

Title	宇宙太陽発電衛星のCO2負荷：若干のシミュレーション
Sub Title	
Author	吉岡, 完治(Yoshioka, Kanji) 管, 幹雄(Kan, Mikio) 野村, 浩二(Nomura, Koji) 朝倉, 啓一郎(Asakura, Keiichiro)
Publisher	慶應義塾大学産業研究所
Publication year	1998
Jtitle	KEO discussion paper. G : 『アジア地域における経済および環境の相互依存と環境保全に関する学際的研究』 (KEO discussion paper. G : "Inter-disciplinary studies for sustainable development in Asian countries"). No.G-14
JaLC DOI	
Abstract	概要我々は、前論文:「宇宙太陽発電衛星のCO2負荷」において、DOE/NASAリファレンスシステムに基づくSPSシステムを取り上げ、そのシステムの立ち上げ時にかかるCO2負荷を計測し、既存の発電システムと比較研究を行った。その結果、SPSのCO2負荷は、火力発電よりも大幅に小さく、原子力発電とほぼ同じ値であることが分かった。本稿は、前稿の基準ケースから、SPSに搭載する太陽電池の種類、SPSからの電力マイクロ波を受信するレクテナの設置方法、およびSPSシステムの建設方法を変更したシミュレーションバージョンである。計測の結果、第1に、太陽電池に関しては、アモルファスシリコン太陽電池の場合は、多結晶シリコン太陽電池の約6割のCO2負荷に低下することが分かった。第2に、レクテナのCO2負荷に関しては、陸上型レクテナを基準とすると、干拓型レクテナは約4倍、洋上型レクテナは約9倍増加することが示された。第3に、SPSを18期間に分割して建設し、完成したSPSシステムからの電力を用いてSPSを建設していく場合には、第2期目以降、既存の電力設備からの電力を必要とせず、SPSの電力だけでSPSが建設されることが明らかになった。そして、SPSの電力を利用してSPSを建設すると、既存の電源設備の電力のみを用いてSPSを建設するよりも、CO2負荷が約半分に抑制されることが明示された。
Notes	表紙上部に"日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業複合領域「アジア地域の環境保全」"の表示あり
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA12113622-00000014-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

宇宙太陽発電衛星のCO₂負荷 —若干のシミュレーション—

吉 岡 完 治
菅 幹 雄
野 村 浩 二
朝 倉 啓一郎

No.G-14

学振未来 WG2-5

宇宙太陽発電衛星のCO₂負荷 -若干のシミュレーション-

吉岡完治、菅幹雄、野村浩二、朝倉啓一郎

1998年3月

キーワード

宇宙太陽発電衛星、SPS、DOE/NASA リファレンスシステム、CO₂負荷
多結晶シリコン太陽電池、アモルファスシリコン太陽電池、陸上型レクテナ
干拓型レクテナ、洋上型レクテナ、電源構成、シミュレーション用産業連関表

概要

我々は、前論文:「宇宙太陽発電衛星のCO₂負荷」において、DOE/NASA リファレンスシステムに基づくSPSシステムを取り上げ、そのシステムの立ち上げ時にかかるCO₂負荷を計測し、既存の発電システムと比較研究を行った。その結果、SPSのCO₂負荷は、火力発電よりも大幅に小さく、原子力発電とほぼ同じ値であることが分かった。本稿は、前稿の基準ケースから、SPSに搭載する太陽電池の種類、SPSからの電力マイクロ波を受信するレクテナの設置方法、およびSPSシステムの建設方法を変更したシミュレーションバージョンである。計測の結果、第1に、太陽電池に関しては、アモルファスシリコン太陽電池の場合は、多結晶シリコン太陽電池の約6割のCO₂負荷に低下することが分かった。第2に、レクテナのCO₂負荷に関しては、陸上型レクテナを基準とすると、干拓型レクテナは約4倍、洋上型レクテナは約9倍増加することが示された。第3に、SPSを18期間に分割して建設し、完成したSPSシステムからの電力を用いてSPSを建設していく場合には、第2期目以降、既存の電力設備からの電力を必要とせず、SPSの電力だけでSPSが建設されることが明らかになった。そして、SPSの電力を利用してSPSを建設すると、既存の電源設備の電力のみを用いてSPSを建設するよりも、CO₂負荷が約半分に抑制されることが明示された。

宇宙太陽発電衛星のCO₂負荷

-若干のシミュレーション-

吉岡完治[†]、菅幹雄[‡]、野村浩二[†]、朝倉啓一郎[§]

1998年3月

1 はじめに

宇宙衛星に太陽電池をはりめぐらしマイクロウェーブで地上に送電するというSPSシステムの構想は、70年代にDOE/NASA リファレンスシステムとして整理されてきた。前論文:「宇宙太陽発電衛星のCO₂負荷」([31])では、このリファレンスシステムにできるだけ準じて我が国の電力全体をまかなうには、システムの立ち上げにどれだけのCO₂負荷がかかり、運用時にどれだけのCO₂を削減できるのかという観点で研究がなされている。もちろんリファレンスシステムといっても20年前の構想なので、今の実状にあわないものもある。例えば単結晶シリコンによって太陽電池を作るには、あまりにもコストフルなので前論文では、多結晶シリコンに切り替えて計算がなされた。

この論文では、そのような基準ケースからいくつかのバリエーションを考えてSPSシステムのCO₂負荷をシミュレーションしてみる。今回のシミュレーションでは主として三つのことを考えた。第一に、多結晶シリコンの太陽電池は普及段階に入ったが、更にアモルファス型にすると効果が高いかもしれないということで太陽電池をアモルファス型に変えたシミュレーションを行う。第二に、リファレンスシステムでは、アメリカ合衆国のように砂漠地帯や空き地の多い国々を前提としているが、我が国にはそのような場所がなかなか見当たらない。電力の受信レクテナを干拓地に据えるのか、また、洋上に据えた場合にCO₂負荷は一体どのように変化するのかを考えてみる。第三に、SPSシステムを作り上げる場合、ロケットの燃料、設備、太陽電池を含めてそのCO₂負荷は電力を経由して発生するウェートが高い。したがって既存の電力でSPSシステムを一部作りそのシステムで発生する電力をもっぱら次のシステム立ち上げに向けていくというようにして、順次、等差級数的にSPSの電力を利用していった場合、どの程度CO₂負荷を削減できるのかということシミュレーションしてみる。以上の三点がこの論文の概要である。

