

展望論文

大規模 E3ME 計量モデルを用いた低・脱炭素政策の
エネルギー・環境・経済への影響分析
—E3ME-FTT モデル分析を中心に—韓 旭¹⁾ (京都大学大学院)

要旨

この論文は E3ME (Energy – environment – economy model at global level) モデルに関するレビュー論文である。E3ME モデルは不均衡マクロ計量経済モデルであり、大規模連立方程式体系で構成される。技術的变化も E3ME モデル内で考慮される。この論文はこのモデルに関する優れた先行文献をできる限り取り上げ、E3ME モデルがどうやってシナリオを設定し、エネルギー、経済効果と環境分析に使用されているかを理解できるようにする。既存の知識を整理したうえで、新たな見解の形成に寄与することで、E3ME モデルの研究の発展に貢献することを目的とする。

することができる。また E3ME モデルを開発・運用されているケンブリッジ・エコノメトリックスは、2100 年までに超長期予測ができるようにモデルを改良・準備中である。

このレビュー論文は、既存の知識に新たな見解を付け加えるため、E3ME モデルの定義、メカニズム、基礎理論、特徴、公式とシナリオの設定などについてまずは詳しく説明し、他のモデルと比較する。次にさまざまな部門に対する経済・環境分析に E3ME モデルが応用された研究の中で優れた論文をレビューした。すべての論文を網羅できないが、この分野の重要で信頼できる論文群を選択してレビューした。先行文献をまとめるだけでなく、評価と検討も行なった。このレビュー論文はモデルの理解と今までの研究の把握、これから E3ME モデルに関する研究、そして残された課題の探究に貢献できる。

1. はじめに

経済産業省の参考資料では、E3ME モデル (Energy–environment–economy model at global level) はコンピュータベースの計量経済モデルだとされている²⁾。李らによれば、E3ME モデルは、59 カ国・地域のマクロ経済部門 (投資、消費、貿易など) と 42 産業 (産業連関表と接続)、12 種の燃料 (石炭、電力、熱など)、24 の電源 (原発、石炭、太陽光など) で構成された大規模連立方程式体系となっている³⁾。

E3ME モデルではシナリオを設定し、一連の計量経済関係を利用することで 40 年間のデータを用いてシミュレーションし、2050 年までのエネルギー・環境・経済分析を推定

2. モデルの類型

2.1 均衡経済学派と不均衡経済学派

経済理論は均衡経済学と不均衡経済学という二つ学派に分けることができる。均衡経済学派の基礎は新古典経済学にあり、中心的な仮定では、生産要素 (労働、資本、知識など) 市場で均衡が成立するようにすべての価格が円滑に調整されることになっている。技術、資源の制約と市場の不完全性の下でも、残りすべての要素が常に最も効率的に活用されるという経済の状態を保証される⁴⁾。

これに対して不均衡経済学派では、経済が永遠に動学的な変動をすると見なされる。そ

の中心は、シュンペーターのイノベーション理論、そしてケインズの投資分析と動学マクロ経済分析である。ケインズの投資分析と動学マクロ経済分析はポストケインジアンの方に基づいてマクロ経済学の総合理論となった⁵⁾。

図1のように均衡モデルでは経済各部門の均衡を厳格に規定するので新規投資が行われる場合、クラウドイングアウト効果が発生する。その後、最適配分によって他の部門では利用可能な資本投資が増え、アウトプットの損失が補填される。これが、GDP(破線)がいったん下がった後にベースラインの近くまで戻る理由である。

他方、不均衡モデルで投資集約型のエネルギー転換プログラムは、新規投資は多くの雇用を作り出し、短中期にGDP(実線)を上昇させる効果をもつ。これは投資の増加によって雇用が増加するためである。その後、債務返済のためマクロ経済の利益が減少する可能性や、長期的には低下する可能性がある。これは、初期段階に銀行が投資のため、資金を提供して経済活動を支えるもの、長期的には債務負担が増加し、それがマクロ経済にネガティブな影響を与えるからである。ただし、優れた技術と設備の累積的な投資とともに技術革新が起きれば、長期的に生産性が向上し、債務返済の負担を相殺する(実線)⁶⁾。

均衡経済学派では、RICE/DICE、REMIND、IMACLIM、AIM、GEM-E3など

のモデルがある。これらは、CGE(Computable General Equilibrium)とも呼ばれる一般均衡モデルの代表的な例である。不均衡経済学派にはEvolutionary Economics、Geels、Technology Innovation Systems、E3M3-FTTなどの代表的なモデルがある。

以下、2.2節ではCGEモデルとE3MEモデルを比較し、2.3節でE3MEモデルについて具体的に紹介し、2.4節ではE3ME以外のモデルを理解するため、他のモデルに関する先行文献を紹介する。

2.2 応用一般均衡モデルCGEとE3MEの比較

この節ではまず、一般均衡モデルの優れた例としてのCGEを説明し、次にそれをE3MEモデルと比較する。CGEモデルはコンピュータに基づく経済モデルであり、地球規模のE3(Energy-Economy-Environment)の相互作用を考慮した。CGEモデルは経済主体の行動の最適化を仮定しており、完全競争、完全知識、完全予見、最適合理行動、合理的期待など前提としている⁷⁾。

より具体的には、CGEモデルはセイの法則に従い、価格は生産量が過剰であっても、すべて売り尽くされように価格が調整されるという特徴がある。需要が供給より大きいなら価格が上昇し、供給が需要より大きいなら価格が低下する。

これに対してE3MEモデルでは、ケイン

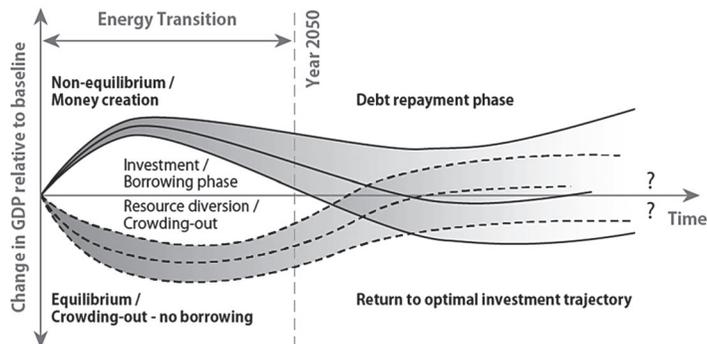


図1 均衡モデルと不均衡モデル

出所：Mercure et al. (2019 p.1028) により筆者作成

ズの有効需要の原理に従い、売り残しがあっても価格は下がらず、経済規模は需要側の要因で決まる。したがって E3ME モデルでは、不均衡が一般的であるので、売り残しは可能である。

環境政策の効果分析なら、E3ME モデルの方が優れている。その要因は、CGE モデルは新古典派理論に基づいて供給が需要に一致するモデルになっているため、環境政策はいつも均衡からの乖離を生み出す要因となり、経済厚生を引き下げる点にある。このため、環境政策が経済に対してネガティブな評価が行われがちになる。

