

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18285

研究課題名(和文) データ駆動型モデリングによる大型膜面展開宇宙構造物の形状・ダイナミクス推定

研究課題名(英文) shape and dynamics estimation of large membrane space deployable structure using data-driven modeling

研究代表者

山崎 政彦 (YAMAZAKI, Masahiko)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：40632302

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：計算コストの低い低次元の数学モデルを用いた数値解析データと信頼度は高いが時間・空間的に断片的な複数の軌道上情報を融合することで、これまで明瞭に説明できなかった軌道上での膜面展開宇宙構造物の形状・ダイナミクスを効率的かつ、詳細に推定する方法の構築を目指した。具体的には以下の3つの課題に取り組んだ。課題(1)軌道上情報と数値解析の融合法の開発、課題(2)大型膜面展開宇宙構造物の軌道上運動モデルの低次元化および、その高速な並列解析コードの開発に取り組む。また、(1)、(2)の成果を基に、課題(3)「予測可能な膜面宇宙構造物システム」の構築を支援する設計法の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：The present study aimed at developing method to estimate a detailed shape and dynamics of solar sail without a huge calculation cost by fusing reduced order mathematical model and high reliability orbit spatio-temporal missing mesurment data. This study has successfully develop the method to the following three problems: (1) Development of a fusing method of orbit measurement data and numerical calculation data, (2) Model reduction of large membrane space structure mathematical model and parallel computation, and (3) Consideration about a desgin method of predictable membrane space structure.

研究分野：宇宙構造物工学，超小型宇宙機工学

キーワード：データ駆動型モデル 膜面宇宙構造物 ソーラーセイル モデル低次元化 固有直交分解

## 1. 研究開始当初の背景

膜面構造物はその名の通り非常に薄い膜面(数 $\mu$ 程度)を用いた構造物であり、重量・体積に比して大面積を確保することが可能なため、将来の惑星間航行用推進装置の実現、或いは大電力の確保を可能にする大型ソーラーパドルや大面積のサンシェード等に期待されている技術である。米国ではNASAがブーム展開方式による大型膜面構造物の実現を目指している。一方、国内では(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)を中心として、ブーム展開方式に比べより大型な構造構築が可能な遠心力展開方式に挑戦し、ソーラー電力セイル探査機 IKAROS を世界に先駆け実証している。

これら膜面展開宇宙構造物は、膜面に皺がよらないような設計や、能動的に皺をなくすることがミッション遂行に必要となり、皺やたるみの予測・推定が実用化に向けたキー技術となる。例えば、ソーラーセイルのミッションの場合には、膜面の变形により宇宙機に生じる太陽光圧トルクが変化するため、効率的な軌道・姿勢制御のためには变形の管理が重要となる。しかしながら、軌道上では計測系の時間、空間分解能、航行中の太陽光の反射等の影響により、計測情報が時間・空間的に断片的(図1:太陽光反射等によるデータ不明瞭点を有する膜面の宇宙空間での計測例)となること、太陽輻射圧や熱変形、経年劣化により時々刻々と形状や構造特性が変化していくことが原因となり、膜面構造の形状・ダイナミクスの定常的な推定には現在のところ至っていない。これまで、宇宙機本体に取り付けたカメラ、分離カメラのデータと軌道運動から膜面の大きな形状を一時的に推定する方法については検討が進められてきたが、詳細な形状・ダイナミクスを定常的に推定するには至っていない。

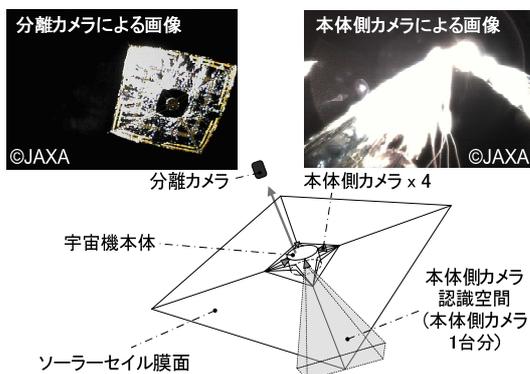


図1 宇宙空間での膜面形状の計測例

## 2. 研究の目的

計算コストの低い低次元の数学モデルを用いた数値解析データと信頼度は高いが時間・空間的に断片的な複数の軌道上情報を融合することで、これまで明瞭に説明できな

った軌道上での膜面展開宇宙構造物の形状・ダイナミクスを効率的かつ、詳細に推定する方法の構築を目的とした。

## 3. 研究の方法

課題(1)軌道上情報と数値解析の融合法の開発、課題(2)大型膜面展開宇宙構造物の軌道上運動モデルの低次元化および、その高速な並列解析コードの開発に取り組む。また、(1),(2)の成果を基に、課題(3)「予測可能な膜面宇宙構造物システム」の構築を支援する設計法の検討を行う。