[†] 慶應義塾大学産業研究所、[‡] 東海大学教養学部、[§] 慶應義塾大学産業研究所未来開拓事業（日本学術振興会特別研究員）

2 宇宙用太陽電池：多結晶シリコン vs アモルファスシリコン

宇宙用太陽電池の想定としてわれわれの基準ケースでのシナリオでは、我が国でも生産実績があり、近年大きく生産量の拡大が見込まれている多結晶シリコン太陽電池についてコストおよびCO₂排出量の計算をおこなった。ここでは同様に高い生産実績のあるアモルファスシリコン太陽電池について比較をおこなう。

アモルファスシリコン太陽電池の特徴としては次のような点がある。まず太陽電池の効率性をみると、同じシリコン系太陽電池と比較しても結晶系と比べ変換効率は8%程度と未だ低く、光劣化現象と呼ばれる変換効率の30%程の悪化がある¹。しかし一方でコスト面からみると相対的に安価であることから、現在では電卓や時計など民生用機器にはほとんどアモルファスシリコン太陽電池が利用されている。また特に宇宙用太陽電池として期待される点としては、モジュールが軽量であり、地上からの輸送の際に高い梱包密度が可能であることである（ただし変換効率の低さから同じ発電量を得るためには多くの面積を要する）。以上のように相対的に長所と短所をあわせ持っているが、変換効率の向上、信頼性の向上、生産コストのいっそうの削減などが現在の課題になっている。このような課題に対し、将来には明るい見通しが期待されている。まず変換効率については、現在でも小面積のもので13%が達成され、将来は実用サイズのものでも向上する見通しにある。初期劣化についても太陽電池構造の工夫によって15%程度まで低減しており、今後も材料開発やデバイス開発が進むと5-10%程度まで低減できると期待されている。また上記の変換効率や信頼性の向上に伴って、民生用需要のみならず電力用需要の需要規模の拡大が達成されれば、その製造プロセスにおける特性からスケールメリットが期待され、大幅なコスト低下が可能になるであろう。このようにアモルファスシリコン太陽電池の変換効率や信頼性の向上、コストの低廉化が期待されているが、現状のコスト構成とCO₂負荷について計算をおこない、多結晶シリコン太陽電池との比較をおこなうことにする。

2.1 アモルファスシリコン太陽電池の製造コスト

アモルファスシリコン太陽電池 (a-Si) の生産工程は、多結晶シリコン太陽電池 (poly-Si) のそれと比較して簡潔であり、セル化とモジュール化の二つに大別される。セル化では、現在一般的に次のような工程からなっている。まず、熱CVD法によってガラス基板上にSnO₂やZnOなどの透明・導電性酸化物膜(TCO)から透明電極を形成し、レーザーによって電極パターニング(透明電極の形状処理)をおこなう。そこにモノシランガス(SiH₄)を流し、高周波の放電によって高いエネルギーを加えて分解されたシリコンがガラス基板に堆積し、アモルファスシリコン膜(i型)を形成する(プラズマCVD法)。その際ジボラン(B₂H₆)を混合するとp型a-Siとなり、フォスフィン(PH₃)を混合するとn型a-Siとなる。このように原料ガスを切り替えることによってp型、i型、n型の膜を順次堆積し、レーザーによるa-Si膜パターニングし、を最後に裏面電極を設置(スパッタ法)およびパターニングすることでアモルファスシリコン太陽電池のセルが形成される。

セルの製造後、特性検査を経てモジュールを形成する。セル化における裏面電極形成、セル特性検査、モジュール化などの工程は、多結晶シリコン太陽電池におけるプロセスとほぼ同様であることから原材料投入量や投入価格を同一にしている。ただしa-Siではガラス基板がそのまま受光面の保護板として用いられるのでモジュール化においてカバーガラスは不要であり、またモジュール化におけるその他の原材料投入量はpoly-Siとa-Siの面積比によってpoly-Siの際の1.8倍としている²。コスト構成の推計にあたり、資料としては太陽光発電技術研究組合[1993]などを参照している。

¹1977年の光劣化現象の発見者から一般にStaebler-Wronski効果と呼ばれており、長時間継続して照度の高い光を照射することで、特性が低下し、その後飽和していく現象である。現状としては通常30-40%程度の光劣化を起こす。

²同じ10MWの太陽電池としても、poly-Siとa-Siではここで想定している変換効率の相違(それぞれ0.15と0.08)を受けて、またカバーガラスからセル表面への入射エネルギー到達効率の相違(それぞれ0.96と1.00)から、必要面積量がa-Siでは1.8倍になっている(稲葉他[1993])。よってここではモジュール製造に必要な各種原材料については面積に比例するとして計算している。

表 1: モジュールコストの比較

	poly-Si	a-Si
太陽電池における想定		
年産規模	10MW	10MW
変換効率	0.15	0.08
1Wあたりのモジュールコスト (yen/W)		
原材料・燃料	163.76	93.59
商業・輸送費	25.64	11.67
労働コスト	36.75	36.25
資本コスト	7.92	89.36
総額	234.07	230.87

推計されたモジュールコストを比較したものが表1である。ここではSPSを想定しているため地上設置に必要な架台、インバーター、およびそれらの工事費については含まれておらず、SPSの太陽発電衛星におけるマイクロ波送電設備、構造体等は別に扱っていることに留意されたい。表でのコスト総額は、原材料投入額（生産者価格）、雇用者所得³、製造設備・建設費⁴に加えて、各種原材料の輸送・商業マージンとして産業連関表より財別に推計した購入者価格によって評価したものである。

推計されたコスト総額をみると、アモルファスシリコン太陽電池では、231円/Wとなっている。多結晶シリコン太陽電池234円/Wであるから若干安価であるにすぎない。poly-Si製造コストと比較しての特徴は、資本コストが89円/Wとモジュールコストの39%を占めていることである。その一方で原材料・燃料コストはpoly-Siで70%であるが、a-Siでは41%に過ぎない。特に電力需要額はpoly-Siで27.86円/W、a-Siで6.34円/Wと、a-Si製造では1Wあたり1/4以下の電力投入しか必要としない。このことはシリコン製造の際に、結晶系シリコンでは1000-1500°Cの温度を必要とするのに対して、アモルファスでは約300°C程度であることによっている。

