

宇宙ステーション「きぼう」船外簡易取付機構(ExHAM)を用いた CFRP 製軽量高精度鏡の長期宇宙曝露実験(CAGOME)準備の状況

○西堀 俊幸, 神谷 友裕, 宇都宮 真, 永松 愛子, 石村 康生, 後藤 健 (宇宙航空研究開発機構),
大西 裕貴, 石田 良平, 真鍋 武嗣 (大阪府立大),
落合 啓 (情報通信研究機構)

1. はじめに

サブミリ波帯以上の高周波での実用化を目指した CFRP 製軽量高精度反射鏡の宇宙長期曝露実験 (CAGOME) を国際宇宙ステーション(ISS)日本実験棟「きぼう」にて実施する。

CAGOME 実験は、宇宙用反射鏡の実用に向けて研究開発した CFRP 製軽量高精度反射鏡 (カーボン鏡) の実験試料を、ISS の軌道(LEO)にて、最長 2 年間に亘り宇宙空間に曝露した後、実験試料を地上に持ち帰り、地上では模擬出来ない、熱サイクル、紫外線、放射線、原子状酸素などの宇宙複合環境ストレスによる材料、鏡面、反射鏡構造の耐性の確認を行い、長期間の経年劣化を定量的に評価する実験である。CAGOME 実験で得られた成果により、将来の CFRP 製軽量高精度鏡 (サブミリ波帯以上) の長期信頼性と寸法安定性の技術を前進させ、将来ミッション¹⁾ に向けて技術の還元を狙う。

2. CAGOME 実験試料

CAGOME の実験試料は、ゼロ熱膨張設計を行ったオール CFRP ハニカムサンドイッチパネルを主構造とする金属反射鏡面を持つカーボン鏡 (鏡面精度: 10 μm rms, 鏡面粗度(Rq): 1 μm rms) である。実験試料を ISS の「きぼう」船外簡易取付機構(ExHAM) に搭載し、長期間 (1~2 年間以上) 宇宙空間に実験試料を曝露させた後に、実験試料を地上に持ち帰り詳細に検査を行うことで、実際の宇宙環境における複合的な劣化要因に対するカーボン鏡の耐性を評価する。CAGOME 実験の研究計画を図 1 に、実験目的を以下に示す。

- ① 熱サイクルによる鏡面やマトリックス樹脂のマイクロクラック増加による長期的な材料物性の変化を確認する
- ② 原子状酸素から鏡面を守る SiO₂ コートの性能を確認する

- ③ 紫外線、放射線による表皮、ゲルコート層の劣化を確認する
- ④ マイクロデブリによる鏡面の損傷を確認する

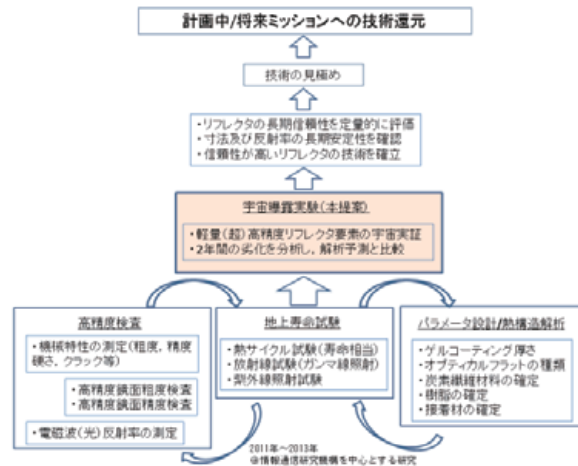


図 1 CAGOME 実験の研究計画

開発したカーボン鏡は、反射鏡面の製造方法等の違い等により、1) 蒸着鏡面タイプ (アルミニウムの真空蒸着)、2) 溶射鏡面タイプ (アルミニウムのプラズマ溶射)、3) 接着鏡面タイプ (インバーの接着)、4) 蒸着鏡面分割タイプ (材料試験及び従来技術の評価用) の 4 種類である (図 2~図 5)。

