

環境コストを考慮した 世界エネルギー需給シミュレーション

大越誠司, 高木重明, 高倉健一郎,
近山徹, 伊原征治郎

日本工業大学
〒345 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1

World Energy System Simulation Considering Environmental Costs

Seiji OHKOSHI, Shigeaki TAKAGI, Kenichiro TAKAKURA,
Tooru CHIKAYAMA, and Seijiro IHARA
Nippon Institute of Technology

The world energy demand and supply were projected up to 2100 using a long-term world energy model. Several types of environmental cost were taken into account on the assumption of costs of fossil fuels. The projected energy mix showed that market penetration of renewable energy is accelerated when environmental costs are included in the fuel cost evaluation.

1. はじめに

エネルギーの大量消費が地球環境に大きな影響を及ぼす恐れがあることは、数十年来ときおり指摘されてきたが、最近、とくに化石燃料の利用に伴って発生する二酸化炭素 (CO₂) やメタン (CH₄) 等の温室効果ガスが、地球を温暖化して気候と環境を改変することが憂慮されるようになった。

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) をはじめ、さまざまな国際的組織や会議が CO₂ 排出削減の方策を検討し、1992年の地球サミットでは「気候変動枠組み条約」が締結された。この条約には、CO₂ 等の排出量を2000年に1990年のレベルに戻す政策手段を講じるよう明記され、これに応じて多くの国々が排出量削減目標を示した。しかし、現在の世界のエネルギーは90%近くが化石燃料であるためにCO₂の排出削減は難しく、目標の達成はきわめて困難になっている¹⁾。

化石燃料を太陽エネルギーで代替すれば、CO₂ 排出削減が進むことは容易に理解されるが、太陽エネルギーは価格が高いのでほとんど実用されていない。太陽や水素のように環境への影響が少ないエネルギーの利用が進まないのは、環境コストが市場価格にごく一部しか反映されていないからであることを、最近のいくつかの研究が示している^{2, 3)}。

本文では、(1) 環境コストが長期的なエネルギー需給に及ぼす影響を推定すること、(2) 環境コストのCO₂ 排出削減効果を推定すること、及び(3) 太陽エネルギーがエネルギー資源として成立するコスト条件を分析すること、を目的に行ったシミュレーション研究の結果を述べる。

2. シミュレーションの概要

2-1. モデルの概要

エネルギー需給バランスやエネルギー消費による CO₂ 排出量の現状を分析して、将来を予測した対策の評価を行なうためには、シミュレーションモデルが必要になる。エネルギーの需要と供給を予測するモデルは、これまでに無数に報告されているが、CO₂ やその他の環境の制約を明示的に取り入れたエネルギーモデルの数は多くはなく、さらにモデル自体を公開しているものになるとごく僅かである。その中で、容易に入手でき、操作が簡単であるために、わが国でも多くのエネルギー研究者が利用している「長期世界エネルギー・CO₂ モデル」⁴⁾がある。これは、米国の経済学者 J.Edmonds と J.Reilly が作成した計量経済学的方法による世界エネルギーモデル⁵⁾に、CO₂ 排出量を計算する機能を付加したものである。

もとのモデルは、世界を 9 地域に分割して、地域ごとのエネルギー種別消費量と CO₂ 排出量を、1975 年から 2100 年まで 25 年間隔で計算するプログラムである。図 1 にモデルの構成⁵⁾を示す。計算手順は、①エネルギー種別の需要と供給をそれぞれ価格の関数で表わす；②価格を反復調整して需要と供給が一致する状態を見いだす；③その状態の化石燃料消費量に排出係数をかけて CO₂ 排出量を地域ごとに計算する、というものである。排出係数は総発熱量 1GJ (= 10⁹ J) 当りの CO₂ 排出量を kg で表わし、石炭 87.3、石油 70.4、及び天然ガス 50.2 の値を用いる。

