

《小特集》

地球温暖化対策の統合評価モデル (AIM) の開発

森 田 恒 幸*・松 岡 譲**・甲斐沼 美紀子*

ABSTRACT The Asian-Pacific Integrated Model (AIM) is a large-scale computer simulation model for assessing policy options to stabilize global climate, particularly in the Asian-Pacific region, from the two perspectives of reducing greenhouse emissions and avoiding the impacts of climate change. AIM is comprised of three linked models: an emission model, a climate model and an impact model. A major part of the emission model is the energy modules for estimating greenhouse gases (GHG) caused by fossil fuel combustions. In the modules, more than 100 technologies are evaluated for their potential to improve energy efficiency and for energy demand estimates at country level, and these are linked to a top-down economic model at global level. The climate model was created by developing original linkages to join several modules such as atmospheric reaction, ocean uptake, carbon cycle, radiative forcing and feedbacks for determining GHG concentrations and climatic changes. The impact model has a spatial water balance model, an ecological matching model, a food production model and a malaria distribution model, so that the increased risks of droughts, flood, vegetation changes, agricultural damages and molarias can be assessed.

1. はじめに

いま地球環境問題は、我々人類の生き方や社会経済の発展のあり方にかかわる基本的な問題として、世界的に政策対応が急がれている。その中でも特に大きな政策課題と認識されているのが、地球温暖化問題である。

地球温暖化問題は、気象、海洋、生物、大気化学等の自然科学の分野のみならず、経済、エネルギー、技術、国際関係等の社会科学や工学分野にまたがる、大変複雑なメカニズムから生じる。このため、少数の領域の科学的知見を寄せ集めるだけでは、なんら有効な政策は見出せない。非常に広い範囲の領域の断片的な知見を、政策立案に向けて総合化しなければならない。しかし、知的ではあるが専門家ではない政策決定者にとって、このような総合化は至難の技であり、政策決定者の思考を助ける有効なツールの開発が不可欠となってきた。

このツールとは、広い範囲の研究者の英知を政策決定に向けて結集するコンピュータ・モデルのことであ

Development of an Integrated Model (AIM) to Assess Policy Options for Stabilizing Global Climate. By Tsuneyuki Morita, Mikiko Kainuma (National Institute for Environmental Studies) and M Yuzuru Matsuoka (Univ. of Nagoya).

*国立環境研究所

**名古屋大学

り、最近になって、この種の学際的なモデリングの研究が一気に盛んになってきた。このモデルは、統合評価モデル (integrated assessment model) と呼ばれ、経済、エネルギー、大気、海洋生態系といった分野を包括的に解析する大変に大規模なもので、シミュレーション技術の集大成ともいえるものである。そして、世界の精鋭がこのモデルの開発競争に参加して、凌ぎを削っている。われわれの研究チームもその一つである。

われわれが開発中のモデルは「アジア太平洋地域における温暖化対策分析のための総合モデル (Asian-Pacific Integrated Model)」, 略して「AIM」と呼ばれ、基本部分が既に完成し、いくつかのシミュレーション分析を行っている。本稿では、この AIM の概要について紹介する。

2. アジア太平洋地域に焦点を当てた世界モデル

統合評価モデルとよばれる温暖化政策の分析モデルは、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が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。EMF (1995) によれば, 現在のところ世界中で16の統合評価モデルが完成もしくは開発中である。その多くは, 経済, エネルギー, 気候変化とい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。全プロセスを通じて緻密なモデリングを試みているものは, 今のところ4つに過ぎない。米国のパツェル研究所のGCAM (Edmonds, et al., 1994), マサチューセッツ工科大学のMIT (MIT, 1994), オランダのRIVMのIMAGE2.0 (Alcamo, 1994), それにわれわれのAIMである。

AIMの特徴はいくつもあるが, 他との大きな違いは, 世界モデルでありながらアジア太平洋地域に焦点を当てている点である。この地域の各国から排出される温室効果ガスを特に詳細に推定し, また温暖化にもなつてこの地域に生じる各種の影響や損害を特に詳しく分析できるように設計している。しかも, 個々の国のモデルはそれぞれの国の研究者と共同で開発し, 各国に政策分析ツールとして定着するようシミュレーション技術の移転を図っているのである。

