

A08 ExHAM による圧電素子の宇宙環境曝露試験計画

田中宏明(防大), 小木曾望(阪府大), 池田忠繁(中部大), 石村康生(早大),
藤垣元治, 後藤優太(福井大), 田川雅人(神戸大), 岩田 稔(九工大), 樋口 健, 勝又暢久(室蘭工大),
岩佐貴史(鳥取大), 坂本 啓(東工大), 岸本直子(摂南大), 波多英寛(熊大), 仙場淳彦(名城大)

Hiroaki Tanaka (National Defense Academy), Nozomu Kogiso (Osaka Prefecture University), Tadashige Ikeda (Chubu University),
Kosei Ishimura (Waseda University), Motoharu Fujigaki, Yuta Goto (University of Fukui), Masahito Tagawa (Kobe University),
Minoru Iwata (Kyushu Institute of Technology), Ken Higuchi, Nobuhisa Katsumata (Muroran Institute of Technology),
Takashi Iwasa (Tottori University), Hiraku Sakamoto (Tokyo Institute of Technology), Naoko Kishimoto (Setsunan University),
Hidehiro Hata (Kumamoto University), Atsuhiko Senba (Meijo University)

1. はじめに

将来の高精度宇宙システムの実現において重要な要素技術であるスマート構造に関し、その代表的な構造部材である圧電素子の耐宇宙環境特性評価を計画した。スマート構造システムは大型宇宙建造物の高精度化において切り札となりうる技術であるが¹⁾、宇宙システムで利用される環境での使用実績が少なく、信頼性に問題がある。これまで圧電素子を含む複合構造の耐放射線、耐紫外線等の特性評価試験は実施してきたが²⁾、それらが複合する環境での特性変化については評価が行われていないため、ExHAM(Exposed Experiment Handrail Attachment Mechanism, 簡易曝露実験装置)³⁾を用いて宇宙環境曝露試験を実施する。本稿では、その取り組み状況について紹介する。

ExHAM は国際宇宙ステーション (ISS) の「きぼう」船外のハンドレールに取り付けられる機器である。実験サンプルは 10 cm×10 cm×2 cm (TYPE-1) と 20 cm×10 cm×2 cm (TYPE-2) の 2 種類あり、1 つの ExHAM で TYPE-1 のサンプルを 20 個設置できる。サンプルは HTV 等で ISS に打ち上げられたあと、「きぼう」与圧部で ExHAM に取り付けられる。その後、ExHAM はエアロックを介して曝露部に出され、ロボットアームによりハンドレールに取り付けられる。宇宙空間に一定期間曝露された後、「きぼう」与圧部に戻され、サンプルが取り外される。サンプルは米国のドラゴン補給船等の搭載品として、地上に回収される。ExHAM は電源を有しないという難点があるものの、サンプルの宇宙空間曝露が可能なこと、また、そのサンプルを地上に回収可能であることなど、利点も多い。ExHAM の概要を図 1 に示す。



図 1 ExHAM 概要³⁾

2. 圧電素子の宇宙環境曝露試験の概要

圧電材料の耐宇宙環境特性を評価するために、ExHAM による宇宙環境曝露試験を実施する。試験計画名は PEACE (PiezoElectric Actuator Characteristic Experiments) とした。2019 年 1 月時点では、2019 年 7 月に ISS まで打ち上げられ、同 10~11 月に曝露試験を開始する予定である。実験サンプルは ISS の進行方向側に設置され、1 年間程度宇宙空間に曝露される。PEACE における実験サンプルの概要を図 2 に、主な構成品を表 1 に示す。このサンプルには、富士セラミクス C-6 製の圧電素子 (図 3) を 10 個配置し、内 3 個は覆いが無く宇宙空間に曝露されており、3 個はポリイミド膜で、4 個がアルミ板で覆われている。また、この圧電素子では、楕形の金電極を用いることで圧電素子の素地の一部を曝露する形状としており、Sample cover の窓から曝露される範囲 (25mm×14mm) で圧電素子の約 77%が曝露され、そのうち素地部は約 38%(曝露範囲の約半分)となる。圧電素子は Sample cover または Exposure plate の窪み部にはめ込まれ、ポリイミドシートを介してポリイミドテープにより固定された後、Exposure plate または Back plate で押さえられる。これらの圧電素子について、打ち上げ前、および、地上回収後に 4 節で示す材料特性を評価し、その変化を評価することで、覆いの必要性やその効果を調査することができる。曝露環境に関しては CAGOME で用いた環境モニタ⁴⁾を参考とし、UV トータル照射量をポリウレタンフィルム (Seedom 社製 DUS601-CDS) の太陽高吸収率の変化と地上較正データから算出、AO トータル照射量をデュポン社製カプトン (SP-1, 100%ポリイミド樹脂) 曝露後の質量変化から算出する予定である。また、ミッション期間中の最大温度については、真空用サーモラベル (日油技研 VL-40, VL-60, VL-90) にて記憶する。ただし、ExHAM では電源が利用できないため、今回の試験では温度履歴および放射線量については計測を行うことができない。

