

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04204

研究課題名(和文) 大型ゴッサマー多体宇宙構造物の運動予測法の確立と運動の理解

研究課題名(英文) Establishment of Prediction Method of Dynamics of Large Gossamer Multi-body Space Structures and Understanding of Their 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、大型膜面やケーブルなどのゴッサマー構造と伸展ブームや宇宙機本体などの支持構造から成る大型ゴッサマー多体宇宙構造物の高速・高精度の運動解析理論の構築と、展開などの運動の予測法の確立、それによる運動の本質の理解を目的とし、次の3つの課題を解決した。すなわち、ゴッサマー多体力学の構造保存型大規模並列解析コードNEDA3.0の完成とソーラーセイルへの適用、スピン展開膜面の相似則構築と微小重力実験による検証、高非線形動的システムの運動予測法と運動の分解法の構築。そして、研究の集大成として、自己展開膜面トラスの設計・解析法を提案し、30m級モデルの展開実験に成功した。

研究成果の概要(英文)：The objectives of this research are 1) construction of fast and highly precise analysis theory of the dynamics of large gossamer multi-body (GMD) that consists of the gossamer structure such as thin membranes and cables, and the support structure such as extensible booms, 2) the establishment of the numerical prediction method of nonlinear motion, and 3) understandings of the essence of the motion. The following were completed to achieve the objectives; 1) development of the numerical code NEDA3.0 for parallel computing of large scale GMD based on structure conserving algorithm, 2) establishment of scaling law of spin-deployment membrane and its verification by micro-gravity experiment, and 3) establishment of motion prediction and the motion decomposition methods of highly nonlinear dynamic system. In the result, the design and analysis method of self-deployable membrane truss structure was presented, and the deployment experiment of its 30m scale model was achieved on the ground.

研究分野：宇宙構造物工学

キーワード：宇宙構造物 宇宙インフラ 柔軟多体力学 構造保存解法 運動予測 自己展開構造

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は JAXA のソーラー電力セイル実証機 IKAROS (図 1) の開発に参加し、構造保存解法に基づく自身の解析コード NEDA[27]を並列化した NEDA 2.0 でセイルの展開を解析した。そして、フライトデータと比較し、NEDA2.0 の優れた予測能力を実証した (図 2)。

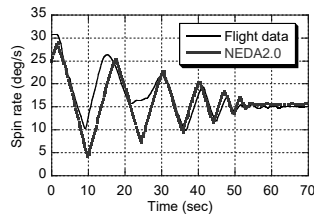
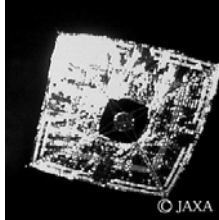


図 1 IKAROS 図 2 フライトとの比較

その後、IKAROS の 16 倍の次期セイル IKAROS2 (現 OKEANOS) 計画に参加し、NEDA2.0 を関係者に提供した。そこでは次の 3 点が問題となった。

【問題点 1】IKAROS 成功から 4 年経った当時でも、IKAROS 規模(14m 四方)の膜面の展開解析に成功しているのは NEDA2.0 とバネ・マス近似法ぐらいであり、後者では誤差を生じることがわかっている。一方、**NEDA2.0 も、次期セイルの解析には、現状の定式化法では計算時間が膨大となる。**

【問題点 2】大型ゴッサマー宇宙構造物は、その運動が重力と空気力の影響を大きく受けやすく、実機サイズの地上試験が困難である。そこで、重力下での小規模真空実験結果から軌道上での実機の運動を予測する相似則の研究がなされているが、**信頼度の高い相似則は得られていない。**

【問題点 3】実機の開発・運用計画立案においては、各設計パラメータが展開運動全体に与える影響を解析し、想定される同定誤差が問題にならないことを確認した上で、運動予測・評価をする必要があるが、これには**多ケースのパラメータ計算を必要とし、膨大な計算時間を要する。**

