

## B2 ISS による CFRP 製高精度鏡の長期宇宙曝露実験

西堀 俊幸, 石村 康生, 後藤 健, 神谷 友裕, 宇都宮 真(JAXA),  
菊池 健一(NICT), 落合 啓(NICT), 石田 良平, 真鍋 武嗣 (大阪府立大)  
Toshiyuki Nishibori, Kousei Ishimura, Ken Goto, Tomohiro Kamiya, Shin Utsunomiya(JAXA),  
Kenich Kikuchi, Satoshi Ochiai(NICT), Ryohei Ishida, Takeshi Manabe(Osaka Prefecture Univ.)

### 1. はじめに

サブミリ波帯以上の高周波での実用を目指した 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」にて行う。2014 年の夏季に実験試料を SpaceX で ISS に打ち上げ、最長 2 年の宇宙環境に曝露させた後に試料を地上に持ち帰り、劣化状況 (材料物性や反射率の経年変化等) を詳しく調べる予定である。本実験は平成 24 年度の「きぼう」利用、汎用宇宙曝露実験用ハンドレール取付機構 (ExHAM) 初期利用テーマとして採択されたものである。

### 2. CAGOME の目的

高弾性ピッチ系炭素繊維複合材を用いたオール CFRP 製の軽量低熱歪みハニカムサンドイッチパネルを主構造とする高精度アンテナ反射鏡は、材料物性の特徴 (高熱伝導, 低熱歪み, 超高弾性) を活かし、鏡面全体を疑似的にゼロ熱膨張化(10-7/K 以下)することが可能であり、将来のサブミリ波・赤外・可視光領域の波長を観測する科学衛星<sup>[1]</sup>の小型アンテナや望遠鏡の反射鏡構造として有望である。しかしながら、CFRP の反射面に炭素繊維が模様となって現れるファイバプリントスルー現象と、吸着した大気中の水蒸気が真空環境で脱湿することにより CFRP が微小変形する等の問題があり、高精度鏡面を達成するために解決すべき課題が存在した。また、熱サイクル、紫外線、放射線による宇宙環境での長期的耐性についての確認も課題とされていた。

一方でミリ波帯より低周波で既に実用になっている CFRP 製アンテナ反射鏡 (高精度マイクロ放射計 ; AMSR) の宇宙における長期寿命 (反射鏡面や材料物性の経年変化) についても未知なところが多い。構造的な不具合に繋がることは無いにせよ、従来の CFRP 製アンテナ反射鏡の長期的な性能の経年変化についても詳しく調査し、次世代の CFRP 製高精度鏡の研究に反映させることが重要である。

以上の背景から、CAGOME 実験では、低熱歪みな CFRP 製の軽量高精度反射鏡の試作品と AMSR の CFRP 反射鏡を部分的に複数枚製作し、国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟「きぼう」の船外プラットフォームに取り付けて、宇宙環境で長期間に亘る曝露を行う。実験サンプルは年 1 回の頻度で 1 枚ずつ回収し、地上に持ち帰った後、鏡面及びパネルの機械特性を測定し、その経時変化から、軽量高精度鏡の軌道上寿命 (5 年以上) を予測し、将来の実用に貢献する (図 1)。