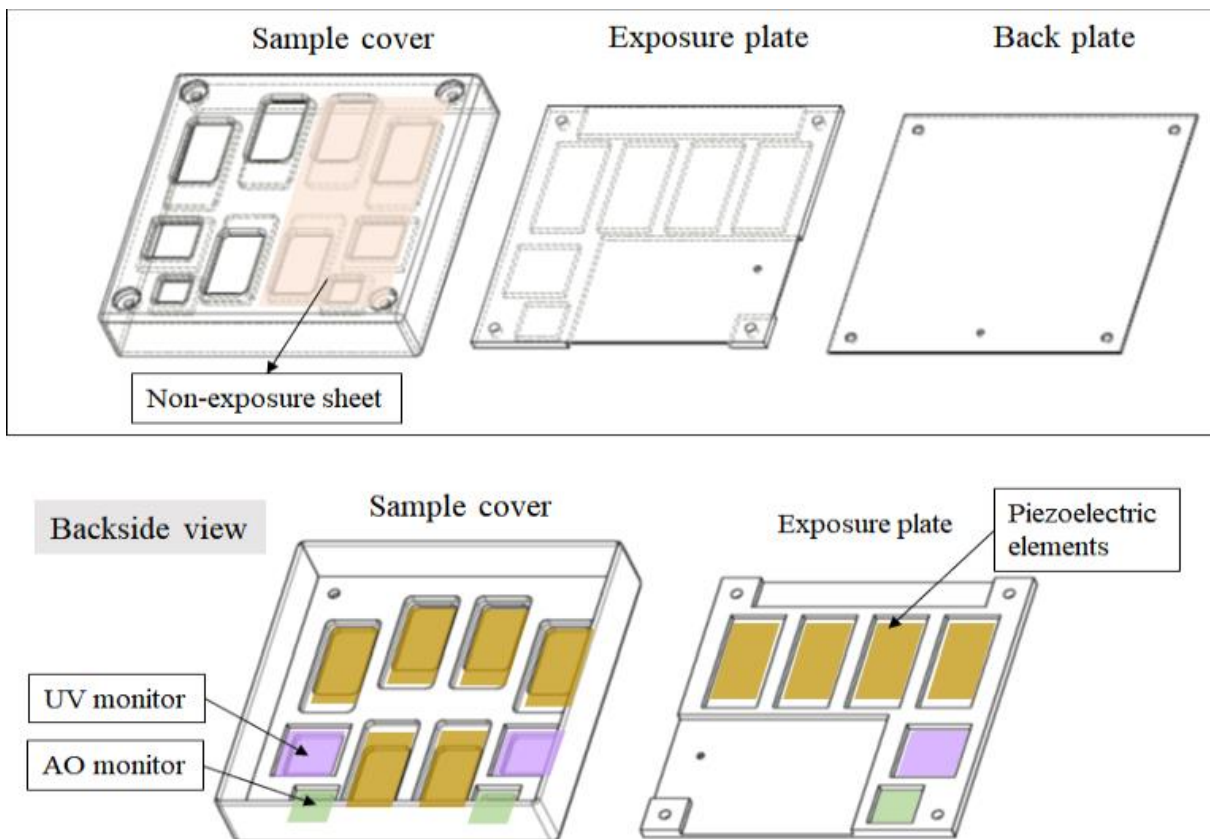


図 2 実験サンプル概要

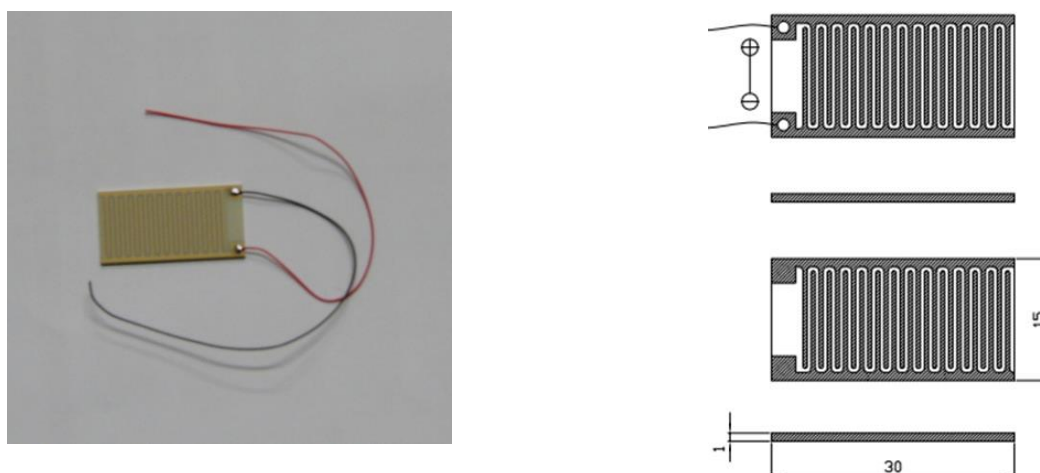


図3 圧電素子サンプルの外観（左）と概形（右）

表1 PEACE 構成品

部品名	質量 [g]	概要
Sample cover	108	Al 5052-H112 + 表面処理※ ¹
Exposure plate	39	Al 5052-H34 + 表面処理※ ¹
Back plate	25	
サンプル（圧電素子）	36	富士セラミクス C-6 製 (3.6g × 10 枚)
ボルト,ナットなど	6	ロックナット
Name Label 類	20	JAXA 支給品
その他（環境モニタ他）	10	概算
合計	約 244	

※1 クロム酸アノダイズ処理：MIL-A-8625 TYPEI Class1

3. ミッション実施上安全面から必要な評価項目

曝露試験を行うためには、実験サンプルが打上、ISS 内での準備中、曝露試験期間中、回収時に有害な問題を起こさないことを保証する必要がある。評価項目と対応の概要を表2に示す。サンプルの構造に関して、耐荷重- Acceleration loads（表3）については打上・回収時に予想される最大加速度に RVLf(Random Vibration Load Factor)を加えた加速度を包絡する形で、17Gを各軸に付与する数値解析を実施した。終局荷重に関する安全率2の要求に対して、正の安全余裕(MS=10.1)が得られており、十分な強度を有していることが確認できた。また、Crew induced loads（クルーのキックロード）については、直径0.5インチの範囲に125 lbf（556N）の荷重が付加された場合でも、耐力に対して1.25、終局荷重に対して2の安全率を有する必要があるが、こちらも現設計において正の安全余裕（MS=0.036）が得られており、要求条件を満たしている。

