

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560958

研究課題名(和文)階層膜面モジュラー構造による宇宙構造物構築に関する研究

研究課題名(英文)Research on Construction of Space Structure Systems Using Membrane Structure Modules

研究代表者

名取 通弘(Natori, Michihiro)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00013722

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：単純な分離・回転・結合の機能を持つ能動結合部の考え方を導入して、展開機能を含む多数の均質なモジュールを自律分散的に移動させて所定の構造物システムを構築する分散型の構築方法を提示した。そのさい能動結合部の基本的機能を検証する概念モデルを設計試作し動作試験を行って、そのような宇宙構造物システム構築の基本的な考え方が十分実現可能であることを示した。またそれに適合するモジュールとして、展開ブームの自己展開力を利用した簡易な展開複合膜面構造を提案し、その展開特性をモデル実験およびシミュレーションにより明らかにした。

研究成果の概要(英文)：An approach of construction of space structure systems composed of many homogeneous modules, in which their object final configuration is obtained through the movement of modules in an autonomous and distributed manner, is investigated. Assuming the modules are deployable, the use of active connecting elements having simple functions of release, rotation and latch, is newly proposed, and through the design, manufacturing and testing of their basic conceptual models, it is proven that the basic idea of this research is sufficiently realizable. A simple deployable membrane structure module with booms compatible to the construction approach stated above, which deploy from rolled-up configuration by elastic energy of stowed booms without any actuators, is proposed, and its deployment characteristics are clarified through the model experiment and simulation.

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：宇宙構造物システム 展開膜面構造 自動構築 能動結合要素

### 1. 研究開始当初の背景

スペースアンテナやソーラーセイル、また宇宙ステーションや、さらには太陽発電衛星といった宇宙における構造物の研究分野では、それらのミッションの大型化、多様化、複雑化などに対応し、今までの構造工学における要素研究の範囲を超えて、構造物システムとしての全体的な研究が、システム工学の立場からだけではなくむしろ構造工学の立場から必要とされている。それは最近の構造工学における適応構造 (adaptive structure) や先進軽量構造 (gossamer structure) といった新たな構造概念が宇宙構造物の研究により進展してきており、それらの導入が効率的な構造物システムの実現に不可欠になりつつあるからである。すなわち膜面やケーブルを主体にしつつ、なおかつ自然物システムに多くみられるロバストな構造物システムの研究が望まれてきた。そのような背景は現在も変わっていない。

### 2. 研究の目的

現在の国際宇宙ステーションは、多目的万能ロボットマニピュレータにより、機能別に異なるモジュールを輸送系までを含めた事前の綿密な計画に基づいて適宜結合させる方法により構築された。本研究ではそのようないわば集中型の構築方法の対極に位置する分散型の構築方法の可能性を提示する。すなわち、多数の均質なモジュールに単純な分離・回転・結合の機能を持たせ、それらを自律分散的に動作させて、所定の構造物システムを構築する分散型の方法の有用性を明らかにすることを目的とする。宇宙開発の当初より検討されてきた展開構造の機能は特に構造物の大型化に有効で、本研究ではそのうちでも特に近年大きく研究が進捗しつつある膜面展開構造をモジュールそのものに導入することを念頭に置く。そのためには柔軟すぎる展開構造モジュールは望ましくなく、適切な剛性確保のために展開ブームを含むより効率的な展開複合膜面構造の検討も本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

本研究は多数の展開膜面構造モジュールに単純な分離・回転・結合の機能を持たせて、それにより宇宙構造物システムを階層的に構築させようとする試みの基礎研究である。そのような試みの有用性を、全体的な数値シミュレーション、および展開ブームを含む展開複合膜面構造と構築機能メカニズムといった主要な要素モデルの試作と実験により明らかにする。

まず、組み立て構築に適合した展開複合膜面構造モジュールについて、概念モデルの設計製作と展開試験、および展開の数値シミュレーションによりその展開特性を明らかにする。そのような展開型のモジュールを念頭に置くと、それに単純とはいえず更に構築のた

