

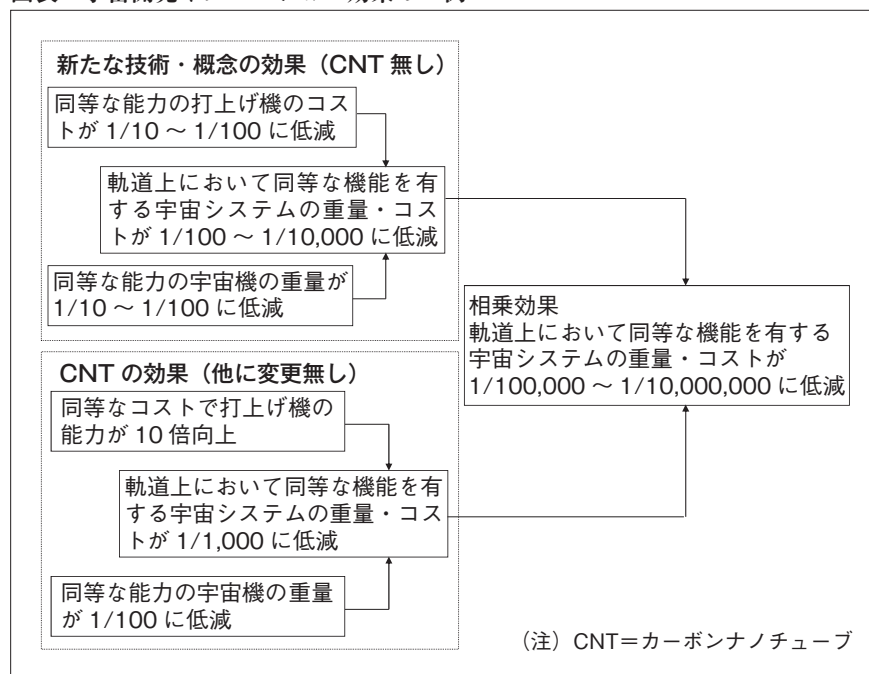
宇宙開発に於けるイノベーション創出に向けて

地球規模の課題への対応に関し、宇宙開発は様々な可能性を秘めている。例えば、人類の喫緊の課題である地球温暖化およびエネルギー問題については各々、多数の衛星を配置するなどして、地球への太陽光入射量を減少する事により地球を冷却化し、地球温暖化問題の解決を目指す「地球の日除け」および地表に比してエネルギー強度が大幅に高い地球周回軌道に於いて太陽光発電を行う「宇宙太陽光発電」という構想が提案されている。

一方、現状の宇宙輸送手段であるロケットの打上げ費用が高価である事などから、費用面が一つの懸案材料と成っている。そうした中で、新たな概念の導入により、従来に比べて遥かに低価格で宇宙活動を実現する事が可能と成り、新たな宇宙開発の展望が開けるとの主張も出て来ている。打上げ費用の低減を目指す構想としては、米国スペース・シャトルの様な一部再使用型ではなく、航空機並みの運用が可能に成る完全再使用型宇宙輸送系に加え、ソーラー電力セイル、MMOSTT、宇宙エレベーターといった太陽光エネルギー、地球の自転エネルギーその他の再生可能エネルギーを利用する事ができる未来の宇宙輸送系などのアイデアが出されている。これらは、推進剤が不要または消費量が大幅に減少する為、打上げ費用の大幅な低減が期待できるとされ、宇宙開発にイノベーションをもたらす可能性が有る。

米国では、この様な宇宙開発に於けるイノベーション創出に取り組む為の組織の再立ち上げが検討されている。我が国においても、既存概念にとらわれず、全く新たな概念で宇宙開発を推進できるように成る為、先端的な研究活動に本格的に取り組み、宇宙開発にイノベーションをもたらし、宇宙開発による社会・経済への貢献を一層強化したいと考える。この様な研究活動の普及・啓発により次世代を担う青少年の科学技術に対する関心を高める事も期待できる。

図表 宇宙開発イノベーション効果の一例



出典：参考文献⁵⁾

宇宙開発に於ける イノベーション創出に向けて

清水 貴史
推進分野ユニット

1 はじめに

SF作家アーサー・C・クラークは、未来の科学技術について予測¹⁾をしており、図表1はその内の宇宙開発に関するものである。超高強度かつ軽量のカーボンナノチューブ(CNT)の出現以来、(1)の宇宙エレベーターは現実味を帯びつつあり、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の技術戦略マップ2009のナノテクノロジー分野の技術ロードマップ²⁾では、2050年頃の実現が予測されている。(2)の宇宙防衛隊は、その必要性が常に唱えられている。約百年前の1908年6月30日には、シベリアのツングースカに太陽系小天体が落下し、大爆発を起こした^{3, 4)}。大都市ではなく無人地帯であった為、人的被害は無かったものの、爆発現場の記録写真はその破壊の凄まじさを示している。太陽系小天体の地球落下は、破壊の規模は大きいものの、発生頻度は極めて低く、またその様な地球落下を事前に阻止する事は技術面・費用面で困難な為、地球近傍天体(NEO)から人類を守る宇宙防衛隊構想は未だ実現していない。(3)の静止通信衛星は既に実現しており、通信・放送の分野で我々の生活に不可欠なものとなっている。(4)の原子力

図表1 アーサー・C・クラークの未来予測

(1) 宇宙エレベーター
・宇宙機と地上の固定装置とを結ぶ紐(テザー)で構成。テザーは、地上から宇宙への物資の輸送にも使用。
・1979年の小説「楽園の泉」では、架空の島の山頂に建設。1981年の技術論文で精密化。実際には、露科学者コンスタンチン・ツィオルコフスキーが1895年に発案。
・NASAは長期に亘り宇宙エレベーターを研究。近年のカーボンナノチューブの進展により、最大の課題である宇宙機と地球とを結ぶのに充分な強度のテザーが開発出来る可能性。
・技術開発の進展を促す為、賞金を提供する競技会も存在。
(2) 宇宙防衛隊
・未実現。1972年の小説「宇宙のランデヴー」では、2131年、小惑星の衝突から地球を守る地球防衛プロジェクトに従事する天文学者が太陽系に向けて突き進む異星人の宇宙船を発見。
・小惑星および隕石は度々地球に接近。NASAは1992年以来、これら天体の監視手法およびこれらが及ぼす脅威の評価方法について研究(Spaceguard Survey)。地球近傍天体(NEO)の約90%を検出する事が米国の政策目標。
・小説「神の鉄槌」では、接近する小惑星の表面に推進系を設置して、その軌道を逸らす事が出来ると提案。
・日本の探査機「はやぶさ」は2005年、小惑星イトカワ着陸に成功。但し、推進系を設置して軌道を逸らす事は未だSFの世界。
(3) 静止通信衛星
・ヘルマン・ポトチュニクおよびコンスタンチン・ツィオルコフスキーが最初に考案。1945年の論文で静止衛星群によるグローバル通信網の構築を提案したのがクラークの功績。
・赤道上空約35,786kmを周回する衛星は、その公転周期が地球の自転周期と一致する為、同一地点の上空に滞在。
・1945年の論文から僅か19年後の1964年、最初の静止通信衛星(シンコム3号)が軌道に投入、太平洋上空に位置、東京オリンピックの映像を米国に中継、世界初の太平洋間TV中継を実現。
・静止衛星通信網は現在、世界のあらゆる地域で音声通信、データ伝送、TV放送の為に利用。気象観測、陸域観測にも活躍。
・クラークは真空管技術の使用を想定、大型かつ定期的な保全が必要とされたものの、予想もされていなかったトランジスタおよびICの出現により、衛星の小型化が実現。
(4) 原子力宇宙飛行
・1951年の小説「宇宙への序曲」では、原子力を利用して宇宙船(プロメテウス号)を推進。
・冷戦初期の米国では、後部に配備した一群の原子爆弾を爆発する事により推力を得る構想「プロジェクト・オリオン」を検討。この構想は未実現。旧ソ連では、原子力電池を搭載した衛星を配備、コスモス954は1978年、カナダに落下、周辺を汚染。
・NASAでは一時、原子力発電による探査機を構想(プロジェクト名「プロメテウス」)。木星の水の衛星群を周回して生命体を探査する計画(JIMO)。同計画は現在、中断、再開の見込みは不明。

出典：参考文献¹⁾

宇宙推進は、米国航空宇宙局(NASA)が一時、木星の衛星群を周回する探査機への搭載を計画するも、現在は中断されている。現状の宇宙輸送手段であるロケットによる打上げ価格は、10,000

ドル/kgのオーダーである。衛星はロケット打上げ環境に耐える剛性を有すると共に、高価なロケット打上げ費用の為に軽量化が求められ、更には軌道上での保全が不可能な為、高信頼性・長寿命化が求められ、高価な物と成っている。一方、従来技術の延長線上には無いものの、荒唐無稽な空想・空論で

はなく、正しい物理法則に基づいた新たな概念の導入により、従来に比べて遥かに低価格での宇宙活動の実現が可能と成り、全く新たな宇宙開発の展望が開けるとの主張⁵⁾も在る。

本稿では、先ず、地球規模の課題への対応に関し、宇宙開発が可能性を秘めている事を示す。次に、宇

宙開発に於けるイノベーション(以下、「宇宙開発イノベーション」と言う)をもたらす得る可能性が有る概念・アイデアなどを紹介すると共に、主に宇宙先進国である米国を例に採って、このような先端概念研究活動を支える研究組織について述べる。

2 人類の直面する重要課題と宇宙技術による解決策

全米研究評議会(NRC)が2009年に発表した報告書⁶⁾では、気候・環境監視、科学探査、先端宇宙技術開発、米国リーダーシップの下での国際協力の推進などに加え、米国としての優先事項に沿った宇宙活動の推進が勧告されている。このような宇宙活動としては、従来は対象とされなかった分野も検討対象に成るとしている。

地球温暖化およびエネルギー問題は現在、人類が直面する最重要課題である。世界各国では、英科学誌「nature」でも紹介⁷⁾されている通り、脱化石燃料を目指して、バイオ燃料に加え、風力・地熱・太陽光・波力といった新たな再生可能エネルギーの開発・利用普及活動が推進されている。また、我が国の温室効果ガス観測技術衛星「いぶき(GOSAT)」⁸⁾は、地球温暖化の原因と成る温室効果ガスの濃度分布に関するグローバルな観測を目的として世界で初めて打ち上げられた衛星である。CO₂回収・貯留(CCS)⁹⁾の様に大気中への温室効果ガスの排出を直接抑制できるものではないにしても、CO₂の排出源・吸収源を特定する事により、地球温暖化問題への対応に貢献できると期待されている。

宇宙活動から人類へのより能動的な貢献は可能であろうか。例えば、静止軌道(GEO)等の地球周回軌道に於いて太陽光発電を行って、

発電したエネルギーをマイクロ波またはレーザー光で地球に送電する「宇宙太陽光発電」^{10, 11)}、また地球-太陽間のラグランジュ点の一つに多数の衛星を配置する等して、地球への太陽光入射量を減少させる事により、地球を冷却化し、地球温暖化問題の解決を目指す「地球の日除け」といった「気候改造技術」(「geo-engineering」または「climate engineering」)¹²⁾が提案されているものの、例えばエネルギー問題については上記 nature 誌の記事⁷⁾でも示されている通り、現状では宇宙太陽光発電は技術面・費用面等から、未だ現実的な解決策とは見做されていない。

