

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 8 月 25 日現在

機関番号：92650

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420817

研究課題名(和文) スーパー・テザー(ベア導電テープ・テザー)の高信頼性伸展手法の確立

研究課題名(英文) Examination of Deployment Performance of Super-Tether in Inverse-Origami Method

研究代表者

藤井 裕矩(FUJII, Hironori)

株式会社TMIT(研究開発部)・研究開発部・教授(移行)

研究者番号：30070650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：スーパーテザーは、通常宇宙で使われるテザーに比べデブリ(宇宙ゴミ)によっても切れにくく、かつ、燃料なしでの電子推進力に優れたベア導電テープテザーである。2010年8月にS520観測ロケットによって120秒の弾道飛行し、その間に逆オリガミ法という新しい伸展手法を用いることによって、柔軟なテープテザーであるスーパーテザーの宇宙伸展に世界で初めて成功した。しかしながら、伸展長さが計画された300mに対して132.6mに留まったため、飛行後実験として、高速度カメラ観察を含めて伸展挙動の解析を実施した。その結果、柔軟で長大な宇宙構造物であるスーパーテザーの宇宙伸展における信頼性を高めるための指針を得た。

研究成果の概要(英文)：Super tether is a bare electrodynamic tape tether which has greater anti-debris features and higher electron collection characteristics than conventional tethers used in space. The super tether is thus expected to play an important roles in both space debris mitigation and space structures construction. The space flight experiment of bare electrodynamic tape tether technology was conducted on the S520-25 sounding rocket launched on August 2010 and successfully deployed 132.6 m of tape tether in 120 seconds during its ballistic flight. This paper reports results of post-flight experimental studies on the folded tape deployment in the Inverse-Origami method. These studies include results of a variety of examinations for deploying drag of the super tether. Insight in the deployment behavior of the super tether is obtained as the results including a suggestion that the vacancy of boxes holding long flexible tether can affect significantly on the deployment performance of the super tether.

研究分野：宇宙航行力学

キーワード：スーパーテザー 観測ロケット 宇宙デブリ 逆オリガミ法 宇宙テザー伸展

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙デブリは、国際宇宙ステーションや人工衛星など宇宙活動における衝突破壊の危険性、さらに、衝突による更なるデブリの数の増加など、宇宙開発において深刻な問題を呈しており、今後宇宙開発のためには早急に解決を迫られている喫緊の問題である。

導電性の宇宙テザーを用いれば、地球磁場と干渉させ燃料を失うことなく推力や抗力を発生させデブリを取り除くことができる。このとき、テザーをテープ状にすれば、通常のみも型テザーに比較してデブリ破断に対する耐性を増し、被覆なしで（ベア）導電性とすれば長い辺を直径とする円柱で代表される集電能力が良くなり、推力/抗力発生能力を数倍向上させることができるので、不要な衛星を除去するため有効となる。（スーパー・テザーと呼ばれる。）また、さらに、角運動量変換による輸送手法を用いれば、これも燃料を必要としないため、大量の放射性廃棄物の宇宙（太陽）への投擲輸送に最もふさわしい経済的な手法として期待されている。

導電テザー技術は化学推進と異なり燃料を消費しないで適切な長さの受動テザーを持った衛星を数週間で地球低軌道から脱出させることができる。しかしながら、導電テザー技術は長大なテザーを宇宙に展開することから他の衛星との衝突の恐れがあるため、宇宙で実証する機会を得るのは困難であった。このベア導電テープ・テザー（スーパー・テザー）技術の有効性を宇宙で実証するために、申請者が提案代表者となり日本・欧州・米国・豪州からなる国際協力として、飛行時間が短いため他の衛星との衝突の可能性が少ない観測ロケット実験を提案し、平成22年8月31日午前5時観測ロケットS-520-25号機による宇宙実験T-Rex（Tether Rocket experiment）を実施した。このとき、テープ・テザーはのみも型のテザーと比べ断面が2次元性を持つため宇宙伸展が困難であったが、逆オリガミ法を開発し、テープ・テザーの世界初の宇宙伸展に成功した。伸展装置は良好に作動し、132.6mの世界最長伸展記録に成功するとともに数種の理工学実験により導電テザーの基礎性能データの取得に成功した<sup>1)</sup>。この成功で得られた成果を基に現

