

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21045

研究課題名（和文）軌道力学の離散系から連続系への展開と宇宙柔軟構造物の運動解明

研究課題名（英文）Development of orbital mechanics from discrete system to continuous system for space flexible structure

研究代表者

稲守 孝哉（Inamori, Takaya）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50725249

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では宇宙柔軟構造物の挙動を軌道力学の新しい視点から検討し明らかにすることを目的とする。

本研究では膜構造について、Hill方程式で表現される相対軌道運動の効果を柔軟構造物の質量要素に適用しその挙動を定式化した。さらに多粒子系モデルによるシミュレータを作成し軌道運動の効果や宇宙環境による力の効果の実装を行った。

さらに軌道運動による振動励起を積極的に用いて小さな電力と時間の効率的な姿勢制御手法を構築した。特に宇宙環境磁場が軌道により大きく変化することに着目し、宇宙構造物に電流ループを持たせ姿勢変化を生じさせる方法について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで検討されてきた軌道力学の知見を連続系にも適用することができる。また、離散系軌道力学では表現が難しいより高周波数の励起振動を扱うことや軌道要素パラメータで構造挙動を扱い、軌道摂動効果の見通しを改善することができる。

さらに、衛星アウトガスなど他連続系にも軌道力学を適用でき応用が広がり、軌道運動で励起される振動を活用した柔軟構造物の効率的な姿勢変更も可能である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to investigate and clarify the behavior of space flexible structures from a new perspective of orbital mechanics.

In this study, the effect of relative orbital motion expressed by the Hill equation is applied to the mass element of the flexible structure and its behavior is formulated for the membrane structure. Furthermore, a simulator based on a many-particle system model is created to simulate the orbital motion of the membrane structure. The effects of orbital motion and the effects of forces due to the space environment are implemented. Furthermore, an efficient attitude control method with small power and time was developed by actively using vibrational excitation caused by orbital motion. Specifically, we focused on the fact that the magnetic field of the space environment changes significantly depending on the orbit, and investigated a method to induce attitude change by adding a current loop to the space structure.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：宇宙構造物 軌道力学

1. 研究開始当初の背景

近年、膜構造といった大きな面積の構造を搭載した人工衛星が検討され、ミッションの達成のため軌道上でのその運動の解明と姿勢制御手法の構築が重要となっている。従来、惑星間軌道等においてスラスタとリアクションホイールといった衛星筐体に搭載された姿勢アクチュエータを用いた手法や、膜構造が太陽輻射圧から得る力を用いた手法が検討されてきた。今後、さらに衛星筐体のみではなく膜構造にも比較的大きな力を与えることができ、さらに姿勢変更に燃料が必要ない手法が求められると思われる。

本研究では今後の膜構造の宇宙応用を見据え、特に地球周回軌道のスピン型膜構造を有する衛星について軌道力学の視点から膜構造の挙動を明らかにし、また軌道運動により変化する宇宙環境を用いた姿勢制御手法を構築する。特に、比較的大きな力を膜構造に与えることができ燃料の必要のない電磁力を用いた膜構造の姿勢変更手法を提案する。

2. 研究の目的

本研究では地球周回軌道において、今後、多くの利用が期待されるスピン型膜構造の衛星について軌道力学を考慮して膜構造の挙動を明らかにする。さらに環境磁場の影響など軌道運動の影響を捉えることで、膜構造の姿勢変更をより容易に実施できる可能性がある。そこで、本研究では軌道運動より変化する宇宙環境を利用し膜構造の姿勢運動を生じさせ姿勢を変更する手法を構築する。特に宇宙環境磁場が軌道により大きく変化することに着目し、膜構造に電流ループを持たせ(図1)磁気トルクを用いることで姿勢を変更する手法の構築を目指す。



図1 電線を配置した膜構造モデル

3. 研究の方法

3-1. 相対軌道運動 (Hill 方程式) の適用

地球を周回する膜構造の挙動を明らかにするため、膜構造をばねマス系による多粒子モデルとし(図2)衛星筐体を剛体として扱いモデル化する。軌道上での膜構造の挙動を確かめるため、Hill 方程式で表現される相対線形軌道効果を質量要素に適用し膜構造の挙動を定式化する。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。さらに軌道運動により励起される膜構造の振動を明らかにする。

