

カーボン・ニュートラルに向けた政策の経済効果のモデル分析

武田 史郎*

<要旨>

温暖化対策が世界全体としての重要な政策課題になり、各国において今後、積極的な温暖化対策が採用されていく可能性が高い。そのような対策の考案にあたっては、様々な政策の定量的効果についての情報が重要になるため、シミュレーション分析のアプローチであるCGE分析が温暖化対策の分析において幅広く利用されるようになってきている。しかし、日本ではCGE分析の利用者が少ないこともあり、温暖化対策のCGE分析についてあまり理解が進んでいない。

そこで本論文では、温暖化対策を対象とするCGE分析の理解を深めるために、CGE分析という手法を説明するとともに、最近の温暖化に関連するCGE分析の動向についてまとめている。まず、第2節でCGE分析がそもそもどのような分析手法で、どのような利点、欠点があるかを説明する。次に、第3節で、実際のCGE分析の例と著名なCGEモデルであるMITのEPPAモデルを紹介し、CGE分析でどのようなモデルが利用され、さらにそれを使ってどのようなことが分析されているかを具体的に説明している。さらに、第4節では、エネルギー、環境に関連するモデルの比較をおこなうプロジェクトを運営するEMFを紹介し、近年のモデル分析の動向について説明している。

JEL Classification Codes : D58, Q40, Q54

Keywords : 応用一般均衡分析、CGE分析、温暖化対策

* 武田 史郎：京都産業大学経済学部教授、内閣府経済社会総合研究所客員主任研究官。

Model Analysis for Economic Effects of Carbon Neutral Policy

By Shiro TAKEDA

Abstract

Climate change policies have become an important policy issue for the world, and many countries will likely adopt more stringent climate change policies in the near future. Information on the quantitative effects of various policies is essential in planning such policies, and computable general equilibrium (CGE) analysis is widely used for deriving such information. However, in Japan, there are few users of CGE analysis, and CGE analysis of climate change is not well understood.

In order to deepen the understanding of CGE analysis for climate change, this paper explains the method of CGE analysis and summarizes recent trends in CGE analysis related to climate change. First, Section 2 explains the main characteristics of CGE analysis and its advantages and disadvantages. Then, Section 3 explains how CGE models are used for climate policy analysis by providing two examples of CGE analyses and a brief explanation of the well-known MIT EPPA model. Finally, Section 4 explains Energy Modeling Forum (EMF), which is a platform for comparing various models.

JEL Classification Codes: D58, Q40, Q54

Keywords: computable general equilibrium analysis, CGE analysis, climate change policy

1. はじめに

パリ協定の発効を受け、地球温暖化対策に積極的に取り組んでいくことが世界全体としての課題となっている。日本を含め、多くの先進国は 2050 年までのカーボン・ニュートラルという目標を掲げている。さらに、多くの途上国も大幅な GHG 削減を目指すようになってきている。このように、多くの地域で大枠の削減目標が決定されているが、その目標をどのような政策手段によって達成していくかはまだ明確ではない。同じ量の GHG 削減であっても、利用する政策によって経済的な影響（負担）は大きく変わりうる。経済的な負担をできる限り小さくする形で、カーボン・ニュートラルを達成していくには、そのための適切な政策手段を選択していく必要がある。多様な政策手段の中から適切な手段を選択していくには、各政策手段の効果に関する定量的な情報が必要である。このような情報を得るために利用されている分析手法の 1 つが「応用一般均衡分析（computable general equilibrium analysis、以下 CGE 分析）」である。

CGE 分析は一般均衡モデルと現実のデータを組み合わせたシミュレーション手法であり、主に政策の効果を事前的、かつ定量的に分析することに利用されている¹。CGE 分析という手法が最初に考え出されたのは 1960 年代であるが、分析にコンピュータが必要であることから、その利用は限定されていた。しかし、90 年代以降、高性能なコンピュータ、ソフトウェアが低価格で入手できるようになったこともあり、利用が増加している。当初は主に貿易政策、租税政策の分析といった分野での利用が多かったが、温暖化対策が重要な政策課題と認識されるようになり、温暖化対策の分析でも多用されるようになってきている。

CGE 分析はアカデミックな研究における利用はもちろん世界各国の様々な政府機関、国際機関によっても幅広く利用されている。しかし、海外と比較し日本では CGE 分析を利用する研究者が少ないこともあり、CGE 分析による温暖化対策分析の現状についてあまり知られていない。そこで本論文では、CGE 分析がどのような分析手法かを説明した上で、温暖化対策を対象とした最近の CGE 分析の動向について解説したい。

2. CGE 分析とは？

2.1 CGE 分析の特徴

既述の通り、CGE 分析は一般均衡モデルと現実のデータを組み合わせたシミュレーション分析の手法であり、政策などの効果を事前的、定量的に分析するためのものである。今後の温暖化対策を立案・計画するにあたり、政策効果の定量的な情報は重要な判断材料になる。それもあり、近年、温暖化対策を対象とした CGE 分析が盛んにおこなわれている。

CGE 分析はモデルとデータを組み合わせておこなうため、その 2 つが分析の重要な構成要素となる。CGE 分析で利用されるモデル（CGE モデル）は多様で、標準的なモデルがあ

¹ CGE 分析全般については Dixon and Jorgenson (2013) が詳しい。

るわけではないが、多くのモデルに共通する特徴はある。CGE分析がどのようなものかを示すために、まず多くのCGEモデルに共通する点を説明しておこう。

まず1つ目の特徴は、CGEモデルは「一般均衡」という名前が示唆する通り、経済を複数の財、産業（部門）に細かく分割して扱った上で、経済全体をカバーするモデルになっているという点である。財や部門の分類は分析目的やデータの制約などに応じてかなり変わるが、いずれにせよ経済の全ての財・部門、そして生産要素をカバーした上で、経済全体を包括的に扱うという形になっている。

第2の特徴は、経済主体の行動のミクロ的基礎付けを考慮しているという点である。具体的には、企業は利潤最大化行動に基づき、生産関数という技術的制約の下、生産量、投入量の決定をおこない、家計（消費者）は効用最大化行動に基づき、効用関数と予算制約の下で、消費（や労働供給など）を決定すると想定する。動学モデルの場合には、さらに貯蓄、投資も異時点間の最適化行動によって決定されると仮定することもある²。CGEモデルは元々、ミクロ経済学の一般均衡モデルをシミュレーションに応用するという形で発展してきたので、ミクロ的基礎付けがあるというのはある意味当たり前の特徴である。

