

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

The deployment performance at the cable simultaneous deployment of the cable from the geostationary orbit in the space elevator construction

○田尾 公希, 山極 芳樹 (静岡大学), 大塚 清敏, 石川 洋二 (大林組)

○Koki Tao, Yoshiki Yamagiwa (Shizuoka University), Kiyotoshi Otstuka, Yoji Ishikawa (Obayashi Corporation)

Abstract (概要)

In this study, dynamics of simultaneous deployment of space elevator cable from GEO to the earth and the space was analyzed. Analysis model of cable dynamics was two-dimension multiple mass model, in which mass points were connected to each other by springs and damper. We studied the propellant mass to control cable dynamics and GEO station orbit keeping and the performance of cable deployment widely.

記号の説明

m :	質点質量
G :	万有引力定数
M_e :	地球の質量
r :	位置ベクトル
ω :	角速度ベクトル
k :	弾性係数
c :	粘性係数
m_p :	推進剤質量
I_d :	トータルインパルス
g_0 :	重力加速度(=9.8m/s ²)
I_{sp} :	比推力

1. 目的および背景

現在, 宇宙へ行く手段としてはロケットが主流であるが墜落や爆発などの危険を伴う。また, 大気汚染など環境の面でも問題がある。そのため, 近年, 宇宙への新しい輸送手段として宇宙エレベーターが注目を集めている。宇宙エレベーターは爆発や墜落などの危険はなく, 低コストであり, 環境に悪影響でなく, 高い輸送能力を有しているためロケットの代替案として有力視されている。また, 宇宙エレベーターは地球から宇宙へ行く手段としてだけではなく, 図1に示すように様々な施設を建設することで火星へ推進剤なしで行くことや低軌道に衛星を投入することが可能になる。

しかし, 宇宙エレベーター実現のためには多くの技術的な問題の解消と物理現象の解明が必要である。特にケーブルのダイナミクスは宇宙エレベーターの設計においてもっとも重要なもので, その現象は早急に明らかにすべき問題である。

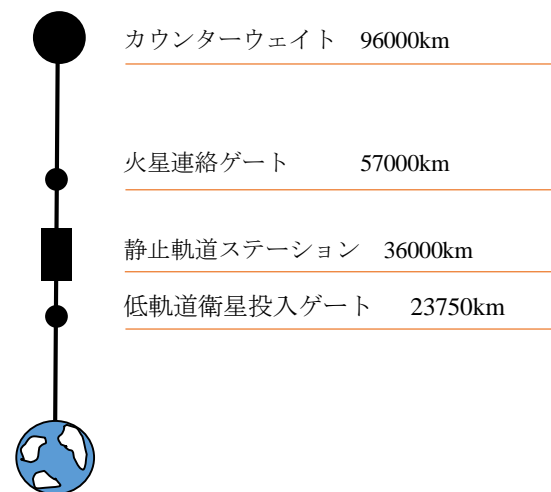


図1 宇宙エレベーター

本研究では, 宇宙エレベーター建設段階において重要なケーブル展開について従来主として研究されてきているステーションの高度を上げ, ケーブルを地球方向に展開する方法に対して静止軌道ステーションより地球及び宇宙方向に同時展開する方法を提案し, ダイナミクスを解析し, 建設方法について推進剤質量, ケーブルにかかる最大応力から制御方法の検討を行う。

2. テザー展開

2.1 宇宙エレベーター建設方法

図2に従来の建設方法, 図3に今回の建設方法を示す。従来の建設方法では, 静止軌道上に宇宙船を配置し地球に向かって先端に推進機を取り付けたケーブルを展開する。それ

と同時に宇宙船を宇宙側に移動させ全体のバランスを保つ(図2)。最終的にケーブルを地表に固定させ、宇宙船は高度96,000kmまで移動しカウンターウェイトを取り付け宇宙エレベーターの完成となる。しかし、この方法を用いると宇宙船を宇宙側に移動させるのに多くの推進剤が必要となってしまう、コストがかかってしまう可能性が高い。

