

**招待論文  
INVITED  
PAPER**

# 招待論文

## 地球温暖化に関するシナリオとモデル解析

SCENARIOS ON GLOBAL WARMING AND THEIR MODEL ANALYSIS

松岡 譲\*・森田恒幸\*\*・甲斐沼美紀子\*\*

*Yuzuru MATSUOKA Tsuneyuki MORITA Mikiko KAINUMA*

\* 京都大学工学部衛生工学教室

(〒606 京都市左京区吉田本町)

\*\* 国立環境研究所地球環境研究グループ

**Keywords:** climate change, global warming, modeling, scenario

### 1. はじめに

地球温暖化問題には多くの不確実性が残されている。炭素循環、雲の影響、海洋の影響といった自然の不確実さとともに、人口成長、経済発展、技術革新などの人間活動の不確実さがある。このため、地球温暖化防止に関する政策展開の方向を決定する場合、将来に向けたいくつもの筋書きを描いていろいろな可能性を見定めることが必要となる。この筋書きを「シナリオ」という。

システム分析においてシナリオという用語は、従来、定量的な予測が難しい場合に文章によって将来の状況が展開していく様子を描写することを意味してきた(クエイド他, 1972; 近藤, 1983)。このため、シナリオは数値モデルが使えない場合に用いる一種の代替的手法として認識されてきた。しかし、モデリング技術が発達してきた現在、シナリオはモデル解析と政策決定をつなぐ重要な情報の表現形式として用いられている。即ち、モデルの入力条件やモデルの出力といった定量的な情報のうち重要なものを明解かつ簡略に記述して、政策決定者に伝える表現形式がシナリオと呼ばれるようになった。このシナリオを通じて研究者と政策決定者との間のコミュニケーションが効率化し、また政策決定の重要な判断材料として用いられるようになってきている。

地球温暖化の分野においては、過去20年の間に種々のモデリングが試みられ(松岡・森田, 1992), 数多くのシナリオが描かれてきた。地球温暖化が非常に複雑かつ長期的な現象であり、多くの不確実さが伴うため、政策の検討に当たっていろいろな可能性を見定めることが不可欠なためである。しかし、これらのシナリオがどの様な範囲で検討されてきているかを体系的に整理した文献はなく、また、不確実な要因を広く勘案した場合にどの様なシナリオが描けるかについて、総合的に分析した

例はない。

このため本論文では、まず、今までに地球温暖化に関して描かれたシナリオを体系的に整理する。そして、これららのシナリオをもとに入力条件を設定してシミュレーションを行い、不確実な要因が複合した場合の温暖化の程度を予測する。そして、この一連の分析をもとにして、地球温暖化の不確実さとその政策的意味を明らかにする。

### 2. 地球温暖化に関する今までのシナリオ

地球温暖化の防止策を検討する際に、政策的に重要なシナリオは5種類ある。第一に、人口、経済、技術など、温暖化を引き起こす基本的かつ人為的な要因が今後どのように推移していくかを想定した「前提シナリオ」がある。これは、現象の不確実さの程度や政策を必要とする状況を判断するために必要不可欠な情報であり、政策判断の基本的前提となる。第二に、この前提シナリオで推移したときに、温室効果ガスがどのくらい排出され、大気中の温室効果ガス濃度がどの程度増加し、その結果としてどのような気候変化が生じるかを推定した「温暖化(気候変化)シナリオ」が必要である。この際、自然メカニズムに対する不明さ、不確実さをどのように取り扱うかが大きな問題となる。それを勘案し、このシナリオをどう変えていくかが、温暖化防止の政策のターゲットとなる。第三に、気候変化が現実のものになったときに、自然環境や社会経済にどの様な影響が生じるかを推定する「影響シナリオ」が求められる。温暖化による人間社会への被害を明確化することによって、温暖化防止政策の必要性や正当性を意味付けることができる。第四に、あるレベルに温暖化をくい止めようとしたら、いかなる政策をどのようなタイミングで導入すべきかを提案した「政策シナリオ」が必要である。政策決定者に与え

られたそもそもその役割は、このシナリオをつくることである。そして第五に、この政策シナリオが実施された場合にマクロ経済影響などの社会経済的負担がどの程度増えるかを推計した「費用負担シナリオ」である。政策の実現可能性を判断するためには、このシナリオが不可欠である。

以上のシナリオについて、今までに多種多様なものが描かれてきた。これらのシナリオのうち、まず、本論文の目的である地球温暖化見通しの分析のために、今までに提案された前提シナリオを詳細に分析して、シミュレーションの入力条件の変動幅を設定する根拠にする。次いで、残りの四種類のシナリオの概要を整理して、わ

### (1) 湿暖化分析の前提シナリオ

来世紀に予想される地球温暖化の主な原因是、化石燃料消費を中心とした人為活動による温室効果ガスの排出活動であり、その大気中での濃度上昇が温暖化をもたらすとの認識は、現在、ある程度のコンセンサスを得られている。これを基本とするならば、前提シナリオの内でもっとも重要な役割を果たすのは、(1)エネルギー消費及びそれに伴う温室効果ガス発生のシナリオである。ついで、他の活動である(2)フロン・ハロンの消費／排出、(3)土地利用転換に伴う温室効果ガスの発生活動、(4)廃棄物埋立・水処理からのメタン・亜酸化窒素の発生活動、(5)セメント生産からの二酸化炭素の発生活動及び(6)農畜業からの温室効果ガス排出活動などを考慮する必要があるが、(1)に比べればそれほど大きいものではない。これらの温室効果ガス排出行動とその将来動向は、各地域、地域の人口あるいは経済活動の程度と深く結びついており、これらをどのように想定するかが、シナリオ設定の根幹となる。

さらに、こうした人為活動と温室効果ガス排出の間に  
は、エネルギー効率、サービス効率あるいは排出原単位  
などのパラメーターにより集約・表現される技術、ライ  
フスタイルなどが関与し、これはどう見積もるかも重要  
な課題となる。もっとも影響度が大きいエネルギー部門  
に即して言えば、一次エネルギー量からエンドユーズ段  
階のエネルギーサービス量に至る間の各種転換係数と、  
それに伴う温室効果ガス排出原単位が問題となる。特に、  
エネルギーの潜在的需要の算出及びこれから二次エネルギー  
需要量への転換操作と、その将来動向は、本問題で  
扱っているような超長期にわたるエネルギー消費の将来  
見通しを得る際に、不確定性が入るもっとも大きな要素  
である。この部分に関し、しばしば用いられている方法  
では、エネルギーサービス及び技術的エネルギー効率の  
経時的改善度を、年率で表現する。これを、AEEI  
(autonomous energy efficiency improvements) と称  
する。エネルギーサービス需要に対する所得効果あるい

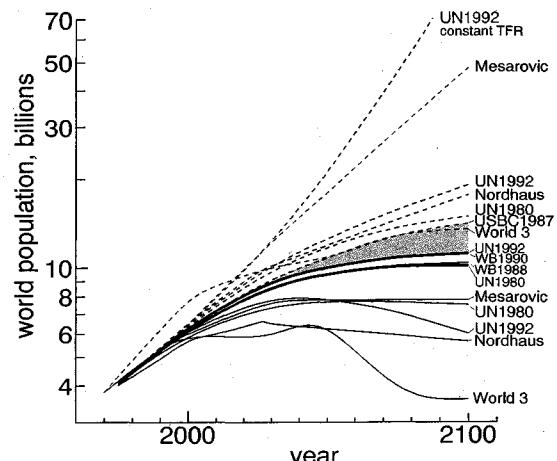


図-1 世界人口の将来推定  
破線は、高位側の推計／設定値、実線は低位側の推計／  
設定値。  
トーンは、本論文での設定幅を示す。

はエネルギー価格効果を、あらかじめ弹性値表現して排除するため、このように呼ばれている。このAEEIも、前提シナリオ中での重要なパラメーターであるが、実態は不明瞭であり、通常、設定値の妥当性を主張することは困難である。

その他、太陽エネルギー、バイオマスエネルギーなど新エネルギーの導入をどのように設定するかなども、前提シナリオの重要な要素である。ただし、本論文では、紙幅の都合上、こうした新エネルギーの積極的な導入はしない場合を想定しよう。そして、以下、順に人口、経済成長、技術改良（AEEI）に焦点をあて、その設定幅をさぐってみよう。

まず、人口に関し、現在までに算定あるいは使用されてきた世界人口の見通しを示してみると、図-1のようになる。図中、破線は、高位側の推計／設定値として提唱されたもの、実線は低位側の推計／設定値として提唱されているものである。現時点での50億人程度を出発点として、2100年には36億人（World 3モデル設定値）から1094億人（UN1992）にいたる非常に広い幅をもつ。極端に大きい値をもつ国連計算値（UN1992）は、2000年初頭でのTFR（合計特殊出生率、女子が生涯に生む子供数の平均値）がそのまま継続すると想定した場合である。次に大きい値を示すメサロビッチの高位側設定値は、現在の人口増加率が将来にわたっても変化しないと想定する場合である。これらは、見通しと言うよりも、思考実験的な値と考えてよい。また、最低位である2100年人口36億人シナリオはローマクラブによる計算であり、環境汚染による死亡率増加の結果であり、想定シナリオとしては妥当ではない。これらを除去して検討するならば、2100年人口は56.6億人（Nordhaus, 1983）

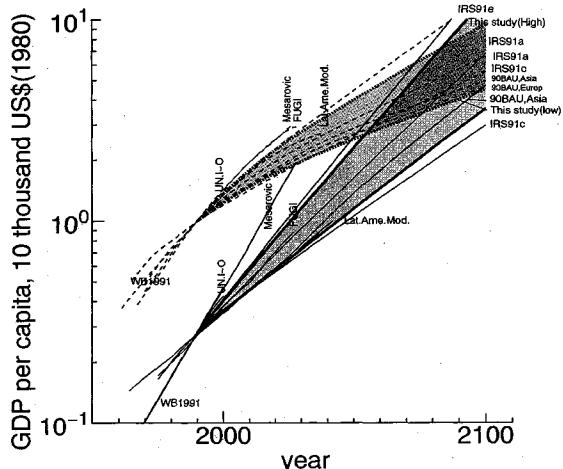


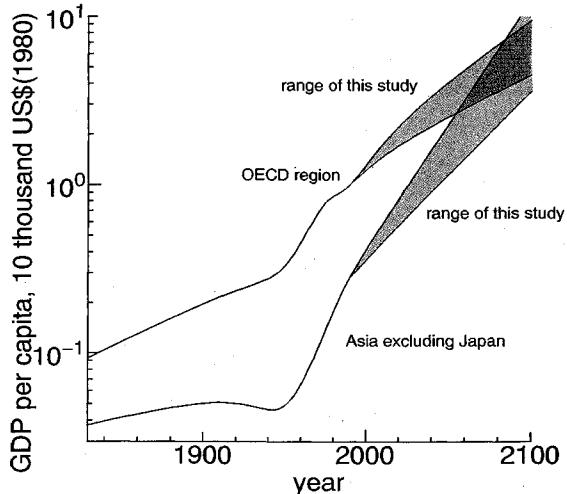
図-2 経済成長の見込み

破線は OECD を、実線はわが国を除く南・東アジアを示す。  
トーンは、本論文での設定幅を示す。

から 191.6 億人 (UN1992) となる。最高位値は TFR 安定値を 2.5 人とシコホートモデルから算出したものであり、最低位値は TFR をほぼ 1.7 人程度としたものに相当する。

