

論 文

不確実性下での気候変動の経済モデリング手法*

小 杉 隆 信

摘 要

様々な種類の不確実性の下において社会が採るべき既存技術の導入あるいは革新技術の研究開発投資による温室効果ガス削減の戦略、すなわち Manne and Richels (*Buying Greenhouse Insurance: The Economic Costs of CO₂ Emission Limits*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1992) のいう「温暖化保険 (Greenhouse Insurance)」を評価するための方法論について概説し、考察を行う。最近の研究においては、気候変動の経済評価のための数理モデルにおいて不確実性を扱うためにさまざまな外生的あるいは内生的確率過程が適用されてきつつあるが、本稿では、これらの適用手法の改善の余地について考察するとともに、最新の研究動向を踏まえつつ、不確実な気候変動に対する合理的な「温暖化保険」戦略の評価に向けたモデル化の更なるステップに関する視点を示す。

I. はじめに

環境問題への対処の方策に関する意思決定を難しくしている大きな要因の一つが、この問題に関わるさまざまな不確実性である。とりわけ、二酸化炭素などの人為的な温室効果ガス排出に起因すると考えられる気温上昇とそれに伴う気候変動という環境問題は、気候変動に関する自然科学的知見が不足しているのみならず、気候変動の影響と対策が多岐にわたり、さらに非常に長期の取り組みが必要とされるということから、必然的に不確実性が極めて大きくなる。

Manne and Richels (1992) は、気候変動対応政策に関する彼らの先駆的な分析研究において、気候変動に関する不確実性に対処するためのヘッジ戦略を「温暖化保険 (Greenhouse Insurance)」と比喩的に表現した。この戦略は大別して、(1) 既存の温室効果ガス削減技術の導入による即座の温室効果ガス削減、(2) 将来低コストで温室効果ガス削減を行えるような革新技術の研究開発、(3) 気候変動とその影響に関する不確実性低減のための科学研究、の三つからなる。

本稿では、不確実性を考慮しない場合の基本的かつ典型的な「温暖化保険」戦略の経済評価

モデルを紹介した後、実際に考慮すべきさまざまな種類の不確実性を分類し、これらの不確実性に関する分析を行うための手法を概説する。ここで主に対象とする「温暖化保険」は、数十年以上のタイムスパンでの科学技術の開発と導入の戦略である。

本稿で取り扱う内容について有用な概説は他にも存在し、その中でも密接に関連する内容を扱っているものとしては Kann and Weyant (2000)、Heal and Kriström (2002)、Peterson (2006)、Baker and Shittu (2008) がある。本稿では、これらの知見を踏まえつつ、「温暖化保険」の評価に伴う種々の不確実性を扱うための確率問題として近年適用されている外生的あるいは内生的確率過程に着目する。その上で、これまでに行われてきた研究では扱われていない点を炙り出し、「温暖化保険」の評価研究に関する今後の方向性について述べる。

Ⅱ. 気候変動の経済モデルの基礎

「温暖化保険」についてのこれまでの研究の大半は、気候変動の経済学研究に確率モデルではなく決定論モデルを適用したものである。ここではまず、基本モデルとして最も標準的な、「温暖化保険」の第1のタイプすなわち既存の温室効果ガス削減技術導入による即座の温室効果ガス排出削減のみを扱うものを説明し、次いで、「温暖化保険」の第2のタイプである技術の研究開発を評価するために、技術変化を内生的に扱うような拡張について述べる。モデルは連続時間問題として定式化できるが、大規模なモデルは、実用的数値分析のためにしばしば離散時間問題に変換される。

一方、「温暖化保険」の第3の分類すなわち気候変動とその影響に関する不確実性低減のための科学研究を扱うモデルについては説明しない。このようなモデルは理論的には構築可能かもしれないが、実用的な分析を行うためには、気候科学研究への投資額と、気候変動とその影響に関する不確実性低減との間に存在する関係が定量的に把握できることが必要であり、この関係について信頼できる定量的データを得るのは極めて困難である。その代わりに、いくつかの研究においては、基本モデルの確率的拡張版を用いて、不確実性の低減を情報の価値として評価を行っている。

1. 基本モデル

気候変動の経済評価のための超長期を扱う動学モデルは統合評価モデルと呼ばれ、一般に、マクロ経済モデル、温室効果ガス排出量と温室効果ガス削減コストを計算する温室効果ガス排出モデル、および大気中温室効果ガス濃度と気温の動学を計算する気候モデルから構成される。統合評価モデルには、マクロ経済モデルから発展したものと、エネルギー技術モデルから発展したものがある。

(1) マクロ経済モデル

統合評価モデルにおいては Ramsey (1928) による新古典派経済成長モデルが最もよく適用される。典型的なモデルにおいては、現在から将来にわたる社会全体での割引後の効用の和を目

的関数とし、これを最大化するような投資の時間的推移を得るように定式化される。すなわち、投資が制御可能な政策変数となる。効用は、消費者のリスク回避性向を反映して、一人あたり消費に関する凹の増加関数として表されることが多い。制約条件として、二つの経済学的な関係式が与えられる。一つ目は、投資と資本の二つの変数間の関係式であり、投資は資本の減耗分の補填と新たな資本の増加に充てられることを表すものである。もう一つは、資本と労働（通常、人口に比例すると仮定する）と技術水準から決まる生産が、消費と資本形成のための投資に分配されることを表すものである。ここで、資本は内生変数であり、労働と技術水準は基本モデルでは外生変数として扱われる。

このマクロ経済成長モデルの枠組みに気候変動の評価を組み込むには、以下の2種類のアプローチが適用できる（この分類は Goulder and Mathai, 2000 による）。

- 費用-便益アプローチ：温暖化によるダメージを経済換算して温室効果ガスの削減コストと比較する。ダメージ関数を特定化する必要があるが、多くの場合、大気中温室効果ガス濃度か平均気温を引数とする関数が用いられる。
- 費用-効果アプローチ：温暖化ダメージを経済換算する代わりに環境制約を与え、その制約下で温室効果ガスの削減コストを評価する。制約としては、温室効果ガス排出量、温室効果ガスの大気中濃度あるいは気温に関するものが採用されうる。