めの分離・回転・結合の機能を付与するのは必ずしも適切ではない。それが展開という構築 (展開構築) の別の機能を果たすべきモジュールの設計を制約しないことが望ましいからである。そこで分離・回転・結合の機能をモジュール同士を結合する結合部に持たせることを検討する。そのような能動結合部の概念モデルを設計製作しそれが十分に機能することを示す。またそのような結合部が加わった場合の数値シミュレーション方法の検討も行う。

### 4. 研究成果

#### 4.1 展開ブームを含む展開複合膜面構造の検討とその研究成果

近年の先進軽量構造研究の帰結の一つとして展開ブームそのものにも膜面からなるインフレータブル要素を用いることが有用である [1-3]。ただし、本研究のように構造物システム全体を扱う研究での地上実証試験などに使用できる十分な剛性と安定した展開特性をもつ簡易なインフレータブル要素は、残念ながら我が国においてまた世界的にも入手が困難である。それに代わりうる展開ブームとして、曲率を持つ断面をフラットにして収納するタイプのいわゆるカーペンターテープブームが、もともと宇宙開発の初期から使われてきたのであるが、近年再評価されている [4]。本研究では、その中でも我が国独自の組紐被覆テープブーム (BCON boom : Bi-Convex Tape Boom Covered by Braid [5]) を使用した展開構造モジュールを提示し、その展開特性をモデル実験およびシミュレーションにより明らかにした [6, 7]。

図 1 に試作した展開複合膜面構造の概念モデルを示す。Model 1 は通常のスチール製の巻尺を使ったもの、Model 2 は BCON ブーム 6 本による膜なしの六角形モデル、Model 3 が四角形モデルである。BCON ブームは構体に巻き付けて収納され、ブーム断面がフラットな状態からもとの曲面に戻る際の弾性エネルギーによりブームが展開する。展開構造においては図 2 に示すような準静的



(a) Model 1 (b) Model 2 (c) Model 3

図 1 展開実験用概念モデル

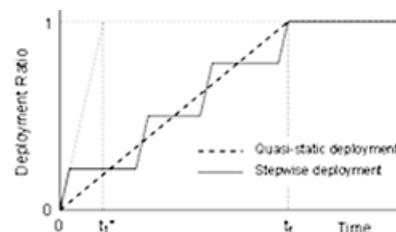


図 2 断続展開の概念

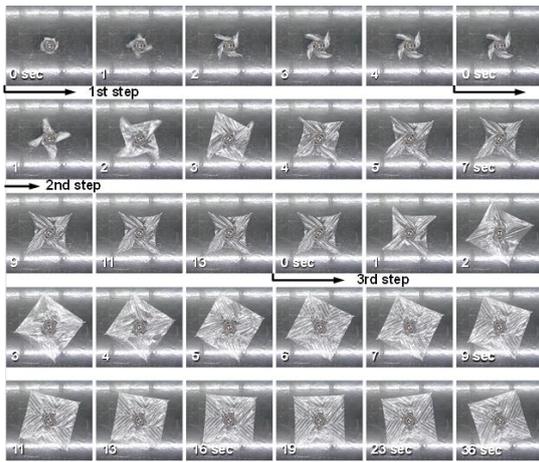


図3 展開挙動, Model 3

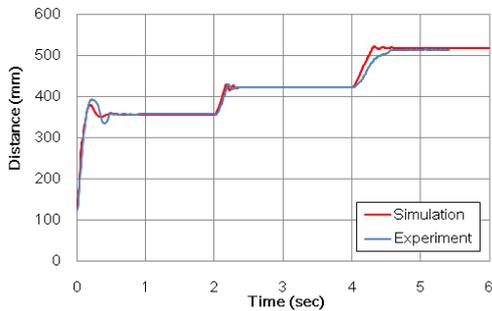


図4 実験およびシミュレーション結果の一例, 構体中心からブーム先端までの距離

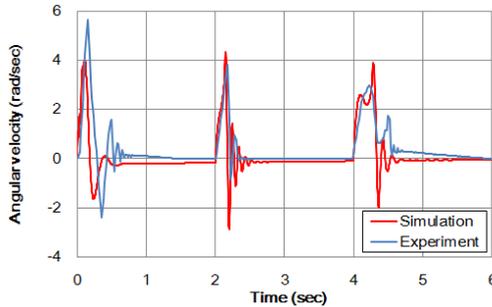


図5 実験およびシミュレーション結果の一例, 構体の角速度

な展開が望ましいので、そのような状態を断続的な弾性エネルギーの解放により近似するためのブーム解放のメカニズムを設計製作し、モデルに装着した。展開実験の一例を図3に示す [6]。図4 および 5 は膜面を多粒子法で近似し、ブームをコッセラ弾性梁として計算したシミュレーション結果との比較である [7]。断続展開中のブームの長さ変化 (図4) と中心構体の角速度 (図5) により一致が見られている。

