

A3 真空槽を用いたスピン型ソーラーセイルの展張形状推定

Stretched shape Estimation of Spin-type Solar sail with Vacuum chamber

菊池 隼仁（東大・院），水森 主（東海大・院），寺元 佑貴（東大・院），

大野 剛（東大・院），松本 純（東大・院），白澤 洋次（JAXA），

森 治（JAXA），川口 淳一郎（JAXA），ソーラーセイル WG 構造部会（JAXA）

Junji Kikuchi (Tokyo Univ.), Tsukasa Mizumori (Tokai Univ.), Yuki Teramoto (Tokyo Univ.),

Go Ono (Tokyo Univ.), Jun Matsumoto (Tokyo Univ.), Yoji Shirasawa (JAXA),

Osamu Mori (JAXA), Junichiro Kawaguchi (JAXA), Solar sail WG Structure Team (JAXA)

1. 緒言

ソーラーセイルは宇宙空間で薄膜フィルムを展開することで、太陽光を利用して姿勢制御や大面積での太陽光発電を可能とするといった特徴を持っている。近年、ソーラーセイル技術は盛んに研究されており、2010年5月に打ち上げられた小型ソーラー電力セイル実証機”IKAROS”（図1左）は世界で初めての技術実証を行い、ミッションフルサクセスを達成した。

スピン型ソーラーセイルとは膜面の展開方法がスピンの遠心力を利用するタイプの総称であり、利点としてマスト型ソーラーセイルに比べ、膜面が大型化した際にも軽量で設計を行うことができる。一方、遠心力のみで展開を行っていることから、膜面形状がスピンレートに依存し、形状推定が困難という欠点がある。

小型ソーラー電力セイル実証機”IKAROS”、そして木星トロヤ群小惑星サンプルリターンを計画している、2020年代打ち上げ予定の次期ソーラー電力セイル（図1右）も同様にスピン型を採用する予定である。



図1 小型ソーラー電力セイル実証機”IKAROS”（左）、次期ソーラー電力セイル（右）

2. 小型ソーラー電力セイル”IKAROS”

2.1 コンフィギュレーション

IKAROSのコンフィギュレーション（図2）は、厚さ $7.5\mu\text{m}$ のポリイミドフィルムを用いた一辺約14m、対角長さ20mの正方形形状である。ペタルと呼ばれる台形膜4枚を繋げた設計となっており、それぞれのペタル間をブリッジ、本体とセイル間はテザーを用いて繋いでいる。約0.5kgの先端マスを各正方形頂点に1つずつ配置することで遠心力を発生させ、ノミナルスピンレートを1rpmとして展張形状を維持している。

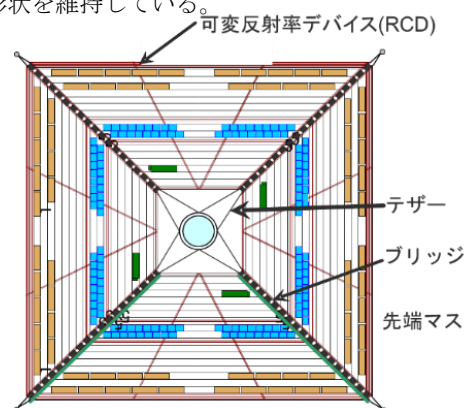


図2 “IKAROS”コンフィギュレーション

2.2 周長余裕

IKAROSには、製作誤差が存在したとしてもテザーに張力を持たせる目的から、周長余裕と呼ばれるセイル周方向への変形余裕を人為的に設けている。例えば、テザーが長い、又は、セイルが小さい、などの製作誤差がある場合、テザーが張力を持たないという状況が起きる。このとき、セイルには不感帯（図3）と呼ばれる、本体のスピンに対してセイルが追従しない領域が発生してしまう。