2.2 SPS規模の太陽電池製造によるCO₂負荷

DOE/NASA リファレンスシステムの想定に従って、その太陽電池出力規模（SPS1基当たり静止軌道上で12.42GW、地上においてレクテナで受電するときには5GW）を満たす太陽電池数量は太陽光入射エネルギーを1.37kW/m²（solar constant）として計算すると、SPS1基あたり先の10MWの太陽電池を約907セット必要とする。リファレンスシステムではSPS60基を想定しているから（全体として年間2.628 × 10¹²kWhの発電量）、約54429セットということになる。

その推計結果の総括表が表2である。表からわかるように、SPSに必要なa-Siの太陽電池総額（モジュールコスト）は125.6兆円となる。CO₂排出量としては、素原材料及びエネルギー投入によってpoly-Siが8.90億t-CO₂の排出（なお多結晶シリコンの製造においては、シリカ還元によってCO₂が発生する部分があり、その発生分は加算されている）であるが、a-Siでは4.35億t-CO₂と約半分程度のCO₂負荷となる。また資本財製造による排出を加算しても、合計でpoly-Siの9.04億t-CO₂に対し、a-Siの5.63億t-CO₂と62%程度に抑制されている。

また部門別CO₂排出量としては、直接・間接の生産波及の結果として最大の排出部門は電力部門であり、自家発電を含むと2.2億t-CO₂で全体の39.4%を占めている。電力部門が最大のCO₂排出部門であることはpoly-Siのケースと同様であるが、poly-Si製造では電力部門が5.1億t-CO₂と大きく、全排出量の59.4%を

³雇用者所得については、産業連関表における半導体素子・集積回路製造における労働分配率を想定し、15.7%として推計している。

⁴各種製造設備については耐用年数10年、建設物は耐用年数40年とし、金利を5%のもとで定率法での償却パターンを仮定して1年当りの費用に換算している。

表 2: SPS 用太陽電池のモジュールコストと CO₂排出量

	poly-Si	a-Si
モジュールコスト(10億円)		
素原材料	89132	50906
商業・輸送費	13955	6349
資本コスト	4312	48607
労働コスト	20002	19716
合計	127402	125578
誘発粗付加価値(10億円)		
第一次産業	6049	3645
第二次産業	74700	98030
第三次産業	46652	23907
CO ₂ 排出量(M.t-CO ₂)		
素原材料 ¹	890.4	434.9
資本投入	13.6	128.3
合計	903.9	563.2

¹ シリカ還元からの CO₂排出を含む

占めていた。a-Si 製造では、アモルファスシリコンを形成するガラス基盤をそのまま受光面の保護板として用いることができることからカバーガラスが不要であり、ガラス製造からの CO₂排出量は 36.4 百万 t-CO₂ と poly-Si の際の 37%程度である。

以上の推計結果によるとアモルファスシリコン太陽電池を想定した場合、特にセル製造における電力需要、ガラス基板が CO₂負荷の点で大きなウェイトを占めており、この傾向自体は多結晶シリコン太陽電池の製造の際とあまり相違は無い。一方金額ベースでも、多結晶シリコン太陽電池と比較して 1W あたりのコストは同様である。しかし、直接的な必要電力量は 22.8%、直接・間接的な生産波及からの CO₂排出量では 62.3%に過ぎず、SPS60 基全体では 3.4 億 t-CO₂ もの排出を削減することが可能である。よって CO₂ 負荷の観点からは、アモルファスシリコン太陽電池に相対的な優位性がある。また将来的にはコスト面から言っても、先に述べたように a-Si の製造工程が相対的に簡潔で、ガス反応ゆえに量産化に適していることから製造規模拡大によるコスト削減効果が期待されるし、また変換効率の向上、信頼性の向上を伴って CO₂排出量をより減少することが期待される。

3 レクテナのシミュレーション:陸上型 vs 干拓型、洋上型

我々は、前論文において、基準ケースとしての DOE/NASA リファレンスシステムに基づくレクテナの CO₂負荷を計測した。それによって、レクテナは、一基あたり 644.8 万トンの CO₂を排出し、SPS システム全体の約 25%の CO₂負荷を持つことが明らかになった⁵。レクテナの基本的な問題点は、SPS システムに占める CO₂負荷が大きいだけでなく、レクテナの設置のために、広大な地上面積を必要とすることによって、北緯 30 度付近に設置する場合は、約 100km²の地上面積を必要とする。したがって、SPS システムの導入を検討する各国は、自然的、経済社会的な要因に基づいて、レクテナの設置場所や設置方法をいろいろと考案しており、本稿は、レクテナの主要な設置パターンに着目し、それぞれの CO₂負荷を『環境分析用産業連関表』を用いて推計する。

⁵DOE/NASA リファレンスシステムでは、レクテナは 60 基必要であり、全体で 3 億 9 千万トンの CO₂負荷を持つ。ただし、わが国の電力供給を全てまかなう規模を想定すると、レクテナは 18 基必要であり、その CO₂負荷は、1 億 2 千万トンである。

3.1 レクテナの設置パターン

CO₂負荷の推計に入る前に、これまでに考察されてきたレクテナの設置パターンとして、『陸上型レクテナ』、『干拓型レクテナ』および『洋上型レクテナ』をとりあげ、若干の説明をしておこう⁶。

(a) 『陸上型レクテナ』

『陸上型レクテナ』は、NASA/DOE リファレンスシステムに基づいており、陸地にレクテナが設置される。OTA[4]は、広大な陸地をもつアメリカについて、1つのレクテナの規模に対応する格子 (grid) によって大陸を分割し、レクテナの候補地が見つかるかどうかを吟味する。そこでは、河川、湖沼、運河、人口密度が高い地域、国境地、軍事保留地、絶滅が危惧される種の生息地、国の娯楽施設地域および地形的にレクテナ設置が許容できない地域(=以上は「絶対的に」除外されるべき地域)や、SPSのマイクロ波による電磁的な干渉を被るかもしれない軍事設備や原子力発電プラントから一定の距離内にある場合も、レクテナの候補地としては除外されている⁷。

