

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14354

研究課題名（和文）超大型宇宙薄膜構造物の波動伝播メカニズムの解明と形状制御システムの開発

研究課題名（英文）Wave Propagation Analysis and Shape Control System Development for Large-Sized Membrane Space Structures

研究代表者

高尾 勇輝（TAKAO, Yuki）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：70896654

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、宇宙空間で展開される超大型の薄膜構造物の変形ダイナミクスを波動工学の観点から解明し、様々な立体形状への能動的な変形を実現する形状制御システムを開発するものである。はじめに、数十から数百メートルの超大型宇宙薄膜構造物の宇宙空間における変形挙動を解析する物理シミュレータを開発し、外部入力によって励起された波動が振動モードを形成するまでの過程を明らかにした。続いて、インパルス応答解析により、膜面への任意の外部入力に対する過渡応答を解析的に記述する理論を構築した。最後に、これらの数値解析および理論を実装した形状制御機構を開発し、大型真空槽を用いた地上実証実験によってその有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

連続体の変形は複雑な偏微分方程式で記述され、解析的に解くことは多くの場合困難である。本研究では、任意の時間履歴・空間分布を持つ外部入力に対する宇宙薄膜構造物の変形応答を解析的に解くことに成功した。従来では計算コストの大きな数値解法が求められる場面において、真の解を与える"Ground Truth"が得られたことの学術的意義は計り知れない。これを活用して開発した形状制御システムは、研究目的である宇宙薄膜構造物のみならず、条件次第では地上環境でも有効に機能することが確認された。つまり、アンテナやプロジェクタなどの地上用製品の立体化や動的変形の見通しも得られ、社会的意義も極めて高い成果が獲得された。

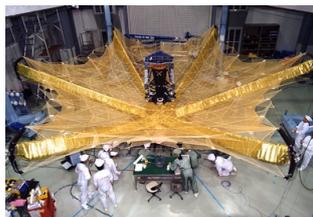
研究成果の概要（英文）：This study investigated the wave-propagation mechanism of large-sized membrane space structures, for application to the development of a shape-control system that enables active deformation of the membranes to various three-dimensional shapes. First, a dynamic simulator that can handle the deformation of 100-meter-class large-sized membranes was developed. It successfully revealed the process in which a wave excited by an external force forms a three-dimensional vibration mode. Next, through an impulse-response analysis, a theory that can analytically describe the transient response of a membrane to an arbitrary external force was developed. Finally, a shape-control mechanism that exploits the physical insights obtained by the numerical analysis and the deformation theory was developed. The validity of the control system was demonstrated through a ground-based demonstration test using a large vacuum chamber.

研究分野：宇宙航行力学

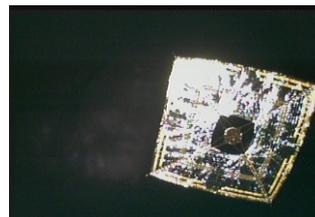
キーワード：大型宇宙構造物 膜展開構造 連続体 振動 波動 形状制御 ハードウェア 数値解析

1. 研究開始当初の背景

ロケットなどの輸送機で一度に輸送可能な質量には限界があるため、宇宙への輸送効率の最大化を図るためには、軽量・大面積かつ収納性に優れた宇宙構造物の活用が欠かせない。その中でも、厚さ数ミクロン程度の薄膜を用いた膜展開構造物は特に輸送効率に優れ、宇宙空間で展開される大型のアンテナや望遠鏡、および太陽電池パドルなどに活用されている（図1）。



