

地球と宇宙をつなぐ10万キロメートルのタワー

# 「宇宙エレベーター」建設構想

構想：大林組プロジェクトチーム 監修：青木義男

タワーはすごい。見上げていると人は元気になる、上に昇ると知らずに笑顔がこぼれる。東京スカイツリーの建設は、私たちにタワーのもつ潜在力を見直させてくれた。

本構想のテーマ「宇宙エレベーター」は、ロケットを使わずに宇宙へ昇っていく夢の移動手段として知られている。しかし、その歴史をたどると、まぎれもなくタワーでもある。それも地上に立つタワーではなく、宇宙空間から地球に向けて吊り下げる奇想天外かつ大胆不敵なタワーだ。そんなタワーがはたして実現できるのだろうか。ジュール・ベルヌの『月世界旅行』を例にだすまでもなく、絵空事に思える空想がしばしば人々の想像力を喚起し、科学技術の発展の母ともなる。大林組プロジェクトチームは今回、空想から科学への橋渡しをめざし、建設の視点から「宇宙エレベーター」という名のタワーがもつ未来への可能性を探求した。



# 宇宙エレベーターの基礎知識

宇宙エレベーターは、地球と宇宙のあいだをケーブルでつなぎ、クライマー（乗り物）で往復する未来の交通システムだ。その考え方は、SFファンや宇宙工学の研究者には数十年前から知られていた。しかし、かならずしも一般的ではない。そこでまず歴史と原理（仕組み）を簡単に紹介しておきたい。

## 「宇宙タワー」の系譜 ―構想の歴史―

タワーを見上げるとき多くの視線はタワーの天辺にとどまるが、その先をどんどん伸ばしていったら…と空想したことはないだろうか。

いまから一〇〇年以上前の一九世紀末、エツフェル塔をヒントに、塔の先を伸ばしていったら宇宙へ行けるのではないかと本気で考察した男がいた。旧ソ連の科学者で、うちに「宇宙工学の父」と呼ばれるコンスタンチン・ツイオルコフスキ―だ。

彼は論考『地球と宇宙に関する幻想』（一八九五年）のなかで、赤道上にタワーを建てて昇っていくと、次第に重力が減少して体重が軽く感じるようになり、やがて重力が消失する空間（高度約三万六〇〇〇キロメー

トル静止軌道\*）に到達することを指摘した。それは理論上のものだが、「宇宙タワー」とも呼ぶことができる人類が想像しえたものとも高いタワーだった。

ツイオルコフスキ―はやがてロケットの研究へと進み、大きな足跡を残したが、その一方で彼のタワーは忘れ去られたかにみえた。ところが二〇世紀半ば、まったく別な形でよみがえった。

一九六〇年、やはり旧ソ連のユーリ・アルツターノフ（レニングラード工科大学研究生）が、タワーを地上からではなく、静止軌道上から地球に向けて伸ばすアイデアを考案した。何もない宇宙空間からタワーを吊り下げる大胆な発想。これが今日の宇宙エレベーター構想を生む契機となった。

その後、アメリカのジェローム・ピアソンなど幾人かの研究者が、それぞれ独自に宇宙エレベーターの考え方を発展させたが、いずれも一部の人々の好奇心の対象でしかなかった。

宇宙エレベーターが広く知られるようになったのは、アメリカのSF作家アーサー・C・クラークの小説『楽園の泉』（一九七九年）に負うところが大きい。クラークはピアソンから聞いた話を参考に、宇宙エレベーターが存

上げると定位置に静止しているように見えることから静止軌道と呼ばれる。日本の気象衛星「ひまわり」をはじめ、世界各国の通信衛星などが設置されている。

## 宇宙エレベーターの仕組み ―若者の夢―

宇宙エレベーターのケーブルは、宇宙空間になぜ立っていられるのだろうか。じつは、その仕組みはとてもシンプルだ。

最初にアイデアを発表したアルツターノフは、一般の人向けに次のように説明している。

―先端に石を結び付けた紐を振り回すと、外へ飛び出そうとする力（遠心力）が、地球に落ちようとする力（重力）を上回り、紐はピンと張る。それと同様に、かりに石を結び付けた紐を地球の赤道上に固定し、宇宙へ向けてどんどん伸ばしていくことができたとしたら、どうなるだろうか。

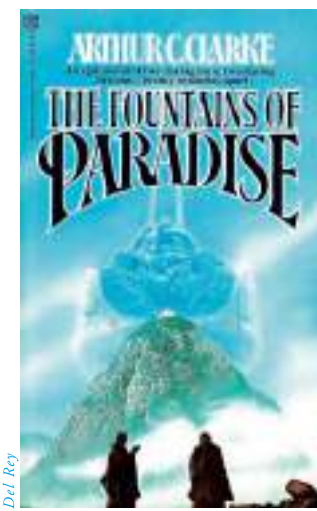
石と紐は地球と同期して回転するので、重力は距離の二乗に逆比例して減少し、反対に遠心力は距離の増加にともなうて大きくなっていく。（中略）石と紐の両方にかかる重力と遠心力を考慮すると、紐の長さが五万六千キロメートルあり、石も十分な重さがあれば、紐はピンと張った状態になるだろう。それが地球と宇宙をつなぐ「宇宙索道（ケーブルの道）」となる。

もちろん実際には、地球から宇宙へ向けて紐を伸ばそうとしても、重力があるのです

在する未来社会を描いた。その中で宇宙エレベーターを「宇宙塔（Orbital Tower）」と呼び、地球と静止軌道をむすぶ「管（Tubes）」ともいつている。クラークのイメージはタワーであり、その中をとおる鉄道のような交通機関でもあった。

しかし、タワーにせよエレベーターにせよ、実現するには決定的な限界があった。どのような材料でも、数万キロの長さにして吊り下げると自重によって切断してしまう。「楽園の泉」から近年まで、宇宙エレベーターのケーブルに適した材料がなかったために、構想は絵空事に過ぎないとされてきた。

その状況を一変させたのは、日本の物理学者・飯島澄男教授（現・名城大学）によって一九九一年に発見されたカーボンナノチューブ（CNT）だった。CN



アーサー・C・クラークの小説『楽園の泉』（1979年）

々に落ちてしまう。では、どうすればいいか。あらかじめ静止軌道上に人工衛星を打ち上げ、そこから地球に向けて紐を垂らしてくればいい。このとき同時に宇宙側にも紐を伸ばすことで、重力と遠心力のバランスをとることができる。

いまから思うと明快な原理だが、当時は米ソのロケット打ち上げ競争が始まってまもない時代だった（ポストーク一号による初の有人宇宙飛行は翌一九六一年のこと）。宇宙についての知識がまだ乏しい時代に、ロケットを使わずに宇宙へ行く方法を考案した。まして宇宙における建築のことなど誰も考えていないなか、アルツターノフの案は目からウロコの発想だった（クラークは「天才的な閃き」と激賞している）。

さらにアルツターノフは、このケーブルの道を伝って電車で宇宙へ行くという画期的なアイデアを提案した（これこそ宇宙エレベーターの原型だ）。その駆動エネルギーには太陽光発電を利用すること、さらに月をはじめほかの衛星、惑星にもケーブルの道を利用すれば燃料を使わずに行き来が可能になるとも書いている。

その後、多くの研究者が宇宙エレベーターに言及しているが、基本的な構想の大半は、この若者の夢から始まったのである。



カーボンナノチューブの構造模式図例 ©AIST

Tは炭素原子でできた軽量かつ高強度の素材で、引張強度は鋼鉄の二〇倍以上もあり、数万キロの長さになっても自重による切断が生じない可能性が出てきた。CNTの発見以降、宇宙エレベーターは科学技術の対象として、真摯な検討に値するものとなったのである。

ところで宇宙エレベーターは、ケーブルが地球と宇宙をつないだ時点で完成なのだろうか。そうではないことを、クラークが示唆している。スペース・オデッセイの最終章にあたる小説『三〇〇一年 終局への旅』のなかで、クラークは宇宙エレベーターの遙かな未来像を描いた。それによれば赤道上に四本のタワーが立ち、静止軌道上でそれらは互いにむすばれ、巨大なリングを形成している。タワーは都市でもあり、人々が住まい、交通システムもできている。

宇宙エレベーターは、一〇〇〇年後の新たな地球の姿へとつながる幕開けであり、壮大な夢への序曲なのである。

\*静止軌道 地球の赤道上空約三万六〇〇〇キロメートルに位置する円軌道。一周回するための周期は二四時間で地球の自転周期と一致し、この軌道上の衛星は地上から見

# 「宇宙エレベーター」建設構想

宇宙エレベーターとは、地球と宇宙をつなぐ一本のケーブルにすぎない。しかし、その一本から興味が広がっていく。なぜ宇宙エレベーターが必要なのか、ケーブルはどれくらいの高さがいいのか、どう建設するのか、風などの影響はどうか、どのように固定するのか、静止軌道にステーションをつくってみたい：建設面からの興味も果てしがなく、私たちは宇宙エレベーターの実現に向けて、さまざまな角度から検討をおこなった。

## なぜ宇宙エレベーターなのか ―構想の背景―

ロケットがあるのに、なぜ宇宙エレベーターを建設する必要があるのか。そう感じる人もいるだろう。

半世紀にわたる宇宙開発の進展によって、人類が宇宙へ進出する目的は多様化した。たとえば宇宙太陽光発電、月や火星の資源活用、宇宙観光旅行、無重力下での新素材や新薬の開発、生命の起源の探求など、私たちが宇宙へ行く目的は山ほどある。スペースコロニー計画(宇宙空間での都市建設)や、テラ・フォーミング計画(人間が居住するための月や火星などの改造)も、その一つにあげておこう。

社会の基盤となる重要な要素だ。そして宇宙観光旅行には、だれでも興味があるだろう。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みてみよう(P.36図参照)。

宇宙エレベーターのケーブルの長さは、九万六〇〇〇キロメートルに及ぶ。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。

ケーブルを地上で支える部分が、アース・ポードだ。宇宙エレベーターの発着点でもある。詳細は後述するが、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―といっても実際はかなりの高さだが―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。宇宙観光旅行の目玉の一つになるだろう。もしかするとクレークが描いたような、

一方、これらの未来計画は、宇宙構造物にも大きな変化をもたらした。かつては小規模な人工衛星が主眼だったが、現在は国際宇宙ステーション(ISS)や計画されている宇宙太陽光発電システムにみられるように、すでに大型化が進んでいる。いずれは宇宙工場や宇宙ホテルなど、恒常的に大規模な空間を必要とする計画も本格化するだろう。

利用目的の多様化と宇宙構造物の大型化、この二つを効率よく実現するためには、人や物資の経済的かつ大量の搬送が欠かせない。ロケットの場合、地球の重力圏を脱出するために膨大な量の燃料を使う。ロケット重量の九〇%は燃料であって、物資などの輸送量は小さく運搬効率が良くない。しかも、打ち上げ時の燃料の飛散が、環境汚染の一因ともなっている。

スペースシャトルはどうか。再利用できるものの、二回ごとの搬送能力は二五トン程度で、しかも莫大な費用(五〇〇億円程度)がかかる(ちなみに国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」は質量約二七トン。スペースシャトルで三回に分けて搬送した)。

それに対して宇宙エレベーターなら、これらの問題点をほとんどクリアできる可能性が大きい。低重力によって巨大な花を咲かせる蘭の植物園をふわふわと散歩できるかもしれない。そこから一気に上昇し、高度二万三七五〇キロメートルのところにあるのが低軌道衛星投入ゲート。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、低軌道衛星投入ゲートから落下させて高度三〇〇キロメートル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。

世界各国を相手に展開するビジネス拠点だ。そして、高度三万六〇〇〇キロメートル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。また、旅行者としては最終目的地となる。

さすがにこの高さになると地球は遙か彼方だが、そのかわり、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。そう、ここは地球の未来のエネルギーになる宇宙太陽光発電システムの重要拠点でもある。季節や天候に左右されず、昼夜とも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なっている。静止軌道ステーションを通過すると、その

がある。たとえば昇降には基本的に電気エネルギーを使うので、ロケット燃料はほとんど必要としない。スペースシャトルでは輸送物資一キログラム当たり一七〇万円程度かかるところが、わずか数万円になると試算されている。

宇宙エレベーターが単なる空想ではなく、宇宙関係者が真剣に検討するテーマとなっている理由も、そこにある。

また、ロケットやスペースシャトルは少数の者しか利用できない。対する宇宙エレベーターは、電車のように頻繁に行き来ができるので、だれでも行くことが可能になるだろう。宇宙はいまや「なぜ行くのか」ではなく、「どのような方法で行くのか」が問われている。宇宙エレベーターは、その答えの一つだ。

## 宇宙エレベーターができたら ―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

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五万七〇〇〇キロメートルの火星連絡ゲートだ。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。

