

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

社会システム編

低炭素社会に向けた技術革新の影響評価のための
動学エネルギー経済モデルの開発

平成 31 年 3 月

Developments of Dynamic Energy-Economics Model towards
Low Carbon Society of Japan

Strategy for Social System

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2018-PP-21

概要

気候変動緩和目標達成のためには断固とした炭素排出削減策が必要なことは広く認識されており、2016 年のパリ合意を受け、日本政府も 2030 年には 2013 年比で 26%の炭素排出削減を公約し、さらに 2050 年には 80%削減目標を掲げている。同時に、この低炭素社会実現が、従来の省エネルギー活動や低炭素燃料への代替の延長のみでは実現が困難であり、日本の産業部門、民生部門、輸送部門の構造的変化と革新的技術の導入による大規模な緩和策の導入が必要なことも明らかとなってきた。

低炭素社会実現のための道筋について、日本政府も「長期低炭素ビジョン」やエネルギー・環境イノベーション戦略（NESTI2050）、2018 年の第 5 次エネルギー基本計画などで検討を進めている。省庁のほか、科学技術振興機構低炭素社会戦略センターの小宮山、山田による新ビジョン 2050 をはじめ国立環境研究所、地球環境産業技術研究機構などの研究機関も公約実現への道筋を検討している。ここで、温暖化対策が社会に持続可能な形で受け入れられるためには、対策の社会経済影響の事前評価が重要なことは疑いない。

本開発では二つのエネルギーモデル開発を行う。一つは、部門別の過去のエネルギー需要の推移を統計的方法で解析した計量経済モデルに関するもので、短期的なエネルギー価格の変動や急速な技術進歩による市場の変化が及ぼすエネルギー需給の変化を扱う。この短期シミュレーションモデルはカーボンプライシング導入などエネルギー価格の変化に対する過渡的な応答や、特に中国で急速に進む自動車の電動化を日本に適用した場合の計算を可能とする。

もう一つのモデルは、多部門動学的エネルギー経済モデルであり、ここでは産業連関モデルとエネルギーフロー技術を統合した動学的最適化が行われる。ここでは、執筆者によって開発された世界動学的エネルギー経済統合モデル THERESIA[1,2]の日本地域のみを取り出し、日本独自のデータベースの適用や実行上の操作性を上げることで部門の細分化や技術の詳細化を行う。これにより低炭素社会のための新しい技術や制度の導入が複数の産業分野間への波及を通し、マクロレベルでの社会経済へどう影響するかを定量的に評価しようとするものである。例えば鋼種別の製品需要と下流製品の原材料変化を考慮したうえで鉄鋼業への低炭素化の影響と緩和の拡大にボトルネックとなっている技術課題の抽出を行う。現段階では、THERESIA モデルの日本地域モジュールに対してシミュレーション期間の延長や炭素排出制約などの挙動の確認を行い、予備的なモデル開発の検証を行った。

Summary

It is well understood that the stringent carbon emission reduction is needed to achieve the target of climate change mitigation. Japan has already committed to reduce the carbon emission by 26% from 2013 level in 2030 and announced 80% reduction in 2050 according to the Paris agreement in 2016. At the same time, it is also recognized the above target will be hardly achieved by only the extrapolation of the past energy conservation adoptions and fuel switch to low carbon fuels. Technological innovations followed by the large structural changes covering whole society must be additionally introduced. Government of Japan therefore conducted “Committee of Long term Low Carbon Vision”, NESTI 2050, and The Fifth Basic Energy Plan. Besides the governmental projects, other researchers and institutions have investigated the pathways towards the low carbon societies, such as “New Vision 2050” by Komiyama and Yamada, Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE) and National Institute for Environmental Studies (NIES). It should be pointed out that the socio-economic assessment is indispensable for the society to accept the low carbon policies. The economic impacts of low carbon policies are strongly connected to the energy supply-demand systems.

In this article the author proposes two model; the one is the econometric simulation model based on the historical statistics. This provides short term behavior as the extrapolation of past trends and the transient response of disturbance or new technologies. Another one is a model development integrating multisectoral input-output approach and energy flow model, which has rarely been established due to the methodological and the calculation problems. The author extracts the model block of Japan from THERESIA to analyze the direct and indirect impacts of low carbon policies and technological changes on the sectoral socio-economic activities. For example, considering the changes in the material constitution of the products and the relationships between steel product type and its production process, this model provides the overall effects of low carbon policy. Current preliminary simulations show the operability of this middle-term multisector energy-economic model for Japan.

目次

概要

1. 低炭素社会戦略におけるエネルギー経済モデルの役割と本開発の位置づけ	1
1.1 低炭素社会技術開発とエネルギー経済モデルの関係	1
1.2 エネルギー経済モデルの役割	4
1.3 エネルギー経済モデルの過去の開発動向	5
1.4 本提案に関連する研究等の動向	6
2. 短期エネルギーシステムシミュレーションモデルの開発	7
2.1 短期エネルギーシステムシミュレーションモデルの定式化	7
2.2 パラメータの統計的推定結果と実績値との比較	9
2.3 シミュレーションの例	15
2.4 短期エネルギーシステムシミュレーションモデルの用途	16
3. 動学的多部門エネルギー経済モデルの開発	17
3.1 動学的多部門エネルギー経済モデルの定式化	17
3.2 動学的多部門エネルギー経済モデルのシミュレーション例	20
3.3 炭素排出緩和政策なし（BAU）ケースにおける結果	21
3.4 2030 年 50%、2050 年 80%削減ケースにおける結果	22
4. 結論と今後の展望	24
5. 政策立案のための提案	25
参考文献	25

1. 低炭素社会戦略におけるエネルギー経済モデルの役割と本開発の位置づけ

1.1 低炭素社会技術開発とエネルギー経済モデルの関係

炭素・資源制約下における技術開発と導入が経済構造にどのような影響を及ぼすかの評価は、低炭素化に向けた政策上の重要な課題である。実際、パリ合意順守のための 2℃排出制約に向け、日本政府は 2030 年に向け炭素排出量の 26%削減（2013 年基準）を公約し、さらに 2050 年には 80%削減を目指しているが、その実現のためには電力需給システム的大幅な変革、鉄鋼業や窯業など高炭素排出産業に大きな技術的および構造的転換が求められることが指摘されている。

日本政府も、低炭素社会実現のための戦略を策定するにあたり、環境政策の観点からその基礎とすべき考え方と我が国の役割を明らかにする理念、また目指すべき将来像の「絵姿」を示すことを目的として中央環境審議会による「長期低炭素ビジョン」[3]をとりまとめた。また 2050 年を見据えた低炭素社会実現のための世界的な技術革新の課題と経路の策定について、総合科学技術・イノベーション会議は、エネルギー・環境イノベーション戦略 NESTI2050[4]を策定した。2018 年には、内閣総理大臣の下でパリ協定に基づく長期戦略策定に向け各界の有識者による新たなビジョン策定のための「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会」が設けられ、環境と経済成長との好循環を実現し、パリ協定に基づく低炭素社会を成長戦略に位置づける長期戦略が議論されつつある[5]。

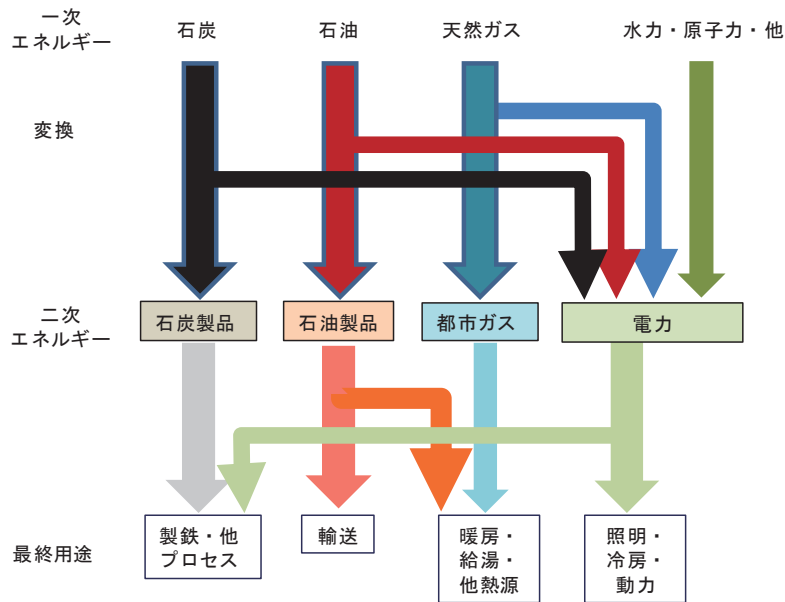
エネルギー構成については、第 5 次エネルギー基本計画[6]が 2050 年を見据えた 2030 年に向けた具体像を示した。省庁のほか、科学技術振興機構低炭素社会戦略センターの小宮山、山田による新ビジョン 2050 [7]をはじめ国立環境研究所、地球環境産業技術研究機構などの研究機関も公約実現への道筋を検討している。

低炭素社会に向けた技術開発の第一のターゲットは言うまでもなくエネルギー需給システムの低炭素化であり、構成要素技術の高効率化による一次エネルギー供給の低減や最終需要の削減など様々な手段がある。ここで、新しい技術開発の導入が、目的である低炭素社会実現にどれほど寄与できるかの見積もりが重要である。もし、エネルギー採掘から転換、輸送、消費までの流れが単一の直接的関係のみで成り立つなら、途中段階の効率改善の効果は自明である。しかし時代とともにエネルギーの変換、用途とも次第に多様化し、またネットワーク化してきたため、技術開発の効果も次第に直截的なものではなくなる。

上流の一次エネルギー供給から下流の最終エネルギー需要までの流れの変化を図 1 のように概観してみる。図 1-(a)には、20 世紀の二度の石油危機までは一次エネルギーから二次エネルギーへの変換、および最終用途との関係が比較的直截的であった状況を示す。このようにフローが単純な場合、各要素技術の効率の改善は比較的独立性が高く直接的な上流からの流入の減少を導く。電源構成も、年間のピーク需要の時間帯に合わせ設備を導入しメリットオーダーで運転するルールが費用最小化を導いた。

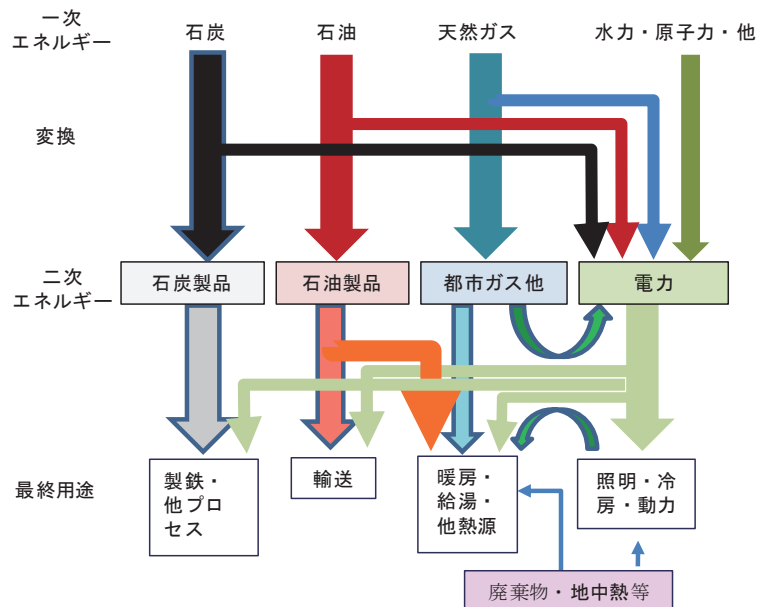
これに対し、需要家にコジェネレーションなど分散型エネルギーの導入が広まると、図 1-(b)のように同じ最終用途に対しても二次エネルギー間の競合が発生するなど需要側間がネットワーク化する。この場合、下流の要素技術の改善は、二次エネルギー間の競合から上流にも波及し、次第に特定の要素技術の導入による間接的効果も拡大するようになる。

