

## 宇宙エレベーターとその研究開発の現状 Space Elevator and Its Research and Development at Present

山 極 芳 樹  
静岡大学大学院工学研究科  
Yoshiki Yamagiwa

Graduate School of Engineering, Shizuoka University  
tmyyama@ipc.shizuoka.ac.jp

**Key Words:** Space Elevator, Space Transportation

**Abstract:** A space elevator is an ultimate transportation system access to space. Such a system is just a product of imagination until some decades ago. But recent advances in technology including the invention of new materials such as carbon nanotube make space elevator possible to realize, and academic researches and developments become active in USA, Japan and European countries in recent ten years. There are many technological problems should be overcome at present, but the increase and the cooperation of researchers and engineers to cope with space elevator and the continuous studies of space elevator will accelerate the realization of space elevator in near future.

### 1. はじめに

地球と宇宙をエレベーターで繋ぎ行き来するという宇宙エレベーター（軌道エレベーターともいう）は、現行のロケットによる輸送に比べて低コストで環境への影響も少なく、人体への負担も少ない安全な輸送手段を提供し、究極の宇宙輸送システムといえるが、数十年前までは、空想の産物でしかなかった。ところが、ここ数十年の間に、カーボンナノチューブに代表される新素材の発明や技術の発展により、技術的に実現可能性が高まり、各国で研究が始まっているのに加え、一般社会においても関心が高まってきている。ここでは、宇宙エレベーターとは何か、また、その研究開発現状はどうなっているかについて概観する。

### 2. 宇宙エレベーターの原理

宇宙エレベーターとは、図1に示すように、赤道面上に静止軌道をまたいで地上と宇宙ステーションをケーブルで繋ぎ、そのケーブルに沿って昇降するクライマーによって地球-宇宙間で物資を輸送する宇宙輸送システムである。ケーブルは宇宙空間で万有引力と地球の自転による遠心力をうけ張った状態が保たれるが、ケーブルが地球の回転と同期するにはその重心が静止軌道上になければならず、そのためには、アンカーステーションの質量によるがおよそ100,000kmの長さのケーブルを必要とする。100,000kmの長さのケーブルを成立させるには、50GPa以上の応力に耐えうる素材が要求されるが、現状、そのような素材は存在しない。しかし、理論上150GPaの限界応力を持つとされるカーボンナノチューブが発明<sup>1)</sup>されたことで、宇宙エレベーターが成立する可能性が生じてきた。

この100,000kmにもおよぶ長さが宇宙エレベーターの建設を困難にしているが、逆にこの長さが、輸送システムと

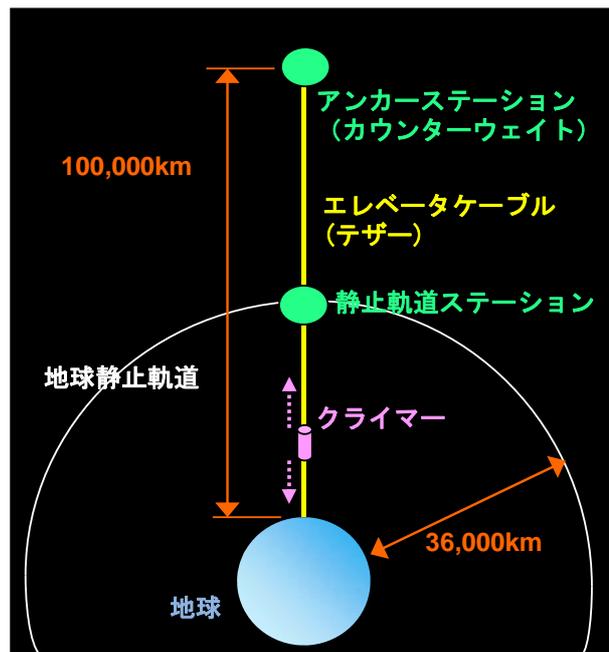


図1 宇宙エレベーターの概略図

して大きな利点をもたらしている。静止軌道上以下では、ケーブル上の物体はその軌道を周回するより低い軌道エネルギー（その高度の軌道を周回するのに必要な周回速度より遅い速度で周回している）なので、静止軌道上以下でケーブル上の物体を切り離すと地上に落下する。一方、静止軌道以上の高度にあるケーブル上の物体はその軌道を周回するのに必要な軌道エネルギー以上のエネルギーを持っている（その高度の軌道を周回するのに必要な周回速度より速い速度で周回している）ので、静止軌道以上の高度にある物体をケーブルから切り離すと、その速度利得により地