最頂部の高度九万六〇〇〇キロメートルにあるのがカウンターウェイトだ。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。

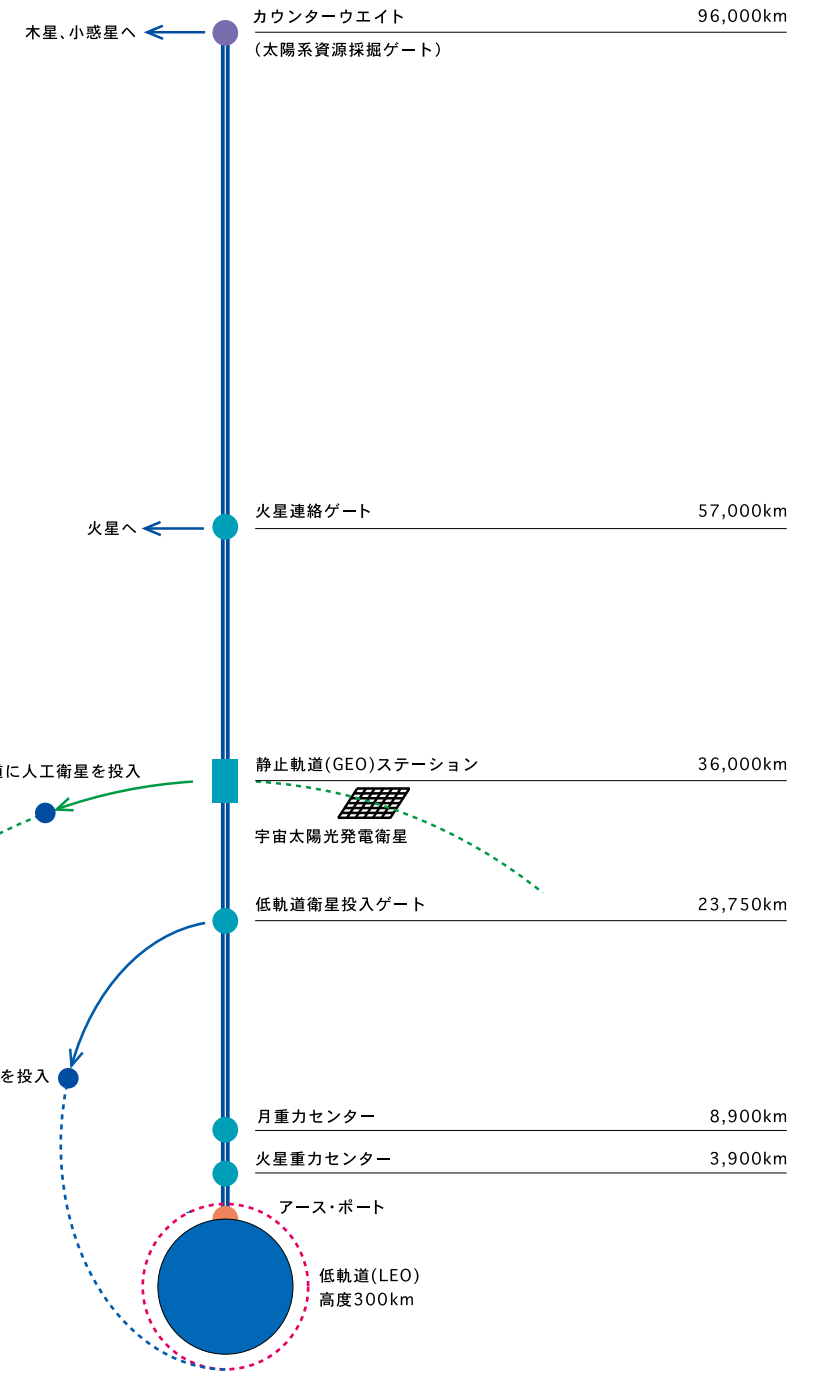
カウンターウェイトは、もともと高い場所に位置する太陽系資源探査のゲートでもあり、この高さになると小惑星帯や木星への飛行も可能だ。遠い宇宙への進出は、未知の資源の発見だけでなく、宇宙の起源をたずねる壮大な旅ともなるだろう。

## 九万六〇〇〇キロメートルのタワー ―高さの物理学―

宇宙エレベーターのケーブルの長さはなぜ、九万六〇〇〇キロメートルになるのだろうか。ケーブルには重力と遠心力の両方が作用するが、静止軌道の下側(地球側)のケーブ



# 全体構成図



宇宙エレベーター各施設利用計画(2050年)

施設	規模	施設の役割
太陽系資源採掘ゲート	12,500t 常時5人居住	木星・小惑星などの探査船発着 宇宙エレベーターのカウンターウエイト
火星連絡ゲート	100t 常時5人居住	火星船の発着 宇宙旅行の観光地
静止軌道ステーション	4,000t 常時50人居住 (内、旅行者15人)	静止衛星の投入・回収・修理 太陽光発電 高付加価値製品の研究・生産 宇宙採掘資源の処理
低軌道衛星投入ゲート	100t 常時5人居住	低軌道衛星の投入
月重力センター	100t 常時5人居住	月重力環境での実験・訓練 宇宙旅行の観光地
火星重力センター	100t 常時5人居住	火星重力環境での実験・訓練 宇宙旅行の観光地
アース・ポート	常時5,000人就業 (主要部)	宇宙エレベーター関連施設(詳細はp46以降) 観光地

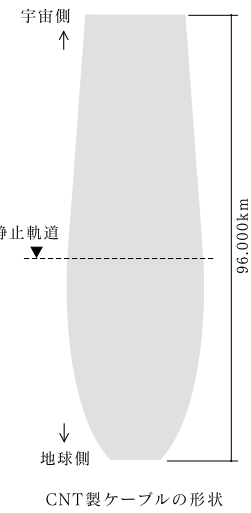
\*t表示は質量を示す。

ルには距離の二乗に反比例した重力が優勢なのに対し、上側(宇宙側)のケーブルには距離に比例した遠心力が優勢となる。そのためもしケーブルだけでバランスをとろうとすると、重力に対抗できる遠心力を得るために宇宙側が非常に長くなる。静止軌道と地球との距離は約三万六〇〇〇キロメートルと決まっているので、総延長は一四万四〇〇〇キロメートルも必要となる計算だ。これを調整するため、宇宙側のケーブル先端(最頂部)にはカウンターウエイトを置く。施工中や供用後のバランスからみてカウンターウエイトが効果的にはたらくためには、ケーブルの長さは五万三〇〇〇〜一〇万キロメートルの範囲が適切と考えられる。

ケーブルの長さを決定するには、太さ(断面積)の検討も必要だ。

ケーブルには両端から引つ張る力(引張力)がはたらく。全体が同じ太さだと、引張応力が最大になる静止軌道の部分に大きな負担がかかる。これを調整し、どの位置でも引張応力をできるだけ均一にするには、静止軌道部分を太くし、両端を細くする方法がよい。こうした形状をテーパーといい、太さの比をテーパー比という。

引張応力やテーパー比は、材料によって異なる。最大引張強度とテーパー比から、ケーブルに適切な材料を比較検討すると、橋梁



のケーブルなどに使用される鋼鉄、登山ロープや防弾チョッキなどに使用されるケブラー繊維などは、テーパー比が大きすぎて不適だが、カーボンナノチューブ(CNT)は適していることが分かる。

現在、CNTはまだ短いものしか作ることができていないが、いずれ十分な長さも可能となるだろう。さらに将来的には、CNTと同じ炭素原子からなるグラフェンも材料候補となるかもしれない。

次に、固有周期や月・太陽の潮汐力による振動の影響を検討してみよう。これらの振動から共振現象が起こると、ケーブルの揺れが非常に大きくなり制御が困難になる可能性がある。

振動の影響はケーブルの長さによって異なる。テーパー形状のCNT製ケーブルを前提として、さきほど提示した五万三〇〇〇〜一〇万キロメートルの範囲を検討すると、六万三〇〇〇〜六万八〇〇〇キロメートル、八万五〇〇〇〜一〇万キロメートルの範囲が共振しない長さとなる。また、ケーブルの最頂部にあるカウンターウエイトからの振動の影響は、二つのケースとも微少にとどまることがわかった。

さらに、宇宙エレベーターの最大の特徴の一つに関する検討を加えた。ケーブル上から衛星や宇宙船を放出すると、わずかなエネルギーを加えるだけで地球周回軌道や太陽周回軌道に投入できるという点だ。つまり「宇宙の行きたいところへ簡単にいくことができる」ためには、どの長さが適しているのか。

宇宙エレベーターができれば、人類はさらに遠い惑星への進出を望むだろう。そのためにはケーブルが長いほうが活用範囲も広がる。ケーブルの長さが一〇万キロメートル程度あると、先端から少しの速度を加えて放出すると木星まで到達できる。太陽系の惑星で最大の質量をもつ木星に接近できれば、スイングバイ航法(重力を利用して加速や軌道変更をおこなう)によってより遠い星へと旅立つことが可能だ。

これらの検討に加えて、施工時及び供用時に複数のクライマーが運行する際の制御の容易性などを考察した結果(詳細は次章参照)、最終的にケーブルの長さは九万六〇〇〇キロメートルが妥当だと判断した。

この高さは、地球と月の距離(約三万八千キロメートル)の四分の一に相当する。月は、もうすぐそこだ。



ケーブル質量(当初)	20t(1本当たり) <p>＊デルタ級ロケットのペイロード上限(20t)による</p>
ケーブルの長さ	96,000km(自重他荷重による伸長後)
ケーブルの形状(当初)	厚さ 4 μ m <p>幅 地上部＝18mm、静止軌道部＝48mm、</p> <p>カウンターウエイト部＝36mm</p> <p>テーパー比 地球側:静止軌道部:宇宙側＝1.0:2.6:2.0</p>
ケーブル引張強度	150GPa <p>＊現況における文献最大値を採用</p>
ケーブルの破断耐力(当初)	28.8kN(2,940kgf)
根元(静止軌道)部	＝厚さ(4 μ m)×幅(48mm)×引張強度(150GPa)
施工時安全率	◇破断 2倍と設定 <p>当初施工時許容荷重＝28.8/2＝14.4kN(1,470kgf)</p> <p>◇張力バランス 宇宙側張力:地球側張力＝1.1:1</p> <p>＊地球側に落ちてこないよう10%余裕をもたせる</p> <p>＊張力＝固定荷重(ケーブル、ウエイト)＋移動荷重(クライマー)</p>
カウンターウエイト質量(当初)	18.4t(ケーブル1本当たり) <p>＊上記全てのケーブル条件によるバランス計算結果による(p44図3、図4)</p>
ケーブルとウエイトの質量比	ケーブル:ウエイト＝20.0t:18.4t＝1:0.920 <p>＊施工中は常に、この質量比で構成</p>
固定荷重による張力(当初)	◇地球側への張力(重力－遠心力)＝7.01kN(715kgf)
	◇宇宙側への張力(遠心力－重力)＝13.24kN(1,351kgf)
	<14.4kN(当初施工時許容荷重)
	＊静止軌道部における荷重バランス計算結果による(p44図4)
1台目クライマー質量・構成	880kg(ケーブル1本当たり440kg) <p>＊上記の全条件にもとづくシミュレーション結果による(p44図4)</p> <p>構成 補強ケーブル＝458kg</p> <p>クライマー本体(カウンターウエイト)＝422kg</p> <p>(質量比＝1:0.920)</p>
補強割増比率	1.15%
(クライマー質量増加率)	＝1回目の補強ケーブル質量(229kg)/当初ケーブル質量(20t)
複数クライマーによる地球側への張力(当初、1～4台目)	4.95kN(505kgf)(ケーブル1本当たり) <p>＊クライマー発進間隔＝12,000km</p> <p>＊静止軌道部における荷重バランス計算結果(p44図4)により、4台目発進時に最大</p>
12,000km間隔運行による荷重割増率	1.15倍
	＝1～4台クライマー荷重(505kgf)/1台目クライマー荷重(404kgf)
地球側への最大張力(当初)	11.96kN(1,220kgf)＝7.01(固定荷重)＋4.95(移動荷重)
	<12.04kN＝13.24(宇宙側張力)/1.1(余力10%)
最終能力	◇最終クライマー質量＝100t(ペイロード70t)
	◇最終クライマーによる地球側への張力＝1,128kN(115tf)
	12,000km間隔運行による荷重の割増1.15倍を考慮
	◇固定施設荷重計＝559kN(57tf)＝①＋②＋③
	①火星重力センター(質量100t):H3,900km 荷重＝38tf
	②月重力センター(質量100t):H8,900km 荷重＝16tf
	③低軌道衛星投入ゲート(質量100t):H23,750km 荷重＝3tf
	④火星連絡ゲート(質量100t):H57,000km 荷重＝－2.5tf(無視)
	◇安全率
	1本当たりのケーブル強度の最終安全率は2、遠心力余力10%を維持。2本のケーブルで1本分の荷重を負担(一方のケーブルが切れても安全率は2)
	＊自重で強度の25%を使っているためこの程度が妥当と判断
	◇ケーブル1本当たりの地球側への許容載荷荷重＝1,687kN(172tf)
	クライマー荷重(1,128kN)＋固定施設荷重(559kN)
	◇ケーブル形状
	厚さ＝1.38mm 幅＝当初通り
クライマー補強回数	510回 <p>＊地球側への張力は、割増比率1.15%で補強しながら当初の341倍へ</p> <p>(1,687kN/4.95kN＝341)</p> <p>341＝1.0115<sup>510</sup>より</p>
ケーブル伸び調整バラスト水必要質量	376t(ケーブル2本に対して)
	(13.24kN－7.01kN)×341倍＝559kN/2本＝1,845kN→188t/本

現在、世界各国による月の資源探査が本格化しつつある。私たちは宇宙エレベーターの完成時期を二〇五〇年としたが、その頃には月の上でも宇宙エレベーターの建設が始まっているかもしれない。

参考:Edwards, B. C., and Westling, E. A., The Space Elevator, A revolutionary Earth-to-space transportation system, Spagoe Inc., San Francisco, 2002.
 Krishi, V., Design of Space Elevator, A Thesis in Mechanical Engineering, Texas Tech University, December 2008.

