

6. 地球環境の予測に係わるシミュレーションについて

Simulation Models of Global Environmental Change

松岡 譲†

Yuzuru MATSUOKA†

Abstract – This paper reviews recent simulation models relating climatic change. These are (1) Emission models of greenhouse gases from fossil fuel use, landuse change and other miscellaneous anthropogenic activity, (2) Global Carbon Cycle models, (3) General Circulation Models, (4) Impact models of climatic change, and, (5) Integrated models of climatic change. Their structures, strength and weakness are briefly introduced and their representative outputs were compared. This paper also emphasized the necessity of Integrated Assessment Model as a basic tool to organize wide and large quantities of related information in ways that facilitate application of the information in decision making and policy setting.

Keywords: Global Environment, Climatic Change, Integrated Assessment

1. 地球環境問題を考えるにはモデルが必要となる。

この報告では、地球環境問題を検討するツールとしての環境モデリングに関し、その概要を述べる。ただし、紙幅の都合上、気候変動問題に関するシミュレーションをトピック的に言及するにとどめる。地球環境問題は、従来の環境問題にくらべ取り扱う時空間スケールが極めて大きく、関連する知見のばらつきが大変大きいのが特徴である。モデルの基本的な役割は、自然科学で取り扱うモデルとは異り、関係する種々雑多な情報を整理・体系化し、それらの帰結としての地球環境の将来像を描くことに、主たる使命がある。さらに、モデルが算定する世界像は、決して将来の予想ではない。モデルでは、現在の経済、社会活動の論理的な外挿が、どの程度の温暖化をもたらすかを、現在までに得られている知識の範囲内で求めるのみである。このように割り切っても、この作業には多くの不確定がつきまとう。その第一は人間活動の進展に伴うものである。技術あるいは政策の展開がその大なるものである。第二は科学的知見の欠如に伴うものである。因果応報のしくみは入り組んでおり、どの過程までをモデルに組み込むかによっても、結果が大きく変化する可能性がある。こうした機構をどのように集約しモデル化するか、またパラメーター値はどのような値を採用するかなども問題となる。第三に現象のもつ不確定そのものに起因するものがある。以上のような問題があるにもかかわらず、われわれは地球温暖化を取り扱う上で、モデルによる予測と対策、影響の効果判定を不可欠な作業と考えている。他により適切な方法がないからである。

さて、地球温暖化に係わる現象は極めて広範囲である。それらを網羅的に体系化あるいは組織化しモデル化することは、不可能である。モデル構築者の世界観、現象観でもって関連する要素を適切に抽出し、大きな影響を及ぼさないとされる要素は、捨象しなければならない。図-1に、温暖化現象の観点から見た各要素モデルの関わりを示す。図に示すように、要素モデルの主たるものは、人間活動に起因する温室効果ガス (GHG) の排出モデル、GHGの環境内での循環・変化モデル、気候変化モデル、温暖化防止の経済影響モデル及び温暖化影響に関するモデルである。最近では、図に示される各要素モデルを有機的に連結した統合評価モデル(IAM) にも大きな関心が集まっている。

