

The Space Elevator Construction Concept

Yoji Ishikawa

ishikawa.yoji@obayashi.co.jp

Obayashi Corporation

Shinagawa Intercity Tower B

2-15-2 Konan, Minato-ku

Tokyo 108-8502, Japan

Abstract

We describe a newly-designed, whole-space elevator system, including its construction process, and we examine its feasibility. The space elevator is planned to be built by the year 2050 with a capacity to carry 100-ton climbers. It is composed of a 96 000-km carbon nanotube cable, a 400-m diameter floating Earth Port and a 12 500-ton counter-weight. Other facilities include Martian/Lunar Gravity Centers, an LEO (Low Earth Orbit) Gate, a GEO (Geostationary Earth Orbit) Station, a Mars Gate and a Solar System Exploration Gate. The construction process consists of deploying the cable and constructing the facilities. It is necessary to analyze the cable dynamics in order to estimate the characteristics of the cable, counter-weight, facilities and climbers, and in order to determine the construction procedures. Parameters for the cable dynamics include tension, displacement and elongation of the cable due to ascending climbers, masses of counter-weight and cable, wind, and fixed loads of facilities. With the help of a computer simulation of the equations of motion, we designed the system and determined the construction process. Based on the results, we conclude the following: construction will be technically feasible with an assumed cable tensile strength of 150 GPa, it will take roughly 20 years to construct the cable, the impacts of wind or Coriolis force on cable displacement are small, and it is essential to fix one end of the cable to the earth's surface, always applying pre-tension at the ground end. According to the plan, a 20-ton cable is deployed initially, and is reinforced 510 times by climbers up to 7 000 tons, ascending in succession over roughly 18 years. The facilities are then transported and constructed within one year. For our model, we estimate that the construction cost will be approximately 100 billion USD, and the transportation operation cost approximately 50 to 100 USD/kg. The large initial construction cost, according to our estimate, will be paid off simply by using the space elevator to construct and operate a single, conventional space solar power system, with an output of 5 GW and a mass of 50 000 tons. This would mean that all other space transportation would benefit from the significantly lower operational cost of the space elevator, which would be roughly one-hundredth of that of conventional launches. The current technology levels are not yet sufficient to realize the concept, but our plan is realistic, and is a stepping stone toward the construction of the space elevator.

Presented at the Sixth SPS Symposium, 3-4 October, 2013

宇宙エレベーター建設構想^{*1}

石川 洋二^{*2} Yoji ISHIKAWA

Key Words: Space Elevator, cable dynamics, GEO, Earth Port

人類や物資を低コストで宇宙に輸送できる未来の新しい宇宙交通システムとして、「宇宙エレベーター」の建設を構想した。宇宙エレベーターは、宇宙太陽光発電システムと一体になって開発・実現されるべきものである。講演では、宇宙エレベーターの意義と革新性を再確認しつつ、現在の科学技術の延長線上で2050年に建設が可能と考えられる宇宙エレベーターの姿を紹介し、その施工過程、構造安定性、工程、コストを述べる。完成したあかつきには一般の方々も比較的容易に宇宙旅行が楽しめる可能性がある。また、月や火星にも探査機や有人宇宙船を送ることができる。この夢の計画を実現するために必要な技術開発、安全性確保の重要性についても触れる。

1. はじめに

東京スカイツリーを建設した建設会社が、その先に来たるタワーとして、宇宙エレベーターを構想した¹⁾。スカイツリーは高度634mであるが、それを2, 3倍しても技術的にはおもしろみはない。発想の転換を図り、究極の塔として宇宙エレベーターのあるべき姿を建設会社なりの視点から検討した。

2. 基本的な考え方

宇宙エレベーターにはいろいろなタイプがあるが、ここでは、Edwards²⁾の案を基本としつつ、独自のアイデアを盛り込み、数値シミュレーション³⁾を援用しながら、現実的と思われるシステムの検討を目指した。