## ケーブルを建設するには―施工計画―

宇宙エレベーターのケーブルは、何も無い宇宙空間に建設する。

その方法は、アルツターノフが最初に提案したように、静止軌道上に打ち上げた衛星や宇宙船から地球側と宇宙側の両方にケーブルを伸ばしていくやり方が、原理としてはわかりやすい。

しかし実際の建設方法は、研究者の一人で『宇宙旅行はエレベーターで』の著者ブラッドリー・C・エドワーズによる案のほうが合理的だ。エドワーズ案を簡単に紹介すると、まず巻いた状態のケーブルとその他材料をロケットで低軌道(高度約三〇〇キロメートル)まで打ち上げる。そこで宇宙船を組み立て、ケーブルを積載して静止軌道まで上昇させる。宇宙船が静止軌道に着いたら、ケーブルを地球に向けて繰り出しながら、宇宙

船はさらに上昇を続ける。ケーブルが地上に届いた時点で、宇宙船は最頂部に至り、そのままカウンターウエイトとなる。

この方法だと宇宙船を、ケーブルを繰り出す母艦と遠心力を生み出すカウンターウエイトとして利用することが可能となる上、ケーブルの送り出しが一方向で済むなどの利点がある。

しかし一方で、実際に施工する観点からエドワーズ案を見直すと、工程全体に不明の部分が多くあり、検討を要することが多岐にわたる。そこで私たちはエドワーズ案をベースにしつつ、実際にケーブルを施工するための詳細な工学的検証をおこなうこととした。施工時及び供用時に必要とされるケーブルの強度やバランスについて、数値の裏付けに基づく検討を加えることで合理的なケーブルの形状や長さなどを設定し、もつとも妥当と思われる実現性の高い施工計画をめざした。

### 《施工のポイント》

ここでは、施工計画において特に重視したポイントと検討の概要を記しておきたい。

施工の前提とした数値及び最終的に得られた数値については p 39の表を、施工手順の詳細については、p 40の図を参照していただきたい。

①高さによる荷重変化

地上に建設するタワーでは、荷重は「重力」によつて鉛直下向きに、どこの高さでもほぼ一定とみなせる。これに地震や風などの外力も加わる。これらの力を合理的に処理する構造計画をおこない、それに沿った施工手順を検討し、上部を支える構造体を下から順に積み上げていくことが基本となる。

それに対して宇宙エレベーターの施工は、特殊かつ複雑だ。宇宙エレベーターのケーブルなどの固定荷重と補強時のクライマーなどの移動荷重は、その位置が高くなるにつれ、重力よりも遠心力が優位となり、値も向きも変化する。しかも荷重が均衡する中心部分分は、地上から三万六〇〇〇キロメートルの高さにあり、補強用クライマーはケーブルの末端にぶら下がり、地球上での構造的合理性に反して(重力とは逆向きに)補強していかなければならない。さらに、地球規模のさまざまな外力にも配慮が必要となる。

そのため施工時及び供用時の安全性や実現性、合理性の検討には、施工手順に沿ってケーブル各部にかかる「張力の変化」を、数値的に正確に把握するように努めた。

②施工時の安全率

ケーブル施工時の安全性を検討するには、ケーブルの強度はもちろんだが、重力と遠心力のバランスも考慮する必要がある。

施工中の強度の安全率を二(ケーブル引張強度が、作用する荷重の二倍以上となる安全性)と想定し、最初に地球に向けて繰り出すケーブルの形状を決定した。その際に

複数のクライマーの荷重(移動により変化する荷重)の比率にも配慮し、安全率の確保を図った。

また、施工中の張力バランスを考慮し、

ケーブルの地球側への落下を防ぐため、常に

宇宙側のケーブルに多めの張力をかける遠心力余力として、一〇%の優位性をもたせた。

この余力は、地表面付近の風の影響やコリオリ力など地球側にはたらく外力への抵抗にも利用される。

ただし、ケーブルの長さ方向の接合技術については将来の技術開発を待つものとし、

ここでは全長にわたりシームレスな一本のケーブルを繰り返し張り合わせることを前提としている。

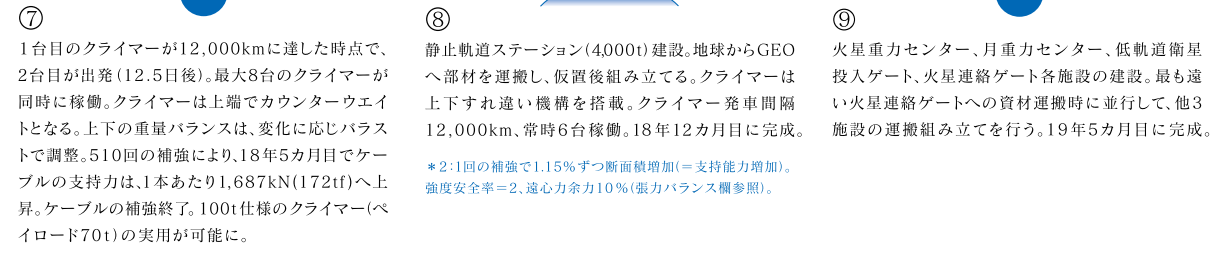
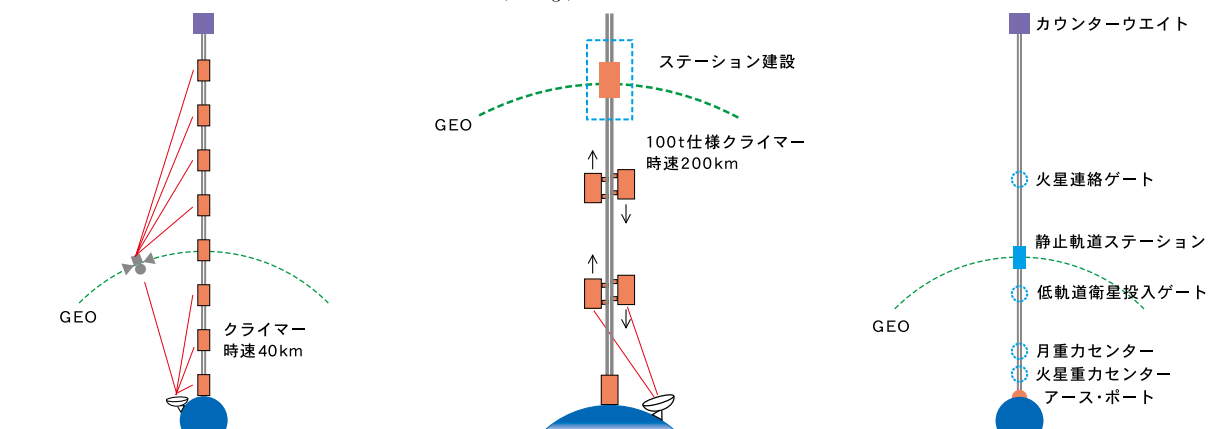
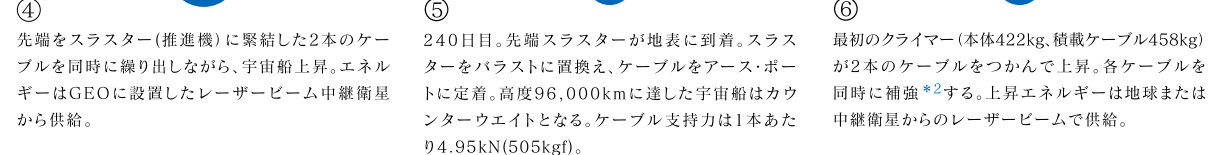
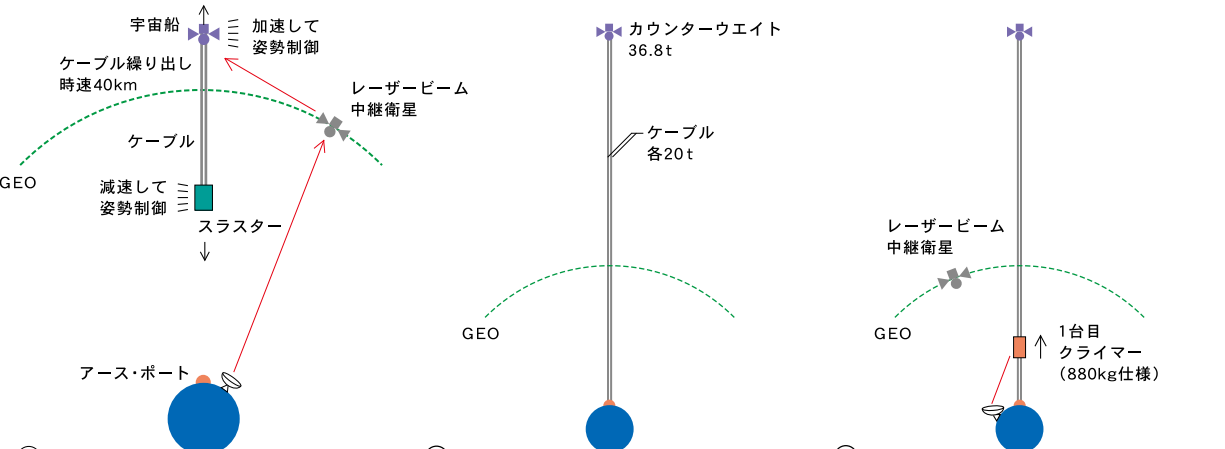
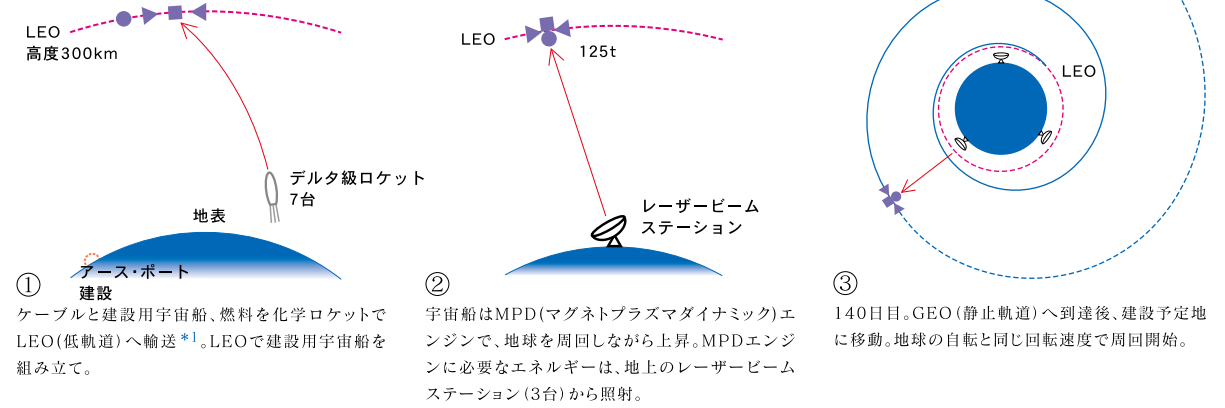
③施工時のケーブルの伸び

ケーブルは非常に長い構造物のため、施工時の荷重による伸びの変化が大きく(とくに地球側が課題で、最初に垂らしたケーブルに一台目のクライマーを取り付けると二〇〇



# 宇宙エレベーター施工ステップ

- \*1:ペイロード(積載重量)①～⑤計125t
- ①(ケーブル(20t)+ウエイト(=建設用宇宙船本体、18.4t)×2セット=76.8t
- ②地球側先端スラスター(625kg)×2セット=1.25t
- ③ペイロード①～⑤の合計をLEOからGEOへ上昇させる燃料
- ④建設用宇宙船を上昇させるスラスター燃料
- ⑤ケーブルを地球側へ降下させるスラスター燃料