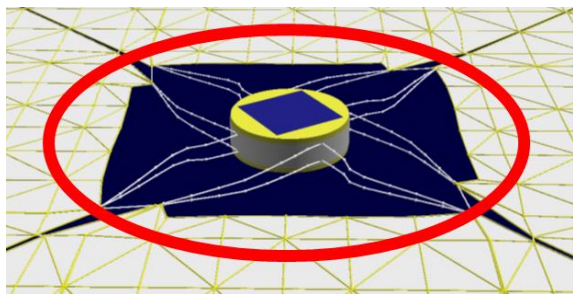


図3 本体スピンに対してセイルが持つ不感帯

イカロス運用グループはこの不感帯の発生を避けるため、人為的にセイルとブリッジの取り付け位置を操作することによりセイルの見かけ上の面積を大きくし、周方向に変形することのできる余裕(周長余裕)を持たせた。これにより、常にテザーは張力を持つ、すなわち、不感帯の発生を防ぐことができる。

2.3 風車トルク

当初、ソーラーセイルの展張形状は平面であることが予想されていたが、分離カメラと本体カメラの画像解析結果から、膜面形状は予測がされていない形状に変形していることが確認された。また、風車に風が当たった際にスピンアップの力が働く原理と同様に、ソーラーセイルが太陽からの光圧を受けることにより、膜面形状に依存してスピンレートが予測できない値に変動する”風車トルク”(図4)と呼ばれる現象が発生することも同様に確認された。

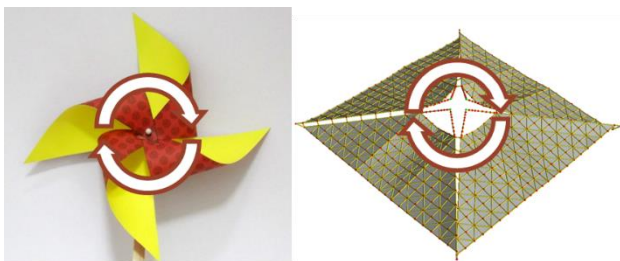


図4 風車トルク

風車トルクのような方向予測が難しいトルクは、姿勢制御や理学観測の観点で運用上悪影響を及ぼすことが十分に考えられる。今研究では、真空槽実験と簡易 FEM 解析を用いて、実験と解析の二つのアプローチから展張形状のメカニズム解明を目的とする。

3. 真空槽実験

3.1 実験方法

約 170Pa まで真空引きを行った真空槽を用いて、縮小版セイル(図5)を 3Hz で回転させることで、宇宙空間でのスピン状態を模擬し膜面形状を観察する。

セイルは一辺 450mm、厚さは IKAROS と同様

7.5 μ m のポリイミドフィルムを用いており、太陽電池などは搭載されておらず、完全な平面膜である。

実験は合計で 3 種類のセイルを用いて行った。テザー長を調節することにより、実験 1 では周長余裕を持たせず、実験 2 では持たせるコンフィギュレーションとし、実験 1,2 を比較することにより周長余裕の影響を確認する。

続いて、実験 3 では、テザーと先端マスの取り付け方法(図6,7)を IKAROS から変更すること(後述)で、展張形状を決定することが可能であることを確認した。以下の表1が各実験のコンフィギュレーション比較である。

	実験 1	実験 2	実験 3
周長余裕	無し	有り	有り
テザー長	57mm	51mm	51mm
テザー先端マス 取り付け方法	IKAROS	IKAROS	変更

表1 実験コンフィギュレーション比較

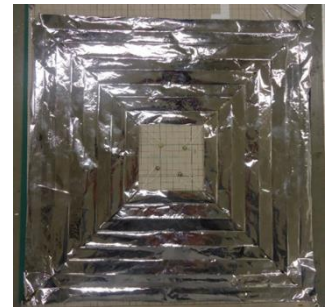


図5 縮小版セイル

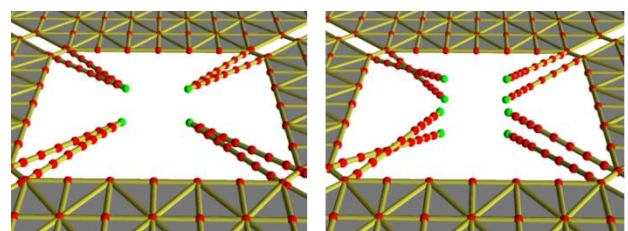


図6 テザー取り付け方法 実験 1,2(左) 実験 3(右)

