

P-260 木星トロヤ群探査に向けた大型ソーラー電力セル膜面展開構造・機構に関する検討

○奥泉信克, 白澤洋次, 森治, 佐藤泰貴, 松永三郎, 名取通弘(JAXA), 古谷寛, 坂本啓, 山浦弘(東工大), 宮崎康行(日大), 井上遼太(NEC), 菊池隼仁(東大), 水森主(東海大), 北尾啓(青学大), 佐藤剛志, 西澤匡士, 横松卓, 倉重宏康(東工大)

概要

次期ソーラー電力セル探査機の先行実験として打ち上げた小型実証機IKAROSでは、セルの遠心力展開や太陽光圧による加速などに成功したが、開発と軌道上実験を通じて、収納時のセルの打ち上げ振動耐性、1次展開後のセル形状の対称性、2次展開時の4ペタルの展開同期性、展開後のセルの形状や剛性などに課題があることが明らかとなった。また、次期ソーラー電力セル探査機では、IKAROSの10倍以上の面積のセルのほぼ全面に薄膜太陽電池セルを搭載する。そのため、セル膜面の収納展開構造・機構について様々な改良が必要である。昨年度までに、再現性のあるセル収納法の開発、セル収納装置の改良、セルのロンチロック機構の追加、2次展開の展開メカニズムの解明、薄膜太陽電池セルの反りによる展開形状への影響の検討、ブームの弾性によって展開する膜面展開構造の概念検討や展開実験などを行ってきた。今年度は主に、薄膜太陽電池セルの反りによるセルの剛性増加メカニズムの検討、セルのロンチロック機構の振動試験による有効性検証、セルの展開後の形状や張力分布の改善方法の検討、ブームによる膜面展開構造の展開実験などを行っている。

セル収納展開機構の改良

IKAROSセル展開機構における課題

IKAROSでは、開発中の正弦波振動試験において、折り畳みと巻き付けによって収納されたセルが変形し、機軸方向への「こぼれ」及び周方向の「緩み」の発生が確認された。それらの防止のため、フライトモデルではセルの帯を括る「タグ」(三つ折りの短冊状フィルム)を多数取り付け、振動耐性を向上させた。しかし、展開時にタグがスムーズに外れず、展開を妨げる危険性を有していた。

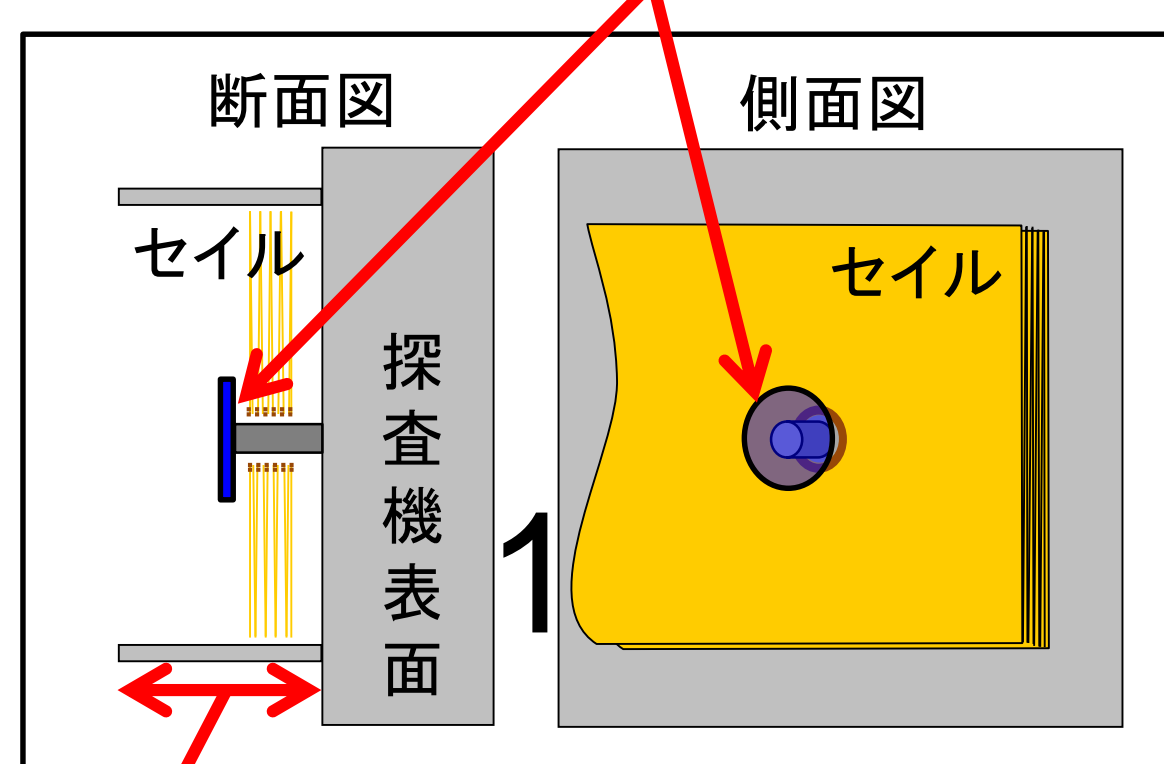
IKAROSセル展開機構からの変更項目

- セル収納部フランジ幅を拡張し、機軸方向のセルの「こぼれ」を防止する。
- セル展開時までセル中心部を保持するロンチロックを新たに設け、周方向のセルの「緩み」を抑える。これは1次展開完了後のセルの横滑り防止、2次展開のトリガーを兼ねる。
- タグは使用しない。
- 回転ガイドは収納状態でセルを押さえ、1次展開のセル繰り出し機能のみとする。