キロメートル以上もケーブルが伸びる)、施工においては多大な障害となる。また、ケーブル完成後もクライマーの運行にともない、ケーブルには伸びの変化が生じる。これらの課題を解消し、施工時から供用時にわたってケーブルの伸びを一定にするため、プレテンション(宇宙側にかかる余分な張力に対し、地球側にもあらかじめ張力をかけてバランスをとる)をおこなう。その際、移動荷重の変化に応じて制御できるように、地球側末端のアース・ポットにバラスト調整システムを導入した。

④施工速度

最初のケーブルが地上に固定された後、クライマーが補強ケーブルを張り付けながら上昇し、ケーブルの支持能力を徐々に(一回につき一・二五%ずつ)高める補強工事をおこなうが、その回数は延べ五二〇回に及ぶ。それだけにクライマーの施工速度の設定は、全体の工期に大きな影響を及ぼす重要な課題だ。

エドワーズ案ではクライマーの速度を時速二〇〇キロメートルと想定しているが、当初は厚さ一ミクロン(一ミリの一〇〇〇分の一)のケーブルを精度よく貼り付けながら上昇することを考慮し、より現実的な速度としてここでは五分の一の時速四〇キロメートルと想定した。ちなみに補強工事によって、ケー

ルの支持能力は当初の五〇五キログラムから最終的には一七二トンにまで向上する。

⑤ラップ施工

全体工程を短縮するには、ラップ施工(二つ以上の工程をオーバーラップさせて進める方法)が不可欠となる。ケーブル補強工事では、先に出発したクライマーにかかる重力の影響がゼロに近づいた時点で、次のクライマーを発進させるものとし、そのための合理的な間隔の検討をおこなった。その結果、静止軌道までを三等分した一万二〇〇〇キロメートルごとにクライマーを発進させる方法を採用し、静止軌道の両側(宇宙側と地球側)ともに適用した。これに対応してケーブル全体の長さも、一万二〇〇〇キロメートルの倍数となる九万六〇〇〇キロメートルとした。

また、等間隔にクライマーが発進することで、ケーブルの伸びとバランスの安定を図るアース・ポットでのバラスト調整の制御系もシンプルにすることができている。

さらに安全率についても、八台のクライマーが並行して施工する状態をシミュレーションした結果、十分に確保できることを確認した。

ケーブルは、重力と遠心力とがバランスした状態でまっすぐにピンと張っているのが理想的だ。しかし実際には、ケーブルにはこれら二つの力を含むさまざまな力が作用し、揺れ動き、伸縮もする。カーボンナノチューブ製のケーブルは、宇宙エレベーターの完成時でも想定した厚さは一・四ミリメートル程度に過ぎない。紙のように薄くて軽いケーブルが、いったいどのような動きをするのか。これはなかなか厄介で未だに完全には解かれていない難問だが、同時に魅力的なテーマでもある。

ケーブルには、検討すべき次のような力が作用する。

- ・引力⇨ケーブルには地球の引力に起因する重力がはたらく。さらに、月や太陽の引力(⇨潮汐力)も作用する。これらは普段はあまり意識されないが、潮の満ち引きにみられるように持続的で雄大な力だ。
- ・地球を周回することにより作用する力⇨ケーブルには、地球の周りを一日に一回の割合で公転することで遠心力がはたらく。さらに公転すると同時に同じ周期で自転もしている。(月と同じように地球に対する向きがいつも同じである。)クライマーはこうした回転運動をするケーブルを伝って上昇するため、クライマーからケーブルを押す力(⇨コリオリ力、上昇時は西向き、下降時は東向き)が作用する。

## ケーブルはどう揺れ動くのか —力学的作用—



ケーブルの運動方程式(地球中心を原点、地軸を回転軸とする座標系)

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = -2m_i \boldsymbol{\Omega} \times \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} + m_i (\boldsymbol{\Omega} \cdot \boldsymbol{\Omega}) \mathbf{r}_i - m_i (\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{r}_i) \boldsymbol{\Omega} \quad \text{【自転の影響】}$$

質点*i*の運動量変化率 コリオリカ

遠心力

$$-GM_e m_i \frac{\mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i|^3} - GM_{moon} m_i \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{moon}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{moon}|^3} - GM_{sun} m_i \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{sun}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{sun}|^3} \quad \text{【引力】}$$

地球の引力

月の引力

太陽の引力

$$-k_{i,i+1} \frac{\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i|} \Delta |\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i| + k_{i,i-1} \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1}|} \Delta |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1}| \quad \text{【伸び縮み弾性力】}$$

$$-\rho_{air} C_D A \left| \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} - \mathbf{U}_{air} \right| \left( \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} - \mathbf{U}_{air} \right) \quad \text{【風の空気抵抗力】}$$

$$+ \mathbf{F}_{other} \quad \text{【クライマーからの荷重】}$$

×:ベクトルの外積  
 ∙:ベクトルの内積  
 $m_i$ :質点*i*の質量  
 $t$ :時間  
 $dt$ :時間微分  
 $G$ :万有引力定数  
 $M_e, M_{moon}, M_{sun}$ :地球、月、太陽の質量  
 $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_{moon}, \mathbf{r}_{sun}$ :質点*i*、月、太陽の位置ベクトル

$\boldsymbol{\Omega}$ :地球の自転角速度ベクトル  
 $C_D$ :風の抗力係数  
 $A$ :風方向に対するケーブルの投影面積  
 $\rho_{air}$ :空気密度  
 $\mathbf{U}_{air}$ :風速ベクトル  
 $\Delta |\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i|$ :質点*i, i+1*間のばねの伸び量  
 $k_{i,i+1}$ :同 ばね定数

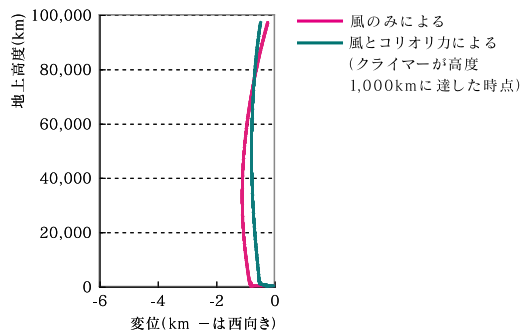
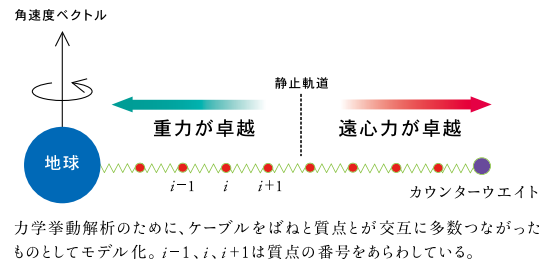


図2 風とコリオリカによる変位

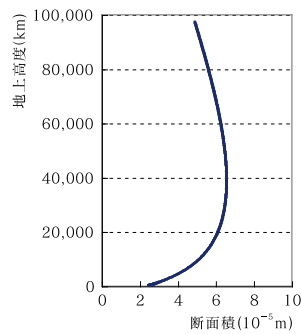


図1 完成時の断面積分布(ケーブル1本分)

• 弾性力∥ケーブル材料には弾力性があるため、伸縮や曲げ、ねじれ、それらにともなう振動、といった現象を起こす弾性力がはたらく。弾性力によるこれらの変形運動には回転に起因するコリオリ力も関与する。

• 風の空気抵抗力∥ケーブルのうち大気圏内にある部分では、風による空気抵抗の影響を無視できない。赤道域は地上から高度十数キロメートル程度の高さまで、地球の自転の影響で年間を通して東よりの風が卓越して吹いている。そのため、風の作用によってケーブルは主に西向きに押される。

• クライマーからの力∥クライマーが昇るときには、その自重や摩擦によってケーブルを下方に引っ張る力(走行抵抗力)がはたらく。走行抵抗力はクライマーが移動する間、大気圏内を除いて大きくは変化しないが、自重による作用は地球から離れるにつれ次第に小さくなる。クライマーがケーブルにコリオリ力もたらすことは先に述べたとおりである。

• 温度差∥地球と同様に、ケーブルにも日射が当たる時間帯と陰になる時間帯が生じ、温度変化によるケーブルの伸縮と熱疲労の影響を受ける可能性がある。

これらの作用によって、ケーブルはどのように揺れ動くのか。はたして制御が可能なのか。それを知るために、コンピュータによる数値シミュレーション解析をおこなった(運動方程式参照)。

ここでは、その結果の概要を紹介したい。さらに詳しくは「ケーブルの挙動の検証」(p.44)を参照していただきたい。

まず最も重要な点は、これらの作用に対してカーボンナノチューブ(CNT)製のケーブルが切断しないだけの十分な強度をもっているかどうかだ。

CNTの引張強度は、現状では文献値で最大一五〇ギガパスカル(※)とされている。ケーブルをその全長にわたって一様の太さにはせず、重力の作用が大きくなる地球に近い側や遠心力が大きくなる宇宙側を、中間部分(静止軌道付近)と比べて細くする、いわゆるテーパ状(図1)にすると、ケーブルの内部応力は全長をつうじて均等に近い数値となる。二様な太さの場合と比較し、内部応力の最大値を二〇パーセント程度低下させることができ、ケーブルの引張強度の四分の一程度となるので、安全率を考慮しても十分な強度といえる。今後、CNTの引張強度はさらに向上すると推定されているので、安全性はより高まるものと判断される。

風の空気抵抗力は、ケーブルへの力学的作用の中でも興味深いもののひとつだ。風からの作用がとりわけ大きいのは、地表から

上昇中はケーブルが下方へ引き伸ばされるため、ケーブルの張力が足りないとクライマーは一定区間、ケーブルを引っ張るだけで高度を増すことができないことも生じ得る。

こうした事態を回避するには、p.41に記述した方法(ケーブルへのプレテンションと、アース・ポットでのバラスト調整)によるケーブルの張力バランスの調整が必要となる。

風やコリオリ力の影響を考慮したときの、ケーブルの西側への変位を示した(図2)。クライマーの荷重でケーブルが下向きの伸びの運動をし、そのときコリオリ力が、風による変位をやや回復させる働きをしている様子もみられる。変位の最大値は、ケーブルの全長からすると一パーセントに満たない小ささである。クライマーに、例えば、ケーブルの変位を回復するような向きの推進機能を持たせるなどの方法で、変位の蓄積は回避できるであろう。

解析結果から総合的にみると、ケーブルの強度、地上部におけるケーブルの固定や制御、クライマーの上昇などの基本的な課題は、いずれもクリアできるものと判断した。

\*ギガパスカル(GPa)はパスカルの単位で強度などにも適用される。一ギガパスカルは一パスカルの一〇の九乗倍。ちなみに一気圧は一〇の五乗パスカル。



ケーブルの挙動の検証  
—いくつかの点をめぐって—

ケーブルの断面は長方形や円形などが考えられるが、いずれにしても材料の弾力性によって伸縮に加え曲げやねじれの変形が起こる。しかし、これら三種類の変形全てを考慮すると、運動方程式の数学的扱いが非常に複雑になる。一方で、伸縮変形を考慮するだけでもケーブルの運動の重要な点は捉えられる。運動方程式(式(43))は、こうした考え方にしたがって求められた。ケーブル全体を長手方向に多くの区画に細分割し、個々の区画毎にそれと同じ大きさの質量と弾力性(ばね定数)ケーブル素材の縦弾性係数・ヤング率と断面積の積に比例し、長さに反比例する)を持つ質点とばねとが、交互に連続してつながったもので近似的に置き換えられるとして、導かれたものである。

弾力性によりケーブルには、振動(縦振動・横振動)や伸縮・たわみなどの変形が生じる。このうち振動については、月や太陽の潮汐力による共振を回避するための長さの選定としてP37に述べられており、また、その他振動に関する問題は既往の研究にみられる。そのため、ここでは、宇宙エレベーターの理解を深めるための基礎的事項や、既往の文献であまり触れ

られていない点について紹介する。まず、ケーブルの形状として望ましいテーパー型について述べる。これは、内部応力を一様に近づけることが、安全率の向上に加え材料の効率的な使用にもつながることからきている。運動方程式のうち地球の重力と遠心力とを取り出し、両者の差が張力(ケーブル断面積 $S$ ×内部引張応力)の変化率に等しいという力の釣り合い状態を考え、これに内部引張応力一定の条件を課すと、ケーブル断面 $S$ (太さ)の分布が、地球(質量 $M_e$ 、半径 $R_e$ )の中心からの距離 $r$ の指数関数として、理論的に

$$S(r) = S(R_e) \exp\left[\frac{\rho}{\sigma} \cdot (GM_e \times \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_e}\right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v^2}{R_e^2} - R_e^2 \Omega^2\right))\right]$$

