

# P-107 ソーラー電力セイル探査機用薄膜太陽電池膜面展開構造の研究開発状況

○奥泉信克(JAXA), 松本純(JAXA), 森治(JAXA), 加藤秀樹(JAXA), 田中孝治(JAXA), 豊田裕之(JAXA), 細田聡史(JAXA), 後藤健(JAXA), 石田雄一(JAXA), 横田力男(JAXA), 川北史朗(JAXA), 名取通弘(JAXA), 古谷寛(東工大), 坂本啓(東工大), 松永三郎(東工大), 宮崎康行(日大), 斉藤一哉(東大), 萱場綾子(首都大), 中篠恭一(東海大), 中条俊大(東大院), 高尾勇輝(東大院), 柏岡秀哉(総研大), 中村拓磨(青学院), 渡邊元樹(青学大), 倉川正也(青学大)

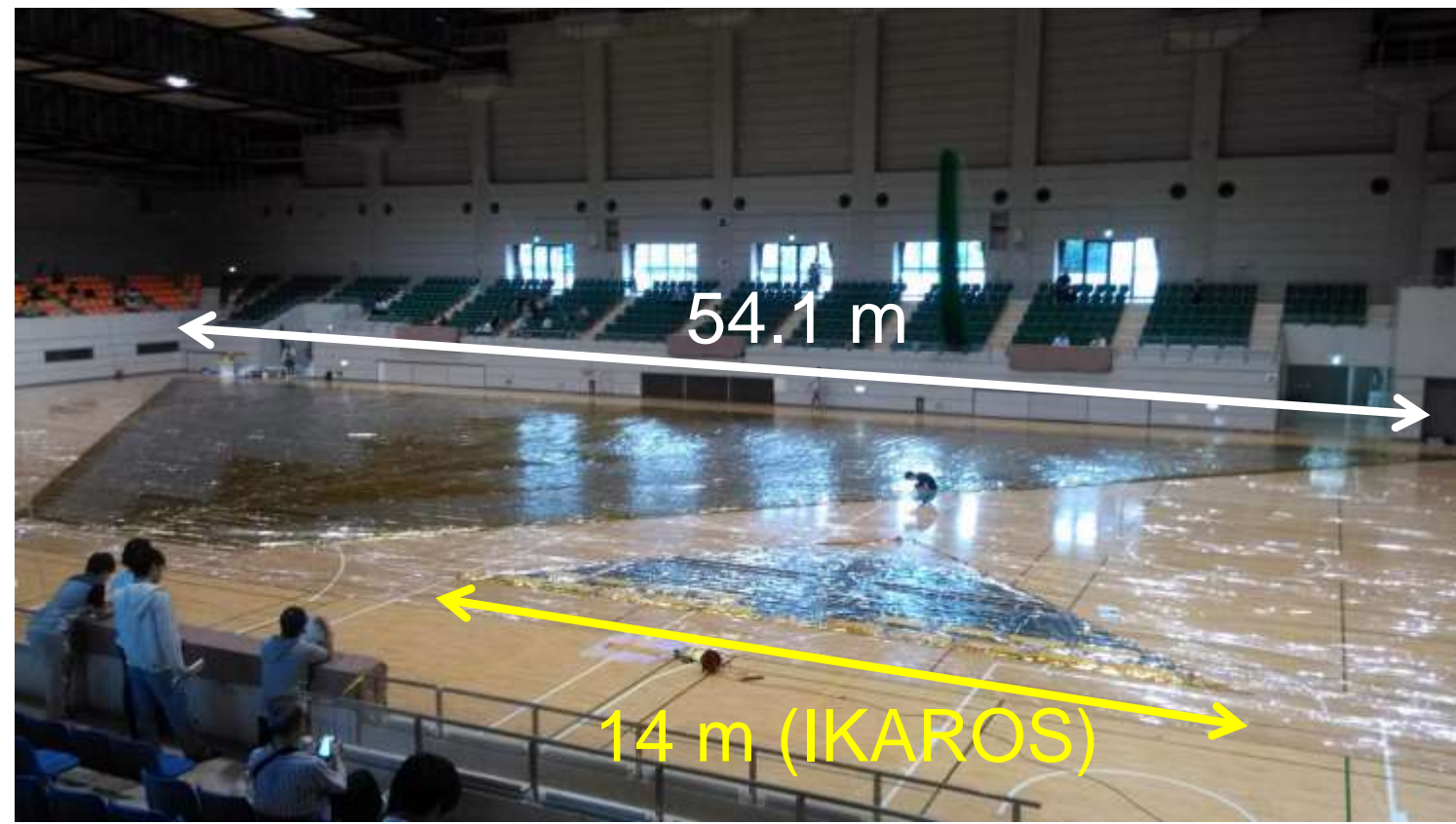
## はじめに

ISAS/JAXAが検討中の「ソーラー電力セイル探査機による木星トロヤ群小惑星探査計画」では、巨大な薄膜太陽電池膜面展開構造物を広げ、外惑星領域でもイオンエンジンが駆動できるだけの十分な電力を確保し、推進剤の大幅削減・大量のペイロード輸送を実現する。本発表では、このミッションにおけるキー技術である電力セイルの(1)試作・最新設計の状況(2)収納・展開に関する試験の結果(3)軌道上での電力セイル形状解析について述べる。

