

7. 内生的技術変化を考慮した動学的応用一般均衡モデルによる気候変動対策の経済分析： 日本経済を対象として

松本 健一^{1*}

¹国立環境研究所 地球環境研究センター（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）

* E-mail: matsumoto.kenichi@nies.go.jp

本論文では、内生的技術変化を考慮した動学的応用一般均衡モデルを開発し、気候変動対策の経済影響を分析した。本モデルは日本経済を対象とし、内生的技術変化をR&D投資とそれに伴う知識資本の蓄積として表現する。

分析より、CO₂排出削減のみを行うと技術変化は促進されるが、GDPや家計消費にマイナス影響が見られ、削減量に応じてその影響が大きくなることが示された。しかし、排出削減と同時にR&D投資に対する補助金を導入すると、投資と知識資本の蓄積がさらに進み、排出削減を行った場合でも行わない場合と比較してGDPや家計消費にプラスの効果が見られる可能性が示唆された。また、感度分析からも同様の傾向が見られることが明らかとなった。

Key Words : *Dynamic CGE model, Endogenous technological change, Knowledge capital, R&D investment, CO₂ emissions abatement, Economic impact*

1. はじめに

気候変動は現代の最重要な地球環境問題であり、日本を含む世界各国ならびにUNFCCCを初めとする国際的な場で中長期的な視点での政策的議論が続いている。2009年12月にコペンハーゲンで開催されたCOP15では期待されていた2013年以降のポスト京都議定書に向けた新たな議定書は策定されなかったが、コペンハーゲン合意が作成された。そして、この合意に基づき、UNFCCC附属書I国ならびに主要な非附属書I国（合計55ヶ国・78%の排出量に相当）が2010年1月末までに2020年の温室効果ガスの排出削減に関する約束を提出した¹⁾。日本は、鳩山首相が2009年9月22日に国連気候変動首脳会合で演説した1990年比25%削減を目標とした。鳩山政権は、また、次期通常国会で地球温暖化対策基本法案（仮称）の提出を目指しており、その中で革新的な技術開発の促進を基本的施策の1つとしている²⁾。さらに、2009年12月30日の臨時閣議において決定した新成長戦略の基本方針において、2020年度までに官民の研究開発投資（R&D投資）をGDP比4%以上にすることを目標として示した。

気候変動対策とR&D投資・技術開発および、経済と

の関係に関する世界的な動きはそれより早く、2008年7月21日にGreen New Deal Groupが“A Green New Deal”を発表し³⁾、UNEPは2008年10月22日に“Global Green New Deal”を発表した⁴⁾。そして、アメリカのオバマ大統領も同様の発表をするなど、多くの国で同様の動きが広がっている。

このように、気候変動の緩和策などに伴う追加的費用や経済的影響への懸念に対し、この問題に対応するための技術開発・普及の重要性が近年、世界的に特に高まっている。技術進歩により、ある量の生産に必要な資源などの投入が少なくすむと期待できる⁵⁾。特に、化石燃料の投入削減が実現すれば気候変動の緩和に直結する。このような気候変動・対策・技術・経済の関係を分析するには、経済モデルで内生的な技術変化を考慮することが重要となる。内生的技術変化が、気候変動政策により技術変化が低炭素型に向うというフィードバックメカニズムを意味するからである⁶⁾。ところが、気候変動問題の経済分析で多く利用されている応用一般均衡（CGE）モデルでは、これまでのほとんどの研究で技術変化が外生的に扱われており^{7,8)}内生化されている例は少ない^{9,10)}。特に、日本を対象にした同様のモデルは見られない。また、その方法も確立されておらず、様々な手法が試行さ

れている。内生的技術変化をモデルで扱う場合、主な方法としてR&D投資による知識資本の蓄積と技術の学習効果の2つが考えられる。後者はボトムアップ型モデルで一般的に使われており、CGEモデルでこれを扱う場合、その構造を考えると前者のほうが適切である¹⁴⁾。技術変化と知識資本に関する近年の研究はRomer¹⁵⁾の研究が大きく、知識を投入要素の1つと考えると知識の蓄積と技術変化の関係を説明した。そして、この枠組みは政策誘発型の技術変化の研究として、経済モデルによる地域政策や経済政策といった政策分析に用いられるようになった¹⁶⁾。この流れはCGEモデルによる貿易政策や公共政策などの政策分析にも見られるようになり¹⁸⁾²⁰⁾、特に気候変動問題に関連する環境・エネルギー分野の経済分析に見られるようになってきた⁹⁾¹⁴⁾。これは、上述のように気候変動問題が現在の重大な社会問題であり、かつ関連する政策がR&D投資や技術変化と密接に関連しているためと考えられる。