これらの数値は、わが国に即していえば、それぞれ昭和 20 年代後半及び昭和 60 年代の出産力に相当し、将来可能性が十分ある値である。しかし、高位推定の場合、2150 年に 280 億人にも達し、その蓋然性には疑問が提出されている。また、低位シナリオのような人口減少等を伴う人口政策に関しては、老齢社会化などの社会的歪が大きな問題点として指摘されており、実現性は高くなないと推定される。これらの状況から考えて、実際に、問題となる範囲としては、最終的な TFR が人口置き換え水準である 2.1 人となる時期を、比較的、早期に見積もった世界銀行による 1990 年推計 (WB1990, Bulatao ら, 1990) と、その時期を遅く見積もった米国センサス局 1987 年推計 (USBC1987) 程度であろう。両者は、来世紀初頭までは大変似かよった軌跡を示すが、その後離れていく。WB 1990 の場合、途上国を含めた世界各国の純再生産率が 2040 年頃までには 1 になると想定し、USBC 1987 では、それを来々世紀であると想定する。2100 年人口は、WB 1990 では 113 億人であり、USBC 1987 では、135 億人である。

経済成長の見込みに関し、図-2 に既往の推定値を示す。図中、破線は OECD 諸国を、実線はわが国を除く南・東アジアの一人あたりの GDP を示す。90 BAU とは、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が 1990 年に公表したシナリオ (RSWG, 1990) にて Business as Usual として設定したもの、IRS 91 とは、同じく IPCC が、1991 年に行った温室効果ガス排出量見直し

図-3 本論文で設定した経済成長の見込みと過去のトレンド  
トーンは、本論文での設定幅を示す。

作業にて、各国からの報告をもとに設定し直したものであり、IRS 91 a を標準とする。これによれば、来世紀初頭までの経済成長率を、OECD 地域にて年率 2.5 %、途上国にて 4.1 %、世界全体で 2.9 % とし、その後、0.8~1.4 % 低下するとしている。その他の線分は、他の世界モデルなどでの設定値あるいは計算値である。先進国地域に比べ、途上国地域には高い成長率を設定するが、2100 年までには、東・南アジア地域を除き、途上国地域が先進国地域に追い付くとは設定しないのが通常である。図中のトーン部は、IRS 91 a で設定された成長率を  $\pm 20\%$  した場合の範囲であり、従来の推定値をほぼ含む。ただし、最近の世界銀行による 1990 年台の経済成長見通し幅 (World Bank, 1991) と比較してみると若干低めとなる。また、図-3 は、IRS 91 a  $\pm 20\%$  幅を過去のトレンドとともに描いたものであるが、やはり低めとなっている。すなわち、現在まで、20 世紀後半に見られた急速な経済成長は、今後、安定化の方向に向かうとの想定が一般的である。

人口成長及び経済成長の設定において、注意しなければならないのは、両者の相関性である。途上国地域における人口成長率、特に出生率の低下は、貯蓄を増加させ資本形成を促進させる。その結果、生産性が増大し経済成長を進展させる。現在、特に南アジア地域などでは、国レベルの発展シナリオの策定にあたり、このメカニズムに強い关心と興味をよせており、それを取り込んだモデル開発あるいはシナリオ策定努力も盛んに行われている (Bilsborrow, 1989)。ただし、本論文の範囲では、もっぱら議論簡潔化の理由から、両者は独立として取り扱うことにしてしよう。

AEEI に関し、最近のいくつかの代表的なエネルギー

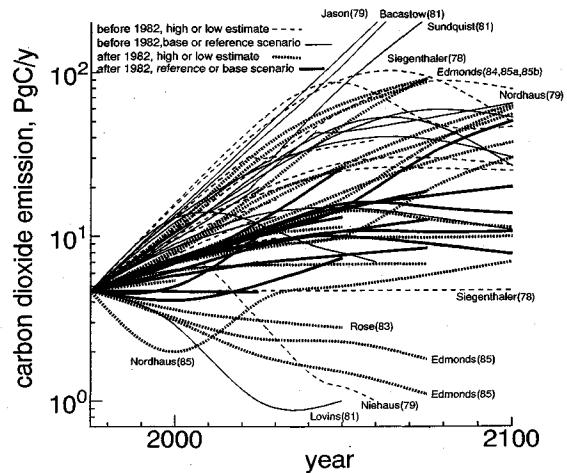
表一 既往のモデルにおける AEEI の設定

modelers	AEEI
from global energy models	
Edmonds and Reilly (1991)	0.5-1.0 % per year
Manne and Richels (1990)	0.0-1.0 % per year
IEA(1991)	1.1 % per year at OECD
GREEN(1991)	1.0 % per year
IPCC(1990) <sup>\$</sup>	0.16 % per year at USA (Lower Growth Scenario) 0.46 % per year at USA (Higher Growth Scenario)
from feasibility studies of energy efficient scenario	
Lovins et al. <sup>\$</sup> (1981)	1.12 % per year at developed countries 1.53 % per year at developing countries
Gordemberg et al. <sup>\$</sup> (1988)	2.85 % per year at developed countries 1.40 % per year at developing countries
\$ estimated	

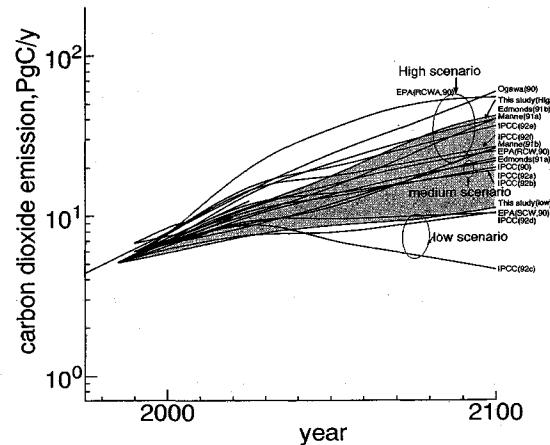
モデルでの設定を、表一に示す。省エネルギーに強い配慮を行わない場合には、年率0~0.5%程度、行つた場合は年率1.0%程度としている。規範的な省エネルギーシナリオでは、どの程度か。例えば、Lovinsら(1981)のシナリオでは、1975年から2080年の間に、一人あたりの一次エネルギー消費量を、先進国地域では約22%に、途上国では50%に削減している。Gordembergら(1988)のシナリオでは、1980年から2020年の間に、先進国地域では一人あたりのエネルギー消費量を50%に、途上国地域では110%程度に抑えると想定する。これらのシナリオのAEEIを、予測期間でのエネルギー価格及び一人あたりGDP成長率を勘案して逆算してみると、年率1.1~2.9%程度になる。Gordembergシナリオの場合、計画期間が40年と比較的短く、計画完了期以降でのいっそうの省エネルギーがかなり困難になっていること等を考えると、年率2%台を長期にわたり継続することの可能性は高くなからう。従って、これを除けばAEEIは、年率0~1.5%程度の幅を想定することができる。ただし、その程度は、エネルギー消費部門あるいは地域によって大きく異なることが想定される。

## (2) 温暖化シナリオと影響シナリオ

人口、経済成長、技術改良など、温室効果ガス排出活動を推定する上での前提が設定されたならば、これらの



図一 化石燃料消費起源の二酸化炭素排出量見込み  
1985年以前の公表値。  
1 PgC=10億tC



図一 化石燃料消費起源の二酸化炭素排出量見込み  
近年の公表値。  
トーンは、本論文での計算幅を示す。

積み上げにより温室効果ガスの排出量を求ることになる。

化石燃料消費起源を中心とした二酸化炭素排出量の将来推定は、以前から繰り返し行われてきた。それらのうち、図一4は、1985年以前の報告値を示したものである。2050年段階にて10億tC/年から1000億tC/年までの100倍にもわたる差異が生じている。図中で、実線はレフランシシナリオとか、ベースシナリオとかと称されるものである。また、太線は、1983年~1985年に公表されたものであるが、1983年以降のものはそれ以前のものにくらべ比較的まとまりも良く、また、やや低めの推定を行っている。これは、1979~1980年の第2次石油危機を背景とした省エネルギー意識の高揚に関連すると考えられる。さらに、図一5には、最近の推定例を示すが、地球温暖化問題の高まりと情報普及を背景に、よ

りまとまった推定幅を示すようになっている。なお、この図のトーン部は、第4章での高位及び低位標準シナリオで挟まれる領域である。

大気中に放出された温室効果ガスは、移流、反応などの作用を受け、大気、海洋内を循環する。二酸化炭素以外のガスは、主に大気中での化学反応により減衰し、また二酸化炭素は、海洋へ取り込まれていく。ここで、もっとも問題となる部分は、二酸化炭素のミッシングシンクの取り扱いである。ミッシングシンク量とは、人為起源排出量、海洋取り込み量及び大気残留量の収支残差として算定されるものであるが、その大きさは10~20億tC/年（人為的二酸化炭素発生量の15~30%）程度と考えられている。最近のいくつかの報告（例えばTansら、1990）はその実体として、北半球を中心とした大陸植生への吸収を示唆するが、河川、降水を通じての炭素移動に起因させる報告（Sarimentoら、1992）もなされている。現状でもこのような混乱が見られ、将来挙動に関してはまったく不明である。このような地球内炭素循環構造に関する不明性は、将来見通しの不確定性の原因となる。