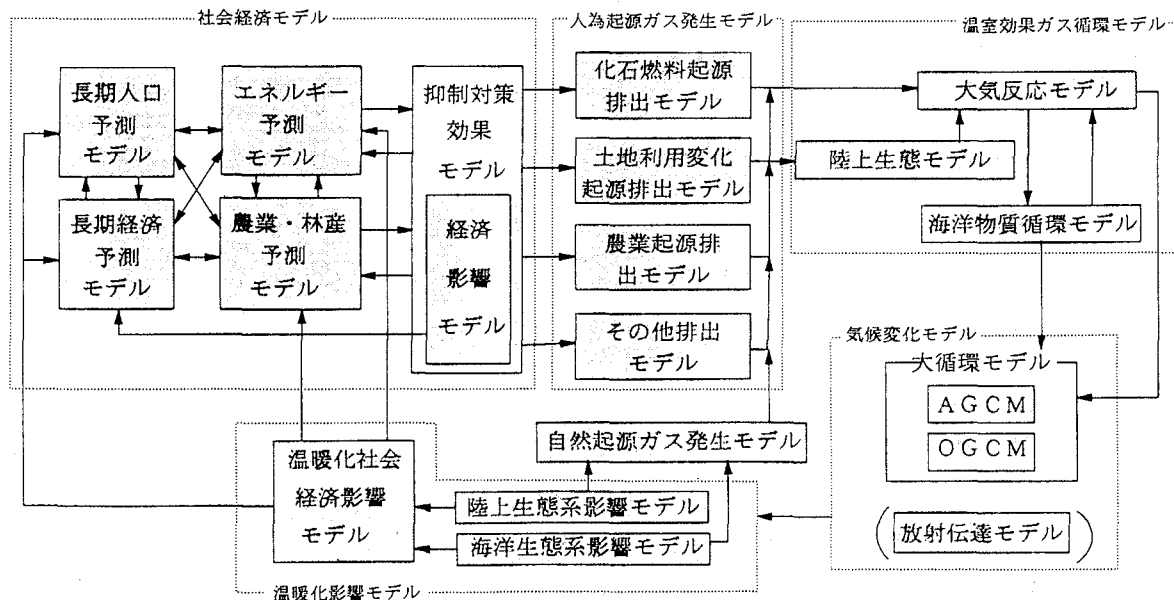


図-1 地球温暖化問題に関連するモデル群

† 名古屋大学工学部地圏環境工学教室

2. 温室効果ガスの排出量変化を推定するモデル群

2.1. 化石燃料使用に伴う排出量推定モデル

石油、石炭あるいは天然ガス等の化石燃料の燃焼により、CO₂、メタン、一酸化炭素、窒素酸化物及び硫酸化合物などが発生する。その将来推定を行うには、化石燃料の消費量予測を行う必要がある。エネルギー消費起源の温室効果ガス排出モデルの構築及びそれを用いた施策効果算定作業は、以前から繰り返行われてきた。著名なNordhaus、Edmonds and Reillyなどのモデルは、1970年代後半から80年代前半にかけて構築され、温室効果ガス排出モデルの先駆けであった。その後、地球環境問題の高まりと共に数多くのモデルが構築されるようになった。1988年以降には世界全域を対象とするものだけでも、80以上のモデル計算結果が報告されており、この種の研究は地球環境研究の中でもっとも熱心な活動がなされている一つである。大きく分けて二つのタイプのモデルが報告されている。その第一は経済学的モデルを出発点とするものであり、トップダウン型のモデル構造に結び付く。価格と弾力性を主たる経済的指数とし、それらとエネルギー消費及び生産の集約的挙動の構造的関係と因果性に関心が寄せられる。第二は技術モデルとでも称するべきものであり、エネルギー消費あるいは機器・技術の展開をモデル記述の中心に据えるものである。前者に属するモデルでもっとも著名なものは、Edmonds Reillyモデル（ERM）である。1983年の発表以来、いくつかの改定版が作成され、米国環境保護庁（USEPA）の2回にわたる温暖化対策レポート、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の将来シナリオ策定作業あるいは著者らのグループにより開発されているモデルなども、このERMをベースとしている。ERMはエネルギーの供給と需要をエネルギー価格で釣り合わせる部分均衡型のモデルであり、供給側に関してはかなり詳細に構築しているが、需要側ではエネルギーサービス需要の発生を1人あたりの国民総生産高とエネルギー価格によって定めたり、エネルギーミックスをコスト比較のみによって行う構造を取っている。また、燃焼効率とサービス効率を総合した広い意味でのエネルギー利用効率改善を外生パラメーターとするなど、モデルリアリティからは問題が多い。OECDが開発したGREENも著名であるが、こうした欠点を持つ。このモデルは、世界を7～12地域、8～14部門の生産活動について逐次的な計算を行う一般均衡型モデルである。また、Manneらが構築したGLOBAL2100、NordhausのDICEなどは、経済学的パラダイムの率直な表現とかモデルを詳述したテキストの刊行などの理由もあってよく流布されている。

