慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	地球環境統合モデルMARIA-7による持続可能性の超長期評価
Sub Title	A long term assessment on sustainability by global integrated assessment model MARIA-7
Author	森, 俊介
Publisher	慶應義塾経済学会
Publication year	1999
Jtitle	三田学会雑誌 (Keio journal of economics). Vol.92, No.2 (1999. 7) ,p.265(25)- 280(40)
JaLC DOI	10.14991/001.19990701-0025
Abstract	
Notes	小特集 : 低環境負荷型社会の構築に向けて
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00234610-19990701-0025

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.

「三田学会雑誌」92巻2号（1999年7月）

地球環境統合モデルMARIA-7による持続可能性の超長期評価

森　　俊介

1．はじめに

1997年12月の京都会議（COP3）を契機に，地球環境問題が広く注目されている。この問題の難しさは，地球科学的な気候変動と人為的な温暖化ガスの排出にとどまらず，その背景も対策もエネルギー消費と化石燃料資源問題，人間活動への影響としての食糧問題と土地利用，さらにこれらの需要を規定する人口問題と経済活動，と拡大し，さらに不確実性も大きい点にある。例えば，バイオマスエネルギーの活用は炭素放出削減に寄与するであろうが，人口問題と食糧生産との競合を解決できなければ，かえって社会を不安定化することが考えられる。

このような複雑な相互関係を分析するため，統合モデルによる接近が欧米を中心に近年盛んになされている。気候と人間活動，とりわけエネルギー／経済問題とのかかわりを地球規模で論じたモデルの草分けとして著名なものに，1983年に発表されたEdmonds-Reillyモデル(1)があって，世界を9地域に分割し，人口，経済成長，エネルギー技術と大気中の温暖化ガスの蓄積による大気温度上昇をシミュレーションモデルにまとめた。また，資源と技術制約のもとで何らかの効用関数を最大化する最適化型モデルとして，A. Manne, R. G. RichelsらのMERGEモデル(2)，W. NordhausのDICEモデル(3)等が開発された。

本報告で用いるMARIA（Multiregional Approach for Resource and Industry Allocation）モデル

（1） J. Edmonds and J. Reilly, "A Long-term Global Energy Economic Model of Carbon Dioxide Release from Fossil Use", *Energy Economics*, April, 1983

（2） A. Manne, R. Mendelsohn and R. Richels, "MERGE A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies", *IIASA Workshop on Integrated Assessment of Mitigation, Impacts and Adaptation to Climate Change*, Oct. 13, 1993

（3） W. D. Nordhaus, "The DICE Model", Cowles Foundation Discussion Paper, Yale Univ., 1992

もこのような視点から開発されたもので，当初は世界を日本（JPN），他OECD（DC），中国（CHN），その他（ROW）の4地域に分割し，エネルギー／資源／経済活動／地球温暖化／食糧供給／土地利用を単純化して定式化した非線形最適化モデルである。この上で2100年までの一人当たり消費から導かれる効用の現在価値通時的最大化を行う。世界貿易も考慮され，各財，技術の潜在価格が導かれる構成となっていた。[4] その後，COP3で先進国地域で排出削減の目標値に差が認められたこと，排出権取引，共同実施，CDMと言う地域間の協力制度がさまざま提案されたため，多様な地域間協力評価の必要性が増したこと，さらに1990年代著しい経済成長を遂げた東アジア地域8カ国（韓国，台湾，香港，シンガポール，インドネシア，マレーシア，フィリピン，タイ）の今後の重要度が大きいことを踏まえ，上記4地域にさらに米国（USA），旧ソ連・東欧（FSU），東アジア（ASN）を加えた7地域分割に拡張を行った。さらに，現在IPCCで進行中の新排出シナリオ策定プロセスに従って，GDP，CO_2排出量，最終エネルギー需要など基本的要素をそのB2ストーリーラインに合わせることとしている。

今回，このような拡張MARIAモデルをベースとして，(1)COP3排出削減のないBAUケースをまずもとめる。これを基準とし，(2)Annex-I諸国に対し単独でCOP3排出削減を行うケース，(3)先進国間に排出権取引を認め，総量でCOP3排出削減となるケースを計算する。次に，COP3対応時に炭素排出削減を実現する上で議論の一つの中心となる原子力に対し不拡大がなされた場合に，どのような影響が生じるかを，(4)わが国のみ原子力不拡大を取るケース，(5)Annex-I全体で原子力不拡大を取るケース，で比較を行う。

さらに，従来の4地域MARIAで強調された(6)食糧生産収率の飽和ケース，(7)食糧生産収率の飽和に途上国地域の人口増加が加わったケースのシミュレーションを行う。これらのシミュレーションを通じ，市場メカニズムが炭素排出削減時には負荷の効率的な分担をもたらす一方，食糧供給不足のような問題では最弱者に一方的なしわ寄せが来るという両刃的側面を持つことを示す。この結果は，国際的市場メカニズムの管理システムの重要性を示唆するものと考えられる。

本モデルの構成は従来の4地域モデル[4]と基本的に同一なので，モデルの構成の説明は簡略化する。

2．MARIAモデルの基本的構成

2.1 地球温暖化ブロック

本モデルの温暖化ブロックは，炭素の放出と大気への蓄積過程と放射強制力による温暖化プロセ

---

(4) S. Mori, "An Integrated Assessment Model for the Evaluation of New Energy Technologies and Food Productivity", *International Journal of Global Energy Issues*, Vol. 11, Nos. 1-4, pp1/18, 1999

スからなる。前者に Wigley[5] らにより提案された5時定数モデルを採用した。これは，ほぼより大規模な大気循環モデルを用いた IPCC 第2次報告書と類似した炭素放出プロファイルを示すことがわかっている。具体的な式は以下の通りである。

$$M(t)=\sum_{k=0}^{\infty}R(k)E(t-k) \tag{1}$$

パラメータは Enting[6] により，表1のように与えた。初期値として1800年で280ppmv＝579Gt-C の均衡状態にあったと仮定することで，過去に対して表1のような結果を得た。

表1　初期値の設定と遡及シミュレーション値

	M0	M1	M2	M3	M4	total	(ppm)
時定数	∞	4.145	18.59	58.46	414.15		
M(1800)	579	0	0	0	0	579	280
M(1965)	621.73	6.511	14.79	18.35	20.56	681.97	321.21
M(1990)	642.89	11.245	28.69	33.72	36.11	754.03	355.14

