

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420858

研究課題名(和文) 軽量膜面展開構造物の形状維持力の評価と創出

研究課題名(英文) Evaluation and Creation of Stiffness and Strength of Lightweight Deployable Membrane Structures

研究代表者

奥泉 信克 (Okuizumi, Nobukatsu)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：10321564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：膜面展開構造物の剛性や強度を効率的に向上するため、膜面構造の立体化や部材貼付の効果解析と実験により検討した。基本的なモデルとして、矩形膜の波板化や円形膜の放射状ジグザグ折りによる固有振動数の向上効果を明らかにした。また、本研究に関連する喫緊の課題である IKAROS のセイル膜面の特性の解明と改良のため、薄膜太陽電池セルの反りに伴う展開形状の立体化による剛性向上効果や貼付部材の影響を明らかにし、さらにセイル外周に折り畳み可能な膜面リブを付加し、その展開形状整形の効果を示した。

研究成果の概要(英文)：In order to effectively increase the stiffness and strength of membrane deployable structures, the effects of making the membranes steric and sticking thin members on them were investigated. As basic examples, corrugated rectangular membranes and rotating corrugated circular membranes were studied and the effects of corrugations on their stiffness were examined by vibration experiments in vacuum and nonlinear finite element analysis. Then the structural property of the solar power sail membrane of IKAROS, which was a pressing subject related to this study, was investigated by nonlinear FEM. A stiffness improvement mechanism of steric deployed shape caused by the curvatures of thin film solar cells and the effects of thin members stuck on the membrane were revealed. Moreover, deployable membrane stiffening ribs were added on the membrane and the shape forming effect were demonstrated.

研究分野：展開構造物，振動工学，構造力学

キーワード：膜面展開構造物 剛性向上 波形矩形膜 ジグザグ折り回転円形膜 加振実験 非線形FEM解析 ソーラ
ー電力セイル

1. 研究開始当初の背景

近年、軽量で収納効率が高く、ソーラーセルやデオービットセル、薄膜太陽電池パドルなどへの様々な応用可能性がある膜面展開構造物の研究開発が世界的に活発となっている。それらの基本的な展開方法は、膜面自身の曲げ剛性は無視して伸展ブームや遠心力によって膜面に張力を与えて平面状に展開するのが一般的である。JAXAでは、2010年に小型ソーラー電力セル実証機IKAROSを打ち上げ、1辺約14m、厚さ7.5ミクロンの正方形膜面の遠心力展開に成功した。しかし、軌道上でのセル膜面は、面外に波打っており、太陽輻射圧に抗して太陽側へ反っている、スピンドルトを極端に低下しても形状が維持されるといった予想外の特徴を示した。その原因として、膜面に貼付した薄膜太陽電池セルなどの部材の反りや剛性の影響が考えられる。このことから、単純な膜面を平面状に展開するよりも、適切に面外形状を与えたり部材を貼付したりすることで、膜構造の剛性や強度を顕著に向上できる可能性があることが明らかになった。

2. 研究の目的

本研究では、膜面構造物に対し、(1)たわみや折り山などによる立体形状化、(2)薄肉弾性部材の貼付、(3)立体的に展開可能なリブの付加の3通りによる剛性や強度の向上可能性を定量的に検討する。基本的なモデルとして矩形膜や円形膜の剛性向上について検討し、具体例として、喫緊の課題であるIKAROSのソーラー電力セル膜面の予想外の展開形状や剛性のメカニズム解明に取り組む。これらにより、将来の大型ソーラー電力セルなどの膜面展開構造物の剛性や強度を向上させる軽量な展開構造方式を検討する。

3. 研究の方法

基本的な膜面展開構造物モデルとして、膜厚15μmのポリイミド膜を用い、両端または一端が固定された波形の矩形膜面および中心固定された放射状に折り癖をつけたジグザグ状円形膜面を考え、主に、

- (1)真空中での加振実験と回転加振実験
- (2)非線形FEMによる固有値解析
- (3)断面形状に基づく固有振動数の理論解析により、曲げ剛性の比較検討を行った。