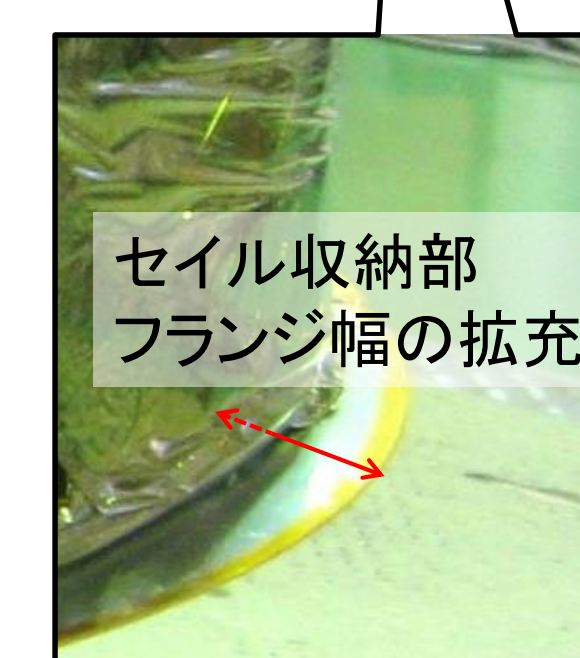
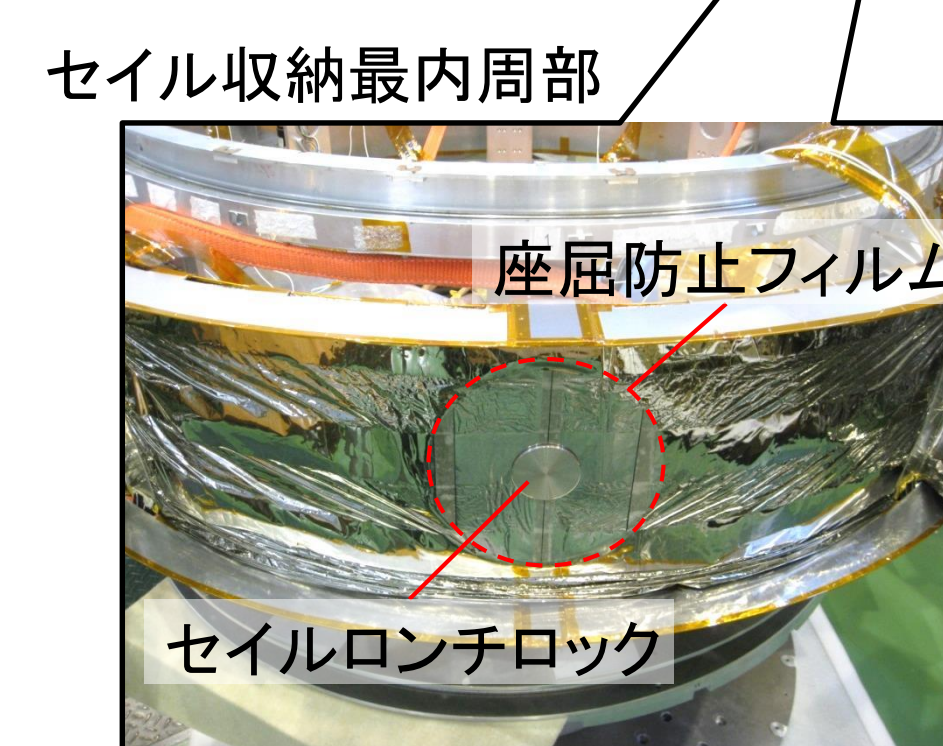
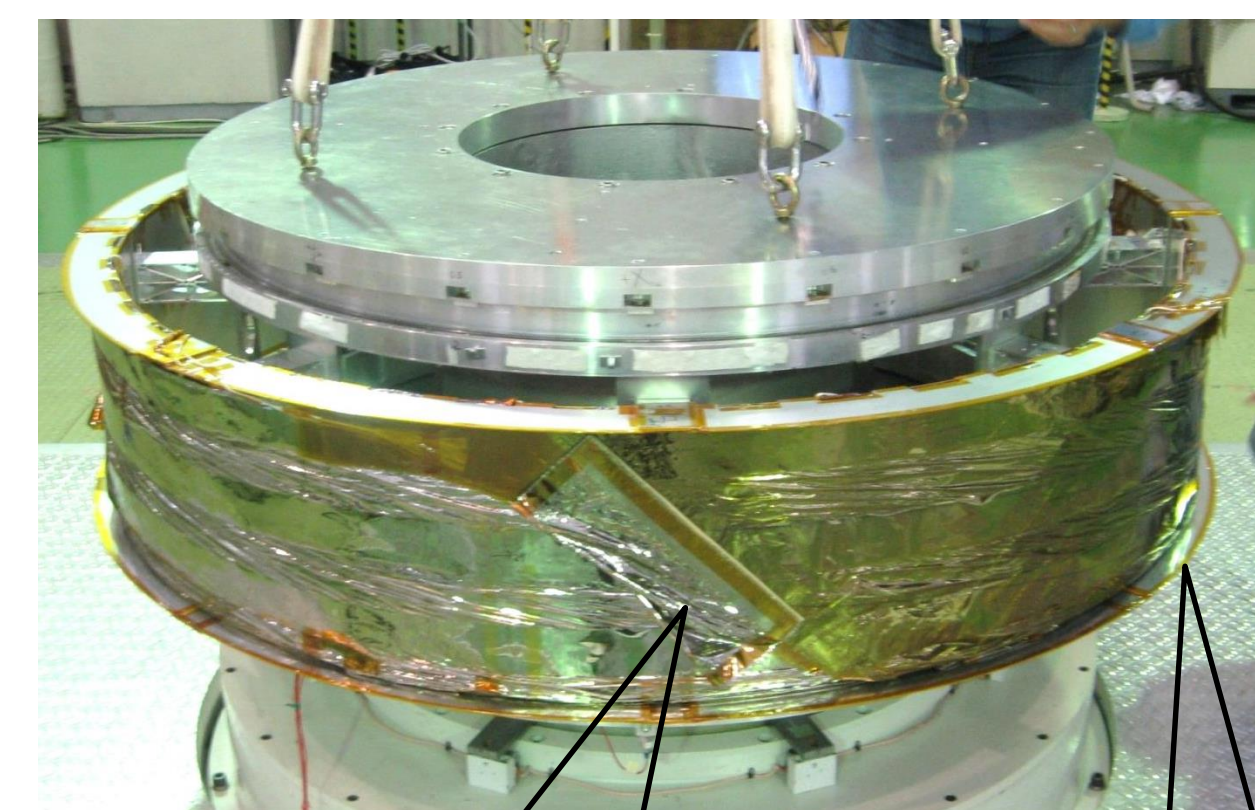
振動試験による変更項目の機能検証

左記の変更項目を反映し改修したIKAROS BBM展開機構を用いてセルを収納し、IKAROSと同じ条件で振動試験を実施した。従来、タグを使用しない場合にはセルのこぼれ・緩みが発生していた条件でも、セルの緩みは発生せず、わずかにこぼれが発生する程度であり、変更項目が有効に機能していることが確認できた。

