

SOLAR-C衛星システムにおける キーアイテムの検討

勝川行雄, 坂東貴正, 原弘久, 末松芳法 (国立天文台)
清水敏文, 戸田知朗, 川勝康弘, 坂井真一郎 (ISAS/JAXA)

SOLAR-Cの軌道選定

システム要求(軌道選択に関わるもの)

1. 観測データの伝送要求(平均レート 8Mbps × 24 時間)を実現できること。
2. 高解像度の観測が実現できること。(姿勢安定・画像安定)
 - 熱入力変動が少ない環境であること。
 - ジンバル等による微小擾乱の影響が小さいこと。
3. SUVIT や通信系の排熱設計が成り立つこと。
4. 観測対象物を 24 時間連続的に観測し続けることが可能であること。
(観測不可期間が少ないこと。)
5. 最新画像を用いて観測視野・撮像シーケンスを変更する常時アクセシ性を有すること。
6. H2A202 で所定の軌道へ打上げ可能なこと。

以上を評価項目とし、SOLAR-C軌道候補のトレードオフを行った。

＜軌道候補＞

- Sun-synchronous polar orbit (SSO) →ひので衛星
- Inclined geo-synchronous orbit (GSO) →SDO衛星
 - ※ 静止軌道は、傾斜角を持たせた軌道と比べてメリットが少なかった
- Lagrangian point (L1) halo orbit →SOHO衛星
 - ※ リサージュ軌道は、ハロー軌道と比べてメリットが少なかった

まとめ



	メリット	デメリット、懸念事項
太陽同期極軌道 (SSO)	ひので衛星等、科学衛星での実績が豊富。	- 可視時間が短く、X帯では観測データダウンリンクの要求を満たせない。Ka帯を使う場合には、ハイゲインアンテナを毎周回、短時間に大きく振る必要があり、これに伴う微小擾乱が大きな懸念。 - 地球アルベドの影響が大きく、これによる軌道周回変動もSOLAR-Cでは懸念事項。
対地同期軌道 (GSO)	- 基本的に常時アクセスが可能のため、太陽の変化に応じた柔軟な観測計画の立案、運用が行える。 - USC34で観測データダウンリンクの要求を満たせる。(USC34に16-QAMの実装が必要)	- X帯の場合、科学衛星での16-QAMの実現性を見極める必要あり。(QPSK方式では、現状のダウンリンク要求に対して不足) - Ka帯の場合は、降雨減衰が懸念事項。 - 主局USC34を考えているが、バックアップ局の確保が課題。 - ペイロード重量は辛うじて成立。
L1ハロー軌道	- 日陰がなく、連続的な観測が行える。(軌道保持マヌーバは年に数回は必要) - アンテナの駆動範囲、頻度が地球周回軌道に比べて小さくて済む。	- X帯、Ka帯のどちらにしても、60m級の大型地上アンテナが必要となり、受信局の確保が課題。臼田局はMMOとの競合が予想される。 - 太陽の変化に応じた観測計画の即時変更の実現性は不透明。(最新画像の海外局からの伝送、テレコマ運用の柔軟性 等)

➡ 地上局確保や通信方式について検討を継続するが、対地同期軌道が最有力候補。

SOLAR-C軌道のトレードオフ (抜粋)