他方、ポストケインジアン理論に従う E3ME モデルは、環境政策が需要を刺激することで、むしろ経済厚生を高める可能性をもつため、環境政策を肯定的に評価する。

2.3 不均衡が一般的なマクロ計量経済モデル

2.3.1 E3ME の概要

E3ME モデルは不完全均衡マクロ計量経済モデルである。E3ME モデルは経路に依存する。さまざまな政策シナリオの下で、さまざまな技術経済的・環境的な軌跡が生成される。そのため政策を選択すれば、どのような軌跡が生み出されるのか、その結果を予測する。選択した一連の政策でターゲットが満たされるまで、モデル計算が繰り返し実行される⁸⁾。

李ら (2020 p.7) は、石炭火力発電と原発早期フェーズアウトに関するシナリオを立て、E3ME モデルを用いた分析を行った。各種のエネルギー環境政策変化が導入されることを前提に、E3ME モデルを用いて経済と産業、二酸化炭素排出に与える影響の定量分析を行っている。

E3ME モデルは柔軟性があり、経済体系やエネルギー需給体系の特徴を表現できる⁹⁾。E3ME モデルの基礎は国民経済計算であり、合計 33 セットの推定方程式がある。投入産出比率が部門間の関係を決定し、二国間貿易データが地域間の関係を提供する。経済的データセットとエネルギー、環境の物的データセットを照合することにより、エネルギー需

要と環境汚染をもたらす排出量の関連性が示される。労働市場もカバーされて自発的失業と非自発的失業を含む¹⁰⁾。推定方程式は燃料消費方程式、技術進歩指標の方程式などを含む。

2.3.2 FTT の概要

E3ME モデルは FTT (Future Technology Transformation) というシムペーターのイノベーション理論に基づいたサブモデルを装着している。これは電力、鉄鋼、道路輸送、熱などの部門に適用され、FTT:Power, FTT:Steel, FTT:Transport, FTT:Heat などに分けられている。FTT モデルのメカニズムはボトムアップ方式であり、将来の多様な低炭素技術の革新効果がこれにより推定できる。

FTT モデルは、低炭素技術のデータセット (電力と輸送部門の場合 2012 年、熱供給部門の場合 2014 年) に基づいて各技術別の学習曲線の計算を行い、現在採用する技術の軌跡から 2050 年までの将来のエネルギー技術の普及を予測する。学習曲線は S 字型であり、技術の軌跡は、合理性がある各エージェントの選択合計から内生的に決定される。技術の拡散程度と資金調達スケジュールによって学習効果レートが決まる。このレートが、技術普及の拡散度合を決定する¹¹⁾。

例えば、FTT: Power モデルを用いて電力部門に関して動学的選択と発電技術の普及をシミュレーションすることができる。Mercure (2012 p.809) より FTT: Power はロジスティック微分方程式と誘発された技術変化に基づくモデルである。学習とともに誘発された技術変化が生じ、ロジスティック微分方程式と組み合わせることで、経路依存性が作用することで S 字型の技術変化が導かれる。ロジスティック微分方程式を用いることで、時間について適切な処理が行なわれる。技術の普及率が低い段階ではその技術の普及率が指数的に上昇し、普及率が高まった段階では、普及率がスピードダウンし、飽和状態に入る。

2 つ技術の均等化発電単価 (LCOE) の比

較によって技術の意志決定をする。LCOE 公式は Mercure (2012 p.802) で説明された。

$$LCOE_i(t) = \frac{\sum_{t=0}^{T_i} \frac{TI_i(t) + OM_i(t) + FC_i(t) + CC_i(t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{T_i} \frac{EP_i(t)}{(1+r)^t}}$$

記号は TI_i が特定の技術投資コスト, OM_i が運営とメンテナンスのコスト, FC_i が燃料コスト, CC_i が排出枠と炭素税に関係ある排出コスト, r は技術あるいは地域の特定の割引率, EP_i は発電所が生成するエネルギーの期待値となっている。

電源選択の際には, LCOE 公式を利用して算定された電源コストだけを決定要因とすることはできない。なぜなら, 石炭火力発電やガス発電のコストが安いから, 高炭素電源にシフトしてしまうからである。これを防ぐには環境への効果を考慮し, 低炭素電源への代替や省エネルギー投資を政策的に促進する必要がある。もちろん, 電源を選択する時に電力容量, 需要と電力網の安定性も考えなければならない。そのため, 技術普及に制約条件をつける必要がある。制約条件の一つとしての技術的な制約 (Mercure 2012 p.803, 804) を明らかにすると, 次のようになる。

$$S_{Flex}CF_{Flex} + S_{Var}CF_{Var} \geq \overline{CF} \left(\frac{\Delta D}{D} + \frac{U_{Var} T_D}{D} - \frac{E_S}{D} \right)$$

$$S_{Flex} - S_{Var} \geq \left(\frac{\Delta U_D}{U_{tot}} - \frac{U_S}{U_{tot}} \right)$$

$$S_{Base} + S_{Var} \leq \left(\overline{CF} - \frac{1}{2} \frac{\Delta U_D}{U_{tot}} - \frac{U_S}{U_{tot}} \right)$$

発電技術は三種類 S_{Base} , S_{Var} と S_{Flex} に分けられ, ベース電源, 変動性のある再生可能エネルギーと柔軟な電力システムに基づく。 CF_{Flex} と CF_{Var} は柔軟な電力システムや変動性のある再生可能エネルギーによって容量因子の平均値である。 \overline{CF} は容量の加重平均である。 D は年間電力平均需要量であり, $D(t)/T_D$ が t 年における 1 日あたりの平均電力需要量である。十分な電力貯蔵があり, $D(t)/T_D$ が超える部分をカバーできるなら ΔD で表す。 U_{Var} は変動性再生可能エネルギーにより容量であり, E_S がエネルギー貯蔵である。そして ΔU_D は毎日のピークの高さであり, U_S が蓄電容量であり, U_{tot} が容量の合計である。

図2は発電技術の三種類がどうやって1日あたりの電力需要量を供給するかを示している。安定性と電力供給のニーズを維持するため, ベース電源 (影) と変動性再生可能エネルギー (黒い) だけから電力を提供してはいけな。ベース電源による供給と変動性再生可能エネルギーのギャップは, 柔軟な電力システム (グレー) によって埋められる必要がある。このシステムは電力に柔軟性を与える。

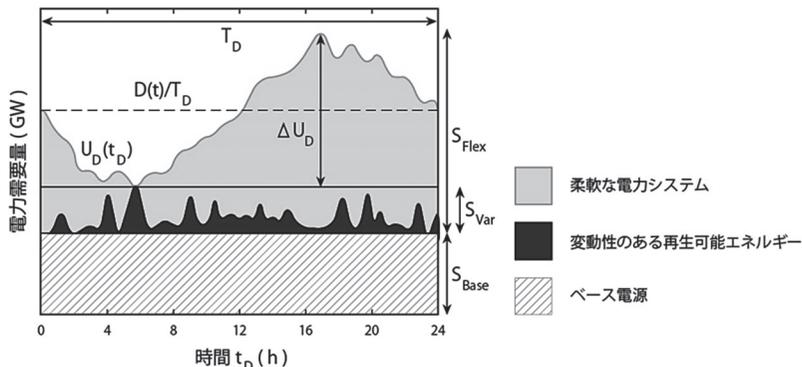


図2 電力の提供仕方

出所: Mercure (2012 p.803) により筆者作成

発電量を迅速に調整でき、わずか数分で電力需要量とのギャップを補うことができる。

ただし、高い調整電源の運営コストは電気料金を押し上げる。柔軟な電力システムを支える発電技術は CCGT、揚水式水力などを含む。ベース電源は、迅速に発電量を変化させることができない原子力と石炭火力などを含む。一方、変動性再生可能エネルギーはコントロールできない可変的な電力生産であり、太陽光、風力と波力などから構成される。

