

宇宙エレベーターの技術的課題への取り組み

淵 田 安 浩 大 塚 清 敏 大 本 絵 利
(技術本部未来技術創造部)

石 川 洋 二 人 見 尚
(技術本部未来技術創造部)

Recent Research Efforts towards Construction of Space Elevator

Yasuhiro Fuchita Kiyotoshi Otsuka Eri Omoto
Yoji Ishikawa Takashi Hitomi

Abstract

It has been nine years since our space elevator construction design announcement in 2012, and related studies have been pushed forward. In this article, we review our recent research efforts towards the construction of a space elevator. After evaluating the technical background of "the Space Elevator Construction Concept" and the subjects to be overcome for that purpose, brief descriptions are presented in relation to the results of the experimental study of cable materials, the numerical simulation of cable dynamics, and the study of the mechanical design of a climber.

概 要

2012年の宇宙エレベーター建設構想の発表から9年が経過し、その間、関連技術に関する研究を進めてきた。本論文では、「宇宙エレベーター建設構想」の技術的背景および建設に向けての課題について改めて整理し、実際の宇宙環境下でのケーブル材料の強度や劣化に関する実験、ケーブルの力学解析のための数値モデルの開発、クライマーの機構的設計の研究、などへの筆者らの最近の取り組み状況を概説する。

1. はじめに

宇宙エレベーター(Fig. 1, 2)は、地球と宇宙との間をケーブルでつなぎ、クライマー（乗り物）で往復する未来の宇宙交通・輸送システムである¹⁾。高度96,000kmに設置したカウンターウェイトが受ける地球の自転する遠心力と地球の重力が釣り合い、ケーブルが緊張する。そのケーブルを利用し、クライマーの昇降を行う。完成すれば、宇宙へ行くコストの大幅な削減、体に負担の少ない宇宙への移動、他天体への出発地点、ロスのない太陽光発電などのメリットがある。宇宙エレベーターに通じるアイデアは既に19世紀末に、ロシアのコンスタンチン・ツオルコフスキーによって考案されていた。それは建物を高くしてゆくと、次第に地球自転の遠心力が重力に抗して建物を支えるようになるという考えで、赤道上に超高層タワーを建造するものであったが実現しなかった。1960年には、ユーリ・アルツターノフが、静止軌道からタワーを地球へ向けて伸ばすアイデアを考案した。1979年には、アーサー・C・クラークの小説「楽園の泉」で宇宙エレベーターが広く知られるようになった。しかしながら、タワーにせよエレベーターにせよ、実在する建設材料の強度に対して質量が大き過ぎ、構造物としては成立できないという状況であった。

その状況を一変させたのが、1991年に飯島澄男が発見したカーボンナノチューブ(CNT)²⁾である。CNTは、軽量（アルミニウムの約半分の比重）、高い機械強度（鉄鋼の約20倍の引張強度）をもつ、炭素原子でできた素材である。CNTをケーブルの素材とすることで、宇宙エレベーターの実現性が高くなった。しかし、宇宙エレベーターは地球と宇宙とをケーブルでつなぐだけでは完成しない。交通システムとするためには、設計・施工・維持管理などの地上と同様の工程管理、地球の重力圏内で鉛直

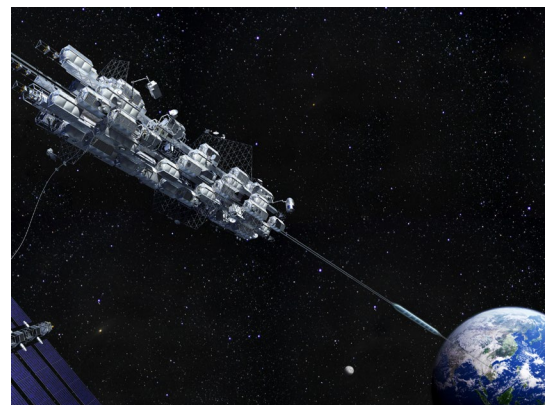


Fig. 1 宇宙エレベーターの概念図¹⁾
Scheme of Space Elevator

に移動するという特殊な移動機構や宇宙特有の環境への曝露などに対応する必要がある。

本論文では、宇宙エレベーター建設に関する課題の整理を行い、それらを解決するためのケーブル材料の宇宙環境曝露実験、数値モデルによるケーブルの力学解析、クライマーの昇降機構の適正化に関する取組み状況の紹介を行う。

2. 建設に関する課題³⁾

2.1 ケーブル材料

宇宙エレベーターのケーブル材料は、炭素原子のみで欠陥のない結晶構造であるCNTが想定され、設計されている。炭素系材料には、炭素繊維材料と主にエポキシ樹脂を熱硬化させたCFRPやCFRTPなどが航空機産業や自動車産業などの分野で広く使用され始めている。炭素繊維のみでは、引張強度10GPa、引張弾性率900GPaという開発品があり、汎用化されているものの、Table 1に示す建設諸元に必要なケーブルの引張強度150GPaに達しない。

近年、CNTの生産量は年々増加しているが、主な用途はリチウムイオン電池の極材への添加剤（長さ数 μm ～1mm以下）として利用されている。しかし、この用途に開発されたものは、10万km近いケーブルの構造材料に利用できるような長尺材料には程遠く、宇宙エレベーター向けには、欠陥のない長尺化製造方法のブレークスルーが課題となっている。

2.2 ケーブルダイナミクス

大林組の建設提案¹⁾における宇宙エレベーターでは、地表面（陸または海上）から、地上高度96,000kmの宇宙空間にまで至る、張力を持った状態のケーブルを想定している。そのため、地表面から宇宙空間までの環境に耐え得る構造でなければならない。ケーブルには、地球との間の万有引力と地球の自転による遠心力、太陽や月からの引力、ケーブルの伸縮による弾性力、ケーブルの運動によるコリオリ力等が働く。さらには、導電性のあるCNTを主材とするケーブルでは、地球磁場内でのケーブルの運動に起因する誘導起電力による電流、電離層や太陽風からの荷電粒子の流れ込みによる電流等の発生が起り得る。このように、電流が発生すると地球磁場との相互作用によるローレンツ力が作用する。

また、大気圏内では、空気による抵抗力を受ける。さらに、クライマーにも地球からの引力、遠心力、昇降運動時のコリオリ力、ケーブルと同様の天体からの引力が働き、クライマーとケーブルの接点における摩擦力や束縛力を通じてケーブルとの間に力学的な相互作用が働く。