内生的技術変化を考慮したCGEモデルによる気候変動政策に関する研究では、まず、Goulder and Schneider⁹⁾が、アメリカを対象とした最適成長型動学的CGEモデルを用いて炭素税とR&D補助金のCO₂排出量と経済への影響を分析している。しかし、ここでは知識資本ストックは物的資本ストックの20%と仮定され、また産業部門の分類が粗く、特にエネルギー部門が詳細でないなど気候変動政策を分析する上で課題が見られる。また、知識資本は減耗しないものと仮定している。Otto, et al.¹¹⁾では、最適成長型動学的CGEモデルを用いて技術変化に偏向がある場合のそのエネルギーに対する偏向の決定要因および環境政策（排出削減）の技術変化への影響を分析しているが、仮想的なデータによる分析でとどまっている。また、Otto, et al.¹²⁾では、技術の外部性を考慮したオランダを対象とした最適成長型動学的CGEモデルを用いて炭素集約的部門と非炭素集約的部門で差異のあるCO₂排出削減とR&D投資への補助金の両政策の効果进行分析し、またLoschel and Otto¹⁰⁾ではバックストップ技術に対する不確実性を考慮した同モデルによりCO₂排出削減政策の効果进行分析している。これらのモデルはGoulder and Schneiderと比較すると部門分類は細かいがエネルギー部門については電力と非電力の分類にとどまってお（ただし、電力は炭素集約的・非炭素集約的電力に分けられている）、例えば気候変動政策導入によるエネルギーの代替効果などが反映されない。また、R&D投資と知識の推計には本研究でも用いた手法（24節を参照）が用いられているが、前者は情報通信技術への投資に、後者はR&Dおよび教育への支出に基づいており、両推計に一貫性が見られない。Wang, et al.¹⁴⁾では、上述した研究よりも詳細に部門分類された中国を対象とした動学的CGEモデルを用

いてCO₂排出削減とR&D投資への補助金の経済的影響を分析している。このモデルは動学的モデルであるが、上述したモデルと異なり逐次型である。しかし、投資の決定にあたっては将来も見据えたモデル化が重要であり、そのためには最適成長型（将来を見通すという意味でforward-looking型とも呼ばれる）の方が適している²¹⁾。特に、本研究および上述した研究のようにR&D投資を通じた内生的技術変化が分析の中心となる場合は、このアプローチの方が適していると考えられる。

これらの点を踏まえて、本研究では日本経済を対象としたCGEモデルを開発し、R&D投資を通じた内生的技術変化をモデルに組み込む。そして、気候変動対策としてCO₂の排出削減目標を設定し、技術変化も考慮して主に経済的效果・影響を分析する。本研究で構築したモデルの構造は基本的に上述した研究に沿ったものであるが、それらの研究で問題あるいは不足として指摘した点を修正している。すなわち、エネルギー部門の詳細化、R&D投資と知識資本の推計への一貫したデータの利用、そして最適成長型アプローチによる動学構造が主要な点として挙げられる。

2. モデル

CO₂排出削減や技術変化が起きた際の経済的影響を分析するために、本研究ではR&D投資と知識資本を導入した動学的CGEモデルを構築する。本モデルは日本を対象とした1地域モデルであり、産業は33部門より構成されている（表1）。また、経済モデルにエネルギーと環境の要素を組み込んでいる。以下に示すように、知識資本は生産、消費および、動学の各要素に現れる。

表-1 産業部門の分類

産業部門		産業部門	
1	農林水産	18	情報・通信機器
2	鉱業	19	電子部品
3	石炭	20	輸送機械
4	原油	21	精密機械
5	天然ガス	22	その他製造業
6	食品加工	23	建設
7	繊維	24	電力
8	パルプ・紙・木製品	25	ガス・熱供給
9	化学	26	水道
10	石油製品	27	廃棄物処理
11	石炭製品	28	商業
12	窯業・土石	29	金融・保険
13	鉄鋼	30	不動産
14	非鉄金属	31	運輸
15	金属製品	32	情報通信
16	一般機械	33	その他サービス
17	電気機械		

(1) データ

CGEモデルで通常用いられる社会会計表（SAM）では、経済主体は産業、家計、政府および、海外から構成されている。本研究では、そのうち家計、政府および、海外はそれぞれ1つずつ存在するものとする。家計は労働と資本（知識資本および物的資本）を所有し、それらを産業部門に供給することで所得を得る。そして、所得は課税され、その残りを消費と貯蓄に用いる。この家計貯蓄は投資（R&D投資および物的資本投資）に回される。産業部門は、国内および海外の産業からの中間投入財と家計の保有する労働や資本といった生産要素を投入して生産活動を行う。生産された財は国内消費ならびに輸出に振り分けられる。また、生産税を政府に支払う。政府は、家計と産業から徴収した税金、関税および、排出権収入（本研究では、CO₂排出削減が行われるケースでは政府が排出権をオークションにより割り当てるとしている）に基づいて政府支出を行う。財政赤字および経常黒字は家計が負うものとする。

本研究では、日本経済を対象とした2005年産業連関表よりSAMを構築する。上述のように、産業部門は33部門に統合しており、気候変動対策を分析するためにエネルギー部門は石炭、原油、天然ガス、石炭製品、石油製品、ガス・熱供給および、電力の7部門に詳細化している。知識資本およびR&D投資に関するデータは産業連関表には表れていない。この推計手法については2.4節で詳述する。

次にCO₂排出量データについては、2005年度エネルギーバランス表に基づいている。この中の炭素単位表にエネルギー種別・部門（家計も含む）別の排出量データが示されており、これを用いて本研究のエネルギー別・部門別の排出量に集計する。本研究では直接排出によるCO₂排出を計上しているため、電力を除く6種類のエネルギー利用によりCO₂が排出され、電力使用からは排出されないものとする。