2.4 他モデルの論文紹介

E3ME 以外のモデルを理解するために先行文献を紹介する。均衡経済学派の代表として、モデル REMIND と CGE を使う先行文献を説明する。Ueckerdt et al. (2017) は REMIND モデルを利用して電力部門を研究した。Wu et al. (2014) は CGE モデルを用い、道路輸送部門を分析した。

Ueckerdt et al. (2017) は、8つ世界地域の変動性再生可能エネルギーを REMIND モデルに投入し、世界の電力供給の脱炭素化が実現できるかどうかを分析した。DIMES モデルより6つパラメーター（ピーク負荷の高さ、基本負荷帯の高さなど）の係数を求め、短期間電力貯蔵のインパクトを推定できる。6つパラメーターが推定できれば、RLDCs (residual load duration curves) の形状が分

かるようになる。

図3のように短期間電力貯蔵がない時（実線）とある時（グレーの破線）の RLDCs を比べることで、モデル内で内生的にコスト最適化のための貯蔵量が決まる。RLDCs を実行し、変動性再生可能エネルギーの電源シェアを推定するため、REMIND モデルで排出量削減シナリオを設定する。シナリオは3つあり (Ueckerdt et al. 2017 p.667)、ベースライン、Tax30 と RE Tax30 である。Tax30 シナリオは幅広い技術オプションを備え、2020年の炭素税率を 30 \$/tCO₂ として、その後、年間 5% ずつ増加すると仮定する。この想定の下では、2℃ 目標を達成する可能性は 66% を超える。RE Tax30 シナリオは、2020年以降の新しい CCS と原子力発電所をフェーズアウトさせるとの想定の下、変動性再生可能エネルギーがもたらす影響を分析する。2020年に 30 \$/tCO₂ の炭素税率を想定し、年間 5% ずつ上昇することで、2℃ 目標を達成する可能性が 66% を超える。

REMIND モデルで上記シナリオを設定したことで、変動性再生可能エネルギーの影響を推定できるようになる。図3のように変動性再生可能エネルギーがない時（グレーの破線）とある時（一点鎖線）の結果を比較し、変動性再生可能エネルギーのインパクトを推定する。それで、世界の電力供給の脱炭素化

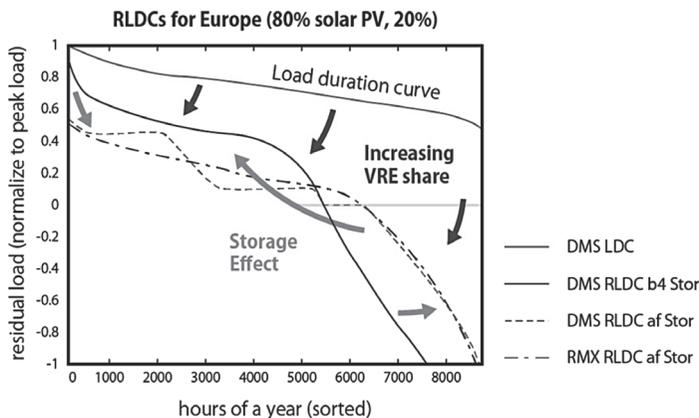


図3 LDC と RLDCs

出所：Ueckerdt et al. (2017 p.670) により筆者作成

が実現できるかどうかを明らかにする。

Wu et al. (2014) は、ゴンペルツ関数 (Gompertz Function Method) と CGE モデルを活用して中国車両のエネルギー需要を探索した。ゴンペルツ関数は (Wu et al. 2014 p.7460) 以下ようになる。

$$V_{i,t} = V_i^* e^{\alpha \beta E F_{i,t}}$$

図4のように α と β の大きさが S 字型曲線の形状を決める。データを用いることで、中国の GDP と年間 GDP 率が分かる。従って国内需要が推定できる。CGE モデルでシナリオを高成長、中成長、低成長の3つと定め、各シナリオにおける中国の自動車保有台数と需要の予測をする。中国の自動車保有台数と需要が分かれば、自動車のエネルギー消費も明らかになる。えられた結果 (Wu et al. 2014 p.7454) は、中国の自動車在庫が、2020年までにゴンペルツ曲線の変曲点を超えて増加するが、2050年までに飽和点に達しない。えられた各シナリオの予測値は、2050年の自動車の総エネルギー消費量が3億8,000万トン、5億7,500万トン、5億8,600万トンの石油に相当する。

以上が、E3ME モデルの基本構造についての研究の概観である。次に、以下で E3ME モデルを経済の様々な部門に適用した研究を展望することにした。

3. E3ME モデルを用いた先行研究レビュー

3.1 電力部門や全部門を主要な対象とする先行研究

3.1.1 Pollitt et al (2014)

Pollitt et al (2014) は E3ME モデルを使い、原発フェーズアウトに関して研究した。原発フェーズアウトによって原発の発電に占めるシェアが変わる。彼らは、異なる温室効果ガス削減目標の設定により、原発フェーズアウトが2030年までに経済と環境効果に及ぼす影響を評価している。N25Cn, N25Cn10, N25Cn15, N25Cn25, N15Cn, N00Cn など12つシナリオが設定されている。例えば、N25Cn10の意味は原発フェーズアウトし、原発の発電シェアが2030年に25%になるが、そのとき温室効果ガスは10%削減されることになる。

シミュレーション結果を見ると、他の政策がない前提でCO2を削減したい場合、炭素税が課さなければならない。温室効果ガス削減の目標が高ければ高いほど、炭素税率は高くなる。そして、フェーズアウトさせる原発シェアが多くなるほど、排出量が増加するという結果が出た。その原因は原発フェーズアウトすると、石炭、ガスというコスト低い発電方法に変わるためである。これは、再生可能エネルギーを促進する政策の重要性を示していると考えられる。

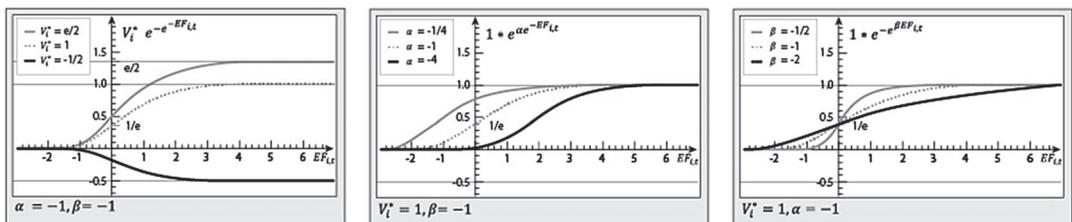


図4 ゴンペルツ関数

出所：筆者作成

3.1.2 李ら (2019), 李ら (2020) と李ら (2021)