評価項目		太陽同期極軌道 (ひので軌道)		対地同期軌道 (軌道傾斜角: 28.5°)		L1点ハロー軌道	
		X帯	Ka帯	X帯	Ka帯	X帯	Ka帯
観測データ伝送要求の実現 (COM & DH)	平均レート8Mbps x 24hの実現 (~700Gbit/日)	×	△ 左記の80Mbpsは、Ka帯なら見込みあり。 (SDOの場合: ~130Mbps) ただし、対応局の有無(後述)と降雨減衰による受信品質低下・伝送不可の割合が懸念事項。	○ 8時間程度の伝送時間を仮定した場合、24Mbps以上の回線が必要となる。 X帯16QAM、中利得アンテナ、出力20Wとすると、24Mbpsは成立する。 日本からの可視は、 中利得アンテナ2台(±X面もしくは±Y面)+2軸指向の場合で、24Mbpsが19h程度、1台+2軸指向でも連続8hの回線が成立する。	伝送レートを仮に80Mbpsとした場合、必要な伝送時間は3h弱で済む。	○ 8時間程度の伝送時間を仮定した場合、24Mbps以上の回線が必要となる。 X帯16QAM、HGA 2軸指向、出力30Wとすると、辛うじて24Mbpsは成立する。(地上局は臼田64m相当の場合。)	X帯の4倍くらいのダウンリンクレート。ただし、降雨減衰による受信品質低下の影響を入れると、能力としては~2倍程度。 (Ka帯QPSK、HGA 2軸指向、出力20Wで、24Mbpsの回線が成立することは確認されている。地上局を34m相当と小さ目、かつ仰角20°時で回線計算しており向上の余地あり。)
	想定する通信系の諸元		Ka帯QPSK、HGAを搭載	X帯16QAM、LGAもしくはMGAを搭載	Ka帯QPSK、HGA(~30cmφ)を搭載	X帯16QAM、HGA(~90cmφ)を搭載	Ka帯QPSK、HGAを搭載
	地上局制約: ①60m級の大型地上アンテナが必要か? ②必要時間確保できる地上局があるか?		①:○ 不要 ②:△ 極域にあるKa帯対応局の調査が必要。 →SVALIにて、NASA衛星に対するKa帯対応計画はある。	①②:○ USC34mにて成立する。 勝浦20mでは、最大17Mbps(5~6h/日)が限度。 オーストラリアにあるNASA局@キャンベラやESA局@パースを国際協力で利用することも検討の価値あり。(国内局で受信条件が悪い位置の時にオーストラリアでは好条件。)	①:○ 不要 ②:△ 国内Ka帯アンテナの専有可否は要調査。(ただし、国内局は降雨減衰の影響が懸念。)ホワイтサンズに複数あるSDOのアンテナを国際協力で利用することも考えられるが、衛星を日本上空に置けないことになる。(日米の地上局の両方から見える中間付近という選択肢もある。この場合は低仰角の時間は増える。)	①:△ 必要。さらに、日中(LST)使える局に限定される。 国内では臼田64mが前提になる。 ②:△ 臼田の場合、MMOとの競合が予想されるため局専有できる時間量が不確実。 (DSNIはX帯16QAMには未対応。)	①:△ 必要。さらに、日中(LST)使える局に限定される。 ②:△ 臼田の場合、MMOとの競合が予想されるため局専有できる時間量が不確実。 国際協力によるDSNの利用が前提になるものと思われる。
	ジンバルの要否		△ 必要	△ USC34mを前提とするならば必要。 (臼田64mならば、LGA回線(機体固定)でも辛うじて成立するが、臼田局を8h以上確保できるかが懸念。)	△ 必要	△○ 必要だが、あおりを補正する程度のジンバルで良い。	
高解像度の実現 (姿勢安定、画像安定)	地球アルベドによる熱変形	△ 地球アルベドの影響大。 ひので軌道の場合、90分強での周期変動を伴う。		○ 極めて小さい		○ 極めて小さい	
	ジンバル等による微小擾乱の発生	N/A	Ka帯指向アンテナを、10分程度の短時間に大きく振る必要がある。動作頻度も高く、約90分おきにこれを行うことになる。 ※ジンバルの影響の度合いを、各々評価する必要あり。 (例: HGAを~180deg/10min)	※ジンバルの影響の度合いを、各々評価する必要あり。 (例: MGAを~30deg/hour)	※ジンバルの影響の度合いを、各々評価する必要あり。 (例: HGAを~30deg/hour)	※ジンバルの影響の度合いを、各々評価する必要あり。 駆動範囲・頻度は、地球周回軌道に比べて小さい。 (例: HGAを~15deg/month) 例えば、1日1回動かせば、その日のダウンリンク中は固定で良い。(観測中の擾乱を避けるため、衛星ポインティング変更時にアンテナ駆動を一緒にやる等の運用が容易。)	
熱設計	SUVITの排熱設計	△ EOLでのM1温度は50℃強。 (バス部も使った排熱設計時)		○ EOLでのM1温度は40℃弱に収まる。(バス部も使った排熱設計時)		TBE	
連続的な観測 (観測不可期間の有無)	日陰	△ 夏季(もしくは冬季)に約3か月の日陰期間あり。 (最大約20分間の日陰が、毎周回(90分強おき)発生する。)		△ 春分、秋分で各20日強の期間、最大70分程度の日陰あり。 (1日1回)		○ なし	
	軌道メンテ	○ 基本的に不要。 (ただし、デブリ回避の方針や手順は検討しておく必要あり。)		△ 準天頂衛星では中心経度±5° に保持しており、年2回実施。		△ 年に2m/s程度のマヌーバが必要。小分けにして数か月ごとに実施した方が良い。	
常時アクセス性 (常時画像確認+観測計画変更)		△ 1バス約10分で、日本からの可視は1日4バス程度しかない。極域では90分強おきに可視があるが、この場合、画像データの伝送にかかる時間を考慮する必要あり。		○ 地上局のアサイン状況によるが、基本的には常時アクセスがしやすい軌道。		△ 地上局のアサイン状況による。どこかの1アンテナに限定すると、日中しか画像データが取得できないことになる。また、海外局で画像受信の場合、データ伝送にかかる時間を考慮する必要あり。	
ペイロード重量の成立性	前提とするロケット打上げ能力(H2A202)は、 太陽同期:約3.8/4.4t 静止トランスファ:約4t 地球重力脱出:約2.5t	○ 特に懸念なし。		○ ・SC中間報告書での重量バジェット:2258kg 傾斜角制御、南北制御を実施しない前提では推奨が1.7t(5年)となり、 ドライ重量2.3tでも辛うじて成立。		○ アポジキックが不要のため、静止軌道や準天頂軌道よりも多くの重量(ミッション機器)を持って行かれる。 詳細未検討。(推進系・通信系・電源系重量の準天頂案からの増減など。)	
放射線環境		典型的ドーズ値 10^4 rad(Si)/年(ひのでの場合) SAA [内帯陽子・電子] と局域[外帯電子、減衰されていない太陽高エネルギー粒子と宇宙線]で放射線レベルが高い。		典型的ドーズ値 10^5 rad(Si)/年(2mm Al Spherical) 放射線レベル低い静穏期と、高エネルギー電子・太陽陽子が多い増大期[太陽活動に大きく依存]がある。宇宙線は減衰なく到達。 →XIT/GI バックグラウンドは許容範囲か? →撮像データは、SDO/AIAデータから見る限り許容できる		典型的ドーズ値: TBD 通常は放射線レベルは低いが、フレア発生時に高エネルギー粒子が急激に増大。宇宙線は減衰なく到達。 →太陽高エネルギー粒子が到達すると、撮像データでも放射線影響がある可能性がある(SOHO/LASCO) →XIT/GI バックグラウンドは許容範囲か?	

