

# 1019 「きぼう」曝露部を用いた形状記憶ポリマ複合材の 宇宙実証実験（SIMPLE/IMP）

○石澤淳一郎，横澤裕，木本雄吾，田村高志（JAXA）

渡邊秋人，堀利行，伊藤裕明（サカセ・アドテック），SIMPLE 共同研究開発チーム

Demonstration Experiment of Shape Memory Polymer Composite Deployment on JEM

Junichiro Ishizawa, Hiroshi Yokozawa, Yugo Kimoto, Takashi Tamura (JAXA)

Akihito Watanabe, Toshiyuki Hori, Hiroaki Ito (Sakase Adtech) and SIMPLE Experiment Team

Key Words: Shape memory polymer, Deployable material, SIMPLE, Inflatable Material Experimental Panel

## Abstract

To demonstrate its shape recovery function and stability in a space environment, shape memory polymer (SMP) samples were mounted on the Inflatable Material Experimental Panel (IMP) of the Inflatable Membrane structures Pioneering Long-term Experiments (SIMPLE) using the Exposed Facility of the Japanese Experimental Module (JEM, Kibo). On August 24, 2012, SMP samples were deployed, heated with solar energy alone, in SIMPLE/IMP. This SMP deployment (shape recovery) was a successful world-first in a space exposure environment.

This paper reports on the results of the SMP deployment experiment featuring a ground test with a solar simulator and a SIMPLE/IMP experiment.

## 1. 目的および背景

形状記憶ポリマ (Shape Memory Polymer: SMP) は、ガラス転移点以上への単純な加熱により、予め記憶させた形状に回復する機能材料であり、宇宙機において大型化が有効な太陽電池パドル、アンテナ、ラジエータ等への応用が期待される材料である。

著者らは、強度、剛性の他、形状回復力の改善のため、炭素繊維によって複合強化させた形状記憶ポリマ複合材を開発し、その宇宙適用に向けた研究開発を実施してきた<sup>1-4)</sup>。このような新たな宇宙構造様式・材料の実用化には、機能、耐環境性等の宇宙実証実験が重要であるが、2012 年 8 月 24 日（日本時間）、国際宇宙ステーション（ISS）「きぼう（JEM）」曝露部を利用した宇宙インフレータブル構造の実証実験

（SIMPLE; Space Inflatable Membranes Pioneering Long-term Experiments）を実施し、形状記憶ポリマの宇宙曝露環境での伸展に世界で初めて成功した。

本発表では、SIMPLE で行われた形状記憶ポリマ伸展実験の速報と、事前に行われた地上試験結果について紹介する。

## 2. 実験方法

### 2.1 形状記憶ポリマ

形状記憶ポリマは、高分子のガラス転移現象を利用した形状記憶材料である。形状記憶ポリマの機能概念を図 1 に示す。形状記憶ポリマの形状記憶・回復機能は、高分子のガラス転移現象を利用したものである。ガラス転移温度（ $T_g$ ）を境に、高温側では柔らかく変形可能なゴム状態、低温側では硬いガラス状態となるため、 $T_g$  以上に加熱した状態で自由に變形させ、その形状を保ったまま  $T_g$  以下にすることで形状を固定でき、軌道上輸送後に再度  $T_g$  以上に加熱することで、初期の形状に回復（伸展）させることが可能である。形状回復温度は  $T_g$  となる。

