

地球温暖化問題対策の統合評価モデル*

熊本尚雄†

1. はじめに

地球温暖化とは、化石燃料 (fossil fuel) の消費により排出される温室効果ガス (greenhouse gases, 以下 GHGs と略記) の大気中の濃度が高まることで、温室効果が強められ、地表面の温度が気候の自然な変動を超えて上昇する現象をいう。

地球温暖化問題は放置すれば、人類の生存を脅かしかねない極めて深刻な問題であり、これまでも多くの GHGs 排出の削減目標数値が定められてきた。例えば、1994年に発効した気候変動枠組条約 (温暖化防止条約) では、先進各国は、GHGs の人為的な排出を2000年において1990年の水準に安定化させることが、努力目標としてあげられている。また、1997年12月に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議 (COP3) において採択された京都議定書では、二酸化炭素 (carbon dioxide, 以下CO₂と略記)、メタン (methane)、一酸化二窒素 (nitrous oxide)、HFC (ハイドロフルオロカーボン)、PFC (パーフルオロカーボン)、SF₆ (六フッ化硫黄) の6種のGHGs排出量合計を、2008年から2012年の平均で、先進国全体で1990年比で5%以上削減 (各国ごとでは、日本6%、アメリカ7%、EU8%の削減等) するとの法的拘束力のある数値目標が定められた。また、先進国内で排出枠の売買を行う排出量取引や先進国同士が相互の協力して排出削減を行う共同実施、途上国との間で排出削減のための事業などを行うクリーン開発メカニズムなどの新たな仕組みが導入されたが、これらの詳細については、2000年に開催予定の第6回締約国会議 (COP6) までに決めることとされていた。しかしながら、未だ合意が得られるまでには達していない。

主なGHGsには、CO₂、メタン、一酸化二窒素などがあるが、中でもCO₂

は、全 GHGs 排出量の80%をも占めており、地球温暖化対策には、CO₂の排出削減が不可欠であると言えよう。

経済学の分野でも、こうした地球温暖化問題（大きく言えば、地球環境）に関する研究が、近年（特に、1990年代前半から）多く為されている。

地球環境研究において、経済モデルへのニーズは大きく分けて3つある。第1のニーズは、「経済活動の地球環境負荷」、すなわち、経済活動が地球環境に及ぼす影響を定量的に予測することである。⁴¹ 第2のニーズは、「地球環境変化の経済的被害」、すなわち、地球規模の環境変化に伴って生じる経済的被害（場合によっては利益）を定量的に分析することである。⁴² 第3のニーズは、「地球環境対策の統合評価」、すなわち、地球環境問題を解決するコストと解決によって軽減される被害の双方を考慮して、最適な政策や経済成長の経路を選択する分析に用いられている。⁴³

このようなニーズは、必要とする経済モデルの特徴を決定付けるものである。第1の特徴は、対象となる問題が地球規模であるため、分析に用いられる経済モデルの大半が世界規模のモデルになるということである。⁴⁴ 第2の特徴は、モデルの予測期間が超長期に及ぶため、超長期の思考実験に耐え得るモデルの構造が不可欠となることである。⁴⁵ また、このような超長期にわたって地球環境問題と経済発展との望ましい関係を明らかにするためには、個別の対策のオプションだけでなく、経済成長の経路そのものも重要な分析対象になる。⁴⁶ そのため、第3の特徴として、望ましい将来の経路の分析を可能にするためには、特別な経済成長モデルが必要となる。最後の特徴として、30~100年という超長期の経済メカニズムを再現するためには、ライフスタイルや技術などの社会の構造変化を勘定しなければならないため、社会の長期的構造変化は、地球環境のモデル分析の際に、決して無視できない重要な要素となることが挙げられる。⁴⁷

地球環境問題、とりわけ地球温暖化に対処するためには、すなわち、気候変動の危険性、生態系の応答、人類の応答、対応手段の実行可能性、有効性、コストおよび副作用を評価するためには、関連する科学的、技術的経済的、および社会政治的知見を最大限に利用し、それらを統合化することによって、問題の基本的な構造とその解釈方向を体系的に明らかにしなければならない。すなわち、他の政治、経済問題よりも気候変動に関する問題は、統合的評価