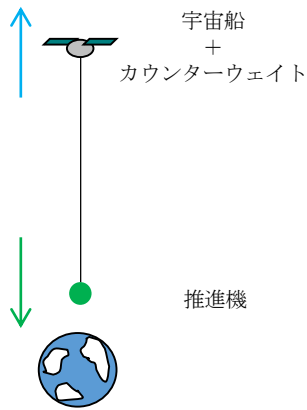


図2 従来の建設方法

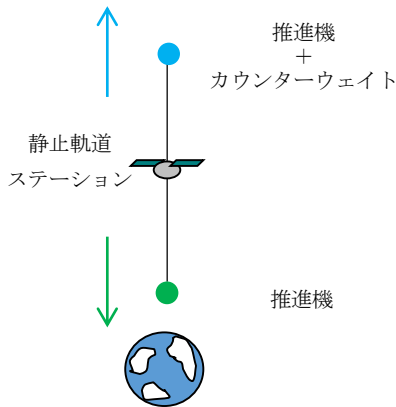


図3 今回の建設方法

そのため、本研究では静止軌道上に静止軌道上に静止軌道ステーションを建設し、地球側と宇宙側に同時にケーブル展開を行う。(図3)このとき、両ケーブルの先端には推進機が取り付けられており、先端速度が制御できるとする。最終的には地球側のケーブルを地表に固定し、宇宙側のケーブルは高度96000kmまで展開しカウンターウェイトを取り付け宇宙エレベーターの完成となる。この方法を用いると、地球側に展開したケーブルが静止軌道ステーションに与える力と、宇宙側に展開したケーブルが与える力を釣り合わせ安定した展開を行うことができ両ケーブルを主としてその先端質点にかかる重力傾斜力を利用して展開でき、大きなステーションを移動させる推進剤を減らすことができコストを抑えることができると考えられる。今回は解析によってこの建設方法による宇宙エレベーターの建設が可能かどうか検証を行う。

2.2 解析モデル

静止軌道ステーションから、宇宙側と地球側のケーブルを同時に展開するモデルとなるため、図4のように展開されたケーブルの長さによって質点数を増やしていく解析モデルを用いて解析を行った。

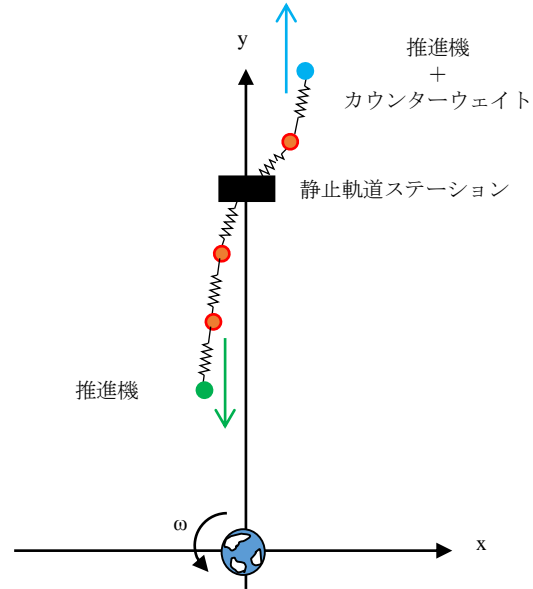


図4 解析モデル

解析に使用した条件を表1に示す。この条件は大森組の宇宙エレベーター建設計画の条件を参考に決定した。今回の解析では展開長さ100kmまでは質点間隔5km、展開長さ600kmまでは質点間隔25km、展開長さ1600kmまでは質点間隔50km、それ以降は100kmとして解析を行なった。また、本研究では、ケーブルを二次元の離散質点モデルで模擬し、各質点間はバネ・ダッシュポット系で結合されている。そのため、ケーブルのねじれは考慮していない。実際の建設ではケーブルは静止軌道ステーションを展開点とし、この時リールに巻かれて展開されるが今回の解析ではリールによる滑り、抵抗はないものとした。展開方法は、両ケーブルともケーブル先端に衝撃を与え鉛直方向にのみ速度を与えている。また、ケーブルの両先端には推進機が取り付けられている。宇宙側のケーブルのみカウンターウェイトが搭載されている。