アジア太平洋地域を特に詳しく扱うことには大きな理由がある。この地域は大きな経済発展のポテンシャルを有しており, 温室効果ガスの排出が急激に伸びることが確実である。二酸化炭素の排出量でみると, 来世紀末には世界の半分にまで増えると予想される。さらに, 一旦気候が変化し始めると, この地域の社会経済は著しい被害を受けることになる。地球温暖化問題の解決には, まずアジア太平洋地域を征することが必要なのである。しかも, わが国は経済援助や技術移転などを通じてこの地域でのリーダーとしての役割が期待されており, 政策分析ツールの開発や研究面のサポートにおいてもわが国への期待は大きい。

3. 研究者と政策決定者のインターフェイス

さて, AIMの全体構造を図1に示す。人為起源の温室効果ガスの排出量を予測する温室効果ガス排出(AIM/排出)モデル, 排出された温室効果ガスの大気中濃度を予測して温度上昇を推定する温暖化現象(AIM/気候)モデル, それに, 気候変化がアジア太平洋地域の自然環境や社会経済に及ぼす影響を推定する温暖化影響(AIM/影響)モデルの三つから構成されている。各々のモデルはさらに細かいサブモデルに

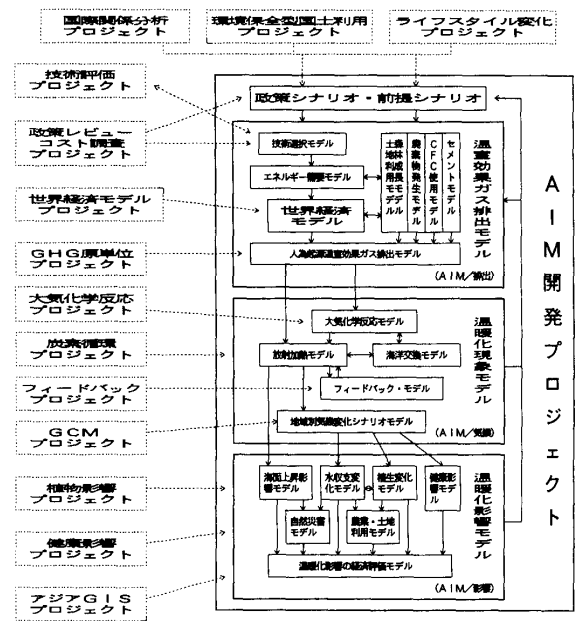


図1 AIMモデルの全体構成と他のプロジェクトとの関係

分かれ, それぞれのサブモデルには関連する研究プロジェクトの成果を集約する体系となっている。即ち, 個々の分野の研究者の知見を総合化して政策決定者に手渡し, また政策決定者の問題意識を個々の研究者に伝えるという, いわばコミュニケーション・インターフェースを構築することが, AIMの基本的な設計方針となっている。

「AIM/排出モデル」の主要部分は, エネルギーモデルと土地利用モデルであるが, 特にエネルギーモデルに大きな特徴がある。詳細な技術評価に基づいてエネルギー消費量を部門別に積み上げて推定するボトムアップ型のモデルと, 市場均衡を基本にして長期的な経済活動の推移を予測するトップダウン型の経済モデルとが統合される構造になっている。これにより, 長期的な社会経済の趨勢と各国の個別的な対策の効果との関係を体系的に分析できるようになった。

「AIM/気候モデル」の特徴は今までに開発されている大気化学反応, 海洋交換, 放射加熱, 等のモデルと, 炭素循環等の独自に開発したモデルを一定のフレームに基づいて組み合わせたことにある。こうして完成したAIM/気候モデルによって, 温室効果ガスの排出が地球規模の気候を変化させるプロセスと, この地球規模の変化が地域の環境や社会に影響を及ぼすプロセスが, 統合して分析できるようになった。

「AIM/影響モデル」については, 水資源への影響, 植物生態系の変化, 健康への影響, 海面上昇による影

響、農業生産の変化、自然災害のパターン変化等、個々の影響を推定するサブ・モデルから構成されている。また、これらの個々の影響が地域の社会経済にどのような影響を及ぼすかについて、総合的に評価するモデルの開発も予定している。これらのモデルの特徴は、独自の地理情報システムの整備によって、10～100キロメートル四方を単位地域とした高解像度の分析が可能な点である。これによって、アジア太平洋地域の温暖化に伴う影響を詳細に分析できるようになった。

4. 省エネ技術の普及に有効な炭素税

AIM/排出モデルでは、人口増加、経済成長、技術革新、各種政策展開等のシナリオを前提として、エネルギー消費量や土地利用変化などを予測し、将来の温室効果ガスの排出量を推定する。