## 電力セイルシステム

### 50m級試作ソーラー電力セイル膜面の製作精度確認

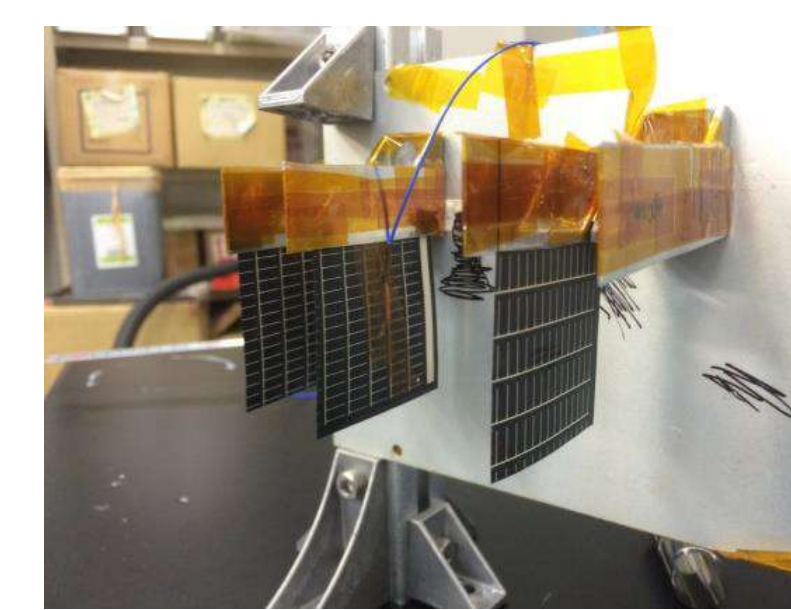
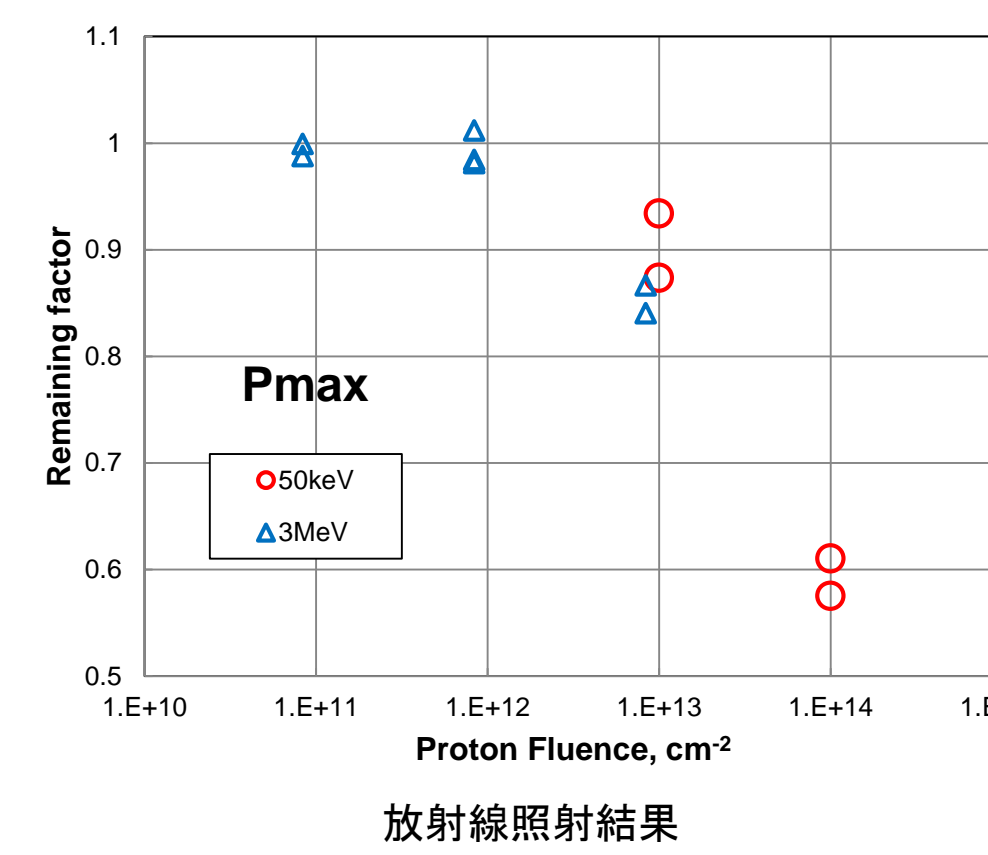
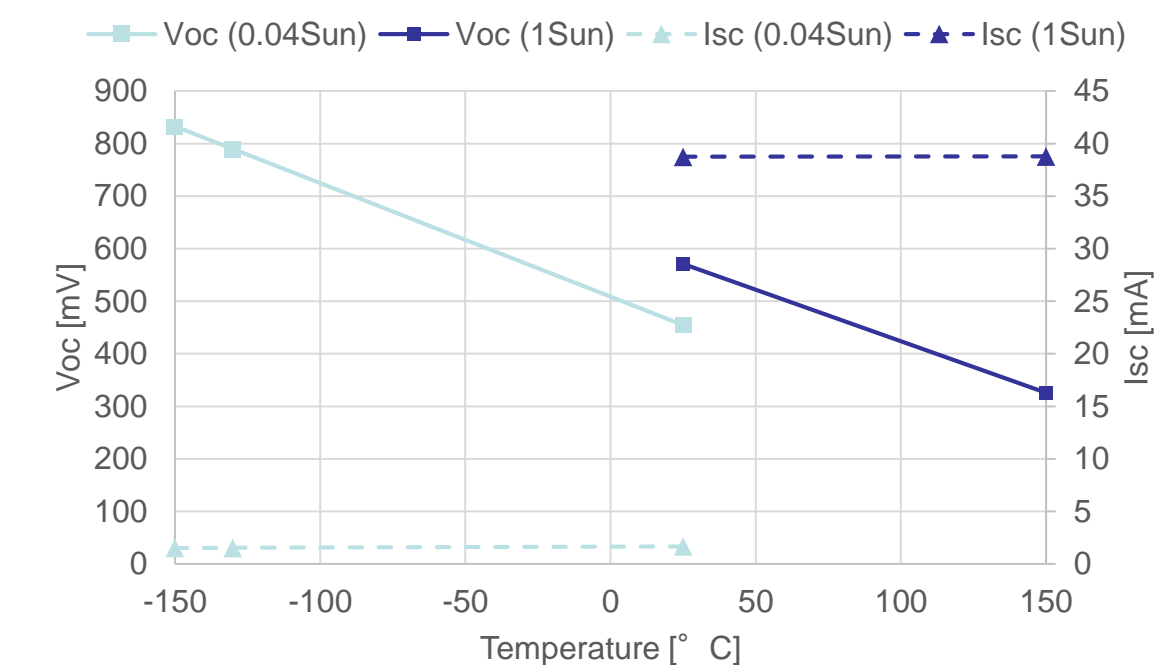
2014-2015年度に行った50m級(実物大)試作ソーラー電力セイル膜面の製作精度を確認するため、公共の体育館を借り切り、セイルを広げて寸法計測を行った。下表に、計測値を示す。明らかな製造ミスを除き、製作誤差は0.3%であった。本試験はアウトリーチ活動も兼ねて、一般に公開した状態で行った。平日にもかかわらず、来場者250名程度、インターネット生中継視聴数6000接続程度と非常に盛況であった。



