

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22760623

研究課題名(和文)次世代宇宙ゴッサマー構造のための設計探査法に関する研究

研究課題名(英文)Design Exploration of Space Gossamer Structures for Next Generation

研究代表者

坂本 啓(Sakamoto, Hiraku)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：40516001

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙システムの概念設計の段階で、不確定性や制御系との連成を考慮して、設計者のために設計空間を可視化し、迅速な設計トレードオフ評価を補助するツールがあれば、性能・信頼性の高い宇宙膜・ケーブル構造(ゴッサマー構造)システムの実現に貢献する。本研究では幾何学的非線形有限要素法を主に用い、そのような設計支援ツールの開発を目指した。具体的には以下の3つの例について、設計空間の可視化を可能にした。すなわち、(1) ソーラーセイルの一気展開制御、(2) 張力安定型リフレクタの形状推定、(3) ソーラーセイルの非同期展開、である。

研究成果の概要(英文)：The present study aimed at developing design-support tools for space gossamer (membrane-cable structure) spacecraft. The tool enables the visualization of design space during the conceptual design phase of space systems. It enables to consider the effect of parameter uncertainties or the coupling with control subsystems. Geometrically nonlinear finite-element methods are mainly used in the tool. This study has successfully applied the tools to the following three practical problems: (1) one-step deployment of a solar sail, (2) shape estimation of a tension-stabilized reflector, and (3) non-synchronous deployment motion of a solar sail.

研究分野：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：不確定性 宇宙工学 宇宙構造物 設計工学 設計支援

1. 研究開始当初の背景

人工衛星の構造設計において現在もっとも注目を集めているものの一つが、膜やケーブルといった張力部材を用いた、超軽量・高収納率の新たな宇宙構造物である。しかし、大型・高精度の宇宙ゴサマー構造を地上で設計・製作し、軌道上での性能を保証することは挑戦的である。

ゴサマー構造の大型化・高精度化が難しい原因として、地上試験が困難であることが挙げられる。ゴサマー構造は一般に、重力下では形状が維持できないほどに柔軟であるので、部分モデルやスケールモデルを用いて実験を行う。そして実験から求めた構造特性パラメータを、主に幾何学的非線形有限要素法（以後、非線形 FEM）を用いた数値解析へ反映し、フルスケールの構造の軌道上での挙動を予測する。しかしこの過程で誤差の混入は避けられないので、不確定性を考慮した信頼性評価が必要である。

2. 研究の目的

宇宙システムの概念設計の段階で、不確定性や制御系との連成を考慮して、設計者のために設計空間を可視化し、迅速な設計トレードオフ評価を補助するツールがあれば、性能・信頼性の高いゴサマー構造システムの実現に貢献すると考える。本研究ではそのような設計支援ツールの開発を目指す。

3. 研究の方法

宇宙ゴサマー構造システムに関する次の 3 つの設計問題について、不確定性や制御系との連成を考慮した新たな解析手法・手順を提案し、設計支援ツールに求められる方法論を構築する。

- (1) ソーラーセイル IKAROS の一気展開法の開発
- (2) 張力安定型の高精度宇宙リフレクタ構造の地上実験の数値解析による再現
- (3) ソーラーセイル IKAROS における形状および展開挙動の不均一性の数値解析によるモデリング

4. 研究成果

上記 (1) ~ (3) についてそれぞれ次の成果を挙げ、数値解析によるゴサマー構造設計支援の方法論の確立に貢献をした。

- (1) ソーラーセイル IKAROS の一気展開法の開発

ソーラーセイル IKAROS の展開時におけるセイル構造の動力学と、衛星バス部の姿勢制御との連成を数値解析によって評価し、実機に適用可能な姿勢制御則を提案した。ここ

では特に不確定性の高い構造パラメータ（膜の圧縮剛性と減衰率）についてパラメトリック解析を行い、提案した制御則のロバスト性を評価した。図 1 に、提案し、不確定性の高いパラメータに対するロバストを示した制御則を用いた膜面展開の様子を示す。

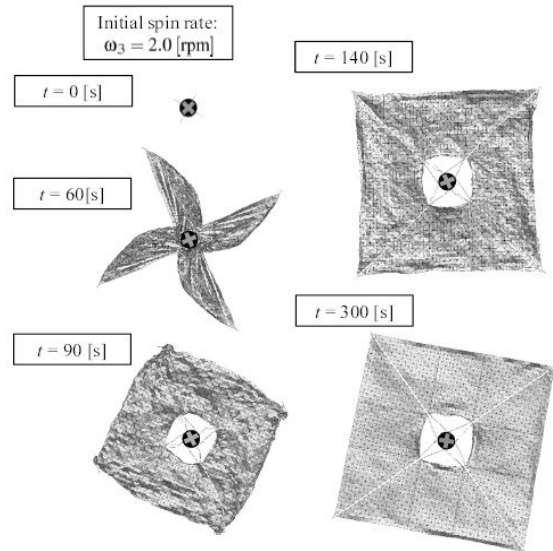


図 1 膜面の一気展開制御則の提案[c13]