表1 解析条件

ケーブル材質	CNT		
ケーブル直径 [mm]	0.2	静止軌道ステーション質量[t]	125
ケーブル密度 [kg/m ³]	1400	時間刻み[s]	0.01
ヤング率[GPa]	1000	許容応力[GPa]	65
推進機質量 (地球側) [t]	1.25	推進機質量 (宇宙側) [t]	2.5
カウンターウェイト[t]	36.8		
質点間隔[km]	5,25,50,100		

運動方程式²⁾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。

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

2.3 リール制御

展開を行う際、たわんだケーブルが地表に衝突してしまう。そこで展開速度に先端質点より高度が低い質点がある場合に展開速度に以下の制御を行った。

$$1 \text{ 分毎に} \quad \text{展開速度} = 0.9 \times \text{展開速度} \quad (2)$$

この制御により展開速度が徐々に減速し、先端速度と展開速度に差が発生し、たわみを減少させる事ができる。また先端質点の高度が最も低い場合、初期の展開速度に戻す制御を行った。宇宙側のケーブルにも同様の制御を行った。

2.4 推進剤質量

本研究では推進剤質量をトータルインパルスから算出している。トータルインパルスとはミッション完了までの推進機の発生推力を時間で積分したものである。式(3)に推進剤質量を求める式を示す。

$$m_p = \frac{I_d}{g_0 \cdot I_{sp}} \quad (3)$$

本研究では、推進機は電気推進機とし、比推力が3000sのものを使用すると仮定する。

2.5 制御方法

解析は次の条件で行った。

- ・ 先端質点と展開速度を共に一定速度で展開
- ・ 先端質点を最大応力によって制御, 展開速度を徐々に加速させる制御

今回の解析ではすべてのケースで静止軌道ステーションの制御はステーションを静止軌道に保持する制御を行うものとする。そして、その保持のために必要なエネルギーを評

価する。

3. 解析結果

3.1 先端質点, 展開速度ともに一定速度

このケースではケーブル先端質点の東西方向, 鉛直方向に制御を加え, 初期速度として宇宙側のケーブルには (0, 113.6km/h) 地球側のケーブルには (0, -67.5km/h) を与え展開速度は宇宙側を 113.6km/h, 地球側を 67.5km/h とした。

図5にはケーブルが展開されてから目標地点に到着するまでの動きを表し, 図中の黒丸は静止軌道ステーションを表している。表2は各推進機で消費される推進剤質量を示している。宇宙側のケーブルは西に, 地球側のケーブルが東の方向へ膨らんでいるのはコリオリ力によるものである。宇宙側の方が大きく膨らんでいるのは展開速度が宇宙側の方が速いためである。