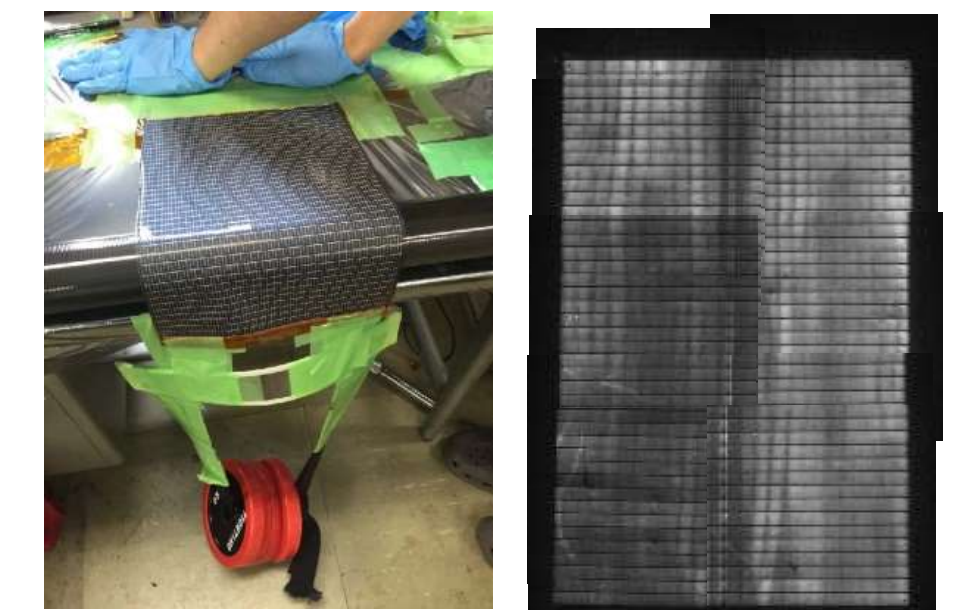
セイル質量	50.38 kg
セイル上辺	6800 mm / 6850 mm (実寸法/設計寸法)
セイル下辺	53960 mm / 54100 mm (実寸法/設計寸法)
半径方向	23470 mm / 23625 mm (実寸法/設計寸法)

### 薄膜発電システム

- 発電システム:これまで得られたCIGS薄膜太陽電池の温度特性を基に、アレイパワーレギュレータ(APR)への入力電圧範囲が60V~150Vとなるように電池の再設計検討を進めている。
- 放射線試験:照射条件を変えてベースデータの取得を実施。
- セイル膜面の展開形状に影響を及ぼす(「セイル構造・機構」参照)太陽電池の温度-反り評価、展開時の応力によるダメージ評価等を行い、設計のベースデータを取得。