そこで、これら 3 つに対応した研究課題を設定し、それらを解決することで大型ゴッサマー多体構造物の実用化を目指そうと考えた。その際、OKEANOS を想定した**大型スピン展開膜と、自己展開膜面トラス (図 3) の 2 つを具体的な解析例として研究を進めることが、研究の波及効果が高い**と考えた。

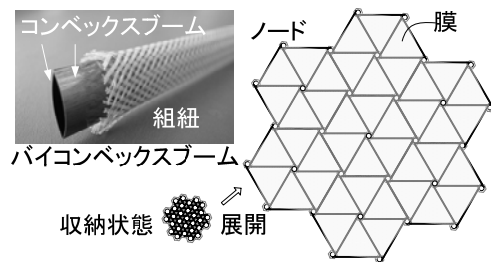


図 3 自己展開膜面トラス

2. 研究の目的

本研究は、大型膜面やケーブルなどのゴッサマー構造と伸展ブームや宇宙機本体などの支持構造から成る**大型ゴッサマー多体宇宙構造物の高速・高精度の運動解析理論**の構築と、展開などの**運動の予測法の確立**、それによる**運動の本質的理解**を目的とし、次の課題を解決することとした。

- 【課題 1】** 構造保存型ゴッサマー多体力学の大規模並列解析コードの完成と実機設計への適用
- 【課題 2】** 地上実験と数値計算を合わせた大型ゴッサマー構造物の軌道上運動の相似則構築
- 【課題 3】** 高非線形動的システムの運動予測法構築とモデル低次元化法による運動の本質的理解

以上により、本研究は①ソーラーセイルや太陽発電用構造物など**大型ゴッサマー宇宙構造物の設計法確立**に貢献し、②構造保存解法等、**応用数学の発展**、③柔軟多体力学や並列非線形 FEM など**計算工学の発展**に寄与し、大型ゴッサマー多体構造物の利用を画期的に拡大する道を拓くことを目指した。

3. 研究の方法

2 節で示した 3 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。

- (1) 解析コード NEDA3.0 の完成と OKEANOS の設計・解析への適用
 - ① NEDA3.0 の作成
 - ② OKEANOS の設計・解析への適用
- (2) 自己展開膜面トラスとスピン展開膜の小規模地上試験の実施と相似則構築
 - ① スピン展開膜の相似則の構築と小型モデルの展開実験による検証
 - ② スピン展開膜の相似特性の理解
 - ③ 自己伸展ブームの曲げ変形解の導出
 - ④ 自己伸展ブームの剥離現象の解明
 - ⑤ 自己展開トラスの設計法の提案
 - ⑥ 自己展開膜面トラスの動特性の理解
 - ⑦ デオービット機構の開発
 - ⑧ 大型自己展開トラスの展開実証
- (3) 経験的固有直交分解によるモデル低次元化手法の構築と運動の本質的理解
 - ① IKAROS の低次元モデルの構築とその特性の理解
 - ② スピン展開膜のモード分解法の提案と展開運動の理解
 - ③ 膜面の動的座屈の解析法の提案

4. 研究成果

3 節に掲げた 3 つの課題を解決し、以下の成果を得た。

- (1) 解析コード NEDA3.0 の完成と OKEANOS の設計・解析への適用
 - ① NEDA3.0 の作成
エネルギー・モーメント法をベースとした

構造保存型の非線形有限要素法に基づく並列解析コード NEDA2.0 を大規模な並列化に対応させたコード NEDA3.0 を作成した。この NEDA3.0 の特徴は、並列計算ライブラリ OpenMPI に対応した、構造領域分割型の並列コードであり、Newton 法ではない加速度反復解法で、接線剛性行列を用いないこと、および、集中質量近似を施すことで、NEDA2.0 と比べて並列効率を各段に向上させたものである。これにより、OKEANOS の運動を現実的な時間で解析することが可能となった。また、それに先立ち、集中質量近似の精度評価も行い、分割数が適切であれば問題にならないことを確認した。