実験では、ステンレス製真空チャンバとアクリル真空デシケータ(新規購入)、真空対応小型動電型加振機一式、ファンクションジェネレータ、自作回転加振装置^{①②}、レーザー変位計(一部新規購入)、加速度ピックアップなどを利用した。非線形FEM解析には、汎用非線形FEMソフトAbaqusを利用した。

また、IKAROSのソーラー電力セル膜面の検討については、Abaqusの陽的動解析によって遠心力と太陽輻射圧を受けるセル膜面の展開形状解析を行い、薄膜太陽電池

の反りによる面外変形や貼付部材が展開形状や剛性に与える影響について検討した。

4. 研究成果

(1) 波形矩形膜面

具体的な波形矩形膜面は、真空槽内で使用可能な加振機の制約のため、大きさを約200mm×200mmとし、断面形状は主にジグザグに折り曲げた場合と正弦波状に変形させた場合の2種類、波の周期20mm、波の高さ1,2,3mm(両振幅)、相対する2辺を固定した場合と1辺のみを固定した場合の2通りについて検討した。ジグザグ断面は、実際の構造物では収納展開用の蛇腹折りを完全展開しないことで形成できると考えられる。

まずジグザグ断面の矩形膜を両端固定した場合について、固有値解析と加振実験を行った。固有値解析では、膜全体が面外変形する有効質量の大きい主要モードだけでなく、膜の自由端や折り線で挟まれた領域が細かく変形する振動モードが多数現れた。波の高さ1mmでの主要最低次モードと波高3mmでの煩雑なモードの例を図1, 2にそれぞれ示す。波高を増すにつれて主要最低次モードの振動数は41Hz, 79Hz, 113Hzとほぼ波高と線形な関係で増加することがわかった。一方、他のモードの最低次振動数はほとんど変化しなかった。これは、波高の増加によって全体的な剛性は向上するが、折り線間の領域

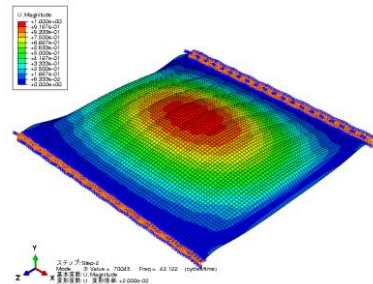


図1. 両端固定ジグザグ折り膜振動モード
波高1mm, 3次モード:41Hz

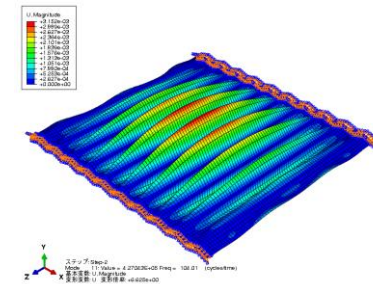


図2. 両端固定ジグザグ折り膜振動モード
波高3mm, 11次モード:10.4Hz

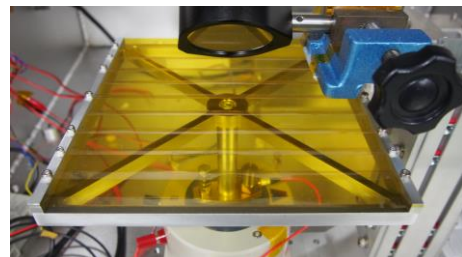


図3. 両端固定ジグザグ折り膜加振実験

の局所的な剛性は変化しないためと考えられる。

加振実験では、図3のように真空槽内で膜を水平に設置し、面外方向に正弦波加振して共振点を計測したが、膜の製作誤差や組立誤差によって膜が容易に歪んでしまい、信頼性のある結果を得ることは困難だった。

次に、ジグザグ断面の矩形膜の一端を固定し、鉛直下向きに設置した場合について、固有値解析と加振実験を行った。波の高さ2mmのジグザグ折り膜の重力下における最低次モードを図4に示す。この場合は、膜が全体的に振動するモードが波高によらず低次に現れるが、膜下端が波打ち変形する。固有値解析で求めたジグザグの波の高さと1次、2次モード振動数、ジグザグ形状の断面2次モーメントから簡易的に計算した1次モード振動数の関係を図5に示す。両端支持の場合と同様に、振動数は波高とともにおおそ線形に増加することがわかる。また、理論解析