2-1

地球温暖化対策

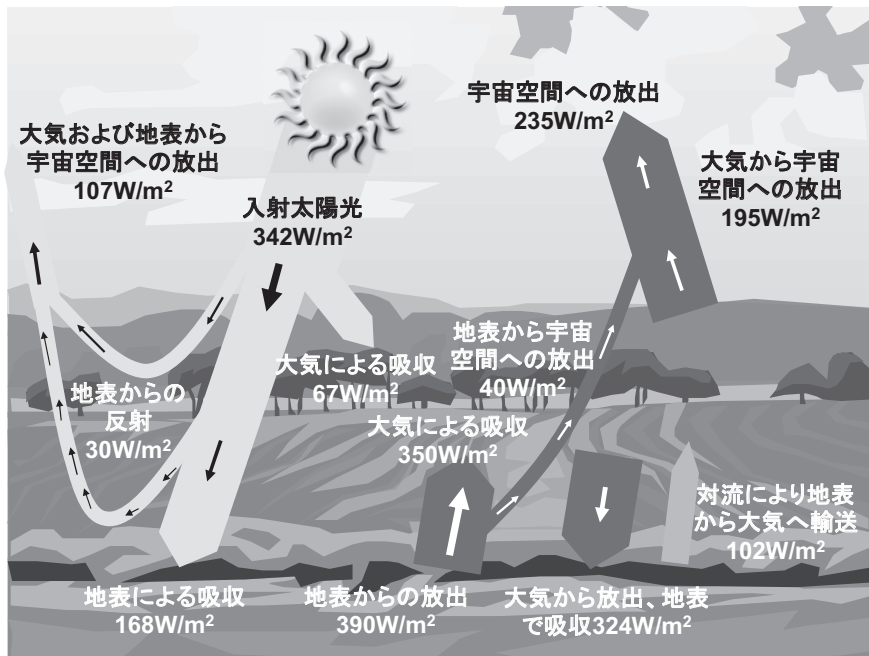
地球温暖化問題は我々人類が直面する喫緊の課題の一つであり、2009年7月にイタリアで開催された主要国首脳会議(ラクイラ・サミット)では、同年12月のコペンハーゲンでの合意に向け、産業革命からの気温の上昇を2度以内に抑える為に、2050年迄に世界全体で温室効果ガスの排出量を半減する事が再確認¹³⁾された。地球温暖化対策の為、温室効果ガスの排出量を削減する事は勿論重要ではあ

るものの、気候を人為的に操作する気候改造技術は、排出量削減努力のみで温暖化を阻止できない時の緊急避難措置として議論されている¹⁴⁾。

英国王立学士院は2009年9月、気候改造技術に関する包括的な報告書¹⁵⁾を発表した。大気中のCO₂を人為的に削減する方法(Carbon Dioxide Removal: CDR)および太陽からの入射光を人為的に操作する方法(Solar Radiation Management: SRM)が議論されている。SRMについては、ピナツボ火山の噴火による火山灰が長期間に亘り大気中に滞留し、入射太陽光が遮蔽された為、気温が約0.5度下がった現象から、その実効性の実証されている。

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の報告書¹⁶⁾によると、大気中のCO₂の量が産業革命以前の値から二倍に成った場合、放射強制力は約4W/m²増加すると考えられる。なお、放射強制力とは、大気と地表との間のエネルギー平衡状態が、温室効果ガスの濃度変化など様々な要因により変化した場合、その変化量を対流圏と成層圏との境界面である圏界面に於ける単位面積当りの放射量(W/m²)の変化で表す指標である^{16, 17)}。地表を加熱する効果が有る場合には正の値、また地表を冷却する効果が有る場合には負の値で示される。

図表 2 大気の平均的なエネルギー収支



出典：参考文献¹⁵⁾ の 21 頁

図表 2 は、太陽と地球との間のエネルギー収支を示しており、地球大気は約 235 W/m² で平衡状態になっている事が分かる¹⁵⁾。近似的には入射太陽光を 1% 減少する事ができれば、放射強制力を約 2.35W/m² 減少できる事に成り、上記約 4W/m² の放射強制力の増加を相殺する為には、入射光を約 1.8% 減少すればよい事になる。

図表 3 は、期待される放射強制力削減量の最大値、単位放射強制力削減当りの年間費用およびリスクの観点から、様々な SRM 手法を比較したものである¹⁵⁾。①居住地域の建物・道路等のアルベド(注：太陽からの入射光に対する反射光の強度の比)を増加させる手法、②

図表 3 SRM 手法の比較

手法	最大放射強制力 (W/m ²)	単位放射強制力当り年間費用 (10 ⁹ ドル / 年 / W/m ²)	潜在的副作用	リスク
居住地域アルベド ^(a)	-0.2	2,000	地域的气候変動	低
草原・穀物アルベド ^(b)	-1	N/A	地域的气候変動 農産物収穫量の減少	中 低
砂漠表面アルベド ^(c)	-3	1,000	地域的气候変動 生態系への影響	高 高
雲アルベド ^(d)	-4	0.2	中止による影響 ^(h) 地域的气候変動	高 高
成層圏エアロゾル ^(e)	無制限	0.2	中止による影響 地域的气候変動 成層圏化学組成の変化	高 中 中
宇宙反射鏡 ^(f)	無制限	5	中止による影響 地域的气候変動 農産物収穫量の減少	高 中 低
通常の削減対策 ^(g) (比較の目的のみ)	-2 ~ -5 ^(g)	200	農産物収穫量の減少	低

(a) 放射強制力の見積もりはレントンおよびボーン (2009) から引用。マーク・シェルドリックは、10 年毎の再塗装ならびに塗装費および人件費として 15,000 ポンド /ha を仮定して、都市部表面の白色塗装の費用を見積もった (私信)。この仮定によると、人類の居住地域である 3.25×10¹²m² を「白い屋根手法」で覆う総経費は、約 4,880 億ポンド / 年、即ち約 2.4 兆ポンド / 年 / W/m²。

(b) 放射強制力の見積もりはレントンおよびボーン (2009) から引用。

(c) 放射強制力の見積もりはガスキル (2004) から引用。

(d) 放射強制力の見積もりはレーマンら (2008) から引用。ブライアン・ローンダーの費用見積もりでは、年当り 300 ~ 400 隻の船舶および運用費を仮定して、年当り総額約 10 億ポンド。

(e) この費用は、ロボックら (出版準備中) による見積もりの最小値で、9 機の KC-10 エクステンダー航空機を使用して、年当り 1TgC の H₂S を成層圏に散布。年当り 1Tg の S により、-1W/m² の放射強制力が得られると仮定 [参考：レントンおよびボーン (2009) は、CO₂ 倍化を相殺する為の量として、1.5 ~ 5TgS/ 年を採用]。

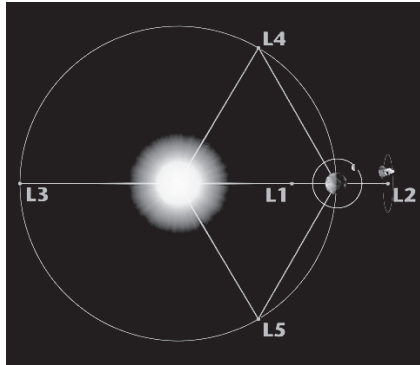
(f) CO₂ 倍化を相殺するのに十分な放射強制力 (-3.7W/m²) を得る為に、100,000t の打上げ重量を仮定。費用見積もりは、将来実現すると期待される打上げ費用および太陽光反射装置の寿命に専ら依存。打上げ費用は 5,000 ドル/kg および反射装置は 30 年毎の交換が必要と仮定。この仮定から、-3.7W/m² を得る為の総費用は年当り約 170 億ドル、即ち約 50 億ドル / 年 / W/m² [キース (2000)、キースとの私信]。

(g) 通常の削減対策：CO₂ を 450 ~ 550ppmv で安定化する為には、世界総生産 (GWP) の 0.5 ~ 1% が必要 [ヘルド (2007)]。現状の GWP は年当り約 40 兆ドルであり、対策費は年当り約 4,000 億ドルの計算。排出が削減されない場合、2100 年迄に約 750ppmv と仮定すると、削減されない場合の放射強制力 (RF)=3.7/ln(2) × ln(750/280)=5.25W/m² および、通常の削減対策が採られた場合、RF=3.7/ln(2) × ln(500/280)=3.1W/m²。従って、この様な削減対策が採られる事による放射強制力の変化は、約 2.15W/m²。この値から通常の削減対策の費用は、約 2,000 億ドル / 年 / W/m²。スターンは、CO₂ 換算で 500 ~ 550ppmv に安定化する為には、(http://www.occ.gov.uk/activities/stern_papers/faq.pdf) 全世界の GDP の 1% が必要と算定。全世界の GDP は現状約 35 兆ドルである為、年当り費用は約 3,500 億ドルの計算。この場合も、約 1,500 ~ 2,000 億ドル / 年 / W/m² という通常の削減対策の費用と同様な結果。

(h) 「中止による影響」とは、気候改造技術システムが突然、終了または故障する事により引き起こされる結果の意味。SRM による解決策では、吸収される入射太陽光の削減により温室効果ガスの増加を相殺する事を目指している為、不具合が発生した場合、気候変動がかなり急速に進展、気候改造技術が無い場合に引き起こされるであろうものより遥かに適応が困難な温暖化が出現。SRM 手法で、最も大きな放射強制力を生み出し、かつ先端技術に依存するものは、この点でリスクが高いと判断。

出典：参考文献¹⁵⁾ の 35 頁

図表 4 太陽-地球間ラグランジュ点



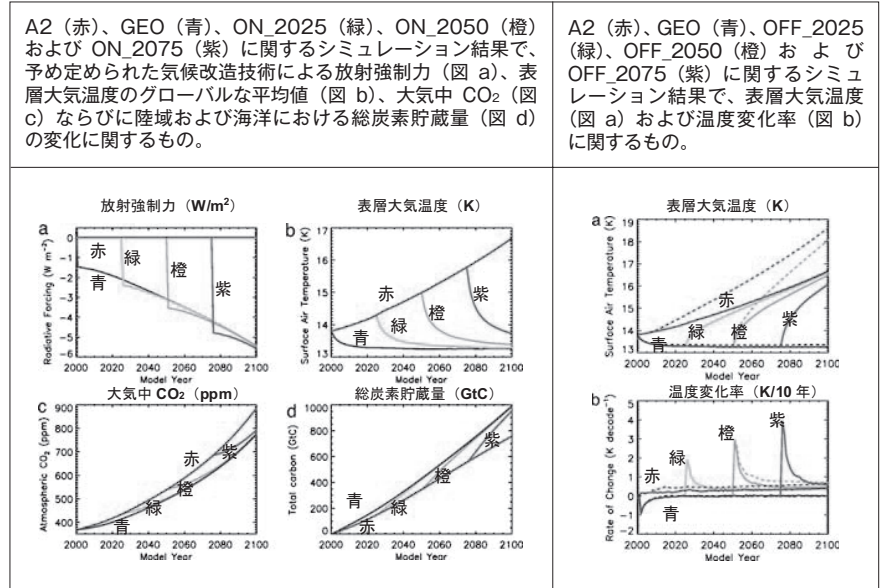
出典：NASA

草原・穀物をアルベドの高い品種に変更する手法、③砂漠をアルベドが高い物質で覆う手法、④海水を上空に噴出して、海洋上空の雲形成核(CCN)の数密度を増加させる事により、雲のアルベドを上昇させる手法、⑤ピナツボ火山の噴火で実証された様に、成層圏のエアロゾルを増加する事により、入射太陽光を反射する手法、および⑥例えば、太陽と地球との重力が均衡するラグランジュ点の一つ(図表 4 の L1)に反射鏡等を設置する事により、地球への入射太陽光の量を削減する手法、ならびに参考として、⑦通常の温室効果ガス排出削減対策が比較されている。