第3の特徴は、全ての市場において需要と供給が等しくなる状況を想定するという点である。これは、言い換えれば、全ての価格は伸縮的に調整されると想定するという点である。ただし、これは多くのCGEモデルでこのように仮定しているということであり、伸縮的な価格を仮定する必要があるということではない。実際、一部の市場には価格の硬直性（price rigidity）を仮定する場合もある。その代表的な例が、賃金の硬直性を仮定するケースである。賃金の硬直性を仮定すると、労働市場において需要と供給が均等化しない、つまり（非自発的）失業が生じることになる。そのような賃金の硬直性を考慮したCGEモデルは例えばTakeda et al. (2019)で利用されている。

第4の特徴は、ミクロ経済学の一般均衡モデルをベースとしていることから、多くのCGEモデルは実物モデルであり、貨幣はベールの役割しかもたないという点である。これは言い換えれば、モデルによって決まる価格は相対価格のみであり、絶対価格、物価水準などの決定は扱えないということである。

以上、CGEモデルの特徴を見たが、CGE分析のもう1つの要素としてデータがある。CGE分析では、ある基準時点におけるデータ（以下、基準データ）の下で、経済が均衡状態にあるという前提に立って分析がおこなわれる。基準データは、経済全体の財、サービス、生産要素のフローを表現するものであり、社会会計表（social accounting matrix、以下SAM）と呼ばれる。SAMの最も基本となるものは産業連関表であるが、産業連関表には一部の税金のデータしか含まれていないこともあり、他のデータを組み合わせて利用することが多い。多地域のCGEモデルではGTAPデータと呼ばれるデータが標準的に利用され

² 後に説明するように、CGE分析でよく利用される逐次動学モデルでは、動学モデルであっても異時点間の最適化行動は考慮されない。

ている³。

2.2 CGE 分析の利点

CGE 分析が温暖化対策の分析という分野で多用されている理由は、温暖化対策の分析にあたって優れた点を有しているからである。具体的には以下のような利点がある。CGE 分析では多数の市場を同時に考慮し、経済全体を包括的に捉える。そして、各財の生産、投入、消費、価格、さらに各経済主体の収入、支出等がモデル中で内生的に決まるという仕組みになっている。従って、温暖化対策が、個々の部門、財、経済主体に与える影響を分析すると同時に、さらには、それら個々の影響の結果として、国全体での所得、GDP といったマクロ指標に生じる効果も分析可能である。

第2に、CGE 分析では、多数の市場を同時に考慮することにより、温暖化対策の市場間、地域間での波及効果を分析できるという利点がある。温暖化対策を導入した際に強い影響を受ける経済主体の1つはエネルギー集約的な（鉄鋼部門のような）素材産業である。しかし、影響はそれにとどまらない。素材産業の生産物の費用・価格が上昇することで、それを利用する最終財産業にも影響を及ぼすことになる。さらに、それが家計（消費者）の消費、所得に影響を与え、最終的に厚生に影響が及ぶことになる。CGE 分析では以上のような波及効果を捉えられる。

また、波及効果と類似しているが、CGE 分析では市場間の相互作用を捉えることも可能である。温暖化対策にともなう市場間の相互作用としては「税相互作用効果 (tax-interaction effect)」がよく知られている。この税相互作用効果の重要性については、例えば、Takeda (2007) を見て欲しいが、これは複数の財・サービス、生産要素の市場をカバーする一般均衡モデルで初めて捉えられる効果である。

第3の利点は、CGE 分析ではモデルが閉じているという点である。ここでの「モデルが閉じている」という意味は、経済全体を包括的に含んだモデルであり、「経済全体での市場均衡が満たされている」、「全ての経済主体についての予算制約が満たされている」の2つを考慮しているということを指す。市場均衡は、需要と供給が等しくなるように価格が調整されるということであるが、それは、供給側に制約がかかるということの意味している。この性質の重要性は、産業連関分析と対比させると理解しやすい。

産業連関分析では、最終需要の増加に対して、波及効果も含め各部門の生産量がどれだけ増加するかという分析がよく行なわれるが、その際、通常、労働、資本、土地等の生産要素市場では、需要の増加に応じて、供給も増加するという想定が置かれている。これは生産要素市場における供給制約を考慮しないということの意味している。これに対し CGE 分析では、財市場における市場均衡に加え、要素市場の均衡も明示的に考慮されるため、要素市場における供給制約を組み込んだ上で波及効果を分析できる。

2つ目の、経済主体の予算制約を考慮しているとは、全ての経済主体の支出、収入を明

³ GTAP データについて詳しくは Hertel (1999)、あるいは GTAP のウェブサイトを参照されたい。

示的に扱い、支出が収入を上まわらないという制約を置いているということである。この性質の重要性も産業連関分析と比較することで理解しやすい。産業連関分析では最終需要（例えば、公共事業）の増加による波及効果がしばしば分析されるが、そもそも最終需要を増加させるには、そのための資金をどこからかファイナンスしてこななければならない。仮に公共事業の増加が増税によって賄われるとするなら、税を支払う主体による需要（例えば、消費需要）は減少するため、全体としては生産が減少してしまうかもしれない。しかし、産業連関分析では最終需要がどうファイナンスされるかをモデルの対象外としているため、資金をファイナンスする側における影響を無視してしまう傾向にある。これに対し、CGEモデルでは、家計、政府の予算制約を明示的に組み込んでいるため、何らかの支出の増加があった場合、必ずそれに伴う収入の増加、あるいは別の支出の減少の影響も考慮されることになる。従って、裏付けのない支出の増加による見せかけの効果を排除できるのである。

2.3 CGE分析の欠点・問題点

CGE分析には前節で説明したような利点があり、だからこそ温暖化対策の分析でもよく利用されているが、同時に様々な欠点、問題点もある。CGE分析を適切に評価・利用するには、そのような点にも留意しておくことが望ましいので以下で説明する。まず、第0節で述べたように、通常のCGEモデルは実物的なモデルであり、モデルで扱えるのは相対価格のみである。このため、多くのCGEモデルでは、マクロ経済学で分析されるような貨幣面、金融面での影響をそもそも分析することはできない。

第2に、個別の部門を詳細には分析しにくいというデメリットがある。複数の市場を考慮し、経済全体を扱うCGE分析では、モデルという側面からもデータという側面からも個別の部門、個別の経済主体の扱いはかなり単純化せざるを得ないことが多い。そのため、個別の部門を詳細に捉えることにはどうしても限界が出てくる。ある特定の部門に焦点を当てたい場合には部分均衡分析などの手法を利用することが望ましい。

