

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

パリ協定気候目標と持続可能開発目標の同時実現に向けた  
気候政策の統合分析

(2-1702)

平成29年度～令和元年度

Integrated Analyses of Climate Policies for Simultaneous Realization  
of the Paris Agreement and the SDGs

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人 国立環境研究所

〈研究分担機関〉

みずほ情報総研 株式会社

国立大学法人 京都大学

〈研究協力機関〉

学校法人立命館 立命館大学

公益財団法人 地球環境戦略研究機関

International Research Center on Environment and Development (仏国)

Wuppertal Institute (独国)

Pacific Northwest National Laboratory (米国)

令和2年5月

## 目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・ P. 1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 パリ協定気候目標に整合的な世界の気候政策とその波及効果に関する分析	・・・・・・・・ P. 24
(国立環境研究開発法人国立環境研究所)	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 わが国におけるゼロ排出の実現に向けた社会シナリオの検討	・・・・・・・・ P. 56
(国立環境研究開発法人国立環境研究所)	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-3 わが国におけるゼロ排出の実現に向けたエネルギー技術対策の定量化	・・・・・・・・ P. 75
(みずほ情報総研株式会社、国立大学法人京都大学)	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	

- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

III. 英文Abstract

.....P. 90

## I. 成果の概要

課題名 2-1702 パリ協定気候目標と持続可能開発目標の同時実現に向けた気候政策の統合分析

課題代表者名 高橋 潔 (国立研究開発法人国立環境研究所社会環境システム研究センター広域影響・対策モデル研究室室長)

研究実施期間 平成29～令和元年度

研究経費(累計額) 144,550千円  
(平成29年度:49,000千円、平成30年度46,550千円、令和元年度:49,000千円)

本研究のキーワード 気候政策、パリ協定、持続可能開発目標、統合評価、ゼロ排出

### 研究体制

- (1) パリ協定気候目標に統合的な世界の気候政策とその波及効果に関する分析(国立環境研究開発法人国立環境研究所)
- (2) わが国におけるゼロ排出の実現に向けた社会シナリオの検討(国立環境研究開発法人国立環境研究所)
- (3) わが国におけるゼロ排出の実現に向けたエネルギー技術対策の定量化(みずほ情報総研株式会社、国立大学法人京都大学)

### 研究協力機関

学校法人立命館 立命館大学

公益財団法人 地球環境戦略研究機関

International Research Center on Environment and Development (仏国)

Wuppertal Institute (独国)

Pacific Northwest National Laboratory (米国)

## 1. はじめに(研究背景等)

パリ協定では、全球気温上昇を工業化前比2℃より十分低く保ち更に1.5℃に抑える努力を追求するとの目標とともに、今世紀後半に人為のGHG排出と吸収の均衡を達成すべく最新科学に基づき早期削減を行うことが合意された。一方、各国の約束削減量の合算では上記目標の達成は困難との認識から、世界全体の進捗状況の定期確認・取組強化の仕組みが規定された。各国は定期確認をふまえた削減約束の引き上げを5年毎に求められる。しかし、削減約束の再検討にあたっては全球・国内両レベルで既存の知見に不足がある。

全球レベルでは、以下2点が主要課題である。第一に、1.5℃、2℃等の低濃度安定化を目指す場合、気候の微細な応答が目標達成の成否を決定付け、炭素循環、非CO2物質(メタン・エアロゾル等)の詳細な扱いが必須となる。最新の気候研究にあってもこれらは一定の不確実性を有しており、その排出削減経路・各国気候政策への影響を丁寧に議論する必要がある。第二に、気候政策は気候以外の社会的課題、例えば飢餓、公平性、経済発展等に正負の副次的影響を及ぼし得るが、これまでそれらは統合的に議論されてこなかった。すなわち、気候目標と各種の持続可能開発目標の同時解決への道筋の提示が望まれている。

一方、国内気候政策に関しては、COP21で示された2030年までの自主削減目標の深掘りに加え、2050年及びそれ以降の削減目標とそこに至る道筋の検討が求められているが、2℃/1.5℃目標に対応した早期削減の実現に向けては、技術的対策と生活・行動様式の変化を通じた需要面対策をともに含む、包括的な緩和策・政策手段の評価と、そのための手法改良・データ拡充が必要である。また各対策・政策に対する社会の受容性の検討も求められる。

## 2. 研究開発目的

以上の背景をふまえ、長期気候目標・持続可能開発目標の同時実現に向けた世界規模及び我が国の気候政策の統合分析、ならびに同分析のための一連の評価手法の開発を、本研究の目的とする。

サブテーマ1では、主に二つの統合評価ツールを用いる。第一は全球排出経路モデルであり、最新の気候科学ならびにGHG削減費用の知見をふまえ、目標達成に必要な全球排出経路とその不確実性を分析する。第二は世界経済モデルであり、気候以外の開発目標の定量分析のための拡張を施し、2°C/1.5°Cの気候目標について、21世紀末までの社会経済・土地利用・GHG排出・持続可能性指標の統合シナリオを提示する。

サブテーマ2では、国内サービス需要モデル（輸送、家計消費等）と国内経済モデルを改良し、炭素税等を含む包括的な政策オプションの検討を実施し、サブテーマ1が描く全球気候政策に整合的な形で、我が国でのゼロ排出実現に向けたシナリオを提示する。また、他サブテーマと連携してステークホルダー対話を実施し、将来シナリオをより政策検討に資するものに発展させる。

サブテーマ3では、日本技術モデルの改良および技術情報の拡充を通じて、サブテーマ1が描く全球気候政策に整合的な形で、我が国でのゼロ排出実現に向けたエネルギー技術対策の定量化を実施する。

図2.0.1は課題全体概要と各サブテーマの役割を示している。図2.0.2(a)・2.0.2(b)は本報告書で報告するサブテーマ別の個別研究項目であり、それぞれ図2.0.1から(a)サブテーマ1部分と(b)サブテーマ2・3部分を抜き出し、以下の章で報告する個別研究項目を配置している。

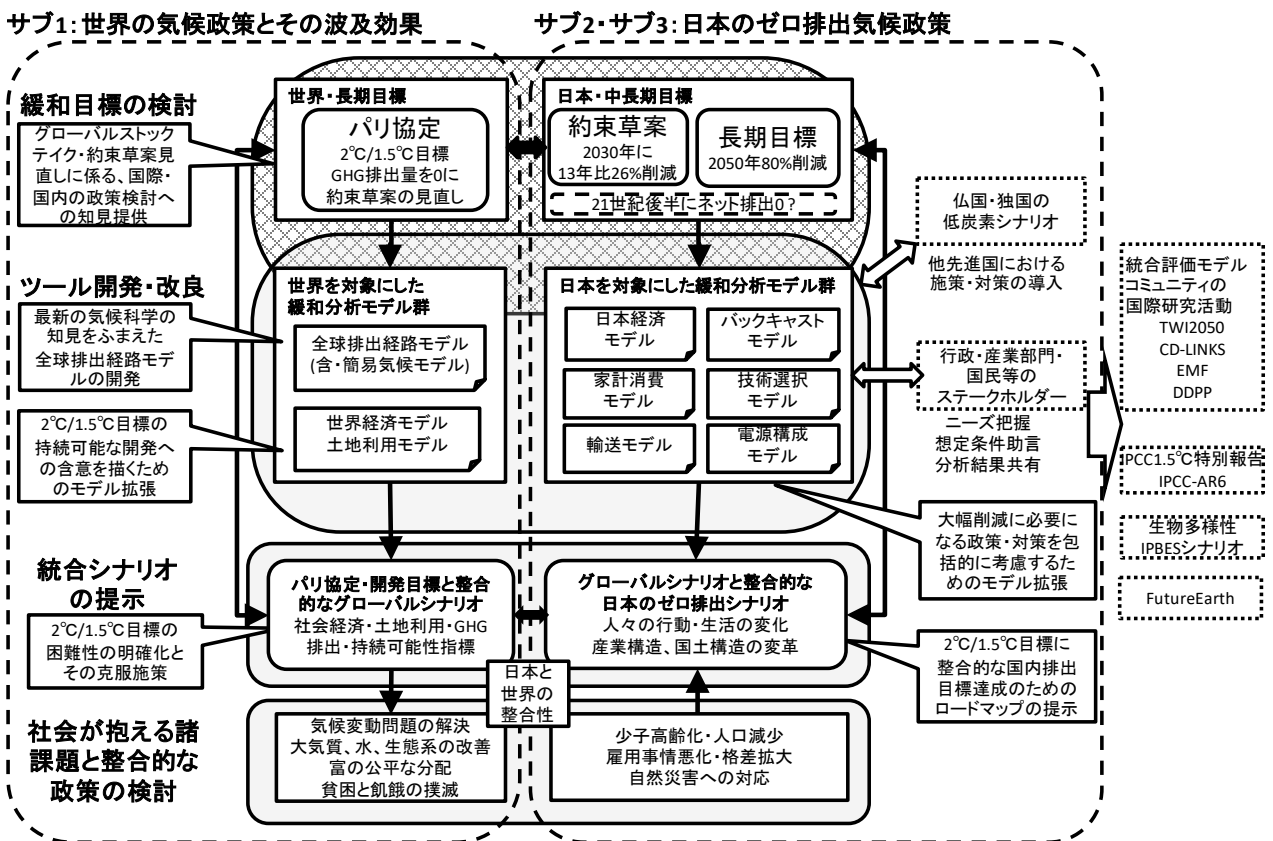
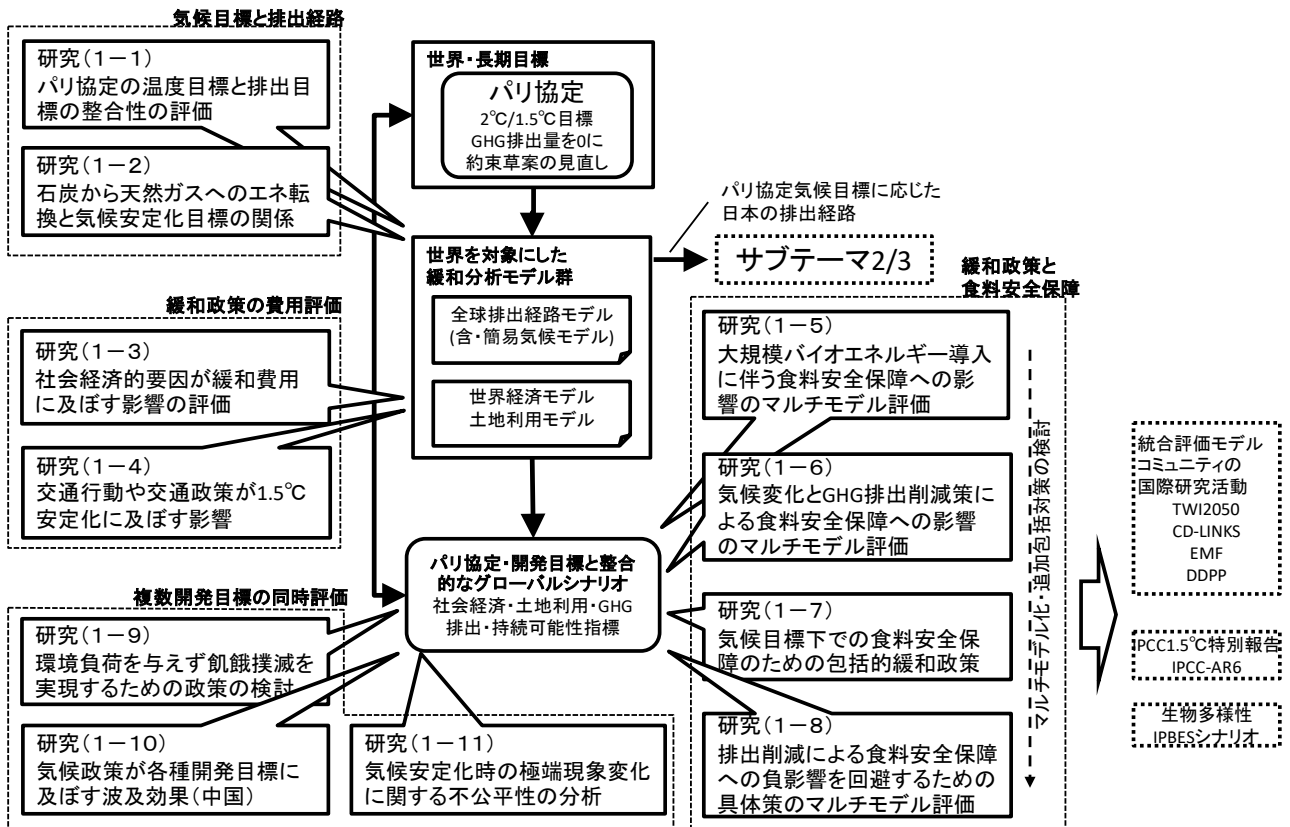


図2.0.1 課題全体の概要と各サブテーマの役割

(a) サブテーマ1の個別研究項目 (研究(1-1)～(1-11))



(b) サブテーマ2とサブテーマ3の個別研究項目 (研究(2-1)～(2-6)と研究(3-1)～(3-4))

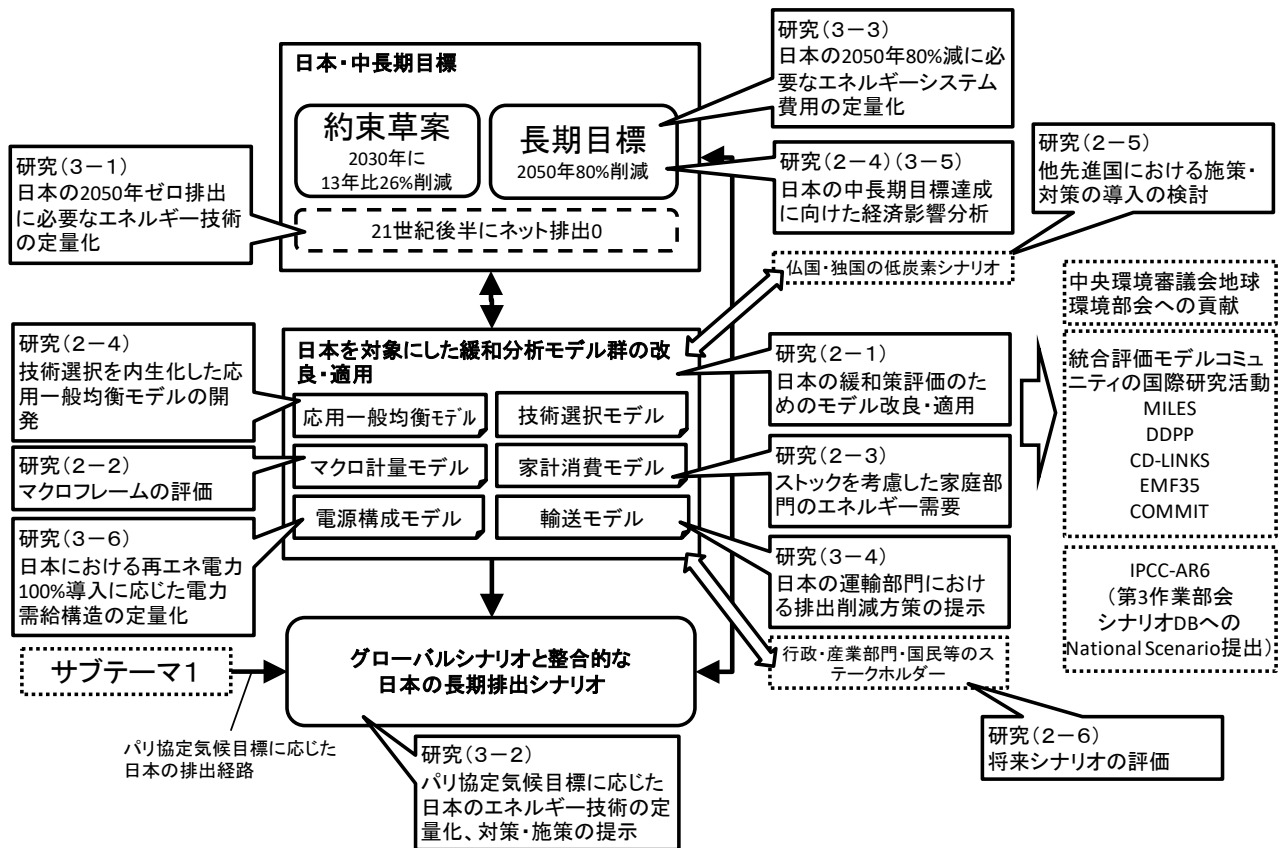


図 2.0.2 本報告書に記すサブテーマ別の個別研究項目 (図 2.0.1 から(a)サブテーマ1部分と(b)サブテーマ2・3部分を抜き出し、以下の章で報告する個別研究項目を配置した)

### 3. 研究開発の方法

#### (1) パリ協定気候目標に統合的な世界の気候政策とその波及効果に関する分析

研究(1-1):簡易統合評価モデルACC2を活用し、パリ協定の温度目標（いわゆる2°C/1.5°C目標）及び排出目標（21世紀後半に人為のGHG排出を正味ゼロ）を達成するための最小費用排出経路の分析を実施し、特に、（しばしば同値として扱われる）温度目標と排出目標の間の整合性について評価した。ACC2は、炭素循環、大気化学、物理気候動態、緩和費用に関わる全球レベルの主要なプロセスを記述しており、地球科学と環境経済学の知見が必要とされる長期的な気候政策を主な分析対象とする。

研究(1-2):国別電力生産量に関して代表的な国々（中・独・米・印）を取り上げ、各国の石炭及び天然ガス火力発電に伴うGHGや短寿命気候汚染物質（SLCP）の排出量を算出し、石炭から天然ガスへのエネルギー転換の気候安定化目標への寄与について不確実性も考慮し検証した。GHGやSLCPの排出量の算出には、ecoinventバージョン3.4を用いた。データベースから得られた様々なガスや物質の単位発電量当たりの排出量に対して、排出指標（emission metric）を適用し、総CO<sub>2</sub>換算排出量を算出した。

研究(1-3):様々な社会経済的要因（技術コストやエネルギー需要の仮定等）が緩和費用に及ぼす影響の評価を実施した。本研究では、世界経済モデルAIM/CGEを用いて、緩和費用の変化から社会経済的要因の役割を評価し、1.5°C目標並びに2°C目標下で社会経済的要因が緩和コストに及ぼす影響を特定した。分析対象とする社会経済的要因としては、低炭素エネルギー供給技術、最終エネルギー効率改善、生活習慣変化、バイオマス技術促進の4種を扱った。

研究(1-4):交通行動や交通政策が1.5°C安定化に及ぼす影響の定量化を実施した。世界交通モデルを用いて異なる交通政策介入が緩和ポテンシャルと費用にどのように影響するかをシミュレートした。2005年から2100年を分析対象期間とし、世界経済モデルAIM/CGEと世界交通モデルAIM/Transportを統合して評価した。両モデルの統合は、エネルギー価格、炭素価格、GDP、交通サービス、交通部門エネルギー消費量などを相互に繰り返しやり取りすることで実装した。

研究(1-5):第33回エネルギーモデルフォーラムに参加する6つの統合評価モデルおよび農業経済モデルと、FAOの手法に基づく栄養不足人口推計モジュールを組み合わせて、高いバイオエネルギー需要が食料安全保障に及ぼす影響の包括的な分析を実施した。指標には、栄養不足人口、一人当たり食料消費カロリー、食料価格、食料自給率、作物・畜産物の生産量、農耕地・牧草地面積を取り上げた。

研究(1-6):複数世界農業経済モデルを用いて、気候変化とGHG排出削減策による食料安全保障への影響を評価した。国際農業モデル比較AgMIP参加の8研究機関の世界農業経済モデルによる食料価格・需給の将来予測データに基づき、国立環境研究所・京都大学開発の飢餓リスク推計ツールを用いて解析を実施した。将来分析では、GHG排出削減策を取らず気候変動が加速するケース（RCP6.0）と、GHG排出削減策を取り気候変動が緩和されるケース（RCP2.6）の2種類を検討した。

研究(1-7):1.5°C気候目標下での食料安全保障を確保する包括的な緩和政策の設計に取り組んだ。食料安全保障に資する政策手段としては、国際援助、バイオエネルギー税、国内収入再配分に焦点を当てた。定量化にあたり、AIMの既開発モデル群を結合的に用いるモデル枠組を構築した。

研究(1-8):GHG排出削減策による食料安全保障への悪影響を回避するための具体策を提言し、途上国への必要な援助費用を算定した。世界6機関の統合評価モデルによる将来予測情報に基づき、飢餓リスク推計ツールを用いて解析を実施した。温室効果ガス排出削減策によりもたらされる食料安全保障への負の影響を回避するための3つの具体策、①食料価格に対する補助金、②途上国に対する国際援助、③飢餓リスクに直面する人のみに対する援助、の費用算定を行った。

研究(1-9):環境に負荷を与えずに飢餓撲滅を実現する政策を論じるべく、飢餓撲滅と食料生産・消費に関わる政策を組み合わせたシナリオを複数用意し政策効果を分析した。分析には、農業経済部分均衡モデルGLOBIOMを用いた。本研究では、シナリオに応じて必要な食料需要量をあらかじめ算定し、それをGLOBIOM内で想定し、その需要を満たす食料需給、土地利用変化、環境負荷物質を推計した。

研究(1-10):世界各国への適用可能性を想定しつつ、中国をケーススタディの対象地域として選択し、2°C目標に統合的な気候政策の結果として、エネルギー安全保障（一次エネルギー源の多様性と輸入依存度）、大気質（SO<sub>2</sub>・NO<sub>x</sub>・黒色炭素の排出）、食料安全保障（食料価格、飢餓リスク人口、食料

自給率輸入依存度)、土地資源管理(森林伐採量)に及ぼす波及影響の総合分析を実施した。

研究(1-11): 1.5℃及び2.0℃気候安定化時の極端現象変化に関する不公平性の分析を実施した。具体的には、気候モデルMIROC5を用いて、現在気候条件(2006~2015)、1.5℃温暖化条件、2.0℃温暖化条件で、それぞれ10年×100メンバの気候実験を行い、現在10年に一度の「暑い昼」と「強い雨」の頻度が1.5℃と2.0℃温暖化時にどれだけ増加するか調べた。さらに、各国・地域の極端現象増加量と累積CO<sub>2</sub>排出量などを比較し、「極端現象変化に関する不公平性」を評価した。

## (2) わが国におけるゼロ排出の実現に向けた社会シナリオの検討

研究(2-1): 将来のマクロフレームやエネルギーサービス需要の変更によるわが国のGHG排出削減の可能性を検討することを目的として、各モデルの更新(モデル構造の見直し、計算の前提となる将来シナリオや技術情報等の更新)をサブテーマ3と協力して行った。

研究(2-2): マクロ計量モデルについては、過去の統計データから、固定資本ストック、労働人口を推計するとともに、実質GDPがこれらの変数を説明変数としてコブ・ダグラス型生産関数を用いて説明できると仮定し、全要素生産性(TFP)を推定した。また、こうした推計結果をもとに、将来人口やTFPに基づく将来GDPの算定を行い、本研究におけるマクロフレームを想定した。

研究(2-3): 家計消費モデルについては、家庭部門における温室効果ガス削減目標の達成可能性を議論することを目的として、家庭部門において保有される機器のエネルギー効率について分析を行った。具体的には、①購入されるエネルギー効率改善の早さ、②効率改善のタイミング、③機器による寿命の違い、④所有量の増減、を踏まえて検討を行った。また、2015年の環境省家庭CO<sub>2</sub>統計の全国試験調査の個票を用いた解析から、モデルによる計算結果を政策に転換する際に留意すべき点を明らかにした。

研究(2-4): 拡充された対策オプションやサブテーマ3で新たに検討される技術の評価するために、応用一般均衡(CGЕ)モデルの改良を行った。具体的には、基準年である2005年及び2011年の産業連関表を再現するとともに、分析対象期間を2050年まで延長するために、部門や財の区分を40程度に集約した。また、具体的な対策オプションを明示的に取り扱えるように投資-資本蓄積の過程や各部門における生産構造についても見直しを行った。改良したCGЕモデルを用いて、サブテーマ3で評価された省エネ技術をはじめ他の個別モデルの結果を前提に、2050年に温室効果ガス排出量を80%削減するシナリオの定量化を行い、経済活動にもプラスの効果をもたらす取り組みとその効果を明らかにした。定量化で想定したのは、再生可能エネルギーの普及拡大、投資回収年の長期化、従来型技術の早期廃止であり、これらによってGDPやGHG価格にどのような影響が生じるかについて分析を行った。

研究(2-5): フランスやドイツで行われてきた、ステークホルダー対話をふまえた国レベル緩和シナリオの開発事例を調査し、対策オプションの拡充を検討するために、これまでにフランスのADEME(環境・エネルギー管理庁)やCIRED(環境・開発国際センター)、ドイツのヴッパタール研究所で組み込まれてきた研究成果を整理しつつ、AIM国際ワークショップやモデリングワークショップ等の機会を活用して意見交換を行い、温室効果ガス排出削減政策の日本での適用可能性について検討を行った。

研究(2-6): 2050年を対象とした将来シナリオの幅を検討するために、ステークホルダー対話として20代の若者世代がどのような将来像を望んでいるかについてヒアリング、意見交換を実施した。ヒアリング対象は、東京工業大学の修士課程及び学部3年生の学生であり、2050年の所得や再エネ導入量、省エネ行動等について調査を行った。

## (3) わが国におけるゼロ排出の実現に向けたエネルギー技術対策の定量化

研究(3-1): 日本を対象としたエネルギー技術モデルを用いて、2050年に日本国内でゼロ排出となるシナリオにおけるエネルギー技術の定量化を行った。同モデルは、逐次動学型のエネルギーシステムモデルであり、サービス需要、各種技術特性(効率・価格)、排出制約等の入力に応じて、技術対策導入量、部門別最終エネルギー消費量、エネルギーシステムコスト、炭素価格等を出力する。シナリオとしては、排出制約(2050年80%減、2050年ゼロ)、技術制約(BECCSなし、原子力フェーズアウト)に応じて、全10ケースの分析を行った。排出制約に関して、2030年はNDCに相当するGHGを2013年比26%削減す



る場合、および2030年の排出制約を課さない場合の2パターンを想定した。2050年については、エネルギー起源CO<sub>2</sub>をネットゼロとするシナリオに加えて、比較対象として2050年目標であるGHG80%削減シナリオを想定した（基準年は1990年）。技術制約として、想定した全技術が利用可能なケースに加え、BECCS非利用ケース（woBECCS）と原子力発電の寿命をすべて40年とするケース（NucPO）を設定した。

研究(3-2)：パリ協定に整合的な日本の長期排出経路におけるエネルギー技術対策の定量化を行うため、世界モデルによる2°C目標に応じた日本の累積排出量に基づくシナリオ分析を実施した。まず、サブテーマ1の出力および他統合評価モデルの結果をふまえ、世界全体のバジェット（累積排出量）より、限界費用均等化に基づき日本のバジェットを設定した。世界全体のバジェットは、2100年までに2°C未満に抑える確率が50%および67%となるケース、加えて2100年までに1.5°Cに抑える確率が67%となるケースとして、2011-2100年の累積CO<sub>2</sub>排出量が1600Gt-CO<sub>2</sub>、1000Gt-CO<sub>2</sub>、400Gt-CO<sub>2</sub>となる3つのシナリオを設定した（それぞれ1600、1000、400Gtシナリオと記述）。また、長期バジェットに加えて、短期（～2030）の削減目標に応じて、次の3パターンにシナリオを分類した。NoPOLシナリオでは追加的な政策を考慮しないこととした。NPiシナリオでは2020年までの政策を考慮し2020年以降はバジェット制約に応じて対策が進む（NDC深掘あり）ものとした。NDCシナリオでは2030年までの政策（NDC含む）を考慮し2030年以降はバジェット制約に応じて対策が進む（NDC深掘なし）ものとした。なお、これらのシナリオにおける日本のエネルギー対策技術および対策費用に関する情報をサブテーマ2に提供した。

研究(3-3)：日本の2050年80%削減におけるエネルギーシステム費用の推計を行った。これまで単独で扱われてきたエネルギーシステム、経済システム、電源システムを結合した統合モデルを用いて費用推計を行った。エネルギーシステムモデルとしてはAIM/Enduse [Japan]を用い、経済モデル、電源モデルからの情報を入力した。経済モデルからはGDPや部門別の生産額、エネルギー価格等を入力した。電源モデルからは蓄電池導入量、変動性再生可能エネルギーの出力抑制率等を入力した。シナリオは、対策を行わないなりゆきケースと、2050年80%減を達成するケースの2つについて分析を行った。

研究(3-4)：日本を対象とした2050年までの低炭素化シナリオについて、旅客輸送部門に着目した詳細な分析を実施した。推計には、サブテーマ2から提供された輸送量、本サブテーマでエネルギー技術モデルを用いて推計した技術データに基づき、燃費改善や電気自動車等の技術による削減を重視したAdvanceTech (ADV)と、技術対策に加えて交通需要削減やモーダルシフト等の対策をバランスよく実施するBalanced (BAL)の2つのシナリオを想定して、各々のエネルギー消費量やCO<sub>2</sub>排出量を推計した。

研究(3-5)：逐次均衡型応用一般均衡モデルAIM/CGE[Country]を用いて、わが国のNDC（2030年に2013年比26%削減）及び長期目標（2050年80%削減）の達成に必要な炭素価格の推計を実施した。分析対象年は、産業連関表のデータに基づき2011年から長期目標の対象年である2050年までとした。

研究(3-6)：日本でのゼロ排出実現の可能性として、再エネ発電のみでの電力需給の分析を実施すべく、RE100分析電源構成モデルを構築した。全国の電力需要を入力とし、蓄エネや連系線利用、余剰電力による水素の地域別・時間別生成を考慮に入れた10電力ごとの電力需給を1時間ごとに再現する線形数理計画モデルとなる。2018年度の10電力ごとの電力需要と主に政府の再エネポテンシャル調査をベースにして、蓄電池蓄電量を年間で最小化する条件のもと、10電力各地域の電力需給の計算を実施した。

## 4. 結果及び考察

### (1) パリ協定気候目標に整合的な世界の気候政策とその波及効果に関する分析

研究(1-1)について、パリ協定の温度目標とゼロ排出目標の整合性を検討し、2つの目標は必ずしも一致しないことを明らかにした。具体的には、排出を正味ゼロまで削減できたとしても、削減に早期から着実に取り組まなければ、温度目標を達成できないことが示唆された。一方、短期的に急激な排出削減を行えば、正味ゼロまで排出削減を行わなくとも温度目標が達成できる可能性があることも同時に示唆された。温度目標を一時的に超過するなら、温室効果ガスの排出を正味ゼロに削減するだけでは不十分で、今世紀中に正味の排出をかなり大きな負にしなければならない。

研究(1-2)について、石炭火力発電と天然ガス火力発電の気候影響を比較すると、天然ガス火力発電の方がどの地域においても短・長期共に気候影響が小さいことが分かった。各々の温室効果ガスや短寿

命大気汚染物質の影響に関しては、CO<sub>2</sub>の影響が両発電で短・長期共に突出している。しかし、より短い時間軸を意味するGWP20やGTP20を基準にすると、CO<sub>2</sub>の影響は相対的に小さくなり、特に石炭の場合、非CO<sub>2</sub>要素の影響が顕著になる。本研究の結果は、石炭から天然ガスへのエネルギー転換が気候安定化目標に整合することを裏付け、石炭火力発電所を段階的廃止する主張の後ろ盾となりうる。

研究(1-3)について、低炭素エネルギー供給技術の進歩が緩和コスト削減において最も重要な要素であることが示された。2100年には、低炭素エネルギー供給シナリオにおける追加的な技術改善による1.5℃ケースのGDP損失は、ベースラインシナリオ（緩和政策無し）と比較して1.7%であり、基準シナリオ（追加の社会経済的要因の変更がない場合）でのGDP損失3.0%のほぼ半分となった。最終エネルギー効率と生活習慣の変化は、ベースライン排出量の削減に役立ち、削減コストの軽減につながる。生活習慣の変化は輸送部門の排出削減にも影響を与える。社会経済的要因のうちバイオマス技術の促進は、炭素隔離・貯留（BECCS）と組み合わせたバイオエネルギー拡大により最大の負のCO<sub>2</sub>排出を生み出す。

研究(1-4)について、運輸部門の脱炭素化は、エネルギー効率改善、車両技術革新、特に電気自動車の展開、公共交通機関の開発、車の占有率の増加などを導入することにより実現可能である。例えば、大量輸送志向の交通の増加により累積CO<sub>2</sub>排出量の15.7%が削減される。低炭素輸送を促す政策が、地球温暖化を2℃と1.5℃に気候緩和する際に生じる炭素価格、GDP損失率、および福祉損失率を大きく削減できることが示された。また、交通政策の寄与は、緩和強度が強いほど効果的である。

研究(1-5)について、バイオエネルギーの大規模な導入が、世界の作物生産と食物と飼料の消費を減少させ、栄養失調の増加につながりうるということが複数モデルで確認された。すなわち、バイオエネルギー価格の上昇に伴い、バイオ農作物の農耕地が拡大し、食料と牧草地の耕地を減少させ、食料価格が上昇する。価格上昇に対応して、作物収量は増加するが、その収量改善は食料需要を満たすには不十分であるため、食料生産は減少する。その結果、食料消費が減少し、より多くの栄養失調がもたらされる。さらに、地域ごとにみると、アジア、アフリカなどで大きな負の影響が確認された。

研究(1-6)について、気候変動による作物収量変化とGHG排出削減策の実施に伴って生じる食料消費・飢餓リスクへの影響に関して次のことが示された。(1)2℃目標の達成に向けた強いGHG排出削減策を実施する場合(RCP2.6)、中庸な社会経済条件(SSP2)では、気候変動緩和策を取らず仮想的に気候変動影響もないと仮定したベースラインと比べて、食料消費は年世界全体で平均110kcal/日/人低下し、飢餓リスク人口は7800万人増加となった。一方、緩和策を実施しないシナリオ(RCP6.0)では気候変動による作物収量変化によって食料消費は45kcal/日/人低下し、飢餓リスク人口は1500万人の増加となった(図4.1.1)。(2)GHG排出削減策を強く実施するほど、食料安全保障への影響は大きくなる。炭素税の上昇に伴って、食料価格は上昇・食料支出は増加し、食料消費が減少、さらには飢餓リスク人口が増加する。(3)地域別にみると、サブサハラアフリカ、南アジア（インドとその他アジア）で大きな負の影響が見られた。これらの地域は、ベースラインで2050年世界全体の飢餓リスク人口のそれぞれ40%、20%を占めるが、RCP2.6（2℃目標相当）のGHG排出削減策の実施により、ベースラインからさらに1200万人、1600万人の飢餓リスク人口が増加することが示された。

研究(1-7)では、国際援助、バイオエネルギー税、国内収入再配分等の政策手段により、気候政策（2℃目標・1.5℃目標相当の緩和政策）の経済効果により生じる飢餓リスク人口の増加を回避できることが示された。これらの政策手段を施さない場合、1.5℃目標シナリオでは、2050年での飢餓リスク人口が1億3300万人になる可能性がある。一方、上記政策手段を含む包括的な気候政策に要する世界全体での追加的厚生損失は、気候緩和に要する総費用（3.7%の厚生損失）と比較して小さく（<0.1%）、国際援助の財政費用も高所得国のGDPの約0.5%に留まる。

研究(1-8)について、途上国への援助費用は世界全体のGDPあたり0.18%（約30兆円）に相当した。これは温室効果ガス排出削減費用と比べると一桁小さいオーダーとなる。また、2℃あるいは1.5℃目標の達成のために必要な炭素価格や費用を推計したところ、その推計値はモデルにより大きく異なることが示された。また、気候目標に準じた温室効果ガス排出削減策を実施する場合、排出削減策を取らないと仮定したベースラインと比べて、飢餓リスク人口は2050年で1.6億人（1.2-2.8億人：モデル不確実性）増加となる。また、食料消費量は年世界全体平均で5-10%程度の低下となった。

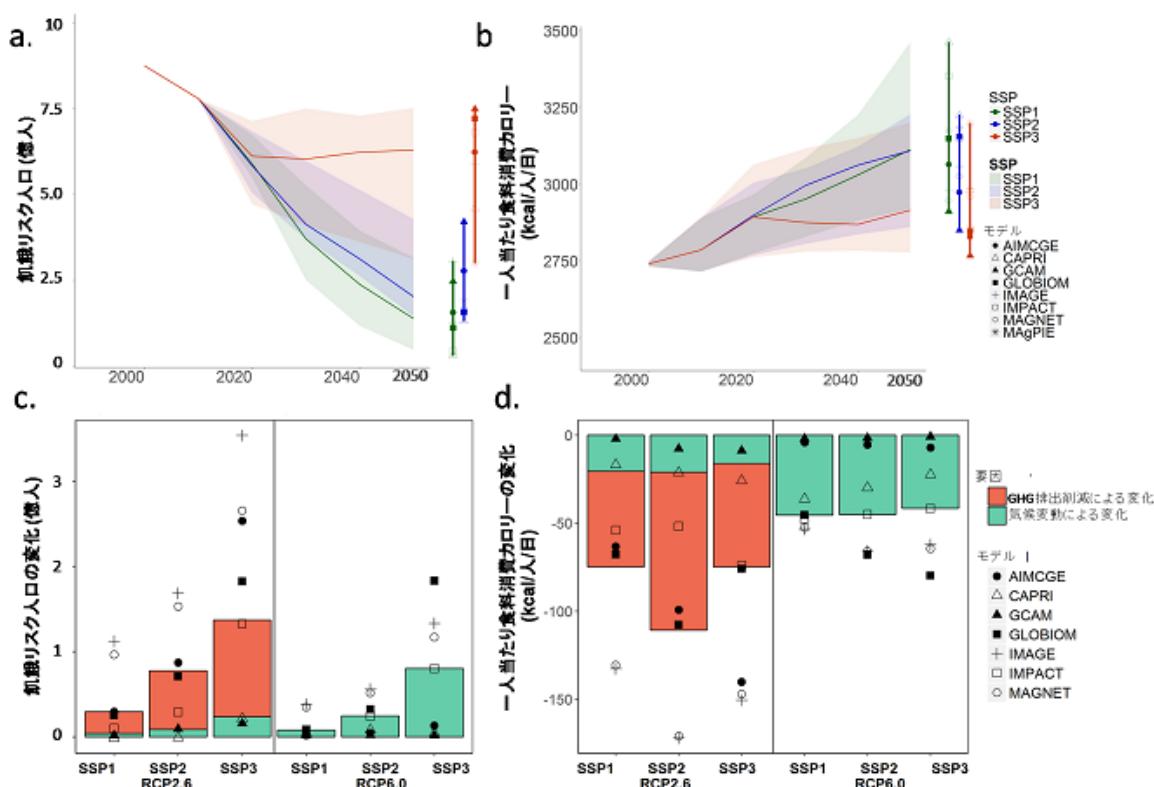


図4.1.1 気候変動影響（作物収量変化）と温室効果ガス（GHG）排出削減策による食料安全保障への影響。ベースラインケースでの、a. 飢餓リスク人口と、b. 一人当たりの食料消費カロリー。3つの社会経済条件（SSP 1～3）及び異なる気候変動影響とGHG排出削減シナリオにおける、c. 飢餓リスク人口と、d. 一人当たりの食料消費カロリーへの影響。c、dの数値はベースラインからの変化量を示す。

研究(1-9)について、2010年時点の世界の不平等な食料分配を改善することなく、一律に食料配分を増やして2030年に飢餓をなくす場合、飢餓撲滅に必要な食料生産が環境に悪影響を与えることが示された。この場合、2030年時点で、なりゆきシナリオと比べて食料生産は20%増え、農地・牧草地は合わせて4800万ha増、農業・土地利用由来の温室効果ガス排出は5.5億トン（二酸化炭素換算）増となった。一方、飢餓の人々に対する集中的な食料支援により飢餓撲滅を達成する場合、なりゆきシナリオに比べて追加的な食料生産は3%程度増加となり、追加的な環境負荷も小さく抑えられた。さらに、貧困層に対する集中的な食料支援に加え、先進国を中心とした食料廃棄や過剰摂取の削減などの対策も合わせて実施することで先進国・発展途上国の食料分配を改善しつつ飢餓をなくす場合は、食料生産とそれに伴う環境への負荷が大きく削減される。この結果は複数SDGsの同時達成を視野に入れた場合、飢餓撲滅には食料増産だけではなく、貧困層への集中的な食料支援と先進国を中心とした食料廃棄物の削減や過剰摂取の抑制などの食料分配の改善を合わせて行うことが重要であることを示唆している。

研究(1-10)について、食料安全保障・土地資源管理に関しては、気候政策による負の波及影響（トレードオフ）が示されたことから、その波及影響を打ち消すための追加的政策として、INDCの深掘り（早期GHG排出削減）、食料生産・消費及び森林保全推進への補助金の効果を検討し、政策の組み合わせにより複数開発目標の同時達成を目指しうることを示した。

研究(1-11)について、2°C温暖化では10年に一度の「暑い昼」と「強い雨」の頻度が劇的に増加することがわかった。例えば、2100年の世界人口の約半数(46%)は、現在10年に1度の「暑い昼」を2年に1度は経験するようになる。一方、1.5°C温暖化では、2年に1度経験する人口の割合は7%まで低減される。2°C実験では、累積CO<sub>2</sub>排出量が少なく（気候変動への責任が小さく）かつ貧しく適応能力の低い地域で、極端現象の頻度増加が大きいという不公平性が示された。これは、2°Cから1.5°Cへの追加緩和と努力により、極端現象の頻度増加を抑えられるだけでなく公平性悪化も低減できることを示している。

## (2) わが国におけるゼロ排出の実現に向けた社会シナリオの検討

研究(2-1)では、日本を対象とした分析において用いる各モデルの改良について検討するとともに、2050年までの将来シナリオの定量化を行った。表4.2.1に各モデルの概要と出力を示す。個々の取り組みを対象としたモデルを用いて家計消費や電源構成などをパラメータ化し、その結果を応用一般均衡モデルに入力して2050年までの社会の変化を反映させるとともに、最終的には日本におけるGHG排出量80%削減目標をいかに達成し、経済活動にいかなる影響が及ぶかを明らかにする。なお、分析手法や将来シナリオの検討に際して、応用一般均衡モデルの改良により評価した項目もあり、当初予定していたモデル改良やモデル結果の利用を行っていないものもある。

表 4.2.1 日本を対象としたモデルとその概要

マクロ計量モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>計量経済分析の手法を用いて、過去の資本、人口、資本等からGDPを推定するモデル。将来の人口推計等をもとに、長期のGDP推計とそれに整合したTFP(全要素生産性)を推計する。</li> </ul>
日本経済モデル(応用一般均衡モデル)	<ul style="list-style-type: none"> <li>2005/2011年産業連関表を基準とした価格メカニズムに基づくモデル。個別モデルの結果をパラメータに反映させるとともに、温室効果ガス排出削減目標を与えることで、マクロ経済全体への影響について定量化を行う。</li> </ul>
バックキャストモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>動学的最適化モデルに基づき、最適な技術や政策の導入について導入量とそのタイミングを明らかにするモデル。今回の分析では、政策や技術導入のタイミングは前提とし、それらの違いによるマクロ経済影響を分析することとしたために、バックキャストモデルは使用しない。</li> </ul>
家計消費モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギーサービス需要量の推計とストックを考慮したエネルギー消費量を推計するモデル。</li> </ul>
電源構成モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>再生可能エネルギーを含めた発電技術の設備容量と発電電力量を推計するモデル。</li> </ul>
輸送モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>貨物輸送量、旅客輸送量を推計するモデル。今回の分析では、輸送量は応用一般均衡モデルで内生的に評価できるように改良したため、今回の分析では使用しない。</li> </ul>

研究(2-2)では、マクロ計量モデルを用いて、将来の実質GDPの推計を行った。将来推計にあたっては、過去の統計データを解析するとともに、コブ・ダグラス型生産関数に基づいてTFP(年率0.36%で変化)や資本の弾力性(0.471)を推定した。これらの推定結果として、将来の人口等に基づく実質GDPの推定をTFPの想定に基づいて行った。

研究(2-3)では、複数の社会経済シナリオ下での家庭部門における2050年のエネルギーサービス需要及びエネルギー消費量を推計するとともに、脱炭素社会において求められるライフスタイルについて、具体的なイメージの提示を可能にするモデルの開発を目的とした。家庭で保有されている機器のストックを考慮するために、機器別の残存率やエネルギー効率に関する情報を用いた分析を実施した結果、特に寿命が長い機器では、基準年から15年経過しても、過去の機器の効率の変化の違いにより、ストック機器効率に2.5%程度の違いがあることが明らかになった。また、2015年の環境省家庭CO<sub>2</sub>統計の全国試験調査の個票を用いて、10地域別に電力消費量の小さい家庭から順に消費量を並べて電力消費量の分布を分析し、モデルで得られる平均的な結果から対策を検討する際の留意点を示している。

研究(2-4)では、日本を対象とした様々な取り組みを統合的に評価するCGEモデルの開発とそれを用いた分析を行った。基準年は2005年及び2011年産業連関表を再現できるようにデータを更新しており、以下で示す分析結果は、2005年産業連関表を用いた分析結果である。また、サブテーマ3における対策技術オプションを明示的に取り込む必要があることから、モデル構造について大幅な修正を行った。具体的には、投資・資本蓄積過程において、省エネ技術の導入の際に必要な追加費用が明示されるように、既存設備、新規設備を区別するとともに、技術についても既存技術と省エネ技術が区別できるように、生産関数を複数設定した。また、気候変動問題とともに高齢化による問題の同時解決を目指して、最終消費部門を世帯主の年齢によって5区分(29歳以下、30-39歳、40-49歳、50-59歳、60歳以上)に分割し、家計調査をもとに各区分での消費構造を反映させた。前提とするマクロフレームは、研究(2-2)で示された将来のGDPの推計結果に基づいたものである。また、将来のGHG排出量についても、排出制約を行わないケースや2050年に80%削減するケースなど、様々な想定に基づいて分析を行っている。図4.2.1では、マクロ計量モデルによる中位的な経済成長を前提に、技術固定ケース(将来

において2015年時点のフローの技術が変化しないと仮定するとともに温室効果ガス排出に制約を想定しないケース）、なりゆきケース（日本を対象とした技術選択モデルにおける省エネ技術の導入が2015年から可能となるケース）、投資回収年数を10年に延長するケース（基準ケースでは投資回収年数は3年）、投資回収年数を10年にするるとともに従来技術を2050年までに廃棄するケース、等の2050年におけるGDP（なりゆきからの変化率）とGHG価格の結果を示したものである。投資回収年数を10年とすることで、GHG価格が低下し、従来技術の早期の退出とそれに伴う追加投資を適切に行うことで経済にもプラスでかつGHG価格を低位に抑えることが可能なことを示している。

