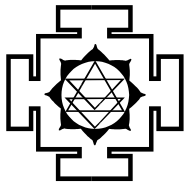
特別レポート

軌道エレベータの実現に向けた技術開発の可能性検討

中島久夫



2007 年 7 月

目　次

1.目標 1
1.1 軌道エレベータとは 1
1.2 軌道エレベータの意義 1
2.課題 2
2.1 実現可能性に関する議論 2
2.2 建設方法 4
2.3 軌道エレベータの構造と素材 5
2.4 技術開発課題 6
2.5 技術開発コスト 8
3.実現想定時期 10
3.1 技術開発のタイムスケール 10
3.2 建設プロジェクトのタイムスケール 10
4.プロジェクトの構成と日本の役割 12
4.1NASA 等のプロジェクト構想 12
4.2 日本主導の技術開発プロジェクト立ち上げの意義 12
4.3 技術開発プロジェクトの実施体制とリーダー 13
4.4 予算負担 13
4.5 建設プロジェクト実現への課題 13

1.目標

軌道エレベータ(宇宙エレベータ:Space Elevator)建設の実現
～ カーボンナノチューブ構造材の開発と軌道エレベータ付帯技術の開発 ～

1.1 軌道エレベータとは

軌道エレベータとは、地球表面から人工衛星の静止軌道まで到達する構造物によって昇降機（ゴンドラ）が昇降するエレベータである。

軌道エレベータに関する最初のアイディアは、「宇宙旅行の父」と称されるロシア人コンスタンチン・E・ツィオルコフスキーが、1895 年に執筆した著作の中で述べられており、これをユーリ・アルツターノフが 1959 年に、赤道直上の静止軌道からケーブルを伸ばす「天のケーブルカー」として構想した。

一般的には、アーサー・C・クラークの SF 小説「楽園の泉(The Foundation of Paradise)」およびチャールズ・シェフィールドの「星ぼしに架ける橋（The Web Between the Worlds)」（いずれも 1979 年）により知られるようになり、以後様々な SF 作品に登場するようになる。

概念としては、静止軌道上の人工衛星から地上に達するケーブル（テザー：綱）を垂らし、そのケーブルを伝って昇降することで、地上と宇宙空間をつなぐ宇宙への架け橋がイメージされる。エレベータといっても、ケーブルでゴンドラを動かすのではなく、ゴンドラがテザーを伝って上下に移動する方式となる。

1.2 軌道エレベータの意義

現在、唯一の宇宙への交通手段であるロケットだが、ロケットは本体の重量の大半(90%以上）を燃料が占めており効率が悪い。しかも、燃料の燃焼時に地球環境に有害な物質を発生するとともに爆音や有毒ガスを発生するという環境負荷が避けられない。それ以外にも、信頼性や事故発生時の安全性の面等で問題を抱えており、宇宙への大量輸送を行うには信頼性に欠ける部分がある。

このため、大量の物資、人員を輸送することを想定する場合、より経済的で無公害の輸送手段が不可欠となる。現在、ロケットに代わるさまざまな輸送手段が検討されているが、軌道エレベータはその有力候補の一つである。

軌道エレベータを実現することにより、現在のロケットによる大気圏離脱より、はるかに割安で、安全な宇宙への交通手段が得られることになる。

軌道エレベータの実現は、世界に宇宙というフロンティアへの実効的な足がかりを与えることになる。その人類史的なインパクトは、20 世紀のパナマ運河をはるかに凌駕するものであり、人類社会を新たな階梯に導くものと考えられる。