第二の技術モデルは、ボトムアップ型の構造に結び付く。そこでは、各機器・技術のコストとパフォーマンスの組み合わせに関心が寄せられ、エネルギー消費活動はそれらの集計として記述される。この研究のもっとも簡明な表現の一つは、技術・コストカーブである。技術コストカーブに基づく解析では、エネルギーのネットワーク的なフロー（RES）とか複合的なサービスを記述できない。技術間及びエネルギーフロー間の依存性あるいはエネルギーサービスの重畳性を考慮しない場合、省エネルギー効果は往々にしてダブルカウントされる。また、サービス需要、技術・機器あるいは資金手当の時間的な展開プロセスを、コストカーブのみで取り扱うには限界がある。これらの諸点を克服する工夫は、以前からいくつか行われていたが、特に1970年代の第一次エネルギー危機を機に、エネルギーフロー供給・消費のシステム的な挙動を取り扱うモデルがいくつか開発された。この系統に属すものはMARKAL、MEDEE、LEAP などがあり世界各国で使用されてきた。このように、エネルギー技術モデルとして今までに多数のものが開発され実用に供されているが、これらは技術モデルなるが故に共通した欠点をもつ。その第一は、エネルギーサービス需要のマクロ経済的効果を取り込めていないことである。エネルギー及びエネルギー機器の生産と消費をめぐる乗数効果あるいは構造変化の経済的相互影響などはなんらかの工夫をしない限り取り込まれない。第二に、市場の不完全性あるいはその他の制度的な障害による制約は、顕わに記述しない限り考慮できないし、しばしば無視され

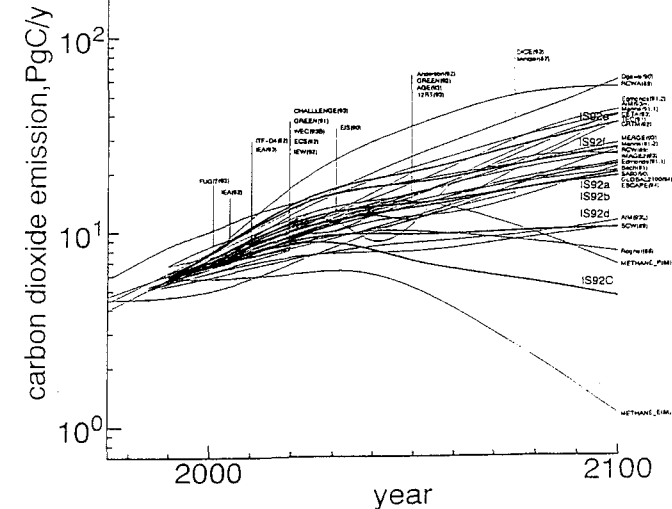


図-2 化石燃料消費から排出される二酸化炭素量

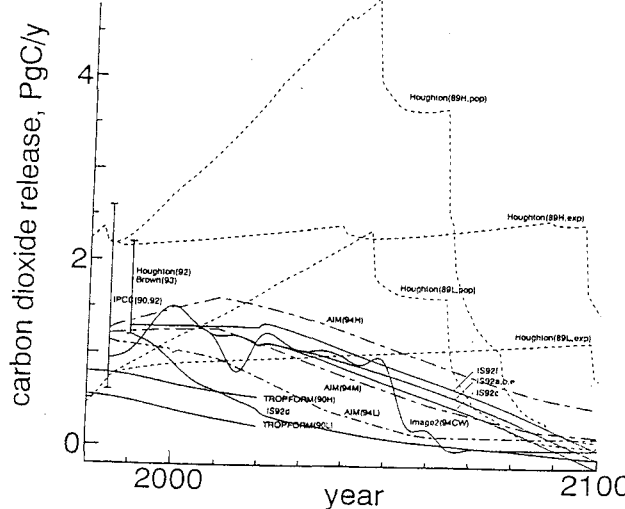


図-3 土地利用変化から排出される二酸化炭素量

る。第三に技術普及・定着の費用と影響は、ほとんどの場合考慮されない。第四に、モデルに考慮された以外のコストと消費者あるいは供給者の技術選択の恣意性がどの程度あるか予測が付かず、算定結果の信頼性に問題が生ずる場合がある。第一の点に関しては、マクロ経済モデルと結合させて回避しようとする試みがいくつかなされている。例えば、著者らが開発しているAIM/Emissionでは、RESに配置された100種以上のエネルギー技術がコスト最小化基準で選択される一方、マクロ的な価格、資源制約についてはエネルギー経済マクロモデルとカップリングさせ、両モデルの融合を図っている。