この中で中心となるサブモデルは、先にも述べたとおり、エネルギー・モデルである。エネルギー・モデルは世界モデルとアジア太平洋地域の国別モデルから構成されている。世界モデルは、EdmondsとReilly(1983)が開発したエネルギーの部分均衡をその基本構造として持つトップダウン型経済モデルを適用している。一方、国別モデルは、部門別に詳細にエネルギー需要量を積み上げて推計するボトムアップ型のエネ

ルギー需要モデルである。この基本構造を図2に示す。

エネルギー需要モデルでは、まず、将来に必要なエネルギーのサービス量をエネルギーサービスモジュールにおいて推計し、エネルギー効率改善モジュールで推定したエネルギー効率をこのサービス量にかけ合わせることで、国別のエネルギー需要量を予測する。この際、エネルギー効率の改善は、技術選択モジュールにおいてどの範囲の省エネ技術が選択されるかにより決定される。例えば、日本モデルでは100種以上、中国モデルでは300種以上の省エネ技術が市場に導入されるかどうか評価されている。

このモデルの優れた点は、これらの省エネ技術の導入がその時々エネルギー価格により決まるという現象を、忠実に再現していることにある。即ち、エネルギー価格が高くなれば、多少の初期コストが高い省エネ技術であっても、燃費節約の便益の方が大きくなって、省エネ技術のシェアが増える。このような現象を体系的にシミュレーションできるのである。これにより、炭素税を導入してエネルギー価格が上昇した場合、どの範囲の省エネ技術が導入され、エネルギー需要量がどの程度減少し、その結果として二酸化炭素排出量がどこまで減らせるかが、体系的に分析できるようになった。

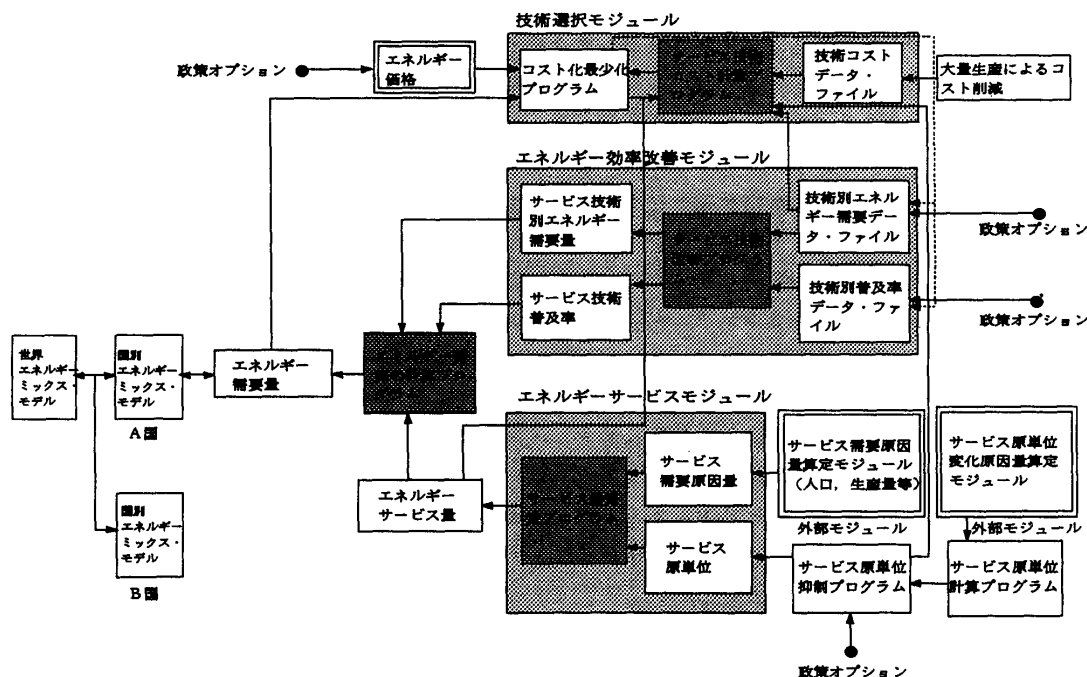


図2 AIM エネルギー需要モデルの基本構造

図3は、わが国におけるシミュレーションの結果を示している。炭素1トン当たり3万円程度の炭素税を導入すれば、家庭、業務及び運輸部門の省エネ技術の導入が大幅に進み、2000年で二酸化炭素排出量を1990年レベルに抑制する可能性があることがわかる。また、炭素税の税収を省エネ初期投資への補助金として積極的に活用すると、炭素1トン当たり3000円程度の薄い税率を課した場合でも、一定の条件の下ではトン2〜3万円の炭素税に匹敵する効果が得られることがわかる。このようなシミュレーション結果は、それぞれの国の政策決定過程に実際に反映されている。