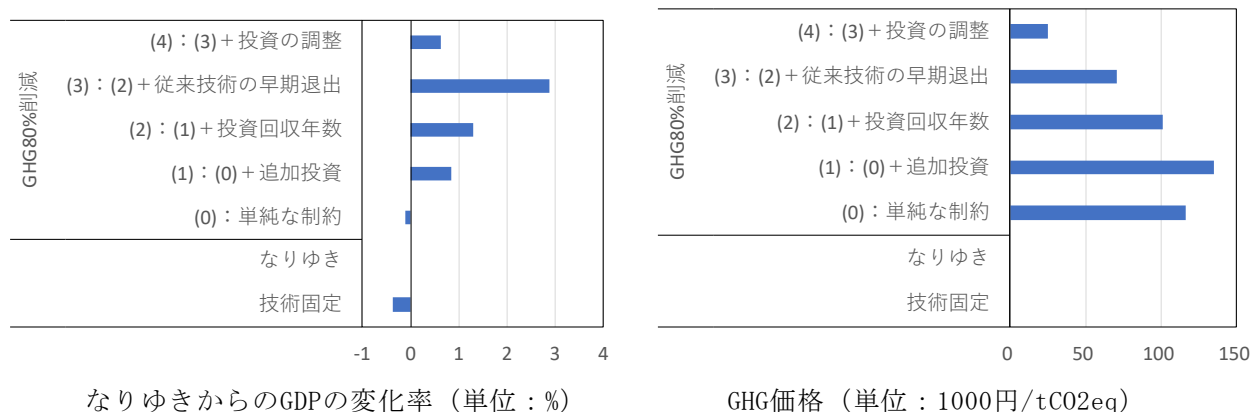


図4.2.1 日本を対象としたCGEモデルによる2050年の試算結果

多様で実効性のある脱炭素社会の構築に向けて、より柔軟な前提や対策オプションのもとでモデルを運用するとともに、試算結果を実行に移すために必要な要件を明らかにすることが求められる。研究(2-5)では、こうした課題に対応するために、これまでに長期低炭素発展戦略の開発を通じてこれらの取り組みを行ってきたフランスADEME（環境・エネルギー管理庁）やCIRED（環境・開発国際センター）、ドイツのヴッパータール研究所に対して、これまでにフランスやドイツでどのような取り組みが行われてきたかについて意見交換を実施した。さらに詳細にモデル分析に関する情報交換を行うために、2019年には日仏モデリングワークショップを開催し、炭素税の税収の利用や、応用一般均衡モデルそのものを新古典派理論に基づくモデルから新ケインズ主義的特徴を備えたモデルへの拡張などの示唆を得た。ただし、日本とフランスの失業率の違いなどモデル化において留意すべき点があり、こうした点を踏まえたモデルの改善は今後の課題である。

研究(2-6)に関して、日本社会が脱炭素化に向かうためには、研究者側からどのような情報を提示する必要があるのか、また、ステークホルダーの意見を将来シナリオに反映させるためにはどのようなモデルの改良が必要となるかについて、JCLP参加企業や認定NPO法人環境文明21の「環境文明塾（環境セミナー）」の参加者との意見交換を行った。さらに、本研究課題で示した将来像の可能性について、2050年に社会の中心を担う若い世代の代表として、東京工業大学の修士課程及び学部3年生に対して、2050年の期待する社会像の意見を聞いた。2050年の1人当たり所得については、最も多い意見は現状の1.5倍で、この値は本研究課題で想定した将来の経済成長の想定と概ね一致する。一方で、発電における再生可能エネルギーの導入比率については想定よりも小さい値を見込んでいた。

### (3) わが国におけるゼロ排出の実現に向けたエネルギー技術対策の定量化

研究(3-1)では、BECCSが利用可能なシナリオの場合、原子力が2050年にゼロとなる場合でも、国内において2050年にゼロ排出に到達する結果となった。特に、2050年ゼロ排出の実現には、80%減シナリオと比べ、エネルギー供給部門、運輸部門の対策が重要となることが分かった。中でもエネルギー供給部門は、ネガティブエミッション技術に加えて、太陽光・風力などの出力変動を伴う電源（VREs）の拡大が重要となることが示された。一方で、建築部門は、80%減シナリオでもほぼゼロ排出となることから、80%減シナリオでも電力等の低炭素エネルギーキャリアへの転換が課題となることが示された。

研究(3-2)では、2050年までの排出経路について、1000Gtシナリオでは、2050年のCO<sub>2</sub>排出量は約75%(2010年比)となることから、国内での2050年80%削減目標は、2°C目標に整合する国内の排出経路の有効なマイルストーンになり得ることが示された(図4.3.1)。なおCO<sub>2</sub>価格はモデルによって大きく異なり、NDC1000シナリオでは約150-2100 US\$/t-CO<sub>2</sub>となった。また、削減費用についても排出制約が厳しくなるほど増加する傾向にあり、1000Gtシナリオでは1600Gtシナリオと比較して費用は約2倍以上の水準となった。また、1600、1000、400シナリオにおいて、CO<sub>2</sub>ゼロ排出となる時点は、それぞれ2100年、2070-2080年、2055年頃となった。したがって、日本における2070年頃までのCO<sub>2</sub>ゼロ排出達成が、世界2°C目標に整合的な水準の目安になると考えられる。以上の結果より、日本の長期戦略に示された2050年80%削減、今世紀後半のできるだけ早期に脱炭素社会を実現、という目標は、世界2°C目標の観点からは整合的と考えられる。さらに、ゼロ排出達成に向け2030-2050年に必要となるエネルギー技術対策・施策について検討を行った。特に1000Gtシナリオでは、2030年から2050年にかけて低炭素エネルギーの大幅な拡大がみられ、2050年時点の低炭素エネルギー比率は、一次エネルギー比で45%-54%、発電電力量比では86%-97%に達する結果となった。低炭素エネルギーの拡大はすべてのモデルで共通の傾向であったことから、重要な対策であることが示唆される。ただし、低炭素エネルギーの内訳はモデルにより多様であり、特に原子力・CCSについては技術普及に関する不確実性があることをふまれば、低炭素エネルギー拡大に向けて多様な対策・施策オプションを講じる必要があると考えられる。

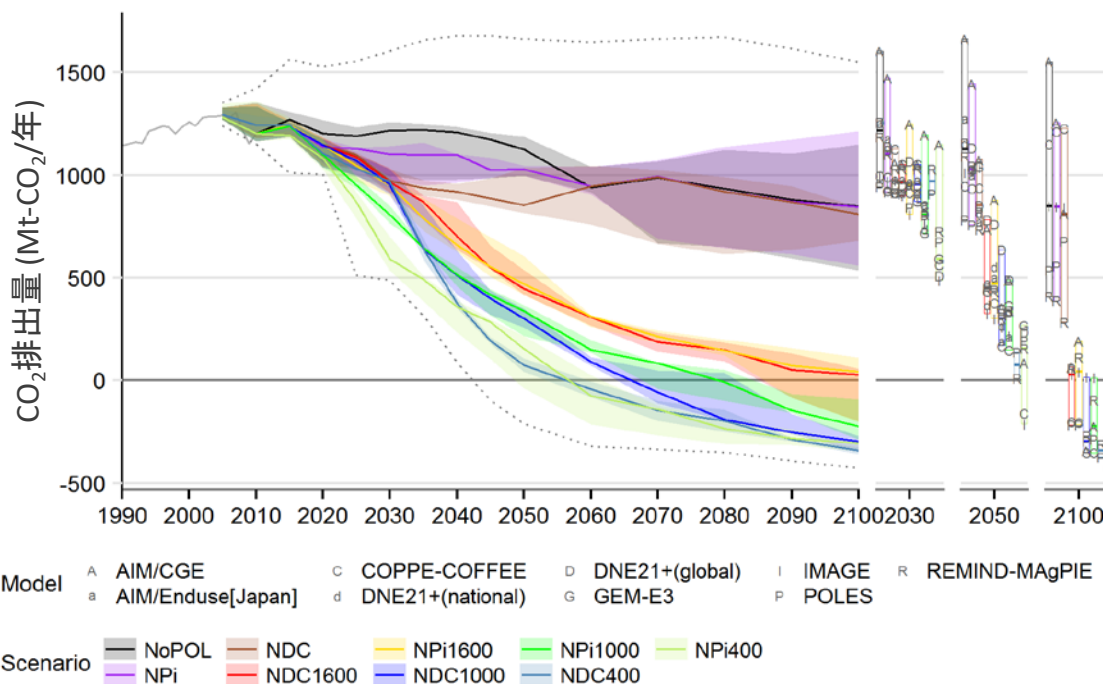


図4.3.1 日本のエネルギー・工業プロセス起源CO<sub>2</sub>排出量。実線は複数モデルの中央値、半透明の領域は25-75パーセンタイル値、点線は全シナリオを通じた最大・最小値を示す。シナリオ名のNPiは2030年目標深掘あり、NDCは深掘なし、数値は世界全体の2100年までのカーボンバジェットを示す。

研究(3-3)では、日本の2050年80%削減におけるエネルギーシステム費用を推計した。2050年のGDPロスはなりゆきケース比約0.8%となり、従来型の経済モデルを単独で用いた場合と比べ半分以下になった。本研究では、経済モデルにエネルギーシステム、電源モデルの情報を入力したことで、従来考慮されていなかったシステム変化の影響を含めたため、GDPロスが従来より低い値になったと考えられる。

研究(3-4)では、2050年の日本の旅客輸送部門からのCO<sub>2</sub>排出量は、ADV、BAL両シナリオについて、2010年比で69%、89%削減される結果となった。また、2050年の最終エネルギー消費量はADVで2010年比46%減、BALで81%削減される結果となった。いずれのシナリオにおいても電力の大幅な低炭素化を想定しており、電力のCO<sub>2</sub>排出原単位は2010年比で97%減となっている。そのため、いずれのシナリオでも低

炭素エネルギー（電力、バイオ燃料、水素）への転換による削減が主要な対策となり、2050年のエネルギー消費量に占める低炭素エネルギーのシェアはADVで43%、BALで44%となった。

研究(3-5)では、わが国のNDC（2030年に2013年比26%削減）及び長期目標（2050年に80%削減）の達成に必要な炭素価格の推計を実施した。目標達成には現状の「地球温暖化対策のための税」の税率では不十分であり、その30倍以上の税率が必要であることが示された。推計にあたり、制約を設けない「①基準シナリオ」と、2030年目標と2050年目標を満たす「②2030・2050年目標達成シナリオ」、2050年目標達成に向けて、2030年目標を深掘りする「③2030年目標深掘り・2050年目標達成シナリオ」の3つのシナリオを設定した。②と③については、想定に基づきそれぞれ削減速度が異なるものの、双方とも長期削減目標を満たす結果となった。②における2030年の炭素価格は9,000円/tCO<sub>2</sub>e、GDP影響は0.3%であった。③の2030年の炭素価格は11,000円/tCO<sub>2</sub>e、GDP影響は0.4%との推計結果であった。

研究(3-6)では、毎時の電力需給を推計するRE100分析用の「電源構成モデル」を構築し、蓄電池の蓄電量を年間で最小化する条件で全国10地域の電力需給を推計した。再生可能エネルギーの導入量については環境省等における検討を踏まえた大量導入を前提とした。冬季の電力需要に備えて大量の蓄電装置の普及が必要であること、冬季における省エネ対策が蓄電装置の普及量の抑制に効果的であることが示された。例えば、再生可能エネルギー発電100%を実現した場合の関西電力管内地域の冬季電力需給については、冬季に日射量が不足する日が続いた場合、夜間の電力を十分に賄う量の蓄電を日中に行うことができず、夏季から長期的に蓄電した電力を消費する需給形態が現れ、そのために1日の平均電力需要の約1か月分に相当する、大量の蓄電池導入が必要となる。そこで、民生部門で、断熱性能強化や空調高効率化により冷暖房需要を5割低減すれば、関西電力管内の蓄電池導入量を1/2程度に削減できる。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

パリ協定の温度目標と排出目標の間の整合性について、炭素循環や気候応答の不確実性を考慮したうえで論じるための手法・手順を提案することが出来た。また、1.5℃及び2.0℃気候安定化時の極端現象変化について定量評価を行ったうえで、さらに極端現象変化に関する不公平性について論ずるための手法・手順を提案することが出来た。（サブテーマ1）

ライフサイクルアセスメントと排出指標の手法を組み合わせた分析により、石炭火力発電から天然ガス火力発電へのエネルギー転換による二酸化炭素排出削減が気候安定化目標に寄与することを示し、石炭火力発電の段階的廃止（フェーズアウト）を支持する結論を示した。（サブテーマ1）

低炭素政策実現のためのバイオエネルギーの大規模導入を含む強い緩和政策が、食料生産・消費ならびに栄養不足人口に及ぼす影響について、複数の統合評価モデルによる評価結果の比較を通じて、評価手法の選択に伴う影響評価結果の不確実性幅を定量的に示すとともに、従来よりも頑健性をもった形でその因子の連動のメカニズムを説明することが出来た。さらに、それらの緩和政策の波及影響の回避のための追加的政策手段についての分析手順を世界に先駆けて提案することができた。また逆に飢餓撲滅の国際目標達成を目指した政策実施が、温室効果ガス排出、森林伐採、窒素利用、農業水利用などに及ぼす波及影響についての分析枠組みも新規に提案し、複数の政策想定の下での帰結について描出することができた。（サブテーマ1）

価格メカニズムなどの経済理論に基づくモデルの開発とその温暖化対策評価への適用により政策を客観的に評価することが可能となる。そうしたツールを用いた定量分析は、Evidence based policyを進める上で必要不可欠なものであることから、本研究の科学的意義は大きい。（サブテーマ1・2・3）

これまで全球気候目標に整合した国・地域を対象とした気候変動緩和シナリオ分析では、限界費用削減均等化や一人当たり排出量均等化といったエフォートシェア手法を用いて、2030、2050年などの時点における排出量を配分する手法が主に用いられていた。本研究ではパリ協定気候目標から示唆される世界1,000Gt-CO<sub>2</sub>のバジェットに整合した日本の2050年までのバジェットを満たすような日本の長期排出経路について、複数の2030年までの短期気候目標のパターンに応じて推計することで、全球気候目標と日本の中長期目標との整合性を初めて定量的に示した。（サブテーマ3）

また、経済・エネルギー・電源システムを統合した新たなモデルを用いて、日本の2050年80%減シナリオにおける経済影響を推計した結果、従来型の経済モデルのみを用いた場合と比較して、GDPロスは半分以上に低下することを新たに明らかにした。（サブテーマ3）

なお、モデルによる計算結果をもとに実際の政策に展開する際には、モデルが示す結果と現状の違いや留意点を認識することが求められる。本研究で行ったような過去の実績の評価や、ミクロなデータにも基づく分布とモデルが示す平均的な活動の違いを明確にすることは、モデルの結果をどのように活用するかを示す一助となる。（サブテーマ2）

## （2）環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

本研究の複数の成果論文が、2018年公表のIPCC1.5°C特別報告書ならびに2019年公表のIPCC土地関係特別報告書で引用された。（サブテーマ1・2・3）

UNFCCCタラノア対話へのサブミッションに本研究成果を反映した。（2018年3月31日・2-1501と共同；サブテーマ1・2・3）

高橋・江守・増井は「モデル・シナリオの勉強会（環境省地球環境局総務課脱炭素化イノベーション研究調査室主催；環境省、文部科学省、気象庁、農林水産省、国土交通省、経済産業省に開催案内）」に講師として参加し、本研究課題の成果も交え、それぞれ影響・適応研究、気候予測研究、緩和研究におけるモデル・シナリオの活用事例について話題提供した（2019年10月；サブテーマ1・2）

中央環境審議会 地球環境部会 長期低炭素ビジョン小委員会（第22回）（2018年3月16日）の配布資料として、AIM/Enduse [Japan]による日本の2050年までのシナリオ分析結果が紹介され、わが国の長期戦略の検討に関する議論に活用された。（サブテーマ2・3）

2018年3月6日にフランス・パリで開催された、フランス環境連帯移行省、日本の環境省が主催する2nd French-Japanese Annual Meeting on Low-Carbon Societyにおいて、日本の2050年までのシナリオ分析およびDDPP-Tへの貢献について、地球環境戦略研究機関の甲斐沼美紀子フェローより紹介された。（サブテーマ2・3）

2019年12月6日に駐日欧州連合代表部（ヨーロッパハウス）において開催された、EU-日本気候変動政策シンポジウムにおいて、日本およびEU（DG-CLIMA）の政策担当者等に対して日本におけるシナリオ・モデル分析研究として本研究の成果を報告、議論した。（サブテーマ2・3）

日本においても長期低炭素発展戦略の作成が求められている中、上記のような成果を通じて本研究の環境政策に貢献する役割は大きい。特に、どのような社会を構築するか、どのような技術が低炭素社会において重要になるかといった問いに対して、本研究で開発するモデルを用いることで定量的な評価が可能となり、環境政策に大きく貢献している。（サブテーマ1・2・3）

### <行政が活用することが見込まれる成果>

研究参画者の江守・増井・長谷川は、IPCC-AR6に代表執筆者に選出されている。今後、AR6の草稿執筆過程において、本研究プロジェクトの研究成果をはじめ、わが国研究機関による研究成果を適切に紹介するとともに、同報告書の作成を通じて国際・国内環境政策の立案に貢献することが期待できる。

本研究で実施したAIM/Enduse [Japan]による日本を対象としたシナリオについては、IPCC AR6 Scenario Databaseへの登録・提出が完了しており、IPCC第6次評価報告書（第三作業部会）へのインプットおよびそれに基づく環境政策への活用が期待される。（サブテーマ1・2・3）

## 6. 研究成果の主な発表状況

### （1）主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) Baker H.S., Millar R.J., Karoly D.J., Beyerle U., Guillod B.P., Mitchell D., Shiogama H., Sparrow S., Woollings T., Allen M.R.: Nature Climate Change, 8, 604-608 (2018)  
Higher CO2 concentrations increase extreme event risk in a 1.5°C world. doi:



10.1038/s41558-018-0190-1

- 2) Bauer N., Rose S., Fujimori S., Van Vuuren D.P., Weyant J., Wise M., Cui Y., Daioglou V., Gidden M.J., Kato E., Kitous A., Leblanc F., Sands R., Sano F., Strefler J., Tsutsui J., Bibas R., Fricko O., Hasegawa T., Klein D., Kurosawa A., Mima S., Muratori M.: Climatic Change (2018) Global energy sector emission reductions and bioenergy use: overview of the bioenergy demand phase of the EMF-33 model comparison. doi: 10.1007/s10584-018-2226-y
- 3) Edelenbosch O.Y., Mccollum D.L., Vuuren D.P., Bertram C., Carrara S., Daly H., Fujimori S., Kitous A., Kyle P., Broin E.O., Karkatsoulis P., Sano F.: Transportation Research, PartD: Transport and Environment, 55, 281-293 (2017) Decomposing Passenger Transport Futures: Comparing Results of Global Integrated Assessment Models. doi: 10.1016/j.trd.2016.07.003
- 4) Fragkos P., Fragkiadakis K., Paroussos L., Pierfederici R., Vishwanathan S., Kberle A., Iyer G., He C., Oshiro K.: Energy Policy, 118, 462-473 (2018) Coupling national and global models to explore policy impacts of NDCs. doi: 10.1016/j.enpol.2018.04.002
- 5) Fronzek S., Carter T.R., Pirttioja N., Alkemade R., Audsley E., Bugmann H., Florke M., Holman I., Honda Y., Ito A., Janes-Bassett V., Lafond V., Leemans R., Mokrech M., Nunez S., Sandars D., Snell R., Takahashi K., Tanaka A., Wimmer F., Yoshikawa M.: Regional Environmental Change, 19, 679-693 (2019) Determining sectoral and regional sensitivity to climate and socio-economic change in Europe using impact response surfaces. doi: 10.1007/s10113-018-1421-8
- 6) Fujimori S., Hasegawa T., Ito A., Takahashi K., Masui T.: Science Data, 5, 180210 (2018) Gridded emissions and land-use data for 2005-2100 under diverse socioeconomic and climate mitigation scenarios.
- 7) Fujimori S., Hasegawa T., Rogelj J., Su X., Havlik P., Krey V., Takahashi K., Riahi K.: Environmental Research Letters, 13, 074033 (2018) Inclusive climate change mitigation and food security policy under 1.5°C climate goal.
- 8) Fujimori S., Hasegawa T., Krey V., Riahi K., Bertram C., Bodirsky B.L., Bosetti V., Callen J., Despres J., Doelman J., Drouet L., Emmerling J., Frank S., Fricko O., Havlik P., Humpenoder F., Koopman J.F.L., van Meijl H., Ochi Y., Popp A., Schmitz A., Takahashi K., van Vuuren D.: Nature Sustainability, 2, 386-396 (2018) A multi-model assessment of food security implications of climate change mitigation.
- 9) Fujimori, S., Oshiro, K., Shiraki, H., Hasegawa, T.: Nature Communications, 10(1), 4737 (2019) Energy transformation cost for the Japanese mid-century strategy. doi:10.1038/s41467-019-12730-4
- 10) Gao L., Yoshikawa S., Iseri Y., Fujimori S., Kanae S.: Water, 9, (10), 763-763 (2017) An Economic Assessment of the Global Potential for Seawater Desalination to 2050. doi:10.3390/w9100763
- 11) Gidden M.J., Riahi K., Smith S.J., Fujimori, S., Luderer G., Kriegler E., Vuuren D.P.V., Berg M.V.D., Feng L., Klein D., Calvin K., Doelman J. C., Frank S., Fricko O., Harmsen M., Hasegawa, T., Havlik P., Hilaire J., Hoesly R., Horing J., Popp J., Stehfest E., Takahashi, K.: Geoscientific Model Development, 12, 1443-1475 (2019) Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. doi: 10.5194/gmd-12-1443-2019
- 12) Hasegawa T., Fujimori S., Havlik P., Valin H., Bodirsky B., Doelman J. C., Fellmann T.,

- Kyle P., Koopman J.F.L., Lotze-Campen H., Mason-D., Ochi Y., Perez-Dominguez I., Stehfest E., Sulser T.B., Tabeau A., Takahashi K., Takakura J., Van Meijl H., Van Zeist W., Wiebe K.D., Witzke P. : *Nature Climate Change*, 8, 699-703 (2018) Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy.
- 13) Hasegawa T. Havlík P., Frank S., Palazzo A., Valin H. : *Nature Sustainability*, 2, 826-833 (2019) Tackling food consumption inequality to fight hunger without pressuring the environment.
  - 14) Kim H., Rosa I.M.D., Alkemade R., Leadley P., Hurtt G., Popp A., van Vuuren D.P., Anthoni P., Arneth A., Baisero D., Caton E., Kramer R.C., Chini L., Palma A.D., Fulvio F.D., Marco M.D., Espinoza F., Ferrier S., Fujimori S., Gonzalez R.E., Gueguen M., Guerra C., Harfoot M., Harwood T.D., Hasegawa T., Haverd V. : *Geoscientific Model Development*, 11, 4537-4562 (2018) A protocol for an intercomparison of biodiversity and ecosystem services models using harmonized land-use and climate scenarios. doi: 10.5194/gmd-2018-115
  - 15) Krey V., Guo F., Kolpa P., Zhou W., Schaeffer R., Awasthy A., BertrameHarm C., Boer H.S., Fragkosh P., Fujimori S., He C., Iyer G., Keramidas K., Köberle A.C., Oshiro K., Reis L.A., Shoai-Tehrani B., Vishwan S., Vuuren D.P.V., : *Energy*, 172, 1254-1267 (2019) Looking under the hood: A comparison of techno-economic assumptions across national and global integrated assessment models. doi: 10.1016/j.energy.2018.12.131
  - 16) Kriegler E., Luderer G., Bauer N., Baumstark L., Fujimori, S., Popp A., Rogelj J., Strefler J., Vuuren D.P.V. : *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical*. 376, 2119 (2018) Pathways limiting warming to 1.5° C: a tale of turning around in no time? doi: 0.1098/rsta.2016.0457
  - 17) Lee D., Min S.-K., Fischer E., Shiogama H., Bethke I., Lierhammer L., Scinocca J. F. : *Environmental Research Letter*, 13, 044033 (2018) Impacts of Half a Degree Additional Warming on the Asian Summer Monsoon Rainfall Characteristics.
  - 18) Liu J.Y., Fujimori S., Takahashi K., Hasegawa T., Su X., Masui T. : *Carbon Management*, 9, (5) (2018) Socio-economic factors and future challenges of the goal of limiting the increase in global average temperature to 1.5°C.
  - 19) Luderer G., Pietzcker R.C., Carrara S., Boer H.S., Fujimori S., Johnson N., Mima S., Arent D. : *Energy Economics*, 64, 542-551 (2017) Assessment of Wind and Solar Power in Global Low-carbon Energy Scenarios. doi: 10.1016/j.eneco.2017.03.027
  - 20) Luderer G., Vrontisi Z., Bertram C., Oreane Y. E, Pietzcker R.C., Joeri Rogelj, De Boer H.S., Drouet L., Emmerling J., Fricko O., Fujimori S., Havlík P., Iyer G., Keramidas K., Kitous A., Pehl M., Krey V., Riahi K., Saveyn B., Tavoni M., Vuuren & Elmar Kriegler; Robert C.P., Joeri R. : *Nature Climate Change*, 8, 626-633 (2018) Residual fossil CO2 emissions in 1.5-2°C pathways. doi: 10.1038/s41558-018-0198-6.
  - 21) McCollum D.L., Zhou W., Bertram C., de Boer H.-S., Bosetti V., Busch S., Després S., Drouet L., Emmerling J., Fay M., Fricko O., Fujimori S., Gidden M., Harmsen M., Huppmann D., Iyer G., Krey V., Kriegler E., Nicolas C., Pachauri S., Parkinson S., Poblete-Cazenave M., Rafaj P., Rao N., Rozenberg J., Schmitz A., Schoepp W., Vuuren D.V., Riahi K. : *Nature Energy*, 3, 589-599 (2018) Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals.
  - 22) Mitchell D., Heaviside C., Schaller N., Allen M., Ebi K.L., Fischer E.M., Gasparrini A., Harrington L., Kharin V., Shiogama H., Sillmann J., Sippel S., Vardoulakis S. : *Nature Climate Change*, 8, 551-553 (2018) Extreme heat-related mortality avoided under

Paris Agreement goals.

- 23) Mittal S., Liu J.Y., Fujimori S., Shukla P.R.: *Energies*, 11, 9, 2213, 24 (2018) An Assessment of Near-to-Mid-Term Economic Impacts and Energy Transitions under “2°C” and “1.5°C” Scenarios for India.
- 24) Ohashi H., Hasegawa T., Hirata A., Fujimori S., Takahashi K., Tsuyama I., Nakao K., Kominami Y., Tanaka N., Hijioka Y., Matsui T.: *Nature Communications*, 10, 5240 (2019) Biodiversity can benefit from climate stabilization despite adverse side effects of land based mitigation.
- 25) Oshiro K., Kainuma M., Masui T.: *Energy Policy*, 110, 581-587 (2017) Implications of Japan’s 2030 target for long-term low emission pathways.  
doi:10.1016/j.enpol.2017.09.003
- 26) Oshiro K., Masui T., Kainuma M.: *Carbon Management*, 9, (5), 493-501(2018) Transformation of Japan’s energy system to attain net-zero emission by 2050.  
doi:10.1080/17583004.2017.1396842
- 27) Oshiro, K., Gi, K., Fujimori, S., van Soest, HL., Bertram, C., Després, J., Masui, T., Rochedo, P., Roelfsema, M., Vrontisi, Z.: *Climatic Change*, (in press) (2019) Mid-century emission pathways in Japan associated with the global 2°C goal: national and global models’ assessments based on carbon budgets. doi:10.1007/s10584-019-02490-x
- 28) Roe S., Streck C., Obersteiner M., Frank S., Griscom B., Drouet L., Fricko O., Gusti M., Harris N., Hasegawa T., Hausfather Z., Havlik P., House J., Nabuurs G.-J., Popp A., Sánchez M.J.S., Sanderman J., Smith P., Stehfest E., Lawrence D.: *Nature Climate Change*, 9, 817-828 (2019) Contribution of the land sector to a 1.5°C World.  
doi: 10.1038/s41558-019-0591-9
- 29) Roelfsema, M., van Soest, HL., Harmsen, M., van Vuuren, DP., Bertram, C., den Elzen, M., Höhne, N., Iacobuta, G., Krey, V., Kriegler, E., Luderer, G., Riahi, K., Ueckerdt, F., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Frank, S., Fricko, O., Gidden, M., Humpenöder, F., Huppmann, D., Fujimori, S., Fragkiadakis, K., Gi, K., Keramidas, K., Köberle, A., Reis, L., Rochedo, P., Schaeffer, R., Oshiro, K., Vrontisi, Z., Chen, W., Iyer, G., Edmonds, J., Kannavou, M., Jiang, K., Mathur, R., Safonov, G., Vishwanathan, S.: *Nature Communications*, 11(1), 2096 (2020). Taking stock of national climate policies: the Paris agreement needs to speed up implementation and scale up ambition. doi: 10.1038/s41467-020-15414-6
- 30) Rogelj J., Popp A., Calvin K.V., Luderer G., Emmerling J., Gernaat D., Fujimori S., Strefler J., Hasegawa T., Marangoni G., Krey V., Kriegler E., Riahi K., Vuuren D.P., Doelman J., Drouet L., Edmonds J., Fricko O., Harmsen M., Havlik P., Humpenoder F., Stehfest E., Tavoni M.: *Nature Climate Change*, 8, 325-332 (2018) Scenarios Towards Limiting Global Mean Temperature Increase Below 1.5°C.
- 31) Rosa I.M.D., Pereira H.M., Ferrier S., Alkemade R., Acosta L.A., Akcakaya H.R., Belder E., Fazel A.M., Fujimori S., Harfoot M., Harhash K.A., Harrison P.A., Hauck J., Hendriks R.J.J., Hernandez G., Jetz W., Karlsson-Vinkhuyzen S.I., Kim H., King N., Kok M.T.J., Kolomytsev G.O., Lazarova T., Leadley P., Lundquist C.J., Marquez J.G., Meyer C., Navarro L.M., Nesshover C., Ngo H.T., Ninan K.N., Palomo M.G., Pereira L.M., Peterson G.D., Pichs R., Popp A., Purvis A., Ravera F., Rondinini C., Sathyapalan J., Schipper A.M., Seppelt R., Settele J., Sitas N., Vuuren D.: *Nature Ecology & Evolution*, 1, 1416-1419 (2017) Multiscale Scenarios for Nature Futures.  
doi:10.1038/s41559-017-0273-9

- 32) Saeed F., Bethke I., Fischer E.M., Legutke S., Shiogama H., Stone D., Schleussner C.-F.: *Environmental Research Letters*, 13, 64024 (2018) Robust changes in tropical rainy season length at 1.5°C and 2°C. doi: 10.1088/1748-9326/aab797
- 33) Silva Herran D., Fujimori S., Kainuma M.: *Climate Policy*, 19, (9), 1117-1131 (2019). Implications of Japan's long term climate mitigation target and the relevance of uncertain nuclear policy. doi: 10.1080/14693062.2019.1634507
- 34) Stehfest E., Zeist W-J V., Valin H., Havlik P., Popp A., Kyle P., Tabeau A., Mason-D' Croz D., Hasegawa T., Bodirsky B.L., Calvin K., Doelman J.C., Fujimori S., Humpenöder F., Lotze-Campen H., Meijl H.V., Wiebe K.: *Nature Communications*, 10, 2166 (2019) Key determinants of global land-use projections
- 35) Tanaka, K. and O' Neill, B.C.: *Nature Climate Change*, 8, 319-324 (2018) The Paris Agreement Zero-emissions Goal is not Always Consistent with the 1.5°C and 2°C Temperature Targets. doi:10.1038/s41558-018-0097-x
- 36) Tanaka K., Lund M.T., Aamaas B., Berntsen T.: *Environmental Research Letters*, 13, 044020 (2018) Climate effects of non-compliant Volkswagen diesel cars. doi: 10.1088/1748-9326/aab18c
- 37) Tanaka K., Cavalett O., Collins W.J., Cherubini F.: *Nature Climate Change*, 9, 389-396 (2019) Asserting the climate benefits of the coal-to-gas shift across temporal and spatial scales. doi: 10.1038/s41558-019-0457-1
- 38) Wu W., Hasegawa T., Ohashi H., Hanasaki N., Liu J.Y., Fujimori S., Masui T., Takahashi K.: *GCB Bioenergy*, 11, 1041-2055 (2019) Global advanced bioenergy potential under environmental protection policies and societal transformation measures. doi: 10.1111/gcbb.12614
- 39) Xie Y., Dai H., Xu X., Fujimori S., Hasegawa T., Yi K., Masui T., Kurata G.: *Environment International*, 119, 309-318 (2018) Co-benefits of climate mitigation on air quality and human health in Asian countries. doi: 10.1016/j.envint.2018.07.008
- 40) 石河正寛、松橋啓介、金森有子、有賀敏典：土木学会論文集G（環境），74（6），II\_193-II\_201（2018）家庭CO2統計に基づく全国10地方別の排出要因分析と市町村別世帯あたり排出量の推計：全国試験調査結果を用いて
- 41) 金森有子：土木学会論文集G（環境），73（5），I\_121-I\_130（2017）家庭部門における地域別エネルギー消費特性を考慮した二酸化炭素排出削減目標の達成可能性 doi:10.2208/jscej.73.I\_121
- 42) 櫛部航、藤森真一郎、長谷川知子：土木学会論文集G（環境），75（5），I\_233-I\_238（2019）食料廃棄物削減目標を達成することによる社会・経済・環境への副次的影響
- 43) 白木裕斗、大城賢、藤森真一郎、長谷川知子：土木学会論文集G（環境），74（5），I\_369-I\_378.（2018）長期低炭素シナリオ下での電力系統安定化策実施量の推計. doi:10.2208/jscej.74.I\_369
- 44) 高橋潔、佐尾博志、本田靖、藤森真一郎、高倉潤也：土木学会論文集G（環境），74（5），I\_53-I\_60（2018）地球温暖化に伴う熱関連死亡による被害額
- 45) 藤森真一郎、大城賢、白木裕斗、長谷川知子土木学会論文集G（環境），74，（5），I\_213-I\_222（2018）エネルギー技術情報を用いた経済モデルによる日本の長期二酸化炭素排出削減費用の推計. doi:10.2208/jscej.74.I\_213

## （2）主な口頭発表（学会等）

- 1) Cassen C., Masui T., Lefevre J., Teixeira A., Lecocq F.: LCS-RNet 11th Annual Meeting, Rome (2019) A Tool for Scenario Analysis: An IPCC perspective

- 2) Fujimori S., Hasegawa T., Krey V., Keywan R., Bodirsky B.L., Bosetti V., Callen J., Despres J., Doelman J., Drouet L., Emmerling J., Frank S., Fricko O., Humpenoder F., Havlik P., Meijl H., Ochi Y., Popp A., Schmitz A., Takahashi K., Vuuren D.: Tenth Annual Meeting of the IAMC 2017, Brazil (2017) A Multi - model Assessment of Food Security Implications of Well Below 2°C Scenarios.
- 3) Fujimori S., Takakura J.: CGRA +1.5 AND 2°C IMPACTS WORKSHOP, Luxemburg (2017) AgMIP Phase 2, 2nd Round Core Scenario Results Overview and Some Insights.
- 4) Fujimori S.: 1st International Workshop on Integrated Assessment Modeling of GHGs and Air Pollutants, Italy (2017) AIM Modeling and Recent on-going Research Activities.
- 5) Fujimori S., Hasegawa T.: FEEM Research Seminar, Italy (2017) AIM Modeling and Recent on-going Research Activities.
- 6) Hasegawa T., Havlik P., Fujimori S., Ochi Y.: Coordinated Global and Regional Assessment Workshop +1.5/+2.0°C Worlds and Beyond, Laxenburg (2017) Using Food Security Indicators Climate Mitigation Effects on food Security: Multi Global Economic Modelling Comparison.
- 7) Hasegawa T., Ohashi H., Fujimori S., Masui T., Takahashi K.: Workshop on Biodiversity and Ecosystem Services Scenarios for IPBES using the Shared Socio - economic Pathways, Germany (2017) Collaborative Work between Biodiversity Impact Assessment Model and AIM.
- 8) Hasegawa T., Sakurai G., Fujimori S., Takahashi K., Hijioka Y., Masui T.: Impacts World 2017, Germany (2017) Global Food Insecurity under Climate Volatility.
- 9) Hasegawa T., Havlik P., Fujimori S., Valin H., Fellmann T., Kyle P., Lotze-Campen H., Mason-D, Ochi Y., Perez-Dominguez I., Stehfest E., Takakura J., Meijl H.V.: Impacts World 2017, Germany (2017) Climate Mitigation Effects on Food Security: Multi Global Economic Modelling Comparison.
- 10) Hasegawa T., Ohashi H., Fujimori S., Takahashi K., Masui T.: The Food and Land-Use Coalition Work Stream 1: Food Agriculture, Biodiversity, Land and Energy (FABLE) Pathways First Meeting of the Country Teams, Austria (2017) Land Use in AIM-Health-CGE: Global Food, Agriculture and Land Use in AIM.
- 11) Hasegawa T., Fujimori S., Havlik P., Bodirsky B., Doelman J., Fellmann T., Kyle P., Koopman J., Lotze-Campen H., Mason-DCroz D., Ochi Y., Perez-Dominguez I., Stehfest E., Sulser T.B., Tabeau A., Takahashi K., Takakura J., Van Meijl H., Van Zeist W.J., Wiebe K.D., Witzke P., Valin H.: Tenth Annual Meeting of the IAMC 2017, Brazil (2017) Food Security under the Stringent Climate Mitigation: Insights from a Multi-model Approach.
- 12) Hanaoka T., Masui T.: 9th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting, California (2017) Effects of Promoting Electrification and Energy Efficiency Improvement in the Building Sector for Achieving of the Climate Target Keeping below 2°C.
- 13) Ichisugi Y., Masui T., Itsubo N.: Eco Balance 2018, Tokyo (2018) Carbon Footprint Projections for Japan Using Computable General Equilibrium.
- 14) Liu J.Y., Fujimori S., Takahashi K., Hasegawa T., Su X., Masui T. 2nd Global Conference on Theory and Applications of OR/OM for Sustainability, China (2017) Socio-economic Factors and Future Challenges of the 1.5°C Goal.
- 15) Liu J.Y., Fujimori S., Takahashi K., Hasegawa T., Su X., Masui T. : International Energy Workshop 2018, Sweden (2018) Assessment of mitigation options reconciling with sustainable development goals: a case study of China.
- 16) Liu J.Y., Fujimori S., Takahashi K., Hasegawa S., Wu W., Masui T.: Eleventh Annual

- Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2018, Spain (2018)  
Identifying trade-offs and co-benefits of climate policies in China to align policies with SDGs and achieve the 2°C goal.
- 17) Masui T. : Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) 6th Annual Meeting, Bangkok (2017) NDC and Long-term GHG Reduction Target of Japan.
  - 18) Masui T. : International Workshop of a Study on Assessing Climate Change Impacts and Policy Development in Korea, Seoul (2017) National Mitigation Target and Scenarios.
  - 19) Masui T. : Capacity Building Workshop on Low Carbon Development for Lao PDR and Cambodia (2018) Science-based methods for analyzing future society and emissions -Overall integrated assessment model and its roles-.
  - 20) Masui T. : LoCARNet 7th Annual Meeting Program, Jakarta (2018) Model and policy making process.
  - 21) Masui T. : Technical workshop France-Japan, Paris (2019) AIM/CGE [Japan].
  - 22) Masui T. : Technical workshop France-Japan, Paris (2019) Overall of AIM (Asia - Pacific Integrated Model).
  - 23) Masui T. : Technical workshop France-Japan, Paris (2019) Application of AIM to climate policies in Japan.
  - 24) Masui T. : BUAA-NIES Bilateral Workshop on Integrated Assessment of Health Co-benefits of Climate Change Mitigation Policy, Beijing (2019) AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and its contribution to climate mitigation policies.
  - 25) Masui T. : High - level Workshop on Climate Policy and Assessment, Tsukuba (2019) AIM (Asia - Pacific Integrated Model) and its contribution to climate mitigation policies.
  - 26) Masui T. : Sharing of View on Climate Change Policies and Mitigation Actions in Lao PDR, Vientiane (2020) Introduction of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and Assessment of Climate Mitigation Actions using AIM.
  - 27) Masui T., Marissa M. : Policy Dialogue on Challenges and Opportunity to Deep Decarbonization Pathway to Achieve NDC Target, Jakarta (2020) Long Term Strategy toward 1.5oC in Asia.
  - 28) Origuchi T., Shinozuka M., Zhang X., Munesue Y., Kanamori Y., Masui T. : Going Green EcoDesign 2017, Tainan (2017) Assessment of Impacts on CO2 Emissions and GDP of ICT Services in Japan using Computable General Equilibrium Model.
  - 29) Oshiro K., Fujimori S. : The First International Workshop of JMIP, Tokyo (2017) Mid-century Scenarios in Japan: Some Insights from CD-LINKS.
  - 30) Oshiro K. : China Energy Modeling Forum Annual Conference. Beijing (2018) Asia-Pacific Integrated Model (AIM) -Applications for the NDC and Mid-century Strategies.
  - 31) Oshiro, K., Fujimori, S., Gi, K., van Soest, HL., Bertram, C., Després, J., Masui, T., Rochedo, P., Roelfsema, M., Vrontisi, Z. : The 12th Annual Meeting of the IAMC, Tsukuba (2019) Japan's emission pathways in the context of the 2°C goals and their implications for the mid-century strategy.
  - 32) Shiogama H. : Japan Geoscience Union Meeting (JpGU)2019, Chiba (2019) Uneven distributions of four hazard indicators of climate change with the Paris Agreementas goals .
  - 33) Su X., Tachiiri, K., Tanaka K., Takahashi K., Watanabe M. : 100th American Geophysical Union (AGU)Fall Meeting, Washington (2018) Development of a GCM emulator used in the integrated assessment of climate change policy.
  - 34) Tachiiri K., Yokohata T., Tanaka K., Takahashi K. : Japan Geoscience Union Meeting

- (JpGU) 2018, Chiba (2018) Discussion: towards understanding climate-human system interaction.
- 35) Takahashi K.: Informal Science Meeting with Dr. Thelma Krug, Tokyo (2017) Intergrated Analyses of Climate Policies for Simultaneous Realization of the Paris Agreement and the SDGs.
- 36) Takahashi K.: Regional Action on Climate Change Conference (RACC9), Kyoto (2017) Integrated Analysis of Mitigation and Adaptation.
- 37) Takahashi K., Masui T., Hibino G.: Japan Geoscience Union Meeting (JpGU) 2018, Chiba (2018) Integrated Analyses of Climate Policies for Simultaneous Realization of the Paris Agreement and the SDGs.
- 38) Takahashi K.: セミナー: 「2050年の世界」イニシアティブの展望, 東京 (2018) Potential contribution of the ERTDF 2 - 1702 research project to TWI2050 initiative - Integrated Analyses of Climate Policies for Simultaneous Realization of the Paris Agreement and the SDGs - .
- 39) Takahashi K.: International Workshop on Climate Change Adaptation Decision Support, Seoul (2019) Introduction to research projects conducted by the NIES/AIM impact modeling team.
- 40) Takimi M., Masui T.: EcoMod2019 - International Conference on Economic Modeling and Data Science, Azores (2019) Assessment of value of carbon price to achieve NDC of Japan using national scale CGE model.
- 41) Tanaka K., O' Neill B.C.: 10th International Carbon Dioxide Conference 2017, Switzerland (2017) Is the Zero Emission Requirement Aligned with 2.0°C and 1.5°C Stabilization Targets?
- 42) Tanaka K.: 簡易気候モデルに関する情報交換会, Tokyo (2018) Paris Targets, Overshoot, Uncertainties, etc. - A View from Simple Climate Model Approach.
- 43) Tanaka K.: B. C. 0に関する情報交換会 2018, Paris Targets, Overshoot, Uncertainties, etc. - A View from Simple Climate Model Approach (2018) The Paris Agreement zero emissions goal is not consistent with 2ies, etc. - A View from Simple Climate Model Approach.
- 44) Tanaka K.: Paris Agreement zero emissions goaence on Negative CO2 Emissions 2018, Sweden (2018) Paris Agreement zero emissions goal is not consistent with 2th 2ies, etc. - A View from Simple Climate Model Approach.
- 45) Tanaka K.: Des reunions climat at Etude et Modelisation du Climat et du Changement Climatique (EMC3), Laboratoire de Meteorologie Dynamique (LMD), Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), Sorbonne University, Paris (2018) The Paris Agreement zero-emissions goal is not always consistent with the 1.5°C and 2°C temperature targets.
- 46) Tanaka K.: Seminaire du Centre International de Recherche sur lsur lche sur l et le Developpement (CIRED), France (2018) Paris Agreement targets and overshoot scenarios.
- 47) Tanaka K.: Sé minaire du Le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), France (2018) Paris Agreement targets and overshoot scenarios.
- 48) Tanaka K., O' Neill B.C.: 100th American Geophysical Union(AGU) Fall Meeting, Washington (2018) The Paris Agreement zero-emissions goal is not alwaysconsistent with the 1.5°C and 2°C temperature targets.
- 49) Tanaka K., Yamagata Y., Boucher O., Ciais P.: Scenarios Forum Denver (2018) Can we bet on overshooting the Paris Agreement temperature targets under climate-carbon feedback uncertainties?