② ONEANOS の設計・解析への適用

OKEANOS の H29 年度時点でのコンフィグレーションを参考に、数学モデルを構築した。計算の高速化を目指して、太陽電池セル等、初期たわみや曲げ剛性が無視できない要素については ANCF シェル要素でモデル化し、シェル要素に結合された膜面については、シェル要素のたわみを考慮した膜要素を新たに開発した。そして、自由度が大きくなると加速度反復解法が Newton 法よりも格段に高速化されていくことを示した(5 節の学会発表の④。以下、[発④]のように記載)。

(2) 自己展開膜面トラスとスピン展開膜の小規模地上試験の実施と相似則構築

① スピン展開膜の相似則を構築し、真空重力下、大気圧微小重力下、真空微小重力下での小型モデルの展開実験により、相似則の妥当性を示した(5 節の雑誌論文の⑧。以下、[論⑧]のように記載)。

図 4 は航空機のパラボリックフライト中に真空槽内でスピン展開した膜の様子の高速度カメラ写真であり、図 5 は、この微小重力実験での膜面の展開率を、異なる膜サイズで重力以外の相似パラメータを合わせた重力下での展開実験結果と比較したもので、両者はよく一致していることがわかる。



図 4 真空・微小重力下での展開実験

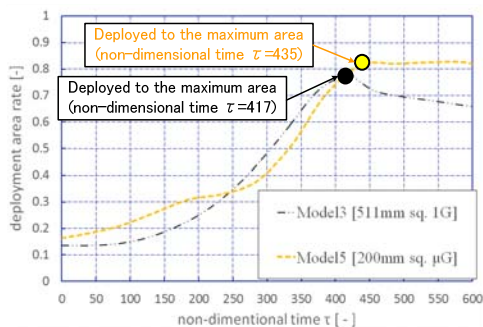


図 5 相似則の実験検証

② スピン展開においては重力パラメータの影響が小さく、また、折り目の数が異なっても折り目に関する相似パラメータが一致していれば相似性が保たれることを数値計算により明らかにした[論④]。

図 6 は小型モデルについて、相似パラメータを一致させつつ、折り目を変えた場合の展開率の時間変化をみたものであり、ほぼ一致していることがわかる。また、図 7 は重力の有無による展開率の変化を比較したものであり、これもよく一致している。これは主に、実機と相似な小型モデルでは、スピンレートが大きく、重力の影響が出にくいことによる。これと図 5 と合わせ、スピン展開の小型相似モデルにおいては、重力の影響は小さいことが明らかとなった。

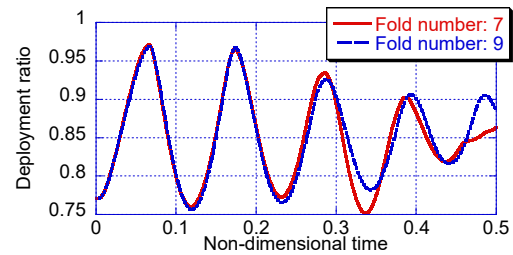


図 6 折り目の相似パラメータの妥当性

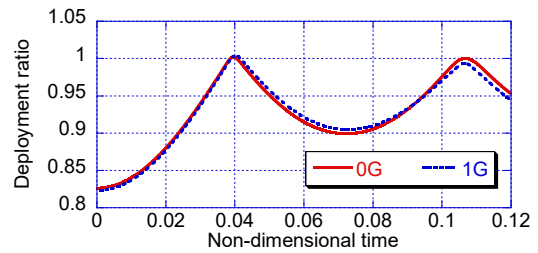


図 7 重力の影響

③ コンベックステープ、ならびに、バイコンベックスブームの曲げ変形解を導出した[論⑥,⑫]。

特に、バイコンベックスブームについては、2 つのテープの接合部のせん断剛性がブームの曲げ剛性に与える影響を解析的に解き、せん断剛性が重要な役割を示していることを定量的に明らかにした(図 8、[論⑥])。

