

Environment Research and Technology Development Fund

環境省環境研究総合推進費終了研究等成果報告書

わが国を中心とした温室効果ガスの長期削減目標に対応する  
緩和策の評価に関する研究  
(2-1402)

平成26年度～平成28年度

Research on Evaluation of Mitigation Strategies to Achieve Long-term Reduction Targets of Greenhouse  
Gases in Japan and the World

国立研究開発法人国立環境研究所  
京都大学  
滋賀県琵琶湖環境科学研究センター  
みずほ情報総研株式会社

平成29年5月

環境省  
総合環境政策局総務課環境研究技術室  
環境保健部環境安全課環境リスク評価室  
地球環境局総務課研究調査室

I. 成果の概要	.....	i
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		
(1) 2050年を対象としたわが国の長期目標の実現に向けた排出削減経路の検討	.....	1
(国立研究開発法人国立環境研究所)		
要旨	.....	1
1. はじめに	.....	2
2. 研究開発目的	.....	3
3. 研究開発方法	.....	3
4. 結果及び考察	.....	12
5. 本研究により得られた成果	.....	34
6. 国際共同研究等の状況	.....	35
7. 研究成果の発表状況	.....	35
8. 引用文献	.....	42
(2) 世界を対象とした将来シナリオの検討とその定量化	.....	43
(国立研究開発法人国立環境研究所)		
要旨	.....	43
1. はじめに	.....	43
2. 研究開発目的	.....	45
3. 研究開発方法	.....	45
4. 結果及び考察	.....	51
5. 本研究により得られた成果	.....	66
6. 国際共同研究等の状況	.....	66
7. 研究成果の発表状況	.....	67
8. 引用文献	.....	73
(3) 日本を対象とした2030年の温室効果ガス削減量の定量化	.....	77
(みずほ情報総研株式会社)		
要旨	.....	77
1. はじめに	.....	77
2. 研究開発目的	.....	78
3. 研究開発方法	.....	78
4. 結果及び考察	.....	82
5. 本研究により得られた成果	.....	92
6. 国際共同研究等の状況	.....	92
7. 研究成果の発表状況	.....	93
8. 引用文献	.....	95

(4) ライフスタイル変化を考慮した家庭のエネルギー消費行動に関する研究 (国立研究開発法人国立環境研究所)	97
要旨	97
1. はじめに	97
2. 研究開発目的	98
3. 研究開発方法	98
4. 結果及び考察	113
5. 本研究により得られた成果	119
6. 国際共同研究等の状況	119
7. 研究成果の発表状況	119
8. 引用文献	120
(5) 社会におけるエネルギー集約素材の蓄積からみた将来シナリオの検討 (京都大学、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター)	123
要旨	123
1. はじめに	123
2. 研究開発目的	124
3. 研究開発方法	124
4. 結果及び考察	133
5. 本研究により得られた成果	149
6. 国際共同研究等の状況	149
7. 研究成果の発表状況	149
8. 引用文献	150
III. 英文Abstract	152

課題名 2-1402 わが国を中心とした温室効果ガスの長期削減目標に対応する緩和策の評価に関する研究

課題代表者名 芦名 秀一（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・対策モデル研究室主任研究員）

研究実施期間 平成26～28年度

累計予算額 166,138千円（うち平成28年度：52,564千円）  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード低炭素社会、統合評価モデル、将来シナリオ、排出経路、緩和策、パリ協定、約束草案、マクロフレーム

#### 研究体制

- (1) 2050年を対象としたわが国の長期目標の実現に向けた排出削減経路の検討（国立研究開発法人国立環境研究所）
- (2) 世界を対象とした将来シナリオの検討とその定量化（国立研究開発法人国立環境研究所）
- (3) 日本を対象とした2030年の温室効果ガス削減量の定量化（みずほ情報総研株式会社）
- (4) ライフスタイル変化を考慮した家庭のエネルギー消費行動に関する研究（国立研究開発法人国立環境研究所）
- (5) 社会におけるエネルギー集約素材の蓄積からみた将来シナリオの検討（京都大学、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター）

#### 研究協力機関

立命館大学、国立研究開発法人森林総合研究所

中国 国家発展和改革委員会 能源研究所、広州能源研究所、

インド インド経営大学院大学 アーメダバード校、マウラナ・アザド国立科学研究所、ボパール建築計画研究所、国立教員養成研究所

タイ タマサート大学

韓国 ソウル大学

米国 米国農務省、国立太平洋北西研究所、スタンフォード大学

ドイツ ポツダム気候影響研究所

フランス Sustainable Development Solutions Network

#### 研究概要

##### 1. はじめに（研究背景等）

2011年3月の東日本大震災と福島第一原子力発電所事故を受け、中央環境審議会やエネルギー・環境会議で温室効果ガス排出削減目標が再議論されてきたが、2013年はじめに安倍首相が2020年の目標値をゼロベースで見直すことを表明するなど、気候変動緩和への取り組みは停滞していた。2015年11-12月にパリで開催された気候変動枠組条約第21回締約国会議に向けて各国はINDC（Intended Nationally Determined Contributions）を提出することとなり、日本では2014年10月より環境省の中央環境審議会と経済産業省の産業構造審議会が合同で「産業構造審議会 産業技術環境分科会 地球環境小委員会 約束草案検討ワーキンググループ中央環境審議会地球環境部会2020年以降の地球温暖化対策検討小委員会合同会合」を設置して、2020年以降の削減目標の検討を進められた。その結果、2015年7月17日にわが国の2030年の温室効果ガス排出削減目標として2013年比26%削減が閣議決定され、正式に日本の削減目標として国内外に示された。また、2016年3月15日には、地球温暖化対策推進本部が開催され、2050年の温室効果ガス排出量を現在より80%削減する目標を盛り込んだ地球温暖化対策計画案が了承された。

このように、温暖化対策に向けた目標に関する議論は徐々に進展が見られるが、一方で、石炭火力発電所の増設の動きが見られるなど、目標をどのように実現するかという点についての議論は十分とはいえず、このままでは長期目標達成が困難となることが危惧される。また、2011年の東日本大震災以降マクロフレームは変化し将来の社会経済のありようについてこれまでの見通しとは異なる傾向が見られているほか、2011年夏の電力不足リスクを契機として全国的、かつ部門横断的に実施された節電行動の定着などの東日本大震災以前と比較して

のエネルギーや気候変動対策に関する意識変化・行動変化も見られるが、これまでの分析では十分に考慮されてきたとは言いがたい。また、気候変動対策には、高効率機器への置き換えや再生可能エネルギーの導入など追加的な費用が必要とされることが多いが、高効率機器の販売量増加などは新たな需要喚起と見なすこともでき、このような気候変動対策によって引き起こされる経済成長（グリーン成長）は、今後の日本経済の重要なドライバーフォースとなり得る可能性もある。これらをはじめ、従来十分でなかった視点を中長期削減目標の分析に反映させることは重要であり、低炭素と整合した新たな社会発展パターンの提示が必要とされている。また、高齢化も見据えた消費行動変化や社会に蓄積された素材ストックの活用など、技術的な対応だけではない緩和策の道筋を提示することも重要である。このため、技術以外の視点も加味して2050年の長期目標に対応した短中期的にも実現可能な緩和策の検討が課題となっている。一方で、国際的に新たな社会経済シナリオ検討やEMF等のモデル比較研究が進行しており、これらの知見や世界の動きを研究に取り込むとともに、日本の取り組みや国際的な影響を発信することも重要となる。

## 2. 研究開発目的

本研究では、長期的な温室効果ガス濃度の安定化を所与として(1)日本及び世界を対象とした新しい社会経済シナリオの作成及び社会構造変化も加味したマクロフレームの定量化と、そのために必要なモデル開発及び既存モデルの改良、(2)(1)に対応し、かつIPCC第五次評価報告書等の最新の知見を踏まえた日本及び世界の削減目標達成のための排出経路の評価、並びに(3)排出経路実現のための対策及び政策の分析・評価とグリーン成長等温室効果ガス削減以外の便益評価、及びシナリオ実現のためのマクロフレームの要素である産業構造や社会の素材ストック、ライフスタイル変化の定量分析、の3つを目的とする。

具体的には、日本を対象に東日本大震災以降の様々な社会変化による東日本大震災前後のマクロフレームの変化を分析するとともに、新たな社会変化を加味した将来のマクロフレームを定量的に検討する。さらに、特に消費行動の変化や社会に蓄積されてきた素材ストックの維持・活用の影響については、家庭エネルギーサービス需要モデルやマテリアルストック・フローモデルなどを改良して詳細に分析するとともに、応用一般均衡モデルを用いて評価・確認し、整合的なマクロフレームとしてとりまとめる。

マクロフレーム分析の結果を踏まえ、バックキャスティングモデル及び技術選択モデルを改良して2050年の長期目標と整合した短中期の削減目標を分析し、実現のための社会経済シナリオや対策・施策を評価するとともに、特に発電部門については電源計画モデルによる詳細分析を行う。また、2030年までについては、技術選択モデルを用いてエネルギー技術の推移を詳細に分析する。これらを通じて、気候変動緩和策実施に必要な費用と便益を明らかにし、中長期削減目標達成のための技術的な対応や、低炭素を目指した日本の経済社会構造の姿と緩和策のあり方を具体的に示す。

また、世界を対象とした分析では、IPCC第5次評価報告書における最新の知見を反映して世界と日本の排出経路を分析するとともに、適応も考慮した複数の新社会経済シナリオ(Shared Socioeconomic Pathways、SSPs)に対応した温室効果ガス排出量の推計と社会経済活動の変化を分析する。

## 3. 研究開発の方法

本研究課題では、業務内容ごとに中心となるモデルを置き、それらの連携により研究開発目的を達成するものとした。図1に、各業務内容で中心となるモデル及びその連携を示す。

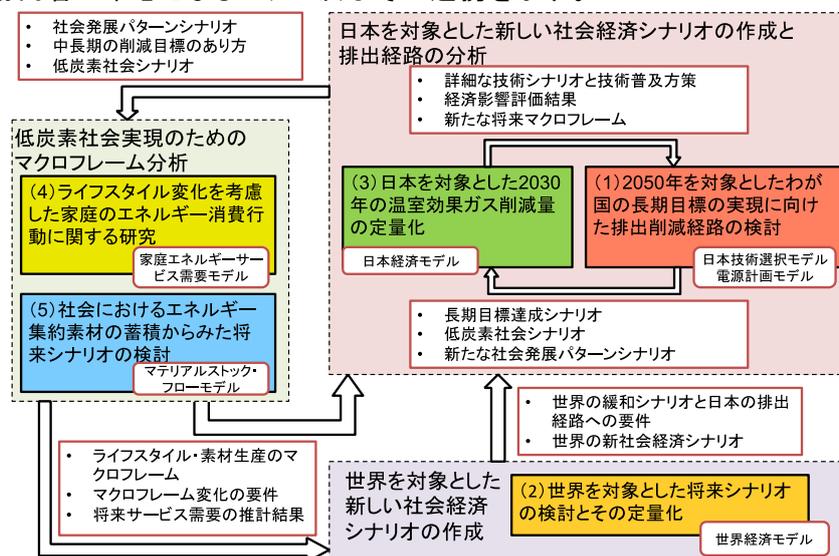


図1 研究開発目的達成のための研究手法及びその連携

### (1) 2050年を対象としたわが国の長期目標の実現に向けた排出削減経路の検討

本サブテーマでは、統合評価モデル群を用いてわが国を対象に長期目標達成のための排出削減経路及びその実現のための対策及び政策を明らかにすることを目的に、マクロ経済モデル、サービス需要分析モデル、バックキャストモデル、技術選択モデル、多地域電源計画モデル、及び長期排出削減経路の簡易分析ツール(低炭素ナビ)を改良・開発した。

マクロ経済モデルは、年齢別人口(3区分)を入力として、実質GDP、労働人口、固定資本ストック、総固定資本形成、家計消費支出を推計するものであり、1970～2014年のデータを参照して2100年までの将来推計を行う。このモデルでは、生産関数としてコブ・ダグラス型を仮定するが、全要素生産性(Total Factor Productivity (TFP))の時間変化を顕に取り込むために状態空間モデル(State Space Model)として構築した。

サービス需要分析モデルは、特にエネルギー需要に大きく影響する素材需要を対象に、各素材の需要を内需(国内消費量)と外需(純輸出)に区分し、内需についてはマクロ経済モデルから得られるマクロ経済指標を説明変数として推計する統計モデルである。

バックキャストモデル(AIM/Backcast Model、AIM/BCM)は、将来の社会経済条件およびサービス需要の推移を所与とし、期間全体の総費用最小化を基準として目標達成のために技術的対策や制度、政策をいつ、どのように講じていくべきかを定量評価結果に基づいて提示するモデルである。基準年(2005年)および目標年(2050年)のCO<sub>2</sub>排出量は固定されている。サービス需要は、2005年から2014年までは実績値を用い、以降はシナリオにて与える。モデルは線形計画法により定式化し、Gurobiを用いて最適解を求める。

技術選択モデル(AIM/Enduse [Japan])は、エネルギー技術に関わる特性を詳細に反映したモデルである。外生的に設定したサービス需要、エネルギー価格やCO<sub>2</sub>価格、エネルギー源別の供給制約、対策技術の導入・普及制約の下で、エネルギー需要に係る総費用(固定費用と運転費用の和)を最小化するよう、1年ごとに技術選択が行われる。

多地域電源計画モデルは、将来の発電設備の容量および各発電方式の発電量などを推計するボトムアップ型最適化モデルである。全国を60地域に分割し、各地域に電力需要ノード、発電ノードを設定し、地域間には実際の地域間連系線ネットワークの情報に基づいた仮想的な連系線を設けた(図2)。解析期間は2005年から2050年までであり、期間全体の費用最小化の最適化計算により電力需要を満足させる長期的な電源構成の変化を分析する。なお、分析では終端効果を除くために2060年までを対象として最適化計算を実施している。

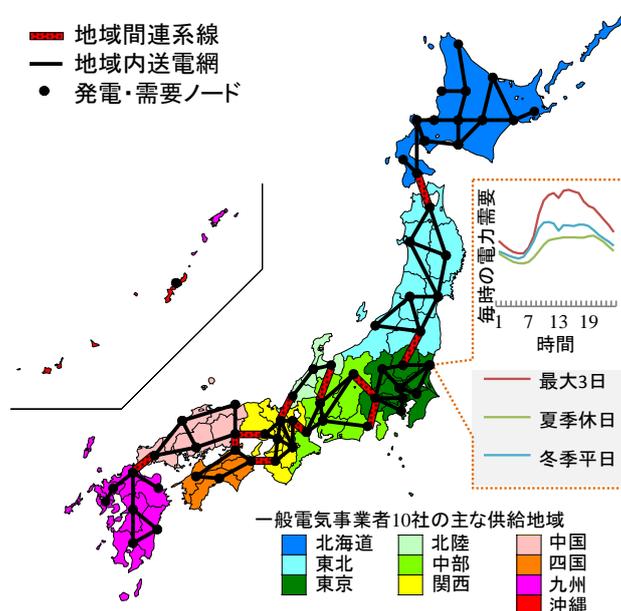


図2 多地域電源計画モデルの構造

低炭素ナビは、2050年に向けた長期的な視点から低炭素社会構築を目的としたエネルギー需給シナリオを可視化するツールである。エネルギー需要側、エネルギー供給側それぞれに約20種ずつ設けた選択肢それぞれに、4ないしは5つのレベル(レベル1:ほとんど、あるいは全く削減努力をしないレベルから、レベル4:達成可能ではあるが、本質的な変化と相当の削減努力が必要とされるレベルないしはレベル5:物理・技術的境界に向けて努力する極めて野心的なレベル)が設定されており、それらの組み合わせに応じて、2050年までの5年ごとの温室効果ガス排出量や一次エネルギー消費量、部門別最終エネルギー需要、発電構成及び費用変化を分析することが可能である。

## (2) 世界を対象とした将来シナリオの検討とその定量化

本サブテーマでは世界応用一般均衡モデルAIM/CGE (Asia-Pacific Integrated Model/Computable General Equilibrium)モデルを用いて、2005年から2100年までの全世界を対象とし、SSPを定量化した。気候に関連する情報はCGEの排出ガス情報を簡易気候モデルであるMAGICC(Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change)に入力して得た。シナリオには、社会経済条件の違いと気候緩和のレベルの違いを考慮したマトリクスを想定した。

### 1) モデルの概要

AIM/CGEモデルは生産、消費、投資、貿易活動が各種生産要素、財等の価格を所与とした関数を用いて記述されている。生産活動は利潤最大化を前提としており、中間財、生産要素を投入する。生産活動により発生する所得(雇用者報酬、営業余剰、生産にかかる税)は代表的家計が受け取る。家計は所得の一部を貯蓄に回し、所得から貯蓄を引いた可処分所得を所与として消費を行う。消費財の支出割合は効用最大化のもと決定される。次に最終消費は家計消費、資本形成で構成される。ここでは家計消費と政府消費を集約して代表的家計消費として表している。資本形成は固定係数の消費とし、財間の消費割合は変化しないとした。貯蓄と投資がバランスするため貯蓄性向は資本形成に応じて内生的に決定するとした。ここで、新たに蓄積される資本は次の年の新規資本として稼働し、生産要素の一つとなる。本モデルは1年単位の逐次型動学モデルである。旧資本と新規資本が区別されており、資本の情報が次年へ更新される。

### 2) シナリオの概要

シナリオのフレームワークは2つの次元を考慮する。第一の次元は社会経済的想定(SSP)、第二の次元は気候条件であり放射強制力であらわされる。社会経済条件は人口、経済、エネルギー、農業、土地利用や大気汚染物質の除去に関する想定が5つのシナリオ間で区別される。

SSPは、縦軸、横軸にそれぞれ緩和策の困難度と適応策の困難度を取り、SSP1からSSP5までの5つの将来像が配置されている(図3)。「緩和策に対する困難度」とは、GHG排出量のドライビングフォースの大きさ(人口増減、経済成長など)と緩和策を行うための能力で定義される。一方、「適応策に対する困難度」は以下のような3つの条件から定義される。第一に気候変動影響に対する暴露の大きさ(沿岸域の人口の増減など)、第二に気候変動に対する社会経済システムや生態系の感度(沿岸域に居住する人の所得の大きさなど)、第三に適応策を実施するための能力(沿岸施設や沿岸域の堤防を建設する資金的、人的資源など)、である。

SSPでは5つの代表的な将来像が想定され、それぞれその将来像を表すような名前が付けられている。SSP1; Sustainability(持続可能)、SSP2; Middle of the road(中庸)、SSP3; Regional Rivalry(地域対立)、SSP4; Inequality(格差)、SSP5; Fossil-fuel Development(化石燃料依存型発展)であり、それぞれの世界観にあわせてストーリーラインが作られている。

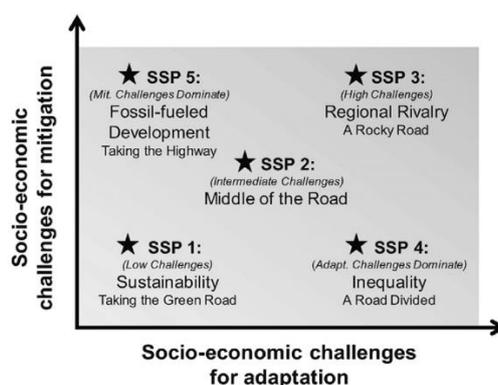


図3 SSPの将来像に関する2軸と各SSPの関係

### 3) 過去の検証手法

本サブテーマでは、AIM/CGEモデルを用いた過去1981年から2005年までのシミュレーションも行った。CGEモデルの基礎データとなる社会会計表の利用可能性により、シミュレーションは古い年から将来に向けて実施するのではなく、2005年から2004年、2003年というように過去に向けて遡った。次にその結果を過去の統計値と比較し、その乖離について解析を行う。具体的には、二つの観点から乖離率を定義して解析を行うこととし、第一は、統計値と推計値の平均的な乖離に関する平均絶対誤差率(MAPE)、平方平均誤差率(RMSPE)を採用し、第二は、乖離の偏りが地域、年、指標などによって異なるのかどうかを検討するために回帰分析を行うものであり、統計値に対する統計値と推計値の比の対数を取り、その絶対値を回帰するものである。

### (3) 日本を対象とした2030年の温室効果ガス削減量の定量化

本サブテーマでは、2050年80%削減目標を踏まえた上で、2030年の温室効果ガス排出量に関する技術的・経済的側面からの詳細な評価を行うことで、わが国における温室効果ガス大幅削減に向けた方策を検討することを目的に、技術選択モデル及び応用一般均衡モデルを改良・開発した。また、将来の温室効果ガス排出量の推計に際し必要となる将来のマクロフレームを、即時に算定するツールの整備も実施した。

技術選択モデルとして、エネルギー技術の特性を精緻に反映することが可能なモデルであるAIM/Enduse [Japan]を用いた。AIM/Enduse [Japan]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、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。本モデルでは、日本全体を、一般電気事業者の供給区域におおよそ整合する10地域に分割し、地域別のエネルギー需給特性、再生可能エネルギーのポテンシャル等を考慮することが可能である。技術選択モデルの概要を図4に示す。主な入力パラメータはサービス需要、各種技術特性（効率・価格）、エネルギー価格、CO<sub>2</sub>価格であり、主な出力データは、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。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反映している点特徴である。

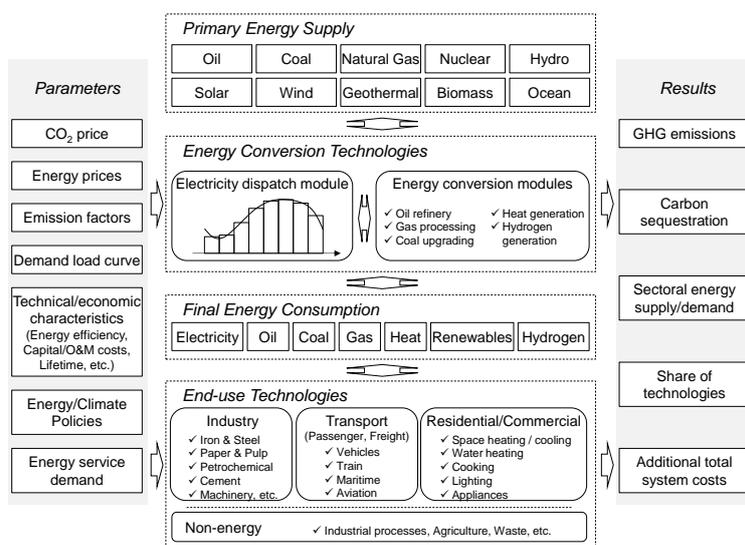


図4 日本技術選択モデル(AIM/Enduse [Japan])の概要

日本経済モデルは、1期を1年とした逐次均衡型の応用一般均衡モデルであり、国全体の粗投資は、モデルで計算された当該年までのGDP、資本と、想定される将来の経済成長率に基づいて計算され、前年の各部門の資本収益率の結果に基づいて各部門に配分を行う。家計は、所得から粗投資（貯蓄）を差し引いたものを、効用最大化に基づいて最終消費財を選好する。モデルでは、短期（1年）と長期（それ以上）について区分し、短期では技術の組み合わせが決まっており、各部門内で同一の技術（資本）によるエネルギーの代替は起こらないが、期を超えた活動については導入される投資・技術によってエネルギー効率改善や燃料代替が生じる。生産部門（産業、業務、運輸の一部）において省エネのための追加投資分が発生すると、その金額だけ翌年の生産投資は減少するが、家計（運輸の一部を含む）における追加投資については最終消費が変化するだけで生産投資に影響しない。なお、これまで、応用一般均衡モデルと技術選択モデルとは独立しており、技術選択モデルから算出されるエネルギー効率改善およびコストを経済モデルに与える一方通行となっていたが、本研究課題において技術選択モデルとの整合を内生的に取ることでできるようにモデル改良を実施した。

マクロフレーム算定ツールは、産業構造や資本形成などの経済勘定、人口構造や生活時間などの社会勘定、素材生産量などの物質勘定について、整合の取れた社会経済（マクロフレーム）の姿を描くことのできるツールであり、経済勘定においては、GDPや最終需要といったフロー指標に加え、人的資本（就業者数）及び人工資本（資本ストック）等のストック指標についても包含する。資本ストックについては、フローの資本形成との整合を確保する。部門分類は41部門である。社会勘定においては人口コホートや就労時間を与え、生産性を介することで経済勘定との整合を確保する。経済勘定と社会勘定との整合のもと、産業構造（業種別生産額）を算定する。さらに素材生産や業務床面積などエネルギー消費量の主たる活動量を算定する。本ツールは2015年公表の総務省産業連関表をもとに2011年を基準年とし、2030年と2050年を分析対象年とする。また、政策検討への対応可能性を重視して、パラメータの変更に伴い即時的に算定結果が出力されるようにした。

#### (4) ライフスタイル変化を考慮した家庭のエネルギー消費行動に関する研究

本サブテーマではライフスタイルと家庭のエネルギー消費行動の関係についてモデル化し、低炭素社会におけるエネルギーサービス需要量を、ライフスタイルの変化を考慮して定量化することを目的とし、家庭部門におけるエネルギーサービス需要を推計するモデル(家庭エネルギーサービス需要モデル)を開発した。家庭エネルギーサービス需要モデルは、世界全体の推計を行うブロックと日本の地域別推計を行うブロックから構成される。

##### 1) 世界を対象にした家庭部門のエネルギー消費量推計手法

世界を対象とした推計においては、まず基準年を2010年として2050年までの地域別のエネルギーサービス量の推計を行った。その推計結果とエネルギー機器の技術シナリオを用い、将来のエネルギー消費量を推計した。

モデルでは、世界を32地域に分類し、エネルギー種を8種類、サービス種を6種類設定した。2010年のエネルギー種別のエネルギー消費量は、最新のEnergy balancesの2010年のデータを32地域に集約するとともに、地域別エネルギー種別エネルギーサービス種別エネルギー消費量の情報を収集し、地域別エネルギー種別エネルギーサービス種別エネルギー消費割合を作成した。この消費割合とEnergy balancesを集約したエネルギー消費量から2010年の地域別エネルギーサービス種別エネルギー消費量を作成した。

エネルギー機器は、41種類設定した。それぞれの機器はサービス種、エネルギー種別にエネルギー強度により2種類設定し、エネルギー強度の小さい機器は先進国で利用され、エネルギー強度の大きい製品は発展途上国で利用されているものとした。2010年のエネルギー機器の分担率については、各国のサービス別の分担率が得られる場合はそれを利用し得られない場合は、機器普及率のデータや社会・経済的状况を考慮し、近隣地域の値を利用して設定した。将来のエネルギー機器の情報については、(1)全てのエネルギー機器のエネルギー強度が小さくなる、(2)基本的に電化が進む、すなわち電化機器の分担率が增大するとして想定した。

##### 2) 日本を対象にした家庭部門のエネルギー消費量及びCO<sub>2</sub>排出量推計手法

推計フローを図5に示す。まず、地域別の基準年のエネルギー消費状況を示すエネルギー消費マトリクスを作成する。それに対し人口・世帯数の変化、機器の効率及びシェアの変化、需要の変化に影響する住宅、気候、ライフスタイルの変化を考慮し、将来のエネルギー消費マトリクスを作成する。これに世帯数を乗じて将来のエネルギー消費量を推計する。またCO<sub>2</sub>排出係数のシナリオを用いて将来のCO<sub>2</sub>排出量を推計する。本研究では日本を10大地域×3都市階級の30地域に分割した。また、家庭部門で使用される主要なエネルギーとして電気、都市ガス、LPG、灯油の4種類を考え、主要な用途として暖房、冷房、給湯、厨房、照明、その他動力(以下、動力)の6種類を考える。熱供給やバイオマス利用等は極めてその量が少ないため、推計対象外とした。

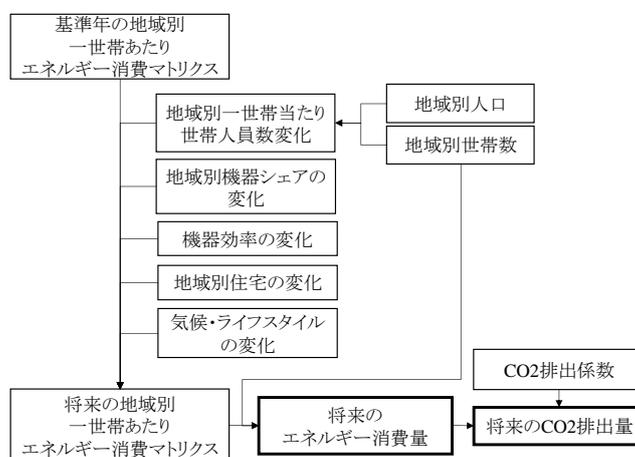


図5 推計フロー

#### (5) 社会におけるエネルギー集約素材の蓄積からみた将来シナリオの検討

本サブテーマでは、エネルギー集約素材である鉄鋼が社会にどの程度蓄積し、再利用可能かを分析し、2050年までの日本における素材生産の必要量について低炭素社会実現の観点から定量的に評価することを目的とし、素材ストック(財ストック)が提供するサービス需要から素材生産にかかわる二酸化炭素排出量までを推計するマテリアルストック・フローモデルを構築した。

マテリアルストック・フローモデルは、素材ストック(財ストック)が提供するサービス需要から素材生産にかかわる二酸化炭素排出量までを推計するモデルである。マテリアルストック・フローモデルは、次の3つのモジュールを内包し、社会経済指標の将来値および素材需要の削減を目的とする「需要対策シナリオ」、素材生産の地域偏在を決定する「生産分配シナリオ」を外生的に与えることにより、サービス需要量、その提供に必要な財ストック量(素材ストック量)、財生産量、素材需要量および素材生産量、二酸化炭素排出量を推計する。図6にマテリアルストック・フローモデルの全体図を示す。

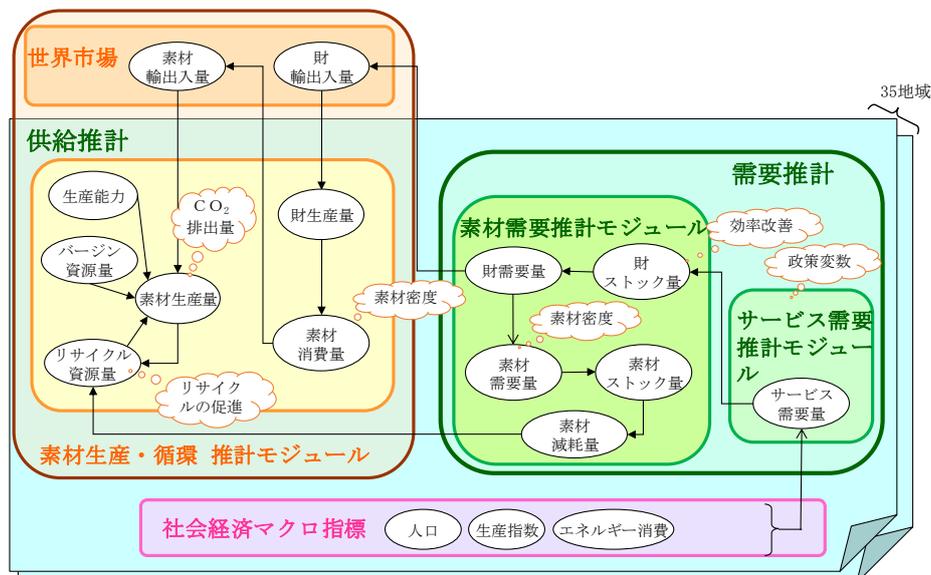


図6 マテリアルストック・フローモデルの全体図

サービス需要推計モジュールは、鉄鋼を主要な成分とする財が提供するサービスと社会経済マクロ指標との係わりを記述するモデルである。サービス需要量は、サービススケール指標とサービスレベル指標の積にて推計する。サービススケール指標とは、人口や生産指数などのマクロ社会経済指標であり、サービスレベル指標とは、一人あたり床面積や一人あたり輸送量などサービススケール指標あたりのサービス量のことである。

素材需要推計モジュールは、サービス需要(サービス需要推計モジュールの出力)をインプットとし、地域内のサービス需要を満たすために必要となる財ストック量と現存する財ストック量との関係から、財ストックの動態式により財需要量を算出し、その生産に要する鉄鋼需要量を推計する。つまり、ここでの財需要量とは、国内の財ストックへの追加量であり、輸出する財は含めない。

素材生産・循環推計モジュールは、素材需要推計モジュールで推計された各地域における鉄鋼需要量を合計して、世界全体の鉄鋼需要量、つまり、鉄鋼生産量とし、その生産量の地域偏在を推計する。鉄鋼や鉄鋼を含む財の輸出入および鉄鋼の生産技術や鉄鋼生産量の決定要因とする製鋼法選択シナリオにより、各地域の製鋼法別鉄鋼生産量、および二酸化炭素排出量を推計する。

分析にあたっては、将来シナリオとして、鉄鋼需要を削減するための対策(サービス需要の管理、財ストックの効率改善、技術進歩)の導入量に応じて複数のケースを設定した需要対策シナリオと、財の貿易、転炉鋼要求量、及び製鋼法選択からなる生産分配シナリオを設定した。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 2050年を対象としたわが国の長期目標の実現に向けた排出削減経路の検討

マクロ経済モデルを用いた日本のエネルギーサービス及び電力需要の将来推計では、生産性が向上を続けるHigh TFPシナリオにおいても、GDPは2030年代にピークアウトし、2100年には1990年代の水準まで縮小することが明らかとなった。GDPが縮小する主な原因は労働人口の減少であり、労働人口は2014～2100年の期間に6,390万人から2,080万人まで減少することが影響している。このことから、少子高齢化に伴う労働力の減少を生産性の向上で補うことは容易ではないことが示唆される。

素材需要分析モデルを用いた将来の素材需要量推計では、素材の消費強度(マクロ経済指標を固定したときの素材消費量; Material Consumption Intensity, MCI)が徐々に低下していることを意味し、過去から現在にかけて同程度の社会経済活動を維持するために必要となる素材量が減少している(効率的な素材利用が進んでいる)ことが明らかとなった。また、将来推計からは、GDPの縮小に伴って家計消費支出と総固定資本形成が縮小するため、素材内需はいずれも減少傾向を示すことがわかった。特に、MCIが低下するシナリオでは減少速度が大きく、2100年における粗鋼やセメントの内需は、過去の水準を大きく下回ることが予想された。

併せて、電力需要モデルを用いて、2011年3月～2015年10月の節電効果を評価したところ、東日本大震災を契機として定着した節電による電力需要抑制効果は、動力については2.9～6.9%、電灯については2.6～9.0%、総電力需要では3.2～7.5%と推定された。また、節電効果の推定値に下方トレンドが見られないことから、震災後の節電行動は定着していると考えられる。

バックキャストモデルを用いて、原子力及びCCSの利用可能性に制約があると想定して80%削減目標の実現可能性を分析したところ、原子力発電に関する想定は、主に電力部門からのCO<sub>2</sub>排出量に影響し、CCSに関する

る想定は、主に産業部門のCO<sub>2</sub>排出量に影響し、原子力発電とCCSともに制約がかかる場合には、この削減目標の達成は必ずしも確実ではないことが明らかとなった。

つぎに、技術選択モデルにより長期排出削減経路実現に向けた対策・施策を分析した。分析にあたっては、温室効果削減に大きく寄与する技術の導入に際しての不確実性を考慮するため、技術制約を伴わない標準ケース、原子力再稼働が行われない原子力ゼロケースに加えて、炭素隔離貯留（CCS（による貯留量が半分の100Mt-CO<sub>2</sub>となる、CCS半減ケースについて推計を実施した。結果より、2050年の温室効果ガス排出量は、全てのケースにおいて2050年80%減が達成されることが明らかとなった（図7）。2050年時点における排出源は、産業部門が約4割を占めており、残りは運輸部門、エネルギー起源CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスが多くを占める。電力の低炭素化により、大幅なCO<sub>2</sub>削減が可能となる家庭・業務部門、旅客輸送部門と比較して、産業部門では、高熱需要に対して化石燃料が消費されることが、特に産業部門においてCO<sub>2</sub>排出量が多く残る要因である。また、貨物輸送部門においても、特に大型の長距離輸送車は電気自動車への置き換えが困難であるため、化石燃料の燃焼に伴い、2050年においてもCO<sub>2</sub>排出が残る結果となっている。

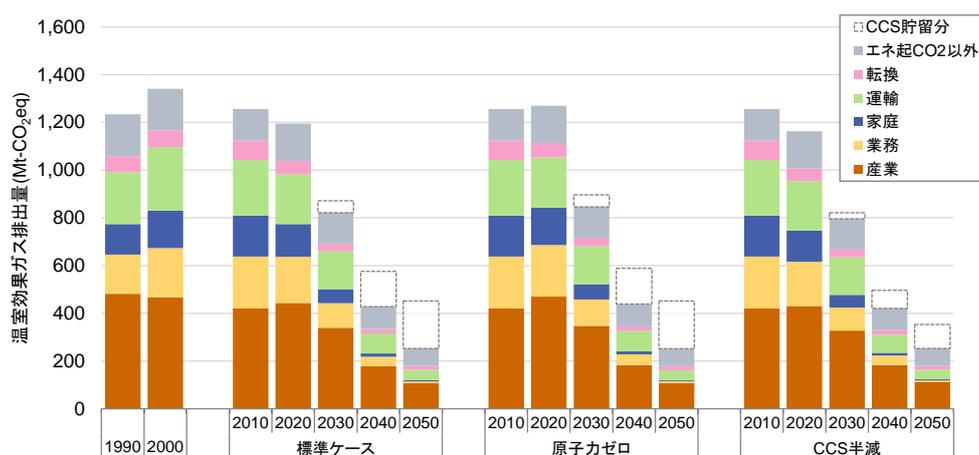


図7 温室効果ガス排出量の推計結果

発電部門における長期大幅削減シナリオの実現可能性を分析した結果、将来の新設電源としてはCCS併設ガス火力発電と原子力発電所及びCCS併設石炭火力が同程度導入される。ガス火力も含め、CCSを併設しない(Unabated)火力発電は2050年には利用されず、寿命(40年)以内のCCSを併設しない火力発電は、2050年には遊休設備となり、その設備容量は総設備容量の5-10%となることが明らかとなった。

また、CO<sub>2</sub>排出制約を課すことによって太陽光発電及び風力発電の大幅導入が進み、おおむね発電電力量の過半に達する。これについて、電力システムの安定性の観点から分析を行ったところ、風力発電については、発電比率が増加するに従い、解列率および蓄電池各対策の導入量が増加することで安定性を確保できることが明らかとなった。また、太陽光発電の場合には、太陽光発電比率が10%を超えた程度から出力抑制や蓄電池の導入が実施されることが明らかとなった。

長期排出削減経路の簡易分析ツール(低炭素ナビ)については、「2013年以降の対策・施策に関する報告書(地球温暖化対策の選択肢の原案について)」に基づいてツールを構築して試算を行うとともに、社会人及び低炭素社会構築の中核となると期待される次世代(大学生等)を対象にしたエネルギー問題に関するワークショップにおいて、低炭素ナビを活用した長期的な低炭素シナリオ検討について試行し、有効性を検討した。

## (2) 世界を対象とした将来シナリオの検討とその定量化

AIM/CGEを用いてSSPを定量化した結果、CO<sub>2</sub>排出量については2100年ではSSP5が最も大きく126GtCO<sub>2</sub>、ついでSSP2、SSP3がそれぞれ74GtCO<sub>2</sub>/年、86GtCO<sub>2</sub>/年となり、SSP4、SSP1が33GtCO<sub>2</sub>/年、26GtCO<sub>2</sub>/年となった。また、CH<sub>4</sub>については、2100年ではSSP3、SSP2、SSP5の順で大きく、それぞれ、657、616、605MtCH<sub>4</sub>/年となり、SSP1、SSP4はそれぞれ438、503MtCH<sub>4</sub>/年であり、CO<sub>2</sub>と比べるとSSP間の幅は小さいことがわかった。N<sub>2</sub>OについてもCH<sub>4</sub>と似たようなことが言える。

気候緩和費用として、GDP損失率、炭素価格に着目すると(図8)、GDP損失率、炭素価格はともにSSP間によって大きく異なり、GDP損失率はSSP1、SSP4は小さく、SSP3、SSP5で大きくなり、SSP2はその間を取ることがわかった。炭素価格はGDP損失と似たような傾向を示し、SSP間の順位もGDP損失と同じとなる。2.6Wケースの2100年についてみると、SSP1、SSP4は500-600\$/tCO<sub>2</sub>であるのに対して、SSP2、SSP5は2000\$/tCO<sub>2</sub>近くとなることが明らかとなった。

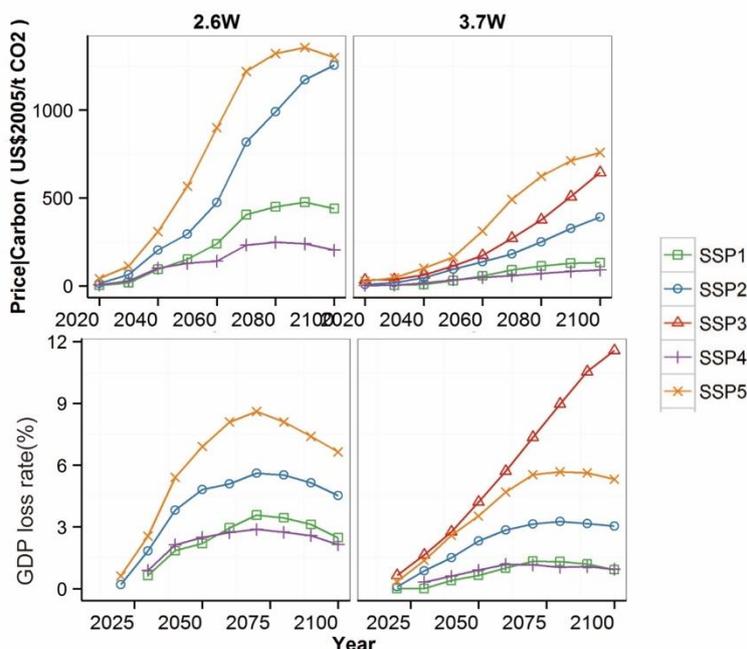


図8 緩和費用と炭素価格(左から2.6W、3.7Wケース)

モデルの検証については、世界全体で見ると一次エネルギー供給量についてのモデル分析と統計値との乖離は約10%となり、最終消費全体で見ると15%程度の乖離となることがわかった。地域別に見ると、一次エネルギー供給量については、総量、バイオマス、石炭などの乖離率は地域別の中央値、平均値も40%以下でありそれほど大きな値を示さないが、天然ガスは平均値が310%と非常に大きな値を示すことがわかった。

### (3) 日本を対象とした2030年の温室効果ガス削減量の定量化

日本技術選択モデルを用いて2030年までの温室効果ガス排出量を推計した結果、約束草案(2030年削減目標)の実現には需要部門における省エネルギーと電力の低炭素化が主要な対策となるとともに、原子力が低位となっても主に再生可能エネルギーの追加的な導入拡大により、約束草案に相当する排出削減は技術的に可能であることが示された(図9)。

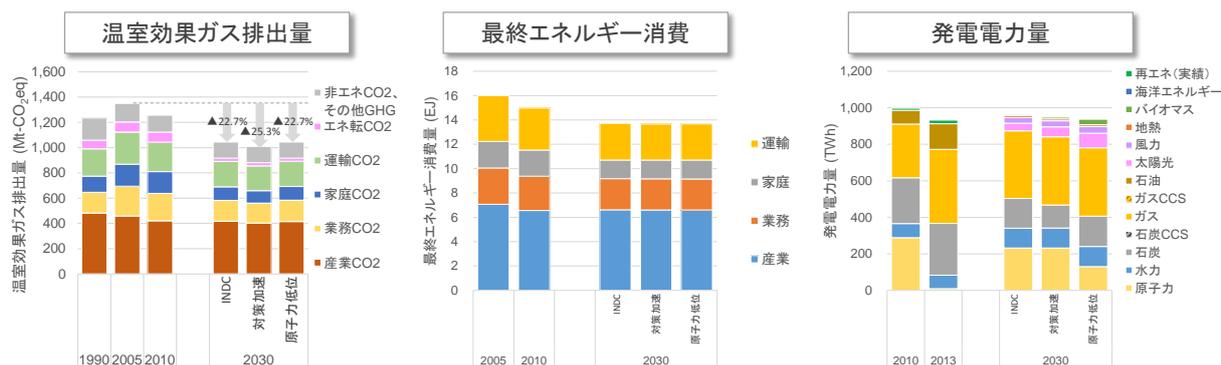


図9 日本技術選択モデルによる2030年までの推計結果

また、日本経済モデルを用いて2030年の経済活動への影響を評価した結果、なりゆきケースでは、2014-2030年の年平均経済成長率1.7%を実現するのに対して、2030年削減目標を達成する約束草案ケースでは、同期間の年平均経済成長率は1.6%となり、2030年のGDP総額への影響は、なりゆきケースの2030年GDPの1.4%に相当する結果となった。なお、中央環境審議会「2013年以降の対策・施策に関する報告書」の対策中位に相当するだけの温暖化対策が導入可能と仮定すると、2030年の経済への影響はなりゆきケースの2030年のGDPに対して1.1%となる。こうしたことから、追加費用の低い温暖化対策の選択肢を確保することで、経済活動への影響をより小さくすることが可能になることが示された。

これら2030年削減目標の分析を踏まえ、2050年80%削減に向けて中長期的に重要となる技術の明確化、および低炭素化に向けた方策の検討を行ったところ、2050年の排出量については約束草案達成時と同水準の

CO<sub>2</sub>価格が維持されるNDC延長ケースでは1990年比で62%の削減となり、約束草案にて示された対策の継続的な実施は有意義なものであることが示唆された。しかし、2050年に80%減とするためにはCO<sub>2</sub>価格を2030年の約3倍以上に相当する600 US\$/t-CO<sub>2</sub>を超える水準が必要となり、長期目標達成には約束草案を大きく上回る水準の削減努力が必要となることが明らかとなった。また、対策の中でも特に、継続的な省エネに加え、2050年までに電力をほぼ低炭素エネルギーに転換すること、および需要部門における低炭素エネルギーへの転換を大幅に進めることが主要な対策となることが明らかとなった。

以上に加えて、マクロフレーム算定ツールを用いて既往研究(脱温暖化2050、中央環境審議会2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会のマクロフレームWG)を踏まえて設定した、高成長シナリオ(A)と低成長シナリオ(B)と、輸出依存型(1)とサービス内需依存型(2)の組み合わせで4本のシナリオについて、2050年の素材生産量、業務床面積、貨物輸送量の試算を行い、結果の妥当性及び有効性を確認した。

#### (4) ライフスタイル変化を考慮した家庭のエネルギー消費行動に関する研究

世界を対象にして家庭部門のエネルギー消費量を推計したところ、世界の社会経済シナリオ(SSP)によりエネルギーサービス量は異なることが明らかとなった。具体的には、SSP5を想定したケースでは暖房、冷房、照明、その他サービスの伸びが大きくなるが、厨房サービスの伸びは小さくなった。国別に見ると、日本では2010年と比較して2050年の暖房のエネルギーサービス量は0.95倍となったが、中国では1.19倍となった。アジアではインフラの整備が進み2050年までの40年程度の間に着しい経済成長により様々なエネルギーサービスが発現することがわかったが、アフリカにおいてはさらに遅れて経済成長が進むことにより、アジア程のエネルギーサービスの発現は見られないことも明らかとなった。また、アジア等の発展途上国では、バイオマスから石炭や石油系燃料、電力へとエネルギーシフトが起きて、例えば、中国であれば化石燃料の消費量は0.58倍になることが分かった。

日本を対象にした家庭部門のエネルギー消費量推計を行った結果(図10)、機器効率とシェアを固定したケース(FIX)となりゆきでの効率改善及びシェア変化を想定したケース(BaU)を比較すると、特に2030年以降、機器効率及びシェアの変化により、灯油やガス機器の使用が減りエネルギー消費量の大幅な削減が期待できることがわかった。また、より低炭素な対策を積極的に導入するケース(LCS)との比較では、ライフスタイルの変化により、エネルギー種別に2030年で約5%、2050年で約10%のエネルギー消費量が削減できることが分かった。

また、家庭部門のCO<sub>2</sub>排出量を分析した結果、2050年80%削減の達成には、暖房、給湯、調理などにおいて利用されているガスや灯油を電気に転換し、かつ電気の排出係数を大幅に削減することが重要であることが明らかとなった。

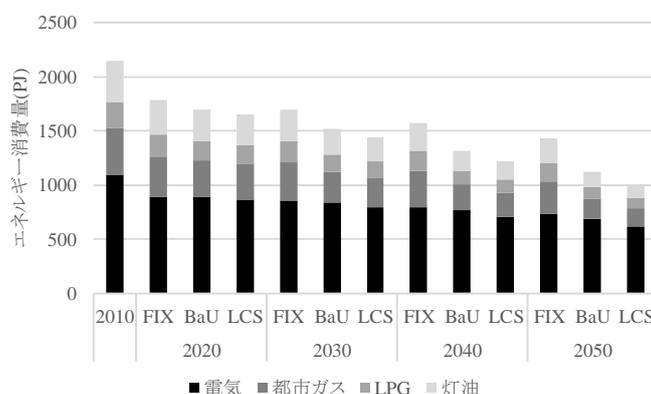


図10 エネルギー消費量

#### (5) 社会におけるエネルギー集約素材の蓄積からみた将来シナリオの検討

世界全体の将来の鉄鋼ストック量を分析した結果、今後見込まれるサービス需要量増加により、2050年には対2005年比で、なりゆきケースで2.8倍、対策最大導入ケースでは2.2倍となり、一人あたりで見ると2005年の3.1トン/人から、なりゆきケースでは2050年には6.0トン/人と、2005年での先進諸国の一人あたり鉄鋼ストック量の範囲の下限程度の値となることがわかった。一方、対策最大導入ケースでは4.7トン/人であり、求められるサービス需要量を78%の鉄鋼ストック量で供給可能となることが示された。

日本の鉄鋼ストック量については、なりゆきケースでは15.1トン/人、対策最大導入ケースでも緩やかに増加し続け2050年で12.9トン/人に達するが、なりゆきケースと比較して2050年で15%削減できることが明らかとなった。しかし、鉄鋼ストックの絶対量としては、ほぼ横ばいであり、2030年以降ゆるやかな減少となる(図11)。これは、サービス需要量が産業生産サービスで1.6倍となる以外はほぼ1.0倍程度であることが要因である。その内訳は、

機械類と建築物が減少するが、交通インフラは微増する。対策最大導入ケースでは、対2005年比で18%の削減であり、交通インフラ、建築物の減少が鉄鋼ストック量削減の大きな要因となっている。絶対量としては小さいが、削減率が高いのは旅客輸送機器であり、鉄鋼ストック量は対2005年比38%にまで減少する。

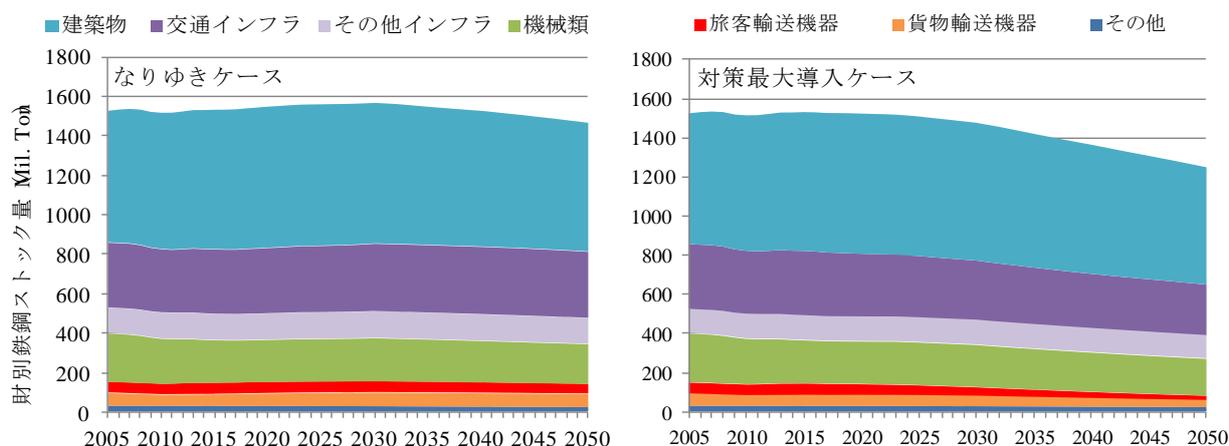


図11 日本の財別ストック量の推計値

粗鋼生産量を分析した結果、想定するケースにより幅はあるが、世界全体での2050年の粗鋼生産量の範囲は17.7～25.3億トンとなり、なりゆきケースでは対2005年比2.2倍に増加するが、対策最大導入ケースでは鉄鋼需要量は2015年以降、ほぼ横ばいとなり17.7億トンに留まることが明らかとなった。日本についての鉄鋼需要量の分析より、日本では2020～2025年の間にピークを迎え、2035年に向けて減少したのち横ばいとなることが明らかとなった。2020年代前半に鉄鋼需要量が増加するのは建築物が原因で、1990年前後に建築された建築物が大量に減耗するため、財ストック量維持のための需要が増加するものである。それ以後は、人口の減少に伴い財ストック量の需要も減少するため、ストック整備のための需要も減少する。2045年以降、再び建築物需要の増加が発生し、鉄鋼需要の減少を抑制していることが明らかとなった。

これらの分析結果をもとに鉄鋼部門からのCO<sub>2</sub>排出量を評価したところ、世界全体では2050年の粗鋼生産量は2005年と比較して増加するが、電炉鋼比率の増加により最大28%の増加に留まり、ほぼ2010年の水準となることがわかった。このことから、2010年以降のCO<sub>2</sub>排出量は、電炉への転換の対策をとることでほぼ増加を抑制できることになることが示唆された。老廃スクラップの回収率を100%と想定した場合には32%削減となり、財ストックの効率改善やハイテンの導入といった対策によるCO<sub>2</sub>削減効果を定量的に示した。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

将来マクロフレームの検討に当たって重要な要素となるGDP等の社会経済条件について、人口等の見通しをもとに、これまでのトレンドに節電行動の定着などの新たな需要側における変化も加味しながら分析することが可能となることが示唆された。また、これまで分析にあたって日本経済モデルと技術選択モデルを独立に用いていたが、本研究を通じて実施した改良により、両モデル間の整合を内生的に取ることができるようになった。このほか、本研究で開発した部門別モデル等も統合することで、わが国の長期目標達成のためにどのような対策を、いつまでに実施していくことが重要か、また、温暖化対策実施時の経済影響の程度についての議論に資する分析が可能となった。特に発電部門については、発電所の立地、電源運用及び系統安定化策の効果も加味して将来の電力供給のあり方について分析することが可能となることが示唆されたほか、家庭部門及び鉄鋼部門について世界の動向も視野に入れた需給両面から多角的に分析できるようになり、2030年あるいは2050年の削減目標の達成に必要な事項を明らかにすることができるようになった。

世界の分析については、今後の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の報告書である第6次評価報告書や1.5℃特別報告書で分野横断的に使われ主要な役割を果たすだけでなく、広義の持続可能性、生物多様性を検討する際のシナリオのベースとなることが期待される新たな社会経済シナリオである「共通社会経済経路(SSP; Shared Socioeconomic Pathways)」を開発できたとともに、これまで十分ではなかった統合評価モデルによる過去の検証を行ったものである。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

本研究において開発した統合評価モデル群(技術選択モデル、日本経済モデル、多地域電源計画モデル、マ

クロ経済モデルなど)の結果から明らかになった、将来の社会経済条件の見通しや長期排出量削減経路の分析結果は、環境省、特に地球環境局総務課低炭素社会推進室に対して提示し、中長期の温暖化対策にかかる政策立案のための定量的な基礎情報として貢献してきた。また、特に技術選択モデル、日本経済モデル及びマテリアルストック・フローモデルの成果については、中央環境審議会の2020年以降の地球温暖化対策検討小委員会の下に組織された技術ワーキンググループやマクロフレームワーキング等へ提供することで、将来の低炭素社会に向けた道筋や排出経路のあり方についての議論へ貢献した。

また、中央環境審議会地球環境部会2020年以降の地球温暖化対策検討小委員会・産業構造審議会産業技術環境分科会地球環境小委員会約束草案検討ワーキンググループ合同会合、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等へ委員として参画したほか、内閣府原子力委員会定例会議に参画し、わが国の約束草案のあり方やその実現のためのシナリオについての議論へ貢献するなど、政府審議会における委員等としての活動を通じて、環境政策の推進に貢献してきた。

開発したモデルのアジア主要国の研究者に対するトレーニングを通じた移転や環境省地球環境局国際地球温暖化対策室が開催した気候変動に関する日印政策研究ワークショップでの発表などを通じて、わが国のみならずアジアにおける環境政策の底上げ、気候変動緩和策の実現にも貢献している。加えて、低炭素ナビについては、安倍総理訪英において2014年5月1日に発表された「気候変動とエネルギー協力に関する日英共同声明」の中で「2050パスウェイ・カリキュレーターの普及に関し(中略)さらなる協力と情報共有の範囲を拡大する」とされたことを受けての開発であり、わが国のみならず英国との関係性を踏まえた環境政策の推進へ貢献した。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

今後、2030年の削減目標(約束草案)のさらなる深掘りや2040年の削減目標検討が見込まれる中では、本研究において開発した統合評価モデル群を活用することによって、将来の社会経済条件の見通しや長期排出量削減経路の分析結果が提供できるほか、ライフスタイル変化も踏まえた分析を活用することで国民運動支援に役立てられるなど、長期的にわが国が低炭素社会に移行するために必要となる中長期の温暖化対策にかかる政策立案のための定量的な基礎情報を提供できるものと考えられる。

SSPをベースとしたIPCC報告書は国際的な気候政策への重要なインプットとなり、将来的に本研究成果は環境政策に大きく貢献できると期待されるほか、国際共同研究(DDPP等)を活用することでわが国と各国のシナリオ比較が可能となり、温室効果ガス削減に関する長期戦略の検討等に際して活用することが可能であると考えられる。

また、本研究で開発したマクロフレーム算定ツールや低炭素ナビは、統合評価モデル群と比較して簡易ではあるが簡便に将来のマクロフレーム等を推計することが可能であるため、迅速性が求められる環境政策の検討場面に於いて有効なツールになると考えられる。