- 50) Tanaka K., O'Neill B.: Achieving Net Zero Conference, Oxford, UK (2019) Paris Agreement zero emissions goal is not always consistent with 2°C and 1.5°C temperature targets.
- 51) Tanaka K., Cavalett O., Collins W.J., Cherubini F.: 12th Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting, Tsukuba (2019) Asserting the climate benefits of the coal-to-gas shift across temporal and spatial scales.
- 52) Tanaka K., Cavalett O., Collins W.J., Cherubini F.: American Geophysical Union(AGU) Fall Meeting, San Francisco (2019) Asserting the climate benefits of the coal-to-gas shift across temporal and spatial scales: reinforcing the support for coal phase-out.
- 53) Wu W., Hasegawa T., Ohashi H., Hanasaki N., Masui T., Fujimori S., Takahashi K.: Eleventh Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2018, Spain (2018) An integrated assessment of global bioenergy potential from dedicated bio-crops under environmental policies.
- 54) Wu W., Takahashi K., Fujimori S.: Scenarios Forum 2019, Denver (2019) Downscaling a global land use allocation model for the quantification of national
- 55) 芦名秀一: TGSW2017, つくば (2017) Society 5.0実現による日本の脱炭素化
- 56) 芦名秀一: 柏市の環境施策と2050低炭素ナビ, 柏 (2017) 柏市について 2050低炭素ナビ開発の経緯 2050低炭素ナビによるシミュレーション
- 57) 芦名秀一: 外部講師による講演会, 豊田 (2017) 脱炭素社会に向けた社会的・技術的対策のパラダイムシフト
- 58) 芦名秀一: 川崎市地域環境リーダー育成講座, 川崎 (2018) 低炭素社会・脱炭素社会に向けた最新動向
- 59) 飯泉仁之直、塩竈秀夫、今田由紀子、花崎直太、金元植、沈志宏、西森基貴: 日本気象学会2017年度秋季大会, 227, 北海道 (2017) 気候モデルによる大規模アンサンブルデータを用いた作物収量への気候変動影響の検出
- 60) 一杉佑貴、増井利彦、伊坪徳宏: 第13回日本LCA学会研究発表会, 東京 (2018) CGEモデルを用いた日本のCFP将来推計
- 61) 今田由紀子、塩竈秀夫、高橋千陽、釜江陽一、森正人、廣田渚郎、小倉知夫、渡部雅浩: 日本気象学会2017年度春季大会, 東京 (2017) 2016年の世界の異常高温事例の多発に関する要因分析
- 62) 今田由紀子、塩竈秀夫、高橋千陽、釜江陽一、森正人渡部雅浩、水田亮、石井正好、木本昌秀: 日本気象学会2017年度秋季大会, 北海道 (2017) 世界の異常高温頻度に対する温暖化の寄与率の歴史的变化
- 63) 江守正多: 日本学術会議公開シンポジウム「パリ協定の下での長期温室効果ガス排出削減戦略を考える」, 東京 (2017) 気候変動予測、影響、リスク管理
- 64) 大城賢: EU-日本気候変動政策シンポジウム, 東京 (2019) Asia-Pacific Integrated Model (AIM)による日本の緩和シナリオ分析
- 65) 大城賢: 環境科学会2019年会, 名古屋 (2019) パリ協定気候目標を踏まえた日本の長期排出経路に関する分析
- 66) 金森有子: 国立環境研究所公開シンポジウム2017, 東京・大津(2017) 家庭からの環境負荷発生-持続可能なライフスタイルに向けて-
- 67) 金森有子: 平成29年度日本計画行政学会公開シンポジウム, 東京 (2017) 2050年持続可能なライフスタイルシナリオ
- 68) 金森有子: 2017年度日本建築学会大会地球環境部門パネルディスカッション, 広島 (2017) アジアの消費の過去、現在、未来
- 69) 金森有子: 第25回地球環境シンポジウム, 神戸 (2017) 家庭部門における地域別エネルギー消費特性を考慮した二酸化炭素排出削減目標の達成可能性
- 70) 塩竈秀夫、今田由紀子、森正人、高橋千陽、渡部雅浩、木本昌秀: 日本気象学会2017年度秋季大



会，東京（2017）極端現象の過去の人間活動による変化と避けられない将来変化

- 71) 塩竈秀夫、藤森真一郎、長谷川知子、高橋潔、久保田泉、田中克政、江守正多、今田由紀子、渡部雅浩、木本昌秀、阿部学、Damiel Mitchell、Daithi Stone、Myles R.Allen：日本気象学会2017年度春季大会，北海道（2017）2.0年安定化から1.5℃安定化への追加緩和と努力によって、極端現象の将来変化をどの程度低減できるのか？
- 72) 塩竈秀夫：日本気象学会、気候科学と古気候プロキシ研究の接点創出，名古屋（2017）産業革命以降と将来の気候変動-古気候研究との関連も含めて-
- 73) 塩竈秀夫：異常気象と温暖化. みんなの地球温暖化教室～京都議定書、パリ協定、そしてこれから～，京都（2017）異常気象と温暖化
- 74) 篠塚真智子、折口壮志、棟居洋介、金森有子、増井利彦：第8回横幹連合コンファレンス，京都（2017）ICTサービス利用による環境および経済への影響～リバウンド効果と波及効果の融合評価～
- 75) 高橋潔：国立環境研究所公開シンポジウム2017，大津（2017）気候変動リスクにどう向き合うか
- 76) 高橋潔：国民対話シンポジウム - パリ協定の実現に向けて/世界の進路・日本の進路-，東京（2017）パリ協定気候目標と持続可能開発目標の同時実現に向けた気候政策の統合分析
- 77) 高橋潔，佐尾博志，本田靖，藤森真一郎，高倉潤也：第26回地球環境研究シンポジウム，長崎（2018）地球温暖化に伴う熱関連死亡による被害額
- 78) 高橋潔：NSC定例勉強会（「2度シナリオ」と「1.5度特別報告書」について），東京（2018）気候変動の長期目標（2℃目標と関連の科学的知見）
- 79) 高橋潔：パタゴニア第6回草の根活動家のためのツール会議：気候変動編，山梨（2018）気候変動リスクにどう向き合うか
- 80) 高橋潔：大和証券株式会社勉強会，東京（2018）気候変動リスクとその管理について考える
- 81) 田中克政，O'Neill Brian C.：推進費2-1702意見交換会，東京（2018）パリ協定の温度目標とゼロ排出目標は本当に整合しているのか？両目標は必ずしも一致しないが、今世紀中盤までにCO2実質ゼロ排出が必要
- 82) 花岡達也：第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，東京（2019）我が国の家庭・業務部門のCO2排出インベントリの要因分析および長期削減目標に向けた評価
- 83) 古川将光、棟居洋介、金森有子、増井利彦：環境科学会2017年会（2017）風力発電の収支評価に関する分析：茨城県鹿嶋市および神栖市における既存設備を例に
- 84) 増井利彦：第47回Japan-CLPダイアログ会合，東京（2017）モデルと将来予測
- 85) 増井利彦：第8回横幹連合コンファレンス，京都（2017）日本における持続可能性評価のためのモデル開発
- 86) 増井利彦：2018年度第2回SPEED研究会，東京（2018）日本における約束草案の実現からその先を見据えた取り組みへ
- 87) 増井利彦：日本建築学会「中長期地域エネルギーシステム戦略検討小委員会」，東京（2018）日本のエネルギー戦略・目標について
- 88) 増井利彦：建設廃棄物協同組合平成30年度「講演の集い」，東京（2018）パリ協定と日本の取り組み-私たちにできること-
- 89) 増井利彦：センフィニティーシステム研究会平成30年度定時総会記念講演，東京（2018）パリ協定と日本の取り組み
- 90) 増井利彦：自動車技術会第5回大気環境技術・評価部門委員会，東京（2019）長期低炭素戦略に向けた長期ビジョン
- 91) 増井利彦：第2期再生可能エネルギー経済学講座 キック・オフシンポジウム，京都（2019）「エネルギー構造転換のマクロ経済・産業影響及び政策手段（部門C）」へのコメントと期待
- 92) 増井利彦：2019年度経営者「環境力」クラブ第1回会合，東京（2019）気候変動問題の最新動向と中小企業の役割

- 93) 増井利彦：MOBILIZE FOR CLIMATE JUSTICE-気候正義のためにたたかう人々-，東京（2020）気候変動問題の現状と私たちにできること

## 7. 研究者略歴

### 研究代表者

高橋 潔

京都大学工学部卒業、博士（工学）、現在、国立環境研究所社会環境システム研究センター副センター長

### 研究分担者

#### 1) 増井 利彦

大阪大学工学部卒業、博士（工学）、現在、国立環境研究所社会環境システム研究センター統合環境経済研究室室長

#### 2) 日比野 剛

東京理科大学理学部卒業、理学修士、現在、みずほ情報総研環境エネルギー第1部次長

## II. 成果の詳細

## II-1 パリ協定気候目標に統合的な世界の気候政策とその波及効果に関する分析

## 国立研究開発法人国立環境研究所

社会環境システム研究センター	広域影響・対策モデル研究室	高橋 潔
社会環境システム研究センター	広域影響・対策モデル研究室	藤森真一郎（平成29年度）
社会環境システム研究センター	環境社会イノベーション研究室	長谷川知子（平成29～30年度）
地球環境研究センター	気候変動リスク評価研究室	塩竈 秀夫・田中 克政

## 〈研究協力者〉

## 国立研究開発法人国立環境研究所

社会環境システム研究センター	Liu Jingyu・Wu Wenchao
社会環境システム研究センター	Zhang Runsen（平成29年度）

## 国立大学法人京都大学

大学院工学研究科 都市環境工学専攻	藤森真一郎（平成30～31年度）
-------------------	------------------

## 学校法人立命館立命館大学

理工学部	長谷川知子（平成31年度）
------	---------------

平成29～令和元年度研究経費（累計額）：46,433千円（研究経費は間接経費を含む）  
 （平成29年度：15,740千円、平成30年度：14,953千円、令和元年度：15,740千円）

## 〔要旨〕

長期気候目標・持続可能開発目標の同時実現に向けた世界規模の気候政策の統合分析、ならびに同分析のための一連の評価手法の開発を目的として、主に二つの統合評価ツールを用いて、本研究を実施した。第一は全球排出経路モデルであり、最新の気候科学ならびにGHG削減費用の知見をふまえ、目標達成に必要な全球排出経路とその不確実性を分析した。第二は世界経済モデルであり、気候以外の開発目標の定量分析のための拡張を施し、2℃/1.5℃の気候目標について、21世紀末までの社会経済・土地利用・GHG排出・持続可能性指標の統合シナリオを提示した。

## 〔キーワード〕

パリ協定、持続可能開発目標、統合評価モデル、食料安全保障、公平性、排出経路排出強度

## 1. はじめに

パリ協定では、全球気温上昇を工業化前比2℃より十分低く保ち更に1.5℃に抑える努力を追求するとの目標とともに、今世紀後半に人為のGHG排出と吸収の均衡を達成すべく最新科学に基づき早期削減を行うことが合意された。一方、各国の約束削減量の合算では上記目標の達成は困難との認識から、世界全体の進捗状況の定期確認・取組強化の仕組みが規定された。各国は定期確認をふまえた削減約束の引き上げを5年毎に求められる。しかし、削減約束の再検討にあたっては全球・国内両レベルで既存の知見に不足がある。

全球レベルでは、以下2点が主要課題である。第一に、1.5℃、2℃等の低濃度安定化を目指す場合、気候の微細な応答が目標達成の成否を決定付け、炭素循環、非CO<sub>2</sub>物質（メタン・エアロゾル等）の詳細な扱いが必須となる。最新の気候研究にあってもこれらは一定の不確実性を有しており、その排出削減経路・各国気候政策への影響を丁寧に議論する必要がある。第二に、気候政策は気候以外の社会的課

題、例えば飢餓、公平性、経済発展等に正負の副次的影響を及ぼし得るが、これまでそれらは統合的に議論されてこなかった。すなわち、気候目標と各種の持続可能開発目標の同時解決への道筋の提示が望まれている。

## 2. 研究開発目的

以上の背景をふまえ、長期気候目標・持続可能開発目標の同時実現に向けた世界規模の気候政策の統合分析、ならびに同分析のための一連の評価手法の開発を、本研究の目的とする。

主に二つの統合評価ツールを用いる。第一は全球排出経路モデルであり、最新の気候科学ならびにGHG削減費用の知見をふまえ、目標達成に必要な全球排出経路とその不確実性を分析する。第二は世界経済モデルであり、気候以外の開発目標の定量分析のための拡張を施し、2°C/1.5°Cの気候目標について、21世紀末までの社会経済・土地利用・GHG排出・持続可能性指標の統合シナリオを提示する。

## 3. 研究開発方法

図3.1.1に、研究計画の概要図（サブテーマ1担当部分を抜粋）に追記する形で示すように、気候目標と排出経路の分析、緩和政策の費用評価、緩和政策と食料安全保障の関係の評価、複数開発目標の同時評価について、研究(1-1)～研究(1-11)の11種の研究を実施し、その各々について気候変動科学の研究コミュニティで良く認知されている国際誌での研究論文発表を行った。

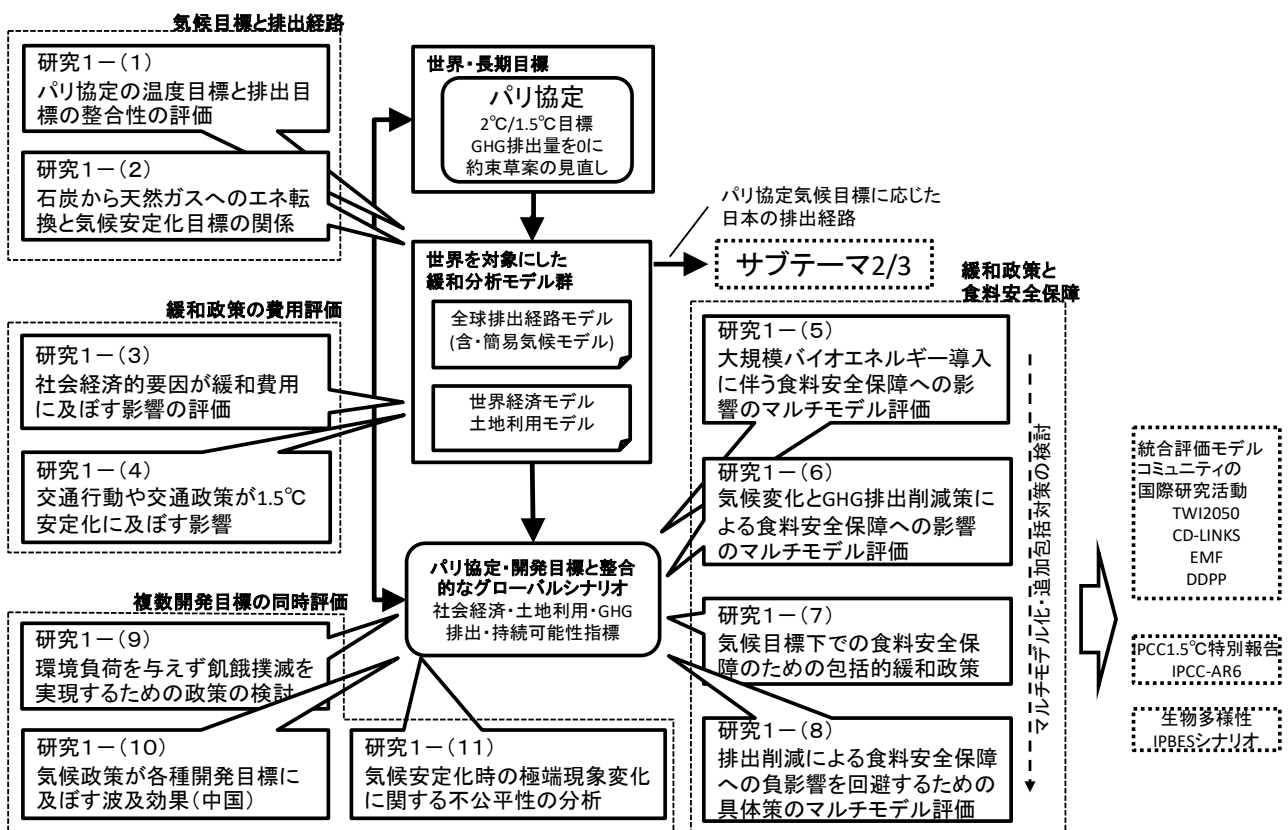


図3.1.1 サブテーマ1の研究計画事項、ならびに実施・公表した11の研究

研究(1-1):計画事項のうち、「気候学ならびにGHG削減費用の最新知見調査に基づく全球排出経路モデルの高度化」に関して、分担者の田中が開発する簡易統合評価モデルACC2 (Aggregated Carbon Cycle, Atmospheric Chemistry, and Climate Model) を活用し、パリ協定の温度目標（いわゆる2°C目標と1.5°C目標）及び排出目標（21世紀後半に人為のGHG排出を正味ゼロ）を達成するための最小費用排出経路の分析を実施し、特に、（しばしば同値として扱われる）温度目標と排出目標の間の整合性について評価した。ACC2は、炭素循環、大気化学、物理気候動態、緩和費用に関わる全球レベルの主要なブ

プロセスを記述しており、地球科学と環境経済学の知見が必要とされる長期的な気候政策を主な分析対象とする。本研究では、ACC2の最適化アルゴリズムにより、モデル中の気候感度等の不確実なパラメータについて、過去の観測データやその他の知見と整合性を満たすよう設定した。

研究(1-2): また、世界各地域から国別電力生産量に関して代表的な国々を取り上げ(中国、ドイツ、米国及びインド)、各国の石炭及び天然ガス火力発電に伴う温室効果ガスや短寿命気候汚染物質の排出量を算出し、石炭から天然ガスへのエネルギー転換が気候安定化目標に寄与するのかを不確実性も考慮し検証した。天然ガスの燃焼によるCO<sub>2</sub>放出量は、石炭の場合の半分以下で、一般的に天然ガス火力発電は石炭火力発電と比較して効率が良い。しかし、天然ガスの主な組成はメタンで、採掘、輸送、貯蔵、燃焼などの様々なサプライチェーンの段階においてメタンが漏出することが報告されている。メタンはCO<sub>2</sub>と比較して大気中の寿命は短いものの、強い温室効果を持つガスであり、近年特に米国で水圧破砕法による天然ガスの生産量が上昇したことを背景に、メタンの漏出に関心が寄せられてきた。また、天然ガス発電によるメタンの漏出量には大きな不確実性が伴い、石炭に対する天然ガスの気候変動対策上の優位性に疑問が投げかけられている。

温室効果ガスや短寿命気候汚染物質の排出量の算出には、ecoinventバージョン3.4を用いた。このデータベースには、石炭及び天然ガス火力発電のサプライチェーン(採掘、輸送、燃焼など)からの温室効果ガスや短寿命気候汚染物質の排出量が、国別もしくは地域的に収められている。データベースから得られた様々なガスや物質の単位発電量当たりの排出量に対して、排出指標(emission metric)を適用して、総CO<sub>2</sub>換算排出量を算出した。IPCC-AR5に掲載されている排出指標に限定し、代表的な地球温暖化係数(Global Warming Potential, GWP)と代案的な地球温度変化係数(Global Temperature change Potential, GTP)を利用した。

研究(1-3): 計画事項のうち「世界経済モデルを用いた1.5°C目標を達成する緩和策、エネルギーシステム、土地利用、交通システムの状況の描出、目標達成のための課題把握、課題克服のための施策提示」に関して、様々な社会経済的要因(技術コストやエネルギー需要の仮定等)が緩和費用に及ぼす影響の評価を実施した。温度目標を2°Cから1.5°Cに変更すると、より協調した取り組みが求められ、大きな費用が発生すると考えられる。本研究では、世界経済モデルAIM/CGEを用いて、緩和費用の変化から社会経済的要因の役割を評価し、1.5°C目標並びに2°C目標下で社会経済的要因が緩和コストに及ぼす影響を特定した。分析対象とする社会経済的要因としては、低炭素エネルギー供給技術、最終エネルギー効率改善、生活習慣変化、バイオマス技術促進の4種を扱った。

研究(1-4): さらに、交通行動や交通政策が1.5°C安定化に及ぼす影響の定量化を実施した。運輸部門は、世界のCO<sub>2</sub>排出量の約4分の1を占める。したがって、2°Cおよび1.5°Cの目標を達成するには、低炭素輸送政策が必要となる。本研究では、運輸部門とマクロ経済との相互作用をよりよく理解し、世界交通モデルを用いて異なる交通政策介入が緩和ポテンシャルと費用にどのように影響するかをシミュレートした。2005年から2100年を分析対象期間とし、世界経済モデルAIM/CGEと世界交通モデルAIM/Transportを統合して評価した。両モデルの統合は、エネルギー価格、炭素価格、GDP、交通サービス、交通部門エネルギー消費量などを相互に繰り返しやり取りすることで実装した。

研究(1-5): 計画事項のうち「気候以外の持続可能性の評価事例としての1.5°C目標の飢餓リスクへの含意の評価」について、大規模バイオエネルギー導入に伴う食料安全保障への影響評価を実施した。バイオエネルギーは、いわゆる1.5°C目標・2°C目標のような強い気候変動緩和目標の達成に向けて、大気中の炭素を吸収する技術として重要な役割を果たすと期待されている。一方で、バイオエネルギーの大規模な導入は食料生産と競合し、世界の食料安全保障を脅かす可能性が示唆されている。そこで、第33回エネルギーモデルフォーラムに参加する6つの統合評価モデルおよび農業経済モデルと、FAOの手法に基づき開発した栄養不足人口推計モジュールを組み合わせ、高いバイオエネルギー需要が食料安全保障に及ぼす影響の包括的な分析を実施した。モダン(従来型を除く)バイオエネルギー需要量を異なるレベルに変えた複数のシナリオを準備し、そのシナリオ下で、食料安全保障に関わる指標の変化を分析した。指標には、栄養不足人口、一人当たり食料消費カロリー、食料価格、食料自給率、作物・畜産物の生産量、農耕地・牧草地面積を取り上げた。

研究(1-6)：複数の世界農業経済モデルを用い、2050年までに気候変化とGHG排出削減策の両者による食料安全保障への影響を評価した。世界の8つの研究機関の世界農業経済モデルが食料価格や食料需給に関する将来予測のデータ提供を行い、国立環境研究所・京都大学の研究チームが開発してきた飢餓リスク推計ツールを用いて解析を実施した。

気候変化ならびにGHG排出削減策が農作物の生産・消費や食料価格に及ぼす影響については、国際農業モデル比較プロジェクトAgMIP (Agricultural Model Inter-comparison and improvement Project)に参加する8つの統合評価モデルあるいは農業経済モデルが用いられた。統合評価モデルあるいは世界農業経済モデルは将来の人口とGDPを入力として、食料需給、土地利用変化、GHG排出量、GHG排出削減量などを出力(将来予測)する。各モデルが出力する一人当たり食料消費カロリー、食料価格、さらにそこから導出される飢餓リスク人口、食料支出の4指標を用いた。

将来分析のシナリオには、まず、GHG排出削減策を取らず気候変動が加速するケース(気候変動加速ケース；RCP6.0)と、GHG排出削減策を取り気候変動が緩和されるケース(対策ケース；RCP2.6)の2種類を検討した。この2つのケースは共に気候変動による作物収量への影響を受け、今世紀末の世界の平均気温が産業革命以前に比してそれぞれ2.7℃(RCP6.0)、1.6℃(RCP2.6)上昇するレベルに相当する。また、RCP2.6では、GHG排出削減策を取るために、GHG排出に対して炭素税を課すことを想定している。また、この気候変動加速ケースと対策ケースに対して、3つの異なる人口やGDPといった社会経済状況の将来変化想定で同様に解析を行い、モデル出力の頑健性を確認した。さらに、参照シナリオとして、気候変動緩和策を取らず仮想的に気候変動影響もないと仮定したベースラインケースを準備した。

研究(1-7)：さらに、1.5℃気候目標下での食料安全保障を確保する包括的な緩和政策の設計にも取り組んだ。食料安全保障に資する政策手段としては、国際援助、バイオエネルギー税、国内収入再配分に焦点を当てた。定量化にあたり、AIMの既開発モデル群を結合的に用いるモデル枠組を構築した。このモデル枠組には、バイオエネルギー作物、植林、非CO<sub>2</sub>排出削減などの土地ベースの緩和オプションが含まれ、その中核はエネルギー、農業、および土地利用市場間の相互作用を描出するAIM/CGEである。分析対象シナリオとして、4つの気候緩和レベルと3つの社会経済シナリオを用い、そこに食料安全保障関連の政策の有無によりシナリオを追加した。

研究(1-8)：今世紀を対象に温室効果ガス排出削減策によってもたらされる食料安全保障への負の影響を回避するための具体策を提言し、途上国への必要な援助費用を算定した。欧州のHorizon2020プロジェクト(CDLINKS)に参画する、日本を含む世界の6つの研究機関の統合評価モデルが提供する将来予測のデータを使用し、京都大学・立命館大学・国立環境研究所・株式会社E-konzalの産学連携研究チームが開発した飢餓リスク推計ツールを用いて解析を実施した。日本からは京都大学・立命館大学・国立環境研究所の研究チームがAIM/CGEモデルを用いて参加した。モデル内では将来の世界全体の累積CO<sub>2</sub>排出量を所与とし、それを満たすための温室効果ガス排出削減を世界一律の炭素税を課すことで表す。炭素税は化石燃料の消費や森林伐採に対して罰金が科せられ、低炭素なエネルギー源の消費や植林などを経済合理的なメカニズムで促す。この炭素税は主として以下の3つの経路で食料安全保障に影響をもたらす。①農業由来の温室効果ガス排出削減のための費用により食料価格が上昇、②農業由来の温室効果ガス排出への課税により食料価格が上昇、③バイオエネルギーの需要が増加し、土地価格や食料価格が上昇。そして、将来分析には温室効果ガス排出削減の規模が異なる4シナリオを検討した。さらに、温室効果ガス排出削減策によってもたらされる食料安全保障への負の影響を回避するための3つの具体策、①食料価格に対する補助金、②途上国に対する国際援助、③飢餓リスクに直面する人のみに対する援助、の費用算定を行った。

研究(1-9)：飢餓の対策として食料の増産が従来よく考えられてきたが、食料の生産そのものは農地開拓、森林伐採、温室効果ガスの排出などの環境負荷をもたらす。そのため、飢餓撲滅のために食料生産を増やすことが環境に意図せぬ負荷を与えてしまうかもしれない。そこで、本研究では、環境に負荷を与えずに飢餓撲滅を実現するための政策を明らかにした。

飢餓撲滅と食料生産・消費に関わる異なる複数の政策を組み合わせたシナリオを準備し、シミュレーションを実施し、結果を比較することで政策の効果を算定した。シナリオには以下のa~gの7つを準

備した。a) 現在の不平等な食料分配を維持しつつ全ての人の食料消費を一律に増やすことにより2030年までに飢餓をなくすシナリオ(図3.1.2中の「食料増産」)、b) 飢餓の人々に集中的に食料支援を実施するシナリオ(図3.1.2中の「食料支援」)、さらに、b)の食料支援に加えて、c)食料廃棄物の削減、d)先進国を中心とした過剰摂取の削減、e)作物収量の改善をそれぞれ組み合わせて飢餓撲滅を実現するシナリオ、さらに、f)集中的食料支援と上の3つの政策をすべて実施するシナリオを準備した。最後に、比較対象として、g)過去を将来に延長した飢餓対策を行わないなりゆきシナリオを準備した。政策の効果は、飢餓撲滅の目標年である2030年について各シナリオの結果を、なりゆきシナリオを比較することとで算定した。

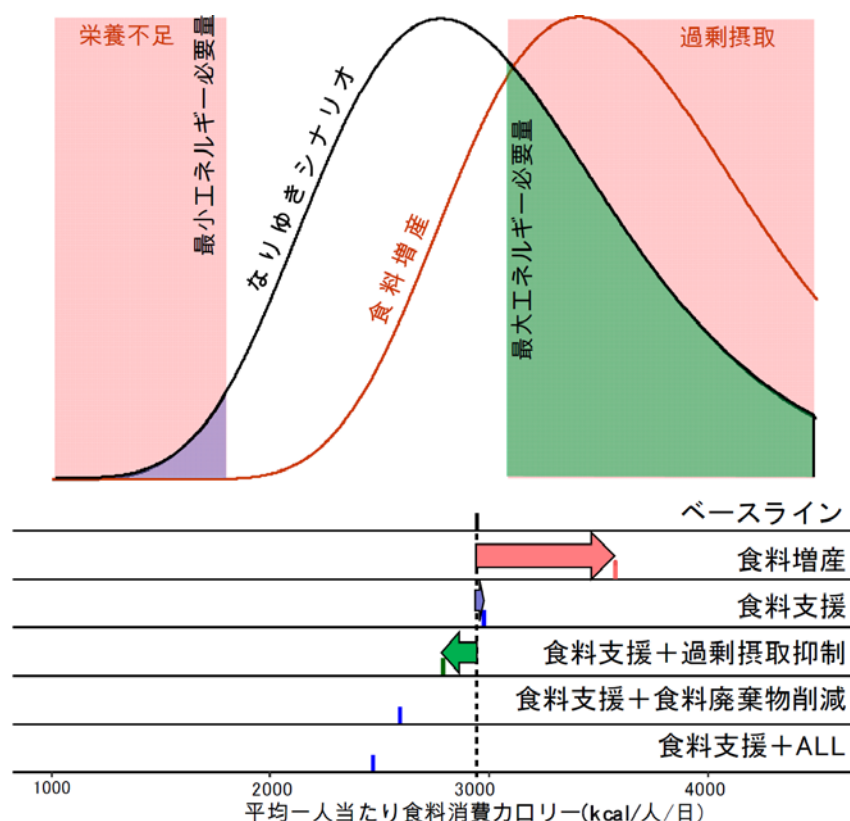


図3.1.2 飢餓撲滅達成のための可能な食料分配の変化。上図の実線の曲線はなりゆきケースと食料増産ケースでの2030年における一人当たり食料消費カロリーに対する人口分布を示す。左右の赤の網掛けはそれぞれ最小エネルギー消費量に満たない範囲と最大エネルギー消費量を超過する範囲を示す。青の網掛けは、2030年になりゆきケースで最小エネルギー消費量に満たない量を消費する人口（飢餓リスク人口）を示し、食料支援政策ではこの不足部分を満たすことを想定している。下の青線は各シナリオでの必要な世界の平均一人当たり消費量を示し、これがモデル内では食料需要の制約となっている。黒の点線はなりゆきシナリオのそれを示す。

シミュレーションには、国際応用システム分析研究所が開発・運用している農業経済部分均衡モデルGLOBIOM(Global Biosphere Management Model)を用いた。GLOBIOMは将来の人口とGDPを入力し、経済合理性に基づき食料需給、土地利用分布、温室効果ガス排出量などを出力（将来推計）するモデルである。人口と所得から算定される農畜産物の需要を所与とし、それを満たすための農畜産物の生産量、土地利用分布、それに伴う環境負荷を算定する。本研究では、シナリオに応じて必要な食料需要量をあらかじめ算定し、それをGLOBIOM内で想定し、その需要を満たす食料需給、土地利用変化、環境負荷物質を推計した。食料需要の算定には、図3.1.2に示すような一人当たり食料消費カロリーに対する人口分布を用いた。「食料増産」シナリオでは食料分配の分布形を維持したまま、最小エネルギー必要量以下の人口がいなくなるまで右にシフトし、その時の平均消費量を想定した。これは、飢餓がなくなるま

ですべての人々の食料消費を一律に増加させることを意味する。「食料支援」シナリオでは、なりゆきシナリオで飢餓の状態にある人々の食料消費を最小エネルギー必要量のレベルまで増加させることを想定した。すなわち、最小必要量に不足する分だけ食料消費を増加させることを想定している。「食料支援+過剰摂取抑制」シナリオでは、「食料支援」に加え、過剰摂取の人々の消費を最大必要量レベルまで落とすことを想定した。すなわち、最大エネルギー必要量を超える分の消費を減らすという想定をした。「食料支援+食料廃棄物削減」シナリオでは、「食料支援」に加えて、消費段階でのロスをなくす、すなわち、廃棄分だけの消費量を低く想定した。「食料支援+ALL」シナリオでは、「食料支援」と過剰摂取抑制、食料廃棄物削減をすべて実施することを想定した。

研究(1-10)：気候政策が各種開発目標に及ぼす波及効果の分析に関しては、世界各国への適用可能性を想定しつつ、中国をケーススタディの対象地域として選択し、2°C目標に統合的な気候政策の結果として、エネルギー安全保障（一次エネルギー源の多様性と輸入依存度）、大気質（SO<sub>2</sub>・NO<sub>x</sub>・黒色炭素の排出）、食料安全保障（食料価格、飢餓リスク人口、食料自給率輸入依存度）、土地資源管理（森林伐採量）に及ぼす波及影響の総合分析を実施した。

研究(1-11)：また、1.5°C及び2.0°C気候安定化時の極端現象変化に関する不公平性の分析を実施した。両安定化水準間での影響差を調べるために、気候モデルMIROC5を用いて、現在気候条件(2006年～2015年)、1.5°C温暖化条件、2.0°C温暖化条件で、それぞれ10年×100メンバの気候シミュレーションを行った。他機関の5気候モデルの実験データとも比較して、現在10年に一度の「暑い昼」と「強い雨」の頻度が1.5°Cと2.0°C温暖化時にどれだけ増加するかを調べた。さらに、各国・各地域の極端現象の増加量と累積CO<sub>2</sub>排出量などを比較することで、「極端現象変化に関する不公平性」を評価し、その不公平性に1.5°C及び2.0°C安定化で差異があるかを調べた。

#### 4. 結果及び考察

研究(1-1)について、パリ協定の温度目標とゼロ排出目標の整合性を両方向から検討した。まず費用が出来るだけ掛からない排出削減方法で温度目標を目指すと、温室効果ガスの排出はどうなるか（ケースiからiv）を分析した（図4.1.1）。また逆に、ゼロ排出目標を目指すと気温上昇はどうなるのか（ケースvからvii）についても検討した。研究では10のシナリオを検討した。その結果、短期間に急激な排出削減を行えば、温暖化は一時的な目標超過なしに1.5°C及び2°Cで安定することが分かった。例えば、1.5°C目標には2033年までに約8%もの排出削減（ケースii）、2°C目標には2060年までに約3分の2の排出削減が必要になる（ケースiv）。いずれの場合も、その後はその排出量を保てば良く正味ゼロ排出までは進まない。

一方、そのような急激な削減は困難であるので、気温が一時的に目標を超過し、今世紀末までに1.5°Cや2°C上昇に戻るシナリオも検討した。1.5°C一時超過シナリオでは、2070年までに温室効果ガスの排出は正味ゼロになり、その後今世紀中は正味負に保たれる（ケースi）（負の排出には大気から二酸化炭素を回収する活動が必要）。2°C一時超過シナリオでは、2085年までに排出はゼロになり、その後は負になるが、負である期間は1.5°C一時超過の場合よりも短くなる（ケースiii）。逆に、温度目標ではなくゼロ排出目標を目指すシナリオにも目を向けた。その中で、今世紀中頃（2060年）に正味ゼロ排出になる場合と今世紀最後（2100年）にそうなる場合を分析した。前者の場合、気温は2°C目標付近でピークを迎え、その後下がる（ケースv）。後者の場合、気温は2043年に2°C上昇を超え、約1世紀の間（ケースvi）、もしくはそれ以上の間（ケースvii）、2°C上昇まで戻らない。

従って、ゼロ排出を達成するタイミングが非常に重要になる。パリ協定で明記されている今世紀後半ゼロ排出という目標を達成しても、排出削減が遅ければ、同じく明記されている温度目標を大きく外れることがあることが示された。本研究の成果はNature Climate Change誌で公表した。



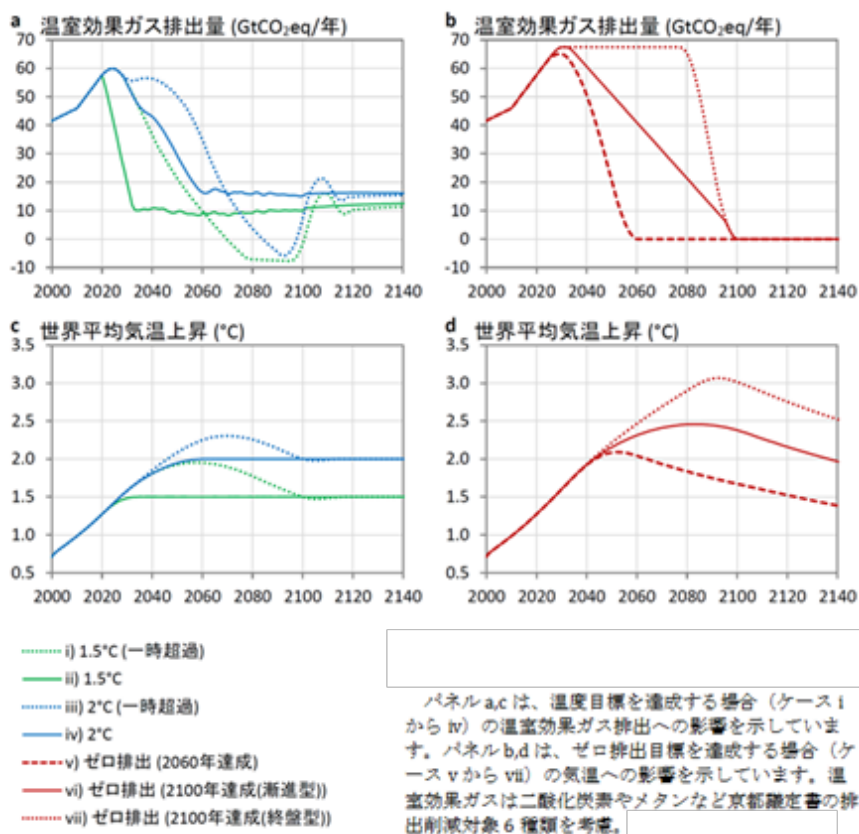


図4.1.1 ACC2を用いたパリ協定温度目標及び排出目標達成のための最小費用排出経路分析（代表的なケースの温室効果ガス排出量と世界平均気温上昇（産業化前比））

研究(1-2)について、石炭火力発電と天然ガス火力発電の気候影響を比較すると、天然ガス火力発電の方がどの地域においても短・長期共に気候影響が小さいことが分かった。各々の温室効果ガスや短寿命大気汚染物質の影響に関しては、CO<sub>2</sub>の影響が両発電で短・長期共に突出している。しかし、より短い時間軸を意味するGWP20やGTP20を基準にすると、CO<sub>2</sub>の影響は相対的に小さくなり、特に石炭の場合、非CO<sub>2</sub>要素の影響が顕著になる（図4.1.2）。本研究の結果は、石炭から天然ガスへのエネルギー転換が気候安定化目標に整合することを裏付け、石炭火力発電所を段階的廃止する主張の後ろ盾となりうる。しかし、石炭から天然ガスへの転換には、他にも多くの検討要因がある。例えば、大気質への影響を考慮すると、天然ガスへの転換はより強く主張されると考えられる。その一方で、天然ガスへの転換を他の気候緩和策より優先させることは、再生可能エネルギーなどの他の低炭素技術の導入に遅延をもたらす可能性がある。また、天然ガスの拡大は、化石燃料設備からの二酸化炭素排出の固定（カーボン・ロックイン）を意味し、脱炭素社会への移行が先送りになる副次的影響も考えられる。また、天然ガスの水圧破砕法に関しては、飲料水汚染、地震活動の誘発などの他の環境面での懸念もある。様々な要因を総合的に考慮し、気候緩和策をどのように進めるのか全体的に検討を続けることが望まれる。本研究の成果はNature Climate Change誌で公表した。

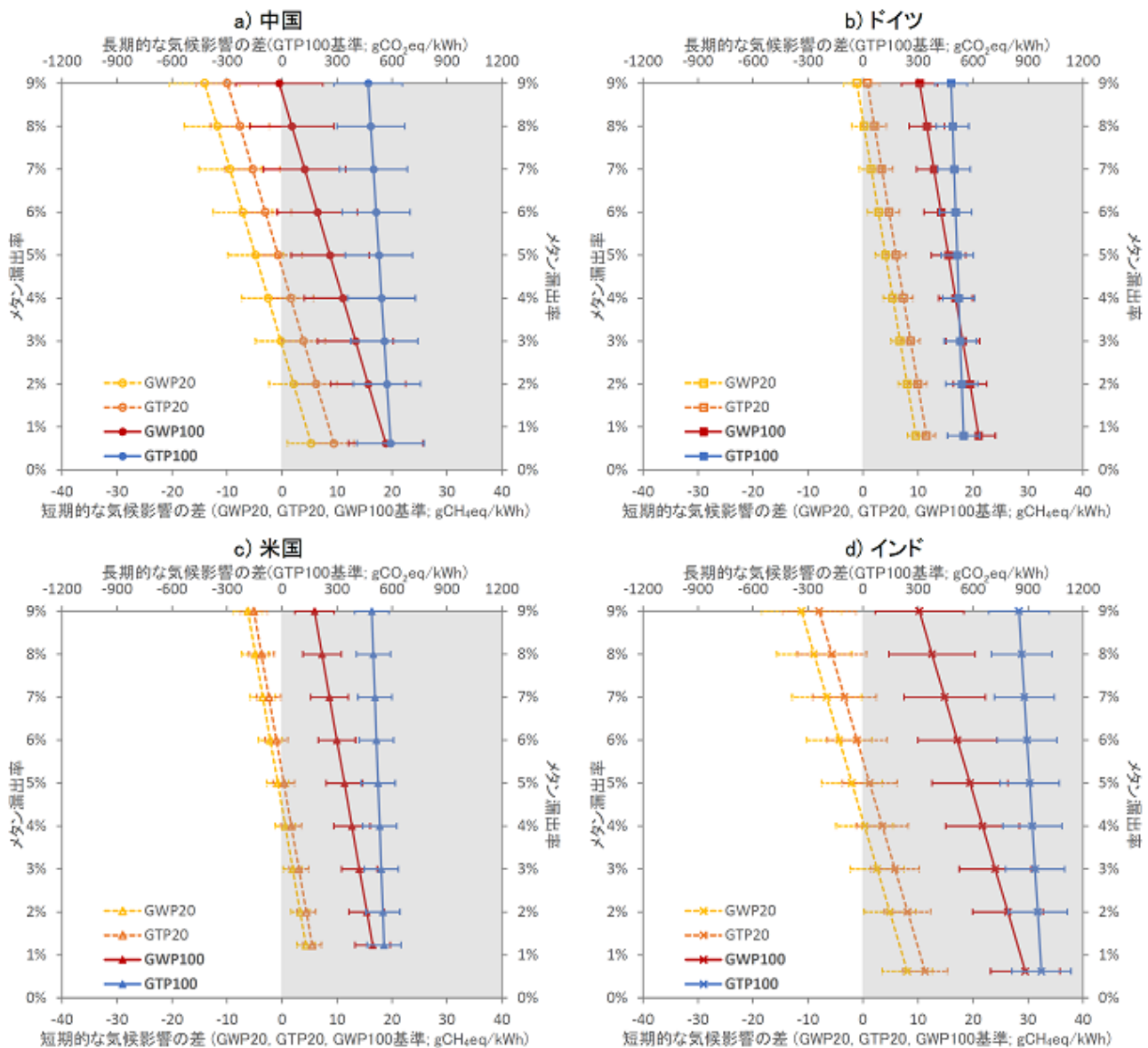


図4.1.2 各国における石炭と天然ガス火力発電の気候影響の差とメタン漏出率による影響。

メタン漏出率は、インベントリ値（約1%）から最大9%までの範囲を仮定している。GWP100とGTP100を補完的利用したマルチ排出指標方式の主要な結果は実線で表し、凡例は太字で示した。灰色の部分には、石炭よりも天然ガス発電による気候影響が小さいことを示す。誤差範囲は排出データと排出指標の不確実性に起因する95%の信頼区間を表す。

研究(1-3)について、図4.1.3は低炭素エネルギー供給技術の技術的進歩が緩和コストの削減において最も重要な要素であることを示している。2100年には、低炭素エネルギー供給シナリオにおける追加的な技術改善による1.5℃ケースでのGDPの損失は、緩和政策なしのベースラインシナリオ（緩和政策無し）と比較して1.7%であり、基準シナリオ（追加の社会経済的要因の変更がない場合）でのGDP損失3.0%の、ほぼ半分である。最終エネルギー効率と生活習慣の変化は、ベースライン排出量を削減するのに役立ち、削減コストの軽減につながる。生活習慣の変化は輸送部門の排出削減にも大きな影響を与える。社会経済的要因のうちバイオマス技術の促進は、炭素隔離・貯留（BECCS）と組み合わせたバイオエネルギーの拡大により最大の負の $CO_2$ 排出を生み出す。これらの社会経済的要因の効果は、1.5℃と2℃のシナリオでわずかに異なるが、同様の傾向が見込める。この結果は、気候安定化を実現際の技術改良の重要性を示唆している。特に低炭素エネルギー供給技術における技術進歩の実現が焦点となる。本研究の成果はCarbon Management誌で公表した。

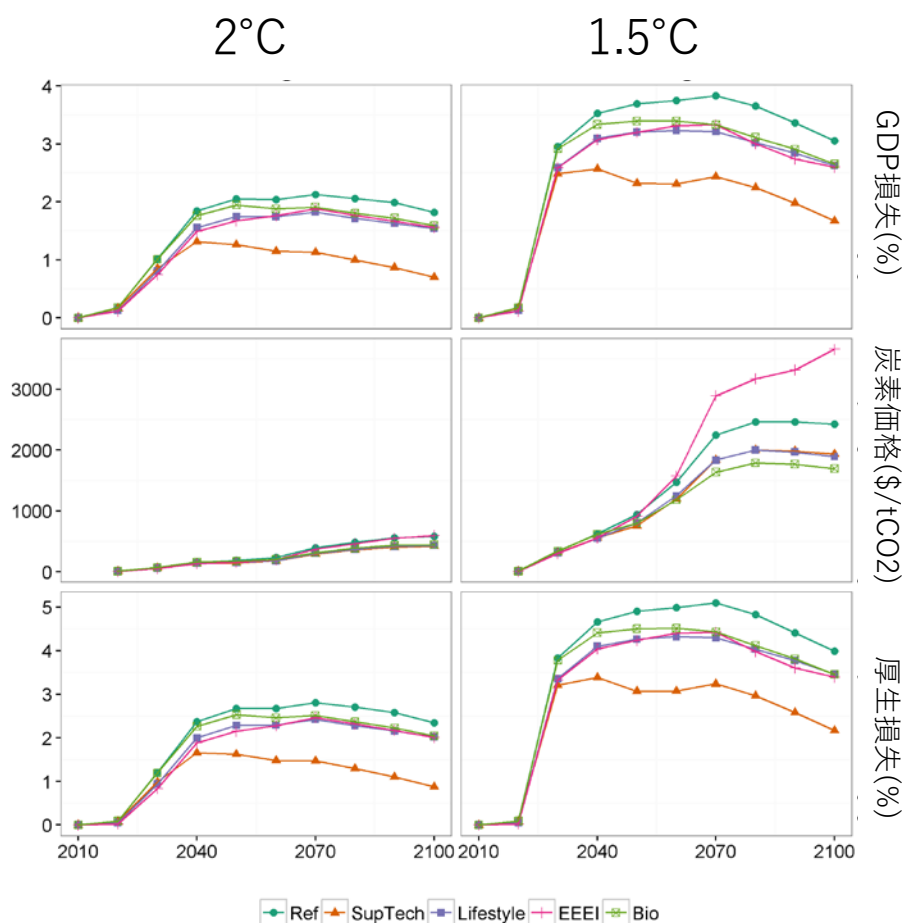


図4.1.3 GDP損失で示す緩和費用（上）、炭素価格（中）、厚生損失（下）。2°C（左）・1.5°C（右）シナリオについて、Ref、SupTech、Lifestyle、EEEI、Bioはそれぞれ基準シナリオ（追加の社会経済的要因の変更がない場合）、エネルギー供給技術の追加的な進歩、低炭素ライフスタイル、エネルギー高効率、バイオエネルギー技術の追加的進歩を導入したシナリオを表す。