(2) 生産構造

上述のように、各産業は生産要素と中間投入財を用いて生産活動を行う。各部門は単一の財を生産しているが、輸出産業では国内財と輸出財の2つを結合生産物として生産するとしている。中間投入は国内財と輸入財のアーミントン合成財として投入される。また、エネルギーを消費するにあたっては、その消費によるCO₂排出量に応じた排出権を保有する必要がある。生産関数はCGEモデルで一般的に用いられる一次同次の多段入れ子CES（Constant Elasticity of Substitution）型関数とし、知識資本については既存の研究に見られるアプローチであるCES型関数の最上部における代替関係を用いる⁹⁾¹⁰⁾¹²⁾¹⁴⁾（図

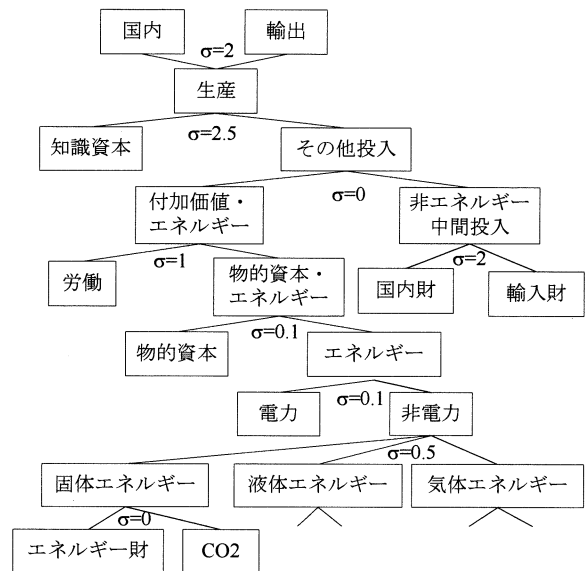


図-1 産業部門の生産構造

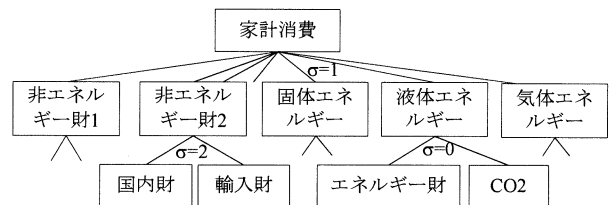


図-2 家計消費の構造

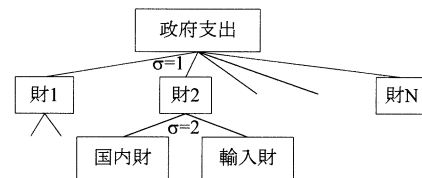


図-3 政府支出の構造

1) . 上述のように、技術変化はある量の生産に必要な資源などの投入を減少させる効果を持つため、図1に示すように知識資本をその他投入との代替関係と考えることができる。

(3) 家計・政府の消費構造

家計は、将来にわたって消費から得られる生涯効用の割引現在価値が最大になるように消費と貯蓄の規模を決定する。家計は労働と資本から所得を得て、その予算制約のもとで各財をアーミントン合成財として消費する。そして、産業部門と同様に、エネルギー消費にあたっては相当する排出権を保有する必要がある。家計の効用関数も生産関数と同様に一次同次の多段入れ子CES型としている（図2）。

一方、政府は労働所得税、資本所得税、生産税、排出

権収入などを予算として政府支出を行っている。政府支出も産業部門や家計同様に一次同次の多段入れ子CES型の効用関数に基づいている（図3）。

(4) 内生的技術変化

本モデルには、資本として物的資本と同時に知識資本を扱っている点に特徴がある。この知識資本は上述のように生産要素の1つとして用いられ、内生的成長理論の概念に基づき、経済への知識の蓄積と技術変化の関係を表すようにモデル化している^{13) 22) 23)}。この知識資本は、動学構造の中で内生的に規模が決定されるR&D投資により蓄積される。つまり、R&D投資の相対価格に基づいて投資額が決定され、それが技術変化（知識資本の蓄積）の決定につながる。そして、この技術変化が経済成長やCO₂排出量などへの影響として現れる。本研究では、物的資本と同様に知識資本も経済システム全体で用いられるものとしている。

上述のように、日本の産業連関表ではR&D投資および知識資本が独立して示されていない。そこで、Terleckyj^{24) 25)}で示され、Loschel and Otto¹⁰⁾やOtto, et al.¹²⁾, Wang, et al.¹⁴⁾などでも用いられている手法により推計する。本研究のようにR&D投資（および知識資本）を扱う場合、それが産業別に得られ、また経済活動全体の構造を表現する既存のSAMにおける消費や投資などと同じ枠組みで構成される必要がある。さらに、CGEモデルによる分析にあたって、R&D投資を考慮した場合にもSAMのバランスが保たなければならない。Terleckyjの手法はSAMの中間投入にR&D投資・知識資本の要素が統合されているものと考え、シンプルなアプローチにより上記の条件を満たすことができる点で有用である。本研究では、まず科学技術研究調査の研究費総額（2005年データ）から部門別のR&D投資額を推計する。次に、そのデータを用いて中間投入表より知識要素を抽出する。この列和と行和がそれぞれ知識資本とR&D投資となる。この手法は、以下の式(1a)~(1d)のようにまとめられる。

$$KC_{i,j} = \frac{INP_{i,j}}{\sum_j INP_{i,j}} RDV_i \quad (1a)$$

$$RD_i = \sum_j KC_{i,j} \quad (1b)$$

$$KN_j = \sum_i KC_{i,j} \quad (1c)$$

$$INPX_{i,j} = INP_{i,j} - KC_{i,j} \quad (1d)$$

INP_{ij} : 元の部門別中間投入表, $INPX_{ij}$: 修正後の部門別中間投入

表, RDV_i : 部門別R&D投資データ, KC_{ij} : 中間投入の知識要素, RD_i : 知識要素の列和（部門別R&D投資）, KN_j : 知識要素の行和（部門別知識資本）