在、欧州と米国でも、軌道上実験の計画が進められている。このようにスーパー・テザー技術は、軌道上での応用が期待されており、確実な伸展性能の確立が望まれている。

## 2. 研究の目的

本研究ではスーパー・テザー（ベア導電テープ・テザー）の伸展特性の力学特性を検証し、高信頼性伸展手法を総括する。本研究代表者はこのテザーの新たな伸展手法を開発し、多くの地上実験と宇宙実験によって手法の信頼性をほぼ確認した。しかしながら、伸展時のメカニズムの推定に困難性が残り、今後の応用のためにぜひ解決する必要がある。したがって、本研究では、宇宙実証実験の結果を踏まえ、飛行前解析を見直し、高速度撮影による観察を加えた飛行後解析によってスーパー・テザーの信頼性の高い伸展手法を確立するための動力学特性の総括検討を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 飛行前解析

スーパー・テザーの宇宙伸展における高い信頼性を得るため、打ち上げ飛行の前に可能な限り地上で宇宙環境を模擬する多種多様な方法で解析を行った。

再検討し、まとめた飛行前解析の実験手法は次のような1-11である。(12は飛行実験)。

1. 空気潤滑浮上
2. 垂直引き出し
3. 真空チェンバー
4. 水ロケット
5. リニアモーター
6. カートをを用いた水平射出
7. 低摩擦台
8. スピンテーブル
9. ワイヤカッターによる垂直射出
10. 弾道飛行による微小重力実験
11. 折り畳み展開と大変形解析の二次元数値解析を含む数値解析冷凍実験
12. 飛行デモンストレーション

これらの12種類の多様な実験においてテザーの伸展性能の研究を総括するに当たって、従来からともに研究を進めてきた研究分担者（草谷：都立産業技術高専、渡部：帝京大、小島：首都大学東京）と密接な協力体制をとることによって、観測ロケットによる宇宙実験、T-Rex、で得られた結果を有効に活用し、総括として動力学特性の研究を行っ



図1. 宇宙で伸展したスーパー・テザー 放出された副衛星からの画像（星印のように見えるものは分離したロケットのノーズコーン）

た。主に、引き出し伸展実験を主として、テザーの柔軟性による接触点の数、面積、移動などの動的な状態について、力学的特性の高速現象を特徴づける手法を調整し、検証を加えながら実験的に研究しデータを得た。このためには、申請者たちが飛行前解析としてかねて行った11種類の研究手法について本研究にふさわしいものを再構成して研究を深めた。最終的には、スーパー・テザー（ペア導電テープ・テザー）の受動的伸展制御につなげた宇宙テザー技術の基盤を形成し、伸展装置の設計変数選択の方向付けを行う。

## (2) 飛行後解析

飛行後解析において、テザー収納ボックスの出口と側壁とで生じる摩擦抵抗が伸展特性に大きく影響すると考え検討したものは次の1. から4. までであり、これらは飛行前解析にさらに加えて、重力の影響を調べるために引き出し方向を変化させるなどのものである。

1. 垂直引きだし試験
2. 水平引き出し試験
3. 斜め方向引き出し試験
4. 仮想的な側壁による検討

これらの試験検討では、テザー収納ボックスの側壁及び出口部での摩擦特性を検討するもので、いずれもすでに行っていた飛行前検討によって得られていた実験解析検討による定量的なデータを再検証するものであった。