大気中の温室効果ガス濃度上昇は、気温上昇をもたらすが、これに関しても少なからず問題点がある。いま、仮に、地球全体の平均気温のみを取り扱い、それを温暖化の尺度とする場合を想定しよう。このときにもっとも重要な量は、温室効果ガス濃度上昇による地球平均温度の上昇値であり、通常、二酸化炭素濃度倍増時の平衡時での気温上昇値（以下、気候感度と称する）で表す。この気候感度の大きさあるいは信頼度は、地球温暖化をめぐる論争の一つの中心である。温度上昇に伴う水蒸気量変化、雪氷量変化、雲量変化などの地球物理学的なフィードバックを考慮しない場合にこの値を算出することは簡単であり、ほぼ $1.3^{\circ}\text{C}$ となる。これに、各種のフィードバック現象が上乗せされ、気候感度値が求められる。この作業には、もっぱら大循環モデル（GCM）を用いる。ただし、現在のGCM計算で取り上げられるフィードバック現象は、上に示した地球物理学的なフィードバックに終始し、下に触れる地球生物、化学的あるいは社会経済的なメカニズムによるフィードバックを含めないのが普通である。

既往の気候感度報告値のちらばりを、図-6に示す。横軸に気候感度を、縦軸に報告値の累積頻度を示したもので、 $1.7\sim 5.2^{\circ}\text{C}$ の範囲を示す。このうち、下線で示したものは、モデリング中、特に問題となるミクロ雲物理過程を取り込んだものであり、比較的小さい気候感度を示す。気候感度の推定幅として、米国科学アカデミー（U.S. National Academy of Sciences, 1979）は1979年に $3 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ としたが、この範囲は、最近のIPCC報告（IPCC, 1992）でも追認されている。

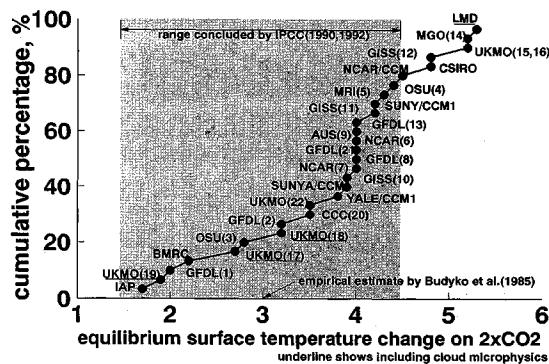


図-6 大気循環モデルの平衡計算を中心とした気候感度の報告値の累積頻度  
図中には研究機関名及びIPCCエントリー番号が記されている。  
トーン部は、IPCCが推定した範囲である。

温暖化に伴う地球生物、化学的あるいは社会経済的なフィードバック現象には、数々のものが上げられる。例えば、二酸化炭素上昇による植物の一次生産量増加とそれに起因する二酸化炭素吸収量の増加、温度上昇による湿地帯あるいは水田からのメタン発生量の増大、あるいは、大陸棚、ツンドラ地帯に貯蔵されているメタン水和物の不安定化などを上げることが出来る。これらのフィードバック挙動に対する推測は、信頼性はともかく不可能ではない。しかし、気候変動に起因する海洋循環あるいは海洋プランクトン生態系への攪乱とそのフィードバック効果などに関しては、その向きについてすら、定かではない。

このように、気候変動は、さまざまな機構を通じフィードバックをもたらすと推測される。しかるにそれらは不明性が高く、IPCCなどが行っている将来見通し算定作業においても、考慮されていない。しかし、温暖化シナリオを策定するにあたり、こうしたメカニズムの存在と効果がどの程度のものかを予知しておくことは不可欠である。

温暖化に伴う温室効果ガス発生機構を通じてのフィードバックとして、比較的よく知られたものとしては、1)二酸化炭素濃度増大による陸上生態系の一次生産量増大、2)気温上昇による陸上生態系の炭素保有量変化、3)気温上昇による湿地帯からのメタンガス発生量増加、4)気温上昇による大陸棚などのメタン水和物不安定化などがある。そこで、これらについて、概略的なオーダー評価を行ってみよう。

1)の陸上生態系の一次生産量増加に関しては、個々の種での短期的な影響について、いくつかの検討がなされている。例えば、図-7は、純一次生産量（NPP）増加と二酸化炭素濃度増加の比（ $\beta$ 係数）に関する報告値の累積頻度を示したものである。しかし、こうした実

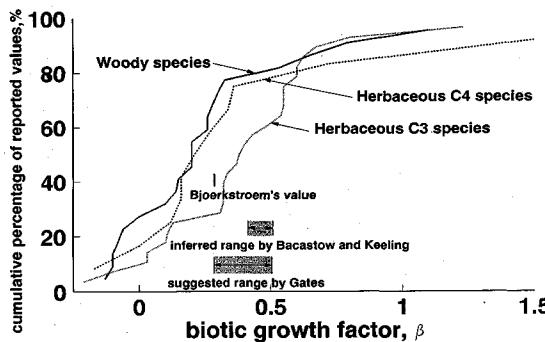


図-7 純一次生産量(NPP)増加と二酸化炭素濃度増大の比( $\beta$ 係数)に関する報告値の累積頻度

験室レベルの植物応答に関する情報を長期的に、地球規模に積み上げるには不明点が多い。さらに、NPP増加量を見積もることが出来ても、それに対する生態系バイオマス量増加がどの程度かを推定する必要がある。これらに関するとりあえずの見通しとして、前者に關し、Gates (1985)は地球規模の生物圏のシミュレーションのレビューから、 $\beta=0.25\sim0.5$ とした。また、後者について、Shugart (1984)はいくつかの森林動態シミュレーションの経験から、植物バイオマスへの効果を0.2~0.6程度と言う。これらを根拠とし、Lashof (1989)は両係数の中間値を採用して、二酸化炭素濃度倍増による陸上植物生態系の炭素貯蔵量増加を、 $0.375 \times 0.4 = 0.15$ 、すなわち15%増と見積もった。現状での陸上植物生態系の炭素量は、6000億tC程度と考えられているから、二酸化炭素濃度倍増、すなわち、280 ppmvの濃度増加で $6000 \times 0.15 = 900$ 億tCの取り込みがあることになる。ただし、このような二酸化炭素肥沃化効果が自然界にて、実際にかつ長期間発現するのか、また、陸上バイオマス量増加による土中炭素量の増加を、どの程度、見込めばよいかなど解明すべき点は多い。

2)の気温変化による生態系炭素保有量変化に関する不明な点は多い。気候変化による炭素保有量変化を算定するために、Emmanuelら (1985)はGCMの計算結果から、Holdridgeの生態系地域区分を用い、二酸化炭素倍増時での温度上昇による生態系変化推定を試みた。また、Lashof (1987)は、3種のGCM結果(気候感度3.5~4.2度)を用い、Olsonの植生区分から生態系保有炭素量変化的算定を行っている。その他、現在にいたるまでに、Solomon (1986)、Woodwell (1986)などいくつかの報告があるが、これらを総合すると $1^{\circ}\text{C}$ の気温上昇によって生態系から、 $0\sim15$ 億tC/年程度の放出があると推定できる。ただ、これらの例は、いずれも上昇速度が遅く、生態系遷移が円滑に行われる場合を想定しているが、上昇速度が急激な場合には、生態系の

破壊による上記算定値を上回る排出量も想定される。しかし、その定量的検討例はない。

湿地帯からの土壤細菌によるメタン放出は、現在のところ1.1億tCH<sub>4</sub>/年程度と考えられているが、この量は気温変化、水分量変化によりかなり増加することが考えられる。まず、土中水分量変化の影響については、現在のGCM結果の地域規模の精度が極めて低いこともあって、地球規模への積み上げは困難である。そこで、沼澤・湿地帯分布あるいは水分量状況の変化を考慮せず、温度効果のみを考慮するならば、ある程度の推測は可能となる。すなわち、現状の沼澤からのメタン放出の地域分布としてMatthews (1989)による1度メッシュデータを用い、温度上昇パターンとしてGISS(気候感度 $4.2^{\circ}\text{C}$ )、GFDL(気候感度 $4.0^{\circ}\text{C}$ )及びUKMO(気候感度 $5.2^{\circ}\text{C}$ )の3種の大気循環モデル平衡時計算結果(Joseph, 1991)を使用し、温度依存性を $Q_{10}$ 表示で3.0、氷点以上の気温時にメタン放出があるとして、地球平均気温 $1^{\circ}\text{C}$ 上昇時の放出量増加値を求めてみると、それぞれ、0.20, 0.28, 0.12億tCH<sub>4</sub>/(年·°C)となった。Lashof (1989)は、線度帶別の比較的荒い計算から、0.12億tCH<sub>4</sub>との結果を得ており、ほぼ同じ範囲にある。湿地帯以外に、水田からのメタン放出にも同様なフィードバック効果が想定されるが、温度上昇幅が小さい低緯度地帯が主対象地域であること、温度以外の厳しい制約条件が考えられることなどの理由からここでは取り扱わないこととする。

大陸棚、永久凍土に埋蔵されるメタン水和物が、気温上昇により不安定化し、大気中に大量に放出されるとの懸念は、Bell (1982)、MacDonald (1983)、Revelle (1983)など多くの研究者により指摘されてきた。Revelle (1983)の試算によれば、大気中の二酸化炭素倍増時における不安定化が原因となって排出されるメタンは、年6.4億tCH<sub>4</sub>にもなり、Chamberlainら (1983)によれば、900億tCH<sub>4</sub>が数十年間にわたり排出されると言う。しかるに、近年では、こうした80年代前半に提唱された値は過大であると考えられるようになった(Kvenvolden, 1988)。Lashof (1989)は、Revelle (1983)、Kvenvolden (1988)などを参考とし、海底面での温度 $1^{\circ}\text{C}$ 上昇が年2.2億tCH<sub>4</sub>の排出をもたらすとの試算値を報告しているが、最近のMacDonald (1990)の検討に比べればやや大きい。

以上の例の他に、数多くのフィードバック機構が示唆されている。植生アルベード変化、海洋循環・海洋プランクトン生態系への攪乱とそれによる二酸化炭素、熱量吸収速度の変化は、将来の気候を大きく変化させるとの示唆も多い。不明さと比例するかのようにフィードバック感度も高くなりがちである。Broecker (1987)、Lehmanら (1992)は、気候変化が引き金となる北大西洋

を中心とする海洋循環変化と、それによるヨーロッパ地域の急激な気候ジャンプの可能性を示唆しているが、その場合には、全世界への影響もまぬがれないであろう。その他、海洋プランクトン生態系のジメチルサルファイド (Charlson ら, 1987), 鉄 (Martin, 1990) などの物質代謝過程への擾乱が、海洋への二酸化炭素吸収速度を大きく変化するとの推測もある。しかるに、現在のところ、こうした推測を地球規模に積み上げ、その効果範囲を判断するには、不明な点が多くすぎる。