これらの、運動を数値力学モデルで表現し、解析的に検討しておかなければならない。

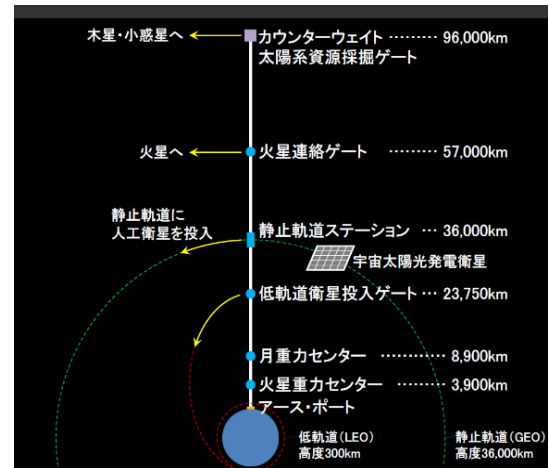


Fig. 2 宇宙エレベーター全体構成¹⁾
Schematic Representation of the Space Elevator

Table 1 建設計画諸元

Articles of Construction Plan

初期ケーブル質量	20tons
補強後ケーブル質量	7,000tons
ケーブル長	96,000km
引張強度	150GPa
安全率(ケーブル1本当り)	2
クライマー上昇速度	40km/h (建設中) 120km/h (運用中)
ケーブル/カウンターウェイト質量比	1:0.92
補強回数	510回

2.3 クライマー

ロケットに対する宇宙エレベーターの優位性として、ロケット輸送と比較した場合の、高いペイロード比（積載重量/機体総重量）と消費エネルギーの少なさによる輸送効率の高さ、ならびに安全性の高さや運用の安定性等が挙げられる。現在のロケットではペイロード比は5%に満たないが、宇宙エレベーターを使うことで、ペイロード比を100%に近い輸送効率とすることが求められている。

また、一般的なエレベーターはカウンターウェイトと釣り合う籠が上下する方式のつるべ式であり、ケーブルをつかんで昇降するクライマー機構のエレベーターは実用化されていない。各種昇降方式を検討し、機構上の課題を解決する必要がある。

2.4 落雷

現在想定している宇宙エレベーターでは、大地（または海上）に接地しているため、ケーブルへの落雷や雷雲内からのアース電流により、大気電位勾配のバランスが崩れる可能性がある。検証方法を含め、地球全体に影響を及ぼしかねない課題でもある。

2.5 エネルギー供給

クライマーの上昇速度にロケットの打上げ速度ほどの大きなものを求めなければ、ポテンシャルエネルギーで賄えるだけのエネルギーで移動することができ、エネルギー消費量はそれほど大きくはない。しかし、交通システムとしての宇宙エレベーターでは、ある程度の移動速度の確保が求められるため、何らかのエネルギー供給を受け、移動する必要がある。

内部で発電することや、発電を行わず蓄電池で電力供給することは、ペイロード比を考慮すると非現実的である。何らかの外部からのエネルギー供給を受けながら移動エネルギーを補う必要がある。

2.6 宇宙デブリ、放射線対策

宇宙エレベーターは、地上から静止軌道(36,000km)を超える構造物であり、航行中の宇宙機の宇宙デブリ衝突確率を参照すると、宇宙デブリによる脅威は大きい。近年宇宙デブリが特に多いとされているのが、低軌道に近い高度範囲であり、デブリ平均速度は秒速7~8kmで、衝突により大きな破壊力を持つ。全長にわたる範囲では、直径10cm以下のデブリは10日に1回、10cm以上のデブリは100日に1回程度、宇宙エレベーターに衝突する危険性があり、それを回避する対策が必要である。高度1,340~1,400kmの60kmのデブリ密度(10cm以上のもの)の衝突可能性は18年に1回、デブリ密度が最も高い740~800kmの60kmの部分では、5年に1回程度となっている。

宇宙エレベーターは人荷エレベーターであり、地上から高度36,000kmの静止軌道ステーションまで7日間で移動する。そのため、人体に対する放射線耐性を確保する必要がある。これまで、アルミニウムによる遮蔽と磁気シールドの2つの方法が提案されている⁴⁾。アルミニウムによる遮蔽では、片道および3日間のステーション滞在を想定した10日間の旅行中に0.01Sv(加重係数1, 0.01Gy=0.01J/kg)以下になるような放射線対策を施すと、クライマー外壁が18tにもなり、非現実的である。電磁シールド遮蔽についても、クライマーにコイルを巻き、遮蔽するための電力を試算した例では、1.12GWもの電力を要し、こちらも非現実的である⁵⁾。

ケーブル材料と同様に遮蔽性能の高い、軽量材料の開発が必要である。

2.7 法律関連

海上設置の場合には、公海の解釈と国家主権の問題がある。上空の領有権の問題もある。領空か否かという問題もあるが、近年では、高度100kmを超える上空は、宇宙とされ、占有はできないが、自由に利用できると解釈されている。実際には、建設主体が国家か民間企業か国際組織か、などで解釈が分かれる可能性がある。

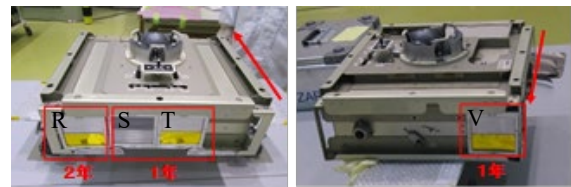
2.8 コスト成立性

輸送するペイロード(貨物・人を含む)の輸送代金収

入で成立する事業計画が必要である。

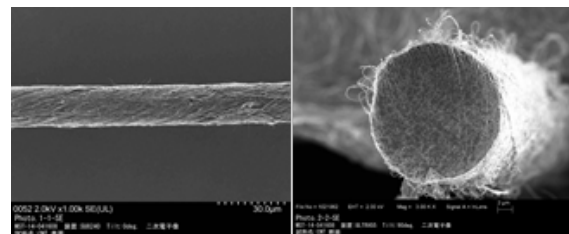
2.9 課題のまとめ

宇宙エレベーターの建設に当たっては、課題が山積している。このうち、2.1ケーブル材料、2.2ケーブルダイナミクスおよび2.3クライマーの課題については、特に重要であると位置づけ、研究に取り組んでいる。それらの取り組み内容について、3章以降で紹介する。



(a)進行方向背面試験体 (b)進行方向前面試験体

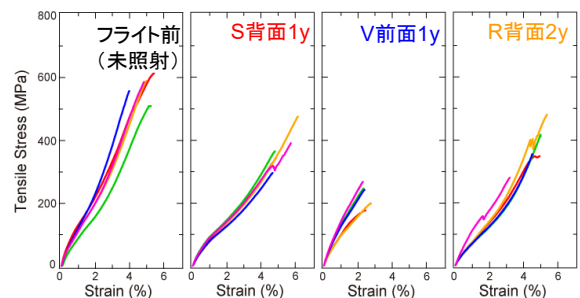
Fig. 3 フライト品の設置状況(矢印はISS進行方向)
Settlement of Exposed Flight Specimens



