

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月15日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560826

研究課題名（和文） 大型膜面展開構造物の数値解析法とダイナミクスに関する研究

研究課題名（英文） Numerical Analysis and Dynamics of Large Deployable Membrane Structures

研究代表者

奥泉 信克（OKUIZUMI NOBUKATSU）

独立行政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

研究成果の概要（和文）：軽量で小さく折り畳み可能な膜面を用いた宇宙大型展開構造物の研究開発のため、膜面の挙動の高速な数値計算法である多粒子系モデルの開発、遠心力で膜面が展開するときの挙動や展開した膜面の振動特性の検討を行った。膜面の伸縮特性をバネと質点でモデル化する従来の多粒子系モデルを拡張し、膜面展開構造物に必要な折り目のモデルを導入し、膜面固有の種々の特性を適切にモデル化することにより、真空中で行った遠心力展開実験結果を精度良く表現できることを示した。また、真空中で膜面に回転と振動を同時に与える実験装置を製作して回転する円形膜の振動特性を実測し、モード解析結果と比較した。

研究成果の概要（英文）：In order to develop large membrane deployable structures, a multiple particle system model which is suited for efficient numerical analysis of membrane dynamics was developed and centrifugal deployment behaviors and vibration characteristics of membranes are studied. By inventing a model for crease stiffness and contact and adjusting the models for buckling and damping, it was confirmed that the numerical method could properly simulate small-scale centrifugal deployment experiments in vacuum. Vibration modes of a rotating circular membrane are also measured by creating an equipment which can rotate and shake a membrane simultaneously. The experimental results were compared with vibration mode analysis.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：膜面構造物，ダイナミクス，数値シミュレーション，遠心力展開，真空槽実験，振動モード

1. 研究開始当初の背景

日本および欧米において、近年ソーラーセルや膜面アンテナなど、Gossamer space system と呼ばれる宇宙大型膜面展開構造物の研究開発が活発に行われている。JAXAでは、大型膜面を遠心力で展開するソーラー電

力セル探査機の研究開発が進められており、そのために膜面の大変形挙動の高速かつ信頼性のある数値シミュレーション技術が必要とされている。また、遠心力で展開される膜面の展開挙動や展開後の振動特性を明らかにする必要がある。地上実験が不可能な

大型膜面の挙動を予測するためのスケール則の確立も重要な課題となっている。

膜面の大変形挙動の数値解析法には、非線形有限要素法と、ばね・質点・ダンパ系で膜面をモデル化する多粒子系モデルがあるが、どちらにおいても膜面の曲げ剛性、しわ、減衰、折り癖の取り扱いが課題となっている。研究代表者らは、これまで多粒子系モデルの研究を行っており、矩形膜の振動実験や「らせん折り」で収納された膜面の遠心力展開実験とシミュレーション結果とを比較し、概ね良好な結果を得ている。しかし、しわ（座屈）や折り目、減衰などのモデルには、さらなる検証と改良が必要である。また、遠心力で展開された円形膜の平衡状態を真空槽内での実験と理論解析、数値解析で検討しているが、振動特性の解明のためには、専用の実験装置の開発による詳細な計測が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、膜面の大変形挙動の高速かつ信頼性のある数値シミュレーション技術確立すること、遠心力によって展開される膜面構造物のダイナミクスを明らかにすることを目的とする。そのため、多粒子系モデルにおいて、座屈、折り癖、接触、減衰などの膜面の種々の特性のモデルの確立に取り組む。また、真空層内での詳細な展開実験や振動実験などによって解析の有効性を検証し、遠心力展開膜面の振動特性を明らかにする。本研究の成果によって、ソーラー電力セイルを始めとする大型膜面を用いた宇宙科学ミッションに貢献する。

3. 研究の方法

(1) 多粒子系モデル

多粒子系モデルによって、折り畳まれた膜面の遠心力展開挙動の高精度なシミュレーション結果を得るため、図1に示すように、折り目を挟む2つの三角形要素の各質点に作用する荷重を表す折り目剛性のシンプルな

