

# 宇宙エレベーター開発ロードマップと JSEA での取り組み<sup>\*1</sup>

大野 修 <sup>\*2</sup> Shuichi OHNO

Key Words: Space Elevator, SPEC, SPS

宇宙エレベーター協会では、宇宙エレベーターを実現するための活動を推進していくにあたって、5つの柱とその基礎からなる活動分野のカテゴリ化を行っている。それぞれのカテゴリーには個別のロードマップが必要で、科学/技術分野においては実証実験を軸とした開発ロードマップを設定している。これに則った実際の取り組みとして、宇宙エレベーターチャレンジを実施している。またこのチャレンジは、メディア露出などによる宇宙エレベーターの社会的な認知度の向上にも貢献している。

## 1. 宇宙エレベーターの実現のために必要な活動

### 1.1 5つの柱と基礎

宇宙エレベーター(以下 SE)の実現に向けて必要な取り組みをカテゴリ化する試みは、以前より米国の SE コミュニティで行われてきた。主なものとして、2007年4月に米国で行われた Space Exploration 2007 Conference にて、Liftport 社の Michael Laine 氏が発表した“Four Pillars of Infrastructure Development to the Space Elevator”が挙げられる。4本の柱とは以下のようなものとされた。

- ・ Science/Technical 科学/技術
- ・ Political/Social 政治/社会
- ・ Legal 法律
- ・ Economic 経済

宇宙エレベーター協会(以下 JSEA)では、その後の検討により、5本目の柱として組織化を加えた。さらに、これら5本の柱を支える基礎としての基本理念を枠組みとしてもつこととして、以下のように表現している。

- ・ Philosophy : 未来世界についての理念
- ・ Technology & Engineering : テクノロジーとエンジニアリング
- ・ Outreach : 社会への広がり
- ・ Legal : 法律と条約
- ・ Business : ビジネス
- ・ Organize : 組織化と運営

なお、JSEA ではリファレンスモデルとしての SE として、Bradley C. Edwards 博士らが提唱した構築方法と完成モデルを選択している。<sup>\*3</sup>

### 1.2 未来世界についての理念

SE の実現には非常に大きな規模の社会投資が必要である。また、宇宙大量輸送機関としての SE は、人類社会に大変な影響を与えることになる。

このような SE について、その実現に向けた活動をなるべく短い時間で進めていくためには、さまざまな取り組みの推進における方向性を明確にする必要がある。この方向性を示し、さまざまな場面での判断基準となる基礎として必要なのが理念である。JSEA におけるこれまでの議論による理念としては、「宇宙エレベーターは人類共通の社会インフラとして構築すべきで、そのためにはなるべく多くの国家や地域による関与を求めていく」といったものが挙げられる。

### 1.2 テクノロジーとエンジニアリング

リファレンスモデルによると、初期の実証 SE を構成する基礎的な技術的な観点から見た構成要素は、主に以下のようなものである。

- ・ テザー : 地上と静止軌道以遠を接続するベルト
- ・ デプロイビークル : 初期テザーの展開用宇宙機
- ・ アースポート : 地上側海上基点
- ・ テザー増強用クライマー : 初期テザーの増強用
- ・ クライマー : 増強後のテザーで運用される運搬機
- ・ エネルギープロジェクション : クライマーへの電磁波によるエネルギー空間伝送
- ・ 静止軌道ステーション

### 1.3 社会への広がり

SE は地上と宇宙空間の間を接続する大量輸送機関として捉えることができる。技術の進歩に伴い数多く構築されることが予想される SE が社会にもたらす影響は非常に大きい。そのため、SE の効用を社会全体が正しく理解したうえで、構築と運用を進めていくことが重要である。

また SE についての正しい認識はその実現のための社会的状況を醸成するための根拠となる。

<sup>\*1</sup> Presented at the Sixth SPS Symposium, 3-4 October, 2013

<sup>\*2</sup> 一般社団法人 宇宙エレベーター協会 会長

<sup>\*3</sup> Bradley C. Edwards: The Space Elevator NIAC Phase II Final Report

#### 1.4 法律と条約

SE が存在する“未来世界についての理念”を継続的に維持し、実際に具現化していくためには、社会的コンセンサスを獲得し、それを明確化にしなければならない。実際には、明文化されたコンセンサスとしての実定法である国内法と国際法を制定し、遵守・批准していく必要がある。