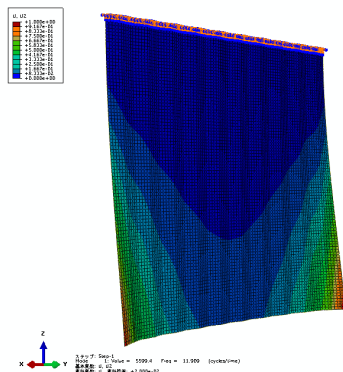


図4. 一端固定ジグザグ折り矩形膜
波高2mm, 1次振動モード: 11.9Hz

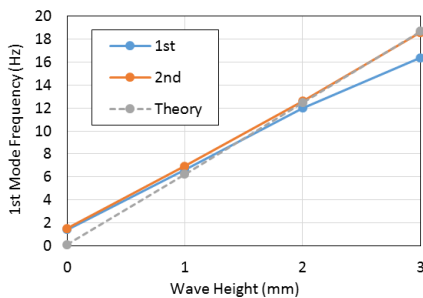


図5. 一端固定ジグザグ折り矩形膜
波高と低次モード振動数の関係

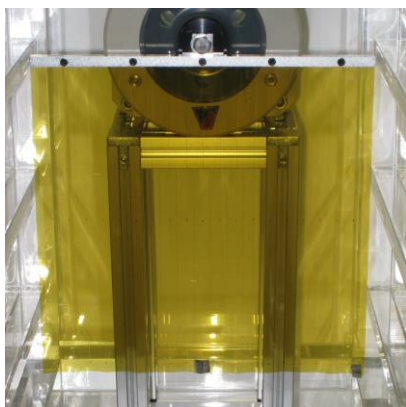


図6. 一端固定ジグザグ折り矩形膜面加振実験

では重力は考慮されていないが、波高0の場合を除いてFEM解析結果と概ね一致し、剛性がジグザグ折り形状に支配されていることが分かる。

加振実験では、主に波の高さ2mmのモデルで共振点の計測と入力増加に伴う非線形性の計測を行った。図6に加振実験の概観を示す。膜下端角部で計測した1次モードの共振点は、解析結果12Hzよりやや高い14Hzとなった。また、膜下端中央が振動するモードの共振点は約18Hzとなり、加振振幅を0.5mmから3mmに増加させると約18Hzから16Hzに低下し、軟性の非線形性を示した。

なお、面外荷重によるジグザグ形状の座屈強度を評価するため、Abaqusにより非線形性を考慮した面外荷重解析を行ったが、同じジグザグ形状でも解析条件の違いによって座屈の様子が異なり、一定の強度を得ることが困難だった。加振実験でも、加振振幅を増加して座屈が生じるか確認したが、座屈を示すような変形や共振点の低下は確認できなかった。

また、正弦波形状の波形膜面についてもFEM解析と加振実験を試みた。一般的な正弦波状の波板については曲げ剛性の理論解が知られている^③が、膜面展開構造物としては膜面を正弦波状に弾性変形させた状態について検討すべきである。FEM解析では、膜面を正弦波状に変形させる解析の後に固有値解析等を行う必要があり。実験では、折り目の製作誤差や固定部の拘束の誤差によって断面形状が容易に歪んでしまい、規則的な正弦波形状の実現が困難だった。

(2) ジグザグ折り回転円形膜面

円形膜面については、直径600mmで中心の直径30mmの範囲を固定し、単純な平面膜の場合と、折り癖を付与した膜の中心部を平面状に固定した場合、および30度間隔で放射状に山折りと谷折りの折り癖を付与して全体がジグザグ形状になるように中心部を固定した場合について主に比較検討した。

実験では、図7のように真空槽内で折り癖を付与した円形膜面を回転しながら軸方向に正弦波掃引加振し、共振点を求めた。一枚の円形膜に折り癖を付けて製作したため、膜面全体が傘のように上または下にややすぼまった形状になるが、重力により上向きは維持できないため、下向きに取り付けて実験を行った。ただし、実験モデルの折り癖の角度管理は困難なため、想定した形状より鋭角の