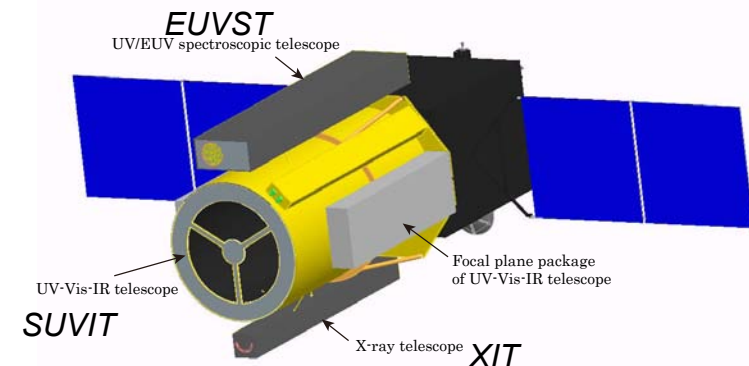
SOLAR-Cの指向安定度

「ひので」衛星の軌道上指向安定度評価と SOLAR-Cへ向けた課題



- 宇宙科学ミッションにおいて、高解像度観測は共通の課題。そのためには、望遠鏡の光学性能だけでなく、**高精度な指向安定度**が必要。
- **太陽観測衛星「ひので」** (SOLAR-B, 2006-) において、高精度姿勢制御系、微小擾乱管理、像安定化装置などによって、日本の光学観測衛星において最高の指向安定度を達成した。
- 次期太陽観測衛星計画**SOLAR-C**。既存装置の2-5倍の解像度向上を狙う。「ひので」で培われた技術を活かしつつ、それを越える高い指向安定度を達成するための衛星システムを検討する必要がある。

- 口径φ1.5m の光学望遠鏡 (SUVIT):
目標分解能 **0.07 arcsec (既存装置の3倍)**
- 紫外線・X線望遠鏡 (EUVST, XIT):
目標分解能は **0.2 – 0.5 arcsec (既存装置の2-5倍)**



- 「ひので」UFSS、IRU、CT(相関追跡装置)の軌道上テレメトリデータを用いて、 $10^{-5} < f < 280\text{Hz}$ の広い帯域にわたり、軌道上指向安定度を評価。
SOLAR-Cにむけた課題を同定した。

SOLAR-Cにおける指向安定度要求



θ_x
 θ_y

		Time	Requirements	unit	note
Solar UV-Vis-NIR Telescope (SUVIT)		1sec	0.02	arcsec (3 σ)	0.015"/pix, Strehl ratio ~ 0.94 at 280 nm
		10sec	0.02	arcsec (3 σ)	0.07"/pix, Strehl ratio ~ 0.98 at 600 nm
		1hr	2	arcsec (0-p)	Image distortion by attitude jitter ~ granular motion
		Mission life	20	arcsec (0-p)	FOV (160")/8
EUV/FUV High Throughput Spectroscopic Telescope (EUVST/LEMUR)		0.5sec	0.1	arcsec (3 σ)	0.14"/pix, contrast ~ 0.96
		5sec	0.1	arcsec (3 σ)	0.14"/pix, contrast~ 0.96
		1hr	2	arcsec (0-p)	Sampling x 6
		Mission life	32	arcsec (0-p)	FOV(256")/8
X-ray Imaging Telescope (XIT)	Normal incidence	1sec	0.1	arcsec (3 σ)	0.1"/pix, contrast~ 0.94
		10sec	0.1	arcsec (3 σ)	0.1"/pix, contrast ~ 0.94
	Grazing incidence	1sec	0.3	arcsec (3 σ)	0.5"/pix, contrast~ 0.94
		1min	0.7	arcsec (3 σ)	2.0"/pix, contrast > 0.99
		1hr	8	arcsec (0-p)	FOV (256")/32
		Mission life	32	arcsec (0-p)	FOV (256")/8