#### 1.5 ビジネス

SE の実現に向けた継続的な推進環境を確立するためには、その実現後までを見据えた上での国際的な社会的投資が可能な状況、関連する裾の広い商業活動や経済活動が成り立つ環境が必要である。

#### 1.6 組織化と運営

“法律と条約”と対を成し、理念に基づいた推進を実際に行っていく組織や運営体制を確立する必要がある。現在までの議論では、特定の国家や地域、グループの利益を目的とした推進体制ではなく、独立性と中立性を備えた専門国際機関が必要であると考えられている。

### 2. 協会としてのロードマップ

#### 2.1 ロードマップとは

SE の実現を図ろうとするならば、前述の5つの柱と基礎のすべてを確立していく必要がある。それぞれの活動の規模は必然的に拡大していくので、円滑に進めていくためには常に更新され続ける分野別のロードマップのような指針/合意が必要である。

また各分野の活動は相互に影響しあうため、ロードマップ間の同期も必要であろう。例としては、地上における技術確立のための実証実験は実施高度が高くなっていくに従い、より大きな費用の確保(“ビジネス”)や、このような試みをまったく想定していない航空法との齟齬の解消(“法律と条約”)が必要であることなどが挙げられる。

#### 2.1 技術分野における開発ロードマップ

5つの柱のうちの1つ、“テクノロジーとエンジニアリング”における構成要素は、さらにその中に数多くの要素技術を内包している。多くの要素技術の目標に対する達成度の確認には、実証実験を行うのが適当である。また、複数の要素技術を対象にした実証実験は、“社会への広がり”のためのデモンストレーションとしても機能する。JSEA では実証実験自体のロードマップを、以下の3種類に分類して進行させるのが適当としている。

##### A. 地上実験

ヘリウムバルーンにより垂下されるテザーによる地上から成層圏内までの実証実験

対象構成要素: テザー、デプロイビークル、テザー増強用クライマー、クライマー、エネルギープロジェクション

##### B. 低軌道～中軌道実験

重心位置が低軌道～中軌道の高度(100～35,786km)での

長さ数千 km までのテザーを用いた実証実験

対象構成要素: テザー、デプロイビークル、テザー増強用クライマー、クライマー、エネルギープロジェクション  
C. 静止軌道実験

重心位置が静止軌道上(35,786km)での長さ 10 万 km までのテザーを用いた実証実験

対象構成要素: テザー、デプロイビークル、テザー増強用クライマー、クライマー、エネルギープロジェクション、静止軌道ステーション

なお、3種類の実証実験は対象構成要素を選択することで同時並行に進行させることが可能である。なお、アースポートについては別途の実証実験を進める。

### 3. 宇宙エレベーターチャレンジ

#### 3.1 概要

地上実験の一環としてヘリウムバルーンを用いてテザーを垂下するパーティカルテザー(以下VT)を構築し、その上をクライマーに昇降させる宇宙エレベーターチャレンジは、2009年に高度150mで開始し、順次高度を上げ2013年8月には高度1,200mに達している。

チャレンジの、“テクノロジーとエンジニアリング”としての側面は、過去に類似の機器が存在しないクライマーの建造に必要な要素技術を試験するための自然環境の中での昇降チャンスの提供と、SEテザーの成層圏以下での挙動の観測と制御技術の獲得にある。また、“社会への広がり”としての側面は、広く様々なメディアを通じてSEに関する社会的認知度を向上させることにある。レポートビデオの英語版の制作とYouTubeなどでの公開を通じて、全世界を対象としたアピールを実施している。



Fig. 1 Balloons of 2013 challenge

### 3.2 VT

2013年8月のチャレンジでは、3基の直径6.75mと2基の直径4.5mの合計5基のヘリウムバルーンを用いて337kgの浮力を獲得、1,200mのロープとベルト1本ずつ、計2本のテザーを同時に上空から垂下した。テザーは以下のような仕様のもを使用した。

- ロープテザー：直径11mm、外層テクノーラ、内層ダイニーマ/ポリプロピレン混紡カーンマントル構造、引張り強度10.0kN、重さ85g/m
- ベルトテザー：幅35mm厚み2mm、テクノーラ製、引張り強度40kN以上(実測値)、重さ43g/m

2種類のテザーを使用する理由は、実証用SEに使用されるテザーの断面形状についての検討が進んでおらず、最適な形状が不明であるからである。なお、将来的にはテザーの形状が高度により異なる仕様も考えられる。

