

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360357

研究課題名（和文） ゴサマー多体力学の解構造

研究課題名（英文） Solution Structure of Gossamer Multi-body Dynamics

研究代表者

宮崎 康行 (MIYAZAKI YASUYUKI)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30256812

研究成果の概要（和文）：本研究では、薄膜やケーブルなどのゴサマー構造と、それを支持する宇宙機本体等から成るゴサマー多体構造物の変形と運動について、その特徴を理論・数値シミュレーション・地上実験により明らかにした。そして、その理論・数値解析手法を JAXA の小型実証機 IKAROS の設計・開発へ適用し、IKAROS の軌道上データとの比較により、その妥当性を宇宙実証した。最後に、ゴサマー構造物の実用化に向けた新しい解析手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：This research clarified the characteristics of the deformation and the dynamics of the gossamer multi-body structure, which consists of the gossamer structure, i.e. thin membrane and cable, and its back-up structure such as the spacecraft main body. The research includes the formulation of the theory, numerical simulation, and the ground experiment. The proposed theory and the numerical method were applied to the design and the development of the small solar sail demonstrator “IKAROS” developed by JAXA, and their validity was proved in space by comparing with the flight data of IKAROS. Finally, a new analytical method of gossamer structure was proposed to contribute to put the structure into practical use.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2011年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	12,800,000	3,840,000	16,640,000

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：構造保存解法・解構造・ゴサマー構造・多体力学

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、ゴサマー多体力学の理論研究は、まだ研究代表者以外、ほとんどやられておらず、そのような中で、JAXA の小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS の打ち上げが予定されているという状況であった。研究代表者は、既に自身のゴサマー多体力学の理論および数値解法を IKAROS の設計・開発に適用しており、あとは IKAROS が打ち上げられ、

軌道上データと自身の予測解析とを比較することで自身の研究を宇宙実証すればよいという状態であった。

しかしながら、実際に IKAROS の実機開発の過程で、次の5点を確立することの必要性を痛感した。

(1)より精密で、かつ、開発期間の短縮化に対応できる、より高速な数値解析手法：ゴ

サマー構造は微小なリンクルが多数発生するが、リンクルの系全体に与える影響の解明には、高速な大規模計算ツールが必須。

(2) 地上実験結果に基づく数値解析の精度評価法：数値解析の精度を評価できるだけの精緻かつ汎用性のある地上試験法を提示しなければ、数値解析結果の評価は困難。

(3) 数値解析の誤差評価理論：ゴサマー宇宙構造物の研究・開発では、地上試験の困難さ（重力や空気力等の影響が大きい）から、数値解析が極めて重要となる。しかし、リンクルの発生・消滅、すなわち、分岐解の振舞いは有限要素法のメッシュ分割や桁落ち誤差等の影響を受けやすいので、分岐解が系全体に与える影響を理論的に評価できなければ、数値解析の評価は困難。

(4) より簡易で、かつ、妥当な解を得られる低次元化モデルの構築法：制御関連等の迅速な研究・開発には低自由度モデルは必須。

(5) ゴサマー宇宙構造物の設計標準

特に、実際に IKAROS も含め、実機開発が先行しているにも関わらず、上記5項目が解決していないことに、一研究者として危機感を抱いていた。そこで、究極の目標である上記(5)の設計標準（設計手法）の確立に向けて、本研究では、残りの4つの解決を目指そうと考えた。

2. 研究の目的

前節の背景を踏まえ、本研究ではその目的を以下の4つの課題の解決とした。

課題1 精密・大規模なゴサマー多体構造物モデルの運動の高速な並列解析コードの開発

課題2 精緻で汎用性のある地上実験法と実験結果に基づく数値解析の精度評価法の提案

課題3 分岐構造が系全体に与える影響を考慮した数値解析の誤差評価理論の構築

課題4 解構造の必要な部分を保存するモデル低次元化法の構築

そして、これらの課題を解決することにより、ゴサマー多体力学の解構造を解明し、研究者・開発者の理解を深め、同時に、数値計算の信頼性を高めることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

