

報告番号	甲 第 14066 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 軌道運動を考慮した宇宙膜構造の電磁力による姿勢変更
(Electromagnetic Attitude Maneuver of a Space Membrane Structure Considering Relative Orbital Dynamics)

氏 名 山田 裕己

論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、スピン型膜構造を有する人工衛星の、電磁力を用いた姿勢変更手法を提案する。さらに、地球周回軌道にて提案手法を用いた時の膜構造の運動の解明、および姿勢変更則の構築を行う。近年、大規模な宇宙システムが提案されるなかで、軽量かつ高収納率で大面積の構造を実現可能なスピン膜構造が注目を集めている。スピン型膜構造の利用においては、そのスピン軸方向の目標方向への指向による姿勢変更が重要となる。特に地球周回軌道での膜構造の利用においては、軌道角速度での姿勢変更による地球指向が重要となる。従来手法として、スラスタとリアクションホイールによる筐体へのトルクを用いた手法や、可変反射率デバイスによる太陽輻射圧のトルクを用いた手法が、主に惑星間軌道での利用を想定して検討された。筐体へのトルクを用いた手法では、軌道角速度での姿勢変更に必要なトルクを作用できるが、筐体のみにはしかトルクを作用できず、慣性により膜構造に変形が生じる恐れがある。太陽輻射圧のトルクを用いた手法では燃料を消費しないが、軌道角速度での姿勢変更に必要なトルクを作用できない。提案手法は、太陽輻射圧のトルクと比較して強い磁気トルクを膜構造と筐体の双方に作用できるため、軌道角速度での姿勢変更と膜構造の形状の維持の達成が期待される。一方で、地球周回軌道における提案手法を用いた時の膜構造の運動が未解明であること、磁気トルクの方向が地磁場の方向

に制約を受けることが、提案手法を用いた軌道角速度での姿勢変更や膜構造の形状の維持に対する課題となる。

本研究では、電磁力を用いたスピン型膜構造を有する人工衛星（展開膜衛星）の姿勢変更手法を提案し、提案手法を用いた時の地球周回軌道における膜構造の運動の解明、および地磁場による磁気トルク方向の制約下での姿勢変更則の構築を研究目的としている。検討ではまず、膜構造の運動の解明や姿勢変更則の構築に使用するための、展開膜衛星のダイナミクスモデルを構築している。次に構築したモデルの線形化およびモード変換により、展開膜衛星の運動モードを導出している。この運動モードにおける筐体の姿勢運動と膜構造の運動の関係の解析、および地球周回軌道における重力と電磁力の各運動モードへの影響の解析により、提案手法を用いた時の膜構造の運動を解明している。また姿勢変更則をダイナミクスモデルから構築し、数値解析によりその有効性を示している。

本論文は以下の 6 章により構成されている。

第 1 章、第 2 章では本研究の背景として、展開膜衛星の姿勢変更における課題、提案手法の概要とその課題、研究目的・意義、および課題の解決方針について述べている。大規模な宇宙デバイスが提案されるなかで、軽量かつ高収納率で大面積の構造を実現可能な宇宙展開膜面構造物が注目を集めている。本研究では特に、宇宙展開膜面構造物の中心に衛星筐体が配置されている構成について扱っている。このような構成の膜構造は、屈曲可能なブームの弾性力を用いて展開状態を維持するブーム型膜構造と、スピンによる遠心力を用いて展開を維持するスピン型膜構造に分類される。スピン型膜構造はブーム型膜構造と比較して姿勢変更が難しくなるが、より大型な膜構造を軽量で実現できる。そのため適切な姿勢変更則により、スピン型膜構造を用いたより大面積の構造からなる宇宙デバイスの実現に寄与できる。

従来研究においてスピン型膜構造の運動は、膜構造のみの運動として主に議論されてきた。一方で膜構造の運動に対する、連続的な姿勢変更をする衛星筐体の運動の影響についての議論は少なく、十分に解明されていない。また、地球周回軌道における宇宙環境を考慮した、膜構造の運動の解明についても十分行われていない。

膜構造の姿勢変更においては、スピン軸方向の目標方向への指向が重要となる。特に地球周回軌道での膜構造の利用では、軌道角速度での姿勢変更による地球指向が重要となる。従来研究ではスラストやリアクションホイールを用いて筐体にトルクを作用する手法と、可変反射率デバイスを用いて太陽輻射圧によるトルクを膜構造に作用する手法について検討がなされた。しかしこれらの手法では、筐体と膜構造の双方に対して、軌道角速度での姿勢変更に必要なトルクを作用することができない。

本研究は筐体に搭載した磁気トルカ (MTQ) が生じる磁気モーメント、および膜構造に配置したループ状の電線を通る電流と、地磁場との干渉により生じる磁気トルクを用いた姿勢変更手法を提案している。提案手法は筐体と膜構造のそれぞれに、変更可能で太陽