なお、目的関数として、上に示したような割引後の効用の和の代わりに、企業の視点に立って、単純に総利潤や総費用を最適化するという定式化を行うモデルも時々見られる。

(2) 温室効果ガス排出モデル

温室効果ガス排出モデルには、温室効果ガス排出構造の表現の詳細度によりさまざまなバリエーションが存在するが、これらは以下の2種類に大別される

1) エネルギー技術モデル

この種のモデルは、二酸化炭素の主排出源であるエネルギーの技術を明示的に扱い、技術のストックを状態内生変数、技術ストック形成のための投資を政策変数とする。エネルギー技術の総コストと二酸化炭素排出量はエネルギーシステムの規模と構成により計算される。技術間の代替は、種々の需要家での需要の将来にわたる推移を考慮してコスト最小化の観点から最適な技術導入の組み合わせを探索することで決定される場合と、過去の傾向から代替の弾力性を推計して与えることで決定される場合とがある。前者はいわゆるボトムアップモデリングアプローチであり、Manne and Richels (1992) などの多くのエネルギー技術モデル研究で採用されている。後者のアプローチは、Bernstein et al. (1999) などによるいくつかの計算可能な一般均衡モデルにおいて適用されている。

エネルギー技術モデルでは二酸化炭素排出削減のための資本への投資の不可逆性を明示的に扱うことができるのが、不確実性下でのリアルオプション分析を行うよう発展させる場合において重要な特徴となる。この点については後に詳述する。

2) トップダウンモデル

もう一つの、より簡単なアプローチは、技術的側面を明示的に考慮せずに二酸化炭素排出抑

制の集計コスト関数を導入することである。例えば Nordhaus (1994) による統合評価モデルでは二酸化炭素排出削減率を政策変数とし、総生産に対する二酸化炭素排出抑制コストの比率を二酸化炭素排出削減率に関する凸の増加関数として定式化している。

このアプローチでは技術ストックが明示的に扱われないので、社会で利用されている技術の構成は急速には変化しないという特徴が反映されにくく、モデルではエネルギーシステムの構造が非現実的な急変をするといった計算結果が得られがちである。Ha-Doung et al. (1997) はこのような問題を修正するような方法を提示しているが、広くは利用されていない。

(3) 気候モデル

二酸化炭素などの温室効果ガスの排出が大気中の温室効果ガス濃度に与える影響と、それが気温や海水温度に与える影響を動的に計算するモデルである。これらの計算値は、気候変動による経済的ダメージを算出するための重要な指標となる。このような計算を行うモデルは大循環モデルと呼ばれ、特に Wigley (1994) による簡易大循環モデルが統合評価モデルにおいて頻繁に利用されている。

より簡易な理論的検討では、大気中の温室効果ガスのストックを環境影響の要因としてとらえ、新たな温室効果ガス排出が一定の割合で温室効果ガスのストックに追加されるとともに、ストックの一部は一定率で自然により吸収されるという単純な式で計算することがある。

2. 技術変化を内生化したモデル

基本モデルでは二酸化炭素排出に関わる技術水準が外生的に与えられるのに対し、これを内生化するよう拡張されたモデルによって「温暖化保険」の第2のタイプすなわち技術水準向上のための研究開発戦略を検討することができる。

経済成長モデルにおいて技術変化を内生化する考えは、技術水準が研究開発活動の蓄積による知識ストックによって内生的に決定されるとした Romer (1990) の内生的技術変化理論の出現以降、徐々に浸透してきている。

Romer (1990) の考え方を気候変動の経済モデルに取り入れた理論的分析は Goulder and Mathai (2000) が示している。統合評価モデルへの適用は、Weyant and Olavson (1999) がエネルギー・環境・気候変動の政策モデルに内生技術変化を導入する方法の初期の検証を行って以降、Popp (2004) などが行っている。Popp (2004) は新たな政策変数としてエネルギー効率向上の研究開発投資を導入し、生産が、消費と資本形成のための投資に加えてこの研究開発投資にも配分可能とした。資本形成のための投資により資本が増加するように、研究開発投資の積み重ねにより知識ストックが成長するとして、知識ストックの増加とともにエネルギー効率が増上し、経済活動1単位あたりの二酸化炭素排出量が減少するというモデル化を行った。研究開発に誘発されるこの種の技術的進歩は、研究による学習と呼ばれる。

技術変化の内生化のためのもう一つのアプローチは、新技術の普及にしたがって生産経験の蓄積が進み、その技術導入コストが低下することを考慮するものである。このアプローチは、第1の「温暖化保険」の蓄積がコストダウンという意味での技術進歩につながるとする。研究

開発を政策変数として扱う代わりに、典型的には、技術のコストが、その技術の累積導入量が倍になるときに一定の習熟率で減少するという経験則に基づく関数で表される（Gritsevskii and Nakićenović, 2000）。この関数が描く曲線は習熟曲線と言われ、この曲線に沿った技術進歩は、実施による学習と呼ばれる。このモデル化は、エネルギー技術モデルに導入した Messner（1997）が草分けである。このアプローチでは政策変数の追加は必要ないが、規模の経済を扱うために非凸の数理計画モデルを解く必要が生じ、大域最適解を得るためには利用しづらい面がある。

環境政策の経済モデルにおける技術変化の内生化については、Löshel（2002）が詳細に議論している。最近開発されたモデルの中には、Miketa and Schrattenholzer（2004）のように、研究による学習と実施による学習の両方を考慮したものも存在する。

Ⅲ. 不確実性下での評価手法

「保険」の評価には不確実性を扱うのが当然であるが、これまで「温暖化保険」については決定論的な枠組みでの評価が中心であった。最近になって、気候変動の科学的・経済的側面の不確実性についての重要性を考慮したモデル分析が行われるようになってきた。ここでは、まず「温暖化保険」の評価に当たって考慮されるべき不確実性を列挙・分類し、それらの不確実性の評価方法について概略を述べた後、具体的な評価例について、比較的最近の重要な研究上の貢献を紹介する。

1. 不確実性の分類

Kelly and Kolstad（1999）は、「温暖化保険」に関する不確実性を二つのタイプに分類している。

第一のタイプは、パラメータの不確実性である。これは、現時点で我々に十分な知見がないことによるものである。この種の不確実なパラメータの代表例は、大気中温室効果ガス濃度の上昇が気温上昇に貢献する度合いである気候感度や、温暖化による影響を経済換算するための係数である。パラメータの値が不確実とはいえ、客観的あるいは場合によっては主観的データに基づいて、値の確率分布については得られることがある。パラメータの不確実性を扱う問題は、確率モデル最適化のテキストである Pflug（1996）の用語では、リコース（遡及）問題と呼ばれる。この不確実性の特徴は、不確実な値が時間の経過や調査研究の結果として将来は確実になってくる、具体的には、例えば信頼区間の幅が狭まると期待されることである。すなわち、我々は不確実な値について学習¹⁾することが可能である。さらに、どの時点でどれくらい値が明確になるのかについても不確実な場合があり、その場合、現時点における値の不確実性だけでなく、この値の本当の値について学習される速さについての不確実性も扱いの対象となる。