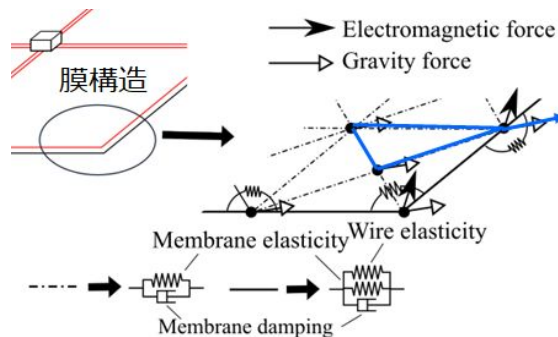


図2 多粒子系を用いたモデル化

3-2. 真空槽を用いた膜構造の実験

小さな膜構造を作製し真空槽を用いて 3-1 で導出した運動モードを確認する(図3)。膜構造には 7.1 μm 厚のポリイミドフィルムを使用し、電線を模した 35 μm 厚の銅シートを 4 ループ取り付ける。電線、膜構造の外周および軸周辺はカプトンテープによりカバーする。スピン型膜構造の挙動を模擬するため膜構造をステッピングモーターに接続し 3.0 Hz でスピン運動させる。膜構造の運動はチャンパー側面に配置したカメラ、物体の各部までの距離を測定可能な深度カメラにより観察する。励起される運動モードと 3-1 の数値シミュレーションの結果を比較する。

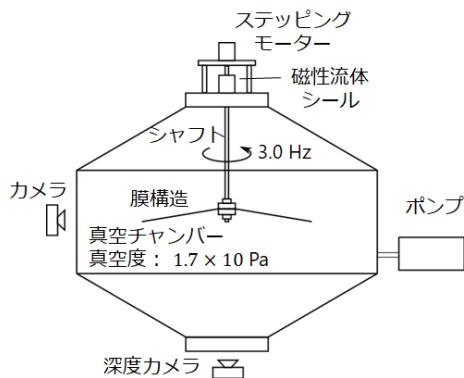


図3 真空槽を用いた試験構成

3-3. 軌道運動を積極的に用いた効率的な膜構造の姿勢変更

軌道運動により変化する宇宙環境を積極的に用いた姿勢制御手法を検討する。本研究では宇宙環境磁場が軌道により大きく変化することに着目し、膜構造に電流ループを持たせ軌道運動から姿勢変化を生じさせることで姿勢制御を行う。3-1 で構築した多粒子法による数値シミュレーションを用いて検討する。

4. 研究成果

3-1. 相対軌道運動 (Hill 方程式) の適用

はじめに本研究において用いる膜構造のダイナミクスモデルの導出を行った。まず筐体を剛体とし、膜構造を質点・ばね・ダンパ系による多粒子系として表現した。筐体にはたらく力として MTQ による磁気トルクと重力傾斜トルクを考慮した。膜構造にはたらく力として、膜構造の剛性、減衰の効果はばね・ダンパで表し、電線の剛性は並進・回転ばねとして表現した。膜構造にはたらく電磁力と軌道運動による効果は各質点にはたらく力として、環境磁場モデルと Hill の式よりそれぞれ求めた。検討では衛星が一定角速度で回転し、膜構造に振動が生じない状態を平衡点とし、平衡点からの質点の位置、筐体の姿勢、角速度のずれを微小として線形化した。得られたモデルよりモード座標系で表現した非拘束モードモデルを得た。これらの検討より、膜構造上の節が一つ以下の低次モードを以下の 4 種類に分類できることがわかった：膜構造の面外方向の振動を表すモード、面外方向への並進運動 + 面外方向周りの回転運動を表すモード、膜構造の振動と筐体の姿勢運動がカップリングするモード、膜構造の面内方向の並進運動を示すモード。相対軌道運動を考慮した際には上記最初の 3 つのモードが生じることが分かった。

3-2. 真空槽を用いた膜構造の実験

実験の様子と観測された膜構造の運動を図 4 と図 5 にそれぞれ示す。3-1 の検討より、実験環境では膜構造の面外方向の振動を表すモードが得られることが想定された。実験で得られた結果からは、想定通り筐体を模した膜構造の固定部に対して膜構造の全体が上下に運動するような振動が見られた。また深度カメラの結果から膜構造には 3.3 Hz の振動が生じたことがわかった。次に数値解析との比較を行った。得られた値は膜構造の面外方向の振動を示しており、膜構造面外方向振動の振動数は 3.1 Hz であり、実験での膜構造の運動の振動数と近い値が得られた。以上のように 3-1 の検討結果を実験より確かめた。