潜在的リスクは除き、費用面だけ見ると、通常の削減対策に比べ、雲のアルベドの上昇または成層圏のエアロゾルの増加による地球の冷却方法は魅力的である。必要な技術の完成時期を除けば、第一印象では高額に成るかと思われる宇宙反射鏡も、この比較ではかなり安価に見積もられている。

図表 5 は、IPCC の六つの温暖化シナリオの内、「A2 シナリオ」をベースに、気候モデルを使用して、気候改造技術による冷却効果および「中止による影響」をシミュレーションにより評価した結果を示している¹⁸⁾。図表 5 の左側は、二酸化炭素の増加による放射強制力の増加を 2000 年(GEO：青)、2025 年(ON_2025：緑)、2050 年(ON_2050：橙)および 2075 年(ON_2075：

図表 5 気候改造技術による冷却効果および中止による影響



出典：参考文献¹⁸⁾

紫)に各々、気候改造技術で相殺し始めた場合の表層大気温度などのシミュレーション結果である。同じく右側は、2000 年から気候改造技術により二酸化炭素の増加による気温の上昇を相殺し始めた場合(GEO：青)をベースに、気候改造技術を 2025 年(OFF_2025：緑)、2050 年(OFF_2050：橙)および 2075 年(OFF_2075：紫)に各々、中止した場合の表層大気温度などの変化を示している。

SRM が実施される場合、長期間を要する CDR と比べ、気温は数年程度で低下する事ができる。しかし、大気中に在る二酸化炭素その他の温室効果ガスを削減するものではない為、一旦実施された SRM 対策を中止した場合、急激な温暖化が起こり、それによる環境変化に見舞われる事^{15, 18)}になるので、SRM 対策を継続する事が必須になる。大気中の二酸化炭素の溶融による海水の酸性化¹⁹⁾の問題も残る。二酸化炭素の極めて長期的な大気中滞留期間を考慮すると、二酸化炭素排出量の削減および CDR による大気中の二酸化炭素の除去もまた必須という事に成る。

英国王立学士院の報告書¹⁵⁾は、気候改造技術が単一の国家・組織などによる単独行動で実施される

場合、他の国・地域に悪影響を及ぼす可能性も有る為、国際協力による研究開発・評価、国連などの国際機関による多国間枠組みでの管理なども併せて勧告している。

2-2

宇宙太陽光発電

太陽は自然の核融合炉であり、実現に向け研究されている地上の核融合炉とは異なり、約 46 億年前から既に存在している。宇宙太陽光発電は、一日 24 時間、一年 365 日、昼夜・天候・季節に関係無く発電でき、間歇的な地上の太陽光発電および風力発電と異なり、ベース電力を供給可能である^{10, 11)}。太陽光の強度(図表 6)は、地球近傍の宇宙空間では約 $1,366 \text{ W/m}^2$ であり、一方、地上では大気による散乱・吸収および季節・気象・昼夜の変化による影響を受ける為、平均約 250 W/m^2 である¹¹⁾。

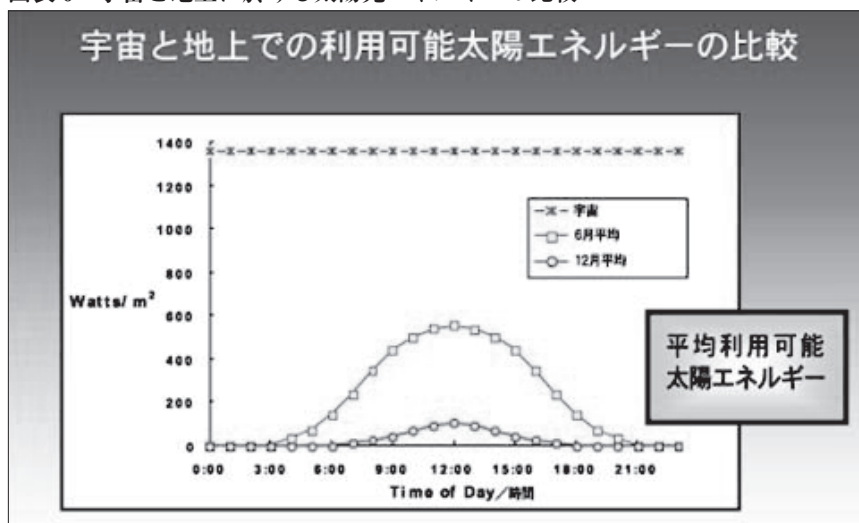
太陽光の単位面積当りエネルギー強度は軌道上の方が大きい為、GW 級発電の為の大規模宇宙構造物が検討された事もある²⁰⁾。宇宙太陽光発電衛星は、発電した電力をマイクロ波またはレーザー光で

送電する事が想定されており、送電ビームによる環境・生物への影響が懸念される一方で、安全対策として、地上受信アンテナ周辺に於けるビーム強度を、例えば米国労働安全基準(OSHA)の上限値 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下²¹⁾とすれば、生物への影響は殆ど無いとの主張²²⁾および調査結果²³⁾も有る。発電所からの送電網などのインフラが整備されていない地域への電力供給⁵⁾といった利用も考えられる。

米国防総省の宇宙国家安全保障室は、原油価格が高騰していた2007年10月10日、宇宙太陽光発電に関する報告書¹¹⁾を公表し、この報告書の公表は我が国でも新聞などで報道された。宇宙太陽光発電は、後述する宇宙エレベーターと同様に古くて新しいアイデアである。米国アーサー・D・リトル社のピーター・グレイザー博士が1968年、マイクロ波送電による宇宙太陽光発電を提唱した後、オイルショックに遭遇した1970年代から80年代初めには、米エネルギー省(DOE)および米国航空宇宙局(NASA)が共同研究を行い、「1979年参照システム」を発表した^{20, 24, 25)}。

この共同研究によると、平板状の太陽光発電衛星(SPS)は、本体の寸法約 $5\text{km} \times 10\text{km} \times 0.5\text{km}$ および送電用アンテナの直径約 1km で、一基当たり約 $5 \sim 10\text{GW}$ の電力を連続的に発電する²⁰⁾。約60基のSPSを静止軌道上に配備する構想で、低高度軌道への物資の運搬に要する費用の削減の為、例えば、二段式完全再使用型宇宙輸送機が必要とされた²⁰⁾。事業費見積もり²⁰⁾は、一基のSPSを含む先行研究開発費、一基のSPSの調達費および一基のSPS当りの年間保全費用が1977年ドルで各々、約1,024億ドル、約113億ドルおよび約203.4百万ドルとされた。最終的に、全米研究評議会(NRC)および米国議会技術評価局(OTA：当時)は、技術的には実現可能であるものの、事業と

図表6 宇宙と地上に於ける太陽光エネルギーの比較



出典：JAXA¹⁰⁾

図表7 宇宙太陽光発電に関する科学技術の進歩

1977 年	2007 年
・太陽光発電 - 効率～10%	・太陽光発電 - 効率～40%→50%
・無線送電 - 半導体増幅器の効率～20% - 機械式アンテナ指向、200m級ジンバル、 $\Phi 1\text{km}$ のアンテナに7GW供給	・無線送電 - 半導体増幅器の効率～80～90% - 電子ビーム走査、機械式ジンバルは不要
・SSPS 電力管理要求 - 電圧～50,000V	・SSPS 電力管理要求 - 電圧<1,000V
・SSPS 打上げ要求 - 専用再使用型大型打上げ機～250トン	・SSPS 打上げ要求 - 通常の商業打上げ機～25トン
・宇宙用ロボット - 自由度～3 - 制御～事前プログラム、遠隔操作	・宇宙用ロボット - 自由度～30以上 - 制御～自律型、遠隔監視
・軌道上組立 - 宇宙飛行士～数百人 - GEOに大規模宇宙工場が必要	・軌道上組立 - 宇宙飛行士～0人 - 宇宙工場の必要無し

出典：参考文献¹¹⁾の21頁

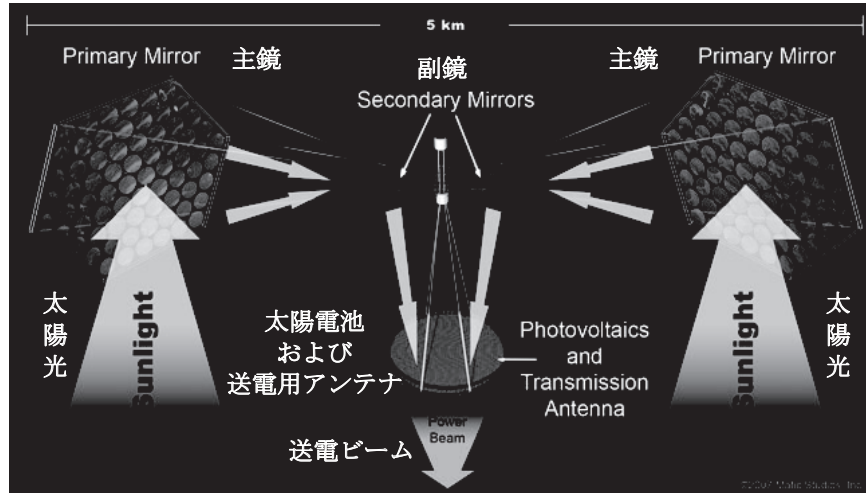
しては経済的に成立し得ないとの評価を下した²⁴⁾。しかし、1990年代および2000年代にも、研究が行われていた²⁵⁾。

30年間の科学技術の進展に伴い(図表7)、宇宙太陽光発電衛星のコンフィギュレーションも進化しており、宇宙国家安全保障室の報告書¹¹⁾の例では、太陽光を主鏡および副鏡で集光して太陽電池に照射し、単位重量当りの発電量の増加が図れる設計になっている(図表8)。太陽電池の直ぐ裏側にマイクロ波送電部が設置されており、配線の引き回しの問題も解消されている。

民間による構想としては、例え

ば、米PowerSat社の事例²⁶⁾が有る。静止軌道上に約300機の衛星を配備し、発電した電力は、これら衛星で仮想的な送信アンテナを構成する事により、地上の受信アンテナにマイクロ波で無線送電する構想であり、衛星の低高度軌道(LEO)から静止軌道(GEO)への移動には電気推進系を採用する(これら2件のアイデアについて、特許を申請)。総発電量は約2.5GWであり、薄膜太陽電池セルの採用などにより衛星を軽量化して、打上げ費用を低減する事により、事業費約30～40億ドルおよび開発期間約10～12年程度を見込んでいる。