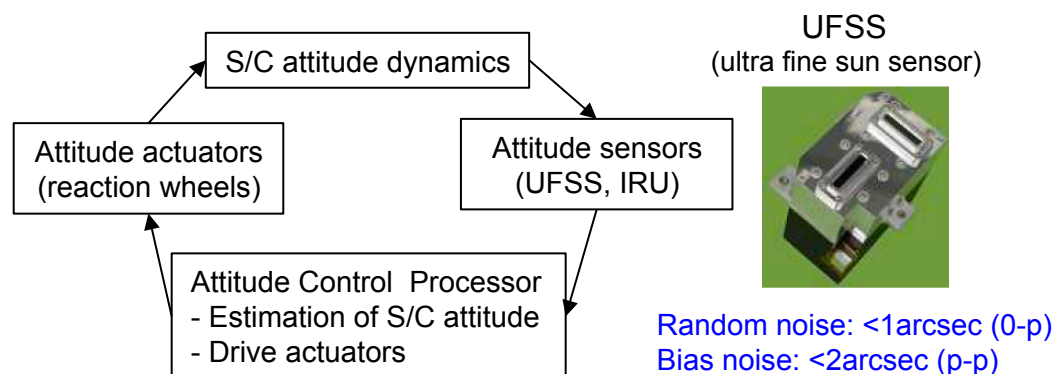
θ_z

		Time	Requirements	unit	note
Solar UV-Vis-NIR Telescope (SUVIT)		1hr	50	arcsec (0-p)	1pix at the edge of FOV
EUV/FUV High Throughput Spectroscopic Telescope (EUVS)		1hr	100	arcsec (0-p)	1pix at the edge of FOV
X-ray Imaging Telescope (XIT)	Normal	1hr	50	arcsec (0-p)	1pix at the edge of FOV
	Grazing	1hr	100	arcsec (0-p)	1pix at the edge of FOV

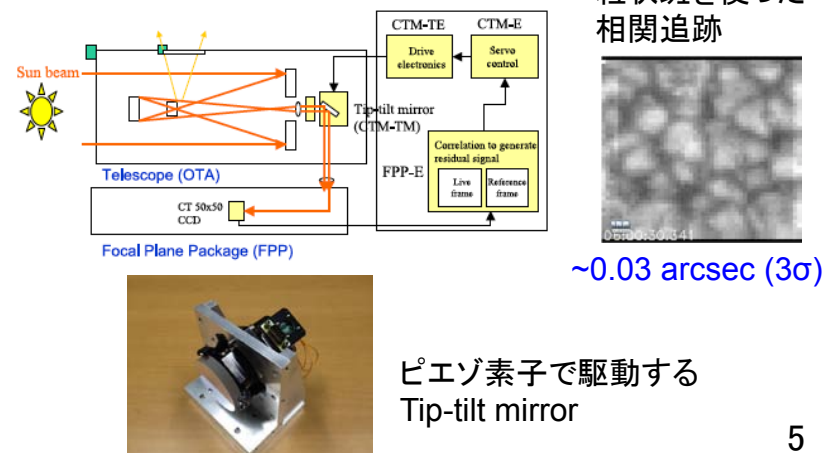
「ひので」衛星における高指向安定度実現方針

- 「ひので」における指向安定度要求
 - － 可視光望遠鏡 (SOT, 0.2- 0.3 arcsec resolution)
 - 姿勢制御系に加え、望遠鏡内の像安定化装置で達成
 - － X線望遠鏡・EUV分光撮像装置 (XRT and EIS, ~1arcsec resolution)
 - 姿勢制御系、すなわち衛星指向のみで達成
- 望遠鏡間、望遠鏡と姿勢センサー間で安定したアライメント
 - － 全ての望遠鏡、太陽センサーは低熱膨張のCFRP製光学ベンチユニット(OBU)にマウント。
- 衛星レベルの微小擾乱管理
 - － 可動物による擾乱を実測
 - － モーメントムホイールの最適回転数を同定