生態圏からの炭素純放出量は1.23Gt/year で安定化するものとした。また，炭素蓄積量と気温上昇には，DICE モデルと同様の2槽放射モデルを用いた。

なお，ここでは近年注目されているメタンの温暖化効果および SOX エアロゾルの冷却効果は加味していない。これは，SOX 排出は健康，生態圏への影響上規制されるべきものであると考えたためである。なお，現在 IPCC で進行中の新温暖化ガス排出シナリオでは，SOX の排出シナリオが IS92 シリーズより下方に修正を受けていることを付記する。

2.2 地域産業構造

MARIA モデルの各地域の基本構造を図1に示す。各地域で資本，労働，エネルギーから経済活動を行い，生産物を消費，投資，貿易に配分する。

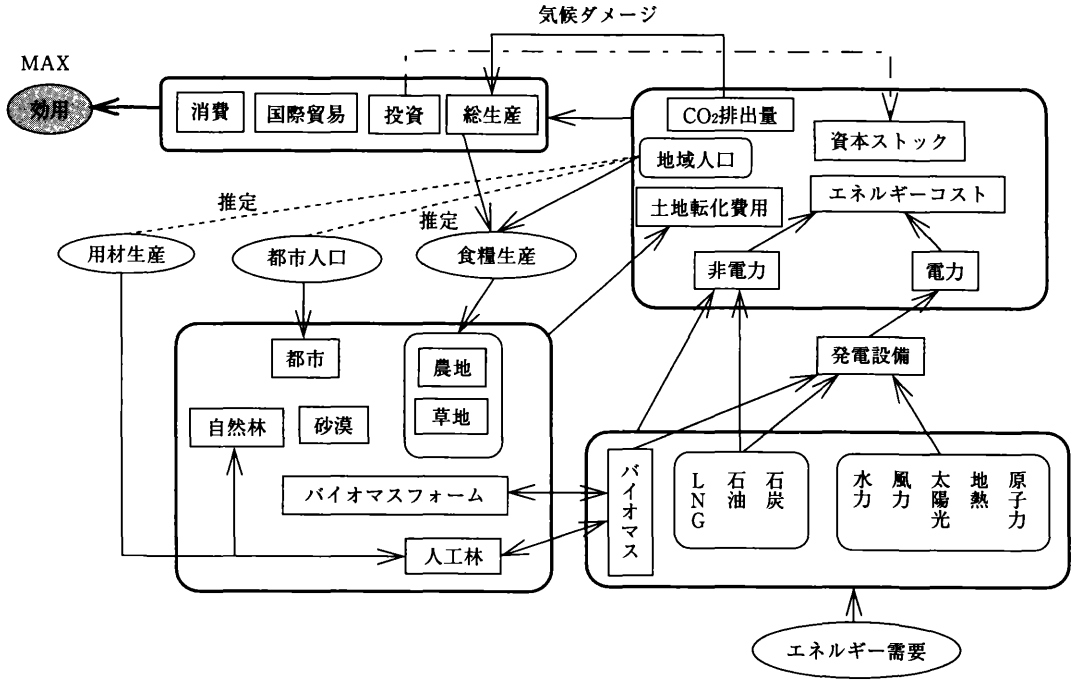
経済成長と人口増加から，食糧需要が与えられ，土地資源の利用が定まる。もし耕地にゆとりがあればバイオマス生産に利用できる。一次エネルギーとして石油，石炭，天然ガス，原子力，地熱，風力，太陽光発電，バイオマスを考え，これが電力および非電力の2種類の2次エネルギーを経て産業，運輸，その他3部門に投入されるものとしている。

---

(5) Wigley, 1991. (See B. B. O'Neill, S. R. Graffin, F. N. Tubiello, Reservoir timescales for anthropogenic CO2 in the atmosphere, TELLUS (1994), 46B, 378/389)

(6) Enting, I. G., Wigley, T. M. L., and M. Heimann, "Future Emissions and Concentrations of Carbon Dioxide: Key Ocean/Atmosphere/Land Analysis", Division of Atmospheric Research, Technical Paper No. 31, CSIRO, 1994

図1　MARIA モデルの基本的構成（1地域ブロック）



産業部門では GLOBAL　2100 モデルと同様の CES 型生産関数を地域 h ごとに与え，これに DICE モデルと同様の温暖化による損害が加わる形式を用いる。これは，生産額に比例して温暖化対策コストが課せられるものと解釈することも可能である。

$$
\begin{aligned}
Y_{h,t} &= D_h(T_t) f((K_{h,t}, L_{h,t}), (E_{h,t}, N_{h,t})) \\
&= I_{h,t} + C_{h,t} - x_{h,t} + EC_{h,t} \qquad (2)
\end{aligned}
$$

ここで，E，Nはそれぞれ電力と非電力エネルギー，I，C，x，EC は各々投資，消費，輸入，エネルギーコストを示す。基本パラメータは，GLOBAL 2100 モデルに従った。$D_h(T_t)$ は温暖化による生産活動へのダメージである。Fankhauser[(7)] の推計を参考に，地球平均気温 3 ℃上昇時に日本1.4%，米国1.3%，他 OECD 1.4%，旧ソ連・東欧1.2%，中国 2 %，ASEAN＝NIES 地域 1.7%，その他地域1.7%と設定した。これは，温暖化により新たに発生した対策費用と解釈することも可能である。地域 h の効用関数は，世代間および地域間の公平性を考慮するため，次の式を用いた。

（7）　S. Fankhauser, "The Economic Costs of Global Warming : Some Monetary Estimates", Costs, Impacts and Benefits of CO_2 Mitigation, (Proc. of IIASA Workshop), CP93-2-2, June, 1993

$$U=\sum_h w_h U_h(c_h)=\sum_h w_h \sum_t (1-\delta_h)^t L_{h,t} ln(_{h,t}/L_{h,t}) \tag{3}$$

この重み w_h は根岸ウェイトと呼ばれ，各地域とも貿易収支が均衡するように与えられる。貿易財は世界全体での需給バランス制約式が課されるが，均衡モデルではそのシャドープライスが国際取引価格を表す。

2.3 運輸・その他部門のエネルギー需要

運輸部門と民生その他部門のエネルギー需要の将来シナリオは，経済成長だけでなく，地理的条件，価値観等に左右される部分が大きいため，ことに発展途上地域において困難を伴う問題である。

ここでは，この部門のエネルギー需要を，簡単に一人当たりのエネルギー消費が一人当たり所得の α 乗に比例して増加する形式を取っている。このパラメータは，途上国地域の一人当たり所得が増加すれば，エネルギー需要も次第に現在のOECD地域の値に接近するものとして，対数線形で補間して求めた。ただし，運輸部門では手段として陸上，海上，航空を考え，さらに陸上輸送は自動車と鉄道に分け，それぞれに需要関数を与えている。すなわち，

$$\left[\frac{energydemand}{population}\right] \geq A\left[\frac{GDP}{population}\right]^{\alpha} \tag{4}$$