また、ランダム振動については HTV, DRAGON, CYGNUS の振動環境を包括する最大予測環境レベル(MPEL: Maximum Predicted Environment Level)を設定, それに対して+3dB (5.8Grms)で試験を実施し安全性を評価する予定である.

表 2 ミッション実施上安全面から必要な評価項目

項目	概要
Touch temp.	α/ε による概算値で代用 ⇒表面処理 (クロム酸アノダイズ処理) を JAXA 標準品のカバーと同じとすることで, JAXA の実績値を利用
圧力変化	十分な大きさのベントホールを設けることで対応 最大実効ベント比 (MEVR) (内部体積) ÷ (実効ベント面積) \leq 5080 [cm]
オフガス/ アウトガス	懸念対象となる材料が少ないため(10g 以下), 評価が不要
耐温度環境	低温側: 液体窒素への投入 高温側: 恒温槽にて健全性を評価予定 規定: $-94^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$
耐荷重	Acceleration loads, Quasi-static loads on orbit Crew induced loads について解析で評価
耐ランダム振動	EM に対して加振試験を実施

表 3 Acceleration loads

	<i>Design Load Factors</i>	
	Nx [G]	Ny [G]/ Nz [G]
Dragon/Launch	+/-6.2	+/-3.5
Dragon/ Reentry(Axial)	+/-9.2	+/-1.8
Dragon/Reentry(Lateral)	+/-1.4	+/-9.3
Cygnus/Launch	+/-7.0	+/-4.0
HTV/Launch	+/-5.1	+/-2.3