第3に、モデル、関数形、パラメータの選択の実証的根拠が希薄であるという問題がある。例えば、市場の競争形態には不完全競争もあり、実際、現代の多くの産業は不完全競争の状態に近いと言われているが、CGE分析で利用されるモデルのほとんどは完全競争を仮定している⁴。また、CGE分析ではモデルが様々な関数形を利用して表現され、さらにそれらの関数には多数のパラメータが含まれる。関数形には、代替の弾力性一定(constant elasticity of substitution、以下CES)の関数がよく利用されるが、それは主に扱いやすいからであり、実証的な根拠があるからではない。また、代替の弾力性パラメータを特定化する必要があるが、この特定化にもしっかりした実証的根拠があるとは言えない⁵。CGE分析の

⁴ 例えば、Balistreri and Rutherford (2012) では不完全競争のCGEモデルが利用されており、そこからは通常の完全競争のCGEモデルとは大きく異なる結果が導かれている。

⁵ CGE分析のためにCES関数の代替の弾力性を推定した研究には、例えば、Okagawa and Ban (2008)、van der Werf (2008)、Koesler and Schymura (2015) などがある。3つの研究とも同じようなパラメータの推定を

シミュレーションはモデル、関数形、パラメータについての仮定に強く依存することが多い。従って、その決定の根拠があやふやな点は大きな問題となりうる。

第4に、データの問題がある。既述の通り、CGE分析ではある年のデータを基準データとして利用し、分析をおこなう。これは、実際に実現した経済の状態をそのまま分析に反映させているという意味では望ましいことかもしれない。しかし、分析結果が一時点でのデータに強く依存してしまうという問題点も孕んでいる。

最後に、分析の透明性の問題がある。CGE分析の結果は、モデル、データ、関数形、パラメータ等の選択に強く依存する可能性が高いので、分析の内容を第三者が客観的に評価し、その妥当性を判断するには、モデルなどに関する詳細な情報が必要になる。しかし、CGE分析ではモデル、データはとも非常に大規模、かつ複雑となることが多いため、分析の詳細を示すことは非常に煩雑な作業になる。この問題に対処するために、シミュレーションのプログラム、データを公開している研究者もいるが⁶、現状では少ない。

3. CGE分析・モデルの紹介

前節でCGE分析の特徴、利点、欠点を説明したが、いくぶん抽象的な内容が多かった。CGE分析という手法の実態を把握してもらうためにも、以下で実際のCGE分析の例を2つ取り上げ、どのような分析に利用されているのかをより具体的に説明したい。取り上げるのはTakeda and Arimura (2021) と Takeda et al. (2014) の2つの研究である。どちらも温暖化対策を対象としたCGE分析である。また、その後に著名なCGEモデルであるMITのEPPAモデルを紹介したい。

3.1 Takeda and Arimura (2021) の分析

Takeda and Arimura (2021) (以下、T2021) は、日本経済を対象とした動学的なCGEモデルを利用して、2050年までにCO₂を80%削減するという日本の温暖化対策を分析した研究である⁷。まず、この研究で利用されているモデルについて説明しよう。CGE分析では経済を多数の財・部門に分けるが、その際に、どのように財・部門を分割するかが1つのポイントになる。財・部門を細かく分割すればするほど、政策効果を細かく分析できる。しかし、財・部門を細かく分割するには、そのために細かなデータが必要になるのに加え、モデルの計算の難易度が高くなるというデメリットもある。

T2021では26財、18部門という形に財・部門を分割し、このうち15財、8部門をエネルギー財、部門としている。CGE分析では1つの部門が1種類の財を生産していると仮定

試みているが、その推定値には大きな乖離が見られる。

⁶ 例えば、MITのEPPAモデルはプログラムが公開されている。また、CGE分析の著名な研究者であるThomas Rutherford氏は自分の分析の多くのプログラムを公開している。

⁷ 2023年1月時点では日本の2050年までの目標はカーボン・ニュートラルであるが、T2021の研究を開始した時点では2050年目標は80%削減であった。

し、「財の数=部門の数」と想定することも多いが⁸、T2021では財の数と部門の数は異なっている。これは1つの部門が多数の財を生産しているケース、逆に、1つの財が複数の部門によって生産されているケースを想定しているからである⁹。CGE分析では財・部門をもっと細かく分割していることも多いが、T2021ではエネルギー財・部門以外をかなり統合して扱い、財・部門の数を比較的少なくしている。この理由は後に説明する。T2021では基準データに日本の2011年の産業連関表（総務省、2015）を利用している。また、CO₂の排出（規制）を分析するので、産業連関表に対応した形のCO₂排出量データも必要になるが、これには2011年の3EIDデータを利用している（Center for Global Environmental Research, 2018）。

T2021が利用しているモデルは多くの部分について一般的なCGEモデルと同じ想定を置いているが、他の多くのCGEモデルと異なる部分もある。その1つは前向き（forward-looking）タイプの動学モデルであるという点である。CGEモデルが利用されるようになった当初は静学モデルを前提としていることがほとんどであったが、しだいに動学モデルの利用が増加してきた。特に、温暖化対策は50年以上の長期に及ぶ状況をカバーする性質を持つため、動学モデルの利用が非常に多い。

経済学で動学モデルというとマクロ経済学で利用されているような前向きタイプのモデル、つまり、代表的家計が前向きの期待に基づき、動学的な最適化行動をとることで、各期の消費、貯蓄（投資）などが決まるモデルを指すことが普通である。しかし、CGEモデルでは、このような前向きタイプではなく、「逐次動学モデル（recursive dynamic model）」と呼ばれるタイプのモデルを利用することが多い。逐次動学モデルとは、静学的（あるいは、後ろ向き）なモデルを繰り返し解いていくことで、時間の推移を描写するモデルである。

前向きのモデルでは将来の全ての期間の変数を同時に解くことになるため、モデルに含まれる変数の数が非常に多くなりやすい。一方、逐次動学モデルでは一時点でのモデルを繰り返し解いていくだけであるので、一度に解く変数の数は一時点しか考えないモデルにおける数とほぼ同じである。CGEモデルでは複数の財・部門を考慮するため、一時点しか考慮しないモデルであってもそもそも変数の数が多くなりやすい。そのようなモデルを前向きタイプの動学モデルに拡張すると変数の数が非常に多くなり、モデルを解くこと自体が難しくなることが多い。これが、CGE分析において逐次動学モデルの利用が多い主な理由である。

しかし、逐次動学モデルでは投資を適切に扱えないという問題がある。投資は本来、投資が将来もたらす収益を基に決定されるものである。ところが、逐次動学モデルでは過去、あるいは現在の状況しか考慮できないため、投資が将来の収益を反映して決まるという前

⁸ 実際、後に紹介する Takeda et al. (2014) ではそう仮定している。

⁹ 例えば、石油製品という部門は8つの石油製品を生産している。また、電力という財は火力発電、水力発電、原子力発電、再エネ発電という複数の部門によって生産されている。

