

氏 名 片山 範将

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1749 号

学位授与の日付 平成27年3月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 空気膜構造による新しいパネル構造の機械特性とその応用
に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 峯杉 賢治
教授 八田 博志
准教授 後藤 健
教授 宮崎 康行 日本大学
准教授 石村 康生 宇宙航空研究開発機構

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

空気膜構造による新しいパネル構造の機械特性とその応用に関する研究
Study of Novel High-specific Stiffness Panel Structure Based on Pneumatic Structural Concept

近年、宇宙構造物は大型化している。その原因の一つに衛星の消費電力の増加がある。電子デバイスの高機能化に伴って衛星のミッションが多機能化し、多くの電力が必要となった。要求される電力を太陽発電によって補うために大型のソーラーアレイが必要になった。また、多様なミッションを実現するためにアンテナや光学観測機器などの物理的な大きさを必要とする通信衛星や科学衛星が増加している。さらに、再生可能エネルギーとして、注目される太陽発電衛星は、一辺が数十 m～数 km の大面積を持つ超大型宇宙構造物であり、今後、大型宇宙構造物、特に、パドルやアンテナを形成する大型面構造の需要が高まると言える。一方で、大型面構造の輸送を考えると、効率よく、経済的に宇宙空間に運搬することが求められる。そこで、今後の大型宇宙構造物は小さく畳んで大きく使う高収納性と重量の軽量化が要求される。また、軌道上で、太陽輻射圧と重力傾斜などの外的荷重に対して、目的の形状を維持するため、ある程度の剛性も求められる。

従来の面構造を構成する主な構造様式は、リジッドパネル型とフレキシブル・ブランケット型があるが、さらなる大型化を考えたとき、両構造様式とも、信頼性、軽量性、収納性について、限界に近付いており、新しい構造様式が求められている。

また、大型化により構造の固有振動数が低下することで構造振動と姿勢制御系が干渉する問題がある。そのため、今後の大型構造物を構成する面構造においては、これらの振動や変形を抑えることができる機能を持つことを期待される。

そこで、本研究では、打上げ時と軌道上の各フェーズの強度・剛性設計における余剰分に着目し、パネルそのものを打上げ時と軌道上時で形態変化させることで、軽量性、収納性を向上させることを着想した。その形態変化の鍵となるものが、気体を内包した複数のセル状空気膜からなるマルチセル空気膜構造である。本研究では、このマルチセル空気膜構造を活用して、新しいサンドイッチパネルと形状制御方法をそれぞれ提案する。

新しく提案するサンドイッチパネルはマルチセル空気膜構造をコアに適用しており、そのセル内圧を変動させることにより、パネルの厚み方向の収納・展開が可能であり、軽量化、収納性、信頼性の向上が見込まれる。また、サンドイッチパネルにしたことにより、空気膜構造を単体で使用したよりも、より高い剛性が確保される。更に、マルチセルであることにより、単一セルが破壊しても全体の形状は維持されるというロバスト性も有する。本研究では、荷重試験と数値解析により、本パネルの機械特性、特に、面外変形の特徴について論じる。もう一つの新しい提案は、空気膜構造の特徴を活かし、セル内圧を用いたパネル構造全体の形状制御システムである。本形状制御システムは、空気膜構造と圧電フィルム等で構成された薄肉のベンディング・アクチュエータを組み合わせたシステムであるため、軽量で、摺動部のない信頼性の高い形状制御を実現することが可能である。本研究では、実験と解析でその有効性を実証する。

初めに、空気膜構造をコア材に用いたサンドイッチパネル構造の機械特性について論じる。本研究では、実際にガスバリア性に優れた膜材を選定して本パネル構造を製作し、荷重試験を行った。まず、剪断試験によって、本パネル構造の等価剪断剛性を取得すると共

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

に、荷重-変位曲線より膜材の等価的なヤング率を理論的に導出した。次に、面外変形の特性を取得するために四点曲げ試験を行った。本パネル構造は、セル内圧を利用しているため、宇宙空間と同じ真空環境下で試験を行う必要があった。よって、真空装置内で駆動可能な曲げ試験機を開発した。本試験機を用いて、セル内圧、コア高さ、表面板厚さをパラメータとした種々の試験片の荷重-変位曲線を取得した。試験結果から、一般的なサンドイッチパネルとは異なり、曲げモーメントによる面外変形は小さく、大部分は剪断力による面外変形であることが明らかになった。また、コア高さと表面板厚さの増加に対して面外変形の剛性は増加することが分かった。ただし、その剛性増加については一般的なサンドイッチパネルの理論とは異なる結果が得られた。

上記の試験結果を受けて、各種パラメータの剛性への影響を定量的に予測、評価するには、より詳細な解析が必要であると判断し、それぞれの試験を模擬する有限要素モデルを構築し、接触問題を有する非線形有限要素法解析を行った。試験結果と本解析結果の変形形状や荷重-変位曲線を定量的に比較・検討した結果、解析モデルが本パネルの変形を評価するために必要な精度を有していることを確認した。更に、四点曲げ試験での面外変形は、空気膜構造のセルの剪断剛性が低いため、その剪断変形が支配していることと、圧子によるパネル厚さ方向の撓みは圧子周辺に限定されることも示した。セル内圧、コア高さ、表面板厚さに対する面外変形の感度解析を行い、セル内圧の増加はセル膜面の剪断座屈による面外変形の剛性低下が始まる変形量を大きくすること、コア高さと表面板厚さについてはサンドイッチパネルの一般的な理論と異なる感度となった実験結果の傾向を本数学モデルはほぼ表せていることを示した。更に、本数学モデルを用いて軌道上で想定される、ある荷重条件下での本パネルの面外変形を算出し、軽量且つある程度有用性のある剛性を確保していることを示した。