本研究は情報通信研究機構(NICT), 宇宙航空研究開発機構(JAXA), 大阪府立大学の協同研究として 2011 年度から試作研究を開始している。

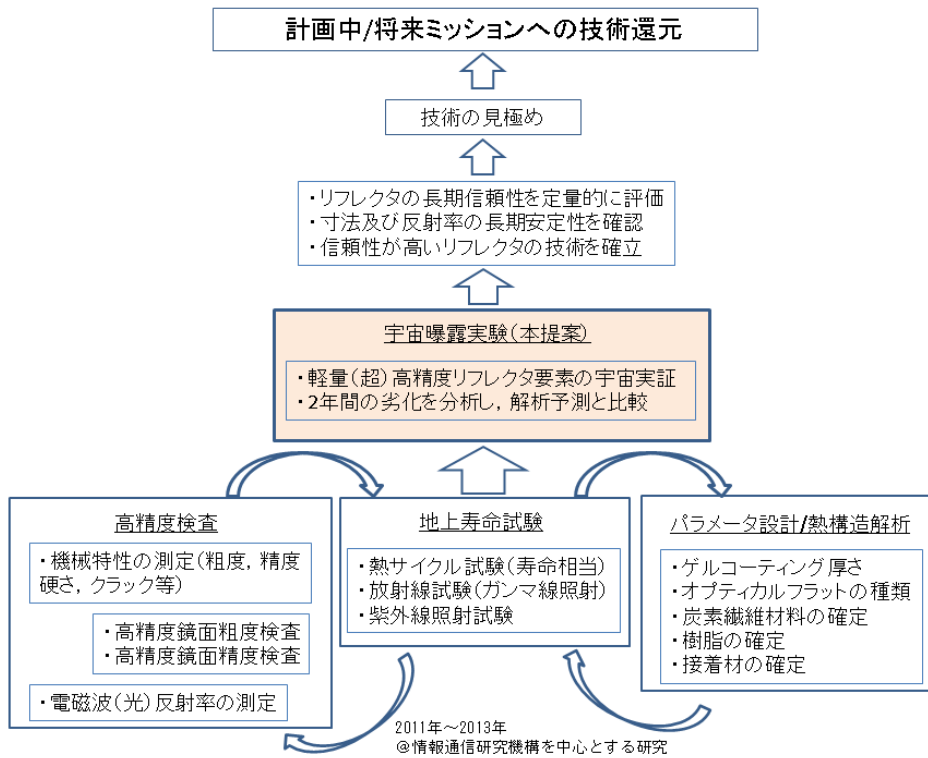


図1 CAGOME 実験の意義

### 3. 汎用宇宙曝露実験用ハンドレール取付機構 (ExHAM)

船外簡易取付機構 (ExHAM) は、ISS の「きぼう」船外のハンドレール (手すり) への取付け部を備えた直方体の曝露実験用試料の装置で、上面に 7 個、側面に 13 個の実験サンプルを搭載することが可能である (図 2)。

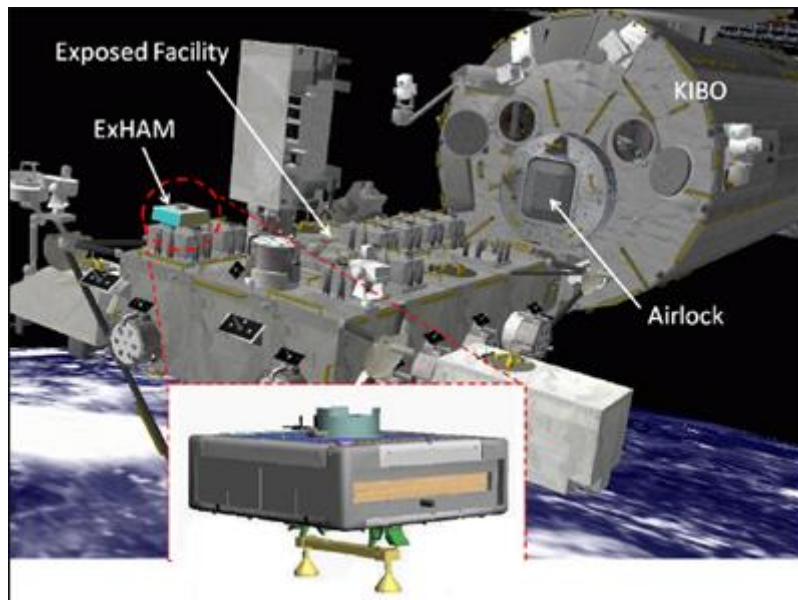


図2 船外簡易取付機構 (ExHAM) を使った実験イメージ

CAGOME 実験では、CFRP 製高精度反射鏡の部分要素を 8 枚 (反射鏡面の製造法が異なる 4 種類のサ

ンプルを各 2 枚) 実験試料として製作し、軌道上の「きぼう」まで与圧の荷物として HTV 等で運び、軌道上のクルーの作業により船内で実験試料を ExHAM に取り付けた後、「きぼう」のエアロックを経由して船外に搬出し、ロボットアームにより船外プラットフォームのハンドレールに取り付ける。曝露実験が終了したら、ExHAM を再度ロボットアームによりハンドレールから取り外し、エアロックを経由して「きぼう」船内に回収した後、船内で実験試料をクルーが取外す。実験試料は年に 1 回の頻度で 1 枚ずつ回収（曝露期間最長は 2 年分）し、地上に持ち帰った後、機械特性（寸法、面精度、質量、硬さ、鏡面のマイクロクラック数、反射率等）の経年変化を測定し、実験試料の劣化を定量的に確認する。