セルロンチロック(90度毎に配置)
・蛇腹状のセルに空けた穴に通してピン止めする
・セルの周方向の緩みを防止する



フランジ幅の拡張
・機軸方向のセルのこぼれを防止する



セルの展開形状の検討

セルの展開形状と剛性の解析による検討

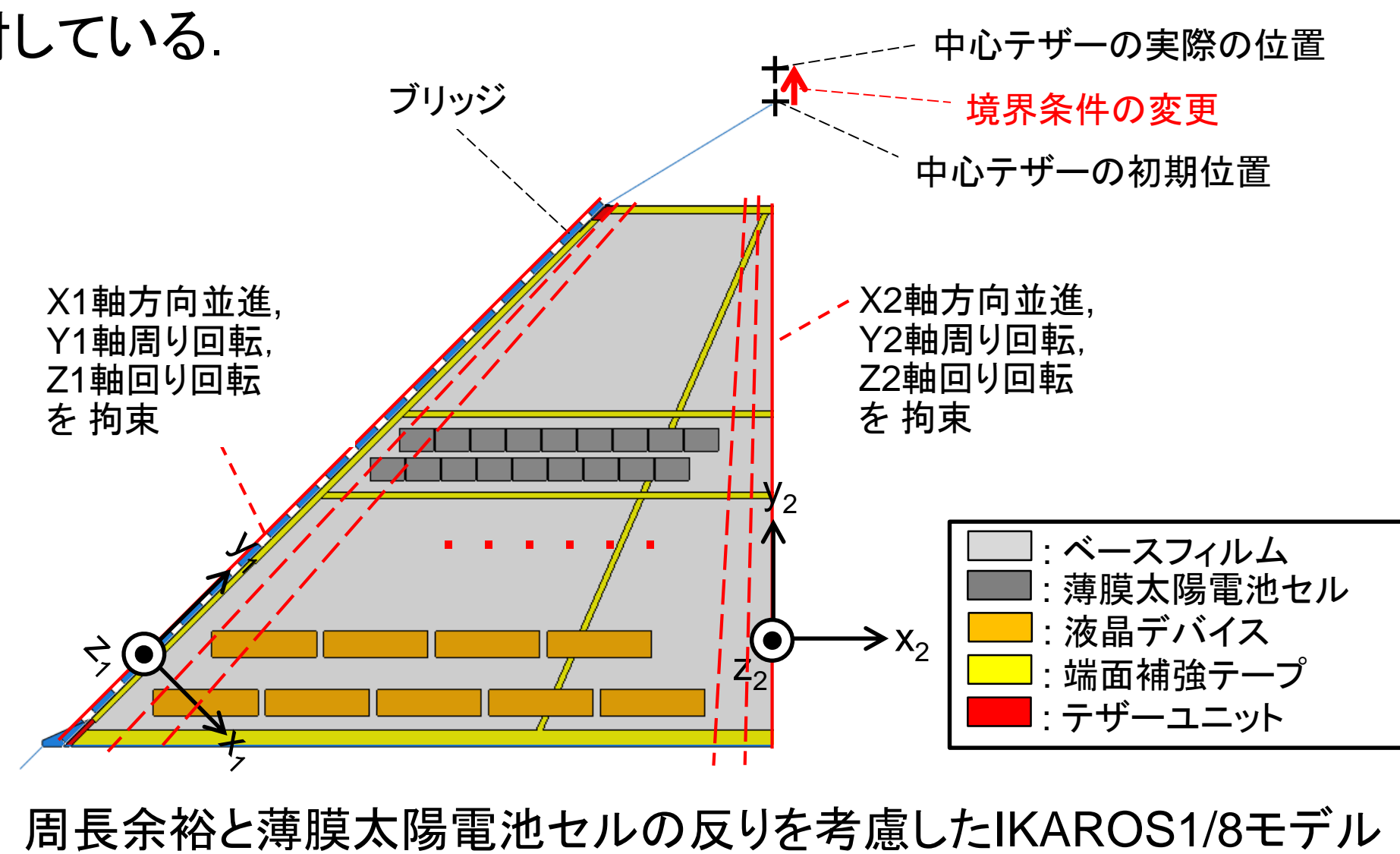
IKAROSでは、スピンドルが低下してセルを展開する遠心力が減少しても、太陽光圧に対してセルがあまりたわまないという想定外の現象が確認された。このような高い面外剛性を持つ要因を解明するため、汎用非線形有限要素コードAbaqusによる展開形状解析を行っている。昨年度までに、セルに搭載された薄膜太陽電池セル等の反りを考慮すると、遠心力が小さくてもセルのたわみが抑えられることを確認した。

今年度は、セルの曲げ剛性増加のメカニズムを詳細に検討した。計算量低減のため、変形の対称性を仮定して1/8モデルで解析を行った。

まず、太陽輻射圧と遠心力を負荷して変形解析を行い、3通りの薄膜太陽電池セルの反りの大きさに対するペタル外周の最大たわみ量を計算し、反りの増加に伴う最大たわみ量の減少率を求めた。

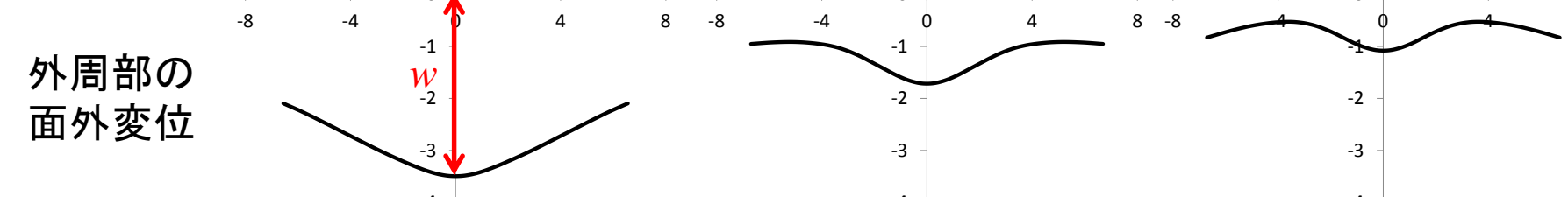
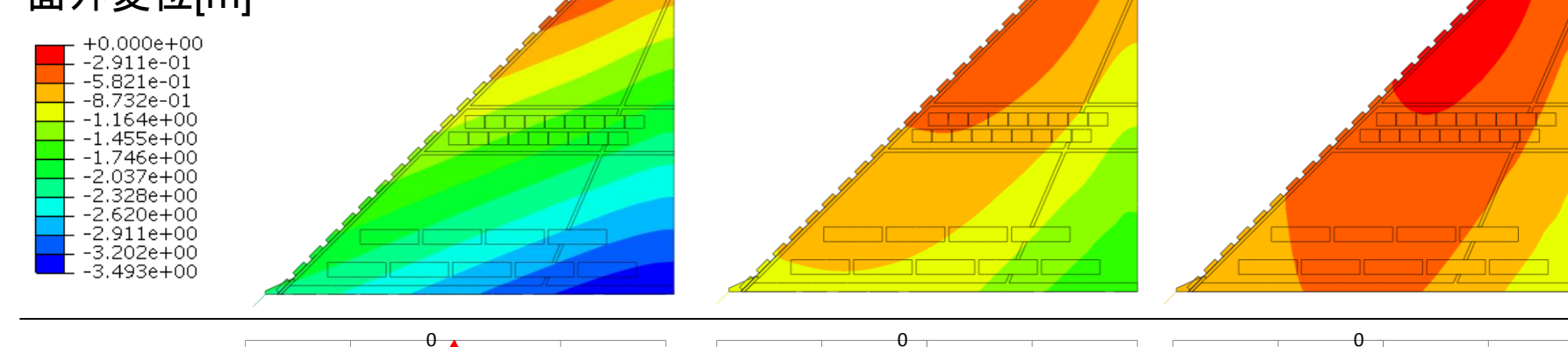
次に、太陽輻射圧を除いて反りのみを与えたペタルの固有値解析によって、剛性の増加率を評価した。その結果、反りによる剛性の増加では、太陽輻射圧負荷後の最大たわみの減少率を説明できないことがわかった。