筆者らが使用したシミュレーションモデルは、上のモデルの地域分割が若干異なり、米国・豪州・ニュージーランド；カナダ・欧州；旧ソ連・東欧；中国とその周辺の共産主義国；中東；アフリカ；ラテンアメリカ；及び東南アジアの 8 地域と日本に分割してある。モデルは 12 個の操作変数によって、さまざまなケースのシミュレーションを行うことができる⁶⁾。操作変数及び設定したそれらの値を表 1 に示す。

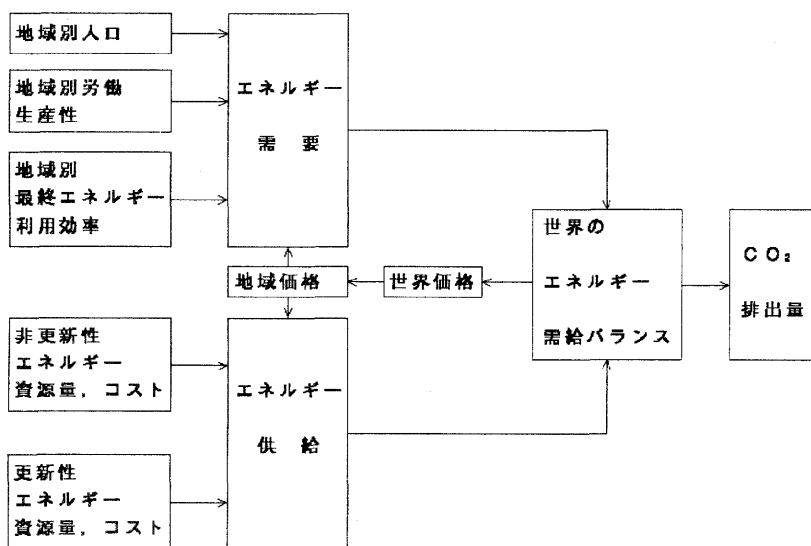


図 1 モデルの構成

2-2. エネルギーの環境コスト

一般に、原料費・建設費・運搬費・保守費などを反映するコストを内部コストと言ひ、直接のコスト計算に入らないで第三者あるいは社会全体に転嫁されているコストを外部コストまたは社会コストと言ひ。外部コストのうち環境の損失に関する部分が環境コストである。エネルギー市場価格に反映されていない外部コストの項目が多数列挙されているが、それらの大半は現在定量化されていないか、または定量できない状況にある²⁾。ここでは、化石燃料に対して見積もられている部分的な環境コストを、文献^{2, 3)}から表2に示すように選び出して合計した値を、モデルの燃料価格に加えてシミュレーションに用いる。

これらの環境コストは1990年米ドルに統一してあるので、モデルに加える際には、消費者物価指数を用いてモデルの初期年である1975年価格に換算した。このようにして求めた値を、表3の②の欄に示す。①の欄はモデルにデフォルト値として組み込まれている環境コストであるが、石炭及びシェールオイルの値は埋め戻し費用を表している。原子力の環境コストは、①がモデルに基準値として与えてある値⁶⁾を示し、②はHohmeyer²⁾が見積もった5.80～35.00[\$/GJ](1990年価格)を換算した高い方の値を示している。

表1 操作変数の設定値

1. 人口 (2075年)	北部	15.48 億人
	南部	97.99 億人
2. 労働生産性 伸び率/年	北部	0.017
	南部	0.029
3. 最終利用エネルギー 効率の伸び率/年		0.005
4. 所得の影響 (指数)	OECD	1.00
	旧ソ連及び東欧	1.25
	南部	1.40
5. 価格の影響 (指数)	価格弾性値	-0.70
	最終利用燃料代替比率	-2.50
	電気事業の燃料代替性	-3.00
	エネルギー対GNP弾性値	
	(1) 北部	-0.15
	(2) 中東	0.05
(3) 南部 (中東を除く)	-0.20	
6. 資源量	在来石油	21250 EXA.J
	天然ガス	13950 EXA.J
	石炭	271000 EXA.J
	シェールオイル	2078605 EXA.J
	原子力	14423 EXA.J
	7. エネルギー生産の 技術進歩率/年	在来石油
天然ガス	0.005	
石炭	0.005	
シェールオイル	0.005	
原子力	0.005	
8. エネルギー生産の 環境コスト	在来石油	表3に 別掲
	天然ガス	
	石炭	
	シェールオイル	
	原子力	
9. 燃料供給技術の 市場への浸透 (コストに対する 弾性値)	在来石油	1.0
	天然ガス	1.0
	石炭	1.0
	シェールオイル	1.0
	10. 太陽及びバイオマス のエネルギーコスト	太陽エネルギー発電
	バイオマス	5.0 \$/GJ
11. 合成燃料のコスト	合成油の 非エネルギーコスト	4.55 \$/GJ
	合成ガスの 非エネルギーコスト	3.30 \$/GJ
	合成油の 非エネルギーコスト	4.55 \$/GJ
	合成ガスの 非エネルギーコスト	3.30 \$/GJ
12. シミュレーション期間		1975年-2100年 (価格: 1975 U.S.\$.)