(Integrated Assessment, 以下 IA と略記) が必要とされている。

本稿は、こうした第3のニーズである「地球環境対策の統合評価」のために開発された「動学的最適化モデル」と呼ばれる成長モデルに焦点を当てて、これらに関する一連のモデルを概観し、各モデルが主張する結論について評価することを目的とするものである。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2節では、地球温暖化のIAモデルの古典であるDICEモデルを考察する。次に、3節では、DICEモデルにおける欠点の1つである不確実性の欠如の問題を考慮したCETAモデル、4節では、被害をDICEモデルのように市場被害(CO₂を2倍にした時に、アメリカ経済が受ける被害)に限定せず、非市場被害をも考慮し、被害に関するより詳細なモジュールを持っているMERGEモデル、5節では、DICEモデルにゲーム論を組み込み、様々な戦略を取った場合のGHGs排出削減を算出することができるRICEモデルを考察する。最後に、6節をまとめとする。しかしながら、紙面の関係上、モデルについては概略を説明するにとどめることとする。尚、本稿で扱った各モデルの特徴を記した表を最後に掲載している。

2. DICEモデル

2-1. はじめに

「地球環境対策の統合評価」のために開発されたモデルは、新古典派成長モデル(最適成長モデル)に基づくものであり、最適な経済成長経路を探索することを可能にしている。⁶⁾

このような動学的最適化モデルの開発例として、最も有名なものが、Nordhaus(1991, 1993, 1994)によって開発されたDICE(Dynamic Integrated Climate and Economy)モデルである。このモデルは、地球温暖化のIAモデルの古典であり、最もシンプルなモデルの1つである。世界を一地域として扱い、13本の方程式により、世界の経済と地球温暖化のメカニズム、さらには温暖化による被害も表現しており、GHGs削減の最適パスを推定する動学最適化モデルである。

また、このモデルは、上述したように、後で考察するCETAモデルやMERGEモデル、RICEモデルの基盤となるものでもある。

2-2. モデルの概説

DICE モデルにおいて、経済の直面する選択は、財・サービスを消費するか、生産的資本に投資するか、もしくは気候変化を遅らせるかである。この選択は、1人当たり消費からなる効用の割引総和として表される目的関数を最大化することである。

最大化するにあたり、2つの制約集合が存在する。1つは、経済的制約 (economic constraints) であり、もう1つは、排出-気候-経済制約 (emission-climate-economy constraints) である。

経済的制約集合とは、Ramsey (1928) モデルとして知られている最適経済成長モデルに関するものである。ここで、注目すべき点は、DICEモデルでは、上記したように世界を一地域として扱っており、総世界生産 (GWP) を表す生産関数を $Y_t = \Omega A_t K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}$ と表現していることである。但し、ここで Y_t は総世界産出、 A_t は技術、 K_t は資本、 L_t は労働、 α は産出の資本に対する弾力性、 $0 \leq \Omega \leq 1$ は GHGs の排出による気温上昇の影響を表す感受性 (気候インパクト) の項である。すなわち、Nordhaus は、地球温暖化は直接的に効用に影響を与えるものではないが、生産を通じて間接的に影響が及ぶものとしてしている。

一方、排出-気候-経済制約集合は、経済と気候変化との関係を表すもので、GHGs の排出、蓄積、気候変化、被害、⁹⁾ 排出削減コストに関する式から構成されるものである。

大気中に蓄積された CO₂ は、地表から反射される赤外線の一部を吸収し、気温の上昇を引き起こす。すなわち、CO₂ の排出量が増加するに伴い、大気中の熱量が増加する。また、気温の変化を考える場合にも、(大気中の熱量の一部は海洋に吸収されるが、その海洋の中でも、比較的温かい海面から冷たい深海へと熱量は移動するという) 自然環境のメカニズムを考慮しなければならない。脚注5で述べたように、地球温暖化はゆっくりとしたペースで進行する問題であり、その過程には、化石燃料の消費→CO₂ の排出→大気中の熱量の増加→気温の上昇→生産への影響、という時間的な遅れが伴う。

そこで、Nordhaus は、気候システムを大気中、海面、海底 (深海) という複数層のシステムにより表している。このように表すことにより、CO₂ の蓄積→大気が暖められる→海面が暖められる→海底へと熱量が拡散される、とい

う気候システムを表すことを可能にしている。

2-3. 推定・結論

Nordhaus は、GHGs の削減に当たり、以下の5つのケースの政策を考え、各政策における排出コントロール、大気中のGHGsの蓄積、平均地球表面温度の上昇、各政策を施行するのに必要とされる炭素税、各政策が産出に与える影響について推定を行なっている。