変形解析結果を参考にペタル外周部の面外変形モードを考えると、反りの増加によって中央部のたわみの小さい変形モードに移していることがわかる。そのため、面外変形モード、周長余裕、最大たわみ量の減少率の関係を検討している。



周長余裕と薄膜太陽電池セルの反りを考慮したIKAROS1/8モデル

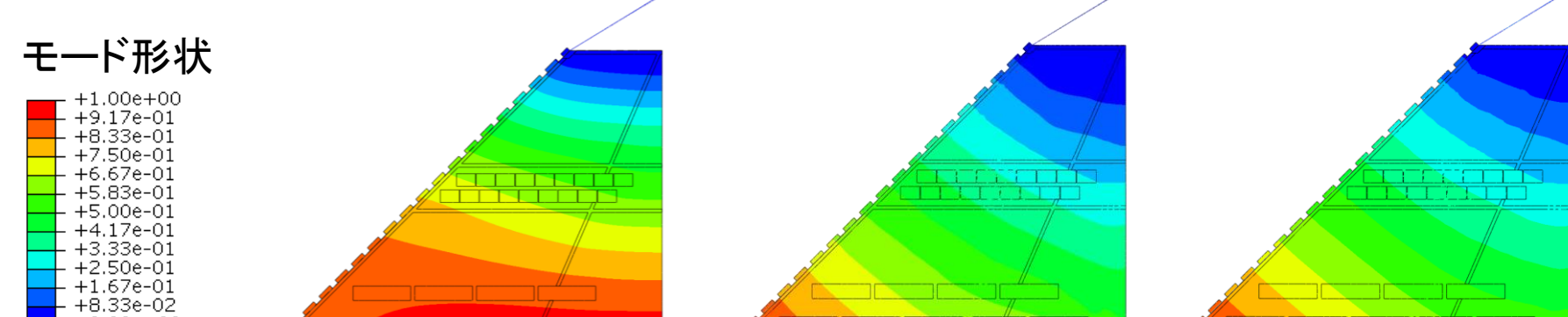
面外変位[m]



最大たわみ w [m]	3.5 m	1.72 m	1.1 m
$\bar{w} (= w/w_0)$	1.0	0.49	0.31

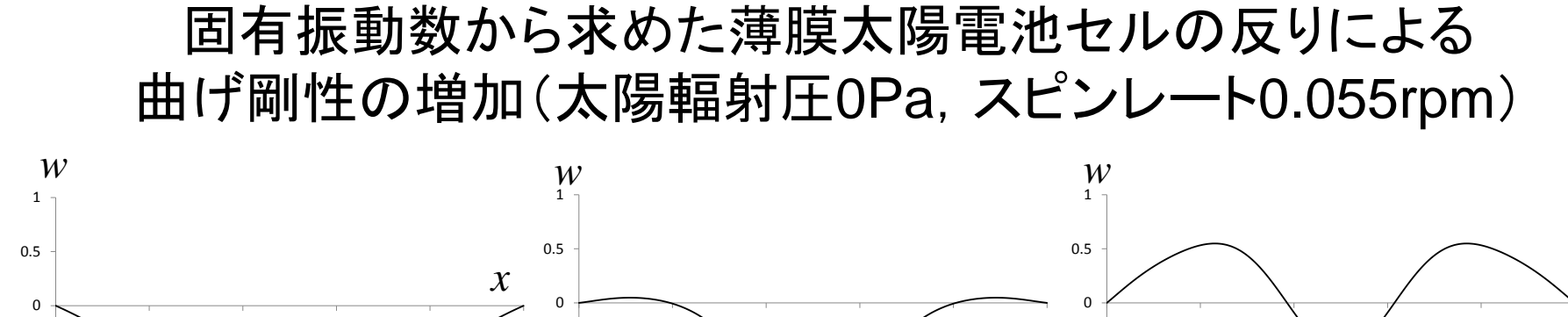
曲げモーメント (a) $M = 0.0 \text{ Nm}$ (0% of the actual value) (b) $M = 9.9\text{e-}5 \text{ Nm}$ (10% of the actual value) (c) $M = 2.0\text{e-}4 \text{ Nm}$ (20% of the actual value)

薄膜太陽電池セルの反りと最大たわみの関係 (太陽輻射圧 $4.5\text{e-}6 \text{ Pa}$, スピンドル 0.055 rpm)



f (振動数)	$8.7\text{e-}4 \text{ Hz}$	$1.1\text{e-}3 \text{ Hz}$	$1.1\text{e-}3 \text{ Hz}$
$\bar{f} (= f/f_0)$	1.0	1.2	1.3
$\bar{D} (= D/D_0 = \bar{f}^2)$	1.0	1.5	1.7
\bar{D}/\bar{w}	1.0	0.73	0.52

固有振動数から求めた薄膜太陽電池セルの反りによる曲げ剛性の増加 (太陽輻射圧 0 Pa , スピンドル 0.055 rpm)