研究(1-4)について、運輸部門における脱炭素化は、エネルギー効率の改善、車両技術の革新、特に電気自動車の展開、公共交通機関の開発、車の占有率の増加などを導入することによって実現可能である。例えば、大量輸送志向の交通の増加により累積CO<sub>2</sub>排出量の15.7%が削減される。ここで重要な発見は、低炭素輸送を促す政策が、地球温暖化を2°Cと1.5°Cに気候緩和する際に生じる炭素価格、GDP損失率、および福祉損失率を大きく削減できることである。また、交通政策の寄与は、緩和強度が強ければ高いほど効果的である（図省略）。

研究(1-5)について、バイオエネルギーの大規模な導入は、慎重に実施しなければ、世界の作物生産と食物と飼料の消費を減少させ、栄養失調を増加させることにつながる事が多くのモデル間で共通して確認された。すなわち、バイオエネルギー価格の上昇に伴い（図4.1.4a）、バイオ農作物の農耕地が拡大し、食料と牧草地の耕地を減少させ、食料価格が上昇する（図4.1.4e）。価格上昇に対応して、作物収量は（MAgPIEを除いて）著しく増加するが、その収量改善は食料需要を満たすには不十分であるため、食料生産は減少する（図4.1.4b, d）。その結果、食料消費（図4.1.4f）が減少し、より多くの栄養失調がもたらされる（図4.1.4g）。さらに、地域ごとにみると、アジア、アフリカなどで大きな負の影響が確認された（図省略）。なお、以上の結果は単純にバイオエネルギーの大規模導入を否定するものではなく、食料生産用耕作地の保護等の追加施策の重要性を示している。この論文は現在Climatic Change誌に投稿中である。

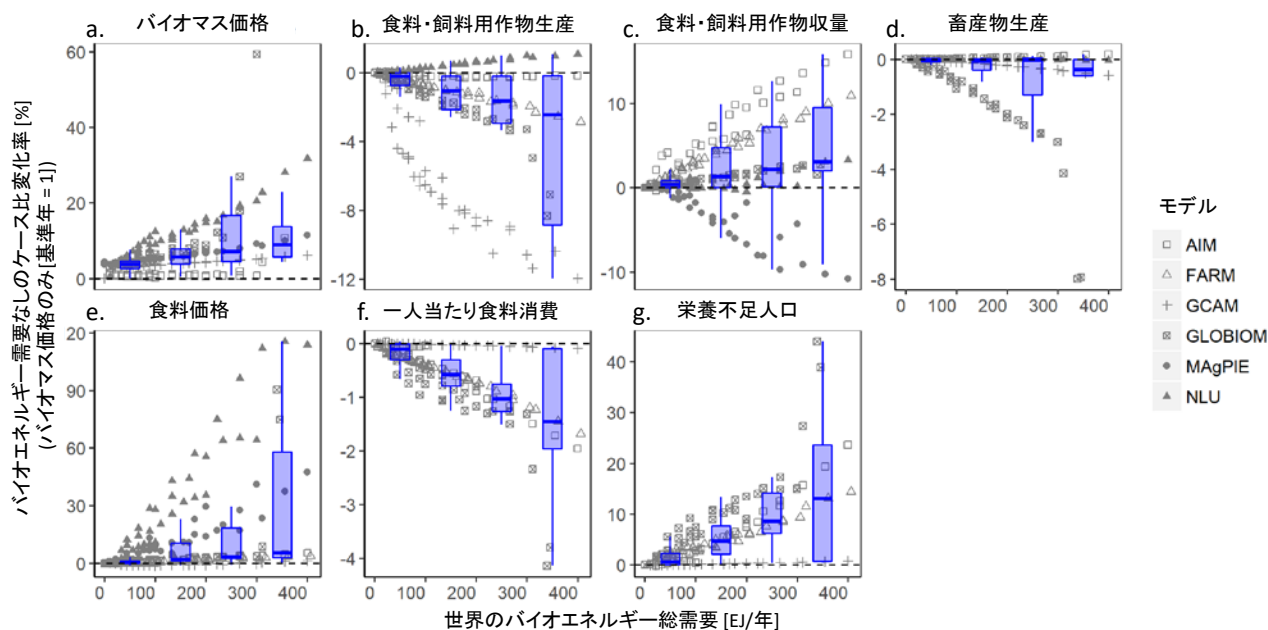


図4.1.4 異なるレベルの世界のモダン（従来型を除く）バイオエネルギー需要に対応した世界の食料安全保障指標。値は、バイオエネルギー需要ゼロの水準からの変化率を示す。箱ひげはモデル間の不確実性の範囲を示す。箱は第1～第3四分位範囲を示し、平線は中央値を示す。

研究(1-6)について、気候変動による作物収量変化とGHG排出削減策の実施に伴って生じる食料消費及び飢餓リスクへの影響を複数のモデルを用いて定量的に示し、結果として次のことが明らかになった。(1)2℃目標の達成に向けた強いGHG排出削減策を実施する場合(RCP2.6)、中庸な社会経済条件(SSP2)では、気候変動緩和策を取らず仮想的に気候変動影響もないと仮定したベースラインと比べて、食料消費は年世界全体で平均110kcal/日/人低下し(数値は複数のモデルによる中位値を示す。以下同様)、飢餓リスク人口は7800万人増加となった。一方、緩和策を実施しないシナリオ(RCP6.0)では気候変動による作物収量変化によって食料消費は45kcal/日/人低下し、飢餓リスク人口は1500万人の増加となった(図4.1.5)。(2)GHG排出削減策を強く実施すればするほど、食料安全保障への影響は大きくなること示された(図省略)。炭素税の上昇に伴って、食料価格は上昇・食料支出は増加し、食料消費が減少、さらには飢餓リスク人口が増加することが示された。(3)地域別にみると、サブサハラアフリカ、南アジア(インドとその他アジア)で大きな負の影響が見られた(図省略)。これらの地域は、気候変動緩和策を取らず仮想的に気候変動影響もないと仮定したベースラインにおいて、2050年世界全体の飢餓リスク人口のそれぞれ40%、20%を占めるが、RCP2.6(2℃目標相当)のGHG排出削減策の実施によって、ベースラインからさらに1200万人、1600万人の飢餓リスク人口が増加することが示された。

すなわち、経済合理性のみで対策を実施した場合、2050年における食料安全保障への影響は、気候変動による作物収量変化よりもGHG排出削減策による影響の方が大きい可能性があることが示された。この排出削減策による影響とは、主として、排出削減に要する費用が農業部門から排出されるメタンや亜酸化窒素への課税(炭素税)により一部賄われ、結果的に食料価格上昇・一人当たり食料消費の減少・飢餓リスクの増加が生じることを意味する。これらの結果はGHG排出削減策の経済合理性だけでなく、飢餓リスクに直面する低所得者、GHG排出部門や地域の特性を考慮し、炭素税率を部門によって変える、直接排出を規制する、補助金を用いる、あるいは炭素税収を食料安全保障対策に充当するなど、多様な政策オプションを取る可能性を検討することが望ましいことを示唆している。

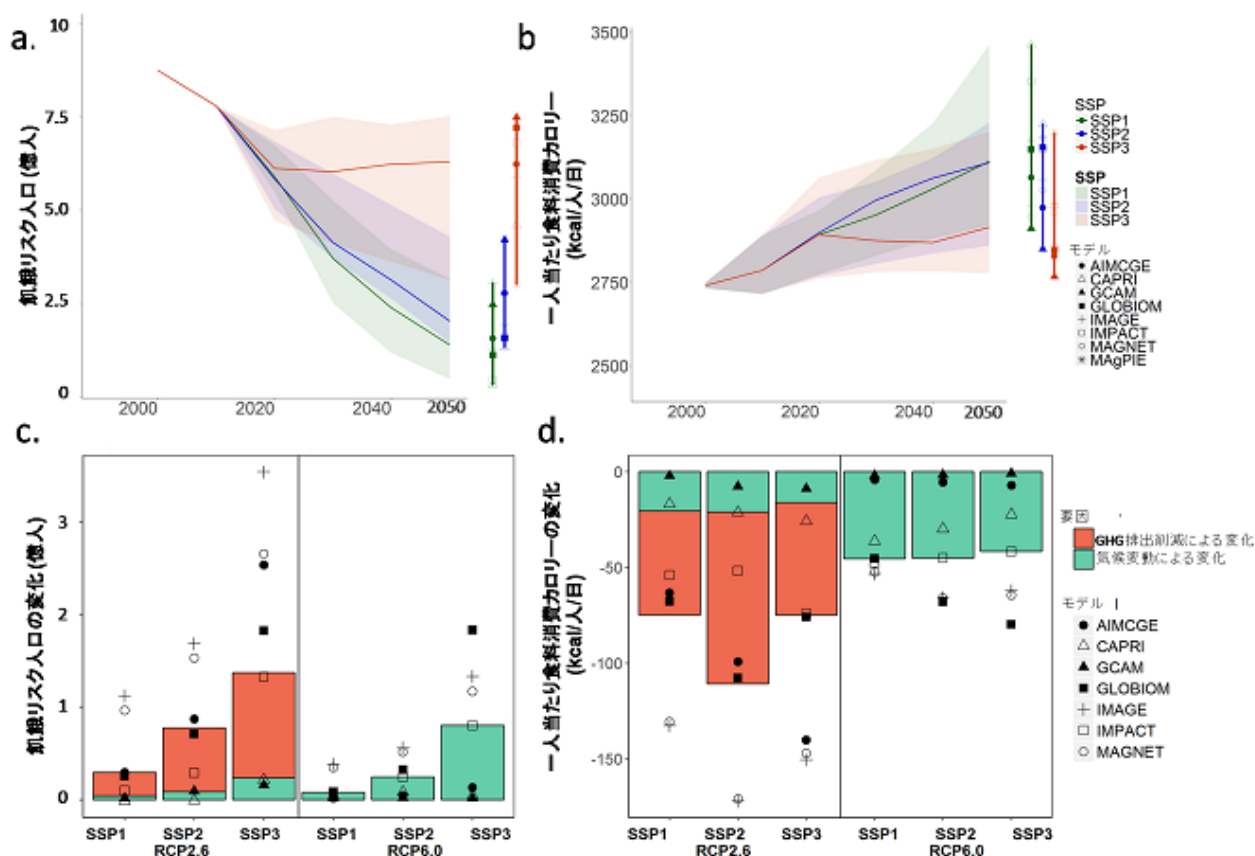


図4.1.5 気候変動影響（作物収量変化）と温室効果ガス（GHG）排出削減策による食料安全保障への影響。ベースラインケースでの、a. 飢餓リスク人口と、b. 一人当たりの食料消費カロリー。3つの社会経済条件（SSP 1～3）及び異なる気候変動影響とGHG排出削減シナリオにおける、c. 飢餓リスク人口と、d. 一人当たりの食料消費カロリーへの影響。c、dの数値はベースラインからの変化量を示す。

研究(1-7)では、国際援助、バイオエネルギー税、国内収入再配分等の政策手段により、気候政策（2℃目標・1.5℃目標相当の緩和政策）の経済効果により生じる飢餓リスク人口の増加を回避できることが示された。これらの政策手段を施さない場合、1.5℃目標シナリオでは、2050年での飢餓リスク人口が1億3300万人になる可能性がある。一方、上記政策手段を含む包括的な気候政策に要する世界全体での追加的厚生損失は、気候緩和に要する総費用（3.7%の厚生損失；図省略）と比較して小さく（<0.1%；図省略）、国際援助の財政費用も高所得国のGDPの約0.5%に留まる（図4.1.6の塗りつぶし無し赤丸）。本研究の成果はEnvironmental Research Letters誌で公表した。

研究(1-8)について、図4.1.7dが示すように、途上国への援助費用は世界全体のGDPあたり0.18%（約30兆円）に相当した。これは温室効果ガス排出削減費用と比べると一桁小さいオーダーとなる。また、2℃あるいは1.5℃目標の達成のために必要な炭素価格や費用を推計したところ、その推計値はモデルにより大きく異なることが示された（図4.1.7a, b）。また、気候目標に準じた温室効果ガス排出削減策を実施する場合、排出削減策を取らないと仮定したベースラインと比べて、飢餓リスク人口は2050年で1.6億人（1.2-2.8億人：モデル不確実性）増加となる（図4.1.7c）。また、食料消費量は年世界全体平均で5-10%程度の低下となった。本研究の成果はNature Sustainability誌で公表した。



図4.1.6 基準年（2005）とSSP2・2050年（BL/NDC/2°C/1.5°Cシナリオ）の飢餓リスク人口の地域分布（棒グラフ・単位：百万人）及びBLと同水準の食料消費を確保するための国際援助政策の資金フロー（サークル・単位；対GDP比）。BLは緩和政策無し、NDC、2°C、1.5°CはNDC延長、2°C目標、1.5°C目標に相当する緩和シナリオでの、食糧安全保障の追加政策がない場合の推計値。サークルは、排他的な気候政策に起因する食糧消費減少を満たすための財政的要件を対GDP比%で示している。塗りつぶし無しの丸は支援国（先進国）の支出資金、塗りつぶしの丸は被支援国の受取資金。図では2°C目標（青）・1.5°C目標（赤）での国際援助政策の分析結果が事例として示されている。

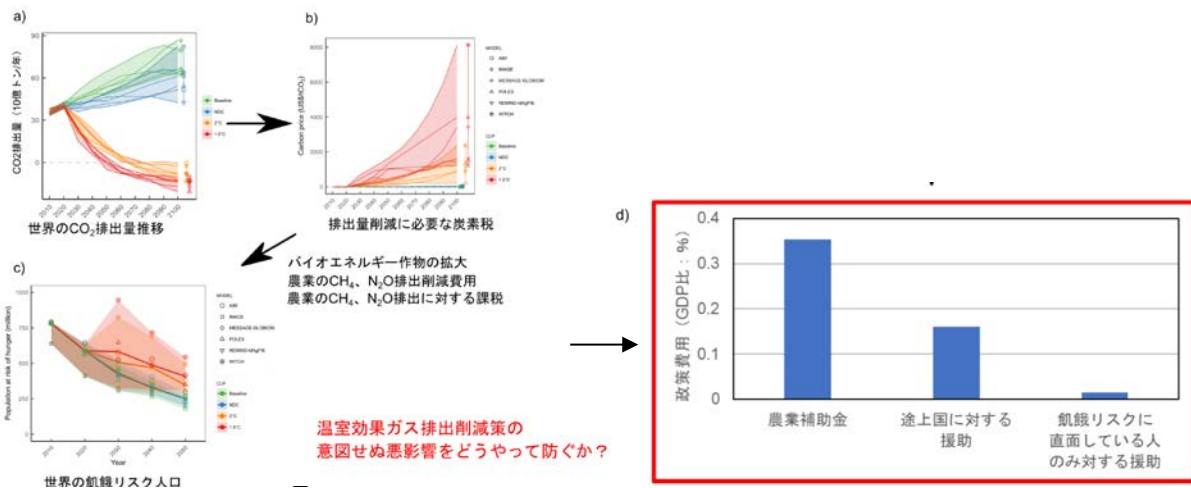


図4.1.7a) 世界のCO<sub>2</sub>排出量、b) 削減に必要な炭素税、c) 温暖化対策に伴う飢餓リスク人口。

(Baseline: 温室効果ガス排出削減策を取らないシナリオ、NDC: パリ協定で各国が提出した2030年までの自主的な排出目標を満たし、その後同程度の排出削減努力を継続するシナリオ、2°C、1.5°C: 全球平均気温をそれぞれ2°C、1.5°C以下に抑制するシナリオ)。図中の幅は複数のモデルによる結果の幅を示します。d)は飢餓リスク人口増加を抑制するための費用で、1.5°C気候安定化時の2050年におけるモデル中位値をGDP比で表示（モデル中位値）。

分析結果の解釈・注意点としては、以下を挙げることができる。(1)現状のODAの額と比較すると、ここで算定された数値はそれほど大きいものではないが、実際の費用の工面は政治的に簡単なものではなく、国際的な議論や協力が必要となる。(2)本研究では費用の概算の情報を提供したが、現実ここで想定した飢餓リスク対策を導入するにあたっては、現地の状況、市場や様々な政治制度などを考慮した対策が必要になる。(3)温室効果ガス排出削減策は、農業部門での悪影響を軽減するだけでなく、他の多くの部門での悪影響を同時に軽減する。そのため、本研究で評価対象とした食料安全保障の悪化のみを理由に温室効果ガス排出削減策の実施が否定されることはない。本研究の結果が示すのは、野心的な温室効果ガス排出削減策を取るべきではないということではなく、上記で述べた柔軟な政策の選択・実施による食料安全保障への負の副次的効果の回避の必要性である。(4)本研究ではすでに明らかにされた気候変化による影響は考慮されておらず、温室効果ガス排出削減に重点を置いて実施した。気温や降水量の平均的な気候条件の変化だけでなく、例えば豪雨や熱波といった極端現象の頻度や規模の変化も引き起こした場合など、そういった極端現象を考慮に入れた分析は今後の研究課題として残る。

研究(1-9)について、なりゆきシナリオでは、今後の経済発展に伴い、世界の平均一人当たり食料消費カロリーは2010年時点で2770kcal/日/人であるのに対し、2030年には2940 kcal/日/人にまで増加、これに伴い、必要な農作物は2030年時点では2010年比で18億トン増え、農地と牧草地をあわせて約1.6億ha増えることが推計された。

2010年時点の世界の不平等な食料分配を改善することなく、一律に食料分配を増やして2030年に飢餓をなくす場合、飢餓撲滅に必要な食料生産が環境に悪影響を与えることが示された(図4.1.8)。この場合、2030年時点で、上のなりゆきシナリオと比べて食料生産は20%増え、農地・牧草地は合わせて4800万ha増、農業・土地利用由来の温室効果ガス排出は5.5億トン(二酸化炭素換算)増となった。

一方、飢餓の人々に対する集中的な食料支援により飢餓撲滅を達成する場合、なりゆきシナリオに比べて追加的な食料生産は3%程度増加となり、追加的な環境負荷も小さく抑えられた。さらに、貧困層に対する集中的な食料支援に加え、先進国を中心とした食料廃棄や過剰摂取の削減などの対策も合わせて実施することで先進国・発展途上国の食料分配を改善しつつ飢餓をなくす場合は、食料生産とそれに伴う環境への負荷が大きく削減されることが示された。具体的には、2030年時点でなりゆきシナリオ比で食料生産は9%減、農地と牧草地をあわせて2.3億ha減となるほか、温室効果ガスは13.6億トン(二酸化炭素換算)減となることが分かった。

この結果は飢餓撲滅や他のSDGsの同時達成に向けた政策を検討する上で、飢餓撲滅には食料増産だけではなく、貧困層への集中的な食料支援と先進国を中心とした食料廃棄物の削減や過剰摂取の抑制などの食料分配の改善を合わせて行うことが重要であることを示唆している。

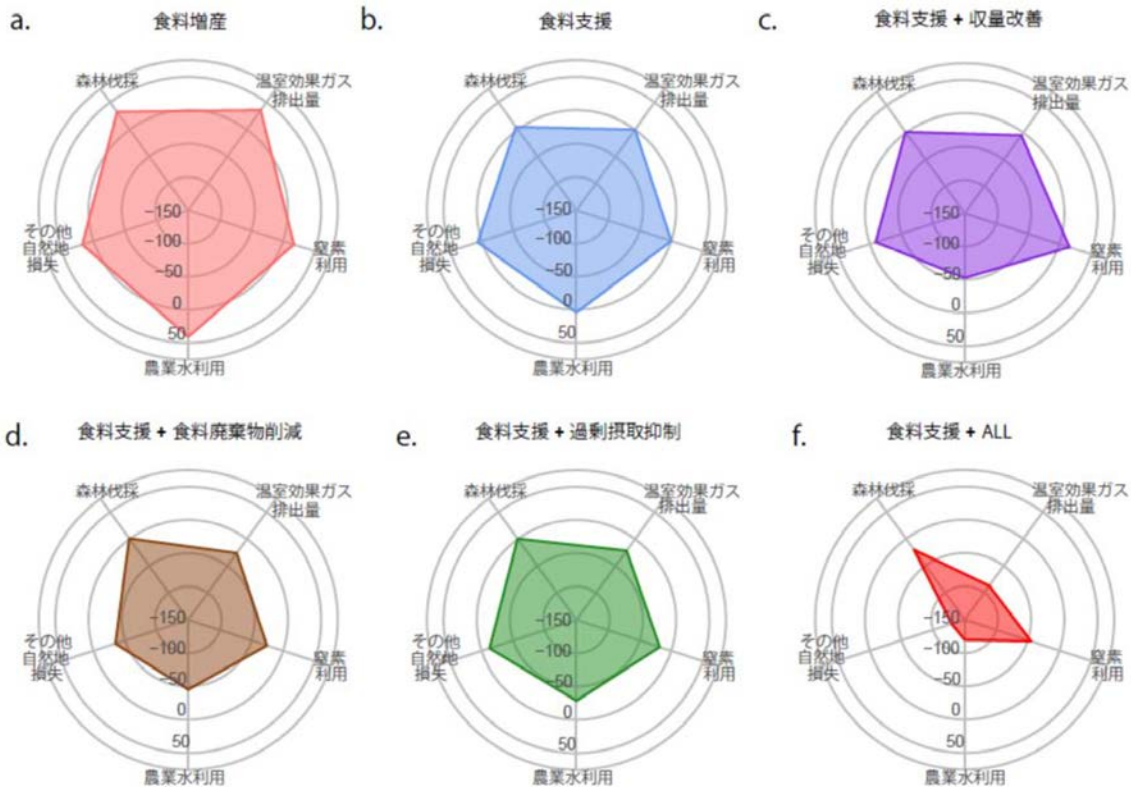


図4.1.8 2030年での異なる飢餓撲滅政策のもとでの農業由来の環境負荷。指標はそれぞれ森林損失、その他自然地の損失、農業用灌漑水利用、窒素肥料利用、農業・土地利用変化に伴う温室効果ガス排出量を示す。値は2030年における各指標の2010年比の変化量をなりゆきケースと比べたときの割合(%)を示す。

研究(1-10)について、食料安全保障・土地資源管理に関しては、気候政策による負の波及影響（トレードオフ）が示されたことから、その波及影響を打ち消すための追加的政策として、INDCの深掘り（早期GHG排出削減）、食料生産・消費及び森林保全推進への補助金の効果を検討し、政策の組み合わせにより複数開発目標の同時達成が目指しうることを示した（図4.1.9）。本研究の成果は Environmental Research Letters誌で公表した。

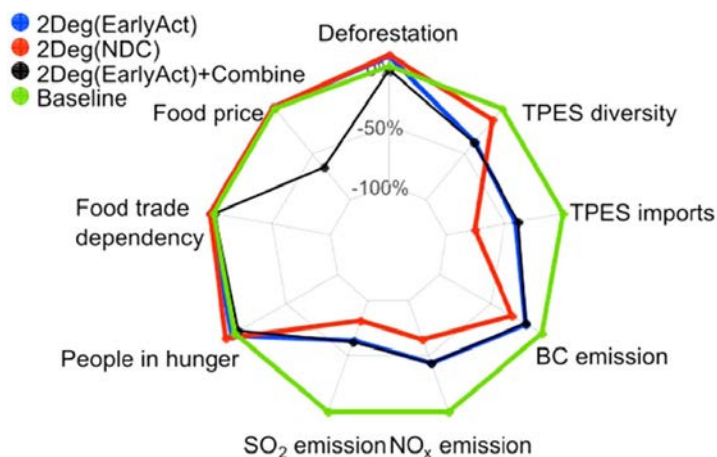


図4.1.9 ベースライン（緩和対策無し・Baseline・緑）と比べた、NDCを経由してその後2°C目標整合の排出経路をたどるシナリオ（2Deg(NDC)・赤）、ならびにNDCよりも早期削減がありうることを想定したうえで2°C目標整合の排出経路を辿りかつ食料生産・消費及び森林保全推進への補助金を想定するシナリオ（2Deg(EarlyAct)+Combine・黒）での、2050年時点での他開発目標関連9指標への波及効果（チャートの内側が正の波及効果。ベースライン（緑）よりも外側はトレードオフ）



研究(1-11)について、2°C温暖化では10年に一度の「暑い昼」と「強い雨」の頻度が劇的に増加することがわかった。例えば、2100年の世界人口の約半数(46%)は、現在10年に1度の「暑い昼」を2年に1度は経験するようになる。一方、1.5°C温暖化では、2年に1度経験する人口の割合は7%まで低減される。2°C実験では、累積CO<sub>2</sub>排出量が少なく(気候変動への責任が小さく)かつ貧しくて適応能力の低い地域で、極端現象の頻度増加が大きいという不公平性があることが分かった(図4.1.10の赤線)。2°C温暖化(赤線)と比べて1.5°C温暖化(青線)では、回帰直線の負の傾きが小さくなっている。つまり、責任が小さく貧しい国々で極端現象頻度増加の抑制量(赤線と青線の差)が大きい。これは、2°Cから1.5°Cへの追加緩和努力によって、極端現象の頻度増加を抑えられるだけでなく、不公平性の悪化を低減できることを示している。本研究の成果はEnvironmental Research Letters誌で公表した。

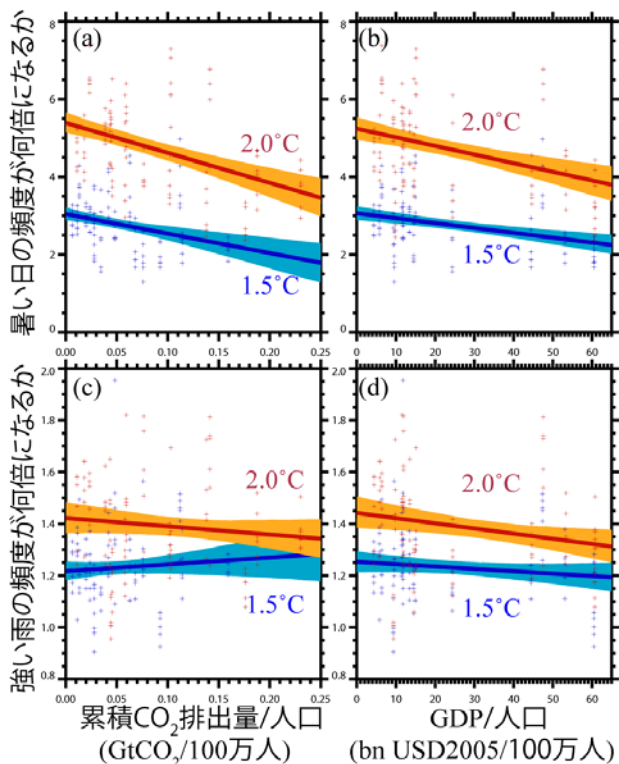


図4.1.10 世界17地域×6気候モデルの極端現象頻度変化(縦軸)と1990-2100年累積CO<sub>2</sub>排出量/人口((a)・(c)の横軸)または1990-2100年平均GDP/人口((b)・(d)の横軸)の関係。CO<sub>2</sub>排出量/人口とGDP/人口は、AIM/CGEで計算されたSSP2シナリオ。赤(青)実線と赤(青)陰影は、2°C(1.5°C)実験の回帰直線とその5-95%不確実性幅。回帰直線の負の傾きが大きいほど、不公平性が大きいことを示す。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

パリ協定の温度目標と排出目標の間の整合性について、炭素循環や気候応答の不確実性を考慮したうえで論じるための手法・手順を提案することが出来た。また、1.5°C及び2.0°C気候安定化時の極端現象変化について定量評価を行ったうえで、さらに極端現象変化に関する不公平性について論ずるための手法・手順を提案することが出来た。

ライフサイクルアセスメントと排出指標の手法を組み合わせた分析により、石炭火力発電から天然ガス火力発電へのエネルギー転換による二酸化炭素排出削減が気候安定化目標に寄与することを示し、石炭火力発電の段階的廃止(フェーズアウト)を支持する結論を示した。

低炭素政策実現のためのバイオエネルギーの大規模導入を含む強い緩和政策が、食料生産・消費ならびに栄養不足人口に及ぼす影響について、複数の統合評価モデルによる評価結果の比較を通じて、評価手法の選択に伴う影響評価結果の不確実性幅を定量的に示すとともに、従来よりも頑健性をもった形

でその因子の連動のメカニズムを説明することが出来た。さらに、それらの緩和政策の波及影響の回避のための追加的政策手段についての分析手順を世界に先駆けて提案することができた。また逆に飢餓撲滅の国際目標達成を目指した政策実施が、温室効果ガス排出、森林伐採、窒素利用、農業水利用などに及ぼす波及影響についての分析枠組みも新規に提案し、複数の政策想定の下での帰結について描出することができた。

価格メカニズムなどの経済理論に基づくモデルの開発とその温暖化対策評価への適用は、政策を客観的に評価することが可能となり、そうしたツールによる定量的な分析は、Evidence based policyを進める上で必要不可欠なものであることから、本研究の科学的意義は大きい。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

本研究の複数の成果論文が、2018年公表のIPCC1.5°C特別報告書ならびに2019年公表のIPCC土地関係特別報告書で引用された。

UNFCCCタラノア対話へのサブミッションに本研究成果を反映した（2018年3月31日・2-1501と共同）

課題代表者の高橋は「モデル・シナリオの勉強会（環境省地球環境局総務課脱炭素化イノベーション研究調査室主催；環境省、文部科学省、気象庁、農林水産省、国土交通省、経済産業省に開催案内）」に講師として参加し、本研究課題の成果も含めながら、影響・適応研究におけるモデル・シナリオの活用事例について話題提供した（2019年10月16日）。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

研究参画者の長谷川は、IPCC-AR6に代表執筆者に選出されている。今後、AR6の草稿執筆過程において、本研究プロジェクトの研究成果をはじめ、わが国研究機関による研究成果を適切に紹介するとともに、同報告書の作成を通じて国際・国内環境政策の立案に貢献することが期待できる。

## 6. 国際共同研究等の状況

課題代表者の高橋は、自然システム・人間システムの統合的なモデル構築についての国際研究調整組織であるAIMES-FutureEarthのScience Steering Committee（科学運営委員会）委員を担当し（2013年1月～2018年12月）、2-1702の研究成果についても同運営委員会を通じた国際アピールに努めた。

課題代表者の高橋ならびに研究参画者の長谷川は、気候影響予測・適応評価研究コミュニティと社会経済・排出シナリオ研究コミュニティの連携促進を目的とした国際調整委員会ICONICS（International Committee on New Integrated Climate change assessment Scenarios）の推進委員を担当し、同委員会を通じた本研究成果の国際アピールに努めるとともに、同委員会の定期会合で得られたシナリオ開発・利用に関する最新動向に関する情報について、本研究の実施に際して活用した。

研究参画者の塩竈は、英国オックスフォード大学の研究者らとともに、2°C温暖化と1.5°C温暖化に対する極端現象の変化を調べるためのAGCM相互比較を目的とした国際研究プロジェクト「HAPPI（Half a degree Additional warming, Prognosis and Projected Impacts）」を提案・運営し、気候予測実験結果の提供を行うとともに、その実験結果を活用して、上述の「1.5°C及び2.0°C気候安定化時の極端現象変化に関する不公平性の分析」を実施した。

研究参画者の藤森・長谷川は、パリ協定の1.5°C目標に整合的な排出シナリオであるRCP1.9シナリオ開発に係る国際共同開発研究に参加し、その成果はNature Climate Change誌にて2018年3月に論文公表された。

研究参画者の長谷川は、IPCC第6次評価報告書に向けた気候変動研究での共通利用が見込まれる新たな社会経済シナリオSSP（Shared Socioeconomic Pathways: 共通社会経済経路）の土地利用シナリオについて、土地利用ダウンスケールモデルAIM/PLUM（integration Platform for Land-Use and environmental Modeling）を活用し、空間詳細化を実施した。その成果は国際的な気候予測実験のモデル比較研究プロジェクトであるCMIP6での活用を想定し、米国メリーランド大学が主催するLUH2（Land-

Use Harmonization 2) プロジェクトにも提供された。

研究参画者の長谷川は、AIM/PLUMによるSSP別土地利用シナリオとCMIP5気候シナリオを同時考慮した全球規模の動植物生息適域評価の取組に、森林研究・整備機構とともに取り組み、IPBES全球評価報告書への貢献を企図し、一連の国際会合ならびに電話会議に継続的に参加し、本研究結果の報告を実施している。

研究参画者の藤森・長谷川は、持続可能な開発目標に関する情報提供を目的とした国際的な取り組みThe World in 2050に参加し、持続可能な開発に関するハイレベル政治フォーラム(HLPF)への情報提供を目的とした報告書において土地利用 (SDG15) の章の執筆を担当している。

研究参画者の長谷川は、国際エネルギーモデル比較評価プロジェクトの一つである、第33回エネルギーモデルフォーラムに参加し、6つの統合評価モデルおよび農業経済モデルと、FAOの手法に基づき開発した栄養不足人口推計モジュールを組み合わせて、高いバイオエネルギー需要が食料安全保障に及ぼす影響の包括的な分析を実施した。

研究参画者の藤森ならびに研究代表者の高橋は、欧州プロジェクトCD-LINKSおよびENGAGEに参加し、低炭素政策の持続可能性への影響について、国際モデル比較評価に貢献した。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) Baker H. S., Millar R. J., Karoly D. J., Beyerle U., Guillod B. P., Mitchell D., Shiogama H., Sparrow S., Woollings T., Allen M. R.: Nature Climate Change, 8, 604-608 (2018) Higher CO<sub>2</sub> concentrations increase extreme event risk in a 1.5°C world. doi: 10.1038/s41558-018-0190-1
- 2) Bauer N., Rose S., Fujimori S., Van Vuuren D. P., Weyant J., Wise M., Cui Y., Daioglou V., Gidden M. J., Kato E., Kitous A., Leblanc F., Sands R., Sano F., Strefler J., Tsutsui J., Bibas R., Fricko O., Hasegawa T., Klein D., Kurosawa A., Mima S., Muratori M.: Climatic Change (2018) Global energy sector emission reductions and bioenergy use: overview of the bioenergy demand phase of the EMF-33 model comparison. doi: 10.1007/s10584-018-2226-y
- 3) Edelenbosch O. Y., Mccollum D. L., Vuuren D. P., Bertram C., Carrara S., Daly H., Fujimori S., Kitous A., Kyle P., Broin E. O., Karkatsoulis P., Sano F.: Transportation Research, PartD: Transport and Environment, 55, 281-293 (2017) Decomposing Passenger Transport Futures: Comparing Results of Global Integrated Assessment Models. doi:10.1016/j.trd.2016.07.003
- 4) Fronzek S., Carter T. R., Pirttioja N., Alkemade R., Audsley E., Bugmann H., Florke M., Holman I., Honda Y., Ito A., Janes-Bassett V., Lafond V., Leemans R., Mokrech M., Nunez S., Sandars D., Snell R., Takahashi K., Tanaka A., Wimmer F., Yoshikawa M.: Regional Environmental Change, 19, 679-693 (2019) Determining sectoral and regional sensitivity to climate and socioeconomic change in Europe using impact response surfaces. doi: 10.1007/s10113-018-1421-8
- 5) Fujimori S., Hasegawa T., Ito A., Takahashi K., Masui T.: Science Data, 5, 180210 (2018) Gridded emissions and land-use data for 2005-2100 under diverse socioeconomic and climate mitigation scenarios.
- 6) Fujimori S., Hasegawa T., Rogelj J., Su X., Havlik P., Krey V., Takahashi K., Riahi K.: Environmental Research Letters, 13, 074033 (2018) Inclusive climate change mitigation and food security policy under 1.5°C climate goal.
- 7) Fujimori S., Hasegawa T., Krey V., Riahi K., Bertram C., Bodirsky B. L., Bosetti V.,

- Callen J., Despres J., Doelman J., Drouet L., Emmerling J., Frank S., Fricko O., Havlik P., Humpenoder F., Koopman J.F.L., van Meijl H., Ochi Y., Popp A., Schmitz A., Takahashi K., van Vuuren D.: *Nature Sustainability*, 2, 386-396 (2018) A multi-model assessment of food security implications of climate change mitigation.
- 8) Gidden M.J., Riahi K., Smith S.J., Fujimori, S., Luderer G., Kriegler E., Vuuren D.P.V., Berg M.V.D., Feng L., Klein D., Calvin K., Doelman J. C., Frank S., Fricko O., Harmsen M., Hasegawa, T., Havlik P., Hilaire J., Hoesly R., Horing J., Popp J., Stehfest E., Takahashi, K.: *Geoscientific Model Development*, 12, 1443-1475 (2019) Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. doi: 10.5194/gmd-12-1443-2019
- 9) Hasegawa T., Fujimori S., Havlik P., Valin H., Bodirsky B., Doelman J. C., Fellmann T., Kyle P., Koopman J.F.L., Lotze-Campen H., Mason-D., Ochi Y., Perez-Dominguez I., Stehfest E., Sulser T.B., Tabeau A., Takahashi K., Takakura J., Van Meijl H., Van Zeist W., Wiebe K.D., Witzke P. : *Nature Climate Change*, 8, 699-703 (2018) Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy.
- 10) Hasegawa T., Havlik P., Frank S., Palazzo A., Valin H.: *Nature Sustainability*, 2, 826-833 (2019) Tackling food consumption inequality to fight hunger without pressuring the environment.
- 11) Kim H., Rosa I.M.D., Alkemade R., Leadley P., Hurtt G., Popp A., van Vuuren D.P., Anthoni P., Arneth A., Baisero D., Caton E., Kramer R.C., Chini L., Palma A.D., Fulvio F.D., Marco M.D., Espinoza F., Ferrier S., Fujimori S., Gonzalez R.E., Gueguen M., Guerra C., Harfoot M., Harwood T.D., Hasegawa T., Havard V.: *Geoscientific Model Development*, 11, 4537-4562 (2018) A protocol for an intercomparison of biodiversity and ecosystem services models using harmonized land-use and climate scenarios. doi:10.5194/gmd-2018-115
- 12) Krey V., Guo F., Kolpa P., Zhou W., Schaeffer R., Awasthy A., Bertrame Harm C., Boer H.S., Fragkosh P., Fujimori S., He C., Iyer G., Keramidas K., Köberle A.C., Oshiro K., Reis L.A., Shoai-Tehrani B., Vishwan S., Vuuren D.P.V., : *Energy*, 172, 1254-1267 (2019) Looking under the hood: A comparison of techno-economic assumptions across national and global integrated assessment models.
- 13) Kriegler E., Luderer G., Bauer N., Baumstark L., Fujimori, S., Popp A., Rogelj J., Strefler J., Vuuren D.P.V.: *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical*. 376, 2119 (2018) Pathways limiting warming to 1.5°C: a tale of turning around in no time? doi:0.1098/rsta.2016.0457
- 14) Lee D., Min S.-K., Fischer E., Shiogama H., Bethke I., Lierhammer L., Scinocca J. F.: *Environmental Research Letter*, 13, 044033 (2018) Impacts of Half a Degree Additional Warming on the Asian Summer Monsoon Rainfall Characteristics. doi:10.1088/1748-9326/aab55d
- 15) Liu J.Y., Fujimori S., Takahashi K., Hasegawa T., Su X., Masui T.: *Carbon Management*, 9, (5) (2018) Socio-economic factors and future challenges of the goal of limiting the increase in global average temperature to 1.533. doi:10.1080/17583004.2018.1477374
- 16) Luderer G., Pietzcker R.C., Carrara S., Boer H.S., Fujimori S., Johnson N., Mima S., Arent D.: *Energy Economics*, 64, 542-551 (2017) Assessment of Wind and Solar Power in Global Low-carbon Energy Scenarios. doi: 10.1016/j.eneco.2017.03.027
- 17) Luderer G., Vrontisi Z., Bertram C., Oreane Y. E., Pietzcker R.C., Joeri Rogelj, De Boer

- H.S., Drouet L., Emmerling J., Fricko O., Fujimori S., Havlík P., Iyer G., Keramidas K., Kitous A., Pehl M., Krey V., Riahi K., Saveyn B., Tavoni M., Vuuren & Elmar Kriegler; Robert C.P., Joeri R.: *Nature Climate Change*, 8, 626-633 (2018) Residual fossil CO<sub>2</sub> emissions in 1.5-2°C pathways. doi:10.1038/s41558-018-0198-6.
- 18) McCollum D.L., Zhou W., Bertram C., de Boer H.-S., Bosetti V., Busch S., Després S., Drouet L., Emmerling J., Fay M., Fricko O., Fujimori S., Gidden M., Harmsen M., Huppmann D., Iyer G., Krey V., Kriegler E., Nicolas C., Pachauri S., Parkinson S., Poblete-Cazenave M., Rafaj P., Rao N., Rozenberg J., Schmitz A., Schoepp W., Vuuren D.V., Riahi K.: *Nature Energy*, 3, 589-599 (2018) Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals.
- 19) Mitchell D., Heaviside C., Schaller N., Allen M., Ebi K.L., Fischer E.M., Gasparrini A., Harrington L., Kharin V., Shiogama H., Sillmann J., Sippel S., Vardoulakis S.: *Nature Climate Change*, 8, 551-553 (2018) Extreme heat-related mortality avoided under Paris Agreement goals.
- 20) Mittal S., Liu J.Y., Fujimori S., Shukla P.R.: *Energies*, 11, 9, 2213, 24 (2018) An Assessment of Near-to-Mid-Term Economic Impacts and Energy Transitions under “2°C” and “1.5°C” Scenarios for India.
- 21) Ohashi H., Hasegawa T., Hirata A., Fujimori S., Takahashi K., Tsuyama I., Nakao K., Kominami Y., Tanaka N., Hijioka Y., Matsui T.: *Nature Communications*, 10, 5240 (2019) Biodiversity can benefit from climate stabilization despite adverse side effects of land based mitigation.
- 22) Roe S., Streck C., Obersteiner M., Frank S., Griscom B., Drouet L., Fricko O., Gusti M., Harris N., Hasegawa T., Hausfather Z., Havlík P., House J., Nabuurs G.-J., Popp A., Sánchez M.J.S., Sanderman J., Smith P., Stehfest E., Lawrence D.: *Nature Climate Change*, 9, 817-828 (2019) Contribution of the land sector to a 1.5°C World. doi:10.1038/s41558-019-0591-9
- 23) Rogelj J., Popp A., Calvin K.V., Luderer G., Emmerling J., Gernaat D., Fujimori S., Strefler J., Hasegawa T., Marangoni G., Krey V., Kriegler E., Riahi K., Vuuren D.P., Doelman J., Drouet L., Edmonds J., Fricko O., Harmsen M., Havlik P., Humpenoder F., Stehfest E., Tavoni M.: *Nature Climate Change*, 8, 325-332 (2018) Scenarios Towards Limiting Global Mean Temperature Increase Below 1.5°C. doi: 10.1038/s41558-018-0091-3
- 24) Rosa I.M.D., Pereira H.M., Ferrier S., Alkemade R., Acosta L.A., Akcakaya H.R., Belder E., Fazel A.M., Fujimori S., Harfoot M., Harhash K.A., Harrison P.A., Hauck J., Hendriks R.J.J., Hernandez G., Jetz W., Karlsson-Vinkhuyzen S.I., Kim H., King N., Kok M.T.J., Kolomytsev G.O., Lazarova T., Leadley P., Lundquist C.J., Marquez J.G., Meyer C., Navarro L.M., Nesshover C., Ngo H.T., Ninan K.N., Palomo M.G., Pereira L.M., Peterson G.D., Pichs R., Popp A., Purvis A., Ravera F., Rondinini C., Sathyapalan J., Schipper A.M., Seppelt R., Settele J., Sitas N., Vuuren D.: *Nature Ecology & Evolution*, 1, 1416-1419 (2017) Multiscale Scenarios for Nature Futures. doi:10.1038/s41559-017-0273-9
- 25) Saeed F., Bethke I., Fischer E.M., Legutke S., Shiogama H., Stone D., Schleussner C.-F.: *Environmental Research Letters*, 13, 64024 (2018) Robust changes in tropical rainy season length at 1.5°C and 2°C. doi:10.1088/1748-9326/aab797
- 26) Silva Herran D., Fujimori S., Kainuma M.: *Climate Policy*, 19, (9), 1117-1131 (2019). Implications of Japan’s long term climate mitigation target and the relevance of uncertain nuclear policy. doi: 10.1080/14693062.2019.1634507

- 27) Stehfest E., Zeist W-J V., Valin H., Havlik P., Popp A., Kyle P., Tabeau A., Mason-D' Croz D., Hasegawa T., Bodirsky B.L., Calvin K., Doelman J.C., Fujimori S., Humpenöder F., Lotze-Campen H., Meijl H.V., Wiebe K.: Nature Communications, 10, 2166 (2019) Key determinants of global land-use projections
- 28) Tanaka K. and O' Neill, B.C.: Nature Climate Change, 8, 319-324 (2018) The Paris Agreement Zero-emissions Goal is not Always Consistent with the 1.5°C and 2°C Temperature Targets. doi:10.1038/s41558-018-0097-x
- 29) Tanaka K., Lund M.T., Aamaas B., Berntsen T.: Environmental Research Letters, 13, 044020 (2018) Climate effects of non-compliant Volkswagen diesel cars. doi: 10.1088/1748-9326/aab18c
- 30) Tanaka K., Cavalett O., Collins W.J., Cherubini F.: Nature Climate Change, 9, 389-396 (2019) Asserting the climate benefits of the coal-to-gas shift across temporal and spatial scales. doi: 10.1038/s41558-019-0457-1
- 31) Wu W., Hasegawa T., Ohashi H., Hanasaki N., Liu J.Y., Fujimori S., Masui T., Takahashi K.: GCB Bioenergy, 11, 1041-2055 (2019) Global advanced bioenergy potential under environmental protection policies and societal transformation measures. doi: 10.1111/gcbb.12614
- 32) Xie Y., Dai H., Xu X., Fujimori S., Hasegawa T., Yi K., Masui T., Kurata G.: Environment International, 119, 309-318 (2018) Co-benefits of climate mitigation on air quality and human health in Asian countries. doi: 10.1016/j.envint.2018.07.008
- 33) 櫛部航、藤森真一郎、長谷川知子：土木学会論文集G（環境），75（5），I\_233-I\_238（2019）食料廃棄物削減目標を達成することによる社会・経済・環境への副次的影響
- 34) 高橋潔、佐尾博志、本田靖、藤森真一郎、高倉潤也土木学会論文集G（環境），74（5），I\_53-I\_60（2018）地球温暖化に伴う熱関連死亡による被害額

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) Fujimori S., Su X., Liu J., Hasegawa T., Takahashi K., Masui T., Takimi M.: Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspective, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.), Springer, 11-29 (2017) Implications of the Paris Agreement in the Context of Long-Term Climate Mitigation Goals.
- 2) Fujimori S., Kubota I., Dai H., Takahashi K., Hasegawa T., Liu C., Hijioka Y., Masui T., Takimi M.: Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspective, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.), Springer, 65-75 (2017) The Effectiveness of the International Emissions Trading under the Paris Agreement.
- 3) Fujimori S., Siagian U.W.R., Hasegawa T., Yuwono B.B., Boer R., Immanuel G., Masui T.: Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspective, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.), Springer, 125-142 (2017) An Assessment of Indonesia's Intended Nationally Determined Contributions.
- 4) Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y.: Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspective, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.), Springer, 201-303 (2017) AIM/CGE V2.0 Model Formula.
- 5) Fujimori S., Hasegawa T., Masui T.: Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspective, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.) Springer, 305-328 (2017) AIM/CGE V2.0: Basic Feature of the Model.
- 6) Kainuma M., Fujimori S., Masui T.: Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspectives, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.), Springer, 1-9 (2017)

Introduction: Overview and Key Messages.

