

平成30年 5月28日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06599

研究課題名(和文) CubeSATによる宇宙テザー伸展挙動解析モデルの宇宙実証研究

研究課題名(英文) Research for verifying the analytical model of space-tether dynamics during deployment in space by using CubeSAT

研究代表者

山極 芳樹 (Yamagiwa, Yoshiki)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：30220255

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)：本研究は、テザー挙動解析モデルの検証と改善を行うために、テザー伸展技術実証のためのCubeSATを開発し、軌道上実験を実施して展開時および展開後のケーブル挙動についてのデータを取得することを目的としたものである。平成27年度には衛星フライトモデルを製作、平成28年度に打ち上げ、「きぼう」からの放出を行い、平成29年度は、テザー伸展を目指して衛星運用を行った。その結果、衛星開発には成功した。テザー伸展に関してはリアルタイムのデータは得られなかったが得られたデータよりテザー伸展には成功したと推測でき、加えて、テザー伸展に関する新たな知見を得るとともに、テザー挙動解析モデルの改善も実施できた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was to develop a CubeSAT for verifying the tether deployment and to obtaining the data of tether dynamics during deployment by performing the experiment in orbit for verifying and improving our developing analytical tether dynamics model. We developed the flight model of CubeSAT in 2015, and this CubeSAT was launched and released from Japanese experimental module "Kibo" on ISS in 2016, then we performed the satellite operation and the tether-deployment experiment in 2017. As the result, the development of satellite was succeeded and the satellite was alive until its reentry. Although the real time data of tether deployment could not be obtained, but it was supposed that the tether deployment in orbit was succeeded from the obtained data. In addition, we could obtain the new knowledge about the tether deployment and could improve the analytical model of tether deployment by this research.

研究分野：宇宙工学

キーワード：宇宙テザー 衛星開発 ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

宇宙テザーは複数の宇宙機を繋ぐケーブルのことであり、多彩な応用が可能で、将来の有用な宇宙システムのひとつである。この宇宙テザーを利用するためには、スムーズなテザー伸展を行うことが重要である。適切な設計を行いスムーズなテザー伸展を可能にするためには、伸展時のケーブルダイナミクスを正確に模擬できるテザー挙動解析モデルの開発と、宇宙実験による検証が必要となる。

研究代表者は、十数年前からテザー研究に携わっており、テザー伸展時を含めたテザー挙動のモデル化も宇宙エレベーターを含めたいくつかの宇宙テザー応用のケースに対して実施してきており、その宇宙検証によるデータ取得によってモデルの精度を高めることを目指している。一方、宇宙検証実験という点では、国内では現時点で軌道上においてテザー伸展に成功した実績がない。

2. 研究の目的

上記のような現状を踏まえ、本研究は、機能制約はあるが短期間かつ低コストで開発できる特徴を持つ CubeSAT により、研究代表者のグループで開発したテザー伸展モデルを利用してテザー伸展機構を設計し、テザー伸展に焦点を絞った軌道上実験を実施し、軌道上のテザー伸展実証、および展開時のケーブル挙動についてのデータ取得し、テザー伸展ダイナミクスモデルの検証と改善を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

平成 27 年度：テザー挙動解析モデルに基づき設計した CubeSAT の技術モデルの試験・改善およびフライトモデルの製作・試験、地上局の整備、想定される状況でのテザー挙動解析

平成 28 年度：宇宙実験によるテザー伸展技術実証とデータ取得およびその解析

平成 29 年度：テザー挙動解析モデルの改善、次期宇宙実験の設計
という流れで実施した。

4. 研究成果

上記の研究計画は、衛星打ち上げロケットの都合もあり、平成 27 年度に CubeSAT フライトモデルを製作、平成 28 年度は、衛星打ち上げ、「きぼう」からの放出を行い、軌道上運用を開始、平成 29 年度は、本実験であるテザー伸展を目指して衛星運用を継続、また、軌道上の衛星状態を推測するための地上実験および解析の実施、となった。また、並行して、宇宙エレベーターおよび衛星を対象とした伸展のテザー挙動解析モデルについて、改善を実施した。