のように求まる。ここで、 $G$ は万有引力定数、 $\Omega$ は自転角速度、 $\rho$ はケーブル材料の密度である。テーパー比は地上高度約三万六〇〇〇キロメートルの静止軌道で最大となり、同約一四万キロメートルのところまで再び1に戻る(図3)。ただ、このような長さのケーブルは建設上の利点がないため、宇宙側の三分の一程度の部分はカウンタージェットで置き換えられる。

ケーブルは自重や遠心力、プレテンションによって常に張力がかかって幾分か引き伸ばされた状態にある。ケーブルの断面積分布(式(43)式(1))は、理論的にケーブルは上から下に向かって容易に伸び降りてくる。そのため、アース・ポートでのケーブルの伸びが緩和され、その結果張力の増加が抑えられるのである。

風の影響は風に対面するケーブルの投影面積に比例するが、断面積を保持した状態での受風面積の工夫でたわみ(図5実線)と張力(図6実線)は大きく軽減できる。また、建設初期の段階は受風面積のわりにケーブルが軽いので風の影響が誇張されるものの、厚みを増した完成時の状況ではさらに抑えられる。

施工中のコリオリ力の影響についてみる。先頭のクライマーが静止軌道を超えた四万七〇〇〇キロメートル付近に達し、五台目のクライマーが上昇開始しようとする時点で、ケーブルの変位を参照すると、ケーブル全体が西向きにシフトしていることがわかる(図7)。変位は先端で三〇〇キロメートル程度であるが、これはケーブルの全長からすると〇・三パーセントに過ぎない。コリオリ力は、クライマーの昇降に伴う地軸の周りの角運動量の保存性によるもので、クライマーへの推力の付与などで調整を図る必要があるが、コリオリ力による加速度は時速二〇〇キロメートルでの走行時でも、一時間かけて時速一〇〇キロメートルに達する程度

の大きさとなる。風に押されても

解を初期条件としてプレテンションを課された状態での断面積分布を数値計算的に求めたものである。伸び変形をすると、伸びによる変位の分だけ重力と遠心力も合わせて変化するため、数値計算的手法によって求める必要があった。

宇宙エレベーターの施工時には、一万二〇〇〇キロメートルの間隔で複数のクライマーがケーブルを上昇する。クライマーにかかる重力と遠心力はクライマーが高くなるにつれて連続的に変化してゆく。その様子は張力が最大となる静止軌道位置における、ケーブル、クライマー、及びカウンタージェットの重力・遠心力の地球側と宇宙側それぞれの総和の時間的な変化に見ることが出来る(図4)。

図4にある赤いぎざぎざの線は、クライマーが上昇を開始した瞬間にその重量が増えるという力による張力が増えるといったサイクルを表現している。赤と緑の二つの線の差はケーブル全体を意味する宇宙側に引きずるうとする力となるが、この力にアース・ポートのバラスト水の重量で対抗し、全体として安定性が得られるようになる。図4は初回のケーブル質量二〇トン、カウンタージェット一八・四トン、クライマー質量四四〇キログ

ゆうつくりとしたもので、制御は困難ではないと考えられる。完成後についても同様である。

最後に完成時について触れる。完成時にはケーブルに沿って高度の低いほうから順に、火星重力センター(高度三九〇〇キロメートル)、月重力センター(高度八九〇〇キロメートル)、低軌道衛星投入ゲート(高度二万三七五〇キロメートル)、火星連絡ゲート(高度五万七〇〇〇キロメートル)、および最高部のカウンタージェット(高度九万六〇〇〇キロメートル)がケーブルに結合された状態になる。

このときのケーブル張力(図8)と内部応力(図9)をみると、これらの施設がある高度、特に地球の重力の影響が大きい火星および月重力センターのところではグラフが不連続になっている。ただし、部分的なケーブルの補強によって質量分布を調整することで、滑らかな張力分布にできる。地上での張力の大きさはカウンタージェットによるプレテンションの大きさにあたるが、一〇〇トン級のクライマー(荷重約一〇〇〇キロニュートン)に耐える仕様であることが確認できる。内部応力は全体的に想定している材料強度一五〇ギガパスカルを大きく下回っており、十分な安全率でのクライマーの走行が期待できる。

(大塚清敏)

表記のない場合はケーブル1本での解析値を示す

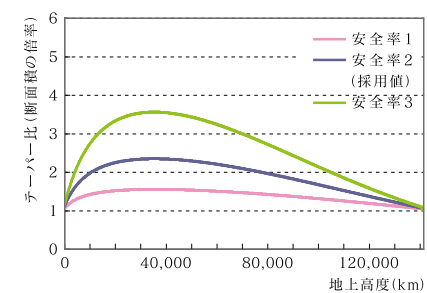


図3 内部引張応力一定時のテーパー比 (材料引張強度150GPa)

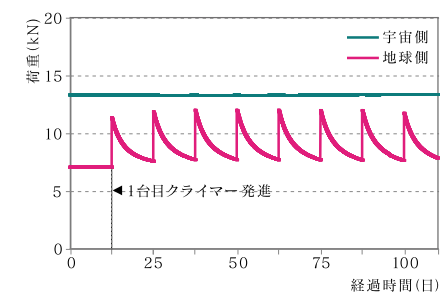


図4 静止軌道部における荷重バランス

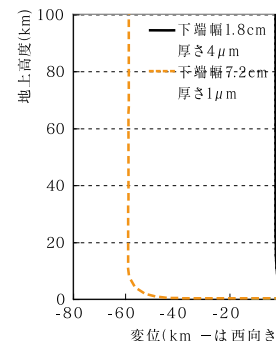


図5 建設初期の風による変位

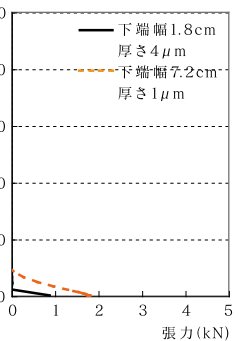


図6 建設初期の風による張力変化 (ケーブル2本分)

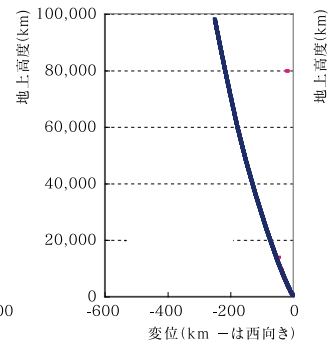


図7 初期クライマー4台による変位 (1台目クライマー47,000km、コリオリ力考慮)

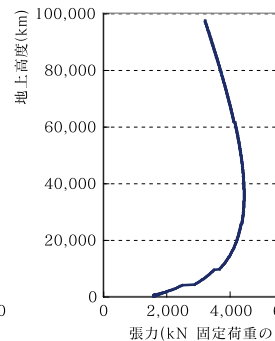


図8 完成時の張力

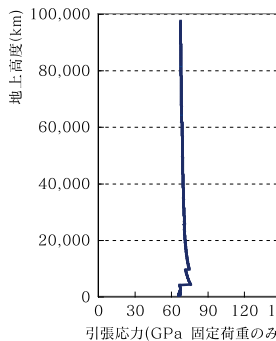


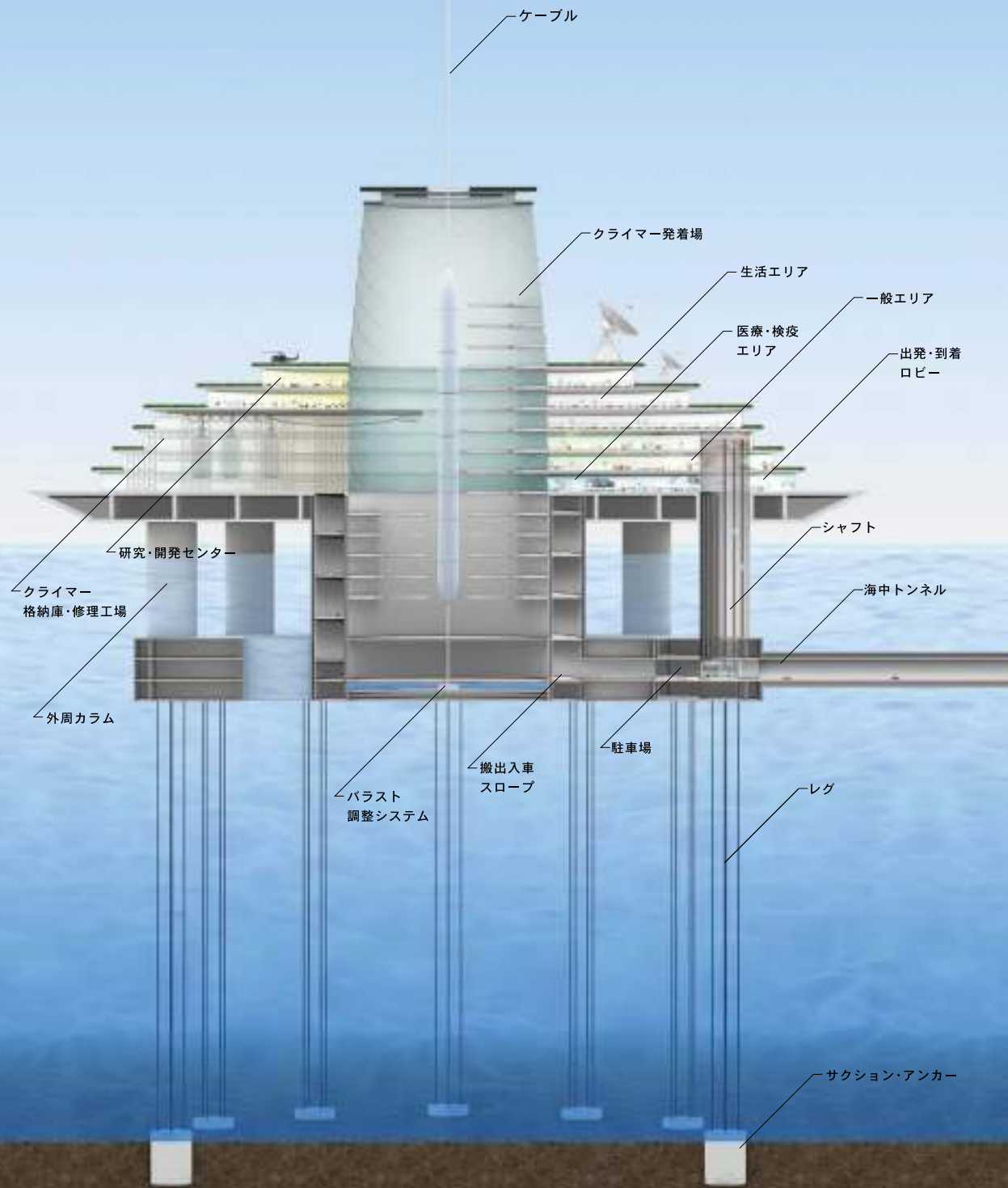
図9 完成時の内部引張応力

# 海に浮かぶ基地 「アース・ポート」

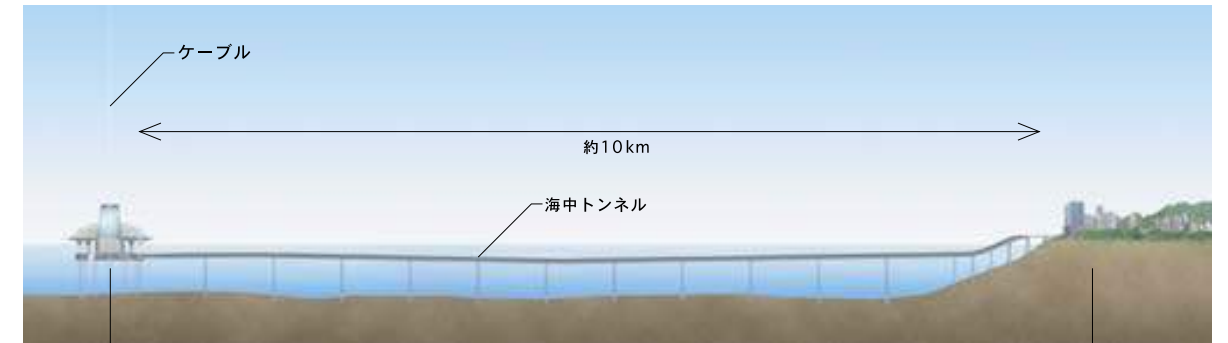
宇宙への旅立ちには、アース・ポートからはじまる。赤道に近い南海のリゾートホテルに滞在し、海中トンネルをとおり、海に浮かぶ宇宙エレベーターの発着場へと向かう。空には、まっすぐ果てしなく伸びる一条のケーブル。アース・ポートは地球と宇宙をつなぐ新たなスペース・オデッセイ（叙事詩）の出发点だ。