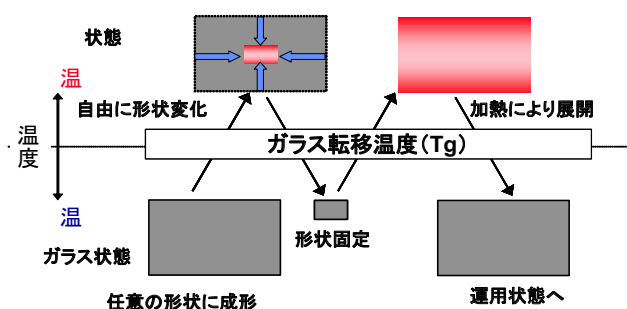


図 1 形状記憶ポリマの機能概念

形状記憶ポリマの形状回復は、材料として安定方向へとなるため目標とした伸展範囲を超えることがない、初期の加工形状に戻るため展開形状の制御がしやすい、展開力がソフトで宇宙機への擾乱を生じにくい等、宇宙展開構造用材料としての利点がある。さらに動作が途中で止まった場合でも、再加熱による伸展が再開可能である。

著者らは、形状回復温度の選択性に優れ、民生用途での実用化も進んでいる、(株) SMP テクノロジー社製（以前は三菱重工株式会社が製造）形状記憶ポリマ「ダイアリィ®」<sup>5,6)</sup>を選択し、形状回復温度ガラス転移温度の高温化や耐宇宙環境性評価を実施してきた<sup>1,4)</sup>。形状記憶合金と比較し、機械的特性や形状回復力、形状回復精度に劣る点に対しては、炭素繊維によって強化した複合材料とすることで改善させることができた<sup>5)</sup>。一方、炭素繊維との複合化によって、ガラス転移点以上での柔軟性（変形性）は低下する問題が生じる。その対策のため、平織、一方向材等、炭素繊維の複合化形態を変えた複数の試作品について比較を行ったところ、炭素繊維三軸織物が変形時の柔軟性の点で有利であった。三軸織物は宇宙機用展開アンテナ（弾性変形の範囲で収納し、軌道上で展開）として採用実績が豊富な、サカセ・アドテック（株）製 SK-802 を採用することにした。

新規材料の宇宙適用については、アウトガス特性（真空中における高分子材料からの放出ガス、周囲への汚染原因）や耐宇宙環境性が重要であるが、紫外線、電子線の照射によっても形状記憶特性が維持されること、アウトガス特性も宇宙用として問題ないことを地上試験で確認している<sup>2)</sup>。

なお、原子状酸素については、構成材料である樹脂（形状記憶ポリマ）、炭素繊維ともに耐性が不十分である。原子状酸素耐性が要求される地球低軌道環境等で用いる場合は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）で開発しているシルセスキオキサン系の耐原子状酸素コーティング<sup>7)</sup>を施すこととしている。同コーティングは透明かつ柔軟であり、形状記憶ポリマの変形動作等に支障がない。SIMPLE 実験に搭載した形状記憶ポリマについても、耐原子状酸素コーティングを施工した。

## 2.2 SIMPLE 実験

SIMPLE 実験装置<sup>8-10)</sup>は、ポート共有実験装置（ポート共有実験装置（Multi-mission Consolidated Equipment: MCE）の1ミッション機器として搭載され、H-2B ロケット3号機（2012年7月21日打上げ）/

こうのとりの（HTV）3号機によって、国際宇宙ステーションに輸送後、「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォームに取り付けられた。

SIMPLE 実験は図2のとおり、次の3つの実験で構成されている。本発表では材料実験パネル（SIMPLE/IMP）について紹介する。

- ① インフレータブル伸展マスト（Inflatable Extension Mast: IEM）の展開実験、長期特性評価。
- ② インフレータブル・スペース・テラリウム（Inflatable Space Terrarium: IST）の展開、内圧維持、植物発芽実験。
- ③ インフレータブル材料実験パネル（Inflatable Material Experiment Panel: IMP）での形状記憶ポリマ、紫外線硬化樹脂の材料実験。