表2 化石燃料の項目別環境コスト^{2, 3)}

	石炭	石油	天然ガス	シェール オイル
人間への影響	3.48	2.83	2.09	2.83
動物への影響	0.51	0.42	0.30	0.42
植物への影響	1.35	1.09	0.81	1.09
水生植物への影響	0.18	1.05	0.11	1.05
建造物への影響	1.12	0.90	0.67	0.90
他の大気汚染コスト	0.98	0.79	0.59	0.79
埋め戻し費用	0.49	—	—	0.20
気候変化の影響	1.39	1.13	0.84	1.13
海面上昇の影響	0.32	0.26	0.19	0.26
合計	9.82	8.47	5.60	8.67

(価格: 1990 U.S.\$/GJ)

3. シミュレーション結果

シミュレーションは、表4に示すケース1～4について行った。この表の環境コストの欄に示す①、②は、それぞれ表3の①、②の欄の値であることを意味する。ケース1とケース2は環境コストをほとんど考えない場合で、2010年以降の太陽エネルギーコストが、ケース1は10[\$/GJ](1975年価格)程度、ケース2ではその2倍程度と仮定する。ケース3とケース4は、表3の②の欄の環境コストをエネルギーコストに加える場合で、2010年以降の太陽エネルギーコストが、ケース3は10[\$/GJ](1975年価格)程度、ケース4はその2倍程度と仮定する。現在の趨勢に比較的近い状況を表すケース1を、ここでは参照基準ケースと考える。

参照基準ケース(ケース1)の、エネルギー資源変遷のシミュレーション結果を図2に示す。長期的には石油、天然ガスが減少ないし消失して、その他のエネルギーで増加する需要を賄う状況が画かれている。将来も環境コストを考慮しないこのケースでは、エネルギー代替の主な役割は価格が安い石炭が担うことになる。このような長期シミュレーションの、遠い将来の部分の数字の絶対値には信頼を置かないのが通常である。着眼点は、それぞれの資源量の比率と推移が示す傾き具合の定性的な意味にある。

表3 シミュレーションに使用する環境コスト

エネルギー種別	①	②
在来石油	0.00	5.94
天然ガス	0.00	5.12
石炭	1.60	3.39
シェールオイル	1.30	5.25
原子力	10.00	21.18

(価格：1975 U.S.\$/GJ)

表4 シミュレーションを行う4ケース

	環境コスト	太陽エネルギー のコスト
ケース1	①	10.0
ケース2	①	20.0
ケース3	②	10.0
ケース4	②	20.0

(価格：1975 U.S.\$/GJ)