不確実性の第二のタイプは、確率変動である。これは、我々の情報の不足によらない不確実性であり、Pflug（1996）の用語では、この不確実性を扱うものを確率システムと呼んでいる。この種の不確実性は、自然系や社会システムがランダムな動きをすることに対応する。具体例としては、気温や技術の進展の年変動などが挙げられる。

ここではさらに、異なる視点からの、もう一つの種類の不確実性として、パラメータの不確実性や確率変動を扱うに当たっての意思決定基準の不確実性を扱いたい。意思決定基準の不確実性は、統合評価モデルの目的関数をどのような考え方で選定するかに関わるものである。Pflug (1996) は、意思決定基準の不確実性に関して、効用モデル、期待値モデルおよびリスクモデルの3種類のモデルを示している。

効用モデルは期待効用最大化に基づくものであり、マクロ経済を扱う場合に最もよく用いられる。この種のモデルでは、消費者の効用を、消費に対して凹な増加関数として与えるのが一般的である。これは、消費者がリスク回避的であるという現実を反映している。

期待値モデルは、コスト最小化あるいは利潤最大化基準を採用するものであり、営利企業の選好に対応している。このモデルは、効用モデルの特別な場合、すなわち効用を利潤に関するリスク中立的関数であると定義した場合に相当する。

リスクモデルは、効用および期待値モデルとは思想を異にする。Pflug (1996) によれば、意思決定者はコストの期待値だけではなく、その変動性を考慮に入れることがある。変動性を高くするような意思決定は高いリスクを引き起こし、望ましくないことから、意思決定プロセスにおいてリスクの尺度が考慮される。リスク尺度は損失関数として定義され、これは期待値からの偏差による悪影響を測るものである。

リスクモデルの目的関数は、期待値モデルから拡張する場合、ある重み付け係数をリスクに乗じた項を期待コストに加えたものとするのが一般的である。リスクを定義するのに、定まった方法は存在しない。Pflug(1996)のようにリスクは期待コストの変動性を表すとしてもよいし、定められた環境制約からの逸脱であるとしてもよい。あるいは、最悪ケースでのコストであると定義することもできよう。ただし、経済モデルではこれまでのところ効用モデルと期待値モデルの意思決定基準がほとんどを占めており、リスクモデルが用いられるのは例外的である。

2. 既存研究における評価手法

(1) 不確実性を扱うための方法

気候変動の経済分析において不確実性を扱うための方法を列挙すると、以下のようになる。

A. 感度分析

B. モンテカルロシミュレーション

C. 確率的最適化問題としてのモデリングの求解

C-1. 状態遷移の確率と遷移幅が外生的に与えられる確率過程を適用するもの

C-2. 状態遷移幅が内生的に決まる確率過程を適用するもの

C-3. 状態遷移確率が内生的に決まる確率過程を適用するもの

上で述べたもののうち、Aの方法は、不確実なパラメータの値のある幅で変化させたときのモデルの解すなわち政策変数の最適値に与える影響を分析するという簡易なものであり、手法上とくに見るべき点はない。Bは、不確実なパラメータの値がある決まった確率分布に従うとして、その確率分布に基づいてパラメータの値を多数サンプリングしてそれぞれのサンプリン

グ値を与えてモデルを解き、解の確率分布を得るものである。これは手法としては新しいものではないが、計算の負荷が大きいのでそれほど頻繁には行われていない。Bの手法を適用したもので特に着目に値する研究例を後に示す。

Cの方法は比較的新しいものであり、気候変動とは関係のない動学的確率一般均衡モデルや、最適成長モデルの発展の結果として開発された確率的最適成長モデルといった経済モデルにおいては適用が進みつつある²⁾。例えばWilliams（2004）は、労働生産性が幾何ブラウン運動に従って進展すると定式化した。確率モデルの目的変数には期待値記号が含まれるが、理論的変形によって期待値記号を取り払い決定論的なモデルに完全にあるいは近似的に帰着させることができる場合がある。幾何ブラウン運動を決定付けるパラメータすなわちドリフトとボラティリティは外生的に、過去のトレンドから統計的に推計したものが与えられる。

このような確率的方法が、近年、気候変動の評価においても適用され始めている。C-1の方法のうち状態遷移が離散的に1回あるいは2～3回だけ行われるものは最も単純な確率的モデルの適用例であり、Manne and Richels（1992）でも行われている。これは初歩的なリアルオプション分析であり、これを拡張したのが、ブラウン運動やポアソン過程を含む確率微分方程式のモデルへの包含である。微分方程式は、場合によっては数値解を得るために差分方程式に変換してモデル化されることもある。確率的に扱うべき変数の種類によっては、遷移幅が外生パラメータだけで決められるC-1の方法の代わりに、遷移幅が内生変数として扱われる場合がある。このC-2の方法を適用する場合、確率過程に従う変数のある時点での遷移幅は、それより前の時点までの政策決定によって制御されることになる。モデル化にあたっては、扱いたい変数の遷移幅がその変数自体の値に依存するような確率過程がよく導入され、その変数に関する幾何ブラウン運動が最も多く適用されるが、気候変動を扱う問題には不連続的な変化が予想される変数が存在するので、そのような変化をモデル化するためにポアソン過程を導入する研究例もある。

C-2の方法では、変数の値の不連続的な変化が生じる確率は事前に外生的に与えられるが、このような想定が必ずしも適切とは言えない場合がある。例えば気候変動による不連続的・不可逆的な影響が懸念されているが、そのような影響が生じる確率は温暖化の度合いを示す平均気温といった変数値に依存するものと考えられる。このような場合をモデル化するにはC-3の方法が適切である。

以下では、Cの方法の研究例を中心に、「温暖化保険」の評価において各種の不確実性を扱ったものの具体例を、不確実性の種類別に紹介する。

(2) 温室効果ガス削減コストに関する不確実性を扱った研究

まず、気候モデルを統合化しない、エネルギー技術経済モデルでの例を示す。Messner et al.（1996）は、エネルギー技術経済最適化モデルにおいて、発電技術の将来の資本コストが不確実であるとし、これらのコストをそれぞれ決まった確率分布として与えて確率的最適化を行うことによって最適な発電技術ミックスのパスを計算した。この研究では、後に詳しく述べるように、将来の技術コストを過小評価するリスクを含むように目的関数が定義されている。