アース・ポート主要部断面図



アース・ポート全体図



アース・ポート(主要部)  
 ・クライマー発着場  
 ・研究開発センター  
 ・修理工場  
 ・生活施設、管理施設

アース・ポート(サポート施設)  
 ・ビジターセンター  
 ・空港、港  
 ・ホテル、ショップ  
 ・追跡施設

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だ。同時にそこは、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。

《立地》

アース・ポートは宇宙への旅立ちの地となるだけに日本に建設したいところだが、実際には難しそうだ。

静止軌道から伸ばしたケーブルは、赤道に向かつて降りてくるため、赤道上ならば、高い緯度の場所より固定や制御がしやすくなる。また、赤道上には熱帯低気圧がないことなども踏まえ、アース・ポートは赤道、もしくはその近辺に建設するものとした。

立地についてはもう一つ、陸上か海上かという点も課題となる。宇宙エレベーターの研究のなかには、揺れ動くケーブルに対応するためアース・ポートは海上を移動できる施設がよいとする見解もみられる。

しかし、私たちは別の視点から、海上施設と陸上施設に分散する案を採用した。宇宙からの最初のケーブルは、ピンポイントで降ろすことができない。どこかでケーブルを捕捉した後、所定の場所までの移動を考慮すると地上よりも海上のほうが都合

がよい。安全性の面からも、最初の固定作業は海上のほうが適している。

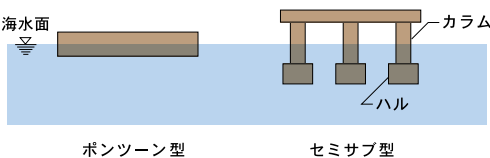
次に、ケーブルを固定すると、アース・ポートにはケーブルに生じる張力がかかる。これに対応するためには、ケーブルは緊結せず、張力を調整しながらいかに固定するかが最重要課題となる。海上構造物なら海水を利用したバラスト調整が可能なので、地上よりも制御しやすい。

また、アース・ポートは人類が宇宙へ進出する出発点でもあり、一国に帰属せず世界各国の共同利用施設となることが望ましいが、テロへの対策は必要だろう。さらに、上部構造物やクライマーからの落下物など、万一の場合の安全対策も考慮しなければならぬ。これらいずれの点においても、アース・ポートは海上に設置したほうが対策は容易となる。

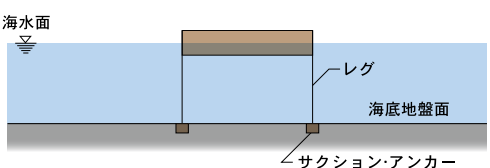
その一方で、アース・ポートの関連施設のなかには、陸上のほうが建設や運営・管理をしやすいものもある。広大な面積を必要とし、大勢が利用する空港、不特定多数の観光客が出入りするホテル、宇宙資源などの研究・利用に携わる企業や工場・倉庫群などだ。海上部の施設には可動性が求められる点からも、こうした大規模施設は陸上のほうが適している。

これら諸条件を検討した結果、アース・

## 浮体構造物の形式



## テンション・レグ係留方式



心躍る潜在となるはずだ。

### 《基本構成と規模》

アース・ポート(以後、アース・ポートの名前は海上の主要部を指す)は、上部建物と、それを海面下で支えるコンクリート浮体で構成される海上構造物だ。

上部建物は、直径四〇〇メートルの円形の平面をもち、クライマー発着場を中心にしたビルから成っている。主な施設として、建物の中心にあるクライマー発着場と、その付随施設(出発・到着ロビー、医療・検査エリア、格納庫、修理工場など)、宇宙エレベーター関連の研究開発エリア、施設管理エリア、勤務要員の生活エリア、船着き場、荷捌き所などがある。総床面積は二七平方メートル。勤務者数は約五〇〇〇人と設定した。

海面下のコンクリート浮体内には、陸地部から来た車の駐車場がある。これらすべてを含む全体の規模は、排水トンで示すと約四〇〇万トンとなる。これは世界最大級のタンカー(載貨重量五〇〇万トン)の数の倍に相当する。

### 《建設のポイント》

アース・ポートには、「浮かぶ、動く、おさめる」という三つの特徴がある。

### ①海に浮かぶ

アース・ポートは、海に浮かぶ構造物だ。コンクリート浮体で浮力をもつ基盤をつくり、その上に建物を建設する。

コンクリート浮体は、中空のコンクリート製の大きな箱を海に浮かべたものを連想するとイメージしやすいだろう。世界にある大型の浮体構造物(橋、道路など)のうち、一定の場所に長期間留まるものはほとんどが鋼鉄ではなくコンクリート製浮体が採用されている。その理由は、波による揺れや振動に対して安定性が高く、海水による腐食にも強く、メンテナンスフリーで長期間の供用が可能だからだ。

コンクリート浮体には、大別するとポンツーン(箱)型とセミサブ(半潜水)型のタイプがある。ポンツーン型は箱型浮体をそのまま海上に浮かべる形式で、波の穏やかな湾内などに多く用いられる。もう一方のセミサブ型は、ハルと呼ばれる箱型浮体を海面下に沈め、その上に中空の柱(カラム)とデッキを設置する形式で、長周期で高い波の立つ外洋に適している。今回の予定地は赤道近くの外洋であることから、アース・ポートにはセミサブ型を選定した。

海面下に設置するハルは中空の浮体なので、そのままでは浮き上がり、風や海流に流される。そのため海底地盤に埋設したサク

ション・アンカー(錘の一種)などにより、ハルとの間をレグ(高張力鋼)でつないで係留する。このテンション・レグという係留方式は、海底油田掘削のプラットフォームなど大水深域での係留に実績がある。

コンクリート浮体は沿岸部のドックで分割して建造し、海に浮かべて連結一体化し、現地まで大型タグボートで曳航する。陸上からのアクセスとなる海中トンネルも、同様の方法で建設する。

### ②海上を動く

アース・ポートは巨大な構造物のため、海中や海底の生態系に影響を及ぼすことも考えられる。必要に応じて生態系への負荷を軽減するため、移設が求められた場合でも対応可能な係留施設とした。

そのためアース・ポートはどの方向へも移動しやすいように、上部の建物と海面下のハルをふくめ、全体を円形の形状とした。また、陸地からの通路は、アース・ポートに追従して移動が可能な海中トンネルを採用した。

移動の際は一時的にレグによる係留を解除し、複数の大型タグボートで所定の位置まで曳航する。その後、あらかじめ海底地盤に埋設しておいたサクション・アンカーに接続して再係留する。

### ③ケーブルやクライマーをおさめる

アース・ポートはケーブルの動きをおさめ、

クライマーを収容する場所でもある。

かつてのSF小説やアニメーション、漫画などでは、アース・ポートはタワー状の建造物として描かれることが多かった。高い位置でケーブルを支えたり、風や雷などから保護する必要性を感じたのだろう。

しかし、前述したケーブルの挙動解析からも、ケーブルを無理に高い位置で捕捉する必要はない。むしろアース・ポートには、ケーブルをどのように固定し、またどのように張力を制御するか、その機能が重要となる。

ケーブルは、アース・ポート中央部の円筒状の空間を抜け、海面下のハルの部分で固定する。ただし完全な固定ではなく、ハルの中空部分に海水を入れ、水の重量と抵抗を利用した制御機能をもつアンカーに接続する。この方法(バラスト調整)によって、ケーブルにプレテンションをかけ、最大四〇〇トン程度と推定されるアース・ポートにかかる張力の制御が可能となる。

一方、中央部の円筒空間は、クライマーの収容場所でもある。

長さが一四四メートルあるクライマーを収容するには、アース・ポートにもある程度の高さが必要となる。ここでは発着場の円筒状空間を海面下のハルまで伸ばし、全体の高さを抑制することで海上構造物としての安定性を高めるようにした。

### クライマーについて

宇宙エレベーターには、どんなクライマーが似合うだろうか。いかにも未来を感じさせるものから銀河鉄道999のようなものまで、さまざまなタイプが考えられる。今回、私たちはクライマーのデザインを決め込まず、未来をにやう世代の想像力にゆだねることにした。読者の一人ずつが、それぞれ夢の乗り物を思い描くのもいいだろう。ただし、アース・ポートや静止軌道ステーションの設計上、クライマーのスケールについては一輛当たり長さ一八メートル×直径七・二メートル、六輛編成で駆動部も入れて全長一四四メートル、乗員定数三〇人と設定した。また、駆動方式は電気やりニアモーターなどが推測されるが、この点については青木義男教授の原稿を参考にさせていただきたい。



NASAによる宇宙エレベーターのイメージ  
クライマーには星条旗が描かれている





静止軌道ステーションは、高度三万六〇〇〇キロメートルという遙かな宇宙にある。建築計画の立案には、まず宇宙空間とは、あるいは静止軌道とはどういうところなのかを考えておく必要がある。

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。

力学的な空間の制約が少ないのでデザインや構造面での自由度は高いともいえるが、静止軌道上では重力と遠心力の均衡を維持し、重心がずれないように配慮する必要がある。また施工面では、大気がなく宇宙線にさらされる外部での作業（船外活動）は極小に留めるべきだろう。

静止軌道上には現在、人工衛星レベルの小型構造物しかない。今回の静止軌道ステーションのような大型宇宙建造物の建設は、私たちにとって初めての挑戦となる。

#### 《建設の前提》

静止軌道ステーションは、宇宙における

ターミナル駅だ。地球からの到達点であり、さらなる遠い宇宙への出発点ともなる。世界の都市にはスケール、デザインともに印象的な駅が多いが、この宇宙のターミナル駅もランドマークならぬスペースマークとなるものが相応しいだろう。また、静止軌道ステーションは宇宙エレベーターの重心に位置するが、ケーブルと接続すると大きな負荷がかかる。そのため鉄道の線路と駅との関係と同様、独立した建造物とした。

一方、静止軌道ステーションは、宇宙環境を生かしたさまざまな機能（宇宙太陽光発電、新素材などの研究・実験、宇宙観光など）をもっている。

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二〇五〇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、滞在人数五〇人（勤務者三五人、観光客一五人）、必要とされる空間は一萬三二〇〇立方メートルと設定した。ちなみに国際宇宙ステーションの全与圧部容積は九三五立方メートルだ。

このような大型の宇宙建造物は、いままでは例がない。建設場所も、高度三万六〇〇〇キロメートルという遠い宇宙だ。ここでは輸送形態もふくめた斬新な建設手法が必要と

なるだろう。

私たちは全体のプロポジションにも留意しつつ、次のような方法を採用した。

#### 《建設のポイント》

##### ①ユニット化

現在の国際宇宙ステーションは、基本機能（推進・姿勢制御・電力・熱制御など）を備えたモジュールを連結して造られている。日本の実験棟「きぼう」も、基本モジュールの一つだ。特殊な宇宙環境を考慮すると、基本モジュールを設定し、それを組み合わせて全体を構築する手法はきわめて合理的だ。

同形状のユニットを採用することにより、建設時の「輸送性」と「安全性（最小の船外活動）」を高めることが可能となるため、静止軌道ステーションにおいても徹底したユニット化を採用した。

ユニット化によって輸送性と安全性が高まるだけでなく、建設途中での部分的な使用や増設、あるいは故障時やデブリなどで被災した場合の部分的入れ替えも可能となる。同時に、表面積が増えるので、空気のない宇宙空間では熱放射にも都合がよいといえる。

また、ユニット化はさまざまな空間の構成を可能とする。ユニットを横方向にも縦方向にも展開することで、施設や機能に応じた配置形態を生み出すことができるからだ。たと



えは居住エリアではユニットを横に展開して広い平面をつくりだす。実験エリアでは縦方向の展開により一定の独立性を確保しつつ、移動しやすい空間をつくることができる。ユニット化のこうしたさまざまな特性は、多機能の大型宇宙構造物の建設に最適のものといえるだろう。

なお、静止軌道ステーションではちょっとした振動が全体に伝わり、変形が生じて重心がずれる可能性がある。その対策として、ユニット同士の接続部分にはある程度の変形を許容する接続ユニットを用いる。振動による変形をしなやかに吸収する柔構造の手法である。

②インフレータブル(膨張可能)

宇宙構造物を考えるときのキーワードの一つが「インフレータブル」で、その典型が空気膜構造だ。膜面をガスで膨らませる空気

膜の構造物は、地上では野球場のドームなどで知られているが、宇宙で利用する場合にも軽量かつコンパクト(高収納性)なので輸送効率が良い。また、宇宙空間はゼロ気圧のため、わずかな空気で膨らませることもできるので理想的だ。

しかし、スペース・テプリアやマイクロメテオロイド(微小隕石)との衝突対策や、膜を均一に展開させる方法にも課題がある。さらに膜面の硬化方法や保護被膜などにも工夫が必要となる。

