

(13) 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

ESTIMATIONS ON FUTURE GLOBAL WARMING WITH A COMPREHENSIVE MODEL

松岡 譲

Yuzuru MATSUOKA

ABSTRACT: A comprehensive mathematical model on global warming was developed. Sub-models on global energy supply and consumption, cycling of global carbon dioxide and others are combined. Results of some calculations based on the model are demonstrated.

KEY WORDS: global warming, mathematical modelling

本論文では、二酸化炭素、メタンなどの温室効果ガスの排出予測と、将来の大気濃度変化および上昇温度を定量的に把握するために作成されたモデルの概要と、それによる計算結果を報告する。解析のフレームを図-1に示す。このうち、エネルギー需要に関するエンドユーズモデル及び世界農業需給モデルに関しては現在、作成を完了しておらず、本報告では外生変量として取り扱う。同様の作業は米国環境保護庁、IPCCなどでも行われており、それらで設定された条件、モデル構造等も逐次、参照しているが、かなり異なる点もある。さらに、ここで述べるモデルでは、現在のところ、大気濃度・温度上昇を求める所までしか取り扱っておらず、温暖化による影響効果は入っていない。

取り扱う温室効果ガスは、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素及びフロン・ハロンである。オゾンも温室効果をもたらすが、本モデルでは、温室効果ガスと言うよりも大気化学反応に係わるガスとしての取り扱いに比重をおく。一酸化炭素、一酸化窒素、二酸化窒素あるいはNMHCなどは大気化学反応を通じて、メタン、オゾンなどの濃度を左右するの観点から排出量、大気濃度の追跡を行う。海洋のCO<sub>2</sub>および熱吸収はボックス拡散モデルを使用した。対象地域の区分は、全球で1ブロックである。但し、排出量算定等の作業段階では、適宜、細分化している。対象年は1985年から2100年と設定し、時間ステップは計算上支障ないかぎり5年とした。

