



次世代赤外線天文衛星(SPICA)の 放射冷却構造に関わる要素試作と ランダム振動環境評価

山脇敏彦、水谷忠均 (JAXA/研究開発本部)、小松敬治、後藤健、竹内伸介 (JAXA/宇宙科学研究所)
施勤忠、赤城弘樹 (JAXA/環境試験技術センター)

SPICAは、現在リスク低減フェーズ2の段階にあり、ミッションの成功に不可欠な要素技術の試作評価を中心とした活動を実施している。本報告では、極低温望遠鏡の実現に不可欠な軽量放射冷却構造の要素試作および望遠鏡光学ベンチから支持される搭載観測機器に対するランダム振動環境評価について述べる。**SPICA**では、太陽からの入熱を宇宙空間に放射で逃がすための多層シールド、鏡筒、パッフルを有している。これらは高熱伝導、軽量化を求められる一方、打上げ時の対座屈強度が大きな課題となっている。このために、要素試験品の製作評価、モデル座屈実験などを実施し、設計の妥当性を評価した。また上記構造および望遠鏡を支持するトラスからの伝導による侵入熱を減らす必要があるため、軌道上でトラスを分離する方式が提案されたが、本フェーズでは、主要な要素となる**CFRP**製パネの試作試験を実施し、その実現性を確認した。さらに搭載観測機器開発でクリティカルとなるランダム振動環境を評価し、フォースリミット法の適用により試験時の環境を緩和することを検討した。これらにより当初目標とした**SPICA**のリスク低減を達成した。

◆ランダム振動環境およびフォースリミット条件

＜解析対象＞
SPICAに搭載される焦点面観測装置FPIA(Focal Plane Instrument Assembly)上の遠赤外線観測装置SAFARI(SPICA FAR-infrared Instrument) 搭載面インターフェース点のランダム振動環境 (Fig.1 Blue Points)

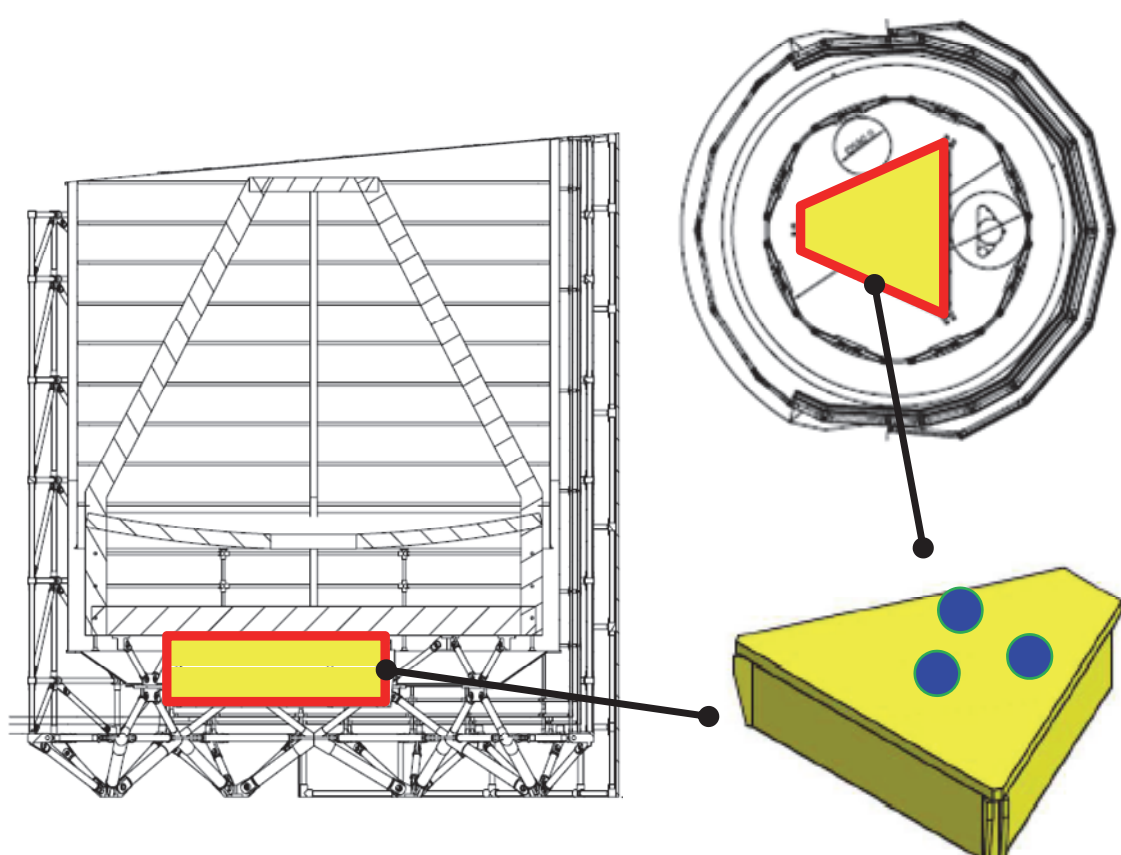


Fig.1 Overview and Location of SPICA-FPIA

FEA : Finite Element Analysis (有限要素解析)
SEA : Static Energy Analysis (統計的エネルギー解析)

＜適用手法＞

ランダム振動環境予測手法 —FEA-SEA統合法—

ランダム振動環境条件の検討では、FEA-SEA統合法を用いた。宇宙機構体パネル等の決定論サブシステムはFEA、拡散音場等の統計的サブシステムはSEAを用いてモデル化、構造から音響への放射(FEA⇒SEA)と音響からの構造負荷(SEA⇒FEA)が等しいとする相反性を利用し、各サブシステム間のパワーフロー平衡を考慮し、統計的サブシステムがランダムに変化する時の平板応答を求める手法(自由度毎)である⁽¹⁾。

