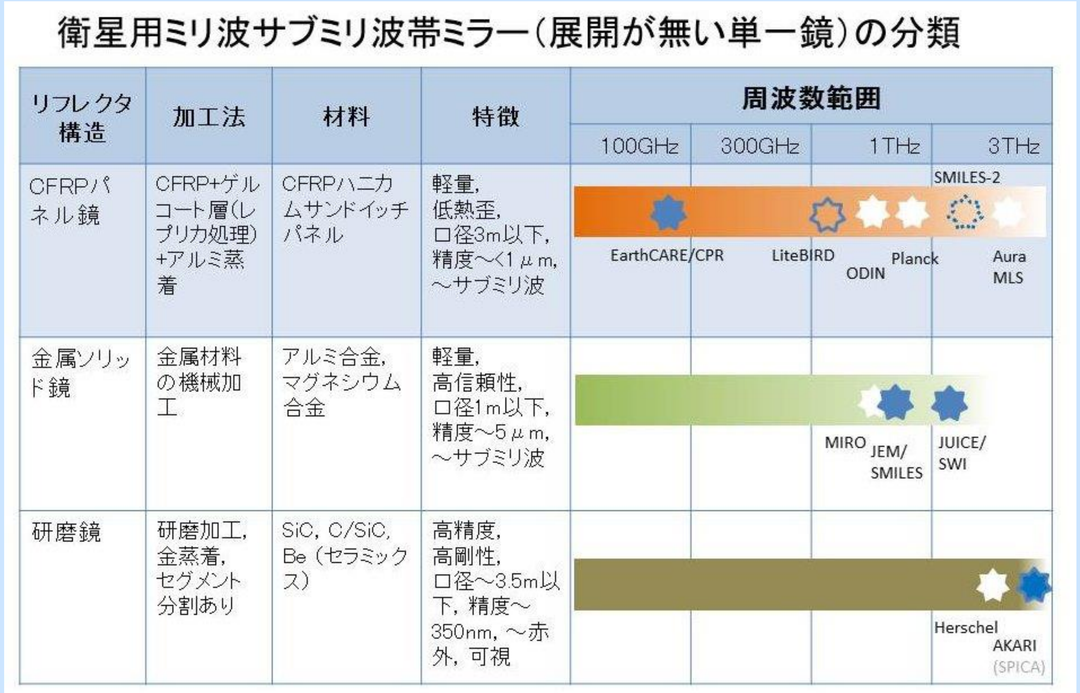
P-157 SMILES-2 用プラズマ溶射カーボン製軽量高精度鏡の部分試作

西堀俊幸，神谷友裕（JAXA），落合啓（NICT），宮崎謙一（三協製作所），中村和行（テクノソルバ），
原憲一（日本グラファイトファイバー），松本隆之（JX日鉱日石エネルギー），石田良平，真鍋武嗣（大阪府立大学）

