



生存圏に宇宙は必要なのか - イノチのつながりと人と世界 -

Do We Really Need to Develop Space for Sustainable Humanopshere?

篠原 真毅 Naoki Shinohara

Kyoto Working Papers on Area Studies No.36
(G-COE Series 34)

March 2009

このグローバル COE ワーキングペーパーシリーズは、下記 G-COE ウェブサイトで閲覧する事が出来ます
(Japanese webpage)

http://www.humanosphere.cseas.kyoto-u.ac.jp/staticpages/index.php/working_papers

(English webpage)

http://www.humanosphere.cseas.kyoto-u.ac.jp/en/staticpages/index.php/working_papers_en

©2009

〒606-8501

京都市左京区吉田下阿達町 46

京都大学東南アジア研究所

無断複写・複製・転載を禁ず

ISBN978-4-901668-66-8

論文の中で示された内容や意見は、著者個人のものであり、
東南アジア研究所の見解を示すものではありません。

このワーキングペーパーは、JSPS グローバル COE プログラム (E-4) :
生存基盤持続型の発展を目指す地域研究拠点 の援助によって出版されたものです。

生存圏に宇宙は必要なのか
—イノチのつながりと人と世界—

篠原 真毅

Kyoto Working Papers on Area Studies No.36
JSPS Global COE Program Series 34
In Search of Sustainable Humanosphere in Asia and Africa

March 2009

生存圏に宇宙は必要なのか - イノチのつながりと人と世界 -*

篠原 真毅**

Do We Really Need to Develop Space for Sustainable Humanopshere?*

Naoki Shinohara**

In 2007, the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) concluded in the Fourth Assessment Report there is no doubt that human activities have caused the global warming. They estimate surface air warming in the 21st century as follows ; 1) Best estimate for a “low scenario” is 1.8 °C with a likely range of 1.1 to 2.9 °C, 2) Best estimate for a “high scenario” is 4.0 °C with a likely range of 2.4 to 6.4 °C, 3) A temperature rise of about 0.2 °C per decade is projected for the next two decades for all scenarios. They conclude that we have to reduce the all long-lived greenhouse gases by 50%. What is real cause of change of the global environment? Human activities or Human being itself? We have to consider the cause and solve the answer of social dilemma between the global environment and human activities. In this paper, we discuss a possibility of space environment use is most hopeful answer of the social dilemma.

はじめに

これまで人類の生存は地球上に限られていた。しかし、今後、地球と月を含む地球近傍の宇宙を人類の「地球生存圏」へと拡大する場合、この生存圏で人類が持続的発展を維持できる条件は、どのようなものであるか。地球と月の環境を保全した上で、人類が現在直面し、

* この論文は 2009 年に発表されたものに加筆したものである

** 京都大学生存圏研究所, 准教授, shino@rish.kyoto-u.ac.jp

将来はさらに深刻化することが明らかな課題（地球温暖化問題、エネルギー問題、食料問題、水資源の問題、人口爆発問題など）への対処をなすことが可能であるのか。この課題解決のために、宇宙環境や月の利用が果たしうる役割は何なのか。これまでの人類の発展の歴史と社会的ジレンマの問題を踏まえて“地球生存圏”の将来の姿を展望する。

地球生存圏の限界

1798年にトマス・ロバート・マルサスによって出版された有名な「人口論」[1]において以下のように述べている。「人口は制限されなければ幾何級数的に増加し、生活資料は算術級数的に増加するから、人口は常に生活資料の水準を越えて増加する。この結果必然的に不均衡が発生する。不均衡が発生すると人口集団には、それを是正しようとする力が働く。すなわち人口に対してその増加を抑えようとする「積極的妨げ（貧困、飢饉、戦争、病気、退廃）」や「予防的妨げ（主として晩婚化・晩産化・非婚化による出生の抑制）」がおこる。また生活資料に対してはその水準を高めようとする。「人為的努力（耕地拡大や収穫拡大など）」がそれぞれ生まれる。」

「人口論」は産業革命が起こらんとする時代の大きな転換期に執筆され、イギリス救貧法に関する批判は資本主義的な経済システムが勃興し始めた当時の社会的矛盾を象徴的に表している。彼は人口抑制に対する積極的妨げと予防的妨げが人口抑制には必然であり、貧困に対する「必要悪」的な見方でイギリス救貧法を批判した。つまり、「国民全体の総幸福量」といった見地から生まれる「成長の限界」が存在する以上、貧困等による人口抑制は必然であると彼は論じたのである。マルサスは当時の啓蒙思想家であるゴドウィンやコンドルセが開いていた理性の信頼とそれに基づく社会の変革によって、人間の進歩と輝かしい未来の到来を予感させる思想に対し激しい攻撃を加え、「人口の原理」に関係付けられた「限界」や「悪