- 7) Limmeechokchai B., Chunark P., Fujimori S., Masui T.: Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspective, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.), Springer, 157-178 (2017) Asian INDC Assessments: The Case of Thailand.
- 8) Liu J.Y., Fujimori S., Masui T.: Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspective, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.) Springer, 45-63 (2017) Temporal and Spatial Distribution of Global Mitigation Cost: INDCs and Equity.
- 9) Shukla P.R., Mittal S., Liu J., Fujimori S., Dai H., Zhang R.: Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspective, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.), Springer, 113-124 (2017) India INDC Assessment: Emission Gap Between Pledged Target and 2°C Target.
- 10) Takahashi K., Emori S., Fujimori S., Masui T.: Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspective, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.), Springer, 31-44 (2017) Risks from Global Climate Change and the Paris Agreement.
- 11) Tran T.T., Fujimori S., Masui T. Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspective, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.) Springer, 179-200 (2017) Realizing the Intended Nationally Determined Contribution: The Role of Renewable Energies in Vietnam.
- 12) 甲斐沼美紀子、高橋潔: 環境情報科学, 46 (3), 1-7 (2017) 気候変動「パリ協定」目標実現に向けての問題のフレーミング
- 13) 塩竈秀夫: 環境情報科学, 46 (3), 15-18 (2017) 1.5°C、2.0°C目標に対する気候変動予測
- 14) 塩竈秀夫: 日本医師会雑誌特別号146 (2), S182-S184 (2017) 「環境による健康リスク」、地球温暖化1-地球温度の変化
- 15) 塩竈秀夫: 環境技術, 47 (7), 353-412 (2018) 過去と将来の気候変動
- 16) 立入郁、高橋潔、伊藤泰志、高山範理、杉村乾: 環境情報科学, 46 (3), 64-70 (2017) 1.5°Cと2°C -気候変動「パリ協定」目標の意味と実現への道筋
- 17) 田中克政: 地球環境研究所ニュース, 29 (4) (2018) パリ協定の温度目標とゼロ排出目標は本当に整合しているのか?
- 18) 田中克政: 地球環境研究センターニュース, 30 (4) (2019) 石炭火力から天然ガス火力発電への転換は、パリ協定目標の達成に寄与 石炭火力発電の段階的廃止の追い風に

## (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Fujimori S., Hasegawa T., Krey V., Keywan R., Bodirsky B.L., Bosetti V., Callen J., Despres J., Doelman J., Drouet L., Emmerling J., Frank S., Fricko O., Humpenoder F., Havlik P., Meijl H., Ochi Y., Popp A., Schmitz A., Takahashi K., Vuuren D.: Tenth Annual Meeting of the IAMC 2017, Brazil (2017) A Multi - model Assessment of Food Security Implications of Well Below 2°C Scenarios.
- 2) Fujimori S., Takakura J.: CGRA +1.5 AND 2° C IMPACTS WORKSHOP, Luxemburg (2017) AgMIP Phase 2, 2nd round core scenario results overview and some insights.
- 3) Fujimori S.: 1st International Workshop on Integrated Assessment Modeling of GHGs and Air Pollutants, Austria (2017) AIM Modeling and Recent on-going Research Activities.
- 4) Fujimori S., Hasegawa T.: FEEM Research Seminar, Italy (2017) AIM Modeling and Recent on-going Research Activities.
- 5) Hasegawa T., Havlik P., Fujimori S., Ochi Y.: Coordinated Global and Regional

Assessment Workshop +1.5/+2.0°C Worlds and Beyond, Laxenburg (2017) Using Food Security Indicators Climate Mitigation Effects on Food Security: Multi Global Economic Modelling Comparison.

- 6) Hasegawa T., Ohashi H., Fujimori S., Matsui T., Takahashi K. : Workshop on Biodiversity and Ecosystem Services Scenarios for IPBES using the Shared Socio-economic Pathways, Germany (2017) Collaborative Work between Biodiversity Impact Assessment Model and AIM.
- 7) Hasegawa T., Sakurai G., Fujimori S., Takahashi K., Hijioka Y., Masui T. : Impacts World 2017, Germany (2017) Global Food Insecurity under Climate Volatility.
- 8) Hasegawa T., Havlik P., Fujimori S., Valin H., Fellmann T., Kyle P., Lotze-Campen H., Mason-D, Ochi Y., Perez-Dominguez I., Stehfest E., Takakura J., van Meijl H. : Impacts World 2017, Germany (2017) Climate Mitigation Effects on Food Security: Multi Global Economic Modelling Comparison.
- 9) Hasegawa T., Ohashi H., Fujimori S., Takahashi K., Masui T. : The Food and Land-Use Coalition Work Stream 1: Food Agriculture, Biodiversity, Land and Energy (FABLE) Pathways First Meeting of the Country Teams, Austria (2017) Land Use in AIM-Health-CGE: Global Food, Agriculture and Land Use in AIM.
- 10) Hasegawa T., Fujimori S., Havlik P., Bodirsky B., Doelman J., Fellmann T., Kyle P., Koopman J., Lotze-Campen H., Mason-DCroz D., Ochi Y., Perez-Dominguez I., Stehfest E., Sulser T.B., Tabeau A., Takahashi K., Takakura J., Van Meijl H., Van Zeist W.J., Wiebe K.D., Witzke P., Valin H. : Tenth Annual Meeting of the IAMC 2017, Brazil (2017) Food Security under the Stringent Climate Mitigation: Insights from a Multi-model Approach.
- 11) Liu J.Y., Fujimori S., Takahashi K., Hasegawa T., Su X., Masui T. : 2nd Global Conference on Theory and Applications of OR/OM for Sustainability, China (2017) Socio-economic Factors and Future Challenges of the 1.5°C Goal.
- 12) Liu J.Y., Fujimori S., Takahashi K., Hasegawa T., Su X., Masui T. : International Energy Workshop 2018, Sweden (2018) Assessment of mitigation options reconciling with sustainable development goals: a case study of China.
- 13) Liu J.Y., Fujimori S., Takahashi K., Hasegawa S., Wu T., Masui T. : Eleventh Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2018, Spain (2018) Identifying trade-offs and co-benefits of climate policies in China to align policies with SDGs and achieve the 2°C goal.
- 14) Shiogama H. : Japan Geoscience Union Meeting (JpGU)2019, Chiba (2019) Uneven distributions of four hazard indicators of climate change with the Paris Agreement as goals
- 15) Su X., Tachiiri, K., Tanaka K., Takahashi K., Watanabe M. : 100th American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, Washington (2018) Development of a GCM emulator used in the integrated assessment of climate change policy.
- 16) Tachiiri K., Yokohata T., Tanaka K., Takahashi K. : Japan Geoscience Union Meeting (JpGU) 2018, Chiba (2018) Discussion: towards understanding climate-human system interaction
- 17) Takahashi K. : Informal Science Meeting with Dr. Thelma Krug, Tokyo (2017) Integrated Analyses of Climate Policies for Simultaneous Realization of the Paris Agreement and the SDGs.
- 18) Takahashi K. : Regional Action on Climate Change Conference (RACC9), Kyoto (2017) Integrated Analysis of Mitigation and Adaptation.
- 19) Takahashi K., Masui T., Hibino G. : Japan Geoscience Union Meeting (JpGU)2018, Chiba



- (2018) Integrated Analyses of Climate Policies for Simultaneous Realization of the Paris Agreement and the SDGs
- 20) Takahashi K. : セミナー : 「2050 年の世界」イニシアティブの展望, 東京 (2018) Potential contribution of the ERTDF 2 - 1702 research project to TWI2050 initiative - Integrated Analyses of Climate Policies for Simultaneous Realization of the Paris Agreement and the SDGs -
  - 21) Takahashi K. : International Workshop on Climate Change Adaptation Decision Support, Seoul (2019) Introduction to research projects conducted by the NIES/AIM impact modeling team
  - 22) Tanaka K., O'Neill B.C. : 10th International Carbon Dioxide Conference 2017, Switzerland (2017) Is the Zero Emission Requirement Aligned with 2.0°C and 1.5°C Stabilization Targets?
  - 23) Tanaka K. : 簡易気候モデルに関する情報交換会, Tokyo (2018) Paris Targets, Overshoot, Uncertainties, etc. - A View from Simple Climate Model Approach.
  - 24) Tanaka K. : B. C. 0に関する情報交換会 (2018) Paris Targets, Overshoot, Uncertainties, etc. - A View from Simple Climate Model Approach (2018) The Paris Agreement zero emissions goal is not consistent with 2ies, etc. - A View from Simple Climate Model Approach.
  - 25) Tanaka K. : Paris Agreement zero emissions goal on Negative CO2 Emissions 2018, Sweden (2018) Paris Agreement zero emissions goal is not consistent with 2th 2ies, etc. - A View from Simple Climate Model Approach.
  - 26) Tanaka K. : Des reunions climat at Etude et Modelisation du Climat et du Changement Climatique (EMC3), Laboratoire de Meteorologie Dynamique (LMD), Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), Sorbonne University, Paris (2018) The Paris Agreement zero-emissions goal is not always consistent with the 1.5°C and 2°C temperature targets.
  - 27) Tanaka K. : Seminaire du Centre International de Recherche sur l'usage de l'énergie et le Développement (CIRED), France (2018) Paris Agreement targets and overshoot scenarios.
  - 28) Tanaka K. : Séminaire du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), France (2018) Paris Agreement targets and overshoot scenarios.
  - 29) Tanaka K., O'Neill B.C. : 100th American Geophysical Union Meeting (AGU) Fall Meeting, Washington (2018) The Paris Agreement zero-emissions goal is not always consistent with the 1.5°C and 2°C temperature targets.
  - 30) Tanaka K., Yamagata Y., Boucher O., Ciais P. : Scenarios Forum, Denver (2018) Can we bet on overshooting the Paris Agreement temperature targets under climate-carbon feedback uncertainties?
  - 31) Tanaka K., O'Neill B. : Achieving Net Zero Conference, Oxford, UK (2019) Paris Agreement zero emissions goal is not always consistent with 2°C and 1.5°C temperature targets.
  - 32) Tanaka K., Cavalett O., Collins W.J., Cherubini F. : 12th Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting, Tsukuba (2019) Asserting the climate benefits of the coal-to-gas shift across temporal and spatial scales.
  - 33) Tanaka K., Cavalett O., Collins W.J., Cherubini F. : American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco (2019) Asserting the climate benefits of the coal-to-gas shift across temporal and spatial scales: reinforcing the support for coal phase-out.
  - 34) Wu W., Hasegawa T., Ohashi H., Hanasaki N., Masui T., Fujimori S., Takahashi K. : Eleventh Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2018, Spain (2018) An integrated assessment of global bioenergy potential from dedicated bio-

crops under environmental policies.

- 35) Wu W., Takahashi K., Fujimori S.: Scenarios Forum 2019, Denver (2019) Downscaling a global land use allocation model for the quantification of national SSPs.
- 36) 飯泉仁之直、塩竈秀夫、今田由紀子、花崎直太、金元植、沈志宏、西森基貴：日本気象学会2017年度秋季大会，227，北海道(2017) 気候モデルによる大規模アンサンブルデータを用いた作物収量への気候変動影響の検出
- 37) 今田由紀子、塩竈秀夫、高橋千陽、釜江陽一、森正人、廣田渚郎、小倉知夫、渡部雅浩：日本気象学会2017年度春季大会，東京(2017) 2016年の世界の異常高温事例の多発に関する要因分析
- 38) 今田由紀子、塩竈秀夫、高橋千陽、釜江陽一、森正人渡部雅浩、水田亮、石井正好、木本昌秀：日本気象学会2017年度秋季大会，北海道(2017) 世界の異常高温頻度に対する温暖化の寄与率の歴史的变化
- 39) 塩竈秀夫、今田由紀子、森正人、高橋千陽、渡部雅浩、木本昌秀：日本気象学会2017年度秋季大会，東京(2017) 極端現象の過去の人間活動による変化と避けられない将来変化
- 40) 塩竈秀夫、藤森真一郎、長谷川知子、高橋潔、久保田泉、田中克政、江守正多、今田由紀子、渡部雅浩、木本昌秀、阿部学、Damiel Mitchell、Daithi Stone、Myles R.Allen：日本気象学会2017年度春季大会，北海道(2017) 2.0℃安定化から1.5℃安定化への追加緩和努力によって、極端現象の将来変化をどの程度低減できるのか？
- 41) 塩竈秀夫：日本気象学会、気候科学と古気候プロキシ研究の接点創出，名古屋(2017) 産業革命以降と将来の気候変動-古気候研究との関連も含めて-
- 42) 塩竈秀夫：異常気象と温暖化. みんなの地球温暖化教室～京都議定書、パリ協定、そしてこれから～，京都(2017) 異常気象と温暖化
- 43) 高橋潔：国立環境研究所公開シンポジウム2017，大津(2017) 気候変動リスクにどう向き合うか
- 44) 高橋潔：国民対話シンポジウム - パリ協定の実現に向けて/世界の進路・日本の進路-，東京(2017) パリ協定気候目標と持続可能開発目標の同時実現に向けた気候政策の統合分析
- 45) 高橋潔，佐尾博志，本田靖，藤森真一郎，高倉潤也：第26回地球環境研究シンポジウム，長崎(2018) 地球温暖化に伴う熱関連死亡による被害額
- 46) 高橋潔：NSC定例勉強会（「2度シナリオ」と「1.5度特別報告書」について），東京(2018) 気候変動の長期目標（2℃目標と関連の科学的知見）
- 47) 高橋潔：パタゴニア第6回草の根活動家のためのツール会議：気候変動編，山梨(2018) 気候変動リスクにどう向き合うか
- 48) 高橋潔：大和証券株式会社勉強会，東京(2018) 気候変動リスクとその管理について考える
- 49) 田中克政，O'NeillBrianC.: 推進費2-1702意見交換会，東京(2018) パリ協定の温度目標とゼロ排出目標は本当に整合しているのか？両目標は必ずしも一致しないが、今世紀中盤までにCO2実質ゼロ排出が必要

### (3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 国民対話シンポジウム「パリ協定の実現に向けて - 世界の進路・日本の進路-」（主催：国立環境研究所社会環境システム研究センター・環境再生保全機構環境研究総合推進費2-1702、2017年10月3日、東京工業大学くらまえホール、観客約70名）をサブテーマ2・3とともに主催した。
- 2) 一般公開セミナー「「2050年の世界」イニシアティブの展望」（主催：国連大学サステイナビリティ高等研究所・IIASA日本委員会・国立環境研究所・地球環境戦略研究機関・SDSN-Japan・2018年10月15日、国連大学 エリザベス・ローズ国際会議場、観客約50名）にて、本推進費課題の概要および主要成果について紹介した。

- 3) 国民対話シンポジウム「低炭素社会から脱炭素社会を目指して」（主催：国立環境研究所社会環境システム研究センター・環境再生保全機構環境研究総合推進費2-1702、2019年11月20日、TKPガーデンシティPREMIUM秋葉原、観客約70名）をサブテーマ2・3とともに主催した。

#### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 成果の記者発表（2018年3月26日、筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会同時配布、「パリ協定の温度目標とゼロ排出目標の整合性 - 2つの目標は必ずしも一致しないことが明らかに-」（田中克政ら）
- 2) EurekAlert!（2018年3月26日）Reconciling Paris Agreement Goals for Temperature, Emissions; [https://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2018-03/ncfa-rpa032318.php](https://www.eurekalert.org/pub_releases/2018-03/ncfa-rpa032318.php)
- 3) Bloomberg（2018年3月26日）Meeting Paris Agreement Targets Will Take Massive Cuts in Emissions; <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-03-26/meeting-paris-agreement-targets-will-take-massive-cuts-in-emissions>
- 4) phys.org（2018年3月26日）Reconciling Paris Agreement Goals for Temperature, Emissions-study Finds Two Targets don't Always Go Hand in Hand; <https://phys.org/news/2018-03-paris-agreement-goals-temperature-emissionsstudy.html>
- 5) earth.com（2018年3月26日）Different Methods of Achieving the Paris Agreement Climate Goals; <https://www.earth.com/news/paris-agreement-climate-goals/>
- 6) EcoWatch（2018年3月27日）Emissions Must Fall By Mid-Century to Meet Paris Temperature Goals, Study Finds; <https://www.ecowatch.com/emissions-mid-century-paris-goals-2553640495.html>
- 7) Science Newsline（2018年3月26日）Reconciling Paris Agreement Goals for Temperature, Emissions; <http://www.sciencenewsline.com/news/2018032616020052.html>
- 8) LongRoom News（2018年3月26日）Reconciling Paris Agreement Goals for Temperature, Emissions -missionsseement Goals foDon't Always Go Hand in Hand; <https://www.hlongroom.hcom/discussion/949613/reconciling-paris-agreement-goals-for-temperature-emissions-study-finds-two-targets-dont-always-go-hand-in-hand>
- 9) next billion（2018年3月26日）Reconciling Paris Agreement Goals for Temperature, Emissions -missionsseement Goals for Temperature, s-for-temperature-emissions-study-finds-news/ reconciling-paris-agreement-goals-temperature-emissions-study-finds-two-targets-dont-always-go-hand-hand/
- 10) techbeepress（2018年3月26日）Reconciling Paris Agreement Goals for Temperature, Emissions-Study Finds Two Targets Don't Always Go Hand in Hand; <http://www.techbeepress.com/reconciling-paris-agreement-goals-for-temperature-emissions-study-finds-two-targets-dont-always-go-hand-in-hand/>
- 11) Europe Breaking News(2018年3月26日) Meeting Paris Agreement Targets Will Take Massive Cuts in Emissions; <https://www.europebreakingnews.net/2018/03/meeting-paris-agreement-will-targets--take-massive-cuts-in-emissions/>
- 12) ClimateChange.ie(2018年3月26日) The Paris Agreement Zero-emissions Goal is not Always Consistent with the 1.5°C and 2°C Temperature. Targets; <http://www.climatechange.ie/the-paris-agreement-zero-emissions-goal-is-not-always-consistent-with-the-1-5%E2%80%89c-and-2%E2%80%89c-temperature-targets/>
- 13) National Science Foundation(2018年3月26日) Reconciling Paris Agreement Goals for Temperature, Emission; [https://www.nsf.gov/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=245001&org=NSF&from=news](https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=245001&org=NSF&from=news)

- 14) Watts Up With That? (2018年3月26日) Remember When We Had to Reduce CO<sub>2</sub> Emissions to Zero to Save the Planet? NCAR says -hand-in-hand/<https://wattsupwiththat.com/2018/03/26/remember-when-we-had-to-reduce-co2-emissions-to-zero-to-save-the-planet-ncar-says-never-mind/comment-page-1/>
- 15) BrightSurf.com(2018年3月26日) Reconciling Paris Agreement Goals for Temperature, Emissions; <https://www.brightsurf.com/news/article/032618452825/reconciling-paris-agreement-goals-for-temperature-emissions.html>
- 16) credible carbon (2018年3月27日) Meeting Paris Agreement Targets Will Take Massive Cuts in Emissions;<https://www.crediblecarbon.com/news-and-info/news/meeting-paris-agreement-targets-will-take-massive-cuts-in-emissions/>
- 17) 日本の研究.com (2018年3月27日) パリ協定の温度目標とゼロ排出目標の整合性 2つの目標は必ずしも一致しないことが明らかに; <https://research-er.jp/articles/view/69230>
- 18) Diario Libre (2018年3月27日) Las Metas de Los Acuerdos de París no Tienen una Relación Mecánica Entre sí; <https://www.diariolibre.com/medioambiente/las-metas-de-los-acuerdos-de-los-acuerdos-de-paris-no-tienen-una-relacion-mecanica-entre-si-XD9498264>
- 19) The Millennium Alliance for Humanity and the Biospher (2018年3月27日); <https://mahb.stanford.edu/breaking-news/ecowatch/>
- 20) EcoWatch (2018年3月28日) Emissions Must Fall By Mid-Century to Meet Paris Temperature Goals, Study Finds ; <https://www.ecowatch.com/emissions-mid-century-paris-goals-2553640495.html>
- 21) Eurasia Review (2018年3月28日) Reconciling Paris Agreement Goals For Temperature, Emissions; <http://www.eurasiareview.com/28032018-reconciling-paris-agreement-goals-for-temperature-emissions/>
- 22) Nedercore (2018年3月28日) Emissions Must Fall By Mid-Century to Meet Paris Temperature Goals, Study Finds; <http://www.nedercore.nl/emissions-must-fall-by-mid-century-to-meet-paris-temperature-goals-study-finds>
- 23) Energetski Portal(2018年3月28日) Emissions Must Fall By Mid-Century to Meet Paris Temperature Goals, Study Finds; <https://www.energetskiportal.rs/en/emissions-must-fall-by-mid-century-to-meet-paris-temperature-goals-study-finds/>
- 24) Carbon Brief (2018年3月28日) National Grid Backs Plan for Earlier Petrol and Diesel ban; <https://www.carbonbrief.org/daily-brief/national-grid-backs-plan-for-earlier-petrol-and-diesel-ban>
- 25) 財経新聞(2018年3月29日) パリ協定の温度目標とゼロ排出目標の整合性は？ゼロ排出の早期達成が重要;<https://www.zaikei.co.jp/article/20180329/434248.html>
- 26) News Salt(2018年3月29日) 「パリ協定」 温度とゼロ排出の2つの目標は必ずしも一致しない?! ; <https://www.newssalt.com/24354>
- 27) Econews(2018年3月30日) Meeting Paris Agreement Targets Will Take Massive Emissions Cuts; <http://econews.com.au/57249/meeting-paris-agreement-targets-will-take-massive-emissions-cuts/>
- 28) Vox media(2018年3月30日) Shell2018年3月30日)reement Targets Will Take Massive Emissi <https://www.vox.com/energy-and-environment/2018/3/30/17171370/shell-oil-climate-change-carbon-2070>
- 29) MSN news(2018年3月30日) Shell1018年3月30日)x.com/energyo Carbon World by 2070, Explained; <https://www.msn.com/en-us/news/other/shell%E2%80%99s-vision-of-a-net-zero-carbon-world-by-2070-explained/ar-AAvhG>

- 30) 国际能源网(2019年3月30日) 从煤炭到天然气: 这种转变如何有助于稳定气候变化;  
<http://gas.in-en.com/html/gas-3101489.shtml>
- 31) 长安金融网(2019年3月30日) 从煤炭到天然气: 这种转变如何有助于稳定气候变化;  
<http://www.ccaj.net/kj/201905/308169.html>
- 32) 燃气表信息网(2019年3月31日) 从煤炭到天然气: 这种转变如何有助于稳定气候变化; <http://www.rqb99.com/news/show.php?itemid=19938>
- 33) brinkwire(2018年3月); <http://en.brinkwire.com/225675/reconciling-paris-agreement-goals-for-temperature-emissions-study-finds-two-targets-dont-always-go-hand-in-hand/>
- 34) Greener Environment Blog(2018年3月); <http://www.greenerenvironment.co.uk/blog.php>
- 35) Crisis Ambientaly Cambio Climatico(2018年3月);  
<http://crisisambiental-cambioclimatico.blogspot.jp/>
- 36) Climate Engineering (2018年4月3日) The Paris Agreement Zero-emissions Goal is not Always Consistent with the 1.5°C and 2°C Temperature Targets; <http://www.climate-engineering.eu/single/tanaka-katsumasa-oneill-brian-c-2018-the-paris-agreement-zero-emissions-goal-is-not-always-consistent-with-the-1-5-c-and-2-c-tem.html>
- 37) 成果の記者発表 (2018年7月30日、筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会同時配布、「温室効果ガス排出削減策が食料安全保障に及ぼす影響の評価 (Nature Climate Change誌掲載) 」 (長谷川知子ら)
- 38) EurekAlert! (2019年4月22日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change; [https://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2019-04/nife-fct041919.php](https://www.eurekalert.org/pub_releases/2019-04/nife-fct041919.php)
- 39) Phys.org (2019年4月22日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change; <https://phys.org/news/2019-04-coal-gas-shift-stabilize-climate.html>
- 40) Earth.com(2019年4月22日) The benefits of phasing out coal outweigh the risks, research shows; <https://www.earth.com/news/phasing-out-coal-gas/>
- 41) europa press(2019年4月22日) El cambio de carbón a gas puede ayudar a estabilizar el Cambio Climático; <https://www.europapress.es/ciencia/habitat-y-clima/noticia-cambio-carbon-gas-puede-ayudar-estabilizar-cambio-climatico-20190422175835.html>
- 42) leonoticiasEl(2019年4月22日) cambio del carbón al gas estabilizará el cambio climático, según un estudio; <https://www.leonoticias.com/mineria/cambio-carbon-estabilizara-20190422201906-nt.html>
- 43) Diari de Girona(2019年4月22日) El canvi del carbó al gas natural establitzarà el canvi climàtic, segons un estudi; <https://www.diaridegirona.cat/fets-gent/2019/04/23/canvi-del-carbo-al-gas/975974.html>
- 44) Environmental News Network(2019年4月22日) From Coal to Gas: How the Shift Can Help Stabilize Climate Change; <https://www.enn.com/articles/57684-from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change>
- 45) Science Daily(2019年4月22日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change; <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/04/190422112759.html>
- 46) HNGN(2019年4月22日) From Coal to Gas: How the Shift can Help Stabilize Climate Change; <http://www.hngn.com/articles/227380/20190422/from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change.html>
- 47) X-MOL(2019年4月22日) Asserting the climate benefits of the coal-to-gas shift across temporal and spatial scales; <https://www.x-mol.com/paper/5653853>
- 48) 7th space(2019年4月22日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change ; [7thspace.com/headlines/809470/from\\_coal\\_to\\_gas\\_\\_how\\_the\\_shift\\_can\\_help\\_stabilize\\_climate\\_change.html](http://7thspace.com/headlines/809470/from_coal_to_gas__how_the_shift_can_help_stabilize_climate_change.html)

- 49) Science Bulletin(2019年4月22日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change; <https://sciencebulletin.org/from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change/>
- 50) Bioengineer(2019年4月22日) From coal to gas: How the shift can help stabilize Climate change; <https://bioengineer.org/from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change/>
- 51) entorno inteligente(2019年4月22日) Shift from coal to gas may stabilise climate change; <https://www.entornointeligente.com/shift-from-coal-to-gas-may-stabilise-climate-change/>
- 52) BrightSurf(2019年4月22日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change ; <https://www.brightsurf.com/news/article/042219481409/from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change.html>
- 53) Gedco(2019年4月22日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change
- 54) Nation news(2019年4月22日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change;<https://nationnews.com.au/from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change/>
- 55) Agenperl(2019年4月22日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change
- 56) VergEnergias(2019年4月22日) Sustituir el carbón por el gas permitirá estabilizar el cambio climático, según un estudio realizado en Japón; <https://www.verdennergias.com/2019/04/sustituir-el-carbon-por-el-gas-permitira-estabilizar-el-cambio-climatico-segun-un-estudio-realizado-en-japon.html>
- 57) Triggered Climate(2019年4月22日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change; <https://www.triggeredclimate.com/home/from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change>
- 58) Listin Diario(2019年4月22日) El cambio de carbón a gas puede ayudar a estabilizar el Cambio Climático; <https://listindiario.com/la-vida/2019/04/22/562369/el-cambio-de-carbon-a-gas-puede-ayudar-a-estabilizar-el-cambio-climatico>
- 59) environment journal(2019年4月23日) Benefits of coal-to-gas switch ‘outweigh’ fracking risks;<https://environmentjournal.online/articles/benefits-of-coal-to-gas-switch-outweigh-fracking-risks/>
- 60) 成果の記者発表（2019年4月23日）、筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会同時配布、「石炭火力から天然ガス火力発電への転換は、パリ協定目標の達成に寄与（Nature Climate Change誌掲載）」（田中克政ら）
- 61) NIES（2019年4月23日）石炭火力から天然ガス火力発電への転換は、パリ協定目標の達成に寄与、石炭火力発電の段階的廃止の追い風に
- 62) University of Reading（2019年4月23日）Benefits of phasing out coal ‘outweigh risks’; <http://www.reading.ac.uk/news-and-events/releases/PR797854.aspx>
- 63) 環境展望台(2019年4月23日) 国環研など、石炭火力発電の段階的廃止による気候安定化の見通しを検証; <http://tenbou.nies.go.jp/news/jnews/detail.php?i=26816>
- 64) iagua(2019年4月23日) El uso del gas en lugar del carbón podría estabilizar el cambio climático;<https://www.iagua.es/noticias/ep/uso-gas-lugar-carbon-podria-estabilizar-cambio-climatico>
- 65) Bohemia(2019年4月23日) Gas por carbón para ayudar a estabilizar el calentamiento global; <http://bohemia.cu/medio-ambiente/2019/04/gas-por-carbon-para-ayudar-a-estabilizar-el-calentamiento-global/>

- 66) manufacturing.net(2019年4月23日) From Coal to Gas: How the Shift Can Help Stabilize Climate Change; <https://www.manufacturing.net/news/2019/04/coal-gas-how-shift-can-help-stabilize-climate-change>
- 67) The Siasat Daily(2019年4月23日) Shift from coal to gas may stabilise climate change; <https://www.siasat.com/news/shift-coal-gas-may-stabilise-climate-change-1490586/>
- 68) Business Standard(2019年4月23日) Shift from coal to gas may stabilise climate change; [https://www.business-standard.com/article/news-ani/shift-from-coal-to-gas-may-stabilise-climate-change-119042301185\\_1.html](https://www.business-standard.com/article/news-ani/shift-from-coal-to-gas-may-stabilise-climate-change-119042301185_1.html)
- 69) Global Security Wire(2019年4月23日) From Coal to Gas: How the Shift Can Help Stabilize Climate Change; <https://globalsecuritywire.com/2019/04/23/from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change/>
- 70) oil gas daily(2019年4月23日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change; [http://www.oilgasdaily.com/reports/From\\_coal\\_to\\_gas\\_How\\_the\\_shift\\_can\\_help\\_stabilize\\_climate\\_change\\_999.html](http://www.oilgasdaily.com/reports/From_coal_to_gas_How_the_shift_can_help_stabilize_climate_change_999.html)
- 71) Technologie Média(2019年4月23日) Stabiliser le changement climatique en passant du charbon au gaz; <https://technologiemedi.net/2019/04/23/stabiliser-le-changement-climatique-en-passant-du-charbon-au-gaz/>
- 72) 生物帮(2019年4月23日) From Coal to Gas: How the Shift can Help Stabilize Climate Change; <http://www.hngn.com/articles/227380/20190422/from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change.html>
- 73) Glocalist(2019年4月23日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change; <https://glocalist.press/from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change/>
- 74) morro digital(2019年4月23日) el cambio-de carbon a gas puede ayudar a estabilizar el cambio-climatico
- 75) apunte(2019年4月23日) Noticias y opiniones, martes 23 de abril 2019 ; <https://apunterd.com/noticias/181549-noticias-y-opiniones-martes-23-de-abril-2019>
- 76) HEPEJCODEEE(2019年4月23日) El cambio de carbón a gas puede ayudar a estabilizar el Cambio Clim camb ; <http://hepejcodeeee-hepejcodeeee.blogspot.com/2019/04/el-cambio-de-carbon-gas-puede-ayudar.html>
- 77) Yahoo News Singapore(2019年4月23日) Shift from coal to gas may stabilise climate change; <https://sg.news.yahoo.com/shift-coal-gas-may-stabilise-climate-change-140447108.html>
- 78) revolution green(2019年4月23日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change; <https://revolution-green.com/coal-gas-shift-can-help-stabilize-climate-change/>
- 79) ANI(2019年4月23日) Shift from coal to gas may stabilise climate change; <https://www.aninews.in/news/science/shift-from-coal-to-gas-may-stabilise-climate-change20190423193447/>
- 80) Yahoo News India(2019年4月23日) Shift from coal to gas may stabilise climate Change; <https://in.news.yahoo.com/shift-coal-gas-may-stabilise-climate-change-140447108.html>
- 81) MSN news(2019年4月23日) Shift from coal to gas may stabilise climate change; <https://www.msn.com/en-in/news/other/shift-from-coal-to-gas-may-stabilise-climate-change/ar-BBWdfq2>
- 82) Deeper(2019年4月23日) Từ than sang gas: Làm thế nào sự thay đổi có thể giúp ổn định biến đổi khí hậu; <https://deeper.vn/tu-than-sang-gas-lam-the-nao-su-thay-doi-co-th e-giup>

on-dinh-bien-doi-khi-hau.html

- 83) InfralineEnergy(2019年4月23日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change; <http://www.infraline.com/Details/From-Coal-To-Gas--How-The-Shift-Can-Help-Stabilize-Climate-Change-348755.htm>
- 84) The Times of India(2019年4月24日) Shift from coal to gas may stabilise climate change; <https://energy.economictimes.indiatimes.com/news/coal/shift-from-coal-to-gas-may-stabilise-climate-change/69017809>
- 85) ars technica(2019年4月24日) Considering methane leaks, is moving from coal to natural gas all that good? ; <https://arstechnica.com/science/2019/04/considering-methane-leaks-is-moving-from-coal-to-natural-gas-all-that-good/>
- 86) The Asian Age(2019年4月24日) Coal-to-gas shift can affect climate change; <https://www.asianage.com/life/more-features/240419/coal-to-gas-shift-can-affect-climate-change.html>
- 87) Deccan Chronicle(2019年4月24日) Coal-to-gas shift can affect climate change; <https://www.deccanchronicle.com/lifestyle/environment/240419/coal-to-gas-shift-can-affect-climate-change.html>
- 88) Eurasia Review(2019年4月24日) From Coal To Gas: How The Shift Can Help Stabilize Climate Change; <https://www.eurasiareview.com/24042019-from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change/>
- 89) newKerala.com(2019年4月24日) Shift from coal to gas may stabilise climate change; <https://www.newkerala.com/news/read/131976/shift-from-coal-to-gas-may-stabilise-climate-change.html>
- 90) Big News Network(2019年4月24日) Shift from coal to gas may stabilise climate change; <https://www.bignewsnetwork.com/news/260630905/shift-from-coal-to-gas-may-stabilise-climate-change>
- 91) tronserve(2019年4月24日) From Coal to Gas: How the Shift Can Help Stabilize Climate Change; <http://tronserve.com/posts/from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change>
- 92) Energy Infra Post(2019年4月24日) Shift from coal to gas may stabilise climate change
- 93) Auckland Magazine(2019年4月24日) From coal to gas: How the shift can help stabilize climate change
- 94) sify finance(2019年4月24日) Shift from coal to gas may stabilise climate change; <http://www.sify.com/finance/shift-from-coal-to-gas-may-stabilise-climate-change-news-commodities-textJpdjgibac.html>
- 95) Devdiscourse(2019年4月24日) Shift from coal to gas may stabilise climate change; <https://www.devdiscourse.com/article/science-environment/489726-shift-from-coal-to-gas-may-stabilise-climate-change>
- 96) News mobile(2019年4月24日) Scientists may have found a way to stabilise climate change ; <http://newsmobile.in/articles/2019/04/24/scientists-may-have-found-a-way-to-stabilise-climate-change/>
- 97) NDTV(2019年4月25日)Shift From Coal To Gas May Stabilise Climate Change, Suggests Study; <https://swachhindia.ndtv.com/shift-from-coal-to-gas-may-stabilise-climate-change-suggests-study-33626/>
- 98) FIS Technology(2019年4月25日) From Coal to Gas: How the Shift Can Help Stabilize Climate Change; <https://ffiiss.com/from-coal-to-gas-how-the-shift-can-help-stabilize-climate-change/>



- 99) Fictron Industrial Supplies Sdn Bhd(2019年4月25日) From Coal to Gas: How the Shift Can Help Stabilize Climate Change; <https://m.newpages.com.my/en/company/728516/news/71092/From-Coal-to-Gas:-How-the-Shift-Can-Help-Stabilize-Climate-Change.html>
- 100) energy in depth(2019年4月26日) New Nature Study Affirms the Climate Benefits of Increased Natural Gas Use; <https://eidclimate.org/new-nature-study-affirms-the-climate-benefits-of-increased-natural-gas-use/>
- 101) 一般社団法人 四国天然ガス普及協会(2019年4月28日) 石炭火力から天然ガス火力発電への転換は、パリ協定目標の達成に寄与; <https://shikoku-naturalgas.com/2019/04/28/%E5%9B%BD%E7%AB%8B%E7%92%B0%E5%A2%83%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%89%80%EF%BC%9A%E7%9F%B3%E7%82%AD%E7%81%AB%E5%8A%9B%E3%81%8B%E3%82%89%E5%A4%A9%E7%84%B6%E3%82%AC%E3%82%B9%E7%81%AB%E5%8A%9B%E7%99%BA%E9%9B%BB/>
- 102) NTNU (2019年4月29日) 50 prosent bedre for klimaet med gass enn kull ; <https://geminino.no/2019/04/50-prosent-bedre-for-klimaet-med-gass-enn-kull/>
- 103) NTNU (2019年4月29日) Coal-to-gas: a bridge fuel on the way towards reduced emissions; <https://www.ntnutechzone.no/en/2019/04/coal-to-gas/>
- 104) NTNU (2019年4月29日) Gas instead of coal is 50% better for the climate; <https://geminiresearchnews.com/2019/05/gas-instead-of-coal-is-50-better-for-the-climate/>
- 105) American Society of Mechanical Engineers/Environmental Systems Division Newsletter (2019年4月)
- 106) Dominion Energy (2019年4月) Investing in Infrastructure for Clean Energy; <https://sustainability.dominionenergy.com/investing-in-infrastructure/>
- 107) SFM News (2019年4月) El cambio de carbón a gas puede ayudar a estabilizar el Cambio Climático; <http://www.sfmnews.com/2019/04/dia-internacional-de-la-tierra.html>
- 108) chuangyvetv.com(2019年5月13日) 从煤炭到天然气 这种转变如何有助于稳定气候变化; <http://chuangyi.chuangyvetv.com/nyhb/20190513/05133584.html>
- 109) xda.cn(2019年5月14日) 从煤炭到天然气：这种转变如何有助于稳定气候变化; <http://news.xda.cn/news/20190514/057720.html>
- 110) 成果の記者発表 (2019年5月16日) 筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会同時配布、「気候安定化による飢餓リスク増加抑制のための費用を算定 (Nature Sustainability誌掲載)」 (藤森真一郎ら)
- 111) Energy Information Australia (2019年5月22日) Ignoring scientific consensus, activist group falsely claims that natural gas won't help lower Australia's emissions; <https://www.energyinformationaustralia.com.au/ignoring-scientific-consensus-activist-group-falsely-claims-that-natural-gas-wont-help-lower-australias-emissions/>
- 112) 毎日新聞(2019年5月30日) 地球温暖化対策 天然ガス有効 日欧の研究チーム発表; <https://mainichi.jp/articles/20190530/ddm/013/040/01200c>
- 113) LNG物联网(2019年6月3日) 这种转变如何有助于稳定气候变化; <http://www.lng168.com/gateWay/newsDetail?id=1536>
- 114) The Williams Blog(2019年6月3日) Nature study affirms climate benefits of increased natural gas usage; <https://blog.williams.com/corporate-responsibility/nature-study-affirms-climate-benefits-of-increased-natural-gas-usage/>
- 115) 国际能源网 (2019年6月4日) 从煤炭到天然气：这种转变如何有助于稳定气候变化 ; <http://gas.in-en.com/html/gas-3105230.shtml>
- 116) Science & Technology Research News (2019年6月11日) gas-instead-of-coal-is-50-better-for-the-climate/; <https://www.scienceandtechnologyresearchnews.com>

/gas-instead-of-coal-is-50-better-for-the-climate/

- 117) Anchorage Farm (2019年6月18日) New scientific study touts climate benefits of gas over coal; <https://www.williams.com/2019/07/18/new-scientific-study-touts-climate-benefits-of-gas-over-coal/>
- 118) environment journal (2019年6月22日) Energy-related carbon emissions rise at fastest rate since 2011; <https://environmentjournal.online/articles/energy-related-carbon-emissions-rise-at-fastest-rate-since-2011/>
- 119) XDA智能手机网 (2019年6月22日) ; <http://news.xda.cn/news/20190621/0610781.html>
- 120) S&P Global Market Intelligence(2019年7月3日) Group says LNG growth worse than coal for climate; industry calls report flawed; [https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/trending/tcLVfX9gw2\\_oiUFq8asr9Q2](https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/trending/tcLVfX9gw2_oiUFq8asr9Q2)
- 121) ScienceNordic (2019年7月7日) gas-instead-of-coal-is-50-better-for-the-climate
- 122) Natural Gas Now(2019年7月30日) Coal to Natural Gas CO2 Emission Reductions Key to Climate Stabilization; <https://naturalgasnow.org/coal-to-natural-gas-co2-emission-reductions-key-to-climate-stabilization/>
- 123) 成果の記者発表 (2019年9月12日) 筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会同時配布、「飢餓撲滅と環境保全の両立のためには公平な食料分配が鍵であることを解明 (Nature Sustainability誌掲載) 」 (長谷川知子ら)
- 124) Ohio Gas & Oil Magazine (2019年9月) ; [https://issuu.com/dixcom/docs/g\\_o\\_sept\\_2019\\_final\\_opt](https://issuu.com/dixcom/docs/g_o_sept_2019_final_opt)
- 125) Anchorage Farm(2019年10月26日) Divergent metrics for methane’ s heating effect; <http://www.anchorageromneys.com/2019/10/divergent-metrics-for-methanes-heating-effect/>
- 126) 成果の記者発表 (2019年12月3日) 林政記者クラブ、農林記者会、農政クラブ、筑波研究学園都市記者会、京都大学記者クラブ、環境省記者クラブ、環境記者会同時配布、「生物多様性保全と温暖化対策は両立できるー生物多様性の損失は気候安定化の努力で抑えられるー (Nature Communications誌) 」 (大橋春香ら)
- 127) Oil Gas Denmark(2020年1月28日) Udskiftning af kul med naturgas er et afgørende skridt for at dæmpe klimaforandringerne; 1) <http://www.oilgasdenmark.dk/udskiftning-af-kul-med-naturgas-er-et-afgoerende-skridt-for-at-daempe-klimaforandringerne/>
- 128) Oil Gas Denmark(2020年1月30日) Coal-to-gas shift is one of the pillars of climate change mitigation; <http://www.oilgasdenmark.dk/coal-to-gas-shift-is-one-of-the-pillars-of-climate-change-mitigation/>

## (6) その他

- 1) Best Paper Award (発表題目: Socio-economic Factors and Future Challenges of the 1.5°C Goal ; 授与機関: Second global conference on theory and applications of OR/OM for sustainability ; 受賞日: 2017年9月8日 ; 受賞者: Liu J.Y., Fujimori S., Takahashi K., Hasegawa T., Su X., Masui T.)
- 2) 環境研究総合推進費[2-1702] [2-1704] [2-1707] 気候政策 三課題 合同研究会の共催 (2018年4月26日・東京大学本郷キャンパス伊藤国際学術研究センター3階中会議室)

## 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

## II-2 わが国におけるゼロ排出の実現に向けた社会シナリオの検討

国立研究開発法人国立環境研究所

社会環境システム研究センター	統合環境経済研究室	増井 利彦・花岡 達也
社会環境システム研究センター	環境政策研究室	金森 有子
社会環境システム研究センター	広域影響・対策モデル研究室	芦名 秀一
地球環境研究センター	副センター長	江守 正多

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所

社会環境システム研究センター 本城 慶多（平成29年度）

公益財団法人地球環境戦略研究機関 石川 智子・西岡 秀三・甲斐沼美紀子

フランス・CIRED (International research center on environment and development)

Christophe Cassen・Jean-Charles Hourcade・Aurélie Mejean・

Vincent Viguié・Gaëlle Le Treut's

ドイツ・Wuppertal Institute Sascha Samadi

米国・PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) James Edmonds

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：45,102千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：15,670千円、平成30年度：13,762千円、令和元年度：15,670千円）

### [要旨]

パリ協定において合意された2°C目標や1.5°C目標の達成に向けて、日本は最終到達点として脱炭素社会を掲げ、2050年までに温室効果ガス排出量を80%削減し、21世紀後半のできるだけ早期に脱炭素社会を実現することを記した長期戦略（パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略）を2019年に閣議決定した。本研究では、アジア太平洋統合評価モデル（Asia-Pacific Integrated Model: AIM）を構成する各モジュールの改良を行い、改良したモデル群を用いて、2050年に温室効果ガス排出量を80%削減する経路の検討と、経済活動への影響について定量化を行った。また、欧州のモデルとの意見交換を通じて温室効果ガス排出量の削減が経済活動にもプラスの効果をもたらす取り組みについて調査し、日本において同様の効果をもたらすような取り組みについて検討を行った。具体的には、再生可能エネルギーの拡大、投資回収年の長期化、低効率な技術の早期退出等を導入することで、温室効果ガス排出量を80%削減する取り組みとGDPの上昇を両立させる取り組みがあることを示した。

### [キーワード]

パリ協定、長期低炭素発展戦略、アジア太平洋統合評価モデル、将来シナリオ、脱炭素社会

### 1. はじめに

パリ協定に示された2°C目標や1.5°C目標の実現を目指して、各国は2020年以降の温室効果ガス排出削減目標であるNDC (Nationally Determined Contribution) や長期低炭素発展戦略の提出が求められている。日本においても、温室効果ガス排出削減目標として2030年に2013年比26%<sup>1)</sup>、2050年に80%それぞれ削減し、21世紀後半のできるだけ早期に脱炭素社会を実現することを目指す<sup>2)</sup>としている。しかしながら、2050年の排出削減目標については、イノベーションを通じた環境と成長の好循環を実現することが基本的な考え方として示されているだけで、具体的なロードマップについては明らかにされていない。2050年までに残された時間は30年を切り、技術によっては今導入されると2050年も稼働しているも

のもあり、ロックインの影響が懸念される。2050年までに温室効果ガス排出量を80%削減する取り組みを進めるには、対策のロードマップを明らかにし、費用や効果などを定量的に明らかにすることが重要となる。また、環境と経済成長の好循環をもたらすような取り組みの可能性について検討することも必要となる。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマでは、日本における温室効果ガス排出量の大幅削減に向けた取り組みを評価するために、これまでに開発してきた日本を対象とした統合評価モデルAIM (Asia-Pacific Integrated Model) の改良を行い、改良したモデルを用いて、2050年の温室効果ガス排出量を80%削減する取り組みの評価を行うことを目的としている。また、欧州において示されている大幅な温室効果ガス排出量の削減が経済活動にもプラスの影響をもたらす分析事例について調査し、そうした取り組みを日本に適用することの可能性を検討することを通じて、日本において温室効果ガス排出量の80%削減と経済的な便益の両方をもたらす取り組みについて評価を行う。