図7. ジグザグ折り回転円形膜面加振実験

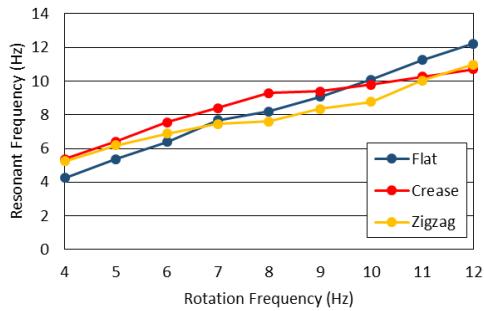


図 8. 回転円形膜加振実験 1次共振点

折り癖となった。図 8 に 3 通りのモデルの加振実験で得られた回転数と 1 次共振点の関係を示す。青線が平面膜、赤線が折り癖付き膜面を平面で固定した場合、黄色がジグザグになるように固定した場合である。平面膜と比較し、折り癖付き平面固定の場合、9Hz 以下で約 20%の剛性向上効果が確認でき、10Hz 以上では逆に約 10%の剛性低下がみられる。ジグザグ形状の場合も約 7Hz を境に同様な傾向が見られるが、折り癖付き平面固定の場合の方が、ジグザグ形状よりも剛性向上効果が高いことがわかる。過去の研究⁴⁾では、回転数が約 10Hz 以下のとき、重力によって周方向に圧縮応力が発生し、約 10Hz を超えると引張応力のみになることがわかっている。半径方向の放射状の折り癖が、低回転数域で周方向圧縮力を吸収し、高回転数域では周方向張力を低下させ、剛性に影響している可能性が考えられる。ジグザグ形状にした場合は、さらに中心付近に周方向張力が発生しにくくなるため、平面固定のときより剛性が低下した可能性がある。

次に、Abaqus による固有値解析を行った。実験に対応したジグザグ状円形膜の解析モデルと重力下で回転数 7Hz での 1 次モード形状を図 9, 10 に示す。図 10 のカラーコンターは面外変位を表し、膜面全体がたわむ主要なモードであることがわかる。実験に対応した

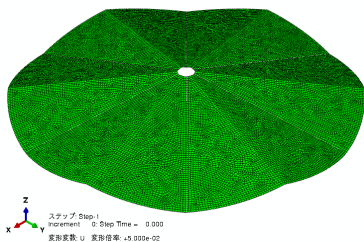


図 9. ジグザグ折り円形膜 FEM モデル

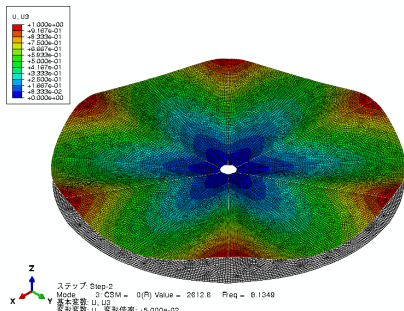


図 10. ジグザグ折り回転円形膜 1次モード (回転数 7Hz)

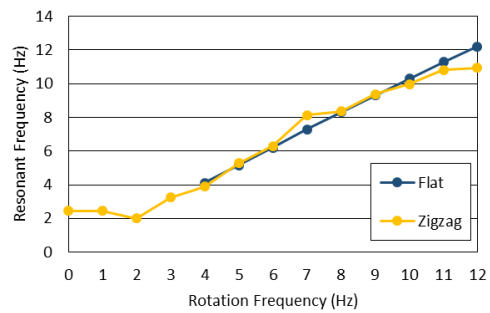


図 11. 回転円形膜固有値解析 1次振動数 (重力下)

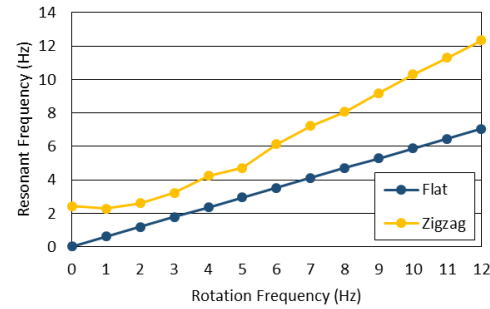


図 12. 回転円形膜固有値解析 1次振動数 (無重力)