基本となるケーブルの長さは、月や太陽の重力の変動周期と共振しない長さとし、かつ、太陽系の多くの惑星に探査機を投入することを考え、約10万kmの長さとした。クライマーは地球を出発する時点でケーブルに負荷を与える荷重となるが、上昇するにつれその負荷は軽減される。高度12,000 kmまで上昇することで2台目が出発することができるので³⁾、12,000 kmごとにクライマーは出発することとし、静止軌道までで約3台、先端までの長さを96,000 kmとすることで一度に8台が取り付けるとした。

ケーブルの材料はカーボンナノチューブとし、静止軌道で断面積が最大となるようなテーパ状とした。ケーブルは一般的には、地球の重力と遠心力が釣り合った状態にあるが、そのままクライマーがケーブルに取り付くとケーブルの伸びが大きくクライマーは地上に落下してしまう。そ

のため、ケーブルにはあらかじめテンション（プリテンション）をかけることとした。宇宙側に10%の遠心力の余力をかけることを基準とした。

クライマーは施工状態（ケーブルの補強）は40 km/hで上昇し、運用状態では200 km/hの速度とした。ケーブルの安全率は2とし、さらに2本供用とした。

以上の条件で、ケーブルとカウンターウェイトの質量比は常に1:0.92を維持することとなる。ケーブルの建設過程を、①芯となるケーブルの建設、②ケーブルの補強、との2段階で実施することとする場合、初期のケーブル質量は打ち上げるロケットの制約から20 tonnesとなる。これを補強する場合には、クライマーの質量の制約から毎回1.15%ずつ質量を増やしていくこととなり、その場合、510回の補強により最終的に100 tonnesのクライマーが上昇できる強度のケーブルが完成する。

3. 宇宙エレベーターの全体構成

宇宙エレベーターはさまざまな分野の可能性を広げるが、代表的なものとして、宇宙太陽光発電、宇宙資源の探査と活用、宇宙観光旅行の三つがある。究極の自然エネルギーとされる太陽の利用、月にあるヘリウム3をはじめとした宇宙資源の開発は、地球の未来社会の基盤となる重要な要素である。

この三つは、いずれも宇宙エレベーターの特徴をもっともよく生かすものである。その特徴にふれながら、宇宙エレベーターの全体構成を見る（図1）。

宇宙エレベーターのケーブルの長さは、96,000 kmに及ぶ。理論上は、ケーブルにはたらく重力と遠心力のバランスによってピンと張っている。しかし実際には、ケーブルは風などの外力によって揺れ動くため、末端部の支持方法を工夫する必要がある。

^{*1}©2013 日本航空宇宙学会

Presented at the Sixth SPS Symposium, 3-4 October, 2013

^{*2}大林組

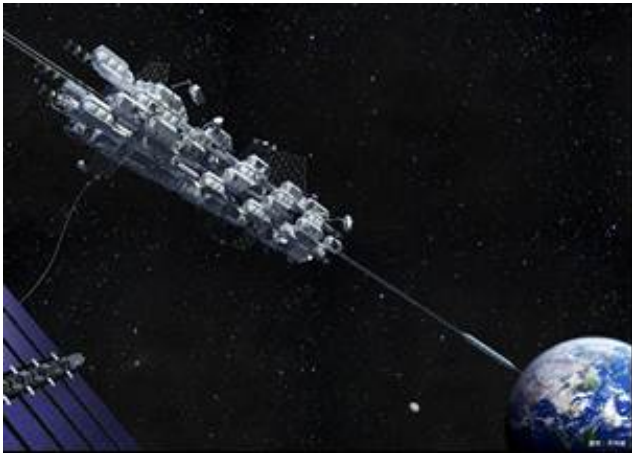


図1 宇宙エレベーター全体像

ケーブルを地上で固定する部分をアース・ポートと名付ける。宇宙エレベーターの発着点でもある。ケーブルの動きや周辺環境などに対応できる、海に浮かぶ建造物として

いる。
地上を離れて少し昇ったところに火星と同じ重力（地球の約三分の一）となる高度（3,900 km）に火星重力センター、月と同じ重力（地球の約六分の一）となる高度（8,900 km）に月重力センターを想定した。専門家にとっては月や惑星での活動を想定した訓練の場となり、旅行者にとっては低重力体験を楽しめる場所とのそうていである。