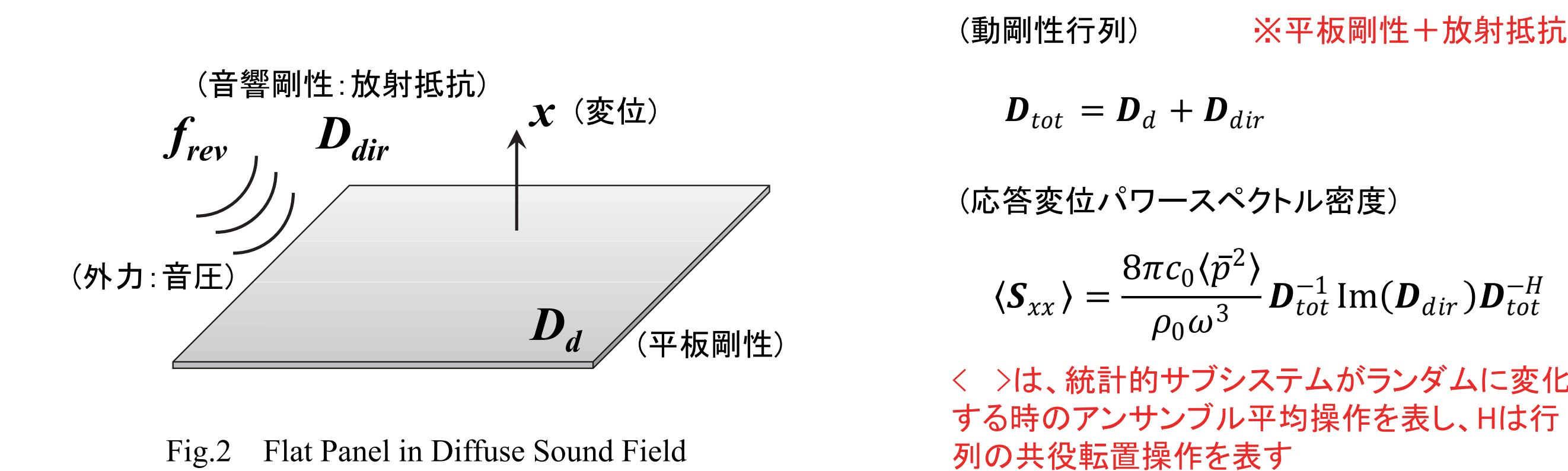


Fig.2 Flat Panel in Diffuse Sound Field

(1) 赤城弘樹, 安藤成将, 柳瀬恵一, 施勤忠, “宇宙機音響振動応答予測に関するFEA-SEA統合法適用の理論検討と実験検証”, 日本機械学会論文集C編, Vol.79, No.802(2013), pp 1960-1969.

フォースリミット振動試験条件 —動質量を用いた最大フォース値の予測手法—

フォースリミット条件の算出では、搭載機器(以下、Load系)の動質量を用いて、機器インターフェース(I/F)点における最大予測フォース値を算出する方法を検討した。Load系I/F点を剛固定として固有値解析を行い、求められた搭載機器の各モードの有効質量により、Load系の動質量 M_L は以下の式を用いて求めることができる⁽²⁾。また、Load系に加わるI/Fフォース F_b は、I/F加速度 A_b と動質量 M_L の積で表される。I/F加速度は実応答(FEA-SEA統合法の結果)を用いる。算出されたI/Fフォースの最大値がフォースリミット条件 $F_{PSDspec}$ となる。

(動質量)
$$\underline{M}_L(\omega) = \frac{F_b(\omega)}{A_b(\omega)} = M_L \left\{ 1 + \sum_{k=1}^n \left(\frac{m_{ek}}{M_L} \frac{r_k^2}{(1-r_k^2) + j2\zeta_k r_k} \right) \right\}$$

(最大予測I/Fフォース)
$$F_{PSDspec} = \max(\underline{M}_L \times A_b(\text{response}))$$

M_L : Load系の剛質量 m_{ek} : Load系のk次モードの有効質量
 r_k : 周波数比($=\omega/\omega_k$) ω_k : Load系のK次モードの固有角周波数
j: 虚数単位 ζ_k : Load系のk次モードの減衰比

(2) 宇宙航空研究開発機構, JERG-2-130 HB004 フォースリミット振動試験ハンドブック

◆大型円筒シェルモデルの座屈実験

鏡筒、パッフル構造の座屈荷重に対する試験検証

一般的に座屈強度は理論値と実験値に相違があることが知られており、設計解析においてはノックダウンファクタを考慮する。しかしながら、半径/厚さの比が1500を超える大型薄肉円筒シェル構造では座屈荷重の実験値が少ないため、機械振動による座屈について実験的検証を行った。SPICAではミッション部の鏡筒、パッフルが対象構造となる(Fig.7参照)。

- 2種類の円筒シェルの正弦波振動試験を行った(Fig.8-9)。その結果、シェルに加わる体積力が座屈荷重より大きくても座屈により形状は崩壊しない。ただし、変形が塑性域に入っていないことが条件である。
- ランダム振動試験、音響試験では、その荷重が座屈荷重より大きくても正弦波試験以上に座屈は問題とならない(Fig.10)。
- $r/t \geq 1500$ 以上の円筒シェルではハンドリングの際、静荷重で座屈させる可能性が大きいので使うべきでない(Fig.11)。