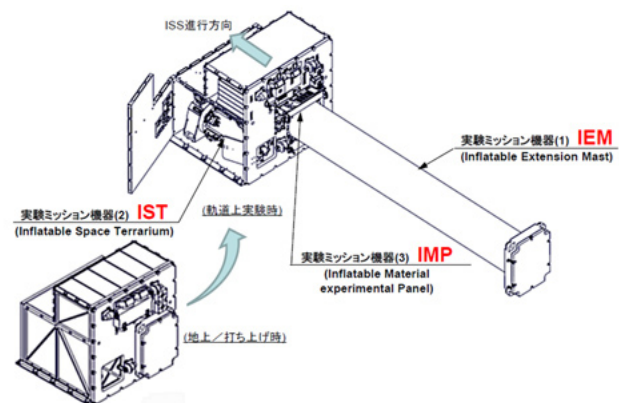


図2 SIMPLE 実験装置概要

SIMPLE/IMP に搭載した形状記憶ポリマ試料には、ダイアリィ®シリーズの中から、強化繊維との複合成型が可能であり、かつ最も高い  $T_g$  を有する MP-9020 ( $T_g:100^{\circ}\text{C}$ ) 樹脂と、炭素繊維三軸織物 SK-802 とを複合化させたものを採用した。また、伸展実験用の形状記憶ポリマ試料は、SMP1、2A、2B の計3種類を搭載した。SMP 1 は形状記憶ポリマ複合材そのままの状態であり、CFRP 特有の黒色を呈している。一方、SMP 2A、2B は、SMP 1 にアルミニウム蒸着 FEP フィルム（太陽光吸収率カタログ値  $< 0.14$ ）を貼付けており、太陽光からの熱を受けにくくした。全ての試料は、炭素繊維に通電することで加熱できるようリターン線を備えている。SMP 1 は太陽光加熱のみによる伸展、SMP 2A、2B は太陽光＋通電加熱による伸展を確認するものとした。なお、SMP 2B は IMP 実験開始後6カ月経過後に通電することで、軌道上長期間経過後に形状回復が可能か調べる目的とした。

なお、SIMPLE/IMP には形状記憶ポリマの他に、紫外線硬化樹脂（UV-Curable Polymer: UVCP）が搭載されている。紫外線硬化樹脂はインフレータブル構造が膨張した後に、その形状を固定、長期間維持するのに有効な材料として搭載された。搭載した紫外線硬化樹脂、サカセ・アドテック社製 SK-1020 / UVCEP（紫外線硬化型エポキシ樹脂）<sup>11-13)</sup>は硬化が進行するとともに変色（無色→赤色）する特徴があり、カメラ等による撮像でその硬化挙動を把握することが可能である。

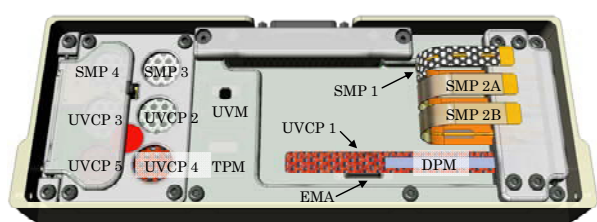


図 3 SIMPLE/IMP 概要図

図 3 は SIMPLE/IMP の概要図である。試料や各種モニタを搭載したサンプルステージ（寸法：68×188 mm）をパレットと呼ぶケースに搭載している。

図 3 右側には軌道上伸展実験を目的とした形状記憶ポリマ試料と、紫外線硬化樹脂の剛性（固有振動数）を測定する試料が搭載されている。また、図 3 左側には、外観等の変化を観察するための試料を 6 個搭載しており、内 3 個は金属板で太陽光から遮蔽し、実験開始後 6 ヶ月間後に金属板を開放し、太陽光に曝す仕様としている。さらに IMP は環境モニタ用の複数のセンサ、カメラを搭載している。搭載試料やセンサ類を表 1～3 にまとめる。温度測定用として、サンプルステージ内部に半導体型温度センサを、形状記憶ポリマ SMP 1、2A、2B の各曝露部根本側に熱電対（簡易な温度測定として）を取り付けている。QCM 及びカメラは IMP 上部の SIMPLE 筐体に、IMP に視野を持つよう設置した。また同カメラで IMP の試料を撮像できるよう、IMP 自身の展開角度は 90 度よりも小さくなっている。