以上の手順によりR&D投資が得られるが、次節で述べる理由によりその初期値を調整する。

(5) 動学構造

本研究で対象とするような環境や経済の変化を分析するためには、時間的視野が必要である。また、投資の分析ではその決定が重要な問題となる。そのため、本研究では、Ramsey型最適成長モデルに基づく動学構造を用いている。Ramsey型最適成長モデルでは、(2a)~(2e)に示すように家計は消費から得られる生涯効用の割引現在価値を最大化する。通常は資本として物的資本のみが考慮されるが、本研究ではR&D投資も扱うため、同様に以下の式に示している。

$$\max \sum_{t=0}^{\infty} \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^t U(C_t) \quad (2a)$$

$$Y_t = F(K_t, KN_t, L_t) = C_t + I_t + RD_t \quad (2b)$$

$$K_{t+1} = (1-\delta)K_t + I_t \quad (2c)$$

$$KN_{t+1} = (1-\mu)KN_t + RD_t \quad (2d)$$

$$L_{t+1} = (1+g)L_t \quad (2e)$$

$U(\cdot)$: 効用関数, $f(\cdot)$: 生産関数, C_t : 消費, Y_t : 所得, K_t : 物的資本, KN_t : 知識資本, L_t : 労働, I_t : 物的資本投資, RD_t : R&D投資, ρ : 割引率, δ : 物的資本減耗率, μ : 知識資本減耗率, g : 労働力増加率

このとき、次の最適条件が満たされる必要がある。以下の式の導出は、例えばPaltsev²⁶⁾が詳しい。

$$P_t = \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^t \frac{\partial U(\cdot)}{\partial C_t} \quad (3a)$$

$$PK_t = (1-\delta)PK_{t+1} + P_t \frac{\partial F(\cdot)}{\partial K_t} \quad (3b)$$

$$PN_t = (1-\mu)PN_{t+1} + P_t \frac{\partial F(\cdot)}{\partial KN_t} \quad (3c)$$

$$P_t = PK_t = PN_t \quad (3d)$$

P_t : 生産価格, PK_t : 物的資本価格, PN_t : 知識資本価格

このような動学モデルの解を求める上では、動学的定常均衡が存在し、かつ初期状態から動学的定常均衡へ収束することが保証されなければならない。しかし、任意の初期状態（本研究では作成したSAMの状態）がそのような条件を満たしているとは限らず、ゆえに、動学モデルによる分析では初期状態も定常均衡にあると仮定するケースが多い^{21), 26)27)}。そのため、本研究では初期状態の投資額を調整する。具体的には、SAMで得られる投資額が基準年における資本・成長率・減耗率から推定される投資額を超える場合はその分を家計消費に加え、下回る場合はその分を家計消費から差し引くことで初期の投資額を変更する。

動学的CGEモデルでは、家計は無限期間の最適化問題から最適な消費と貯蓄の組み合わせを決定する。しかし、本研究のようなシミュレーション分析では有限期間を扱わざるをえず、その終端時点での解が無限期間の解と同じにならなければならない。そこで本研究では、事前に終端時点での投資の増加率を特定する必要がないなどの利点があるLau, et al.²⁸⁾で提案されている手法に基づき、終端での投資の増加率が経済成長率と一致するような条件を与える。また、シミュレーションにおいて所得および市場均衡を得るためには初期から終端時点まで全ての期間で動学的定常均衡状態させる必要があり、そのため労働効率で図った労働増加率は成長率と同率とする^{21), 29)}。

3. ベースラインと分析シナリオ

(1) ベースラインの設定

本研究では、基準年データとして前章で示したSAMを用いる。そして、基準年である2005年から2020年までを対象に動学的分析を行う（割引率5%）。モデルにおける経済成長は労働力の増加（年率1%）と資本蓄積による。物的資本と知識資本はそれぞれへの投資により蓄積され、また資本減耗率はそれぞれ5%と15%とする。知識資本はその蓄積が非常に緩やかな場合は減耗しないと考えられるが、そうでない場合は減耗すると考えるのが妥当である¹¹⁾¹²⁾。本研究で対象とする環境分野は今後急速な技術変化（産業の成長）が期待され、また既存の研究でも同様の方法が用いられているため^{10)14), 29)}、本研究でも知識資本が物的資本と同様に減耗するものとする。知識資本の減耗率については、Sue Wing¹³⁾による文献サーベイでは9-15%程度、Otto, et al.¹²⁾による文献サーベイでは18-35%程度と非常に幅が広い。そのため、本研究では上記の値を知識資本減耗率として用い、第5章の感

度分析により分析を補完する。

(2) 分析シナリオ

本研究の目的である内生的技術変化を考慮した場合のCO₂排出削減と経済への影響を分析するために、上述のベースラインに対して分析シナリオを設定する。1つめは排出削減量である。本研究では、ベースライン比で0%（排出制約なし）から50%までの10%刻みで6ケースを設定し、各ケースで毎年同率の排出削減が起こるものとする。もう1つはR&D投資への補助金である。この補助金によりR&D投資が促進され、技術変化につながると期待される。補助金率はベースライン比で0%から50%までの10%刻みで6ケースを設定し、その率は毎年一定とする。