徳の重要性」といった方向性から人間と社会を捉えようとしたのである。

その後200年の人類の歩みを見ると、人類はゴドウィンやコンドルセが考えていた社会変革を科学技術によって実現し、マルサスの人口論の限界を打破してきたことがわかる。マルサスの人口論は単純には「耕作面積」×「単位面積あたりの収穫量」＝「人間を養える限界」という図式であった。地球には、人間が住める土地は無限にあるわけではない。作物を栽培できる土地にもかぎりがある。地表での人口分布に着目すると、定住生活が営まれる範囲をエクメーネ(居住地域)という。エクメーネとは、食糧生産に利用している耕地・牧草地の範囲で、南極大陸をのぞく全陸地のほぼ3分の1(約48億ha)である。広義には森林も含める。人口論の限界を乗り越えられたのは、エクメーネの限界に対し、農業技術で「単位面積あたりの収穫量」を飛躍的に増加させたためである。例えば1920年までの世界人口の動きを人口増加に関するフェルフルスト・パールのロジスティックモデルに当てはめ、アメリカの人口学者パールが1936年に計算したときの人口上限予測は2100年で26億4550万人であった[2]。当然この数値は第2次世界大戦後の人口増加であっさり破られる。植民地国家の独立や輸送技術の進化による人・物の移動も人口増を支えた要因と考えられ、人口増の原因は非常に複雑ではあるが[3]、主な原因は東南アジアにおける緑の革命のように先進国からの技術導入(抗生物質や除虫剤等)により「単位面積あたりの収穫量」が増加し、人口増を支えることができるようになったためである。その後の人口限界予測では、63億人(フィッシャー)、77億人(ペンク)、133億人(ホルシュタイン)などとパールの予測よりも大幅に増加している。現実には21世紀の現在、人口論を超える63億もの人間を地球は養うことができるようになった。

この方法論で今後も人類は成長を続けることができるだろうか。この方法論の「成長の限界」を示した有名なモデルがローマクラブの「成長の限界」(1972年)である[4]。D. H. メドウズを中心とするローマクラブは、マルサスが示した人口と食糧生産の関係に工業化、汚染、

及び再生不可能な天然資源の消費という要素を加えた5要素で世界システム・ダイナミクス分析を行い、人類の成長に限界があるとの警鐘を鳴らした。人口と工業投資がこのまま幾何級数的成長を続けると地球の有限な天然資源は枯渇し、環境汚染は自然が許容しうる範囲を超えて進行することになり、100年以内に成長は限界点に達するという結論を出している。しかし同時に、この成長を生み出している人口や資本のフィードバックループを抑制するというこれまでに例のないアプローチをとれば、将来長期にわたって持続可能な生態的および経済的な安定性を打ち立てることも可能であるとしている。その後の、特に汚染=地球環境問題と非再生天然資源問題を中心とした成長の限界論が世界を席卷し、京都議定書や環境サミットといった世界的な流れを形成しているのは周知の通りである。

さらに20年後の1992年にまとめられた続編「成長の限界 限界を超えて」[5]では20年間の新たなデータを集め考察した結果、技術改良や環境意識の高揚、環境政策の強化などが見られるにもかかわらず、多くの資源や汚染のフローが、持続可能な限界を既に超えてしまっているとされた。成長の限界を超えるには物質の消費や人口を増大させるような政策や慣行を広範にわたって改めることと、原料やエネルギーの利用効率を速やかに、かつ大幅に改善することが提示されている。さらに2005年にまとめられた「成長の限界 人類の選択」[6]でもさらに10年分のデータの更新により同様の証明が提示され、まだ間に合うから持続可能な社会を目指そうと再び訴えている。しかし、彼らも認めているように、汚染や人口の問題は固有の時間差（遅れ）を持っているために、今から目指す持続可能な社会が成長の限界を打破できるかは議論が残る。

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)によってローマクラブが示した時間差の問題と現実が突きつけられたのが2007年である。IPCCがまとめた第4次報告書は地球環境問題の科学的論議をほぼ収束させ、人間活動と地球温暖化現象の因果をはっきりさせた[7][8]。2090年から

2099年の平均気温は、環境との保全と経済の発展が両立する社会では、 1.8°C ($1.1^{\circ}\text{C}\sim 2.9^{\circ}\text{C}$)の上昇(1090年～1999年比)であり、化石エネルギー源を重視しつつ高い経済成長を実現する社会では、 4°C ($2.4^{\circ}\text{C}\sim 6.4^{\circ}\text{C}$)の上昇し、2030年までは社会シナリオによらず10年あたり 0.2°C 上昇すると予測している。つまり、今すぐ対応を始めてもある程度の地球温暖化は避けられないのである。IPCC報告書は定量評価を行った結論として地球温暖化を食い止めるためには、人為的に排出されている温室効果ガスを現在の半分以下に減らす必要があるとまとめている。