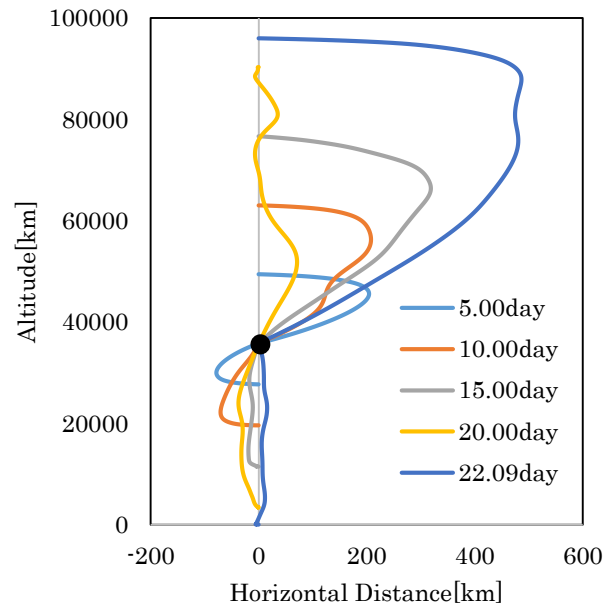


図5 ケーブルダイナミクス

表2 推進剤質量

推進剤質量[ton]			
地球側	宇宙側	静止軌道ステーション	合計
107.9	741.9	38.37	888.2

必要な推進剤質量に関しては宇宙側のケーブルを制御するのに多くの推進剤を必要としていることがわかる。そして、それぞれ先端質量に対して非常に大きな値となっている。現在の解析では推進剤質量を考慮していない。推進剤を考慮すると推進剤の質量により更に先端質量が増加するので減速するために必要な推力が大きくなり更に推進剤が必要になってくると予想される。次に特に多い宇宙側の推進剤質量を減らすような制御方法を考えいく。

3.2 先端質点、展開速度ともに制御

このケースでは展開速度を宇宙側は上限を 200km/h とし、徐々に増加させ続け、96,000km の地点で 0km/h となるような制御を行った。宇宙側の展開速度については 2 パターンの解析を行った。それぞれ条件 1, 条件 2 とする。条件 1 は 95,500km の地点まで徐々に 200km/h まで展開速度を上昇させた。条件 2 は 36,500km の地点まで徐々に 200km/h まで展開速度を上昇させ、しばらく展開速度一定で展開し、95,500km の地点から展開速度を減速させる制御を行った。それぞれ展開速度を示すグラフを条件 1 は図 6 に条件 2 は図 7 に示す。そして、地球側の展開速度を条件 1 は 67.5km/h とし、条件 2 は 112.8km/h として制御を行った。これは宇宙側の先端質点、地球側の先端質点が同時到着する速度である。

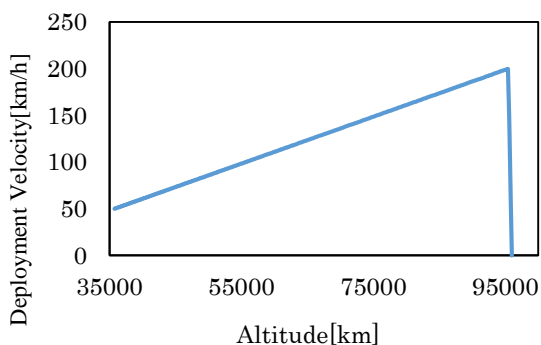


図 6 条件 1 の高度ごとの展開速度

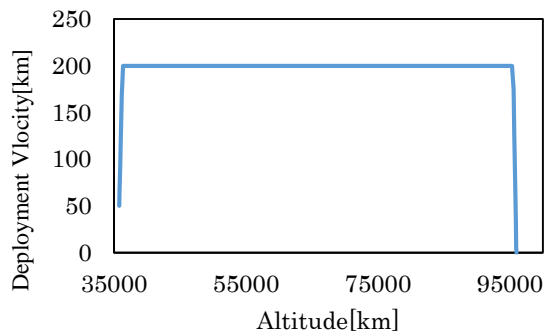


図 7 条件 2 の高度ごとの展開速度

先端質点には鉛直方向に制御を加え、初期速度として宇宙側のケーブルには (0, 50 km/h) 地球側のケーブルには条件 1 は (0, -67.5km/h), 条件 2 は (0, -112.8km/h) を与えた。宇宙側のみ鉛直方向の制御は等速でなく、ケーブルにかかる最大応力によって先端速度を制御した。制御方法はケーブルの最大応力が 52GPa (許容応力の 80%) を超えた時、先端速度に以下のような制御を加えた。