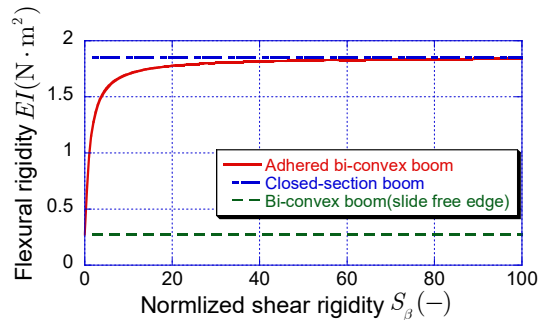
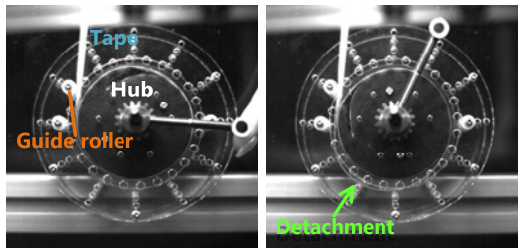


図 8 接合部のせん断剛性がブームの曲げ剛性に与える影響

④ 自己伸展ブームの剥離現象を理論的に説明し、非剥離条件式を導いた[論⑤,発①]。

回転自由のハブに巻き付けられた 1 本のブームが自己伸展する際、ハブの角速度が臨界値を超えることで剥離が起こることを実

験(図9)と理論により明らかにし、臨界値を与える方程式を導いた。これにより、剥離を起こさない自己展開構造の設計が可能となった。



(a) 安定状態 (b) 剥離状態
図9 自己伸展ブームの剥離現象

⑤ 収納性に優れ、剥離等の不安定現象を起こさない自己展開トラスの設計法を提案した[論⑤,発①,③,⑤].

ブームの厚みの効果を見捨ると、収納時にブームがハブに収納しきれずに余剰が出てしまい、所定の形状に収納できないことや、ハブの半径が適切でないと、ブームをハブに巻き付けられない(ハブからブームが浮いてしまう)ことを理論的に示し、これら、ならびに、④項に示した剥離現象も起こらない自己展開トラスの設計法を示した(図10)。そして、その設計法に基づいて製作した直径4.4mのモデルで展開試験を行い、展開に成功した(図11)。

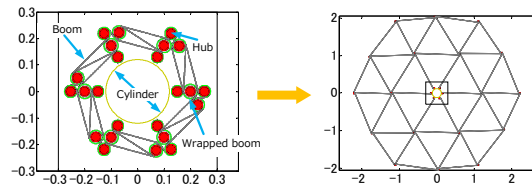


図10 自己展開トラスの設計例

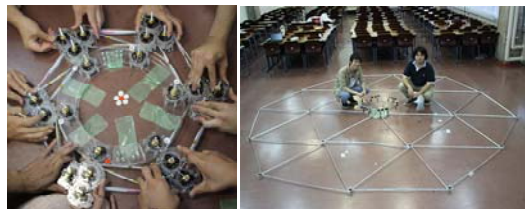


図11 設計した自己展開トラスの展開例

⑥ 微小重力下展開実験を行い、膜面の影響を示した[論⑤,⑩,発⑤]. また、自己展開膜面トラスの振動特性を数値解析により明らかにした[発②].

航空機を用いた微小重力下での展開実験を図12、図13のように実施し、膜の有無による展開性の違い等を明らかにした(図14)。これにより、国際会議 ACMD2016にてPaper Awardを受賞した。



