

《論文》

WORLD-3による宇宙エネルギー資源開発評価モデル

An Evaluation Model of Development of Energy Resources in Space
by Using WORLD-3

山極芳樹*、金田典久**、石川芳男***

Abstract

An evaluation model of energy resources in space by using WORLD-3 is proposed for evaluating the effects of developments of Solar Power Satellites (SPS) and the moon resource (^3He) on earth's ecological and economics system. The simulation results show that (1) the continuous growth of earth's ecological and economics system can be possible by the developments of SPS and the moon resource, however, the enormous investment in SPS and the moon resource is necessary to achieve such condition as far as the costs of these developments are in present levels, (2) it takes long time before the development of the moon resource have a good effect on earth's system, (3) the effective development with proper investment is possible by developing SPS and the moon resource together.

〈キーワード〉 宇宙開発、エネルギー、環境、世界モデル

* 静岡大学工学部機械工学科 ** 東レエンジニアリング(株)

*** 日本大学理工学部航空宇宙工学科

1. はじめに

現在、人類はそのエネルギー消費の大部分を化石燃料に依存しているが、そのために近年のエネルギー消費の指数関数的な増加に伴い、エネルギー資源の枯渇、大気汚染といった問題が深刻化してきている。このような状況にあって、現代文明社会の永続的維持発展を可能にするためには、豊かかつ環境にやさしいエネルギー資源を基盤とする新たなエネルギーシステムへの早急な転換が必要である。

豊富でクリーンな地球外エネルギー資源の利用は、このような問題の最も効果的な解決方法であると考えられるが、宇宙開発は莫大な資本投資が必要な大プロジェクトであり、その有益な開発形態を見いだすためには、地球全体の生態・経済系という大きな視点から宇宙開発の影響の評価を試みる必要がある。

本論文は、地球外エネルギー資源利用の代表的なものとして太陽発電衛星 (SPS)¹⁾ 及び月面に豊富に存在するクリーンな核融合燃料である ^3He の開発²⁾について、MeadowsのWORLD-3モデル³⁾を応用した評価モデルを提案し、これらの開発が地球生態・経済系に及ぼす影響について評価するためのいくつかのシミュレーションを試みたものである。

2. 地球-SPS-月システム

地球-SPS-月システムのモデルは、MeadowsのWORLD-3/91モデル⁴⁾およびForresterのWORLD-2モデル⁵⁾を応用した宇宙開発評価モデル^{6), 7)}に基づいている。地球-SPS-月モデルの状態は、地球上における人口 (POP)、エネルギー資源量 (石油; NRO、石炭; NRC、天然ガス; NRG)、資本量 (工業資本; IC、サービス資本; SC)、食糧量 (F)、汚染 (PPOL)、SPSのエネルギー容量 (STE)、月における資源量 (MNR) と資本量 (MC) の8のレベルで表される。ただし、本論文での計算結果では、資本、食糧は一人あたりの工業資本生産 (IOPC)、一人あたりの食糧 (FPC)、SPSエネルギー容量は、エネルギー供給能力5 GWのSPSを1台とした台数 (SPSN) で表している。宇宙開発に伴う宇宙への人口の移住や必要な食糧については、計算の範囲内では地球上のそれらに比べると無視できるであろうからここでは考慮しない。また、月やSPS周辺の宇宙空間は十分な汚染の吸収源と考えられるので月およびSPSにおける汚染も無視する。SPSシステムはモデル中の資本と資源を通じて地球および月と結合し、月システムはモデル中の資本を通じて地球システムと結合する。これらは、様々なレートと補助変数によってお互いに結合されるが、図1の地球-SPS-月モデルのフローダイアグラムにその様子を示す。