$$\text{先端目標速度 (鉛直方向)} = 0.99 \times \text{超えた時の先端速度} \quad (3)$$

その後、ケーブルの最大応力が 40GPa (許容応力の約 60%) を下回り、その時点での展開速度よりも先端速度が下回っている時、先端速度に以下のような制御を加えた。

$$\text{先端目標速度 (鉛直方向)} = 1.1 \times \text{下回っている先端速度} \quad (4)$$

そして、ケーブルの先端質点が東西方向±250km を超えたら中心に向かって 10km/h を先端目標速度 (東西方向) として一分間制御を行った。

3.2.1 条件 1 の解析結果

図 8 にはケーブルが展開されてから目標地点に到着するまでの動きを表し、図中の黒丸は静止軌道ステーションを表している。図 9 は宇宙側と地球側のケーブルに発生している最大応力と展開時間の関係を表している。図 10 は宇宙側と地球側の先端質量の速度を示している。表 3 は各推進機で消費される推進剤質量を示している。

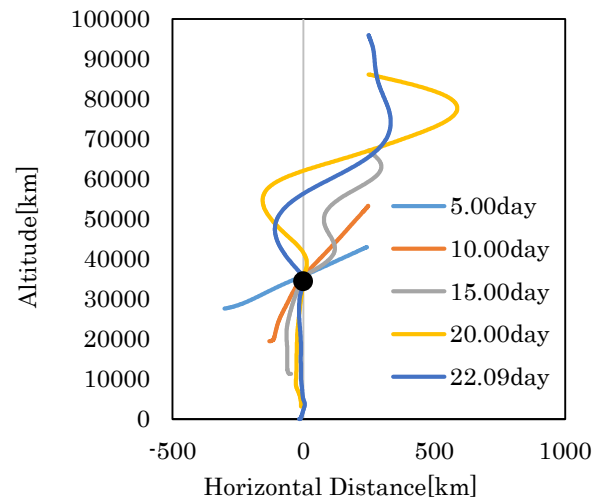


図 8 ケーブルダイナミクス

表 3 推進剤質量

先端速度[km/h]		推進剤質量[ton]			
		地球側	宇宙側	静止軌道ステーション	合計
地球側	宇宙側				
67.5		106.6	318.7	259.1	684.7
67.5	113.6	107.9	741.9	38.37	888.2