図表 8 宇宙太陽光発電衛星（一例）



©Mafic Studios, Inc.、出典：参考文献¹¹⁾の8頁

3 宇宙開発イノベーション

3-1

宇宙開発イノベーションの 必要性

図表 9 に宇宙太陽光発電システムの費用見積もりの一例を示す^{27, 28)}。この見積もりは、宇宙空間では常時発電できる事を利用したベース電力供給に供する場合のもので、2020 年～2030 年頃の実現を想定している。打上げ費用は、実際の値ではなく、宇宙太陽光発電システムが地上システムと競合できるように成る為に要求される値であ

る。宇宙太陽光発電システムが地上システムと競合できるように成る為には、現状の打上げ費用から最大二桁程度の改善を要する事が分かる。欧州では、サハラ砂漠に広大な太陽熱発電システムを構築する事により、再生可能エネルギーの利用拡大を目指す動き²⁹⁾が有り、これが実現する場合、少なくとも欧州にとって、宇宙太陽光発電の実現を目指す意義が薄れる。

上記の通り、宇宙太陽光発電、地球の日除けなど宇宙開発は可能性として地球規模の問題を解決する事ができるものの、現状の技術レベルでは、例えば打上げ費の間

題が有り、経済的実現性が乏しいと考えられる。新たな可能性の開拓の為に、既存の技術の延長ではなく、斬新な概念で宇宙システムを実現できるイノベーションが必要に成る。米国有人宇宙飛行計画再検討委員会は、2009 年 9 月 8 日に暫定報告書³⁰⁾を公表した後、同年 10 月 22 日に最終報告書³¹⁾を公表し、NASA 有人月・惑星探査計画は、予算が当初の見込み通りに伸びなかった結果、現状のままでは意義の有る計画の実現は不可能であるとして、予算の増額と共に、探査目的・手段の見直しを提言した。NASA の大規模宇宙開発プロジェクトでも度々、コストが問題となる。

このような現状に対し、米国の研究者⁵⁾は、図表 10 に示す原則を掲げつつ、宇宙開発イノベーションの実現の為に発想の転換を提唱している。イオンエンジンといった次世代宇宙推進系である電気推進系の採用ならびに主衛星およびテザーと呼ばれるケーブルで構成されるテザー衛星の活用に加え、打上げ環境に耐える為の高剛性の構造物を開発するのではなく、形状の変更が可能な薄膜の宇宙空間での展開または極めて多数の衛星の

図表 9 地上および宇宙発電システムの比較（一例）

総供給電力(GW)	分類 ^{注1)}	発電費用(ユーロ/kWh) ^{注2)}	打上げ費用(ユーロ/kg) ^{注2)}
0.5	地上	0.09 (0.06)	N/A
	宇宙	0.28 (0.28)	
5	地上	0.08 (0.05)	750 (200)
	宇宙	0.04 (0.04)	
10	地上	0.08 (0.05)	620 (90)
	宇宙	0.05 (0.05)	
50	地上	0.08 (0.05)	770 (270)
	宇宙	0.04 (0.03)	
100	地上	0.08 (0.05)	770 (250)
	宇宙	0.03 (0.03)	
500	地上	0.08 (0.05)	670 (210)
	宇宙	0.04 (0.04)	

注 1) 地上は太陽熱発電、宇宙はマイクロ波送電、注 2) () 内の数字は揚水式水力貯蔵システムを使用した時の値

出典：参考文献^{27, 28)}

図表 10 宇宙開発イノベーション創出に有効な原則－宇宙環境は抗うことなく有効活用

1. 構造は情報で代替
2. 分散型宇宙システムの採用。巨大アンテナを実現する為に、多数の衛星が協同する編隊飛行システムを採用
3. 大型ながら軽量のアンテナを実現する為に、形状変更が可能な薄膜を採用
4. 穏やかな宇宙環境下で薄膜を生成
5. 宇宙空間では、物質ではなくエネルギーおよび情報を輸送
6. バンドギャップの異なる複数の太陽電池セルを併用、太陽光発電を高効率化
7. 化学推進系の代わりに電気推進系を使用
8. 長いテザー（紐）の電磁氣的、動力学的および静的特性を活用
9. 遠隔またはアクセスが困難な場所に電力を無線送電
10. 大型かつ複雑な宇宙機の整備、修理および改良
11. 月の重力が弱い点を利用して、月での採掘・製造ならびに月から地球周回軌道および地球への材料および製品の輸送
12. 計算機、センサーおよび人工知能の成果の活用
13. 機能材料、特にナノ材料の活用
14. ナノテク、MEMS および NEMS の活用

出典：参考文献⁵⁾の10頁

図表 11 原則「構造は情報で代替」

- ・ トラス構造の排除。全ての構成要素は精確に軌道制御（編隊飛行）
- ・ 地球上ではなく宇宙空間で形状を形成する主鏡
 - 柔らかいプラスチック製ラップの様な圧電素子の薄膜
 - 支持構造が無く宇宙空間で展開
 - 表面形状の変形が可能
 - 宇宙空間で電子ビームを利用して精確な形状を形成
- ・ 残余の形状誤差は、液晶面で二次補正
- ・ 非常に軽量・安価かつ組立が容易なシステム

出典：参考文献⁵⁾の27頁

協働により、大口径アンテナを実現する事を提唱している。図表 11 は、図表 10 に示す原則の内、「構造は情報で代替」するとの原則を具体化する方法を述べたものである。打上げ時には必要であるものの、宇宙空間では実質的に不必要なトラス構造に代わって編隊飛行を採用する事、また剛構造ではなく表面形状の変更が可能な薄膜により軽量の大型鏡面を軌道上展開する事などが提案されている。

3-2

宇宙開発イノベーションの構想例

(1) 宇宙エレベーター

宇宙エレベーターは実現すれば、宇宙活動に画期的変化をもたらす可能性が有る。露科学者コンスタンチン・ツィオルコフスキーが

1895 年にアイデアを発表した宇宙エレベーター^{32～34)}は現在、重心が静止軌道を周回しつつ、テザー全体が重心の周りを一周回当り一回自転するテザー衛星の一種として研究されている。地球の自転エネルギーの利用に加え、リニアモーターカーによる宇宙エレベーター上の移動が実現する場合、下降するペイロード（貨物等の意味）が放出するエネルギーを他のペイロードの上昇に利用できる為、化学推進ロケットと比べ大幅な打上げ費用の低減が期待できるとされている³⁴⁾。

1960 年、露技術者ユーリ・アルツタノフは宇宙エレベーターに関する理論的考察を発表した^{32、33、36)}。彼の論文³⁶⁾では、ロケットに代わる未来の宇宙輸送系として、一端が赤道上に固定され、重心が静止軌道(GEO)を周回する構造物が考察されている。重心より地球側では地球の中心からの距離の二乗に

反比例する重力が優位、一方、反対側では距離に比例する遠心力が優位と成り、地球の中心からの距離約 42,166km の重心では重力と遠心力とが釣り合う引張構造物である(図表 12 の上)。移動手段としては、最高秒速数 km で移動するリニアモーターカーの様な乗物が想定されており、高度 5,000km に在る最初の停車駅の太陽光発電施設から電力供給を受けるとされている。第二停車駅は静止軌道高度に在り、これから先は遠心力により移動できる為、電力の供給は不要であるとされている。終着駅は高度約 60,000km に在り、食物栽培用温室・観測所・太陽光発電所・作業場・燃料貯蔵庫といった施設に加え、惑星間航行宇宙船の発着場が在り、終着駅の位置では惑星間航行に必要な速度が既に得られている為、地上から発射されるロケットとは異なり、大規模な推進系を使用する事無く、宇宙船の出航が可能であるとされている。

アルツタノフが論文を発表した東西冷戦時は、当時の東側から西側に情報が伝達する事は無く、米国でも研究者らにより独自に構想が練られていた^{32、33)}。その様な研究者の一人であるジェロウム・ピアソンは 1975 年、専門誌に論文³⁴⁾を発表し、宇宙エレベーターの建設に係る技術的問題は、①自重による挫屈、②材料強度および③動的安定性であるとして、解析結果を示した。上記①は、圧縮構造ではなく引張構造の採用により解決する事ができ、地球と反対側の端に錘おもりを設けない場合の全長は、約 144,000km と成り(参考：地球－月間の距離は約 384,000km)、さらに上記②は、重力および遠心力のポテンシャルの和を変数として、テザーの幅を指数関数的に変化させる事により解決できるとした³⁴⁾。

米国のウィリス・タワー(シカゴ)およびエンパイアステートビルディング(ニューヨーク)、マレー

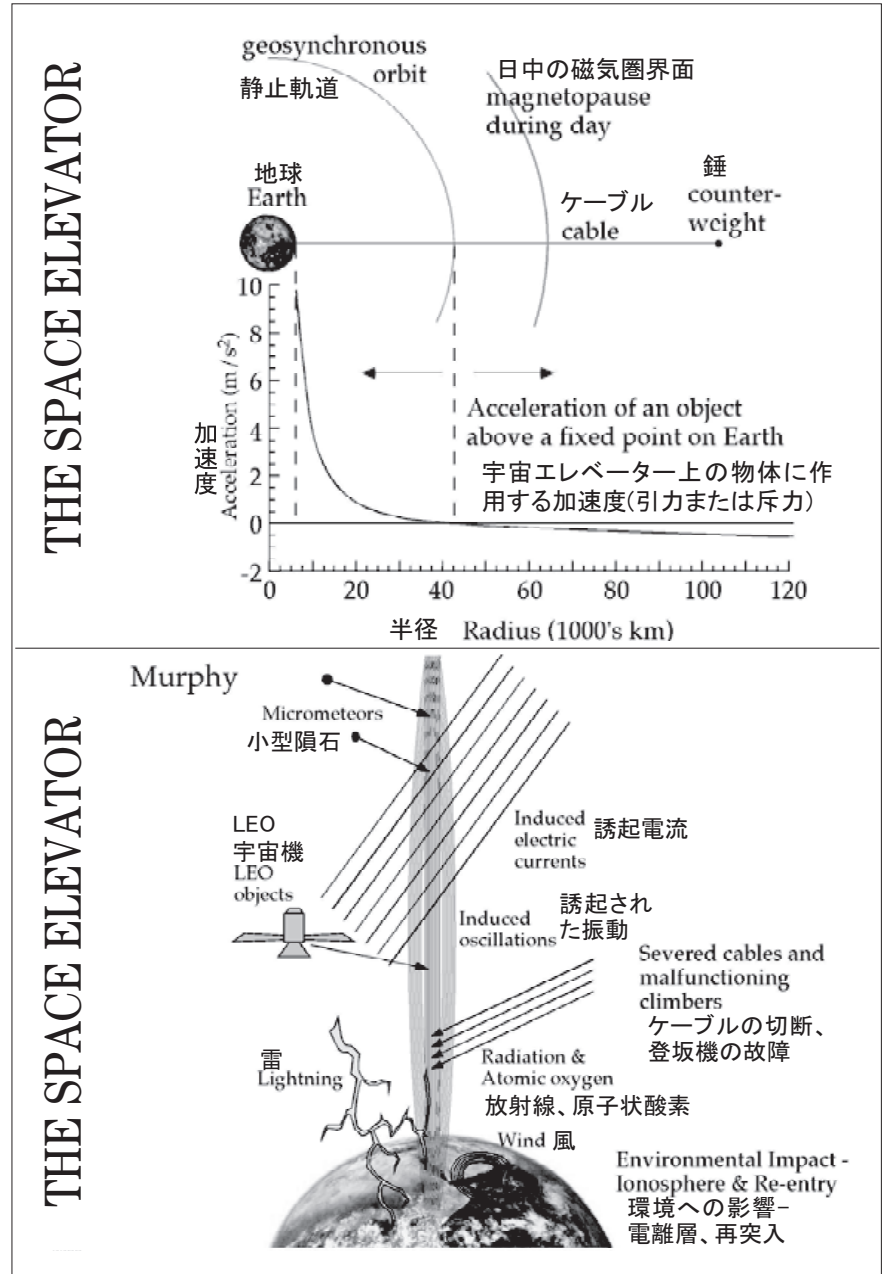
シアのペトロナスツインタワー(クアラ Lumpur)、台湾の台北 101 (台北)といった現存する超高層ビルは、圧縮構造である為、高さは約 400 ~ 500m である。一方、引張構造を採用する事により、理論的には超巨大な宇宙エレベーターの建設が可能に成る。