## 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) 藤森真一郎、甲斐沼美紀子、増井利彦、長谷川知子、戴瀚程: 土木学会論文集 G(環境), 70 (5), I\_137-I\_146 (2014)  
「エネルギーサービス需要低減の価値: 統合評価モデルを用いた気候緩和シナリオによる定量化」
- 2) Fujimori S., Hasegawa T., Masui T., Takahashi K.: Food Security, 6 (5), 685-699 (2014)  
“Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions”
- 3) Fujimori S., Kainuma M., Masui T., Hasegawa T., Dai H.: Energy policy, 75, 379-391 (2014)  
“The effectiveness of energy service demand reduction: A scenario analysis of global climate change mitigation”
- 4) Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y.: Energy Economics, 48, 306-315 (2015)  
“Gains from emission trading under multiple stabilization targets and technological constraints”
- 5) Fujimori S., Hasegawa T., Masui T. (2014) EMF30 SLCF - AQ AIM/CGE implementation. EMF30.2 Working Group Meeting "Non-Kyoto Forcing, Bio-Energy, Land use & Air Quality Considerations in Global Energy and Climate Policy Scenarios"
- 6) Hasegawa T., Fujimori S., Takahashi K., Masui T.: Environmental Research Letters, 10 (1), 014010-014017 (2015)  
“Scenarios for the risk of hunger in the twenty-first century using Shared Socioeconomic Pathways”

- 7) 長谷川知子、藤森真一郎、高橋潔、増井利彦: 土木学会論文集 G(環境), 70 (5), I\_1-I\_12 (2014)  
「共通社会経済シナリオSSPを用いた飢餓リスクに関する将来シナリオの開発」
- 8) 長谷川知子、大沢遼平、五味馨、松岡譲: 土木学会論文集 G(環境), 70 (5), I\_189-I\_199 (2014)  
「インドネシア温室効果ガス排出削減目標の達成可能性に関する検討: 農業・土地利用変化部門」
- 9) 河瀬玲奈、松岡譲: 土木学会論文集 G(環境), 70(6), II\_239-II\_247 (2014)  
「2050年における世界の鉄鋼部門からのCO<sub>2</sub>排出量削減ポテンシャルの推計」
- 10) 大城賢、増井利彦: エネルギー・資源, 35, 4, 31-39 (2014)  
「わが国を対象とした多地域エネルギー技術選択モデルによる2050年までの温室効果ガス削減シナリオ分析」
- 11) 大城賢、増井利彦: 土木学会論文集 G(環境), 70, 6, II\_207-II\_215 (2014)  
「低炭素エネルギー技術の不確実性を考慮したわが国の長期温室効果ガス削減シナリオ分析」
- 12) 安田貴徳, 五味馨, 松岡譲: 環境衛生工学研究, Vol.28, No.3, 166-1169(2014)  
「アジアにおける低炭素地域開発の共便益に関する基礎的研究」
- 13) 金森有子, 有賀敏典, 松橋啓介: 都市計画論文集, 50 (3), 1017-1024, 2015  
「空き家率の要因分析と将来推計」
- 14) Smith S., Clarke L., Edmonds J., Kejun J., Kriegler E., Masui T., Riahi K., Shukla P., Tavoni M., Vuuren D., Weyant J.: Nature Climate Change, 5, 391-391, 2015  
“Long history of IAM comparisons”
- 15) 石河正寛, 松橋啓介, 金森有子: 都市計画論文集, 50 (3), 838-843, 2015  
「世帯規模別建て方別世帯数の都道府県別将来推計とエネルギー消費に及ぼす影響」
- 16) Hasegawa T., Fujimori S., Shin Y., Tanaka A., Takahashi K., Masui T.: Environmental Science & Technology, 49 (12), 7245-7253, 2015  
“Consequence of Climate Mitigation on the Risk of Hunger”
- 17) Hak M., Hasegawa T., Matsuoka Y.: J. Global Environ. Eng., 71 (5), 165-176, 2015  
“An assessment of GHG emissions and mitigation potential from Agriculture, Forestry and Other Land-Use in Cambodia”
- 18) 藤森真一郎, 増井利彦, 松岡譲, 戴瀚程: 土木学会論文集G(環境), 71 (5), I\_153-I\_164, 2015  
「統合評価モデルAIM/CGEを用いた過去のエネルギー消費量の推計とモデル検証」
- 19) 河瀬玲奈、松岡譲: 土木学会論文集G(環境), 71(5), I\_383-I\_391, 2015  
「世界における生産分配を考慮した本の鉄鋼生産量の推計」
- 20) 藤森真一郎, 長谷川知子, 増井利彦, 高橋潔, シルバエランディエゴ, 戴瀚程, 脇岡靖明, 甲斐沼美紀子: 土木学会論文集G(環境), 71 (6), II\_217-II\_228, 2015  
「AIMによる新社会経済シナリオSSPの定量化とそのシナリオの特徴」
- 21) Oshiro K. and 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”
- 22) Silva D. H., Dai H., Fujimori S., Masui T.: Energy Policy, 91, 75-86, 2016  
“Global assessment of onshore wind power resources considering the distance to urban areas”
- 23) Hasegawa T., Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y.: Journal of Cleaner Production, 114, 233-242, 2016  
“Introducing detailed land-based mitigation measures into a computable general equilibrium model”
- 24) Dai H., Xie X., Xie Y., Liu J., Masui T.: Applied energy, 162, 435-449, 2016  
“Green growth: The economic impacts of large-scale renewable energy development in China”
- 25) Beibei Cheng, Dai H., Peng Wang, Xie Y., Li Chen, Daiqing Zhao, Masui T.: Energy Policy, 88, 515-527, 2016  
“Impacts of low-carbon power policy on carbon mitigation in Guangdong Province, China”
- 26) Mittal S., Dai H., Fujimori S., Masui T.: Applied Energy, in press, 2016  
“Bridging greenhouse gas emissions and renewable energy deployment target: Comparative assessment of China and India”
- 27) Rui Wu, Dai H., Yong Geng, Xie Y., Masui T., Xu Tian: Applied Energy(2016)  
“Achieving China’s INDC through carbon cap-and-trade: Insights from Shanghai”
- 28) Fujimori S., Dai H., Masui T., Matsuoka Y.: Energy, 114, 1, 293-301(2016)  
“Global energy model hindcasting”

- 29) 藤森真一郎, 長谷川知子, 高橋潔, 増井利彦, 滝見真穂: 土木学会論文集G(環境), 72, 5, I\_223-I\_231 (2016)  
「パリ協定の短中期的排出目標と長期機構安定化目標における含意」
- 30) Fujimori S., Su X., Liu J., Hasegawa T., Takahashi K., Masui T., Takimi M.: SpringerPlus, 5, 1620 (2016)  
“Implication of Paris Agreement in the context of long-term climate mitigation goals”
- 31) Fujimori S., Kubota I., Dai H., Takahashi K., Hasegawa T., Liu J., Hijioka Y., Masui T., Takimi M.: Environmental Research Letters, 11, 10400(2016)  
“Will international emissions trading help achieve the objectives of the Paris Agreement?”
- 32) Liu J., Fujimori S., Masui T.: Environmental Research Letters, 11, 11, 114004(2016)  
“Temporal and spatial distribution of global mitigation cost: INDCs and equity”
- 33) Rao S., Klimont Z., Leita J., Riahi K., Dingenen R., Reis L. A., Calvin K., Dentener F., Drouet L., Fujimori S., Harmsen M., Luderer G., Heyes C., Streffer J., Tavoni M., Vuuren D.P.: Environmental Research Letters, 11, 12, 124013(2016)  
“A multi-model assessment of the co-benefits of climate mitigation for global air quality”
- 34) Oshiro K., Kainuma M., and Masui T.: Climate Policy, 16(sup1), S63-S77 (2016)  
“Assessing decarbonization pathways and their implications for energy security policies in Japan”
- 35) Shiraki H., Nakamura S., Ashina S., and Honjo K.: Energy, 114, 478-491 (2016)  
“Estimating the Hourly Electricity Profile of Japanese Households: Coupling of Engineering and Statistical Methods”
- 36) Hasegawa T., Fujimori S., Boer R., Immanuel G.S., Masui T.: sustainability, 8, 1283-1294(2016)  
“Land-Based Mitigation Strategies under the Mid-Term Carbon Reduction Targets in Indonesia”
- 37) Fujimori S., Hasegawa T., Masui T., Takahashi K., Herran D.S., Dai H., Hijioka Y., Kainuma M.: Global Environmental Change, 42, 268-283(2017)  
“SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways”
- 38) Vuurena D.P., Riahi K., Calvin K., Dellink R., Emmerling J., Fujimori S., KC S., Kriegler E., O’Neill B.: Global Environmental Change, 42, 148-152(2017)  
“The Shared Socio-economic Pathways: Trajectories for human development and global environmental change”
- 39) Kriegler E., Bauer N., Humpenoder F., Leimbach M., Streffer J., Baumstark L., Bodirsky B.L., Hilaire J., Klein D., Mouratiadou I., Weindl I., Bertram C., Dietrich J.-P., Luderer G., Pehl M., Pietzcker R., Piontek F., Lotze-Campen H., Biewald A., Bonsch M., Giannousakis A., Kreidenweis U., Muller C., Rolinski S., Schultes A., Schwanitz J., Stevanovic M., Calvin K., Emmerling J., Fujimori S., Edenhofer O.: Global Environmental Change, 42, 297-315(2017)  
“Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century”
- 40) Bauer N., Calvin K., Emmerling J., Fricko O., Fujimori S., Hilaire J., Eom J., Krey V., Kriegler E., Mouratiadou I., Boer H.S., Berg M., Carrara S., Daioglou V., Drouet L., Edmonds J. E., Gernaat D., Havlik P., Johnson N., Klein D., Kyle P., Marangoni G., Masui T., Pietzcker R. C., Strubegger M., Wise M., Riahi K., Vuuren D.P.: Global Environmental Change, 42, 316-330(2017)  
“Shared Socio-Economic Pathways of the Energy Sector &#8211; Quantifying the Narratives”
- 41) Riahi K., Vuuren D.P., Kriegler E., Edmonds J., O’Neill B.C., Fujimori S., Bauer N., Calvin K., Dellink R., Fricko O., Lutz W., Popp A., Cuaresma J.C., KC S., Leimbach M., Jiang L., Kram T., Rao S., Emmerling J., Ebi K., Hasegawa T., Havlik P., Humpenoder F., Silva L.A., Smith S., Stehfest E., Bosetti V., Eom J., Gernaat D., Masui T., Rogelj J., Streffer J., Drouet L., Krey V., Luderer G., Harmsen M., Takahashi K., Baumstark L., Doelman J.C., Kainuma M., Klimont Z., Marangoni G., Lotze-Campen H., Obersteiner M., Tabeau A., Tavoni M.: Global Environmental Change, 42, 153-168(2017)  
“The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview”

- 42) Popp A., Calvin K., Fujimori S., Havlik P., Humpenoder F., Stehfest E., Bodirsky B.L., Dietrich J.P., Doelmann J.C., Gusti M., Hasegawa T., Kyle P., Obersteiner M., Tabeau A., Takahashi K., Valin H., Waldhoff S., Weindl I., Wise M., Kriegler E., Lotze-Campen H., Fricko O., Riahi K., Vuuren D.P.: Global Environmental Change, 42, 331-345(2017)  
“Land-use futures in the shared socio-economic pathways”
- 43) Rao S., Klimont Z., Smith S.J., Dingenen R., Dentener F., Bouwman L., Riahi K., Amann M., Bodirsky B.L., Vuuren D.P., Reis L.A., Calvin K., Drouet L., Fricko O., Fujimori S., Gernaat D., Havlik P., Harmsen M., Hasegawa T., Heyes C., Hilaire J., Luderer G., Masui T., Stehfest E., Streffler J., Sluis S., Tavoni M.: Global Environmental Change, 42, 346-358 (2017)  
“Land-use futures in the shared socio-economic pathways”
- 44) Edelenbosch O.Y., Kermeli K., Crijns-Graus W., Worrell E., Bibas R., Fais B., Fujimori S., Kyle P., Sano F., Vuuren D.P.: Energy, 122, 701-710(2017)  
“Comparing projections of industrial energy demand and greenhouse gas emissions in long-term energy models”

<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。

(2)主な口頭発表(学会等)

- 1) Asayama Y: 第42回環境システム研究論文発表会(2014)  
“Toward the pledge and sustainable implementation of Thailand NAMAs: Analysis of barriers to energy efficiency in designated buildings”
- 2) 芦名秀一, 白木裕斗: 第33回エネルギー・資源学会研究発表会(2014)  
「多地域電源計画モデルを用いた2050年までのわが国電力部門における低炭素化シナリオの検討」
- 3) Ashina S.: The 12th Workshop on GHG Inventories in Asia (WGIA12) (2014)  
“Roles of GHG Inventories at Regional or City Level for Developing Future GHG Emission/Removal Projection”
- 4) 芦名秀一: 低炭素社会は実現できるか? DDPP(Deep Decarbonization Pathways Project)報告セミナー及び環境省環境研究総合推進費 2-1402 報告会(2014)  
「日本における温室効果ガス排出量の大幅削減を実現する新たな社会発展の可能性」
- 5) 芦名秀一: 平成26年度エネルギー特別講座「エネルギーデータの作成と利用」(2014)  
「バックキャストの手法と実施例」
- 6) Ashina S.: RENKEI Programme Summer School at Tohoku University (2014)  
“Designing Low Carbon Society Scenarios”
- 7) 芦名秀一: 平成26年度宮城県環境シンポジウム (2014)  
「低炭素社会実現に向けた取り組みを考える: 私たちができることを考えるには?」
- 8) Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y.: 7th Annual Meeting of the IAMC 2014 (2014)  
“Development of a global computable general equilibrium model coupled with detailed energy end-use technology”
- 9) Fujimori S.: Workshop on Global Climate Risks Forum (2014)  
“AIM Global climate impact studies with CGE model and future perspectives”
- 10) Fujimori S., Hasegawa T., Takahashi K., Masui T.: 5th AgMIP Global Meeting (2015)  
“How to construct the SSPs - the AIM example”
- 11) Fujimori S., Hasegawa T., Masui T.: EMF30.2 Working Group Meeting "Non-Kyoto Forcing, Bio-Energy, Land use & Air Quality Considerations in Loba Energy and Climate Policy Scenarios" (2014)  
“EMF30 SLCF-AQ AIM/CGE implementation”
- 12) Hanaoka T.: Twenty-third Asia-Pacific Seminar on Climate Change (2014)  
“The latest scientific findings from UNEP GAP report and IPCC AR5 - 2°C global temperature change limit target and Global GHG reductions by 2050”
- 13) Hasegawa T., Fujimori S., Takahashi K., Masui T.: The 7th IAMC Annual meeting, Maryland, U.S. (2014)  
“Scenarios of risk of hunger for the 21st century using Shared Socioeconomic Pathways”

- 14) Hasegawa T., Fujimori S., Masui T.: EMF30.2 Working Group Meeting "Non-Kyoto Forcing, Bio-Energy, Land use & Air Quality Considerations in Loba Energy and Climate Policy Scenarios", Maryland, U.S.(2014)  
"Bioenergy Study Report: AIM modeling team"
- 15) Hasegawa T., Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y.: Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) 3rd Annual Meeting, Bogor, Indonesia (2014)  
"Introducing detailed land-based mitigation technologies into a CGE model: Application to Indonesia"
- 16) Hasegawa T., Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y.: The advancement and enhancement on Low Carbon Development Researches and Policies among Cambodia, Lao PDR, and Myanmar, Phnom Penh, Cambodia. (2015)  
"Introduction to AFOLU model and its application"
- 17) Kamei M: 国際都市計画シンポジウム 2014 (2014)"Urban Energy Systems and their increasing importance in global long-term energy strategies"
- 18) Kawase R. and Matsuoka Y.: The joint 11th International Society for Industrial Ecology (ISIE) Socio-Economic Metabolism Section Conference and the 4th ISIE Asia-Pacific conference, Melbourne, Australia(2014)  
"World Steel Stock and Demand towards 2050"
- 19) Kawase R. and Matsuoka Y.: The ICEEWM 2015: XIII International Conference on Environment, Energy and Waste Management, Zurich, Switzerland(2015)  
"Feasibility of Iron Scrap Recycling With Considering Demand-supply Balance"
- 20) 増井利彦: 国際比較日本研究センター研究会「環境政策における科学的知見と政策過程」(2014)  
「温暖化政策における政策決定と統合評価モデル」
- 21) 増井利彦: 環境科学会 2014 年会(2014)  
「これまでの目標設定の議論の方法について」
- 22) 増井利彦: 低炭素社会は実現できるか? DDPP(Deep Decarbonization Pathways Project)報告セミナー及び 環境省環境研究総合推進費 2-1402 報告会(2014)  
「本日のセミナーの概要」
- 23) 増井利彦: シンポジウム「気候変動に関する最新の科学的知見～IPCC 第 5 次統合報告書に向けて～」(2014)  
「IPCC第五次評価報告書における緩和策とアジアの低炭素社会実現」
- 24) Masui T.: MILES (Modeling and Informing Low Emission Strategies) kick-off meeting (2015)  
"Asia-Pacific Integrated Model"
- 25) 増井利彦: 気候ネットワーク・連続セミナー 温室効果ガス削減の可能性をさぐる ～新たな目標設定と政策の実施に向けて (2015)  
「日本における緩和策の経緯と-2°C目標に向けて」
- 26) 増井利彦: SAT テクノロジー・ショーケース 2015 (2015)  
「低炭素社会の作り方」
- 27) 増井利彦: 気候変動の科学とわたしたちの未来～IPCC と福島県民の対話～ (2015)  
「日本における気候変動対策」
- 28) 増井利彦: 龍谷大学環境サイエンスコース 地球温暖化防止講演会(2015)  
「低炭素社会の実現に向けて」
- 29) 増井利彦: 沖縄バイオ燃料国際セミナー (2015)  
「地球温暖化の現状～その影響と対策について～」
- 30) 大城賢、増井利彦: 環境経済・政策学会 2014 年大会(2014)  
「長期温室効果ガス排出削減シナリオにおける電力需給調整対策の役割」
- 31) 大城賢、伏間文悟、増井利彦: 環境科学会 2014 年会(2014)  
「輸送距離別将来交通需要を考慮した次世代自動車普及による長期CO2排出削減効果」
- 32) 大城賢、増井利彦: 土木学会第 42 回環境システム研究論文発表会(2014)  
「低炭素エネルギー技術の不確実性を考慮したわが国の長期温室効果ガス削減シナリオ分析」
- 33) 大城賢, 甲斐沼美紀子, 増井利彦, 日比野剛: 低炭素社会は実現できるか? DDPP(Deep Decarbonization Pathways Project)報告セミナー及び 環境省環境研究総合推進費 2-1402 報告会 (2014)

「日本のDDPs(Deep Decarbonization Pathways)の概要」

- 34) Silva D., Ashina S., Fujino J.: 31st Conference on Energy, Economy, and Environment (2015)  
“Disaggregation of electricity demand using downscaling methodology at global scale”
- 35) 増井利彦: 第24回東芝グループ環境展, 川崎, 2015  
「気候変動のリスクと機会」
- 36) Fujimori S., Hasegawa T., Masui T., Takahashi K.: 18th Annual Conference on Global Economic Analysis, Melbourne, Australia, 2015  
“Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions”
- 37) Fujimori S.: Climate Change Impacts & Integrated Assessment XXI (CCI/IA), Snowmass, Colorado, USA, 2015  
“Integrated assessment model with agricultural impact”
- 38) Masui T., Kainuma M., Fujita T.: Our common future under climate change, Paris, France (2015)  
“Development of scientific tools and their application to Asian countries toward low carbon society”
- 39) 増井利彦: キヤノングローバル戦略研究所 地球温暖化国内シンポジウム 日本の地球温暖化抑制の2050年ビジョンとその実現, 東京 (2015)  
「日本における2050年の温室効果ガス排出量を80%削減する経路の検討 –DDPPにおける日本の分析結果から–」
- 40) Kanamori Y.: 8th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting, Lucerne-Horw, Switzerland, 2015  
“Estimation of energy service demand and energy consumption in residential sector by 2050”
- 41) ハク マオ, 長谷川知子, 松岡 譲: 土木学会第23回地球環境シンポジウム, 札幌(2015)  
「An assessment of GHG emissions and mitigation potential from Agriculture, Forestry and Other Land-Use in Cambodia(カンボジアにおける農業・土地利用部門の温室効果ガス排出削減に関する検討)」
- 42) 藤森真一郎, 増井利彦, 松岡譲, 戴瀚程: 第23回地球環境シンポジウム, 札幌 (2015)  
「統合評価モデルAIM/CGEを用いた過去のエネルギー消費量の推計とモデル検証」
- 43) 明日香壽川, 上園昌武, 歌川学, 甲斐沼美紀子, 田村堅太郎, 樋屋治紀, 外岡豊, 西岡秀三, 朴勝俊, Pranab Jyoti BARUAH, 平田仁子, 増井利彦, 脇山尚子: 環境経済・政策学会2015年大会, 京都 (2015)  
「わが国における2030年を対象とした温室効果ガス排出削減目標の議論」
- 44) 金森有子, 有賀敏典, 松橋啓介: 環境科学会2015年会, 吹田(2015)  
「高齢期の住まい方に着目した高齢世帯のエネルギー消費量推計について」
- 45) 金森有子: 環境科学会2015年会, 吹田 (2015)  
「家庭からの環境負荷のモデル推計と持続可能なライフスタイルに関する研究」
- 46) Masui T.: Policy Research Workshop on How to enhance climate actions to meet a long-term goal, New Delhi, India, 2015  
“Assessment of INDCs toward 2 degree target based on AIM (Asia-Pacific Integrated Model)”
- 47) Masui T.: Policy Research Workshop on How to enhance climate actions to meet a long-term goal, New Delhi, India, 2015  
“Contribution of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) to INDCs in Asia”
- 48) Masui T.: Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) 4th Annual Meeting, Johor Bahru, Malaysia, 2015  
“Assessment of INDCs toward 2 degree target and discussion process in Japan”
- 49) 藤森真一郎: Horizon 2020 情報セミナー 2015: Horizon 2020 の2016-17 ワークプログラムと日欧連携, 東京 (2015)  
「国立環境研究所気候変動緩和策研究に関する事例」
- 50) 藤森真一郎, 長谷川知子, 増井利彦, 高橋潔, シルバエランディエゴ, 戴瀚程, 脇岡靖明, 甲斐沼美紀子: 第43回研究論文発表会, 札幌(2015)  
「AIMによる新社会経済シナリオSSPの定量化とそのシナリオの特徴」
- 51) 増井利彦: 環境文明21シンポジウム 気候変動時代をどう乗り越えていくか, 東京 (2015)

「企業活動と暮らしの今後？ ～緩和と適応～」

- 52) 大城賢:DDPP報告シンポジウム2 低炭素社会をどう実現するか?, 東京 (2015)  
「DDPPの結果」
- 53) 増井利彦:DDPP報告シンポジウム2:低炭素社会をどう実現するか?, 東京(2015)  
「はじめに+約束草案+COPIに向けた現状」
- 54) Masui T., Hijioka Y., Kim S.K., Lim J.H., Gao Q.: The 12th Tripartite Presidents Meeting among NIES, NIER and CRAES, Yeosu, Korea ,2015  
“Research Collaboration for Low Carbon Development in Three Countries”
- 55) 増井利彦:ブレCOPイベント「COP21に向けて」, 東京(2015)  
「INDCにおける緩和策、適応策の評価に向けて」
- 56) 芦名秀一:第13回環境研究シンポジウム 2050年の地球と暮らしー環境技術と地球規模課題ー, 東京 (2015)  
「2050年に向けて環境技術の評価する」
- 57) 増井利彦:環境文明21 経営者環境クラブ, 東京 (2015)  
「気候変動時代に向けた企業の取組の方向と可能性」
- 58) Fujimori S., Hasegawa T., Takahashi K., Masui T. :AgMIP Global Economic Modeling (GlobEcon) group, Phase 2 progress meeting , Potsdam, Germany ,2015  
“How to construct the SSPs? - the AIM example”
- 59) Fujimori S., Dai H., Masui T., Matsuoka Y. :IAMC meeting 2015 , Potsdam, Germany ,2015  
“Global Energy Model Hindcasting and Validation”
- 60) Hasegawa T., Fujimori S., Takahashi K., Yokohata T., Masui T. :IAMC meeting 2015, Potsdam, Germany, 2015  
“Economic implications of climate change on human health through undernourishment”
- 61) Fujimori S., Sands R., Hasegawa T.: EMF 33 meeting, Potsdam, Germany ,2015  
“EMF33 bioenergy supply scenario CGE implementation issues: FARM and AIM approaches”
- 62) 増井利彦, 芦名秀一, 藤森真一郎, 藤野純一, 大城賢, 日比野剛:第6回横幹連合コンファレンス, 名古屋(2015)  
「わが国における長期の温室効果ガス排出削減目標とその実現可能性」
- 63) Kawase R. and Matsuoka Y.: International Society for Industrial Ecology conference 2015, Taking Stock of Industrial Ecology, Guildford, United Kingdom(2015)  
“What is the Effective Countermeasure to Reduce Material Stock and Demand? – A Case Study of Steel –,”
- 64) Kawase R. and Matsuoka Y.: The 3rd Plano Cosmo and the 10th Society for Social Management Systems International Conference, Bandung, Indonesia (2015)  
“Global CO<sub>2</sub> emission reduction potential by scrap recycling”
- 65) Kawase R.: 18th International Conference on Environmental and Ecological Engineering, Paris, France (2016)  
“A Range of Steel Production in Japan towards 2050”
- 66) 本城慶多, 芦名秀一:エネルギー・資源学会第32回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2016)  
「状態空間モデルによる日本の粗鋼生産量の将来推計」
- 67) Masui T.: Carbon Emission Pathways for Bangladesh, Dhaka, Bangladesh , 2016  
“Integrated Assessment using AIM (Asia-Pacific Integrated Model) toward low carbon society”
- 68) 増井利彦:並木小学校スタイル科授業, つくば(2016)  
「並木小学校スタイル科 お仕事先生」
- 69) Hasegawa T., Fujimori S., Shin Y., Tanaka A., Takahashi K., Masui T. :, CESM 2016 Winter Working Group Meetings, Boulder , USA, 2016  
“Consequence of Climate Mitigation on the Risk of Hunger”
- 70) Kawase R.: 18th International Conference on Environmental Systems Science and Engineering, Paris, France (2016)  
“Estimation of World Steel Production by Process”
- 71) 増井利彦:経営者「環境力」クラブ 2016 年度第1回会合(2016)  
「パリ協定と日本の排出削減」

- 72) 増井利彦: 環境基礎講座(2016)  
「パリ協定と日本の取り組み」
- 73) Masui T.: NIES and ITRI Workshop on AIM-Taiwan, (2016)  
“Introduction of AIM, Asia-Pacific Integrated Model”
- 74) Masui T.: NIES and ITRI Workshop on AIM-Taiwan, (2016)  
“Top-down/Bottom-up Integration with AIM (Asia-Pacific Integrated Model)”
- 75) Fujimori S., Oshiro K.: Climate Change Impacts & Integrated Assessment XXII (CCI/IA)(2016)  
“Japan NDC (AIM/Enduse[Japan]) Global emissions trading under NDCs (AIM/CGE[global])”
- 76) Masui T.: LoCARNet 5th Annual Meeting (2016)  
“Support of Integrated Assessment Modeling for Capacity Development in Asia”
- 77) Kawase R.: International Society for Industrial Ecology (ISIE) 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, Nagoya, Japan, 2016  
“Global Steel Production towards 2050 “
- 78) 増井利彦: 祈月書院秋季研修会(2016)  
「地球環境問題が主導する持続性文明の条件: 気候変動問題から見た 2050 年とその先」
- 79) Fujimori S., Oshiro K.: CD-LINKS 3rd meeting (2016)  
“Japan scenarios: some insights from national and global model comparison”
- 80) Park C., Hasegawa T., Fujimori S., Takakura J., Takahashi K., Hijioka Y., Masui T.: Ninth Annual Meeting of the IAMC 2016 (2016)  
“Economic implications of limiting global temperature at 1.5 °C: the case of building energy use”
- 81) Fujimori S., Kubota I., Dai H., Takahashi K., Hasegawa T., Liu J., Hijioka Y., Masui T., Takimi M.: Ninth Annual Meeting of the IAMC 2016(2016)  
“Will International Emissions Trading Help Achieve the Objectives of the Paris Agreement?”
- 82) Tu T.T., Fujimori S., Masui T.: Ninth Annual Meeting of the IAMC 2016(2016)  
“REALIZING THE INTENDED NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION: THE ROLE OF RENEWABLE ENERGIES IN VIETNAM”
- 83) Masui T., Oshiro K., Kainuma M., Hibino G.: Ninth Annual Meeting of the IAMC, Beijing, China, 2016  
“Quantitative Japan’s GHG mitigation analysis based on Asia-Pacific Integrated Model”
- 84) Oshiro K.: Japan-India Policy Research Workshop, New Delhi, India, 2016  
“Assessment of Japan’s NDC and long-term goal - Contributions of Asia-Pacific Integrated Model (AIM)”
- 85) Fujimori S.: AgMIP Global Economics Workshop(2016)  
“AgMIP Phase 2 Core scenario results overview and some insights”
- 86) Honjo K., Ashina S.: The 22nd AIM International Workshop(2016)  
“Evaluation of the reduction of electricity demand in Japan after the 2011 Tohoku Earthquake”
- 87) Zhang R., Fujimori S., Dai H., Hanaoka T.: Ninth Annual Meeting of the IAMC 2016(2016)  
“How do transport behavior and policy affect mitigation potential and cost? A simulation by AIM/Transport model”
- 88) Zhang R., Fujimori S., Dai H., Hanaoka T.: ITEC Symposium - Next-Generation Automotive Technology: Social Benefit and Diffusion Policy (2016)  
“Key factors influencing the global passenger transport dynamics using the AIM/Transport model”
- 89) Zhang R.: the Joint conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE) 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, Abstracts (2016)  
“Spatial distribution and correlation of traffic-related carbon emissions and land use: a case study for Changzhou City”
- 90) Zhang R., Matsushima K., Kobayashi K.: International Conference on Land Use and Rural Sustainability, Abstracts(2016)  
“Can land use planning help mitigate transport-related carbon emissions? a case of Changzhou”

- 91) 増井利彦: COMPO 研究会(2017)  
「パリ協定と地球温暖化問題の行方」
- 92) 藤野純一, グエン・タイ・ホア, 越智雄輝, 藤原和也: 第 33 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 講演論文集, 93-96(2017)  
「パリ協定と途上国自治体における低炭素シナリオ開発」
- 93) 本城慶多, 芦名秀一: 第 33 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 講演論文集, 33, 75-78(2017)  
「東日本大震災が日本の電力需要に与えた影響について～状態空間モデルによるアプローチ～」

## 7. 研究者略歴

課題代表者: 芦名 秀一

東北大学大学院工学研究科修了、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広域影響・対策モデル研究室主任研究員

研究分担者

1) 藤森 真一郎

京都大学大学院工学研究科修了、工学博士、現在、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・対策モデル研究室研究員

2) 日比野 剛

東京理科大学理学専攻修士課程修了、現在、みずほ情報総研株式会社環境エネルギー第1部次長

3) 金森 有子

京都大学大学院工学研究科修了、工学博士、現在、国立環境研究所社会環境システム研究センター環境政策研究室主任研究員

4) 河瀬 玲奈

京都大学大学院工学研究科修了、工学修士、現在、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究員

## 2-1402 わが国を中心とした温室効果ガスの長期削減目標に対応する緩和策の評価に関する研究

### (1) 2050年を対象としたわが国の長期目標の実現に向けた排出削減経路の検討

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 広域影響・対策モデル研究室 芦名 秀一  
 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 環境社会イノベーション研究室 藤野 純一

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所

甲斐沼 美紀子・五味 馨・Diego Silva Herran（平成26年度）・朝山 由美子（平成26年度）・亀井 未穂（平成26年度）・本城 慶多（平成27～28年度）・白木 裕斗（平成27～28年度）・Park Chan（平成27年度）・Liu Jingyu（平成27～28年度）

みずほ情報総研株式会社	日比野 剛・大城 賢
立命館大学	島田 幸司（平成26年度）
国立研究開発法人森林総合研究所	森田 香菜子（平成26年度）
中国 能源研究所	Hu Xiulian・Jiang Kejun
中国 広州能源研究所	Zhao Daiqing（平成26～27年度）
インド インド経営大学院大学アーメダバード校	P.R.Shukla
インド ボパール建築計画研究所	Manmohan Kapshe（平成26～27年度）
インド マウラナ・アザド国立科学研究所	Manmohan Kapshe（平成28年度）
インド 国立教員養成研究所	Aashish Deshpande（平成28年度）
韓国 ソウル大学	Lee Dong-Kun（平成26～27年度）
タイ タマサート大学	Bundit Limmeechokchai（平成27年度）
米国 米国農務省	Ronald Douglas Sands（平成26～27年度）
米国 国立太平洋北西研究所	Jae Edmonds（平成27年度）
米国 スタンフォード大学	John Weyant（平成27年度）
フランス Sustainable Development Solutions Network	Emmanuel Guerin（平成26年度）
ドイツ ポツダム気候影響研究所	Elmar Kriegler（平成27年度）

平成26～28年度累計予算額：61,355千円（うち平成28年度：21,525千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

本研究では、統合評価モデル群を用いてわが国を対象に長期目標達成のための排出削減経路及びその実現のための対策及び政策を明らかにすることを目的とし、将来のサービス需要推計とそれに基づく2050年の長期目標と整合した短中期の削減目標及び排出削減経路の分析と実現のため

の社会経済シナリオや対策・施策の評価を行った。また、開発した統合評価モデル群をもとに「気候変動とエネルギー協力に関する日英共同声明」も踏まえて簡易に低炭素シナリオを分析できるツール（低炭素ナビ）を開発してワークショップ等で有効性を確認した。

具体的には、人口及びTFPの想定をもとに2100年までのマクロ経済指標を推計し、生産性の大幅な向上なしにはGDPが2030年代にピークアウトし、2100年には1990年代の水準まで縮小することを明らかにするとともに、素材需要についても同様に減少傾向となることを示した。加えて、東日本大震災以降の節電行動の定着状況を評価した結果、2011年以降は総電力需要3.2～7.5%に相当する節電が継続して行われていると見込まれることが明らかとなった。

日本を対象とした2050年までの長期排出削減経路を分析した結果、80%削減の実現には、需要側でのエネルギー効率改善に加えて、一次エネルギー供給における再生可能エネルギー（水力を含む）の比率を約4割に拡大し、石炭・石油からガスへの燃料転換を進めることが肝要であることが明らかとなった。

発電部門に着目した分析では、2050年80%削減の達成に必要な太陽光発電及び風力発電の導入とともに、太陽光発電については蓄電池導入を、風力発電については解列と蓄電池導入を進めることにより電力システムの安定性を確保しつつ排出削減が達成できることが示唆された。

#### [キーワード]

温室効果ガス、低炭素社会、将来シナリオ、対策技術、統合評価モデル

### 1. はじめに

2011年3月の東日本大震災と福島第一原子力発電所事故を受け、中央環境審議会やエネルギー・環境会議等において温室効果ガス排出削減目標の再議論が徐々に進められてきた。これらの議論においては、2020年や2030年の削減目標水準の議論が中心であり、2050年80%削減という長期目標達成の観点から、どのような排出削減経路を取るべきかについては十分明らかになっているとは言いがたかった。

このような状況のもと、2015年11-12月にパリで開催された気候変動枠組条約第21回締約国会議に向けて各国はINDC（Intended Nationally Determined Contributions）を提出することとなり、日本では2014年10月より環境省の中央環境審議会と経済産業省の産業構造審議会が合同で「産業構造審議会 産業技術環境分科会 地球環境小委員会 約束草案検討ワーキンググループ中央環境審議会地球環境部会2020年以降の地球温暖化対策検討小委員会合同会合」を設置して、2020年以降の削減目標の検討を進められた。その結果、2015年7月17日にわが国の2030年の温室効果ガス排出削減目標として2013年比26%削減が閣議決定され、正式に日本の削減目標として国内外に示された。また、2016年3月15日には、地球温暖化対策推進本部が開催され、2050年の温室効果ガス排出量を現在より80%削減する目標を盛り込んだ地球温暖化対策計画案が了承されている。

このように、温暖化対策に向けた目標に関する議論は徐々に進展が見られるが、一方で、石炭火力発電所の増設の動きが見られるなど、長期目標実現のための排出削減経路のあり方と、その実現方策についての議論は依然として十分とは言えない状況にある。

また、2011年の東日本大震災以降マクロフレームは変化し将来の社会経済のありようについてこれまでの見通しとは異なる傾向が見られている。特に、2011年夏の電力不足リスクを契機とし

て全国的、かつ部門横断的に実施された節電行動の定着などの東日本大震災以前と比較してのエネルギーや気候変動対策に関する意識変化・行動変化も観察されているものの、これまでの分析では十分に考慮されてきたとは言いがたく、これらの社会変化を踏まえた長期的な社会経済シナリオやそれに基づく排出削減経路及びその実現方策の提示が必要とされているといえる。

これらに加えて、長期的にわが国が低炭素社会へ移行するためには、特定のセクターの努力や、特定の技術導入のみに依存するのではなく、政策決定者とともに、産業、市民、NGOなど様々なステークホルダーが協同して対策を進めていくことが求められる。そのため、それぞれのステークホルダーがそれぞれの立場からシナリオを考えていくための簡易な低炭素社会シナリオ検討ツールの必要性が高まっているところである。

## 2. 研究開発目的

本研究では、統合評価モデル群を用いてわが国を対象に長期目標達成のための排出削減経路及びその実現のための対策及び政策を明らかにすることを目的とする。

具体的には、バックキャスティングモデル及び技術選択モデルを改良して、日本を対象に2050年の長期目標と整合した短中期の削減目標及び排出削減経路を分析し、実現のための社会経済シナリオや対策・施策を評価するとともに、特に発電部門については電源計画モデルによる詳細分析を行う。また、排出経路の分析にあたっては、サービス需要の将来シナリオが必要となるところ、サービス需要及び電力需要を予測する統計モデルを構築し、人口や生産性、消費行動の変化が将来のサービス需要に与える影響を評価する。これらに加えて、開発した統合評価モデル群の成果を踏まえて、簡易に長期排出削減経路を分析できるツール開発とワークショップでの試行を通じた有効性検討も行う。

## 3. 研究開発方法

上記を踏まえ、本研究では、（1）マクロ経済モデルを用いた日本のエネルギーサービス需要の将来推計、（2）バックキャストモデル及び技術選択モデルを用いた2050年までの長期排出削減経路の分析、（3）多地域電源計画モデルを用いたわが国の電力部門を対象とした長期大幅削減シナリオの分析、及び（4）長期排出削減経路の簡易分析ツール（低炭素ナビ）の開発とワークショップにおける有効性検討を実施した。以下に、それぞれの研究開発方法を示す。

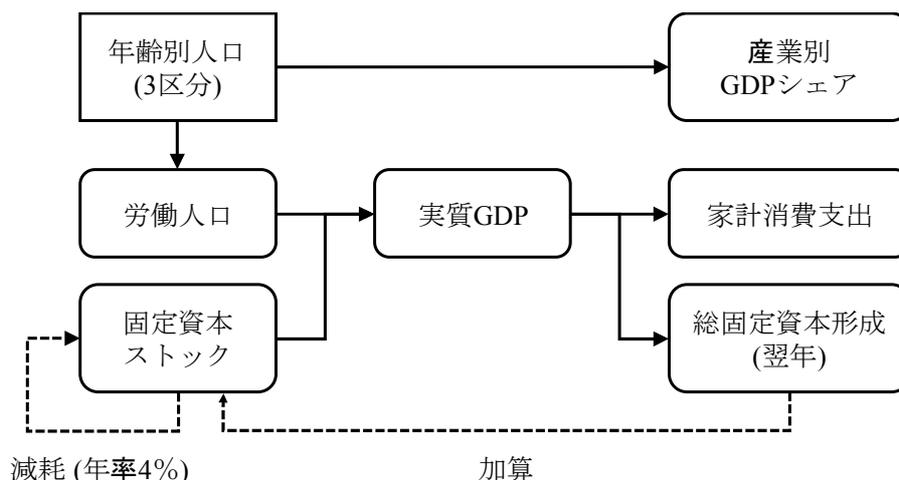
### （1）マクロ経済モデルを用いた日本のエネルギーサービス及び電力需要の将来推計

#### 1) マクロ計量モデルの概要

サービス需要はマクロ経済指標（GDP及びそのコンポーネント）に強く依存するため、サービス需要のモデリングに先立って簡易的なマクロ計量モデルを構築した。

図(1)-1に開発したマクロ計量モデルの構造を示す。モデルは、年齢別人口（3区分）を入力として、実質GDP、労働人口、固定資本ストック、総固定資本形成、家計消費支出を推計するものであり、推計にあたって参照する過去のデータ期間は1970～2014年（N=45）とした。

本モデルでは、生産関数としてコブ・ダグラス型を仮定する。通常、生産関数のパラメータはデータ期間を通じて一定であるという仮定のもと、最小二乗法で推定される。しかし、モデルの切片（全要素生産性、Total Factor Productivity（TFP））は時間変動することが知られており、



図(1)-1 マクロ計量モデルの構造

推計期間が数十年にわたる場合は結果に大きな影響を与える。そこで、生産関数を状態空間モデル（State Space Model）に拡張して全要素生産性（Total Factor Productivity、TFP）の時間変動をランダムウォークで記述した以下の式(1)-1及び式(1)-2を用いることとした。ここで、 $t$ は推計年次、 $Y_t$ はGDP、 $K_t$ は固定資本ストック、 $L_t$ は労働人口、 $A_t$ は全要素生産性（TFP）、 $\theta$ は資本弾力性である。また、 $v_t$ 、 $w_t$ はそれぞれ平均ゼロの正規分布に従う誤差項である。

$$\log \frac{Y_t}{L_t} = \log A_t + \theta \log \frac{K_t}{L_t} + v_t, \quad v_t \sim N(0, V) \quad \text{式(1)-1}$$

$$\log A_{t+1} = \log A_t + w_t, \quad w_t \sim N(0, W) \quad \text{式(1)-2}$$

## 2) 将来素材需要分析モデルの概要

サービス需要は素材需要、業務床面積、輸送需要から構成されるが、特にエネルギー需要に大きく影響する素材需要を対象にモデリングを実施した。各素材の需要を内需（国内消費量）と外需（純輸出）に区分し、内需についてマクロ経済指標を説明変数とする統計モデルを構築した。素材内需の予測は、粗鋼とセメントのモデルは総固定資本形成を、エチレンと紙・板紙のモデルは家計消費支出を説明変数としてパラメータの時間変動を考慮した状態空間モデルで行った。データ期間は1970～2014年（ $N=45$ ）とした。

これらのモデル化において、外需については、国内のマクロ経済指標による予測が困難であるため、原則モデリングの対象としていないが、粗鋼生産量については世界の社会経済シナリオであるSSP（Shared Socioeconomic Pathways）（サブテーマ（2）で詳述）を参照したモデル化と分析を実施した。モデルでは、国内の実質GDP、国外の実質GDP成長率、日本円の実質実効為替レートを説明変数とし、将来の粗鋼生産量の確率分布を求める。

## 3) 電力需要分析モデルの概要

2011年以降、東日本大震災及び引き続いての福島第一原子力発電所事故をきっかけに、全国的に節電行動が定着して電力需要の減少が見られるようになったが、電力需要は複合的な要因で決

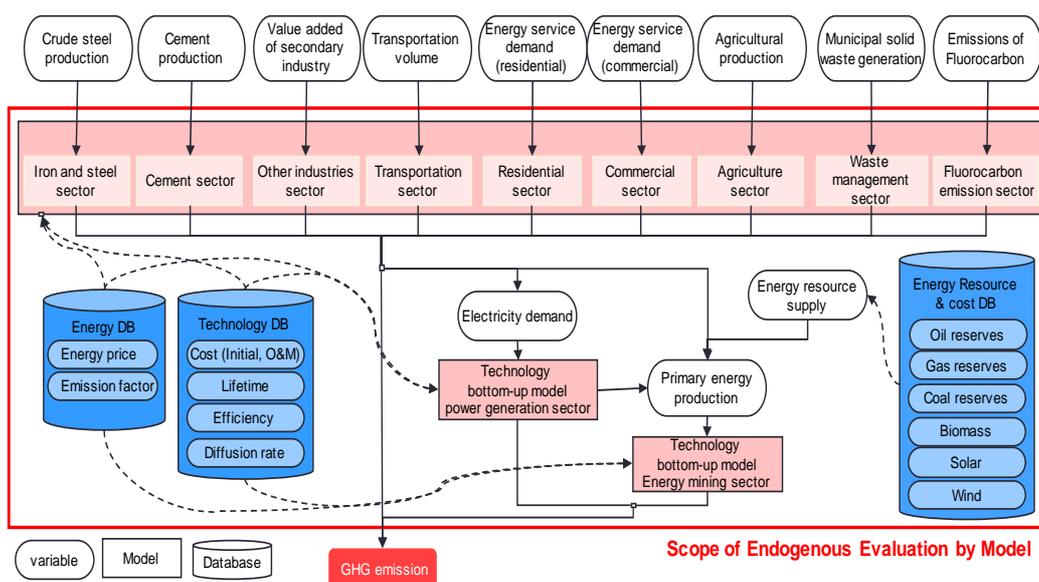
定される従属的な需要量であるために、節電行動定着による影響を顕に取り出すことは困難となっている。これまでに、計量経済分析を用いた震災後の電力需要評価の研究はいくつか行われているが、既往研究は年次データまたは四半期データを用いているため、参照できるデータ数が限定的であり、節電効果の時間変動を詳しく調べることは出来ていなかった。また、パラメータが時間変動しないという仮定のもと、古典的な回帰モデルで電力需要を予測しているため、節電効果が無関係な要因から切り離すことに失敗している可能性がある。そこで、電力需要を動力需要と電灯需要に区分し、両者の月次変動を予測する状態空間モデルを構築した。データ期間は1980年4月～2015年10月（N=331）とし、説明変数は季節要素、トレンド要素、冷暖房度日、生産指数、実質賃金、電力価格、暦変数に加えて、震災ダミーを用いた。震災ダミーは2011年3月以前に0を、以降に1をとる時系列であり、その係数によって月別の節電効果を評価することができる。

## （2）バックキャストモデル及び技術選択モデルを用いた2050年までの長期排出削減経路の分析

### 1) バックキャストモデルの概要

バックキャストモデル（AIM/Backcast Model、AIM/BCM）は、将来の社会経済条件およびサービス需要の推移を所与とし、期間全体の総費用最小化を基準として目標達成のために技術的対策や制度、政策をいつ、どのように講じていくべきかを定量評価結果に基づいて提示するモデルである。基準年（2005年）および目標年（2050年）のCO<sub>2</sub>排出量は固定されている。サービス需要は、2005年から2014年までは実績値を用い、以降はシナリオにて与える。モデルは線形計画法により定式化し、Gurobiを用いて最適解を求める。

図(1)-2に、AIM/BCMの概要を示す。モデルでは、大きく産業部門、家庭部門、業務部門、運輸部門、農業等非エネルギー部門を設定するとともに、必要に応じてそれぞれにサブセクターを設けている。例えば、産業部門は鉄鋼、セメント、その他産業部門に分解している。また、家庭部門では暖房、冷房、給湯、厨房、照明、冷蔵庫、TV、その他家電の別にサービス需要を設定している。



図(1)-2 バックキャストモデル（AIM/Backcast Model）の概要

## 2) 技術選択モデルの概要

技術選択モデル (AIM/Enduse [Japan]) は、エネルギー技術に関わる特性を詳細に反映したモデルである。計算フローは図(1)-3に示す通りで、外生的に設定したサービス需要、エネルギー価格やCO<sub>2</sub>価格、エネルギー源別の供給制約、対策技術の導入・普及制約の下で、エネルギー需要に係る総費用（固定費用と運転費用の和）を最小化するように、1年ごとに技術選択が行われる。

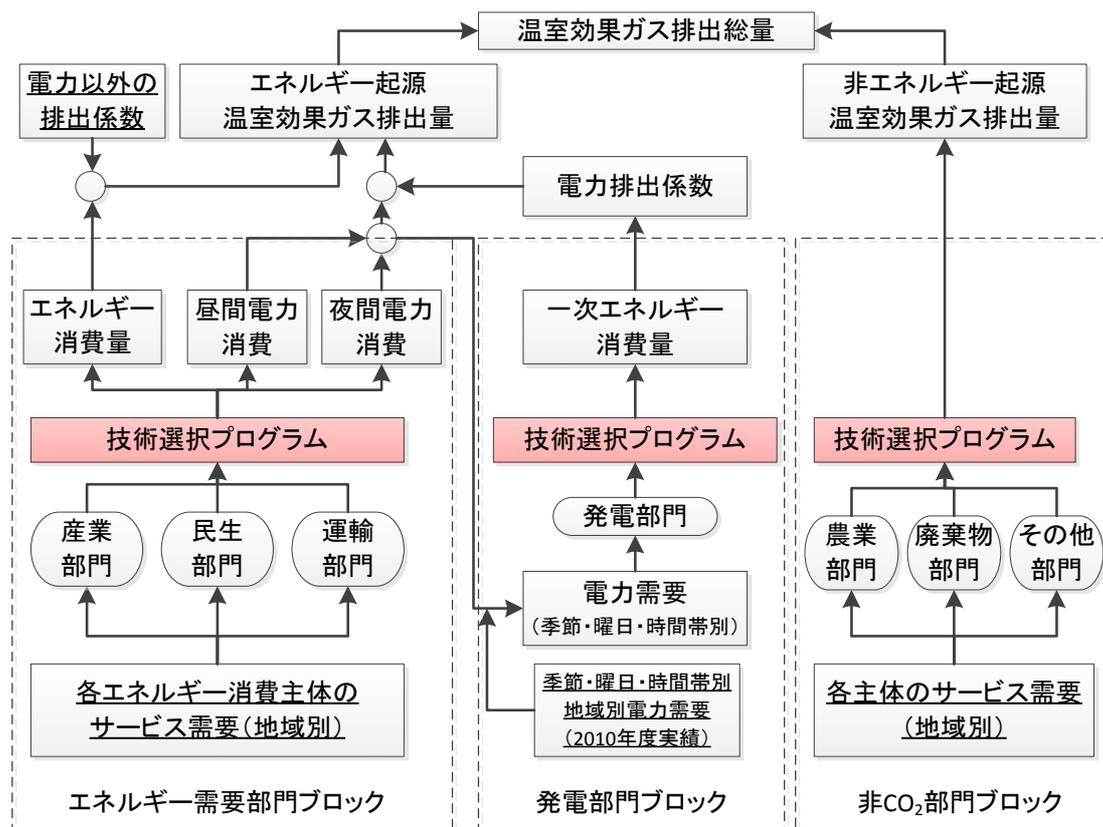
モデルは、大きくエネルギー需要部門ブロック、発電部門ブロック、非CO<sub>2</sub>部門に分類される。エネルギー需要部門ブロック、非CO<sub>2</sub>部門ブロックでは、外生的に設定した地域別のサービス需要を満たすよう、各部門において技術選択が行われる。発電部門ブロックでは、電源別のベース、ミドル、ピーク特性や、太陽光発電の時間帯別の出力変動を反映するため、時間帯別の電力需給が簡易的に考慮されている。なお、原子力、地熱、太陽光、風力、流込式水力発電を除く火力発電等は、年間の設備利用率の上限（石炭80%、LNG70%、石油60%）の範囲内で、電力需要に応じ内生的に時間帯別の発電量が決定される。ただし、発電部門ブロックの構成はAIM/Enduseのモデル構造に対応させるため、後述する多地域電源計画モデルと比較すれば簡易な構造であり、電源別の短時間の負荷追従性や、出力変動幅の上限・下限等の特性は考慮されていない。

温室効果ガスはエネルギー起源CO<sub>2</sub>、非エネルギー起源CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFCs、PFCs、SF<sub>6</sub>を対象とした。エネルギー起源CO<sub>2</sub>は産業、家庭、業務、運輸、エネルギー転換部門からの排出量を推計する。分析期間は2010～2050年とした。技術選択における費用の評価方法としては回収期間法を採用し、産業、民生、非CO<sub>2</sub>部門は3年、運輸は5年、素材産業の製造プラント、省エネ住宅・建築物、発電部門は10年と設定した。

本研究では、地域区分を考慮できる多地域版モデルを使用している。モデルの構造はAIM/Enduse [Japan]と同一であるが、それぞれのブロックについて、一般電気事業者の供給エリアに従い、10地域（北海道、東北、関東、中部、北陸、関西、中国、四国、九州、沖縄）の地域区分を設けた。モデルでは、10地域合計のエネルギー需要に係る総費用（固定費用と運転費用の和、式(1)-3を参照）を最小化するように技術選択が行われる。ここで、 $r$ は地域を表し、 $TC$ は年間総費用、 $c_i$ は機器 $i$ の初期費用（年価換算）、 $I_i$ は機器 $i$ の年間新規導入量、 $c_k$ はエネルギー種 $k$ の価格、 $E_k$ はエネルギー種 $k$ の年間消費量、 $tax$ はCO<sub>2</sub>排出価格、 $Q_m$ は温室効果ガス種 $m$ の年間排出量（CO<sub>2</sub>換算）である。

$$TC = \sum_r [\sum_i (c_{i,r} \times I_{i,r}) + \sum_k (c_{k,r} \times E_{k,r}) + tax \times \sum_m Q_{m,r}] \rightarrow \min \quad \text{式(1)-3}$$

分析にあたって導入対象とした主な対策技術の一覧を表(1)-1に示す。需要側の対策技術については、効率、コスト、寿命といったパラメータを、各種統計資料に基づき設定した。なお、本モデルでは地域別の技術特性をパラメータに反映することが可能であるため、例えば寒冷地のヒートポンプ空調器・給湯器、住宅断熱については地域ごとに固有のパラメータを設定した。発電技術に関しては、発電効率やコスト、ピーク時供給力、設備利用率上限といったパラメータを、発電種ごとに設定した。なお、火力発電・鉄鋼・セメントについては炭素隔離貯留 (Carbon Capture and Storage, CCS) の導入を想定している。年間の最大CO<sub>2</sub>貯留量上限は、2050年に200 Mt-CO<sub>2</sub>/年が上限となるよう設定した。



図(1)-3 日本を対象とした技術選択モデルの計算フロー図

表(1)-1 導入を想定した主な対策技術

産業	高効率古紙パルプ製造技術、高効率黒液回収ボイラー、セメント廃プラ利用、セメント製造時のCCS、革新的セメント製造プロセス、フェロコックス、高炉CCS、高炉廃プラ利用、直流式電炉、次世代コークス炉、内部熱交換型蒸留、ナフサ接触分解、高効率自家発電、自家発電・蒸気ボイラーのガス転換、高性能工業炉、産業用HP、高性能ボイラー、高効率モータ、産業用コージェネ、農機具の省エネ、漁船の省エネ、ハイブリッド建機
家庭/業務	高効率エアコン、潜熱回収型給湯器、電気HP給湯器、家庭用燃料電池、高効率照明、高効率家電・動力、省エネ住宅・建築物、HEMS、BEMS
運輸	高効率ガソリン車、高効率ディーゼル車、ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車、電気自動車、バイオ燃料、エコドライブ、鉄道・船舶・航空の省エネ化
発電	石炭ガス化複合発電(+CCS)、石炭ガス化燃料電池複合発電(+CCS)、高効率LNG複合発電(+CCS)、LNG燃料電池複合発電(+CCS)、太陽光発電(住宅用・メガソーラー)、風力発電(陸上・洋上)、地熱発電、バイオマス発電、水力発電、揚水発電、地域間連系線増強
非CO <sub>2</sub>	有機性廃棄物の直接埋立禁止、施肥量削減、HFCs冷媒の廃棄時回収、半導体製造ラインのFガス除去装置、マグネシウム溶解時のSF <sub>6</sub> フリー化

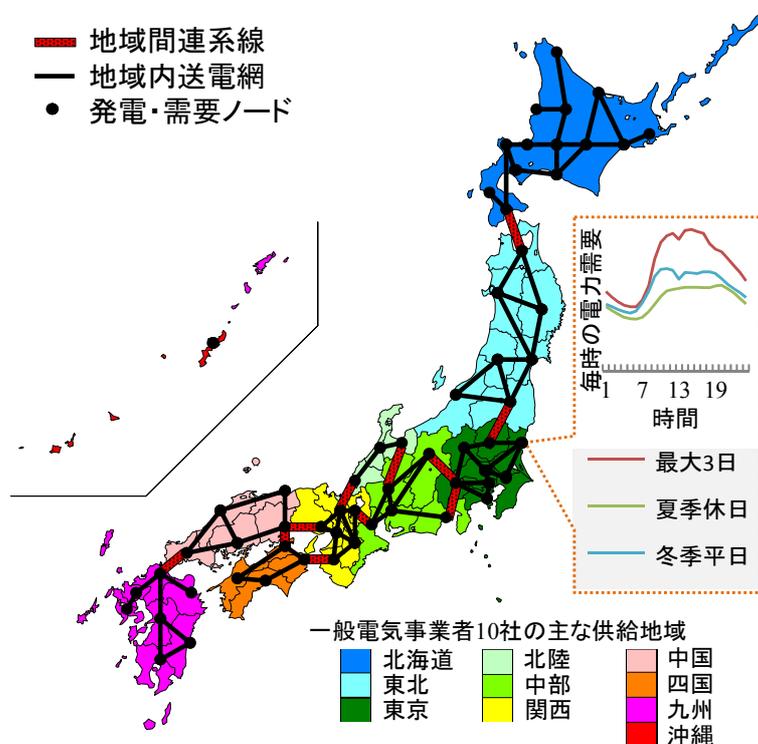
### (3) 多地域電源計画モデルを用いたわが国の電力部門を対象とした長期大幅削減シナリオの分析

電力部門における低炭素化対策には、大きく (a) 需要削減、(b) 原子力や天然ガスなどのCO<sub>2</sub>排出量の低い燃料減への転換、(c) 炭素隔離貯留設備 (Carbon Capture and Storage、CCS) の設置、(d) 太陽光や風力発電などの再生可能エネルギー発電の導入、がある。本研究では、主に (b) から (d) に着目し、多地域電源計画モデルを用いてわが国電力部門の低炭素化シナリオについて分析した。

