



宇宙エレベーター構想

石川 洋二

宇宙エレベーターは未来の宇宙における新しい輸送交通システムである。アイデアは百年以上前から知られているが、今回、建設会社の視点から検討し、全長 96,000 km に及ぶ宇宙エレベーターの全体構成、主要構成施設などを設計した。カーボンナノチューブという新規の材料が適用できれば施工は可能である。安全性などの配慮が必要であり、技術開発の要素は多々あるが、将来の宇宙開発を一変する可能性があり、国際的な協力のもとに進めるべきプロジェクトである。

キーワード：宇宙、エレベーター、輸送、交通、カーボンナノチューブ、静止軌道

1. 宇宙エレベーターの概要

現在宇宙にモノや人を運ぶために、ロケットなどの化学推進に頼っている。宇宙エレベーターは、ロケットに代わる可能性のある、将来の宇宙における輸送・交通システムである。その利点はコストである。スペースシャトルでは輸送物質 1 kg あたり 170 万円かかるところが、わずか数万円になると試算されている。

宇宙エレベーターの構成要素の基本となるものは、軌道あるいは索道とみなされるケーブルである。このケーブルが地上から宇宙に延びている。このケーブルに沿って、「かご」あるいは乗り物が昇降する。この乗り物をここでは「クライマー」と名付けよう。このクライマーでモノや人を輸送する。ケーブルの要所には、それぞれの役割を持つ施設がそれぞれ適した高度に設置される。クライマーはこの施設を経て昇降するので、これらの施設は駅のようにみなすことができる。この宇宙エレベーター一式は地球の一点、おそらく赤道付近の低緯度地域、に固定されて地球の自転とともに回る。すなわち、地球の自転と同じ角速度で周回している。

このケーブルはなぜ地上から宇宙にまで伸びることが可能なのか？ ケーブルというのは柔構造を持つにもかかわらずなぜ軌道や索道の役割を果たすことができるのか？ ここではケーブルの長さを 96,000 km と設計している。生活にかかわりの深い気象衛星、通信衛星、放送衛星などの静止衛星が周回しているのは、高度約 36,000 km の静止軌道だ。ケーブルはこの静止軌道をはるかに超えた長さとなっている。実はこの長さ

のケーブルには主に地球の重力と遠心力が作用している。重力は地球から離れれば減少し、逆に遠心力は地球から離れれば増加する。地球と同じ角速度の場合、これが釣り合うのはちょうど静止軌道の高度、36,000 km となる。つまり、ケーブルは重力と遠心力とで両端から引っ張られてピンと張り、地球に一端を固定すれば直立するように見えるのだ。

このアイデアは百年以上前から存在していたが不可能な計画と思われていた。最強の鋼鉄でもこれだけの長いケーブルにかかる引張強度に耐えられなかったからだ。それが 1990 年代初頭になって、カーボンナノチューブ (CNT) という材料が発見されて一変した。鋼鉄の百倍もの引張強度を持つとされる CNT を用いて初めて建設の可能性が見えてきたのである。

本構想では、96,000 km の CNT 製のケーブル軌道

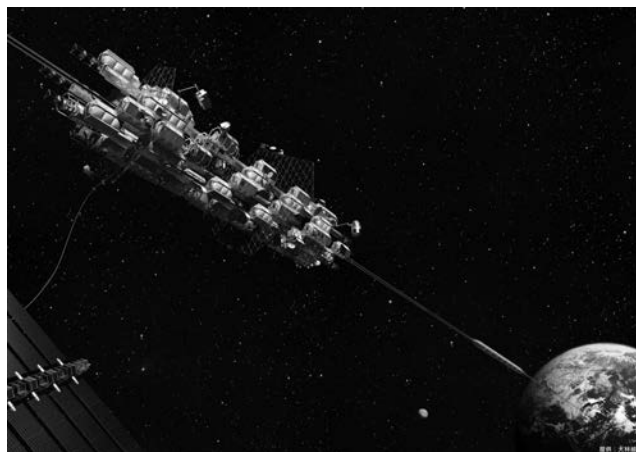


図-1 想像図 (クライマーがケーブルを昇り静止軌道ステーションに近づく)

をクライマーが昇降して、モノや人を宇宙へ運ぶ(図1)。ちょうど地上のエレベーターと同様なイメージであるが、ここで考えている宇宙エレベーターは、モノレールのように、軌道上を自力で移動する点で異なっている。その仕組みとしては、ケーブルを相対するローラー(車輪)で挟み込んで自走式で自身の重量を運搬するというものである。