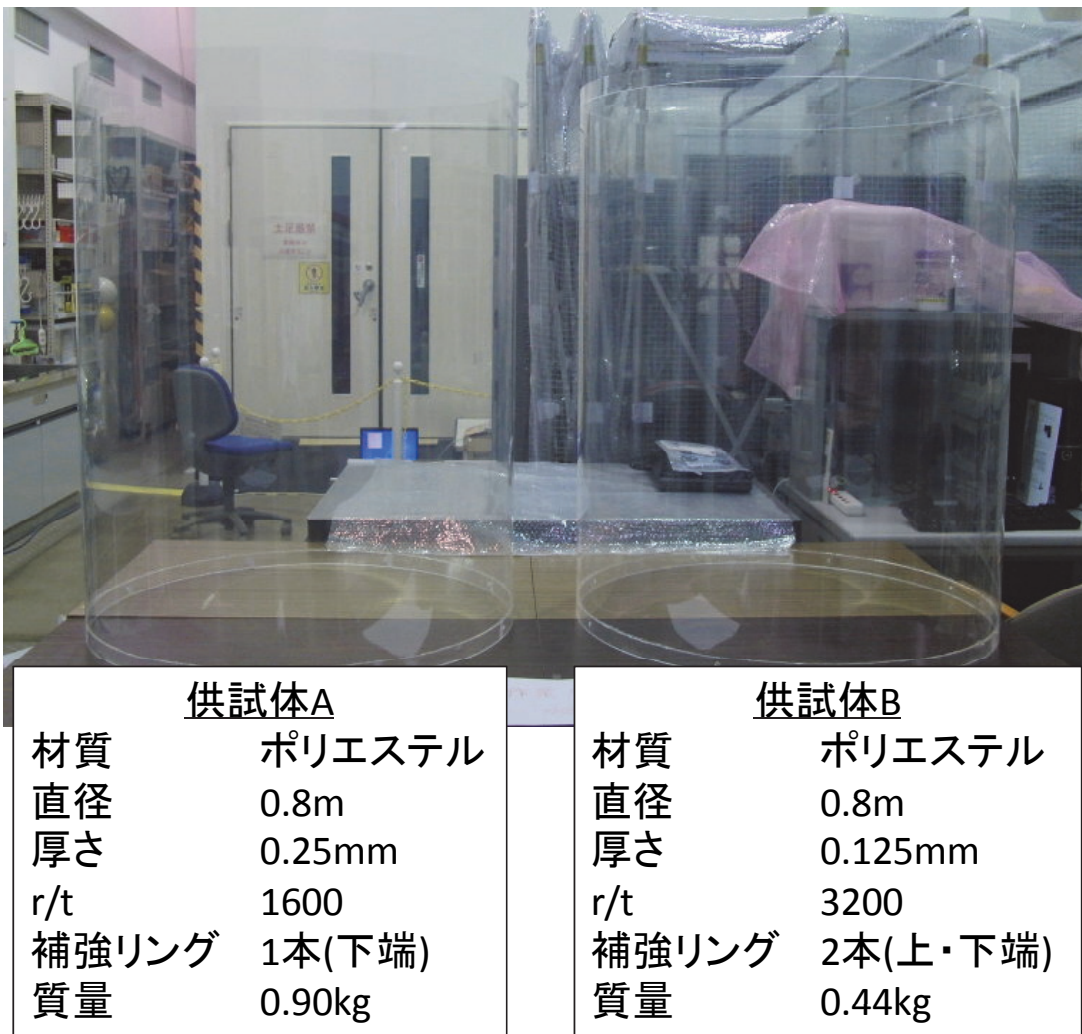


Fig.8 1/4-scaled specimen made of polyester film which have different thickness (0.25mm and 0.125mm).

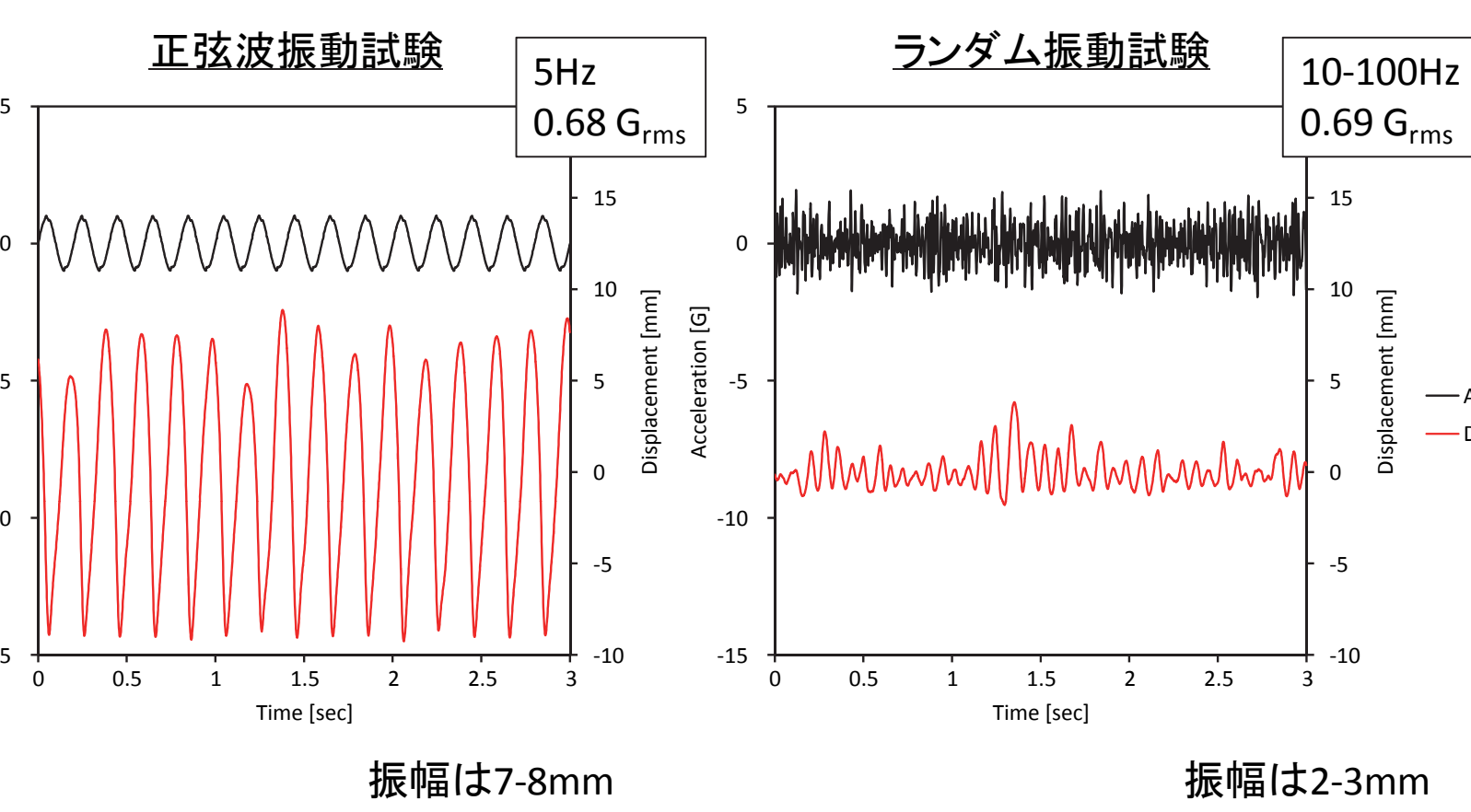


Fig.10 Acceleration (black line) and displacement (red line) of the cylindrical shell. (left: sinusoidal vibration, right: random vibration)