(a)側面

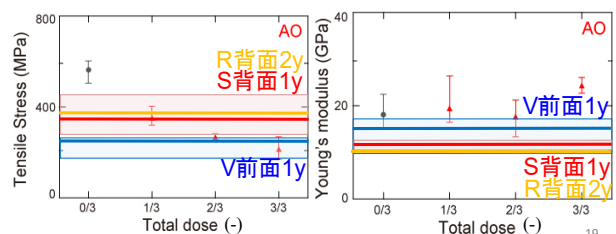
(b)切断面

Fig. 4 CNT 撚糸(フライト前)の電子顕微鏡像
SEM Images of CNT Yarns



(a)フライト前(b)背面 384 日(c)前面 484 日(d)背面 769 日

Fig. 5 CNT 撚糸(太撚り)フライト品の S-S 曲線
Strength-Strain Curve of Thick Yarns of Exposed CNT



(a)照射量と引張強度の関係 (b)照射量とヤング率の関係

Fig. 6 CNT撚糸(太撚り)フライト品の機械的特性
Mechanical Properties of Thick Yarns of Exposed CNT

3. ケーブル材料の宇宙曝露実験

3.1 実験の概要

宇宙エレベーターのケーブル材料と想定する CNT 撚糸⁶⁾について、高度400kmの国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟「きぼう」の船外曝露実験装置を利用し、宇宙空間での環境耐性を調査した。高度200kmから600kmにおいては、原子状酸素(以下、AO)が大気の支配的な成分で、ISSが周回する高度400kmでは、大気組成の80%以上を占める。酸素分子(O₂)は太陽光の真空紫外線(VUV、波長100~200nm)を吸収して光解離する。AOの組成は、酸素原子単独(O)が99%以上、酸素イオン(O⁺)がごく少量であるとされる。高度600kmを超えるとヘリウム、高度800kmを超えると水素が多くなる。

Fig. 3にフライト品の設置状況、Fig. 4にCNT撚糸(フライト前)の電子顕微鏡像を示す。1年曝露試験体は、ISS進行方向背面(SおよびT試験体)と前面(V試験体)に、2年曝露試験体では、背面(R試験体)に設置した⁷⁾。

また、地上対照試験は、1回目は2014年11月12日~2015年3月2日、2回目は2016年6月8日~30日に、JAXA所有の真空複合環境試験設備にて行った。全期間照射で約6か月間の曝露環境に相当する照射量を試験条件とした。

表面形態の外観観察には、走査型電子顕微鏡(FE-SEM SU8030)を用いた。観察は加速電圧3kVで行った。撚糸直径は、マイクロメータや光学顕微鏡を用いて測定した。いずれも、宇宙曝露面から観察した。

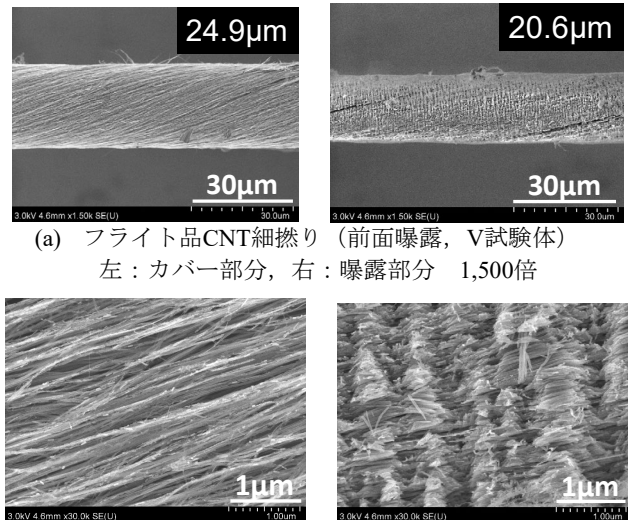
3.2 機械的特性の結果

Fig. 5に太撚りCNT撚糸の応力ひずみ曲線を示す。フライト品の(a)フライト前、(b)背面384日、(c)前面484日、(d)背面769日の結果を示す。Fig. 6に照射量と機械的特性の関係、(a)切断時の引張強度、(b)ヤング率を示す。横軸は、地上対照試験の照射量(6か月)を1とした比率を、0/3(未照射)、1/3(2か月)、2/3(4か月)および3/3(6か月)を示す。細撚りには、損傷が大きく強度試験に至らなかった。太撚りについては、背面より前面の方が引張強度は低下していることが測定できた。

地上対照試験の結果は再現性が確認できたため、ここでは、誤差棒付きのプロットで、地上対照試験2回目のAO照射結果を示す。フライト品の5本の撚糸の試験結果の範囲を薄いトーンで、水平の太線で平均値を示す。照射量0/3(フライト前、未照射)と比較して、フライト品の引張強度が低下していることがわかる。

3.3 外観観察

Fig. 7にCNT撚糸の走査電子顕微鏡像を示す。フライト品試験体についてサンプル固定用のカバーで覆われている部分と曝露部分との比較を行った。特に、劣化の大きかった V試験体について示す。カバー部分での直径24.9 μ mに対して曝露部分では20.6 μ mとなり、曝露により明



(a) フライト品CNT細撚り(前面曝露、V試験体)
左：カバー部分、右：曝露部分 1,500倍

(b) フライト品CNT細撚り(前面曝露、V試験体)
左：カバー部分、右：曝露部分 30,000倍

Fig. 7 フライト品CNT撚糸の走査電子顕微鏡像
SEM Images of Exposed CNT Yarns

らかに直径が減少していることがわかった。曝露部分では、表面からCNTの数本分の深さまでがえぐり取られている様子が観察できる。一方、撚糸表面にCNT繊維とは異なる粒状の物質が観察されることから、カバー部分でも若干の損傷が生じたと考えられる。これにより、カバーはあるものの、原子状酸素(AO)の回り込みがあったと考えられる。

カバー部分ではCNTの方向がほぼ揃っているのに対して、曝露部分では、長い繊維が表面にみられず、短い繊維となって、繊維どうしの再付着や、アモルファス化した炭素が付着したようなものがみられた。CNT合成時の触媒金属が露出している可能性もあると考えられる。