次に、影響シナリオについては、温暖化シナリオに比べて研究が大きく遅れている。これは、温暖化シナリオ自体が多くの不確定要因を含んでいる上に、地域レベルの詳細な気候変化を予測することが大変難しいことによる。しかしながら、今までに一定の気候変化を仮定して、定性的な分析を中心に種々の影響シナリオが描かれてきた。これらの異なった前提と方法論により独立に行われてきた研究成果にもとづいて、IPCC の第二作業部会では、1990年に影響予測の報告書（西岡ら, 1992）をとりまとめた。影響シナリオに関する研究は、政策的重要性から、現在、勢力的に行われつつあるが（例えば、Parry ら, 1992），紙幅の都合上、この論文では、ふれないこととする。

### (3) 政策シナリオ及び費用負担シナリオ

地球温暖化を防止するための政策シナリオについては、今までに数多く提案されている。このシナリオは、通常、政策、手段及び技術の三つのオプションを組合せてこれらの導入の時間的スケジュールとともに提案される。政策オプションとは各種施策の方針であり、フロンガスの生産・利用の抑制、自動車排ガスの規制、自動車燃費の改善、発電の効率化、太陽エネルギー・バイオマスエネルギーへの転換、水田や廃棄物埋立地のメタンガスの抑制などによって温室効果ガスを減少させる政策の他に、植林によって二酸化炭素を吸収する政策など、多種多様なものがある。一方、手段オプションとは政策を実現するための方途であり、排ガス規制や土地利用規制のような直接規制の手段、課徴金や汚染税、汚染権取引制度のような市場メカニズムを活用した手段、補助金や開発援助などの財政的手段、啓蒙、教育、訓練などの情報・教育的手段、環境アセスメントや計画、市民参加といった計画的手段がある。これらの手段は一般化・体系化され「制度」として定着することが多い。また、技術のオプションには、自動車排ガス抑制のための触媒技術、バイオマス・エネルギー利用の促進のためのバイオマス・ガス化技術、二酸化炭素固定化技術など数多くある。

このような政策、手段及び技術を組み合わせた最初の本格的な政策シナリオは、1989年の2月に米国環境保護庁の政策オプションレポートによって提案された（Lashof ら, 1990）。このレポートでは、来世紀中に温

暖化を止めるためには、単一の対策では無理で、いろいろな対策を組み合わせて導入することが必要であることが主張された。そして、排ガス規制、省エネ、化石燃料の消費に対する課税、太陽エネルギー技術の開発、バイオマスの商業化、原子力の利用などを組み合わせて総合的に二酸化炭素排出抑制を図り、これに加えて植林やバイオマスの大規模栽培による二酸化炭素の吸収策、農業生産方式の改善や廃棄物の減少によるメタンガスの抑制策、さらにはフロンガスの規制策も組み合わせて導入すべきとした。また、1989年に68カ国が参加して開かれたオランダ環境大臣会議でも、温室効果ガスの抑制と熱帯林の植林・保全がセットで検討され、具体的な目標が宣言された（McKinsey and Company, 1989）。さらに、1990年2月の米国国務省主催の非公式セミナーでも、温暖化防止のための総合的アプローチが提案され、温室効果ガス全体について多様な削減方策を組み合わせる方向を打ち出している（The Task Force on the Comprehensive Approach to Climate Change, 1991）。一方、わが国でも1991年になって「地球気候安定化に向けた総合戦略：COSMO プランーI」と題して、26の個別政策プログラムからなる総合的な政策シナリオが提案された（森田, 1990a）。このプログラムのうち、都市構造、ライフスタイル、産業構造等の社会経済システムの基本構造を変革するプログラムについて、最近、COSMO プランーIIとして新たな提案も出されている（西岡・森田, 1992）。また、1990年の10月にはわが国の政府の政策シナリオとして「地球温暖化防止行動計画」が策定され、わが国の二酸化炭素排出抑制目標とともに目標達成のための各種指針が定められた。さらに、1990年の10月にはIPCCの最終報告がまとまり、総合的な対応戦略とその実施メカニズムが提案され（霞が関地球温暖化問題研究会編訳, 1991），これを受け、1992年6月の地球温暖化枠組条約における政策シナリオの検討へつながってきている。

さて、以上のような広範囲の政策シナリオのうち、本論文では経済的手段の一つである「炭素税」に焦点を当てて検討する。炭素税とは、温室効果ガスの中でも最も排出量が多い二酸化炭素を対象にして、二酸化炭素の排出量に応じて税金を課すことにより、市場メカニズムを通じて効率的な抑制を図るものである（森田, 1990b）。炭素税は、今までに最も検討が進んでいる手段であり、スウェーデンやノルウェーなどでは既にこの税を導入している（Morita, 1992）。以下のシミュレーションではこの炭素税を政策シナリオとして検討するため、この税の効果や費用について、今までの研究をレビューする。

炭素税の導入及びそれによる世界経済への影響については、今までにいくつかの定量的シナリオが描かれている。そして、炭素税の効果やマクロ経済影響を予測する

ために、既に 10 以上の数量モデルが開発されている。これらのモデルを使った予測では、炭素税の税率に大きな幅があり、炭素税の導入による世界の経済成長率の低下も年率 0.3~0.5 % との悲観的なシナリオから、低下したとしても 0.01 % 以下であるとする楽観的なシナリオまでさまざまある (OECD, 1991)。これらの予測結果は、予測の前提シナリオが異なったりモデルの構造が異なるため、単純に比較することができない。そこで、1991 年から経済協力開発機構 (OECD) が中心となって、同じ前提シナリオの下で世界経済モデルの比較研究が進んでいる。

OECD の比較研究に参加したモデルは 5 つある。まず、Mann ら (1991) の開発した Mann-Richel モデルは詳細なエネルギー部門をもつ動学的最適化モデルである。パックストップ技術を含めてエネルギーを 9 種に分類し、将来の予想をベースにした最適化行動をモデル化している。世界を 5 地域に分類し、石油のみ貿易可能にしている。予測期間は 2095 年までと超長期である。

次に、Edmonds-Reilly モデル (Barns et al, 1991) は、詳細なエネルギー部門をもつ部分均衡型シミュレーションモデルであり、一次エネルギーを 6 種、二次エネルギーを 4 種に分けている。世界は 9 つの地域に分割され、化石燃料は貿易可能で、世界的な需給均衡により価格が決定される。エネルギー部門とマクロ経済のリンクは極めて単純な構造である。2100 年までを予測対象期間としている。

一方、OECD は独自のインハウスモデルを開発中であり、GREEN と呼ばれている (Burniaux ら, 1991)。これは、逐次型動学的一般均衡モデルで、一次エネルギーを 4 種、二次エネルギーを 2 種に分類している。世界を 9 地域に分割して、完全な貿易リンクをもち、交易条件変化の影響も考慮される。国際間で排出権売買ができるようモデル化されている。予測期間は 2020 年までである。

また、Whalley と Whigle (1991) は、比較静学的一般均衡モデルにより分析を試みている。このモデルはエネルギーが 2 種類のみで、6 つに分割した地域の間で貿易もモデル化している。全地域で共通の炭素税を課し、課税の国際的帰着を分析することを主たる目的としている。1990 年から 2100 年の 110 年間を一期とするため途中の過程の分析はできない。

以上は、いずれも長期予測モデルであるが、国際エネルギー機関 (IEA) のモデル (IEA, 1991) だけは、2005 年までの中期をターゲットとしたいわゆる計量経済モデルである。OECD 諸国のみを対象に 10 地域に分割して、詳細なエネルギー部門をもつ。エネルギーの分類は 5 種であるが、製品の細目も多い。なお、マクロ経済とのフィードバックはない。

これらの 5 つのモデルを用いて、人口増加率、経済成長率及び資源賦存量に関して同じ前提シナリオを与えたシミュレーションにより、標準ケースの二酸化炭素排出量の伸びを予測し、次いで、この二酸化炭素排出量の伸び率を年当たり 1 %, 2 %, 3 % 低下させる場合の炭素税の率と GNP の減少率が求められた。図一 8 及び図一 9 には 2 % 低下させるケースの予測結果が、二酸化炭素排出量の削減率と炭素税との関係、並びに、炭素税と GNP の減少率との関係を表すグラフにして示してある。二酸化炭素排出量増加率を、2 % 削減するということは、二酸化炭素排出量を現状レベルで安定化させるか、あるいは少し削減することを意味する政策シナリオである。なお、これらの図には、後で紹介するわれわれのシミュレーション (AIM) の結果についても併せて載せている。

二酸化炭素排出量増加率を 2 % 削減するために、炭素税は 1 炭素トン当たり 2000 年で 97~388 米ドル、2020 年で 283~332 米ドルを課するという政策シナリオとなる。また、この課税に伴う費用負担シナリオは、標準ケースの GNP と比較して、2000 年 0.3~3.7 %, 2020 年で 1.2~1.9 % のロスが生じるという予測結果が出ている。グラフでみると炭素税の効果と経済影響に関して一定の関係が見られるものの、かなりのバラツキも見られる。

OECD における検討によれば、予測値が違ってくる主要な原因として四つの点をあげている。第一は、エネルギー利用効率改善度 (AEEI) に関する仮定で、これの違いにより標準ケースでの二酸化炭素排出量の伸びが大きな影響を受ける。第二は、クリーン・エネルギーを供給する技術 (パックストップ・テクノロジー) に関する仮定であり、第三は、要素代替の弾力性 (ESUB) の値である。いずれも炭素税の税率に直接影響を及ぼす。第四は、炭素税の収取の還元方法で、この還元をうまく行うことにより経済への影響を緩和することが可能である。

### 3. 本論文における地球温暖化に関するシナリオとケースの設定

第 2 章では、地球温暖化に関する前提シナリオと温暖化メカニズムの幅を示したが、本章では、それらを整理・補足しつつ、本論文の検討で設定したシナリオを中心に説明を行う。

まず、人口に関しては、低位側を世界銀行が 1990 年に推計した 2100 年で 113 億人となるシナリオとし、高位側を米国センサス局 (USBC) が推計した 2100 年で 135 億人となるシナリオとする。また、経済成長に関しては、IPCC (1992) が策定したシナリオを中心に、その成長率を 20 % 増及び 20 % 減したものと高位及び低