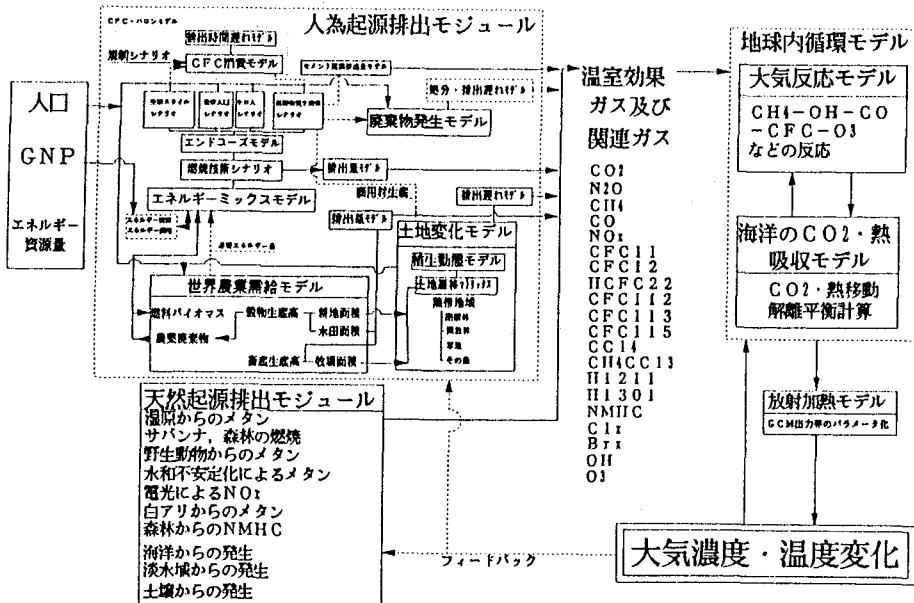


図-1 モデルの全体フレーム

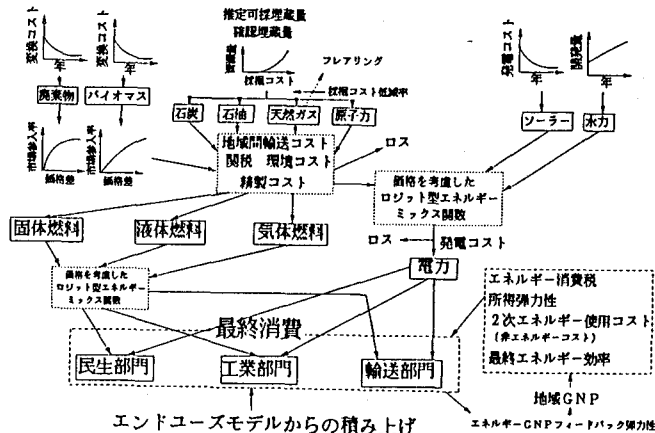


図-2エネルギーサブモデルの概念図

## 1. 温室効果ガスの排出サブモデル群

人為排出源として、化石燃料燃焼に伴うもの、化石燃料採掘に伴うもの、農業活動に伴うもの、セメント生産に伴うもの、フロン・ハロン使用に伴うもの、廃棄物埋立に伴うもの、森林破壊など土地利用変化に伴うものを考慮する。自然発生源としては $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ を中心に生物、土壌あるいは海洋からの発生を考慮する。

### 化石燃料燃焼に伴う排出量の算定

この部門で考慮する温室効果関連ガスは $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 及び $\text{NO}_x$ である。排出量の将来推定は将来エネルギー消費量の推定を土台とする。将来エネルギー消費量の算定モデルの概念図を図-2に示す。このフレームは現在、この種の作業で広く使用されているエドモンズ・ライリーモデルを一部改変したものである。

二酸化炭素の消費エネルギー単位量あたりの発生量は、使用エネルギー量からの算出が比較的容易であり、例えば石炭で $25 \text{ kg C/GJ}$ 、石油で $19 \text{ kg C/GJ}$ 、天然ガスで $13.4 \text{ kg C/GJ}$ の数値を使用する。メタン、亜酸化窒素あるいは一酸化炭素については、燃焼方法が関連し、使用エネルギー量のみからは簡単に算定できない。燃焼技術及びその改良の将来シナリオが必要となる。米国のRadian Corp.(1988)は、世界各地域の民生、産業、輸送各部門の省エネ及びガス発生抑制技術参入の見通しを算定したが、このシナリオから算出すると、省エネ対策をあまり行わなかったときには来世紀半ばまでは $1 \sim 1.5\%$ /年、それ以降は $0.7 \sim 1.2\%$ /年の最終用途効率の改善(低省エネシナリオ)が、また、省エネ努力を強く行う時には、この値は $1.5 \sim 2.5\%$ /年及び $1.2 \sim 1.9\%$ /年の改善(高省エネシナリオ)としている。エネルギー需要に関しては、米国環境保護庁、IPCC等の作業に使用されているMintzer(先進国部分)及びSathaye(開発途上国部分)の積み上げ計算値を使用する。これらの計算の前提となった世界人口は1985年段階にて49億人程度、2025年で82億、2100年にて104億人程度のものである。経済成長率としては、今世紀中は、先進国にて年成長率 $2 \sim 2.5\%$ 、発展途上国は $3 \sim 4.6\%$ のものが、21世紀末には世界各国にて $1 \sim 2\%$ 程度となるものを想定する。これらの数値はいずれも世界銀行が想定しているもので、他のサブモデルでもこれを使用する。また、この見通しより $1 \sim 2\%$ 上げた場合も想定し、それぞれ、低成長シナリオあるいは高成長シナリオと呼ぶことにする。これらから算定された需要積み上げ結果は、2025年まではおおそ $0.5\%$ (低経済成長、高省エネシナリオ)～ $1.1\%$ /年(高経済成長、低省エネシナリオ)程度の増加が、それ以降については $0 \sim 0.4\%$ /年程度の増加となっている。エネルギー需要と供給のバランスについては、図-2のフレームを用い、各燃料の価格調整により行う。

以上の設定によるモデル計算では、省エネ努力を強力に行わない場合の高成長シナリオでは1次エネルギー需給量は現状の $3 \times 10^{20} \text{ J}$ から2025年には $6.6 \times 10^{20} \text{ J}$ 、さらに2100年には $16 \times 10^{20} \text{ J}$ (平均成長率約 $1.46\%$ /年)となった。また、低成長シナリオでは2025年には $4.6 \times 10^{20} \text{ J}$ 、2100年には $7 \times 10^{20} \text{ J}$ (平均成長率約 $0.7\%$ /年)程度となっている。