3.4 ケーブル材料の宇宙曝露実験のまとめ

宇宙エレベーターに向けたカーボンナノチューブの宇宙曝露実験を行い、地上対照試験の結果と比較検討した結果、以下のことがわかった。

- 1) ISSの進行方向・背面方向の位置にかかわらず引張強度の低下がみられた。低下の程度は、背面より前面の方が大きい。
- 2) 力学的性状のうち、ヤング率は大きく変化しない。
- 3) 電子顕微鏡観察により、AOによるとみられる撚糸表面の損傷が生じたことがわかった。
- 4) 損傷による、CNTの残骸物などの再付着がみられる。

表面からの損傷を防ぐための被覆対策を行った宇宙曝露実験を計画中であり、引続き検討を行う。

4. ケーブル（テザー）の力学解析

4.1 ケーブルの力学的釣り合いの基礎とテーパー形状

宇宙エレベーターの根幹をなす構成要素はケーブル（テザーともいう）である。静止軌道高度を境に地球側では地球との間の万有引力が、宇宙側では宇宙向きの遠心力が卓越するため、ケーブルは常に両端部に向かって引っ張られ、内部には張力が働いた状態にある(Fig. 8)。これがケーブルの基本的な力の釣り合いである。張力によってケーブルは自然の長さより幾分か弾性的に伸長した状態にあるが、引張応力が一定となるような断面積分布をもち地球に対し静止した力学平衡解を求めることができる。

ケーブルの各部には地球からの引力と地球の周りの公転運動による遠心力、およびケーブル内部に働く張力が釣り合った状態にある。地球中心からの距離を r とすると、Fig. 8のような $r - 1/2 dr$ と $r + 1/2 dr$ とに挟まれた長さ dr のケーブル素片の力の釣り合いは、引張応力を一定値 $\bar{\sigma}$ とする場合式(1)のように書かれる。

$$\left(-G \frac{M_E}{r^2} + r\Omega_0^2\right) \frac{\rho}{1+\varepsilon} A(r) dr = \bar{\sigma} dA(r) \quad (1)$$

ここに、左辺第1項は地球からの引力、第2項は遠心力であり、右辺はケーブル素片両端の断面に働く張力（断面積 A と応力 σ の積）の差である。 G 、 M_E 、 Ω_0 は、それぞれ万有引力定数、地球の質量、地球自転の角速度、 $A(r)$ は、位置 r におけるケーブル断面積、 ρ はケーブルの密度（CNTの密度）である。 ε はケーブルの伸び歪で、引張応力一様条件下では ε も一様となる。 $\rho/(1+\varepsilon)$ は、Poisson比を1と仮定した場合の、伸びによる長さ dr のケーブル素片の密度の減少を表している。式(1)を積分すると、応力一定の断面積分布 $A(r)$ は、地上における断面積 $A(R_E)$ （ R_E は地球の平均半径）に対する比として式(2)のようなる。

$$\frac{A(r)}{A(R_E)} = \frac{\exp\left\{-\frac{\rho}{(1+\varepsilon)\bar{\sigma}}\left(G\frac{M_E}{r} + \frac{1}{2}r^2\Omega_0^2\right)\right\}}{\exp\left\{-\frac{\rho}{(1+\varepsilon)\bar{\sigma}}\left(G\frac{M_E}{R_E} + \frac{1}{2}R_E^2\Omega_0^2\right)\right\}} \quad (2)$$

式(2)の断面積比は静止軌道高度（地上高度約36,000km）で最大で、引張内部応力を $\bar{\sigma} = 65\text{GPa}$ とする場合約2.47となる。ケーブルのこうしたテーパー形状により、引張応力一定の力学平衡解が存在可能となっている。ケーブルは様々な外力で常に何らかの運動状態にあるが、その断面積分布を式(2)のような分布にすることで、全長にわたって引張応力一定に近い状態とすることができる。

4.2 宇宙エレベーターの数値モデル

前節では引張応力一定の静力学平衡解の存在を示したが、宇宙エレベーターには前述のように様々な力学的外力や日射などの熱的外力が作用する。力学的な作用には

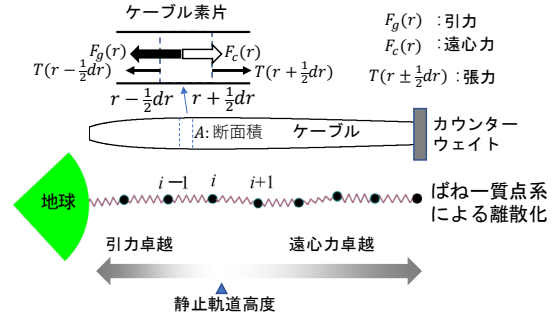


Fig. 8 ケーブルの力の釣り合いとばね—質点モデル
Balance of Forces and Coil-Mass Series Model

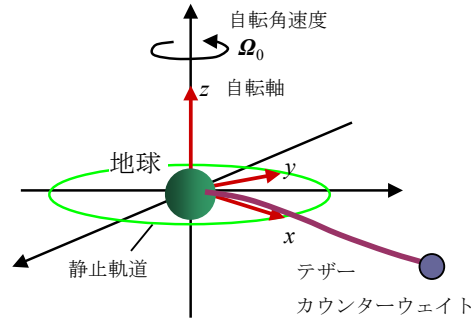


Fig. 9 宇宙エレベーターと力学座標系
Coordinate System of the Cable Dynamics Model

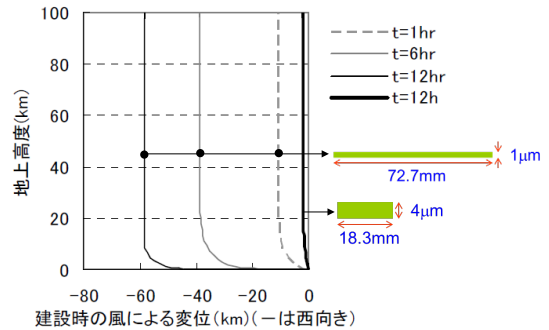


Fig. 10 低高度における風によるケーブルの撓み
Wind-Induced Deflection and Cable Crosssection

大気圏内の風との間の空気力、クライマーの走行による反力、あるいは導電性のあるCNTケーブルに何らかの原因で生じる電流と地磁気との間のローレンツ力などがあり、熱的な作用としては日照の有無による放射環境の大きな違いに起因する部分が多い。これら外力に対するケーブルの3次元的応答や温度の検討に供する目的で、既往研究^{8),9),10)}と比べ、より包括的な数値モデルを開発した。ここでは、その構成と結果のいくつかを示す。