李ら (2019), 李ら (2020) と李ら (2021) は三編とも E3ME モデルに基づいて 2050 年までに脱炭素化を実現することが日本経済と二酸化炭素排出に及ぼす影響を推定している。しかし、これらの論文それぞれでシナリオ設定が異なっている点は、注意を要する。そこで以下では、これらの論文のシナリオと主な結果、そして今後の課題として残った点やメリットなどについて説明する。

i) 李ら (2020)

李らは、日本エネルギー経済研究所 (2019) 刊行の「IEEJ OUTLOOK 2020」のレファレンスケースをベースラインシナリオとして採用、発電部門に対して次のシナリオを設定している。それは、石炭火力は発電効率の低い順から、2030 年もしくは 2040 年までにフェーズアウトさせ、原発の場合は、稼働年数 40 年到達した古い原発から順にフェーズアウトさせるというものである¹²⁾。後の研究では、李ら (2020) と同じように電源フェーズアウトの考え方がシナリオに取り入れられている。

以上のシナリオの下での主な結果は、次のとおりである。GDP は一般の予想と異なり、2030 年までにはベースラインシナリオに比べて 0% ~ 0.3% のプラス成長となる。驚くべきことに、石炭火力を 2030 年にフェーズアウトさせる方が、2040 年にフェーズアウトさせるよりも、GDP が概ね 0.1% 上回るとの結果が出ている。

2030 年以降の石炭火力のフェーズアウトシナリオでは、2030 年~2040 年はベースラインシナリオに比べて 0.0% ~ 0.1% の GDP プラス効果が続くが、2040 年~2050 年は 0.0% ~ 0.2% マイナス効果が表れている。

発電部門における二酸化炭素排出量は、石炭火力 2030 年フェーズアウトシナリオの場合、2017 年の排出量に比べ、2030 年に 52.7%、2040 年に 46.7%、2050 年に 49.1% へ削減されると予測されている。石炭火力 2040 年フェーズアウトシナリオの場合、

2017 年排出量に比べて、2030 年に 43.2%、2040 年に 47.5%、2050 年に 49.9% の削減が生み出される。

この論文から、発電部門での削減が日本の二酸化炭素排出量の削減に大きく貢献することが分かった。しかし他方で、その削減量が日本の 2050 年の温室効果ガス削減目標の実現には大きく及ばないことが示された。日本の 2050 年までにカーボンニュートラルを実現するため、このシナリオの上に、さらに何らかの部門に対してどのようなシナリオを加えたら、カーボンニュートラルの目標とのギャップを埋めるかを考えられる。

ii) 李ら (2019)

李ら (2019) は、炭素税・グリーン税制改革の制度設計の違いに応じて異なるシナリオを設定している。炭素税は全ての部門の化石燃料消費に課されるが、炭素含有量に応じて同じ税率の炭素税が課されるものとする。これはすべてのシナリオに共通である。他方、日本政府は炭素税収を三つの方法で経済に還元すると想定している。つまり、消費税減税で還元 (S1)、所得税減税で還元 (S2)、そして企業の雇用関連社会保障負担軽減で還元 (S3)、の 3 つのシナリオである。

李ら (2019 p.90, 91) より、炭素税率を高くすればする方は、低炭素電源への代替や省エネルギー投資が促進されることが分かる。化石エネルギーの需要とエネルギー集約製品の需要も大きく削減される。他方でそれは、再生可能エネルギーの普及とコストダウンを促進し、低炭素社会に向けた産業構造の変化を促進する。

GDP へのプラス影響と雇用の促進が最も大きかったのは、所得税減税への還元シナリオ S2 であった。消費税減税で還元 S1 は GDP へのプラス効果も S2 と同じぐらい大きい。物価の下落が顕著となっている。

筆者にとって印象的だったのは、低所得層では、彼らの負担する炭素税負担額の所得に占める割合が高いという点である。所得分配の公平性を確保するためには、シナリオを設定する際に所得税率構造の調整やベーシック

インカムの導入などを検討する必要がある。

もう1点、筆者にとって印象的だった点は、この論文が税収を経済に還元する複数の方法を比較検討しようとしている点である。なぜ税収を経済に還元するのか、当初は理解できなかったが、Lee et al. (2018) と Vercoulen et al. (2019) を読むことで、その理由が明快になった。

Lee et al. (2018) は、原発の電源構成比率を20%、10%、0%と三通り想定した上で、全部門に対して炭素税に課税し、税収を経済に還元しない場合と還元する場合とに分けて分析を行っている。分析結果から、炭素税収を還元しなければ、GDPにマイナスの影響が表れることが分かった。そして、Vercoulen et al. (2019) は二酸化炭素に課税するが、税収を還元しないシナリオを設定した。結果は、GDPにネガティブな影響を与えるというものであった。これらの結果から、経済成長を促進しつつCO₂排出量を削減するには、税収を経済に還元する税収中立的な税制改革を実行する必要があることが分かった。

iii) 李ら (2021)

李ら (2021) は以前の研究の上に立って、さらにシナリオを改善した。発電部門では、2050年カーボンニュートラル実現のため、2021年から石炭火力発電所を低効率で稼働歴の長い順に廃止し、2040年にはフェーズアウトさせるというシナリオを設定した。再エネ発電については、風力とバイオマス発電には、2021年～2035年にFIT (feed-in tariffs) を適用し、太陽光と水力発電にはFITを適用しないと想定している。産業部門については、産業部門の中で二酸化炭素排出量ではその約40%を占めている鉄鋼部門のみを、炭素税の対象にするという政策シナリオを採用している。

交通部門については、2020年12月に日本政府の2030年代半ばにガソリン車の販売を禁止する方針に従い、2035年以降は内燃機関のみの乗用車は販売されないと設定している。またEV (Electric car) については、2025年までに購入時に搭載蓄電池容量によ

って、一台当たり8,000～13,000米ドルまでの購入補助が支給されると想定している。

以前の論文に比べ、脱炭素化に向けた政策シナリオがより具体的になったため、以前の論文よりも明快な結果がえられている。2050年の電源構成は再エネ電源の割合が大きくなり、89.1%に占めるようになる。そして、2050年のカーボンニュートラル達成時のマクロ経済影響は、ベースラインシナリオに比べて4%ほどGDPが増加するという結果になった。

3.1.3 炭素税に関する比較

炭素税に関してVercoulen et al. (2019) を李ら (2019)、李ら (2021) と比較することができる。Vercoulen et al. (2019) はE3ME-FTT:Steelモデルを使用し、2050年まで鉄鋼産業と二酸化炭素排出への影響、そして経済効果を分析した。中国、日本、韓国と台湾の鉄鋼産業を分析対象としてシミュレーションしており、シナリオで採用される政策手段は炭素税だけとなっている。この論文の傑出しているところは、シナリオによって技術普及の違いと製鋼製造技術のトレンド、そして技術による鉄鋼生産量などについて詳しく分析した点にある。鉄鋼産業の技術普及や製鋼製造手法など、特定産業に焦点を当ててより詳細に分析する場合に参考にすべき論文だと考えられる。