球軌道を離脱して月や他惑星に物体を送り込むことができる。たとえば、高度 46,000km から切り離すと月へ、高度 57,000km から切り離すと火星へ、高度 96,000km から切り離すと小惑星帯や木星へ物資を輸送できる（図 2）。つまり、宇宙エレベーターは地上と地球軌道上の輸送だけではなく、太陽系内の多くの衛星、惑星への物資輸送も容易になり人類の活動領域を大きく拡大できる、宇宙輸送システムとして革命的なものなのである。

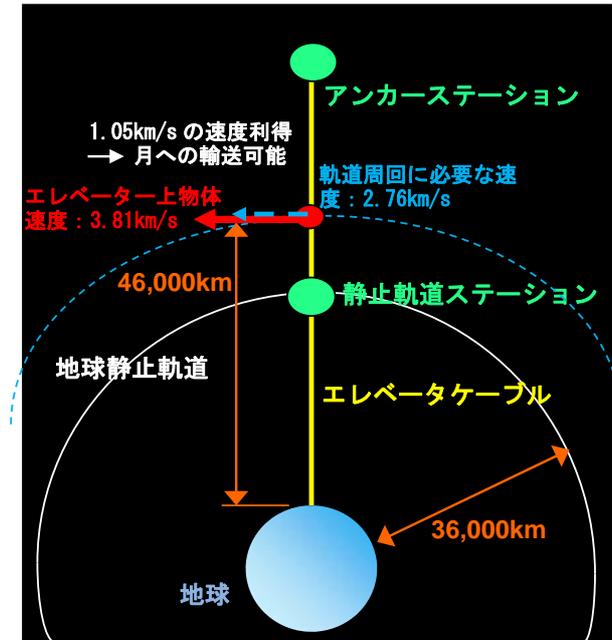


図 2 宇宙エレベーターによる地球圏外物資輸送(月への輸送の場合)

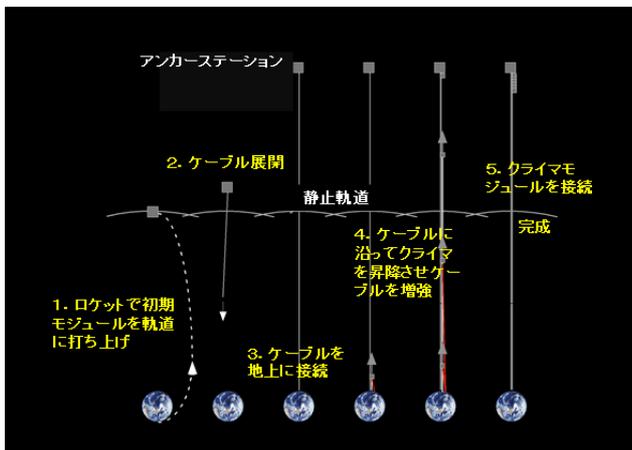


図 3 宇宙エレベーターの建築

宇宙エレベーターの建築は、まず、静止軌道上までロケットで初期ケーブルを打ち上げ、ステーションからケーブルを展開し、地上に接続し、その後、クライマをケーブルに沿って昇降させて、ケーブルおよびアンカーステーションを増強していき、最終的な形にするという方法<sup>2)</sup> (図 3) が一般的に考えられている。システム自体の具体的な形式は今後の検討によるが、大林組が提案している宇宙エレベ