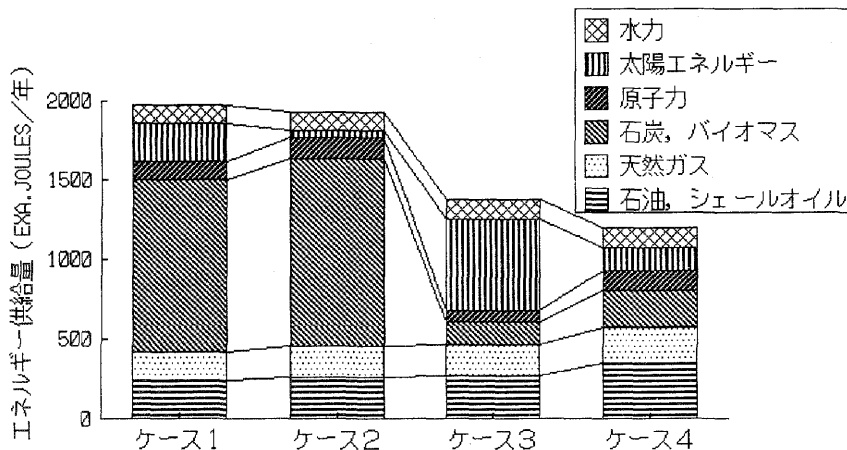


図2 エネルギー資源の変遷のシミュレーション結果(ケース1)

図3は、2050年頃の主要エネルギーの供給量を、ケース毎に比較して示す。太陽エネルギーが技術開発の停滞によってコストが高く、かつ環境コストが導入されない場合（ケース2）には、太陽エネルギーの利用が進まない分だけ石炭がさらに多く増加する。環境コストが導入され、太陽エネルギーコストが安い場合（ケース3）には、太陽エネルギー利用が急速に進んで全エネルギーの40%程度にまで達する。一方、環境コストによって化石燃料と原子力のコストが上昇するために、経済成長が抑制されること及びエネルギー利用の効率化が進むこと、の二つの理由からエネルギー需要量が減少し、したがって総供給量も減少する。環境コストが導入され、太陽エネルギーコストが高い場合（ケース4）には、太陽エネルギーの利用が遅れるとともに、すべてのエネルギーコストが上昇するために、ケース3と同じ理由から総エネルギー供給量がさらに減少する。

ケース1～4の2050年におけるCO₂排出量を図4に示す。環境コストが導入される場合（ケース3、4）にCO₂排出量が減るのは、上に述べた理由からエネルギー供給量が減少するためであるが、太陽エネルギーコストが安いケース3の排出量が最も少なくなる。

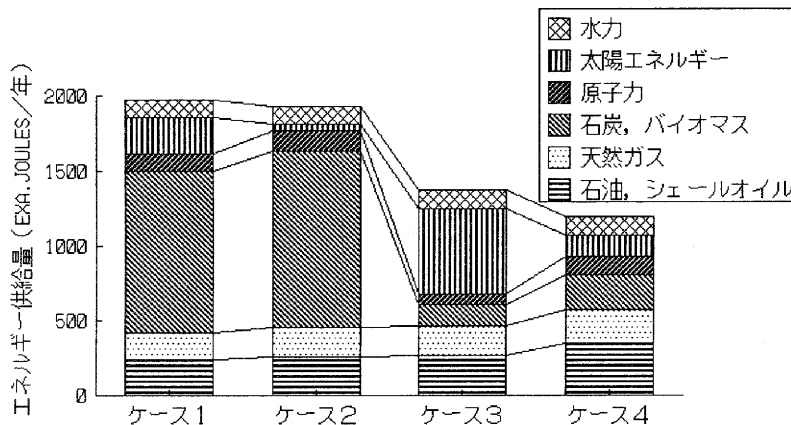


図3 環境コストと太陽エネルギーコストがエネルギー需給に及ぼす影響
(2050年)

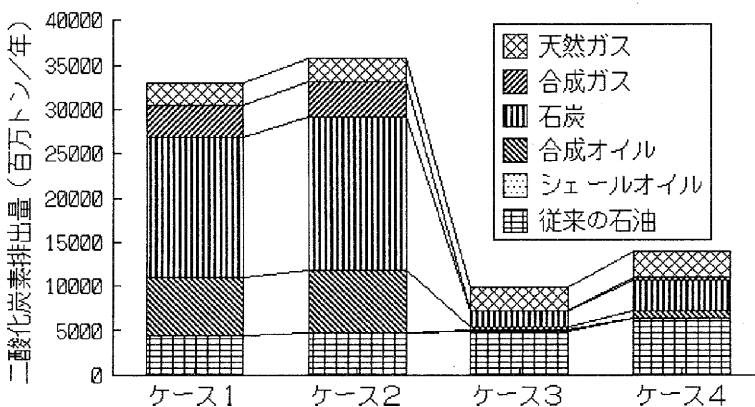


図4 環境コストと太陽エネルギーコストがCO₂排出量に及ぼす影響
(2050年)