- (1) No controls: このシナリオは、一切、地球温暖化対策を行わない場合を想定している。
- (2) Optimal policy: このシナリオは、最適な経済行動が実現する場合を想定している。1990年から最適化行動が取られるものと仮定し、CO₂削減のために炭素税が導入されるとしている。
- (3) Ten-year delay: 最適な政策が施行されるのが10年遅れた場合を想定している。これは、「地球温暖化の影響が十分に把握できるまで、取り組む必要はない」という意見を評価するものであり、2000年から炭素税が導入され、最適化行動が取られると仮定している。
- (4) Stabilize emission: このシナリオは、1990年水準のGHGs排出の20%をカットする場合を想定している。このシナリオは、毎年のCO₂排出量に上限を設けるもので、1990年の80%を上限とする。しかしながら、今後もCO₂排出量は増加すると見込まれており、削減量は実質的に年々増加していくことを意味する。したがって、このシナリオは思い切った削減努力が経済行動へ及ぼす影響を評価していると考えられる。
- (5) Geoengineering: このシナリオは、コストを掛けずに、気候変化を軽減することができるような技術が導入される場合を想定している。具体的には、CO₂を宇宙に放出したり、海底に閉じ込めたりする技術などが発明され、地球温暖化の影響を全く受けない場合を想定している。

その結果、Nordhaus は、現時点における経済的観点からの順位をつけており、(5)の優位性を主張している。すなわち、地球温暖化の被害は軽微である一方で、取り組みには莫大な費用がかかるとしており、地球温暖化には控えめな手段で対応するのが適当であると結論づけている。この結論については、後に考察する Manne and Richels (1990, 1992) や Peck and Teisberg (1992, 1993)

等も同様の報告をしている。

しかしながら、この DICE モデルには、いくつかの欠点がある。

第1に、地球温暖化による負効用は、生産の減少を通じて間接的にしか受けられないものと表現されている点、第2に、算出の過程において、オゾン減少、大気汚染や R&D のようなその他の潜在的な市場の失敗を省略していることが考えられる。

第3に、被害関数、特に気候変化による発展途上国や自然の生態系の反応についてほとんど考慮していないことが挙げられよう。地球温暖化により、被害を被る国は先進国のみならず、発展途上国や自然の生態系も同様であり、これらへの影響を無視していることには問題があると言わざるを得ない。

これに関連して、不確実性の問題を除いている（閾値を明示的に示していない）ことも挙げられる。特に、地球温暖化の被害は連続的ではなく、気温の上昇が一定水準を超えると被害が急激に増加すると考えられている。以上のことから明らかなように、Nordhaus は地球温暖化の被害を過小評価している。

しかしながら、この DICE モデルに代表されるような「早期の国際協定に基づく本格的な温暖化対策の必要性を必ずしも認めない」という意見を支持する学者は少なからず存在する。このような意見は、no regret policy と呼ばれるものであり、「地球温暖化問題についてはまだ不確実性が大きいので、現時点でコストのかかる温暖化対策を取ると、投じた費用が結果的に無駄になる可能性があるため、現時点では温暖化対策が無駄にならない政策（エネルギー効率を高める省エネルギー投資）を行うべきである」という考え方である。

これに対し、國則・松村（1999）は、IPCC 報告書に発表された現在までの自然科学的な研究の蓄積を根拠に no regret policy は危険な考え方であると言及している。

確かに、遠い未来に技術革新によって大した費用なく炭素排出の削減に成功しても、それ以上に気候の変化がカタストロフィーを引き起こす閾値を越えてしまったら取り返しのつかない事態となり、人類の生存が危うくなって、過去の温暖化対策に関する過小評価を後悔しても遅すぎるのである。

以上の点からも、Nordhaus の結果を全面的に受け入れるには抵抗があると言えよう。

3. CETAモデル

3-1. はじめに

先に見た DICE モデルには、いくつかの欠点があった。その中の1つである、不確実性の問題を考慮しているモデルに、Kolstad (1994,1996) のモデルや本節で考察する Peck and Teisberg (1992, 1993) が開発した CETA (Carbon Emissions Trajectory Assessment) モデルがある。

気候変動による生態系の作用は、全世界の地域において同じであることはなく、各地域への影響は異なったものとなり、不確実性の問題は、環境を考える際には、必ず生じる問題である。

3-2. モデルの概説

CETA モデルの特徴は、気候変化が重要問題となる場合、もしくは、ならない場合という世界の直面し得る様々な状況を表せることができるように(すなわち、気候変化が重大である場合には、大被害をもたらすように、反対に、そうでない場合には、小さな被害を表すように)修正することで、上述した不確実性の問題を解決し、学習 (learning) 過程が最適な排出削減水準に与える影響について分析しているものである。また、このタイプの分析により、もし、世界の現状についての情報が、早い段階で得られるならば、どれだけの追加的な1人当たりの消費が得られるか、ということを求めることにより、完全情報の値を算出することも可能にしている。

この他に特徴的な点は、GHGs を CO₂ のみに限定して分析しているIAモデルが多いのに対し、この CETA モデルでは、CO₂ のみならずメタン、一酸化二窒素や CFCs などをも含めた GHGs の蓄積による気温上昇を、Dickinson and Cicerone (1986) が主張する関係式を用いて定式化している点である。⁹⁰