重力のある場合の平面膜とジグザグ状円形膜の固有値解析結果を図 11 に示す。平面膜で回転数が 3Hz 以下の場合の解析は困難だった。図 11 より、FEM 解析でもジグザグ折りによる高回転数域の剛性低下が見られる。7Hz 以下での剛性向上効果が実験とは異なっているが、解析モデルは、実験モデルと異なり理想的な形状であるためではないかと考えられる。重力のない場合の解析結果を図 12 にそれぞれ示す。この場合には平面膜の 1 次モード振動数が低下するため見かけ上大きな剛性向上効果が現れており、固有振動数が回転数 12Hz のとき約 1.8 倍、回転数 0Hz のとき約 74 倍となった。

なお、折り癖のある膜を平面状に固定した状態の解析は困難だった。

(3) IKAROS セイル膜面

IKAROS のソーラー膜面の概要を図 13 に示す。軌道上でのセイル膜面の展開形状や剛性を解明するため、膜面に貼付された薄膜太陽電池セルと液晶デバイスの反りの影響、薄膜太陽電池セルと液晶デバイス、補強テープ、膜面ハーネス (フラットケーブル) の有無の

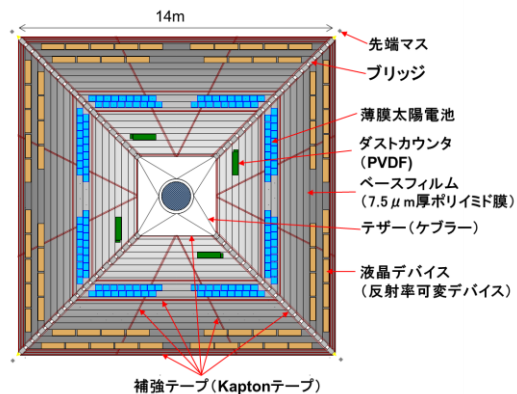


図 13. IKAROS セイル膜面の概要

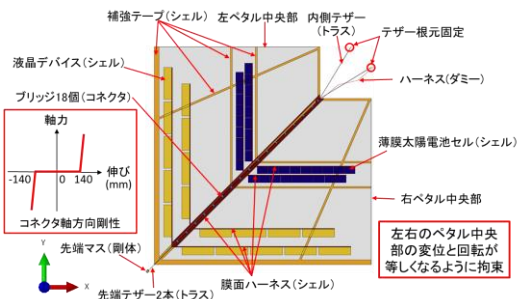


図 14. IKAROS セイル膜面 FEM モデル

影響を汎用非線形 FEM ソフト Abaqus による展開形状解析を行って検討した。さらに、外周に折り畳み可能な膜面リブを追加することによる剛性向上法を考え、その効果を解析によって確認した。

IKAROS セイル膜の FEM モデルを図 14 に示す。計算時間短縮のため陽的動解析を用い、2 ペタルの半分ずつをモデル化し、ブリッジの代わりにコネクタ要素で 2 ペタルを接続した。コネクタは、ブリッジの長さ 140mm に達すると大きな復元力が作用するように設定した。各ペタルの中央には、変位と回転が一致し、周方向に変形しないように拘束条件と境界条件を与えた。また、遠心力と太陽輻射圧をユーザサブルーチンで与えた。解析は、高速化のためマススケーリングを用い、変形が概ね収束するまで行った。

薄膜太陽電池セルと液晶デバイスの反りの影響を検討するため、薄膜セルと液晶デバイスにモーメントを負荷することによって反りを加え、展開形状を計算した。遠心力は軌道上でのスピンレート低下時の回転数 0.055rpm 相当とし、太陽輻射圧は地球近傍の値とし、反りの大きさや方向を変えて多数の解析を行った。薄膜セルと液晶デバイスにペタル周方向に反るように大きなモーメントを与えた結果、セイル全体が太陽側に変形して収束する状態が得られた。その展開形状