上記③については、月の潮汐力による縦振動、および、共振を起こす速度での移動時間は数時間程度に制限する事を条件として、ペイロードの昇降運動による横振動を解析した結果、宇宙エレベーターは動的に安定であるとした³⁴⁾。

図表 13 は、代表的な高強度材料の物理特性と共に、上記の通り指数関数的にテザーの幅を変化させた時の静止軌道上での幅と地上での幅との比(テーパー比)を示したものである(特性速度については後述する「MMOSTT」を参照)。現実的なテーパー比を実現する為には超高強度かつ低密度の材料が必要と成り、メガメートル(Mm:メガは 10^6)規模の CNT ケーブルの実現が必須と成る。月では重力が地球の約 6 分の 1 と小さく成る為、月面での宇宙エレベーターは現状の高強度材料を使用する事で建設可能である³⁷⁾とされている。なお、CNT ケーブルについては、微視的スケールでの材料強度は、欠陥などの為に巨視的スケールでは実現できず、巨視的スケールでの強度はかなり低下するとの説³⁸⁾もある。

輸送系としての宇宙エレベーターの最大の特長は、地球の自転エネルギーを再生可能エネルギーとして打上げに利用できる点である³⁴⁾。化学推進ロケットによる打上げでは、ペイロードは、推進剤の燃焼から得られる熱エネルギーによって、地球周回などに必要な位置エネルギーおよび運動エネルギーを獲得する。一方、宇宙エレベーターによる打上げでは、ペイロードは、上昇する際に宇宙エレベーターを介し、地球の自転エネ

図表 12 宇宙エレベーター



出典：参考文献³⁵⁾

図表 13 代表的な高強度材料の物理特性

材料	密度 (ρ :kg/m ³)	引張強度 (σ :GPa)	特性長さ ^{注7)} ($h=\sigma/\rho g$: km)	テーパー比 ($e^{0.776Re/h}$) ^{注8)}	特性速度 ^{注9)} ($V_c=(2\sigma/f\rho)^{1/2}$: km/s)
SWCNT ^{注1)}	2266	50	2250	9.0	4.7
T1000G ^{注2)}	1810	6.4	361	9.2×10^5	1.9
ザイロン PBO ^{注3)}	1560	5.8	379	4.7×10^5	1.9
スペクトラ 2000 ^{注4)}	970	3.0	315	6.5×10^5	1.8
M5 ^{注5)}	1700	5.7	342	1.9×10^6	1.8
M5 (予定) ^{注5)}	1700	9.5	570	5.9×10^3	2.4
ケブラー49 ^{注6)}	1440	3.6	255	2.7×10^5	1.6

注1) 単層カーボンナノチューブ
 注2) 東レの炭素繊維
 注3) 東洋紡績・アラミド社の PBO 繊維
 注4) ハニウェル社の超高分子量ポリエチレン
 注5) マゼラン社
 注6) 東レ・デュポン社のバラ系アラミド

注7) Characteristic Length、または破断長 (Breaking Height)。g は地球の重力加速度で、約 9.8m/s²
 注8) Re は地球の半径で、約 6,378km
 注9) 安全係数 (f) は、左側が 2、右側が 3

出典：参考文献^{34), 37)}

ルギーを分け与えられる為、静止軌道高度に達した時には、静止軌道周回に必要なエネルギーを既に獲得している。宇宙エレベーター

の最先端は、重心と同じ角速度で回転している為、進行方向の速度は約 10.93km/s に成り、ここから放出されるペイロードは、太陽系

内に於いて、地球より内側では0.39天文単位(AU:1AUは太陽—地球間の平均距離で、約1.5億km)に在る水星および地球より外側では9.6AUに在る土星まで飛行可能に成る。更には、重心の在る静止軌道高度から最先端まで宇宙エレベーター上で遠心力により加速すると、パイロードは、上記進行方向の速度に加えて動径方向にも約10.1km/sの速度を得る事ができ、土星以遠の太陽系天体への飛行も可能に成る。地球の自転と同期して赤道面内を回転する宇宙エレベーターによるハンマー投げの威力は凄まじい。かつてのローマ帝国により敷設されたローマ街道が、当時の陸上交通インフラと成った様に、宇宙エレベーターは未来の宇宙交通インフラに成り得るかもしれない。

宇宙エレベーター建設に於ける最大の問題点は、大量の材料を必要とする事である。テーパー比10の超高強度材料、ケーブルの最小断面積 50cm^2 および米国スペース・シャトルの使用を仮定した場合でも、宇宙エレベーター建設に必要な打上げ回数は、非現実的な約24,000回に成ると算出されている³⁴⁾。その為、蜘蛛の糸手法による宇宙エレベーター建設^{39)、40)}も検討されている。最初は、静止軌道に衛星を配備し、そこから細いケーブルを展開し、以後は、地上から送信

されるマイクロ波またはレーザー光によってエネルギー供給を受ける登坂機でケーブルを追加し、徐々に構造を強化する構想である。

風・雷・放射線・原子状酸素・宇宙デブリ(塵)^{ゴミ}・小型隕石等による劣化・損耗に加え、赤道面内で運動する為、常に赤道面を通過する低高度軌道(LEO)周回衛星と衝突する可能性も有り(図表 12 の下)、国際協力による宇宙交通管理(STM)の確立⁴¹⁾が必要となる。万が一倒壊した場合、一部は地球を周回、一部は大気中で炎上、一部は地表に落下する事になる。

宇宙エレベーターのミニチュア版としては、例えば、センサーなどを備えたテザーの一端が低高度軌道に在る静止衛星が考えられ⁵⁾、これが実現すれば、赤道上空の定位置からの高分解能画像の取得が可能となる。

(2) MMOSTT

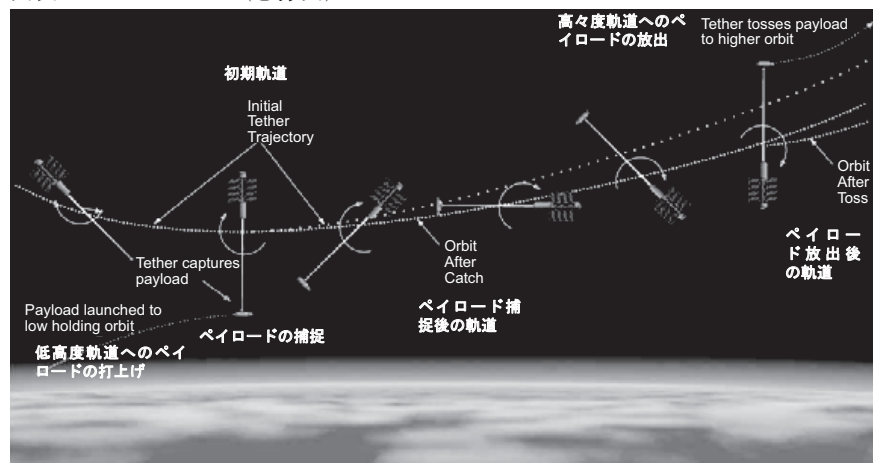
MMOSTT (Moon & Mars Orbiting Spinning Tether Transport) という構想も、宇宙エレベーターと同様、テザー衛星の応用例である^{42, 43)}。片側に質量的に錘にも成る制御部を備えた全長約 100km および総重量約 20t のテザー衛星が、赤道面内の低高度軌道を周回しつつ、重心の周りを自転する。高度約 300km を飛行する極超音速機などから受け取ったペイロードに自

身のエネルギーを分け与える事により、ペイロードを静止遷移軌道(GTO)、月遷移軌道(LTO)その他の高エネルギー軌道へ投入する(図表 14)。通常は軌道に廃棄され宇宙デブリ(塵)に成るのみの打上げロケット上段部も、錘としての重量を稼ぐ為に、制御部に接続される。制御部と反対側の端には、ペイロードを捕捉する為のペイロード把持部が有る。ペイロードから見た場合、MMOSTT のペイロード把持部は非常に急速に上空から降下し、直ちに上昇する為、非常に短時間でのペイロードの捕捉が要求される。MMOSTT は、謂わば、軌道上に於いて空中ブランコおよびハンマー投げを行う。

パイロード捕捉および放出に伴うエネルギー損失は、太陽電池パネルで発生した電流をテザーの通電部に流して、地磁気との間で相互作用(ファラディ効果)を行う事により、進行方向に推力を発生して回復可能であり、原理的には推進剤が不要である^{42), 43)}。軌道配備には、現状の技術を使用する場合、化学推進ロケットが必要であるものの、以降は太陽光エネルギーという再生可能エネルギーを利用した宇宙輸送系を構成し得る。

MMOSTT も宇宙エレベーターと同様、テザーに使用する材料の強度が問題である^{42), 43)}。重量最適化の為、テザーの幅を指数関数的に変化させる必要があり、テザー重量とペイロード重量との比(M_T/M_p)は、ペイロードに分け与える速度増分(ΔV)と材料の強度および密度に依存する特性速度(V_C : 図表 13 を参照)との比($\Delta V/V_C$)の二乗を冪とする指数関数に比例する⁴²⁾。GTO および LTO への軌道投入には、約 3km/s 程度 の速度増分が必要である為、二回に分けて速度増分を与える事により、スペクトラ 2000 など現状利用できる高強度材料を使用して、MMOSTT は実現可能であるとされている⁴³⁾。

図表 14 MMOSTT (想像図)



出典：参考文献 43)

(3) 帆推進

電気推進系の一種であるイオンエンジンは、推進剤排出速度が化学推進系の約 10 倍であり、約 10 分の 1 の推進剤消費量で化学推進系と同等の速度変換を得る事ができる為、我が国の小惑星探査機「はやぶさ」といった大きな速度変換を必要とする太陽系探査ミッション、長寿命化が求められる静止通信衛星などに使用されている⁴⁴⁾。イオンエンジンは①太陽光エネルギーを電力に変換し、②その電力で推進剤をイオン化して電場で加速・排出する事によって推力を発生させており、二段階で太陽光エネルギーから推力を得ている事になる。

一方、太陽エネルギーを直接推力に変換し、推進剤を全く必要としない帆推進という技術も古くから研究されている⁴⁵⁾。その一つは、光の粒子性による太陽光輻射圧を利用し、宇宙機搭載の鏡で太陽光を反射する事により推力を得る太陽帆(ソーラーセイル)である。もう一つは太陽風プラズマと宇宙機搭載の超伝導磁石が発生する磁場との間の相互作用を利用し、太陽風プラズマを逸らす事により推力を得る磁気セイルである。