3-3. 推定・結論

Peck and Teisberg は、主体の意思決定に基づき、不確実性が存在する場合に、経済が直面する状況を分類し、それぞれの状況において3つの GHGs 削減の政策 ((1)No control: 一切、地球温暖化対策を行わない場合、(2)Optimal policy: 経済的に効率的、または最適な気候変化を遅らせる政策を構築する場合、(3)1990 limit: CO₂ 排出を1990年水準に安定化させるケース)が行われた場合の情報価値を計測している。

その結果、不確実性を解決するような政策の計画を立て、施行するには十分な時間が必要であること、また、同時に、GHGs削減の政策を施行する場合には、不確実性の問題を早急に解決する必要性があることを強調している。

4. MERGEモデル

4-1. はじめに

Manne and Richels (1990, 1992) や Manne and Richels et al. (1995) が開発した MERGE (Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG reduction policies) モデルは、詳細なエネルギーのモジュールをもち、エネルギー・ミックスの変化を予測することにより、CO₂の排出量をより詳細に再現できるものである。また、世界を5地域から8地域に分割して、同時のアルゴリズムによってエネルギーの国際貿易もシュミレートすることも可能である。

4-2. モデルの概説

MERGE モデルの特徴的な点は、主に以下の3点に集約される。

まず、大気中におけるCO₂の蓄積が、Mailier-Reimer and Hasselmann (1987) が発展させた炭素循環モデル (carbon cycle model) を用いてモデル化されている点である。特に、CO₂の瞬間的な大気中への排出に対するインパルス関数 (impulse function) は、ウェイト付けされた指数の合計によって表されている。

次に、CETA モデル同様に、GHGsをCO₂のみに限定せず、メタンや一酸化二窒素などのその他のGHGsをも含めて気候変化を定式化している点である。

最後は、MERGE モデルの最も特徴的な点として挙げられるが、被害に関する定式化についてである。先に見たDICEモデルでは、アメリカ経済の市場被害 (market damages) のみを考えていたのに対し、MERGEモデルでは、市場被害に加えて非市場被害 (non-market damages) をも考慮しており、従来のモデルより詳細な被害に関するモジュールを持っていると言える。¹⁰⁾

4-3. 推定・結論

Manne and Richels (1995) は、DICEモデルでNordhausが行った推定のように、GHGs排出の削減に関する異なる5つの政策 ((1)Business as usual: GHGs

排出削減に関して、何ら政策を施さないシナリオ、(2)Delayed tax：2000年から CO₂ 排出1トン当たり1ドル課税するシナリオ、(3)Early tax：2000年から CO₂ 排出1トン当たり5ドル課税するシナリオ、(4)Stabilize CO₂ emissions：CO₂ 排出を1990年水準に安定化させるシナリオ、(5)Stabilize CO₂ concentration：大気中の CO₂ 蓄積水準を415ppmv に安定化させるシナリオ) を考え、各政策に対する二酸化炭素の排出、蓄積、平均気温の変化、温暖化による被害(市場被害+非市場被害)を推定している。

その結果、現時点における経済的観点から順位を、(5)→(3)→(4)→(2)→(1)とつけており、先の DICE モデルと類似した結論を導いている。

しかしながら、この MERGE モデルにおいても DICE モデル同様に、不確実性の水準を given として分析を行っている。気候変化について議論する際には、必ず利害関係が伴う。例えば、何の政策も施さないことにより、取り返しのできない深刻な状態に陥る危険性もあれば、逆に即座に政策を施行し、行動にうつったことにより、かえって莫大なコストがかかることになるという危険性もある。したがって、現在の行動が、世界の気候にどのような影響を与えるかということには細心の注意を払って政策を行う(行動を起こす)べきであり、MERGE モデルがより有用な政策ツールとなるには、こうした気候を考える際に伴う危険性を、明示的に扱うことが必要であると考えられる。

5. RICEモデル

5-1. はじめに

RICE (Regional Integrated model of Climate and the Economy) モデルは、2節における DICE モデルを拡張したモデルであり、Nordhaus and Yang (1996) によって開発された。このモデルは、ゲーム理論 (game theory) のフレームワークを用いて構築されており、もし各地域が、利己的な戦略(自分達の地域の便益を最大化するような戦略)を行った場合に、達成される(ナッシュ解である)排出削減値などを算出することができる。

5-2. モデルの概説

RICE モデルは、DICE モデルの拡張であり、モデルを構成する方程式の多くが類似したものである。しかしながら、決定的に異なる点は、DICE モデルが一地域モデルであるのに対して、RICE モデルでは、多地域(正確には世界