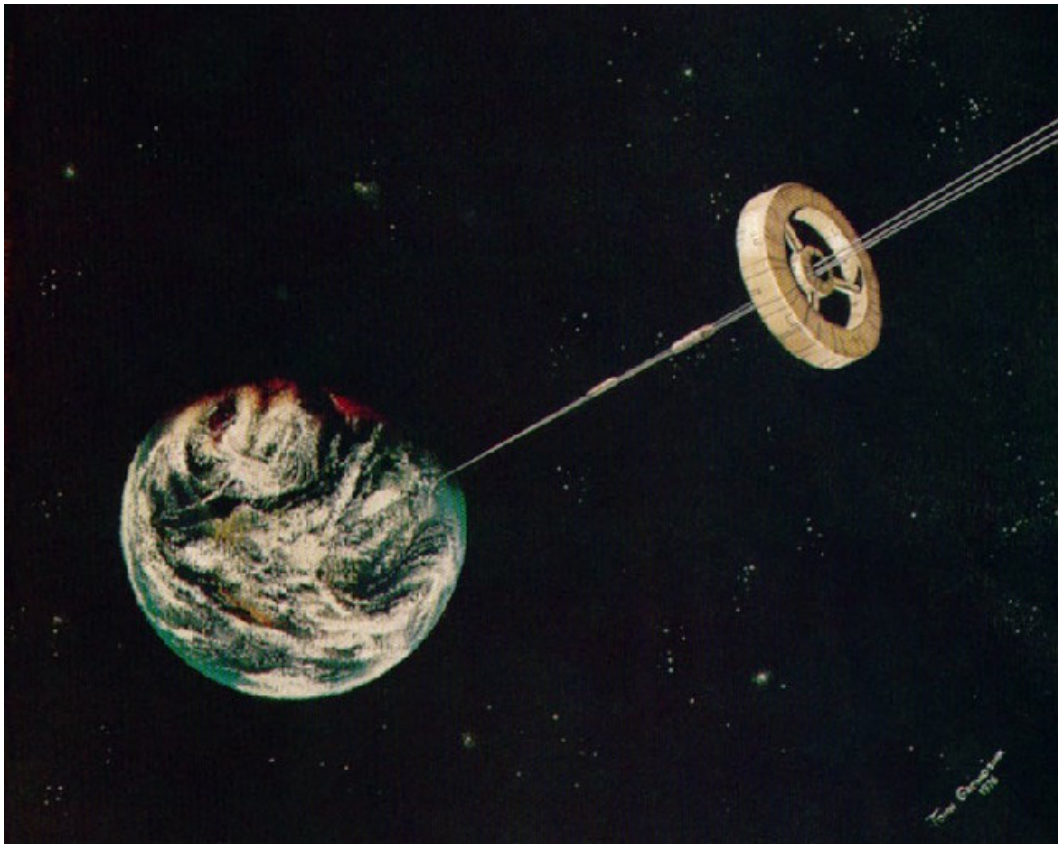


図 1-1　軌道エレベータのイメージ
出典：NASA ホームページ http://nasaexplores.nasa.gov/show2_912a.php?id=01-015&gl=912

2.課題

2.1 実現可能性に関する議論

軌道エレベータを、SF の世界ではなく、現実の宇宙計画として検討する研究プロジェクトには既に半世紀以上の歳月が費やされている。

しかし、軌道エレベータの実現性については、クラークの「楽園の泉」が刊行された当時においてもまだ疑問視されていた。その実現可能性が脚光を浴び始めたのは、カーボンナノチューブ（以後「CNT」と言う）の発見と、その驚くべき物理特性が明らかになってからである。

周知のように、CNT を発見したのは、日本の飯島澄男[1]である。1991 年、飯島はフラーレンを作っている途中にアーク放電した炭素電極の陰極側の堆積物中から CNT を発見した。

CNT は、銅よりも高い導電性、ダイヤモンドを上回る伝熱性、軽量かつ高強度という、

[1]日本電気株式会社　NEC ラボラトリーズ　特別主席研究員、名城大学理工学部材料機能工学科教授、科学技術振興事業団　国際共同研究事業「ナノチューブ状物質」プロジェクト　代表研究者、独立行政法人産業技術総合研究所　新炭素系材料開発研究センター　センター長

優れた特性を持っている。

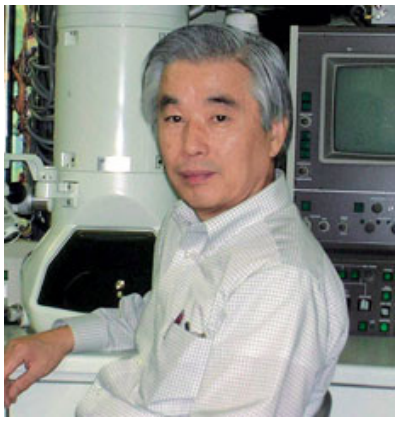


図 2-1　飯島澄男博士

出典：独立行政法人産業技術総合研究所ホームページ

http://www.aist.go.jp/aist_j/science_town/living/living_04/living_04_02.html

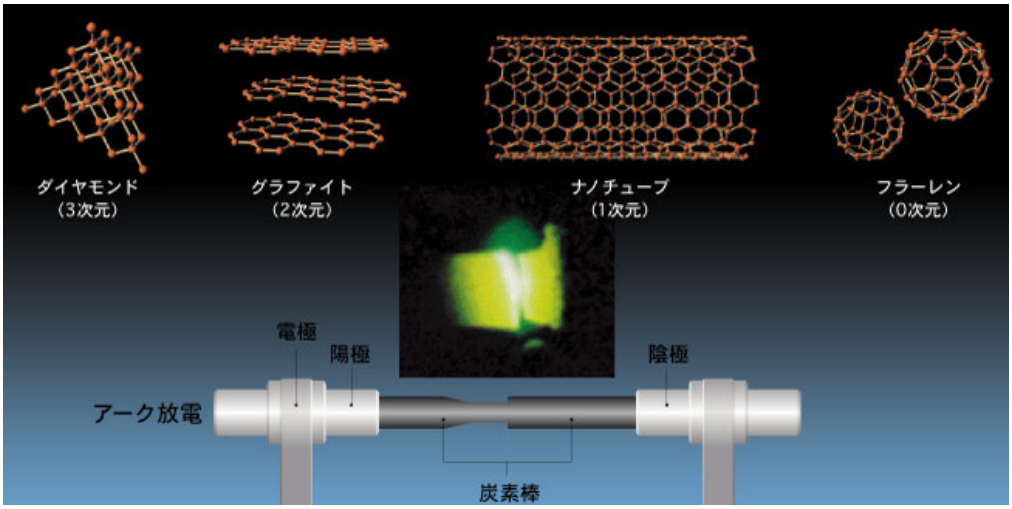


図 2-2　炭素の同素体とその次元性

出典：独立行政法人産業技術総合研究所ホームページ

http://www.aist.go.jp/aist_j/science_town/living/living_04/living_04_01.html

この CNT の発見以来、軌道エレベータの実現可能性をめぐる議論は俄に活発化する。

以後、軌道エレベータの研究は、NASA の研究所 Institute for Advanced Concepts(NIAC)を始め、Eureka Scientific、High Lift Systems 社等の米国の研究機関や企業を中心に行われてきた。

