

論文の内容の要旨

論文題目 燃料転換の障壁を考慮したエネルギーモデルの構築と これを用いた温室効果ガス排出制約下のエネルギー構成の推計 氏 名 白木 裕斗

1. 序論

将来の気候変動の緩和を目的として、中長期の温室効果ガスの排出削減目標に関する議論が進められている。中長期の排出削減目標の策定にあたっては、将来の削減ポテンシャルや対策コストを分析するため、エネルギーモデルと呼ばれるシミュレーションモデルが活用されてきた。エネルギーモデルを用いたこれまでの分析によって、中長期の温室効果ガス排出削減に効果的な施策と位置づけられているものは、①高効率機器の導入、②二酸化炭素回収貯留、③燃料転換の3つに分類できる。中でも燃料転換の実施にあたっては、経済的な利点が明確でない、既存の燃料供給システムの大転換が必要であるなど、エネルギーの供給から需要までを含む広範囲にその実施を妨げる要因（障壁）が存在しているため、障壁の構造の整理と定量的な分析が不可欠となる。他方、既往のエネルギーモデルにおける燃料転換の障壁の扱いをレビューした結果、いくつかの燃料転換の障壁を適切にモデル化できていないという課題が明らかとなった。特に、①採掘部門がモデル化されておらず転換部門と最終消費部門のみで最適化が行われていること、②転換部門における再生可能エネルギー（RE）の導入に伴う出力変動対策など技術的な障壁のパラメータの根拠が示されていないこと、③最終消費部門の将来の技術の普及量を外生的に制約しているがパラメータの根拠が示されていないことの三点が大きな課題と考えられる。本研究では、これらの解決を目的として、採掘部門、転換部門、最終消費部門における燃料転換の障壁を考慮したエネルギーモデルの開発を行う。これにより、エネルギーモデルの説明力、透明性を向上することを目指す。さらに、説明力、透明性を高めたモデルを用いて、将来の温室効果ガス排出目標を達成可能な排出経路およびエネルギー構成を提示する。

2. 動学最適型エネルギーモデルの構築

2章では既往モデルと同様の燃料転換の障壁のモデル化手法を採用した世界エネルギーモデルを構築し、その推計結果から既往の手法が抱える課題を再整理した。構築したモデルは、与えられたサービス需要制約やCO₂制約の下での技術の導入量、CO₂排出経路を最適化計算により推計する異時点間動学最適化型ボトムアップモデルである。本研究では、「2050年の世界全体のCO₂排出量を2005年比で半減にすること」をCO₂制約として、エネルギーシステムに関わる費用が最小となる将来のCO₂排出経路やエネルギー構成を推計した。推計の結果、解析最終期に急激な排出削減を行う経路が最適解とされた。しかし、序論で示した三点の課題が解決されていないため、モデルの結果の妥当性を確認できなかった。そこで、3章から5章では、上述の三点の課題の解決をめざし、採掘部門、転換部門、最終消費部門における燃料転換の障壁のモデル化手法の改善を行う。

3.採掘部門における燃料転換の障壁のモデル化

3章では、“採掘部門がモデル化されておらず転換部門と最終消費部門のみで最適化が行われている”という課題に着目し、この解決を目指した。まず、採掘部門の資源供給設備の容量および寿命を明示的にモデル化した「エネルギー資源モデル」開発し、採掘部門における燃料転換の障壁のうち、投資回収計画などの経済的障壁を明示的にモデル化した。開発したモデルを用いた分析により、エネルギー構成の急激な転換が採掘部門に与える影響を、エネルギー価格のスパイクという形で定量的に表現できることを確認した（図1）。次に、開発したエネルギー資源モデルを従来型のエネルギーモデルと統合させることで、採掘部門も含めたエネルギーシステム全体での最適経路の導出を可能とした。従来のエネルギーモデルでは、急速な燃料転換による採掘産業への影響を十分に考慮していないため、化石燃料産業への影響の懸念に対して回答することが難しかった。本研究では、採掘部門のモデル化により、採掘部門への影響も含めた費用最小のCO₂排出経路、および、採掘産業への影響を示せた。