の形式である。

2.4 エネルギー資源および炭素回収投棄技術の設定

エネルギー資源と利用費用の設定は重要なパラメータである。これらは，A. Manne[2]，藤井[8]らによる。なお，枯渇性資源の場合，採掘・加工費用は枯渇に近づくにつれ次第に上昇するものとした。原子力は，2030年に高速増殖炉が導入され，2070年に軽水炉がすべて置き換えられるとする核燃料サイクルシナリオを，導入の上限として設けている。

本モデルでは，CO_2の回収と海洋及び地中投棄技術を導入した。地中処理には，廃天然ガス田，促進石油回収，地下帯水層の3種を与えた[8]。このほか，将来型の輸送用流体燃料技術として，メタノール合成技術やハイドロカーブプロセスを導入した。

2.5 土地利用と食糧需給

土地利用と食糧需給にもとづくバイオマスエネルギー評価ブロックの導入は，本モデルの一つの特徴である。土地利用形態として耕地，草地，森林，バイオマスファーム，その他に分類し，前2

---

(8) 山地憲治，藤井康正，グローバルエネルギー戦略，電力新報社，1995

者から穀物生産とバイオマスファーム（キャッサバを仮定）および畜肉生産（牛，羊）がなされることとした。穀物の一部は，豚，鶏飼料に利用される。

図2に示すような食糧消費フローを考え，一人当たり熱量需要と蛋白質需要，および動物性蛋白質のシェアを一人当たり所得の関数で与え制約とする。ここで，牛・羊および鶏・豚は現状値で平均をとる。また，乳製品，魚類その他について，初期値として現状値で固定する。

耕地への転換可能面積は，Croisson[9]らの推計を用い，表2のように与えた。この数値は，FAOの中生産性潜在耕地面積とほぼ対応する。植林の可能面積は，Johansson らに従い，ROW 地域で4.26億 ha とする。

図2　食糧需給フローの構成

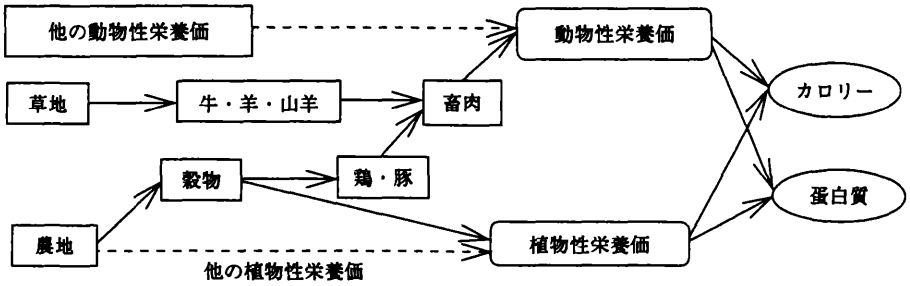


表2　耕地への転換可能面積（100万 ha）

	自然林	草地	その他
ROW	400	486	296
CHN	0	14	0

また，自然林保護区を初期自然林面積の$\frac{1}{3}$とし，人工林では10年単位で伐採と植林が連続的に行われるとする。伐採された丸太の一部は用材，燃材（薪）を供給するが，前者の需要は2040年以降増加しないと仮定する。自然林，人工林の年間炭素吸収量をそれぞれ7.5Ct/ha，10Ct/ha とした。バイオマスファームからのエネルギー供給はサトウキビ，キャッサバの平均をとり155GJ/ha/year とした。

収率の進歩は，食糧生産を考える上で最も重要なパラメータである。ここでは，シミュレーションの基準ケースとして，やや楽観的なケースを設定した。すなわち，オランダの値（現状の世界最大値）まで年率1％で上昇し，耕地の穀物作付け面積は現状より10％まで増加しうるとする。これと，反収が2050年以降飽和するシナリオを比較する。

（9） P. Croisson and J. R. Anderson, "Resources and Global Food Prospects, Supply and Demand for Cereals to 2030", World Bank Technical Paper 184, 1992

土地転換費用は最も重要なパラメータであるが，十分な資料があるとは言えない。ここでは，1 ha 当たりの植林費用が$1400-$2000かかるものとし，10年で償却されるとする。また，穀物生産の$\frac{1}{3}$を廃棄物としてバイオマスエネルギーに利用できるものとした。以上の結果，バイオマスの最大供給可能量は2100年でほぼ3.3GTOE に達する。

なお，シミュレーション結果をより現実的なものとするため，エネルギー利用設備に年率5％の拡大上限制約を導入している。このような制約はエネルギー転換をよりスムースなものとする一方，市場導入の損益分岐点をわかりづらくする欠点を持つ。今回は，他モデルとの比較の意味もあり，この制約を導入した。

2.6 基準パラメータの設定―― IPCC 新排出シナリオについて

IPCC では，第2次評価報告書以降の新たな科学的知見を反映するため，1997年より従来の IS92 シリーズに代わる新たな排出シナリオの策定作業を開始した。[10] 表3には，その基本的パラメータを示す。このように，ほぼ従来の IS92a ケースと対応する B2 シナリオにおいても炭素排出は控えめであり，環境対策がある程度織り込まれていると言える。

表3　IPCC 新排出シナリオの基本的シナリオ設定数値

1. Fossil Fuel CO_2 in Gt/yr as [C].

Scenario	1990	2020	2050	2100
A1B	6.0	12.1	16.0	13.1
A2	6.2	11.1	18.5	29.9
B1	6.1	7.5	9.0	5.7
B2	5.9	9.3	11.2	13.9
IS92a	6.0	10.0	13.2	19.8

2. Primary Energy in EJ/yr

Scenario	1990	2020	2050	2100
A1B	345	648	1204	2079
A2	330	611	984	1589
B1	348	475	680	820
B2	351	567	869	1356
IS92a	344	648	934	1453

3. Global population in millions.

Scenario	1990	2020	2050	2100
A1B	5262	7493	8704	7056
A2	5263	8191	11296	15068
B1	5297	7767	8933	7239
B2	5262	7672	9367	10414
IS92a	5252	7972	10031	11312

4. GWP in trillion US dollars

Scenario	1990	2020	2050	2100
A1B	20.9	60.8	174.7	532.4
A2	20.1	40.6	81.9	243.6
B1	20.6	53.5	134.8	338.6
B2	20.3	43.4	86.1	238.6

なお，このシナリオ策定作業には，1999年初の時点で世界から6統合モデルが参加しており，日本からは国立環境研究所の AIM チームと MARIA-7 モデルが参加していることを付記する。