本研究では、この2つのシナリオ設定の組み合わせにより36ケース（両方とも0%の組み合わせを含む）を分析する。

次章で各シナリオをベースラインと比較した結果を示す。

4. 分析結果

(1) 限界排出削減費用

CO₂の限界排出削減費用（MAC）は追加的に1単位のCO₂排出を削減するためにかかる費用を表すものであり、排出削減の経済的な厳しさを示すのに用いられる。図4は、純粋に排出削減のみを行った場合の各年におけるMAC曲線を示したものである。本図が示すとおり、削減率に応じてMACは増加し、同様の研究でも見られるように2次関数で近似できる¹⁴⁾。また、MACは基準年を除く各年で見ると、R&D投資に対する補助金により低下することがわかる（図5）。これは、この補助金の導入によりCO₂排出削減に対する負担が低減することを意味する。

(2) 投資への影響

まず、純粋にCO₂排出削減を行った場合のR&D投資および物的資本投資への影響を見ると、図6のような変化を示す。この図はベースラインと比較したものであるが、R&D投資は削減率が高いほど規模が上昇する傾向にある。また、初期にはその差が大きいが、経年的にその差が縮小することがわかる。このようなR&D投資の上昇は知識資本の蓄積を促進し、CO₂排出削減に伴う技術変化を意味する。

一方、もうひとつの投資である物的資本投資を見ると、R&D投資とは反対に削減率が高いほど規模が低下する。

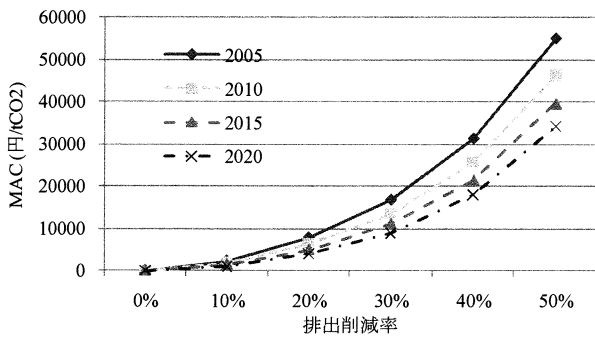


図4 各年のMAC曲線

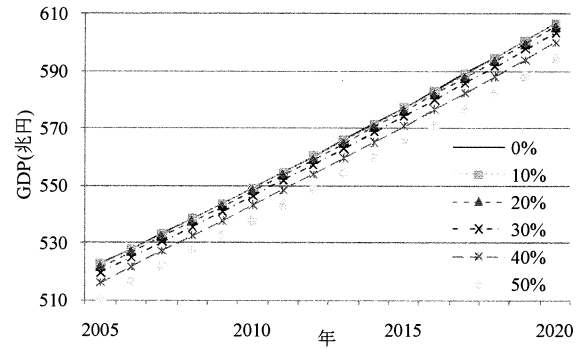


図8 排出削減率ごとのGDP変化

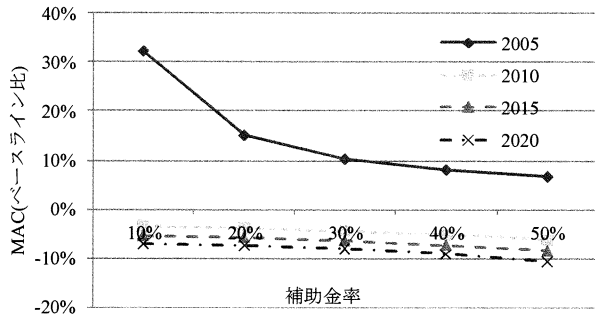


図5 補助金導入による各年のMACの変化

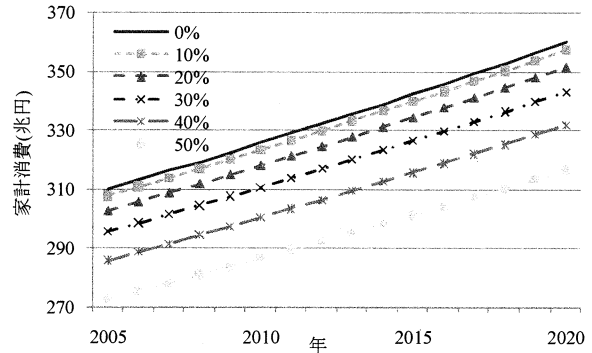


図9 排出削減率ごとの家計消費変化

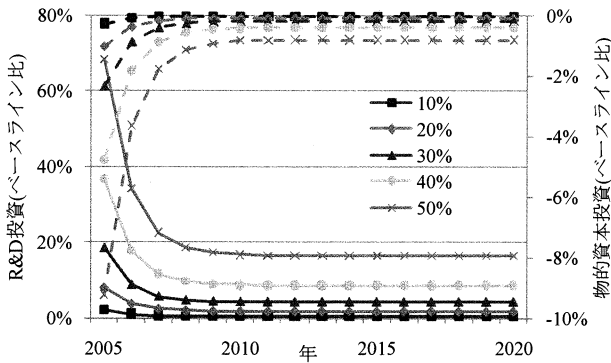


図6 排出削減率ごとの投資変化 (実線：R&D, 破線：物的資本)