#### 4.2 能動結合部による宇宙構造物システム構築の検討とその研究成果

将来の宇宙構造物システムのより効率的な構築には展開構造要素を取り入れることが必要である [8, 9]。構築のために必要なマニピュレーションもできる限り分散型であることが望ましい。そのためには、集積状態にあるモジュールのそれぞれに単純な分離・



図6

図7 状態変数

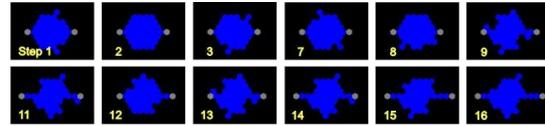


図8 移動構築シミュレーションの一例, 状態変数にランダム性を付与してのデッドロック状態回避例

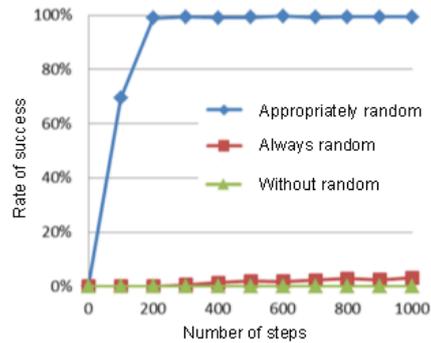


図9 移動構築の成功率

回転・結合機能を持たせて (図6、この場合モジュール形状は六角形)、結合を途切れさせずに自律分散的にモジュールの移動を繰り返して所定の構造体を形成する試み [10] をさらに発展させることが有効であろう。

すなわち、モジュールの移動は図7にあるように、所定のゴール位置からの距離を状態変数として、周辺モジュールとの変数情報の交換のみに基づいて状態変数の大きなモジュールが優先的に変数が小さくなるような方向に移動して構築を完了する。ただこの場合、移動により状態変数が増えるような場合にはモジュールは元の位置に戻ろうとしてデッドロック状態に陥ることがある。その場合は、状態変数にある程度のランダム性を与えて状態変数が増えてもそのまま移動を続行できるようにして、デッドロック状態が解消してからはランダム性を小さくしていく操作が有効である。例えば、図8は集積状態から直線状の形態に移動構築を行う場合であるが、Step 1-3 にデッドロック状態が現れ、Step 8-11 ではいくつかのモジュールは状態変数が増える方向に移動して、その後は自律分散的に移動が進行していくことが示されている [11]。そのようなランダム性の操作が移動構築の成功率に直接的に影響していることを図9に示した。

4.1 節で検討した展開複合膜面構造を一つのモジュールとして、展開の機能に加えて図6のような構築のための機能を更に加えると、モジュールの設計が複雑になりすぎる。本研究では構築のための機能をモジュール間の結合部に持たせる考え方を提

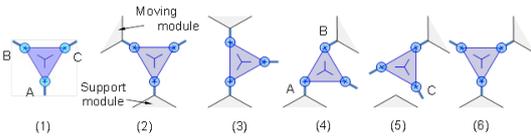


図 10 モジュール間結合要素

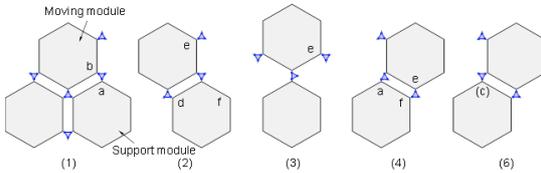
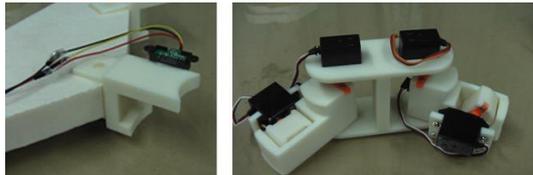