今回の構想ではこうした点を踏まえ、ユニットを金属パネルと膜のハイブリッド構造とした。

パネル三面で構成するコンパクトな三角柱の形状でクライマーに連結して輸送し、静止軌道上ではパネルに内包した膜部分を

空気圧によって膨張させて六角柱の形状にする。これによって体積が約六倍に広がる。展開時の膜部分の硬化や被膜はパネル内であらかじめおこなっておくことができる。もし地上に戻す必要が生じた場合には、空気を下げてもとに戻す。

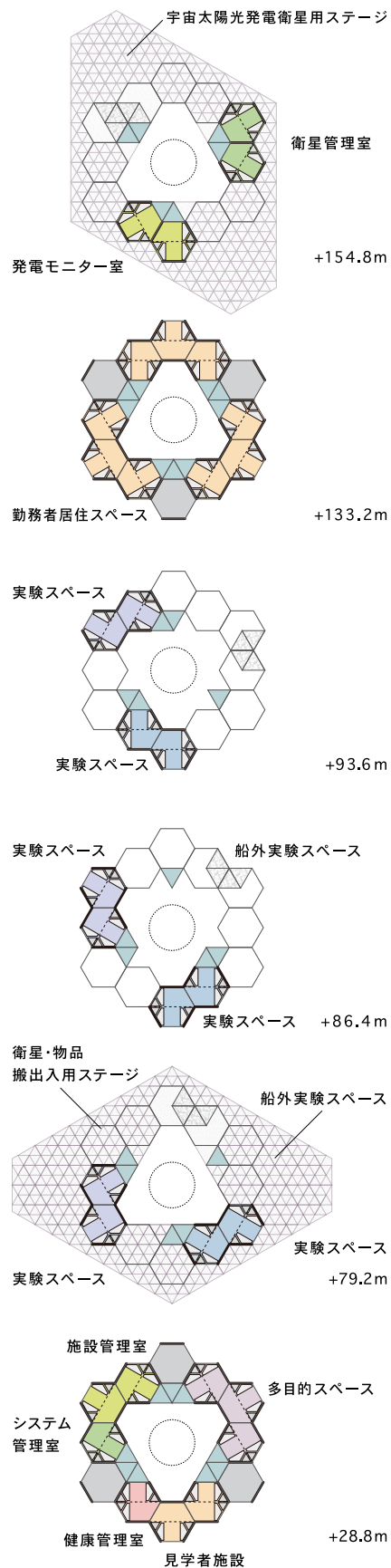
また、パネル内面には輸送時から設備類を収納し、静止軌道上に設置後すぐに機能するようにした。

膜の素材にはさまざまな候補があるが、ここではNASAなどで研究されてきたマルチレイヤーを想定した。マルチレイヤーは高分子材料などの多層構造をもつフィルム状素材で、温度差やスペース・テプリアなどに強いとされている。

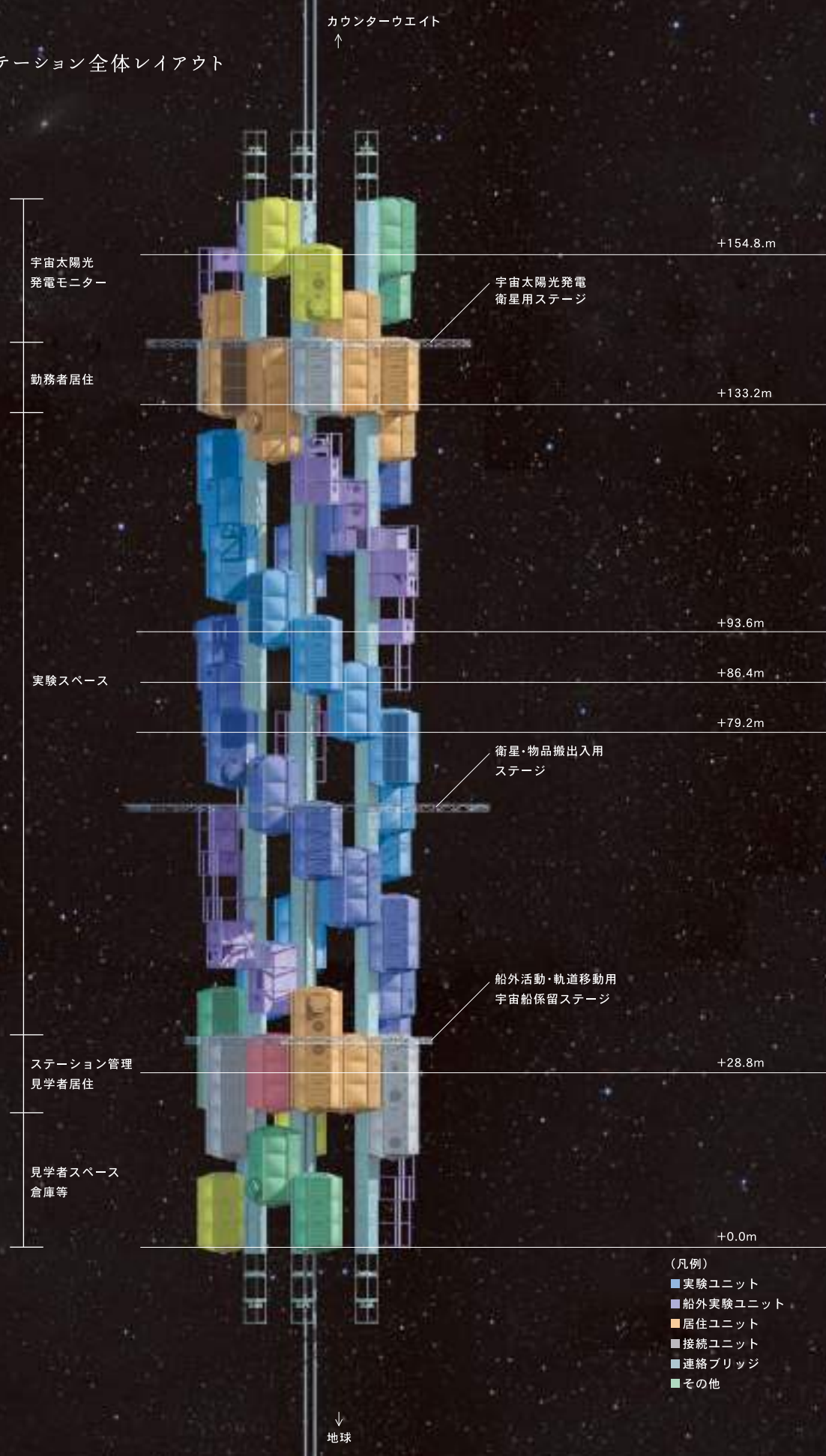
③パーテイカル(垂直性)

宇宙ステーションの形状というと、一般的

ゾーニング図



静止軌道ステーション全体レイアウト







ユニット内部

静止軌道ステーションは六六ユニットで構成され、その内訳は実験ユニット二八、居住ユニット二二、その他二六となる。縦長のプロポーションを利用し、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（P54参照）。

もともと地球に近い部分が、観光客用のスペースを中心としたゾーン。展望室の窓は大きくはないが、地球を中心に太陽や月によるダイナミックな天体のショーを見ることが出来る。

中間に位置するのは、実験スペースを中心としたゾーンだ。ここでは地球から運んできた実験材料だけでなく、月や火星などから持ち帰った鉱物資源などの分析・研究もおこなわれる。世界中から研究者が集い、さながら

究極の自然エネルギー  
— 宇宙太陽光発電システム —

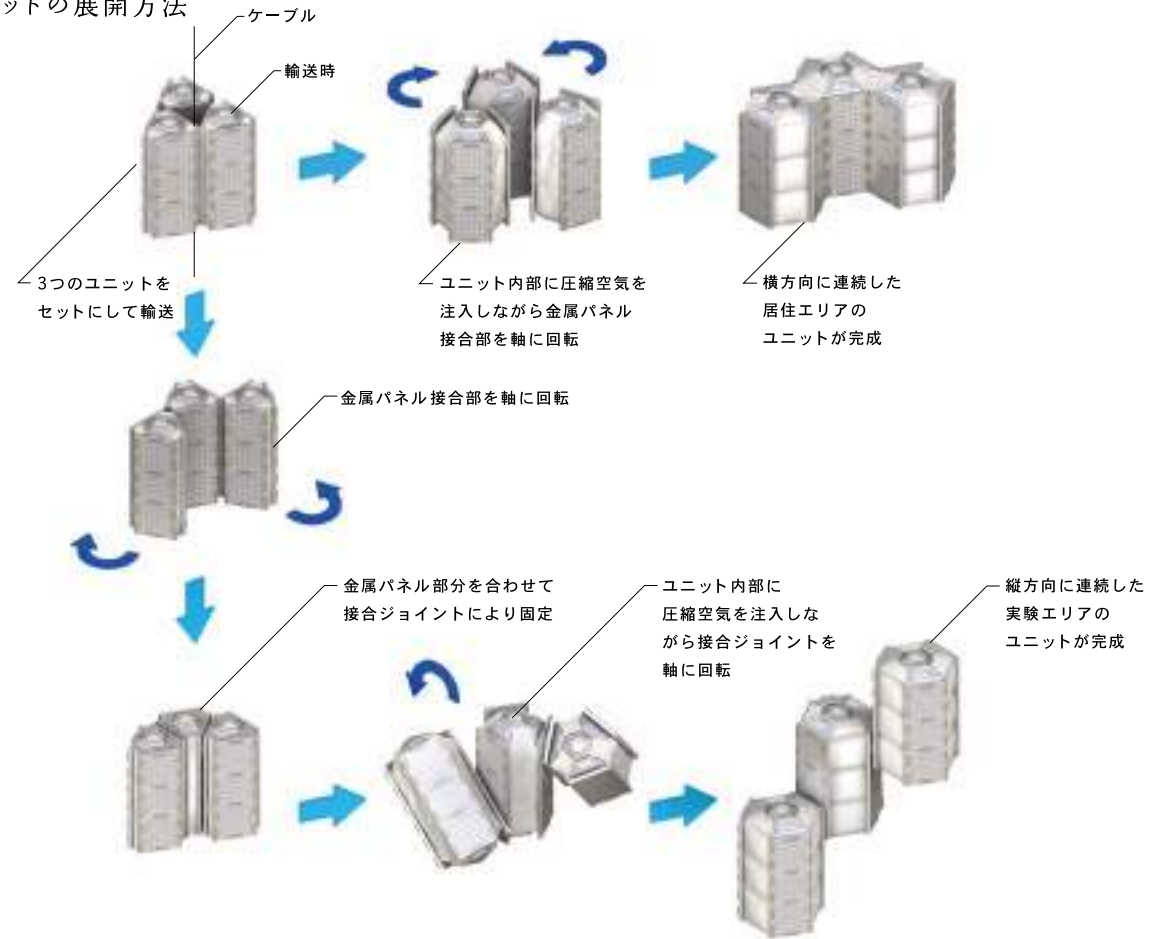
宇宙エレベーターの利用法のなかでも、最大規模のプロジェクトが宇宙太陽光発電システムの建設だ。そこで最後に、このシステムについて簡単にふれておきたい。

宇宙太陽光発電は静止軌道上で太陽光を集めて発電し、そのエネルギーを地上のレクテナ（受電施設のアンテナ）に送って利用す

インフレーター・ユニット

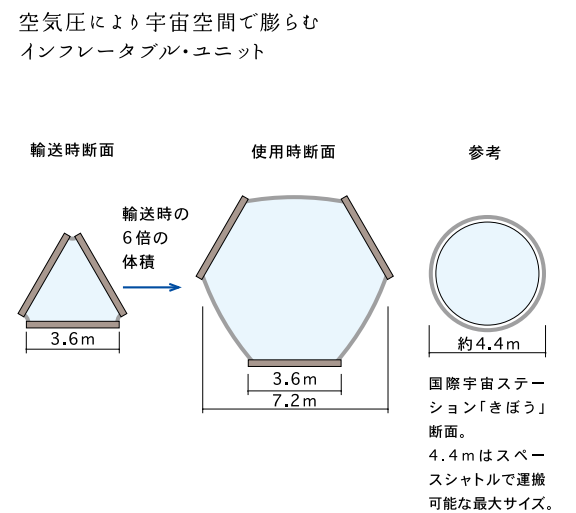


ユニットの展開方法



平面的に広がる形状のほうが一見安定しているように思えるが、宇宙空間における姿勢制御では平面（断面）が小さく、縦長の形状のほうが重心の安定を図りやすい。また、地球から昇ってくるクライマーの長さに対応するにも、縦長形状のほうが適している。