ーター建設構想 (図 4)<sup>3)</sup> を例にとると、カーボンナノチューブを利用すると、テーパを持つテープ状のケーブルを仮定した場合、最終的には最大幅 50mm (静止軌道上)、厚さ 1.4mm、総質量 7000t 程度のケーブルで建築可能となる。アンカーステーションは最終的には 6500t となる。クライマの最終形は 100t (ペイロード 70t) で、運行速度は 200km/h が想定されている。地上でのケーブル接続方法は、海上の浮体構造物を利用し、海水をバラストとしてケーブルの張力を調整する方法 (図 5) が提案されている。宇宙ステーションは先端のアンカーステーション、静止軌道上の静止軌道ステーション、ほかケーブルに沿って変化する重力に応じてケーブル上にいくつかのサブステーションが建設されることであろう。エネルギー供給方法は、ステーションは太陽電池を利用し、クライマは移動すること、軽量さが要求されることから、有線やバッテリーによるエネルギー供給は難しいので、無線送電が想定されている。

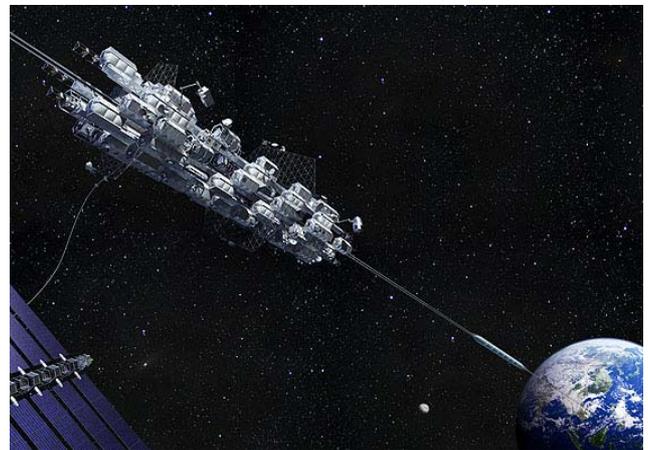


図 4 大林組提案宇宙エレベーター概念図<sup>3)</sup>

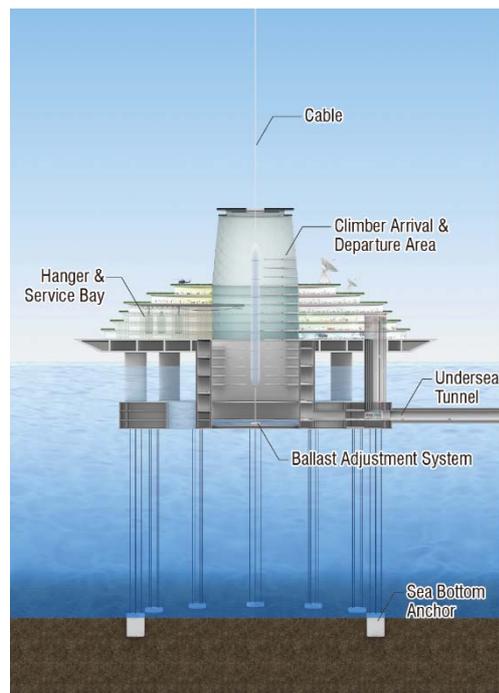


図 5 大林組提案宇宙エレベーター地上部概念図<sup>3)</sup>

### 3. 宇宙エレベーターへの取り組みの歴史

宇宙エレベーターのアイデア自体は、宇宙工学の父とされる Tsiolkovsky までさかのぼる<sup>4)</sup>が、静止軌道からケーブルを伸ばして地上と結ぶというアイデアは Artsutanov が 1960 年に提案したもの<sup>5)</sup>である。1975 年には Pearson が宇宙エレベーターの成立性を検討<sup>6)</sup>している。その後、1979 年に有名な SF 作家で技術者でもある Arthur C. Clarke が当時の科学技術の知識を駆使して発表した SF 小説「楽園の泉」<sup>7)</sup>は、宇宙エレベーターの建築方法、運用方法を詳述し、宇宙エレベーターの存在を広く世に知らしめた。このころまでは、宇宙エレベーターは空想もしくは机上の話に過ぎなかったが、現実味を帯びてきたのは、「楽園の泉」の中でもウィスカーと呼ばれていた炭素系の超軽量強度材料に相当するカーボンナノチューブの発明である。これを機に、NASA でワークショップが開催され、2000 年には NASA の助成によりロスアラモス国立研究所の Edwards が宇宙エレベーターの理論的な成立性について詳細な検討<sup>8)</sup>を行い、宇宙エレベーターを現実的な問題として検討する機運が高まってきた。Edwards の検討の後、システムの要となるケーブルの展開・ダイナミクスについて後述のような研究者たちが本格的な学術研究を行っている。