5. 世界の二酸化炭素の半分がアジアから

このように国別に見積もられたエネルギー需要量は、世界モデルにより国際市場を通じて調整され、各国の最終のエネルギー消費量が種類別に決定される。そして、この種類別のエネルギーに基づいて将来の二

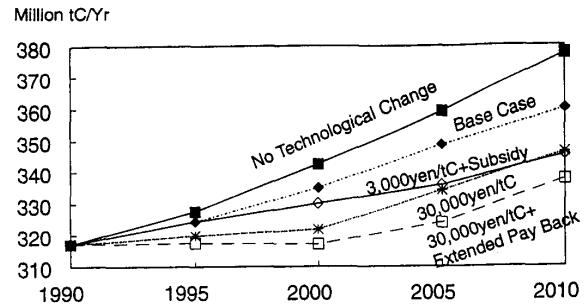


図3 わが国の二酸化炭素排出量の将来予測

酸化炭素の排出量が推計される。

図4は、こうして推計されたアジア太平洋地域の二酸化炭素排出量で、特別な政策を導入しない場合の2100年の値を示している。特に中国、インド、韓国、タイ、マレーシア、インドネシア、日本の一部で排出量の伸びが大きいことが分かる。来世紀には中国は二

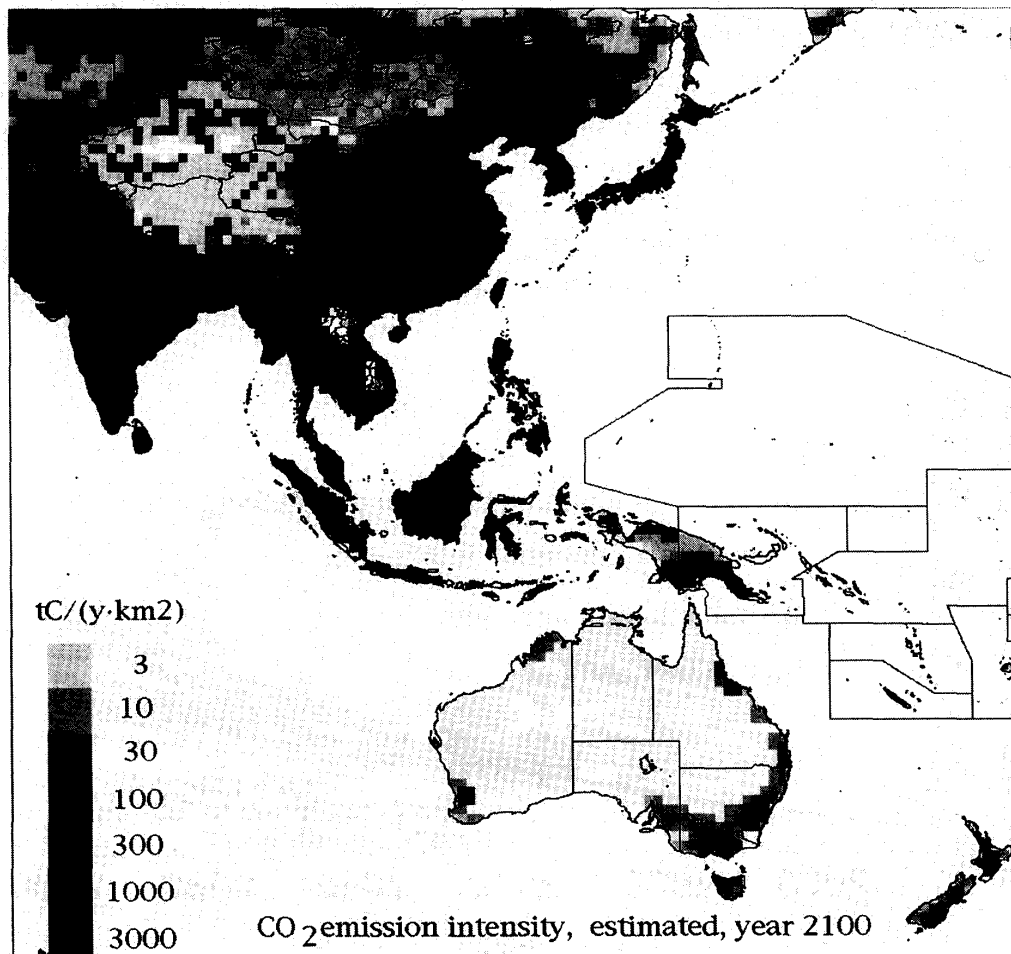


図4 アジア太平洋地域からの二酸化炭素排出量の予測（2100年、標準ケース）

酸化炭素の排出量において世界でトップに躍りでる他、インドも世界4位まで順位を上げる。その結果、アジア太平洋地域の二酸化炭素排出量は、現在のところ世界の4分の1程度のシェアにとどまっているものが、来世紀には世界全体の半分近くを排出する可能性がある。

以上はアジア太平洋地域のシミュレーション結果であるが、AIM/排出モデルにはアジア太平洋地域以外を6地域に大きく分割した世界モデルを用意しており、このモデルを用いれば全世界の温室効果ガスの排出量を推定することができる。

また、エネルギー消費に伴う二酸化炭素排出量の他、森林減少やセメント生産による二酸化炭素の排出、また土地利用変化によるメタンの排出モデルも用意している。特に、森林減少のモデルについては、過去100年間の森林破壊と人口増加の歴史的データをもとにその関係を分析して、熱帯林の減少の統計的予測モデルを完成させ、今後100年間の森林減少による二酸化炭素フラックスを国別に推定している。