地球温暖化の主な原因となる温室効果ガスである CO_2 及び CH_4 (メタン) の排出量の年次推移を、それぞれ図5及び図6に示す。これらのガスの排出量は、太陽エネルギー利用と環境コストの導入によって著しく抑制される。とくに環境コストによる抑制効果が顕著であることが、曲線間の距離関係に表れている。

太陽エネルギーのコストをさらに変えて行ったシミュレーション結果から、太陽光発電コストと太陽エネルギー供給量の関係を抜き出して示したのが図7である。日本の太陽光発電の現状は 70 [円/kWh] 前後が可能になりつつある。現状の半分以下にコストを下げる事ができれば、太陽エネルギーの利用が進む可能性が見られる。さらに、環境コストがエネルギー市場価格に反映されるようになれば、太陽エネルギー利用はいっそう急速に進む可能性がある。

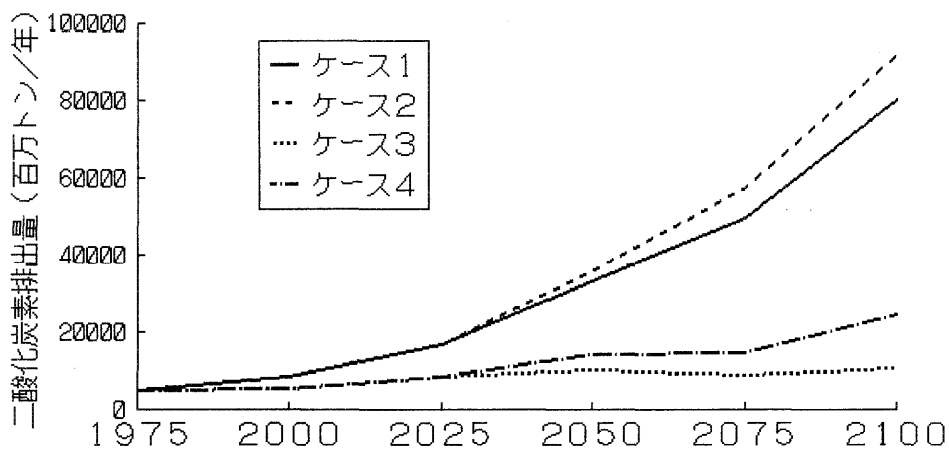


図5 CO_2 排出量の推移

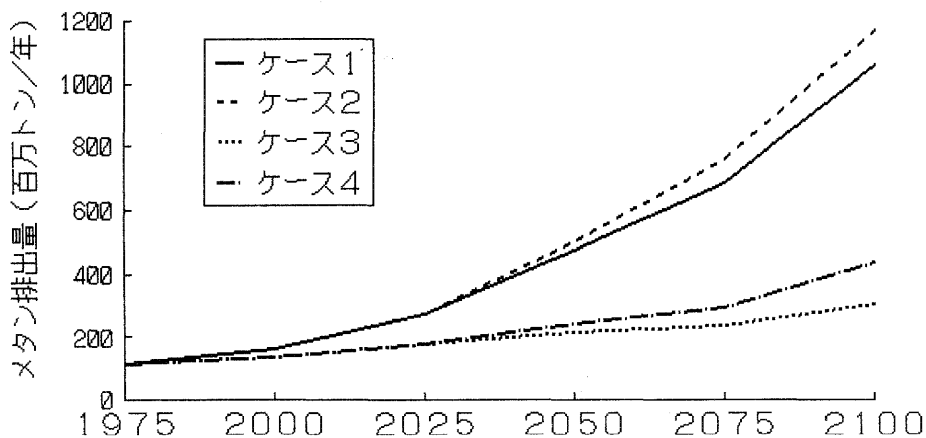


図6 CH_4 排出量の推移

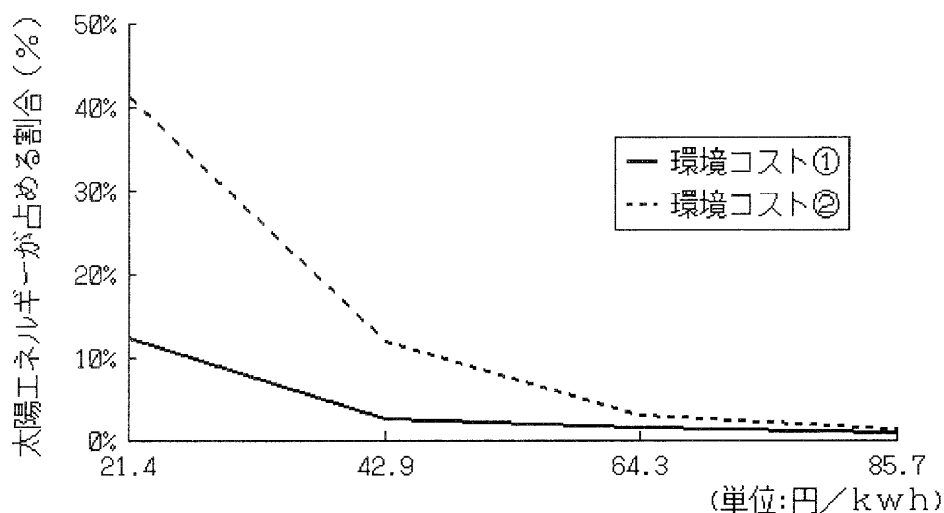


図7 太陽光発電コストと太陽エネルギー導入量の関係

4. 結言

環境コストを市場価格に含めるシミュレーションの結果から、次のようなことが示唆される。環境コストをエネルギーコストに加えると、太陽エネルギーが高くて導入が進まない場合でもCO₂排出抑制にとっては顕著な効果がある。ただしこの場合にはすべてのエネルギー価格が高騰して経済成長には支障となる恐れがある。この不利益は、太陽エネルギーのコストを安くすることによって補われる。

現在、モデルを改良して、水素エネルギーに関する同様なシミュレーションを行うことを計画しているが、水素エネルギーの環境コストも化石燃料に比べると著しく低い³⁾ので、本文の太陽エネルギーとほぼ同様な結論が得られるであろうと予想される。たとえば、砂漠に建設した太陽光発電/水電解プラントで水素を生産し輸送する場合の水素エネルギーは、価格の約70～80%を太陽光発電コストが占める⁷⁾と試算されている。水素への変換と輸送のコストが占める残りのコストは、太陽光発電の将来コストの不確かさの範囲に含まれる程度と考えられる。