#### 4. CFRP 製高精度反射鏡の実用化に向けた研究

軽量低熱歪みハニカムサンドイッチパネルを主構造とした CFRP 製軽量高精度反射鏡の研究フローを図 3 に示す。

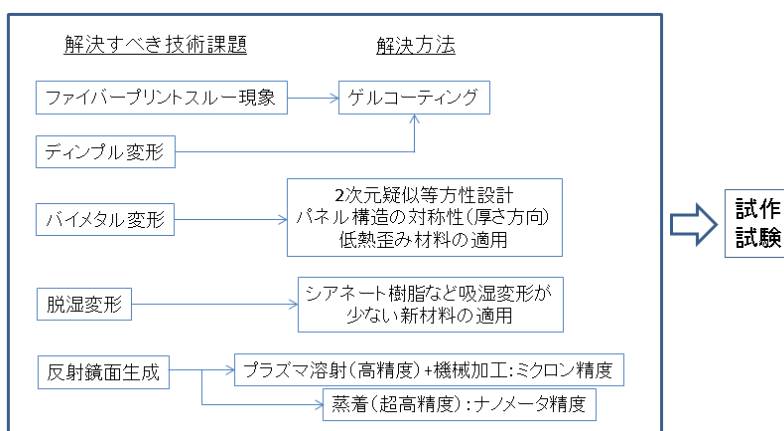


図 3 CFRP 製軽量高精度反射鏡の研究課題と解決方法

CFRP 製高精度鏡面を実現させる上で障害となる反射面の「ファイバープリントスルー現象」については、CFRP 表皮の上に樹脂による「ゲルコーティング」を行い、オプティカルフラットを転写させた上でアルミニウムを蒸着するレプリカ法<sup>[2]-[3]</sup>により解決する方法と、プラズマ溶射によりアルミニウムを表皮の上に積層させ、その後、機械加工と光学研磨を行う方法を検討した(図 4)。その他、線膨張係数が小さいインバーを表皮に接着した後に械加工する方法も検討した。どの方法も実験試料の大きさ(100~300mm)であれば  $1\ \mu\text{m r.m.s}$  前後の鏡面精度が実現できており、サブミリ波帯での実用について問題はない。

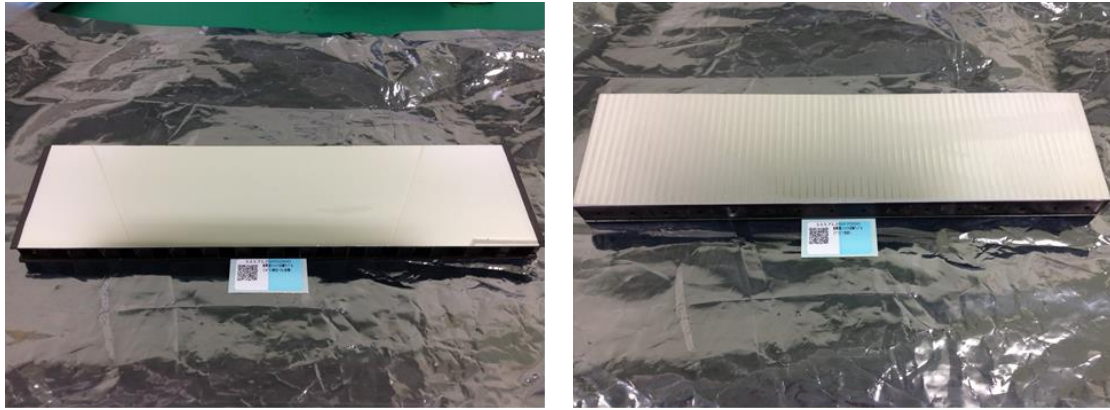


図4 CFRP 製軽量高精度反射鏡の試作品（2012年度，NICT）  
（左：アルミ蒸着鏡面，右：プラズマ溶射アルミ鏡面）

反射鏡面の製造法という観点から，プラズマ溶射法による鏡面は赤外まで，レプリカ法による鏡面は可視光（nm 精度）まで対応可能だと考えられが，鏡面精度や鏡面精度以外の問題である「脱湿変形」，「バイメタル変形」，「ディンプル変形」も相対的に小さくすることが必要であり，そのための製造方法や経年変化については検討を要する。但し，これらの波長に於ける CFRP 製超高精度鏡に用いられる材料は共通であるので，CAGOME 実験の成果は利用出来ると考える。