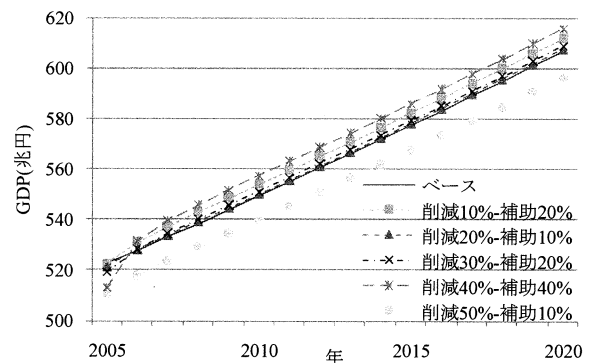


図10 排出削減率と補助金の組み合わせによるGDP変化

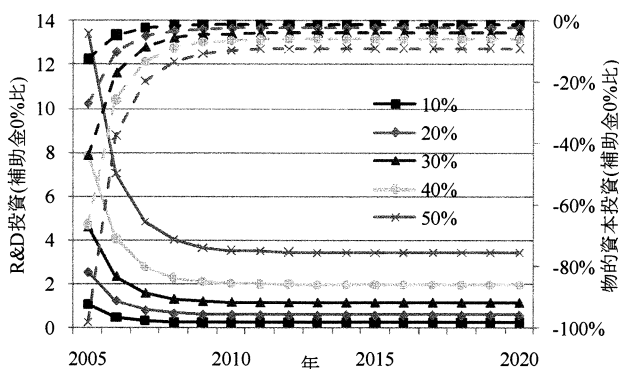


図7 補助金導入による投資変化 (削減率10%時, 実線：R&D, 破線：物的資本)

また、R&D投資と同様に初期ほどその差が大きく、経年的にその差が縮小することが示されている。

R&D投資と物的資本投資のこのような関係は、図1で示した生産構造における代替関係が一因と考えられる。R&D投資により蓄積される知識資本は最上位での代替関係があるが、物的資本はその下位で代替関係があるとされている。そのため、CO₂排出制約のもとで家計の効用最大化のための最適資源配分を考えるとき、R&D投資への配分を増やすことが効率的な手段であると考えられるためである。

次に、R&D投資に対する補助金を導入する場合の投資への影響を補助金なしのケースと比較すると図7のようになる。補助金を導入することによりR&D投資が上

昇し、上昇幅は初期ほど大きく経年的に縮小していく。その一方で、物的資本投資は低下し、その低下幅は初期ほど大きく経年的に縮小していく。

(3) 経済的影響

次に、投資以外への経済的影響を見ると、排出削減時のGDPはベースライン比で低下する(図8)。その低下率は10%削減の0.05%程度から50%削減の2%程度であり、各ケースで経年的な差はほとんど見られない。この影響に最も寄与しているのが金額・率ともに家計消費の低下であり、図9に示すようにその低下率は10%削減の0.7%程度から50%削減の12%程度である。GDPと同様に経年的な差はほとんど見られない。このとき、前節で示したように排出削減に伴う技術変化が起きているが、それだけでは経済を上昇させるには至らない。

では、R&D投資への補助金を導入した場合にGDPへの影響はどのようになるか。ベースライン比の代表的な結果を図10に示す。本図が示すように、排出削減を行った場合でも、R&D投資に対する補助金を導入することでGDPの上昇が見られる可能性がある(ただし、基準年を除く)。本研究で分析したケースの中でこのような傾向が見られるのは、削減-補助金の組み合わせが10-10%、20-10%、30-20%、40-30%、50-40%および、それらより高補助金率のケースである。このとき、低補助金率のケースでは政府消費の上昇も見られ、これは政府消費を犠牲にせず補助金を通じてGDPの上昇が達成されることを意味する。さらに、家計消費では、10-20%、20-40%、30-50%および、それらより高補助金率のケースでベースライン比で全期間で上昇が見られる。

5. 感度分析

本研究で得られた結果は、シミュレーションに用いるパラメータ値により影響を受ける可能性がある。そこで、

本章では割引率と知識資本減耗率に関する感度分析を行い、その結果を示す。本研究では、割引率と減耗率をそれぞれもとの値の2分の1あるいは2倍にした場合についての4パターンを分析する。

前章で示した項目について、感度分析の結果を表2にまとめる。この結果からまず、パラメータの変更によらず、オリジナルのものと結果の傾向は概ね変わらないと言える。排出削減や補助金導入によりR&D投資が上昇し、反対に物的資本投資は低下する。また、GDPや家計消費は排出削減を行うことで低下し、排出削減により促進される技術変化のみでは経済の上昇にはつながらない。しかし、R&D投資への補助金により経済が上昇する可能性も示されている。MACも排出削減量に応じて上昇するが、補助金の導入により低下する傾向にある。

パラメータ値の影響を受けるのは、ベースライン比の結果の上昇あるいは低下の幅である。割引率を2分の1にした場合、R&D投資の上昇幅と物的資本投資の低下幅の縮小が見られ(投資全体では上昇幅が縮小)、また家計消費の低下幅が拡大することからGDPの低下幅が拡大する。知識資本の減耗率を2倍とした場合もこれと同様の結果である。このような結果が得られる理由として、上述のように家計消費への影響がGDP変化に最も寄与する要因であり、割引率や減耗率の変化が家計の消費と貯蓄の決定に重要な影響を与えるためである。その一方で、これらの分析では、R&D投資に対する補助金を導入することにより排出削減を行っても効用やGDPが上昇するケースで上昇幅の拡大が見られ、また上昇するケースも多くなる。