本研究での主な成果を以下にまとめる。
＜衛星開発＞

テザー伸展技術の実証を目的に 100m のテ

ザーを収納した 2U サイズ CubeSAT (STARS-C) を完成させた。STARS-C のミッションシーケンスを図 1 に、ミッション部詳細を図 2 に、製作した衛星内観、外観を図 3、4 に示す。

STARS-C のミッションシーケンス

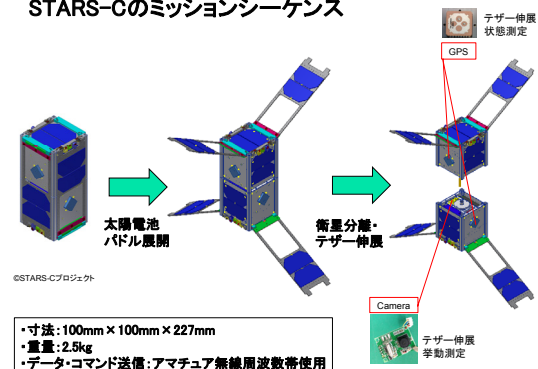


図 1 STARS-C のミッションシーケンス。

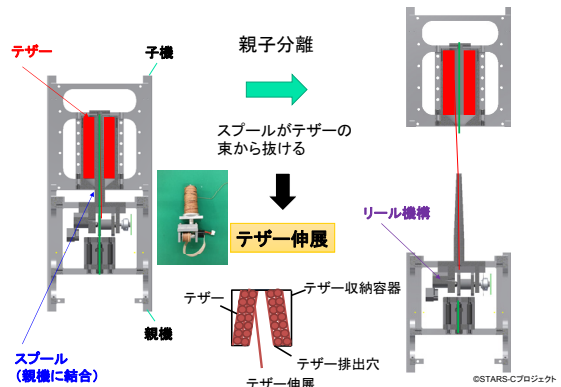


図 2 STARS-C のミッション部詳細。

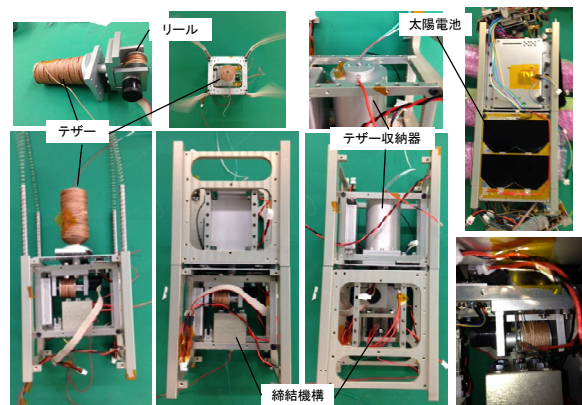


図 3 完成した衛星内観。

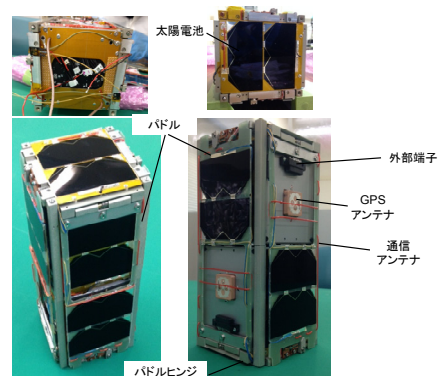


図 4 完成した衛星外観。

*詳細は、雑誌論文④, 国際会議発表⑤, ⑦, ⑨, 国内学会発表⑧~⑩, ⑫~⑭, ⑯参照.

<衛星運用>

完成した衛星は2016年11月にJAXAに引き渡し, 12月9日にH-IIBにて打ち上げ, 12月19日にISSから放出され, 2018年3月2日の大気圏再突入まで運用を行った. モールス信号は大気圏再突入の前日まで受信でき, 衛星は最後まで機能しており, 大学初の衛星開発としては成功した. また, 各地の天文台の協力の下, CubeSATとしては困難な地上光学観測による輝度変化を利用した衛星姿勢推定を行い成功した(図5).