アルミ蒸着鏡面タイプCFRP高精度鏡のサブミリ波反射損失

| 測定周波数 [GHz] | 偏波            | 熱晒し試験前 反射損 [%] | 熱晒し試験後 反射損 [%] |
|-------------|---------------|----------------|----------------|
| 625.32      | perpendicular | 0.23±0.07      | 0.23±0.03      |
| 625.32      | parallel      | 0.43±0.08      | 0.46±0.04      |
| 649.32      | perpendicular | 0.19±0.06      | 0.21±0.02      |
| 649.32      | parallel      | 0.50±0.05      | 0.45±0.03      |

アルミ溶射タイプCFRP高精度鏡のサブミリ波反射損失

| 測定周波数 [GHz] | 偏波            | 熱晒し試験前 反射損 [%] | 熱晒し試験後 反射損 [%] |
|-------------|---------------|----------------|----------------|
| 625.32      | perpendicular | 0.35±0.06      | 0.34±0.04      |
| 625.32      | parallel      | 0.69±0.04      | 0.70±0.05      |
| 649.32      | perpendicular | 0.30±0.06      | 0.33±0.04      |
| 649.32      | parallel      | 0.71±0.04      | 0.71±0.05      |

アルミ接着タイプCFRP高精度鏡のサブミリ波反射損失\*

| 測定周波数 [GHz] | 偏波            | 熱晒し試験前 反射損 [%] | 熱晒し試験後 反射損 [%] |
|-------------|---------------|----------------|----------------|
| 625.32      | perpendicular | 0.32±0.06      | —              |
| 625.32      | parallel      | 0.64±0.07      | —              |
| 649.32      | perpendicular | 0.30±0.05      | —              |
| 649.32      | parallel      | 0.63±0.04      | —              |

図5 CFRP 製軽量高精度反射鏡のサブミリ波反射率測定結果

2012年度に試作した CFRP 製軽量高精度鏡のサブミリ波(640GHz 帯)に於ける反射率の測定結果を図5に示す。測定は宇宙科学研究所（ISS 科学プロジェクト室）のサブミリ波反射損失測定装置（特開2012-078249）<sup>[4]</sup>で行った。測定は高温（80℃）と低温（-150℃）の環境に高精度鏡を晒した後，互いに直交する2偏波にて反射率を測定したものである。全ての試料で99.2%以上のサブミリ波反射率が確認され，アンテナ性能として問題無い事と温度晒しにて性能の劣化が無いことを確認した。

## 5. 実験試料の構成

CAGOME の実験試料の組立図を図 6 に示す。実験試料のエンベロープは ExHAM とのインタフェースにより定められており、100×100×20mm の平板で 200g 以下の重量でなければならない。実験試料は搭載位置による宇宙環境の違いを確認するため、各試料に環境モニタを取り付け、さらに安全要求を満たすために、試料本体を PEEK 材(Ketron 1000)のケースに入れる。

表 1 実験試料（本体）の種類

| 試料種名                        | 試料詳細  | フライト品数 |
|-----------------------------|---|--------|
| 蒸着鏡面タイプ                     | アルミニウム蒸着鏡面（レプリカ鏡）   | 2 個    |
| 溶射鏡面タイプ                     | アルミニウムのプラズマ溶射鏡面（研磨鏡）  | 2 個    |
| 接着鏡面タイプ                     | インバー接着鏡面（切削鏡）   | 2 個    |
| 蒸着鏡面分割タイプ<br>(AMSR 材料模擬タイプ) | 蒸着鏡面タイプの最外層が部分的に 1)表皮, 2)ゲルコート層, 3)アルミ蒸着層, 4)SiO <sub>2</sub> コート層を持つもの | 2 個    |