その中で、NIAC は、2000 年に Bradley C. Edwards の研究成果として The Space Elevator[2]というレポートを発表している。Edwards はまた、2003 年にもこの続編とな

[2] The Space Elevator , October 31, 2000, Bradley C. Edwards, Ph.D.
(http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/472Edwards.pdf)

るレポート[3]を発表している。

これらのレポートでは、軌道エレベータについて、その構造や建設方法、予算やスケジュールについて、科学的な検討が行われている。

以下では、この Edwards の研究成果に基づき、軌道エレベータ実現のための課題について、その概要を示すこととする。

2.2 建設方法

現在提唱されている建設方法は、長大な吊り橋を建設する場合と同様の手法であり、静止軌道上に人工衛星を作り、地球側にケーブルを少しずつ下ろしていく方法である。その際、人工衛星の重心が静止軌道からはずれないように、反対側（宇宙方向）にもケーブルを伸ばす必要がある。

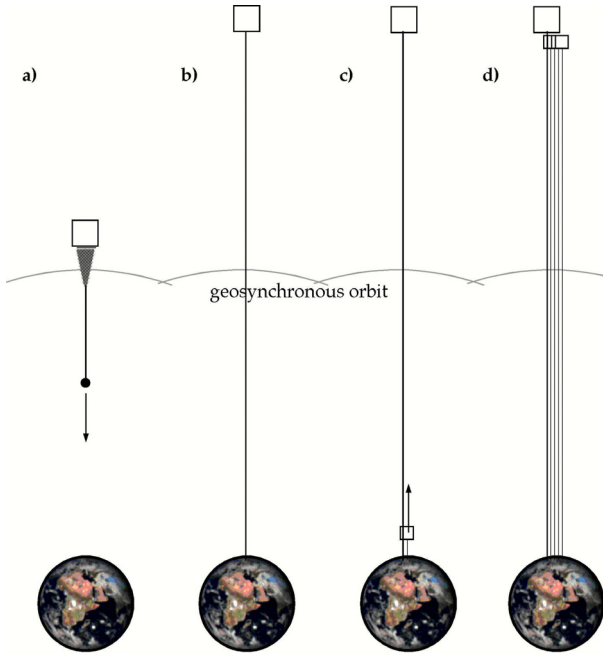


図 2-3　軌道エレベータの建築手順構想

出典：The Space Elevator , October 31, 2000, Bradley C. Edwards, Ph.D.

地球側に伸ばしたケーブルが地上に達すると、それをガイドにしてケーブルをさらに何本も張って太くし、構造物を構築する（図 2-3 を参照）。ケーブルや構造物の建築材料は地上から運び上げずに、小惑星帯から適切な鉱物を含む小惑星を運搬して静止軌道上に固定し、工場を建設して軌道上で製造する方法が最も安上がりになると考えられている。

建設場所は赤道上が最適とされている。赤道から離れた場所に建設することも不可能ではないが、ケーブルにかかる張力が大きくなるという点だけでも、難易度が高くなる。比

[3] The Space Elevator NIAC Phase II Final Report , March 1, 2003 , Bradley C. Edwards, Ph.D. Eureka Scientific (http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/521Edwards.pdf)

較的赤道に近い場合でも、安定性や建設方法など考慮すべき事は増える。また、赤道以外ではケーブルが地面に対して垂直にはならない。

地球の重力場は完全に均一ではないため、赤道上に作るなら西経 90 度（ガラパゴス諸島付近）および東経 73 度（モルディブ付近）が最も安定させやすいとされている。なお、Edwards の報告書では、ガラパゴス諸島の西 1000 マイル地点に可動式のアンカーを設置する案が提唱されている。

2.3 軌道エレベータの構造と素材

軌道エレベータは、静止軌道上の衛星（宇宙ステーション）、長さ 62,000 マイル（約 10 万 km）に達するケーブル、地上面におけるベースとなるアンカー部、ケーブル上を機動するゴンドラ（クライマー）によって構成されることになる。