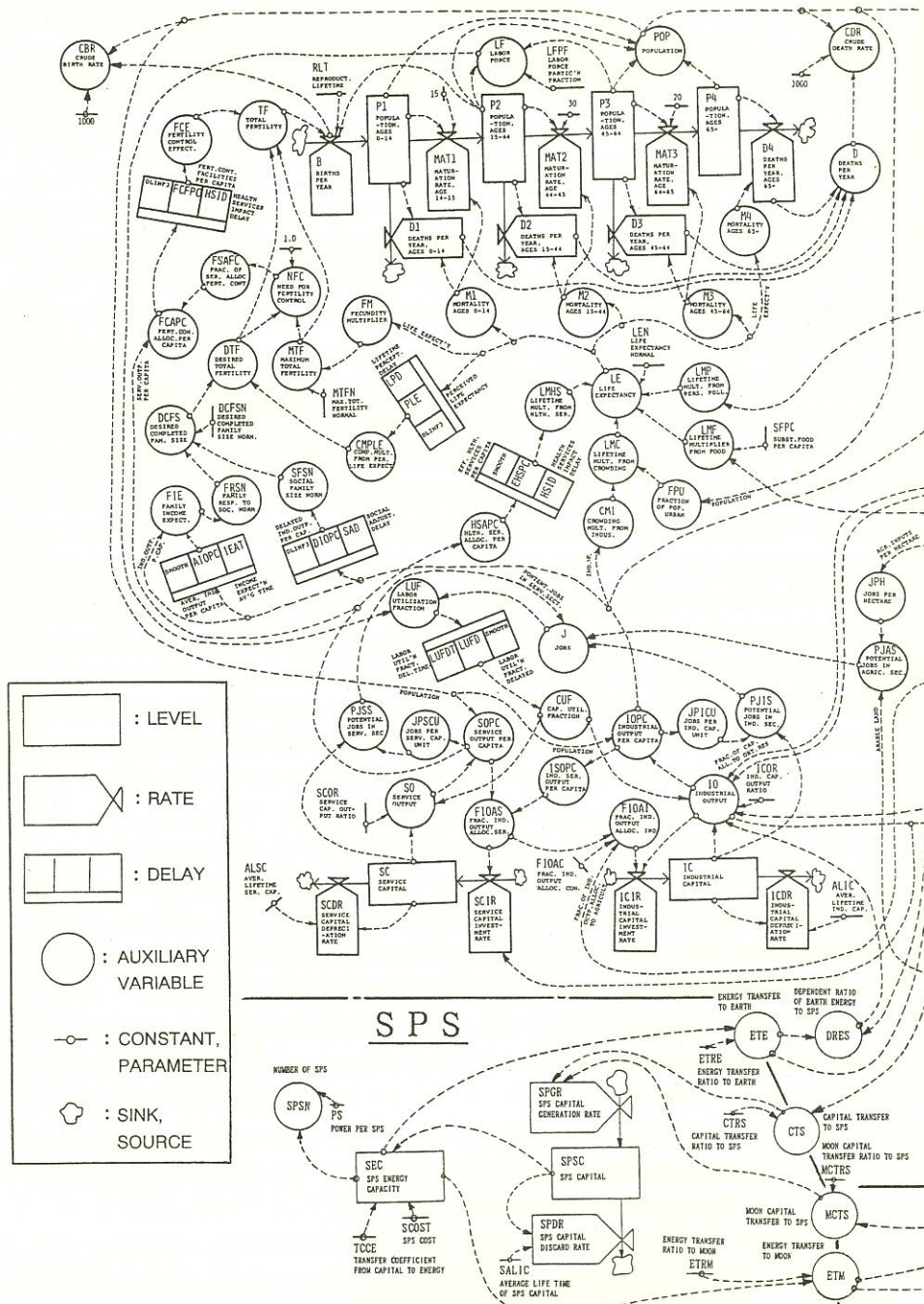
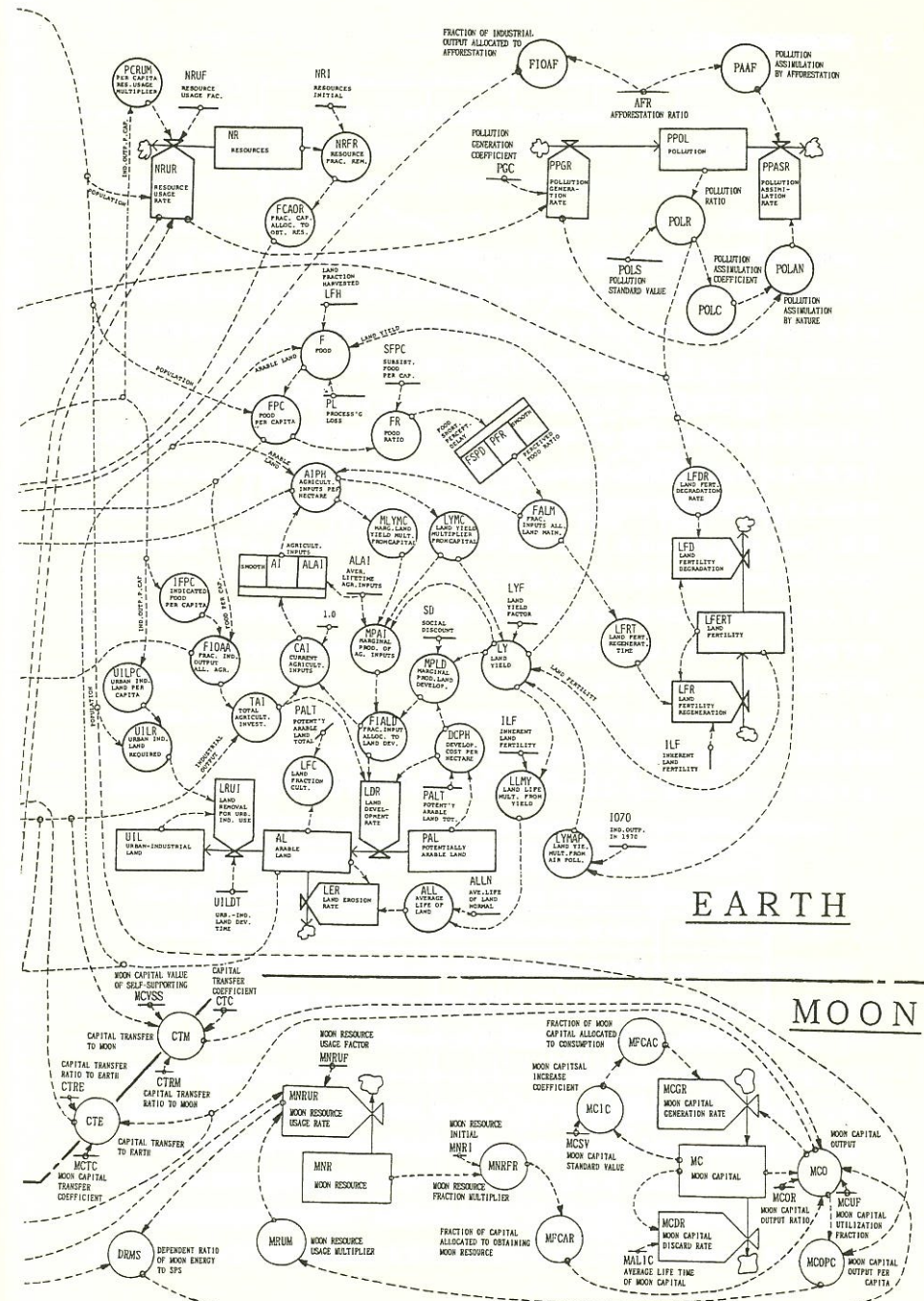


図1 地球-SPS-月モデルフローダイアグラム



3. WORLD-3の修正

モデル中の地球システムは、MeadowsのWORLD-3/91に基づくが、本解析の目的にあうように以下の修正を行った。

3.1 資源 (NR)