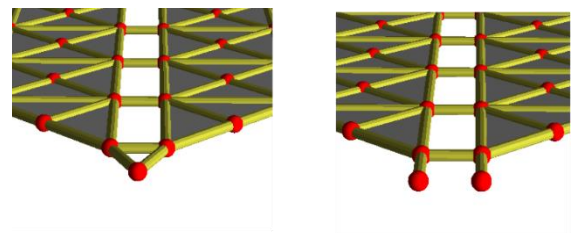


図7 先端マス取り付け方法 実験 1,2(左) 実験 3(右)

3.2 実験結果 1

実験 1 コンフィギュレーションの縮小版セイルを真空槽内でスピンさせた際の、水平方向から撮像した画像が図 6 である。図 6 より、膜面形状がほぼ平面であることが確認でき、セイルとブリッジ間に段差などは見られない。

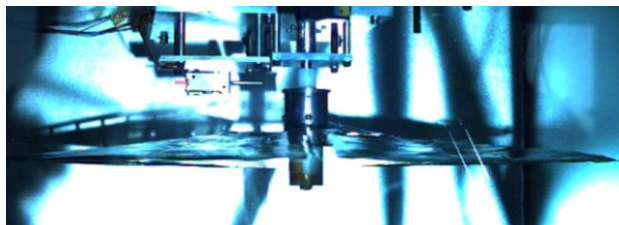


図 6 実験 1 展張形状

実験結果より周長余裕を持たせない場合、以下の利点と欠点が挙げられる。

利点・・・膜面形状を平面に保つことが可能。

欠点・・・製作誤差が存在するとき、テザーがたるみ不感帯が発生する。

3.3 実験結果 2

実験コンフィギュレーション 2 の撮像画像が図 9 である。膜面形状は平面ではなく、各ペタル間に図 9 のような段差が見られる。また、同様の実験を二度行った。ペタル間の段差の位置関係を上下で定義したものを図 10 とし、実験一回目と二回目でのペタル間段差の位置関係をまとめたものが表 2 である。表 2 の結果より、展張形状が実験毎に一定ではないことが確認できた。原因として、実験 2 コンフィギュレーションでは膜面が左右対称であり、微小な誤差によって展張形状の不均在誘起されていると考えられる。このため、実験 2 のコンフィギュレーションでは膜面の展張形状を一つに決定することができない。

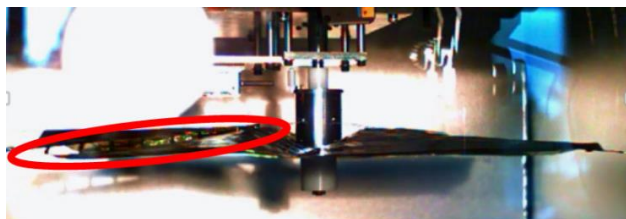


図 9 実験 2 展張形状

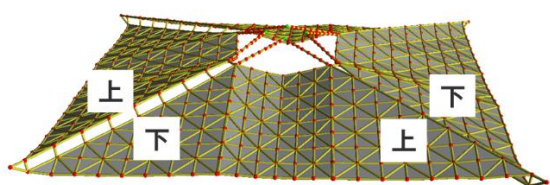


図 10 上下の定義

	一回目	二回目
ペタル 1,2 間	下上	下上
ペタル 2,3 間	上下	上下
ペタル 3,4 間	上下	下上
ペタル 4,1 間	平	下上

表 2 ペタル間段差の位置関係

実験結果より周長余裕を持たせる場合、以下の利点と欠点が挙げられる。

利点・・・テザーに常に張力を持たせることが可能。

欠点・・・展張形状が一定ではなく、予測が難しい。

3.4 実験結果 3

実験 3 では、テザーと先端マスの取り付け方法 (図 11) を実験 1,2 から変更している。テザーに関しては、本体取り付け部分に上下差を持たせ、人為的に非対称性を作り出している。また、先端マスをペタル頂点にそれぞれ設置することで、遠心力を二方向に分離する。このような操作から、セイルに人為的な非対称性を持たせることにより、展張形状を一つに決定できると予想される。