表 1 SIMPLE/IMP 搭載の形状記憶ポリマ試料

搭載試料	搭載目的、仕様等
SMP 1	太陽光による伸展実験。
SMP 2A, SMP 2B※	SMP1 形態に、熱制御フィルムを施工。太陽光＋通電加熱による伸展実験。
SMP 3, SMP 4※	宇宙環境曝露による変化観察。

※ IMP 展開 6 か月経過後に実験開始

表 2 SIMPLE/IMP 搭載の紫外線硬化樹脂

搭載試料	搭載目的、仕様等
UVCP 1	宇宙環境曝露による剛性変化測定。 （固有振動数測定）
UVCP 2, UVCP 3※	軌道上太陽光による硬化挙動観察。 （3 は軌道上 6 か月経過後に実施）
UVCP 4, UVCP 5※	地上硬化済品の宇宙環境曝露による変化観察。

※ IMP 展開 6 か月経過後に実験開始

表 3 SIMPLE/IMP 搭載モニタ等

搭載モニタ等	目的、仕様等
UVM	IMP 入射紫外線量測定。 感度波長域：260～400 nm 最大感度波長：370 nm
TPM	サンプルステージ内部温度測定。 （半導体型温度センサ）
DPM	UVCP 1 の変位測定。 （ピエゾフィルム）
EMPA	UVCP 1 加振用電磁石。UVCP 1 裏面に施工した磁性体を引き付ける。
TC（熱電対）	SMP 1, 2A, 2B の曝露部根本温度を測定。箔型熱電対。
QCM <sup>14-16)</sup>	各試料表面に施工されている耐原子状酸素コーティングの浸食量測定、アウトガス付着測定。
カメラ（左右各 1 台）	静止画（カラー）撮像用。
SOA	形状記憶合金による太陽光遮蔽板の展開機構。

IMP は図 2 左下のように閉じた状態で軌道上に輸送され、装置展開後に紫外線等の宇宙環境に曝されるようになっている。なお、形状記憶ポリマ試料、紫外線硬化樹脂試料、QCM の水晶振動子の各表面には、2.1 項で述べた耐原子状酸素コーティングを施した。図 4 に SIMPLE/IMP のサンプルステージ（フライト品）の写真を示す。



図 4 SIMPLE/IMP サンプルステージ（フライト品）



形状記憶ポリマは  $T_g$  以上への加熱によっての伸展（形状回復）するため、軌道上での試料温度が重要である。ISS では1周回約 90 分間となるため、IMP 各試料への太陽光入射は短時間の内に変化する。そこで SIMPLE/IMP 実験では、太陽光入射状態及び SMP 各試料の温度について予測解析を実施した。太陽光入射については、ISS の軌道傾斜角や姿勢、SIMPLE やその周辺の形状（影の解析のため）を取込んだ解析を実施した。温度予測は、複数の IMP 太陽光入射角度毎に実施した。解析により SMP 1 は太陽光のみで、SMP 2A、2B は太陽光＋通電加熱で完全伸展する見込みが得られたが、地上のソーラ試験によっても確認することとした。

## 2.2 地上ソーラ試験

地上ソーラ試験は、フライト品と同様の IMP/SS モデルを使用し、JAXA 研究開発本部電源グループ所有のソーラシミュレータ（太陽電池評価用）及び同装置併設の真空チャンバを用いて行った。試験は、試料位置におけるソーラ光強度条件を 0.35 及び 1 ソーラとして設定し、半日陰時に想定しない形状記憶ポリマの動作がないか、全日照時に形状記憶ポリマが伸展するかを確認することにした。ソーラ試験の様子を図 5 に示す。試験中のチャンバ内圧力は 10 Pa 程度であった。