しかし 20m 級の膜の動的展開という未知の現象に対してモデル化しきれない要素があり、何について地上実験を実施すべきかの課題を明確化した。

- (2) 張力安定型の高精度宇宙リフレクタ構造の地上実験の数値解析による再現

初年度は ASTRO-G のアンテナ鏡面を模擬し、ケーブルと柔軟梁からなる部分・スケール実験モデルを実験室に設置した。この実験モデルの形状計測を行い、本構造様式に存在する不確定性を、数値モデル（有限要素モデル）のパラメータの分布として定量化する手法を開発した。構造解析にはあまり使用されていない統計学手法（ブートストラップ法）を導入し、適用性を評価した。

2 年目には実験モデルをさらに大型に作り変え、張力安定型アンテナ構造において直接計測することができないパラメータを、構造の形状計測から同定する手法を開発した。具体的には、(1) 宇宙ゴサマー構造の地上実験モデルの形状計測を実施し、(2) 幾何学的非線形構造数値モデルを作成して、(3) 数値モデルのパラメータを最適化手法によって同定した。図 2 に提案手法によってパラメータ推定を実施し、実験計測形状を幾何学的非線形 FEM で高精度に模擬した例を示す。

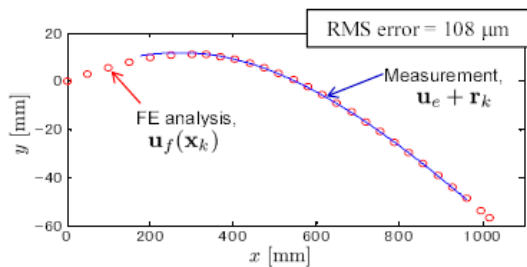


図2 張力安定構造のFEMモデル更新手法の開発[c10]

最終年度には上記アルゴリズムを改善し、解の精度を向上させて計算時間を短縮することで設計ツールとしての適用性を高めた。

- (3) ソーラーセイル IKAROS における形状および展開挙動の不均一性の数値解析によるモデリング

上記(1)-(2)と同様の考え方をソーラーセイルのアプリケーションに対しても適用し、構造の性能(展開ダイナミクスの同期性)に感度の高い設計パラメータの同定とその感度解析を可能にした。図3にソーラーセイル IKAROS の展開挙動を簡易なモデルで模擬し、不確定性の高いパラメータの影響を評価した例を示す。



図3 簡易梁モデルによるセイル膜展開挙動の再現と評価[c2]

一方で、薄膜の剛性の膜形状への影響のように、地上実験では感度が検出困難だが軌道上の荷重条件では感度が無視できないようなパラメータの影響をどのように可視化するか、という問題には課題を残した。

今後は数値解析による補償の限界を示し、実験と数値解析を融合させたゴッサマー宇宙構造物の設計手法の確立が求められる。本研究はその実現に向けた貢献をした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件) **すべて査読あり**

[j1] H. Sakamoto, M. C. Natori, S. Kadonishi, Y. Satou, Y. Shirasawa, N. Okuizumi, O. Mori, H. Furuya, M. Okuma, "Folding Patterns of Planar Gossamer

Space Structures Consisting of Membranes and Booms", Acta Astronautica, Vol. 94, Issue 1, Jan.-Feb. 2014, Pages 34-41.

[j2] H. Sakamoto, Y. Miyazaki, and O. Mori, "Transient Dynamic Analysis of Gossamer Appendage Deployment Using Nonlinear Finite Element Method," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 48, No. 5, Sept.-Oct. 2011, pp. 881-890.

〔学会発表〕(計 15 件)

[c1] 西澤匡士, 坂本啓, 大熊政明, 奥泉信克, 白澤洋次, 森治, 古谷寛, 佐藤泰貴, 「ソーラーセイル膜における面外変形の剛性への影響評価」, No. A1, 第 29 回宇宙構造・材料シンポジウム, 神奈川県相模原市, 2013 年 12 月 3 日.