2010年に行った観測ロケットによる飛行デモンストレーション時のテザー伸展の時間履歴データを図2に示す。展開後70秒付近で急激な伸展停止がみられる。これは宇宙環境によってテザーボックス内の空間的な余裕がなくなり、テザーが出口に詰まるような現象が得られたのでないかと考えられる。このため、今回、飛行後実験解析として、収納ボックス内部の空間余裕であり特に注目したのは、次のような項目5. と6. を加えて検討を行った。

5. ボックスの開口部比率の検討
6. ボックス出口からの距離の検討

さらに、これらの実験結果を確認するために、

7. 高速度カメラ観察

として、高速度カメラによってボックス内部からのテープ・テザーの伸展状況を高速度カメラによって観察し、テザーボックス内の余裕の効果について検証した。

このため、出口の開口率を変化できるようにし、かつ、出口からのテープの位置を調整できるようにし、さらに高速度カメラによって出口からの伸展状況が観察できるようなものを製作して実験に用いた。図3（左）にS520-25観測ロケットで使用したテザー収納ボックス、

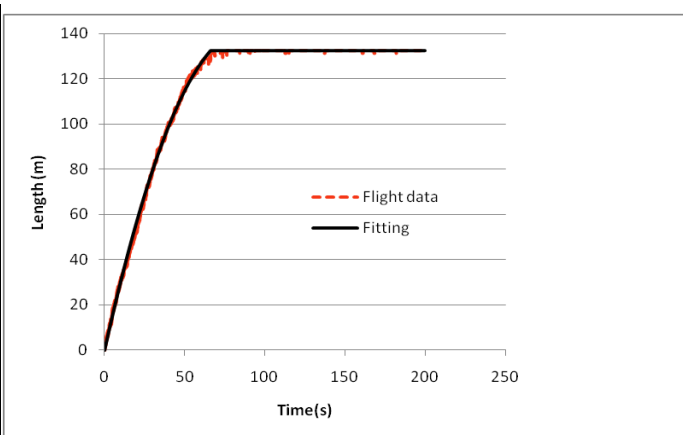


図2 飛行デモンストレーションにおけるテザー伸展の時間履歴

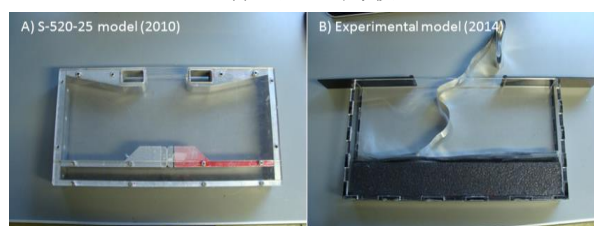


図3 飛行実験に用いたテザー収納ボックス（左）と今回の実験モデル（右）

図3（右）には今回実験のために製作したものを示す。今回のものには出口に伸展長計測装置が付属していないためテザー出口でのテープ・テザーの動きが単純化されている。

## 4. 研究成果

繰り出し抵抗の測定には抵抗のない場合との定量的な差をとることによりデータを得、ここ数年の実験で多数の結果を得ており再現性を検証している。現在までに、スーパー・テザー（ペア導電テープ・テザー）の伸展特性について、テザー収納ボックス内の空間的な余裕が十分な場合の検討によって信頼性はほぼ確認されている。

しかしながら、テザー収納ボックスの開口比とボックス出口から折りたたんだテザーの最上端部との距離を変化させたときの伸展抵抗を測定した結果、極度に距離が縮まって詰まった状態では、伸展抵抗が非線形的に急激に増加することが分かった。

### (1) 収納ボックス出口と側壁の摩擦の再検討

スーパー・テザー伸展における重要な定量的な特性パラメータである伸展速度と側壁摩擦に関して、ボックス内の空間余裕が十分あるときの再検討では、定量的なデータを得ることが出来た。

#### ① 伸展速度の効果、

収納ボックスの側壁の摩擦抵抗がテザー伸展速度に対して線形に依存していることが、重力の影響を変化させた斜め打ち出し展開による飛行後解析でも確認された。

このことは、同じ時間の中に展開されるテザーの長さが異なることから容易に理解できる。この効果については飛行前解析に先んずるテザーボックスの設計過程から十分に判っていた事実である。