シナリオでは、炭素税率が2021年の5米ドル/CO₂・トンから比例的に増加するが、S1の炭素税率は2050年までに50米ドル/CO₂・トンに達するのに対し、S2の場合は、2050年までに100米ドル/CO₂・トンに到達するとされている。これらに対してS3では、2050年までに炭素税率が200米ドル/CO₂・トンに到達するとされている。

李ら (2019) と李ら (2021) は、分析する部門がVercoulen et al. (2019) と違って発電部門であるが、やはり炭素税を脱炭素化のための政策手段として採用している。李ら (2019 p.87) では、2021年時点では全てのシナリオで炭素税率が21.1米ドル/CO₂・トンとなっているが、その後、シナリオによって

若干の差が現れる。2030年には80.2～81.8米ドル/CO₂・トンとなり、2040年には184.5～189.6米ドル/CO₂・トン、2050年には383.1～394.6米ドル/CO₂・トンとなっている。李ら(2021 p.156)の炭素税は、2021年50米ドル/CO₂・トンの税率から比例的に増加し、2040年には400米ドル/CO₂・トンになり、2041年～2050年の間に400米ドル/CO₂・トンを維持するとしている。

李ら(2019)と李ら(2021)はVercoulen et al. (2019)より高めに炭素税を設定しており、その結果、炭素税の環境効果も強化されている。李ら(2019)は温室効果ガス80%削減を、そして李ら(2021)は2050年カーボンニュートラル実現を目標に設定している。他方、Vercoulen et al. (2019)では、温室効果ガスの削減が限られている。

Vercoulen et al. (2019)では、中国に関する三つシナリオの中で、どの炭素税シナリオを採用しても、排出削減が実現できない。これに対して日本は、どの炭素税シナリオでも排出削減が実現するが、温室効果ガス削減目標には到達しない。韓国と台湾の場合は、シナリオS3の時だけ、排出削減が実現する。

炭素税などのカーボンプライシングを導入すると、再生可能エネルギーへの大規模投資が進み、GDPを増加させる効果がある。しかし、電力価格と鉄鋼の価格が上昇し、輸出の減少と輸入の増加につながり、GDPに負の影響を与える。さらに、価格上昇が実質賃金を引き下げるので消費が減少し、GDPはさらに減少する。そのため、炭素税を高めれば高いほど望ましいわけではなく、生産量とGDPを考慮し、どのくらいの水準に設定すれば気候変動政策上も、マクロ経済政策上も適切か斟酌する必要があると考えられる。

Vercoulen et al. (2019)において温室効果ガス排出の削減効果が小さい要因は、李ら(2019)と李ら(2021)のように炭素税率を高い水準に設定していない点にある。もう一つの要因は、政策手段として炭素税のみを導入するシナリオが設定された点にある。李ら(2021)では、発電部門における石炭火力発電のフェーズアウトや再エネ発電を促進する

FITの導入、さらには交通部門での政策導入などのポリシーミックス・シナリオが設けている点に違いがある。

3.2 鉄鋼部門を主要な対象とする先行研究

Vercoulen et al. (2019)とVercoulen et al. (2020)は鉄鋼部門を主要な対象として分析を行っている。二篇ともE3ME-FTT:Steelモデルを使ってシミュレーションしている。3.1.3節ではVercoulen et al. (2019)を李ら(2019)、李ら(2021)と比較した。後者は、ベースラインと炭素税だけを含むシナリオを三つ設定している。それに対して、Vercoulen et al. (2020)はより複雑に政策を組み合わせるシナリオを導入した。

シナリオはベースラインと排出削減という二通りしかなく、ベースラインではEU ETS (EU Emissions Trading System)の現状が継続し、他の追加的な政策は導入されないと想定されている。排出削減シナリオでは、炭素税、補助金とフェーズアウト規制が含まれる。例えば鉄鋼部門では、設備投資の水素ベース技術に対して30%を補助し、BF-BOFをフェーズアウトさせる。ポリシーミックスは電力部門にも広がり、化石燃料発電のフェーズアウトもある。

類似点は、同じシナリオの下で、違う国のシミュレーションの結果を比較した点である。Vercoulen et al. (2019)が日本、中国、韓国と台湾を比較するのに対し、Vercoulen et al. (2020)はスウェーデンを中心とし、ドイツ、フランス、スペイン、イタリアとポーランドを比較分析している。これらにより、同じ政策の組み合わせ、同じシナリオの下でも、国によって効果が異なることが分かった。各国の状況に適應することが重要であると考えられる。

相違点は主に二つある。第1に、Vercoulen et al. (2019)は炭素税の作用と効果だけを研究している。炭素税を引き上げ、CO₂排出量、経済効果と製鋼製造手法の組み合わせで変化を推定している。これに対して、Vercoulen et al. (2020)は排出削減シナリオで多数の政策を設定し、他の部門まで拡大

し、CO2排出量、雇用と製鋼製造手法の組み合わせに関する政策の総合効果を観察した。第2に、Vercoulen et al. (2020) は水素も考慮している。たとえば、鉄鋼部門では水素使用の60%を補助する。脱炭素化を実現するためには、水素の果たす役割を無視してはならない。日本の経済産業省は『水素基本政策』を制定・公表して、水素社会を構築するために3つのフェーズ(『水素基本政策 p.3』)を設定している¹³⁾。

さらに経済産業省は鉄鋼部門を対象として、ロードマップ(Ministry of Economy, Trade and Industry October 2021 p.23)を策定した。いつかどんな製鋼製造手法で水素製鉄を始めるのか、そのスケジュールを設定したのである。経済産業省(令和3年9月14日 p.19)の社会実装スケジュール(表1)では、水素還元製鉄・電炉拡大の開発フェーズおよび実証フェーズが2021年~2030年、技術確立フェーズが2030年~2040年、導入支援が2040年以降とされている。

そのためVercoulen et al. (2020)は、こうした日本の水素経済計画を考慮したより詳細なシナリオ設定が課題といえる。

また、この論文は経済効果を分析していない。したがって、Vercoulen et al. (2020)の水素を取り入れたシナリオでは、経済にネガティブなインパクトが及ぶかどうかは分からない。シナリオの効果の一部としては、水素導入で製鉄コストが増加し、鉄鋼輸入が増加する結果、GDPを押し下げる効果があるとされる。同時に水素の導入で雇用が増加し、GDPを押し上げる効果も生まれる。結局、

純効果がどうなるかはシミュレーション分析をしてみないと確定できないと思われる。

3.3 熱供給業部門を主要な分析対象とする先行研究

Knobloch et al. (2019) と Knobloch et al. (2020) は、熱供給業部門を主要な分析対象とする業績である。Knobloch et al. (2019) では地球温暖化を1.5℃に抑えるために2050年に熱供給業部門の脱炭素化を実現しなければならないが、それをどうやって実現するかを検討している。シナリオを設定し、その下で熱供給業部門ためのポリシーミックスを研究している。