6. 不確実が故に必要な温暖化防止政策

温室効果ガスの排出量が地球規模で推計されると、次に、AIM/気候モデルを用いて、大気中の温室効果ガスの濃度が決定され、全球的な気温の上昇のシナリオ、さらに地域の気候変化のシナリオが決定される。

まず、炭素循環モデルにより二酸化炭素濃度が決定され、大気化学反応モデルを通じてメタンガスや亜酸

化窒素の濃度が決定される。そして、放射加熱モデルを通じて全球的な気温上昇のシナリオが決定されることになる。この際、炭素循環の不確実性（ミッシングシンク）、気温上昇に伴う温室効果ガスの排出量への二次的影響（フィードバック）、海洋循環の影響などが考慮される。大気化学反応については米国のAMACモデル、海洋交換については標準的なボックス拡散海洋吸収モデル、放射加熱についてはIPCC（気候変動政府間パネル）等を用いているが、炭素循環については現在オリジナルモデルを開発中である。

また、地域的な気候変化については3種類の大循環モデルの出力をもとに推定モデルを作成している。

図5は、特別の温暖化対策がとられなかった場合の全球の平均気温の上昇を予測したもので、真ん中のハッチの部分は人間活動（人口増加、経済発展、技術革新など）の不確実さによる推計幅を、また、その上下には自然の不確実性による幅を示している。今後、来世紀にかけて摂氏2度から4度の気温上昇が見込まれる。

このようなシミュレーション分析によって、次の点が多岐にわたった。

- (1) 今までに得られた科学的知見と今までの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、温暖化の可能性が非常に高い。
- (2) 社会経済的な不確定要因と自然の不確定要因のいずれもが、温暖化の推定に大きな影響を及ぼす。この