(b) 『干拓型レクテナ』

西ヨーロッパにおいては、沖合におけるレクテナの建設が考察されており、構造設計の可能性から人工島方式と干拓方式が選択され、大量の砂の浚渫問題と建設費用の観点から干拓方式による設置が吟味されている。干拓方式によるレクテナの設置作業は、基本的に、建設作業場 (人工島) の建造→堤防の建設と水抜き (干拓用の構造物設置) →排水システムの設置→レクテナ本体の設置にしたがって進む。レクテナの設置場所は、海岸から20km、主要な電力消費の中心地点から300kmの範囲で、水深は30m以下である。立地の研究事例として、北緯53度、Den Helder (オランダ) の60km沖合で、水深27mの地点が取り上げられている。

(c) 『洋上型レクテナ』

国土の狭い日本でも、沖合におけるレクテナの設置が考察されているが、『干拓型レクテナ』とは構造設計が異なっている。そこでは、地震などによる海底変動の影響を受けないことと、設置地点の水深に影響されないことを考慮し、洋上において、アンテナ・架台が「浮体」構造物によって支えられる浮遊方式 (セミサブ (半潜水) 方式) が吟味されている⁸。また、レクテナは、1ブロック (50m×200m、浮体16個) ごとにドックで建造され、海上にて、結合・係留される。レクテナの設置地点については、200カイリ水域内の水深200m以下の海域において、平均波高、平均風速、最大流速と台風の通過度数等の観点から、輪島沖、島根沖、響灘、対馬東方、五島灘、土佐湾と鹿島灘が候補地としてあげられ、気象・海象および船舶航路の状況が調査されている。

3.2 CO₂負荷の推計範囲と推計方法

『陸上型レクテナ』は、DOE/NASA リファレンスシステムに基づく基準ケースとしてのレクテナであり、前論文にて、そのCO₂排出量を推計している。『干拓型レクテナ』と『洋上型レクテナ』は、『陸上型レクテナ』とは異なるアンテナ構造や架台構造をもつことが予想されるが、それに関する詳細な基礎データを入手できなかった。したがって、『干拓型レクテナ』は、『陸上型レクテナ』の周囲を干拓堤防で取り囲んだ構造とし、『洋上型レクテナ』は、『陸上型レクテナ』を洋上の浮体構造物で支える構造とし、それぞれCO₂負荷を計算する。そして、『陸上型レクテナ』、『干拓型レクテナ』および『洋上型レクテナ』について、その基本的な機能と構造物の構成に基づいて、(1) アンテナ関連製品、(2) 架台、(3) 電気設備、(4) 建設・設置工事、および(5) 『干拓型レクテナ』と『洋上型レクテナ』にそれぞれ必要な浮体構造物と干拓堤防・作業島に区分し、環境分析用の産業連関分析によってレクテナ1基あたりのCO₂負荷を推計す

⁶ 『陸上型レクテナ』は、DOE/ER[1]とOTA[4]を、『干拓型レクテナ』は、ESA[2]を、そして、『洋上型レクテナ』は、橋本[28]を、それぞれ参考にした。

⁷ 農地と渡り鳥の経路は、レクテナの設置には「潜在的に」除外されるべき地点とされる。

⁸ 畚野[30]は、人工島を含む固定式の有効性を指摘している。

る。設置地点は、北緯35度（短軸:9.6Km,長軸12.7Km）に調整している。

前論文と推計作業が重なる部分についてはそちらを参照していただくことにして、今回、新たに推定した部分についてのみ計測手順を示す。とくに、(5)は、干拓堤防についてはESA[2]の値を、浮体構造物については橋本[28]の値をそれぞれ用いる。

(a) 『陸上型レクテナ』

基準ケースとしての『陸上型レクテナ』金額ベクトルを表3で示す。

表 3: 陸上型レクテナ

レクテナの構成	金額 (億円)	I-O表対応コード	産業連関表の部門
(1) アンテナ関連製品			
アンテナ・導体	1771.8	2722021	アルミ圧延製品
ガリヒ素ダイオード	9770.5	3341011	半導体素子
商業・輸送マージン	1116.2		
(2) 架台部分			
架台	940.1	2621011	普通鋼形鋼
商業・輸送マージン	126.5		
(3) 電気設備			
インバータ	455.1	3411021	開閉制御装置および配電盤
制御装置	23.7	3411021	開閉制御装置および配電盤
商業・輸送マージン	98.3		
(4) 建設・設置(産業連関表の部門)			
(上位5部門)			
建設用金属製品	152.7	2811011	
ケーブル	97.0	2721013	
生コンクリート	61.2	2522011	
工業用陶磁器	46.6	2531012	
建設機械器具賃貸業	43.9	8513012	
上位5部門以外	342.6		
商業・輸送マージン	88.4		
総計	15134.5		

(b) 『干拓型レクテナ』

表4は、『干拓型レクテナ』の金額ベクトルを示している。(5)の干拓・堤防は、はじめに、砂利・砂、採

表 4: 干拓型レクテナ

レクテナの構成	金額 (億円)	I-O表対応コード
(1) アンテナ関連製品		
(2) 架台部分		(1)から(4)は、全て
(3) 電気設備		『陸上型』と同一。
(4) 建設・設置		
(5) 干拓・堤防(産業連関表の部門)		
(上位5部門)		
砂利・砕石	6959.1	0622011
建設機械器具賃貸業	2400.0	8513012
舗装材料	2056.0	2121021
セメント製品	1992.4	2523011
土木建築サービス	1671.2	8519031
上位5部門以外	14865.2	
商業・輸送マージン	3573.0	
総計	48651.5	

石、コンクリートとコンクリートキューブ（それぞれ、384百万m³、31100千t、500千m³、8700千m³）は対応する単価（それぞれ、1422円/t、1032719円/千t、11500円/m³、12412円/t）を掛け⁹、砂アスファルトとアスファルトコンクリート（それぞれ、42100千tと644千t）は物量的な投入素材比¹⁰と舗装材料部門を用いて金額を推計した。そして、『1990年建設部門分析用産業連関表』の「海岸」、「港湾・漁港」と「土地造成」の3部門を統合し、先に求めた砂利・砂等の価額から統合部門の金額ベクトル全体を