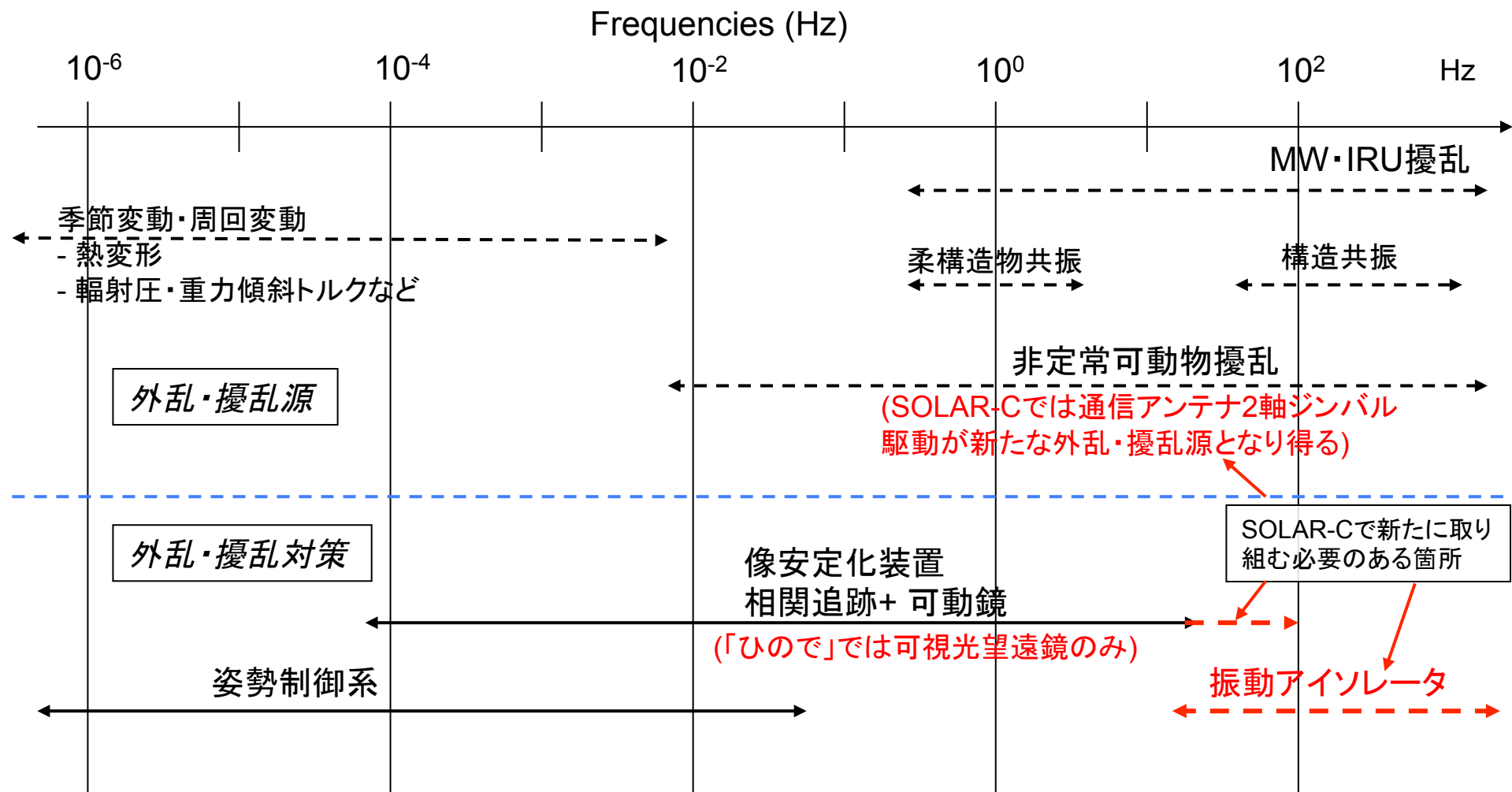
姿勢制御系



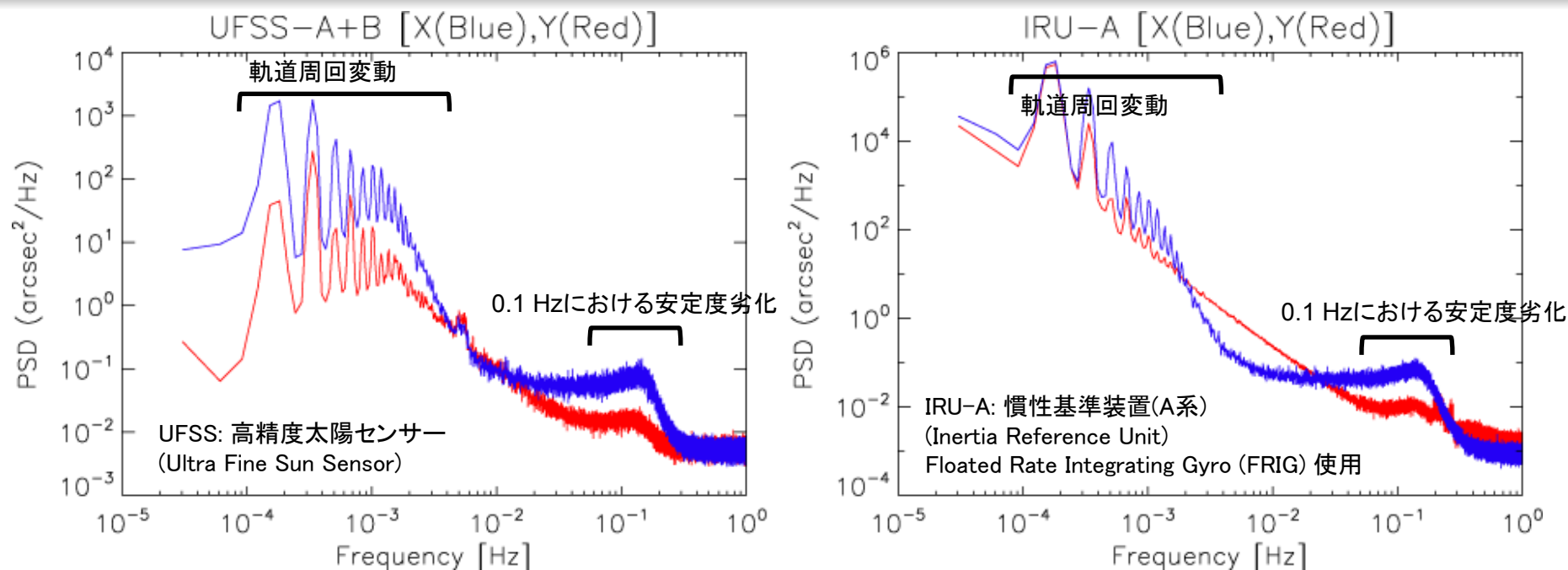
像安定化装置(SOT)