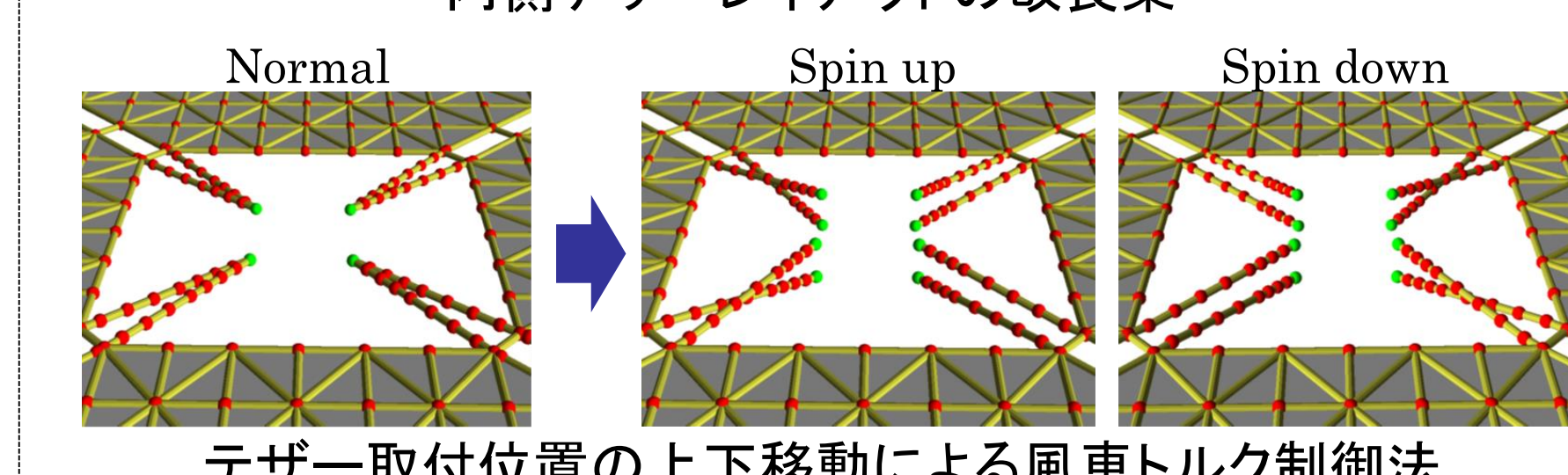
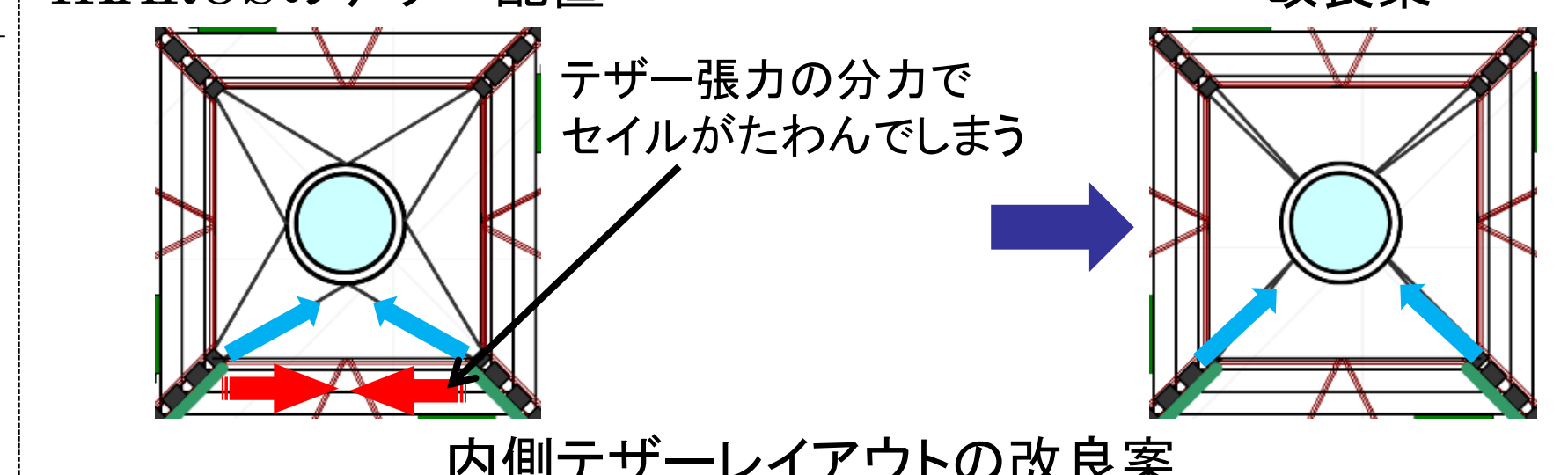


薄膜太陽電池セルの反りとセルの面外変形モード

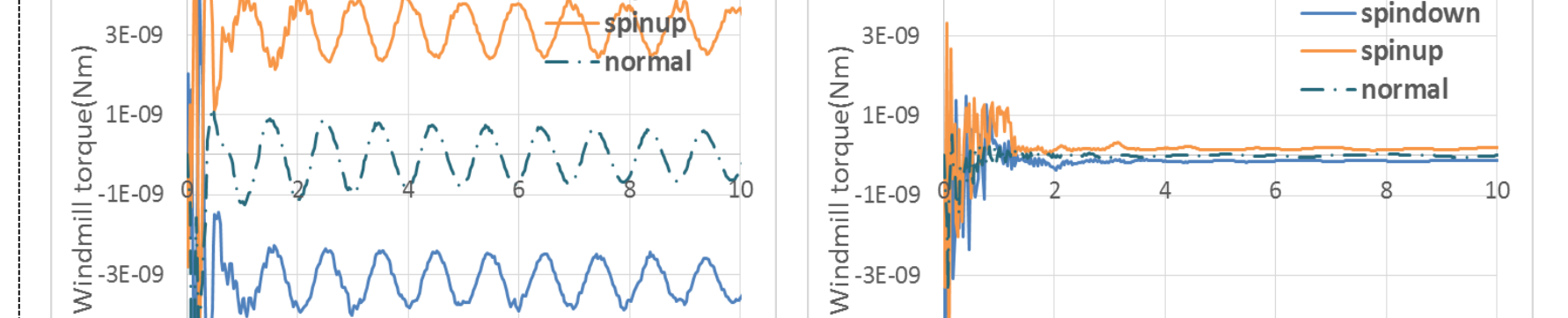
セル展開形状の制御法の検討

IKAROSでは、展開後のセルの形状が複雑な非対称形状となり、太陽輻射圧によって風車トルクが発生し、スピンドルが自然に増減してしまう問題が生じた。薄膜太陽電池を全面に搭載する次期セルでは、その曲率によりさらに風車トルクが発生する可能性がある。そこで、中心テザーの取付位置の移動によってセルの展開形状を変更し、風車トルクを制御する方法を検討している。