2節に示した4つの課題について、それぞれ以下の方法で研究を実施した。

課題1 精密・大規模なゴサマー多体構造物モデルの運動の高速な並列解析コードの開発：研究代表者が開発したゴサマー多体

力学の保存型解法の並列解析コード NEDA2.0 をベースに、大規模で高速な並列解析コードを開発し、IKAROS の軌道上データとの比較により、コードの妥当性を実証する。そして、JAXA による次期ソーラーセイルの研究・開発に適用する。

課題2 精緻で汎用性のある地上実験法と実験結果に基づく数値解析の精度評価法の提案：膜面の変形および荷重計測を行う実験装置を開発して数値計算結果と比較することで、リンクルやスラックの発生・消滅を高精度で再現する膜要素を開発する。また、高真空下での1m級ゴサマー多体構造物の高速展開ダイナミクスの計測をカメラによるステレオ視を用いて行う実験装置を開発し、画像データと数値計算結果から変形形状を数値的に再構築する手法を開発する。

課題3 分岐構造が系全体に与える影響を考慮した数値解析の誤差評価理論の構築：課題1で開発するコードを用いてゴサマー多体構造物の運動を解析し、収束誤差や桁落ち誤差によって発生した複数の解の関係を明らかにし、それらの時間発展による差の拡大、すなわち、誤差範囲を評価する。その際、時々刻々の接線剛性マトリクスの固有値解析により、それら複数の解と静的分岐解との関係を明らかにする。

課題4 解構造の必要な部分を保存するモデル低次元化法の構築：課題3の結果に基づき、解構造（エネルギー・運動量・角運動量、拘束条件、主要な分岐解等）を保存する低次元モデルの構築法を定式化し、課題1の計算結果と比較することで低次元モデル構築法の妥当性を評価する。

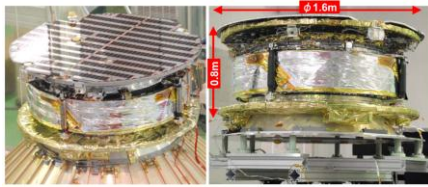
4. 研究成果

前節に掲げた4つの課題を解決し、それぞれ、以下の研究成果を挙げる事ができた。

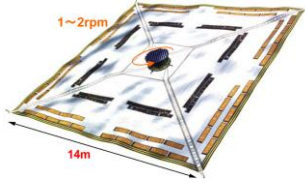
(1) 精密・大規模なゴサマー多体構造物モデルの運動の高速な並列解析コードの開発

開発したコードを用いて IKAROS の打ち上げ前に、軌道上挙動予測解析をおこなった。IKAROS は直径約 1.6m の円筒型の宇宙機本体の側面に膜面を巻き付けておき、軌道上でそれを展開することで一辺が 14m の正方形のセイルを展開する（図1）。そのセイル構造は、厚さ 12.5・m の4つの台形状のポリイミド膜に図2のように多くの貼付物を添付し、ブリッジ膜で結合するというもので、これを詳細にモデル化し、展開挙動の予測する数値解析ツールを整えた（図3）。

そして、2010年5月21日に打ち上げられたソーラー電力セイル小型実証機 IKAROS（図4）の軌道上挙動予測および運用結果解析に適用した（雑誌論文⑨～⑪、学会発表⑦～⑨、⑪、⑬、⑮。以下、雑⑨、学⑦等と記す）。