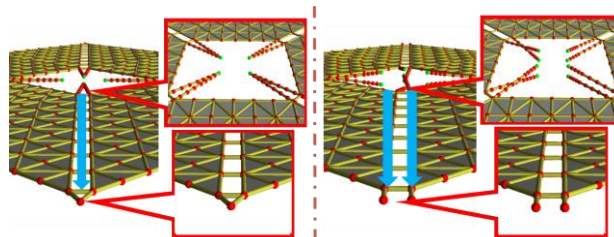


図 11 テザー、先端マスの取り付け方法
実験 1,2(左) 実験 3(右)

実験コンフィギュレーション 3 の撮像画像が図 12 である。また、同様の実験を四度行い、ペタル間の段差の位置関係を表 3 にまとめている。

四度全ての実験でペタル間段差の位置関係が同一で上下、つまり風車形状を作り出せたことから、テザー、先端マスの配置を変更し人為的にセイルに非対称性を持たせることにより、膜面の展張形状を一つに決定することが可能であると言える。

またこの実験結果より、周長余裕を持たせることによる欠点である、“展張形状の予測”が可能になり、非対称性を操作することにより展張形状がコントロールできることから、風車トルクを用いたスピンレート制御も可能であると結論できる。

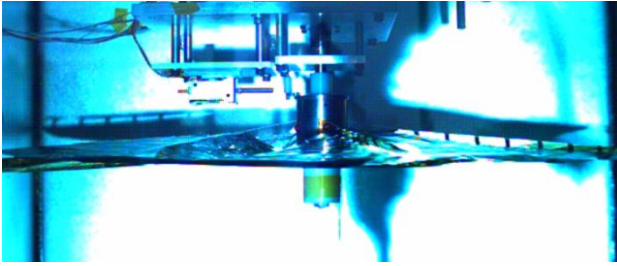


図 12 実験 3 での展張形状

	一回目	二回目	三回目	四回目
ペタル 1,2 間	上下	上下	上下	上下
ペタル 2,3 間	上下	上下	上下	上下
ペタル 3,4 間	上下	上下	上下	上下
ペタル 4,1 間	上下	上下	上下	上下

表 3 ペタル間段差の位置関係

4.簡易 FEM 解析

4.1 簡易 FEM

多粒子法(図 13)は、膜面を質点、バネ、ダンパーで表現することにより、FEM 解析に比べ短い計算時間で膜面形状の解析を可能とする。

質点の質量は、三角形要素の質量をそれぞれの頂点に等分に配分することで決定している。バネ定数は、膜面の変位から弾性エネルギーと歪みエネルギーが等価であると仮定し計算を行い、減衰係数はバネ定数との比率から導出を行っている。また、セイルの折り目に生じる力を模擬するため、折り目角度に比例した回転バネ定数を導入し、製作誤差としてセイル全体にランダム誤差 1%を同様に導入している。

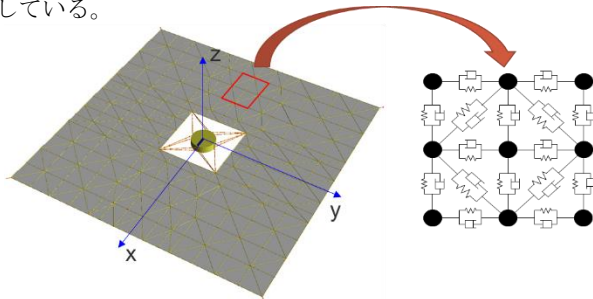


図 13 多粒子法概念図

多粒子法は、三方向のみの近似から対角行列でバネ定数を表現している。それに対し、今解析で導入した簡易 FEM は、三角形形状の中にも要素があると仮定し弾性係数行列を設定することで、バネ定数を全方向の変位から対称行列として導出することが可能となる。このことから、多粒子法では、運動方程式を一方向の変位のみで計算していたところ、簡易 FEM では全方向の変位を運動方程式に反映することが可能となる。