#### 1) 多地域電源計画モデルの概要

多地域電源計画モデルは、将来の発電設備の容量および各発電方式の発電量などを推計するボトムアップ型最適化モデルである。全国を60地域に分割し、各地域に電力需要ノード、発電ノードを設定し、地域間には実際の地域間連系線ネットワークの情報に基づいた仮想的な連系線を設けた (図(1)-4)。

解析期間は2005年から2050年までであり、期間全体の費用最小化の最適化計算により電力需要を満足させるための長期的な電源構成の変化を分析する。なお、分析では終端効果を除くために2060年までを対象として最適化計算を実施した。電力需要は、電力需要の年間値及び日負荷曲線の情報を元に1時間毎に設定した。日負荷曲線は、1年を7期 (夏季最大需要日、夏季平日、夏季休日、冬季平日、冬季休日、中間期平日、中間期休日) に分類して設定した。なお、太陽光発電及び風力発電導入による影響を評価するために、各期の平均的な出力曲線を地域ごとに設定した。また、初期費用や寿命、効率等については表(1)-2に示すように設定した。



図(1)-4 多地域電源計画モデルの構造

表(1)-2 各発電方式の主なパラメータ

発電方式	略称	初期費用 [万円 /kW]	寿命 [年]	熱効率 (所内損失含む)	最大 設備利用率	LFC 供給 量 (充電 時)	LFC 要求量
原子力	原子力	26.0	40	33%	95%	0%	-
石炭火力	石炭	26.0	40	38%	83%	5%	-
石炭ガス化複合発電(IGCC)	IGCC	32.0	40	36%	83%	5%	-
CCS 併設型 IGCC	IGCC w/CCS	38.7	40	30%	83%	5%	-
石油火力	石油	20.0	40	34%	83%	5%	-
ガス火力	ガス	19.0	40	37%	83%	10%	-
ガスコンバインド	ガス CC	12.0	40	44%	83%	10%	-
CCS 併設型 ガスコンバインド	ガス CC w/CCS	24.5	40	38%	83%	10%	-
水力	水力	30.0	80	-	-※1	0%	-
揚水	揚水	60.0	80	65%※2	95%	20% (0%)	-
太陽光	太陽光	23.0	20	-	-※1	-	10% (発電量比)
蓄電池併設なし風力	風力	20.0	20	-	-※1	-	15% (発電容量比)
短周期変動調整蓄電池併設 型風力 (20分周期変動 50% 抑制)	風力 w/SBST1	28.0	20	-	-※1	-	7.5% (発電容量比)
短周期変動調整蓄電池併設 型風力 (20分周期変動 100% 抑制)	風力 w/SBST2	68.0	20	-	-※1	-	0% (発電容量比)
長周期変動調整蓄電池	SBLT	24	10	85%※2	95%	20% (0%)	-

※1 出水率、平均風速、日射量等により地域別代表日別時間別に外生的に決定。

※2 充放電効率

発電設備ごとの設備容量は、既設、建設中・計画中の設備については外生的に与えた。将来の設備容量追加は、費用最小化を目的関数とした最適化計算により内生的に算出されるが、太陽光発電および風力発電については、都道府県ごとに設定した発電ノードそれぞれでポテンシャル評価等の結果に基づいた導入可能設備量上限を設け、過剰な設備導入が起らないようにした。

## 2) 再生可能エネルギー導入量評価手法の概要

本研究では、多地域電源計画モデルを改良して再生可能エネルギーの出力変動対策を考慮できるようにし、太陽光や風力のような気候条件等により発電出力が変動する再生可能エネルギー（変動性再生可能エネルギー（Variable Renewable Energy、VRE））の導入量評価を行った。

具体的には、VREの出力変動抑制対策として検討されている蓄電池の活用、揚水発電の活用、調整力拡大に向けた電源運用（負荷周波数制御（LFC）調整力の活用）、地域間連係線を活用した調整力の拡大、VRE発電の出力抑制や解列、の5つのうち、(a) LFC容量制約の考慮、(b) VREの出力抑制・解列の考慮、(c)短周期変動調整蓄電池と長周期変動調整蓄電池の区別、の3点を分析に反映できるようにモデルの拡張を行った。

電力需要の変動およびVREの出力変動は、変動の周期によって三つに区分される。具体的には、変動周期が数分以下の微小な変動成分（サイクリック成分）、数分から数十分程度までの短周期変動分（フリッジ成分）、および十数分以上の長周期変動分（サステンド成分）の三つである。VREの大量導入を想定した場合、これらの変動成分のうち特にフリッジ成分の調整力の不足が大

きな懸念事項と考えられている。そこで、VREの導入に伴うフリッジ成分の増加（LFC要求量）、変動に対する調整力（LFC調整力）の供給、およびLFC要求量とLFC供給力のバランスを以下の制約式により明示的にモデル化した。ここで、 $r$ は地域、 $g$ は発電方式、 $d$ は代表日、 $h$ は時間、 $LFC\_D$ はLFC調整力の要求量、 $LFC\_S$ はLFC調整力の供給可能量、 $O$ は発電量、 $C$ は発電容量、 $C\_PO$ は解列容量、 $S$ は蓄電量、 $dmd$ は電力需要量、 $udlfc\_o$ は発電量あたりのLFC要求量、 $udlfc\_c$ は発電容量あたりのLFC要求量、 $ud\_lfc\_dmd$ は電力需要量あたりのLFC要求量、 $uslfc\_o$ は単位発電量あたりのLFC供給可能量、 $uslfc\_s$ は蓄電量あたりのLFC供給可能量、 $us\_lfc\_dmd$ は許容調整残を表す。

$$LFC\_D_{r,d,h} = udlfc\_o_g \times O_{r,g,d,h} + udlfc\_c_g \times (C_{r,g} - C\_PO_{r,g,d,h}) + udlfc\_dmd \times dmd_{r,d,h} \quad \text{式(1)-4}$$

$$LFC\_S_{r,d,h} = uslfc\_o_g \times O_{r,g,d,h} + uslfc\_s \times S_{r,g,d,h} + uslfc\_dmd \times dmd_{r,d,h} \quad \text{式(1)-5}$$

$$LFC\_D_{r,d,h} \leq LFC\_S_{r,d,h} \quad \text{式(1)-6}$$

VREの導入に伴うLFC調整力の推計では、モデルの線形性を維持するため、全ての変動成分が無相関であることを仮定し、単純にすべての変動成分を足し合わせるによりLFC要求量を算出した。この仮定ではLFC要求量を実際の要求量より過剰に見積もる可能性が高いが、式(1)-4を満たしている場合、LFC供給量を過剰に準備することに相当するため、電力の安定供給の観点からは安全側の誤差となる。

VREの大量導入に伴う出力変動対策としては、LFC調整力の供給のような電力系統側の対策だけでなく、VREの出力抑制や解列など系統に接続するVRE側での出力変動対策についても議論されている。そこで、以下の式を用いてVREの出力抑制および解列をモデル化した。ここで、 $C\_PO$ は解列容量、 $cf$ はVREの設備利用率（日射量、平均風速から設定した代表日 $d$ 、時間 $h$ における発電容量あたり発電量）を示す。

$$O_{r,g,d,h} \leq cf_{r,g,d,h} \times (C_{r,g} - C\_PO_{r,g,d,h}) \quad \text{式(1)-7}$$

式(1)-7において、の $C_{r,g}$ と $C\_PO_{r,g,d,h}$ の差分が解列後のVREの系統接続容量を表し、出力抑制は、不等号記号が成立することで表現する。

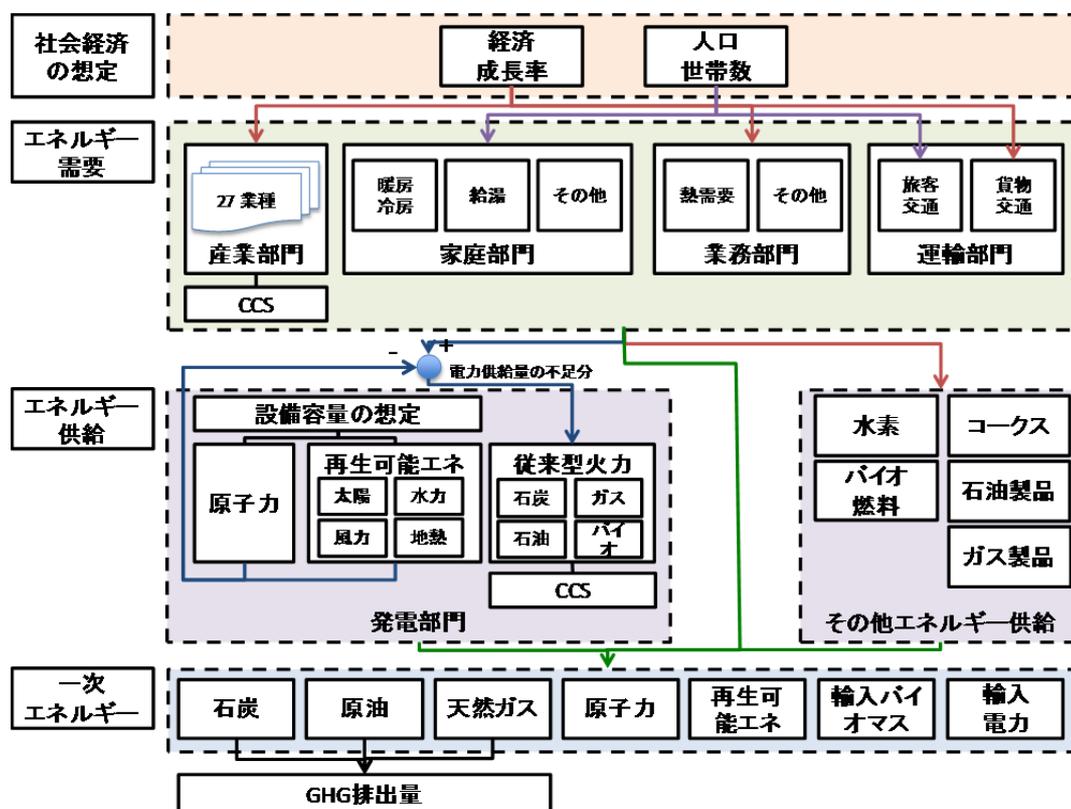
これらの出力抑制と解列に加えて、出力変動対策としての蓄電池導入をモデル化した。具体的には短周期変動調整蓄電池、および長周期変動調整蓄電池を区別してモデル化する。短周期変動調整蓄電池は風力発電の短周期変動対策として風力発電所との併設を想定し、長周期変動調整蓄電池は太陽光、風力の長周期変動対策として変電所や発電所など、系統により制御可能な地点への設置を想定する。なお、風力発電所に併設する短周期変動調整蓄電池の出力容量は目標とする20分周期変動の抑制率により異なることから、本研究では風力発電所の20分以内変動を50%抑制する容量（風力発電容量比17%）の蓄電池を併設した風力発電所（風力w/SB1）、および風力発電所の20分以内変動を100%抑制する容量（風力発電容量比100%）の蓄電池を併設した風力発電所（風力w/SB2）の2種類を想定する。なお、太陽光発電は風力と比較して短周期変動が小さくLFC調整容量制約への影響が小さいと予想されること、大量導入時には平滑化効果により短周期変動が縮小されること、余剰発電量対策として導入される長周期変動対策蓄電池への蓄電により短周期変動の調整が可能なることから、太陽光発電設備への短周期変動対策蓄電池の併設は考慮しなかった。

#### (4) 長期排出削減経路の簡易分析ツール（低炭素ナビ）の開発とワークショップでの有効性検討

本研究では、英国エネルギー・気候変動省（Department of Energy & Climate Change: DECC）の開発した2050カリキュレータをもとに日本独自のデータや要素を加え、日本版2050カリキュレータ（日本版低炭素ナビ）として開発した。なお、本研究開発は安倍総理訪英において2014年5月1日に発表された「気候変動とエネルギー協力に関する日英共同声明」では、「2050パスウェイ・カリキュレーターの普及に関し（中略）さらなる協力と情報共有の範囲を拡大する」との文言が盛り込まれたことの一環として実施したものである。

低炭素ナビは、2050年に向けた長期的な視点から低炭素社会構築を目的としたエネルギー需給シナリオを可視化するツールである。低炭素ナビには、ExcelモデルとWebツールの2種類があり、いずれも、Webサイト（<http://www.2050-low-carbon-navi.jp/>）よりアクセス可能である。図(1)-5に、モデルの構造を示す。

日本版低炭素ナビでは、エネルギー需要側、エネルギー供給側それぞれに約20種ずつ設けた選択肢それぞれに、4ないしは5つのレベル（レベル1：ほとんど、あるいは全く削減努力をしないレベルから、レベル4：達成可能ではあるが、本質的な変化と相当の削減努力が必要とされるレベルないしはレベル5：物理・技術的限界に向けて努力する極めて野心的なレベル）が設定されている。それらの組み合わせに応じて、2050年までの5年ごとの温室効果ガス排出量や一次エネルギー消費量、部門別最終エネルギー需要、発電構成及び費用変化を分析することが可能となる。



図(1)-5 日本低炭素ナビのモデル構造

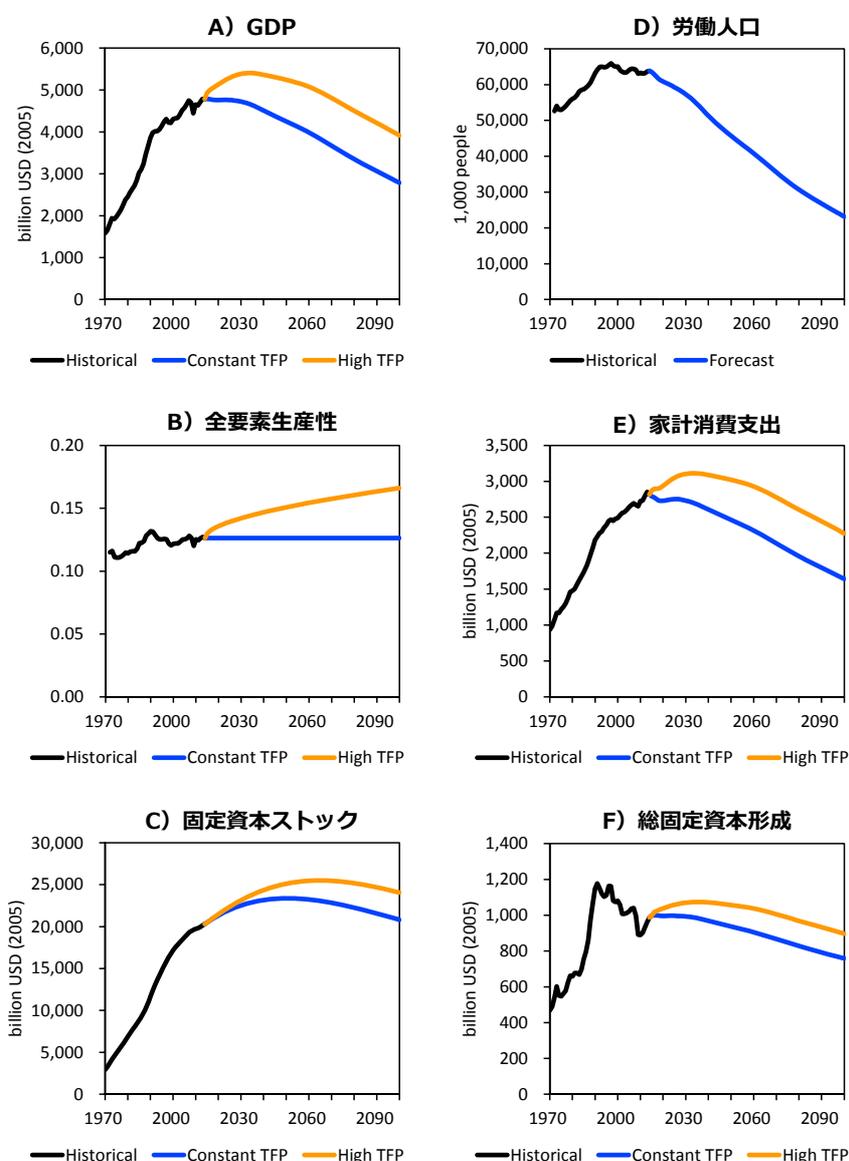
#### 4. 結果及び考察

##### (1) マクロ経済モデルを用いた日本のエネルギーサービス及び電力需要の将来推計

##### 1) マクロ計量モデルを用いた将来マクロ経済指標の推計

マクロ計量モデルに人口及びTFPのシナリオを入力し、2015～2100年のマクロ経済指標を推計した。人口シナリオは、国立社会保障・人口問題研究所の中位推計（2012年版）による。TFPについてはConstant TFPとHigh TFPという2つのシナリオを仮定した。前者はTFPが2014年の水準で固定されるシナリオであり、後者は各年のTFPが確率分布の95%クオンタイルを通過するシナリオで、2100年のTFPは2014年の水準と比べて31%高くなる。各年のTFPがHigh TFPの仮定値を上回る確率は5%である。

マクロ経済指標の推計結果を図(1)-6に示す。生産性が向上を続けるHigh TFPシナリオにおいても、GDPは2030年代にピークアウトし、2100年には1990年代の水準まで縮小することが明らかと



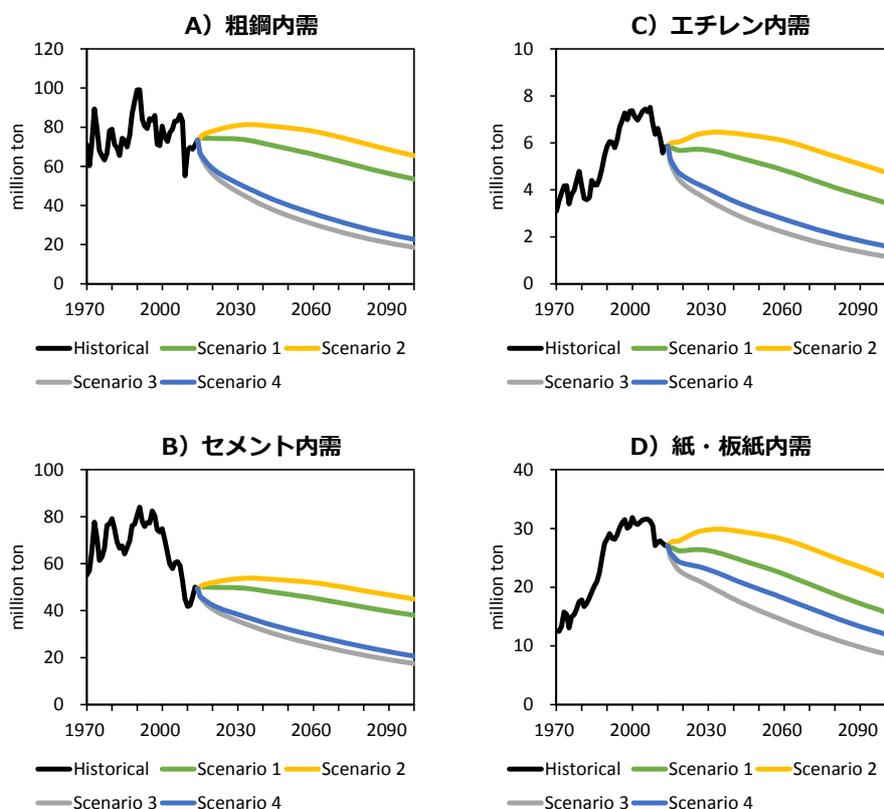
図(1)-6 マクロ経済指標の推計結果

なった。家計消費支出と総固定資本形成も同様の傾向を示している。GDPが縮小する主な原因は労働人口の減少であり、労働人口は2014～2100年の期間に6,390万人から2,080万人まで減少することが影響している。このことから、少子高齢化に伴う労働力の減少を生産性の向上で補うことは容易ではないことが示唆される。

## 2) 素材需要分析モデルを用いた将来の素材需要量推計

本研究にて構築したモデルにおいて素材需要のパラメータを推定したところ、いずれの素材についても切片が時間変動しており、データ期間を通じて下方トレンドに従っていることが明らかとなった（弾力性は一定）。これは、素材の消費強度（マクロ経済指標を固定したときの素材消費量；Material Consumption Intensity、MCI）が徐々に低下していることを意味し、過去から現在にかけて同程度の社会経済活動を維持するために必要となる素材量が減少している（効率的な素材利用が進んでいる）ことを示している。そこで、将来のMCIについてConstant MCIとLow MCIという2通りのシナリオを仮定した。前者はMCIが2014年の水準で固定されるシナリオであり、後者は毎年のMCIが確率分布の5%クォンタイルを通過するシナリオで、2100年のMCIは2014年の水準を大きく下回る。

前述したマクロ計量モデルの出力を素材需要モデルに入力し、2015～2100年の素材内需を推計した（図(1)-7）。シナリオ1～4はそれぞれ、TFPとMCIに関するシナリオの組合せに対応しており、具体的な組合わせは表(1)-3にまとめる。GDPの縮小に伴って家計消費支出と総固定資本形成が縮



図(1)-7 素材内需の推計結果

表(1)-3 素材需要の将来推計に用いたシナリオ

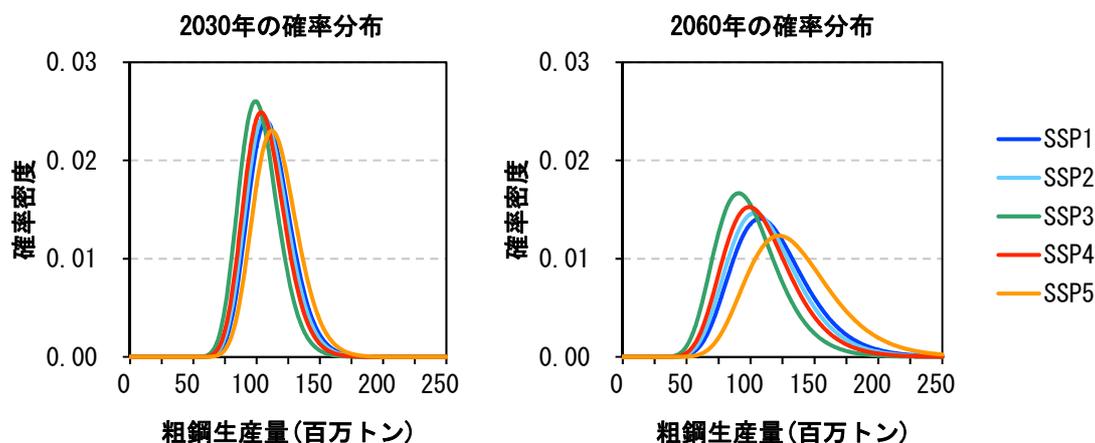
Scenario	TFP	MCI
1	Constant	Constant
2	High	Constant
3	Constant	Low
4	High	Low

小するため、素材内需はいずれも減少傾向を示している。特に、MCIが低下するシナリオ3～4では減少速度が大きく、2100年における粗鋼やセメントの内需は、過去の水準を大きく下回ることが予想されることが明らかとなった。

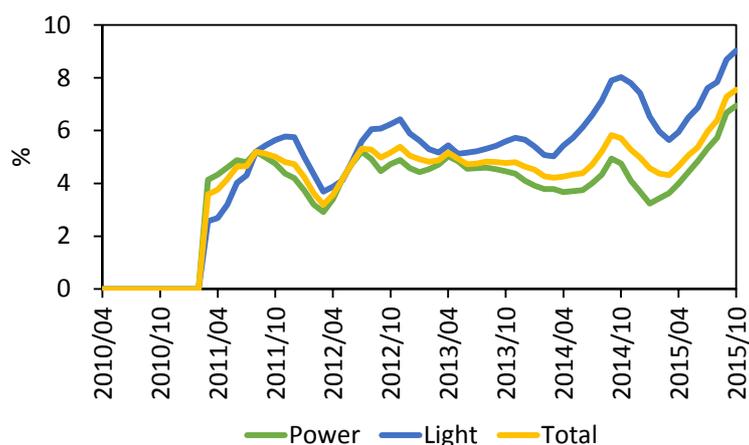
つぎに、粗鋼生産量について外需も考慮した分析を行った結果について述べる。前述の分析より、粗鋼内需の時系列データが下方トレンドを含んでいることが明らかとなっている。これは、高度経済成長期の終焉、及び産業構造の変遷に伴う縮小を反映していると考えられる。

1980年以降、日本の実質GDPは緩やかに成長を続けてきたが、粗鋼生産量には上方トレンドが見られない。これは、経済成長の効果が下方トレンド、すなわち、鉄鋼依存度の低下によって相殺されたためである。日本の鉄鋼業は、近年外需への依存を強めており、その傾向はトレンドからも明らかとなっている。特に、2000年代前半に中国を始めとするアジア諸国の経済成長に伴って鉄鋼外需が急拡大し、粗鋼生産量のトレンドは一時的に横ばいからやや上方トレンドを示すようになったが、世界金融危機（2008～2009年）の影響でトレンドは再び下方に転じている。日本の粗鋼生産量は、国外の経済動向に大きく左右される状況にあり、先行きはきわめて不透明である。そこで、鉄鋼の外需の指標として世界の社会経済シナリオであるSSPのGDPを利用し、内需も含めた日本の鉄鋼産業における粗鋼生産量を分析した。

図(1)-8は2030年及び2060年の粗鋼生産量の確率分布を示している。極端に高い経済成長率を仮定するSSP5を除くと、粗鋼生産量の期待値は1980～2014年の変動幅に収まっている。しかしながら、いずれの確率分布も分散が大きく、粗鋼生産量が期待値から乖離する可能性を示唆している。分散の大部分は、時系列データに内在する確率トレンドに由来する。日本経済の鉄鋼製品に対す



図(1)-8 2030年及び2060年における日本の粗鋼生産量の確率分布



図(1)-9 節電効果の月次推定値

る依存度は、国内外の社会経済状況に応じて確率的に変動しており、長期的には大きな不確実性をもたらす。それゆえ、粗鋼生産量の将来推計にあたり、実質GDPなど主要な経済変数の効果を見るだけでは不十分である。日本鉄鋼連盟は、2030年の粗鋼生産量について1億1千万トン～1億3千万トンという暫定的な見通しを提示している。図(1)-8の確率分布によると、上記の見通しが実現する確率は25～40%にとどまり、粗鋼生産量の確率トレンドに大きな影響を与える鉄鋼市場の動向に注意を払う必要がある。

### 3) 電力需要分析モデルを用いた東日本大震災後の節電行動定着に関する分析

電力需要モデルを用いて、2011年3月～2015年10月の節電効果を評価した。既往研究は、震災前と震災後の電力需要を比較することで節電効果を推定しているが、このアプローチでは基準時点の選び方によって結果が大きく変わってしまう。そこで、本研究では、震災の影響を含む需要推計値と含まない需要推計値を比較することで節電効果を推定した。前者はモデルの推計値そのものであり、後者は震災ダミーを同じ長さの零ベクトルで置き換えたモデルの推定値である。動力、電灯、総電力需要についての節電効果を図(1)-9に示す。動力需要の節電効果は2.9～6.9%、電灯需要の節電効果は2.6～9.0%と推定された。また、総電力需要の節電効果は3.2～7.5%と推定された。節電効果の推定値に下方トレンドが見られないことから、震災後の節電行動は定着していると考えられる。震災を契機として電力需要に構造的な変化が生じており、本研究の結果から将来推計を行う際には、消費者の節電行動を考慮に入れる必要があるであろうことが示唆された。

## (2) バックキャストモデル及び技術選択モデルを用いた2050年までの長期排出削減経路の分析

### 1) バックキャストモデルを用いた長期排出削減経路の実現可能性分析

日本を対象に2050年までの長期排出経路及びその実現のための対策・施策を評価するにあたり、まずバックキャストモデルを用いて長期排出経路の実現可能性分析を実施した。

分析では、原子力及びCCSの利用可能性に着目して分析ケースを設定した。具体的には表(1)-4に示す通りである。いずれのケースでも、2050年のGHG排出量は可能な限り最小化するとする制約を追加的に設けた。これは、ケースによってはわが国の掲げるGHG削減目標（2050年に80%）を

表(1)-4 バックキャストモデルを用いた排出削減経路分析のケース一覧

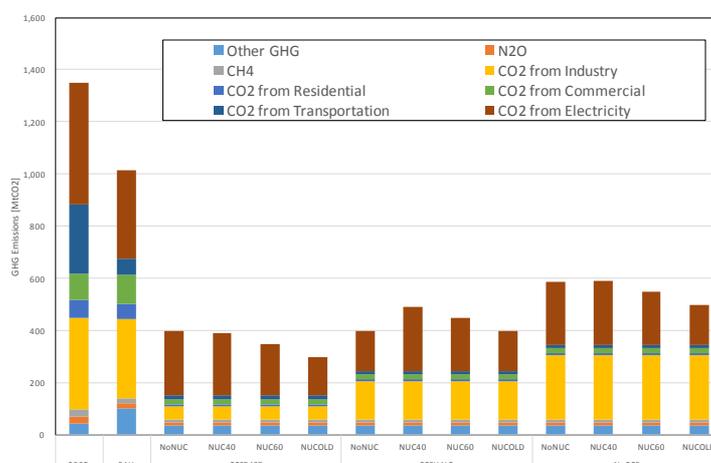
	原子力の想定	CCSの想定
ケース1-1	原子力なし (NoNUC)	2050年2億トン (CCSBASE)
ケース1-2	原子力なし (NoNUC)	2050年1億トン (CCSHALF)
ケース1-3	原子力なし (NoNUC)	CCSなし (NoCCS)
ケース2-1	40年廃炉 (NUC40)	2050年2億トン (CCSBASE)
ケース2-2	40年廃炉 (NUC40)	2050年1億トン (CCSHALF)
ケース2-3	40年廃炉 (NUC40)	CCSなし (NoCCS)
ケース3-1	60年廃炉 (NUC60)	2050年2億トン (CCSBASE)
ケース3-2	60年廃炉 (NUC60)	2050年1億トン (CCSHALF)
ケース3-3	60年廃炉 (NUC60)	CCSなし (NoCCS)
ケース4-1	旧・エネ基 (NUCOLD) *	2050年2億トン (CCSBASE)
ケース4-2	旧・エネ基 (NUCOLD) *	2050年1億トン (CCSHALF)
ケース4-3	旧・エネ基 (NUCOLD) *	CCSなし (NoCCS)

\*東日本大震災以前のエネルギー基本計画から福島第一、第二及び浜岡等の廃炉の分を差し引いて設定。

満たさない結果が予期されたところ、各ケースそれぞれにどこまで削減可能かを比較、検討するために設けた制約である。これらに加えて、2050年のGHG排出量に制約を課さないシナリオ(BAU)についても分析した。

バックキャストモデルによる2050年のGHG排出量の分析結果を図(1)-10に示す。基準年(2005年)の排出量と比較すると、GHG排出量制約及び原子力・CCSの利用可能性に制約を置かないシナリオ(BAU)であっても、日本のGHG排出量は減少することがわかる。これは、人口減少等によりサービス需要が減少することによる効果である。また、2005年のGHG排出量と比較すると25%減にとどまり、長期的に低炭素社会に向かうには十分ではない。

原子力発電とCCSの利用可能性について制約を課した場合の結果に着目すると、原子力発電に関する想定は、主に電力部門からのCO<sub>2</sub>排出量に影響し、CCSに関する想定は、主に産業部門のCO<sub>2</sub>排出量に影響することが分かる。CCSが年間2億トン利用でき、原子力発電も2050年に一定程度利用できる場合には、わが国の掲げる2050年までにGHG排出量を80%削減する目標に大きく近づく



図(1)-10 2050年のGHG排出量の分析結果

ことが可能であるが、原子力発電とCCSともに制約がかかる場合には、この削減目標の達成は必ずしも確実ではないことがわかる。なお、本モデルではサービス需要を外生的に与えており、省エネルギー等の推進やライフスタイル・ワークスタイル変化による需要削減等の効果は頭には組み入れられておらず、これらの効果を含めることでサービス需要そのものの低減も期待でき、原子力とCCSの制約が厳しい場合でも2050年80%削減の達成可能性は残されているものと考えられる。

## 2) 技術選択モデルを用いた長期排出削減経路及び対策・施策の分析

バックキャストモデルによる実現可能性の分析結果も踏まえ、技術選択モデルにより長期排出削減経路実現に向けた対策・施策を分析した。分析にあたっては、温室効果削減に大きく寄与する技術の導入に際しての不確実性を考慮するため、技術制約を伴わない標準ケース、原子力再稼働が行われない原子力ゼロケースに加えて、炭素隔離貯留(CCS)による貯留量が半分の100Mt-CO<sub>2</sub>となる、CCS半減ケースについて推計を実施した。なお、原子力発電については、費用最小化による技術選択に基づくのではなく、発電容量、最大設備利用率を、ケースごとに外生的に設定した。すなわち、原子力ゼロケースでは、2014年度以降、すべての原子力発電について再稼働が行われず、新增設も行われないと仮定し、標準ケース、CCS半減ケースでは、2013年度末において原子力規制委審査中の原子炉のうち、運転開始後の経過年数が30年以下のものは再稼働すると仮定し、以降はIEAのWorld Energy Outlook 2012のNew Policies Scenarioに従い、1990年以降に稼働開始したものは50年、それ以外は40年で廃炉と想定した。また、新設2基(大間、島根3号)を想定し、設備利用率はすべて70%とした。

日本全体の将来のマクロフレームは、中央環境審議会2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会(以下、2013小委)技術WGの想定に基づき、表(1)-5のとおり設定した。地域別のマクロフレームは、推計または按分により設定する。例えば、人口および世帯数は、国立社会保障・人口問題研究所が推計した都道府県別将来世帯数の推計式を元に、2035年以降は中位推計のパラメータを2050年まで延長し、都道府県別の将来世帯数を推計した。地域別の実績データが入手できない部門は、例えば産業部門であれば、工業統計より得られる地域別生産額シェアを用いて、推計開始年の活動量を按分し、将来の地域別シェアは、基準年の地域別シェアが維持されると仮定した。

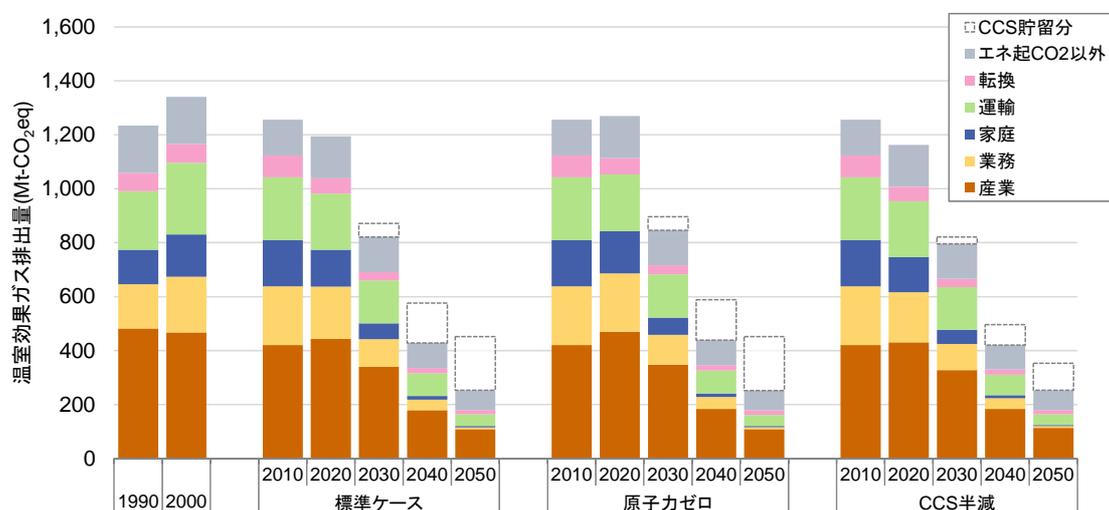
表(1)-5 主要なマクロフレームの想定

	2010年	2050年
粗鋼生産量(万t)	11,079	8,500
セメント生産量(万t)	5,605	5,000
世帯数(万世帯)	5,336	4,429
業務床面積(百万m <sup>2</sup> )	1,834	1,896
旅客輸送量(億人km)	12,640	11,400
貨物輸送量(億tkm)	5,356	6,870

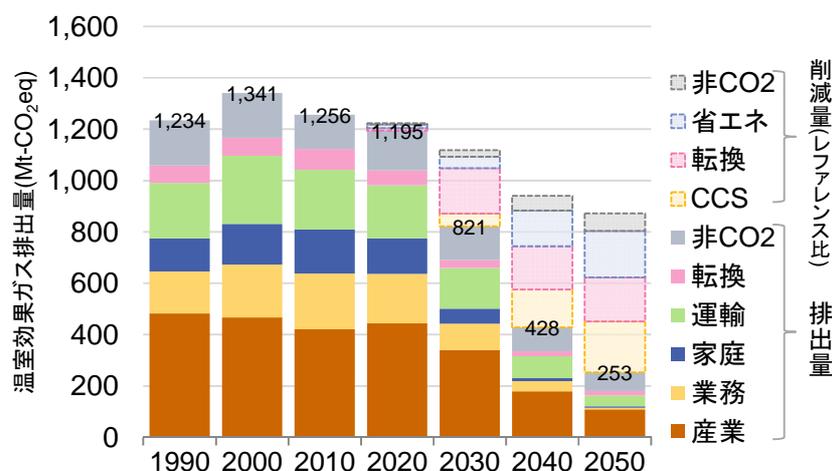
### a. 温室効果ガス排出量の分析結果

2050年の温室効果ガス排出量は、全てのケースにおいて2050年80%減が達成される結果となった（図(1)-11）。2050年時点における排出源は、産業部門が約4割を占めており、残りは運輸部門、エネルギー起源CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスが多くを占める。電力の低炭素化により、大幅なCO<sub>2</sub>削減が可能となる家庭・業務部門、旅客輸送部門と比較して、産業部門では、高熱需要に対して化石燃料が消費されることが、特に産業部門においてCO<sub>2</sub>排出量が多く残る要因である。また、貨物輸送部門においても、特に大型の長距離輸送車は電気自動車への置き換えが困難であるため、化石燃料の燃焼に伴い、2050年においてもCO<sub>2</sub>排出が残る結果となっている。

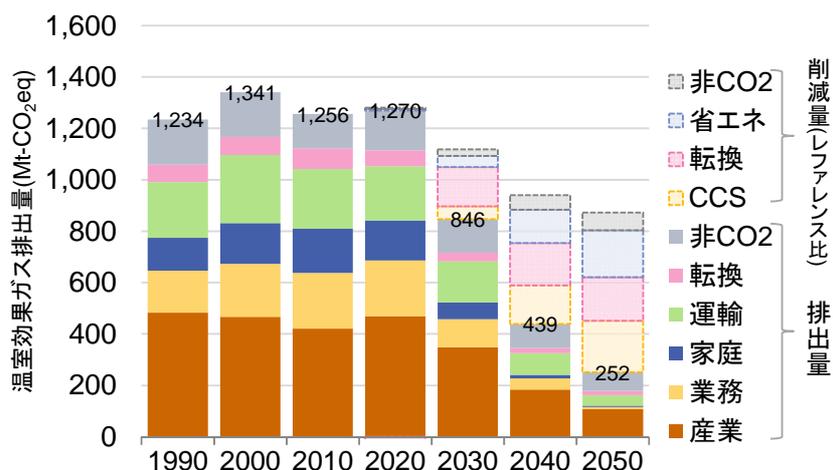
要因別の温室効果ガス削減内訳は、省エネルギー、非CO<sub>2</sub>の比率は全てのケースにおいてほぼ近い水準となっている。一方、CCSによる削減寄与度が比較的小さいCCS半減ケースでは、エネルギー転換部門における削減寄与度が他のケースと比較して高い水準にある（図(1)-12～図(1)-13）。



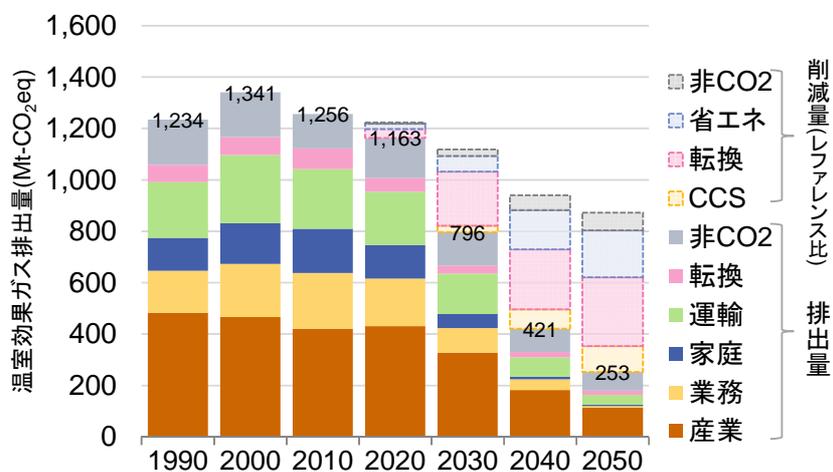
図(1)-11 温室効果ガス排出量の推計結果



図(1)-12 要因別削減量内訳（標準ケース）



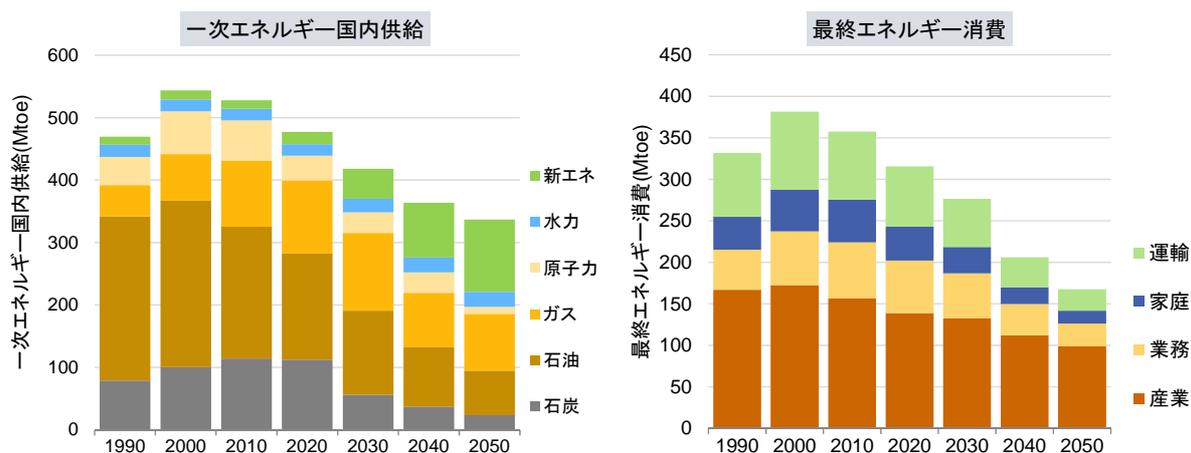
図(1)-13 要因別削減量内訳 (原子力ゼロ)



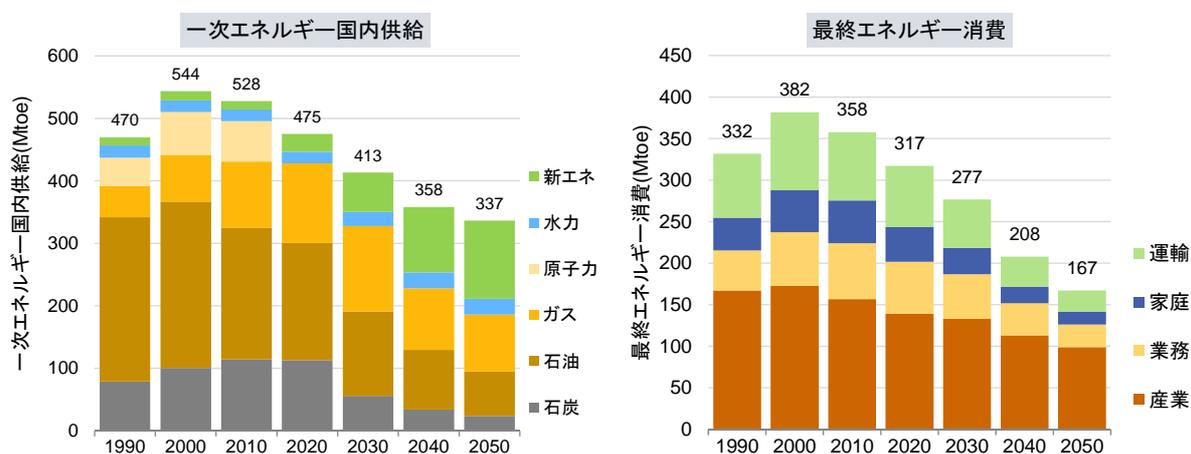
図(1)-14 要因別削減量内訳 (CCS半減)

## b. エネルギー需給の分析結果

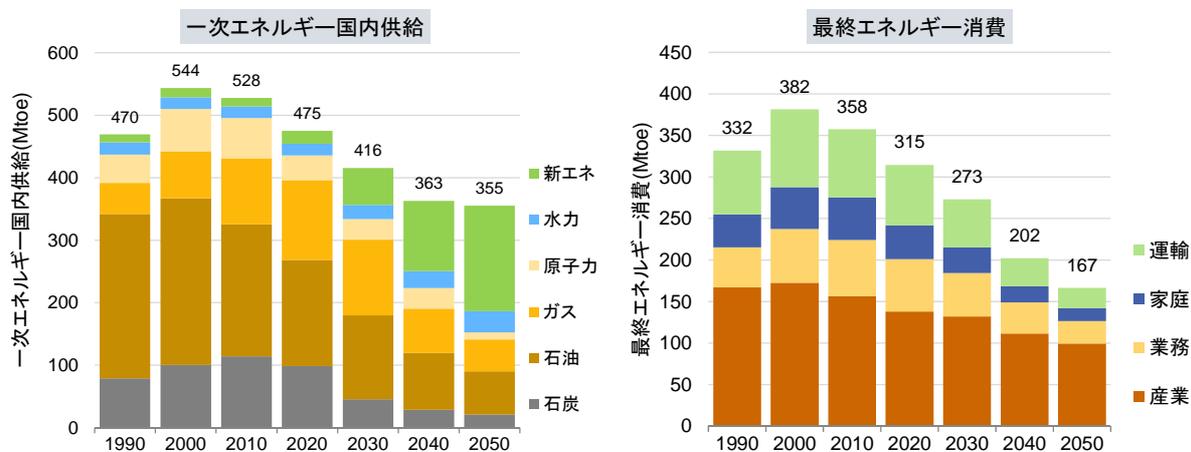
各ケースにおけるエネルギー供給・需要の推計結果を図(1)-15～図(1)-17に示す。一次エネルギー供給量（非エネルギー用途を含む）のうち、再生可能エネルギーの比率が2050年に大幅に増加し、水力を含めれば、約4割を再生可能エネルギーが担う結果となった。CCS半減ケースでは、化石燃料シェアがさらに低下し、約6割を再生可能エネルギーが占める結果となった。さらに、化石燃料のうち、石炭・石油の消費量は大きく低下し、ガスの比率が高まる結果となっており、化石燃料全体の低炭素化に寄与している。また、2050年の最終エネルギー消費量は、2010年と比較して約半減する結果となっており、80%目標達成における省エネルギーの重要性が示されたといえる。産業部門では、最終エネルギー消費は約3割減に留まる一方、人口減少による最終エネルギー消費減の効果も含まれる家庭部門や、電気自動車へのシフトにより大幅なエネルギー効率（二次エネルギーベース）改善が見込まれる運輸部門においては、2010年と比較して、エネルギー消費量は約3分の1まで削減される結果となった。



図(1)-15 エネルギー供給・需要量の推計結果（標準ケース）



図(1)-16 エネルギー供給・需要量の推計結果（原子力ゼロ）



図(1)-17 エネルギー供給・需要量の推計結果（CCS半減）

### c. 発電電力量の分析結果

標準ケースにおける発電電力量・発電容量の推計結果について図(1)-18に示す。2050年の発電電力量構成は、水力を含めれば約5割強を再生可能エネルギーが占め、残りはほぼCCS付のガス火力発電、原子力発電が占める結果となった。これらは、CO<sub>2</sub>排出係数がほぼゼロの低炭素エネルギー源であるため、2050年における電力のCO<sub>2</sub>排出係数はほぼゼロとなる。そのため、電力のシェアが高まる家庭・業務部門におけるCO<sub>2</sub>排出量は、極めて低い水準まで低下する結果となった。また、2030年頃までは、省エネルギーによって電力需要は減少するが、それ以降は需要部門における電力へのシフトに伴い、電力需要は2030年以降増加に転じ、2050年の電力需要は2010年と同程度となった。

発電電力量に占めるCCSなしの火力発電のシェアは大幅に低下する一方で、発電容量については、2050年までCCSなしのガス火力、石炭火力、石油火力が一定量残り、火力発電の総発電容量は、2010年とほぼ同水準となった。これは、太陽光や風力といった、出力変動を伴う電源が大量に導入されるため、それらのバックアップ電源として火力発電の容量が必要となるためである。なお本モデルでは、先述のように発電部門を簡易化していることから、出力変動を伴う電源の大量普及時における電力需給調整については、後述の多地域電源計画モデルを用いた分析も踏まえて議論していくことが肝要である。

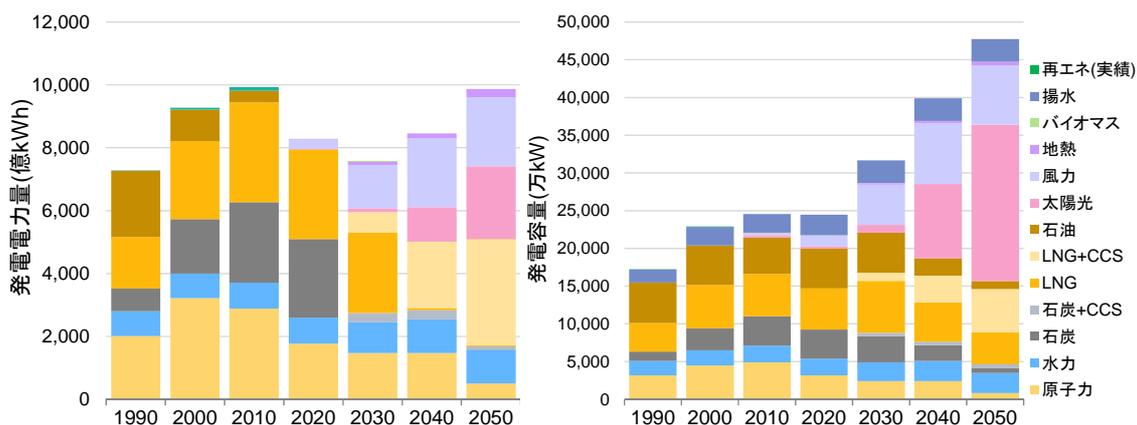
原子力なし、CCS半減ケースにおける発電電力量の推計結果を図(1)-19、図(1)-20に示す。まず、原子力ゼロケースでは、標準ケースと比較して、特に2020～2040年頃において、原子力発電の代わりに火力発電による発電量が増加している。しかし、2050年には、標準ケースでも発電電力量に占める原子力比率は5%程度に留まっていることから、原子力ゼロケースとの差は比較的小さい。

CCS半減ケースでは、発電電力量に占めるCCS付火力の比率が、標準ケースと比較して大幅に低下し、太陽光・風力発電比率が7割近くまで高まる結果となった。このようなケースでは、出力変動に対応する電力需給調整対策の必要性がさらに高めると考えられる。なお、発電部門以外にも、鉄鋼・セメント部門にCO<sub>2</sub>回収技術の導入を想定しているため、発電部門におけるCCS付火力発電の量は、標準ケースの半分より低い水準に留まる結果となった。

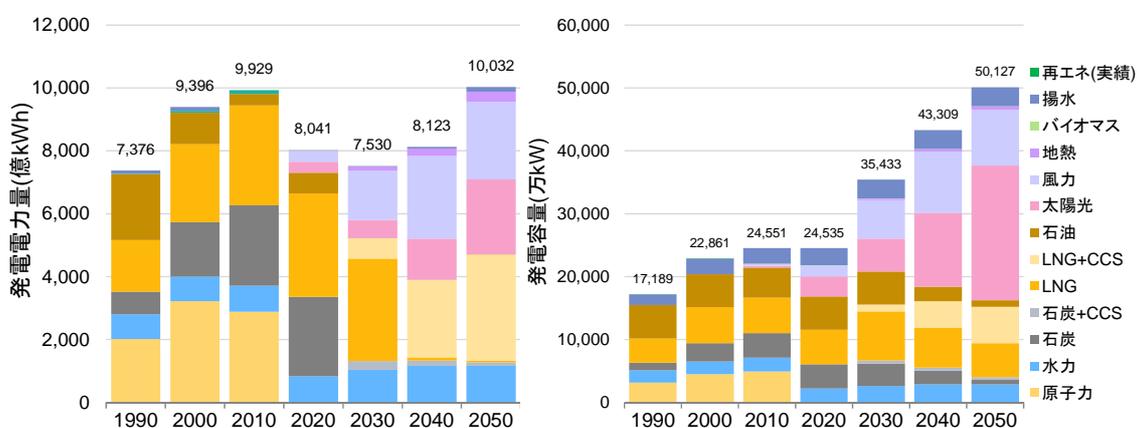
### d. 化石燃料輸入額・累積投資額の分析結果

ケース別の化石燃料輸入額は、各年における化石燃料消費量に、IEAのEnergy Technology Perspectivesにおける2050年までの燃料価格見通しに基づき推計した、将来の燃料価格を乗じることで算出した。

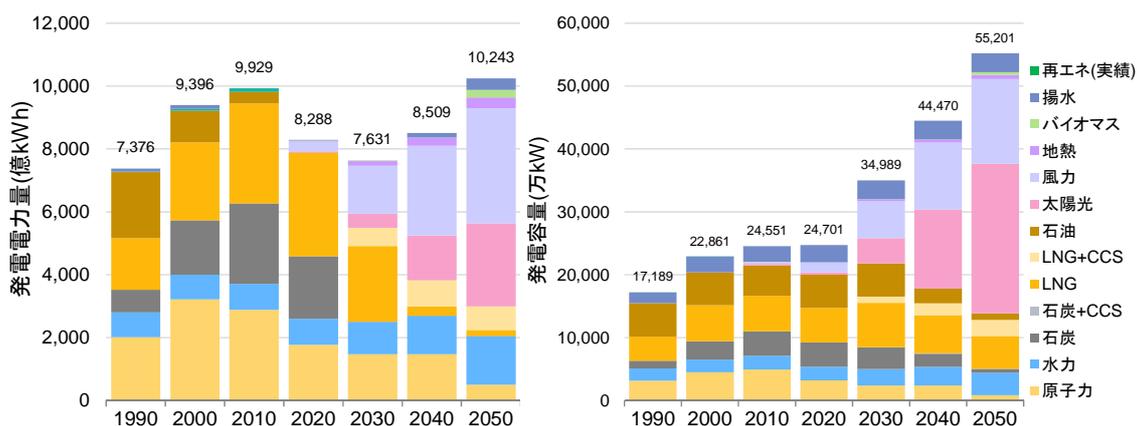
2020年の化石燃料輸入額は、主に原子力発電のシェア低下に伴う化石燃料消費量増に伴い、2010年実績より増加し、その金額は特に原子力ゼロケースにおいて大きい(図(1)-21)。しかしながら、2030年には、省エネルギー、再生可能エネルギーの普及が進むことによって、輸入額は2010年より低い水準まで低下し、ケース間の差も縮小する結果となった。さらに、2050年には、2030年の約5割程度まで低下する結果となった。特に、CCS半減ケースでは、化石燃料から再生可能エネルギーへのシフトが大幅に進むため、他の2ケースと比較して、輸入額は低い水準となった。



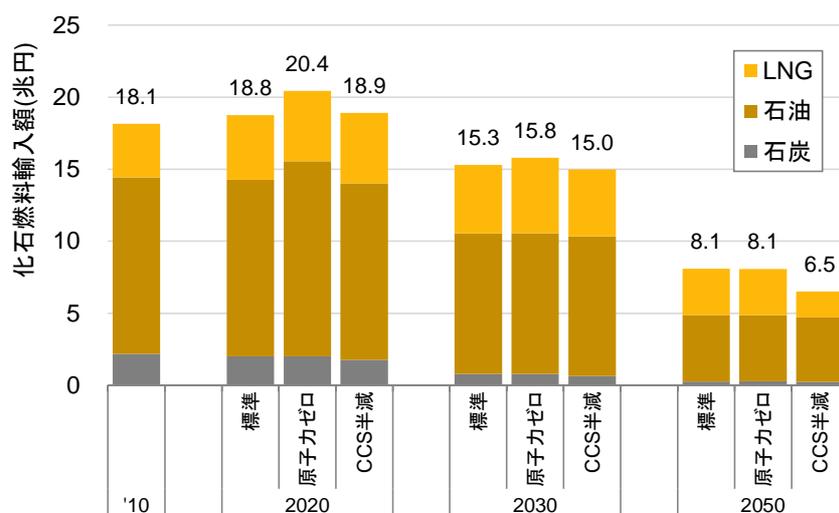
図(1)-18 発電電力量・発電容量の推計結果（標準ケース）



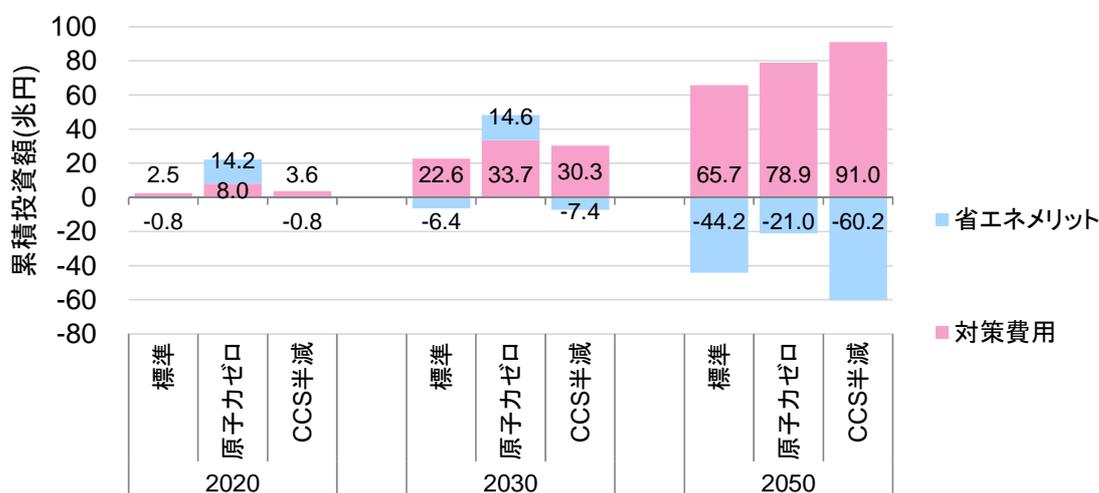
図(1)-19 発電電力量・発電容量の推計結果（原子力ゼロ）



図(1)-20 発電電力量・発電容量の推計結果（CCS半減）



図(1)-21 ケース別の化石燃料輸入額の比較



図(1)-22 ケース別の累積投資額（レファレンスケース比）

各ケースにおけるレファレンスケース比の追加対策費用、エネルギー費用の削減（省エネメリット）について、割引率3%を用いて現在価値換算した累積投資額を算出した。

2020年、2030年、2050年までのケース別累積投資額を図(1)-22に示す。対策費用は、2030年までは原子力ゼロケースが最も大きく、2030年までの累積対策費用は約33兆円に達する。これは、原子力の停止により主に発電技術の新設が他のケースと比べて促進されるためであると考えられる。一方、2050年までの累積対策費用はCCS半減ケースにおいて最も大きく、約91兆円に達する。これは、再生可能エネルギーの増加によりエネルギー転換部門における投資額が他のケースより多くなるためである。