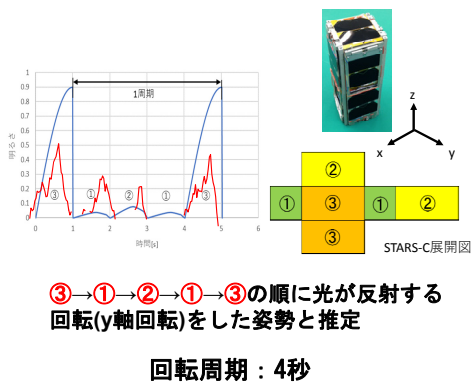


図5 光学観測からの衛星姿勢推定の結果.

<テザー伸展実験>

運用開始後, 通信状況を調整, 2017年8月からテザー伸展コマンドの送信を開始した.

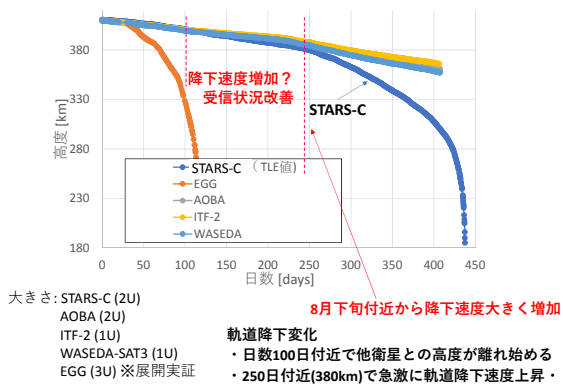


図6 STARS-C 軌道降下状況.

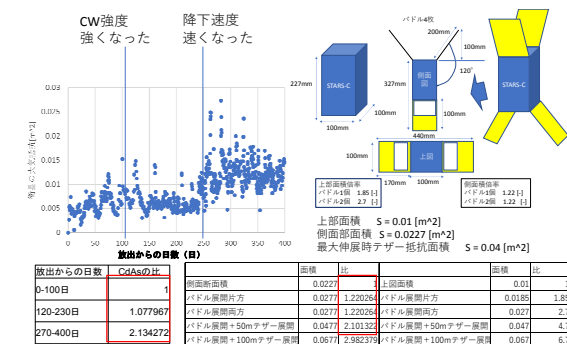


図7 STARS-C 状態変化の推定結果.

FM通信環境が万全ではなかったためGPSおよびカメラデータが得られなかったが, 衛星の電力データ, 高度変化のデータ(図6)および衛星の面積, 抵抗変化の解析より, 本方式でのテザー伸展に成功したと推定される.

また, 衛星状態の推定結果(図7)からテザーは100m全伸展していないと考えられるが, テザー伸展についての追加の地上実験および解析結果(図8)との比較より, 今回のような重力傾斜力が非常に小さい環境ではテザー巻癖によるバネ力がテザー伸展に大きく影響してくるという新たな知見を得た.

<考えられるテザーが全伸展しない原因>

- ・空気中と真空中の伸展抵抗の違い
- ・衛星のリバウンド
- ・テザーの巻癖によるバネ力



■ STARS-Cは分離初速度2.15 [m/s]
 →バネ力考慮するとテザー伸展は数十m

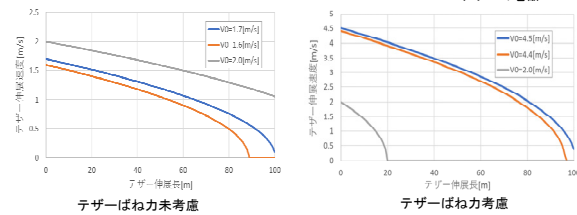


図8 テザー巻癖によるバネ力のテザー伸展への影響評価.

*詳細は, 国際会議発表①, ③, 国内学会発表①, ④参照.

