

宇宙エレベータ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

○藤井慎一郎（静岡大学・工・院），山極芳樹（静岡大学・工）
石川洋二，大塚清敏（大林組）

1. はじめに

現在，地球 - 宇宙間の輸送には化学ロケットが使用されているが，爆発や墜落などの危険を伴う点，推進剤の燃焼による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，大量の物資や人員を輸送する手段としては適していない．そのため，このような大量物資を輸送する手段として現在，宇宙エレベータが提案されている．しかし，宇宙エレベータ建設には多くの技術的な課題の解消と物理現象の解明が必要である．技術的な課題として挙げられるものが宇宙エレベータ建設において必要となるケーブルである．全長 96000 km となる宇宙エレベータには大きな張力が働くため，それに耐える引張強度を持つ材料が必要となるが現状の生成技術では宇宙エレベータの建設は不可能である．唯一，建設可能な強度を持つとされる材料は CNT（カーボンナノチューブ）であるが，現状では生成可能な長さや強度が不十分である．物理現象についても，地表付近の風などの大気による影響，宇宙における地球磁場や太陽風による影響と考察すべき現象は多くある．

以上のことより，現在取り組むべき課題はケーブルについてである．ケーブルのダイナミクスはシステム全体に影響を与え，その現象の解明により今後の宇宙エレベータ建設計画は左右されることが考えられる．特に宇宙エレベータ建設段階においてケーブル展開時のダイナミクスの解析は早急に解決すべき問題である．

本研究では，宇宙エレベータ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，実現可能性について検討を行う．

2. 宇宙エレベータ

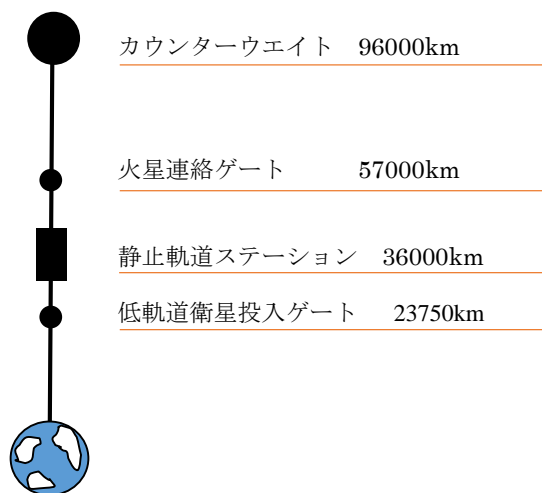


図1 宇宙エレベータ

宇宙エレベータとは図 1 に示すように宇宙と地球とをケーブルで繋ぎクライマーと呼ばれる昇降機が移動することで宇宙と地球とを行き来できるシステムのことである．建設方法としては従来主に検討されていた方法では，図 2 に示すように静止軌道上に宇宙船を打ち上げ，そこから地球に向かってケーブルを展開する．それと同時に宇宙船を宇宙方向に移動させ宇宙エレベータを建設する．

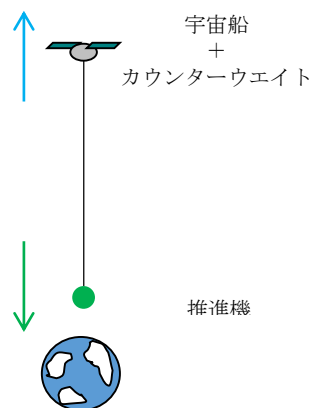


図2 従来主に検討されていた建設方法

しかし、この方法では宇宙船の移動に多くの推進剤を必要とするためコストがかかってしまう。そこで、本研究では図3に示すように静止軌道を起点としそこから地球側と宇宙側の両方にケーブルを展開する。

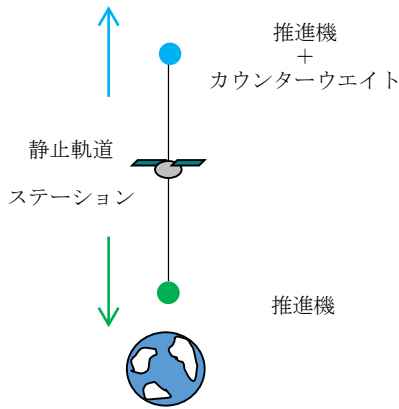


図3 今回の建設方法

両ケーブルの先端には推進機が取り付けられているため制御を行うことが可能である。最終的に地球側のケーブルを地表で固定し、宇宙側のケーブルは高度96000 kmまで展開し宇宙エレベータの基礎が完成となる。本研究では、この際のケーブルのダイナミクスについて数値解析を用いて解析を行なった。

3. 解析手法

3.1 解析モデル

静止軌道ステーションから、宇宙側と地球側の同時にケーブルを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。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エイトが搭載されている。