実験試料（本体）の種類を表 1 に示す。実験試料の種類は、反射鏡面の製造法が異なる 3 種類（レプリカ鏡、研磨鏡、切削鏡）と AMSR の CFRP 製アンテナ材料を模擬した試料と CFRP とレプリカ材の耐久性を確認しり試料を複合した蒸着鏡面分割タイプの計 4 種類から構成される。原子状酸素から反射鏡面を守るため反射面の表面には SiO<sub>2</sub> コートを施している。

使用する表皮とコアの材料は温度安定性を考慮してピッチ系の高弾性炭素繊維とシアネートエステル系マトリックス樹脂の組み合わせによる UD 材（YSH60A-30S/NM-31）を使用し、2 次元等方的にゼロ膨張（CTE：10-7/K 以下）とするために擬似等方積層した表皮(1.5～2.5mm)を製作した。また、ハニカム材は Ultracor 社製のカーボンハニカム材 UCF（表皮と同種の炭素繊維を材料とする）を使用した。

曝露実験中の宇宙環境をモニタするため、各試料には環境モニタ材を取り付ける。最高到達温度を記録するため、日油技研工業社製サーモラベル（真空用）を 3 種試料のケースと蓋に貼る。

紫外線 (UV) のトータル照射量をモニタするため、ITO コート成膜したポリウレタンフィルム (Seedom 社製 DUS601-CDS) をケース表面に装着する。紫外線照射量は、曝露後のポリウレタンフィルムの太陽光吸収率  $\alpha_s$  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。UV モニタの較正は JAXA 研究開発本部の材料グループの支援を得ている。

原子状酸素(AO)のトータル照射量をモニタするために、デュポン社製ベスペル(SP-1/ポリイミド樹脂)を試料に取り付ける。AO のトータル照射量は、曝露後のベスペルの質量変化から算出する。以上の材料は過去に宇宙ステーションで実施された材料曝露実験 JEM/MPAC&SEED の環境モニタとして使用された実績がある。

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) をケースのカバーに 5 個セルを搭載する。曝露後の TLD 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 の吸収線量を算出し、地上保管されたセルとの比較で曝露期間中の吸収線量を算出する。TLD は現在も「きぼう」の船内の放射線モニタ (PADLES) として使用されているものと同じである。TLD の較正について



ては JAXA 有人宇宙技術センターの協力を得ている。

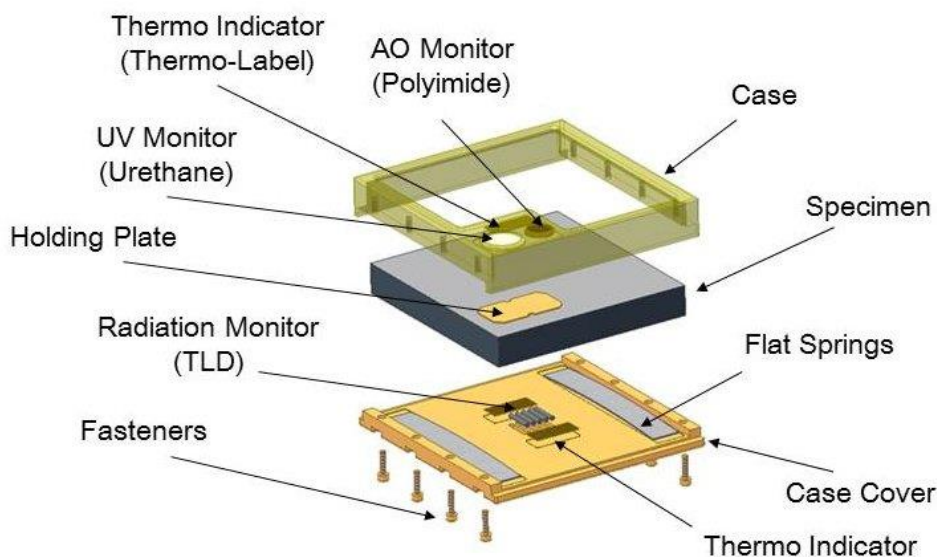


図 6 CAGOME 実験試料 (組立図)