ソーラーセイルの場合、反射鏡と成る軽量の薄膜の実現が鍵となる⁴⁵⁾。太陽光輻射圧(p_{rad})から得られる最大加速度は、帆の面積を S 、膜の面積密度を ρ とすると以下の様に成る。

$$\text{帆への輻射圧/帆の質量} = (p_{\text{rad}} \times S) / (\rho \times S) = p_{\text{rad}} / \rho$$

地球近傍の宇宙空間に於ける太陽光輻射圧は約 $5 \times 10^{-6} \text{Pa}$ であり、面積密度約 0.01kg/m^2 の超軽量の薄膜が実現できると仮定すれば、 $5 \times 10^{-4} \text{m/s}^2$ とイオンエンジンと同等の加速度が実現できる⁴⁵⁾。1N ($\sim 0.1 \text{kg}$ 重) 程度の推力を得るには、面積 $= 0.2 \times 10^6 \text{m}^2$ ($= \text{推力} / \text{太陽光輻射圧} = 1\text{N} / (5 \times 10^{-6} \text{Pa})$) から、大きさ約 $450 \text{m} \times 450 \text{m}$ の帆が

必要であり、帆の質量は約 2,000kg である⁴⁵⁾。

ソーラーセイルの帆の面積が極めて大きいにも拘らず、得られる推力が小さい事から、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、イオンエンジンとソーラーセイルとを併用するハイブリッド型のソーラー電力セイル(図表 15)が研究されている⁴⁶⁾。直径 50m にも及ぶ膜面の一部を薄膜太陽電池とする事により、イオンエンジンを始めとする搭載機器に電力を供給する構想で、木星探査などが想定されている。

JAXA は、ソーラー電力セイルの技術実証の為、2010 年度に金星探査機「あかつき(PLANET-C)」との相乗りで小型実証機「IKAROS」を打ち上げる。このミッションにより、①大型膜面の展開・展張、②薄膜太陽電池による発電、③ソーラーセイルによる加速および④ソーラーセイルによる航行技術を実証する計画⁴⁷⁾である(図表 16)。IKAROS は、イオンエンジンは搭載せず、ソーラーセイルのみで金星方向へ飛行する。

地球近傍に於ける太陽風プラズマの動圧は約 $7 \times 10^{-10} \text{Pa}$ であり⁴⁵⁾、太陽光輻射圧より遥かに小さい為、

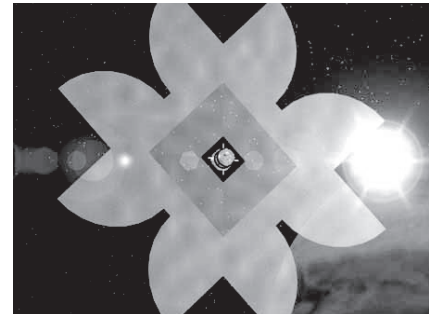
当然、巨大な帆が必要に成ると考えられる。

米国の研究者は、太陽風の動圧に屈する事無く帆を抜けて、太陽系を航行する事ができる磁気セイルについて研究した⁴⁸⁾。磁気セイルが、地球の磁気圏の様に、太陽風プラズマと磁気流体力学(MHD)的に相互作用する時、磁気セイルは以下に示す加速度(F/M)で運動するとした。但し、 ρ および V は各々、太陽風の密度および速度、また R_m 、 ρ_m 、 I および j は各々、磁気セイルの半径、密度、超伝導コイルを流れる電流および電流密度である。 μ は真空の透磁率($= 4\pi \times 10^{-7}$)である。

$$F/M = 0.59(\mu \rho^2 V^4 R_m / I)^{1/3} (j / \rho_m)$$

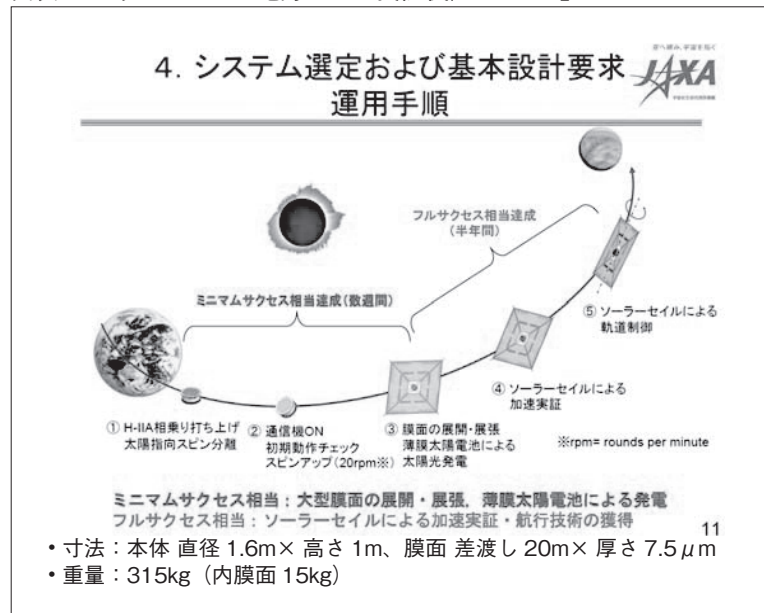
太陽風の代表的な値として $V = 5 \times 10^5 \text{m/s}$ および $\rho = (8.35 \times$

図表 15 ソーラー電力セイル



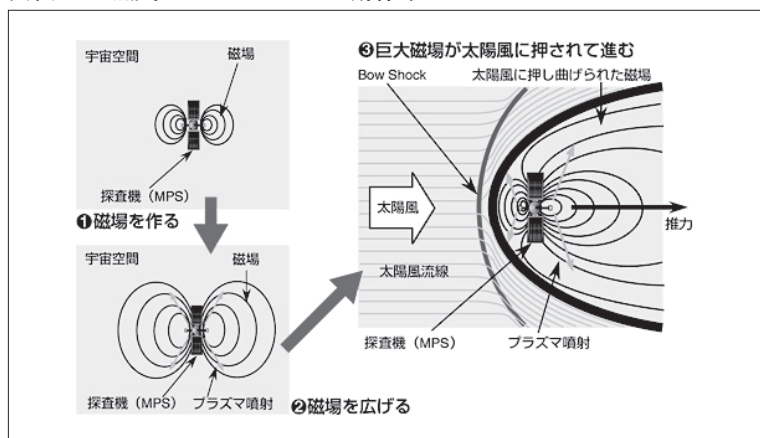
出典: JAXA⁴⁶⁾

図表 16 小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」



出典: JAXA⁴⁷⁾

図表 17 磁気プラズマセイルの動作原理



出典：参考文献⁴⁵⁾

10^{-21}kg/m^3)/ Rs^2 [Rs は、磁気セイルの太陽からの距離を天文単位(AU)で表した値]、また超伝導コイルについては、 $R_m=31.6\text{km}$ 、 $\rho_m=5000\text{kg/m}^3$ (酸化銅並み)、 $j=10^{10}\text{A/m}^2$ および直径(ϕ)=2.52mm をそれぞれ夫々仮定すると、重量約 5t の磁気セイル[I は約 50kA、磁束密度(B_m)は約 10^{-6}T]は、地球近傍で約 0.017m/s^2 の加速度を受ける⁴⁸⁾。超巨大な帆船ではあるけれども、加速性能だけで観れば、磁気セイルはソーラーセイルに勝るとも劣らない。

この様に巨大な超伝導コイルを宇宙空間で展開するのは、非現実的と考えられていたところ、半径 10cm 程度のコイルで半径 10km 程度の小規模な磁気圏を形成して、その磁気圏に荷電粒子を注入すると、磁気圏が拡大されて、太陽風と効率的に相互作用できる為、現実的な推進系が実現できるとの研究成果^{49, 50)}が発表された(図表 17)。これは磁気プラズマセイルと呼ばれ、推力を得る為に荷電量子の注入が必要であり、推進剤を必要とする事に成るものの、大規模な推力を発生する事ができるとされた為、一時は有望視された。

その後、この研究発表に対しては、放出される荷電粒子が磁気流体力学的に振舞うとの誤った仮説の下に行われたシミュレーション

結果に基づくものであり、この程度の磁場の強度では、太陽風の動圧に耐える事ができず、太陽風はこの様な帆をすり抜けてしまうとの指摘⁵¹⁾がなされた。シミュレーションの前提が妥当でなかった為、映画「マトリックス」の様に電脳空間でのみ成立する仮想的な物理現象であったと云えるかもしれない。

太陽風に抗して大きな帆を展開する為には、やはり強大な磁場が必要なのである。

3-3

宇宙開発イノベーションが拓く可能性

米国有有人宇宙飛行計画再検討委員会は、軌道上推進剤補給施設の開発を提案している³¹⁾。無人の宇宙空間を推進剤の補給を受ける事なく、地表から目的地まで只管突き進む場合と比べ、宇宙輸送系に対する制約が緩和され、宇宙輸送系の開発費・運用費を低減する事が期待できる。航空機並みの運用が可能で二段式完全再使用型宇宙輸送機が実現すれば、シャトルの外部タンクの様に廃棄される部分が無い為、運用費の低減が期待できる。更には、化学推進ロケットと異なり、例えば、ソーラー電力

セイル、MMOSTT、宇宙エレベーターといった太陽光エネルギー、地球の自転エネルギーその他の再生可能エネルギーを利用する事ができる宇宙輸送系が実現する時、推進剤が不要または消費量が大幅に減少する為、打上げ費の大幅な低減が実現する可能性が有る。

打上げ費が低減する時、宇宙へのアクセスがより容易に成り、宇宙機の寿命・信頼性に対する要求が緩和され、宇宙機開発費の低減に繋がる可能性が有る。薄膜・編隊飛行の採用による宇宙機の軽量化・小型化が実現し、より安価な打上げ費で等価な機能の宇宙機を展開する事ができる可能性も有る。打上げ費が大幅に低減すれば、現状は最終的に宇宙デブリ(塵)になる運命の宇宙機も、地球に持ち帰っての再利用化、更には軌道上での保全・修理・改良が実現する可能性も有る。

軽量かつ強靱なカーボンナノチューブを適切な価格で利用する事ができれば、打上げ機的能力向上および宇宙機の重量削減に繋がる可能性も有る。

なお、宇宙エレベーター、MMOSTT といった大規模構造物は衝突断面積が大きい為、他の宇宙機、宇宙デブリ(塵)などとの衝突が大きな問題と成る。本稿では述べないけれども、宇宙活動が活発化する時、本格的な宇宙デブリ(塵)対策、国際協力による宇宙交通管理(STM)体制構築が必要になってくると思われる⁴¹⁾。将来に向けた布石として、米連邦航空局(FAA)では、次世代航空管制システム「NextGen」の検討において、航空機のみならず、米空軍が構想している「宇宙即応体制(ORS)」による打上げへの対応も検討しており⁵²⁾、更に、米国防高等研究機関(DARPA)は 2009 年 9 月、宇宙デブリ(塵)問題の根本的解決の為に、情報提供を要請している⁵³⁾。