こうしたモデル群は、今後の世界のGHG排出量についてどのような推定を行っているか。図-2は、今後100年における化石燃料起源の現状推移型のCO₂排出量見通しを悉皆的に収集したものである。1990年の年60億tCの排出量は、2050年には55~359億tCに、2100年には12~580億tCへと推移している。算定値の最大および最小値の幅は大きく、2050年にて6.5倍、2100年には50倍にもなるが、変動係数はそれぞれ39%、54%であるから算定値の大部分は平均値の付近にある。パラツキの主原因となっているものは、経済成長率、エネルギー効率及びエネルギーミックスであり、これらが相俟って幅広い将来像を推計させている。

2.2. 土地利用変化のモデル

最近のアジア、アフリカ及び中南米を中心とする熱帯林面積の減少速度は1700万ha/年程度であるとされ、永久農地、住宅地あるいは一時的な耕作の後休閑林になると考えられている。森林1haの消失により、時間おくれを伴いながらも、50~100tC程度のCO₂が大気中に放出される。熱帯林破壊の原因としては、移動耕作あるいは農地の拡大、過度の薪材採取、商用材伐採などさまざまな理由が考えられる。従って、この部門からの温室効果ガス発生量のモデル化には、そうした動的プロセスの定式化と各土地利用区分間の動的な転換マトリックスを描く必要がある。土地利用変化に起因する温室効果ガス排出モデルの報告数は化石燃料に比べはるかに少ない。図-3は、それらの推計値を図示したものである。これらは、概ね人口圧力が森林消滅の推進力となると想定して算出作業を行っている。例えば、AIMの場合では、国連人口推計作業とほぼ同じ出生、死亡パラメータを使用して算出した各国人口をもとに、熱帯付近の71ヶ国の森林減少を積み上げ、これとOECDによる炭素量変化算定方式を組み合わせる。このモデルにおいては、各国別の森林面積減少速度を過去25年間の平均人口増加率と残存森林面積の積に比例すると想定し、森林面積減少に伴い消滅速度が抑制されることを仮定している。

図-3からわかるように、土地利用変化部門では現状排出量の評価においてさえ、大きなバラツキがある。これには二つの不明性が寄与している。第一は森林消滅によって放出される単位面積あたりの総炭素量見積もりと時間遅れである。第二は森林面積減少速度である。これらのうち、第二の点は、最近のいくつかの稠密な調査により改善が著しい。上記のモデルは、いずれも土地利用転換の原因力を対象地域の人口増加と関連づけている。過去100年程度の熱帯森林の面積は、アジア地域においては人口増加にほぼ追従し、ラテンアメリカではそれほど強い関係なしに推移してきた。それらからすれば、上記のモデルはある程度の根拠と不合理性をもつ。人間活動と土地利用変化の関わりモデル化は、マルサス、ボズラップらを代表として膨大な研究がなされてきた。また地球環境研究としても、現在、IGBP/HDPの中心課題となり多大な労力が投入されているが、予測性が高いモデルを構築するにはしばらくかかるものと考えられる。

2.3. その他の排出モデル

農業活動に関連した温室効果ガスの排出には、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および農業廃棄物焼却などからのガス放出がある。化石燃料消費でも同様であったが、農業関係の排出量の算定を行うには、まず、将来の世界農業の活動水準を算定しなければならない。IIASAが開発した世界食糧需給モデルであるBLS (Basic Linked System)は、20カ国の国モデルと14の地域モデルから構成され、小麦、米、雑穀、牛肉、羊肉等の9つの農業生産物、非農業生産物の需給を取り扱う一般均衡型モデルである。このモデルで算定すると、2050年での人口が100億人程度となる中位推定では、耕作地面積、稲作面積はそれぞれ1.2倍、1.5倍になり、また窒素施肥量は2倍となる結果を得、これに排出原単位を乗ずることによって排出量算定などが行われている。世界食糧需給モデルは、穀物潜在生産量モデルと組み合わせ、気候影響による飢餓人口変化などにも使用されている。

