた。すだれコリメータを持たない蛍光比例計数管 8 台あわせた有効面積は $640~\rm cm^2$ であった。蛍光比例計数管は $2-80~\rm keV$ の広いエネルギー帯をカバーし、かつ高いエネルギー分解能と大きな有効面積を持って、鉄 K-X 線の本格的な分光観測の道を拓いた。また、X 線バースト中に中性子星表面の重力により赤方偏移した鉄の吸収線を発見した。

1987 年に打ち上げられた「ぎんが」衛星 [7] には大面積比例計数管が搭載された。この比例計数管は多層芯線アレイ構造を持ち、同時にきた信号を排除する反同時計数をとっている。これによって、荷電粒子によるバックグラウンドを大幅に低減させる。大面積比例計数管 1 台あたりの有効面積は $500~\rm cm^2$ であり、8 台搭載しているため、計 $4000~\rm cm^2$ の有効面積であった。有効面積を大きくすることによって、これまで暗くて精度の高い観測ができなかった X 線連星や活動銀河核に対して多くの成果を上げた。また、短時間で多くの光子を検出できるため、時間変動を追う研究にも大いに貢献した。

1993 年に日本とアメリカが協力して開発した「あすか」衛星 [8] が打ち上げられた。日本としては初めて X 線望遠鏡を搭載した X 線天文衛星である。また、位置検出能力のある蛍光比例計数管や X 線 CCD(Charge Coupled Device、電荷結合素子) カメラを組み合わせることにより、10 keV までの撮像能力を持った世界で初めての X 線天文衛星となった。CCD カメラを搭載することで鉄輝線付近でのエネルギー分解能は蛍光比例計数管に比べて約 3 倍も向上した。これによって、6.4 keV の中性鉄輝線と 6.7 keV のヘリウム様鉄輝線が分解できるようになった。また、超新星残骸の中心部の熱的放射と周縁部の非熱的放射を分離し、周縁部での高エネルギー電子のシンクロトロン放射を発見した。図 1.1,1.2 に「あすか」で取得された撮像データとスペクトルを示す。

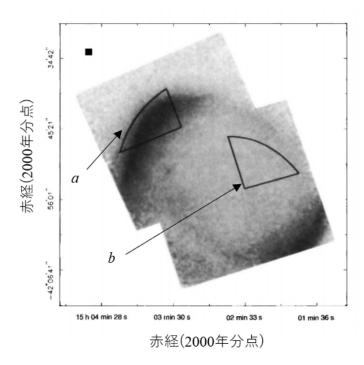


図 1.1. 超新星残骸 SN1006 の 0.4-8 keV の撮像データ。周縁部を a、中心部を b とする。[9] の画像を一部変更

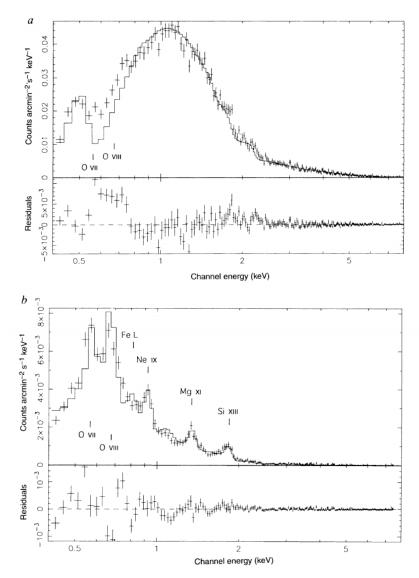


図 1.2. 超新星残骸 SN1006 の典型的なスペクトル(a:周縁部、b:中心部)。a では非熱的な power law(a=1.95 \pm 0.20) のスペクトルであり、b は熱的スペクトルであることが分かる。[9]

2005 年に打ち上げられた「すざく」衛星 [10] は 5 台の軟 X 線検出器と 1 台の硬 X 線検出器を搭載している。軟 X 線望遠鏡は、4 台の X 線 CCD カメラ、1 台のマイクロカロリメータである。マイクロカロリメータは 6 keV の X 線に対して $\Delta E_{\rm FWHM}$ \sim 6 eV の高エネルギー分解能観測が期待されたが、打ち上げ直後に冷却材である液体へリウムがすべて蒸発してしまい、本格的な観測することができなかった。「すざく」に搭載された X 線 CCD カメラは、これまでに搭載された他のものに比べて優れたエネルギー分解能を持つ。特に 1 台の X 線 CCD カメラは背面から X 線を入射させる構造になっており、これにより 1 keV 以下の低エネルギー側で格段に優れた感度とエネルギー分解能を達成している。軟 X 線検出器と硬 X 線検出器の組み合わせにより、広帯域の X 線スペクトルを 1 つの衛星で 1 度に観測が可能になった。

2016 年 2 月に JAXA、NASA、SRON など日米欧で、X 線天文衛星「ひとみ」 [11] が打ち上げられた。「ひとみ」衛星にはマイクロカロリメータが搭載されており、軌道上で 6 keV の X 線に対して $\Delta E_{\rm FWHM} \sim 5$ eV の超高分解能を達成した。しかし、衛星の姿勢制御の不具合により打ち上げから 1 カ

月で運用断念を余儀なくされた。しかし、その画期的な性能は X 線天文学の将来に必要なものであることに疑いはない。2022 年度に「ひとみ」の代替 X 線天文衛星 XRISM を打ち上げる予定である。

1.2 XRISM 衛星

XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Misson) は、NASA や SRON との国際共同開発として 2018 年に開始された JAXA が主導する 7 番目の X 線天文衛星計画である。星や銀河、そしてその間を 吹き渡る高温ガス「プラズマ」に含まれる元素やその速さを測ることで、星や銀河、銀河の集団がつくる 大規模構造の成り立ちをこれまでにない詳しさで明らかできる。XRISM には、広い視野を持つ X 線撮 像器と極超低温に冷やされた X 線分光器が搭載されている。これらを使って、プラズマに含まれる元素 やプラズマの速さを画期的な精度で測定する。

1.2.1 科学目標と要求性能

XRISM は次の3つの科学的疑問に答えることを目的に計画された。

1. 宇宙の大規模構造「銀河団」はどうやってできたのか

「銀河団」には1億度もの高温ガスが存在することが知られている。この高温ガスは熱放射で 冷えていくはずであるが、冷えずに長い年月にわたって安定して存在している。高温ガスの 運動や元素組成量を調べることで温めている熱源を明らかにする。

2. 宇宙の元素はどうやって作られ、拡散されたのか

身の回りの元素は星の中や超新星で作られたと考えられている。これら元素の誕生場所と考えられているところで如何に元素が生成され、銀河内や銀河間に拡散していっているのか、その過程を明らかにする。

3. ブラックホールの周りで何が起こっているのか

ブラックホールが作り出す強重力場は時空の歪みを発生させると考えられている。ブラックホールが周辺にどのような影響を与えるかをさぐる。また、銀河中心に存在する巨大ブラックホールは銀河全体に匹敵する光度で輝き、とてもパワフルな天体として知られている。この巨大ブラックホールが周辺に与える影響を調べるとともに、巨大ブラックホールに成長するメカニズムを解明する。

科学目標を達成するために必要な性能を以下に示す。

1. 加熱機構の解明

分光した輝線のエネルギーシフトと速度の関係をドップラー効果から計算し、高温ガスの運動を知る。そのために、銀河団ガスの視線方向の平均速度を $100~{\rm km/s}$ 以下、速度分散 (1σ) を $150~{\rm km/s}$ 以下の精度で決定する。エネルギー幅に換算すると、それぞれ、 $\Delta E_{\rm FWHM}\sim 4$ eV、 $\Delta E_{\rm FWHM}\sim 6$ eV となる。

2. 元素組成量の決定

線幅の狭い輝線はエネルギー分解能が高いほど検出感度が高くなるため、高エネルギー分解能を実現する。基準として、鉄 K 蛍光輝線スペクトルを $\Delta E_{\mathrm{FWHM}} \sim \! 8 \; \mathrm{eV}$ (速度幅: 200

km/s) より良い精度で速度分散 (1σ) を測定する。

3. ブラックホールが周辺に与える影響

ブラックホールのアウトフローに焦点をあて、アウトフローによって放出される原子の速度を測定する。アウトフローの運動速度を、視線方向の平均速度を $100~{\rm km/s}$ (エネルギー幅: $\Delta E_{\rm FWHM}\sim 4~{\rm eV}$) 程度、速度分散 (1σ) を $150~{\rm km/s}$ (線幅: $\Delta E_{\rm FWHM}\sim 6~{\rm eV}$) 程度より良い精度で決定する。

1.2.2 ミッション系機器

XRISM の主なミッション機器は X 線望遠鏡(2 台)と X 線 CCD カメラ(Xtend)、マイクロカロリメータ(Resolve)である。

1.2.2.1 軟 X 線望遠鏡(X-Ray Mirror Assembly XMA)

直径 45 cm、焦点距離 5.6 m の Wolter I 型の望遠鏡である (図 1.3)。合計 1624 枚の多重薄板型望遠鏡を採用しており、有効面積は 6 keV で 420 cm² である。視線方向外からの X 線を防ぐプリコリメータや、温度維持のためのサーマルシールドを搭載している。

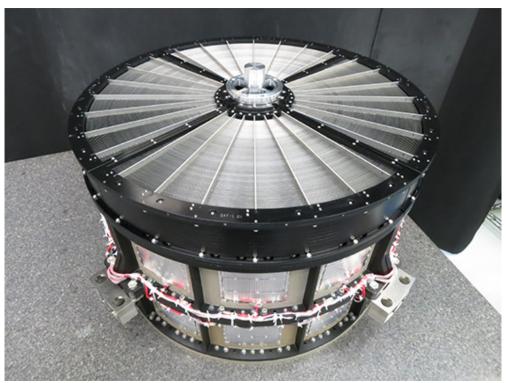


図 1.3. XRISM 衛星搭載 X 線望遠鏡 XMA[13]

1.2.2.2 X 線 CCD カメラ (Xtend)

光子が検出器にあたると光電効果によって電子が飛び出してくる。可視光の場合、光子 1 つにつき電子 1 つが飛び出すが、X 線の場合、飛び出した電子 1 つが他の原子もしくは同じ原子をイオン化して最終的に複数の電子ができる。これを利用し、飛び出した電子の数を読み出し、撮像分光するものが X 線 CCD カメラである。Xtend は 0.5-1.2 keV の範囲の撮像分光を担い、X 線望遠鏡と組み合わせることで 38 分角四方の広視野を実現している。Xtend を図 1.4 に示し、Xtend の仕様を表 1.1 に示す。また、図 1.5 に CCD のフォーマットを示す。

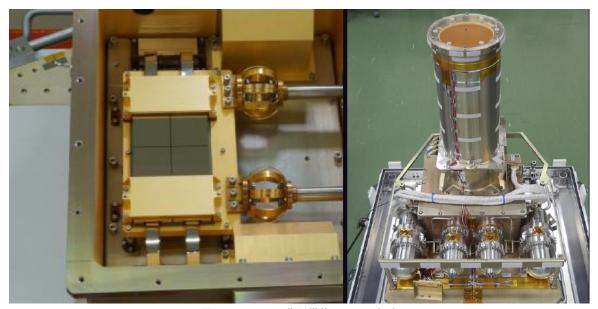


図 **1.4.** XRISM 衛星搭載の *Xtend*[13]

表 1.1. Xtend の仕様

様式	裏面照射型,フレームストア方式
クロック	2-phase
ピクセルサイズ	$24~\mu\mathrm{m} \times 24~\mu\mathrm{m}$
ビンニング後のピクセルサイズ	$48~\mu\mathrm{m} \times 48~\mu\mathrm{m}$
ビンニング後のフォーマット	$640(H) \times 640(V)$
読み出しノードの数	4
空乏層	$200~\mu\mathrm{m}$
可視光防止層	100 nm (アルミニウム)
観測時間	4 sec/frame
読み出しノイズ	5-6 e ⁻ rms(typica)
暗電流	0.5 - $1.0~{\rm e^-}$ /sec/bpix (-110 , typica)

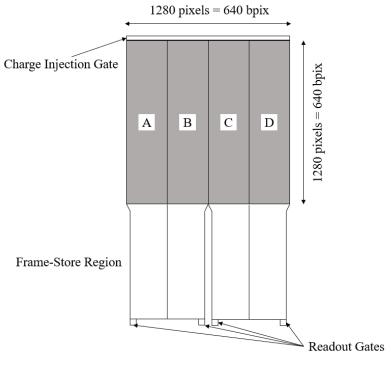


図 **1.5.** CCD のフォーマット

図 1.5 の A、B、C、D は物理的に分けられていない。CCD で生成された電子は Frame-Store Region まで送られ、順番に読み出される。Charge Injection Gate は、入射光子が起こした光電効果によってできた空孔を埋めるものである。CCD は 4 つ配置され (図 1.6)、CCD には 100 nm のアルミニウムが貼られており可視光の入射を防いでいる。

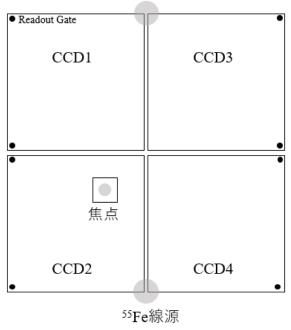


図 1.6. CCD の配置

CCD の端に較正用 55 Fe 線源が照射されている。また、XMA で集められた X 線は CCD 全体の中心より少しずれた場所に集光される。

1.2.2.3 X 線マイクロカロリメータ (Resolve)

Resolve は 0.3-12 keV の分光を担い、エネルギー分解能は CCD より数 10 倍高い 6 eV を実現している。このエネルギー分解能を実現するために、X 線マイクロカロリメータは 50 mK まで冷却されている。以下に X 線マイクロカロリメータの構造と動作原理、エネルギー分解能について述べる。

構造と動作原理

X線マイクロカロリメータの基本構造の模式図を図 1.7 に示す。X線マイクロカロリメータは、X線 吸収体と温度一定に制御された熱浴、X線吸収体と熱浴を結合するサーマルリンク、さらに吸収体の温度 上昇を測定するための温度計(サーミスタ)で構成される。X線は光電効果により吸収されると最終的 にすべて熱化して吸収体の温度が上昇し、図 1.8 に示すような温度応答を得る。X線光子のエネルギーを E、吸収体の熱容量を C とすると、吸収体の温度上昇は、

$$\Delta T = \frac{E}{C} \tag{1.1}$$

で決まることになる。各パラメータの典型値は $E\sim 1$ fJ、 $C\sim 1$ pJ/K、 $\Delta\sim 1$ mK である。この微小な温度の変化を温度計で測定することでエネルギー値を得る。吸収体と熱浴はサーマルリンクを通してつながっており、吸収体で生じた熱は次第に熱浴へと逃げていき、その後、素子の構成で決まる時定数で定常状態に戻る。温度応答の時間はサーマルリンクの熱伝導度 G と、吸収体の熱容量 C を用いて

$$C\frac{d\Delta T}{dt} = -G\Delta T\tag{1.2}$$

という式で表せる。これを解くことによって時定数が求まり、

$$\tau_0 = \frac{C}{G} \tag{1.3}$$

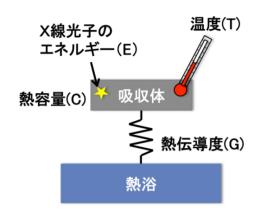
となる。典型値が $\tau_0 \sim 3.0~{\rm ms}$ 、X 線マイクロカロリメータの温度の時間変化は、この時定数に従って指数関数的に減少することになる。式 $1.3~{\rm ho}$ 分かるように、これは吸収体の熱容量 C とサーマルリンク G によって決まる定数となり、入射 X 線光子のエネルギーによらないことが分かる。このことは後述する波形処理で使用する波形テンプレートを決めるうえで重要である。

エネルギー分解能

X 線カロリメータのエネルギー分解能は、光子検出過程に伴うゆらぎと、読みだされた波形に重畳するノイズによって決まる。これらのゆらぎとノイズの要因は発生源ごとに以下のような 3 つの要因に分けて考えられる。

- (1) 検出器自身に由来する、ゆらぎとノイズ
- (2) 温度計の読み出し回路系のノイズ
- (3) その他の要因によるノイズ(電磁干渉や微小擾乱、熱浴の温度ゆらぎ等)

本研究で扱うのは (3) の微小擾乱である。(1) のノイズにはさらに、素子の温度ゆらぎ(フォノンノイズ)と温度計のノイズ(ジョンソンノイズ)の 2 つの要素がある。温度計が温度変化による電気抵抗の変化を



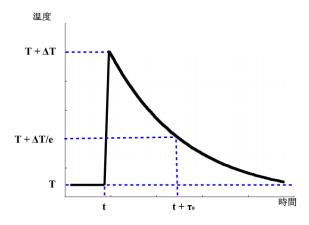


図 1.7. X 線マイクロカロリメータの基本構造 [31]

図 1.8. X 線光子吸収時の吸収体の温度応答 [32]

利用したものであれば、その電気抵抗による熱ノイズ (ジョンソンノイズ) は温度計の雑音として避けられないものである。(1) のノイズによって決まるエネルギー分解能は以下のように考えることができる。 ボルツマン定数 k_B を用いると、温度 T の物質中でのフォノン 1 個が持つ平均エネルギーは

$$\epsilon = k_B T \tag{1.4}$$

と表せる。また、熱容量 C の受光素子全体が持つ内部エネルギーは

$$U = CT (1.5)$$

とかけるので、平均フォノン数Nはそれらの値を用いて、

$$N = \frac{CT}{k_B T} = \frac{C}{k_B} \tag{1.6}$$

となる。フォノン数のゆらぎはポアソン分布に従うため \sqrt{N} となり、したがってフォノン数のゆらぎによる素子のエネルギーのゆらぎは

$$\Delta U \sim \sqrt{\frac{CT}{k_B T}} k_B T = \sqrt{k_B C T^2} \tag{1.7}$$

となる。X 線光子による温度上昇は T に比べると小さいので、検出器の温度 T がそのままエネルギー分解能の見積もりになる。したがって、エネルギー分解能は FWHM で

$$\Delta E = 2.35\xi\sqrt{k_BCT^2} \tag{1.8}$$

ここで ξ はバイアス条件や温度計の感度によって決まるパラメータであり、温度計として半導体温度計を使用したとすると、その値は ~ 2 の値を持つ。エネルギー分解能を向上させるためには、式 (1.8) から分かるように、素子の温度 T を極低温にして、熱容量 C を小さくすればよいことになる。しかし、設計が決まった場合、(1)、(2) のノイズは変えることはできなくなる。そのため、XRISM 衛星に搭載する Resolve の元来よいエネルギー分解能を最大限発揮するためには (3) のノイズをいかにして小さくするかが重要である。

1.2.3 バス系機器

ここでは XRISM 衛星に搭載されるバス系機器のうち、姿勢制御系について述べる。姿勢制御系に使用されている各機器の簡単な説明を表 1.2 にまとめ、姿勢制御系のシステムブロックダイアグラムを図 1.9 に示す。XRISM 衛星の姿勢軌道制御系 (AOCS) は定常観測時に観測要求を満たす精度で天空上の

Components	Main function	
姿勢制御計算機	標準搭載コンピュータ(SpaceCube2)に姿勢制御搭載ソフトウェア(ACFS)を搭載したもの。	
AOCP	各種制御機能のコントローラ。	
14-port SpaceWireルータ	各センサ・アクチュエータをACIMを介してAOCPと接続する。	
SWR	他のシステムのネットワークからは切り離されている。	
恒星センサ	センサ内に搭載されているCCDカメラで取得した星画像データから姿勢を決定する。	
STT	でフリ内に指載されているCCDガメノで取得した生画家チーダから姿勢を決定する。	
慣性基準装置	チューンド・ドライ・ジャイロ (TDG)を2個内蔵し、TDG軸に直交した2軸のレートを検出し、	
IRU	衛星の角度を計算する。	
デジタル太陽センサ	太陽電池セルを用いて太陽角を検出する。	
DSS	太陽电池セルを用いて太陽角を快出する。	
磁気センサ	フラックスゲートセンサを用いて地球磁場を計測する。	
GAS	777777 TOTAL CONTINUE OF THE PROPERTY OF THE P	
リアクションホイール	モーターを用いてロータを加減速させ、その反作用により衛星姿勢を制御する。	
RW		
磁気トルカ	コイルを流れる電流により励起された磁場と地磁場の相互作用によるトルクを発生させる。	
MTQ STTインターフェイスモジュール		
ACIM-STT	STTとインターフェイスを司る。	
IRUインターフェイスモジュール		
ACIM-IRU	IRUとインターフェイスを司る。	
CSAS&GASインターフェイスモジュール		
ACIM-SG	GAS, DSSとインターフェイスを司る。	
MTQ駆動装置	MTQとインターフェイスを司る。	
ACIM-MTQ + ACIM-MPSU	migc 12 2 2 ± 12 c d a 0	
RWインターフェイスモジュール	リアクションホイールアセンブリとインターフェイスを司る。	
ACIM-RW		
RCS駆動装置	推進系とインターフェイスを司る。	
ACIM-RCS		

表 1.2. 姿勢制御系の機器のまとめ [14]。但し、XRISM では一部設計が変更されている。

指定された方向に衛星を指向させることを主要機能とする。AOCS は、姿勢制御フライトソフトウェア (ACFS) を搭載した姿勢制御搭載計算機 (AOCP)、4 種類の姿勢センサ(恒星センサ:STT (3 台)、慣性基準装置:IRU (2 台)、磁気センサ:GAS(2 台)、デジタル太陽センサ:DSS(2 式))、2 種類の姿勢アクチュエータ (リアクションホイール:RW (4 台)、磁気トルカ:MTQ (3 台))、二次推進系 RCS の駆動装置 (ACIM-RCS)2 台、MTQ の駆動装置 (ACIM-MTQ)2 台とその電源部 (ACIM-MPSU)2 台、センサ・アクチュエータと AOCP の各信号のインターフェイスを司る 4 種類のインターフェイスモジュール (ACIM) により構成される。AOCS 機器は全て冗長系を有している。

本研究の対象となるものは姿勢軌道制御系のうち、IRU と RW である。この 2 つは微小擾乱を発生させるため以下で詳しく説明する。

1.2.3.1 慣性基準システム (IRU)

慣性基準装置 (IRU) はチューンド・ドライ・ジャイロ (TDG) を 2 個内蔵し、TDG の 3 軸のうち 2 軸に直交した軸の角速度を検出する。 2 個の TDG の軸は直交しているため、合計で 4 軸の角速度を検出

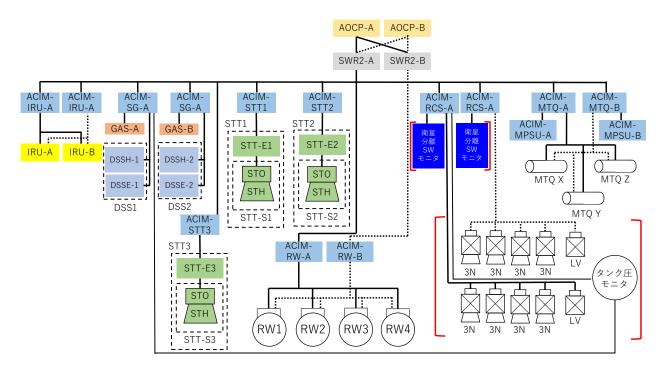


図 **1.9.** 姿勢制御系のシステムダイアグラム [14]。但し、XRISM では一部設計が変更されている。黒の実線は主系、点線は従系を示している。赤色の括弧で囲まれている場所は姿勢制御系以外の機器である。

し、そのうち 1 軸は冗長系となる。この IRU を 2 台採用し(IRU-A, IRU-B)、IRU-B に対して IRU-A を 45°傾けて搭載することで、4 個の TDG のうちどの 2 個を使用しても 3 軸分の角速度を検出できるようにし、TDG の故障も 2 個までなら対処が可能になっている。チューンド・ドライ・ジャイロは回転型のジャイロスコープの一種であるため、以下に回転型のジャイロスコープの動作原理を述べる [15]。

動作原理

対称コマを対称軸周りに高速で回転させたものをジャイロと呼ぶ。ここで、角速度 ω で回転しているジャイロの回転軸を角速度 $\Omega(|\Omega|\ll|\omega|)$ で回転させる (図 1.10)。このとき対称コマの角運動量 L は運動方程式に従って変化する。

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{\Omega} \times \mathbf{L} \tag{1.9}$$

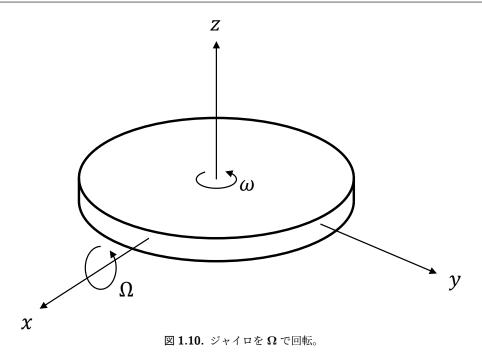
$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = (0, -I_z \omega \Omega, 0) \tag{1.10}$$

と変形できる。これは、ジャイロに y 軸左回りのトルクがかかっていることを示しており、反作用としてジャイロの回転軸に

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = (0, I_z \omega \Omega, 0) \tag{1.11}$$

のy軸右回りのトルクがかかっている。このトルクをジャイロモーメントと呼ぶ。

ジャイロスコープでは既知の角運動量をジャイロに与え、回転運動をしたときに発生したジャイロモーメントから、角速度と回転角を測定する装置である。XRISM 衛星に搭載している IRU ジャイロの周波数 ω は 155 Hz である。



1.2.3.2 リアクションホイール (RW)

リアクションホイール (RW) はモーターでロータを加減速させ、その反作用により、衛星姿勢を制御する。XRISM 衛星では 4 台の RW を設置し、3 軸で姿勢制御を行い、残りの 1 軸は冗長系である。表 1.3 に RW の性能を示す。RW が発生させる擾乱には自身の回転による擾乱のほかに、RW を加減速させたときに発生するロッキング (首振り) モードと呼ばれる振動による擾乱がある。以下でロッキングモードの発生原理を述べる [16]。

最大角運動量 ±80 N m ses ± 1.5 % 最大回転数 ±6000 rpm 最大出力トルク ±0.2 N m @ 6000rpm 最大ロストルク 0.04 N m 最大起動トルク 0.025 N m

表 1.3. RW の性能。数値は JAXA から提供された。

1.2.3.3 ロッキングモードの発生原理

回転体の重心と回転中心がずれている状態を不釣合いとよぶ。さらに回転しているときの不釣り合いを動的不釣り合いとよび、回転していないときのものを静的不釣合いとよぶ。図 1.11 に動的、静的不釣合いがある場合の構造共振を含むホイールの力学モデルを示し、使用している変数を表 1.4 にまとめる。

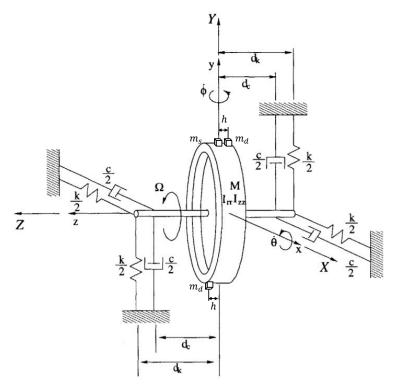


図 1.11. 不釣合いのあるホイールの力学モデル [16] を一部変更。

表 1.4. 図 1.11 で使用している変数

\overline{M}	ロータ質量
m_s	静不釣合い質量
m_d	動不釣合い質量
r_s	静不釣合い質量の半径方向位置
r_d	動不釣合い質量の半径方向位置
h	動不釣合い質量の軸方向位置
k	バネ定数
c	ダンピング係数
d_k	ホイール質量中心からバネまでの距離
d_c	ホイール質量中心からダンパーまでの距離
φ	X軸周りの回転角
θ	Y軸周りの回転角
x	x 軸周りの変位
У	y軸周りの変位

図 1.11 のモデルで静的な不釣合いに対する運動方程式は

$$\begin{pmatrix} M_t & 0 \\ 0 & M_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = u_s \Omega^2 \begin{pmatrix} -\sin(\Omega t) \\ \cos(\Omega t) \end{pmatrix}$$
(1.12)

で表される [17]。 ここで、 M_t はロータの全質量 $(M+2m_d+m_s)$ 、 u_s は静的不釣り合い量 (m_sr_s) である。動的不釣合いに対する回転運動方程式は

$$\begin{pmatrix}
I_{\theta} & \frac{1}{2}\bar{I}\sin(2\Omega t) \\
\frac{1}{2}\bar{I}\sin(2\Omega t) & I_{\phi}
\end{pmatrix} + \Omega \begin{pmatrix}
\frac{c_{\theta}}{\Omega} - \bar{I}\sin(2\Omega t) \\
-I_{zz} - 2\bar{I}\cos^{2}(2\Omega t)
\end{pmatrix} \begin{pmatrix}
\dot{\theta} \\
\dot{\phi}
\end{pmatrix} + \Omega \begin{pmatrix}
\frac{\dot{c}_{\theta}}{\Omega} - \bar{I}\sin(2\Omega t) & I_{zz} + 2\bar{I}\cos^{2}(2\Omega t) \\
-I_{zz} - 2\bar{I}\cos^{2}(2\Omega t) & \frac{c_{\theta}}{\Omega} + \bar{I}\sin(2\Omega t)
\end{pmatrix} \begin{pmatrix}
\dot{\theta} \\
\dot{\phi}
\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}
k_{\theta} & 0 \\
0 & k_{\theta}
\end{pmatrix} \begin{pmatrix}
\theta \\
\phi
\end{pmatrix} = u_{d}\Omega^{2} \begin{pmatrix}
-\sin(\Omega t) \\
\cos(\Omega t)
\end{pmatrix} \tag{1.13}$$

である [17]。ここで

$$I_{\theta} = I_{rr} + 2m_d h^2 + I_{cc} \cos^2(\Omega t) \tag{1.14}$$

$$I_{\phi} = I_{rr} + 2m_d h^2 + I_{cc} \sin^2(\Omega t) \tag{1.15}$$

$$\bar{I} = 2m_d r_d^2 + m_s r_s^2 \tag{1.16}$$

であり、 I_{zz} は回転軸周りの慣性モーメント、 I_{rr} は回転軸と直交する軸周りの慣性モーメント、 I_{cc} はダンパーによる回転軸と直交する軸周りの慣性モーメント、 c_{θ} は回転のダンピング係数、 k_{θ} は回転方向のばね定数、 u_d は動的不釣合い量 $(u_d r_d)$ である。

次に、単純化のために不釣合いがなく、ダンパーがない場合を考える $(m_s=m_d=0, c=c_{\theta}=0, I_{cc}=0)$ 。これを式 1.13 に当てはめると、

$$\begin{pmatrix} I_{rr} & 0 \\ 0 & I_{rr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{pmatrix} + \Omega \begin{pmatrix} 0 & I_{zz} \\ -I_{zz} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_{\theta} & 0 \\ 0 & k_{\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix} = \mathbf{0}$$
 (1.17)

となる。この式を Laplace 変換すると

$$\begin{pmatrix} s^{2}I_{rr} & 0 \\ 0 & s^{2}I_{rr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix} + \Omega \begin{pmatrix} 0 & sI_{zz} \\ -sI_{zz} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_{\theta} & 0 \\ 0 & k_{\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix} = \mathbf{0}$$
$$\begin{pmatrix} s^{2}I_{rr} + k_{\theta} & s\Omega I_{zz} \\ -s\Omega I_{zz} & s^{2}I_{rr} + k_{\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix} = \mathbf{0}$$
(1.18)

上式の特性方程式は

$$(s^{2}I_{rr} - s\Omega I_{zz} + k_{\theta})(s^{2}I_{rr} + s\Omega I_{zz} + k_{\theta}) = 0$$
(1.19)

となる。正の固有振動数のみを選ぶと、

$$s = \pm \frac{I_{zz}}{2I_{rr}}\Omega + \sqrt{\left(\frac{I_{zz}\Omega}{2I_{rr}}\right)^2 + \frac{k_{\theta}}{I_{rr}}}$$

となる。この式から、ホイールを釣合いの状態で回転させたとき、回転軸と直交する軸周りに回転することが分かる。この首振りの回転をロッキングモードと呼び、その固有振動数 (ロッキング周波数) は、s を ω_n と置きなおすと

$$\omega_p = \pm \frac{I_{zz}}{2I_{rr}}\Omega + \sqrt{\left(\frac{I_{zz}\Omega}{2I_{rr}}\right)^2 + \frac{k_\theta}{I_{rr}}}$$
(1.20)

で表すことができる。式 1.20 の第 1 項が正のときを周方向の前進ロッキングモード (Forward precession)、負のときを周方向の後退ロッキングモード (Backward precession) と呼ぶ。回転数 0 のとき $(\Omega=0)$ のロッキング周波数を $\omega_0^2=k_\theta/I_{rr}$ 、 $I_{zz}/I_{rr}\simeq 2$ とすると、

$$\omega_p = \pm \Omega + \sqrt{\left(\frac{I_{zz}\Omega}{2I_{rr}}\right)^2 + \omega_0^2} \tag{1.21}$$

となる。

XRISM 衛星で使用する RW のロッキングモードの関連のパラメータを表 1.5 に示す。また、RW が発生させる振動を RW の周波数の関数としてプロットした。それを図 1.12 に示す。XRISM 衛星の通常観測では 1500-4500 rpm $(25-75~{\rm Hz})$ を使用する。

表 1.5. リアクションホイールのロッキングモード関連のパラメータ。数値は JAXA から提供された。

ω_0 (Hz)	110
I_{zz} (kg mm ²)	0.1273
I_{rr} (kg mm ²)	0.0622

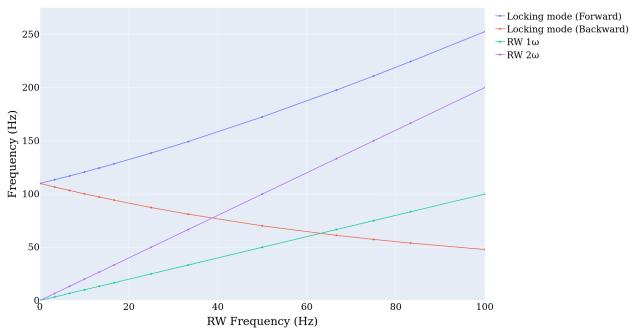


図 1.12. リアクションホイールの周波数と発生させる振動の周波数の関係。青、赤線がロッキングモードの周波数を示し、緑、紫線がリアクションホイールの基本振動とその 2 倍の周波数の振動を示している。

第2章

研究の背景と設計

Contents

2.1	背景
	2.1.1 微小擾乱干涉
	2.1.2 ひとみ衛星 SXS 装置における微小擾乱干渉
2.2	研究の設計
	2.2.1 範囲
	2.2.2 課題
	2.2.3 構成

2.1 背景

2.1.1 微小擾乱干涉

衛星や衛星内部の要素には様々な外力と内力が働く。衛星の姿勢やミッション機器の機能、性能を変化させる内力のうち、意図した制御力・制御トルク以外のものを内部擾乱 (internal disturbance、略して擾乱) と定義する。主な内部擾乱としては、機械式冷凍機の駆動による振動、ホイールの回転による振動、大型アンテナや太陽電池パドルの向きを変えるときの回転による振動などがあげられる。

擾乱が問題になるのは、擾乱発生機器によって高い周波数 (10~Hz~=500~Hz~程度) の小さな擾乱(微小擾乱)が発生し、衛星構造を伝達していく間に、構造の局所的な部分の固有振動数と共振して倍率が大きく (100~feta=500~feta=60~fe

指向精度への影響

擾乱による指向性能への影響はこれまでさまざまな衛星で確認されている。以下に、*Gaia* と SPICA で確認された、擾乱による指向性への影響とその解決方法を紹介する。

• Gaia

Gaia は銀河系の三次元マップの作成を目的として、ESA が 2013 年に打ち上げた可視光位置天文 衛星である [18]。太陽 — 地球系第二ラグランジュ点 (L2) で 60 $\operatorname{arcsec\cdot s^{-1}}$ で回転しながら、銀河

系内部の 10 億個の星を数 10 μarcsec の精度で観測を行う。

取得したデータを転送するためにアンテナを用いるが、従来のアンテナでは機械式の回転またはステアリングを用いて地球に信号を送るためのビームを向ける必要がある。このような手法では、衛星の回転速度や姿勢が変動し、同じ場所を再度マッピングしたり飛び地ができたりするため、超高精度での観測には不向きである。そのため、Gaia では Phased Array Antenna (PAA) [19] という機械式の回転やステアリングを使用しないアンテナが採用された。また、Gaia は二方向同時観測という手法を用いることで、衛星の回転速度不均一による星の分布の粗密と、実際の星の分布の粗密とを区別することが可能になった。

• SPICA

SPICA は大口径 (2.5 m) の赤外線望遠鏡を 8 K 以下に冷却し、中間赤外線から遠赤外線領域において超高感度の観測を行う宇宙天文台計画である [20]。

SPICA は赤外線を観測するため、望遠鏡の温度を低くすることで望遠鏡からの赤外線放射を減らし、ノイズを低減することで高感度、高解像度観測を可能にする。しかし、冷却には放射冷却と機械式冷凍機を用いるため、機械式冷凍機が発生させる擾乱によって姿勢安定性に影響を及ぼす。そこで、SPICA では、望遠鏡と機械式冷凍機の間を Main Truss Assembly [21] と呼ばれるトーラス状の構造物で固定することで擾乱の侵入を防いだ。また、機械式擾乱を抑えるため冷凍機の駆動周波数を最適化する研究が進んでいる [22]。

極低温検出器への影響

最新の天文観測衛星は、極低温検出器を装備したものが増えてきた。極低温検出器は通常 1 K 以下の極低温で動作することで、検出器に入射した光子の持つ微弱エネルギーを検出器の温度変化として測定するものである。このような検出器は、これまでにないような高い感度を持つ。X 線光子のように離散的なエネルギーを温度変化のパルスとして検出する装置をマイクロカロリメータと呼び、宇宙マイクロ波背景放射のようにほぼ一定のエネルギーを温度変化の直流成分として検出する装置をボロメータと呼ぶ [23]。XRISM の Resolve 装置、Athena 衛星の X-IFU 装置の検出器にはマイクロカロリメータが、Plank 衛星の HFI 装置、LiteBIRD の検出器にはボロメータが採用されている。

微小擾乱のエネルギーが熱化して、マイクロカロリメータやボロメータに侵入した場合、これらの検出器はどのような熱入力に対しても感度があるので、天体からの信号に対して雑音源になる。例えば、 Resolve のエネルギー分解能の要求値は 6 keV の X 線に対して 7 eV であり、時定数は 3 ms である。これを電力に換算すると $7(\text{eV}) \times 1.602 \times 10^{-19} (\text{J/eV})/(3 \times 10^{-3}(\text{s})) \simeq 3.4 (\text{fW})$ であり、この程度以下での熱入力でも観測性能を大きく損なう。

2.1.2 ひとみ衛星 SXS 装置における微小擾乱干渉

ひとみ衛星 [24] は 2016 年に JAXA が打ち上げた日米欧共同開発の X 線天文衛星である。ひとみ衛星には、50 mK で動作する極低温マイクロカロリメータ型検出器 Soft X-ray Spectrometer (SXS) [25] が搭載された。SXS は軌道上で X 線マイクロカロリメータによる初めての天体観測を行った。

SXS は 50 mK で動作するために、5 つの機械式冷凍機と 2 つの断熱消磁冷凍が使用された。SXS では機械式冷凍機が発する振動が検出器に侵入し、低周波ノイズとして検出された。このノイズは約 100 Hz 以下の周波数帯域に現れたために midband ノイズと呼ばれ、midband ノイズが出現しているときにはエネルギー分解能が著しく低下することが分かった。midband ノイズの周波数は機械式冷凍機の駆動周波数に依存することが分かり、以下の対策が取られた。

• 共振の回避

§2.1.1 で述べたように、擾乱はデュワーを伝達していく間に、構造の固有振動数と共鳴して増幅される。SXS で使用された冷凍機は周波数を変更できるため、冷凍機の周波数を変更し、構造の固有振動数を避けることで微小擾乱を抑えた。

振動アイソレーターの設置

SXS では、2 段スターリング冷凍機のコンプレッサーとデュワーの間に Vibration isolation system (VIS)[26] と呼ばれる振動アイソレーターが設置された。振動アイソレーターは、コンプレッサーとデュワーの間に固有振動数が \sim 100 Hz のバネを挟むことで、コンプレッサーが発生する振動の固有振動数より高い周波数の成分のデュワーへの伝達率を低減させるものである。VIS を設置する前の検出器のエネルギー分解能は大きく変動したが、VIS を設置することでそれが 4.53 eV まで向上した。エネルギー分解能の要求を満たすためにはフライト機器に新しく VIS を設置する必要があり、すでに完成していた機器の大幅な設計変更が要求された。Resolve では、VIS に launch lock の新規機構が追加された。そのため、打ち上げ時には VIS を固定し、軌道上で VIS を開放できるようになった。

2.2 研究の設計

2.2.1 範囲

ひとみ衛星では midband ノイズの原因追及のため、SXS 装置に発生する振動を加速度として測定するシステムが青山学院大学澤田真理氏らにより構築された。しかし、データは間欠的にしか取得されなかったため、網羅的な解析がされていない。これを踏まえ、Resolve では、地上試験中センサーが 50 mK に保持される全期間を通じて、連続的な加速度データを取得することにした。これを網羅的に解析し、物理的なメカニズムや長期的なトレンドを追求することが本研究の目標である。地上試験は、Resolve 装置単独のサブシステム試験 (2019-2022 年) と衛星搭載後のシステム試験 (2022 年) からなる。このうち、本論文は、前半のサブシステム試験期間の結果を集大成する。微小擾乱干渉は2種類が想定されている (図 2.1)。

- 1. Resolve サブシステム内での干渉。主に機械式冷凍機による。
- 2. 衛星バス系機器や他サブシステムによる干渉。主に *Xtend* サブシステムの機械式冷凍機や姿勢制 御に用いるリアクション・ホイール (reaction wheel)、慣性基準装置 (inertial reference unit) による。

本論文ではサブシステム試験だけで評価できる 1 およびシステム — サブシステムインターフェイスのサブシステム側における 2 を扱う。

2.2.2 課題

X 線マイクロカロリメータの分光性能を最大化するための、微小擾乱の理解と低減が本研究の目的である。本研究では具体的に以下の3つの課題を設定する。

- 1. X 線マイクロカロリメータの分光性能劣化に直結する低周波 ($< 20~{\rm Hz}$) での機械式冷凍機由来の 微小擾乱干渉について、そのメカニズムを明らかにする。
- 2. デュワー外部から侵入するその他の機器由来の微小振動の影響を評価する。

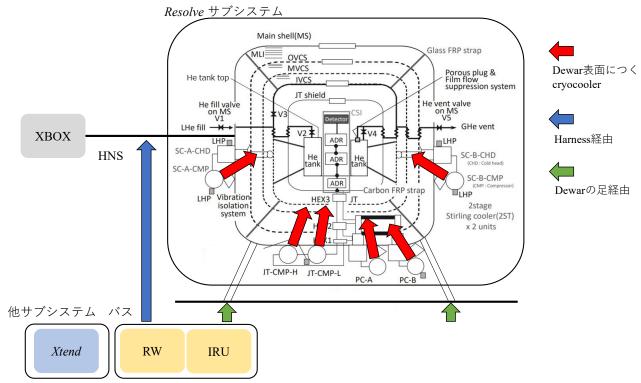


図 2.1. 微小擾乱源と微小擾乱の種類、及び経路。赤色の矢印は機械式冷凍機による擾乱を示し、Dewar のシールドから侵入する。 青色の矢印は reaction wheel (RW) と inertial reference unit (IRU) と *Xtend* からの擾乱を示し、Harness (HNS) から侵入 する。緑色の矢印は Dewar の足から擾乱の侵入を示している。

3. 機械式冷凍機の駆動周波数を変更することで、微小擾乱の影響の低減を行う。そのための評価方法を確立し、分光性能の改善を実証する。

また、大きな環境変化があった時の微小擾乱干渉の伝達関数の変化の幅、及び、最適化から外れた時の症状についても調査する。特に、打ち上げ後、加速度データがない場合でも診断をできるようにする。

2.2.3 構成

本論文の構成を図 1 にまとめる。§3.1 で Resolve 装置全体、§3.2 で加速度測定系と加振試験系について説明する。§4 で試験概要と用いるデータについて説明する。§4.1 で試験の概要、§4.2 で取得したデータセットを述べる。データ処理は A.1 でまとめる。§5 で §2.2.2 であげた各課題に対応した解析を行う。§5.1 で課題 (1) を達成するために、X 線マイクロカロリメータのエネルギー分解能を悪化させる low-freq beat と干渉メカニズムについて議論する。§5.2 で課題 (2) を達成するために微小擾乱加振試験の結果と影響を評価する。§5.3 で冷凍機駆動周波数の最適化についての試験計画とその解析結果を述べる。最後に §6 で以上の結果をまとめる。

第3章

装置

Contents

3.1	Resolve 装置
	3.1.1 検出器
	3.1.2 信号処理系
	3.1.3 冷却系
	3.1.4 クライオスタット 56
3.2	加速度測定系
	3.2.1 測定系について
	3.2.2 加速度測定系の構成図
	3.2.3 ハードウェア
	3.2.4 ソフトウェア
3.3	加振試験系
	3.3.1 測定系について
	3.3.2 ハードウェア

3.1 Resolve 装置

XRISM 衛星に搭載される Resolve は、焦点距離 $5.6\,\mathrm{m}$ の X 線望遠鏡(X-ray Mirror Assembly; XMA)と、X 線マイクロカロリメータ検出器とを組み合わせた、きわめて高い分光性能を特長とする分光器である(図 3.1)。表 $3.1\,\mathrm{c}$ Resolve の性能要求をまとめる。基本的な性能は「ひとみ」衛星の軟 X 線分光検出器(Soft X-ray Spectrometer; SXS)と同様である。図 $3.2\,\mathrm{c}$ は Resolve のブロックダイアグラムを示す。 Resolve では、XMA で集光した X 線がフィルターホイール(Filter Wheel Mechanics; FWM)やゲートバルブを通り、デュワー内に入射する。マイクロカロリメータは極低温でのみ高エネルギー分解能を達成できるので、センサー部分は多段冷却機構を用いて約 $50\,\mathrm{mK}$ に制御されている。X 線入射による温度上昇をセンサーが読み出し、信号処理系(XBOX、PSP)で適切な信号処理を行うことで光子の到来時刻、位置、エネルギーをイベントとして抽出する。この一連の流れに従い、以下に Resolve の検出器、信号処理系、冷却系、クライオスタットについて順に説明する。また、表 $3.2\,\mathrm{c}$ SXS のコンポーネントの概要を示す。



図 3.1. XRISM 衛星の全体像と Resolve[27]

表 **3.1.** Resolve の要求値

-	
エネルギー範囲	0.3-1.2 keV
エネルギー分解能(5.6 keV)	7 eV (FWHM)
ピクセル数	6×6 pixels
視野	$2.9' \times 2.9'$
有効面積(1 keV)	$160~\mathrm{cm}^2$
有効面積(6 keV)	$210~\mathrm{cm}^2$
角分解能 (Half Power Diameter)	1.7'
寿命	3 年
最大カウントレート	150 count/s/array

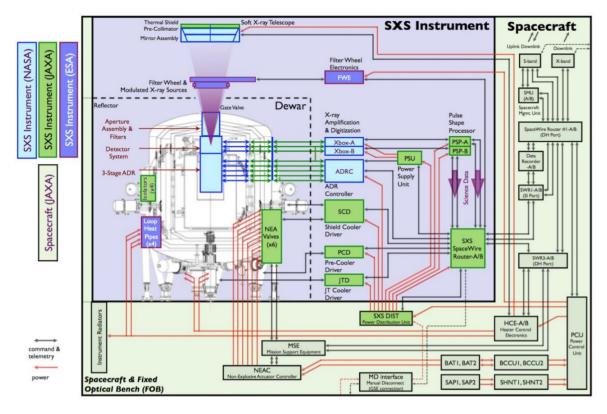


図 3.2. SXS サブシステム構造のブロックダイアグラム [28]

表 3.2. Resolve のコンポーネントの概要

Components	Main function	提供
CSI	X線マイクロカロリメータ、反同時計数検出器(Anti-co検出器)、JFETプリアンプ、3段ADRなどから構成され、DWR内に設置される。	NASA
ApA	断熱・遮光フィルタ。DMSフィルタ、OVCSフィルタ、IVCSフィルタ及び支持構造からなる。	NASA
DWR	SXS検出器を50 mKまで冷却する多層構造からなるクライオスタットである。最内部のHeタンクに液体へリウムを保持する。	IHS
4	望遠鏡で集光されたX線は、DWRの入射窓を通じて検出器で検出される。	11112
CDA	DWRのシールド冷却器用の2台の2段スターリング冷凍機SC-A、及びJTC予冷用の2台の2段スターリング冷凍機PC-Aを駆動する。	IHS
CDB	SC-BとPC-Bを駆動する。	IHS
JTD	JTCのコンプレッサを駆動する。	SHI
ADRC	ADRを制御し、カロリメータの温度を50 mKに保つ。ApAフィルタの温度制御を行う。	NASA
XBOX	カロリメータとAnti-co検出器にバイアスを供給する。それらの信号を増幅してA/D変換を行う。	NASA
PSP-A/B	X線イベントを検出し、波形処理を行ってパルス波形を計算する。また、X線到来時刻を決定する。	MHII
SWR-A/B	SWR-A/B Resolveの各機器と衛星バスの間のSpWコミュニケーションのルーターである。	NEC
PSU	XBOXに二次電源を供給する。	NEC
DIST	衛星バス電源をSXSのコンポーネントに分配し、ON/OFFを行う。電流を測定し、過電流時に分離する。	NEC
FWM	フィルタホイールに搭載されるフィルタや MXSを保持・回転して使用するフィルタを選択する。	SRON
FWE	フィルタホイールや校正用線源 MXSを駆動する。	SRON

3.1.1 検出器

3.1.1.1 X 線マイクロカロリメータ

X 線マイクロカロリメータは NASA/GSFC によって開発されている。素子 1 ピクセルが 水銀テルル (HgTe) の一辺 $814~\mu m$ の正方形で、 6×6 のアレイ状に配置される。36 ピクセルのうち 35 ピクセルが 天体観測に使用される。また、アレイの外側にキャリブレーション用のピクセルが 4 つ用意されており、うち 1 つに 55 Fe の較正線源を照射しデータが読み出される。よって、観測用とキャリブレーション用の計 36 ピクセル分のデータが実際に使われることになる。その写真とピクセルマップを図 3.3.3.4 示す。

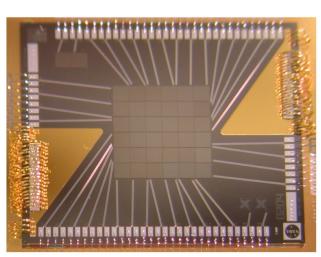


図 3.3. X 線マイクロカロリメータ検出器の性能実証機 [29]

5	6	8	16	14	12
3	4	7	15	13	11
1	2	0	17	10	9
27	28	35	18	20	19
29	31	33	25	22	21
30	32	34	26	24	23

図 3.4. ピクセルマップ [30] を一部変更。

1.2.2 節の式 (1.8) から、X 線マイクロカロリメータの温度が小さいほどエネルギー分解能が良くなる。これを踏まえて、Resolve の X 線マイクロカロリメータは、 $50~\rm mK$ に冷却される。データの読み出しは後で述べる X-ray box (Xbox) によって行われる。

3.1.1.2 反同時計数検出器

Resolve は、宇宙線などの荷電粒子のバックグラウンド除去のために反同時計数検出器 (anticoincidence detector, Anti-co 検出器) を搭載する。Anti-co 検出器はシリコンの PIN 型検出器で、大きさ $10~\text{mm} \times 10~\text{mm}$ 、厚さは $500~\mu\text{m}$ である。Anti-co 検出器はカロリメータアレイの下に設置され、カロリメータと Anti-co 検出器で同時にトリガーにかかったとき、その信号を除外することで宇宙線起源のバックグラウンドを除去できる。



図 3.5. anti-co 検出器の模式図

3.1.2 信号処理系

3.1.2.1 X-ray Box (XBOX)

XBOX は Resolve のアナログ信号処理部であり、NASA/GSFC が開発を担当している。XBOX はカロリメータと反同時計数検出器からの信号を読み出し、信号のフィルタリング、増幅と A/D 変換を行う。A 系統 (XBOX-A) と B 系統 (XBOX-B) の 2 系統が存在し、それぞれがカロリメータアレイ 18ch + 反同時計数検出器 1ch の信号を扱う。反同時計数検出器は 1 つしかないが、その信号は分岐され A/B 両系で読み出される。増幅・デジタル変換されたデータは Low Voltage Differential Signaling (LVDS) により差動信号としてデジタル波形処理部の対応する系に送られる。XBOX はデータ処理のほかに、カロリメータや反同時計数検出器への電圧供給や増幅器の温度制御、さらにその電圧と温度のモニタリングも行う。

3.1.2.2 Pulse Shape Processor (PSP)

Resolve のデジタル波形処理部は Pulse Shape Processer (PSP) と呼ばれ、ISAS/JAXA、三菱重工業、東京都立大学、埼玉大学、立教大学が共同で開発している。PSP にも A 系と B 系の 2 系統が存在し、それぞれに対応する系の XBOX でデジタル変換されたデータを受け取り、微分波形を用いたセカンドパルスの検出とイベントのグレード付けや、最適フィルタ処理による光子のエネルギーの高精度測定を行う。また、ノイズの収集も行っている。

セカンドパルスの検出

複数の光子を短時間に検出するイベント (重畳イベント) において、初めに到来したイベントをファーストパルス、2番目以降に到来したイベントをセカンドパルスとする (図 3.6)。イベントの検出は FPGA によるファーストパルス検出と、CPU によるセカンドパルス検出の 2 手順で行われる。まず、FPGA でイベント波形についての時間微分を計算し、その微分値がしきい値を超えた時にイベントにトリガーをかける。その後、CPU によって、イベント波形から平均波形を引き、その差分がセカンドパルス用のしきい値以上になったときにセカンドパルスがトリガーされる。セカンドパルス検出の概要を図 3.7 に示す。

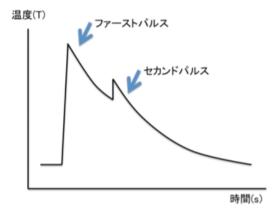


図 3.6. 重畳イベントにおける、ファーストパルスとセカンドパルスの模式図 [31]

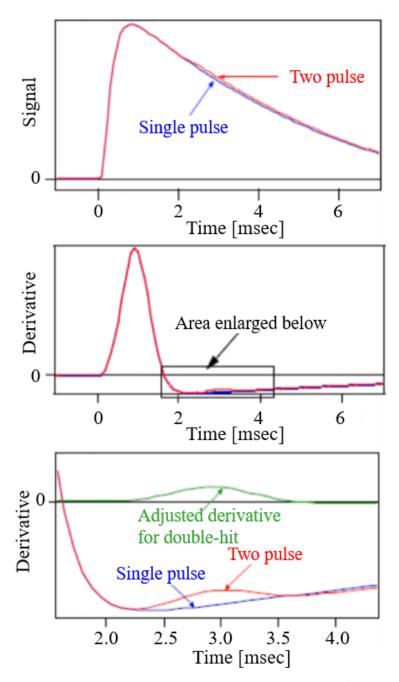


図 3.7. セカンドパルスの検出の概要。1 番上の図は微分前の波形で、赤はセカンドパルスを含み、青は含まない。真ん中の図は 1 番上の図の波形の微分後。1 番下の図は真ん中の図のセカンドパルス部分を拡大したもの。赤-青が緑の波形。[32] による図を一部修正

グレード付け

ある時刻の全ピクセル分の波高値データの集合を sample、sample に含まれる個々のピクセルの波高値データを ADC sample と表記する。sample は XBOX から 12.5 kHz で送られてくる。

セカンドパルス検出後、イベントのトリガタイミングの時間間隔によってグレード付けが行われる。 グレード付けの定義を図 3.8 に示す。グレードは High、Medium、Low と primary、secondary の組み 合わせで付けられる。Hight Resolution (HR) イベントは、トリガされた時刻から 874 ADC sample の

間に他のイベントが入射していないイベントを指す。Medium Resolution(MR) イベントは、トリガされた時刻から 256 ADC sample の間に他のイベントが入射していないイベントを指す。それ以外のイベントは Low Resolution(LR) イベントとしてグレード付けされる。primary、secondary はイベント同士の前後関係によって決まる。L より M、M より H の方が、また secondary より primary の方が隣のパルスによる波形のゆがみが少ないので、よりよいエネルギー分解能が得られる。Hp、Mp、Ms イベントは次にそれぞれのテンプレートで最適フィルタ処理による波高値解析が行われる。L イベントは FPGAで計算された LO RES PH がそのまま波高値として用いられる (図 3.9)。

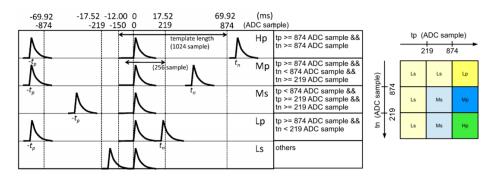
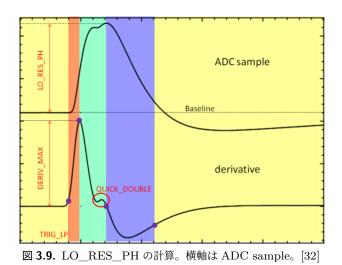


図 3.8. グレード付けの定義 [32]



最適フィルタ処理

PSP での波高値解析は、テンプレート波形を用いた最適フィルタ処理によって行われる。まず、その数学的背景を述べる。時定数が入射した X 線のエネルギーに依存しないため、全てのパルスは同じ形をしていると仮定し、これを $H\times S(t)$ とする。S(t) が規格化されたパルス波形で、H はその大きさである。最適なパルスハイトの推定値 H は、ノイズを含む実データ D(t) とパルス波形のモデルとの差を最小にするものである。これを周波数空間において考えると、ノイズのない信号とノイズのフーリエ変換を $S(\omega)$ 、 $N(\omega)$ とおけば、データ $D(\omega)$ は

$$D(\omega) = HS(\omega) + N(\omega) \tag{3.1}$$

と書けることになる。 H を最小にするには、

$$\chi^2 = \sum_{\omega} \frac{|D(\omega) - HS(\omega)|^2}{|N(\omega)|^2}$$
(3.2)

で定義される χ^2 を最小にすればよい。ここで、 $|N(\omega)|$ はノイズのパワースペクトルである。 χ^2 を最小にする解は、 $\frac{\partial}{\partial H}\chi^2=0$ より

$$H = \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)S^*(\omega) + D^*(\omega)S(\omega)}{2|N(\omega)|^2}}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2}$$
(3.3)

と求まる。D(t)、S(t) は実関数であり、 $D(\omega)$ 、 $S(\omega)$ も実関数であるので

$$D(\omega)S^*(\omega) = D(-\omega)S^*(\omega) = D^*(\omega)S(\omega)$$
(3.4)

が分かる。ここから、H は

$$H = \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)S^*(\omega)}{|N(\omega)|^2}}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2}$$
(3.5)

または

$$H = \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)}{S(\omega)} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2}$$
(3.6)

と書き直すことができる。式 (3.6) は、H が $\left|\frac{S(\omega)}{N(\omega)}\right|^2$ を重みとしたときの $\frac{D(\omega)}{S(\omega)}$ の平均値であることを表す。ここで、周波数空間での最適フィルタテンプレートを

$$F(\omega) = \frac{S(\omega)}{|N(\omega)|^2} \frac{1}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2}$$
(3.7)

と定義し、時空間に変換したものをF(t)と置けば、Hが次のように求まる。

$$H = \sum_{t} D(t)F(t) \tag{3.8}$$

これが最適フィルタ処理と呼ばれる。この本質は観測された波形 D が $\frac{1}{|N(\omega)|^2}$ の重みをもった $2\sum_{\omega}DS$ の積の和によってノイズ無し波形 S とクロスコリレーションされることである。

ノイズの収集

ノイズは PSP によって収集される。ノイズのデータセットは §4.2.2 で記述する。

3.1.3 冷却系

衛星で使用される冷凍機はいくつか条件があり、主な条件は次のとおりである。

- 打ち上げに耐えることかできる。
- 質量、体積、消費電力を抑えたもの。
- 微小重力下でも地上と同じように作動する。

• 信頼性があり寿命が長いもの。

この条件を達成できるような冷凍機を単体、もしくは組み合わせて目標の温度まで冷却する。天文衛星に搭載される冷凍機は主に、冷媒、機械式冷凍機、極低温冷凍機に分類される。*Resolve* では、冷媒(液体ヘリウム)、機械式冷凍機(2-stage-Stirling 冷凍機 STC、Joule-Thomson 冷凍機 JTC)、断熱消磁冷凍機(ADR)が使用されている。以下に各冷凍機について簡単に述べる。

3.1.3.1 冷媒

固体もしくは気体の冷媒をタンクで保持し、その気化熱を利用して冷却する冷凍機である。固体冷媒を用いた場合、昇華熱と密度が液体冷媒よりも高いため同じ体積でより長い冷却を可能にする。また、液体冷媒は流出しないようにする必要がある。固体冷媒に固体水素を使用した場合、約10 K まで冷却が可能である。しかし、より低い温度の需要が増加したため、液体ヘリウム(4 K)を冷媒として使用する衛星が多くなっている。液体ヘリウムは気圧がほぼ0の宇宙空間では沸点が低くなり、より低温まで冷却(強制沸騰冷却)することができる。この冷凍機の利点は、電気を使わないこと、気化した冷たい冷媒をタンクから衛星外に放出する際に、シールドに這うように設置したパイプを通すことでシールドを冷却でき(Vapor cooling と呼ぶ)その他の冷凍機の負荷を減らすことができることがあげられる。欠点としては、冷凍機が冷媒だけの場合、冷却剤がなくなると観測ができなくなる点である。

3.1.3.2 機械式冷凍機 (1) Stirling 冷凍機

スターリング冷凍機は畜冷器を介して高温部と低温部が配置さており、圧縮部のピストンと膨張部の ピストンを駆動させて冷却する。

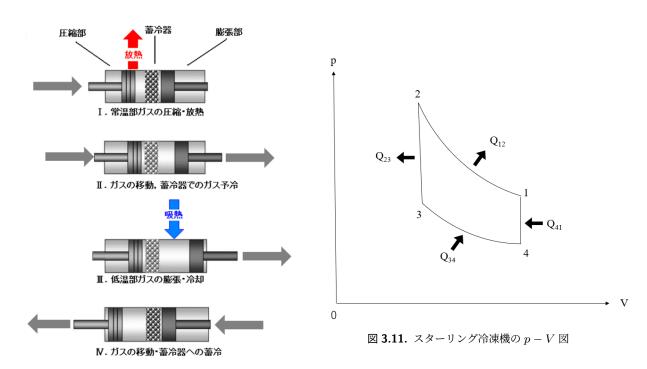


図 3.10. スターリング冷凍機のサイクルの例 [34]

スターリング冷凍機の冷却サイクルの4つに分かれており(図3.10)、以下にその過程について述べる。

またその過程に対応する p-V 図を図 3.11 に示す。

I (図 $3.11:1 \rightarrow 2$):圧縮部のピストンが右に移動し、作動気体を圧縮する。このときに発生した圧縮熱はシリンダ周囲に配置された低温熱源で除去される。

- II (図 $3.11: 2 \rightarrow 3$):圧縮部のピストンと膨張部のピストンが容積を保ったまま右に動き、圧縮ガスは 畜冷器を通ることで冷却される。
- III (図 $3.11: 3 \rightarrow 4$):圧縮ガスは膨張ピストンを右に動かすことで膨張仕事を行い、その結果作動気体の温度は下がり、シリンダ周囲から熱を奪う。
- IV (図 3.11: $4 \rightarrow 1$):圧縮部のピストンと膨張部のピストンが連動して左に動き、畜冷器を通ることで畜冷器から熱を奪い、圧力が上昇する。

スターリング冷凍機で 2 つの冷却ステージを持つものが 2 段スターリング冷凍機である。Resolve では、シールドを $30~\rm K$ まで冷却する Shield-cooler (SC) 2 台と JTC を $15~\rm K$ まで予冷する Pre-cooler (PC) 2 台が使用されている。そのノミナル駆動周波数は $15.00~\rm Hz$ であり、駆動周波数は $13.93-16.26~\rm Hz$ の範囲で $0.01~\rm Hz$ ごとに $256~\rm Q$ 階で設定できる。

3.1.3.3 機械式冷凍機 (2) Joule-Thomson 冷凍機

断熱壁で囲まれ細孔栓で仕切られた左右 2 つの室にピストンを備え、両室の気圧を一定に保ちながらピストンを押すことにより左室にあった体積 V_1 の一定量の気体が右室に移り体積が V_2 になったとする (図 3.12)。

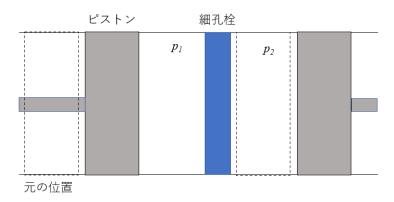


図 3.12. 断熱壁に囲まれ細孔栓で仕切られたピストン

この気体の内部エネルギーの変化量 $U_2 - U_1$ は、熱力学第 1 法則より

$$U_2 - U_1 = p_1 V_1 - p_2 V_2 (3.9)$$

であるから

$$U_1 + p_1 V_1 = U_2 + p_2 V_2 (3.10)$$

となり、エンタルピー H = U + pV が一定に保たれていることが分かる。したがって、

$$dH = TdS + Vdp = 0 (3.11)$$

である。ここで H = H(S, p) の全微分は

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p dS + \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_S dp \tag{3.12}$$

である。(3.11) 式と(3.12) 式を比べると

$$T = \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p \tag{3.13}$$

$$V = \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_{S} \tag{3.14}$$

であることが分かる。したがって、

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_S = \left(\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial H}{\partial S} \right)_p \right)_T$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial S} \right)_p = \left(\frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_S \right)_p$$

が成立する。ここで

$$\left(\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p\right)_T = \left(\frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_S\right)_p \tag{3.15}$$

であるので、

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p \tag{3.16}$$

が得られる。

次に、(3.11) 式より

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_{T} = T\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_{T} + V \tag{3.17}$$

また、(3.16) 式から

$$\begin{split} \frac{\partial(V,p)}{\partial(S,p)} &= \frac{\partial(T,S)}{\partial(p,S)} \\ \frac{\partial(V,p)}{\partial(S,p)} &= \frac{\partial(S,T)}{\partial(p,T)} \frac{\partial(p,T)}{\partial(S,p)} \\ \frac{\partial(V,p)}{\partial(S,p)} \frac{\partial(S,p)}{\partial(T,p)} &= \frac{\partial(S,T)}{\partial(p,T)} \\ -\frac{\partial(V,p)}{\partial(T,p)} &= \frac{\partial(S,T)}{\partial(p,T)} \end{split}$$

よって

$$\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_n \tag{3.18}$$

を得ることができる。また、(3.17) 式を変形して上式を代入すると

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_{H} = \frac{T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p} - V}{C_{p}} \tag{3.19}$$

を得ることができる。ここで $C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p$ は定圧比熱である。分子が 1 より大きいか小さいかによって圧力変化による温度変化の向きが違う。実在気体では体積がありファンデルワールス力が働くため、低温で分子は正になり、高温では分子は負になる。以上の原理を利用したものがジュールトムソン冷凍機である。Resolve では、JT Shield を 4.5 K まで冷却するために使用されている。そのノミナル駆動周波数は 52 Hz であり、駆動周波数は 50.48-53.83 Hz の範囲で 0.11 Hz ごとに 32 段階で設定できる。

3.1.3.4 断熱消磁冷凍機

磁場 B で磁化を M から M+dM に増加させる際の単位体積当たりにされる仕事は BdM である。 よって、温度 T の常磁性塩に磁場 B を印加し、磁化を dM 増加させたときの単位体積当たりの内部エネルギーの増加量は

$$dU = TdS + BdM (3.20)$$

で与えられる。

ヘルムホルツの自由エネルギーは

$$A = U - TS$$

である。また、ギブズの自由エネルギーは

$$G = A - BM$$

この微小量は

$$dG = dA - BdM - MdB$$

$$= TdS + BdM - TdS - SdT - BdM - MdB$$

$$= -SdT - MdB$$
(3.21)

となる。また、G = G(T, B) の全微分は

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{R} dT + \left(\frac{\partial G}{\partial B}\right)_{T} dB \tag{3.22}$$

であることが分かる。上式と (3.21) 式を比較すると

$$-S = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_B \tag{3.23}$$

$$-M = \left(\frac{\partial G}{\partial B}\right)_T \tag{3.24}$$

である。したがって、

$$-\left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T = \left(\frac{\partial}{\partial B}\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_B\right)_T$$
$$-\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B = \left(\frac{\partial}{\partial M}\left(\frac{\partial G}{\partial B}\right)_T\right)_B$$

第3章 装置

が成立する。ここで、

$$\left(\frac{\partial}{\partial B} \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_B\right)_T = \left(\frac{\partial}{\partial M} \left(\frac{\partial G}{\partial B}\right)_T\right)_B$$

であるので、

$$\left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T = \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B \tag{3.25}$$

となる。

エントロピーを Tと Bの関数と考えると

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B dT + \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \tag{3.26}$$

となる。ここで可逆サイクルでは dS=dQ/T であり、一定の磁場 B での熱容量を C_B とすると $dQ=C_BdT$ である。よって、

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B = \frac{C_B}{T} \tag{3.27}$$

ヤコビアンを用いて (3.25) 式を書き直すと

$$\frac{\partial(S,T)}{\partial(B,T)} = -\frac{\partial(T,S)}{\partial(B,T)} = \frac{\partial(M,B)}{\partial(T,B)}$$
(3.28)

となる。同様に (3.27) 式は

$$\frac{\partial(S,B)}{\partial(T,B)} = \frac{\partial(B,S)}{\partial(B,T)} = \frac{C_B}{T} \tag{3.29}$$

となる。(3.28) 式を(3.29) 式で割ると

$$\frac{\partial(T,S)}{\partial(B,S)} = -\frac{T}{C_B} \frac{\partial(M,B)}{\partial(T,B)}$$

偏微分の形に戻すと

$$\left(\frac{\partial T}{\partial B}\right)_{S} = -\frac{T}{C_{B}} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{B} \tag{3.30}$$

となる。

キュリーの法則から弱い磁場中の常磁性塩の磁化は

$$M(T,H) = \frac{CB}{T}$$

である。ここで C はキュリー定数である。今、磁化と磁場の向きは同じとする。よって

$$\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B = -\frac{CB}{T^2}$$
$$= -\frac{M}{T}$$

となり、

$$\left(\frac{\partial T}{\partial B}\right)_S = \frac{M}{C_B} \tag{3.31}$$

が得られる。常磁性塩では M>0 であり、 $C_B>0$ であるので、(3.31) 式から分かるように、磁場が増加すると温度が増加し、磁場が減少すると温度が減少する。これを利用したものが断熱消磁冷凍機である。断熱消磁冷凍機の S-T 図を図 3.13 に示す。

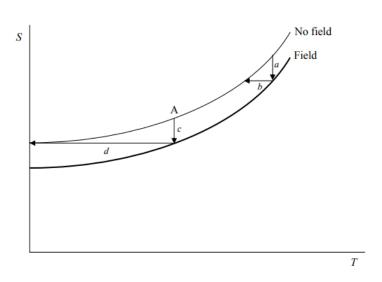


図 3.13. ADR の冷凍サイクル [35]

a で磁場をかけながら等温変化する。磁場をかけると熱が発生するが Resolve では液体ヘリウムに熱を捨てる。b では断熱状態で磁場を消し冷却する。このサイクルを繰り返すことで冷却できるが、Resolve では $4.5~\rm K$ まで予冷しているため、2 つの ADR を直列し 1 回で $50~\rm mK$ まで冷却できる。また、常磁性塩の磁化が終了すると約 1 時間かけて再磁化する (ADC recycle)。ヘリウム冷媒がある場合、1 回の再磁化でおよそ 2 日間 $50~\rm mK$ に保持できる。

 $1.12~{\rm K}$ から $0.5~{\rm K}$ まで冷却するのを第 $2~{\rm Q}$ ADR、 $0.5~{\rm K}$ から $0.05~{\rm K}$ まで冷却するのを第 $1~{\rm Q}$ ADR と呼ぶ。第 $3~{\rm Q}$ ADR は通常は使用されないが、液体ヘリウムがなくなった場合、これでヘリウムタンクを冷却することで冷媒なしでの運用を可能にする。

3.1.3.5 Vibration Isolation System

Vibration Isolation System(VIS) は 2 段スターリング冷凍機のコンプレッサとデュワー間に設置された振動アイソレータである。振動アイソレータは振動源と物体の間にバネを挟み振動の伝達を減衰する装置である。図 3.14 のような 1 自由度のバネとダンパーが設置されたおもりが振動したときに物体にその振動が伝達される。そのときの力の伝達率 T(f)、すなわちは F と F_0 の比は以下の式で与えられる [26]。

$$T(f) = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\kappa)^2}{(1 - \kappa^2)^2 + (2\zeta\kappa)^2}}$$

ここで ζ は臨界減衰に対する減衰率、 κ はバネの固有振動数とおもりの振動の比である。力の伝達率 T(f) を 1 より小さくするためには、 $\kappa > \sqrt{2}$ である必要がある。SXS では $200~\rm{Hz}$ 以上の振動を減衰す

るために VIS を設置しているため、200 Hz 以上の振動を減衰するために必要なバネの固有振動数は 140 Hz 程度であることが分かる。

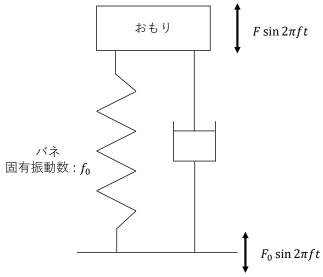


図 3.14. 1 自由度の振動。[36] の図を一部改変。

3.1.4 クライオスタット

Resolve のクライオスタットには冷凍機、マイクロカロリメータがついており、マイクロカロリメータと ADR の動作環境の作成・維持、望遠鏡の焦点にマイクロカロリメータを保持などの働きをする。デュワーは外側から Dewar Main Shell (DMS)、Outer Vaper-Cooled Shield (OVCS)、Middel Vaper-Cooled Shield (MVCS)、Inner Vaper-Cooled Shield (IVCS)、Joule-Thomson Shield (JTS)、1.2 K Shield で構成される。Shield 間は部材で固定されている。また、内側に行くほどより低温まで冷やすため、体積は小さくなっている。Resolve の冷凍チェーンを図 3.15 を示す。

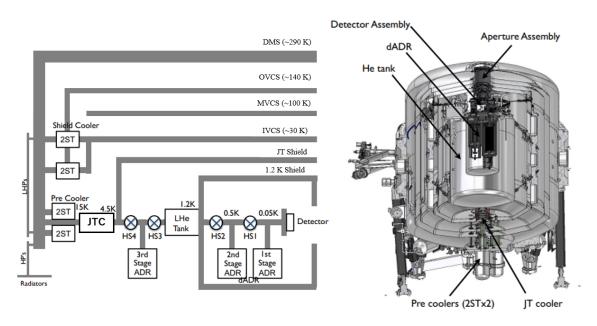


図 3.15. Resolve の冷却チェーン (左図) と CAD で書かれたデュワーの断面図 (右図)[37]

DMS は 290 K (室温) に、OVCS は STC の 1 段目で 140 K まで、IVCS は STC (2 段スターリング 冷凍機) の 2 段目で 30 K まで、JTS は JTC で 4.5 K まで、1.2 K Shield は液体ヘリウムで 1.2 K まで冷やされる。Shield 自体は冷凍機で熱を吸い上げる必要があるため、熱伝導度が高い必要があるが、Shield 間は温度差を維持するため断熱したい。極低温では純度によって熱伝導度が変わるため、Shield には純度の高い物質が使用している。Shield 間で熱伝導が起こる要因としては、ガスによる熱伝導、輻射、Shield を固定している部材による熱伝導、配線による熱伝導があげられる。これらの熱伝導は、それぞれ以下のように対策している。

- ガスによる熱伝導:デュワー内を真空にする。
- 輻射による熱伝導:Multilayer Insulation(MLI) で Shield の表面を覆う。
- 部材による熱伝導:GFRP、CFRP、ケブラーなど、高強度で低熱伝導の材質を使用。
- 配線による熱伝導:配線の数を少なくし、熱伝導は低く、電気伝導は高い配線を用いる。

デュワー内部を真空にするため、DMS は真空に耐えられるものが使用される。また、マイクロカロリメータの信号を読み出す配線は、デュワーの外まで伸びているため、熱は侵入しやすいので注意して設計された。

3.2 加速度測定系

冷凍機によって生じる加速度を、デュワーの適切な位置に加速度ピックアップを取り付けて測定した。 その測定系について述べる。

3.2.1 測定系について

加速度測定系は以下の特徴を持つ。

- 同時に8チャンネルまでの入力を測定できる。
- 各チャンネルで平均 25 kHz までのサンプリングレートでサンプリングできる。
- ダイナミックレンジ 100 dB 程度。
- ノイズフロアレベルは $2-3\times10^{-5}$ G/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (G = 9.8 m/s²) 程度。
- 計算機によって処理されたデータを処理し、ディスプレイに自動更新する (quick-look=QL) 機能をもつ。

測定で得た時空間データと計算機で処理された周波数空間データが協定世界時 (UTC) でタイムスタンプを押されて保存される。また、取得されたデータは QL システムでリアルタイムモニターする。また、delay-look(DL) システムによってバッチ処理され、診断用プロットが生成される。リアルタイムモニターの例を図 3.16 に、バッチ処理で生成されたプロットを図 3.17、3.18 に示す。図 3.16 はレコード長 32 s、サンプリング周波数 10.0 kHz で取得されたときのリアルタイムモニターを示しており、上段から時空間データ、時空間データをフーリエ変換したフルバンド (~ 5000 Hz) の周波数空間データ、フルバンドの最大周波数の 10 分の 1 まで (~ 500 Hz) を抜き出した周波数空間データを示している。図 3.17 は同じ時間に取得された全 8 チャンネルの時空間データを、それぞれフーリエ変換し作成した周波数空間データを重ねてプロットしたものである。図 3.18 は作成した周波数空間データを取得した時間の関数としてプロットした図である。横軸に取得した時間、縦軸の周波数空間データの周波数を取り、色でパワースペクトルを示している。

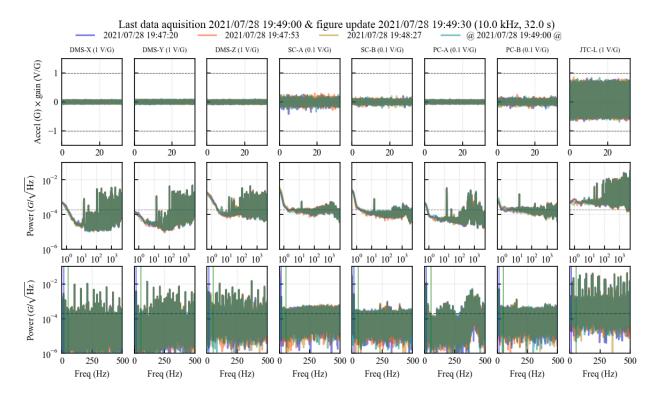


図 3.16. QL システムの例。(上段)時空間データ、(中段) $\sim 5000~{\rm Hz}$ までを表示した周波数空間データ、(下段) $\sim 500~{\rm Hz}$ までを表示した周波数空間データ。上段のグラフの上に加速度を測定している場所を示し、シグナルコンディショナーのゲインを()内に示している。

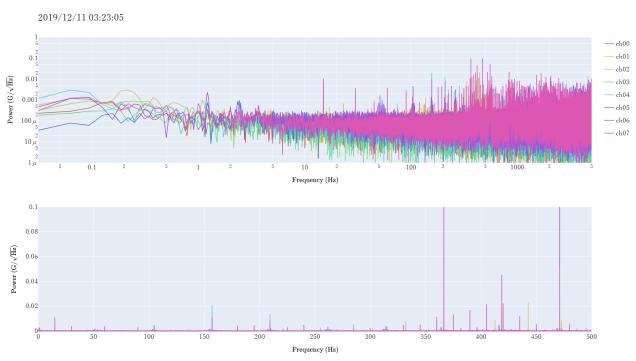


図 **3.17.** 8ch で取得したデータのパワースペクトル。上段:対数表示でフルバンド、下段: 線形表示で 500 Hz までのバンドを表示している。

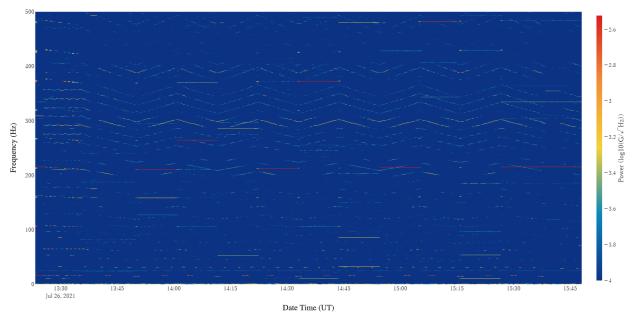


図 3.18. DWR -Y X 軸のヒートマップ。冷凍機の振動を変化させた場合のデュワーの加速度の変化が見える。

3.2.2 加速度測定系の構成図

図 3.19 に加速度測定系の構成図を示す。シグナルコンディショナはアナログ出力を整形、増幅、ゲインの正規化をするものである。そのアナログ出力を同軸ケーブルでデータロガー NI USB-6212 に送り、A/D 変換を行う。その後、デジタル信号は USB ケーブルで PC に送られる。

PC では、NI USB-6212 から信号を読み出し続け、時空間データを npz 形式で、引数で指定したサンプリングレートとレコード長とともに保存する。さらに、QL ディスプレイを更新し、4 回に 1 度表示を png 形式で保存する。また、すべてのデータは外付けの SSD に保存される。サンプリングレート 10 kHz、レコード長 32 s で 1 日中データ取得を行った場合、データ容量は 27 GB 程度となる。

時空間データは解析サーバにアップロードされ、解析サーバ内で周波数空間データに変換される。さらに、周波数空間データから各 ch ごとの 1 次元プロット、8ch 全ての 1 次元プロット (図 3.17) と各 ch ごとの 2 次元プロット (図 3.18) が作成される。

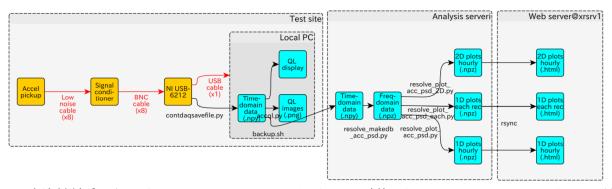


図 **3.19.** 加速度測定系のダイアグラム。ハードウェアはオレンジのボックスと赤線で示し、ソフトウェアはシアンのボックスと黒線で示す。

3.2.3 ハードウェア

表 3.3 に加速度測定系に使用したハードウェアの一覧を示す。また、図 3.20 にハードウェアの写真を、図 3.22 にハードウェア同士の接続を示す。また、図 3.21 に全てのハードウェアを接続した加速度測定系の概観を示す。