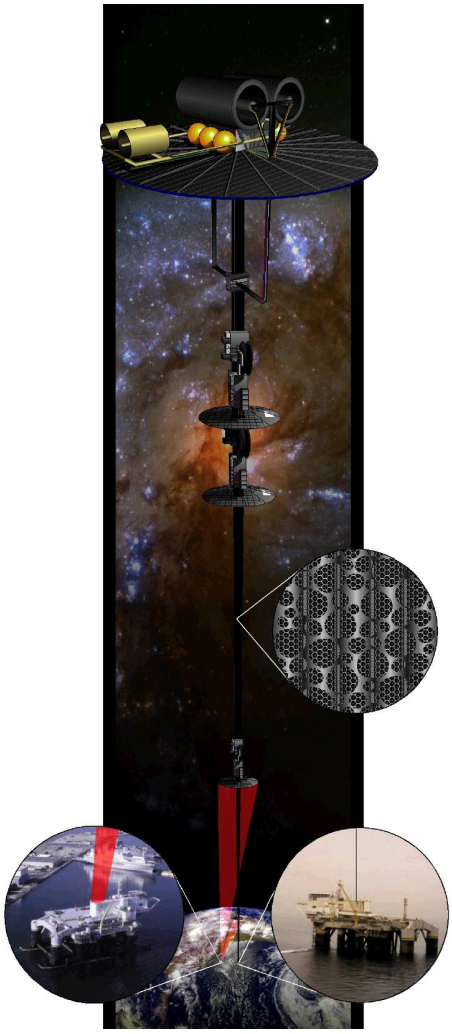


図 2-4　軌道エレベータの構成

出典：The Space Elevator NIAC Phase II Final Report , March 1, 2003 , Bradley C. Edwards, Ph.D. Eureka Scientific

この中で、最も困難な課題と考えられていたのが、ケーブル部の素材であり、現在でもそれは変わらないが、CNT の発見により、有望な素材が見出されたと考えられている。

2.4 技術開発課題

軌道エレベータを建設するための技術開発課題の中心は、10 万 km に達するケーブル素材にある。

軌道エレベータのケーブルは、下に行くほど重力が強まり遠心力が弱まる一方、上に行くほど重力が弱まり遠心力が強まる。したがってケーブルのどの点においても張力がかかる。その大きさは、その点より上の構造物に働く重力と遠心力の絶対値の差となる。

また、軌道エレベータのケーブルは、大気圏中の落雷や台風への耐性、ケーブル自体が誘発する電流や振動への対策、隕石や他の人工衛星との衝突回避といった諸問題をクリアするものとして構築されなければならない。

Edwards の報告書では、このような問題への対応を可能にするケーブルに必要な強度として、100GPa という値がひとつの目安とされている（図 2-5 参照）。

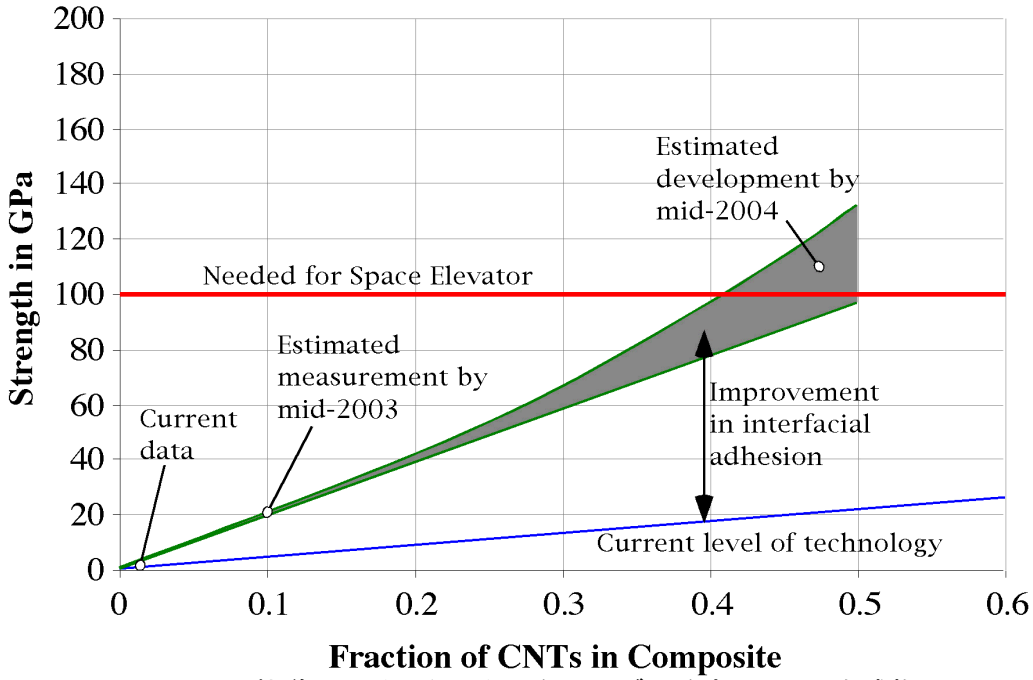


図 2-5　軌道エレベータに必要なケーブル強度と CNT 合成物の今後の技術開発によって実現が期待される強度性能の曲線

出典：The Space Elevator NIAC Phase II Final Report , March 1, 2003 , Bradley C. Edwards, Ph.D. Eureka Scientific

現状の開発状況からすると、結果的に Edwards の見通しは楽観的に過ぎるものであった訳だが、強度 100GPa という値は、決して実現不可能な値であるともいえない。