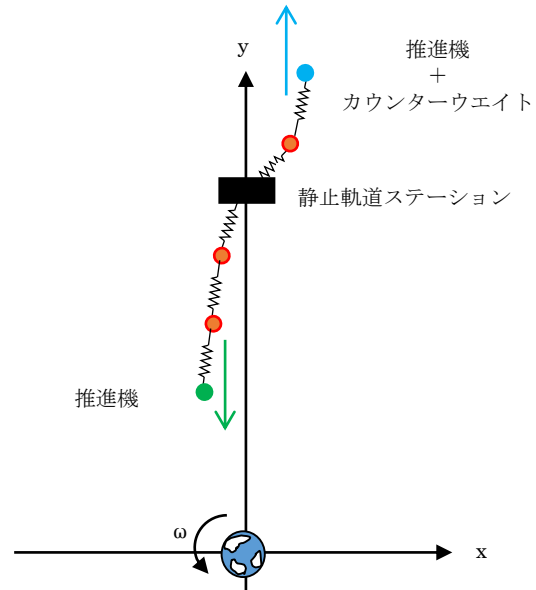


図4 解析モデル

運動方程式は式(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。

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

m : 質点質量, G : 万有引力定数, M_e : 地球の質量
 \mathbf{r} : 位置ベクトル, $\boldsymbol{\Omega}$: 角速度ベクトル, k : 弾性係数,
 c : 粘性係数

表1 パラメータ^[1]

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
カウンターウエイト[t]	36.8		
質点間隔[km]	5,25,50,100		

3.2 解析条件

先行研究において、制御を加えず静止軌道上で主衛星からケーブル先端の子衛星を地球に向けて放出しケーブル展開した場合、主衛星を含めた全システム軌道が降下し最終的に地球に衝突することが示されている。また、展開速度についても制御する必要があるとされている。

そこで、本研究では静止軌道ステーションが静止軌道上に保持させるように制御を行なった。また、各ケーブルの展開速度は宇宙側が(0,67.3 km/h)、地球側を(0,-40 km/h)とし、展開速度は宇宙側が 67.3 km/h、地球側が 40 km/h となるように制御を行なった。

3.3 制御方法

静止軌道ステーション及び両ケーブル先端は設定した速度になるように推進機によって力を与え速度を制御している。静止軌道ステーションは(0,0)、両ケーブル先端は(0,初速度)となるように制御を行なった。展開速度は静止軌道ステーション上のリールで制御を行なったと仮定した。

4. 解析結果及び考察

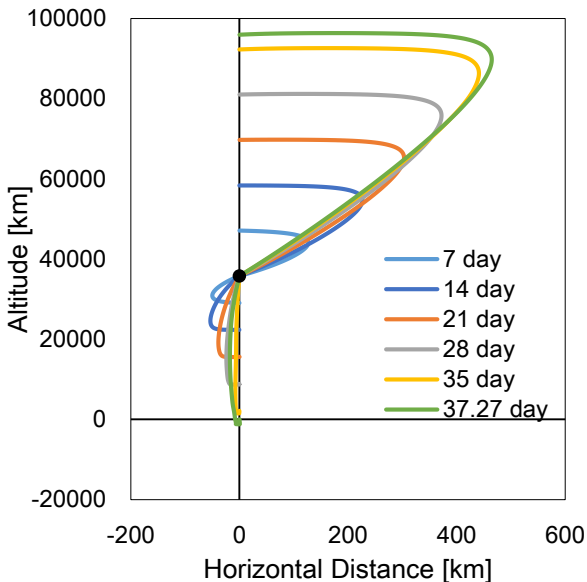


図5 ケーブル全体の変位

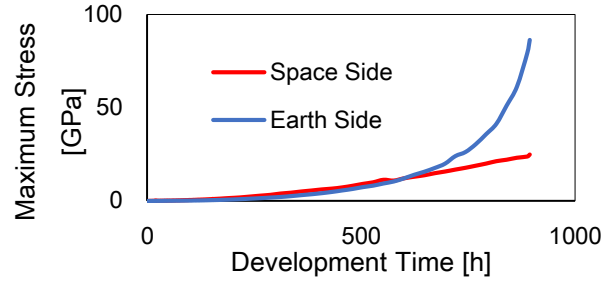


図6 最大応力の時間変化

図 5 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 6 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。宇宙側のケーブルは西に、地球側のケーブルは東の方向へ膨らんでいるがこれはコリオリ力によるものである。また、宇宙側のケーブルの膨らみが大きいのは展開速度が宇宙側の方が速いためである。しかし、この制御では展開完了時に地球側の先端質点が地表に到着する前にたわんだケーブルが地表に衝突してしまっている。また、地球側のケーブルに発生している最大応力は許容応力である 65 GPa を超えてしまっている。このままでは建設することが困難であるため、リールにブレーキ制御を行い、展開速度を減少させる制御を行なった。

