

P-166 ソーラー電力セイル用 薄膜太陽電池 膜面展開構造の研究開発

○奥泉信克, 森治, 加藤秀樹, 田中孝治, 野々村拓, 豊田裕之, 細田聡史, 松永三郎, 後藤健, 石田雄一, 横田力男, 川北史朗, 白澤洋次, 名取通弘(JAXA), 古谷寛(東工大), 宮崎康行(日大), 坂本啓, 山浦弘(東工大), 萱場綾子(首都大), 松本純, 中条俊大, 菊池隼仁, 池本和晃, 小山凌(東大), 高浦直己(東理大), 北尾啓(青学), 木下寛之(東海大), 中村拓磨(青学), 西澤匡士, 横松卓, 和田雅之, 鈴木聡太(東工大)

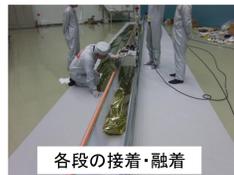
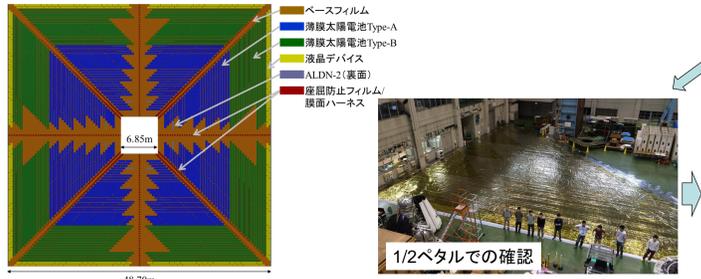
電力セイルとセイル展開機構

ソーラー電力セイル探査機によるトローヤ群小惑星の探査ミッションでは、太陽距離5.2AU太陽正対でバスシステムへ2kW、イオンエンジンシステムへ2.6kW以上の電力を供給すること。
がシステムからの要求となり、次の2つが主要な要素となる。

電力セイル: 軌道の各フェーズに必要な電力を確保する。発電のための薄膜太陽電池、姿勢制御のための液晶デバイス、理学観測機器を搭載する。

セイル展開機構: 折り畳んで収納されて打上げられる電力セイルを軌道上で展開する。

IKAROSよりも大型となることから、これまでの研究開発の成果を基に設計と試作を行い、設計と製造方法を検証している。また、各要素技術の最新の成果を適宜設計へ取込み、最適化を図っている。



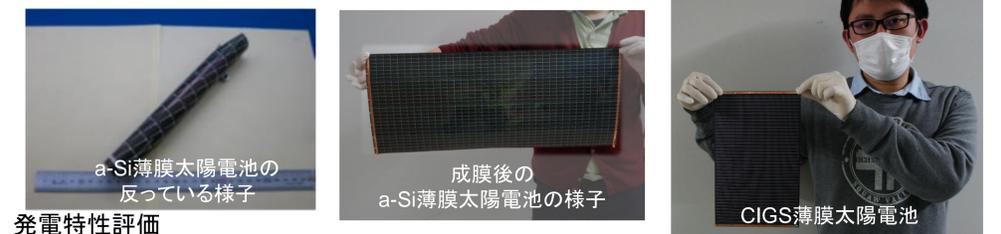
発電部

薄膜発電システムについて

ソーラー電力セイルの発電システムへの要求は、単位質量当たりの発電量、柔軟性、形状維持可能薄膜構造である。近年、薄膜太陽電池の開発の進捗が大きく進展しているが、中でもCIGS太陽電池は、薄膜太陽電池の中で高い変換効率が期待でき、ポリイミドフィルム上に形成することにより柔軟かつ軽量化を実現できる。しかし薄膜多層構造は温度変化による反りが発生する課題がある。薄膜太陽電池の反り対策の概要とCIGS太陽電池の特性評価に関して示す。