図 1-(c)ではさらにネットワーク化が進み系統連系を含む電気自動車や太陽電池の大量導入により上流へのフィードバックが大きくなった場合である。この場合、供給システムの安定のためには、畜エネルギー技術などそれまでの一方向的なフローとは異なる技術が必要になりうる。また情報通信技術の進展とあいまって容量市場など市場形態の変革がなされれば、ネットワーク化はエネルギーシステムだけにとどまらず社会経済全体への大きな構造的変化をもたらす可能性を持つ。



- (1) 20世紀型の主なエネルギーフロー。
- ・ 2次エネルギーの形態と最終用途間には強い対応関係がある。
 - ・ 上流から下流へのフローは一方方向。
 - ・ 各段階の技術改良の効果の見積もりは比較的直截的に得られる。

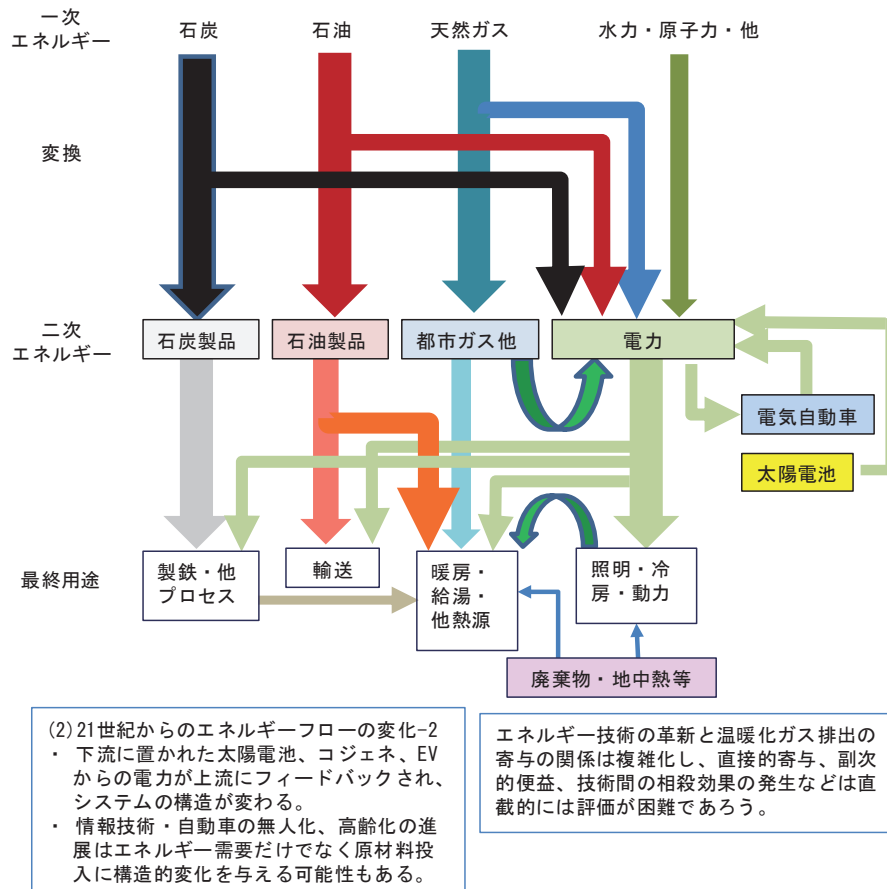
(a) 上流から下流への一方向的エネルギーフロー



- (2) 21世紀からのエネルギーフローの変化-1
- ・ コージェネレーション、ヒートポンプ、電気自動車の進展
 - ・ 廃棄物・地下熱なども利用拡大
 - ・ これらは下流の相互連携をネットワーク化する。
 - ・ 技術間の競合や相乗効果を検討する必要がある。

(b) 上流から下流への一方向的エネルギーフロー

図 1 一次エネルギー供給から最終需要までのフローの歴史的変化の概念図



(c) 下流の多様化とネットワーク化が上流に及ぶ

図1 一次エネルギー供給から最終需要までのフローの歴史的変化の概念図（続き）

このような状況では、要素技術の改善がもたらす炭素排出削減の効果には直接的寄与、間接的寄与、競合による相殺の可能性、さらに温暖化対策以外の副次的便益の発生までが考えられる。便益や費用の二重計算の回避は特に重要であるが、もはや個別効果の積み上げでは評価が困難となる。このようなネットワークにおいては、不確実な外乱の波及的影響も想定を超えて拡大するものとなる可能性を持つため、モデル構築とシミュレーション技術は不可欠なものとなる。一般的に、エネルギーフローには保存則と線形性が成り立つことから、システムフローを数理的な関係式で表し、全体的な効率性を求めるようなモデル構築がプラント設計などで古くからなされてきた。

これまでの低炭素社会実現シナリオの研究では、まずエネルギー転換部門に焦点が当てられ、次いで産業・輸送・家庭・業務部門の省エネルギーや温暖化ガス排出削減の可能性が探求されてきた。しかしさらに低炭素化を目指して自動車の電動化や軽量化など製品の原材料構成に変革が起きた場合、影響は個別の部門だけでなく産業全体に波及する。同様に、消費パターンの変化も構造的な変化をもたらすことが予想される。

このように低炭素技術の開発や政策導入は、単なる入力から出力までのスループットの改善だけでなく、社会経済との相互影響を含む総合的な評価が必要となる。実際、政府間気候変動パネル（IPCC）では温暖化緩和策導入の困難さを示す指標として、しばしばGDPの低下率や産業の海外移転発生のいわゆる「炭素漏えい」を指標に用いてきたことが示すよう、緩和策導入に伴う

総合的な経済影響評価は、実施計画において不可欠なものであった。

このように温暖化対策を技術評価、政策評価と併せて社会経済的インパクトを定量的かつ総合的に行うには、技術や需給の相互関係性を定量的な制約として与える数理モデルが唯一のツールと考えられてきた。2018 年ノーベル経済学賞を受賞した Williams Nordhaus は経済と気候変動をコンパクトに統合した DICE モデル開発者であり、この分野の草分けである[8]。日本では、これまでも経済政策の論理的な裏付けに日本経済研究センターのマクロモデルが、エネルギー政策評価には日本エネルギー経済研究所のエネルギー経済モデルが、長期エネルギー産業政策システム評価には上記地球環境産業技術研究機構のモデルが、環境経済政策評価には国立環境研究所の AIM などが貢献してきた。またすでに第 IV 期となる「環境経済の政策研究」は経済と環境政策との関係性について様々なモデル開発を行いつつ解析を与えてきた。世界のエネルギー経済モデルの歴史的視点は、例えば文献[9]にある。

緩和策の導入が具体的段階に入るにつれ、社会経済への影響評価は次第にマクロな影響から産業部門への直接および間接影響が重要な論点になりつつあるが、IPCC 等で温暖化政策評価に使われてきた既存の統合評価モデルはマクロ部門 GDP の低下やエネルギーコストなどに主眼を置いて開発がされ、中長期的部門別影響評価には限界があった。

他方、産業活動を多部門化して扱う既存の方法には産業連関分析や応用一般均衡分析 (CGE) が歴史を持つが、これらは基本的にある一時点を分析するものであるため、設備投資や技術導入などの動学的経路を扱うには適していない。

同時に、これらのモデルは新技術の導入や原子力政策などはシナリオで扱っており科学技術開発がおよぼす低炭素社会と経済の相互影響を総合的に見ようとしたものではない点に注意が必要である。モデル化が困難な理由として、(1)両者の関係が確定的なものではなく不確実性が大きいこと、(2)技術開発と導入の間には時間的な遅れがあり動学的な視点が不可欠な一方、産業と社会の相互作用を見るには経済活動の多部門化が必要であるが開発例がほとんどないこと、(3)イノベーションはしばしば「収穫の逡増性」で特徴づけられ、求解が難しくなること、などがあげられよう。ここではその第二の視点に着目する。

1.2 エネルギー経済モデルの役割

エネルギー経済モデルは、大きくは変数間の関係を数式で表して全体的な実行可能解を導き、さらにそのなかで何らかの基準を最適化する数理計画モデルと、基本的に過去の時系列データを統計解析し、その延長として将来を描くシミュレーションモデルに大別される。前者が基本的に「あるべき姿」における各構成要素の均衡状態における活動量を表すのに対し、後者は、関係構造が過去から不変であることを前提としたうえで、新しい要素が加わった場合の将来像を描く。このため、本質的に前者は中長期的均衡解を、後者は短期的あるいは部分的な調整過程を扱うものとなる。ただし、いずれも個別の数式の積み上げとして部分と全体の間の整合性が担保される。

モデル上、技術は導入される段階になってはじめて社会経済に影響するので、これらのモデルは技術開発の可否を扱うものではないが、技術が導入された時の社会経済への直接・間接的な影響と緩和策導入拡大に対する技術ボトルネックの存在を与えることができる。

特に前者の数理計画モデルでは、各変数や制約式の上下限の変化がどのように全体的な評価関数に影響するかが求解と同時に得られるので、何が普及の障壁になっているかが、また何が余剰となるかも同時に示される。例えば、低炭素化制約の下で鉄鋼生産から高炉を減らせば高張力鋼板など高付加価値鋼の生産が減少し、自動車産業が影響を受ける。しかし自動車が軽量化を目指

¹⁾ イノベーションと経済活動の関係はシュンペーター以来重視されており、2018 年のノーベル経済学賞を受賞した Romer に代表される「内生的技術進歩」という一研究分野を形成している。ただ収穫逡増は定式化すると「非凸」問題になるため市場メカニズムと最適行動の文脈に乗りにくい問題があった。地球温暖化の分野では太陽光発電やガス複合発電の学習効果を明示的に定式化したモデル[10]も試みられたが主流となるには至っていない。

し CFRP やアルミ使用に移行できればこの影響は小さくなり、同時にリサイクルのためのスクラップはその分減ることになる。問題は、このような移行が市場競争力を持つかどうかであるが、それには、この移行のどの技術が緩和のボトルネックとなっているかを明らかにせねばならない。もし高炉が炭素回収隔離と一体化されていればこのような移行の必要性は減少するであろうし、CFRP 利用が低コストかつ量産可能となれば高炉鋼への需要が置き換えられることになる。最終的には CFRP 利用拡大による炭素排出量増加との差し引きにより全体的な緩和策への寄与を評価できることになる。

このような解析は、多部門モデルによってのみ可能となる。総合的な寄与は低炭素技術の導入と一体化して行う必要のあることは言うまでもない。

後者の時系列データに基づくモデルは短期的な変動の影響を扱うが、モデルの構造によっては外乱の影響が累積し、必ずしもトレンドの周りの一定の変動とならない場合がある。すると外乱あるいは新技術導入があるとシミュレーション結果の不確実幅が広がり、必ずしも期待値が良い意思決定基準を与えるとは限らなくなる。この場合は後悔値最小化のような基準が望ましくなる可能性がある。また、近年の中国に見られるような自動車の電動化の急速な拡大が充電インフラの拡大速度を超えると、過渡状態において発電系統などエネルギーシステムに負荷が発生することが予想されるが、この評価は短期的なシミュレーションモデルによってのみ対応できよう。

以上の観点に立ち、本提案書では新しい技術開発や低炭素政策導入が産業部門別活動に及ぼす影響評価を統合的に行うための二つの評価システムを提案する。具体的には、一つはエネルギー価格と経済活動がエネルギー需要に及ぼす短期的な挙動を扱うシミュレーションモデル、もう一つは産業連関表による部門間の相互連関モデルと動学的エネルギーモデルに組み合わせを行う。

これらの評価システムにより 2030 年の 2013 年比 26%炭素排出削減、さらに 2050 年の 80%炭素排出削減目標の達成にむけて、新しい技術開発や制度が導入される際、①現状の技術の延長の場合、社会経済活動にどのような影響が現れるのか、②新しい技術開発や社会制度が導入された場合、どのような効果がどの時点で現れるのか、③またどのような導入経路が望ましいものとなるのか、④緩和策普及の技術ボトルネックがどこにあり、どのような技術開発が望まれているのか、などの政策導入課題を定量的かつ統合的に評価することを目指す。