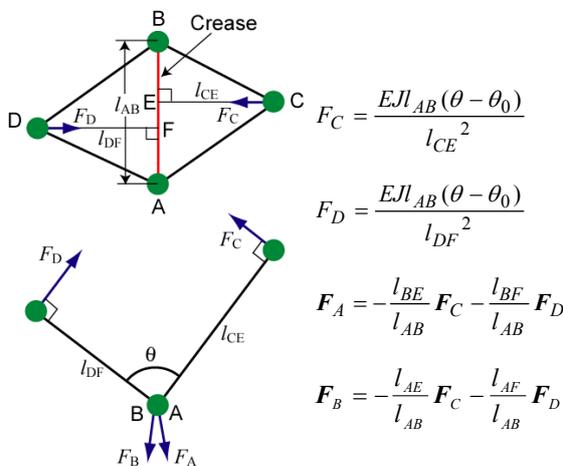
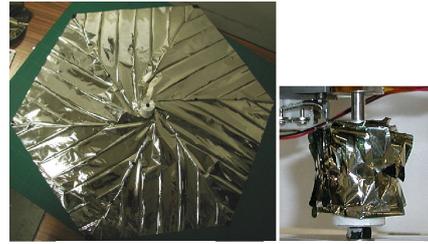
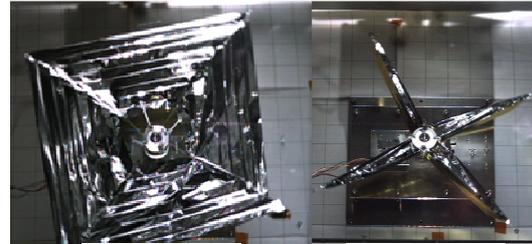


図1 折り目モデル



(a) 展開時 (b) 収納時

図2 らせん折り膜面



(a) 展開時 (b) 収納時

図3 四角折り膜面

モデルを新規に考案した。さらに、従来の膜面の座屈特性モデルを実験に合わせてチューニングするとともに、空気抵抗と減衰を考慮した。モデルの検証のため、厚みを考慮した折り目曲線によって、しわを生じることなく膜面を折り畳むことのできる「らせん折り」で収納された六角形膜面の遠心力展開実験結果と数値シミュレーション結果とを比較検証した。実験に用いた膜面は、図2に示す膜厚 $7.5\mu\text{m}$ 、対角線の長さ 650mm のポリイミドフィルムで、折り目間隔の異なる2種類を製作して実験を行った。

次に、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」で採用された「四角折り」の場合についても、膜厚 $7.5\mu\text{m}$ 、1辺 455mm のポリイミド小型膜面モデルの真空槽内遠心力展開実験結果との比較により多粒子系モデルを検証した。四角折り膜面モデルを図3に示す。実験目的は、多粒子系モデルの検証だけでなく、IKAROSのソーラーセイル膜面の軌道上展開結果の理解に資するためである。IKAROSは2010年6月にセイル膜面の遠心力展開に成功したが、展開の途中でセイルに大きな非対称形状が発生した。また展開後のセイル形状も太陽側に凸な不自然な形状になっていると推定されている。

四角折り膜面の展開では、膜の座屈強度だけでなく、折り目や接触の影響が大きく、原理的に展開中に非対称形状が発生しやすい。そのため、座屈強度と折り目剛性のモデルを実験結果と比較してさらにチューニングを行い、折り目の周りでの膜同士の接触を考慮するため、折り目剛性モデルに対して接触に伴うペナルティ係数を掛けるように改良した。引き続き、それらのパラメータを変化さ

せて、非対称形状が発生したり展開が不完全になる条件について検討した。

(2) 回転円形膜の振動特性

研究代表者は、内径 660mm、内圧約 1/100 気圧の亚克力真空槽内において、膜厚 7.5 μ m、直径 600mm のポリイミド円形膜の回転実験を行ってきた。その実験では、重力による面外変形や残留空気の影響による面外振動が発生した。面外振動の振動数は、これまでの多粒子系モデルによる固有値解析と回転対称シェル膜理論と von Karman 理論による振動方程式を用いた解析で得られた周方向 2 次、半径方向 0 次の (2, 0) モードで説明できた。しかし、実験ではモード形状を計測できなかったため、本研究でレーザー変位計による面外変位の同時多点計測を行った。従来は回転する膜面を空間に固定されたレーザー変位計 1 台で計測したため、ドップラシフトを生じた見かけの振動数しか得られなかったが、レーザー変位計を追加して 4 点同時計測を行うことにより、それらの位相差を計測した。