図 11 モジュール移動の様子



(a) モジュール側受け (b) 結合部モデル

図 12 モジュール間結合要素モデル

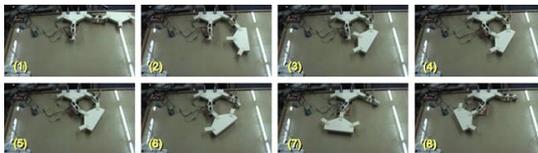


図 13 モジュール移動実験

示し、その基本となる能動結合部の機能モデルの試作を試みる [11]。図 10 に六角形モジュールを対象としてモジュール間能動結合要素に必要な作動機能を示す。図 11 は図 6 のモジュールの動作を結合部を含むモジュールに対して具体的に示したものである。図の番号は図 10 の各状態にそれぞれ対応している。(6) の状態で一連の動作が完了し、次の動作の初期状態ともなる。能動結合要素の設計および製作の一例を図 12 に示す。図 12 は図 10 の A および B の機能をモデル化したもので、モジュールとの結合・分離は図 12(b) の右端に示す半月型ブロックの回転により行われる。モジュール側にはこのブロックを受ける溝が掘られた受けがあるだけである(図 12(a))。この結合要素によるモジュールの移動実験の様子を図 13 に示す。作動は測距センサーの計測データをもとにして行い、様々な要因から生じる位置ずれに対しては、半月型ブロックとその受けの設計が有効で 100 回の試行のすべてで作動を成功させることができた。

以上、本研究では、単純な分離・回転・結合の機能を持つ能動結合部の考え方を導入して、展開機能を含む多数の均質なモジュールを自律分散的に移動させて所定の構造物システムを構築する分散型の方法を具体的に提示することができた。またそれに適合するモジュールとして展開ブームを含むより効率的な展開複合膜面構造を提示できた。能動結合部を含めた移動構築のシミュレーシヨ

ンアルゴリズムはモジュールの頂点が結合部を持つ場合と持たない場合を 1 と 0 で区分して改良することができる。また、移動のどの時点でモジュールを展開させるべきかなどについては今後の研究課題としたい。本研究の展開複合膜面構造についての成果はそれだけ単独でも新しい効率的な軽量アレイ構造の提示として、現在の宇宙開発に十分貢献できるものと期待できる。

#### 4. 研究成果 での引用文献

- [1] Lichodziejewski, D., Derbès, B., Slade, K. and Mann, T., "Vacuum Deployment and Testing of a 4-Quadrant Scalable Inflatable Rigidizable Solar Sail System," AIAA 2005-2122, 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf., April 2005, Austin, Texas.
- [2] Katsumata, N., Natori, M.C. and Yamakawa, H., "Analysis of Dynamic Behavior of Inflatable Booms in Zigzag and Modified Zigzag Folding Patterns," Acta Astronautica, 93 (2014), 45-54.
- [3] Natori, M.C., Katsumata, N. and Yamakawa, H., "Membrane Modular Space Structure Systems and Deployment Characteristics of Their Inflatable Tube Elements," 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials (SDM) Conf., AIAA 2010-2909, Orlando, FL, April 2010.
- [4] Straubel, M., Block, J., Sinapius, M. and Huehne, "Deployable Composite Booms for Various Gossamer Space Structures," AIAA 2011-2023, 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf., April 2011, Denver, Colorado.
- [5] Watanabe, A., Ito, H. and Hori, T., "Study of the Extensible Structure Which Coated a Braid," Japanese 56th United Conf. Space Science and Technology (Ukaren), JSASS-2012-4496, Beppu, Japan, Nov. 2012 (in Japanese).
- [6] Natori, M.C., Katsumata, N., Okuizumi, N., Watanabe, A. and Yamakawa, H., "Deployable Membrane Structures with Rolled-up Booms," AIAA-2013-1596, 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials (SDM) Conf., April 2013, Boston USA.
- [7] Okuizumi, N., Katsumata, N., Kobayashi, H., Ikuta, H., Yamazaki, M., Ito, Y., Natori, M.C., and Yamakawa, H., "Stepwise Deployment of Membrane Structures with Rolled-up Booms: Experiments and Simulations," AIAA 2014-1039, AIAA Spacecraft Structures Conf., (SciTech2014), Jan. 2014, National Harbor, Maryland, USA.
- [8] Natori, M.C., "Concepts of Advanced Light Space Structure Systems and Their Characteristics," Structures Conf. in Japan, Japan Soc. Aeronautical and Space Sciences / Japan Soc. Mechanical Engineers (JSASS/ JSME), 2007, Fukushima, Japan, pp. 1-6.
- [9] Helms, R.G. and Freeland, R.E., 2008, "Very Large Space Structures Orbital Deployment, Testing and Validation," 59th Int'l. Astronautical Congress (IAC), IAC-08-C2.2.3.
- [10] Ukegawa, K. and Natori, M.C., "Self-Assembly of Hierarchical Modular Structure Systems," 16th Int'l. Conf. Adaptive Structures and Technologies (ICAST),