図12 自己展開トラスの微小重力下での展開

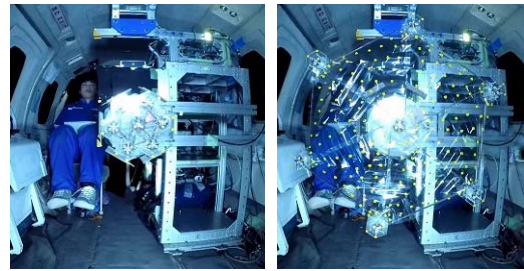
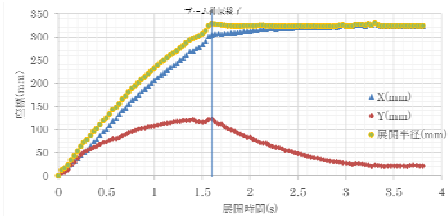
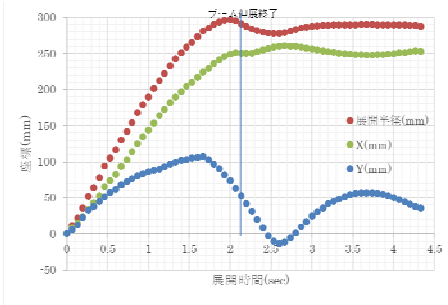


図13 膜付き自己展開トラスの微小重力下での展開



(a) 膜がない場合



(b) 膜がある場合

図14 自己展開トラス展開半径の時間変化

また、自己展開膜面トラスの振動解析を行い、膜面の張力の影響や、展開後にハブを固定する(回転を拘束する)か否かによる特性の違いを明らかにした(図15)。

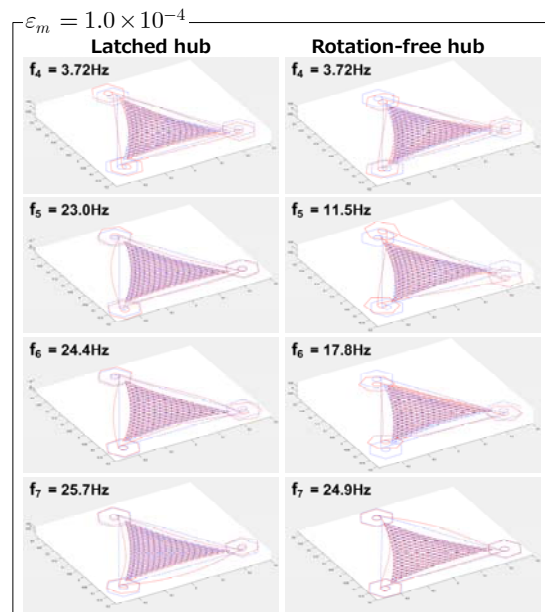


図15 自己展開トラスの振動解析例

⑦ 3U CubeSat用デオービット機構を開発した[論⑦,⑨].

自己展開構造の研究の知見を活かし、図16に示すようなデオービット機構を開発し

た. また, 60cm 級超小型衛星用のデオービット機構の設計も行った (図 17). これらにより, 2 年連続で, 国際コンペ Deorbit Device Competition および Debris Mitigation Competition にて 1 位を獲得した.



図 16 CubeSat 用デオービット機構

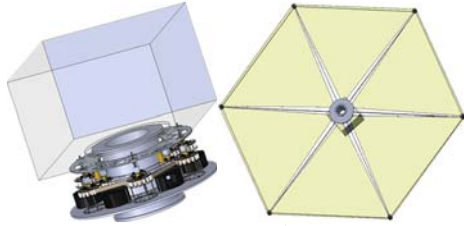


図 17 60cm 級衛星用デオービット機構

⑧ 2m 級から 30m 級にいたる自己展開トラスの展開実証実験を成功させた.

まず, 直径 2m の 17N42B トラス (ノードが 17 個, ブームが 42 本のトラス, 図 18(a)) から始まり, 4.4m17N42B (図 18(b)), 5m 膜付き 3N3B (図 18(c)) を成功させた. そして, 自己展開トラスとしては世界的にも最大級である, 20m 級および 30m 級トラスの自己展開に成功した (図 19).