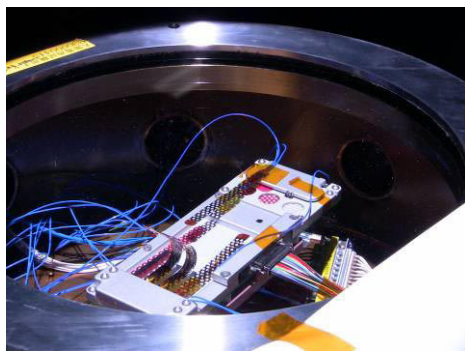


図 5 ソーラ試験の様子

ソーラ試験中は、IMP/SS に搭載された各モニタでの温度、UV 強度の実測を行ったほか、SMP 試料に極細型熱電対（(株) アンペムエスティ製 KFT-25-100）を追加し、局所の温度計測を行った。真空チャンバ外からのサーモグラフィ（チャンバ窓材を介した温度測定が可能）による温度分布測定を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 地上ソーラ試験結果

地上ソーラ試験は、IMP/SS モデルの設置角度を変えることで、複数の太陽光入射角度で試験を実施した。太陽光入射が最大となる入射角 0 度の条件においても、0.35 ソーラでの模擬ソーラ光では SMP 1、2A、2B 各試料の最高温度は 60℃以下であり、形状記憶ポリマの  $T_g$  を大きく下回ることが確認できた。

試験結果は、熱解析の結果と同様、SMP 1 のみ完全伸展となったが（一例を図 6 に示す）、熱解析によりも伸展時間が長くなる傾向が見られ、入射角 0 度で約 5 分間、その他の設定角度では約 15 分間で SMP 1 が全伸展に至った。SMP 1、2A、2B 試料は図 4 のように、中央部で屈曲した形態に収納しているが、展開（形状回復）過程で約 90 度屈曲の状態（模擬ソーラ光に対して垂直となる）になると、試料の受光量が極小となり、形状回復に必要な加熱量が減少し、伸展が一時停滞してしまうためである。その後試料は時間経過とともに加熱され、全伸展に至った。

以上の結果から、軌道上の IMP 実験は SMP 各試料が太陽光の直射を受けやすく、昇温しやすい、軌道傾斜角 0 度付近が有利と確認された。

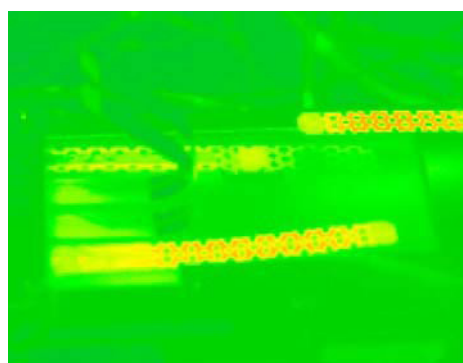


図 6 サーモグラフィ測定結果の一例  
左側一番下の SMP 1 のみ全伸展した。  
（緑<黄<赤の順で高温となる。）

なお、SMP 2A、2B への通電加熱実験も実施した。真空中、ソーラ光照射状態で、約 3 秒間の加熱 1 回により完全伸展に至ることを確認した。

### 3.2 SIMPLE 実験結果（速報）

SIMPLE/IMP 実験は、ISS の軌道傾斜角がほぼ 0 度となる 2012 年 8 月 24 日に実施された。実験は「きぼう」ロボットアーム手首に設置されているビデオカメラによる動画をリアルタイムで観察しながら行うことができた。

日陰時に IMP を展開した際に撮像した IMP 曝露初期状態（ビデオカメラ画像）を図 7 に示す。SMP 1、2A、2B の伸展は見られず、また UVCP 2 も白色（未硬化）の状態となっている。