個々の研究者の研究とは別に、組織的な動きも出てきて、アメリカでは 2003 年には Spaceward Foundation が設立され、賞金を懸けたクライマ競技が 2005 年から 2009 年にかけて実施され、International Space Elevator Consortium (ISEC) 主催の Space Elevator Conference が 2008 年から開催されている。日本でも、宇宙エレベーター協会 (JSEA) が設立され、2009 年から毎年宇宙エレベーター技術競技会 (現：宇宙エレベーターチャレンジ) と宇宙エレベーター学会が開催されている。また、2012 年には (株) 大林組が宇宙エレベーター建設構想 (前述) を発表し、2013 年には日本航空宇宙学会の軌道エレベーター検討委員会が発足している。宇宙エレベーターチャレンジの詳細は第 4 章で述べる。ヨーロッパでは European Spaceward Association (ESA) が 2007 年に設立され国際会議を開催していたが、現在中断されている、一方、日本の宇宙エレベーター技術競技会に触発されミュンヘン工科大学 (2009 年、2010 年の宇宙エレベーター技術競技会に参加) にて European Space Elevator Challenge が 2012 年から始まっている。さらに宇宙エレベーターの実現に向けた検討を国際協力で行う動きも出てきており、2014 年に International Academy of Astronautics (IAA) で宇宙エレベーター常任委員会が設置され活動を始めている。

### 4. 宇宙エレベーターの技術的課題と研究の現状

宇宙エレベーターの理論的成立性は多くの検討で明らかとなっている<sup>9)</sup>が、その実現には多くの課題の克服が必要である。以下に主要な課題を列挙する。

- 軽量強度ケーブルの開発
- ケーブルの動的安定

- 摩耗の少ない高効率クライマの開発
- クライマの安定制御
- エネルギー供給方法
- 地上へのアンカー方法
- 強風対策
- 宇宙ゴミ (宇宙デブリ) 対策
- 放射線対策
- 雷・雨対策
- 法律上 (宇宙法・航空法・領海法等) の問題
- 国際協力

この中で、宇宙エレベーターの主要要素であるケーブルとクライマの技術的課題と研究の現状について、下記に解説する。

#### 4.1 ケーブルの技術的課題と研究の現状

宇宙エレベーター成立は軽量強度ケーブルの開発に最も依存している。カーボンナノチューブの発見が一つの突破口になったとはいえ、CNT の研究は電気的特性に注目したものが中心で、建材としての有用性を生かした研究は近年始まったばかりで、現状では、前述のように、宇宙エレベーター成立に必要な特性を満たす状況には至っていない。機械的強度に重きを置いた開発としては、帝人において cm スケールの CNT 繊維で 2GPa の強度を達成<sup>10)</sup>しており、今後の発展に期待がかかる。