## 6. 実験運用と地上対照実験

フライト品製造後、実験試料本体をケースに入れ、環境モニタ材をインテグレーションした後、打上げによる損傷が無いことを輸送時に使用する CTB (Cargo Transfer Bag) に緩衝材とともに入れ、振動試験(AT レベル)を行い、目視検査で問題が無いことを確認した後、フライト品の候補を決める。

打ち上げ前の実験試料の状態を確認するため、1) 寸法、2) 面粗度、3) 面精度、4) 内部断面 (X 線 CT)、5) 硬さ (ビッカース硬さ)、6) 質量、7) 顕微鏡による鏡面全体の写真撮影 (マイクロクラックの検査)、8) サブミリ波反射率の検査を実施する。

実験試料を国際宇宙ステーションに輸送後、日本実験棟「きぼう」の ExHAM を使って約 1~2 年間に亘り、実験試料を宇宙空間に晒す (図 7)。試料回収後、実験試料を地上に持ち帰り、曝露期間が異なる 2 個の実験試料を打ち上げ時と同じ検査を行い、詳細に調べることで、鏡面と材料の物性変化と反射率低下の傾向を得て、5 年程度の長期間に亘る高精度反射鏡の寿命評価を行う

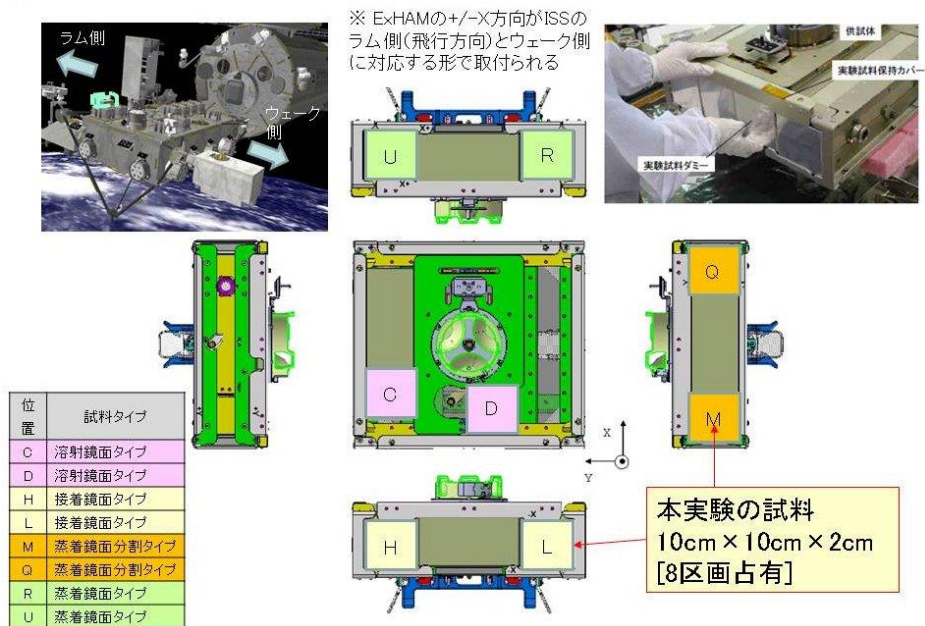


図 7 CAGOME 実験試料取付位置

## 7. 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) の準備を進めている。実験試料は最長 2 年の宇宙環境曝露後に回収し、劣化状況 (反射率の経年変化等) を詳しく調べる。実験試料のフライト品は 2014 年内に完成予定であり、現在、フライト品のインテグレーションを行っている。

CAGOME の軌道上運用 (長期宇宙環境曝露) と並行して、2014 年度以降は地上対照実験として寿命試験 (熱サイクル試験, 放射線試験等) を実施する予定である。

実験成果として得られた実宇宙環境による鏡面やパネル構造の経時変化から、金属鏡面や「ゲルコート」の違いによる長期寿命を確認し、EOL における性能を外挿により推定する。また、劣化を解析予測と比較することで、EOL における性能予測精度を向上させ、軌道上で長期間に亘り高精度な鏡面を維持できるオール CFRP 製の軽量 (超) 高精度反射鏡の開発技術の確立を目指す。

### [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] S.Utunomiya, T.Kamiya, R.shimizu, “Dimensional Stability of CFRP Mirrors for Space Telescopes Under Low Temperature Environment, 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