電波天文衛星はるか



小型ソーラー電力セイル実証機IKAROS

図1. 膜展開構造物を利用した宇宙機の例

薄膜構造物は曲げ剛性を持たないため、自身で形状を維持することはできず、何らかの方法で張力を与え外的に形状管理を行う必要がある。従来は、伸展ブームなどの支持構造物を用いるほか、宇宙機をスピンさせて遠心力によって張力を印加する方法などが広く採用されてきた。しかし、これらの方法は、特定の（多くの場合は平面的な）展開形状を静的に維持することを目的としており、立体的なジオメトリでの動的な形態変化を達成することはできない。無限次元システムとして知られる連続体の中でも、曲げ剛性を持たない薄膜構造物の変形ダイナミクスは特筆して難解であるため、その立体的・動的変形状態を直接制御する試みはほとんど行われてこなかった。特に、10メートルを超える大型の薄膜構造物では、入力印加から特定の立体形状の形成に至るまでに過渡的な波動伝達現象を伴うため、1～数メートル程度の比較的小型の宇宙構造物で広く用いられている定常応答解析では、正確な物理を表現できないという課題がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、10メートル程度的大型膜から、100メートルを超える超大型膜を対象として、その波動伝達を伴う過渡的な構造変形メカニズムを解明し、3次元かつ動的な形態移行を可能とする形状制御システムを開発することである。はじめに、曲げ剛性を持たずに宇宙空間を浮遊する薄膜構造物の、外部入力に対する過渡的な変形応答の現象解明に取り組む。次に、膜面上で複数の波動を混成させて特定の立体変形を形成するための制御理論を構築する。最後に、当該理論を実装し、超大型膜への適用を想定した形状制御システムのハードウェアを開発し、大型真空槽を用いた地上実証実験によってその有効性を示す。

3. 研究の方法

本研究は、「超大型薄膜構造物の波動伝播メカニズムの解明」と「形状制御システムの開発」という2つの大きな目的の達成に向けて、以下の3つの手順に分けて進める。

1) 超大型膜の構造変形シミュレータの開発

宇宙空間で浮遊する巨大な薄膜構造物の基本的な振る舞いを定性的および定量的に理解するため、物理シミュレータを用いた解析を行う。一般的な有限要素法は計算コストが非常に大きく、過渡応答解析では数秒～数十秒分程度のシミュレーションが限界であるため、本研究では大局的な構造変形の時間発展を高速に計算することのできる多粒子法を用いる。多様な形状・サイズの薄膜構造物に、振動・波動工学の基本となるインパルス入力を印加し、振動モードの形成に至るまでの波動伝播の特性を明らかにする。

2) 薄膜構造物の一般化変形理論の構築

構造解析を通して得られた知見に基づき、宇宙薄膜構造物の変形ダイナミクスに関する一般化理論を構築する。曲げ剛性を持たない薄膜構造物の変形を解析的にモデル化し、時間変数と空間変数に依存する偏微分方程式の形で立式する。続いて、単位インパルス入力を与えた際の応答を解析的に導出する。従来の連続体の過渡応答解析の考え方を拡張し、任意の外部入力に対する変形応答を単位インパルス応答の畳み込みの形で表現する。以上により、インパルス入力に限定しないあらゆる波形の入力に対する変形応答が解析的に記述可能となる。

3) 形状制御システムの開発

以上の研究成果を応用し、膜面上に生成した複数の波動を合成して特定の立体形状を形成するための制御理論を構築する。続いて、宇宙空間での波動生成を想定し、大型膜の多点同時加振を実現するハードウェアを新たに開発する。真空槽を用いた地上実験を行い、様々な膜サイズや制御波形に対する形状制御システムの応答をパラメトリックに評価する。

4. 研究成果

1) 超大型膜の構造変形シミュレータの開発

薄膜構造物の大局的な構造変形の時間発展を比較的高速に計算することのできる多粒子法を用いて、物理シミュレータを開発した。図2に示す通り、当該シミュレータでははじめに、解析で扱う宇宙薄膜構造物の定義を行う。膜の構成粒子要素や弾性パラメータなどを定義した基底クラスを用意し、これを継承したサブクラスにて、例えば理論との整合性に特化した円形膜や IKAROS 型の宇宙機を構築するための実体化を行う。続く構造変形ダイナミクスクラスでは、上記の様々な宇宙薄膜構造物インスタンスをテンプレート引数で受け取り、運動方程式に基づく構造変形の時間発展を計算することができる。この構造変形ダイナミクス定義クラスでは、静止状態の初期条件から開始して一切の外部入力も作用しない、いわば「何もしない」ダイナミクスの計算が行われる。これを継承したサブクラスにて、初期条件や制御入力を特定の要求に合わせてオーバーライドすることで、膜構造変形を伴う様々な物理現象を解析することができる。以上の通り、対象とする宇宙機の形態や解析したいシ