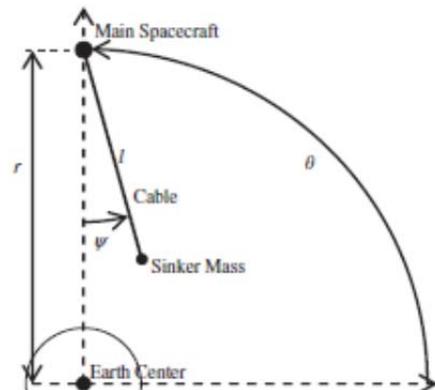


図 6 武市によるエレベーターケーブル展開モデル<sup>12)</sup>

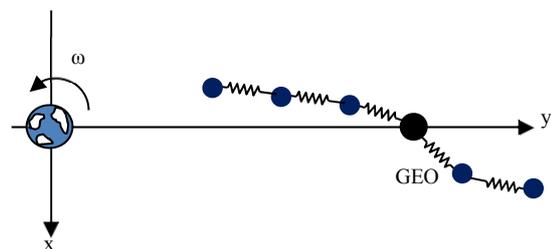


図 7 藤井らによるエレベーターケーブル展開モデル<sup>13)</sup>

ケーブル素材自体の開発とともに、ケーブルダイナミクスの把握は、ケーブルの強度設計のみならずクライマの安定制御、エネルギー供給制御ほかシステム全体の設計に関わっている重要な課題である。建設初期におけるケーブ

ル展開時のダイナミクスについては Lang、武市、藤井たちが検討している。Lang<sup>11)</sup>、武市<sup>12)</sup>は、Edwards が提案している重心を静止軌道以上に保ちながらケーブルを地球方向に進展しながらアンカーステーションの軌道を上げていくケースについてアンカーステーションとケーブル端部の2点質点の動的挙動を検討(図6)し、安定に展開するための制御法等を提案している。藤井<sup>13)</sup>は、まだ初期段階であるが静止軌道上ステーションから地球側・宇宙側にケーブルを同時展開する場合について多点質点系モデルで解析(図7)し、展開時のケーブルの動的変形やケーブル応力の変化を明らかにしている。

エレベーター 完成後のケーブルダイナミクスについては Lang, Williams, Cohen, 山極らが検討している。Cohen<sup>14)</sup>、Williams<sup>15)</sup>はケーブルを剛体としてクライマ昇降時のダイナミクスを検討しているが、Lan<sup>16),17)</sup>は柔軟構造物であるケーブルを多数点の質点とばねで模擬したモデルにより、大気中の風の影響とクライマ運動の影響をより詳細に検討している。山極たち<sup>18)</sup>は Lang と同じく多質点 - ばね系によるケーブルモデル(図8)で、クライマ昇降の影響をさらに詳しく検討して、上昇・下降の同時運用でケーブル振動を大きく抑えることが可能なことを示した。10万 km におよぶ柔軟構造物であるケーブルのダイナミクスは複雑で、厳密に把握するためには、まだ、多くの検討課題が残っているが、しだいに設計に繋がる重要な知見が得られつつある。

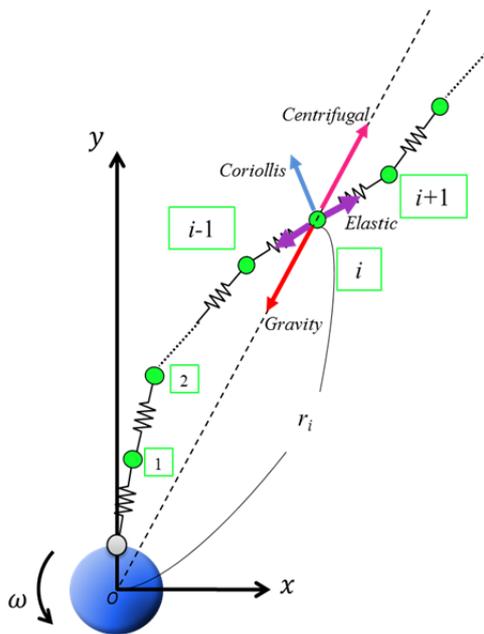


図8 山極らによるエレベーターケーブルダイナミクス解析モデル<sup>18)</sup>

#### 4.2 クライマの技術課題と研究の現状

宇宙エレベーターの特色は、一度システムを構築すると地球 - 宇宙間の輸送運用が容易であることであるが、輸送コストを大きく低減させるためには、多数回の輸送を可能

にする必要がある。そのため輸送機であるクライマには片道10万 kmにおよぶ距離を最小限のメンテナンスおよび高いエネルギー効率で、高速かつ安定に多数回往復できる能力が要求される。宇宙エレベーターによる物資輸送方法は様々なアイデアがあり、その中でも2台のゴンドラをアンカーステーション経由のケーブルで繋いだ釣瓶式(図9(a))は、一方の位置エネルギーを他方のゴンドラ上昇に用いて最も効率的な方法と考えられるが、ケーブル間の干渉等未検討な部分が多く、現状では Edwards が提案したように摩擦を利用してケーブルを昇る自走式のクライマ(図9(b))が研究の主流となっている。