WORLD-3モデルでは、資源については1970年の消費量で250年ものとして具体的なものを定義していないが、本研究では、地球外エネルギー資源の効果を評価することが目的であるから地球資源もエネルギー資源を考える。地球のエネルギー資源としては、化石燃料の石油、石炭、天然ガスおよび水力、原子力等のエネルギー源による電力に分類し、それぞれの量をNR0, NRC, NRG, NRRとする。これらの資源量はWORLD-3モデルと同じように資源単位で表すが、その定義とエネルギー消費量のデータ⁸⁾との比較から、1資源単位はおよそ石油換算で10バレルに相当する。1970年におけるエネルギー全消費量は 3.6×10^9 資源単位である。石油、石炭、天然ガスの推定究極埋蔵量⁹⁾ (各量の初期値) NRIO, NRIC, NRI Gは表1に示す通りである。また、各エネルギー資源の占有率(RDO, RDC, RDG, RDR)は図2に示す通りである。1990年まではデータ^{8), 9), 10)}に基づき、それ以降は仮定である。ただし、水力、原子力等による電力は化石燃料の回避度基準で評価¹⁰⁾した場合 (電力の熱量レベルでの値を化石燃料の電力変換効率で割った数値で評価した場合) のものである。

表1 エネルギー資源の究極埋蔵量とCO₂発生係数

エネルギー資源	究極(可採)埋蔵量	CO ₂ 発生量換算係数 (t/バレル) ¹⁾
石油	NRIO: 2.0×10^{12} バレル	PGCO: 0.101
石炭	NRIC: 5.7×10^{15} kg (2.86×10^{13} バレル) ²⁾	PGCC: 0.133
天然ガス	NRI G: 2.5×10^{14} m ³ (1.8×10^{12} バレル) ²⁾	PGCG: 0.071
³ He	MNRI: 1.1×10^9 kg (3×10^{14} バレル) ²⁾	

*1: 炭素換算値、

地球大気中に均質に拡散する場合 $1 \text{ t} = 5.4 \times 10^{-9} \text{ ppm}$

*2: () 内は石油等量換算値

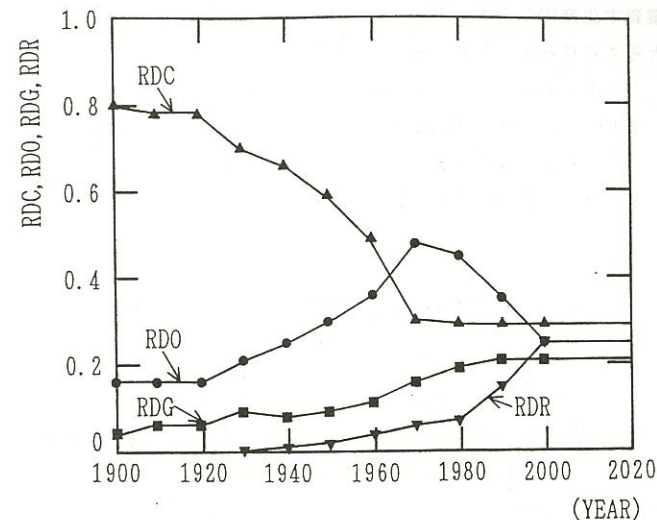


図2 地球上のエネルギー消費における各エネルギー資源の占有率

3.2 汚染 (PPOL)

WORLD-3モデルでは、汚染はすべての汚染を統合したものとして扱い、人口と資本量から決定されている。本研究では、これを化石燃料の消費に関係が深く、地球温暖化の原因となるとされている大気中のCO₂量を汚染PPOLとし、以下のように決定する。

ある年 t での汚染のレベル: $PPOL(t) = PPOL(t-DT) + DT * (PPGR - PPASR)$

汚染の初期値 (1900年の値¹¹⁾): $POLI = 297 \text{ ppm}$

CO₂生成量: $PPGR = NRUR0 * PGCO + NRURC * PGCC + NRURG * PGCG$

CO₂吸収量: $PPASR = POLAN + PAAF$

自然界によるCO₂吸収量: $POLAN = POLC * PPGR$

植林によるCO₂吸収量: $PAAF = 270 * AFR$

(270ppmは現在の全植物によるCO₂吸収量¹²⁾)

DT: 計算時間幅

NRUR0, NRURC, NRURG: 石油、石炭、天然ガスの年間消費量

PGCO, PGCC, PGCG: 石油、石炭、天然ガスの消費によるCO₂発生係数¹¹⁾

AFR: 現在の全植物量 ($1 \times 10^{10} \text{ ha}$) に対する植林率

また、汚染吸収係数POLCは、大気中のCO₂量 (ここでは、汚染比POLR) により変化すると考えるが、その関係に関するデータはないので、ここでは文献13)等を参考に0.4

とし、この値で一定と仮定した。また、植林を行うにあたっては、その費用を\$800/ha¹²⁾として工業資本生産IOから差し引いた。大気中のCO₂量増加は人口、食糧に大きな影響を与えると考えられるが、これらの影響の程度については今のところデータや確かな予測がない。しかしながら、ここではPPOLと人口、食糧を結び付ける補助変数（期待寿命LMP、土地生産力の衰退率LFDR、大気汚染からの土地収率乗数LYMAP）の関係を、図3のように仮定して影響を評価する。ただし、これは数値的に根拠のないものであるから、データや確かな予測がそろいしだい改訂すべきものである。

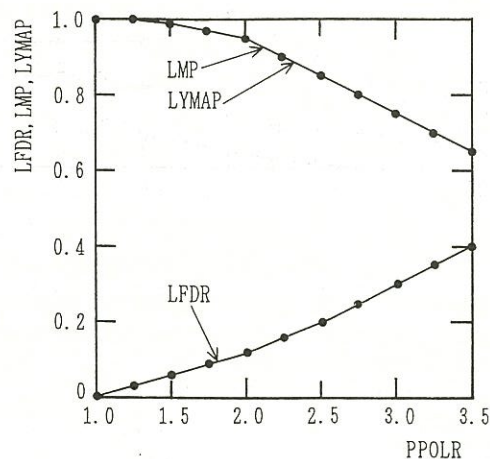


図3 汚染量（汚染比：POLR）と各補助変数（期待寿命；LMP、土地生産力の衰退率；LFDR、大気汚染からの土地収率乗数；LYMAP）

3.3 農業への投資による土地収率率LY/ILFと土地寿命LLMYの関係

WORLD-3/91モデルでは、最新のデータに基づいてWORLD-3モデル中のいくつかの係数の変更がなされているが、特に、土地の平均寿命標準値ALLNが6000年から1000年と大幅に減少しているのが、将来の土地劣化の影響が大きすぎてエネルギー資源の違いによる影響を判断するのが難しくなってしまう。そこで、この影響を緩和するため、土地収率率と固有の土地生産力の比LY/ILFと土地収率率からの土地寿命乗数LLMYの関係を、文献3)の標準的な関係から楽観的な関係に変更した。