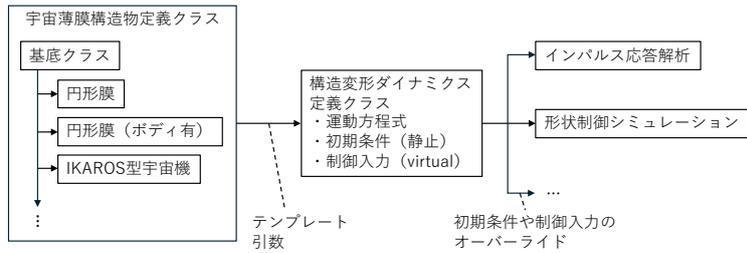


図2. 構造変形シミュレータの構成

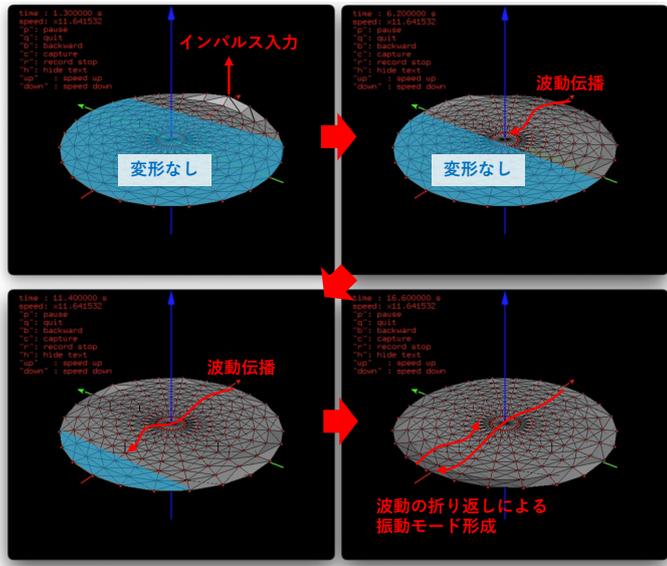


図3. インパルス応答解析の例

ュエーションを柔軟に変更可能な、拡張性に優れたシミュレータを開発した。

続いて、当該シミュレータを用いて、大型宇宙薄膜構造物の波動伝播メカニズム解明のためのインパルス応答解析を行った。初期状態にて特定の粒子にインパルス入力を与え、その後の膜面全体の变形応答の解析を行った。図3に示す通り、入力箇所から波動が伝播して端部で折り返し、振動モードを形成する過程が観察された。特筆すべきは、入力の印加直後しばらくは静止状態のまま、波動が伝達するまで変形しない領域が存在する点であり、これはモード法では表現できない性質である。次に成果2)で構築した理論と照合したところ、膜面上での各点における変形応答の波形および周波数が整合することが確認できた。

2) 薄膜構造物の一般化変形理論の構築

本研究が扱う薄膜構造物のような連続体の変形は一般に偏微分方程式で記述され、解析的な取り扱いが困難であることがよく知られている。そのため、有限要素法や多粒子法などに基づく数値解法が用いられることが多い。しかし、連続体の数値解析は計算コストが非常に大きく、また解析対象の変更のたびにモデルの再構築と再解析が必要となるほか、計算結果の背後に潜む物理の解釈が難しいといった課題が存在する。本研究では、多くの場合は困難とされる、薄膜構造物の変形に関する偏微分方程式を解析的に解く試みを行った。

はじめに、対称性に優れ数学的に扱いやすい円形膜を仮定し、線形理論に基づいて構造変形の運動方程式を立式した。宇宙薄膜構造物の場合は、浮遊体であるため境界条件が存在しないといった特殊性を持つが、太鼓などの固定端境界条件を持つ円形膜の支配方程式である Bessel 方程式と類似した運動方程式が得られる。そこで、Bessel 方程式の解法に倣った級数解法を導入し、非斉次形式の運動方程式の解析解の獲得に成功した（図4）。その結果、得られた一般解は、Zernike 多項式と呼ばれる直交多項式の

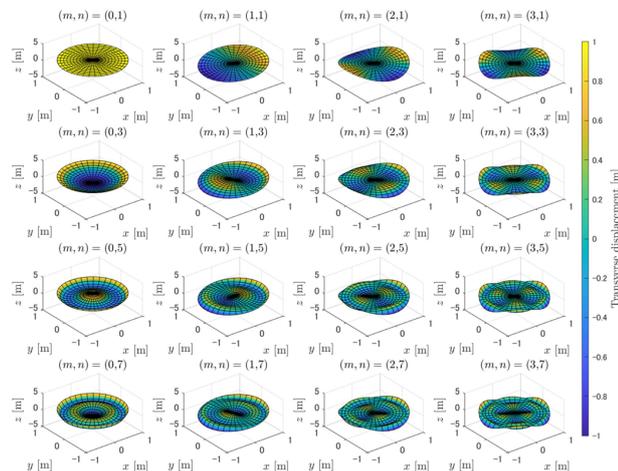


図4. Zernike 多項式で表される膜構造の変形モード

一種と厳密に一致することが判明した。Zernike 多項式は、レンズの光学収差の解析などで頻繁に用いられてきたが、歴史的に見ても薄膜構造物の変形ダイナミクスとは完全に独立した理論体系の中で登場したものであり、本成果は非常に興味深い発見である。