このような人間活動の成長に対するアンチテーゼとしての「持続可能な社会論」が世界を席卷している。そこでは啓蒙思想のように人類の知恵を信じれば、人口を抑制し、原料やエネルギーの利用効率を改善することでこれまでの生活を維持しつつ、持続可能な循環型社会が実現し、地球は破綻しない、としている。しかし、そのような持続可能な社会の実現は可能であろうか。また可能であるとしても間に合うのであろうか。マルサスの「必要な悪徳」を啓蒙思想で乗り越えた人類はそれでも再び「成長の限界」に面してしまったのではなかったのだろうか。2008年の洞爺湖サミットでの中国やインドの主張は人間が今後も成長を欲することの表れではないのか。

人間は少し我慢することで社会がよくなることを知っていても「誰も見ていなければ」「私一人くらい」という気持ちでその行為を行うことが出来ず、結果社会が悪くなる、という社会的ジレンマから逃れることが未だ出来ていない。逆にそこで開き直って大を生かすために小の虫を殺す、といった論調も出現する。ドフトエフスキーも小説カラマゾフの兄弟の中でこのような矛盾した人間心理を看破している。「人類全体を愛するようになればなるほど、個々の人間、つまりひとりひとりの個人に対する愛情が薄れていくからだ。空想の中ではよく人類への奉仕という情熱的な計画までたてるようになり、もし突然そういうことが要求されるなら、おそらく本当に人々のために十字架にかけられるにちがいないのだけれど、それ

にもかかわらず、相手がだれであれ一つ部屋に二日と暮らすことができないし、(中略) わたしは人がほんのちょっとでも接触するだけで、その人たちの敵になってしまうだろう。その代わりいつも、個々の人を憎めば憎むほど、人類に対するわたしの愛はますます強烈になっていくのだ」

本来、そのような小さな個人と大きな人類の生存というミクロとマクロをつなぐ位置に家族や社会や国といった集団が存在し、教育や慣習、在来知といった社会的ジレンマを少しでも解消するような機能がそこにはあるはずである。社会的ジレンマは小集団では解消できることもあるが、人類の単位まで来ると突然ドストエフスキー的なジャンプが起こり、「大か、小か」といった二者択一になってしまう。結局社会的ジレンマを人間が克服できないのは、人間という種が様々な矛盾を内包しているためではないか。利己的でありながら利他的であり、善人でもあり悪人にもなれる。そんな複雑な人間のよき一面だけに寄った持続可能社会の構築は、人間の矛盾を無視した非常に不安定な方法論である。マルクス主義の破綻は人間を労働者として捕らえ、一方の消費者としての側面を理解しなかった(あるいは当時はこの側面が顕著でなかった)ためではなかったか。地球生存圏の宇宙への拡大は制限された希望ではなく、拡大する欲望の充足であるとも言える。ヨーロッパ人が新大陸を目指し、秀吉が朝鮮出兵を行ったのは制限されたエクメーネの拡大による社会の安定化のためであろう。単位面積あたりの収穫量が成長の限界を規定するのであれば、再びエクメーネの増加のために、また膨れゆく人間と人類の成長の欲望を満たすために新しいフロンティアである宇宙を目指すべきではなかろうか。つまり、宇宙船地球号といった閉鎖系での思考方法を覆し、地球生存圏を宇宙へ開かれた開放系へとパラダイムシフトすることにより、従来のゼロ・サム的な成長の限界を打破し、真の持続可能な社会の実現が可能となると筆者は考えている。

地球生存圏の打破 – 第1歩：宇宙太陽発電所 SPS -

宇宙開放系への展開は言うは易し、行ふは難しである。現在の宇宙利用はあくまでも地球中心主義的な考えに基づいている。現在の宇宙利用は電磁波を利用した通信・放送・リモートセンシングがほとんどであり、宇宙環境の中でも「高高度」という条件を電磁波という手段を持って間接的に利用しているに過ぎない。もしくは有人の場合には宇宙ステーション利用、月探査、火星探査(予定)といった特殊な冒険家の世界を出ていない。一部宇宙観光の萌芽が見えるが、今後のロケットの低コスト化と安全性の向上という課題のクリアーが一般化への必須条件であり、クリアー後には地上の一般の観光との競争が待っている。今後の地球生存圏の拡大には真の意味での宇宙利用、つまり宇宙を生活の場とすることが不可欠であるが道のりは遠い。ローマクラブの警鐘や IPCC の 4 次報告は、すでに宇宙船地球号が悲鳴を上げており、かつその悪化はすでにブレーキをかけても手遅れに近くなっていることを述べている。そこで「いつかは宇宙利用」ではなく、現実と折り合い、地球閉鎖系の救済を同時に行いつつ、かつ現在の宇宙利用の主流である電磁波を用いたリモートな宇宙利用として、宇宙太陽発電所システムの早期着手を提唱したい。