Oct. 2005, Paris, France, pp.86-93.

- [11] M.C. Natori, M.C., Nagasawa, M., Yamada, J., Okuno, A., Yamakawa, H., and Higuchi, K., "A Basic Construction Concept for Space Structure Systems Using Active Connecting Elements," submitted the abstract to the AIAA Spacecraft Structures Conf, (SciTech 2015), January 2015, Kissimmee, Florida.

#### 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)

- 1) N. Katsumata, M.C. Natori and H. Yamakawa, "Analysis of Dynamic Behaviour of Inflatable Booms in Zigzag and Modified Zigzag Folding Patterns," Acta Astronautica, 93 (2014), 45-54, 査読あり.
- 2) Katsumata, N., Kaimori, M., Yamasaki, M., Higuchi, K., Natori, M., and Yamakawa, H., "Deployment Characteristics of Braid Coated Bi-Convex Tape and Bi-SMA Convex Tape Booms for Deployable Membrane Structures," J. Mechanics Engineering and Automation, Vol.4, No.1, Jan. 2014, pp.52-62, 査読あり.

[学会発表] (計 17件)

- 1) Okuizumi, N., Katsumata, N., Kobayashi, H., Ikuta, H., Yamazaki, M., Ito, Y., Natori, M.C., and Yamakawa, H., "Stepwise Deployment of Membrane Structures with Rolled-up Booms: Experiments and Simulations," AIAA 2014-1039, AIAA Spacecraft Structures Conf., (SciTech2014), Jan. 2014, National Harbor, Maryland, USA, 査読あり.
- 2) A. Torisaka, Y. Sato, M.C. Natori, T. Akita, H. Yamakawa, N. Kobayashi, "Study on Optimum Connecting Points of Boom-Membrane Structure as a Basic Model for Larger Lightweight Space Structure," 24th Int'l. Conf. Adaptive Structures and Technologies, October 2013, Aruba, 査読なし.
- 3) H. Sakamoto, H. Furuya, Y. Satou, M.C. Natori, A. Watanabe, N. Kawabata, R. Sakai, N. Okuizumi, O. Mori, Y. Shirasawa, M. Takai, N. Katsumata, A. Torisaka and R. Funase, "Origami-Based Membrane Storage and Deployment Technology for De-orbiting Satellites," IAC-13-B4.6A.4, 64th Int'l. Astronautical Congress, Sept. 2013, Beijing, China, 査読なし.
- 4) M.C. Natori, N. Katsumata, H. Yamakawa, H. Sakamoto and N. Kishimoto, "Conceptual Model Study Using Origami for Space Applications," ASME DETC2013-13490, Proc. ASME 2013 Int'l. Design Engineering Technical Conf., August 2013, Portland, Oregon, USA, 査読あり.
- 5) Y. Satou, H. Furuya, H. Sakamoto, Y. Shirasawa, O. Mori, N. Okuizumi, M.C. Natori, "Wrapping Experiments of Piecewise Straight

Fold Membrane for Large Solar Sail," ISTS 2013-c-54, 29th Int'l. Symp. Space Technology and Science, June 2013, Nagoya, Japan, 査読なし.