## ② 側壁摩擦の効果

側壁の静止摩擦係数がテザー伸展時の抵抗に影響する。この効果は、垂直打ち出し、水平打ち出し、テープの重量を変化させて行う斜め打ち出しなど、多くの手法で検討した。

これらの結果に加えて、収納ボックスの側壁の材料を変えて摩擦係数を変化させるなどして検討を行った。その結果、側壁の静止摩擦係数に対して摩擦抵抗が線形的に依存するという典型的な結果が得られた。

このことより、テザーボックスの材料を選択することによってテザー伸展抵抗を調整できるというテープ・テザー伸展に関する設計指針が得られたことになる。

### (2) 収納ボックスの空隙効果

飛行後解析では、収納ボックスの出口と折りたたんだテープ・テザーの最上部との距離が重要なパラメータであると考えられるようになった。これは、未確認の宇宙飛行状態を想定することによって、重力がほぼ上下逆になったときの展開性能まで検討を行った。テザー展開の想定外の停止として、ボックス出口で多量のテザーが詰まったときが容易に想像できる。このような空隙効果は、収納ボックスの出口開口率と、ボックス出口とテザーとの距離に関係している。

収納ボックスの空隙の効果は、電子天秤を用いて伸展抵抗を測定することによって検討した。収納ボックスの空隙の効果を表すために展開抵抗の時間応答の結果を図5（出口までの距離が 12.3 cm）、そして、図6（2.5 cm）に示す。

本手法の逆オリガミ法では、60 cm長さで折りたたまれたテープ・テザーの部分ごとに展開するので、伸展抵抗は周期的に変動する。伸展抵抗の増減の周期は 0.4 s であって、これは伸展速度 1.0m/s の伸展周期と一致している。したがって、伸展抵抗の頂上は一つの折り畳み部が通過するとともに生まれものである。出口までの距離が 2.5 cm の時には、開口率が 17%と 33%の場合展開抵抗の増加がみられる。これは出口までの距離が減少するにつれて開口比の効果が薄れることで理解できる。また、出口までの距離が 2.5 cm の場合に、開口比が 33%の時の抵抗が開口比の 17%の時より大きくなりうるのが注意される。

図7にてテープ・テザーの出口までの距離の効果をまとめる。横軸は出口開口率であり、テザーボックス幅、すなわち全幅に対する出口の幅のパーセンテージとしている。ここでは開口率を左から右に 17%, 33%, そして 67%, とし、出口からテザーまでの距離を上から下に 12.3cm, 7.4cm, and 2.5cm と変えて検討