展開後最初の日照を迎え、硬化挙動観察用の UVCP 2 の変色が進む状態が観察された。その後同周回において、IMP への太陽光入射強度が極大となる日照中心付近で、SMP 1 の伸展が確認された（日本時間 21 時 10 分頃に全伸展）。地上ソーラ試験では 5～15 分間を全伸展に要したが、SIMPLE 実験では伸展動作開始から完了まで 3 分程度であった。これは、熱解析やソーラ試験において考慮していなかった反射光による SMP 1 試料への加熱寄与によるものと考えられる。地上ソーラ試験で見られた伸展途中での一時停滞も見られなかったが、これも周囲からの反射光による加熱の影響と推察される。

また、SMP 2A は日照中の伸展実験を、8 月 26 日午前 0 時 14 分に実施した。通電時間は 5 秒間を狙ったが実際は 3 秒以内になったようである（今後調査予定）。その後、午前 11 時 4 分に 2 回目の通電を行い、全伸展に至った。SMP 1 及び SMP 2A 伸展後に撮影された映像を図 8 に示す。SMP 2A は 2 回加熱で



図 7 IMP 展開直後の様子（日照直前の日陰）

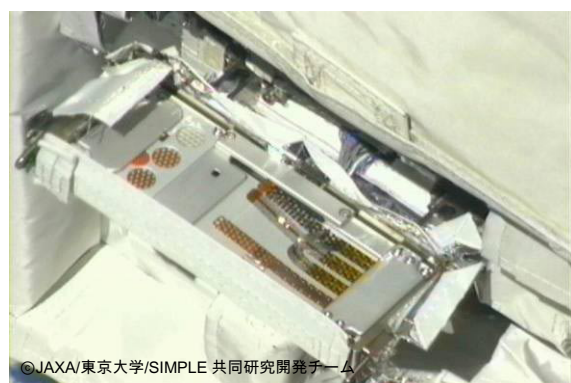


図 8 形状記憶ポリマ（SMP1、SMP2A）の軌道上伸展状態

の伸展となったが、形状記憶ポリマの特長である、伸展途中で止まった場合の再伸展の確認ができた。

以上のとおり、SIMPLE/IMP 実験において形状記憶ポリマの宇宙曝露環境における伸展（形状回復）実証世界で初めて成功した。

なお、IMP での形状記憶ポリマ伸展実験では、伸展後の試料が収納方向に若干戻る事象も観察された。これを含め、軌道上のデータ、画像を詳細に確認すると共に、実用に向けて対策が必要なものがあれば、その立案、試験による検証を実施していく予定である。

#### 4. おわりに

SIMPLE/IMP 実験では、宇宙曝露環境における形状記憶ポリマの伸展（形状回復）実証に世界で初めて成功した。軌道上で測定された温度等のデータを含め、形状記憶ポリマ動作についての詳細な解析を継続する予定である。

また、IMP 実験開始から 6 ヶ月経過後となる 2013 年 2 月頃には、SMP 2B の伸展実験や、金属板によって遮光していた搭載試料の宇宙太陽光曝露実験を実施する計画である。加えて、IMP 搭載の各実験試料について、今後長期間（最長 2 年間程度）に亘って観察を継続することにより、宇宙環境曝露による長期影響を調べていく。

SIMPLE 実験に搭載された形状記憶ポリマは、単純平板の材料形態であった。今後、SIMPLE 実験の解析と並行して、宇宙実用化に向けた具体的モデルの開発にも取り組んでいく。

#### 謝辞：

IMP 実験を含む SIMPLE 実験及びその装置開発は、東京大学大学院青木隆平教授を代表とする SIMPLE 共同研究開発チーム（装置開発：WEL リサーチ、サカセ・アドテック）と、JAXA 有人宇宙環境利用ミッション本部宇宙環境利用センター船外利用ミッション G の共同研究によってなされた。WEL リサーチ 中野充彦氏、JAXA 吉田長治氏の IMP の熱解析により、形状記憶ポリマ伸展タイミングを正確に事前把握することができた。また、軌道上の形状記憶ポリマ伸展動画の撮像は、JAXA KIBOTT チーム、船外利用ミッション G の尽力によるものである。