蒸着鏡面タイプはアルミニウムの真空蒸着で反射鏡面を形成したもので、可視光領域での応用を狙った超高精度(nm 精度)な軽量鏡である^{2),3)}。高い鏡面精度と鏡面粗度を実現するため、表皮の繊維が蒸着層に転写しないように (プリントスルー問題を解消)、エポキシ樹脂 (厚さ約 60 μm) を用いて高精度な光学フラットな面をゲルコート層に転写した上でアルミニウムを蒸着したものである。

溶射鏡面タイプは表皮の上にアルミニウムをプラズマ溶射して比較的厚いアルミニウム層を形成し、さらに機械研削と鏡面研磨により薄いアルミニウムの反射鏡面を製作したものである。鏡面には溶射によるミクロなポーラスが残るが、蒸着鏡面タイプより厚く安定な反射鏡面を形成出来る利点がある。残

留するマイクロポーラスの影響で、表面の粗度を向上させるためには限界があるが、サブミリ波帯までの高周波に適用出来る軽量鏡である。

接着鏡面タイプは表皮にインバー(Inver)を接着した後に機械研削によりインバーを薄くした軽量高精度鏡である。インバーは鉄とニッケルの合金で、ニッケルの含有率を35%とすることでCTEを $2 \times 10^{-6}/K$ 以下とした特殊な合金である。アルミニウムと比較して線膨張係数がカーボン表皮により近いインバーを用いることで、熱変化により生じるパネルの反りなどを低減し、機械的、熱的に安定な反射鏡面の実現を狙っている。

蒸着鏡面分割タイプは、従来技術(AMSR2のミリ波帯アンテナ)の長期耐性と、カーボン鏡に使用している材料の長期耐性を確認する実験試料である。表面は4分割(パネルは2分割)されており、1)カーボン表皮、2)表皮の上にエポキシ樹脂によるゲルコート層を形成したもの、3)カーボン表皮に直接アルミニウムを蒸着したもの、さらに4)3)に二酸化珪素でコート形成したものから構成される。3)と4)はAMSR-2のアンテナと同じ製造プロセスで製作している。

カーボン鏡本体はシアネートエステル系樹脂(NM-31)と60トンクラスの高弾性ピッチ系炭素繊維(YSH-60A-30S)を用いたNGF社製特注UDプリプレグ(NM6037E-12C)を16plyした表皮と、Ultracor社のカーボンハニカムコア(溶射鏡面タイプを除く)との組み合わせにより製作したオールCFRP製のハニカムサンドイッチパネルである(表1)。表皮は繊維方向にゼロ膨張(CTE: $10^{-7}/K$ 以下)に近いパネルになるように製作するため、UDプリプレグ材を擬似等方積層して製作した。使用するマトリックス樹脂は地上での吸湿変形を抑えるためにシアネートエステル系樹脂とし、さらに鏡面を二酸化珪素でコート(厚さ約100nm)することで、原子状酸素から反射鏡面を保護する設計とした。