(a) 膜面収納時



(b) 膜面展開時

図1 IKAROS

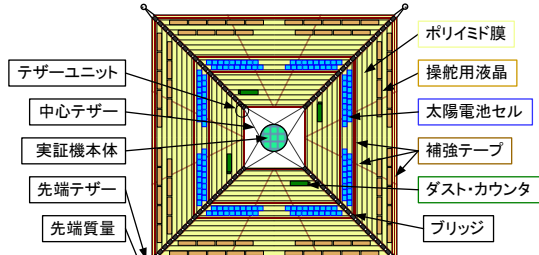


図2 IKAROSのセイル膜面構造

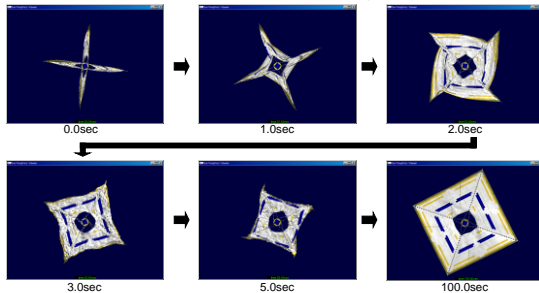


図3 IKAROSの展開予測解析例

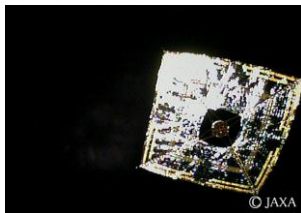


図4 IKAROSの軌道上撮影画像

図5はIKAROSの膜展開時のスピンのフライトデータとNEDAによる計算結果とを比較したものであり、定性的に非常によく合致していることがわかる。27secあたりまで、若干のずれがあるが、これはIKAROSの膜が非対称展開をしたためであり、その原因についても研究した(学①)。

このように、IKAROSのフライトデータとの比較によりNEDAの解析理論・数値計算手法が実証されたことで、この知見を活かして次期ソーラーセイルの開発に向けた研究を実施するに至った(雑①, 学③)。なお、IKAROSの開発・運用については学会誌による解説記事を4編発表した(雑②~⑤)。また、文献

雑②によりAIAAのBest Paper in Gossamer Systemsを受賞した。

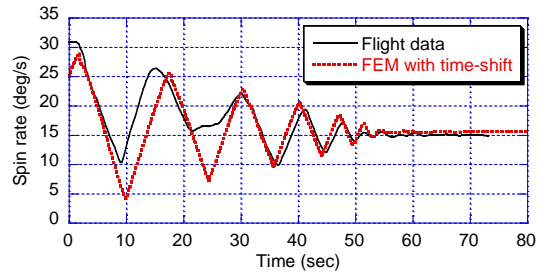


図5 スピンの比較

(2) 精緻で汎用性のある地上実験法と実験結果に基づく数値解析の精度評価法の提案

まず、図6のようなレーザ変位計による変形状計測及びロードセルによる荷重計測を行う小型(100×300)のリンクル計測装置を製作した。図7は矩形膜面にせん断変位を与えた際のリンクル形状の計測例である。