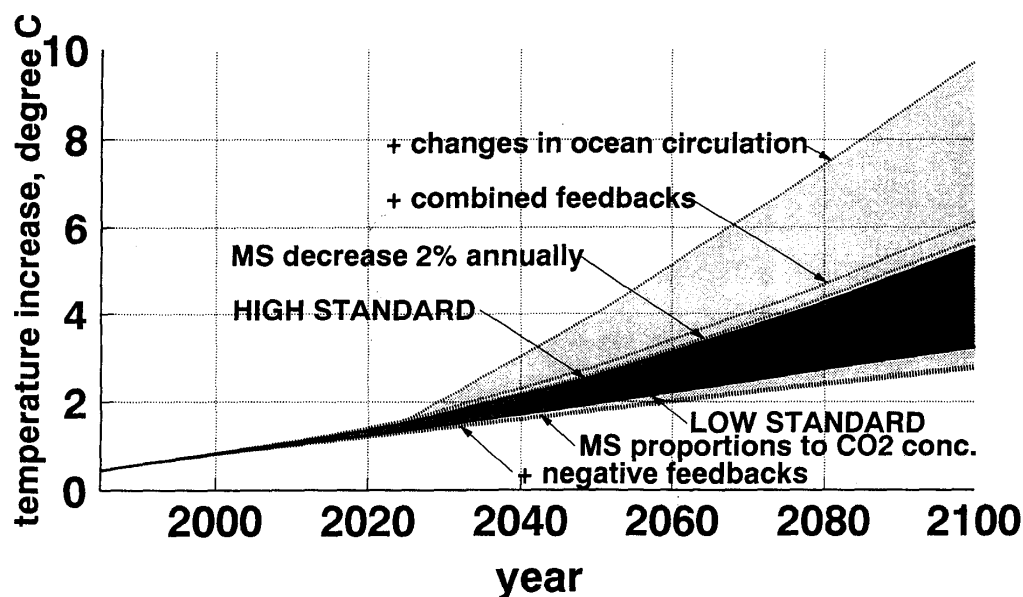


図5 AIM/気候モデルを用いた気温上昇の予測

両方の要因を勘案すると温暖化の不確実さの幅は非常に大きくなる。

(3) このような不確実さは、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。不確実さに対応した幅広い政策オプションの検討が必要である。

(4) 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、フィードバックの三つであり、今後ある程度不確実さを減らせる可能性がある。また、社会的要因についても、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。しかし、そのためにはかなりの長期間を要する。

(5) 以上のことから、温暖化対策の基本は、可能な限り早いタイミングでできるところから対策を実施して、後世の世代がとりうるオプションの幅を広げ、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、と言える。

7. 増加する渇水と洪水のリスク

地域別の気候変化が想定されると、AIM/影響モデルを用いて温暖化影響が検討できる。これらの影響は、地理情報システムをベースにした詳細なモデルにより推計する必要があるが、現在までに、水収支変化モデル、植生変化モデル及び健康影響モデルの三つのモデルが完成している。

まず、陸域の水収支への影響は、地球温暖化の影響のなかでも最も重要な問題の一つである。降水量や蒸発量、その頻度及び期間の変化は、水資源の利用、洪水等の自然災害、農業や陸域生態系に大きな影響を与える。このため、各流域で雨水の流出過程を再現する水資源影響モデルの開発を試みた。このモデルは降水量、蒸発量、融雪、河川流量による水収支モジュールと地形データから決定された河川の流出ルートの水輸送モジュールより構成されている。

図6、図7はこのモデルを用いて温暖化により気候が変化したときの表流水の変化で、二酸化炭素濃度が二倍になった時の洪水及び渇水のリスクの増減を示す。図6の明るい部分は、十年確率で生じる洪水時の流量が二倍以上に増加する地域で、洪水のリスクの増加が予想される地域である。これらの地域には、インド、中国及び日本のそれぞれの一部が含まれる。一方、図6の黒い部分は、十年確率の渇水時の流出量が40～50パーセント程度減少する地域であり、アジア太平洋地域の大変広い地域で温暖化によって渇水被害のリスクが増加することが明らかとなった。洪水時の流