ID	Name	型式他	個数	所掌
1	加速度ピックアップ	Endevco 876, 224C, SHOWA SOKKI 2300A	8	JAXA
2	ローノイズケーブル		8	JAXA
3	シグナルコンディショナー	Endevco 2775A N5901, 600-A-CB5	8	JAXA
4	同軸ケーブル		10	JAXA
5	データロガー	NI USB-6212 BNC	1	ISAS
6	USBケーブル		1	ISAS
7	制御用ノートパソコン	Toshiba DynaBook	1	愛媛大
8	マウス		1	愛媛大
9	外付けSSD	BUFFALO SSD-PLUS3	2	TMU
10	USBハブ	SANWA supply	1	ISAS
11	液晶ディスプレイ	Acer KA270H	1	TMU
12	テーブルタップ		1	TMU
13	ログブック		1	ISAS

表 3.3. ハードウェアの一覧。



図 3.20. ハードウェアの写真。ラベルの番号は表 3.3 に対応。

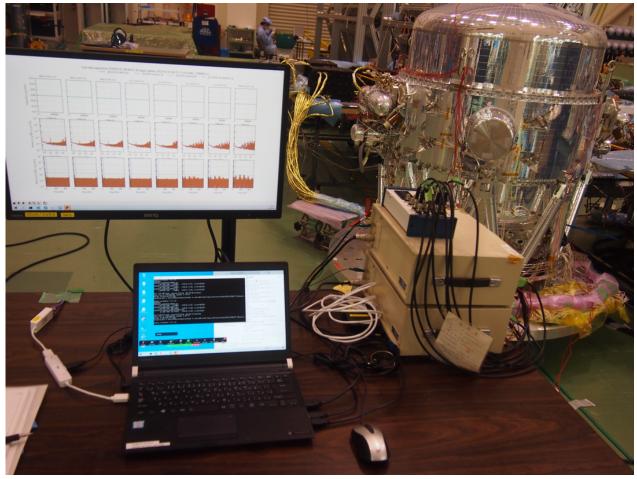


図 3.21. 加速度測定系の概観。

• 加速度ピックアップ

物体の加速度を測定する装置である。本研究では圧電型加速度ピックアップを用いる。圧電型加速度ピックアップは、力が加わると分極し電荷を出力する物体(圧電体)を用いて加速度を測定する装置である。加速度ピックアップは装置の個体差があり、1 G の加速度で出力する電荷量が違

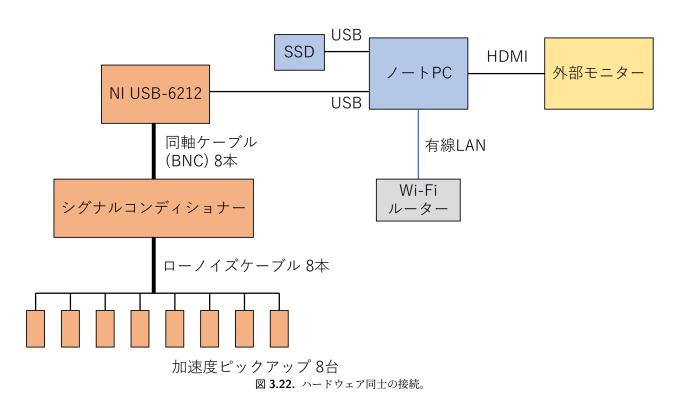
うため、個別にゲイン (pC/G) の設定を行う必要がある。

• シグナルコンディショナー

加速度ピックアップから出力された電荷を電圧に変換する装置である。シグナルコンディショナーのゲイン (V/G) を調節することで、1~G あたりの電圧出力を変更し、加速度の測定範囲を変更することが可能である。

• NI USB-6212 BNC

NI USB-6212 は、シグナルコンディショナーから送られてくる電圧出力を A/D 変換する装置である。入力電圧の範囲は $\pm 1~V$ である。



3.2.4 ソフトウェア

ソフトウェアは python で書かれている。使用されたスクリプトを以下に示す。

3.2.4.1 QL システム

contdaqsavefile.py

動作

各チャンネルでサンプリングレート $10~\rm kHz$ で $32~\rm t$ が可時系列を取得する (オプションで変更可能)。 タスク生成、 $32~\rm t$ t 回連続で実行、タスク終了、を繰り返す。タスクを生成する際に若干の時間的オーバーヘッドがあるので、 $1~\rm t$ タスクあたりの連続取得回数を増やすほうが効率はよいが、メモリの消費が激しいので低めに設定している。 $32~\rm t$ t 加定の中身は、各チャンネルを $1~\rm t$ サンプルずつ交互に取得するため、 $10~\rm ch1$ ch2, $10~\rm ch2$ ch3, $10~\rm ch2$ ch3,

ンプリングする。いずれかのチャンネルが閾値(オプションで変更可能)以上の出力を含む場合、標準出力と beep 音で warning を出す。

生成データ

ゲイン引数で V を G 単位に換算し、冒頭に測定開始時刻とサンプル当たりの経過時間を追加して npz 形式として保存する。npz は標準的なバイナリ形式である。レコード長 32 s、サンプリング周波数 10.0 kHz でデータを取得した場合は 1.0 MB 程度のファイルとなる。ファイル名は $raw^*.npz$ となり、*には取得を始めた時間を西暦、月、日、時間、分、秒の順でゼロ埋めをしたもの (YYYYmmdd-HHMMSS の形式) が記述される。

このスクリプトは本修論で改良を行った。これによりシグナルコンディショナーのゲインを 1V/G 以外に設定しても、その違いを吸収してデータ保存できるようになった。その結果、50~W 駆動時に振動が大きい SC,PC のゲインを 0.1~V/G として測定し、saturation を抑えることができた。

accpl.py

動作

matplotlib で測定データをプロットする。FFT 解析には sxs_fft_mod.py を呼び出して使用する。sxs_fft_mod.py は matplotlib の mlab モジュールで窓関数を使用して FFT するスクリプトである。パワースペクトルは広帯域低分解能: $f=0-5000~{\rm Hz}$ 、 $df=2.5~{\rm Hz}$ と、狭帯域高分解能: $f=0-500~{\rm Hz}$ 、 $df=0.25~{\rm Hz}$ の 2 種類を表示する。4 測定分が異なる色で重ね描きされ、以降古いものから上書きされる。画面上部に各色が対応する測定時刻が表示され、@で囲まれたデータが最新のものである。(図 3.16)

生成データ

ここで生成されるパワースペクトルはファイルには保存されない。

3.2.4.2 DL システム

 $resolve_makedb_acc_psd.py$

動作

取得した生データ (raw*.npz) を引数で指定し、それを sxs_fft_mod.py をもちいて FFT し、パワースペクトルを作成する。次に、引数で指定した場所に生データの時間分解能と測定時間からサンプリング周波数を計算し、psd_ 測定時間 _ サンプリング周波数のディレクトリを作成する。その後、そのディレクトリの下にパワースペクトルを npz 形式で保存するスクリプトである。作成される PSD は広帯域低分解能: $f=0-5000~{\rm Hz}$ 、 $df=0.3125~{\rm Hz}$ と、狭帯域高分解能: $f=0-500~{\rm Hz}$ 、 $df=0.03125~{\rm Hz}$ と、広帯域高分解能: $f=0-5000~{\rm Hz}$ 、 $df=0.03125~{\rm Hz}$ の 3 種類である。

生成データ

3種類の PSD はそれぞれ別ファイルに保存 (psdb_*.npz、psdn_*.npz、psda_*.npz)。8 チャンネルすべて同じ **npz** に保存する。列が周波数方向、列がチャンネルに対応する 2 次元配列になっている。各行はパワースペクトルの値である。本研究では広帯域高分解能 (psda) だけを用いる。

resolve plot acc psd.py

動作

引数でパワースペクトルのデータがあるディレクトリ、グラフを保存するディレクトリ、サンプリング周波数、測定時間、開始日時、終了日時を指定する。指定したパワースペクトルのデータがあるディレクトリ内にある、開始時間から終了時間の間に測定されたデータを平均して、各チャンネルのデータをプロットする。プロットしたグラフは両対数グラフであり、縦軸は $\mathrm{mG}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ であり、横軸は Hz である。プロットしたグラフは.html 形式と.png 形式で保存される。(図 3.17)

生成データ

プロットしたグラフは引数で指定したディレクトリの下に、psd 開始日時 – 終了日時.html(.png) の形式で保存される。

resolve_plot_acc_psd_2D.py

引数でパワースペクトルのデータがあるディレクトリ、グラフを保存するディレクトリ、サンプリング周波数、測定時間、開始日時、終了日時を指定する。指定したパワースペクトルのデータがあるディレクトリ内にある、開始時間から終了時間の間に測定されたデータを、測定された日時 (UTC) を横軸に、縦軸に周波数 (Hz) をとり、パワースペクトルの値を色で表した二次元プロットを 1 チャンネルずつプロットする。プロットしたグラフは.html 形式と.png 形式で保存される。 (図 3.18)

生成データ

引数で指定したディレクトリの下に新しく $\operatorname{ch} x$ (x はチャンネルの番号)という名前のディレクトリをそれぞれ作り、その下にディレクトリの名前に対応する ch のプロットを psd 開始日時 – 終了日時. html (. png) の形式で保存する。

3.3 加振試験系

サブシステム外部から侵入した擾乱に対して、マイクロカロリメータがどのような影響を受けるのかを評価するために、Resolve と衛星システムの境界上に加振機を取り付け特定の周波数の振動を発生させて入力する試験を行う(§5.2)。加振機は、デュワーのベースプレート (DWR BP) と、XBOX を固定している土台、および、デュワーから信号を読み出すハーネス (HNS) の土台に取り付けた。また、加振機の周辺と実験室の床に加速度ピックアップを設置し、加振機が駆動しているときの加速度を測定した。

3.3.1 測定系について

加振試験系の構成は加速度測定系に加振機が加わったものでありほぼ同じものである。DWR ベースプレート加振系のシステムダイアグラムを図 3.23 に示す。加速度と加振レベルを同じ A/D で記録するため時刻及び位相が同期されている。

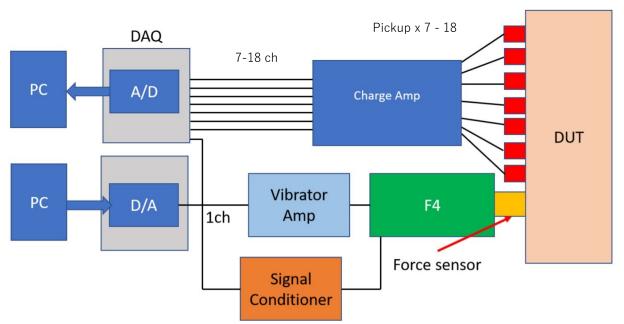


図 3.23. 加振試験系のシステムダイアグラム。図は東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構の長谷部氏から提供。DWR 加振と HNS,XBOX 加振では使用した機器は違うが、試験系の構成はほぼ同じである。DWR 加振では加速度ピックアップを 7 ch、 HNS, XBOX 加振では加速度ピックアップを 18 ch 使用した。

3.3.2 ハードウェア

表 3.4 に HNS, XBOX 加振試験系に使用したハードウェアの一覧を示す。また、図 3.24 にハードウェアの写真を示す。

	<u> </u>			
D	Name	型式他	個数	所掌
1	振動試験装置	Siemens社 LMS SCADAS	1	NEC
2	加速度ピックアップ	3軸の測定が可能	6×3	JAXA
3	加振機 (XBOX)	Wilcoxson F4	1	NEC
4	加振機 (HNS)	Wilcoxson F4	1	NEC
5	ローノイズケーブル		18	JAXA

表 3.4. HNS,XBOX 加振試験系のハードウェアの一覧。

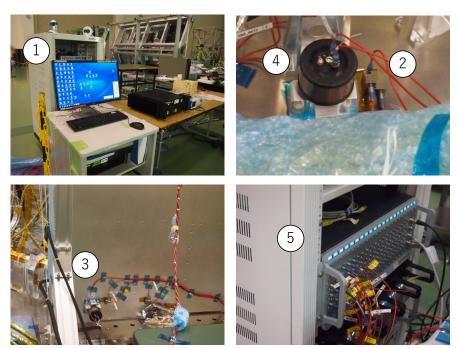
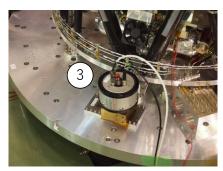


図 3.24. ハーネス、XBOX 加振試験系のハードウェア。

表 3.5 に DWR BP 加振試験系に使用したハードウェアの一覧を示す。また、図 3.25 にハードウェアの写真を示す。

	20101 / /	7,		
ID	Name	型式他	個数	所掌
1	加速度ピックアップ	Columbia 876	3	JAXA
1	加述反しツブブツブ	SHOWASOKKI 2300A	4	JAAA
2	ローノイズケーブル		7	JAXA
3	加振機	Wilcoxon F3	1	JAXA
4	加振機アンプ		1	JAXA
5	チャージアンプ	600-A-CB5	2	JAXA
6	BNCケーブル		8	JAXA
7	データロガー	NI USB-6212 BNC	1	ISAS

表 3.5. デュワー ベースプレート加振試験系のハードウェアの一覧。



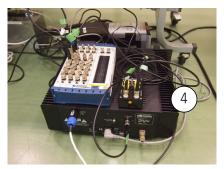


図 3.25. デュワー ベースプレート加振試験系のハードウェア。

第4章

データ取得

Contents

4.1	試験の概要
	4.1.1 TC1
	4.1.2 TC2
	4.1.3 TC1A
	4.1.4 TC2A
	4.1.5 TC3
	4.1.6 TC4
	4.1.7 TC5
4.2	データセット
	4.2.1 HK データ
	4.2.2 マイクロカロリメータのデータ
	4.2.3 加速度のデータ

4.1 試験の概要

Resolve の地上試験では、デュワーの Flight Model に装置を入れて性能を確認した。1回の冷却試験を Test Campaign (TC) 番号で区別する。通常、室温から 50 mK 制御まで 4 日かかり、その後各種の機能、性能試験を行う。TC1 ではデュワーを仮組み状態で、TC2 ではデュワーを本組み状態で冷却試験が行われた。その後、TC3 で冷凍機の微小擾乱が検出器へ与える影響などを評価する予定であったが、TC2 の後に、デュワーでの He のリークが確認されたため、デュワーの改修が行われた。また、冷凍機にも異音が見つかったため、修理されている。その後、TC1、TC2 と同じ地上試験が再度実施され、それぞれ TC1A、TC2A と名付けられた。TC2A で冷却性能が確認された後、冷凍機の微小擾乱が検出器へ与える影響の評価が途中まで行われた。TC3 では、デュワーの振動試験と、TC2A の続きから冷凍機の微小擾乱が検出器へ与える影響の評価が行われる予定であった。しかし、振動試験中に不具合が確認されため、微小擾乱の影響の評価は TC4 の後に延期された。TC4 では、これまでの TC などで検証したフライト機器をサブシステムに組み込み、サブシステム全体の性能試験を行った。設計の妥当性と信頼性の確認、および製造品質と耐環境性の確認がされた。その後、TC3 で延期された微小擾乱の影響の評価が行われた。TC4 は年末年始を挟んで TC5 として継続された。

マイクロカロリメータの性能の確認にはノイズデータと、X線を照射したときのスペクトルから計算

第 4 章 データ取得 **70**

したエネルギー分解能を用いた。マイクロカロリメータの性能は冷凍機の駆動周波数の組み合わせを変えることで大きく変化した。冷凍機起源の微小擾乱がノイズに与える影響を調査するために、加速度データ取得用の加速度ピックアップをデュワーに取り付けた。デュワーの各名称と断面図を示したものを図4.1 に示す。各 TC の実施場所と日時、加速度データを取得した期間をまとめたものを表4.1 に示す。 TC1 のデータは愛媛大学の粟木氏、志達氏、広島大学の内田氏が取得した。それ以降は、主に筆者が測定系の設営、データ取得を行った。以下に各試験の概要をまとめる。各 TC で加速度ピックアップを取り付ける位置を変え、様々な加速度データを取得した。

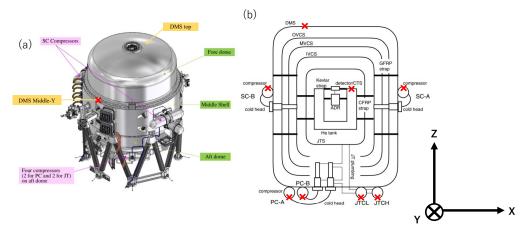


図 **4.1.** (a) デュワーのイラスト (b) デュワーの断面の概略図と座標軸の定義 (Dewar axis)[39]。赤のバツ印は加速度ピックアップを取り付けた位置を示している。

TC	Place	Period of TC	Accel data	Period of Accel data used	Participation
1	新居浜	2019/12/05 - 2020/02/20	✓	2019/12/11 - 2019/12/16	
2	筑波	2020/03/16 - 2020/05/29			
1A	新居浜	2021/05/04 - 2021/05/23	✓	2021/05/11 - 2021/05/12	✓
2A	筑波	2021/07/08 - 2021/08/26	✓	2021/07/25 - 2021/07/28	✓
3	筑波	2021/08/27 - 2021/10/02	√	2021/08/27 - 2021/08/30,	,
3	外汉	2021/00/21 - 2021/10/02	V	2021/09/10 - 2021/09/13	V
4	筑波	2021/10/03- 2021/12/23	✓	2021/12/01 - 2021/12/15	√
5	筑波	2022/01/24 - 2022/03/12	✓	2022/01/24 - 2022/02/22	✓

表 4.1. 各 TC のまとめ

4.1.1 TC1

2019 年 12 月 7 日 -2020 年 2 月 20 日に愛媛県新居浜市の住友重機械愛媛工場で行われた。TC1 はデュワー内に CSI を入れて仮組状態で性能を確認すること目的として行われた。設置された加速度ピックアップを図 4.2 に、表 4.2 に加速度データを取得した位置と設定を示す。仮組のため He tank (低温ステージ)に真空低温用加速度ピックアップをおいた。他のすべての計測は室温ステージの計測なので重要なデータである。

第 4 章 データ取得 **71**

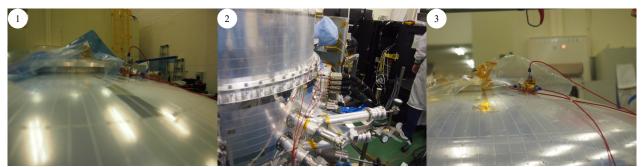


図 4.2. TC1 で設置された加速度ピックアップ。それぞれ、(1) He tank, (2) DMS Middle -Y, (3) DMS top である。(1) の写真は He tank ではなくシールドが見えている。実際の He tank はシールドに一番内側にあり、検出器は He tank 中央にワイヤーで吊るされている。He tank に取り付けられた加速度ピックアップは、検出器を吊るしているワイヤーに近い場所にある。

表 4.2. TC1 で加速度データを取得した位置と設定。 Chan はデータロガーのチャンネル番号、 Name は加速度ピックアップが 取り付けられた場所の名前、Position を加速度ピックアップの取り付け場所、Direction は加速度を測定している方向、 Pickup は加速度ピックアップ、 Signal conditioner はシグナルコンディショナーを示し Model はモデル名、S/N はシリアルナンバー、 gain は 1 G あたりの電荷量もしくは出力電圧を示している。

Config1 2019/12/11 15:48 - 12/16 11:29 (UT)

DAQ	Q Position			Position Pickup			Signal conditioner		
Chan	Name	Position	Direction	Model	S/N	gain [pC/G]	Model	S/N	gain [V/G]
AI0	A10X	He tank	X (DWR axis)	876	180	53.6	2775A	C166	1
AI1	A10Y	He tank	Y (DWR axis)	876	181	54.6	2775A	C135	1
AI2	A10Z	He tank	Z (DWR axis)	876	182	55.3	2775A	C141	1
AI3	A21X	DMS middle -Y	X (DWR axis)	224C	A07M	12.28	2775A	C167	1
AI4	A21Y	DMS middle -Y	Y (DWR axis)	224C	A07N	11.93	2775A	n/a	1
AI5	A21Z	DMS middle -Y	Z (DWR axis)	224C	A08G	12.20	2775A	C142	1
AI6	A20Y	DMS top	Y (DWR axis)	224C	A05L	12.08	N5901	RO1025	1
AI7	A20Z	DMS top	Z (DWR axis)	224C	A06N	12.70	N5901	RO1026	1

Config2 2019/12/16 11:30:00 - 12/18 00:55 (UT)

DAQ	Position			Pickup			Signal conditioner		
Chan	Name	Position	Direction	Model	S/N	gain [pC/G]	Model	S/N	gain [V/G]
AI0	A10Z	He tank	Z (DWR axis)	876	182	55.3	2775A	C166	1
AI1	A10Y	He tank	Y (DWR axis)	876	181	54.6	2775A	C135	1
AI2	A10X	He tank	X (DWR axis)	876	180	53.6	2775A	C141	1
AI3	A21X	DMS middle -Y	X (DWR axis)	224C	A07M	12.28	2775A	C167	1
AI4	A21Y	DMS middle -Y	Y (DWR axis)	224C	A07N	11.93	2775A	n/a	1
AI5	A21Z	DMS middle -Y	Z (DWR axis)	224C	A08G	12.20	2775A	C142	1
AI6	A20Y	DMS top	Y (DWR axis)	224C	A05L	12.08	N5901	RO1025	1
AI7	A20Z	DMS top	Z (DWR axis)	224C	A06N	12.70	N5901	RO1026	1

第 4 章 データ取得 **72**

図 4.3 に TC1 で取得されたキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトルを示す。測定されたスペクトルは冷凍機の駆動周波数が、JTC で 53.83 Hz 、STC で 15.69 Hz のものである。Mn-K α 線は 55 Fe 線源による。図 4.3 上段の赤色の十字の点は実際に測定されたスペクトル、青色の点線は 55 Fe 線源のスペクトル、青色の実線は実際に測定されたスペクトルをフィッティングして作成したスペクトルモデルである。下段は実際に測定されたスペクトルと作成したスペクトルモデルとの残差(赤色の十字と青色の実線との差分)である。5.9 keV は Mn K α 1、5.89 keV は Mn K α 2 の輝線である。図中の "Fit Parameters"に Mn K α 1 の輝線をフィットしたパラメータが記載されており、FWHM の値をエネルギー分解能の指標としている。FWHM の値が大きくなるほど、Mn K α 1 と Mn K α 2 の輝線のすそが重なり、2 つの輝線の間の谷が浅くなる。FWHM の値が小さくなるほど、2 つの輝線の間の谷が深くなる。このため、エネルギー分解能が良い方が、エネルギーが近い輝線の分光ができることが分かる。

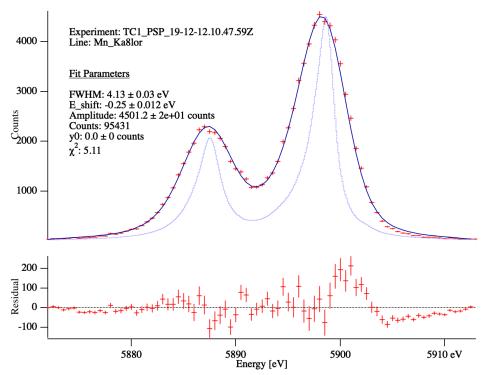


図 4.3. TC1 でのキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトル。上段の赤色の十字の点は実際に測定されたスペクトル、青色の点線は 55 Fe 線源のスペクトル、青色の実線は実際に測定されたスペクトルをフィッティングして作成したスペクトルモデルものである。下段は実際に測定されたスペクトルと作成したスペクトルモデルとの残差(赤色の十字と青色の実線との差分)である。JTC は $^{53.83}$ Hz、STC は $^{15.69}$ Hz で駆動していた。図は NASA の S.Poter 氏によって作成された。

4.1.2 TC2

2020 年 3 月 16 日 -2020 年 5 月 29 日に愛媛県新居浜市の住友重機械愛媛工場で行われた。TC2 はデュワー内に ApA を入れて本組状態で性能を確認することを目的として行われた。しかし、冷却中にデュワーにリークが見られたので中断され、その後修理のためにデュワーが解体された。

4.1.3 TC1A

2021 年 5 月 4 日 -23 日に愛媛県新居浜市の住友重機械愛媛工場で行われた。TC1 はデュワー内に CSI を入れて仮組状態で性能を確認すること目的として行われた。ただし、He tank での加速度測定は 実施しなかった。設置された加速度ピックアップを図 4.4 に、表 4.4 に加速度データを取得した位置と設定を示す。

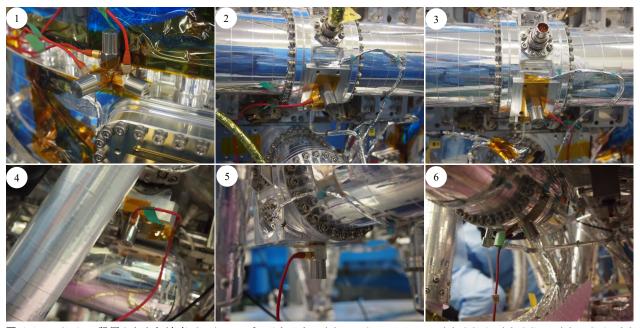


図 **4.4.** TC1A で設置された加速度ピックアップ。それぞれ、(1) DMS Middle -Y, (2) SC-A, (3) SC-B, (4) PC-A, (5) PC-B, (6) JTC-H である。

表 **4.3.** TC1A で取得された加速度データの位置

Config3 2021/05/07 01:06 - 05/12 23:35 (UT)

	<u> </u>								
DAQ		Position			Pickup Signal cond			nal conditio	ner
Chan	Name	Position	Direction	Model	S/N	gain [pC/G]	Model	S/N	gain [V/G]
AI0	A21X	DMS middle -Y	X (DWR axis)	2300A	3740	51.0	600-A-CB5	5261	1
AI1	A21Y	DMS middle -Y	Y (DWR axis)	2300A	3741	50.6	600-A-CB5	5261	1
AI2	A21Z	DMS middle -Y	Z (DWR axis)	2300A	3742	49.5	600-A-CB5	5261	1
AI3	A51Z	SC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3743	50.3	600-A-CB5	5263	0.1
AI4	A52Z	SC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3744	50.8	600-A-CB5	5261	0.1
AI5	A53Z	PC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3745	50.7	600-A-CB5	5263	0.1
AI6	A54Z	PC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3746	49.3	600-A-CB5	5263	0.1
AI7	A61Z	JTC-H CMP	Z (local axis)	2300A	3747	49.9	600-A-CB5	5263	0.1

TC1A 以降、筆者も参加し、実験装置のセットアップ、データの取得、解析まで行った。既存のシステムに対して以下のような改良を行った。

1. 加速度データを取得する際、冷凍機のコンプレッサの加速度は測定可能上限を超えたため gain を $1~{\rm G/V}$ から $10~{\rm G/V}$ に変更した。そのため gain を考慮した QL 表示、データ保存をするように

更新した。

2. データロガーの pig tail を脱着して GND が取れているときと取れていないときのデータの変化を確認した。GND が取れていない場合、加速度データの数 100 Hz 帯までノイズが乗ったが、GND が取れている場合は小数点第 2 位程度までノイズが安定した。

3. TC1 の結果に基づき WFRB の record length を 8 秒から 32 秒に変更することを提案し、採択された。これにより、一部のピクセルに対して加速度と同じ周波数分解能でデータ取得ができるようになった。

図 4.5 に TC1A で取得されたキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトルを示す。測定されたときの冷凍機の駆動周波数は、JTC が 52.35 Hz 、STC が 15.71 Hz であった。

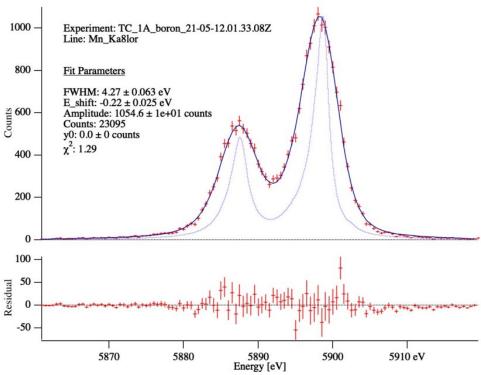


図 4.5. TC1A でのキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトル。図 4.3 と同様の方法で作成された。JTC は 52.35 Hz、STC は 15.71 Hz で駆動していた。図は NASA の S.Poter 氏によって作成された。

4.1.4 TC2A

2021 年 7 月 8 日 -2021 年 8 月 28 日に茨城県つくば市の JAXA 筑波宇宙センターで行われた。TC2A では冷凍機の駆動周波数の組み合わせを全て行い (周波数スキャン)、検出器の温度とノイズデータからエネルギー分解能がもっともよい冷凍機駆動周波数の組み合わせを見つけることが試験目的の 1 つである。設置された加速度ピックアップを図 4.6 に、加速度データを取得した位置と設定を表 4.4 に、そして、加速度データが取得された時間とその時の設定を表 4.5 示す。

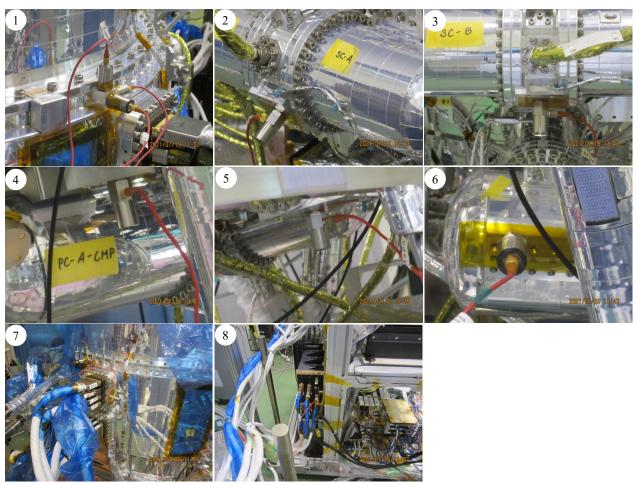


図 **4.6.** TC2A で設置された加速度ピックアップ。それぞれ、(1) DMS Middle -Y, (2) SC-A, (3) SC-B, (4) PC-A, (5) PC-B, (6) JTC-L, (7) Harness (HNS) connector, (8) XBOX side pannel である。

表 4.4. TC2A で取得した加速度データの位置と設定

Config4

DAQ		Position			Picku	ıp	Sign	nal conditio	ner
Chan	Name	Position	Direction	Model	S/N	gain [pC/G]	Model	S/N	gain [V/G]
AI0	A21X	DMS middle -Y	X (DWR axis)	876	180	53.7	600-A-CB5	5261	1
AI1	A21Y	DMS middle -Y	Y (DWR axis)	876	181	54.1	600-A-CB5	5261	1
AI2	A21Z	DMS middle -Y	Z (DWR axis)	876	182	56.3	600-A-CB5	5261	1
AI3	A51Z	SC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3743	50.3	600-A-CB5	5261	0.1
AI4	A52Z	SC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3744	50.8	600-A-CB5	5263	0.1
AI5	A53Z	PC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3745	50.7	600-A-CB5	5263	0.1
AI6	A54Z	PC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3746	49.3	600-A-CB5	5263	0.1
AI7	A62X	JTC-L CMP	Y (local axis)	876	183	49.9	600-A-CB5	5263	1

Config5

DAQ		Position			Picku	ıp	Sign	nal conditio	ner
Chan	Name	Position	Direction	Model	S/N	gain [pC/G]	Model	S/N	gain [V/G]
AI0		HNS connector	X (DWR axis)	2300A	3740	51.0	600-A-CB5	5261	1
AI1		XBOX side pannel		2300A	3741	50.6	600-A-CB5	5263	1
AI2	A21Z	DMS middle -Y	Z (DWR axis)	876	182	56.3	600-A-CB5	5261	1
AI3	A51Z	SC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3743	50.3	600-A-CB5	5261	0.1
AI4	A52Z	SC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3744	50.8	600-A-CB5	5263	0.1
AI5	A53Z	PC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3745	50.7	600-A-CB5	5263	0.1
AI6	A54Z	PC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3746	49.3	600-A-CB5	5263	0.1
AI7	A62X	JTC-L CMP	X (local axis)	876	183	49.9	600-A-CB5	5263	1

表 4.5. TC2A で加速度データを取得した時間とそのときの設定

Start (UT)	End (UT)	Config
2021/7/19 2:30	2021/7/26 2:09	4
2021/7/26 2:10	2021/7/26 5:03	5
2021/7/26 5:04	2021/7/27 3:24	4
2021/7/27 3:25	2021/7/27 8:45	5
2021/7/27 8:46	2021/7/28 4:27	4
2021/7/28 4:28	2021/7/28 8:34	5
2021/7/28 8:35	2021/7/28 9:46	4
2021/7/28 9:47	2021/7/28 9:56	5
2021/7/28 9:57	2021/7/29 1:02	4

図 4.7 に TC2A で取得されたキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトルを示す。測定されたときの冷凍機の駆動周波数は、JTC が 53.48 Hz 、STC が 15.71 Hz であった。この冷凍機駆動周波数は周波数スキャンから決定した。

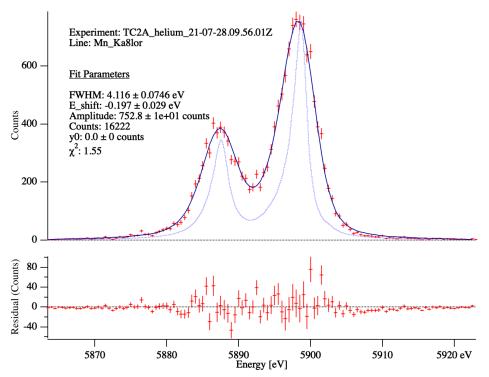


図 4.7. TC2A でのキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトル。図 4.3 と同様の方法で作成された。JTC は 53.48 Hz、STC は 15.71 Hz で駆動していた。図は NASA の S.Poter 氏によって作成された。

4.1.5 TC3

2021 年 8 月 27 日 -2021 年 10 月 2 日に茨城県つくば市の JAXA 筑波宇宙センターで行われた。 TC2A で行った周波数スキャンの続きを行うことが試験目的の 1 つであったが、2021 年 9 月に行った振動試験中に不具合が発生したため、再試験することになった。従って、周波数スキャンは一部だけ行われた。 全ての周波数スキャンは、もう 1 度行われる振動試験の後に TC4 で実施されることになった。振動試験前 (2021/08/27 - 08/30) に設置された加速度ピックアップを図 4.8 に、振動試験後 (2021/09/11 - 09/13) に設置された加速度ピックアップを図 4.9 示す。また、表 4.6 に加速度データを取得した位置と設定を示す。

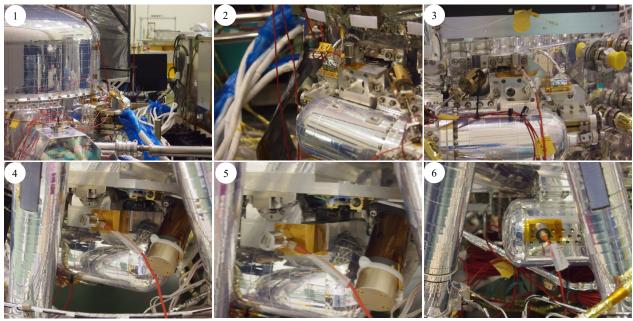


図 **4.8.** TC3 で設置された加速度ピックアップ (振動試験前)。それぞれ、(1) DMS Middle -Y, (2) SC-A, (3) SC-B, (4) PC-A, (5) PC-B, (6) JTC-L である。

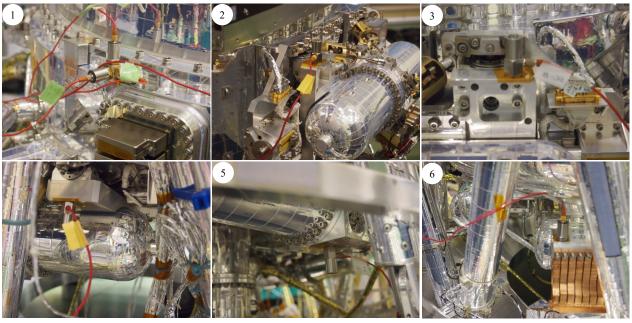


図 **4.9.** TC3 で設置された加速度ピックアップ (振動試験後)。それぞれ、(1) DMS Middle -Y, (2) SC-A, (3) SC-B, (4) PC-A, (5) PC-B, (6) JTC-L である。

表 4.6. TC3 で取得した加速度データの位置と設定

Config6 2021/08/27 05:37 - 2021/08/30 12:22 (UT)

DAQ		Position			Pickt	ıp	Sign	nal conditio	ner
Chan	Name	Position	Direction	Model	S/N	gain [pC/G]	Model	S/N	gain [V/G]
AI0	A21X	DMS middle -Y	X (DWR axis)	876	180	53.7	600-A-CB5	5261	1
AI1	A21Y	DMS middle -Y	Y (DWR axis)	876	181	54.1	600-A-CB5	5261	1
AI2	A21Z	DMS middle -Y	Z (DWR axis)	876	182	56.3	600-A-CB5	5261	1
AI3	A51Z	SC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3743	50.3	600-A-CB5	5261	0.1
AI4	A52Z	SC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3744	50.8	600-A-CB5	5263	0.1
AI5	A53Z	PC-A CMP	Y (local axis)	2300A	3745	50.7	600-A-CB5	5263	0.1
AI6	A54Z	PC-B CMP	Y (local axis)	2300A	3746	49.3	600-A-CB5	5263	0.1
AI7	A62X	JTC-L CMP	Y (local axis)	876	183	49.9	600-A-CB5	5263	1

Config7 2021/09/11 02:33 - 2021/09/13 20:24 (UT)

DAQ		Position			Picku	ıp	Sign	nal condition	ner
Chan	Name	Position	Direction	Model	S/N	gain [pC/G]	Model	S/N	gain [V/G]
AI0	A21X	DMS middle -Y	X (DWR axis)	876	180	53.7	600-A-CB5	5261	1
AI1	A21Y	DMS middle -Y	Y (DWR axis)	876	181	54.1	600-A-CB5	5261	1
AI2	A21Z	DMS middle -Y	Z (DWR axis)	876	182	56.3	600-A-CB5	5261	1
AI3	A51Z	SC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3743	50.3	600-A-CB5	5261	0.1
AI4	A52Z	SC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3744	50.8	600-A-CB5	5263	0.1
AI5	A53Z	PC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3745	50.7	600-A-CB5	5263	0.1
AI6	A54Z	PC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3746	49.3	600-A-CB5	5263	0.1
AI7	A62X	JTC-L CMP	Z (local axis)	876	183	49.9	600-A-CB5	5263	1

図 4.10 に TC3 で取得されたキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトルを示す。測定されたときの冷凍機の駆動周波数は TC2A と同じで、JTC が 53.48 Hz 、STC が 15.71 Hz であった。

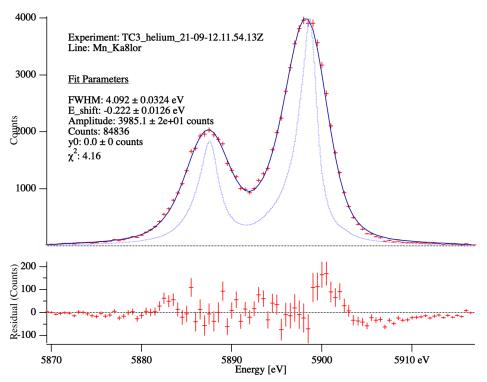


図 **4.10.** TC3 でのキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトル。図 4.3 と同様の方法で作成された。JTC は 53.48 Hz、STC は 15.71 Hz で駆動していた。図は NASA の S.Poter 氏によって作成された。

4.1.6 TC4

2021 年 10 月 10 日 -2021 年 12 月 21 日に茨城県つくば市の JAXA 筑波宇宙センターで行われた。 TC4 では加振機を使用して振動を加え検出器への影響を評価する加振試験と、TC3 で行うことができなかったすべての周波数スキャンが行われた。加振試験で使用した加速度ピックアップは、JAXA が設置したものと、NEC が設置したものがあった。JAXA が設置した加速度ピックアップはデュワーに取り付けているものと同じ型のものを使用している。加速度測定系で使用した加速度ピックアップを図 4.11 に、加振系で使用した加速度ピックアップを図 4.12 に示す。加速度データを取得した位置と設定を表4.7 に、そして、加速度データが取得された時間とその時の設定を 4.8 示す。

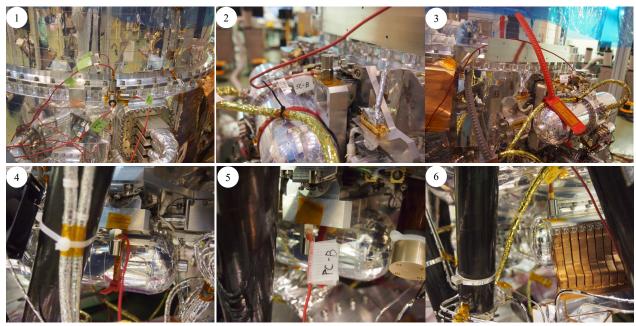


図 **4.11.** TC4 で設置された加速度ピックアップ (加速度測定系)。それぞれ、(1) DMS Middle -Y, (2) SC-A, (3) SC-B, (4) PC-A, (5) PC-B, (6) JTC-L である。

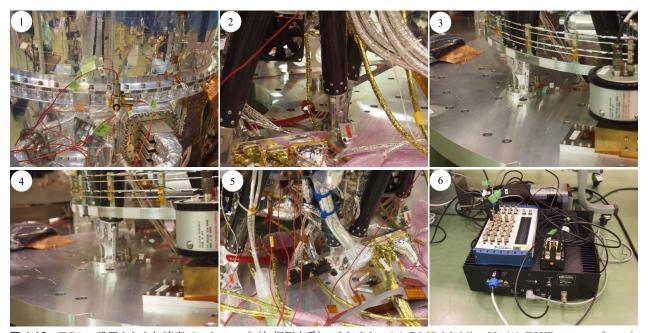


図 **4.12**. TC4 で設置された加速度ピックアップ(加振測定系)。それぞれ、(1) DMS Middle -Y, (2) DWR ベースプレート +X (Z 軸), (3) DWR ベースプレート +Y (Z 軸), (4) DWR ベースプレート -X (Z 軸), (5) DWR ベースプレート -Y (Z 軸), (6) Force センサ出力である。

表 **4.7.** TC4 で取得した加速度データの位置と設定。Config8 が加速度測定系の構成、Config9 が加振測定系の構成である。Config8

DAQ		Position			Pickup			Signal conditioner		
Chan	Name	Position	Direction	Model	S/N	gain [pC/G]	Model	S/N	gain [V/G]	
AI0	A21X	DMS middle -Y	X (DWR axis)	876	180	53.7	600-A-CB5	5261	0.1	
AI1	A21Y	DMS middle -Y	Y (DWR axis)	876	181	54.1	600-A-CB5	5261	0.1	
AI2	A21Z	DMS middle -Y	Z (DWR axis)	876	182	56.3	600-A-CB5	5261	0.1	
AI3	A51Z	SC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3743	50.3	600-A-CB5	5261	0.1	
AI4	A52Z	SC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3744	50.8	600-A-CB5	5263	0.1	
AI5	A53Z	PC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3745	50.7	600-A-CB5	5263	0.1	
AI6	A54Z	PC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3746	49.3	600-A-CB5	5263	0.1	
AI7	A62X	JTC-L CMP	Z (local axis)	876	183	49.9	600-A-CB5	5263	0.1	

Config9

DAQ		Position			Picku	ıp	Sign	nal conditioner S/N gain [V/G] 5261 0.1 5261 0.1 5261 0.1 5261 0.1 5261 0.1 5263 0.1	
Chan	Name	Position	Direction	Model	S/N	gain [pC/G]	Model	S/N	gain [V/G]
AI0	A21X	DMS middle -Y	X (DWR axis)	876	180	53.7	600-A-CB5	5261	0.1
AI1	A21Y	DMS middle -Y	Y (DWR axis)	876	181	54.1	600-A-CB5	5261	0.1
AI2	A21Z	DMS middle -Y	Z (DWR axis)	876	182	56.3	600-A-CB5	5261	0.1
AI3		DWR base +X	Z (DWR axis)	2300A	3740	51.0	600-A-CB5	5261	0.1
AI4		DWR base +Y	Z (DWR axis)	2300A	3741	50.6	600-A-CB5	5261	0.1
AI5		DWR base -X	Z (DWR axis)	2300A	3742	49.5	600-A-CB5	5263	0.1
AI6		DWR base -Y	Z (DWR axis)	2300A	3743	50.3	600-A-CB5	5263	0.1
AI7		Force sencer output V							0.0238

表 4.8. TC4 で加速度データを取得した時間とそのときの設定

Start (UT)	End (UT)	Config
2021/12/1 0:00	2021/12/7 23:40	8
2021/12/8 0:00	2021/12/8 5:00	9
2021/12/8 5:07	2021/12/10 0:20	8
2021/12/10 0:30	2021/12/10 8:35	9
2021/12/10 8:40	2021/12/11 5:30	8
2021/12/11 5:40	2021/12/10 8:30	9
2021/12/10 8:40	2021/12/15 17:51	8

図 4.13 に TC4 で取得されたキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトルを示す。測定されたときの冷凍機の駆動周波数は、JTC が 53.48 Hz 、STC が 15.71 Hz であった。

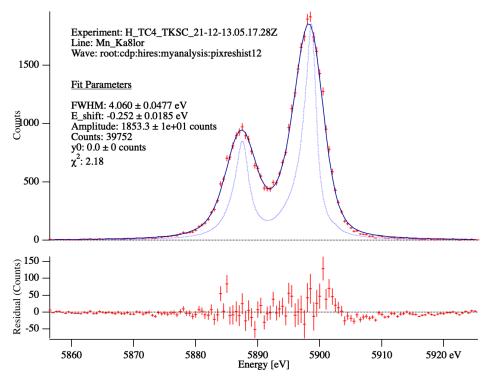


図 **4.13.** TC4 でのキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトル。図 4.3 と同様の方法で作成された。JTC は 51.59 Hz、STC は 14.63 Hz で駆動していた。図は NASA の S.Poter 氏によって作成された。

4.1.7 TC5

2022 年 1 月 24 日 -2022 年 3 月 12 日に茨城県つくば市の JAXA 筑波宇宙センターで行われた。TC5 は正月を挟むため終了した TC4 の続きに相当するため、目的は TC4 と同じである。

設置された加速度ピックアップを図 4.14 に、加速度データを取得した位置と設定を表 4.9 に示す。

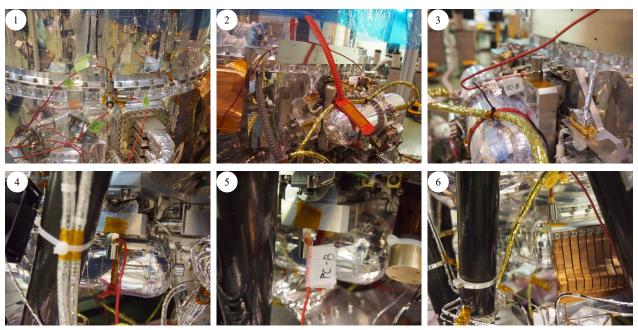


図 **4.14.** TC5 で設置された加速度ピックアップ。 それぞれ、(1) DMS Middle -Y, (2) SC-A, (3) SC-B, (4) PC-A, (5) PC-B, (6) JTC-L である。

表 4.9. TC5 で取得した加速度データの位置と設定

Config10 2022/01/24 00:14:27 - 2022/02/22 01:55:15 (UT)

DAQ		Position			Pickı	ıp	Sign	nal condition	ner
Chan	Name	Position	Direction	Model	S/N	gain [pC/G]	Model	S/N	gain [V/G]
AI0	A21X	DMS middle -Y	X (DWR axis)	876	180	53.7	600-A-CB5	5261	0.1
AI1	A21Y	DMS middle -Y	Y (DWR axis)	876	181	54.1	600-A-CB5	5261	0.1
AI2	A21Z	DMS middle -Y	Z (DWR axis)	876	182	56.3	600-A-CB5	5261	0.1
AI3	A51Z	SC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3744	50.8	600-A-CB5	5261	0.1
AI4	A52Z	SC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3745	50.7	600-A-CB5	5263	0.1
AI5	A53Z	PC-A CMP	Z (local axis)	2300A	3746	49.3	600-A-CB5	5263	0.1
AI6	A54Z	PC-B CMP	Z (local axis)	2300A	3747	49.9	600-A-CB5	5263	0.1
AI7	A62X	JTC-L CMP	Z (local axis)	876	183	52.4	600-A-CB5	5263	0.1

図 4.15 に TC5 で取得されたキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトルを示す。測定されたときの冷凍機の駆動周波数は、JTC が 53.59 Hz 、STC が 15.09 Hz であった。

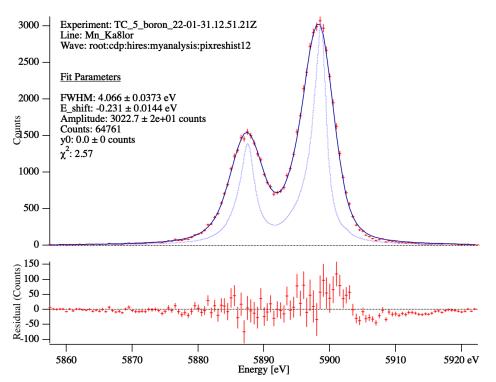


図 **4.15**. TC5 でのキャリブレーションピクセルの Mn-K α 線のスペクトル。図 4.3 と同様の方法で作成された。JTC は 53.59 Hz、STC は 15.09 Hz で駆動していた。図は NASA の S.Poter 氏によって作成された。

4.2 データセット

Resolve からは、搭載機器の状態をモニターするための House Keeping(HK) データと、検出器にパルスが入射したときのデータ(パルスデータ)と検出器のノイズデータが取得されている。地上試験ではこれらのデータに追加して、デュワーに加速度ピックアップを取り付けて加速度データが取得された。これらのデータの内、本研究では HK データ、ノイズデータ、加速度データを使用した。

4.2.1 HK データ

House Keeping (HK) データとは、搭載機器が取集する装置状態をモニターするためのデータの総称である。装置各部の温度や電源電力、電圧などが含まれる。このうち、本研究では検出器の温度のモニターデータと 1 段 ADR のマグネット電流を用いた。前者は 50 mK ステージ温度データをサンプリングレート 1 Hz で取得したものである。典型値は 50 mK であるが、ADR リサイクルを行っている間は温度が上昇する。また、モニターデータとコントロールデータがあり共に 50 mK ステージの温度を表す。コントロール制御は PID 制御に用いる。後者は ADRC が制御している ADR に流す電流の大きさをサンプリングレート 1 Hz で取得したものである。電流の大きさは磁場を少しずつ弱くしていくため、 $\sim -0.008~{\rm mA/s}$ で減少している。また、ADR リサイクルを行っている間は電流が大きくなる。微小擾乱が検出器内に侵入した場合、振動の持つエネルギーは熱エネルギーに変換され、温度ゆらぎとなる。そのため、微小擾乱の侵入は 50 mK ステージデータでは数値のゆらぎとして現れる。また、3.31 式より、ADR は磁性塩にかける磁場を弱くすることで冷却を行う。マグネット(コイル)の磁場の大きさは流れ

る電流の大きさに比例するため、磁場を弱くするためには電流を弱くすればよい。そのため、ADR で冷却を行うときには、電流が減少する。よって、微小擾乱によって検出器に追加の熱入力が発生した場合、温度を下げるために ADR のマグネット電流データの値がより急激に減少する。図 4.16 に ADR のマグネット電流データ (上段)、 $50~{\rm mK}~{\rm A}$ ステージ温度のモニターデータ (下段) との例を示す。 $2~{\rm c}$ つのデータは同じ時間に取得されており、温度が上昇すると、ADR マグネット電流が減少していることが分かる。\$1.2.2.3 節で述べているように、熱浴の温度ゆらぎがマイクロカロリメータのエネルギー分解能に影響を及ぼすため、ADR のマグネット電流データの傾きと $50~{\rm mK}~{\rm A}$ ステージ温度データの安定性はエネルギー分解能を推定する指標になる。

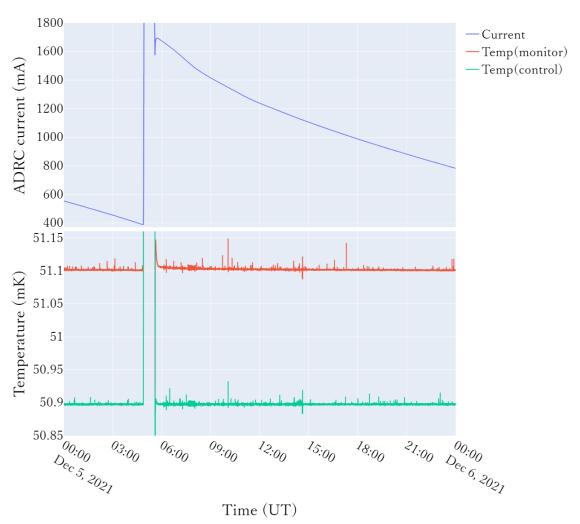


図 **4.16.** HK プロットの例。ADR のマグネット電流データ (上段)、50 mK ステージ温度のモニターデータ (下段)。05:00 頃に ADR リサイクルが行われ、06:00 前に終了している。ADR リサイクル終了後 ADRC current が増大している。

4.2.2 マイクロカロリメータのデータ

マイクロカロリメータでは一定の周波数のまま、レコード長を変化させてノイズデータを取得する。また、ノイズデータにはパルスが含まれているものと含まれていないものがある。これらのデータは軌

道上でも取得される。以下にノイズデータの名前とその取得方法を述べる。

4.2.2.1 1k noise spec

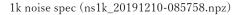
1k noise spec は周波数分解能が 12.2 Hz のスペクトルデータを取得する方法である。コマンドで命令したときにサンプリング周波数 12.5 kHz で 1024 サンプルの長さ (約 80 ms) からなるノイズレコードを 1 セットとして収集記録し始める。100 セットをサンプリングし終えたあと、100 セットそれぞれをフーリエ変換し平均したノイズを取得する。ここで、ノイズレコードとはパルスを判別する閾値以下の連続するデータである。この方法で取得されたノイズを図 4.17 に示す。太い青の破線は STC の周波数、赤の破線は JTC の周波数、細い青、赤の破線はそれぞれ対応する冷凍機の周波数の定数倍の周波数である。ピンクの破線は交流電源の周波数である。

4.2.2.2 8k noise spec

8k noise spec は周波数分解能が 1.5 Hz のスペクトルデータを取得する方法である。取得方法は 1k noise spec とほぼ同じである。1k noise spec との違いはサンプル数が 8192 サンプルになり、セット数が 50 セットもしくは 10 セットになっている点である。この方法で取得されたノイズを図 4.18 に示す。各破線は図 4.17 と同様である。1k noise spec に比べて周波数分解能は高いが、サンプリングしている間に X 線が入射してはいけないため、取得が一定時間内に完了しないことがある。そこで、11、12、13 番ピクセルだけ 10 セットとする。理由は、12 番目のピクセルに 55Fe の較正用線源を照射しているので X 線パルスによってノイズレコードが中断されるためである。また、11、13 番ピクセルは 12 番ピクセルのからのクロストークが発生するため、12 番ピクセルと同じようにノイズレコードの取得が中断される。

4.2.2.3 WFRB (wave-form ring buffer) dump

WFRB dump はサンプリング周波数 12.5 kHz で波形データと波形の微分データを取得する方法である。Anti-co 検出器のデータも同時に取得する。コマンドで命令したときに、各 PSP カードごとに 2 ピクセル分のノイズの波形とその波形を微分したものを収集記録し始める。TC1 では 10 s 間 (変更可能) のデータを取得する。これを 1 セットとして、2 ピクセル 5 セット分のデータを順に取得し、5 セットをまとめたものを 1 つの WFRB dump データとしている。すなわち、1 つの WFRB には計 50 秒の連続したデータが 2 つあり、それぞれ最初の 10 秒はピクセル A 番目のデータ、次の 10 秒はピクセル B 番目、…、のように複数のピクセルのデータが結合されている。1 回に取得できるピクセル数は、PSPカードが 4 枚あるので計 8 ピクセルである。TC1A から仕様が変更され、32 s 間のデータを 8 ピクセル分取得するようになった。取得する 8 ピクセルの内訳はピクセル 00、05、09、18、23、27、34 番とAnti-co 検出器の A1 系である。X 線パルスの有無に関係なく取得される。取得された WFRB の波形を図 4.19 に、その波形をフーリエ変換したものを図 4.20 に示す。図 4.19 の縦軸の ADC sample 4.19 に、4.19 に、



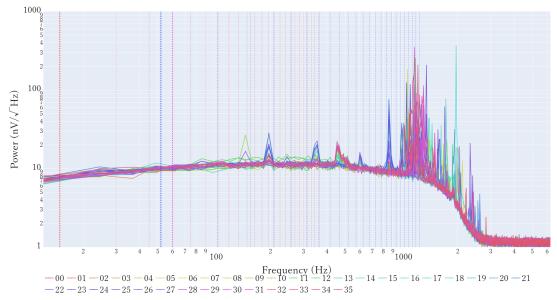


図 **4.17**. 1k ノイズスペクトル。凡例はピクセル番号を示している。太い青の破線は STC の周波数、赤の破線は JTC の周波数、細い青、赤の破線はそれぞれ対応する冷凍機の周波数の定数倍の周波数である。ピンクの破線は交流電源の周波数である他の図も同じで方法で作成している。

8k noise spec (ns8k_20191211-013557.npz)

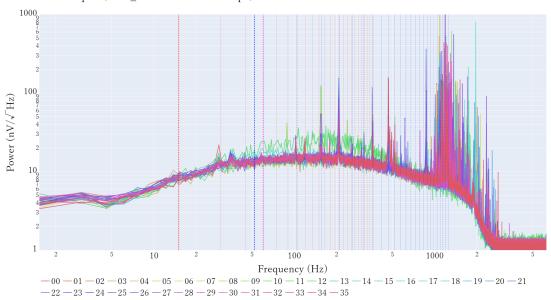


図 **4.18.** 8k ノイズスペクトル

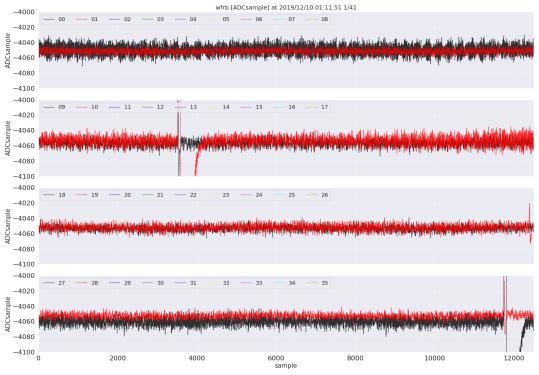


図 4.19. WFRB で取得された波形

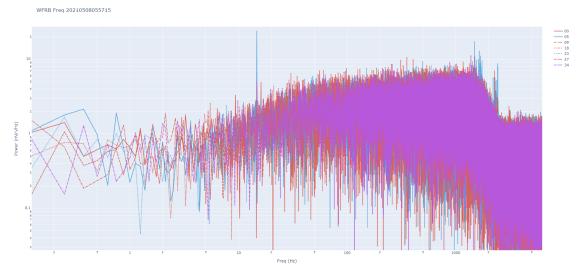


図 4.20. WFRB で取得された波形をフーリエ変換したもの (32 秒で取得された WFRB)

4.2.2.4 Sample dump

Sample dump はサンプリング周波数 12.5 kHz で波形データと波形の微分データを取得する方法である。Anti-co 検出器のデータも取得する。コマンドで命令したときに、ノイズの波形とその微分を 1024 サンプルを 1 セットとして収集記録し始める。そして、50 セット (4.096 秒) 分または 25 セット (2.048 秒) 分をまとめて取得し、これを 1 つ sample dump としている。X 線パルスの有無に関係なく取得される。全 pixel が同時に取得されるので、時間空間で相関するノイズの診断に有効である。取得されたノイズの波形を図 4.21 に、その波形をフーリエ変換したものを図 4.22 に示す。

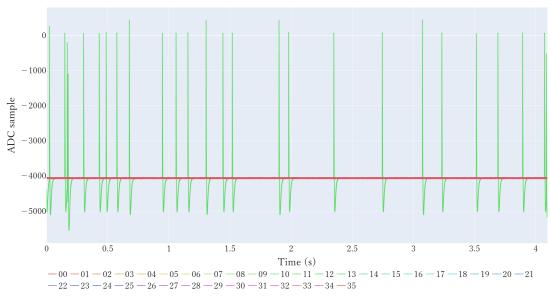


図 4.21. sample dump で取得された波形

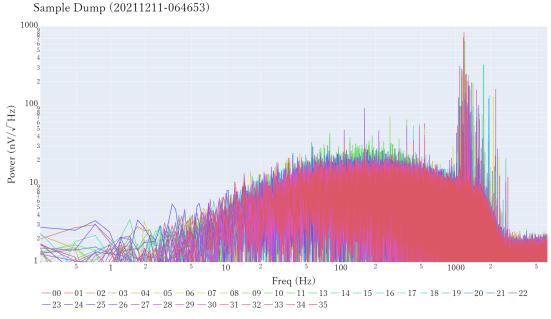
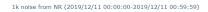


図 4.22. sample dump で取得された波形をフーリエ変換したもの

4.2.2.5 Noise record

Noise record はサンプリングレート 12.5 kHz で波形データを取得する方法である。コマンドの有無によらず、CPU に余裕があるときは常時、noise record をサンプリング周波数 12.5 kHz で 1024 サンプルのデータをサンプリングし、これを 1 セットとして取得する。noise record は通常、1 秒に 1 ピクセルのデータを取得する設定になっている。したがって、各ピクセルのノイズ 1 セットは 9 秒に 1 回取得される。noise record を利用すると、任意の時間帯で 1k noise spec が作成できる。ただしデータ量は少ないので、短時間の変動は追えない。2019/12/10 00:00:00 から 1 時間の間に取得されたノイズレコードを全てで平均したものを図 4.23 に、それをフーリエ変換したものを図 4.24 に示す。



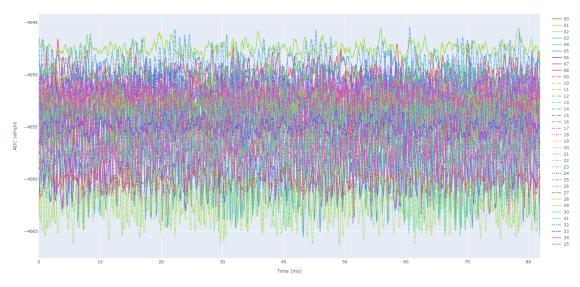


図 **4.23.** Noise record で取得されたノイズ波形

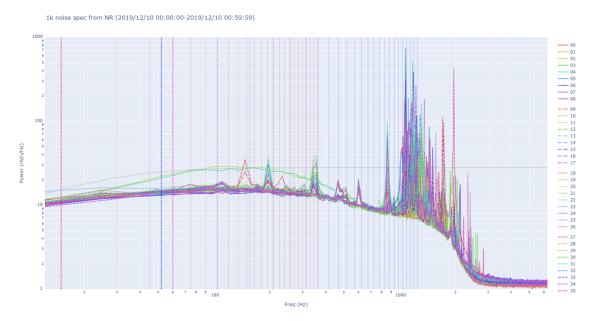


図 4.24. Noise record で取得されたノイズ波形をフーリエ変換したもの

4.2.2.6 各 TC でのノイズデータ取得パラメータ

各 TC でノイズを取得する際のパラメータのまとめを表 4.10、4.11、4.12 に示す。

	出力	データ	pixel	Anti-co	X線パルス含	サンプリング	レコード長	サンプル数	総時間	サンプル率
						(Hz)	(sample)		(s)	(sample/s/pix)
1k noise spec	コマンド時	スペクトル	36	0		12.5k	1024	100	0.08	
8k noise spec	コマンド時	スペクトル	36	0		12.5k	8192	50, 10 (#1)	0.66	
WFRB	コマンド時	波形	$(2+2+2+2+1) \times 4$	2	x	12.5k	12288	10	10	
sample dump	コマンド時	波形	36	2	x	12.5k	1024	50	4.096	
noise record	常時	波形	36	0		12.5k	1024	8	8	1/9

表 **4.10**. ノイズデータを取得するパラメータ (TC1)

表 **4.11.** ノイズデータを取得するパラメータ (TC1A)

	出力	データ	pixel	Anti-co	X線パルス含	サンプリング	レコード長	サンプル数	総時間	サンプル率
						(Hz)	(sample)		(s)	(sample/s/pix)
1k noise spec	コマンド時	スペクトル	36	0		12.5k	1024	100	0.08	
8k noise spec	コマンド時	スペクトル	36	0		12.5k	8192	50, 10 (#1)	0.66	
WFRB	コマンド時	波形	7	1	x	12.5k	400000	1	32	
sample dump	コマンド時	波形	36	2	x	12.5k	1024	50	4.096	
noise record	常時	波形	36	0		12.5k	1024	8	∞	1/9

表 **4.12.** ノイズデータを取得するパラメータ (TC2A、TC3、TC4、TC5)

	出力	データ	pixel	Anti-co	X線パルス含	サンプリング	レコード長	サンプル数	総時間	サンプル率
						(Hz)	(sample)		(s)	(sample/s/pix)
1k noise spec	コマンド時	スペクトル	36	0		12.5k	1024	100	0.08	
8k noise spec	コマンド時	スペクトル	36	0		12.5k	8192	50, 10 (#1)	0.66	
WFRB	コマンド時	波形	7	1	x	12.5k	400000	1	32	
sample dump	コマンド時	波形	36	2	x	12.5k	1024	50, 25	4.096, 2.048	
noise record	常時	波形	36	0		12.5k	1024	8	∞	1/9

4.2.3 加速度のデータ

以下に TC1、1A、2A、3 で取得された加速度データの典型的なスペクトルの例を示す。表 4.13 に使用した加速度データの日付とそのデータ取得されたときの各冷凍機の電力 (W) をまとめた。

Frequency (Hz) Power (W) TC Date (UT) SC/PC JTC SC-A SC-B PC-A PC-B JTC-L JTC-H 2019/12/11 03:23:05 TC1 15.00 52.35 48.1 51.2 50.2 49.7 17.0 6.0 TC1A 2021/05/12 18:04:50 15.71 52.35 48.1 49.7 49.4 45.7 14.6 5.7 TC2A 2021/07/24 20:11:00 15.00 52.35 48.6 48.9 13.9 5.6 50.1 44.8 TC3 2021/09/12 09:54:27 14.45 53.02 50.0 51.0 48.9 5.4

表 4.13. 加速度データが取得されたときの日付と冷凍機の電力。

図 4.25 に TC1 で取得された He tank と DMS middle -Y と DMS top の加速度データの典型的なスペクトルを示す。図の上段はフルバンドを両対数でプロットしたもので、下段は 500 Hz までを線形でプロットしたものである。スペクトルのベースラインは $\sim 100~\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度である。全てのチャンネルで JTC と STC の基本波と高調波による振動が確認できる。

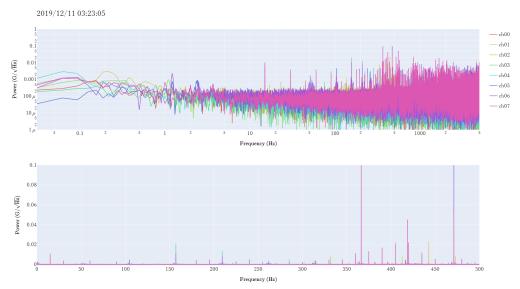


図 **4.25.** TC1 での He tank, DMS middle -Y, DMS top のスペクトルの典型なデータ。(上段) フルバンドを両対数でプロットしたもの。(下段)500 Hz までを線形でプロットしたもの。ch00: He tank (X), ch01: He tank (Y), ch02: He tank (Z), ch03: DMS middle -Y (X), ch04: DMS middle -Y (Y), ch05: DMS middle -Y (Z), ch06: DMS top (Y), ch07: DMS top (Z)

次に、図 4.26 に TC1A で取得された DMS middle -Y と SC/PC-A/B と JTC-H の加速度データの 典型的なスペクトルを示す。DMS middle -Y、PC-A、JTC-H のスペクトルのベースラインは ~ 100 $\mu \text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度、SC-A/B、PC-B のスペクトルのベースラインは $\sim 1 \text{ mG}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度である。PC-A と B のスペクトルの差は、設置場所による VIS の影響の有無が原因である。詳しい比較は後述する。DMS middle -Y と JTC のスペクトルには JTC と STC の基本波と高調波による振動が確認できる。STC の スペクトルには基本波と 150 Hz 以上の高調波が確認できる。

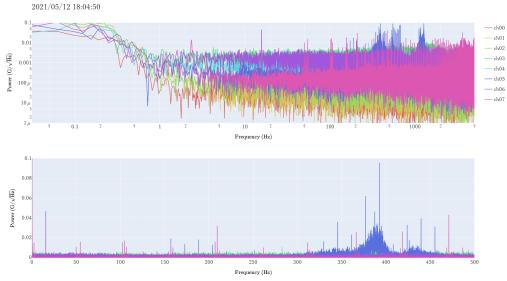


図 **4.26.** TC1A での He tank, DMS middle -Y, DMS top のスペクトルの典型なデータ。ch00: DMS middle -Y (X), ch01: DMS middle -Y (Y), ch02: DMS middle -Y (Z), ch03: SC-A, ch04: SC-B, ch05: PC-A, ch06: PC-B, ch07: JTC-H。図 4.25 と同じ方法で作成した。

次に、図 4.27 に TC2A で取得された DMS middle -Y と SC/PC-A/B と JTC-L の加速度データ

の典型的なスペクトルを示す。TC1A では ch07 の加速度ピックアップが JTC-H に取り付けられていたが JTC-L に変更された。JTC-L のベースラインは $\sim 0.1~mG/\sqrt{Hz}$ であり、JTC-H のもの ($\sim 0.5~mG/\sqrt{Hz}$) より小さくなっている。他のチャンネルの加速度スペクトルは TC1A とほぼ同じである。

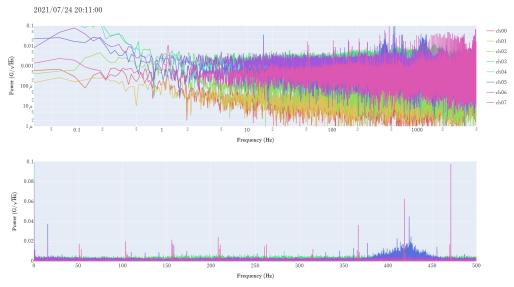


図 **4.27.** TC2A での He tank, DMS middle -Y, DMS top のスペクトルの典型なデータ。ch00: DMS middle -Y (X), ch01: DMS middle -Y (Y), ch02: DMS middle -Y (Z), ch03: SC-A, ch04: SC-B, ch05: PC-A, ch06: PC-B, ch07: JTC-L。図 4.25 と同じ方法で作成した。

次に、図 4.28 に TC3 で取得された DMS middle -Y と SC/PC-A/B と JTC-L の加速度データの典型的なスペクトルを示す。TC3 では ch03, 04 (SC-A/B) の取り付け位置が TC1A、TC2A から変わっており、 VIS の影響を受けるようになったため、加速度スペクトルの形が変わっている。他のチャンネルの加速度スペクトルは TC2A とほぼ同じである。

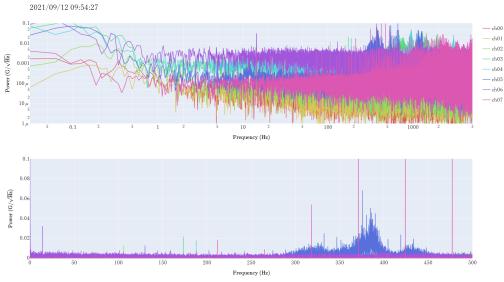
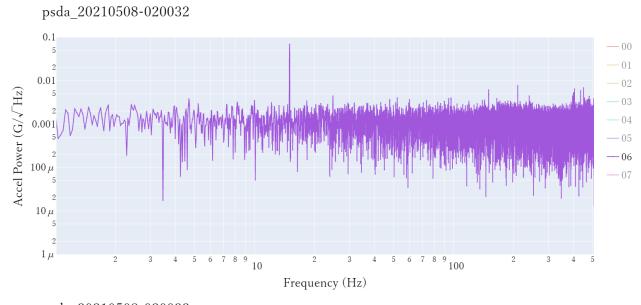


図 **4.28.** TC3 での He tank, DMS middle -Y, DMS top のスペクトルの典型なデータ。ch00: DMS middle -Y (X), ch01: DMS middle -Y (Y), ch02: DMS middle -Y (Z), ch03: SC-A, ch04: SC-B, ch05: PC-A, ch06: PC-B, ch07: JTC-L。図 4.25 と同じ方法で作成した。

VIS の影響

TC1A と TC2A では同じ種類、駆動方法の冷凍機である PC-A と PC-B の加速度を測定している。しかし、加速度ピックアップを取り付ける位置の違いから PC-A では VIS を通していない振動が測定され、 PC-B では VIS を通していない振動が測定される。図 4.29 に PC-A と PC-B のスペクトルを比較したものを示す。VIS を通していない PC-B のスペクトルは $250-500~{\rm Hz}$ のパワーが増大していることに対して、VIS を通した PC-A のスペクトルの同じ周波数帯のパワーは増大していない。PC-B のベースラインは $\sim 0.5~{\rm mG/\sqrt{Hz}}$ であるが、PC-A のベースラインは $\sim 1~{\rm mG/\sqrt{Hz}}$ となっている。



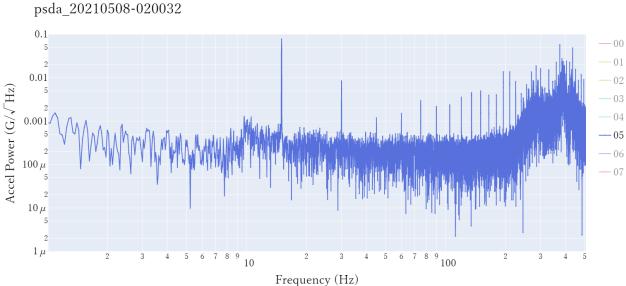


図 **4.29.** VIS の有無による加速度スペクトルの変化。上段: VIS を通した振動の加速度スペクトル(PC-A)。 下段: VIS を通していない振動の加速度スペクトル(PC-B)。

Spot cooler の影響

Cryo cooler は冷却対象の熱を奪うことで冷却している。そのため、奪った熱によって Cryo cooler のコンプレッサーが熱を持つため、地上試験では Spot cooler で送風することでコンプレッサーを冷却している。軌道上ではコンプレッサーが持つ熱は宇宙空間へ放出される。

Spot cooler からの送風がコンプレッサーの振動を誘発する可能性があるため、Spot cooler ON/OFF ならびに Cryo Cooler ON/OFF の 4 つの組み合わせで SC-A の加速度スペクトルを確認した。以上の 4 つの加速度スペクトルを並べたものを図 4.30 に示す。 上から Spot cooler ON/Cryo cooler OFF、Spot cooler OFF、Cryo cooler OFF、Spot cooler ON/Cryo cooler ON、Spot cooler OFF/Cryo cooler ON で取得された加速度のスペクトルである。上の 2 つを比較すると Spot cooler が ON のときには 50 Hz 以下のパワーが大きくなることが分かる。しかし、下の 2 つを比較すると Cryo cooler が ON に なったときには、パワーが 2 桁大きくなるため spot cooler の影響は確認できなくなる。よって、Spot cooler が発生させる振動は Cryo cooler が発生させるものより小さく無視できる。

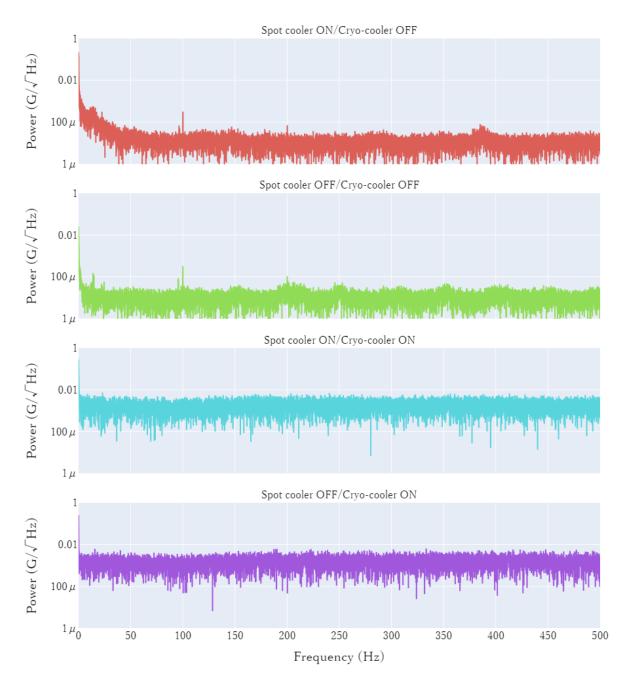


図 4.30. Spot cooler ON/OFF 、 Cryo Cooler ON/OFF の 4 つの組み合わせのときに取得された加速度スペクトル

時刻同期

擾乱源(加速度)と応答(カロリメータ)の位相差からノイズが発生する原因を推定することができる。例えば、位相が $\pi/2$ ずれる周波数のノイズはキャパシティブな結合か作用するノイズであると推定でき、マイクロカロリメータの読み出し回路で発生していると推定できる。しかし、今回のサブシステム試験で取得されたデータから加速度データとマイクロカロリメータデータの時刻同期をすることは難

しく、簡単な位相解析のみを行った。

微小擾乱加振試験 (§5.2 参照) で 2021/12/11 10:20 - 10:24 (UT) の時間中、加振機を用いて外部からデュワーのベースプレートを 200.5 Hz で振動させた。その時に取得された加速度データと sample dump を用いて 2 つのデータの間にどれだけの位相差があるか調査した。図 4.31 の上段にデュワーのベースプレートの加速度データの時空間データを、下段にピクセル 10 番の sample dump の時空間データをプロットしている。次に図 4.32 に 2 つのデータをフーリエ変換し、150-230 Hz を拡大したプロットを示す。図から分かるようにこの 2 つのデータ両方に 200.5 Hz のピークが確認できる。この 2 つのデータをフーリエ変換して取得したスペクトルの 200.5 Hz のピークだけ残し、それ以外の周波数を 0 に置き換えてから逆フーリエ変換を行った。このとき、フーリエ変換して得たスペクトルは虚数の情報を保持したまま逆フーリエ変換された。逆フーリエ変換で取得された時空間データの最初の 4 波長分の時系列データを図 4.33 に示す。この 2 つのデータの時刻差を、山のズレで見積もると 0.0029 秒であった。これを位相差に直すと 1.16 π であった。また、この 2 つのデータは原点が同期されていないため、この位相差に $2\pi \times n$ (n は 0 以上の整数)を足した値が真の位相差であると考えられる。

サブシステム試験を通して、加速度データとマイクロカロリメータデータの時刻同期は必ずしも一貫 した確認はしていないので、本論文では周波数空間での応答だけを議論する。

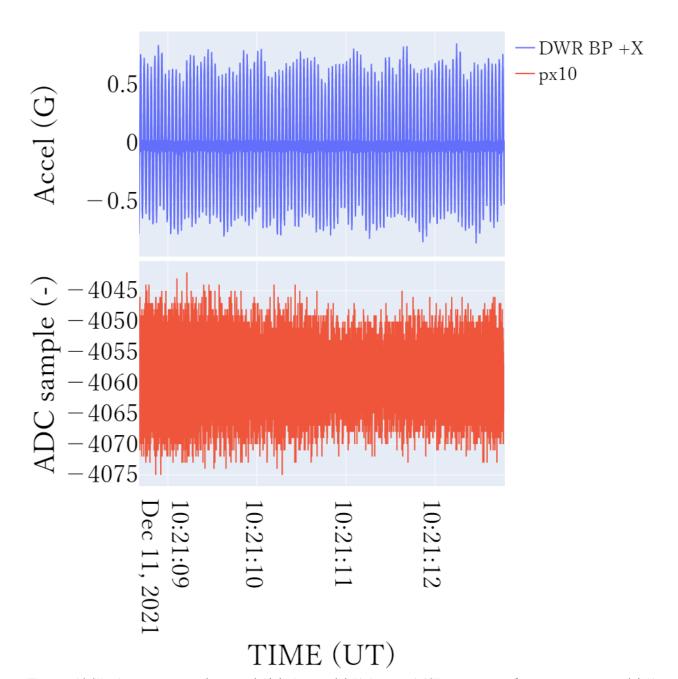


図 4.31. (上段) デュワーのベースプレートの加速度データの時空間データ、、(下段) ピクセル 10 番の sample dump の時空間 データ。sample dump が取得された時間を拡大している。

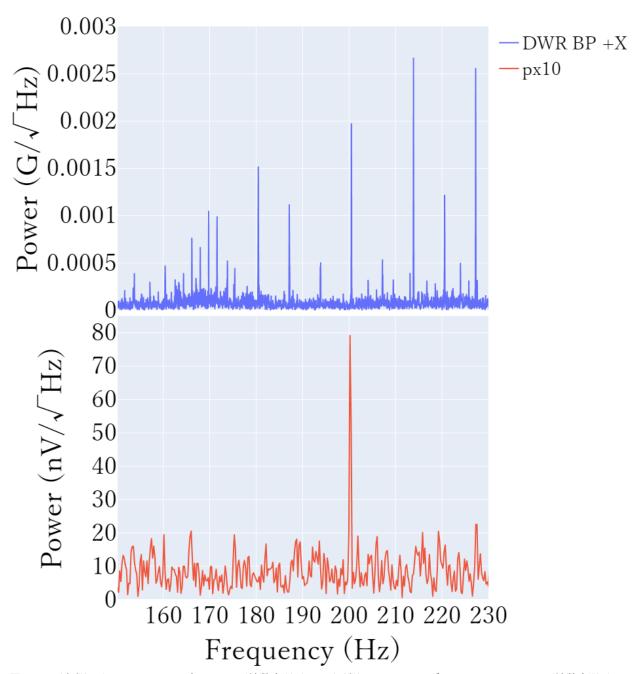


図 **4.32.** (上段) デュワーのベースプレートの周波数空間データ (下段) ピクセル 10 番の sample dump の周波数空間データ。 $150-230~{\rm Hz}$ を拡大している。

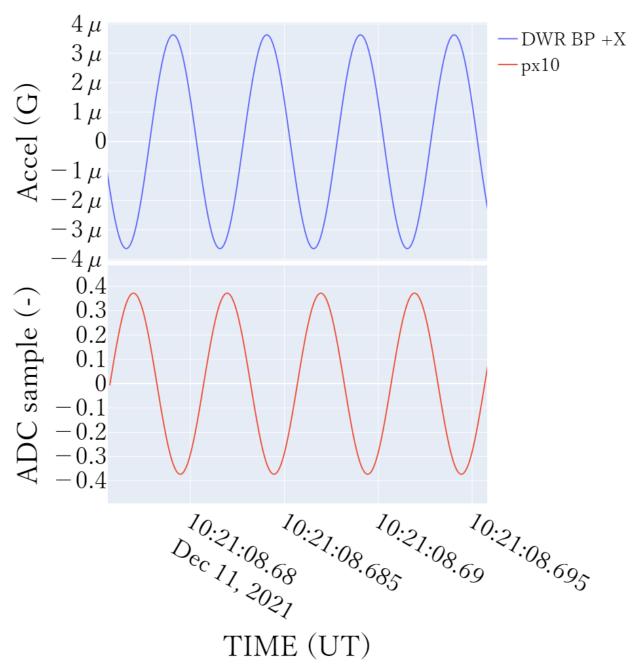


図 **4.33**. 200.5 Hz のノイズだけを残し逆フーリエ変換をかけて取得した時空間データ。(上段) デュワーのベースプレートの 200.5 Hz の時空間データ (下段) ピクセル 10 番の sample dump の 200.5 Hz の時空間データ。sample dump の最初の 4 波長分を拡大している。