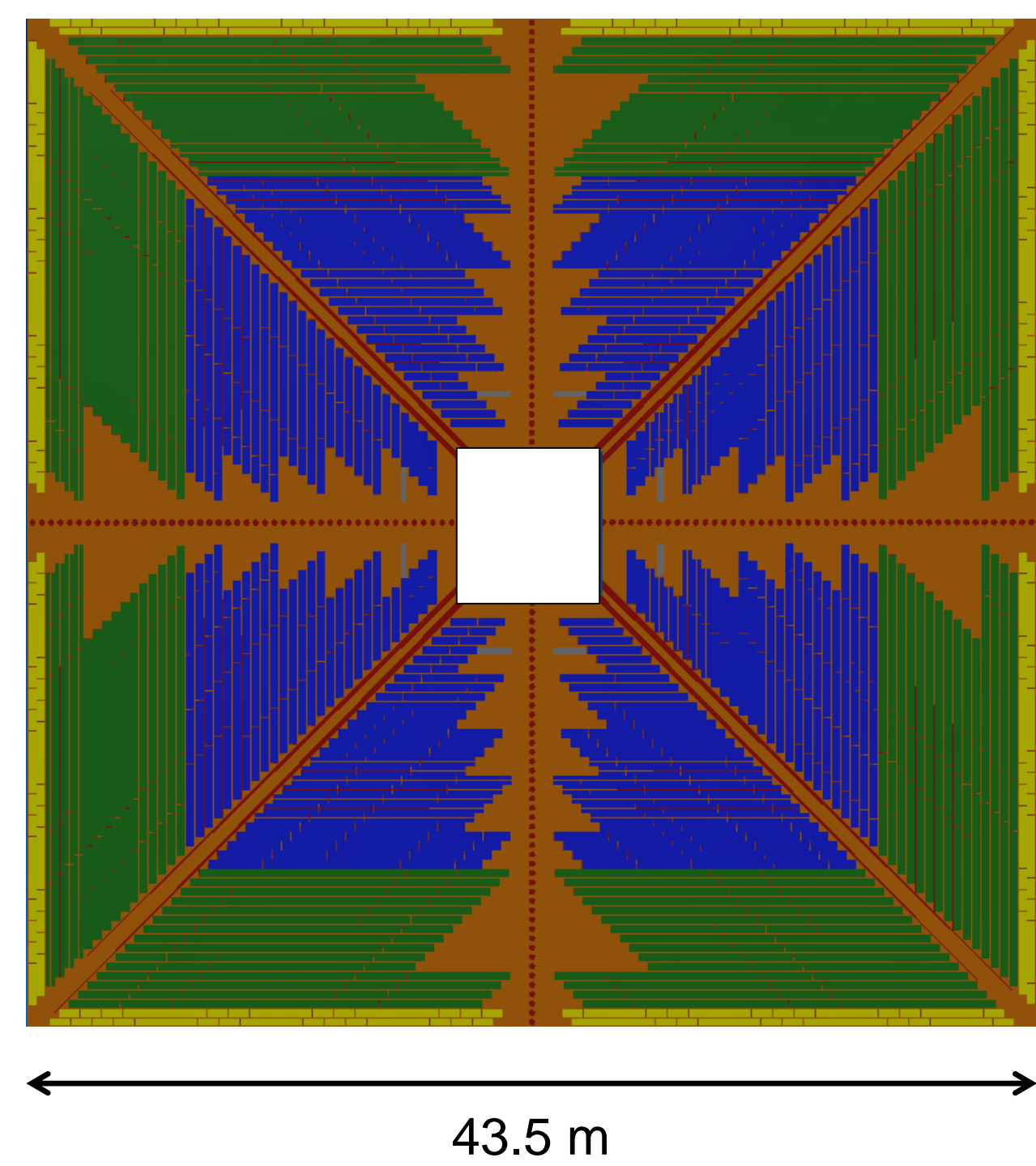
温度による反りの変化量計測状況



応力を負荷した後EL, I-V特性を取得しダメージを評価(劣化はしなかった)

### ソーラー電力セイル膜面の最新設計

薄膜太陽電池の最新仕様を反映して、ソーラー電力セイル膜面の再設計を行った。

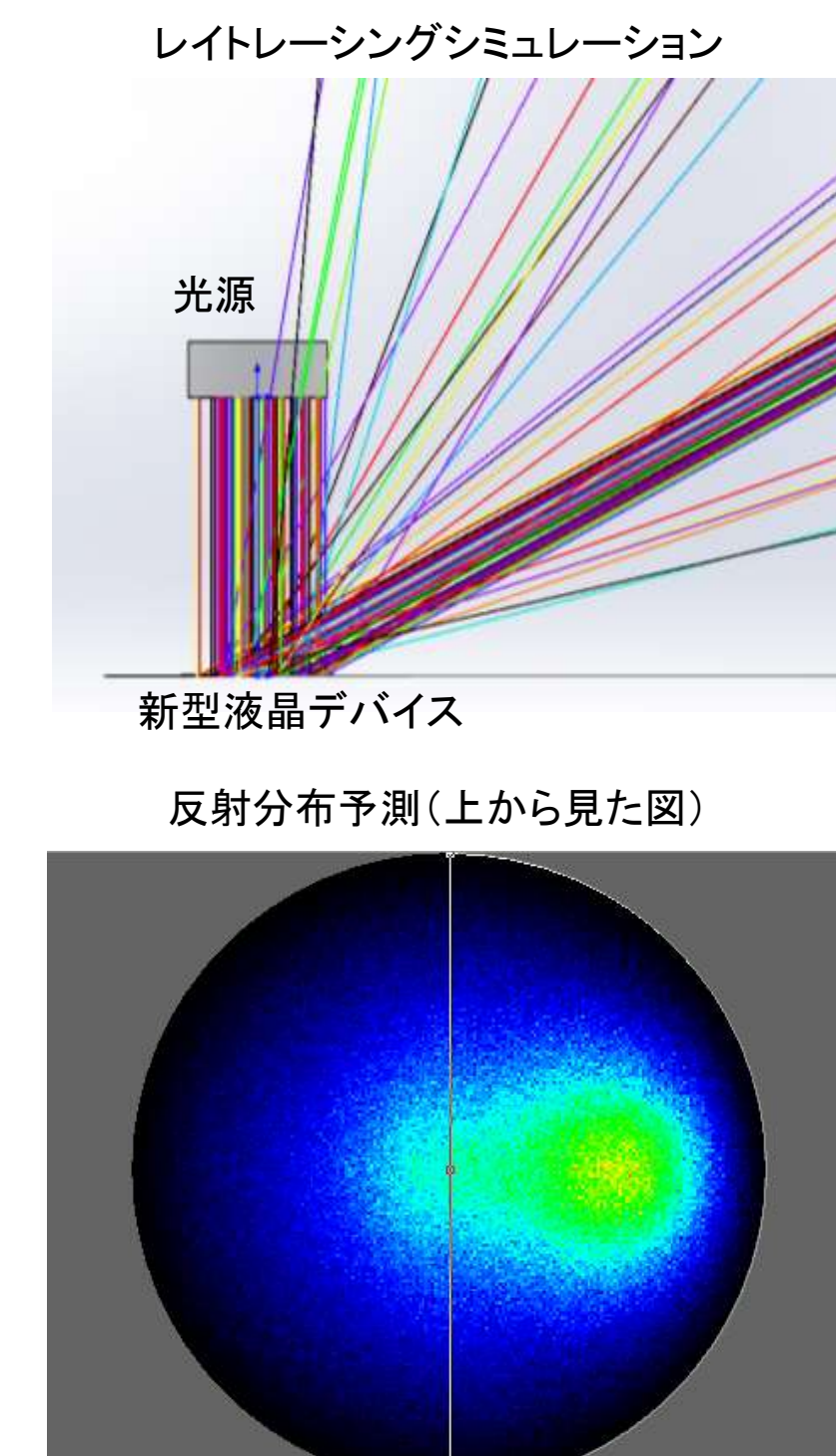
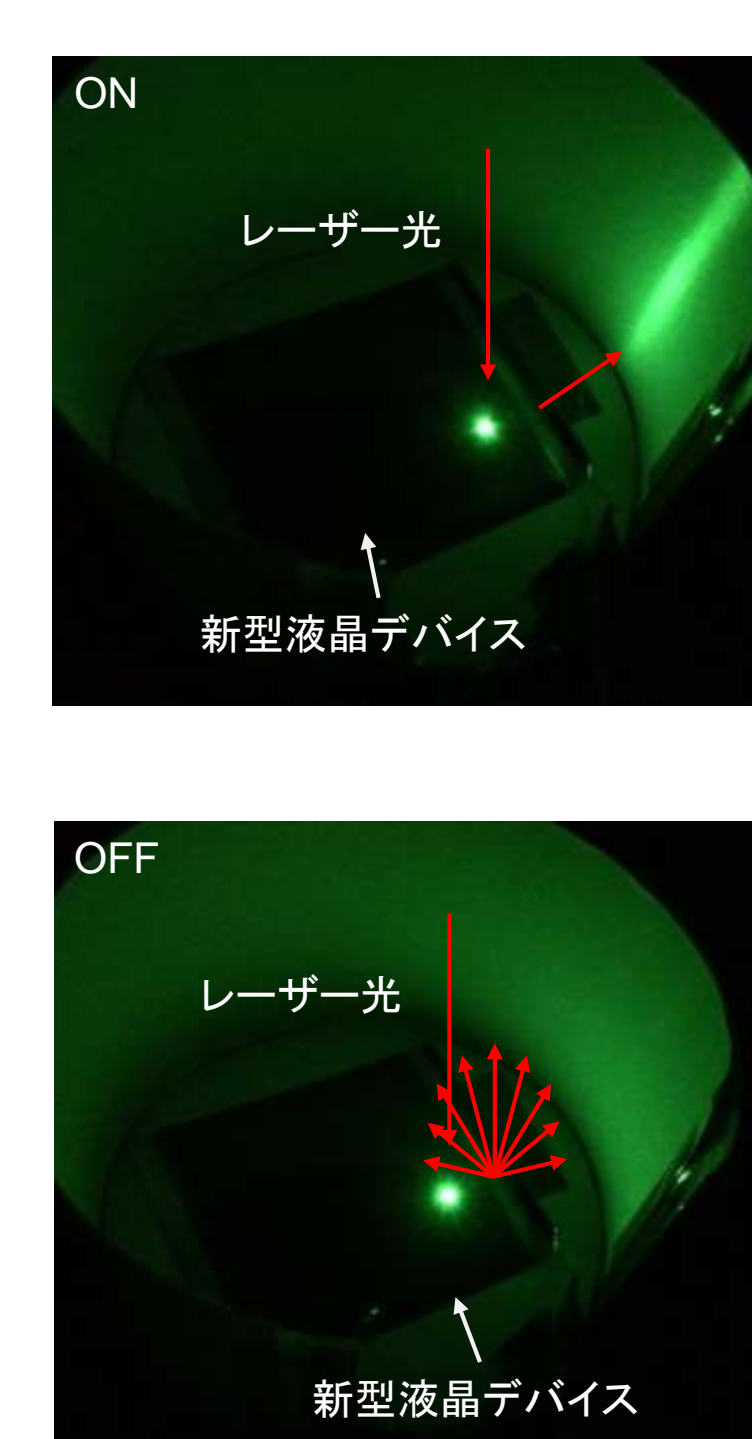