1.3 エネルギー経済モデルの過去の開発動向

経済活動とエネルギーシステムの統合的な評価モデルは第一次石油危機以降盛んに開発され、長い歴史を持つ。一国の経済を対象とした計量経済学モデルは、Klein のマクロモデル以降広く経済活動の分析ツールの一部として定着し、日経研究センター、日本エネルギー経済研究所をはじめ多くのシンクタンクに導入例があり経済政策の分析と予測に活用されている。これらをエネルギーフローと統合してシミュレーションに用いられた例も、米国を中心に長い歴史を持つ。これらは文献[9]にまとめられている。

石油危機後、石油価格がどのように決まるかについて、古典的な経済合理性では説明できないことから様々な独自モデルが開発された[9]。しかし地球温暖化問題に焦点を絞ると、Edmonds と Reilly[11]が嚆矢である。このモデルは経済活動、エネルギー需要、エネルギー種相互投入シェア、温暖化ガス排出、温暖化影響などの相互影響をコンパクトなシミュレーションモデルで表現したものであった。

1990 年以降、特に炭素税の扱いや気候政策の評価のため、エネルギー経済モデルと地球温暖化対策を組み合わせたモデルの開発例が増加した。世界モデルとしては、Nordhaus の DICE モデル[8]と Manne らの GLOBAL 2100[12]に端を発する。特に IPCC の新排出シナリオ[13]以降様々なモデル開発が行われ世界的な気候政策に寄与してきた。エネルギーフローや経済理論モデルの再現、さらに気候モデルや生態系モデル、農業モデルの統合を目指し、次第に大規模化し、評価ツールというよりもモデルシステムに拡張された。

技術評価型のエネルギー経済モデルでは、エネルギー需要を外部から与え、費用を最小化するような設備運用や設備導入を求める。このようなモデルでは、フローの精緻化による技術の詳細化や、設備計画の動学的な拡張は比較的容易にできる。さらに経済活動そのものを内生化し、エネルギー需要も併せて通時的最適化から求めるモデル(GLOBAL 2100[12]、GRAPE[14]、MARIA[15])も長い歴史を持つが、これらはいずれも産業活動は基本的にマクロ 1 部門で扱うことが多い。

産業活動とエネルギー技術の関連を扱う分析方法に産業連関分析あるいは応用一般均衡モデル (CGE) をベースとした多部門経済活動を扱うモデルにエネルギー技術フローを統合したプロジェクトでは、AIM[16]、MIT-EPPA[17]、FEEM[18]などが著名である。これらは、計算量の制約から CGE とエネルギーフローモデルを別個に解き、データを交換しつつ計算を行う逐次最適化による求解が通常用いられる。このため、枯渇性資源制約問題、温暖化濃度制約、核燃料サイクル問題や炭素貯留・隔離技術 (CCS) のような長期的な時間制約に対する計画問題を扱うことは厳密にはできない。

これらはいずれも地球温暖化の長期評価手法として IPCC-WG3 で中心的に利用されてきており第 5 次評価報告書では 30 のモデルが収録されている[19]。

しかし両者を統合した動学的多地域・多部門・エネルギー経済モデルの統合化は決して容易なものではない。例えば、変数はおおざっぱには (部門数)² × (地域数) × (時点数)² ⁱⁱ⁾ で増加する。また、データベースの整合性の維持に慎重さが必要となり、更新も簡単ではない。

そこで、本提案では対象を日本 1 国に限ることで計算量の縮小を行う一方、日本で整備された経済統計や技術データベースを適用することで、分析の詳細化をはかることを見込む。その第一段階としてまず THERESIA[1,2]モデルの日本ブロックを取り出し、シミュレーション期数の延長や炭素排出制約シミュレーションを行うことで、今後の拡張と寄与の可能性を検証する。さらに、この産業連関モデルとエネルギーフローモデルを統合し、産業部門別活動と中長期エネルギー設備計画を同時決定するモデルの枠組みと予備的計算による検証を示す。

1.4 本提案に関連する研究等の動向

エネルギーシステムを技術だけでなく社会経済を含めて総合的に検討する研究プロジェクトとして、古くは 1987 年から 1993 年にかけて文部省 (当時) 科学研究費重点領域研究「エネルギー変換と高効率利用」が、当時世界的にも例を見ないほど広範囲の研究者を集めて実施された。

その後、地球温暖化問題が国際的に注目されるに従い、いくつかのプロジェクトが立ち上がり今日に至っている。

例えば、1990 年に設立された地球環境産業技術研究機構は、IPCC 設立当初からエネルギー経済モデルの開発を続け、発電技術や CCS の温暖化と社会経済影響評価を行って世界的に情報発信しつつ現在に至っている。ほぼ時を同じくして国立環境研究所は京都大学 松岡譲とともに環境と経済に重点をおくモデル開発プロジェクトを開始し、次第に世界各国との協力関係を広げ今日に至っている。科学技術振興事業団 (当時) は 1996 年に「環境低負荷型の社会システム」領域で公募を行い、ここに「地球環境保全のための国際的枠組みの研究」(代表者: 京都大学 佐和隆光) が採択され、翌年の京都議定書に向けた影響評価を多部門モデルやゲーム論、エネルギー経済モデルなどの構築で行った。

低炭素社会実現のための統合評価モデルの開発プロジェクトとしては、我が国では前述の国立環境研究所の AIM プロジェクトと地球環境産業技術研究機構の Phenix-ALPS (I ~ III) が最も中

ⁱⁱ⁾ 定式化の工夫や相互依存制約の導入により実際の変数はこれよりも減らせるが、依然として極めて大規模な計算が必要である。THERESIA は 15 部門・12 地域・7 期モデルであるが求解に約 7 日を要し、柔軟性に難点があり具体的な政策評価ツールとしての利用は制約された。

心的存在であり、これまで IPCC をはじめとする欧米の様々なモデル比較プロジェクトへの参加や、国内的にも炭素税評価などの様々な政策提言を行ってきている。前者はエネルギー/経済のほか気候や農業、生態系など環境分野に強みを持ち、後者はエネルギー技術、産業技術の詳細な扱いに特徴がある。

温暖化対策の政策評価としてエネルギー経済モデルが着目され相互比較を行った例が、内閣府政府懇談会（2009）による「我が国の中期温暖化対策評価」[20]である。ここでは我が国の中期温暖化対策評価のために、日本の 6 研究機関による 4 種類の異なるタイプのエネルギー経済モデルにより二酸化炭素 15%削減のシナリオが検討された。

近年の気候変動研究プロジェクトで注目されるものの一つに、2012～2016 年度に実施された環境省環境研究総合推進費 戦略的研究開発プロジェクト S-10「地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究（ICA-RUS）」[21]がある。ここには地球科学、生態系、海洋、気候変動影響、エネルギー経済、リスク認知など幅広い研究者が参画したが、中には AIM ほかに 4 つの統合評価モデルが相互比較しつつリスク管理戦略を導く活動が含まれている。このほか、すでに第 IV 期となる「環境経済の政策研究」は経済と環境政策との関係性について様々な公募プロジェクトによりモデル開発を行いつつ解析を与えてきた。

我が国の施策としては、「低炭素社会づくり行動計画」が 2008 年 7 月 29 日に閣議決定された。この閣議決定を受け、文部科学省は 2009 年 8 月に「低炭素社会づくり研究開発戦略」を策定した。科学技術振興機構は戦略の一つとして取り上げられた「戦略的社会シナリオ研究」の実施機関として、低炭素社会戦略センター（LCS）を設置した。LCS では、技術的定量評価を中心に社会・経済への影響分析などを行い、現在に至るまで低炭素社会の実現を目指すシナリオ策定を行っている。本研究も、この一環と位置づけられる。

2. 短期エネルギーシステムシミュレーションモデルの開発

2.1 短期エネルギーシステムシミュレーションモデルの定式化

ここでは、ツールとしての短期エネルギーシステムシミュレーションモデルの定式化を示す。過去のデータを統計解析し、その関係を将来に延長するモデルはモデルの正当性がわかりやすく、また様々な外乱やパラメータ変化の影響がわかりやすく示される特徴がある。ただし、過去の構造が変化する場合に当然適用が困難になることや、異なるモデル式に現れる変数間に何らかの制約があって連立方程式体系になっている場合、統計的推定や将来への延長シミュレーションは慎重な扱いが必要になる。

本モデルは、基本的に、(1)産業の生産額あるいは GDP とエネルギー価格によりエネルギー需要が与えられる、(2)エネルギー種間の相対価格によりエネルギー種間の投入シェアが決まる、という 2 つの段階からなる。

まず、経済活動を総合エネルギー統計[22]の簡易表に従い、化学製品、食品、紙・パルプ、鉄鋼業、非鉄金属業、窯業・土石、繊維・革製品、機械産業、他製造業、他産業の 10 産業部門、家庭、業務の 2 民生部門、貨物、旅客の 2 運輸部門計 14 部門を対象とした。

このエネルギー総合統計による 1990～2015 年の間のエネルギー需要データをもとに、①エネルギー需要関数、②集計燃料間投入シェア関数、が回帰分析により推計される。推定パラメータは符号条件と単位根検定をクリアすることを必要とする。

石炭・石油・ガス（製品含む）化石燃料および電力の投入シェアは図 1 の多段階選択フローで決定されると想定し、各分岐の選択は、遅れを持つ生産額と相対価格によるロジットモデルで表されるものとする。特定の経済活動の基本式は以下のようなものである。

$$\ln\left(\frac{S_{A,t}}{S_{B,t}}\right) = C + a Y_t + b Y_{t-1} + \alpha P_{A,t} + \beta P_{A,t-1} + \gamma P_{B,t} + \delta P_{B,t-1} + \theta \ln\left(\frac{S_{A,t-1}}{S_{B,t-1}}\right) \quad (1)$$

ここで $S_{A,t}$ 、 $S_{B,t}$ は t 期エネルギー種 A と B の投入シェア、 $P_{A,t}$ 、 $P_{B,t}$ は t 期エネルギー種 A と B の価格、 Y_t は対象部門の生産額または GDP である。回帰係数 C 、 a 、 b 、 α 、 β 、 γ 、 δ 、 θ は統計的に推定されるパラメータであるが、統計的に有意なものであること、回帰残差が単位根を持たないこと、符号が適切なものであることなどの一般的要件を満たす必要がある。また活動によってはさらに変数を追加することがある。

次にエネルギー需要関数の基本式は平均投入エネルギー価格 P_t により、以下のように与える。ただし、 D_t は対象活動の t 期エネルギー需要である。回帰係数の要件、必要に応じた変数の追加の可能性は上のシェアモデルと同様である。

$$\ln D_t = \lambda \ln D_{t-1} + \mu \ln Y_t + \kappa \ln P_{t-1} + K \quad (2)$$

ここで、 $\mu / (1 - \lambda)$ 、 $\kappa / (1 - \lambda)$ は長期所得弾性値および長期価格弾性値と呼ばれる。 λ が 1 に近いほど、長期的な影響に比べ短期的効果は小さく調整に時間のかかることが示される。 K は統計的に推定されるパラメータである。 P_t は対象活動部門に投入される集計平均エネルギー価格であり、

$$P_t = S_{A,t} P_{A,t} + S_{B,t} P_{B,t} \quad (3)$$

となる。モデル上は、エネルギー種の選択は最上位から電力 vs. 熱、固体燃料 vs. 流体燃料、ガス vs. 石油というように多段階選択モデルで表現される (図 2)。ただし価格の項が有意に得られない場合は過去からのトレンドのみで変化することになる。