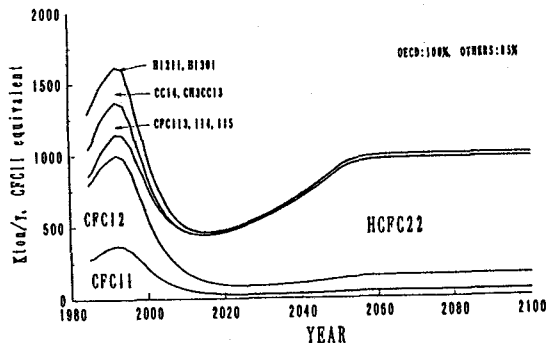


図-3 CFCなどの排出量見通し

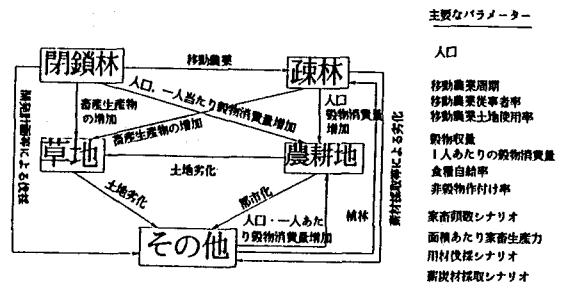


図-4 土地利用変化サブモデルの概念図

### フロン、ハロンの排出量の算定

フロン及びハロンの排出量は、6月末のモントリオール議定書第2回締約国会議の結果、大幅に削減されることとなった。図-3はこの議定書参加の割合が消費量ベースでOECD諸国100%、その他の国85%と想定したときの排出量見通しである。図では、各種フロン等の排出量は放射加熱量の観点からCFC11に換算し記している。この計算では、抑制施策を行わないときの消費量成長率を、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、それ以降にはほぼ一定となるように仮定している。また、消費から排出にいたる遅れ関数は、米国ランド研究所等の調査結果などを参考に、エアロゾル噴射剤、洗浄剤・溶剤の場合には1年以内に、冷媒では4年程度にわたって、断熱材等は20年程度にわたって排出される等の仮定を行っている。

### 農業活動からの排出量の算定

水田からのメタン、家畜からのメタン、窒素肥料施肥による亜酸化窒素があげられる。その他、農業廃棄物焼却、開墾などによるガス放出もある。排出量算定のもととなる食料生産予測は、先に述べた人口増などをもとに、Froberg(1988)が算定したものを利用した。これによれば、水田面積は、1985年の1億5千万haから来世紀半ばには2億3千万ha程度に達する。その後は人口の安定化と収量増加のためにほとんど増加しない。肉類・酪農物需要は21世紀後半にほぼ現在の2倍程度となる。また、窒素肥料量は2.6倍程度となる。本報告では、この算定結果に、種々の報告値を参考にして定めた排出原単位を乗じ将来のガス排出量を算定している。農業廃棄物の焼却は、二酸化炭素などのガスを発生する。本モデルではその発生量を、耕作面積から推定している。

### 森林破壊・植林による排出量の算定

森林破壊を中心とした土地利用変化による排出量算定には、図-4のような閉鎖林、疎林、草地、農地等の土地利用区分間の遷移過程と各区分内の簡易的な炭素循環過程とを組み合わせたボックス型モデルを作成して算定した。対象地域は、アフリカ、ラテンアメリカ、アジアの熱帯林国の3地域である。現状の森林破壊が継続するとしたときの計算結果では、来世紀後半には森林が消滅する結果となっている。森林破壊に伴うバイオマス燃焼は、メタン、NOx、COを放出する。これに関しては、種々の現状排出量報告値をとりまとめ、森林破壊面積変化速度に比例するものと考えた。

### その他の排出量の算定

人為起源としては、セメント生産からの二酸化炭素発生、廃棄物埋立からのメタン排出量などがある。これらはいずれも1人あたりのGNPと関連させ、推定している。但し、OECD諸国はほとんど横ばいであると仮定した。また温帯地域での野火、火入れなども将来にわたり大きく変化しないと考えた。自然起源としては、沼沢など湿地帯からのメタン、野生動物・シロアリからのメタン、海洋からのメタン、亜酸化窒素、一酸化炭素などがあげられる。これらも現状排出量に関する種々の報告値を積み上げ、後に述べるフィードバック効果を除き変化しないものと考えた。