今回のシミュレーションでは，世界人口推移は IPCC で進行中の新排出シナリオの B2 に合わせ，2100年で約104億人と設定した。さらに重要な仮定として，化石燃料資源，ことに石油と天然ガス

(10)　http : //sres. ciesin. org

表4　世界化石燃料資源量の設定（GTOE）

	石炭	石油	天然ガス
DC	764.7	19.6	612.4
JPN	4.8	0.14	5.6
ROW	392.6	2283.3	8842.5
CHN	540.6	63.9	174.8
NAM	934.2	83.8	1218.0
ANS	20.9	26.1	592.5
FSU	3590.3	161.2	8544.0
World	6248.0	2638.0	19989.9

に関し，IIASA の Rogner の推定を基準として用いている。これは，非在来型資源の新たな発見が反映されているため，従来より楽観的となっている。

本モデルでは，メタンクラスレートを除く非従来型資源までを採用する。この数値を表4に示すが，枯渇に従い，エネルギー利用コストが2次関数的に上昇する形式を用いた点は従来どおりである。

3．シュミレーション

以下にシミュレーション結果を示す。

まず，基準となる BAU ケースであるが，表3の CO_2 排出量に近づけるためには原子力とバイオマスなど無炭素燃料の利用拡大が前提とならざるを得ない。後者は，食糧需給場欄から制約を受けるので，ここでは原子力のエネルギーコストを kwh あたり ¢3.5になるものとしている。また，石炭の利用費用を天然ガスの2倍とした。この他の費用設定は，4地域モデルと同様である。

この場合の世界エネルギー需給構成，GDP 推移を図3，図4に示す。表5には世界の地域別 CO_2 排出量を示すが，ここには植林による吸収オプション及び炭素の隔離技術が織り込まれている。ただし，BAU では後者は採用されていない。

また，図5には炭素排出及び各種エネルギー源の潜在価格（国際取引におけるプレミアム価格）を示す。炭素排出に制約を加えない場合でも，本モデルでは Fankhauser に従い，地球温暖化が社会に対し GDP の1.4-1.7%程度の追加費用を伴うものとしているため，炭素 t あたりの排出潜在価格が導かれる。

図6には，わが国の1次エネルギー供給推移を示す。このように，原子力のウェイトは大きい。また，輸送用ガス利用の増大が見られるが，これは燃料電池自動車の普及と考えられる。

以下に，京都会議で定められた排出削減量への対応（以下 COP3 対応と呼ぶ）を地域ごとに行った場合を示す。まず，1次エネルギー供給であるが，石炭が減少し，この分を原子力が増大し補っている。