を10地域に分類している)を扱うモデルであるという点と上述したようにゲーム論のフレームワークを用いて分析している点である。

したがって、経済的なトレードオフや国家の自己利益 (self-interests) を考慮することができ、実際に国がどのように気候変動に対する政策を選択するのか、また各国が異なる戦略をとる可能性を導入している。このことは先のモデルでは考えられていなかったことであり、新しく導入された要素である。

5-3. 推定・結論

Nordhaus and Yang (1996) は、3つの異なる戦略 ((1) *Market strategy*: GHGsの排出に対して何ら対策を行わないケース, (2) *Cooperative strategy*: この戦略の下では、全ての国が協調してGHGs排出を効率的に削減する政策をとるケース, (3) *Non-cooperative strategy*: 各国が自国の利益のみを最大化するようなCO₂排出の削減政策を施すケース)を考え、これらの各戦略に対して達成される3つの項目 ((A)産出・排出・気候変化: CO₂の排出, 蓄積, 平均地球温度の変化, (B)政策変数: CO₂排出のコントロール率, 炭素税, (C)厚生効果 (welfare effect): 各戦略から得られる利益)の値を推定している。

その結果、Nordhaus & Yang (1996) は、各項目に対して以下のように結論付けている。

- (1) 世界産出もCO₂の排出も、他の多くの統合評価モデルにおいて得られた数値よりもはるかに高い値を示している。
- (2) 各地域が、*Non-cooperative strategy*をとった場合に達成されるCO₂排出のコントロール率と炭素税の値は、*Cooperative strategy*をとった場合に達成される値より、はるかに低くなる。⁹⁾ また、炭素税の政策を行うことが他の政策よりも有用である。
- (3) *Cooperative strategy*をとった場合に得られる各地域の利益の合計は、高いものとなるが、*Non-cooperative strategy*の場合には、極端に低いものとなる。

6. まとめ

ここまで見てきたモデルは、経済部門間の相互作用を方程式群であらわし、一気に解いていくという意味で「トップダウン・ダウン」と呼ばれている。これに対して、各経済部門の活動を詳細に記述し、これらを積み上げていくことにより経済活動の全体像を記述していくモデルがある。これを「ボトムアップ・

モデル」という。

このボトムアップ・モデルは、長期的なライフスタイルの変化や技術の変化を再現するのに向いている。すなわち、各経済部門のエネルギー消費や供給のプロセスを詳細にモデル化し、これらのプロセスがライフスタイルや技術革新によってどのように変わっていくかをシミュレートする。そして、各プロセスが積み上げて全体のエネルギー消費や供給の量を推計し、CO₂の排出量を予測する。トップダウン・モデルのように、積み上げたエネルギー需給の一般均衡は保証されないが、政策の効果が個々のプロセスや技術ごとに推計でき、また、社会の構造的変化の記述が容易である。これらは、トップダウン・モデルで行うことは困難であり、地球環境研究ではボトムアップモデルが必要不可欠となっている。⁹³

更に、最近の地球環境分野では、経済モデルの統合化が大きなテーマとなっている。これは、地球温暖化問題のように巨大なシステムを対象とした問題において、既存の断片的な知見を集め、まとめ、解釈し、出来れば調和させ、政策担当者の思考を助けることが不可欠となってきたからに他ならない（森田・松岡（1996））。このため、膨大拡散した科学的知見を組合せ、政策と科学のコミュニケーションを活性化するために、経済モデルと自然現象のモデルを統合化したり、経済モデル同士（トップダウン・モデルとボトムアップ・モデル）を統合化することが求められている。⁹⁴

このように、統合評価モデリング研究は、気候変動問題の分析に大きく貢献している。しかしながら、こうした統合評価モデリングには、早急に解決されなければならない点も多く存在する。例えば、モデルのコンポーネントの改良である。特に、気候変動の影響モデル、人間社会の適用過程のモデル、更には技術革新や普及の過程の内生化は重要なことと考えられる。⁹⁵ 様々な政策オプションの複合化によって、より洗練された政策のパッケージをデザインする必要性もある。また、異なった統合評価モデル間での比較も必要であろうし、統合評価のプロセスを国の政策決定過程のみならず、気候変動枠組み条約に基づく国際間の交渉過程にも根付かせる必要もあると考えられる。

今後、これらの問題を克服することにより、更なる統合評価の展開が期待される。

モデル名	開発者名	開発目的	経済的特徴	気候特徴	シミュレーション・最適化
DICE	Nordhaus (1991,1993, 1994)	最適排出経路 の計算	コブ・ダグラス 一地域	炭素蓄積	最適化
CETA	Peck and Teisberg (1992, 1993)	最適排出経路 の計算	Nested CES; 多地域; 不確実性分析	炭素蓄積	最適化
MERGE	Manne and Richels (1990, 1992) Manne and Richels et al (1995)	最適排出経路 の計算	Nested CES; 多地域;	炭素蓄積; その他のGHGs	最適化; Negishi weights
RICE	Nordhaus and Yang (1996)	最適排出経路 の計算	コブ・ダグラス; 多地域	炭素蓄積	最適化; Negishi weights