フロン及びハロンは、成層圏オゾンの消滅原因となる以外に、強い温室効果ガスでもある。この部門での排出モデルの役割は、未参入国及び未規制物質の消費量予測、新規代替物質のミックスに加え、消費から排出にいたるプロセスの定量化である。こうした事象を総合的に取り扱うモデルとしては、米国環境保護庁 (USEPA) が開発したIAM (Integrated Assessment Model) があり算定作業に従事している。

3. 温室効果ガス循環と気候のシミュレーション

2の各モデルで算出したガスは、大気中に放出される。大気中の空気量は約 1.77×10^{20} モルである。炭素循環に関し、例えばCO₂が10億tC (1×10^{15} g すなわち 8.33×10^{13} モル) 放出されこれが大気中に一様に混合したならば、これによる濃度上昇は $8.33 \times 10^{13} / 1.77 \times 10^{20} = 0.471 \times 10^{-6}$ すなわち0.471ppmv となる。これに、海洋などへの吸収の効果を考慮すれば大気中濃度が算定される。次式はこれを定式化したものである。

表-1 最近の炭素循環モデル一覧

モデル名称	開発者	海洋モデル	大陸炭素モデル	CO ₂ 肥化モデル
AIN/TCCM	Blanis, Matsuoka and Kainuma(1995)	Response func.	0.5x0.5° x 7 pools	Logarithmic
ANU-BACE	Taylor, Lloyd and Farquhar(1993)	BDM	ANU-BACE	Miscel.
-	Emanuel(1993)	BDM	26-ecosystems	Linear
-	Cohen(1992)	(with land)	(with ocean)	-
-	Enting and Lassey(1993)	BDM	2-box	Hyperbolic+saturation
SLAVE	Friedlingstein(1992)	Response func.	5x5° grid x 9 ecosystems	Logarithmic/Hyperbolic
GLOCO	Goldstein and Keller(1994)	HILDA	6-regions x 6-ecosystems	-
HCCCM	Heimann et al.(1993)	HAMOC3-3	OBM3m	Hyperbolic
HILDA+Biota	Joos and Siegenthaler(1992)	HILDA	4-box	Logarithmic
LLNL-CCM	Jain and Wuebbles(1993)	HILDA	6-box	Logarithmic
-	Braswell and Moore(1994)	12-box	5-box	Miscel.
LODYC OGCM	Orr and Monfray(1994)	OPA model	-	-
-	Peng(1994)	BDM	-	-
-	LeQuere, Sarmiento and Pacala(1994)	GCM (NOM code)	5-box	Miscel.
IMAGE2.0	Alcamo and Krol(1994)	12-box	0.5x0.5° x 7 pools	Logarithmic
-	Harvey(1989)	Response func.	6-box	Logarithmic
-	Viecelli(1994)	lifetime	None	-
MAGICC	Wigley(1991)	Response func.	4-box	Logarithmic/Hyperbolic
NMTC	Zakharova and Selyakov(1991)	2-box	-	-

BDM : ボックス拡散モデル

HILDA : High-Latitude Exchange/Interior Diffusion-Advection model(Shaffer and Sarimiento, 1993)

HAMOC3-3 : 3次元Hamburg海洋炭素循環モデル, 15層 x 3.5° grid, Maier-Reimer and Hasselman(1987)

OBM3m : 2次元Osnabruck生物圏モデル, 5炭素プール x 2.5° grid

OPA model : Ocean Parallelise model developed at LODYC, 19層 x 1~2° grid

ANU-BACE : ANU Biosphere/Atmosphere Exchange model

$$\frac{1}{0.471} \cdot \frac{dC(t)}{dt} = Q_{foss}(t) + D_n(t) - S_{ocean}(t) - S_{fert}(t) - S_{resid}(t) \quad (1)$$