IKAROSのテザー配置



テザー取付位置の上下移動による風車トルク制御法



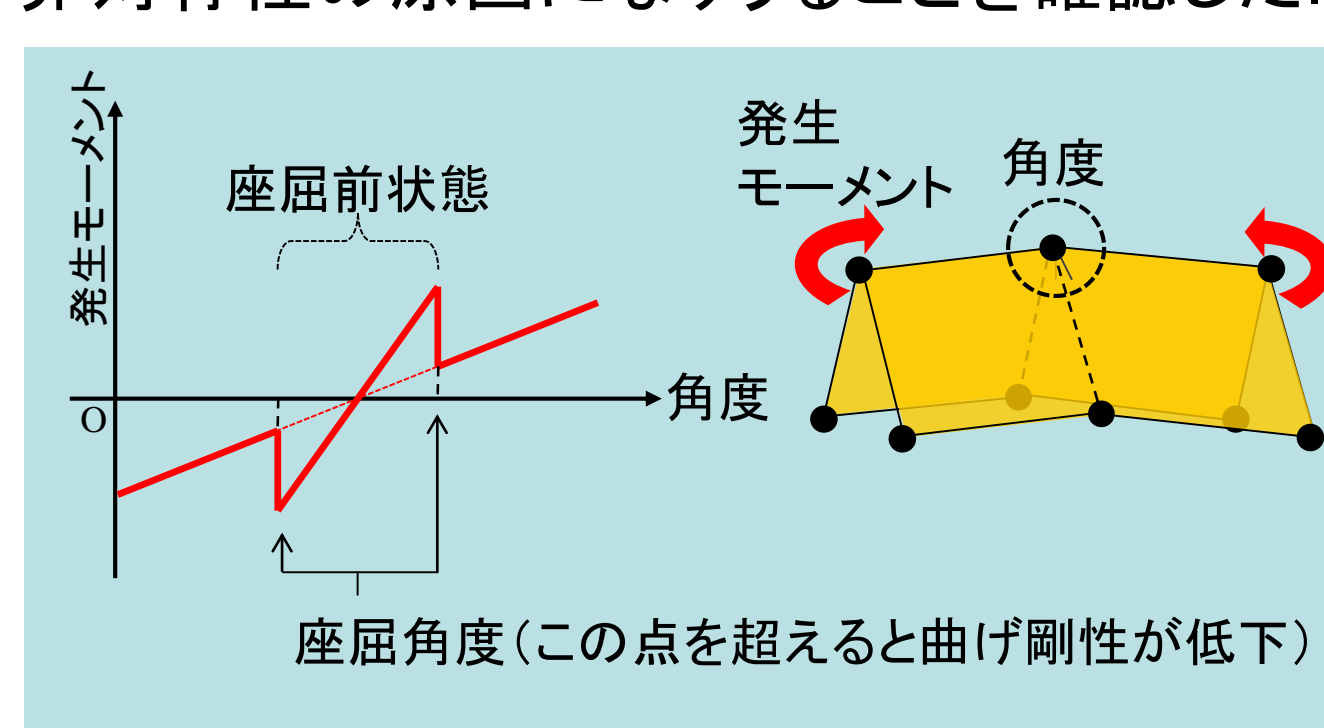
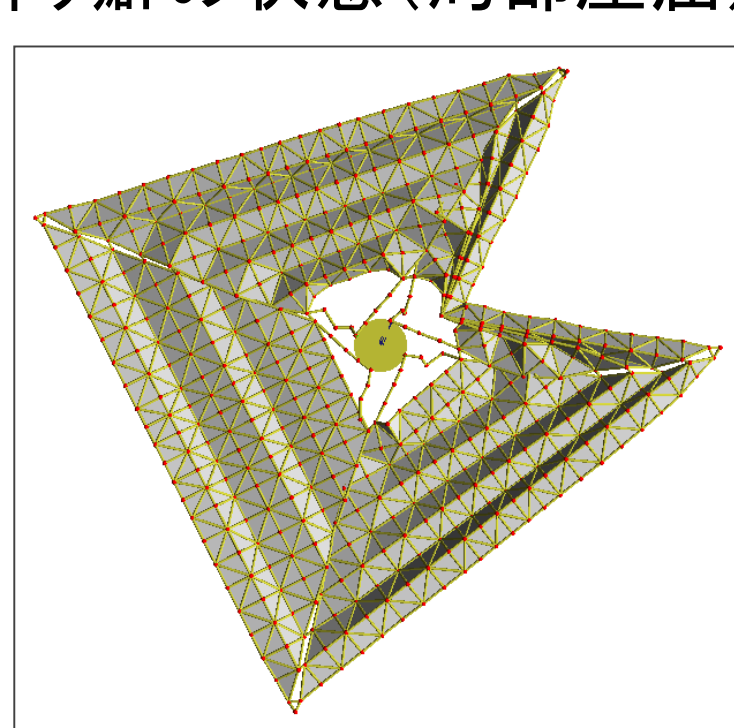
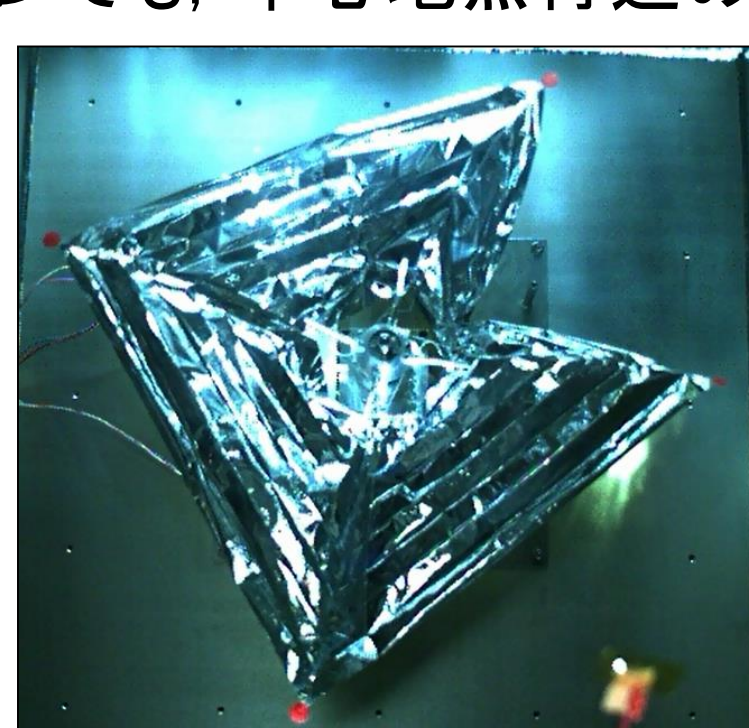
薄膜太陽電池のたわみ角: 0 deg 薄膜太陽電池のたわみ角: 48 deg

セル搭載の薄膜太陽電池のたわみ角に対する風車トルク制御量のシミュレーション (小型真空槽実験サイズのモデルの場合)