向きの行動を捉えられない¹⁰。後に説明するが、T2021 では、法人税という一種の投資収益に対する課税を分析対象の1つとしているため、投資行動をより現実的な形で捉えたい。そこで、投資をより適切に捉えることができる前向きのタイプの動学モデルを利用している。T2021 では財と部門の数を少なく抑えているが、その理由は前向きタイプのモデルであっても、モデルに含まれる変数の数を減らすためである。

T2021 では、日本における 2050 年までに CO₂ 排出量を 80%削減するという政策を分析している。削減の手段には様々なものがあるが、T2021 では炭素税を利用すると仮定している。炭素税を用いる場合、政府に新たな税収が生じることになるが、その税収をどのように扱うかが分析の1つのポイントとなる。最もオーソドックスで、単純な方法は、税収を全て家計に一括で還元する (lump-sum rebate) という方法である。しかし、一括で還元するのではなく、既存の税を減税することに利用する方が経済的に望ましい効果をもたらす可能性があるという主張がある。

所得税、法人税、消費税などの既存の税は一般に経済活動に歪みをもたらしているといわれる。よって、これらの税を減税することで、経済の効率性が高まる可能性がある。炭素税の導入自体は経済に負担をもたらすことになるが、同時に既存の税を減税することで効率性の改善という効果も生じる。仮に後者の効果が強ければ、単に一括で税収を家計にそのまま渡してしまうよりも、よい効果をもたらす可能性がある。このように炭素税の導入とともに既存の税を減税するという政策は「環境税制改革」と呼ばれる。環境税制改革という形で排出規制を導入することは、CO₂ の削減という「第1の配当」だけではなく、経済効率の改善という「第2の配当」をもたらす可能性があることから、環境税制改革の「二重の配当仮説」と呼ばれている¹¹。

二重の配当が実際生じるのであれば、負担を大幅に軽減しながら CO₂ の削減をおこなえることを意味する。そのため、世界各国の温暖化対策における環境税制改革の二重の配当仮説の分析が数多くおこなわれてきた。既に導入された排出規制に伴い二重の配当が生じたかどうかを検証する事後的な分析もあるが、多くの分析は CGE モデルを用いたシミュレーションの分析である。T2021 は日本における 2050 年までの温暖化対策について、二重の配当が生じるかを分析した研究である¹²。

図表 1 が T2021 で取り上げているシナリオである。どれも炭素税を導入して、2050 年までに CO₂ 排出量を 80%削減するというシナリオであるが、シナリオによって炭素税収の扱いが変わってくる。まず、LUMP は炭素税収を一括で家計に還元するというシナリオである。これが純粋な炭素税の効果を表すシナリオとあってよい。残りの3つのシナリオが環

¹⁰ このため、逐次動学モデルでは通常特殊な仮定をおくことで投資を決定している。具体的には、投資を外生的に固定してしまうか、貯蓄率一定という仮定によって貯蓄を決め、それに応じて投資が決まるというアプローチをとっているものが多い。

¹¹ 二重の配当仮説について詳しくは、例えば、環境経済・政策学会 (2018) の「二重の配当」の項目、あるいは有村他 (2018) を見てほしい。

¹² Freire-González (2017) は多数の CGE 分析による二重の配当仮説の分析についてまとめている。

境税制改革のシナリオであり、INC、COR、CON がそれぞれ所得税、法人税、消費税の減税をおこなうというシナリオである。環境税制改革という形を利用した方が、経済的な負担が軽減されるかどうか分析の重要なポイントとなる。シミュレーションでは、炭素税を導入したことで炭素税導入前の状態（BAUシナリオ）から経済がどう変化するかを分析している。

図表 1：T2021 で分析しているシナリオ

シナリオ	説明
LUMP	炭素税＋税収を一括で家計に還元
INC	炭素税＋所得税の減税
COR	炭素税＋法人税の減税
CON	炭素税＋消費税の減税

シミュレーションでは、CO₂排出量、炭素税率、炭素税収などのCO₂関連の変数への効果、消費、投資、労働供給、余暇、GDP、所得、厚生などのマクロ変数への効果、個々の部門の生産量への効果を分析している。しかし、ここでは二重の配当が生じるかどうかに関心を当てるので、その基準となる、GDP、所得、厚生への影響のみを見ることにする。結果は図表2にある。

図表 2：T2021 における排出規制（炭素税）の効果

		LUMP	INC	COR	CON
2030 時点	GDP	-0.28	0.03	0.99	0.19
	所得	-0.40	-0.06	1.10	0.63
	厚生	-0.30	-0.41	-0.49	-0.05
2050 時点	GDP	-2.09	-1.51	-0.13	-1.78
	所得	-2.93	-2.28	-0.68	-2.12
	厚生	-1.95	-1.93	-1.69	-1.77
	生涯厚生	-0.47	-0.47	-0.68	-0.43
	GDP の DPV	-0.49	-0.25	0.66	-0.19
	所得の DPV	-0.70	-0.44	0.65	-0.07

注：全て BAU の値からの変化率（%）である。DPV は割引現在価値の合計のことを指す。

数値は BAU シナリオの値からの変化率（%）を表している¹³。2030 年時点での影響を見ると、GDP や所得への影響は環境税制改革のケースの方が LUMP よりもマイナスの幅が小さい（あるいは、プラスになっている）。これは GDP や所得という変数を基準にすると

¹³ プラスの数値は BAU シナリオの値よりも増加したということを意味する。

純粋な炭素税（LUMP）よりも環境税制改革という形をとった方が望ましいということになる。2050年時点での影響、あるいは期間全体を通じての影響についても同様のことが言える。一方、厚生（代表的家計の効用）という変数からは環境税制改革は必ずしも望ましくないという結果となっている。

以上の結果は、炭素税収をどう処理すべきかは、どの変数を重視するかで変わってくるということを意味するが、いずれにせよ CGE 分析によるシミュレーションではこのように政策効果を定量的に明らかにし、それにより政策の優劣を評価することが可能である。

3.2 Takeda et al. (2014) の分析

もう1つの CGE 分析の例である Takeda et al. (2014)（以下、T2014）は、世界全体を14地域に分割した多地域のグローバル CGE モデルを利用した分析である。CGE モデルには、前節の T2021 のように、1地域のみを分析対象としたものも多いが、温暖化対策の分析ではこの T2014 のように多数の地域をカバーする多地域モデルも多い¹⁴。多地域モデルのメリットの1つは政策が貿易に与える影響、貿易を通じた影響を分析できる点である。

温暖化対策がもたらす貿易を通じた効果として「炭素リーケージ」がある。炭素リーケージとはある地域で CO₂ を削減しようとする、別の地域で CO₂ が増加してしまう現象を指す¹⁵。炭素リーケージが強く働くと、温暖化対策の有効性が大きく損なわれることになるので、CO₂ の削減をおこなう際には炭素リーケージを抑えながらおこなう必要がある。具体的な対策としては、温暖化対策の負担が重くなりやすいエネルギー集約・貿易財部門（energy-intensive trade-exposed sector、以下 EITE 部門）への負担を軽減する政策などがある。