図5 出口までの距離が 12.3 cm（高い）時の展開抵抗の時間応答

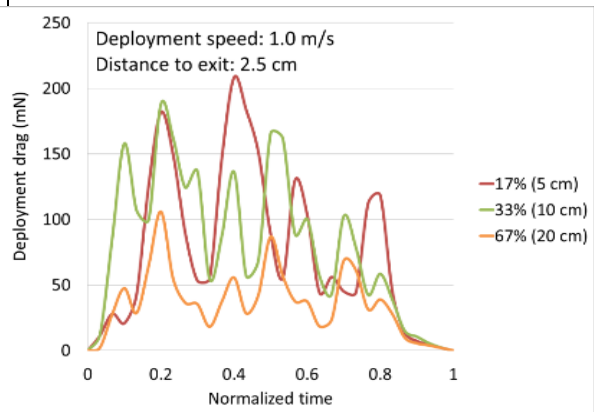


図6 出口までの距離が 2.5 cm（低い）時の展開抵抗の時間応答

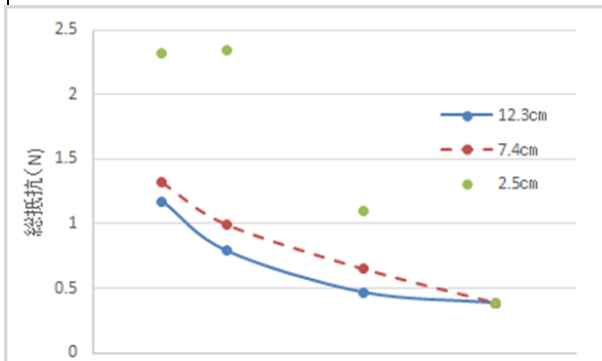


図7 ボックスの空隙効果（出口からテザーまでの距離：上から下に 12.3cm, 7.4cm, そして、2.5cm）

した。テープ・テザーは 100%の開口率では出口の抵抗を受けない。このときの抵抗値は折りたたまれたテザーが延ばされることによる抵抗のみからなり、ボックスの空隙から詰まることなく自由に伸展してゆくことがみられる。しかしながら、出口までの距離が縮まり、開口率が減少するにつれて抵抗は非線形的に増加し、出口までの距離が極度に小さいとき開口率が減少するとデータが不安定化することが分かる。

この状態は高速度カメラで観察することが出来て、出口とテザーの距離、そして、出口の開口率の双方から成り立つ空隙効果によって大きく影響されることが分かる。

### (3) 高速度カメラによる観察<sup>2)</sup>

テープ・テザー伸展時のミクロな様子を高速度カメラを用いて観察した。観察のためにテープ・テザーにマーカーを付け、これの挙動を高速度カメラで観察して、ボックスの空隙と出口の開口率の効果を実験的に検討した。図8に出口開口比を左から17%, 33%, 67%そして100%とし、伸展速度を上から下に0.5m/s, 1.0m/s and 1.5m/sとしたときの伸展速度の影響を示す。図9に、出口開口率を左から17%, 33%, 67%とし、出口からテザーまでの距離を上から下に上から下に12.3cm, 7.4cm, 2.5cmとしたときのボックスの空隙効果を示す。これらから、テザー上部の出口との距離の減少は、開口率の減少と相まってテザー伸展特性に大きく影響することが分かり、(2)の測定結果を裏付ける。

また、テザーの伸展過程において、展開抵抗が急に増加する現象が見られ、更にはテザーが詰まることがあった。これは複数の折りたたんだ部分が重なって厚さが増したためであり、テザーボックスに十分な余裕がない場合出口で詰まると考えられる。これはボックスの空隙率の効果である。

宇宙空間におけるテザーの伸展においては材料固有のクセは無視できない。このとき、折り畳み部での展開抵抗が伸展の過程において主要な効果を及ぼすことも分かった。今回の検討によって地上実験においては、テープ・テザーの折り畳み部は完全に(100%)平らにならず90%程度しか開かないことが分かった。通常では、地上試験実験で伸展させるより、宇宙での伸展長さは数キロメートルに及ぶほど非常に長くなるので、折り畳み部の数は地上で実験されるものよりずっと多い。このため、折戻し、展開、が連続的に増加するとともに宇宙デモンストレーションでは完全に伸展が終わるまで折り畳み部が抵抗を増加させ続けることとなる。このように、地上実験では検討できない領域がある。この事実は、宇宙では長大となるテザーの長さ制御の地上検証の困難性を表している。

#### ■まとめ

観測ロケット実験(T-Rex)においてテープ・テザーの伸展速度が急激に減少したことは、テープ・テザーを受動的に伸展させることに特有の技術的難しさがあることを示していると思われる。今回、種々の手法によって検討したように、テープ・テザーの全体的な一般化された伸展特性の理解は非常に重要である。宇宙空間での運動は、未知の要素が大きくテザー、特にテープ・テザーにおいては長い柔軟物が運動するので、その運動を妨げないようテザーボックス内に十分な余裕空間を保持することが必要であり、伸展性能の高信頼化の重要な要素であると結論付けることが出来た。