(a) 2m17N42B トラス



(b) 4.4m17N42B トラス



(b) 膜付き 5m3N3B トラス

図 18 展開実証例 1



(a) 20m 級トラス



(a) 30m 級トラス

図 19 展開実証例 2

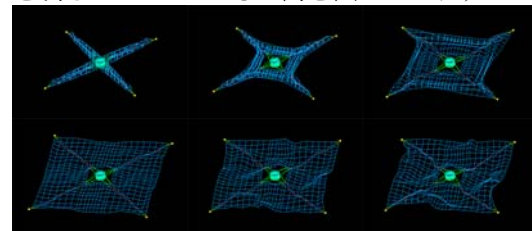
(3) 経験的固有直交分解によるモデル低次元化手法の構築と運動の本質的理解

① IKAROS の低次元モデルの構築とその特性の理解

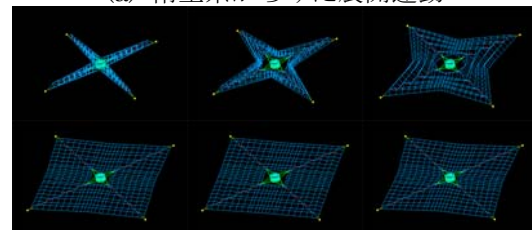
KAROS の低次元化モデルを構築し, IKAROS のノミナル展開運動が 10 次程度のモードで表現できることを明らかにした. また, それぞれのモードがどのような運動に対応しているか整理した.

② スピン展開膜のモード分解法の提案と展開運動の理解

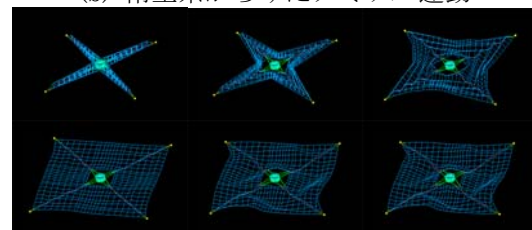
①の固有直交分解は, 運動がモードの線形和で表現可能であることを前提にしており, 展開運動のように, 幾何学的非線形運動を前提とした運動への直接的な適用は容易ではない. そこで, 大変位・大変形を伴う, 剛体と柔軟構造物から成る多体構造物の運動について, 得られた運動データから, 幾何学的関係から想定されるノミナルの展開運動を抽出する. そして, 時々刻々の残渣分を求め, これを経験的固有直交分解することでモードを求める, 幾何学的非線形運動を前提としたモード分解法を新たに提案し, それに基づいて低次元モデルを構築する方法を示した. そして, これをソーラーセイルのスピンの展開に適用し, スピン展開の本質的な運動モードを明らかにした. その例を図 20 に示す.



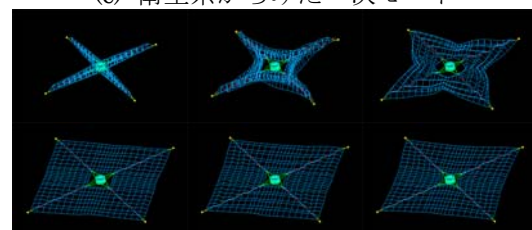
(a) 衛星系からみた展開運動



(b) 衛星系からみたノミナル運動



(c) 衛星系からみた一次モード



(d) 衛星系からみた四次モード

図 20 展開運動のモード分解

③ 膜面の動的座屈の解析法の提案

運動の本質の膜面の展開運動について、動的座屈を引き起こす外乱の条件を解析的に導き、外乱がその後の運動に与える影響を数値解析により調べることで、設計物の外乱に対するロバスト性の定量的評価法、ならびに、外乱にロバストな設計法を示した[論②,③,⑩].

最後に、本研究の成果も含め、展開構造物技術を小型人工衛星に搭載して利用することをまとめた論文を発表した[論①].