次に、回転円形膜が有する複数の振動モードを励起するため、別途導入した真空対応小型動電型加振器、ファンクションジェネレータおよびステンレス製矩形真空槽を利用して、真空槽内の回転膜面加振機構を新規製作し、回転円形膜面の加振実験を実施した。回転膜面加振機構の概要を図 4 に示す。当初、ベアリングで支持された回転軸を加振器で軸方向に加振し、ステッピングモーターのトルクを磁気カップリングによって非接触で回転軸に伝達する機構を製作したが、磁力と加振力が互いに影響して正弦波状の加振ができないことがわかった。そのため、回転軸に回転と軸方向の滑りの自由度を同時に与えることができるロータリーボールスプラインを利用し、ベアリングで支持された回転軸を軸方向に加振し、ロータリーボールスプラインを介してステッピングモーターによって回転軸を直接回転させる機構に変更した。ただし、真空対応小型加振器がオープンルー

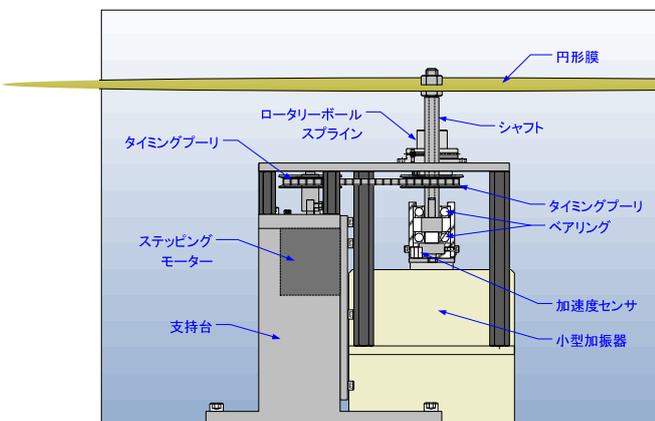


図 4 回転膜面加振機構

プ制御のため、加振加速度振幅の正確な設定はできない。

この装置により、回転数 5~15Hz、加振振動数 5~40Hz 程度の範囲で Φ 600mm の回転円形膜の正弦波加振やランダム加振を行い、回転軸の振動加速度と膜面の変位をそれぞれ加速度センサとレーザー変位計（円周方向 2 箇所）によって計測した。さらに、振動中の動的形状を高速カメラで撮影した。

4. 研究成果

(1) 多粒子系モデル

考案した膜面の折り目剛性モデルを用い、座屈特性モデルを実験に合わせてチューニングするとともに、空気抵抗と減衰を適切に考慮することによって、「らせん折り」膜面を用いた六角形膜面の遠心力展開実験結果と比較して、シミュレーション結果が大幅に改善されることを確認した。図 5 に膜面の半径の展開率の時刻歴の比較を示す。

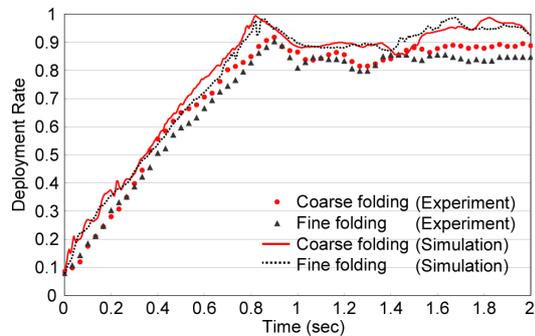


図 5 らせん折り膜面の遠心力展開の時刻歴 実験とシミュレーションの比較

次に、IKAROS の四角折り膜面については、折り目間隔の異なる 2 種類の小型膜面モデルの真空槽展開実験に対応し、折り目特性と接触、座屈特性モデルを改良して数値シミュレーションを実施した結果、展開中の非対称形状や折り目を表現することができ、シミュ

