

### S - 3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案 手法の確立に関する総合研究プロジェクト

#### 1. 温暖化対策評価のための長期シナリオ研究

#### (2) 気候変動対応政策オプションに関する研究

##### 内生的技術革新によるGHG排出削減可能性の検討

滋賀大学 経済学部

中田 実

#### [要旨]

内生的技術進歩は、CO<sub>2</sub>削減技術の変化にどのような影響を与えうるか、経済モデル、工学モデルを比較検討する。工学モデルにおいては、Gerlagh and van der Zwaan (2003)、Grubler and Messener (1998) など、技術進歩率の内生化は、CO<sub>2</sub>の早期削減にプラスの影響を持つ可能性がある、とした研究結果があるが、経済モデルにおいてはNordhaus (2002)、Goulder and Schneider (1999) など、マイナスの影響を持つ可能性がある、もしくはほとんど影響をもたらさない、とするモデルがある。この違いは経済・工学モデルにおいて技術変化の内生化方法、という点での根本的な違いに由来するものではない。むしろその他の生産関数・研究開発活動(R&D)における仮定や生み出される技術の想定の違いによるものが大きい。また、経済モデルにおいて技術進歩率を内生化する場合、それがCO<sub>2</sub>削減に要する費用を低減させるかどうかは、モデル内で市場均衡が社会的最適解と乖離しているかどうか鍵となる可能性がある。また、現在EU内で議論されている、2050年までにCO<sub>2</sub>排出80%減という目標が、ETCの導入で達成可能なのかについては、慎重に検討すべきである。

[キーワード] 内生的経済成長、内生的技術革新、気候変動、削減費用、学習曲線

#### 1. はじめに・研究目的

気候変動モデル、外生的に技術進歩率が与えられてきたが、近年の内生的技術進歩理論の発展により、エネルギー効率係数や、生産関数の効率係数などの進歩率を内生化する動きが広がっている。工学モデルにおいては、技術進歩率の内生化は、CO<sub>2</sub>の早期削減にプラスの影響を持つ可能性がある、とした研究結果があるが、経済モデルにおいてはマイナスの影響を持つ可能性がある、もしくはほとんど影響をもたらさない、とする分析結果がある。この違いはどこからくるのか、また内生的技術進歩は、CO<sub>2</sub>削減技術の変化にどの程度影響を与えうるのか、各モデルを比較検討する。

#### 2. 結果

工学モデルにおいては、Gerlagh and van der Zwaan (2003)<sup>1)</sup>、Grubler and Messener (1998)<sup>2)</sup> など、技術進歩率の内生化は、CO<sub>2</sub>の早期削減にプラスの影響を持つ可能性がある、とした研究結果があるが、経済モデルにおいてはNordhaus (2002)<sup>3)</sup>、Goulder and Schneider (1999)<sup>4)</sup> など、マイナスの影響を持つ可能性がある、もしくはほとんど影響をもたらさない、とするモデルがある。この違いは経済・工学モデルにおいて技術変化の内生化方法、という点での根本的な違いに

由来するものではない。むしろその他の生産関数・研究開発活動(R&D)における仮定や生み出される技術の想定の違いによるものが大きい。また、経済モデルにおいて技術進歩率を内生化する場合、それがCO<sub>2</sub>削減に要する費用を低減させるかどうかは、モデル内で市場均衡が社会的最適解と乖離しているかどうか鍵となる可能性がある。

また、現在EU内で議論されている、2050年までにCO<sub>2</sub>排出80%減という目標が、ETCの導入で達成可能なのかについては、慎重に検討すべきである。