4. 圧電素子の耐宇宙環境特性評価のために実施する評価項目

本試験では, 圧電素子の耐宇宙環境特性評価のため, 宇宙空間曝露前後で圧電素子の特性を計測し, その比較を行うとともに, 地上での比較試験 (AO,UV,放射線の照射や熱サイクル負荷) を行ったサンプルとの性能比較を行う. 圧電素子の特性としては, 電気的特性評価 (キャパシタンス,抵抗) や電氣的共振周波数の評価, 印加電圧—発生変位の評価, 表面観察を実施する. これらの評価のうち, 印可電圧—変位関係の評価では, 印加電圧 0 – 500 V の正弦波 (0.1Hz および 10Hz) を圧電素子に印加し, その際の変位を計測した. 変位はレーザー変位計 (キーエンス LKG-30) を用いた計測を実施した他, 福井大

学 藤垣研究室で構築したレーザー干渉計（図 4）による計測も実施した。試験結果の一例を図 5（レーザー変位計）および図 6（レーザー干渉計）に示す。計測の結果，レーザー変位計では圧電素子の駆動を計測できているものの，ノイズが多く波形自体の評価は難しいため，最大変位についての評価に利用することとする。一方，レーザー干渉計の評価ではきれいな波形が計測できており，波形の変化についても評価が可能であると言える。また，この計測を通して，圧電素子サンプル毎の個体差が大きいことが明らかになった。また，設置状態においても計測結果が異なってくる現象も確認できたため，計測系についてはさらに検討を進める必要がある。

今後，ExHAM に搭載する圧電素子の評価を実施するほか，地上試験において，AO,UV,放射線の照射や熱サイクル負荷を行い，圧電素子の特性変化を調べる予定である。