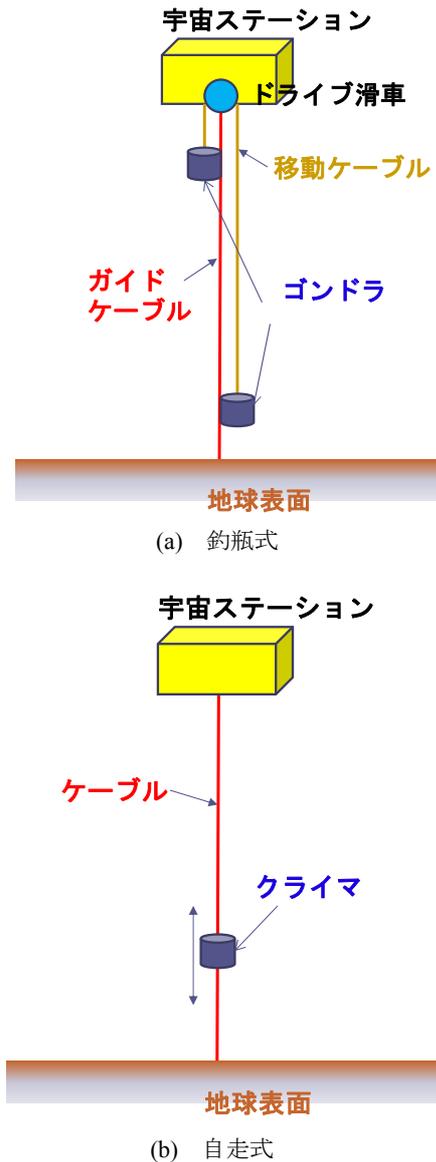


図9 宇宙エレベーターの形式

クライマの設計については、現状試行錯誤の段階であるが、前述の宇宙エレベーター協会主催の宇宙エレベーターチャレンジ<sup>19)</sup>は、そのクライマ技術を検証する格好の場となっている。宇宙エレベーターチャレンジはベルトテザーおよびロープテザーをバルーンにより浮上させ、そのテザ

ーに沿ってクライマを昇降させ、参加各チームが、クライマの速度、制御性、安全性、輸送能力、等を競いながら、昇降時の様々なデータも取得してクライマ技術の向上を図ろうというもの(図10)で、2009年に高度150mの昇降から開始し、順次高度を上げて2013年度のチャレンジでは高度1200mに達している。2013年には大学・高専や社会人の合計17チームが参加し、高度では1チームが1100mの昇降という世界記録を達成(図11)しており、別のチームは時速60kmという自動車なみの速度での上昇を可能にしている。競技でのクライマは10kg程度の重さの小型クライマで、もちろん、これらのクライマで得られる技術的知見がそのまま実際の宇宙エレベーターに適用できるわけではないが、摩耗を抑えるためにテザーに接触させるローラを複数個に分散させる(図12)、空気抵抗を減らすためにテザーに沿った細長構造がよい、等の設計指針がしだいに得られつつあるし、高校・大学生の工学教育の実践の場としても重要な機会となっている。