新古典派的経済成長論を源とするトップダウン型一般均衡モデルでは、エネルギー効率向上など、技術進歩率を外生的に与えてきたため、環境税など政策導入は技術進歩率に影響を与えない。欠点は早くから指摘されてきたが、spilloverとして準公共財になってしまう技術を生み出す経済モデルを考えると、競争均衡の枠内で扱うことは難しいためモデル化が遅れた。また、エネルギーセクター最適化問題を解くボトムアップ型工学モデルでは、将来の生産構造をシミュレートという形で扱う。そのため新エネルギーの費用削減などを考える場合は、変数をやはり外生的に与えてきた。こうした欠点を補うため、近年Romer (1990) に端を発した技術進歩を内生化するいわゆる内生的成長理論の発展に触発され、気候変動の統合モデルにおいても、経済・工学の両側面から技術進歩を内生化しようとする動きが出てきた。こうしたモデルには、Gerlagh and van der Zwaan (2003)<sup>1)</sup>, Grubler and Messener (1998)<sup>2)</sup>, Nordhaus (2002)<sup>3)</sup>, Goulder and Schneider (1999)<sup>4)</sup>, Buonanno et.al. (2003)<sup>5)</sup> などがある。

こうした内生的な技術革新モデルを大まかに分類すると、1) ETC(内生的技術変化): 最終財生産関数の技術進歩を内生化したモデルで、技術進歩率はR&D投資額に比例、2) LBD(学習効果): 最終財生産関数の技術進歩を内生化したモデルで、技術進歩率は設備投資の累積額に比例、3) ITC(誘発的技術変化): 新エネルギーや環境技術の技術進歩率を内生化する。気候政策が導入された場合に、新エネ研究開発が行われ、技術進歩率は、環境政策の度合いに比例、の3つに分けられる。経済モデルではETC、工学モデルではLBDが技術進歩の内生化に利用されることが多いが、両者は一定の条件下で同じことを示す。

まず、工学モデルにおけるLBDを利用した学習曲線を表すと、

$$lr = \theta = 1 - 2^{-\lambda} \quad ,$$

となる。但し  $lr$  は学習率で  $\lambda > 0$  とする。この場合、

$$\lambda = -\frac{\ln(1-\theta)}{\ln 2} \quad ,$$

を得ることができる。ここで、費用関数を

$$v_t = v_0 \left( \frac{K_t}{K_0} \right)^{-\lambda}$$

とする。但し  $K_t$  は累積的な投資額である。すると、

$$\frac{\dot{v}_t}{v_t} = -\lambda \frac{\dot{K}_t}{K_t} \quad \text{となる。この場合、}$$

$$\frac{\dot{A}_t}{A_t} = -\frac{\dot{v}_t}{v_t} = \lambda \frac{\dot{K}_t}{K_t} = \lambda \frac{\dot{H}_t}{H_t} = \lambda \frac{R_t}{H_t} \quad ,$$

但し、 $A_t$  は知識資本、 $R_t$  は研究開発投資額、 $H_t$  は過去の研究開発投資の市場価値、 $\lambda$  は研究開発の効率性である (Barro, 1999)<sup>6)</sup>。これは、経済モデルで利用される内生的成長理論の知

識資本の集積を示す関数とほぼ同じものである。

一方、その以外のモデルの生産関数などの特定化の段階で、経済・工学両モデルの間で違いが見られた。R&Dセクターについては、R&D重複率の有無、環境R&Dと他のR&Dとの位置づけであり、生産関数については、化石燃料と新エネルギーとの代替可能性と、その代替弾性値についてである。まずR&D重複率についてであるが、Nordhaus (2002)<sup>3)</sup>では、知識資本の蓄積関数は以下のように示される。

$$\frac{\dot{A}_t}{A_t} = \lambda R_t^\psi - \delta. \text{ 但し, } \psi \text{ は研究開発に対する技術の弾性値, } \delta \text{ は技術の減価償却値.}$$

しかしJones (1995)<sup>7)</sup>によると、 $\psi$ は技術の弾性値ではなく研究開発の重複率を示している。つまり  $0 < \psi \leq 1$  の場合には、研究開発が重複していて、R&Dが効率的ではないことを示しているが、Nordhaus (2002)<sup>3)</sup>にはそれが明示されていない。