参考図を左に、諸元を下表に示す。本設計で前提としたCIGS薄膜太陽電池は太陽距離5.2AUにおいて、約9%の変換効率となる。この効率が以前の検討値よりも上がっているため、セイルのサイズも一回り小さいものとなった。

サイズ	43.5 × 43.5 m
質量(先端マス含)	203 kg
先端マス	10 kg × 4
慣性モーメント(z軸回り)	9.8 × 10 <sup>4</sup> kg・m <sup>2</sup>
ポリイミドフィルム膜厚	10 μm
有効発電量	5.6 kW (太陽角 0 deg, 太陽距離 5.2 AU)
段数	43.5
折り幅	450 mm

### 新型液晶デバイスの開発状況

新型液晶デバイスの再設計、再試作を行った。



新型液晶デバイスは、表面に入射する光を、通電すると(ON)入射角より大きな反射角で鏡面反射させ、通電しないと(OFF)拡散反射させる薄膜デバイスである(左図)。ON, OFFの制御で、光圧を利用したセイル面内、面外のトルクが生み出せ、探査機の姿勢制御や外乱相殺が可能になる。制御性能向上のため、レイトレーシングによるデバイス構造の最適化を行い(右図)、改めて試作を行っている。完成したものに対して反射分布の測定を行い、実測による性能評価を行う予定である。また、デバイス内の液晶がその中を通過する光(偏光)に与える影響を調べており、その理解に基づいた、更なる性能向上を目指した設計を行う予定である。

## セイル構造・機構

### 50m級試作ソーラー電力セイル膜面の収納展開試験

昨年度までに、セイルの大型化とIKAROSの軌道上結果を考慮し、膜面収納方法の研究開発、展開機構の設計変更等を行った。展開機構のIKAROSからの現状の主な変更は以下の通りである。

- 打ち上げ振動によるセイル脱落防止のため収納部フランジの幅に余裕を設ける。そのため、収納状態において回転ガイドがセイル膜面を押さえつけない。
- 1次展開終了時のベタル横ずれ防止のため、ベタル中心部に貫通穴を設けてピンで本体に固定する。そのため、回転ガイドの展開後にピンを分離することによって2次展開を開始する。