また、形状記憶ポリマの宇宙適用に向けた研究開発は、MHI 林宣也氏、三輪典生氏、SMP テクノロジー林俊一氏に長年に亘る協力を受けた。地上試験

は、JAXA 研究開発本部電源グループ島崎一紀氏及び AES の方々の支援を頂いた。記して感謝する。

## 参考文献

- [1] J.Ishizawa, K.Imagawa, J.Yoshikawa, S.Hayashi and N.Miwa:Research on Applicability of Shape Memory Polymers to Inflatable and Deployable Space Structure, Proceedings of the 7th Japan International SAMPE Symposium, pp.295-298, 2001.
- [2] 石澤淳一郎、今川吉郎、南伸太朗、馬場尚子、林俊一、林宣也、三輪典生：形状記憶ポリマの宇宙適用性研究、第 47 回宇宙科学技術連合講演会、2G2、2003.
- [3] J.Ishizawa, H.Shimamura, S.Minami, N. Hayashi, N. Miwa and S. Hayashi:New Actuator Using Shape-Memory Polymer For Space Use, 56th International Astronautical Congress (IAC2005), IAC-05-C2.4, 2005.
- [4] 島村宏之、石澤淳一郎、林俊一：形状記憶ポリマー複合材の開発、プラスチック、1(2006)、pp.124-128、2006.
- [5] 林俊一：ポリウレタン系形状記憶ポリマーの特性と用途、ポリマー材料フォーラム講演要旨集 pp.247-250、1997.
- [6] 戸伏 壽昭、林 俊一、伊貝 亮、原 永志、三輪 典生：ポリウレタン系形状記憶ポリマーフィルムの形状固定性および形状回復性、日本機械学会論文集、62(1996)、第 597 号、pp.1291-1298、1996.
- [7] 石澤淳一郎、木本雄吾、田村高志、古田尚正、北村昭憲、鈴木浩：耐原子状酸素性コーティングのポリイミドフィルムへの適用、第 55 回宇宙科学技術連合講演会、1B01、2011.
- [8] T.Aoki, H.Furuya, K.Ishimura, Y.Miyazaki, K. Senda, H.Tsunoda, K.Higuchi, J.Ishizawa, N.Kishimoto, R.Sakai, A.Watanabe and K.Watanabe:On-Orbit Verification of Space Inflatable Structures, 26th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS 26), 2008-c-07, 2008.
- [9] 青木隆平、石村康生、泉田 啓、角田博明、古谷 寛、宮崎康行、石澤淳一郎、岸本直子、樋口 健、酒井良次、渡邊秋人、渡辺和樹：宇宙インフレータブル構造の宇宙実証、日本学術会議・JAXA/ISAS 第 24 回宇宙利用シンポジウム、pp.98-99、2008.
- [10]SIMPLE (web) : <http://simple.blogdns.org/>
- [11] 渡邊秋人、酒井良次、堀利行、伊藤裕明、樋口 健、渡辺和樹：三軸織物を用いた光硬化型宇宙インフレータブル構造技術の検討、第 50 回宇宙科学技術連合講演会講演集、pp1693-1698、2006.
- [12] 渡邊秋人、酒井良次、堀利行、樋口 健、渡辺和樹：宇宙インフレータブル構造における硬化技術の検討、第 51 回宇宙科学技術連合講演会講演集、2K10、2007.
- [13] 石澤淳一郎、酒井良次、木本雄吾、宮崎英治、SIMPLE（実験）チーム：きぼう曝露部利用インフレータブル構造材料の宇宙実証実験、第 52 回宇宙科学技術連合講演会講演集、3E11、2008.
- [14] 西山和孝、國中均：宇宙機搭載用 QCM の開発（その 2）、平成 21 年度宇宙輸送シンポジウム、2010.
- [15] 明星電気（株）宇宙用 QCM (web) : <http://www.meisei.co.jp/products/space/qcm.html>