終わりに、モデルの構成に関してご教示下さった工業技術院電子技術総合研究所の主任研究官清水定明氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 朝日新聞, P.1, 1995.1.16.
- 2) O.Hohmeyer: Renewables and the Fuel Cost of Energy, Energy Policy, 365-375, April 1992.

- 3) F. Barbir and T. N. Veziroglu: Effective Costs of the Future Energy System, *Int. J. Hydrogen Energy*, **17**, 299-308, 1992.
- 4) Jae A. Edmonds and John Reilly : The IEA/ORAU Long-Term Global Energy -CO₂ Model, Personal Version A84PC, Oak Ridge National Laboratory, ORNL /CDIC-16, CMP-002/PC, Dec. 1986.
- 5) Edmonds, J and J. Reilly: A Long-Term Global Energy-Economic Model of Carbon Dioxide Release from Fossil Fuel Use, *Energy Economics*, **5**, No. 2, 74-88, 1983.
- 6) 横山長之編 : 地球環境シミュレーション , p.p.225-228, 白亜書房 , 1991.
- 7) 伊原征治郎 , 若松清司 , 金竹隆志 , 鈴木穰 , 太田時男 : 太陽電池による水素生産 コストの試算 , 水素エネルギーシステム , **18**, No.1, 16-23, 1993.