図 3　世界の 1 次エネルギー供給（BAU ケース）

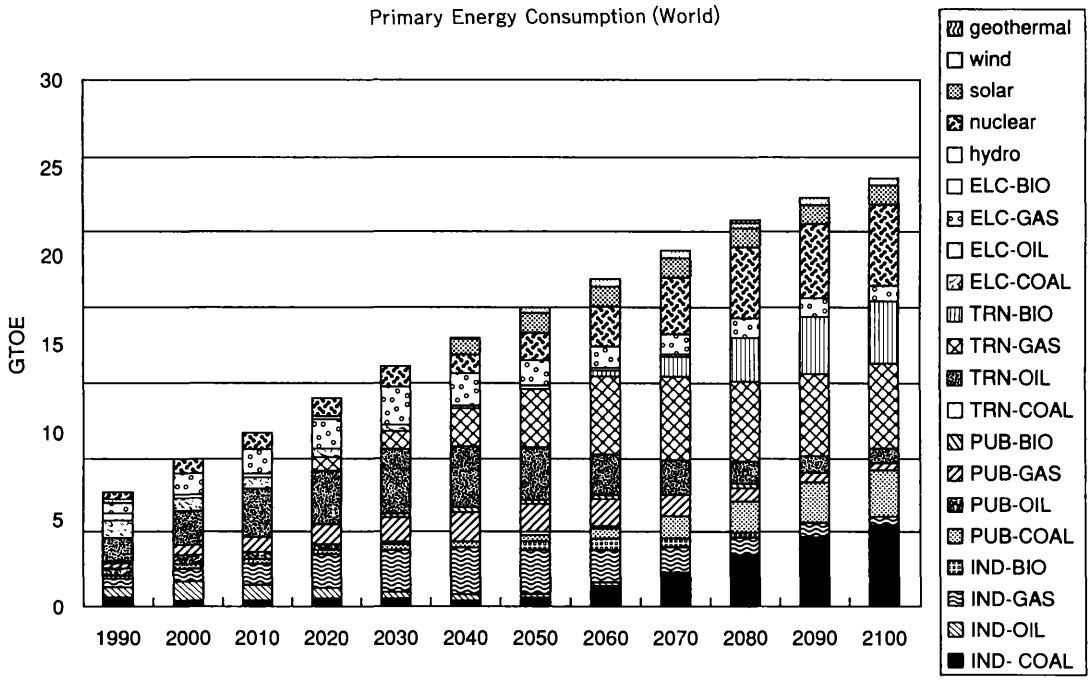


図 4　世界の GDP 推移（BAU ケース）

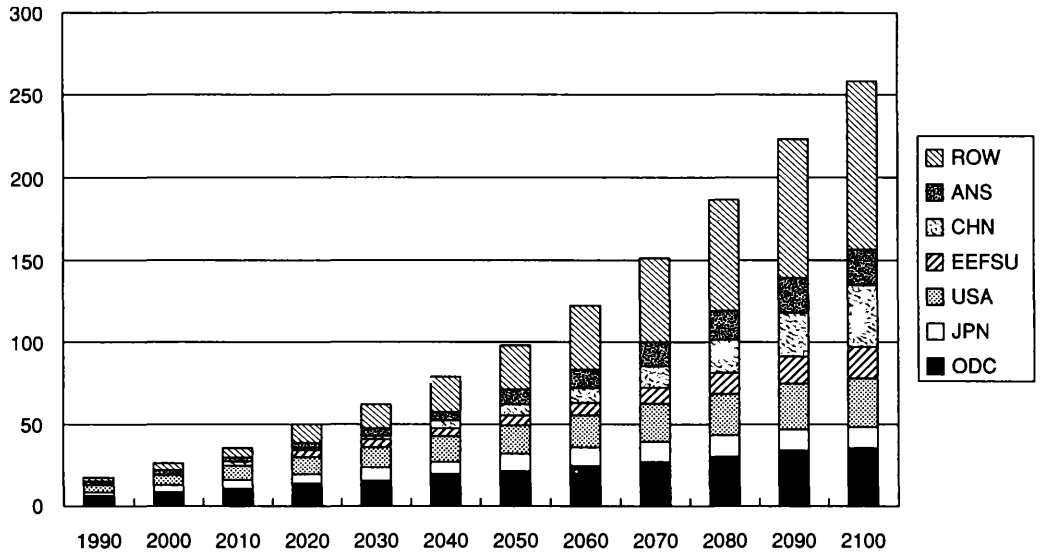
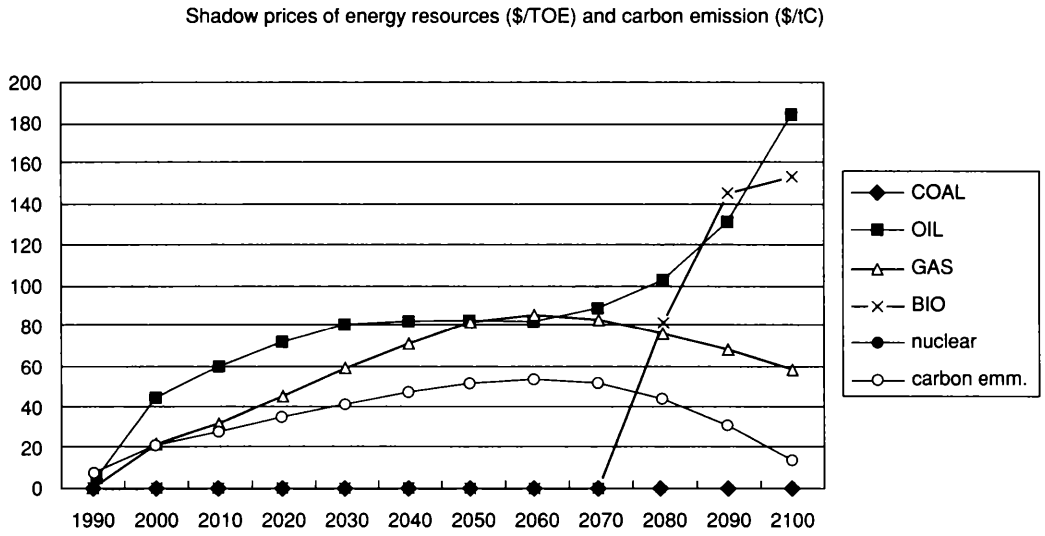


表 5　世界地域別炭素排出量の推移（Mt-C）BAU ケース

year	ODC	JPN	USA	EEFSU	CHN	ANS	ROW	total
1990.0	1336.5	319.4	1412.2	1281.3	662.3	223.2	788.4	6023.4
2000.0	1776.4	388.9	1804.1	1286.2	664.6	309.4	1101.4	7331.0
2010.0	1807.1	363.9	1890.5	1296.5	982.9	426.5	1570.8	8338.2
2020.0	1850.0	364.3	1935.7	1348.9	1349.8	479.1	2239.4	9567.3
2030.0	1833.6	348.3	1973.0	1397.8	1618.0	576.5	3009.2	10756.4
2040.0	1733.0	319.2	1958.1	1322.6	1716.9	619.2	3354.2	11033.3
2050.0	1532.2	298.9	1840.2	1307.7	1854.4	671.7	3614.8	11119.9
2060.0	1512.9	293.1	1853.3	1325.3	2021.8	644.5	3854.6	11505.6
2070.0	1520.0	289.5	1935.0	1305.7	2455.9	514.9	3946.6	11967.7
2080.0	1633.4	328.3	2056.1	1464.7	2855.4	471.2	3625.7	12434.8
2090.0	1754.6	351.0	2200.4	1827.9	3282.5	519.0	3758.4	13693.9
2100.0	1756.9	353.8	2219.0	1930.0	3931.4	498.7	3673.0	14362.7

図 5　炭素排出（$/tC）及びエネルギー資源の潜在価格（$/TOE）　BAU ケース



しかし，GDP への影響は世界全体では2010年に 1 %低下を見るものの，その後格差は次第に縮小し，2060年以降は逆転し0.2%ほど高くなる。この場合の炭素排出量を表 6 に示す。

世界合計で削減が果たされていることは言うまでもないが，中国も排出が減少する一方，東アジア地域と ROW で増大している。ただし，中国の GDP は増加した。これは，先進国においては天然ガス消費の削減がもたらされるため，途上国地域は逆に余剰となった天然ガスを拡大利用できることが原因と考えられる。このように，COP3 への対応は，それまで石炭中心とならざるを得なかった中国，ROW 地域に天然ガス導入を促す効果がある。東アジア地域, ROW 地域では, 経済の拡大がこれを上回る。これをより明確にするため，NonAnnex-I 地域の 1 次エネルギー需要を，表 7