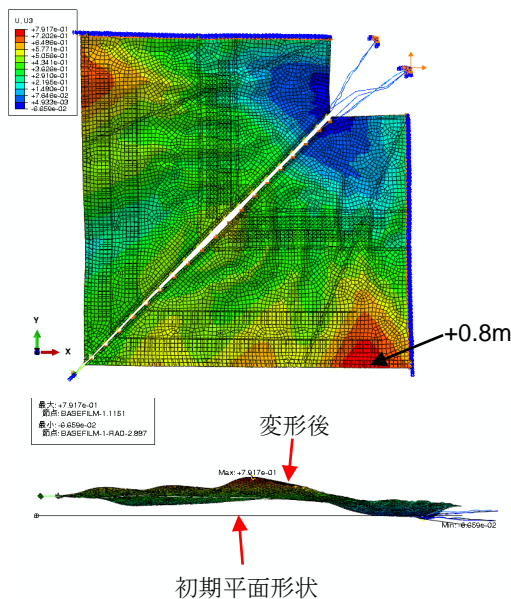


図 15. IKAROS セイル膜面展開形状解析結果 (スピンレート 0.055 rpm, 太陽輻射圧 9.14×10^{-6} Pa)

を図 15 に示す。主に薄膜セルの反りによってペタルの横幅が縮小してブリッジが伸びきり、さらに収縮したため、膜面が上方方向に回転して中心側に変位している。この状態では、四角形セルが全体として四角錐状に立体化しており、下方方向にたわむには飛び移り座屈する必要があるため、太陽輻射圧に耐えているものと考えられる。つまり、軌道上の IKAROS のセイル膜において、膜面展開構造の立体形状化による剛性と強度の向上が結果的に実現した可能性がある。

次に、スピンレートと太陽輻射圧はそのままとし、薄膜セルと液晶デバイス、補強テープ、膜面ハーネスの有無による展開形状の変化を確認した。その結果、補強テープのみを貼付した場合には、図 16 のように比較的たわみの小さい結果が得られた。薄膜セルや液晶デバイスは 1 枚ずつ分割されており、膜面ハーネスはペタル斜辺を除いてペタル周方向に貼付されているが、補強テープは半径方向、周方向ともに貼付されているため剛性向上効果が比較的高いのではないかと考えられる。貼付場所を最適化すれば、さらに改善される可能性があると思われる。

最後に、セイル膜の外周に折り畳みと展開が可能な膜面リブを付加する剛性向上法について検討した。図 17 にその概念図を示す。蛇腹折りの一部を短い膜で拘束することにより、三角形断面の膜面リブを展開できる可能性がある。このようなリブをペタル再外周

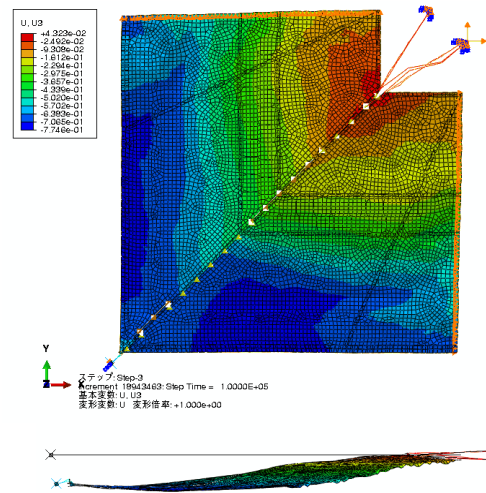


図 16. IKAROS セイル膜面展開形状解析結果 補強テープのみ貼付 (スピンレート 0.055 rpm, 太陽輻射圧 9.14×10^{-6} Pa)