<伸展時のテザー挙動解析モデル>

独自に開発したテザー挙動解析モデルを宇宙エレベーターに適用し, モデルの改善とモデルによる評価を実施した. 特に宇宙エレベーターケーブル伸展に関しては, 静止軌道ステーションからの地球側, 宇宙側への同時伸展というケーブル伸展方法を新たに提案した. 図9は, その際のケーブル伸展の様子を示す.

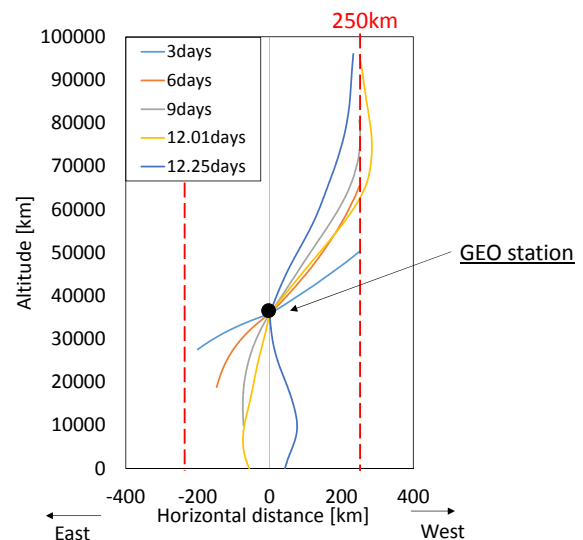


図9 提案した静止軌道ステーションからの上下同時展開方式による宇宙エレベーターケーブル伸展の挙動.

また、この伸展方法が、従来提案されているステーション軌道を上げながらケーブルを地球側に伸展する方法に比べ、ケーブルおよびステーション制御に要する推進剤を3分の1以下に減らすことができる(表1)ことを示した。

表1 従来の方法と提案したケーブル伸展方法におけるケーブルおよびステーション制御に要する推進剤質量の比較.

Cable deployment method		Total Propellant for Control [t]
Proposed method	Control by stress limit	425.6
	Constant speed	499.7
Preceding method		1221

さらに、本モデルを次期衛星(1km以上のテザー伸展とテザー上のクライマ移動を目的とする)に適用し、テザー伸展挙動の推定を行った(図10)。

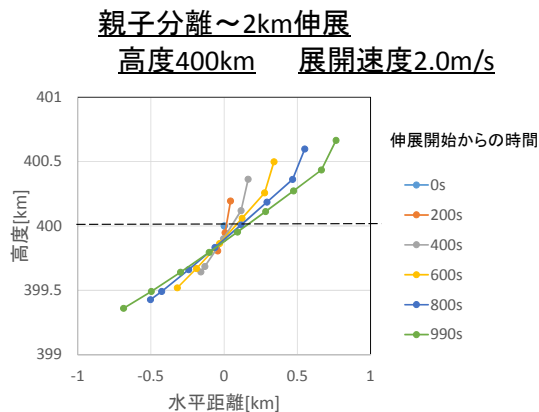


図10 開発モデルによる次期衛星のテザー伸展挙動推定結果.

*詳細は、雑誌論文①～③、⑤、⑥、国際会議発表②、④、⑥、⑧、国内学会発表②、③、⑤～⑦、⑩、⑫参照。

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6件)

- ① Ishikawa, Y., Otsuka, K., Yamagiwa, Y. and Doi, H., Effects of Ascending and Descending Climbers on Space Elevator Cable Dynamics, Acta Astronautica, 査読有, Vol.145, 2018, pp.165-173.
- ② Yamagiwa, Y., Tao, K., Sato, S., Otsuka, K and Ishikawa, Y., Cable Dynamics and Control at the Simultaneous Deployment of the Cables from GEO Station during Space Elevator Construction, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 査読有, Vol. 16, No. 2, 2018, pp. 165-171.
- ③ Tao, K, Yamagiwa, Y., Ishikawa, Y. and Otsuka, K., Study about the

Simultaneous Deployment Performance of the Cables from GEO Station at the Space Elevator Construction, Acta Astronautica, 査読有, Vol.138, pp.590-595, 2017.

- ④ Yamagiwa, Y., Nohmi, M., Aoki, Y., Momonoi, Y., Nanba, H., Aiga, M., Kumao, T. and Watahiki, M., Space Experiments on Basic Technologies for a Space Elevator Using Micro-satellites, Acta Astronautica, 査読有, Vol.138, 2017, pp. 570-578.
- ⑤ Ishikawa, Y., Tamura, T., Otsuka, K., Horiike, T., Iwaoka, T., Masui, N., Hamachi, K., Katsuyama, S., Aoki, Y., Yamagiwa, Y., Inoue, F. and Omoto, E., Obayashi Corporation's Space Elevator Construction Concept, Journal of British Interplanetary Society, 査読有, Vol.69, No.6/7, 2016 pp. 227-239.
- ⑥ 山極芳樹, 土井日向, 大塚清敏, 石川洋二, 宇宙エレベーターにおける運用時のケーブルダイナミクスの概説, 日本航空宇宙学会誌, 査読有, 第63巻, 第6号, 2015, pp.205-211.

[学会発表] (計25件)

<国際会議>

- ① Yamagiwa, Y., Nohmi, M., Fukiba, K., Aoki, Y. and Kanda, T., Verification of Space Elevator Technologies: Present Status and Future Plan in Japan, Proceedings of 68th International Astronautical Congress, Adelaide, 2017.9.28.
- ② Yamagiwa, Y., Tao, K., Sato, S., Otsuka, K. and Ishikawa, Y., Cable Dynamics and It's Control at the Simultaneous Deployment of the Cables from GEO Station during Space Elevator Construction, Proceedings of 31st International Symposium of Space Technology and Science, Matsuyama, 2017.6.6.
- ③ Kumao, T., Aiga, M, Watahiki, M, Nohmi, M. and Yamagiwa, Y., STARS-C Tether Deployment Mission and Quick Report of Operation Results, Proceedings of 31st International Symposium of Space Technology and Science, Matsuyama, 2017.6.7.
- ④ Ishikawa, Y., Otsuka, K. Yamagiwa, Y. and Doi, H., Impact of Ascending and Descending Climbers on Space Elevator Cable Dynamics, 67th International Astronautical Congress, Guadalajara, 2016.9.29.
- ⑤ Yamagiwa, Y., Nohmi, M., Aoki, Y., Momonoi, Y., Nanba, H., Aiga, M.,

- Kumao, T. Watahiki, M. Otsuka, K. and Ishikawa, Y., Development of Microsatellites for Verifying the Basic Technologies of Space Elevator in Space, 67th International Astronautical Congress, Gaudalajara, 2016. 9. 29.
- ⑥ Tao, K., Yamagiwa, Y., Otsuka, K. and Ishikawa, Y., Study about the Performance for Simultaneous Deployment of the Cables from GEO Station under the Space Elevator Construction, 67th International Astronautical Congress, Gaudalajara, 2016. 9. 29.
- ⑦ Yamagiwa, Y., Nohmi, M., Aoki, Y., Momonoi, Y., Nanba, H., Aiga, M., Kumao, T. and Watahiki, M., Space Experiments of Basic Technologies of Space Elevator by Using Microsatellites, The Fifth International Conference on Tether in Space, Ann Arbor, 2016. 5. 26.
- ⑧ Tao, K., Yamagiwa, Y., Otsuka, K. and Ishikawa, Y., Study about the Simultaneous Deployment Performance of the Cables from GEO Station at the Space Elevator Construction, The Fifth International Conference on Tether in Space, Ann Arbor, 2016. 5. 26.
- ⑨ Momonoi, Y., Namba, H., Aiga, M., Ishikawa, M., Matsuo, H., Kumao, T., Yamagiwa, Y., and Nohmi, M., Development of STARS-C; CubSAT for Tether Deployment Mission, Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC & 6th NSAT, Kobe, 2015. 7. 8.
- <国内学会>
- ① 山極芳樹, テザー伸展実証超小型衛星 STARS-C (“はごろも”) の概要と現状報告, 国際宇宙ステーション・「きぼう」利用シンポジウム, 東京, 2018. 1. 25.
- ② 大塚清敏, 石川洋二, 山極芳樹, 大本絵利, 宇宙エレベーターケーブルの温度解析と力学への影響の基礎検討, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 新潟, 2017. 10. 25.
- ③ 佐藤勝治, 田尾公希, 山極芳樹, 大塚清敏, 石川洋二, 宇宙エレベーター建設における静止軌道上からの最適なケーブル同時展開制御方法に関する研究, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 新潟, 2017. 10. 25.
- ④ 能見公博, 山極芳樹, 熊王丈留, 静大衛星 STARS-C 軌道上実験報告と今後の衛一誠開発に向けて, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 新潟, 2017. 10. 25.
- ⑤ 田尾公希, 山極芳樹, 大塚清敏, 石川洋二, 宇宙エレベーター建設における静止軌道上からのケーブル同時展開の制御と挙動について, 2016 年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2017. 1. 20.
- ⑥ 佐藤勝治, 山極芳樹, 石川洋二, 大塚清敏, 田尾公希, テザー小型衛星におけるテザー伸展挙動解析, 2016 年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2017. 1. 20.
- ⑦ 田尾公希, 山極芳樹, 大塚清敏, 石川洋二, 宇宙エレベーターにおける静止軌道上からのケーブル同時展開建設方法の最適化について, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 函館, 2016. 9. 9.
- ⑧ 相賀雅紀, 熊王丈留, 綿引雅一, 山極芳樹, 能見公博, テザー伸展実証超小型衛星 ‘STARS-C’ の開発およびフライトモデルの性能検証, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 函館, 2016. 9. 9.
- ⑨ 相賀雅紀, 熊王丈留, 綿引雅一, 山極芳樹, 能見公博, 宇宙テザー基礎技術実証超小型衛星 STARS-C の設計開発, 電子情報通信学会宇宙航行・エレクトロニクス研究会, つくば, 2016. 6. 24.
- ⑩ 山極芳樹, 宇宙エレベーター; その原理と研究開発の現状, 第 18 回化学工学会学生発表会 浜松大会 特別講演 (2016. 3. 5) (招待講演)
- ⑪ 田尾公希, 山極芳樹, 大塚清敏, 石川洋二, 宇宙エレベーター建設における静止軌道上からのケーブル同時展開時の展開性能について, 2015 年度宇宙輸送シンポジウム, 2016. 1. 14
- ⑫ 難波大貴, 山極芳樹, 能見公博, 矢野智大, 吉村勇人, 桃井優, 超小型衛星「STARS-C」のコマンド・データ処理部の開発, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 2015. 10. 07
- ⑬ 相賀雅紀, 桃井優, 熊王丈留, 綿引雅一, 尾藤惇史, 山極芳樹, 能見公博, テザー伸展実証超小型衛星のミッション部設計, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 2015. 10. 07
- ⑭ 綿引雅一, 桃井優, 難波大貴, 熊王丈留, 尾藤惇史, 能見公博, 山極芳樹, 宇宙テザー伸展実証実験のための超小型衛星開発, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 2015. 10. 07
- ⑮ 田尾公希, 藤井慎一郎, 山極芳樹, 大塚清敏, 石川洋二, 宇宙エレベーター建設における静止軌道上からのケーブル同時展開における展開性能の研究, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 2015. 10. 07
- ⑯ 山極芳樹, 宇宙エレベーター; その原理と研究開発の現状, 日本航空宇宙学会中部支部定例談話会 2015 (2015. 6. 24) (招待講演)

[その他]

ホームページ等

山極研究室 HP:

<http://ars.eng.shizuoka.ac.jp/~yamalab501/>

能見研究室 HP:

<http://ars.eng.shizuoka.ac.jp/~nohmlab>

STARS-C HP:

<http://stars.eng.shizuoka.ac.jp/starsc.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山極 芳樹 (YAMAGIWA, Yoshiki)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号: 30220255

(2) 研究分担者

能見 公博 (NOHMI, Masahiro)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号: 20325319