図6　日本の1次エネルギー供給（BAU ケース）

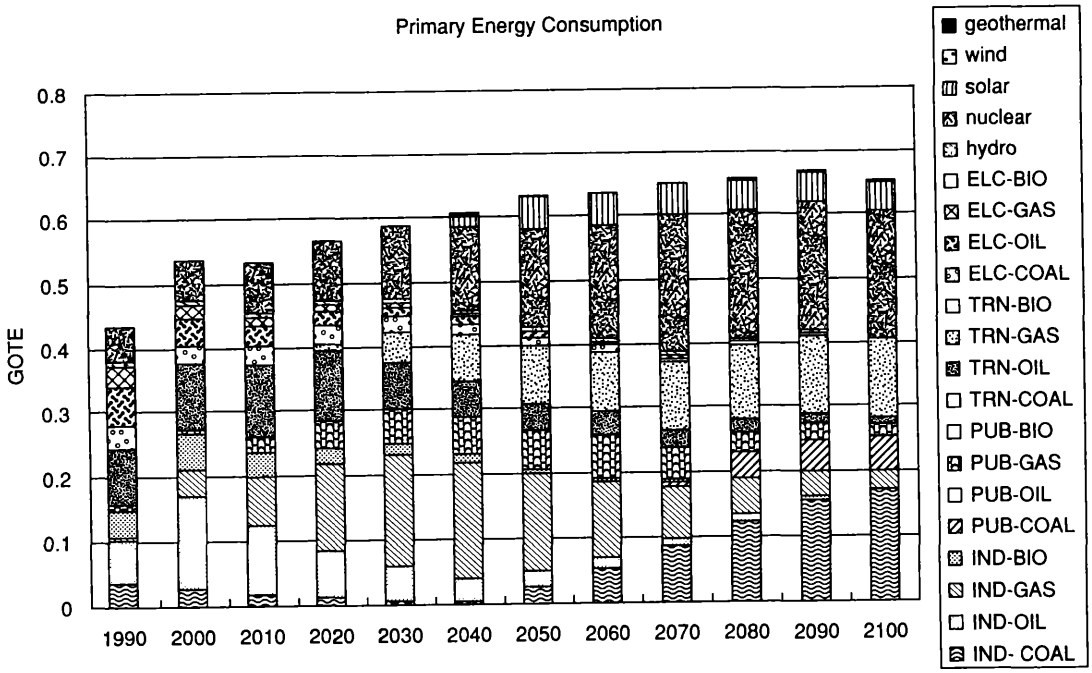


図7　世界の1次エネルギー供給（COP3 国別対応ケース）

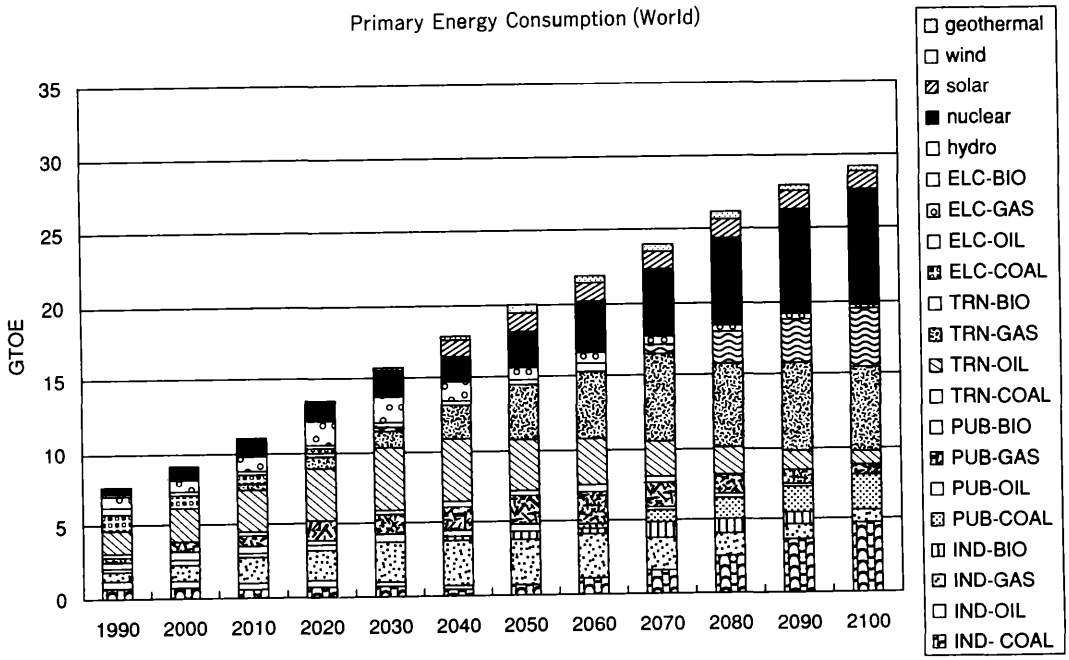


表 6　世界地域別炭素排出量の推移（Mt-C）（COP3 国別対応ケース）

year	ODC	JPN	USA	EEFSU	CHN	ANS	ROW	total
1990.0	1336.5	319.4	1412.2	1281.3	662.3	223.2	788.4	6023.4
2000.0	1210.9	299.6	1303.4	1280.4	711.7	309.7	1182.3	6297.9
2010.0	1210.9	299.6	1303.4	1280.4	1027.0	434.0	1702.5	7257.8
2020.0	1210.9	299.6	1303.4	1280.4	1400.4	551.2	2496.2	8542.1
2030.0	1210.9	299.6	1303.4	1280.4	1695.2	620.0	3202.9	9612.4
2040.0	1210.9	299.6	1303.4	1280.4	1792.7	657.0	3492.8	10036.7
2050.0	1193.7	280.7	1303.4	1254.2	1926.9	691.8	3703.8	10354.4
2060.0	1205.9	278.4	1303.4	1279.8	1916.5	696.5	4085.5	10766.0
2070.0	1202.9	273.5	1303.4	1280.4	2169.7	665.3	4272.6	11167.8
2080.0	1178.3	280.1	1238.3	1214.0	2706.0	669.0	3955.5	11241.2
2090.0	1210.9	299.6	1151.3	1280.4	2847.6	582.6	4532.9	11905.3
2100.0	1210.9	299.6	1303.4	1280.4	3210.4	604.8	4730.6	12640.1

表 7　NonAnnex-I 地域の 1 次エネルギー需要比較（GTOE）

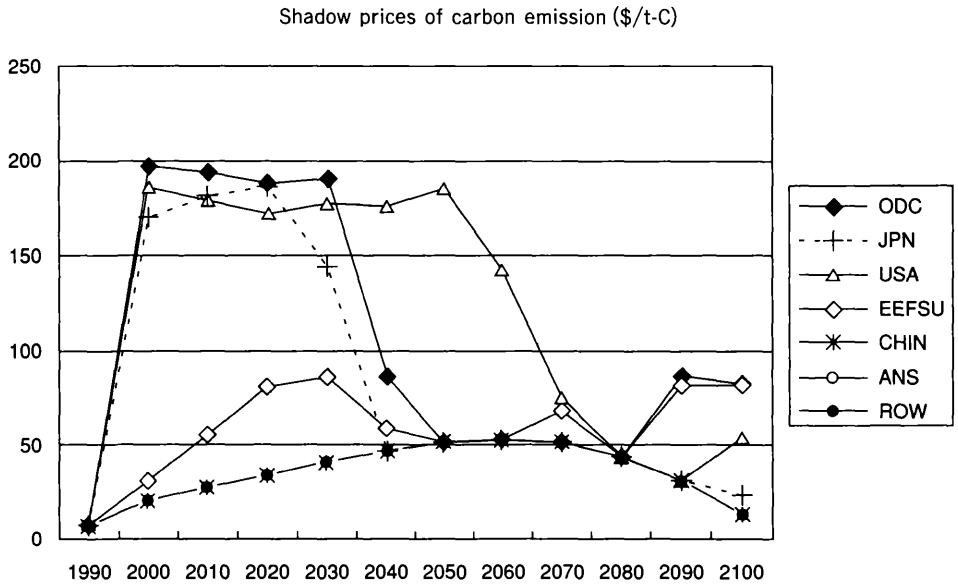
(BAU)