	多粒子法	簡易 FEM
形状		
バネ定数	$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & & \\ & k_2 & \\ & & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix}$

表 4 多粒子法と簡易 FEM の比較

4.2 解析結果 1

簡易 FEM を用いた実験 1 の解析結果が図 14 であり、ペタル間段差の位置関係を表したグラフが図 15 である。実験と同様、セイルはほぼ平面を保っており、ペタル間段差はほとんど見られない。

これより、実験と解析は一致していると結論できる。

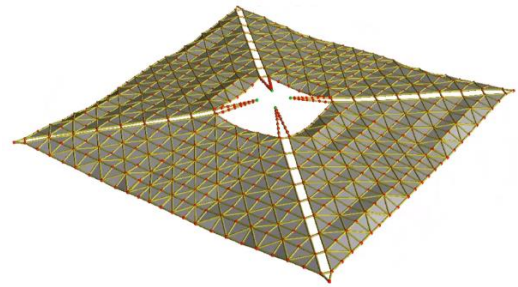


図 14 展張形状の解析結果(実験 1)

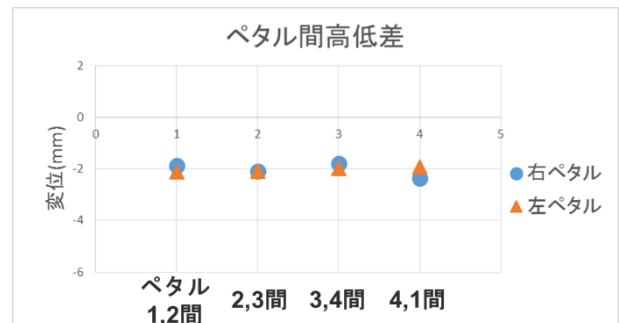


図 15 ペタル間段差の位置関係(実験 1)

4.3 解析結果 2

実験 2 の解析結果が図 16 であり、ペタル間段差の位置関係を表したグラフが図 17 である。実験と同様、ペタル間に段差は見られ不規則形状となった。また、この他に 3 つのランダム誤差モデルで解析を行ったところ、それぞれが別々の不規則形状となることも確認できた。

これより、実験と解析は一致していると結論できる。

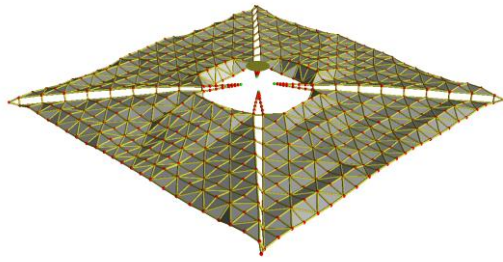


図 16 展張形状の解析結果(実験 2)

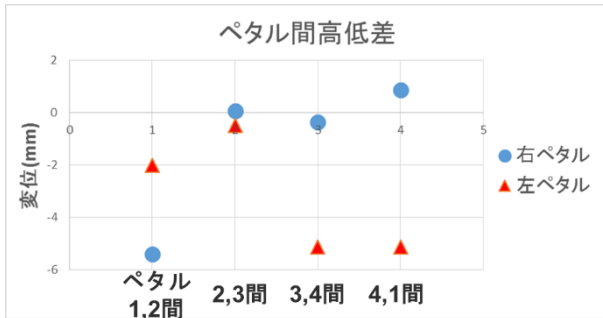


図 17 ペタル間段差の位置関係(実験 2)

4.4 解析結果 3

実験 3 の解析結果が図 18 であり、ペタル間段差の位置関係を表したグラフが図 19 である。実験と同様、セイルは風車形状に変形することが確認できた。また、この他に 3 つのランダム誤差モデルで解析を行ったところ、全て同様に風車形状に変形することも確認できた。

これより、実験と解析は一致していると結論できる。

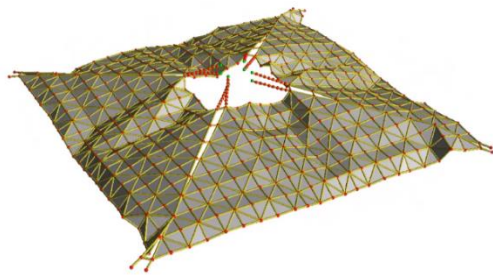


図 18 展張形状の解析結果(実験 3)