- 6) Natori, M.C., Katsumata, N., Yamakawa, H., Watanabe, A., Kawabata, N., Okuizumi, N., Mori, O., Shirasawa, Y., Sakamoto, H. and Furuya, H., "Model Study of Membrane Space Structures Based on a Stepwise Deployment Concept," ISTS 2013-c-55, 29th Int'l. Symp. Space Technology and Science, June 2013, Nagoya, Japan, 査読なし.
- 7) Okuizumi, N., Ito, Y., Natori, M., Katsumata, N., Yamakawa, H., "Numerical Simulation of Stepwise Deployment of Membrane Structure with Booms Using Multi-Particle Approximation Method," ISTS 2013-c-56, 29th Int'l. Symp. Space Technology and Science, June 2013, Nagoya, Japan, 査読なし.
- 8) H. Sakamoto, S. Kadonishi, Y. Satou, H. Furuya, Y. Shirasawa, N. Okuizumi, O. Mori, H. Sawada, J. Matsumoto, M.C. Natori, Y. Miyazaki and M. Okuma, "Repeatability of Stored Configuration of a Large Solar Sail with Non-negligible Thickness," AIAA 2013-1804, 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf., April 2013, Boston, 査読あり.
- 9) M.C. Natori, N. Katsumata, N. Okuizumi, A. Watanabe and H. Yamakawa, "Deployable Membrane Structures with Rolled-up Booms and Their Deployment Characteristics," AIAA-2013-1596, 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf., April 2013, Boston, 査読あり.
- 10) H. Tamaru, T. Akita, M.C. Natori and H. Yamakawa, "Stiffness Characteristics of Membrane Space Structures Supported by Booms," ASME IMECE2012-88254, Proc. ASME 2012 Int'l. Mechanical Engineering Congress & Exposition, November 2012, Houston, Texas, USA, 査読あり.
- 11) H. Sakamoto, M.C. Natori, S. Kadonishi and M. Okuma, "Folding Patterns of Planar Gossamer Space Structures Consisting of Membranes and Booms," ICAST2012 #63: 23rd Int'l. Conf. Adaptive Structures and Technologies, October, Nanjing, China, 査読なし.
- 12) N. Katsumata, M.C. Natori and H. Yamakawa, "Dynamic Behavior Analysis of Inflatable Booms in Zigzag and Modified Zigzag Folding Patterns," IAC-12-C2.3.11, 63rd Int'l. Astronautical Congress, Naples, Italy, Oct. 2012, 査読なし.
- 13) M.C. Natori, H. Hori, K. Sawai, N. Okuizumi and H. Yamakawa, "Stepwise Deployment of Membrane Space Structures Rolled-up Together with Support Booms,"

IAC-12-C2.2.9, 63rd Int'l. Astronautical Congress, Naples, Italy, Oct. 2012, 査読なし.

- 14) N. Katsumata, M.C. Natori and H. Yamakawa, "Experimental and Theoretical Evaluations on Deployment Behavior of Inflatable Boom Elements," AIAA-2012-1582, 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, April 2012, Honolulu, Hawaii, 査読あり.
- 15) H. Hori, N. Okuizumi, M.C. Natori and H. Yamakawa, "Structure Concept of Solar Sail Spacecraft and Their Deployment Characteristic," ICAST2011 #27, 22nd Int'l. Conf. Adaptive Structures and Technologies, Oct. 2011, Corfu, Greece, 査読なし.
- 16) N. Katsumata, M.C. Natori and H. Yamakawa, "Folding and Deployment Analyses of Inflatable Structures," ISTS 2011-c-31, 28th Int'l. Symp. Space Technology and Science, Okinawa, Japan, June 2011, 査読なし.
- 17) H. Sawada, O. Mori, N. Okuizumi, Y. Shirasawa, Y. Miyazaki, M. Natori, S. Matunaga, H. Furuya and H. Sakamoto, "Evaluation of Solar Power Sail Deployment Mechanism of IKAROS," ISTS 2011-o-4-04v, 28th Int'l. Symp. Space Technology and Science, Okinawa, Japan, June 2011, 査読なし.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

名取 通弘 (NATORI, Michihiro)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号 : 00013722

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

山川 宏 (YAMAKAWA, Hiroshi)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号 : 00097263

勝又 暢久 (KATSUMATA, Nobuhisa)  
室蘭工業大学・もの創造系領域・助教  
研究者番号 : 60534948