このように、CNT が注目されているのは、その軽量性と高強度という点にあるが、現

状の CNT の長さは、せいぜい数ミリから数センチ程度のものであることや、長尺化すると強度の点で問題が生じる等、解決すべき問題点は多い。いうなれば、この点が軌道エレベータを建設するための最大の技術開発課題ということになる。

現在、CNT に関する研究は、世界的に熾烈な競争の只中にあり、わが国でも産業技術総合研究所[4]をはじめとして、様々な CNT の生成方法について研究が行われている。

CNT に関する特許出願動向をみると、日本はさすがに CNT の発見国だけあって、2004 年までの CNT に関する特許出願件数は、世界でも最も多く 43%を占めている。

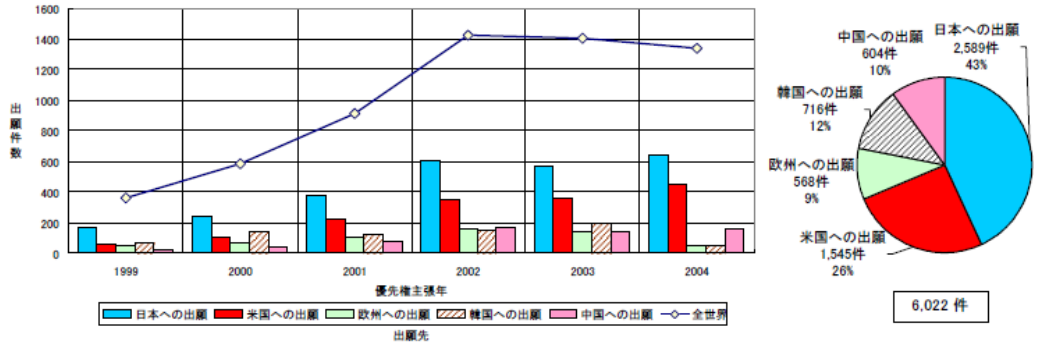


図 2-6　CNT の出願先国別出願件数と構成比率（全世界）

出典：特許庁「平成 18 年度特許出願動向調査報告書　ナノテクノロジーの応用
－カーボンナノチューブ、光半導体、走査型プローブ顕微鏡－」平成 19 年 4 月

なお、上記の特許庁「特許出願動向調査報告書」には、このような CNT の研究開発プレイヤーとして表 2-1 に示す企業、大学、研究機関が示されている。

表 2-1　CNT の主要な研究開発プレイヤー

	日本	米国	欧州	韓国	中国
企業	ソニー、日本電気 東レ、トヨタ自動車 富士ゼロックス キヤノン、富士通 日立製作所 松下電器産業 三菱電機、大研化学 ノリタケ、日信工業	Hyperion Catal. GE E.I.DuPont Rockheed Martin IBM Intel Motorola Battele	Nantero Infineon Philips Elec. Lucent Tech.	三星SDI LG電子 三星電子 日進ナノテック	Hongfujin Prec Hon Hai Prec
大学	信州大学 名古屋大学 大阪府立大学 名古屋工業大学 名城大学	Rice大学 Kentucky大学 California大学 Oklahoma 大学		Postech Found Pohang SciTec	清華大学 浙江大学 上海交通大学 北京大学 天津大学 南京大学
研究機関	産業技術総合研究所 科学技術振興機構 物質・材料研究機構 ファインセラミックスセンター	NASA	仏原子力委 CSIRO（豪州）	KIST ETRI	中国科学技術院 ITRI（台湾）

出典：同前

[4] 画期的な単層カーボンナノチューブ合成技術を開発、独立行政法人産業技術総合研究所「プレスリリース」、2004 年 11 月 19 日、http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2004/pr20041119/pr20041119.html、
単層カーボンナノチューブで高強度繊維の紡糸に成功、独立行政法人産業技術総合研究所「プレスリリース」、2006 年 5 月 11 日、http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2006/pr20060511/pr20060511.html、
単層カーボンナノチューブの安価な大量合成法を開発、独立行政法人産業技術総合研究所「プレスリリース」、2007 年 2 月 7 日、http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2007/pr20070207/pr20070207.html、
高品質単層カーボンナノチューブ量産とサンプル配布を開始、独立行政法人産業技術総合研究所「プレスリリース」、2007 年 2 月 13 日、http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2007/pr20070213/pr20070213.html

また、これらの特許出願のうち CNT の分離・精製方法と製造技術に関する特許出願は、図 2-7 に示すように分離・精製が 246 件、製造技術が 402 件で合計 648 件と全出願数の 1 割程度である。