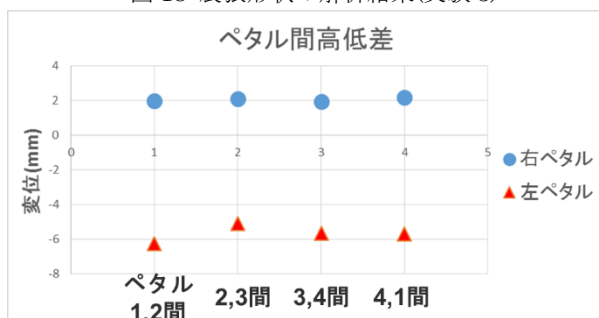


図 19 ペタル間段差の位置関係(実験 3)

5. 可変反射率デバイス搭載実験

5.1 可変反射率デバイス(RCD)

IKAROS は、スイッチの ON/OFF の操作で反射率を自由に変えることのできる可変反射率デバイス(RCD)を搭載し、燃料を使わずに太陽光圧のみでの加速、姿勢制御の軌道上実証を成功させた。

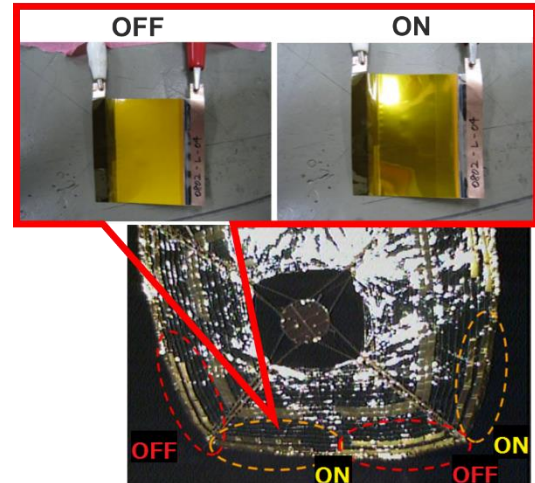


図 20 可変反射率デバイス(RCD)

ここで、セイル収納時に RCD も同様に折り畳み収納し、セイル展開時に RCD を 45 度の角度を持った状態で展開させることで、RCD が光圧から受ける力をスピン軸方向へのトルクに変換する(図 21)ことが可能となる。

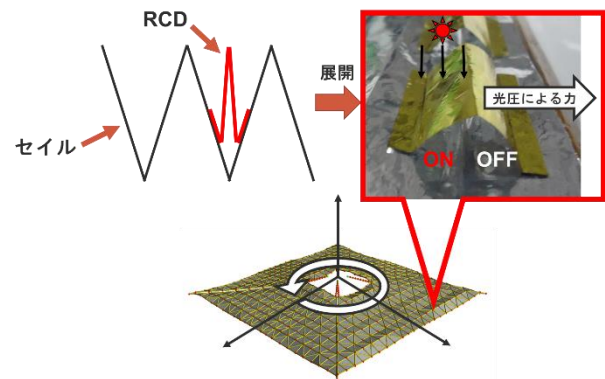


図 21 RCD によるスピン軸方向へのトルク

しかし、この仮定が成立するためには、強い遠心力下でも RCD が倒れずに立ち続けていなければならないという前提が必要である。

今実験ではその前段階として、RCD を模擬したポリイミドフィルムを縮小版セイルに搭載することで、FEM 解析と真空槽実験の比較から解析の妥当性を検討する。

5.2 FEM 解析

解析は、FEM 解析ソフト Abacus のシェル要素(図 22)を用いる。今解析と実験では、実物の RCD を張り付けず、 $7.5\mu\text{m}$ のポリイミド膜をセイル上に乗せることで 45° で立っている RCD を模擬する。