排出量取引制度における、そのような費用軽減措置としては排出枠の初期配分を無償にするという政策がある。排出量取引制度における排出枠の初期配分方法としては、オークションが最もオーソドックスな方法であるが、オークション方式では CO₂ 排出量が多いエネルギー集約部門の負担が重くなる。EITE 部門の負担を軽減するものとして、排出枠の初期配分を無償でおこなう方法があるが、無償配分には過去の CO₂ 排出量を基に初期配分をおこなうグランドファザリング方式（grandfathering 方式）や生産量に基づく配分方式（output-based 方式、以下 OBA 方式）など様々な方式がある。T2014 では、排出量取引を導入する状況において、初期配分方式の違いが、GDP、厚生、炭素リーケージ、EITE 部門への影響にどのような違いをもたらすかを分析している。

T2014 では基準データに 2004 年を基準年とする GTAP 7 データを利用し、世界を 14 地域、26 部門に分割したグローバルな CGE モデルを利用している。T2021 では動学モデルを利用したが、T2014 では静学モデルを利用している。シミュレーションでは、日本が排

¹⁴ また、1つの国を複数の地域に分割したモデルもある。例えば、Yamazaki and Takeda (2013)、白井他 (2013) は日本を複数地域に分割した CGE モデルを利用している。同様に、Rutherford and Schreiber (2019) は米国を複数地域に分割した CGE モデルを利用している。

¹⁵ 炭素リーケージについて詳しくは環境経済・政策学会 (2018) の「炭素リーケージ」の項目を参照されたい。

出量取引によって CO₂ 排出量を基準年比で 30%削減するという政策を想定している。そして、排出枠の初期配分方式に図表 3 のような複数のシナリオを比較している。取り上げるのは、オークション方式、グラントファザリング方式、OBA 方式、そしてオークションと OBA 方式の組み合わせである。

図表 3 : T2014 で分析しているシナリオ

シナリオ名	利用する初期配分方式
AUC	オークション方式による有償配分
GF	グラントファザリング方式による無償配分
OBA	生産量に基づく (output-based) 無償配分
AO-E	EITE 部門、電力部門、石油石炭製品部門には OBA 方式、その他の部門にはオークション方式
AO-ET	EITE 部門には OBA 方式、その他の部門にはオークション方式

シミュレーションでは、初期配分方式の違いによって、炭素リーケージ率、EITE 部門の生産量、CO₂ 排出量、排出枠価格、消費、輸出、輸入、労働供給、賃金率、所得、GDP、厚生などの変数への影響がどう変化するかを分析している。図表 4 はそのうち日本の GDP と厚生への影響と炭素リーケージ率を掲載している。

図表 4 : T2014 における排出量取引の効果

	AUC	GF	OBA	AO-E	AO-ET
厚生	-0.28	-0.54	-0.52	-0.44	-0.34
GDP	-0.07	-0.86	-0.66	-0.48	-0.24
炭素リーケージ率	20.58	20.36	15.27	15.31	16.92

厚生と GDP は BAU の値からの変化率 (%)。リーケージ率は%。

厚生、GDP の値は BAU シナリオ (CO₂ を削減しないシナリオ) からの変化率 (%) を表している。また、炭素リーケージ率は日本が排出量取引を導入することによる炭素リーケージ率 (%) を表している。厚生、GDP の数字はどれも排出量取引の導入によって低下している。そして、その低下率は AUC シナリオで最も小さい。よって、厚生、GDP という観点からはオークション方式で初期配分することが望ましいことになる。しかし、炭素リーケージ率は AUC シナリオが最も高くなる一方、OBA 方式を採用することによってかなり低下する。よって、炭素リーケージを防止するという観点からは、オークション方式よりも OBA 方式を利用することが望ましいということになる。T2021 でもどの効果を重視するかで、望ましい政策が変わってきたが、ここでも同様のことが成り立っている。

3.3 EPPA モデル

温暖化対策を分析するための CGE モデルは多数開発されている。それは第 0 節でも説明するが、ここでまず温暖化対策分析用の著名な CGE モデルである EPPA モデルを紹介しておきたい。EPPA モデルは MIT の Joint Program on the Science and Policy of Global Change によって作成されている the MIT Economic Projection and Policy Analysis Model というグローバル CGE モデルである。90 年代から開発・利用が始まり、その後、継続的に改良、アップデートされつつ、様々な温暖化対策の分析に利用されてきた。最新の版のモデルは 2022 年に公表されたばかりの EPPA 7 モデルである。ここでは、Chen et al. (2022) を基に EPPA 7 モデルを説明したい。

EPPA モデルは世界全体をカバーするグローバル・モデルであり、世界を図表 5 の 18 地域、図表 6 の 21 部門に分割している。21 部門のうち発電以外の部門は 12 部門であり、多くの多地域 CGE モデルと比較し部門の分類は少し粗いと言える。

図表 5 : EPPA モデルの地域分類

地域	地域
1 United States	10 South Korea
2 Canada	11 Indonesia
3 Mexico	12 China
4 Japan	13 India
5 Australia, New Zealand & Oceania	14 Brazil
6 European Union+1	15 Africa
7 Eastern Europe and Central Asia	16 Middle East
8 Russia	17 Latin America
9 East Asia	18 Rest of Asia

図表 6 : EPPA モデルの部門分類

部門	部門
1 農業（穀物）	13 電力（石炭火力）
2 農業（家畜）	14 電力（ガス火力）
3 農業（林業）	15 電力（水力）
4 食品	16 電力（原子力）
5 石炭	17 電力（石油火力）
6 原油	18 電力（太陽光）
7 石油製品・石炭製品	19 電力（風力）
8 エネルギー集約産業	20 電力（その他の発電）
9 その他の産業	21 電力（送配電）
10 帰属家賃	
11 サービス	
12 輸送	

EPPA モデルは基準データとして、GTAP-Power 10 を利用している (Chepeliev, 2020)。これは 2014 年を基準年とする GTAP10 データ (Aguiar et al., 2019) の発電部門を細かく分割したデータである。EPPA モデルは GTAP データを利用していることもあり、多くの多地域 CGE モデルと共通する部分も多いが、独自の部分も多い。以下で、EPPA モデルを特徴づける要素について説明する。

まず、EPPA モデルでは各地域にそれぞれ 1 つの代表的家計を想定しているが、その効用関数に、生存消費 (subsistence consumption) を時間とともに変化させる形の Stone-Geary 型効用関数を利用している。これは非相似拡大的な選好を考慮するためである。