宇宙太陽発電所 SPS(Space Solar Power Station/Satellite)は、CO₂ フリーでありながら大規模基幹電源として用いることが可能な将来構想である。SPS は宇宙空間で超大型の太陽電池パネルを広げ、太陽光発電によって得られる直流電力を電磁波=マイクロ波やレーザー等に変換して送電アンテナから地上に設置されるアンテナと整流回路(マイクロ波-電力変換回路)が一体となった「レクテナ」へ伝送し、再び直流電力に戻す方式の発電所である(図1)。発電量は地上で100万kW程度を想定しており、30年の経済寿命の間発電/売電を行う想定である。SPS は静止衛星軌道 36,000km 上空に建設する計画である。地球の半径は約 6,000km であり、地軸が傾いていることから、静止衛星軌道では地上が夜でも地球の影にはほとんど入らない。

特にマイクロ波を用いた SPS から地上への無線電力伝送は電離層での反射・散乱や大気・雨での吸収・散乱がほとんどない「電波の窓」と呼ばれる周波数帯を用いているために曇りや雨でも太陽光発電の電力を利用できるという利点を持つ。SPS の太陽電池は常に太陽を向くように制御し(太陽指向)、逆にマイクロ波送電アンテナは常に地球の受電サイトを向くように制御するため(地球指向)、SPS は 24 時間の安定した太陽光発電が可能となる。SPS は現在日[9][10]米[11]-[13]欧[14]で様々な角度から検討が進められている。

SPSを実現するために必要な技術は太陽光発電、マイクロ波送電、ロケット、宇宙構造・ロボット技術、熱制御等であるが、乗り越えなければならない技術の高い壁は無く、各技術の研磨と低コスト化が必要のみである。太陽光発電は現在の宇宙用太陽電池をより1)高量産性、低コスト化、2)軽量化(=高効率化)、3)高耐放射線性化、を行うことで経済的実現性を高めればよい。電磁波による無線電力伝送は理論的・実験的に20世紀初頭からニコラ・テスラにより実証実験が行われるような古い技術[15][16]であり、超巨大高効率高精度軽量アンテナフェーズドアレーが必須であるが、1960年代以降、アメリカ[17]と日本[18]で多くの実証実験が行われているため、技術的な壁は高くない。SPSが提唱され40年がたち、その実現は2030-2040年頃と目され、大きなプロジェクト化が未着手なのにもかかわらず、多くの研究者がSPS研究を行っているのはその実現可能性と将来性の高さのためである。これまで様々なSPSが検討されてきたが、最近の主流は大きな反射板を用いて太陽光を制御・集中させて太陽光発電を行い、発生させた電力をマイクロ波機器にある程度分散配電してからマイクロ波送電を行うものである。図2はJAXAが提唱している最新のSPSである[9]。

ローマクラブのワールドモデルにも対し、エネルギーコスト解析に基づいた SPS を含むワールド・ダイナミックス・シミュレーションモデルを作成し、SPS が地球生態・経済系に及ぼす影響が評価されている[19]。図3がローマクラブの古典モデルのシミュレーション結果、

図4、図5はSPSを含むワールドモデルのシミュレーション結果を示している。図4に示すようにSPSへのエネルギー投資が少ない場合は、SPSの成長が地球上でのエネルギー消費の成長を支えきれないので、成長の限界を回避できない。しかし、図5に示すようにSPSへの投資が大きい場合は、SPSの成長が地球上のエネルギー消費の増加を充分支えることが可能となり、地球上の人口、資本の継続的な成長を可能にする。SPSのエネルギー投資が大きい場合、SPS自体から地球への供給されるエネルギーによってSPSの成長が増進されるという"自己増殖状態"となる。一度この状態が達成されると、地球上での成長の限界は完全に回避できることが、このシミュレーション結果によって示されている。

地球生存圏の打破 -第2歩：月利用-

SPSは宇宙から地上への無線エネルギー伝送システムであるため、電磁波の安全性に対する議論は多いが、宇宙利用に対する懸念はあまりない。あくまでも地球生存圏のためにリモートで宇宙を利用するシステムであるためである。しかし、SPSは宇宙開放への第1歩に過ぎない。エクメーネを劇的に拡大するためにはやはり宇宙での生活の展開が必要であろう。宇宙生活となると無重力環境の懸念が発生することになる。そこでSPSで培った超巨大宇宙システム建造技術を生かし、かつスムーズに宇宙生活を展開するためにはやはり地球の約1/6とはいえ重力のある月が重要となってくる。現在検討されているような地球資源持ち出しによる月面基地への生活者の常駐をまずスタートし、いずれは月資源を利用した自己増殖的な次の月面基地の建設へと進めるとよい。その間、地球生存圏への月資源の輸出も行うことで少しだけエクメーネを拡大し、持続可能な社会の発展に寄与もできる。