第二に、環境R&Dと他のR&Dとの位置づけである。R&Dセクターにおいて、環境R&Dが通常のR&Dをクラウディングアウトするか否か、モデル上の設定が、CO2削減に正負どちらの影響を及ぼすかにかかってくる。これは環境技術が他の技術と比較して一般性を持つものなのか、それとも非常に特殊な技術で他の技術とは別のものなのか、という技術に対する見方にも依存する。Nordhaus (2002)<sup>3)</sup>では：

$$Q_t = A_t K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}$$

$$C_t = Q_t - I_t - 4R_t$$

$$E_t = Z_t Q_t$$

$$\frac{\dot{Z}_t}{Z_t} = \lambda R_t^\psi - \delta$$

となっている。但し、 $C_t$ は消費、 $Q_t$ は生産、 $L_t$ は労働、 $I_t$ は投資、 $E_t$ はCO<sub>2</sub>排出、 $Z_t$ はエネルギー効率係数で  $0 < \alpha < 1$ である。R&Dセクターは環境R&Dのみ行うと仮定されており、生産関数へのスピルオーバー効果は存在しない。従って、環境R&Dを行うと他のR&Dをクラウディングアウトし、これがより大きな社会的収益率を損なっているということで、社会全体にとって研究開発投資の4倍の機会費用を生み出すと仮定されている。Goulder and Schneider (1999)<sup>4)</sup>では、ETCの導入が、現在のR&Dを将来に先送りすることを可能にしている。上記両モデルでは、私的企業がR&Dを行って特許をとり、それで独占的な利潤を得てスピルオーバーの存在する技術開発費用をまかなう、というモデルを明示的には導入していない。従って社会的最適と市場均衡とは、乖離していない可能性があり、計算上の問題をさけるために、両者とも少なくとも長期では、競争均衡が成立し定常状態に到達する仮定をおいている。環境分野でR&Dを行うことは、他分野のR&Dを減らすことに繋がるといった負の影響を及ぼすことになる。

一方RICEモデルを拡張したBuonanno et. al. (2003)<sup>5)</sup>では：

$$Q_t = A_t H_t^\beta K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}$$

$$C_t = Q_t - I_t - R_t$$

$$E_t = (Z_t + e^{-H})Q_t$$

$$\frac{\dot{H}_t}{H_t} = \frac{R_t}{H_t} - \delta$$

但し、 $\sigma > 0$ でスピルオーバーの大きさを表す。研究開発によって生まれた技術は、環境技術、一般的な技術に関わらず、同じ知識資本として蓄積し、生産関数、エネルギー効率の向上に寄与するモデルとなっており、環境R&Dは他のR&Dをクラウドディングアウトすることはない。このようなモデルの設定では、ETCの導入はCO2削減費用に対して、正の影響を及ぼす。

次に、生産関数については、化石燃料と新エネルギーとの代替可能性と、代替弾性値について述べる。Gerlagh and van der Zwaan (2003)<sup>1)</sup>によると、モデル内で化石燃料と新エネルギーとの代替が可能で別セクターであることが重要である。Nordhaus (2002)<sup>3)</sup>では別になっていない。また別セクターになっていたとしても、化石燃料と新エネルギーの代替弾性値の仮定に大きな違いがある。Goulder and Schneider (1999)<sup>4)</sup>では $\sigma < 1$ で代替が困難であるとの仮定がおかれている。一方Gerlagh and van der Zwaan (2003)<sup>1)</sup>では、 $1 < \sigma$ で代替が容易であるという仮定がおかれている。代替が困難であると、削減は難しくなるので、一般に削減費用は割高になる。