一方、累積の省エネメリットは、標準ケースでは2050年時点で約41兆円、CCS半減ケースでは約60兆円に達する結果となった。原子力ゼロケースでは、比較基準のレファレンスケースにおいて原子力の再稼働を見込んでいるため、2030年まではエネルギー費用がレファレンスケースより高い水準となる。しかし、2050年までの累積エネルギー費用は、レファレンスケースを下回る結果となっている。

### (3) 多地域電源計画モデルを用いたわが国の電力部門を対象とした長期大幅削減シナリオの分析

#### 1) 発電部門における長期大幅削減シナリオの実現可能性分析

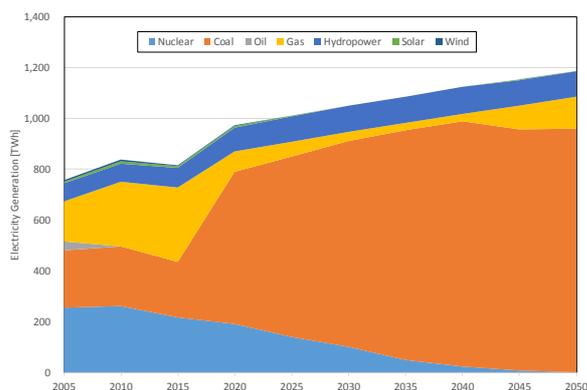
発電部門における長期大幅削減シナリオの実現可能性分析の結果について述べる。分析は、以下の3つのシナリオを対象に実施した。なお、制約を課す石炭火力はCCSが併設されない設備(Unabated)のみとした。

- ケース0 (BAU) : 原子力発電は40年廃炉とし、石炭火力の新設に制約を設けないケース。
- ケース1 (FIXNUC) : 原子力発電のみ追加的な新設を認めず、既設は40年で廃炉となるケース。石炭火力はCCS併設の有無にかかわらず新設が可能とする。
- ケース2 (FIXCOL) : CCSなし石炭火力(Unabated Coal)の新設を認めないケース。原子力発電は、2011年の設備容量(除く福島第一、福島第二、及び3.11以降廃炉となった発電所)を上限として新設も可能とするが、40年で廃炉とする。
- ケース3 (FIXNUCCOL) : 原子力発電とCCSなし石炭火力のいずれでも新設を認めないケース。

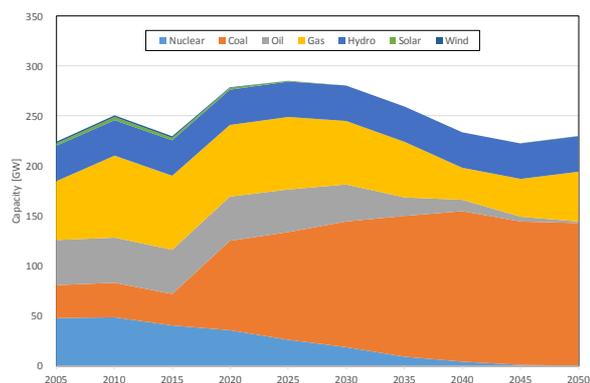
まず、ケース0(BAU)での発電電力量及び発電容量の結果について述べる(図(1)-23及び図(1)-24)。原子力発電及び石炭火力を課さないケース0では、新設電源としてCCSなし石炭火力が選択され、2015年以降発電量及び発電電力量ともに石炭火力の割合が徐々に増加する。その結果、2050年には、電力需要の81%が石炭火力にて供給されることになる。原子力発電、石炭火力発電、太陽光発電及び風力発電は新設は行われず、既設設備の廃止に従って徐々に設備容量と発電電力量が低下する。水力発電は、将来においても一定程度の割合を維持するが、これは本分析では水力発電(一般水力及び揚水式水力)は既設及び新設予定の設備が将来も維持されるものと想定しているためである。石炭火力発電が増加する結果、電力部門からのCO<sub>2</sub>排出量は2015年以前は330 MtCO<sub>2</sub>前後であったものが、2050年には815 MtCO<sub>2</sub>と約2.5倍に増加する。

つぎに、原子力発電と石炭火力それぞれに制約を課したケース(ケース1~3)の結果について述べる(図(1)-25及び図(1)-26)。CO<sub>2</sub>排出量削減制約を加えると、将来の新設電源としてはCCS併設ガス火力発電と原子力発電所及びCCS併設石炭火力が同程度導入される。ガス火力も含め、CCSを併設しない(Unabated)火力発電は2050年には利用されず、寿命(40年)以内のCCSを併設しない火力発電は、2050年には遊休設備となる。遊休設備となる発電容量の割合は、原子力発電と石炭火力発電に対する制約によっても異なるが、おおむね総設備容量の5-10%となる。また、CO<sub>2</sub>排出制約を課すことによって太陽光発電及び風力発電の大幅導入が進み、ケースによって違いはあるものの、おおむね発電電力量の過半がこれらの電源により供給される。

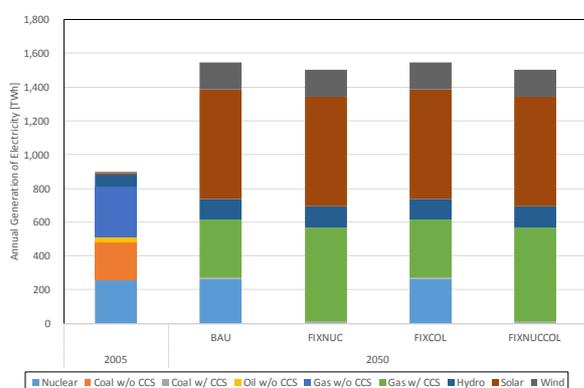
CO<sub>2</sub>排出量の制約を課すことにより、発電所の運用も変化し、ベースロードとミドルロードを石炭火力を制約した場合には原子力発電所が、原子力発電所を制約した場合にはCCS併設石炭火力発電所が担い、ミドルロードの一部とピークロードをケースを問わずCCS併設ガス火力が担うことがわかった。なお、電力需給のバランスを確保するために、電力供給が超過する時間帯を中心に最短距離での送電では無く、遠方へ迂回して供給することで距離に比例する電力損失を意図的に発生させる事象が確認された。加えて、これらのCO<sub>2</sub>排出量の少ない電源への転換により、CO<sub>2</sub>排出量は2005年比で95%まで削減できることがわかった。



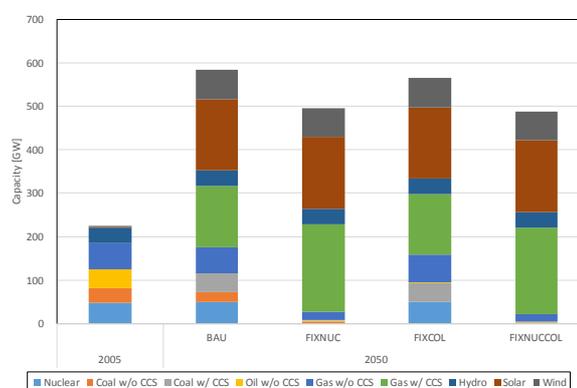
図(1)-23 発電電力量の変化(ケース0(BAU))



図(1)-24 発電容量の変化(ケース0(BAU))



図(1)-25 2050年のケース別発電電力量

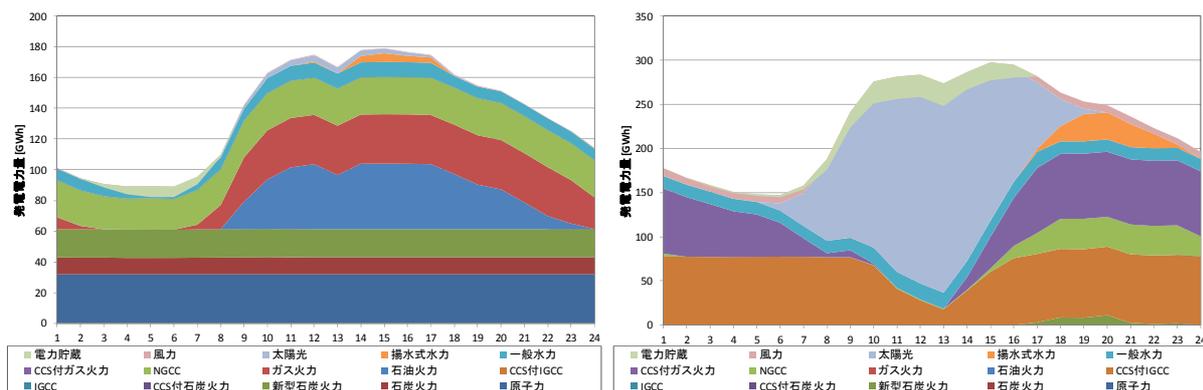


図(1)-26 2050年のケース別発電容量

## 2) 再生可能エネルギー大規模導入時の電力系統安定化対策に関する分析

電力部門のCO<sub>2</sub>排出量を大幅削減するためには、太陽光発電と風力発電の大幅導入が不可欠であることが明らかとなったが、これら再生可能エネルギー発電設備の大規模導入により、毎時の電力需給バランスも大きく変化する。図(1)-27に、CO<sub>2</sub>排出量制約を課した場合のケース0 (BAU) における2005年と2050年それぞれの夏期最大三日の電力需給バランスを示す。2005年は、原子力発電と石炭火力発電がベースロードとなり、ガス火力とガスコンバインド (NGCC) がミドルロードをになう。日中のピークロードは石油火力と揚水式水力によりまかなわれる。いっぽう、2050年は2005年とは異なり明確なベース・ミドル・ピークロードの分類はなく、日中の太陽光発電からの発電電力を中心に、不足分を他の電源でまかなうという電源運用に変化する。また、2005年は揚水式水力への電力貯蔵は主に夜間に行われるが、2050年は日中の太陽光発電や風力発電の発電量が高まる時間帯に揚水式発電への電力貯蔵が行われ、夕方から夜間にかけての太陽光発電からの発電量が低下し他の発電設備の出力増加が間に合わない時間帯に電力需要を賄うために発電するという運用に変化する。

このように、発電部門の低炭素化には太陽光発電及び風力発電の大幅導入が必要であり、導入が拡大するに伴い電源運用も変化する事が明らかとなった。しかし、気候条件等により発電出力が変動する再生可能エネルギー(変動性再生可能エネルギー: VRE) の導入が可能かどうかは、電力系統の安定性分析と併せて議論することが重要であるが、長期排出経路分析と安定性分析を



(a) 2005年

(b) 2050年

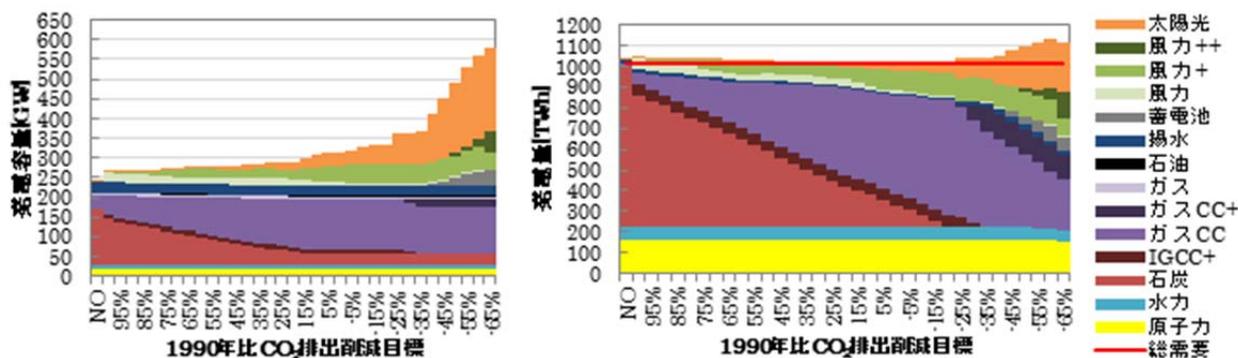
図(1)-27 夏期最大三日の電力需給バランス（ケース0（BAU））

同時に実施することは分析上の困難が伴う。そこで、単年度を切り取り、CO<sub>2</sub>排出量削減目標を変化させてVREの導入量と電力システムの安定性を分析し、もって再生可能エネルギー発電の導入量が実現可能かを検討した。分析では、再生可能エネルギー発電導入量拡大による電力系統安定化問題が顕在化すると見られる2030年を対象とした。なお、再生可能エネルギー導入量には原子力発電所再稼働の有無も影響することから、分析では原子力発電所の再稼働あり・なしを想定している。

図(1)-28(a)及び(c)に、原子力発電所再稼働ありとなしの場合それぞれのCO<sub>2</sub>排出削減目標別の発電容量を示す。2030年断面では、発電部門からのCO<sub>2</sub>排出量削減は、原子力発電再稼働有りの場合には1990年比-67%、なしの場合には-50%が限界であったため、これらの削減目標までの結果を示している。太陽光発電の増加に伴い、総発電容量は増加するが、これは、太陽光発電と他の発電方式の設備利用率が異なることに起因するものである。原子力発電再稼働あり・CO<sub>2</sub>削減目標-67%のケースでは、全設備容量の約35%を太陽光発電が占める結果となっている。

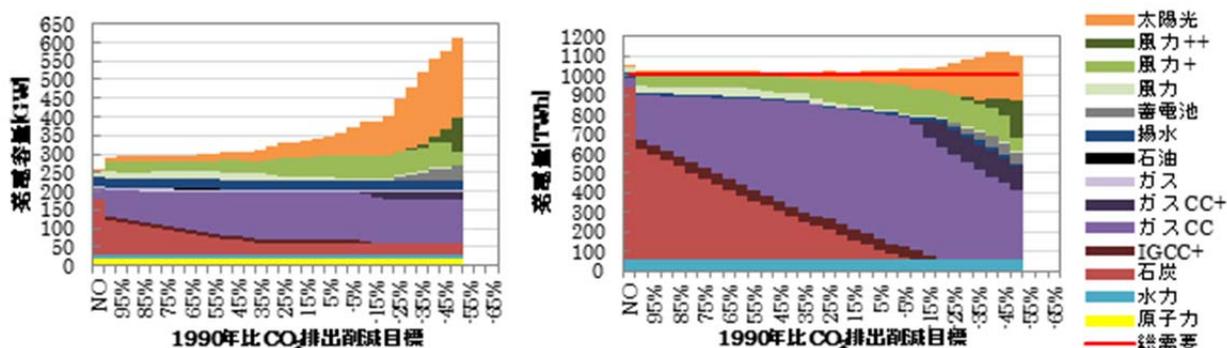
原子力発電所再稼働ありとなしの場合それぞれのCO<sub>2</sub>排出削減目標と発電構成との関係を図(1)-28(b)及び(d)に示す。削減目標がない場合（図中のNO）には、VREはほとんど導入されず、石炭火力が増加するために発電部門からのCO<sub>2</sub>排出量は、再稼働ありで1990年比134%増（678Mt-CO<sub>2</sub>）、再稼働なしでは168%増（777Mt-CO<sub>2</sub>）となった。排出目標が厳しくなるに従い、石炭火力からガスコンバインドサイクルやCCS併設型IGCC（IGCC+）への転換が進むとともに、蓄電池併設風力発電（風力+）の導入量が増加する。さらに排出目標が厳しくなると、太陽光発電の導入と、ついでCCS併設型IGCCの代替としてCCS併設型ガスコンバインドサイクル（ガスCC+）へ転換される結果となった。CCSの貯留可能量が上限に達すると、太陽光発電および蓄電池の導入量が増加する。さらに-35%よりも削減目標が厳しくなると、LFC供給量の高いガスコンバインドサイクル発電の使用が制約されるため、短周期変動の100%抑制が可能な蓄電池併設型風力発電（風力++）のシェアが拡大する。

次に、この発電構成の結果をもとに、各VRE導入量と出力変動対策実施量の関係を分析した。風力発電比率と短周期変動対策用蓄電池の導入量、および、風力発電の解列比率の関係を図(1)-29に示す。風力発電比率は、風力発電からの発電量を総電力需要量で除すことにより求めた。また、解列率は、解列により失われた発電量を、解列を行わなかった場合の発電量（潜在的発電量）に



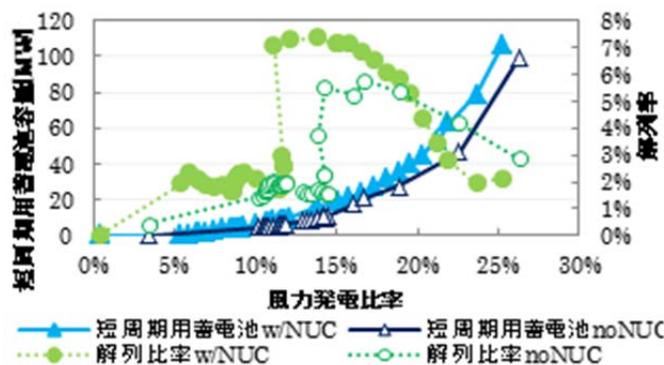
(a) 発電容量（原子力再稼働あり）

(b) 発電量（原子力再稼働あり）



(c) 発電容量（原子力再稼働あり）

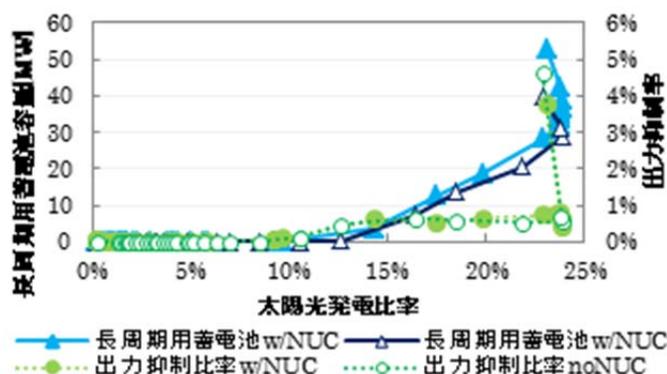
(d) 発電量（原子力再稼働あり）

図(1)-28 2030年のCO<sub>2</sub>排出量と発電方式別設備容量及び発電量との関係

図(1)-29 風力発電比率と出力変動対策の関係（全国）

より除すことにより求めた。

風力発電比率が増加するに従い、解列率および蓄電池各対策の導入量が増加する。両者を比較すると、短周期変動対策用蓄電池の導入よりも先に解列による出力変動対策が実施される結果となった。これは、解列に伴う発電量損失による風力の単位発電費用の増加に比べて、解列に伴う発電量損失の回避のための蓄電池導入による単位発電費用の増加が高額であることに起因している。また、風力発電比率が約15%に達した後は解列比率が減少し、短周期変動対策用蓄電池の導入量が加速度的に増加する結果となった。この解列率の減少は、短周期変動対策用蓄電池を併設した風力発電所の導入比率が高まった結果、風力の短周期変動が抑制され、解列による出力変動対策を行う必要性が無くなったために生じていると考えられる。原子力発電所再稼働の有無による



図(1)-30 太陽光発電比率と出力変動対策の関係 (全国)

影響を見ると、再稼働なしのほうが出力変動対策が実施される風力発電比率が高いことがわかる。これは、原子力発電は短期の出力調整を行わないと仮定し、火力と水力により系統側からのLFC調整力が供給されると仮定しており、原子力発電の比率がゼロで火力発電の比率が高い原発なしケースの方が、系統側からLFC調整力を多く供給できるためである。

太陽光発電比率と長周期用蓄電池の導入量、および、太陽光発電の出力抑制率を図(1)-30に示す。太陽光発電比率は、風力発電比率と同様に太陽光発電からの発電量を総電力需要量で除すことにより求めた。また、出力抑制率は、出力抑制により失われた発電量を、出力抑制を行わなかった場合の発電量（潜在的発電量）により除すことにより求めた。太陽光発電の場合には、太陽光発電比率が10%を超えた程度から出力抑制や蓄電池の導入が実施される。この比率は風力発電の結果より大きい。これは太陽光発電と風力発電の発電時間の違いが影響していると考えられる。一般に、太陽光発電は日中の発電量が大きく夜間は発電しないため、太陽光発電の短周期変動は日中に発生し夜間は発生しない。他方、日本の電力需要は夜間に比べて日中の方が高いため、昼間の方が火力発電の発電量は多い。すなわち、太陽光発電の場合、短周期変動が発生する日中に、系統からLFC調整力が多く供給できるため、系統側の対策のみで連系可能な比率が高くなっている。いっぽうで風力は日中・夜間問わずに発電するが、電力需要の低い夜間には、火力発電の発電量が少なくなり、LFC調整力の供給量も低下する。そのため、風力発電の場合は、夜間のLFC調整力が不足する時間帯に出力変動対策を実施しなければならないため、VRE側での対策（解列、蓄電池併設）が必要な比率が相対的に低くなっている。このような発電時間の違いが両発電方式の出力変動対策の実施水準の差に影響している。太陽光発電比率が約24%に達した後に急激に蓄電池容量、出力抑制率が増加しているが、これは系統に接続されたVREの比率が極端に高くなり、また火力発電や水力発電の比率が極端に低くなったために、VRE側での出力抑制策の必要性が急激に増加するために生じている。また、原子力発電再稼働の影響について見ると、風力発電と同様に再稼働なしの方が長周期用蓄電池の導入が始まる太陽光発電比率が高いことがわかる。

#### (4) 長期排出削減経路の簡易分析ツール（低炭素ナビ）の開発とワークショップでの有効性検討

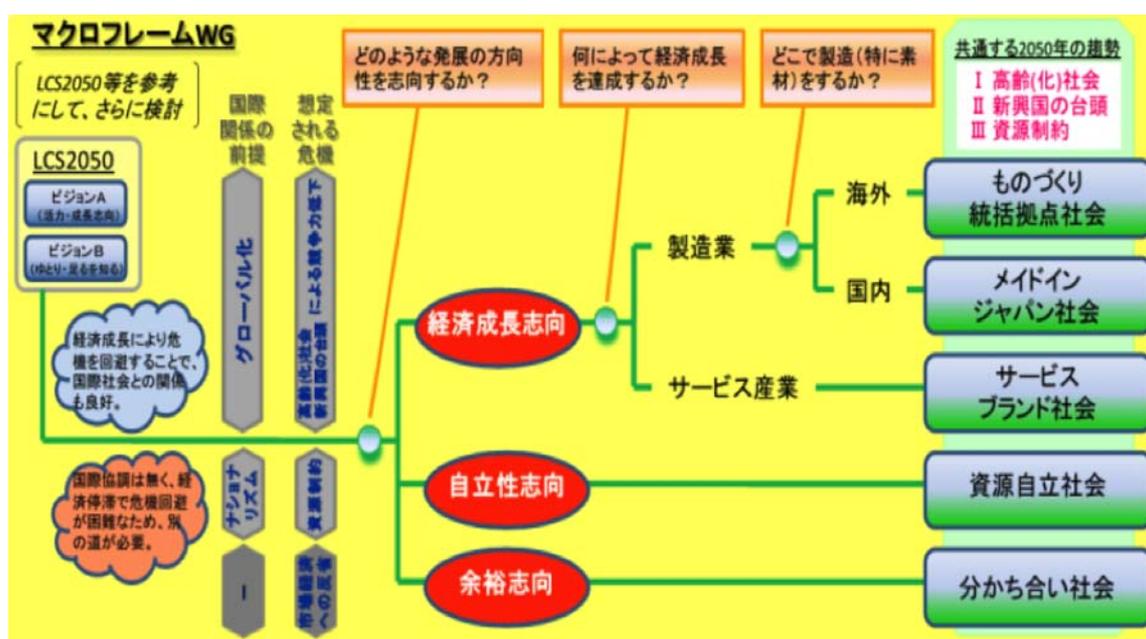
2050年におけるエネルギー消費および温室効果ガス排出の予測においては、将来の社会構造や経済活動レベルの想定が大きな影響を与える。そこで、日本低炭素ナビでは、環境省中央環境審議会 地球環境部会「2013年以降の対策・施策に関する報告書（地球温暖化対策の選択肢の原案について）」に示された5つの社会像を選択肢として想定した。具体的には、ものづくり統括拠点社会、メイドインジャパン社会、サービスブランド社会、資源自立社会、分かち合い社会である。各社会像の特徴について図(1)-31に示す。社会像の選択により、GDP、人口、世帯数、産業部門の生産量、旅客・貨物輸送量及び業務部門床面積が変化する。

日本低炭素ナビでは、前述の社会像も含めて35種の対策について、それぞれ2～5つの選択肢を設け、それらの組み合わせで将来の排出経路を計算、表示できる。ここでは、排出削減や気候変動対策を全く取らなかった場合（無対策ケース）、需要側のみで対策を講じたケース（需要側対策強化ケース）、供給側のみで対策を講じたケース（供給側対策強化ケース）、並びに需給両面で低炭素社会への対策を強化したケース（最大努力ケース）の4つを示す。なお、比較のために社会像の想定はものづくり統括拠点社会で統一して計算を実施した。

##### 1) エネルギー需給の分析結果

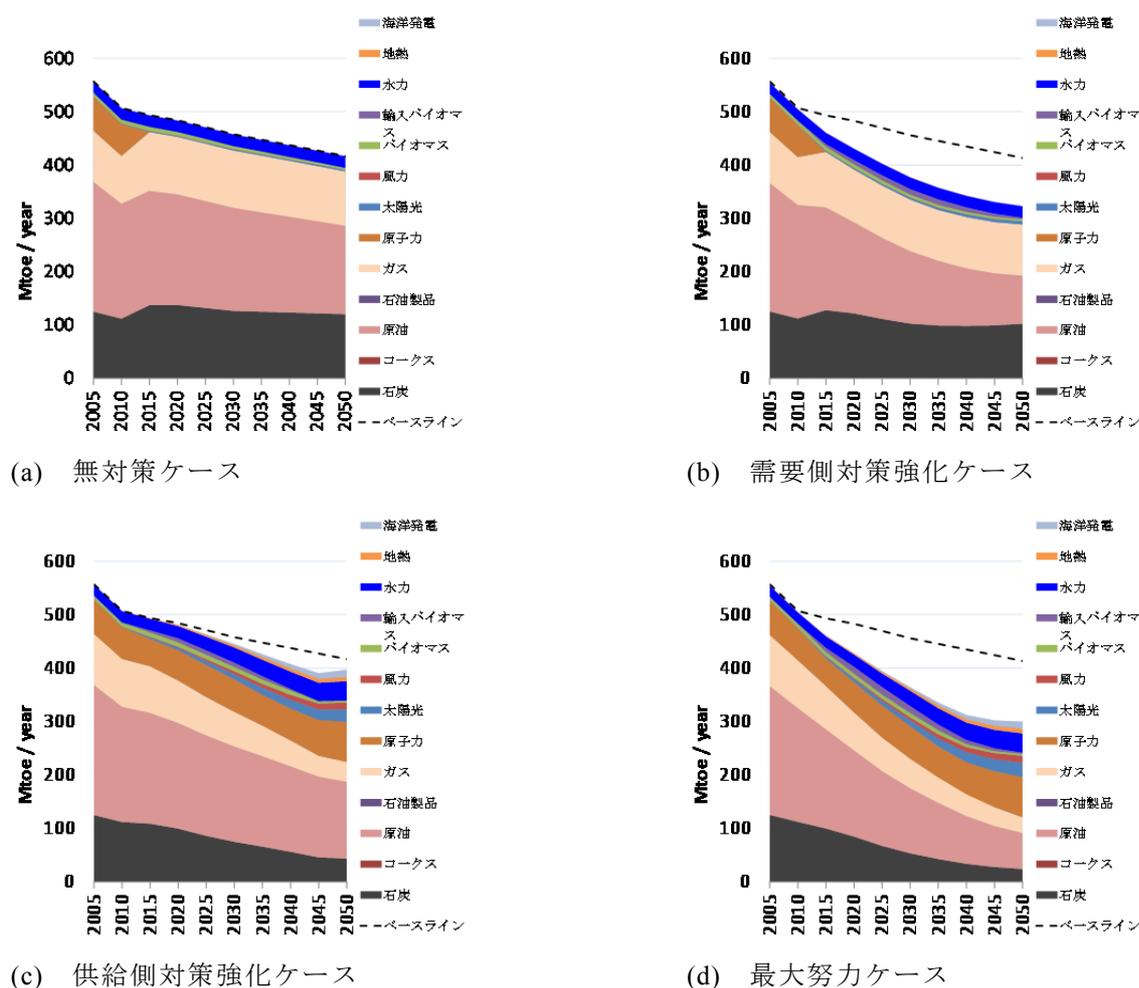
図(1)-32(a)～(d)に、各ケースの一次エネルギー消費量を比較して示す。なお、図中の破線は、無対策ケースにおける総一次エネルギー消費量である。

無対策ケースでも、一次エネルギー消費量は下降傾向を示し、2005年の562 Mtoeから2050年には415 Mtoeまで減少する。これは、前提としている将来社会像（ものづくり統括拠点社会）では、GDPは2005年から2050年にかけておよそ1.5倍に増加するが、人口減少と自然に進む機器の効率化

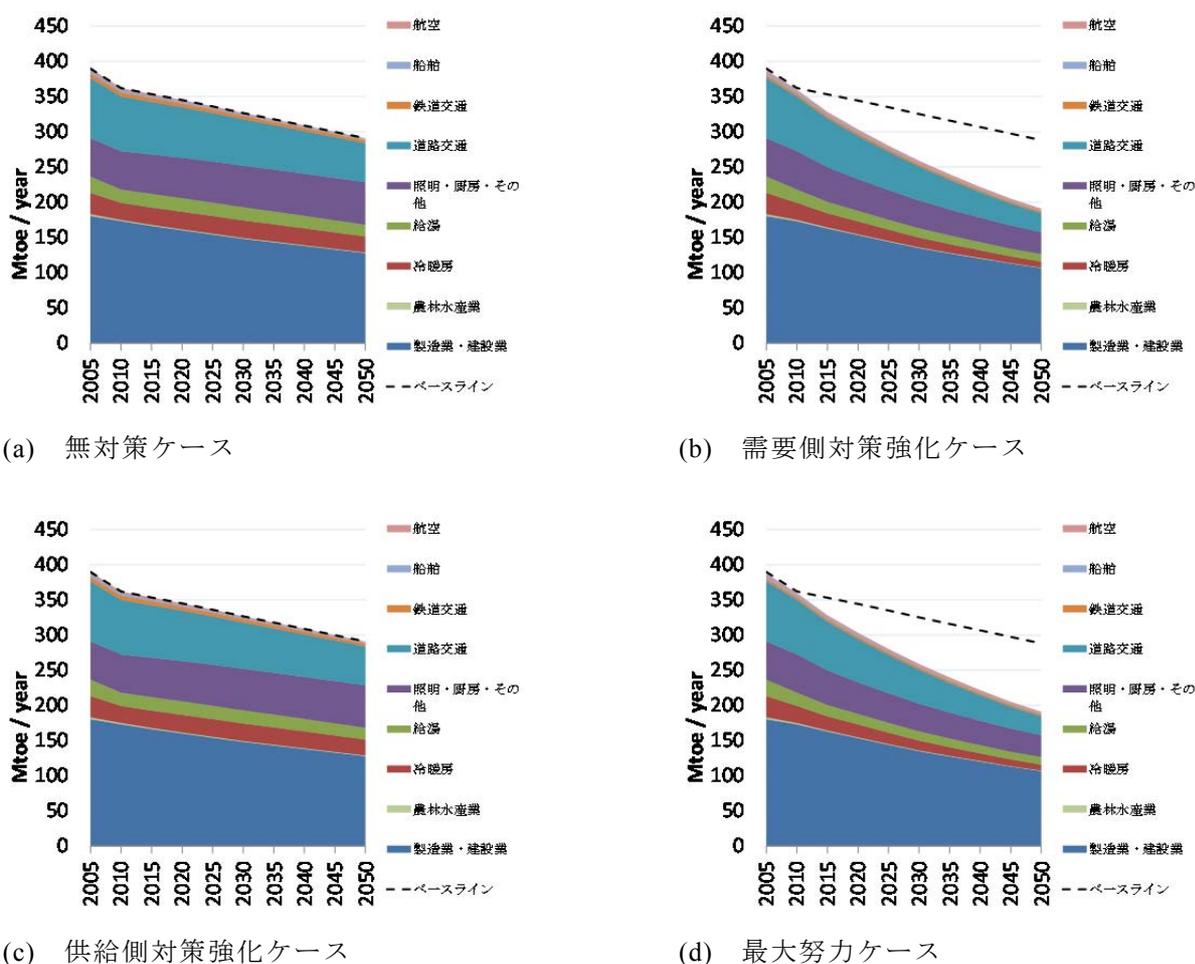


図(1)-31 5つの2050年社会像のコンセプト（出典：環境省中央環境審議会 地球環境部会「2013年以降の対策・施策に関する報告書（地球温暖化対策の選択肢の原案について）」2012年6月。）

が相まって一次エネルギー消費量全体としては減少するものである。需要側対策を強化することで、一次エネルギー消費量はさらに減少し、最大努力ケースでは2050年に270 Mtoeとなる。これは、図(1)-33に示すように最終エネルギー消費量が無対策ケースと比較して減少したためである。すなわち、需要側対策を強化することにより、エネルギー消費抑制が進み、供給側対策を講じることで燃料転換が進むことがわかる。各ケースの最終エネルギー消費量（図(1)-33）を比較するとより明確であり、供給側対策強化ケースは無対策ケースと同一であるのに対して、需要側対策強化ケースと最大努力ケースはいずれの部門でも無対策ケースと比較してエネルギー需要の低減が進んでいることがわかる。



図(1)-32 一次エネルギー消費量の分析結果

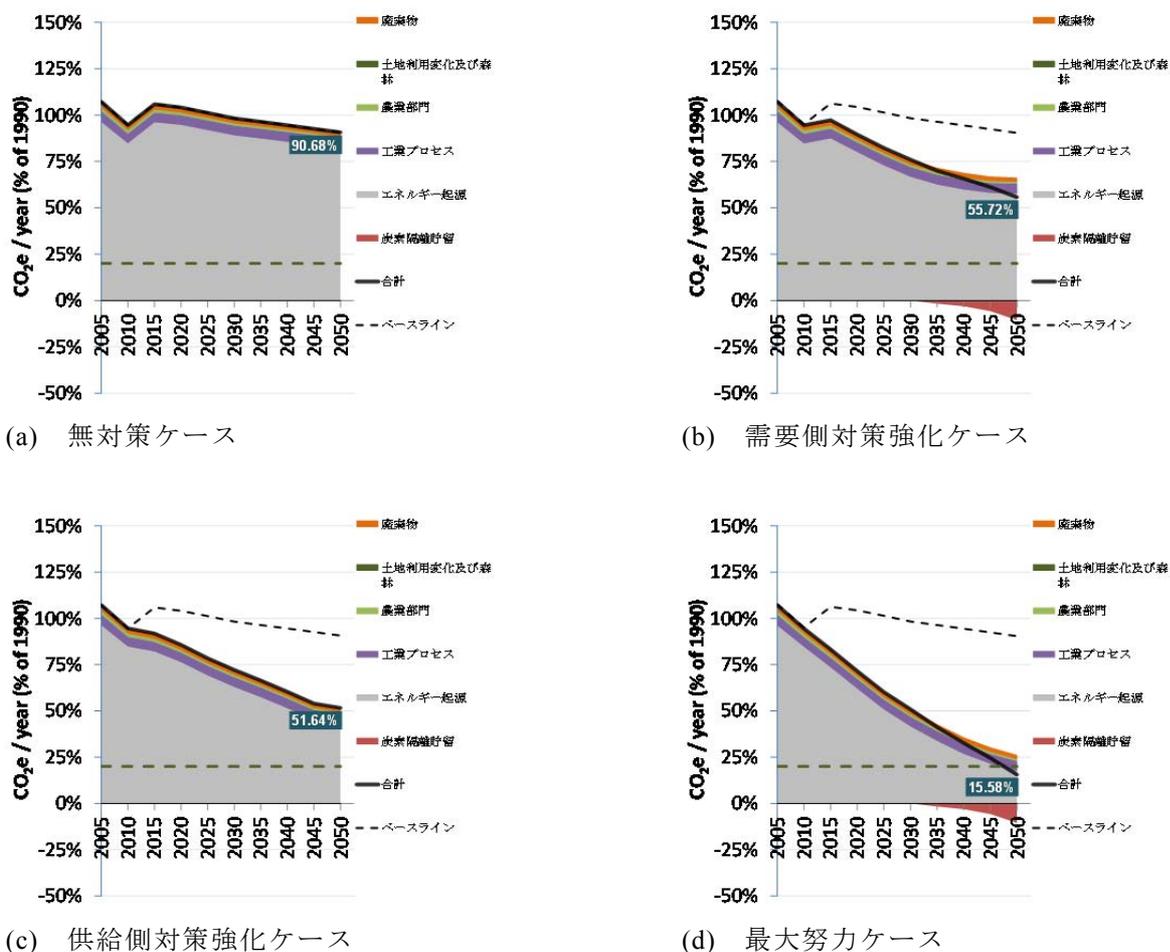


図(1)-33 部門別最終エネルギー消費量の分析結果

## 2) 温室効果ガス排出量の分析結果

温室効果ガス排出量の分析結果に着目すると（図(1)-34）、無対策ケースでも2050年には1990年比で約90%まで減少することがわかる。これは、一次エネルギー消費量と同様にGDPは増加するものの人口減等の影響によりエネルギー需要量が減少するためである。しかしながら、日本が目標として掲げている1990年比80%削減（1990年比で20%まで削減）に到達することは困難である。

需要側対策強化ケースと供給側対策強化ケースでは、それぞれ需要削減と燃料転換が進むことにより無対策ケースと比較して温室効果ガス排出量は削減できるが、1990年の温室効果ガス排出量の約半分程度である。需要側と供給側の両者の努力を統合した最大努力ケースでは、炭素隔離貯留（CCS）による貯留分も加味して1990年比16%（同84%減）まで到達できる。すなわち、わが国が長期的に低炭素社会を目指すためには、需要側の努力のみ、あるいは供給側の努力のみでは十分ではなく、需給両面で対策を講じていくことが必要であることが示唆された。



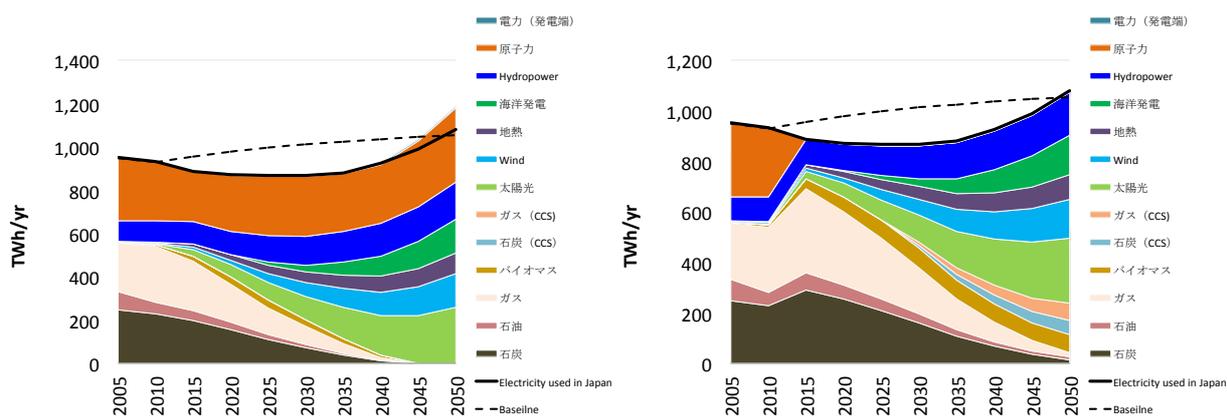
図(1)-34 温室効果ガス排出量の分析結果（1990年比で表示）

### 3) 原子力発電所再稼働の影響の分析結果

供給側対策強化ケースと最大努力ケースのいずれも、温室効果ガス排出量削減対策としての原子力発電所の再稼働を許容している（図(1)-32参照）。そこで、最大努力ケースにおいて原子力発電所のみ再稼働なしとした場合についても分析した。

図(1)-35と図(1)-36は、最大努力ケースにおいて原子力再稼働を有りとした場合と無しの場合の発電構成及び温室効果ガス排出量を比較して示したものである。

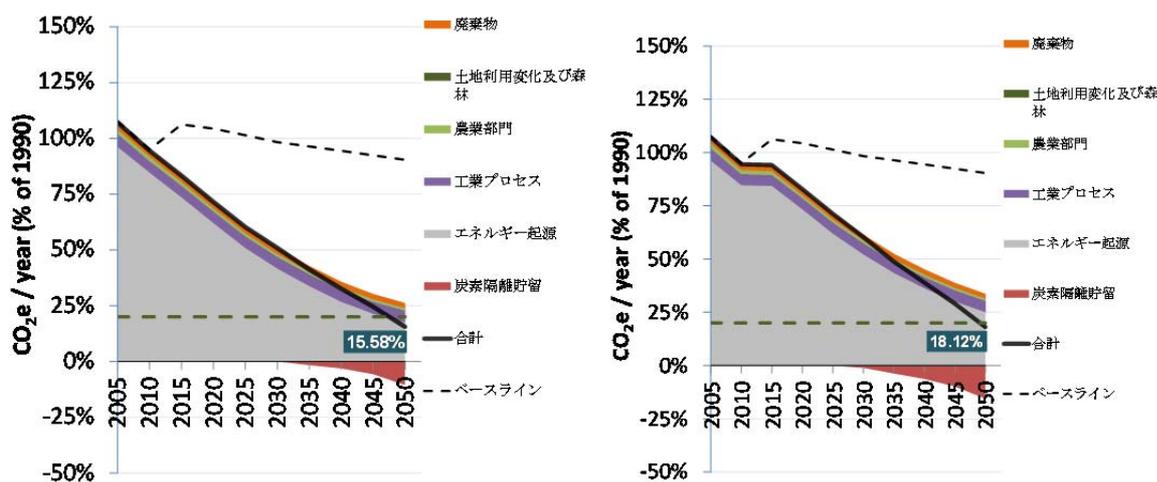
再稼働なしの場合には、2020年から2025年頃までの期間は原子力発電所の代替としての石炭火力発電やガス火力が増加し、結果温室効果ガス排出量も増加する。しかし、2020年頃から再生可能エネルギー発電設備の導入が加速度的に増加することで、2050年にはほぼすべての電源が再生可能エネルギーへと代替される。温室効果ガス排出量は、原子力再稼働ありの場合よりもやや増加するものの、原子力なしの場合でも1990年比18%（同82%減）に到達することがわかる。このことから、エネルギー需給両面での対策をしっかりと講じていくことで、原子力発電なしでの低炭素社会も実現可能であることが示唆された。



(a) 原子力再稼働あり

(b) 原子力再稼働なし

図(1)-35 発電構成の比較（最大努力ケース）



(a) 原子力再稼働あり

(b) 原子力再稼働なし

図(1)-36 温室効果ガス排出量の比較（最大努力ケース）

#### 4) ワークショップでの低炭素ナビの有効性検討

社会人及び低炭素社会構築の中核となると期待される次世代（大学生等）を対象にしたエネルギー問題に関するワークショップにおいて、低炭素ナビを活用した長期的な低炭素シナリオ検討について試行し、有効性を検討した。

ワークショップは、都内で2回、名古屋地区及び北陸地域にてそれぞれ1回開催した。参加者は、中央環境審議会にて検討された2050年に想定される5つの将来社会像（ものづくり統括拠点社会、メイドインジャパン社会、サービスブランド社会、資源自立社会、分かち合い社会）から一つを選択し、それぞれで2050年にGHG排出量を80%削減するためのエネルギー技術・エネルギー種の構成についてグループに分かれての検討を実施した。ワークショップを通じて、低炭素ナビと連携した長期的な低炭素シナリオ検討手法の有効性が確認できたが、いくつかの課題も指摘された。例えば「サービス」の意味することが主催者、参加者の間で一致をせず、例えば「サービス=観光業」との認識の参加者とサービスを第三次産業と認識する参加者との間では議論がかみ合わない

ことがあったため、議論の際にはそれぞれの考える範囲を明確化しておくことが重要であることや、安定供給、エネルギー安全保障などエネルギーに関わる様々な用語の定義と差違を共有しておくことが必要であることが明らかとなった。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

将来マクロフレームの検討に当たって重要な要素となるGDP等の社会経済条件について、人口等の見通しをもとに、これまでのトレンドに節電行動の定着などの新たな需要側における変化も加味しながら分析することが可能となることが示唆された。さらに、これらを統合してわが国の長期目標達成のためにどのような対策を、いつまでに実施していくことが重要か、また、温暖化対策実施時の経済影響の程度についての議論に資する分析が可能となった。特に発電部門については、発電所の立地、電源運用及び系統安定化策の効果も加味して将来の電力供給のあり方について分析することが可能となることが示唆された。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

本研究において開発した統合評価モデル群（技術選択モデル（AIM/Enduse [Japan]）、バックキャストモデル（AIM/BCM）、多地域電源計画モデル、及びマクロ経済モデル）の結果から明らかになった、将来の社会経済条件の見通しや長期排出量削減経路の分析結果は、環境省、特に地球環境局総務課低炭素社会推進室に対して提示し、中長期の温暖化対策にかかる政策立案のための定量的な基礎情報として貢献してきた。また、特にAIM/Enduse [Japan]の成果については、中央環境審議会の2020年以降の地球温暖化対策検討小委員会の下に組織された技術ワーキンググループやマクロフレームワーキング等へ提供することで、モデル分析結果を元にした将来の低炭素社会に向けた道筋や排出経路のあり方についての議論へ貢献した。

また、中央環境審議会地球環境部会2020年以降の地球温暖化対策検討小委員会・産業構造審議会産業技術環境分科会地球環境小委員会約束草案検討ワーキンググループ合同会合、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等へ委員として参画したほか、内閣府原子力委員会定例会議に参画し、わが国の約束草案のあり方やその実現のためのシナリオについての議論へ貢献するなど、政府審議会における委員等としての活動を通じて、環境政策の推進に貢献してきた。

また、開発したモデルは、アジア主要国の研究者に対してトレーニングを通じて移転し、わが国のみならずアジアにおける環境政策の底上げ、気候変動緩和策の実現にも貢献している。

また、低炭素ナビについては、安倍総理訪英において2014年5月1日に発表された「気候変動とエネルギー協力に関する日英共同声明」の中で「2050パスウェイ・カリキュレーターの普及に関し（中略）さらなる協力と情報共有の範囲を拡大する」とされたことを受けての開発であり、わが国のみならず英国との関係性を踏まえた環境政策の推進へ貢献した。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

今後、2030年の削減目標（約束草案）のさらなる深掘りや2040年の削減目標検討が見込まれ

る中では、本研究において開発した統合評価モデル群（技術選択モデル（AIM/Enduse [Japan]）、バックキャストモデル（AIM/BCM）、多地域電源計画モデル、及びマクロ経済モデル）を活用することによって、将来の社会経済条件の見通しや長期排出量削減経路の分析結果が提供でき、中長期の温暖化対策にかかる政策立案のための定量的な基礎情報を提供できるものと考えられる。

## 6. 国際共同研究等の状況

### 1) 国際共同研究計画名：UNEP GAP Report

[カウンターパート] UNEP-DTU Partnership (Dr. Michel den Elzen)

[参加・連携状況] 世界の様々な国際機関および大学の多数の研究者がUNEPから招待を受け、執筆者・協力執筆者として参画する中で参画者（花岡）が貢献。

[国際的な位置づけ等] 世界2℃目標の長期シナリオと京都議定書以降の2020年、2030年の短期・中期の各国目標とのギャップを評価する報告書。2010年から始まり、IPCCに並んでCOP等の国際交渉に影響力を持つ。

### 2) EMF30 (Energy Modeling Forum 30)

[カウンターパート] Stanford University (Prof. John Weyant)

[参加・連携状況] 世界の様々な大学・国際機関の研究者が参画する国際モデル比較プロジェクトの一つ。研究テーマは世界モデルを用いた短寿命ガスと大気汚染の分析であり花岡が本モデル比較に貢献。

[国際的な位置づけ等] IPCC第五次評価報告書の経験を踏まえ、第六次評価報告書に向けて必要と考えられる特定の研究テーマについて、世界モデル群を用いてモデル比較を行うものであり、ここでの成果物はIPCC評価報告書に引用されるため、国際学術界において影響力を持つ。

### 3) DDPP (Pathways to Deep Decarbonization)

[カウンターパート] Institute for Sustainable Development and International Relations (Dr. Henri Waisman)

[参加・連携状況] 国連事務局の後援の下で発足したプロジェクトであり、12ヶ国31研究機関が参画し、各国の2050年に向けた大幅な温室効果ガス削減シナリオに関する結果がまとめられている。現在、主要15か国が報告書として出版しており、日本からは増井及びサブテーマ3の日比野、大城が本プロジェクトへ貢献。

[国際的な位置づけ等] 世界2℃目標の長期シナリオの達成に向けて各国の大幅なGHG削減シナリオを各研究機関が分析したものであり、2015年にUNFCCCの下での定められる各国の将来数値の目標（Intended Nationally Determined Contributions）の評価に影響力を持つ。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 大城賢、増井利彦：エネルギー・資源, 35, 4, 31-39 (2014), わが国を対象とした多地域エネルギー技術選択モデルによる2050年までの温室効果ガス削減シナリオ分析
- 2) 大城賢、増井利彦：土木学会論文集G（環境）, 70, 6, II\_207-II\_215 (2014), 低炭素エネルギー

一技術の不確実性を考慮したわが国の長期温室効果ガス削減シナリオ分析

- 3) Oshiro K. and 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
- 4) Oshiro K., Kainuma M., and Masui T.: Climate Policy, 16(sup1), S63-S77 (2016), Assessing decarbonization pathways and their implications for energy security policies in Japan
- 5) Shiraki H., Nakamura S., Ashina S., and Honjo K.: Energy, 114, 478-491 (2016), Estimating the Hourly Electricity Profile of Japanese Households: Coupling of Engineering and Statistical Methods

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

#### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) Asayama Y: 第42回環境システム研究論文発表会 (2014)  
“Toward the pledge and sustainable implementation of Thailand NAMAs: Analysis of barriers to energy efficiency in designated buildings”
- 2) 芦名秀一, 白木裕斗: 第33回エネルギー・資源学会研究発表会 (2014)  
「多地域電源計画モデルを用いた2050年までのわが国電力部門における低炭素化シナリオの検討」
- 3) Ashina S.: The 12th Workshop on GHG Inventories in Asia (WGIA12) (2014)  
“Roles of GHG Inventories at Regional or City Level for Developing Future GHG Emission/Removal Projection”
- 4) 芦名秀一: 低炭素社会は実現できるか? DDPP (Deep Decarbonization Pathways Project) 報告セミナー及び 環境省環境研究総合推進費2-1402報告会(2014)  
「日本における温室効果ガス排出量の大幅削減を実現する新たな社会発展の可能性」
- 5) 芦名秀一: 平成26年度エネルギー特別講座「エネルギーデータの作成と利用」(2014)  
「バックキャストの手法と実施例」
- 6) Ashina S.: RENKEI Programme Summer School at Tohoku University (2014)  
“Designing Low Carbon Society Scenarios”
- 7) 芦名秀一: 平成26年度宮城県環境シンポジウム (2014)  
「低炭素社会実現に向けた取り組みを考える: 私たちができることを考えるには?」
- 8) Hanaoka T.: Twenty-third Asia-Pacific Seminar on Climate Change (2014)  
“The latest scientific findings from UNEP GAP report and IPCC AR5 - 2°C global temperature change limit target and Global GHG reductions by 2050”
- 9) Kamei M: 国際都市計画シンポジウム2014 (2014)  
“Urban Energy Systems and their increasing importance in global long-term energy strategies”
- 10) 増井利彦: 国際比較日本研究センター研究会「環境政策における科学的知見と政策過程」(2014)  
「温暖化政策における政策決定と統合評価モデル」

- 11) 増井利彦: 環境科学会2014年会(2014)  
「これまでの目標設定の議論の方法について」
- 12) 増井利彦: 低炭素社会は実現できるか? DDPP (Deep Decarbonization Pathways Project) 報告セミナー及び 環境省環境研究総合推進費2-1402報告会(2014)  
「本日のセミナーの概要」
- 13) 増井利彦: シンポジウム「気候変動に関する最新の科学的知見～IPCC第5次統合報告書に向けて～」 (2014)  
「IPCC第五次評価報告書における緩和策とアジアの低炭素社会実現」
- 14) Masui T.: MILES (Modeling and Informing Low Emission Strategies) kick-off meeting (2015)  
“Asia-Pacific Integrated Model”
- 15) 増井利彦: 気候ネットワーク・連続セミナー 温室効果ガス削減の可能性をさぐる ～新たな目標設定と政策の実施に向けて (2015)  
「日本における緩和策の経緯と-2°C目標に向けて」
- 16) 増井利彦: SATテクノロジー・ショーケース2015 (2015)  
「低炭素社会の作り方」
- 17) 増井利彦: 気候変動の科学とわたしたちの未来～IPCCと福島県民の対話～ (2015)  
「日本における気候変動対策」
- 18) 増井利彦: 龍谷大学環境サイエンスコース 地球温暖化防止講演会(2015)  
「低炭素社会の実現に向けて」
- 19) 増井利彦: 沖縄バイオ燃料国際セミナー (2015)  
「地球温暖化の現状～その影響と対策について～」
- 20) 大城賢、増井利彦: 環境経済・政策学会2014年大会(2014)  
「長期温室効果ガス排出削減シナリオにおける電力需給調整対策の役割」
- 21) 大城賢、伏間丈悟、増井利彦: 環境科学会2014年会(2014)  
「輸送距離別将来交通需要を考慮した次世代自動車普及による長期CO<sub>2</sub>排出削減効果」
- 22) 大城賢、増井利彦: 土木学会第42回環境システム研究論文発表会(2014)  
「低炭素エネルギー技術の不確実性を考慮したわが国の長期温室効果ガス削減シナリオ分析」
- 23) 大城賢、甲斐沼美紀子、増井利彦、日比野剛: 低炭素社会は実現できるか? DDPP (Deep Decarbonization Pathways Project) 報告セミナー及び 環境省環境研究総合推進費2-1402報告会(2014)  
「日本のDDPs (Deep Decarbonization Pathways) の概要」
- 24) Silva D., Ashina S., Fujino J.: 31st Conference on Energy, Economy, and Environment (2015)  
“Disaggregation of electricity demand using downscaling methodology at global scale”
- 25) 増井利彦: 第24回東芝グループ環境展, 川崎, 2015  
「気候変動のリスクと機会」
- 26) Masui T., Kainuma M., Fujita T.: Our common future under climate change, Paris, France (2015)  
“Development of scientific tools and their application to Asian countries toward low carbon society”

- 27) 増井利彦：キャノングローバル戦略研究所 地球温暖化国内シンポジウム 日本の地球温暖化抑制の2050年ビジョンとその実現，東京 (2015)  
「日本における2050年の温室効果ガス排出量を80%削減する経路の検討－DDPPにおける日本の分析結果から－」
- 28) 明日香壽川，上園昌武，歌川学，甲斐沼美紀子，田村堅太郎，槌屋治紀，外岡豊，西岡秀三，朴勝俊，Pranab Jyoti BARUAH，平田仁子，増井利彦，脇山尚子：環境経済・政策学会2015年大会，京都 (2015)  
「わが国における2030年を対象とした温室効果ガス排出削減目標の議論」
- 29) Masui T.: Policy Research Workshop on How to enhance climate actions to meet a long - term goal , New Delhi, India ,2015  
“Assessment of INDCs toward 2 degree target based on AIM (Asia - Pacific Integrated Model)”
- 30) Masui T.: Policy Research Workshop on How to enhance climate actions to meet a long - term goal , New Delhi, India ,2015  
“Contribution of AIM (Asia - Pacific Integrated Model) to INDCs in Asia”
- 31) Masui T.: Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) 4th Annual Meeting, Johor Bahru, Malaysia ,2015  
“Assessment of INDCs toward 2 degree target and discussion process in Japan”
- 32) 増井利彦：環境文明21シンポジウム 気候変動時代をどう乗り越えていくか，東京 (2015)  
「企業活動と暮らしの今後？ ～緩和と適応～」
- 33) 増井利彦：DDPP報告シンポジウム2：低炭素社会をどう実現するか？，東京(2015)  
「はじめに＋約束草案＋COPに向けた現状」
- 34) Masui T., Hijioka Y., Kim S.K., Lim J.H., Gao Q.: The 12th Tripartite Presidents Meeting among NIES, NIER and CRAES, Yeosu, Korea ,2015  
“Research Collaboration for Low Carbon Development in Three Countries”
- 35) 増井利彦：プレCOPイベント「COP21に向けて」，東京(2015)  
「INDCにおける緩和策、適応策の評価に向けて」
- 36) 芦名秀一：第13回環境研究シンポジウム 2050年の地球と暮らしー環境技術と地球規模課題ー，東京(2015)  
「2050年に向けて環境技術を評価する」
- 37) 増井利彦：環境文明21 経営者環境カクラブ，東京 (2015)  
「気候変動時代に向けた企業の取組の方向と可能性」
- 38) 増井利彦，芦名秀一，藤森真一郎，藤野純一，大城賢，日比野剛：第6回横幹連合コンファレンス，名古屋(2015)  
「わが国における長期の温室効果ガス排出削減目標とその実現可能性」
- 39) 本城慶多，芦名秀一：エネルギー・資源学会第32回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，東京 (2016)  
「状態空間モデルによる日本の粗鋼生産量の将来推計」
- 40) Masui T. : Carbon Emission Pathways for Bangladesh, Dhaka, Bangladesh , 2016  
“Integrated Assessment using AIM (Asia-Pacific Integrated Model) toward low carbon society”