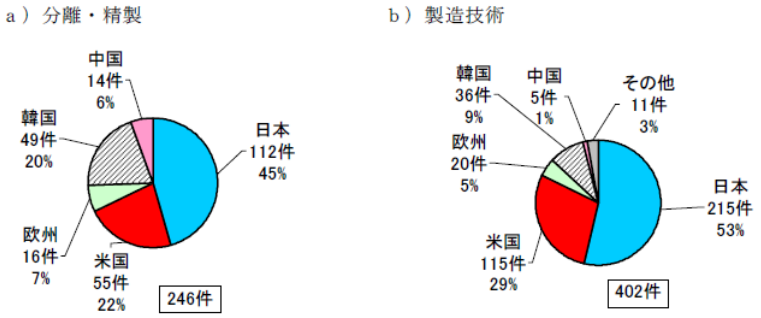


図 2-7　CNT の分離・精製および製造技術に関する出願人国籍別出願件数と構成比率（全世界）

出典：同前

分離・精製方法と製造技術に関する特許出願の約 5 割は日本国籍の出願人によるものであるが、次に多いのは米国籍の出願人となっている。

しかし、構造材としての使用を見据えた CNT の長尺化に関する研究は、日本より米国が一歩リードする状況にあり、現時点での成果として、テキサス大学[5]とシンシナティ大学[6]の研究成果が注目を集めている。

ケーブル素材以外の技術開発課題としては、最初のケーブルの展開方法、2 番目以降のケーブルの展開方法（宇宙船の利用）、アンカーの構築、静止衛星の宇宙ステーション化、軌道上のプラントとしての小惑星の利用、ゴンドラの運転方法等が挙げられるが、いずれも、理論的には既存技術の応用で可能なものであり、革新的な技術開発が不可欠というものではない。ただし、これらを実際に運用可能な技術段階に到達させるためには、それなりの試験と研究を重ねる必要がある。

なお、Edwards の報告書では、これらの各論点についても一応の検討が行われているので、詳細については原著を参照して頂きたい。

2.5 技術開発コスト

Edwards の報告書では、軌道エレベータの建設コストの試算が行われているが、CNT の技術開発コストに関する言及は存在しない。なぜなら、Edwards の報告書では、必要性能の CNT が早晩開発されるという想定で検討が行われているからである。しかし、現

[5] テキサス大学では、オーストラリア連邦科学産業研究機構植物繊維技術研究センターと共同で、多層 CNT で幅 1cm、長さ 1m を超える透明シートを開発した。これは、触媒を用いた CVD によって合成された多層 CNT が林立する森（Forest）の側面からシートを紡ぎだす手法で、できあがった CNT シートは、175MPa/(cm^3)の強度を持つという。http://www.utdallas.edu/news/archive/2005/carbon-nanotube-sheets.html 参照。

[6] シンシナティ大学は、First Nano, CVD Equipment Corporation と協力して、CNT そのものを 7mm 以上に成長させる技術を開発した。http://www.sciencedaily.com/releases/2006/11/061129092204.htm 参照。

状の CNT の性能は、いまだに軌道エレベータを実現できる水準には達していない。これを達成するためには、幾つかの技術的なブレイクスルーが必要な状況にあることは、CNT の研究が進展するに応じて明らかとなってきた。

では、その技術開発を行うためのコストはどの程度必要であろうか。本レポートにおいて、そのコストを推計することは不可能であるが、現在の技術開発予算の転換という枠組みから、補助的な検討を加えることはできる。

たとえば、2006 年度の NEDO におけるナノテクノロジー・材料分野の研究開発予算として計上されているのは 140 億円となっている。これに対して、国全体でのナノテクノロジー関連の技術開発予算は、2004 年度のデータとなるが、940 億円となっている。現状における CNT 関連の技術開発予算はこれらのごく一部を占めるに過ぎないが、大枠としては、この予算枠をひとつの参照軸と考えることができる。

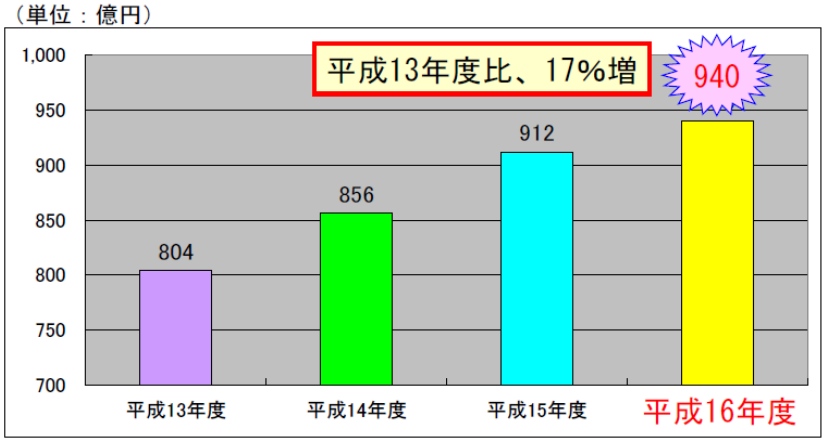


図 2-8　ナノテクノロジー・材料分野における予算の推移

出典：ナノテクノロジー・材料研究開発推進プロジェクトチーム会合（第 7 回）平成 16 年 3 月 10 日、配布資料「ナノテクノロジー・材料分野の平成 16 年度政府予算案について」
http://www8.cao.go.jp/cstp/project/ntpt/ntpt_no7/material_1-1.pdf

また、最終的に軌道エレベータの実現を想定した技術開発という点では、宇宙開発予算も関連予算とみなすことができる。2004 年度の日本の宇宙開発予算は、文部科学省、経済産業省、総務省、国土交通省、環境省、内閣府の総額で 2732 億円[7]と報告されている。