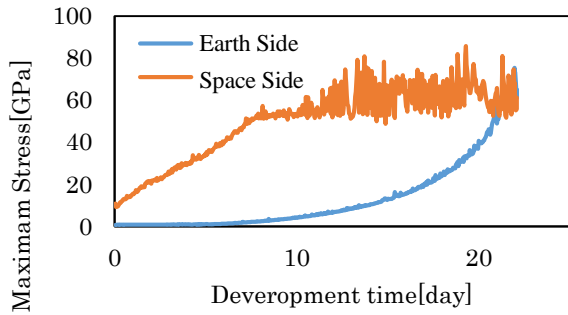


図9 最大応力

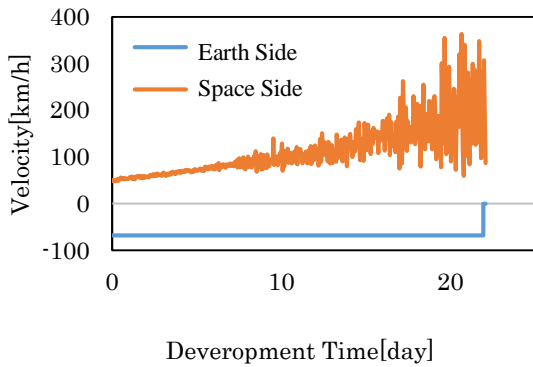


図10 先端速度

図8より宇宙側のケーブルの先端質点の水平距離は全て250km以下であり東西方向についての制御がされていることが分かる。宇宙側の膨らみに関しては最大で500km程度であるので問題ない。図9より最大応力に関して宇宙側は52GPaを超えたところで応力の上昇がなくなり、52GPa付近で収まっていることが分かる。これにより、制御が働いていることが確認できる。その後52GPaからの上昇が見られるが、最大でも80GPaであるので、CNTの破断応力の55%程度で抑えられたといえる。図10より地球側は一定速度であり、一定速度で制御した結果が確認できる。宇宙側に関しては建設が進むにつれ、先端速度が上昇していることが分かる。上昇はしているが最大でも約350km/hである。よって、十分実現可能な値であるといえる。表3より先端速度を一定速度で展開した時と比較して宇宙側の先端質点で必要とする推進剤質量は57%減少した。全体としては23%の減少が見られた。このことから推進剤質量を減少が目的だった制御の効果はあったといえる。

しかし、先端質点でかかる推進剤質量は減少しているが、静止軌道ステーションにかかる推進剤質量は増加している。このことから、静止軌道ステーションにかかる宇宙側からの力と地球側からの力を釣り合わせ安定した展開ができるというメリットが生かせていないといえる。

3.2.2 条件2の解析結果

図11にはケーブルが展開されてから目標地点に到着するまでの動きを表し、図中の黒丸は静止軌道ステーションを表している。図12は宇宙側と地球側のケーブルに発生している最大応力と展開時間の関係を表している。図13は宇宙側と地球側の先端質量の速度を示している。表4は各推進機で消費される推進剤質量を示している。

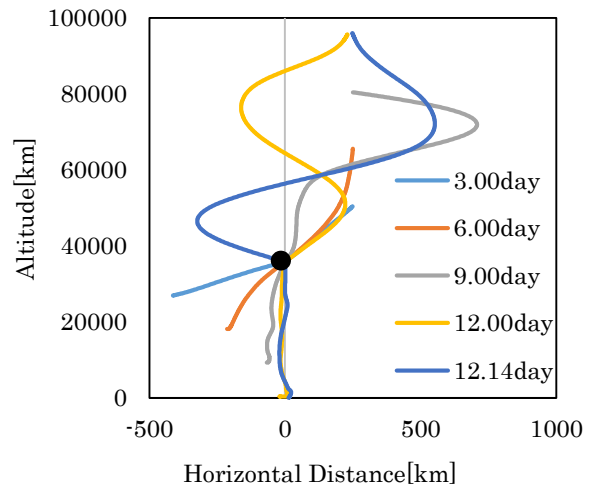


図11 ケーブルダイナミクス

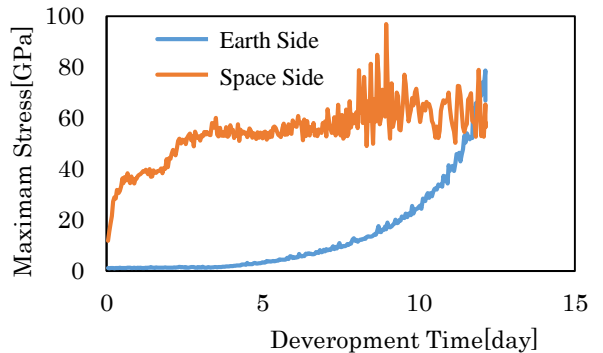


図12 最大応力

表4 推進剤質量

先端速度[km/h]		推進剤質量[ton]			
		地球側	宇宙側	静止軌道ステーション	合計
地球側	宇宙側				
122.8		58.13	246.0	165.0	469.2
122.8	206.8	58.13	406.8	21.94	486.7