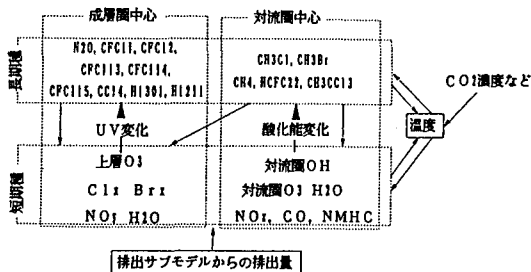


図-5 大気化学サブモデルの概念図

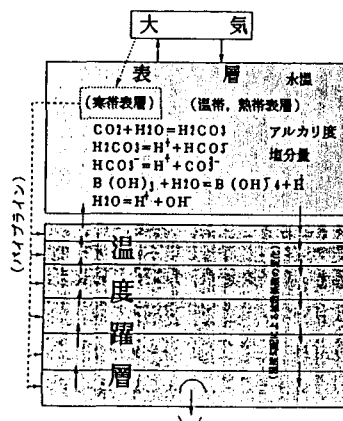


図-6 海洋サブモデルの概念図

## 2. 大気・海洋に関するサブモデル群

以上の各過程で発生したガスは大気中に放出される。CO<sub>2</sub>に関しては、海洋への取り込みが重要であり、他のガスに関しては大気中の光化学反応を中心とした化学的反應による変化が重要となる。後者については、米国NASAのPratherらから提案したAMAC (Assessment model for atmospheric composition) モデルを適用する。この方法では、まず、対象とする化学種を、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、反応速度が大きく一年程度の時間スケールでは、長期種の濃度によって定まる平衡状態に達していると考えてよいオゾン、水酸ラジカルなどの短期種とに分ける。考慮する反応として、対流圏でのOHラジカルが中心となるCH<sub>4</sub>等の酸化反応および成層圏での紫外線による光化学反応を取り上げ、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するものである。図-5にモデルの概念図を掲げる。CO<sub>2</sub>の海洋吸収については、本論文ではボックス拡散モデルを使用している。これは全海洋を深さ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、しかる後に中層海洋に拡散していくという機構を考える。図-6にその概念図を掲げる。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pH酸量、アルカリ度、塩分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る。このモデルを使用し、<sup>14</sup>C、<sup>3</sup>H分布で検定された拡散係数及び海面での物質移動速度を用いて、CO<sub>2</sub>排出量がそろっている1830年からの大気中CO<sub>2</sub>濃度を試算してみると、例えば1985年時点での観測濃度346ppmvに合致させるためには排出量を10億トン/年あまり小さくしなければならない。これはミッシングシンクの問題として著名な現象である。ボックス拡散モデルの他に高緯度海域のアウトクロップ現象を考慮したモデルなどにより、このミッシングシンク量を試算しても、事態はわずしか改善されない。すなわち、これらの簡略的な海洋モデルで、こうした現象を取り扱うことは限界がある。本モデルではこの現象の解明ができるまでの暫定的な手段として、このシンク量は、1985年レベルが以後も継続するものとして取り扱うことにする。現在のところ、海洋生物の影響は考慮していない。

温室効果ガス濃度の増加による増加放射加熱量の算出は、CO<sub>2</sub>等15化学種について、Hansenら、AER (Atmospheric and Environmental Research) Inc.などにより報告されている回帰式を使用した。増加放射加熱量ΔQと上昇温度ΔTの関係は、Dickinson(1986)の0次元モデルを使用する。すなわち、

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

なる熱収支式を想定する。ここにFは海洋の熱吸収であり、λはフィードバック係数と呼ばれる定数である。λの値としては、最近の大循環モデル (GCM) 計算結果などを参照して、1.43 W/m<sup>2</sup>と設定した。この値は、2酸化炭素濃度倍増時の平衡上昇温度を3℃とすることに対応する。この操作により、GCM計算が具現すると考えられる地球物理学的フィードバック効果である水蒸気、大陸雪氷、雲の効果はパラメトライズされたものとする。