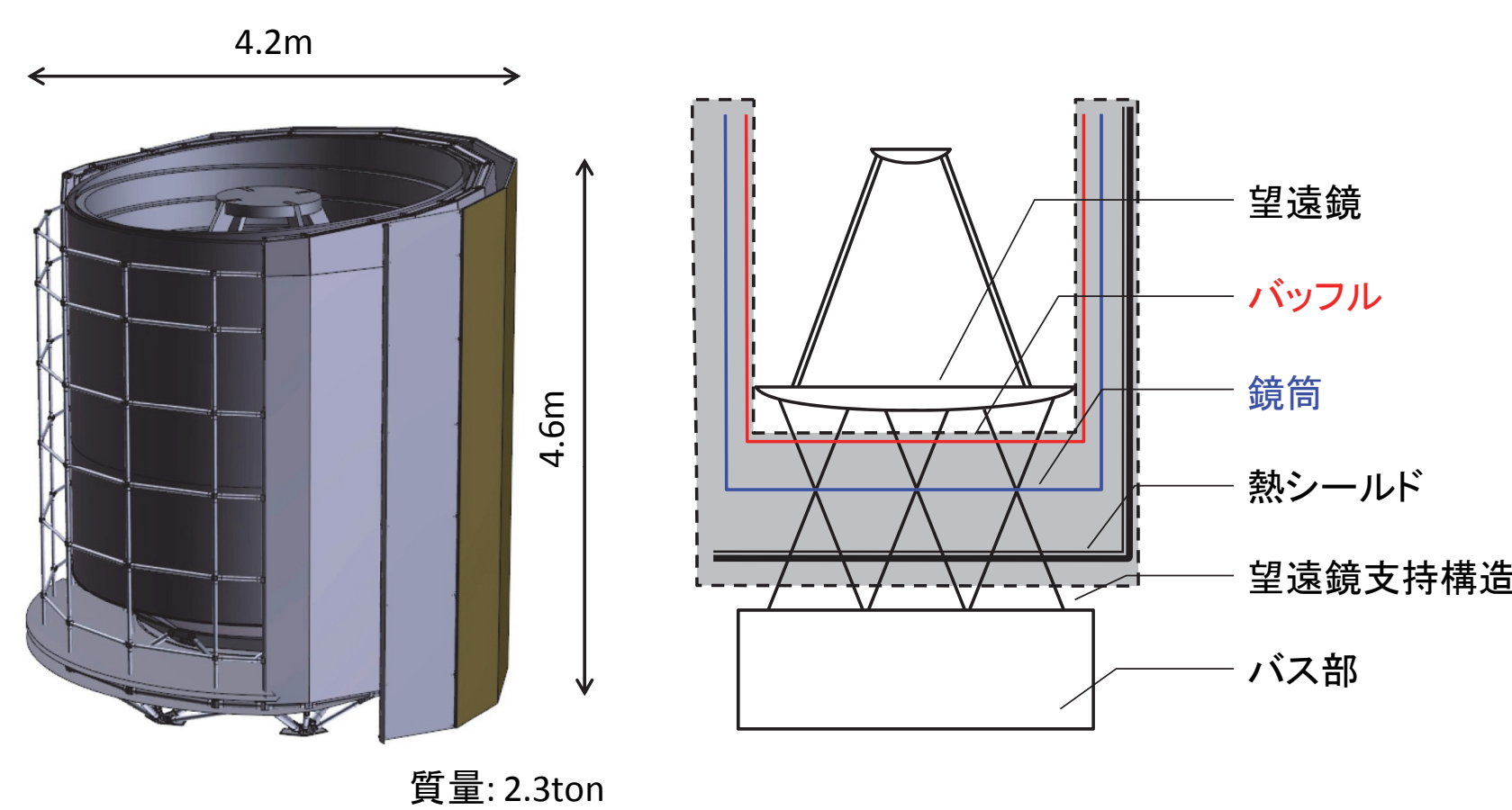


Fig.7 Overview and locations of the baffle and the telescope shell.



Fig.9 Vibration and buckling test of the large cylindrical shells.

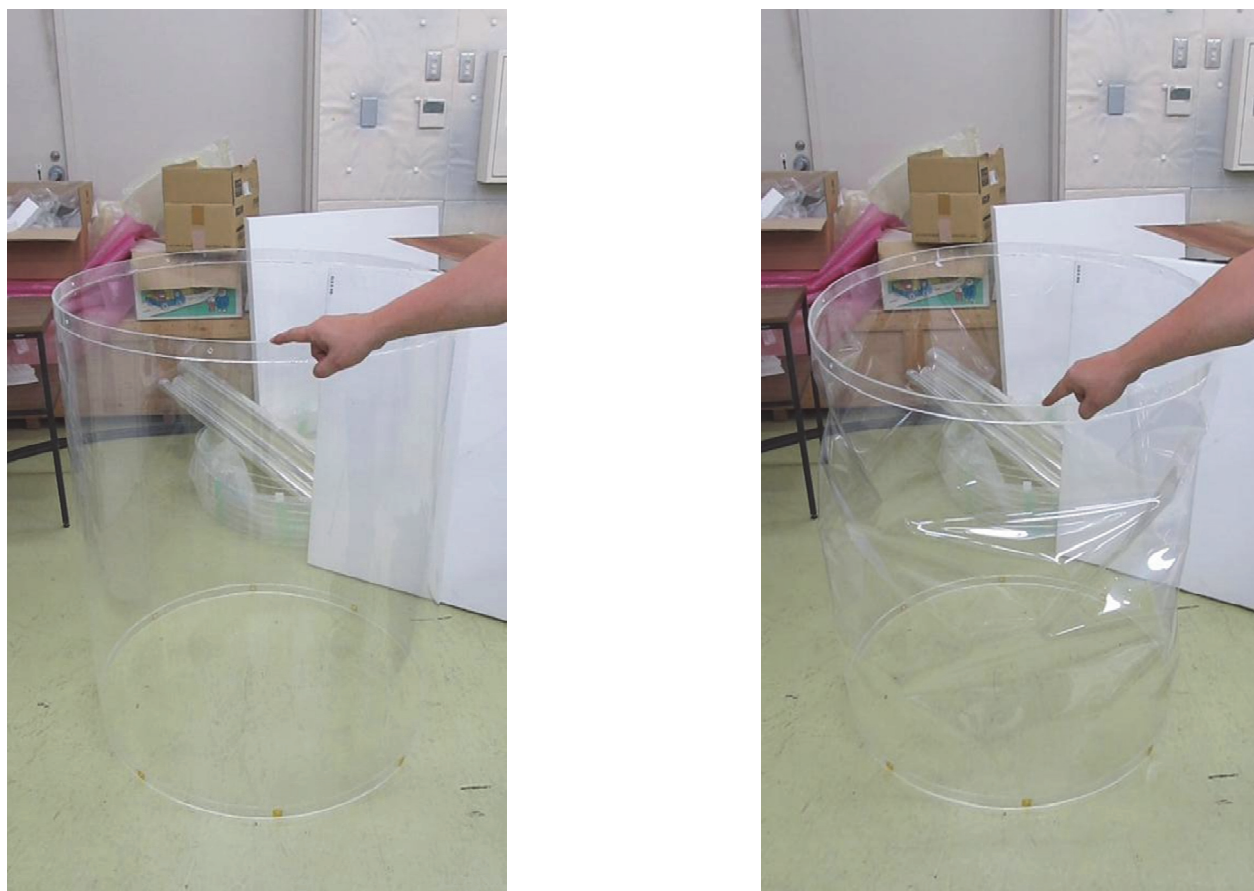


Fig.11 Buckling of the cylindrical shell ($r/t = 3200$) induced by static loading. The buckling load can easily be applied by finger.