数値モデルは、地球に固定され、宇宙側端部にカウンターウェイトをもつ連続体ケーブルを、ばね—質点系で近似したものである(Fig. 8)。Fig. 9のように地球中心に原点をもち、地軸(z軸)の周りを角速度 Ω で自転する座標系で記述される i 番目の質点（質量 m_i 、地球中心からの位置

ベクトル $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ の運動方程式は、式(3)のように書かれる。

$$\begin{aligned} m_i \frac{d\mathbf{U}_i}{dt} = & -2m_i \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{U}_i + m_i (\boldsymbol{\Omega}_0 \cdot \boldsymbol{\Omega}_0) \mathbf{r}_i - m_i (\boldsymbol{\Omega}_0 \cdot \mathbf{r}_i) \boldsymbol{\Omega}_0 \\ & + \mathbf{F}_{G_{earth},i} + \mathbf{F}_{G_{moon},i} + \mathbf{F}_{G_{sun},i} + (A\sigma)_{i+\frac{1}{2}} - (A\sigma)_{i-\frac{1}{2}} \\ & + \mathbf{F}_{drag,i} + \mathbf{F}_{lift,i} + \mathbf{F}_{clb,i} + \mathbf{F}_{other,i} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{U}_i = d\mathbf{r}_i/dt$ 、 $\boldsymbol{\Omega}_0$ は地球自転の角速度ベクトルである。式(3)の右辺1,2,3項は順に地球の周りを公転することによるコリオリ力、遠心力、および回転座標系を使うことで現れる見かけの力（メトリック力）、第4,5,6項は質点 i と地球、月、太陽との間の引力である。右辺第7,8項は、ばねの伸縮の弾性力、第9項以降の $\mathbf{F}_{drag}$ 、 $\mathbf{F}_{lift}$ 、 $\mathbf{F}_{clb}$ 、 $\mathbf{F}_{other}$ は、順に大気圏内で働く風による抗力と揚力、クライマーから作用する力、その他の力（電流によるローレンツ力など）である。 $A\sigma$ はばねの伸びによる張力でばね定数 $k_{i+1/2}$ とばねの伸びとの積である。 $k_{i+1/2}$ は質点 i 、 $i+1$ 間のばね定数で、 i 、 $i+1$ 間のケーブルの平均断面積 $\bar{A}$ 、ばねの自然長 $l_{0,i+1/2}$ 、ヤング率 E によって、 $k_{i+1/2} \approx E\bar{A}/l_{0,i+1/2}$ と近似した。力学解析の初期条件は、4.1に示した、理論的な力学平衡解とした。初期条件における引張応力一定は離散化された系でもほぼ厳密に成り立っている。

ケーブルの温度 θ は、質点（ケーブル素片） i の温度 θ_i についての式(4)の熱収支式を用いて予測される。

$$C_\sigma m_i \frac{d\theta_i}{dt} = S_R + I_R + H_a + D_T + J \quad (4)$$

式(4)の右辺は、左から順に、太陽放射収支、赤外放射収支、大気圏内での大気との熱交換、ケーブル内熱伝導、および電流が流れた場合のJoule発熱、によるケーブルの加熱率である。太陽放射は、ケーブルが地球の日影に入っている部分は当たらないとしている。温度の計算では、比熱、日射反射率、赤外放射率等の熱的物性は全てCNT素材の値を用いた。

4.3 数値解析結果

4.3.1 風の作用に対する応答 大気圏内ではケーブルは風の空気力を受け、撓むことが予想される。石川ら¹⁾の提案の建設初期の仕様のケーブルに対し、建設地の赤道域での平均的な風¹¹⁾を与えると、Fig. 10に示すように、卓越する東風により低高度においてケーブルは短時間で西に押され、12時間後には変位が60kmに達した。ここでは、ケーブルは平たいリボン状で、広い方の面が風に直角に対面する最も不利な状況を想定している。このような大きな撓みはクライマーの走行にも支障が出る。そこで、ケーブルの断面積を保存するように幅を1/4、厚さを4倍にすると、西側への変位を数km以内に抑えるこ

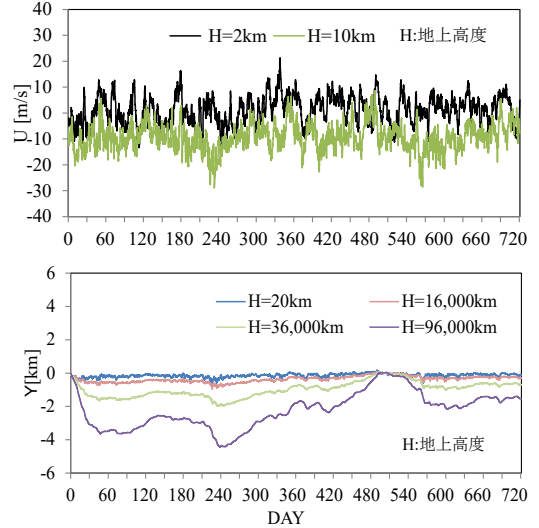


Fig. 11 東西方向の風速Uおよびケーブル変位Y
Time Series of E-W Wind and Cable Displacement

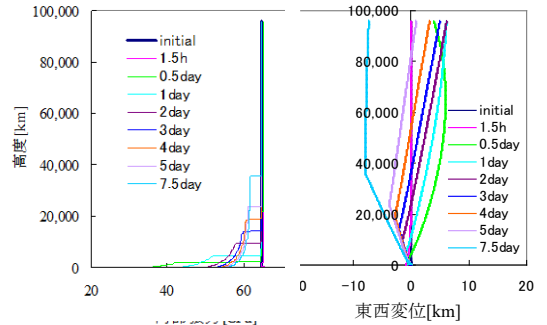


Fig. 12 クライマー上昇時の応力(左)と変位(右)
Stress and Cable Deflection due to a Rising Climber

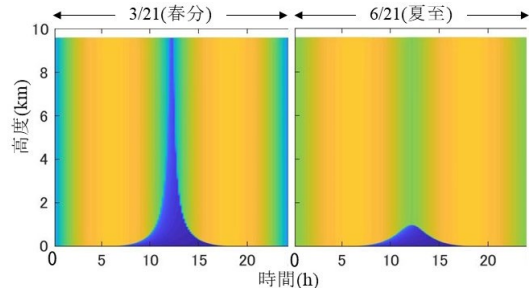


Fig. 13 ケーブル温度日変化の高度—時間断面
Diurnal Variation of the Cable Temperature

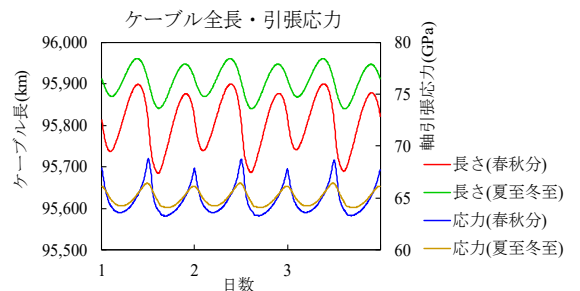


Fig. 14 温度によるケーブル長と引張応力
Cable Length and Tensile Stress

とができた。ケーブルの撓みは空気抵抗に大きく依存することがわかる。図示しないが、このように大きな撓みが生じてても張力は時間的にほとんど変化しない。それは、風によりケーブルに働く抗力と揚力の合力が常にケーブルに垂直に働くため、撓んでもその分だけ上空のケーブルがあまり伸びることなく降りてくるからである。暖簾を揺き分ける場合に似ている。