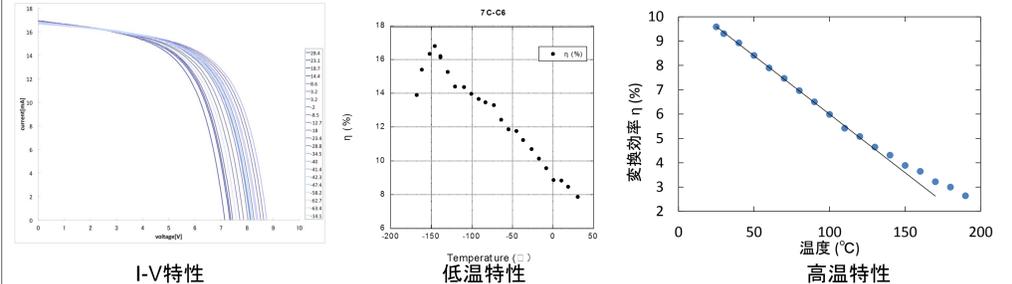
反り対策

温度変化により発生する反りをスパッタリングによる表面コーティングで抑制する方法を開発した。サンプルはa-Si太陽電池を用いた。コーティング材は酸化亜鉛で、表面500nm、裏面500nmである。成膜前後のa-Si太陽電池の様子を下の写真にて示す。熱真空試験により、広い温度範囲で変形を緩和できることを確認した。



発電特性評価

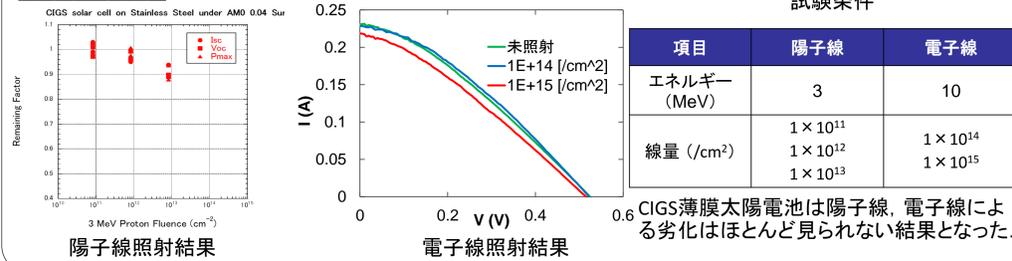
CIGS薄膜太陽電池の写真を右上図に示す。サイズは31cm×19.5cm。重さは4.5gである。25μmのポリイミドフィルムをベースにした軽量太陽電池である。太陽電池のI-V特性、温度特性を示す。



項目	地球近傍 1SUN, 25°C	木星近傍 0.04SUN, -150°C
変換効率 (%)	9.58	16
発電量 (W)	7.4	0.5
質量当たりの発電量 (kW/kg)	1.6	0.1

150°C~-150°Cの範囲で変換率がほぼニアに変化することを確認した。またその時の温度特性は-0.53 %/°Cとなった。今回の結果を用いて、地球近傍での発電能力と木星近傍の発電能力を左の表に示す(ここでは太陽電池のみの重さを考慮している)。下記に耐宇宙環境試験結果を示す。

耐宇宙環境性

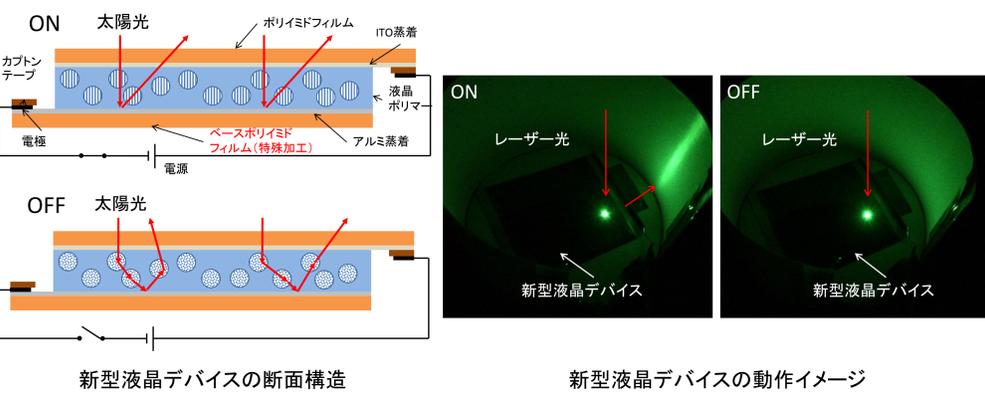


姿勢制御デバイス

新型液晶デバイスの開発

セイル膜面に搭載する姿勢制御デバイスとして、IKAROSに搭載された液晶デバイスを改良した新型液晶デバイスを開発している。電極がついた薄膜多層構造であり、そのベースとなるフィルムに、直上から照射された光を斜めに反射する、特殊加工を施したポリイミドフィルムを用いている。このデバイスをON, OFF制御することで、太陽光圧によるセイル膜面に対する面内、面外両方の成分を持った力を生み出すことができる。これにより、探査機の姿勢だけでなく、スピンレート制御も可能になり、セイル膜面のねじれ形状に起因する太陽光圧の外乱(風車効果)を燃料を消費することなく相殺することができる。