## 3. 研究開発方法

図3.2.1は、研究計画の概要図（サブテーマ2担当部分を抜粋）に、以下で報告するサブテーマ2の個別研究項目(2-1)～(2-6)の6種の研究を配置したものである。

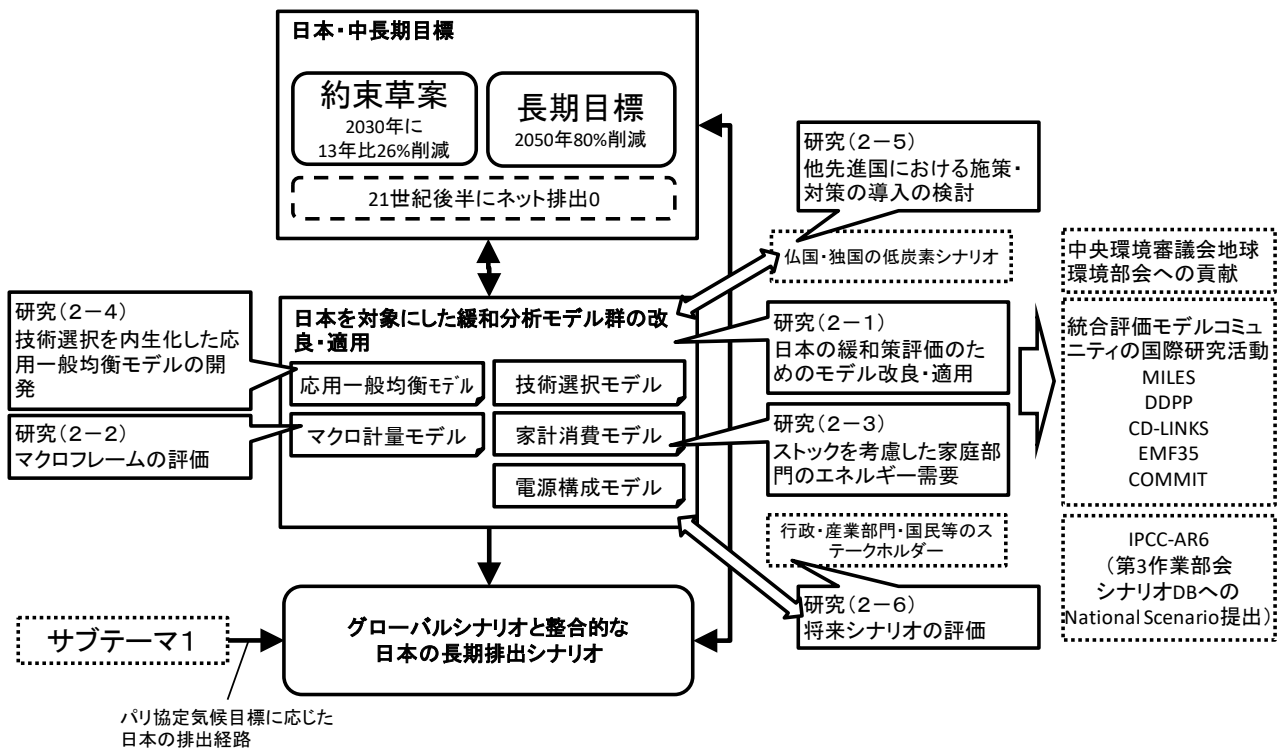
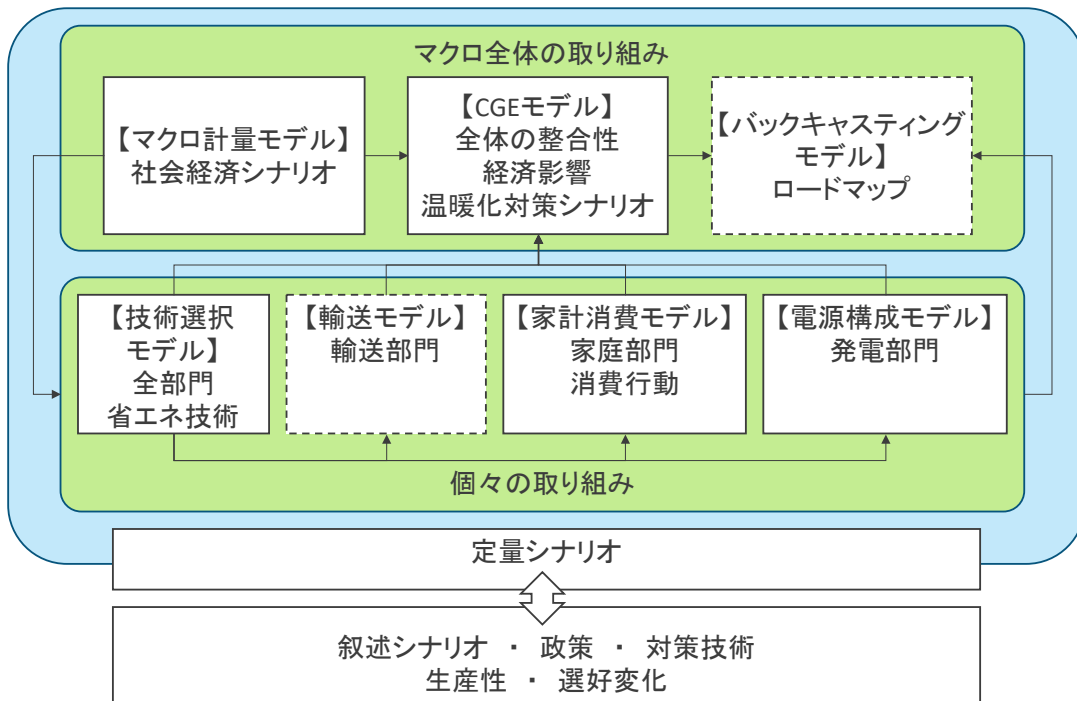


図3.2.1 サブテーマ2の研究計画事項、ならびに実施した6つの研究

研究(2-1)では、本研究課題の日本を対象とした分析において用いる各モデルの改良について検討するとともに、モデルを用いた2050年までの将来シナリオの定量化を行った。図3.2.2に日本を対象としたモデルの枠組を示す。本サブテーマでは、サブテーマ3と共同で、図3.2.2に示す各モデルの更新を行うとともに、更新したモデルを用いて2050年までの我が国の経済活動と温室効果ガス排出量の推移を定量的に明らかにする。家庭や発電など個々の取り組みを評価するモデルを用いて、2050年までの取り組みを定量化し、そうした結果を応用一般均衡モデル(CGEモデル)のパラメータの変化として取り込み、2050年の温室効果ガス排出量を80%削減する取り組みや、2050年までの様々な追加的な取り組みによるマクロ経済への影響について、定量的に明らかにするものである。



注：破線の各モデルは、研究計画当初は分析に用いる予定のモデルであったが、最終的には使用していないモデルである。

図3.2.2 日本を対象としたモデルとその位置付け

研究(2-2)で行ったマクロ計量モデルの概要を図3.2.3に示す。本モデルは、固定資本ストックと労働人口からGDPを推定するためのモデルである。固定資本形成の算定については、1期前のGDPに投資比率（2015年値までは実績値、以降は2015年値（22.3%）で推移すると想定）を乗じて、当期の固定資本形成を算定している。また、1期前の固定資本ストックに（1-資本減耗率（6.4%））を乗じて、1期前の固定資本ストックの残存量を推計し、それに当期の固定資本形成を加え、当期の固定資本ストックとした。労働人口の推計については、応答変数、生産年齢人口と老年人口を説明変数とした自己回帰和分移動平均モデル（ARIMAモデル）を適用した。TFPと資本弾力性の推計については、コブ・ダグラス型の生産関数を仮定し、1970～2015年の実績GDP、固定資本ストック、労働人口の統計データを用いて、TFPと資本弾力性を推計した。また、TFPの時間変動にはランダムウォークで記述した。

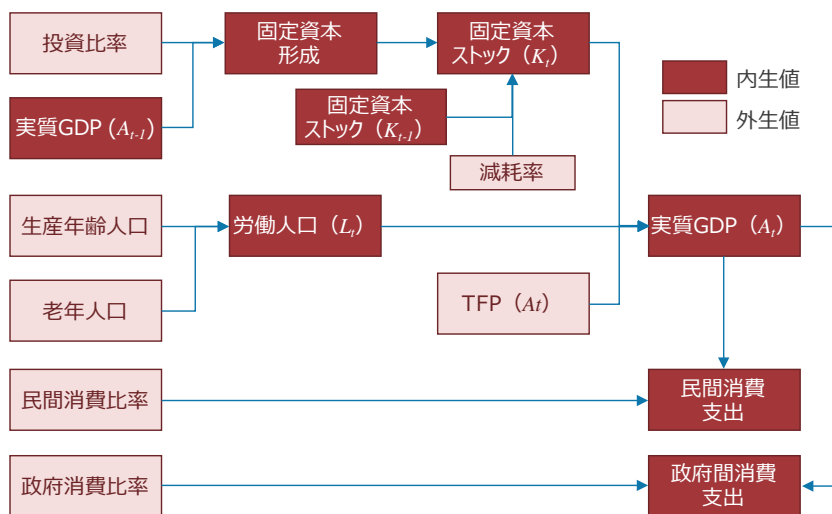


図3.2.3 マクロ計量モデルによる実質GDP推計のフロー

研究(2-3)では、家庭部門におけるエネルギーサービス需要量を推計するとともに、推計されたエネルギーサービス需要量を満たすエネルギー消費量を推計することを目的として、家計消費モデルの構築を行った。特に後者では、機器の効率の変化が及ぼす影響が重要である。そこで、テレビや冷蔵庫という家庭が持つ主要機器について残存率を機器別に設定し、機器効率改善のスピードが異なるシナリオ（A：機器効率が長期間にわたり一定に変化するケース、B：短期間で劇的な効率変化が起きるケース）において、ストック機器の効率に及ぼす影響を分析した。

家庭消費モデルによる分析に加えて、電力消費量の分布の特徴を明らかにし、今後の家庭の電力消費の削減に向けてどのような削減策が有効かを分析するための分析を行った。具体的には、2015年の環境省家庭CO2統計の全国試験調査の個票を用いて、10地域別に電力消費量の小さい家庭から順に消費量をプロットすることで、電力消費量の分布を分析した。

研究(2-4)では、上記のマクロ計量モデルで示された将来のGDPを再現し、家計消費モデルや電源構成モデル、さらにはサブテーマ3で改良した技術選択モデルの結果をもとに、2050年までの日本における生産、消費活動を整合的に表す応用一般均衡モデルの改良を実施した。これまでに開発してきた日本を対象とする応用一般均衡モデルAIM/CGE [Japan]を、本課題に用いるにあたって、技術選択の内生化や家計部門の詳細化などの改良を行っている。また、モデルの基準年として、2005年と2011年の両方が利用可能であるが、計算結果の検証を行うために分析では2005年を基準年としたモデルを使用している。図3.2.4にAIM/CGE [Japan]の全体像（各年における構造）を、表3.2.1にAIM/CGE [Japan]の部門と財・サービスの区分をそれぞれ示す。

各生産部門は、資本、労働、原材料、エネルギーを投入し、財（+屑・副産物）を産出する。これらの投入要素は、図3.2.5に示すような入れ子型の生産関数によって入力される。また、各生産部門においては、既存設備による資本（前年に使用した設備から減耗分を除いた量）と新規投資による資本を区別し、それぞれがサブ部門として生産活動を行っている。また、既存設備、新規設備ともに、複数の技術（従来技術、省エネ技術など）を想定することが可能である。低炭素技術は、複数の技術群（NDC達成用、80%削減達成用、CCSなど）に集約しており、AIM/Enduse [Japan]で使用されているデータと対応したものとなっている。なお、基準年については、過去の資本のコホートを区別せずに、平均的な既存設備、従来技術のみが存在すると仮定している。

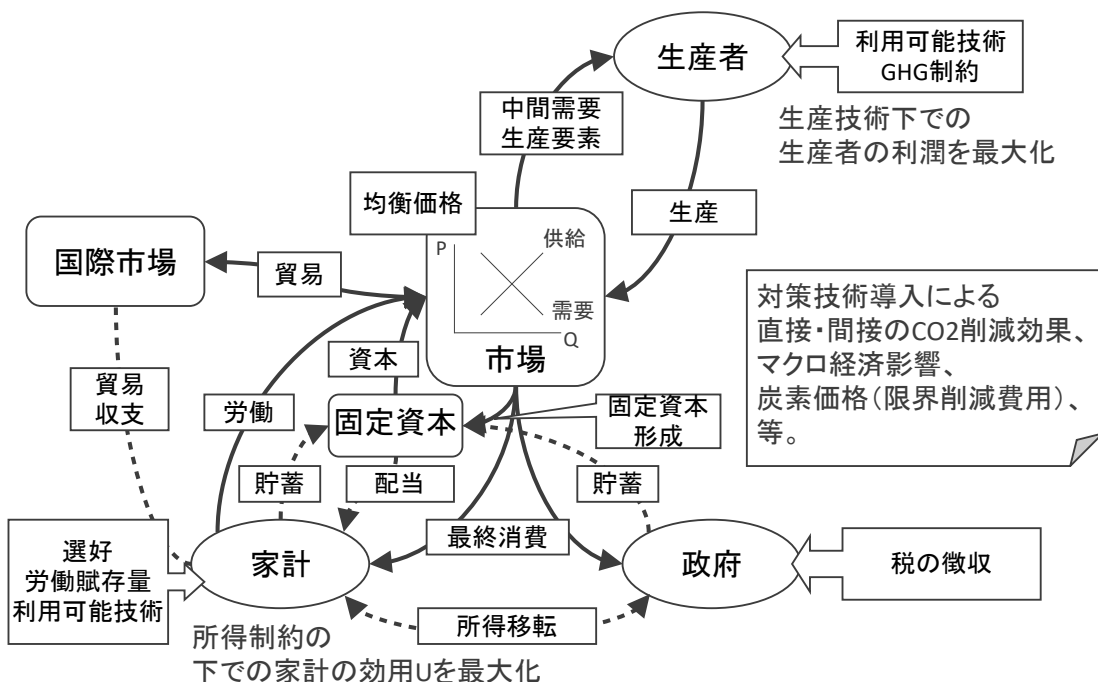
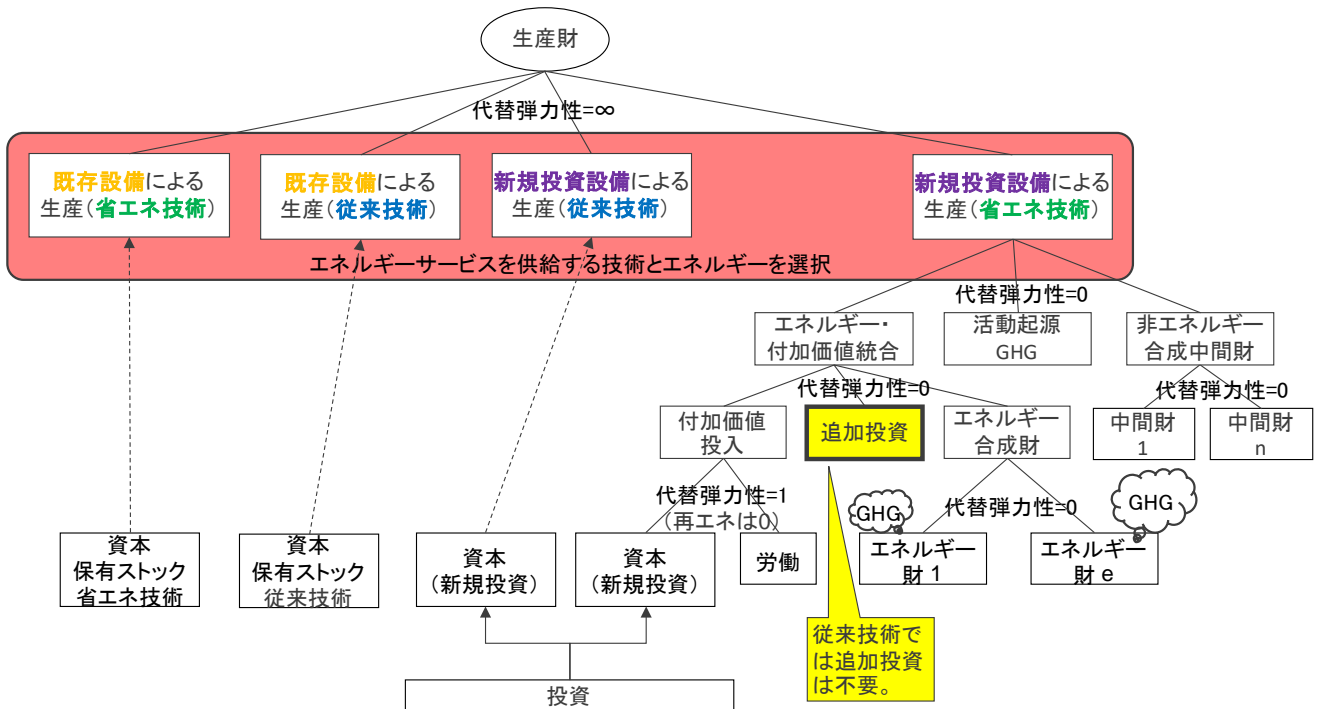


図3.2.4 日本を対象とした応用一般均衡モデルAIM/CGE [Japan]の全体像

表3.2.1 AIM/CGE [Japan]における活動と財・サービスの区分

活動(列部門)		財・サービス(行部門)		活動(列部門)		財・サービス(行部門)	
1	農林水産業	1	農林水産業	24	電力(自家発電)	24	電力
2	鉱業	2	鉱業	24n	原子力		
3	石炭・原油・ガス	03c	石炭	24tC	石炭火力		
		03o	原油	24tO	石油火力		
		03g	天然ガス	24tG	ガス火力		
4	飲食料品	4	飲食料品	24H	水力		
5	繊維製品	5	繊維製品	24S	太陽光		
6	パルプ・紙・木製品	6	パルプ・紙・木製品	24W	風力		
7	化学製品	7	化学製品	24G	地熱		
8	石油製品	8m	自動車用石油製品	24B	バイオマス		
		8o	その他石油製品	25	都市ガス	25	都市ガス
9	石炭製品	9	石炭製品	26	熱供給	26	熱供給
10	プラスチック・ゴム	10	プラスチック・ゴム	27	水道	27	水道
11	窯業・土石	11	窯業・土石	28	廃棄物処理	28	廃棄物処理
12	鉄鋼	12	鉄鋼	29	商業	29	商業
13	非鉄金属	13	非鉄金属	30	金融・保険	30	金融・保険
14	金属製品	14	金属製品	31	不動産	31	不動産
15	汎用機械	15	汎用機械	32	運輸・郵便	32	運輸・郵便
16	生産用機械	16	生産用機械	33	情報通信	33	情報通信
17	業務用機械	17	業務用機械	34	公務	34	公務
18	電子部品	18	電子部品	35	教育・研究	35	教育・研究
19	電気機械	19	電気機械	36	医療・福祉	36	医療・福祉
20	情報・通信機器	20	情報・通信機器	37	その他非営利団体サービス	37	その他非営利団体サービス
21	輸送機械	21	輸送機械	38	対事業所サービス	38	対事業所サービス
22	その他製造工業製品	22	その他製造工業製品	39	対個人サービス	39	対個人サービス
23	建設	23	建設	40	事務用品・分唯不明	40	事務用品



新規投資は、従来技術と省エネ技術のいずれかとして利用される。  
 省エネ技術として利用する場合には、省エネのための追加投資が必要。  
 翌年には、それぞれ既存設備に組み入れられる。

図3.2.5 AIM/CGE [Japan]における生産構造

各部門では、資本と労働が統合され、付加価値を産出する。資本と労働の統合については、再生可能エネルギーの生産については代替弾力性が0のレオンチェフ関数を、それ以外の部門については代替弾力性が1のコブダグラス関数を採用している。再生可能エネルギーの生産においてレオンチェフ関数を使用している理由は、資本が生産容量そのものを示しており、想定されている供給量以上のエネルギーの生産が生じないようにするためである。

付加価値とエネルギーもレオンチェフ関数によって統合され、エネルギー・付加価値が産出される。なお、エネルギーは個別のエネルギー種が統合されるが、これもレオンチェフ関数を仮定している。つまり、設備によって、利用可能なエネルギー種はあらかじめ決まっており、エネルギー価格の変化によってエネルギー種が代替することはないと考えている。例えば、自動車において、ガソリン価格が高くなったために投入エネルギーをガソリンから電力に置き換えることはできないとしている。なお、1年という短期ではそうしたエネルギーの代替は発生しないが、1年を超える長期では、新しい設備の導入によってエネルギー種の代替が起こりうると考えている。

エネルギー・付加価値は、エネルギー以外の中間需要（原材料）とレオンチェフ関数で統合されて、財を産出する。なお、生産過程において排出されるGHG排出量は、エネルギー起源と活動起源を区別して取り扱う。排出量は、GIOが推定しているGHGインベントリにあわせている。エネルギー起源のGHG排出量は、エネルギー消費量（化石燃料の燃焼量）に比例して排出すると仮定し、活動期限のGHG排出量は、活動水準に比例して排出すると仮定している。

なお、省エネ技術を導入するためには、新規投資の段階で追加投資が必要となる。追加投資は、エネルギー・付加価値統合と同じ段階でレオンチェフ関数の一要素として統合される。なお、一度設置された省エネ技術は、翌年以降は追加費用なく使用することが可能である。

産出側については、異なる技術（サブ部門）で産出される財は、同じ財として扱われる。つまり、代替弾力性が無限大となる。生産された財は、輸出と国内向けに配分され、国内向けの財は輸入財と統合されて、国内市場に共有される。輸出と国内向けの配分はCET関数で、国内財と輸入財の統合はCES関数で定義されると仮定した。なお、AIM/CGE [Japan]は一国モデルであり、小国の仮定を用いている。つまり、国際価格そのものは外生とし、想定される貿易収支を達成するように為替レートが変化する。2014年までの国際価格は延長産業連関表の輸出入のデフレーターを使用し、それ以降は、エネルギー価格はIEA等を参照し、その他の財の価格は、2015年以降は2014年の値から変化しないと仮定している。また、国内生産に占める輸出の比率や、国内供給に対する輸入の比率も、延長産業連関表をもとに2014年まで想定し、それ以降は変化しないとしている。

AIM/CGE [Japan]では、家庭部門を世帯主年齢によって5種（-29歳；30-39歳；40-49歳；50-59歳；60-歳）に区分している。それぞれ、労働力と株券を保有しており、賃金と配当を得ている。また、政府との間で所得移転を行っている。なお、配当は資本ストック部門から、資本所得に応じて各家庭に配分される。なお、均衡計算にあたっては、所得から将来の経済成長に必要な投資（貯蓄）はあらかじめ差し引かれ、残りの所得を効用が最大となるように各財を消費する。家庭部門における消費構造を図3.2.6に示す。



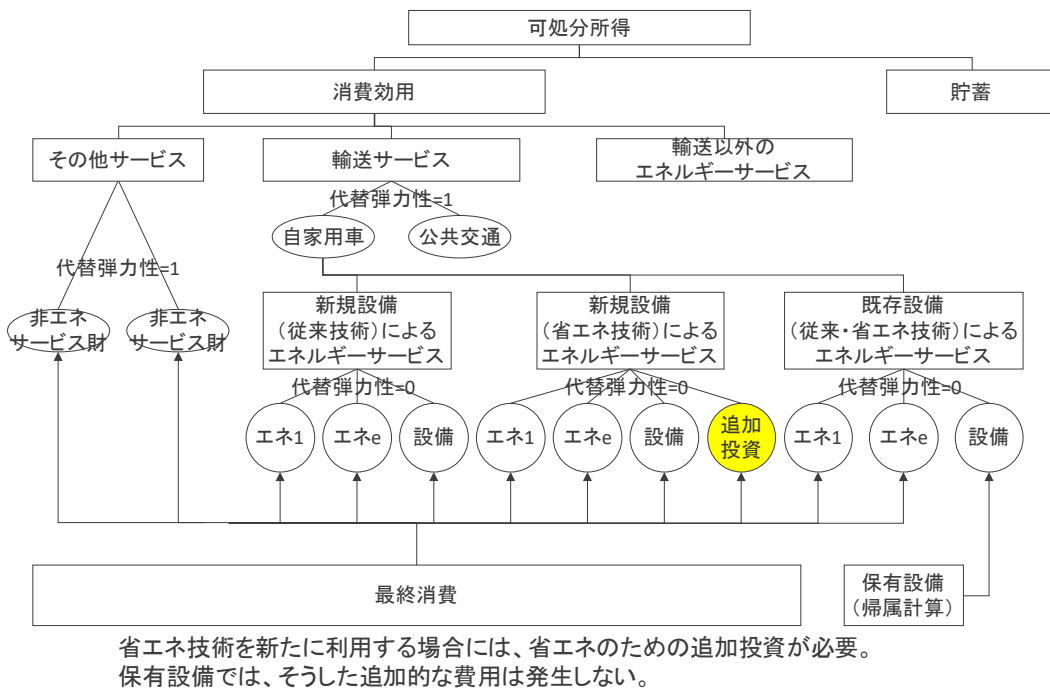


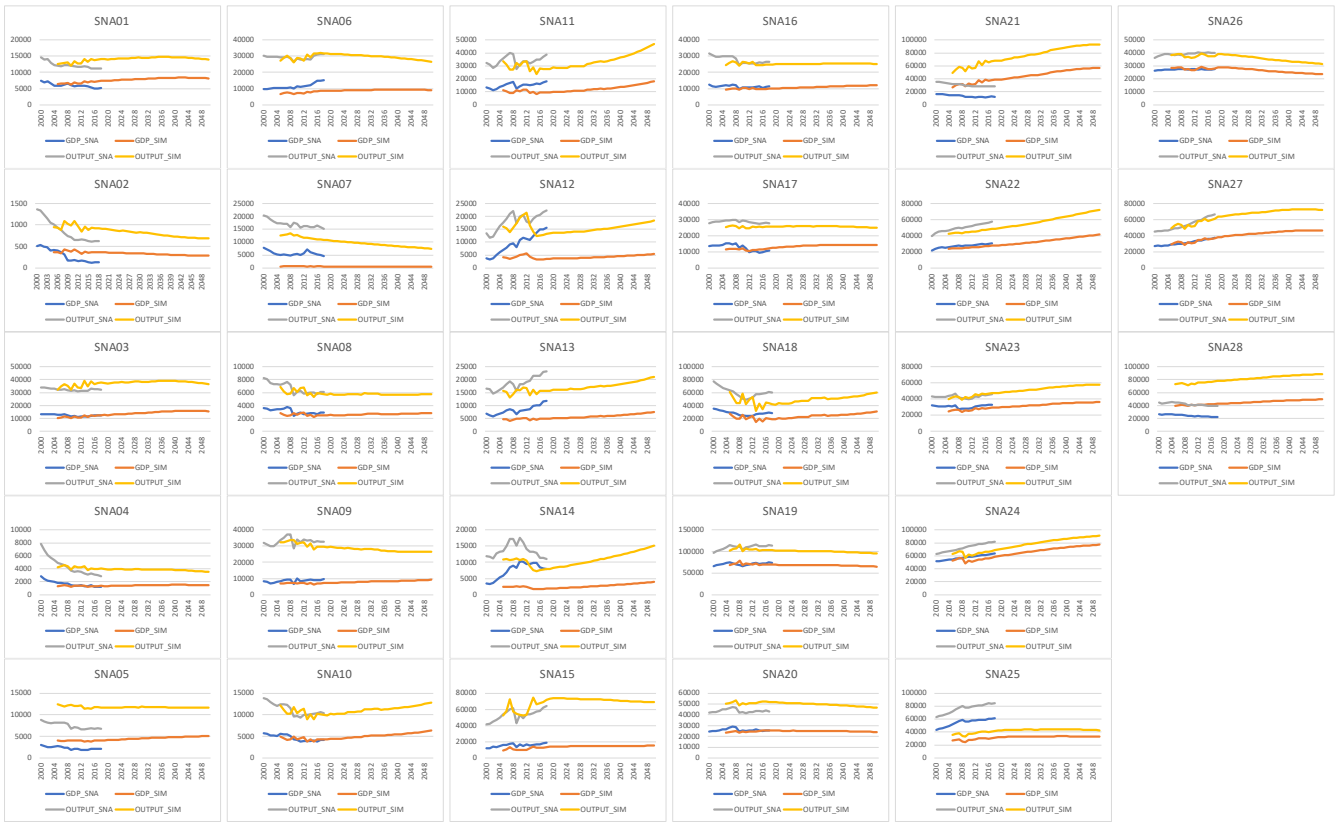
図3.2.6 AIM/CGE [Japan]における最終消費構造

消費効用は、輸送サービス、輸送以外のエネルギーサービス、その他のサービスの3つの要素からなる。このうち、輸送サービスと輸送以外のエネルギーサービスの各需要量については、世帯数と所得水準により必要なサービス量に変化するとしている。輸送サービスは、自家用車による輸送サービスと公共交通による輸送サービスに分解され、それらは代替弾力性が1のコブダグラス関数で統合されている。自家用車については、前年までに保有しており今年も利用可能な自家用車を使ったサービスと新たに購入する自家用車によって得られるサービスからなる。既存設備については、帰属計算で保有自動車のストック量をあらかじめ計算しておく。また、自動車の新規購入については、最終消費財として購入された輸送機械を対象としている。それぞれの設備を使用する際に必要なエネルギーについては、レオンチェフ関数であらかじめ定義されている（使い方による省エネは対象としていない）。なお、家庭部門においても省エネ技術の選択が可能であるが、購入の差異には追加投資が必要であるとしている。生産部門と同様に、一度設置されると次年以降は追加費用なしで省エネ技術の利用が可能となる。

輸送以外のエネルギーサービスについては、冷暖房や給湯、照明等の家庭内で使用するエネルギーサービスをまとめて扱ったものである。これも自家用車と同様に、保有する設備と新規購入する設備の量が決めれば、それらを使用する際に必要なエネルギーも計算される。その他のサービスは、それ以外の最終消費であり、個々の財がコブダグラス関数によって統合されている。

総投資額は、想定される将来の経済成長を達成するように、各年の均衡計算の前にあらかじめ貯蓄が決定される。各部門への投資の配分や技術の選択については、各年の収益が最大となるように内生的に決定される。なお、省エネ技術の導入には追加投資が必要となるが、追加投資は導入年のみにおいて必要となり、一度設置されるとその設備に対する追加投資は発生しないとしている。モデルでは、初期費用の高い省エネ技術の導入が容易となるように、投資回収年数を変化させることも可能となっている（標準的なケースでは一律3年と設定している）。

図3.2.7は、部門別の粗生産額と付加価値額において、本モデルの計算結果と統計値にどの程度乖離があるかを取りまとめたものである。なお、図3.2.7では、分析結果に示すなりゆきシナリオでの2050年までの結果も示している。統計値として国民経済計算のデータを用いており、表3.2.2のような対応関係としている。なお、図3.2.6ではモデルの部門と統計値の部門が完全に一致していないために、基準年である2005年において差が見られる部門もあるが、本モデルによる傾向は概ね実績を反映しているといえる。



■付加価値（国民経済計算） ■付加価値（推計結果） ■粗生産（国民経済計算） ■粗生産（推計結果）

注：部門の対応は、表3.2.2を参照のこと。

図3.2.7 部門別粗生産額と付加価値額における本モデルの推計結果と国民経済計算の実績値の推移

表3.2.2 モデルの部門（横軸）と国民経済計算の部門（縦軸）の対応関係

	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
SNA01 農林水産業	*																																							
SNA02 鉱業		*	*																																					
SNA03 食料品				*																																				
SNA04 繊維製品					*																																			
SNA05 パルプ・紙・紙加工品						*																																		
SNA06 化学							*	*																																
SNA07 石油・石炭製品								*	*																															
SNA08 窯業・土石製品										*																														
SNA09 一次金属											*	*																												
SNA10 金属製品												*																												
SNA11 はん用・生産用・業務用機械													*	*	*																									
SNA12 電子部品・デバイス																*																								
SNA13 電気機械																	*																							
SNA14 情報・通信機器																	*																							
SNA15 輸送用機械																		*																						
SNA16 その他の製造業									*									*																						
SNA17 電気・ガス・水道・廃棄物処理業																	*	*	*	*	*	*																		
SNA18 建設業																		*																						
SNA19 卸売・小売業																								*																
SNA20 運輸・郵便業																																			*					
SNA21 宿泊・飲食サービス業																																							*	
SNA22 情報通信業																																				*				
SNA23 金融・保険業																																	*							
SNA24 不動産業																																	*							
SNA25 専門・科学技術、業務支援サービス業 教育																																				*				
SNA26 公務																																			*					
SNA27 保健衛生・社会事業																																				*				
SNA28 その他のサービス																																				*	*	*	*	

注：モデルの部門は表3.2.1を参照のこと。

研究(2-5)では、フランスやドイツで行われてきた、ステークホルダー対話をふまえた国レベル緩和シナリオの開発事例を調査し、対策オプションの拡充を検討するために、フランスのADEME（環境・エネルギー管理庁）やCIRED（環境・開発国際センター）、ドイツのヴッパータール研究所において組み込まれてきた研究成果を取りまとめるとともに、AIM国際ワークショップやモデリングワークショップ等の機会を活用して意見交換を行い、温室効果ガス排出削減政策の日本での適用可能性について検討を行った。

研究(2-6)では、日本における2050年を対象とした将来シナリオの幅を検討するために、ステークホルダー対話を実施した。企業経営や社会人に対してはJCLP参加企業との連携に向けた意見交換や、認定NPO法人環境文明21が実施されている「環境文明塾（環境セミナー）」の参加者との意見交換を行った。また、現在20代の若者世代が2050年の将来像としてどのような社会を望んでいるかについては、アンケートを実施した。対象は、東京工業大学の修士課程及び学部3年生の学生であり、2050年の所得や再エネ導入量、省エネ行動等について調査を行った。

#### 4. 結果及び考察

研究(2-1)において、当初の計画では図3.2.2のすべてのモデルを用いて分析する予定であったが、輸送モデルを用いた輸送部門における取り組みの評価については、技術選択モデルの結果を用いてCGEモデルにおいても旅客輸送や貨物輸送の輸送量を含めた緩和策を内生的に評価することが可能となったことから、輸送モデルの更新や輸送モデルを用いた分析は実施していない。また、2050年の排出削減目標を実現する対策の最適なロードマップを評価することを目的としてバックキャストを用いる予定であったが、最適な経路ではなく現状で検討されている取り組みや、それを基礎とした追加的な対策など次善の取り組みについて応用一般均衡モデルを用いて評価することとしたために、バックキャストモデルを用いた分析も実施していない。そのほか、電源構成モデルについては、本課題においてモデルの改良は行っていないが、これまでに開発してきたモデルを用いて、2050年までの想定した経済規模に対応する発電技術の設備容量と発電電力量を推計した。表4.2.1に分析に用いたモデルの概要と特徴を示す。

表4.2.1 日本を対象とした分析に用いたモデルとその特徴

マクロ計量モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>計量経済分析の手法を用いて、過去の資本、人口、資本等からGDPを推定するモデル。将来の人口推計等をもとに、長期のGDP推計とそれに整合したTFP(全要素生産性)を推計する。</li> </ul>
日本経済モデル (応用一般均衡モデル)	<ul style="list-style-type: none"> <li>2005/2011年産業連関表を基準とした価格メカニズムに基づくモデル。個別モデルの結果をパラメータに反映させるとともに、温室効果ガス排出削減目標を与えることで、マクロ経済全体への影響について定量化を行う。</li> </ul>
バックキャストモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>動学的最適化モデルに基づき、最適な技術や政策の導入について導入量とそのタイミングを明らかにするモデル。今回の分析では、政策や技術導入のタイミングは前提とし、それらの違いによるマクロ経済影響を分析することとしたために、バックキャストモデルは使用しない。</li> </ul>
家計消費モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギーサービス需要量の推計とストックを考慮したエネルギー消費量を推計するモデル。</li> </ul>
電源構成モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>再生可能エネルギーを含めた発電技術の設備容量と発電電力量を推計するモデル。</li> </ul>
輸送モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>貨物輸送量、旅客輸送量を推計するモデル。今回の分析では、輸送量は応用一般均衡モデルで内生的に評価できるように改良したため、今回の分析では使用しない。</li> </ul>

研究(2-2)の成果として、図4.2.1にマクロ計量モデルを用いて推定した将来の実質GDPの推計結果を示す。将来推計にあたっては、コブ・ダグラス型生産関数に基づいてTFP（図4.2.1の左）や資本の弾力性（0.471）を推定した。本分析では、この結果をもとに将来シナリオの検討を行った。図4.2.1の右に、想定した人口やTFPに基づく将来のGDPの結果を示す。日本のNDCでは2030年の実質GDPを711兆円

(2005年価格)としており、図4.2.1ではシナリオ1に相当するが、本課題の想定ではTFPを現状程度に想定した場合のシナリオ2を基準シナリオに設定する。

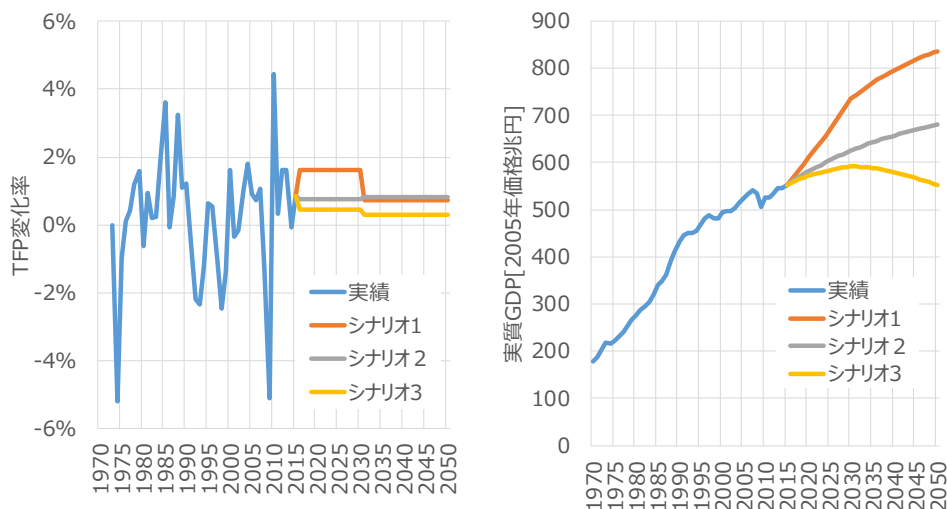


図4.2.1 マクロ軽量モデルによるTFPの推計結果（左）と実質GDPの推計結果（右）

研究(2-3)では、家計における機器のストックについて分析を行った。これまでのモデル分析では、過去の機器効率改善のスピードや種類をあまり考慮せず、基準年のストック機器の効率には、主に5年前の販売機器の平均効率を用いていた。しかし、機器別の残存率やエネルギー効率に関する情報を用いた分析を実施した結果、表4.2.2に示すように特に寿命が長い機器（メーカーの保証期間ではなく、現実的に長期間使用されることが多い機器。例えば冷蔵庫）では、基準年から15年経過しても、過去の機器の効率の変化の違いにより、ストック機器効率に2.5%程度の違いがあることが明らかになった。

表4.2.2 寿命の異なる機器の違いによる2030年のストック機器効率

	年率0.5%	00-10年に10%
テレビ	1.060	1.060
	3-4年	3-4年
洗濯機	1.042	1.032
	6-7年	8-9年
冷蔵庫	1.034	1.019
	8-9年	11-12年

※上段：機器効率 下段：販売効率との差

家庭CO2統計の個票を用いた分析結果として、以下に示す地域別の電力消費量の特徴が明らかになった。(a) 図4.2.2では代表して関東地方の結果を示しているが、どの地域にも共通して言えることとして、多電力消費世帯（電力消費の上位約5-10%程度）の消費量が飛び抜けて多い。(b)結果として、平均電力消費量の世帯は、電力消費量の小さい世帯から60%-65%くらいの世帯になる。(c)そのため、単純に平均電力消費量を示すと、60-65%程度の世帯は平均より電力を消費していない世帯と認識し、電力消費量の削減が進まない可能性がある。(d)また、電力消費量の多い上位5%及び10%の全て世帯の電力消費をそれぞれ電力消費上位5%、10%レベルまで削減した場合（図-1に示したのは、1月の消費量について上位10%の世帯の世帯の電力消費を減らした場合）、それぞれ3%、5%程度平均電力消費量が小さくなることがわかった。

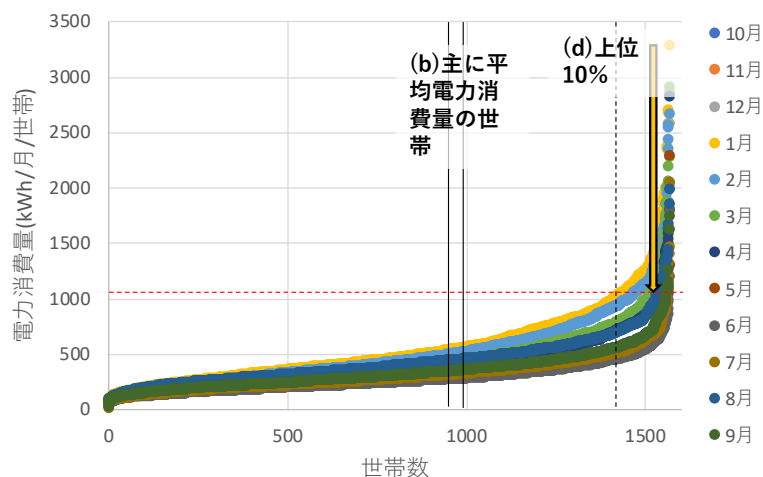


図4.2.2 関東地方の電力消費量(2014年10月から2015年9月)の結果

こうした結果は、EBPM（エビデンスに基づく政策立案）において、モデルの結果を政策に展開する際に重要な示唆を与えてくれる。モデルによる政策評価は科学的な方法によって得られるものであるが、モデルの結果を政策に利用する場合の留意点を示している。ここで示したようなモデルは、対象とする主体を集約したものであり、そうしたモデルから得られる結果は対象とする集合の平均的なものである。しかしながら、本分析において見たように個々の主体の分布を考えると、制度設計は平均値ではなく最頻値や中央値を対象としたものが好ましいといえる。モデルの結果を具体的にどのように政策に展開するかを検討は、本課題の対象外であるが、重要な課題であるといえる。

研究開発手法で示したように、本課題において電源構成モデルの修正は行わず、(1)で示した経済規模における電源構成の推計に用いている。図4.2.3に、基準シナリオ（図4.2.1におけるシナリオ2）における技術別の設備容量と発電電力量を示す。なお、再エネ拡大を想定したシナリオでは、2050年に再生可能エネルギーによる発電電力量は図4.2.3で示した値の2.8倍となり、総発電電力量の67%を占めている。

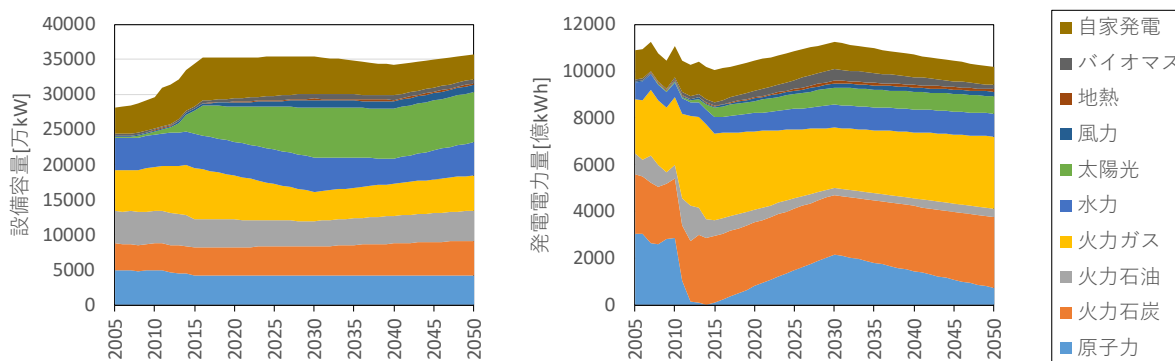


図4.2.3 電源構成モデルによる基準シナリオにおける設備容量（左）と発電電力量（右）

研究(2-4)の応用一般均衡モデルを用いた分析では、基準シナリオに対して2030年にNDCを達成するとともに、2050年に温室効果ガス排出量を80%削減する取り組みについて評価する。想定するシナリオを表4.2.3に示す。対策ケースでは、再エネを拡大する、モデルの想定としている投資回収年数3年を10年に変更する、2030年以降に利用可能な従来技術を早期に廃棄して省エネ技術を導入することを考える。省エネ技術は、NDCを達成するための技術は2016年から、長期戦略を達成するための技術とCCS技術は2031年から、それぞれ導入可能であるとしている。なお、従来技術の早期退出については、廃棄したストックに対して追加でどれだけ投資するかについて、以下の3つのケースを想定した。

ストック転換1： 廃棄したストックに相当する分だけ追加投資を行う場合

ストック転換2： 追加投資を実施しない場合

ストック転換3： 追加で導入する資本は廃棄する資本よりも効率的となっていることを考慮して追加投資を調整する場合

表4.2.3 想定するシナリオ

	投資回収年数	温室効果ガス排出制約	
		なし	2030年NDC 2050年80%削減
技術固定	3年	技術固定woGHG	-
省エネ選択可+再エネ拡大なし		再エネ拡大なしwoGHG	再エネ拡大なしwLCS
省エネ選択可+再エネ拡大あり		なりゆきwoGHG	なりゆきwLCS
	10年	-	なりゆき10wLCS
省エネ選択可+再エネ拡大あり+従来技術の早期退出+投資拡大あり		-	ストック転換1wLCS
省エネ選択可+再エネ拡大あり+従来技術の早期退出+投資拡大なし		-	ストック転換2wLCS
省エネ選択可+再エネ拡大あり+従来技術の早期退出+投資拡大調整		-	ストック転換3wLCS