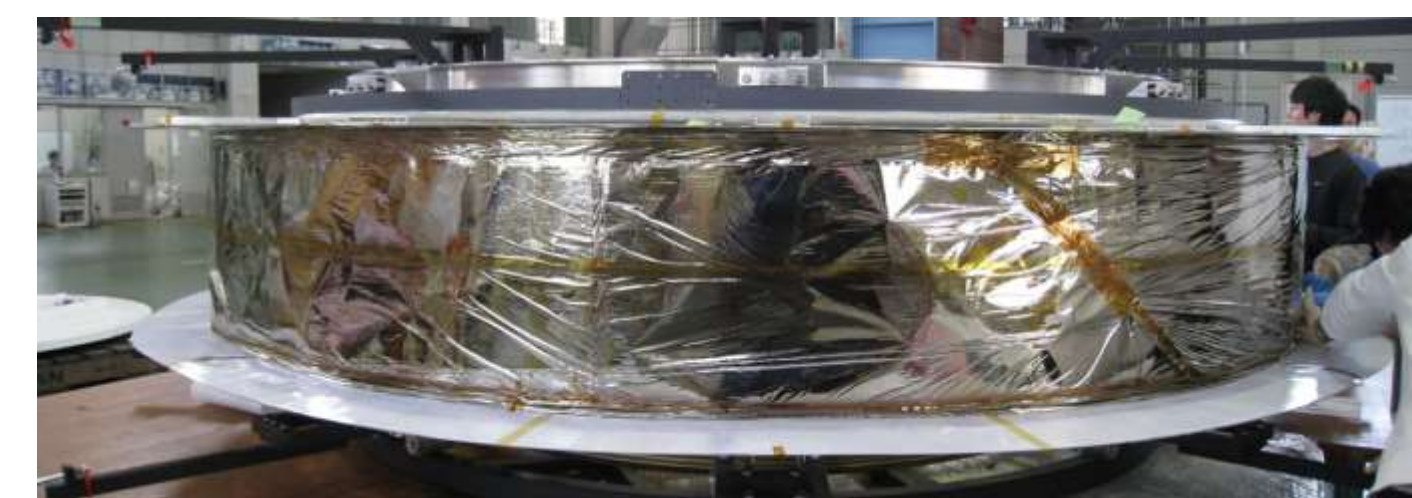
膜面収納方法と展開機構の有効性を検証するため、試作50m級セイル1ペタルと試作大型展開機構を用い、セイル1ペタル収納試験、1次展開繰り出し試験、2次展開トリガー試験を2015年3~4月にかけて実施した。

#### (1)1ペタル収納試験

厚みのある多層膜の内側を意図的にたませ、巻き付け厚さと周方向の位相を予測、管理しながら巻き付ける収納方法によって、蛇腹折りした50m級試作1ペタルを2つ折りしたのに対して2度の巻き付け試験を実施し、治具等に改良すべき点があったものの、巻き付けは破綻なく可能であることを確認した。