4. 地球-SPS-月モデルへの拡張

4.1 SPSモデル

SPSと地球および月とは、以下のような要素で結合されるとする。

- (1) 地球（または月）からSPSへの資本投資：SPS開発のため地球の工業資本生産（または月資本生産）の一部をSPSに投資する。
- (2) SPSから地球（または月）へのエネルギー供給：SPSが増加するにつれて、そのSPSが発生するエネルギーを地球（または月）へ供給する。それに伴い地球エネルギー資源（または月エネルギー資源）の消費量を減少させていく。

これらの要素は、以下のパラメータで表されるとする。

- (1) SYEAR：地球からSPSへの資本投資開始年（年）
- (2) CTRS：地球上の年間工業資本生産IOに対する地球からSPSへの資本投資割合
- (3) MCTRS：年間月資本生産MCOに対する月からSPSへの資本投資割合
- (4) ETRE：SPSから地球へのエネルギー供給割合
- (5) ETRM：SPSから月へのエネルギー供給割合
- (6) SALIC：SPSの平均寿命（年）
- (7) SCOST：SPSのコスト（\$ / KW）

ある年 t でのSPS資本SPSCは、

$$SPSC(t) = SPSC(t-DT) + DT * (SPGR - SPDR)$$

$$SPGR = CTS + MCTS : \text{年間SPS資本増加量}$$

$$SPDR = SPSC / SALIC : \text{年間SPS資本減少量}$$

$$CTS = CTRS * IO : \text{地球からの資本投資によるSPSの年間資本増加量}$$

$$MCTS = MCTRS * MCO : \text{月から資本投資によるSPSの年間資本増加量}$$

であり、これよりSPSエネルギー供給能力SECが下記のように決定される。

$$SEC = TCCE * SPSC / SCOST$$

$$SCOST : \text{SPSのコスト}$$

$$TCCE = 3.6 * 5.6 / 10 = 2.2 (\$ \cdot \text{資源単位} / \text{KW}) : \text{資本・エネルギー変換係数}$$

さらにSPS台数SPSNおよびSPSから地球または月へ供給される年間エネルギー量ETE、ETMは、下記のようになる。

$$SPSN = SEC / PS \quad (PS \text{ は SPS 1 台のエネルギー容量で、ここでは } 5 \text{ GW})$$

$$ETE = ETRE * SEC$$

$$ETM = ETRM * SEC$$

SPSのコストSCOSTは、文献14)を参考に下記のように設定した。

地球から投資する場合の1台目のSPSコスト(研究開発コスト含む)；\$17,500/KW

地球から投資する場合の2台目以降のSPSコスト；\$3,000/KW

月から投資する場合のSPSコスト；\$2,400/KW

また、TCCEは、SPSに投資された資本（資本単位）をSPSを介した場合に地球に供給できるエネルギー（資源単位）に変換するための係数で、モデルの計算値とGDPのデータ¹⁵⁾の比較からモデル中の1資本単位は1980年（上記のSPSコストはこの年のドル表示）の約3.6ドルに相当し、また、1KWは年間約5.6バーレルの石油が発生するエネルギーと等価であり、さらに、1資源単位は10バーレルと等価であるということから決定された。

SPSからのエネルギーETEは、他のエネルギー量と比較する場合は水力、原子力等による電力の場合と同じように化石燃料の回避度基準で評価する。すなわち、地球上の全エネルギー消費量NRURに対するSPSからの供給エネルギーの占有率をDRESとし、化石燃料の電力変換効率をETCFとすると、

$$DRES = ETE / (ETCF * NRUR)$$

とする。月へのSPSのエネルギーを供給する場合も同様に、月面上の全エネルギー消費量MNRURに対するSPSからの供給エネルギーの占有率をDRMSとし、化石燃料の電力変換効率をETCFとすると、

$$DRMS = ETM / (ETCF * MNRUR)$$

とする。ここで、化石燃料の電力変換効率ETCFは、現在、国連統計局では30%を標準係数としているが、SPSが導入される2000年以降はもっと効率が改善されていると考えられるので、ここではETCF=0.4とした。なお、本計算では、現在、電気エネルギー以外の形態でエネルギー資源を利用している金属の精錬や輸送といった分野でも、将来、電気エネルギーが使用され、最終的にはすべて電気エネルギーに置き換えられると仮定している。

4.2 月モデル

月と地球とは、以下の要素で結合されるとする。

- (1) 地球から月への資本投資：月資本量が月における産業が自給自足できる段階に増加するまで月資源開発のために地球工業資本生産の一部を投資する。
- (2) 月から地球への資本返還：月資本量が月における産業が自給自足できる段階に増加した後、月資本生産の一部を地球へ返還し、それに伴って地球における地球資源への依存度を減少していく。実際は、大部分、エネルギー資源の³Heを輸送することになるが、この場合、返還資本とは地球へ送られた³Heによるエネルギーを使って製造されるであろう工業資本量に相当すると考えればよい。

これらの要素は、以下のパラメータで表されるとする。

- (1) MYEAR：地球から月への資本投資の開始年（年）
- (2) MCVSS：月産業が自給自足するのに必要な月資本量のMYEARにおける地球工業資

本ICに対する割合

- (3) CTRM：地球の年間工業資本生産IOに対する地球から月への資本投資割合
- (4) CTRE：年間月資本生産MCOに対する月から地球への資本返還割合
- (5) MALIC：月資本の平均寿命（年）