テクノーラは帝人(株)の開発したパラ型アラミド繊維で、分解開始温度は500°C、引張り強度3.4GPaで、クライマーのローラーが空転した際に発生する摩擦熱にある程度対抗できることと、入手性などから選択している。

参加したクライマーは事前に建築物から垂下したテザーなどによる試験走行を行っている場合が多いが、そのようなテザーと、チャレンジでのVTとは、以下のような違いがある。

- ・風や張力などの影響で発生する振動
- ・テザー自身の重量による高度による張力の差異
- ・高度によってことなる大気圧
- ・風や霧、湿度などの影響

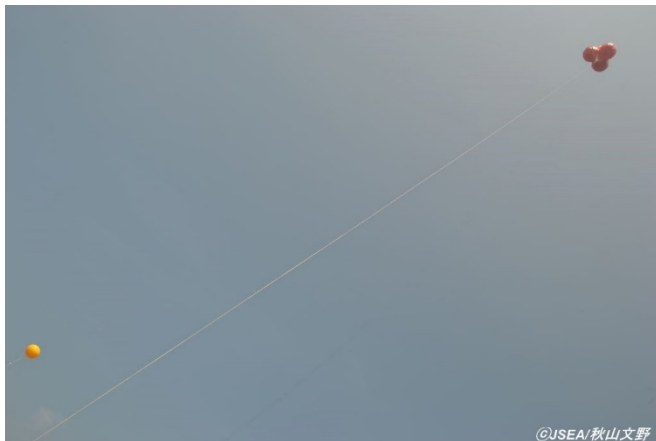


Fig. 2 High altitude VT

### 3.3 クライマー

2013年に参加した17台のクライマーは、まず高度200mから垂下された低高度VTで昇降機能の確認を行った。低高度VT上を20分間の規定時間内に複数回の昇降をトラブルなく行えた6台について、高度1,200mから垂下された高高度VTでの昇降を行った。なお、ここでいう高度とは垂直高度ではなくテザーに沿った昇降距離である。

VT上の昇降とは下端から上昇→停止→下降→下端にて

停止までを指し、以下のような成立条件を設定している。

- ・制御されていない落下などがない
- ・上端、下端に設置されたバンパーへの制御されていない衝突がない
- ・軽微なものを除く機体の破損が認められない
- ・テザーやバンパーを損傷させない
- ・下降後、安全に昇降を安全に停止する

バンパーとはテザー上で昇降できる範囲の下端と上端に設置された直径30cmのポリカーボネートとスタイロフォームで製作された車止めのことである。

低高度VTでの昇降機能の確認を行ったうえで高高度VTでの昇降に挑戦したクライマーは6台で、うち成功したクライマーは3台の昇降結果は以下のようなものである。

#### ○チーム奥澤

- ・重量6.7kg(ペイロード2.8kg)
- ・到達高度1,100m(ベルトテザー、テザー上昇距離)
- ・上昇速度6.0m/s、下降速度5.6m/s
- ・上昇、下降ともに安定して実施、上端バンパーへの接触を避けるために、高度1,100mの設定により昇降
- ・テザーに対する駆動機構として、初めて搬送用ベルトを採用した

#### ○日本大学理工学部 入江研

- ・重量9.4kg
- ・到達高度800m(ロープテザー、垂直高さ)
- ・上昇速度11.1m/s(瞬間16.9m/s)、下降速度1.8m/s
- ・上昇、下降ともに安定して実施

#### ○日本大学理工学部 青木研B

- ・重量11.5kg
- ・到達高度600m(ベルトテザー、垂直高さ)
- ・上昇速度2.7m/s(瞬間3.5m/s)、下降速度2.3m/s
- ・上昇、下降ともに安定して実施、ただし複数あるタイミングベルトのうち一つが破損、一部ネジ脱落



Fig. 3 Team Okuzawa's climber

到達高度にテザー上昇距離とあるものは、到達位置の外部からの観測によるもの、垂直高さとあるものは搭載した MPU の気圧計による計測結果である。

また、ペイロードとはクライマーの機能に一切関係ない資機材で、貨物として積み込まれた MPU やカメラを指す。

なお昇降不成立となった 3 台の状況は以下のようなものである。

- ・下降時にブレーキ機構が融解し、平均下降速度 10.7m/s で落下、下端バンパーに衝突、これを破損させた
- ・上昇時にローラーが破損し、平均下降速度 15.6m/s で落下し、下端バンパー接触前にねじれたテザーが噛み込んで停止
- ・上昇時にローラーが破損し、上空 400m 程度で停止、テザーを損傷(軽微な焦げ)させた