4 宇宙開発イノベーションの創出に向けた米国の取り組み

第3-2項で紹介した宇宙開発イノベーションの構想の例は、ソーラー電力セイルを除き全てNASA先端概念研究所(NIAC)の資金提供を受けて研究されたものである。これ以外にも、系外惑星の観測を目的として、表面形状の変形が可能な薄膜でできた超軽量な直径20～30mの大口徑望遠鏡およびこれらの編隊飛行による仮想的な口径約数百mの超大型望遠鏡に関する研究⁵⁴⁾、高解像度な地球観測を目的として、静止軌道に配備された極めて多数の超小型衛星の編隊飛行による仮想的な直径30～40km程度の大型アンテナに関する研究⁵⁵⁾なども行われた。

NIACは、長期的視点から航空宇宙に係る先端的概念をNASAの将来ミッションに役立てる為に、NASAが1998年2月に米国宇宙研究協会(USRA)に委託して設立した外部機関である⁵⁶⁾。現在進行中のプロジェクトへの技術支援は目的とはせず、10年～40年先の将来ミッションを対象とし、新たなイノベーションの創出を目的としていた(図表18)。技術成熟度(TRL)⁵⁷⁾としてはTRL1～2の基礎研究が対象であった。また、米国民、特に青少年の科学技術への関心を高める為の普及・啓発活動も実施していた⁵⁶⁾。

ブッシュ前米大統領は有人宇宙活動に関し2004年1月、低高度軌道(LEO)という呪縛を逃れて、1960～70年代のアポロ計画の様に、月その他の太陽系天体へと有人宇宙活動を再度展開する為の構想⁵⁸⁾を発表し、NASAはこの構想の実現に着手した。しかし、皮肉にもその後の予算が伸び悩んだため資金難に陥り、その煽りを受けてNIAC運営委託契約は打ち切られる事となり、NIACは2007年4月31日を

もって活動を停止した⁵⁹⁾。

NIACは約9年間の運営期間中、総計約36.2百万ドルの資金提供を受け、その内約70%を研究資金として外部に提供し、残る約30%を組織運営費として使用した⁵⁶⁾。NIACが行った研究助成には、①期間約6ヵ月、研究資金約50,000～75,000ドルで初期の概念検討を行う「フェーズ1」および②期間24ヵ月以内、研究資金約400,000ドル以内で更に検討を進める「フェーズ2」があった。受領した研究提案は総数1,309件に昇り、126件のフェーズ1研究および42件のフェーズ2研究に対し、総計27.3百万ドルを提供した。研究テーマの中には、将来的な有望性から、米国防総省その他の機関から追加の研究資金を獲得したものもある。なお、NIAC存続期間に於けるNASA年間予算³¹⁾は約130億～170億ドルであった。

全米研究評議会(NRC)は、NASAでは従前、先端的な概念を生み出す為、NIACという仮想的な機関の

運営が委託されていたけれども、予算難の為、NIAC委託契約が中止され、その結果、NASAが外部組織による宇宙開発イノベーション創出の機会を失った状況を踏まえ、2009年に報告書⁶⁰⁾を発表した。

この報告書では、NASAが現状、プロジェクト開発にのみ専念し、先端的な研究開発に先行投資しない事は、米国の将来の宇宙開発にとってマイナスであるとして、NIACの復活が提言されている⁶⁰⁾。但し、NASAの将来プロジェクトに貢献できる可能性を高める為、改善案も出しており、10年後の実現を視野に入れた研究も対象に含める事、フェーズ1および2の期間・研究資金枠を拡大する事、概念のより本格的な実証を行う為、期間約4年以内および研究資金約5百万ドル以内の「フェーズ3」を新設する事などを勧告している。また、提案要請周知先の拡大、専門分野・年齢・性別なども含め、提案審査員の拡充も必要と勧告している。宇宙開発イノベーションを構想す

図表18 NIACのミッション

現在	10年後	20年後	30年後	40年後
NASA事業	NIACのミッション： 画期的な先端概念			
ミッション本部	アーキテクチャー			
・探査システム ・宇宙運用 ・科学 ・航空研究	<ul style="list-style-type: none"> ・目標を達成するための全体計画 ・一群のシステム、全体ミッションまたは計画の目的を達成するためのそれらの運用方法および相互関係 			
技術開発	システム			
・システム開発 課題解決支援	<ul style="list-style-type: none"> ・アーキテクチャーの具体的実現 ・一群の装置、ソフトウェアおよび運用目的 			

出典：参考文献⁵⁶⁾の32頁

る為には、極めて先進的な提案を行い得る研究者・技術者の育成と

共に、その様な提案を審査・採択し得る機能も重要である。

5 おわりに

「人が想像できる事は必ず人が実現できる」とは、SF作家ジュール・ベルヌの言葉であり、かつてTVコマーシャルでも使われていた。人のアイデアが、全て実現できる訳ではないにしても、実現した場合に多大な影響を及ぼした事例は確かに存在する。例えば、実現前には夢物語であったかもしれない蒸気機関の発明による産業革命、更には自動車・航空機といった交通手段の大衆化は、我々の社会・生活様式を一変した。

宇宙開発に於いて、ロケット・人工衛星といった既存技術の改良が重要である事は、論を待たない。一方、地球規模の課題への対応に関し、宇宙開発は様々な可能性を秘めており、新たな可能性の開拓の為に、10年以上先の未来を目指し、イノベーション創出に向けた努力も重要である。

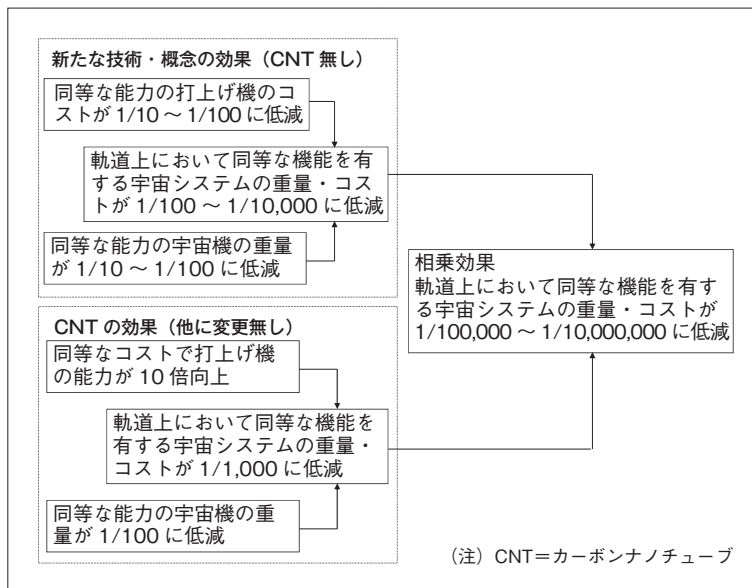
宇宙開発イノベーションが進展する時、どのような世界が拓けるのか。かなり楽観的な予測ではあるけれども、図表 19 は宇宙開発イノベーションの進展がもたらす効果の一例⁵⁾である。宇宙システムの重量・コストが数パーセントではなく、何桁ものオーダーで削減される時、その効果がもたらす影響

は現状の我々では全く予測できないであろう。正に良い意味でナシーム・ニコラス・タレブが言う所⁶¹⁾の「ブラック・スワン(黒い白鳥)」の出現に我々は驚く事になるかもしれない。

1960年代頃のアポロ計画は東西冷戦下、米国の威信を賭けた人類初の有人月探査計画で、燃料電池⁶²⁾、計算機⁶³⁾など数多の技術進歩がもたらされたと言われている。本稿で述べた様な宇宙開発イノベーションが実現する場合、人類にもたらされる社会的影響は如何程の

ものか。主要先進国の一員である我が国においても、既存概念に囚われる事無く、全く新たな概念で宇宙開発を推進できるように成る為に、先端的な研究活動に本格的に取り組み、宇宙開発にイノベーションをもたらし、宇宙開発による社会・経済への貢献を一層強化したいと考える。NIACと同様⁵⁶⁾、このような先端的な研究活動の普及・啓発により次世代を担う青少年の科学技術に対する関心を高める事も期待できる。

図表 19 宇宙開発イノベーション効果の一例



出典：参考文献⁵⁾ の 262 頁

参考文献

- 1) “Arthur C Clark : Predictions,” BBC NEWS online, March 19, 2008 : <http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/7304852.stm>
- 2) 「技術戦略マップ 2009 ナノテクノロジー分野」、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、2009 年 4 月 30 日 HP 掲載 : <http://www.nedo.go.jp/roadmap/2009/nano1.pdf>
- 3) “Tunguska at 100,” Nature, Vol.453, Issue no.7199, June 26, 2008, pp.1157-1159
- 4) 「ツングースカ大火球 100 年の謎」、L. ガスベリニ、E. ボナッティおよび G. ロンゴ、日経サイエンス 2008 年 8 月号、

pp.36-42

- 5) “Advanced Space System Concepts and Technologies : 2010-2030+,” Ivan Bekey, The Aerospace Corporation, ISBN 1-884989-12-8, 2003
- 6) “America’s Future in Space : Aligning the Civil Space Program with National Needs,” Committee on the Rationale and Goals of the U.S. Civil Space Program, National Research Council, ISBN 0-309-14037-4, 2009 :
<http://www.nap.edu/catalog/12701.html>
- 7) “Electricity without Carbon,” Nature, Vol.454, August 14, 2008, pp.816-823
- 8) JAXA の HP 「人工衛星プロジェクト いぶき (GOSAT)」 : <http://www.satnavi.jaxa.jp/project/gosat/index.html>
- 9) “Carbon capture plant backed by EU,” BBC NEWS online, October 16, 2009 :
http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/england/south_yorkshire/8311286.stm
- 10) JAXA HP 「宇宙エネルギー利用 (太陽光の利用)」 : <http://www.ard.jaxa.jp/research/hmission/hmi-ssps.html>
- 11) “Space-Based Solar Power as an Opportunity for Strategic Security : Phase 0 Architecture Feasibility Study : Report to the Director, National Security Space Office : Interim Assessment,” October 10, 2007 :
<http://www.nss.org/settlement/ssp/library/final-sbsp-interim-assessment-release-01.pdf>
- 12) 「温暖化の究極の解決策！？地球に日よけ」、ロバート・クンジグ、日経サイエンス 2009 年 6 月号、pp.60-70
- 13) 外務省 HP 「G8 首脳宣言 (Responsible Leadership for a Sustainable Future)」 :
<http://www.mofa.go.jp/policy/economy/summit/2009/declaration.pdf>
- 14) “The Geoengineering Option-A Last Resort Against Global Warming,” David G. Victor, M. Granger Morgan, Jay Apt, John Steinbruner, and Katherine Ricke, Foreign Affairs, March / April 2009
- 15) “Geoengineering the climate : Science, governance and uncertainty,” the Royal Society, September 2009 :
<http://royalsociety.org/displaypagedoc.asp?id=35217>
- 16) “Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Susan Solomon, Dahe Qin, Martin Manning, Melinda Marquis, Kristen Averyt, Melinda M.B. Tignor, Henry LeRoy Miller, Jr. and Zhenlin Chen (eds) , Cambridge University Press :
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm
- 17) EIC ネット環境用語集「放射強制力」 : <http://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&serial=2419>
- 18) “Transient Climate-Carbon Simulations of Planetary Geoengineering,” H. Damon Matthews and Ken Calderia, PNAS, June 12, 2007, vol.104, no.24, pp.9949-9954 : <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0700419104>
- 19) “Climate targets ‘will kill coral’ ,” BBC NEWS online, September 2, 2009 :
<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8233632.stm>
- 20) “Technical Assessment : Satellite Power System Concept Development and Evaluation Program, Volume 1, Technical Assessment Summary Report,” NASA Technical Memorandum 58232, November 1980 :
<http://www.nss.org/settlement/ssp/library/NASATechnical%20Memorandum58232-SPSTechnical%20Assessment.pdf>
- 21) 米労働省 HP の「Radiofrequency and Microwave Radiation Standards」 :
<http://www.osha.gov/SLTC/radiofrequencyradiation/standards.html>
- 22) “How Safe Are Microwaves and Solar Power from Space?,” John M. Osepchuk, IEEE Microwave Magazine, December 2002, pp.58-64 : <http://electricalandelectronics.org/wp-content/uploads/2008/10/01145676.pdf>
- 23) “Project Summary : Responses of Airborne Biota to Microwave Transmission from Satellite Power System (SPS),” the United States Environment Protection Agency, EPA-600/S1-84-001, September 1984 : 以下の EPA サイトで検索。
<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.EXE?ZyActionL=Register&User=anonymous&Password=anonymous&Client=EPA&Init=1>
- 24) “A Fresh Look at Space Solar Power : New Architectures, Concepts and Technologies,” John C. Mankins, International Astronautical Federation IAF-97-R.2.03, 1997 :
<http://www.nss.org/settlement/ssp/library/1997-Mankins-FreshLookAtSpaceSolarPower.pdf>
- 25) “Appendix C : US Activities (NASA Report) of the International Union of Radio Science (URSI) White Paper on Solar Power Satellite (SPS) Systems,” 2007 : <http://www.ursi.org/WP/Appendices070529.pdf>
- 26) PowerSat 社 HP : <http://www.powersat.com/>
- 27) “Earth & Space-Based Power Generation Systems-A Comparison Study : A Study for ESA Advanced Concepts