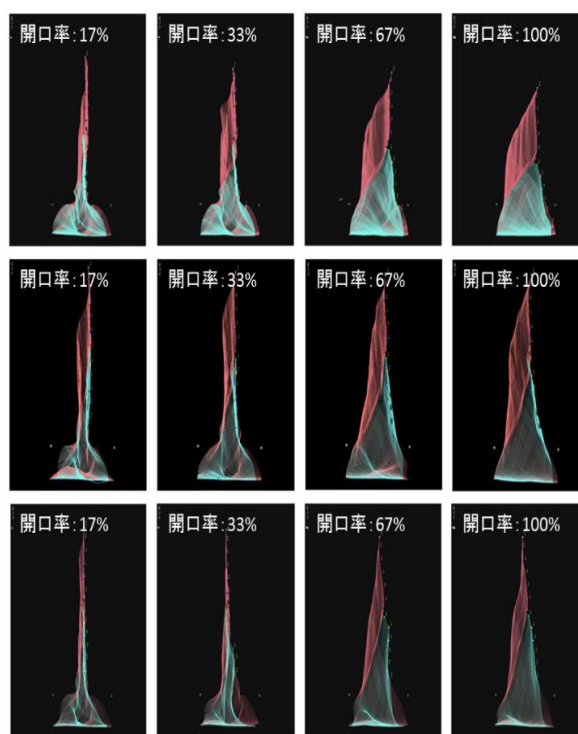


図8 伸展速度(上から下に0.5m/s, 1.0m/s and 1.5m/s)が異なるときの伸展状態

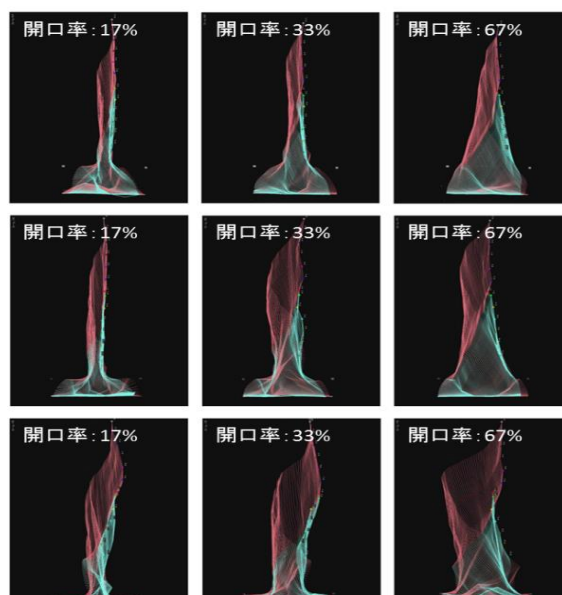


図9 ボックスの空隙効果(出口からテザーまでの距離: 上から下に12.3cm, 7.4cm, 2.5cm)

#### 参考文献

<sup>1)</sup>Fujii, H.A., Watanabe, T., Sahara, H., Kojima, H., Takehara, H., Yamagiwa, Y., Sasaki, S., Abe, T., Tanaka, K., Oyama, K-I, Johnson, L., Khazanov, G.V. Sanmartin, J.R., Charro, M., Kruijff, M., van der Heide, E.J., Rubin, B., Garcia de Quiros, F.J., Trivailo, P.M., and Williams, P., "Space Demonstration of Bare Electrodynamic Tape-Tether Technology on the Sounding Rocket S520-25," AIAA-2011-6503, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Portland, OR, August 2011.