## 4. 研究成果

上記の(1)~(2)についてそれぞれの成果を上げ、ソーラー電力セイルを始めとする大型膜面展開宇宙構造物を用いたミッションに貢献した。

### 課題(1)軌道上情報と数値解析の融合法の開発

複数のデータ形式を用いた形状・ダイナミクス推定コードを開発するとともに、当初の予定にはなかった、数値解析モデル(有限要素法解析モデル)を用いない新たな形状・ダイナミクス推定法の解析コードを開発することが出来た。これにより、提案手法の精度・計算コストの選択肢を広げることが可能となった(図2は有限要素法モデルを用いずに欠損データから複数回の繰り返し計算により真のモード形状を推定した結果)。

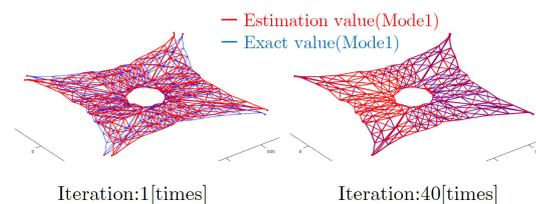


図2 真のモード形状の推定

また、位置・速度情報および計測頻度と計測領域の異なる実データに近い計測データと数値解析の融合手法の構築に取り組み、微小重力実験下(航空機によるパラボリックフライトで取得)および真空環境下での実験データの一部を意図的に欠損させ、提案手法による推定を行い、実データ(実際のノイズを含むデータに対する)推定法の有効性を確認できた。

### 課題(2)大型膜面展開宇宙構造物の軌道上運動モデルの低次元化および、その高速な並列解析コードの開発

支配方程式を低次元の部分空間で計算す

る低次元有限要素法解析モデルに加え，モデルのスパース性を利用して計算に必要な要素のみを選定し，有限要素法における重ね合わせ計算の省略と，接線剛性マトリクス，接点力ベクトルのスパース化，これまでは捨てていた計算過程でのデータを積極的に取り入れることにより反復計算の高速化方法を導入，並列計算ルーチンの一部実装と合わせて，フルモデルの計算時間に比べ 90%以上の計算コストの低減を実現できた．図 3 には四角形型ソーラーセイルの展開運動をフルモデル（要素数：9761，自由度 8007），従来の低次元モデル（要素数：9761，自由度 156），本研究で提案する低次元モデル（要素数：187，自由度：156）により計算した結果を表示した．図 4 には各モデルで計算した際の計算コストの比較をフルモデルの計算コストを 100 として表示した．

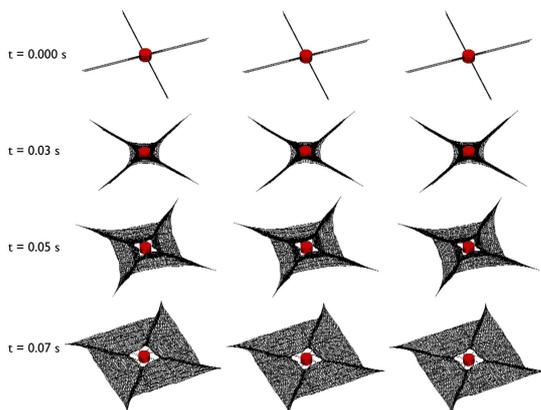


図 3 展開運動のモデル別比較（左：フルモデル，中：低次元モデル（従来モデル），右：低次元モデル（90%計算コスト削減モデル））

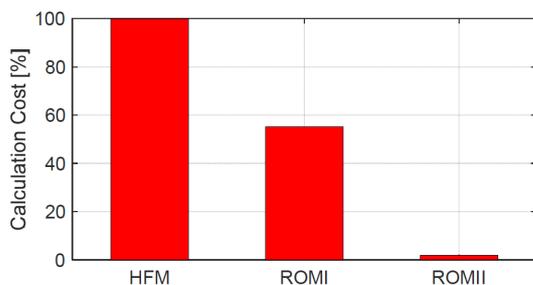


図 4 展開運動のモデル別計算コスト比較（HFM：フルモデル，ROMI：低次元モデル（従来モデル），ROMII：提案する低次元モデル）

### 課題（3）「予測可能な膜面宇宙構造物システム」の構築を支援する設計法の検討

課題（3）では，課題（1），課題（2）の結果を踏まえ「予測可能な膜面宇宙構造物システム」の構築を支援する設計法の検討を行い，小型モデルから大型モデルを予測するための相似則および，相似パラメータの時間・空間的緩和法の構築について取り組み，

微小重力，真空下での実験により妥当性を評価した．課題（1）の軌道上での運動の推定，課題（2）の軌道上運動の低コスト予測，および，課題（3）の中で実施した相似則は，対象の構造配置や，計測機器の配置，計測間隔などを上手く設定することで大幅に効果が大きくなることが確認でき，課題の（1），（2），（3）を実施することによる「予測可能な膜面宇宙構造物システム」の実現に向けた方向性を明確にできた．

今後は数値解析による推定の限界および推定に必要なコンフィギュレーションを示し，実験と数値解析を融合させた膜面宇宙構造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

〔雑誌論文〕（計 6 件）

Shoji Kawazoe, Masahiko Yamazaki, Yasuyuki Miyazaki, Estimation Method of Missing Components for Spin Deployable Membrane Dynamics, Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, AIAA SciTech Forum, AIAA 2018-2159, pp.1-14, DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2018-2159>, 2018. 査読有．