- 41) 増井利彦：並木小学校スタイル科授業，つくば(2016)  
「並木小学校スタイル科 お仕事先生」
- 42) 増井利彦：経営者「環境力」クラブ 2016年度第1回会合(2016)  
「パリ協定と日本の排出削減」
- 43) 増井利彦：環境基礎講座(2016)  
「パリ協定と日本の取り組み」
- 44) Masui T.: NIES and ITRI Workshop on AIM - Taiwan, (2016)  
“Introduction of AIM, Asia - Pacific Integrated Model”
- 45) Masui T.: NIES and ITRI Workshop on AIM - Taiwan, (2016)  
“Top-down/Bottom-up Integration with AIM (Asia-Pacific Integrated Model)”
- 46) Masui T.: LoCARNet 5th Annual Meeting(2016)  
“Support of Integrated Assessment Modeling for Capacity Development in Asia”
- 47) 増井利彦：祈月書院秋季研修会(2016)  
「地球環境問題が主導する持続性文明の条件：気候変動問題から見た2050年とその先」
- 48) Masui T., Oshiro K., Kainuma M., Hibino G.: Ninth Annual Meeting of the IAMC, Beijing, China, 2016  
“Quantitative Japan’s GHG mitigation analysis based on Asia-Pacific Integrated Model”
- 49) Honjo K., Ashina S.: The 22nd AIM International Workshop(2016)  
“Evaluation of the reduction of electricity demand in Japan after the 2011 Tohoku Earthquake”
- 50) 増井利彦：COMPO研究会(2017)  
「パリ協定と地球温暖化問題の行方」
- 51) 藤野純一，グエン・タイ・ホア，越智雄輝，藤原和也：第33回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，講演論文集，93-96(2017)  
「パリ協定と途上国自治体における低炭素シナリオ開発」
- 52) 本城慶多，芦名秀一：第33回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，講演論文集，33, 75-78(2017)  
「東日本大震災が日本の電力需要に与えた影響について～状態空間モデルによるアプローチ～」

### (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) 「低炭素社会は実現できるか？」DDPP (Deeply Decarbonization Pathways Project) 報告セミナー及び環境省環境研究総合推進費2-1402報告会（主催：国立環境研究所、2014年10月7日、東京工業大学くらまえホール、観客約200名）にて講演
- 2) シンポジウム日本の排出削減目標議論の行方（2015年4月8日、東工大蔵前会館くらまえホール、観客98名）にて講演
- 3) DDPP報告シンポジウム2「低炭素社会をどう実現するか？」（2015年10月29日、東京工業

大学キャンパス・イノベーションセンター国際会議場、観客38名)にて講演

- 4) 茨城県つくば市立並木小学校における「並木小学校スタイル科特別授業」にて低炭素社会の考え方や、将来シナリオの成果を踏まえて児童の将来選択に資する情報を提供(2016年2月1日)
- 5) 福島県立原町高等学校における「進路選択のための特別講演」にて、低炭素社会及び将来シナリオ研究と文理融合アプローチの必要性について説明(2016年10月13日、聴講者高校1年生全体)
- 6) 第51回環境システムシンポジウム「社会転換に向けてのテクノロジーアセスメントの理論と手法の開発に向けて」(主催:土木学会環境システム委員会、環境アセスメント協会、2017年2月27日、土木学会講堂、参加者約150名)にて講演

#### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞(2014年6月6日、低炭素社会訴え公開シンポ)
- 2) 電気新聞(2014年7月23日、英国エネルギー・気候変動省 温暖化ガス 排出分析ツール発売 長期目標策定に貢献)
- 3) 朝日新聞夕刊(2014年7月23日、温暖化の未来 手軽にナビ エネルギー構成示す「計算機」)
- 4) 電気新聞(2014年7月24日、ISAP閉幕 ラジェンドラ・パチャウリ氏ら講演 温暖化ガス「今世紀末ゼロ目標に」)
- 5) 日刊工業新聞(2014年12月23日、50年までの温室ガス排出簡易計算ツール IGES、学生イベントで活用)
- 6) 毎日新聞(2015年1月15日、地球温暖化防止に新ルール 削減余地 モデルで評価)
- 7) 日本経済新聞(2015年1月19日、温暖化めぐる2つの裂け目「可能性の窓」開く対策を)
- 8) 中国新聞夕刊(2015年1月30日、温室ガスの排出量 算出ソフトを公開)
- 9) 朝日新聞(2015年2月14日、コスト検証2委員追加)
- 10) 日本経済新聞(2015年2月14日、エネルギー 迫る選択の時(3) =省エネ技術は宝 「使わぬ」知恵、成長の糧に)
- 11) 電気新聞(2015年2月16日、総合資源エネルギー調査会 発電コストWG 18日に初会合 荻本、増井氏が委員に)
- 12) 日経産業新聞(2014年5月13日、政策=環境省、今夏に研究・開発計画 低炭素など5領域推進 競争的資金で企業と連携)
- 13) 毎日新聞(2015年1月8日、地球温暖化防止に新ルール 世界を導いた日本モデル)
- 14) 一般財団法人地球温暖化防止全国ネット情報誌全国ネット通信(Vol.16 2014秋号、2014年はESD year!(ESD環境教育への取り組みについて))
- 15) 環境ソリューション企業総覧(2014年版Vol.14、長期低炭素社会の実現めざして~日本版2050パスウェイ・カリキュレーターの開発~)
- 16) 月刊事業構想(1月号別冊 環境ビジネス冬号、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)など温室効果ガス対策の今後=二酸化炭素排出量を目標値まで下げることは技術的には可能、今こそ、一般の人を含めて、お互いの立場を理解しあって深い議論をおこなえる場が必要)
- 17) NHKラジオ第一「私も一言!夕方ニュース」(2014年4月15日(18:12-18:45)、IPCC第5次

評価報告書（第3作業部会）の内容や課題等について）

- 18) 言論スタジオ（2014年12月6日、政治はなぜ原発政策から逃げるのか（再生可能エネルギーについて） [http://www.genron-npo.net/studio/2014/12/post\\_19.html](http://www.genron-npo.net/studio/2014/12/post_19.html)
- 19) TOKYO FM 「サード・プレイス」（2015年1月30日（5:00-5:30）、環境省グッドライフアワードについて）
- 20) 毎日新聞，2015年4月9日，30年の温室ガス30%減 国立機関試算 原発稼働見込まず 05年比
- 21) 日本農業新聞，2015年4月9日，温室ガス目標で国立環境研究所 高成長でも37%削減可能
- 22) 朝日新聞，2015年4月22日，温室ガス目標 調整大詰め 最適目標へ試算様々
- 23) 北海道新聞，2015年4月25日，社説＝温室ガス削減 意欲見えない政府論議
- 24) 高知新聞，2015年4月26日，社説＝温室ガス削減 意欲ある目標を掲げよ
- 25) 東京新聞，2015年5月14日，ニュースの追跡・話題の発掘＝政府の温室ガス削減目標 原発頼み 達成困難 再生 省エネ重視を
- 26) 中日新聞，2015年5月15日，特報＝大丈夫か温室ガス削減 原発頼み 甘い目標 廃炉ルール化、延長前提？ 産業部門数値 低い設定疑問
- 27) 日本経済新聞，2015年5月21日，電源構成・温暖化ガス削減目標 政府と研究機関に開き 原子力規制で実現性変動
- 28) 環境新聞，2015年9月30日，環境対策の相互効果分析 環境省 首都圏の再開発を想定
- 29) 日刊工業新聞，2015年10月9日，環境文明21 気候変動でシンポ
- 30) 朝日新聞，2015年10月27日，（朝日地球環境フォーラム2015） どの暮らし選ぶの？「脱炭素」へのナビゲーション 藤野純一氏
- 31) 読売新聞，2015年10月31日，「2度目標」へ 151億トン削減不足 2030年 温室ガス・各国提出分
- 32) 神奈川新聞，2015年10月31日，国連分析 目標達成でも2.7度上昇 今世紀末 平均気温温暖化被害拡大か
- 33) 信濃毎日新聞，2015年10月31日，146カ国の温室ガス減目標分析 世界気温2.7度上昇の恐れ 国連 COP21を前に発表
- 34) 琉球新報，2015年10月31日，温暖化で2.7度上昇恐れ 国連、146カ国目標「不十分」
- 35) 静岡新聞，2015年10月31日，国連 ガス削減目標分析 温暖化「2.7度上昇」
- 36) 山陽新聞，2015年10月31日，146カ国の温室ガス削減目標 今世紀末2.7度上昇 国連「抑制には不十分」
- 37) 毎日新聞，2015年11月7日，〈未来へのバトン COP21〉 国連環境計画 温室ガス 120億トン追加削減必要 各国に積極策促す
- 38) 電気新聞，2015年11月19日，COP21新枠組み 日本エネルギー経済研究所討論会 「二分論」解決など鍵 専門家が課題指摘
- 39) 環境新聞，2015年11月18日，「環境立国・日本」を築いた人たち
- 40) 毎日新聞，2015年11月21日，温室効果ガス 都「高い目標は姿勢」 00年比 「30年までに30%削減」
- 41) 毎日新聞，2015年12月15日，〈未来へのバトン COP21〉 温暖化防止高い壁 パリ協定

採択 日本なお火力依存 技術どこまでCO<sub>2</sub>回収

- 42) 産経新聞, 2015年12月15日, 〈温暖化会議 COP21〉 暮らしの変化 浸透なるか ほぼ全ての住宅省エネ化/LED利用促進
- 43) 日刊水道新聞, 2015年1月25日, 有識者の視点 パリ協定の目標実現へ 日本の経験を活かして 国立環境研究所 藤野純一氏
- 44) 日刊下水道新聞, 2015年1月27日, 有識者の視点 パリ協定の目標実現へ 日本の経験を活かして 国立環境研究所 藤野純一氏
- 45) NHK Eテレ TVシンポジウム, 2015年4月11日14:00-15:00, "2月17日に開催された沖縄バ  
イオ燃料国際セミナーのパネルディスカッションの放映"
- 46) 特定非営利活動法人 言論NPO, 「安倍政権3年の通信簿は2.7点(5点満点)」, 2015年12  
月25日, "<http://www.genronnpo.net/politics/archives/6103.html>"
- 47) 特定非営利活動法人 言論NPO, 「インターネット番組『言論スタジオ』での討論の様子  
の動画」, 2016年1月5日, <http://www.genronnpo.net/studio/>

#### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

#### 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

## (2) 世界を対象とした将来シナリオの検討とその定量化

国立研究開発法人国立環境研究所 広域影響・対策モデル研究室

藤森 真一郎

平成26～28年度累計予算額：23,241千円（うち平成28年度：7,350千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

本研究は2つのテーマで構成される。その第一はSSP (Shared Socioeconomic Pathways) と呼ばれる社会経済シナリオの構築で、第二は統合評価モデルの過去の再現性検証である。社会経済シナリオはIPCCの新シナリオプロセスのもとで実施され、世界の気候変動研究において、第一、第二、第三作業部会を横断的に用いられるシナリオである。これまでは2000年に公表されたSRES (Special Report on Emissions Scenarios) が存在し、広く使われてきたが、それを現在の研究、政策ニーズにある形で更新することを目的としている。定量化作業には統合評価モデルAIM (Asia-Pacific Integrated Model) を用いた。本研究ではできる限りモデルのパラメータ設定を公開し、透明性を確保した。SRESとSSPの比較を行ったところ、土地利用、大気汚染物質で大きな差が見られた。具体的には森林面積がSSPでは減少傾向であるのに対して、SRESではかなり増加するものも見られた。SRESの大気汚染物質は全体として過剰推計の傾向にあった。これは近年の大気汚染除去技術の浸透などがSRES策定時よりも進んだことが考えられる。第二のモデル検証作業は、統合評価モデルの重要な課題の一つであった。本研究は統合評価モデルを過去へ向けてシミュレーションすることでその再現性を確認した。その結果グローバルでは再現性が良かったが、地域別、あるいは部門別でみるとその乖離が大きかった。特に発電構成はその乖離が大きく、エネルギー供給側は現在のモデルから何らかの乖離が必要であることが示唆された。

### [キーワード]

社会経済シナリオ、SSPs、統合評価モデル、モデル検証

### 1. はじめに

これまで、統合評価モデルを用いた気候緩和策だけでなく、気候モデルシミュレーション、気候変動の影響、適応、および脆弱性評価（以下影響評価と略す）という気候変動関連研究の主たる3つの研究コミュニティにおいて、排出シナリオに関する特別報告書 (Special Report on Emissions Scenarios; SRES; Nakicenovic and Swart<sup>1)</sup>) が広く使用されてきた。SRESは気候変動関連の研究に広く貢献したが、いくつかの問題も残った。例えば、排出シナリオ、気候シナリオを作り、最後に影響評価を行うというステップには時間がかかるという事が指摘された。とりわけ、研究の最後尾に位置する影響評価にとってこの時間制約は大きい。他の例としては、SRESに基づく気候モデルと影響評価では気候緩和策を実施していないシナリオが前提となっていたが、近年いわゆる2°C目標などに代表されるように強く排出削減を行うようなシナリオも政策的な意味を持ち、その解析が必要となった。また、SRESの公表から時間がたち、排出量などの情報が最新の統計情報と

一致しなくなっているということも問題となっている。

こうした背景を受け新シナリオプロセスではこれらの問題に対処するために (Moss, *et al.*<sup>2)</sup>、所謂パラレルアプローチを採用することになった。このプロセスは、代表濃度経路 (Representative Concentration Pathways; RCPs) の開発から始まり、その後、気候シナリオと社会経済シナリオが並行して開発される。RCPはすでに開発公表され、van Vuuren, *et al.*<sup>3)</sup>によってまとめられている。気候シナリオもすでに結合モデル相互比較プロジェクトフェーズ5 (CMIP5; <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) として知られ、公表されている。そして現在、最後に社会経済シナリオの定量化が残されている。

社会経済シナリオ (Shared Socioeconomic Pathways; SSPs) は、今世紀を通じて社会や自然環境との相互作用を理解するために、複数の研究コミュニティによって使用されるように設計される。概念やシナリオの構造の詳細は、O'Neill, *et al.*<sup>4)</sup>やvan Vuuren, *et al.*<sup>5)</sup>などによって議論されている。SRESと同様に、SSPも叙述的なストーリーと定量的情報の両方を有するが、SRESとSSPの間には少なくとも4つの違いが存在する。第一はシナリオの軸 (将来の世界観) の考え方である。SRESは環境/経済的問題志向、及びグローバル/地域開発パターン志向の二軸でシナリオを捉えたのに対して、SSPは適応と緩和に対する困難度の多寡を2軸とする空間で捉えている。第二は、シナリオの数であり、SRESが4つで設計されたのに対し (正確にはA1はさらに細分化されているが代表的なものは4つ)、SSPは5つ存在する。そのうちの4つは、緩和、適応に対する困難度の高低の組み合わせで (SSP1、SSP3、SSP4、およびSSP5)、5番目 (SSP2) は、緩和と適応の両方の困難度が中程度である。第三は、SSPはシナリオマトリクスアプローチと呼ばれる方法で使われることを想定しており、社会経済条件と気候目標 (例えば、RCPの放射強制力) の二次元を組み合わせで使用する。これにより、SRESでは不可能だった緩和シナリオ下での影響評価の実施が可能となる。第四に基準年をできる限り最新のものにし、SRESで1990年であったものがSSPでは2005年となる。

一方、これまで、世界全体を対象として50年から100年といった比較的長期の気候緩和策分析を行うツールとして統合評価モデルは重要な役割を担ってきた。2014年に公表されたIPCC

(Intergovernmental Panel on Climate Change) の第3作業部会の第五次評価報告書の中でも統合評価モデルの結果が多く引用されている (例えば、Clarke *et al.*<sup>6)</sup>)。統合評価モデルの代表的なものはAIM/CGE<sup>7)</sup>、GCAM<sup>8)</sup>、IMAGE<sup>9)</sup>、MESSAGE<sup>10)</sup>、ReMIND<sup>11)</sup>、WITCH<sup>12)</sup>などがあるが、これらのモデルは経済、エネルギー需給、温室効果ガス (GHG) の排出と大気中の温室効果ガスの濃度変化、気候変化といった要素を取り込んだ、複数のモジュール (モデル) を結合させている。このうち、エネルギー需給に関連するモデル (モジュール) は将来の主要なGHG排出量、技術的な緩和策の実行可能性、費用等を算定するために主要なコンポーネントとなる。

これらの統合評価モデルが社会的あるいは政策的に重要な情報を発信するとともにそのモデルの信頼性が問われることもしばしば発生するようになってきた。統合評価モデルの信頼性を示すためにはいくつかの方法がある (IAMC web<sup>13)</sup>)。例えば、Diagnosticsと呼ばれるある特定の炭素価格パスを与えてモデルの挙動を検証する方法 (Kriegler *et al.*<sup>14)</sup>)、モデルドキュメントを整備し一般に公開する方法などがすでに実施されている。しかし、その重要性は認識されながらいまだに実施されてきていないのがHindcastingと呼ばれるモデルの過去のシミュレーションである。Chaturvedi *et al.*<sup>15)</sup>はその先駆的な取組の一つであり、アメリカの民生部門を対象としてシミュレーションを実施した。van Ruijven *et al.*<sup>16-17)</sup>はモンテカルロ法を用いて、過去の再現性を確認しながら

ら途上国の民生部門や交通部門のパラメータを推定する手法を提案した。また、関連研究として Beckman *et al.*<sup>18)</sup>は石油の生産量を外生的に与え価格の再現性を確認することでモデルの検証を行った。より伝統的なモデル検証の方法として、計量経済学的手法を用いてパラメータを推定するというのはこれまでも行われてきた (Jorgenson<sup>19)</sup>など)。ただし、世界全体について各国のエネルギー価格、資本価格や部門別の生産量などのデータが全ての国について利用可能ではなくこの手法は必ずしも世界モデルのパフォーマンスがどの程度であるのかという問いに対して応えられるわけではない。また、それ以外の既存研究についてもエネルギー消費量の再現性を世界モデル全体について検証したわけではなく、限られた部門や地域における取組であった。

## 2. 研究開発目的

本研究の目的は以下の3点を有する。第一に各種モデルパラメータなどの設定を可能な限り明らかにしたうえで、SSPの定量化を行うことである。第二に、定量化されたシナリオの特徴を、これまでの気候変動研究で主として使われてきたSRES、RCPと比べてSSPが気候モデル、影響評価モデルにとって有用な点を明らかにする。第三に、代表的な統合評価モデルの一つであるAIM/CGE<sup>20-24)</sup>を用いて、過去のエネルギー消費量(供給量)の推計を行い、その結果を統計値と比較することで、(1)モデルの再現性を明らかにし、(2)現在のモデルの問題点を把握する。前述のように統合評価モデルの最も重要なコンポーネントは主要なGHG排出量を決定するエネルギー消費量であり、本研究の解析ではエネルギー消費量に着目する。

## 3. 研究開発方法

### (1) 手法

#### 1) モデル

本研究では世界応用一般均衡モデルAIM/CGE (Asia-Pacific Integrated Model/ Computable General Equilibrium) モデル<sup>20-24)</sup>を用いて、2005年から2100年までの全世界を対象とし、SSPを定量化した。気候に関連する情報はCGEの排出ガス情報を簡易気候モデルであるMAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change)<sup>25)</sup>に入力して得た。シナリオには、社会経済条件の違いと気候緩和のレベルの違いを考慮したマトリクスを想定した。

本研究で用いるCGEモデルは生産、消費、投資、貿易活動が各種生産要素、財等の価格を所与とした関数を用いて記述されている。生産活動は利潤最大化を前提としており、中間財、生産要素を投入する。生産活動により発生する所得(雇用者報酬、営業余剰、生産にかかる税)は代表的家計が受け取る。家計は所得の一部を貯蓄に回し、所得から貯蓄を引いた可処分所得を所与として消費を行う。消費財の支出割合は効用最大化のもと決定される。次に最終消費は家計消費、資本形成で構成される。ここでは家計消費と政府消費を集約して代表的家計消費として表している。資本形成は固定係数の消費とし、財間の消費割合は変化しないとした。貯蓄と投資がバランスするため貯蓄性向は資本形成に応じて内生的に決定するとした。ここで、新たに蓄積される資本は次の年の新規資本として稼働し、生産要素の一つとなる。本モデルは1年単位の逐次型動学モデルである。旧資本と新規資本が区別されており、資本の情報が次年へ更新される。一般に統合評価モデルには逐次動学型と動学最適型モデルの二つのタイプが存在するが、本研究が対象としている緩和策シナリオはすでに決められたGHG排出パスのもとでエネルギーシステム、土地利用

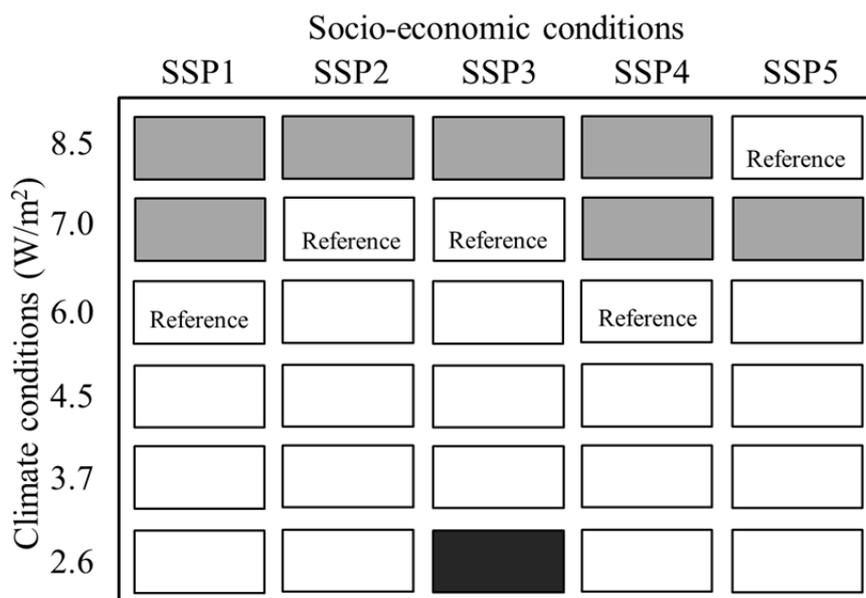
などのレスポンスを解析するというものを行っており逐次動学型モデルを使用する。詳細な式体系については、Fujimori, *et al.*<sup>26)</sup>に記述されているのでそちらを参照されたい。

温室効果ガス（GHG）としては、エネルギー起源CO<sub>2</sub>、土地利用起源CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、F-ガスを扱う。エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量は、化石燃料消費量と燃焼に係数を乗じて計算される。非エネルギー関連のCO<sub>2</sub>排出量は土地利用の変化と産業プロセスで構成されており、土地利用変化排出量は、炭素ストック密度を前年と当年の森林面積の変化量に乘じる。土地利用変化の排出以外の非エネルギー関連の排出量は、活動量レベルに比例すると仮定される。CH<sub>4</sub>はさまざまな排出源を持っているが、主として米の生産、家畜、化石燃料の採掘、及び廃棄物管理部門から排出される。N<sub>2</sub>Oは、施肥や家畜糞尿管理、化学工業によって排出される。CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oいずれも活動量に係数を乗じる。大気汚染物質の排出（BC、CO、NH<sub>3</sub>、NMVOC、NO<sub>x</sub>、OC、SO<sub>x</sub>）は、燃料の燃焼及び活動レベルに排出係数を乗じる形で定式化されている。排出係数は、大気汚染物質除去技術や関連法規の実施に応じて経年的に変化していく。

本研究では緩和策シナリオを扱うが、いずれの緩和策シナリオでも世界全体のGHG排出量制約を課す。この場合、GHG排出価格が内生変数となり、すべてのGHG排出に対して価格付けされGHG削減が達成される。その炭素価格は炭素税としてすべての排出に課税され、その税収は家計が全量を受け取ると仮定する。エネルギーの最終消費部門はこのGHGに対する課税により、省エネ化とより低炭素排出のエネルギー源への転換を進める。一方、発電部門も同様に化石燃料火力発電は相対的に発電費用が高くなり、再生可能エネルギーへとシフトしていく。ただし、火力発電、バイオマス発電などでは炭素隔離貯蔵（CCS）の導入が可能であり、炭素価格に応じてCCSの導入比率が決定される。CCSの導入は、CCSサービスを提供する産業を仮定し（生産構造はIEA<sup>27)</sup>を基に作成）、そのサービスを各種発電部門が中間投入とするとした。一方、土地利用についてはGHG排出価格が土地の炭素ストックに応じて価値を持ち、地代に追加されるとして、土地利用変化に伴うCO<sub>2</sub>排出が減少するように定式化した。その他の非エネルギー起源排出に対しては、限界削減費用曲線を導入して、炭素価格に応じて削減が行われる。

## 2) シナリオ

シナリオのフレームワークは2つの次元を考慮する（図(2)-1）。第一の次元は社会経済的想定（SSP）、第二の次元は気候条件であり放射強制力であらわされる。社会経済条件は人口、経済、エネルギー、農業、土地利用や大気汚染物質の除去に関する想定が5つのシナリオ間で区別される。気候条件は、長期的な（2150年）放射強制力であり、RCPの4つのレベル（2.6W/m<sup>2</sup>、4.5W/m<sup>2</sup>、6.0W/m<sup>2</sup>、8.5W/m<sup>2</sup>）と7.0W/m<sup>2</sup>、3.7W/m<sup>2</sup>が加えられた6つで構成される（以降この気候緩和条件を2.6Wケースなどと呼ぶ）。RCPはこれまでの気候変動関連研究で標準的に用いられてきており、RCPとSSPの組み合わせでシナリオが設計されることで既存研究との整合性が取れた解析が可能となる。7.0WケースはSSP2、SSP3で気候緩和策を実施しないケース（以降リファレンスと呼ぶ）の放射強制力が7.0W/m<sup>2</sup>相当であったため追加されている。一方3.7Wケースは既存の統合評価モデル研究でこの気候安定化レベルの議論が多いためRCPに追加された。図(2)-1の灰色の領域は、リファレンスケースが当該放射強制力を超えないことを表している。リファレンスケースはSSPによって放射強制力に差があり、例えば8.5W/m<sup>2</sup>に達するのはSSP5のみである。一方、SSP5の7.0Wはリファレンスよりも小さな放射強制力ではあるが、7.0W/m<sup>2</sup>は現在の政策検討において現実的な緩和策目標の



図(2)-1 シナリオマトリクス

対象となっていないため、ここでは定量化されない。また、図中の黒い領域はSSP3の2.6Wシナリオでみられるが、これは当該シナリオの解が存在しなかったことを意味する。具体的には、ある年までは排出制約を満たす均衡解は存在するが、ある時点で排出制約を満たす均衡解が得られなかった。これはSSP3が緩和策への困難度が高いシナリオであり、後述するように様々なモデル内パラメータが排出削減を困難にさせるように想定されているためである。

### 3) SSP シナリオの想定

SSPは、縦軸、横軸にそれぞれ緩和策の困難度と適応策の困難度を取り、SSP1からSSP5までの5つの将来像が配置されている(図(2)-2)。「緩和策に対する困難度」とは2つの条件、すなわち1)GHG排出量のドライビングフォースの大きさ(人口増減、経済成長など)、2)緩和策を行うための能力で定義される。緩和策を行うための能力は、エネルギー消費を抑制する、あるいは炭素強度を下げるような技術(石炭から天然ガスへシフトするといった燃料転換、CCSなどがあげられる)の利用可能性、国際政治制度の進展度、緩和策を推進するための資金的な援助・人的資本によって記述できる。必ずしもこれらすべての要素が同時に同じ方向性を持つ必然性はないが、例えばSSP5やSSP3は緩和策の困難度が高く、上述のような要素のいくつかが増加させる方向性を持つことになる。

一方、「適応策に対する困難度」は以下のような3つの条件から定義される。第一に気候変動影響に対する暴露の大きさ(沿岸域の人口の増減など)、第二に気候変動に対する社会経済システムや生態系の感度(沿岸域に居住する人の所得の大きさなど)、第三に適応策を実施するための能力(沿岸施設や沿岸域の堤防を建設する資金的、人的資源など)、である。ただし、気候変動による影響や適応策に関する解析は本研究では扱わない。

SSPでは5つの代表的な将来像が想定され、それぞれその将来像を表すような名前が付けられている。SSP1; Sustainability(持続可能)、SSP2; Middle of the road(中庸)、SSP3; Regional Rivalry



図(2)-2 SSPの将来像に関する2軸と各SSPの関係 (O'Neill, et al.)

(地域対立)、SSP4; Inequality (格差)、SSP5; Fossil-fuel Development (化石燃料依存型発展) であり、それぞれの世界観にあわせてストーリーラインが作られた<sup>28)</sup>。

SSP1は「持続可能」という言葉が示すように、緩和、適応ともに困難性が小さい、つまり緩和策、適応策の導入が容易な世界である。途上国の教育水準の向上により、人口増加が止まり、経済発展も進み、貧困の解消が進む。物質への依存度が低く、エネルギー技術の発展は高いといった特徴を持つ。それに対してSSP3は緩和策、適応策ともに導入に大きな困難を伴う社会である。教育水準の向上は低く、途上国では人口増加が止まらない。また所得は増加せず、多くの人が気候変動影響に対して脆弱となる。エネルギー技術への投資も進まず、GHG排出量も増加することになる。各将来像の詳細については、O'Neill, et al.<sup>28)</sup>を参照されたい。

異なる社会経済状況を表すためにSSPに応じてモデル内の各種パラメータを変更する。その想定一覧を表(2)-1に示す。表中の1列目には各種想定を行う要素があり、それに応じて各SSPがどのような方向性を持つか示され、最も右の列に具体的なモデル内パラメータとその変更方法が記述されている。これらの想定は以下の手順で決定した。①エネルギー需要・供給側、農業・土地利用や大気汚染物質排出規制の想定がSSPの叙史的ストーリーラインに従うとどのようにあるべきかを定める(高い、低い等の定性的情報)。②①の情報を解釈し、表(2)-1に示すようなパラメータ想定を行う。③シミュレーションを実行し結果を見て、過去のシナリオ研究(SRESやRCP)、観測値と技術改善のスピード等を照合し、結果がストーリーラインと整合的か確認する。ここで確認するのは、例えば、エネルギー強度を見た場合、SSP1<SSP2<SSP3という順序になっていることなどである。④必要に応じて①からの作業を見直し一連の作業を繰り返す。

表(2)-1 各種パラメータの想定一覧 (表中の引用文献<sup>22, 29-32)</sup>)

要素	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5	パラメータの変更方法
人口・労働人口	低い	中間	高い	低い/高い	低い	人口と労働人口を外生的に変化させる。(Ke and Lutz (2014) より)。SSP4は高所得国は低く、低所得国は高い。
所得	高い	中間	低い	高い/低い	高い	GDPを外生的に入力し全要素生産性を内生変数とする。(Dellink et al. より)SSP4は高所得国は高く、低所得国は低い。
再生可能エネルギーコストの低減速度	速い	中間	遅い	遅い	遅い	再生可能エネルギー発電部門の投入係数を変化させる。中間とはIEA(2012)の2050年値とし、"速い"、"遅い"とはそこからプラス25%、マイナス50%変化させることを意味する。
非在来型バイオマス消費の社会受容性	低い	中間	高い	高い	中間	(1)バイオマス発電のロジック関数の選好パラメータ、(2)交通部門の燃料選択のロジック関数の選好パラメータの2つを変化させる。"中間"とはデフォルトの値で、"高い"、"低い"とはそこからプラスマイナス25%変化させることを意味する。デフォルトはreferenceケース、緩和策ケースでそれぞれ全体のシェアの1%、10%となる値である。
再生可能エネルギー(太陽光、風力)の選好	高い	中間	中間	高い	低い	再生可能エネルギー(太陽光、風力)のロジック関数選好パラメータを変化させる。"中間"とはデフォルトの値で、"高い"、"低い"とはそこから2倍、もしくは1/2する。デフォルトはreferenceケース、緩和策ケースでそれぞれ全体のシェアの1%、10%となる値である。
原子力コストの変化	中間	中間	低い	高い	中間	原子力発電部門の労働、資本、その他サービスの投入係数を変化させる。中間とはIEA(2012)の2050年値とし、"速い"、"遅い"とはそこから年率プラス、マイナス2%変化させることを意味する。
原子力の社会受容性	低い	中間	高い	中間	中間	原子力発電部門のロジック関数選好パラメータを変化させる。"中間"とはデフォルトの値で、"高い"、"低い"とはそこから年率プラス、マイナス2%変化させることを意味する。社会受容性が低いケースは極端に原子力をさげる想定をしている。デフォルトの値は基準年でキャリブレートされた値である。
火力発電の社会受容性	低い	中間	高い	中間	高い	再生可能エネルギー(太陽光、風力)のロジック関数選好パラメータを変化させる。"中間"とはデフォルトの値で、"高い"、"低い"とはそこから2倍、もしくは1/2する。デフォルトの値は基準年でキャリブレートされた値である。
エネルギー効率Autonomous energy efficiency improvement (AEEI)の改善速度	速い	中間	低い	SSP4	SSP5	産業の生産関数・家計消費関数のエネルギー投入にかかる係数を変化させる。"中間"はデフォルトの値を使用し、産業については"速い"、"遅い"とはデフォルトから年率プラス、マイナス年率0.5%変化させることを意味する。LES関数は所得弾力性の想定をプラスマイナス25%変化させる。SSP4は地域により異なり、高所得国ではSSP1の想定、低所得国ではSSP3の想定を行う。SSP5は基本的にSSP2の想定であるが、交通部門のみ年率0.5%高い効率改善を想定する。デフォルトとは、経済成長率に応じて変わり、経済成長率が年率1%以下、1%-3%、3%-5%、5%-7%、7%以上でそれぞれ、経済成長速度の半分、1%、1.1%、1.4%、経済成長速度の半分とした。これらの想定はBabiker et al.(2001)の一部に基づく。
石炭の消費選好	低い	中間	高い	低い	高い	産業・家計部門のエネルギー種の選択を行うロジック関数の選好パラメータを変化させる。"中間"とはデフォルトの値で、"高い"、"低い"とはそこから年率プラスマイナス2%する。デフォルトの値は毎年1%ずつ減少するとした。
電力の消費選好	高い	中間	中間	高い	中間	産業・家計部門のエネルギー種の選択を行うロジック関数の選好パラメータを変化させる。"中間"とはデフォルトの値で、"高い"、"低い"とはそこから年率プラスマイナス1%する。デフォルトの値は毎年1%ずつ増加するとした。
在来型バイオマスの消費の減少速度	高い	中間	低い	低い	高い	在来型バイオマスの消費係数を変化させる。"中間"は年率2%で減少していくと想定し、"高い"、"低い"はそれぞれプラスマイナス年率0.25%変化させる。
交通需要の大きさ	低い	中間	中間	低い	中間	家計消費の自動車燃料消費に関する所得弾力性パラメータ及び産業の交通サービス投入係数を変化させる。前者の"中間"とは1.0であり、"低い"とは0.75と想定した。後者は"中間"とは年率0.5%で、"低い"とは1.0%で低下すると想定した。
石炭の採掘費用	中間	中間	低い	中間	低い	石油・天然ガス採掘部門の生産性は累積採掘量によって決まっており、資源が枯渇することによる費用増加を表す曲線を変化させる。中間はRogner (1997)に基づき、"低い"は0.66倍のコストがかかるとした。また、年率のコスト上昇の上限については"中間"では5%であるが"低い"は1%とした。
石油天然ガスの採掘費用	中間	中間	高い	中間	中間	石油・天然ガス採掘部門の生産性は累積採掘量によって決まっており、資源が枯渇することによる費用増加を表す曲線を変化させる。中間はRogner (1997)に基づき、"高い"は1.5倍のコストがかかるとした。また、年率のコスト上昇の上限については"中間"では5%であるが"高い"は7.5%とした。
素材の中間投入係数の減少速度	速い	中間	遅い	速い	遅い	非鉄金属、非金属部門における鉄とセメントの中間投入係数を変化させる。"中間"とは年率2%で減少し、"高い"、"低い"はそれぞれプラスマイナス年率1.0%を変化させる。
CCSの費用	中間	中間	中間	低い	低い	CCSサービスの提供部門の投入係数を変化させる。"中間"はFujimori et al.の値をそのまま使用し、"低い"とはその0.5倍の値を用いる。
CCSの社会受容性	低い	中間	中間	高い	中間	CCSの最大導入可能量を変化させる。"中間"は85%で、"高い"、"低い"はそれぞれ100%、50%である。
家計の工業製品に対する消費選好	低い	中間	高い	低い	高い	家計の消費関数の所得弾力性を変化させる。"中間"はデフォルトの値を用い、"高い"、"低い"はそれぞれプラス50%、マイナス25%変化させることを意味する。
大気汚染物質抑制策の強度	強い	中間	弱い	弱い	高い	大気汚染物質の規制の強度によって排出係数を変化させる。詳細はRaoetalを参照されたい。排出係数の変化はGAINSを用いている。
非エネルギー起源GHG排出の削減対策費用	低い	中間	高い	低い	高い	非エネルギー起源GHG排出に対する削減対策費用を変化させる。Fujimori et al.で書かれているσを変化させる。"中間"はデフォルトの値を用い、"高い"、"低い"はそれぞれプラス、マイナス25%変化させることを意味する。
土地生産性の向上速度	高い	中間	低い	低い/高い	高い	土地生産性パラメータを変更する。詳細はHasegawa et al.を参照されたい。
農産財の輸出・輸入税	低い	低い	高い	高い	低い	農産財の輸出・輸入税を変化させる。"低い"とは現状を維持し、"高い"場合は現在より33%高い税を課す。
エネルギー財の輸出・輸入税	低い	低い	高い	低い	低い	エネルギー財の輸出・輸入税を変化させる。"低い"とは現状を維持し、"高い"場合は現在より33%高い税を課す。
畜産物の消費選好	低い	中間	高い	高い	低い	畜産物の家計消費の所得弾力性を変化させる。詳細はHasegawa et al.を参照されたい。

#### 4) データ

CGEモデルは、社会会計表を用いて基準年のモデル内パラメータをキャリブレートする。本研究ではエネルギーフローやGHG排出量を適切に扱うために、金額のフローを表す社会会計表とエネルギー統計や排出量などを調整したデータを用いる。社会会計表とエネルギー情報にはGlobal Trade Analysis Project (GTAP)<sup>33)</sup>とIEAのEnergy balance<sup>34)</sup>を基本として用い、その他国民経済計算、産業統計などの国際統計で調整を行った。調整の一部はFujimori and Matsuoka<sup>35)</sup>に示されている通

りである。GHG、及び大気汚染物質の排出量はEDGAR4.2<sup>36)</sup>を用いた。ただし、土地利用起源の排出量はEDGAR4.2を用いず、RCPを用いた<sup>7)</sup>。農業・土地利用データは農業統計<sup>37)</sup>、RCP及びGTAPの物理的情報を用いた。

風力、太陽光の潜在的エネルギー供給量は高解像度のグリッド（0.5分）の気象、土地利用情報から計算したDai, *et al.*<sup>38)</sup>を用いた。化石燃料資源はRogner<sup>39)</sup>を基にした。Fガスの排出量はHarnisch, *et al.*<sup>40)</sup>の手法を用いて外生的に与えた。

## （２）過去の検証手法

### １）モデルと諸パラメータについて

本研究はAIM/CGEモデルを用いて過去1981年~2005年までのシミュレーションを行った。CGEモデルの基礎データとなる社会会計表の利用可能性により、シミュレーションは古い年から将来に向けて実施するのではなく、2005年から2004年、2003年というように過去に向けて遡った。次にその結果を過去の統計値を比較し、結果の検証を行った。

過去のシミュレーションをするに当たって、将来推計に用いてきたモデル構造及びパラメータ更新方法に以下の2つの変更を加えた。第一は各産業の資本の扱いである。将来シミュレーションでは各産業が持つ資本を旧資本と新規資本で区別されているが、データの利用可能性から、旧資本と新規資本を区別せず、一つの集約的な資本として扱った。第二はエネルギー採掘価格の取り扱いである。将来推計の際には化石燃料の採掘価格は累積採掘量と資源賦存量（Rogner<sup>39)</sup>）から計算する。しかし、今回は過去の採掘価格に関する情報を得ることが困難であったため、価格指数を用いて過去に対して遡っていくこととした。採掘価格は固定変数として、その相補関係にある内生変数としてエネルギー採掘部門のレント（資本や労働に帰属できない天然資源由来の収益）を想定した。

本モデルのエネルギー消費量を決定する上で、重要なパラメータがいくつか存在するので、ここではそれらについて述べる。非エネルギー転換部門のエネルギーと付加価値のCES関数の代替弾力性であるが、これは0.4とした（Webster *et al.*<sup>41)</sup>）。次に、価格とは関係ないエネルギー技術進歩を表すAEEIであるが、これはGDP成長率に応じて想定を変えた。負のGDP成長時にはAEEIは0、0-3%のGDP成長時にはAEEIは1%、3-5%のGDP成長時にはAEEIは1.5%、5%以上の時には、GDP成長率の半分の成長率がAEEIとして得られると想定した。これは過去の経験により高いGDP成長率（例えば年率5%を超えるような）が達成されるときにはエネルギー効率改善が強く進み、GDP成長率が緩やかになるとエネルギー効率改善も緩やかになってきたという事実に基づいた想定である（Ruijven *et al.*<sup>17)</sup>）。エネルギー源別では石炭、ガス、電力についてそれぞれ年率1%、-0.5%、-1%の割合でロジット関数のパラメータを変化させた。この想定は過去に石炭から石油、天然ガス、電力へと燃料がシフトしてきた様相を捉えるための係数設定であるが、既存文献研究から有用な数値が得られなかったため、恣意的ではあるが上述のように想定した。在来型バイオマスのAEEIは年率1%を仮定した。次に、家計のLES関数の自動車燃料の所得弾力性は1.0、その他のエネルギー財の所得弾力性は0.5とした。両部門におけるエネルギー源の代替（内訳）を表すロジット関数の価格に対する指数は-1.0とした。発電部門における燃料転換効率は年率1%と仮定した。ここで示したパラメータ設定のうち、CES関数における代替弾力性の値は先進国の過去の計量で得られた値であるが、それ以外のものは先験的に決めているもので、本研究で得られた知見を基により妥

表(2)-2 モデル外生変数の一覧のデータソース

要素	データ源	備考
GDP	国連国民経済計算	全要素生産性を内生的に決定し、ターゲットとするGDPを推計する。
人口	国連人口推計	人口変化を統計に従い変化させる。
労働人口	国連人口推計	生産要素の一つである労働力を労働人口に応じて変化させる。
資本形成	国連国民経済計算	資本投資総量をそのまま統計に従って与える。
資源価格 (天然ガス、原油)	IEA Energy Prices and Taxes	各地域の石油採掘部門の生産価格を国際価格の価格指数に応じて変化させ、資源レントを内生化する。ただし、天然ガス価格は1988年までしか遡れなかったため、それ以前は石油価格の価格指数を外挿した。
資源価格 (石炭)	COMTRADE	各地域の石炭部門の生産価格を輸出価格の価格指数に応じて変化させ、資源レントを内生化する。

当な数値を得られることが期待されるものである。

将来推計で行うのと同様に過去のシミュレーションでもいくつかの変数を外生的に変更する。表(2)-2にそのリストを示す。人口・経済関連指標はすべての国、対象期間について得られるためそれらを使用するが、基準年からの変化率として用いた。これは社会会計表が統計値から若干異なるためである。原油価格はいくつかの主要な取引所におけるスポット価格が得られるため、これらを平均して、さらに経済指標と同様に基準年からの比として用いた。天然ガス価格も原油価格と同様であるが、IEAの統計上では1988年までしか遡れなかったため、それ以前は原油価格の動きを比として与えた。石炭価格は国によって異なり、石炭の輸出額と輸出量の統計から価格を計算し、これも同様に基準年比で与えた。

## 2) 結果の分析手法

推計結果を得たのちに、それと過去の統計とを比較し、その乖離について解析を行う。ここでは以下のような二つの観点から乖離率を定義して解析を行う。第一は、統計値と推計値の平均的な乖離に関するものであり、平均絶対誤差率 (MAPE)、平方平均誤差率 (RMSPE) を採用した。第二は、乖離の偏りが地域、年、指標などによって異なるのかどうかを検討するために回帰分析を行う。第二の乖離の偏りの分析は、統計値に対する統計値と推計値の比の対数を取り、その絶対値を回帰する。2005年、世界全体を基準として回帰を行う、すなわち2005、世界全体の $a$ 、 $b$ それぞれの係数は基準値0となるように推定する。統計値にはIEAのEnergy Balance<sup>42)</sup>を用いた。また、表(2)-2に示される指標を解析対象とした。結果の章ではこれらの係数の推定値の指数を取って、1を引いたもの（比率に変換しなおす）を示す。

## 4. 結果及び考察

### (1) SSPの定量化

#### 1) 排出量

GHG排出量としてCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの排出量を図(2)-3に示す。CO<sub>2</sub>のリファレンスケースについ

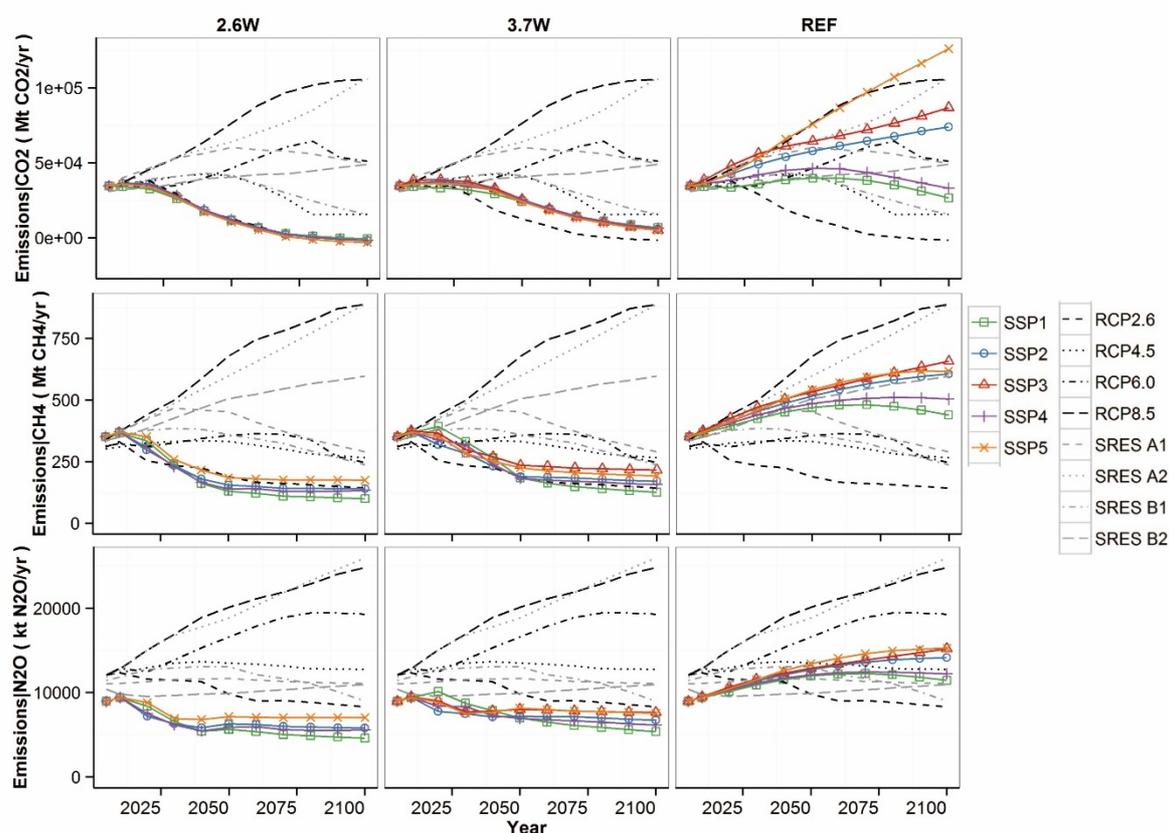
て見ると2100年ではSSP5が最も大きく126GtCO<sub>2</sub>であった。次いで、SSP2、SSP3が近い値をとりそれぞれ74GtCO<sub>2</sub>/年、86GtCO<sub>2</sub>/年となった。それら2つのケースからさらに小さい値を取ったのはSSP4、SSP1であり、それぞれ33GtCO<sub>2</sub>/年、26GtCO<sub>2</sub>/年となった。SSP5はSRESの中でCO<sub>2</sub>排出量が最も大きなシナリオであるA2よりもやや大きな値を示している。RCPと比べると2080年付近までRCP8.5をなぞるように増加していき、最後の20年でRCP8.5の増加速度が遅くなるのに対してSSP5はそのまま増加し続けた。一方、SSP2、SSP3は21世紀前半でSRESのA1、A2と似たような軌跡で増加していき、21世紀後半はSRESのA1、A2の中間あたりとなる。SSP1、SSP4は、2070年頃まではSRESの中でも環境志向型であるB1、B2と類似の軌跡となり、2070年以降はB1、B2の間となる。SSP1、SSP4が緩和策への困難度が低いことと対応している形となっている。RCPと比較するとこれら二つのシナリオはRCP4.5とRCP6.0の間の値を取る。

緩和策を行う2.6W、3.7Wケースについて見ると、ほぼいずれのSSPも同じような経年変化となる。これはAIM/CGEのモデル実行上、GHG全体の排出量制約を外生的に置くためGHGの内訳に多少の差異はあれ、CO<sub>2</sub>の排出量としては大きな差異が生まれにくいことに起因する。3.7WケースはおよそRCP4.5とRCP2.6の間を取る。2.6WケースはほぼRCP2.6と同じ軌跡となり、21世紀後半では純負の排出となる。

次にCH<sub>4</sub>についてみると、2100年ではSSP3、SSP2、SSP5の順で大きいがこれら3つは類似の軌跡となり2100年でそれぞれ、657、616、605MtCH<sub>4</sub>/年となったSSP1、SSP4は上記3つのシナリオと比べると小さく、それぞれ438、503MtCH<sub>4</sub>/年であった。CO<sub>2</sub>と比べるとSSP間の幅は小さく、SRESと比べても小さいことがわかる。SRESではA1が最も近い値であるが、それ以外のシナリオは大きく異なる。RCPと比べると、RCP8.5とRCP6.0（RCP4.5とほぼ同じ）の中間あたりにすべてのSSPが位置する。

次に緩和策ケースについてみると、3.7Wケースではいずれのシナリオもリファレンスケースと比べると削減されることがわかる。SSP3、SSP5はRCP2.6とRCP4.5の間あたりに位置し、SSP1、SSP2、SSP4はRCP2.6と似た傾向を示す。2.6WケースではSSP5がRCP2.6よりやや大きく、それ以外のSSPはRCP2.6よりやや小さい値となった。SRESは3.7Wケースと比べるといずれも大きいが、これはいずれのSRESでも緩和策を考慮していないことが一つの要因として考えられる。

N<sub>2</sub>OについてもCH<sub>4</sub>と似たようなことが言え、SRES、RCPと比べると幅が小さい。ただし、基準年の排出量が異なるが、これはEDGARのインベントリデータが異なるためである。成長率で見た場合すべてのSSPは、RCP6.0と近い挙動を示した。緩和ケースでは3.7W、2.6WケースともにRCP2.6と近い変化（基準年から変化）となった。



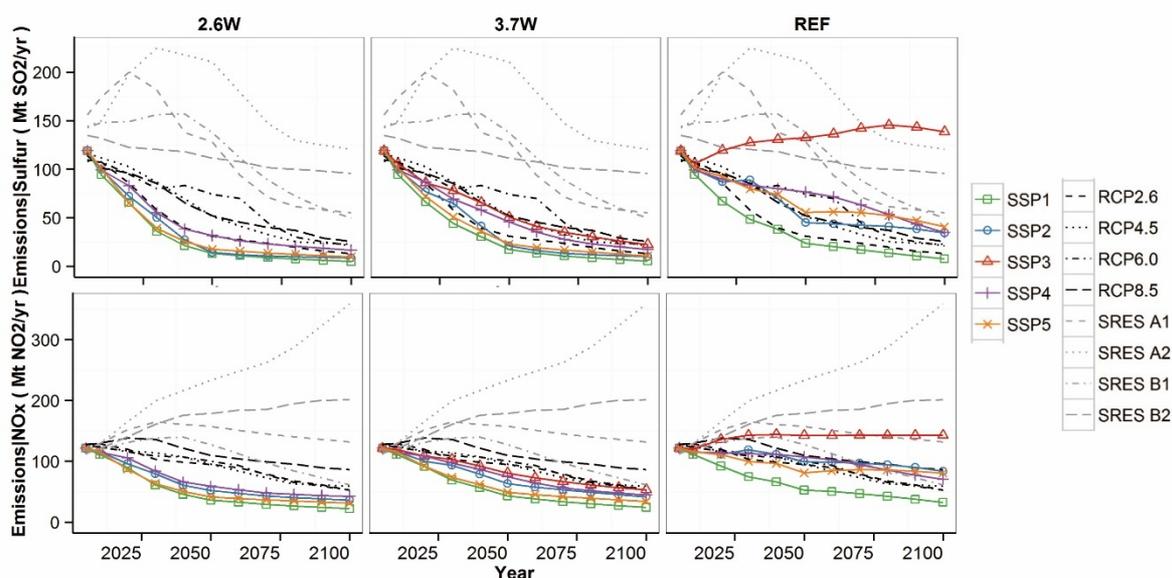
図(2)-3 世界全体のCO<sub>2</sub> (上)、CH<sub>4</sub> (中段)、N<sub>2</sub>O (下) 排出量  
(左から2.6W、3.7W、リファレンスケース)

## 2) 大気汚染物質

大気汚染物質として硫黄酸化物、窒素酸化物の排出量を示す(図(2)-4)。まず、硫黄酸化物のリファレンスに注目する。硫黄酸化物はSSP3を除き21世紀中に大きく減少する。これはRCPの傾向と類似の傾向である。SSP3は排出量が現状とほぼ変わらず、2100年で138Mt/年となったこれは石炭に依存した燃料消費と大気汚染物質除去規制の進展が遅いという想定をSSP3が置いているためである。SSP5が次に大きな値となり、40Mt/年であった。SSP5は石炭依存型ではあるものの大気汚染物質除去規制の進展が早く進んだためこのような結果となっている。幅について見ると、RCPではすべてのシナリオにおいて減少しており、2100年では12-25Mt/年となっていたが、SSPは7.7-138Gt/年と非常に大きくなっていることがわかる。SRESは基準年の値(1990年)が140Mt/年であり、その後の排出量も過大に見積もられていたが、現実には脱硫装置の普及などによってエネルギー消費量自体は増加するものの排出量は下がった。従って、SSPはSRESと比較すると全体として小さな値となっている。

窒素酸化物は硫黄酸化物と同様にSSP3が最も大きく、2100年では142Mt/年であった。硫黄酸化物と比べるとSSP3を除くSSP間でも差が生じており、SSP2、SSP4、SSP5は70-80Mt/年付近に位置し、SSP1が32Mt/年となった。RCPと比べると、SSP2、SSP4、SSP5は似たような傾向を示す。SRESはA1、A2で非常に大きな値を示しており、SSPの傾向とは大きく異なる。

緩和策ケースについて見ると、大部分のシナリオで窒素酸化物、硫黄酸化物ともにいずれのRCP、



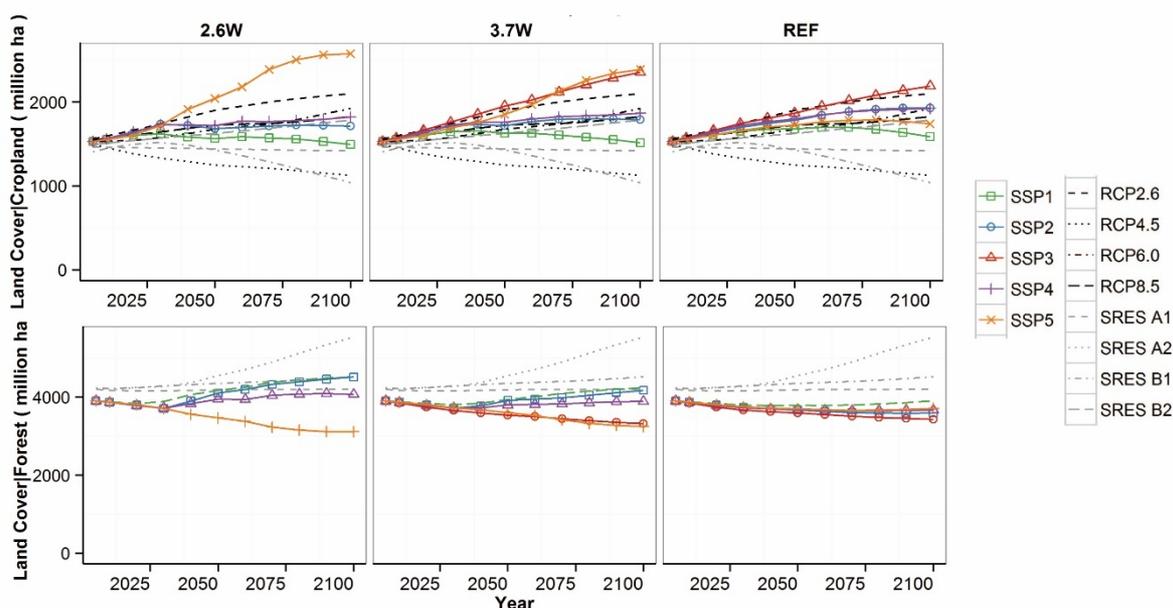
図(2)-4 世界全体の硫黄酸化物（上）、窒素酸化物の排出量（下）  
（左から2.6W、3.7W、リファレンスケース）