### 3. 大気濃度と温度上昇の見通し

以上のモデル設定に基づき計算した例を以下に示す。図-7は高成長・低省エネシナリオ（以下、シナリオ1とする）時のCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排出量の推移である。フロン・ハロン等の規制は、図-3に示したのと同じ仮定を用いている。この規制により、これらの物質による加熱量はかなり小さくなっている。図-8は、シナリオ1を基礎として、各種の発生量抑制対策を行った場合の結果である。シナリオ2ではエネルギー需要及びエネルギー効率をエネルギーサブモデルの項で述べている高省エネシナリオに差し替え、石炭及び石油の最終使用に30%および20%（2100年時）の消費税をかけている。シナリオ3ではシナリオ2に加え、ソーラーエネルギーコストの低下（2030年には\$0.05/GJ程度とする）及びバイオマスエネルギーの転換価格の低下、水力開発の促進などの再生エネルギーの強力な促進、植林の強化（2100年までに約10億haの植林）、農業関係排出原単位の年0.5%の削減、廃棄物からのメタン発生抑制（先進国にて現在の1/10~1/2、途上国にて2倍程度に抑える）などの抑制政策を行うと考えている。各規制による段階的な大気中のCO<sub>2</sub>当量濃度の変化を図-9に示す。

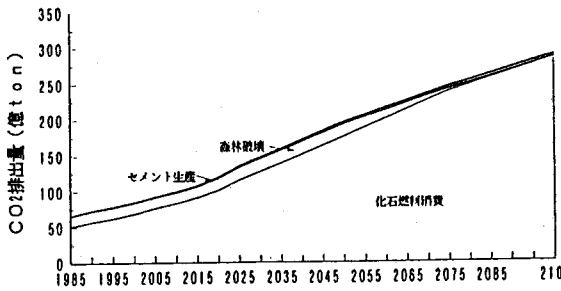


図-7(a)シナリオ1でのCO<sub>2</sub>排出量

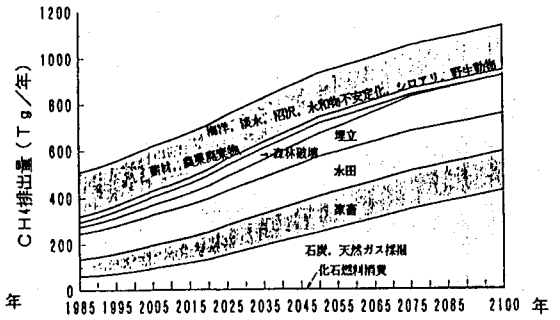


図-7(b)シナリオ1でのCH<sub>4</sub>排出量

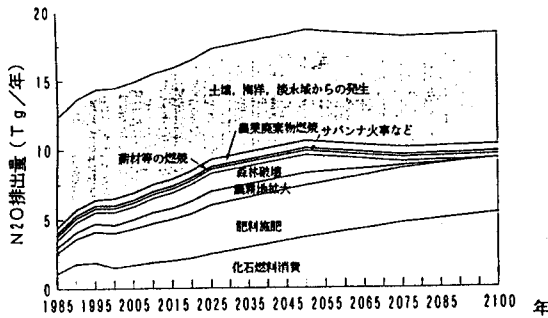


図-7(c)シナリオ1でのN<sub>2</sub>O排出量

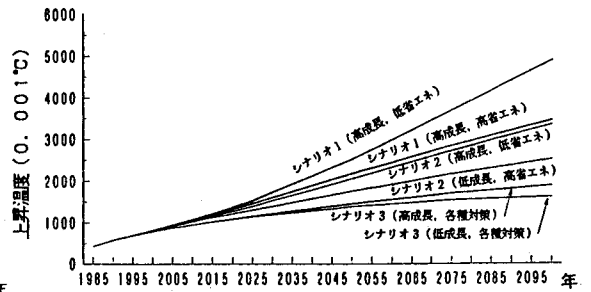


図-8(a)各シナリオ下での上昇温度

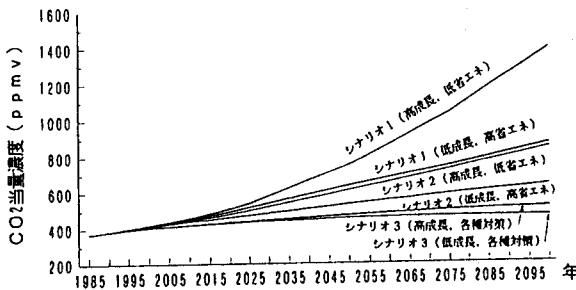


図-8(b)各シナリオ下でのCO<sub>2</sub>当量濃度の増加

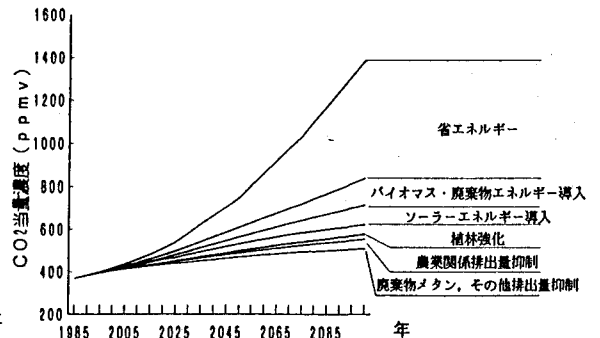


図-9 各規制下でのCO<sub>2</sub>当量濃度の変化

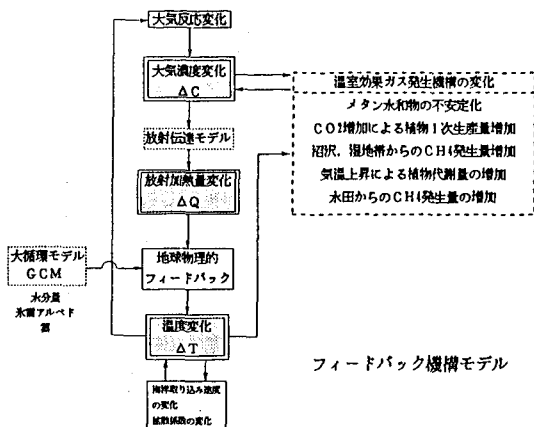


図-10 このモデルでのフィードバック機構

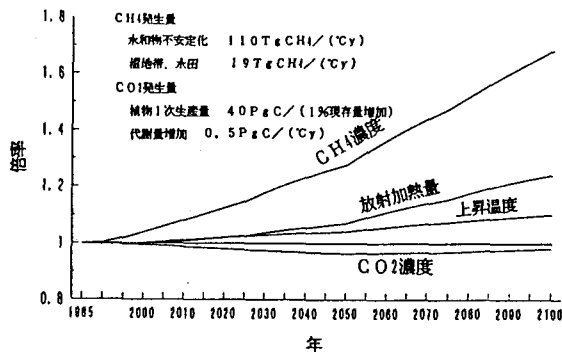


図-11 排出量フィードバック機構の感度

以上の計算では気温上昇あるいは $\text{CO}_2$ 濃度上昇による排出機構の変化を考慮していない。本モデルにて組み込まれているフィードバック機構は図-10左部分であるが、さらにこれに加え、図右半分に示される排出機構を通じてのフィードバックを考慮したときの計算値の変化を図-11に示す。計算に使用したフィードバックパラメーターは各種文献からまとめたものを使用しているが、問題となる点がかなりあり、現在のところ、こうした計算から確信ある結論を引き出すことは出来ないと思われる。