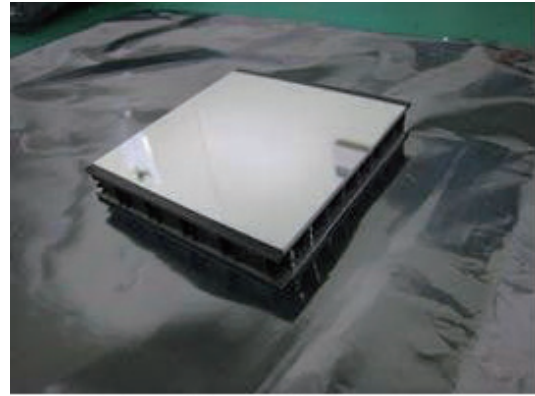


図2 蒸着鏡面タイプ

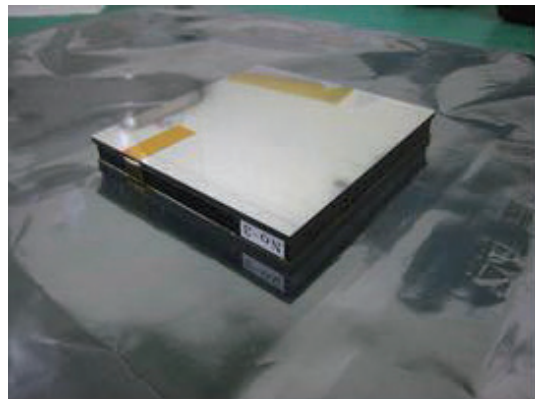


図3 溶射鏡面タイプ

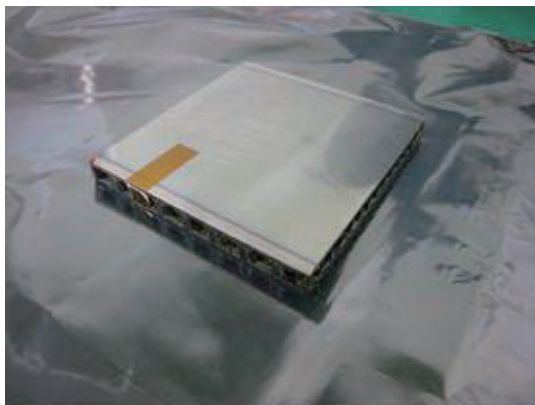


図4 接着鏡面タイプ

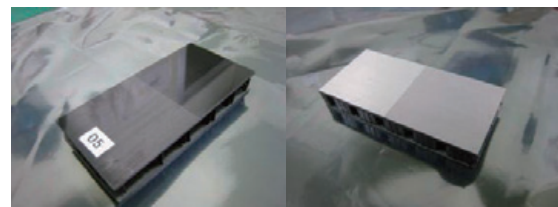


図5 蒸着鏡面分割タイプ
(左:表皮+レプリカ層, 右:AMSR2 模擬)

表 1 カーボンミラーの主材料 (UD プリプレグ)

項目	品名	備考
品名	NM6037E-12C	日本グラファイトファイバー社製
炭素繊維	YSH60A-30S	60 トンクラス、ピッチ系高弾性炭素繊維
マトリックス樹脂	NM-31	シアネートエステル樹脂
FAW	125±6 [g/m ²]	単位面積あたりの繊維重量
RC	28±3 [wt%]	レジンコンテンツ

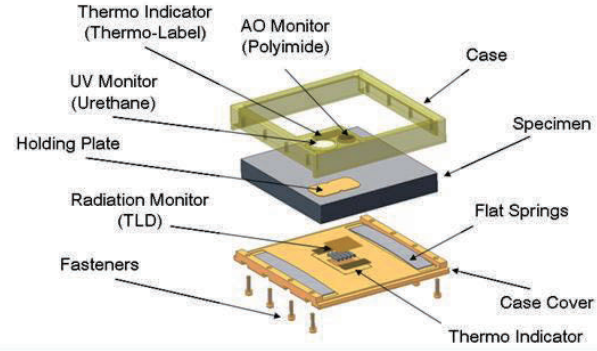


図 7 CAGOME 実験試料の分解図

3. 実験試料の構成

カーボン鏡を組み込んだ実験試料のフライト品を図 6 に、分解図を図 7 及び図 8 に示す。



図 6 CAGOME 実験試料 (フライト品)

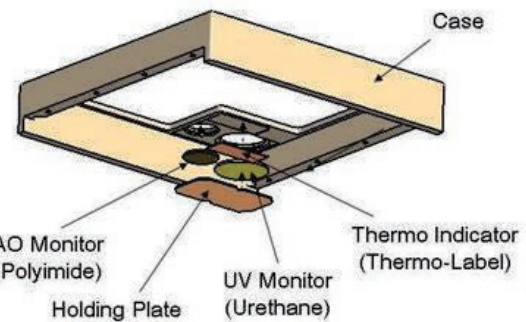


図 8 CAGOME 実験試料の分解図 (裏側から見る)

ExHAM とのインタフェースの要求により、実験試料の大きさは 100×100×20mm の平板で、200g 以下の重量でなければならない。実験試料の搭載位置による宇宙環境の違いを記録するため、全ての試料に環境モニタを取り付けた。有人の安全要求を満たすため、カーボン鏡本体は PEEK 材(Ketron1000)のケースとカバーで覆った。