	COAL	OIL	GAS	Biomass	Nuclear	Renew.
1990	0.803	0.778	0.2425	0.0202	0.0746	0.0324
2000	0.7115	1.2671	0.3952	0.0582	0.3464	0.0384
2010	0.832	2.0164	0.6438	0.1072	0.6205	0.0347
2020	0.958	2.861	1.0487	0.1805	0.9382	0.033
2030	0.9141	3.7897	1.7082	0.2968	0.9801	0.0742
2040	0.779	3.7067	2.7826	0.4848	0.6631	0.9608
2050	0.8501	3.0803	4.2756	0.7899	1.019	1.1055
2060	1.3848	2.185	5.1831	1.2866	1.6202	1.1046
2070	2.2557	1.5477	5.222	2.0957	2.1765	1.1031
2080	3.1176	1.0839	4.4964	3.414	2.802	1.1017
2090	4.1071	0.7593	4.2173	3.8627	3.2748	1.1005
2100	4.7555	0.5315	4.394	4.1753	3.5469	1.0993

(COP3 国別対応)

	COAL	OIL	GAS	Biomass	Nuclear	Renew.
1990	0.803	0.778	0.2425	0.0202	0.0746	0.0324
2000	0.8299	1.2671	0.3952	0.035	0.1348	0.0465
2010	0.9949	2.025	0.6439	0.0865	0.2489	0.1098
2020	1.0903	3.1432	1.0487	0.1458	0.4901	0.0358
2030	1.0377	4.0054	1.7082	0.2374	0.6864	0.0815
2040	0.7379	4.0605	2.7826	0.3987	0.4858	0.939
2050	0.7378	3.4096	4.3172	0.6523	0.8908	1.1032
2060	1.0471	2.7053	5.348	1.0625	1.4957	1.1046
2070	1.7061	1.9667	5.8965	1.7307	2.0884	1.1031
2080	2.7788	1.3771	5.2729	2.8191	2.7003	1.1017
2090	3.6048	0.9644	5.4418	3.0416	3.279	1.1005
2100	4.6309	0.6753	5.1047	3.4748	3.5436	1.0993

図 8　炭素排出の潜在価格の地域差（COP3 国別対応時）



に示すよう BAU と COP3 で比較する。

バイオマスが低下し，天然ガスと石油需要が伸びていることが見て取れる。原子力は逆に低下している。このように Annex-I 地域の動向がちょうど逆に現れている。

次に，この場合の炭素排出の潜在価格を地域的に見る。この場合，削減を地域単独で行うため，図 8 のように地域差が表れる。限界費用については，COP3 制約時には日本，米国，その他 DC でほぼ接近した値となっている。米国は，限界費用の高い時期がもっとも長い。日本で比較的速やかに低下するのは，原子力発電所拡大のためである。しかし，21世紀後半にはいずれの地域も収束に向かっている。

COP3 に対応する際，Annex-I 諸国間に排出権取引を認めた場合の変化として，地域別の CO_2 排出量の推移と炭素排出の潜在価格を見ることとする。

まず，炭素排出量推移は表 8 のようになっている。世界全体では排出量がさらに減少している。これは，先進諸国間の経済影響が緩和されたため，途上国への排出増大のインセンティブが低下したためと考えられる。今回，中国は増加し，逆に東アジアとその他途上国地域は低下した。

また，日本と米国は21世紀前半で排出量が増加，すなわちその他先進地域と EEFSU から排出権を購入するが，炭素排出削減技術の積極的な導入により，21世紀後半はむしろ輸出できる側に回っている。

図 9 に見るよう，炭素排出の潜在価格は排出権取引を行った結果，$100/tC 未満に収まっている。

次に，食糧生産の飽和時を示す。この場合，2060年以降食糧生産の収率は伸びないものとする。

表 8　世界地域別炭素排出量の推移（Mt-C）（COP3 対応に Annex-I 国間の排出権取引を導入した場合）

year	ODC	JPN	USA	EEFSU	CHN	ANS	ROW	total
1990	1336.5	319.4	1412.2	1281.3	662.3	223.2	788.4	6023.4
2000	1550.9	363.0	1594.3	588.9	674.8	309.4	1115.8	6197.1
2010	1555.3	337.8	1622.3	581.7	1006.1	431.0	1580.9	7115.1
2020	1528.6	327.3	1645.5	595.7	1363.9	544.6	2386.9	8392.6
2030	1507.8	314.9	1677.5	596.9	1644.9	615.3	3122.9	9480.2
2040	1370.3	286.8	1554.9	884.9	1753.4	648.0	3442.9	9941.3
2050	1287.4	264.0	1540.3	1005.3	1862.3	686.2	3681.3	10326.8
2060	1252.0	250.4	1520.6	1074.0	1970.3	696.4	3989.0	10752.7
2070	1248.9	234.2	1535.5	1078.5	2239.4	523.3	4274.7	11134.5
2080	1277.7	213.8	1543.9	1015.3	2747.0	431.6	3976.9	11206.2
2090	1357.1	191.3	1559.4	989.2	3108.8	417.2	4303.6	11926.6
2100	1376.5	203.7	1511.6	1005.2	3654.0	490.5	4361.5	12603.1

図 9　炭素排出（$/tC）及びエネルギー資源の潜在価格（$/TOE）（COP3 対応：排出権取引あり）

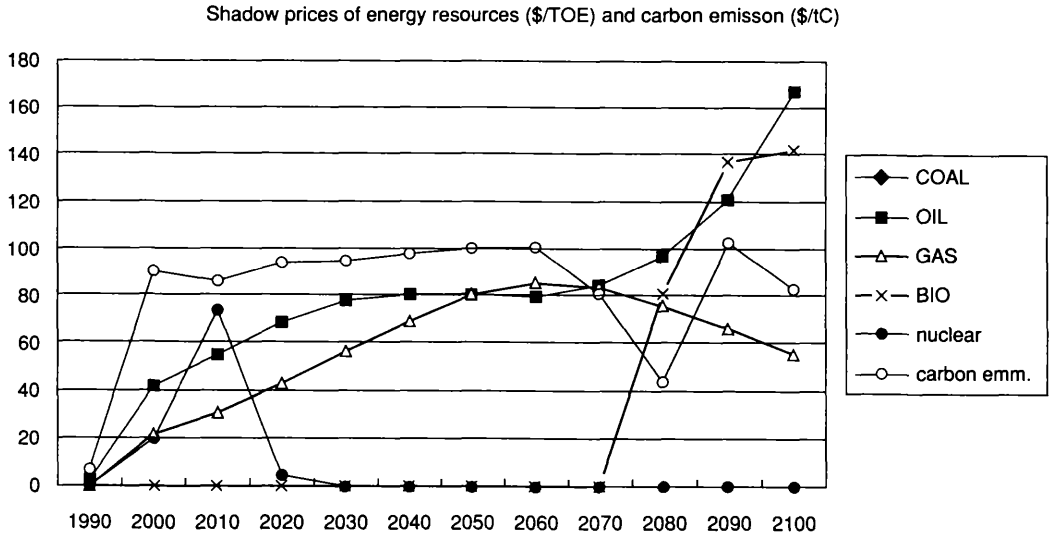


表 9，表10，表11に BAU，食糧収率飽和かつ人口を BAU と同一にした場合，さらに中国と ROW 地域の人口を2100年で15%増大するよう人口増加率を変化させた場合の，一人あたり所得の推移を示す。明らかに最弱地域にしわ寄せが集中しており，市場メカニズムが社会的に破局的状況をもたらしかねない点を警告していると言える。