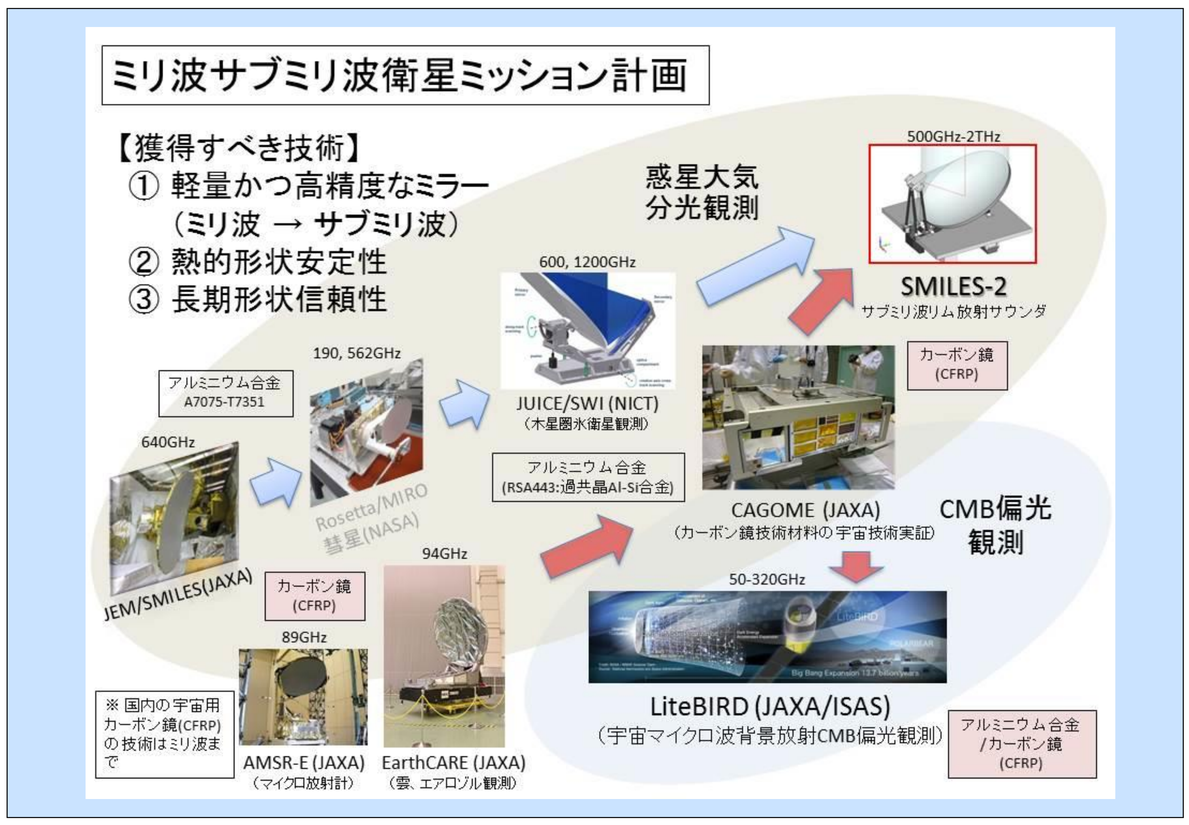
1. はじめに

LEO に投入される周回衛星から地球高層大気の本格的なリム放射観測を狙う SMILES-2 の準備研究として，テラヘルツ帯を観測するために必要な高精度と科学衛星への搭載に必要な軽量化を兼ね備えたカーボン製主鏡の要素試作を開始したので報告する．



2. THz帯観測に必要なアンテナ製造技術

640GHz帯の超伝導受信機を用いたリム放射観測を成功させたJEM/SMILESは，オールアルミニウム合金(7075-T7351)を用いて熱的相似変形則をアンテナ構造に適用させ，400mm開口のオフセット・カセグレンアンテナ（鏡面精度：20μm r.m.s 以下)をサブミリ波用として実用化させた．一方，SMILES-2は，JEM/SMILESの様に軌道上の安全性要求を第一とした国際宇宙ステーション搭載用とは異なり，アルミニウム合金で全てのアンテナ構造を製造すると質量が大きくなり科学衛星搭載として不向きである．より高精度かつ軽量なアンテナ構造を実用化させるためには，宇宙用赤外望遠鏡として実績がある研磨鏡を使うか，ミリ波帯で実績があるCFRPパネル鏡を選択する方法が考えられるが，研磨鏡はサブミリ波帯としては精度という観点からはオーバスペックであり，また，製造工程が複雑な分，製造コストが数倍高い．また，CFRPパネル鏡（アルミ蒸着鏡）は製造コストは安いが，高精度化や物性の長期安定性や形状安定性に開発課題が存在する．