実験試料は反射鏡面が宇宙空間に曝露する構成になっている。カーボン鏡の寸法は 89×93×13mm 以下とした。ハニカムサンドイッチパネルの厚さは試料種により異なるため、カバーと試料裏面の間に挿入した SUS 製の板バネ 2 枚により、試料をケースに押さえ付ける構造とし、打上げ時の振動や熱によるケースと試料の隙間の変化を製造公差と板バネで吸収する構成とした。なお、カーボン鏡単体の質量は 150g/個以下とした。

カーボン鏡のケースとカバーには 4 種類の環境モニタ材 (原子状酸素モニタ、紫外線モニタ、最高到達温度モニタ、放射線モニタ) を取り付けた。これら環境モニタ材は全て材料曝露実(MPAC&SEED)で使用実績がある。

試料の最高到達温度はケース裏とカバーに貼り付けた 3 種類のサーモラベル (不可逆性温度シール, VL-40、VI-60、VL-80) により判定する。これにより、試料が経験した最高温度を 40℃から 95℃まで 5℃間隔で記録する。

試料の反射鏡面が受ける紫外線のトータル照射量を求めるために、ケースの円形開口 (φ: 15mm) にはポリウレタンフィルムを配置した。紫外線照射量 (UV) は、曝露後のポリウレタンフィルム (Seedom 社製 DUS601-CDS) の太陽光吸収率 α_s の変化と紫外線照射量対太陽光吸収率の地上較正データから算出する。

試料の反射鏡面に衝突する原子状酸素(AO)のトータル照射量をモニタするために、ケースの円形開口部 (φ: 10mm) にデュボン社製ベスペル(SP-1, 100%ポリイミド樹脂) を配置した。トータル照射量は、曝露後のベスペルの質量変化から算出する。紫外線

モニタ材と原子状酸素モニタ材はケースの開口部径より 2mm 以上大きいため、曝露面に飛び出すことは無い構造になっている。また、モニタ材は PEEK 材の押さえ板によりカーボン鏡の鏡面に接触する構造になっている。

実験試料が受ける放射線のトータル吸収線量を得るために熱ルミネッセンス線量計(TLD)を試料ケースのカバーに搭載する。搭載する TLD は「きぼう」船内で多くの測定実績がある PADLES で使用されているトーレック社製 TLD MSO-S を 5 本である。トータル吸収線量は PADLES と同様に TLD リーダーにより熱蛍光線量測定を行い、TLD の吸収線量を算出する。TLD セルはカバーにセル 1 個単位の溝を PEEK 材に作り、その溝に TLD セルを埋め込んだ。TLD セルは Mg₂SiO₄:Tb (ケイ酸マグネシウム) の結晶をパイレックスガラスに封入したものである。そのため、セルが破損した時により生じる恐れがある微粒子の飛散を防止する安全要求を満たすため、TLD は TLD カバー (カプトンフィルム) で覆った。TLD カバーにより密閉された領域の空気を排出するため、35 μm のメッシュを持つ SUS 製のネットで覆った上で直径 3mm のベントホールを設けた。

CAGOME 実験試料のフライト機が未確定だったため、打上げと回収を運用中の宇宙ステーション往還機全てを考慮し、ワーストな環境条件 (振動, 温度, 減圧/加圧) を設計条件として取り入れた。実験試料は与圧実験用の荷物として打上げられるため、CTB(Cargo Transfer Bag)に収納される。そのため、振動試験は実際の梱包状態を再現して実施した。

4. 試験及び検査

カーボン鏡のフライト品候補の製造 (各種 6 個) が完了した後、打上げ前の試料の状態を詳細に記録するため、カーボン鏡に対して、1)寸法, 2)鏡面精度 (形状誤差), 3)鏡面粗度, 4)内部断面(X線 CT), 5)硬さ, 6)質量, 7)鏡面全面撮影, 8)サブミリ波反射率の検査 (ベースライン検査) を実施した。なお、この検査項目は曝露実験後、実験試料を地上に回収後にも実施する。