ランダム振動環境予測

本検討では、FPIA上SAFARI搭載面インターフェース3点のH-IIA ATレベル音響負荷時の面外2軸方向ランダム振動応答を求めた。解析に用いた構造数学モデルはFPIAの単体モデルである(搭載機器SAFARIおよび機器結合部IOB(Instrument Optical Bench)はパネマスモデルにて表現)。境界条件はモデル上6点(FPIA搭載時のインターフェース点、図3赤印)を6自由度剛固定とした。モデルの総質量は245.8kgである。以降のランダム振動応答解析では、固有値解析結果として出力された固有値およびモード形状(モード質量=1として正規化)を用いた。FEA-SEA統合法では、評価点を含む平面上のモード形状のみを取り込んで計算を行う。SAFARI搭載面インターフェース3点のランダム振動応答の包絡線(Envelope)、包絡線に構造数学モデルの不確かさを考慮し+3dBのマージンを加えてランダム振動環境条件を算出した。最終的には、ESA解析から算出した環境のRRS解析結果からJAXA解析結果の包絡を確認し、10.3Grmsの環境条件を適用することとした。

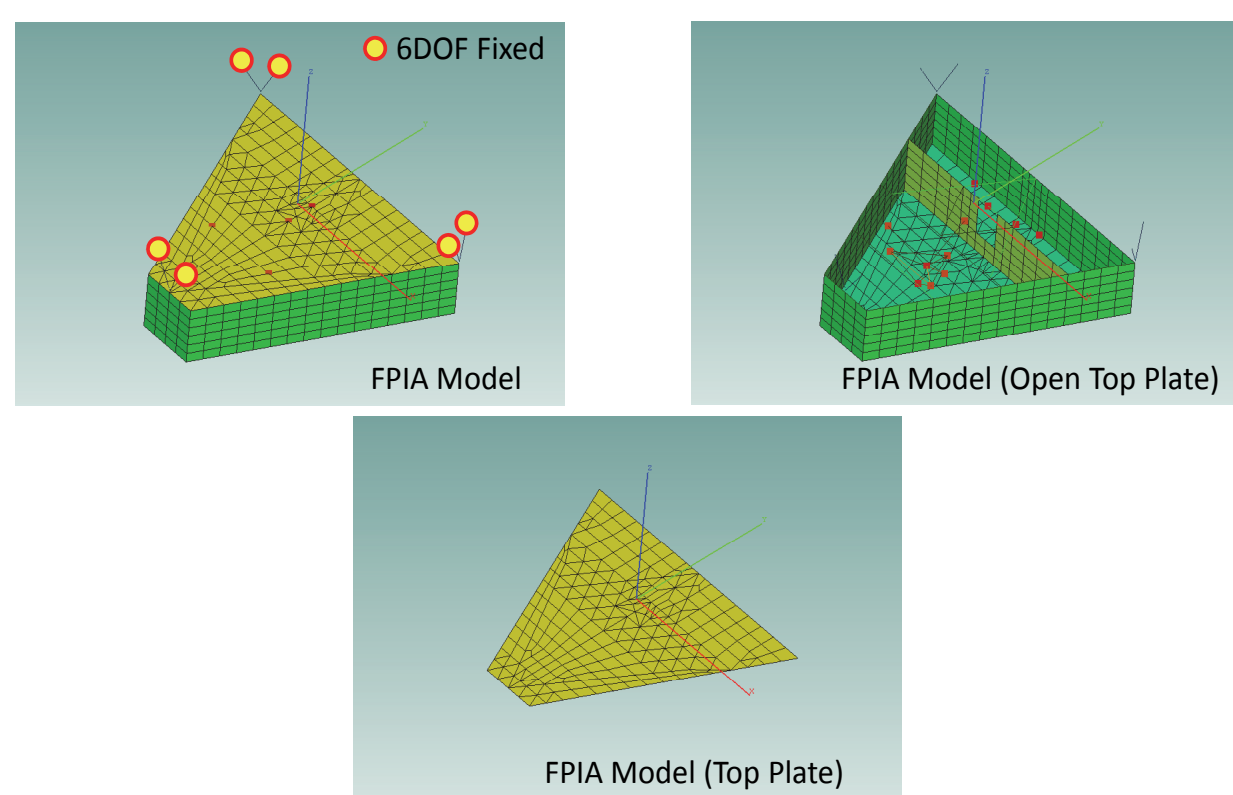