IMAGE-REMGモデルでは将来的な熱供給に対する需要変化を推定し、FTT:Heatモデルで熱供給関連技術の選択をシミュレーションしている。熱供給への需要が変化すると、技術ごとのエネルギー需要も変化する。これに基づいて、各燃料使用量からCO2排出量が計算できる。

シナリオは10通り設定され(Knobloch et al. 2019 p.530, 531, 533)、シナリオaがベースラインであり、シナリオbが新築住宅の断熱レベルを高めたケース、シナリオcが既存建築物の改装を行うことで熱供給の需要削減を実現するケースである。シナリオd~jはシナリオcを前提に、追加的な政策を導入する。例えば、シナリオhは、炭素税率を2020年の50€/tCO2から年間10%ずつ直線的に引き上げ、2050年までに200€/tCO2に到達させる。その上で、2030年までに再生可能熱供給技術のために投資費用の50%の

●導入フェーズ: 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ 4. 自立商用フェーズ

●具体化すべき政策手法: ①目標、②法制度(規制改革等)、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	~2030年	~2040年	~2050年	
精錬・ 圧延手 法	COURSE50(水素活用等でCO ₂ ▲30%)の大規模実証					導入支援			
	水素還元製鉄、電炉拡大の技術開発					実証		技術確立	導入支援
	精錬、圧延、加工プロセスの省エネに必要な基礎技術の開発					導入・拡大			
	国際的協力枠組の構築(過剰生産能力への対応、メタルスレッドの確保)、開発した省エネ・CO ₂ 削減技術が適切に評価される国際標準の策定を推進								

表1 社会実装スケジュール

出所: 経済産業省(令和3年9月14日 p.19)

補助金を与える。シナリオ i はシナリオ h に加えて、さらに 'kick start' (市場に基づくものではなく、調達スキーム、建築基準法またはその他の規制における使用義務によって新しい技術を導入する政策措置) 政策を採用する。

Knobloch et al. (2019 p.541, 535) は 2050 年まで改善された建物の断熱材料と既存技術の組み合わせで、住宅用熱供給のほぼ完全な脱炭素化は可能だが、厳格な政策手段がなければ実現する可能性は低いとしている。シナリオ h は補助金の影響で、バイオマスや太陽熱など再生可能エネルギーの展開にとしては有利である。そのため、2050 年までの年間総排出量は 85% 削減できる。しかし、中東とロシアに相対的に無効果であり、2050 年に排出量の 3 分の 2 がこれらの地域から排出される結果となる。それに対してシナリオ i の 'kick start' 政策は、ロシアと OPEC 諸国で再生可能エネルギーを促進することができる。これにより、90% の排出量を削減できるため、シナリオ i が最も効果的となる。

Knobloch et al. (2020) は電力部門を脱炭素を実現する前に、EV と HP (Heat pumps) を促進した場合、どうなるかを研究した。E3ME-FTT-GENIE モデルとライフサイクル評価を使い、三つシナリオを設定し、世界 59 地域を分析した (Knobloch et al. 2020 p.438)。

Knobloch et al. (2020 p.442-444) のシミュレーション結果によれば、確率 75% で 2°C を実現するターゲットに向けて排出を削減する政策シナリオは、電力部門にはこの政策を適用しないシナリオより排出量が少なくなる。しかし、後者のシナリオの下でも EV と HP を促進することで、ほぼすべての世界地域の排出量を削減する可能性となる。さらに、効率が悪い EV と HP でも、効率の高いガソリン車と化石燃料ボイラーより排出量が少ないという。

3.4 道路輸送部門を主要な分析対象とする先行研究

Mercure et al. (2018 c) の主要な分析対

象は、道路輸送部門となっている。日本エネルギー経済研究所 (2018 p.3) では、IAM (integrated assessment models) は経済と気候変動を同時に評価し、費用を最小化するモデルである。しかし Mercure et al. (2018 c p.109) で IAM モデルは、技術進歩を最適化しており、政策に対して経済主体の現実的な反応が不明確となるという問題点がある。

この点、E3ME-FTT は技術進化と拡散のシミュレーションとして優れたモデルだといえる。このため、Mercure et al. (2018 c) は IAM モデルと E3ME-FTT モデルを結合してより優れた推計を可能にしている。彼らは地球温暖化を 2°C に抑えるため、道路輸送部門の合理的な脱炭素シナリオを探索した。

この研究では規制、基準、登録税、燃料税、道路税、補助金、バイオ燃料義務化と 'kick start' に関するシナリオが検討された (Mercure et al. 2018 c p.120, 123)。例えば、シナリオ S I では規制により、2018 年から低効率の液体燃料車の販売を段階的にフェーズアウトさせる。シナリオ S III では、2050 年に全地域の 70% に達するまで、バイオ燃料ブレンドの義務化を徐々に増やす。

シナリオ S III は、好ましいシミュレーション結果をえた。2050 年道路輸送部門の排出量は 0.43 GtC/y 以下に減少し、バイオ燃料ブレンドの義務化が増加して 2050 年に全地域の 85% に達する結果となった。しかし、シナリオを道路輸送部門だけに対象を絞れば、温室効果ガス削減 2°C 目標と 1.5°C 目標が実現できないため、他の部門も合わせて考える必要がある (Mercure et al. 2018 c p.123, 124)。

3.5 電力、道路輸送、建築、熱供給業など多部門を対象とする先行研究

Mercure et al. (2018 a) と Mercure et al. (2018 b) は共通点が多い。Mercure et al. (2018 a) は、「技術変化の状況を十分に認識していない」、「技術変化の状況を十分に認識した」、そして「2°C 目標を達成する」という 3 つシナリオを設定し、比較分析を行っている¹⁴⁾。

他方, Mercure et al. (2018 b) は「シナリオを技術変化の状況を十分に認識した」と「2℃ 目標を達成する」という二つシナリオを比較し, 後者については3通りの仮定を置いている¹⁵⁾。

これら二篇のシナリオには共通点があるため, 結果(GDP, 雇用など)も類似したものとなっている。しかし, Mercure et al. (2018 b) はより精確に2℃ 目標を3つに分けて分析したので, 確率と推論方法によりCO2 排出量の違いを推定することができた。

4. E3ME-FTT モデルの今後の展開と課題

以上, 本稿はE3ME-FTTモデルの紹介, 他のモデルとの比較, そして関連する主要論文のレビューより, E3ME-FTTモデルについて既存の知識の整理を行った。新たな見解の形成に資するため, 先行文献についての評価も行なった。

E3MEモデルに関する研究は, さらに発展の余地がある。シナリオ設定の結果, おおむねカーボンニュートラルを実現することは, 経済にも良いことを示しえた点に, E3MEモデルの意義がある。

カーボンニュートラル実現のため, シナリオ分析の対象となる部門を一つだけに絞った場合, 目標を実現しにくくなることも分かってきた。したがって分析対象を全部門に広げ, それらに対するシナリオ設定が必要となる。しかし, 全部門に対する政策設定は複雑となり, よい効果がえられるシナリオがまだ形成されていないという課題もある。より効果的に環境を保護すると同時に, 経済発展を促進し, さらに資源を節約するシナリオの設定を工夫しなければならない。