冷凍機電力依存性

XRISM 衛星を打ち上げる際に加速度ピックアップは設置されない。また、機械式冷凍機の電力はある程度自由に設定できる。そこで、冷凍機のパワーとデュワーに発生する加速度との間に線形性があれば、冷凍機のパワーからデュワーに発生する加速度の推測が可能になる。線形性を調べるために、まず

は 2 段スターリング冷凍機の電力とそのコンプレッサの加速度データに与える影響を調査した。この時、STC と JTC の周波数はそれぞれ 14.63、15.69 Hz である。SC-A の電力を上げたときには SC-B の電力も同様に上げている。PC も同様である。また、SC の電力を上げた場合、同時に PC の電力も上げている。よって、1 つの冷凍機の電力を追跡すれば、冷凍機全体の電力の増減を追うことができる。今回は SC-A の電力に注目した。調査に使用したデータのパラメータを表 4.14 に示す。また、図 4.34 に各パラメータで取得された SC-A/B、PC-A/B の加速度スペクトルを示す。

表 4.14. 加速度の冷凍機パワー依存性を調査するために使用したデータのパラメータ

Power (W)								
SC-A	SC-B	PC-A	PC-B	JTC-H	JTC-L			
39.88	42.09	48.00	49.38	5.66	15.37			
40.34	41.64	48.46	48.92	5.66	15.37			
49.51	49.70	48.00	48.92	5.66	15.37			
49.97	49.79	48.37	49.10	5.66	15.37			
59.13	59.55	48.46	49.38	5.66	15.37			
68.76	69.17	48.00	49.15	5.66	15.37			
77.93	78.80	48.00	48.92	5.66	15.37			
78.39	78.35	48.00	48.92	5.66	15.37			

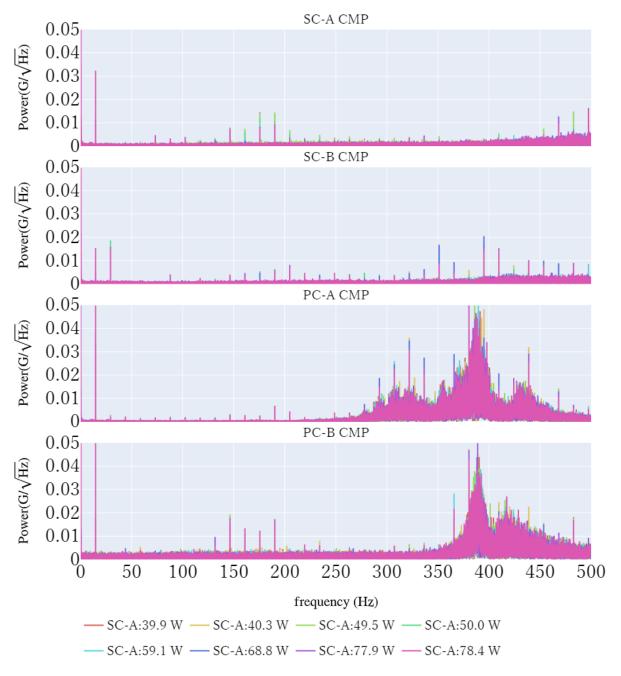


図 4.34. SC-A/B, PC-A/B の加速度データ

次に、STC の倍波を抜き出し、それを SC-A が 39.9 W のときのもので割ったものをプロットしたものを図 4.35-4.38 に示す。各図の横に引かれた点線は、各電力を 39.9 W で割った値であり線形性を持っている場合この点線上にプロットされるはずである。点線の色はデータが取得されたときの冷凍機の電力と対応している。

図から分かるように 2 段スターリング冷凍機の電力とそのコンプレッサの加速度の間に線形性は確認されなかった。そのため、デュワーと冷凍機の電力の間にも単純な線形性はないと考えられる。

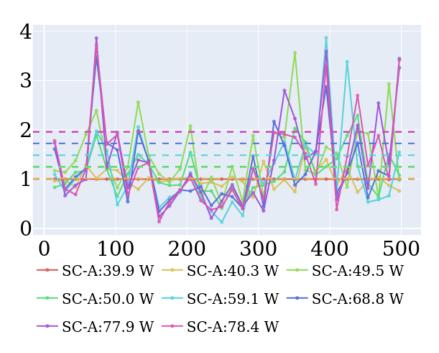


図 **4.35**. 各電力のときに取得された加速度スペクトルを SC-A が 39.9 W のときの加速度スペクトルで割ったもの (ch03:SC-A)。

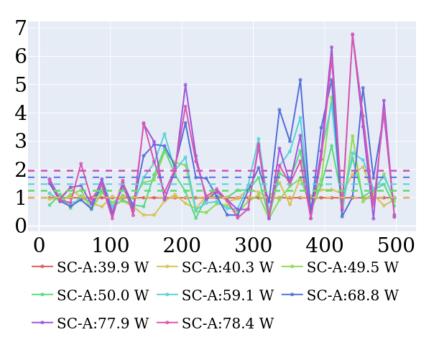


図 **4.36**. 各電力のときに取得された加速度スペクトルを SC-B が 39.9 W のときの加速度スペクトルで割ったもの (ch04:SC-B)。

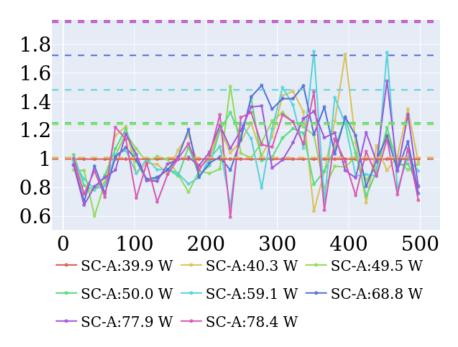


図 **4.37**. 各電力のときに取得された加速度スペクトルを PC-A が 39.9 W のときの加速度スペクトルで割ったもの (ch05:PC-A)。

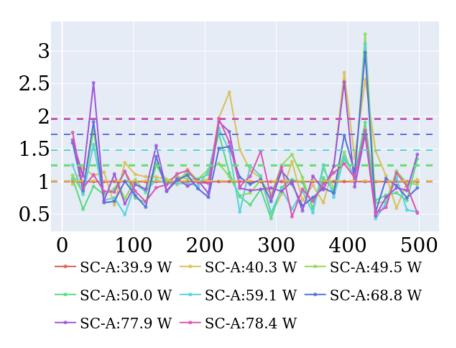


図 **4.38**. 各電力のときに取得された加速度スペクトルを PC-B が 39.9 W のときの加速度スペクトルで割ったもの (ch06:PC-B)。

第5章

課題

Contents

5.1	カロリメータにおけるノイズ源の特定
	5.1.1 データセット
	5.1.2 データ解析
	5.1.3 結果と考察
$\bf 5.2$	微小擾乱加振試験
	5.2.1 データセット
	5.2.2 データ解析
	5.2.3 結果と考察
5.3	冷凍機駆動周波数の最適化
	5.3.1 データセット
	5.3.2 データ解析
	5.3.3 結果と考察

5.1 カロリメータにおけるノイズ源の特定

5.1.1 データセット

センサーには様々なノイズがのるが、冷凍機による微小擾乱ノイズを特定するには冷凍機駆動周波数を変えたデータを用いると分かりやすい。サブシステム試験では冷凍機の駆動周波数を様々な組み合わせに変更し、各組合せでノイズデータを取得した。これを冷凍機周波数スキャンと呼ぶ。スキャンは各TCでいくつか実施された。各冷凍機周波数スキャンで取得されたデータ群をまとめて run と呼び、各TCで行われた順に、TC1 run01, TC1 run02, \dots と名付ける。各 run が取得されたときの各パラメータを $\S B$ に示す。1段目に CTS の温度、2段目に各 SC/PC の電力、3段目に SC/PC (両方まとめてSTC)の駆動周波数、4段目に JTC の駆動周波数をプロットしている。また、 $\S 5.1$ で作成した図は $\S B$ にまとめている。

各 run をまとめた表を表 5.1 に示す。run は run の番号、time は run の時間、scan strategy はスキャンの方法、acquired data は run で取得されたマイクロカロリメータのノイズデータの種類を示している。スキャンの方法として、run の間に JTC の駆動周波数だけ変化したものは JTC freq scan 、STC の駆動周波数だけ変化したものは STC freq scan 、JTC と STC 両方の駆動周波数が変化したものを

第5章 課題 107

STC/JTC freq scan としている。

表 **5.1**. 各 run のまとめ

					Noise data							
TC run Date		Date	Time (UT)	Sacn strategy	HK	nr_ns	1k, 8k ns	2s Sample rec	4s Sample rec	WFRB (5s)	WFRB (32s)	DR
1	1	2019/12/11	03:00:00 - 07:00:00	JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	2	2019/12/12	09:15:00 - 09:50:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	3	2019/12/13	08:16:00 - 11:11:00	STC/JTC freq scan	X	X	X					X
1	4	2019/12/14	06:41:00 - 08:15:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	5	2019/12/15	02:45:00 - 04:10:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	6	2019/12/15	09:00:00 - 10:00:00	JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	7	2019/12/16	01:00:00 - 02:10:00	JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	8	2019/12/16	02:20:00 - 07:15:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1A	1	2021/5/11	06:45:00 - 08:15:00	JTC freq scan	X							
1A	2	2021/5/11	10:15:00 - 10:55:00	STC/JTC freq scan	X							
1A	3	2021/5/11	11:40:00 - 16:15:00	JTC freq scan	X	X	X		X		X	
1A	4	2021/5/11	16:55:00 - 20:55:00	STC freq scan	X	X	X		X		X	
1A	5	2021/5/12	04:00:00 - 06:00:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X		X	
2A	1	2021/7/26	05:12:00 - 06:03:00	STC/JTC freq scan	X							X
2A	2	2021/7/26	13:23:10 - 18:48:05	STC/JTC freq scan	X							X
2A	3	2021/7/27	13:17:50 - 23:59:59	STC/JTC freq scan	X			X				X
2A	4	2021/7/28	12:14:50 - 23:50:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X		X	X

5.1.2 データ解析

5.1.2.1 各データに出現するノイズ

マイクロカロリメータのノイズデータ

マイクロカロリメータデータはノイズスペクトルに出現するピークと冷凍機駆動周波数 (CryoCooler drive frequency: CC drive freq) との関係を調査することを目的に取得された。

TC1 run01 では STC 駆動周波数を 15.00 Hz に固定し、JTC 駆動周波数を 50.43-53.83 Hz の間を ~ 0.1 Hz ずつ 32 段階で変化させ、各 JTC 駆動周波数でマイクロカロリメータデータを取得している。そこで、この run で取得されたピクセル 00 番の sample dump のスペクトルを JTC 駆動周波数の毎にプロットし、マイクロカロリメータデータの JTC 駆動周波数依存性を調査した。そのプロットの一

第 5 章 課題 108

例を図 5.1 に示す。縦軸はスペクトルの周波数、横軸は JTC 駆動周波数、色はスペクトルのパワースペ

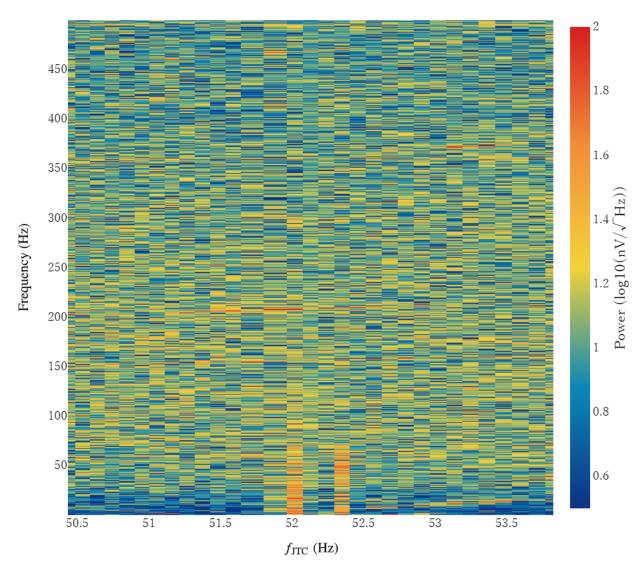


図 **5.1.** JTC 駆動周波数 $(f_{\rm JTC})$ の毎の px00 番の sample dump スペクトル。

クトル密度 (Power Spectral Density: PSD) の大きさを示している。 スペクトル周波数が $\sim 150~{\rm Hz}$ 、 $\sim 200~{\rm Hz}$ 、 $\sim 350~{\rm Hz}$ 、 $\sim 450~{\rm Hz}$ で PSD が大きくなっていることが確認でき、JTC 駆動周波数のシフトに合わせて PSD が大きくなるスペクトル周波数もシフトしている。また、PSD が大きくなる各スペクトル周波数は JTC 駆動周波数の 3、4、7、9 倍に相当している。このことは、STC 駆動周波数でも同様のことが確認できる。以上のことから、冷凍機駆動による発生する振動がマイクロカロリメータにノイズとして現れることが確認できた。また、スペクトル周波数が $0-100~{\rm Hz}$ 、JTC 駆動周波数が $52~{\rm Hz}$ 付近で高いピークが見られる。これはマイクロカロリメータが $52~{\rm Hz}$ の駆動時に共鳴し、効率よく擾乱を検出器に伝えるメカニズムがある事を示す。詳しくは \$5.1.3.2 節で述べている。

次に、各ピクセルで冷凍機駆動周波数依存性がどのようになっているかを確認した。全てのピクセル

をカロリメータの配置と同じように並べたものを図 5.2-5.6 に示す。各プロットの上の数字はピクセルの番号を示している。ピクセル 11,13 番はピクセル 12 番によるクロストークによってノイズが大きくなっている。基本的にピクセル 00 番で見られた JTC 駆動周波数に依存したピークは他のすべてのピクセルで確認できた。図から確認できる各スペクトル周波数のピークの特徴を以下にまとめた。

- スペクトル周波数: $\sim 150~\rm{Hz}$ のピーク ピクセル 09、 $27~\rm{a}$ では大きなピークとなっているが、ピクセル 14、 $21~\rm{a}$ は小さなピークとなっている。 $\sim 150~\rm{Hz}$ のピークの強さは処理系やピクセルの配置に依存しないことが分かる。
- スペクトル周波数: $\sim 200~\rm{Hz}$ のピーク ピクセル 05、19、20、21、22、24、25、27番でピークが大きくなっていた。バックグラウンドに まぎれるほど弱いピークとなるピクセルはない。ピークが大きくなるピクセルは検出器の端に分 布しているように見える。特に、ピクセル 19、20、21、22、24、25番は隣接している。 $\sim 200~\rm{Hz}$ のピークの強さはピクセルの配置に依存しているように見える。
- スペクトル周波数: $\sim 350~\rm{Hz}$ のピーク ピクセル $09-26~\rm{ff}$ 番の $18~\rm{ff}$ 個でピークが特に大きくなっている。ピクセル $05~\rm{ff}$ 番を左上、 $23~\rm{ff}$ 番を右 下としたときに、ピークが大きくなるピクセルは検出器の右側に偏っていた。よって、 $\sim 350~\rm{Hz}$ のピークの強さはピクセルの配置に依存していると考えられる。
- ・ スペクトル周波数: $\sim 450~\rm{Hz}$ のピーク ピクセル 09-17、 $27-35~\rm{ff}$ 番の $18~\rm{ff}$ 個でピークが特に大きくなっている。ピークが大きくなるピク セルは明らかに処理系に依存しており、ピークが大きくなるものは A1、B1 で処理された信号である。

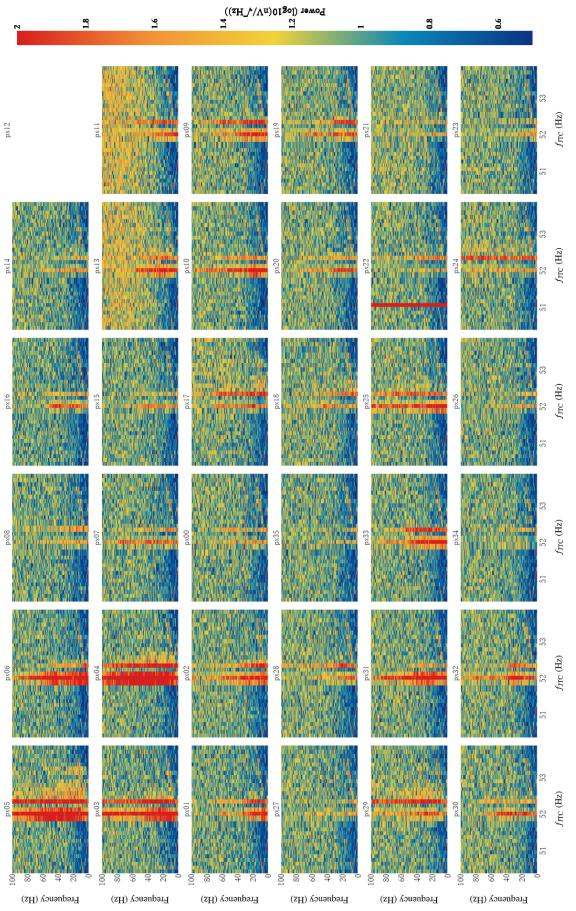


図 5.2. JTC 駆動周波数と sample dump スペクトルの関係 $(0-100~\mathrm{Hz})$ 。

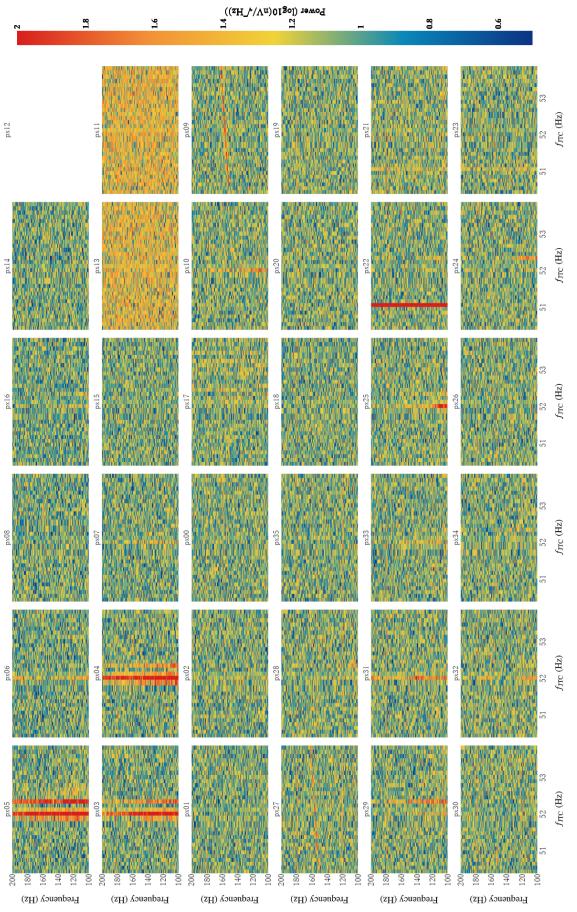


図5.3. JTC 駆動周波数と sample dump スペクトルの関係 (100 - 200 Hz)。

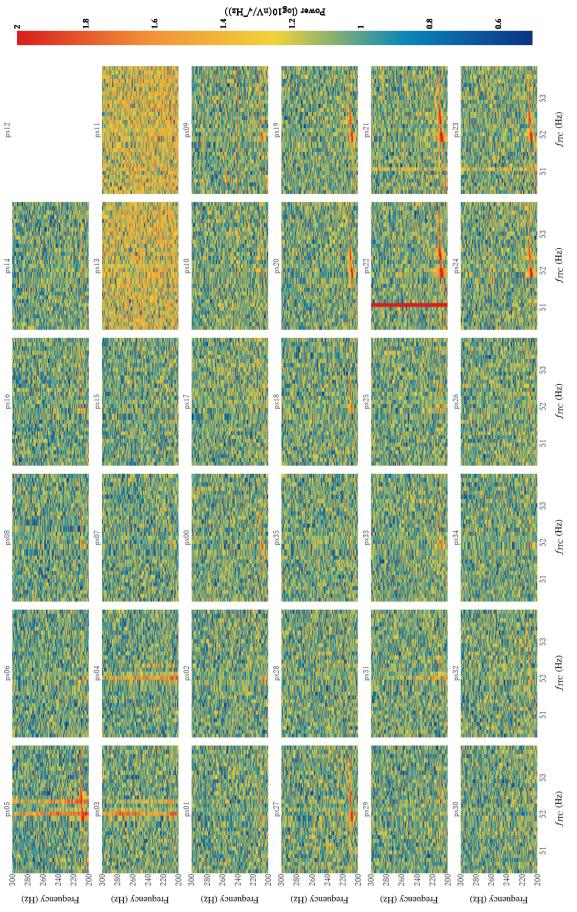


図 5.4. JTC 駆動周波数と sample dump スペクトルの関係 (200 - 300 Hz)。

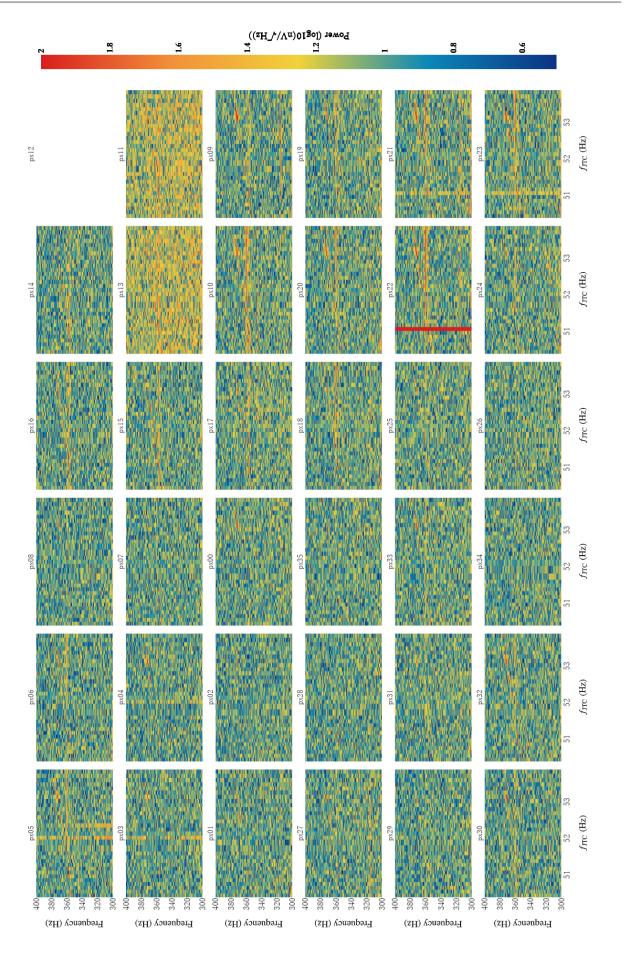


図5.5. JTC 駆動周波数と sample dump スペクトルの関係 (300 – 400 Hz)。

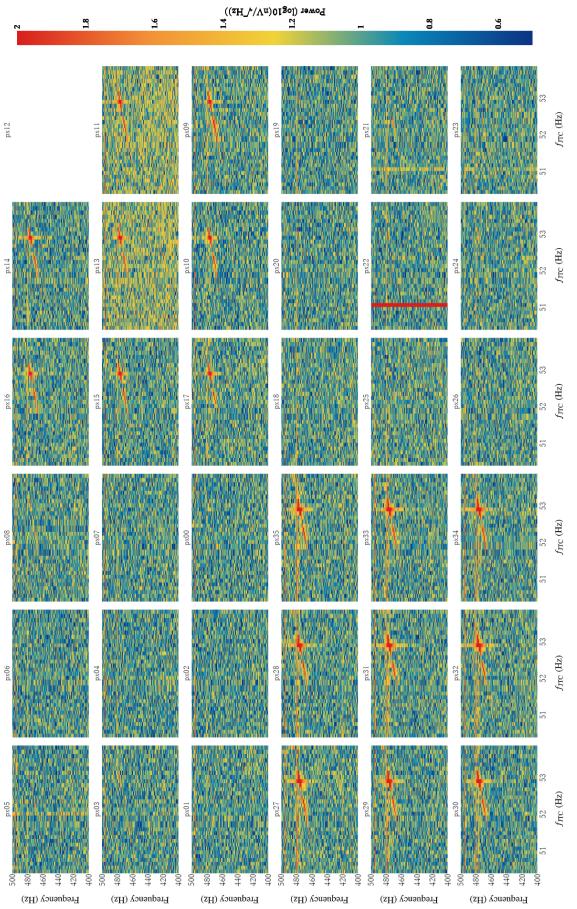
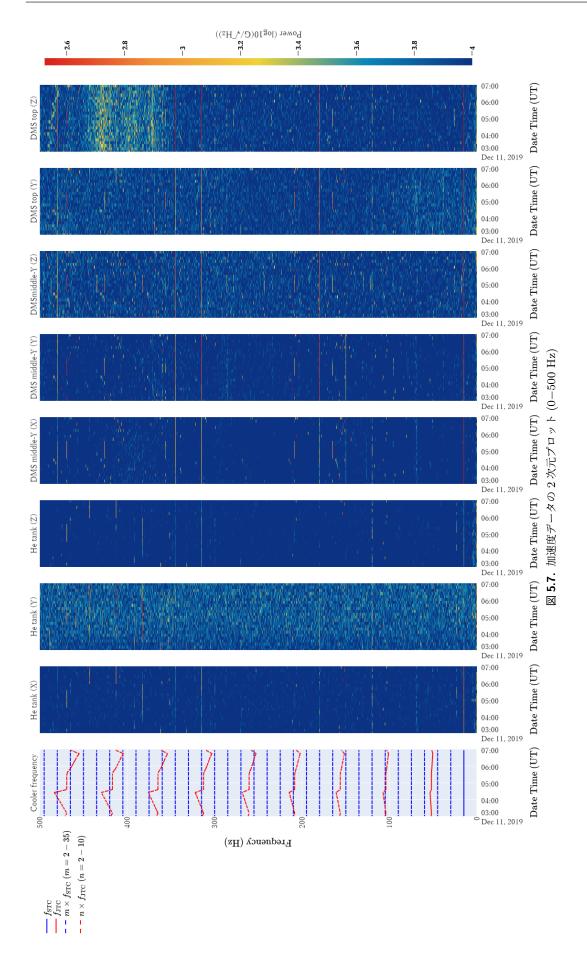


図 5.6. JTC 駆動周波数と sample dump スペクトルの関係 (400 – 500 Hz)。

加速度データ

加速度データは Resolve に発生する微小擾乱と CC drive が起こす振動との相関を確認することを目的に取得された。レコード長が 32 秒で取得された He タンクとデュワーでの加速度の時系列データを、それぞれで PSD を作成し時間毎に示したものが図 5.7 である。各時刻での STC と JTC の駆動周波数 $f_{\rm STC}$ 、 $f_{\rm JTC}$ が分かるように図 5.7 の左側に駆動周波数とその倍波の周波数を表した。



次に、He tank で取得された加速度スペクトルから 50-54 Hz の定数倍の周波数を抜き出したものを図 5.8 に示す。X、Y、Z は図 4.1(b) の軸での振動方向を表している。上段が 1 倍であり、下段に向かうごとに 2 倍、3 倍、 \cdots 、9 倍になっている。また、データが取得された時の JTC の駆動周波数 $f_{\rm JTC}$ ごとに色を変えている。He tank のスペクトルには $f_{\rm JTC}$ の定数倍の周波数にピークが見られた。そして、 $f_{\rm JTC}$ がシフトした場合、He tank のスペクトルに見えるピークが、 $f_{\rm JTC}$ の定数倍だけシフトしていることが分かる。よって、加速度データに見られる振動と JTC の駆動との間に関連がある。しかし、He tank X, Y, Z の基本波を比較した場合、Z 方向の振動が X, Y 方向よりはるかに小さいことが分かった。また、同じ方向でも倍波ごとに振動の大きさは異なっており、倍波によって伝達しやすいものと伝達しにくいものがあることが分かる。

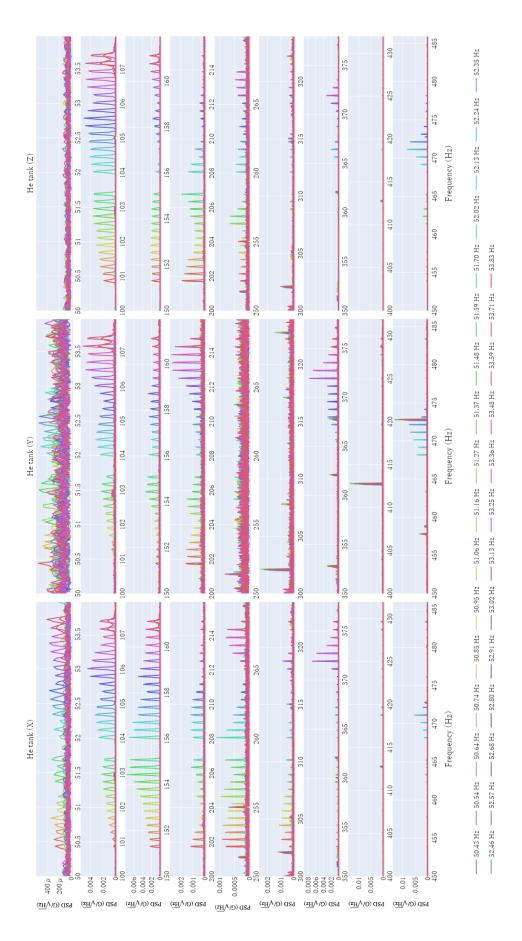


図 5.8. He tank の加速度スペクトル (50-486 Hz)。上段が 1 倍であり、下段に向かうごとに 2 倍、3 倍、・・・、9 倍になっている。

加速度データに現れるピークには起源が推測できるものとできないものがあった。図 5.8 を用いて原 因が分かるピークと分からないピークを分類した。

• 原因が分かるもの

 $-f_{\rm JTC}$ の倍波によるもの: $f_{\rm JTC}$ の整数倍の周波数に見られるピーク 図 5.9 に加速度データの 50-54 Hz 帯に出現するピークを示す。 $f_{\rm JTC}$ が変化すると加速度 スペクトルの 50-54 Hz 帯に出現するピークの周波数も変化し、この 2 つの周波数は一致していた。そして、図 5.8 から分かるように JTC の高調波についても同様であった。そのため、加速度スペクトルの 50-54 Hz 帯に出現するピークとその倍波は JTC 起源であることがわかる。

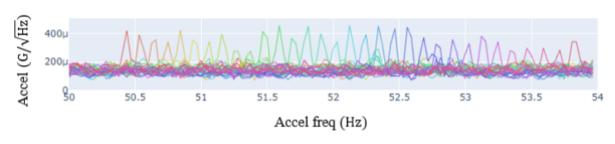
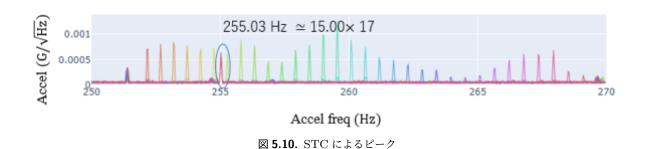


図 5.9. ch00 の基本波

 $-f_{\rm STC}$ の倍波によるもの: $f_{\rm STC}$ の整数倍の周波数に見られるピーク 図 5.10 に加速度データの 250-270 Hz 帯に出現するピークを示す。図 5.10 の 255 Hz に ピークが出現しており、 $f_{\rm JTC}$ が変動しても出現する周波数は一定で変化しない。また、He タンクの x 方向 $({\rm ch}00)$ と z 方向 $({\rm ch}02)$ でピークが出現し、y 方向 $({\rm ch}01)$ では出現しない。



• 原因が分からないもの

- JTC、STC の倍波でなく、ピークの分布が狭いもの このピークは 251.41, 302.13, 352.84, 362.12, 412.85, 472.85 Hz 付近で見られ (図 5.11)、 JTC、STC の整数倍の周波数ではない。ピークの分布は 0.1 Hz 程度で広がっていた。これ らのピークは JTC の 5 倍波以上の周波数で見られた。

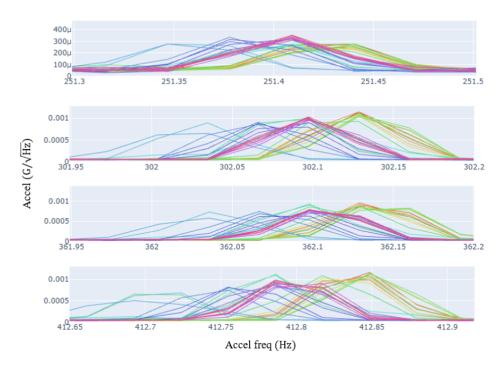


図 **5.11.** JTC、STC の倍波でなく、ピークの分布が狭いもの (ch00)。図 5.8 のピークが確認できた周波数の近くを拡大している。

- JTC、STC の倍波でなく、ピークの分布が広いもの このピークは 269.75, 314.74, 419.78, 464.78 Hz 付近に見られ (図 5.12)、JTC と STC の整 数倍となっていないもの。ピークの分布は 0.4 Hz 程度で広がっていた。これらのピークは JTC の 5 倍波以上の周波数で見られた。

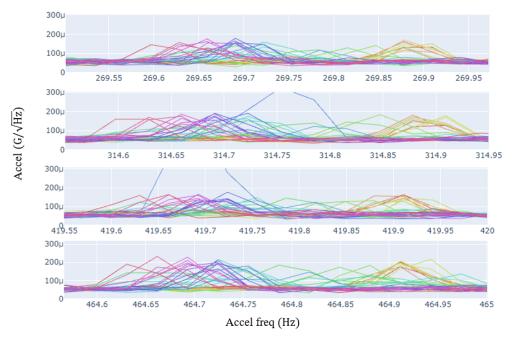


図 5.12. JTC、STC の倍波でなく、ピークの分布が広いもの (ch00)。図 5.11 と同じ方法で作成した。

次に、原因がわからないピークがノイズデータにどのように現れるか調査した。 $f_{\rm JTC}$ の 5 倍波以上に相当する周波数帯の加速度データと 8k noise spec のデータを並べてプロットした (図 5.13)。図 5.13 から分かるように、8k noise spec では、原因が分からないピークと同じ周波数に大きなピークは見られなかった。図 5.14 に加速度データの分類のまとめを、表 5.2 に分類できないピークの周波数を示す。

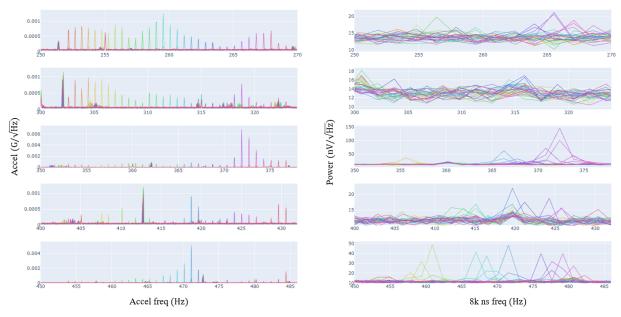


図 **5.13.** 左:加速度データ (ch00) 右:8k ns データ (px00)

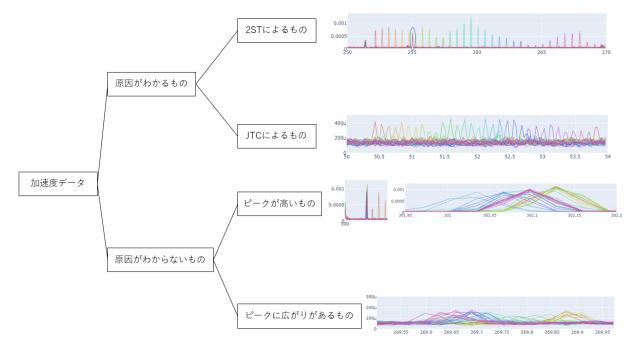


図 5.14. 加速度データの分類のまとめ

表 5.2. 原因の分からないピークの周波数

Frequency band (Hz)	Narrow peak (Hz)	Broad peak (Hz)
200 - 300	251.4	269.8
300 - 400	302.1, 352.8	314.7
400 - 500	412.9, 472.9	419.7, 464.8

本研究では、機械式冷凍機が発生させる擾乱について追及していくため、JTC と STC 起源の振動を扱っていく。

5.1.2.2 両データの相関

応答関数

冷凍機起源の振動が Resolve のノイズに与える影響を調査するために応答関数を作成した。スペクトルを周波数 f の関数とすると、加速度スペクトルを A(f)、マイクロカロリメータのノイズスペクトルを S(f) とかける。このとき応答関数 T(f) を以下の式で定義する。

$$T(f) = \frac{S(f)}{A(f)} \tag{5.1}$$

応答関数の作成には sample dump から作成したマイクロカロリメータスペクトルと加速度スペクトルを使用した。この 2 つのデータは周波数分解能が違うため、応答関数を作成するときには加速度スペクトルの周波数分解能をマイクロカロリメータスペクトルのものに合わせた。TC1 run01 で取得された He tank (X) の加速度スペクトルとピクセル 00 番のマイクロカロリメータスペクトル、この 2 つのデータから作成した応答関数を例として図 5.15 に示す。同様に全てのピクセルで応答関数を作成し、配置順に並べたものを図 5.16 に示す。px22 番の応答関数で全体が大きくなるデータ (黄緑色) が存在するが、これは X 線が入射したため大きくなっている。図 5.16 から分かる結果を以下にまとめる。

- JTC3 倍波 ($150\sim162~\text{Hz}$) ピクセル $09~\text{番を除いたピクセルで応答関数は小さかった。ピクセル <math>09~\text{番のみ応答関数が大きく }$ なったが原因は今のところ不明である。
- JTC4 倍波 (200~216 Hz) 大きさはピクセルごとに差異があったが、すべてのピクセルで応答関数が大きくなった。特に ~ 208) Hz のときに最も大きくなった。
- JTC7 倍波 ($350\sim378~\text{Hz}$) ピクセル 09-18~番で $\sim355~\text{Hz}$ で応答関数が大きくなる傾向が確認できた。また、ピクセル 09, 10, 20, 21, 22, 23~8番で $\sim372~\text{Hz}$ の応答関数が大きくなった。図 3.4~ではピクセル 09-27~8は右側にあるため、配置による差だと考えられる。
- JTC9 倍波 (450~486 Hz) ピクセル 09-17, 27-35 番で 472, 495 Hz の応答関数が大きくなる傾向が確認できた。472 Hz の応答関数が大きい場合のみ、495 Hz の応答関数が大きくなっている。ピクセル 09-17 番は A1 系で, 27-35 番は B1 系で信号が処理されているので、処理系依存の応答関数の増大であると考えられる。

また、マイクロカロリメータデータの低周波側 ($\sim 30~{\rm Hz}$) で応答関数が大きくなる周波数があり、冷凍機の駆動周波数によって出現する周波数が変わっていた。しかし、そのようなピークは加速度データには確認されず、マイクロカロリメータデータ特有のものであった。

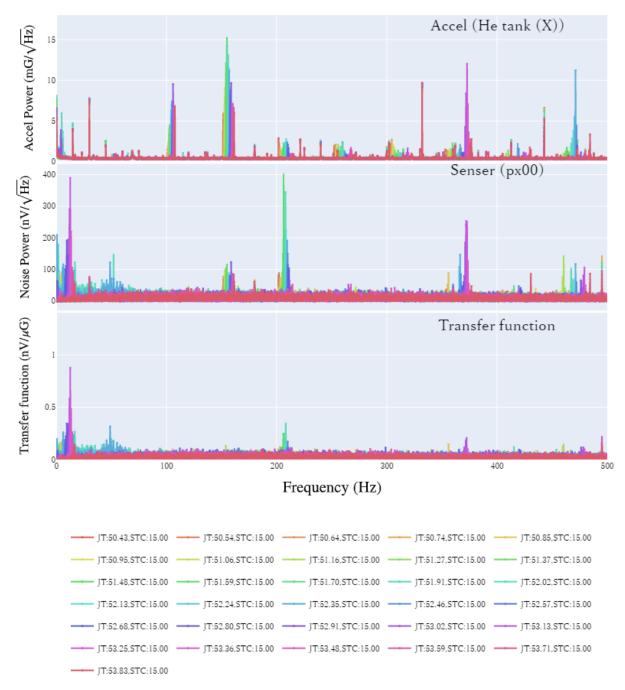


図 **5.15.** (上) He tank (X) の加速度スペクトル。(中) ピクセル 00 番のセンサースペクトル。(下) 応答関数。

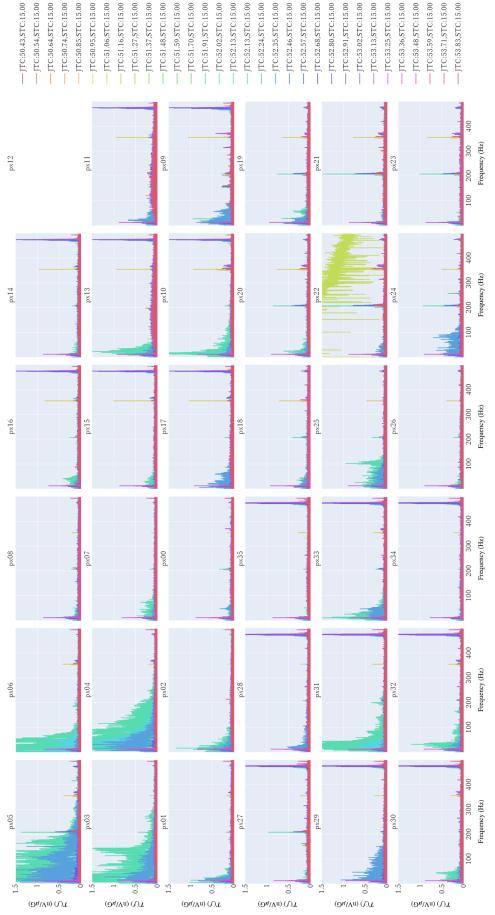


図 5.16.応答関数のプロット。全ピクセルの応答関数をピクセルの配置順に並べている。データが取得されたときのジュールトムソン冷凍機の駆動周波数を JTC の右側に、2 段スターリン グ冷凍機の駆動周波数を STC の右側に記し、各組合せ毎に色を変更している。

5.1.2.3 バイアス電圧依存性

冷凍機が発生させる微小擾乱によって、マイクロカロリメータにノイズが発生することが分かった。ノイズの周波数ごとに、どのような侵入経路をたどったかを特定するために、マイクロカロリメータの読み出し回路に印加するバイアス電圧の有無によってどのようにノイズデータが変化するかを調査する。 Resolve の読み出し回路図を図 5.17 に示す。回路にバイアス電圧 $V_{\rm bias}$ が印加されている場合、サーミスタは熱検出器として働く。しかし、 $V_{\rm bias}$ が印加されていない場合、サーミスタには、電流が流れないため、熱検出器として働かない。そのため、 $V_{\rm bias}=0$ V と $V_{\rm bias}\neq0$ V のときのノイズスペクトルを比較することで、ノイズが熱的か電気的なものかを区別することができる。ノイズが $V_{\rm bias}=0$ V のときに出現するものを電気的ノイズとし、 $V_{\rm bias}\neq0$ V のときに出現するものを熱的ノイズとする。熱的ノイズで周波数が冷凍機駆動周波数に依存する場合、振動が熱に変わることでノイズが発生していると考えることができる。

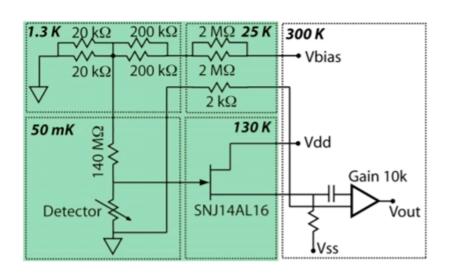


図 5.17. マイクロカロリメータの読み出し回路 [42]

また、Anti-co 検出器はマイクロカロリメータのすぐ下に設置されている非熱的検出器であるため、そのノイズは熱的起源ではなく、電気的な起源である。このため、そのノイズスペクトルは微小擾乱が回路から侵入しているかどうかの調査に適している。Anti-co 検出器の回路図を 5.18 に示す。Anti-co 検出器の読み出し回路はマイクロカロリメータのものとよく似ており、違いはバイアス電圧を印加する点から検出部の間に抵抗が設置されているかと、検出器として使用する素子である。そのため、Anti-co 検出器とマイクロカロリメータのスペクトルに同時に出現しているピークは回路の共通部分から侵入したと考えられる。

この調査は同じ時刻に取得されたマイクロカロリメータと Anti-co 検出器データを使用し、バイアス電圧が 0.0, 1.6 V ときに取得されたものを使用した。1.6 V は正常運転時のバイアス電圧である。使用したデータを表 5.3 にまとめる。 マイクロカロリメータの sample dump から作成したスペクトルを図 5.19 の左側に示す。ピクセル 19, 25, 26, 29 番のデータはこの測定中に不安定になったため除外し

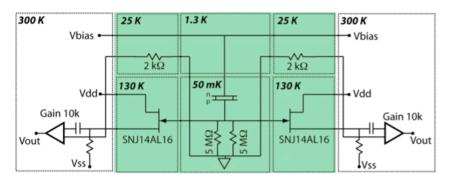


図 5.18. Anti-co 検出器の読み出し回路 [42]

表 5.3. バイアス電圧依存性の調査に使用したデータのパラメータ

No.	Date(UT)	V _{bias} (V)		f _{STC} (Hz)	f (H ₂)
NO.		Calorimeter	Anti-co	I _{STC} (IIZ)	I _{JTC} (IIZ)
1	2022/01/28 06:44	0.0	0.0	14.63	53.48
2	2021/01/28 07:23	1.6	6.0	14.63	53.48

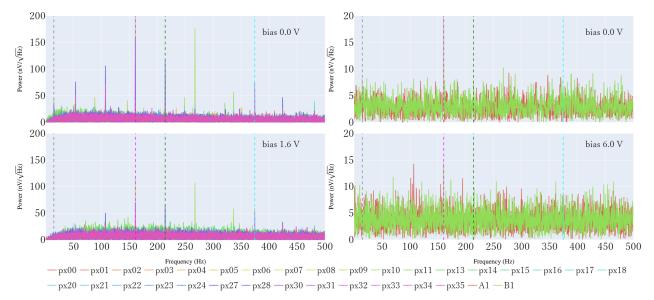


図 **5.19.** 各データのマイクロカロリメータ (左側) と Anti-co 検出器 (右側) のノイズスペクトル。上段にバイアス電圧が $0.0~\rm V$ のときに取得されたデータ、下段がバイアス電圧がカロリメータ $1.6~\rm V$ 、 Anti-co 検出器 $6.0~\rm V$ のときに取得されたデータである。グレーの線で $f_{\rm STC}$ 、マゼンタの線で $3f_{\rm JTC}$ 、緑の線で $4f_{\rm JTC}$ 、シアンの線で $7f_{\rm JTC}$ の周波数を示している。線を引いた周波数はマイクロカロリメータのノイズスペクトルにピークが見られた周波数である。

た。次に Anti-co 検出器の sample dump から作成したスペクトルを図 5.19 の右側に示す。カロリメータスペクトルに出現するピークは、すべて冷凍機駆動周波数の倍波に等しい周波数であった。同様に、Anti-co 検出器に出現するピークも冷凍機駆動周波数の倍波に等しい周波数であった。また、応答関数を作成した際に見られた、マイクロカロリメータのノイズスペクトルの低周波数側に出現するノイズも確認された(図 5.20)。

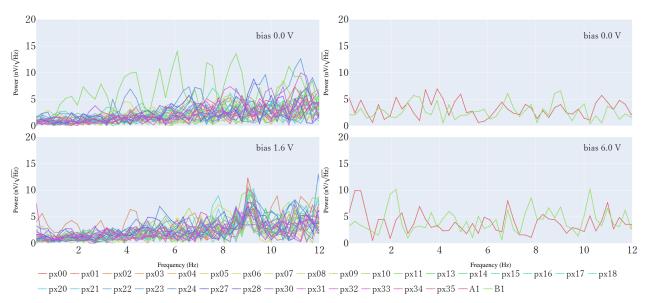


図 **5.20.** 図 5.19 の低周波数側を拡大した図。 \sim 9 Hz にピークが全てのピクセルで確認できる。また、このピークは Anti-co 検 出器では出現しなかった。

5.1.2.4 Quadrant 依存性

ノイズスペクトルで quadrant 依存性を調査した。使用したデータは TC1 で JTC の駆動周波数が $53.13~\rm Hz$ で STC が $15.00~\rm Hz$ のときに取得された sample dump である。各ピクセルで $150,\,208,\,355,\,375,\,482~\rm Hz$ 付近でのピークのパワーを抜き出し、それらをピクセルの配置に並ベヒートマップを作製した。ヒートマップを図 $5.21-5.25~\rm ic$ に示す。 $150~\rm Hz$ では $2~\rm or$ がけ高い値を示したが、他のピクセルの値は ほぼ一定であった。 $208,355,372~\rm Hz$ は右下のピクセルの値が高くなる傾向があった。また、左上に配置されているピクセルの一部でもピークが高くなった。 $482~\rm Hz$ では quadrant 依存性が顕著であり、右上 (ピクセル $09-18~\rm am$) と左下 (ピクセル $19-27~\rm am$) のピークが高くなった。

5.1.2.5 AC 電源周波数依存性

新居浜市の住友重機械工場で取得されたノイズスペクトルに 300, 420 Hz のラインノイズが確認できた。これは冷凍機の高調波ではなく、AC 電源の周波数の 5 及び 7 倍波だと考えられる。また、AC 電源の周波数は東日本と西日本で異なるため、西日本で取得されたマイクロカロリメータのノイズデータと東日本で取得されたものを比較し、300, 420 Hz のラインノイズが AC 電源起源によるものか調査した。この調査に使用したデータを表 5.4 に示す。sample dump から作成したピクセル 00, 09, 18, 27 番のスペクトルを図 5.26 に示す。新居浜で取得されたバイアス電圧が 0.0 V のデータ (図 5.26No.1) には 300 Hz のピークが出現しているため、300, 420 Hz のノイズは電気的なノイズであることが分かる。また、新居浜で取得されたデータ (図 5.26No.1-4) に出現していた 300 Hz のピークは、筑波で取得されたデータでは (図 5.26No.5) では消えていた。

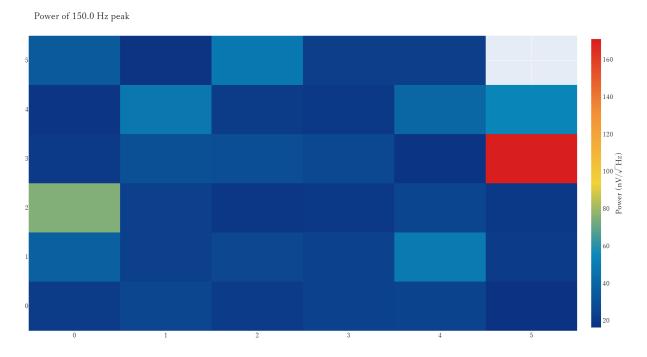


図 **5.21**. 各ピクセルのノイズスペクトルのピーク (150 Hz)。右上にはピクセル 12 番が入るが校正用ピクセルであり、X 線が照射されノイズが測定できないため除外している。

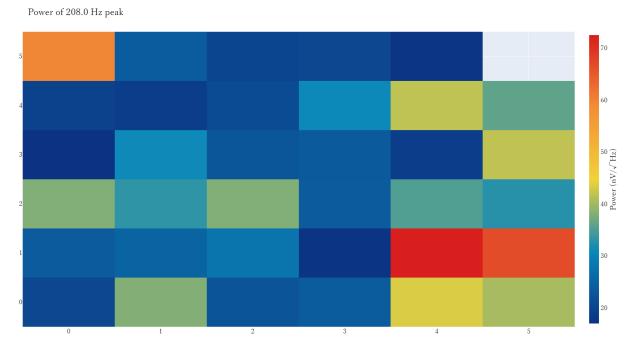


図 **5.22**. 各ピクセルのノイズスペクトルのピーク (208 Hz)。



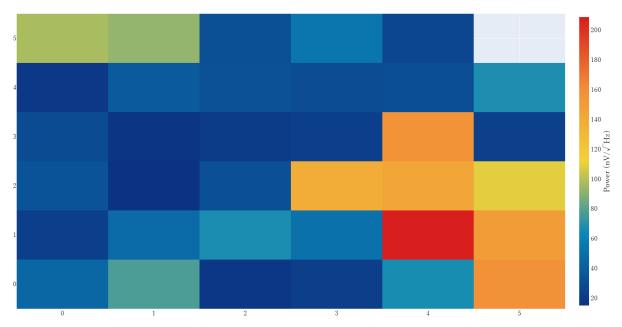


図 5.23. 各ピクセルのノイズスペクトルのピーク (355 Hz)。

Power of 375.0 Hz peak

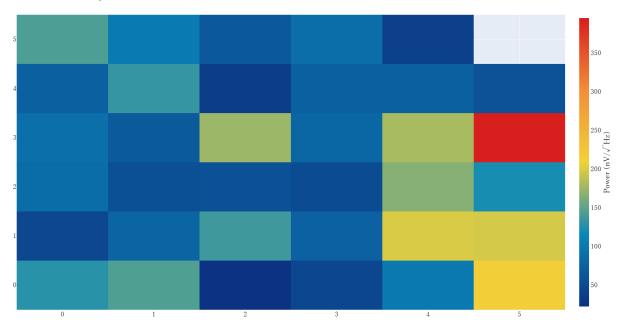


図 5.24. 各ピクセルのノイズスペクトルのピーク (375 Hz)。

Power of 482.0 Hz peak

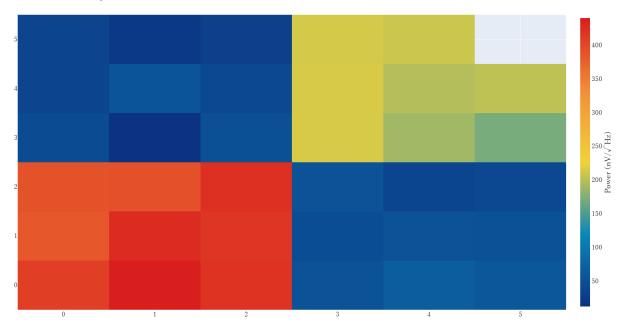


図 **5.25**. 各ピクセルのノイズスペクトルのピーク (482 Hz)。

No.	Date(UT)	V _{bias} (V)	f _{STC} (Hz)	f _{JTC} (Hz)
1	2021/05/11 01:10	0.0	15.71	52.13
2	2021/05/11 01:01	1.6	15.71	52.13
3	2021/05/11 15:52	1.6	15.71	53.59
4	2021/05/11 19:10	1.6	14.87	53.59
5	2021/07/28 09:50	1.6	14.45	53.48

表 5.4. AC 電源周波数依存性の調査に使用したデータのパラメータ

5.1.3 結果と考察

5.1.3.1 ノイズの分類

バイアス電圧による分類

バイアス電圧が 0.0 V のときに出現したピークは 14.64 (STC 基本波)、53.47 (JTC 基本波)、106.94 (JTC2 倍波)、160.41 (JTC3 倍波)、213.88 (JTC4 倍波)、267.34 (JTC5 倍波)、336.44 (STC18 倍波)、372.28 (JTC7 倍波)、424.33 (JTC8 倍波)、481.22 (JTC9 倍波) Hz であった。バイアス電圧が 1.6 V のときに出現したピークは 106.94 (JTC2 倍波)、160.41 (JTC3 倍波)、267.34 (JTC5 倍波)、336.44 (STC18 倍波)、372.28 (JTC7 倍波)、424.33 (JTC8 倍波) Hz と冷凍機の基本波より小さい 9.03 Hz であった。このうち、9.03 Hz のピークはバイアス電圧が 0.0 V では出現せず、1.6 V で出現しているため、熱的なノイズであると考えられる。それ以外のノイズはすべてバイアス電圧が 0.0 V のときに出現していたため、電気的なノイズであると考えられる。

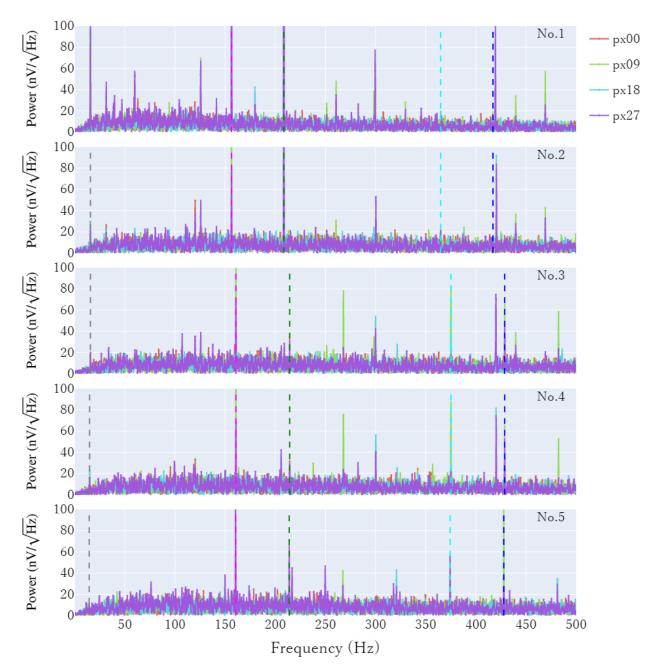


図 **5.26.** AC 電源周波数とマイクロカロリメータノイズスペクトルの関係。プロットは上からの No. 1, 2, 3, 4, 5 のノイズスペクトルを示しており、No.1 がバイアス電圧が $0.0~\rm V$ 、それ以外が $1.6~\rm V$ である。そして、No.1 $-4~\rm t$ は新居浜で、No.5 はつくばで取得された。グレーの線で $f_{\rm STC}$ 、マゼンタの線で $3f_{\rm JTC}$ 、緑の線で $4f_{\rm JTC}$ 、シアンの線で $7f_{\rm JTC}$ の周波数を示している。線を引いた周波数はマイクロカロリメータのノイズスペクトルにピークが見られた周波数である。

AC 電源周波数による分類

まずは、図 5.26 の No.1 と No.2 を比較する。No.1 の全てのピークが No.2 で小さくなった。AC 電源起源であると考えられる 300 Hz のピークは No.1 と No.2 のどちらにも出現しているため、電気的なノイズであると考えられる。また、No.2 で新たに 120 Hz のピークが出現した。次に、No.2 と No.3, 4を比較する。冷凍機駆動周波数を変化させたとき、 120, 300, 420 Hz のピークは変化しなかった。そして、No.5 では 120, 300, 420 Hz にピークが出現せず、 $150(50\times3)$, $250(50\times5)$ Hz にピークが出現した。よって、120, 150, 250, 300, 420 Hz は AC 電源によるノイズだと考えられる。

Anti-co 検出器に出現したラインノイズの周波数は、15, 105, 208, 251, 260, 330, 375, 428, 482 Hz であった。このうち、マイクロカロリメータのスペクトルで確認できるものは 15, 208, 260, 300, 375, 428, 482 Hz であった。そのため、これらのラインノイズは非熱的で、回路から侵入したと考えられる。

ノイズの分類のまとめ

以上のノイズの分類の結果をまとめる。以下の3種類に大別される。

- 1. AC 電源によるノイズ。50 (東日本) Hz、60 (西日本) Hz 及びその倍波。電気的。
- 2. 機械式冷凍機駆動周波数 (STC 13.93-16.26 Hz、JTC 50.43-53.83 Hz) 及びその倍波。バイアス電圧 0 V で見えているので電気的。
- 3. 機械式冷凍機に起因する低周波 (≤ 20 Hz) ノイズ。熱的。

5.1.3.2 ビートと共鳴

ノイズ分類 3. が特に重要なので、さらに考察を深める。ノイズスペクトルの低周波側 (\leq 20 Hz) に 出現する周波数が CC drive freq に依存しているが、その定数倍でないピークが確認された (図 5.27)。マイクロカロリメータデータにだけ低周波数側 (\sim 30 Hz) に冷凍機駆動周波数に依存した鋭いピークが確認された。それの冷凍機駆動周波数依存性と再現性を調べた。STC の駆動周波数を固定し、JTC の駆動周波数を 50.43-53.84 Hz の間を 32 段階で変化させ各 JTC 駆動周波数のときに sample dump を取得した。その後、sample dump からスペクトルを作成し、作成したスペクトルを JTC 駆動周波数を横軸に並べてプロットした。そのプロットを図 5.28 の左図に、作成したプロットからピークが出現する周波数を示したものを図 5.28 の右図に示す。図 5.28 右図の黒線の傾きは \sim 7、赤線の傾きは \sim 4 であった。

黒線で表したピークは JTC 駆動周波数が $51.43~\rm Hz$ のときに スペクトルの $0~\rm Hz$ に出現する。同様に、赤線で表したピークは JTC 駆動周波数が $52.5~\rm Hz$ のときにスペクトルの $0~\rm Hz$ に出現する。 $51.43(52.5)\rm Hz$ を基準にして JTC の駆動周波数を Δf だけずらしたときに、このピークは $7(4)\times\Delta f~\rm Hz$ だけシフトする。以上のことから、このピークは JTC が発生させる振動と STC が発生させる振動のうなりと考えられる。このうなりの周波数 $f_{\rm beat}$ と JTC 駆動周波数 $f_{\rm JTC}$ の関係は

$$f_{\text{beat}} = |N \times f_{JTC} - f_{\text{other}}|$$

である。ここで N は JTC 駆動周波数の N 倍波を表す。今の場合は、黒線が Δf の 7 倍、赤線が Δf の 4 倍でシフトしているため、N=7, 4 である。 $f_{\rm beet}$ が 0 になるときの $\nu_{\rm other}$ の値は 360 Hz (N=7)、210 Hz(N=4) である。いま、STC 駆動周波数 $f_{\rm STC}$ は 15.00 Hz なので、360 Hz は STC の 24 倍波、210 Hz は STC の 14 倍波に相当する。 よって、黒線で表したうなりを $f_{\rm beat}$ 1、赤線で合したうなりを

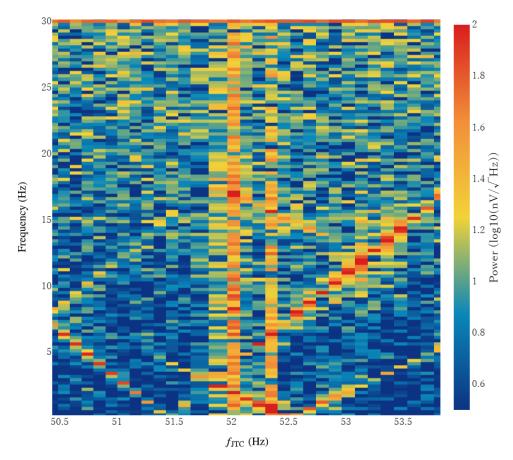


図 **5.27.** JTC 駆動周波数 $(f_{\rm JTC})$ の関数で表した px00 番の sample dump スペクトル $(0-30~{\rm Hz})[43]$ 。 $f_{\rm JTC}$ に依存した 2 つのピークのシフトが確認できる。

 f_{beat2} とすると以下の式で表すことができる。

$$f_{\text{beat}1} = |7f_{\text{JTC}} - 24f_{\text{STC}}|$$
 (5.2)

$$f_{\text{beat2}} = |4f_{\text{JTC}} - 14f_{\text{STC}}|$$
 (5.3)

うなりを生成している、4、7 倍の $f_{\rm JTC}$ は応答関数の値が大きくなる。しかし、応答関数が大きい場合にうなりが発生するとしたら、9 倍の $f_{\rm JTC}$ に依存したうなりが発生するはずである。しかし、9 倍の $f_{\rm JTC}$ 起源のうなりは、すべての run で確認されなかった。

共鳴

4、7 倍の $f_{\rm JTC}$ に依存した周波数のうなりがマイクロカロリメータデータで確認された。他の倍波では確認できず、その理由はあるはずである。これらの周波数が共鳴にあたっていることから、共鳴を起こしている場所でうなりが発生し、マイクロカロリメータにノイズとして現れていると考えられる。そこで、うなりが発生する条件を、うなりが実際に確認できた冷凍機駆動周波数の組み合わせを調べることで制限していった。そして、制限した周波数から共鳴周波数を特定する。各うなりが出現したときの冷凍機駆動周波数についてまとめる。

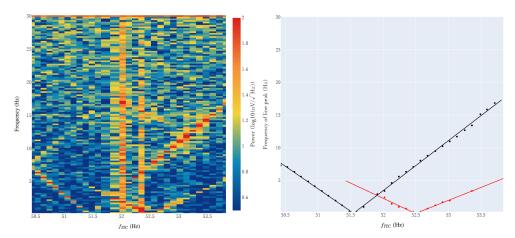


図 5.28. 左図:マイクロカロリメータデータのスペクトルを JTC 駆動周波数の関数としてプロットしたもの。右図:左図で確認 できたピークを抜き出しプロットしたもの。黒点、赤点をそれぞれ、y=a|x|+b でフィットし、フィットした関数を同じ色の実線で示した。黒線の傾きは ~ 7 、赤線の傾きは ~ 4 であった。

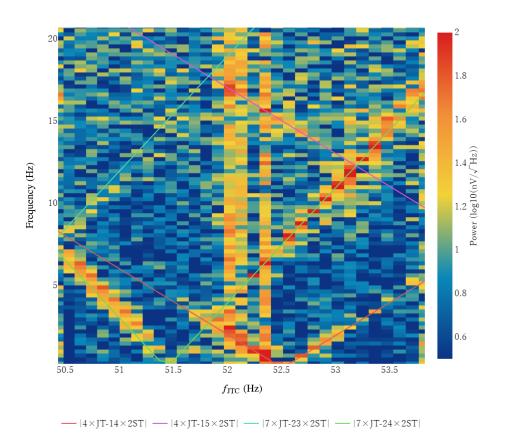


図 5.29. TC1 run1 で確認できる px00 番のうなり。うなりが出現の周波数の計算値を線で示している。

$4f_{\rm JTC}$ によるうなり

 $4f_{\rm JTC}$ によるうなりは TC1 run1, 5 でうなりが出現した。うなりが出現したときの冷凍機駆動周波数の組み合わせは以下の通りであった。

$$f_{\text{JTC}} = 51.27 - 53.35 \text{Hz}$$

 $f_{\text{STC}} = 14.77 - 15.16 \text{Hz}$

 $f_{\rm JTC}$ を 4 倍、 $f_{\rm STC}$ を 14 倍の周波数が共鳴にあたり、その周波数は

$$4f_{\text{JTC}} = 205.1 - 213.4 \text{Hz}$$

 $14f_{\text{STC}} = 206.8 - 212.3 \text{Hz}$

であった。 $4f_{\rm JTC}$ は 209 ± 4 Hz、 $14f_{\rm STC}$ は 209 ± 3 Hz の範囲にある場合にうなりが出現していることが分かった。G.Sneiderman 氏の解析によると 208.7 Hz に ADR の磁性塩の共鳴周波数があることが分かっている。よって、 $4f_{\rm JTC}$ によるうなりは ADR の磁性塩の共鳴によって、マイクロカロリメータに発生していると考えられる。

JTC 又は STC のどちらかの冷凍機駆動周波数がこの範囲内にあるが、もう一方の冷凍機駆動周波数がこの範囲から外れていた場合にはうなりは確認できなかった。また、両方の冷凍機駆動周波数がこの範囲内にあるときでも、マイクロカロリメータスペクトルの $4f_{\rm JTC}$ で PSD が大きくない場合うなりが確認できなかった (図 5.30)。この現象は、TC2A run3 で見られ、TC1 のほぼ同じ冷凍機駆動周波数の組み合わせで得られたデータにはうなりが発生していた。この原因は分かっていないが、TC1,TC1A は新居浜で行われ、TC2A ではつくばで行われているため、デュワーの運搬中に何らかの要因でデュワーの共鳴周波数が変化した可能性が考えられる。

$7f_{ m JTC}$ によるうなり

 $7f_{\rm JTC}$ によるうなりは TC1 run1, 2, 6, 8 で出現した。うなりが出現したときの冷凍機駆動周波数の組み合わせを表 5.5 に示す。 $7f_{\rm JTC}$ によるうなりは、 $7f_{\rm JTC}$ と $24f_{\rm STC}$ が $\sim 355~{\rm Hz}$ 付近の時と $\sim 372~{\rm Hz}$

couple	$f_{ m STC}$ (Hz)	$f_{ m JTC}$ (Hz)	$24f_{\rm STC}$ (Hz)	$7f_{\rm JTC}$ (Hz)
1	15.00	50.54 - 51.27	360	353.8 - 358.9
2	15.00	52.24 - 53.71	360	365.7 - 376.0
3	15.44 -15.47	53.25	370.6 - 371.3	372.8

表 5.5. $7f_{
m JTC}$ によるうなりが出現した周波数

付近の時に出現していることが分かる。このうなりが出現した run は少ないため、 $7f_{\rm JTC}$ と $24f_{\rm STC}$ が 共鳴周波数からどの程度離れると出現しなくなるか限定することは難しい。G.Sneiderman 氏の解析によると、 $372~{\rm Hz}$ はマイクロカロリメータの振動モードの 1 つであることが分かっている。しかし、氏の解析では $355~{\rm Hz}$ に共鳴は存在しないが、応答関数では $355~{\rm Hz}$ にピークが存在するため、 $355~{\rm Hz}$ には何かの共鳴があると考えられる。また、couple2 のように $24f_{\rm STC}$ が $355~{\rm Hz}$ 側の共鳴にあたっていて、 $7f_{\rm JTC}$ が $372~{\rm Hz}$ 側の共鳴にあたっている場合でもうなりが発生していることから、 $355~{\rm Hz}$ はマイクロカロリメータに関係している共鳴だと推測できる。

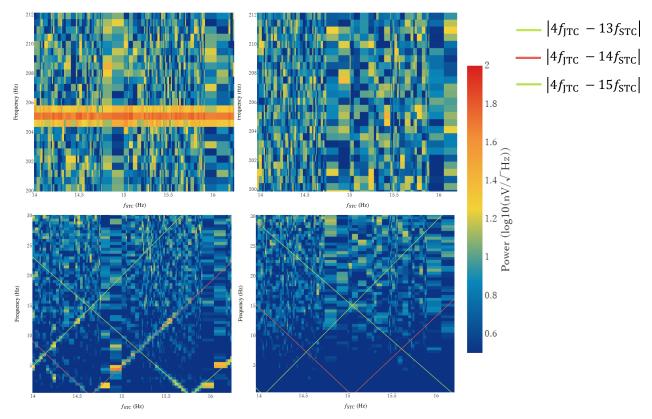


図 **5.30**. マイクロカロリメータスペクトルを f_{STC} を横軸に表したもの。左側は JTC が 51.27 Hz のときを、右側は JTC が 52.68 Hz のときのデータを抽出して作成している。使用したデータは TC2A run3 の freq scan である。下側に \sim 30 Hz まで、上側に \sim 200 \sim 212 Hz までのスペクトルを示している

どちらもうなりが出現すると予想される冷凍機駆動周波数の組み合わせであるが、JTC が $52.68~\rm{Hz}$ のときにはうなりが出現しなかった。そこで $4f_{\rm JTC}$ のスペクトルを確認したところ、うなりが出現しなかった freq scan では $4f_{\rm JTC}$ での PSD は小さかった。

 $4f_{\rm JTC}$ によるうなりと同様に、TC2A run3 で冷凍機駆動周波数の組み合わせが条件を満たしている場合でも $7f_{\rm JTC}$ 起源のうなりが出現しなかった。これも、デュワーの運搬中に何らかの要因で振動の伝達関数が変化したためだと考えられる。

ビートと共鳴

マイクロカロリメータデータでは JTC と STC の高調波が共鳴にあたった場合にうなりが発生している。そのため、この 2 つの振動が共鳴を起こしている場所で合成され、マイクロカロリメータにノイズとして出現していると考えられる。そこで、この 2 つの波を正弦波と考え、周波数をそれぞれ f_1 、 f_2 とすると、2 つの波の和は以下の式で表すことができる。

$$\cos 2\pi f_1 t + \cos 2\pi f_2 t = 2\cos \left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2}t\right) \cos \left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2}t\right)$$
(5.4)

ここで、 $\frac{f_1-f_2}{2}$ をうなり周波数 (f_b) 、 $\frac{f_1+f_2}{2}$ をキャリア周波数 (f_c) と呼ぶ。マイクロカロリメータデータには、うなり周波数の 2 倍の周波数にうなりが確認されているため、計算で求めた波形とは違う形になっている。さて、2 つの波がただ合成されただけでは、フーリエ変換するともとの 2 つの波に分解されるので、うなりの周波数に相当するところで PSD が大きくなることはない。したがって、合成された波には、ある種の非線形効果が働いた可能性がある。図 5.31 は、 $f_1=208~{\rm Hz}$ 、 $f_2=210~{\rm Hz}$ の正弦波の合成波に非線形効果を適用しなかった波 (図中左) と非線形効果(例として upper clip)を適用した波

(図中右) をそれぞれフーリエ変換をした結果を示す。図 5.31 から分かるように、非線形効果を適用しない場合は、2 つの周波数に分離され、うなりの周波数では PSD の増加は見られない。一方、非線形効果が適用されるとフーリエ変換した際に、2 つの波が単純に分解されるのではなく、2 つの波に加えてうなり周波数の 2 倍の周波数にピークが出現していることが分かる。また、うなりのほかに $f_1 \pm N(2f_b)$ 、 $f_2 \pm N(2f_b)$ (N は自然数) の周波数にもピークが出現した。これらピークは実データでは確認されていない。理由は、これらのピークの PSD はうなり周波数の 2 倍に出現するピークに比べ 1 桁以上小さいためであると考えられる。このような現象は、非線形効果を別のもの (振幅を -3 する、振幅を正と負で大きさを変えるなど) に変えても確認することができた。また、非線形効果を変えた場合、 $f_1 \pm N(2f_b)$ 、 $f_2 \pm N(2f_b)$ のピークの大きさが変化した。

以上の解析から、マイクロカロリメータデータに現れるうなりは、冷凍機の振動の高調波が共鳴を起こしている場所に侵入し、そこで合成された後に非線形効果が適用されたため生成されたと考えられる。

ビートのバイアス依存性

これまでの議論により、カロリメータスペクトルに見られる低周波ノイズは冷凍機起因のノイズであることが分かった。 $\S5.1.2.2$ バイアス電圧による分類の図 5.20 にも 9.03 Hz の低周波ノイズが見られ、これは JTC の 4 倍波によって発生するビート $f_{\mathrm{beat2}} = |4 \times 53.48 - 14 \times 14.63| = 9.1$ Hz とほぼ同じ周波数であった。いま、スペクトルの分解能が 0.244 Hz であることから一致していると考えることができ、このノイズはバイアス電圧が 0 V のときに出現していない。このことから、JTC の 4 倍波によって発生するビートは熱的ノイズであると考えられる。

現在までにビートが確認できる冷凍機駆動周波数でバイアス試験が行われたのは、今回使用したデータを取得するときのみである。そのため、JTCの7倍波によるビートの分類はできない。

ビートのピクセル依存性

出現するビートのパワーがピクセルによって変化するか調査した。調査には TC1 2019/12/11 03:17:06 に取得された sample dump を使用した。このデータが取得されたときの冷凍機駆動周波数と出現するビートの周波数を表 5.6 に示す。このデータは $4f_{\rm JTC}$ 、 $7f_{\rm JTC}$ によって発生するビートが確認できる (図 5.32)。 $\S 5.1.2.3$ で作成した図と同じものを周波数を変えて作成した。

図の作成に使用した周波数は $1.0~{\rm Hz}~(|4f_{\rm JTC}-14f_{\rm STC}|$ 、図 5.33)、 $5.6~{\rm Hz}~(|7f_{\rm JTC}-24f_{\rm STC}|$ 、図 5.35)、 $209.0~{\rm Hz}(4f_{\rm JTC})$ 、図 5.34)、 $365.7~{\rm Hz}(7f_{\rm JTC})$ 、図 5.36) である。図から分かるように、 $209~{\rm Hz}$ 、 $365.7~{\rm Hz}$ にはピクセルによってピークが大きいもの、小さいものがあり、ピクセル依存性が確認できる。 $1.0~{\rm Hz}$, $5.6~{\rm Hz}$ には $209~{\rm Hz}$, $365.7~{\rm Hz}$ ほどのピクセル依存性が確認できない。また、ビートが最も強いピクセルと $209~{\rm Hz}$, $365.7~{\rm Hz}$ のピークが最も高いピクセルは一致しない。すなわち、ビートの元である $4f_{\rm JTC}$ 、 $7f_{\rm JTC}$ のピークの強さによらず、ビートはほぼ同じピークの強さをもつ。よって、ビートが発生する条件は共鳴周波数に $2~{\rm 種類}$ の冷凍機の高調波が同時にあたることであり、その高調波の強さによらないと考えられる。以上のことから、ビートによる分光性能の低下を回避するためには、冷凍機の高調波を共鳴周波数から外すしかないと考えられる。

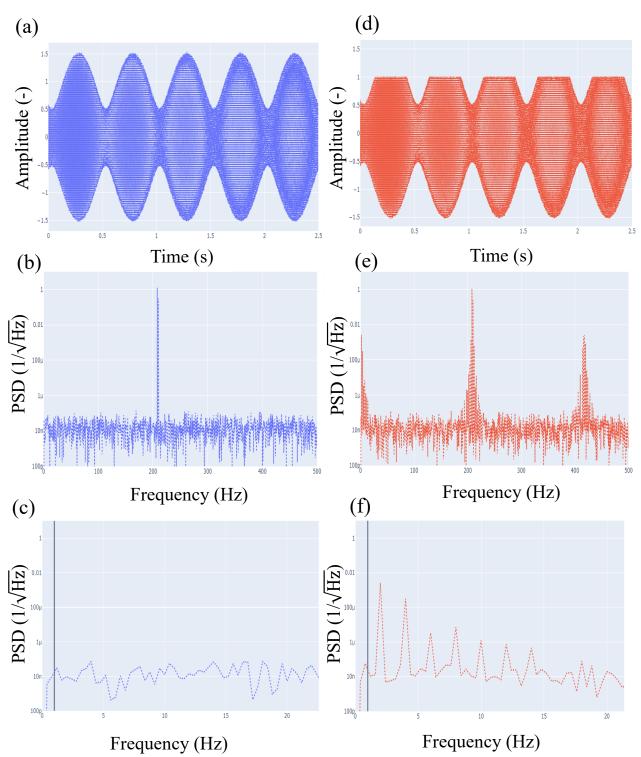


図 **5.31.** (a): $f_1=208$ Hz、 $f_2=210$ Hz の正弦波の合成波。(b): (a) をフーリエ変換して得たスペクトル。(c): (b) のスペクトルの低周波側を拡大したもの。(d): $f_1=208$ Hz、 $f_2=210$ Hz の正弦波の合成波に非線形効果 (upper clip) を適用した波。(e): (d) をフーリエ変換して得たスペクトル。(f): (e) のスペクトルの低周波側を拡大したもの。(c)、(f) 中の黒線は $\frac{f_1-f_2}{2}$ の周波数を示している。非線形効果を適用したスペクトルには低周波側にピークが出現していることが分かる。また、出現したピークの中に $\frac{f_1-f_2}{2}$ の 2 倍の周波数に出現しているものがある。

表 5.6	調杏に伸田	1 たデータ	のパラメータ
1X J.U.	- 明且に 文用	しんノーグ	のハノハーブ

Date (UT) f _s	f (H ₇)	f _{JTC} (Hz)	Beat frequency (Hz)		
Date (UT) f _{STC} (Hz)		IJTC (IIZ)	$ 4f_{JTC} - 14f_{STC} $	$ 7f_{JTC} - 24f_{STC} $	
2019/12/11 03:17:06	15.00	52.24	1.04	5.68	

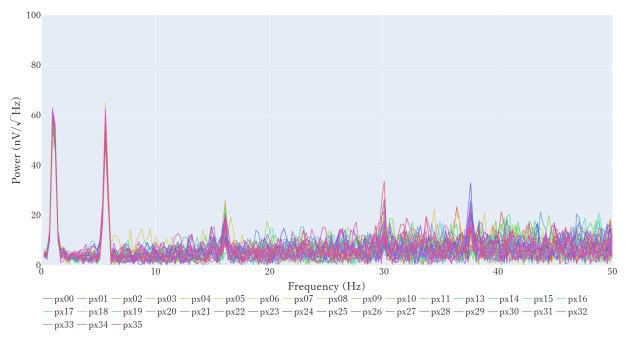


図 5.32. 調査に使用したデータのスペクトル。 $0-50~{
m Hz}$ を拡大しており、ビートが出現していることが分かる。

Power of 1.0 Hz peak

5

4

3

2

1

0

1

2

3

4

56

58

(ZH//Au) 15

60

58

54

52

図 5.33. ビート $(|4f_{\text{JTC}} - 14f_{\text{STC}}|)$ のピクセル依存性

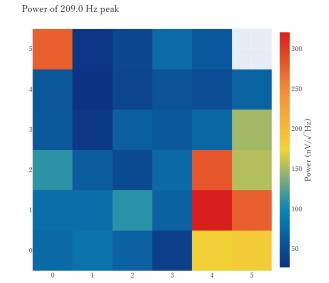


図 **5.34.** $4f_{\rm JTC}$ のピクセル依存

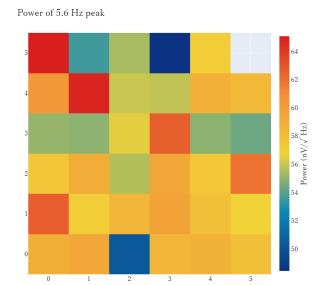


図 5.35. ビート ($|7f_{\rm JTC}-24f_{\rm STC}|$) のピクセル依存性

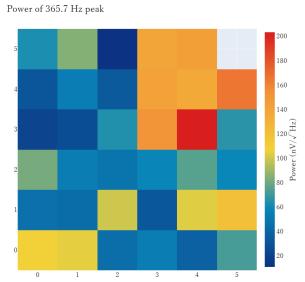


図 5.36. $7f_{
m JTC}$ のピクセル依存性

5.2 微小擾乱加振試験

微小擾乱加振試験(以下、加振試験)は Resolve 以外のサブシステムが発生させる微小擾乱がマイクロカロリメータへ与える影響を評価する試験である。主に想定される微小擾乱源はバス系姿勢制御サブシステムの RW と $IRU(\S1.2.3)$ である。外部からの微小擾乱を再現するために、加振機を XBOX、デュワーと XBOX を接続するハーネス (HNS)、デュワーのベースプレート $(DWR\ BP)$ に設置し、それぞれで加振機単体を駆動させ、Resolve 対システム境界でのレベル $(I/F\ レベル)$ の振動を発生させた。それぞれの加振機を図 5.37 に示す。





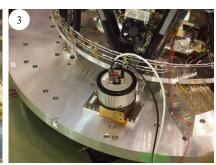


図 5.37. 加振系の加振機。それぞれ、(1) XBOX (2) HNS, (3) DWR BP に設置された加振機である。

5.2.1 データセット

擾乱加振試験ではレベル調整試験、Sweep 試験、Dwell 試験を行い、加振機で発生させた振動がマイクロカロリメータへどのような影響を与えるかを評価した。

• レベル調整試験

加振機で周波数範囲 (XBOX、HNS は 20-205 Hz、DWR BP は 10-700 Hz)、振幅 1N の振動を発生させ、一定時間加振し加速度を測定する。この結果をもとに、加速度データから各周波数 ごとに振幅を増幅・減衰させ、I/F レベルと同等か大きい振動を再現し、これを I/F レベル加振とする。

• Sweep 試験

加振機で周波数範囲の I/F レベル加振を一定時間行う。周波数を変化させる速さは加振する場所によって異なる。加振している間に取得された検出器面の温度データ、ADR のマグネット電流データからマイクロカロリメータの分光性能が悪くなる周波数を特定する。