SRESよりも小さな値を示した。

### 3) 土地利用

土地利用として耕作地と森林面積に着目する（図(2)-5）。耕作地のリファレンスケースについてみると、2100年ではSSPはおよそ現在と同レベルもしくは増加となっている。最も大きいのはSSP3であり2191Mha、最も小さいのはSSP1で1586Mhaとなった。SRESやRCPは現状から大きく下がるシナリオが含まれるが、それらと比べるとSSPの幅は小さい。RCPはRCP2.6のような緩和策を強く行いバイオ作物が大量に導入されているものも含まれており（RCPの中ではRCP2.6が最も大きい）、リファレンスケースと横並びで比較するときには留意が必要である。緩和ケースについてみると、シナリオ間の差は大きくなる。これはバイオ作物の導入量などによって大きく影響を受けるためである。SSP3、SSP5ではバイオ作物の大量導入が耕作地拡大に大きく寄与している。SSP5の非在来バイオの社会受容性は中程度であるが（表(2)-1）、リファレンスケースで化石燃料に依存したエネルギー消費量が大きいため、そこから緩和策を取った時には大幅なGHG排出削減を実現するために大規模な負の排出が必要となり、そこでバイオマスとCCSを組み合わせた技術の大量導入が必要となり、このような結果となった。

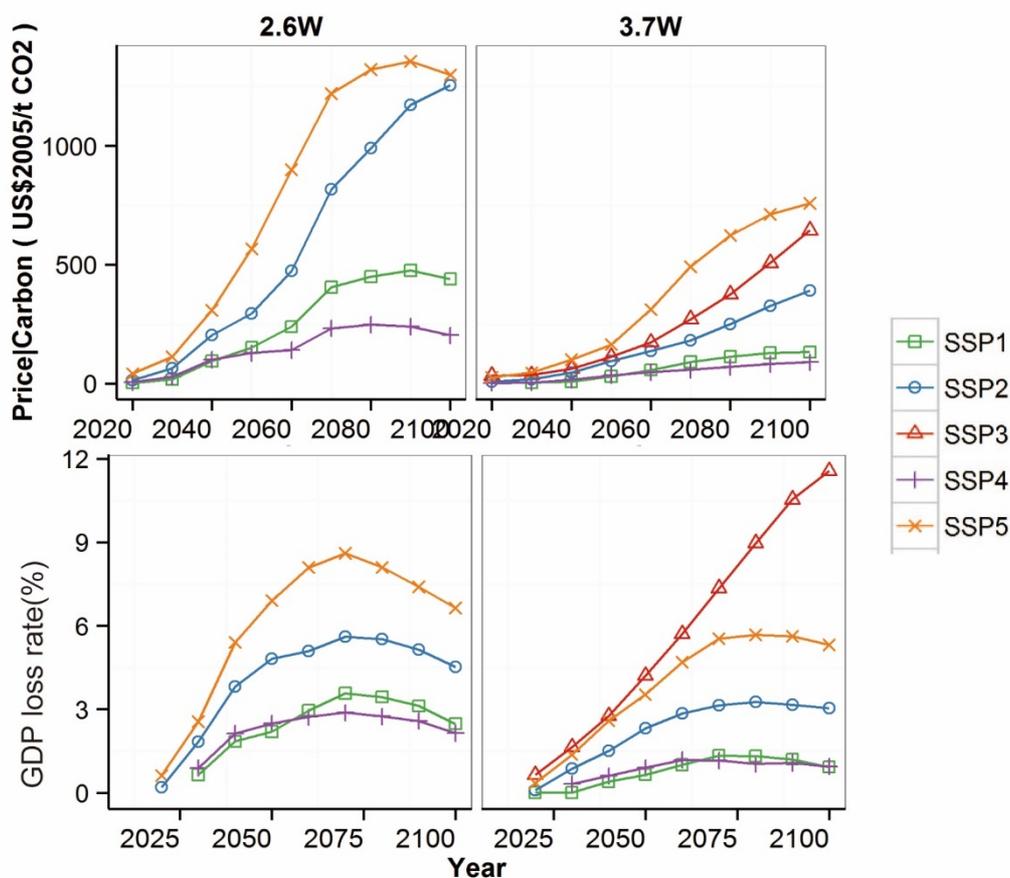
森林は耕作地と逆の動きとなり、SRESではかなり増加するシナリオが多いが、SSPでは横ばいもしくは減少となった。緩和策実施時には農業土地利用部門が緩和策に参加するSSP1、SSP2、SSP4では植林が進み増加するが、SSP3、SSP5では森林保護が進まず、バイオ作物の導入により森林が減少する。



図(2)-5 世界全体の主要な土地利用（上：耕作地、下：森林）  
（左から2.6W、3.7W、リファレンスケース）

#### 4) 気候緩和費用

気候緩和費用として、GDP損失率、炭素価格を示す（図(2)-6）。GDP損失率、炭素価格はともにSSP間によって大きく異なる。GDP損失率についてみると、SSP1、SSP4は小さく、SSP3、SSP5で大きくなり、SSP2はその間を取る。これらの順位は緩和策への困難度に対応する形となっていることがわかる。2100年時点で3.7WケースではSSP3で12%、SSP5で4.5%の損失となっている。一方、SSP1、SSP4は1.0%であり、SSP2は2.9%となった。SSP3とSSP2はリファレンスケースでGHG排出量がほぼ同じでありながら、SSP3はSSP2と比べて大きな数値となった。これは主として2つの要因による。その第一はSSP3のGDPがSSP2より低く、同じ削減費用が発生したとしても、対GDP比でみると割合が大きくなる。第二はSSP3のパラメータの設定は緩和策の困難性が高いように想定されているので、削減費用自体も大きくなることである。2.6Wケースでは3.7Wケースと比べて全体的に緩和費用が上がり、SSP1、SSP4で1.5%、SSP2で3.5%、SSP5で6%となる。2.6Wでは21世紀後半になるとGDP損失率が減少に転じているがこれは以下の理由による。すなわち、GDP損失率の挙動はGDPの成長率と緩和策実施によるGDP損失額の増加率の相対的な関係で決まる。さらに、ここでは示していないがGDP損失額の絶対値は炭素価格の挙動と近くなる。従って、GDP成長率の増加速度と炭素価格の増加速度の関係でGDP損失率の増減がおおよそ決まる。例えば、SSP5では、2050年から2100年にかけてGDP成長率が年率約2.3%であり、炭素価格の変化は年率約2.4%である。従って、GDP損失率は21世紀後半でほとんど変化がなくなる。炭素価格の上昇が21世紀後半である程度落ち着くことについては、二つの理由が考えられる。その第一はGDPの増加率が21世紀後半の方が遅くリファレンスの排出量の増加率が21世紀後半で遅くなり、GHG削減量の年変化は21世紀前半よりも後半の方が小さいことである。その第二は、21世紀後半になるとバイオマスCCS、大規模植林による炭素吸収等が進み大きな炭素価格上昇を伴わなくても排出パスを達成できるということである。



図(2)-6 緩和費用と炭素価格 (左から2.6W、3.7Wケース)

炭素価格はGDP損失と似たような傾向を示し、SSP間の順位もGDP損失と同じである。2.6Wケースの2100年についてみると、SSP1,SSP4は500-600\$/tCO<sub>2</sub>であるのに対して、SSP2、SSP5は2000\$/tCO<sub>2</sub>近くとなった。

## 5) 結果の解釈

AIMによるSSPの定量化情報をここまで見たが、これらの結果から気候モデル、影響評価モデルにとってより重要となる以下2点の議論を行う。具体的には、大気汚染物質は全てのRCPで21世紀後半大きく減少していたがSSPではほぼ現状と変わらないシナリオが含まれる、土地利用はSRESで大規模に森林が増加し耕作地が減少するシナリオが存在したが、SSPのリファレンスケースではそういった傾向は見られない、という点である。

第一の大気汚染物質の排出量は、RCPの排出量がすべてのシナリオにおいて大きく削減されているのに対して、リファレンスケースのSSPは大きな幅を持っている。特にSSP3の排出量が多いのはSSPを特徴づけるものであると言える。RCPがCMIP5で使われた時に、大気汚染物質の排出量がいずれのRCPでも似通っており、大気化学輸送モデル実験が有意義に行えないという事が指摘された。今後、SSPは気候モデルの比較プロジェクトCMIP6で使われるが、とりわけその中でも大気化学輸送モデル比較はRCPで比較することができなかつた異なる大気汚染物質排出量下でのシナリオ実験が可能となるであろう。

第二に土地利用の中でも耕作地はSRESで大きく減少するというシナリオが存在したが、SSPではそのようなシナリオは見られなかった。土地利用によって影響を受ける、炭素循環、水資源、生態系などのモデル解析では大幅な森林減少や耕作地の拡大などは新しい知見を生むと期待される。このSRESとの違いの要因は、背後に想定している食料需要と土地生産性の向上の見積りとの違いが考えられる。今回のSSPがSRESよりも全般に大きな値を示しているということは、SRESと比べてSSPにおける食料需要が大きいか土地生産性の向上速度が遅い、もしくはその両方となる。SRESがどのような想定を置いていたかは明確にされておらず、想定についてここでは比較できないため、これ以上の深い考察はできないが、SSPを使うに当たってこのような違いがあることは認識しておくことが必要である。

## (2) モデル検証の結果及び考察

### 1) 世界全体の乖離

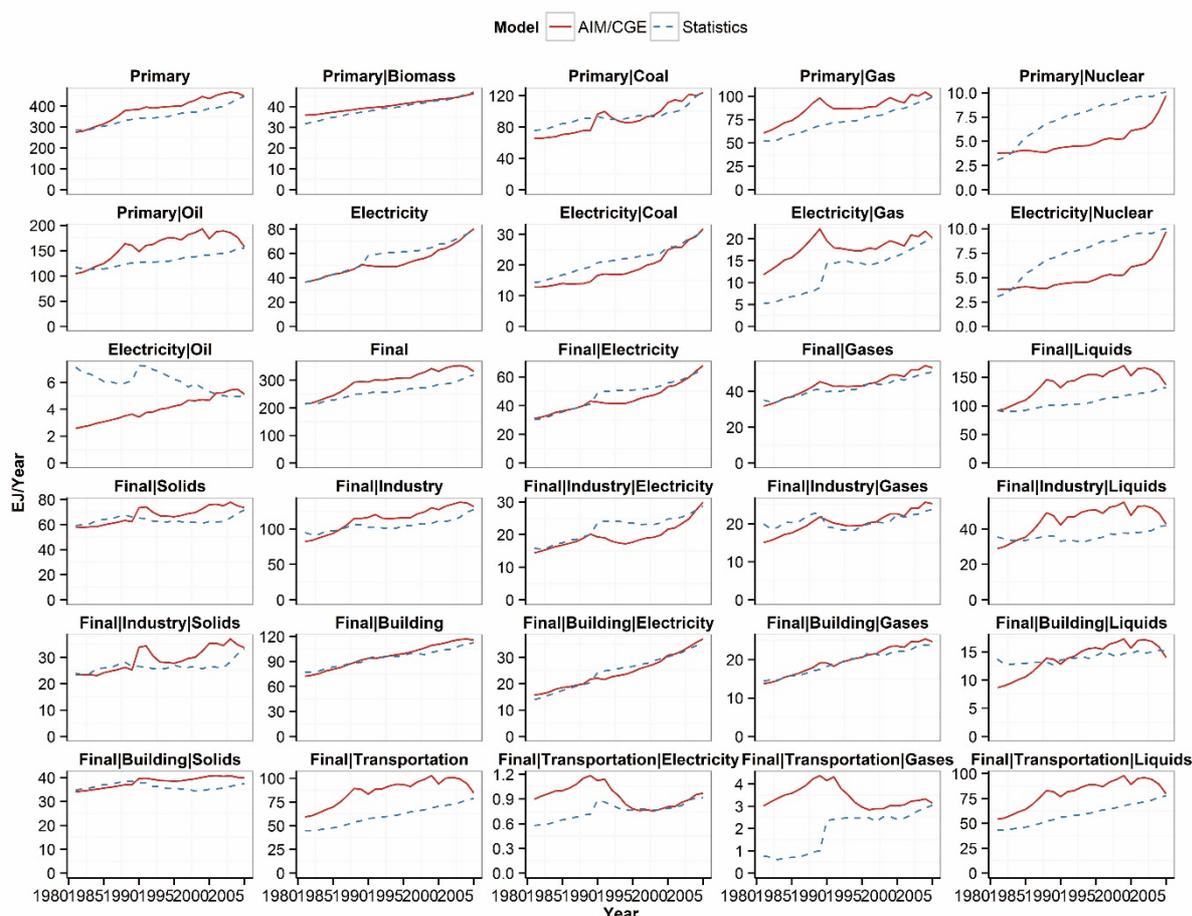
世界全体（全地域を集約した合計）の乖離率を表(2)-3に示す。これらは対象期間の平均値を表している。また、一次エネルギー供給量、発電量(熱供給を含む)、最終エネルギー消費量をそれぞれ総量及びエネルギー源別で、最終エネルギー消費はさらに産業、交通、民生部門について示している。一次エネルギー供給量の総量は約10%の乖離であった。一方、エネルギー源別に見るとある程度の幅がある。バイオマスは5%程度と低いが、石炭が10%、石油、天然ガスは20-25%程度と大きくなり、原子力は35%程度となった。電力は全体でみると10%以下であり、小さい乖離であった。個別のエネルギー源で見ると、最も小さいのは石炭の15%程度、大きいのは天然ガスで、60%を超える乖離率を示し、幅が大きかった。個別のエネルギー源では乖離率が大きいと全体では小さくなるというのは、電力の需要側の推計精度はそれなりに高いが、電力構成を決める部分の精度が低いことを示唆している。

最終消費全体でみると15%程度の乖離であった。ガス、電力、固形燃料の乖離率が低くそれぞれ5%、8%、10%程度であったのに対して、液体燃料は30%程度の乖離率となり、相対的に高かった。最終消費全体は個別の部門の乖離率の平均に近い値となっている。最終エネルギー消費を部門別でみると、民生が最も乖離率が小さく5%、産業が11%、交通が45%程度であった。特に民生は最も高い乖離率の液体燃料でも12%程度とその再現性は相対的に高い。産業の乖離率は、民生部門の乖離率をほぼ2倍にした値であった。これら2つの部門はエネルギー源別の乖離率よりも部門全体の乖離率の方が小さいというのも一つの特徴である。すなわち、エネルギー総量としての再現性は高いが、エネルギー源別の推計には改善の余地があることを示唆している。交通部門は前述の2つのエネルギー最終消費部門とは大きく異なり、エネルギー総量でも高い乖離率である45%となった。特にガス燃料は100%を超える乖離率であるが、これは交通部門の中でその消費シェアが非常に小さくかつ過去にさかのぼるほどその消費量が急激に下がるためだと考えられる（多くはパイプライン由来であった）。

表(2)-3 世界全体の主要指標に関する乖離率（33%以上の箇所を色づけ）

	MAPE	RMSPE
一次エネルギー	10%	11%
一次エネルギー バイオマス	4%	5%
一次エネルギー 石炭	10%	11%
一次エネルギー ガス	20%	22%
一次エネルギー 原子力	32%	35%
一次エネルギー 石油	23%	25%
発電	7%	10%
発電 石炭	14%	16%
発電 ガス	63%	86%
発電 原子力	32%	34%
発電 石油	34%	39%
最終エネルギー	14%	15%
最終エネルギー 電力	7%	9%
最終エネルギー ガス	5%	6%
最終エネルギー 液体	30%	33%
最終エネルギー 固体	10%	12%
最終エネルギー 産業	11%	13%
最終エネルギー 産業 電力	12%	15%
最終エネルギー 産業 ガス	8%	10%
最終エネルギー 産業 液体	29%	33%
最終エネルギー 産業 固体	14%	18%
最終エネルギー 民生	4%	5%
最終エネルギー 民生 電力	6%	7%
最終エネルギー 民生 ガス	4%	5%
最終エネルギー 民生 液体	12%	15%
最終エネルギー 民生 固体	8%	9%
最終エネルギー 交通	44%	45%
最終エネルギー 交通 電力	27%	37%
最終エネルギー 交通 ガス	155%	230%
最終エネルギー 交通 液体	38%	39%

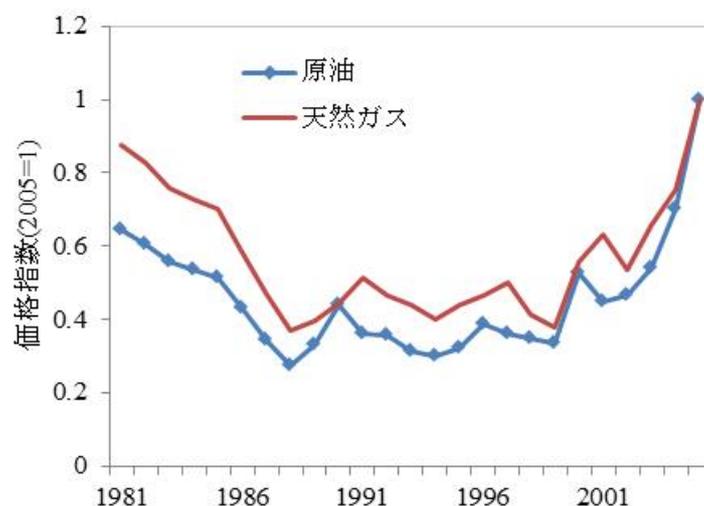
次に、各指標のグラフ一覧を図(2)-7に示す。乖離率が高い指標はグラフ上でも統計値との不一致度が高いという印象を与えることがわかる（例えば、交通部門）。しかし、表(2)-3の乖離率のみでは得られない特筆すべき情報がこのグラフから読み取れる。第一に、系統的な乖離が生じているものと、そうでないものが存在することである。例えば、一次エネルギー供給総量（図(2)-7の1段目左から1つ目）は対象期間全体を通して推計値の方が統計値よりも大きな値を示しているが、乖離率が同程度の石炭の一次エネルギー供給量（図(2)-7の1段目左から3番目）は統計値と比べて推計値が高い年と低い年が混在している。第二の点は、短期的には乖離が見られても、長期で見ると乖離が小さいような印象を与える指標が存在する。その例は石油の一次エネルギー供給量である。全体として推計値は統計値より高いがシミュレーションの対象期間の最初と最後の区間は比較的一致度が高い。



図(2)-7 世界全体の主要指標に関する統計値とシミュレーション結果

(各図のキャプションのうち部門は以下を表すPrimary：一次エネルギー供給、Final：最終エネルギー消費、Industry：産業、Building：民生、Transportation：交通。また、エネルギー源はBiomass：バイオマス、Coal：石炭、Gas：石炭、Nuclear：原子力、Oil：石油、Electricity：電力、Liquids：液体燃料、Solid：固体燃料を表す)

石油、天然ガスの一次エネルギー供給（図(2)-7の2段目左、1段目左から4番目）が、全体的にシミュレーション結果の方が高い値を示していることはGHG排出量を決める主要な要因の一つということで注目に値する。しかしその要因はこれら二つの指標で異なると考えられる。石油は液体燃料消費の最終エネルギー消費量が、天然ガスは発電が統計値とシミュレーション結果で大きく異なるためである。石油に関しては統計値の経年変化が小さく緩やかに上昇しているのに対して、推計結果では経年変動が大きい。この要因を見ると、シミュレーション結果の挙動は価格の影響が多くを説明していると考えられる。図(2)-8は2005年を基準とした石油価格指数を表しているが、最終消費の液体燃料消費の逆の動きに近いものとなっている。このことは、モデルの石油消費価格に対する弾力性が実態よりも高い可能性を示唆している。石油の主たる消費は交通部門であり、交通エネルギー需要の価格弾力性が高い可能性がある。一方、天然ガスについて着目すると、前述のように発電構成が大きく異なることがその要因であるが、さらにその原因の可能性は4つ考えられた。第一に、天然ガス発電の過去の現実の生産コスト変化がモデルよりも大きなものであ



図(2)-8 原油と天然ガスの価格指数

た可能性があることである。生産コストは燃料転換効率と資本効率の想定で決まっているが、燃料転換効率は手法の節で示したように毎年1%ずつ改善すると仮定している。一方、資本効率は全要素生産性で決まっており、これらが実態を反映していない可能性は十分にあり得る。第二の可能性は、コスト以外の要因による生産シェアの変化である。地政学的な要因や大気汚染対策等ここでは明示的に扱っていないが、価格以外の要素で変化してきたものがあり得る。第三に前述の石油と同様に、シミュレーション結果は価格の逆関数との連動性が高くなっているが、統計値は価格に対して強く反応していない。ここでも同様に発電シェアを決めているモデル内の価格弾力性に関連するパラメータが実態と比べて大きい可能性がある。第四に、統計値自体の信頼性である。天然ガスの発電（図(2)-7の2段目左から4番目）を見ると統計値が1988年で急激な増加を示しているが、統計値を詳細に調べると、1988年以前で非OECDの多くの国で熱供給量が欠測していた。従って、直接このような統計値と比較してよいのかは議論の余地がある。

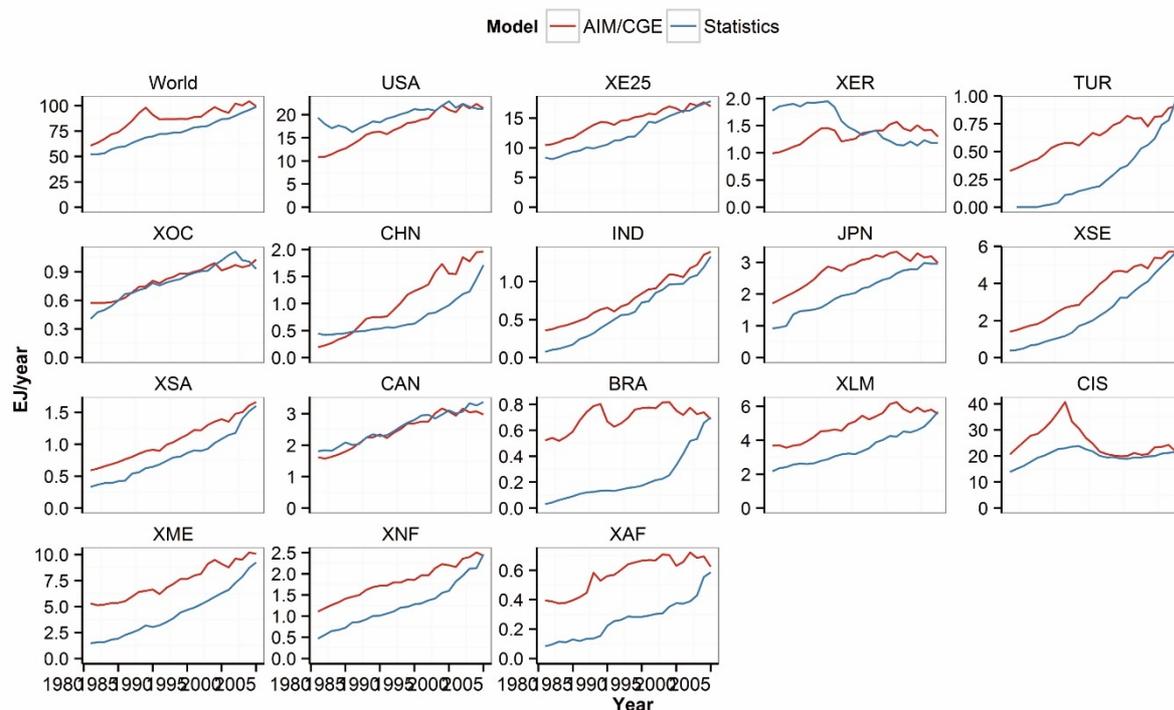
## 2) 地域別の乖離率

次に地域別で乖離率をみると様相は大きく変わる。ここでは、地域別で計算した平均絶対誤差率の主要統計量（平均、中央値、標準偏差）と世界合計とを表(2)-4に示す。

世界合計量は地域別の平均や中央値よりも低い値を取ることであり、その傾向はすべての指標で見られた。これは、世界全体で見ると乖離を打ち消しあって、全体として乖離率が低くなるが、地域別で見た時には乖離率が高い地域も含まれることを表している。一次エネルギー供給量に注目すると、総量、バイオマス、石炭などは地域別の中央値、平均値も40%以下でありそれほど大きな値を示していないが、天然ガスは平均値が310%と非常に大きな値を示している。図(2)-9に地域別の天然ガスの推移を示す。これらを見ると地域によっては過去ほぼゼロの消費量から急激に消費量を伸ばしたものも含まれ、そういった地域で乖離率が大きくなりこのような現象が起こっていると考えられる。例えば、ブラジル（BRA）は最も顕著であるが、それ以外の低所得国、その他東南アジア（XSE）、その他アジア（XSA）、その他アフリカ（XAF）を中心にこの傾向が見られる。ガス燃料については発電、産業、民生、交通いずれにおいても同様の傾向がみられる。

表(2)-4 地域別乖離率の主要統計量 (33%以上の箇所を色づけ)

	世界 合計	地域別乖離率統計量		
		平均値	中央値	標準偏差
一次エネルギー	10%	21%	16%	15%
一次エネルギー バイオマス	4%	32%	14%	49%
一次エネルギー 石炭	10%	37%	22%	37%
一次エネルギー ガス	20%	310%	47%	951%
一次エネルギー 原子力	32%	80%	32%	141%
一次エネルギー 石油	23%	33%	32%	14%
発電	7%	23%	22%	14%
発電 石炭	14%	108%	27%	220%
発電 ガス	63%	420%	131%	851%
発電 原子力	32%	80%	32%	143%
発電 石油	34%	47%	42%	29%
最終エネルギー	14%	23%	20%	13%
最終エネルギー 電力	7%	24%	23%	15%
最終エネルギー ガス	5%	180%	63%	462%
最終エネルギー 液体	30%	38%	37%	14%
最終エネルギー 固体	10%	38%	18%	67%
最終エネルギー 産業	11%	27%	22%	20%
最終エネルギー 産業 電力	12%	28%	31%	11%
最終エネルギー 産業 ガス	8%	242%	46%	742%
最終エネルギー 産業 液体	29%	43%	35%	28%
最終エネルギー 産業 固体	14%	64%	25%	121%
最終エネルギー 民生	4%	16%	16%	8%
最終エネルギー 民生 電力	6%	32%	27%	22%
最終エネルギー 民生 ガス	4%	329%	88%	927%
最終エネルギー 民生 液体	12%	36%	24%	27%
最終エネルギー 民生 固体	8%	47%	27%	73%
最終エネルギー 交通	44%	50%	52%	19%
最終エネルギー 交通 電力	27%	334%	38%	1165%
最終エネルギー 交通 ガス	155%	4133%	671%	7378%
最終エネルギー 交通 液体	38%	46%	47%	24%



図(2)-9 天然ガスの地域別結果（モデルの地域区分+世界全体（World））

### 3) 回帰分析の結果

表(2)-5は回帰分析の地域別係数 $a$ の指数を取り、1を引いた値を示しており、上段に高所得国（現在のOECD、その他欧州と旧ソ連）、下段に低所得国（前述以外の地域）における数値を表している。スター（\*）はt検定の0.1%、1%、5%有意水準を満たしているかどうかを表している。係数がゼロに近いものは多くの場合この検定を通過できず、ゼロであることを排除できない、すなわち有意差が存在しない可能性を示唆している。ここでは主要指標となる一次エネルギー供給と最終エネルギー供給のみを示す。

指標、地域によって、大きなばらつきがあるが、全体として低所得国の方が大きな値を示している。例えば、一次エネルギー供給総量で見ると、アメリカ（USA）、カナダ（CAN）、日本（JPN）、欧州（XE25）などが1ケタ台（-2から8%）であるのに対して、その他アジア（XSA）、その他中南米（XLM）、中東（XME）、北アフリカ（XNF）では二桁（15%から27%）となっている。その他アフリカ（XAF）は例外であり6%であった。エネルギー源別でも同じような傾向が見られる。この要因として、モデル内パラメータは先進国で得られた知見に基づいているため、低所得国の再現性が低くなるということが考えられる。

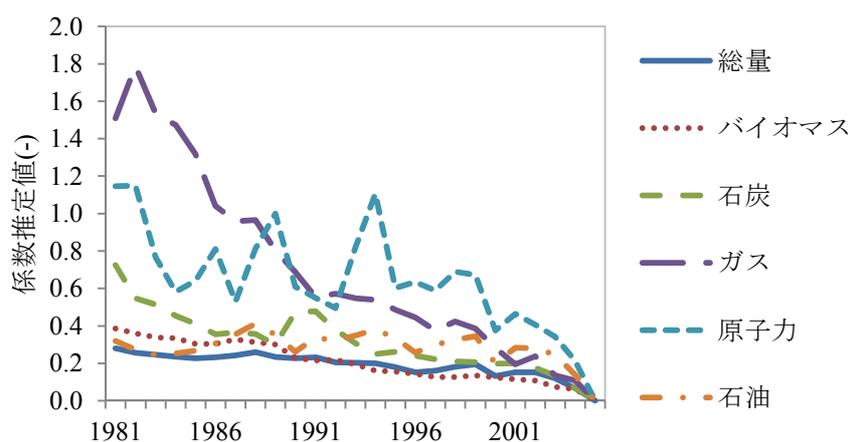
最終エネルギー消費は総量で見ると一次エネルギー供給と同じような傾向にあり、高所得国の方が小さな値である。しかし、エネルギー源別で見ると必ずしもそうとは限らないようである。特に固体燃料は高所得国でも大きな値を示しており（アメリカ、日本がそれぞれ22、39%）、低所得国は中東で77%と高い値を示しているがそれ以外では一桁の数値（-2%から6%）である。これは在来型バイオマスと関連している可能性がある。低所得国では在来型バイオマスの消費量のシェ

表(2)-5 地域別ダミーの結果

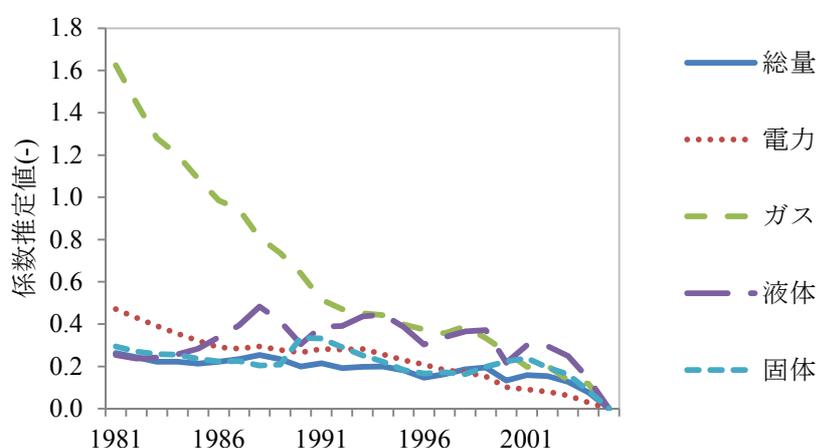
	USA	CAN	JPN	XE25	XOC	XER	TUR	CIS	
一次エネルギー	-0.01	0.00	0.08 ***	-0.02	-0.02	0.05 ***	0.14 ***	0.00	
一次エネルギー バイオマス	0.12 ***	0.05	0.01	0.32 ***	0.02	0.56 ***	0.34 ***	0.71 ***	
一次エネルギー 石炭	0.06	0.04	0.22 ***	0.18 ***	-0.01	0.15 ***	0.11 *	0.06	
一次エネルギー ガス	0.00	-0.08	0.17	0.05	-0.07	0.13	4.69 ***	0.05	
一次エネルギー 原子力	0.24	0.06	-0.05	-0.01	0.00 ***	-0.12	0.00 ***	0.07	
一次エネルギー 石油	0.04	0.06 *	-0.02	-0.04	0.01	-0.01	-0.07 *	-0.03	
最終エネルギー	0.02	-0.01	0.13 ***	0.00	-0.02	0.05 ***	0.15 ***	-0.03	
最終エネルギー 電力	0.13 ***	0.25 ***	0.01	0.01	0.05	0.25 ***	0.34 ***	0.19 ***	
最終エネルギー ガス	0.25 *	0.19	0.41 ***	0.05	0.06	0.38 ***	5.68 ***	0.04	
最終エネルギー 液体	0.00	0.08 ***	0.03	-0.04	-0.02	-0.03	-0.07 ***	-0.04	
最終エネルギー 固体	0.22 ***	0.09 ***	0.39 ***	0.07 *	0.06	0.04	-0.03	0.17 ***	
	CHN	IND	BRA	XSE	XSA	XML	XME	XNF	XAF
一次エネルギー	0.04 *	-0.05 *	0.19 ***	0.15 ***	0.16 ***	0.14 ***	0.41 ***	0.27 ***	0.06 ***
一次エネルギー バイオマス	-0.02	-0.01	0.09 *	0.03	0.04	0.11 ***	0.17 ***	0.18 ***	0.08 *
一次エネルギー 石炭	0.13 ***	0.07	0.39 ***	0.06	1.14 ***	0.58 ***	0.38 ***	0.10 *	0.02
一次エネルギー ガス	0.21	0.25	2.50 ***	0.51 ***	0.13	0.23	0.47 ***	0.32 *	0.93 ***
一次エネルギー 原子力	-0.02	-0.13	0.49 ***	-0.11	1.64 ***	0.25	0.00 ***	0.00 ***	0.05
一次エネルギー 石油	0.03	0.23 ***	0.10 ***	0.09 ***	0.27 ***	0.05	0.24 ***	0.13 ***	0.18 ***
最終エネルギー	0.07 ***	-0.07 ***	0.18 ***	0.18 ***	0.16 ***	0.09 ***	0.36 ***	0.15 ***	0.06 ***
最終エネルギー 電力	0.06	0.07 *	-0.01	0.11 ***	0.29 ***	0.03	0.14 ***	0.19 ***	0.01
最終エネルギー ガス	0.42 ***	0.37 ***	2.36 ***	0.82 ***	0.38 ***	0.10	0.44 ***	0.53 ***	0.92 ***
最終エネルギー 液体	0.03	0.14 ***	0.06 *	0.18 ***	0.20 ***	0.05 *	0.26 ***	-0.04	0.06 *
最終エネルギー 固体	0.11 ***	0.03	0.19 ***	-0.02	0.06	0.02	0.74 ***	0.02	0.04

アが高いが、在来型バイオマス消費はIEAの統計値自体も簡易的推計に頼っていると推測され、この方法と本研究の手法が近いために係数が小さくなっている可能性がある。一方、高所得国では石炭が主たる固体燃料のエネルギー源であり、低所得国のバイオマスと比べるとその乖離率は高くなっているのではないかと推測される。

次に図(2)-10、図(2)-11に回帰分析の年の係数 $b$ の指数を取り、1を引いた値を一次エネルギー供給、最終エネルギー消費について示す。いずれの指標も過去に遡るほど係数の値が高くなり、過去に遡るほど乖離率が高い傾向にあることを意味している。シミュレーションは2005年を基準年として行っているため、基準年に近いほどその乖離率が小さくなるというのは事前に推測されたことである。エネルギー源別でみると、一次エネルギー総量、最終エネルギー総量は年を遡っても他のエネルギー源別と比べると小さい傾向にある。ガスはいずれの項目も大きな値を示している。これは、ここまでの結果と整合的である。



図(2)-10 回帰分析の時系列に関する係数（一次エネルギー供給）



図(2)-11 回帰分析の時系列に関する係数（最終エネルギー消費）

#### 4) 今回の結果から得られるモデル精度の解釈

ここまで、モデルの精度として統計値とシミュレーション結果の乖離率を見た。人によりその印象は異なるであろうが、世界全体で見れば一次エネルギー供給量は10%程度の乖離であり、エネルギー源別でもそれほど大きな乖離ではなかったと捉えても良いのではないかと考えられる。しかし、より詳細な部門やエネルギー源に立ち入ると乖離率は大きなものが含まれ、問題があることが明らかになった。

一方、本研究で得られた乖離率をモデル誤差としてそのまま将来に対して適用できるであろうか。例えば将来の25年分の推計であれば、一次エネルギー供給の誤差は10%程度と見込むことができるかどうかなどである。この点についてはいくつか議論の余地がある。我々はこの問いに対して、以下の2つの制限はあるものの、限定的な条件の基では将来について適用できる可能性があると考えている。

その第一は、過去の延長の世界として多くの場合捉えられる所謂BaUのシナリオに対して今回の結果が有効であったとしても、SSPs<sup>43)</sup>のような多元的な将来像を描くようなシナリオに対して有効ではないだろう。また、社会、経済、エネルギーシステムに対して大きな変化を強いるような

制約を課すシナリオにおいても同様のことが言える。例えば、過去の世界では大きな炭素価格とといったような強い市場の介入を伴っていない世界であったが、統合評価モデルは多くの場合大きな炭素価格を付けたシナリオ下でもシミュレーションを実施し、その時の政策の有効性等について議論を行う。強く市場に介入するような世界を想定した時に実際の社会では、人々の行動選択基準の変化、技術的可能性の拡大、費用最小化行動の制約となっているものを取り除くような様々な施策が同時に入ってくる可能性は十分にある。過去にも原油価格が変動するということはあるが、それを上回るような例えば500\$/tCO<sub>2</sub>といった炭素価格付けは過去に全く経験していないことであり、過去の統計値との検証は上述の可能性について何ら情報を与えない。場合によっては社会の大きな変化に対するコストを過大評価することになる。従って、BaUの推計としては現在のモデル誤差は今回示したようなものと解釈できる可能性があるが、強い政策介入、あるいは人々の認識、制度や技術進歩にまで関わるような大規模な社会的な変化を検討するようなシナリオに対しては、このモデルは保守的な結果をもたらす可能性があり、そのようなシナリオ下でのモデルの信頼性は担保していない。

第二の点は、Hodges and Dewar<sup>44)</sup>の指摘に関連する。Hodges and Dewarはモデルの検証可能性に必要な基準として以下の4つをクリア必要するべきだとしている。1)観測可能性、2)モデルの構造の不定性、3)モデルの外生変数の定常性、4)十分に信頼性における観測値情報である。条件の1)を満たすことはできるが、Scher and Koomey<sup>45)</sup>は経済モデルが上記の基準2)、3)を満たすことに対して悲観的な見解を述べている。さらに、仮にそれらをクリアしたとしても4)にも課題が残る。例えば、結果で見たように天然ガスといった商品取引がされているものですら、過去に遡ると欠測が存在する。さらに在来型のバイオマス消費に至っては観測することが非常に困難であり、統計値自体も推計に頼っている。統計値とモデルシミュレーション値の一致度が高いからと言って実態を表しているかどうか自明ではない。

以上の論点を踏まえると、今回の過去に対する検証で得られるモデルのパフォーマンスに関する知見は限定的なものであると解釈するのが妥当であろう。それでも、統合評価モデルがモデルの精度を問われた時に対する応えの一つとして、限定的な条件の基でのある種のモデルの精度としては使える情報なのではないかと考えらえる。

## 5) 今後のモデル改良の可能性

今回の結果からは、世界全体として見た場合は過去の再現性はそれなりに高いものも見られたが、地域別の結果となると、一次エネルギー供給量といった基礎的なエネルギー関連指標でも非常に再現性が低いものも含まれることが分かった。また、世界全体で見たとしても部門やエネルギー源によってはその再現性が低いものも見られた。全体から見た場合シェアが非常に小さいために乖離率として見た時に大きな値を示すものはある程度許容されるとしても、全体に対するシェアが相応に大きい再現性が低いものがあった。具体的には部門で言うと交通部門、エネルギー源別でみると石油、天然ガスの再現性は相対的に低かった。こういった部門、エネルギー源については今後モデルの改善が望まれるであろう。

今回の推計でモデルの問題箇所はある程度把握できたが、その要因の同定は単に乖離率や統計量などを見るだけでは明らかにならなかった。従って、因果関係があり得る指標間を比較し、グラフを照合しながら、原因の探索と解決策の検討が必要となると考えられる。例えば、今回一つ

の例として天然ガスが地域によっては大きな乖離を示していることを見た。これらが何の要因によって生じているのかは明確ではなかったが、部門別の要因の可能性は検討できる。都市化による民生部門のガス需要の増加、ガス発電技術の進展、採掘技術の進展などがその要因として考えられる。いずれも過去30年の間で大きく変化が起こった事象である。これらは一つ一つ丁寧な解析が必要となるであろう。

その原因の同定をした後に採用すべきパラメータの推計手法についてはさらに検討すべき事項がある。計量経済学的手法を用いてパラメータを推定するというのとは一つの方法として考えられるし、そういった取組はこれまでも見られた。しかし、序章で述べたように、世界全体について各国のエネルギー価格、資本価格や部門別の生産量などのデータが全ての国について利用可能ではなくこの手法は必ずしも世界モデルのパフォーマンス向上に結び付くとは限らないであろう。別の方法として、いくつかの代表的なパラメータを選択し、それらについてモンテカルロ法などを用いてパフォーマンスの高いパラメータの組み合わせを推計することは可能と考えられる。類似の取り組みとしてはvan Ruijven *et al.*<sup>17)</sup>が途上国について行った例が見られる。また、Beckman *et al.*<sup>18)</sup>も確率分布を与えることでパラメータの推定をしているという意味で本質的にはvan Ruijven *et al.*<sup>17)</sup>と同様の手法を採っている。さらに、気候モデルのモデルパラメータの調整などでも類似の取り組みは行われている(Aman *et al.*<sup>46)</sup>)。従って、こういった取組は今後の統合評価モデルのモデル精度の向上という意味で重要なものになるかもしれない。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

これまで、統合評価モデルは過去の検証を適切に行われてこなかったが、本研究は過去の検証の一つの取り組みとして、重要な位置づけとなる。また、新たな社会経済シナリオである「共通社会経済経路 (SSP; Shared Socioeconomic Pathways)」は、今後の気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の報告書である第6次評価報告書や1.5°C特別報告書で分野横断的に使われ主要な役割を果たすだけでなく、広義の持続可能性、生物多様性を検討する際のシナリオのベースとなることが期待されるものであり、様々な環境分析の土台となるものである。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

SSPをベースとしたIPCC報告書は国際的な気候政策への重要なインプットとなり、将来的に本研究成果は環境政策に大きく貢献するものと考えられる。

## 6. 国際共同研究等の状況

### ・ IAMC (Integrated Assessment Modeling Consortium)

カウンターパート; John Weyant (Stanford:アメリカ)、Jae Edmonds(PNNL:アメリカ)、Elmar Kriegler (PIK:ドイツ)、Detlef van Vuuren (PBL:オランダ)、Keywan Riahi and Volker Krey (IIASA:オーストリア)、Brian O'niell (NCAR: アメリカ)、Massimo Tavoni (FEEM: イタリア)など

特定の予算源はないが世界の代表的な統合評価チームなどが各自の研究費を持ち寄って活動を実施。実質的にIPCCのWG3の中核的な活動を行っており、IPCCのWG3のシナリオデータベースの構築、提供などを実施。SSP開発もIAMCの活動の一部である。藤森らは当該推進費で活動を実施しIPCC活動へ貢献。

・ **EMF (Energy Modeling Forum)**

カウンターパート； John Weyant (Stanford:アメリカ)、 Steve Smith(PNNL:アメリカ)、 Nico Bauer、 Alex Popp(PIK:ドイツ)、 Detlef van Vuuren (PBL:オランダ)、 Keywan Riahi and Volker Krey (IIASA:オーストリア)、 Steven Rose(EPRI: アメリカ)など

スタンフォード大学を中心にした最も古くから存在する統合評価モデル比較プロジェクトで、現在は第30、33期が並行してじっしされている。それぞれ短寿命ガス、バイオマスイエネジーというテーマ下でモデル比較を行い、IPCC1.5℃特別報告書へ向けて現在論文を執筆中。

・ **ADVANCE (Advanced Model Development and Validation for the Improved Analysis of Costs and Impacts of Mitigation Policies)**

カウンターパート； Elmar Kriegler (PIK:ドイツ)、 Detlef van Vuuren (PBL:オランダ)、 Keywan Riahi and Volker Krey (IIASA:オーストリア)、 Bert Saveyn (JRC: スペイン)、 Massimo Tavoni (FEEM: イタリア)など

European Union's Seventh Framework Programme (FP7)の基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。藤森らは当該推進費でADVANCEへ参加し、モデル比較等を通じて共同研究、論文執筆を実施。

・ **CD-LINKS (Linking Climate and Development Policies – Leveraging International Networks and Knowledge Sharing)**

カウンターパート； Keywan Riahi and Volker Krey (IIASA:オーストリア)、 Elmar Kriegler (PIK:ドイツ)、 Detlef van Vuuren (PBL:オランダ)、 Jiang Kejung (ERI: 中国)、 Massimo Tavoni (FEEM: イタリア)など

European Union's Seventh Framework Programme (Horizon 2020)の基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。藤森らは当該推進費でCD-LINKSへ参加し、現在暫定的な結果を出してIPCC1.5℃特別報告書へ向けて成果のとりまとめを行っている。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) 長谷川知子, 藤森真一郎, 高橋潔, 増井利彦: 土木学会論文集G(環境), 70(5), I\_1-I\_12 (2014), 共通社会経済シナリオSSPを用いた飢餓リスクに関する将来シナリオの開発
- 2) 藤森真一郎, 甲斐沼美紀子, 増井利彦, 長谷川知子, 戴瀚程: 土木学会論文集G(環境), 70(5), I\_137-I\_146 (2014), エネルギーサービス需要低減の価値: 統合評価モデルを用いた気候緩和シナリオによる定量化 <平成27年度地球環境論文奨励賞(JSCE Award)受賞>

- 3) Fujimori S., Hasegawa T., Masui T., Takahashi K. : Food Security, 6 (5), 685-699 (2014), Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions
- 4) Fujimori S., Kainuma M., Masui T., Hasegawa T., Dai H. : Energy policy, 75, 379-391 (2014), The effectiveness of energy service demand reduction: A scenario analysis of global climate change mitigation
- 5) Hasegawa T., Fujimori S., Takahashi K., Masui T. : Environmental Research Letters, 10 (1), 014010-014017 (2015), Scenarios for the risk of hunger in the twenty-first century using Shared Socioeconomic Pathways
- 6) Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y. : Energy Economics, 48, 306-315 (2015), Gains from emission trading under multiple stabilization targets and technological constraints
- 7) Dai H., Silva D., Fujimori S., Masui T. : Renewable Energy, 85, 19-30 (2015), Key factors affecting long-term penetration of global onshore wind energy integrating top-down and bottom-up approaches
- 8) Hasegawa T., Fujimori S., Shin Y., Tanaka A., Takahashi K., Masui T. : Environmental Science & Technology, 49 (12), 7245-7253 (2015), Consequence of Climate Mitigation on the Risk of Hunger
- 9) 藤森真一郎, 増井利彦, 松岡譲, 戴瀚程: 土木学会論文集G(環境), 71 (5), I\_153-I\_164 (2015), 統合評価モデルAIM/CGEを用いた過去のエネルギー消費量の推計とモデル検証
- 10) 藤森真一郎, 長谷川知子, 増井利彦, 高橋潔, シェルバエランディエゴ, 戴瀚程, 肱岡靖明, 甲斐沼美紀子: 土木学会論文集G(環境), 71 (6), II\_217-II\_228 (2015), AIMによる新社会経済シナリオSSPの定量化とそのシナリオの特徴
- 11) Silva D. H., Dai H., Fujimori S., Masui T.: Energy policy, 91, 75-86 (2016), Global assessment of onshore wind power resources considering the distance to urban areas
- 12) Mittal S., Dai H., Fujimori S., Masui T.: Applied energy (2016), Bridging greenhouse gas emissions and renewable energy deployment target: Comparative assessment of China and India
- 13) Hasegawa T., Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y. : Journal of Cleaner Production, 114, 233-242 (2016), Introducing detailed land-based mitigation measures into a computable general equilibrium model
- 14) Dai H., Fujimori S., Silva D., Shiraki Y., Masui T., Matsuoka Yuruzu : Energy Economics, in press (2016), The impacts on climate mitigation costs of considering curtailment and storage of variable renewable energy in a general equilibrium model (in press)
- 15) 増井利彦, 藤森真一郎, 高橋潔, 甲斐沼美紀子, 花岡達也, 大城賢, 日比野剛, 滝見真穂: 環境経済・政策研究, 9 (1), 66-70 (2016), 2°C目標の実現に向けたINDCsの評価と日本の取り組み
- 16) Fujimori S., Dai H., Masui T., Matsuoka Y. : Energy, 114 (1), 293-301 (2016), Global energy model hindcasting
- 17) 藤森真一郎, 長谷川知子, 高橋潔, 増井利彦, 滝見真穂: 土木学会論文集G(環境), 72 (5), I\_223-I\_231(2016), パリ協定の短中期的排出目標と長期気候安定化目標における含意
- 18) Fujimori S., Su X., Liu J., Hasegawa T., Takahashi K., Masui T., Takimi M. : SpringerPlus, 5:1620

- (2016), Implication of Paris Agreement in the context of long-term climate mitigation goals
- 19) Fujimori S., Kubota I., Dai H., Takahashi K., Hasegawa T., Liu J., Hijioka Y., Masui T., Takimi M.: *Environmental Research Letters*, 11 (104001) (2016), Will international emissions trading help achieve the objectives of the Paris Agreement?
  - 20) Liu J., Fujimori S., Masui T.: *Environmental Research Letters*, 11 (11), 114004 (2016), Temporal and spatial distribution of global mitigation cost: INDCs and equity
  - 21) Rao S., Klimont Z., Leita J., Riahi K., Dingenen R., Reis L. A., Calvin K., Dentener F., Drouet L., Fujimori S., Harmsen M., Luderer G., Heyes C., Strefler J., Tavoni M., Vuuren D.P.: *Environmental Research Letters*, 11 (12), 124013 (2016), A multi-model assessment of the co-benefits of climate mitigation for global air quality
  - 22) Hasegawa T., Fujimori S., Boer R., Immanuel G.S., Masui T.: *sustainability*, 8, 1283-1294 (2016), Land-Based Mitigation Strategies under the Mid-Term Carbon Reduction Targets in Indonesia
  - 23) Fujimori S., Hasegawa T., Masui T., Takahashi K., Herran D.S., Dai H., Hijioka Y., Kainuma M.: *Global Environmental Change*, 42, 268-283 (2017), SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways
  - 24) Vuurena D.P., Riahi K., Calvin K., Dellink R., Emmerling J., Fujimori S., KC S., Kriegler E., O'Neill B.: *Global Environmental Change*, 42, 148-152 (2017), The Shared Socio-economic Pathways: Trajectories for human development and global environmental change
  - 25) Kriegler E., Bauer N., Humpenoder F., Leimbach M., Strefler J., Baumstark L., Bodirsky B.L., Hilaire J., Klein D., Mouratiadou I., Weindl I., Bertram C., Dietrich J.-P., Luderer G., Pehl M., Pietzcker R., Piontek F., Lotze-Campen H., Biewald A., Bonsch M., Giannousakis A., Kreidenweis U., Muller C., Rolinski S., Schultes A., Schwanitz J., Stevanovic M., Calvin K., Emmerling J., Fujimori S., Edenhofer O.: *Global Environmental Change*, 42, 297-315(2017), Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century
  - 26) Bauer N., Calvin K., Emmerling J., Fricko O., Fujimori S., Hilaire J., Eom J., Krey V., Kriegler E., Mouratiadou I., Boer H.S., Berg M., Carrara S., Daioglou V., Drouet L., Edmonds J. E., Gernaat D., Havlik P., Johnson N., Klein D., Kyle P., Marangoni G., Masui T., Pietzcker R. C., Strubegger M., Wise M., Riahi K., Vuuren D.P.: *Global Environmental Change*, 42, 316-330(2017), Shared Socio-Economic Pathways of the Energy Sector & Quantifying the Narratives
  - 27) Riahi K., Vuuren D.P., Kriegler E., Edmonds J., O'Neill B.C., Fujimori S., Bauer N., Calvin K., Dellink R., Fricko O., Lutz W., Popp A., Cuaresma J.C., KC S., Leimbach M., Jiang L., Kram T., Rao S., Emmerling J., Ebi K., Hasegawa T., Havlik P., Humpenoder F., Silva L.A., Smith S., Stehfest E., Bosetti V., Eom J., Gernaat D., Masui T., Rogelj J., Strefler J., Drouet L., Krey V., Luderer G., Harmsen M., Takahashi K., Baumstark L., Doelman J.C., Kainuma M., Klimont Z., Marangoni G., Lotze-Campen H., Obersteiner M., Tabeau A., Tavoni M.: *Global Environmental Change*, 42, 153-168 (2017), The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview

- 28) Popp A., Calvin K., Fujimori S., Havlik P., Humpenoder F., Stehfest E., Bodirsky B.L., Dietrich J.P., Doelmann J.C., Gusti M., Hasegawa T., Kyle P., Obersteiner M., Tabeau A., Takahashi K., Valin H., Waldhoff S., Weindl I., Wise M., Kriegler E., Lotze-Campen H., Fricko O., Riahi K., Vuuren D.P. : Global Environmental Change, 42, 331-345 (2017), Land-use futures in the shared socio-economic pathways
- 29) Rao S., Klimont Z., Smith S.J., Dingenen R., Dentener F., Bouwman L., Riahi K., Amann M., Bodirsky B.L., Vuuren D.P., Reis L.A., Calvin K., Drouet L., Fricko O., Fujimori S., Gernaat D., Havlik P., Harmsen M., Hasegawa T., Heyes C., Hilaire J., Luderer G., Masui T., Stehfest E., Streffler J., Sluis S., Tavoni M.: Global Environmental Change, 42, 346-358 (2017), Future air pollution in the Shared Socio-economic Pathways
- 30) Edelenbosch O.Y., Kermeli K., Crijns-Graus W., Worrell E., Bibas R., Fais B., Fujimori S., Kyle P., Sano F., Vuuren D.P. : Energy, 122, 701-710 (2017), Comparing projections of industrial energy demand and greenhouse gas emissions in long-term energy models

#### <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) 藤森真一郎, 増井利彦: 環境情報科学, 43 (3), 35-41 (2014)  
「統合評価モデルを用いた気候緩和策分析及び新シナリオプロセスにおけるその役割」
- 2) Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y.: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 296-306 (2017)  
“CHAPTER 9: A Global Computable General Equilibrium Model Coupled with Bottom-Up Energy End-Use Technology. In: Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y. 著, The WSPC Reference on Natural Resources and Environmental Policy in the Era of Global Change Volume 3: Computable General Equilibrium Models”

#### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 長谷川知子, 藤森真一郎, 高橋潔, 増井利彦: 土木学会第22回地球環境シンポジウム 土木学会論文集G（環境）, 70(5), I\_1-I\_12 (2014)  
「共通社会経済シナリオSSPを用いた21世紀の飢餓リスクシナリオの開発」
- 2) Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y.: 7th Annual Meeting of the IAMC 2014 (2014)  
“Development of a global computable general equilibrium model coupled with detailed energy end-use technology”
- 3) Fujimori S., Hasegawa T., Masui T.: EMF30 SLCF-AQ AIM/CGE implementation. EMF30.2 Working Group Meeting (2014)  
“Non-Kyoto Forcing Bio-Energy Land use & Air Quality Considerations in Global Energy and Climate Policy Scenarios”
- 4) Fujimori S., Hasegawa T., Hanasaki N., Takahashi K., Masui T., Kanae S., Honda Y.: Workshop on Global Climate Risks Forum(2014)

- “AIM Global climate impact studies with CGE model and future perspectives”
- 5) Hasegawa T., Fujimori S., Takahashi K., Masui T. : The 7th IAMC Annual meeting (2014)  
“Scenarios for the risk of hunger in the 21st century using Shared Socioeconomic Pathways”
  - 6) Hasegawa T., Fujimori S., Masui T. : Bioenergy Study Report AIM modeling team. EMF30.2 Working Group Meeting (2014)  
“Non-Kyoto Forcing, Bio-Energy, Land use & Air Quality Considerations in Global Energy and Climate Policy Scenarios”
  - 7) Hasegawa T., Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y. : Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) 3rd Annual Meeting (2014)  
“Introducing detailed land-based mitigation technologies into a CGE model: Application to Indonesia”
  - 8) Fujimori S., Hasegawa T., Takahashi K., Masui T. : 5th AgMIP Global Workshop (2015)  
“How to construct the SSPs?- the AIM example”
  - 9) Fujimori S., Hasegawa T., Masui T., Takahashi K. : 18th Annual Conference on Global Economic Analysis, Abstracts (2015)  
“Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions”
  - 10) Fujimori S.: Climate Change Impacts & Integrated Assessment XXI (CCI/IA) (2015)  
“Integrated assessment model with agricultural impact”
  - 11) 藤森真一郎, 増井利彦, 松岡譲, 戴瀚程: 第23回地球環境シンポジウム 土木学会論文集G(環境), 71(5), I\_153-I\_164(2015)  
「統合評価モデルAIM/CGEを用いた過去のエネルギー消費量の推計とモデル検証」
  - 12) 藤森真一郎: Horizon 2020 情報セミナー 2015: Horizon 2020 の2016-17 ワークプログラムと日欧連携 (2015)  
「国立環境研究所 気候変動緩和策研究に関する事例」
  - 13) 藤森真一郎, 長谷川知子, 増井利彦, 高橋潔, シェルバエランディエゴ, 戴瀚程, 脇岡靖明, 甲斐沼美紀子: 第43回研究論文発表会 土木学会論文集G(環境), 71(6), II\_217-II\_228 (2015)  
「AIMによる新社会経済シナリオSSPの定量化とそのシナリオの特徴」
  - 14) Fujimori S., Hasegawa T., Takahashi K., Masui T.: AgMIP Global Economic Modeling (GlobEcon) group, Phase 2 progress meeting(2015)
  - 15) Fujimori S., Ron Sands, Hasegawa T.: EMF 33 meeting (2015)  
“EMF33 bioenergy supply scenario CGE implementation issues: FARM and AIM approaches”
  - 16) Fujimori S., Dai H., Masui T., Matsuoka Y.: IAMC meeting 2015(2015)  
“Global Energy Model Hindcasting and Validation”
  - 17) Hasegawa T., Fujimori S., Takahashi K., Yokohata T., Masui T.: IAMC meeting 2015(2015)  
“Economic implications of climate change on human health through undernourishment”
  - 18) 増井利彦, 芦名秀一, 藤森真一郎, 藤野純一, 大城賢, 日比野剛: 第6回横幹連合コンファレンス, 同論文集, 367-370 (2015)  
「わが国における長期の温室効果ガス排出削減目標とその実現可能性」
  - 19) Hasegawa T., Fujimori S., Shin Y., Tanaka A., Takahashi K., Masui T.: CESM 2016 Winter

Working Group Meetings(2016)

“Consequence of Climate Mitigation on the Risk of Hunger”

- 20) Silva H. D., Dai H., Fujimori S., Masui T.: Japanese-German Workshop on Renewable Energies(2016)  
 “Assessment of onshore wind power resources for Japan and Europe considering distance to urban areas”
- 21) Fujimori S., Oshiro K.: Climate Change Impacts & Integrated Assessment XXII (CCI/IA) (2016)  
 “Japan NDC (AIM/Enduse[Japan]) Global emissions trading under NDCs (AIM/CGE[global])”
- 22) Fujimori S., Oshiro K.: CD-LINKS 3rd meeting (2016)  
 “Japan scenarios: some insights from national and global model comparison”
- 23) Park C., Hasegawa T., Fujimori S., Takakura J., Takahashi K., Hijioka Y., Masui T.: Ninth Annual Meeting of the IAMC 2016(2016)  
 “Economic implications of limiting global temperature at 1.5 °C: the case of building energy use”
- 24) Fujimori S., Kubota I., Dai H., Takahashi K., Hasegawa T., Liu J., Hijioka Y., Masui T., Takimi M. :  
 Ninth Annual Meeting of the IAMC 2016(2016)  
 “Will International Emissions Trading Help Achieve the Objectives of the Paris Agreement?”
- 25) Tu T.T., Fujimori S., Masui T. : Ninth Annual Meeting of the IAMC 2016(2016)  
 “REALIZING THE INTENDED NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION:THE ROLE OF RENEWABLE ENERGIES IN VIETNAM”
- 26) Fujimori S.: AgMIP Global Economics Workshop, (2016)  
 “AgMIP Phase 2 Core scenario results overview and some insights”
- 27) Zhang R., Fujimori S., Dai H., Hanaoka T. : Ninth Annual Meeting of the IAMC 2016(2016)  
 “How do transport behavior and policy affect mitigation potential and cost? A simulation by AIM/Transport model”
- 28) Zhang R., Fujimori S., Dai H., Hanaoka T.: ITEC Symposium - Next-Generation Automotive Technology: Social Benefit and Diffusion Policy (2016)  
 “Key factors influencing the global passenger transport dynamics using the AIM/Transport model”

### (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

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) プレスリリース 2017年2月 気候変動研究で分野横断的に用いられる社会経済シナリオ (SSP; Shared Socioeconomic Pathways)の公表

## (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) Nakicenovic, N., Swart, R., Special report on emissions scenarios, *Special Report on Emissions Scenarios*, Edited by Nebojsa Nakicenovic and Robert Swart, pp. 612. ISBN 0521804930. Cambridge, UK: Cambridge University Press, July 2000., Vol. 1, 2000.
- 2) Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., Wilbanks, T. J., The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, Vol. 463, No. 7282, pp. 747-56, 2010.
- 3) van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K., The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change*, Vol. 109, No. 1-2, pp. 5-31, 2011.
- 4) O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., van Vuuren, D. P., A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways, *Climatic Change*, Vol. 122, No. 3, pp. 387-400, 2013.
- 5) van Vuuren, D. P., Kriegler, E., O'Neill, B. C., Ebi, K. L., Riahi, K., Carter, T. R., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kram, T., Mathur, R., Winkler, H., A new scenario framework for Climate Change Research: scenario matrix architecture, *Climatic Change*, Vol. 122, No. 3, pp. 373-386, 2013.
- 6) Clarke, L., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, G., Fisher-Vanden, K., Hourcade, J.-C., Krey, V., Kriegler, E., Löschel, A., McCollum, D., Paltsev, S., Rose, S., Shukla, P. R., Tavoni, M., Zwaan, B. C. C. v. d., Vuuren, D. P. v., *Assessing Transformation Pathways. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2014.
- 7) Masui, T., Matsumoto, K., Hijioka, Y., Kinoshita, T., Nozawa, T., Ishiwatari, S., Kato, E., Shukla, P. R., Yamagata, Y., Kainuma, M., An emission pathway for stabilization at 6 Wm<sup>-2</sup> radiative forcing, *Climatic Change*, Vol. 109, No. 1-2, pp. 59-76, 2011.
- 8) Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M. A., Clarke, L. E., Edmonds, J. A., RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100, *Climatic Change*, Vol. 109, No. 1-2, pp. 77-94, 2011.
- 9) van Vuuren, D. P., Stehfest, E., den Elzen, M. G. J., van Vliet, J., Isaac, M., Exploring IMAGE model scenarios that keep greenhouse gas radiative forcing below 3W/m<sup>2</sup> in 2100, *Energy Economics*, Vol. 32, No. 5, pp. 1105-1120, 2010.
- 10) Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., Rafaj, P., RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions, *Climatic Change*, Vol. 109, No. 1-2, pp. 33-57, 2011.