当然これまでの宇宙技術を結集した有人作業ということになるが、大切なのはこれまでの冒険家や研究者のための月面基地とだけになってはならないということである。例えば南極

基地も初期の頃はまさに冒険家と研究者のための設備であったであろうが、今や電話やインターネットが通じるような研究・生活空間へと近づいている。月面基地も地球生存圏の拡大という観点に立てばそのような快適空間を目指し、その先の宇宙利用を目指すべきである。

宇宙は安全性を追求するがゆえに高コストで当然という考えは将来改めなくてはならない。環境問題ですら経済問題であると報告したのはスターン報告である[20][21]。スターン報告は英国政府がニコラス・スターン元世界銀行上級副総裁に作成を依頼した気候変動問題の経済影響に関する報告書で2006年10月に公表されたものである。報告書によると、対策を講じなかった場合のリスクと費用の総額は現在及び将来のGDPの5%強に達し、より広範囲のリスクや影響を考慮に入れば、損失額は少なくともGDPの20%に達する可能性があり、逆に温室効果ガスの排出量を削減するなどの対策を講じた場合の費用は世界の年間GDPの1%程度で済む可能性がある、としている。温室効果ガスの排出は、今も経済の成長によって進むが、大気中の温室効果ガス濃度の安定化は可能であり、経済成長の継続と矛盾せず、低炭素経済への転換は競争力という点からは大きな挑戦であるが、一方、経済成長への好機でもある、と報告書はまとめている。このように持続可能な社会を性善説に頼ることなく、経済活動というアプローチでも推進しようとしている現状で、「宇宙は特別」「経済活動とは切り離して考えるべき」といい続けていては世界の賛同は得られない。SPSも月面基地も、投資に対するリターンがどれくらいか、リスク管理はどうなっているのか、といった地上生活と同様の物差しで議論できるようにはなくならなくてはならない。

しかしこのような人間の欲望に根ざした拡大する生存圏に対しては大きな反論があろう。つまり、「人間には動物とは異なる理性があり、理性を信ずることで持続可能な生存圏の実現は可能なはずである」と。アリストテレスは、社会の存在により人間は倫理的な「友愛(フイリア)」と政治学的な「ポリス的献身」を実践することが出来る、つまり人間はポリス的動

物であると述べた。確かに人間は社会の中に身をおくと理性が働き、全体の利益に対して献身的行動をとることが多い。アリストテレス以降何千年も人間の理性を信じながらも社会的ジレンマが解決できていない事実も忘れてはならないが、逆に解決するような努力=より良い社会の構築に向けた人間活動も忘れてはならない。つまり、イノチのつながりによる社会の実現を目指す行為こそ、人間の本質であり、さらにこの矛盾こそが人間の人間たるゆえんであると著者は考える。それ故に人間は何千年も社会的ジレンマが解決できずとも生存できてきたのであろう。エクメーネの拡大を少しずつ進めたとしても、持続可能な社会の実現に向けての現在の努力を怠ってはならないのが人間の当然の行為である。先に述べた矛盾した生物である人間の一方の性質だけを伸ばすことは人類の 19 世紀的拡大路線の再現になってしまい、再び環境悪化による自滅への道につながってしまう。持続可能な生存圏への取り組みと、拡大する生存圏への取り組みを両軸にしてこそ人本来の活動に無理がなくなり、地球生存圏の安定へとつなげることが出来る。

地球生存圏の打破 -最終形-

「それぞれの人にとって環境とは、「私を除いて存在する全て」であるに違いない。それに対して宇宙は、「私を含んで存在する全て」であるに違いない。環境と宇宙の間のたった一つの違いは、私・・・見る人、為す人、考える人、愛する人、受ける人である私」と数学者・建築家・思想家であるバックミンスター・フラーはアポロ 9 号の宇宙飛行士だったラッセル・シュワイカートに贈った[22]。現在の環境問題に対する漠然とした危機感はこの当事者意識の薄さに起因するように思えてならない。ゴミを分別したから環境問題が少しだけ解決した、マイ箸を持っている私は良い人、といった「私とその仲間は環境にやさしい」というぬるい意識を払拭しない限り、「環境にやさしい」というキー・ワードが結局企業活動の利益に使わ