論文をレビューした結果, E3 (Energy-Economy-Environment) 関連計量モデルのシミュレーション分析においては, 脱炭素社会の望ましい経済ビジョンを描く多角的なシナリオ設定の試みがなされてきた。欧州委員会 (EU Commission) では, E3MEモデルのこうした機能が評価され, 長らくEUのエ

ネルギー・気候変動政策・制度設計において, 主要参考モデルとして重用されてきたという実績がある¹⁶⁾。

さらにこのモデルには, 本文でも触れたように電源 (FTT:Power), 鉄鋼 (FTT:Steel), 交通 (FTT:Transport), 熱供給 (FTT:Heat) など各部門で様々な低炭素技術を取り扱うことができるという利点がある。それぞれの技術に独自の学習曲線が推計され, 投資コストや耐用年数などを反映した技術革新効果 (それによる低炭素技術のコストダウン効果) が, ボトムアップで内生的に決定される最先端のFTTサブモデルが装着されているのである。

近年では, 水素経済の展望を2050年までシミュレーションできるFTT:Hydrogenも開発されており, FTT機能のさらなる補強・強化を進められている。2050年カーボンニュートラル経済への移行過程では, 様々な低・脱炭素技術の革新が起きることが想定される。この点を踏まえると, E3MEモデルのFTT機能は, 今後の低・脱炭素技術の発展を柔軟にモデルに取り込むことができる点で, 他のモデルに対して優位性をもつといえるだろう。つまりE3MEモデルは, 未来の経済ビジョンをより科学的に描くことができる, 強力な分析ツールとして高く評価されるべきだと思われる¹⁷⁾。

謝辞

本研究を進めるにあたり, 京都大学大学院経済学研究科諸富徹教授には, 熱心なご指導ご鞭撻を賜り, 心から感謝いたします。名城大学経済学部李秀澈教授には, 多くのご助言, 激励を頂き, 深謝の意を表します。また, 本研究は公益財団法人SOMPO環境財団の学術研究助成金により実施されました。

注

- 1) 京都大学大学院経済学研究科 Email: xuhan.economics@gmail.com
- 2) 経済産業省 (2016), p.1.
- 3) 李ら (2020), p.7.

- 4) Mercure et al. (2019) p.1021
- 5) Mercure et al. (2019) p.1021
- 6) Mercure et al. (2019) p.1028, 1029
- 7) E3ME テクニカル・マニュアル Version 6.0 p.24
- 8) Knobloch et al. (2020) p.446
- 9) E3ME テクニカル・マニュアル Version 6.0 p.8
- 10) 李ら (2018) p.412
- 11) Knobloch et al. (2020) p.445, 446
- 12) 石炭火力発電と原子力発電に関するフェーズアウトシナリオは、以下のように設定されている (李ら 2020 p.8, 9, 10).
- [1] 石炭火力発電のフェーズアウト (～ 2030 年)**
- ① 稼働 40 年以上が経過する亜臨界の石炭火力発電所は 2021 年度に廃止
 - ② 亜臨界の残りの石炭火力発電所の全てを 2023 年度に廃止
 - ③ 2025 年度には超臨界の石炭火力発電所を全廃
 - ④ 2030 年には超々臨界および石炭ガス化複合発電 (IGCC) を併せた残る発電所を全廃
 - ⑤ 2021 年度と 2022 年度は年 350 万 kW 未満と緩やかに廃止を進め、2023 年度以降の全廃は 500 万 kW 超とする
- [2] 石炭火力発電のフェーズアウト (～ 2040 年)**
- ① 2020 年度と 2021 年度の廃止分は 200 万 kW 以下に留め、最初は緩やかにフェーズアウトを進める
 - ② 亜臨界の設備は 2025 年度までに廃止
 - ③ 超臨界の設備は 2027 年度末までに廃止
 - ④ 2030 年度までに現状の 3 分の 1 の設備利用率まで低下させ、新規の石炭火力発電所については、2040 年までにフェーズアウト
- [3] 原発のフェーズアウト**
- ① ベースラインシナリオ：現在稼働中の 9 基、そして原子炉設置変更許可がなされた 7 基、合計 16 基が 2025 年まで稼働すると想定。ただし、2020 年から 2025 年までにどの原発がいつ再稼働するかは定かでないで、9 基から 16 基まで比例的に稼働電源が増加すると想定
 - ② 2025 年以降、新規稼働はないものとし、稼働年数 40 年に達する原発から順にシャットダウンさせる (すでに原子力規制委員会から 60 年運転が認められている 4 基を除く)
- 13) 3 つのフェーズの詳細と実現タイミングは、下記のようになっている。
- ① フェーズ 1: 水素利用の飛躍的拡大 (現在～) 定置用燃料電池や FCV の利用を大きく広げ、世界に先行する水素・燃料電池分野の世界市場を獲得
 - ② フェーズ 2: 水素発電の本格導入／大規模な水素供給システムの確立 (2020 年代後半) 水素需要を更に拡大し、水素源を未利用エネルギーに広げ、従来の「電気・熱」に「水素」を加えた新たな二次エネルギー構造を確立
 - ③ フェーズ 3: トータルでの CO₂ フリー水素供給システムの確立 (2040 年頃) 水素製造に CCS を組み合わせ、または再生可能エネルギー由来水素を活用し、トータルでの CO₂ フリー水素供給システムを確立
- 14) Mercure et al. (2018 a p.589, 590, 594) では、以下の 3 通りのシナリオが用意されている。
- ① IEA IEA プロジェクトは将来の需要に関して投資家と政策立案者の計画を反映している。FTT モデルの技術予測を使用しておらず、投資家が技術変化の状況を十分に認識していないことを想定している (特に EV や再エネなどの技術変化)。
 - ② TDT FTT モデルを使用し、今までの技術軌道の下で電力、道路輸送、建築、およびその他の部門についてエネルギー需要を予測している。
 - ③ 2°C FTT モデルを使用し、75% の確率で 2°C 以下を達成するため、一連の政策 (補助金、税金と規制) が実行される。例えば、2°C 目標を達成するため、全部門に技術変化の

インセンティブを与えるべくCO₂への価格設定が導入される。

- 15) Mercure et al. (2018 b) は、ベースライン・シナリオと2°Cシナリオを比較分析している。このうち後者については、以下の3つの異なる仮定が置かれている。
- ① 2°C 線形推論・・・2°C 目標を確率75% (線形) 達成
 - ② 2°C 指数推論・・・2°C 目標を確率70% (指数) 達成
 - ③ 残差0.5GtCの2°C 指数推論・・・2°C 目標を確率68%で達成し、そのうち残差0.5GtCがある
- 16) 例えば、EUのカーボンニュートラル宣言の理論的根拠を提供しているEU Commission (2018) では、2050年カーボンニュートラル達成時の経済ビジョンについて、E3MEモデルのシミュレーション結果をCGEモデルシミュレーション結果とともに図表と本文に詳しく記述している。
- European Commission (2018) "A Clean Planet for all A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy", Brussels. Retrieved April 3, 2021, from https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf
- 17) 世界銀行もE3MEのFTT機能を高く評価し、2022年からケンブリッジ・エコノメトリックスのモデラー数人を専属エコノミストとして受け入れ、FTTモデルの開発・強化を進めている。そして筆者は、2023年4月～10月まで、ケンブリッジ・エコノメトリックスでのインターンシップを通じて、環境と経済の好循環のメカニズムが良く具現されているE3ME-FTTモデルについて、理論から実践(モデルプログラムのデザインとモデルの運用)まで習得する予定である。