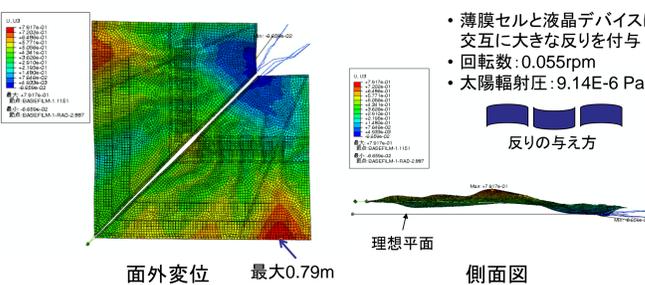
実験室レベルでの製作方法は確立しており、探査機搭載に向けた量産手法の検討、試験を進めている。



セイル構造・機構

IKAROSソーラー電力セイルの展開形状と剛性の解明

IKAROSのセイル膜面の予想外の展開形状と剛性の原因を解明するため、非線形FEM解析ソフトAbaqusによる展開形状解析を実施、セイルの周方向の収縮によって、セイル全体の面外変形と半径方向への縮小が起り、回転数を低下しても変形形状が維持されることを確認した。

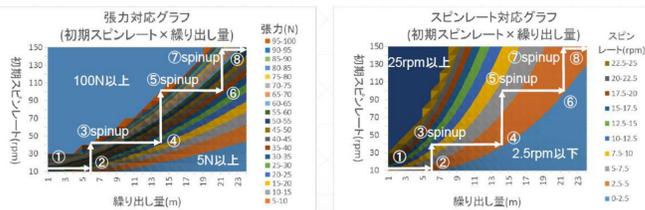


ソーラー電力セイル1次展開スピンレート解析

ソーラー電力セイルの1次展開中のスピンレート履歴を多粒子法で解析した結果、セイル根元の張力とスピンレートを安全な範囲に維持して伸展するには、伸展中に数回のスピンアップが必要になることを示した。

折り数46.5段、繰り出し量23.49m、セイル外辺48.7m、質量46kg/1ペタル
本体質量1,000kg、慣性モーメント Ix=437.5, Iy=438.0, Iz=499.5(kg・m²)、初期スピンレート10rpm、先端質量10kg/個

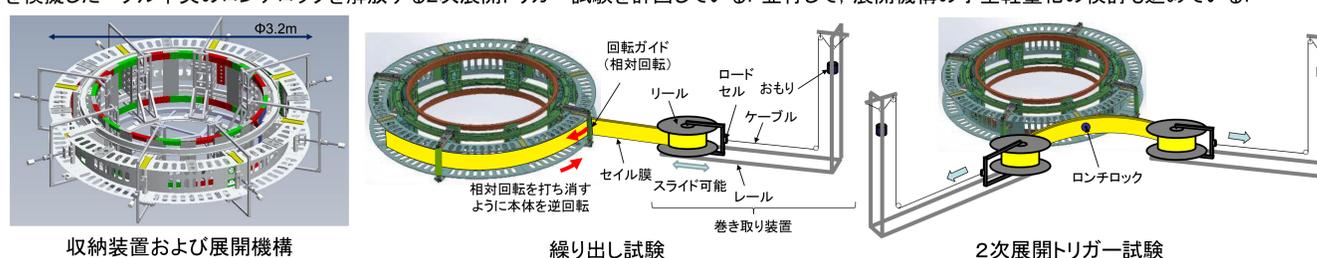
最適化条件: 根元張力: 5N以上, 100N以下, スピンレート: 2.5rpm以上, 25rpm以下



セイル繰り出し量に対する根元張力とスピンレートの変化

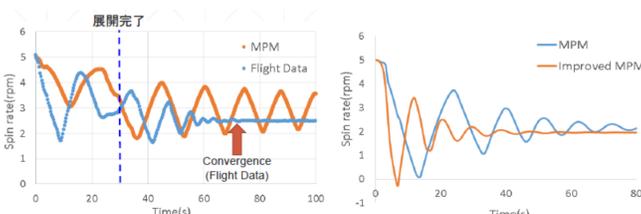
ソーラー電力セイル 収納・展開試験

50m級ソーラー電力セイルの収納展開の実現性を検証するため、2013年度に試作した収納装置と展開機構、20m級1ペタルを用いた収納試験、今年度試作中の50m級1ペタルの収納試験を2015年2月に実施予定。引き続き50m級1ペタルを用い、1次展開を模擬した繰り出し試験、2次展開開始を模擬したペタル中央のロンチロックを解放する2次展開トリガー試験を計画している。並行して、展開機構の小型軽量化の検討も進めている。