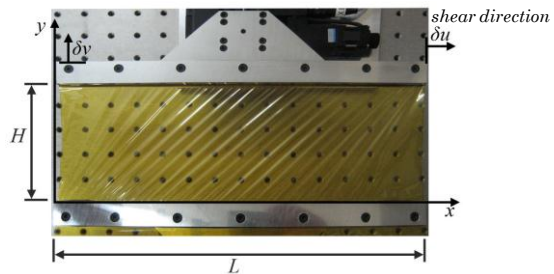


図6 膜面のリンクル計測装置

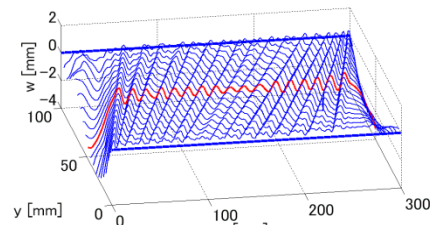


図7 膜面のリンクル計測例

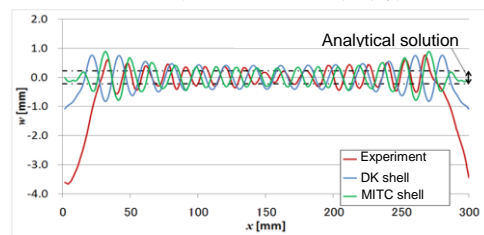


図8 シェル要素の計算と実験との比較

図8はシェル要素(DK要素及びMITC要素)と実験結果との比較であり、DK要素による計算が実験とよく符合することを確認し、本研究で提案する3つの膜要素と比較した。図9は膜の主応力分布を表しており、Mod-SRMモデルと呼んでいる、圧縮を受ける膜の非線形な構成則を仮定するモデルが最もDK要素の特徴をとらえていることを明らかにした。

また、Φ1800, H1000, 真空度0.001Paの真空層とカメラ2台を用いて、スピン展開膜

の三次元形状のステレオ視法により再構築を行う実験装置を開発した。図 10 は撮影写真と再構築した例である。この開発により、 $\Phi 1200$ 程度の比較的大型の膜面を高真空下でスピン展開し、その運動を誤差 0.4mm 程度と高精度で数値化することが可能となった。

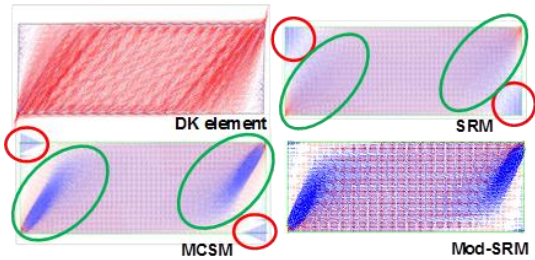


図 9 膜要素と DK 要素の比較

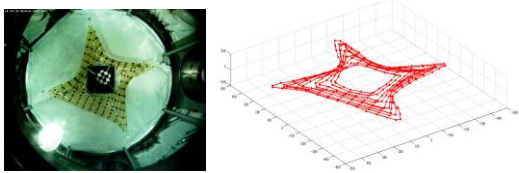


図 10 膜面形状の再構築

また、これに合わせて、計測点が膜面自身の影となって映らなかった場合など、画像に欠損データがある場合の再構築法も研究し、Gappy POD による再構築方法が有効であることを示した (今後発表予定)。

以上より、膜面の静的変形と展開運動を高精度に計算・地上実験する方法を確立した。

(3) 分岐構造が系全体に与える影響を考慮した数値解析の誤差評価理論の構築

膜面の運動解析中に接線剛性マトリクスの最少固有値が 0 以下となった状態で次の時間ステップでの解を求める際、その固有値に対等した固有ベクトル方向に微小変位を与えたものを初期値として解を求めることで、与えなかった場合と異なる解に誘導・収束させることができることを示した。図 11 は 2 辺を拘束された正方形膜に強制変位を瞬間的に与えた後の運動を計算した例であり、誘導しない場合とした場合との観測点の座標の差の時間変化を示したものである。この図の通り、座標の差は無視できないほど大きなものとなっており、接線剛性マトリクスの最低固有値方向 (静的分岐解方向) に誘導する方法が有効であることを明らかにした。

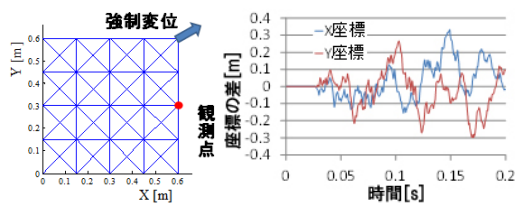


図 11 複数解の誘導

(4) 解構造の必要な部分を保存するモデル低次元化法の構築

いくつかのモデル低次元化手法を試した結果、引張時と圧縮時とで剛性が不連続に変化するというゴサマー多体構造に適した手法として、経験的固有直交分解による解空間の低次元化が最も適していることをつきとめた。そして、低次元空間の自由度決定法やパラメータ解析など設計時における低次元モデルの利用法を提案し、かつ、低次元モデルによる (フルモデルとの) 誤差の推定法を提案した (図 12, 雑⑦, ⑧, ⑬, ⑭, 学④, ⑪, ⑮)。そして、IKAROS を模した膜面のスピン展開解析において、適切にフルモデルを模擬でき、かつ、誤差の推定を良好に行えることを示した (図 13)。