高度 23,750 km のところに低軌道（LEO）ゲートを設置する。宇宙エレベーターで部品を搬送して人工衛星を組み立て、LEO ゲートから落下させて高度 300 km の低軌道に投入する。

高度 36,000 km には静止軌道ステーション。ここには、宇宙環境を活用した多様な最先端の研究・実験施設が集積する。

宇宙太陽光発電パネルもここには設置される。地球の未来のエネルギーをになう宇宙太陽光発電システムの重要拠点となる。ここでは発電システムの設置だけでなく、地球への送電やメンテナンスも担う。

静止軌道ステーションを通過すると、その先は太陽系の惑星の資源探査や採掘のための領域となる。一定の高度から宇宙船を放出すると、遠心力を推進力として最小のエネルギーで他の惑星へ行くことができる。高度 57,00 km に火星ゲートを想定する。火星は太陽系のなかでもっとも地球に近い組成をもつ惑星で、資源探査のみならず、宇宙農業をおこなって人間が居住する可能性もある。もし火星の地表にも宇宙エレベーターができれば、宇宙船は二つの星をつなぐ渡し船となる。

最頂部の高度約 96,000 km にカウンターウェイトを設置する。カウンターウェイトは、もっとも高い場所に位置する太陽系資源探査のゲートでもある。この高さになると小惑星帯や木星への飛行も可能となる。

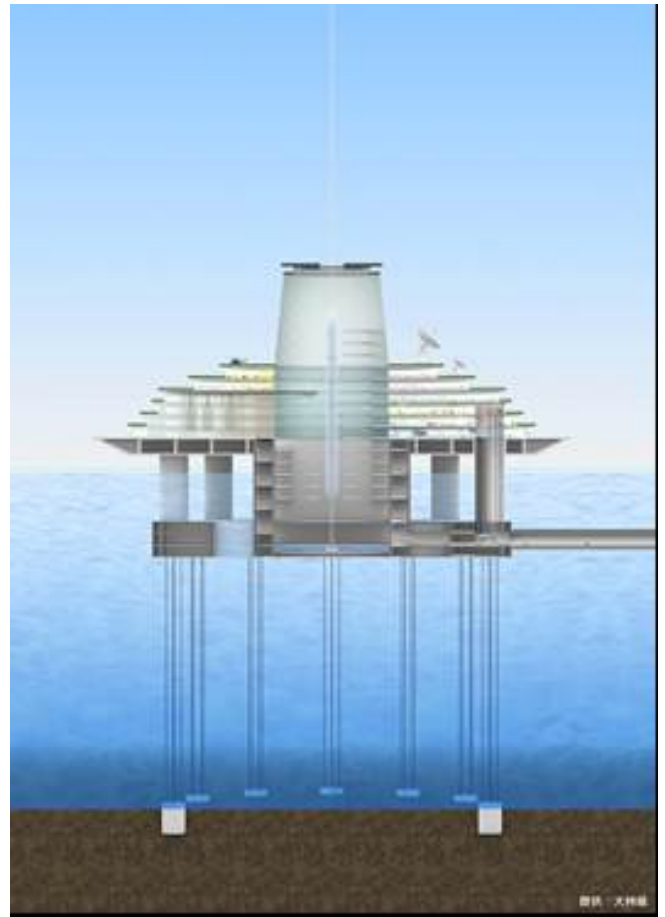


図2 アース・ポート

4. アース・ポート

アース・ポートは、宇宙エレベーターのケーブルを地上に固定し、ケーブルにかかる張力を調整する施設である。同時に、静止軌道ステーションなどの建設中は人や資材の搬送基地となり、最終的には私たちが宇宙とのあいだを往復するための発着場となる（図2）。

参考文献

- 1) 大林組：「季刊大林 No.53 タワー」、2012.
- 2) Edwards, B. C. and Westling, E. A.: The space elevator, A revolutionary Earth-to-space transportation system, Spageo, 2002.
- 3) 大塚清敏、石川洋二：第 57 回宇宙科学技術連合講演会、2013.
- 4) Kaithi, V.: Design of Space Elevator, A thesis in Mechanical Engineering, Texas Tech University, December 2008.