れるだけで地球生存圏の抜本的な解決にはならない。逆に宇宙を語ることで個人の幸福や充足を無視しては過去の愚かな独裁者の論理と同じである。宇宙飛行士の多くは地上に戻ると宗教者や農業従事者になり、何かを悟るとよく言われる。「環境と宇宙の間のたった一つの違いは、私」という境地に人類全部が達するとは思えないが、それでも宇宙環境を利用することはこれまで神々の領域であった空を生活の場にするという、これまでにない感覚を人類の多くに気付かせる役目も果たすであろう。ドストエフスキーが指摘した個人と人類の幸せ追求の矛盾を、宇宙環境が中和、昇華して人類を新しいステージへと導けないだろうか。おそらくこのステージに進むためには宇宙を見上げているだけではドストエフスキーのジレンマからは逃れられない。人が実際に宇宙を地球生存圏として利用して、生活の場にして始めてジレンマの中和、昇華に至るのではないだろうか。そのように環境と私が一体となった感覚を誘発する宇宙とは人間の進むべき最終形に思える。しかしその道のりは非常に遠い。これまで重力に縛られていた人間が 1903 年にライト兄弟により重力から多少解放されて地球の表層(～10km) を往来するようになって 100 年足らず。さらに完全なる重力からの開放への道のりがいかほどか想像しにくい、現在の宇宙技術をスタートとして SPS、月面利用、太陽系利用、そして重力からの開放といったステップを、「裸のサル」である人間の矛盾した内面と共に進めていけば、地球生存圏は宇宙生存圏へと発展できるであろう。その先には重力から開放された新しい「空飛ぶサル」へと人が変化していくであろう。そのために、複合科学である「生存科学」の展開が必要となるであろう。

参考文献

- [1] トマス・ロバート・マルサス, “人口論”, 中公文庫 1973
- [2] 稲田充男, “人口予測の数学モデル”, Bulletin of Toyohashi Sozo College, 1997, No. 1, 27-32
- [3] 河野稠果, “世界の人口 [第2版] ”, 東京大学出版会, 2000
- [4] ローマクラブ, 大来佐武郎監訳, “成長の限界”, ダイヤモンド社, 1972
- [5] ローマクラブ, 茅陽一監訳, “成長の限界 限界を超えて”, ダイヤモンド社, 1992

- [6] ローマクラブ, 枝廣淳子訳, “成長の限界 人類の選択”, ダイヤモンド社, 2005
- [7] <http://www.ipcc.ch/>
- [8] http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf
- [9] 藤田辰人, 森雅裕, 久田安正, 福室康行, 木皿且人, 瀬在俊浩, 吉田裕之, 鈴木拓明, “JAXA における宇宙エネルギー利用システム(SSPS)の研究現状”, 信学技報 SPS2008-01(2008-04), pp.1-4, 2008
- [10] 小林裕太郎, 三原荘一郎, 斉藤孝, 金井宏, “SSPS に関する USEF の活動状況”, 信学技報 SPS2008-02 (2008-04), pp.5-10, 2008
- [11] (財)無人宇宙実験システム研究開発機構, “平成19年度太陽光発電利用促進技術調査成果報告書”, 2008.3
- [12] <http://www.nss.org/settlement/spp/library/nssso.htm>
- [13] Mankins, J. C. ; “A fresh look at the concept of space solar power”, Proc. of 3rd Int. Conf. on Solar Power from Space – SPS’97, S7041, 1997
- [14] Summerer L. and F. Ongaro, “Solar Power from Space – Validation of Options for Future”, Proc. of the 4th Int. Conf. on Solar Power from Space – SPS’04, pp.17-26, 2004
- [15] Tesla, N., “The transmission of electric energy without wires, The thirteenth Anniversary Number of the Electrical World and Engineer”, March 5, 1904.
- [16] Tesla, N., “Experiments with Alternate Current of High Potential and High Frequency”, McGraw Pub. Co., N.Y., 1904.
- [17] Brown, W.C.; “The history of power transmission by radio waves”, IEEE Trans. MTT, Vol.32, No.9, pp.1230-1242, 1984
- [18] Matsumoto, H., “Research on Solar Power Station and Microwave Power Transmission in Japan : Review and Perspectives”, IEEE Microwave Magazine, No.12, pp.36-45, 2002
- [19] Yamagiwa, Y. and M. Nagatomo ; "An Evaluation Model of Solar Power Satellites Using World Dynamics Simulation", Space Power, vol.11, no.2, pp.121-131, 1992
- [20] http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.cfm
- [21] <http://www-iam.nies.go.jp/aim/stern/index.htm>
- [22] 立花隆, “宇宙からの帰還”, 中央公論社, 1985