外乱・擾乱源とその対策

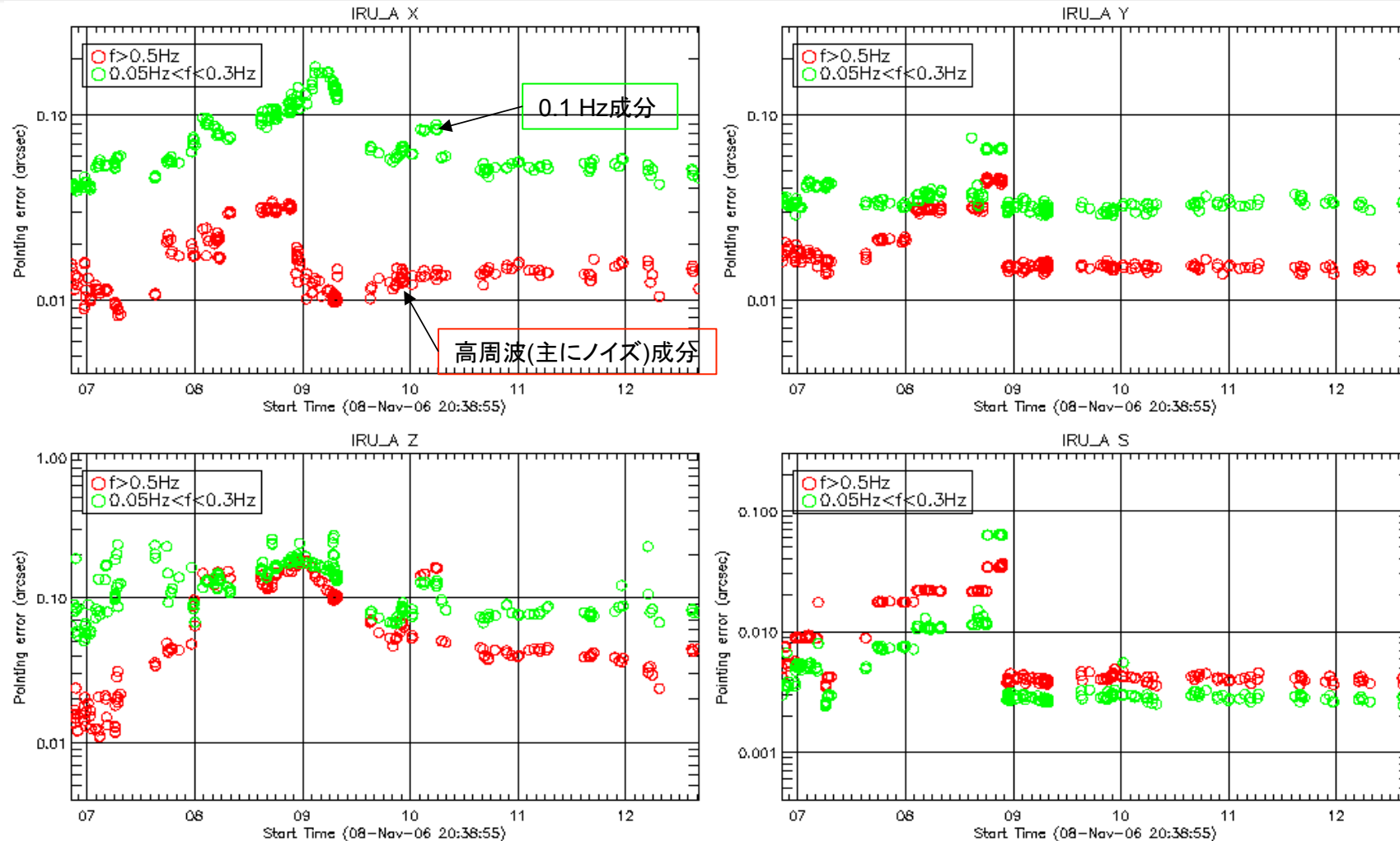


「ひので」軌道上指向安定度評価: UFSS, IRUで測定された指向誤差のパワースペクトル



- 軌道周回変動 ($10^{-4} - 10^{-2}$ Hz): ~ 0.6 arcsec (0-p)
 - 姿勢センサーや望遠鏡の支持構造の熱変形が主要因
 - 太陽同期極軌道、地球赤外の影響によって、温度変動が発生(バーベキューモード)
- 0.1Hz帯における指向安定度劣化: ~ 0.1 arcsec (0-p)
 - 振幅はUFSS・IRUでほぼ同じ。また可視光望遠鏡の相関追跡装置(CT)でも0.1Hzで同程度の振幅が観測されている。センサーの性質によるものではなく、衛星全体が揺れている。
 - 0.1Hzは姿勢制御系制御帯域の上限周波数に対応している。
 - 姿勢制御モデルではこのような劣化は起こらないはず。
 - 経年変化が顕著。打ち上げ後から2009年の2月にかけて徐々に悪化。2009年の2月以降減少し安定になる。
 - X軸周り(上図の青線)の方がY軸周り(上図の赤線)より大きい。