• Dwell 試験

Sweep 試験で選定した周波数の振動を 5 分間加え、マイクロカロリメータのノイズデータを取得する。そして、加振する振動の振幅を I/F レベル加振の振動を基準に増加・減少させマイクロカロリメータへの影響を評価する。

解析には Sweep, Dwell 試験で取得されたデータを使用する。図 5.38 に HNS, XBOX, DWR BP ごとの I/F レベルを示す。DWR BP の I/F レベルにはリアクションホイールのロッキングモード (§1.2.3) が考慮されていないもの (I/F レベル) と考慮されているもの (New I/F レベル) がある。New I/F レベ

ルは本研究で設定したものであり、 $10-110~{
m Hz}$ が I/F レベルの $5~{
m ft}$ 、 $110-220~{
m Hz}$ が I/F レベルの $10~{
m ft}$ 倍、 $220~{
m Hz}$ 以降は I/F レベルと同じである。

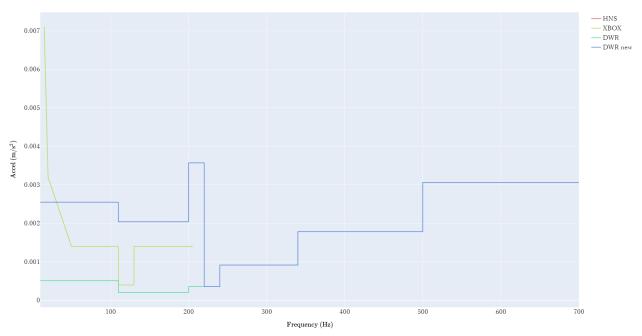


図 **5.38.** ハーネス, XBOX, デュワー ベースプレートごとの I/F レベル。デュワーベースプレートの I/F レベルにはリアクションホイールのロッキングモードが考慮されていないもの (I/F レベル) と考慮されているもの (New I/F レベル) がある。ハーネスとデュワーベースプレートの I/F レベルは同じ値である。

5.2.1.1 XBOX、HNS 加振

XBOX、HNS の擾乱加振試験は NEC が設置した加振系で実施された。XBOX の加速度データを測定するために使用した加速度ピックアップを図 5.39 に、HNS の加速度データを測定するために使用したものを図 5.40 に示す。また、XBOX を加振したときのパラメータを表 5.7 に、HNS を加振したときのパラメータを表 5.8 にまとめる。Sweep 試験では加振周波数を 60 秒ごとに 5 Hz 変化させ、低周波数から高周波数へと変化させた。



図 5.39. XBOX 加振で使用した加速度ピックアップの名前と座標軸の定義。

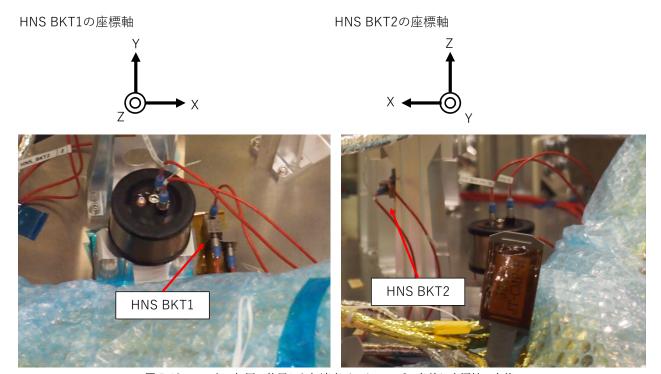


図 5.40. ハーネス加振で使用した加速度ピックアップの名前と座標軸の定義。

5.2.1.2 DWR BP 加振

DWR BP の擾乱加振試験は JAXA が設置した加振系で実施された (図 4.12)。 DWR BP に加振した ときのパラメータを表 5.9 にまとめる。この加振では、Sweep 試験で加振周波数を変更するときには連続で $0.2~{\rm Hz/s}$ あるいは $0.05~{\rm Hz/s}$ の一定の速さで変化させた。

表 **5.7.** XBOX 加振の試験パラメータ。Data set は各試験中に取得されたデータを示しており、Trms は検出器面の温度データ、di/dt は ADR のマグネット電流のデータ、PSP NS はノイズデータを示している。

Case ID	Date	Time (UT)	Mode			Injection	n			Data set		
Case ID	Date	Time (U1)	Mode	Frequency range (Hz)	Direction	Δf (Hz)	Duration (min)	Level (dB)	Souce	Trms	di/dt	PSP NS
1	2021/12/4	02:31 - 03:11	Sweep	25 - 205	Upward	5	1		1 N	×	×	
2	2021/12/4	09:16 - 09:53	Sweep	25 - 205	Upward	5	1		I/F	×	×	
3	2021/12/5	01:43 - 01:48	Dwell	25			5	0	I/F	×	×	×
4	2021/12/5	01:51 - 01:56	Dwell	70			5	20	I/F	×	×	×
5	2021/12/5	02:00 - 02:05	Dwell	70			5	0	I/F	×	×	×
6	2021/12/5	02:07 - 02:12	Dwell	120			5	20	I/F	×	×	×
7	2021/12/5	02:13 - 02:18	Dwell	120			5	0	I/F	×	×	×
8	2021/12/5	02:20 - 02:25	Dwell	170			5	20	I/F	×	×	×
9	2021/12/5	02:27 - 02:32	Dwell	170			5	0	I/F	×	×	×
10	2021/12/5	02:33 - 02:38	Dwell	205			5	20	I/F	×	×	×
11	2021/12/5	02:51 - 02:56	Dwell	25			5	-6	I/F	×	×	×
12	2021/12/5	02:57 - 03:02	Dwell	70			5	6	I/F	×	×	×
13	2021/12/5	03:04 - 03:09	Dwell	120			5	6	I/F	×	×	×
14	2021/12/5	03:10 - 03:15	Dwell	170			5	6	I/F	×	×	×
15	2021/12/5	04:31 - 04:36	Dwell	205			5	0	I/F	×	×	×
16	2021/12/5	04:37 - 04:42	Dwell	205			5	-6	I/F	×	×	×

表 5.8. ハーネス加振の試験パラメータ。Data set は各試験中に取得されたデータを示しており、Trms は検出器面の温度データ、 di/dt は ADR のマグネット電流のデータ、PSP NS はノイズデータを示している。

C ID	D. t.	T' (LIT)	Mode			Injection	n				Data	set
Case ID	Date	Time (UT)	Mode	Frequency range (Hz)	Direction	Δf (Hz)	Duration (min)	Level (dB)	Souce	Trms	di/dt	PSP NS
1	2021/12/3	09:29 - 09:42	Sweep	150 - 205	Upward	5	1		0.1 N	×	×	
2	2021/12/3	09:46 - 09:58	Sweep	150 - 205	Upward	5	1		0.01 N	×	×	
3	2021/12/3	11:11 - 11:23	Sweep	150 - 205	Upward	5	1		1 N	×	×	
4	2021/12/4	07:57 - 08:07	Sweep	25 - 70	Upward	5	1		I/F	×	×	
5	2021/12/4	08:11 - 08:39	Sweep	70 - 205	Upward	5	1		I/F	×	×	
6	2021/12/4	08:50 - 08:51	Sweep	200	Upward	5	1		I/F	×	×	
7	2021/12/6	04:11 - 04:16	Dwell	35			5	0	I/F	×	×	×
8	2021/12/6	04:17 - 04:22	Dwell	35			5	+6	I/F	×	×	×
9	2021/12/6	04:22 - 04:27	Dwell	45			5	0	I/F	×	×	×
10	2021/12/6	04:28 - 04:33	Dwell	45			5	+6	I/F	×	×	×
11	2021/12/6	04:35 - 04:40	Dwell	55			5	0	I/F	×	×	×
12	2021/12/6	04:41 - 04:46	Dwell	55			5	+6	I/F	×	×	×
13	2021/12/6	04:47 - 04:52	Dwell	70			5	0	I/F	×	×	×
14	2021/12/6	04:52 - 04:57	Dwell	70			5	+6	I/F	×	×	×
15	2021/12/6	04:58 - 05:03	Dwell	120			5	0	I/F	×	×	×
16	2021/12/6	05:05 - 05:10	Dwell	120			5	+6	I/F	×	×	×
17	2021/12/6	05:10 - 05:15	Dwell	170			5	0	I/F	×	×	×
18	2021/12/6	05:36 - 05:41	Dwell	170			5	0	I/F	×	×	×
19	2021/12/6	05:42 - 05:47	Dwell	170			5	-6	I/F	×	×	×
20	2021/12/6	05:48 - 05:53	Dwell	200			5	0	I/F	×	×	×
21	2021/12/6	05:54 - 05:59	Dwell	200			5	+6	I/F	×	×	×
22	2021/12/6	06:18 - 06:23	Dwell	45			5	+20	I/F	×	×	×
23	2021/12/6	06:24 - 06:29	Dwell	45			5	+24	I/F	×	×	×
24	2021/12/6	06:30 - 06:35	Dwell	200			5	-6	I/F	×	×	×
25	2021/12/6	06:36 - 06:41	Dwell	55			5	+12	I/F	×	×	×
26	2021/12/6	06:41 - 06:46	Dwell	70			5	+12	I/F	×	×	×
27	2021/12/6	06:47 - 06:52	Dwell	120			5	-6	I/F	×	×	×
28	2021/12/6	06:53 - 06:58	Dwell	170			5	-12	I/F	×	×	×

5.2.2 データ解析

Sweep 試験の解析では取得した検出器面の温度データ、ADR のマグネット電流データを用いて、温度 安定性が悪くなる微小振動の周波数を特定した。各微小振動の周波数の評価には、加振したときの検出 器の温度 $T_{\rm rms}$ と、その時の ADR マグネット電流の傾きを基準にした。Dwell 試験の解析では、特定した周波数の微小振動を加振している間に取得されたノイズデータのスペクトルを作成し、ノイズを確認

表 **5.9.** デュワー ベースプレート 加振の試験パラメータ。Data set は各試験中に取得されたデータを示しており、Trms は検出器面の温度データ、di/dt は ADR のマグネット電流のデータ、PSP NS はノイズデータを示している。

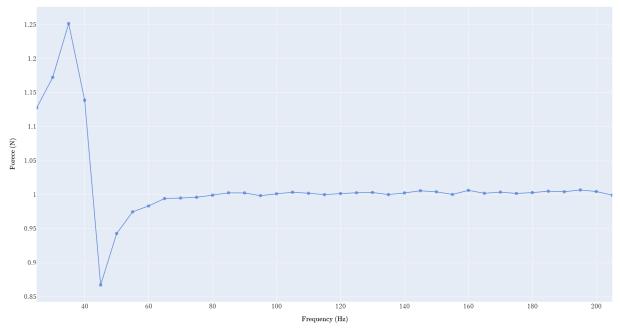
C ID	D.	T' (LIT)	M 1			Injection					Data	set
Case ID	Date	Time (UT)	Mode	Frequency range (Hz)	Direction	df/dt (Hz/s)	Duration (min)	Level (dB)	Souce	Trms	di/dt	PSP NS
1	2021/12/8	01:36 - 02:34	Sweep	10 - 600	Upward	0.2			0.1 N	×	×	
2	2021/12/8	02:43 - 03:44	Sweep	10 - 600	Upward	0.2			1 N	×	×	
3	2021/12/9	03:45 - 04:45	Sweep	10 - 600	Upward	0.2			0.66 N	×	×	
4	2021/12/10	00:54 - 01:41	Sweep	10 - 600	Upward	0.2		0	I/F	×	×	
5	2021/12/10	07:48 - 07:51	Sweep	185 - 195	Upward	0.2			I/F	×	×	
6	2021/12/10	07:52 - 07:57	Sweep	350 - 400	Upward	0.2			I/F	×	×	
7	2021/12/10	08:12 - 08:17	Sweep	590 - 620	Upward	0.2			I/F	×	×	
8	2021/12/10	08:02 - 08:11	Sweep	600 - 700	Upward	0.2			I/F	×	×	
9	2021/12/11	06:56 - 07:22	Sweep	10 - 60	Upward	0.05			1 N	×	×	
10	2021/12/11	07:30 - 07:35	Dwell	70			5	0	I/F	×	×	×
11	2021/12/11	07:36 - 07:41	Dwell	120			5	0	I/F	×	×	×
12	2021/12/11	07:42 - 07:47	Dwell	155			5	0	New I/F	×	×	×
13	2021/12/11	07:56 - 08:01	Dwell	155			5	0	I/F	×	×	×
14	2021/12/11	08:02 - 08:07	Dwell	170			5	0	I/F	×	×	×
15	2021/12/11	08:08 - 08:13	Dwell	200			5	0	I/F	×	×	×
16	2021/12/11	08:19 - 08:26	Sweep	190 - 210	Upward	0.05		0	I/F	×	×	
17	2021/12/11	08:27 - 08:34	Sweep	370 - 390	Upward	0.05		0	I/F	×	×	
18	2021/12/11	08:35 - 08:45	Sweep	590 - 620	Upward	0.05		0	I/F	×	×	
19	2021/12/11	09:02 - 09:19	Sweep	10 - 60	Upward	0.05		0	I/F	×	×	
20	2021/12/11	09:20 - 09:27	Sweep	190 - 210	Downward	0.05		0	I/F	×	×	
21	2021/12/11	09:28 - 09:42	Sweep	60 - 220	Upward	0.2		0	New I/F	×	×	
22	2021/12/11	09:45 - 09:50	Dwell	35			5	0	I/F	×	×	×
23	2021/12/11	09:51 - 09:52	Dwell	380.4			1	0	I/F	×	×	
24	2021/12/11	09:54 - 09:55	Dwell	380.4			1	-12	I/F	×	×	
25	2021/12/11	09:56 - 09:57	Dwell	603			1	0	I/F	×	×	
26	2021/12/11	09:59 - 10:00	Dwell	603			1	-12	I/F	×	×	
27	2021/12/11	10:01 - 10:03	Dwell	611			1	0	I/F	×	×	
28	2021/12/11	10:03 - 10:05	Dwell	611			1	-12	I/F	×	×	
29	2021/12/11	10:05 - 10:06	Dwell	200.5			1	0	I/F	×	×	
30	2021/12/11	10:08 - 10:09	Dwell	200.5			1	-12	I/F	×	×	
31	2021/12/11	10:10 - 10:14	Dwell	380.4			4	0	I/F	×	×	×
32	2021/12/11	10:15 - 10:19	Dwell	200.5			4	-12	I/F	×	×	×
33	2021/12/11	10:20 - 10:24	Dwell	200.5			4	0	I/F	×	×	×

した。

HNS 加振

Sweep 試験

図 5.41 の横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸に I/F レベル加振を行ったときの振動の振幅をプロットしたものを示す。 1 N の固定値の加振 (150-200~Hz は線形性確認のため 0.1,0.01~N の加振を実施) 及び、I/F レベル加振の結果を図 5.42 に示す。横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸に加振した微小振動の周波数と同じ周波数のパワーを加速度スペクトルから抜き出したものをプロットしている。 黒色の点線は設定された I/F レベル、灰色の点線は設定された New I/F レベルを示している。 I/F レベル加振は I/F レベルを超えていればよいので、155-205~Hz の I/F レベル加振は 1 N で加振している。 図 5.43 の横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸にマイクロカロリメータの温度の標準偏差をプロットしたものを示す。縦軸の値が $2.5~\mu K$ (Resolve の要求値) より低くなっていればよい。図 5.44 に横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸にマイクロカロリメータのマグネット電流データの傾きをプロットしたものを示す。縦軸の値が -0.008(図中の灰色の点線) に近いほど温度は安定している。



 $\boxtimes 5.41.~{\rm HNS~Micro\mbox{-}}{vibration~frequency~vs~force_{\circ}}$

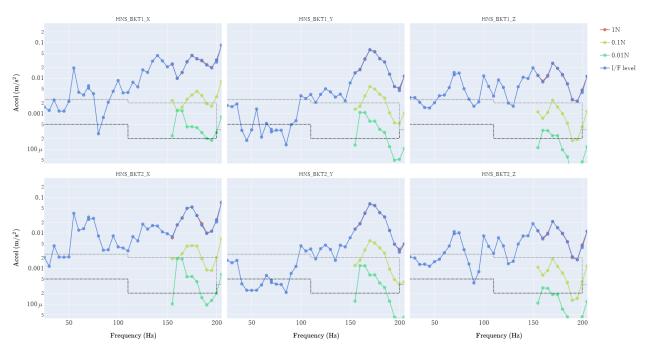
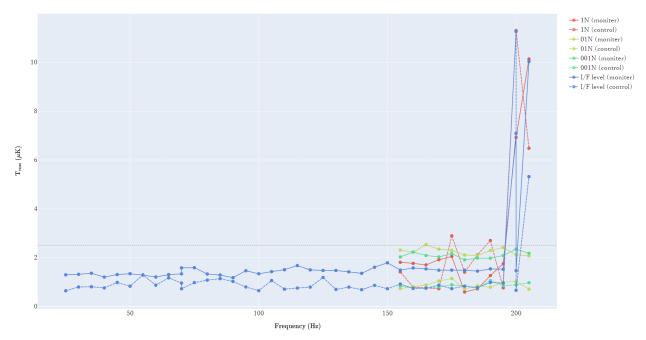


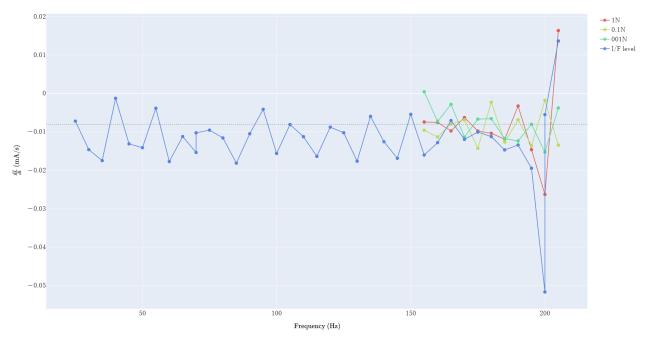
図 **5.42.** HNS Micro-vibration frequency vs Accel。上段は HNS BKT1 の X, Y, Z で取得された加速度データで、下段は HNS BKT2 の X, Y, Z で種痘された加速度データである。

Dwell 試験

Sweep 試験の結果 (図 5.43、5.44) に基づき、dwell 周波数の表 5.10 のように選定した。次に、図 5.45-5.51 に各周波数で加振しているときのピクセル 00 番のノイズスペクトルを示す。他のピクセルは



 \boxtimes 5.43. HNS Micro-vibration frequency vs Temperature standard deviation



 \boxtimes **5.44.** HNS Micro-vibration frequency vs $\frac{dI}{dt}$

付録 C にまとめて記載しており、XBOX、DWR の試験も同様である。また、各図には加振周波数を灰色の点線をプロットしている。各ノイズスペクトルで加振周波数にピークが出現したものと、低周波数側 (\sim 20 Hz) にピークが出現したものを表 5.11 にまとめる。ただし、120 Hz 0,+6 dB 加振中は Sample dump が正しく取得できていなかったので省略する。

	Z CITCH E WOLL / VIZZ CITCHE (TITLE / VIZZ CITCHE)
Dwell周波数 (Hz)	選定理由
35	一番初めにdl/dtが低下したため。
45	特に応答がないため。比較に使う。
55	Trms(contlor)で応答があったため。
120	dl/dtとTrms で100 Hz 以上で応答が見られたため、
170	帯域全体を等間隔で選定した。
200	dl/dtとTrmsで最も大きな応答を示したため。

表 **5.10**. Dwell 周波数と選定理由 (ハーネス加振)

表 **5.11.** HNS Dwell 試験のまとめ。Injected frequency に印がついているものはノイズスペクトルに加振した振動の周波数が見えているもので、Low frequency band に印がついているものは低周波数帯 (\sim 20 Hz) にピークがあるものである

F(II-)	I1 (4D)	Pe	eak
Frequency (Hz)	Level (dB)	Injected frequency	Low frequency band
35	0	×	
33	6	×	
	0		
45	6		
43	20		
	24	×	
	0	×	
55	6	×	
	12	×	
	0	×	
70	6	×	
	12	×	
120	-6		
	0	×	
170	-6		
	-12		
	0	×	×
200	6	×	×
	-6	×	×

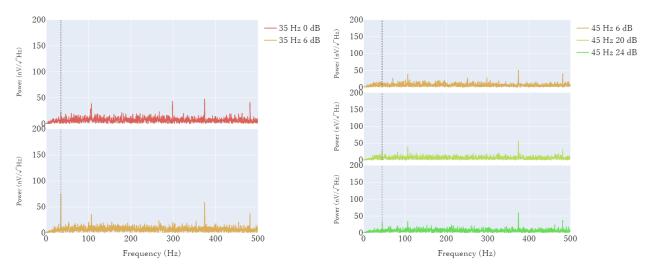


図 **5.45.** HNS 加振 (35 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセ 図 **5.46.** HNS 加振 (45 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)

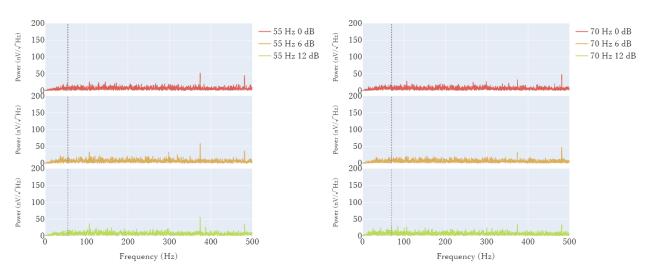


図 **5.47.** HNS 加振 (55 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセ 図 **5.48.** HNS 加振 (70 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセ ル 00 番)

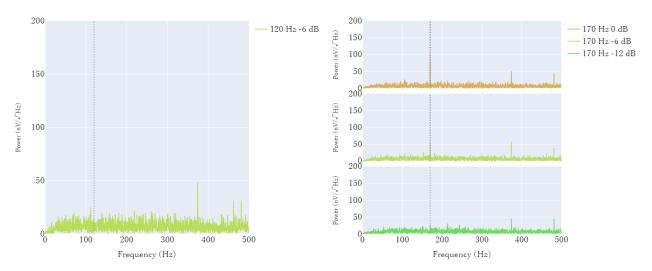


図 **5.49.** HNS 加振 (120 Hz) のときのノイズスペクトル (ピク 図 **5.50.** HNS 加振 (170 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)

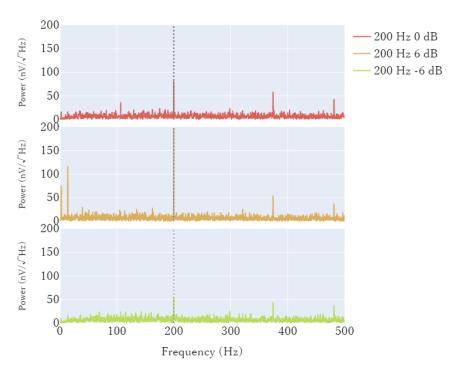
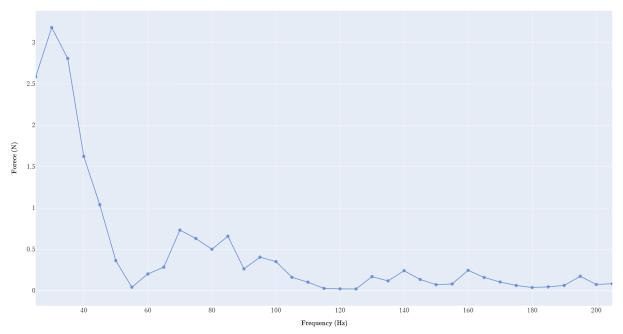


図 5.51. HNS 加振 (200 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)

XBOX 加振

Sweep 試験

図 5.52 の横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸に I/F レベル加振を行ったときの振動の振幅をプロットしたものを示す。

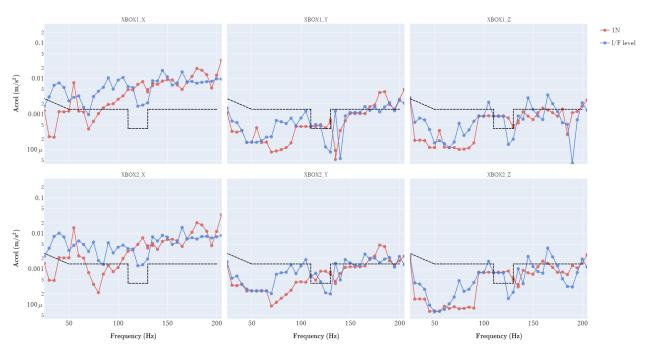


 $\boxtimes 5.52.$ XBOX Micro-vibration frequency vs force

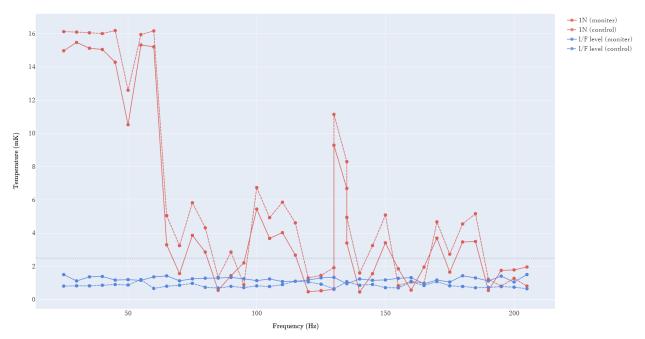
1~N の固定値の加振 (150-200~Hz は線形性確認のため $0.1,\,0.01~N$ の加振を実施) 及び、I/F レベル加振の結果を図 5.53~に示す。横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸に加振した微小振動の周波数と同じ周波数の振幅を加速度スペクトルから抜き出したものプロットしている。

図 5.54 の横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸にマイクロカロリメータの温度の標準偏差をプロットしたものを示す。縦軸の値が 2.5 μ K (Resolve の要求値) より低くなっていればよい。I/F レベル加振では温度の標準偏差 T_{rms} はほぼ一定であったが、25 Hz で最大の応答があり、205 Hz で 2 番目に大きい応答があった。

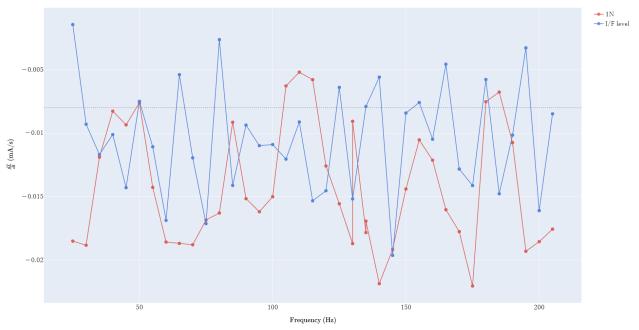
図 5.55 の横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸にマイクロカロリメータのマグネット電流データの傾きをプロットしたものを示す。縦軸の値が -0.008(図中の灰色の点線) に近いほど温度は安定している。



 $\boxtimes {\bf 5.53.}$ XBOX Micro-vibration frequency vs Accel



 \boxtimes 5.54. XBOX Micro-vibration frequency vs Temperature standard deviation



 \boxtimes **5.55.** XBOX Micro-vibration frequency vs $\frac{dI}{dt}$

Dwell 試験

Sweep 試験の結果 (図 5.54、5.55) に基づき、dwell 周波数の表 5.56 ように選定した。

図 5.57-5.61 に各周波数で加振しているときのピクセル 00 番のノイズスペクトルを示す。各ノイズスペクトルで加振周波数にピークが出現したものと、低周波数側 ($\sim20~{\rm Hz}$) にピークが出現したものを表 5.12 にまとめる。

	Total Professional (125 of 1784)
Dwell周波数 (Hz)	選定理由
25	Trms(moniter)で最も大きい応答があったため。
70	特に大きな応答はなかったため、ハーネス加振と同じ周波数を選択した。
120	- 55 HzはJTCの駆動周波数に近いため70 Hz に変更された。
170	33112は月10の船割向放鉄に近いため70112に支史された。
205	Trms(moniter)で2番目に大きい広答があったため。

図 **5.56.** Dwell 周波数と選定理由 (XBOX 加振)

表 **5.12.** XBOX Dwell 試験のまとめ。Micro-vib frequency に印がついているものはノイズスペクトルに加振した振動の周波数が見えているもので、Low frequency band に印がついているものは低周波数帯 ($\sim 20~{\rm Hz}$) にピークがあるものである

Engage (Hz)	Lavial (dD)	Pe	ak
Frequency (Hz)	Level (dB)	Injected frequency	Low frequency band
25	0		
23	-6		
	0		
70	6		
	20	×	
	0		
120	6		
	20		
	0		
170	6		
	20	×	
	0		
205	20	×	
	-6		

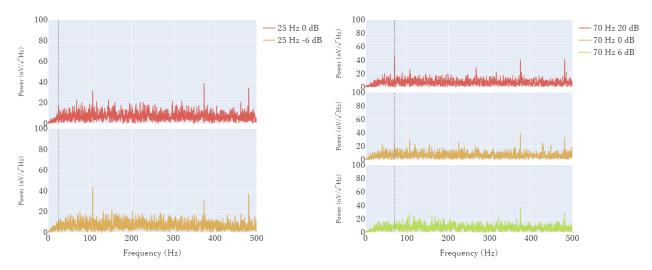


図 **5.57.** XBOX 加振 (25 Hz) のときのノイズスペクトル (ピク 図 **5.58.** XBOX 加振 (70 Hz) のときのノイズスペクトル (ピク セル 00 番)

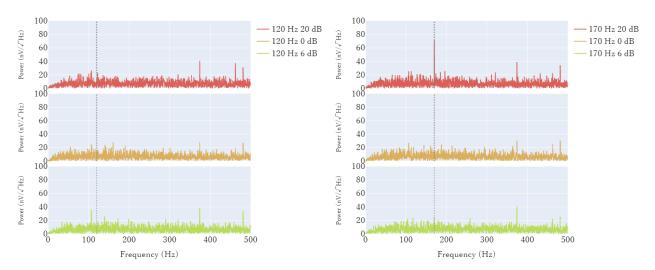


図 **5.59.** XBOX 加振 (120 Hz) のときのノイズスペクトル (ピ 図 **5.60.** XBOX 加振 (170 Hz) のときのノイズスペクトル (ピ クセル 00 番)

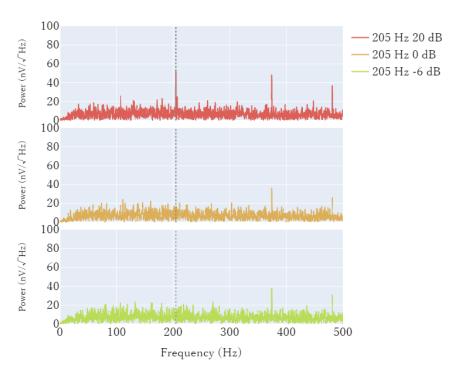
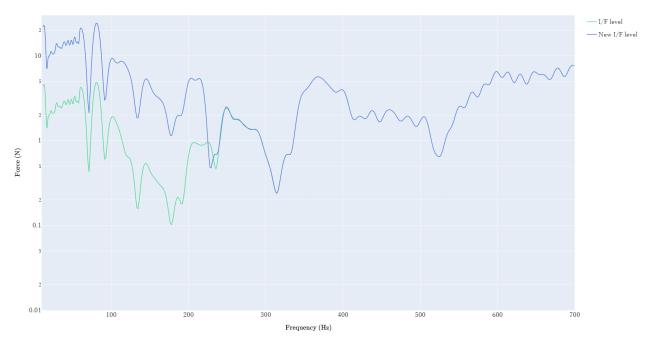


図 5.61. XBOX 加振 (205 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)

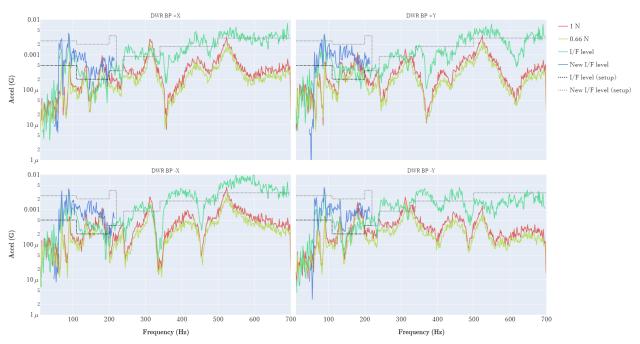
5.2.2.1 DWR BP 加振

Sweep 試験

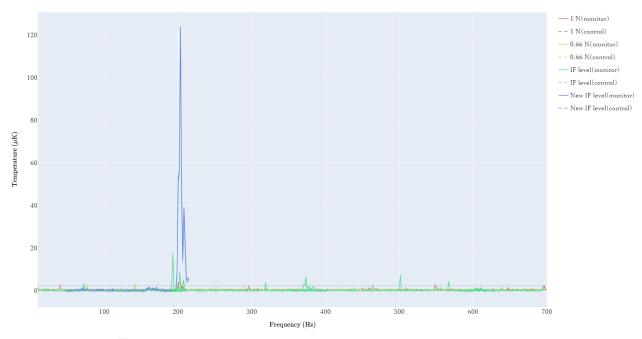
図 5.62 に横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸に各レベルの加振を達成するために発生させる振動の振幅をプロットした。図 5.63 に横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸に加振した微小振動の周波数と同じ周波数の振幅を加速度スペクトルから抜き出したものをプロットした。図 5.64 に横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸にマイクロカロリメータの温度の標準偏差をプロットしたものを示す。縦軸の値が 2.5 μ K (Resolve の要求値) より低くなっていればよい。図 5.65 に横軸に加振した微小振動の周波数、縦軸にマイクロカロリメータのマグネット電流データの傾きをプロットしたものを示す。縦軸の値が -0.008(図中の灰色の点線) に近いほど温度は安定している。



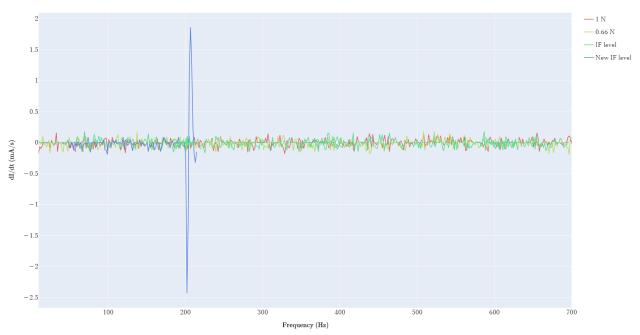
 \boxtimes **5.62.** DWR Micro-vibration frequency vs force



 \boxtimes **5.63.** DWR Micro-vibration frequency vs Accel



 \boxtimes $\bf 5.64.$ DWR Micro-vibration frequency vs Temperature standard deviation



 \boxtimes **5.65.** DWR Micro-vibration frequency vs $\frac{dI}{dt}$

Dwell 試験

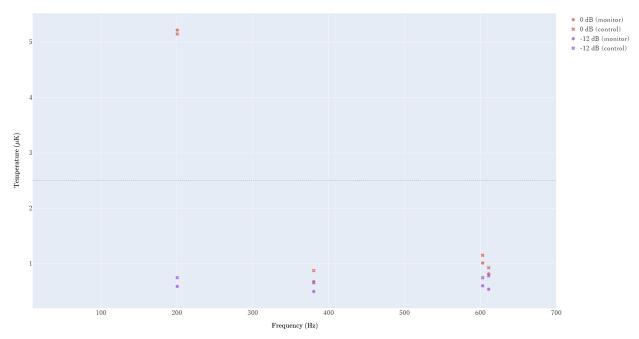
Sweep 試験の結果 (図 5.64、5.65) に基づき、dwell 周波数の表 5.66 ように選定した。

Dwell周波数 (Hz)	選定理由					
35	ハーネス加振との比較のため。					
70	Trms(moniter)で大きい応答があったため。					
120	ハーネス、XBOX加振との比較のため。					
155	Trms(moniter)で大きい応答があったため。					
155	また、JTCの3倍波に周波数が近いため。					
170	ハーネス、XBOX加振との比較のため。					
200	Trms(moniter)で大きい応答があったため。					
200	また、JTCの4倍波に周波数が近いため。					
200.5	190 - 210 HzのSweep試験(Case ID : 16)で					
200.5	マイクロカロリメータの温度が上昇した周波数である。					
380.4	370 - 390 HzのSweep試験(Case ID : 17)で					
300.4	マイクロカロリメータの温度が上昇した周波数である。					
603	Trms(moniter)で大きい応答があったため。					
003	また、600Hz帯に初めて応答が確認できたため。					
611	Trms(moniter)で大きい応答があったため。					
011	また、600Hz帯に初めて応答が確認できたため。					

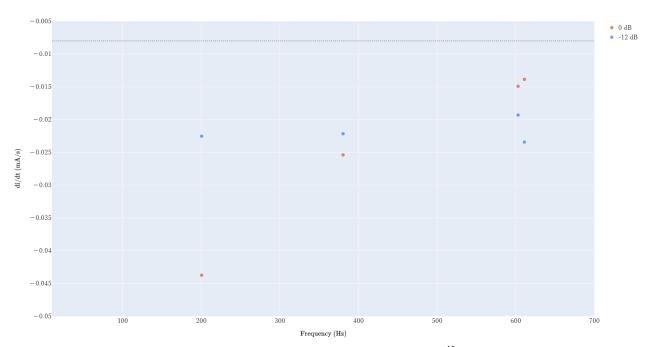
図 5.66. Dwell 周波数と選定理由 (デュワー ベースプレート加振)

200.5 Hz と 380.4 Hz は表 5.9 の Case ID 16,17 の Sweep 試験で、これまでの Sweep 試験よりゆっくり加振周波数を変化させマイクロカロリメータの温度変化を詳しく測定し決定した。 DWR BP 加振の Dwell 試験では加振時間が 1 分のものと 4 分のものがあった。前者を Short dwell、後者を Dwell と呼ぶ。 Short dwell 中の各周波数のときの検出器面の温度の標準偏差を図 5.67 に、ADR のマグネット電

流の傾きを図 5.68 に示す。図 5.69-5.76 に Dwell で取得された各周波数で加振しているときのピクセル 00 番ノイズスペクトルを示す。各ノイズスペクトルで加振周波数にピークが出現したものと、低周波数 側 (\sim 20 Hz) にピークが出現したものを表 5.13 にまとめる。ただし、120 Hz 0,+6 dB 加振中に Sample dump が正しく取得できていなかった。



 \boxtimes 5.67. DWR Micro-vibration frequency vs Temperature standard deviation



 \boxtimes **5.68.** DWR Micro-vibration frequency vs $\frac{dI}{dt}$

表 **5.13.** DWR Dwell 試験のまとめ。Micro-vib frequency に印がついているものはノイズスペクトルに加振した振動の周波数 が見えているもので、Low frequency band に印がついているものは低周波数帯 (\sim 20 Hz) にピークがあるものである

E., (II-)	C	I1 (4D)	Pe	eak
Frequency (Hz)	Source	Level (dB)	Injected frequency	Low frequency band
35	I/F	0		
70	I/F	0		
120	I/F	0		
155	I/F	0		
133	New I/F	0	×	
170	I/F	0		
200	I/F	0		×
200.5	I/F	0		×
200.3	I/F	-12		
380.4	I/F	0	×	×

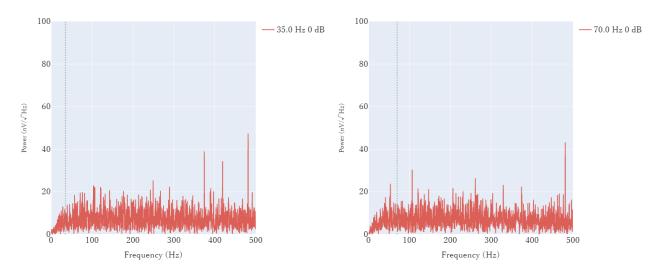


図 **5.69.** DWR BP 加振 (35 Hz) のときのノイズスペクトル 図 **5.70.** DWR BP 加振 (70 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)

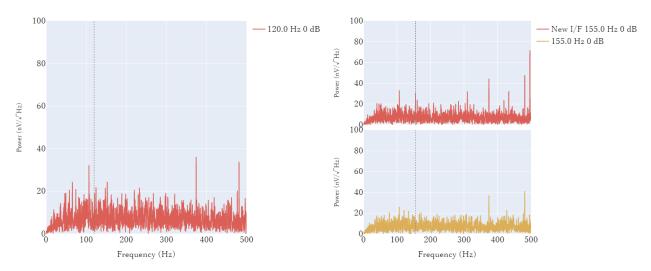


図 **5.71.** DWR BP 加振 (120 Hz) のときのノイズスペクトル 図 **5.72.** DWR BP 加振 (155 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)

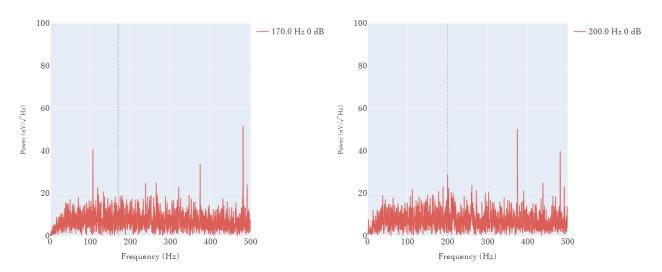


図 **5.73.** DWR BP 加振 (170 Hz) のときのノイズスペクトル 図 **5.74.** DWR BP 加振 (200 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)

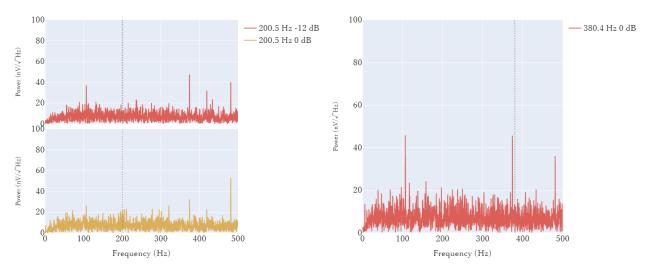


図 **5.75.** DWR BP 加振 (200.5 Hz) のときのノイズスペクト 図 **5.76.** DWR BP 加振 (380.4 Hz) のときのノイズスペクトル (ピクセル 00 番)

5.2.3 結果と考察

5.2.3.1 加振による温度安定性の変化

まず、Sweep 試験で得られたマイクロカロリメータの温度データから温度安定性を確認した。Resolve の温度安定性の要求値は $2.5\mu K$ であり、I/F レベル加振したときに、この値より Trms が大きくなった 加振周波数を表 5.14 にまとめる。図 5.43 より HNS 加振では 0.1 N より小さい加振の場合、要求値を満たしている。また、DWR BP 加振では図 5.64、5.67 より、1 N 加振の場合 200 Hz 以外では要求値を満たし、I/F レベルの-12 dB では 200 Hz でも要求を満たす。

今回の加振試験で、要求値を満たしてはいたが 603~Hz で温度が大きく揺らいだ。周波数スキャンなどで取得したノイズスペクトルには 600~Hz 付近ではラインノイズは出現しなかった。そこで、JTC の高調波が取りえる周波数の範囲を図 5.77~に示す。図 5.77~で示したように 600~Hz 付近は JTC の高調波には含まれていなかった。そのため、JTC スキャンでは共鳴が起こらずノイズにならなかったと考えられる。

表 **5.14.** 加振周波数とマイクロカロリメータ温度安定性。各周波数の加振をしたときに、マイクロカロリメータ温度安定性の要求値 $\pm 2.5 \mu \mathrm{K}$ より大きくなった周波数のまとめ。XBOX でこの値より大きくなるものはなかった。

	Injected frequency (Hz)	$T_{rms} (\mu K)$
HNS	200	11.3
пиз	205	10
XBOX		
	193.1	17.5
DWR	202.5	9.1
DWK	207.44	5.2
	373.6	6.6

5.2.3.2 応答の線形性

HNS 加振は 1,0.1,0.01 N 加振のとき、DWR BP は 1,0.66 N 加振のときの加速度から、入力した力に対して発生する振動が線形性を持つか確認した。1 N 加振したときの加速度で、各入力で加振したときの加速度を割り、その値が入力と近いか確認した。図 5.78 に HNS 加振の、図 5.79 に DWR BP 加振の結果を示す。 HNS 加振では線形性が確認できた。0.01 N 加振の 160 Hz 付近では値が大きくなっているが、これは加振で発生する振動が小さくフロアノイズに埋もれたためだと考えられる。DWR BP 加振では一部の狭い範囲でしか線形性が確認できなかった。

5.2.3.3 加振周波数と低周波ノイズ

HNS、DWR BP では多くの周波数でノイズスペクトルにラインノイズが見られた。特に、HNS では 0 dB でもラインノイズが確認でき微小擾乱に敏感であると考えられる。また、HNS の 200 Hz 加振、 DWR BP の 200.5, 380.4 Hz 加振ではラインノイズだけではなく低周波数帯にもラインノイズが出現した (図 5.80)。特に、DWR BP 380.4 Hz 加振のときに、加振していないときは出現しなかった 1.4 Hz

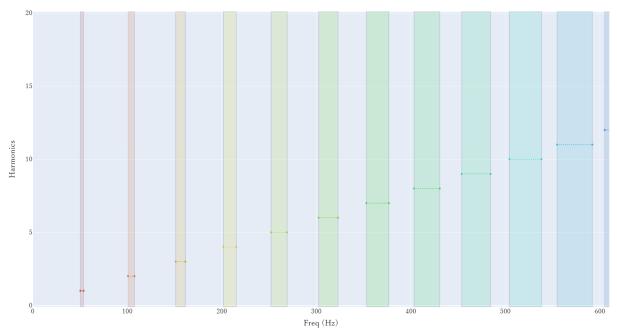


図 **5.77**. JTC の高調波が取りえる範囲

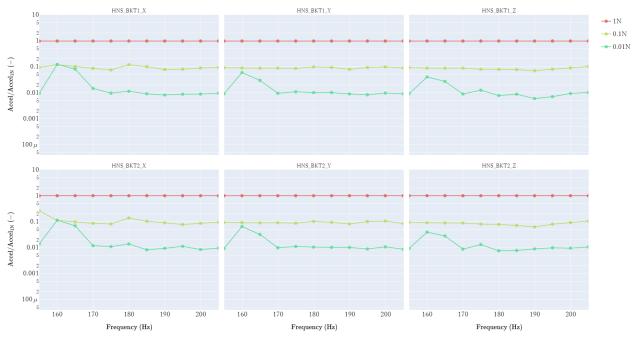


図 5.78. ハーネス (HNS) 加振の線形性の確認。



図 5.79. デュワー ベースプレート (DWR BP) 加振の線形性の確認。

のうなりが出現している。また、DWR BP 200.5 Hz 0,-12 dB 加振のときのノイズスペクトルを比較すると、-12 dB 加振では 0dB 加振のときに出現していた 1.7 Hz のラインノイズが消えている。このことから、外部から侵入した微小擾乱がこの低周波ラインノイズ源であることは確かである。

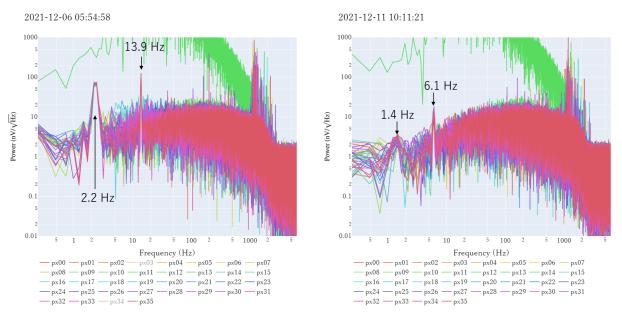


図 **5.80.** HNS, DWR BP 加振時にノイズスペクトルに出現する低周波ラインノイズの例。左:HNS 加振 (200 Hz)、右:DWR BP 加振 (380.4 Hz) のときのノイズスペクトル。

加振時に出現した低周波ラインノイズは全て表 5.15 に示す周波数の組みが生成するうなりの周波数と一致している。

Place	Injected frequency (Hz)	Line noise freq (Hz)	Source1	Source2	
HNS	200	2.2	Micro-vib (200 Hz)	14×STC (202.3 Hz)	
HNS	200	13.9	Micro-vib (200 Hz)	4×JTC (213.9 Hz)	
	200.5	1.7	Micro-vib (200.5 Hz)	14×STC (202.3 Hz)	
DWR BP	200.3	13.4	Micro-vib (200.5 Hz)	4×JTC (213.9 Hz)	
DWKBP	380.4	1.4	26×STC (375.7 Hz)	7×JTC (374.4 Hz)	
	360.4	6.1	Micro-vib (380.4 Hz)	7×JTC (374.4 Hz)	

表 5.15. 加振時に出現する低周波ラインノイズの擾乱源のまとめ。

XBOX では 24 dB 加振のときにのみ、加振周波数と同じ周波数のラインノイズが現れた。Sweep 試験の結果から XBOX 加振ではマイクロカロリメータへの熱侵入はないため、XBOX の振動が接続されている HNS に伝達し、HNS を介してノイズになったと考えられる。

加振した際に応答があった加振周波数は §5.1 で紹介した共鳴周波数 (208, 372 Hz) に近かった。そのため、加振による振動が共鳴しマイクロカロリメータのノイズになっていると考えられる。また、低周波帯に発生するビートが機械式冷凍機だけではなくサブシステムに侵入する擾乱によっても発生すると断定できた。

5.3 冷凍機駆動周波数の最適化

Resolve で使用している STC は 256 段階、JTC は 32 段階で駆動周波数を設定することができる。冷凍機駆動周波数の全組み合わせは $256 \times 32 = 8192$ 点である。この組み合わせの中から、エネルギー分解能がもっともよくなる組み合わせを 1 組決定する必要がある。サブシステム試験で最適値を実験的に決めて、そのあと変更しない予定であるが、打ち上げや軌道上の環境により伝達関数が変化することも想定する必要がある。そこで、NASA の提案に基づき、以下に記述する Step0-5 の方法を用いて、できるだけ包括的かつ迅速に最適値を決定することにした。地上試験の中でも応答が変化したのでこの方法を用いて最適化を何度か行うことになった。本課題ではその方法と結果を述べる。NASA 側の解析結果の確認とその間の加速度データに異常がないかを研究項目とする。

5.3.1 データセット

TC2A では Resolve の GND をとる作業に時間がかかったため、Step~0-3 だけ実施され、TC4 で Step~0-4 が実施された。また、TC5 では TC4 で決定した冷凍機の組み合わせでビートノイズが発生したため、急遽 Step0-2 まで実施された。

5.3.1.1 Step0

目的

微小擾乱の影響は VIS がついていない JTC の影響が大きいので、まず常にエネルギー分解能が 悪くなる JTC の駆動周波数を特定する。TC1, TC1A ではこのような周波数が 6-8 個あるよう だったので、取り除くべき JTC の駆動周波数を 6 個程度特定する。

方法

JTC を 32 段階、STC を最大周波数から等間隔で 9 段階変化させたスキャンを行い、各点で 6 秒間滞在する。合計 $32\times 9=288$ 点である。

• 測定項目

ADR の電流変化、検出器面の温度安定性

これにより、候補点を8192点から6600点程度まで減らす。

5.3.1.2 Step1

目的

ADR の電流増加や検出器面の温度安定性だけから、より長時間積分する測定点を 1600 点程度までしぼる。

方法

6600点のスキャンを行い、各点で6秒間滞在する。

• 測定項目

ADR の電流変化、検出器の温度変化

これにより、候補点を6600点から1600点程度まで減らす。スキャン中に温度不安定になるとその後の

いくつかのデータも悪影響を受ける。しかし、1600 点あれば良い点を探すことは十分可能であり、悪影響を受けたデータそのまま評価する。

5.3.1.3 Step2

目的

残った 1600 点を確認し、共振やその他の不安定要素がある点を排除する。

方法

1600点のスキャンを行い、各点で30秒間滞在する。

• 測定項目

ADR の電流変化、検出器の温度変化、2 秒の sample dump のスペクトル

これにより、候補点を 1600 点から 80 点程度まで減らす。

5.3.1.4 Step3

目的

残りの80点全てをより長い時間で評価する。

方法

80点のスキャンを行い、各点で480秒間滞在する。

• 測定項目

ADR の電流変化、検出器面の温度安定性、4 秒の sample dump のスペクトル

これにより、候補点を80点から10点まで減らす。

5.3.1.5 Step4

目的

残りの 10 点の候補点と、候補点を基準に冷凍機駆動周波数 $\pm \Delta f_{STC,JTC}$ の範囲の点の安定性を確認する。

方法

90点のスキャンを行い、各点で480秒間滞在する。

• 測定項目

ADR の電流の RMS、検出器の温度の RMS、4 秒の sample dump のスペクトル

これにより、1つの最適点と2つの代替点を決定する。

5.3.1.6 Step5

目的

冷却サイクル、振動試験、および軌道上で、最適点とその周囲の点での検出器の応答が時間経過に よらず一貫していることを示す。

方法

9点のスキャンを行い、各点で480秒間滞在する。

• 測定項目

ADR の電流の RMS、検出器の温度の RMS、4 秒の sample dump のスペクトル

5.3.1.7 Step のまとめ

TC2A の各 Step のまとめを表 5.16 に示す。Step は step の番号、Number of point は測定する点数、 Time は各点で測定する時間、Date は実施日、dI/dt は ADR のマグネット電流データの、 $T_{\rm rms}$ は 50 mK ステージ温度データの、NS はノイズスペクトルの取得を示している。

Stan Number of no	Number of maint	Time (a)		Date	Measurement item			
Step	Number of point	Time (s)	TC2A	TC4	TC5	dI/dt	Trms	NS
0	288	6	2021/07/26	2021/12/03	2022/01/28	✓	✓	
1	6600	6	2021/07/26	2021/12/05	2022/01/28	✓	√	
2	1600	30	2021/07/27	2021/12/07	2022/01/29	✓	√	~
3	80	480	2021/07/28	2021/12/09		~	✓	~
4	90	480		2021/12/11		✓	✓	~
5	9	480				✓	✓	~

表 **5.16**. Step のまとめ。

5.3.2 データ解析

データ解析には検出器の温度データである $50~\mathrm{mK}$ ステージ温度データ、ADR のマグネット電流データ、 $2~\mathrm{s}$ sample dump 、 $4~\mathrm{s}$ sample dump を使用した。 $50~\mathrm{mK}$ ステージにおいて、取得されたデータの標準偏差を用いて検出器の温度のゆらぎを推定する。取得した ADR のマグネット電流データを $1~\mathrm{y}$ 関数でフィッティングしたときの傾きの大きさを用いて検出器への浸入熱を推定する。2, $4~\mathrm{s}$ sample dump から、低周波のパワースペクトルの積分値を用いて検出器のエネルギー分解能の良し悪しを推定する。以上の $3~\mathrm{t}$ 種類のデータからエネルギー分解能が最も良い点を決定した。

データ解析は迅速性、確実性を要するため、NASA、JAXA 側で独立に行い、NASA の結果を JAXA 側で確認することにした。また、スキャン中に振動入力に異常がないかは、加速度のデータを JAXA 側が確認する。JAXA 側の作業は筆者がすべて担当した。

5.3.2.1 Step0

288 点で 50 mK ステージ温度データと ADR のマグネット電流データが取得された。表 D.1、D.5、D.10 に Step0 でデータを取得した点と順番を示す。横軸に JTC の駆動周波数、縦軸に STC の駆動周波数をとり、50 mK 温度計データの標準偏差を色で示したものを図 5.81(TC2A) と図 5.83(TC4)、5.85(TC5) に、ADR の電流データからフィッティングして求めた $\frac{dI}{dt}(I:ADR)$ の電流 (mA)、t:時間 (s))を色で示したものを図 5.82(TC2A) と図 5.84(TC4)、図 5.86(TC5) に示す。

図 5.81 は検出器の温度安定性を見ている。温度安定性はゲインの安定性に最も大事な要素であり、エネルギー分解能に直結する。検出器に対して熱入力があると、検出器の温度を 50 mK に保つために、ADR の電流を小さくして磁場を弱くすることで冷却させる。よって、図 5.82 では黄色に近いほど検出器への熱入力が少ない。すなわち、微小擾乱による追加の熱入力が少ない。TC2A では JTC が 50.43-51.16, 51.48-52.57 Hz、STC が 14.79-14.90, 15.93-16.16 Hz、TC4 では JTC が 53.13 Hz 以上と 50.95 Hz 以下の組、TC5 では JTC が 53.14 Hz 以下の組が Step1 で行う scan から除外された。

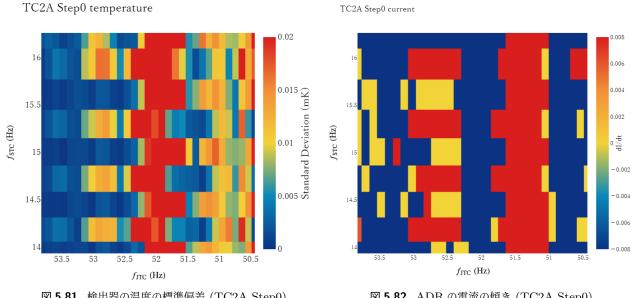


図 5.81. 検出器の温度の標準偏差 (TC2A Step0)

図 **5.82**. ADR の電流の傾き (TC2A Step0)

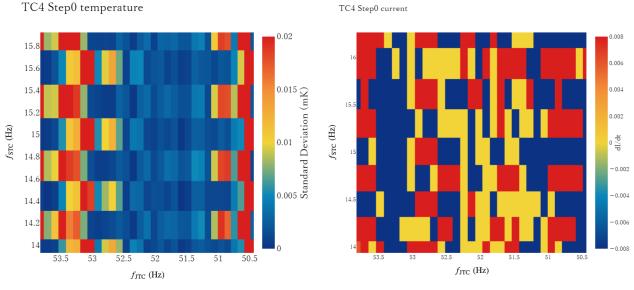


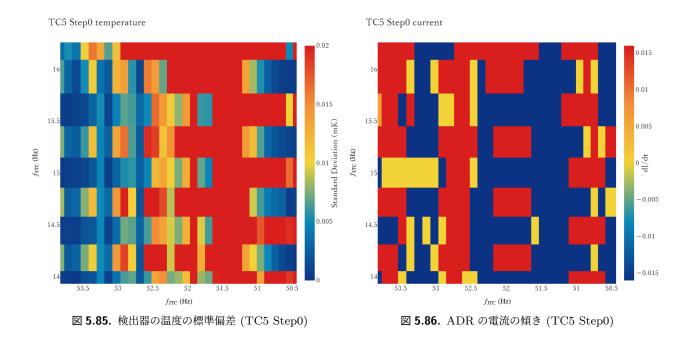
図 5.83. 検出器の温度の標準偏差 (TC4 Step0)

図 5.84. ADR の電流の傾き (TC4 Step0)

Step0 の結果から Step1 で scan する点の総数は TC2A が 2847 点、TC4 が 4864 点、TC5 が 1536 点 になった。TC5では、TC4で行われた周波数スキャンで選ばれた冷凍機の組み合わせが使用されたが、 ノイズスペクトルに低周波ビートが出現したため、急遽周波数スキャンが行われた。そのため、TC5で は他の TC の周波数スキャンと比べると 1 つのステップで抽出する組を少なくしている。

5.3.2.2 Step1

TC2A では 2847 点、TC4 では 4864 点、TC5 では 2048 点で 50 mK ステージ温度データと ADR のマグネット電流データが取得された。表 D.2,D.6, D.11 に Step1 でデータを取得した点と順番を示 す。横軸に JTC の駆動周波数、縦軸に STC の駆動周波数をとり、50 mK ステージ温度データの標準



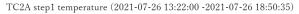
偏差を色で示したものを図 5.87(上段:TC2A、中段:TC4、下段:TC5) に、ADR のマグネット電流データからフィッティングして求めた $\frac{dI}{dt}(I:\text{ADR})$ の電流 (mA)、t:時間 (s)) を色で示したものを図 5.88(上段:TC2A、中段:TC4、下段:TC5) に示す。 作成したヒストグラムから、標準偏差が小さい順に TC2Aでは 1056 点、TC4では 1200 点、TC5では 156 点を抽出した。また、ARD のマグネット電流データでは $\frac{dI}{dt}$ が -0.08 mA/s に近いものからほぼ同じ数の点を抽出した。TC2Aで抽出した点を図 5.89 に、TC4で抽出した点を図 5.90、TC5で抽出した点を図 5.91 に示す。また、NASA が ADR のマグネット電流データを用いた解析で抽出された点も同時に示す。

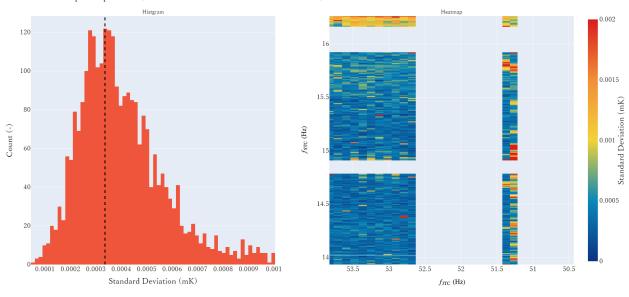
5.3.2.3 Step2

TC2A では 1054 点、TC4 では 1210 点で 50 mK ステージ温度データ、ADR のマグネット電流データ、2s sample dump が取得された。表 D.3,D.7, D.12 に Step2 でデータを取得した点と順番を示す。

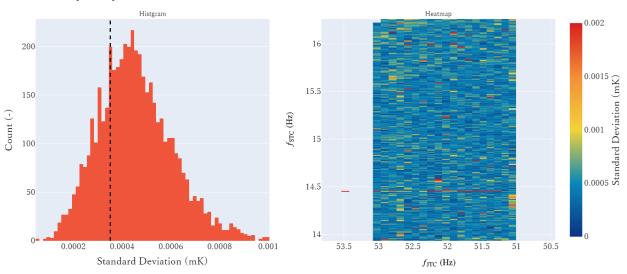
横軸に JTC の駆動周波数、縦軸に STC の駆動周波数をとり、50 mK ステージ温度データの標準偏差を色で示したものを図 5.92(上段:TC2A、中段:TC4、下段:TC5) に、ADR のマグネット電流データからフィッティングして求めた $\frac{dI}{dt}(I:\text{ADR})$ の電流 (mA)、t:時間 (s))を色で示したものを図 5.93(上段:TC2A、中段:TC4、下段:TC5) に示す。 作成したヒストグラムから、標準偏差が小さい順に TC2Aでは 83 点、TC4 では 80 点、TC5 では 10 点を抽出した。また、ADR のマグネット電流データでは $\frac{dI}{dt}$ が -0.08 mA/s に近いものからほぼ同じ数の点を抽出した。

次に step2 から追加で取得された 2 s sample dump を使用して解析を行った。sample dump から作成したスペクトルの低周波側のパワーが低い場合、検出器の分光性能が良くなることが TC1, TC1A の結果から分かっている。そのため、作成したスペクトルの低周波側 $(0-45~{\rm Hz})$ を積分した値を全ピクセル (ピクセル 12 番を除く) で平均したものを指標にし、温度データ、電流データで作成した図と同じものを作成した。それを図 5.94(上段:TC2A、中段:TC4、下段:TC5) に示す。TC2A で抽出した点を図 5.95 に、TC4 で抽出した点を図 5.96、TC5 で抽出した点を図 5.97 に示す。また、NASA が sample dumpを用いた解析で抽出された点も同時に示す。





TC4 Step1 temperature (2021-12-05 06:18:00 -2021-12-05 14:48:00)



 $TC5\ Step1\ temperature\ (2022-01-28\ 11:00:00\ -2022-01-28\ 21:59:59)$

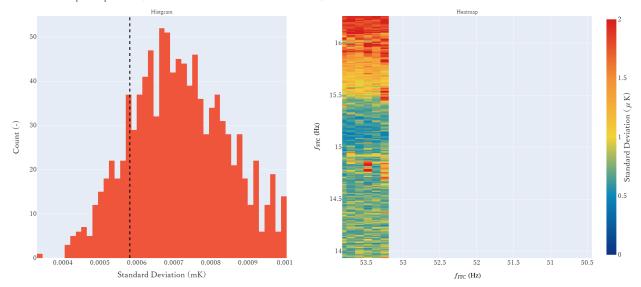
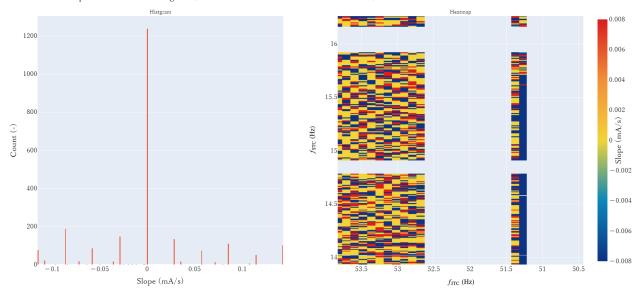
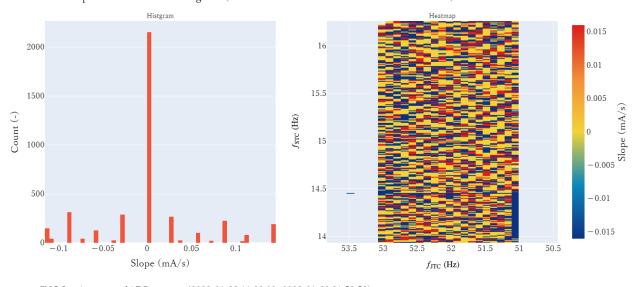


図 5.87. Step1 の検出器面の温度の標準偏差。上段:TC2A、中段:TC4、下段:TC5。

 $TC2A\ step 1\ current\ of\ ADR\ magnet\ (2021-07-26\ 13:22:00\ -2021-07-26\ 18:50:35)$



TC4 Step1 current of ADR magnet (2021-12-05 06:18:00 -2021-12-05 14:48:00)



 $TC5\ Step1\ current\ of\ ADR\ magnet\ \ (2022-01-28\ 11:00:00\ -2022-01-28\ 21:59:59)$

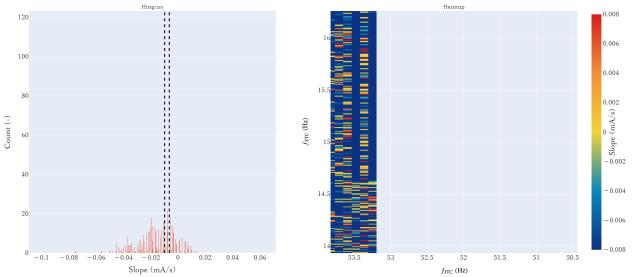


図 **5.88.** Step1 の ADR のマグネット電流の傾き。上段:TC2A、中段:TC4、下段:TC5。

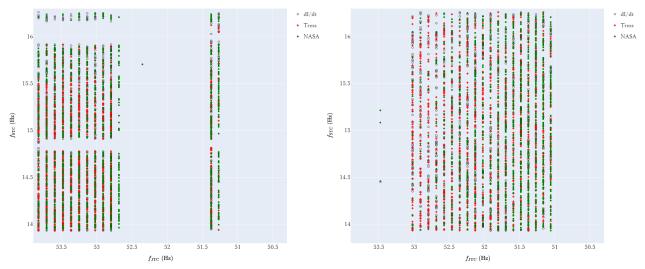


図 5.89. TC2A Step1 で抽出された 1054 点

図 5.90. TC4 Step1 で抽出された 1200 点

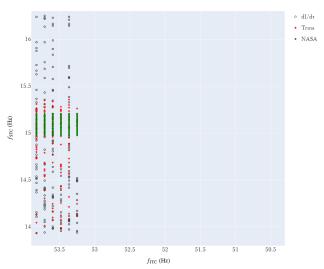
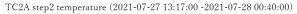


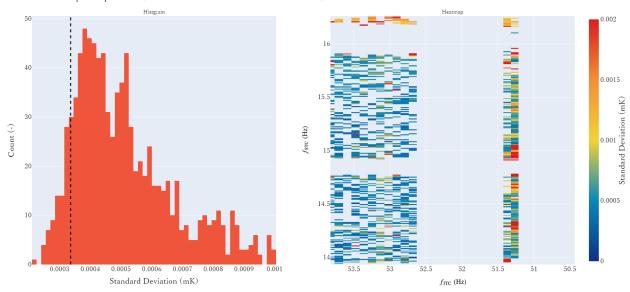
図 **5.91**. TC5 Step1 で抽出された 156 点

5.3.2.4 Step3

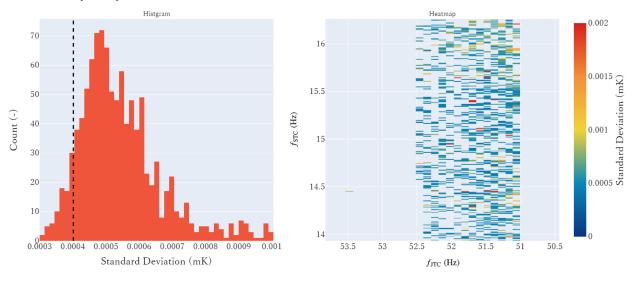
TC2A では 83 点、TC4 では 80 点で 50 mK ステージ温度データ、ADR のマグネット電流データ、4 s sample dump が取得された。 $\S D$ 、表 D.4,D.8 に Step3 でデータを取得した点と順番を示す。横軸に JTC の駆動周波数、縦軸に STC の駆動周波数をとり、50 mK ステージ温度データの標準偏差を色で示したものを図 5.98(上段:TC2A、下段:TC4) に、ADR のマグネット電流データからフィッティングして求めた $\frac{dI}{dt}(I:\text{ADR})$ の電流 (mA)、t:時間 (s)) を色で示したものを図 5.99(上段:TC2A、下段:TC4) に示す。

次に、取得した 4 s sample dump のスペクトルを 0.244-500 Hz のパワーを積分しピクセル数で 平均した値を比較した。その結果を図 5.100(上段:TC2A、下段:TC4) に示す。TC2A で抽出した点を図





TC4 Step2 temperature (2021-12-07 09:45:00 -2021-12-07 21:45:00)



 $TC5\ Step2\ temperature\ (2022-01-29\ 11:14:50\ -2022-01-30\ 00:15:30)$

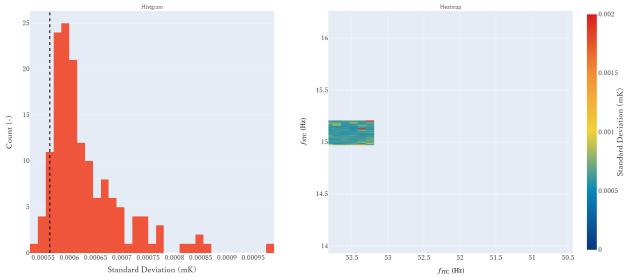
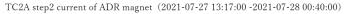
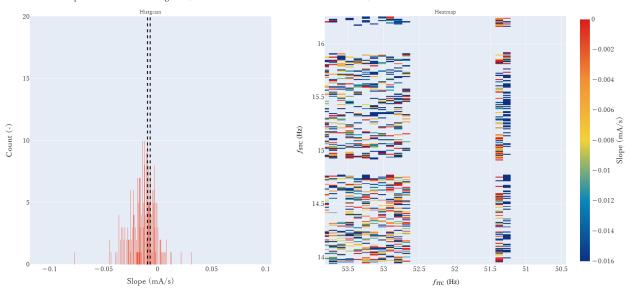
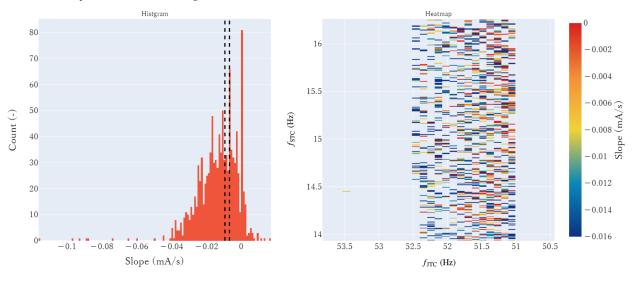


図 5.92. Step2 の検出器面の温度の標準偏差。上段:TC2A、中段:TC4、下段:TC5。





TC4 Step2 current of ADR magnet (2021-12-07 09:45:00 -2021-12-07 21:45:00)



 $TC5\ Step 2\ current\ of\ ADR\ magnet\ \ (2022-01-29\ 11:14:50\ -2022-01-30\ 00:15:30)$

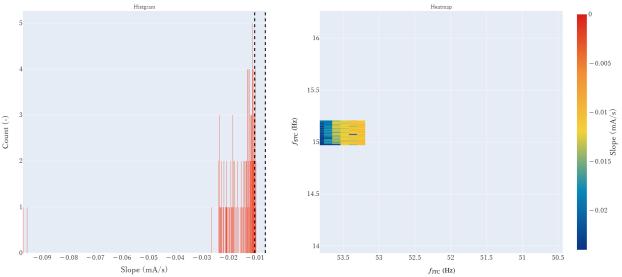
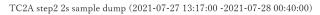
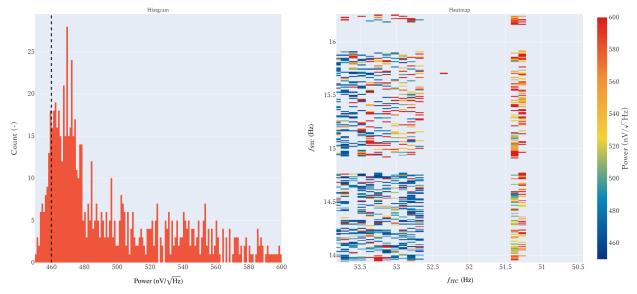
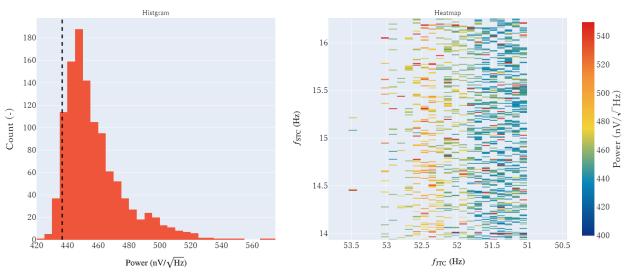


図 **5.93.** Step2 の ADR のマグネット電流の傾き。上段:TC2A、中段:TC4、下段:TC5。





TC4 Step2 sample dump (2021-12-07 07:00:00 -2021-12-07 21:40:20)



 $TC5\ Step2\ sample\ dump\ (2022-01-29\ 11:14:50\ -2022-01-30\ 00:15:00)$

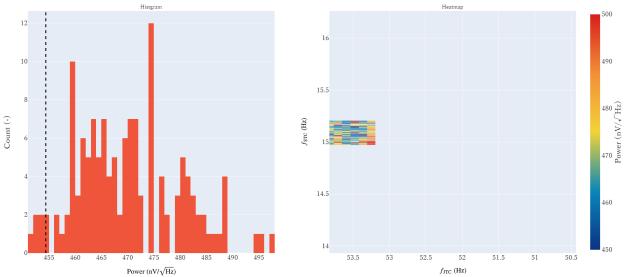


図 5.94. Step
2 の Sample dump 。上段:TC2A、中段:TC4、下段:TC5。

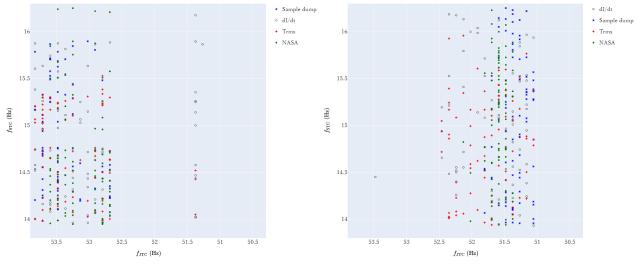


図 **5.95.** TC2A Step2 で抽出された 81 点

図 5.96. TC4 Step2 で抽出された 80 点

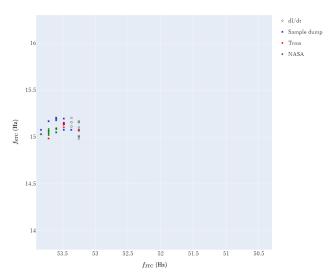
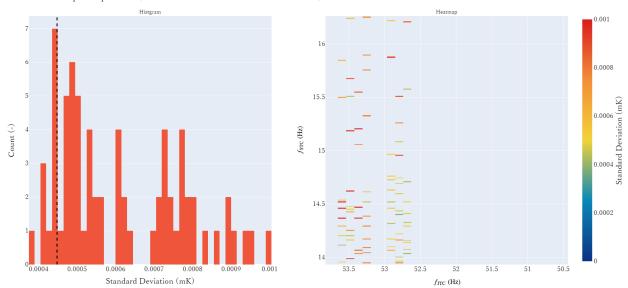


図 5.97. TC5 Step2 で抽出された 10 点

5.101 に、TC4 で抽出した点を図 5.102 に示す。また、NASA が sample dump を用いた解析で選定した点も同時に示す。

5.3.2.5 Step4

TC4 では 90 点で 50 mK ステージ温度データ、ADR のマグネット電流データ、4 s sample dump が取得された。\$D、表 D.9 に Step4 でデータを取得した点と順番を示す。横軸に JTC の駆動周波数、縦軸に STC の駆動周波数をとり、50 mK ステージ温度データの標準偏差を色で示したものを図 5.103(TC4) に、ADR のマグネット電流データからフィッティングして求めた $\frac{dI}{dt}(I:\text{ADR})$ の電流 (mA)、t:時間 (s))を色で示したものを図 5.104(TC4) に示す。 次に、取得した 4 s sample dump のスペクトルを 0.244 -500 Hz のパワーを積分しピクセル数で平均した値を比較した。その結果を図 5.105 に示す。 TC4 で抽出



 $TC2A\ step 3\ temperature\ (2021-07-28\ 13:17:00\ -2021-07-29\ 00:40:00)$

TC4 Step3 temperature (2021-12-09 01:40:00 -2021-12-09 13:00:00)

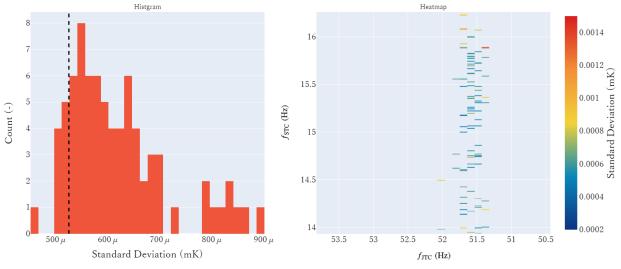


図 5.98. Step3 の検出器面の温度の標準偏差。上段: TC2A、下段: TC4。

した点を図 5.106 に示す。また、NASA が sample dump を用いた解析で抽出された点も同時に示す。

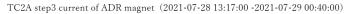
5.3.3 結果と考察

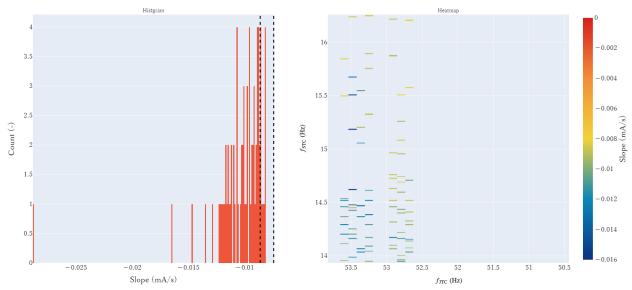
5.3.3.1 各ステップの結果

TC2A、TC4、TC5 の周波数スキャンの結果を表 5.17、5.18、5.19 に示す。

Step0

振動試験前に実施された TC2A と振動試験後に実施された TC4 では、検出器の温度が安定する冷凍機駆動周波数の組み合わせが違った。振動試験のような大きな振動が加えられたときに、デュワーのシールド間の配置や検出器をつるしているワイヤーのテンションが少しだけ変化するなど、共鳴周波数が変





 $TC4\ Step 3\ current\ of\ ADR\ magnet\ (2021-12-09\ 01:40:00\ -2021-12-09\ 13:00:00)$

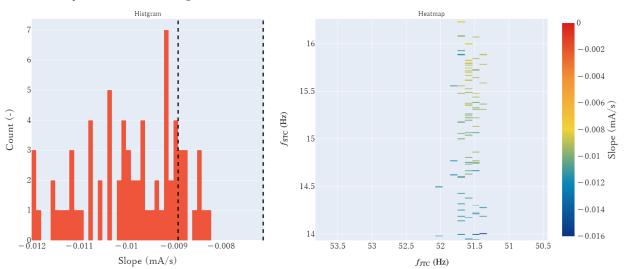
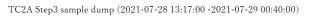
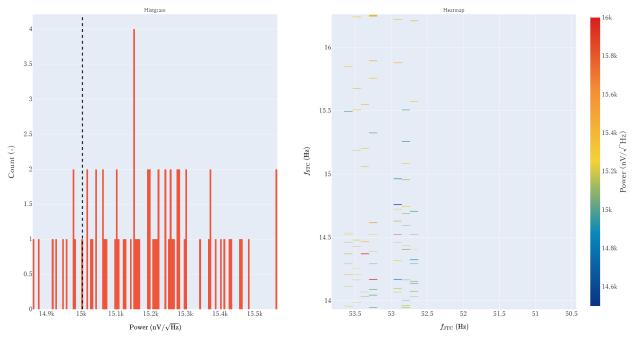


図 **5.99.** Step3 の ADR のマグネット電流の傾き(上段:TC2A、下段:TC4)。

表 5.17. TC2A の周波数スキャンの結果のまとめ。各ステップで抽出した点の数と抽出するデータの閾値を示す。

	Step0	Step1	Step2	Step3	
Selected of pairs			1054	83	10
$T_{rms}(nK)$			340	330	440
dI/dt (mA/s)	Min		-0.0017	-0.0092	-0.0086
ul/ut (IIIA/s)	Max		0.001	-0.0067	-0.0074
Sample dump $(\log 10(nV/\sqrt{Hz}))$	0 ~ 45 Hz integral			458	
Sample dump (log10(li V/V Hz))	0 ~ 500 Hz integral				15000





 $TC4\ Step 3\ sample\ dump\ (2021-12-09\ 01:40:00\ -2021-12-09\ 13:00:10)$

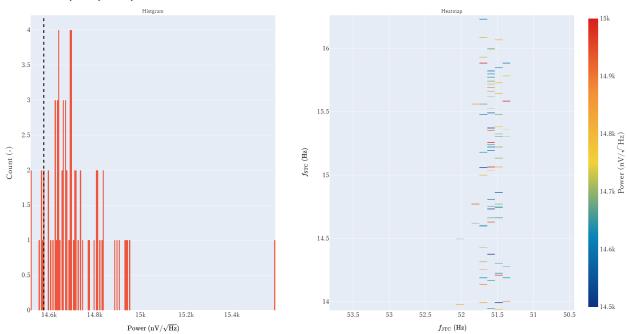


図 **5.100.** Step3 の Sample dump (上段:TC2A、下段:TC4)。

表 5.18. TC4 の周波数スキャンの結果のまとめ。

			Step1	Step2	Step3	Step4
Selected of pairs			1210	80	10	3
T _{rms} (nK)			350	400.0	520	470
dI/dt (mA/s)	Min		-0.0017	-0.0092	-0.0089	-0.0092
di/dt (IIIA/s)	Max		0.001	-0.0067	-0.0080	-0.0080
Comple down (lea10(nV/ / Ha))	0 ~ 45 Hz integral			458		
Sample dump $(\log 10(nV/\sqrt{Hz}))$	0 ~ 500 Hz integral				14750	14560

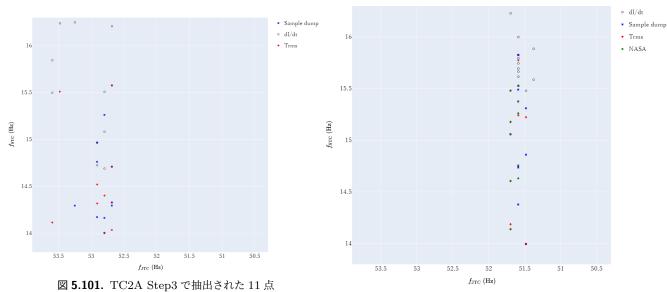


図 **5.102.** TC4 Step3 で抽出された 10 点

TC4 Step4 temperature (2021-12-11 10:40:00 -2021-12-11 22:30:00)

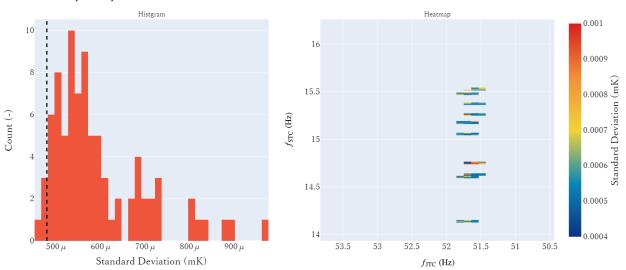


図 **5.103**. Step4 の検出器面の温度の標準偏差 (TC4)。

表 5.19. TC5 の周波数スキャンの結果のまとめ。

	Step0	Step1	Step2	
Selected of pairs			156	10
T _{rms} (nK)			581	563
dI/dt (mA/s)	Min		-0.0010	-0.0010
ui/ut (IIIA/s)	Max		-0.0006	-0.0006
Sample dump $(log 10(nV/\sqrt{Hz}))$	0 ~ 45 Hz integral			454



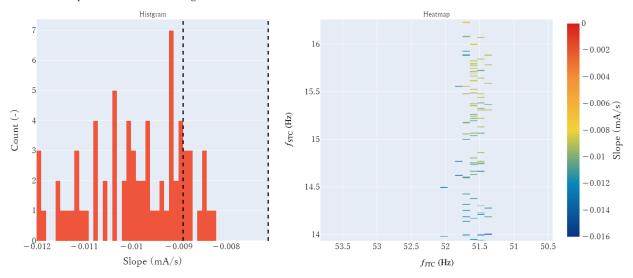
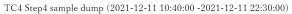
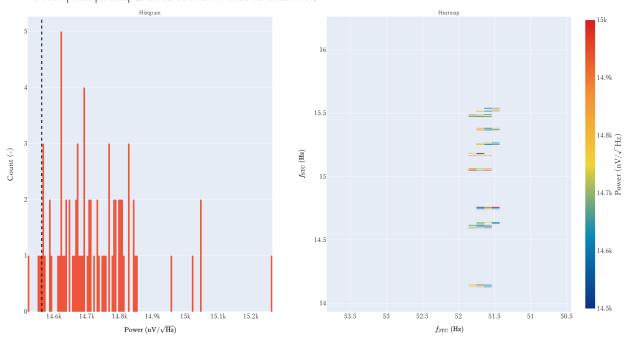


図 5.104. Step4 の ADR のマグネット電流の傾き (TC4)。





 \boxtimes **5.105.** Step4 $\mathcal O$ Sample dump (TC4).