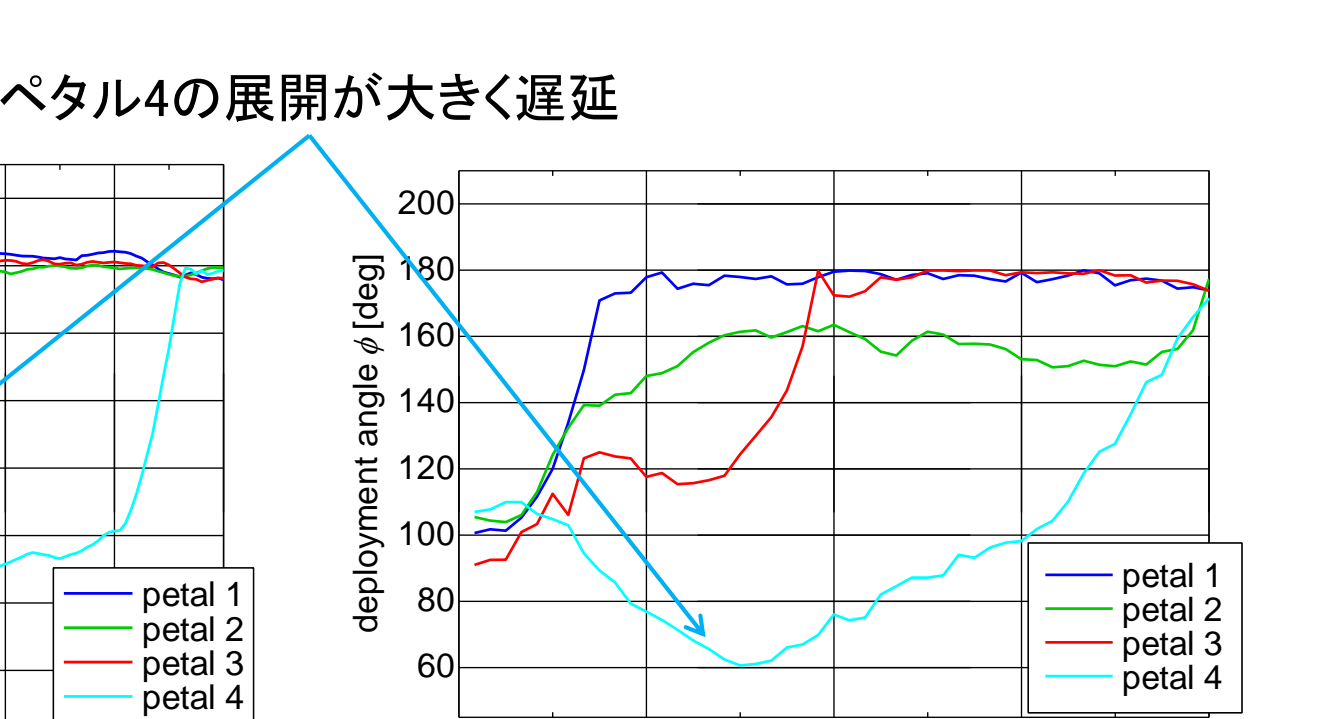
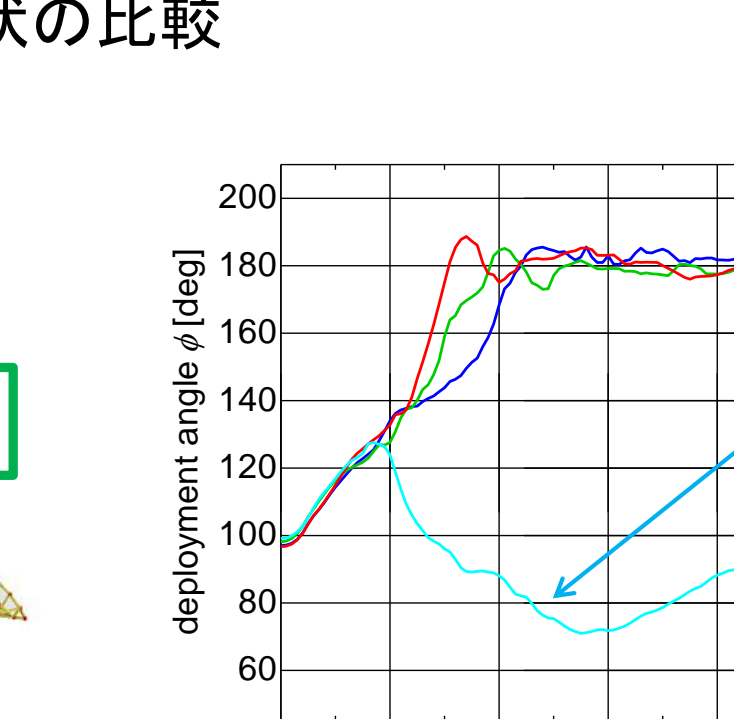
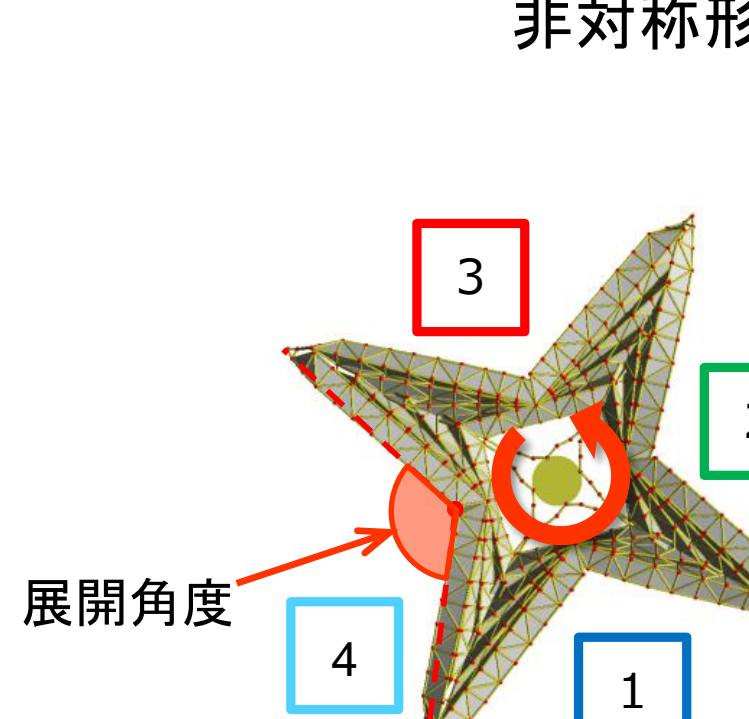
セルの展開挙動の検証

2次展開時の非同期展開挙動の検討

小型モデルの真空槽展開実験において、膜面を変形させて中心地点以外に折り癖のある状態から展開させると、非同期展開が起こること、折り数が増加すると非同期展開が起こりやすくなることを明らかにした。また、折り目の力学特性を考慮した多粒子系モデルのシミュレーションでも、中心地点付近の折り癖の状態(局部座屈)が非対称性の原因になりうることを確認した。