では、ユニットでどのようにパーティカルなプロポーションをつくるのか。ユニットは横方向への拡張だけでなく、ジョイント部分を接点として回転させることで縦方向への



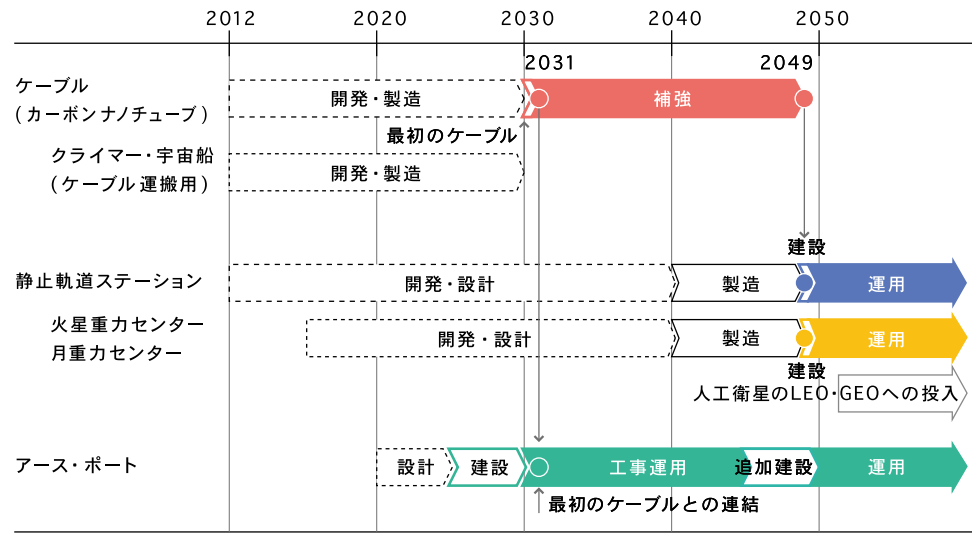
伸長も可能となる。この方法で縦方向へと連続的に展開させると螺旋形状が構築される。螺旋を組み合わせることで、宇宙構造物では例のない三重螺旋の縦長の静止軌道ステーションが誕生する。宇宙エレベーターに相応しい、インパクトのある宇宙のターミナル駅となるだろう。

縦長の螺旋形状には、無重力の宇宙ステーション内での移動においてもつかまる場所が多く、方向転換しやすいといったメリットもある。

《ゾーニング》

静止軌道ステーションは六六ユニットで構成され、その内訳は実験ユニット二八、居住ユニット二二、その他二六となる。縦長のプロポーションを利用し、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（P54参照）。

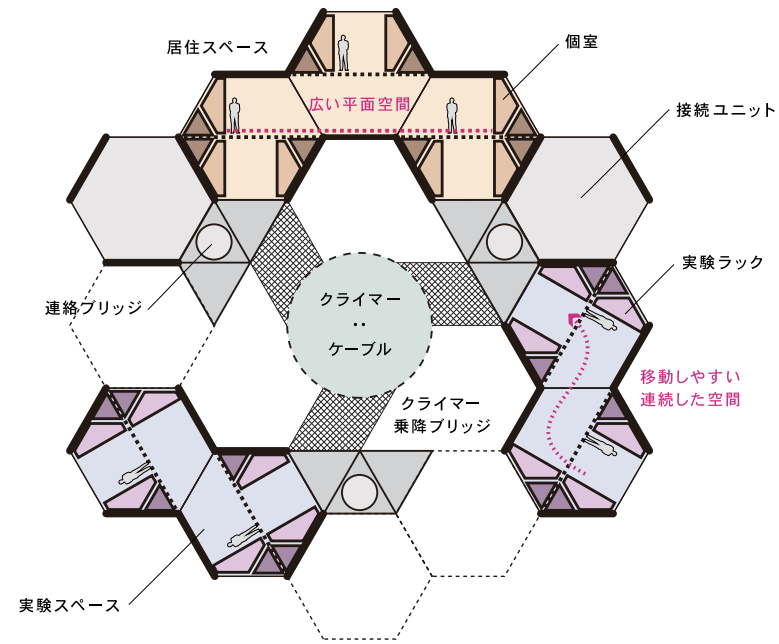
建設スケジュール



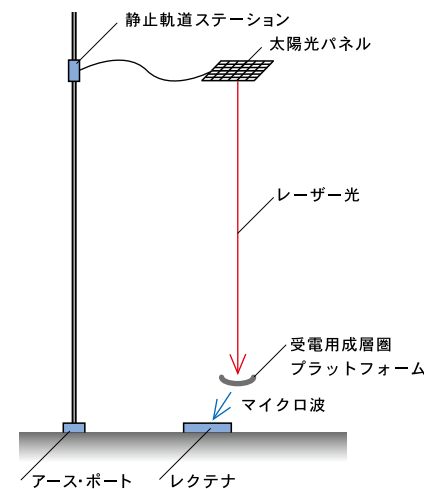
また、宇宙太陽光発電システムでは送電方法(レーザー光かマイクロ波か)が一つの課題となる。安全性やコントロール性、送電ロスなどに、それぞれメリット、デメリットがあり、単独で利用するにはリスクがある。

宇宙太陽光発電システムの建設では、集光パネルや太陽電池パネル、アンテナなどで構成される大型構造物を静止軌道上に展開する

ユニット断面図



宇宙太陽光発電システム送電模式図



必要がある。そのため人や資材の搬送に、宇宙エレベーターは大きな役割を果たさだろう。私たちは宇宙エレベーター構想の前提として、大型の宇宙太陽光発電システムの本格的実用化を想定している。太陽電池パネルの規模は五キロメートル×一〇キロメートル、発電量は五ギガワット。これにともなう地上部の受電施設として、半径五キロメートル規模のレクテナを建設する。

私たちが、成層圏の上部境界付近に受電用プラットフォームと送電アンテナを設置し、中継する方法を考案した。宇宙空間ではコントロール性のよいレーザー光で送電し、大気空間では安全性の高いマイクロ波を使って地上へ届ける分送電方式を採用することで、高効率で安全な送電をおこなうことができるだろう。

**工期について**  
宇宙エレベーターは構造物が多く、それぞれの供用時期にも時間差があるが、静止軌道ステーションの供用開始(二〇五〇年)をもって全体の完成とした。CNT製ケーブルやクライマーの開発などをのぞくと、アース・ポートの着工(二〇二五年)からの全体工期は二五年間となる。

●作業を終えて  
星新一のSFショートショート『ジャックと豆の木』では、ジャックは天まで伸びた豆の木を登っていった先で、宇宙人と出会う。私たちは宇宙エレベーターで昇っていった先に、何を見るのだろうか。できうるならそれは、未来あるいは希望という名の「何か」であってほしい。  
私たちがこのプロジェクトに取り組み始めてまもなく、東日本大震災が発生した。あ

まりの現実の重さに、宇宙エレベーターの非現実感が空虚にさえ思えた。そのとき編集顧問の先生たちに、こう励まされた：宇宙へ伸びるタワーのような壮大な構想こそ日本を元気にしてくれる可能性がある。  
宇宙関連プロジェクトは過去にも数多いが、宇宙エレベーター構想ほど型破りで壮大なものはない。宇宙の専門家でもあるチームの一人は、「まさか季刊大林で宇宙エレベーターを取り上げるとは思わなかった」と楽しみに呟いた。  
監修していただいた日本大学の青木義男教授は地上のエレベーターの専門家だけに、「宇宙エレベーターなんてできるのかな」と笑いつつ、宇宙エレベーター協会の副会長をつとめるほど夢中になっておられる。  
今回の構想は奇抜ではあるが、未来への予感や可能性に満ち溢れている。宇宙がちょっと近くなったような気がする。いつか、こういえる日が来るだろうか。  
「諸君、こんどは宇宙で会おう」  
最後になったが、構想の全般にわたり貴重な助言をいただいた青木義男教授に、改めて御礼申し上げます。  
大林組プロジェクトチーム  
技術本部 石川洋二 田村達一 大塚清敏  
設計本部 堀池隆弥 岩岡丈夫  
土木本部 増井直樹 浜地克也



# 二〇五〇年宇宙エレベーターの旅

「今度の休暇は豪勢ね。なんにもないところに行くのだから」

「だから面白いのさ、メグミ」

いよいよ一般人旅行者が宇宙エレベーターに乗れるようになって最初の抽選にあたるなんて、運がよかった。親子三人で旅行の費用は一二万ドル(ひとり四万ドル)と高価だったけれど、今後それほど費用が下がる見込みはないらしい。

いよいよ明日、その宇宙エレベーターに乗って宇宙に旅立つ。静止軌道ステーションへ。重力も感じず、船外には空気もない所だ。不安もあったけれど、二か月も訓練してきたのだからもう心配はない。

化学ロケットしかなかった時代には、出発時や帰還時に人体には大きな重力加速度がかかった。宇宙エレベーターではゆっくりと加速していくので、重力加速度の負担は少ないし、時間をかけて無重力状態に入っていく。母の責務としてしっかりと調べただけれど、宇宙の放射線は有害であるが、宇宙エレベーターや静止軌道ステーションではしっかりと防衛される構造になっている。それで子供のエリカを連れてゆくこともできる。

## 【出発日】

出発時間は現地時間の正午だ。クライマーは、直立するエレベーターのケーブルに沿っ

の本来の目的は、将来火星に人類の居住地を作るための研究だ。地表では長時間火星の重力環境を作ることができない。

ここで下車するブラッドリーさんに続いて降り、私たちも少しのあいだ見学することにした。ここでは、研究者が長期間滞在して、トマトや藻類を栽培し、魚や鶏を飼育している。火星重力が人間の健康へ及ぼす影響も調べている。

さて、そろそろにまたクライマーに乗って旅の再開だ。重力はどんどん減っていく。

## 【二日目】

朝早く、高度八九〇〇キロメートルの月重力センター(017G)に到着。重力が小さいので歩くだけでもピョンピョン跳ねてしまう。「朝早く」といっても、漆黒の宇宙なので、それほど実感はわからない。ただし、太陽が地球の陰から出てくるのが早くなってきている。

## 【五日目】

高度二万三七五〇キロメートルの低軌道衛星投入ゲートに到着。ここから人工衛星を落とすところや高度三〇〇キロメートルの低軌道に投入することができる。いろいろな衛星が準備してあった。

## 【八日目】～【二二日目】

八日目にととうと静止軌道ステーションに到着。

クライマーはさらに上昇を続けるが、私たち一般旅行者はここで下車して、静止軌道



て、旅客機ほどの太さの繭玉のような車両が縦に連なっている。一般旅行者としては五人、そのほかには宇宙の勤務者が一五人乗り込んだ。

出発は、快適な速さで登り始めたが、それでもぐんぐん地面が遠ざかって、時速二〇〇キロメートルに達した後は加速度もかからず快適な移動となった。雲は瞬間につきぬけ、五分もしないうちに地球の丸みが明らかになり始めた。一五分もすると大気を抜けたのだから、周囲は藍色に染まり、漆黒となり、星が見え始めた。

このように書いてみると、窓にかじりついて外を見ていたと思われるかもしれない。しかし実際は自分の部屋で、モニター画面で見ていたのだ。クライマーにはほんの小さな窓しかない。

出発してから三〇分もすると体が軽くなったような気がした。重力が減っていたのだ。出発から二時間もしないうちに一〇パーセント重力が減ったとアナウンスがあった。その後、急速に重力が減っていった。夜となった今では、半分ほどの重力しかない。

## 【一日目】

今朝早く、高度三九〇〇キロメートルの火星重力センターに到着した。ここではちょうど火星の重力(0.38G)が体験できる。センタ

ステーションに乗り移った。

ここでの楽しみは無重力だ。そのなかでの動きだ。いろいろな変わったスポーツが楽しめる。スポーツ好きのパートナーは、二次元サッカーや連続宙返りをして大喜びだ。いやむしろ宇宙では、筋肉の衰えを防ぐために積極的に筋トレをしなくてはならない。

そして、ここから眺める宇宙は絶景だ。「七等星も八等星も見える」と星の好きなエリカが目を凝らしている。地球から眺めるよりも鮮明で賑やかな宝石の絨毯が拡がり、乳白色に輝く天の川に泳ぎ出してゆきなくなる。こんなにたくさんの星は、空気に覆われた地球上では見ることはできなかった。見渡すとすべての星座を見ることができ

地球はというと、腕の先に載せたサッカーボールぐらいの大きさにしか見えない。しかも、地球から見る月のように、ここから見る地球は満ち欠けする。私たちが育んだかけがえない大気はその地球の薄皮程度にしか存在しないと思うと、地球生命の存在が奇跡のように感じられる。

宇宙を満喫した二週間もあつという間に過ぎてしまった。明日からはまた一週間かけて、地上に戻る。

持ち帰るべきお土産は・・・思い出以外はない。やっぱり普通の旅行とは趣きが違う。ああそうだ、火星重力ステーションの農場でミニトマトの苗木をもらったんだっけ。

エリカに宇宙エレベータートマトとして育てさせることにしよう。

(石川洋二)



Illustration: Naoyuki Sato