参考文献

「水素基本戦略」再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議(平成29年12月26日)
<https://www.enecho.meti.go.jp/category/>

savingandnew/advancedsystems/hydrogensociety/data/hydrogenbasicstrategy.pdf
2022/10/05

- 「製鉄プロセスにおける水素活用プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」経済産業省 令和3年9月14日
- 「地域別統合評価モデルを使った超長期気候変動分析」日本エネルギー経済研究所 2018年3月8日 <https://eneken.ieej.or.jp/data/7832.pdf>
- 李秀澈; Unnada Chewpreecha; 朴勝俊 (2019) 「日本の2050年温室効果ガス80%削減に向けた炭素税・グリーン税制改革の経済影響評価: E3MEマクロ計量経済モデルを用いた評価」*財政と公共政策*, 65, 84-94
- 李秀澈, 何彦旻, 昔宣希, 諸富徹, 平田公子, Unnada Chewpreecha, Hector Pollitt (2020) 「石炭火力発電と原発早期フェーズアウトの2050年までの日本経済と電源構成、そして二酸化炭素排出影響分析: E3MEマクロ計量経済モデルを用いた分析」*京都大学大学院経済学研究科再エネ講座ディスカッションペーパー No.25*, 2020年9月
- 李秀澈, 何彦旻, 昔宣希, 諸富徹, Unnada Chewpreecha (2021) 「日本の2050年カーボンニュートラルの実現がエネルギー構成及びマクロ経済へ与える影響分析: E3MEマクロ計量経済モデルを用いた分析」*エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集* 40, 156-163
- 「E3MEモデルおよびAIM/CGE [Japan] モデルの概要」第2回 税制全体のグリーン化推進検討会 2016年7月28日参考資料 経済産業省
- 「E3MEテクニカル・マニュアル Version 6.0」*Cambridge Econometrics* 2014年4月
- 「IEEJ OUTLOOK 2020」日本エネルギー経済研究所 (IEEJ) 2019年
- Knobloch, F., Hanssen, S., Lam, A., Pollitt, H., Salas, P., Chewpreecha, U., Huijbregts, M., Mercure, J (2020) Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. *Nature Sustainability*, 3, 437-447
- Knobloch, F., Pollitt, H., Chewpreecha, U., Daioglou, V., Mercure, J (2019) Simulating the deep decarbonisation of residential

- heating for limiting global warming to 1.5°C . *Energy Efficiency* 12, 521–550
- Lam, A., Lee, S., Mercure, J., Cho, Y., Lin, C., Pollitt, H., Chewpreecha, U., Billington, S (2018) Policies and Predictions for a Low-Carbon Transition by 2050 in Passenger Vehicles in East Asia: Based on an Analysis Using the E3ME-FTT Model, *Sustainability* 2018, 10, 1612
- Lee, S.; Chewpreecha, U.; Pollitt, H.; Kojima, S (2018) An economic assessment of carbon tax reform to meet Japan's NDC target under different nuclear assumptions using the E3ME model. *Environ. Econ. Policy Stud.* 20, 411–429
- Luderer, G., Pietzcker, R., Carrara, S., Sytze de Boer, H., Fujimori, S., Johnson, N., Mima, S., Arent, D (2017) Assessment of wind and solar power in global low-carbon energy scenarios: An introduction. *Energy Economics* 64, 542–551
- Mercure, J (2012) FTT:Power : A global model of the power sector with induced technological change and natural resource depletion. *Energy Policy* 48, 799-811
- Mercure, J., Knobloch, F., Pollitt, H., Paroussos, L., Scricciu, S., Lewney, R (2019) Modelling innovation and the macroeconomics of low-carbon transitions: theory, perspectives and practical use. *Climate Policy* 2019, 19, 8, 1019–1037
- Mercure, J., Lam, A., Billington, S., Pollitt, H. (2018 c) Integrated assessment modelling as a positive science: private passenger road transport policies to meet a climate target well below 2°C . *Climatic Change* 151, 109–129
- Mercure, J., Pollitt, H., Edwards, N., Holden, P., Chewpreecha, U., Salas, P., Lam, A., Knobloch, F., Viñuales, J (2018 b) Environmental impact assessment for climate change policy with the simulation-based integrated assessment model E3ME-FTT-GENIE. *Energy Strategy Reviews*, 20, 195-208
- Mercure, J., Pollitt, H., Viñuales, J. E., Edwards, N. R., Holden, P. B., Chewpreecha, U., Salas, P., Sognnaes, I., Lam, A. and Knobloch, F. (2018 a) Macroeconomic impact of stranded fossil fuel assets. *Nature Climate Change*, 8, 588–593
- Ministry of Economy, Trade and Industry. Japan's Roadmap to "Beyond-Zero" Carbon https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/roadmap/innovation/the.pdf 2022/10/05
- Ministry of Economy, Trade and Industry (October 2021) Technology Roadmap for "Transition Finance" in Iron and Steel Sector https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/transition/transition_finance_technology_roadmap_iron_and_steel_eng.pdf access 2022/9/16
- Pauliuk, S., Milford, R., Müller, D., Allwood, J (2013) The Steel Scrap Age. *Environmental Science and Technology*, 47, 3448-3454
- Pollitt, H., S. Park, S. Lee, K. Ueta (2014) An Economic and Environmental Assessment of Future Electricity Generation Mixes in Japan - An assessment using the E3MG macro-econometric model, *Energy Policy* 67: 243-254
- Ueckerdt, F., Brecha, R., Luderer, G., Sullivan, P., Schmid, E., Bauer, N., Bottger, D., Pietzcker, R (2015) Representing power sector variability and the integration of variable renewables in long-term energy-economy models using residual load duration curves. *Energy* 90, 1799-1814
- Ueckerdt, F., Pietzcker, R., Scholz, Y., Stetter, D., Giannousakis, A., Luderer, G (2017) Decarbonizing global power supply under region-specific consideration of challenges and options of integrating variable renewables in the REMIND model. *Energy Economics* 64, 665–684
- Vercoulen, P., Lee, S., Suk, S., He, Y., Fujikawa, K., Mercure, J (2019) Decarbonizing the

East Asian Steel Industry in 2050 - An Analysis Performed using E3ME-FTT:Steel
Vercoulen, P. and Markkanen, S. (2020) Technology, employment, and climate change mitigation: Modelling the iron and steel industry. Technical Report. Cambridge,

UK: CLG Europe.

Wu, T., Zhang, M., Ou, X (2014) Analysis of Future Vehicle Energy Demand in China Based on a Gompertz Function Method and Computable General Equilibrium Model. *Energies* 2014, 7, 7454-7482