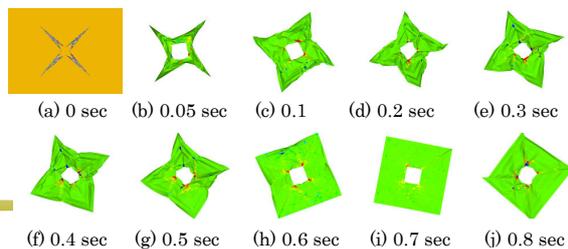


図 6 四角折り膜面の遠心力展開シミュレーション

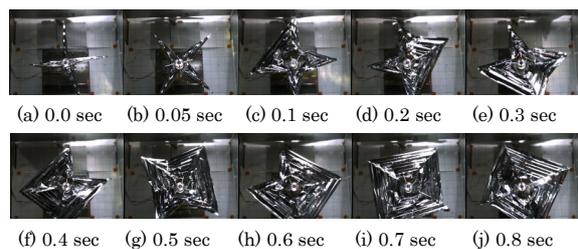


図 7 四角折り膜面の遠心力展開実験

レーション結果が定性的に妥当であること、パラメータをチューニングすることによりシミュレーション結果が実験結果に定量的に近づくことを確認した。図6, 7に展開中の膜面形状のシミュレーション結果と実験結果をそれぞれ示す。

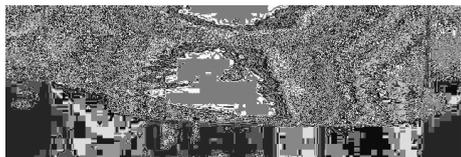
IKAROS で発生した非対称な展開挙動や不自然な展開形状については、十分な理解に至っていない。多粒子系モデルによって展開途中の非対称形状はある程度表現できるが、実際の展開挙動を再現するには、膜面と展開機構の間の接触や滑りなどをモデル化し、展開前の初期状態の非対称性も忠実に再現する必要がある。また、展開後の形状を表現するには、ソーラーセイルに貼付された太陽電池や電力ハーネスなどをモデル化する必要がある。そのため、薄板要素や梁要素を加えた複合膜面構造物に対応できるように多粒子系モデルを拡張することが、将来の宇宙膜面展開構造物の設計解析に利用するためにも大きな課題である。

(2) 回転円形膜の振動特性

真空槽内の回転円形膜の実験において、残留空気の影響で発生した面外振動をレーザー変位計により4点同時計測した結果、周方向90度おきに同位相で振動しており、周方向2次、半径方向0次の(2, 0)モードの振動が発生していることを確認した。これにより、これまでの解析結果の妥当性の一部が確認された。



(a)モード(0,0) (回転数:15Hz, 加振振動数:15Hz)



(b)モード(1,0) (回転数:15Hz, 加振振動数:15.4Hz)



(c)モード(3,0) (回転数:15Hz, 加振振動数:33.5Hz)



(d)モード(4,0) (回転数:10Hz, 加振振動数:24Hz)

図8 振動モード形状例

次に、新規製作した回転加振機構による回転円形膜の加振実験を行った結果、複数の振動モードを励起して観察することができた。観察された代表的なモード形状の高速カメラ画像を図8に示す。レーザー変位計で計測された膜面端部の見かけの振動数成分から、回転数×周方向モード次数だけ真の振動数からずれることを考慮して周方向モード次数を求め、カメラ画像と比較した。なお、回転軸を加振しても高次モードは大きく励起されず、多くのモードの共振点や半径方向次数の確認は困難だった。

実験で計測された振動モードと解析結果の比較を図9に、明確に得られた共振振動数を表1にそれぞれ示す。図9において、中抜きの記号は実験から得られた周方向次数0~4のモード、黄色い三角は表1の共振点、黒丸と実線は解析結果をそれぞれ示す。(1, 0), (2, 0), (3, 0)モードの発生領域は解析結果と概ね一致した。表1に示した第2の共振点は、解析による半径方向1次の振動モードの領域と概ね一致した。しかし、最低次(0, 0)モードの共振点は、解析結果と異なり(1, 0)モードに近接しており、両者を明確に区別することは困難だった。この解析と実験との差異は、共振時には面外変形が大きくなるため、解析で仮定した微小振動の範囲を超えているためではないかと思われる。