- 11) Bauer, N., Baumstark, L., Leimbach, M., The REMIND-R model: the role of renewables in the low-carbon transformation—first-best vs. second-best worlds, *Climatic Change*, Vol. 114, No. 1, pp. 145-168, 2012.
- 12) Cian, E., Bosetti, V., Tavoni, M., Technology innovation and diffusion in “less than ideal” climate policies: An assessment with the WITCH model, *Climatic Change*, Vol. 114, No. 1, pp. 121-143, 2011.
- 13) IAMC IAMC.  
<http://www.globalchange.umd.edu/iadc/scientific-working-groups/evaluation-and-diagnostics/>  
(accessed 1. April).
- 14) Kriegler, E., Petermann, N., Krey, V., Schwanitz, V. J., Luderer, G., Ashina, S., Bosetti, V., Eom, J., Kitous, A., Méjean, A., Paroussos, L., Sano, F., Turton, H., Wilson, C., Van Vuuren, D. P., Diagnostic indicators for integrated assessment models of climate policy, *Technological Forecasting and Social Change*, 10.1016/j.techfore.2013.09.0202014.
- 15) Chaturvedi, V., Kim, S., Smith, S. J., Clarke, L., Yuyu, Z., Kyle, P., Patel, P., Model evaluation and hindcasting: An experiment with an integrated assessment model, *Energy*, Vol. 61, pp. 479-490, 2013.
- 16) Ruijven, B., Sluijs, J. P., Vuuren, D. P., Janssen, P., Heuberger, P. S. C., Vries, B., Uncertainty from Model Calibration: Applying a New Method to Transport Energy Demand Modelling, *Environmental Modeling & Assessment*, Vol. 15, No. 3, pp. 175-188, 2009.
- 17) van Ruijven, B., de Vries, B., van Vuuren, D. P., van der Sluijs, J. P., A global model for residential energy use: Uncertainty in calibration to regional data, *Energy*, Vol. 35, No. 1, pp. 269-282, 2010.
- 18) Beckman, J., Hertel, T., Tyner, W., Validating energy-oriented CGE models, *Energy Economics*, Vol. 33, No. 5, pp. 799-806, 2011.
- 19) Jorgenson, D. W., Econometric methods for modeling producer behavior, *Handbook of econometrics*, Vol. 3, pp. 1841-1915, 1986.
- 20) Fujimori, S., Masui, T., Matsuoka, Y., Gains from emission trading under multiple stabilization targets and technological constraints, *Energy Economics*, Vol. 48, pp. 306-315, 2015.
- 21) Hasegawa, T., Fujimori, S., Takahashi, K., Masui, T., Scenarios for the risk of hunger in the twenty-first century using Shared Socioeconomic Pathways, *Environmental Research Letters*, Vol. 10, No. 1, pp. 014010, 2015.
- 22) Fujimori, S., Kainuma, M., Masui, T., Hasegawa, T., Dai, H., The effectiveness of energy service demand reduction: A scenario analysis of global climate change mitigation, *Energy Policy*, Vol. 75, No. 0, pp. 379-391, 2014.
- 23) Fujimori, S., Masui, T., Matsuoka, Y., Development of a global computable general equilibrium model coupled with detailed energy end-use technology, *Applied Energy*, Vol. 128, No. 0, pp. 296-306, 2014.
- 24) Hasegawa, T., Fujimori, S., Shin, Y., Takahashi, K., Masui, T., Tanaka, A., Climate Change Impact and Adaptation Assessment on Food Consumption Utilizing a New Scenario Framework, *Environmental science & technology*, Vol. 48, No. 1, pp. 438-445, 2014.

- 25) Meinshausen, M., Raper, S. C. B., Wigley, T. M. L., Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6 – Part 1: Model description and calibration, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 11, No. 4, pp. 1417-1456, 2011.
- 26) Fujimori, S., Masui, T., Matsuoka, Y., *AIM/CGE [basic] manual*, Discussion paper series, 2012-01, Center for Social and Environmental Systems Research, National Institute Environmental Studies: 2012, <http://www.nies.go.jp/social/dp/pdf/2012-01.pdf>.
- 27) IEA, *CO<sub>2</sub> Capture and Storage -- A Key Carbon Abatement Option*, OECD/IEA: Paris, France, 2008.
- 28) O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., Solecki, W., The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century, *Global Environmental Change*, Vol. accepted, No. 0, 2015.
- 29) Hasegawa, T., Fujimori, S., Shin, Y., Tanaka, A., Takahashi, K., Masui, T., The Consequence of Climate Mitigation on Food Security, in review.
- 30) IEA, *Energy Technology Perspectives 2012*, International Energy Agency (IEA), 2012.
- 31) Kc, S., Lutz, W., The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100, *Global Environmental Change*, 10.1016/j.gloenvcha.2014.06.0042014.
- 32) Babiker, M. H., Reilly, J. M., Mayer, M., Eckaus, R. S., Wing, I. S., Hyman, R. C., *The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model; Revisions, Sensitivities, and Comparisons of Results*, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Cambridge, MA, 2001.
- 33) Dimaranan, B. V., Global trade, assistance, and production: the GTAP 6 data base. B.V., D., Ed. Center for Global Trade Analysis, Purdue University, 2006.
- 34) IEA, Energy balances for non-OECD countries. OECD/IEA, Ed. Paris, France, 2013.
- 35) Fujimori, S., Matsuoka, Y., Development of method for estimation of world industrial energy consumption and its application, *Energy Economics*, Vol. 33, No. 3, pp. 461-473, 2011.
- 36) EC-JRC/PBL Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), release version 4.2. <http://edgar.jrc.ec.europa.eu>.
- 37) Food and Agriculture Organization of the United Nations, (FAO), FAOSTAT. FAO, Ed. Rome, Italy, 2013.
- 38) Dai, H., Silva Herran, D., Fujimori, S., Masui, T., Key factors affecting long-term penetration of global onshore wind energy integrating top-down and bottom-up approaches, *Renewable Energy*, Vol. 85, No. 0, pp. 19-30, 2016.
- 39) Rogner, H.-H., An assessment of world hydrocarbon resources, *Annual Review of Energy and the Environment*, Vol. 22, No. 1, pp. 217-262, 1997.
- 40) Harnisch, J., Klaus, S., Wartmann, S., Rhiemeier, J.-M., *Development of f-gas module for timer model*, ECOFYS, Germany, 2009.
- 41) Webster, M., Paltsev, S., Reilly, J., Autonomous efficiency improvement or income elasticity of energy demand: Does it matter?, *Energy Economics*, Vol. 30, No. 6, pp. 2785-2798, 2008.

- 42) IEA, Energy balances for OECD countries. OECD/IEA, Ed. Paris, France, 2013.
- 43) O'Neill, B., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K., Hallegatte, S., Carter, T., Mathur, R., Vuuren, D., A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways, *Climatic Change*, Vol. 122, No. 3, pp. 387-400, 2014.
- 44) Hodges, J. S., Dewar, J. A., Center, A., *Is it you or your model talking?: A framework for model validation*. Rand Santa Monica, CA, 1992.
- 45) Scher, I., Koomey, J., Is accurate forecasting of economic systems possible?, *Climatic Change*, Vol. 104, No. 3-4, pp. 473-479, 2011.
- 46) Annan, J. D., Hargreaves, J. C., Edwards, N. R., Marsh, R., Parameter estimation in an intermediate complexity earth system model using an ensemble Kalman filter, *Ocean Modelling*, Vol. 8, No. 1-2, pp. 135-154, 2005.

### (3) 日本を対象とした2030年の温室効果ガス削減量の定量化

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

岡 和孝・藤原 和也・元木 悠子・大城 賢

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所

増井 利彦・芦名 秀一

平成26～28年度累計予算額：54,062千円（うち平成28年度：17,121千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

2015年12月のCOP21に向け、日本では2030年の温室効果ガス削減目標を示した約束草案の検討が行われるとともに、2016年からは、より長期を対象とした低排出発展戦略の検討が開始されている。本研究では、日本を対象とした技術選択モデル・応用一般均衡モデルを改良し、わが国における2030年およびそれ以降の温室効果ガス排出量の評価、削減目標の達成に向けた方策検討を実施した。さらに、社会経済シナリオに応じたマクロフレームの定量化を行うためのツールを開発した。まず、技術選択モデルによる2030年を対象とした分析では、省エネルギーと電力の低炭素化が達成されれば、原子力発電の水準が政府のエネルギーミックス想定より低位となる場合でも、約束草案の目標（2030年に2013年比26%削減）は技術的に達成可能であること、および追加的な再生可能エネルギー拡大・石炭火力からガス火力への転換等による電力の低炭素化が進めば、更なる削減も可能であることが示された。ただし、2030年のCO<sub>2</sub>価格は他国と比較しても高い水準と評価されたことから、達成は必ずしも容易ではなく、政策による支援の必要性が示唆された。また、応用一般均衡モデルによる2030年を対象とした分析では、約束草案を達成する際の2030年のGDPへの影響は、なりゆきケース比でGDPの1.4%に相当する結果となった。一方、追加費用の低い温暖化対策が導入可能と仮定すると、経済影響は1.1%に低下することが示された。さらに、技術選択モデルによる2050年までの排出経路を踏まえた分析では、約束草案の実施および削減努力の継続は2030年以降の排出削減にも有効であるものの、2050年80%削減には、それを上回る努力が必要となることが示された。特に、需要部門において電力等の低炭素エネルギーへの転換を進めることが主要な対策となることから、ヒートポンプ・電気自動車といった、現時点では導入率の低い技術の普及を2030年以降に加速することが重要であり、そのためには早期からの技術開発やインフラ整備も含めた方策が重要となることが示唆された。

#### [キーワード]

技術選択モデル、応用一般均衡モデル、約束草案、中長期目標、低炭素社会

#### 1. はじめに

わが国では、第四次環境基本計画において、2050年の温室効果ガス排出削減目標として、80%削減が明示されている。また、2015年のCOP21に向け、各国では2020年以降の削減目標を含む約

東草案（INDC: Intended Nationally Determined Contribution）の検討が実施され、わが国は2015年7月に、新たな2030年の温室効果ガス削減目標として、2013年比26.0%削減を提示した。さらには、2016年より、COP21を踏まえ長期低排出発展戦略の検討が開始されている。これらの目標の検討および評価にあたっては、最新の動向を踏まえた社会経済シナリオの見直し、長期目標との整合の観点を踏まえた評価、および目標達成に向けた施策の検討が必要である。

## 2. 研究開発目的

本研究では、技術選択モデル・応用一般均衡モデルを用いて、2050年80%削減目標を踏まえた上で、2030年の温室効果ガス排出量に関する技術的・経済的側面からの詳細な評価を行うことで、わが国における温室効果ガス大幅削減に向けた方策を検討することを目的としている。また、将来の温室効果ガス排出量の推計に際し必要となる将来のマクロフレームを、即時に算定するツールを整備することを目的とする。

## 3. 研究開発方法

### （1）日本技術選択モデル

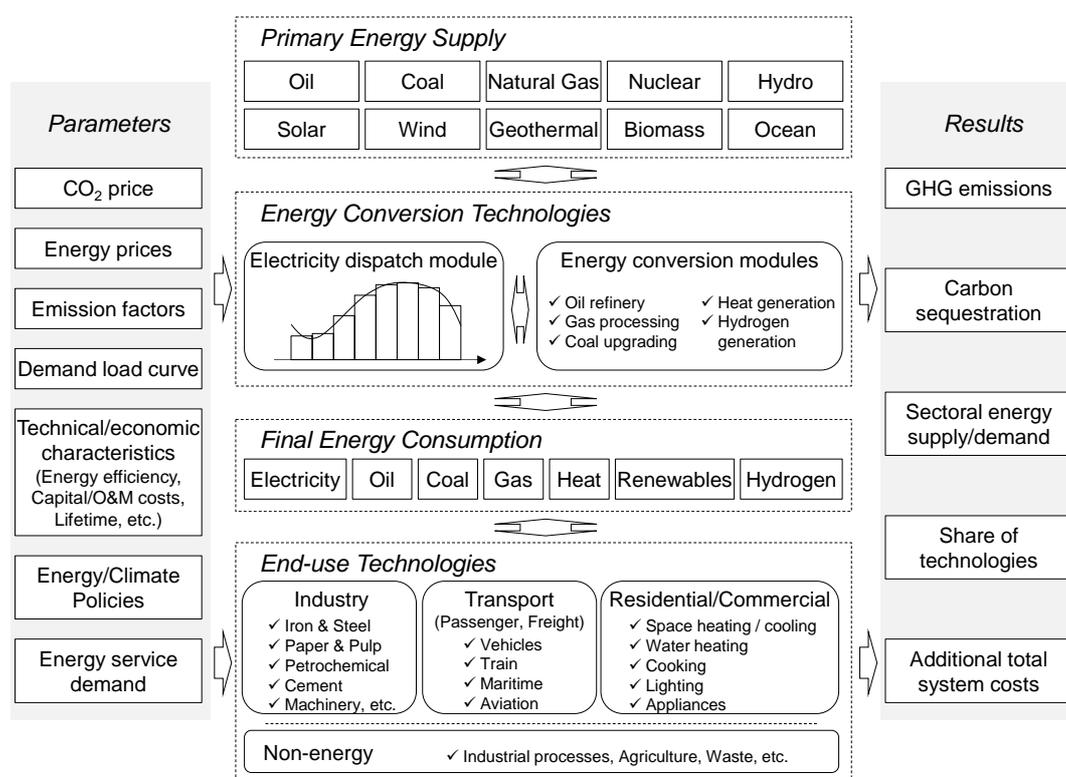
本研究では、2030年およびそれ以降の排出経路について、必要となる温暖化対策および方策の具体化を行うことを目的として、エネルギー技術の特性を精緻に反映することが可能な技術選択モデルであるAIM/Enduse [Japan]を用いた。本モデルは、Kainuma et al. (2003)<sup>1)</sup>をベースに、日本全体を10地域に区分した多地域版モデルである。本研究課題では、後述するように、従来のモデルでは考慮されていなかった、電気自動車・電気HP給湯器の充電・稼働時間の変更、電気分解による水素製造を新たに考慮したことで、VREsの拡大に対する需給調整策を考慮した評価を行うことが可能となった。

### 1) 日本技術選択モデルの概要

本研究で用いたAIM/Enduse [Japan]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、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。本モデルでは、日本全体を一般電気事業者の供給区域におおよそ整合する10地域に分割し、地域別のエネルギー需給特性、再生可能エネルギーのポテンシャル等を考慮することが可能である（表(3)-1）。技術選択モデルの概要を図(3)-1に示す。主な入力パラメータはサービス需要、各種技術特性（効率・価格）、エネルギー価格、CO<sub>2</sub>価格であり、主な出力データは、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。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反映している点が特徴である。

表(3)-1 日本技術選択モデルの地域区分

地域区分	47都道府県
北海道	北海道
東北	青森、岩手、宮城、秋田、山形、福島、新潟
関東	茨城、栃木、群馬、埼玉、千葉、東京、神奈川、山梨
中部	長野、静岡、愛知、岐阜、三重
北陸	富山、石川、福井
関西	滋賀、京都、大阪、兵庫、奈良、和歌山
中国	鳥取、島根、岡山、広島、山口
四国	徳島、香川、愛媛、高知
九州	福岡、佐賀、長崎、熊本、大分、宮崎、鹿児島
沖縄	沖縄



図(3)-1 日本技術選択モデル (AIM/Enduse [Japan]) の概要

本研究で用いたAIM/Enduse [Japan]にて評価対象とした、主な技術の一覧を表(3)-2に示す。エネルギー転換部門では、火力発電の高効率化、石炭・ガス火力へのCCS導入、原子力、再生可能エネルギーのほか、揚水発電、地域間連系線の容量拡大等が考慮されている。また、CCS導入は産業部門においても考慮されている。最終需要部門では、様々な省エネルギー技術や燃料転換を考慮することが可能である。

なお本研究課題では、従来のモデルでは考慮されていなかった、電気自動車・電気HP給湯器の充電・稼働時間の変更、電気分解による水素製造を新たに考慮したことで、出力変動を伴う再生可能エネルギー (VREs: Variable Renewable Energies) の拡大に対する需給調整策を考慮した評価を行うことが可能となった。それに伴い、運輸部門の技術として、水素を利用する燃料電池車

表(3)-2 日本技術選択モデルが対象とする主な技術

エネルギー 転換	火力発電の効率改善、CCS付石炭火力、CCS付ガス火力、原子力発電、陸上風力発電、洋上風力発電（着床・浮体）、太陽光発電、地熱発電、バイオマス発電、海洋エネルギー発電、揚水発電、地域間連系線増強、水素製造（電気分解）、電気自動車・HP給湯器の充電・稼働時間変更、送配電ロス低減
産業	産業プロセスにおけるエネルギー効率改善（次世代コークス炉、高効率電炉、ナフサ接触分解、高効率黒液ボイラ、等）、鉄鋼・セメントCCS、産業用HP、ボイラ・モータの高効率化、燃料転換（石炭⇒ガス等）、バイオマス利用
運輸	内燃機関の燃費改善、ハイブリッド車（HEV）、プラグインハイブリッド車（PHEV）、電気自動車（BEV）、燃料電池車（FCEV）、天然ガス車、バイオ燃料、鉄道・船舶・航空のエネルギー効率改善
民生	建物の外皮性能向上、設備・機器の高効率化（エアコン、給湯器、照明、家電・動力）、電気HP給湯器、家庭用燃料電池、太陽熱温水器、エネルギーマネジメントシステム（HEMS, BEMS）

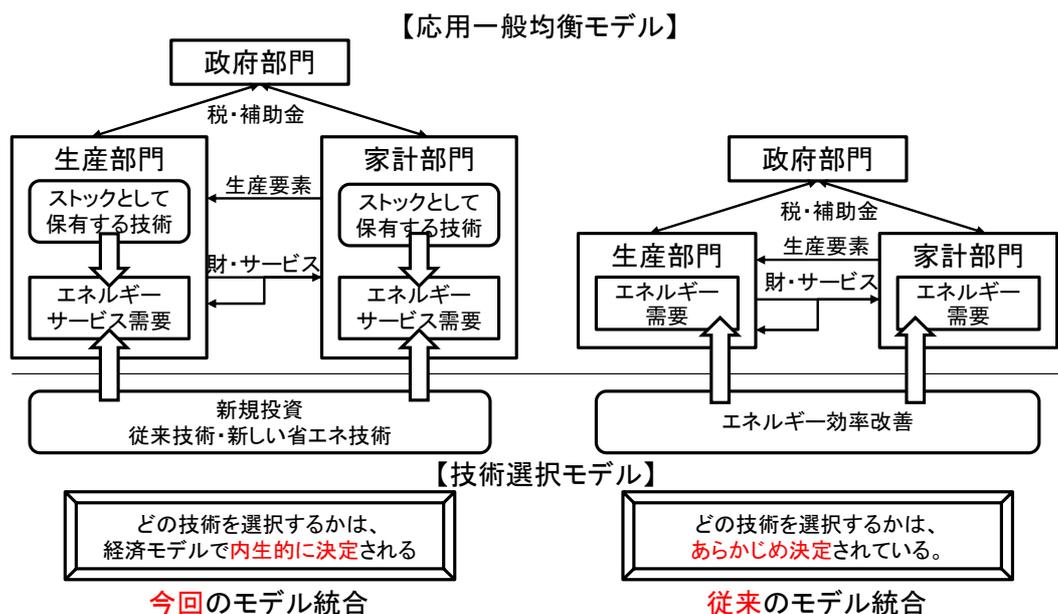
（FCEV）を新たな技術として追加している。ただし、水素は国内の電力起源のみを評価対象としており、海外からの水素輸入は本研究の対象外としている点に留意されたい。そのほか、エネルギー転換部門において、新たに海洋エネルギー発電（波力・潮力）を技術として追加したことに加え、洋上風力発電を着床式・浮体式に区分した。なお、BECCS (Bioenergy with CCS)等のネガティブエミッション技術は本モデルでは考慮されていない。

## （２）日本経済モデル

日本経済モデル（応用一般均衡モデル）を用いた短中期排出経路の分析にあたっては、Masui (2005)<sup>2)</sup>をベースとして、技術選択モデルとの整合を内生的に取ることでモデル改良を実施した。これまで、応用一般均衡モデルと技術選択モデルとは独立しており、技術選択モデルから算出されるエネルギー効率改善およびコストを経済モデルに与える一方通行となっていた。そこで、両モデルの連携を内生的にとることができるよう、図(3)-2に示すような統合を実施した。

改良型日本経済モデルは、1期を1年とした逐次均衡型の応用一般均衡モデルであり、国全体の粗投資は、モデルで計算された当該年までのGDP、資本と、想定される将来の経済成長率に基づいて計算され、前年の各部門の資本収益率の結果に基づいて各部門に配分を行う。家計は、所得から粗投資（貯蓄）を差し引いたものを、効用最大化に基づいて最終消費財を選好する。モデルでは、短期（1年）と長期（それ以上）について区分し、短期では技術の組み合わせが決まっており、各部門内で同一の技術（資本）によるエネルギーの代替は起こらないが、期を超えた活動については導入される投資・技術によってエネルギー効率改善や燃料代替が生じる。生産部門（産業、業務、運輸の一部）において省エネのための追加投資分が発生すると、その金額だけ翌年の生産投資は減少するが、家計（運輸の一部を含む）における追加投資については最終消費が変化するだけで生産投資に影響しない。

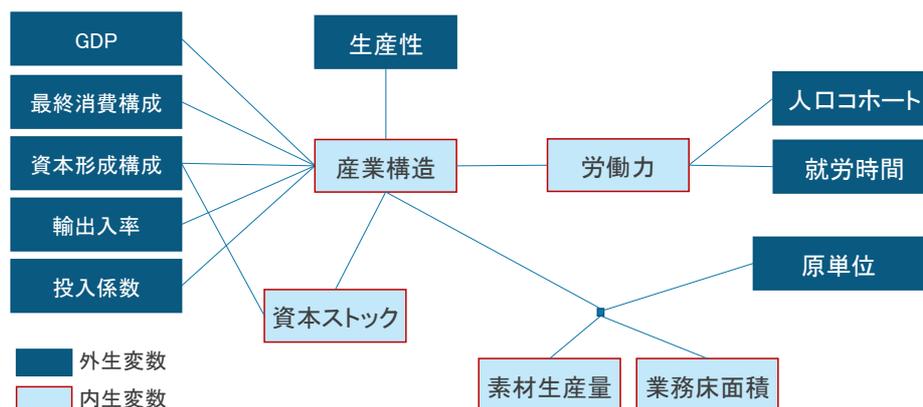
基準となるデータは、2000年産業連関表をもとに、生産部門はU表とV表を通じて投入と産出の関係を定義し、太陽光発電、風力発電についてもそれぞれ独立した部門として設定した。また、化石燃料をはじめとする各財の国際価格は外生的に設定した。表(3)-3に、改良型日本経済モデルにおける部門及び財の設定を示す。



図(3)-2 日本経済モデル改良の概要

表(3)-3 改良型日本経済モデルの部門・財の設定

耕種農業	石油製品	ガソリン	事務用・サービス用機器	金融・保険
畜産		ジェット燃料油	民生用電子・電気機器	不動産仲介及び賃貸
農業サービス		灯油	電子計算機・同付属装置	住宅賃貸料(帰属家賃含む)
林業		軽油	通信機械	鉄道輸送
漁業		A重油	電子応用装置・電気計測機	道路輸送
金属鉱物		B重油・C重油	半導体素子・集積回路	自家輸送
非金属鉱物		ナフサ	電子部品	水運
石炭		液化石油ガス	重電機器	航空輸送
原油		その他の石油製品	その他の電気機器	貨物運送取扱
天然ガス		石炭製品	コークス	乗用車
食料品	その他の石炭製品		その他の自動車	運輸付帯サービス
飲料	舗装材料		船舶・同修理	通信
飼料・有機質肥料(除別掲)	プラスチック製品	その他の輸送機械・同修理	放送	
たばこ	ゴム製品	精密機械	公務	
繊維工業製品	なめ革・毛皮・同製品	その他の製造工業製品	教育	
衣服・その他の繊維既製品	ガラス・ガラス製品	再生資源回収・加工処理	研究	
製材・木製品	セメント・セメント製品	建築	医療・保健	
家具・装備品	陶磁器	建設補修	社会保障	
パルプ・紙・板紙・加工紙	その他の窯業・土石製品	土木建設	介護	
紙加工品	鉄鉄・粗鋼	原子力発電	電力	その他の公共サービス
出版・印刷	鋼材	石炭火力		広告・調査・情報サービス
化学肥料	鋳鍛造品	石油火力		物品賃貸サービス
無機化学基礎製品	その他の鉄鋼製品	ガス火力		自動車・機械修理
有機化学基礎製品	非鉄金属製錬・精製	水力・地熱等		その他の対事業所サービス
有機化学製品	非鉄金属加工製品	太陽光		娯楽サービス
合成樹脂	建設・建築用金属製品	風力		飲食店
化学繊維	その他の金属製品	ガス・熱供給		旅館・その他の宿泊所
医薬品	一般産業機械	水道		その他の対個人サービス
化学最終製品(除医薬品)	特殊産業機械	廃棄物処理		事務用品
	その他の一般機器	商業	分類不明	



図(3)-3 マクロフレーム算定ツールの概要

### (3) マクロフレーム算定ツール

産業構造や資本形成などの経済勘定、人口構造や生活時間などの社会勘定、素材生産量などの物質勘定について、整合の取れた社会経済（マクロフレーム）の姿を描くことのできるツールを開発した。マクロフレーム算定ツールの概要を図(3)-3に示す。経済勘定においては、GDPや最終需要といったフロー指標に加え、人的資本（就業者数）及び人工資本（資本ストック）等のストック指標についても包含する。資本ストックについては、フローの資本形成との整合を確保する。部門分類は41部門である。社会勘定においては人口コホートや就労時間を与え、生産性を介することで経済勘定との整合を確保する。経済勘定と社会勘定との整合のもと、産業構造（業種別生産額）を算定する。さらに素材生産や業務床面積などエネルギー消費量の主たる活動量を算定する。本ツールは2015年公表の総務省産業連関表をもとに2011年を基準年とし、2030年と2050年を分析対象年とする。また、政策検討への対応可能性を重視して、パラメータの変更に伴い即時的に算定結果が出力されるようにした。

## 4. 結果及び考察

### (1) 日本技術選択モデル、日本経済モデルによる2030年目標の分析

#### 1) 日本技術選択モデルによる分析

本分析では、表(3)-4に示す3つのケースについて、2030年までの温室効果ガス排出量の推計を行った。INDCケースは、NDCの水準に相当する▲25.4%（2005年比）とした。ただし、本研究で用いたモデルでは森林吸収等を考慮していないため、LULUCFを除いた▲22.7%を制約条件としている。対策加速は、2030年の削減量をNDCに固定せず、2050年80%削減に向けて、2015年から即時に対策を進めるケースである（したがって、本ケースのみ2050年まで推計を実施）。原子力低位は、GHG排出制約についてはINDCケースと同様であるが、それぞれ原子力の想定に制約を課している。

推計の前提となる主要な活動量については、INDCおよび長期エネルギー需給見通しに基づいて設定した（表(3)-5）。原子力発電は、INDC・長期エネルギー需給見通しの想定（2030年20-22%）と一致するよう、耐用年数を設定した。具他提起には、寿命は、IEA World Energy Outlook 2014<sup>3)</sup>のNew Policies Scenarioにおける記述に基づき、1980年中頃以降に運転開始したものは60年延長、それ以外は40年とし、さらに新設3基を想定した。以上の想定に基づくと、2030年の原子力発電量は約232TWhとなり、INDC想定の場合にほぼ整合する。なお、原子力低位ケースでは60年延

表(3)-4 ケース設定

INDC	2030年にINDCに相当する2005年比22.7%削減（LULUCF除く）。原子力発電はINDCに整合。（2030年約232TWh）
対策加速	2030年の削減水準を明示的に課さず、2050年80%削減に向けて削減を進めるケース
原子力低位	原子力発電の60年延長および新設を見込まず、すべて40年廃炉とするケース。削減目標に関する設定は、INDCケースと同様

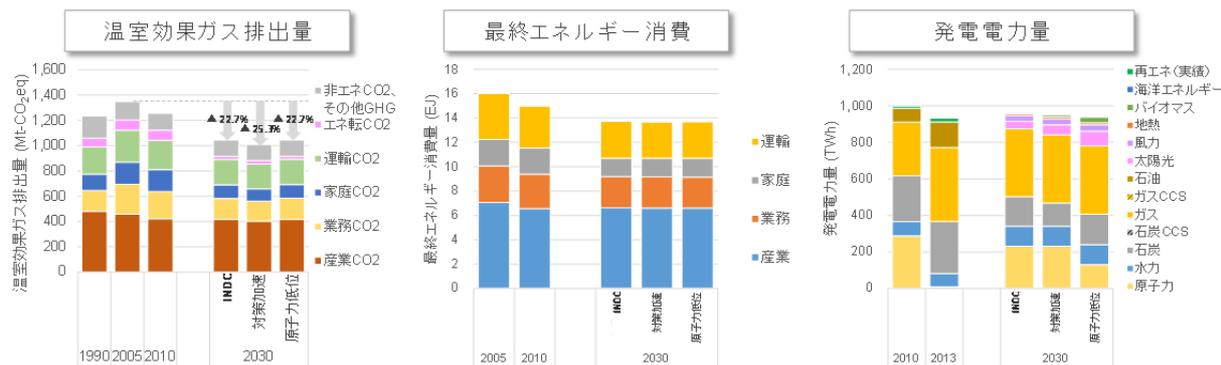
表(3)-5 日本技術選択モデルによる推計に用いた2030年までの活動量想定

		2005	2010	2030
人口	百万人	128	128	117
世帯数	百万世帯	50.4	53.4	52.0
実質GDP	05年連鎖価格兆円	507	512	711
粗鋼生産量	百万t	113	111	120
セメント生産量	百万t	73.9	56.1	55.6
業務床面積	百万m <sup>2</sup>	1,759	1,829	1,971
旅客輸送量	十億人km	1,409	1,366	1,410
貨物輸送量	十億トンkm	466	451	520

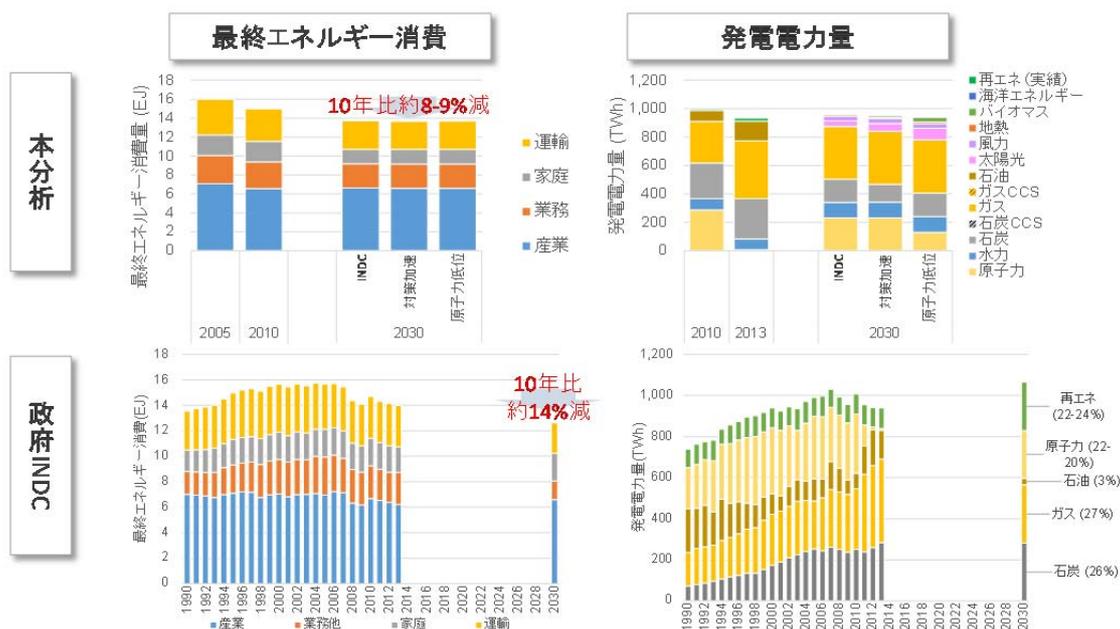
長を見込まず、すべて寿命は40年とした。なお、CCSについては、2030年までは導入されないと仮定した。

図(3)-4に、日本技術選択モデルによる2030年までの温室効果ガス排出量、最終エネルギー消費、発電電力量の推計結果を示す。まず、いずれのケースにおいても需要部門における省エネルギーと電力の低炭素化が主要な対策となっており、原子力低位ケースにおいても、主に再生可能エネルギーの追加的な導入拡大により、INDCに相当する排出削減は技術的に可能であることが示された。さらに、対策加速ケースでは、INDCケースからの追加的な再生可能エネルギー拡大・石炭火力からガス火力への転換により、排出量は05年比22.7%減から25.3%減となった。したがって、INDCを上回る追加的な削減には、エネルギーセキュリティの観点も考慮した上で、石炭からガス火力へのシフト、再生可能エネルギーの追加導入をいかにして達成するかが課題となることが示唆される。また、2030年のCO<sub>2</sub>価格は、INDCケースでは約187、対策加速ケースでは約220、原子力低位ケースでは約236 US\$/t-CO<sub>2</sub>に達する結果となった。これは、Aldy et al. (2016)<sup>4)</sup>等において示されている、他国のCO<sub>2</sub>価格と比較しても高い水準にあることから、目標達成は必ずしも容易ではなく、省エネルギー・低炭素エネルギーの普及方策による後押しが不可欠であるといえる。

なお、日本技術選択モデルによるINDCケースの2030年の推計結果は、日本政府が提出したINDCと比較して、省エネ・再エネ導入量が低水準にある一方、発電電力量に占めるガス比率が高い（図(3)-5）。これは、本分析ではサービス需要削減対策やFITを考慮していないことや、エネルギーセキュリティの観点を明示的に考慮していないことが主な要因と考えられる。特に省エネにおいては両者の差が大きいことから、政府のINDCでは、本研究では考慮していないサービス需要削減対策を含む大幅な省エネを見込んでいることが示唆される。なお、本分析は2015年改訂前の総合エネルギー統計に基づく一方、政府のINDCは改訂後のデータに基づいていることから、両者は単純には比較できない点に留意が必要である。



図(3)-4 日本技術選択モデルによる2030年までの推計結果



図(3)-5 本分析とINDCの比較

## 2) 日本経済モデルによる分析

### a. 2030年までのCO<sub>2</sub>排出量・GDPロスの推計

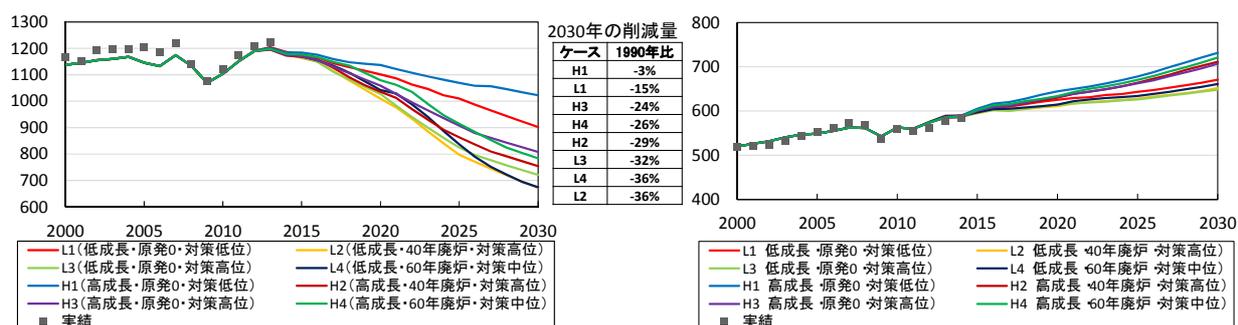
改良型日本経済モデルを用い、2030年までを対象とした複数のシナリオをについて排出経路分析を実施した。分析では、経済成長及び省エネルギー対策導入量、再生可能エネルギー導入量、並びに原子力発電の再稼働及び寿命の想定を組み合わせたシナリオに基づいて実施した。具体的には、経済成長は経済財政諮問会議の「成長戦略シナリオ」に基づき、低成長（年率0.9%）と高成長（年率1.6%）の2ケースを設定した。人口は、国立社会保障・人口問題研究所推計の「出生（中位）死亡（中位）」を用い、労働力は雇用政策研究会推計の「経済成長と労働参加が適切に進むケース」の想定を用いた。省エネルギー対策及び再生可能エネルギー導入量は、中央環境審議会2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会の想定を用いている。原子力は、ゼロケースに加えて、再稼働後40年廃炉と60年廃炉の3ケースを置く。これらのなかから、8ケースを取り上げて分析を実施した（表(3)-6）。

表(3)-6 分析ケース

	低経済成長	高経済成長
原発0・温暖化対策低位	L1	H1
原発40年廃炉・温暖化対策高位	L2	H2
原発0・温暖化対策高位	L3	H3
原発60年廃炉・温暖化対策中位	L4	H4

各ケースのエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の分析結果を図(3)-6に示す。結果より、高位ケースに相当する温暖化対策が実施されることで、経済成長が低成長と想定したケースでは2030年に1990年比30%以上（32-36%）、高成長ケースでは同20%以上（24-29%）のCO<sub>2</sub>排出量削減が可能であることが明らかとなった。次に、経済成長率の想定の影響について着目すると、原子力発電所の再稼働および温暖化対策の強度が同一想定の場合（たとえばL1とH1）を比較すると、高成長ケースの方が、低成長ケースと比較して1990年比で7-10%程度排出量が増加することがわかる。また、温暖化対策強度の違い（たとえばL1とL3）では、経済成長や原子力発電の想定が同じであっても、温暖化対策を強化することによって、1990年比で14-17%程度の追加的な削減が可能であることが示唆されている。いっぽう、原子力発電の再稼働の影響については、温暖化対策強度が高位の場合で、原子力発電所ゼロのケース（L3・H3）と原子力発電所再稼働・40年廃炉のケース（L2・H2）を比較すると、1990年比で4%程度の差が生じるにとどまる。

GDPの推移について、2030年の経済活動への影響を、低成長、高成長のケース間で比較すると、温暖化対策低位の場合と比較して対策を強化した場合（温暖化対策高位）には、低成長を想定したケース（L1とL3）では23兆円、高成長を想定したケース（H1とH3）で25兆円の差が生じる。しかし、2010年から2030年までの経済成長率で見ると、低成長ケースで年率0.7-0.9%（ベースラインは0.9%）、高成長ケースで年率1.1-1.3%（同1.6%）は実現できる。このことから、温暖化対策と経済成長は両立しうることが示された。

図(3)-6 エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量、GDPの推移（単位: Mt-CO<sub>2</sub>, 2000年価格兆円）

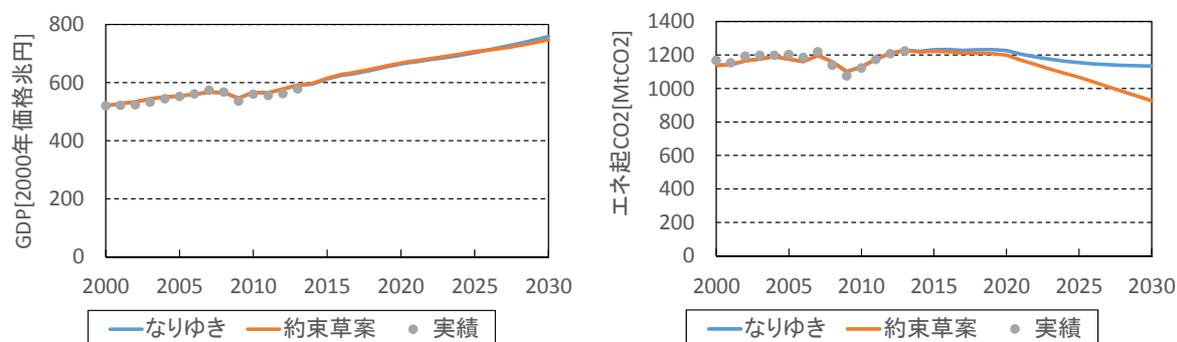
## b. 日本経済モデルによる日本のINDCの評価

日本が提出したINDCに示された排出削減目標は、2030年の温室効果ガス排出量を2013年比26%削減（約1,042Mt-CO<sub>2</sub>）というものであるが、日本経済モデルではエネルギー起源CO<sub>2</sub>のみを対象とするため、2030年の排出量を約927Mt-CO<sub>2</sub>と設定した。また、想定した省エネ技術の普及状況は、中央環境審議会2013年以降の対策・施策に関する報告書の高成長・対策低位ケースの結果を前提としている。このほか、2030年の電源構成については、長期エネルギー需給見通しの想定に基づいて設定している。

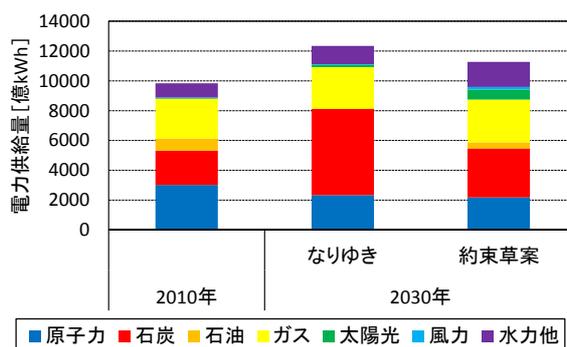
結果のうち、GDPとCO<sub>2</sub>排出量の推移を図(3)-7に示す。なりゆきケースでは、2014-2030年の年平均経済成長率1.7%を実現するのに対して、INDCの目標を達成する約束草案ケースでは、同期間の年平均経済成長率は1.6%となり、2030年のGDP総額への影響は、なりゆきケースの2030年GDPの1.4%に相当する結果となった。なお、中央環境審議会「2013年以降の対策・施策に関する報告書」の対策中位に相当するだけの温暖化対策が導入可能と仮定すると、2030年の経済への影響はなりゆきケースの2030年のGDPに対して1.1%となる。こうしたことから、追加費用の低い温暖化対策の選択肢を確保することで、経済活動への影響をより小さくすることが可能になることが示された。

一方、約束草案を達成するために必要となる追加投資の総額は、2030年までに34兆円で、CO<sub>2</sub>価格は2030年に26,300円/t-CO<sub>2</sub>となった。なお、CO<sub>2</sub>価格は、最も高額な対策に対するCO<sub>2</sub>の価格であり、政策的に導入される炭素税は、税収を温暖化対策に活用するなどのポリシーミックスにより、これよりも低く抑えることができる可能性がある。なお、炭素税収を追加投資に充てない場合、2030年のGDPへの影響はなりゆきケースと比較して4.7%に増大する。また、「2013年以降の対策・施策に関する報告書」の対策中位に相当するだけの温暖化対策が導入可能と仮定すると、追加投資額は増大するが、CO<sub>2</sub>価格は22,900円/t-CO<sub>2</sub>に低下する。GDPへの影響と同様に、追加費用の低い温暖化対策の選択肢を確保することの重要性が、CO<sub>2</sub>価格の水準にも表れる結果となった。

図(3)-8に各ケースにおける2030年の電源構成を示す。生産構造の変化等もあり、2030年の発電電力量は、長期エネルギー需給見通し（10,650億kWh）と比較すると、今回の計算結果は6%大きくなる結果となった。



図(3)-7 GDP (左図) とエネルギー起源CO<sub>2</sub> (右図) の推移



図(3)-8 電源構成

## (2) 日本技術選択モデルによる2050年までの排出経路を踏まえた低炭素化方策検討

本分析では、サブテーマ(1)との協同で、INDCにおける2030年の排出水準を考慮した上で、2050年80%削減に向けて中長期的に重要となる技術の明確化、および低炭素化に向けた方策の検討を行った。なお、本分析にあたっては、サブテーマ(4)およびサブテーマ(5)における、サービス需要に関する検討結果を踏まえ、活動量想定等のパラメータ設定に反映した。したがって、先述の2030年までの推計とは異なり、必ずしも活動量想定はINDCと一致しない点に留意されたい。

本分析では、表(3)-7に示す6つのケースについて推計を行った。レファレンスケースは、特段の排出制約を設けない(CO<sub>2</sub>価格をゼロと設定)ケースである。ただし、削減費用が負となる技術は、CO<sub>2</sub>価格がゼロであっても導入が進むため、いわゆる技術固定ケースとは異なる点に留意が必要である。NDC延長は、2030年にINDCにおける削減目標を満たし、それ以降のCO<sub>2</sub>価格を2030年の値に固定したケースである(なお、本分析はCOP21後に実施したことから、ケース名はNDCと表記しているが、2015年7月に公表された政府の約束草案を指す場合はINDCと記載する)。NDC80は、INDCにおける2030年の削減目標、および2050年80%目標を満たすケースである。対策加速は、2030年の削減量をINDCに固定せず、2050年80%削減に向けて、2015年から即時に対策を進めるケースである。原子力低位・原子力ゼロは、GHG排出制約についてはNDC80と同様であるが、後述するように、それぞれ原子力の想定に制約を課している。

温室効果ガス排出量の制約について、NDC延長やNDC80ケースでは、2030年の温室効果ガスの排出制約は、INDCの水準に相当する▲25.4%(2005年比)とした。ただし、本研究で用いたモデルでは森林吸収等を考慮していないため、LULUCFを除いた▲22.7%を制約条件としている。また、2050年80%削減を満たすケースについては、2016年の地球温暖化対策計画において目指すとされている▲80%とした。計画では、基準年が明記されていないため、今回は1990年比▲80%を制約条件として設定した。

推計の前提となる主要な活動量について、実質GDP、粗鋼生産量は、2030年までは長期エネルギー需給見通しに基づき、2050年は中央環境審議会2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会、技術WGにおける想定を用いた。世帯数、業務床面積、輸送量、および家庭部門におけるサービス需要の水準については、本研究課題のサブテーマ(4)、(5)における想定を踏まえて設定した(表(3)-8)。原子力発電は、INDC・長期エネルギー需給見通しの想定(2030年20-22%)と一致するように、耐用年数を設定した。なお、原子力低位ケースおよびレファレンスケースでは、60年延長を

表(3)-7 推計を実施したケース

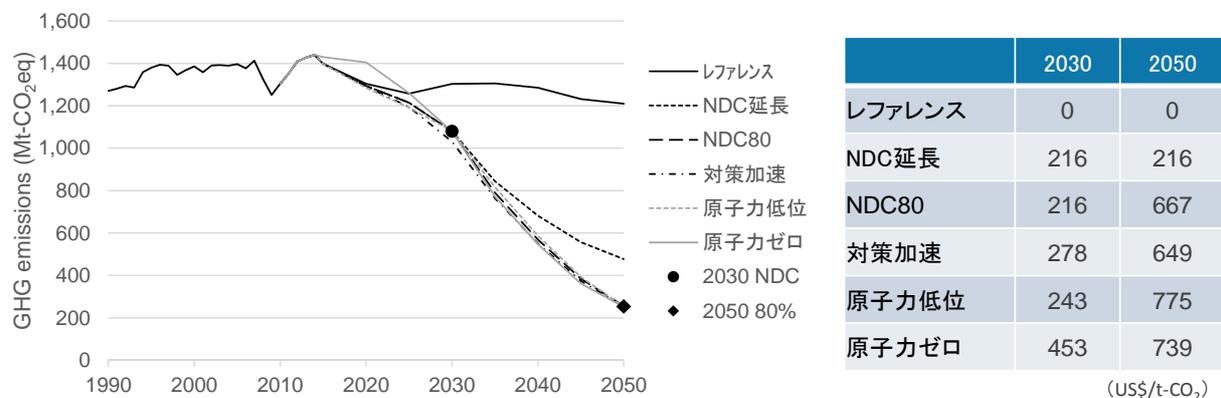
① レファレンス	温室効果ガス排出制約なし
② NDC延長	2030年にNDCの削減水準を満たし、それ以降CO <sub>2</sub> 価格一定
③ NDC80	2030年にNDCの削減水準を満たし、その後2050年80%削減に向けてさらに削減を進める
④ 対策加速	2050年80%削減に向けて早期から削減を進めるケース
⑤ 原子力低位	原子力発電の60年延長を見込まず、すべて40年廃炉
⑥ 原子力ゼロ	すべての原子力発電が稼働しない

表(3)-8 2050年までの活動量想定

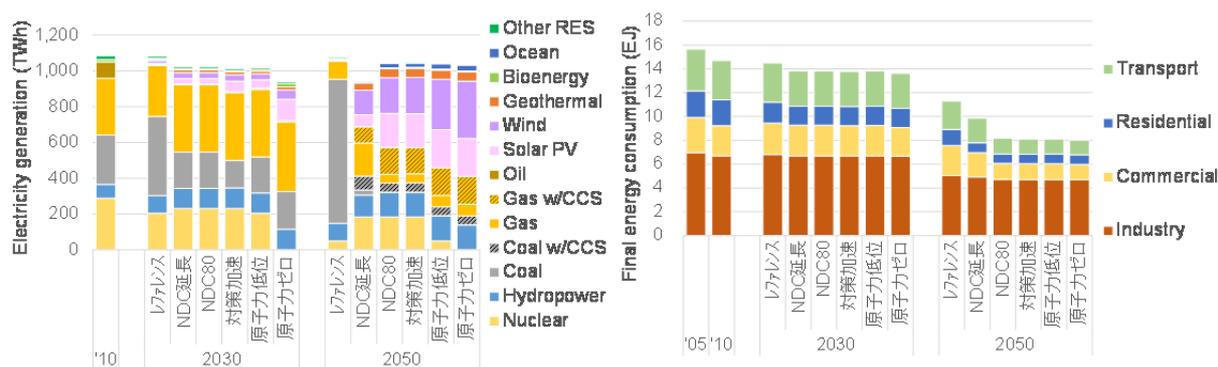
		2010	2030	2050
人口	百万人	128	117	97
世帯数	百万世帯	53.4	52.7	45.3
実質GDP	05年連鎖価格兆円	512	711	821
	billion US\$ <sub>2005</sub>	4,648	6,406	7,400
業務床面積	百万m <sup>2</sup>	1,829	2,011	1,950
旅客輸送量	十億人km	1,307	1,357	1,209
貨物輸送量	十億トンkm	451	522	500

見込まず、すべて寿命は40年とした。CCSについては、2030年より導入が開始され、2040・2050年の貯留量を、それぞれ最大50・150 Mt-CO<sub>2</sub>/yrと想定した。この想定に基づくと、2050年までの累積貯留量は約1,325 Mt-CO<sub>2</sub>となる。

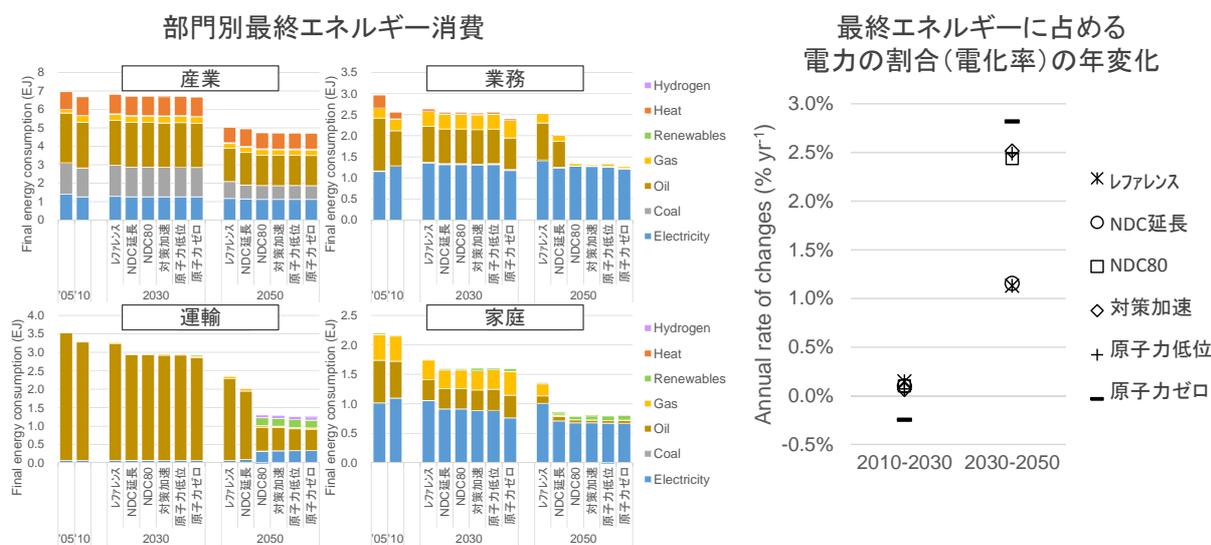
2050年までの温室効果ガス排出量およびCO<sub>2</sub>価格の推計結果を図(3)-9に示す。レファレンスケースでは、2030年の温室効果ガス排出量は1990年比約3%増（2005年比約7%減）、2050年は1990年比約5%減となった（図(3)-2）。それ以外のケースにおける2050年の温室効果ガス排出量は、INDCと同水準のCO<sub>2</sub>価格が維持されるNDC延長ケースにおいても、1990年比で62%の削減となり、この点においてINDCの実施・削減努力の継続は有意義なものであることが示唆される。一方で、2050年に80%減となるケースでは、CO<sub>2</sub>価格は600 US\$/t-CO<sub>2</sub>を超える水準となり、これはNDC80ケースの場合、2030年のCO<sub>2</sub>価格の約3倍以上に相当する。したがって、2050年80%削減には、INDCを大きく上回る水準の削減努力が必要となるといえる。

図(3)-9 2050年までの温室効果ガス排出量・CO<sub>2</sub>価格の推計結果

2050年80%削減に向けた主要な方策の一つとして、需要部門における省エネルギーの加速が挙げられる。2050年の最終エネルギー消費は、レファレンスの2010年比約23%減と比較して、NDC延長では約33%減となり、特に家庭部門での削減が顕著であるほか、業務、運輸部門においても化石燃料消費はやや減少する。また、80%削減を達成するケースでは、2010年比44~45%減となり、家庭だけでなく業務、運輸でもエネルギー消費は大幅に削減される結果となった(図(3)-10)。加えて、電力に占める低炭素エネルギー(再生可能エネルギー・原子力・CCS)の拡大も重要な方策である。レファレンスでは、2050年にかけて特に石炭火力大きく増加し、NDC延長ケースでは、再生可能エネルギー、CCSの導入が進むものの、CCSなしの火力発電が20%以上残る結果となった。一方、80%減を達成するケースでは、太陽光・風力発電を中心に再生可能エネルギーが大幅に増加することに加え、CCS火力発電のシェアも高まることで、低炭素エネルギー比率は93~95%まで拡大する結果となった。ただし、出力変動を伴う太陽光・風力・海洋エネルギー発電(VREs)の比率は、NDC80、対策加速では約40%、原子力低位・ゼロではそれぞれ50%、55%まで拡大し、特にピーク時では、VREsの比率が50%以上まで拡大する結果となった。そのため、VREsを受け入れるための系統対策が課題となる。