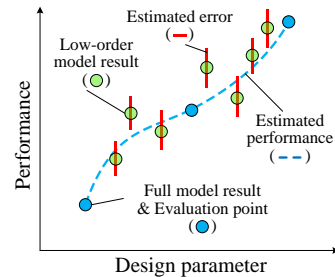


図 12 フルモデルとの比較を最小限に抑えた低次元モデルの利用と誤差推定

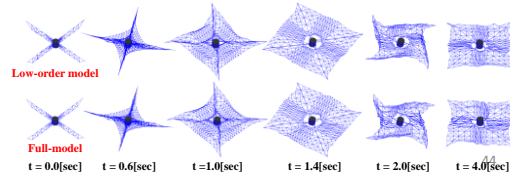


図 13 フルモデルと低次元モデルの比較

以上により、当初の研究目的を達成することができた。

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 14 件)

- ① Hiraku Sakamoto, Shogo Kadonishi, Yasutaka Satou, Hiroshi Furuya, Yoji Shirasawa, Nobukatsu Okuizumi, Osamu Mori, Hirotaka Sawada, Jun Matsumoto, Michihiro Natori, Yasuyuki Miyazaki, Masaaki Okuma, "Repeatability of Stored Configuration of a Large Solar Sail with Non-negligible Thickness", AIAA-2013-1804, (Proc. 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference), pp. 1-15, Apr 2013, DOI:10.2514/6.2013-1804, 査読有
- ② 白澤洋次, 宮崎康行, 奥泉信克, 坂本啓, 森治, 澤田弘崇, 古谷寛, 松永三郎, 名取通弘, 津田雄一, 川口淳一郎, 「IKAROS の