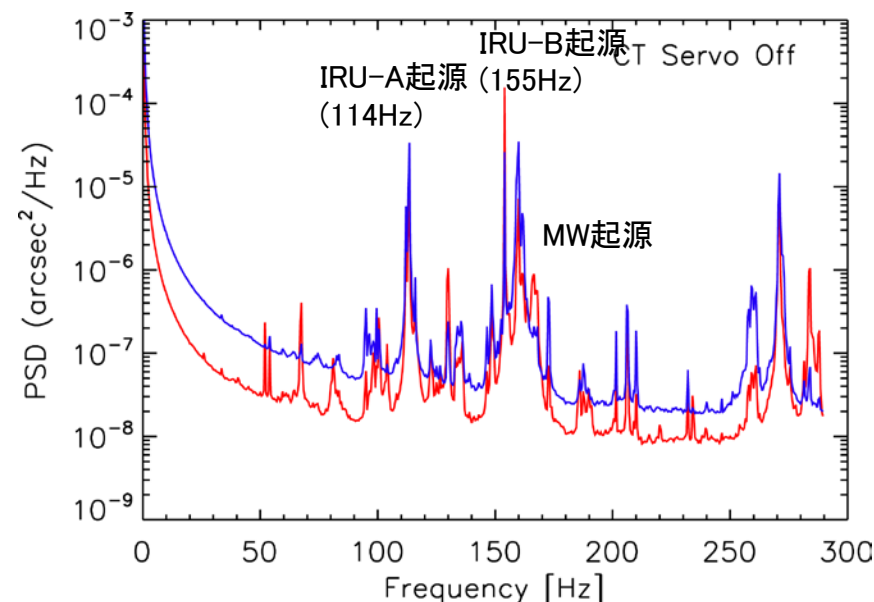
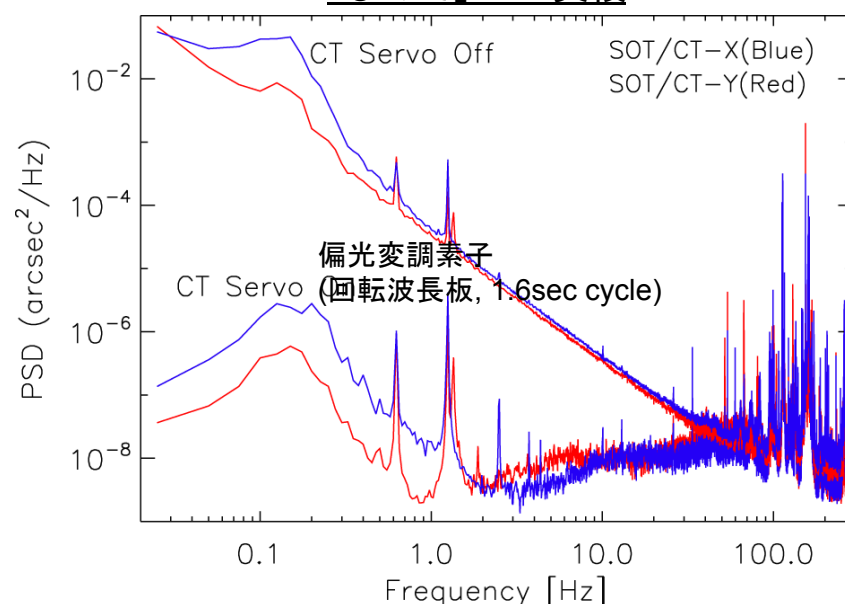
「ひので」軌道上指向安定度評価: IRU-Aで測定した0.1Hz近傍指向安定度の経年変化



- 0.1Hz近傍の振幅(上図の○)は打ち上げ後から2009年の2月にかけて徐々に悪化。その後、減少し安定になる。この経年変化はX軸のみに見られる。UFSSでも同様の経年変化が見られている。
- 高周波(主にノイズ起源)成分(上図の○)は特にZ軸周りで顕著な変化が見られた。