表1 気候変化に関する統合評価モデルの一覧

註) この表には、本稿で考察したモデルのみを記述している。尚、より詳細な気候変化に関する統合評価モデルの表については、Nakicenovic et al. (1994, 1996) を参照のこと。

参考文献

- Alcamo, J., Shaw, R., and Hordijk, L. (1990), *The RAINS model of acidification : science and strategies in Europe*, Kluwer Academic Publishers.
- Alcamo, J., (1994), *IMAGE 2.0-integrated model of global climate change*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Burniaux, J. M., Nicoletti, G., and Oliveira-Martins, J. (1992), "GREEN : a global model for quantifying the costs of policies to curb CO₂ emissions," *OECD Economic Studies*, pp.49-92.
- Dickinson, R. E., and Cicerone, R. J. (1986), "Future global warming from atmospheric trade gases," *Nature*, pp.109-115.
- Dorfman, R., and Dorfman, N. (1976), *Economics of the environment*, W. W. Norton.
- Edmonds, J. A., and Reilly, J. M. (1985), *Global energy assessing the future*, Oxford University Press.
- Fisher, G., Frohberg, K., Keyzer, M. A., and Parikh, K. S. (1988), *Linked national models: a tool for international food policy analysis*, Kluwer Academic Publishers.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (1990), *Climate change : the IPCC scientific assessment*, Cambridge University Press.

- Kolstad, C. D. (1994), "The timing of CO₂ control in the face of uncertainty and learning," In : Ierland, van E. C. (ed.) *International environmental economics*, Elsevier Science Publishers.
- Kolstad, C. D. (1996), "Uncertainty, learning, stock externalities and capital irreversibilities", In : Ierland, van E. C. and Gorka, K. (ed.), *Economics of atmospheric pollution*, Springer.
- Maier-Reimer, E., and Hasselmann, K. (1987), "Transport and storage of carbon dioxide in the ocean : an inorganic ocean-circulation carbon cycle model", *Climate Dynamics*, pp.63-90.
- Manne, A. S., and Richels, R. (1990), "CO₂ emission limits : an economic cost analysis for the USA", *Energy Journal*, pp.51-74.
- Manne, A. S., and Richels, R. (1992), *Buying greenhouse insurance*, the economic costs of carbon dioxide emissions limits , Cambridge : MIT Press.
- Manne, A. S., Mendelsohn, R., and Richels, R. (1995), "MERGE : a model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies", *Energy Policy*, pp.17-34.
- Morita, T., Matsuoka, Y. et al. (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.
- Nakicenovic, N., Nordhaus, W. D., Richels, R., and Toth, F. L. (1994), *Integrative assessment of mitigation, impacts and adaptation to climate change*, Laxenburg.
- Nakicenovic, N., Nordhaus, W. D., Richels, R., and Toth, F. L. (1996), *Climate change : integrating science , economics and policy*, Laxenburg.
- Nordhaus, W. D. (1991), "To slow or not to slow? : the economics of the greenhouse effect," *Economic Journal*, pp.920-937.
- Nordhaus, W. D. (1993), "Rolling the DICE : an optimal transition path for controlling greenhouse gases," *Resource and Energy Economics*, pp.27-50.
- Nordhaus, W. D. (1994), *Managing the global commons : the economics of the greenhouse effect*, Cambridge, MA : MIT Press.
- Nordhaus, W. D., and Yang, Z. (1996), "A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies," *American Economic Review*,

pp.741-765.

- Peck, S. C., and Teisberg, T. J. (1992), "CETA : a model for carbon emissions trajectory assessment," *Energy Journal*, pp.55-77.
- Peck, S. C., and Teisberg, T. J. (1993), "Global warming uncertainties and the value of information : an analysis using CETA," *Resource and Energy Economics*, pp.71-97.
- Ramsey, F. P. (1928), "A mathematical theory of saving," *Economic Journal*, pp.543-559.
- Tahvonen, O., Hans, von S., and Jinsung, X. (1993), "Atmospheric CO₂ accumulation and problems in emission abatement," In : Boero, G., and Silberston, A. (ed.) *Environmental economics : proceeding of a conference held by the Confederation of European Economic Associations at Oxford , 1993* , St. Martin's Press.
- 環境経済・政策学会編 (1998) 『環境経済・政策研究のフロンティア』 東洋経済新聞社.
- 國則守生・松村敏弘 (1999) 「環境問題と国際協調—地球温暖化を中心として」 経済研究 50, pp.32-43.
- 熊本尚雄 (1999) 「地球環境の統合評価モデル」, 未定稿.
- 森田恒幸・松岡譲・甲斐沼美紀子 (1995) 「地球温暖化対策の統合評価モデル (AIM) の開発」 『シミュレーション』, pp.4-11.
- 森田恒幸・松岡譲 (1996) 「地球環境研究の統合化に向けたモデリングの動向」 『地球環境』, pp.63-72.
- 森田恒幸 (1997) 「温暖化対策モデルは何を明らかにしたか」, 『経済セミナー』, pp.16-21.