現在、日本の宇宙開発はロケット中心であるが、これを軌道エレベータ開発に切り替えることができるのであれば、相応の予算を使用することができるはずである。

[7] 社団法人日本航空宇宙協会データ

3.実現想定時期

強度 100GPa の CNT 構造材の実現目標時期：2030 年
軌道エレベータ建設の実現目標時期：2050～2100 年

軌道エレベータの実現は、単なる技術開発プロジェクトではなく、技術開発課題達成後に建築プロジェクトを発足させなければ、構想の実現には至らない。実現目標時期を上記にように、50 年間のタイムラグを含んで設定したのは、困難はむしろ建築プロジェクトの実現の方にあると考えるためであり、そこには、政治的な課題が多数存在すると考えられるからである。

3.1 技術開発のタイムスケール

軌道エレベータ実現に関する技術開発において、最も重要な課題は前項で示した 100GPa 以上の強度を持った CNT 製のケーブルの開発である。これの成否が、本プロジェクトの成否そのものを左右する。

しかし、このケーブル開発について楽観的に考えなければ、軌道エレベータの実現という構想自体が覚束なくなるので、ここでは、この技術開発のタイムスパンを、最大で 20 年間と仮定する。

まず、最初の 5 年間で、世界の技術開発の現状調査、FS 調査等を実施し、技術開発計画全体の構想を立て、続く 10 年～15 年間を実際の技術開発に当てる。もちろん、可能な限り短期間で成果を挙げることが望ましい。

次に、CNT 以外の技術開発についても、これと平行する時間軸において実施する。これについては、Edwards の報告書を叩き台とすることが有効であると考えられるので、ここから、個別の課題ごとに 5 年～15 年の時間で技術開発を達成するように努める。

3.2 建設プロジェクトのタイムスケール

建設プロジェクトについては、Edwards の報告書において、次頁の図 3-1 に示すように 50 年間のタイムスケールが見積もられている。ただし、このタイムスケールには、小惑星帯における資源採掘、火星への殖民や火星における軌道エレベータ建設まで含んだものとなっている。

Edwards の構想では、最初のケーブルの展開作業を最初の 10 年間で終え、以後の 40 年間で軌道エレベータを実際に運用可能な状態にさせるよう計画されている。