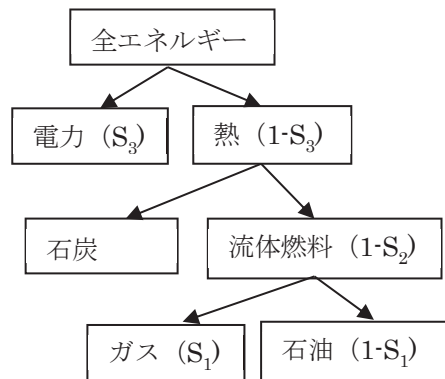


図2 エネルギー種選択のフロー

これらからエネルギー投入量を求める具体的手順は以下のようなになる。

- ① 産業部門別生産額の推移と各化石燃料の価格系列を外生的に与える。
- ② ロジットシェアモデルを用い下位から順に投入エネルギーシェアを決定する。
- ③ エネルギー選択シェアとエネルギー価格から、集計エネルギーの平均価格が決定される。
- ④ 上位の分岐についてもロジットシェアモデルからエネルギーシェアと集計エネルギー平均価格を決定する。

⑤ 最上位の集計エネルギー平均価格と部門別生産額を用い、部門全体エネルギー需要を推計する。

⑥ ロジットモデルシェアモデルを用い上位のエネルギー需要を逐次下位のエネルギー需要に配分していくことで、最下位までのエネルギー需要が得られる。

発電部門では、原子力、再生可能エネルギー等は政策による決定が大きいので外生的に与え、調整項としての火力発電にのみ図 2 のエネルギー種選択を適用する。ただし石炭火力のシェアについては(1)式の相対価格に関する項が有意にならなかったため、結果としてガス火力と石油火力発電についてのみエネルギー種選択がなされる構成となった。

2.2 パラメータの統計的推定結果と実績値との比較

ここでは需要関数とエネルギー種選択関数について統計的に有意でない項目を除去し、かつ回帰残差の単位根検定をクリアしたものについてパラメータ推定結果および実績値と推定値の適合状況を図 3 に示す。需要関数は、活動部門により説明変数が変化する。なお、以下、回帰係数の下の()内は t 値を示す。

<化学工業>

$$\ln D_t = 1.034 \ln D_{t-1} - 1.045 \ln Y_t - 0.265 \ln P_{t-1} + 9.841 \quad (4)$$

(7.367) (-2.096) (-2.376) (2.523)

$$R^2=0.804 \quad \text{単位根検定}(t \text{ 値}) : -5.804 \quad Y_t : \text{GDP}$$

<食品工業>

$$\ln D_t = 0.810 \ln D_{t-1} + 1.654 \quad (5)$$

(2.713) (11.495)

$$R^2=0.852 \quad \text{単位根検定}(t \text{ 値}) : -8.804$$

<機械工業>

$$\ln D_t = 0.927 \ln D_{t-1} + 0.395 \ln Y_t - 0.540 \ln Y_{t-1} + 2.380 \quad (6)$$

(11.696) (2.967) (-4.112) (1.524)

$$R^2=0.922 \quad \text{単位根検定}(t \text{ 値}) : -4.150$$

<繊維工業>

$$\ln D_t = 0.792 \ln D_{t-1} - 0.126 \ln Y_{t-1} + 0.561 \quad (7)$$

(8.281) (2.258) (1.614)

$$R^2=0.982 \quad \text{単位根検定}(t \text{ 値}) : -3.596$$

<紙・パルプ業>

$$\ln D_t = 0.824 \ln D_{t-1} - 0.129 \ln P_{t-1} + 1.313 \quad (8)$$

(8.980) (-3.037) (1.700)

$$R^2=0.937 \quad \text{単位根検定}(t \text{ 値}) : -5.297$$

<鉄鋼業>

鉄鋼業では、エネルギー需要について有意な係数を持つ需要関数を得ることができなかったため、定数として扱うことになった。

<非鉄金属業>

$$\ln D_t = 0.760 \ln D_{t-1} - 0.249 \ln P_{t-1} + 1.487 \quad (9)$$

(6.504) (-2.71) (1.831)

$$R^2=0.937 \quad \text{単位根検定}(t \text{ 値}) : -6.038$$

< 窯業・土石業 >

$$\ln D_t = 1.073 \ln Y_{t-1} - 0.191 \ln P_{t-1} - 0.615 \quad (10)$$

(13.396) (-2.992) (-0.996)

$$R^2=0.982 \quad \text{単位根検定(t 値)}: -3.860$$

< 他製造業 >

$$\ln D_t = 0.761 \ln D_{t-1} - 0.209 \ln Y_t - 0.314 \ln P_{t-1} + 3.630 \quad (11)$$

(9.680) (-2.288) (-4.897) (3.898)

$$R^2=0.959 \quad \text{単位根検定(t 値)}: -5.016$$

< 他産業 >

$$\ln D_t = 0.810 \ln D_{t-1} + 1.654 \quad (12)$$

(0.187) (20.452)

$$R^2=0.948 \quad \text{単位根検定(t 値)}: -6.691$$

< 家庭部門 >

$$\ln D_t = 0.782 \ln D_{t-1} + 2.352 \quad (13)$$

(11.138) (3.112)

$$R^2=0.844 \quad \text{単位根検定(t 値)}: -5.425$$

< 業務部門 >

$$\ln D_t = 0.908 \ln D_{t-1} - 0.640 \ln Y_t - 0.200 \ln P_{t-1} - 7.783 \quad (14)$$

(12.285) (2.412) (-3.424) (-2.378)

$$R^2=0.959 \quad \text{単位根検定(t 値)}: -5.128$$

< 貨物輸送部門 >

・ 石油製品

$$\ln D_t = 0.852 \ln D_{t-1} - 0.277 \ln Y_t + 5.164 \quad (15)$$

(11.482) (-3.022) (2.763)

$$R^2=0.959 \quad \text{単位根検定(t 値)}: -4.739$$

・ 電力

$$\ln D_t = 0.972 \ln D_{t-1} + 0.112 \quad (16)$$

(16.500) (0.429)

$$R^2=0.922 \quad \text{単位根検定(t 値)}: -5.507$$

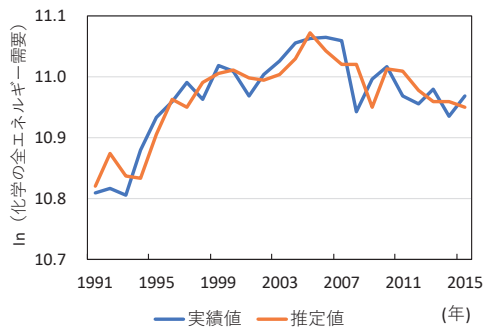
< 旅客部門 >

$$\ln D_t = -0.275 \ln D_{t-1} + 0.943 \ln Y_{t-1} + 3.797 \quad (17)$$

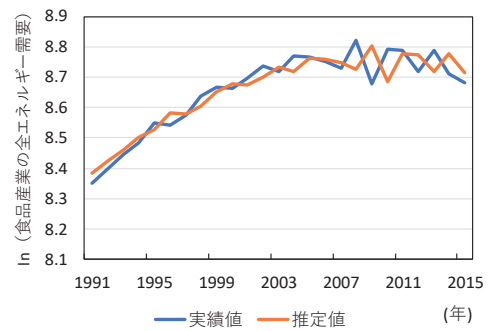
(13.966) (-3.291) (3.749)

$$R^2=0.903 \quad \text{単位根検定(t 値)}: -4.972$$

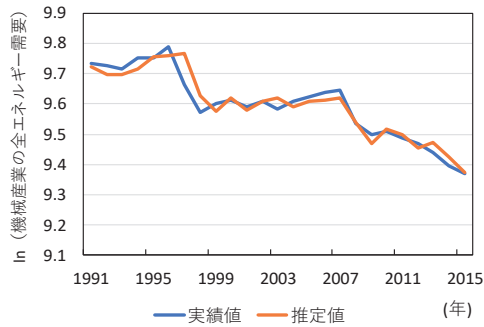
これらの図のように、エネルギー需要は単純な傾向を示すとはかぎらないが本定式化は良い追従性を示しているといえる。また鉄鋼業の需要関数が有意な関係を示さなかったことが示すよう、今後の電炉の拡大等の構造的な変化は過去の延長では得られない。このため外部からシナリオとして与える必要がある。また貨物輸送部門では、独立な石油需要と電力需要を仮定した場合にのみ有意な結果を得た。そのため、この部門では次に述べるエネルギー種間の投入シェアモデルは構成されない。