- セイル展開解析」, 日本航空宇宙学会誌, 61(1), pp.14-21, 2013, 査読無
- ③ 澤田弘崇, 森治, 奥泉信克, 白澤洋次, 宮崎康行, 名取通弘, 坂本啓, 古谷寛, 松永三郎, 稲川慎一, 木村真一, 津田雄一, 「IKAROSのセイル展開ミッション」, 日本航空宇宙学会誌, 60(12), pp.429-437, 2012年12月5日, 査読無
- ④ 宮崎康行, 「ソーラーセイル・イカロスの膜構造解析」, 日本計算工学会誌「計算工学」, 17(2), pp.28-35, 2012, 査読無
- ⑤ 奥泉信克, 白澤洋次, 宮崎康行, 森治, 「小型ソーラ電力セイル実証機 IKAROSの薄膜セイル展開挙動」, 日本マイクログラフィティ応用学会誌, 29(1), 2012, pp.48-55, 2012年1月31日, 査読無
- ⑥ Hiraku Sakamoto, Yasuyuki Miyazaki, and Osamu Mori, “Transient Dynamic Analysis of Gossamer Appendage Deployment Using Nonlinear Finite Element Method”, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 48(5), pp.881-890, September 2011, DOI: 10.2514/1.52552, 査読有
- ⑦ Masahiko Yakazaki and Yasuyuki Miyazaki, “Error Estimation of Low-Order Model for Gossamer Muti-body Structure”, *AIAA-2011-6281 (Proc. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference 2011)*, pp.1-9, August 2011, DOI:10.2514/6.2011-6281, 査読有
- ⑧ Masahiko Yakazaki and Yasuyuki Miyazaki, “Empirical Model Reduction of Geometrical Constrained Gossamer Structures”, *Journal of System Design and Dynamics, Special Issue of Asian Conference on Multi-Body Dynamics 2010*, 5(3), pp.441-449, April 28, 2011, DOI: 10.1299/jsdd.5.441, 査読有
- ⑨ Yasuyuki Miyazaki, Yoji Shirasawa, Osamu Mori, Hirotaka Sawada, Nobukatsu Okuizumi, Hiraku Sakamoto, Saburo Matunaga, Hiroshi Furuya, and Michihiro Natori, “Conserving Finite Element Dynamics of Gossamer Structure and Its Application to Spinning Solar Sail “IKAROS””, *AIAA-2011-2181 (Proc. 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference)*, pp.1-17, April 2011, DOI:10.2514/6.2011-2181, 査読有
- ⑩ Hiroshi Furuya, Osamu Mori, Hirotaka Sawada, Nobukatsu Okuizumi, Yoji Shirasawa, Michihiro Natori, Yasuyuki Miyazaki, and Saburo Matunaga, “Manufacturing and Folding of Solar Sail ‘IKAROS’”, *AIAA-2011-1967 (Proc. 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference)*, pp.1-4, April 2011, DOI:10.2514/6.2011-1967, 査読有
- ⑪ Yoji Shirasawa, Osamu Mori, Yasuyuki Miyazaki, Hiraku Sakamoto, M Hasome, Nobukatsu Okuizumi, Horotaka Sawada, Hiroshi Furuya, Saburo Matunaga, and Michihiro Natori, “Analysis of Membrane Dynamics using Multi-Particle Method for Solar Sail Demonstrator “IKAROS””, *AIAA-2011-1890 (Proc. 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference)*, pp.1-14, April 2011, DOI:10.2514/6.2011-1890, 査読有
- ⑫ Hirotaka Sawada, Osamu Mori, Nobukatsu Okuizumi, Yoji Shirasawa, Yasuyuki Miyazaki, Michihiro Natori, Saburo Matunaga, Hiroshi Furuya, and Hiraku Sakamoto, “Mission Report on The Solar Power Sail Deployment Demonstration of IKAROS”, *AIAA-2011-1887 (Proc. 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference)*, pp.1-11, April 2011, DOI:10.2514/6.2011-1887, 査読有
- ⑬ Masahiko Yakazaki and Yasuyuki Miyazaki, “Low-Order Model of Spin Type Solar Sail Dynamics by Empirical Model Reduction”, *AIAA-2011-1891 (Proc. 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference)*, pp.1-8, April 2011, DOI:10.2514/6.2011-1891, 査読有
- ⑭ Masahiko Yamazaki and Yasuyuki Miyazaki, “Empirical Model Reduction of Spinning Solar Sail,” *Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, Vol.8, No.ists27, Pc_35-Pc_40, December 29, 2010*, 査読有, https://www.jstage.jst.go.jp/article/tastj/8/ists27/8_ists27_Pc_35/_pdf
- [学会発表] (計17件)
- ① Go Ono, Kengo Shintaku, Yoji Shirasawa, Osamu Mori, Yasuyuki Miyazaki, and Saburo Matunaga, “Study of Asynchronous Solar Sail Deployment using Finite Element Method”, *The 29th International Symposium on Space Technology and Science (29th ISTS)*, Jun 6, 2013, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan (予定).
- ② 井上祥子, 屋宮拓海, 宮崎康行, “膜面構造物におけるしわの解析手法と実験の紹介”, 第21回スペース・エンジニアリング・