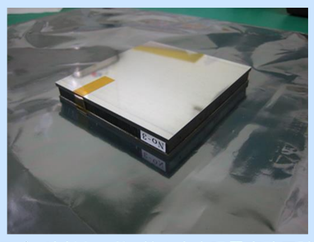


W/Gで検討中のSMILES-2は，従来の640GHzから2THz帯までを観測バンドとし，さらに高度分解能を上げたアンテナが必要になる．従って，上記課題以外に，口径1mクラスの主鏡を5μm r.m.sの精度で製造する技術の確立が必要である．

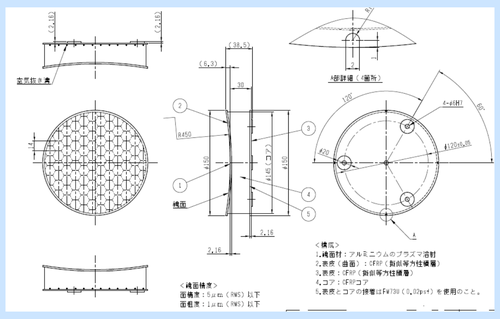
3. プラズマ溶射鏡面を持つカーボン鏡の試作

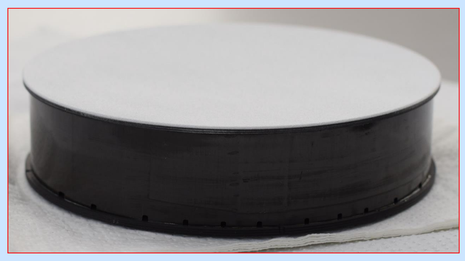
従来研究として，ピッチ系炭素繊維複合材の材料物性（高熱伝導，低熱歪み）を活かし，オールCFRP製の軽量ハニカムサンドイッチパネルを主構造とするゼロ熱膨張化設計(10-7/K以下)を施した反射鏡パネルを赤外や可視光波長領域で実用化させる検討が存在した．この研究では，鏡面粗度を劣化させる炭素繊維の「ファイバープリントスル一現象」を低減させるため，樹脂により高精度鏡面をレプリカ法で製造する技術の検討やCFRPのマトリックス樹脂が空気中の水分を吸って膨張したものが宇宙で脱湿することにより変形する「脱湿変形」を最少化させる検討が行われていた．また，宇宙環境における長期安定性に関する実証としては，2015年秋から国際宇宙ステーションの船外プラットフォームでカーボン鏡の宇宙曝露実験（CAGOME）を実施中であり，2年間の宇宙曝露実験後にカーボン鏡の試料を地球に持ち帰り，詳細に物性変化や形状変化を比較することで，カーボン鏡材料や構造の長期安定性等を詳細に確認する予定である．

部位	設計結果	備 考
反射面	構成：アルミニウムのプラズマ溶射(厚さ:200μm) 保護膜：無し、曲率半径:450mm、直径:145mm	
スキン	材料：YSH60A-30S/NM-31（UDプリプレグ） 積層：[(0/45/-45/90/90/-45/45/0)×3]、24ply 厚さ：2.16mm	裏表対称 硬化時ポストキュア無し
接着層	フィルム状接着剤 （Cytec社 FM73U） 厚さ：0.2mm 以下	表皮とコアの接着
コア	UDプリプレグによりハニカムコアを集成 積層：[0/90/0]、3ply、0.3mm 材料:0度 YSH60A-30S、90度 T700S-12K	
パネル厚さ	25.68～31.5mm	
質量特性	195.8g（計算値）	