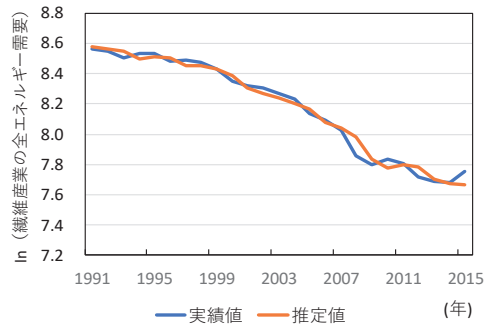
化学工業



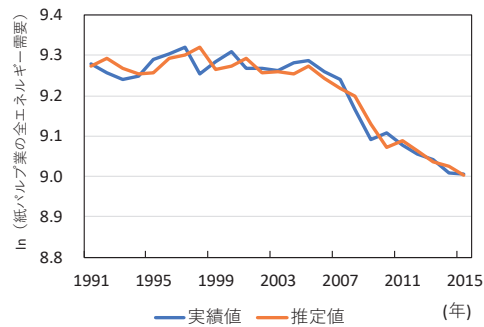
食品工業



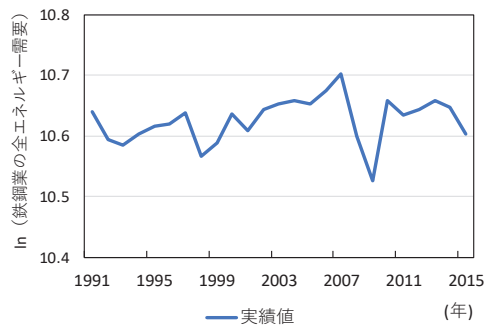
機械工業



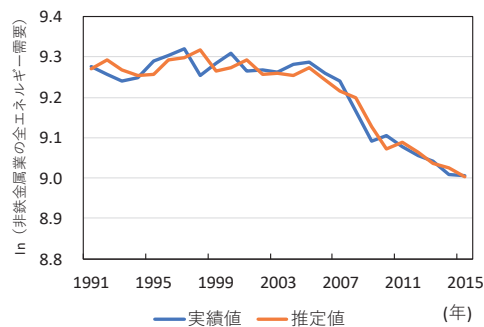
繊維工業



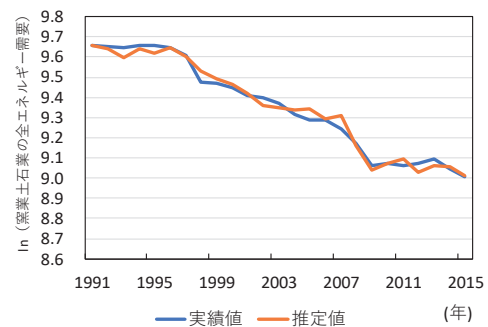
紙・パルプ業



鉄鋼業



非鉄金属業



窯業・土石業

図 3 部門別エネルギー需要 実績値と推定値

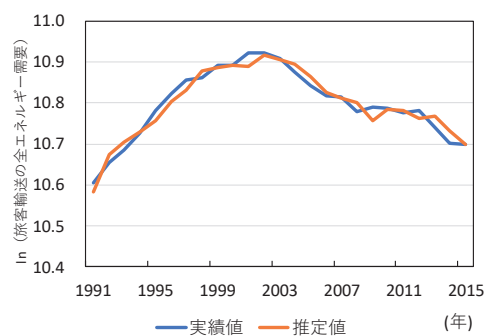
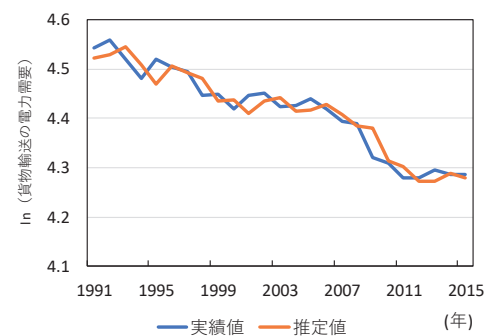
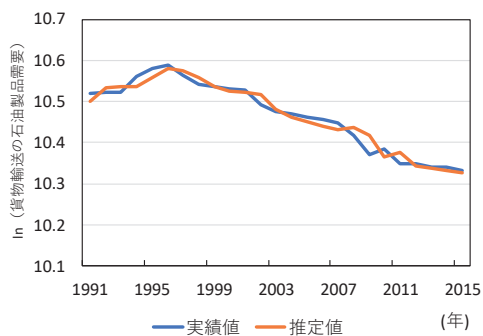
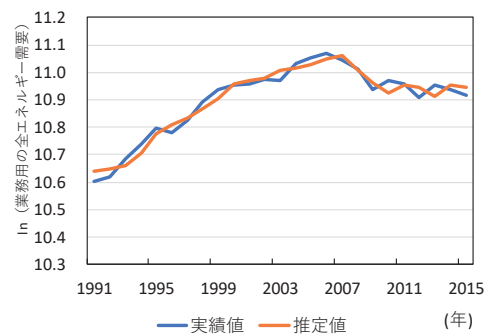
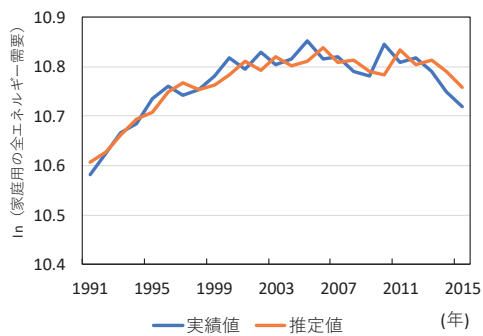
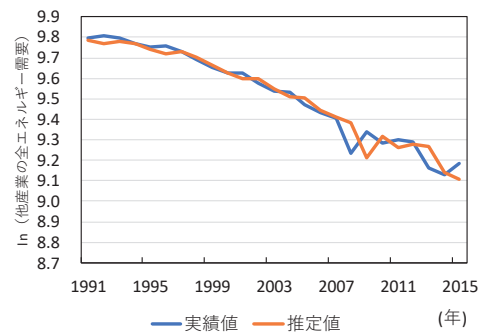
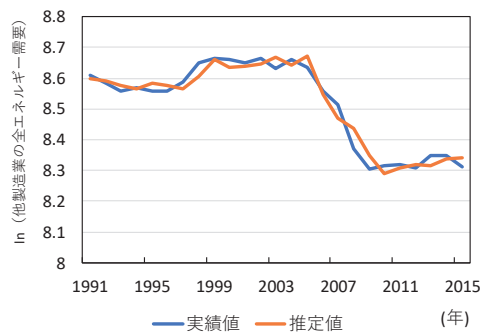


図 3 部門別エネルギー需要 実績値と推定値 (続き)

ついで、エネルギー投入シェアの推定結果を示す。エネルギーシェアは、結果として

$$\ln\left(\frac{S_{A,t}}{S_{B,t}}\right) = C + \alpha P_{A,t} + \theta \ln\left(\frac{S_{A,t-1}}{S_{B,t-1}}\right) \quad (18)$$

の形式となったものが多い。表 1 に推定結果を、図 4 に総合的な実績値と推定値を示す。このように、この多段階エネルギー種選択モデルは過去の実績値をよく追従しているといえる。

表 1 エネルギー投入シェア関数推定結果： α 、 θ 等の上段は回帰係数推定値、下段は t 値を示す。

	化学工業			食品工業			機械工業			繊維工業		
	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(熱/電力)	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(熱/電力)	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(熱/電力)	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(熱/電力)
C	-1.675	0.753	0.060	0.038	1.536	—	-0.687	0.750	-0.355	0.126	0.878	1.738
α	7.651	0.776	0.903	0.970	0.768	—	15.290	0.789	0.773	1.033	0.815	-0.130
	3.154	7.395	15.083	16.88	5.078	—	3.049	7.308	4.902	26.05	6.742	-3.830
θ	0.624	—	—	—	—	—	0.809	—	—	—	—	-1.020
	5.396	—	—	—	—	—	12.273	—	—	—	—	-2.455
R²	0.900	0.704	0.908	0.925	0.529	—	0.966	0.699	0.511	0.967	0.664	0.454
単位根検定(t値)	-4.524	-4.449	-4.311	4.664	6.019	—	-3.954	-5.795	-4.473	-4.759	-4.288	-4.268

	紙・パルプ業			鉄鋼業			非鉄金属業			窯業・土石業		
	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(熱/電力)	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(熱/電力)	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(熱/電力)	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(熱/電力)
C	-0.329	—	-3.328	0.065	-0.643	-0.233	0.062	0.216	-0.118	0.085	-0.032	-0.502
α	0.708	—	0.441	0.987	0.673	0.727	1.002	0.851	0.902	1.013	0.725	-2.443
	5.739	—	9.452	32.70	4.602	4.832	24.52	9.513	9.044	31.78	5.059	-7.648
R²	0.589	—	0.788	0.979	0.479	0.504	0.963	0.797	0.781	0.978	0.527	0.709
単位根検定(t値)	-4.348	—	-2.952	-4.859	-3.574	-3.282	-6.038	-4.036	-3.326	-4.273	-4.136	-4.344

	他製造業			他産業			家庭部門		業務部門		旅客部門
	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(熱/電力)	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(熱/電力)	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(ガス/石油)	ln{(ガス+石油)/石炭}	ln(石油/電力)
C	-0.617	0.105	-0.954	-0.841	0.817	-1.627	0.013	7.236	-19.803	0.162	3.797
α	11.927	0.969	17.088	7.507	0.883	0.562	1.002	-0.551	1.450	-0.627	-0.275
	2.469	12.791	2.516	1.971	12.246	3.194	12.019	-2.097	2.129	-2.047	-3.291
θ	0.806	—	-1.920	0.873	—	—	—	0.733	23.858	0.831	0.943
	9.212	—	-2.721	12.241	—	—	—	5.801	2.322	12.919	13.966
γ	—	—	0.402	—	—	—	—	—	0.945	—	—
	—	—	2.515	—	—	—	—	—	16.829	—	—
R²	0.963	0.877	0.515	0.970	0.867	0.307	0.863	0.948	0.988	0.963	0.903
単位根検定(t値)	-6.543	-2.701	-4.010	-4.694	-5.885	-3.630	-6.433	-6.678	-5.674	-5.105	-4.972

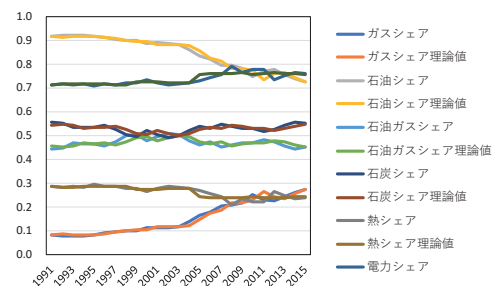
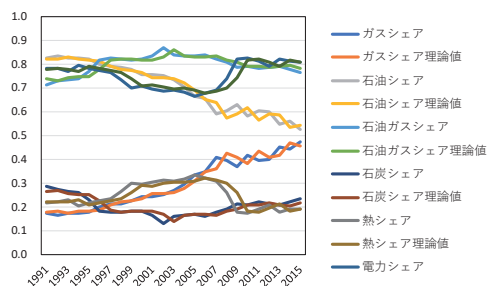
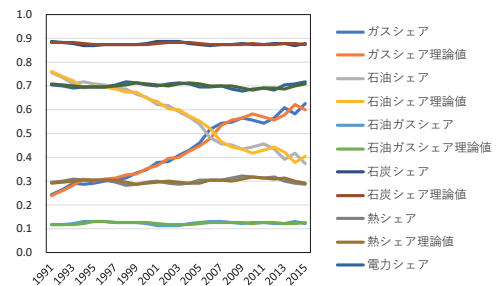
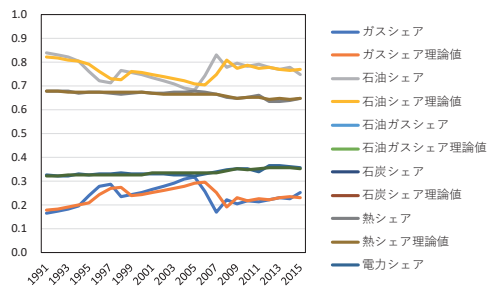
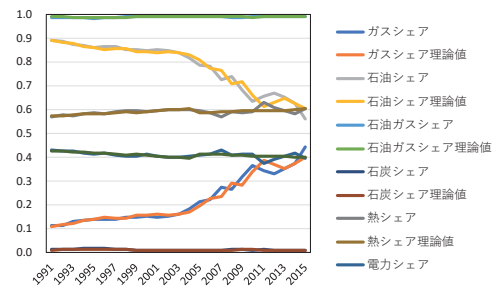
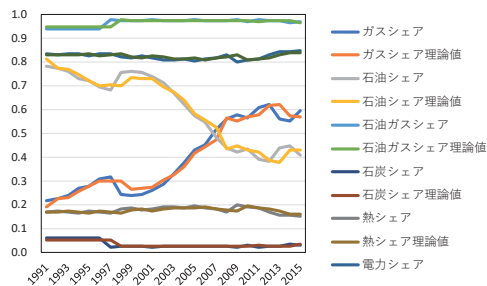
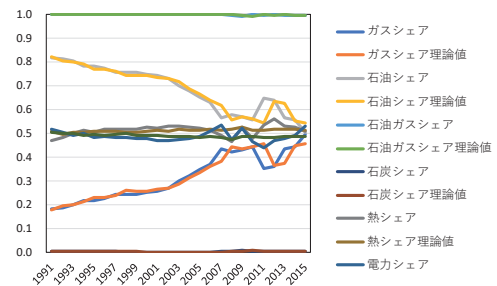
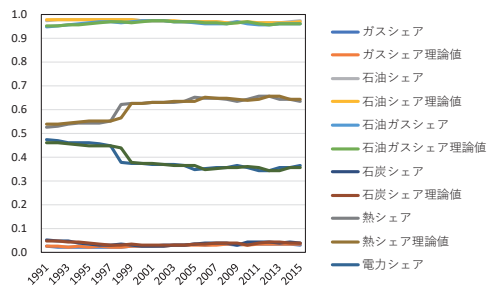