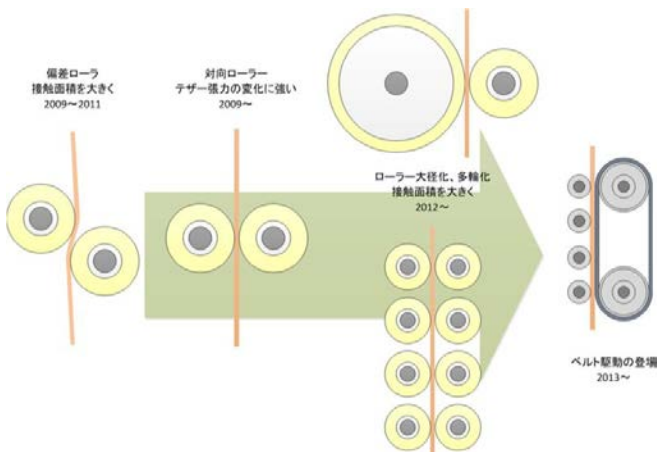


Fig. 4 Climber mechanism trend

そのほか特色ある機能を実現した例として、重量物の運搬に特化したクライマーの昇降が行われた。昇降距離は他のクライマーに比べると短いが、自重の 3 倍以上のペイロードを運搬した。

○The 4<sup>th</sup> Laboratory (ベルト)

- ・重量 19.2kg (ペイロード 65.0kg)
- ・到達高度 20m 程度 (ベルトテザー上昇距離)
- ・上昇速度 0.7m/s、下降速度 0.6m/s
- ・ペイロード 100kg にも挑戦したが、テザー張力不足により水平移動のみ



Fig. 5 4th Lab.'s climber with heavy payload

### 3.4 MPU

クライマーの昇降状態は、地上からの視認が可能な高度では外部からの観測による昇降の計測ができたが、1km を超える高度となるとこの方法は困難である。さらに姿勢制御や加速制御を行うクライマーが登場していることから、その詳細な挙動を計測/記録したいというニーズが高まってきた。そこで、クライマーの統一した挙動計測を行うことを目的に、新たにメジャーメント・ペイロードユニット (以下 MPU) と、解析ソフトウェアを製作した。MPU は慣性計測ユニット (IMU) と各種センサー、記録用の小型コンピュータを組み合わせたもので、筐体は ABS 樹脂、サイズは 1 辺 10cm の立方体で、microSD カードにデータが記録される。MPU で計測/記録が可能な項目は以下のようなものである。

- ・ 3 軸加速度
- ・ 3 軸角加速度
- ・ 空間位置 (GPS)
- ・ 方位 (電子コンパス)
- ・ 高度 (気圧)
- ・ クライマーの商品電力、電圧

なお、今回のチャレンジでは MPU による計測/記録自体が初めてとなるため、可能な範囲での観測による計測を併用した。



Fig. 6 Measurement Payload Unit

### 3.5 今後について

現在 2014 年 8 月に実施予定の次回のチャレンジの企画策定を進めているが、主な達成目標として以下を検討している。

- ・ より高い高度での実施
- ・ MP のより高いサンプリング周波数の向上
- ・ 高高度 VT 上での複数回連続昇降によるクライマー耐久性の試験
- ・ VT の挙動と環境データの獲得、関連性の解析
- ・ ストリーミングメディアによるネット中継/公開

以上、JSEA として検討と考察を継続しているロードマップの概要と、それに基づいた JSEA での取組みについて解説をした。

Shuichi Ohno

Japan Space Elevator Association

Shiba N build. 2F, Shiba 1-13-22, Minato-ku, Tokyo, 105-0014

#### Abstract

JSEA; Japan Space Elevator Association categorize own activities to realize Space Elevator in 5 pillars and base. Each categorized activities must have own roadmaps. We configure the development roadmap centered on demonstration experiment in category "Technology & Engineering". We are conducting Space Elevator challenge as an actual activity in line with development roadmap. Also this challenge contribute to gain social recognition of Space Elevator through various media.