ここで、地球から月への資本投資で1年間に増加する月資本量CTMは、下記のようになる。

$$CTM = IO * CTRM * CTC$$

CTC：輸送コストを考慮した地球資本の月資本への変換係数

月基地設備はエネルギー設備が中心とすると、電力プラントの建設費は地球上の設備を参考にとすると約 $1 \times 10^6 / \text{MW}^{16)}$ 、燃料の採掘・精製プラントを含めて倍程度とすると約 $2 \times 10^6 / \text{MW}$ である。ところで、プラントの重量は、文献17)での月面用原子力発電プラント及び³He製造プラントの検討を参考にとするとエネルギープラント全体で約300 t/MWと見積もられる。地球から月への輸送費を約 $3 \times 10^6 / \text{t}$ とすると、1MWの電力プラントをその運用に必要な³He製造プラントもふくめて月面に建造するには、すべてを地球資源で賄った場合の地球からの資本投資のみで考えると約 1×10^9 の輸送費が必要ということになる。この輸送費が月開発への投資の大部分を占めることになり、地球から投資した資本量に対し月ではその0.002倍の地球上の設備に相当する設備しかできないことになる。そこで、本解析ではCTC=0.002とおくことにする。

また、月から地球へ1年間に返還される資本量は、下記のように表される。

$$CTE = MCO * CTRE * MCTC$$

MCTC：輸送コストを考慮した月資本の地球資本への変換係数

ここで、年間月資本生産MCOは、地球の年間工業資本生産IOと同じく

$$MCO = MC * (1 - MFCAR) * MCUF / MCOR$$

という関係から算出するが、月資本利用率MCUF、月資本出力比MCORは、地球の資本利用率CUF、工業資本出力比ICORと同じと仮定した。また、月における月資源獲得のための資本投資割合MFCARは、地球における資源獲得のための資本投資割合FCAORが地球資源残存比NRFRから決定されるのと同じく月資源残存比MNRFRから決定されるとするが月資源獲得にはより多くの投資が必要と思われるので、その関係を図4のように仮定した。なお、地球からの資本投資がある場合は、MCOはここで計算したMCOにCTMを加えたものになる。MCTCについては、月から地球への輸送に必要なエネルギーは非常に小さくてすむこと、および、先に記したように、実際に輸送されるのはエネルギー資源としての³He自体が大部分であろうから、輸送重量は非常に小さい（電力1MWにつき必要な³Heは $5 \times 10^{-2} \text{ kg}$ ）ことを考慮すると輸送コストは無視できるので、ここではMCTCは1とする。

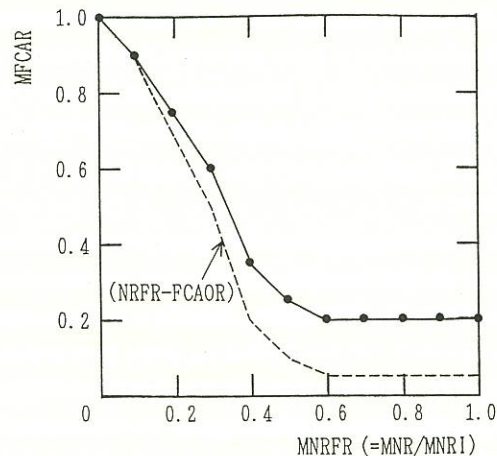


図4 月資源の残存比MNRFRと月における
資源獲得のための資本投資割合MFCARの関係

ある年 t での月資本MCは、

$$MC(t) = MC(t-DT) + DT * (MCGR - MCDR)$$

$$MCGR = MC * (1 - MFCAC - CTRE - MCTRS) : \text{年間月資本増加量}$$

$$MCDR = MC / MALIC : \text{年間月資本減少量}$$

とする。ここで、前述のようにCTREは月から地球への資本返還割合、MCTRSは月からSPSへの資本投資割合であるが、MFCACは、月で消費される資本や惑星探査などの宇宙開発（SPSは除く）へ投資される資本など月資本の生産には関係しない投資資本量の割合で、月資本増加係数MCICにより図5のように変化すると仮定する。MCICはMCと月資本基準値MCSV（MYAERでの地球工業資本量に等しいとする。）の比MC/MCSVである。また、MALICは、月の真空環境においては地球上の工業資本平均寿命ALICより長いと考えられるので、ここでは20年とする。

月でのエネルギー資源である ^3He の推定究極埋蔵量（MNRI）は、表1に示したとおりである。1GWの核融合電力プラントは年間約50kgの ^3He で作動できるので、MNRIは約 3×10^{14} バレルの石油に相当する（石油の電力変換効率ETCFが40%の場合）。月資源の消費の関係は地球資源の消費の関係に準ずる（月資本生産量と資源残存量で決定）。

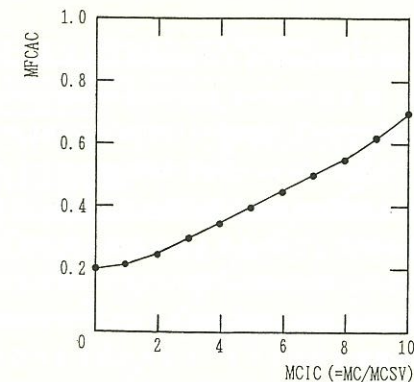


図5 月資本増加係数MCICと非生産月資本割合MFCACの関係

5. シミュレーション結果

5.1 修正WORLD-3の計算結果

図6は、資源および汚染のサブシステムを修正したWORLD-3/91モデルの計算結果である。オリジナルの標準計算の結果とほぼ同じく、主として石油資源の枯渇により来世紀前半に一人あたりの工業生産および食糧が、さらに数十年遅れて人口が成長の限界を迎え、その後衰退していく。また大気中の CO_2 レベルは、現在の2倍程度の高レベルに達する。