最後に、経済モデルにおいてETCの導入がCO2削減に要する費用を低減させるかどうかは、モデル内で市場均衡が社会的最適解と乖離しているかどうかの一つの要因となる可能性がある。内生的成長理論においては、LBDなど技術を生み出すプロセスを簡略化したモデルと、企業行動メカニズムを明示的に表現したモデルがある。後者には、前者にはない社会的最適解と市場均衡とは乖離する傾向がある。詳しく述べると、後者においては、研究開発部門は開発した技術で特許を得て、その技術を使って生産する中間財を独占的に販売する市場を得る。一方開発された技術はspilloverとして最終財生産の効率性を外部効果で向上させる、というメカニズムになっており、私的企業が準公共財となってしまう技術を生み出すインセンティブが表現される。この場合、最終財生産セクターでは競争均衡を仮定するが、中間財セクターは独占的競争など不完全競争を仮定するため、政府がR&Dへの補助金などを与えて政策介入しない場合には、均衡におけるR&D活動水準は最適水準を下回ることが多い。理論上は一般均衡の枠内で不完全競争を扱うことは可能だが、経済・工学を問わずこの意味でのETCが導入されたモデルはまだ存在しない。これは、不完全競争を仮定すると、発生する利潤を消費するのか貯蓄して資本の蓄積に貢献するのか経済モデル内で処理することが難しいことが原因の一つであると考えられる。不完全競争を導入した状態で環境税などの環境政策を導入すると、最終財生産から研究開発部門に構造変化がおきて、短期的にはGDPにマイナスの影響を与えるが、長期的には成長率が上昇する可能性がある(Nakada2004)<sup>8)</sup>。以上の知見が意味することは、不完全競争が導入されていると、CO<sub>2</sub>削減にかかる費用は、マクロ経済的には環境政策は最終生産及び経済成長率にマイナスの効果を与える可能性があるが、長期的には経済は新しい均衡に移り成長率が上昇するので、ETCの導入は全体として削減費用を低減させる可能性があるということである。

関連して、生産関数の効率係数向上率についてどの程度が一般的なのか、という問いについて検討する。Goulder and Schneider (1999)<sup>4)</sup>では、1995年の成長率は2.6%としているが、長期均衡

においては、成長率は人口成長率と同じ、1.25%に設定されている。Nordhaus (2002)<sup>3)</sup>では、成長率、利子率などをETCを未導入のDICEモデルから外生的に与えられている。Nordhaus (1992)<sup>9)</sup>によると、具体的には1965-1987年までは、成長率1.41%であるが、それ以降は10年ごとに0.11%減少していくことになっている。また、Coe and Helpman (1995)<sup>10)</sup>では、日本の1970-1990年の平均的な成長率は、3.4%と見積もられている。内生的成長モデルの定量的分析については、まだ数が余り多くなく、一般化するのにはより多くの分析結果が望まれる。

ところでEUでは、平均気温上昇を2℃以内に抑えるという目標を達成するため、京都以後の対策を検討している。den Elzen et.al.(2003)<sup>11)</sup>によると、CO<sub>2</sub>濃度を450～550ppmvに抑えるには途上国の参加が欠かせないが、そのためには各国が納得できる参加ルールを構築する必要がある。しかし、特に途上国が納得できる参加ルールを構築するには、排出量の公正な配分という側面から、最終的には一人あたりのCO<sub>2</sub>排出量を同一にする、という形の配分ルールを目指さざるを得ない可能性があり、現在先進国と途上国との間で大きな差異のある排出水準を、2050年までにどのような形で収束させるか、という事が検討されている。den Elzen et.al.(2003)<sup>11)</sup>によると、提示されている多くの削減経路は、日本を含む多くのOECD諸国に対し、CO<sub>2</sub>排出量を2050年までに1990年水準の80%に削減することを迫る、非常に厳しいものとなりうる。この厳しい目標は達成可能なのだろうか、内生的技術革新は急速なGHG排出削減をもたらすのだろうか。Nordhaus (1999)<sup>8)</sup>やGoulder and Schneider(1999)<sup>4)</sup>の結果より、単にETCを導入してもほとんど効果はない可能性がある。また、化石・新エネルギーの代替がない場合にはあまり効果はない。ボトムアップ型+一般均衡モデルでは、化石燃料と新エネルギーの代替を仮定している場合、新エネルギーにLBDを導入する場合と、効果がある可能性があるが、技術創出のミクロ的基礎が明確ではないことが課題としてあげられる。現時点では、そのどのモデルを導入しても、OECD諸国は2050年までにCO<sub>2</sub>排出80%削減という厳しい目標を達成するのに十分な排出経路を描くことが出来るかどうかは、より詳細な検討が必要である。