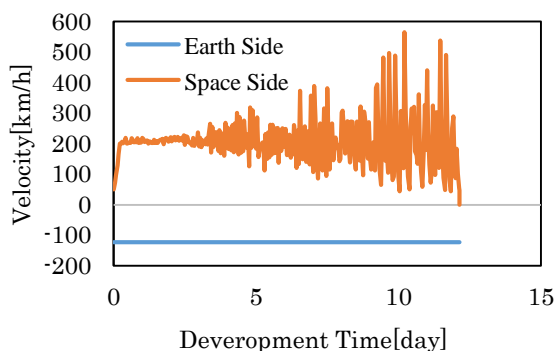


図 13 先端速度

図 11 より宇宙側のケーブルの先端質点の水平距離は全て 250km 以下であり東西方向に関しての制御がされていることが分かる。宇宙側の膨らみに関しては最大で 700km 程度であるので問題ない。図 12 より最大応力に関して宇宙側は展開速度が上昇しきったところで最大応力の上昇が収まっているが、また上昇し始めている。そして、52GPa を超えたところで応力の上昇がなくなり、52GPa 付近で収まっていることが分かる。これにより、制御が働いていることが確認できる。その後 52GPa からの上昇も見られるが、最大でも 90GPa であるので、CNT の破断応力の 60% 程度であるので抑えられたといえる。図 13 より地球側は一定速度であり、一定速度で制御した結果が確認できる。宇宙側に関しては建設が進むにつれ、先端速度が上昇していることが分かる。そして、展開速度が上昇しきったところで先端速度の上昇は止まっており、さらに上昇はしているが最大でも約 500km/h である。実現可能な値でないといえる。表 4 より先端速度を一定速度で展開した時と比較して宇宙側の先端質点で必要とする推進剤質量は約 40% 減少した。全体としては約 4% の減少が見られた。このことから制御の効果はあったといえる。しかし、条件 1 と同じように先端質点にかかる推進剤質量は減少しているが、静止軌道ステーションにかかる推進剤質量は増加している。このことから、条件 2 の制御でも静止軌道ステーションにかかる宇宙側からの力と地球側からの力を釣り合わせ安定した展開ができるというメリットが生かせていないといえる。

4. 結論

本論文では、宇宙エレベーター建設段階において重要なケーブル展開時のダイナミクスを解析し、静止軌道ステーションより地球及び宇宙側にケーブルを展開する建設方法について推進剤質量、最大応力から制御方法の検討を行った。展開速度、先端質点ともに一定速度として制御したものでは先端質点に対して推進剤質量が膨大な量となる結果になってしまった。特に宇宙側の推進剤質量が膨大となった。よって、本論文では宇宙側の推進剤質量が減少するよう展開速度を徐々に増加させ、先端質量を最大応力によ

て減速、加速させる制御方法を検討した。その制御方法では推進剤質量を減少させることができた。本論文内条件 1 では 23% の減少が、条件 2 では 4% の減少が見られ制御の効果があったと言える。そして、条件 2 のほうが使用する推進剤は少ないが、条件 1 に比べ減少率が低いことから条件 1 の制御のほうが推進剤を減らす制御としては有効であったと言える。そして、ケーブルダイナミクス、ケーブルの最大応力、先端速度それぞれの項目で検討した結果、条件 1 のみ十分に実現可能性があると言える。そして、どちらの条件でも先端質点にかかる推進剤質量は減少しているが、静止軌道ステーションにかかる推進剤質量は増加していることが分かった。このことから、静止軌道ステーションにかかる宇宙側からの力と地球側からの力を釣り合わせ安定した展開ができるというメリットが生かせていないといえる。

以上、本論文で検討した制御方法では推進剤を減少させることは出来たが、静止軌道ステーションを起点とし宇宙側、地球側に展開する建設方法のメリットが生かせていない可能性があるの確認することや、今回は宇宙側のみ制御方法を考えてきたが、同じような制御方法やほかの制御方法を地球側の制御に適用することで推進剤質量が減少するか確認する必要がある。

参考文献

- 1) 佐藤実：宇宙エレベーターの物理学，株式会社オーム社，2011
- 2) 株式会社大林組：季刊大林，No.53，2012
- 3) Noboru Takeichi：Geostationary station keeping control of a space elevator during initial cable deployment，Acta Astronautica 70，(2012) 85–94
- 4) 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