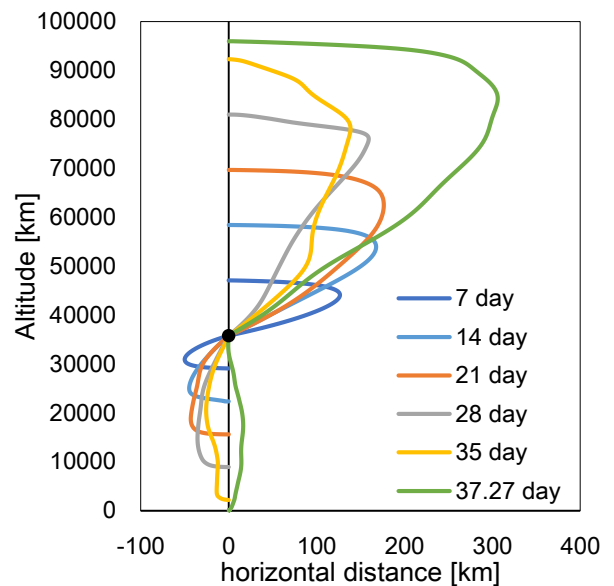


図7 ケーブル全体の変位

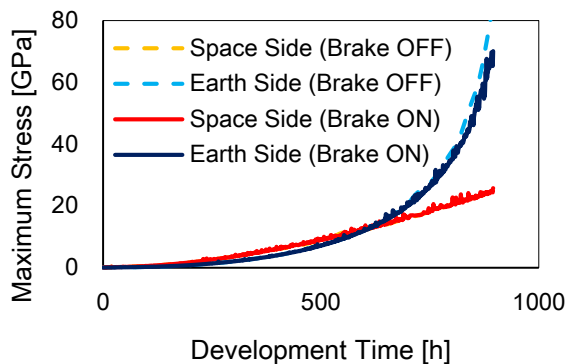


図8 最大応力の時間変化

図 7 よりブレーキ制御を行なったことでたわみが減少し衝突することを防ぐことができている。また、図 8 より最大応力も小さくなっていることが分かる。

表2 展開速度による最大応力の変化

展開速度 Km/h	地球側	-10	-40	-100
	宇宙側	16.8	67.3	168.25
最大応力 GPa	地球側	66.7	69.7	78.6
	宇宙側	24.9	25.7	27.1

また、表 2 は展開速度による最大応力の変化を示しているがこれより、展開速度を遅くしたほうが発生する最大応力を小さくできることが分かった。次に今回の建設方法と従来主に検討されていた建設方法の比較を行う。

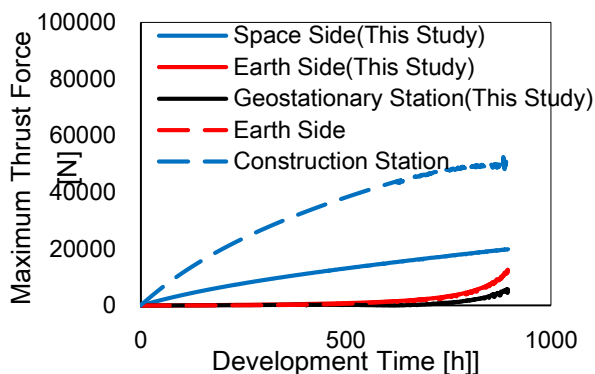


図9 推力の時間変化

表3 今回の建設方法

展開初速度 km/h		トータルインパルス $Ns \times 10^9$
地球	宇宙	合計
-10	16.83	157.017
-40	67.3	44.112
-100	168.3	17.614

表4 従来の建設

展開初速度 km/h		トータルインパルス $Ns \times 10^9$
地球	宇宙	合計
-10	16.83	430.009
-40	67.3	109.644
-100	168.3	43.724

図 9 は推力と展開時間の関係を表している。表 3 が今回の、表 4 が従来主に検討されていた建設方法におけるミッション完了時のトータルインパルスを表している。この結果から今回の建設方法の方が必要となる最大の推力も小さく、トータルインパルスの値も 40%程度小さくすることが出来ている。つまり、今回の建設方法のほうがコストを抑えることができることが分かった。また、展開速度が速いほどトータルインパルスが小さい。これは、展開速度が速いほど制御するために必要な推力は大きくなるがミッション時間が短くなるためトータルとしてトータルインパルスが小さくなったものと考えられる。

5. まとめ

本研究では解析によって宇宙エレベータ建設が可能であるか検証を行なった。解析の結果、展開時に発生する最大応力を許容応力以下にすることは出来なかったが許容応力非常に近い値まで抑えることができた。今後、新たな制御を考えることで十分建設は可能であるといえる。また、従来主に検討されていた建設方法のよりも静止軌道を起点とした展開方法のほうが必要となる推力も小さくコストを抑えることができた。

参考文献

[1]株式会社大林組, “季刊大林 No. 53”, 2012