実験の精度向上や解析結果の詳細な検証のためには、実験については、真空対応小型加振器へのフィードバック制御の導入や、膜面形状の3次元計測法の検討が必要である。解析については、膜面の座屈特性や曲げ剛性の近似法、有限振幅の振動解析法の検討が必要であると考えられる。

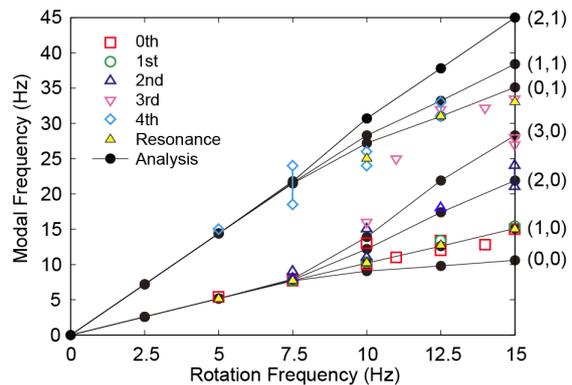


図9 実験結果とモード解析結果の比較

表1. 実験で得られた共振点

回転数[Hz]	共振点[Hz]	
5.0	5.1	
7.5	7.7	
10.0	10	25
12.5	13	31
15.0	15	33

本実験により、回転膜面の基本的な振動特性の計測が可能であることが確認できた。折り目をつけた円形膜面や IKAROS の四角折り膜面などの実験と解析を行って、将来のソーラー電力セイル探査機などの遠心力展開型膜面構造物の力学特性の把握に繋げていくことが今後の課題である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

① N. Okuizumi, A. Muta and S. Matsunaga, Enhancement of a Spring-mass System Model for Numerical Simulations of Centrifugal Deployment Dynamics of Folded Square Membranes, Transactions of Japan Society for Astronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 査読有り, to appear.

② N. Okuizumi and T. Yamamoto, Centrifugal Deployment of Membrane with Spiral Folding: Experiment and Simulation, Journal of Space Engineering, 査読有り, Vol. 2, No. 1, 2009, pp. 41-50.

[学会発表] (計6件)

① N. Okuizumi, A. Muta, S. Matsunaga, Enhancement of a Spring-mass System Model for Numerical Simulations of Centrifugal Deployment Dynamics of Folded Square Membranes, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, Okinawa, 2011-c-30, June 8, 2011.

② N. Okuizumi, A. Muta, S. Matsunaga, H. Sakamoto, Small-scale Experiments and Simulations of Centrifugal Membrane Deployments of Solar Sail Craft "IKAROS", 52th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 12th AIAA Gossamer Spacecraft Forum, Denver, AIAA-2011-1888, June 8, 2011.

③ 奥泉信克, 多粒子系モデルによる遠心力展開膜面の数値シミュレーション, 第60回理論応用力学講演会, OS09-14, 東京工業大学, 3月8日, 2011.

④ N. Okuizumi, Numerical Simulations of Centrifugal Deployments of Membranes by Spring-Mass System Models, 51th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 11th AIAA Gossamer Spacecraft Forum, AIAA-2010-2583, Orlando, April 5, 2010.

⑤ 奥泉信克, 多粒子系モデルによるソーラーセイル膜面の展開解析, 第53回宇宙科学技術連合講演会, 2H04, 京都大学, 9月10日, 2009.

⑥ 奥泉信克, らせん折り膜面の遠心力展開実験と数値シミュレーション, 19th JAXA Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, C-21, JAXA 宇宙科学研究本部, 7月31日, 2009.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

http://stage.tksc.jaxa.jp/taurus/member/okuizumi/index_frame.html#research

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥泉 信克 (OKUIZUMI NOBUKATSU)

独立行政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