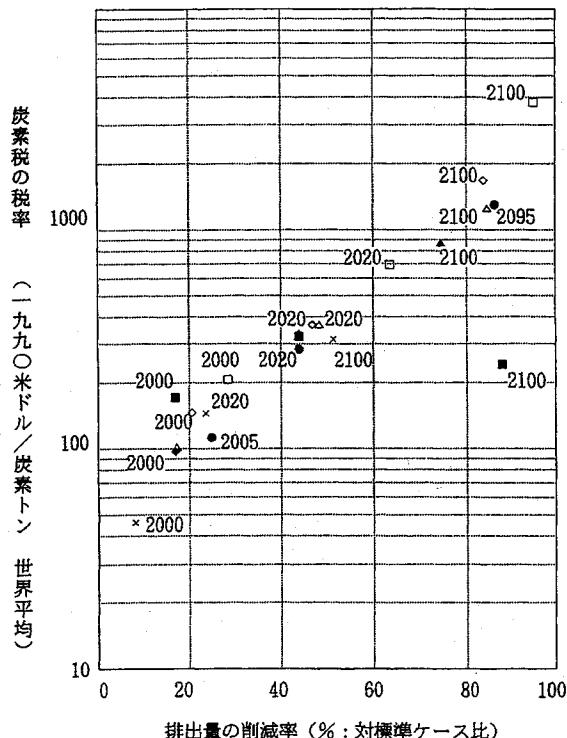


図-8 排出量の削減率と炭素税の税率との関係

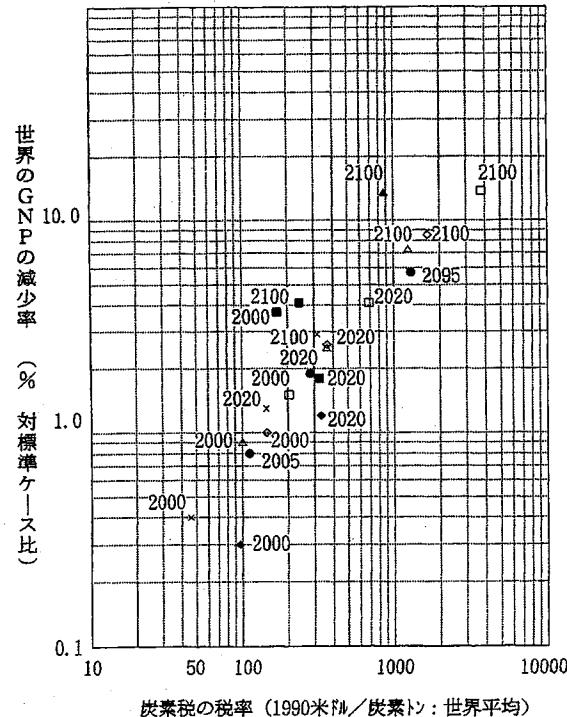


図-9 炭素税の税率とGNP減少率の関係

位とする。今世紀中の先進国の中の経済成長率は2%から3%となる。

エネルギー最終需要効率改善率(AEEI)に関しては、高効率化シナリオとして、米国環境保護庁(USEPA, 1990)が策定した急変化社会シナリオのベースとなったエネルギー需要を、低効率化シナリオとしては、緩変化社会シナリオのベースとなったエネルギー需要を基礎とする。これは、先進国地域についてはMintzer(1988)により、途上国については、Sathayeら(1988)によるエンドユース型の積み上げ値であり、AEEI値はこれから逆算して求めることにする。

フロン、ハロン等のオゾン層破壊に係わる温室効果ガスに関しては、モデルでは、10種を取り扱っている。このうち、規制物質であるCFC-11、CFC-12などの9種については、モントリオール議定書第2回締約国会合(1990年6月)での削減スケジュールをもとに、これへの先進国参加率を100%、途上国参加率を85%として策定した。また、過度的物質であるHCFC-22については、UNEPなどに報告されている消費量見通しから、今世紀中にて約4%/年程度、来世紀半ばまでは2.5%/年程度の増加があり、それ以後には一定となる

よう仮定した。フロン、ハロンに関しては、1992年11月に開催されるモントリオール議定書第4回締約国会合にて、より厳しい規制がなされる見込みであるが、本論文では、前記の規制スケジュールとし、シナリオ間で変わらない。

森林破壊を中心とする土地利用転換部門の前提シナリオとしては、人口増加を主因として推定されたアジア16カ国、アフリカ36カ国、ラテンアメリカ23カ国での森林量変化予測シナリオ(Houghton, 1990)を使用した。現状の森林消滅速度は指数的に増加し、来世紀半ばに3400万ha/年に達し、来世紀末には熱帯森林はほぼ消滅すると想定するものである。

その他、都市廃棄物埋立からのメタン発生、セメント生産工程からの二酸化炭素排出、農業活動からの各種の温室効果ガスの発生に関しては、人口成長、一人あたりGDP増加などから推定し、特に抑制対策を行わないものとする。

次に、温暖化機構に関するシナリオとしては、2.(2)で述べた気候感度及び各種フィードバックメカニズムを組み合わせ設定するものとする。

まず、ミッシングシンクに関しては、その実体及び将

来動向共に不明である。そこで、次の3つのシナリオを想定しその不明さに対応しよう。その1は、計算期間中シンク量を一定とし、1985年での値（14.3億tC／年）を採用するものである。これを標準とする。その2は、シンク量を大気濃度に比例させるものである。なんらかの負フィードバックを想定するものである。その3は、将来、このシンク量は期待できないと考えるものであり、例えば年率2%で減衰させるものである。

次に、気候感度に関しては、標準値を3°Cとし、低、高位値としては、これに1°Cの増減を加えた2°C、4°Cとする。

フィードバックメカニズムに関しては、2.(2)で取りまとめた5つの機構のオプションを準備する。その第一は、二酸化炭素による肥沃化効果である。これは負のフィードバック効果である。取り込み量は、CO<sub>2</sub>濃度に比例させ、濃度倍増時(280 ppmv增加)で900億tCとする。第二は気温上昇が原因となって、陸上生態系で貯蔵していた炭素を放出する効果である。2.(2)で示した幅はかなり広いが、ここでは仮に5億tC/(年°C)する。第三は、気温上昇に基づく土壤中のメタン細菌活動の活発化によるCH<sub>4</sub>排出量の増加である。これについては、2.(2)で求めた三数値の平均値である0.20億tCH<sub>4</sub>/(年・°C)を採用する。第四は、気温上昇によるメタン水和物不安定化の効果である。これに関する不明な点が多いが、とりあえず、地表気温1°Cの上昇により、Lashofの報告値の半分である1.1億tCH<sub>4</sub>/(年・°C)を採用しよう。

フィードバック機構に関する第五の例として、上に述べたメカニズムに比べれば確度は低いが、全く排除することもできないものとして、海洋表層温度の上昇値が産業革命前にくらべ、ある一定値、例えば2°Cを超えた場合に、海洋循環に大きな変化が生じ、二酸化炭素及び熱量の海洋吸収がシャットダウンされるとのオプションを用意しよう。

以上のシナリオ及びオプションを組み合わせ、本論文では下のようなケースを検討する。

まず、温室効果ガス排出に関する前提シナリオとして、人口、経済成長及びAEEIの各要素を組み合わせ、以下の標準ケースを作成する。この際、温室効果ガス抑制対策を取り立てて行うことはしない。

- (1) 高位標準シナリオ：高位人口シナリオ（米国センサス局推定、2100年135億人）+高位経済成長（IRS 91a 成長率20%増）+低効率化シナリオ
- (2) 低位標準シナリオ：低位人口シナリオ（1990年世界銀行推定、2100年113億人）+低位経済成長（IRS 91a 成長率20%減）+高効率化シナリオ

これに、温暖化抑制対策の例として、炭素税の導入を

行い、二酸化炭素排出量の安定化および削減を行うケースを想定する。排出量安定化ケースでは、1990年以降、排出量伸びを止めるような炭素税の賦課を行う。税率は世界一律とする。この場合、賦課率は前提シナリオに大きく依存する。標準ケースの二つのシナリオに対応した高位あるいは低位の賦課率とそれによるマクロ経済影響が算定される。排出量削減排出のケースとしては、来世紀末までに、大気二酸化炭素濃度の安定化を図ることを大略のメドとして、削減率を年率1%とした場合を想定しよう。基準年は1990年とする。この場合においても、標準ケースの二つのシナリオに対応し二つの賦課率とマクロ経済影響の経時の軌跡が算定される。

ミッシングシンク、フィードバックなどについては、検討を簡単にするために、標準的メカニズムを基本として、高位側、低位側に次の順番で機構付加を行うこととする。

まず、高位側には、(1)ミッシングシンク量の年率2%減少、(2)正のフィードバック機構、すなわち、陸上生態系代謝量増加、湿地帯からのメタン排出増加、水和物不安定化の付加、(3)海洋循環の変化、を順に加える。また、低位側には(4)ミッシングシンク量の大気濃度との比例仮定、(5)負のフィードバック機構、すなわち、二酸化炭素による肥沃化効果、を順に加えることとする。

#### 4. シミュレーションによる温暖化及び政策シナリオの分析

##### (1) 検討に使用したモデルの概要

本検討には、著者らが開発中のシミュレーション・モデル（アジア太平洋地域温暖化対策分析総合モデル：AIM）を用いた。このモデルは、主にアジア太平洋地域の温暖化防止対策を検討するために開発しているものであるが、世界規模の予測も可能なように世界モデルとリンクしている。この世界モデルには、米国環境保護庁で開発された大気安定化フレーム（ASF）を出発点として、これにいくつかのサブモジュール及び入力データを追加、置換あるいは更新したものを用いている（松岡、1990、Matsuoka, 1992）。世界の地域区分に関し、本論文で示すものは、エネルギー関連部門では9地域、他の部門では現象に応じて1ボックスから数十ボックス（地域）分けを行っている。計算対象期間は、原則として1985年から2100年であるが、炭素、熱循環などでは1830年から助走計算を行っている。また、対象とする温室効果関連ガスは、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、フロン・ハロンなど15種である。