第 2 に、EPPA モデルでは、家計の効用関数内で輸送関連財を詳細に扱うというアプローチを採用している。例えば、多くの CGE モデルでは効用関数内で様々な用途の石油製品を一括して扱ってしまっているが、EPPA モデルでは輸送用途の石油製品と輸送以外の用途の石油製品を分けて扱っている。また、内燃機関 (internal combustion engine、ICE) による自動車、電気自動車 (electric vehicle、以下 EV)、公共輸送サービスなどを明示的に扱っている。以上のアプローチにより、ICE タイプの自動車への規制や EV の促進などの輸送関連の温暖化対策を分析しやすくなっている。

第 3 の特徴は、多様な発電技術を考慮している点である。既にある程度の利用がおこなわれている発電技術としては図表 6 の 9 つを考慮し、さらにそれに加え、バックストップ技術 (ここでは、現時点では商業的に利用されていないが、将来経済性が改善し、商業ベースで利用される可能性が高い技術を意味する) も考慮している。具体的には、“pulverized coal with CCS”, “NGCC”, “Biomass plant with CCS” など 10 の技術を考慮している。これにより、様々な発電技術、バックストップ技術をターゲットとするような政策の分析が可能になっている。

EPPA モデルは逐次動学モデルタイプの動学モデルであり、2015 年から 5 年おきに 2100 年までのタイムスパンをカバーしている¹⁶。労働人口、生産要素投入に関する生産性水準、autonomous energy efficiency improvement (AEEI) パラメータなどを外生的に設定した上で各期のモデルを解くことで、貯蓄、投資、化石燃料生産の資源の推移、バックストップ技術の普及率 (penetration rate) などが内生的に決まってくる。

資本は各期の投資によって蓄積されていくが、CGE モデルではその資本を全て同じように扱ってしまうか、せいぜい既に利用された資本と新規に蓄積された資本の 2 つに区別して考えるだけのことが多いが、実際には資本は導入された時期により、その中身や性質が大きくことなることが多い。投資された時期による資本の中身の違いを考慮するために、EPPA モデルでは投資された時期に従って資本のヴィンテージを区別している。

また、第 5 の特徴として土地利用を詳細に扱っているという点がある。土地を natural forest、crop、pasture など 6 つの形態に区別して扱い、さらにその 6 つの形態の間での変換も考慮している。このように多様な土地の形態とその間の変換を考えることで、土地利用変

¹⁶ ただし、逐次動学モデルであるので、2050 年までしか計算しないということも可能である。

化による農業生産や GHG 排出量の変化も分析できる。

最後の特徴として、EPPA モデルでは多様な排出物を考慮している。まず、CO₂, CH₄, N₂O, PFCs, HFCs, SF₆ などの GHG の排出が計算可能であるし、CO₂ は化石燃料起源だけではなく、工業プロセス排出なども考慮されている。また、GHG 以外には、エアロゾルや様々な大気汚染物質、具体的には CO, VOCs, NO_x, SO₂, BC, OC, NH₃ がカバーされている。生産活動からのこれらの排出物の量だけではなく、既述の通り、土地利用変化に伴う排出も考慮されている。よって、温暖化対策の効果を詳細に分析できるだけではなく、温暖化対策以外の環境対策（大気汚染対策など）も分析可能なモデルになっている。

Chen et al. (2022) では、モデルの利用例を示すために簡単な政策シミュレーションがおこなわれている。そこでは“ParisForever”という各国が提出している 2030 年までの“Nationally Determined Contributions”（以下、NDCs）に基づく削減目標が 2030 年以降も継続されるというシナリオと“AcceleratedActions”という気温上昇を 1.5°C 以内に抑えるために必要な削減をおこなうというシナリオがとりあげられている。削減目標を達成するために利用される手段としては、電力部門、輸送部門への様々な施策に加え、カーボンプライシングも考慮している。シミュレーションでは、各地域の GDP、GHG 排出量、エネルギー起源 CO₂、1 次エネルギーの構成、発電の構成、EV の数、EV 向けの電力需要量、土地利用の状態、化石燃料に関わる座礁資産 (stranded asset) など様々な変数への影響が分析されている。EPPA モデルは非常に多くの分析に利用されており、その成果が論文として公表されている。それらの成果については、EPPA モデルのウェブサイトを見て欲しい¹⁷。

最後に、EPPA モデルの特筆すべき点について触れておきたい。この節では EPPA モデルを詳しく紹介したが、世界各国の研究者・研究機関が温暖化対策分析用の CGE モデルを多数作成しており、モデルの水準として EPPA モデルに劣らないモデルもある。しかし、ほとんどの CGE モデルと異なり、EPPA モデルはシミュレーションのためのプログラムが公開されているという特徴がある¹⁸。プログラムが公開されているということは、1) モデルがどのような構造を持ち、どのようなデータを利用しているかを正確、かつ完全に第三者がチェックできる、2) 第三者が同じようなシミュレーションを再現できるということを意味する。この結果、EPPA モデル（とその分析）は他のモデルと比較し、極めて客観性、透明性が高いという性質を持っている。これがここで特に EPPA モデルを紹介した主な理由である。

4. Energy Modeling Forum

第 3 節で、2 つの CGE 分析と EPPA モデルを簡単に紹介した。これで実際に利用されて

¹⁷ <https://globalchange.mit.edu/publications/3>

¹⁸ EPPA モデルは GAMS (General Algebraic Modeling System) という数値計算ソフトウェア上で MPSGE というソルバーを利用する前提で、そのプログラムが記述されている。EPPA モデルのウェブサイトにもプログラムのダウンロードを申請するページがある。

いる CGE 分析やモデルについてある程度イメージを持てたかもしれないが、前節でも書いたように、温暖化対策の分析のための CGE モデルは多数存在しており、その全体像について知るには第3節の内容だけではいささか不十分である。そこで、以下では Energy Modeling Forum（以下、EMF）について紹介したい¹⁹。

EMF とは、スタンフォード大学において 70 年代から運営されている、エネルギーや環境に関するモデル分析に従事する研究者が情報交換や共同研究をおこなうためのプラットフォームである。EMF は様々な活動の場になっているが、その 1 つの重要な役割はモデルを比較する機会の提供である。

CGE モデルであれ、それ以外のタイプのモデルであれ、多数のモデルが多数の研究者、研究機関によって作成され、様々なシミュレーション分析のために利用されている。そして、それらの分析からはしばしば大きく異なる結果が導かれている。このように、様々なモデルが乱立し、独自の分析が並立的に行われ、そして分析間で政策効果に大きな違いが生じる結果が導かれているような状況は、分析の結果を参考にしたい政策決定者には当然好ましくない。また研究者にとっても、自分のモデルと他のモデルが大きく異なる結果導いているが、その理由が不明な状況は望ましくない。そこで、EMF は、様々なモデルの開発者が集まり、ある程度共通の前提の下で分析をおこなうことで、モデルの違いによりどのくらい結果が変わるのか、そしてその差はモデルのどの部分の違いに起因するのかを明らかにする場を提供している。