表 9　一人あたり所得の推移（$1000 per cap）（BAU）

year	ODC	JPN	USA	EEFSU	CHN	ANS	ROW	total
1990	13.268	22.604	19.347	2.328	0.248	1.702	0.936	3.472
2000	17.108	31.169	24.743	3.329	0.331	2.374	1.237	4.308
2010	21.828	37.554	29.040	4.899	0.609	3.434	1.737	5.223
2020	27.393	44.504	33.537	6.984	1.097	5.025	2.426	6.367
2030	32.943	52.014	38.294	9.120	1.666	6.805	3.108	7.483
2040	39.153	60.050	44.484	11.607	2.387	9.324	3.874	8.801
2050	46.021	68.510	51.366	14.602	3.873	13.059	4.795	10.498
2060	52.929	74.189	58.005	19.385	5.771	16.657	6.207	12.546
2070	60.486	79.920	65.163	25.541	8.677	21.217	7.978	15.137
2080	69.052	85.802	73.083	33.645	12.940	25.342	10.242	18.380
2090	76.390	90.485	80.174	41.945	17.690	30.348	12.466	21.657
2100	80.687	90.351	84.300	50.436	23.920	33.026	14.656	24.711

表10　一人あたり所得の推移（$1000 per cap）（収率飽和）

year	ODC	JPN	USA	EEFSU	CHN	ANS	ROW	total
1990	13.268	22.604	19.347	2.328	0.248	1.702	0.936	3.472
2000	16.337	29.484	23.625	3.144	0.351	2.285	1.217	4.132
2010	20.466	34.813	27.166	4.527	0.664	3.213	1.642	4.907
2020	25.475	40.886	31.140	6.383	1.134	4.705	2.230	5.913
2030	30.526	47.562	35.409	8.276	1.608	6.338	2.821	6.891
2040	36.140	54.615	40.943	10.468	2.210	8.629	3.496	8.050
2050	42.393	62.182	47.170	13.091	3.498	12.039	4.302	9.554
2060	48.654	67.220	53.167	17.368	5.199	15.331	5.542	11.377
2070	55.416	72.214	59.593	22.768	7.754	19.468	7.118	13.675
2080	62.803	76.860	66.279	29.735	11.419	23.105	9.035	16.430
2090	70.868	83.154	74.242	37.947	15.814	28.062	9.528	18.612
2100	78.767	91.740	81.352	45.901	17.540	29.199	8.569	19.166

表11　一人あたり所得の推移（$1000 per cap）（収率飽和及び途上国の人口増大）

year	ODC	JPN	USA	EEFSU	CHN	ANS	ROW	total
1990	13.268	22.604	19.347	2.328	0.248	1.702	0.936	3.472
2000	16.349	29.510	23.645	3.148	0.352	2.287	1.208	4.102
2010	20.472	34.824	27.174	4.530	0.664	3.214	1.636	4.841
2020	25.475	40.890	31.142	6.381	1.131	4.703	2.223	5.797
2030	30.505	47.529	35.382	8.251	1.604	6.332	2.815	6.717
2040	36.059	54.476	40.843	10.450	2.202	8.608	3.485	7.797
2050	42.113	61.788	46.859	12.990	3.473	11.964	4.263	9.171
2060	47.747	65.978	52.221	16.900	5.074	15.075	5.411	10.744
2070	55.754	73.022	59.998	22.845	7.580	19.490	5.765	12.300
2080	67.019	85.150	70.411	30.699	7.996	22.951	5.134	13.122
2090	73.394	87.736	76.597	38.867	15.058	28.131	3.726	14.095
2100	78.594	89.233	81.893	47.271	21.453	31.252	2.716	15.009

4. おわりに

上記はあくまで計算機上のシミュレーションでしかない。では，どのようなことが知見として言えるだろうか。言うまでもないが，上記の破局的状況下では，国際社会は現実的には維持できず，2100年になる前に難民・内乱・戦争など，さらに事態は悪化しているであろう。こうなると，その被害は地球の温暖化のレベルを遙かに越えるものとなろう。重要な点は，この結果が，モデルという「効率的」な世界の中で導かれたものであるという点である。現実には，確かにそこまで行く前に何らかの破局回避の手段が国際的に執られるであろう。しかしながら，21世紀社会が資源，環境，技術，食糧，人口のいずれにおいても，「分配の公平性」の意味で，楽観視が許されないとは言えそうである。「自然体ケース」に受容できる解があったからといって，それは決して「自然に達成できる」ことを意味しない。努力の到達点としての一つの姿にすぎない。

これらのシミュレーションを通じ，市場メカニズムが炭素排出削減時には負荷の効率的な分担をもたらす一方，食糧供給不足のような問題では最弱者に一方的なしわ寄せが来るという両刃的側面を持つことが示された。

このように考えると，21世紀の世界は決して安閑としていられるものとは言えそうもない。国際的市場メカニズムの管理体制，低環境負荷技術の開発と拡大，人口安定化努力など，持続可能な社会に向けての努力を怠れば，災害の弱者直撃という，きわめて非人道的な世界に陥りかねない，脆弱性の高いものになると考えられよう。結論として以下を持続可能な社会のための条件としてまとめることができる。

(1)環境対策の効率的実施のために，市場メカニズムを活用せねばならない。市場メカニズムの活用により，環境保全の費用は大幅に削減できよう。また，技術移転を促進が期待できる。

(2)21世紀半ばは，20世紀型の石油主導社会からの脱却の過渡期である。次世代への軟着陸のために資源の有効利用技術の開発と普及に力を注がねばならない。特に，電力，輸送分野では石炭クリーン利用，モダンバイオマスのウェイトが高まる。原子力も重要なオプションである。

(3)食糧生産は21世紀特に重要な課題となりうる。森林と耕地を含めた土地利用と水の資源管理，収率の向上により供給を確保せねばらない。さらに，食糧では分配の公平性が大きな課題であるが，市場メカニズムに任せたままでは逆に弱者に一方的な負担を強いる破局的状況をもたらす危険がある。市場メカニズムの国際的管理のための制度作りが必要である。

（東京理科大学理工学部経営工学科教授）