化したためだと考えられる。Step0 では検出器面温度が大きく変動するものを除外するように、温度の標準偏差が小さいものを抽出した。その結果、Step0 で TC2A では 2847 点、TC4 では 4864 点、TC5 では 1536 点まで絞ることができた。

Step1

Step0 では大雑把に STC、JTC の駆動周波数の組み合わせを抽出していたが、Step1 ではより細かくスキャンし、より正確に抽出する。Step0 ほど検出器面温度が大きく変動することはないが、Step1 で

第 5 章 課題 185

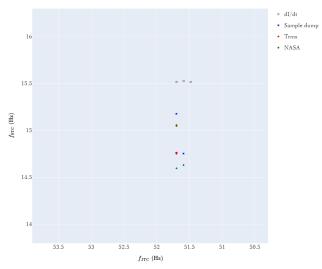


図 5.106. TC4 Step4 で抽出された 3 点

も温度の標準偏差が小さいものを抽出した。その結果、Step1 で TC2A では 1054 点、TC4 では 1210 点、TC5 では 156 点まで絞ることができた。NASA の解析と比較すると TC2A では dI/dt の結果がよく一致しているように見える。TC4 では JTC が 52Hz 以上ではあまり一致していなかったが、 JTC が 52Hz 未満ではよく一致しているように見える。TC5 では、 $T_{\rm rms}$ の結果と一致していた点が多かった。NASA が抽出した点は、TC2A、TC4 では dI/dt を、TC5 では $T_{\rm rms}$ を基準に抜き出されている。そのため、私が抽出した点が TC2A では dI/dt とよく一致しており、TC5 では $T_{\rm rms}$ がよく一致している。TC4 で JTC が 52 Hz 以上の点があまり一致していない理由はよくわかっていない。TC4 の Step2 では NASA の結果から調査する点が決定された。

Step2

Step2 から sample dump が取得されるため、以降の解析では sample dump が主になる。ノイズペクトルには冷凍機駆動周波数の組み合わせによってビートが発生する。そのため、Step2 ではビートが発生する組み合わせを除外するために、ノイズスペクトルを $0.488-45~\mathrm{Hz}$ で積分しそのパワーが小さくなる順に抽出した。図 $5.121~\mathrm{に非最適化時のノイズスペクトルを}$ 、図 $5.122~\mathrm{に最適化時のノイズスペクトルを}$ 、区 $5.122~\mathrm{に最適化時のノイズスペクトルを}$ 、の結果、Step2 で TC2A では $81~\mathrm{点}$ 、TC4 では $80~\mathrm{点}$ 、TC5 で $10~\mathrm{点}$ まで絞ることができた。TC2A、TC4 の sample dump の解析では JTC が $51-52\mathrm{Hz}$ の組が多く抽出されており、これはNASA の解析とほぼ同じである。TC5 の sample dump の解析では $10~\mathrm{点}$ 中 $3~\mathrm{点}$ だけ NASA の解析とつ致していた。

Step3

Step2 ではビートが発生する冷凍機駆動周波数の組み合わせを除外した。そのため、Step3 では冷凍機駆動周波数の高調波がデュワー内部の共鳴周波数と等しくならないようにした。共鳴を避けた場合、ノイズスペクトルのピークは低くなるはずなので、ノイズスペクトルを $0.244-500~\mathrm{Hz}$ で積分しそのパワーが小さくなる順に抽出した。その結果、Step3 で TC2A では 11 点、TC4 では 10 点まで絞ることが

第 5 章 課題 186

できた。sample dump の解析では JTC が \sim 51.5Hz の組みが多く抽出されており、これは NASA の解析とほぼ同じである。

Step4

Step4 でも再度ノイズスペクトルを $0.244-500~{\rm Hz}$ で積分しそのパワーが小さくなる順に抽出した。 sample dump と検出器面温度標準偏差の解析結果は同じような結果になっており、NASA の解析と比較しても似たような結果になっている。筆者の解析では JTC が $51.588~{\rm Hz}$ 、STC が $14.753~{\rm Hz}$ が最もよい冷凍機の組であり、NASA の解析では JTC が $51.588~{\rm Hz}$ 、STC が $14.631~{\rm Hz}$ が最もよい冷凍機の組となった。

解析結果より、Sample dump で抽出された組み合わせと $T_{\rm rms}$ で抽出されたものの分布が似ていることが分かった。しかし、dI/dt は外れた位置にいた。このことから $T_{\rm rms}$ が良い組み合わせのものは Sample dump の解析でもよい傾向にあり、分光性能が高い組み合わせが抽出できる。dI/dt の解析で抽出された組み合わせのものは ADR の電流の消費が緩やかになるため、ADR リサイクルの回数を減らすことができ、観測可能時間が延びる。Resolve は高エネルギー分解能を強みにしているおり、検出器の温度が安定しているほどこれはよくなるため、 $T_{\rm rms}$ と Sample dump の結果を重視した。

5.3.3.2 最適化中の加速度データ

周波数スキャン中にデュワーに異常がないかを加速度データで確認した。図 5.107-5.110 に TC2A の Step0-3 中の加速度スペクトルを時間の関数としてプロットしたものを示す。次に、図 5.111-5.115 に TC4 の Step0-4 中の加速度スペクトルを時間の関数としてプロットしたものを示す。 TC4 の Step1、

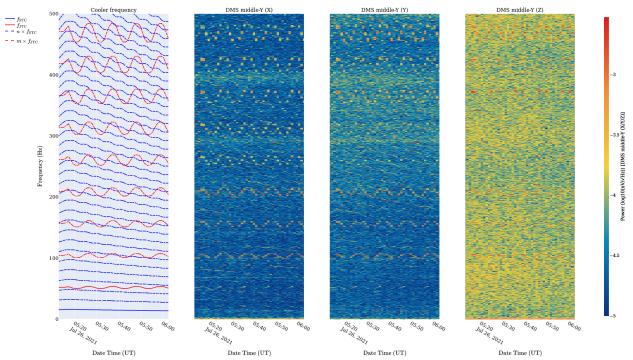


図 **5.107**. TC2A Step0 中の加速度スペクトル。左から、加速度スペクトルが取得されたときの冷凍機駆動周波数とその高調波、DWR middle -Y (X 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Y 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Z 軸) の加速度スペクトルである。

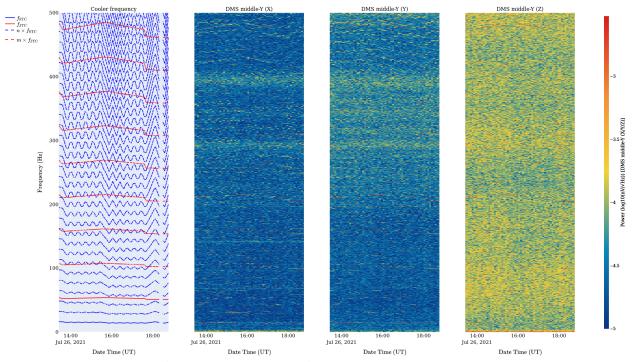


図 **5.108.** TC2A Step1 中の加速度スペクトル。左から、加速度スペクトルが取得されたときの冷凍機駆動周波数とその高調波、DWR middle -Y (X 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Y 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Z 軸) の加速度スペクトルである。

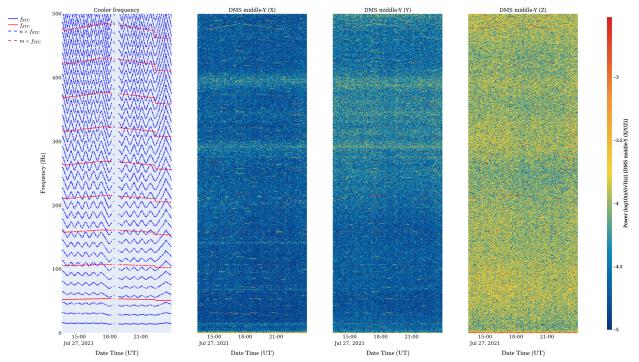


図 **5.109.** TC2A Step2 中の加速度スペクトル。左から、加速度スペクトルが取得されたときの冷凍機駆動周波数とその高調波、DWR middle -Y (X 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Y 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Z 軸) の加速度スペクトルである。

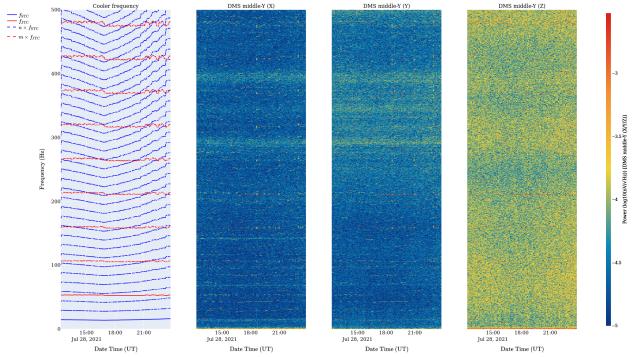


図 **5.110.** TC2A Step3 中の加速度スペクトル。左から、加速度スペクトルが取得されたときの冷凍機駆動周波数とその高調波、DWR middle -Y (X 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Y 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Z 軸) の加速度スペクトルである。

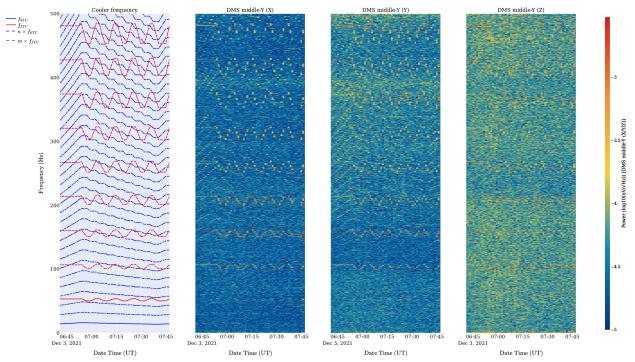


図 **5.111.** TC4 Step0 中の加速度スペクトル。左から、加速度スペクトルが取得されたときの冷凍機駆動周波数とその高調波、DWR middle -Y (X 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Y 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Z 軸) の加速度スペクトルである。

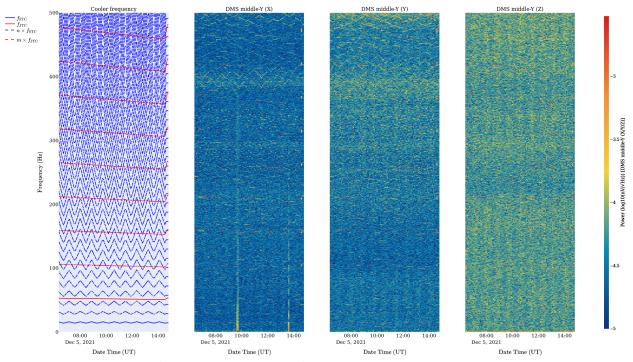


図 **5.112.** TC4 Step1 中の加速度スペクトル。左から、加速度スペクトルが取得されたときの冷凍機駆動周波数とその高調波、DWR middle -Y (X 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Y 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Z 軸) の加速度スペクトルである。

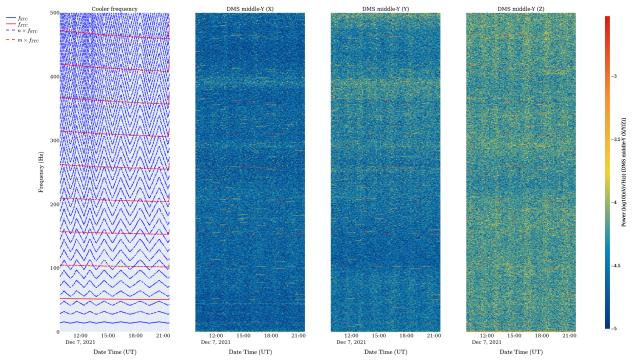


図 **5.113.** TC4 Step2 中の加速度スペクトル。左から、加速度スペクトルが取得されたときの冷凍機駆動周波数とその高調波、DWR middle -Y (X 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Y 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Z 軸) の加速度スペクトルである。

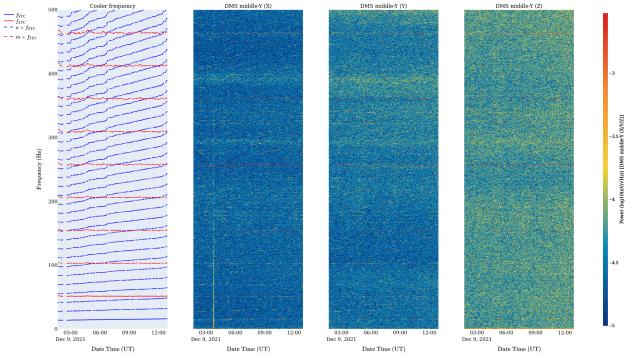


図 **5.114.** TC4 Step3 中の加速度スペクトル。左から、加速度スペクトルが取得されたときの冷凍機駆動周波数とその高調波、DWR middle -Y (X 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Y 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Z 軸) の加速度スペクトルである。

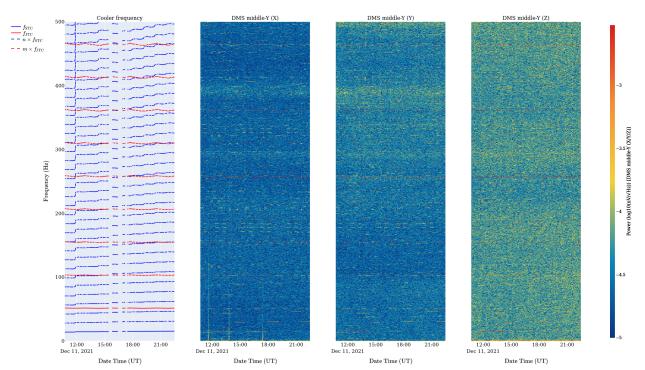


図 **5.115.** TC4 Step4 中の加速度スペクトル。左から、加速度スペクトルが取得されたときの冷凍機駆動周波数とその高調波、DWR middle -Y (X 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Y 軸) の加速度スペクトル、DWR middle -Y (Z 軸) の加速度スペクトルである。

Step3、Step4で特定の時刻に縦に強いピークが見られた。これは、このピークは全て低周波側が最も高くなっているので、加速度ピックアップとケーブル間の接触不良によるものだと考えられる。そのほかのピークは冷凍機駆動周波数のものであり、デュワーの応答自体に大きな異変は無かった。

5.3.3.3 エネルギー分解能の変化

TC2A で周波数スキャン前のマイクロカロリメータ (キャリブレーションピクセル) のエネルギー分解能を図 5.116 に、周波数スキャン後のものを図 5.117 に示す。波数スキャン前の冷凍機駆動周波数の組み合わせは、TC1、TC1A の run の結果から決定した組み合わせである。また、周波数スキャン後のものは TC2A の Step2 が終了した後のものである。

次に、TC4 で周波数スキャン前のマイクロカロリメータ (キャリブレーションピクセル) のエネルギー分解能を図 5.118 に、周波数スキャン後のものを図 5.119 に示す。周波数スキャン前の冷凍機駆動周波数の組み合わせは、TC2A の周波数スキャンの結果から決定した組み合わせである。また、周波数スキャン後のものは TC4 の Step4 が終了した後のものである。

各 TC の周波数スキャン前後のエネルギー分解能の値を以下にまとめる。TC2A も TC4 も前後で誤差の範囲で一致していた。そのため、Scan 前からそれなりに最適な組が選択されていたと考えられる。

• TC2A

- スキャン前 JTC 52.35 Hz、STC 15.71 Hz 分解能 4.041 ± 0.026 eV
- スキャン後 JTC 53.48 Hz、STC 14.45 Hz 分解能 4.116 ± 0.075 eV

• TC4

- スキャン前 JTC 53.48 Hz、STC 14.45 Hz 分解能 4.117±0.048 eV
- スキャン後 JTC 51.59 Hz、STC 14.63 Hz 分解能 4.060 ± 0.048 eV

5.3.3.4 非最適化時に見られた現象

検出器面温度の不安定化

冷凍機駆周波数の高調波が共鳴周波数に近い場合に見られる検出器面の温度変化を図 5.120 に示す。 Step0 での冷凍機駆動周波数非最適化時は検出器面の温度が上昇し、最適化時には温度が安定していた。 この現象は Step0, 1 の段階で確認でき、温度の標準偏差をもとに最適化時の冷凍機駆動周波数の組みを 抽出することで除去できた。

ビートの出現

冷凍機駆動周波数の高調波の組がデュワーの共鳴周波数に近い値となったときに、ノイズスペクトルにビートが出現する。非最適化時は 1-5 Hz に余分なパワーがあることが分かる。図 5.121 に非最適化時のノイズスペクトルを、図 5.122 に最適化時のノイズスペクトルを示す。この現象は主に Step2 の段階で確認でき、ノイズスペクトルの低周波側のパワーの和をもとに最適化時の冷凍機駆動周波数の組みを抽出することで除去できた。

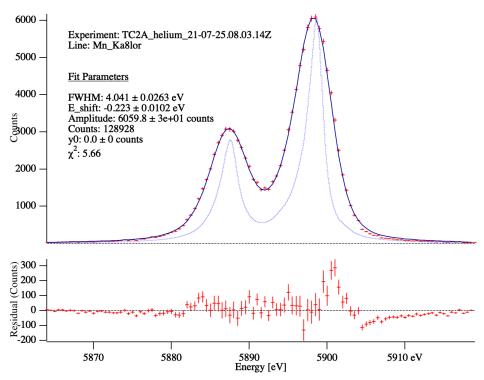


図 **5.116.** 2021/07/25 に測定されたマイクロカロリメータのエネルギー分解能。JTC が 52.35 Hz で STC が 15.71 Hz に測定された。図は NASA の F.S.Poter 氏によって作成された。

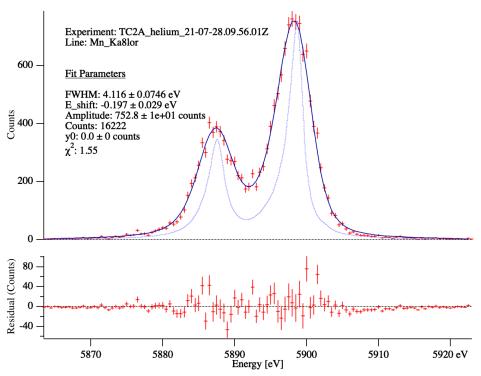


図 **5.117.** 2021/07/28 に測定されたマイクロカロリメータのエネルギー分解能。JTC が 53.48 Hz で STC が 14.45 Hz のときに測定された。図は NASA の F.S.Poter 氏によって作成された。

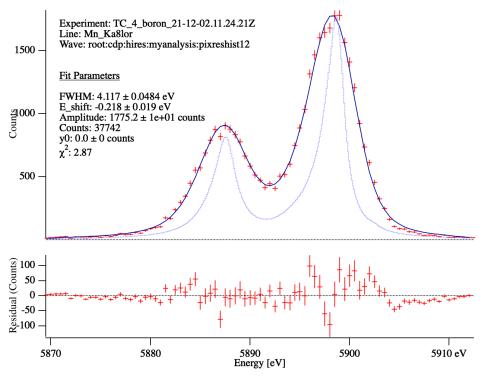


図 **5.118**. 2021/12/02 に測定されたマイクロカロリメータのエネルギー分解能。JTC が 52.35 Hz で STC が 15.71 Hz に測定された。図は NASA の F.S.Poter 氏によって作成された。

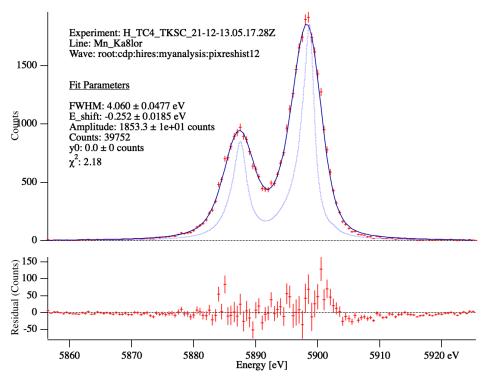


図 **5.119.** 2021/12/13 に測定されたマイクロカロリメータのエネルギー分解能。JTC が 53.48 Hz で STC が 14.45 Hz のときに測定された。図は NASA の F.S.Poter 氏によって作成された。

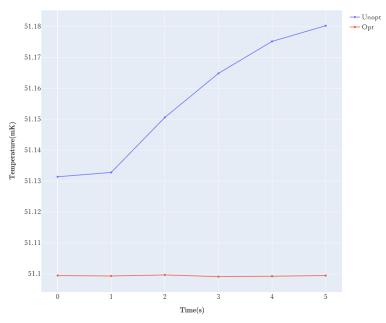


図 5.120. Step0 での冷凍機駆動周波数最適化。非最適化時の温度変化を青線で、最適化時の温度変化を赤線で示している。

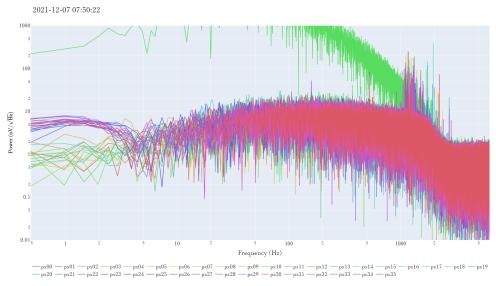


図 5.121. Step2 での冷凍機駆動周波数非最適化時のノイズスペクトル。非最適化時に低周波帯にビートが出現している。

ラインノイズの増大

冷凍機駆動周波数の高調波の一方がデュワーの共鳴周波数に近い値となったとき、ノイズスペクトルでは冷凍機の高調波と等しい周波数のラインノイズが増大する。図 5.123 に非最適化時のノイズスペクトルを、図 5.124 に最適化時のノイズスペクトルを示す。これらの図を比較すると最適化時には、 ~ 150 Hz のラインノイズが低くなっており、 ~ 299 Hz のラインノイズはフロアノイズと同じレベルになった。この現象は主に Step3 の段階で確認でき、ノイズスペクトルの 0-500 Hz のパワーの和をもとに最適化時の冷凍機駆動周波数の組みを抽出することで除去できた。

第 5 章 課題 **195**

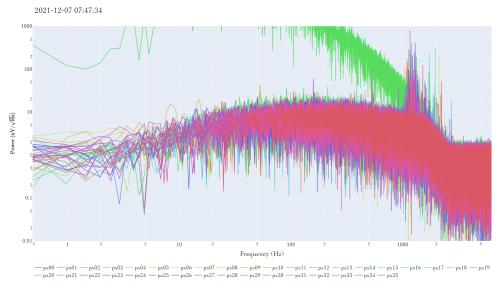


図 5.122. Step2 での冷凍機駆動周波数最適化時のノイズスペクトル。最適化時に低周波帯にビートが出現しない。

これらの現象はいずれも軌道上データだけで診断可能である。

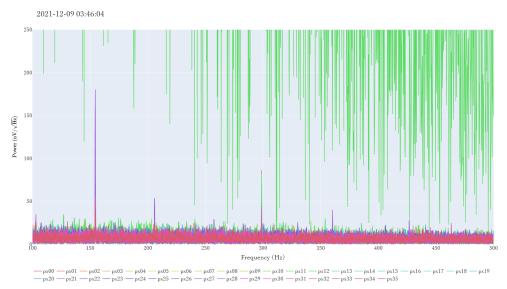


図 **5.123.** Step3 での冷凍機駆動周波数非最適化時のノイズスペクトル。非最適化の例として 150 Hz のピークが高くなる、299 Hz にピークが出現するといった現象が確認できる。

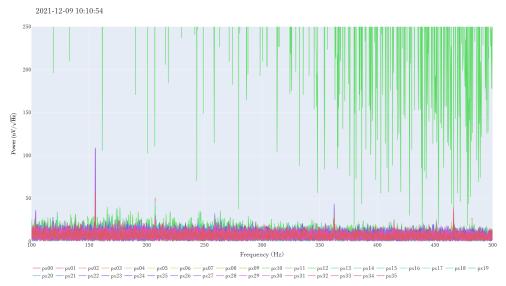


図 5.124. Step3 での冷凍機駆動周波数最適化時のノイズスペクトル。最適化時に 299 Hz のピークが消えている。

第6章

結論

本研究の目的は、Resolve に搭載する X 線マイクロカロリメータの分光性能を最大化するために微小擾乱干渉の理解と低減することであった。微小擾乱源は Resolve が搭載している機械式冷凍機 (2 段スターリング冷凍機=STC とジュールトムソン冷凍機=JTC) と Resolve 以外の機器である。

機械式冷凍機由来の微小擾乱の評価には、デュワーの振動を加速度として測定するシステムを構築した ($\S 3.2$)。そして、STC と JTC の駆動周波数を変化させ、様々な組で加速度データとマイクロカロリメータのノイズを同時に取得した。このデータセットを取得したときの場所と取得日時をまとめたものを表 6.1 に示す。

Place	Period	Time of 50 mK (hour)
新居浜	2019/12/11 - 2019/12/16	135
筑波	2021/05/11 - 2021/05/12	44
筑波	2021/07/26 - 2021/07/28	69
筑波	2021/09/11 - 2021/09/13	60
筑波	2021/12/03 - 2021/12/12	222

表 **6.1.** データ取得した場所と日時。加速度データは期間中常に取得されている。Time of 50 mK は加速データを取得中に検出器の温度が \sim 50 mK だった時間を示している。

Resolve 以外の機器由来の微小擾乱の評価には、デュワーの振動を測定する加速度としてシステムに加えて、外部から振動を加えるシステムを構築した ($\S 3.3$)。そして、加振周波数を変化させ、各加振周波数のときに加速度データとマイクロカロリメータのノイズを同時に取得した。このデータセットを取得したときの場所と取得日時をまとめたものを表 6.2 に示す。 $\S 2.2$ で設定した課題に対応させて、本研究の結果をまとめる。

1. 機械式冷凍機由来の微小擾乱干渉

地上試験で取得された加速度データとマイクロカロリメータのノイズデータから、機械式冷凍機由来 の微小擾乱がマイクロカロリメータに与える影響を評価した。

加速度データとマイクロカロリメータのノイズデータに出現するピークの分類を行った。加速度データのピークは一部原因不明のものがあったが、マイクロカロリメータへの影響は確認できなかった。マイクロカロリメータのピークはほぼすべて分類ができ、AC電源によるものと微小擾乱が読み出し回路に

第 6 章 結論 198

Place	Date	Time (UT)
筑波	2021/12/03	09:29 - 09:58
筑波	2021/12/03	11:11 - 11:23
筑波	2021/12/04	02:31 - 03:11
筑波	2021/12/04	07:57 - 08:51
筑波	2021/12/04	09:16 - 09:53
筑波	2021/12/05	01:51 - 04:42
筑波	2021/12/06	04:11 - 06:58
筑波	2021/12/08	01:36 - 03:44
筑波	2021/12/09	03:45 - 04:45
筑波	2021/12/10	07:52 - 08:17
筑波	2021/12/11	06:56 - 10:24

表 6.2. データ取得した場所と日時。Time は加振機で振動を発生させた時間である。

侵入してノイズになったものに分けられた。マイクロカロリメータのピークの内、ジュールトムソン冷凍機の 4、7 倍波が発生させるピークは、2 段スターリング冷凍機のそれぞれ 14, 24 もしくは 25 倍波と干渉し低周波のビートノイズ (図 5.27) を生成することが分かった。更に、バイアス試験から、これらが熱化していることが分かった。すなわち、デュワー外部で発生した高周波 ($\leq 200~{\rm Hz}$) の微小擾乱が内部の極低温部に侵入し、その何らかの固有振動数と共鳴して非線形増幅を生じて低周波 ($\leq 20~{\rm Hz}$) のビートとしてエネルギー再分配され、それが熱化して、カロリメータの分解能を大きく損なう。このような描像の現象を本研究で発見し、解明した。この低周波ノイズは冷凍機駆動周波数の組み合わせが特定の組の場合にのみ出現していることが判明し、その出現条件をまとめた。そして、出現条件は 2 つの冷凍機の高調波が同時に極低温部の共鳴周波数にあたっていることが条件であった。これにより、分光性能劣化をもたらす低周波のノイズの回避方法が分かった。

2. その他の機器由来の微小擾乱干渉

加振試験系でその他の機器由来の微小擾乱から期待される最悪値を生成し、加速度データとマイクロカロリメータのノイズデータから影響を調べた。微小擾乱はリアクションホイールと慣性基準装置が発生させる振動をもとに、ハーネスと XBOX、デュワーベースプレートに注入された。

加振したときにマイクロカロリメータの温度安定性が Resolve の要求値を満たしているかを調べた。そして、要求値を満たすことができなくなったときの加振をまとめた (表 5.14)。次に加振機で発生させる振動に線形性を調べた。ハーネス加振では 1, 0.1、0.01 N を、デュワーベースプレートでは 1、0.66 N を加振し、加速度ピックアップで取得された各データを比較した結果、ハーネス加振では線形性が確認できた (図 5.78) がデュワーベースプレートでは一部でしか確認できなかった (図 5.79)。最後に、発生させた微小擾乱がマイクロカロリメータに与える影響を評価した。そして、ハーネスに 200 Hz、デュワーベースプレートに 200.5, 380.4 Hz の加振をしたときに低周波ノイズが出現 (図 5.80) した。この低周波

第 6 章 結論 199

ノイズが出現する周波数は、機械式冷凍機由来の微小擾乱で発生したものと特徴が一致していたため、出 現メカニズムは機械式冷凍機由来のものと同じであると考えられる。

3. 冷凍機駆動周波数の最適化

TC2AとTC4で行った周波数スキャンから、機械式冷凍機由来の微小擾乱の影響が最初となる機械式冷凍機の組み合わせを見つける方法を確立した。方法はStep0-5まであり、全てのStepを行うことで、機械式冷凍機の組み合わせごとにマイクロカロリメータにどのような影響が出るかを網羅的に調査することができ、迅速に最適化を行うことを可能にした。本修論ではStep0-4まで扱った。

Step0,1 ではマイクロカロリメータの温度安定性 (図 5.87) と ADR マグネット電流の傾き (図 5.88) から冷凍機の組み合わせを評価した。そして Step2 以降ではマイクロカロリメータのノイズデータも加えて評価した (図 5.94)。同時に、デュワーの加速度データも確認し異常がなかった個ともわかった。次に、この方法で決定された冷凍機駆動周波数の組みでマイクロカロリメータの分光性能が向上するか確認した。TC2A では Step2 までの結果しか反映できていなかったため、分光性能が低下した (4.116±0.075 eV)。しかし、Step4 まで行った TC4 ではエネルギー分解能が向上していた (4.060±0.048 eV)。最後に、冷凍機駆動周波数が最適化されていない場合の現象を、マイクロカロリメータの温度安定性 (図 5.120)、ノイズスペクトルに出現するピークの有無 (図 5.121,5.124) の観点からまとめた。

以上のように、極低温検出器に対する微小擾乱干渉の影響は、単純ではないことが分かった。感受側で問題となるのは、JTC, STC の駆動周波数の基本波・高調波ではなく、それらが低温段の固有振動数に近づいた時、非線形応答によって両者の差分周波数にエネルギーが再分配され、低周波ノイズとしてセンサーの分光性能を劣化される。また、妨害側でも、例えばリアクション・ホイールは、回転数の基本波だけではなく、静止時の固有振動数とのカップリングによって生じるロッキング周波数がより大きな問題になり得る。このように、微小擾乱の非自明な伝達を十分考慮する必要があると明らかにしたのが、本論文の第一の成果である。現代・近未来の天文観測衛星の標準装備となりつつある極低温検出器の設計と開発への意義は大きいと考える。

本論文を上梓する 2022 年 3 月末に、Resolve は衛星システムに手渡される。先代の SXS 装置の同時期 (2015 年 3 月末) と比較して、微小擾乱に対する装置の応答は遥かによく理解できている。 SXS 装置で大問題となった mid-band ノイズの再来は常時監視でも捕捉されず、これから迎える衛星上での微小擾乱環境に対する応答も管理できている。また、機械式冷凍機の駆動周波数最適化を実施し、その最適値で打ち上げ後も運用を行う予定である。打ち上げに伴い、再び、干渉を増幅する固有振動数の変化があるかもしれない。軌道上では加速度データは測定されない。しかし、そのような状況下も、周波数最適化が外れた場合の現象を把握しており診断は可能である。また、周波数最適化の手法は確立した。微小擾乱干渉は、Resolve 装置の最大のリスクの1つであるが、高いレベルの準備を持って衛星システム引き渡しまで持って行けたのが本論文の第二の成果である。

付録 A

データの処理方法

本研究では冷凍機によって生じる加速度と、カロリメータに生じるノイズとの相関を調べる。そのため、加速度とカロリメータのノイズの時空間データをフーリエ変換によって周波数空間に変換し、どの周波数がどのように影響を及ぼしているかを調べる。ここでは「離散数理 テキスト」[40],「サンプリング定理と離散フーリエ変換」 [41] を参照しながら、離散フーリエ変換の基本をまとめ、加速度データの適切なサンプリング周波数とレコード長を導出する。

A.1 離散フーリエ解析

A.1.1 直交関数系とフーリエ級数

ある関数列 $\phi_0(t), \phi_1(t), \phi_2(t), \cdots$ が存在し、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi_i(t) \cdot \phi_j(t) dt = 0 \qquad (i \neq j)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi_i(t) \cdot \phi_j(t) dt \neq 0 \qquad (i = j)$$

となる関数列を直交関数系と呼ぶ。さらに、i=jのときの積分値が1になる場合を正規直交関数系と呼ぶ。更に、任意の関数が次のように線形結合で表すことができるなら、正規直交完備な関数系である。

$$f(t) = \sum_{i} a_i \phi_i(t)$$

フーリエ変換は三角関数を基底とするものである。任意の関数として h(t)=h(t+T) のような周期 T をもつ関数を考える。この場合、 $f_s=\frac{1}{T}$ とおくと、 f_s より小さい周波数について考える必要はない。関数系として以下の三角関数を考える。

$$e^{i2\pi f_s nt} = \cos(2\pi f_s nt) + i\sin(2\pi f_s nt)$$
 $(n = 0, 1, 2, \cdots)$

そうすると、h(t) は次のように表される。

$$h(t) = \sum_{n = -\infty}^{\infty} c(n)e^{i2\pi f_s nt}$$
(A.1)

$$c(n) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} h(t) \cdot e^{-i2\pi f_s nt} dt$$
 (A.2)

また、c(n) をオイラーの公式から $\sin c \cos c$ を用いて表すと、

$$c(n) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} h(t) \left\{ \cos(2\pi f_s nt) - i \sin(2\pi f_s nt) \right\} dt$$
 (A.3)

$$=\frac{a(n)-ib(n)}{2}\tag{A.4}$$

となる。ここで、

$$a(n) = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} h(t) \cos(2\pi f_s nt) dt \qquad b(n) = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} h(t) \sin(2\pi f_s nt) dt$$

である。すると、h(t) は次のようになる。

$$h(t) = \sum_{n = -\infty}^{\infty} c(n)e^{-i2\pi f_s nt}$$
$$= \sum_{n = -\infty}^{\infty} \frac{a(n) - ib(n)}{2}e^{-i2\pi f_s nt}$$

ここで、 $c(-n) = \frac{a(n)+ib(n)}{2}$ より

$$h(t) = \frac{a(0)}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{a(n) - ib(n)}{2} e^{i2\pi f_s nt} + \frac{a(n) + ib(n)}{2} e^{-i2\pi f_s nt} \right\}$$

$$= \frac{a(0)}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a(n) \cos(2\pi f_s nt) + b(n) \sin(2\pi f_s nt) \right]$$
(A.5)

式 (A.5) がフーリエ級数展開である。

A.1.2 フーリエ変換

A.1.1 節の議論では、h(t) が周期 T を持つとしていたが、実際は周期関数でない場合もある。このような場合は $T\to\infty$ として扱う。そうした場合、 $f_s=1/T\to df$ に変わり、 $nf_s=f$ と連続になる。そのためフーリエ級数展開は次式のように書き直すことができる。

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \right\} e^{i2\pi f t} df$$
 (A.6)

この式を

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i2\pi ft}dt$$
 (A.7)

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)e^{i2\pi ft}df$$
 (A.8)

のようにおく。式 (A.7) がフーリエ変換、式 (A.8) が逆フーリエ変換である。

A.1.3 離散フーリエ変換

実際に何かの観測値を取得する場合、連続に取得することは不可能であり、ある間隔でデータを離散的に取得することになる (図 A.1)。

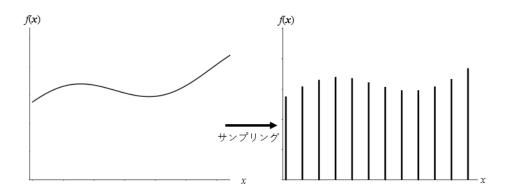


図 A.1. 連続関数をある時間間隔でサンプリング

フーリエ変換は積分で表示されるが、取得したデータは飛び飛びに値が出ているので積分ができない。 そこで区分求積法を用いて積分を行う。図 A.2 のような関数のフーリエ変換を区分求積法を用いて書き 直していく。

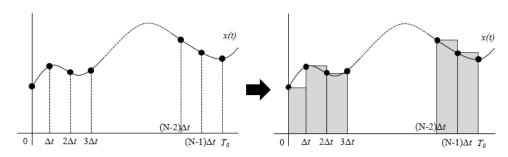


図 A.2. 区分求積法。[40] の図を引用し一部改変

式 (A.7) から x(t) のフーリエ変換 X(f) は

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi f t} dt$$

である。今、t は $0\sim T_0$ の間なので、上式の積分範囲は $0\sim T_0$ となる。よって、この積分の近似値は

$$X(f) \simeq x(0)\phi(0)\Delta t + x(\Delta t)\phi(\Delta t)\Delta t + x(2\Delta t)\phi(2\Delta t)\Delta t + \cdots + x((N-1)\Delta t)\phi((N-1)\Delta t)\Delta t$$

となる。ここで、 $\phi(t)=e^{-i2\pi ft}$ とした。 Δt は区間 $[0,T_0]$ を N 等分したものなので、

$$\Delta t = \frac{T_0 - 0}{N} = \frac{T_0}{N} \tag{A.9}$$

と書ける。この Δt を用いて X(f) を書き直すと

$$X(f) \simeq \frac{T_0}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t)\phi(n\Delta t)$$
(A.10)

となる。式 (A.10) が離散フーリエ変換である。

A.2 サンプリング

A.2.1 離散フーリエ変換の周波数範囲

取得するデータが離散的な波の場合を考える。例として波数2の波の場合を図A.3に示す。

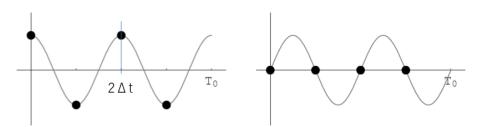


図 A.3. 波数 2 の離散的な波。[40] の図を引用し一部改変

この波に含まれる波の最大周波数 f_{\max} は

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2\Delta t} \tag{A.11}$$

である。さらに、離散的な波の基準となる周波数 Δf (周波数分解能) を

$$\Delta f = \frac{1}{T_0} \tag{A.12}$$

とおき、式 (A.9)、(A.12) を式 (A.11) に代入すると

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2\Delta t}$$

$$= \frac{N}{2}\Delta f \tag{A.13}$$

の関係式が得られる。以上より、離散的な波の特徴を捉えるには、周波数

$$0, \pm \Delta f, \pm 2\Delta f, \cdots, \pm \frac{N}{2}\Delta f \tag{A.14}$$

について考えれば良い。ここで、周波数 $f_s=2f_{\max}$ をサンプリング周波数、 f_{\max} をナイキスト周波数と言う。

以上の考えを離散フーリエ変換に当てはめていく。調べる必要のある周波数 $k\Delta f(k=\pm 0,\pm 1,\pm 2,\cdots,N/2)$ の近似されたフーリエ変換 $X(k\Delta f)$ は、

$$\begin{split} X(k\Delta f) &= \frac{T_0}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) \phi(n\Delta t) \\ &= \frac{T_0}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-i2\pi(k\Delta f)(n\Delta t)} \end{split}$$

となる。式 (A.9) と式 (A.12) から関係式

$$\Delta f \cdot \Delta t = \frac{1}{N}$$

が成立し、この式を用いて $X(k\Delta f)$ を書き直すと、

$$X(k\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t)e^{-i\frac{2\pi nk}{N}}$$

となる。ここで

$$W_N = e^{-i\frac{2\pi}{N}}$$

と置くと、点

$$W_N^0, W_N^1, W_N^2, \cdots, W_N^{N-1}$$

は図 A.4 のように単位円を N 等分した円周上の点となり、関係式

$$W_N^N = 1$$

を満たす。さらに、関係式

$$W_N^{N-m} = W_N^N \cdot W_N^{-m} = W_N^{-m}$$

が成立するので、

$$W_N^{N-1} = W_N^1, W_N^{N-2} = W_N^2, W_N^{N-3} = W_N^3, \cdots$$

となる。

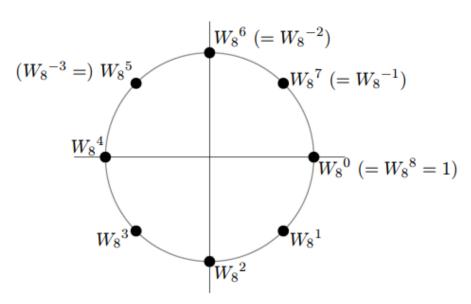


図 **A.4.** N 等分された単位円周上の点(N=8 の場合)[40]

よって、離散フーリエ変換は

$$X(k\Delta f) = \frac{T_0}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) W_N^{nk} \qquad (k = 0, 1, 2 \dots, N-1)$$

と書き直すことができる。

A.2.2 サンプリングとサンプリング定理

図 A.1 のようにサンプリングされた離散的な関数を $f_T(x)$ とすると以下のように書くことができる。

$$f_T(x) = f(x)comb_T(x)$$
(A.15)

ここで、 $comb_T(x)$ は

$$comb_T(x) = \sum_{n = -\infty}^{\infty} \delta(x - nT)$$
(A.16)

で表される、デルタ関数が周期Tの間隔で無限に並んだくし形関数と呼ばれるものである(図 A.5)。

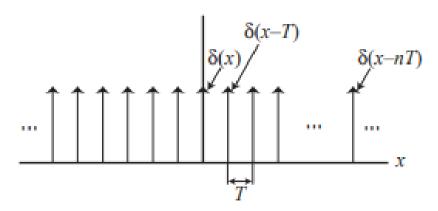


図 A.5. くし形関数 [41]

また、くし形関数のフーリエ変換は

$$FT[comb_T(x)](\nu) = \frac{1}{T}comb_{1/T}(\nu)$$
(A.17)

である [41]。ここで、 $\mathrm{FT}[\mathrm{comb}_T(x)]$ はくし形関数のフーリエ変換を表す。したがって、 $f_T(x)$ のフーリエ変換は

$$FT[f_T(x)](\nu) = \frac{1}{T} \{FT[f(x)](\nu) * comb_{1/T}(\nu)\}$$
 (A.18)

となる。ここで、*記号はコンボリューション(畳み込み積分)の演算で

$$f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y)g(t-y)dy$$

と定義される。また、デルタ関数と任意の関数のコンボリューションは

$$f(t) * \delta(t) = \int_{\infty}^{\infty} f(y)\delta(t - y)dy$$
 (A.19)

となる。式 (A.19) の右辺では y が $-\infty$ から ∞ まで動くが、t=y のとき以外は $\delta(t-y)=0$ であるため、 $f(y)\delta(t-y)$ の積分への寄与は 0 である。よって、

$$f(t) * \delta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y)\delta(t - y)df$$
(A.20)

$$= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t-t)dy \tag{A.21}$$

$$= f(t) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(0) dy \tag{A.22}$$

$$= f(t) \tag{A.23}$$

となり、任意の関数とデルタ関数のコンボリューションは、その任意の関数になる。

くし形関数はデルタ関数が一定間隔で並んだものなので、任意の関数とくし形関数とのコンボリューションは、任意の関数全体が一定間隔で並んだものとなる。したがって、式 (A.18) は、元の関数 f(x) を 周期 T でサンプリングした $f_T(x)$ をフーリエ変換すると、元の関数 f(x) をフーリエ変換した FTf(x) が周期 1/T で無限に並んだものになることを意味している (図 A.6)。ここで ν_c はカットオフ周波数とよばれ、元の関数 f(x) がもつ最大の周波数を意味する。

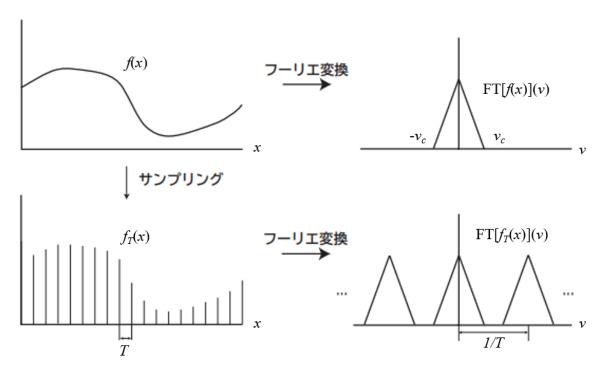
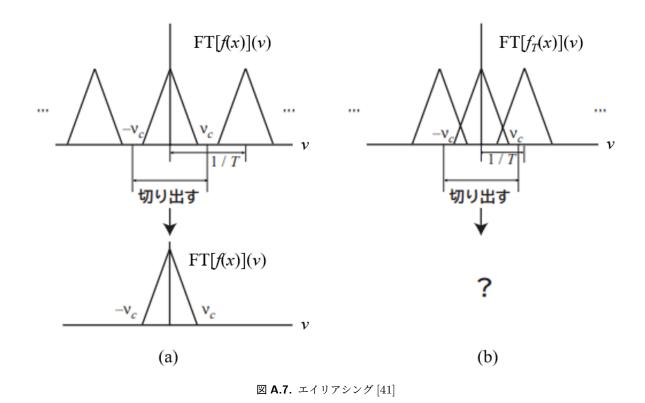


図 A.6. サンプリングとフーリエ変換 [41]

図 A.7(a) のように、周波数空間でくし形関数の間隔が十分広い場合は、隣りあう $\mathrm{FT}[f(x)]$ 同士は重ならず、周波数空間で幅 1/T の部分を取り出すと、元の関数のフーリエ変換 $\mathrm{FT}[f(x)]$ が取り出せる。これに対して、図 A.7(b) のように周波数空間でくし形関数の間隔が狭い場合、隣りあう $\mathrm{FT}[f(x)]$ 同士が重なってしまい、周波数空間で幅 1/T の部分を取り出しても元の関数のフーリエ変換を取り出すことができない。この現象をエイリアシングという。

元の $\operatorname{FT}[f(x)]$ は $-\nu_c$ から ν_c の範囲に存在するので、図 $\operatorname{A.7(a)}$ のように隣りあう $\operatorname{FT}[f(x)]$ 同士が重ならないようにするには、間隔 1/T が $2\nu_c$ 以上であればよい。すなわち、元の関数の持つ最大の周波数の 2 倍 より細かくサンプリングすれば、サンプリングしたものから元の関数を再現できる。これをサンプリング定理と呼ぶ。



A.2.3 サンプリング周波数とレコード長の決定

これまでの議論をふまえて、本研究で使用するサンプリング周波数とレコード長を決定する。

• サンプリング周波数

ある一定周波数の振動が物体に侵入したとき、振動が伝達する際に波形が歪むことによって、高調波が発生する。本研究でも冷凍機の振動の高調波が発生するため、それを考慮してサンプリング周波数を決定する必要がある。駆動周波数が大きい ${\rm JTC}(\sim 50~{\rm Hz})$ が駆動したときの高調波は、 $10~{\rm Hz}$ が $\sim 500~{\rm Hz}$ 、 $\sim 500~{\rm Hz}$ ($\sim 500~{\rm Hz}$) が駆動したときの高調波は、 $\sim 500~{\rm Hz}$ ($\sim 500~{\rm Hz}$) が駆動したときの高調波は、 $\sim 500~{\rm Hz}$ ($\sim 500~{\rm Hz}$) が返去とさる。そのため、エイリアシングを発生させないためには、最低でも数 $\sim 1000~{\rm Hz}$ のサンプリング周波数が必要となる。本研究では、サンプリング周波数を $\sim 10000~{\rm Hz}$ に設定し、 $\sim 5000~{\rm Hz}$ ($\sim 1000~{\rm Hz}$) までエイリアシングの影響を受けないようにした。また、マイクロカロリメータのサンプリング周波数 $\sim 12.5~{\rm kHz}$ ともほぼ合っているので同じ周波数帯をカバーできる。

• レコード長

本研究では冷凍機の駆動周波数の伝達を確認するため、冷凍機の駆動周波数を変更したときのスペクトルの変化を測定する必要がある。本研究で使用した冷凍機の駆動周波数は、JTC が

 $50.43\sim53.83~Hz$ を 0.1~Hz 間隔 (32~Q)階)で設定でき、STC が $13.93\sim16..26$ Hz を 0.01~Hz 間隔 (256~Q)階)で設定できる。STC には VIS が設置されているため影響が小さいと考えられるが、JTC は VIS が設置されていないため影響が大きいと考えられる。そのため、JTC の駆動周波数の伝達を確認するためには、周波数分解能が 0.1~Hz よりも大きい必要がある。そのため、本研究ではレコード長を 32~s (周波数分解能:0.03125~Hz) とした。これにより、STC の最小分解能の 1/3、JTC の最小分解能の 10~G0周波数分解能を確保できる。

A.3 パワースペクトル密度 (PSD)

パワースペクトル密度(Power Spectral Density)は、フーリエ変換後のパワースペクトル(振幅スペクトルの 2 乗)が周波数分解能に依存しないように、パワースペクトルを単位周波数当たり、もしくはその平方根で表したものである。また、PSD には負と正の周波数を使う両側 PSD と、正の周波数のみを使用しパワーを 2 倍にした片側 PSD がある。本研究では片側 PSD を採用し、単位は、加速度データでは G/\sqrt{HZ} 、カロリメータのデータは nV/\sqrt{Hz} を用いる。

A.4 窓関数

フーリエ変換では関数 f(x) が周期関数であることが前提となっている。しかし、実際の観測データは周期関数でない場合が多く、そのときは $f(t) \neq f(t+T)$ となる。そのため、f(T) で不連続になるため、スペクトルにノイズが発生する。それを回避するために、窓関数がよく用いられる。窓関数とは関数の両端が 0、もしくはとても小さな値となる関数であり、この窓関数を観測データにかけ合わせることでf(T) での不連続を回避できるようになる (図 A.8)。窓関数には様々な種類があり、解析でよく使われる窓関数としては、ハニング窓、ハミング窓、ブラックマン窓がある (図 A.9)。

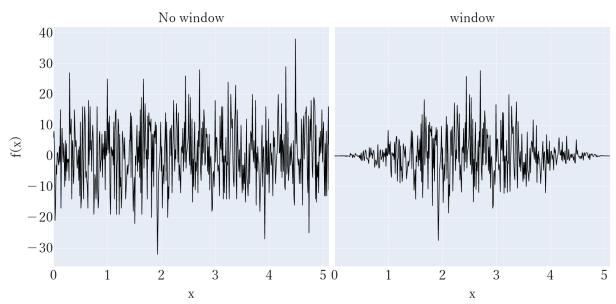


図 A.8. (左) 窓関数をかける前の関数と (右) 窓関数をかけた後の関数

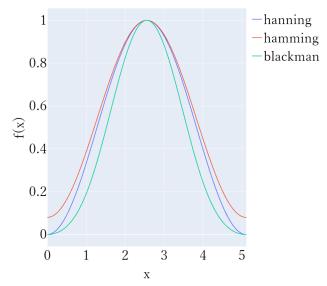


図 A.9. (青線) ハニング窓、(赤線) ハミング窓、(緑線) ブラックマン窓

窓関数を使用した場合、フーリエ変換後の振幅が本来の振幅より小さくなる。そのため、フーリエ変換後の振幅スペクトル $F_A(f)$ 、パワースペクトル $F_P(f)$ には以下の補正をする必要がある。

$$F_A'(f) = c_A F_A(f) \tag{A.24}$$

$$F_P'(f) = c_P F_P(f) \tag{A.25}$$

ここで、

$$c_A = \frac{1}{\int_0^T w(t)dt}$$
$$c_P = \frac{1}{\sqrt{\int_0^T w(t)dt}}$$

であり、 $F'_A(f)$ 、 $F'_P(f)$ は補正後のスペクトル、w(t) は使用した窓関数である。前者は振幅を保存する (amplitude conservation)、後者は電力を保存する (power conservation) 補正である。本研究はハニング窓を用い、power conservation をしたスペクトルを用いる。

付録 B

全 run の取得データ

表 B.1 に各 run のまとめを示す。以下に各 run で取得された HK データ、加速度データ、マイクロカロリメータのノイズデータから作成した図を示す。作成方法は $\S5$ 章に記載されている。

表 **B.1**. 各 run のまとめ

				Noise data								
тс	run	Date	Time (UT)	Sacn strategy		nr_ns	1k, 8k ns	2s Sample rec	4s Sample rec	WFRB (5s)	WFRB (32s)	DR
1	1	2019/12/11	03:00:00 - 07:00:00	JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	2	2019/12/12	09:15:00 - 09:50:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	3	2019/12/13	08:16:00 - 11:11:00	STC/JTC freq scan	X	X	X					X
1	4	2019/12/14	06:41:00 - 08:15:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	5	2019/12/15	02:45:00 - 04:10:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	6	2019/12/15	09:00:00 - 10:00:00	JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	7	2019/12/16	01:00:00 - 02:10:00	JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1	8	2019/12/16	02:20:00 - 07:15:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X	X		X
1A	1	2021/5/11	06:45:00 - 08:15:00	JTC freq scan	X							
1A	2	2021/5/11	10:15:00 - 10:55:00	STC/JTC freq scan	X							
1A	3	2021/5/11	11:40:00 - 16:15:00	JTC freq scan	X	X	X		X		X	
1A	4	2021/5/11	16:55:00 - 20:55:00	STC freq scan	X	X	X		X		X	
1A	5	2021/5/12	04:00:00 - 06:00:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X		X	
2A	1	2021/7/26	05:12:00 - 06:03:00	STC/JTC freq scan	X							X
2A	2	2021/7/26	13:23:10 - 18:48:05	STC/JTC freq scan	X							X
2A	3	2021/7/27	13:17:50 - 23:59:59	STC/JTC freq scan	X			X				X
2A	4	2021/7/28	12:14:50 - 23:50:00	STC/JTC freq scan	X	X	X		X		X	X

TC1 run1

2019/12/11 03:00:00 - 2019/12/11 07:00:00

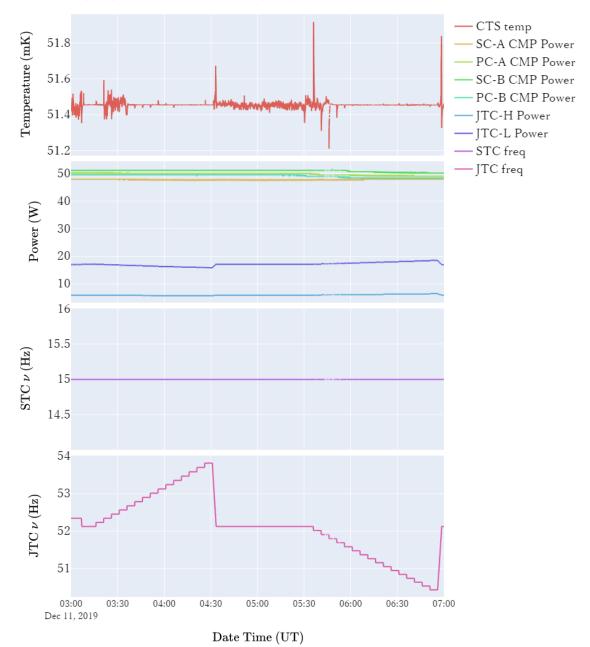


図 B.1. 2019/12/11 03:00:00 - 07:00:00 の間の各パラメータの変化 (TC1 run1)。

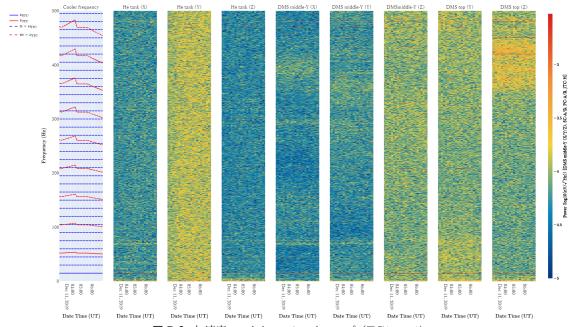


図 B.2. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run1)。

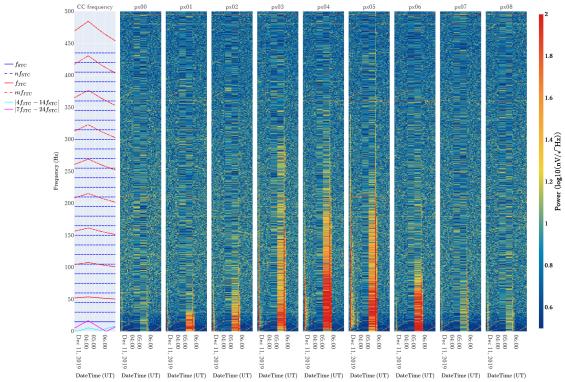


図 B.3. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run1)。

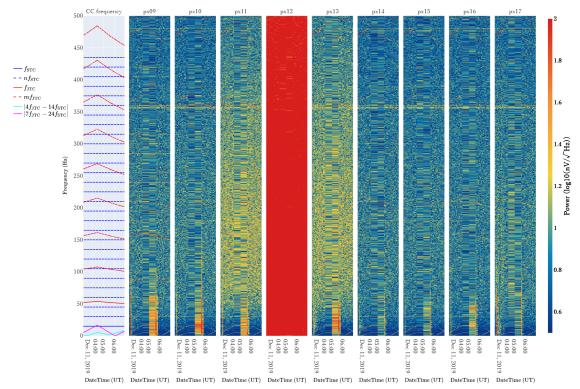


図 B.4. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run1)。

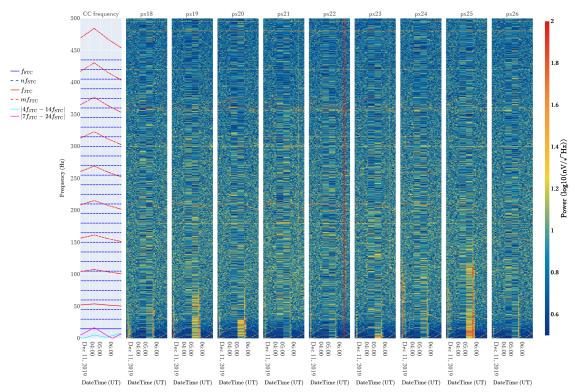


図 B.5. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run1)。

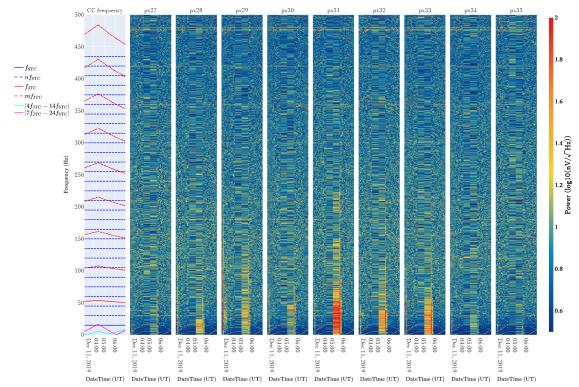


図 B.6. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run1)。

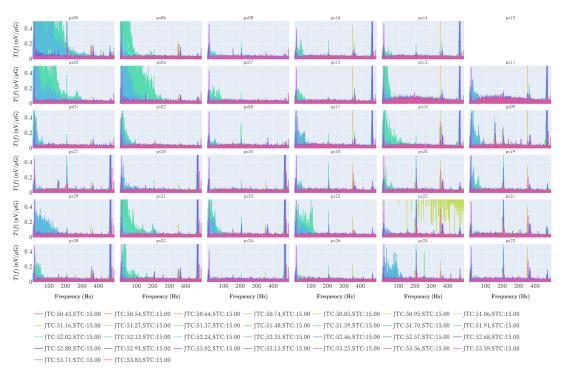


図 B.7. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1)。

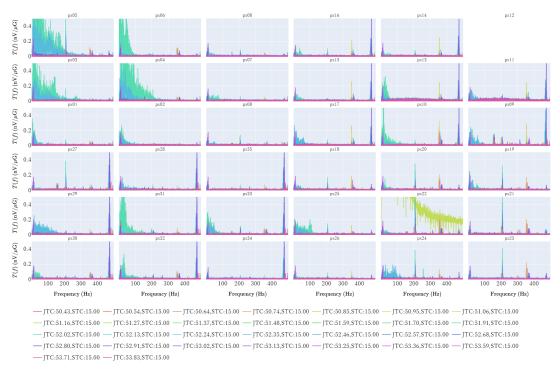


図 B.8. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1)。

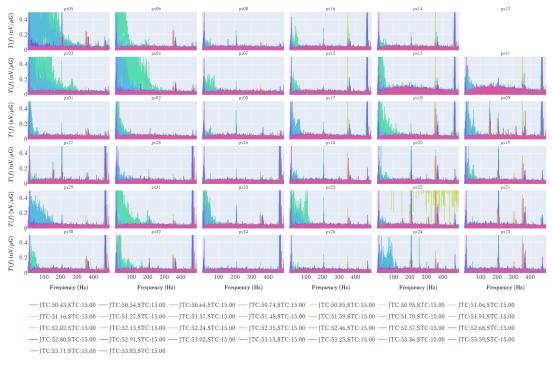


図 B.9. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1)。

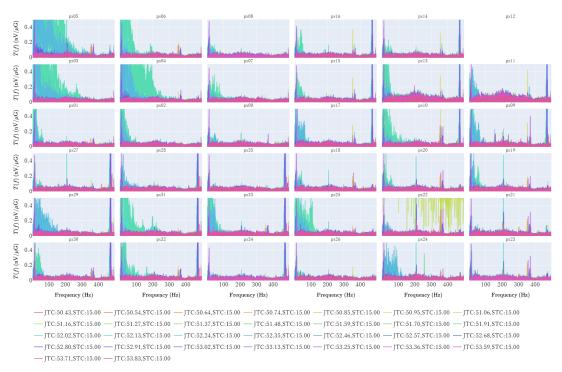


図 **B.10.** 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1)。

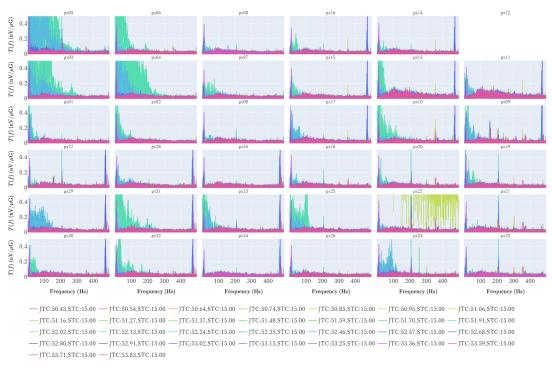


図 **B.11**. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1)。

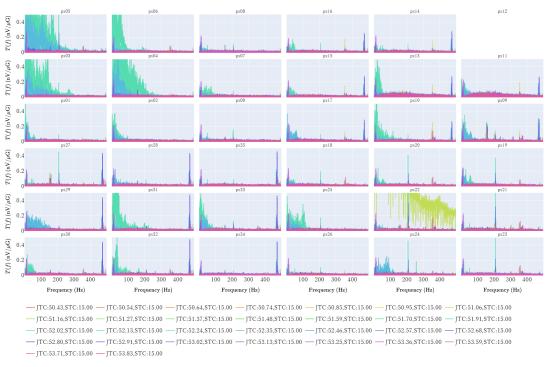


図 **B.12.** 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run1)。

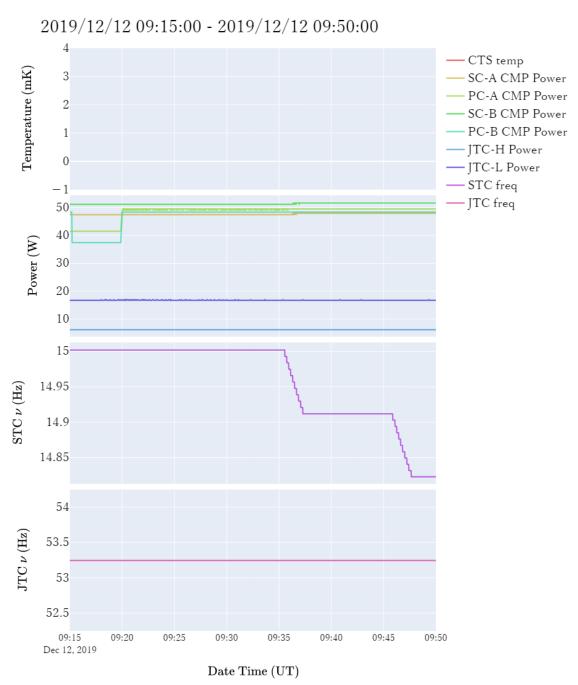


図 B.13. 2019/12/12 09:15:00 - 09:50:00 の間の各パラメータの変化 (TC1 run2)。

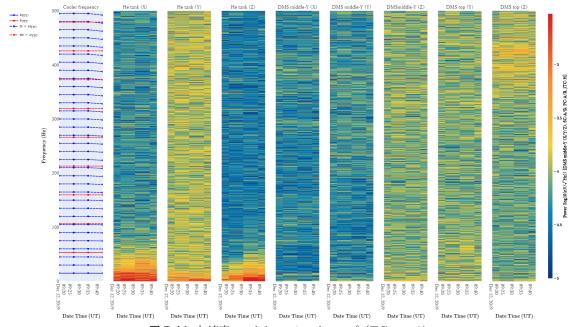


図 B.14. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run2)。

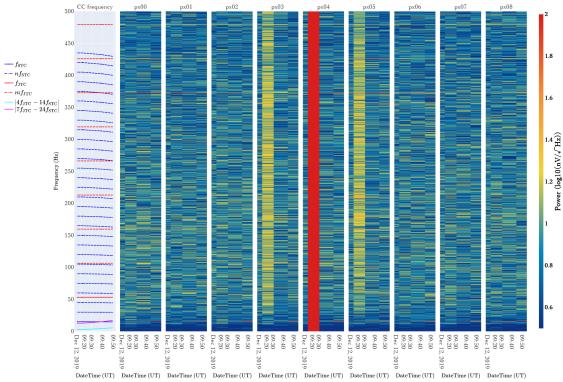


図 B.15. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run2)。

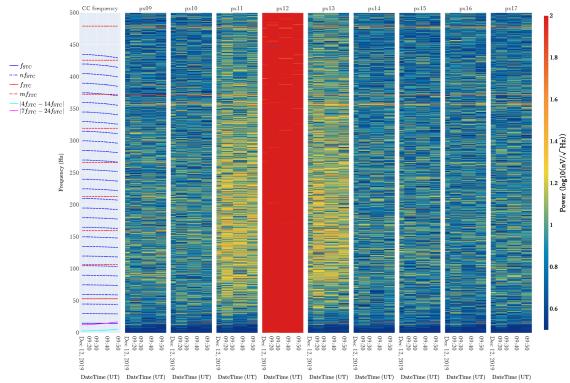


図 B.16. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run2)。

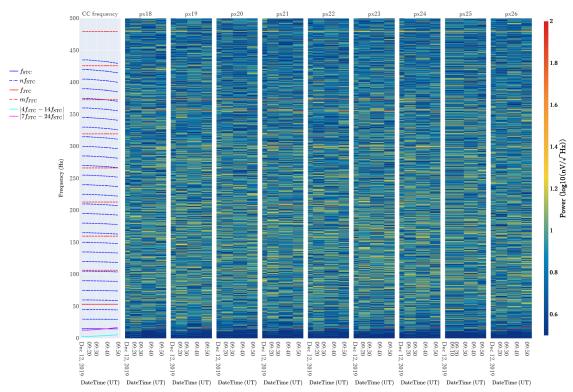


図 B.17. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run2)。

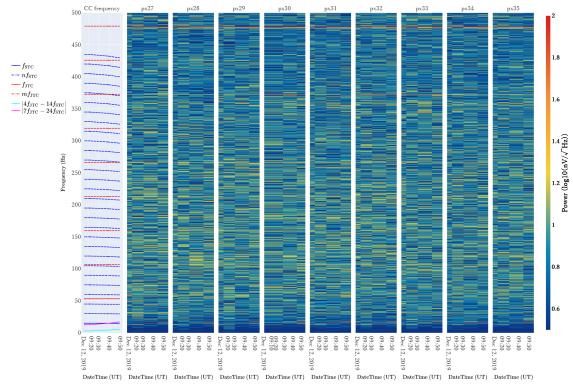


図 B.18. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run2)。

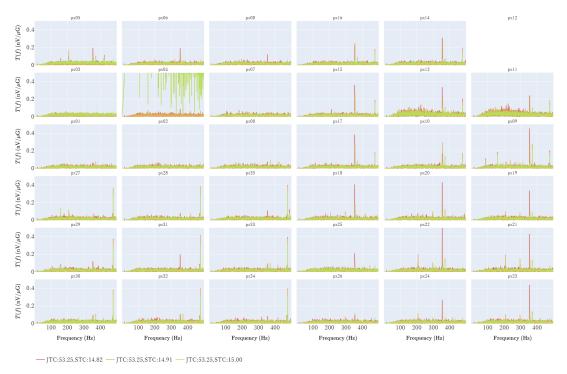


図 B.19. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He ank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 ($TC1 ext{ run2}$)。

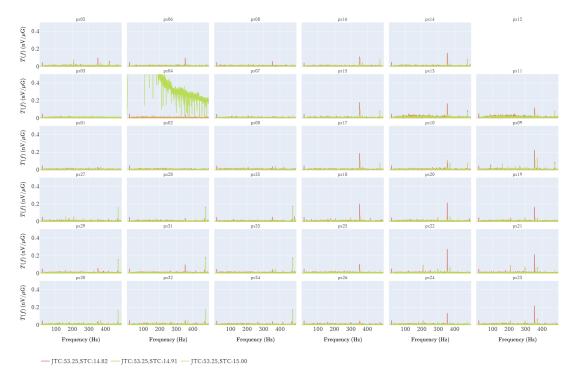


図 B.20. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run2)。

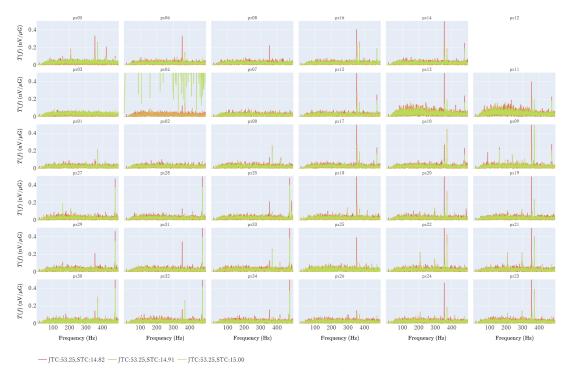


図 B.21. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run2)。

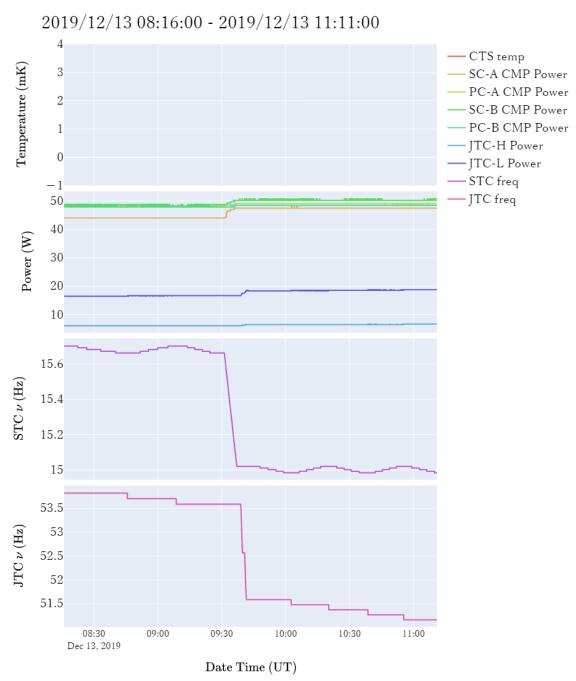


図 B.22. 2019/12/13 08:16:00 - 11:11:00 の間の各パラメータの変化 (TC1 run3)。

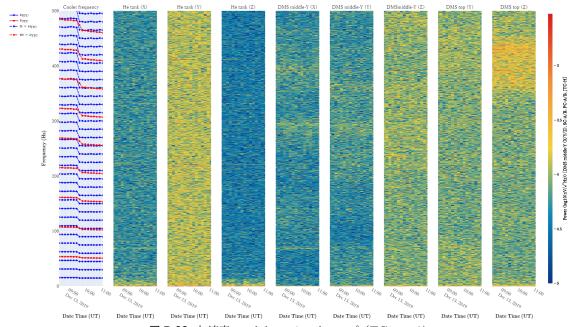


図 B.23. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run3)。

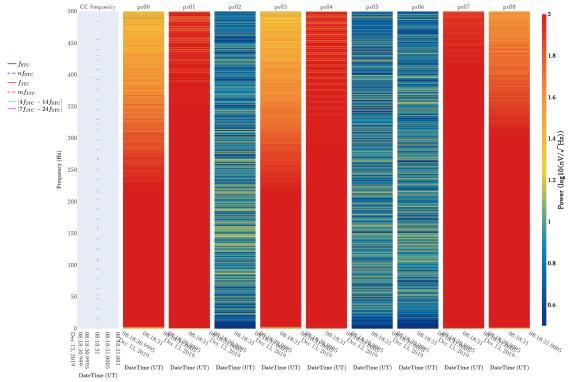


図 B.24. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run3)。

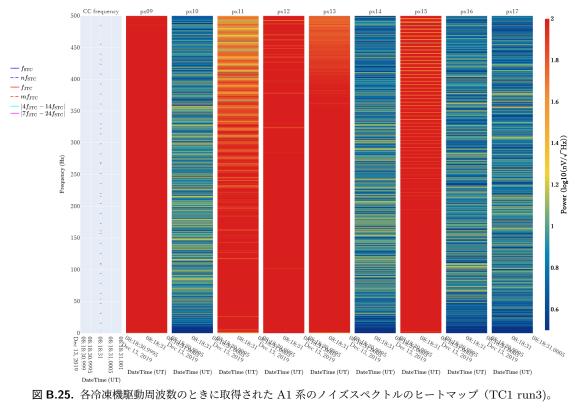


図 B.25. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run3)。

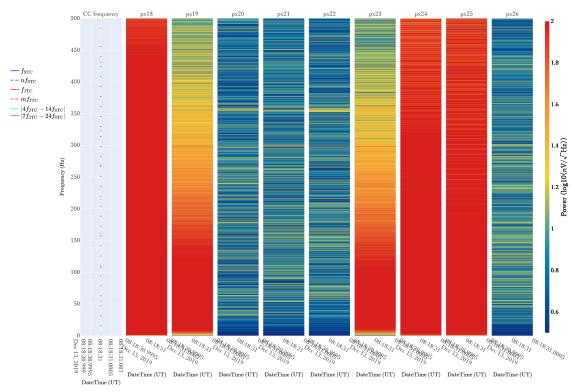


図 B.26. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run3)。

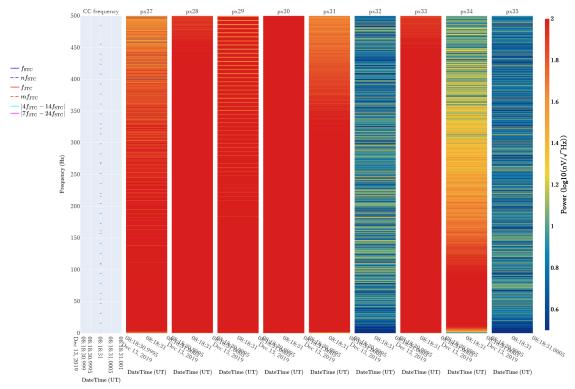


図 B.27. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run3)。

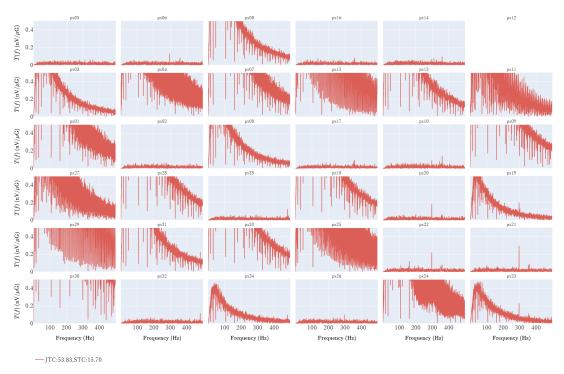


図 B.28. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He ank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 ank (X))。

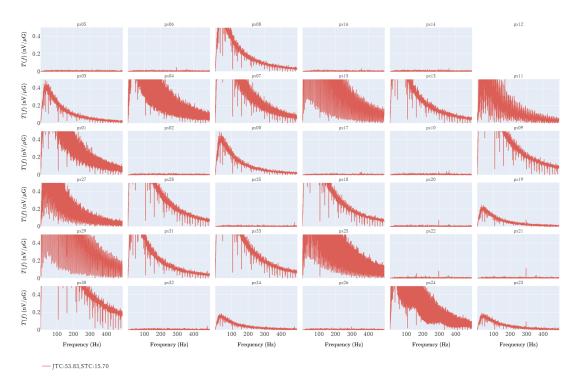


図 B.29. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run3)。

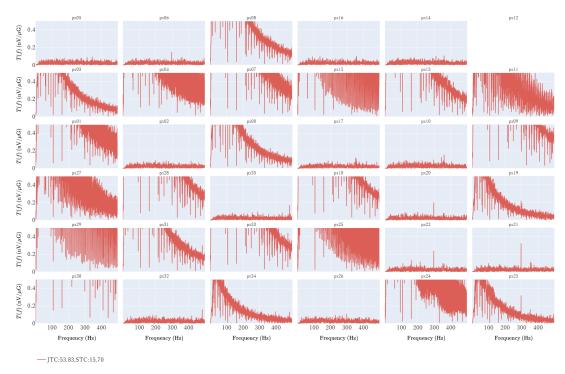


図 B.30. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run3)。

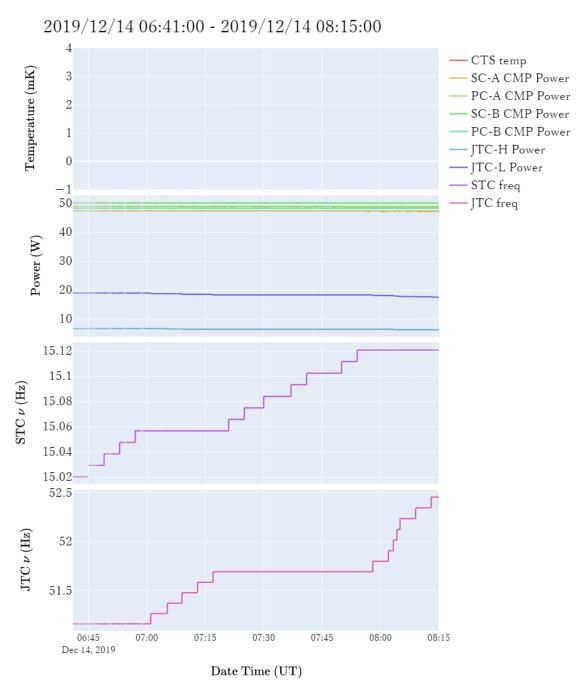


図 B.31. 2019/12/14 06:41:00 - 08:15:00 の間の各パラメータの変化 (TC1 run4)。

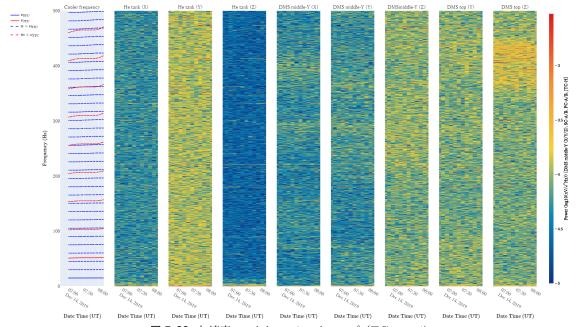


図 B.32. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run4)。

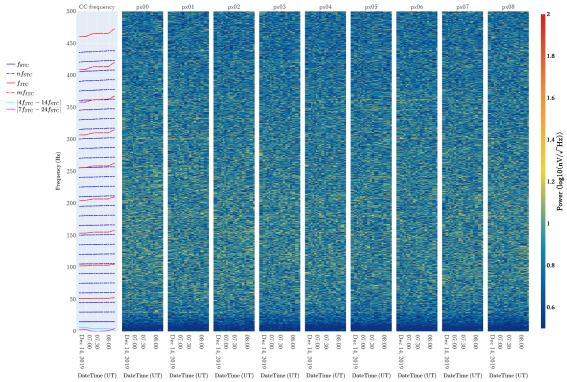


図 B.33. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run4)。

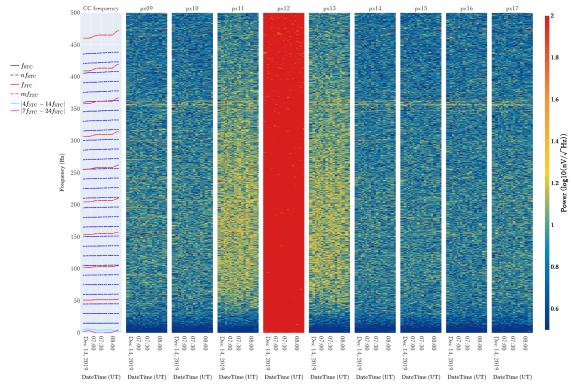


図 B.34. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run4)。

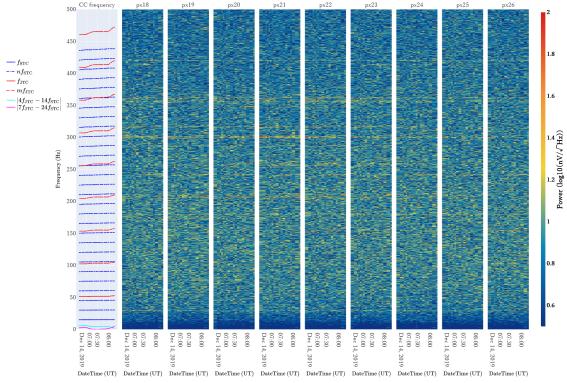


図 B.35. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run4)。

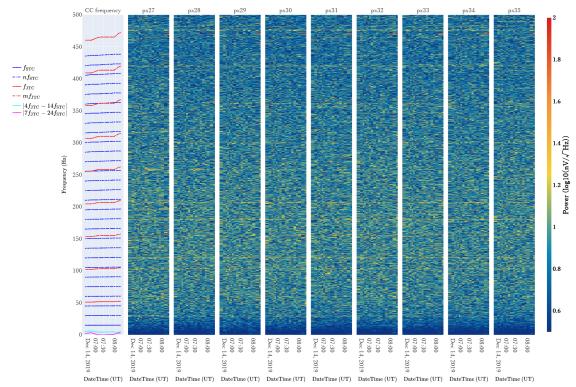


図 B.36. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run4)。

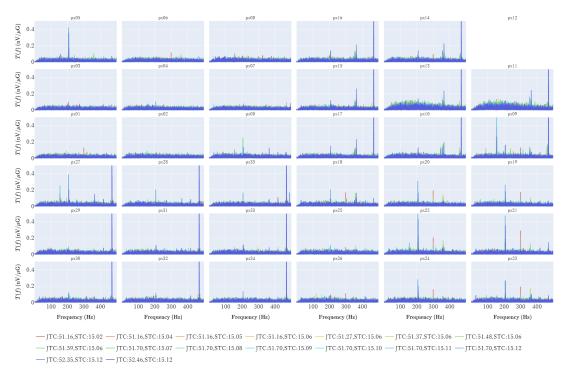


図 B.37. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He ank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 anh (X))