最後に、新しく提案した本パネルの形状制御機構について説明する。本手法は、隣り合うセルの隔壁にベンディング・アクチュエータを配置することで、体積変化をおこし、セルの圧力のつり合い点を移動させることで、全体としてパネルに曲げ変形を発生させるというものである。この機構のメリットとしては、摺動部を必要しないフィルム状のベンディング・アクチュエータを用いるため、信頼性が高く、空気膜構造の軽量性を維持できるということである。本研究では、基本概念を理論的に表すだけでなく、数学モデルを構築して解析を行い、本機構の実現可能性を確かめると共に、電圧に対する回転角の線形性を明らかにした。更に、6つのパラメータについて、制御性能に対する感度解析を行い、最も感度の大きいパラメータは、セルのアスペクト比であることを示した。検証実験においても、本手法の妥当性と印可電圧に対する回転角の線形性を示した。

以上のように本論文では、マルチセル空気膜構造を用いて、将来の大型宇宙構造物に適用可能な見通しのある新しいサンドイッチパネルと形状制御方法を提案し、その特性を解析と実験によって検証した。

博士論文の審査結果の要旨
Summary of the results of the doctoral thesis screening

空気膜構造による新しいパネル構造の機械特性とその応用に関する研究
Study of Novel High-specific Stiffness Panel Structure Based on Pneumatic Structural Concept

本論文は、次第に大型化する傾向にある宇宙構造物において必須の構造様式の一つであるパネル構造に関して、複数の空気膜からなるマルチセル空気膜構造を活用した、新たなサンドイッチパネル及び形状制御手法を提案するものである。新しいサンドイッチパネルは、コアにマルチセル空気膜構造を適用したものであり、セル内の気体の有無によりパネルを厚さ方向に収納・展開する機能を有する。これにより、従来のパネルは打上時にロケットの衛星包絡域に収納するために折りたたむだけであったが、本パネルを利用することで更に体積そのものを減少させることが可能になり、同じ容量の衛星包絡域でもより大型のパネルが打上可能になる。一方、新規の形状制御手法は、マルチセル空気膜構造の隣り合う二つのセル間の共通隔壁に圧電アクチュエータを適用することにより変形を発生させ、その結果生じる二つのセル間の圧力差でパネルに曲げ変形を生じさせて形状を制御するという斬新なものである。本手法は、摺動部がないシンプルなシステムで有り、信頼性が高く、軽量であるという特長を有する。

論文は全六章からなる。

第一章においては、研究背景、及び、大型化に対応するためのパネル構造の軽量性・収納性要求と形状制御の必要性を論じた上で、打上時と軌道上での衛星構体に対する強度・剛性条件のギャップに着目して軽量性・収納性を向上させるためにパネルを形態変化させるという独創的な着想を示している。第二章では、形態変化を可能にするためにマルチセル空気膜構造を導入し、これをコアとして用いた新しいサンドイッチパネルを提案している。そして、本パネルが軽量性・収納性に優れているだけでなく、軌道上で自身の形状を維持するに足る剛性を確保できることやセルの内圧を利用していることによる形状復元性、マルチセルであることによる形状維持に対するロバスト性を有することを示している。

第三章では、提案したパネルの機械特性を評価するために、ガスバリア性の優れた材料を選定し、メーカーと協力して供試体の製作を行い、それに剪断試験及び四点曲げ試験を実施した結果を示している。また、第四章において、剪断試験及び四点曲げ試験の詳細数学モデルを構築し、接触問題を有する非線形有限要素法解析を行っている。その結果、以下のことを明らかにしている。

- 1) 本パネルの面外変形は、空気膜構造であるセルの剪断変形に支配されること。
- 2) セル膜面が剪断座屈した後も、セルの内圧によって本パネルは面外変形に対してある程度の剛性を有し、変形が小さくなると元の剛性に復元すること。
- 3) コア高さ、表面板厚さが本パネルの面外変形に与える感度はサンドイッチパネルの一般的な理論と異なる傾向を示したが、数学モデルにおいてその傾向をほぼ表すことに成功したこと。

更に、試験結果より得られた本パネルの面外変形に対する剛性が、宇宙で想定されるミッションの一つを可能にする程度の値を有することを示し、本パネルの有用性を明らかにしている。

第五章ではマルチセル空気膜構造によるパネル構造の応用として、セル隔壁に圧電アクチュエータを用いた新たな形状制御方法について、その基本概念を理論的に示し、数値解析と実験によって本手法の妥当性を明らかにしている。更に、制御性能に影響を及ぼすパ

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

ラメタを洗い出し、圧電素子に加える電圧が性能に与える影響を実験より取得し、理論とほぼ合致することを示している。

以上のように本論文は、マルチセル空気膜構造を活用して、サンドイッチパネルと形状制御方法に関して二つの独創的な提案をしている。両提案とも、軽量性・信頼性に優れており、今後益々大型化することが予想される宇宙構造物のパネル構造に関して、大型化の限界を迎えつつある現状の構造様式のブレイクスルーとなり得る可能性を有しており、工学的に大きな有用性があると判断される。

よって、申請された論文は独創性・工学的有用性を併せ持ち、博士論文に値するものと判定した。