次に、割引率を2倍とした場合、2分の1とした場合と逆の結果が得られ、R&D投資の上昇幅と物的資本投資の低下幅の拡大が見られ(投資全体では上昇幅が縮小)、家計消費の低下幅が縮小する効果によりGDPの低下幅は縮小する。しかし、減耗率を2分の1とした場合は、2倍とした場合のほぼ逆の結果が見られるが、GDPの低下幅は拡大する。これは、GDPの構成要素である家計消費、

表-2 感度分析の結果

	MAC		R&D投資		物的投資		GDP		効用	
	削減	補助	削減	補助	削減	補助	削減	補助(上昇 ケース数 ^f)	削減	補助(上昇 ケース数 ^f)
オリジナル	上昇	低下 ^a	上昇	上昇	低下	低下	低下	(19)	低下	7
割引率 1/2	E	D	D	E	D	D	E	E(19)	E	E(7)
割引率 2倍	E	E	E	D	E	E	D ^e	D(18)	D	D(6)
減耗率 1/2	E(2005年), D(2006年~)		E	E	E	E	E	D(12)	D	D(7)
減耗率 2倍	D(2005年), E(2006年~)		D ^c	D	D ^d	D	E	E(21)	E	E ^g (7)

*表中のE・Dはそれぞれオリジナルの結果における各項目の上昇あるいは低下幅の拡大・縮小を意味する。また「削減」は排出削減時、「補助」は補助金導入時の結果を示している。

a: どのパターンでも初期には上昇も見られる。 b: 低削減率ケースでは増加傾向を示す。 c: 低削減率ケースでは僅かに投資が低下する。 d: 低削減率ケースでは僅かに投資が上昇する。 e: 50%ケースでは僅かに低下幅が拡大(E)する。 f: 削減率0%を除く。 g: 削減率30%では上昇幅が縮小する。

政府消費、投資および、輸出入それぞれの変化の差異がオリジナルのものよりも小さく、そのバランスが影響したものである。その一方で、これらの分析では、R&D投資に対する補助金を導入することにより排出削減を行っても効用やGDPが上昇するケースで上昇幅の縮小が見られ、また上昇するケースも少なくなる。

6. おわりに

本研究では、内生的技術変化を考慮した動学的CGEモデルを開発し、気候変動対策としてのCO₂排出削減とR&D投資に対する補助金導入の効果・影響を分析した。本モデルでは、内生的技術変化をR&D投資を通じた知識資本の蓄積との関係として定義した。分析の結果、従来の研究でも示されているように、CO₂排出削減量に応じてMACが上昇し、また家計消費やGDPが低下するなど経済にマイナス影響が生じた。このとき、排出削減量に応じて技術変化は促進されるが、その効果が排出削減によるマイナス影響を好転させるには至らない。しかし、そのような状況下でも、R&D投資に対する補助金導入によりR&D投資を通じて知識資本の蓄積が促進され、経済へのプラスの効果が起こり得ることが示唆された。この傾向は、本研究の感度分析の範囲でも確認された。

はじめにも述べたように、既存の研究で主に用いられてきたCGEモデルでは技術変化が外生的に与えられている。そのため、本研究のように政策・対策に応じた技術変化の効果を分析することは困難である。ひとつの方法として、予め政策・対策ごとの技術変化を設定してケースごとに使い分けことが考えられる。しかし、その場合、政策と技術変化の関係を（ある程度の裏付けはあるとしても）恣意的に想定することになる。そのため、そのような手法よりも、動学構造の中で政策・対策の変化（本研究ではCO₂排出削減や補助金）により内生的に他の要素との関係も考慮して技術変化が決定される本研究の手法の方が適切であると言える。

本研究では、分析の端緒としてCO₂排出制約に伴う排出権収入を政府の一般所得として扱い、R&D投資に対する補助金は排出権収入とは別に設定した。そのため、今後の研究では、排出権収入と補助金の関係を考慮した分析、そしてより広く気候変動政策と環境投資の関係を考慮した政策志向的な分析を行う。また、知識のスピルオーバー効果や産業ごとに固有の知識（技術）など知識資本のモデル化手法に関する研究も行っていく。