赤道域の風は実際には時間的にかなり変動している。そこで米国国立環境予報センターNCEPの3次元気象データである客観解析データの、(0N, 135E)における風の鉛直分布時系列(6時間毎)を用い、2001年1月1日から2年間のケーブルの挙動を調べた (Fig. 10での変位を抑える方の断面を仮定)¹²⁾。風速の東西成分とケーブルに沿ったいくつかの高度における東西変位をFig. 11に示す。南北方向変位は東西よりはるかに小さい。ケーブルは風に対して受動的に応答し、変位の極端な増幅などはない。Fig. 10に見られるように下端付近に撓みが集中する。また、Fig. 11から推察されるが、ケーブルは全体としてはほぼ直線性を保ち、その傾斜が時間変動するような動きをしている。

4.3.2 クライマーの走行に対する応答 ケーブルと車輪との滑りなしの摩擦力 f によって、ケーブルから反力を取りながら前進するタイプの質量 M_{clb} のクライマー(ペイロード含む)がケーブルに沿った速度 U_{clb} で走行する場合を考える。クライマー走行がケーブルに及ぼす力は、引力と遠心力の和を g 、クライマーに作用する空気力を D とすると、式(5)のように書かれる。

$$F_{clb} = -M_{clb} \left(\frac{dU_{clb}}{dt} + 2\Omega_0 \times U_{clb} + g \right) - f + D \quad (5)$$

式(5)の右辺()内第1項は、クライマーの加速による慣性力、第2項はコリオリ力である。Fig. 12の左図は一定の速度で走行するときの引張応力の高度分布である。クライマーより低高度(地球側)では応力が小さくなる。これはケーブルに働く張力に対する抗力を地上の固定点(アースポート)とクライマーで分担して受け持った状態になるからである。クライマーより低高度では値は正のままであり張力が維持されている。これが負になるとクライマーは落下する。Fig. 12の右図はクライマー上昇時のケーブルの変位である。クライマーに働くコリオリ力によって西向きに押されることでケーブルは西向きに撓む。下降するときは逆に東向きに押される。

4.3.3 ケーブルの温度について 宇宙環境への曝露に対する例として、地球の周りの周回運動に伴うケーブル温度の日変化を春分および夏至について、高度-時間断面の形でFig. 13に示す。図では0時が正午、12時が真夜中である。温度変動の範囲は+70℃程度から-230℃程度と非常に大きい。宇宙エレベーターの公転面は地球の公転面に対し約23.4°傾いているため、春秋分にはケーブル全体が地球の陰影に入る時間帯があり、そこでは大気圏

内を除くケーブルの全長にわたって-200℃以下となる、夏至冬至では地球近くの一部を除き終日日が当たる。日変化には半日の周期的変化がある。最高温度はケーブルが1日2回太陽放射に対して垂直になるときに現れ約+70℃である。一方、温度の極小も2回あり、地球の陰影では温度は-200℃を下回るが、日が当たっていてもケーブルが太陽光と平行になる正午付近には極小値が現れる。図からは判別しづらいが、大気圏内では大気との熱交換のため、昼夜を問わず気温に近い。こうした大きな温度変化があるとケーブル材物性の温度依存性の影響が明瞭になる可能性がある。CNTのヤング率の温度依存性¹³⁾を考慮すると、温度変化によるケーブルの伸縮が起こる。Fig. 14に冬(夏)至および春(秋)分近くの3日間のケーブル全長およびケーブル内の引張応力最大値の時間変化を示す。ここでは、4.3.1項と同様に、平均的な風を考慮している。春(秋)分の時期が冬(夏)至の時期より長さ変動が大きい。両時期を合わせると最長と最短との間で300km程度の差があることがわかる。応力も全長と同様に変動が見られる(Fig. 14)。ヤング率の温度依存性を考慮しない場合は、65GPaでほぼ一定である。春(秋)分の時期が年間で最大で設計張力65GPaの10%弱程度の変動幅で、単純に無視できる大きさではない可能性があり、さらに検討が必要である。

4.4 ケーブル力学解析のまとめ

ケーブルの力学の解析や温度予測が可能な包括的な数値モデルを開発し、それを用いた数値実験によって以下のことが分かった。

- 1) 引力、遠心力、弾性力の間の静力学的釣り合いの下で、引張応力を一定値(例えば65GPa)にするようなケーブル断面積の高度分布の、理論的導出を示した。そうした断面積分布にすることで運動状態にあるケーブルの内部応力を設計張力から大きくずれることがないようにできる。
- 2) 大気圏内の風によるケーブルの変位について調べた。断面形状の取り方が変位の大きさに有意に影響するものの、風の作用に対する応答は受動的で変位が一方的に増幅するなど無く、応答は安定的であることが示された。
- 3) クライマー走行の際は、コリオリ力によるケーブルの撓みが顕著に現れることが示された。
- 4) ケーブルの温度は地球の周りの公転の途上での日射の有無により、+70℃以上から-200℃以下まで、非常に大きな温度変化をすることがわかった。また、力学物性の温度依存性の影響が、ケーブル長さや内部応力に対して有意となる可能性が示された。

5. クライマー

5.1 クライマー概説

クライマーとは、宇宙エレベーターの昇降機構を指し、自ら昇降する機構を持つ。地上エレベーターの昇降方式は、つるべ式（カウンターウェイト方式）が主流だが、大林組の宇宙エレベーターでは、クライマー方式を採用しており、本クライマーについては湘南工科大学と共同で研究開発を実施している。