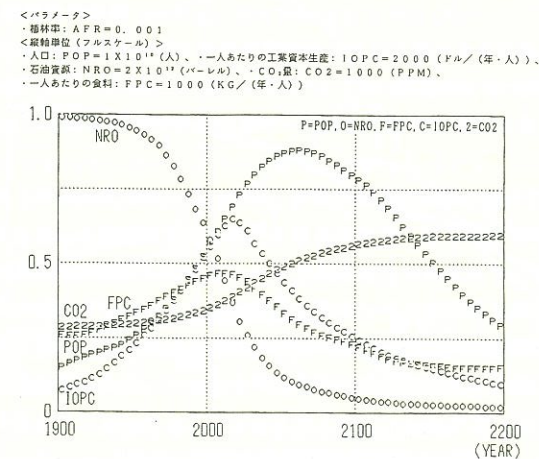


図6 修正WORLD-3/91モデルの計算結果

5.2 SPS開発の効果

図7および図8は、月資源開発は行わずにSPS開発のみを行った場合の計算結果を示す。図7はCTRS=0.02、図8はCTRS=0.095の場合である。その他のパラメータは、両者ともSYEAR=2000, MCTRS=0, EIRE=1, EIRM=0, SALIC=30である。

図7のように地球からの投資が小さい場合、SPSが地球のエネルギー需要を支えるのに十分成長する以前に化石燃料の枯渇の影響が現れて、人口、資本量は成長の限界に達し、SPSへの資本投資量が減少してSPS自体もその規模を縮小せざるを得なくなってしまい、SPSの効果が現れない。それに対し、図8のように地球からの資本投資が大きい場合、SPSは地球におけるエネルギー需要を満たすのに十分な規模に成長し、さらにそのSPSの成長がSPS自体が供給するエネルギーによって支えられるため、地球上の人口、工業生産は長期にわたり高いレベルを維持でき、大気中のCO₂量は低いレベルに抑えることが可能である。しかしながら、SPS開発コスト、SPS寿命に予想以上の大きな改善を計らない限り、このようなSPS開発の効果が生ずるためには本例の年間工業資本生産の約9%（世界平均GDPの3%程度）というような大きな資本投資が必要となる。

<パラメータ>

- ・植林率: AFR=0.001、・地球からSPSへの資本投資開始年: SYEAR=2000(年)、
 - ・SPSコスト: SCOST=3000(ドル/KW)、・SPSの平均寿命: SALIC=30(年)、
 - ・SPSから地球へのエネルギー供給割合: ENTE=1、
 - ・地球からSPSへの年間資本輸送割合: CTRS=0.02
- ### <縦軸単位(フルスケール)>
- ・人口: POP=1×10¹⁰(人)、・一人あたりの工業資本生産: IOPC=2000(ドル/(年・人))、
 - ・石油資源: NRO=2×10¹²(バレル)、・CO₂量: CO2=1000(PPM)、
 - ・一人あたりの食料: FPC=1000(KG/(年・人))
 - ・SPS台数: SPSN=4000(台)

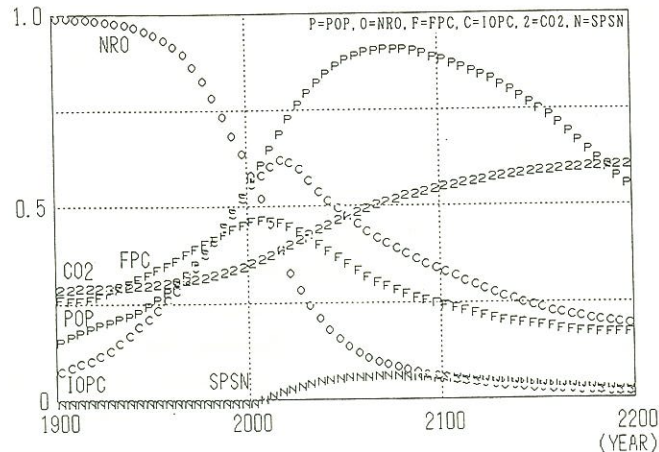


図7 SPS単独開発の場合のモデル計算結果
(SPSへの年間資本投資割合CTRS=0.02)

<パラメータ>

- ・植林率: AFR=0.001、・地球からSPSへの資本投資開始年: SYEAR=2000(年)、
 - ・SPSコスト: SCOST=3000(ドル/KW)、・SPSの平均寿命: SALIC=30(年)、
 - ・SPSから地球へのエネルギー供給割合: ENTE=1、
 - ・地球からSPSへの年間資本輸送割合: CTRS=0.095
- ### <縦軸単位(フルスケール)>
- ・人口: POP=1×10¹⁰(人)、・一人あたりの工業資本生産: IOPC=2000(ドル/(年・人))、
 - ・石油資源: NRO=2×10¹²(バレル)、・CO₂量: CO2=1000(PPM)、
 - ・一人あたりの食料: FPC=1000(KG/(年・人))
 - ・SPS台数: SPSN=4000(台)

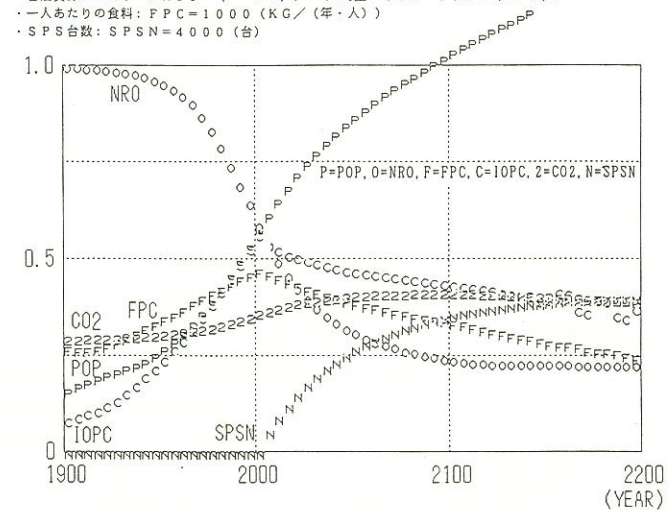


図8 SPS単独開発の場合のモデル計算結果
(SPSへの年間資本投資割合CTRS=0.095)