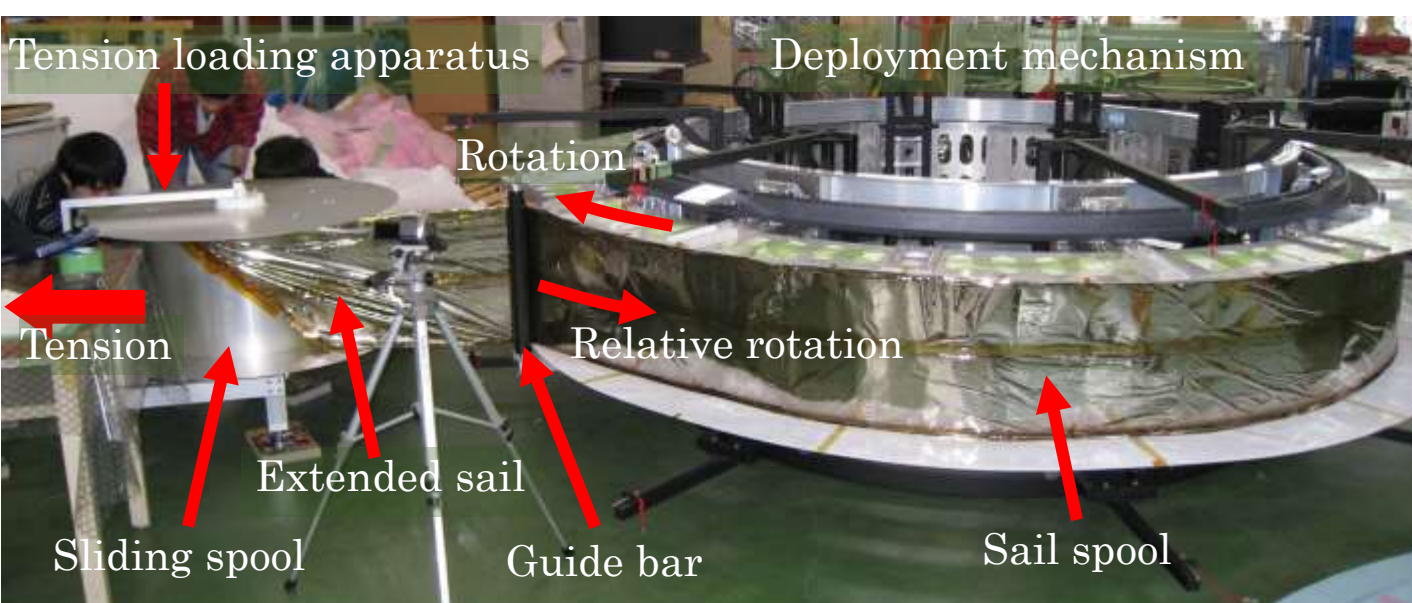
1ペタル収納試験概要



1ペタル収納結果

#### (2)1次展開繰り出し試験

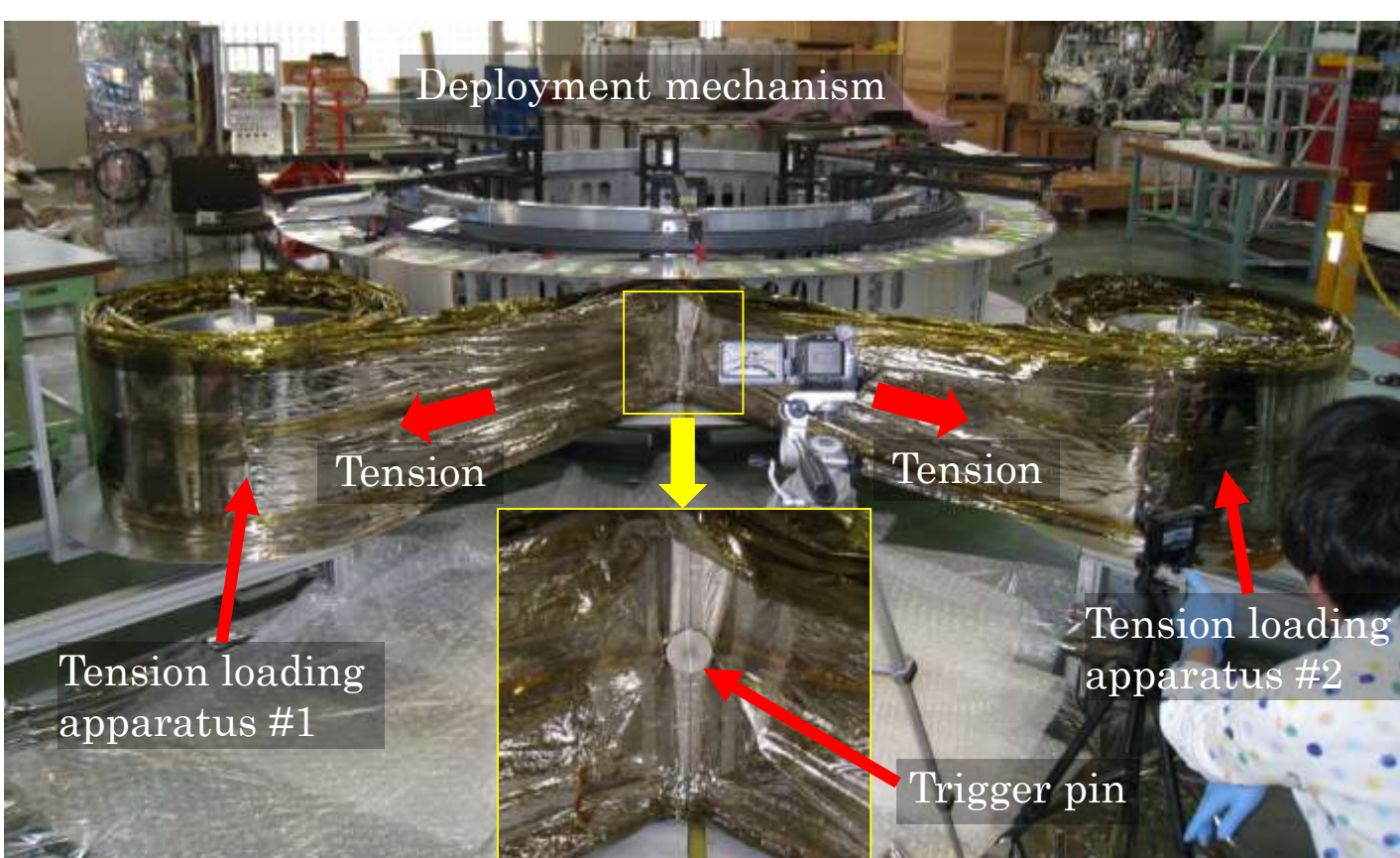
50m級セイルでは、IKAROSと異なり、繰り出し中のセイルの張力とスピンドルを一定範囲に保つため、途中でスピンドル調整が必要となる。そのため、数値シミュレーションによって7回のスピンドル調整を伴う繰り出しシーケンスを作成した。試験は、収納されたセイルの先端を張力負荷装置のスプールに巻き付け、重りや遠心力相当の張力を負荷、調整し、展開機構と回転ガイドを逆回転させてベタルを準静的に繰り出すことによって実施した。その結果、張力負荷装置の摩擦などの問題を除いて、膜面が滑らかに繰り出されることを確認した。



1次展開繰り出し試験概要

#### (3)2次展開トリガー試験

蛇腹折りした試作1ペタルの両端を2台の張力負荷装置に巻き付け、ベタル中央の貫通穴にピンを通し、ピン先端を展開機構に取り付けたNEAに結合し、NEAを動作させてピンが引っかかることなく分離されるかどうかを観察した。当初、ピンとNEAカプラーの結合部に段差があり、多層膜の貫通穴の縁に引っかかる結果となったが、ピンの形状改良と貫通穴の径拡大により、引っかかることなく分離できることを確認した。