温室効果ガス排出量の制約を課さない3つのシナリオにおける温室効果ガス排出量の推移を図4.2.4に示す。技術固定も新規に導入される分の効率が改善されないフロー固定であるため、毎年わずかではあるがエネルギー効率が改善する。また、人口減少や2015-2050年まで年平均0.6%という経済成長率の想定のために温室効果ガス排出量は減少傾向を示し、2050年の排出量は、技術固定で1072MtCO<sub>2</sub>eq、再エネ拡大なしで958MtCO<sub>2</sub>eq、なりゆきで744MtCO<sub>2</sub>eqとなる。これらの結果から、投資回収年数3年で導入される省エネ技術による温室効果ガス削減量は114MtCO<sub>2</sub>、再エネ導入による温室効果ガス削減量は214MtCO<sub>2</sub>eqとなる。また、2030年における温室効果ガス排出量は、技術固定では1118MtCO<sub>2</sub>eq、再エネ拡大なしで1052MtCO<sub>2</sub>eqと現状のNDCの水準である1042MtCO<sub>2</sub>eqを上回るが、なりゆきでは1037MtCO<sub>2</sub>eqを下回る結果となった。こうした結果から、再エネ導入も含めてなりゆきでも導入される省エネの取り組みのみでも2030年のNDCは達成可能であるが、2050年の80%削減については十分ではなく、追加的な取り組みが必要であることがわかる。

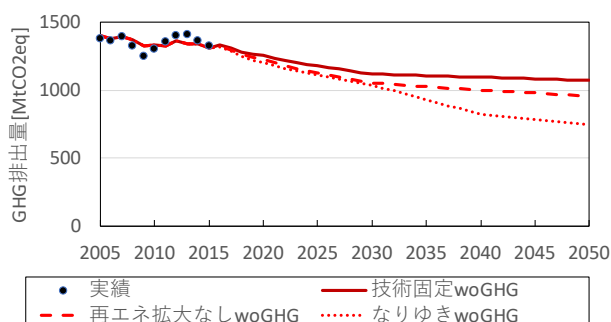
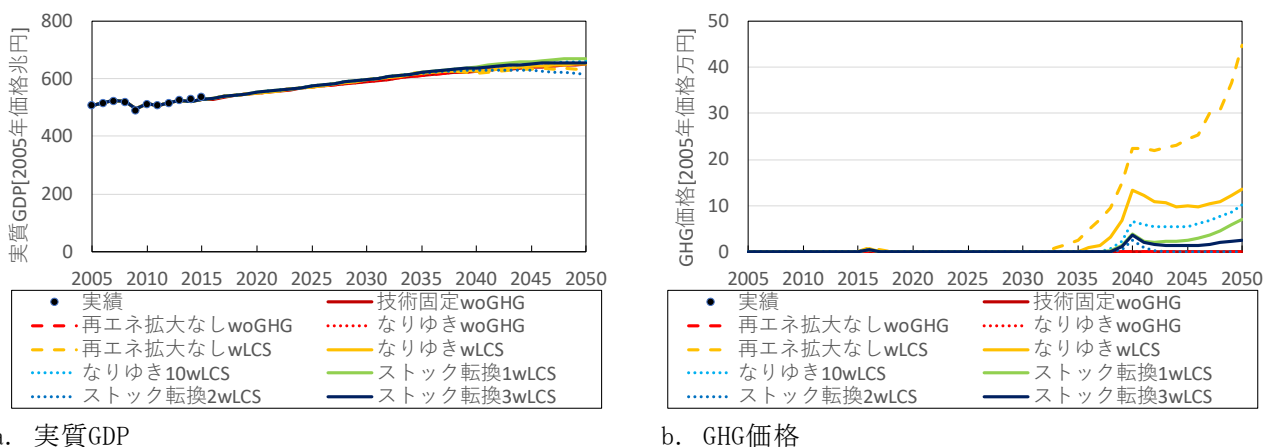


図4.2.4 温室効果ガス排出量に制約を課さない場合の排出量の推移

次に、2050年に温室効果ガス排出量を80%削減する制約を課すシナリオについて分析結果を示す。図4.2.5は、各シナリオにおける実質GDPの推移を示したものである。いずれのシナリオでも2050年における実質GDPは、現状と比較すると増大している。ただし、再エネ拡大なしwLCSとなりゆきwLCSの2050年における実質GDPは、なりゆきwoGHGのそれと比較すると、それぞれ-3.3%、-0.1%とGDPは減少する結果となっている。また、GHG価格についても再エネ拡大なしwLCSとなりゆきwLCSでは2050年に10万円/tCO<sub>2</sub>eqを越えるなど極めて高額な対策を導入する必要が求められる結果となった。これに対して、投

資回収年数を10年としたシナリオでは、GHG価格は減少する傾向にある。ただし、なりゆきから投資回収年数を10年に変更しただけでは、GHG価格は11.6万円/tCO<sub>2</sub>eqから10.1万円/tCO<sub>2</sub>eqに変化するに過ぎない。そこで、2030年以降に従来技術のストックを退出させる取り組みを行ったところ、廃棄するストックに相当する投資を追加的に行うストック転換1wLCSの2050年の実質GDPは、なりゆきwoGHGのそれと比較して2.9%増加する一方、GHG価格は7.0万円/tCO<sub>2</sub>eqに止まる結果となる。一方で、投資額を変化させないストック転換2wLCSでは、2050年のGHG価格は0となるものの、2050年の実質GDPはなりゆきwoGHGのそれと比較して-5.8%となる。つまり、資本ストックの廃棄は、生産ポテンシャルの減少を招くことから、これを補填する投資が必要であるが、投資が過大な場合、生産活動のリバウンドを引き起こし、温室効果ガス排出量の潜在的な増加をもたらすことから、廃棄設備と新規に導入される設備の効率の違いを踏まえた適切な投資の判断が必要となる。その1つとして想定したストック転換3wLCSでは、2050年にGDPはなりゆきwoGHGと比較して0.6%の増加となるが、GHG価格は2.5万円/tCO<sub>2</sub>eqにまで低下する。



a. 実質GDP

b. GHG価格

図4.2.5 各シナリオにおけるGDPとGHG価格の推移

図4.2.6は、なりゆきwoGHG、なりゆきwLCS、なりゆき10wLCS、ストック転換3wLCSの各シナリオにおいてどのような技術によって生産が行われているかを示したものである。図中の「従来技術・ストック」は基準年のストック平均の効率をもった技術によって生産されたものを示す。同様に「従来技術・新規投資」は、従来技術に相当する技術ではあるが新規投資による活動を示している。「NDC技術」とは、NDCを達成するために想定された効率的な技術である。なりゆきwoGHGにおいても利用されていることから、一部のNDC技術は「No Regret Technologies」として導入される技術であることがわかる。また、投資回収年数を3年から10年とすることで、NDC技術は前倒しで導入されることがわかる。ストック転換3wLCSでは2050年までに従来技術を廃棄しており、こうした取り組みがGHG価格の低下につながっている。

以上の結果から、省エネ導入のために長期の投資回収を導入するとともに、非効率的な既存技術を早期に廃棄して高効率の機器に置換することによって、同じ技術選択が可能であっても2050年のGDPを押し上げ、2050年のGHG価格を比較的低い水準に維持させることが明らかとなった。また、こうした傾向は、マクロ計量モデルで示した他の経済背長を想定した場合にもあてはまる。低成長のケースの場合、ストック転換3wLCSではなりゆきwoGHGと比較して2050年のGDPは1.6%の増加となるが、GHG価格は0となる（なりゆきwLCSでは2050年のGHG価格は5.2万円/tCO<sub>2</sub>eqとなる）。また、高成長のケースの場合、ストック転換3wLCSではなりゆきwoGHGと比較して2050年のGDPは0.6%の増加となるが、GHG価格は14.8万円/tCO<sub>2</sub>eqとなる（なりゆきwLCSでは2050年のGHG価格は51.4万円/tCO<sub>2</sub>eqとなる）。これらの結果から、高額なGHG価格を導入しなくても効率的な技術が導入されるような制度、政策の実現、従来型でエネルギー効率の劣る設備の早期の退役が、脱炭素社会の実現に向けて重要であると結論づけることができる。

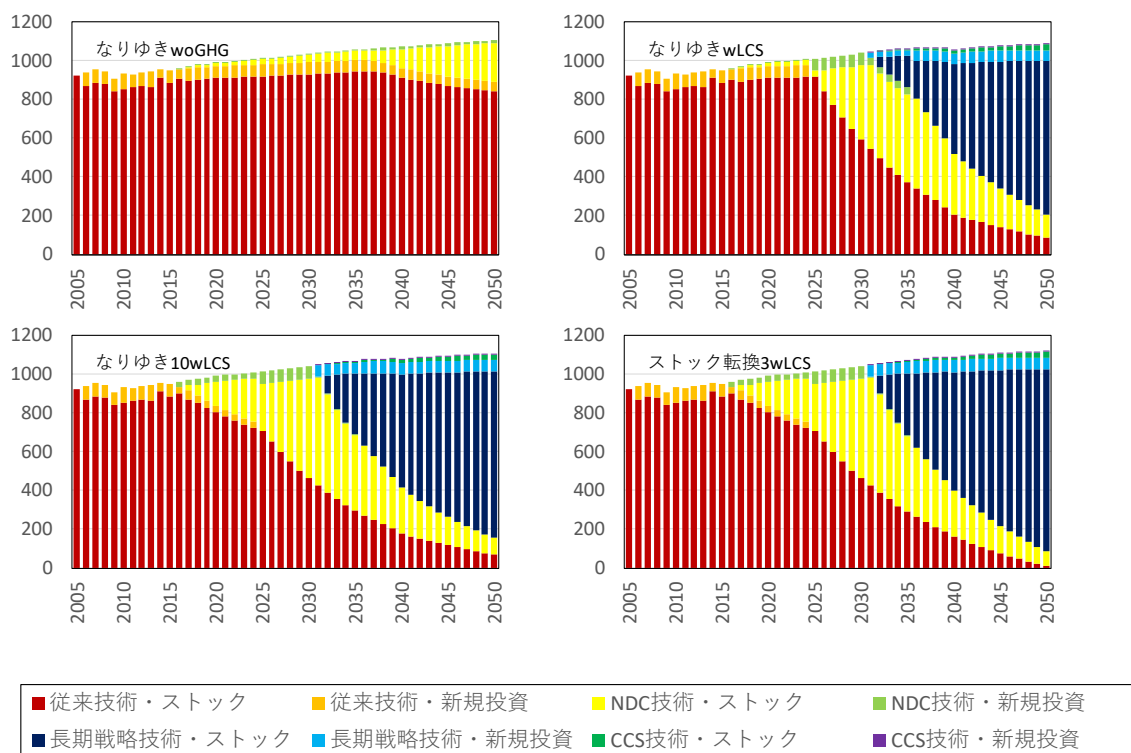


図4.2.6 各シナリオにおける技術別生産額の推移（単位：2005年価格兆円）

研究(2-5)では、研究(2-4)で示した分析を行うに当たって、多様で実効性のある脱炭素社会の構築に向けて、より柔軟な前提や対策オプションについて検討を行った。こうした課題に対応するために、これまでに長期低炭素発展戦略の開発を通じてこれらの取り組みを行ってきたフランスADEME（環境・エネルギー管理庁）やCIRED（環境・開発国際センター）、ドイツのヴッパータール研究所に対して、これまでにフランスやドイツでどのような取り組みが行われてきたかについて意見交換を実施した。

特に、CIREDとは応用一般均衡モデルに加えて技術選択モデルについての意見交換を行い、フランスにおける分析では、新古典派に基づくCGEモデルではなく、新ケインズ主義的な特徴（不均衡市場）を内在したCGEモデルを開発し、温室効果ガス排出削減が新たな労働需要を生み出し、より効率的な経済活動が可能となることを組み入れて評価していること、炭素税収を労働税減税等に活用することで二重の配当を目指した分析を行っていること、などの情報を得た。税収の活用については、(4)で示した分析では政府支出の増大に使用されており、法人税減税や所得税減税などのポリシーミックスの評価が課題である（ただし、減税の財源として温暖化対策税を使用する場合、脱炭素社会における温暖化対策税の税収はゼロになることから追加的な取り組みが必要である）。また、温暖化対策の実現によって経済活動も活性化するという結果は、温暖化対策が新たな労働需要を生み出し、失業率が改善されることを内生化するモデル構造に起因するものであるが、こうした構造を日本に適用する場合、日本における課題（特に人口減少）を踏まえると慎重に検討すべき内容でもある。つまり、労働需要の増加は、人口減少に直面する日本社会において、労働市場の不均衡を更に拡大させる可能性もある。こうした課題を踏まえて、(4)で示したような投資回収年の長期化やエネルギー効率の劣る従来技術の早期廃棄を前提とした分析を行うこととした。

研究(2-6)では、日本の将来シナリオの幅（可能性）について検討を行うため、様々なステークホルダーに対してヒアリング、意見交換を実施した。その1つが、JCLP参加企業との連携に向けた意見交換や、認定NPO法人環境文明21が実施されている「環境文明塾（環境セミナー）」をお借りした意見交換を通じて、脱炭素社会の実現に向けてのステークホルダーとの関わりやモデルの開発方針について検討を行った。



また、本分析でも示した将来シナリオの前提について、どのような考えをもっているかについて、東京工業大学の修士課程及び学部3年生に対して、2050年の期待する社会像についてアンケートを行った。有効回答数は38であった。2050年の1人当たり所得の希望について自由記述で尋ねたところ、現状と比較して平均1.6倍（中央値と最頻値は1.5倍、最大値は3倍、最小値は0.9倍）となった。また、省エネ製品の購入の基準については63%が耐用年数全体で判断すると回答し、モデルのなりゆきでの想定である3年という回答は16%であった。さらに、2050年における発電電力量に占める再エネの比率についての予想を自由回答で聞いたところ、平均49%、中央値と最頻値はともに50%という結果となった。得られた2050年の社会像について、経済活動の規模は、想定している人口を適用すれば、概ね本研究で想定していたものと同じであるが、発電に占める再生可能エネルギーの導入割合はモデルの想定よりも小さい。そのため、そうした社会では温室効果ガスの排出ポテンシャルが大きくなり、温室効果ガス排出量の80%削減を達成するには、GHG価格そのものは上昇する結果となる。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

これまでにモデル比較研究が行われ、モデルが異なることによって生じる将来推計の幅について議論が行われているが、本分析は1つのモデルに対して様々な条件を与えることで、将来推計にどれだけの違いが見られるかを推計している。こうした将来推計がどのような前提によって得られるかを明らかにすることは、蓋然性の高い将来シナリオを検討する上で、また、様々な将来の可能性を定量的に明らかにする上で、重要な取り組みであると考えている。

また、モデルによる計算結果をもとに実際の政策に展開するために、モデルが示す結果と現状の違いを明らかにすることが求められる。本研究で行ったような過去の実績の評価や、ミクロなデータにも基づく分布とモデルが示す平均的な活動の違いを明確にすることは、モデルの結果をどのように活用するかを示す一助となる。

最後に、本研究で行ったような個別の取り組みを詳細に評価するモデルとマクロな活動全体を統合的に評価するモデルを組み合わせ、それぞれのモデルの特徴を活かすような分析の枠組は、個別の課題における本質を分析するとともに、社会全体の目標である脱炭素社会の実現に向けてどのように取り組みを深化させるかを明らかにすることが可能となる。モデルの詳細さと全体の整合性評価の両方を同時に求める場合、モデルが大規模になり、モデルそのものがブラックボックスと批判される可能性があるが、モデルを適切に分割し、それぞれのモデルの役割を明確化することで、ステークホルダーに対して具体的な説明が可能となり、モデルはブラックボックスという批判を回避することが可能となる。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

環境税や道路特定財源に関する分析結果については、これまでに応用一般均衡モデルを用いた試算結果を環境省に提供してきた。また、2018年3月にパリで開催された日仏専門家会合では、環境省とともに出席し、本研究課題の成果も含めた日本におけるモデル分析の現状等を報告した。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

日本が2019年に提出した長期低炭素発展戦略では、2050年に温室効果ガス排出量を80%削減し、21世紀後半の早い時期に脱炭素社会を実現することが明記されているが、どのように実現するかを示したロードマップは明確ではない。本研究では、経済成長の想定も含めて様々な前提を対象として、2050年に温室効果ガス排出量を80%削減するシナリオの評価を行ってきた。今回使用したモデル群に対して、環境行政として取り組むべき課題を反映させることで、実効的なロードマップを描くことが可能になると考えている。特に、本研究課題の結果から、より長期の投資回収年数で技術導入が可能となるような施策や、従来技術をできるだけ早期に廃棄を促すような取り組みが、環境と経済の好循環の実現に向けて有効であることが示唆されている。

また、家計消費モデルの解析において示されたエネルギー消費世帯の分布状況から、モデルの結果を政策に展開する際の留意点が示唆されており、こうした結果は今後の環境行政において活用が見込まれると考えている。

## 6. 国際共同研究等の状況

本研究の一部は、日仏共同研究や日独共同研究に基づいて実施したものであり、既に先進的に行われている取り組みを本研究で取り入れるための課題等について、LCSRNet（低炭素社会国際研究ネットワーク）年次会合やAIM国際ワークショップ等の場を使って意見交換や整理を行った。また、LCSRNet年次会合において、CIRED（フランス）と共同でIPCC第6次評価報告書で必要なモデルの出力結果について議論を行い、そうした結果をLoCARNet（低炭素アジア研究ネットワーク）において、アジアの途上国におけるモデル研究者にフィードバックするなどの活動を行ってきた。IPCC第6次評価報告書では、第3作業部会においてこれまでの長期シナリオに加えて短中期のシナリオが取り上げられる。本研究の結果もこうした活動を意識して取り組んできた。そのほか、パリ協定の実現に向けた対応として、米国PNNLが主催するImplication of Parisの第3回会合を2017年10月に東京にて開催し、グローバルストックテイクに向けた研究について、世界の研究者と議論を行った。また、EUの長期戦略策定に当たって2019年1月に実施されたセミナーにおいて、日本の分析を報告し、長期低炭素発展戦略について意見交換を行った。上記も含め、本研究課題を通じて行った国際的な活動は以下の通りである。

CIREDサマーセミナー（2017年7月；パリ）

ISAPでのテーマ別会合（長期脱炭素戦略：円滑な変革への道筋；2017年7月；横浜）

第9回LCSRNet年次会合（2017年9月；英国・ワーウィック）

Implication of Paris第3回会合（2017年10月；東京）

第23回AIM国際ワークショップ（2017年11月；つくば）

日仏専門家会合（2018年3月；パリ）

第10回LCSRNet年次会合（2018年7月；横浜）

第24回AIM国際ワークショップ（2018年11月；つくば）

CIREDとの意見交換会（2018年11月；つくば・東京）

日仏モデリングワークショップ（2019年1月；パリ）

EUセミナー（2019年1月；東京）

第11回LCSRNet年次会合（2019年10月；ローマ）

第8回LoCARNet年次会合（2019年11月；北京）

第25回AIM国際ワークショップ（2019年11月；つくば）

第12回IAMC年次会合（2019年12月；つくば）

## 7. 研究成果の発表状況

### （1）誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) 石河正寛, 松橋啓介, 金森有子, 有賀敏典: 土木学会論文集G (環境), 74 (6), II\_193-II\_201 (2018) 家庭CO2統計に基づく全国10地方別の排出要因分析と市町村別世帯あたり排出量の推計: 全国試験調査結果を用いて
- 2) 金森有子: 土木学会論文集G (環境), 73 (5), I\_121-I\_130 (2017) 家庭部門における地域別エネルギー消費特性を考慮した二酸化炭素排出削減目標の達成可能性

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 増井利彦, 久保田泉: 電気評論, 102 (6), 50-51 (2017) パリ協定の意義、課題と今後の温暖化対策
- 2) 増井利彦: 環境技術会誌, (168), 16-18 (2017) 日本における脱炭素社会の実現への課題
- 3) 増井利彦: 全国ネット通信, 28 (秋), 1-1 (2017) 長期目標と地球温暖化対策税
- 4) 増井利彦: 公衆衛生, 81 (12), 988-994 (2017) 低炭素社会の実現に向けた取り組み
- 5) 増井利彦: 環境経済・政策学会編, 環境経済・政策学事典, 丸善, 194-195 196-197 (2018) 統合評価モデルとシナリオ. 温暖化対策費用
- 6) 増井利彦: Japan Engineering & Technology Intelligence, 67 (1), 102-105 (2019) 国立研究開発法人国立環境研究所における低炭素研究プログラムPJ3 世界を対象とした低炭素社会実現に向けたロードマップ開発手法とその実証的研究
- 7) 増井利彦: ピーターDピーダーセン 竹林征雄編著, SDGsビジネス戦略, 日刊工業新聞社, 187-194 (2019) 第3章 目標13 気候変動に具体的な対策を
- 8) 増井利彦: 大気環境学会編, 大気環境の事典, 朝倉書店, 302-303 (2019) 地球温暖化: 排出シナリオと将来予測
- 9) 増井利彦: 環境技術会誌, (178), 15-17 (2019) これからの脱炭素社会に向けて
- 10) 増井利彦: ニュースで深掘り英語 (ジャパンタイムズ出版), 1, 122-123 (2020) 脱炭素社会の実現に向けて

## (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Cassen C., Masui T., Lefevre J., Teixeira A., Lecocq F.: LCS-RNet 11th Annual Meeting, Azores (2019) A Tool for Scenario Analysis: An IPCC perspective.
- 2) Hanaoka T., Masui T.: 9th international Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting, California (2017) Effects of Promoting Electrification and Energy Efficiency Improvement in the Building Sector for Achieving of the Climate Target Keeping below 2°C.
- 3) Ichisugi Y., Masui T., Itsubo N.: Eco Balance 2018, Tokyo (2018) Carbon Footprint Projections for Japan Using Computable General Equilibrium.
- 4) Masui T.: International Workshop of a Study on Assessing ClimateChange Impacts and Policy Development in Korea, Seoul (2017) National Mitigation Target and Scenarios.
- 5) Masui T.: Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) 6th Annual Meeting, Bangkok (2017)  
NDC and Long-term GHG reduction target of Japan.
- 6) Masui T.: Capacity Building Workshop on Low Carbon Development for Lao PDR and Cambodia, Vientiane (2018) Science-based methods for analyzing future society and emissions -Overall integrated assessment model and its roles-.
- 7) Masui T.: LoCARNet 7th Annual Meeting Program, Jakarta (2018) Model and policy making process.
- 8) Masui T.: Technical workshop France-Japan, Paris (2019) AIM/CGE [Japan].
- 9) Masui T.: Technical workshop France-Japan, Paris (2019) Overall of AIM (Asia - Pacific Integrated Model).
- 10) Masui T.: Technical workshop France-Japan, Paris (2019) Application of AIM to climate policies in Japan.
- 11) Masui T.: BUAA-NIES Bilateral Workshop on Integrated Assessment of Health Co-benefits of Climate Change Mitigation Policy, Beijing (2019) AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and its contribution to climate mitigation policies.
- 12) Masui T.: High - level Workshop on Climate Policy and Assessment, Tsukuba (2019) AIM

- (Asia-Pacific Integrated Model) and its contribution to climate mitigation policies.
- 13) Masui T.: Sharing of View on Climate Change Policies and Mitigation Actions in Lao PDR, Vientiane (2020) Introduction of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and Assessment of Climate Mitigation Actions using AIM.
  - 14) Masui T., Marissa M.: Policy Dialogue on Challenges and Opportunity to Deep Decarbonization Pathway to Achieve NDC Target, Jakarta (2020) Long Term Strategy toward 1.5oC in Asia.
  - 15) Origuchi T., Shinozuka M., Zhang X., Munesue Y., Kanamori Y., Masui T.: Going Green EcoDesign 2017, Tainan (2017) Assessment of impacts on CO2 emissions and GDP of ICT services in Japan using computable general equilibrium model.
  - 16) Takimi M., Masui T.: EcoMod2019 - International Conference on Economic Modeling and Data Science, 東京 (2019) Assessment of value of carbon price to achieve NDC of Japan using national scale CGE model.
  - 17) 芦名秀一: TGSW2017, つくば (2017) Society 5.0実現による日本の脱炭素化
  - 18) 芦名秀一: 柏市の環境施策と2050低炭素ナビ, 柏 (2017) 柏市について 2050低炭素ナビ開発の経緯 2050低炭素ナビによるシミュレーション
  - 19) 芦名秀一: 外部講師による講演会, 豊田 (2017) 脱炭素社会に向けた社会的・技術的対策のパラダイムシフト
  - 20) 芦名秀一: 川崎市地域環境リーダー育成講座, 川崎 (2018) 低炭素社会・脱炭素社会に向けた最新動向
  - 21) 一杉佑貴, 増井利彦, 伊坪徳宏: 第13回日本LCA学会研究発表会, 東京 (2018) CGEモデルを用いた日本のCFP将来推計
  - 22) 江守正多: 日本学術会議公開シンポジウム「パリ協定の下での長期温室効果ガス排出削減戦略を考える」, 東京 (2017) 気候変動予測、影響、リスク管理
  - 23) 金森有子: 国立環境研究所公開シンポジウム2017, 東京・大津 (2017) 家庭からの環境負荷発生-持続可能なライフスタイルに向けて-
  - 24) 金森有子: 平成29年度日本計画行政学会公開シンポジウム, 東京 (2017) 2050年持続可能なライフスタイルシナリオ
  - 25) 金森有子: 2017年度日本建築学会大会, 広島 (2017) アジアの消費の過去、現在、未来
  - 26) 金森有子: 第25回地球環境シンポジウム, 神戸 (2017) 家庭部門における地域別エネルギー消費特性を考慮した二酸化炭素排出削減目標の達成可能性
  - 27) 篠塚真智子, 折口壮志, 棟居洋介, 金森有子, 増井利彦: 第8回横幹連合コンファレンス, 京都 (2017) ICTサービス利用による環境および経済への影響 ～リバウンド効果と波及効果の融合評価～
  - 28) 花岡達也: 第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2019) 我が国の家庭・業務部門のCO2排出インベントリの要因分析および長期削減目標に向けた評価
  - 29) 増井利彦: 第47回Japan-CLPダイアログ会合, 東京 (2017) モデルと将来予測
  - 30) 増井利彦: 第8回横幹連合コンファレンス, 京都 (2017) 日本における持続可能性評価のためのモデル開発
  - 31) 増井利彦: 2018年度第2回SPEED研究会, 東京 (2018) 日本における約束草案の実現からその先を見据えた取り組みへ
  - 32) 増井利彦: 日本建築学会「中長期地域エネルギーシステム戦略検討小委員会」, 東京 (2018) 日本のエネルギー戦略・目標について
  - 33) 増井利彦: 建設廃棄物協同組合平成30年度「講演の集い」, 東京 (2018) パリ協定と日本の取り組み-私たちにできること-
  - 34) 増井利彦: センフィニティシステム研究会平成30年度定時総会記念講演, 東京 (2018) パリ

協定と日本の取り組み

- 35) 増井利彦：自動車技術会第5回大気環境技術・評価部門委員会，東京（2019）長期低炭素戦略に向けた長期ビジョン
- 36) 増井利彦：第2期再生可能エネルギー経済学講座 キック・オフシンポジウム，京都（2019）「エネルギー構造転換のマクロ経済・産業影響及び政策手段（部門C）」へのコメントと期待
- 37) 増井利彦：2019年度経営者「環境力」クラブ第1回会合，東京（2019）気候変動問題の最新動向と中小企業の役割
- 38) 増井利彦：MOBILIZE FOR CLIMATE JUSTICE-気候正義のためにたたかう人々-，東京（2020）気候変動問題の現状と私たちにできること

### （3）出願特許

特に記載すべき事項はない。

### （4）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 国民対話シンポジウム「パリ協定の実現に向けてー世界の進路・日本の進路ー」（主催：国立環境研究所社会環境システム研究センター・環境再生保全機構環境研究総合推進費2-1702、2017年10月3日、東京工業大学くらまねホール、観客約70名）をサブテーマ1・3とともに主催した。
- 2) 東京工業大学のオープンキャンパス（2018年8月10日）において、高校生を対象に日本における2050年のシナリオを構築する簡易ツールを用いた脱炭素社会の実現に向けた取り組み評価を実施した（参加者数：52名）。
- 3) 国民対話シンポジウム「低炭素社会から脱炭素社会を目指して」（主催：国立環境研究所社会環境システム研究センター・環境再生保全機構環境研究総合推進費2-1702、2019年11月20日、TKPガーデンシティPREMIUM秋葉原、観客約70名）をサブテーマ1・3とともに主催した。

### （5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

### （6）その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) 地球温暖化対策推進本部(2020) 日本のNDC（国が決定する貢献），アクセス日：2020年4月30日，<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai41/siryoul.pdf>
- 2) 地球温暖化対策推進本部(2020) パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略，アクセス日：2020年4月30日，<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai40/pdf/senryaku.pdf>

## II-3 わが国におけるゼロ排出の実現に向けたエネルギー技術対策の定量化

みずほ情報総研株式会社

環境エネルギー第1部 地球環境チーム 日比野 剛  
大城 賢（平成29～30年度）  
滝見 真穂・平山 智樹・川村 淳貴

国立大学法人京都大学

大学院工学研究科 都市環境工学専攻 大城 賢（令和元年度）

平成29～令和元年度研究経費（累計額）：53,015千円（研究経費は間接経費を含む）  
（平成29年度：17,590千円、平成30年度：17,835千円、令和元年度：17,590千円）

### [要旨]

2015年に採択されたパリ協定では、産業革命以前からの平均気温上昇を2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求するという目標が示された。また、日本が2019年6月に国連気候変動枠組条約（UNFCCC）事務局に提出した長期戦略では、2050年までの温室効果ガス排出80%削減に加えて、今世紀後半のできるだけ早期に脱炭素社会を実現するという目標が提示された。ただし、パリ協定の全球気候目標と、日本の長期目標の整合性は明らかでなく、いつゼロ排出を達成することが必要か、またそれにはどのような対策が必要になるのかは明らかでない。そこで本研究では、全球気候目標に整合的な形で、日本の長期ゼロ排出実現に向けたエネルギー対策の定量化を行った。それを通じて、今後の2030-2050年にかけての中長期目標検討、政策検討への政策的含意を示すことを目的とした。結果として、パリ協定気候目標の2℃、1.5℃に整合的なシナリオにおいて、日本ではそれぞれ2070-2080年、2055年頃にCO<sub>2</sub>ゼロ排出が必要となることが明らかとなった。また、2050年時点のCO<sub>2</sub>排出量は、2℃、1.5℃でそれぞれ約75%減、92%減（2010年比）となった。これより、2050年80%削減目標が達成されれば、世界2℃目標を満たす可能性が高い一方で、1.5℃目標の観点からは追加的な削減が必要となることが示唆された。さらにこれらの排出経路においては、低炭素エネルギー（再生可能エネルギー、原子力、CCS）の拡大が重要な対策・施策であることが示唆された。2℃目標に整合的なシナリオでは、日本における2050年時点の低炭素エネルギー比率は、一次エネルギー比で45%-54%、発電電力量比では86%-97%に達する結果となった。

### [キーワード]

気候変動緩和、パリ協定、長期低炭素発展戦略、統合評価モデル、エネルギーシステム

#### 1. はじめに

2015年に採択されたパリ協定では、産業革命以前からの平均気温上昇を2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求するという目標が示された。また、日本が2019年6月に国連気候変動枠組条約（UNFCCC）事務局に提出した長期戦略では、2050年までの温室効果ガス排出80%削減に加えて、今世紀後半のできるだけ早期に脱炭素社会を実現するという目標が提示された。ただし、パリ協定の全球気候目標と、日本の長期目標の整合性は明らかでなく、いつゼロ排出を達成することが必要か、またそれにはどのような対策が必要になるのかは明らかでない。そこで本研究では、全球気候目標に整合的な形で、日本の長期ゼロ排出実現に向けたエネルギー対策の定量化を行う。それを通じて、今後の2030-2050年にかけての中長期目標検討、政策検討への政策的含意を示す。

#### 2. 研究開発目的

日本技術モデルの改良および技術情報の拡充を通じて、サブテーマ1が描く全球気候政策に整合的な

形で、我が国でのゼロ排出実現に向けたエネルギー技術対策の定量化を実施する。

### 3. 研究開発方法

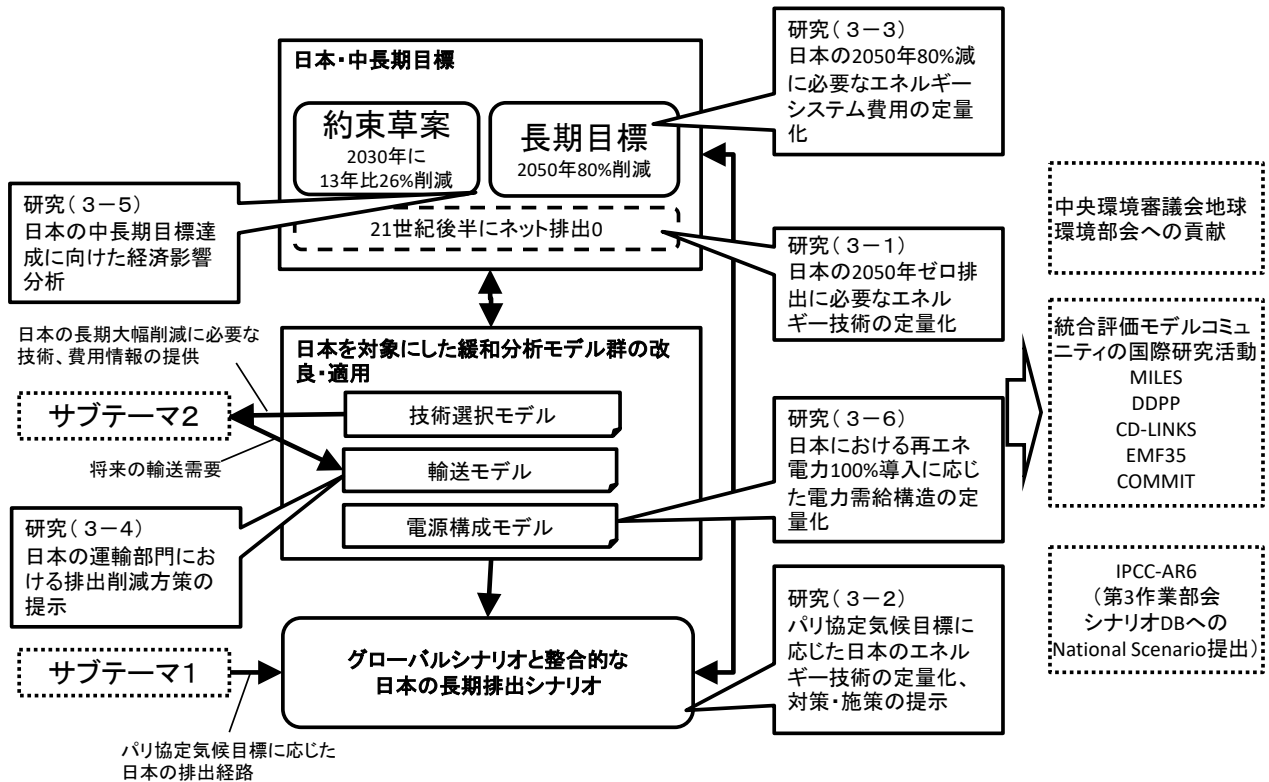


図3.3.1 サブテーマ3の全体像

サブテーマ3の全体像を図3.3.1に示す。サブテーマ3では日本を対象に、主にエネルギー技術に関連する緩和分析モデル群を用いて、長期の排出経路分析を実施した。用いたモデルは、技術選択モデル、輸送モデル、電源構成モデルである。個別の研究方法について以下に示す。

研究(3-1)：研究計画に示した、日本を対象としたゼロ排出シナリオの分析に向け、日本技術モデルの改良を行うとともに、1.5℃目標を踏まえ、2050年に日本国内でゼロ排出となるシナリオの分析を行った。日本技術モデルとして用いたAIM/Enduse [Japan] (Oshiro et al. 2015)<sup>1)</sup>は、目的関数の総費用(初期投資+エネルギー費用+CO<sub>2</sub>価格)を最小化するように、エネルギー技術の組み合わせを推計する逐次動学型モデルである。主な入力サービス需要、各種技術特性(効率・価格)、エネルギー価格であり、主な出力は、温室効果ガス排出量、部門別最終エネルギー消費量、一次エネルギー供給量である。なお電力部門については、3時間ごとの需給バランスを考慮できる構造となっており、太陽光発電や風力発電の出力の時刻変動を一部反映している。今回は、ゼロ排出シナリオの分析に向けて、新たに発電部門におけるバイオマスCCS(BECCS)に関する技術データ調査を行い、技術オプションに追加した。排出制約(2050年80%減、2050年ゼロ)、技術制約(BECCSなし、原子力フェーズアウト)に応じて、全10ケースについて分析を行った。排出制約に関して、2030年はNDCに相当するGHGを2013年比26%削減する場合、および2030年の排出制約を課さない場合の2パターンを想定した。2050年については、エネルギー起源CO<sub>2</sub>をネットゼロとするシナリオに加えて、比較対象として2050年目標である温室効果ガス80%削減シナリオを想定した(基準年は1990年)。技術制約として、想定したすべての技術が利用可能なケースに加えて、BECCS利用なしのケース(woBECCS)、および原子力発電の寿命をすべて40年とするケース(NucPO)を設定した。

研究(3-2)：研究計画に示した、サブテーマ1が描く全球気候政策に整合的な形での分析に向けて、世界モデルにより示された、2℃目標に応じた日本の累積排出量に基づくシナリオ分析を実施した。具

体的には、国際モデル比較研究であるCD-LINKSへの貢献の一環として、日本技術モデルを用いた2050年までのシナリオ分析を実施するとともに、他の世界モデル、一国モデルの結果も含めた日本の2050年までの排出シナリオのとりまとめ、および論文執筆を行った。CD-LINKSでは、複数の世界モデルを用いた分析により、世界全体のバジェット（累積排出量）に応じた、限界費用均等化に基づく国別のバジェットが設定されている。世界全体のバジェットは、2100年までに2°C未満に抑える可能性が50%および67%となるケース、加えて2100年までに1.5°Cに抑える確率が67%となるケースとして、2011-2100年の累積CO<sub>2</sub>排出量が1600Gt-CO<sub>2</sub>、1000Gt-CO<sub>2</sub>、400Gt-CO<sub>2</sub>となる3つのシナリオが設定されている。これら3つのシナリオのうち、本研究における日本を対象とした分析では、1600、1000Gt-CO<sub>2</sub>の2ケースを選択し、一国モデルに対して、1600、1000Gt-CO<sub>2</sub>シナリオに対応する2011-2050年のバジェットとして、36、31Gt-CO<sub>2</sub>のバジェットを設定した（以降、それぞれ1600、1000Gtシナリオと記述）。また、長期のバジェットに加えて、短期（～2030）までのプレッジに応じて、次の3パターンにシナリオを分類した。NoPOLシナリオでは、追加的な政策を考慮しないこととした。NPiシナリオでは、2020年までの政策を考慮し、2020年以降はバジェット制約に応じて対策が進む（NDCの深掘あり）ものとした。NDCシナリオでは、2030年までの政策（NDC含む）を考慮し、2030年以降はバジェット制約に応じて対策が進む（NDCの深掘なし）ものとした。なお本研究では、AIM/Enduse [Japan]を含む2つの一国モデルに加えて、日本を単独の地域として含む7つの世界モデルが参加した。さらに、2050年以降の排出経路について、2°C未満の可能性が50%および67%となるケースに加えて、1.5°Cの可能性が67%となるケースを対象とした（400Gtシナリオと表記）。またこれらを2030年のNDC（Nationally Determined Contribution）の考慮の有無別（それぞれNDC・NPiと表記）に区分した。これらのシナリオにおける2050年以降の排出経路に関するシナリオ分析を実施した。また、これらのシナリオにおいて日本ゼロ排出達成に必要な対策技術および対策費用に関する情報をサブテーマ2に提供した。

研究(3-3)：日本の2050年80%削減におけるエネルギーシステム費用の推計を行った。日本の2050年温室効果ガス80%減目標の達成に伴う経済影響の推計に際して、既往研究では経済モデルやエネルギーシステムモデルが単独で用いられてきた。本研究では、これまで単独で扱われてきたエネルギーシステム、経済システム、電源システムを結合した統合モデル(Fujimori et al., 2019)<sup>2)</sup>を用いて、2050年80%削減を達成するシナリオにおける費用を推計した。本研究では、エネルギーシステムモデルとしてはAIM/Enduse [Japan]を用い、経済モデル、電源モデルからの情報を入力した。経済モデルからはGDPや部門別の生産額、エネルギー価格等を入力した。電源モデルからは蓄電池導入量、変動性再生可能エネルギーの出力抑制率等を入力した。これらに基づき、AIM/Enduse [Japan]からは技術導入量・費用、電力需要等の出力を、経済・電源モデルに入力するためのパラメータとして整理した。経済システム、電源システムの情報としては、それぞれAIM/CGE (Fujimori et al., 2017)、AIM/Power (Shiraki et al., 2016)<sup>3)</sup>からの出力を用いた。シナリオは、対策を行わないなりゆきケースと、2050年80%減を達成するケースの2つについて分析を行った。

研究(3-4)：日本を対象とした2050年までの低炭素化シナリオについて、旅客輸送部門に着目した詳細な分析を実施した。本研究はサブテーマ2との協同であり、仏IDDRIによるDDPP-Transportの一環として実施された。本サブテーマからは、燃費等の輸送関連技術データおよび将来の電力のCO<sub>2</sub>原単位について、AIM/Enduse [Japan]のデータを提供した。これらのデータに基づき、燃費改善や電気自動車等の技術による削減を重視したAdvanceTech (ADV) Scenarioと、技術対策に加えて交通需要削減やモーダルシフト等の対策をバランスよく実施するBalanced (BAL) Scenarioの2つのシナリオを想定し、各シナリオにおける対策導入量に基づいて、エネルギー消費量やCO<sub>2</sub>排出量を推計した。

研究(3-5)：逐次均衡型の応用一般均衡モデルであるAIM/CGE[Country]を用いて、わが国のNDC（2030年に2013年比26%削減）及び長期目標（2050年に80%削減）の達成に必要な炭素価格の推計を実施した。分析対象年は、産業連関表のデータに基づき2011年から、長期目標の対象年である2050年までとした。

研究(3-6)：日本におけるゼロ排出の実現の可能性として、再エネ発電のみによる電力需給の分析を実施するために、RE100分析電源構成モデルを構築した（図3.3.2）。全国の電力需要をインプットとし



て、蓄エネや連系線利用、余剰電力による水素の地域別・時間別生成を考慮に入れた10電力ごとの電力需給を1時間ごとに再現する線形数理計画モデルとなっている。2018年度の10電力ごとの電力需要と、主に政府の再エネポテンシャル調査をベースにして、蓄電池の蓄電量を年間で最小化する条件のもと、10電力各地域の電力需給の計算を実施した。

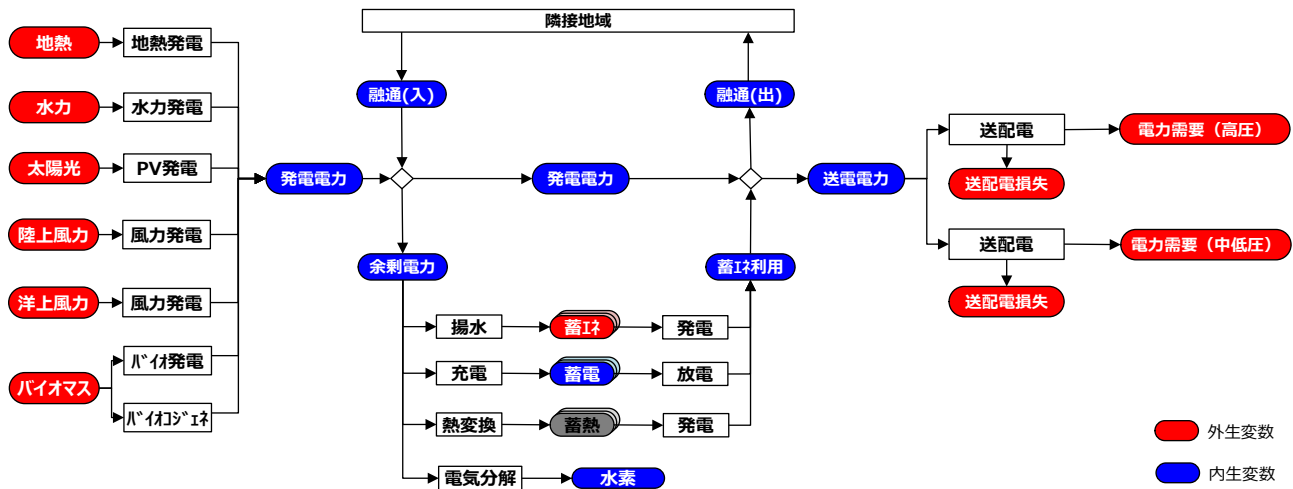


図3.3.2 RE100%分析電源構成モデル

#### 4. 結果及び考察

研究(3-1)では、BECCSが利用可能なシナリオの場合、原子力フェーズアウトでも国内において2050年にゼロ排出に到達する結果となった。特に、2050年ゼロ排出の実現には、80%減シナリオと比べ、エネルギー供給部門、運輸部門の対策が重要となる（図4.3.1）。中でもエネルギー供給部門は、ネガティブエミッション技術に加えて、太陽光・風力などの出力変動を伴う電源（VREs）の拡大が重要となることが示された。一方で、建築部門は、80%減シナリオでもほぼゼロ排出となることから、80%減シナリオにおいても電力等の低炭素エネルギーキャリアへの転換が課題となることが示された（図4.3.2）。運輸部門では電化、水素、バイオ燃料の導入が追加削減に寄与する。また産業部門では、80%減とゼロ排出シナリオの差は小さいものの、今世紀後半に更なる削減を達成するには、これらの残存する排出量をいかに削減するかが重要な課題となることが示唆された。なお今回は、シナリオ間でのエネルギーサービス需要の変化を考慮していないため、技術対策のみで2050年ゼロ排出を達成するには、BECCS、VREsへの依存など、多くの困難を伴うことが示唆された。この論文はCarbon Management誌に掲載された。