ここに、 $C(t)$ は大気中濃度(ppmv)、 Q_{foss} は化石由来排出量(燃料及びセメント生産起源、 GtCy^{-1})、 D_n は土地利用変化由来排出量(GtCy^{-1})、 S_{ocean} 及び S_{fert} はネットの海洋取り込み及び大陸植生取り込み分であり、 S_{resid} はその他の吸収機構による大気からの消失分である。式(1)で表現される地球内炭素循環メカニズムを取り扱った最近のモデルを表-1に一覧しその代表的な出力例を図-4に示す。これは排出シナリオとしてIS92aを使用したときの11のモデルの地球平均CO₂濃度計算結果を描いたもので、1990年の354ppmvが2050年には480~520ppmv、2100年には629~731ppmvとなっている。2100年時点の標準偏差は30.3ppmv程度もあり、モデル化機構がかなり異なることを反映している。

大気中の温室効果ガス濃度から気候変動を算定するには、ほとんどの場合、大気/海洋大循環モデル(A/OGCMs)を使用する。しかし、現在のところ、この計算にかかる労力は膨大であるため、気軽に計算を繰り返すことはできない。そこで、環境影響評価などの目的には、既往の計算結果を計算機可読媒体などでオフライン的に影響モデルに受け渡す。大きく分けて2通りの計算種類がある。第1はCO₂濃度を一定量変化させたときの平衡的な気候状態を算出したものである。第2はGHG濃度を時間的に変化させた非平衡計算である。第2の場合でも、濃度シナリオは各ラン毎に固定されているから、任意の排出シナリオに対する気候変化を算定するにはこれらのA/OGCMsの結果を外挿する必要が生ずる。しばしば行われている方法は、各個のGCM結果を地表付近温度の地球平均で除して、時間的及び空間的に「正規化」された気候変動プロフィールを作成する。一方、地表付近の地球平均気温に関しては、GCM計算結果及び放射加熱モデル計算結果などを参照しながら作成した簡易な放射加熱式と、地表・海洋付近の熱収支式を組み合わせた0次元気候モデル(Dickinson, 1986)を使用して、海洋の影響とか産業革命以前からの履歴も考慮した格好で算定する。そのうえで、平衡GCM計算結果ならば「正規化」気候変動を温度上昇値倍に、非平衡GCM計算結果ならば簡易モデルの温度上昇の時間的軌跡を参照してGCM計算の時間軸を調整する(Grecoら, 1994)。GCM計算結果を使用するにあたり、その精度、分解能は悩みのタネである。前者に関し、現状状態の計算結果あるいはGHG濃度変化時の計算結果より、両状態の変化量の方が信頼性が高いと想像されているから、現状時に関しては観測値を、気候変化時には観測値に計算変化量を上乘せしものを使用するのが通常である。分解能に関しては、1989年以前に行われたGCM計算は500~1000kmメッシュであったが、最近では300km程度のものが入手できるようになった。しかし、地域的な影響評価を行うには粗すぎ、なんらかの内挿を行うのが通常である。米国が途上国51ヶ国を対象に実施している温暖化影響調査プロジェクトでは地点間距離に反比例する重みで内挿する方法を採用する。この操作を現状時及び変化時計算の月平均値について行い、その差あるいは比を日観測量に上乘せしものを変化時の影響モデルの入力とする。しかし、この方法は、メッシュ内空間パターンの変化とか時間的変動の変化をほとんど考慮していない。これに関し、GCMをネスティングし直接的に推定しようとする方法とか、観測値と計算値の統計量あるいは大循環パターンの比較から偏差統計量変化を推定しようとする方法などが試みられているが、未だ成熟した方法に至っていない。

これらは特定分野を対象としたモデルであるが、分野間の複合作用とか間接影響を評価するためには、それらを別途、独立に構築し階層的にリンクさせ有機的に組み直す必要がある。そうした総合化の例として、図-5に AIM/Impactで構築中の影響評価モデルのフレームを示す。