#### 4. さいごに

本報告で示したモデルは、地球温暖化現象を温室効果ガス発生及び地球内での循環に焦点をあて、温暖化現象をなるべく広い視野から把握しようと試みたものである。各部分の精度には多くの問題が残されている。サブモデル間の論理的な結合性も弱い。また、設定したシナリオに関しても、IPCC等でトップダウン的に設定されたものを参照しており、その具体性、実現性等については、一つ一つ吟味していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) Lashof, D. and Tirpak, D., 1989, Policy options for stabilizing global climate, Draft Report to Congress, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., USA.
- 2) Edmonds, J. and Reilly, J.M., 1983, A long-term global energy-economic model of carbon dioxide released from fuel use. Energy Economics 5(2), 74-88.
- 3) Mintzer, I., 1988, Projecting future energy demand in industrialized countries: An end-use oriented approach, World Resources Institute.
- 4) Sathaye, J., 1990, Energy and global warming: Future scenarios and resources implications. "Experts" report of the Energy and Industrial Subgroup, IPCC.
- 5) Fisher, G., Froberg, K., Keyzer, M.A. and Parikh, 1988, Linked National Models: A tool for international food policy analysis. Kluwer Academic Pub.
- 6) Prather, M.J. (ed.), 1989, An Assessment Model for Atmospheric Composition. NASA Conference Publication 3023, NASA Goddard Institute for Space Studies, New York, NY, 46pp, USA.