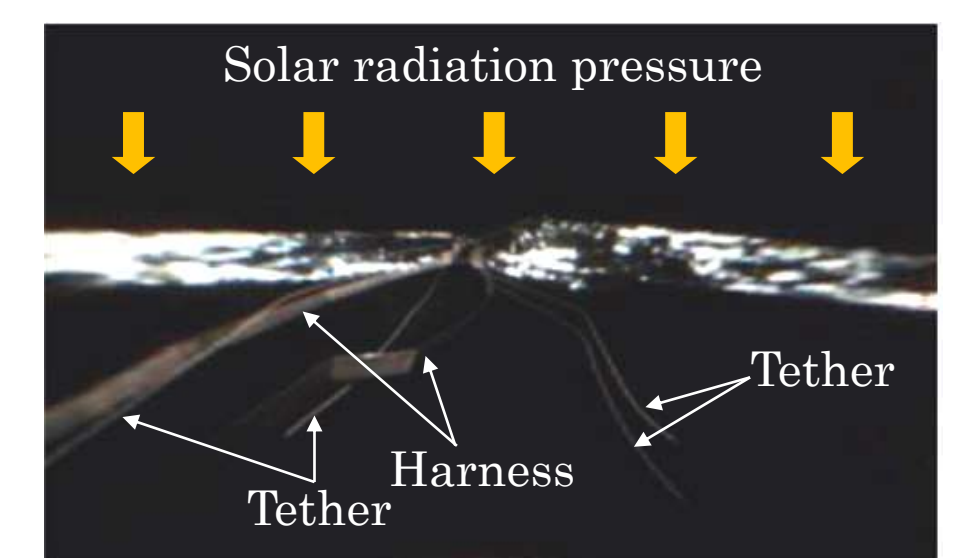
2次展開トリガー試験概要

### ソーラー電力セイル膜面の展開形状解析と設計方針

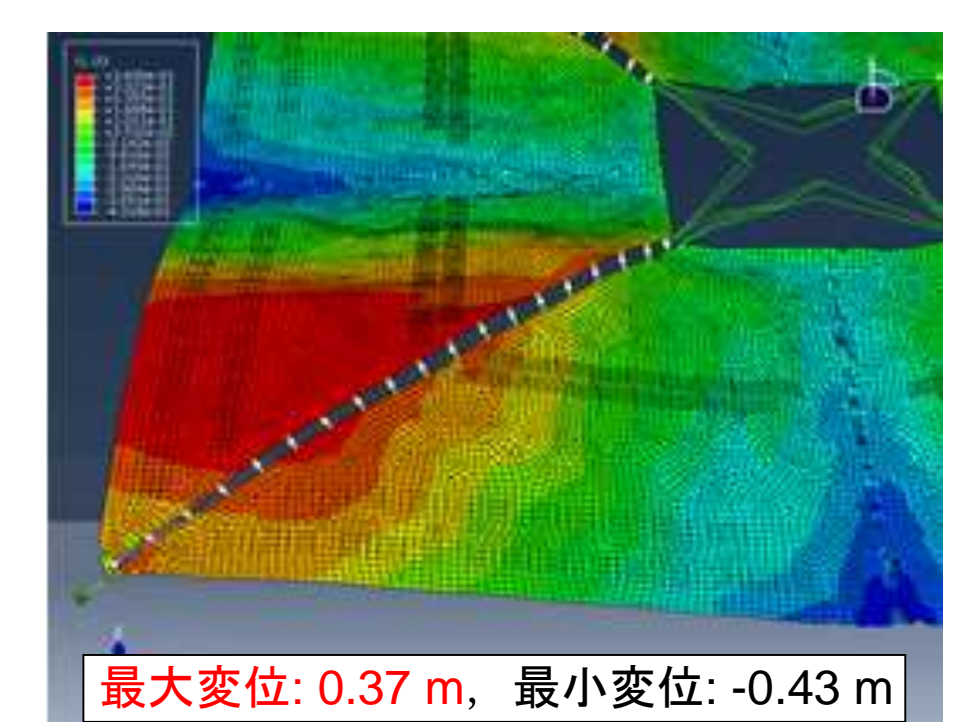
IKAROSでは、セイル展開後、太陽輻射圧に抗して上に反った展開形状や高剛性、内側テザーのたるみが観察され、変形したセイルが太陽輻射圧を受けて発生するトルクによるスピンドル変化や姿勢運動への影響が問題となった。これまでに、その主な原因は薄膜太陽電池セルの反りであると推定し、多粒子近似法と非線形FEMによる展開形状解析を行い、メカニズムを検討した。その結果、IKAROSでは、主にセルが周方向に変形してピラミッド型の形状になったことにより、セイルが上方にたわんで剛性が増大したものと考えられる。

薄膜太陽電池セルがほぼ全面貼付される50m級セイルでは、長期運用に支障のないセイル展開形状を確実に実現するため、以下のセイル構造・機構の設計を検討している。

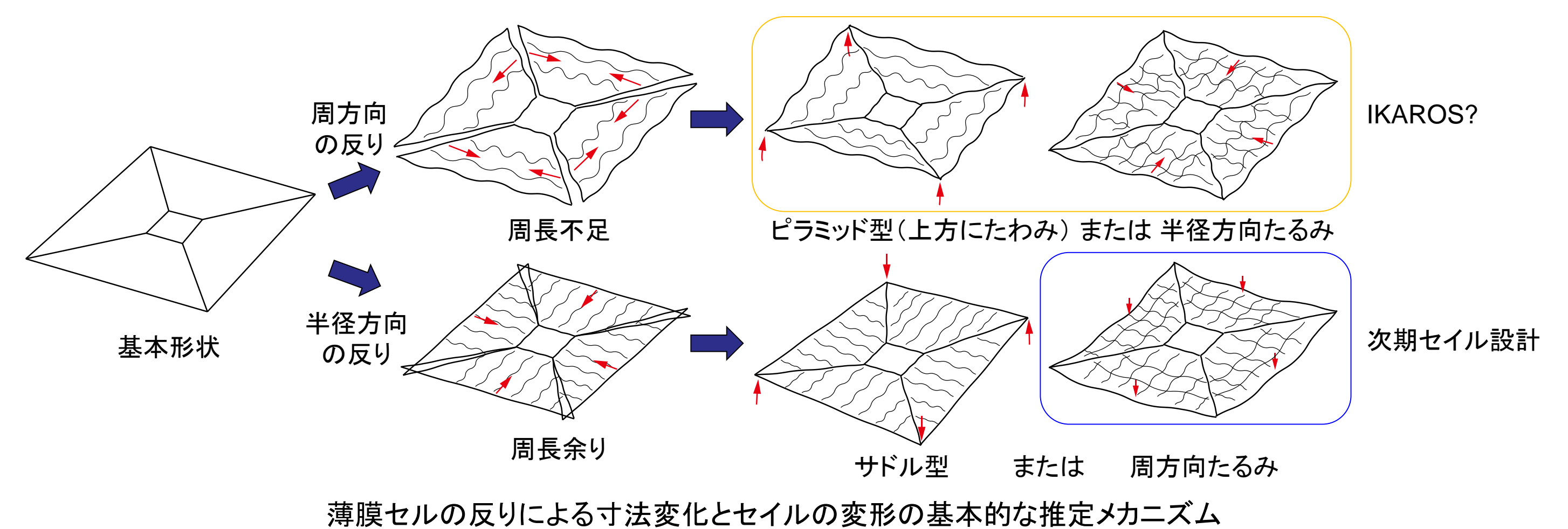
- 薄膜セルの反りは不可避なため、反りが半径方向にのみ生じるように、薄膜セルの構造や接合法などを工夫する。
- 太陽輻射圧トルク低減のため、IKAROSで設けた周長余裕は最低限とし、ペタル間の段差や周方向のたるみを低減する。
- セイルと本体間の荷重パスを確保するため、内側テザーのたるみやハーネスの縮みを防止するための機構や構造を導入する。



IKAROS低スピンドル時カメラ画像



対応する低スピンドル、周方向反り導入時の展開形状FEM解析結果



### 展開機構と構体の結合法

展開機構は八角形のハニカムサンドイッチ構体の外周に断熱スパーを介して結合される。軽量化のため展開機構の寸法を可能な限り縮小しつつ、強度剛性を考慮した構体との結合法を検討した結果、展開機構の主金具を構体角部に結合する方針とした。組み立て作業性について今後検討が必要である。

