

宇宙エレベーター—実現性評価活動と宇宙太陽光発電システム^{*1}

土田 哲^{*2}・佐藤 実^{*3} Akira TSUCHIDA and Minoru SATO

Key Words: Space Elevator, IAA, Carbone nanotube, SPS

2003年NASAのNIAC (NASA Institute of Advanced Concept) プログラムとして Bradley Edwards 博士がまとめた「宇宙エレベーター」構想発表を皮切りに、日欧米の科学者を中心に宇宙エレベーターに関する研究が進められている。講演では、日本、米国や欧州での研究活動を紹介しながら、国際宇宙航行アカデミー (IAA)が2010年から実施している『宇宙エレベーター実現に向けた実現性評価活動』や『日本版宇宙列車構想』をサマライズし、その中で行われた『宇宙太陽光発電システム』に関する議論を紹介する。

1. 宇宙エレベーターに関する世界の動き

1.1 歴史

宇宙エレベーターのアイデアが提案された時期は意外に古い。1895年にコンスタンチン・エドゥアルドビッチ・ツイオルコフスキーが、赤道上に塔を建てる。というアイデアを、エッセイ¹⁾に書いている。しかし、地表から塔を伸ばして宇宙に行くというアイデアは実現不可能である。たとえば、コンクリートを使って高さ100 kmの塔を建てる、底面の半径は1600 km程度になり²⁾現実的ではない。

地上からの塔を伸ばすのではなく、静止軌道からケーブルを伸ばして地表と結ぶというアイデアは、ユーリー・アルツターノフが1960年に提案した³⁾。しかしこのアイデアも、ケーブルに要求される強さと軽さが非現実的であり実現不可能といわれていた。

強さと軽さを兼ね備えたカーボンナノチューブが、1991年にNEC基礎研究所の飯島澄男によって発見⁴⁾され、宇宙エレベーターを巡る状況が変化した。さらに、1999年にNASAのマーシャル宇宙飛行センターで開かれた「高度な宇宙インフラストラクチャーに関するワークショップ」⁵⁾と、2000年に同じくNASAの助成を受けたロスアラモス国立研究所員のブラッドリー・C・エドワーズによる宇宙エレベーターの理論的な実現性についての報告⁶⁾により、宇宙エレベーターを現実的な問題として検討しようという雰囲気に変化した。

現在、宇宙エレベーターは、ケーブルに要求される強さと軽さを満たす材料が存在しないため実現不可能だが、世界各地 (米国、欧州、日本) で実現に向けた真剣な議論が本格的に始まっている。

1.2 米国

アメリカでは、1999年にNASAが宇宙エレベーターのワークショップを開催し、2000年にブラッドリー・C・エドワーズがNASAのInstitute for Advanced Conceptsプログラムによって半年間研究するなど、20世紀末から21世紀初めにかけて、概念研究が盛んであった。また、2003年にSpaceward Foundationが設立され、賞金をかけたクライマーの競技会などを2005年から2009年まで開催した。また、ISEC主催の国際会議Space Elevator Conferenceが2008年から毎年開催されている。

宇宙エレベーターについての理論的研究は、2000年前後にNASAの支援によって本格的に開始された。理論的研究がアメリカで進められたことについては、宇宙エレベーターについてのツイオルコフスキーやアルツターノフのアイデアがロシア語で書かれていたためアメリカでは知られておらず、独立に再発明されていたことが指摘される。たとえば1966年には、スクリップス海洋研究所のジョン・D・アイザックスらが1966年2月11日号に短い報告⁷⁾をしている。

また1975年には、アメリカ空軍航空力学研究所のジェローム・ピアソンが軌道塔という呼び方で宇宙エレベーターについて議論した論文⁸⁾を発表した。このような事情のためか、ISEC⁹⁾などでのアメリカにおける宇宙エレベーターの理論的検討は、原理的な研究よりも実際の開発にむけた技術的な検討に重きを置く傾向にあるように見える。

宇宙エレベーターのジャーナルとしては、ISECが2013年から発行しているCLIMBがある。現在Volume 1, Number 1とVolume 2, Number 1が発行済みである。

クライマーの競技会は、2005年から2009年まで2008年を除く4回、NASAの支援によりSpaceward Foundationが実施した。テープ状(2009年はロープ状)のケーブルを、エネルギーを外部から供給(Power Beaming)するクライマーで昇降する競技で、NASAが200万ドルの賞金を提供した。しかし、NASAの支援終了後、競技会は開催されていない。