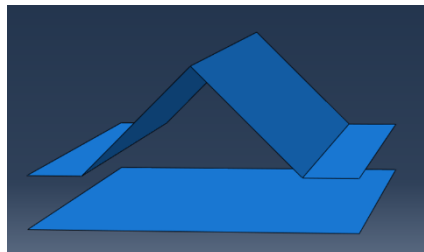


図 22 RCD を模擬したシェル要素

以下の図 23 が 3Hz のスピン状態で一様な遠心力を受けたと仮定したポリイミド膜の変位分布結果である。RCD 斜辺が 14mm では RCD が立つことができるのに対し、斜辺 32mm では RCD が遠心力方向に倒れているのが確認できる。

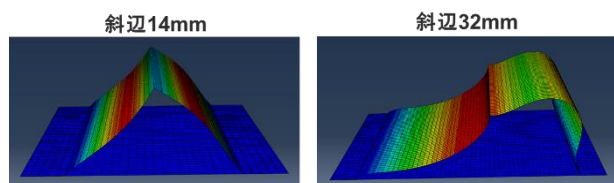


図 23 FEM 解析結果

5.3 実験結果との比較

図 24 が RCD を搭載した際の真空槽実験の結果と、FEM 解析結果を比較したものである。

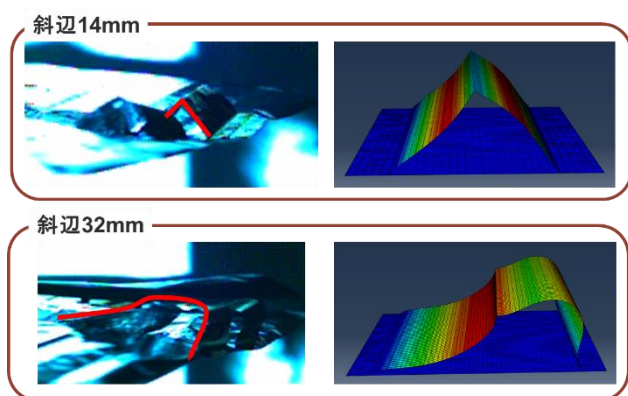


図 24 真空槽実験と FEM 解析の比較

図 24 から、実験と解析結果は非常に近い形状を示していることが確認できる。定性的だが、FEM 解析で遠心力下でのポリイミド膜の変形を模擬できたと結論できる。

6. 結論

真空槽実験より、左右対称な膜面形状では多少の誤差の影響を受け、展張形状は一つに決定しない。それに対して、テザー、先端マスの配置を変更し人為的に非対称性を作り出すことで、膜面の展張形状を一つに決定することが可能となる。これを利用することで、非対称性の操作から風車トルクのコントロールが可能であると結論できる。

多粒子法のパネ定数を対称行列として表現する簡易 FEM を用いることで、膜面の展張形状の厳密な解析が可能であることが確認できた。

また、可変反射率デバイス搭載実験より、定性的ではあるが FEM 解析を用いることで遠心力下でのポリイミド膜の変形を模擬することが可能であると結論できる。

今後の方針として、まず真空槽実験において、今回使用した縮小版セイルはデバイスなどの機器を全く搭載していない。そのため、今後は膜面に太陽電池デバイスなどを実際に搭載することで展張形状にどのような影響を与えるかの確認を行う。

また FEM 解析に関しては、より定量的な評価を行い解析の精度を向上させてゆくことで、実スケールでも整合性の取れるモデルの構築を目指す。

参考

[1]Yuichi Tsuda , “Improved Multi-Particle Model for Dynamics Analysis of Arbitrary-Shaped Thin Flexible Structure”, Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics , Vol.14 , A-2 , 2004 , pp 7-12

[2]Yuich Tsuda , Osamu mori , “DYNAMICS ANALYSIS OF SOLAR SAIL MEMBRANE USING IMPROVED MULTI-PARTICLE MODEL” , Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics , Vol.15 , B-3 , 2005 , pp 160-166

[3]Yasuyuki Miyazaki , Yuka Iwai “Dynamics Model of Solar Sail Membrane” , Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics , Vol.14 , A-6 , 2004 , pp 32-37