実験試料をインテグレーションした後に受入試験として、1)ランダム振動試験(15.63Grms, 60 秒), 2)高温晒し試験(70°C, 30 分), 3)低温晒し試験(-100°C, 30 分), 4)ExHAM との適合性試験, 5)レーザ干渉計 (DynaFiz, NewView7300)による表面精度・表面粗さの精密測定を実施した。受入試験前後でカーボン鏡のベースライン検査を実施し、検査結果からフライト

品 (各試料 2 個) を選定した。受入試験後のカーボン鏡の面精度と面粗度を表 2 に示す。反射率測定は 640GHz 帯の直交する 2 直線偏波にて実施し、98%以上の反射率を確認している^{4),5)}。

受入試験後の検査により、鏡面精度等は目標とした仕様を満たしたが、蒸着鏡面タイプの試料はパネルの薄さの関係で、レプリカを取る作業 (脱型) による湾曲が残留し、鏡面精度 (形状誤差) が想定より大きいことが判明した。さらに、低温晒し試験でアルミ蒸着層にクラックが確認された。

蒸着鏡面タイプのアルミ蒸着層に発生したクラックの発生メカニズムを調査するため、レーザ干渉計で鏡面の全面撮影を実施しながら、常温から低温に向け実験試料を冷却する再現実験を 9 月に実施し、クラック発生メカニズムを解明する予定である⁶⁾。

フライト品が ExHAM に問題無く取り付けられるかどうか等、手順を含めて確認するために実施した適合性試験の様子を図 9 に示す。

表 2 カーボン鏡の面精度と面粗度

種類	鏡面粗度 (Rq) [μm rms]	鏡面精度 [μm rms]
蒸着鏡面タイプ	0.02	1.6
溶射鏡面タイプ	0.76	3.0
接着鏡面タイプ	0.14	4.5
蒸着鏡面分割タイプ	0.45	0.8



図 9 ExHAM との適合性試験の様子

一方で、宇宙ステーションのフラクチャコントロールの要求として、打上げ時の振動と減圧/加圧により、実験試料の破壊、損傷、TLD のガラスセルの破損が無いことを確認する必要があった。そのため、

認定品(QM)を製作し、1)ランダム振動試験(30.45Grms, 180 秒), 2)高温晒し試験(86°C, 30 分), 3)低温晒し試験(-116°C, 30 分)を認定試験として実施し、カーボン鏡、インテグレーション部品、環境モニタ材に異常が生じないことを確認した。

引き渡し準備を終えた CAGOME 実験試料を図 10 に示す。



図 10 打上げ準備を終えた CAGOME 実験試料

5. 曝露実験と地上対照試験

実験試料は ISS に輸送された後、日本実験棟「きぼう」船内実験室に運ばれ、エアロックテーブル上の ExHAM に取り付けられる(クルーによる取付け)。実験試料の取付位置を図 11 に示す。

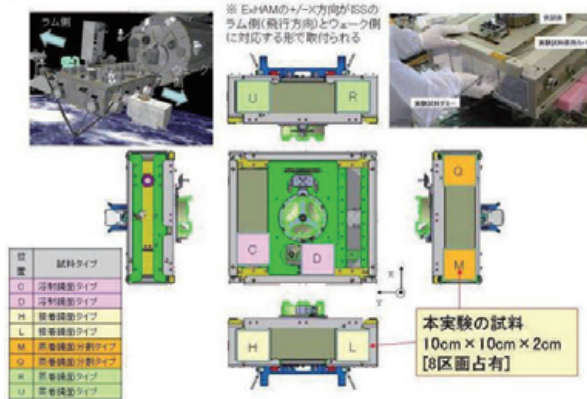


図 11 CAGOME 実験試料の取付け位置

試料の取付けが完了した ExHAM はエアロックを介して船外に搬出され、ロボットアームの子アームにより、ExHAM を把持し、船外プラットフォームのハンドホールドに取り付けられる。なお、ロボットアームの操作は地上からの遠隔操作により行われる。実験試料の取り外しと回収は上記と逆の手順で実施される。