⁹コンクリートは2.5t/m³、砂利・砂は1.9t/m³で換算。（建設省[17]）

¹⁰西日本設計測量より聞き取り。

推計し、干拓堤防・作業島の建設に不要な中間投入部門を削除することによって、干拓堤防・作業島の建設ベクトルを求めた。

(c) 『洋上型レクテナ』

表5は、『洋上型レクテナ』の金額ベクトルを示している。(2)の架台部分の土台は、浮体構造物の上に敷き詰める鋼板であり、洋上型レクテナ全体に必要な鋼材(27600千t)から架台¹¹と浮体構造物の鋼材量を差し引いてもとめ(4508.2千t)、単価(67581円/t)を掛けた。(5)の浮体構造物(20800千t)は、それを鋼船部門(I-O表符号:361101)の鋼材投入量に対応させ、鋼船部門の金額投入ベクトル全体を推計し、客室に関連する部門や船内の内燃機関関連部門を削除することによって、浮体構造物の金額ベクトルを推計した。

表 5: 洋上型レクテナ

レクテナの構成	金額(億円)	I-O表対応コード	
(1) アンテナ関連製品	『陸上型』と同一。		
(2) 架台部分			
架台	940.1	2621011	普通鋼形鋼
土台	3587.2	2621012	普通鋼鋼板
商業・輸送マージン	609.9		
小計	5137.2		
(3) 電気設備	『陸上型』と同一。		
(5) 浮体構造物			
(上位5部門)			
普通鋼鋼板	9104.6	2621012	
鉄鋼シャースリット	3691.5	2649011	
ポンプおよび圧縮機	1901.0	3019011	
普通鋼形鋼	1861.2	2621011	
冷間仕上鋼材	1665.9	2623011	
上位5部門以外	21050.6		
商業・輸送マージン	4474.5		
総計	62122.1		

3.3 設置パターン別のレクテナのCO₂負荷

前節で推計した表3から表5にもとづいて、3つの立地パターンによるレクテナのCO₂負荷を表6にまとめている。CO₂負荷全体では、『陸上型レクテナ』(645万t)→『干拓型レクテナ』(2372万t)→『洋上型レクテナ』(5942万t)の順に上昇し、『洋上型レクテナ』は『陸上型レクテナ』の約9倍のCO₂負荷をもつ。また、レクテナの基本的な役割=マイクロ波の受電・整流を担うアンテナと架台部分のCO₂負荷は、『陸上型レクテナ』では90%、『干拓型レクテナ』では24%、『洋上型レクテナ』では23%であって、『陸上型レクテナ』において、主要なCO₂の排出源である。しかし、『干拓型レクテナ』や『洋上型レクテナ』では、干拓・堤防工事(73%)や浮体構造物(76%)からのCO₂負荷が決定的な要因となる。

表 6: レクテナのCO₂負荷(万t)

レクテナの構成	陸上型	干拓型	洋上型
アンテナ・導体関連製品	369.5	369.5	369.5
架台	210.9	210.9	1015.9
電気設備	13.8	13.8	13.8
設置工事	50.7	50.7	-
洋上型・干拓型構造物	-	1727.4	4542.5
計	644.9	2372.2	5941.5

次に、表7は、レクテナの設置パターンごとに、直接間接のCO₂負荷の上位5部門を示している。『陸上型アンテナ』は、第1位は事業用発電部門、第2位は鉄鉄部門、第3位は石炭製品部門であり、上位5部門で、全体の6割を超えるCO₂を排出しており、とくに、事業用発電部門と自家発電部門で、全体の36%の

¹¹ 『陸上型レクテナ』と同一とする。

CO₂負荷をもつ。『干拓型レクテナ』においても、第1位は、事業用発電部門であり、上位5部門には入っていない自家発電部門を加えると、全体の1/4を占める。また、巨大な干拓工事を反映してか、自家用貨物輸送が第2位に位置していることが特徴的である。そして、『洋上型レクテナ』は、『陸上型レクテナ』と『干拓型レクテナ』と異なり、浮体構造物のために膨大な鉄鋼製品を必要とすることから、銑鉄部門が第1位に位置し、事業用電力部門が第2位となる。そして、上位5部門で、全体の7割を超えるCO₂を排出している。

表 7: 部門別のCO₂直接間接排出量(万t)

陸上型		干拓型		洋上型	
事業用発電	182.3	事業用発電	441.8	銑鉄	1657.3
銑鉄	87.5	自家用貨物自動車輸送	300.6	事業用発電	1074.4
石炭製品	58.4	銑鉄	214.9	石炭製品	980.3
自家発電	49.8	石炭製品	149.8	自家発電	421.1
アルミ	27.8	その他窯業土石	140.2	熱間圧延鋼材	290.4
計(上位5部門以外含む)	644.8		2372.2		5941.5

レクテナは地上の巨大な建造物であり、アンテナ・架台の構造体と立地場所は、マイクロ波の影響を考慮しつつ、地形や気象状況からの負荷、大口の電力需要地帯、地上の建造物、経済社会活動領域および人口分布等のいろいろな要因を吟味することによって、決定されると思われる(OTA[4])。しかし、その決定によっては、レクテナの建設による環境負荷を著しく変動させることも明らかであり、レクテナのアンテナと架台の構造設計だけでなく、レクテナの設置場所も、慎重に判断する必要があるといえよう。とはいえ、レクテナの設置パターン別のCO₂負荷計算のための基礎データは、基本的に不十分であることも明らかであって、今後、より精確な基礎データによる再検討が望まれよう。

4 宇宙太陽発電衛星のシミュレーション

DOE/NASA リファレンスシステムは、1基あたり地上で5GWの発電が可能なSPSを全部で60基打ち上げる計画であった。それは、米国の電力需要をまかなうことを念頭に考えて計画されており、日本に適用する場合は、打ち上げる衛星の数は少なくなるであろう。日本の1995年時点の販売電力量(7511億kWh)に相当する電力量を発電するためには、18基が必要である。

本シミュレーションでは、18基のSPSを18期間に渡って1基ずつ建設していくケースを考える。第1基目のSPSシステムの建設は、全て既存電力でまかなう。そして、2基目のSPSを建設する時には、1基のSPSの発電によって得られた電力を優先的に利用し、不足分を既存の電力設備から得る。やがて2基のSPSが完工し、3基目の建設に取り掛かると、今度は2基のSPSの発電によって得られる電力が利用可能である。このようにSPSからの電力によってSPSを建設する場合は、SPSを全て既存の電源設備で建設する場合と比べてCO₂負荷はどのように違ってくるのかをシミュレーションしてみた。こうした計算においては、SPSが参入していくにつれて、SPSと既存電力の電源構成が変化していく様子を記述するためのモデルが必要である。そのモデルをつくるために、以下の想定を行った。