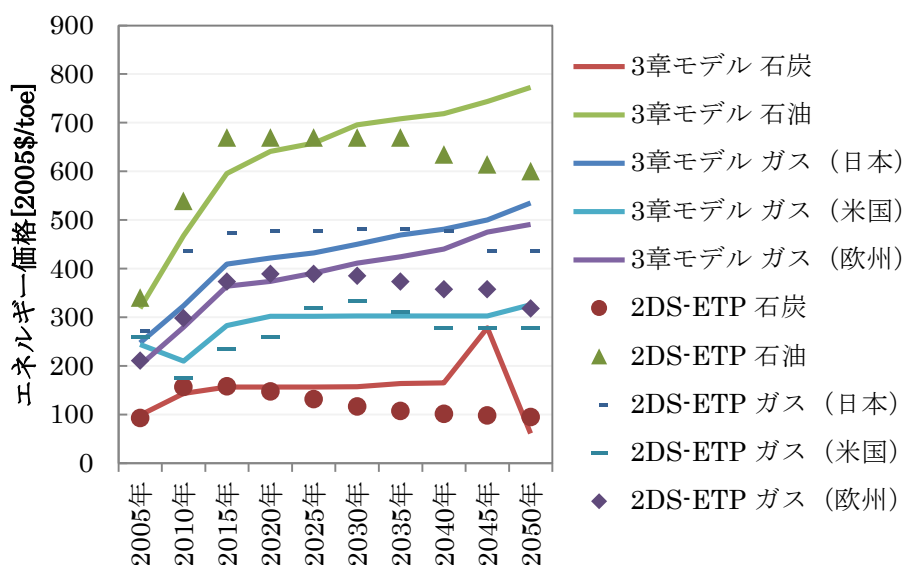


図1 エネルギー構成が2040年に急激に変化するシナリオにおけるエネルギー価格の推計結果

4.転換部門における燃料転換の障壁のモデル化

4章では、“転換部門におけるREの導入に伴う出力変動対策など技術的な障壁のパラメータの根拠が示されていない”という課題に着目し、その解決を目指した。まず、電力部門に焦点を当てた詳細なモデルを、REの変動性を考慮可能な形式に拡張し、変動性再生可能エネルギー発電（VRE）の導入段階別の出力変動対策の実施量を推計した。モデルの結果を回帰分析することで、導入段階別VRE別の蓄電池必要量、出力抑制・解列による発電量の減少量が明らかとなった（表1）。推定したパラメータを世界エネルギーモデルに適用し、将来のエネルギー構成への影響を分析した結果、既往のモデルによる推計値と比較して、蓄電池なしのVREの発電量が減少し、蓄電池併設型のVREの発電量を多く見積もった。これに伴い、解析期間に導入される蓄電池容量が増加した。以上から、既往のモデルで用いられていたパラメータは蓄電池なしの風力の系統接続率の上限を過大に設定しており、将来の蓄電池の導入量を過小に見積もっていた可能性が明らかとなった。本研究では詳細なモデルにより推計したパラメータを用いることで、モデルの透明性を高められたとともに、シナリオの蓋然性の評価を可能にした。

5.最終消費部門における燃料転換の障壁のモデル化

5章では、“最終消費部門の将来の技術の普及量を外生的に制約しているがパラメータの根拠が示されていない”という既往モデルの課題に着目し、その解決を目指した。まず、燃料供給インフラの整

表 1 出力変動対策実施量の推計結果 (SBST: 短周期変動用蓄電池、SBLT: 長周期変動用蓄電池)

風力発電				太陽光発電			
段階 (風力比率 p)	SBST (風力 容量比)	SBLT (風力 容量比)	抑制・解列 (年間発電 量比)	段階 (太陽光 比率 q)	SBST (太陽光 容量比)	SBLT (太陽光 容量比)	抑制・解列 (年間発電 量比)
段階① $p < 4.7\%$	—	—	—	段階①② $q < 8.7\%$	—	—	—
段階② $4.7\% \leq p < 10.4\%$	○ (32%)	—	○ (3%)		—	—	—
段階③ $10.4\% \leq p < 14.7\%$	○ (57%)	○ (14%)	○ (7%)	段階③ $8.7\% \leq q < 21.6\%$	—	○ (29%)	—
段階④ $14.7\% \leq p < 19.7\%$	○ (92%)	○ (33%)	○ (5%)	段階④⑤ $q \geq 21.6\%$	—	○ (29%)	—
段階⑤ $p \geq 19.7\%$	○ (513%)	○ (-113%)	○ (3%)				