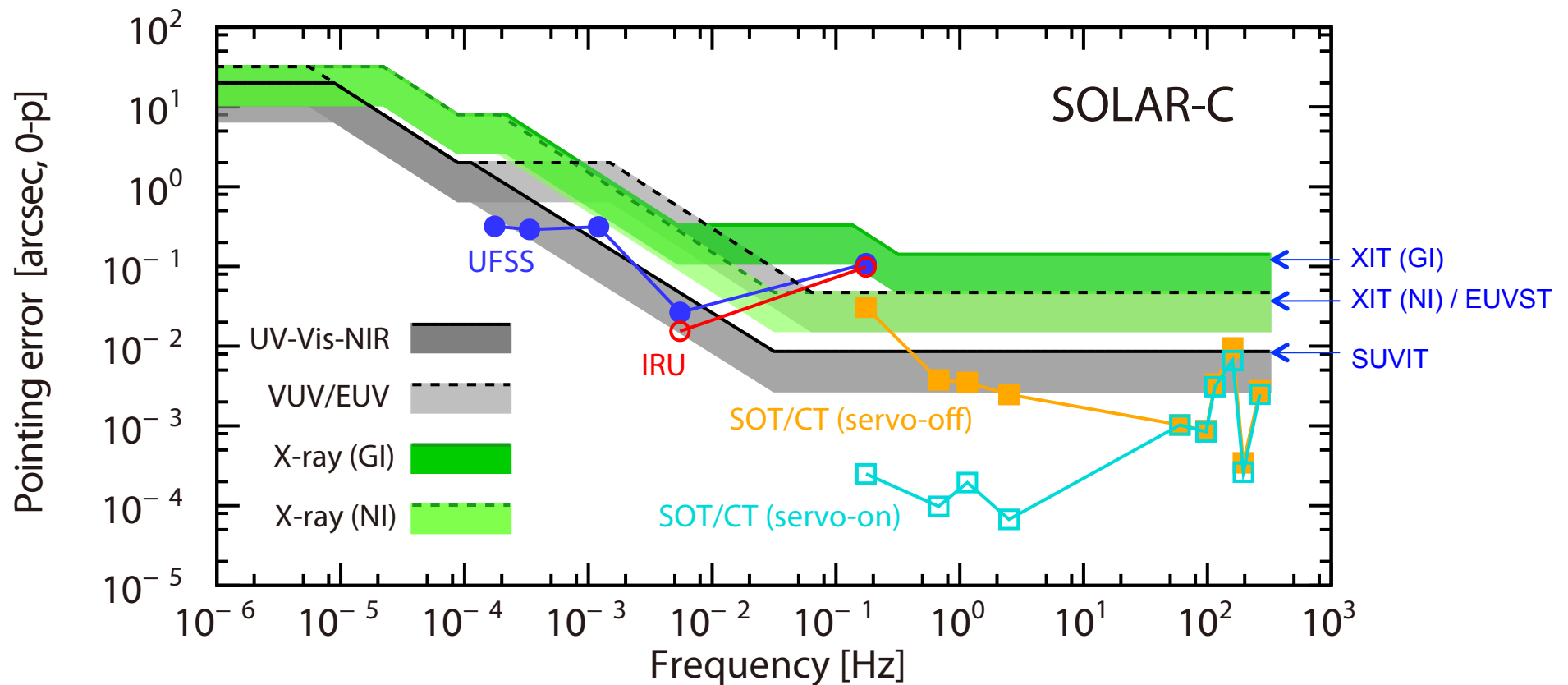
「ひので」軌道上指向安定度評価: 相関追跡装置(CT)によって計測された高周波数域擾乱

「ひので」CTM実績



- 相関追跡装置(correlation tracker): 580Hzサンプリングの高速CCDカメラを使用
- 像安定化装置によって20Hzより低周波域で外乱・擾乱が低減化されていることを確認。
- 100Hzより高周波数域でパワースペクトル上に多数のピーク。機械式ジャイロやホイールで発生した擾乱が、望遠鏡構造と共振することで発生。
- 高周波数域における共振によって生じる指向誤差は0.01 – 0.02 arcsec (0-p)。
 - ホイール回転数のドリフトとともに指向安定度劣化を観測(2011年)。最悪時は~0.1 arcsec(0-p)程度。

SOLAR-C指向安定度要求 vs ひので実績



「ひので」指向安定度実績(●: UFSS, ○: IRU, ■□: CTM)と SOLAR-Cにおける指向安定度要求との比較。

帯が各ミッション機器に対する指向安定度要求(帯の上端)とその許容レベル(要求の1/3に対応, 帯の下端)を示す。

Here is assumed sinusoidal vibrations to convert $X_{3\sigma}$ to X_{0p} .

$$\Delta X_{0p} = \frac{\sqrt{2}}{3} \Delta X_{3\sigma}$$

SOLAR-C指向安定度要求を満たすための課題



1. 軌道周回変動 ($<10^{-3}$ Hz)

- 構造設計・熱設計が重要
- 衛星を静止軌道(GEO)や準天頂軌道に投入することができれば、地球アルベド・赤外線の影響は小さくなり、温度変動・熱ひずみを無視できるオーダーまで小さくすることができる。

2. 中周波数域の指向安定度 ($10^{-2} - 1$ Hz)

- 「ひので」では姿勢系の制御帯域上限近傍における指向安定度の劣化が観測されている。テレメトリデータと姿勢制御モデルの再評価から原因究明にあたっている。
- 望遠鏡側が必要な指向安定化を行うのが全体方針。このためには欧米のAOまでに衛星バス側の指向安定度について明確化する必要がある。
 - X線やUV望遠鏡は海外から供給予定。高解像度 (0.1"-0.14"/ピクセル)が要求されている。0.1秒角(0-p)の指向安定度(ひので実績)では不足
 - 衛星バス側で実現できない場合、光学望遠鏡に加え、X線やUV望遠鏡にもガイド望遠鏡と像安定化装置をもつ必要
- 中周波数域の指向安定度は衛星姿勢制御帯域の最適化が重要。

3. 高周波数域の微小擾乱 (50 – 300Hz)

- バス機器からの微小擾乱の発生や伝達を抑制する。
 - ホイールを振動アイソレータにマウント
 - 無擾乱なジャイロを使用する (e.g. FOG)
 - 観測装置一体を振動アイソレータにマウント (衛星バスと観測装置をアイソレート)
- 可視光望遠鏡内の像安定化装置の性能を向上させる。
 - Cross-over frequencyとして~20Hzだったものを、100Hz程度にまで広帯域化する。そのためには、関連追跡装置として、高速カメラ(> 3000fps、ただし50x50の小フォーマットでよい)が必要。