Fig.3 SPICA FPIA Finite Element Model

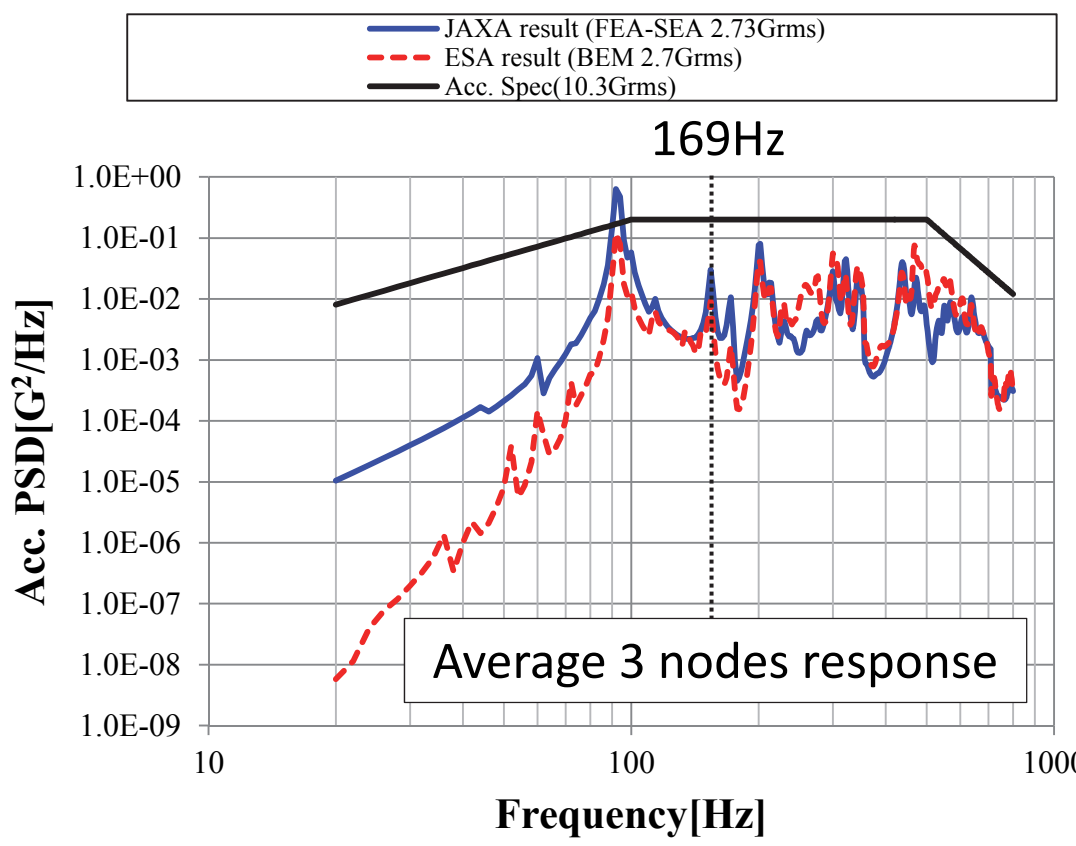


Fig.4 Analysis-result the response and envelope

Table 1 Parameters used for analysis		
Parameters	Symbol	Value
Area(Top Face)	A	1.82m ²
Mass	M	245.8kg
Material	-	aluminium alloy
Young's modulus	E	6.82e+10 Pa
Sonic speed	c ₀	340 m/s
Air density	ρ	1.27 kg/m ³
Element Length	-	0.1 m(Average)
Poisson's ratio	ν	0.33
Node number	-	315
Frequency range	-	20 - 800Hz
Mode number	-	48
Damping Ratio	ζ	0.01 (all mode)

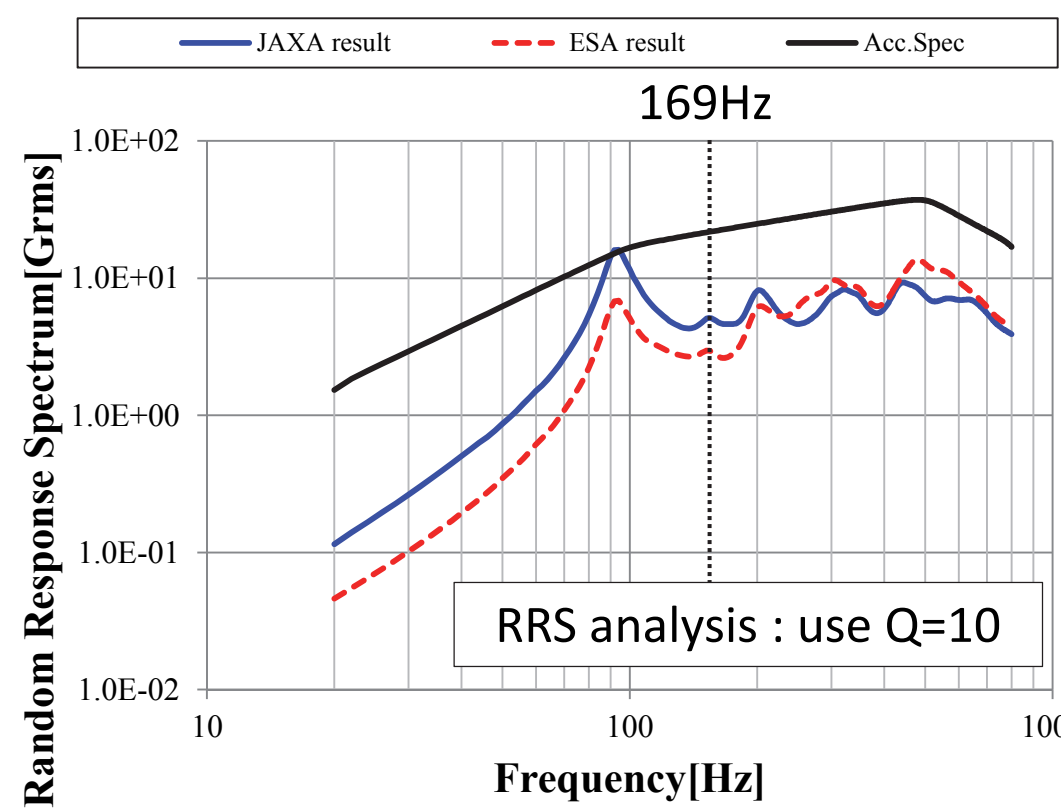
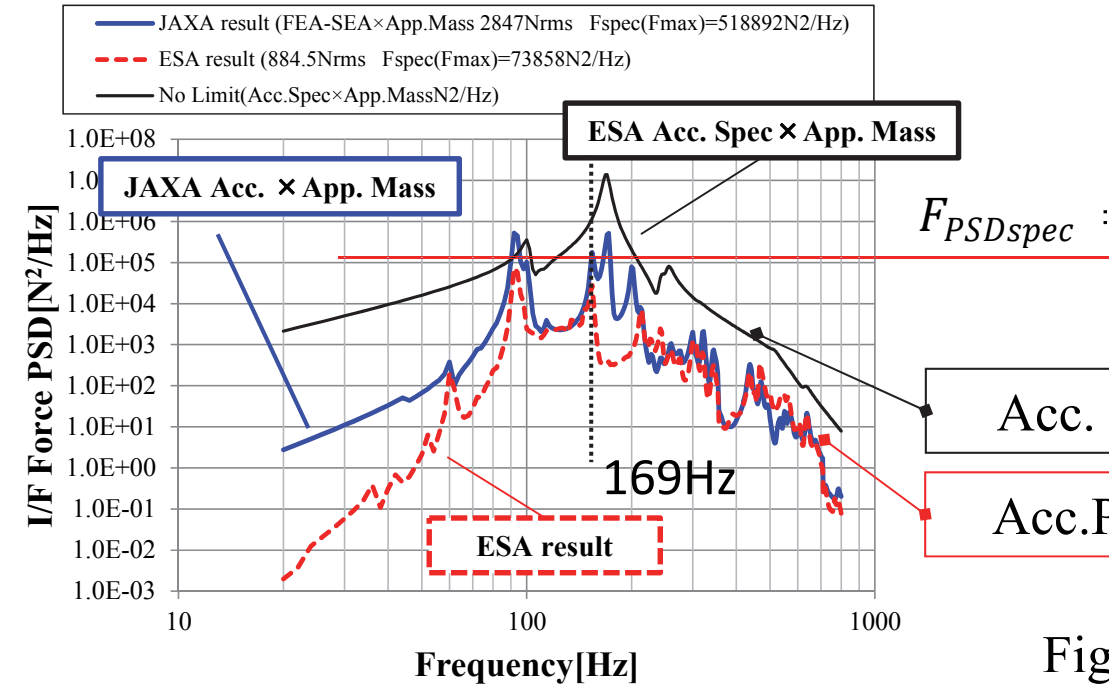