備速度などの異時点間の障壁をモデル化するため、要因分解手法により動学的な制約式を導出した。その結果、最終消費部門における燃料転換は新規需要における各燃料のシェア（新規需要の係数）およびその変化率（買替需要の係数）により表されることが分かった。次に、日本の家庭部門、業務部門、非素材系産業部門の過去のデータを用いて、設定した制約式に適用可能なパラメータを推計することで（図 2）、検証可能な手法による最終消費部門の燃料転換のパラメータの設定を実現した。さらに、導出した制約式と推計したパラメータを適用した世界エネルギーモデルを用いて将来のエネルギー構成を分析した結果、最終消費部門の燃料転換の障壁を外生的に与えた既往モデルの結果と比較し、民生部門の電力需要量が低下し、ガスや石油の需要量が増加する結果を得た。既往モデルでは外生的なパラメータにより最終消費部門の燃料転換を制約していたが、本研究で設定した制約式およびパラメータの推計手法を用いることで、最終消費部門の燃料転換を検証可能な手法でモデル化できた。

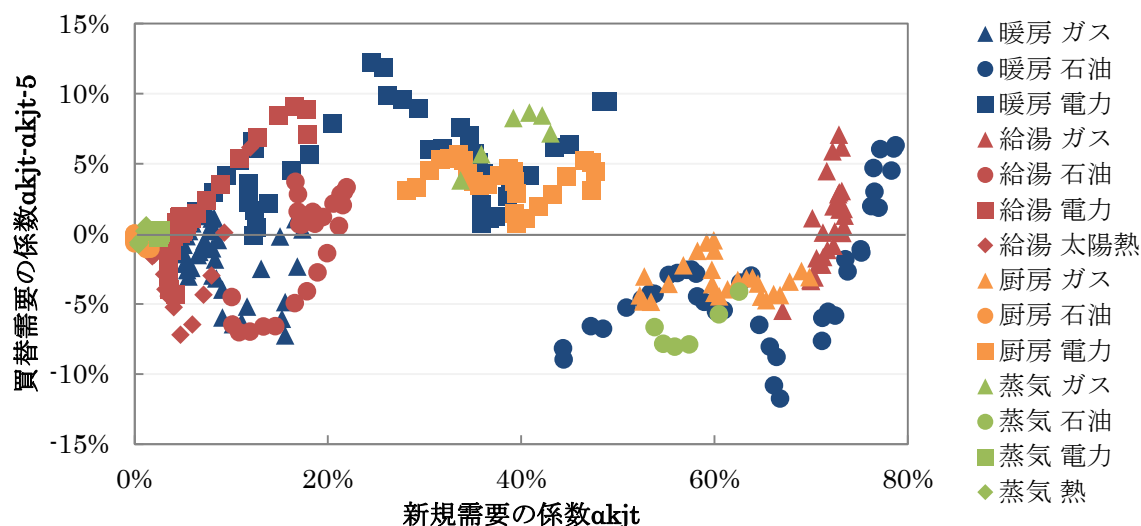


図 2 日本における最終消費部門の燃料転換の係数の推計結果

6. 燃料転換の障壁を考慮した温室効果ガス排出制約下のエネルギー構成の推計

6 章では、3 章から 5 章まででモデル化した各部門の障壁を適用した世界エネルギーモデルを用いて、燃料転換の障壁を考慮した将来の CO₂ 排出経路、エネルギー構成を推計した。その結果、長期目標の達成のみを目的とした場合、本研究で考慮したすべての燃料転換の障壁を適用した場合において

も、排出削減目標年近くで急激に CO₂ 排出削減を行う経路が費用最小経路となった（図 3）。累積排出量の削減を目指すような実効性のある排出削減には、中期目標の策定が必要となるといえる。また、4 章や 5 章の結果と同様、VRE の出力変動対策実施量の増加や最終消費部門における石油・ガス消費量の増加という結果を得た。これらの結果からは、すべての部門の燃料転換の障壁を考慮した場合においても、蓄電池など出力変動対策の技術革新への投資が必要不可欠であること、複数の部門にまたがる CO₂ 排出削減策の実施が不可欠であることが確認された。また、2 章から 5 章で構築したモデルと比較し、6 章モデルの CO₂ 排出経路は早期に排出量がピークアウトする結果を得た。これは、燃料転換の障壁を考慮した場合には、障壁により燃料転換の速度が制限されるため、目標年より早期から徐々に排出削減を行う必要があることを意味している。このようなエネルギーシステムの“慣性”をモデル化できた点は、本研究のモデル研究としての成果である。