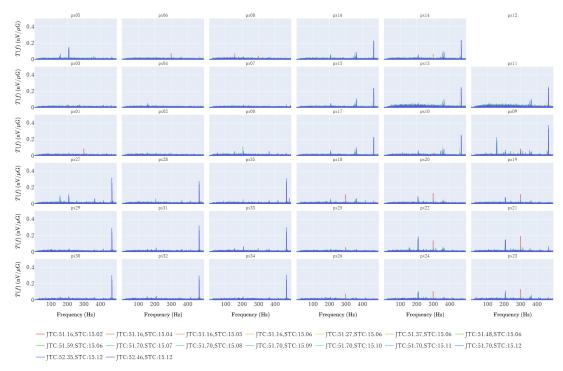


図 B.38. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run4)。

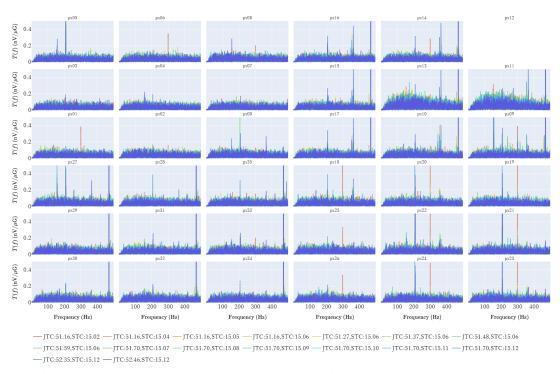


図 B.39. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run4)。

2019/12/15 02:45:00 - 2019/12/15 04:10:00

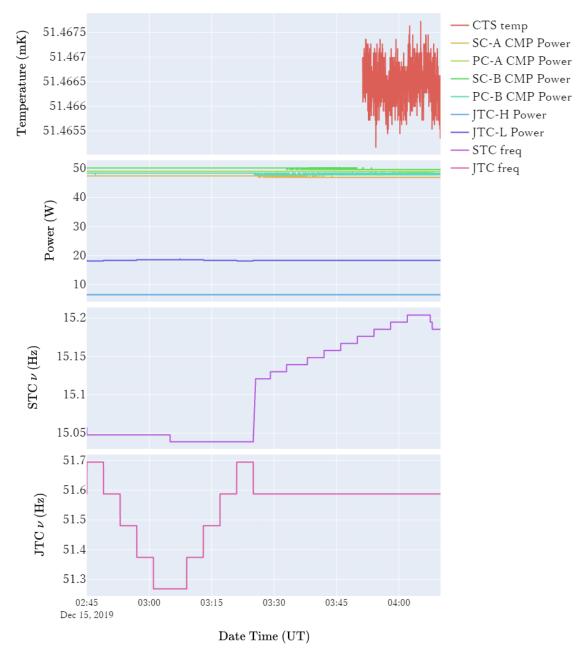


図 B.40. 2019/12/15 02:45:00 - 04:10:00 の間の各パラメータの変化 (TC1 run5)。

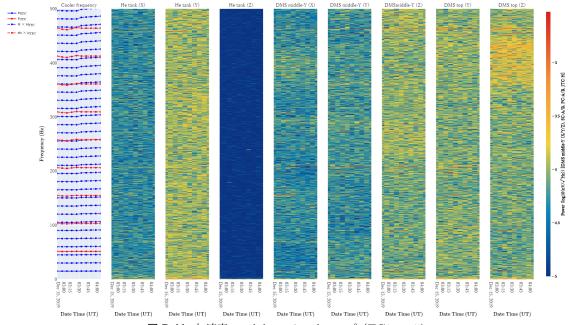


図 B.41. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run5)。

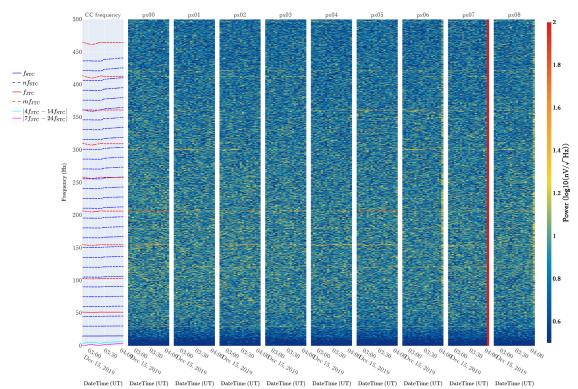


図 B.42. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run5)。

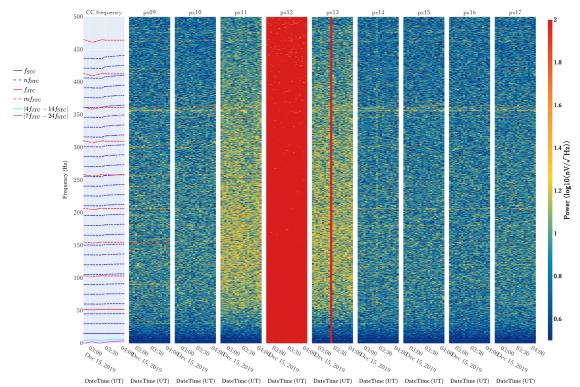


図 B.43. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run5)。

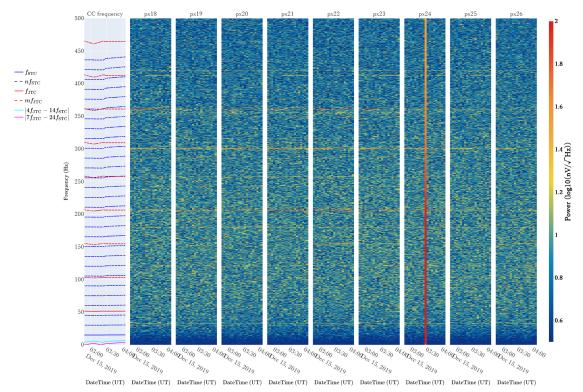


図 B.44. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run5)。

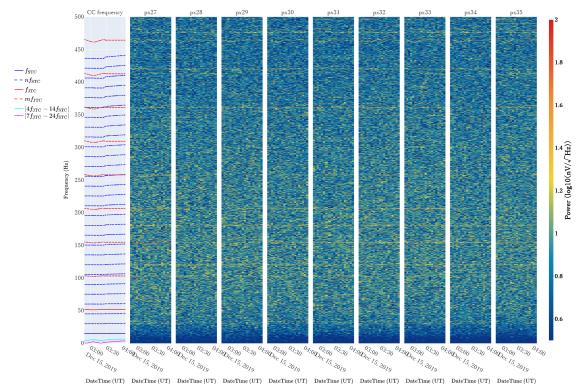


図 B.45. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run5)。

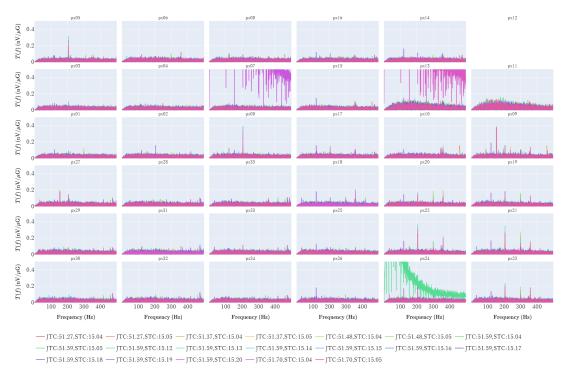


図 B.46. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run5)。

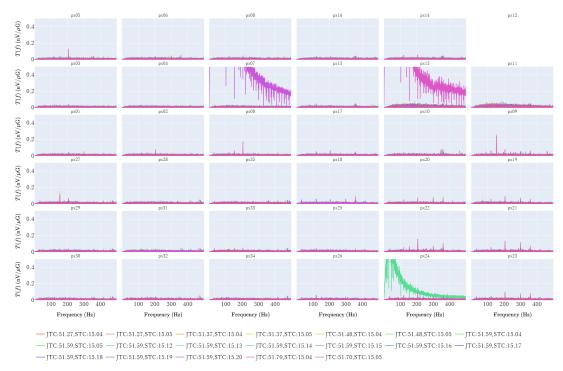


図 B.47. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run5)。

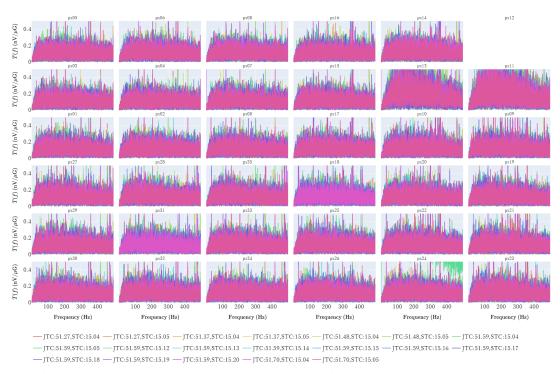


図 B.48. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run5)。

2019/12/15 09:00:00 - 2019/12/15 10:00:00

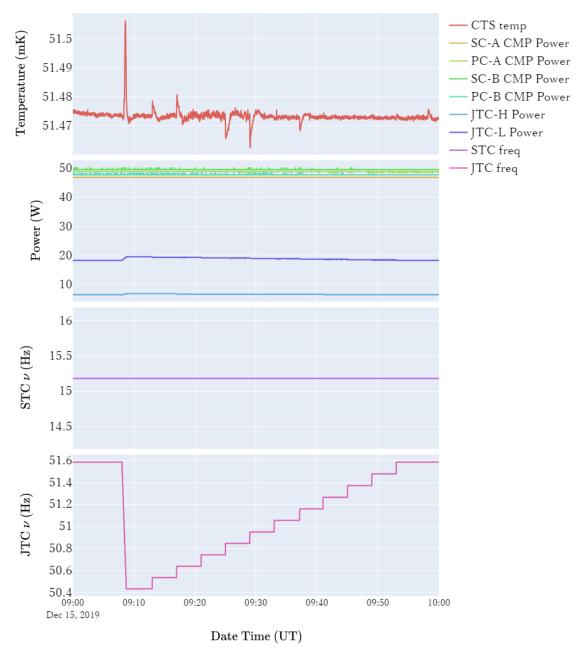


図 B.49. 2019/12/15 09:00:00 - 10:00:00 の間の各パラメータの変化 (TC1 run6)。

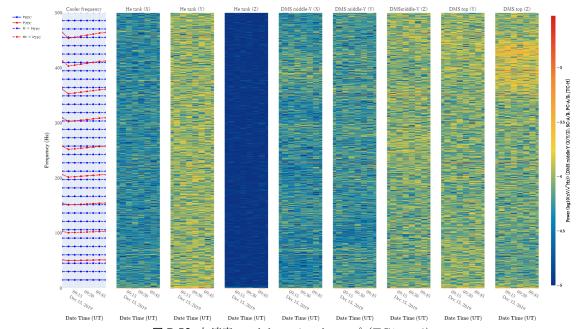


図 B.50. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run6)。

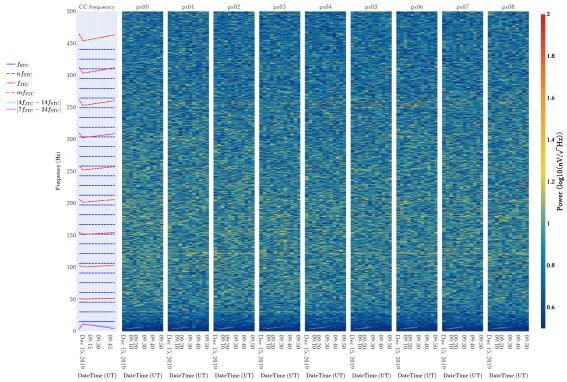


図 B.51. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run6)。

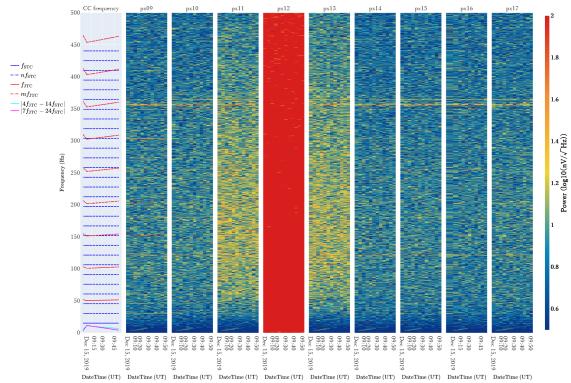


図 B.52. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run6)。

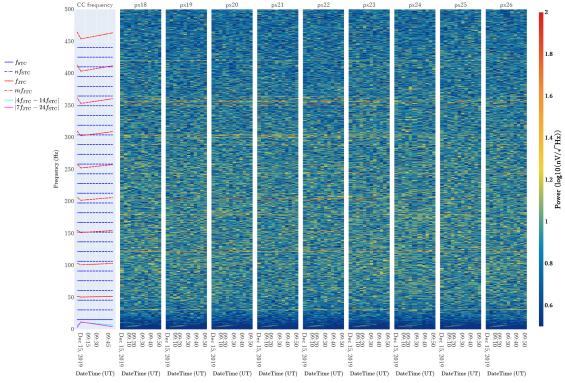


図 B.53. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run6)。

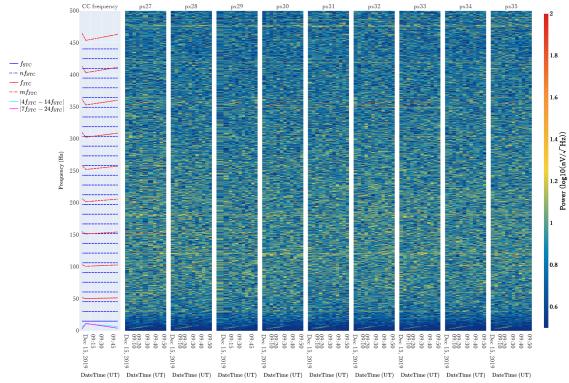


図 B.54. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run6)。

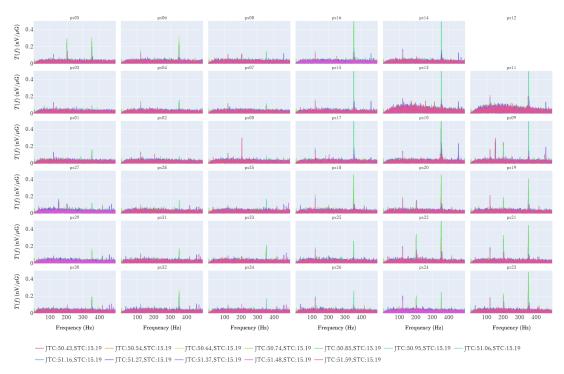


図 B.55. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He ank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 anh (X))

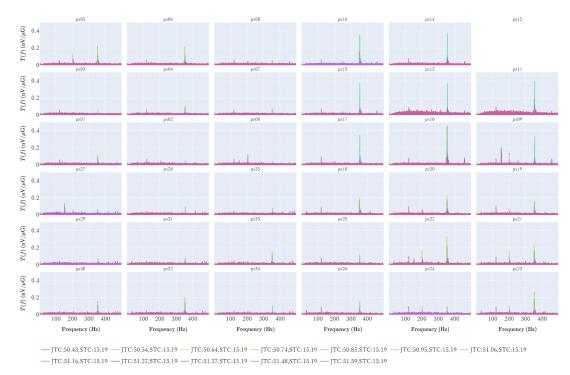


図 B.56. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run6)。

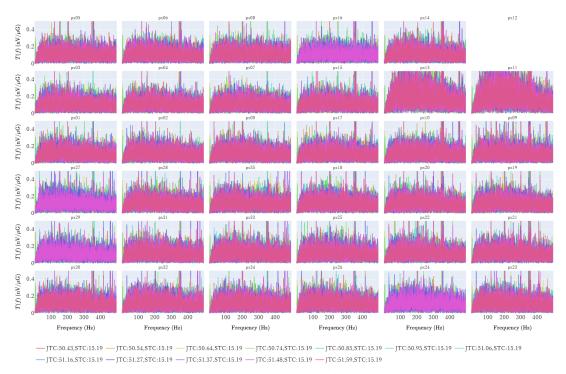


図 B.57. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run6)。

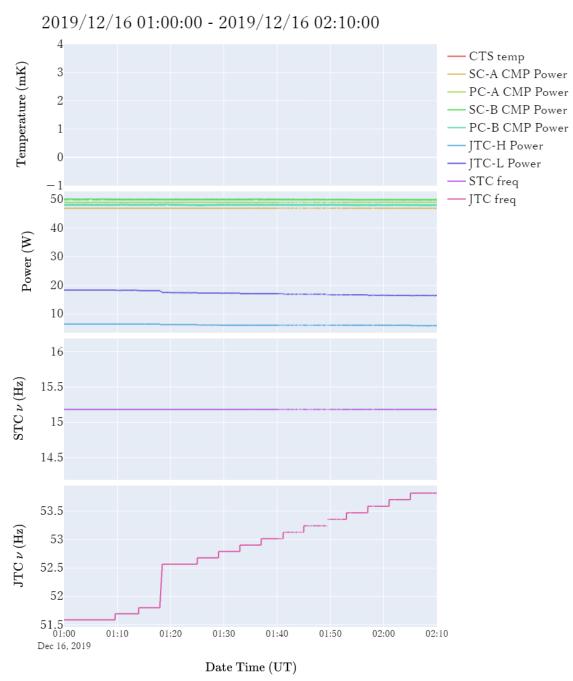


図 **B.58.** 2019/12/16 01:00:00 - 02:10:00 の間の各パラメータの変化 (TC1 run7)。

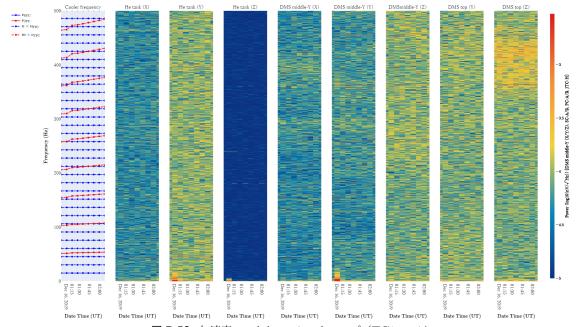


図 B.59. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run7)。

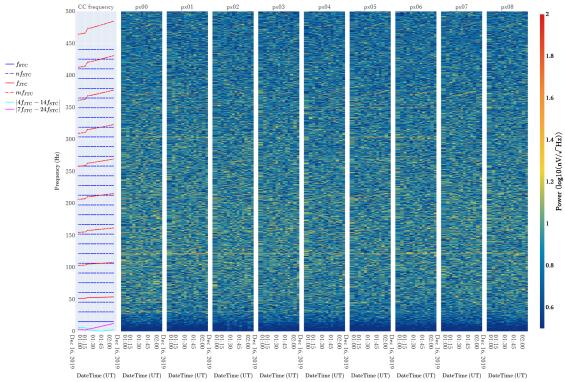


図 B.60. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run7)。

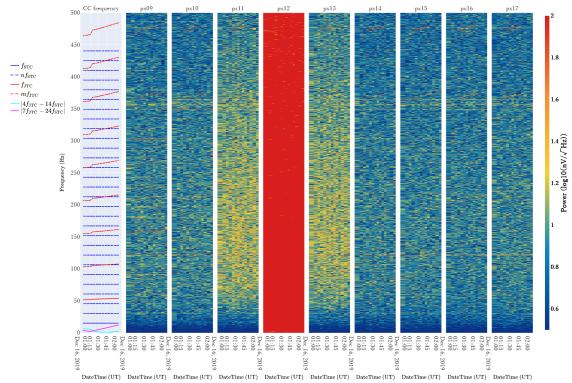


図 B.61. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run7)。

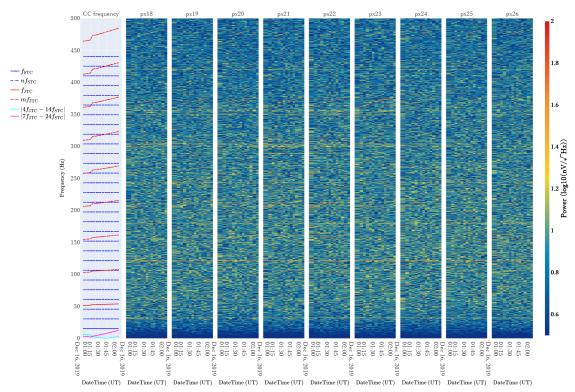


図 B.62. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run7)。

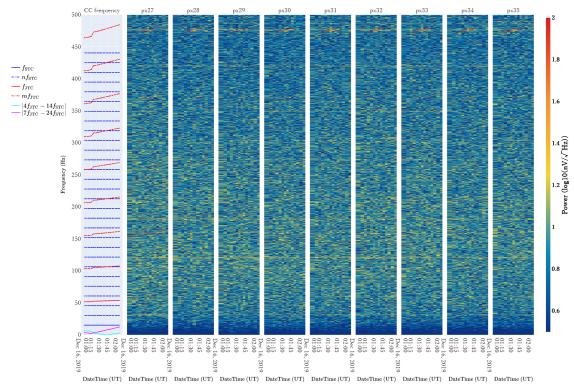


図 B.63. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run7)。

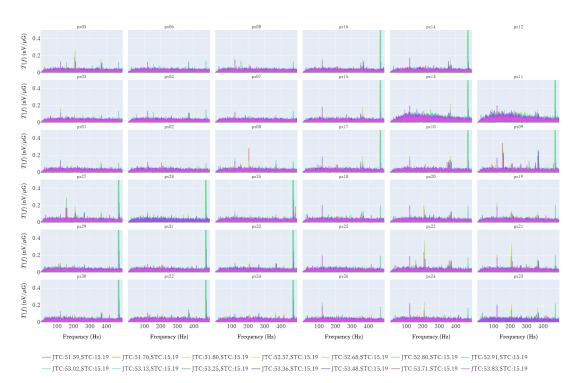


図 B.64. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He ank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 ($TC1 ext{ run7}$)。



図 B.65. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run7)。

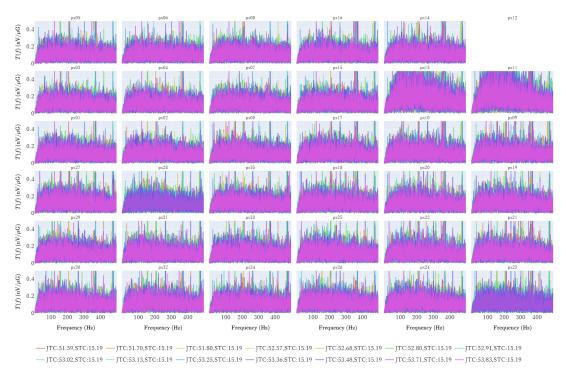


図 B.66. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run7)。

2019/12/16 02:20:00 - 2019/12/16 07:15:00

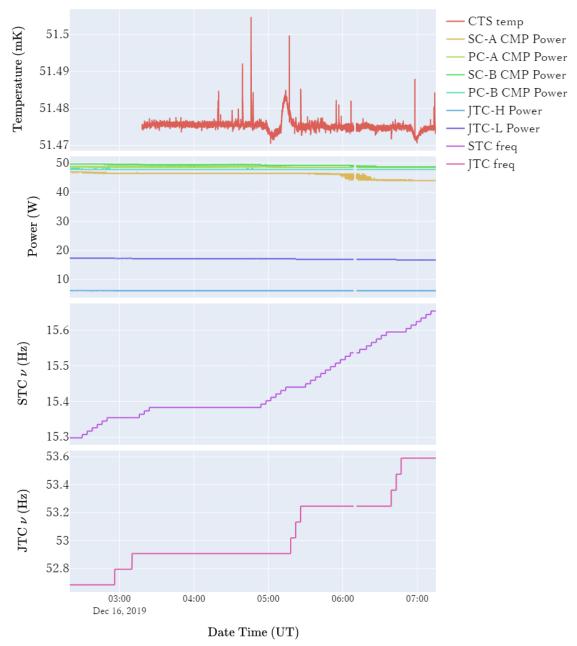


図 B.67. 2019/12/16 02:20:00 - 07:15:00 の間の各パラメータの変化 (TC1 run8)。

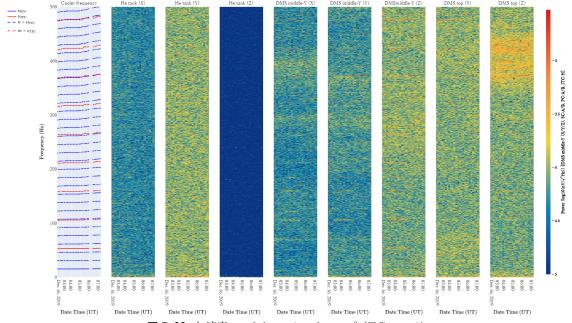


図 B.68. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1 run8)。

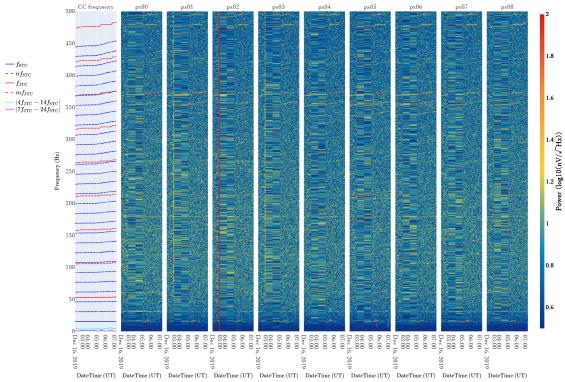


図 B.69. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run8)。

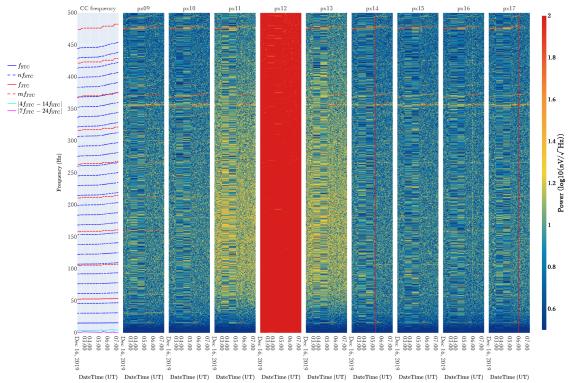


図 B.70. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run8)。

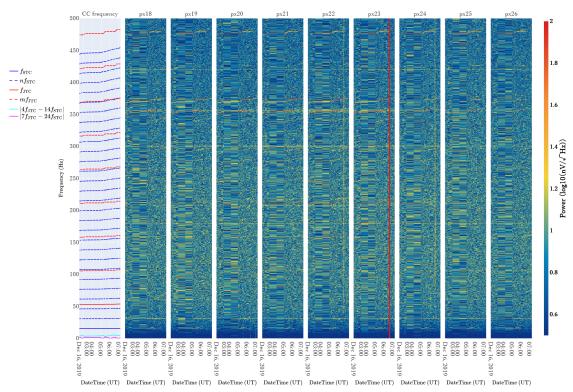


図 B.71. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run8)。

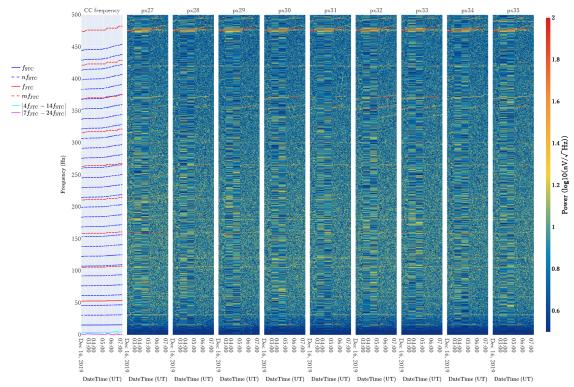


図 B.72. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1 run8)。

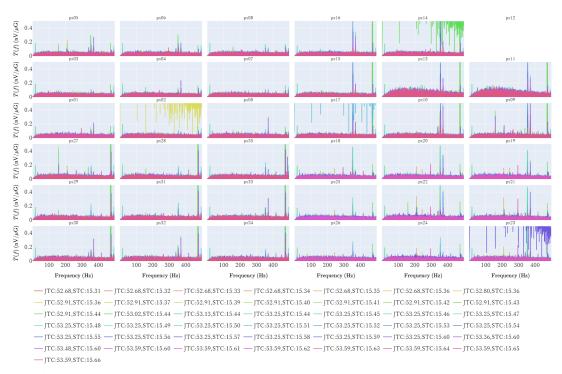


図 B.73. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run8)。

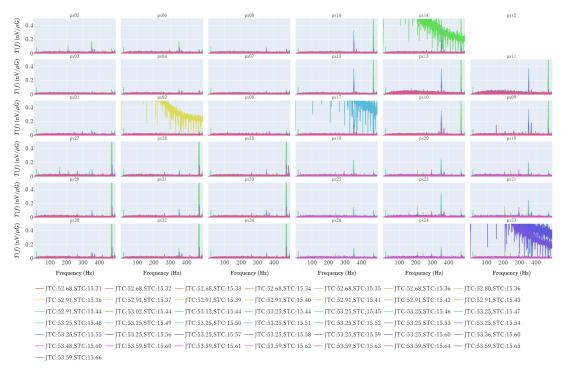


図 B.74. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run8)。



図 B.75. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された He tank (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1 run8)。

2021/05/11 10:15:00 - 2021/05/11 10:55:00

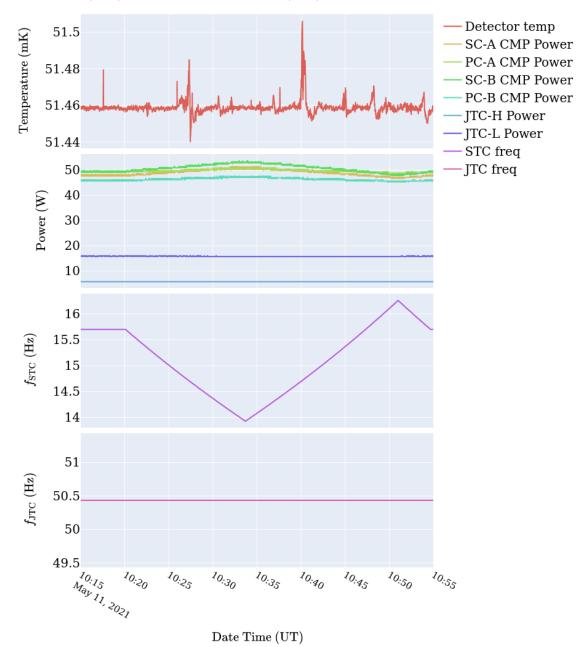


図 B.76. 2021/05/11 10:15:00 - 10:55:00 の間の各パラメータの変化 (TC1A run2)。

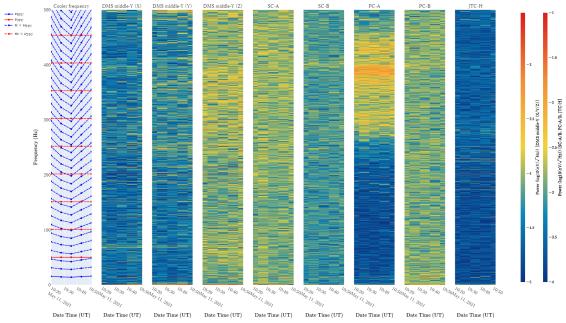


図 B.77. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1A run2)。

2021/05/11 11:40:00 - 2021/05/11 16:15:00

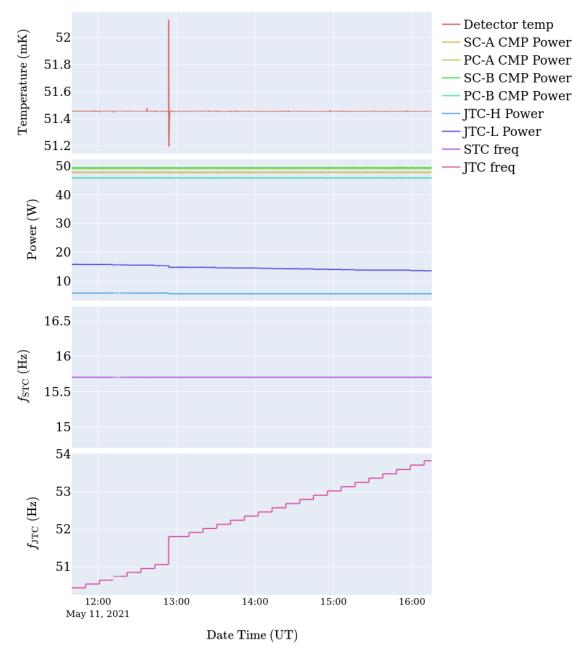


図 B.78. 2021/05/11 11:40:00 - 16:15:00 の間の各パラメータの変化 (TC1A run3)。

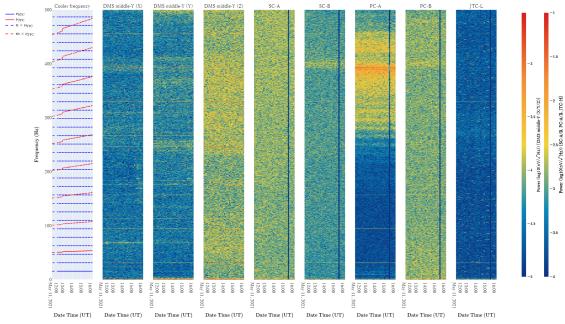


図 B.79. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1A run3)。

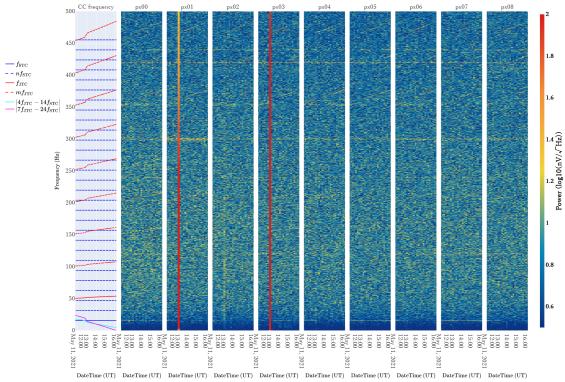


図 B.80. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run3)。

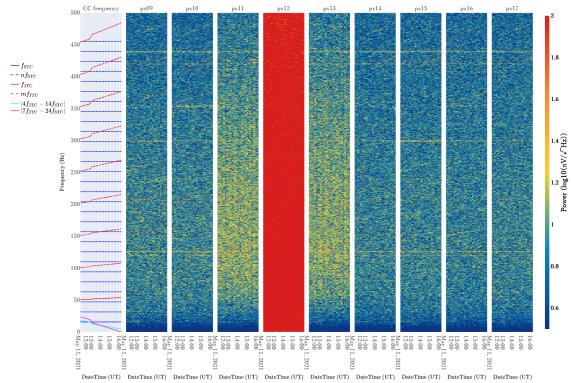


図 B.81. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run3)。

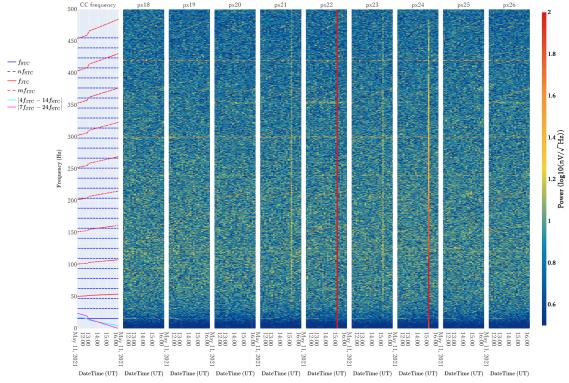


図 B.82. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run3)。

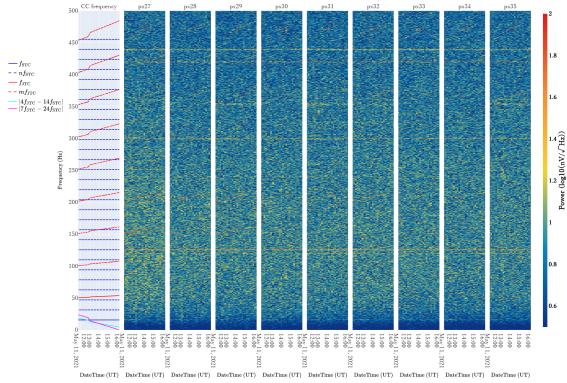


図 B.83. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run3)。

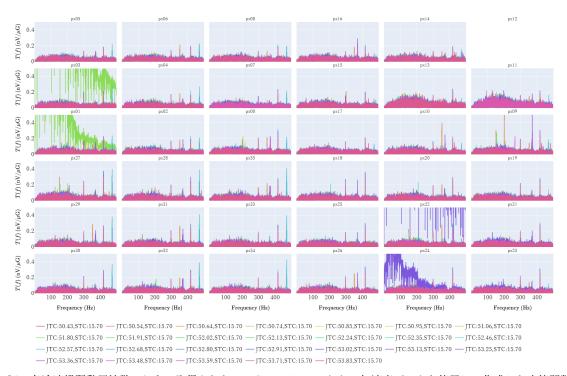


図 **B.84**. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 TC1A run3)。

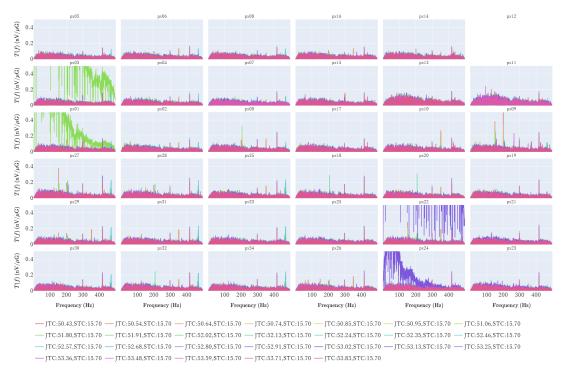


図 **B.85**. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run3)。

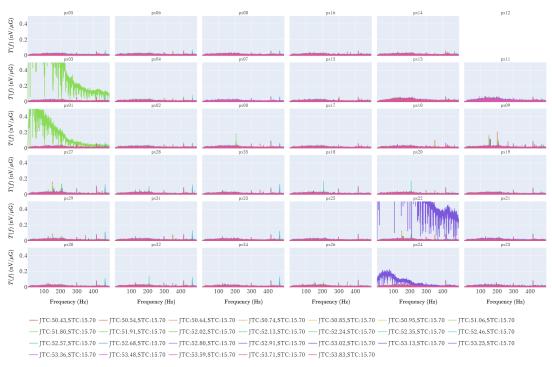


図 **B.86**. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run3)。

2021/05/11 16:55:00 - 2021/05/11 20:55:00

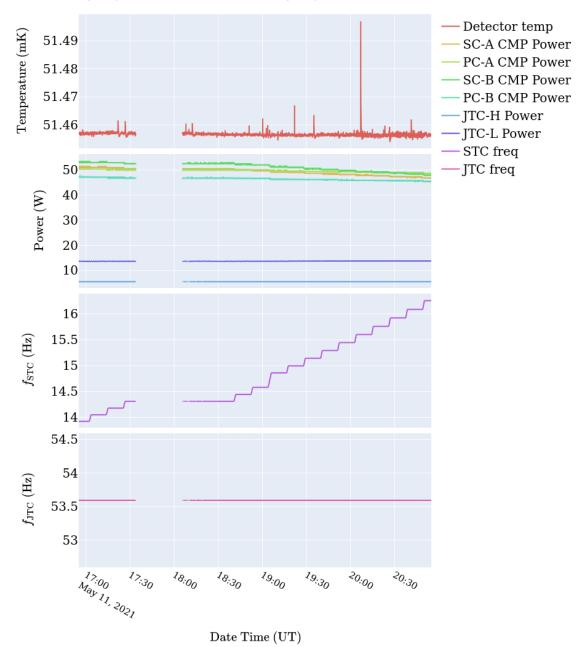


図 B.87. 2021/05/11 16:55:00 - 20:55:00 の間の各パラメータの変化 (TC1A run4)。

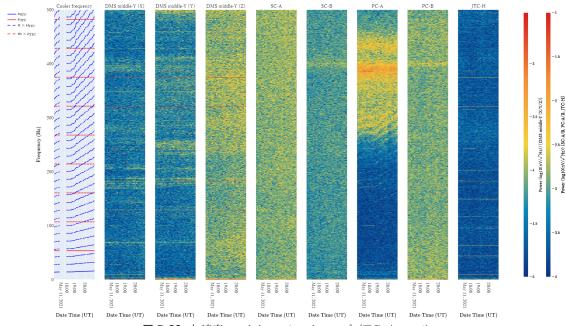


図 B.88. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1A run4)。

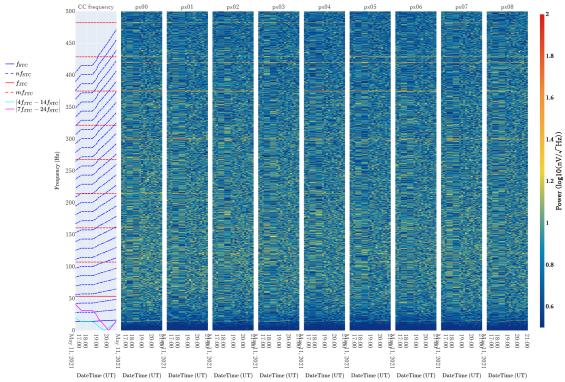


図 B.89. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run4)。

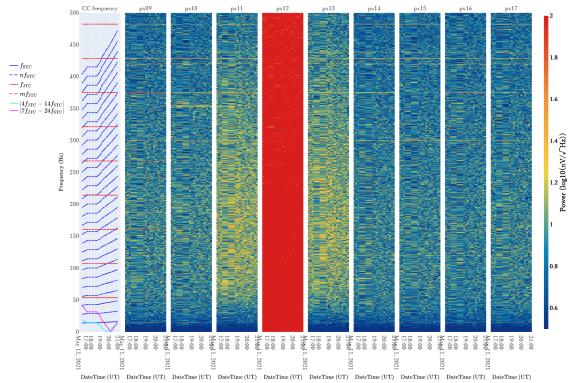


図 B.90. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run4)。

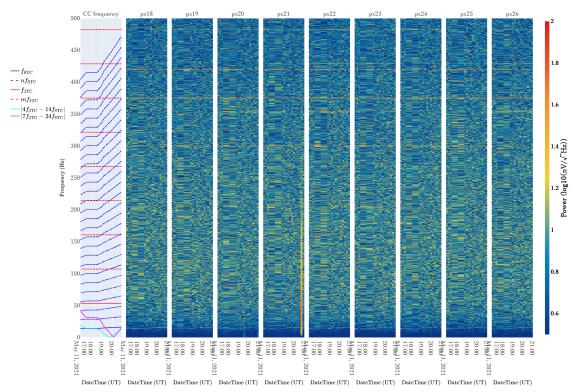


図 B.91. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run4)。

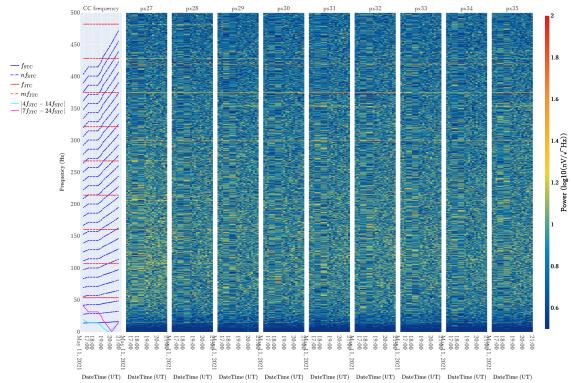


図 **B.92.** 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run4)。

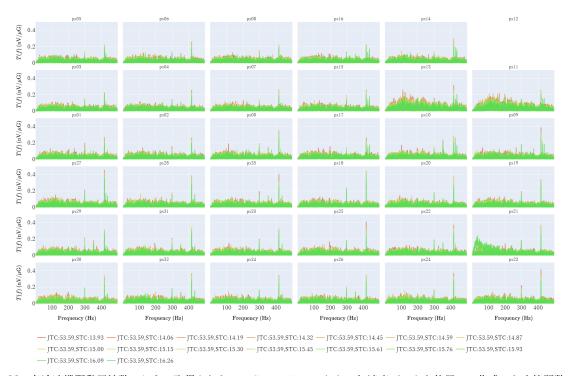


図 **B.93**. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run4)。

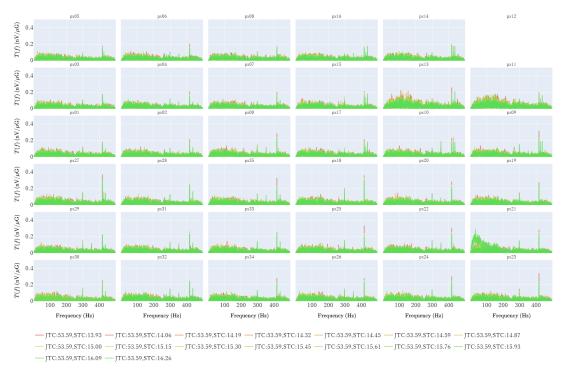


図 **B.94.** 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数(TC1A run4)。

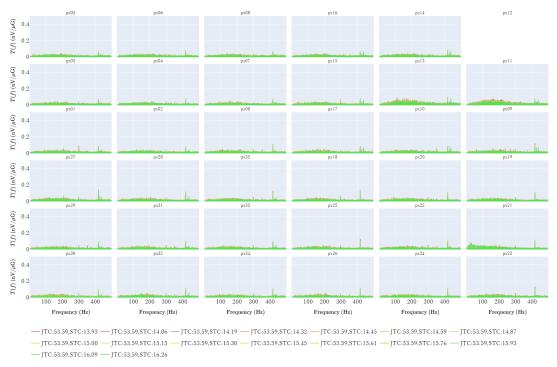


図 **B.95.** 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (Z) の加速度データを使用して作成した応答関 (TC1A run4)。

2021/05/12 04:00:00 - 2021/05/12 06:00:00

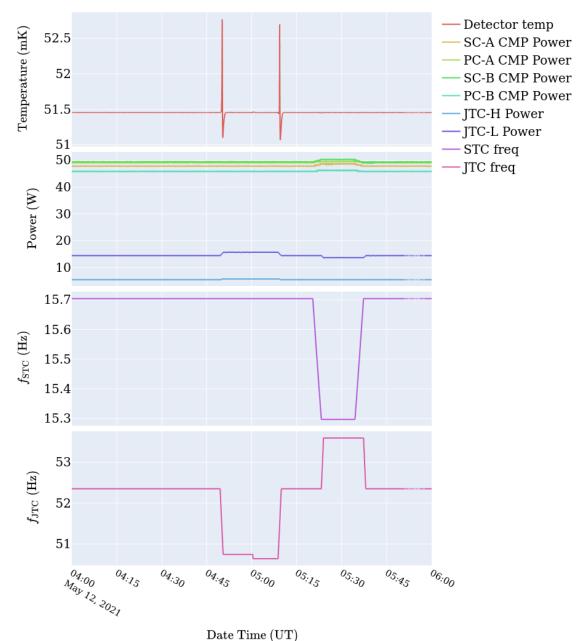


図 **B.96.** 2021/05/12 04:00:00 - 06:00:00 の間の各パラメータの変化 (TC1A run5)。

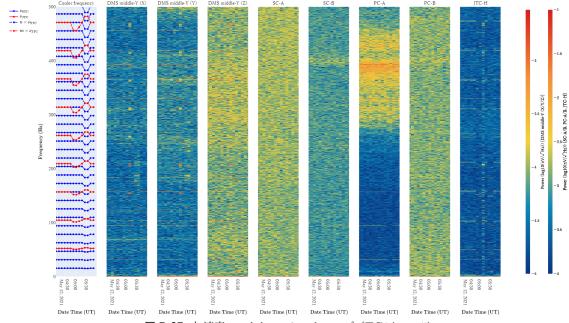


図 B.97. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC1A run5)。

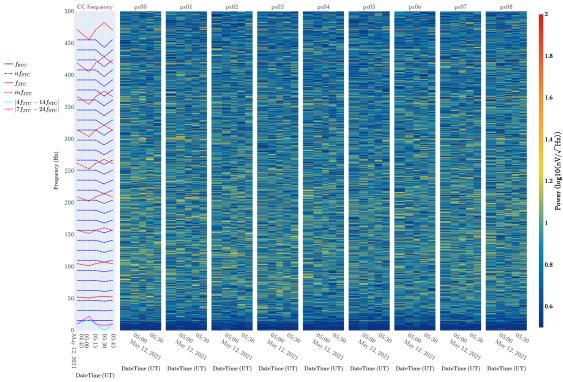


図 B.98. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run5)。

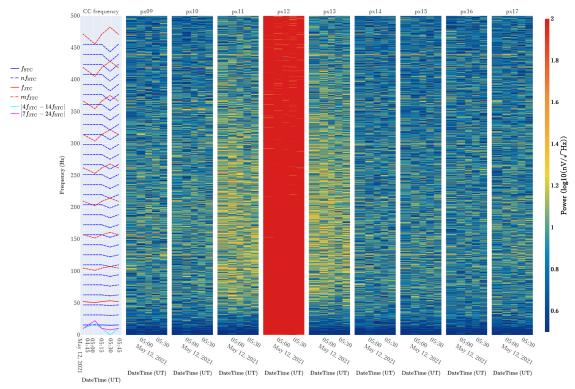


図 B.99. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run5)。

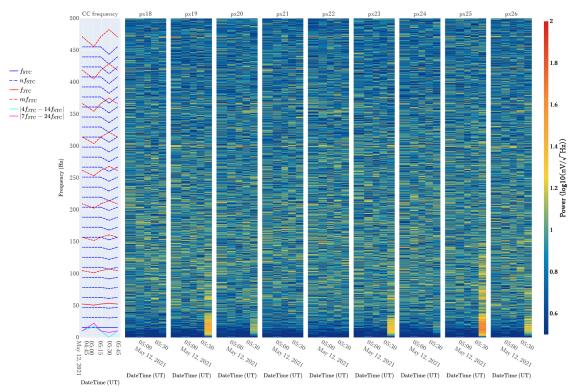


図 B.100. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run5)。

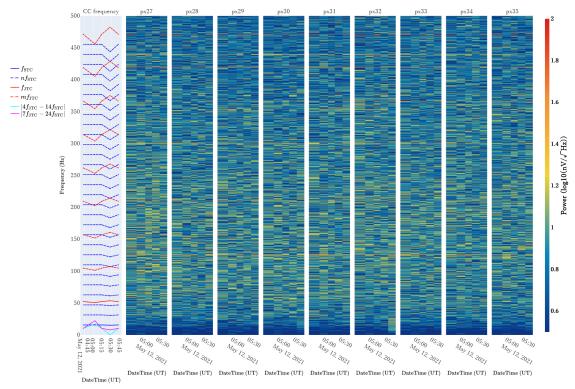


図 B.101. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC1A run5)。

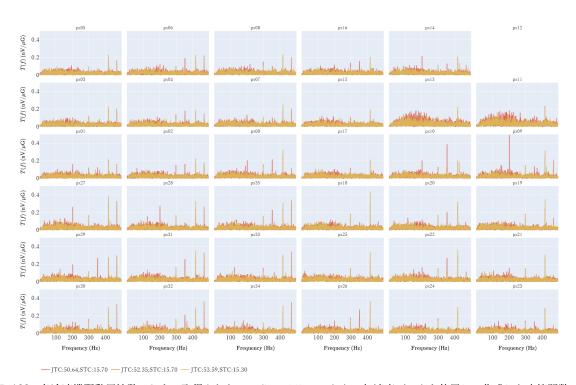


図 **B.102**. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (X) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run5)。

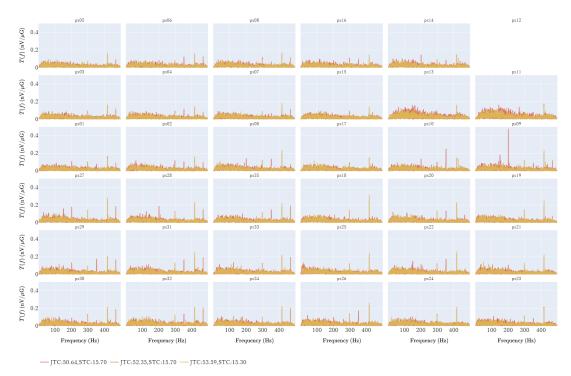


図 **B.103.** 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (Y) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run5)。

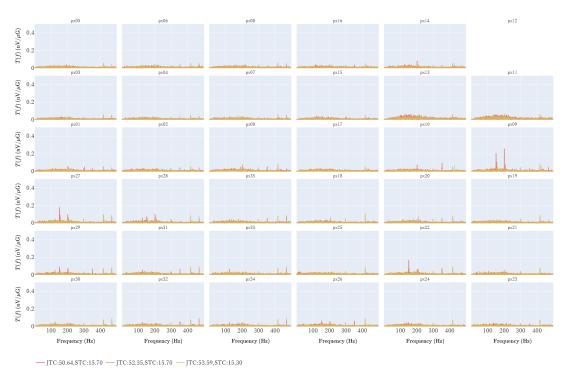


図 **B.104.** 各冷凍機駆動周波数のときに取得された DMS middle -Y (Z) の加速度データを使用して作成した応答関数 (TC1A run5)。

2021/07/26 05:12:00 - 2021/07/26 06:03:00

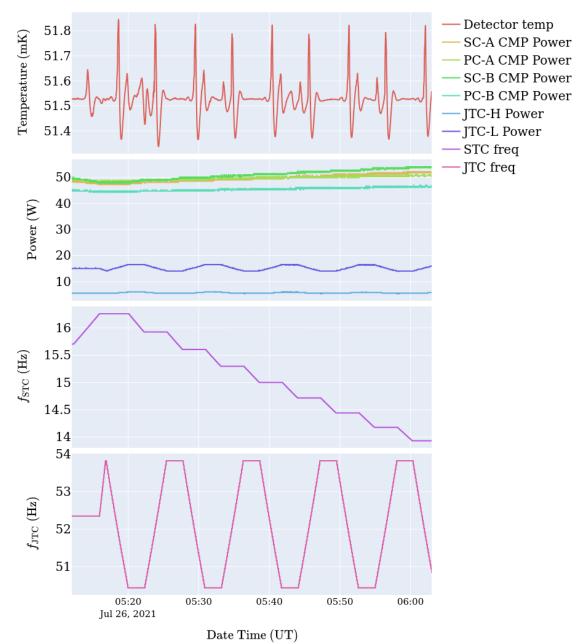


図 B.105. 2021/07/26 05:12:00 - 06:03:00 の間の各パラメータの変化 (TC2A run1)。

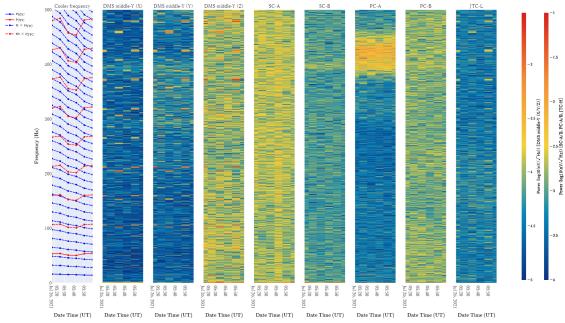


図 B.106. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC2A run1)。

2021/07/26 13:23:10 - 2021/07/26 18:48:05

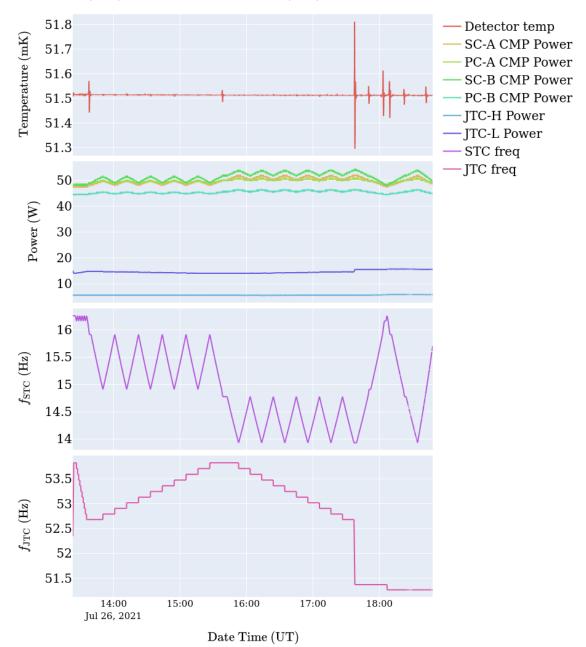


図 B.107. 2021/07/26 13:23:10 - 18:48:05 の間の各パラメータの変化 (TC2A run2)。

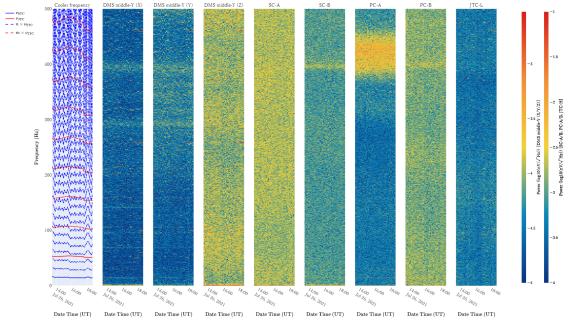


図 B.108. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC2A run2)。

2021/07/27 13:17:50 - 2021/07/27 23:59:59

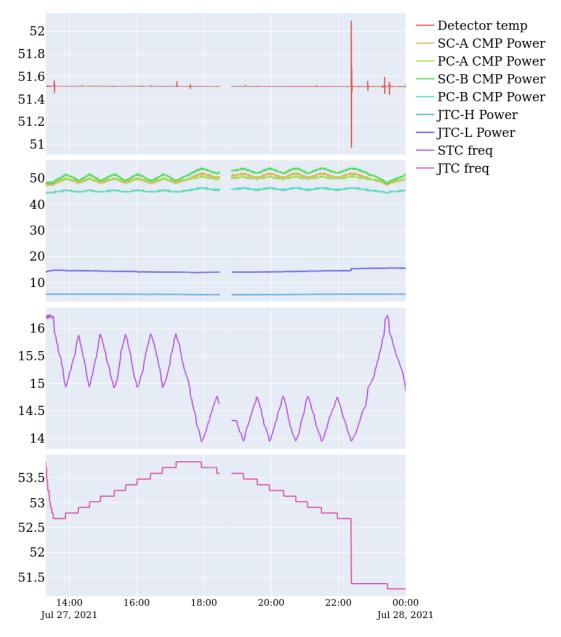


図 B.109. 2021/07/27 13:17:50 - 23:59:59 の間の各パラメータの変化 (TC2A run3)。

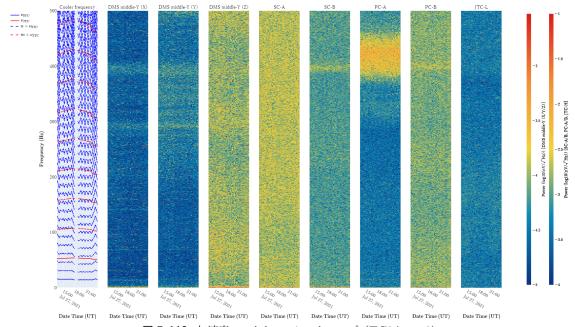


図 B.110. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC2A run3)。

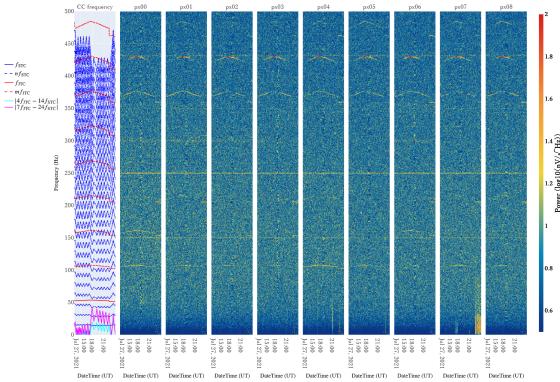


図 B.111. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run3)。

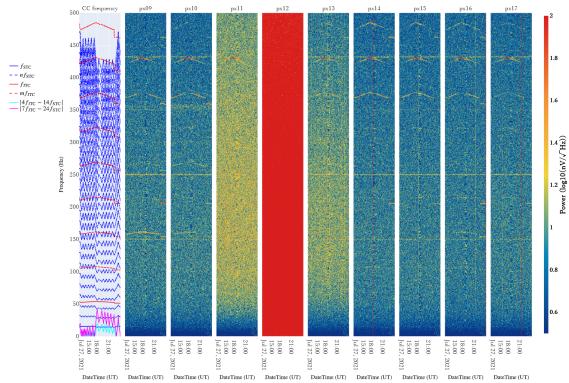


図 B.112. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run3)。

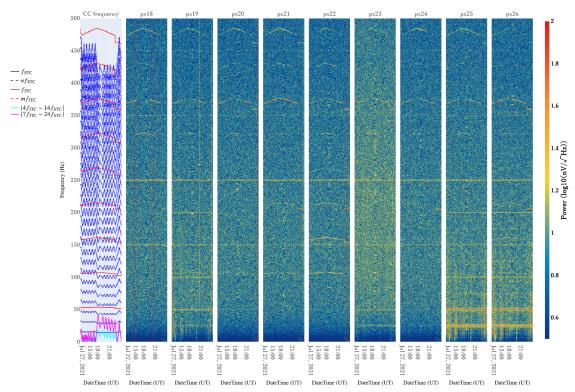


図 B.113. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run3)。

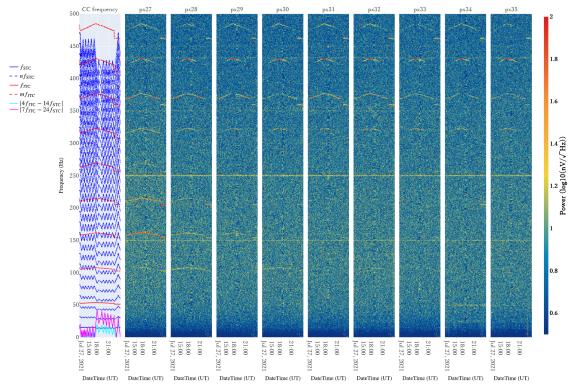


図 B.114. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run3)。

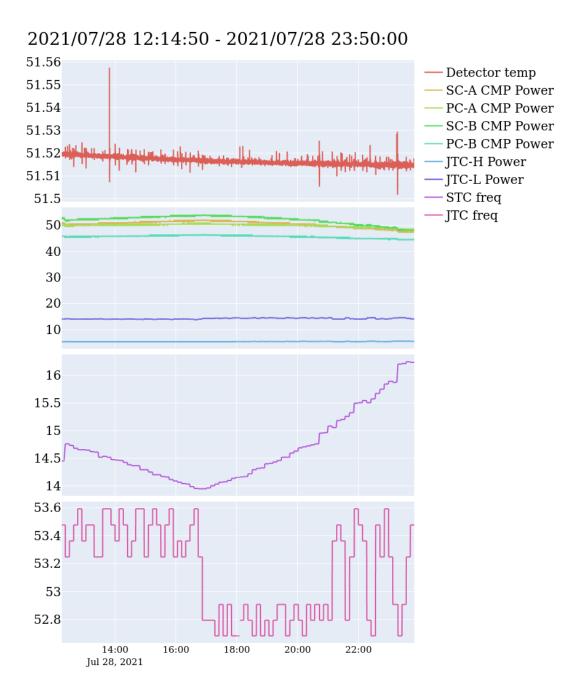


図 B.115. 2021/07/28 12:14:50 - 23:50:00 の間の各パラメータの変化 (TC2A run3)。

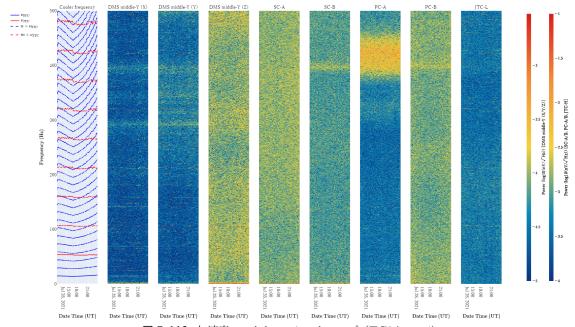


図 B.116. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC2A run4)。

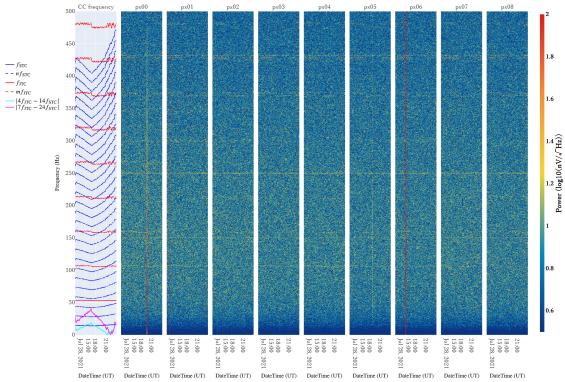


図 B.117. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run4)。

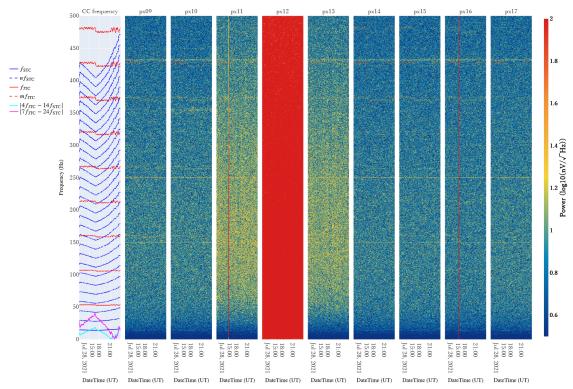


図 B.118. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された A1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run4)。

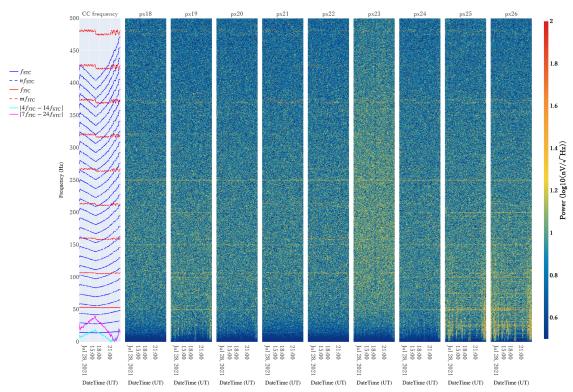


図 B.119. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B0 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run4)。

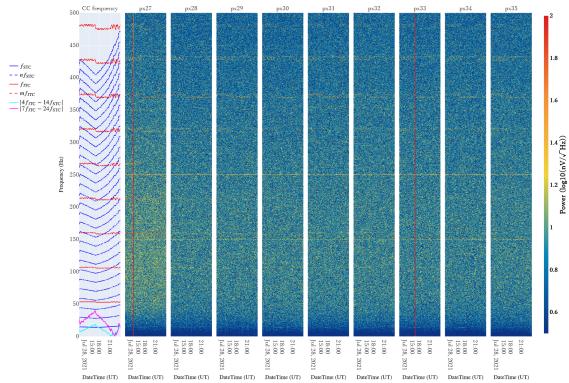


図 B.120. 各冷凍機駆動周波数のときに取得された B1 系のノイズスペクトルのヒートマップ (TC2A run4)。

TC3 run1

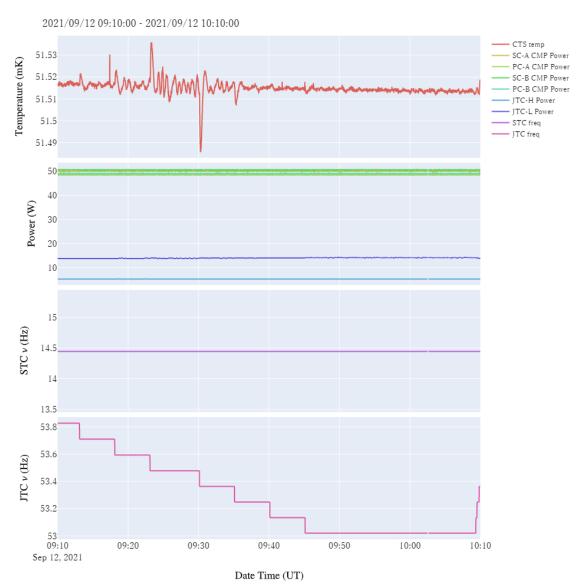


図 **B.121.** 2021/09/12 09:10:00 - 10:10:00 の間の各パラメータの変化 (TC3 run1)。

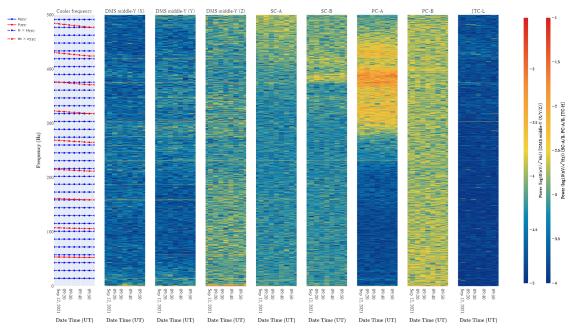


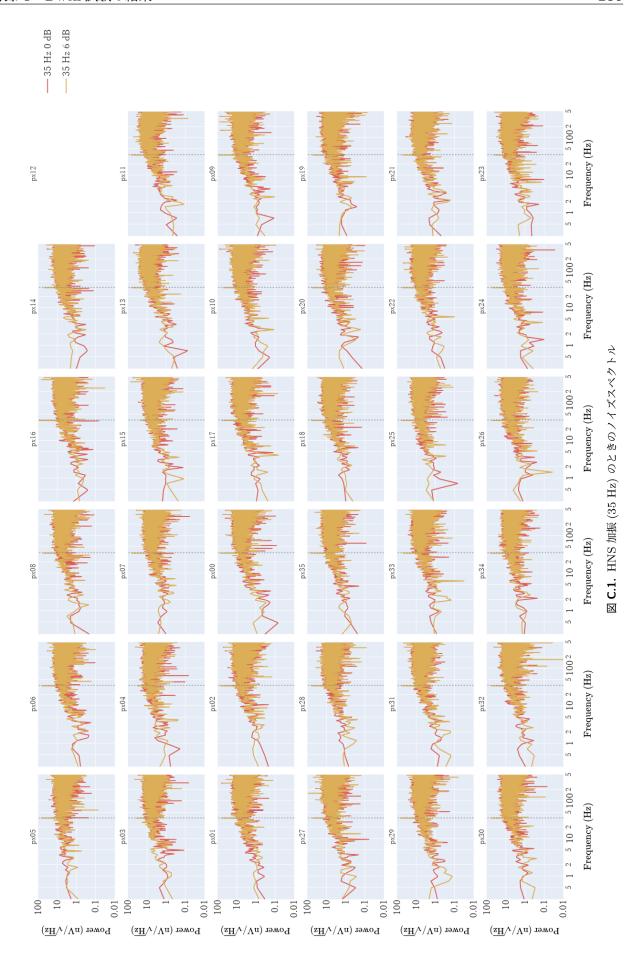
図 B.122. 加速度スペクトルのヒートマップ (TC3 run1)。

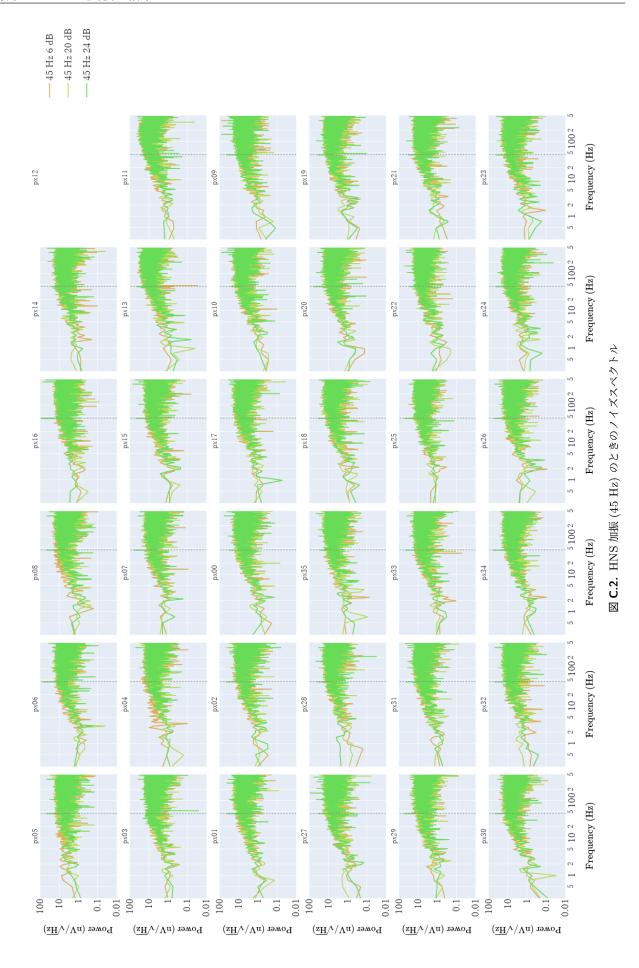
付録 C

Dwell 試験の結果

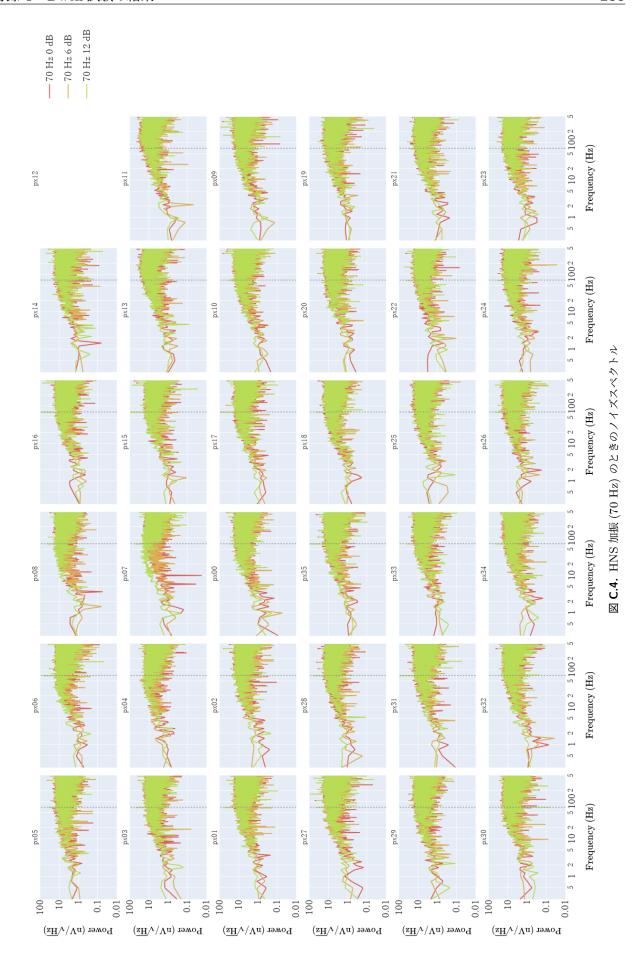
ハーネス (HNS)、XBOX、デュワー (DWR) 加振試験で行った Dwell 試験で取得された全ピクセルのスペクトルを以下に示す。