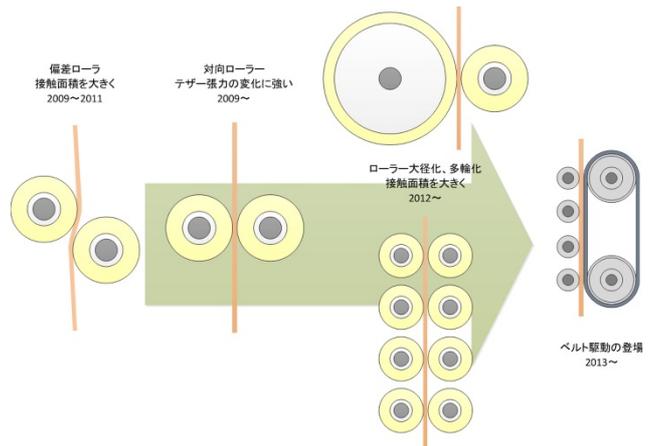


図12 クライマ機構の変遷 (図提供：宇宙エレベーター協会)<sup>19)</sup>

## 5. おわりに

地球の人口が70億人を超え、発展途上国の急激な進歩で、エネルギーを含む多くの資源が指数関数的に消費され続けている現在、今後、100年200年のスパンで考えると多くの資源が底をつき、地球上では賄いきれないことは自明の理で、これからの人類としては、地球上という2次元的な場所ではなく宇宙も含めた3次元的な空間に行動範囲を拡大していく必要に迫られている。宇宙エレベーターは常時、地球から宇宙へ、また、宇宙から地球への物資輸送を可能にするため、加えて、他の惑星・衛星上にも宇宙エレベーターを築けば、大量の物資が地球と宇宙・惑星・衛星間を行き来することになる。このことは、たとえば、宇宙にホテルや病院、発電所等を築き、また、他の惑星や衛星から地球で足りなくなる鉱物資源を持ってくる、といったロケットのみではコスト的にペイしない宇宙産業において多くの新たなビジネスチャンスを提供し社会を大きく変革させることに繋がる。このような新たな輸送手段の革命が宇宙エレベーターといえる。

宇宙エレベーターに必要な技術は多岐にわたり、その開発には、多分野の多くの技術者・研究者の技術・知識を結集し、多くの技術的課題を克服していく必要がある。現状、宇宙エレベーターの実現に対する取り組みは始まったばかりであるが、しだいに実現に繋がる知見が得られつつあり、その技術的課題は、決して克服不可能なものではない。また、その技術は宇宙エレベーター特有のものというわけではなく、エレベーターの要である軽量高強度のケーブル開発は建築や輸送機資材等の発展に、クライマ機構の開発は、索道システムへの応用はもちろん、エレベーターやビル、タワー等の補修ブローブ開発等に、エネルギー無線供給システムの開発は、車や列車の無線エネルギー供給システム、過疎地への無線エネルギー供給システム等へ、など地上の多くの技術発展に寄与するし、さらに、宇宙デブリ問題への対策は、宇宙開発自体にとって避けては通れない課題であるし、防風、雷、雨、放射線対策は多くの分野で必要と

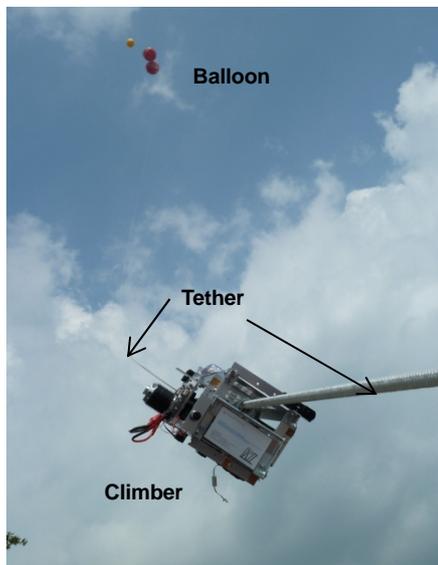


図10 宇宙エレベーターチャレンジ(2012年競技会, バルーン高度700m, 静岡大製クライマ上昇の様子)



図11 2013年宇宙エレベーターチャレンジで高度1,100m昇降の世界記録を達成したチーム奥澤のクライマ (写真提供：宇宙エレベーター協会/秋山)<sup>19)</sup>

される課題であり、宇宙エレベーター技術開発を通じて、多くの分野での工学的・技術的課題の解決に繋がる。

宇宙エレベーターが夢物語ではなくなりつつある現在、多くの関連分野の研究者・技術者の方々が宇宙エレベーター研究開発へ参加・連携し、宇宙エレベーターの早期実現に繋がっていくことを願ってやまない。