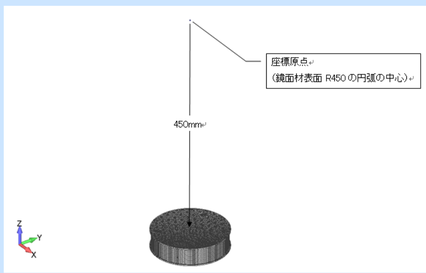
プラズマ溶射カーボン鏡の宇宙曝露実験用試料
（2014年度製作、フライト中）



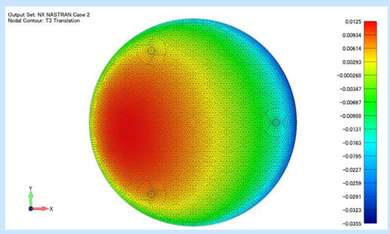


曲率を持つプラズマ溶射カーボン鏡
（2015年度製作、溶射後）

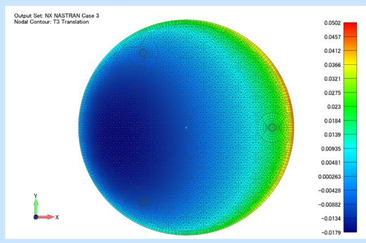
試作を行った曲率を持つプラズマ溶射カーボン鏡



NASTRAN による熱変形解析のモデル



高温(+70℃)時の熱変形



低温(-50℃)時の熱変形

解析に用いた材料物性値

	単位	YSH60A/NM31	T700S-12K/NM31	アルミニウム
縦弾性係数E1	GPa	330	155	70
縦弾性係数E2	GPa	7.00	8.00	–
ポアソン比 ν12	–	0.3	0.3	0.33
横弾性係数 G12	GPa	4.00	4.00	G=E/2(1+ν)
密度 ρ	kg/m³	1800	1800	2800
引張許容応力 σ1T	MPa	1700	3000	–
圧縮許容応力 σ1C	MPa	350	1000	–
引張許容応力 σ2T	MPa	40	40	–
圧縮許容応力 σ2C	MPa	130	100	–
せん断許容応力τ12	MPa	60	50	–
熱膨張率 α1	–	-1.5E-6	-1.0E-6	24E-6
熱膨張率 α2	–	35E-6	35E-6	–
備考				

熱変形解析結果（ベストフィット無し）

荷重ケース	温度条件	RMS誤差
200	＋70℃	12.71μmRMS
300	-50℃	18.09μmRMS
400	-100℃	30.99μmRMS

テストピースによるCTEの実測結果

サンプル名	長さ, mm	熱膨張係数, ppm/K -40～0℃	0～50℃	50～100℃
T700S-12K/NM-31 0度	21.971	-0.50	-0.55	-1.00
T700S-12K/NM-31 90度	22.036	24.6	25.8	26.3
YSH60A-30S/NM-31 0度	22.027	-1.59	-1.82	-2.04
YSH60A-30S/NM-31 90度	22.044	28.4	30.2	31.9

曲率を持つプラズマ溶射カーボン鏡の熱変形解析

従来検討されていたCFRPパネルを用いた軽量高精度鏡は反射面にアルミニウム蒸着を用いており，特に低温の熱サイクルによって表面スキンの炭素繊維方向に生じたクラックにより蒸着層にもクラックを発生させる．本研究では，CFRPパネル表皮のアルミニウム反射層をプラズマ溶射（100-200μm厚）により形成し，蒸着（約1μm厚）より厚く，機械的に強固な反射面を形成し，機械切削と研磨に耐えうる鏡面を製作することで，鏡面の形状精度と表面粗度を管理する手法を検証する．

試作したカーボンミラーは高弾性ピッチ系炭素繊維複合材を用いたオールCFRPハニカムサンドイッチパネルであり，反射鏡面は環境温度の違いによる曲率半径の変化を評価するために450mmの球面鏡とした．カーボンミラーのスキンは宇宙曝露実験や地上研究の実績があり，かつ，低吸湿性のマトリックス樹脂（YSH60A-30S/NM-31）を使用したものを使用した．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，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シアネートエステル系樹脂とし，脱湿及び吸湿変形を抑えた．

4. まとめと今後の予定

曲率を持つプラズマ溶射カーボン鏡材料の熱変形予測とCTEの実測を行った．また，試作したカーボン鏡の常温での鏡面精度（5μm r.m.s 以下)と鏡面粗度の測定が完了した．今後は低温・高温環境時の曲率半径の変化を実測し，熱変形解析との比較を行う予定である．