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Y. Miyazaki, Deployable Techniques for Small Satellites, Proceedings of the IEEE, Vol.106, No.3, pp. 471-483, 2018, DOI: 10.1109/JPROC.2018.2799608, 査読有.
- ② S. ARITA, Y. MIYAZAKI, Modified Method of Detecting Dynamic Buckling, Mechanical Engineering Letters, Vol 4, No.17-00441, pp.1-8, 2018. DOI: 10.1299/mel.17-00441, 査読有.
- ③ S. Arita, I. Fukuta, Y. Yamagiwa, Y. Miyazaki, A Proposal of New Deployable Space Structure Applying Buckling, Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA 2018-1952, pp.1-10, 2018, DOI: 10.2514/6.2018-1952, 査読有.
- ④ T. Suzuki, Y. Miyazaki, M. Yamazaki, Similarity Rule of Deployment Behavior for Spin Deployment Membrane, AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA 2018-1438, pp.1-9, 2018, DOI: 10.2514/6.2018-1438, 査読有.
- ⑤ Y. Miyazaki, M. Fukunaga, D. Kousaka, Membrane Structure Supported by Self-Deployable Truss for Space Applications, AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA 2018-0451, pp.1-13, 2018, DOI: 10.2514/6.2018-1201, 査読有.
- ⑥ M. Fukunaga, Y. Miyazaki, Structural Characteristics of Self-Extensible boom, AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA 2018-0451, pp.1-10, 2018, DOI: 10.2514/6.2018-0451, 査読有.
- ⑦ N. Tada, S. Inoue, Y. Miyazaki, Membrane Deployment Deorbit System by Convex Tapes, in Innovative Ideas on Micro/Nano-Satellite Missions and Systems, IAA Book Series, pp. 2-12, 2017, 査読有.
- ⑧ Y. Tatematsu, T. Suzuki, M. Yamazaki, Y. Miyazaki, Verification of the Similarity Rules for Spin Deployment Membrane in the ground experiment, 4th AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA 2017-1114, pp.1-9, 2017, DOI: 10.2514/

6.2017-1114, 査読有.

- ⑨ N. Tada, S. Inoue, Y. Miyazaki, M. Yamazaki, Membrane Deployment De-orbit System by Convex Tapes, 4th AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA 2017-0619, pp.1-11, pp.1-10, 2017, DOI: 10.2514/6.2017-0619, 査読有.
- ⑩ A. Tamura, S. Inoue, M. Yamazaki, Y. Miyazaki, Deployment Dynamics of Self-Deployable Truss Structure Consisting of Bi-convex Booms, 4th AIAA Spacecraft Structure Conference, AIAA 2017-0175, pp.1-10, 2017, DOI: 10.2514/6.2017-0175, 査読有.
- ⑪ S. Arita, Y. Miyazaki, A Study of Dynamic Evaluation of Structural Buckling, Mechanical Engineering Letters, Vol.2, Paper No.15-00677, pp.1-8, 2016, DOI: 10.1299/mel.15-00677, 査読有.
- ⑫ Y. Miyazaki, S. Inoue, A. Tamura, Analytical solution of the bending of a bi-convex boom, Mechanical Engineering Journal, Vol.2, No.6, 2015, DOI: 10.1299/mej.15-00465, 査読有.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 福永桃子, 宮崎康行, 自己展開トラスの展開性向上, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2017-4701, pp.1-6, 2017 年.
- ② M. Fukunaga, Y. Miyazaki, Structural Characteristics of BCON Truss, International Symposium on Space Technology and Science, 2017-c23, pp.1-8, 2017.
- ③ 高坂大樹, 宮崎康行, バイコンベックスブームを用いた自己展開トラス構造の試作検討, 第 59 回構造強度に関する講演会講演集, pp.43-45, 2017 年.
- ④ 菅野宏伸, 宮崎康行, 剛体及び剛体拘束系への構造保存型 ANCF の適用, 第 25 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2A5, pp.1-6, 2016 年.
- ⑤ S. Inoue, A. Tamura, D. Kawarabayashi, D. Hyodo, Y. Miyazaki, Report on Microgravity Experiments of Self-Deployable Truss Structure Consisting of BCON Booms, 8th Asian Conference on Multibody Dynamics, paper-1290215, pp.1-10, 2016.

[その他]

ホームページ : http://forth.aero.cst.nihon-u.ac.jp/research_GMD.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