AIMは、人為起源の温室効果ガス発生・吸収モジュール、自然起源の温室効果ガス発生モジュール、及び地球規模の温室効果ガス循環・温度上昇モジュール及び

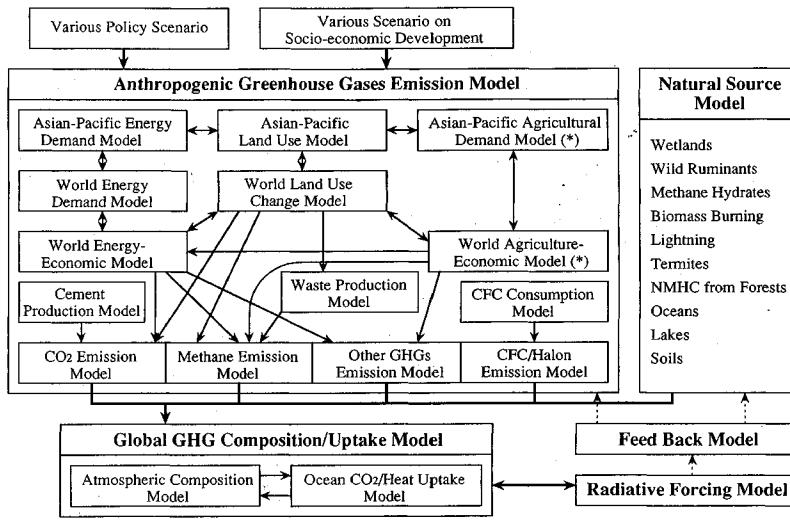


図-10 アジア太平洋地域温暖化対策分析総合モデル：AIM の概要

フィードバックモジュールから構成されている（図-10）。人為起源の温室効果ガス発生・吸収モジュールは、人口、経済成長及び資源ベースをシナリオとして与え、エネルギー・モデル、フロン・ハロン排出モデル、セメントCO<sub>2</sub>排出モデル、都市廃棄物からのメタン発生モデル、農業活動からの温室効果ガス排出モデル、土地利用変化からのCO<sub>2</sub>排出・吸収モデルなどから温室効果ガス排出総量を体系的に推計する仕組みになっている。人為起源の温室効果ガス発生部門の中核をなすエネルギー・モデルは、エネルギー需給に関する部分均衡型モデルであるエドモンズ・ライリー・モデル（Edmondsら, 1983）を基本にして、エンドユーズ・モデルとの結合、資源供給のより実際的なモデル化、エネルギー消費部門の精細化、エネルギー機器・資本のビンテージモデル化など大幅な改良を行っている。

大気中に放出された二酸化炭素以外の温室効果ガスは、化学反応などにより徐々に減衰する。モデルでは、対象となる化学種を、反応時間が比較的長いフロン、ハロンあるいはメタンのような長期種と、反応速度が大きいオゾン、水酸ラジカルなどの短期種とに分け、後者については擬平衡状態を想定する。その上で、対流圈でのOHラディカルが中心となるCH<sub>4</sub>等の酸化反応と光化学反応などを取り上げ、それらの反応速度と各化学種濃度変化の間を簡単な代数式で定式化している。

二酸化炭素の海洋吸収については、以下の検討では、ボックス拡散モデルを使用している。このモデルでは、全海洋を深さ100m程度の表面混合層と、その下、約1000mの深さの中層海洋に分割する。そして、大気から吸収された二酸化炭素は、無機炭素として表面混合層内に均質に混合し、かかる後に中層海洋に拡散していく

という機構を考える。CO<sub>2</sub>(aq)からHCO<sub>3</sub><sup>+</sup>あるいはCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>への解離は、全ほう酸量、アルカリ度、塩分量及び水温の影響を考慮しながら、化学平衡式を解くことによって求めている。大気反応あるいは海洋の二酸化炭素取り込みモデル中に出現する反応速度、CO<sub>2</sub>移動係数、鉛直拡散係数などの温度依存性は、モデル中に組み込んでおり、フィードバック効果の項としては取り上げないことにする。

温室効果ガス濃度の増加による增加放射加熱量の算出には、既往の放射対流モデルの計算結果などを参考として作成した回帰式を使用した。增加放射加熱量ΔQと上昇温度ΔTの関係は、次のような簡単な、地表面付近の熱収支式である

$$\Delta Q - \lambda \Delta T = F$$

を想定する。ここにFは海洋の熱吸収フラックスであり、λはフィードバック係数と呼ばれる定数である。λの値は、気候感度を3°Cとすれば、二酸化炭素倍増時(280 ppmvから560 ppmvを想定)のΔQを4.3 w/m<sup>2</sup>として、1.43 w/(m<sup>2</sup>·C)となる。Fは、二酸化炭素と同じくボックス拡散モデルで算定している。

## (2) シミュレーションによる検討

前提シナリオに基づき算定した化石燃料消費起源の二酸化炭素排出量を、図-11に示す。二つの標準シナリオのもとで二酸化炭素排出量を予測すると、2025年で1.4倍～2.4倍、2100年で2倍～7倍の範囲で増加する。その結果、2100年排出量は、高位標準シナリオの場合、397億tC/年に、低位標準シナリオの場合、112億tC/年となる。これを、既往の報告値と比較したものは、すでに、図-5に挙げている。近年の報告値幅とほぼ対応していることがわかる。

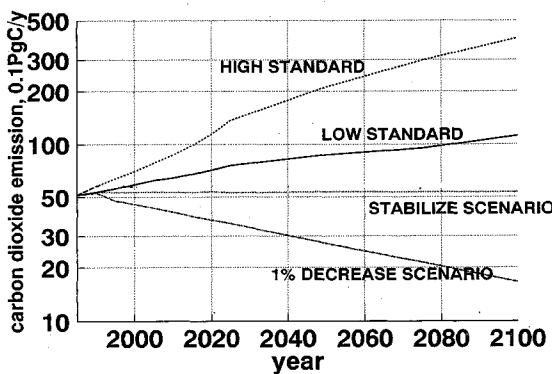


図-11 化石燃料消費起源の二酸化炭素排出量

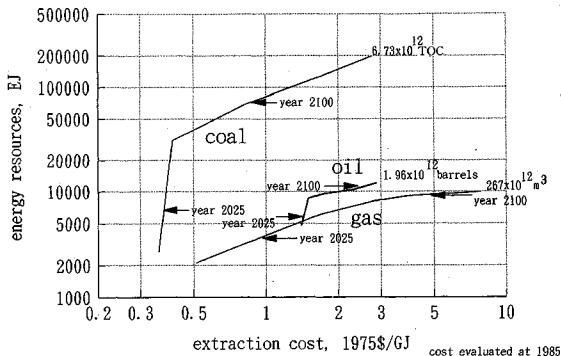
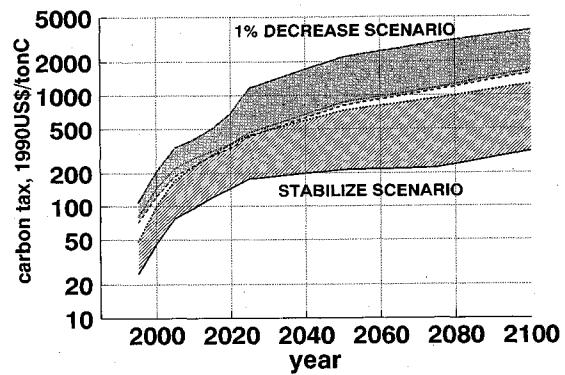
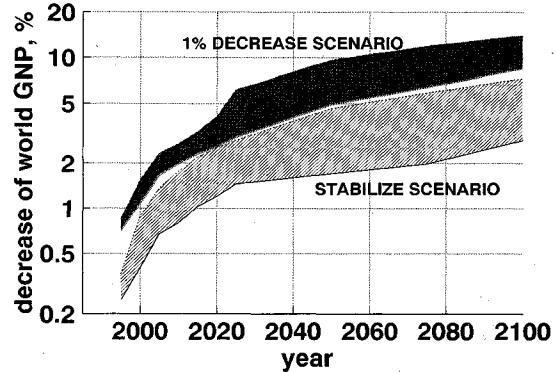


図-12 化石エネルギー資源の消費見通し

図-12は、高位標準シナリオにおける化石エネルギー資源消費の軌跡である。縦軸に資源量を、横軸に採掘コストを取った資源・コスト曲線上での、2025年及び2100年の位置を示したものであるが、本設定シナリオのような化石燃料消費を行ったとしても、石油及び天然ガスについては、来世紀の末までに経済的埋蔵量の大部分（90%程度）を消費するが、石炭については37%程度しか消費していない。すなわち、化石燃料の枯渇により地球温暖化問題が解決するという見込みは、この先百年は考えにくいことになる。

次に、炭素税の導入を図り、排出量安定化及び年率1%削減を行うケースについて、政策遂行に要する税率を図-13に示す。経時的に高率の賦課が必要となり、安定化ケースの場合、2025年で1炭素t当たり180米ドル～440米ドル、2100年で310米ドル～1250米ドルの範囲となる。また、これによる世界GNPの減少率を図-14に示すが、安定化ケースにて、2025年で1.5%～2.8%，2100年で2.8%～7.3%の範囲となる。ここに示した税率及びGNP影響の算定結果と他の世界モデルでの算定結果の比較は、すでに、図-9に示したが、それによれば、他のモデルによっても、ほぼ同様の結果を得るであろうことが推定される。以上から、排出量安定化を、炭素税による抑制対策により行う場合、高位標準で

図-13 炭素税税率の経時的变化  
トーン部は設定シナリオの差による幅である。図-14 世界GNPの減少率  
トーン部は設定シナリオの差による幅である。

あっても、潰滅的なマクロ経済影響をうけるとは、想定できない。

後に示すように、二酸化炭素排出量の安定化だけでは温暖化は止まらない。もっと厳しい対応が必要である。毎年1%を削減するシナリオでは、来世紀末に炭素税が1炭素t当たり2000米ドル以上にもなる可能性があるが、それでも温度上昇は続く。植林、ソーラーやバイオマスのエネルギーコストの低減等を含めた総合的な対応の必要性を改めて認識させる。

次に、図-15に、温室効果ガス濃度の経時変化を示す。図-15(a)は標準ケースを示したものであり、ミッシングシンク(図中にはMSと記す)、正、負のフィードバック機構及び海洋吸収のシャットダウンの効果が記されている。こうした機構のつけ加えにより、設定シナリオによる広がり幅は、いっそう大きくなる。2100年にて、図-15(a)に示す標準ケース場合では、819～1846 ppmvから690～2379 ppmvに、図-15(b)に示す安定化ケースでは、713 ppmvが617～872 ppmvに、図-15(c)に示す年率1%削減ケースの場合には、573 ppmvが518～780 ppmvとなる。同様の広がりは、上昇温度幅にも見られる。図-16(a), (b), (c)はそれを示し