Nordhaus and Popp (1997) は、パラメータ不確実性のもとでの最適な二酸化炭素排出削減率を確率的統合評価モデルで求めている。評価対象とする不確実パラメータには、生産額に対する温室効果ガス排出の比率と、二酸化炭素排出削減率から排出削減コストを計算するための係数が含まれる。彼らは、将来のある時点において不確実性が無くなるという状況を仮定し、その時点の早い遅いについての感度解析も行っている。

二酸化炭素排出削減技術のコストが研究開発投資に依存するモデルでの分析例としては、Baker and Adu-Bonnah (2008) が将来の削減コストについて三つのケースを想定し、技術革新努力によって削減コストがより低いケースに移行するものとして最適な研究開発投資パスを計算している。

Böhringer and Rutherford (2007) は、新技術のコストが従来技術と競争的になる時期の不確実性に着目した。彼らは、革新的な二酸化炭素無排出技術の研究開発を内生化した確率的動学一般均衡タイプの統合評価モデルを用い、その革新技術が経済的に利用可能となる時期として6ケースを想定して最適な二酸化炭素削減と研究開発投資の推移を計算した。これらのケースに対する確率分布は外生的に決まるが、革新技術が利用可能となったあとの導入量は内生的に計算される。

温室効果ガス削減コストに関する不確実性を扱った研究は、手法的には素朴なものが多く、ここに紹介した研究において、不確実性分析に当たって利用する確率分布はすべて外生的に与えたものである。

(3) 内生的技術変化に関する不確実性を扱った研究

1) 研究による学習に関するパラメータの不確実性

Bosetti and Drouet (2005) は、研究による学習と実施による学習の両方を扱える統合評価モデルの確率問題版を用いて、二酸化炭素削減技術全体としての改善に対する最適投資に関する分析を行った。彼らは研究開発投資による効果や実施経験によるコスト削減は確率的に進展するとし、研究開発蓄積についての習熟率と経験蓄積に対する習熟率という二つの不確実な習熟率の組み合わせの不確実な進展を表すシナリオツリーを扱った。このシナリオツリーはある決まった将来時点において四つの枝に分岐する。この四つは、二つの習熟率それぞれが既定の二通りの値のいずれかをとり、それら二通りの値に対して確率が外生的に与えられていると想定して設定されるものである。同様に、Blanford and Weyant (2005) は、確率的統合評価モデルへの拡張を視野に入れて、複数の技術に対する2種類の習熟率の不確実性を扱う理論的分析を試みている。

新技術の導入時期の不確実性が内生的に決まるようなモデル化研究としては、Bahn et al. (2008) がある。彼らは、現在の二酸化炭素排出経済が技術革新によって無排出の経済に切り替わるとし、その切り替わりの確率が研究開発投資に伴う知識ストックの蓄積に従って徐々に高まっていくとした。このことにより、研究開発投資の意思決定が技術革新の時期に影響を与えることをモデル化している。

2) 実施による学習に関するパラメータの不確実性

Grübler and Gritsevskii (1997) と Gritsevskii and Nakićenović (2000) は、実施による学習を扱える確率版エネルギー技術経済モデルにおいて、太陽電池といった新技術の習熟率に関する不確実性を、各種技術に対して先験的に決まった分布を与えることによって考慮した上で、エネルギー技術導入に関する分析を行った。確率的最適化に基づいて不確実な習熟率を扱う分析は極度の計算負荷を伴うものであり、筆者の知る限りでは、これらが唯一のものである。ただし、統合評価モデルにモンテカルロシミュレーションを適用した Alberth and Hope (2007) のような例は存在する。

(4) 気候変動とその影響に関する不確実性を扱った研究

1) 温室効果ガス排出に課されるコストあるいは許容可能な閾値についての不確実性

エネルギー技術経済モデルでは気候変動とその影響に関する不確実性を直接は取り扱えないが、二酸化炭素の価格すなわち排出枠の取引価格³⁾や国によっては炭素税、あるいは二酸化炭素排出の上限値を代理確率変数としてそれらの不確実性を間接的に取り扱うことができる⁴⁾。この種の分析のうち最も基本的なものは、Manne and Richels (1992) が早くも示している。彼らは、将来のある時点において課される二酸化炭素排出制約のレベルが3通りありうるとして、そのうちどれが採用されるかの不確実性はその時点になるまで分からないとした場合の最適なエネルギー技術構成を計算している。彼らはさらに、ある近時点において、その後に課される二酸化炭素排出制約レベル3通りのうちどれが採用されるかに関する予測が行われる、というやや複雑な意思決定ツリーを考え、その予測の精度がエネルギー技術導入の戦略に与える影響も分析している。この分析の副産物として、完全情報あるいは情報更新の価値が導出されている。これは、間接的に、不確実な気候変動のダメージに関する学習の価値を計算していることになる。

より進んだリアルオプション分析が、国際エネルギー機関で最近開発されたエネルギー技術経済モデルで行われている (Blyth et al., 2007)。このモデルでは、燃料価格の推移が幾何ブラウン運動に従うとし、二酸化炭素価格はこの燃料価格に連動するとしている。さらに、ある決まった将来時点(1回)において、二酸化炭素価格がその直前の価格から -100% から +100% の幅でランダムに増減すると想定するという形で、二酸化炭素価格の連続的・不連続的両方の確率過程がモデル化されている。

以上に示した研究例では、二酸化炭素の価格や排出上限値はモデルにおいて制御可能な内生変数とは関連せず、予め外生的に与えられたものから決まる。

2) 大気中温室効果ガス濃度や気温上昇によるダメージ、あるいは危険な気候変化をもたらすようなこれらの閾値についての不確実性

この不確実性は、気候モデルを統合化した統合評価モデルで分析される。Nordhaus (1994) は、気温上昇に伴う経済的ダメージを計算する関数の係数といった主要な不確実パラメータの値を確率分布として与えてモンテカルロシミュレーションを行うことによって、最適な炭素排出抑制率の確率分布を示している。Mastrandrea and Schneider (2004) は、危険な気候変化をもたらす気温上昇の閾値と気候感度の二つのパラメータについて気候変動に関する政府間パネル第三次評価報告書 (Smith et al., 2001) の知見に基づき確率分布を与えて、この二つの確率分布を

同時に考慮した並列モンテカルロシミュレーションを行っている。

Nordhaus (1994) は更に、確率的最適化に基づく先駆的な分析を行った。彼は、気温上昇に伴う経済的ダメージの真の規模が不確実であるとし、真の損害が大きいか小さいかの二つのケースのうちどちらが正しいかが将来のある時点において判明するという状況を想定した分析を行っている。さらに、この情報について学習するのに要する時間も不確実であることを考慮して、この時点の早い遅いについての感度解析を行っている。分析の結果として、各種パラメータに関する真の情報 が 早期に得られることの価値が計算されている。最近の例では、二酸化炭素排出削減技術への研究開発投資を内生的に考慮した確率的統合評価モデルによって、ダメージを計算する関数の係数の不確実性の度合いが研究開発投資に及ぼす影響が分析されている (Baker et al., 2006)。