ExHAM には 4 種類の CAGOME 実験試料を各 2 個(合計 8 個)取り付ける。曝露実験 1 年を経過した後、各種 1 個を ExHAM から取外し、地上に持ち帰る。さらに 2 年経過した後、残りの試料を全て回収

する。ExHAM を使った曝露実験の様子を図 12 に示す⁷⁾。

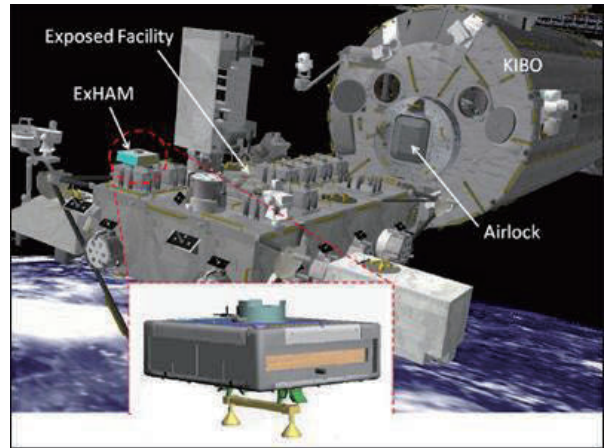


図 12 ExHAM を使った曝露実験の予想図

2015 年以降は実験試料の曝露実験と並行し、地上対照実験として、軌道上宇宙環境に相当したストレスを試料に加える寿命試験(熱サイクル試験、放射線試験等)を実施し、回収した試料と劣化状況を比較する予定である。

6. おわりに

国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」の汎用宇宙曝露実験用ハンドレール取付機構(ExHAM)を用いた CFRP 製軽量高精度鏡の宇宙長期曝露実験(CAGOME)の準備が完了した。

ExHAM は ATV5(本年 7 月)により既に ISS に運ばれており、CAGOME 実験試料はソーラセイル材料テーマとともにシグナス補給船運用 3 号機(Orb-3)にて 10 月に ISS に運ばれた後、ExHAM1 号機に取り付けられ、「きぼう」船外プラットフォームで長期曝露実験を開始する予定であった。しかしながら、Antares ロケットの打上げ失敗で実験試料を全て喪失した。現在、JAXA ではリカバリプランとして、実験試料フライト品の再製作を進めるとともに、打上げ機会の調整を行っている。

参考文献

- 1) Y.Kasai, H.Sagawa, T.Kuroda, T.Manabe, S.Ochiai, K.Kikuchi, T.Nishibori, P.Baron, J.Mendrok, P.Hartogh, D.Murtagh, J.Urban, F.Scheele, U.Frisk, "Overview of the Martian Atmospheric Submillimetre Sounder FIRE", Planetary and Space Science 63-64(2012)62-82, 2011.
- 2) S.Utunomiya, R.Shimizu, "Monitoring of Dimensional

- Stability of CFRP Mirrors for Space Telescopes by Using Embedded FBG Sensors”, Proc. ICCM-17, Scotland, 2009.
- 3) T.Kamiya, S.Utsunomiya, K.komatsu, R.Shimizu, “Improvement of The CFRP Composite Mirror Surface Using A Replica Method”, Proc. ICCM-18, Jeju Island, 2011.
 - 4) 独立行政法人宇宙航空研究開発機構、西堀、菊池、水越、真鍋、“サブミリ波反射損失の測定方法及び測定装置”、特開 2012-078249、2012-04-19.
 - 5) 大西、真鍋、西堀、飯田、菊池、落合：CFRP 軽量高精度リフレクタ実験試料のサブミリ波帯反射特性の測定、1N14、第 58 回宇宙科学技術連合講演会、2014.
 - 6) 西堀、神谷、宇都宮、落合、大西、石田、真鍋：CFRP 製軽量高精度鏡のアルミ蒸着鏡面に生じたクラックの原因究明、A2-13、第 39 回複合材料シンポジウム、2014.
 - 7) 渡辺、西堀、白澤、佐巻：「きぼう」日本実験棟における船外簡易取付機構（ExHAM）を用いた実験計画について、2K01、第 57 回宇宙科学技術連合講演会、2013.