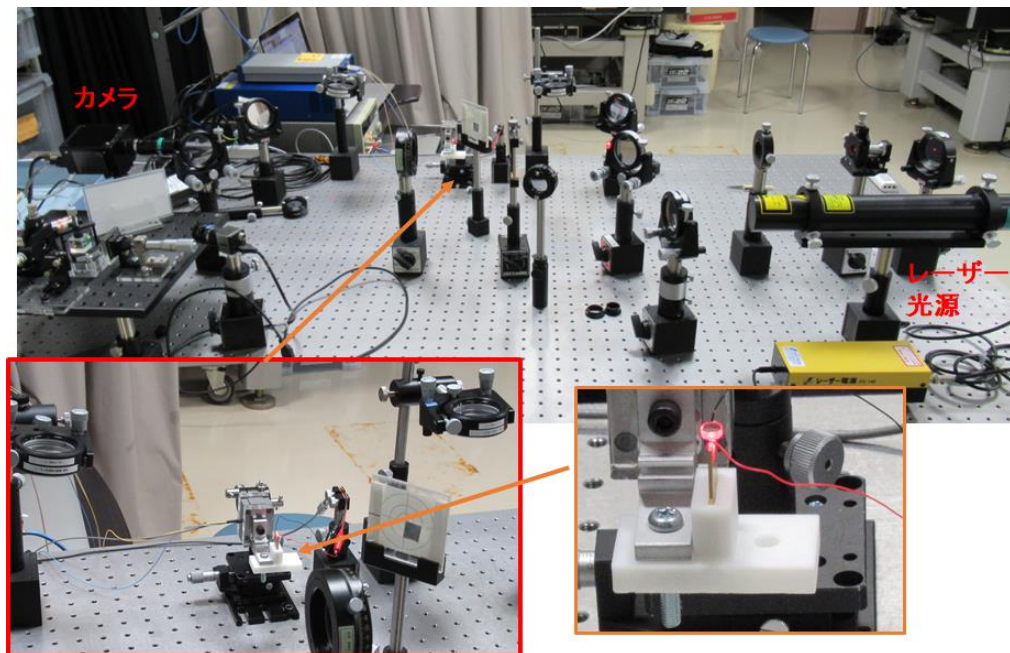


図 4 レーザー干渉計による変位計測系外観

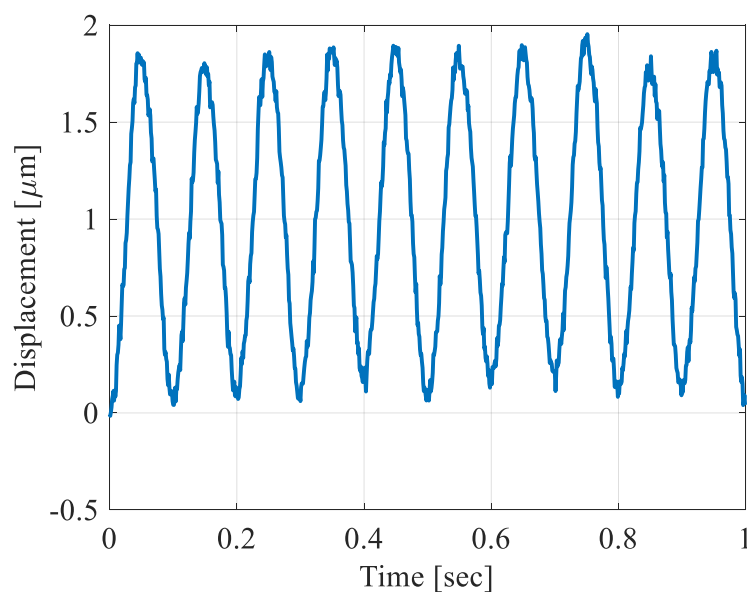


図 5 圧電素子の変位計測結果（レーザー変位計，10Hz 駆動）

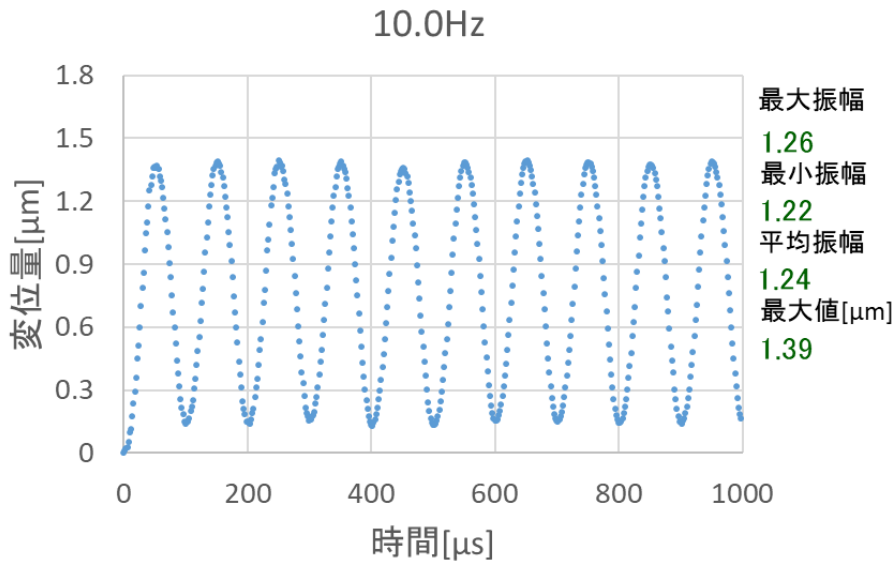


図 6 圧電素子の変位計測結果（レーザー干渉計，10Hz 駆動）

5. まとめ

圧電材料の耐宇宙環境特性を評価するために、ExHAM を用いて実施予定である、宇宙環境曝露試験：PEACE（PiezoElectric Actuator Characteristic Experiments）について、試験計画と準備状況を紹介した。現在、サンプルの設計がほぼ固まった段階であり、ミッション実施上安全面から必要な項目について評価を実施するとともに、圧電素子の耐宇宙環境特性評価のための評価も並行して行っている。今後、実験サンプルは 2019 年 7 月に ISS まで打ち上げ、同 10～11 月に曝露試験を開始、約 1 年間の宇宙空間曝露後、地上に持ち帰られる予定であり、宇宙空間曝露前後での圧電素子の特性評価を通して、圧電素子の耐宇宙環境特性を明らかにする計画である。

なお、今回のサンプルの設計では、作業性を考え Sample cover の裏に圧電素子を置く窪みを設けた形としたが、キックロードに対してこの窪み部での応力が応力集中のため大きくなり、初期設計から Sample cover の板厚を厚くする設計変更を行う必要が生じた。今後の教訓として、ExHAM での実験サンプルの設計では、キックロードが負荷される可能性のある面に複雑な形状の穴を開けることは推奨できないと考える。

謝辞

本研究は JAXA/ISAS 戦略的開発研究費「高性能科学観測にむけた高精度構造・材料の研究開発」の支援によって行われたものである。

参考文献

- 1) H.Tanaka, et. al., Development of a smart reconfigurable reflector prototype for an extremely high-frequency antenna, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 27, 2016, pp. 764-773.
- 2) S.Morishima, et. al., Performance Evaluation of Smart Beams under Quasi-space Environments, 2011-c-10, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011.

- 3) JAXA 宇宙環境利用センター, ExHAM パンフレット, JAXA.
- 4) 西堀俊幸 他, 軽量高精度カーボン鏡の長期宇宙曝露実験, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2H09 (JSASS-2017-4398), 2017.