Fig.5 Analysis-result the response and envelope(RRS)

最大フォース値の予測

対象モデルであるSPICA FPIAをLoad系(搭載部)とSource系(被搭載部)に分ける。本検討では、Load系をSAFARI+IOB、Source系をFPU(IOB+SAFARI以外の観測装置)とする。Load系は、Source系の上面パネル上に3点で結合する構造である。Load系を結合点6自由度剛固定として固有値解析を行った。この結果より2方向で最も有効質量の大きい3次モード(169.17Hz)をLoad系のリミット対象モードとした。



FEA-SEA統合法と搭載機器の動質量を用いたI/Fフォースの算出結果より、最大予測フォース値を見積もり、試験時の過負荷を予測することが出来ることがわかる。
フォースリミット適用による内部応答の低減量Grms (Nolimit - Force Limit)=10dB down

Acc. Spec. × Apparent Mass
Acc.PSD (Average) × Apparent Mass

Fig.6 Analysis-result the response and envelope

◆軌道上トラス分離機構 パネ試作試験

軌道上トラス分離機構

望遠鏡を支持するトラスは3段構成となっているが、望遠鏡への侵入熱を低減するため、絶対温度30K領域と4.5K領域をつなぐ上段トラスを軌道上で分離する(Fig.12)。

CFRP断熱パネの設計および試作試験

分離されるトラスを接続する部材として、CFRP製のパネを設計し試作した。材料の選定は、4.5-30Kの温度域における低熱伝導性を検証した結果であり、パネ形状は断熱性に加えて望遠鏡への擾乱伝達低減を考慮している。リスク低減フェーズ2(RMP#2)では要素試験(材料試験)およびパネ単体試験を実施し(Fig.13)、分離機構を試作した(Fig.14)。