1. SPSとレクテナは、1基ずつ建設し、全部で18基建設する。また、SPSとレクテナを1基建設するのに要する期間は1期間とする。
2. 太陽電池製造設備、宇宙基地と宇宙輸送機は、第1期目に全部製造・建設することとする。
3. 第 t 期には、第 $t-1$ 期以前に建設されたSPSシステムは稼働している。($t = 2, 3, \dots, N; N = 18$)
4. SPSシステムから供給される電力は、SPSシステムの建設のために優先的に利用される。

なお、シミュレーションの具体的な方法については、補論を参照していただきたい。

我々のシミュレーションに基づいて計算したCO₂負荷を表8の左側にまとめている(ただし、表8の「SPSの余剰電力とCO₂負荷の帰属計算」は、本節の最後で取り扱う)。第1期目は、SPSシステムの立ち上げの時点であり、SPSからの電力供給は存在せず、太陽電池製造設備、宇宙輸送機、宇宙基地、太陽発電衛星(1基)とレクテナ(1基)が既存の電源設備からの電力供給(276.9億kWh)のみによって建設される。第2期目は、第1期目に建設されたSPSと既存の電源設備の電力によってSPSが建設されるが、シミュレーションの結果は、第1期目に建設されたSPSの電力だけで第2期目のSPS建設に必要な電力が総てまかなわれ、既存の電源設備からの電力を全く必要としないことを示している。3期目以降も、SPSからの発電量は累積的に増加していくが、1期間あたりに建設すべきSPSシステムは、第2期目と同一であることから、既存の発電設備からの電力を必要としない。したがって、SPSの電力によってSPSを建設していく場合には、2期目以降は、SPSの電力供給だけでSPSを建設可能なことが明らかになった。

表 8: SPSによってSPSを建設する場合のCO₂負荷

期	SPS建設に必要な電力(億kWh)			CO ₂ 負荷 万トン (b)	稼働中のSPS		SPSの余剰電力とCO ₂ 負荷の帰属計算		
	SPSからの 電力供給 (a)	既存電力から の電力供給	計		数	発電量 億kWh (c)	余剰電力 億kWh (c)-(a)	CO ₂ 負荷 億トン (d)	総合効果 億トン (b)-(d)
1	0	276.9	276.9	3201	0	0	0	0.0	0.3
2	246.8	0	246.8	1388	1	438	191.2	0.1	0.0
3	246.8	0	246.8	1388	2	876	629.2	0.3	-0.2
4	246.8	0	246.8	1388	3	1314	1067.2	0.5	-0.4
5	246.8	0	246.8	1388	4	1752	1505.2	0.7	-0.6
6	246.8	0	246.8	1388	5	2190	1943.2	0.9	-0.8
7	246.8	0	246.8	1388	6	2628	2381.2	1.1	-1.0
8	246.8	0	246.8	1388	7	3066	2819.2	1.4	-1.2
9	246.8	0	246.8	1388	8	3504	3257.2	1.6	-1.4
10	246.8	0	246.8	1388	9	3942	3695.2	1.8	-1.6
11	246.8	0	246.8	1388	10	4380	4133.2	2.0	-1.8
12	246.8	0	246.8	1388	11	4818	4571.2	2.2	-2.1
13	246.8	0	246.8	1388	12	5256	5009.2	2.4	-2.3
14	246.8	0	246.8	1388	13	5694	5447.2	2.6	-2.5
15	246.8	0	246.8	1388	14	6132	5885.2	2.8	-2.7
16	246.8	0	246.8	1388	15	6570	6323.2	3.0	-2.9
17	246.8	0	246.8	1388	16	7008	6761.2	3.2	-3.1
18	246.8	0	246.8	1388	17	7446	7199.2	3.5	-3.3
19	-	-	-	-	18	7884	-	-	-
計	4195.6	276.9	4472.5	26797			62818.4	30.2	-27.5

次に、表9によって、電力生産1単位あたりCO₂排出量を発電形態別に比較しよう。今回のシミュレーションにおいても、SPSの耐用年数を30年と想定し、次のように計算を行っている。

$$26797(\text{CO}_2\text{排出量:万トン}) \div 7884(\text{SPS発電量:億kWh}) \div 30(\text{耐用年数}) \times 100 = 11 \text{ (g/kWh)}$$

表9のSPSの電力を利用せずにSPSを建設する場合と火力・原子力発電の値に関しては、前論文と慶應義塾大学産業研究所環境問題分析グループ[16]の第5章「電力生産によるCO₂排出」をそれぞれ参照されたい。この結果より、SPSの電力を利用せずにSPSを建設する場合は、SPSと原子力発電は同じ程度であるが、SPSの電力を用いてSPSを建設する場合は、その約半分のCO₂負荷しか持たないことが明らかになった¹²。

最後に、これまで説明を保留していた表8の「SPSの余剰電力とCO₂負荷の帰属計算」を見てみよう。SPSの電力を利用してSPSを建設する場合は、2期目以降、余剰電力が発生する。表8の(d)列は、その余

¹²ただし、前論文と同様に、SPSの電力生産1単位あたりCO₂排出量の値には、電力事業者の送配電を含む経常費用からのCO₂排出が含まれておらず、火力・原子力の値にはそれが含まれている。それはSPSについて送配電などの経常費用について現存のデータがないからである。したがって、表9の数字の扱いには注意を要する。

表 9: 電力生産1単位あたり CO₂排出量の比較

発電方式	(g-CO ₂ /kWh)		
	経常運転時	建設時	合計
SPS(SPSからの電力を利用してSPSを建設していく場合)	0	11	11
SPS(SPSからの電力を利用せずにSPSを建設した場合)	0	20	20
石炭火力発電	1222	3	1225
石油火力発電	844	2	846
LNG火力発電	629	2	631
原子力発電	19	3	22

剰電力に既存の電力設備の単位あたり CO₂ 負荷をかけた値である。つまり、SPS の剰電力と同等の電力を、既存の電力設備によって生産したならば、30.2 億トンの CO₂ が排出されるということである。しかし、実際には、SPS の剰電力の生産からは CO₂ は排出されず、30.2 億トンは、既存の電力生産によって評価されたマイナスの CO₂ 負荷と考えられる。したがって、SPS 建設から発生する CO₂ 負荷から (d) 列を引き、それを「総合効果」として示している。