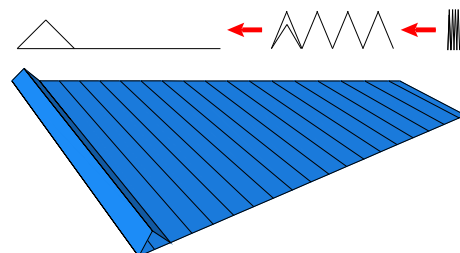


図 17. 折り畳み展開可能な膜面リブ概念図

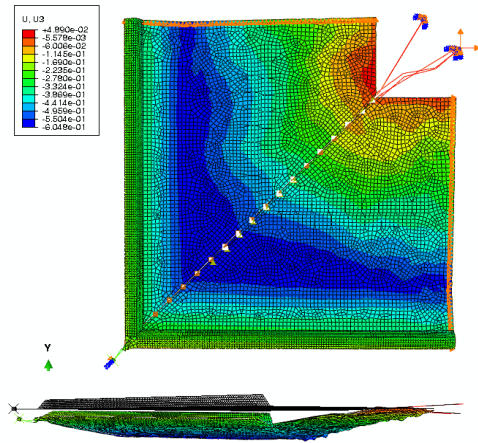


図 18. IKAROS セイル膜面展開形状解析結果
膜面リブのみ付加

(スピンドルト 0.055 rpm, 太陽輻射圧 9.14×10^{-6} Pa)

に付加して展開形状解析を行った結果を図 18 に示す。その他の部材は貼付されていない。完全収束ではないが、外周の変形が抑制され、整った展開形状となることがわかる。

なお、上記のような部材貼付や膜面リブの効果は、実際には製作誤差の影響などによって解析結果ほどの大きな効果が得られない可能性もあるため、さらに検討が必要と考えられる。

(4) まとめ

膜面展開構造物の剛性や強度を向上する新たな方法として、膜面構造の立体化や部材貼付の効果を解析と実験により検討した。基本的なモデルとして、矩形膜の波形化や円形膜の放射状ジグザグ折りによる固有振動数の向上効果を明らかにした。また、本研究に関連する喫緊の課題である IKAROS のセイル膜面の特性の解明と改良のため、薄膜太陽電池セルの反りに伴う展開形状の立体化による剛性向上効果や貼付部材の影響を解明し、さらにセイル外周に折り畳み展開可能な膜面リブを付加し、その展開形状整形効果を確認した。

さらなる検討のためには、実験モデルの製作精度の改善、真空中の実験装置や微小荷重計測法の開発、非線形 FEM 解析法の適切な利用や改良、非線形性を考慮した剛性や強度の検討が重要と思われる。

<引用文献>

① N. Okuizumi, Vibration Mode Analysis of a Rotating Circular Membrane under Transverse Distributed Load, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol.3, No.1, pp.95-106, 2009.

② N. Okuizumi, Forced Vibration Experiments of a Rotating Extremely Thin Circular Membrane, *Mechanical Engineering Review*, Vol. 1, No.5, 2014.

③ S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, Second Edition, pp.367-368, 1959.

④ N. Okuizumi, Equilibrium of a Rotating Circular Membrane under Transverse Distributed Load, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol.1, No.1, pp.85-96, 2007.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① N. Okuizumi, Forced vibration experiments of a rotating extremely thin circular membrane, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 1, No.5, 2014, p.DR0054.

[学会発表] (計 4 件)

① 奥泉信克, 佐藤泰貴, 森治, 古谷寛, 坂本啓, 白澤洋次, ソーラー電力セイル膜面の展開形状解析, 第 57 回構造強度に関する講演会, 2015, 3A09.

② Y. Satou, O. Mori, N. Okuizumi, Y. Shirasawa, H. Furuya and H. Sakamoto, Deformation Properties of Solar Sail IKAROS Membrane with Nonlinear Finite Element Analyses, 2nd Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech, Kissimmee, FL, 2015, AIAA-2015-0430.

③ Y. Satou, N. Okuizumi, H. Sakamoto, H. Furuya, G. Ono, Y. Shirasawa and O. Mori, Nonflatness of Solar Sail Membrane Predicted by Nonlinear Finite Element Method, 1st Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech 2014, National Harbor, MD, 2014, AIAA-2014-0832.

④ 奥泉信克, 佐藤泰貴, 大野剛, 古谷寛, 坂本啓, 森治, IKAROS ソーラー電力セイル膜面の展開形状に関する検討, 3A06, 第 55 回構造強度に関する講演会, 2013, 室蘭工大.

[その他]

ホームページ等

http://stage.tksc.jaxa.jp/taurus/member/okuizumi/3D_membrane_structures.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥泉 信克 (OKUIZUMI, Nobukatsu)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：10321564