クライマーモデルの駆動機構は、大きく分けてFig. 15に示す3種類がある。その特徴を以下に示す。

- a) 対向式：シンプルで、必要な摩擦力を得るために大きな押付け力が必要。
- b) 非対向式：テザーの接触面積が広く、a)より押付け力が小さい。
- c) 交差式：テザーの接触面積が広く、テザーの振動で接触面が変化する。a)と同等の駆動力が必要。

b)およびc)は、a)と比較して、ローラとテザーの間の接触面積が大きいため、摩擦力を大きくできるが、その分のモータ消費電力が大きく、テザー張力の影響を受けやすいなどの欠点がある。クライマーモデルとしては、シンプルであるa)を採用し、検討・設計を行った。

5.2 クライマーモデルの駆動機構の検討と実験

クライマーの駆動機構を設計する際、自重に対して駆動機構が必要とする出力を把握するため、テザーに吊るしたカウンターウェイトを昇降する実験装置を考案し、各種の諸量を実験によって計測した¹⁴⁾。

Fig. 16に実験装置の概略を示す。駆動ローラの表面はウレタン樹脂製、ローラ軸を介してモータを結合し、電圧と回転数を同期させて高い回転トルクを保持させた。テザーにはベルト方式を採用し、ベルト（幅35mm、厚さ2mm）の端部は滑車を介して垂直方向に荷重を与え、荷重の均一化を行った。ローラ軸にはロードセルを挟み、駆動時の押付け力を記録した。

ローラの駆動機構はFig. 17に示すような2つの駆動機構を用いてその違いを確認した。

- a) シングル駆動式：下側が駆動ローラ上側が受動ローラであり、駆動ローラは両方から2台のモータを直結
- b) ダブル駆動式：上下側共に駆動ローラで、上下側に同じモータを設置して同期

テザーに取り付けた重りを吊るし、荷重を維持できる押付け力をローラとテザーに与えることで、押付け力 F_v と摩擦力 F_m の関係を確認した。Fig. 18に押付け力と荷重の関係を示す。シングル駆動式ではモータが自重を維持するには約3倍の押付け力が必要であり、ローラとベルト間の静止摩擦係数はおよそ0.3であることが確認できた。荷重量に対して、押付け力 F_v を変えてローラを回転させ、重りが上昇できる最小の F を実験的に把握した。昇降可能な F は自重力の4倍程度である。

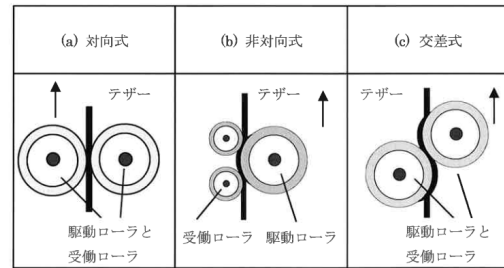


Fig. 15 クライマーモデルの駆動機構
Mechanism of Climber Model

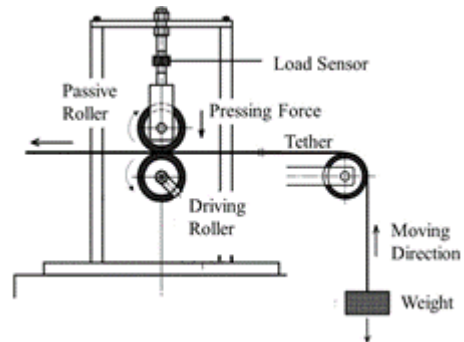


Fig. 16 実験装置の概要
Test Apparatus for Driving Rollers Used Space Elevator



A: Single operation B: Double operation

Fig. 17 クライマーモデルの駆動部
Operation Type of Roller

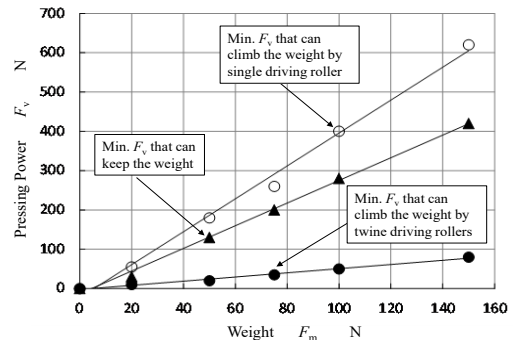


Fig. 18 押付け力と荷重の関係
Relations between Pressing Power and Hung Weight

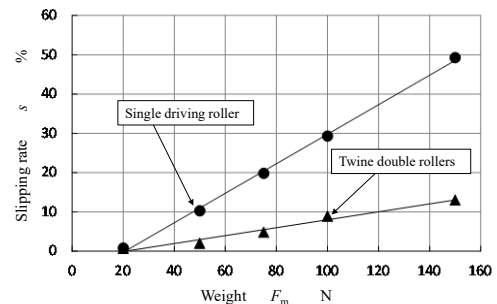


Fig. 19 すべり率と荷重の関係
Relations between Slipping Rate and Hung Weight

同様の実験を、ダブル駆動式を用いて諸量の計測を実施した。昇降可能な押付け力はシングル駆動と比較して、はるかに小さい値となる。表裏2面で摩擦力を発生させるため荷重量よりも小さい値で昇降が可能となる。

重りを吊るしたテザーの移動速度は、荷重が増えるほど低下する。理想的な回転速度 v_0 に対する実際の移動速度 v よりすべり率は式(6)のように書かれる。

$$s=(v_0-v)/v_0 \quad (6)$$

すべり率は荷重に対して直線の関係となる(Fig. 19)。ダブル駆動式は、シングル駆動式に比べてすべり率が低く、両面の摩擦力が増えてすべりを起こしにくい機構である。クライマーが上昇する際には、テザーの振れなどが発生し、ローラの引き込み角度は異なることが予想される。その際、テザーの表と裏では摩擦力が異なるため、シングル駆動ではすべりが発生しやすくなる。ダブル駆動ではこの欠点を補正できる利点がある。

5.3 クライマーモデルの設計・製作と検証

前述の実験結果より、クライマーモデルへの負荷を小さくするために、ダブル駆動式によるクライマーモデルを設計・製作した¹⁵⁾。Fig. 20にクライマーモデルの全体概要を示す。ローラの接触点を中心として、各軸に対称となるように駆動モータ、押付け機構、テザーのガイドフレームを構成し、重心バランスを考慮した。クライマーモデルの基本仕様をTable 2に示す。クライマーモデルの動作制御には、安価で手軽に扱うことのできるオープンソースウェアのArduinoを用いた。制御フローをFig. 21に示す。上昇時の安全機能として、時間制御フローを、また、下降時は速度の増加を防ぐため、カウント信号を用いて、ブレーキが作動する速度低下フローを設けた。