5.3 月資源開発の効果

図9は、SPSの開発は行わずに月資源開発のみを行う場合の計算結果を示す。MYEAR=2000, MALIC=20, CTRM=0.02, CTRE=0.1で、地球から月への年間資本輸送割合CTRMの値は、SPS開発のみの場合のSPSへの投資が少ない場合(図7)のCTRSの値と同じである。

月資本はすぐには成長増加しないので、月資源開発の効果がすぐには現れずに地球上の人口、工業生産、食糧は21世紀の前半に成長の限界に達していったん減少してしまうが、月資本がしだいに成長して地球への資本返還が行われるようになるにつれて地球資源への依存度が減少するので、人口、工業生産のレベルは回復し始め、CO₂レベルは比較的強く抑えられる。このような月資源開発の効果が現れるには開発開始後100年程度という長い年月を要するが、いったん効果が現れれば数百年の長期にわたり良好な地球環境を維持できる。

<パラメータ>

- ・植林率: $AFR=0.001$ 、・地球から月への資本投資開始年: $MYEAR=2000$ (年)、
 - ・月産業自給自足状態の資本割合: $MCVSS=0.01$ 、・月資本平均寿命: $MALIC=20$ (年)、
 - ・地球から月への年間資本輸送割合: $CTRM=0.02$ 、
 - ・月から地球への年間資本輸送割合: $CTRE=0.1$
- <縦軸単位 (フルスケール)>
- ・人口: $POP=1 \times 10^{10}$ (人)、・一人あたりの工業資本生産: $IOPC=2000$ (ドル/ (年・人))、
 - ・石油資源: $NRO=2 \times 10^{12}$ (バレル)、・ CO_2 量: $CO2=1000$ (PPM)、
 - ・一人あたりの食料: $FPC=1000$ (KG/ (年・人))
 - ・ 3He 資源: $MNR=1.1 \times 10^8$ (KG)、・月資本: $MC=4 \times 10^{14}$ (ドル)

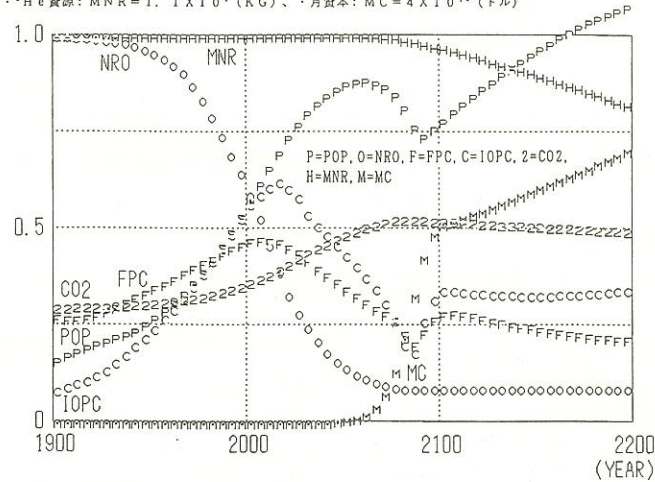


図9 月資源単独開発の場合のモデル計算結果
(月への年間資本投資割合 $CTRM=0.02$)

5.4 SPS・月資源並行開発の効果

図10は、SPSおよび月資源開発を同時に行う場合の計算結果である。開発のシナリオは図11に従うとする。すなわち、地球からSPSと月へは同時に資本投資を開始し、地球へはSPSからのエネルギー供給のみを行い、月産業が自給自足状態に達したあとは地球から月への資本投資は終了し、さらに月からSPSへの資本投資を開始して地球からSPSへの資本投資は減少させていく。最終的には、SPSは月からの資本供給のみでその成長が維持されるとする。パラメータの値は、 $MYEAR=2000$, $MALIC=20$, $CTRM=0.01$, $CTRE=0$, $SYEAR=2000$, $ETRE=1$, $ETRM=0$, $SALIC=30$, $CTRS=0.01$, $MCTRS=0.1$ で、地球からの全投資量、すなわち地球からSPSおよび月への年間資本投資割合の合計 ($CTRS+CTRM$) は、図7および図9と同じで、月からSPSへの資本投資割合 $MCTRS$ の値は、図9の月から地球への資本返還割合 CTM と同じである。

<パラメータ>

- ・植林率: $AFR=0.001$ 、・地球から月への資本投資開始年: $MYEAR=2000$ (年)、
 - ・月産業自給自足状態の資本割合: $MCVSS=0.01$ 、・月資本平均寿命: $MALIC=20$ (年)、
 - ・地球から月への年間資本輸送割合: $CTRM=0.01$ 、・月から地球への年間資本輸送割合: $CTRE=0$ 、
 - ・地球からSPSへの資本投資開始年: $SYEAR=2000$ (年)、・SPSの平均寿命: $SALIC=30$ (年)、
 - ・SPSコスト: $SCOST=3000$ (ドル/KW)、・SPSから地球へのエネルギー供給割合: $ENTE=1$ 、
 - ・地球からSPSへの年間資本輸送割合: $CTRS=0.01$ 、
 - ・月からSPSへの年間資本輸送率: $MCTRS=0.1$
- <縦軸単位 (フルスケール)>
- ・人口: $POP=1 \times 10^{10}$ (人)、・一人あたりの工業資本生産: $IOPC=2000$ (ドル/ (年・人))、
 - ・石油資源: $NRO=2 \times 10^{12}$ (バレル)、・ CO_2 量: $CO2=1000$ (PPM)、
 - ・一人あたりの食料: $FPC=1000$ (KG/ (年・人))
 - ・ 3He 資源: $MNR=1.1 \times 10^8$ (KG)、・月資本: $MC=4 \times 10^{14}$ (ドル)、
 - ・SPS台数: $SPSN=4000$ (台)