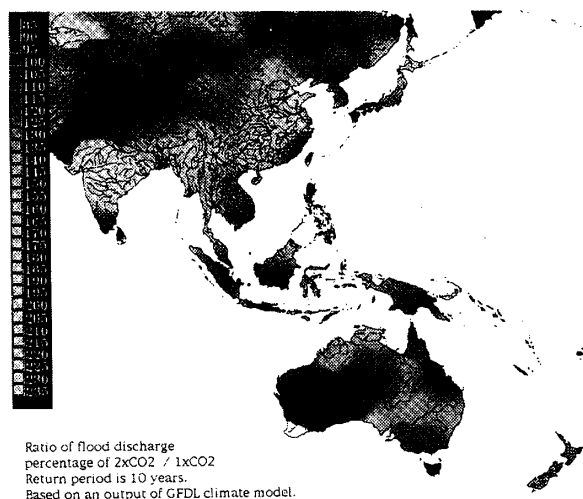


図6 十年確率の洪水時における月間流出量変化

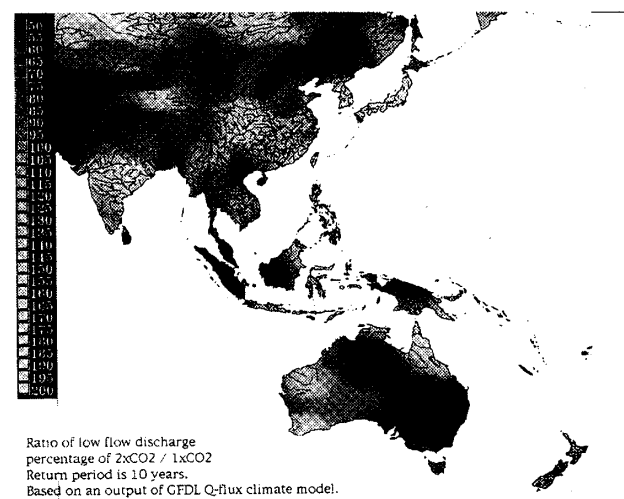


図7 十年確率の渇水時における月間流出量変化

出量が増加する地域は必ずしも渇水被害が緩和されるとは限らず、いくつかの地域では洪水のリスクと渇水のリスクが同時に高まることが予想されている。

8. 植物への影響だけでなく人間の健康への影響も

また、自然植生の変化を予測するためのモデルを開発した。このモデルは、現在の植生の分布と、その分布する地域の自然条件との関係を予め明らかにしておき、気候の変化によってこれらの自然条件がどのように変わり、どの地域の植生の生育条件が損なわれるか予測するものである。詳しくは、それぞれの植生の生育可能範囲とみなし、地球温暖化によってこの範囲を超

えてしまう場合に、この地域の植生は変化するとみなしている。

図8はいくつかの気候変動のシナリオの下での自然植生のシミュレーション結果を示している。中国北部からモンゴルにかけての北方針葉樹やカラマツ針葉樹林帯、それにチベットやヒマラヤの山岳部凍土地帯が大きな影響を受ける可能性があることが分かる。また、中国南東部の常緑—落葉樹林帯、インドの乾燥落葉樹林帯、インドシナ半島及び北オーストラリアなどでも、温暖化により大幅な植生変化が生じる可能性が示されている。

なお、実際の植生遷移のメカニズムは、複雑かつダイナミックであり、本格的に植生変化を分析するため、植生遷移の確率モデルの開発を進めている。

ところで、地球温暖化の影響のうち、今のところ最も大きな経済的損失が見込まれているものは、人の健康への影響である。地球温暖化は地表付近の気温を上昇させて降水量を増加させるため、マラリアの媒介動物であるハマダラカの繁殖とともに原虫の形成期間の短縮効果をもたらし、世界のマラリア患者を増加させると予想されている。このようなリスクを定量的に推定するために、世界規模のマラリア分布の変化予測モデルを開発した。このモデルでは、1) ハマダラカの生息条件（気温変化、土壌水分量等）を明らかにし、2) 温暖化により生息条件がどのように変化するか推定する。3) そして、この結果からハマダラカの生息域、繁殖、原虫の形成期間を推定して、4) それぞれの地域におけるマラリア患者の増加の可能性を評価した。

図9は二酸化炭素濃度が二倍になった時点でマラリ

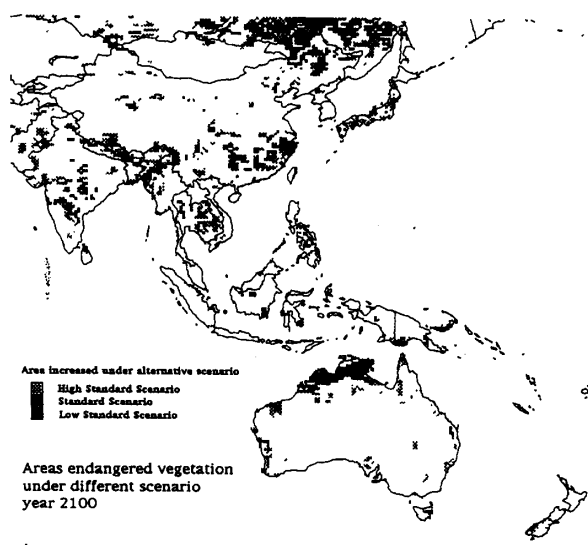


図8 いくつかの温暖化シナリオの下での植生変化の予測

アのリスクの高い地域がどの程度拡大するかを示す。斜線部分が地球温暖化によりマラリアの高いリスクが予想される地域に新たに加わる地域で、アフリカ南部、オーストラリア北部、中国南部、東南アジア、インド、南アメリカ南部の一部がこれに当たる。これは、マラリアのリスクに曝されている人口が、今よりも10～30パーセント増加することに相当する。