5. 統合評価モデル(IAM)の必要性

地球温暖化問題は、非常に幅広い分野にまたがる問題で、多くの複雑なメカニズムから成り立っている。そのため、少数の特定の領域の科学的知見を寄せ集めるだけでは、なんら有効な対策・政策を見いだすことはできず、それらの対策あるいは政策立案に向けての総合化が必須となる。しかし、知的ではあるが専門家でない市民あるいは施策決定者にとって、このような総合化は困難な点も多く、彼らの思考とその組織化を助ける有効なツールとしての統合評価モデル(integrated assessment model)の開発が不可欠となる。このモデルでは、広い範囲の研究者の英知を系統的に体系化し、世論あるいは施策決定に向けて結集することを使命とする。最近になって、この種の学際的なモデリングの開発が一気に盛んになってきた。経済、エネルギー、気候、生態系といった分野を総括的に解析・総合化するもので、その規模も大規模になり、環境に関するシミュレーションの集大成の一つとも言えるものである。そして、世界のモデル研究者たちがこの開発競争に参加して凌ぎを削っている。温暖化統合評価モデルでは、人間の活動によって温室効果ガスがどのくらい排出されるか、その温室効果ガスが大気中に蓄積され気温や地域の気候がどのように変化するか、さらに、この気候変化が各地の自然環境や人間活動にどのような影響や被害を与えるか、という一連のプロセスを統合して分析するところに特徴がある。これによって対策の総合的な効果や間接的な効果の判断、政策評価における不確実な要因の判断、対策の費用と効果の比較などいろいろな政策決定のニーズに体系的に答えることができる。現在、世界中で20弱の統合評価モデルが完成もしくは開発中であるが、その多くは、経済、エネルギー、気候変化と言った特定のプロセスのみを詳細にして、他のプロセスは簡略なモジュールにとどめる構造となっている(図-6)。全プロセスを通じて緻密なモデリングを試みているのは、その内の4つであると考えられている。米国のバトラー研究所のGCAM(Global Change Assessment Model)、マサチューセッツ工科大学のMITモデル、オランダの環境衛生研究所のIMAGE2.0(Integrated Modeling of Global Climate Change 2.0)及び名古屋大学と国立環境研究所が共同して開発している AIM(Asian-Pacific Integrated Model for Climatic Change)である。

地球規模問題を取り扱うモデルとしては、従来からWorld3などのグローバルモデルなどの系譜がある。それらのモデルでは、現代社会の一般的な行動様式あるいは思考パターンがそ上にあげられその帰結としての世界像を描くことによって、社会的警告あるいは教育面において優れた役割を担ってきた。一方、IAMでは、具体的な行動・政策決定の支援を目的とする。そこでは、施策結果結果としての今後の地球環境及び社会の将来像を説得性を持って提示しなければならない。そのためには、個々の要素モデルの地球規模現象と地域性が強い環境影響評価を何らかの同一フレームで取り扱ったり、1~10年程度の中短期スケールの施策課題を100年以上の超長期スケールの事象と連結させる必要が生ずる。構築モデルの再現性を検証できるチャンスは少なく、一研究グループの作業では完結不可能であり、分野を横断し多国間にわたる共同プロジェクトとして発展することが不可欠となる。

このように、地球環境のIAMは、従来の環境モデル「パラダイム」では想定していなかった種々の状況に遭遇する。その意味から、きわめて挑戦的な分野であり、そうした努力を続けることによって、環境システム工学の新しいフロンティアが開かれるものと確信している。

引用文献

- U.S.Country Studies Management Team, 1994, Guidance for Vulnerability and Adaptation Assessments, U.S.Country Studies Program.
- Carter,T.R., M.L.Parry, H.Harasawa and S.Nishioka, 1994, IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations, Intergovernmental Panel on Climatic Change Working Group II. 59pp.
- Dickinson, R.E.,1986, How will climate Change? (in) The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems, (eds.)B.Bolin, B.R.Doos, J.Jager and R.A.Warrick, John Wiley,207-270.
- 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.
- Greco,S., R.H.Moss, D.Viner and R.Jenne, 1994, Climate Scenarios and Socioeconomic Projections for IPCC WGII Assessment, Intergovernmental Panel on Climatic Change Working Group II.
- Kates, R.W., J.H.Ausubel and M.Berberian (eds.), 1985, Climate Impact Assessment, Wiley, 625pp.
- 松岡 譲・森田恒幸, 1994, 最近の温室効果ガス排出見通しとそれによる気候変動について、環境システム研究、22、359-368.
- Weyant,J, 1995, Integrated assessment of climate change: An overview and comparison of approaches and results, (in) IPCC WGIII Second Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climatic Change Working Group III.