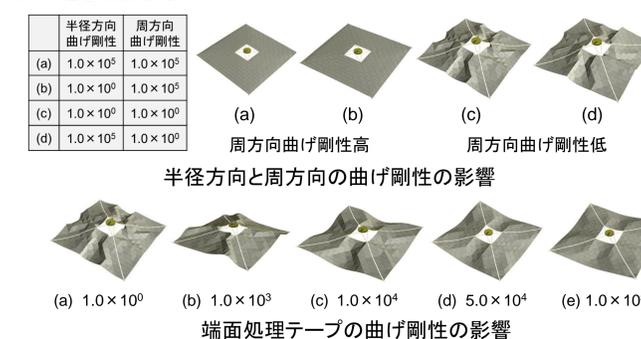
ソーラー電力セイル展開挙動解析モデルの改良

従来のIKAROS多粒子モデルでは、2次展開解析での振動減衰がフライト結果より小さく、チューニングを行っても、剛性行列を改良した多粒子モデルを導入しても一致させることができなかった。そのため、セイルのモデル化を見直した結果、ブリッジの剪断変形に伴う減衰を追加すると、セイルの振動減衰が顕著に増加し、フライト結果に近づくことを確認した。



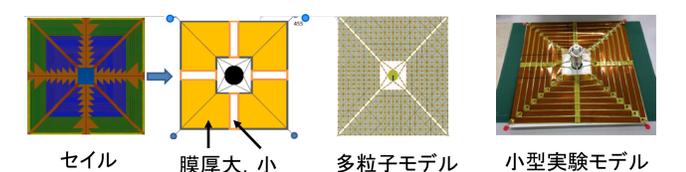
展開形状に対する曲げ剛性の影響の解析

多粒子法により、セイルの半径方向と周方向の曲げ剛性や、ペタル外周の端面処理テープの剛性が展開形状に与える影響を解析した結果、周方向曲げ剛性やペタル外周部の剛性の増加が膜面を平坦化する効果をもつことを確認した。



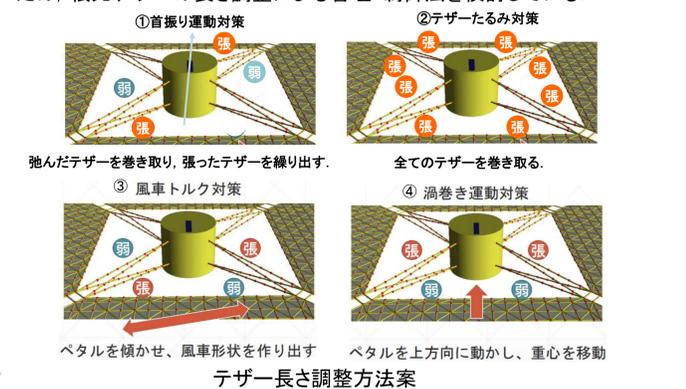
ソーラー電力セイル2次展開挙動

ソーラー電力セイルを模擬した薄膜セル搭載部とペタル中央部で膜厚の差異があるモデルにおいて、多粒子解析と展開実験によって非同期展開挙動の発生を検討している。多粒子モデルでは、圧縮剛性と半径方向折り目剛性によって、同期展開と非同期展開が起こることを示した。



テザー長さ調整による膜面形状管理・制御法の検討

本体スピン軸傾斜による首振り運動、セイルの縮小によるテザーたるみ、太陽放射圧トルク、セイル重心高さオフセットによる渦巻き運動の対策のため、根元テザーの長さ調整による管理・制御法を検討している。



シューレース・テザー機構の検討

先端マスに作用する遠心力によって、半径方向だけでなく周方向にも張力を発生させ、ペタルの平坦度を向上させるため、IKAROSの膜面ブリッジに換わり、2本のテザーを靴紐のように通すシューレース・テザー機構を考案し、最適な設計を、解析や実験、タグチメソッドにより検討している。