図表 7 はこれまで EMF で進められたプロジェクトのテーマの一部である。各テーマの下に多数のモデル開発者が参加し、モデルの比較がおこなわれている。プロジェクトのテーマは EMF24、EMF27、EMF32、EMF35 のように分析対象の地域によって分けられていることもあれば、EMF29、EMF36 のように分析対象の政策によって分けられる場合もある。また、EMF のモデル比較は CGE モデルに限定されているわけではなく、ボトムアップ型の技術選択モデルも利用されれば、電力市場のモデルなども利用されている²⁰。

多くの場合、EMF のプロジェクトの研究成果は学術論文としてまとめられて公表される。それらの論文を読むことで、EMF でおこなわれたモデルの比較研究についての詳細を知ることができる。近年における温暖化対策の（CGE）分析の動向や全体像についての知識を得たい場合には、EMF の成果がまとめられた論文を読むことが非常に役に立つ。図表 7 のプロジェクトの中で特に EMF27、EMF29、EMF36 には多数の CGE モデル開発者が参加し、CGE 分析の比較をおこなっている。以下で、この 3 つをもう少し詳しく説明したい。

¹⁹ EMF のウェブサイト：<https://emf.stanford.edu/>

²⁰ ただし、モデルのタイプが変わればそもそも分析できる事柄も変わってくるため、比較は少し難しくなる。例えば、CGE モデルでは個々の部門の生産水準や GDP は通常、モデルで内生的に決まってくる変数であるが、部分均衡モデルである技術選択モデルや電力市場モデルなどでは外生的に設定されていることが多い。

図表 7：EMF のプロジェクトの例

名前	テーマ
EMF24	U.S. Technology and Climate Policy Strategies
EMF25	Energy Efficiency and Climate Change Mitigation
EMF27	Global Model Comparison Exercise
EMF29	The Role of Border Carbon Adjustment in Unilateral Climate Policy
EMF32	US GHG and Revenue Recycling Scenarios
EMF33	Bio-Energy and Land Use
EMF35	Japan model intercomparison project (JMIP) on long-term climate policy
EMF36	Carbon Pricing After Paris (CarPri)

まず、EMF27 はグローバル・モデルを比較するプロジェクトであり、18 個という極めて多くのモデルが参加している。ただし、モデルの多くは部分均衡モデルで、CGE モデルは OECD の ENV-Linkages、アメリカの FARM、Phoenix、EU の IMACLIM の 4 つである。EMF でのモデル比較の際には、通常、共通の政策シナリオを設定する。EMF27 では GHG の大気中濃度を 2100 年までに 450ppm、あるいは 550ppm に抑えるという 2 つのシナリオを考慮している。さらに、利用可能な技術についても複数のシナリオを想定し、その共通シナリオを用いて比較をおこなっている。

Climate Change の Volume 123、Issue 3-4 が EMF27 についての特別号となっており、EMF27 に参加したモデルの分析結果がまとめられている。モデルの比較では、GHG 排出量、割引炭素価格の平均値、消費の損失の割引現在価値、エネルギー構成、電源構成などの変数が使われている。詳しくは、Kriegler et al. (2014) を見てほしいが、モデルによって変数の値にかなり大きな差がみられる。例えば、450ppm シナリオにおける 2050 年時点での影響を見ると、消費の損失の程度は FARM モデルで ENV-Linkages モデルの 3 倍以上大きく、Phoenix モデルと比較しても 3 倍近く大きくなっている。また、電源構成についてもモデル間の差がかなり大きい。

モデル間で政策シナリオなど多くの部分を共通化しているにもかかわらず、大きく異なる政策効果が導かれていることから、やはり異なるモデルを用いることで、分析結果が大きく変わりうるということが確認できる。これは単一の CGE モデルから導出された結果を解釈する際には十分気を付ける必要があることを示唆している。

2 つ目の EMF29 は国境炭素調整措置 (border carbon adjustment、以下 BCA) の効果についてモデル比較をおこなったプロジェクトである²¹。Energy Economics の Volume 34, Supplement 2 がこの EMF29 の特別号となっており、プロジェクトの成果がまとめられている。

²¹ 国境調整措置は現在 EU で導入が検討されており、EU が carbon border adjustment mechanism と呼んでいることから、CBAM という用語が利用されることが多いが、EMF29 では BCA という呼び方が使われている。

特に、Böhringer et al. (2012) がモデル比較をまとめている。EMF29には12のモデルが参加している。BCAはカーボンプライシングに付随する政策ということもあるので、CGEモデル以外の参加が多かったEMF27と異なり、参加しているのは全てCGEモデルである。全てがCGEモデルということもあり、EMF29ではモデル間で様々な要素を共通化しやすくなっている。実際、基準データをGTAP7.1に統一し、さらに部門や地域についても同じ分類を利用するというように、政策シナリオ以外に、データの部分でも共通化している部分が多い。

以上の設定の下で、排出規制とBCAの導入の効果についてモデル比較をおこなっている。比較している効果は、CO₂排出量、炭素価格、炭素リーケージ、EITE産業の生産量、GDPへの影響などである。EMF27ではモデル間で結果に大きな差が観察されたが、EMF29でも同様に、カーボンプライスの水準、GDPの変化率などはモデル間で数倍の差が観察される。モデルのタイプをCGEモデルに限定し、共通化した部分をかなり増やしても、分析結果に大きな差が生じうるということを意味している。

最後に、EMF36について説明しよう。このEMF36は比較的新しいプロジェクトで2030年までのNDCsに基づく削減の影響をモデル間で比較する内容である。比較結果はやはりEnergy Economicsに論文として公表されており、特にBöhringer et al. (2021)が全体のまとめをおこなっている。EMF36はEMF29と似ており、参加しているモデルは全てCGEモデル(17個のモデル)である。そして、データはGTAP9(基準年は2011)かGTAP10(基準年は2014)に統一しており、さらに部門分類、地域分類も共通化している。EMF29ではBCAという貿易に対する措置を主な分析対象としていたため、全てのモデルが多地域モデルであったが、EMF36では1地域のモデルも含まれている。

2030年までの削減策を分析するということで、BAUの設定(BAUシナリオにおける2030年時点でのCO₂排出量とGDP)も共通化している。政策シナリオとしては、NDCsの設定について複数シナリオを考慮することに加え、国際間での排出量取引の有無についても複数シナリオを考慮し、国際間の排出量取引の導入による影響も比較している。