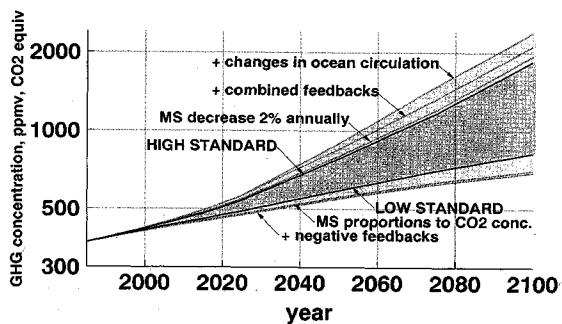


図-15 (a) 温室効果ガス濃度の変化  
標準ケースの場合, 気候感度 3 °C

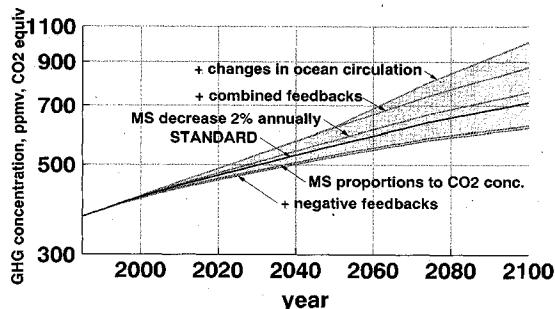


図-15 (b) 温室効果ガス濃度の変化  
排出量安定化ケースの場合, 気候感度 3 °C

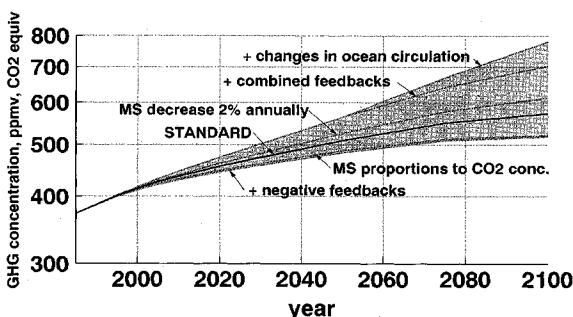


図-15 (c) 温室効果ガス濃度の変化  
年率 1 % 削減ケース, 気候感度 3 °C

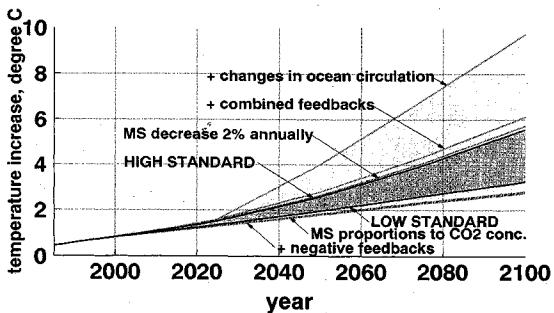


図-16 (a) 温度上昇の経時的変化  
標準ケースの場合, 気候感度 3 °C

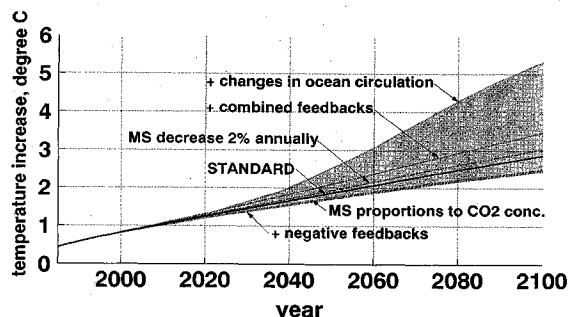


図-16 (b) 温度上昇の経時的変化  
排出量安定化ケースの場合, 気候感度 3 °C

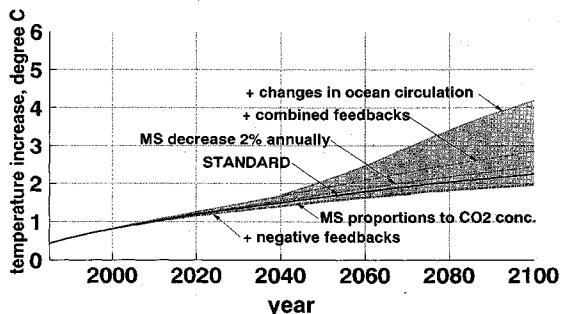


図-16 (c) 温度上昇の経時的変化  
年率 1 % 削減ケース, 気候感度 3 °C

たものである。この場合、海洋循環変化の影響が、大変大きく表れているのが特徴的である。図-16(c)に見られるように、年率 1 % 削減ケースにおいても来世紀中に温度上昇を止めることは出来ない。図-15, 16 は、気候感度を 3 °C とした場合であるが、これを 2, 3, 4 °C とした結果を図-17 に示す。図には、今までの各ケースでの最高と最低の軌跡を記している。4 °C においては、2080 年にて 2.2~10 °C にも及ぶ幅が生じている。

### (3) モデルによるシナリオ分析の解釈

4. (2) の結果から、以下の解釈を行うことができる。

- 1) 地球温暖化現象の不確実さには、社会経済的要因と自然的要因のいずれもが大きく効いている。社会経済

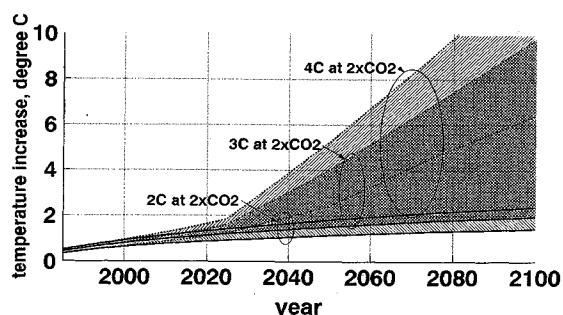


図-17 気候感度 2 ~ 4 °C での気温の上昇  
標準, 安定化, 年率 1 % 削減ケースを併せて示す

- 的要因の不確実さの方が相対的に大きい可能性もある。
- 2) 地球温暖化の予測値は大きくばらつくが、地球温暖化の予想をくつがえすことは難しい。
  - 3) 二酸化炭素排出量安定化に要するコストも大きくばらつくが、その影響は漸減的とはいえない。
  - 4) 二酸化炭素濃度安定化のためには本検討では取り上げなかった対策オプションを含めた総合的な対応が必要である。
  - 5) 化石燃料資源が来世紀末に枯渇することは想定できない。

## 5. おわりに

本論文では、地球温暖化に関するシナリオをシミュレーション・モデルを用いて策定・分析することにより、地球温暖化及びその抑制の見通しと不確実さについて検討した。本分析の結果を、政策的問いに対応させて次のようにまとめることができる。

### 1) 地球は本当に温暖化するか？

今までに得られた科学的知見と将来の発展に対する認識を前提にすれば、地球の温暖化を否定することは困難であり、温暖化の可能性は非常に高いといえる。地球温暖化は現実の政策課題と認識すべきである。

### 2) 地球温暖化の不確実さはどの程度か？

社会経済的な不確定要因と自然の不確定要因の両方を勘案すれば不確実さの幅は非常に大きく、温暖化の程度は来世紀末で少なくとも  $1.5^{\circ}\text{C}$ 、最悪の場合には  $10^{\circ}\text{C}$  を超えると推定される（いずれも産業革命前と比較した場合、以下同じ）。これは、今までに認識されている不確実さの幅（例えば IPCC の結果）よりもさらに大きく、これに対する政策対応を検討する必要がある。

### 3) 不確実さの幅に対してどう政策対応すべきか？

今回明らかにした不確実さの幅は、現段階での政策オプションの確定が困難であることを示している。気温上昇が  $1.5^{\circ}\text{C}$  か  $10^{\circ}\text{C}$  以上かでは政策オプションの選択が本質的に異なる。従って、現時点の政策展開としては、第一に、不確実さに対応した幅広い政策オプションを検討すること、第二に、不確実さを減らすための努力を続けること、第三に、最悪の事態に備えた手を今から打つておくこと、が基本となる。

### 4) 政策オプションはどの範囲で検討すべきか？

来世紀中に温度上昇を止めること（気候安定化）を政策目標に設定すれば、今までに提案された政策オプションよりさらに厳しい温暖化防止対策、例えば、社会経済システムの基本的構造の変革が要求される。一方、最も楽観的なケースでも何らかの対策が必要である。なお、対策のレベルは安定化させる温度に依存し、この温度をどの程度にするかは影響シナリオに大きく依存するため、この分野の研究も重要である。

### 5) 不確実さを減らすことはできるか？

自然の不確定要因のうち大きなものは、気候感度、海洋の影響、フィードバックなどであり、今後の研究推進によってある程度不確実さを減らせる可能性がある。しかし、これらの研究には長期間を要し、また、解明されたとしても本質的に不確定要因の残る現象もある。社会経済的要因については、人口政策や経済政策によって不確実さを減らせる部分もあるが、その効果が出るには長期間を要する。不確実性について見通しがつくには時間が必要である。

### 6) 温暖化防止対策の効果はどのくらい期待できるか？

これから百年以上にわたって二酸化炭素排出量を毎年 1% ずつ削減するという、大変厳しい政策シナリオを前提としなければ、気候安定化のシナリオを書くことが難しい。この場合にかかる費用は、世界の総生産額の 10% 程度にもなる可能性がある。二酸化炭素の排出量を安定化させるだけでは、温暖化の時期を多少遅らせる程度の効果しかない。気候安定化には大変な努力と時間を必要とする。

### 7) 防止対策のタイミングが遅れた場合、だれが困るか？

二酸化炭素排出量を毎年 1% 削減する場合でも、現世代の費用負担に比べて来世紀末の世代の負担は十倍以上になる。もし、防止対策実施のタイミングが遅れたならば、後世の世代の費用負担が増えるか、もしくは温暖化による被害を後世の世代が受けることになる。政策対応の遅れによって困るのは、現世代ではなく後世の世代である。

### 8) 現時点でどのような政策展開の方向が適切か？

以上の結果を総合すると、可能な限り早いタイミングで出来るところから防止対策を導入し、後世の世代がとりうるオプションの幅を大きくするとともに、不確実の程度と範囲を見極めるための時間を稼ぎ、併せて最悪の温暖化シナリオに備えて社会経済システムの適応策を検討しておくことが、ロバストな政策展開の方向と結論できる。

最後に、本研究に関して残された課題を整理する。まず、本分析に用いた諸前提やパラメータは、最新の科学的知見や将来の発展に関する認識に基づいて設定したが、太陽活動、大気エアロゾル等の不確定要因や、バックストップ技術などの革新的な技術導入について検討を省略している。これは、もっぱら、本論文での分析範囲を限定し、論理を明確にするためであり、別途、検討中である。また、社会経済的な前提シナリオの設定において、人口増加と経済成長のようにシナリオ相互の関係に配慮する必要があるが、今回はそれぞれ独立に与えた。シナリオ相互の整合性についてさらに検討が必要であ

る。なお、シミュレーション・モデルの予測結果については、現在、同様なモデルとの比較分析を行っており、本予測結果の妥当性を種々の局面から検証中である。

一方、本研究に用いたモデルについては、現在、二つの方向で改良を進めている。一つは、アジア太平洋地域において温室効果ガスの将来予測と対応策を検討するため、これらの地域の国別モデルを開発して現在のモデルとリンク作業を行っている。他の一つは、温暖化の影響シナリオを含めて総合的な政策判断ができるように、温暖化影響モデルを開発して、現在のモデルと統合させる予定である。