さて、このように上方に運ばれるモノや人はどのように宇宙活動に参加させるのだろうか? モノとは人工衛星や探査機である。宇宙は無限ではあるが、通常の宇宙活動の場は数種類に限られる。大きく、地球を周回する軌道と太陽を周回する軌道に分けられる。地球を周回する軌道には、低軌道(高度およそ300~1,400 km)と静止軌道(高度36,000 km)がある。宇宙エレベーターを用いれば、これらのすべての軌道に人工衛星や探査機を投入することができる。静止軌道の高度36,000 kmにある静止軌道は、宇宙エレベーターと同じく1日で地球を1周している。したがって、静止軌道に人工衛星を投入するためには、宇宙エレベーターのクライマーで人工衛星を地上から静止軌道高度まで垂直に運び、そこから、投入すればよい。静止軌道よりも低い高度で人工衛星を投入すると地球方向に落ちていく楕円軌道に入る。投入する高度をあらかじめ計算しておけば、任意の低軌道に人工衛星を投入することができる。一方、静止軌道よりも高く、高度47,000 kmより高い高度から探査機を離すと地球の重力圏を抜けて太陽を回る軌道に入る。投入する高度をあらかじめ計算しておけば、任意の惑星—たとえば火星、木星、金星、水星など—に探査機を送ることができる。このような用途を考えてケーブルの長さを設計している。

2. 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だ。

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。

ケーブルを地上で固定する部分が、アース・ポート

だ。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、海に浮かぶ建造物だ。

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うえ、地球を眺めるにもいい高さだ。

そこから一気に上昇し、高度23,750 kmのところにあるのが低軌道(LEO)ゲート。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。宇宙エレベーターならではの逆転の発想で、ロケットによる打ち上げよりもはるかに低コストで人工衛星の低軌道投入をおこなうことができる。

そして、高度36,000 kmにあるのが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・実験施設が集まっている。旅行者にとっては最終目的地となる。

ここからは、翼を広げた巨大な宇宙太陽光発電パネルを間近に見ることができる。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である。季節や天候に左右されず、昼夜ともに日射のある静止軌道上は、地上よりも太陽光を効率的に利用することができる。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っている。

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。そのシンボルが高度57,000 kmの火星ゲートだ。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にあるのがカウンターウエイトだ。ケーブルに遠心力を生み出し、ピンと張るための錘となる。

カウンターウエイトは、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だ。遠い宇宙への進出は、未知の資源の発見だけでなく、宇宙の起源をたずねる壮大な旅ともなる。

3. 静止軌道ステーション

静止軌道では、地上との相違点として、無重力あるいは微小重力、真空、大きな温度差（日照面と日陰面）などの特殊環境がある。スペース・デブリ（地球の衛星軌道上にある使用済ロケットや人工衛星及びその破片）や宇宙線（宇宙空間を飛び交う原子核や素粒子）などの影響も考慮しなければならない。また、建設部材の輸送形態（ケーブルの搬送能力に対応した形状、数万キロメートルに及ぶ輸送距離など）も検討すべき要件となる。

これらの役割や機能を発揮するため、本格的な使用を開始する 2050 年における静止軌道ステーションには、何人のスタッフとどれくらいのスペースが必要なのだろうか。私たちは国際宇宙ステーションなどを参考に規模を検討し、滞在人数 50 人（勤務者 35 人、観光客 15 人）、必要とされる空間は 13,200 m³ と設定した。ちなみに国際宇宙ステーションの体積は 933 m³ だ（図—1 参照）。

静止軌道ステーションは 66 ユニットで構成され、その内訳は実験ユニット 28、居住ユニット 12、その他 26 となる。縦長のプロポーショナルを利用し、これらのユニットを明確なゾーニングで分けるのが、ステーションの特徴の一つだ

4. おわりに

以上述べた宇宙エレベーター建設構想は、世界でも唯一の包括的な計画であり、施工方法も含めて実現可能性を定量的に検討したものである。ただし、必要な技術レベルは、現在の技術が工期に見合うだろうスケ

ジュールで発展するものと想定している。つまり、種々の分野での積極的な技術開発が必要である。開発すべき技術としては、ケーブル材料としてのカーボンナノチューブの長繊維化・高強度化、クライマー駆動技術、エネルギー伝送技術、投入エネルギーの回生技術などがある。一方で、危機管理の面から、特にケーブルの安全性への配慮が施工段階、運用段階の両方において重要である。ケーブルには、隕石、種々の電磁波、スペース・デブリ、風、雷、テロなどの外乱が作用するので、その予防・予知・回避・対策などが必須である。また、社会学的な側面からは、このような巨大なプロジェクトの資金調達、実施体制などが問題となる。輸送のランニングコストが約百分の一となるとはいえ、本建設構想においては、建設インシャルコストは約 10 兆円と見積もられた。しかし、私たちの試算では一基の宇宙太陽光発電衛星を建設し運用すればインシャルコストは償還できる。二機以上の宇宙太陽光発電衛星を建設し、その他の宇宙ビジネスを安価に推進すれば十分に経済合理性のあるプロジェクトである。宇宙ビジネスを根本から変える可能性のある本プロジェクトは、国際的な協力のもとで実施されるのが理想ではあるが、日本がぜひイニシアティブをとっていききたいと思っている。

JICMA



【筆者紹介】
石川 洋二（いしかわ ようじ）
㈱大林組
エンジニアリング本部
上級主席技師