図 4 部門別エネルギー種類別シェア 実績値と推定値

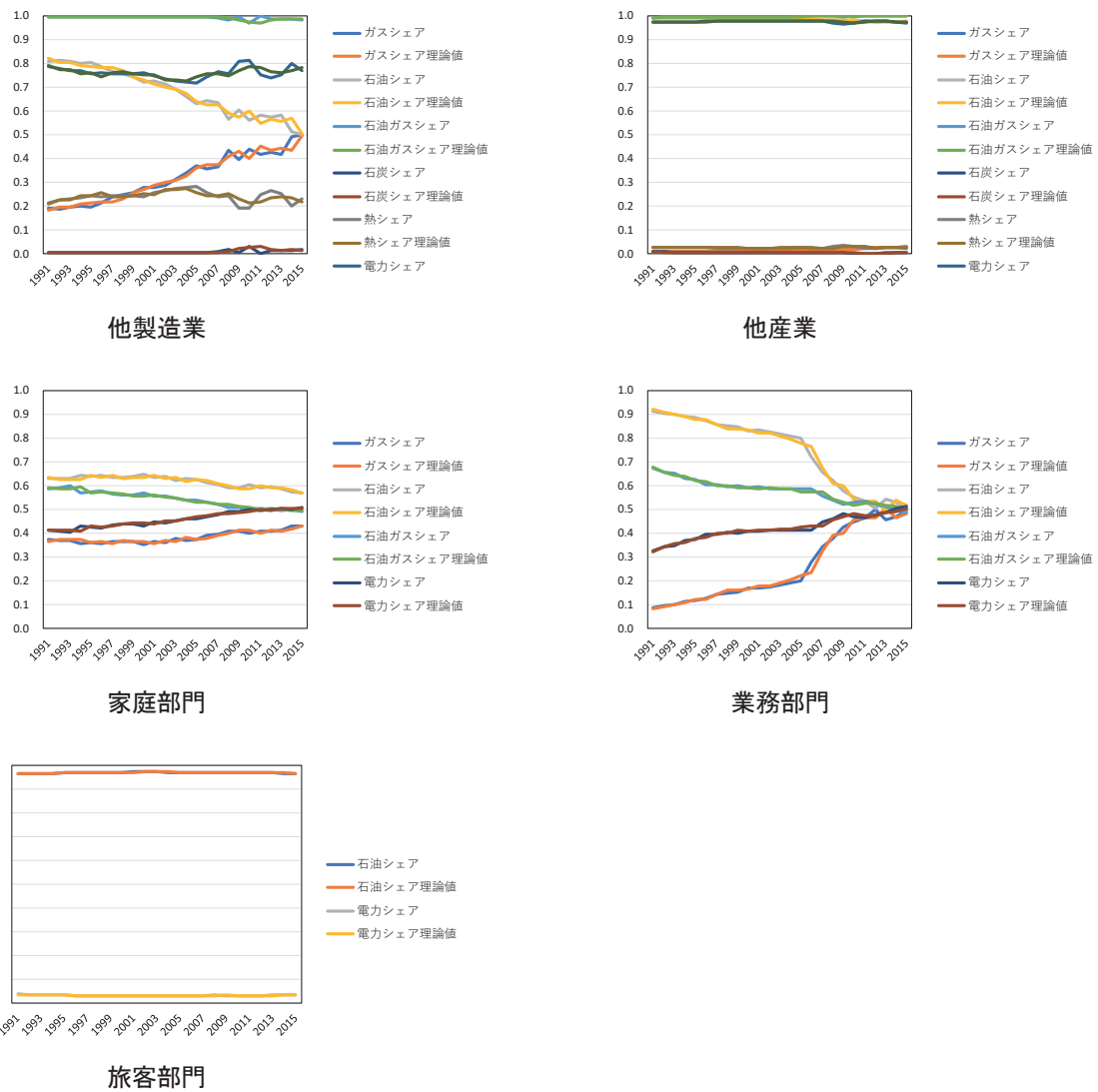


図 4 部門別エネルギー種類別シェア 実績値と推定値 (続き)

2.3 シミュレーションの例

このモデルは単純な構成であるため、各部門の生産額やエネルギー価格の将来シナリオを与えれば様々なシミュレーション結果を容易に得ることができる。一例として、「電力中央研究所.2030 年までのエネルギー需給展望の見直し (2015)」[23]に基づいて各産業の成長と化石燃料価格上昇シナリオに基づき、2030 年までのシミュレーションを実施した。この場合、表 2 のような 2 種類の設定を与えた。

図 5 には例としてエネルギー種類別需要の推移を示す。エネルギー価格の上昇率の高低は電力とガス需要に現れるが、石油需要はトレンドとして低下傾向になる。

表 2 試算のための業種別生産額年上昇率とエネルギー価格の年上昇率の設定

	2015-2030		2015-2030
化学	-0.70%	非鉄金属	0.53%
食品	-0.40%	窯業	-0.70%
機械	-0.90%	他製造	0.10%
繊維	-2.70%	他産業	1.00%
鉄鋼	0.60%	実質GDP	1.00%
紙パルプ	0.40%		

	低ケース	高ケース
石油価格	0.00%	3.80%
ガス価格	0.00%	3.10%
石炭価格	0.00%	4.10%
電力価格	0.00%	2.00%
電灯価格	0.00%	1.60%

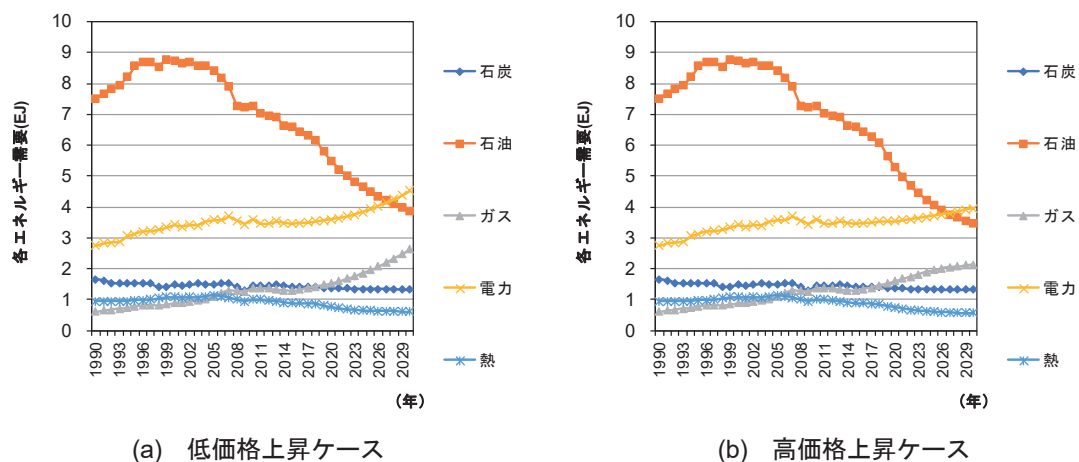


図 5 エネルギー需要の推移 1990-2015 は実績値 : 2016 以降はシミュレーション値

2.4 短期エネルギーシステムシミュレーションモデルの用途

ここで提示した短期エネルギーシステムシミュレーションモデルは、基本的な構成の例示であるため、この段階で直ちに何らかの提言を導くものではなく、これを基盤として電気自動車の普及や再生可能エネルギーの拡大の影響を見るためのツールの開発に過ぎない。しかし、上記のグラフが示すよう、このエネルギー需要やエネルギー種間の競合は過去の実績をよく追従しかつランダムウォークのない体系であることが確認されているため、新技術の導入や外乱に対する短期的な応答については、信頼性のある計算結果を導出する。また(4)～(17)の需要関数や表 1 のシェア関数の価格の係数が小さいことから、短期的な価格調整の余地は小さく、カーボンプライシングの効果が現れるにはある程度時間を要することが示唆されている。また、鉄鋼業のエネルギー需要関数で有意な結果が得られなかったことは、この産業が過去ほぼ一定の構造で生産を続けて

きたことを示しており、低炭素化戦略としての電炉への移行は過去の延長ではなく構造的な変化を外生的に与える必要がある。

3. 動学的多部門エネルギー経済モデルの開発

3.1 動学的多部門エネルギー経済モデルの定式化

本提案モデルの定式化は、既発表の文献[1]と同様であるので、ここでは基本式のみ述べることにする。以下では、この定式化のフレームと計算例を示す。説明のため、2財＋一次エネルギー1種、二次エネルギー1種とする。

ここでは、一次エネルギーは全て二次エネルギーに変換されたのちに各産業や消費に分配されるものとしている。

下記の金銭取引表（表3）では、 a_{ij} は投入係数を、 Q は産出額を表す。 S と E は各々一次エネルギーと二次エネルギー需要を示す。下表では、説明のため二次エネルギーは全て同一価格 P_e で各部門に販売されるものとしているが、実際の統計表に合わせる際は「部門別取引価格係数」を乗じ調整する。 m は純輸出額、 I は投資額、 C は消費額をあらわす。

VADは付加価値額である。一次エネルギー生産付加価値額 VA_Epre と VA_E はエネルギー産業の資本費であり、ここに設備固定費合計値が入る。付加価値部門では資本と労働の価格をそれぞれ P_k 、 P_L と記す。投資列は、各産業への投資マトリクスに拡大することができる。

表3 2非エネルギー部門＋2エネルギー部門の取引表の例

(1) 金銭取引表（実質価格）

			中間需要				最終需要			生産額
			非エネルギー産業部門		エネルギー産業部門		貿易	投資	消費	
			1	2	一次	二次	m	I	C	
中間投入	非エネルギー産業部門	1	$X_{11} = Q_1 \cdot a_{11}$	$X_{12} = Q_2 \cdot a_{12}$	X_{1p}	X_{1e}	m_1	I_1	C_1	Q_1
		2	$X_{21} = Q_1 \cdot a_{21}$	$X_{22} = Q_2 \cdot a_{22}$	X_{2p}	X_{2e}	m_2	I_2	C_2	Q_2
	エネルギー産業部門	一次	O	O	O	X_{pe}	m_p	O	O	$Q_p = P_p \cdot S$
		二次	$X_{e1} = P_e \cdot E_1$	$X_{e2} = P_e \cdot E_2$	X_{ep}	X_{ee}	m_e	O	$C_e = P_e \cdot E_c$	$Q_e = P_e \cdot E$
付加価値		K	$P_k \cdot K_1$	$P_k \cdot K_2$	VA_Epre	VA_E				
		L	$P_L \cdot L_1$	$P_L \cdot L_2$						
生産額		Q	Q_1	Q_2	$Q_p = P_p \cdot S$	$Q_e = P_e \cdot E$				

(2) エネルギーフロー表（EJ）

	非エネルギー産業部門		一次エネルギー	二次エネルギー	貿易	投資	消費	生産量
一次エネルギー	O	O	O	E_{pe}	E_{mp}	O	O	TE_p
二次エネルギー	E_1	E_2	E_{ep}	E_{ee}	E_{me}	O	E_c	TE_e

この対応関係に対しては、バランス式が以下のように導ける。ここでは説明の簡易化のため貿易は「純輸出」に集約している。

$$Q_i = \sum_j a_{ij} Q_j + m_i + I_i + C_i \quad (j=1,2) \quad \text{行方向バランス式} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Q_j &= \sum_i a_{ij} Q_i + P_e E_j + P_K K_j + P_L L_j \\ &= \sum_i a_{ij} Q_i + P_e E_j + VAD_j \end{aligned} \quad \text{列方向バランス式} \quad (20)$$

$$Q_j - \sum_i a_{ij} Q_i = f_j(E_j, K_j, L_j) \quad j \text{ 部門生産関数} \quad (21)$$

となる。 f_j は j 部門の付加価値生産とエネルギーコストの和である。さらに

$$\alpha_j = 1 - \sum_i a_{ij} \quad (22)$$

を用いることで、供給に関する財バランス

$$\frac{1}{\alpha_i} f_i(E_i, K_i, L_i) = \sum_j a_{ij} \frac{1}{\alpha_j} f_j(E_j, K_j, L_j) + m_i + I_i + C_i \quad (23)$$

を得る。なお、取引表には資本と労働への支払い額は示されているが、投入量は別統計が必要であり、価格は明示されないことに注意が必要である。

二次エネルギー産業の場合、物量ベースであるので基本はバランス式であり、

$$E = \sum_j E_j + E_{ep} + E_{ec} + E_C \quad (24)$$

となる。投入・産出バランスは、この簡易化された体系では

$$P_e (E - E_{ep} - E_{ec}) = VE \quad (25)$$

となる。

エネルギー部門では、発電部門のように複数の技術の中から最適な組み合わせを追求する定式化が自然である。例えば技術 k の供給平均費用が π_k であるとする、供給量合計 $E = \sum_k E_k$ の下では、エネルギーの量バランス式と費用配分式が

$$\sum_j X_{ej} + X_{ep} + X_{ec} + C_e = S a_e(E) = \sum_k \pi_k E_k, \quad X_{ej} = P_e E_j, \quad X_{ep} = P_e E_{ep} \quad (26)$$

のように得られる。

以上の体系は、実質取引に関するバランス式であり、財間の相対的価格変化を明示する際は、非エネルギー財も実質フローバランスと金銭フローバランスを分ける必要がある。これには(1)、(2)式の取引表に、各財の相対価格指数 P_i を乗じた金銭取引額バランス式をさらに加える必要が