シミュレーションでは、炭素価格の水準、各国(あるいは世界全体)の厚生水準がモデル間でどう変わるかを検証している。EMF36でもモデル間で効果に大きな差が観察されており、例えば、炭素価格の水準、世界全体での厚生への影響はモデル間で数倍の差が生じている。やはり、モデルの違いが分析結果に対して大きな影響をもたらすことが確認できる。

以上、EMFについて簡単に見てきたが、EMFはそれまでばらばらにおこなわれていたモデル分析を比較可能な形にすることによって、モデルの違いによって分析結果が大きく変わる可能性が高いという問題点を明らかにしてくれたと言える。

5. 終わりに

温暖化対策が世界全体としての重要な政策課題になり、各国において今後、積極的な温暖化対策が採用されていく可能性が高い。そのような対策の考案にあたっては、様々な政策の定量的効果についての情報が重要になるため、シミュレーション分析のアプローチである CGE 分析が温暖化対策の分析において幅広く利用されるようになってきている。しかし、日本では CGE 分析の利用者が少ないこともあり、温暖化対策の CGE 分析についてもあまり理解が進んでいない。

そこで本論文では、温暖化対策の分析に関わる CGE 分析についていくつかの観点からまとめてきた。まず、CGE 分析がどのような手法であるかを第 2 節で説明した。そして、より具体的な理解を深めるために、第 3 節で実際の CGE 分析の例と著名な CGE モデルである MIT の EPPA モデルを紹介した。最後に第 4 節で、様々な CGE モデルを比較するプラットフォームである EMF について説明した。EMF には多数の CGE モデルの開発者が参加し、共通の枠組みの中で、モデルの違いがシミュレーション分析の結果にどのような違いをどの程度をもたらすのかという比較分析に取り組んでいる。

CGE 分析は政策効果の定量的な情報を得ることができる利点もあるが、EMF の取り組みの結果、モデルの違いが分析結果に大きな差をもたらす可能性も高いことが明らかになっている。この意味で CGE モデルによる分析の信頼性はまだ改善の余地が大きく、それは今後の研究における重要な課題の 1 つだと思われる。

参考文献

- 有村俊秀・武田史郎・尾沼広基 (2018) 「炭素価格の二重の配当」, 『環境経済・政策研究』, 11 巻 2 号, pp.73–78.
- 環境経済・政策学会 (編) (2018) 『環境経済・政策事典』, 丸善出版.
- 白井大地・武田史郎・落合勝昭 (2013) 「温室効果ガス排出規制の地域間 CGE 分析」, 『環境経済・政策研究』, 6 巻 2 号, pp.12–25.
- 総務省 (編) (2015) 『平成 23 年 (2011 年) 産業連関表—総合解説編—』,
https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/011index.htm
- Aguiar, A. et al., (2019). “The GTAP data base: Version 10.” *Journal of Global Economic Analysis*, Vol.4, No.1, pp.1–27.
- Balistreri, E.J. and Rutherford, T.F., (2012). “Subglobal Carbon Policy and the Competitive Selection of Heterogeneous Firms.” *Energy Economics*, Vol.34, pp.S190–S197.
- Böhringer, C. et al., (2021). “Climate policies after Paris: Pledge, Trade and Recycle: Insights from the 36th Energy Modeling Forum Study (EMF36).” *Energy Economics*, Vol.103, p.105471.
- Böhringer, C., Balistreri, E.J. and Rutherford, T.F., (2012). “The role of border carbon adjustment in

- unilateral climate policy: Overview of an Energy Modeling Forum study (EMF 29).” *Energy Economics*, Vol.34, pp.S97–S110.
- Center for Global Environmental Research, (2018). *Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan 2011 Using Input-Output Tables (3EID)*, Available at:
<https://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/index.html>
- Chen, Y.-H.H. et al., (2022). “A Multisectoral Dynamic Model for Energy, Economic, and Climate Scenario Analysis.” *Low Carbon Economy*, Vol.13, No.02, pp.70–111.
- Chepeliev, M., (2020). “GTAP-Power 10a Database: a Technical Note.”
- Dixon, P.B. and Jorgenson, D.W. eds., (2013). *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*, Oxford, UK: North-Holland.
- Freire-González, J., (2017). “Environmental taxation and the double dividend hypothesis in CGE modelling literature: A critical review.” *Journal of Policy Modeling*.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpolmod.2017.11.002>
- Hertel, T.W., (1999). *Global Trade Analysis: Modeling and Applications* T. W. Hertel, ed., New York: Cambridge University Press. Available at:
<http://econpapers.repec.org/RePEc:cup:cbooks:9780521643740> [Accessed April 1, 2011].
- Koesler, S. and Schymura, M., (2015). “Substitution Elasticities in a Constant Elasticity of Substitution Framework – Empirical Estimates Using Nonlinear Least Squares.” *Economic Systems Research*, Vol.27, No.1, pp.101–121.
- Kriegler, E. et al., (2014). “The role of technology for achieving climate policy objectives: overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies.” *Climatic Change*, Vol.123, No.3–4, pp.353–367.
- Okagawa, A. and Ban, K., (2008). “Estimation of Substitution Elasticities for CGE Models.”
- Rutherford, T.F. and Schreiber, A., (2019). “Tools for Open Source, Subnational CGE Modeling with an Illustrative Analysis of Carbon Leakage.” *Journal of Global Economic Analysis*, Vol.4, No.2, p.66.
- Takeda, S. et al., (2014). “Output-based allocation of emissions permits for mitigating the leakage and competitiveness issues for the Japanese economy.” *Environmental Economics and Policy Studies*, Vol.16, No.1, pp.89–110.
- Takeda, S., (2007). “The double dividend from carbon regulations in Japan.” *Journal of the Japanese and International Economies*, Vol.21, No.3, pp.336–364.
- Takeda, S. and Arimura, T.H., (2021). “A computable general equilibrium analysis of environmental tax reform in Japan with a forward-looking dynamic model.” *Sustainability Science*, Vol.16, No.2, pp.503–521.
- Takeda, S., Arimura, T.H. and Sugino, M., (2019). “Labor Market Distortions and Welfare-Decreasing International Emissions Trading (for check).” *Environmental and Resource Economics*,

Vol.74, No.1, pp.271–293.

van der Werf, E., (2008). “Production functions for climate policy modeling: An empirical analysis.”

Energy Economics, Vol.30, No.6, pp.2964–2979.

Yamazaki, M. and Takeda, S., (2013). “An assessment of nuclear power shutdown in Japan using the computable general equilibrium model.” *Journal of Integrated Disaster Risk Management*,

Vol.3, No.1, pp.36–55.