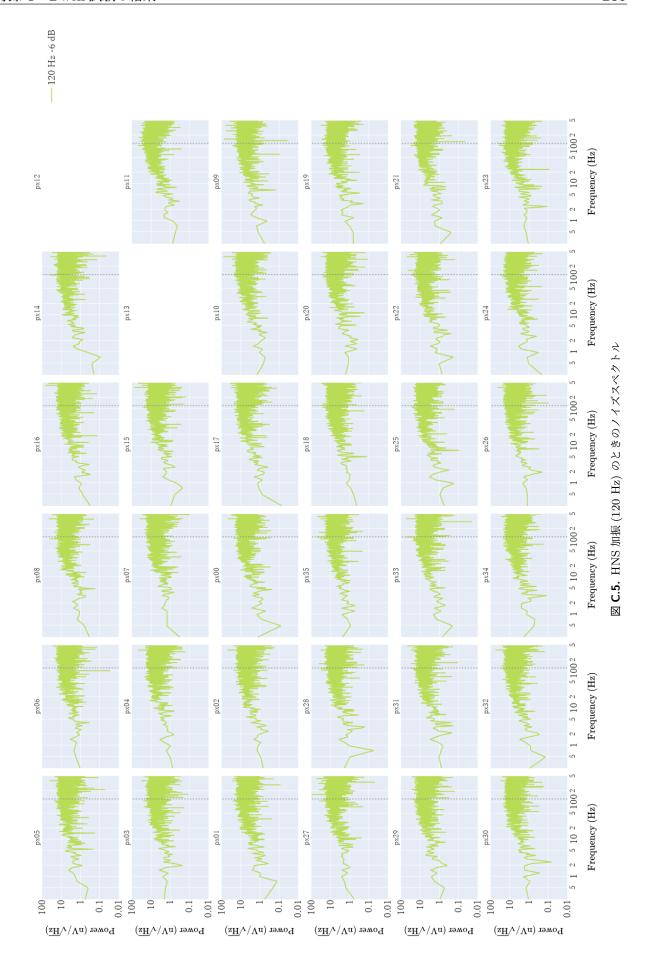
C.1 HNS 加振

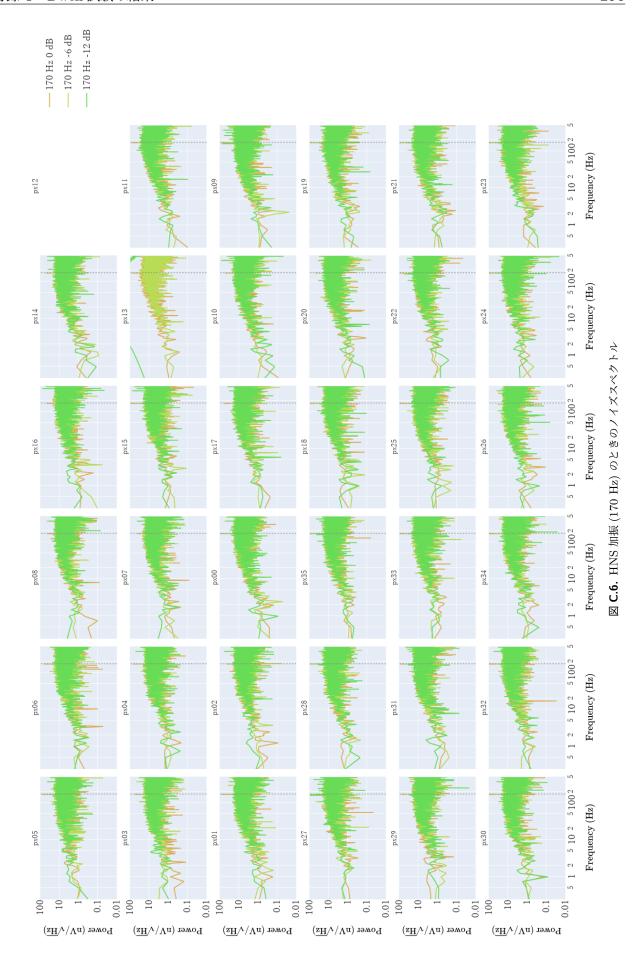


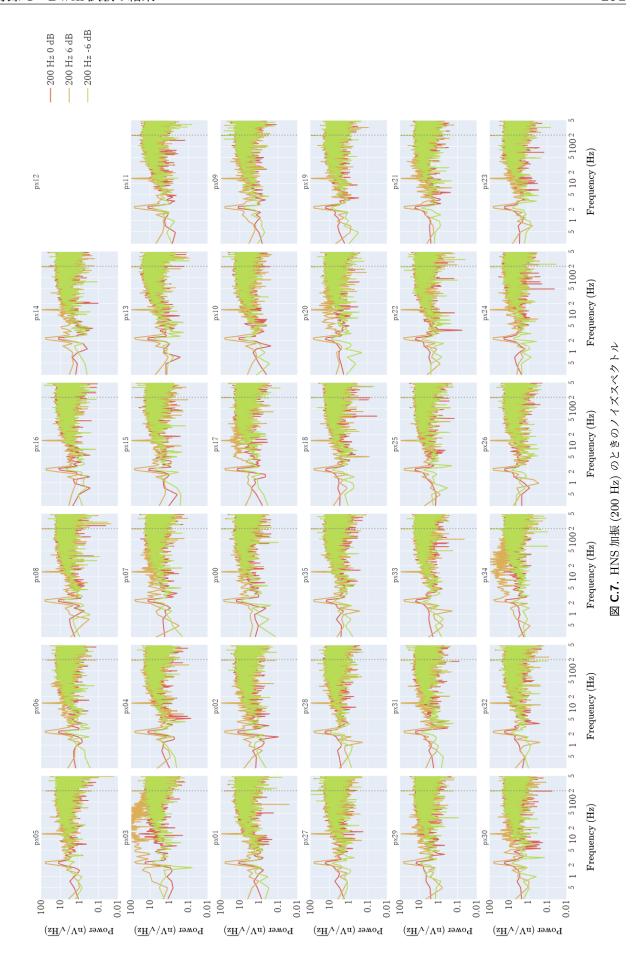




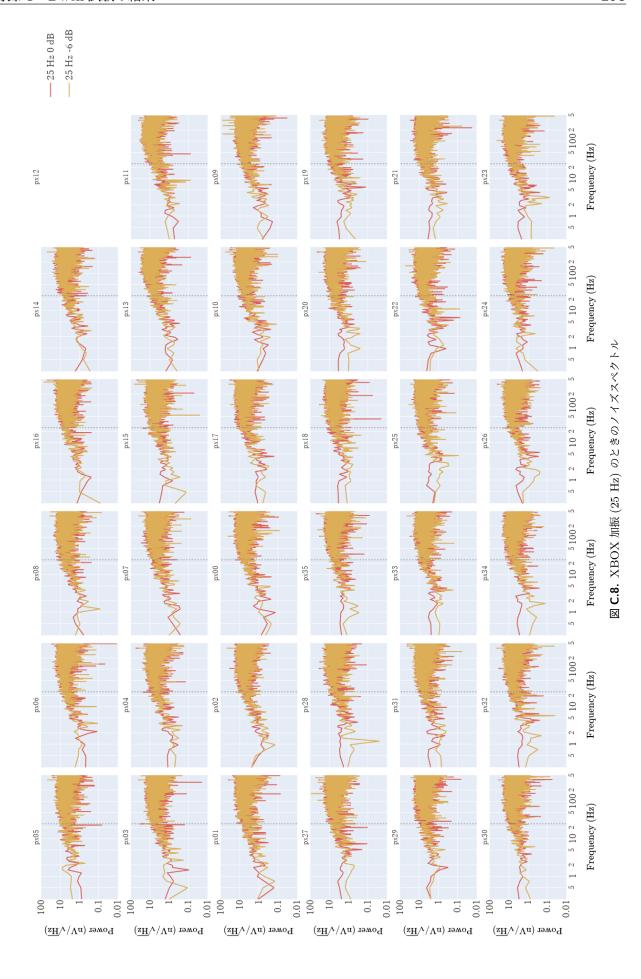






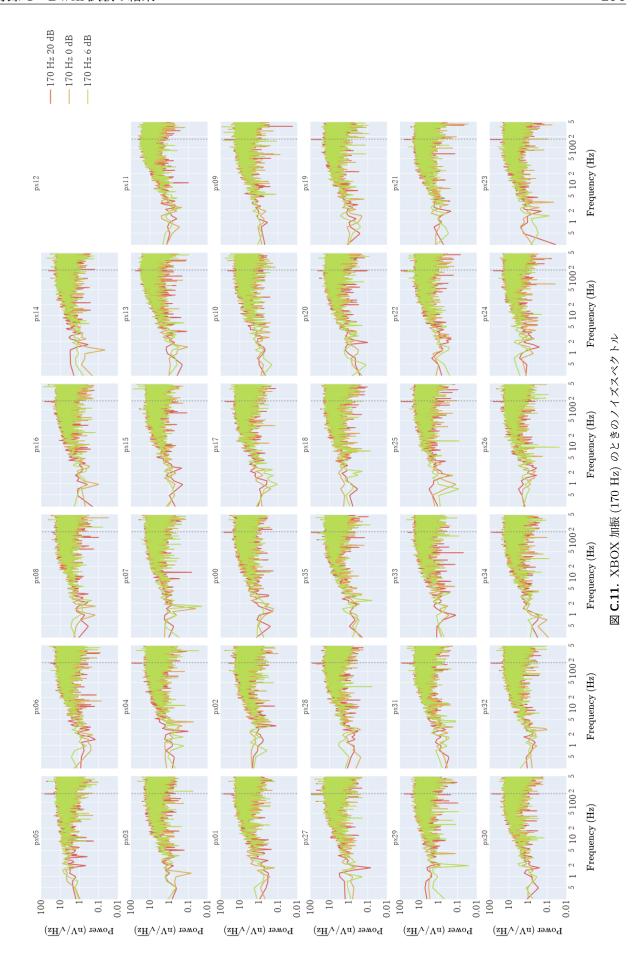


C.2 XBOX 加振



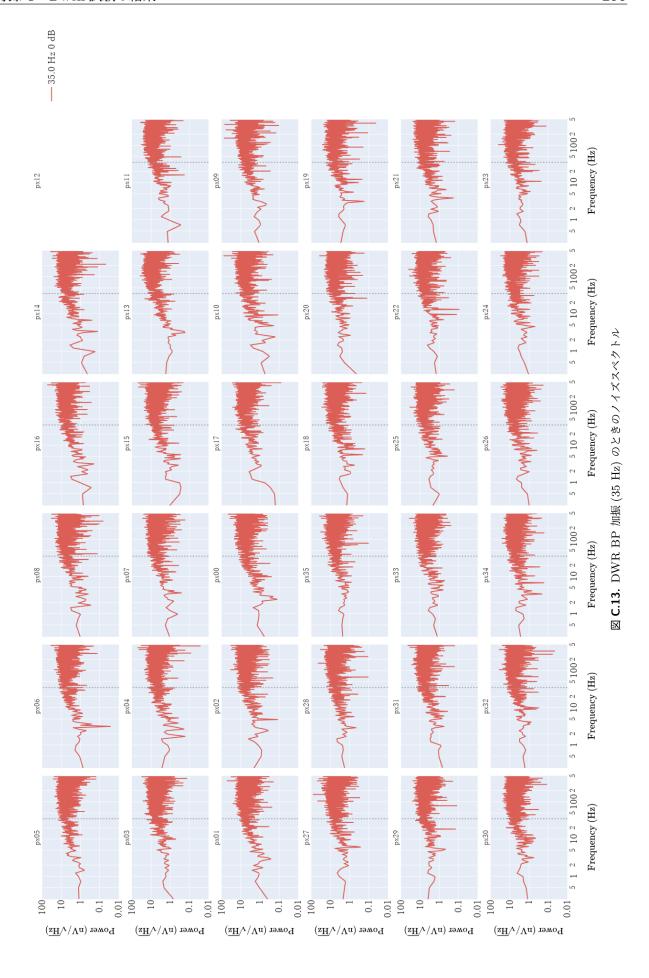


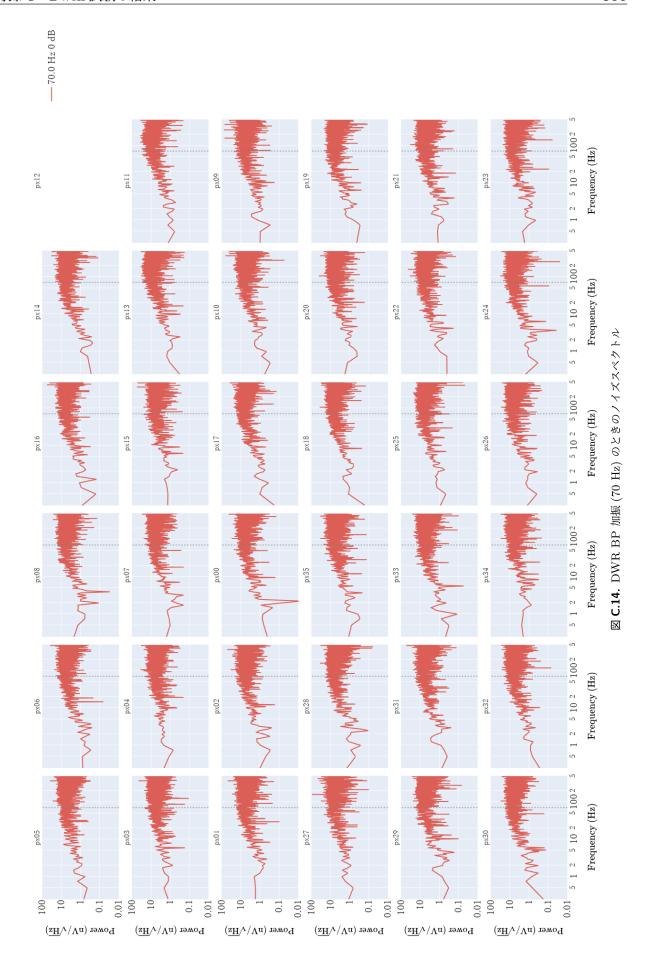


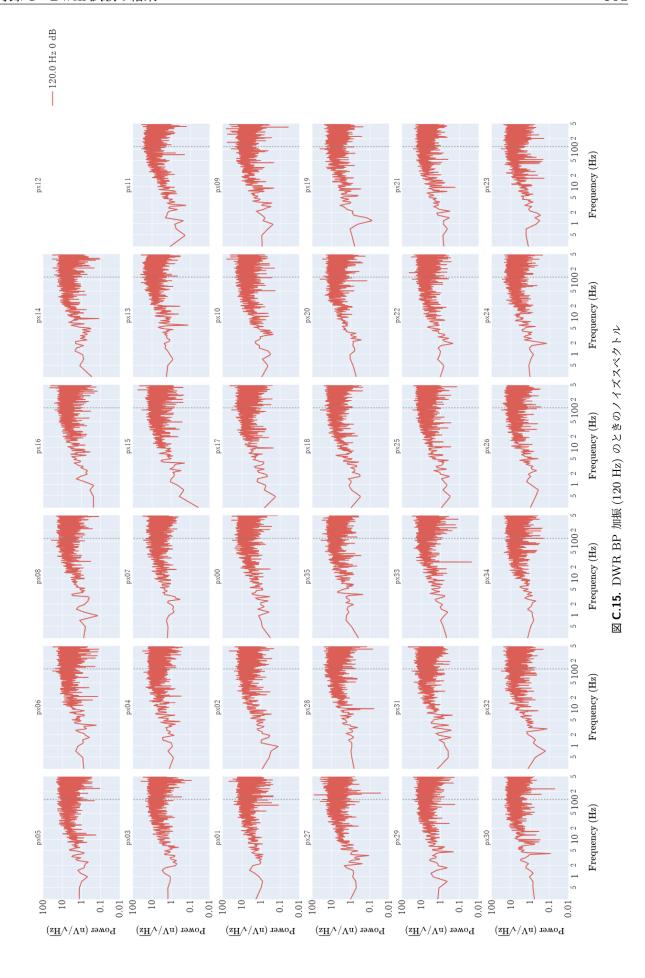


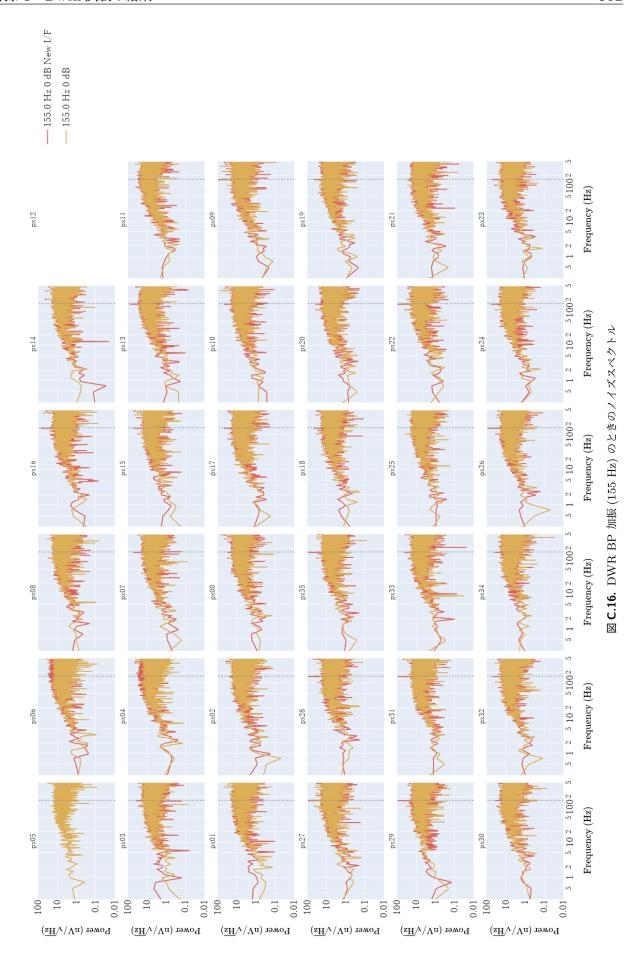


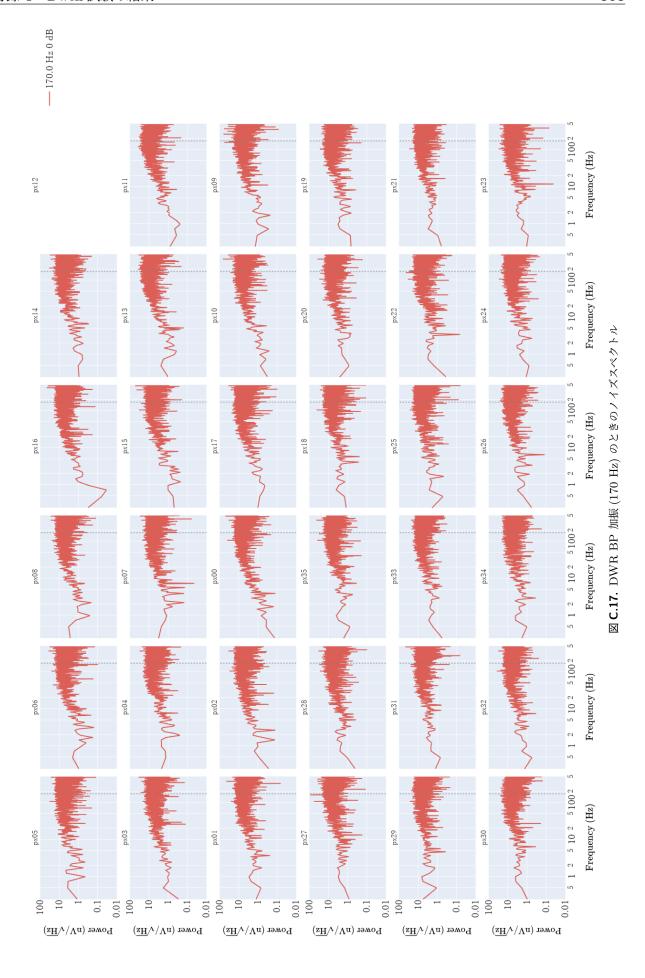
C.3 DWR 加振

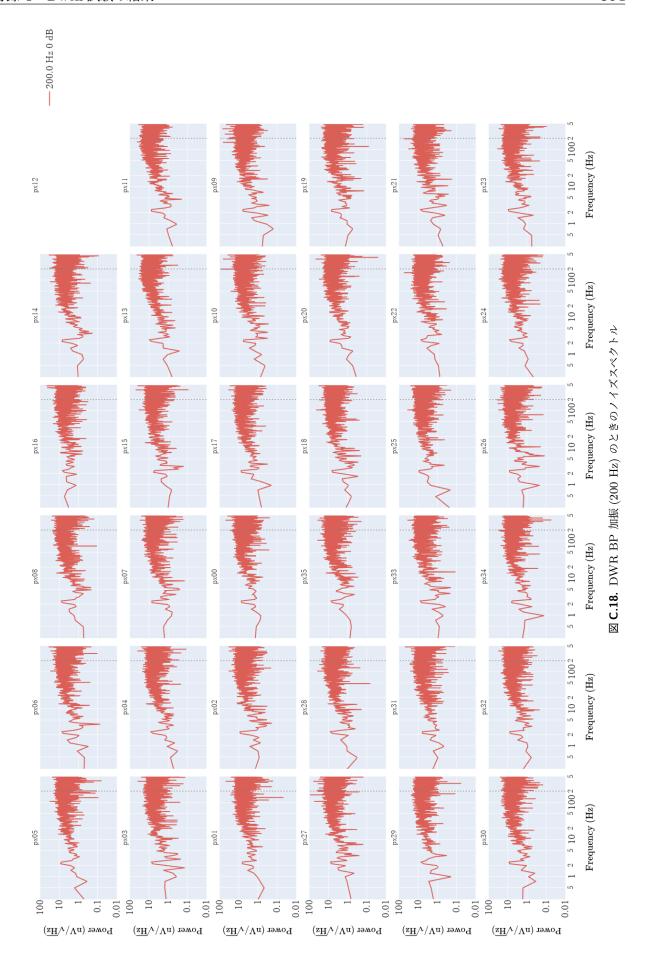


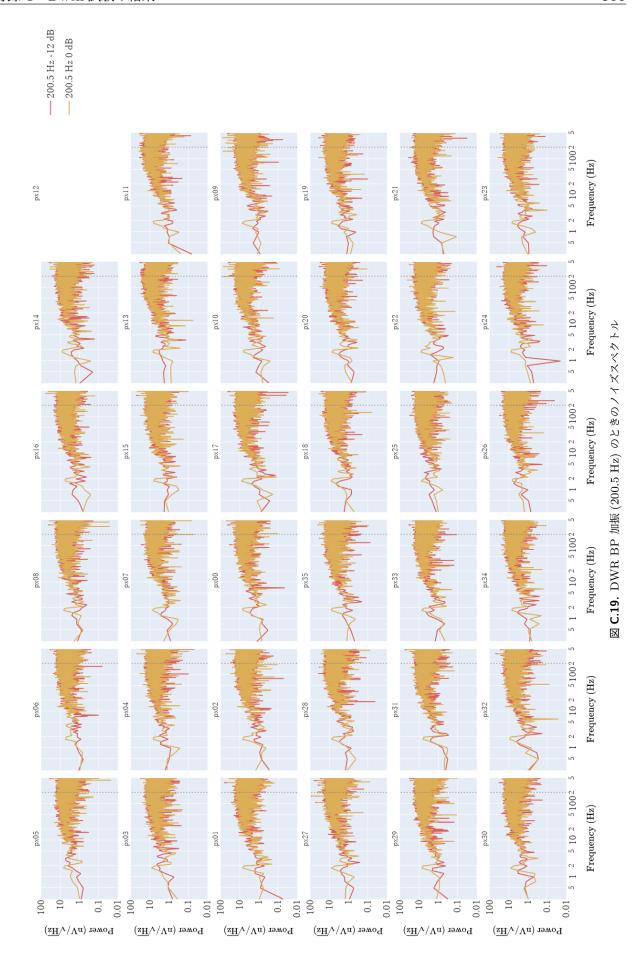












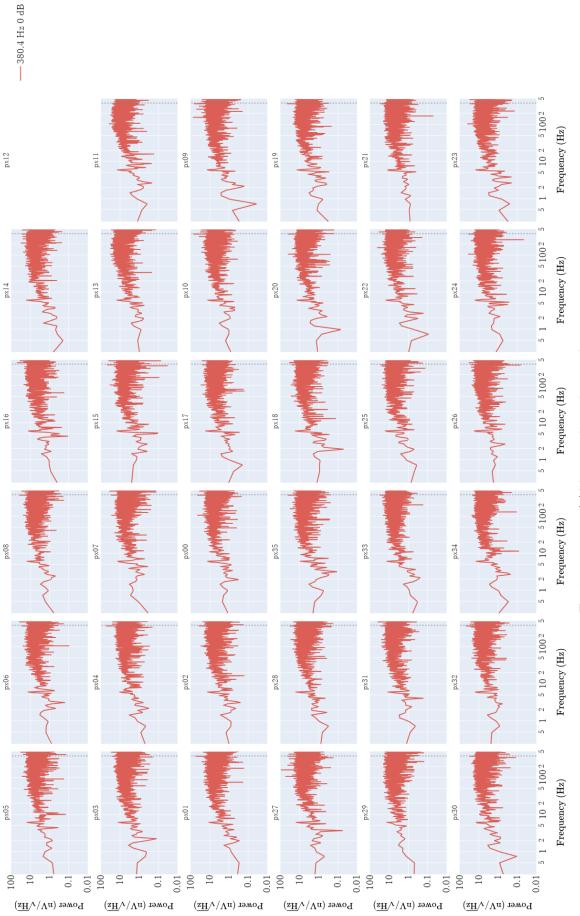
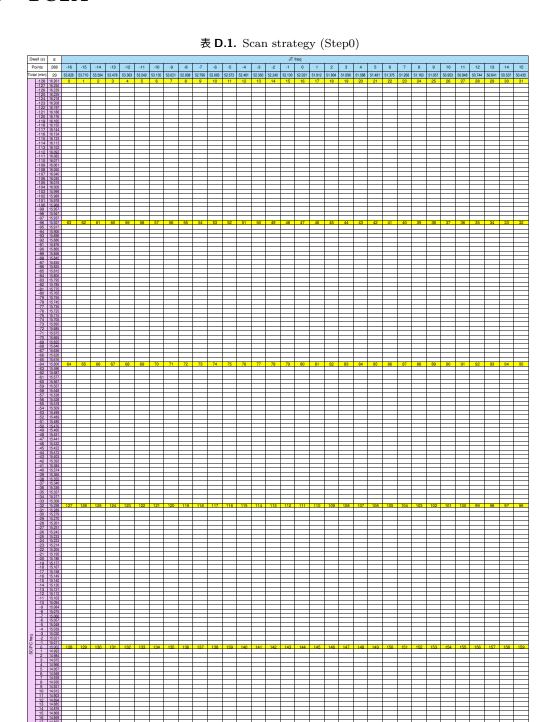


図 C.20. DWR BP 加振 (380.4 Hz) のときのノイズスペクトル

付録 D

Scan strategy

D.1 TC2A



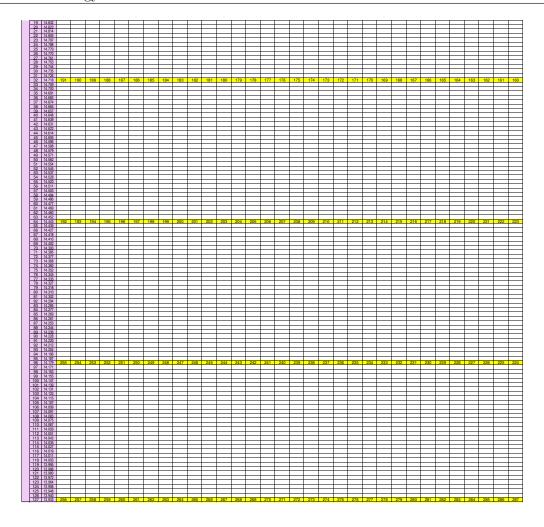
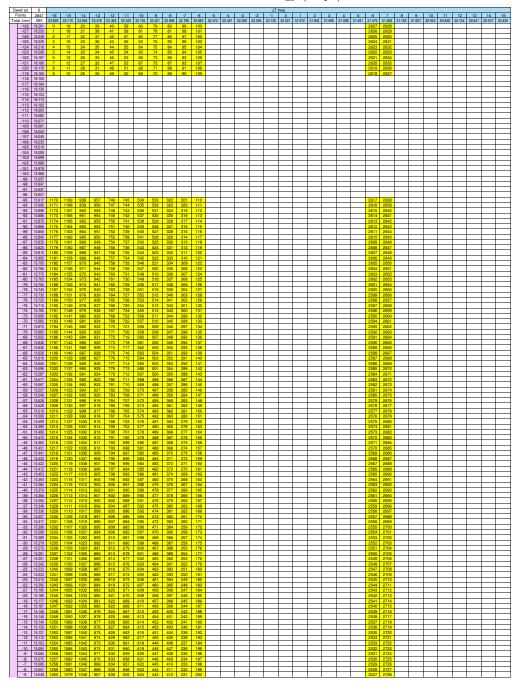


表 D.2. Scan strategy (Step1)



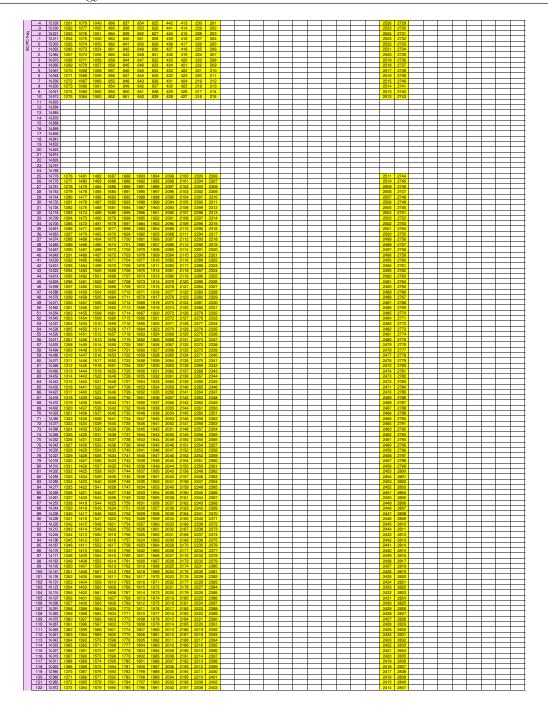


表 D.3. Scan strategy (Step2)

Dwell (s Points Total (m	105	4 -16	-15 53.710	-14 53.594	-13	-12	-11 53.249	-10 53.135	-9 53.021	-8 52.908	-7 52.798	-6 52.683	-5 52 572	-4 52.661	-3 52350	-2 52.200	-1 52 130	0	1 51.912	2	3 51.696	4 51.588	5 51.481	6	7 51 268	8 51 163	9 51 057	10 50.963	11	12	13	14	15 50.435
-12 -12	8 16.2 7 16.2	50	33.710	03.094		33,303	10	33.130	14	15	02.750	32,003	02.012	02.401	02.000	02.240	02.130	52.021	01.912	31.004	01.050	01.000	31.401	01.310	01.200	01.163	51.057	00.203	30.040	30.744	50.041	30.331	50.435
-12 -12 -12	5 16.2 4 16.2	18	3 2 1		5 4		9		13	16 17 18	24 23 22													965 964	907								
-12 -12 -12	3 16.2 2 16.1 1 16.1 0 16.1	97	1				7	11		19	22 21 20	25												963 962 961	958							F	
-11	9 16.1 8 16.1	65 55				6																		960 949	960								
-11	7 16.1 6 16.1	44 34																															
	4 16.1 3 16.1	13																															
-11	1 16.0	62 71																															
-10 -10	8 16.0 7 16.0	60 40																															
-10 -10	6 16.0 5 16.0 4 16.0	19																														H	
-10 -10	3 15.9 2 15.9 1 15.9	99 68 78																															
-10	0 15.9 9 15.9 3 15.9	68																															
-9	7 15.9 3 15.9	97 27																															
-9 -9:	15.9	06 96	367	295			223		151			26 27												948	962								
-9 -9	15.8	76 368 66	366	296 297 298	294	224		152 153 154	150	93 94		28													963 964 965							F	
-8	9 15.8 3 15.8 7 15.8	45 369	365 364	299 300	293	225 226 227	222	155		95 96	92 91	29 30												947 946 945	966 967 968								
8-1	15.8	15	363	301	292	228 229	221 220	156 157	149 148		90													944 943	969								
-8	15.7	95 372	J02	303	290			158			pn.	31																			=		
-8 -8 -7	1 15.7 0 15.7 9 15.7	65 374		304			219 218			97	- 69														970								
-7	3 15.7 7 15.7 3 15.7	35 376 25 377		305	289	230	217	159 160	147	98	88	32 33												942	971								
-7	15.7	15 378	361	306 307	288 287	231	216	161		99	87	34			1053									941	972 973								
-7:	2 15.6 1 15.6 1 15.6	85 379 75	260	308	286 285	233	214			100	86													940	974							E	
-6	15.6	85 46	359			LUU			146		05													939	975						\equiv		
-6	7 15.6 3 15.6 5 15.6	26 16	308	309 310	284	234	213 212	163 164 165	140	102	85														976 977								
-6 -6	15.6 15.5 15.5	96 381 87	357	311	283	235 236	211 210	166		103														938	978 979								
-6 -6	15.5 15.5 15.5	67 382 67	356	312	282 281			167	144	104		36 37 38												936									
-5	15.5	48	355 354 363	313		237 238 239					84	39												934	980 981								
-5	15.5 15.5 15.5 15.5	09	352	214	280					105	83	40 41													982								
-5: -5	15.4	89 80		315				169	142	106	82 81	42 43 44												933	984								
-4	15.4 15.4 15.4	60 384 51		316	279 278				141 140	108	80 79	45												932	986 987								
-4	7 15.4 3 15.4 5 15.4	32 22		317	277		209	170	139	109	78													931	988 989								
-4	15.4 3 15.4 2 15.3	03 93 386		318		240	208	171 172 173	138		77													930 929 928	990								
-4 -4	15.3	84 387 74 85 388							137	110	76 76														992								
-3	3 15.3 7 15.3 3 15.3	55 46	351	210	276	241		174 175	136 135	111	74	40												927	993								
-3	15.3	27 17	350	320		242 243	207	177			/3	46												926	994								
-3	15.2	98 390 89	349	321 322			206	178	134			48												925 924	996 997								
-3 -2	15.2 15.2 15.2	79 70 61 391	347			244		179			72	49												923	998								
-2 -2	7 15.2 3 15.2 5 15.2	393		323	275 274		F	180	Ē	113	71									Ē	F			922	1000		Ē	Ē				Ē	Ē
-2	15.2 15.2 15.2	23 394	346	324	273	245			133	114	69 68 67													921	1002								
-2	15.1	95 86	344		272		200																								=		
	9 15.1 3 15.1 7 15.1 3 15.1		343	325	270 269 268	246	204	181	131			50													1004							e	
					267	246		182	129	115	40													919	1005								
-1	15.1 3 15.1 2 15.1 1 15.1	03	342 341		266	247 248	203	183 184	128	116	65													918 917 916									
-11 -9 -8	15.0 15.0	94 401 84 402 75	340			249					64 63	51												915 914									
	15.0 15.0 15.0 15.0		339	300	265	250 251 252	202	185 186 187 188	127	117	63 62 61													913 912	1006 1007							F	
4 2	15.0 15.0 15.0 15.0	39 30 404 21 405	338 337	327	264 263	253	201 200 199	188 189		119	60	F^												011	1008								
			337 336 335 334	321						120	- 60	53 54												910 909 908 907									
2	14.9 14.9 14.9	84 75	222		262 261		198	190	126 125 124		59													906 905 904 903 902									E
5	14.9 14.9 14.9	66 67 406	332 331 330		261 260 259 258	254	197 196 196		123	121	58 57 56										H			903 902 901	1009						\equiv	FĪ	H
	, 14.0	.,																															

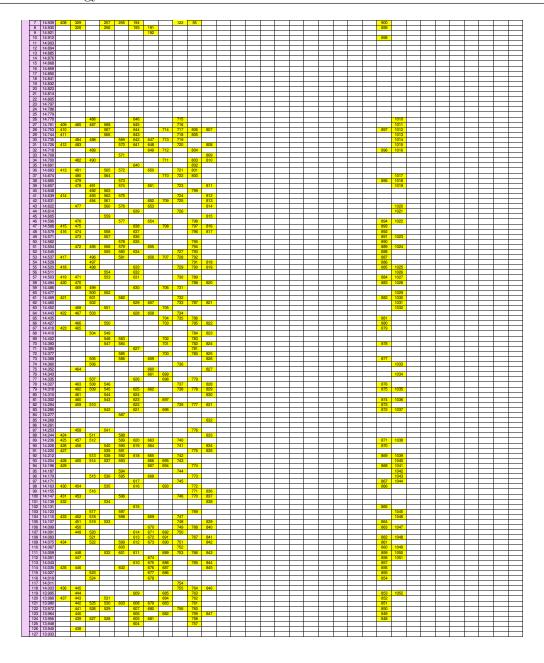
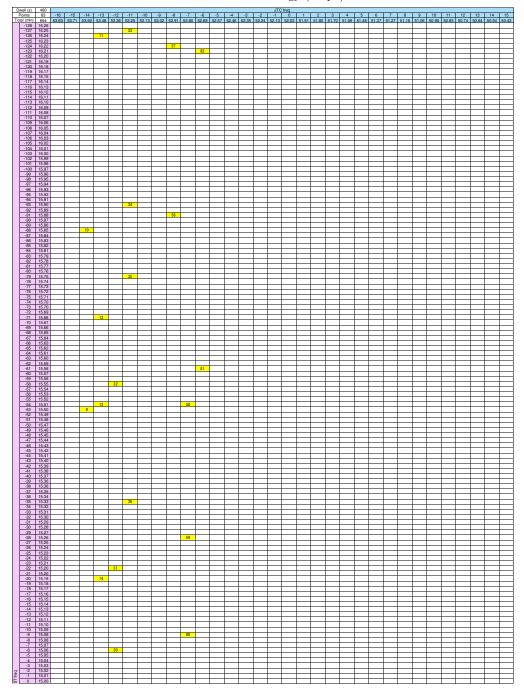
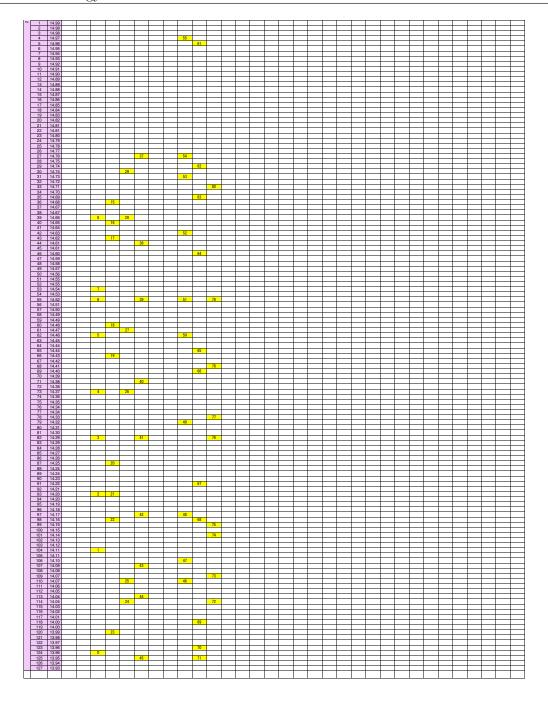


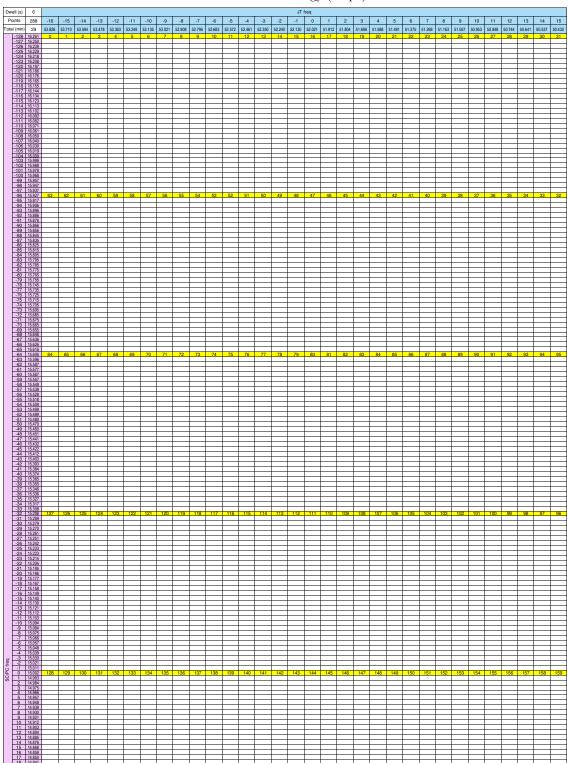
表 D.4. Scan strategy (Step3)





D.2 TC4

表 D.5. Scan strategy (Step0)



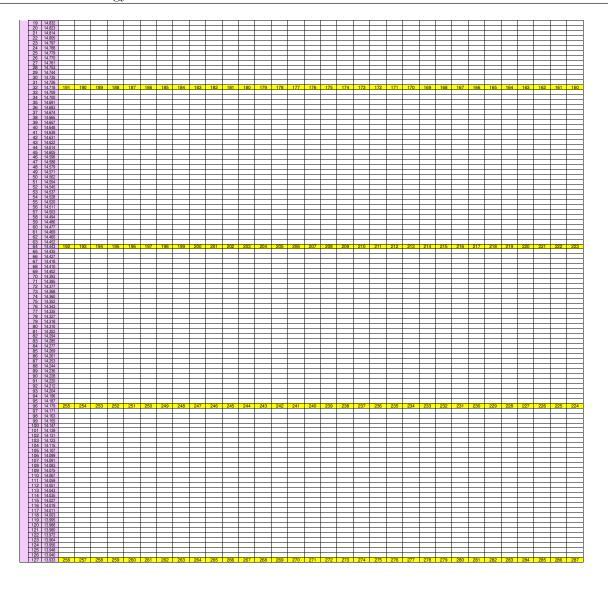


表 D.6. Scan strategy (Step1)

Dwell (s)	6.000																JTC	frea															
Points	4864.000	-16	-15	-14	-13	-12		-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Total (min)	486.400	53.83	53.71	53.59	53.48	53.36	53.25	53.13	53.02	52.91 511	52.80 512	52.68 1023	52.57 1024	52.46 1535	52.35	52.24 2047	52.13 2048	52.02	51.91 2560	51.80 3071	51.70 3072	51.59 3583	51.48 3584	51.37 4095	51.27 4096	51.16 4607	51.08	50.95	50.85	50.74	50.64	50.54	50.43
-128 -127	16.261								1	510	513	1023	1024	1534	1537	2047	2048	2558	2561	3070	3073	3582	3585	4095	4096	4606	4609						
-126	16.239								2	509	514	1021	1026	1533	1538	2045	2050	2557	2562		3074	3581	3586	4093	4098	4605	4610						
-125	16.229								3	508	515	1020	1027	1532	1539	2044	2051	2556	2563		3075	3580	3587	4092	4099	4604	4611						
-124 -123	16.218								5	507	516 517	1019	1028	1531	1540	2043	2052	2555 2554	2564 2565	3067 3066		3579 3578	3588 3589	4091	4100	4603	4612 4613						
-122	16.197								6	505	518	1017	1030	1529	1542	2041	2054	2553	2566	3065	3078	3577	3590	4089	4102	4601	4614						
-121	16.186								7	504	519	1016	1031	1528	1543	2040	2055	2552	2567	3064	3079	3576	3591	4088	4103	4600	4615						
-120	16.176								8	503	520 521	1015	1032	1527	1544	2039	2056	2551	2568	3063	3080	3575	3592 3593	4087	4104	4599 4598	4616						
-119 -118	16.165								10	501	521	1013	1033	1525	1545	2038	2057	2549	2570	3062	3082	3574	3593	4085	4105	4598	4618						
-117	16.144								11	500	523	1012		1524	1547	2036	2059	2548	2571		3083	3572	3595	4084	4107	4596	4619						
-116	16.134								12	499	524	1011		1523	1548	2035	2060	2547	2572	3059		3571	3596	4083	4108		4620						
-115 -114	16.123								13	498 497	525 526	1010	1037	1522 1521	1549 1550	2034	2061	2546 2545	2573 2574	3058 3057		3570 3569	3597 3598	4082	4109 4110	4594 4593	4621 4622						
-113	16.102								15	496	527	1008	1039	1520	1551	2032	2063	2544	2575	3056	3087	3568	3599	4080	4111	4592	4623						
-112	16.092								16	495	528	1007	1040	1519	1552	2031	2064	2543	2576	3055	3088	3567	3600	4079	4112	4591	4624						
-111	16.082								17	494	529	1006	1041	1518	1553	2030	2065	2542 2541	2577	3054	3089	3566 3565	3601	4078	4113	4590 4589	4625						
-110 -109	16.071 16.061								18	493	531	1005	1042	1517	1555	2029	2066	2541	2579		3090	3564	3603	4077	4114	4589 4588	4626						
-108	16.050								20	491	532	1003		1515	1556	2027	2068	2539	2580		3092	3563	3604	4075	4116	4587	4628						
-107	16.040								21	490	533	1002		1514	1557	2026	2069	2538	2581	3050		3562	3605	4074		4586	4629						
-106	16.030								22	489 488	534 535	1001	1046	1513 1512	1558 1559	2025	2070	2537 2536	2582 2583	3049 3048	3094	3561 3560	3606 3607	4073 4072	4118	4585 4584	4630 4631						
-105 -104	16.019							H	24	487	536	999	1047	1511	1560	2024	2072	2535	2584	3047	3095	3559	3608	4072	4119	4583	4632						
-103	15.999								25	486	537	998	1049	1510	1561	2022	2073	2534	2585	3046	3097	3558	3609	4070	4121	4582	4633						
-102	15.988	<u> </u>			₩.	₩.	<u> </u>	\square	26	485	538	997	1050	1509	1562	2021	2074	2533	2586	3045	3098	3557	3610	4069	4122	4581	4634					_]	
-101	15.978	-	-	-	-	-	\vdash	H	27 28	484 483	539 540	996 995	1051	1508 1507	1563 1564	2020	2075	2532 2531	2587 2588	3044	3099	3556 3555	3611 3612	4068 4067	4123	4580 4579	4635 4636			-	-		
-100 -99	15.968 15.957				t	t	t	H	29	482	541	994		1506	1565	2018	2077	2530	2589	3042		3554	3613	4066	4125	4578	4637						
-98	15.947								30	481	542	993	1054	1505	1566	2017	2078	2529	2590	3041	3102	3553	3614	4065	4126	4577	4638						
-97	15.937				1	1	<u> </u>		31	480	543	992	1055	1504	1567	2016	2079	2528	2591	3040	_	3552	3615	4064	4127	4576	-						
-96 -95	15.927								32	479 478	544 545	991	1056	1503 1502	1568 1569	2015	2080	2527	2592	3039	3104 3105	3551	3616 3617	4063	4128	4575	4640 4641						
-95	15.917	L	L	L	L	L	L		34	477	546	989	1057	1502	1570	2013	2082	2525	2593	3037	3105	3549	3618	4062	4130	4573	4642		L	L			
-93	15.896								35	476	547	988	1059	1500	1571	2012	2083	2524	2595	3036	3107	3548	3619	4060	4131	4572	4643						
-92	15.886								36 37	475 474	548 549	987 986		1499	1572 1573	2011	2084	2523 2522	2596 2597		3108	3547 3546	3620 3621	4059 4058	4132	4571 4570	4644 4645						
-91 -90	15.876 15.866								38	474	550	985		1498	1574	2010	2085	2522	2597	3034		3545	3622	4058	4134		4646						
-89	15.856								39	472	551	984	1063		1575	2008	2087	2520	2599	3032		3544	3623	4056	4135	4568	4647						
-88	15.845								40	471	552	983	1064	1495	1576	2007	2088	2519	2600	3031	3112	3543	3624	4055	4136	4567	4648						
-87	15.835								41	470 469	553 554	982 981	1065 1066	1494 1493	1577	2006	2089	2518 2517	2601	3030 3029	3113	3542 3541	3625 3626	4054	4137	4566 4565	4649						
-86 -85	15.825 15.815								43	468	555	980	1067	1493	1579	2005	2090	2517	2603	3029	3115	3540	3627	4053	4139	4564	4651						
-84	15.805								44	467	556	979	1068	1491	1580	2003	2092	2515	2604	3027	3116	3539	3628	4051	4140	4563	4652						
-83	15.795								45	466	557	978		1490	1581	2002	2093	2514	2605	3026		3538	3629	4050	4141	4562	4653						
-82	15.785								46 47	465 464	558 559	977 976		1489	1582 1583	2001	2094	2513 2512	2606	3025 3024		3537 3536	3630 3631	4049 4048	4142		_						
-81 -80	15.775 15.765								48	463	560	975	1071	1487	1584	1999	2096	2511	2608	3023		3535	3632	4048	4144	4559	4656						
-79	15.755								49	462	561	974	1073	1486	1585	1998	2097	2510	2609		3121	3534	3633	4046	4145	4558	4657						
-78	15.745								50	461	562	973	1074	1485	1586	1997	2098	2509	2610	3021	3122	3533	3634	4045	4146	4557	4658						
-77 -76	15.735 15.725								51 52	460 459	563	972 971	1075	1484	1587	1996	2099	2508 2507	2611	3020 3019	3123 3124	3532 3531	3635 3636	4044	4147	4556 4555	4659						
-75	15.715								53	458	565	970	1077	1482	1589	1994	2101	2506	2613	3018		3530	3637	4042	4149	4554	4661						
-74	15.705								54	457	566	969	1078		1590	1993	2102	2505	2614	3017		3529	3638	4041	4150	4553	4662						
-73	15.695								55 56	456 455	567	968		1480	1591	1992	2103	2504	2615	3016 3015		3528 3527	3639 3640	4040	4151	4552 4551	4663 4664						
-72 -71	15.685 15.675								57	454	569	966	1081	1479	1593	1991	2104	2502	2617		3128	3527	3641	4039	4153	4550	4665						
-70	15.665								58	453	570	965	1082	1477	1594	1989	2106	2501	2618	3013	3130	3525	3642	4037	4154	4549	4666						
-69	15.655								59	452	571	964	1083	1476	1595	1988	2107	2500	2619	3012	3131	3524	3643	4036	4155	4548	4667						
-68	15.646 15.636	-	-	-	-	-	\vdash	H	60	451 450	572 573	963 962	1084	1475	1596 1597	1987 1986	2108	2499 2498	2620 2621	3011	3132	3523 3522	3644 3645	4035 4034	4156	4547 4546	4668 4669			-	-		
-67 -66	15.626				t	t	t	H	62	449	574	961		1473	1598	1985	2110	2497	2622	3009		3521	3646	4034	4158	4545	4670						
-65	15.616								63	448	575	960		1472	1599	1984	2111		2623	3008		3520	3647	4032	4159		_						
-64	15.606	-	-	-	-	-		\vdash	64 65	447 446	576 577	959 958	1088	1471	1600	1983 1982	2112	2495 2494	2624 2625	3007 3006		3519 3518	3648 3649	4031	4160	4543 4542	4672 4673	-	-	-			
-63 -62	15.596 15.587	<u> </u>	 	 			 	H	66	445	578	958	1089	1469	1602	1982	2113	2494	2626	3006	3137	3518	3650	4030	4162	4542 4541	4674			 	<u> </u>		
-61	15.577								67	444	579	956	1091	1468	1603	1980	2115	2492	2627	3004	3139	3516	3651	4028	4163	4540	4675						
-60	15.567	L						Ш	68	443	580	955	1092	1467	1604	1979	2116	2491	2628	3003	3140	3515	3652	4027	4164	4539	4676						
-59	15.557						\vdash		69 70	442	581 582	954 953	1093	1466	1605	1978	2117	2490 2489	2629	3002 3001	3141	3514	3653 3654	4026 4025	4165 4166	4538 4537	4677				-	_	
-58 -57	15.548 15.538				t	t	t	H	71	440	583	952	1094	1464	1607	1976	2119	2488	2631		3143	3512	3655	4025	4167	4536	4679						
-56	15.528								72	439	584	951	1096	1463	1608	1975	2120	2487	2632		3144	3511	3656	4023	4168	4535	4680						
-55	15.518	-			-	-	<u> </u>	\vdash	73	438	585	950	1097	1462	1609	1974	2121	2486	2633	2998	0.10	3510	3657	4022	4169	4534	4681						
-54 -53	15.509	-	-	-	-	-	\vdash	\vdash	74 75	437 436	586 587	949 948	1098	1461 1460	1610 1611	1973 1972	2122	2485 2484	2634 2635	2997 2996	3146 3147	3509 3508	3658 3659	4021	4170	4533 4532	4682 4683			-	-		
-53	15.489						t		76	435	588			1459		1971				2995					4172								
-51	15.480								77	434	589	946	1101	1458	1613	1970	2125	2482		2994	0	0000	3661	4018	4173	4530	4685						
-50	15.470				1	1	<u> </u>		78 79	433 432	590 591		1102	1457	1614 1615	1969 1968	2126	2481 2480	2638 2639	2993		3505 3504	3662 3663	4017		4529 4528							
-49 -48	15.460						1	\vdash	80	432	592			1455			2127			2992	0.0.	3504				4528 4527							
-47	15.441	L	L	L	Ŀ	Ŀ	L	LП	81	430	593	942	1105	1454		1966	2129	2478	2641	2990	3153	3502	3665	4014	4177	4526	4689	L	L	L	L		L
-46	15.432								82	429	594		1106		1618	1965	2130		2642	2989		3501	3666	4013		4525							
-45 -44	15.422	-	-	-	-	-		\vdash	83 84	428 427	595 596	940 939		1452 1451	1619 1620	1964 1963	2131 2132	2476 2475	2643 2644	2988 2987	3155 3156	3500 3499	3667	4012 4011	4179 4180	4524 4523	4691 4692	-	-	-			
-44	15.412	<u> </u>	 	 			 	H	84	427	596 597		1108		1620	1963 1962	2132	2475	2644 2645		3156	3499	3668 3669	4011	4180	4523 4522				 			
-42	15.393								86	425	598	937	1110	1449	1622	1961	2134	2473	2646	2985	3158	3497	3670	4009	4182	4521	4694						
-41	15.384	L						Ш	87	424	599	936		1448	1623	1960	2135	2472		2984			3671	4008		4520							
-40	15.374				-	-	-	H	88 89	423 422	600		1112	1447	1624 1625	1959 1958	2136 2137	2471	2648	2983 2982		3495 3494	3672 3673	4007 4006		4519 4518					_		
-39 -38	15.365 15.355	<u> </u>	 	 			 	H	90	422	601			1446	1625	1958	2137			2982 2981			3673 3674	4006		4518 4517				 	<u> </u>		
-37	15.346	L	L	L	Ŀ	Ŀ	L	LП	91	420	603	932	1115	1444	1627	1956	2139	2468	2651	2980	3163	3492	3675	4004	4187	4516	4699	L	L	L	L		L
-36	15.336								92	419	604	931		1443	1628	1955	2140	2467	2652		3164		3676	4003	4188	4515							
-35	15.327	-	-	-	\vdash	\vdash	-	\vdash	93 94	418	605 606	930		1442 1441	1629	1954 1953	2141	2466 2465	2653 2654	2978 2977	3165	3490 3489	3677 3678	4002 4001	4189	4514 4513		-	-	-	-		
-34	15.317 15.308	<u> </u>	 	 			 	H	95	417	607			1440			2142			2977						4513 4512				 	 		
*00	10.000								-																								

Г											927													4192						
ŀ	-32 -31	15.298 15.289						96	415	608	927	1120	1439	1632	1951	2144	2463 2462	2656 2657	2975	3168 3169	3487 3486	3680 3681	3999 3998	4192	4511 4510	4704 4705				<u> </u>
ľ	-30	15.279						98	413	610	925	1122	1437	1634	1949	2146	2461	2658	2973	3170	3485	3682	3997	4194	4509	4706				
Ī	-29	15.270						99	412	611	924	1123	1436	1635	1948	2147	2460	2659	2972	3171	3484	3683	3996	4195	4508	4707				
	-28	15.261						100	411	612	923	1124	1435	1636	1947	2148	2459	2660	2971	3172	3483	3684	3995	4196	4507	4708				
Ļ	-27	15.251						101	410	613	922	1125	1434	1637	1946	2149	2458	2661	2970	3173	3482	3685	3994	4197	4506	4709				₩
ŀ	-26	15.242						102	409	614 615	921 920	1126	1433	1638 1639	1945 1944	2150	2457 2456	2662 2663	2969 2968	3174 3175		3686 3687	3993 3992	4198 4199	4505 4504	4710 4711				
ŀ	-25 -24	15.233 15.223						103	408	616	919	1128	1432	1640	1944	2152		2664	2967	3176		3688	3992	4200	4503	4711				
ľ	-23	15.214						105	406	617	918	1129	1430	1641	1942	2153	2454	2665	2966	3177	3478	3689	3990	4201	4502	4713				
Ī	-22	15.205						106	405	618	917	1130	1429	1642	1941	2154	2453	2666	2965	3178	3477	3690	3989	4202	4501	4714				
	-21	15.195						107	404	619	916	1131	1428	1643	1940	2155	2452	2667	2964	3179	3476	3691	3988	4203	4500	4715				
L	-20	15.186						108	403	620	915	1132	1427	1644	1939	2156	2451	2668	2963	3180	3475	3692	3987	4204	4499	4716				
ļ	-19	15.177						109	402	621	914	1133	1426	1645 1646	1938	2157	2450	2669	2962	3181	3474	3693	3986	4205	4498	4717				
ŀ	-18 -17	15.167 15.158						110	401	622	913 912	1134	1425	1647	1937 1936	2158 2159	2449 2448	2670	2961 2960	3182 3183	3473 3472	3694 3695	3985 3984	4206 4207	4497 4496	4718 4719				_
ŀ	-16	15.149						112	399	624	911	1136	1423	1648	1935	2160	2447		2959	3184	3471		3983		4495	4720				
ľ	-15	15.140						113	398	625	910	1137	1422	1649	1934	2161	2446	2673	2958	3185	3470	3697	3982	4209	4494	4721				
Ī	-14	15.130						114	397	626	909	1138	1421	1650	1933	2162	2445	2674	2957	3186	3469	3698	3981	4210	4493	4722				
	-13	15.121						115	396	627	908	1139	1420	1651	1932	2163	2444	2675	2956	3187	3468	3699	3980	4211	4492	4723				
Ļ	-12	15.112						116	395	628	907	1140	1419	1652	1931	2164	2443	2676	2955	3188	3467	3700	3979	4212	4491	4724				₩
ŀ	-11	15.103						117	394	629	906	1141	1418	1653	1930	2165	2442	2677 2678	2954	3189	3466	3701	3978 3977	4213 4214	4490 4489	4725 4726				
ŀ	-10 -9	15.094 15.084						118	393	631	905	1142	1417	1655	1929	2166	2440		2953	3190	0.00	3702 3703	3977	4214	4489	4726				-
ŀ	-8	15.075						120	391	632	903	1144	1415	1656	1927	2168	2439	2680	2951	3192		3704	3975	4216	4487	4728				
Ī	-7	15.066						121	390	633	902	1145	1414	1657	1926	2169	2438	2681	2950	3193	3462	3705	3974	4217	4486	4729				
	-6	15.057						122	389	634	901	1146	1413	1658	1925	2170	2437	2682	2949	3194	3461	3706	3973	4218	4485	4730				Ш
L	-5	15.048				\vdash		123	388	635	900	1147	1412	1659	1924	2171	2436	2683	2948	3195	3460	3707	3972	4219	4484	4731				⊢
ļ	-4	15.039				\vdash	\vdash	124	387 386	636	899 898	1148	1411	1660 1661	1923	2172	2435 2434	2684	2947	3196 3197	3459 3458	3708 3709	3971 3970	4220 4221	4483	4732 4733				-
ŀ	-3 -2	15.030 15.021				\vdash	H	125	385	638	898	1149	1410	1662	1922	2173		2686	2945	3197	3458	3709	3970	4221	4482	4734				\vdash
fred	-1	15.021				\Box		127	384	639	896	1151	1408	1663	1920	2175	2432	2687	2944	3199	3456	3711	3968	4223	4480	4735				<u> </u>
2ST f	0	15.002						128	383	640	895	1152	1407	1664	1919	2176	2431		2943	3200	3455	3712	3967	4224	4479	4736				
"	1	14.993						129	382	641	894	1153	1406	1665	1918	2177	2430	2689	2942	3201		3713	3966		4478	4737				Ш
1	2	14.984	<u> </u>	<u> </u>		ш		130	381	642	893	1154	1405	1666	1917	2178	2429	2000	2941	3202		3714	3965		4477	4738	_			⊢
1	3	14.975	\vdash	\vdash		\vdash	H	131	380 379	643 644	892 891	1155	1404	1667 1668	1916 1915	2179 2180	2428 2427	2691 2692	2940 2939	3203 3204	3452 3451	3715 3716	3964 3963	4227 4228	4476 4475	4739 4740			_	\vdash
ŀ	5	14.966			-	\vdash		133	379	645	890	1157	1403	1669	1914	2181	2426	2693	2939	3204	3450	3717	3962	4229	4474	4740		-		\vdash
ı	6	14.948				П		134	377	646	889	1158	1401	1670	1913	2182		2694	2937	3206	3449	3718	3961	4230	4473	4742				
	7	14.939						135	376	647	888	1159	1400	1671	1912	2183	2424		2936	3207	3448	3719	3960	4231	4472	4743				
	8	14.930	_	_		\Box		136	375	648	887	1160	1399	1672	1911	2184		2696	2935	3208		3720	3959	4232	4471	4744	_			oxdot
1	9	14.921						137	374	649	886	1161	1398	1673	1910	2185	2422	2697	2934	3209	0	3721	3958	4233	4470	4745				-
ŀ	10	14.912	-	-	-	\vdash	\vdash	138	373 372	650 651	885 884	1162	1397 1396	1674 1675	1909	2186	2421	2698	2933	3210 3211	3445	3722 3723	3957 3956	4234 4235	4469 4468	4746 4747	-	-		
ŀ	11	14.903			-	\vdash		139	372	652	883	1163	1396	1676	1908	2188	2420	2699	2932	3211	3444	3723	3955	4235	4468	4748		-		\vdash
ľ	13	14.885						141	370	653	882	1165	1394	1677	1906	2189	2418	2701	2930	3213	3442	3725	3954	4237	4466	4749				
	14	14.876						142	369	654	881	1166	1393	1678	1905	2190	2417	2702	2929	3214	3441	3726	3953	4238	4465	4750				
L	15	14.868						143	368	655	880	1167	1392	1679	1904	2191		2703	2928	3215	3440	3727	3952	4239	4464	4751				
ŀ	16 17	14.859						144	367 366	656 657	879 878	1168	1391	1680 1681	1903	2192 2193	2415 2414	2704	2927 2926	3216 3217	3439 3438	3728	3951 3950	4240 4241	4463 4462	4752 4753				-
ŀ	18	14.850						146	365	658	877	1170	1389	1682	1902	2193	2413		2925	3217	3437		3949		4461	4754				-
ŀ	19	14.832						147	364	659	876	1171	1388	1683	1900	2195	2412		2924	3219	3436		3948		4460	4755				
İ	20	14.823						148	363	660	875	1172	1387	1684	1899	2196	2411	2708	2923	3220	3435	3732	3947	4244	4459	4756				
	21	14.814						149	362	661	874	1173	1386	1685	1898	2197		2709	2922	3221	3434	3733	3946	4245	4458	4757				
Ļ	22	14.805						150	361	662	873	1174	1385	1686	1897	2198	2409	2710	2921	3222	3433	3734	3945	4246	4457	4758				₩
ŀ	23	14.797						151	360 359	663 664	872 871	1175	1384	1687 1688	1896 1895	2199 2200	2408 2407		2920 2919	3223	3432 3431	3735 3736	3944 3943	4247 4248	4456 4455	4759 4760				_
ŀ	24 25	14.788						153	358	665	870	1177	1382	1689	1894	2201	2406		2918	3225	3430		3942	4249	4454	4761				
ľ	26	14,770						154	357	666	869	1178	1381	1690	1893	2202	2405	2714	2917	3226	3429	3738	3941	4250	4453	4762				
[27	14.761						155	356	667	868	1179	1380	1691	1892	2203	2404	2715	2916	3227	3428	3739	3940	4251	4452	4763				
L	28	14.753						156	355	668	867	1180	1379	1692	1891	2204		2716	2915	3228	3427	3740	3939	4252	4451	4764				Щ.
ŀ	29	14.744						157	354	669	866	1181	1378	1693	1890	2205	2402	2717 2718	2914 2913	3229	3426 3425	3741 3742	3938 3937	4253	4450	4765				
1	30	14.735				\vdash		158	353	670 671	865 864	1182	1377	1694	1889	2206	2401	2718	2913	3230	3425	3742	3937 3936	4254 4255	4449 4448	4766 4767				\vdash
ı	32	14.718						160	351	672	863	1184	1375	1696	1887	2208	2399	2720	2911	3232	3423	3744	3935	4256	4447	4768				
	33	14.709						161	350	673	862	1185	1374	1697	1886	2209		2721	2910	3233	3422	3745	3934	4257	4446	4769				
	34	14.700				μП		162	349	674	861	1186	1373	1698	1885	2210		2722	2909	3234	3421		3933		4445	4770				L
ļ	35	14.691				\vdash	\vdash	163	348	675 676	860 859	1187	1372	1699	1884	2211	2396		2908	3235		3747 3748	3932		4444	4771 4772				₩
1	36 37	14.683 14.674				\vdash		164	347	676	859 858	1188	1371	1700	1883	2212	2395	2724	2907	3236		3748 3749	3931	4260 4261	4443	4772				
ŀ	38	14.665						166	345	678	857	1190	1369	1702	1881	2214	2393	2726	2905	3238	3417	3750	3929	4262	4441	4774				
j	39	14.657						167	344	679	856	1191	1368	1703	1880	2215	2392	2727	2904	3239	3416	3751	3928	4263	4440	4775				
	40	14.648				μП		168	343	680	855	1192	1367	1704	1879	2216	2391		2903	3240	3415	3752	3927	4264	4439	4776				L
1	41	14.639						169	342	681 682	854 853	1193	1366 1365	1705 1706	1878	2217	2390 2389	2729 2730	2902 2901	3241 3242	3414	3753 3754	3926 3925	4265 4266	4438 4437	4777 4778				-
ŀ	42	14.631	\vdash	\vdash		\vdash	H	170	341	682	853 852	1194	1365	1706	1877	2218	2389	2730 2731	2901	3242	3413		3925 3924	4266 4267	4437 4436	4778 4779			_	\vdash
ŀ	44	14.622						172	339	684	852	1195	1364	1707	1875	2219	2388	-	2899	3243	3412		3924	4267	4435	4779				
ı	45	14.605	L	L				173	338	685	850	1197	1362	1709	1874	2221		2733	2898	3245		3757	3922	4269	4434	4781				L
	46	14.596						174	337	686		1198		1710			2385			3246	3409		3921	4270	4433	4782				Ш
ļ	47	14.588	<u> </u>	<u> </u>		ш		175	336			1199	1360	1711	1872	2223	2384			3247		3759	3920		4432	4783	_			⊢
ŀ	48	14.579	\vdash	\vdash		\vdash	H	176 177	335	688 689	847 846	1200 1201	1359	1712 1713	1871	2224	2383 2382	2736	2895	3248 3249	3407 3406	3760 3761	3919 3918	4272 4273	4431 4430	4784 4785			_	\vdash
ŀ	49 50	14.571 14.562						177	334	690	845	1201	1358	1714	1870 1869	2225	2382	2738	2893	3249		3762	3918		4429	4786				
ŀ	51	14.554						179	332	691	844	1203	1356	1715	1868	2227	2380			3251	3404		3916		4428					
	52	14.545						180	331	692		1204	1355	1716	1867		2379			3252		3764	3915	4276						
Į	53	14.537	L	L		ш		181	330	693	842	1205	1354	1717		2229	2378			3253		3765	3914		4426					L
ļ	54	14.528	<u> </u>	<u> </u>		ш		182	329	694	841	1206	1353	1718	1865	2230 2231	2377		2889 2888	3254 3255		3766	3913		4425	4790	_			⊢
ŀ	55 56	14.520	\vdash	\vdash		\vdash	H	183 184	328 327	695 696	840 839	1207 1208	1352 1351	1719 1720	1864 1863	2231		2743 2744		3255 3256	3400 3399	3767 3768	3912 3911		4424 4423	4791 4792			_	\vdash
ŀ	56 57	14.511				\vdash		184	327	697	839	1208	1351	1721	1862	2232	2375		2886	3256	3399		3911	4280	4423	4792				\vdash
	58	14.494				\Box		186	325	698	837	1210	1349	1722		2234	2373			3258	0000	3770	3909		4421	4794				<u> </u>
Ī	59	14.486						187	324	699	836	1211	1348	1723	1860	2235		2747		3259		3771	3908		4420					
	60	14.477	_	_		\Box		188	323	700		1212	1347	1724	1859	2236	2371			3260		3772		4284			_			
	61	14.469				\vdash	\vdash	189	322	701		1213	1346	1725	1858	2237	2370		2882	3261		3773	3906		4418	4797				₩
	62	14.460	-	-	-	\vdash	\vdash	190	321	702	833	1214	1345	1726 1727	1857	2238	2369 2368	2750	2881 2880	3262 3263	3393 3392	3774 3775	3905 3904	4286 4287	4417 4416	4798 4799	-	-		
	63 64	14.452						191	319	703	832	1215	1344	1727	1855	2239	2368	2752	2879	3263	3392	3776	3904	4287	4415	4799				
				-	_			193	318	705	830	1217	1342	1729	1854	2241	2366	2753	2878	3265	3390	3777	3902	4289	4414	4801				
L	65	14.435						193	310									2700		3200	3350	3111			1010 110	4001				
ŀ		14.435 14.427						193	317	706	829	1218	1341	1730	1853	2242	2365			3266		3778	3901		4413	4802				

68 1 69 70 171 172 173 174 175 176 177 178 181 182 183 184 184	14.418 14.410 14.402 14.393 14.385 14.377 14.368 14.360 14.352 14.343 14.335 14.327 14.318 14.310 14.302 14.302						196 197 198 199	316 315 314 313 312	707 708 709 710	828 827 826	1219 1220 1221	1340 1339 1338	1731 1732 1733	1852 1851 1850	2243 2244	2364 2363	2755 2756	2876 2875 2874	3267 3268 3269	3387 3386	3779 3780 3781	3900 3899 3898	4291 4292 4293	4411 4410	4804			F
69 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 82 183 84	14.402 14.393 14.385 14.377 14.368 14.360 14.352 14.343 14.335 14.327 14.318 14.310 14.302 14.302						198 199	313			1221	1338		1050				0074	0000	3386	3781	3898	4293	4410	4805			
70 1 71 72 73 74 1 75 1 76 1 77 78 79 1 80 1 1 82 83 84 84 1 1 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70	14.393 14.385 14.377 14.368 14.360 14.352 14.343 14.335 14.327 14.318 14.310 14.302 14.302						199		710						2245	2362	2757											
71	14.385 14.377 14.368 14.360 14.352 14.343 14.335 14.327 14.318 14.310 14.302 14.294							312		825	1222	1337	1734	1849	2246	2361	2758	2873	3270	3385	3782	3897	4294	4409	4806			T
73 1 74 1 75 1 76 1 77 1 78 1 79 1 80 1 81 1 82 1 83 1	14.368 14.360 14.352 14.343 14.335 14.327 14.318 14.310 14.302 14.294						200		711	824	1223	1336	1735	1848	2247	2360	2759	2872	3271	3384	3783	3896	4295	4408	4807			
74 1 1 75 1 76 1 77 1 78 1 1 79 1 1 80 1 1 82 1 1 83 1 1 84 1 1	14.360 14.352 14.343 14.335 14.327 14.318 14.310 14.302 14.294							311	712	823	1224	1335	1736	1847	2248	2359	2760	2871	3272	3383	3784	3895	4296	4407	4808			
75 1 76 1 77 1 78 1 79 1 80 1 81 1 82 1 83 1 84 1 1	14.352 14.343 14.335 14.327 14.318 14.310 14.302 14.294						201	310	713	822	1225	1334	1737	1846	2249	2358	2761	2870	3273	3382	3785	3894	4297	4406	4809			
76 1 77 1 78 1 79 1 80 1 81 1 82 1 83 1 84 1 1	14.343 14.335 14.327 14.318 14.310 14.302 14.294						202	309	714	821	1226	1333	1738	1845	2250	2357	2762	2869	3274	3381	3786	3893	4298	4405	4810			
77 1 78 1 79 1 80 1 81 1 82 1 83 1 84 1	14.335 14.327 14.318 14.310 14.302 14.294						203	308	715	820	1227	1332	1739	1844	2251	2356	2763	2868	3275	3380	3787	3892	4299	4404	4811			
78 1 1 79 1 80 1 81 1 82 1 83 1 84 1	14.327 14.318 14.310 14.302 14.294						204	307	716	819	1228	1331	1740	1843	2252	2355	2764	2867	3276	3379	3788	3891	4300	4403	4812			<u></u>
79 1 80 1 81 1 82 1 83 1	14.318 14.310 14.302 14.294						205	306	717	818	1229	1330	1741	1842	2253	2354	2765	2866	3277	3378	3789	3890	4301	4402	4813			<u></u>
80 1 81 1 82 1 83 1 84 1	14.310 14.302 14.294						206	305	718	817	1230	1329	1742	1841	2254	2353	2766	2865	3278	3377	3790	3889	4302	4401	4814			<u> </u>
81 1 82 1 83 1 84 1	14.302 14.294						207	304	719	816	1231	1328	1743	1840	2255	2352	2767	2864	3279	3376	3791	3888	4303	4400	4815			<u></u>
82 1 83 1 84 1	14.294						208	303	720	815	1232	1327	1744	1839	2256	2351	2768	2863	3280	3375	3792	3887	4304	4399	4816			<u></u>
83 1							209	302	721	814	1233	1326	1745	1838	2257	2350	2769	2862	3281	3374	3793	3886	4305	4398	4817			<u></u>
84 1	14.285						210	301	722	813	1234	1325	1746	1837	2258	2349	2770	2861	3282	3373	3794	3885	4306	4397	4818			<u> </u>
							211	300	723	812	1235	1324	1747	1836	2259	2348	2771	2860	3283	3372	3795	3884	4307	4396	4819			Ш.
05	14.277						212	299	724	811	1236	1323	1748	1835	2260	2347	2772	2859	3284	3371	3796	3883	4308	4395	4820			
	14.269						213	298	725	810	1237	1322	1749	1834	2261	2346	2773	2858	3285	3370	3797	3882	4309	4394	4821			
	14.261						214	297	726	809	1238	1321	1750	1833	2262	2345	2774	2857	3286	3369	3798	3881	4310	4393	4822			1
	14.253				_		215	296	727	808	1239	1320	1751	1832	2263	2344	2775	2856	3287	3368	3799	3880	4311	4392	4823			ـــــ
	14.244				_		216	295	728	807	1240	1319	1752	1831	2264	2343	2776	2855	3288	3367	3800	3879	4312	4391	4824			ـــــ
	14.236					\vdash	217	294	729	806	1241	1318	1753	1830	2265	2342	2777	2854	3289	3366	3801	3878	4313	4390	4825			₩
	14.228						218	293	730	805	1242	1317	1754	1829	2266	2341	2778	2853	3290	3365	3802	3877	4314	4389	4826			₩
	14.220						219	292	731	804	1243	1316	1755	1828	2267	2340	2779	2852	3291	3364	3803	3876	4315	4388	4827			_
	14.212						220	291	732	803	1244	1315	1756	1827	2268	2339	2780	2851	3292	3363	3804	3875	4316	4387	4828			_
	14.204						221	290	733	802	1245	1314	1757	1826	2269	2338	2781	2850	3293	3362	3805	3874	4317	4386	4829			₩-
	14.196		 				222	289	734	801	1246	1313	1758	1825	2270	2337	2782	2849	3294	3361	3806	3873	4318	4385	4830			-
	14.187						223	288	735	800	1247	1312	1759	1824 1823	2271	2336	2783 2784	2848 2847	3295 3296	3360 3359	3807	3872	4319	4384 4383	4831 4832			-
	14.179		 				224	287	736 737	799 798	1248	1311	1760 1761	1823	2272	2335	2785	2847	3296	3359	3808	3871 3870	4320 4321	4383	4832			-
	14.171						225	285	738	797	1249	1309	1762	1821	2274	2333	2786	2845	3297	3357	3810	3869	4321	4381	4834			-
	14.155						227	284	739	797	1250	1309	1762	1820	2274	2332	2787	2844	3290	3356	3811	3868	4323	4380	4835			-
	14.155						228	283	740	795	1251	1307	1764	1819	2276	2332	2788	2843	3300	3355	3812	3867	4323	4379	4836			-
	14.139						229	282	741	794	1253	1306	1765	1818	2277	2330	2789	2842	3301	3354	3813	3866	4325	4378	4837			-
	14.139						230	281	742	793	1254	1305	1766	1817	2278	2329	2790	2841	3302	3353	3814	3865	4326	4377	4838			-
	14.123						231	280	743	792	1255	1304	1767	1816	2279	2328	2791	2840	3303	3352	3815	3864	4327	4376	4839			
	14.115						232	279	744	791	1256	1303	1768	1815	2280	2327	2792	2839	3304	3351	3816	3863	4328	4375	4840			
	14.107						233	278	745	790	1257	1302	1769	1814	2281	2326	2793	2838	3305	3350	3817	3862	4329	4374	4841			—
	14.099						234	277	746	789	1258	1301	1770	1813	2282	2325	2794	2837	3306	3349	3818	3861	4330	4373	4842			—
	14.091						235	276	747	788	1259	1300	1771	1812	2283	2324	2795	2836	3307	3348	3819	3860	4331	4372	4843			_
	14.083						236	275	748	787	1260	1299	1772	1811	2284	2323	2796	2835	3308	3347	3820	3859	4332	4371	4844			\vdash
	14.075						237	274	749	786	1261	1298	1773	1810	2285	2322	2797	2834	3309	3346	3821	3858	4333	4370	4845			T
	14.067						238	273	750	785	1262	1297	1774	1809	2286	2321	2798	2833	3310	3345	3822	3857	4334	4369	4846			
	14.059						239	272	751	784	1263	1296	1775	1808	2287	2320	2799	2832	3311	3344	3823	3856	4335	4368	4847			
	14.051						240	271	752	783	1264	1295	1776	1807	2288	2319	2800	2831	3312	3343	3824	3855	4336	4367	4848			
	14.043						241	270	753	782	1265	1294	1777	1806	2289	2318	2801	2830	3313	3342	3825	3854	4337	4366	4849			
	14.035						242	269	754	781	1266	1293	1778	1805	2290	2317	2802	2829	3314	3341	3826	3853	4338	4365	4850			
115 1	14.027						243	268	755	780	1267	1292	1779	1804	2291	2316	2803	2828	3315	3340	3827	3852	4339	4364	4851			
	14.019						244	267	756	779	1268	1291	1780	1803	2292	2315	2804	2827	3316	3339	3828	3851	4340	4363	4852			
117 1	14.011						245	266	757	778	1269	1290	1781	1802	2293	2314	2805	2826	3317	3338	3829	3850	4341	4362	4853			
118 1	14.003						246	265	758	777	1270	1289	1782	1801	2294	2313	2806	2825	3318	3337	3830	3849	4342	4361	4854			
119 1	13.995						247	264	759	776	1271	1288	1783	1800	2295	2312	2807	2824	3319	3336	3831	3848	4343	4360	4855			
120 1	13.988						248	263	760	775	1272	1287	1784	1799	2296	2311	2808	2823	3320	3335	3832	3847	4344	4359	4856			
121 1	13.980						249	262	761	774	1273	1286	1785	1798	2297	2310	2809	2822	3321	3334	3833	3846	4345	4358	4857			
122 1	13.972						250	261	762	773	1274	1285	1786	1797	2298	2309	2810	2821	3322	3333	3834	3845	4346	4357	4858			
123 1	13.964						251	260	763	772	1275	1284	1787	1796	2299	2308	2811	2820	3323	3332	3835	3844	4347	4356	4859			
124 1	13.956					oxdot	252	259	764	771	1276	1283	1788	1795	2300	2307	2812	2819	3324	3331	3836	3843	4348	4355	4860			L
125 1	13.948						253	258	765	770	1277	1282	1789	1794	2301	2306	2813	2818	3325	3330	3837	3842	4349	4354	4861			Щ.
	13.940						254	257	766	769	1278	1281	1790	1793	2302	2305	2814	2817	3326	3329	3838	3841	4350	4353	4862			—
127 1	13.933	Ш				Ш	255	256	767	768	1279	1280	1791	1792	2303	2304	2815	2816	3327	3328	3839	3840	4351	4352	4863			Ш

表 D.7. Scan strategy (Step2)

Owell (s)	30																JTO	C freq															
Points	1210		-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
otal (min)	605 16.26		53.71	53.59	53.48	53.36	53.25	53.13	53.02	52.91	52.80	52.68	52.57	52.46	52.35	52.24	52.13	52.02	51.91	51.80	51.70	51.59	51.48	51.37	51.27	51.16	51.06	50.95	50.85	50.74	50.64	50.54	50.43
	16.25												70			275	276						702	902		1113							
-126	16.24												71								528					1112							
	16.23 16.22																	398			529		703	901		1111							
	16.21												72					330			530			900	903		1114						
	16.20									33				405	400	274	277	007			531			000	904	4400							
	16.19 16.18													165	166	273	278	397 396	399					899	905	1109							-
-119	16.17																	395	400					898		1107							
	16.15													164	407	272				526	532	701	704				1115						
	16.14 16.13									32					167	271	279		401	525 524		700	705		906		1116						
-115	16.12												73				2,0	394	101	523		699	700		907								
	16.11														168	270		393	402		533	698 697		897 896	908	1106	1117						
	16.10												74		168						533	696		896	908	1106							
-111	16.08																			522	534		706				1118						
	16.07													400					403	504			707		910		4440						
	16.06								3			69		163		269			404	521	535	695	708		910		1119						
	16.04									31		68					280		405					895	912								
	16.03													162				392		520		694	709		913	1105							
	16.02	ļ																332			536		710		910								
-103	16.00																	391			537	693											
	15.99 15.98					-	_	_	_	_			_	_		268	281	390 389	406		538		-	894 893	914	1104		_	-				-
	15.96				L	L					L					L	L	388	407		539		L	892	915	1103		L	L		L		L
	15.96		H			ĻΞ	Ē	Ē	Ē	Ē			Ē			ĻΞ	282						ĻΞ	00.	916	1000	1400		LΞ				ĻΞ
	15.95 15.94		H		-	-	-	-	-	-	-		75	161	169	-	283 284		-	519	540	692	-	891		1102 1101	1120				-		
-96	15.93									30			76		170		285		408		541				917	1100	1122						
	15.92																286	387		540			711		918 919	1099							
-94	15.91 15.90		\vdash														287			518		690			920	1098	1123						
-92	15.89																			517	542			890		1097	1124						
	15.88 15.87															267		386			543	689		889			1125						₩
	15.86															207								003		1096							
-88	15.85																		409	516			712	888	922		1126						
	15.84 15.83												77	160		266					544	688		887	923 924								
-85	15.82																					000			925								
	15.81																200					607		886	926 927		1107						Щ.
	15.79 15.78								4				78		171		288					687		885	927		1127						
-81	15.77													159	172				410		545	686				1095							
	15.76											67	79			265		385		515				884	929 930								
	15.75 15.74											66		158		264	289			514		685			930	1093							
-77	15.73											65		157							546	684											
	15.72 15.71									29		64 63			173	263	290		411	513 512		683 682	713 714	883		1091							-
	15.70									23		03							411	012		002	715		931								
-73	15.70																	384				681		882	932	1090							
	15.69 15.68														174			383					716	881			1128						
-70	15.67																	000	412	511		680		880	933		1129						
	15.66																004		440		543		717		934	1089							
-68 -67	15.65 15.64												80	156			291		413		547		718 719		934								
-66	15.63										34			155			292			510	548				936	1088							
	15.62								5				81	154	175		293 294	382	414			679	720			1087	1130						
-63	15.61		\vdash										- 61		175		294		414		549		721				1131						
-62	15.59										35		82				295			509		678	722	879			1132						
	15.58 15.57												83				296								937	1086	1133						
-59	15.56	L			L	L	L	L	L	L			L	L		L	L	L		508	550		723	878	331	1085	1700		L				L
-58	15.55													153	176		297	381									1134						
	15.54 15.53								6	28					177		298			507	551	677	724		938	1084 1083	1135						
-55	15.52								Ľ											506		676	725	877	939	1082	1137						
-54	15.51		H			ĻΞ	Ē	Ē	Ē	Ē			Ē	Ē		ĻΞ	F	380			F	675		876		1081	1138	Ē	LΞ				ĻΞ
	15.50 15.49		H			 										 		379 378		505		674	726	875 874	940 941		1139						
-51	15.48																299				552	673	727			1080	1141						
-50	15.47				-	-			-	27			84			-	-		415 416		553		-	-	942 943	1079	1142 1143		-		-		├-
	15.46 15.45				 	1							85			1	 		410		554		728		343		1144						
-47	15.44										36		86		178		300						729										
	15.43 15.42						-	-	-	-			-	152	179 180			-	417 418	504		672	730 731	873	944	1077							\vdash
	15.42				L	L	L	L	L	L			L	L	700	L	301		+10	304	L	L	701	872	944	1077		L	L				L
-43	15.40														100		302				555						1						
	15.39 15.38		H		-	-	-	-	-	-	-		-	-	181	261	303		-		556		732	-	946	1075	1145				-		+
-40	15.37														182							671	733			1074	1147						
-39	15.36		H			ĻΞ	Ē	Ē	8							ĻΞ	304 305			503 502	557	670	734	871	947	1073	1148		LΞ				ĻΞ
-38	15.36 15.35	-	H			 							87			 	305 306		419	502		669	735		-		1149						
-36	15.34													151			307		-,,,,	301					948	1070							
-35	15.33					<u> </u>										<u> </u>					-	000	736			1069	1151	_	_				\vdash
-34	15.32 15.31	 			 	1	 	 	 	26		62		150 149		1	 	 			559	668 667	737 738	870			1152						\vdash
-32	15.30													148	183			377								1068	1153						
	15.29 15.28											61			184 185		308	376		500	560	666 665		869		1067	1154						\vdash
-29	15.27				L	L	L	L	L	L		60		L	700	L	L				561	303	L		949	1007	1155	L	L				L
-28	15.26																	375		499		664		868									
	15.25	i .	1		I	1	l	1	1	l	l		1	1		1	1	l	Ì	498	l	1	739	867	950	1066		l	ı	i e	ĺ		1