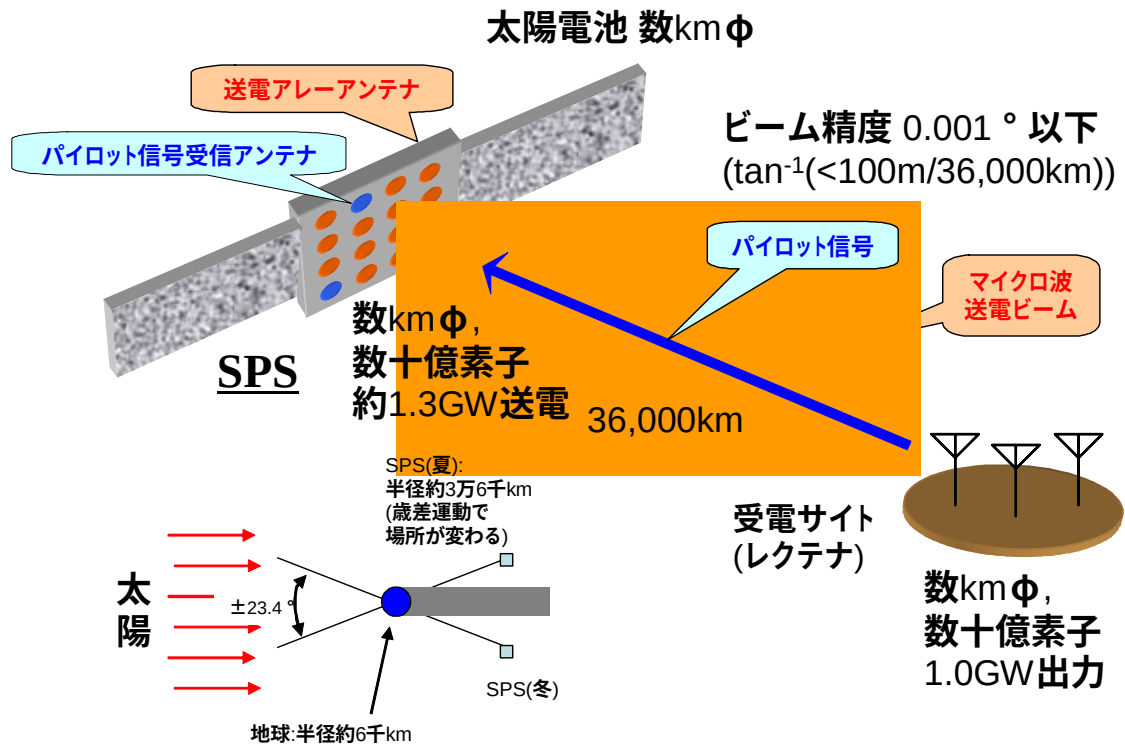


図1 SPS の一般的な概念とパラメータ

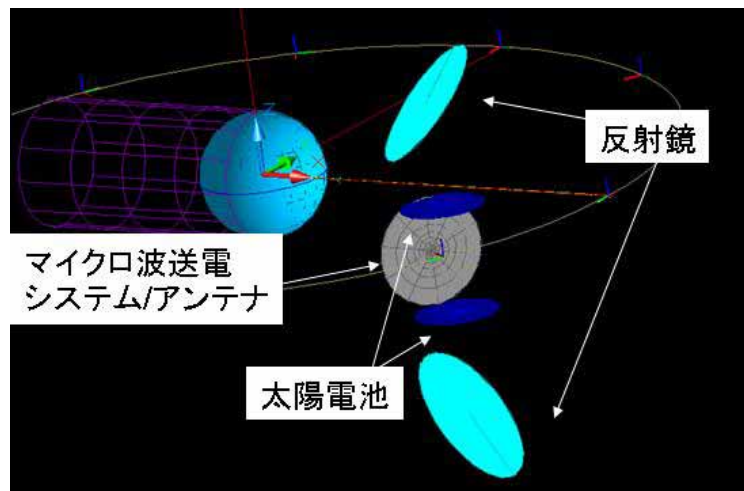


図2 JAXA-SPSの概念図 (2004年モデル) 一次ミラー：2.5km×3.5km, 1,000 t×2, 発電部：1.2km～2kmφ(TBD), 送電部：1.8～2.5kmφ, 発電部と送電部をあわせて8,000t程度 [9]

<縦軸単位 (フルスケール)>

- ・人口: $P = 1 \times 10^{10}$ (人) 、・資源: $NR = 9 \times 10^{11}$ (資源単位) 、
- ・地球資本: $CI = 2 \times 10^{10}$ (資本単位) 、・汚染比: $POLR = 20$ 、
- ・生活の質: $QL = 2$ 、・食料比: $FR = 2$