既に述べたように、気候変動の影響の不確実性は一般に時間とともに明らかになる、つまり将来において、気候変動の影響についての、より正確な知識が得られると期待される。このことが最適気候政策に与える影響について着目した理論的研究としては、Gollier et al. (2000) が効用関数の形状による最適解への影響を 2 時点の簡易な確率的最適化モデルを用いて検討し、効用関数の第 2 次および 3 次導関数に関わる消費者のリスク回避度と慎重さの値が鍵となる役割を果たすことを示した。また、Baker (2005) は、ダメージ関数のパラメータの値の学習が徐々に段階的に行われることを考慮した理論的分析を行った。

標準的なリアルオプション分析が Pindyck (2000) によって環境政策の経済モデルに導入された。彼の理論的枠組みでは、汚染ストックによる社会的費用を計算する関数の係数値が時間とともに幾何ブラウン運動に従って推移するとしている。この運動を定めるためのパラメータであるドリフトとボラティリティは外生的に与えられる。この定式化では不確実性が永遠に成長すると仮定され、パラメータ不確実性に関する学習の可能性は考慮されないが、Pindyck (2000) は、気候変動や酸性雨問題に関して歴史的に不確実性が解明されてきた証拠は薄いとのことでこの仮定を正当化している。

幾何ブラウン運動は連続的な確率過程であるが、いくつかの先進的な研究では、汚染ストックにより不連続的に生じる経済的インパクトの懸念を反映するために、ジャンプ過程を導入している。例えば Dotsis et al. (2005) は Pindyck (2000) が導入した確率過程に単純に一定規模のポアソンジャンプ項を付け加えており、一方 Baranzini et al. (2003) は、ある時点における温室効果ガス削減による割引後総便益と削減費用との割合の推移が、幾何ブラウン運動とポアソン過程を組み合わせた確率過程に従うとした。Baranzini et al. (2003) は数値計算例も示しているが、統合評価モデルによる計算ではない。

上に述べた研究例では、不確実を有するパラメータの確率的推移は基本的に外生的要因により与えられ、制御は不可能である。汚染に伴うダメージ関数のパラメータ不確実性の場合、ダメージの変化の大きさは汚染ストックや気温という制御可能な変数に依存するという意味では内生的に決まることになるが、ダメージの不連続的な変化がいつ起こるかの確率については全く不可制御である。

しかし実際には、汚染によるダメージの変化時点は、環境保全努力によって制御可能なはずである。Clarke and Reed (1994) が汚染ストックに依存するハザード関数を基本的な環境経済分析モデルに導入したのを受けて、Gjerde et al. (1999) はこれを気候変動の経済モデルに適用した。すなわち、温度上昇に伴い深層海流循環の停止や南極西部水床の融解といった不連続的な大規模影響事象が生じやすくなるものとし、それがまだ生じていないある時点において生じる確率が基準時点からの気温上昇に伴い上昇するとして、大規模影響事象の発生時点を確率変数とするモデル化を行った。このモデルでは、事象の発生前後で効用が不連続的に変化するとし、目的関数は、事象発生前後それぞれの割引後の期待効用の和を足し合わせたものの期待値とした。このアプローチは、大規模事象の発生が環境管理行動によって制御できる場合のモデル化として適切な表現であると考えられるが、上記のモデル化では、事象は1回しか起きないと想定されている。

3) 上記の不確実性が内生的技術変化に及ぼす影響

上の1)と2)で挙げた例は、内生的技術変化のメカニズムを含まないモデル評価であった。内生的技術変化を考える場合、気候変動の影響コストあるいはその反映としての温室効果ガス排出への上限枠設定や価格付けが技術変化の駆動力となるが、これらが不確実である場合には、技術変化に与える影響が複雑になる。これまでのところ、内生的技術変化を考慮したモデルに上記の不確実性を組み合わせた評価例としては、Baker and Shittu (2006) が、研究による学習を通じた内生的技術変化を考慮したモデルを用いて、将来課される炭素税の不確実性の度合いが二酸化炭素排出抑制技術の最適研究開発投資にもたらす影響を計算している。こういった計算は、既に示した方法論を組み合わせることで行われるので、特段新たな方法論を用いるものではないが、政策的な意義は重要である。このトピックに関する総説はBaker et al. (2007) に詳しい。

この課題で今後重要な研究テーマとなると考えられるキーワードは、研究による学習と実施による学習との役割分担と、ポーター仮説 (Porter, 1991) であろう。前者については、Grübler and Gritsevskii (1997) が取り組みかけているが、結局、研究による学習のメカニズムを実施による学習に包含させて後者のみを考慮した上で、習熟率と二酸化炭素価格の不確実性の下での最適な温室効果ガス削減技術導入経路を求めるとどまっている。後者は、温室効果ガスの排出に上限枠を設定するといった環境規制が、規制のない場合よりも技術革新を進めることによって経済成長にも便益をもたらすという仮説であるが、筆者の知る限り、本稿のⅡ章で述べた枠組み、すなわち経済を1部門に集計して扱い、現在から将来に亘る異時点間の最適化を行うような経済モデルを元にした統合評価モデルを用いた分析では、この仮説に沿った結果を得た例はない。ただし、消費者が短期的費用便益評価に基づいて技術導入を行うとする考え方のもとで、実施による学習の考え方に従い技術の普及とコスト低減のパターンを外生的に与えたタイプの統合評価モデルでは、二酸化炭素排出制約を厳しくしたほうが制約しない場合よりも世界総生産が増加するとの計算結果を導いている例がある (Barker et al., 2006)。ここで挙げたトピックスについては、本稿の最終節においても議論することにする。

(5) 意思決定基準に関する不確実性

意思決定基準に関する不確実性には、事実上の標準的基準である期待効用あるいはコストの最適化モデルにおけるパラメータ不確実性と、基準自体、すなわち目的関数を定義するに当たっての思想的な不確実性とがある。

1) 目的関数に係わるパラメータ不確実性

効用モデルでは、相対的リスク回避度一定型の効用関数を仮定することが多い。この種の目的関数に現れるパラメータであるリスク回避度と純時間選好率は、モデルの解に対して感度が高い。この感度を扱った研究には、最近の Heal (2009) を初めとして多くのものが存在する。