### 3. 考察

今後は、ETCの導入が経済に与える影響を、本質的に捉えるモデル構成とはどのようなものなのか、詳細に検討する必要がある。また、ETCを導入した場合、生産関数の技術変化率はどのくらいの水準になるのか、検討する必要がある。また、経済モデルにおいて、不完全競争を導入したモデルを構築できないか、検討を重ねる必要がある。

### 4. 本研究により得られた成果

以上の検討より、モデルによって、内生的技術進歩の導入がCO<sub>2</sub>削減技術の変化に与える影響が異なる原因は、経済・工学モデルにおいて技術変化の内生化方法、という点で根本的に異なることにあるわけではなく、むしろその他の生産関数・研究開発活動(R&D)における仮定や生み出される技術の想定の違いによるものが大きいので、モデルの構成によってはプラスの影響を与えることが分かった。また、経済モデルにおいて技術進歩率を内生化する場合、それがCO<sub>2</sub>削減に要する費用を低減させるかどうかは、モデル内で市場均衡が社会的最適解と乖離しているかどうか、鍵となる可能性があることが分かった。しかし、現在EU内で議論されている、2050年までにCO<sub>2</sub>排出80%減という目標が、ETCの導入で達成可能なのかについては、慎重に検討する必要がある。

## 5 . 参考文献

- 1) Gerlagh, R. and B. van der Zwann (2003), "Gross World Product and Consumption in a Global Warming Model with Endogenous Technological Change," Resource and Energy Economics, 25, 35-57.
- 2) Grubler and Messener (1998), "Technological Change and the Timing of Mitigation Measures," Energy Economics, 20, 495-512.
- 3) Nordhaus, W. (2002), "Modeling Induced Innovation in Climate Change Policy," in Grubler, Nakićenović and Nordhaus eds. Modeling Induced Innovation in Climate Change Policy, Resource for the Future.
- 4) Goulder L. and S. Schneider (1999), "Induced Technological Change and the Attractiveness of CO2 Abatement Policies," Resource and Energy Economics, 21 211-253.
- 5) Buonanno, P., et.al. (2003), "Endogenous Induced Technical Change and the Costs of Kyoto," Resource and Energy Economics, 25, 11-34.
- 6) Barro, R. (1999), "Notes on Growth Accounting," Journal of Economic Growth, 4, 119-137.
- 7) Jones, C. (1995), "R&D-Based Models of Economic Growth," Journal of Political Economy, 103, 759-84.
- 8) Nakada, M.(2004), "Does Environmental Policy Necessarily Discourage Growth," Journal of Economics, 81, 3, 249-275.
- 9) Nordhaus, W. (1992), "An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gasses," Science, 258, 1315-1319.
- 10) Coe, D. and E. Helpman (1995), "International R&D Spillovers," European Economic Review, 39, 859-887.
- 11) den Elzen, et.al (2003) Exploring Climate Regimes for Differentiation of Commitments to Achieve the EU Climate Target, RIVM report 728001023.

## 6 . 国際共同研究等の状況

なし

## 7 . 研究成果の発表状況

### ( 1 ) 誌上発表 ( 学術誌・書籍 )

<論文 ( 査読あり ) >

Nakada, M.(2004), "Does Environmental Policy Necessarily Discourage Growth," Journal of Economics, 81, 3, 249-275.

<その他誌上発表 ( 査読なし ) >

なし

<書籍>

なし

<報告書類等>

なし

( 2 ) 口頭発表

なし

( 3 ) 出願特許

なし

( 4 ) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

( 5 ) 受賞等

なし

( 6 ) 一般への公表・報道等

なし

9．成果の政策的な寄与・貢献について

CO<sub>2</sub>削減については、ポスト京都議定書を睨んで2050年までの長期的な目標を立てる必要に迫られているが、対策が長期に渡るため、技術変化をどのように考えるかは非常に重要となる。本研究は、モデル分析において外生的に与えてきた技術進歩率を内生化することで、よりCO<sub>2</sub>削減についてより詳細な分析を行う際の基礎的な知見を与える。