この一連の計算は、一種の「帰属計算」である。それによると、SPS の CO₂ 負荷は、SPS の建設からの CO₂ 負荷と剰電力の CO₂ 負荷を考慮に入れた「総合効果」では、剰電力分からのマイナス効果を持つ CO₂ 負荷が大きく、トータルで -28 億トンの CO₂ 負荷として評価されることが分かった。

5 結びにかえて

この一連の太陽発電衛星の分析から分かるように、宇宙太陽発電に関する CO₂ 負荷は非常に少ないということがいえる。70 年代の DOE/NASA リファレンスシステムを使っても、このように低い CO₂ 負荷であるから、次の課題として、新しく計画されるパワータワーでは、どの程度、CO₂ に関して改善の余地があるかを明らかにせねばならない。我々は、経済学者であるが、SPS システムのコスト計算は意図的に行わなかった。宇宙開発技術は、研究開発、言ってみれば、知識労働者の人件費のかたまりであり、膨大なコストがかかることは明らかである。したがって、このようなプランは、ひょっとしたら 9 電力、あるいは 1 国単位では、満身に費用負担ができないかもしれない。しかし、地球環境というグローバルな観点からいうと、コストが高いということは、もしエネルギーの節約と CO₂ 負荷の低下が可能ならば、新たな産業を創出するということであって、見方によっては、たいしたことではない、というふう考えたのである。おそらく地球環境問題の要は、電力をいかに生成するかということになる。そして、地球閉鎖系からの脱出というテーマとして、宇宙発電衛星は、その一つのきっかけになると考えている。

補論

シミュレーションにあたって、通常的环境分析用産業連関表データを少し加工し、電力を既存電力アクティビティと SPS アクティビティの 2 つに分けて、図 1 のようなデータ・ベースを考えておく（このデータ・ベースの作り方の詳細は、吉岡・菅 [32] を参照）。

- $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$: 分割された投入係数行列で図1のように電力を特掲したもの。
 f^R, f^S : レクテナ (R) と太陽電池 (S) の構成を示す
 コモディティベクトルでN期間に分割して生産可能なもの
 f^o : N期間に分割できず初期投資が必要なもので、たとえば宇宙基地
 X_1 : 電力を除く誘発生産額ベクトル
 x_2 : 電力の誘発生産量(kWh)(受電端ベース)
 z_1, z_2 : 既存電力アクティヴィティ1、SPS 発電アクティヴィティ2から
 生産された誘発生産量
 e : 単位あたり CO₂排出原単位(エミッションファクター)
 α : 電源構成ベクトル

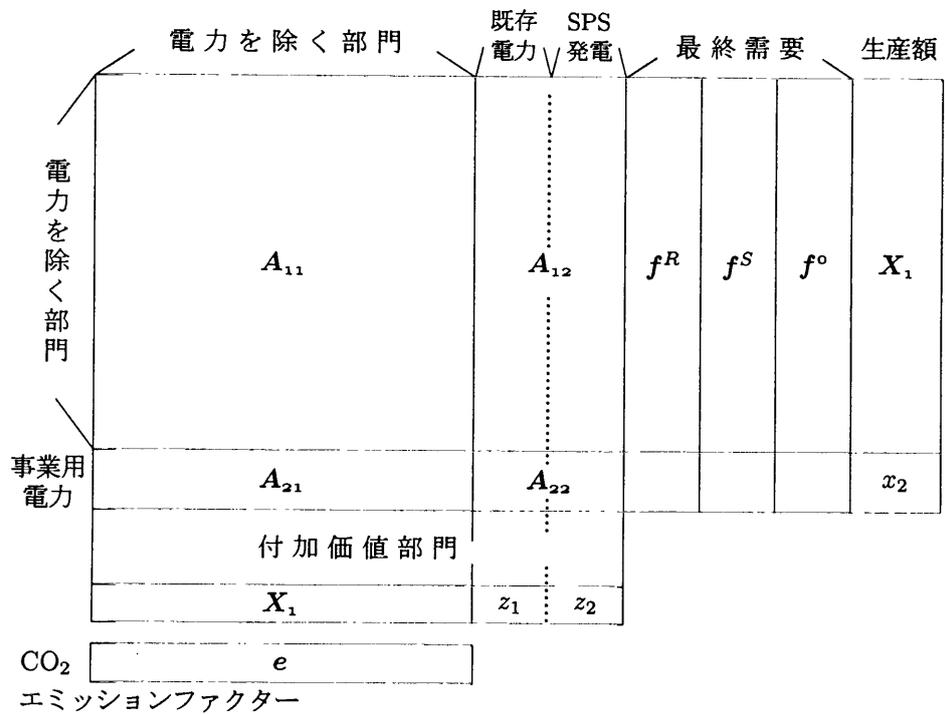


図 1: 今回用いるシミュレーション用の環境分析用産業連関表の概略図

この概略図に示した変数名に順じ、シミュレーションの内容を示そう。既存の電力アクティヴィティのみを用いて、レクテナなどを作る場合のCO₂負荷は、次のように解くことができる。

すなわち、 $f(f^R, f^S, f^o)$ を与件として、誘発生産額 X_1 、 x_2 は、

$$\begin{cases} A_{11}X_1 + A_{12}z + f = X_1 \\ A_{21}X_1 + A_{22}z = x_2 \\ \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \alpha x_2 \end{cases} \text{ ただし、} \alpha = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

を解くことによって求まる。また、誘発CO₂発生量は、

$$\text{CO}_2 = (e) \begin{pmatrix} X_1 \\ z_1 \\ z_2 \end{pmatrix}$$

で求まる。この計算過程をベクトル値関数でとっておく。次に、SPS アクティビティを N 期に分割し作成する。その際、1 期目はすべて既存電力でまかない、2 期目以降は、SPS から生じた電力を全て使い、残りだけを既存電力アクティビティでまかなう方法を取った場合の CO_2 負荷計算は次のようになる。

まず第 1 期目であるが、 $f = \frac{1}{N}(f^R + f^S) + f^0$ であり、太陽電池とレクテナの $1/N$ 期が資本財として作られ、それに f^0 が加わる。その際電源構成ベクトル α は $\alpha = (1 \ 0)$ が用いられ、誘発される CO_2 負荷、生産額は (1) 式で示した量の $1/N$ となる。