しかし、この計画は Edwards が示した技術的前提において設定されたもので、政治的な側面に対する斟酌はなされていない。

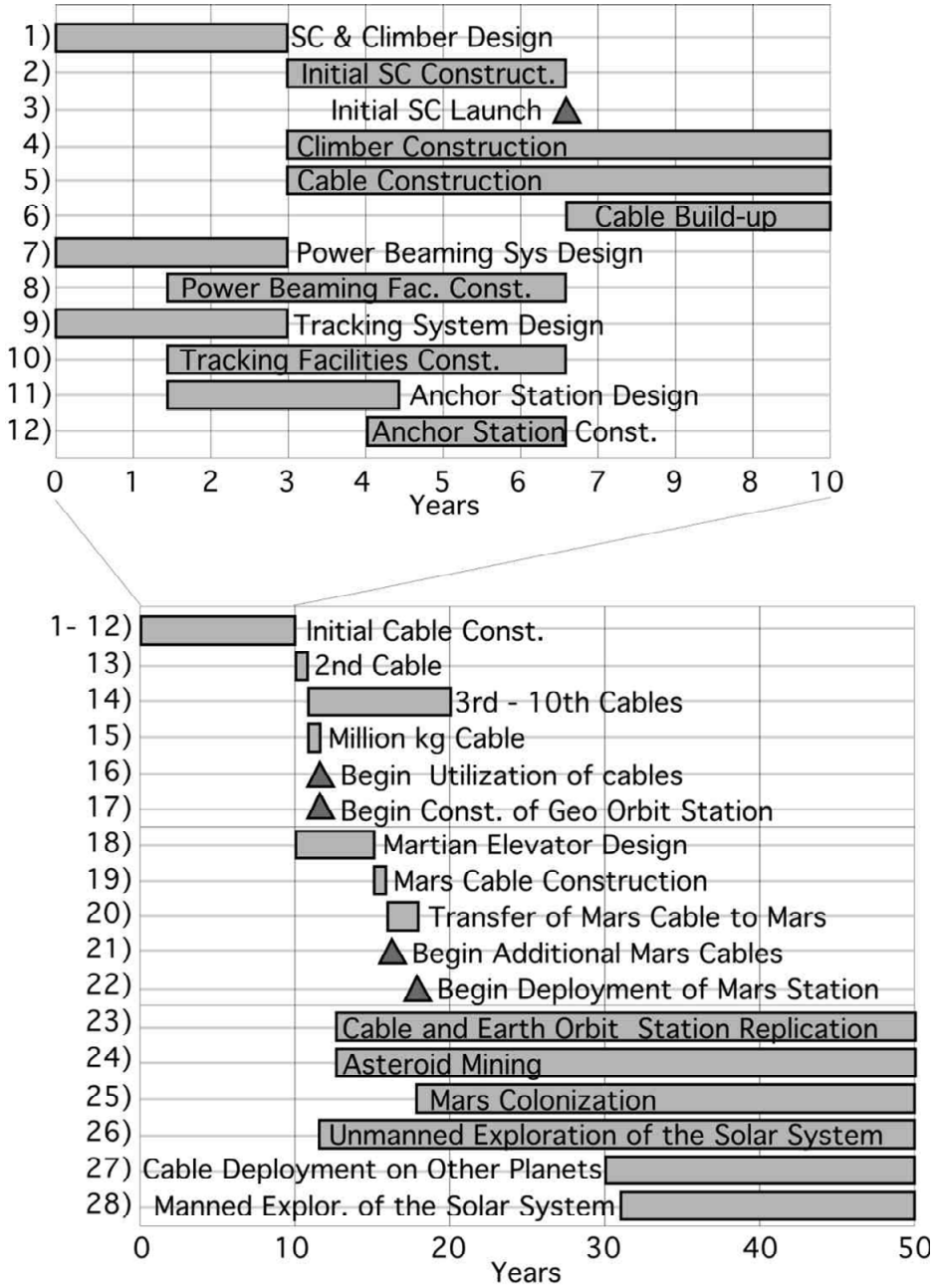


図 3-1　軌道エレベータの建設シナリオとスケジュール

出典：The Space Elevator , October 31, 2000, Bradley C. Edwards, Ph.D.

4.プロジェクトの構成と日本の役割

4.1NASA 等のプロジェクト構想

現在 NASA では、Centennial Challenges（百年の挑戦）[8]というプロジェクトの第一弾として、軌道エレベータの基礎となる技術を 2010 年までに実証しようというプロジェクトを立ち上げ、ケーブルやゴンドラ製作のコンテストを実施している[9]。

図 4-1　NASA の Space Elevator 構想図

出典：http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast07sep_1.htm

しかし、これらのコンテストの賞金はかなり低く、プロジェクトの実効性については議会等で疑問の声も出ている。

また、High Lift Systems 社から分離してできた LiftPort 社[10]では、2031 年 10 月 27 日を軌道エレベータの運行開始予定日として建設計画を推進している。ただし、これについても当初の計画では、2018 年 4 月 12 日を運行開始予定日としてものが延期されている。現状からするなら、この予定も相当無理なものと考えられる。

4.2 日本主導の技術開発プロジェクト立ち上げの意義

このような中、日本が主導して、軌道エレベータ用の CNT 構造材の技術開発プロジェクトを立ち上げる意義は非常に大きいと思う。これまでも見てきたように、CNT に関する日本の技術開発の実績は世界の中でもトップレベルにあるが、その方向性はどちらかと

[8] http://centennialchallenges.nasa.gov/参照。
[9] http://www.elevator2010.org/site/index.html 参照。
[10] http://www.liftport.com/参照。

いうと情報電子・エレクトロニクス分野等への応用研究が主導するものであり、宇宙工学や構造材利用という観点における研究は米国に一歩遅れを取っているとみなさざるを得ない。

しかし、CNT 発見国として、この分野をないがしろにすることは、やがて大きな禍根を残す可能性があり、特にそれを象徴する人類史上のモニュメントが軌道エレベータとなることが想像できる。

米国の軌道エレベータプロジェクトは、現在のところ足踏み状態とみえるが、もし、CNT 構造材において米国の技術開発がブレイクスルーを成し遂げた場合、日本は長期的かつ国家的な損失を蒙ることになるはずである。

そのような状態を回避するためにも、今こそ、ここに示した技術開発プロジェクトをナショナルプロジェクトとして立ち上げる必要がある。

4.3 技術開発プロジェクトの実施体制とリーダー

CNT 構造材および軌道エレベータ付帯技術に関する技術開発プロジェクトは、日本が国家レベルで取り組むべき技術開発案件であり、プロジェクトの担い手は現状においては JAXA（宇宙航空研究開発機構）が相応しいであろう。

実際の研究開発実施主体としては、JAXA 以外にも AIST（産業技術総合研究所）のナノカーボン研究センターをはじめ、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）、NIMS（物質・材料研究機構）、JST（科学技術振興機構）、理化学研究所等のリソースを糾合し、研究開発チームを編成するとともに、民間企業の参画も募る。

その一方、プロジェクト管理等については国家戦略的なマネージメントの下で行うべきである。

4.4 予算負担

予算については、現在のナノテク関連の技術開発予算と宇宙開発予算から抽出する。予算規模は、当初の 5 年間の予備研究を 10 億円程度で実施し、実際の研究開発に際しては、予備研究の調査結果に基づいて予算規模を判断することとする。

4.5 建設プロジェクト実現への課題

建設プロジェクトについては、技術開発の成果が得られて初めて具体的な構想を立て得るが、いずれにしても日本単独での建設は不可能であろう。

これを実現するためには、現在進行中の国際宇宙ステーションで行われている様なプロジェクト形態を更に拡大した形で行う必要があると思われるが、軌道エレベータ建設プロジェクトを立ち上げるための政治的ハードルは遙かに高いことが予想される。

その実現は人類史における大いなるターニングポイントとなるであろう。

以上