^{*1}©2013 日本航空宇宙学会

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

^{*2}アーストラック・コーポレーション、茨城県つくば市春日2-8-6-306、E-mail: akira.tsuchida@earth-track.com

^{*3}東海大学 理学部 基礎教育研究室、神奈川県平塚市北金目 4-1-1、E-mail: minoru@tokai-u.jp

1.3 欧州

ヨーロッパにおいても、2007年に European Spaceward Association¹⁰⁾が設立され、2010年まで国際会議を開催していた。しかしその後、ヨーロッパでの経済危機の影響により中断され、国際会議は開催されていない。

クライマーの競技会は、2012年にミュンヘン工科大学において European Space Elevator Challenge¹¹⁾が開催されている。50mのテープ状のケーブル上を、バッテリーを積んだクライマーで昇降する競技で、規格が定められたペイロードを積み、エネルギー効率を基にしたスコアを競うものである。

1.4 日本

日本では、2008年に JSEA¹²⁾が設立（後に一般社団法人化）され、国際会議や学会、クライマーの競技会を毎年開催している。現在は、国際会議や学会とクライマーの競技会の両方を開催しているのは、3極のうち日本だけである。

クライマーの競技会は、JSEAが2009年から毎年、宇宙エレベーター技術競技会（2013年より、宇宙エレベーターチャレンジ）が開催されている。日本でのクライマーの競技会は、テープ状とロープ状のケーブルをヘリウム風船で持ち上げ、バッテリーを積んだクライマーで昇降する競技であり、毎回最高高度を高くしていくことを目標としている。2013年には高度1200mを達成し、2009年にヘリコプターからの吊り下げで高度1000mを達成していたアメリカの記録を更新した。

1.5 国際宇宙航行アカデミー (IAA)

宇宙エレベーターの実現に向けた検討では、国際的な協力も行われている。International Astronautical Congress (IAC) では、宇宙エレベーターセッションが開かれており、多数の参加者が集まっている。

2. IAA 宇宙エレベーター実現に向けた実現性評価活動

2.1 IAA Study Report の目次案¹³⁾

International Academy of Astronautics (IAA) の宇宙エレベーター検討委員会では、宇宙エレベーターの技術的な実現可能性の評価をし、2013年に IAA の Study Working Group として報告する予定である。

現状の目次案は以下の通りである。

Part I - Introductory

1 Introduction (Vision)

2 Systems Infrastructure View

Part II - Major Elements

3 Tether Material

4 Tether Climbers

5 End Station Infrastructure (Base & Apex Anchor)

Part III - Systems Approach

6 Dynamics & Deployment

7 Systems Design for Environment

Part III - Systems Approach

8 Systems Design for Space Debris

9 Operations Concept

10 Summary of Technological Assessment

Part IV - Architectural and Policy Considerations

11 Developmental Roadmaps

12 Legal and Regulatory Frameworks

13 Market Projections

14 Financial Perspective

Part V - Conclusions

2.2 「日本版宇宙列車」プログラムのビジョン

IAAの宇宙エレベーター実現に向けた実現性評価活動を行う Study Working Group メンバに「日本版宇宙列車構想」¹⁴⁾検討時のプログラムビジョンを紹介した。

「宇宙列車プログラム」のビジョン:

“宇宙輸送革命を！”

この「革命」の結果、地球から宇宙へ、あるいは宇宙から地球へと様々なものが輸送されることになる。

つまり「宇宙列車」に興味を持つ利害関係者（ステークホルダー）は、地球と宇宙の間の物資（あるいは人員）輸送を行いたい人ということになる。宇宙列車に投資をしてくれる良質な顧客を獲得するために、この宇宙列車が将来もたらすであろう4つのものを優先順位順であげる。つまり、

- エネルギー
- 食料
- 資源（月や他の惑星）
- 軌道上エコシティ

このことから、我々は、最初の商用宇宙列車の目標を、「宇宙太陽光発電衛星(SSPS)の建設に貢献すること」(①エネルギー)と定義した。

その後、この宇宙列車が宇宙輸送に貢献し、安定的に運用できると認知された後は、静止軌道ステーション上での宇宙農業が開始され、②食料が生産されるようになるであろう。

3つめの段階では、宇宙列車が地球一月の間、あるいは地球と他の惑星（火星）間の物資輸送、とりわけ、③月や火星で採掘された資源の運搬に使用されるであろう。

このように宇宙列車が宇宙農業や資源開発の基地としての役割を果たすようになれば、自ずと静止軌道ステーション上で生活を始める人類が登場する。それが、④軌道上エコシティである。

上記のシナリオに基づき、我々は今、宇宙太陽光発電衛星建設への貢献を目指した宇宙列車ロードマップを作成することにしたわけである。

2.3 宇宙エレベーターロードマップ

第1図に宇宙エレベーターロードマップ¹⁵⁾を示す。宇宙