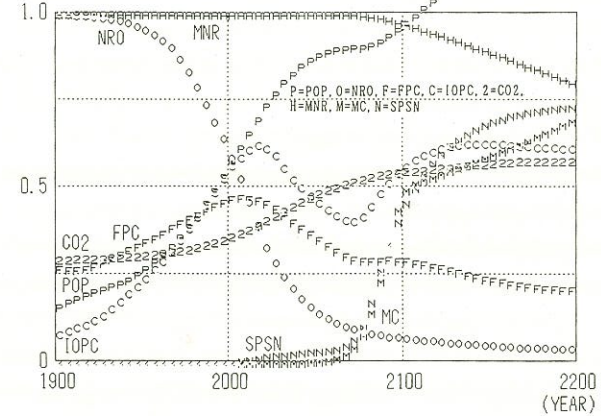


図10 SPS・月並行開発の場合のモデル計算結果

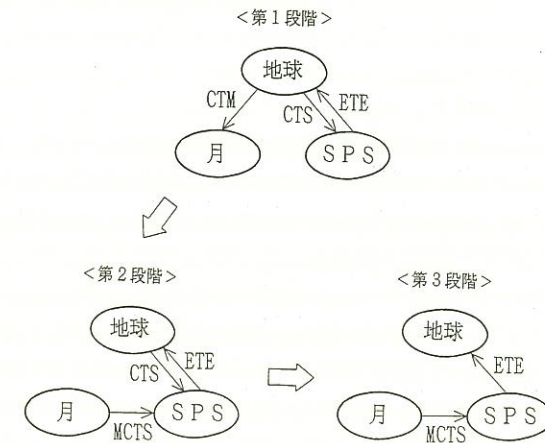


図11 SPS・月並行開発のシナリオ

図9の月資源開発のみを行う場合と同様、地球上の人口、工業生産はいったん成長の限界に達し減少するが、SPSの効果でその度合いは小さく回復も早期に始まり、その後、高レベルの達成、維持が可能になる。CO₂レベルは、工業生産の成長が大きくなるため高くなるが、地球資源のみに依存する場合に比べれば低く抑えられる。このように、SPSと月資源を並行に開発することで効果的な宇宙エネルギー開発が可能になる。このケースでの地球からの資本投資は、世界平均のGDPの約0.7%に相当する。これは、現在の宇宙開発費（アメリカでGDPの0.2%、日本でGDPの0.03%）に比べると莫大な値であるが、軍事費（アメリカでGDPの5%、日本でGDPの1%）等に比べるとかなり小さな値であり、現実的な可能性がある投資額と考えられる。

ところで、一人あたりの食糧に関しては、食糧部門の関係の一部を楽観的な関係に変更したにも関わらず、全体としてSPSや月資源開発の効果が十分現れずに減少傾向にある。これは、耕地の減少と劣化はエネルギー政策だけでは解決できない問題であることを示している。このため、高い生活水準での人類の継続的成長を可能にするためには、エネルギー政策とともに、人口抑制、新しい耕地の獲得、食糧生産効率の増加等の食糧問題解決のための政策を実施していくことが重要といえる。

6. まとめ

地球外エネルギーの開発を行う場合、それらが地球生態・経済系にどのような効果をもたらすかを検討するために、太陽発電衛星（SPS）と月資源（核融合燃料の³He）の開発について、MeadowsのWORLD-3モデルを基にした評価モデルを提案した。また、そのモデルによっていくつかのシミュレーションを行い、その結果、下記のようなことがわかった。

- (1) SPSおよび月資源の開発によって、地球生態・経済系の成長の限界を回避し、継続的成長が可能となるが、現在の宇宙開発コストに基づく限り、そのためには莫大な資本投資が必要である。
- (2) 月資源開発では、その効果が現れるまで長期間を要する。
- (3) SPSと月資源開発を並行させることで現実的な投資額で効果的な宇宙エネルギー開発が可能になる。
- (4) 将来起るであろう食糧不足の問題は、エネルギー政策だけでは解決できず、エネルギー政策に並行して検討すべき重要な問題である。

* 備考：本研究は、財団法人日本証券奨学財団の助成金を受けているものである。

〈参考文献〉

- (1) "The Final Proceedings of the Solar Power Satellite Program Review", DOE/NASA Conf-800491, 1980.
- (2) "Report of NASA Lunar Energy Enterprise Case Study Task Force", NASA TM-101652, 1989.
- (3) Meadows, D. L., Behrens I I I, W. W., Meadows, D. H., Randers, J. and E. K. O. Zahn, "Dynamics of Growth in a Finite World", Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, 1974.
- (4) Meadows, D. H., Meadows, D. L., and J. Randers, "Beyond the Limits", Earthcan Publication Limited, London, 1992.
- (5) Forrester, J. W., "World Dynamics", Second ed., Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, 1973.
- (6) Schultz, F. W., "The Effects of Investment in Extraterrestrial Resource and Manufacturing on the Limits to Growth", Journal of the British Interplanetary Society, Vol. 41, pp. 497-508, 1988.
- (7) 山極芳樹、金田典久、鈴木航介、石川芳男、栗木恭一、"地球生態・経済系と太陽発電衛星および月資源開発"、日本航空宇宙学会誌、第40巻、第457号、pp. 51-58, 1992.
- (8) Loftness, R. L., "Energy Handbook", Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1978.
- (9) 資源ハンドブック編集委員会編、"資源ハンドブック"、丸善、東京、1989.
- (10) 世界資源研究所編、"世界の資源と環境 1992-1993"、ダイヤモンド社、東京、1992.
- (11) 地球環境工学ハンドブック編集委員会編、"地球環境工学ハンドブック"、オーム社、東京、1991.
- (12) 熊崎実、"炭素の放出源から吸収源へ"、季刊環境研究、第77号、pp. 76-85, 1990.
- (13) 井村秀文、"地球温暖化防止の世界的枠組み"、季刊環境研究、第86号、pp. 152-166, 1992.
- (14) Hanley, G. M., "Satellite Power System (SPS) Concept Definition Study (Exhibit D) Vol. VI, Part 1-Cost and Programmatic", NASA CR-3397, 1981.
- (15) World Bank ed., "World Development Report 1989", Oxford University Press, New York, 1989.
- (16) 吉田方明編著、"新体系土木工学92・エネルギー計画"、技報堂出版、東京、1981.
- (17) 未来工学研究所、"月面基地と月資源開発研究会報告書"、1991.