2) 意思決定基準の定義に関する不確実性

エネルギー技術モデルの研究においては、期待効用やコストの最適化以外の意思決定基準に関する不確実性が考慮されてきた。Malcolm and Zenios (1994) は、将来の電力需要が不確実な場合における発電プラント確率計画モデルを開発し、電力供給の公共性を考慮して、将来における供給不足のリスクを軽減するという視点から、目的関数として従来の期待コストに電力不足となる確率を表す項を追加した。Messner et al. (1996) による、エネルギー技術の資本コストに関する不確実性を扱う確率的技術モデルでは、目的関数を、期待コストと将来のエネルギーコストを過小評価する経済的リスクを表すペナルティー項の和とした。このモデルを拡張して技術習熟率の不確実性も考慮したモデルでは、各技術の動学的期待コストと実際のコストとの差異を表す項を目的関数に追加している (Gritsevskii and Nakićenović, 2000)。これらはいずれも、Pflug (1996) の用語法でいうリスクモデルである。

一方、気候変動をモデルに組み込んだものでは、理論レベルでの検討がいくつか存在するにとどまる。Lange (2003) は、不確実性下において人々は殆どの場合期待効用を最大化するのではないとの尤もらしい考察に基づき、汚染を考慮した 2 時点理論経済モデルにおいて汚染ストックの経済的ダメージが不確実な場合を考えてマクシミン基準を意思決定基準として採用した。具体的には、目的関数を、期待効用と最悪ケースでの効用との重み付け和とした。この延長線上で、Gonzalez (2008) は、モデルとは未知の真のモデルの近似に過ぎず、さまざまの有り得るモデルに対して確率を与えることはできないとの考えにより、モデル構造自体の不確実性を考慮したリスクモデルを提示している。これらの取り組みは、あいまいとされる予防原則の概念を気候変動の経済モデルに適用するための具体的な方法を探ったものとして評価される。

Lange and Treich (2008) は、気候影響を表す不確実パラメータに対しては客観的な唯一の確率分布など存在しないことを考慮して、リスクモデルとは違ったアプローチを行っている。彼らは、パラメータに対して複数の主観的確率分布が与えられるものとして、社会計画者がこれらの分布に関する曖昧さを回避するとの想定に基づく効用関数を提案している。

IV. 総括および今後の展望

気候変動に関する経済分析は超長期の問題を扱うものであり、考慮すべき不確実性として複

数の確率変動およびパラメータ不確実性が存在する。これらの不確実性に対応する戦略すなわち「温暖化保険」が複数存在し、さらに、不確実なパラメータの将来推移は連続のみならず不連続なものになる可能性があり、さらには、この推移は種々の手段で人為的に制御できる可能性がある、といった複雑な問題を提示することから、実用面だけでなく理論面においても興味深い分析の場が提供される。

内生的技術変化あるいは技術の学習は、経済学の中でも比較的新しいトピックであり、気候変動の経済モデルにおいてもまだ行うべきことが残されている。Grübler and Gritsevskii (1997) は Watanabe (1995) を参照し、習熟曲線に従う実施による学習とその前段階として行われる研究による学習との区別と関連の重要性を述べてはいるが、彼らのモデル上ではこれらの二つの技術の学習は相乗効果があるものとみなして、実施による学習に集約して扱っている。しかし、実施による学習によれば技術の導入がその技術のコスト低減をもたらすので、このメカニズムのモデルへの適用は、技術の早期導入を図り温室効果ガスを早期に減少させることを動学的最適解とする傾向にあるが、一方、研究による学習によれば技術の社会的普及を伴わない研究開発活動による知識の蓄積が技術変化を推進するので、このメカニズムが働くと、温室効果ガスを早期に減少することが必ずしも最適解とはならない。将来の気候変動の影響コスト、温室効果ガス排出のコストや、技術の2種類の学習のパラメータについて、それぞれ不確実性が存在する場合については、これらのメカニズムがどのように働くかについては単純でないと予想され、モデルによる検証が求められる。

この検証に当たっては、過去において技術の2種類の学習のメカニズムが果たしてきた役割の実証分析を、モデルの有用性をテストする上での参照情報として利用すべきであろう。このような実証分析としては、Papineau (2006) などが挙げられる。これを参照したモデル研究としては、Ansar and Sparks (2009) が、先に述べた Baranzini et al. (2003) の方法論に、省エネルギー技術の導入と運転によるコスト効果とその技術の累積導入量に伴って高まる習熟曲線効果を追加した。つまり、将来、この効果により技術導入の費用対効果が高まると期待されることから一種のオプション価値が生じ、家庭や企業といった経済主体が省エネ設備を遅らせる傾向にあることを理論的に説明し、これが現実の経済主体が要求する内部収益率の高さを良く説明できることを示した。彼らの研究は、統合評価モデルにおいても、技術のコストを習熟曲線のトレンドに沿いつつも幅を持って変化する確率過程として取扱うべきことを示唆している。

技術の学習のパラメータの不確実の扱いについて、一つ付け加えておきたい。パラメータ不確実性は、時間の経過により自動的に解消されていくだけではなく、Kelly and Kolstad (1999) が将来の気象観測値をもとにベイズ推計により気候感度というパラメータの値の信頼区間が狭まっていくという学習過程をモデル化しているように、ベイズ学習などの積極的な学習によっても解消される可能性がある。しかし、温室効果ガス抑制コストや内生的技術変化に関するパラメータ不確実性については、時間に伴う自動的な学習を考慮した研究は極めて少ない上、積極的な学習の導入については、Blanford and Weyant (2005) がその必要性を示唆しているものの、実際の研究例は筆者の知る限り存在しない。

不連続な影響を伴う大規模影響事象が気候変動によって生じる恐れがあるとして、これを考慮した研究がいくつか行われていることが示された。その中で、影響事象は1回あるいは複数回生じるが、その発生確率は外生的に与えられるというモデル化を行ったものがあるが、これでは、人為的に生じる気候変動による影響を、まったく制御しようのない地震などの自然災害と同じように扱っていることになる。一方、ハザード関数として発生確率を内生化し、その確率が我々の温室効果ガス削減努力により制御できるようなモデル化を行っている例はいくつか存在するが、このような例では、大規模影響事象の起きる回数が1回だけとされている。しかしながら、実際には複数の事象が生じる可能性が十分存在するので、複数回の発生を扱えるような拡張が考えられよう。

さらに、前章で示したように、意思決定基準としていくつかのものが提案されてきてはいるが、これまでの統合評価モデル研究は伝統的な費用 - 便益あるいは費用 - 効果の基準に基づくものが大半を占める。しかし、こういった伝統的なアプローチには環境倫理、すなわち予防原則や世代間・地域間衡平の観点から種々の批判がある（例えば Azar, 1998 参照）一方で、具体的な検討事例は少ない。今後は、種々の非伝統的な意思決定基準でのモデリング評価例が増えるべきと考えられる。