続いて、運動方程式に斉次項、つまり外部入力を加えた場合の過渡応答の解析解を導出した。はじめに、膜面上の任意の位置 (r, θ) に単位インパルス入力を与えた場合の変形応答を算出した。次に、一般的な過渡応答解析の考え方に倣い、各々の時刻 t で膜面上の各点 (r, θ) に作用したインパルス応答の畳み込みによって、任意の外部入力 $f(r, \theta, t)$ を受ける薄膜構造物の変形応答を、拡張された Duhamel 積分の形で記述することに成功した。直径 2 メートルの小型膜および直径 20 メートルの大型膜の有限要素モデルを作成し、高精度数値シミュレーションを行った結果と比較したところ、有限要素モデルの分解能(メッシュ数)を上げるほど解析解に近づくことが判明した(図 5)。すなわち、本研究で確立した理論とその解析解が、従来の計算コストが大きな有限要素解析に置き換わる“Ground Truth”として成り立つことが示唆された。本成果は、任意の時間履歴・空間分布を持つあらゆる外部入力に対する変形応答を解析的に解くことができるため、本研究の最終目標である形状制御に限らず、様々な問題で活用することのできる極めて強力な手段を提供する。

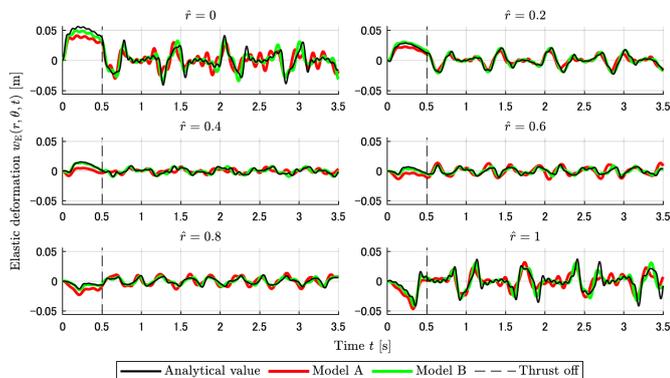


図 5. 過渡応答における解析解と有限要素解析の比較 (Model A: 低分解能 FEM、Model B: 高分解能 FEM)

3) 形状制御システムの開発

以上で得られた物理的知見や理論を実装し、超大型薄膜構造物の能動的形態変化に向けた形状制御システムを開発した。はじめに、ハードウェア化の際の設計も想定し、膜面上の複数箇所に加振機構が設置された状態を仮定した。これらの加振点では独立に正弦波入力を発生させることができ、すなわち各加振点から独立した波が生成される。薄膜構造物の全体的な変形形状はこれらの波の合成として表される。そこで、2)で構築した過渡応答理論を用いて、入力(加振点の数・位置・周波数)に対する出力(薄膜構造物の全体形状)の解析的表現を導出した。続いて、特定の出力波形を得るための加振入力への必要条件を導出し、フィードフォワード制御則として形状制御器の定式化を行った。1)で開発した物理シミュレータに上記の制御則を適用し、形状制御シミュレーションを行ったところ、宇宙空間で浮遊する大型の薄膜構造物について、目標の立体形状が安定的に形成されることが確認された(図 6)。