Tomohiro Suzuki, Shuto Suzuki, Masahiko Yamazaki, Yasuyuki Miyazaki, Similarity Rule of Deployment Behavior for Spin Deployment Membrane, Proceedings of AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech Forum, AIAA 2018-1438, pp.1-9, DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2018-1438>, 2018, 査読有．

Yuki Tatematsu, Tomohiro Suzuki, Masahiko Yamazaki, Yasuyuki Miyazaki, Verification of the Similarity Rules for Spin Deployment Membrane in the ground experiment, Proceedings of 4th AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech Forum, AIAA 2017-1114, pp.1-9, DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2017-1114>, 2017, 査読有．

Masahiko Yamazaki, Data Driven Model for Efficient Prediction and Estimation of Spin Type Membrane Space Structure Dynamics, Proceedings of 4th AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech

Forum, AIAA 2017-1112, pp.1-13, DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2017-1112>, 2017, 査読有.

Masahiko Yamazaki, Kyohei. Mita, Yasuyuki Miyazaki, Empirical Data Driven Model for Sail Membrane Dynamics Estimation, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 14, pp.65-71, 2016, 査読有.

Masahiko Yamazaki, Empirical Data Driven Model for Shape and Dynamics Estimation of Large Deployable Membrane Space Structure, Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, AIAA SciTech Forum, AIAA 2016-0679, pp.1-13, DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2016-0679>, 2016, 査読有.

[学会発表](計 12 件)

Shoji Kawazoe, Masahiko Yamazaki, Yasuyuki Miyazaki, Estimation Method of Missing Components for Spin Deployable Membrane Dynamics, The 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-c-43, pp.1-6, 2017.

Tomohiro Suzuki, Yasuyuki Miyazaki, Masahiko Yamazaki, Similarity Rule of Deployment Behavior for Spin Deployment Membrane, The 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-c-47, pp.1-6, 2017.

Masahiko Yamazaki, Data Driven Model Reduction for Spin-type Membrane Space Structure, The 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-c-42, pp.1-6, 2017.

Hiraku Sakamoto, Hiroki Nakanishi, Hiroshi Furuya, Masahiko Yamazaki, Yasuyuki Miyazaki, Akihito Watanabe, Kazuki Watanabe, Ayako Torisaka-Kayaba, Development of CubeSat OrigamiSat-1 for Space Demonstration of Deployable Membrane Structure Technologies, The 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-f-023, pp.1-6, 2017.

Hiroki Nakanishi, Hiraku Sakamoto, Hiroshi Furuya, Masahiko Yamazaki, Yasuyuki Miyazaki, Akihito

Watanabe, Kazuki Watanabe, Ayako Torisaka-kayaba, Mitsushige Oda, Development of Nano-Satellite OrigamiSat-1 with Highly Functional Deployable Membrane, Proceedings of 4th international symposium for Solar Sailing, 17085, 2017.

山田諭, 丸木悠暉, 山崎政彦, 宮崎康行, 微小重力環境下でのインフレーションチューブの伸展挙動解析, 第60回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp.1-5, 2016年.

山崎政彦, 立松裕基, 田村明寛, 多田伸, 山田諭, 河原林大思, 鈴木智大, 宮崎康行, 坂本啓, 航空機パラボリックフライトによる宇宙展開構造物の微小重力環境実験, 第60回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp.1-5, 2016年.

立松裕基, 鈴木智大, 山崎政彦, 宮崎康行, 微小重力環境下実験を用いた遠心力展開膜面の展開挙動相似則の検証, 第60回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp.1-5, 2016年.

Yuki Tatematsu, Tomohiro Suzuki, Masahiko Yamazaki, Yasuyuki Miyazaki, Similarity Rules for Spin Deployment Membrane, The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics, ACMD2016, 2016.

Masahiko Yamazaki, Yasuyuki Miyazaki, Empirical Data Driven Model for Sail Membrane Dynamics Estimation, The 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015-c-22, pp.1-7, 2015.

Yuki Maruki, Masahiko Yamazaki, Yasuyuki Miyazaki, Ground Experiments of Deployment of Inflatable Membrane Structure of Nano-Satellite "SPROUT", The 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015-c-19, pp.1-7, 2015.

Hiraku sakamoto, Hiroki Nakanishi, Masahiko Yamazaki, Yasuyuki Miyazaki, Hiroshi Furuya, Akihito Watanabe, Kazuki Watanabe, and Mitsushige Oda, CubeSat Design for Space Demonstration of Deployable Membrane Structure Technologies, The 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015-f-74, pp.1-7, 2015.

〔その他〕

宮崎・山崎研究室 Web :

<http://forth.aero.cst.nihon-u.ac.jp/>

山崎班 Web :

[http://forth.aero.cst.nihon-u.ac.jp/yamazaki/web\\_yamazaki/index.html](http://forth.aero.cst.nihon-u.ac.jp/yamazaki/web_yamazaki/index.html)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

山崎 政彦 (YAMAZAKI, Masahiko)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号 : 40632302