* 本稿は、拙稿『地球環境の統合評価モデル』の加筆修正版である。モデルの詳細な説明については、こちらを参照されたい。

† E-mail : ged1103@srv.cc.hit-u.ac.jp

- (1) 今後の経済成長に伴って、エネルギー消費がどれくらい増加し、その結果、地球温暖化の原因となるCO₂の排出量はどこまで増えるか、また、CO₂を削減するために、炭素税などの経済的手段はどの程度の効果があるか、さらには、このような削減策を行うと、どの程度の経済的コストがかかるか、という一連の定量的分析が、経済モデルに求められることになる。

「経済活動の地球環境負荷」を予測するために開発された世界動学的応用一般均衡モデル(global dynamic applied general equilibrium model, 超長期の思考実験には、過去のトレンドよりも、論理の一貫性と整合性を重視するモデルが適しており、この典型的なモデルのことを「応用一般均衡モデル」と呼ぶ。このモデルは、全ての財について価格調整による市場均衡を仮定し、長期的に整合した経済もダイナミクスを描くものである)の例としては、経済協力開発機構(OECD)で開発されたOECD-GREEN (GeneRal Equilibrium ENvironmental) モデル(Burniaux et al. (1992))が有名である。

このモデルは、CO₂の排出と削減対策の効果を予測するために開発されたもので、エネルギー部門を詳細に表現した世界モデルである。このモデルでは、世界を12分割しており、完全な貿易リンクをもち、交易条件の変化の影響についても考慮できるようになっている。

また、この他に、一般均衡モデルではないが、エネルギーのみの部分均衡を再現するモデルとして有名なものに、Edmonds-Reillyモデル(Edmonds and Reilly (1985))がある。このモデルは、CO₂の排出量を分析した世界モデルの元祖とみなされ、米環境庁の政策分析やIPCC(気候変動に関する政府間パネル)の排出シナリオなど、多くの分析に用いられている。

- (2) 地球温暖化や酸性雨によって、農業生産は地域的にどの程度落ち込むか、これが世界の穀物市場にどのような影響を及ぼすか、その結果、日本の食糧製品の価格がどのように変化して消費者余剰がどれくらい落ち込むか、というような分析に経済モデルは威力を発揮している。

「地球環境変化による経済的被害」を分析するために開発された均衡モデルの例としては、国際応用システム研究所(IIASA)で開発されたBLS(Basic Linked System)モデル(Fisher et al. (1988))やRAINS(Regional Acidification INformation and Simulation)モデル(Alcamo et al.(1990))がある。

BLSモデルは、世界の食糧需給の長期的均衡を分析するために開発され、気候変動による農産物への影響を経済的に評価するため、いくつかの改良が施された。このモデルにより、気候変動に伴う農産物生産の変化と国際市場を通じた調整プロセスが再現され、国別・地域別の経済的影響が推計できる。

一方、RAINSモデルは、酸性化問題に対する自然科学的な観測、また、この問題を抑制するための政策と自然科学とのリンクを分析するために開発されたシナリオ生成手段(scenario generating device)である。このモデルにより、酸性化の原因となる硫黄や窒素の沈殿を抑制する政策の国内ないし国際的な経済的影響を推計できる。このRAINSモデルは、IAが政策決定プロセスに接近した最初のモデルであり、ヨーロッパの酸性雨問題や長距離越境大気汚染条約(LPTAP条約)の議定書策定に大きく貢献した。

- (3) 例えば、CO₂削減のためのコストが非常に高つく場合、少し対策のタイミングを遅らせることと、可能な限り早期に対策を実施することのどちらが望ましいか、というような問題に対して、対策のタイミングの違いによるコストの差と共に、温暖化に伴う経済的被害の違いをも考慮して、経済モデルにより統合的に評価することが多く求められている。