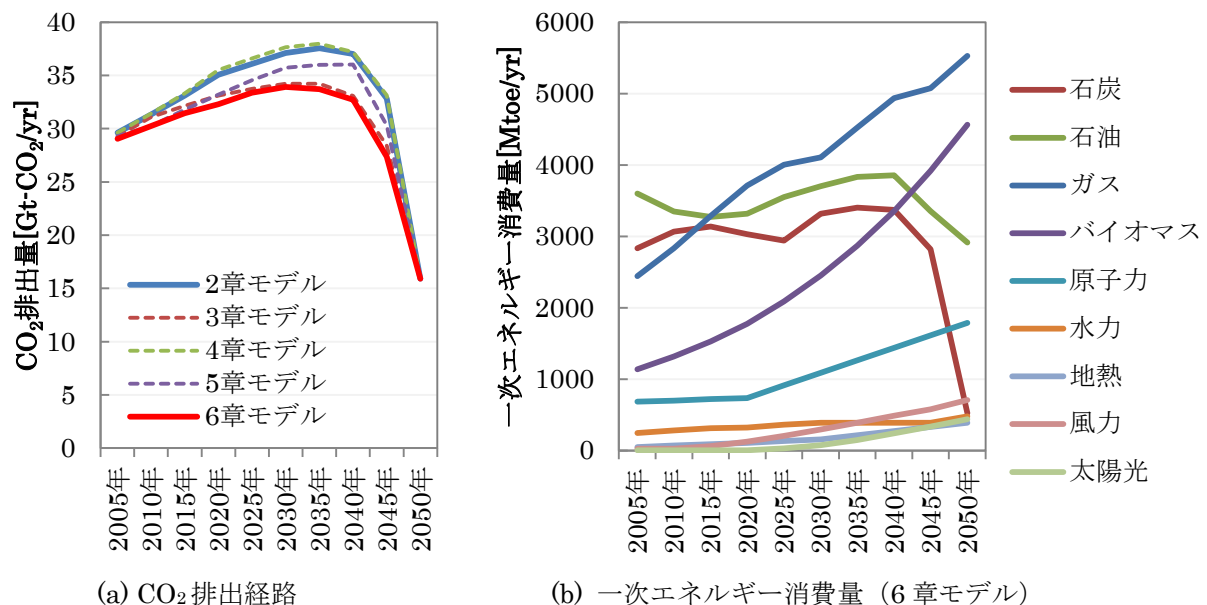


図 3 燃料転換の障壁を考慮したエネルギーモデルの推計結果

7. 結論

本研究では、既往エネルギーモデルにおける燃料転換のモデル化の課題の解決を目的として、採掘部門、転換部門、最終消費部門の燃料転換の障壁のモデル化、および、燃料転換の障壁を考慮したエネルギーモデルの開発を実施した。本研究のモデル研究としての主な成果を以下に示す。

- ・燃料転換が採掘設備に与える影響をエネルギー価格に反映可能なエネルギー資源モデルの構築
- ・採掘部門を含めたエネルギーシステム全体で費用最小となる CO₂ 排出経路の導出
- ・定量的モデルに基づく VRE 導入時の出力変動対策パラメータの推計方法の提示
- ・検証可能な手法による最終消費部門の燃料転換のパラメータの推計方法の提示

また、開発したモデルを用いて、将来の温室効果ガス排出目標を達成可能な排出経路およびエネルギー構成を推計した。本研究の政策研究としての主な成果を以下に示す。

- ・燃料転換の障壁を考慮しても、目標年近くでの急激な排出削減が費用最小となるため、長期目標のみでは累積排出量は減少しない。累積排出量を減らすためには、中期目標が不可欠となる。
- ・2050 年世界半減を達成する世界においては、天然ガス・バイオマスが一次エネルギー供給の中心となる。ガス・バイオマス供給インフラを段階的に導入することが必要といえる。
- ・2050 年世界半減を達成する世界においては、VRE が電力供給の 1/3 を担う。出力変動抑制のため VRE とほぼ同規模の蓄電池の導入が求められるため、蓄電池の技術革新が求められる。