輻射圧よりも強い磁気トルクを作用可能であると見込まれ、形状の維持と軌道角速度での姿勢変更の達成が期待される。

スピン型膜構造の姿勢変更では、スピン角速度に合わせたトルク方向の変更が重要である。このトルク方向の変化の時定数は膜構造の運動の時定数と近く、姿勢変更により膜構造に変形が生じうる。特に筐体の姿勢運動が膜構造に変形を生じる恐れがあるが、膜構造の運動に対する筐体の姿勢運動の影響は未解明である。また地球周回軌道では電磁力や重力の影響が優位となる高度が存在するが、膜構造の運動に対する電磁力や重力の影響は未解明である。そのため提案手法における形状維持の実現のためには、これらの解明が望まれる。さらに、地磁場方向による磁気トルク方向の制約により、姿勢変更に要求される方向のトルクを出力することが通常できないため、この制約を考慮した姿勢変更則の構築が望まれる。

第3章では、本研究において用いる展開膜構造のダイナミクスの導出を行っている。本研究において展開膜衛星のダイナミクスは、衛星の重心周りの相対運動としてモデル化する。まず慣性座標系における膜構造のダイナミクスを多粒子法によって、慣性座標系における筐体のダイナミクスを剛体の運動としてモデル化する。多粒子法では膜構造を質点・ばね・ダンパ系で置き換え、膜構造の運動を各質点の運動として表現する。質点にはたらく力としては、ばね・ダンパで表される膜構造の剛性、減衰の効果による力に加え、並進・回転ばねにより表現された電線の剛性の効果による力、電磁力、および重力について考慮し、モデル化を行う。筐体の並進運動においては膜構造からの境界力と重力を、姿勢運動においては膜構造からの境界トルク、MTQによる磁気トルク、および重力傾斜トルクを考慮してモデル化する。そしてこれらのダイナミクスモデルを機体座標系に変換し、カップリング項を導出することで、展開膜衛星のダイナミクスのモデル化を行う。

次に得られたダイナミクスモデルの線形化およびモード分解により、衛星のダイナミクスをモード座標系で表現する。本研究では衛星が一定角速度で回転し、膜構造に振動が生じていない状態を平衡点とし、平衡点からの多粒子法における質点の位置、筐体の姿勢、角速度のずれを微小とする。そして二次以上の微小量をゼロとする近似から、線形化されたダイナミクスモデルを導出する。次に線形化されたダイナミクスモデルのモード変換により、衛星の運動モードを求める。その後、得られた運動モードを用いて、非拘束モードモデルと呼ばれる、モード座標系で表現されたダイナミクスモデルを得る。

第4章では、第3章で得られたダイナミクスモデルの解析により、地球周回軌道での膜構造の運動に対する、筐体の姿勢運動、重力、電磁力の影響を解明している。まず、第3章で得られた運動モードを筐体の姿勢運動と膜構造の低次の運動に注目して分類し解析することで、膜構造の運動に対する筐体の姿勢運動の影響を検討している。この結果として、衛星の運動モードは面外振動モード、回転振動モード、面内並進モード、面外並進・回転

モードの 4 種類に分類できることを明らかにし、特に回転振動モードが筐体の姿勢運動と膜構造の運動のカップリングを示すモードであることを示している。次に小型膜構造を用いた実験により得られた膜構造の運動と、第 3 章で求めたダイナミクスモデルの理論解析および数値解析により得られた膜構造の運動との比較を行い、両者において膜構造に表れる振動の形状および振動数が一致していることを示している。

重力および電磁力の影響の解明では、まずモード座標系で表された重力および電磁力モデルの導出を行っている。そしてモデル式の理論解析により重力および電磁力の各運動モードへの影響を検討している。重力および電磁力のモデル式は、軌道角速度とスピン角速度に依存する時変項と依存しない時不変項を持つことを解明している。軌道面外方向周りで運動する膜構造では、重力のモデル式はモード座標に依存し、全ての運動モードに影響を与える一方で、電磁力のモデル式はモード座標に依存する項としない項に分けられ、その両方が回転振動モード、面外並進・回転モードに影響を与えることを示している。また、電磁力の影響は MTQ の磁気モーメントの方向および電流の有無によって変化することを示している。次に数値解析によって、理論解析で得られた知見の一般性を示し、微小変形領域を逸脱したことにより生じる運動についてまとめている。

第 5 章では提案手法での展開膜衛星の姿勢変更則を構築した。第 3 章で得られた衛星のダイナミクスモデルから、地球指向時に筐体と膜構造の姿勢を協調させつつ変更するために必要なトルクを算出している。そしてこのトルクをもとにした、膜構造に流れる電流、および MTQ の磁気モーメントの算出式を導出し、数値解析によりこの算出式の有効性を示している。一方で磁気トルクは地磁場方向による制約から要求トルク方向以外の方向成分を持ち、姿勢が乱れる。そのため本研究は、磁場変動を考慮した、疑似逆行列を用いた姿勢変更則を併せて構築し、数値解析によりその有効性を示している。

第 6 章では本研究で得られた主な知見および今後の展望について述べている。