謝辞：本研究は環境省地球環境研究総合推進費Bc-088の支援を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) UNFCCC: UNFCCC receives list of government climate pledges, Press Release (1 Feb., 2010), 2010.
- 2) 環境省: 地球温暖化対策基本法案（仮称）の概要（たたき台）, 第11回環境省政策会議, 2010.
- 3) Green New Deal Group: A green new deal, New Economics Foundation, 2008.
- 4) UNEP: Global green new deal, 2008.
- 5) Gillingham, K.T., Newell, R.G., and Pizer, W.A.: Modeling endogenous technological change for climate policy analysis, *Energy Econ.*, Vol.30, No.6, pp.2734-2753, 2008.
- 6) Babiker, M.B., Reilly, J.M., Mayer, M. Eckaus, R.S., Sue Wing, I., and Hyman, R.C.: The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) model: Revisions, sensitivities, and comparisons of results, *MIT JSPGCG Report*, No.71, 2001.
- 7) Nijkamp, P., Wang, S., and Kremers, H.: Modeling the impacts of international climate change policies in a CGE context: The use of the GTAP-E model, *Econ. Modelling*, Vol.22, No.6, pp.955-974, 2005.
- 8) Matsumoto, K. and Masui, T.: Mid-term dynamic effects of carbon tax based on the imputed price of carbon, *Env. Sci.*, Vol.22, No.6, pp.391-400, 2009.
- 9) Goulder, L. and Schneider, S.: Induced technological change and the attractiveness of CO₂ abatement policies, *Resource Energy Econ.*, Vol.21, No.3-4, pp.211-253, 1999.
- 10) Loschel, A. and Otto, V.M.: Technological uncertainty and cost effectiveness of CO₂ emissions reduction, *Energy Econ.*, Vol.31, pp.S4-S17, 2009.
- 11) Otto, V.M., Loschel, A., and Dellink, R.: Energy biased technical change: A CGE analysis, *Resource Energy Econ.*, Vol.29, No.2, pp.137-158, 2007.
- 12) Otto, V.M., Loschel, A., and Reilly, J.: Directed technical change and differentiation for climate change, *Energy Econ.*, Vol.30, No.6, pp.2855-2878, 2008.
- 13) Sue Wing, I.: Induced technical change in computable general equilibrium models for climate-change policy analysis, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- 14) Wang, K., Wang, C., and Chen, J.: Analysis of the economic impact of different Chinese climate policy options based on a CGE model incorporating endogenous technological change, *Energy Pol.*, Vol.37, No.8, pp.2930-2940, 2009.
- 15) Romer, P.M.: Endogenous technological change, *J. Polit. Econ.*, Vol.98, No.5, pp.S71-S102, 1990.
- 16) Verspagen, B.: Endogenous innovation in neoclassical growth-models - A survey, *J. Macroecon.*, Vol.14, No.4, pp.631-662, 1992.
- 17) Walz, U.: Long-run effects of regional policy in an economic union, *Ann. Reg. Sci.*, Vol.30, No.2, pp.165-183, 1996.
- 18) Diao, X.S., Roe, T., and Yeldan, E.: Strategic policies and growth: an

- applied model of R&D-driven endogenous growth, *J. Devel. Econ.*, Vol.60, No.2, pp.343-380, 1999.
- 19) Chusseau, N. and Hellier, J.: Social policies and R&D subsidies - Impact on inequality, unemployment, growth and the tax burden, *Int. J. Manpower*, Vol.29, No.3, pp.239-262, 2008.
 - 20) Bye, B., Faehn, T., and Heggedal, T.R.: Welfare and growth impacts of innovation policies in a small, open economy; An applied general equilibrium analysis, *Econ. Modelling*, Vol.26, No.5, pp.1075-1088, 2009.
 - 21) Babiker, M., Gurgel, A., Paltsev, S., and Reilly, J.: Forward-looking versus recursive-dynamic modeling in climate policy analysis: A comparison, *Econ. Modelling*, Vol.26, No.6, pp.1341-1354, 2009.
 - 22) Sue Wing, I.: Representing induced technological change in models for climate policy analysis, *Energy Econ.*, Vol.28, No.5-6, pp.539-562, 2006.
 - 23) Barro, R.J. and Sala-i-Martin, X.: Economic growth, 2nd edition, The MIT Press, 2003.
 - 24) Terleckyj, N.E.: Effects of R&D on the productivity growth of industries: An exploratory study, *National Planning Association Report*, No.140, 1974.
 - 25) Terleckyj, N.E.: Direct and indirect effects of industrial research and development on the productivity growth of industries, in: Kendrick, J.W. and Vaccara, B.N. eds., *New development in productivity measurement*, University of Chicago Press, pp.359-386, 1980.
 - 26) Paltsev, S.: Moving from static to dynamic general equilibrium economic models, *MIT JPSPGC Tech. Note*, No.4, 2004.
 - 27) 伴金美: 日本経済の多地域動学的応用一般均衡モデルの開発 : Forward Lookingの視点に基づく地域経済分析, *RIETI Discussion Paper*, 07-J-043, 2007.
 - 28) Lau, M.L., Pahlke, A., and Rutherford, T.F.: Approximating infinite-horizon models in a complementarity format: A primer in dynamic general equilibrium analysis, *J. Econ. Dynam. Control*, Vol.26, No.4, pp.577-609, 2002.
 - 29) Popp, D.: Innovation in climate policy models: Implementing lessons from the economics of R&D, *Energy Econ.*, Vol.28, No.5-6, pp.596-609, 2006.

(2010. 3. 1 受付)

(2010. 6. 21 受理)

Economic Analysis on a Climate Change Measure Applying a CGE Model Considering Endogenous Technological Change: Targeting Japanese Economy

Ken'ichi MATSUMOTO¹

¹Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

This study purposes to develop a dynamic general equilibrium model that considers endogenous technological change and to analyze the economic impacts of a climate change measure using it. In order to focus on the relationship between the measure and its impacts in Japan, it is a single country model targeting the Japanese economy. Endogenous technological change is modeled as the accumulation of knowledge capital which is derived from R&D investment.

As a result, negative effects on GDP and household consumption are observed when only abatement of CO₂ emissions is implemented and the effects become more severe according to the amount of abatement, despite technological change being promoted. However, when emissions abatement and subsidies on R&D investment are implemented simultaneously, it is indicated that there is a possibility of positive effects on both GDP and household consumption compared to the base case through further acceleration of R&D investment and the accumulation of knowledge capital. Similar tendencies are observed in sensitivity analysis for some key parameters.