9. おわりに

以上、AIMモデルの全体像を簡単に紹介した。このモデルを使っていままでに分かったことは、地球温暖化問題を解決するには、今後100年をかけて、われわれの社会のあり方や経済発展のあり方、それにわれ

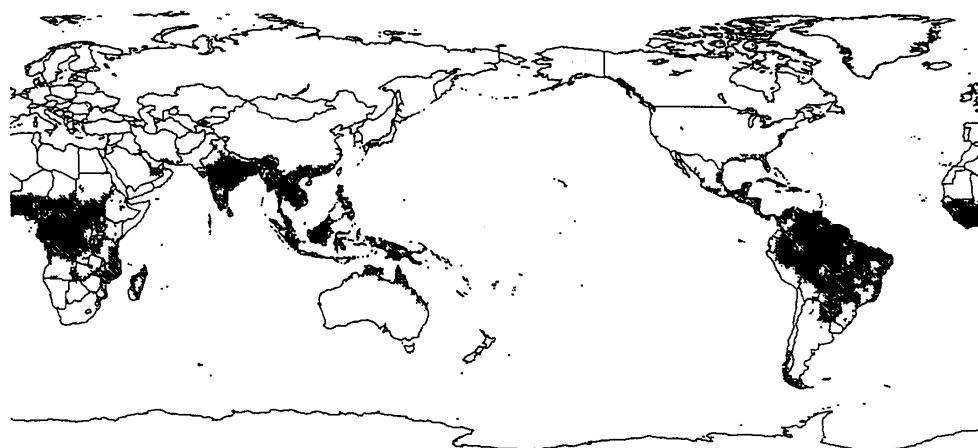


図9 マラリアの安定常在地域の拡大予測

われの生活の仕方を基本的に変えていかなければならないということである。短期的な環境規制や自然保護政策では効果がほとんど期待できない。これからの環境政策には、経済政策やエネルギー資源政策などを包含し、今後100年以上にわたって通用する「本流としての政策論」が不可欠となってきている。

もとより、このモデルを完成させるには、今後多くの作業と国際的連携が必要不可欠である。このため、国内の一研究機関のプロジェクトから、世界の共同プロジェクトへと発展を図っているところである。既に、アジア地域の途上国との共同研究により、国別モデルの開発や改良を進めており、この地域の温暖化対策の評価や国際協調政策の検討に用いられるようになってきている。さらに、米国、オランダ、オーストリア等の研究機関とも、世界モデルの改良のために共同研究を始めており、国際的な政策分析ツールとして活用が図られることを願っている。

参 考 文 献

- AIM 開発チーム (1994) アジア太平洋地域における地球温暖化対策の総合分析モデルの開発。国立環境研究所, 23
- AIM 開発チーム (1994) 技術選択を考慮したわが国の二酸化炭素排出量の予測モデルの開発。国立環境研究所, F-64-'94/NIES, 90
- Alcamo, J. (eds.) (1994) Image 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change, Kluwer Academic Publishers, 318, Dordrecht, the Netherlands
- 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
- Edmonds, J. et al. (1994) Design for the Global Change Assessment Model. *Proceedings of the International Workshop on Integrative Assessment of Mitigation, Impacts, and Adaptation to Climate Change*, IIASA, Laxenburg, Austria, October 13/15
- EMF (Energy Modeling Forum) (1995) Integrated Assessment of Climate Change: An Overview and Comparison of Approaches and Results
- 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, 000/000
- 松岡 譲・森田恒幸・甲斐沼美紀子 (1992) 地球温暖化に関するシナリオとモデル解析。土木学会論文集 449, 1/16
- MIT (Massachusetts Institute of Technology) (1994) Joint Program on the Science and Technology of Global Climate Change
- Matsuoka, Y., T. Morita and H. Harasawa (1994) Emission of Carbon Dioxide Flux from Tropical Deforestation. *Center for Global Environmental Research, CGER-I013-'94*, 35
- Morita T., Y. Matsuoka, M. Kainuma, H. Harasawa and K. Kai (1993) AIM-Asian Pacific Integrated Model for Evaluating Policy Options to Reduce GHG Emissions and Global Warming Impacts. In "Global Warming Issue in Asia", Asian Institute of Technology, 254/273
- Morita T., Y. Matsuoka, I. Penna and M. Kainuma (1994) Global Carbon Dioxide Emission Scenarios and Their Basic Assumptions-1994 Survey-. *CGER-I011-'94*, Center for Global Environmental Research, Tsukuba, 77