図 4 真空槽における試験の様子

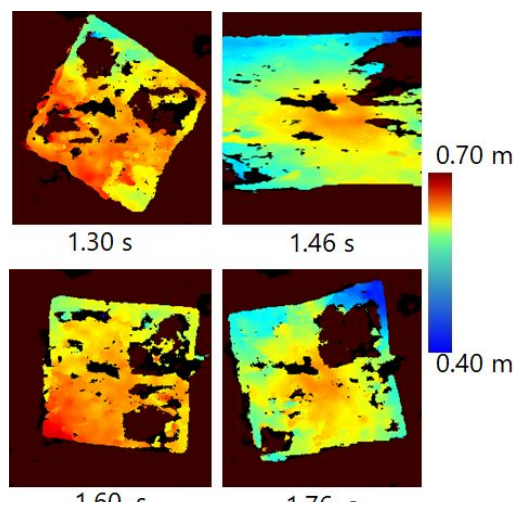


図 5 深度カメラによる取得画像

3-3. 軌道運動を積極的に用いた効率的な膜構造の姿勢変更

3-1 で得られたダイナミクスモデルから、膜構造の面ベクトル方向を地球方向に指向させる制御則を検討した。3-1 の検討から磁気トルクを用いると面外方向への並進運動 + 面外方向周りの回転運動を表すモード、膜構造の振動と筐体の姿勢運動がカップリングするモードの 2 つのモードが生じることがわかっており、これらを用いることで姿勢を変更することを検討した。磁気トルクを用いる際には磁場ベクトルの方向にはトルクを出力できないことから、トルク出力の算出には疑似逆行列を用いた。数値解析により 10m 四方の膜構造について低軌道の軌道周期の 6000s より短い時間で姿勢を変更できることを示した (図 6)。

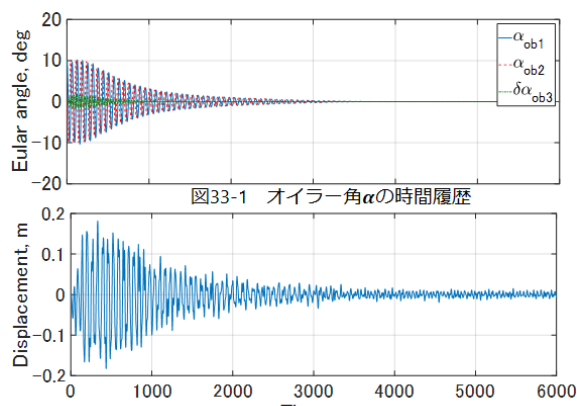


図 6 電磁力を用いた膜構造の姿勢制御結果

5. 主な発表論文等

- 1) 山田裕己, 稲守孝哉, 佐藤泰貴, 川井翼, 菅原佳城, 地球低軌道における電磁力を用いた宇宙展開膜面構造物の展開, 日本航空宇宙学会論文集, 69-5, pp.187-196, 2021.
- 2) Y. Yamada, T. Inamori, J. H. Park, Y. Satou, Y. Sugawara, and K. Yamaguchi, Attitude Control of Spin-type Membrane Structures using Electromagnetic Force in Earth Orbit, Advances in Space Research, 69-10, pp. 3864-3879, 2022.
- 3) 中山 理志, 稲守 孝哉, 山田 裕己, 柔軟構造物の軌道運動効果を考慮した相対位置・姿勢の超高精度化, 第 64 回宇宙科学技術連合講演会, 2020.

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 山田裕己, 稲守孝哉, 佐藤泰貴, 川井翼, 菅原佳城	4. 巻 69-5
2. 論文標題 地球低軌道における電磁力を用いた宇宙展開膜面構造物の展開	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 187-196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.69.187	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 Y. Yamada, T. Inamori, J. H. Park, Y. Satou, Y. Sugawara, and K. Yamaguchi	4. 巻 69-10
2. 論文標題 Attitude Control of Spin-type Membrane Structures using Electromagnetic Force in Earth Orbit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 3864-3879
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2022.02.050	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中山 理志, 稲守 孝哉, 山田 裕己
2. 発表標題 柔軟構造物の軌道運動効果を考慮した相対位置・姿勢の超高精度化
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分 担 者	佐藤 泰貴 (Sato Yasutaka) (70726760)	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・ 准教授 (82645)	

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
---------	---------