回転パネによる、局部座屈する曲げ剛性のモデル



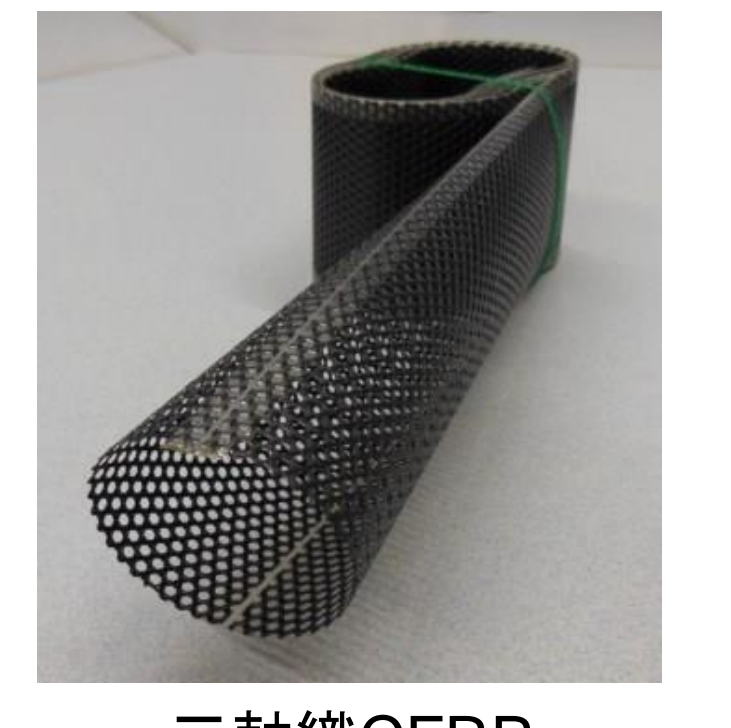
展開角度の時刻歴

ブームによる膜面展開構造の研究

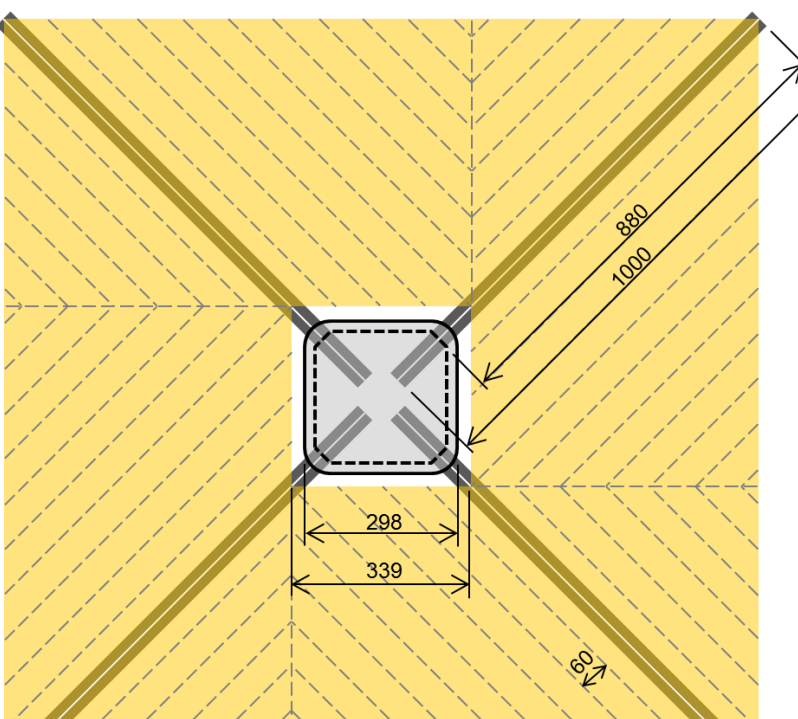
三軸織CFRP円筒型ブームを用いた膜面展開構造物

遠心力展開型構造物は、大型化には適していると考えられるが、構造の安定性に問題があり、姿勢制御などにも制約を与えるため、小型衛星用デオービット膜や薄膜太陽電池パドルなどにも応用可能なブーム展開型膜面構造物の研究も行っている。

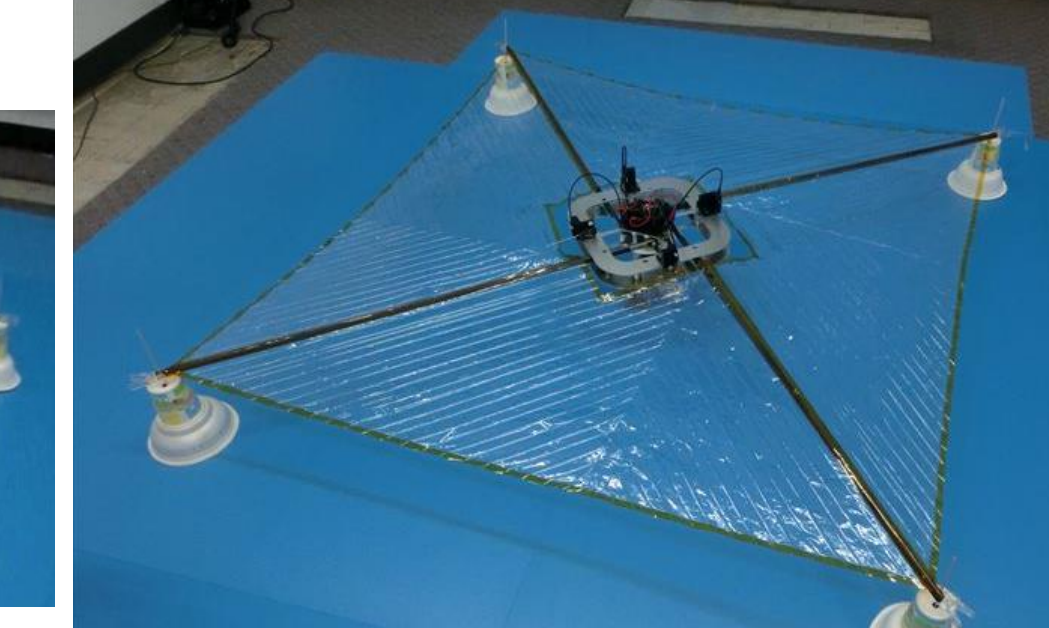
ブームには三軸織CFRP製の2つの半円状断面ブームを貼り合わせた円筒型ブームを用い、回転二重波折りを回転対称形状にアレンジした膜面によるブーム・膜面複合展開構造物を提案している。円筒型ブームは、2つの半円状ブームをフラットに潰すことによって巻き付け収納でき、展開後の剛性や形状精度が比較的高い。膜面は、ブームと一体で折り畳み・巻き付け収納される。これまでに、ブーム長1m、ブーム先端直径40mmおよび13mmの地上展開実験モデルを作成し、ブーム先端をホバークラフトで支持する重力補償による展開実験、FEMによるブームの展開解析などを実施し、展開可能性や展開挙動について検討している。



三軸織CFRP円筒ブーム



展開構造概要



収納状態

展開途中

展開状態