<sup>2)</sup> 6. [雑誌論文] 1)に同じ。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- 1) Hironori A. Fujii, "High Speed Observation of Bare Electrodynamic Tether in Inverse-Origami Method," International Journal of Space Science and Engineering (査読あり、accepted for publication).
- 2) Hironori A. Fujii, Masahito Hirakawa, Mitsuyosi Tuchiya and Kenji Uchiyama, "Space tether technology and its application to air borne wind energy generation," Proceedings of the 26<sup>th</sup> Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, Yoshinodai, Kanagawa, 2016, C10, pp.1-6. (査読なし).
- 3) Kojima, H. and Taruoka, Y., "Deployment Control of a Tethered Satellite System for Rendezvous with a Target," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.59, No.6, pp.313-322(2016). (査読あり).
- 4) Hironori A. Fujii, Takeo Watanabe, and Tairo Kusagaya, "Tether Actuator to Control Vibration of Space Structures," Acta Astronautica, Vol.117, December 2015, pp.55-63. (査読あり).
- 5) Takeo Watanabe, Hironori A. Fujii, Takeshi Sakamoto, and Genrokuro Matsunaga, "Penetration Dynamics of an Asteroid Sampling System Inspired by Japanese Sword Technology," The ISTS Special Issue of Transactions of Japan Society for Aeronautics and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 14 (2016) No. ists30 p. Pk\_23-Pk\_28. (査読あり).
- 6) 藤井裕矩, 大久保博志, 新川和夫, 草谷大郎, Rob Stroeks, 高橋泰岳, 遠藤大希, 渡部武夫, 丸山勇佑, 中嶋智也, 浅生利之, 関和市, 「高空風力発電研究の紹介」, 日本風力エネルギー学会学会誌, 第40巻, 第1号, 通巻116号, (2016年2月), pp. 543-553. (査読なし)
- 7) 藤井裕矩, 平川雅人, 内山賢治, 渡部武夫, 草谷大郎, 「扇型テザー風車の動力伝達テザーとテザー形状の検討」, ブイヤント航空, Vol. 43, No. 1, 2016年7月, pp. 39-46. (査読なし).
- 8) 藤井裕矩, 向井浩子, 津久井一平, 「宇宙エレベータにおける一つの構想」, 特集 宇宙エレベータの実現を目指して, 日本航空宇宙学会学会誌, 第63巻, 第1号, (2015年1月), pp. 27-32. (査読あり).

〔学会発表〕(計57件)

- 1) 藤井裕矩, 渡部武夫, 草谷大郎, 小島広久, スーパー・テザー展開性能の飛行後検討, (社) 日本航空宇宙学会第47期定時社員総会/年会講演会, 2016年4月14~15日, 東京大学山上会館
  - 2) Hironori A. Fujii, Yohei Sugimoto, Hirohisa Kojima, Takeo Watanabe, and Tairo Kusagaya, "Examination of Deployment Performance of Super-Tether in Inverse-Origami Method", 5th International Conference on Tethers in Space, May 24-26, 2016 at the University of Michigan (located in Ann Arbor, Michigan, USA) conference website (tethersinspace2016.com)
  - 3) 藤井裕矩, 杉本洋平, 小島広久, 「スーパー・テザーの逆オリガミ法による伸展特性の高速度解析について」 "High-Speed Observation for Deployment of Super-Tether in Inverse-Origami Method," 25th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, July 27, 2015, 宇宙科学研究所
  - 4) 森亮哉, 藤井裕矩, 杉本洋平, 「スーパー・テープ・テザーの射出速度の変化の摩擦抵抗への影響について」, Dynamics and Design Conference 2014, 上智大学, 2014年8月26~29日.
- 他、53件

〔その他〕

ホームページ等

web:

<http://www013.upp.so-net.ne.jp/tmit/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤井裕矩 (FUJII, Hironori)  
株式会社 TMIT・研究開発部: 所長  
研究者番号: 30070650

### (2) 研究分担者

草谷大郎 (KUSAGAYA, Tairo)  
東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授  
研究者番号: 40404941

### (3) 研究分担者

渡部武夫 (WATANABE, Takeo)  
帝京大学・理工学部・講師  
研究者番号: 40433180

### (4) 研究分担者

小島広久 (KOJIMA, Hirohisa)  
首都大学東京・システムデザイン研究科教授  
研究者番号: 50322350