ある。これは

$$p_i Q_i = \sum_j a_{ij} p_j Q_j + p_i (\eta_i x_i - \mu_i m_i + I_i + C_i) \quad (j=1,2) \quad \text{行方向バランス式} \quad (27)$$

$$p_j Q_j = \sum_i a_{ij} p_i Q_i + P_e E_j + p_j \text{VAD}_j \quad \text{列方向バランス式} \quad (28)$$

で表される。(27)式の η および μ は輸出入で価格が異なる場合を反映した。

以上はある時点における静学的なバランス式である。これに対し、投資計画、温暖化対策やエネルギー設備計画などは長期的な動学的計画が不可欠である。

本モデルでは、部門 j の生産構造を、既存設備の除却による縮小と新規投資による設備の拡大の 2 項目により表わす。新規投資については資本設備とエネルギー、労働投入の代替性が考慮されるが、設置後は代替不可能というパティ=クレイ型生産モデルを仮定している。この基本式は f を 4 要素生産関数として以下のように示される。

$$YN_{jt} = f_j(IS_{jt}, LN_{jt}, EN_{jt}, NEN_{jt}) \quad (29)$$

$$Y_{jt} = (1-d)Y_{jt-1} + YN_{jt} \quad (30)$$

$$L_{jt} = (1-d)L_{jt-1} + LN_{jt} \quad (31)$$

$$K_{jt} = (1-d)K_{jt-1} + IS_{jt} \quad (32)$$

$$NE_{jt} = (1-d)NE_{jt-1} + NEN_{jt} \quad (33)$$

$$EE_{jt} = (1-d)EE_{jt-1} + EEN_{jt} \quad (34)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \sum_j IS_{jt} &= I_t, & \sum_j L_{jt} &= L_t, & \sum_j Y_{jt} &= Y_t \\ \sum_j E_{jt} &= E_t, & \sum_j NE_{jt} &= NE_t \end{aligned} \quad (35)$$

YN_{jt} : 新規投資産出額(エネルギー費用を含む)

Y_{jt} : 総産出額(エネルギー費用を含む)

K_{jt} : 資本ストック

L_{jt} : 総労働投入量

LN_{jt} : 新規投資向け労働投入量

EE_{jt} : 総電力投入量

NE_{jt} : 総非電力投入量

EEN_{jt} : 新規設備投資向け電力投入量

NEN_{jt} : 新規設備投資向け非電力投入量

IS_{jt} : j 部門投資額

である。このように変数名に N が追加されると新規投資分への投入を表す。生産額が与えられれば中間投入が決まり、産業連関モデルの枠組みに適用できる。

k 種発電設備 G_{kt} についても同様に

$$G_{kt} = (1-d) G_{kt-1} + GN_{kt} \quad (36)$$

にしたがって設備拡大がなされる。

国際市場価格が変化した場合の国内市場への影響を求めるため、ここでは以下のパーシェ型価格指数を計算することとした。

$$\pi_{j,t} = \frac{\sum_i a_{ij} p_{i,t} Q_i + P_{e,t} E_j + p_{j,t} VAD_j}{\sum_i a_{ij} p_{i,0} Q_i + P_{e,0} E_j + p_{j,0} VAD_j} \quad (37)$$

なお、上記の定式化は産業活動とエネルギー技術の動学的関係に焦点を当てたため、政府部門の税收や家計部門の貯蓄との関係などマクロ経済の基本的な関係式は省かれており、通常のマクロ経済モデルに比べ大幅な簡略化がなされている。

上記に加え、エネルギーブロックでは一次エネルギーから二次エネルギーへの転換効率入出力フローや炭素回収隔離の技術オプションも含まれる。これらは必要に応じ拡張することができる。

3.2 動学的多部門エネルギー経済モデルのシミュレーション例

ここでは、本モデルの動作検証を目的としたシミュレーションの例を示す。対象は、日本のみとし、表 4 のように非エネルギー産業 12 部門、一次エネルギー 6 部門、二次エネルギー 3 部門、最終需要 3 部門から構成される。

シミュレーションは、1997 年を初期値とし、経済活動としての産業連関データは GTAP-V.5 に基づいて与え、エネルギーフローや変換効率は IAE エネルギーバランス表に基づいて与えた。この両者により、1997 年初期値のエネルギー価格やエネルギー変換効率などは与えられることになる。ここでは、5 年を 1 期として計算を行い、12 期までのシミュレーション結果を示す。今回のシミュレーションでは、簡単のため化石燃料輸入価格は一律に年率 1.7%、それ以外の一次エネルギー価格は 1997 年初期値から一定としている。

なお本モデルではいくつか設定すべきパラメータがあるが、中で最も重要なものは、各産業部門の自律的な生産性上昇と、エネルギー利用効率の上昇の設定である。ここでは、動作検証のため年率 1% の上昇を仮の値に設定しているが、これらは基本的なベースライン設定にあわせて調整すべきであることは言うまでもない。

表 4 部門分割と略号の一覧表

産業部門	農業	(AGR)	輸送機械業	(TRN)	石油	(OIL)	二次エネルギー	電力	(ELC)
	建設業	(CNS)	一般機械業	(OME)	石炭	(COAL)		流体燃料	(P_C)
	化学製品業	(CPG)	他製造業	(OMF)	天然ガス	(GAS)		その他	(THM)
	食品業	(FPR)	事業サービス業	(BSR)	原子力	(NUC)	最終需要	貿易	(TRD)
	繊維製品業	(TWL)	公共サービス業	(SSR)	バイオ	(BIO)		投資	(INV)
	鉄鋼業	(INS)	輸送業	(T_T)	他再エネ	(RNW)		消費	(CSM)

発電技術として、化石燃料およびバイオマスの火力発電に対しては従来型 (CNV)、ガスコンバインド発電 (GCC)、次世代型 (ADV) の 3 レベルの発電技術を設定するとともに、後者 2 技術に対してはそれぞれ CCS あり (GCCS および ADVS) を想定した。CCS によるエネルギー効率の低下やコスト上昇は文献[9]に基づいて設定している。ただし、今回は 2050 年が目標年のため、CCS の導入はそれまではなされないものとしている。今後、2050 年以降のさらなる低炭素化からゼロ排出化を考える際は CCS の導入ケースも含めることとする。

以下、本モデルの性能を示す目的として、いくつかの予備的シミュレーション結果を示す。

3.3 炭素排出緩和政策なし (BAU) ケースにおける結果

まず、BAU ケースにおける部門別生産額の推移、一次エネルギー供給、電源構成の変化を図 6～8 に示す。このようにエネルギー構成と部門別生産額の推移を整合的に同時決定可能な点は本モデルの大きな特長である。

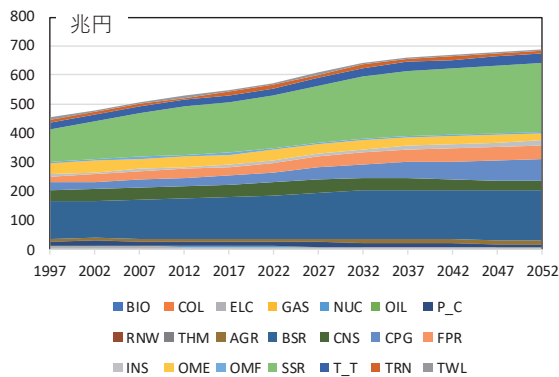


図 6 BAU ケースにおける部門別付加価値生産額の推移 (1997 年価格兆円)

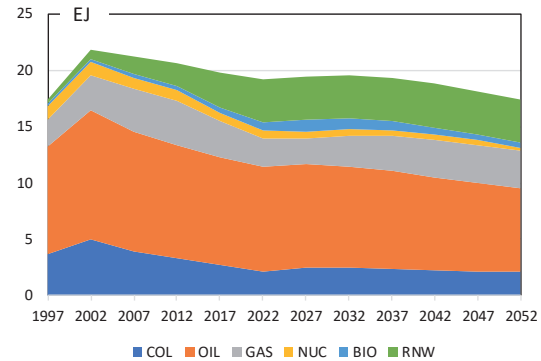


図 7 BAU ケースにおける一次エネルギー供給の推移 (EJ)

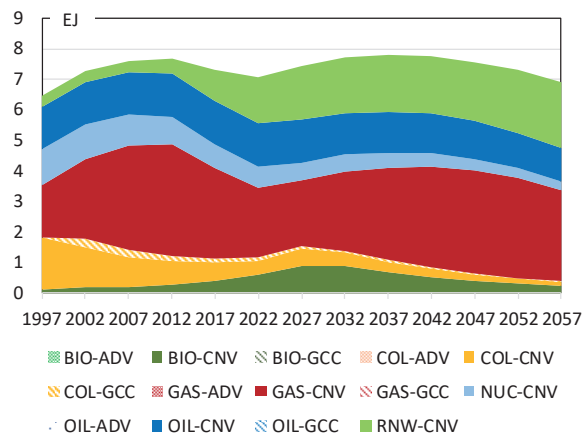


図 8 BAU ケースにおける電源構成の推移 (EJ)

3.4 2030 年 50%、2050 年 80%削減ケースにおける結果

次いで、日本が目標として掲げた 2050 年 80%削減制約ケースにおける結果と BAU との比較を例として示す。

図 9 にこの 2 ケースの CO₂ 排出量の推移を示す。

本設定では、図 9 のように BAU においても CO₂ 排出は次第に低下する結果となる。

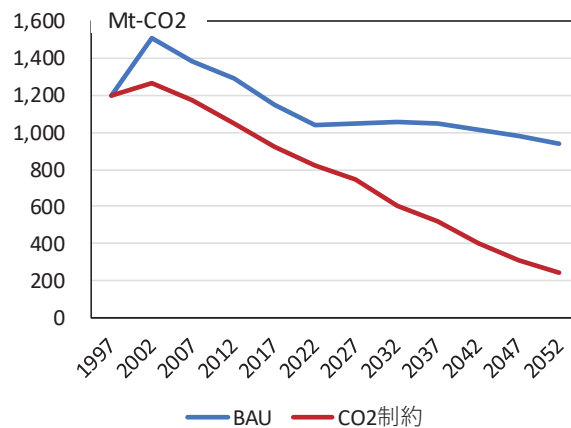


図 9 BAU と CO₂ 排出削減制約ケースにおける CO₂ 排出量の推移 (Mt-CO₂)

図 10、図 11 には一次エネルギー供給の推移と電源構成の推移を示す。再生可能エネルギーのシェアの増加と化石燃料消費の低下が明らかである。電源構成については再生可能エネルギーとバイオマスの導入について大きな変化が見られる。第一に、BAU でも再生可能エネルギーの導入が拡大し、2030 年には全体の 23.6%、2050 年では 27.1%のシェアを占める。第二に、80%削減ケースでは、再生可能エネルギーは 2030 年で 32.2%、2050 年では 37.6%となる。バイオマス発電もこのケースでは 2050 年で 35.2%に達しており、2050 年では合わせると全体の 7 割を超えている。

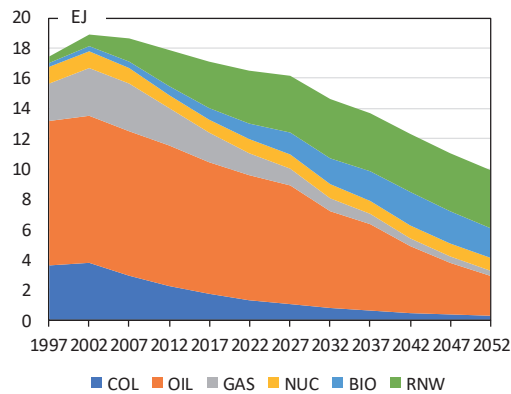


図 10 CO₂ 排出制約ケースにおける
一次エネルギー供給の推移 (EJ)