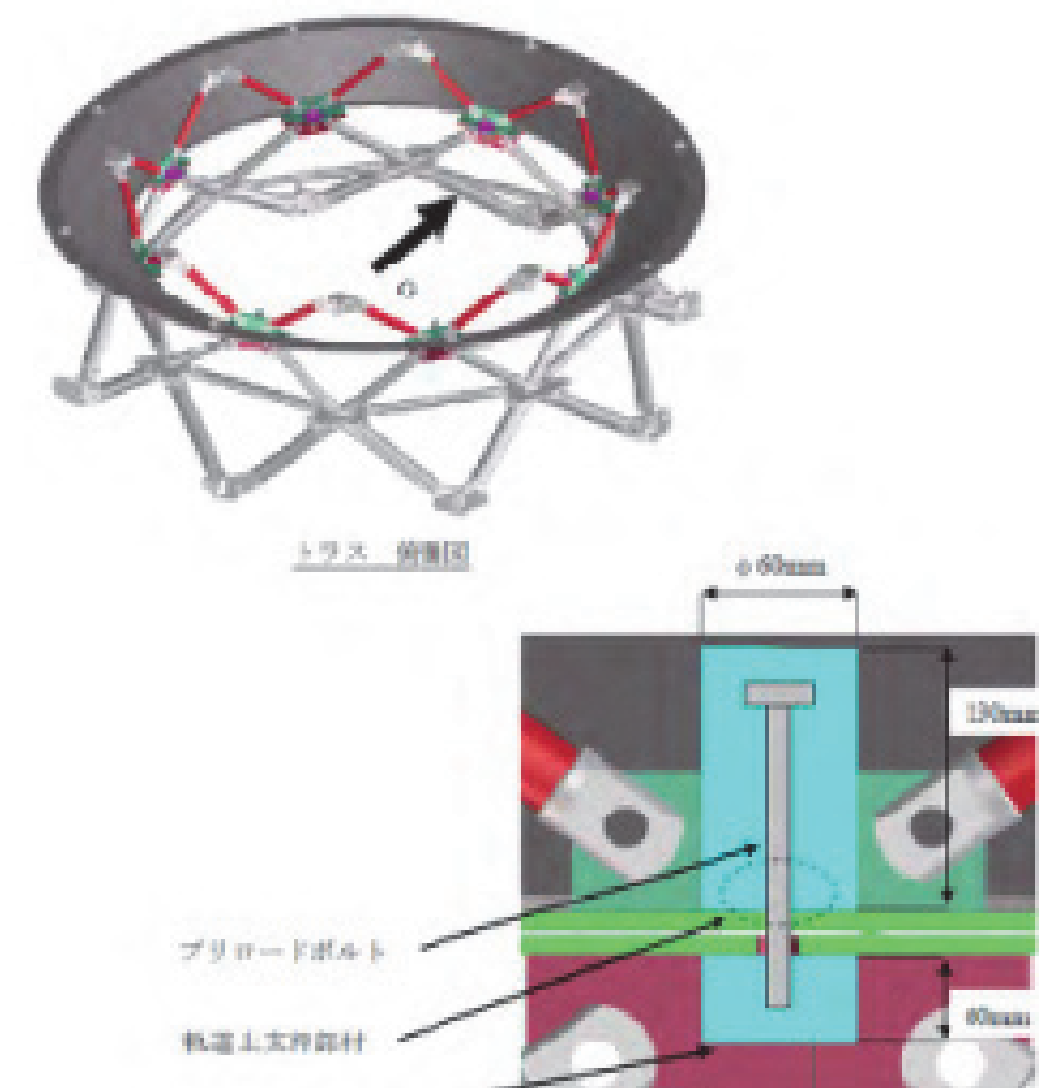


Fig.12 Schematic of truss separation mechanisms

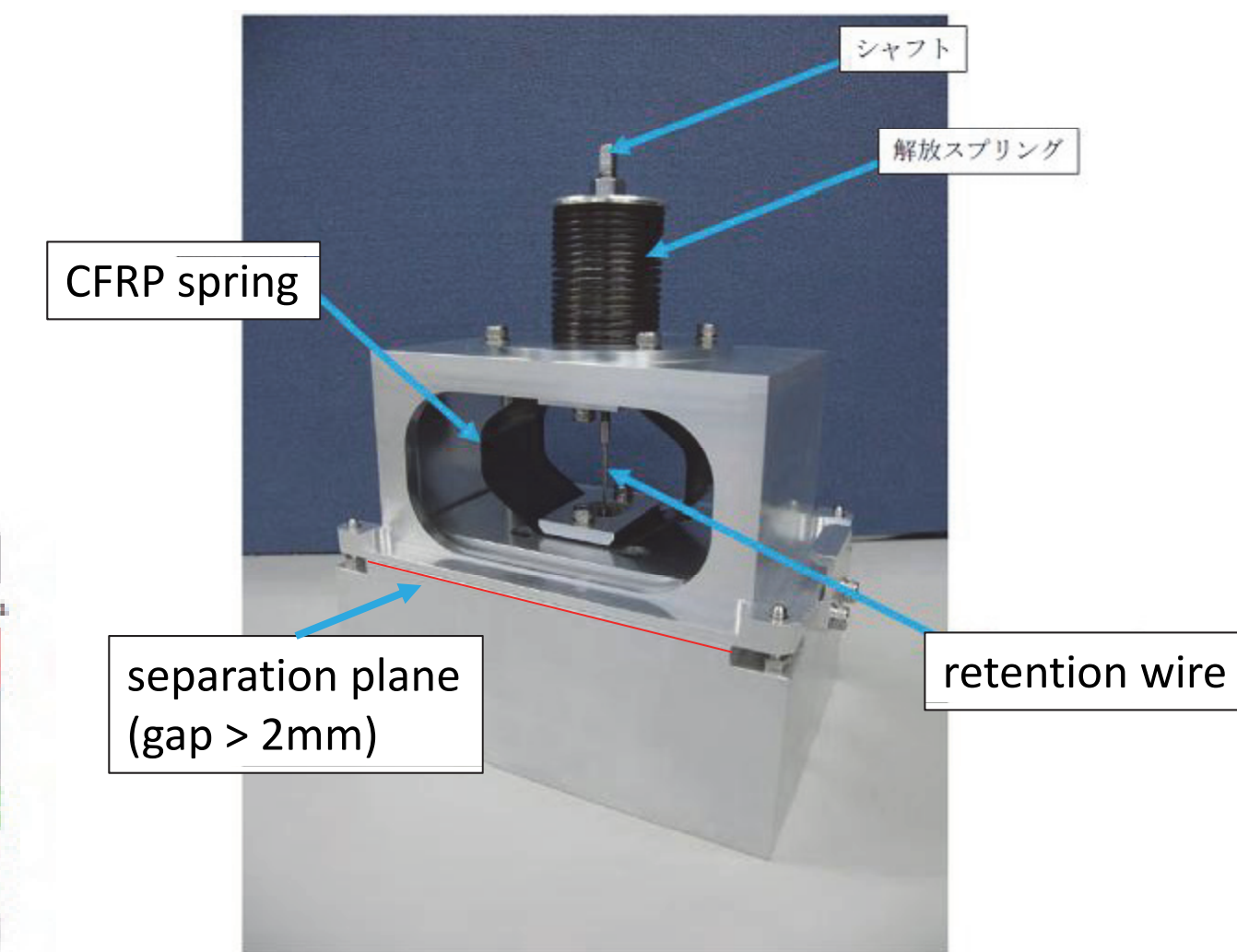


Fig.14 Insulation CFRP spring and separation mechanisms (breadboard model)

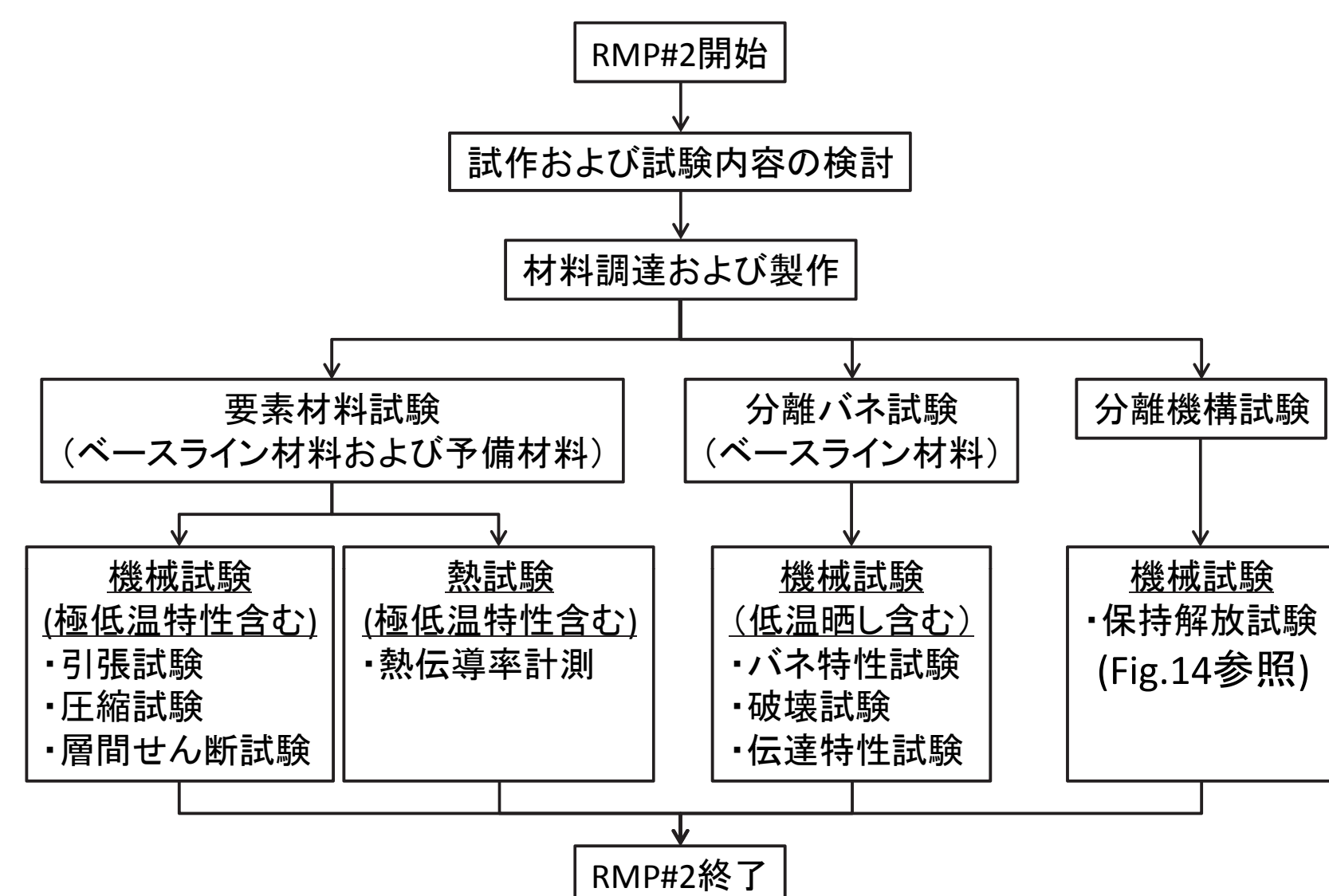


Fig.13 Test plan of the truss separation mechanisms in risk mitigation phase 2.