なお、本研究の遂行にあたっては、環境庁地球環境研究総合推進費の援助を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

### 文 献

- 1) Bacastow, R. and C. Keeling (1973) : Atmospheric carbon dioxide and radiocarbon in the natural carbon cycle changes from A.D. 1700 to 2070 as deduced from geochemical model. (in) G. Woodwell (ed.), Carbon and the biosphere, CONF-720510, Atomic Energy Commission, Washington D.C.
- 2) Barns, D.W., J.A. Edmonds and J.M. Reilly (1991) : Use of Edmonds-Reilly Model to Model Energy Related Greenhouse Gas Emissions for Inclusion in a OECD Survey Volume. mimeo, 9pp.
- 3) Bell, P. (1982) : Methane hydrate and the carbon dioxide question, (in) W. Clark (ed.) Carbon dioxide review 1982. Oxford, New York, 401-405.
- 4) Bilsborrow, R. E. (1989) : The demographics of macroeconomic demographic models. Population Buletin, 50, 39-83.
- 5) Bjoerkstrom, A. (1979) : A model of CO<sub>2</sub> interaction between atmosphere, oceans and land biota, (in) The Global Carbon Cycle, Scope 13. B. Bolin et al. (eds.), John Wiley, 403-457.
- 6) Broecker, W.S. (1987) : Unpleasant surprises in the greenhouse?, Nature, 328, 123-126.
- 7) Bulatao, R.A., E. Bos, P.W. Stephens and M.T. Vu. (1990) : World population projections, 1989-90 editions. Short-and longterm estimates. The World Bank, John Hopkins Univ., 490pp.
- 8) Burniaux, J., J.P. Martin, G. Nicoletti and J.O. Martin (1991) : The Costs of Policies to Reduce Global Emissions of CO<sub>2</sub> : Alternative Scenarios with GREEN, mimeo., 36pp.
- 9) Charlson, R., J. Lovelock, M. Andreae and S. Warren (1987) : Ocean phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate, Nature, 326, 655-661.
- 10) Chamberlain, J.W., H.M. Foley, G.J. MacDonald and M.A. Ruderman (1982) : Climate effects of minor atmospheric constituents, (in) W.C. Clark, (ed.) Carbon dioxide review 1982, Oxford, New York, 255-277.
- 11) Edmonds, J. and J. Reilly (1983) : A long term global energy-economic model of carbon dioxide release from fossil fuel use. Energy Economics, 74-88.
- 12) Emanuel, W.R., H.H. Shugart and M.P. Stevenson (1985) : Climate change and broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes. Climatic Change, 7, 29-43.
- 13) Gates, D. (1985) : Global biospheric response to increasing atmospheric carbon dioxide concentration, (in) Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation. Report DOE/ER-0238, U.S. Department of Energy, Washington, D.C.
- 14) 18) International Energy Agency (IEA) (1991) : Carbon Taxes and CO<sub>2</sub> Emissions Targets : Results from the IEA Model. mimeo.
- 15) Hoeller, P. et al. (1990) : A Survey of Studies of the Costs of Reducing Greenhouse Gas Emissions. OECD Working Paper, No. 89, 45p.
- 16) Houghton, R. (1990) : Projections of future deforestation and reforestation in the tropics, IPCC Tropical Forestry Response Options workshop, Sao Paulo, January 9-11, 1990.
- 17) Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group 1 (1992) : 1992 IPCC Supplement ; Full Scientific Report.
- 18) International Energy Agency (IEA) (1991) : Carbon Taxes and CO<sub>2</sub> Emissions Targets : Results from the IEA Model. mimeo.
- 19) Joseph, D. (1991) : Climate model output data general information, 2 July 1991, NCAR, Boulder, USA.
- 20) 霞が関地球温暖化問題研究会編訳 (1991) : IPCC 地球温暖化レポート. 中央法規, 278p.
- 21) 近藤次郎 (1983) : システム分析, 丸善, 271p.
- 22) Kvenvolden, K. (1988) : Methane hydrates and global climate, Global Biogeochemical Cycles, 2, 221-229.
- 23) Lovins, A.B., L.H. Lovins, F. Krause and W. Bach (1981) : Least-cost energy, solving the CO<sub>2</sub> problem, Brick House Pub., Andover, USA.
- 24) Lashof, D. (1987) : The role of the biosphere in the global carbon cycle : Evaluation through biospheric modeling and atmospheric measurement. Ph. D. Dissertation, Energy and Resources Group, University of California, Berkeley.
- 25) Lashof, D.A. (1989) : The dynamic greenhouse : feedback processes that may influence future concentrations of atmospheric trace gases and climate change, Climatic Change, 14, 213-242.
- 26) Lashof, D.A. et al. (1990) : Policy Options for Stabilizing Global Climate/Report to Congress. U.S. EPA. December 1990.
- 27) Lehman, S.J. and L.D. Keigwin (1992) : Sudden changes in North Atlantic circulation during the last deglaciation, Nature, 356, 757-762.
- 28) MacDonald, G.J. (1983) : The many origins of natural gas, J. Petrol. Geol., 5, 341-362.
- 29) MacDonald, G.J. (1990) : Role of Methane clathrates in past and future climates, Climatic Change, 18 247-281.
- 30) Mann, A.S. (1991) : Global 2100 : Alternative Scenario for Reducing Carbon Emissions, mimen., 20pp.

- 31) Martin, J.H., Glacial-interglacial CO<sub>2</sub> change : The iron hypothesis, *Paleoceanography*, 5 (1), 1-13.
- 32) Matthews, E. (1989) : Global data bases on distribution, characteristics and methane emission of natural wetlands : Documentation of archived data tape, NASA Technical Memorandum, 4153, 18pp.
- 33) 松岡 謙 (1990) : 温暖化現象の総合化モデルとそれによる温室効果ガス濃度と上昇温度の将来推定について, 環境システム研究, 18, 82-87.
- 34) Matsuoka, Y. (1992) : Projection of global climate change under carbon taxation using comprehensive global environmental model, *Global Warming and Economic Growth* (ed.) A. Amano, Center for Global Environmental Research, CGER-1001-92, 99-110.
- 35) 松岡 謙・森田恒幸 (1992) : 地球温暖化におけるモデルと予測, 計測と制御, 31, 577-585.
- 36) McKinsey & Company (1989) : Protecting the Global Environment : Funding Mechanisms / Findings and Conclusions. Ministerial Conference on Atmospheric Pollution & Climatic Change, 27p.
- 37) Melillo, J.M., J.R. Fruci, R.A. Houghton, B. Moore, III and D.L. Skole (1988) : Land-use change in the Soviet Union between 1850 and 1980 : cause of a net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere, *Tellus* 40B, 116-128.
- 38) Mintzer, I. (1988) : Projecting future energy demand in industrialized countries : An end-use oriented approach. World Resources Institute, Washington, D.C.
- 39) 森田恒幸 (1990 a) : 地球気候安定化のための政策オプションの体系. 季刊環境研究, No. 77, 21-29.
- 40) 森田恒幸 (1990 b) : 地球気候安定化と経済的手段. 季刊環境研究, No. 77, 92-102.
- 41) 森田恒幸 (1990 c) : 地球温暖化にみる環境リスクの政策分析. システム／制御／情報, 34 (10), 4-8.
- 42) Morita, T. (1992) : Aspects of Taxation for Protecting Global Environment. *Global Warming and Economic Growth* (ed.) A. Amano, Center for Global Environmental Research, CGER-1001-92, 12-16.
- 43) 西岡秀三監訳 (1992) : 地球温暖化の影響予測／IPCC 第2作業部会報告書. 中央法規, 233p.
- 44) 西岡秀三・森田恒幸 (1992) : 地球気候安定化のための社会経済システムの構造転換政策の体系, 季刊環境研究, No. 86.
- 45) Nordhaus, W.D. and G.W. Yohe (1983) : Future paths of energy and carbon dioxide emissions, (in) *Changing Climate : Report of the carbon dioxide assessment committee*, National Academy Press, Washington, DC. 87-153,
- 46) OECD Secretariat (1991) : Overview paper on costs of reducing CO<sub>2</sub> emissions ; evidence for six global models, mimeo., 29pp.
- 47) Parry, M.L., M. Rozari, A.L. Chong et al. (eds.) (1992) : The potential socio-economic effects of climate changes in South East Asia, United Nations Environment Programme, Nairobi, 126pp.
- 48) Patterson, D.T. and E.P. Flint (1990) : Implications of increasing carbon dioxide and climate change for plant communities and competition in natural and managed ecosystems, (in) *Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture*, ASA Special Publication No.53, 83-110.
- 49) クウェイド (Quade, E.S.) 他編 (1972) : システム分析 2, 竹内書店, 244p.
- 50) RSWG (Response Strategies Working Group) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1990) : Emissions Scenarios, 58pp.
- 51) Revelle, R. (1983) : Methane hydrates in continental slope sediments and increasing atmospheric carbon dioxide, (in) *Changing Climate*, National Academy Press, Washington D.C., 252-261.
- 52) Shugart, H. (1984) : A theory of forest dynamics, Springer, New York, 203-206.
- 53) Sarimento, J.L. and E.T. Sundquist (1992) : Revised budget for the oceanic uptake of anthropogenic carbon dioxide, *Nature*, 356, 589-593.
- 54) Sathaye, J.A., A.N. Ketoff, L.J. Schipper and S.M. Lele (1987) : An end-use approach to development of long-term energy demand scenarios for developing countries, mimeo., 60pp.
- 55) Solomon, A. (1986) : Transient response of forests to CO<sub>2</sub>-induced climate change : simulation modeling experiments in Eastern North America, *Oecologia* 68, 567-579.
- 56) Tans, P.P., I.Y. Fung and T. Takahashi (1990) : Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget, *Science*, 247, 1431-1438.
- 57) The Task Force on the Comprehensive Approach to Climate Change (1991) : A comprehensive approach to addressing potential Climate Change, February 1991.
- 58) United Nations (1992) : Long-range world population projections, two centuries of population growth, 1950-2150. United Nations Publication, Sales No.E.92.XIII. 3.
- 59) U.S. Bureau of the Census (1987) : World population profile : 1987, U.S. Department of the Commerce, Washington, D.C.
- 60) U.S. National Academy of Sciences (1979) : Carbon dioxide and climate : a scientific assessment, Washington D.C., 22pp.
- 61) World Bank (1991) : World development report 1991, Oxford University Press, 290pp.
- 62) Woodwell, G. (1986) : Global warming : and what we can do about it, *Amicus Journal* 8, 8-12.

(1992.6.16受付)