	-26	15.24					1	1	1	T			59			186				420		Г	663			951								$\overline{}$
	-25	15.23	3													100				120		562	000	740		001	1065							
		15.22																309					662	741	866		1064							
		15.21				2										187								742										
		15.20					-	-	-						147			310			497	563	661		865									
		15.19						1							14/			310			496		001	743		952							=	-
		15.18					t		t	t				88	146		260				100	564		, 40		953	1063						\neg	-
	-18															188	259		374		495	565					1062							
	-17	15.16	5																	421						954		1156						
		15.15																							864									
		15.14																	373	422					863	956	1060							_
		15.13					-	-	-	-							258		372		494			744			1059 1058						\rightarrow	
	-13	15.12	4					1						89					312				660	745	862		1000						=	-
		15.10												90			257				493	566	000	740	861	957		1157					-1	-
		15.09									25		58					311			492		659	746	860			1158						=
	-9	15.08				- 1									145		256				491		658	747		958	1057							
		15.08											57							423							1056	1159						
		15.07																			490	567	657	748	859	959	1055							_
	-6	15.06					-	-	-	-				91	144	100	000					568 569	656		858 857		1054						\rightarrow	
	-5 -4	15.05						1			24				143	189	255		371		489	570	655		856		1053						=	-
		15.03						1	-		24				142	190			3/1		403	370	000	749	000		1000	1160					-1	-
	-2	15.02												92													1052							=
fred	-1	15.01																			488	571		750	855									
2ST	0	15.00)															312				572						1161						
	1	14.99																313				573												
		14.98		-	-	-	1	+	1	₩	-			-	-	191	<u> </u>	314	369	-	-	574	-		854				-				\rightarrow	\rightarrow
	3	14.98					1	1-		1					141		-	315				1		751		960		1162					\rightarrow	=
		14.96					1	1	1	t		\vdash			(41	\vdash	-	316	368				654	,01		300		1163					-1	-
		14.95					t		t	9		37						317	367				653	752			1051	. 100					\neg	\dashv
	7	14.94		L	L		L	L	L	Ľ	L			L	140		L	318		L	L	L	Ľ	753				1164		L				
	8	14.93	3											93						424		575												
	9	14.92	2				<u> </u>	1	<u> </u>	_				94	139		254		366				652							ш				
		14.91		<u> </u>	-	<u> </u>	<u> </u>	1	1	₩	<u> </u>			<u> </u>	<u> </u>	192	<u> </u>								<u> </u>			1165					\longrightarrow	الت
		14.90		-	-	-	1	+	1	₩	-			-	-	193	250	240		425		576	-	754	-	961	1050	1166					\rightarrow	\rightarrow
	12	14.89		-			1	+	1	 	-			-	-		253	319 320		-		577 578	-	754		962	1050 1049						=	=
	14	14.88	3				1	 	1	 							252	020		426	487	579			853	963							=	=
		14.87						1		İ		38			138					427		T		755	500	555	1047	1167					=	\neg
	16	14.86									23					194	251				486	580		756	852		1046	1168						
	17		5												137		250		365				651		851			1169						
		14.84																					650		850									
		14.83																321									1045							
		14.82																322 323							849	004		1170						
	21	14.81						-	-									323					649			964		1171					-+	-
		14.80																324			485		043					11/1						
		14.79																325	364		484							1172						
	25	14.78									22			95						428	483	581		757	848	965		1173						
	26	14.77	7											96						429	482	582		758	847	966		1174						
	27	14.76	3										56												846	967								
		14.75												97		195		326					648	759			1044							_
	29	14.74					-	-	-						136						481	583	647	760	845	968		1176						
	30	14.74	2														249				401	203	04/		844								-1	_
		14.72									21				135	196		327		430					843		1043						-1	-
	33	14.71												98		197									842	969	1042							
	34	14.70													134	198	248																	
		14.69																			480		646					1177						
	36	14.68														400		000	363	404	479	504	645		044	970	1041							
	37 38	14.67						-	-						133	199		328	362	431	478	584	644	761	841	971	1040						-+	-
		14.66						1		10			55	99		200			302	432			643	762		972	1039	1178					=	-
		14.65								11			00	100	102	200			361	402	477		040	763		SIL	1038	1170					-1	-
		14.64		L	L	L	L	L	L	Ľ	L				131	201	L	329		L		585		764			1037		L	L				
	42	14.63	3											101		202		330		433	476		642		839									
	43	14.62	2				<u> </u>	1	<u> </u>	_										434	475				838					ш				
		14.61					1	1	1	-		\vdash				000				435	,	FOC		765	837			1179		ш	_	_	-	\vdash
		14.61		-	-	-	1	+	1	₩	-			-	-	203	<u> </u>			436	474	586 587	-	766	836			1180					\rightarrow	\rightarrow
	46 47	14.60					1	1	1	t		\vdash	54	102		204	-		360	430	473	36/			630	973	1036	1101					-1	-
		14.58					t		t	t			V-1	702	130	_04			700		-,3	588			835	370	. 500	1182					\neg	-
	49	14.57	7																359				641			974	1035							
	50	14.56	S					Ļ Ī								205	247						640	767	834		1034	1183						
	51	14.55		<u> </u>	-	<u> </u>	<u> </u>	1	<u> </u>	12				<u> </u>	<u> </u>	206	246	331	055		-	For	000	768	833				<u> </u>				\longrightarrow	الت
				-	-	-	1	+	1	₩	-			-	-		0.45		358		470	589	639	700	832		1000		-				\rightarrow	\rightarrow
		14.54		-		-	1	+	1	 	-			-	-		245	333		-	472	590	638	769	831	975	1033	1184	-				=	=
	55	14.52					1	 	1	 				103			243	332			471	591	637			976		1104					=	=
		14.51						1		Ì				,,,,,		207							636	770		977							=	\neg
	57	14.50)													208	242							771			1032	1185						
	58	14.49						1 -		_			53			209			357							978							[
	59			<u> </u>	-	<u> </u>	<u> </u>	1	1	₩	<u> </u>			<u> </u>	<u> </u>	210	<u> </u>			<u> </u>	-	1	635		<u> </u>				<u> </u>				\longrightarrow	الت
	60	14.48	,				1	1	1	!		\vdash	52 51			\vdash	-			437		-			830		1031			\vdash	-	-	\rightarrow	-
		14.46				0	1	1	1	t		\vdash	51			\vdash	241			43/				772	630		1029	1186					-1	-
	63	14.45	5			-			t	t			50				240				470			773	829		1029	. 100					\neg	-
								1		Ì											469	592			828	979	1027	1187					=	\neg
	65	14.44	1							13				104				333		438	468	593	634	774									ات	
	66	14.43	3					Ļ Ī										334		439		594	633	775		980	1026							
		14.42	2	<u> </u>	-	<u> </u>	<u> </u>	1	1	₩	_			<u> </u>	<u> </u>	0	<u> </u>			<u> </u>	467	ļ	<u> </u>	776			1025	1189	-	ш			\longrightarrow	الت
	68	14.41		-	-	-	1	+	1	₩	20		49		129	211	220		356	-	466	FOE	600		826	981 982			-				\rightarrow	\dashv
	69	14.40	,	-	-	-	+	+	+-	+-	-	39		-	129		239	335	356		466 465	595	632		825		1024		-	\vdash			-1	\rightarrow
		14.38					1	 	1	 		- 59			120		200	336	J55		-100	<u> </u>	631		824	303	1024						=	\dashv
		14.38					t		t	t							237	500				596	630		J24		1023						\neg	-
		14.37						1		İ				105	127						464		629	777	823								=	\neg
	74	14.36	3																						822	984								
	75	14.35	5													212				440				778				1190						
	76	14.34	1				<u> </u>	1	<u> </u>	_							236					L	_	779						ш				
	77	14.34		<u> </u>	-	<u> </u>	<u> </u>	1	1	₩	<u> </u>			<u> </u>	<u> </u>					<u> </u>	-	597	628						<u> </u>				\longrightarrow	الت
	78	14.33	5	Ь—	<u> </u>	<u> </u>	1	1	1	Ь—	Ь—			Ь—	Ь—		235			Ь—	<u> </u>	L	Ь—		821		1021		<u> </u>	ш				

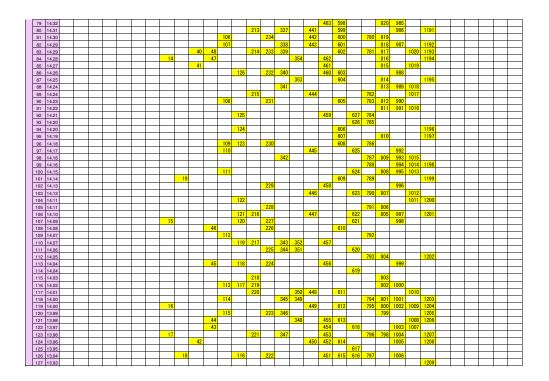
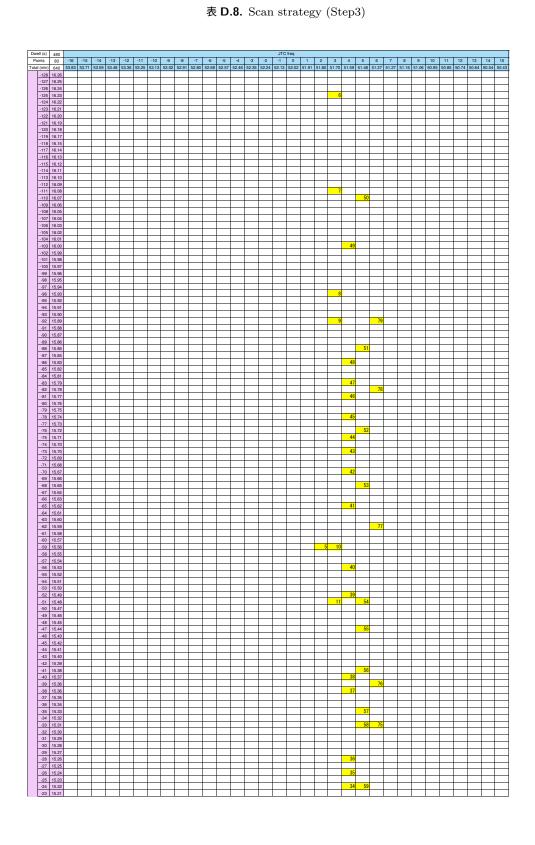
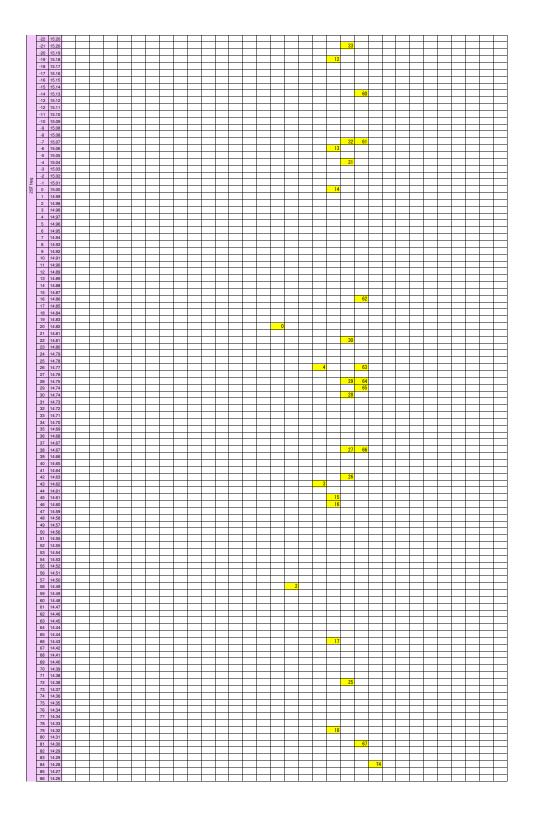


表 D.8. Scan strategy (Step3)





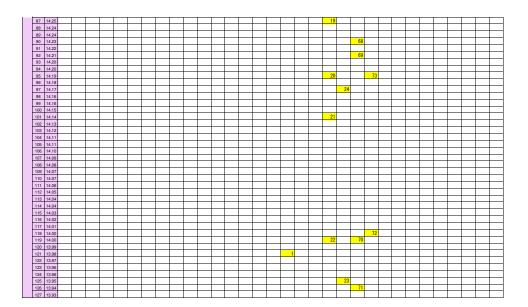
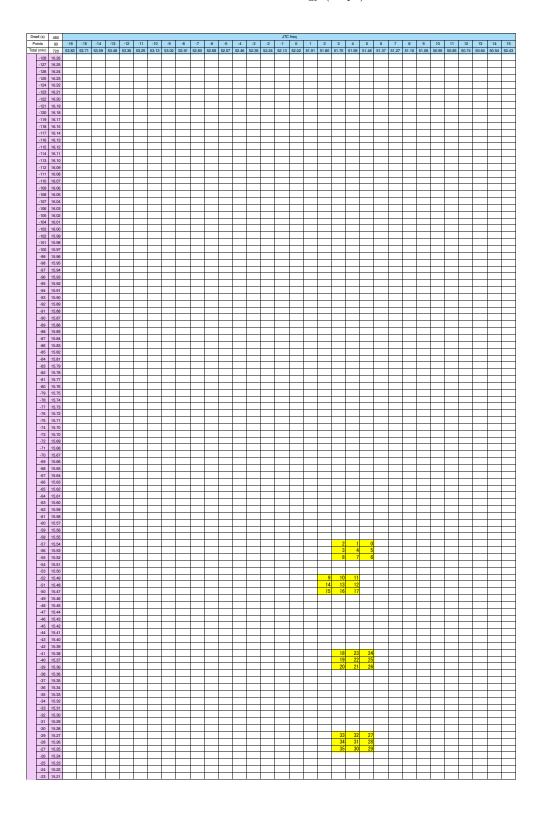


表 D.9. Scan strategy (Step4)



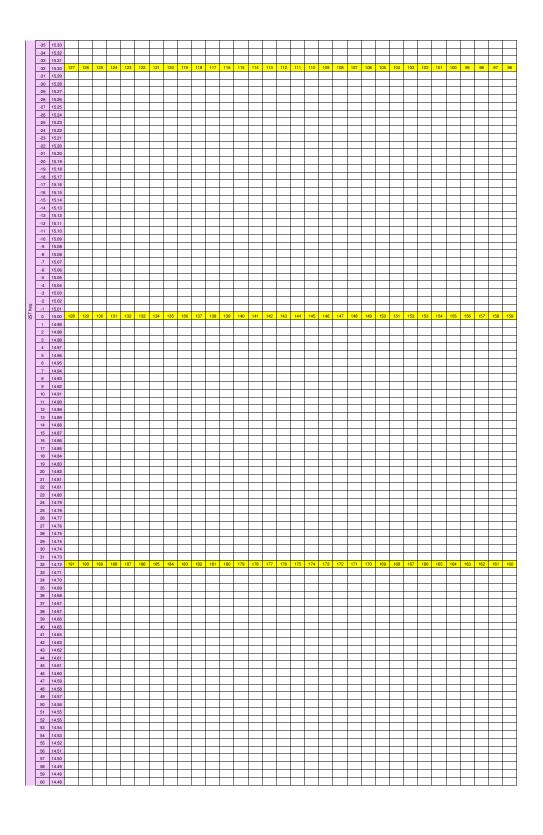
Column C		.22	15.2	0	Т .	Г	_	r		_	ı —	Г					<u> </u>			_													_		$\overline{}$
Section Sect		-21	15.21	0																															$\overline{}$
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.		-20	15.19	9																		36	37	38											
10 10 10 10 10 10 10 10		-19	15.1	8																				39											
1		-18	15.1	7																		42	43	44											
Mail		-17	15.1	6																															
		-16	15.1	4																														-	_
1		-14	15.13	3																															
Dec Color		-13	15.13	2																														\dashv	\exists
March Marc		-12	15.1	1																															
1		-11	15.10	0																															
4 60 1 1 1 1 1 1 1 1 1		-10	15.0	9																														-	_
1		-9	15.00	8																														-+	_
A		-8	15.0	7																		47	46	45											
S S S S S S S S S S		-6	15.0	6																		48	49	50											=
		-5	15.0	5																		53	52	51											
		-4	15.0	4																															
		-3	15.0	3																															
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	5	-2	15.0	2																															
1 Miles	STfn																																	=	_
1 100 1 100 10	Ö	1	14.9	9																															-
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1																																			
1 MR		3	14.90	8																															
C 100		4																																	
T 100		5	14.9	6	 	-		-	-			-		-	-			\vdash	-		H			-	\vdash	-	\vdash	\vdash	-			-	-	\rightarrow	\dashv
1 100														-	-			\vdash						-	\vdash		\vdash	\vdash						\dashv	=
1 30 1 1 1 1 1 1 1 1 1		8	14.9	3																														\dashv	\exists
S W		9	14.9	2																															
U 100		10	14.9	1	_																ш											[[
10 100					-	1			1			1		-	-				-					-					-					\rightarrow	=
Table Tabl		12	14.8	9										-	-			\vdash						-	\vdash		\vdash	\vdash						\dashv	\dashv
S 100 S																																		\dashv	\neg
V ME		15	14.8	7																															
No.		16	14.8	6	_																ш											[[]
No. No.		17	14.8			1	-	-	-	-	-	1		<u> </u>	<u> </u>		-		-	-			-	<u> </u>					-	-	-			\rightarrow	=
S 148		18	14.8		-	1			1			1		-	-		-		-	-			-	-					-	-	-			=	=
3 141		20	14.8	2														H			\vdash				H		H	H						\dashv	\neg
2 Mail		21	14.8	1																															
3 157		22	14.8	1																															
25 157																																		-	_
30 1477		24	14.79																															-+	_
27 15/12		26	14.7	7																															
29 15/25		27	14.7	6																			54	55	56										
19 1972		28	14.7	5																			59	58	57										
1 12 12 12 13 14 14 15 15 15 15 15 15		29	14.7	4																			60	61	62										
2 1471		30	14.7	4																														-+	_
Section Sect		30	14.7	2																															
35 14:00																																			
32 1407		34	14.7	0																															
30 1467 1468 1469 14		35	14.6	9																															
Section 1.65		36	14.6	7																														=	-
30 14.65																																			
1 1646		39	14.6	6																															
Section		40	14.6	5																														-	
41 145 1		41	14.6	4																			65	64	63									_	_
44 1455 1450 177 70 175 1850		42	14.6	2																														=	_
86 1456 1456 1457 1458		44	14.6	1																		72	73	74											
1.55		45	14.6	1																			76	75											
8 458																						78	79	80											
0. 1456		47	14.5	9																															-
00 1456		48	14.5	7										-	-			\vdash						-	\vdash		\vdash	\vdash						\dashv	\dashv
5 1456		50	14.5	6	L	L	L		L	L	L	L		L	L		L			L			L	L						L	L				
S 1456		51	14.5	5																															
55 14.50		52	14.5	5	-	-			-			-						\vdash			ш				\vdash	_	\vdash	\vdash				_	_	\rightarrow	-
50 14.50					 	-		-	-			-		-	-			\vdash	-					-	\vdash	-	\vdash	\vdash	-			-	-	\rightarrow	\dashv
50 14.50		55	14.5	2	—	 			 			 																						=	=
ST 1450		56	14.5	1																															
1.46		57	14.50	0																														二	
0.0 14.46					-	-	-	-	-	-		-					-				ш									-					\vdash
61 14.67 62 14.66 63 14.64 65 14.64 65 14.64 66 14.64 67 14.62 68 14.64 69 14.60 70 14.62 71 14.62 71 14.62 72 14.62 73 14.62 74 14.62 75 14.63 76 14.64 77 14.58 77 14.58 78 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.58 79 14.59 79 14.59 79 14.50 79		59 pn	14.4	8										-	-			\vdash						-	\vdash		\vdash	\vdash						\dashv	=
0 14.46 6 14.44 6 14.44 6 14.44 6 14.42 6 14.42 7 14.42 7 14.42 7 14.42 7 14.53 7 14.53 7 14.53 7 14.54 7 14.54 7 14.55 7 14.55 7 14.56 7 14.5		61	14.4	7														H			\vdash				H		H	H						\dashv	\neg
0 14.66		62	14.4	6																															
65 1446		63	14.4	5	\perp	\perp		L				\perp									ш													二	二
66 14.45					-	-			-			-						\vdash			ш				\vdash	_	\vdash	\vdash				_	_	\rightarrow	\vdash
67 14.42		65	14.4	2	-	1			1			1		-	-				-	-			-	-					-					=	=
08 14.41		67	14.4	2														H			\vdash				H		H	H						\dashv	\neg
50 14.46		68	14.4	1																															
71 1438 72 1438 73 1437 74 74 74 74 74 74 74		69	14.4	0	_																ш											[[
72 438 737 7437 7436 75 436 75 436 75 436 75 436 75 436 75 436 75 436 77 434 77 434 78 432 78 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 432 78 78 432 78 78 432 78 78 78 78 78 78 78 7		70	14.3	9	-	-			-			-						\vdash			ш				\vdash	_	\vdash	\vdash				_	_	\rightarrow	\vdash
73 14.37		71	14.3	8		1			1			1	-			-		H			\vdash				H		H	H						\dashv	\dashv
17		73	14.3	7																														\dashv	=
75 14.56		74	14.3	6	L	L		L	L			L																							
70		75	14.3	5																															
78 1435 79 1436 79 143		76	14.3	4	_	_						_								_			_									[[]
79 14.32					-	-	-	-	-	-	-	-					-			-			-							-	-			\rightarrow	-
80 14.35 18.30 18.		78	14.3	2										-	-			\vdash						-	\vdash		\vdash	\vdash						\dashv	\dashv
81 14.90 82 14.29 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9		80	14.3	1														H			\vdash				H		H	H						\dashv	\neg
80 1429 80 1429 84 1429 86 1427		81	14.3	0	L	L		L				L							L										L					一	
83 14.29 84 14.28 85 14.27		82	14.29	9																															
85 14.27		83	14.25	9	\perp	\perp		L				\perp									ш													二	二
85 1427 86 1428		84	14.21	8	-	-			-			-						\vdash			ш				\vdash	_	\vdash	\vdash				_	_	\rightarrow	\vdash
	Ι.	85 po	14.2	7 e		-			-			-																						=	=
		90	14.2	~										<u> </u>	<u> </u>									<u> </u>											

87	14.25																			<u> </u>
88	14.24																			
89	14.24																			
90	14.23																		, !	
91	14.22																			
92	14.21																			
93	14.20																			
94	14.20																			
95	14.19																			
96	14.18																			
97	14.17																			
98	14.16																			
99	14.16																			
100	14.15										83	82	81							
101	14.14										84	85	86							
102	14.13										89	88	87							
	14.12																			
104	14.11																			
105	14.11																			
106	14.10																			
107	14.09																			
108	14.08																			
109	14.07																			
110	14.07																			
111	14.06																			
112	14.05																			
113	14.04																			
114	14.04			1														ı		Π
115	14.03																			
116	14.02																			
117	14.01			1														ı		П
118	14.00																			
119																				
120	13.99																			
121	13.98																			
122																				
123	13.96																			
124																				
125																				
126	13.94																			
127																				

D.3 TC5

表 D.10. Scan strategy (Step0)

	,																																
Dwell (s) Points	6 288	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	JTC -1	freq 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Total (min) 29	53.83	53.71	53.59	53.48	53.36	53.25	53.13	53.02	52.91	52.80	52.68	52.57	52.46	52.35	52.24	52.13	52.02	51.91	51.80	51.70	51.59	51.48	51.37	51.27	51.16	51.06	50.95	50.85	50.74	50.64	50.54	50.43
-128		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
-127																																	
-125																																	
-124	16.22																																
-123	16.21																																
-122																																	
-120																																	
-119																																	<u> </u>
-118 -117																																	
-116																																	
-115	16.12																																
-114																																	
-113 -112																																	
-111																																	
-110																																	Щ.
-109 -108																																	
-107																																	
-106	16.03																																
-105										<u> </u>												<u> </u>											₩
-104																																	
-102	15.99																																
-101																																	₩
-100 -99																																	
-98	15.95																																
-97	15.94	_						_	_	_												Ę				-		_	-			-	
-96 -95		63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32
-94																																	
-93	15.90																																ഥ
-92																																	₩
-91 -90																																	
-89																																	
-88																																	Щ.
-87 -86																																	
-85																																	
-84																																	
-83																																	
-82 -81	15.78 15.77																																
-80	15.76																																
-79																																	
-78 -77																																	
-76																																	
-75																																	
-74 -73	15.70 15.70																																
-72																																	
-71																																	
-70							-				-					-			-				-					-					
-69 -68																																	
-67	15.64																																
-66																																	-
-65 -64			65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
-63	15.60																																
-62							-				-					-			-				-		Н			-					
-61 -60																																	
-59	15.56																																
-58	15.55																								Ш					_			\vdash
-57 -56	15.54																																
-55		L						L	L												L												L
-54	15.51																																ഥ
-53							-				-					-			-				-		Н			-					
-52 -51							<u> </u>			1	<u> </u>					<u> </u>			<u> </u>			1	<u> </u>					<u> </u>					\vdash
-50	15.47																																
-49	15.46																								Щ								L
-48 -47							-				-					-			-				-					-					
-47																																	
-45	15.42																																
-44																														_			\vdash
-43 -42																																	
-42																																	
	15.37																																
-40												1																					1
-40 -39	15.36																																-
-40	15.36 15.36																																



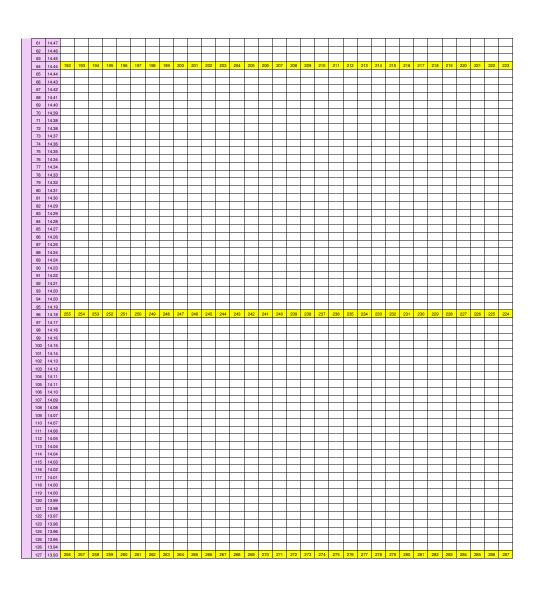


表 **D.11.** Scan strategy (Step1)

Dwell (s)	6.000																JTC	freq															
Points	2048	-16		-14					-9 53.02		-7 =2 00	-6	-5 52 57	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		12		14	15
Total (min) -128	204.8 16.26	53.83	53.71	53.59	53.48 3	53.36 4	53.25	53.13 6	53.02 7	52.91	52.80	52.68	52.57	52.46	52.35	52.24	52.13	52.02	51.91	51.80	51.70	51.59	51.48	51.37	51.27	51.16	51.06	50.95	58.Uc	50.74	50.64	oU.54	50.43
-127 -126	16.25 16.24	15 16	14	13	12	11	10	9	8 23																								H
-125	16.23	31	30	29	28	27	26	25	24																								
-124	16.22	32 47	33 46	34 45	35 44	36 43	37 42	38 41																								\vdash	\vdash
-123 -122	16.21 16.20	48	49	50	51	52	53	54	55																								П
-121	16.19	63	62	61	60	59	58	57	56																								
-120 -119	16.18 16.17	64 79	65 78	66 77	67 76	68 75	69 74	70 73	71 72																							H	\vdash
-118	16.15	80	81	82	83	84	85	86	87																								
-117	16.14	95 96	94 97	93 98	92 99	91	90	89	88 103																							\vdash	\vdash
-116 -115	16.13 16.12	111	110	109	108	107	106		103																							H	H
-114	16.11	112	113	114	115	116	117	118	119																								
-113 -112	16.10 16.09	127	126 129	125 130	124 131	123 132	122	121	120																							\vdash	\vdash
-111	16.08	143		141	140	139	138	137	136																								
-110	16.07	144		146 157	147 156	148 155	149 154	150 153	151 152																								\vdash
-109 -108	16.06 16.05		161		163		165	166																								H	H
-107	16.04		174	173	172	171	170	169	168																								
-106	16.03	176	177	178	179 188	180	181	182	183 184																							\vdash	\vdash
-105 -104	16.02 16.01	192		194	195	196	197	198	199																								П
-103	16.00	207	206	205	204	203	202	201	200																								曰
-102 -101	15.99 15.98	208	209	210	211	212	213	214	215																							H	\vdash
-101	15.98	224	225	226	227	228	229	230	231		L	L	L	L	L	L	L		L	L	L	L		L			L	L	L	L			ΕΤ
-99	15.96	239			236		234			L	L	L		ĻΞ		ĻΞ	L							L				L		L		Ы	Д
-98 -97	15.95 15.94	240 255	241 254	242 253	243 252	244 251	245 250	246 249	247																							H	H
-96	15.93	256	257	258	259	260	261	262	263																								口
-95	15.92	271 272	270 273	269 274	268 275	267 276	266 277	265 278	264 279		-	-	-		-		-		-		-	-					-		-			H	\vdash
-94 -93	15.91 15.90	287	286	285	284	283	282	281	280																							П	П
-92	15.89	288		290	291		293	294	295																								
-91 -90	15.88 15.87		302 305		300 307		298 309	297	296 311																							\vdash	\vdash
-89	15.86	319		317	316	315	314		312																								П
-88	15.85	320	321	322	323	324	325	326	327																								
-87 -86	15.84 15.83	335 336	334 337	333 338	332 339	331 340	330 341	329 342	328 343																							\vdash	\vdash
-85	15.82	351	350	349	348	347	346	345	344																							П	mi
-84	15.81	352	353	354	355	356	357	358	359																								Ш
-83 -82	15.79 15.78	367 368	366 369	365 370	364 371	363 372	362 373	361 374	360 375																							H	\vdash
-81	15.77	383	382	381	380	379	378		376																								
-80	15.76	384	385	386	387 396	388	389		391																							\vdash	\vdash
-79 -78	15.75 15.74	399 400	398 401	397 402	403	395 404	394 405	393 406	392 407																							H	H
-77	15.73	415	414	413	412	411	410	409	408																								
-76 -75	15.72 15.71	416	417	418 429	419 428	420 427	421 426	422 425	423 424																							\vdash	H
-74	15.70	432			435	436	437	438																									Πİ
-73	15.70	447		445	444	443	442		440																							ш	ш
-72 -71	15.69 15.68	448 463	449 462	450 461	451 460	452 459	453 458	454	455 456																							H	\vdash
-70	15.67	464		466	467	468	469	470	471																								
-69	15.66	479 480	478 481	477	476 483	475 484	474 485	473 486	472 487																							\vdash	\vdash
-68 -67	15.65 15.64	495	494	493	492	491	490	489	488		L	L	Ŀ	L	Ŀ	L	L		Ŀ	L	Ŀ	Ŀ	L	L			Ŀ	L	Ŀ	L	L		ГÌ
-66	15.63	496	497	498	499	500	501	502	503																							П	릐
-65 -64	15.62 15.61	511 512	510 513	509 514	508 515	507	506 517		504 519					-		-																H	\vdash
-63	15.60	527	526	525	524	523	522	521	520																								口
-62 -61	15.59	528 543	529 542	530 541	531 540	532 539	533 538	534 537	535 536		-	-	-		-		-		-		-	-		-			-	-	-	-		H	Н
-61 -60	15.58 15.57	544	545	546	547	548	538	550	551		L	L	L	L	Ŀ	L	L		Ŀ	L	Ŀ	Ŀ	L	L			Ŀ	L	Ŀ	L	L		
-59	15.56	559	558	557	556	555	554	553	552																							П	릐
-58 -57	15.55 15.54	560 575	561 574	562 573	563 572	564 571	565 570	566 569	567 568																							H	Н
-56	15.53	576	577	578	579	580	581	582	583																								口
-55	15.52	591	590	589 594	588	587	586	585	584																							Ы	H
-54 -53	15.51 15.50	592 607	593 606	594 605	595 604	596 603	597 602	598 601	599 600		-	-					-							-								H	Н
-52	15.49	608	609	610	611	612	613	614	615																								口
-51	15.48	623 624		621 626	620 627	619	618	617 630																								Н	Н
-50 -49	15.47 15.46	639			636		634																									Н	\vdash
-48	15.45	640	641	642	643	644	645	646	647																								曰
-47 -46	15.44 15.43	655 656	654 657	653 658	652 659	651 660	650 661		648 663																							H	Н
-45	15.43	671		669	668	667	666	665	664																								ᄅ
-44	15.41	672	673	674	675	676	677	678		L	L	L		ĻΞ		ĻΞ	L							L				L		L		Ы	Д
-43 -42	15.40 15.39	687 688	686 689	685 690	684 691	683 692	682 693		680 695					-		-																H	H
-42	15.38	703	702	701	700	699	698	697	696					L		L																	
-40	15.37		705 718		707			710																								H	H
-39 -38	15.36 15.36	_		717 722	716 723	715 724	714 725		712 727																							H	H
-37	15.35	735	734	733	732	731	730	729	728																								口
-36	15.34	736		738	739	740	741		743					H		H																H	H
-35 -34	15.33 15.32	751 752	750 753	749 754	748 755	747 756	746 757		744 759																							H	H
-33	15.31		766	765		763			760																								
										_	_	_		_		_	_	_		_				_				_	_	_	_		

	-32	15.30	768	769	770	771		773	774	775												ш	$\vdash \vdash$	للم		<u> </u>
	-31	15.29	783 784	782 785	781 786		779 788				-											\vdash	\vdash	_		
	-30 -29	15.28 15.27	799	798	797		795		793		H											\vdash	П	\neg		<u> </u>
	-28	15.26	800	801	802		804		806	807																
	-27	15.25	815	814	813	812	811	810	809	808																
	-26	15.24	816	817	818	819	820	821	822	823													$\vdash \vdash$	لللم		
	-25 -24	15.23 15.22	831 832	830 833	829 834	828 835	827 836	826 837	825 838	824 839	-											\vdash	\vdash	_		-
	-24	15.21	847	846	845	844	843		841	840	H											\vdash	П	\neg		<u> </u>
	-22	15.20	848	849	850		852		854	855																
	-21	15.20	863	862	861		859		857	856																
	-20	15.19	864	865	866		868		870	871												Ш	ш	لــــا		
	-19	15.18	879 880	878 881	877 882	876 883	875 884		873 886	872 887	-											بـــا	\vdash			
	-18 -17	15.17 15.16	895	894	893	892	891		889	888	 	 										-	H	_		-
	-16	15.15	896	897	898	899	900	901	902	903	H											\vdash	П	\neg		—
	-15	15.14	911	910	909	908	907	906	905	904																
	-14	15.13	912	913	914	915	916	917	918	919																
	-13	15.12	927	926	925		923		921	920												ш	\vdash	لللم		
	-12	15.11	928 943	929 942	930 941		932 939		934 937	935	-											\vdash	\vdash	\rightarrow		
	-11 -10	15.10 15.09	944	945	946	_	948	949	950	951	 											 		\dashv		-
	-9	15.08	959	958	957	956	955	954	953	952												\Box		\neg		
	-8	15.08	960	961	962	963	964	965	966	967																
	-7	15.07	975	974	973	972	971	970	969	968	الل											لب	μĪ	آلے	L	<u> </u>
	-6	15.06	976 991	977 990	978 989	979	980 987		982 985	983 984	⊢				\vdash	\vdash		\vdash		-		\vdash	\vdash	_		1
	-5 -4	15.05 15.04	991	990	989		987	986	985	984	H											\vdash	\Box	_		\vdash
	-3	15.03	1007	1006	1005		1003		1001	1000												т	П	\neg		T
CT.	-2	15.02	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015																
T fred	4	15.01	1023	1022	1021		1019		1017	1016	الل											لب	μĪ	آلے	L	<u> </u>
2ST	0	15.00	1024 1039	1025 1038	1026	1027 1036	1028	1029 1034	1030	1031	┝		-	-			-			-	-	\vdash	H		-	┢
	2	14.99	1039	1038	1037		1035		1033	1032	H				H			H				H	H		H	\vdash
	3	14.98	1055	1054	1053		1051	1050	1049	1048												m	H	\neg		Ħ
	4	14.97	1056	1057	1058		1060																			
	5	14.96	1071		1069		1067				┡		<u> </u>	<u> </u>			<u> </u>			-	<u> </u>	ш	$\vdash \vdash$	لــــا	—	—
	7	14.95	1072	1073	1074		1076		1078	1079	\vdash		\vdash	\vdash	H	H	\vdash	H		-	-	₩	H		\vdash	₩
	8	14.94	1088	1089	1090		1092		1094		H											\vdash	П	\neg		<u> </u>
	9	14.92	1103	1102	1101	1100	1099	1098	1097	1096																
	10	14.91	1104	1105	1106		1108	1109	1110	1111												Ш				
	11	14.90	1119	1118	1117		1115		1113	1112	-											بـــا	\vdash			
	12	14.89	1135		1133			1130		1127	H											-	\vdash	_		-
	14	14.88	1136		1138		1140		1142	_														\neg		
	15	14.87	1151		1149		1147		1145																	
	16	14.86	1152	1153	1154		1156 1163		1158	1159												ш	\vdash	للم		<u> </u>
	17 18	14.85	1167 1168	1166 1169	1165 1170		1163	1162 1173	1161 1174	1160	 											-	\vdash	-		
	19	14.83	1183	1182	1181		1179		1177	1176														=		
	20	14.82	1184	1185	1186		1188		1190	1191																
	21	14.81	1199	1198	1197		1195															ш	\vdash	للم		
	22	14.81	1200 1215		1202		1211	1205 1210	1206 1209		-											\vdash	\vdash	_		
	24	14.79	1216	1217	1218		1220		1222	1223												\vdash		-		
	25	14.78	1231	1230	1229		1227	1226	1225																	
	26	14.77	1232	1233	1234	1235	1236		1238	1239												ш	\vdash	لللم		
	27 28	14.76	1247 1248	1246	1245 1250		1243 1252	1242 1253	1241 1254	1240	-											\vdash	\vdash	_		-
	29	14.75	1263	1262	1261		1259		1257	1256														\neg		
	30	14.74	1264	1265	1266		1268	1269	1270	1271																
	31	14.73	1279	1278	1277		1275		1273	1272												ш	\vdash	لللم		
	32	14.72	1280 1295	1281	1282		1284 1291	1285 1290	1286 1289	1287	┝		-	-			-			-	-	\vdash	H		-	┢
	33	14.71	1295	1294	1293	1292	1291		1289	1288	 											\vdash	H	_	\vdash	₩
	35	14.69	1311	1310	1309	1308	1307	1306	1305	1304	H											H	M	\neg	H	T
	36	14.68	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319												፱				
	37	14.67	1327	1326	1325		1323	1322	1321	1320	الل											لب	μĪ	آلے	تـــا	<u> </u>
	38	14.67	1328 1343	1329 1342	1330 1341		1332 1339		1334 1337	1335 1336	\vdash		\vdash	\vdash	H	H	\vdash	H		-	-	₩	H		\vdash	\vdash
	39 40	14.66	1344	1345	1346		1348		1350	1351	\vdash											\vdash	\Box	_		\vdash
	41	14.64	1359	1358	1357	1356	1355	1354	1353	1352			L	L			L					T		\equiv		L
	42	14.63	1360	1361	1362	1363	1364		1366	1367													ш			
	43	14.62	1375	1374	1373	1372	1371	1370	1369	1368	┡		<u> </u>	<u> </u>			<u> </u>			-	<u> </u>	ш	$\vdash \vdash$	لــــا	—	—
	44	14.61	1376	1377	1378	1379	1380	1381 1386	1382 1385	1383	₩											\vdash	H	_	\vdash	₩
	46	14.60			1394			1397	1398													m	H	\neg		Ħ
	47	14.59	1407	1406	1405	1404	1403	1402	1401	1400																
	48	14.58						1413			الل											لب	μĪ	آلے	تـــا	<u> </u>
	49	14.57	1423 1424	1422 1425	1421		1419 1428	1418 1429			┝		-	-			-			-	-	\vdash	H		-	┢
	50 51	14.56	1424	1425			1428			1431	H					H						₩	\vdash	_	\vdash	┢
	52	14.55	1440	1441	1442		1444		1446													m	H	\neg		Ħ
	53	14.54	1455	1454	1453	1452	1451	1450	1449	1448																
	54	14.53	1456	1457	1458		1460		1462		الل											ﻟﻄﻠ	μĪ	آلے	L	<u> </u>
	55	14.52	1471 1472	1470	1469		1467 1476		1465 1478		┝		-	-			-			-	-	\vdash	H		-	┢
	56 57	14.51	14/2	14/3	14/4		1483		14/8		H				H			H				H	H		H	\vdash
	58	14.49	1488	1489	1490	1491	1492	1493	1494	1495												m	H	\neg		H
	59	14.49	1503	1502	1501	1500	1499	1498		1496																
	60	14.48	1504	1505	1506		1508			1511	لـــا								_]			لط	H	آب	آطا	<u> </u>
	61	14.47	1519 1520	1518 1521	1517 1522		1515 1524		1513 1526	1512 1527	H		_	_			_			_		\vdash	H		_	-
		14.46	1535	1521	1522		1524		1526 1529		H		 	 			 			<u> </u>		\vdash	H	_	 	┢
	62								1542		H											\vdash		-		t
	62 63 64	14.45	1536	1537	1538	1539	1540	1541	1542	1543																
	63 64 65	14.44	1551	1550	1549	1548	1547	1546	1545	1544																
	63 64	14.44		1550		1548		1546	1545																	

		_	_	_	_	_		_	_				_	_	_		_	_	_	_	_	_						_	_				_
67	14.42		1566	1565	1564		1562	1561	1560																								
68	14.41	1568	1569	1570	1571	1572	1573	1574	1575																								
69	14.40	1583	1582	1581	1580	1579	1578	1577	1576																								
		1584	1585	1586	1587	1588		1590	1591					1																			\vdash
70	14.39					1595								-		-																	\vdash
71	14.38	1599	1598	1597	1596		1594	1593	1592																								
72	14.38	1600	1601	1602	1603	1604	1605	1606	1607																								
73	14.37	1615	1614	1613	1612	1611	1610	1609	1608																								
74	14.36	1616	1617	1618	1619	1620	1621	1622	1623																								
		1631	1630	1629	1628		1626	1625	1624					1																			-
75	14.35			_	_	_		_						-																			\vdash
76	14.34	1632	1633	1634	1635	1636	1637	1638	1639																								
77	14.34	1647	1646	1645	1644	1643	1642	1641	1640																								
78	14.33	1648	1649	1650	1651	1652	1653	1654	1655																								
79	14.32	1663	1662	1661	1660	1659	1658	1657	1656																								
		1664	1665	1666	1667	1668	1669	1670	1671																								
80	14.31													-		_																	\vdash
81	14.30	1679	1678	1677	1676		1674	1673	1672																								
82	14.29	1680	1681	1682	1683	1684	1685	1686	1687																								
83	14.29	1695	1694	1693	1692	1691	1690	1689	1688																								
84	14.28	1696	1697	1698	1699	1700	1701	1702	1703																								
		1711	1710	1709	1708	1707	1706	1705	1704					!		1																	\vdash
85	14.27									_			!	1	-	<u> </u>	-	-	!	-	-	-						!	-				\vdash
86	14.26	1712	1713	1714	1715			1718	1719					<u> </u>		_																	\sqcup
87	14.25	1727	1726	1725	1724		1722	1721	1720																								
88	14.24	1728	1729	1730	1731	1732	1733	1734	1735	l -			1 -	1 -	1 -	1	1 -	1 -	1 -	1 -	1 -	1 -	_		I	Ī	_	1 -	1	I	Ī		1 7
89	14.24	1743	1742	1741	1740	1739	1738	1737	1736																								
90	14.23	1744	1745	1746	1747	1748	1749	1750	1751					1																			H
		_	_	_	_	_	_		_					-		-																	\vdash
91	14.22	1759	1758	1757	1756	1755	1754	1753	1752																								
92	14.21	1760	1761	1762	1763	1764	1765	1766	1767																								
93	14.20	1775	1774	1773	1772	1771	1770	1769	1768																								
94	14.20	1776	1777	1778	1779	1780	1781	1782	1783																								
95	14.19	1791	1790	1789	1788	1787	1786	1785	1784					H																			
96	14.18	1792	1793	1794	1795	1796	1797	1798	1799																								
97	14.17	1807	1806	1805	1804		1802	1801	1800																								
98	14.16	1808	1809	1810	1811	1812	1813	1814	1815																								
99	14.16	1823	1822	1821	1820	1819	1818	1817	1816																								
100	14.15	1824	1825	1826	1827	1828	1829	1830	1831					H																			
		_	_					_						-		-																	-
101	14.14	1839	1838	1837	1836	1835	1834	1833	1832																								
102	14.13	1840	1841	1842	1843	1844	1845	1846	1847																								
103	14.12	1855	1854	1853	1852	1851	1850	1849	1848																								
104	14.11	1856	1857	1858	1859	1860	1861	1862	1863																								
105	14.11	1871	1870	1869	1868	1867	1866	1865	1864																								\Box
		1872	1873	1874	1875	1876	1877	1878	1879					1		!																	\vdash
106	14.10	_	_	_				_						-																			\vdash
107	14.09	1887	1886	1885	1884		1882	1881	1880					1	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>		<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>											
108	14.08	1888	1889	1890	1891	1892	1893	1894	1895																								
109	14.07	1903	1902	1901	1900	1899	1898	1897	1896	_	-	-	1 -	1 -	1 -		1 -	1 -	1 -	1 -	1 -	1 -				٦		1 -	1		٦		1 7
110	14.07	1904	1905	1906	1907	1908	1909	1910	1911																								
111	14.06	1919	1918	1917	1916		1914	1913	1912																								\Box
		1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927				!	1	 	!	 	 	!	 	 	 						!	 				\vdash
112	14.05	_									_	_	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-				_		-			_		\vdash
113	14.04	1935	1934	1933	1932	1931	1930	1929	1928					<u> </u>		_																	\vdash
114	14.04	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943		Щ.	Щ.	<u></u>	Ш.	Ш.	Ш.	Ш.	Ш.	<u></u>	Ш.	Ш.	Ш.	Щ.	Щ.				<u></u>				Щ.	
115	14.03	1951	1950	1949	1948	1947	1946	1945	1944																								
116	14.02	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959																								\Box
		1967	1966	1965	1964	1963	1962	1961	1960				 	1	—	-	—	—	 	—	—	—						 					\vdash
117	14.01												_	1	-	-	-	-	_	-	-	-						_					\vdash
118	14.00	1968	1969	1970	1971		1973	1974	1975																								
119	14.00	1983	1982	1981	1980	1979	1978	1977	1976				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						1					1 1
120	13.99	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991																								
121	13.98	1999	1998	1997	1996		1994	1993	1992																								\vdash
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007		_	_	 	1	-	-	-	-	 	-	-	-	-					 	-			_	\vdash
122	13.97													-		-																	\vdash
123	13.96	2015	2014	2013	2012			2009	2008																								
124	13.96	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	_	-	-	1 -	1 -	1 -		1 -	1 -	1 -	1 -	1 -	1 -				٦		1 -	1		٦		1 7
125	13.95	2031	2030	2029	2028	2027	2026	2025	2024																								
126	13.94	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039					1																			H
							_				_	_	 	1	-	-	-	-	 	-	-	-	-		\vdash	-		 	-	\vdash	-	_	\vdash
	13.93	2047	2046	2045	2044	2043	2042	2041	2040		<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	Ц	<u> </u>	Ц	Ц	<u> </u>	Ц	Ц	Ц	<u> </u>	<u> </u>					<u> </u>			<u> </u>	ш
127																																	

表 **D.12.** Scan strategy (Step2)

Dwell (s)	30																JTC	freq															
Points	156		-15		-13			-10					-5			-2	-1	0		2	3	4	5	6	7			10				14	15
Total (min)	78 16.26	53.83	53.71	53.59	53.48	53.36	53.25	53.13	53.02	52.91	52.80	52.68	52.57	52.46	52.35	52.24	52.13	52.02	51.91	51.80	51.70	51.59	51.48	51.37	51.27	51.16	51.06	50.95	50.85	50.74	50.64	50.54	50.43
-127	16.25																																
	16.24 16.23																																Ш
-125	16.22																															-	П
-123	16.21																																
-122	16.20 16.19																																H
-120	16.18																																
	16.17																																\vdash
-118	16.15 16.14																																H
-116	16.13																																
	16.12 16.11																																\vdash
-113	16.10																																
-112	16.09																																
	16.08 16.07																																H
-109	16.06																																
	16.05																															-	\vdash
-107	16.04 16.03																															-	П
-105	16.02																																
	16.01 16.00																															-	Н
-102	15.99																																
-101	15.98		-																													=	Н
-100	15.97 15.96		t			t																t								H		\dashv	Н
-98	15.95																																
	15.94 15.93		1		_		_	_	-	_				_	_	_	-	_	_	_	_		_	-			_	-				=	\vdash
-95	15.92																																
-94	15.91		\vdash			F			H								H					F		H				H					H
	15.90 15.89		 		 	1	<u> </u>	 	1	<u> </u>				 	<u> </u>	<u> </u>	1	 	<u> </u>	<u> </u>	 	1	<u> </u>	1	-	-	<u> </u>	1				\dashv	П
-91	15.88																																
-90	15.87 15.86		<u> </u>																													=	Н
-88	15.85																																
-87	15.84																															=	\blacksquare
-86 -85	15.83 15.82																																H
-84	15.81																																
	15.79 15.78																															_	\vdash
	15.77																																П
-80	15.76																															=	\blacksquare
-79	15.75 15.74																																H
-77	15.73																																
-76 -75	15.72 15.71																															-	Н
-74	15.70																																П
-73	15.70																																
-72 -71	15.69 15.68																																H
-70	15.67																																
	15.66																															_	Н
-67	15.65 15.64																																П
-66	15.63																															=	\blacksquare
	15.62 15.61																																H
-63	15.60																																
-62	15.59 15.58		<u> </u>																													=	\vdash
-60	15.57		L		L	L	L	L	L	L				L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L					
-59	15.56	F	\vdash		F	Ļ	Ē	F	ĻΞ	Ē				F	Ē	Ē	ĻΞ	F	Ē	Ē	F	Ļ	Ē	ĻΞ			Ē	ĻΞ		Щ		J	H
-58 -57	15.55 15.54		 		 	1	<u> </u>	 	1	<u> </u>				 	<u> </u>	<u> </u>	1	 	<u> </u>	<u> </u>	 	1	<u> </u>	1	-	-	<u> </u>	1				\dashv	П
-56	15.53																																
	15.52 15.51		1		_		_	_	-	_				_	_	_	-	_	_	_	_		_	-			_	-				=	\vdash
-53	15.50																																
-52	15.49		\vdash			F			H								H					F		H				H					H
-51 -50	15.48 15.47		 		 	1	<u> </u>	 	1	<u> </u>				 	<u> </u>	<u> </u>	1	 	<u> </u>	<u> </u>	 	1	<u> </u>	1	-	-	<u> </u>	1				\dashv	П
-49	15.46																																
	15.45 15.44		<u> </u>		-	-		-	-					-			-	-			-	-		-	-	-		-				\dashv	\vdash
-4/	15.44	L	L		L	L	L	L	L	L				L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L			Ŀ		
-45	15.42		E																														H
	15.41 15.40		 						 								 							 				 				\dashv	\vdash
-42	15.39																																
-41	15.38		\vdash			F			H								H					F		H				H					H
-40	15.37 15.36		 		 	1	<u> </u>	 	1	<u> </u>				 	<u> </u>	<u> </u>	1	 	<u> </u>		 	1		1	-	-		1				\dashv	П
-38	15.36																																
-37	15.35 15.34		<u> </u>																													=	\vdash
-35	15.34		t			1			<u> </u>								<u> </u>					1		<u> </u>				<u> </u>				\exists	П
-34	15.32		E																														H
	15.31 15.30		-				-			-					-	-			-	-			-				-					=	H
-31	15.29																																
-30	15.28		\vdash		F	Ļ	Ē	F	ĻΞ	Ē				F	Ē	Ē	ĻΞ	F	Ē	Ē	F	Ļ	Ē	ĻΞ			Ē	ĻΞ		Щ		J	H
	15.27 15.26		+																														H
-27	15.25																																

I .	00 45	- 04							_																	Т —	T	_	Т	
1	26 15 25 15	5.24 5.23	-																											
		5.22	-																								1		1	
		5.21	\neg																											
		5.20	0	- 1	2	3	4	5																						
H		5.20	11	10	9	8	7	6																			-		-	
			12	13	14	15	16																				-		-	
ΠE	9 15	E 10	23	22	21	20	19	18				—	—							H							+		+	
		5.18	24	25	26	27	28	29		\vdash	-	—	—	\vdash	-	-	\vdash	-	\vdash	\vdash	-	-	-			 	+	 	+	
ΙĖ	8 15	5.17	35	20	33	32	31	30																			-		-	
	7 15	5.16		34																							_		_	
	6 15	5.15	36	37	38	39	40	41																						
<u> </u>	5 15	5.14	47	46	45	44	43																							
<u> </u>	4 15	5.13	48	49	50	51	52	53]											 []]	 	┕	ш¯	┕	ш¯	ш¯
-	3 15	5.12	59	58	57	56	55	54																						
-	2 15	5.11	60	61	62	63	64	65																						
-		5.10	71	70	69	68	67	66																						
l -	0 15	5.09	72	73	74	75	76	77																						
		5.08	83	82	81	80	79	78																			1		1	
 	8 15	5.08	84	85	86	87	88	89																		H		H		
		5.07	95	94	93	92	91	90																		H		H		
ΙH	6 15	5.06	96	97	98	99	100	101																			1		1	
ΙH	5 15	5.05	107	106	105	104	103	102																			1		1	
l F	4 15	5.04	108	109	110	111	112	113																						
			119																							-	+	-	+	-
					117	116																					_		_	
0	2 15		120	121	122	123	124																				_		_	
au .	1 15		131	130	129	128	127	126																						
2ST freq	15		132	133	134	135																				_	1	_	1	_
	1 14	4.99	143	142	141	140	139	138																						
	2 14	4.98	144		146	147]											 []]	 	┕	ш¯	┕	ш¯	ш¯
	3 14	4.98	155	154	153	152	151	150]	L]	L T	L	L	L]	L T	L T	L I	L T	 L I	 L I	L T	L T	L T	L I	 	L ^T	l T	L ^T	l T	┖ -
	4 14	4.97																									L		L	
	5 14	4.96	\neg	\neg																										
		4.95																									Π		Π	
	7 14	4.94	_	\neg																							T		T	
	3 14	4.93	_																											
ı	9 14	4.92	- †																								1		1	
		4.91	- †																								1		1	
ı H	1 14	4.90	\dashv					H				—	—							H							+		+	
				-			-			\vdash	-	—	—	\vdash	-	-	\vdash	-	\vdash	\vdash	-	-	-			 	+	 	+	
H	2 14	4.89	-+				-	\vdash			-	-	-		-	-		-		\vdash	-	-	-			+	+	+	+	+
H	3 14	4.89	-+				-	\vdash			-	-	-		-	-		-		\vdash	-	-	-			+	+	+	+	+
		4.88	-+					\vdash				-	-													-	+	-	+	-
	5 14	4.87	-+	-+	_		-	\vdash	_	\vdash	-	—	—	\vdash	-	-	\vdash	-	\vdash	\vdash	-	-	-			+	+	+	+	+
H	6 14	4.86 4.85	-+	-			-	\vdash				-	-					-		\vdash		-				-	+	-	+	-
l L	7 14	4.85										<u> </u>	<u> </u>							ш						-	1	-	1	-
-		4.84																												
	9 14	4.83																												
2	0 14	4.82																												
2	1 14	4.81																												
- 2	2 14	4.81																												
2	3 14	4.80																												
2	4 14	4.79																												
2	5 14	4.78																												
- 2	6 14	4.77																												
- 2	7 14	4.76																												
		4.75																												
I I .	9 14	4.74																												
																										+		_	_	
	0 14	4 74																												
	0 14	4.74																											1	
3	0 14	4.74 4.73																												
0	0 14	4.74 4.73 4.72																												
0	0 14 1 14 2 14 3 14	4.74 4.73 4.72 4.71																												
0 0 0 0	0 14 1 14 2 14 3 14 4 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70																												
2 2 2	0 14 1 14 2 14 3 14 4 14 5 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69																												
200	0 14 1 14 2 14 3 14 4 14 5 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68																												
3	0 14 11 14 2 14 3 14 4 14 5 14 6 14 7 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67																												
3	0 14 11 14 2 14 3 14 4 14 5 14 6 14 7 14 8 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67																												
	0 14 11 14 2 14 3 14 4 14 5 14 6 14 7 14 8 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67																												
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	0 14 11 14 2 14 3 14 4 14 5 14 6 14 7 14 8 14 9 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67 4.66 4.65																												
3 3 3 3 3 3 3 3 4	0 14 11 14 2 14 3 14 4 14 5 14 6 14 7 14 8 14 9 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67 4.66 4.65 4.64																												
30 30 30 30 30 30 30 30 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	0 14 11 14 2 14 3 14 4 14 5 14 6 14 7 14 8 14 9 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67 4.66 4.65 4.64																												
20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 2	0 14 2 14 3 14 4 14 5 14 6 14 7 14 8 14 9 14 1 14 2 14 3 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.62																												
20 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 0	0 14 2 14 3 14 4 14 5 14 6 14 7 14 8 14 9 14 1 1 14 2 14 3 14 4 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.65 4.64 4.63 4.62 4.61																												
3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0 141 1422 1433 144 1455 1466 1447 1477 1478 1478 1478 1478 1478 1478	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.62 4.61																												
	0 14 11 14 12 14 14 14 15 14 16 14 17 17 14 17 17 14 18 14 19 14 11 1	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.67 4.66 4.64 4.63 4.62 4.61 4.61 4.60																												
	0 14 11 14 12 14 14 14 15 14 16 14 17 14 17 14 18 14 19 14 10 14 11	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.62 4.61 4.61 4.60 4.60 4.61																												
2 2 2 2 2 2 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	00 144 11 1422 1433 144 144 144 145 155 1444 145 166 1445 177 177 1445 177	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.62 4.61 4.61 4.60 4.59																												
	00 14 11 14 12 14 13 14 14 14 14 14 15 14 16 14 17 17 17 14 17 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.64 4.63 4.64 4.63 4.64 4.63 4.64 4.65 4.65 4.65 4.65 4.66 4.66 4.66																												
	00 144 11 142 14 144 14 145 14 145 14 146 14 146	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.64 4.63 4.64 4.63 4.64 4.63 4.64 4.65 4.65 4.65 4.65 4.65 4.66 4.66																												
\$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$	00 144 11 142 14 14 14 14 15 14 16 14 17 14 18 14 19 14 10 14 11 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.63 4.62 4.61 4.61 4.60 4.55 4.54 4.57 4.56 4.55																												
	11 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 1	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.64 4.63 4.62 4.61 4.61 4.59 4.59 4.58 4.59 4.58 4.59 4.55 4.55																												
	11 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 1	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.63 4.62 4.61 4.61 4.60 4.55 4.54 4.57 4.56 4.55																												
	11 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 1	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.64 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61 4.62 4.61 4.61 4.63 4.63 4.63 4.63 4.64 4.65 4.65 4.65 4.65 4.65 4.65 4.65																												
	11 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 1	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.67 4.66 4.63 4.64 4.63 4.62 4.61 4.61 4.61 4.61 4.62 4.63 4.64 4.65 4.65 4.65 4.65 4.65 4.65 4.65																												
	00 144 11 144 144 146 155 146 166 147 17 148 187 187 187 187 187 187 187 187 187 18	4.74 4.73 4.72 4.71 4.69 4.68 4.67 4.66 4.67 4.66 4.65 4.64 4.65 4.61 4.61 4.60 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59																												
	00 144 11 144 144 146 155 146 166 147 17 148 187 187 187 187 187 187 187 187 187 18	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.66 4.63 4.61 4.61 4.61 4.61 4.52 4.58 4.58 4.59 4.58 4.59 4.58 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59																												
2 C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	00 144 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.63 4.64 4.61 4.61 4.61 4.61 4.55 4.55 4.54 4.55 4.55 4.55 4.55 4.5																												
	00 144 11 142 143 143 144 145 146 147 147 147 147 147 147 147 147	4.74 4.73 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67 4.66 4.66 4.65 4.64 4.61 4.61 4.61 4.61 4.50 4.58 4.57 4.56 4.55 4.54 4.55 4.54 4.55 4.54 4.55 4.54 4.55 4.54 4.55 4.54 4.55 4.54 4.55 4.54 4.55 4.54 4.55 4.54 4.55 4																												
	00 144 141 142 144 144 144 144 144 144 144	4.74 4.73 4.71 4.71 4.70 4.69 4.66 4.67 4.66 4.66 4.65 4.66 4.63 4.62 4.61 4.60 4.59 4.58 4.59 4.58 4.55 4.55 4.55 4.55 4.55 4.55 4.55																												
	00 144 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.66 4.65 4.63 4.62 4.61 4.61 4.61 4.62 4.53 4.54 4.55 4.55 4.55 4.55 4.55 4.55																												
2 C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	00 144 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	4.74 4.73 4.73 4.71 4.70 4.69 4.67 4.66 4.67 4.66 4.63 4.62 4.63 4.63 4.62 4.61 4.61 4.61 4.55 4.55 4.55 4.55 4.55 4.55 4.55 4.5																												
	00 144 142 144 141 144 141 144 141 144 141 144	4.74 4.73 4.73 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.66 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63																												
\$ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	00 144 11 144 14 14 14 14 14 14 14 14 14 1	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.61 4.61 4.61 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59 4.59																												
\$ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	00 144 11 1442 1442 1442 1442 1442 1442 14	4.74 4.72 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67 4.67 4.66 4.65 4.64 4.63 4.62 4.61 4.61 4.61 4.61 4.63 4.62 4.63 4.62 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63																												
	00 144 11 1442 33 144 44 145 5 146 6 144 147 77 148 8 144 147 147 147 147 147 147 147 147 147	4.74 4.72 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.67 4.67 4.66 4.65 4.66 4.65 4.66 4.65 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61 4.62 4.63 4.57 4.57 4.57 4.57 4.57 4.57 4.57 4.57																												
2 C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	00 144 11 1442 33 144 1455 146 147 147 147 147 147 147 147 147 147 147	4.74 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.66 4.65 4.64 4.67 4.66 4.63 4.62 4.61 4.61 4.60 4.59 4.59 4.51 4.51 4.52 4.51 4.53 4.54 4.55 4.54 4.55 4.55 4.54 4.55 4.55 4.56 4.56																												
\$ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	00 1411 1442 1443 1444 1444 1445 1444 1444 1445 1444 1445 1444 1445 1444 1445 1444 1445 1455 1445 145	4.74 4.72 4.72 4.71 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.67 4.66 4.63 4.64 4.63 4.63 4.64 4.63 4.63																												
	00 141 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.72 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.66 4.66 4.66 4.66 4.66 4.66																												
	00 144 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.73 4.72 4.71 4.69 4.68 4.67 4.66 4.65 4.66 4.65 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61																												
	00 144 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.73 4.72 4.71 4.69 4.69 4.68 4.67 4.66 4.66 4.66 4.66 4.63 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61																												
\$\frac{2}{3}\$ \$\	00 144 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.73 4.72 4.71 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.67 4.66 4.67 4.66 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61 4.61																												
\$\frac{1}{2}\$ \$\	00 144 141 141 141 141 141 141 141 141 1	4.74 4.73 4.72 4.71 4.71 4.69 4.68 4.67 4.66 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63																												
2 C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	00 144 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.73 4.73 4.73 4.74 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.67 4.68 4.67 4.68 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69																												
	00 144 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.72 4.72 4.71 4.72 4.74 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.67 4.66 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63																												
	00 144 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.72 4.72 4.71 4.72 4.74 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.67 4.66 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63																												
	00 144 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.72 4.72 4.71 4.72 4.74 4.70 4.69 4.68 4.67 4.66 4.67 4.66 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63 4.63																												
	00 144 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.73 4.73 4.74 4.70 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69																												
	00 144 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.73 4.73 4.74 4.70 4.60 4.60 4.60 4.60 4.60 4.60 4.60 4.6																												
	00 144 144 144 144 144 144 144 144 144 1	4.74 4.73 4.73 4.74 4.70 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69 4.69																												

79 14.32	т т		_						_			_				_			_	$\overline{}$
		-	-																\vdash	\vdash
80 14.31	_		_																	_
81 14.30	_		_																	_
82 14.29		_																	\vdash	\vdash
83 14.29																			\vdash	
84 14.28																			\vdash	
85 14.27																			\vdash	
86 14.26																			\vdash	
87 14.25																				
88 14.24																				
89 14.24																			1 1	
90 14.23																				
91 14.22																				
92 14.21																				
93 14.20																				
94 14.20																				
95 14.19																				
96 14.18																				
97 14.17	\pm																		\neg	
98 14.16																			\Box	Н
99 14.16																				\vdash
100 14.15																			\vdash	
101 14.14																			\vdash	
102 14.13		-	-																\vdash	\vdash
		-	-																\vdash	\vdash
103 14.12 104 14.11		_	_																$\vdash \vdash$	\vdash
105 14.11		_	_																$\vdash \vdash$	\vdash
		_																	\vdash	
106 14.10	_		_																	_
107 14.09		_																	\vdash	\vdash
108 14.08																			\vdash	
109 14.07																			\vdash	
110 14.07																			\vdash	
111 14.06																				
112 14.05																				
113 14.04																				
114 14.04																				
115 14.03																			$ldsymbol{\sqcup}$	
116 14.02																				
117 14.01																			╚	
118 14.00																				
119 14.00																				
120 13.99																				
121 13.98																				
122 13.97																				
123 13.96																				
124 13.96																				H
125 13.95																				
126 13.94		\rightarrow	_																\vdash	
127 13.93	+	_																		\vdash
12/ 13.93					 	 	 	 	_		Ь—	<u> </u>		 	 Ь—	Ь—	Ь—	Ь—		ш

付録 E

加速度センサの較正カーブ

作成日時:2019/11/18 10:35:45

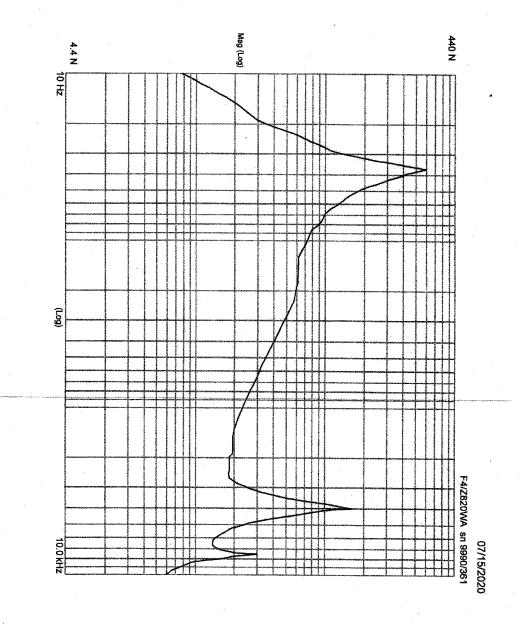
加速度センサ貸出一覧表 表示内容:[全て表示]

19-0041

プロジェクト名/試験名:XRISM Resolve 所属:JAXA(その他)

貸出日:2019/11/19 返却予定日:2020/03/31型式:224C 個数:10個

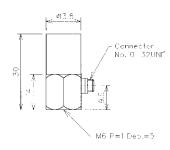
番号	シリアル	校正期限	感度	共振周波数	制造容量。			評価		
黄包		TX-III-JUFFEX	[pC/(m/s2)]	[Hz]	[df]	時	感度	共振	爾斯電	総合
1	A05G (/	2021年11月	1.2513	29155	908	Α	Α	Α	Α	Α
2	A05L i	2021年11月	1.2322	29345	896	Α	Α	Α	Α	Α
3	A06N	2021年11月	1.2953	29192	931	Α	Α	Α	Α	Α
4	A07M V	2021年11月	1.2522	31370	911	Α	Α	Α	Α	A
5	A07N ν	2021年11月	1.2161	30441	894	Α	Α	Α	Α	Α
6	A08G V	2021年11月	1.2445	29569	868	Α	Α	Α	Α	Α
7	A11L V	2021年11月	1.2597	31509	915	Α	Α	Α	Α	Α
8	A14M V	2021年11月	1.2728	30594	893	Α	Α	Α	Α	Α
9	A99N i/	2021年11月	1.2755	29305	894	Α	Α	Α	Α	Α
10	AFJL1 ν	/ 2021年11月	1.3540	29078	900	Α	Α	A	Α	Α



圧電型加速度ピックアップ MODEL-2300A

外形寸法 (単位:mm)





仕様

電荷感度 : 5pC/(m/s²) ±10%

静電容量 : 850pF±20%共振周波数 : 約 30kHz絶縁抵抗 : 1,000MΩ以上

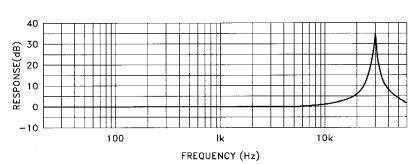
最大横感度 : 5%以下

最大加速度 : 16,000m/s² 耐衝撃加速度 : 20,000m/s² 使用温度範囲 : ~40~150℃

検出構造: 圧縮型ケース材質: SUS

質量 :約29g

周波数特性(Typ.)



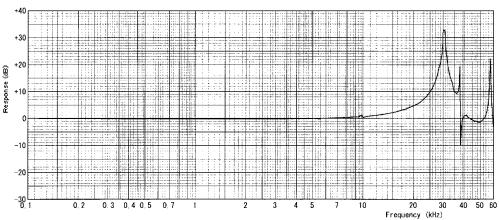
S-131G SHOWA SOKKI 昭和測器株式会社

出荷試験成績書

昭和測器株式会社



6	名	加速度センサ	電圧感度(Hz) mV/ms ⁻²	
型	式	2300A	電荷感度(100 Hz) 5.20 pC/ms ⁻²	
No.		3740		C = (Cd+Cc)
			ケーブルCc 150 pF	Cd:ピックアップ
試驗	自	2020 年 10月 27日	絶縁抵抗(DC 500 V) 10000 ΜΩ以上	容量
室	温	25 ℃	備考	



出荷試験成績書

昭和測器株式会社



	品 型 No.	名式	加速 2300 3741		ンサ					電布静電	F感度(南感度(高容量(- ブル(10		Iz) Iz) m	5.	16 95 15	0	pF	C = (0 Cd :	Cd+Cc) ピックフ	゚゙゚ッフ
	試 験室	温	2020	年	10 25)月	27	°C			縁抵抗(考		500) V)	1			以上		容量	
+40														Щ	444						
+30																	155				
+20																				\ \	
+10																				V.	
0																-		سبب			J
-10																					
-20					950-04					T# ::							111				
																	<u> </u>				
-30 <u>└</u> 0. 1		0.	2 0.	3 0.	4 0.5	0. 7	1		11.77	2	3	4	5	1.77	7	10	F	requen	0 3 cy (kHz)	0 40	50

20 30 Frequency (kHz)

0.2 0.3 0.4 0.5 0.7 1

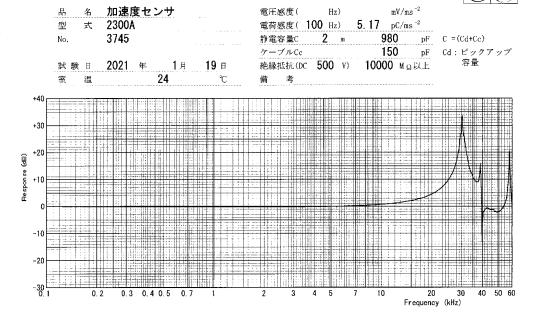
出荷試験成績書 昭和測器株式会社 品 名 加速度センサ 型 式 2300A No. 2742 $\rm mV/ms^{-2}$ 電圧感度(Hz) 電荷感度(100 Hz) 5.13 pC/ms ⁻² 静電容量C 2 m 980 pF C = (Cd+Ce) ケーブルCc 150 pF Cd: ピックアップ | 150 pF C = ケーブルCc 150 pF Cd = ケーブルCc 150 pF Cd = 注験 日 2021 年 1月 19 日 絶縁抵抗(DC 500 V) 10000 M Ω以上 室 温 24 ℃ 備 老 No. 3743 +20 g Response +10 0.3 0.4 0.5 0.7 20 40 50 60 Frequency (kHz)

出荷試験成績書 昭和測器株式会社 電圧感度(Hz) mV/ms⁻² 電荷感度(100 Hz) 5.18 pC/ms⁻² 品 名 加速度センサ 型 式 2300A 静電容量C 2 m 970 pF C = (Cd+Cc) No. 3744 ケーブルCc 150 pF Cd:ピックアップ ケーブルCc 150 pF 絶縁抵抗(DC 500 V) 10000 MΩ以上 試験日 2021 年 1月 19日 室 温 24 ℃ 備考 9 Response 0.2 0.3 0.4 0.5 0.7 Frequency (kHz)

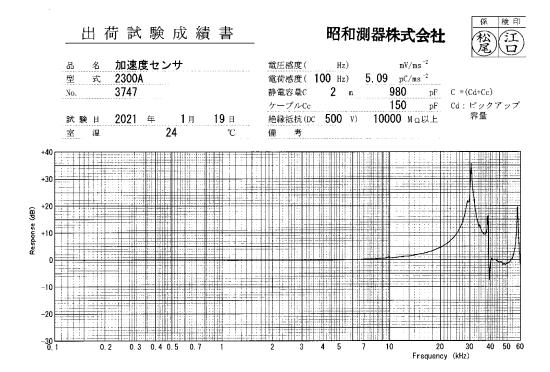


昭和測器株式会社





出荷試験成績書 昭和測器株式会社 電圧感度(llz) mV/ms⁻² 電荷感度(100 Hz) 5.03 pC/ms⁻² 品 名 加速度センサ 型 式 2300A 静電容量C 2 m 980 pF C =(Cd+Cc) No. 3746 ケーブルCc **150** pF 絶縁抵抗(DC **500** V) **10000** M Q以上 ケーブルCc 150 pF Cd: ピックアップ 試験日 2021 年 1月 19日 室 温 24 ℃ 備考 9 Response +10 20 30 Frequency (kHz) 0.3 0.4 0.5 0.7



改訂履歴

版数	発刊日	改定履歴
第1版	2022年1月31日	初版発行
第2版	2022年3月25日	Abstract, 4.2.3節 「時刻同期」、「冷凍機パワー依存性」、5.1.2.2節「バイ
		アス電圧依存性」、5.1.2.4「AC電源周波数依存性」、
		5.1.3.1節「ノイズの分類」を変更。
		3.1.3節「Vibration Isolation System」、5.1.3.2節「ビートのピクセル依存
		性」、「ビートの位相」を追記。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、多くの方にお世話になりました。お世話になった皆様に深く感謝いたします。

指導教官である粟木久光教授には、学部生のころから天文学や誤差論を教えていただき、定例ミーティングでは研究の進め方から研究報告の方法につてご指導いただきました。また、修士になってからは学会発表や申請資料の添削などもしていただき大変世話になりました。私が修士になってからの2年間は、流行りの感染症のため自由に大学で研究することが難しくなりました。なかなか大変な研究生活でしたが遠隔ミーティングを導入し、少しでも円滑な研究ができるように配慮していただき感謝しています。また、ミーティングだけでは理解できなかったことを聞きに行った際には丁寧に教えてくださり、研究が行き詰まることなく進めることができました。学術振興会の申請書を書く際にはとても多くの時間をかけて添削してくださいました。添削されて帰ってきたものには訂正箇所がたくさんありましたが、訂正を繰り返すうちに研究計画が煮詰まっていき、博士課程で行っていくことがはっきりとしたものになりました。来年からもよろしくお願いします。

本修士論文を執筆する中で最もお世話になったのが宇宙研の辻本匡弘准教授でした。辻本さんには修士論文の添削だけではなく、Resolve の地上試験に参加した際、実験のサポートもしていただきました。そのおかげで論文執筆に必要なデータを可能な限り取得することができ、書き上げることができました。修士2年から始まった毎月のミーティングでは行った解析に対してアドバイスをいただき、次にするべきことが明確になり研究が大変進めやすくなりました。特に、TC2A後の毎週のミーティングでは高い頻度でアドバイスがいただけたため、これまでにないほどの速度で研究が進みました。また、LTDやSPIE研究会に提出する英語のアブストラクトやプロシーディングの添削をしていただきました。英語で長文を書くこと自体が初めてだったため、つたない文章でしたが添削後は見違えるような文章になっており驚愕しました。また、300ページを超える修士論文を丁寧に添削していただき、コメントをしていただいたことに本当に感謝しています。お忙しい中私のために時間を作っていただきありがとうございました。来年度も地上試験に参加する予定なので、そのときはよろしくお願いします。

立教大学の山田真也准教授には、主に python を使用したデータ解析について教えていただきました。修士 1 年のときに行った FFT を用いてパーセバルの定理を確認する際に教えていただいたことや、山田さんが書かれた記事から、python で解析を進めるうえで必要な知識の基礎を身に着けることができました。この時に身に着けた基礎が解析を進めていく中で大変役に立ちました。加速度データの時間解析を行った際に共有していただいたコードから、学べることがたくさんありました。その時に、私が知らなかったモジュールの関数を教えていただき、自分で実装することが大変なプログラムも 1 行のコードでできるようになることがあり、大変助かりました。本研究が順調に進んだのは python を用いた解析の基礎を身に着けることができたことも大きな要因の 1 つだと考えており、教えていただいた山田さんには

謝辞 349

感謝しています。

共同研究者である、NASA/GSFC の Fredrick.S.Porter さんには、マイクロカロリメータのエネルギー分解能の結果をご提供いただき、NASA/GSFC の Caroline.A.Kilbourne さん、Richard.L.Kelley さん、JAXA の竹井洋さんには LTD のプロシーディングにコメントをいただき、感謝しています。

修士論文を書く上で必要なデュワーの構造共振のデータは NASA/GSFC の Gary Sneiderman さんに 提供していただきました。周波数スキャンの NASA 側の解析は NASA/GSFC の Meng Ping Chiao さんと F.S.Porter さんが行われ、結果を共有していただきました。微小擾乱加振試験では JAXA の安田進さんと東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構の長谷部孝さんにお世話になりました。この試験への参加は試験の前日に急に決まったものでしたが、安田さんと長谷部さんは快く承諾していただきました。

Resolve チームの皆様には、サブシステム試験に参加する機会をいただきました。Instrument manager の JAXA の竹井洋さん、東京都立大学の石崎欣尚准教授、金沢大学の藤本龍一准教授は、修士論文研究を含めた Resolve 試験全体が進むように主導的な役割を果たして頂きました。TC1 では広島大学の内田悠介特任助教と愛媛大学の志達めぐみ助教にデータを取得していただきました。私が参加した実験でのコマンド作業は、TC1A では東京大学の富永愛侑さん、TC2A では富永さんと京都大学の水本岬希特任助教、TC3 では埼玉大学の加藤颯さんに行っていただきました。加速度データを取得する加速度計などは安田さんに用意していただきました。DAQ システムは澤田真理さんが SXS 向けに開発したものを改良して使わせて頂きました。吉田さん、菅さんをはじめ SHI の方はデュワーの冷却をしていただきました。また、STC の冷却に使用するスポットクーラーの当て方や配置といった細かなことまで対応していただきました。また。菅さんには加速度ピックアップの取り付けも行って頂きました。実験に参加し、自身でデータを取得することで理解がしやすくなりました。実験に参加した際にサポートしていただいた皆様には感謝しています。JAXA の竹井洋さんは修論にもコメントをいただきました。コメントのおかげで修論がより理解しやすくなったと思います。ありがとうございます。

今までにない大学院生活でしたが、同じ研究室の亀谷さん、小谷くん、岩崎くん、植野くんのおかげで研究生活を充実したものにすることができました。

最後に、これまで支えて大学院まで通わせてくれた家族には本当に感謝しています。

本修士論文は多くの方々の協力のおかげで完成することができました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] Friedman, H., et al., 1951, Photon Counter Measurements of Solar X-Rays and Extreme Ultraviolet Light, Phys. Rev. 83, 1025
- [2] 井上 一, 高橋 忠幸, 水本 好彦, 小山 勝二, 2008, 宇宙の観測 III 高エネルギー天文学 現代の天文学 (日本評論社)
- [3] Giacconi, R., et al., 1971, An X-ray scan of the galactic plane from Uhuru, The Astrophysical Journal, 165, L27
- [4] Giacconi, R., et al., 1979, The Einstein (HEAO 2) X-ray Observatory, The Astrophysical Journal, 230, 540
- [5] Hayakawa, S., 1981, Galactic X-rays observed with X-ray astronomy satellite 'Hakucho', Space Science Reviews, 29, 221
- [6] Tanaka, Y., et al., 1984, X-Ray Astronomy Satellite Tenma, Astronomical Society of Japan, 36, 641
- [7] Makino, F., et al., 1987, The X-Ray Astronomy Satellite Astro-C, Astro. Lett. and Communications, 25, 223
- [8] Inoue, H., 1993, The X-ray astronomy satellite "ASCA", Experimental Astronomy, 4, 1-10
- [9] Koyama, K., et al., 1995, Evidence for shock acceleration of high-energy electrons in the supernova remnant SN1006, Nature 378,255
- [10] Mitsuda, K., et al., 2007, The X-Ray Observatory Suzaku, PASJ, 59, 1
- [11] Takahashi, T., et al., 2010, The Astro-H mission, 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-09-008E
- [12] 日本天文学会百年史編纂委員会, 2008, 日本の天文学の百年 (恒星社厚生閣)
- [13] XRIAM X 線分光撮像衛星 | JAXA 宇宙科学研究所 (2020/10/3) アクセス
- [14] 峯杉 賢治ほか, 2016, ASTRO-H バス系システムの開発, 第 16 回宇宙科学シンポジウム講演集, P-088
- [15] 永田 誠一, 1991, 基礎物理学演習 I (サイエンス社)
- [16] Masterson, R., et al., 1999, Development and Validation of Empirical and Analytical Reaction Wheel Disturbance Models. 40th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA99-1204
- [17] 井澤 克彦, 市川 信一郎, 2008, 高速回転ホイール (高速回転ホイール開発を通しての知見), 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-07-25

参考文献 351

- [18] Gaia Collaboration, 2016, The Gaia mission, Astronomy&Astrophysics 595, A1
- [19] Allica, J. C., 2010, Architecture of GAIA satellite phased array antenna, Proc. Fourth European Conference on Antennas and Propagation, pp. 1-4
- [20] SPICA サイエンス検討会メンバー, 2020, SPICA サイエンス検討会最終報告書
- [21] Mitani, S., et al., 2017, Precision pointing control for SPICA: risk mitigation phase study, Proc. SPIE 9143, 914347-1
- [22] Shigeto, S., et al., 2021, Evaluation method for effect of active vibration control on cooling performance of Stirling cooler, ELSEVIER, Cryogenics, 117, 103308
- [23] 富永 愛侑, 2021, 修士論文, 東京大学
- [24] Takahashi, T., et al., 2016, The ASTRO-H (Hitomi) x-ray astronomy satellite, Proc. SPIE 9905, 99050U.
- [25] Kelley, R. L., et al., 2016, The Astro-H High Resolution Soft X-Ray Spectrometer, Proc. SPIE 9905, 99050V
- [26] Takei, Y., et al., 2018, Vibration isolation system for cryocoolers of soft x-ray spectrometer on-board ASTRO-H (Hitomi), Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 4(1), 011216
- [27] 御堂岡 拓哉, 2020, 修士論文, 東京大学
- [28] Kelley, R. L., et al., 2016, The Astro-H high resolution soft x-ray spectrometer, Proc. SPIE 9905, 99050V
- [29] Kilbourne, C. A., et al., 2016, Design, implementation, and performance of the Astro-H SXS calorimeter array and anticoincidence detector, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4, 1, 011214
- [30] 加藤 優花, 2017, 修士論文, 埼玉大学
- [31] 山口 直, 2014, 修士論文, 埼玉大学
- [32] 武田 佐和子, 2013, 修士論文, 埼玉大学
- [33] Fujimoto, R., et al., 2017, Performance of the helium dewar and the cryocoolers of the Hitomi soft x-ray spectrometer, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 4, 1
- [34] 公益社団法人 日本冷凍空調学会, スターリング冷凍機, <https://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/190.html>(2020/10/13) アクセス
- [35] CHAPTER 15 ADIABATIC DEMAGNETIZATION, http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/thermod/thermod/http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/thermod/http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/thermod/http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/thermod/http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/thermod/http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/thermod/http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/thermod/http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/thermod/http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/thermod/http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/thermod/http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/thermod/http://orca.phys.uvic.ca/<a href=
- [36] 安田 進, 2015, 特別講演 ASTRO-H/SXS 用振動アイソレータの開発, 第 31 回宇宙構造・材料シンポジウム:講演集録, SA6000047005
- [37] Mitsuda, K., et al., 2014, Soft x-ray spectrometer (SXS): the high-resolution cryogenic spectrometer onboard ASTRO-H, Proc. SPIE 9144 91442A
- [38] Duband, L., 2015, Space cryocooler developments, Physics Procedia 67, 1, 10
- [39] Takei, Y., et al., 2016, Vibration isolation system for cryocoolers of soft x-ray spectrometer on-board ASTRO-H (Hitomi), Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 4, 1

参考文献 352

- [41] (2020/9/20) アクセス
- [42] Porter., F. S., et al., 2010, The detector subsystem for the SXS instrument on the Astro-H observatory, Proc. SPIE 7732, 77323J
- [43] Imamura. R., et al, 2021, Mechanical cryocooler noise observed in the ground testing of the Resolve X-ray microcalorimeter onboard XRISM, 19th International Workshop on Low Temperature Detectors