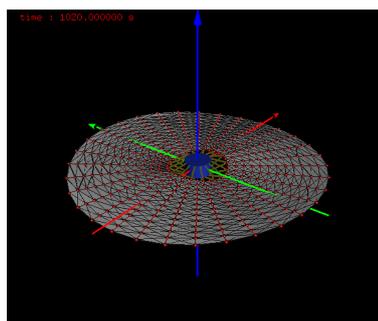


図 6. 20 メートル級大型膜の形状制御シミュレーション結果

最後に、宇宙空間での実用化を想定した形状制御ハードウェアの開発を行った。宇宙空間では、機械摺動部が多い機構は故障に繋がりがやすすため、可能な限り軽量かつ簡素な機械設計が望ましい。本研究では、ロータリーソレノイドと呼ばれる、電圧の正負の切り替えのみで矩形波を生成できる電磁アクチュエータに着目した。薄膜構造物へ要求される立体形状、およびそのために必要なアクチュエータ配置はミッションごとに異なるため、要求に応じてシステム構成を柔軟に変更できるように、ロータリーソレノイドを用いた加振アクチュエータのモジュール化を行った(図 7)。さらに、任意の数のモジュールを同一の入力信号で独立に駆動させることのできる同期制御回路を設計し、多点同時加振を行うための形状制御機構へと統合した。この機構を用いて、大気抵抗の影響を排除するために真空槽を用いて形状制御実験を行った(図 8)。放物形状を持つ変形モードを目標として形状制御を行い、リアルタイム 3 次元形状計測を行ったところ、理論と整合する立体変形の形成が確認された。さらに副次的な成果として、遠心剛性が十分に高い膜素材を使えば、大気中であっても形状制御が機能することが確認され、本研究成果の地上応用の展望も得られた。以上の研究成果は、2 件の特許として出願・公開済みであるほか、計測自動制御学会の第 10 回制御部門マルチシンポジウムにて最優秀論文に選出された。

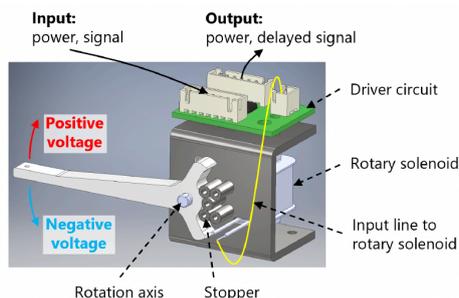


図 7. 加振モジュール

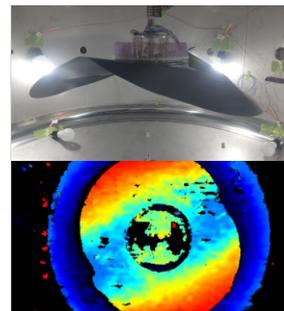


図 8. 形状制御の実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takao Yuki	4. 巻 60
2. 論文標題 Analytical Model for Transverse Vibrations of Spinning Membranes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Spacecraft and Rockets	6. 最初と最後の頁 481 ~ 498
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.A35367	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高橋 秀幸, 松下 将典, 高尾 勇輝, 森 治, 角田 博明	4. 巻 21
2. 論文標題 太陽光圧によるソーラーセイルの姿勢制御に向けた形状記憶合金ワイヤを用いた膜形状制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 21 ~ 30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/astj.21.21	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高尾勇輝, 森治, 渡邊秋人, 武井祥平, 江川主民, 藤井樹里
2. 発表標題 スピン型ソーラーセイル形状制御装置の開発状況
3. 学会等名 第32回アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高尾勇輝, 森治, 渡邊秋人, 武井祥平, 江川主民, 藤井樹里, 楠本哲也, 杉原アフマッド清志, 大木優介, 菊地翔太
2. 発表標題 ソーラーセイルを用いた自律飛行型ターゲットマーカの研究開発
3. 学会等名 第23回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高尾勇輝, 森治, 渡邊秋人, 武井祥平, 江川主民, 藤井樹里
2. 発表標題 モード励振を用いた薄膜構造物の連続形状制御システムとそのハードウェア開発
3. 学会等名 計測自動制御学会 第10回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高尾勇輝
2. 発表標題 遠心力展開される薄膜構造物の立体・可変構造化に向けたアクティブ形状制御システムの実証計画と将来構想
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Takao
2. 発表標題 Constellation Around Small Bodies Using Micro Solar Sails Aboard Next-Generation Space Transportation System
3. 学会等名 ISAS Planetary Exploration Workshop 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Takao, Osamu Mori, Shota Kikuchi, Yusuke Oki, Ahmed Kiyoshi Sugihara, Tetsuya Kusumoto
2. 発表標題 Constellation around Small Bodies Using Spinning Solar Sails Under Simultaneous Orbit-Attitude-Structure Control
3. 学会等名 6th International Symposium on Space Sailing (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 形状制御装置	発明者 高尾勇輝，森治，渡邊秋人，武井祥平，江川主民，藤井樹里	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-105723	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 形状制御方法	発明者 高尾勇輝，森治	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-096780	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

[受賞] 計1件 1. 高尾勇輝，森治，渡邊秋人，武井祥平，江川主民，藤井樹里，制御部門マルチシンポジウム賞(基礎分野)，第10回制御部門マルチシンポジウム，計測自動制御学会，2024年3月。

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------