## 参 考 文 献

- 1) Iijima, S. : Helical microtubules of graphitic carbon, Nature, 354, pp56-58, 1991. K. E. Tsiolkovski: Grezi o zemle i nebe, izd-vo ANSSSR, 35, 1959.
- 2) Edwards, B. C. and Westling, E. A.: The Space Elevator: A Revolutionary Earth-To-Space Transportation System, 2003. B. C. Edwards, Huston, USA, 2003.
- 3) 株式会社大林組, 季刊大林 No. 53, 2012.
- 4) Tsiolkovski, K.E.: "Speculations About Earth and Sky and on Vesta," Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1959; Grezi o zemle i nebe (in Russian), Academy of Sciences, U.S.S.R., Moscow,
- 5) Artsutanov, Y.: original is in Russian, "V kosmos na elektrovoze" "Into the Cosmos With an Electric Locomotive," Komsomolskaya Pravda, July 31, 1960.
- 6) Pearson, J. : The orbital tower: A spacecraft launcher using the Earth's rotational energy, 2, 9-10, pp785-799, 1975.
- 7) アーサー・C・クラーク; 楽園の泉, 早川書房, 東京, 1980.
- 8) Edwards, B. C.; The Space Elevator, NIAC Phase II Final Report ([http://www.niac.usra.edu/files/studies/final\\_report/521Edwards.pdf#search=The+Space+Elevator%2C+NIAC+Phase+II+Final+Report](http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/521Edwards.pdf#search=The+Space+Elevator%2C+NIAC+Phase+II+Final+Report)), 2003.
- 9) 佐藤実; 宇宙エレベーターの物理学, オーム社, 東京, 2011.
- 10) De Volder, M. F. L., Twafick, S. H, Baughman, R. H. and Hart A. J. ; Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications, Science, No.339, pp.535-539, 2013.
- 11) Lang, D. D., Space Elevator Initial Construction Mission Overview, ([http://www.keithcu.com/wiki/images/f/f/Paper\\_Lang\\_GEO\\_Deploy.pdf](http://www.keithcu.com/wiki/images/f/f/Paper_Lang_GEO_Deploy.pdf))
- 12) Takechi, N., Geostationary Station keeping Control of a Space Elevator During Initial Cable Deployment, Acta Astronautica 70, pp.85-94, 2012.
- 13) 藤井慎一郎, 山極芳樹, 松井信, 大塚清敏、石川洋二; 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展開時のダイナミクスについての解析, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム論文集, STCP-2013-074, pp.1-4, 2014.
- 14) Cohen, S. S. and Misra, A. K., The Effect of Climber transit on the Space Elevator Dynamics, Acta Astronautica 64, pp.538-553, 2009.
- 15) Williams, P., Climber Motion Optimization for the Tethered Space Elevator, AIAA 2008-7383, pp.1-17, 2008.
- 16) Lang, D. D., Space Elevator Dynamic Response to In-Transit Climbers, 1st International Conference on Science, Engineering, and Habitation in Space, Albuquerque, NM, Space Engineering and Science Inst., Paper 10152148, 2006.
- 17) Lang, D. D., Approximating Aerodynamic Response of the Space Elevator to Lower Atmospheric Wind, ([http://spaceelevatorwiki.com/wiki/images/8/8d/Paper\\_Lang\\_Aero.pdf](http://spaceelevatorwiki.com/wiki/images/8/8d/Paper_Lang_Aero.pdf))
- 18) Yamagiwa, Y., Doi, H., Oshuka, K. and Ishikawa, Y.; Cable Dynamics of Space Elevator with Considering Climber Motion, Journal of Space Technology and Science, 2014. (to be published)
- 19) 大野修一; 宇宙エレベーター開発ロードマップと JSEA での取り組み, 第 16 回宇宙太陽発電衛星 (SPS) シンポジウム論文集, pp.1-5, 2013.