設計製作したクライマーモデルを用いてSPEC (Space Elevator Challenge) に参加して、モデルの検証を行った。SPECは日本宇宙エレベーター協会がクライマーの基礎技術の確立と構想の周知を目的として、毎年開催している。パルーン高度160mでのクライマー昇降において、20分間のテスト時間内で3回連続昇降の往復に成功した。

5.4 クライマーのまとめ

宇宙エレベーター用のクライマー昇降技術の設計・試作および競技会参加を通して、以下の知見を得た。

- 1) クライマーモデルの駆動機構には、対向式・非対向式・交差式があるが、対向式が最もシンプルでモータの消費電力が小さく、テザー張力の影響を受けにくい。
- 2) クライマーのローラは、シングル駆動よりダブル駆動の方が必要な押付け力を大きく低減でき、昇降機構の簡素化につながる。
- 3) 競技会では、高さ160mのテザーを20分間に3往復し、

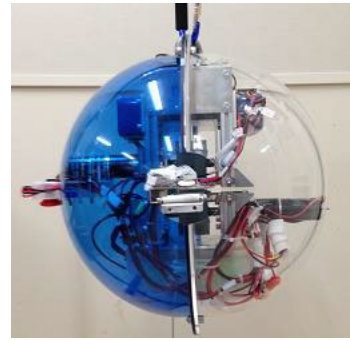


Fig. 20 クライマーモデル外観
Production Drawing and Appearance

Table 2 クライマーモデルの基本仕様
Specifications of Climber Model

外観サイズ	直径450mm, 球形
駆動機構	モーター Maxon DCモーター
	減衰比 1/13
	速度 2.5m/s (上昇時) 2.0m/s (下降時)
	出力 150w×4
	電源電圧 22.4V×2
駆動ローラー	方式 対向式
	直径 80mm
	表面素材 ウレタン樹脂
制御機構	方式 自律コンピューター
	センサ エンコーダ, タイマー

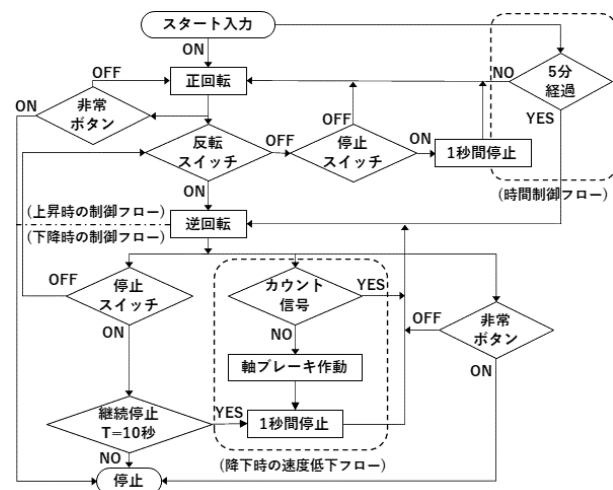


Fig. 21 制御フロー
Control Flow

速度0.8m/sで安定した昇降が実現できた。

現在は、これに加えてより効率のよい、駆動機構や高荷重対応クライマー等の検討をしており、今後も進めていく予定である。

6. 宇宙エレベーターの取組みのまとめ

宇宙エレベーターにむけた課題の整理を行い、ケーブル材料の宇宙環境曝露実験、挙動解析に基づくケーブルの力学解析の研究動向、クライマーに関する取組み状況に関する最新研究動向をまとめた。以下に要旨を列記する。

- 1) ケーブル材料を想定したCNT撚糸の宇宙環境曝露実験では、宇宙環境下での損傷度合いを把握し、今後の対策立案を進めている。
- 2) ケーブルダイナミクスは、大気環境下のみならず、宇宙空間での挙動検討も合わせて検討を進めていく必要がある。
- 3) クライマーは、試作モデルなどを通じ、基本駆動機構の知見を得た。今後もより効率の良い機構等の検討を進める。

宇宙エレベーターに関する関心は高く、取り組むべき未解決の課題も明らかにされてきている。ここでは、大林組における取組みを紹介したが、宇宙エレベーター建設実現のためには、一民間企業の取組みにとどまらず、多方面の様々な見地から検討を進めることが、実現への近道となる。

参考文献

- 1) 大林組:宇宙エレベーター建設構想, 季刊大林No. 53, 2012.2
- 2) Iijima S.: Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, 354, pp.56-58, 1991
- 3) 青木節子, 青木義男, 石川洋二, 井上翼, 大野修一, 小笠原俊夫, 甲斐素直, 佐藤実, 高野忠, 土田哲, 向井浩子, 山極芳樹: 軌道エレベーター検討委員会報告書, 航空宇宙学会, 2015.9.15
- 4) Jorgensen, A. M., S. E. Patamia. and H. Gassend: Passive Radiation Shielding Considerations for Proposed Space Elevator, *Acta Astronautica*, 60, pp.198-209, 2007
- 5) Plasma Shield by Means of a Rotating Magnetic Field for Innovative Space Transportation, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, Vol. 10, No. ists28, pp. Pc73-Pc78, 2012
- 6) Inoue, Y. et al.: Anisotropic carbon nanotube papers fabricated from multiwalled carbon nanotube webs, *CARBON*, 49, pp.2437-2443, 2011
- 7) 渕田安浩, 他: 3A06宇宙エレベーターのCNTケーブルに及ぼす原子状酸素の運動エネルギーに関する考察, 第64回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2020-4372, 2020.10.27-30
- 8) Lang, D.: Space elevator dynamics reference manual, NASA Technical Report, 155p, 2006.4
- 9) Cohen, S. S. and A. K. Misra: The effect of climber transit on the space elevator dynamics, *Acta Astronautica*, No.64, pp.538-553, 2009.8
- 10) Kaithi, V.: Design of space elevator, Master of Science thesis, Texas Tech Univ., p.133, 2008.12
- 11) 松野太郎, 島崎達夫, 岸保勘三郎: 成層圏と中間圏の大気, *大気科学講座3*, 東京大学出版会, p. 179, 1981.1
- 12) 大塚清敏, 大本絵利, 石川洋二: 宇宙エレベーターの力学と大気圏内の風の長期的作用に対する安定性, 大林組技術研究所報 No. 80, 2016
- 13) G. Deleri and B. Sungu: Temperature dependence of the tensile properties of single walled carbon nanotubes: O8N) tight bindings MD simulation, *Phys. Rev. B*, 184104, 2007
- 14) 井上文宏, 石川洋二, 大本絵利: 宇宙エレベーター構想におけるクライマー駆動ローラの設計と動的解析, 第59回宇宙科学技術連合講演会, 1J05, 2015
- 15) 大本絵利, 他: 宇宙エレベーター用クライマーモデルの開発, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 4H05, 2016