- Team,” Blandow, V., Schmidt, P., Weindorf, W., Zerta, M., Zittel, W., Bernasconi, M., Collins, P., Nordmann, Th., Vontobel, Th., and Guillet, J., European Space Agency Contract No.17682/03/NL/EC, January 2005 :
[http://www.esa.int/gsp/ACT/doc/POW/GSP-RPT-SPS-0503 % 20LBST % 20Final % 20Report % 20Space % 20Earth % 20Solar % 20Comparison % 20Study % 20050318 % 20s.pdf](http://www.esa.int/gsp/ACT/doc/POW/GSP-RPT-SPS-0503%20LBST%20Final%20Report%20Space%20Earth%20Solar%20Comparison%20Study%20050318%20s.pdf)
- 28) “Peter Glaser Lecture : Space and a Sustainable 21st Century Energy System,” Ongaro, F. and Summerer, L., 57th International Astronautical Congress, Paper IAC-06-C3.1.01, 2006 :
http://www.esa.int/gsp/ACT/doc/POW/ACT-RPR-NRG-2006-IAC-SPS-Peter_Glaser_Paper.pdf
- 29) DESERTECH Foundation の HP : <http://www.desertec.org/index.html>
- 30) “Summary Report of the Review of U.S. Human Space Flight Plans Committee,” September 8, 2009 :
[http://www.nasa.gov/pdf/384767main_SUMMARY % 20REPORT % 20-% 20FINAL.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/384767main_SUMMARY%20REPORT%20-%20FINAL.pdf)
- 31) “Seeking a Human Spaceflight Program Worthy of a Great Nation,” Review of U.S. Human Spaceflight Plans Committee, October 22, 2009 : http://www.nasa.gov/pdf/397898main_HSF_Cmte_FinalReport_High.pdf
- 32) “The Space Elevator : ‘Thought Experiment’, or Key to the Universe,” Arthur C. Clark (First Published in Advances in Earth Oriented Applied Space Technologies, Vol.1, pp.39-48, Pergamon Press Ltd., 1981. Printed in Great Britain) :
[http://wiki.spaceelevator.com/Open_Wiki/Documents/Articles/The_Space_Elevator % 3a 'Thought_Experiment' % 2c_of_Key_to_the_Universe % 3f](http://wiki.spaceelevator.com/Open_Wiki/Documents/Articles/The_Space_Elevator%3a'Thought_Experiment'%2c_of_Key_to_the_Universe%3f)
- 33) “Audacious & Outrageous : Space Elevators,” Science@NASA Headline News, September 7, 2000 :
http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast07sep_1.htm
- 34) “The orbital tower : a spacecraft launcher using the Earth’s rotational energy,” Jerome Pearson, Acta Astronautica, Vol.2, pp.785-799, Pergamon Press Ltd., 1975 : <http://www.star-tech-inc.com/papers/tower/tower.pdf>
- 35) “The Space Elevator,” Bradley C. Edwards, presented at the June 2001 NIAC Annual Meeting :
<http://www.niac.usra.edu/files/library/meetings/annual/jun01/521Edwards.pdf>
- 36) “To the Cosmos by Electric Train,” Yuri Artsutanov, July 31, 1960 (Russian to English translation. First published in the Young Person’s PRAVDA) : http://wiki.spaceelevator.com/@api/deki/files/13/=Artsutanov_Pravda_SE.pdf
- 37) “NIAC Phase I Study : Lunar Space Elevators for Cislunar Space Development,” Jerome Pearson, Star Technology and Research, Inc. : <http://www.niac.usra.edu/studies/1032Pearson.html>
- 38) “On the Strength of the Carbon Nanotube-based Space Elevator Cable : From Nano- to Mega-Mechanics,” Nicola M. Pugno, arXiv:cond-mat/0601668v1, January 30, 2006 : <http://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0601/0601668.pdf>
- 39) “NIAC Phase I Study : The Space Elevator,” Bradley C. Edwards, Eureka Scientific, Inc. :
<http://www.niac.usra.edu/studies/472Edwards.html>
- 40) “NIAC Phase II Study : The Space Elevator,” Bradley C. Edwards, Eureka Scientific, Inc. :
<http://www.niac.usra.edu/studies/521Edwards.html>
- 41) “Cosmic Study on Space Traffic Management,” International Academy of Astronautics (IAA) , ISBN 2-9516787-5-4, 2006 : <http://iaaweb.org/iaa/Studies/spacetraffic.pdf>
- 42) “NIAC Phase I Study : Tether Transport System for LEO-MEO-GEO-Lunar Traffic,” Robert P. Hoyt, Tethers Unlimited, Inc. : <http://www.niac.usra.edu/studies/7Hoyt.html>
- 43) “NIAC Phase II Study : Moon & Mars Orbiting Spinning Tether Transport Architecture Study,” Robert P. Hoyt, Tethers Unlimited, Inc. : <http://www.niac.usra.edu/studies/373Hoyt.html>
- 44) 「月・惑星探査における我が国の宇宙開発能力」、清水貴史、科学技術動向 2008 年 8 月号 (No.89)、pp.20-36 :
<http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt089j/index.html>
- 45) 「磁気プラズマセイルの研究と深宇宙探査への挑戦」、舟木一幸および山川宏、プラズマ・核融合学会誌、Vol.83、No.3、2007 年、pp.281-284 : http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2007_03/jspf2007_03-281.pdf
- 46) 「ソーラー電力セイル実証計画について」、ISAS ニュース、2005 年 3 月号 (No.288) :
<http://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.288/mission-05.html>
- 47) 「小型ソーラー電力セイル実証機 (IKAROS) の計画概要」、森治、2009 年 9 月 9 日 :
http://www.jaxa.jp/press/2009/09/20090909_sac_ikaros.pdf
- 48) “The Magnetic Sail : Final Report to the NASA Institute of Advanced Concepts,” Robert Zubrin and Andrew Martin, Pioneer Astronautics, January 7, 2000 : http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/320Zubrin.pdf
- 49) “NIAC Phase I Study : Mini-Magnetspheric Plasma Propulsion (M2P2) , NIAC Award No.07600-010, Final Report,”

- Robert M. Winglee, May 1999 : http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/3Winglee.pdf
- 50) "NIAC Phase II Study : Mini-Magnetspheric Plasma Propulsion (M2P2) , NIAC Award No.07600-032, Final Report," Robert M. Winglee, November 2001 : http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/372Winglee.pdf
- 51) "Fundamentals of the Plasma Sail Concepts : Magnetohydrodynamic and Kinetic Studies," G. Khazanov, P. Delamere, K. Kabin and T. J. Linde, Journal of Propulsion and Power, Vol.21, No.5, September-October 2005, pp.853-861 : <http://hsd.gsfc.nasa.gov/staff/bios/cs/KhazanovGV/AIAA-3737-130.pdf>
- 52) "Space Transportation Concept of Operations Annex For NextGen Version 1.0," the Federal Aviation Administration : http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/media/NextGen_ConOps_Space_Annex_final_v1.0.doc
- 53) "DARPA Orbital Debris Removal," Solicitation No.DARPA-SN-09-68
- 54) "NIAC Phase I Study : An Extremely Large Yet Ultralightweight Space Telescope and Array -Feasibility Assessment of a New Concept, NIAC Grant # 07600-006," Ivan Bekey, Bekey Designs, Inc., May 29, 1999 : http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/58Bekey.pdf
- 55) "NIAC Phase I Study : Extremely Large Swarm Array of Picosats for Microwave / RF Earth Sensing, Radiometry, and Mapping, NIAC Research Sub-Award No.07605-003-029," Ivan Bekey, Bekey Designs, Inc., April 29, 2005 : http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/942Bekey.pdf
- 56) "NASA Institute for Advanced Concepts 9th & Final Report 2006-2007," NASA Institute for Advanced Concepts : http://www.niac.usra.edu/files/library/annual_report/2006annualreport.pdf
- 57) 「航空科学技術に係る日米欧の研究開発動向」、清水貴史、科学技術動向 2009 年 4 月号 (No.97)、pp.19-34 : <http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt097j/index.html>
- 58) "The Vision for Space Exploration," the National Aeronautics and Space Administration, February 2004 : http://www.nasa.gov/pdf/55583main_vision_space_exploration2.pdf
- 59) NIAC HP : <http://www.niac.usra.edu/>
- 60) "Fostering Visions for the Future : A Review of the NASA Institute for Advanced Concepts," Committee to Review the NASA Institute for Advanced Concepts, National Research Council, ISBN 0-309-14052-8, 2009 : <http://www.nap.edu/catalog/12702.html>
- 61) "The Black Swan : The Impact of the Highly Improbable," Nassim Nicholas Taleb, Penguin Books, 2008 (First published in the United States of America by The Random House Publishing Group 2007 and in Great Britain by Allen Lane 2007)
- 62) "Apollo's Fuel-Cell Power Legacy," BBC NEWS online, July 16, 2009 : <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8154721.stm>
- 63) "Weaving the Way to the Moon," BBC NEWS online, July 15, 2009 : <http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/8148730.stm>

執筆者プロフィール



清水 貴史

推進分野ユニット
科学技術動向研究センター 特別研究員
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

宇宙開発関連業務に従事。科学技術動向研究センターでは宇宙開発を中心としたフロンティア分野を担当。