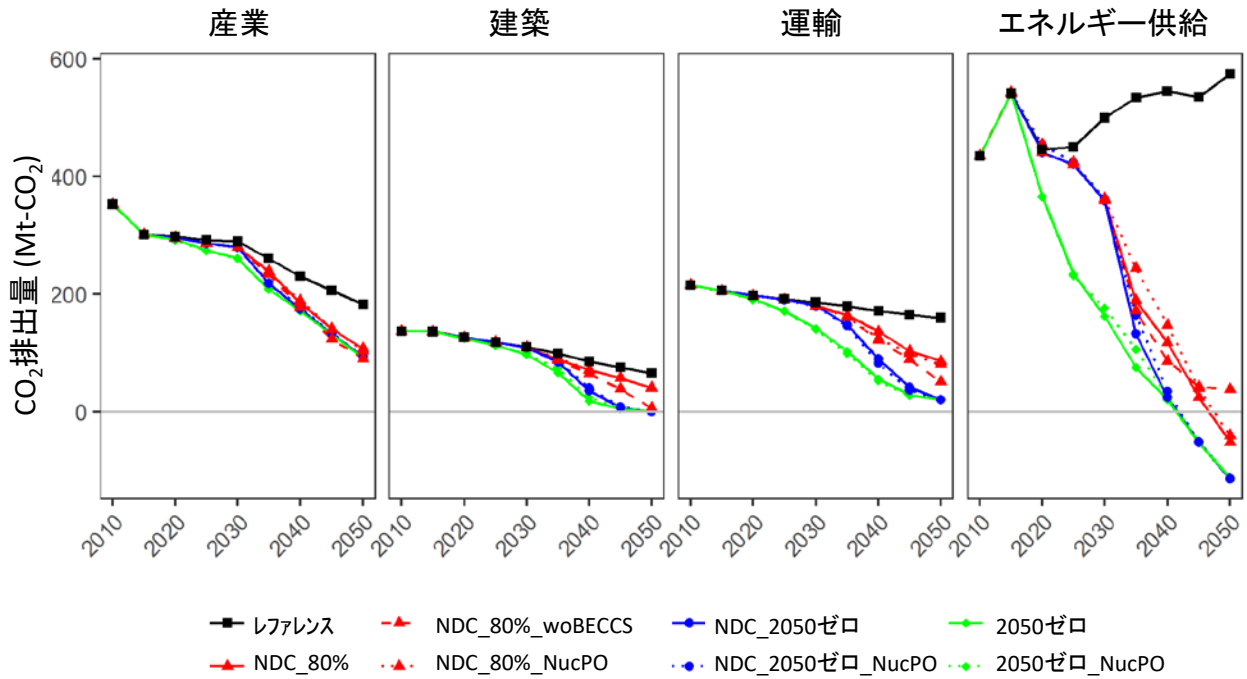


図4.3.1 日本の部門別エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量

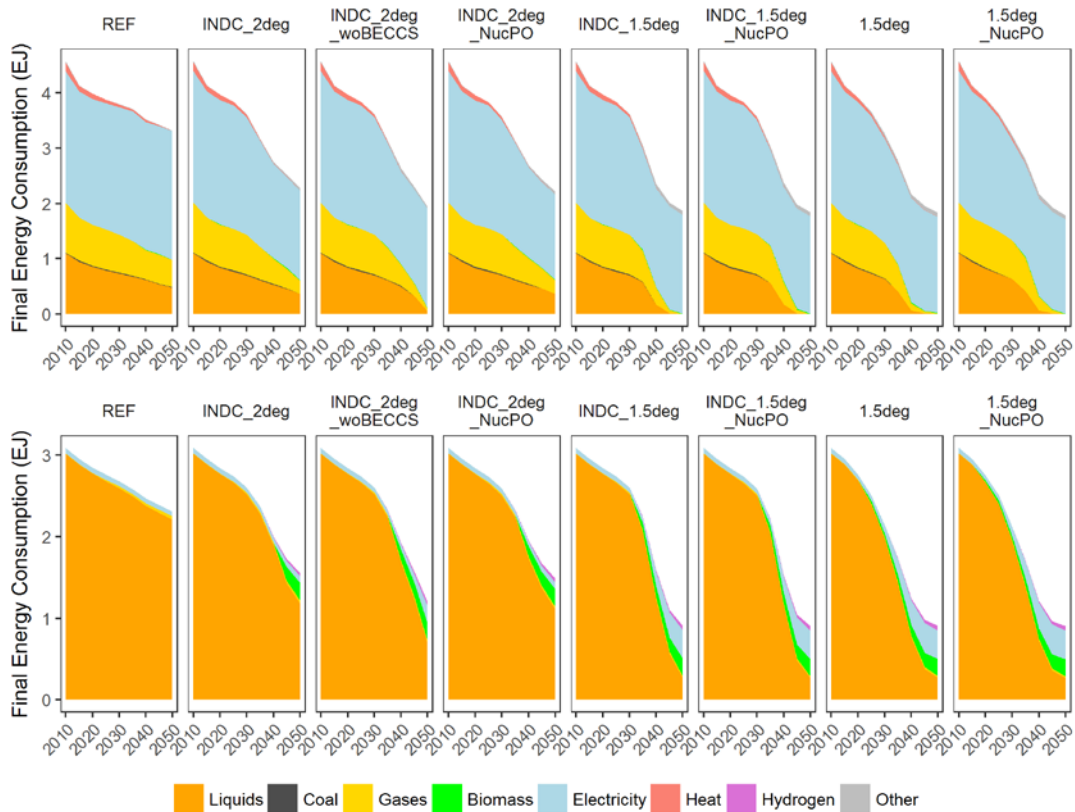


図4.3.2 部門別エネルギー消費量。(上) 民生部門、(下) 運輸部門。

研究(3-2)では、日本における2050年までの排出削減目標および今世紀後半までのゼロ排出実現に向けた排出経路について以下の知見を得た。図4.3.3は、日本の2100年までのCO<sub>2</sub>排出量(エネルギー・工業プロセス起源)の推計結果である。実線は複数モデルによる推計結果の中央値、幅は25-75パーセントイル幅を示している。

シナリオ別の長期排出経路の特徴として、主に以下の二点が挙げられる。第一に、2050年までの排

出経路について、NDC1600とNPi1600の2030年の排出量はほぼ同水準であることから、日本のNDCはhighバジェットにほぼ整合することが示唆された。一方で、NPi1000の2030年排出量との間にはギャップがあることから、1000Gtシナリオには必ずしも整合していない。2点目に、1000Gtシナリオでは、2050年のCO<sub>2</sub>排出量は約-75%(2010年比)となる。したがって、国内での2050年80%削減目標は、2°C目標に整合する国内の排出経路の有効なマイルストーンになり得ることが示された。ただし、NDC1000シナリオでは、2030-2050年の年平均削減率の中央値は約6%/年となり、これに相当する削減は、1970年以降、オイルショック・リーマンショックを除いて起こっていないことから、その実現は容易ではないことが示唆された。なおCO<sub>2</sub>価格はモデルによって大きく異なり、NDC1000シナリオでは約150-2100 US\$/t-CO<sub>2</sub>となった。また、削減費用についても排出制約が厳しくなるほど増加する傾向にあり、1000Gtシナリオでは1600Gtシナリオと比較して費用は約2倍以上の水準となった。第二に、ゼロ排出を達成する時点について、1600、1000、400シナリオにおいて、CO<sub>2</sub>ゼロ排出となる時点は、それぞれ2100年、2070-2080年、2055年頃となった。したがって、日本における2070年頃までのCO<sub>2</sub>ゼロ排出達成が、世界2°C目標に整合的な水準の目安になると考えられる。これと2050年時点のCO<sub>2</sub>排出量（1600、1000、400シナリオでそれぞれ約66%減、75%減、92%減（2010年比））より、2050年80%削減目標が達成されれば、世界2°C目標を満たす可能性が高い一方で、1.5°C目標に整合的な水準とするには、80%以上の削減が必要となり得ることが示唆された。

以上の結果より、日本の長期戦略に示された2050年80%削減、今世紀後半のできるだけ早期に脱炭素社会を実現、という目標は、世界2°C目標の観点からは整合的であると考えられる。ただし、本研究を踏まえ、日本の削減目標の検討・評価を行うにあたっては、以下の点について議論が必要である。第一に、国別のカーボンバジェットの値は、エフォートシェアリングの手法によって大きく変わり得るため、限界費用均等化以外の手法を用いれば結果は変わり得る。ただし、一人当たり均等化やGDPあたり均等化といった手法を用いた場合、一般的には日本の排出量は限界削減費用均等化より低い水準となるため、多くのケースでは追加的な削減が必要になるという示唆が得られるものと考えられる。第二に、1000・400シナリオでは今世紀後半の大規模なネガティブエミッションが必要となることが示されており、仮にこれをバイオマスCCSで行う場合は、バイオマス資源の確保やCCS貯留地の確保が課題となる。また、大規模なネガティブエミッションが困難な場合は、カーボンバジェットを1000、400Gtに整合的な水準に抑制するために、2050年以前に本研究で示された水準からの追加削減が必要となる可能性がある。

さらに、ゼロ排出達成に向け2030-2050年に必要となるエネルギー技術対策・施策についての検討を行った。図4.3.4は図4.3.3の排出シナリオにおける、低炭素エネルギー（再生可能エネルギー、原子力、CCS）の比率示したものである。特に1000Gtシナリオでは、2030年から2050年にかけて低炭素エネルギーの大幅な拡大がみられ、2050年時点の低炭素エネルギー比率は、一次エネルギー比で45-54%、発電電力量比では86-97%に達する結果となった。2030年においては、1000GtシナリオのうちNDCからの追加削減を伴うシナリオ（NPi1000）において、発電電力量に占める低炭素エネルギー比率は複数モデルの中央値で60%まで拡大する。低炭素エネルギーの拡大はすべてのモデルにおいて共通の傾向であったことから、重要な対策であることが示唆される。ただし、低炭素エネルギーの内訳はモデルによって多様である。図4.3.5に示されるように、再生可能エネルギーおよび原子力・CCSの比率はモデルによって大きく異なり、発電電力量ベースでは、2050年の1000Gtシナリオにおける再生可能エネルギー比率は20-60%の幅がある結果となった。特に原子力・CCSについては技術普及に関する不確実性があることを踏まえれば、低炭素エネルギー拡大に向けて多様な対策・施策オプションを講じる必要があると考えられる。この論文はClimatic Change誌に掲載された。

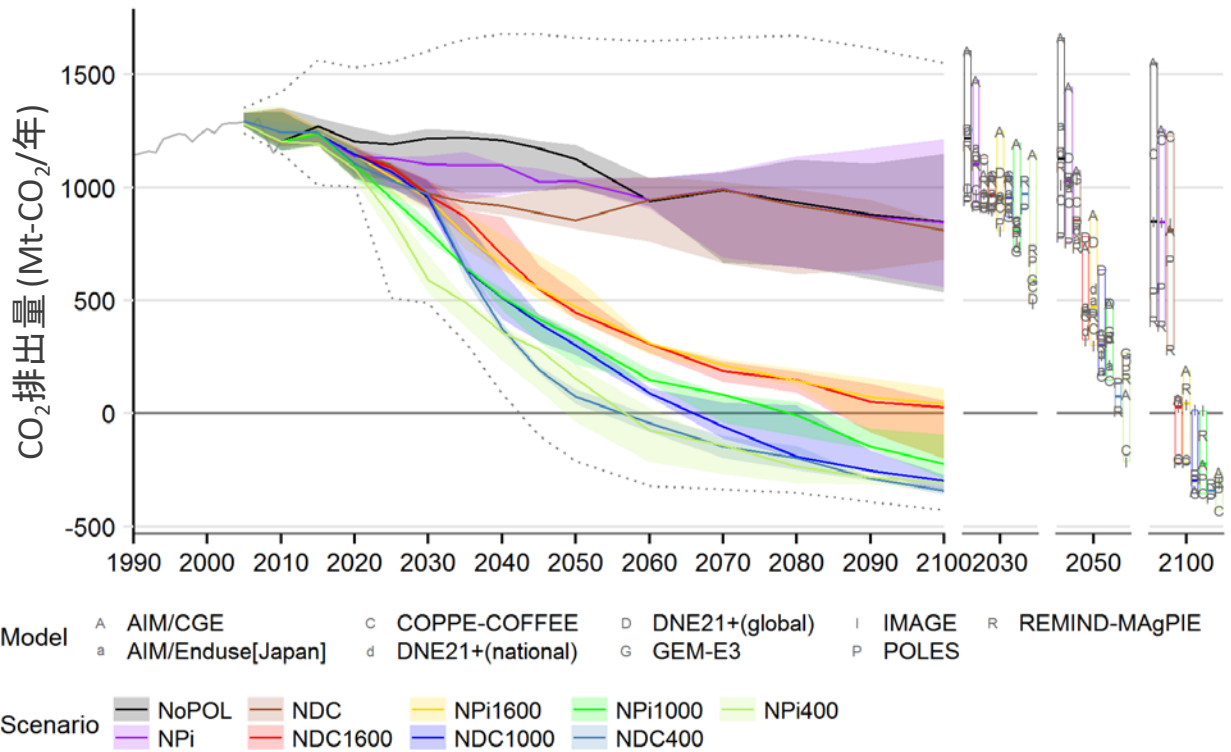


図4.3.3 日本のエネルギー・工業プロセス起源CO<sub>2</sub>排出量。実線は複数モデルの中央値、半透明の領域は25-75パーセンタイル値、点線は全シナリオを通じた最大・最小値を示す。シナリオ名のNPiは2030年目標深掘あり、NDCは深掘なし、数値は世界全体の2100年までのカーボンバジェットを示す。

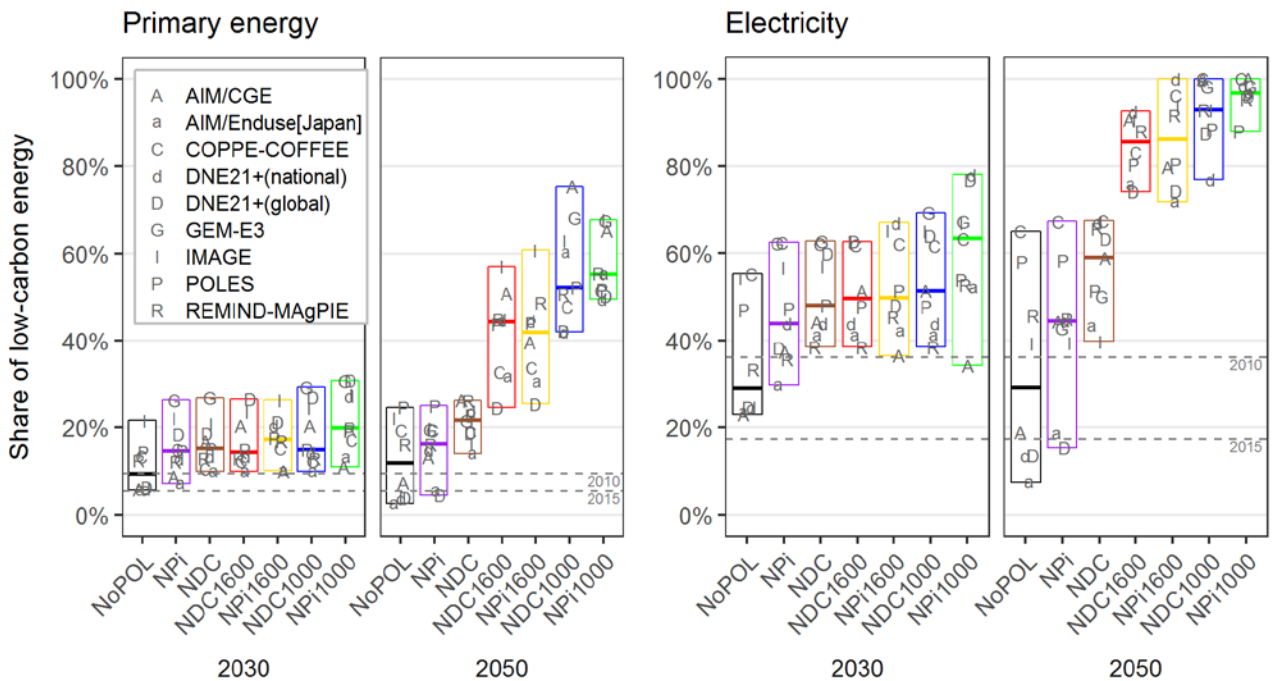


図4.3.4 一次エネルギー・発電電力量に占める低炭素エネルギー比率。低炭素エネルギーには再生可能エネルギー、原子力、CCSが含まれる。

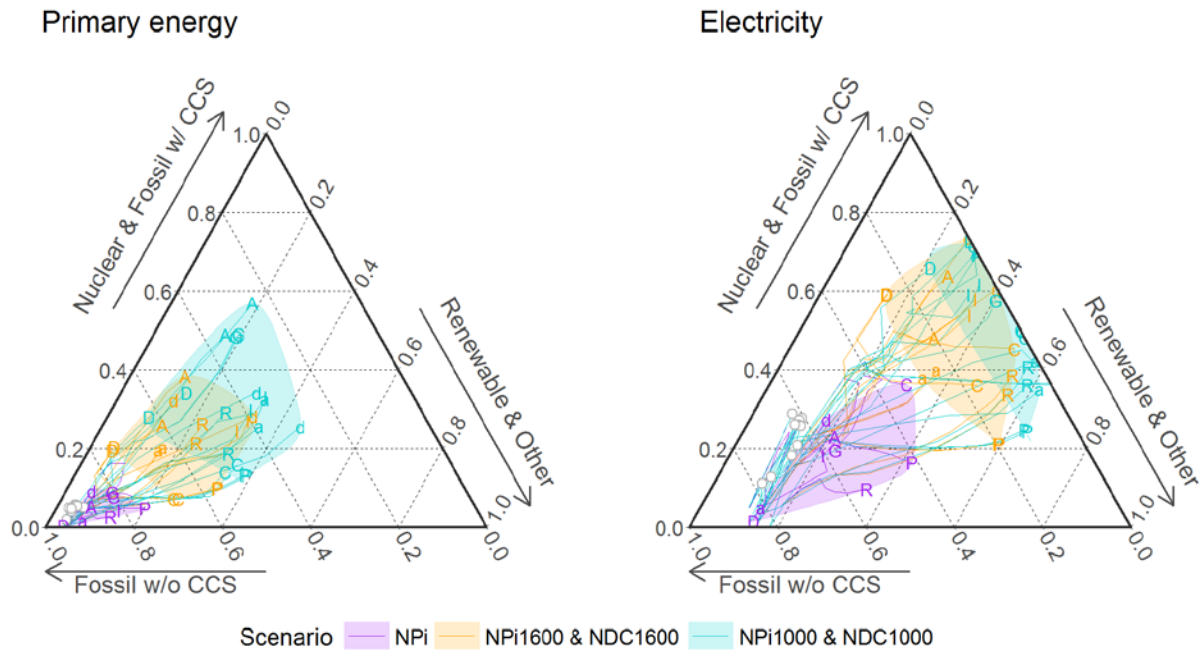


図4.3.5 一次エネルギー・発電電力量構成。影付きの部分は2050年時点における複数モデルの結果に囲まれた範囲を示す。

研究(3-3)では、日本の2050年80%削減におけるエネルギーシステム費用の推計を行った。2050年のGDPロスはなりゆきケース比約0.8%となり、従来型の経済モデルを単独で用いた場合と比べ半分以下の値となった(図4.3.6)。従来型の経済モデル内では省エネ・電化などのシステム変化が過去の価格とエネルギー消費の観測に基づいて決定されるため、大きなシステム変化を伴うシミュレーションには不向きであった。しかし本研究では、経済モデルにエネルギーシステム、電源モデルの情報を入力したことで、システム変化の影響を考慮したため、GDPロスが従来と比べ低い値になったと考えられる。なお、本推計ではGDP損失が発生するという結果が出ているが、今回は一般均衡モデルを用いており、気候変動対策をしない状態が最適な資源配分と仮定した場合の推計である。また、気候変動対策によって予期せぬ技術イノベーションが起こる可能性については考慮されておらず、異なる手法で推計した場合は損失が必ず発生するわけではない点に留意が必要である。

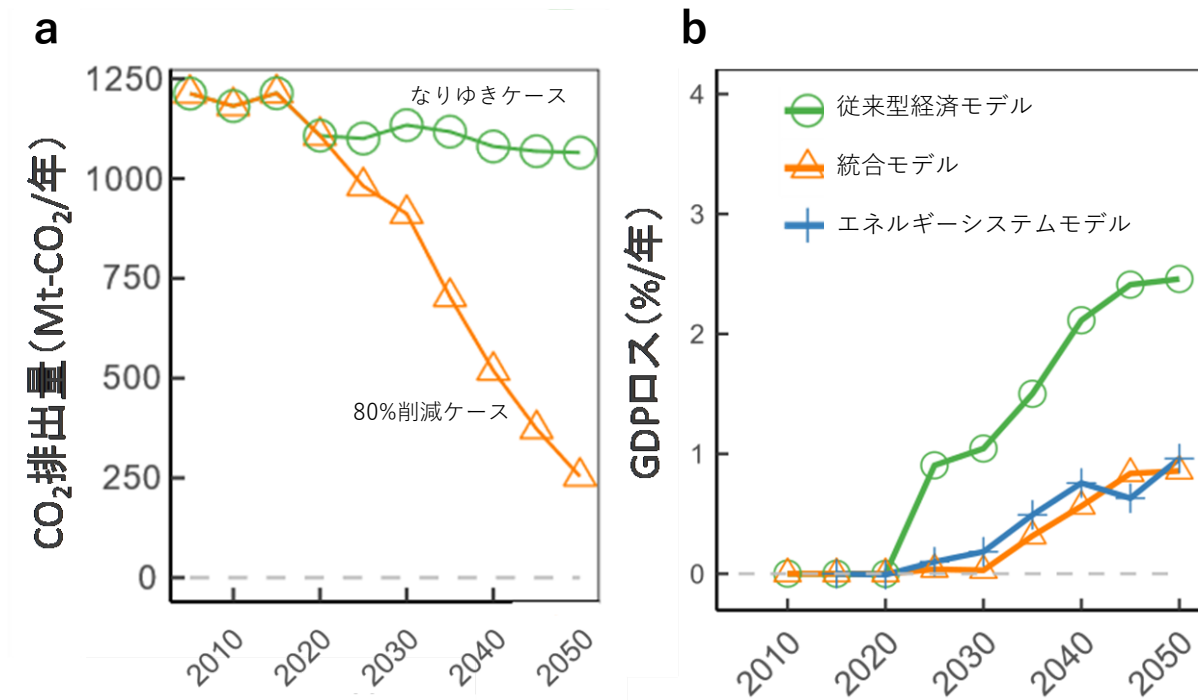


図4.3.6 a) 日本のエネルギー・工業プロセス起源CO<sub>2</sub>排出量 b) なりゆきケース比のGDPロス

研究(3-4)では、2050年の日本の旅客輸送部門からのCO<sub>2</sub>排出量は、ADV、BAL Scenarioそれぞれについて、2010年比で69%、89%削減される結果となった（図4.3.7）。また、2050年の最終エネルギー消費量はADV Scenarioで2010年比46%減、BAL Scenarioで81%削減される結果となった。いずれのシナリオにおいても電力の大幅な低炭素化を想定しており、電力のCO<sub>2</sub>排出原単位は2010年比で97%減となっている。そのため、いずれのシナリオでも低炭素エネルギー（電力、バイオ燃料、水素）への転換により大幅削減を達成しており、2050年のエネルギー消費量に占める低炭素エネルギーのシェアはADVで43%、BALで44%となった。この論文は現在Climate Policy誌に投稿中である。

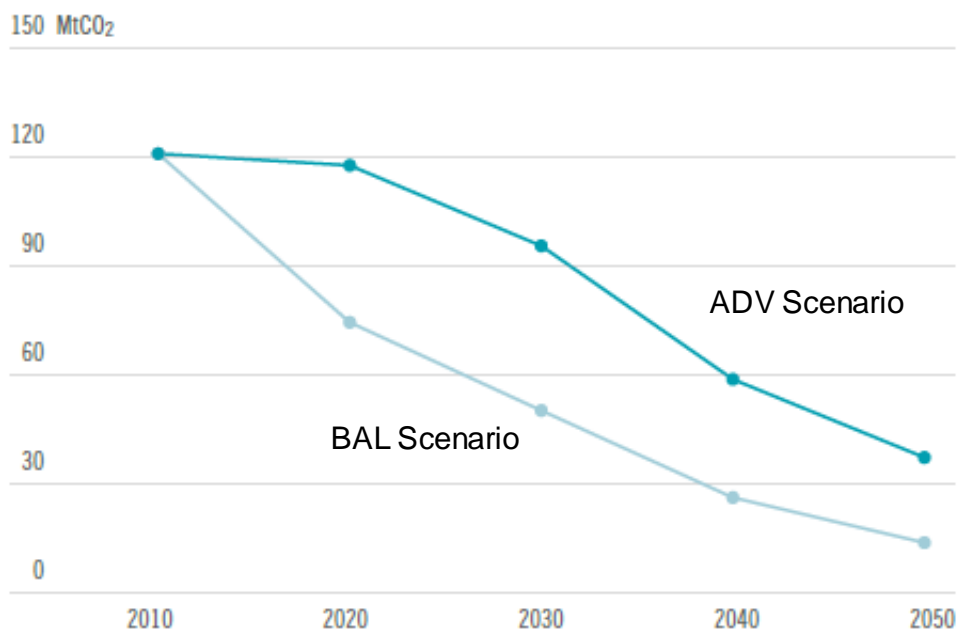


図4.3.7 日本の旅客輸送部門のCO<sub>2</sub>排出量推計結果

研究(3-5)では、逐次均衡型の応用一般均衡モデルであるAIM/CGE[Country]を用いて、わが国のNDC（2030年に2013年比26%削減）及び長期目標（2050年に80%削減）の達成に必要な炭素価格の推計を実施した。推計にあたり、制約を設けない「①基準シナリオ」と、2030年目標と2050年目標を満たす「②2030・2050年目標達成シナリオ」、2050年目標達成に向けて、2030年目標を深掘りする「③2030年目標深掘り・2050年目標達成シナリオ」の3つのシナリオを設定した。①において、温室効果ガス排出量は、基準年から2050年にかけて緩やかに増加した。②と③は、想定に基づきそれぞれ削減速度が異なるものの、双方とも長期削減目標を満たす結果となった。②における2030年の炭素価格は9,000円/tCO<sub>2</sub>、GDP影響は0.3%であった。③の2030年の炭素価格は11,000円/tCO<sub>2</sub>、GDP影響は0.4%との推計結果であった。わが国では2012年より「地球温暖化対策のための税」が導入されているが、本分析によれば、現在の税率である289円/tCO<sub>2</sub>は、2030年の削減目標達成のための水準としては低い値との結果になった。本分析における炭素価格の水準はCarbon Pricing Leadership Coalition (2017)<sup>4)</sup>における「補完的な環境政策が存在する場合、パリ協定の目標達成に合致した明示的な炭素価格の水準は、2020年までに40~80米ドル/tCO<sub>2</sub>、2030年までに50~100米ドル/tCO<sub>2</sub>」との記述に合致している。

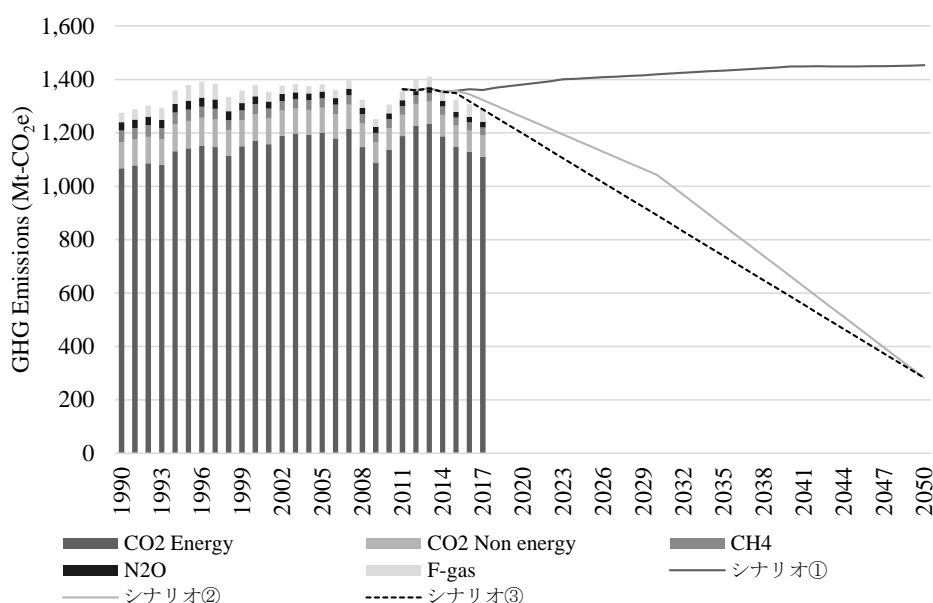


図4.3.8 AIM/CGE[Country] Japanにおける温室効果ガス排出量の推計結果

研究(3-6)では、日本におけるゼロ排出の実現の可能性として、再生可能エネルギー発電のみによる電力需給の分析を実施するために毎時の電力需給を推計する「電源モデル」を構築し、蓄電池の蓄電量を年間で最小化する条件で全国10地域の電力需給を推計した。再生可能エネルギーの導入量については環境省等における検討を踏まえた大量導入を前提とし、例えば、太陽光発電については8,541億kWh、風力発電は5,193億kWhとした。図4.3.9には、2018年度の電力需要のもと、再生可能エネルギー発電100%を実現した場合の関西電力管内地域の冬季電力需給の推計結果を示す。冬季に日射量が不足する日が続いた場合、夜間の電力を十分に賄う量の蓄電を日中に行うことができず、夏季から長期的に蓄電した電力を消費する需給形態が現れる。図4.3.10は、同地域に設置した蓄電池の蓄電量の通年推移を示している。前述の冬季の夜間電力逼迫の解消のため、1日の平均電力需要の約1か月分に相当する、大量の蓄電池導入が必要となる（緑折線）。一方、対策の一例として、電力需要の66%を占める民生部門で、断熱性能強化や空調高効率化により冷暖房需要を5割低減したとき、関西電力管内の蓄電池の導入量は無対策に比べて1/2程度に削減できることが示された（茶折線）。冬季の電力逼迫対応のためだけに導入される蓄電池は年間稼働率が低いため、経済性も劣る。一方、建築物の断熱性能強化や工場の排熱利用など、冬季の電力需要を低減する省エネ対策は非効率な投資の抑制につながる。

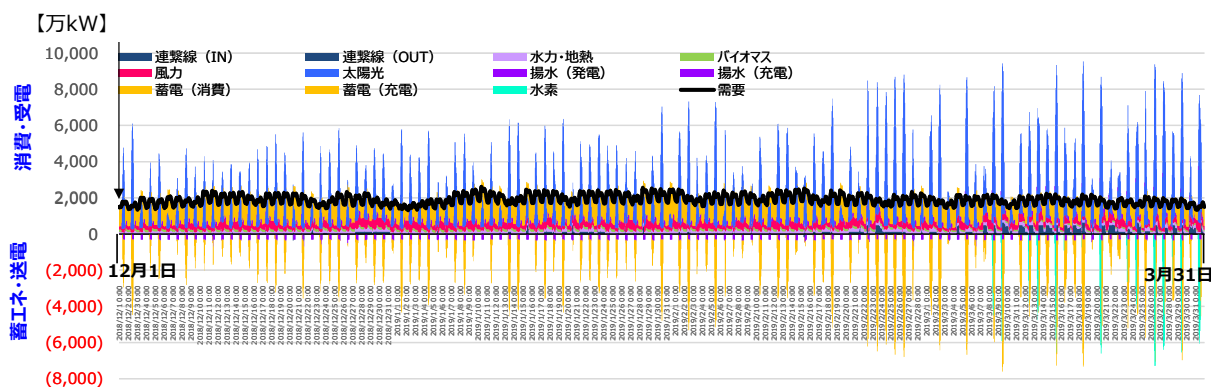


図4.3.9 関西電力管内の12～3月のRE100%での電力需給

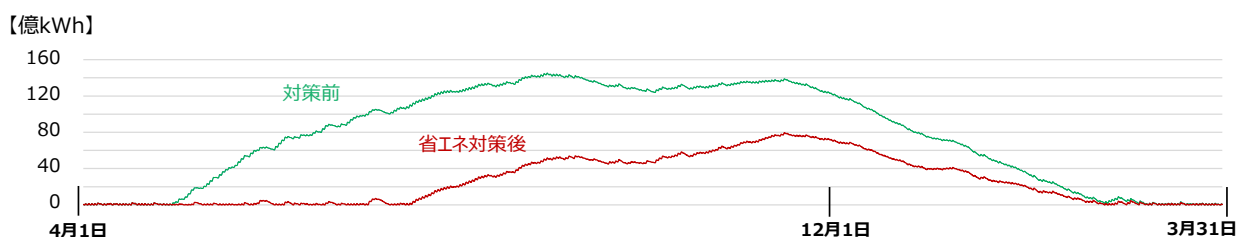


図4.3.10 関西電力管内の通年の蓄電池の蓄電量

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

これまで全球気候目標に整合した国・地域を対象とした気候変動緩和シナリオ分析では、限界費用削減均等化や一人当たり排出量均等化といったエフォートシェア手法を用いて、2030、2050年などの時点における排出量を配分する手法が主に用いられていた。本研究ではパリ協定気候目標から示唆される世界1,000Gt-CO<sub>2</sub>のバジェットに整合した日本の2050年までのバジェットを満たすような日本の長期排出経路について、複数の2030年までの短期気候目標のパターンに応じて推計することで、全球気候目標と日本の中長期目標との整合性を初めて定量的に示した。

また、経済・エネルギー・電源システムを統合した新たなモデルを用いて、日本の2050年80%減シナリオにおける経済影響を推計した結果、従来型の経済モデルのみを用いた場合と比較して、GDPロスは半分以上に低下することを新たに明らかにした。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

中央環境審議会 地球環境部会 長期低炭素ビジョン小委員会（第22回）（2018年3月16日）の配布資料として、AIM/Enduse [Japan]による日本の2050年までのシナリオ分析結果が紹介され、わが国の長期戦略の検討に関する議論に活用された。

2018年3月6日にフランス・パリで開催された、フランス環境連帯移行省、日本の環境省が主催する2nd French-Japanese Annual Meeting on Low-Carbon Societyにおいて、日本の2050年までのシナリオ分析およびDDPP-Tへの貢献について、地球環境戦略研究機関の甲斐沼美紀子フェローより紹介された。

2019年12月6日に駐日欧州連合代表部（ヨーロッパハウス）において開催された、EU-日本気候変動政策シンポジウムにおいて、日本およびEU（DG-CLIMA）の政策担当者等に対して日本におけるシナリオ・モデル分析研究として本研究の成果を報告、議論した。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で実施したAIM/Enduse [Japan]による日本を対象としたシナリオについては、IPCC AR6



Scenario Databaseへの登録・提出が完了しており、IPCC第6次評価報告書（第三作業部会）へのインプットおよびそれに基づく環境政策への活用が期待される。

## 6. 国際共同研究等の状況

[国際共同研究計画名] DDPP-Transport (Deep Decarbonization Pathways Project-Transport)

[カウンターパート] Yann Briand; Henri Waisman (IDDRI: フランス)

[参加・連携状況] 日本技術選択モデル、交通モデルによる2050年までの排出経路の分析結果を提供するとともに、レポート (Kainuma et al. (2017)) の作成に貢献。本サブテーマからは大城が本プロジェクトへ貢献。

[国際的な位置づけ等] 国連事務局の後援の下で発足した、世界2℃目標の長期シナリオの達成に向けて、16カ国の研究機関が参画するプロジェクト (DDPP) の第2フェーズにあたる。本年度は日本、フランス、イギリス、メキシコにおける旅客輸送部門の2050年までの低炭素化シナリオにフォーカスし、成果はCOP23において報告された。

[国際共同研究計画名] MILES (Modeling and Informing Low-Emissions Strategies)

[カウンターパート] Thomas Spencer (IDDRI: フランス)

[参加・連携状況] 日本技術選択モデルによる日本の約束草案の評価、および2050年までの排出経路の分析結果を提供。中国ERIと共同で長期シナリオにおけるElectrificationの役割に関するレポートの執筆、およびE3MLab (ギリシャ) による本プロジェクトの成果の論文執筆 (Energy Policyに掲載) に貢献した。本サブテーマからは大城が本プロジェクトへ貢献。

[国際的な位置づけ等] EUの委託により2014年に開始された国際研究プロジェクトであり、仏IDDRI、独PIKが主体となり、EU、中国、インド、ブラジル、日本、米国の研究グループが参加。2017年度がプロジェクトの最終年にあたり、COP23に先立って統合報告書が公表された。

[国際共同研究計画名] CD-LINKS (Linking Climate and Development Policies- Leveraging International Networks and Knowledge Sharing)

[カウンターパート] Heleen van Soest (PBL: オランダ)ほか

[参加・連携状況] WP1-WP6のうち、WP3にて、世界全体を対象としたglobal modelと、国・地域を対象としたnational modelの間のギャップの把握、両者の連携による低炭素化戦略を検討することを目的としている。その中の日本のシナリオ分析に際し、本研究成果の一部である日本技術選択モデルによる日本の2050年までのシナリオ分析結果を提供したほか、日本を対象とした論文を執筆した。本サブテーマからは大城が本プロジェクトへ貢献。

[国際的な位置づけ等] European Union's Seventh Framework Programme (Horizon 2020)のもとでの大型プロジェクトで、統合評価モデルコミュニティの活動で主要なもの。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文 (査読あり)>

- 1) Fragkos, P., Fragkiadakis, K., Paroussos, L., Pierfederici, R., Vishwanathan, S. S., Köberle, A. C., Iyer, G., He, C.-M., Oshiro, K.: Energy Policy, 118, 462-473 (2018)  
Coupling national and global models to explore policy impacts of NDCs.  
doi:10.1016/j.enpol.2018.04.002
- 2) Fujimori, S., Oshiro, K., Shiraki, H., Hasegawa, T.: Nature Communications, 10(1), 4737 (2019) Energy transformation cost for the Japanese mid-century strategy.  
doi:10.1038/s41467-019-12730-4
- 3) Krey, V., Guo, F., Kolp, P., Zhou, W., Schaeffer, R., Awasthy, A., Bertram, C., de

- Boer, H.-S., Fragkos, P., Fujimori, S., He, C., Iyer, G., Keramidas, K., Köberle, A. C., Oshiro, K., Reis, L. A., Shoai-Tehrani, B., Vishwanathan, S., Capros, P., Drouet, L., Edmonds, J. E., Garg, A., Gernaat, D. E. H. J., Jiang, K., Kannavou, M., Kitous, A., Kriegler, E., Luderer, G., Mathur, R., Muratori, M., Sano, F., van Vuuren, D. P.: Energy, 172, 1254-1267 (2019). Looking under the hood: A comparison of techno-economic assumptions across national and global integrated assessment models. doi:10.1016/j.energy.2018.12.131
- 4) Oshiro, K., Kainuma, M., Masui, T.: Energy Policy, 110, 581-587 (2017) Implications of Japan's 2030 target for long-term low emission pathways. doi:10.1016/j.enpol.2017.09.003
- 5) Oshiro, K., Masui, T., Kainuma, M.: Carbon Management, 9 (5), 493-501. (2018) Transformation of Japan's energy system to attain net-zero emission by 2050. doi:10.1080/17583004.2017.1396842
- 6) Oshiro, K., Gi, K., Fujimori, S., van Soest, HL., Bertram, C., Després, J., Masui, T., Rochedo, P., Roelfsema, M., Vrontisi, Z.: Climatic Change, (in press) (2019) Mid-century emission pathways in Japan associated with the global 2°C goal: national and global models' assessments based on carbon budgets. doi:10.1007/s10584-019-02490-x
- 7) Roelfsema, M., van Soest, HL., Harmsen, M., van Vuuren, DP., Bertram, C., den Elzen, M., Höhne, N., Iacobuta, G., Krey, V., Kriegler, E., Luderer, G., Riahi, K., Ueckerdt, F., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Frank, S., Fricko, O., Gidden, M., Humpenöder, F., Huppmann, D., Fujimori, S., Fragkiadakis, K., Gi, K., Keramidas, K., Köberle, A., Reis, L., Rochedo, P., Schaeffer, R., Oshiro, K., Vrontisi, Z., Chen, W., Iyer, G., Edmonds, J., Kannavou, M., Jiang, K., Mathur, R., Safonov, G., Vishwanathan, S.: Nature Communications, 11(1), 2096 (2020). Taking stock of national climate policies: the Paris agreement needs to speed up implementation and scale up ambition. doi: 10.1038/s41467-020-15414-6
- 8) 白木裕斗, 大城賢, 藤森真一郎, 長谷川知子: 土木学会論文集 G (環境), 74(5), I\_369-I\_378. (2018) 長期低炭素シナリオ下での電力系統安定化策実施量の推計. doi:10.2208/jscej.74.I\_369
- 9) 藤森真一郎, 大城賢, 白木裕斗, 長谷川知子土木学会論文集 G (環境), 74, (5), I\_213-I\_222 (2018) エネルギー技術情報を用いた経済モデルによる日本の長期二酸化炭素排出削減費用の推計. doi:10.2208/jscej.74.I\_213

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) Oshiro, K., Masui, T., Kainuma, M.: Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspectives, (Fujimori S., Kainuma M., Masui T. ed.), Singapore: Springer Singapore, 143-156 (2017) Quantitative Analysis of Japan's 2030 Target Based on AIM/CGE and AIM/Enduse.

#### (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Fujimori, S., Shiraki, H., Oshiro, K., Hasegawa, T.: Eleventh Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium, Seville, Spain. (2018) New integrated assessment modeling framework: incorporating energy-economic, technology, power

generation, and land-use models.

- 2) Masui, T., Oshiro, K.: APERC Annual Conference 2019, Tokyo, Japan. (2019) Net-zero emission pathways.
- 3) Oshiro, K., and Fujimori, S.: The first international workshop of JMIP. Tokyo, Japan. (2017) Mid-century scenarios in Japan: some insights from CD-LINKS.
- 4) Oshiro, K.: LCSR-net 10th Annual Meeting. Yokohama, Japan. (2018) Scenario analysis on mid-century low emission pathways in Japan.
- 5) Oshiro, K.: China Energy Modeling Forum Annual Conference. Beijing, China. (2018) Asia-Pacific Integrated Model (AIM) - Applications for the NDC and mid-century strategies -
- 6) Oshiro, K., Fujimori, S., Gi, K., van Soest, HL., Bertram, C., Després, J., Masui, T., Rochedo, P., Roelfsema, M., Vrontisi, Z.: The 12th Annual Meeting of the IAMC. Tsukuba. Japan. (2019) Japan's emission pathways in the context of the 2°C goals and their implications for the mid-century strategy.
- 7) Takimi, M., Masui, T.: EcoMod 2019. Ponta Delgada, Azores, Portugal. (2019) Assessment of value of carbon price to achieve NDC of Japan using national scale CGE model.
- 8) 大城賢：EU-日本気候変動政策シンポジウム，東京（2019）Asia-Pacific Integrated Model (AIM)による日本の緩和シナリオ分析
- 9) 大城賢：環境科学会 2019 年会，名古屋（2019）パリ協定気候目標を踏まえた日本の長期排出経路に関する分析
- 10) 白木裕斗，大城賢，藤森真一郎，長谷川知子．土木学会第26回地球環境シンポジウム．長崎（2018）長期低炭素シナリオ下での電力系統安定化策実施量の推計
- 11) 藤森真一郎，大城賢，白木裕斗，長谷川知子．：土木学会第26回地球環境シンポジウム．長崎（2018）エネルギー技術情報を用いた経済モデルによる日本の長期二酸化炭素排出削減費用の推計
- 12) 増井利彦，大城賢：シンポジウム 地球温暖化対策を考えるためのエネルギー・シナリオ分析：2050年とその後を見据えて，東京（2019）わが国における2050年のゼロ排出に向けた可能性と課題

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 日比野剛（2019）「日本における脱炭素社会への道のり」，国民対話シンポジウム「低炭素社会から脱炭素社会を目指して」（主催：国立環境研究所 社会環境システム研究センター環境再生保全機構環境研究総合推進費 2-1702 及び 2-1908、2019年11月20日、TKP ガーデンシティ PREMIUM 秋葉原）

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞（2019年12月8日、全国版、2頁、「原発アピール躍起だけど／廃止でも温暖化抑制の試算」
- 2) 中日新聞（2019年12月14日、滋賀県版、社会面(12版)、「温室ガス削減で経済損失「意外と小さい」新試算」
- 3) 中日新聞（2019年12月14日、岐阜県版、社会面(11版)「経済負担 意外と小さい」「温室ガス削減でGDP 2～8%損失」 京大など試算では「0.8%」

- 4) 毎日新聞 (2019年11月12日、総合面 (P4) 「温室ガス削減費用 10分の1に圧縮 2050年時点 年5.3兆円 再生エネ導入費安く 京大チーム試算」)
- 5) プレスリリース (2019年10月21日、於京都大学、「日本の長期温室効果ガス削減目標にかかる費用の新しい推計」)

#### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

#### 8. 引用文献

- 1) Oshiro, K., Masui, T.: Energy Policy, 81, 215-225 (2015) Diffusion of low emission vehicles and their impact on CO<sub>2</sub> emission reduction in Japan.
- 2) Fujimori, S., Oshiro, K., Shiraki, H., Hasegawa, T.: Nature Communications 10, 4737 (2019) Energy transformation cost for the Japanese mid-century strategy.
- 3) Shiraki, H., Ashina, S., Kameyama, Y., Hashimoto, S., Fujita, T.: Journal of Cleaner Production 114, 81-94 (2016) Analysis of optimal locations for power stations and their impact on industrial symbiosis planning under transition toward low-carbon power sector in Japan.
- 4) Carbon Pricing Leadership Coalition (2017) High-Level Commission on Carbon Prices.

### III. 英文Abstract

## Integrated Analyses of Climate Policies for Simultaneous Realization of the Paris Agreement and the SDGs

Principal Investigator: Kiyoshi TAKAHASHI

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)  
 16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN  
 Tel: +81-29-850-2543 / Fax: +81-29-850-2960  
 E-mail: ktakaha@nies.go.jp

Cooperated by: Mizuho Research Institute, Kyoto University

[Abstract]

Key Words: Climate Policy, the Paris Agreement, the Sustainable Development Goals, Integrated Assessment, Zero Emission

The Paris Agreement which was entered into force in 2016 states to strengthen the global response to the threat of climate change by keeping a global temperature rise this century well below 2 degrees Celsius above pre-industrial levels and to pursue efforts to limit the temperature increase even further to 1.5 degrees Celsius. To achieve these ambitious goals, the Paris Agreement requires all Parties to put forward their best efforts through Nationally Determined Contributions, and to strive to formulate and communicate long-term low greenhouse gas emission development strategies. While achievement of the goals agreed in the Paris Agreement is a necessity for the world to maintain its sustainability, it needs to be realized in a manner that does not disturb or disable the other important societal goals, typically exemplified as the 17 Sustainable Development Goals adopted by world leaders in September 2015 at the UN Summit. For example, stringent mitigation policies to achieve the climate goal of the Paris Agreement may increase the risk of hunger in low-income countries through the expected increase in food prices and land resource conflicts between food crops production and bioenergy crops production. For achieving the global goals on climate and food security simultaneously, in addition to the GHGs mitigation efforts like energy system transformation, supplementary measures such as international aid or regional income redistribution would be needed. Based on the backgrounds stated above, we have conducted researches for suggesting policy packages to realize both the decarbonized society and sustainable development goals in the world and Japan. Through the analyses, we have found that there are both synergies and tradeoffs between stringent climate policies consistent with the Paris Agreement and the Sustainable Development Goals. Some of the tradeoffs suggested in the researches could be reduced by taking additional specific policies. We have also shown climate policies and mitigation pathways required in Japan for achieving the 1.5 degree Celsius target globally.