- コンファレンス, 2013年1月25日-26日, 祝戸荘, 奈良
- ③ 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」, 宇宙構造材料シンポジウム, 2012年12月4日, JAXA, 相模原
- ④ Masahiko Yamazaki and Yasuyuki Miyazaki, "Model Order Reduction for Nonlinear Structural Dynamics of Membrane Space Structure, Sagami-hara", 2012 ISAS 22th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, July 30, 2012.
- ⑤ 屋宮拓海, 井上祥子, 宮崎康行, 「薄膜のしわの解析モデルの検証について」, 第20回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2012年1月27日, ホテルクレセント, 仙台.
- ⑥ 早瀬 亮, 亀村 裕之, 宮崎 康行, 「薄膜の折り目の力学モデルに関する研究」, 第53回構造強度に関する講演会, 2012年7月27日, ジョイナス, 秋田.
- ⑦ Yasuyuki Miyazaki, Yoji Shirasawa, Osamu Mori, and Hirotaka Sawada, "Finite Element Analysis of Deployment of Gossamer Space Structure", Multibody Dynamics 2011, ECCOMAS Thematic Conference, Université catholique de Louvain, Brussels, Belgium, July 5, 2011.
- ⑧ Yoji Shirasawa, Osamu Mori, Yasuyuki Miyazaki, Hiraku Sakamoto, Mitsue Hasome, Nobukatsu Okuizumi, Hirotaka Sawada, Saburo Matunaga, Hiroshi Furuya, Jun'ichiro Kawaguchi, "Evaluation of Membrane Dynamics of IKAROS Based on Flight Result and Simulation Using Multi-Particle Model", 28th ISTS, Okinawa Convention center, Okinawa, June 10, 2011.
- ⑨ Hirotaka Sawada, Osamu Mori, Nobukatsu Okuizumi, Yoji Shirasawa, Yasuyuki Miyazaki, Michihiro Natori, Saburo Matunaga, Hiroshi Furuya, Hiraku Sakamoto, "Evaluation of Solar Power Sail Deployment Mechanism of IKAROS", 28th ISTS, Okinawa Convention center, Okinawa, June 10, 2011.
- ⑩ Ryo Hayase, Yasuyuki Miyazaki, Hiroyuki Kamemura, and Shoko Inoue, "A Study on Mechanical Model of Crease of Membrane", 28th ISTS, Okinawa Convention center, Okinawa, June 8, 2011.
- ⑪ Masahiko Yamazaki and Yasuyuki Miyazaki, "Low-order Modeling and Experimental Validation of Spin Type Solar Sail Dynamics", 28th ISTS, Okinawa Convention center, Okinawa, June 8, 2011.
- ⑫ 宮崎康行, 白澤洋次, 澤田弘崇, 森治, IKAROS 構造系専門部会, 「IKAROS」のセイル膜展開挙動の予測・検証法について」, 第19回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 熊本, 2011年1月27日.
- ⑬ 澤田弘崇, 森治, 奥泉信克, 白澤洋次, 宮崎康行, 名取通弘, 松永三郎, 古谷寛, 坂本啓, 「IKAROS セイル展開ミッションの軌道上結果について」, 第54回宇宙科学技術連合講演会, 静岡, 2010年11月18日.
- ⑭ 宮崎康行, 白澤洋次, 森治, 奥泉信克, 澤田弘崇, 松永三郎, 牟田梓, 「IKAROSのセイル膜の二次展開シミュレーションと軌道上展開結果」, 第54回宇宙科学技術連合講演会, 静岡, 2010年11月18日.
- ⑮ Masahiko Yamazaki and Yasuyuki Miyazaki, "The Dynamics of Square Type Spinning Solar Sail", International Space Conference of Pacific-basin Societies 2010, Montreal, Canada, July 27, 2010.
- ⑯ Yoji Shirasawa, Osamu Mori, Nobukatsu Okuizumi, Hirotaka Sawada, Yasuyuki Miyazaki, Hiraku Sakamoto, Hiroshi Furuya, and Saburo Matunaga, "Analysys of Membrane Deployment Dynamics of Solar Sail using Multi- Particle Model", The 20th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, 相模原, July 26, 2010.
- ⑰ 早瀬亮, 宮崎康行, 「膜の折り目の力学モデルについての一考察」, 第52回構造強度に関する講演会, 鳥取, 2010年7月21日.

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 康行 (MIYAZAKI YASUYUKI)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 30256812

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし