

## テザー小型衛星におけるテザー伸展挙動解析

## Analysis of tether deployment dynamics of tether microsatellite system

○佐藤 勝治・田尾 公希・能見 公博・山極 芳樹（静大）  
青木 義男（日大）・大塚 清敏・石川 洋二（大林組）

○Shoji Sato・Koki Tao・Masahiro Nohmi・Yoshiki Yamagiwa(University of Shizuoka)  
Yoshio Aoki (Nihon University) Kiyotoshi Ootsuka・Yojiro Ishikawa (Obayashi Corporation)

## Abstract（概要）

We are now developing the microsatellite called STARS-E for verifying the basic technologies of future space elevator. STARS-E is composed of a mother satellite, a daughter satellite, a climber and a tether connecting them, and its objective is to verifying the long tether deployment and the climber operation along the tether on orbit, and obtaining the dynamic data during them. The objective in this study is to analyze tether dynamics during and after the deployment of 2km tether for understanding its dynamics and to estimate the timing of climber operation because the operation of climber must be performed after the tether is stabilized. The results showed that the tether was swung to vertical direction to the direction of tether deployment by Coriolis force, but its motion would be stabilized by the gravity gradient force in about 1 hour from the start of tether deployment.

## 記号の説明

- $m$ : 質点質量
- $G$ : 重力定数
- $M_e$ : 地球の質量
- $r$ : 位置
- $\omega$ : 角速度
- $k$ : 弾性係数
- $c$ : 減衰係数

## 1. 目的および背景

現在、地上から宇宙への輸送手段として化学ロケットが用いられている。しかし、化学ロケットは爆発やついレクなどの危険を伴う点、推進剤の燃焼により環境に対して悪影響を及ぼす点、高コストで非経済的な点などの問題があり、大量の物資や人員の輸送を行う手段としては適していない。このような化学ロケットに代わる経済的かつ高い輸送能力をもった輸送手段として宇宙エレベーターというのが近年注目されている。宇宙エレベーターとは、地上から宇宙空間にケーブルを伸ばし、そのケーブルをクライマーと呼ばれる昇降機が昇降することで物資や人員の輸送を行うという大規模な輸送システムである。

しかし、宇宙エレベーターを実現させるためには多くの技術的問題や物理現象の解明が必要である。私たちは”STARS プロジェクト”という超小型テザー伸展衛星による宇宙での実証実験を行うことでこの技術的問題と物理現象を解明にアプローチしている。

本研究では、この”STARS プロジェクト”の中でも軌道上

でのテザー伸展およびクライマーの昇降を目的としている”STARS-E”に焦点を絞り、衛星からテザーが伸展開始後のテザーのダイナミクスを解析し、衛星の姿勢が安定するまでにかかる時間を確認し、クライマーを昇降させるタイミングを検討する。

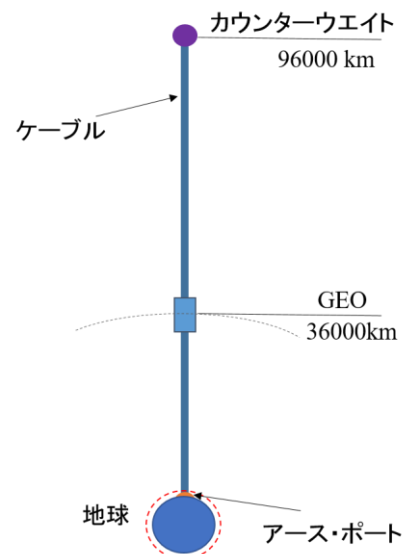


図1 宇宙エレベーターの概略図

## 2. STARS プロジェクト

STARS プロジェクトとは、宇宙エレベーターの実現に向けて超小型衛星による宇宙エレベーターの基礎技術実証を目的としたプロジェクトである。

### 2.1 STARS-C

STARS-C とは、静岡大学を中心としたグループによって開発された超小型テザー伸展衛星 (100×100×200[mm]) である。テザーは 100m の非導電性テザーである。また、STARS-C はテザー伸展技術の習得を目的としている。STARS-C の概要を図 2 に示す。

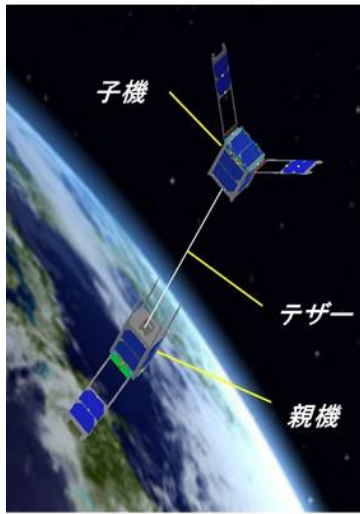


図 2 STARS-C の概要図

### 2.2 STARS-E

STARS-E は、静岡大学を中心としたグループによって開発された小型テザー衛星 (500×500×500[mm], 50kg) である。テザーは 2km の非導電性テザーである。また、STARS-E はテザー伸展技術及び軌道上でのクライマー昇降技術の習得を目的としている。STARS-E の概要図を図 3 に示す。



図 3 STARS-E の概要図

## 3. STARS-E プロジェクト

### 3.1 ミッションシーケンス

STARS-E のミッションシーケンスは以下のである。また、ミッション時の衛星の変化を図 4 に示す。

- (1) ロケットから放出
- (2) 姿勢制御
- (3) テザー伸展
- (4) リール機構の制御
- (5) 昇降機の移動

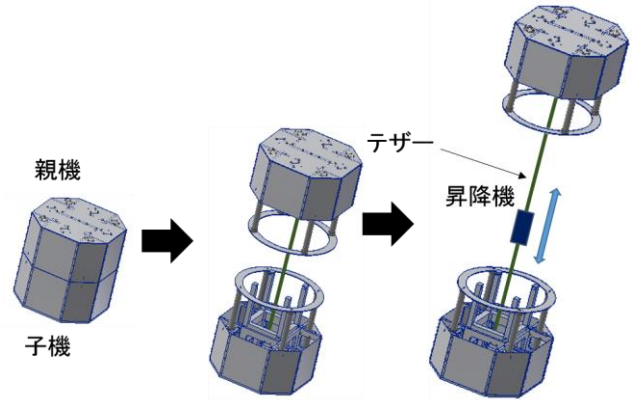


図 4 ミッション時の衛星の様子

衛星はロケットから放出後、姿勢を地球方向へと衛星が向くように制御を行う。これは、本衛星が宇宙エレベーターのケーブル伸展を想定しているためである。衛星が地球方向を向いた段階でテザーの伸展を行う。このとき、テザーはリール機構によって制御される。テザーの伸展が終了し、テザーの挙動が落ち着いた段階で昇降機の移動を行い、軌道上での昇降機の移動を実証する。

### 3.2 STARS-E の構造

STARS-E の全体図を図 5 に示す。

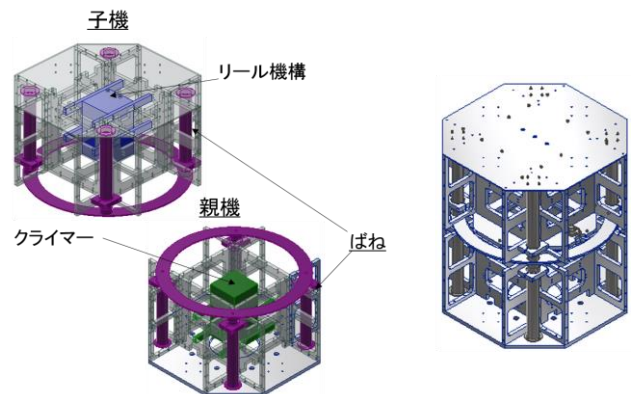


図 5 STARS-E の全体図

図 5 に示すように、STARS-E は主にテザー伸展機構、リール機構、クライマーから構成されている。それぞれの構成要素について以下で紹介する。

### 3.2.1 テザー伸展機構

STARS-E では、親機と子機の分離にばね力を使用し、親機と子機が分離することを想定している。ばね力によって親機と子機が分離することでテザー伸展が開始する。親機と子機とばねの位置関係を図 6 に示す。

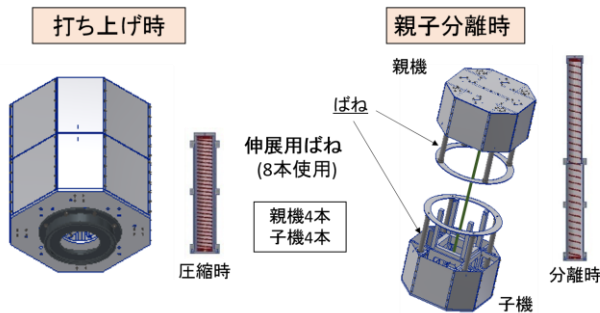


図 6 親機，子機とばねの位置関係

図 6 からわかるように、ばねは親機，子機にそれぞれ 4 本ずつ搭載されており、図 6 の左で示したように圧縮されたばねが、図 6 の右に示されるように解放されることで親機と子機が分離し、テザーが伸展する。

### 3.2.2 リール機構

STARS-E では、軌道上におけるクライマーの昇降を行うことを想定している。そのため、テザーのねじれを避ける必要がある。そのため、リール機構を採用した。リール機構の概略図を図 7 に示す。

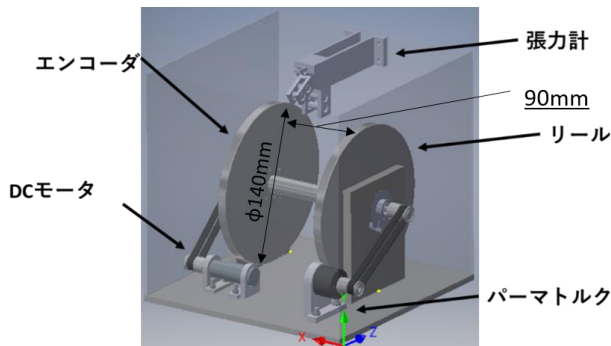


図 7 リール機構

図 7 に示すように、STARS-E に搭載するリール機構はエンコーダ，DC モータ，パーマトルク，張力計から構成されている。DC モータによってリールを駆動する。そして、パーマトルクはリールのブレーキとして利用されている。張力計はテザーの張力測定を行う。ここで得られる張力のデータは、宇宙エレベータ建設時におけるテザーダイナミクスの解析や、昇降機の動作がテザーに与える影響などを知らうえで重要な知見となる。

### 3.2.3 クライマー（昇降機）

STARS-E に搭載するクライマーの概略図を図 8 に示す。

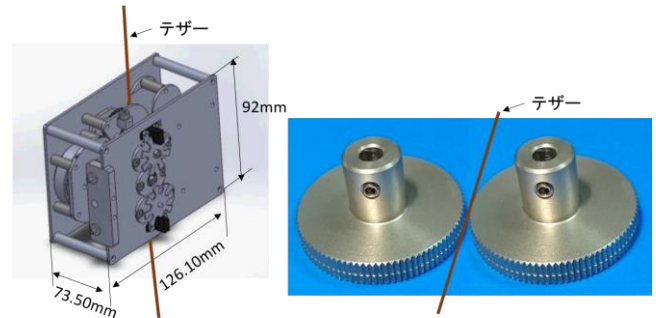


図 8 クライマーとローラ

クライマーとテザーの位置関係は、図 8 のようである。また、クライマーの内部には、図 8 に示したようなローラが入っている。クライマーは、このローラとテザーの摩擦で駆動する。また、ローラは表面にローレット加工を施し、摩擦力が増加するように設計されている。

## 4. テザー展開

STARS-E は、高度 400km の軌道に投入される。そして、展開速度 2.0m/s でテザーを進展させ、2km 伸展したところで伸展が終了し、伸展終了後のテザーが地球方向に向き、安定したところで、クライマーを昇降させる。

### 4.1 解析モデル

STARS-E と条件を合わせるため、子機からテザーを放出するモデルとなっている。また、テザーは長さによって質点が増加するようになっており、質点間隔は 200m として解析を行った。また、本研究では、テザーは二次元の離散質点モデルで模擬しており、各質点間はバネ・ダッシュボット系で結合されている。そのため、ねじれは考慮していない。展開点におけるリールによる滑り、抵抗は無視している。計算は赤道上で円軌道として計算している。テザーが放出されると放出されたテザーの質量分だけ子機の質量から減少していくように計算している。ここで、解析条件を表 1、解析モデルを図 9 に示す。

表 1 解析条件

テザー材質	ケブラー
テザー直径[mm]	0.6
テザー密度[kg/m <sup>3</sup> ]	1440
ヤング率[Gpa]	70.5
親機質量[kg]	25
子機質量[kg]	25
時間ステップ[s]	0.01
テザー伸展長さ[km]	2
衛星の高度[km]	400

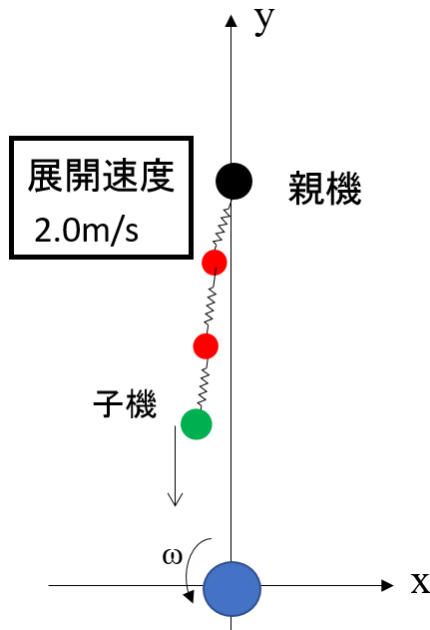


図9 解析モデル

運動方程式<sup>1)</sup>は、式(1) (第一項：コリオリ力，第二項：遠心力，第三項：万有引力，第四項：弾性力，第五項：減衰力)を用いた。これを4次のRunge-Kutta法で解く。

$$\begin{aligned}
 m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = & -2m_i \boldsymbol{\omega} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} + m_i (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{\omega}) \mathbf{r} - GM_e m_i \frac{\mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}|^3} \\
 & + \left\{ \begin{aligned} & k_i \frac{\mathbf{r}_{i-1} - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_{i-1} - \mathbf{r}_i|} \Delta |\mathbf{r}_{i-1} - \mathbf{r}_i| b_i \\ & + k_{i+1} \frac{\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i|} \Delta |\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i| b_{i+1} \end{aligned} \right\} \quad (1) \\
 & + \{c_i (\dot{\mathbf{r}}_{i-1} - \dot{\mathbf{r}}_i) b_i + c_{i+1} (\dot{\mathbf{r}}_{i+1} - \dot{\mathbf{r}}_i) b_{i+1}\}
 \end{aligned}$$

## 4.2 制御方法

今回の解析モデルでは先端質点の制御は行わず，テザーは重力傾斜力によって伸展している。また，テザーが2km伸展した時点で先端速度が0m/sになるように制御している。

## 5. 解析結果

### 5.1 親子分離から2km伸展までテザーの挙動

衛星の親子分離から2kmまで伸展したときのテザーの挙動を図10に示す。子機から放出されるテザー展開速度は2.0m/sであり，高度400kmで姿勢が安定し，衛星が地球方向を向いたところで，テザーの展開を開始し，テザーが2km伸展した時点で伸展終了とした。

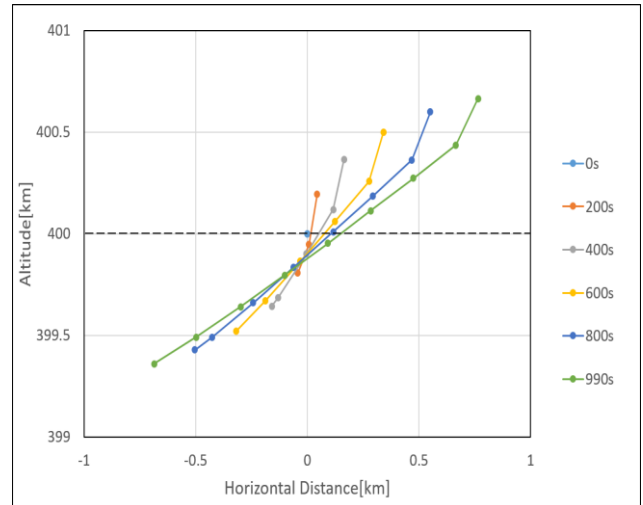


図10 伸展開始後2kmまでのテザー挙動

図10から，テザー展開開始後，テザーは地球方向から大きな角度を持って伸展している。さらに，図10から2km伸展するのに要する時間は約15分であることがわかる。また，テザーは高度400kmの上方と下方でテザーの挙動は変化している。これは，衛星が400kmで高度が落ちないように速度で飛んでいるので高度400kmより上方と下方では，コリオリ力の働く方向が逆方向になる。また，図10から，テザーは地球方向から大きな角度を持って伸展していることから，親機と子機に働くコリオリ力が親機，子機の重力傾斜力よりも支配的ではないかと考えられる。よって，テザー伸展開始から2km伸展するまでの親機，子機のコリオリ力と重力傾斜力の関係を図11，図12に示す。

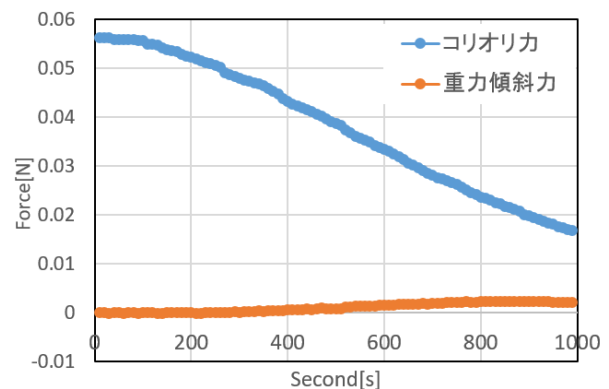


図11 重力傾斜力とコリオリ力の関係 (親機)

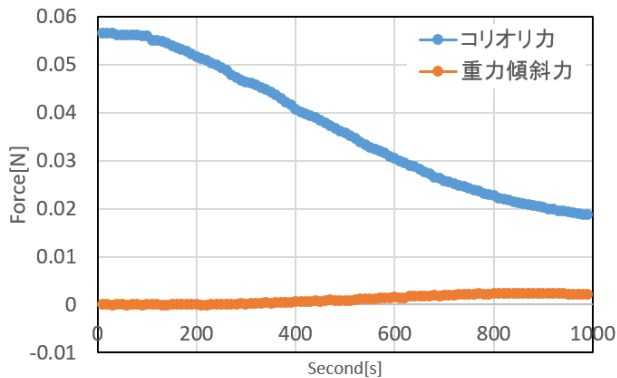


図 12 重力傾斜力とコリオリ力の関係 (子機)

図 11 から、親機ではテザー展開開始から 2km 伸展するまでは、重力傾斜力よりもコリオリ力の方が支配的であることがわかる。これより、テザー展開開始から 2km 伸展するまではコリオリ力の影響により、テザーは地球方向から大きな角度を持って伸展していると考えられる。

また図 12 から、子機においても同様に、テザー展開開始から 2km 伸展するまでは、重力傾斜力よりもコリオリ力の方が支配的であることがわかる。これより、テザー展開開始から 2km 伸展するまではコリオリ力の影響により、テザーは地球方向から大きな角度を持って伸展していると考えられる。

## 5.2 2km 伸展後のテザーの挙動

衛星が親子分離をし、2km 展開を行った後のテザーの挙動を確認する。2km までのテザー挙動は地球に対して大きな角度を持って伸展していた。しかし、その時点では、衛星の姿勢が安定しているとは言えない。その為、テザーが 2km 展開終了後のテザーの挙動を確認する必要がある。

よって、テザーが 2km 伸展したのち、ある程度時間が経過すると、コリオリ力と重力傾斜力の関係はどのようになるのかによって、2km 伸展後に時間が経過したときのテザーの挙動が地球方向に対してどのような角度を持って伸展していくのか、決まってくると考えられる。

また、このようなテザーの 2km 伸展終了後、ある程度の時間が経過したときに、重力傾斜力だけで衛星の姿勢が地球方向に向くのか、またその場合、衛星の姿勢が安定までにはどのくらいの時間を要するのかを確認することで、衛星を実際に運用した際に、テザー伸展が終了し、その後、姿勢が安定した段階で、テザー上をクライマーが昇降させるタイミングを知ることができる。ここで、2km 伸展後のテザー挙動を図 13 に示す。

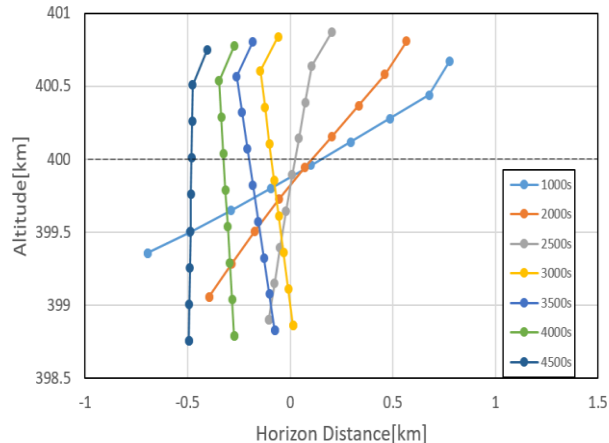


図 13 2km 伸展後のテザーの挙動

図 13 から、2km 伸展後の時間経過を見てみると、2km 伸展後直後は地球方向に対して大きな角度を持っていることがわかりますが、時間が経つにつれて、衛星の姿勢が徐々に地球方向を向いていくことがわかる。このことから、テザー伸展終了後は、コリオリ力よりも重力傾斜力の方が支配的になることがわかる。この要因としては、テザーが 2km 伸展するまでは、各質点は地球方向に速度を持って展開しているが、2km 伸展終了した時点で速度が 0m/s になるように制御しているので、2km 伸展後は伸展中に比べ速度が小さくなるため、コリオリ力も小さくなる。そのため、重力傾斜力が支配的になると考えられる。このため、2km 伸展後の時間経過を見ると、衛星の姿勢は徐々に地球方向に向いていくことがわかる。ここで 2km 伸展後の重力傾斜力の変化を図 14 に示す。

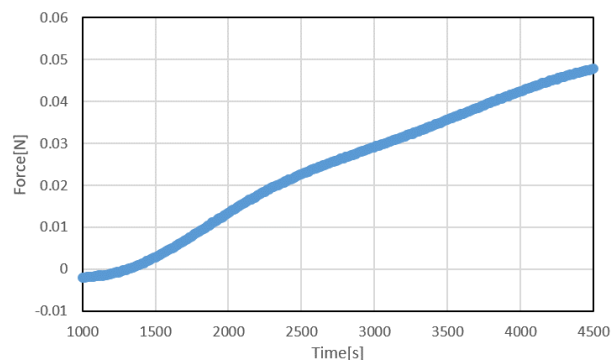


図 14 2km 伸展終了後に衛星に働く重力傾斜力

図 14 からわかるように、2km 伸展後、時間が経つにつれて徐々に重力傾斜力も上昇している。このことから、2km 伸展後は、時間が経つにつれて徐々に衛星の姿勢が地球方向に向き、安定していくと考えられる。

また、図 13、図 14 より、2km 伸展後の衛星は、時間が経つにつれて徐々に姿勢が安定していき、その後グラフの左側へと推移していっていることがわかる。また、時間が経つにつれて高度が下がっていることがわかる。この要因

としては、2km 伸展終了後、衛星の姿勢が安定したのちに、重力傾斜力が支配的になるため、システム全体として徐々に降下すると考えられる。また、このシステム全体の降下に伴ってシステム全体の周回速度が増加したため、図 13 のグラフにおいてシステム全体が左側に推移したと考えられる。

また、図 13 から衛星の姿勢が安定するまでに要する時間は約 1 時間くらいであるということがわかる。このことから、衛星がテザー伸展を開始してから姿勢が安定し、クライマーの昇降を行うことができるようになるまでの時間は約 1 時間であると考えられる。

## 6. 結 論

本論文では、宇宙エレベーター建設に向けて極めて重要な課題である軌道上におけるテザー伸展技術及び軌道上におけるクライマーの昇降技術の実証実験を目的とする人工衛星” STARS-E “における軌道投入後からテザー伸展及び伸展後のテザーの挙動の解析を行った。そして、その解析結果からクライマーを昇降させる最適なタイミングの検討を行った。解析結果から、STARS-E においてテザー伸展開始から 2km 伸展終了までのテザーの挙動は、テザーに働くコリオリ力が支配的なため、地球方向に対して大きな角度を持った方向にテザーが伸展することが分かった。また、テザーの伸展が終了するまでに要する時間は約 15 分であった。また、テザーの 2km 伸展終了後からその後の経過に関しても計算を行った。2km 伸展終了後からある程度の時間の経過を見てみると、2km 伸展終了直後はコリオリ力の影響で地球方向に対して大きな角度を持った方向にテザーは向いているが、徐々に時間が経過するにつれて、重力傾斜力の影響で地球方向に姿勢が安定していく。また、姿勢が安定するまでに要する時間は約 1 時間であることがわかる。よって、衛星がテザー伸展を開始してから姿勢が安定し、クライマーの昇降を行うことができるようになるまでの時間は約 1 時間であると考えられる。さらに、衛星は時間が経過するにつれて重力傾斜力が支配的になるため徐々に軌道が降下していくことが分かった。

以上、本論文では小型テザー衛星” STARS-E “の初期テザー挙動解析を行った。しかし、現在の解析モデルは赤道上で計算している。そのため、実際に衛星が周回する軌道を考えると、軌道傾斜角を考慮し、これにより衛星に与えられる影響を考慮する必要がある。さらに、より詳細なテザーの挙動を確認するためにもモデルの三次元化を行い、衛星に働く三次元的な力やテザーの挙動を考慮して計算していく必要があると考えられる。最終的には、テザー上をクライマーが昇降するようなモデルを完成させ、ミッション時の STARS-E の解析も行っていく必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 株式会社大林組：季刊大林，No.53，2012
- 2) 藤井 慎一郎：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ダイナミクスと軌道保持性能についての研究，静岡大学 修士論文，2015
- 3) 原田 峻輔：宇宙エレベーター建設時におけるテザーの展開時におけるダイナミクスについての解析，静岡大学 卒業論文，2012
- 4) 田尾 公希：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制御について，静岡大学，修士論文，2017
- 5) 能見公博，山極芳樹，青木義男：軌道エレベータ衛星 STARS-E の試作機開発，宇宙科学技術講演会講演集 60，6p，2016