「温暖化保険」の評価例は極めて数多く、本稿では扱いきれなかった評価視点も存在する。例えば本稿では経済全体を一つの集計された主体として扱うモデルだけを取り上げ、複数の主体の戦略的行動の分析に焦点をおいたモデルは取り上げなかったが、このようなモデルを一般均衡理論やゲーム理論を応用して構築することは、新たな知見を与えるであろう。この応用は、本稿で扱った温室効果ガス排出制約による内生的技術変化について検討を行う場合に特に重要となるかもしれない。すなわち、もしもポーター仮説が正しいとするならば、それは、Smulders (2005) が示唆するように、イノベーションの担い手によって蓄積された知識ストックが拡散してしまって、担い手となった経済主体がその知識の利用による収益の一部しか得ることができない一方で、その他の経済主体がこの知識にただ乗りして利益を得られることが一つの原因である可能性がある。上に示した Ansar and Sparks (2009) も、ある経済主体が、他者による研究開発や導入により新技術のコストを低減することを待つという選択を行うことが、社会全体での最適行動の達成を阻害しうることを暗示している。この点に着目した検討は、今後発展の余地がある。

注

※本稿は、2008年3月19日～22日に開催された確率過程論と数理ファイナンスへの応用に関する第8回立命館国際シンポジウムおよび数理ファイナンスに関する第8回コロンビア大学－日本金融・証券計量・工学学会会議での発表に基づく拙稿「Assessments of 'greenhouse insurance': A methodological review」(『Asia-Pacific Financial Markets』誌に掲載、DOI: 10.1007/s10690-009-9111-7)に加筆したものである。本稿で扱う調査研究は、平和中島財団2007年度国際学術共同研究助成および環境省平成21年度環境経済の政策研究助成を受けて行われた。

- 1) ここで言う学習とは情報の学習であり、II章の2節に示した技術の学習とは意味が異なる。気候変動評価の文献に学習という用語が現れる際には、どちらの意味で用いられているかに注意しなければならない。
- 2) 動学的確率一般均衡モデルおよび確率的成長モデルに関する概説は、それぞれ Kremer et al. (2006) および Olson and Roy (2004) を参照のこと。
- 3) 欧州連合域内においては2005年1月から二酸化炭素排出量取引制度が導入され、二酸化炭素の排出枠が市場で価格付けされている。本稿執筆時点で日本では排出量取引は試行的に行われているに過ぎないが、日本も関わっているクリーン開発メカニズムや共同実施の事業において削減される温室効果ガスの量（クレジット）は相対取引によってやはり価格付けされている。
- 4) 気候変動による影響が大きいことは、炭素税が高いことあるいは二酸化炭素排出目標が厳しいことに対応する。

参考文献

- Alberth, S. and Hope, C. (2007). Climate modelling with endogenous technical change: Stochastic learning and optimal greenhouse gas abatement in the PAGE2002 model. *Energy Policy*, 35, pp.1795-1807.
- Ansar, J. and Sparks, R. (2009). The experience curve, option value, and the energy paradox. *Energy Policy*, 37, pp.1012-1020.
- Azar, C. (1998). Are optimal CO₂ emissions really optimal? *Environmental and Resource Economics*, 11, pp.301-315.
- Bahn, O., Haurie, A. and Malhamé, R. (2008). A stochastic control model for optimal timing of climate policies. *Automatica*, 44, pp.1545-1558.
- Baker, E. (2005). Uncertainty and learning in a strategic environment: global climate change. *Resource and Energy Economics*, 27, pp.19-40.
- Baker, E. and Adu-Bonnah, K. (2008). Investment in risky R&D programs in the face of climate uncertainty. *Energy Economics*, 30, pp.465-486.
- Baker, E., Clarke, L., Keisler, J. and Shittu, E. (2007). Uncertainty, Technical Change and Policy Models. UMBMWP 1028, College of Management, University of Massachusetts, Boston, MA.
- Baker, E., Clarke, L. and Weyant, J. P. (2006). Optimal technology R&D in the face of climate uncertainty. *Climatic Change*, 78, pp.157-179.
- Baker, E. and Shittu, E. (2006). Profit-maximizing R&D in response to a random carbon tax. *Resource and Energy Economics*, 28, pp.160-180.
- Baker, E. and Shittu, E. (2008). Uncertainty and endogenous technical change in climate policy models. *Energy Economics*, 30, pp.2817-2828.
- Barker, T., Pan, H., Köhler, J., Warren, R. and Winne, S. (2006). Decarbonizing the global economy with induced technological change: Scenarios to 2100 using E3MG. *The Energy Journal*, Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation Special Issue, pp.241-258.
- Baranzini, A., Chesney, M. and Morisset, J. (2003). The impact of possible climate catastrophes on global warming policy. *Energy Policy*, 31, pp.691-701.
- Bernstein, P. M., Montgomery, W. D. and Rutherford, T. F. (1999). Trade impacts of climate policy: The MS-MRT model. *Energy and Resource Economics*, 21, pp.375-413.
- Blanford, G. J. and Weyant, J. P. (2005). *A global portfolio strategy for climate change technology*