- (4) 世界全体を一地域として扱うモデルや5~20地域に分割する多地域モデルが必要となる。特定の国や地域のみを焦点を当てて、議論しているものもあるが、「地球環境対策の統合評価」のために用いられるモデルは、地球規模の環境変化を再現する必要があるため、必ず、世界モデルが必要とされる。
- (5) 例えば、酸性雨 (acid rain) 問題では、土壌や生態系に影響が出てくるには10~40年はかかるし、地球温暖化問題の場合になると、気候変化の顕著な影響が出てくるのは、50~100年後になる。また、これらの問題の解決には30~100年という超長期にわたる取り組みが必要となる。
- (6) 経済成長の経路の選択如何によって、個々の対策以上に地球環境への負荷を軽減できる可能性がある。
- (7) 例えば、発展途上国の1人当たりGDPが増加すれば、自動車普及率が急激に増加してCO₂の排出量が増えるであろうし、逆に、大気汚染による被害に対する意識が高まって脱硫対策技術の導入が進み、二酸化硫黄 (sulfur dioxide) の排出が減少することも考えられる。
- (8) 例えば、地球温暖化の対策コストと被害の双方を考慮して、100年間の経済厚生を総和を最大化するように経済成長経路を決定することにより、全ての期間のCO₂削減量が同時に決定され、この削減のための炭素税率も決定される。
- (9) このDICEモデルを初めとし、後で考察する全てのモデル共に、気温上昇による被害を絶対的な気温水準に依存するものとして定式化を行っている。しかしながら、近年では、気温の変化率に依存するものと定式化して、CO₂緩和政策の異時点間効率性問題を考えているものもある。これについては、Tahvonen et al. (1993) を参照のこと。
- (10) 彼等は、CO₂、メタンと一酸化二窒素、CFCsによる気温上昇の関係が、それぞれ対数形、平方根、線型で表すことができると主張している。また、MERGEでは、IPCC (1990) に従い、同様の関係式を用いている。但し、MERGEモデルにおいては、CFCsについては考慮していない。
- (11) 非市場被害に関する測定は、経済的に困難であることから、多くの費用・便益分析において無視されてきた。しかしながら、Dorfman & Dorfman (1976) の指摘するように、これらの効果を無視して被害を測定するのは危険であると考えられる。そこで、Manne and Richels (1995) はある地域の居住者は、住んでいる地理的状況 (住んでいる場所) に関係なく、エコロジカルな損失に対して同等の評価を下すものと仮定している。したがって、非市場被害をWTP (willing to pay) により評価するというアプローチをとっている。ここで言うWTPとは、「各地域の消費者が、生態系の被害を避けるために、どれだけのコストを支払ってもよいと考えているか」という割合を1人当たりのGDPと気候変化に依存する形で表すものである。
- (12) このような結論となる理由は、各国が、他国の行う気候変化に対する政策にただ乗り (free-ride) するならば、費用を大幅に削減することができることを知っているからであると考えられる。
- (13) 地球環境のために開発されたボトムアップ・モデルとしては、AIM (Asian Pacific Integrated Model) モデル (森田・松岡他 (1995), Morita, Matsuoka et al. (1993)) の一部であるAIMエンドユース・モデルがある。このモデルは、エネルギーの最終消費の側面を重点的に記述したもので、技術選択のプロセスを詳細に再現できるところに最大の特徴がある。
- (14) この種の統合モデルは、ここ10年の間に、地球規模での各種データの整備や地球規模の各種モデリングの進展、また、コンピュータ技術のハードとソフトの両面の発達により、急速に発展してきた。地球温暖化問題を例に取れば、経済活動→それによって生じるGHGsの排出→炭素循環や大気化学反応などの自然のプロセス→気候変化→気候変化に伴う様々な影響→気候変化による経済的被害→更にその経済活動へのフィードバック、といった一連のモデルを統合するものである。このモデルの代表的なものとして、AIMモデルとIMAGE2.0 (Alcamo et al. (1994)) がある。また、

この他に、米国の国立太平洋北西研究所の GCAM (Global Change Assessment Model) モデルやマサチューセッツ工科大学の MIT モデルが開発中である。

- (15) これらの要素を内生化するものの重要性は、以下のように考えられる。まず、人間社会の適用過程を内生化するということは、人口および土地利用の変化を内生化することと考えられ、出生率と経済成長率との構造的依存性および国内人口流動、さらにはこうした人口・経済状況の変化をもたらす土地利用の変化は、将来環境を大きく左右することになると考えられるからである。次に、技術革新や普及の過程を内生化すれば、世代間分配などの問題について検討することが可能になると考えられる。したがって、これらの要素を内生化して考えた場合には、結果が大きく変わってくる可能性が生じる。

しかしながら、本稿で考察したモデルをはじめ、ほとんどのモデルが、これらの要素を外生変数として扱っている。例えば、CETA モデルでは、技術進展をエネルギー最終用途効率 (AEEI)、およびバックストップテクノロジーとして集約化を図り、外生的なものとして扱っている。