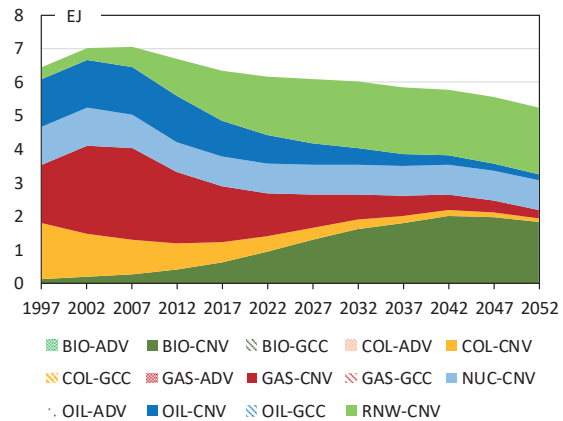


図 11 CO₂ 排出制約ケースにおける
電源構成の推移 (EJ)

次いで、各産業部門の BAU ケースに対する生産額の低下率を図 12 に示す。

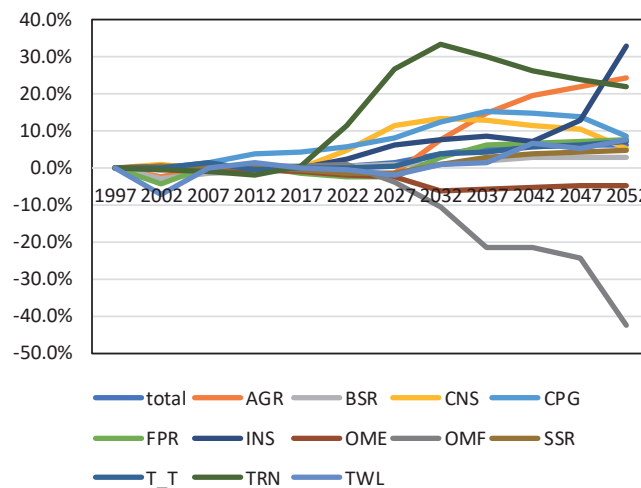


図 12 CO₂ 排出制約ケースにおける BAU からの産業部門別生産額の低下割合

このように、輸送機械製造業と鉄鋼業では BAU からの低下が目立つ半面、一般機械製造業およびその他製造業ではむしろ生産額が増加している。また、図 13 より鉄鋼業、輸送機械製造業においては、炭素排出制約の導入により製品輸出額が低下し、一般機械製造業では増加することが見て取れる。現段階ではデータも最新のものではなく試算の段階を出るものではないが、このような部門別の貿易への影響が評価できる点は、本システムの特徴といえるものである。

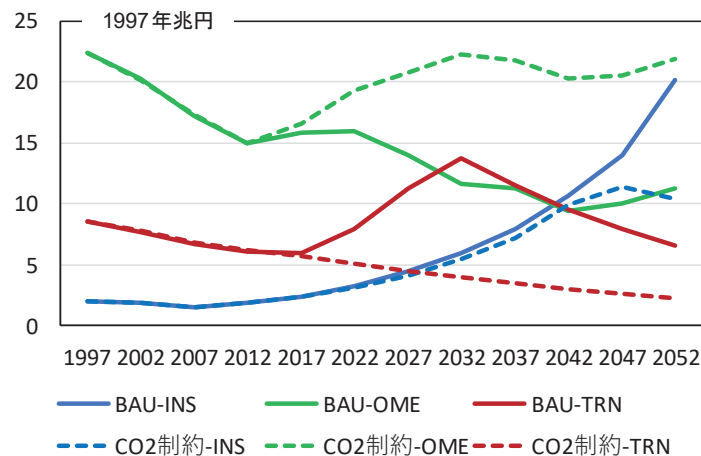


図 13 BAU ケースと CO₂ 排出制約ケースにおける鉄鋼業（INS）、輸送機械製造業（TRN）
および一般機械製造業（OME）の輸出額の変化

4. 結論と今後の展望

ここでは、エネルギー経済モデルが過去どのように開発されてきたか、どのような情報を提供可能かを示したうえで、ツールとしての短期的なシミュレーションモデルの開発と、エネルギーフローと多部門経済モデルを統合した動学的多部門エネルギー経済最適化モデルの開発の 2 モデルを提示した。前者では、単純な構成ながら過去の推移をよく追従するモデル式を推定でき、過去の延長からは短期的にどのような姿が得られるかを信頼性のある方法で示し得た。

後者では、新技術や制度の導入がエネルギー構成や産業部門別にどのように影響するかの経路を導くことで、2050 年低炭素社会の実現に向け、①技術や制度の導入の効果の評価と影響の動学的経路、②現状の緩和策拡大に対する技術ボトルネックの抽出と開発すべき技術課題、③効果の不確実性の幅等を定量的に導くことを目的としたシステム開発を目指すものである。

今回は、炭素排出制約によるエネルギーシステムの変化、および産業の部門別影響を統合的に評価するためのモデル構築の枠組みと予備的な試算を示した。現段階では、既存の THERESIA モデルからの日本ブロックの抽出を行い、シミュレーション期間の延長の可能性や計算時間の確認を行い、ツールとしての実用性の検証を行った段階にとどまる。しかし、12 産業部門 9 エネルギー種、12 期シミュレーションを 1 時間以内に計算可能なことを確認できた。今後、日本の経済統計や技術データベースを用い、部門数や製品の詳細化などの拡張可能性を確認することができた。

しかし、用いたデータは 1997 年時点のものと古く、また産業影響を見るうえで特に重要な投資係数行列やエネルギー技術のコストや効率などの将来のキーとなるパラメータは政策評価のためには最新のものに差し替える必要がある。ことに、1 国モデルに限定したことで計算の柔軟性を得た反面、海外の動向については妥当性のあるシナリオの設定が必要であるが、これらは今後の課題に残されている。

今後の具体的な拡張として、今後最新の統計に基づいた部門数や技術の詳細化、データの更新を行うことや、より具体的には多部門モデルの特徴を活かし自動車の電動化や軽量化による製造原材料の変化、製品の用途を考慮した高炉と電炉の分担、情報化の進展等の産業相互影響の定量評価を目指すことがあげられる。特に、1.2 に述べたような社会の低炭素化における自動車の軽量と電動化、製造原材料の変化、鉄鋼業の生産プロセス、発電技術の相互関連の解析と技術ボトルネックの抽出は第一の課題と考えられる。

5. 政策立案のための提案

本提案は、新技術開発の産業部門別影響の動学的経路やボトルネック課題の抽出のために、これまで例のほとんどないエネルギーフローモデルと多部門経済モデルを統合したモデルの構築を目指すものである。2050 年低炭素社会の実現のためのシナリオ策定を行ううえで、様々な技術開発課題の社会経済への直接および間接的影響を、一貫性のある定量的方法で評価するシステムの構築は、意義あるものと思われる。今後、特に低炭素社会の実現のうえでボトルネックとなる技術開発課題の探索は政策立案に資するものと考えられる。

現段階では、本システムはいずれも基本的構成の動作検証の段階にとどまるものの、プログラム本体は一応の完成を見ており、今後、自動車の電動化の間接的な影響や鉄鋼業の変化の間接的影響評価などを、このようなモデルを評価のプラットフォームとして示すことで低炭素化に対する技術ボトルネックの明示化などが可能になると期待できる。

参考文献

- [1] Shunsuke Mori, Yoshiaki Wada, Kenshiro Imai and Masashi Ohkura, “THERESIA: Toward Holistic Economy, Resource and Energy Structure for the Integrated Assessment of Global Warming Mitigation Options”, Journal of Applied Input-Output Analysis, Vol.16, Dec. 2010, PP.21-40, Sep. 2011.
- [2] Shunsuke Mori, “A new approach of carbon emission allocation among stakeholders: an expansion of Multiregional and Multisectoral Dynamic Energy-Economic Model THERESIA”, Journal of Economic Structures, Vol.5, No.5, pp.1/22, 2016.
- [3] 中央環境審議会, 長期低炭素ビジョン
http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004000/pdf/046_s01_00.pdf (引用日: 2019 年 1 月 23 日) .
- [4] 総合科学技術・イノベーション会議, エネルギー・環境イノベーション戦略
<https://www8.cao.go.jp/cstp/nesti/honbun.pdf> (引用日: 2019 年 1 月 23 日) .
- [5] パリ協定長期成長戦略懇談会, パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会第 1 回資料, パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会の開催について, <https://www.env.go.jp/earth/earth/ondanka/mat01.pdf> (引用日: 2019 年 1 月 23 日) .
- [6] エネルギー基本計画 (平成 30 年 7 月 3 日閣議決定)
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf (引用日: 2018 年 11 月 15 日) .
- [7] 小宮山宏, 山田興一, “新ビジョン 2050 地球温暖化、少子高齢化は克服できる“, 日経 BP, 2016.
- [8] William D. Nordhaus, “Managing the Global Commons”, MIT Press, 1994 (邦訳: 地球温暖化の経済学、室田泰弘, 山下ゆかり, 高瀬香絵訳, 東洋経済新報社, 2002).
- [9] 電気学会複合エネルギー需給システム技術調査専門委員会編, “エネルギー分野におけるシステムモデル分析の現状と将来“, 電気学会技術報告 1092, 2007.
- [10] Hal Turton, and Leonardo Barreto, “The extended energy-systems ERIS model: An overview”, IIASA Interim Report IR-04-010, 2004.
- [11] Jae Edmonds, and John Reilly, “A Long-term global energy economic model of carbon dioxide release from fossil use”, Energy Economics, April, 1983.
- [12] Alan S. Manne, and Richard G. Richels, “Buying Greenhouse Insurance”, The MIT Press, 1992.
- [13] Intergovernmental Panel on Climate Change, “Emissions Scenarios,” (Nebojsa Nakicenovic ed.), Cambridge University Press, July, 2000.

- [14] Atsushi Kurosawa, “Multigas Mitigation: An Economic Analysis Using GRAPE Model”, The Energy Journal, 27, Special Issue 3, 2006.
- [15] Shunsuke Mori, “The Development of Greenhouse Gas Emissions Scenarios Using an Extension of the MARIA Model for the Assessment of Resource and Energy Technologies”, Technological Forecasting and Social Change, Vol. 63, pp. 289-311, 2000.
- [16] Shinichiro Fujimori, Toshihiko Masui, and Yuzuru Matsuoka, AIM/CGE [basic] manual, Discussion paper series, 2012-01, Center for Social and Environmental Systems Research, N.I.E.S, 2012.
- [17] EPPA, <https://globalchange.mit.edu/node/31> (Retrieved on July, 4, 2017) .
- [18] FEEM, <http://www.witchmodel.org/pag/publications-2.html> (Retrieved on September 9, 2011) .
- [19] IPCC-AR5-WG3, IPCC Fifth Assessment Report, WG-3 Full report, Annex II, Table A.II.14, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf, 2014, (Retrieved 4, July, 2017).
- [20] 内閣官房, 我が国の中期温暖化対策評価.
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/tikyuu/kaisai/dai07kankyo/index.pdf> (Retrieved 23, Nov., 2018) .
- [21] 環境省環境研究総合推進費, 戦略的研究開発プロジェクト.<https://www.nies.go.jp/ica-rus/index.html> (引用日: 2018 年 11 月 8 日) .
- [22] 資源エネルギー庁, 総合エネルギー統計, http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/
(引用日: 2018 年 11 月 8 日) .
- [23] 星野優子, 浜瀧純大, 永田豊, “2015 年版長期エネルギー需給見通しの検証”, 電力中央研究所研究報告書 (電力中央研究所報告) , Y15012,
<https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/Y15012.html> (引用日: 2019 年 3 月 8 日) .

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

社会システム編

低炭素社会に向けた技術革新の影響評価のための
動学エネルギー経済モデルの開発

平成 31 年 3 月

Developments of Dynamic Energy-Economics Model towards
Low Carbon Society of Japan

Strategy for Social System,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2019.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 研究統括 森 俊介 (Shunsuke MORI)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4 階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2019 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