次に 2 期目については、SPS システム全体の発電量を SkWh/年 とすれば、 $f = \frac{1}{N}(f^R + f^S)$ を与えて、

$$\left\{ \begin{array}{l} z_2 = S/N \\ z_1 + z_2 = x_2 \\ A_{11}X_1 + A_{12}z + f = X_1 \\ A_{21}X_1 + A_{22}z = x_2 \\ \text{CO}_2 = (e) \begin{pmatrix} X_1 \\ z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (2)$$

によって、 X_1 、 x_2 、 CO_2 負荷が求まる。

同様に、 t 期目 ($t = 3, \dots, N$) については、 $f = \frac{1}{N}(f^R + f^S)$ を与えて、

$$\left\{ \begin{array}{l} z_2 = (t-1)S/N \\ z_1 + z_2 = x_2 \\ A_{11}X_1 + A_{12}z + f = X_1 \\ A_{21}X_1 + A_{22}z = x_2 \\ \text{CO}_2 = (e) \begin{pmatrix} X_1 \\ z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (3)$$

を解くことにより、その際の生産誘発、 CO_2 負荷が求まる。この (3) の計算方法を $t = 3$ から N 回順次行い、今までの誘発生産、誘発 CO_2 負荷量を加えることにより、システム全体の負荷計算が出来上がる。

参考文献

- [1] DOE/ER-0023(1979), 'Reference System Report'
- [2] Europea Space Agency(1980), 'Study on Infrastructure Considerations for Microwave Energy Ground Receiving Stations:SPS offshore rectenna siting study in West-Europe', Contract Report.
- [3] NASA(1970), 'Final Report on the Rectenna Structural Design and Arrangement Study', memorandum.
- [4] Office of Technology Assessment(1981), 'Solar Power Satellite', OTA Report.
- [5] Franz,C.C. and Cambel,A.B.(1981), "Net Energy Analysis of Space Power Satellites", *Energy(UK)*, vol.6,pp.485-501.
- [6] Masafumi,Y.(1993), "Present Status and Future Prospects for Advanced Space Solar Cells", *Technical Digest of the International PVSEC-7*, Nagoya,Japan.
- [7] シーエムシー(1993), *Yearbook of Markets in High-Tech Materials*.
- [8] 稲葉 敦,他10名(1993),「太陽光発電システムのエネルギー評価」,『化学工学論文集』,Vol.19, pp.809-817.
- [9] 稲葉 敦,他8名(1995),「太陽光発電システムのライフサイクルアセスメント」,『エネルギー・資源』,Vol.16, pp.65-71.
- [10] 稲葉 敦,他8名(1995),「太陽光発電システムの導入によるCO₂排出量削減効果」,『エネルギー・資源』,Vol.16, pp.72-77.
- [11] 後川 昭雄,他4名(1992),「SPS用太陽電池(a-Si)の耐放射線性計測実験」,第11回宇宙エネルギーシンポジウム.
- [12] 後川 昭雄,他5名(1996),「SPS2000用太陽電池の電子線照射実験」,第15回宇宙エネルギーシンポジウム.
- [13] 内山 洋司(1994),「太陽光発電用多結晶シリコン製造システムへの投入エネルギー」.
- [14] 科学技術庁資源調査会(1983),『エネルギー収支から見た自然エネルギー利用技術の評価手法に関する調査報告』,科技庁資源調査会報告,第88号.
- [15] 加藤 和彦,他10名(1994),「太陽光発電システムの経済性評価」,『化学工学論文集』,Vol.20, No.2, pp.261-267.
- [16] 慶應義塾大学産業研究所環境問題分析グループ(1996),『環境分析用産業連関表』,慶應義塾大学産業研究所 KEO モノグラフ・シリーズ, No.7.
- [17] 建設省河川局(1985),『建設省河川砂防技術基準』,山海堂.
- [18] 鈴木 皓夫,他2名(1991),「宇宙用太陽電池の現状と今後の展開」,『エネルギー・資源』,Vol.12, pp.52-57.
- [19] 太陽光発電懇話会(1996),『太陽光発電システムの設計と施工』,オーム社.
- [20] 太陽光発電技術研究組合(1993),「アモルファス太陽電池の実用化研究」,平成4度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書.
- [21] 太陽光発電技術研究組合(1994),『太陽光発電システム設計ガイドブック』,オーム社.
- [22] 高倉 秀行(1991),「太陽光発電衛星用太陽電池素子の現状」,第10回宇宙エネルギーシンポジウム.
- [23] 武田 行弘:「電力用アモルファス太陽電池の開発動向」,『電力中央研究所報告』,Vol. 183045 (1984年).
- [24] NEDO(1992),『太陽光発電システム実用化技術開発・光熱ハイブリッド型太陽光発電システムの研究開発・宇宙発電システムに関する調査研究(平成3年度委託業務成果報告書)』,三菱総合研究所.
- [25] NEDO(1994),『太陽光発電システム実用化技術開発・太陽光発電利用システム・周辺技術の研究開発・宇宙発電システムに関する調査研究(平成5年度委託業務成果報告書)』,三菱総合研究所.
- [26] 野村 昇,他4名(1995),「産業連関表を用いた太陽光発電システムのエネルギーペイバックタイムの見積り」,『エネルギー・資源』,Vol.16, No.5, pp.57-64.
- [27] 橋本博(1980),「宇宙衛星発電(SPS)方式の展望」,『電力中央研究所報告』,180021.
- [28] 橋本博(1983),「宇宙衛星発電方式(SPS)の受電設備洋上立地と発電可能電力の検討」,『電力中央研究所報告』,183005.
- [29] 浜川圭弘, 桑野幸徳(1994),『太陽エネルギー工学:太陽電池』,培風館.
- [30] 畚野信義「SPSシステムの概要」『電波研究所季報』Vol.28 No.148 1982年
- [31] 吉岡 完治,他3名(1998),「宇宙太陽発電衛星のCO₂負荷」『KEO DISCUSSION PAPER』No.2(WG2-1), 慶應義塾大学産業研究所・日本本学術振興会未来開拓学術推進事業
- [32] 吉岡 完治,菅 幹雄(1997)「環境分析用産業連関表の活用-シナリオ・レオンティエフ逆行列の構想」『経済分析』第154号,経済企画庁経済研究所