[c2] 佐藤剛志, 坂本啓, 新宅健吾, 大野剛, 松永三郎, 森治, 白澤洋次, 奥泉信克, 大熊政明, 「折り目剛性を考慮した宇宙膜構造の非対称展開挙動の解析」, No. 3A02, 第 55 回構造強度に関する講演会, 北海道室蘭市, 2013 年 8 月 9 日.

[c3] H. Sakamoto, S. Kadonishi, Y. Satou, H. Furuya, Y. Shirasawa, N. Okuizumi, O. Mori, H. Sawada, J. Matsumoto, Y. Miyazaki, M. Okuma, "Development of Repeatable Storage Method for a Large Solar Sail," 2013-c-53, presented at the 29th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Nagoya, Aichi, Japan, June 6, 2013.

[c4] T. Nishizawa, H. Sakamoto, M. Okuma, H. Furuya, Y. Satou, N. Okuizumi, Y. Shirasawa, O. Mori, "Evaluation of Crease Effects on Out-of-plane Stiffness of Solar Sails," 2013-c-52, presented at the 29th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Nagoya, Aichi, Japan, June 6, 2013.

[c5] H. Sakamoto, S. Kadonishi, Y. Satou, H. Furuya, Y. Shirasawa, N. Okuizumi, O. Mori, H. Sawada, J. Matsumoto, M. C. Natori, Y. Miyazaki, M. Okuma, "Repeatability of Stored Configuration of a Large Solar Sail with Non-negligible Thickness," AIAA 2013-1804, presented at 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference, April 8-11, 2013, Boston, MA, USA.

[c6] 門西省吾, 坂本啓, 佐藤泰貴, 古谷寛, 白澤洋次, 奥泉信克, 森治, 澤田弘崇, 松本

純, 名取通弘, 宮崎康行, 大熊政明, 「厚さを考慮したセイル膜の収納再現性について」, 第 28 回宇宙構造・材料シンポジウム, 神奈川県相模原市, 2012 年 12 月 4 日.

[c7] 坂本啓, 小木首望, 田中宏明, 石村康生, 大熊政明, 「モデル更新による張力構造の高精度解析」, 第 28 回宇宙構造・材料シンポジウム, 神奈川県相模原市, 2012 年 12 月 4 日.

[c8] H. Sakamoto, M. C. Natori, S. Kadonishi, M. Okuma, "Folding Patterns of Planar Gossamer Space Structures Consisting of Membranes and Booms," No. 63, 23rd International Conference on Adaptive Structures and Technologies, Nanjing, China, Oct. 11-13, 2012.

[c9] 坂本啓, 名取通弘, 門西省吾, 大熊政明, 「厚さを考慮した平面膜の折り畳みについて」, No. 1A11, 第 54 回構造強度に関する講演会, 熊本県熊本市, 2012 年 8 月 1 日.

[c10] H. Sakamoto, N. Kogiso, H. Tanaka, K. Ishimura, and M. Okuma, "Finite-Element Model Updating for Highly Precise Tension-Stabilized Space Reflectors," AIAA 2012-1837, presented at 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference, April 23-26, 2012, Honolulu, HI, USA.

[c11] 坂本啓, N. Ragosta, 大熊政明, 「膜構造の展開挙動の有限要素解析とその妥当性確認」, No. 1B08, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 愛媛県松山市, 2011 年 11 月 30 日 ~ 12 月 2 日.

[c12] H. Sakamoto, Y. Okada, and N. Kogiso, "Finite Element Model Updating for Tension-Stabilized Flexible Space Structures," ISTS 2011-c-48, presented at the 28th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Okinawa, Japan, June 9, 2011.

[c13] H. Sakamoto, Y. Shirasawa, H. Sawada, D. Haraguchi, and O. Mori, "A Spin-up Control Scheme for Contingency Deployment of the Sailcraft IKAROS," AIAA 2011-1892, presented at the 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference, Denver, CO, USA, April 4-7 2011.

[c14] 坂本啓, 原口大輔, 白澤洋次, 森治, 「数値動解析に基づく IKAROS セイル膜の一気展開の制御則の構築」, No. 2S10, 第 54

回宇宙科学技術連合講演会, 静岡県静岡市, 2010 年 11 月 17-19 日.

[c15] D. Haraguchi, H. Sakamoto, Y. Shirasawa, and O. Mori, "Design criteria for spin deployment of gossamer structures considering nutation dynamics," AIAA 2010-8072, presented at AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Toronto, Ontario, Canada, Aug. 2-5, 2010.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願・取得なし

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 啓 (SAKAMOTO HIRAKU)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 40516001