- development*. Paper presented at the Annual Meeting of the International Energy Workshop 2005, Kyoto.
- Blyth, W., Bradley, R., Bunn, D., Clarke, C., Wilson, T. and Yang, M. (2007). Investment risks under uncertain climate change policy. *Energy Policy*, 35, pp.5766-5773.
- Bosetti, V. and Drouet, L. (2005). *Accounting for uncertainty affecting technical change in an economic-climate model*. Working Paper 147.2005, Milan: Fondazione Eni Enrico Mattei.
- Böhringer, C. and Rutherford, T. F. (2007). *Innovation, uncertainty and instrument choice for climate policy*. Paper presented at Annual Congress of the Verein für Socialpolitik, Munich.
- Clarke, H. R. and Reed, W. J. (1994). Consumption/pollution tradeoffs in an environment vulnerable to pollution-related catastrophic collapse. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 18, pp.991-1010.
- Dotsis, G., Makropoulou, V. and Psychogios, D. (2005). *The timing of environmental policies in the presence of extreme events*. Paper presented at the 9th Annual International Conference on Real Options: Theory Meets Practice, Paris.
- Gjerde, J., Grepperud, S. and Kverndokk, S. (1999). Optimal climate policy under the possibility of a catastrophe. *Resource and Energy Economics*, 21, pp.289-317.
- Gollier, C., Jullien, B. and Treich, N. (2000). Scientific progress and irreversibility: an economic interpretation of the 'Precautionary Principle'. *Journal of Public Economics*, 75, pp.229-253.
- Gonzalez, F. (2008). Precautionary principle and robustness for a stock pollutant with multiplicative risk. *Environmental and Resource Economics*, 41, pp.25-46.
- Goulder, L. H. and Mathai, K. (2000). Optimal CO₂ abatement in the presence of induced technological change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 39, pp.1-38.
- Gritsevskii, A. and Nakićenović, N. (2000). Modeling uncertainty of induced technological change. *Energy Policy*, 28, pp.907-921.
- Grübler, A. and Gritsevskii, A. (1997). A Model of Endogenous Technological Change through Uncertain Returns on Learning (R&D and Investments). Paper presented at the International Workshop on Induced Technical Change and the Environment. June 26-27, 1997, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- Ha-Doung, M., Grubb, M. J. and Hourcade, J.-C. (1997). Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂-emission abatement. *Nature*, 390, pp.270-273.
- Heal, G. (2009). Climate economics: A meta-review and some suggestions for future research. *Review of Environmental Economics and Policy*, 3, pp.4-21.
- Heal, G. and Kriström, B. (2002). Uncertainty and climate change. *Environmental and Resource Economics*, 22, pp.3-39.
- Kann, A. and Weyant, J. P. (2000). Approaches for performing uncertainty analysis in large-scale energy/economic policy models. *Environmental Modeling and Assessment*, 5, pp.29-46.
- Kelly, D. L. and Kolstad, C. D. (1999). Bayesian learning, growth, and pollution. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 23, pp.491-518.
- Kremer, J., Lombardo, G., von Thadden, L. and Werner, T. (2006). Dynamic stochastic general equilibrium models as a tool for policy analysis. *CESifo Economic Studies*, 52, pp.640-665.
- Lange, A. (2003). Climate change and the irreversibility effect – combining expected utility and MaxiMin. *Environmental and Resource Economics*, 25, pp.417-434.
- Lange, A. and Treich, N. (2008). Uncertainty, learning and ambiguity in economic models on climate policy:

- some classical results and new directions. *Climatic Change*, 89, pp.7-21.
- Löshel, A. (2002). Technological change in economic models of environmental policy: a survey. *Ecological Economics*, 43, pp.105-126.
- Malcolm, S. A. and Zenios, S. A. (1994). Robust optimization for power systems capacity expansion under uncertainty. *Journal of Operational Research Society*, 45, pp.1040-1049.
- Manne, A.S. and Richels, R. (1992). *Buying greenhouse insurance: The economic costs of CO₂ emission limits*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Mastrandrea, M. D. and Schneider, S. H. (2004). Probabilistic integrated assessment of “dangerous” climate change. *Science*, 304, pp.571-575.
- Messner, S. (1997). Endogenized technological learning in an energy systems model. *Journal of Evolutionary Economics*, 7, pp.291-313.
- Messner, S., Golodnikov, A. and Gritsevskii, A. (1996). A stochastic version of the dynamic linear programming model MESSAGE III. *Energy*, 21, pp.775-784.
- Miketa, A. and Schratzenholzer, L. (2004). Experiments with a methodology to model the role of R&D expenditures in energy technology learning processes; first results. *Energy Policy*, 32, pp.1679-1692.
- Nordhaus, W. D. (1994). *Managing the global commons: The economics of climate change*. Cambridge, MA: The MIT Press. (室田泰弘・高瀬香絵訳『地球温暖化の経済学』東洋経済新報社、2002年)
- Nordhaus, W. D. and Popp, D. (1997). What is the value of scientific knowledge? An application to global warming using the PRICE model. *The Energy Journal*, 18, pp.1-45.
- Olson, L. J. and Roy, S. (2004). *Theory of stochastic optimal economic growth*. Working Paper 05-01, College Park, MD: Department of Agricultural and Resource Economics, The University of Maryland.
- Papineau, M. (2006). An economic perspective on experience curves and dynamic economies in renewable energy technologies. *Energy Policy*, 34, pp.422-432.
- Peterson, S. (2006). Uncertainty and economic analysis of climate change: A survey of approaches and findings. *Environmental Modeling and Assessment*, 11, pp.1-17.
- Pflug, G. Ch. (1996). *Optimization of stochastic models: The interface between simulation and optimization*. Norwell, MA: Kluwer Academic.
- Pindyck, R. S. (2000). Irreversibilities and the timing of environmental policy. *Resource and Energy Economics*, 22, pp.233-259.
- Popp, D. (2004). ENTICE: endogenous technological change in the DICE model of global warming. *Journal of Environmental Economics and Management*, 48, pp.742-768.
- Porter, M E. (1991). America's green strategy. *Scientific American*, 264, p.168.
- Ramsey, F. P. (1928). A mathematical theory of saving. *The Economic Journal*, 38, pp.543-559.
- Romer, P. M. (1990). Endogenous technical change. *Journal of Political Economy*, 98, pp.S71-S102.
- Smith, J. B., Schellnhuber, H.-J, Mirza, M. M. Q., Fankhauser, S., Leemans, R., Erda, L., Ogallo, L., Pittock, B., Richels, R., Rosenzweig, C., Safriel, U., Tol, R. S. J., Weyant, J. P. and Yohe, G. (2001). Vulnerability to climate change and reasons for concern: A synthesis. In: J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White (Eds.), *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability, Contribution of Working Group II to the 3rd Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 913-967. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Smulders, S. (2005). Endogenous technological change, natural resources, and growth. In: R. D. Simpson, M. A.

- Toman and R. U. Ayres (Eds.), *Scarcity and Growth Revisited: Natural Resources and the Environment in the New Millennium*, pp.155-176. Washington, DC: RFF Press. (植田和弘監訳『資源環境経済学のフロンティア』日本評論社、197～224頁、2009年)
- Watanabe, C. (1995). Identification of the role of renewable energy. *Renewable Energy*, 6, pp.237-274.
- Weyant, J. P. and Olavson, T. (1999). Issues in modeling induced technological change in energy, environmental, and climate policy. *Environmental Modeling and Assessment*, 4, pp.67-85.
- Wigley, T. M. L. (1994). The contribution from emissions of different gases to the enhanced greenhouse effect. In: T. Hanisch (Ed.), *Climate change and the agenda for research*, pp. 193-222. Boulder, CO: Westview Press.
- Williams, N. (2004). Small noise asymptotics for a stochastic growth model. *Journal of Economic Theory*, 119, pp.271-298.