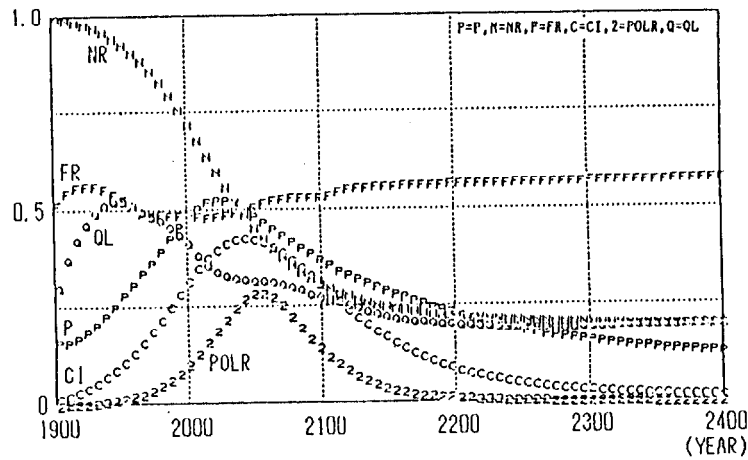


図3 WORLD-2 モデルシミュレーション結果 [19]

<パラメータ>

- ・地球からSPSへの資本投資開始年: $IYEAR = 2000$ (年) 、
- ・SPSコストが改良値に到達する年: $RYEAR = 2100$ (年) 、
- ・毎年の地球からSPSへのエネルギー投資量: $E_t = 0.003 \times NRUR$ (MJ/年) 、
- ・SPSの減価償却率: $SCIDN = 0.01$ 、・植林率: $WR = 0.002$

<縦軸単位 (フルスケール)>

- ・人口: $P = 1 \times 10^{10}$ (人) 、・石油資源: $NRO = 2 \times 10^{12}$ (バレル) 、
- ・地球資本: $CI = 5 \times 10^{10}$ (資本単位) 、・ CO_2 量: $CO2 = 1000$ (PPM) 、
- ・SPS台数: $N = 4000$ (台) 、・生活の質: $QL = 2$ 、

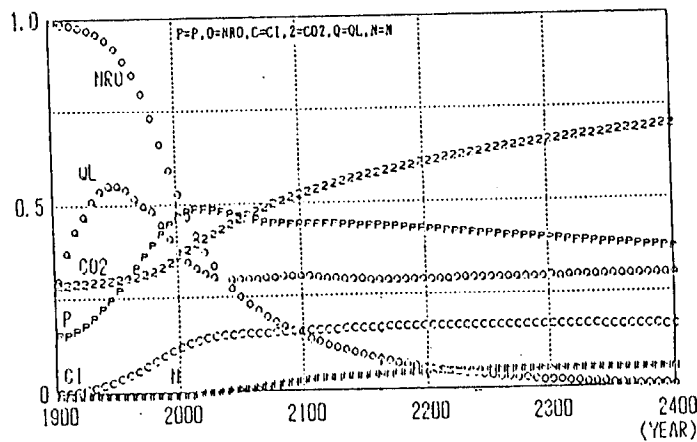


図4 SPS を含む WORLD MODEL 計算結果(SPS へのエネルギー投資が小さい場合)[19]

<パラメータ>

- ・地球からSPSへの資本投資開始年: I YEAR=2000 (年) .
 - ・SPSコストが改良値に到達する年: R YEAR=2100 (年) .
 - ・毎年の地球からSPSへのエネルギー投資量: E t=0.01×NRUR (MJ/年) .
 - ・SPSの減価償却率: SCIDN=0.01 . ・植体系: WR=0.002
- <縦軸単位 (フルスケール) >
- ・人口: P=1×10¹⁰ (人) . ・石油資源: NRO=2×10¹² (バレル) .
 - ・地球資本: CI=5×10¹⁰ (資本単位) . ・CO₂量: CO2=1000 (PPM) .
 - ・SPS台数: N=4000 (台) . ・生活の質: QL=2.

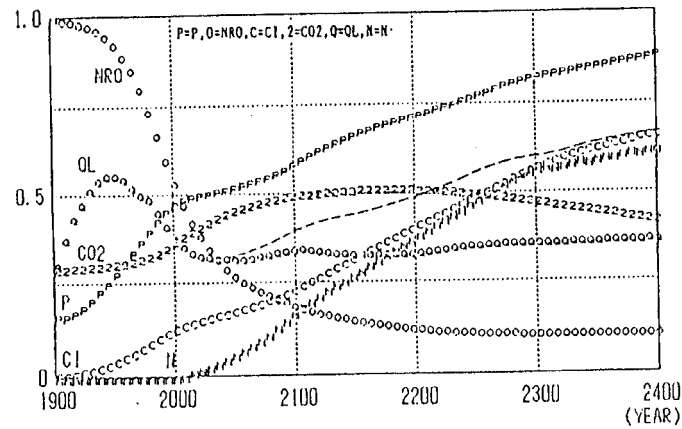


図5 SPSを含むWORLD MODEL 計算結果(SPS へのエネルギー投資が大きい場合)[19]