図(3)-10 発電電力量・最終エネルギー消費の推計結果



図(3)-11 部門別エネルギー消費構成・電化率推移の推計結果

さらに、先述のように電力のCO<sub>2</sub>排出係数がほぼゼロに近い水準となることから、最終需要部門における化石燃料から電力および水素（再生可能エネルギー起源）へのシフトが重要な方策となる。2050年における最終エネルギー消費に占める低炭素エネルギー（電力、水素、再生可能エネルギー）の比率は、レファレンス・NDC延長の約33%から、80%減となるケースでは、46～47%まで増加し、特に電力の割合が大きい（図(3)-11）。部門別にみると、特に家庭・業務部門では電力の割合が90%以上となり、CO<sub>2</sub>排出量はほぼゼロに近い水準となる。家庭部門では、冷暖房・給湯におけるエアコン、ヒートポンプ給湯器の比率が80～90%まで増加する結果となり、特に給湯では、2030年以降に急速にヒートポンプ給湯器が導入される結果となった。また、運輸部門では、電気自動車、燃料電池車の導入加速が重要な対策であり、特に旅客自動車では2050年に80%以上を電気自動車が占める結果となった。なお、電力へのシフトは2030年以前まではほとんど進展しない一方で、2030-2050年には年率約2.5%を超える水準で導入を進めることが必要となる。今回の推計では、2030年までに、ヒートポンプ給湯器や電気自動車の導入はほぼ進まない結果となったものの、ロックインの影響や、早期からの対策導入による初期費用等の障壁の克服を考慮すれば、より早期からの導入拡大が有効となる可能性がある。

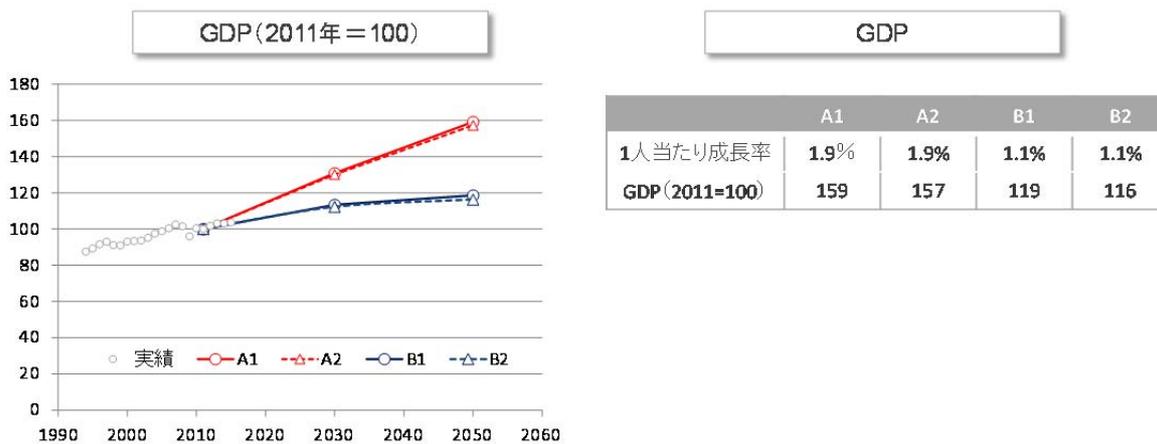
以上より、INDCの実施および削減努力の継続は有効であるものの、2050年80%削減には、INDCを上回る緩和努力が必要となることが示された。特に、継続的な省エネに加え、2050年までに電力をほぼ低炭素エネルギーに転換すること、および需要部門における低炭素エネルギーへの転換を大幅に進めることが主要な対策となることが明らかとなった。これらを進める上では、出力変動の大きい太陽光発電や風力発電（VREs）の大幅な拡大を可能にする系統対策や、ヒートポンプ・電気自動車といった、現時点では初期費用等の障壁を有する技術の普及を、特に2030年以降に加速することが重要な課題である。その実現には、2030年までの対策の加速に加えて、それ以降の普及加速を実現するため、早期からの技術開発やインフラ整備も含めた方策が重要となることが示唆された。

### （3）マクロフレーム算定ツールによる試算結果

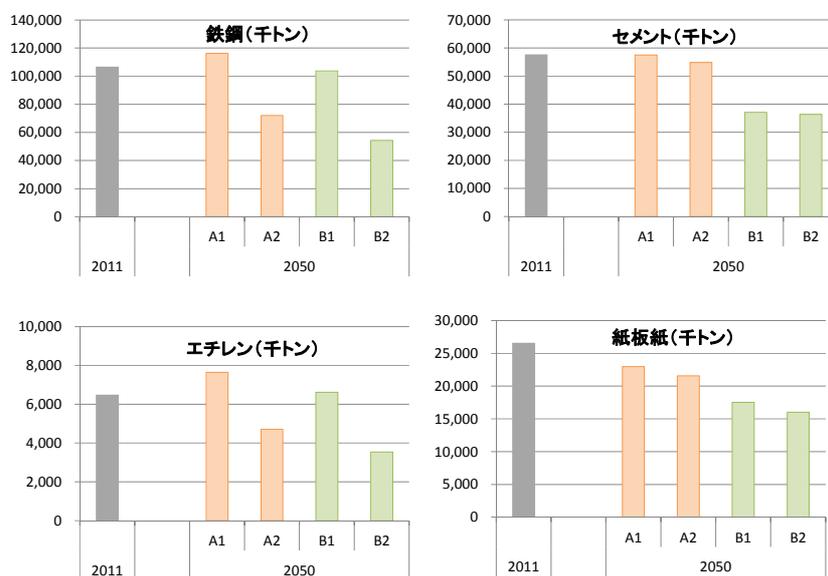
マクロフレーム算定ツールを用いて、2050年の素材生産量、業務床面積、貨物輸送量の試算を行った。経済成長率の想定については、既往研究（脱温暖化2050、中央環境審議会2013年以降の対策・施策の関する検討小委員会のマクロフレームWG）を踏まえ、高成長シナリオ（A）と低成長シナリオ（B）と、輸出依存型（1）とサービス内需依存型（2）の組み合わせで4本のシナリオを設定し、それぞれのシナリオにおいて、一人当たりの生産額の伸び率を設定した。なお、本ツールでは、最終消費構成や資本形成構成などの経済勘定について、一人当たりの生産額の設定を介して、就業者数や一人当たり就労時間などの社会勘定との整合を図っている。2050年までのGDPの試算結果を図(3)-12に示す。

マクロフレーム算定ツールを用いた、2050年の素材生産量の推計結果を図(3)-13に示す。経済成長のシナリオによって素材生産量の見通しは大きく異なる。また、特に粗鋼・エチレンは、輸出依存型とサービス内需依存型での差が大きい。

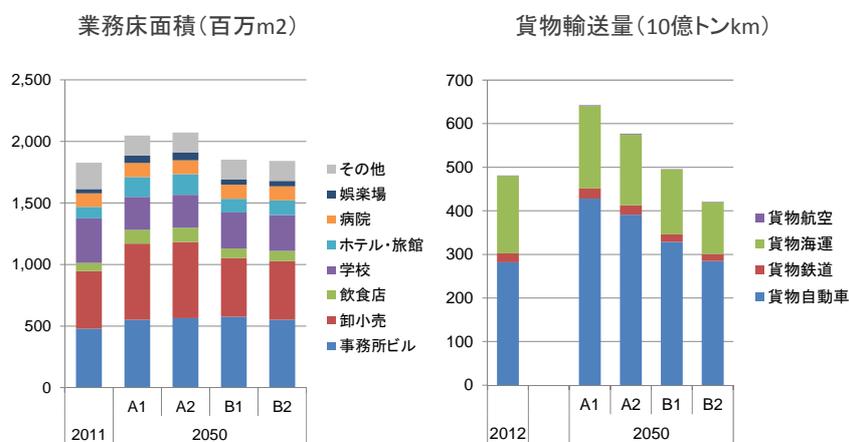
業務床面積・貨物輸送量も経済成長の見通しに応じて大きく変化する結果となった（図(3)-14）。ただし、素材生産量と異なり、業務床面積は、輸出依存型と比較してサービス内需依存型の方がわずかに大きい値となっている。



図(3)-12 マクロフレーム算定ツールによるGDPの試算結果



図(3)-13 マクロフレーム算定ツールによる素材生産量の試算結果



図(3)-14 マクロフレーム算定ツールによる業務床面積、貨物輸送量の試算結果

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

日本経済モデル（応用一般均衡モデル）について、これまでは経済モデルと技術選択モデルが独立しており、技術選択モデルから算出されるエネルギー効率改善およびコストを経済モデルに与える一方通行となっていたが、本研究では技術選択モデルとの整合を内生的に取ることでできるように日本経済モデルの改良を実施したことで、両モデルの連携を内生的にとることが可能となった。また、技術選択モデルについては、従来のモデルでは考慮されていなかった、電気自動車・電気HP給湯器の充電・稼働時間の変更、電気分解による水素製造を新たに考慮したことで、出力変動の大きい再生可能エネルギー（VREs）の拡大に対する需給調整策を考慮した評価を行うことが可能となった。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

日本技術選択モデル及び日本経済モデルによる分析結果は、環境省、特に地球環境局総務課低炭素社会推進室に対して提示し、中長期の温暖化対策にかかる政策立案のための基礎情報として提供してきた。さらに、環境省地球環境局国際地球温暖化対策室が開催した気候変動に関する日印政策研究ワークショップ（2016年8月）において、本研究の日本技術選択モデルによる、約束草案・2050年目標の分析結果を発表・提供した。また、内閣府の原子力委員会第6回定例会議において、国立環境研究所増井利彦室長より、温暖化問題と原子力発電に関する発表が行われ、その中で本研究の日本技術選択モデルによる2050年までの温室効果ガス排出量の推計結果が紹介された。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

国際共同研究であるDDPP、MILESに対して、日本技術選択モデル・日本経済モデルによる2030年、2050年までの分析結果を提供するとともに、レポートの執筆を行った。DDPP、MILESでは、日本以外の国・地域に関する中長期のシナリオ分析結果も併せて提示されており、それらと日本のシナリオを比較することで、温室効果ガス削減に関する長期戦略の検討等に際して活用することが可能である。

また、本研究で開発したマクロフレーム算定ツールは、他のモデル群と比較して、即時的に将来のマクロフレームを推計することが可能であるため、迅速性が求められる環境政策の検討場面において有効なツールになると考えられる。

## 6. 国際共同研究等の状況

本研究課題では、以下の国際共同研究プロジェクトに参画し、本研究で得られた成果を提供している。

### 1) DDPP (Deep Decarbonization Pathways Project)

[カウンターパート] Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI), France, (Dr. Henri Waisman)

[参加・連携状況] 日本技術選択モデル、日本経済モデルによる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. (2015)）を執筆。本研究課題からは増井・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プロジェクトであり、世界2℃目標の長期シナリオの達成に向けて、16カ国の研究機関が自国の大幅削減シナリオを分析するとともに、各国のレポートを公表。また本プロジェクトの統合報告書は、国連気候変動サミットにて報告されている。

## 2) MILES (Modeling and Informing Low-Emissions Strategies)

[カウンターパート] Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI), France, (Dr. Thomas Spencer)

[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するとともに、地球環境産業技術研究機構（RITE）と共同でレポートを執筆（Akimoto et al. (2015)）。本研究課題からは増井・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している（日本からは、国立環境研究所（NIES）および地球環境産業技術研究機構（RITE）が参加）。各研究機関が自国のINDCに関する分析を実施するとともに、PIKが世界モデル（REMIND）を用いた分析を行い、各国のINDCより得られる示唆についてまとめた統合報告書が、2015年10月に公表された。

## 3) CD-LINKS (Linking Climate and Development Policies- Leveraging International Networks and Knowledge Sharing)

[カウンターパート] Keywan Riahi and Volker Krey (IIASA:オーストリア), Elmar Kriegler (PIK:ドイツ), Detlef van Vuuren (PBL:オランダ), Jiang Kejung (ERI: 中国)、 Massimo Tavoni (FEEM: イタリア)など

[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ている。本研究課題からは藤森・増井・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) 大城賢、増井利彦：エネルギー・資源, 35, 4, 31-39 (2014), わが国を対象とした多地域エネルギー技術選択モデルによる2050年までの温室効果ガス削減シナリオ分析

- 2) 増井利彦、大城賢、日比野剛：土木学会論文集G(環境), 70, 5, I\_43-I\_51 (2014), 技術選択を考慮した応用一般均衡モデルによるわが国の温室効果ガス排出削減目標の評価
- 3) 大城賢、増井利彦：土木学会論文集G (環境) , 70, 6, II\_207-II\_215 (2014), 低炭素エネルギー技術の不確実性を考慮したわが国の長期温室効果ガス削減シナリオ分析
- 4) Oshiro, K. and 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
- 5) Oshiro, K., Kainuma, M., & Masui, T.: Climate Policy, 16(sup1), S63-S77 (2016), Assessing decarbonization pathways and their implications for energy security policies in Japan

#### <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) 芦名秀一、大城賢：地球環境研究センターニュース 25(9), 8-11 (2014)  
「低炭素社会は実現できるか？ -DDPP 報告セミナー及び環境省環境研究総合推進費2-1402 報告会-」
- 2) 増井利彦、大城賢、甲斐沼美紀子、日比野剛：季刊環境研究, 178, 89-95, (2015)  
「日本における2050年温室効果ガス排出量の80%削減に向けた道筋 -DDPP (Deep Decarbonization Pathways Project)での結果を踏まえて-」
- 3) Kainuma, M., Masui T., Oshiro K. and Hibino G, (2015)  
“Pathways to deep decarbonization in Japan”
- 4) Akimoto, K., Shuai, B., Sano, F., Oda, J., Kainuma, M., Masui, T. and Oshiro, K. (2015)  
“MILES (Modelling and Informing Low Emissions Strategies) Project - Japan Policy Paper: A joint analysis of Japan's INDC”
- 5) Masui, T., Oshiro, K., and Kainuma, M.: Enabling Asia to Stabilise the Climate, Springer Singapore, 55-66 (2016), “Eighty Percent Reduction Scenario in Japan”

#### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 大城賢、増井利彦：環境経済・政策学会2014 年大会(2014)  
「長期温室効果ガス排出削減シナリオにおける電力需給調整対策の役割」
- 2) 大城賢、伏間丈悟、増井利彦：環境科学会2014 年会(2014)  
「輸送距離別将来交通需要を考慮した次世代自動車普及による長期CO<sub>2</sub>排出削減効果」
- 3) 大城賢、増井利彦：土木学会第42回環境システム研究論文発表会(2014)  
「低炭素エネルギー技術の不確実性を考慮したわが国の長期温室効果ガス削減シナリオ分析」
- 4) 大城賢、甲斐沼美紀子、増井利彦、日比野剛：低炭素社会は実現できるか？ DDPP (Deep Decarbonization Pathways Project) 報告セミナー及び 環境省環境研究総合推進費2-1402報告会(2014)  
「日本のDDPs (Deep Decarbonization Pathways) の概要」

- 5) 増井利彦, 芦名秀一, 藤森真一郎, 藤野純一, 大城賢, 日比野剛: 第6回横幹連合コンファレンス, 名古屋(2015)  
「わが国における長期の温室効果ガス排出削減目標とその実現可能性」
- 6) 増井利彦, 芦名秀一, 藤森真一郎, 岡川梓, 日比野剛, 松井重和, 大城賢: シンポジウム日本の排出削減目標議論の行方 (2015)  
「AIM (アジア太平洋統合モデル) による温室効果ガス排出量の新しい試算結果 (中間報告)」
- 7) 大城賢: DDPP報告シンポジウム2 低炭素社会をどう実現するか? (2015)  
「DDPPの結果」
- 8) Fujimori S., Oshiro K.: Climate Change Impacts & Integrated Assessment XXII (CCI/IA)(2016)  
“Japan NDC (AIM/Enduse[Japan]) Global emissions trading under NDCs (AIM/CGE[global])”
- 9) Oshiro, K.: Japan-India Policy Research Workshop, New Delhi, India (2016)  
“Assessment of Japan’s NDC and long-term goal - Contributions of Asia-Pacific Integrated Model (AIM) –“
- 10) Masui, T., Oshiro, K., Kainuma, M., Hibino, G.: Ninth Annual Meeting of the IAMC, Beijing, China, (2016)  
“Quantitative Japan’s GHG mitigation analysis based on Asia-Pacific Integrated Model”

### (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

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日刊工業新聞 (2014年11月25日、1頁、「気候変動に挑む5 次世代に残せ豊かな地球」)
- 2) 日経エコロジー (2015年3月号、106頁、「DDPP」)

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) Kainuma, M., Matsuoka, Y., & Morita, T.: Springer, Japan, (2003)  
“Climate policy assessment: Asia-Pacific integrated modeling”
- 2) Masui, T.: European Journal of Operational Research, 166(3), 843-855 (2005)  
“Policy evaluations under environmental constraints using a computable general equilibrium model”
- 3) IEA: OECD/IEA., Paris (2014) “World Energy Outlook 2014”
- 4) Aldy J, Pizer W, Tavoni M, Reis LA, Akimoto K, Blanford G, et al.: Nature Clim. Change, 6(11), 1000-1004 (2016).

“Economic tools to promote transparency and comparability in the Paris Agreement”

#### (4) ライフスタイル変化を考慮した家庭のエネルギー消費行動に関する研究

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 環境政策研究室

金森 有子

平成26(開始年度)～28年度累計予算額：16,546千円（うち平成28年度：5,233千円）

予算額は、間接経費を含む。

##### [要旨]

本サブテーマではライフスタイルと家庭のエネルギー消費行動の関係についてモデル化を行い、低炭素社会におけるエネルギーサービス需要量を、ライフスタイルの変化を考慮して定量化することを目的とする。そのために家庭部門におけるエネルギーサービス需要を推計するモデル（家庭エネルギーサービス需要モデル）を開発した。モデルでは、暖房、冷房、給湯、厨房、照明、その他動力の6種類のエネルギーサービス種を設定し、気候の違いや高齢化や家族構成の変化、またいくつかのライフスタイルの変化（外食化の進展、住宅種選択の変化等）を考慮したエネルギーサービス需要量を推計する。

世界を対象にした推計では、世界32地域に対しSSPの5つのシナリオ別に2050年までのエネルギーサービス需要の違いを推計した。その結果2050年において今後著しい人口及び経済成長が見込まれるアジア地域の発展途上国では、1.35倍（SSP3における中国）から13.2倍（SSP3におけるインド）程度のエネルギー消費量の増加が見込まれることが分かった。

日本を対象にした詳細な推計では、日本を10地域に分割し、シナリオ別に2050年までのエネルギーサービス需要、エネルギー消費量及びCO<sub>2</sub>排出量を推計した。その結果、条件によっては2030年に2013年比で41%のCO<sub>2</sub>排出量を削減することは可能であることがわかった。また家庭の努力はもちろんのこと、電事連の示す目標レベルまで電気の排出係数を下がる必要があることが分かった。また、2050年に2013年比でCO<sub>2</sub>排出量を80%削減する目標の達成の可否は電気の排出係数がどこまで下げられるかに大きく依存する。例えば、排出係数が0.104kgCO<sub>2</sub>/kWhまで下がり、電化の進展、環境配慮型ライフスタイルの浸透などの条件によっては、家庭部門におけるCO<sub>2</sub>の大幅削減達成可能であることが分かった。

##### [キーワード]

二酸化炭素排出量、ライフスタイル、エネルギー消費行動

#### 1. はじめに

気候変動問題の解決に向けて、世界中が温室効果ガス削減のための目標を定めている。日本では2015年に国連に提出した約束草案により、温室効果ガス排出量を2030年に2013年比で26%削減することとした。なかでも家庭部門の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出削減目標は39%であり、業務部門と並び大幅な削減が求められることになった。

家庭部門のCO<sub>2</sub>排出量については、日本だけでなく世界中で多様なライフスタイルがあるために、家庭部門全体に効果のある削減対策の提示が困難である。また、ほとんどの国で世帯規模が小さ

くなっており、家庭でのエネルギー消費が非効率になっているため、一人あたりエネルギー消費量が増加していることもあり、ますます削減が困難になっている。しかしCO<sub>2</sub>削減目標の達成に向けて、家庭部門についてあらゆる角度から削減の可能性、またその限界を明確にすることは急務である。

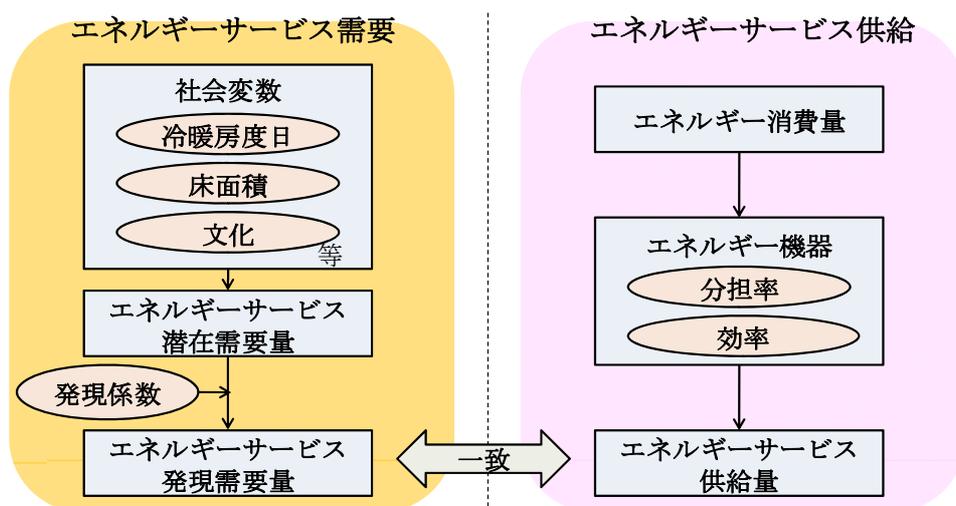
## 2. 研究開発目的

本サブテーマではライフスタイルと家庭のエネルギー消費行動の関係についてモデル化を行い、低炭素社会におけるエネルギーサービス需要量を、ライフスタイルの変化を考慮して定量化することを目的とする。そのために家庭部門におけるエネルギーサービス需要を推計するモデル（家庭エネルギーサービス需要モデル）を開発した。モデルでは、暖房、冷房、給湯、厨房、照明、その他動力の6種類のエネルギーサービス種を設定し、気候の違いや高齢化や家族構成の変化、またいくつかのライフスタイルの変化（外食化の進展、住宅種選択の変化等）を考慮したエネルギーサービス需要量を推計した。日本を対象に詳細なモデルを開発するが、世界についても特に途上国においては日本以上に急激なライフスタイルの変化が見込まれる中で家庭部門におけるエネルギー消費量の変化は注目されている。そこで世界を対象にした簡易モデルを用いたエネルギー消費量の推計と日本を対象に詳細なモデルを用いてCO<sub>2</sub>削減目標の達成可能性の検討を実施した。

## 3. 研究開発方法

本サブテーマでは主に2つのことを実施した。1つは、世界を対象にした家庭部門におけるエネルギーサービス需要の変化及びエネルギー消費量の推計である。もう1つは、日本を対象にした詳細なモデルを用いた家庭部門におけるエネルギー消費量及びCO<sub>2</sub>排出量の推計である。この2つの研究では、対象が異なることで推計の詳細さが異なる。しかし、基本的な考え方は同じであるため、はじめに基本的な推計方法について説明する。

本研究では、エネルギーサービスという概念を導入する。人々はエネルギーサービス需要を満たすべく、エネルギー消費行動をとるものとする。エネルギーサービスの需給バランスは、図(4)-1に示したように整理した。エネルギーサービスの潜在需要は、エネルギーサービスの増減に影響を与える複数の社会要因（気候・社会環境・文化等）によって決定される。しかし、現実にはその地域の経済発展の状況に応じた所得制約や物理的制約（インフラの不整備等）により、発現する需要は潜在的な需要を下回ることがある。この潜在需要量と発現需要量の比を発現係数とした。一方、エネルギーサービスの供給は、エネルギーサービスを提供する機器と機器を動かすためのエネルギーによって決定される。エネルギーサービスの需給バランスは、発現需要量と供給量が一致するような関係を意味する。以後、特に断りのないときは、エネルギーサービス需要とはエネルギーサービス発現需要を指す。



図(4)-1 エネルギーサービス需給バランス

エネルギーサービスとエネルギー消費との関係を式(4)-1に表す。

$$EN_{e,es,dv,t} = ES_{s,t} \cdot Sh_{es,dv,t} / Eff_{e,dv,t} \quad \text{式(4)-1}$$

$EN_{e,es,dv,t}$  :  $t$ 年における用途 $es$ のうち機器 $dv$ で賄うのに必要なエネルギー $e$ の消費量

$ES_{s,t}$  :  $t$ 年の用途 $es$ のエネルギーサービス量

$Sh_{es,dv,t}$  :  $t$ 年における用途 $es$ の機器 $dv$ シェア

$Eff_{e,dv,t}$  :  $t$ 年の機器 $dv$ のエネルギー効率

式(4)-1が示すようにエネルギーサービスとは、エネルギーを使って機器を動かすことにより得られるものであり、例えばエアコンの使用により得られる暖かさや涼しさなどがそれに該当する。

次にエネルギーサービス需要の変化について説明する。エネルギーサービス需要は、様々な要因によって変化する。サービス需要量の変化は式(4)-2に示す3つの要素から説明する。

$$UES_{r,es,t} = BES_{r,es} \cdot ESTIME_{r,es,t} \cdot ESSIZE_{r,es,t} \cdot ESINT_{r,es,t} \quad \text{式(4)-2}$$

$UES_{r,es,t}$  :  $t$ 年における地域 $r$ のエネルギーサービス種 $es$ の単位エネルギーサービス量

$BES_{r,es}$  : 基準年の地域 $r$ のエネルギーサービス種 $es$ の単位エネルギーサービス量

$ESTIME_{r,es,t}$  :  $t$ 年における地域 $r$ のエネルギーサービス種 $es$ のサービス時間

$ESSIZE_{r,t}$  :  $t$ 年における地域 $r$ のエネルギーサービス種 $es$ のサービスサイズ

$ESINT_{r,es,t}$  :  $t$ 年における地域 $r$ のエネルギーサービス種 $es$ のサービス強度

それぞれの家庭部門のエネルギーサービス種は暖房、冷房、給湯、厨房、照明、その他動力の6種類である。エネルギーサービス種に対するサービス時間、サービスサイズ、サービス強度の3種類の要素のイメージを表(4)-1に示す。サービス時間とはエネルギーサービスを供給する時間や回数、サービスサイズとはサービスを供給する規模に関係する変数、サービス強度とは供給する際

表(4)-1 エネルギーサービスの3要素

	サービス時間	サービスサイズ	サービス強度
暖房	暖房時間	暖房面積	温度設定
冷房	冷房時間	冷房面積	温度設定
給湯	給湯回数	1回あたりの給湯量	湯の温度
厨房	調理回数	1回あたりの調理量	火力
照明	照明時間	照明面積	明るさ
その他動力	機器使用時間	機器のサイズ	機器使用の強さ

の強さに関する変数を想定した。実際には表(4)-1に示した変数が入手できるとは限らない。計算に用いた変数については、それぞれの部分で説明する。

以上の関係を用いて、次の手順で将来のエネルギー消費量を推計する。まず、気候及び社会・経済変数を用いて、将来の一人（あるいは一世帯）あたりエネルギーサービス量を推計する。それと人口あるいは世帯数の将来推計値を用いて、地域全体のエネルギーサービス量を推計する。次にそのエネルギーサービス量を供給する機器について、効率とシェアの想定を行う。その想定に基づき必要となるエネルギー消費量及びCO<sub>2</sub>排出量が推計される。

#### (1) 世界を対象にした家庭部門のエネルギー消費量推計

基準年を2010年とし世界の2050年までの地域別のエネルギーサービス量の推計を行った。その推計結果とエネルギー機器の技術シナリオを用いて、将来のエネルギー消費量を推計した。世界を32地域に分類し、エネルギー種を8種類、サービス種を6種類設定した。各設定の内容を表(4)-2から表(4)-4に示す。エネルギー種のバイオマスとは、途上国等で使用されている伝統的なバイオマスを指す。

表(4)-2 地域分類

コード	地域名	コード	地域名	コード	地域名
JPN	日本	XCS	中央アジア	XEWI	アイスランド、ノルウェー、スイス等
CHN	中国	XME	その他の中東	XEEI	ベラルーシ、クロアチア、ウクライナ
IND	インド	AUS	オーストラリア	XENI	その他ヨーロッパ
IDN	インドネシア	NZL	ニュージーランド	RUS	ロシア
KOR	韓国	XOC	その他のオセアニア	MEX	メキシコ
THA	タイ	CAN	カナダ	ARG	アルゼンチン
MYS	マレーシア	USA	アメリカ	BRA	ブラジル
VNM	ベトナム	XE15	西ヨーロッパのEU15か国	XLM	その他中南米
XSE	その他の東南アジア	XE10	東ヨーロッパのEU10か国	ZAF	南アフリカ
XSA	その他の南アジア	XE2	ブルガリア・ルーマニア	XAF	その他アフリカ
XEA	その他の東アジア	TUR	トルコ		

表(4)-3 エネルギー種

コード	名称	コード	名称	コード	名称	コード	名称
BM	バイオマス	OL	石油	LPG	LPG	EL	電力
CL	石炭	NG	天然ガス	HT	熱供給		

表(4)-4 エネルギーサービス種

サービス種	定義
暖房	室内を暖めること。
冷房	室内を冷やすこと。エアコンを使用した冷房のみとする。
給湯	お湯を沸かすこと。
厨房	調理。研究では、ガスコンロを利用した調理のみを対象とする。
照明	部屋を照らすこと。
その他動力	上に含まれないエネルギーサービスをすべて含む。テレビや冷蔵庫等の家電製品の動力。

## 1) 基準年（2010年）の情報

2010年のエネルギー種別のエネルギー消費量は、最新のEnergy balances<sup>1)</sup>の2010年のデータを32地域に集約した。また、地域別エネルギー種別エネルギーサービス種別エネルギー消費量の情報をできる限り収集し、地域別エネルギー種別エネルギーサービス種別エネルギー消費割合を作成した。この消費割合とEnergy balancesを集約したエネルギー消費量から2010年の地域別エネルギーサービス種別エネルギー消費量を作成した。

本研究では、エネルギー機器を41種類設定した。機器はサービス種、エネルギー種別にエネルギー強度により2種類設定している。エネルギー強度の小さい機器は先進国で利用されているものとし、エネルギー強度の大きい製品は発展途上国で利用されているものとした。

2010年のエネルギー機器の分担率については、各国のサービス別の分担率が得られる場合はそれを利用し得られない場合は、機器普及率のデータや社会・経済的状况を考慮し、近隣地域の値を利用して設定した。

日本のエネルギー強度に関する情報は、省エネルギーセンター<sup>2)</sup>から得られる。これは最新の販売機器に関するエネルギー強度（直接得られる情報はエネルギー効率）であるため、実際に利用されているエネルギー機器の平均エネルギー強度より小さいことが予想される。本研究では、日本では機器の平均的な寿命を考慮して2005年時点の販売機器のエネルギー強度を2010年に利用されている機器のエネルギー強度の平均値とした。日本の機器はエネルギー強度が小さいため、海外に関しては次のルールで機器のエネルギー強度を設定した。

### ・先進国の場合

先進国では、基本的に日本と同じエネルギー強度の機器を使用しているものとした。ただし、電気機器に関して日本よりも若干エネルギー強度が大きいことが報告されているため、電気機器

に関しては10%程度エネルギー強度が大きくなるように設定した。

・発展途上国の場合

発展途上国では、化石燃料系機器に関して日本よりエネルギー強度の大きいものが利用されていると考え、先進国が利用している機器よりもエネルギー強度が10%程度大きいと設定した。また、電気製品に関しては、エアコンに関しては30%程度大きく、その他サービスを供給する機器に関しては、逆に30%程度エネルギー強度を小さく設定した。その他需要は地域の発展レベルに応じて、照明から冷蔵庫やテレビ、その他の電気製品が導入されていく。そのため、その他サービスを供給する機器に関しては、照明だけのエネルギー強度はその他の雑多な電気機器の平均的なエネルギー強度よりも小さいものとし、上述のように設定した。

基準年のエネルギーサービス量は、地域別エネルギー種別エネルギーサービス種別エネルギー消費量とエネルギー機器の強度及び分担率の情報から計算した。

## 2) 社会変数とエネルギーサービス需要量の関係

エネルギーサービス潜在需要量は各社会変数との間に式(4)-3から式(4)-7に示す関係をもっているものとした。本研究では、日本の一人あたりサービス発現需要量を1とした時の、各地域における一人あたりサービス発現需要量を設定する。

暖房は、暖房面積、暖房度日、熱損失係数によって需要が決まることとした。

$$\bar{D}_r^{WM} = ARH_r \cdot HDD_r \cdot Q_r / (ARH_{JPN} \cdot HDD_{JPN} \cdot Q_{JPN}) \quad \text{式(4)-3}$$

冷房は、冷房面積、冷房度日、熱損失係数により決定され、潜在需要量は式(4)-4のように表わされる。

$$\bar{D}_r^{CL} = ARC_r \cdot CDD_r \cdot Q_r / (ARC_{JPN} \cdot CDD_{JPN} \cdot Q_{JPN}) \quad \text{式(4)-4}$$

式(4)-5は厨房需要と、調理強度と内食率との間の関係である。

$$D_r^{CK} = UCK_r \cdot REH_r / (UCK_{JPN} \cdot REH_{JPN}) \quad \text{式(4)-5}$$

給湯需要については、1人あたり給湯サービス需要量の間に式(4)-6を想定する。

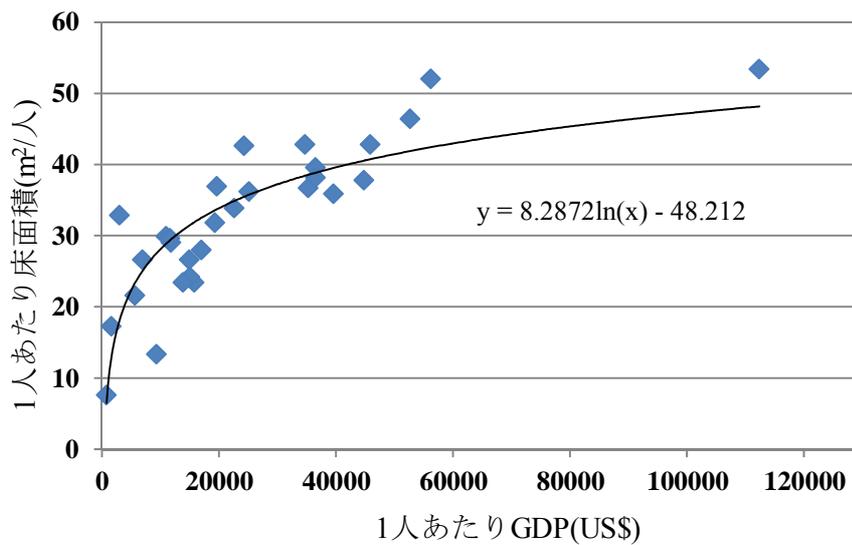
$$\bar{D}_r^{HW} = PHW_r / PHW_{JPN} \quad \text{式(4)-6}$$

照明需要は、床面積によって式(4)-7に示すように需要が決まることとした。

$$\bar{D}_r^{LT} = ARL_r / ARL_{JPN} \quad \text{式(4)-7}$$

その他需要には、テレビ、冷蔵庫、その他家電製品といった様々なサービスが含まれる。その他需要では、可処分所得の増加に伴い、今までに想定していない需要を生み出すために、潜在需要量と発現需要量を区別することは現実的ではない。そこで一人あたりGDPがその他需要を説明するとした(式(4)-8)。

$$D_r^{OT} = GDP_r / GDP_{JPN} \quad \text{式(4)-8}$$



図(4)-2 1人あたりGDPと床面積の関係

### 3) 社会変数の将来推計

#### a. 床面積

床面積は、冷房と暖房、照明のサービス需要の推計に用いる。将来の床面積については、過去の地域別の1人あたり床面積データ<sup>3)</sup>と1人あたりGDP<sup>4)</sup>との関係式に基づき設定した。

入手可能な地域別の最新の1人あたり床面積情報を収集し、その年の1人あたりGDPとの関係は式(4)-9に示した通りとなった。地域別の床面積とGDPの関係を図(4)-2に示す。

$$1人あたり床面積(m^2)=8.72872*\ln(1人あたりGDP(US\$))-48.212 \quad \text{式(4)-9}$$

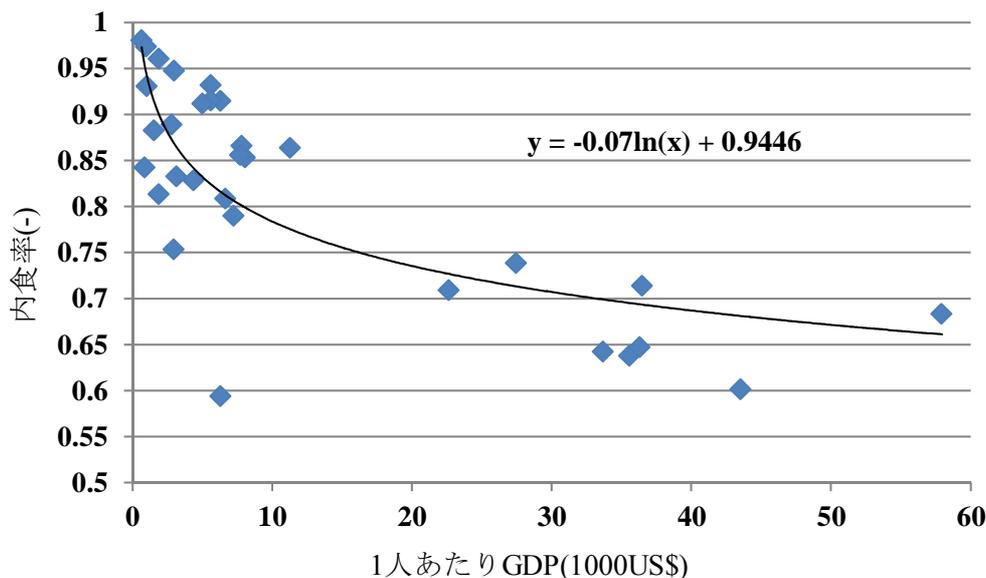
図(4)-1に示したように、1人あたりGDPの増加に伴い、1人あたり床面積も増加している。しかし、式(4)-9から得られる1人あたり床面積と実際1人あたり床面積にはかい離があるため、基準年においてこの差を補正し、1人あたりGDPの将来シナリオを用いて将来の床面積を設定した。

#### b. 内食率

内食率については、厨房サービスの推計に用いる。GMID<sup>5)</sup>の食料への消費支出金額から設定した2010年における地域別内食率（金額ベース）と1人あたりGDPの関係は式(4)-10に示す通りとなった。これらの関係を図(4)-3に示す。

$$内食率(-) = -0.07*\ln(1人あたりGDP(1000US\$))+0.9446 \quad \text{式(4)-10}$$

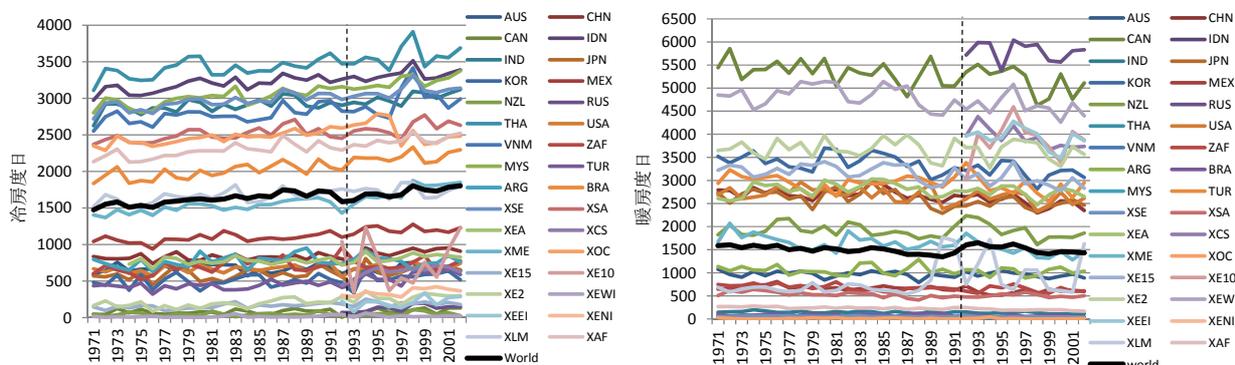
1人あたりGDPの増加に伴い、内食率が減少することが分かった。ただし、式(4)-10から得られる内食率と実際の内食率との間にはかい離があるため、基準年において、この差を補正し、1人あたりGDPの将来推計値を用いて将来の内食率を設定した。



図(4)-3 1人あたりGDPと内食率の関係

c. 冷暖房度日の設定

冷暖房度日は冷房と暖房サービス需要量に影響を与える。1971年から2002年までの地域別の冷暖房度日はMichell.T.D and P. D. Johnes<sup>6)</sup>に基づいて、人口によって重みづけし、地域別に集約して求めた結果を図(4)-4に示す。図(4)-4から年々冷房度日は増加傾向、暖房度日は減少傾向が見られた。これらの変化は、(1)地球温暖化による気温上昇の影響や(2)都市化等による人の居住分布が変化したことによる影響などの複数の原因が考えられる。しかし、それらの要因を十分に考慮して冷暖房度日の変化を式で記述するのは困難である。そこで本研究では、単純に地域別の冷暖房度日の経年変化について線形近似し、2050年までの冷暖房度日を設定した。



(注) 1991年より以前は、旧ソビエト連邦及びユーゴスラビアに関連する地域を世界全体 (world) に含まない。

図(4)-4 冷暖房度日 (左図：冷房度日、右図：暖房度日)

#### d. その他の変数

式(4)-3から式(4)-8に示したサービスを決定する変数のうち、aからcで説明していない調理強度、1人あたり給湯需要量、熱損失係数については、現時点では将来推計が可能になる十分な過去の情報が入手できなかったため、2010年の値から変化しないものとした。

#### e. 発現係数：エアコン普及率の設定

エネルギーサービス需要は、インフラ整備が不十分である等の理由により必ずしも全ての潜在需要が満たされるとは限らないことは、すでに説明した。潜在需要量と発現需要量との関係を示すのが発現係数であるが、発現係数が具体的にどのように解釈すべきかについては簡単な議論ではない。そこで、暫定的にエアコンの普及率が冷房サービスの発現に関わる重要なファクターであると考えた。普及率は、地域によりその普及速度、普及の到達レベルが異なる。そこで将来のエアコン普及率を考えるにあたり、普及の到達レベルと普及速度について次のように考えた。

まず普及の到達レベルは、

- ・ 冷暖房度日が1500以上である地域は、最大95%まで普及する
- ・ 冷暖房度日が600以上1500未満である地域は、最大75-80%まで普及する
- ・ 冷暖房度日が600未満である地域は、最大40%まで普及する

普及速度は、現在すでに普及の到達レベルが最大に達していると判断できる地域は、これ以上普及しないものとした。一方、現在普及中である地域は、近隣で先に同じような普及曲線を持つ地域を設定し、その地域と同じ普及曲線に従い、普及が進むものとした。

#### f. 将来のエネルギーサービス量推計

これまでの結果に基づき、2050年までの一人あたりおよび地域全体のエネルギーサービス量を推計した。将来推計に必要なGDP及び人口のシナリオはSSPs (Shared Socio-economic Pathways)<sup>7)</sup>を用いた。SSPsは5つのシナリオを持つ。SSP1は持続可能な世界、SSP2は緩和と適応に対して中程度の挑戦が必要な世界、SSP3は緩和と適応に対して多くの挑戦が必要な世界、SSP4は適応についてはあまり問題にならないが多くの緩和策が必要な世界、そしてSSP5は緩和についてはあまり問題にならず、適応について多くの問題がある世界を描いている。

#### g. 将来の技術シナリオの設定

将来のエネルギー機器の情報については、基本とする2つの考えに基づき設定した。まず、(1)全てのエネルギー機器のエネルギー強度が小さくなるものとした。また(2)基本的に電化が進む、すなわち電化機器の分担率が增大するものとした。2050年のエネルギーサービス種別の電気機器の分担率を設定し、2050年に向け線形で変化していくものとした。エネルギー機器のエネルギー強度のシナリオは、次の通りとする。

##### ・ 先進国のエネルギー機器

電気調理器具と電気給湯機については、2010年と比較して2050年のエネルギー強度が1.053になるものとした。エアコンについては冷房及び暖房で使用する場合にそれぞれ強度が0.111及び0.097になるものとした。また、その他の機器のエネルギー強度は2010年から変化しないものとした。

### ・途上国のエネルギー機器

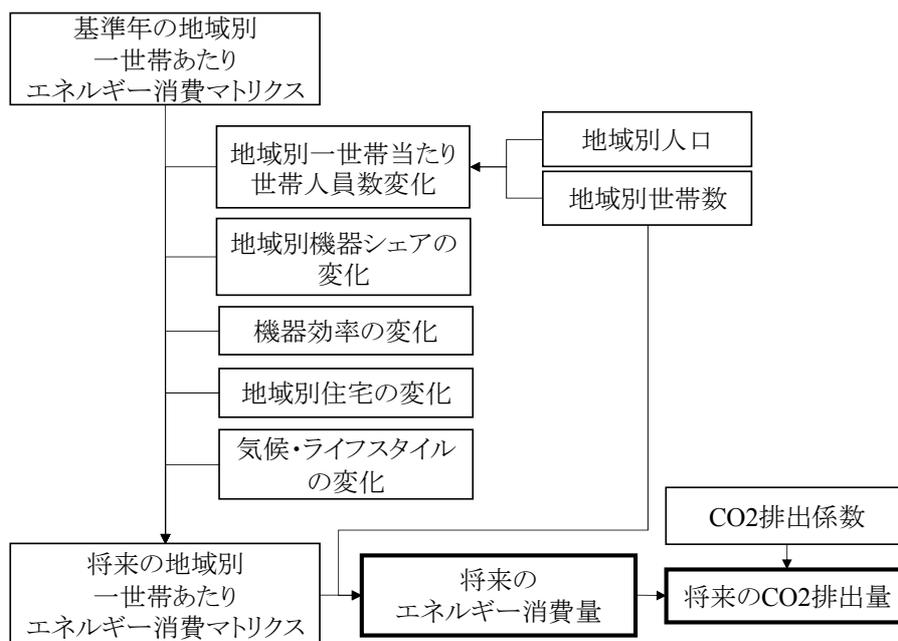
まず、中国について2050年に先進国のエネルギー強度の追いつくように線形で強度が改善されるものとした。そして1人あたりGDPが中国以上である地域の場合は、中国と同じ強度の機器を使用することとした。逆に中国よりも1人あたりGDPが低い地域については、中国の1人あたりGDPとエネルギー機器のエネルギー強度の関係に基づき、1人あたりGDPの将来シナリオを用いてエネルギー強度を設定した。

### h. エネルギー消費量の推計

上述のエネルギーサービス量と、将来のエネルギー機器の技術シナリオに基づき、2050年までの地域別エネルギー種別エネルギー消費量を推計した。

#### (2) 日本を対象にした家庭部門のエネルギー消費量及びCO<sub>2</sub>排出量推計

推計フローを図(4)-5に示す。まず、地域別の基準年のエネルギー消費状況を示すエネルギー消費マトリクスを作成する。それに対し人口・世帯数の変化、機器の効率及びシェアの変化、需要の変化に影響する住宅、気候、ライフスタイルの変化を考慮し、将来のエネルギー消費マトリクスを作成する。これに世帯数を乗じて将来のエネルギー消費量を推計する。またCO<sub>2</sub>排出係数のシナリオを用いて将来のCO<sub>2</sub>排出量を推計する。本研究では日本を10大地域×3都市階級の30地域に分割する。地域分類を表(4)-5、表(4)-6に示す。また、家庭部門で使用される主要なエネルギーとして電気、都市ガス、LPG、灯油の4種類を考え、主要な用途として暖房、冷房、給湯、厨房、照明、その他動力（以下、動力）の6種類を考える。熱供給やバイオマス利用等は極めてその量が少ないため、本研究では推計対象外とした。



図(4)-5 推計フロー

表(4)-5 大地域分類

地域	都道府県
北海道	北海道
東北	青森県、岩手県、宮城県、秋田県、山形県、福島県
関東	茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県
北陸	新潟県、富山県、石川県、福井県
東海	山梨県、長野県、岐阜県、静岡県、愛知県、三重県
近畿	滋賀県、京都府、大阪府、兵庫県、奈良県、和歌山県
中国	鳥取県、島根県、岡山県、広島県、山口県
四国	徳島県、香川県、愛媛県、高知県
九州	福岡県、佐賀県、長崎県、熊本県、大分県、宮崎県、鹿児島県
沖縄	沖縄県

表(4)-6 都市階級分類

分類	内容
地域分類1	政令指定都市及び都道府県庁所在市
地域分類2	人口5万人以上の市
地域分類3	人口5万人未満の市及び町村

	暖房	冷房	給湯	厨房	照明	動力	合計
電気							
都市ガス							
LPG							
灯油							
合計							

図(4)-6 エネルギー消費マトリクス (単位: MJ/世帯・年)

### 1) 基準年のエネルギー消費マトリクスの作成

基準年のエネルギー消費マトリクスの作成について説明する。まず10大地域別のエネルギー消費マトリクス(図(4)-6)を作成する。このうち、家庭部門では極めてエネルギー消費が小さい、あるいは定義上データが入り得ない部分を日本エネルギー経済研究所<sup>8)</sup>を参考に決定し、図中では濃灰色にした。

エネルギー種別エネルギー消費量及び用途別エネルギー消費量(図(4)-6の網掛け部)は、住環境計画研究所<sup>9)</sup>を用いた。その次に以下の手順でマトリクス内部を作成した。

**Step1:** 「冷房」「照明」「動力」のエネルギー消費量は、全て各サービスの電気消費量として計上する。「照明」と「動力」は住環境計画研究所<sup>9)</sup>ではわかれていない。地域別の詳細な情

表(4)-7 給湯と厨房におけるエネルギー消費割合

	給湯			厨房	
	電気	ガス	灯油	電気	ガス
北海道	0.10	0.33	0.57	0.20	0.80
東北	0.10	0.45	0.45	0.20	0.80
関東	0.05	0.90	0.05	0.10	0.90
北陸	0.13	0.67	0.20	0.25	0.75
東海	0.10	0.85	0.05	0.15	0.85
近畿	0.10	0.88	0.02	0.15	0.85
中国	0.20	0.65	0.15	0.25	0.75
四国	0.18	0.62	0.20	0.25	0.75
九州	0.18	0.70	0.12	0.22	0.78

報はないため、全地域一律に一世帯当たりの照明のエネルギー消費量を2234MJ/世帯・年とした。これは資源エネルギー庁省エネルギー対策課<sup>10)</sup>より設定した。

Step2: 「厨房」と「給湯」は、E-Stat<sup>11)</sup>を基に表(4)-7に示す割合でエネルギー種別に割り振る。また、都市ガスとLPGは、それぞれの総量の比で割り振る。

Step3: 「暖房」のエネルギー種別消費量は、エネルギー種別エネルギー消費量の総量から暖房以外の用途のエネルギー消費量を差し引く。

住環境計画研究所<sup>9)</sup>では、地域分類が9分類であり、九州と沖縄が大きな一つの地域（以後、九州・沖縄地域）になっている。そこで、九州と沖縄を分離するための方法を、式(4)-11から式(4)-15に示した。まず、九州・沖縄地域のエネルギー消費原単位は作成する各地域のエネルギー消費原単位と整合している必要があるため、式(4)-11を満たす必要がある。次にいくつかの情報源によりエネルギー種別、サービス種別エネルギー消費量、及びエネルギー消費原単位に関する参照値を入手する。式(4)-12から式(4)-14に示すように推計値と参照値との誤差を定義し、式(4)-15に示すこれらの誤差の二乗和を最小にするように、エネルギー消費マトリクスを決定した。参照値として九州と沖縄のエネルギー種別エネルギー消費量及び用途別エネルギー消費量はE-Stat<sup>12)</sup>、エネルギー消費マトリクスには住環境計画研究所<sup>10)</sup>の九州・沖縄地域のデータを用いた。

$$VM_{i,j} \cdot HH = \sum_r VM_{r,i,j} \cdot HH_r \quad \text{式(4)-11}$$

$$ERR1_{r,i} = VE_{r,i} - RE_{r,i} \quad \text{式(4)-12}$$

$$ERR2_{r,j} = VES_{r,j} - RES_{r,j} \quad \text{式(4)-13}$$

$$ERR3_{r,i,j} = VM_{i,j} - RM_{r,i,j} \quad \text{式(4)-14}$$

$$OBJ = ERR1_{r,i}^2 + ERR2_{r,j}^2 + ERR3_{r,i,j}^2 \quad \text{式(4)-15}$$

$VE_{r,i}$  : 地域 $r$ のエネルギー $i$ の消費量推計値

$RE_{r,i}$  : 地域 $r$ のエネルギー $i$ の消費量参照値

- $VES_{r,j}$  : 地域 $r$ の用途 $j$ 別のエネルギー消費量推計値  
 $RES_{r,j}$  : 地域 $r$ の用途 $j$ 別のエネルギー消費量参照値  
 $VM_{r,i,j}$  : 地域 $r$ のエネルギー種 $i$ 用途 $j$ のエネルギー消費量推計値  
 $RM_{r,i,j}$  : 地域 $r$ のエネルギー種 $i$ 用途 $j$ のエネルギー消費量参照値  
 $ERR1_{r,i} \sim ERR3_{r,i,j}$  : 推計値と参照値の差  
 $HH_r$  : 地域 $r$ の世帯数  
 $OBJ$  : 最小化する目的変数

次に、地域区別のマトリクスを作成した。手法は九州と沖縄を分離した方法と同様の手法を用いて、作成した10地域分類別のマトリクスに整合するように、それぞれ3つの都市階級別のマトリクスを作成する。エネルギー種別エネルギー消費量及び用途別エネルギー消費量の参照値はE-Stat<sup>11)</sup>、エネルギー消費マトリクスの参照値には作成した10地域分類別のマトリクスを用いた。

なお、このように作成されたマトリクス及び世帯数を用いて計算した日本全体のエネルギー消費量は日本のエネルギー消費量の統計値<sup>12)</sup>と整合しない。そこでエネルギー種別に2010年のエネルギー消費量と整合するよう補正した。

## 2) 将来のエネルギー消費マトリクスの作成

将来のエネルギー消費マトリクスを考えるために必要な要素を整理する。エネルギー消費量と機器に関する諸変数との関係は、エネルギーサービスという概念を用いて式(1)に示した。式(1)より将来のエネルギー消費に影響するのは、エネルギーサービス量の変化、機器の変化であることがわかる。そこで将来のマトリクスを作成するうえで検討したのは、世帯分布の変化、エネルギーサービス量の変化に影響を与える世帯人員数の変化と住宅の変化、気候の変化、ライフスタイルの変化、そして機器の変化の6点である。

### a. 世帯分布の変化

世帯の地理的な分布は今後も変化することが予想される。地理的な違いはエネルギー消費量の違いにも影響を与える。そこで本研究では松橋ら<sup>13)</sup>による2050年までの1キロメッシュの人口及び世帯数推計結果を本研究で用いた30地域分類に集約し、2050年までの人口と世帯分布を考慮した。

### b. 世帯人員数の変化

世帯人員数の変化は世帯のエネルギー消費量に影響する。そこで将来の地域分類別世帯人員数の変化に基づき、一世帯あたりのエネルギー消費量を補正した。まず地域別の人口及び世帯数から2050年までの世帯人員数の変化を算出する。世帯人数 $X$  (ただし $Y < X < Y+1$ 、 $Y$ は整数) と用途別エネルギー消費量の関係を式(4)-16に表す形で線形補完し、一世帯あたりのエネルギー消費量を補正した。世帯人数別エネルギー消費量はE-Stat<sup>11)</sup>を用いた。

$$EN_{es,X} = (Y+1-X) \cdot EN_{es,Y} + (X-Y) \cdot EN_{es,Y+1} \quad \text{式(4)-16}$$

$Y$  : E-Stat<sup>11)</sup>で示されている世帯人数別統計の世帯人数

表(4)-8 住宅の建て方に関するケース設定

ケース名	内容
住宅1	2010年の都道府県別世帯類型別建て方割合が2050年まで継続
住宅2	2008年から2013年の5年間に観察された世帯類型別建て方割合の変化率が2020年まで継続し、その後は2050年に変化率が0になるように遞減
住宅3	全ての世帯類型について0.5%/5年の変化率で戸建住宅の割合が減少

$X$  : 将来の世帯人員数

$EN_{es, X}$  :  $X$ 人世帯の用途 $es$ のエネルギー消費量

### c. 住宅の変化

住宅の建て方（戸建/集合）の違いは住宅内のエネルギー消費に影響する。世帯類型別の住宅の建て方割合は近年大きく変化している。このような変化は、人々の住宅選択の嗜好の変化と過去の人々の選択の帰結の組み合わせで起きたと考えられる。例えば、ほとんどの都道府県では単身世帯の戸建住宅割合が増加している。これは、単身者が戸建住宅を選択するようになったよりも、戸建住宅で夫婦のみで生活していた高齢者が相手の死亡により結果的に単身になるケースが増えていることが影響していると考えられる。一方夫婦と子世帯や都心部の夫婦のみ世帯は集合住宅の割合が増加している。これは近年の若・中年世代が戸建住宅よりも集合住宅を志向していることの表れかもしれない。このような変化の理由を明らかにするのは現時点で困難であるため理由を組み込んだ将来設定を示すことは困難である。しかし変化が大きいため無視することもできない。そこで本研究では表(4)-8に示す3つのケースを想定した。住宅2のケースは、近年見られた変化が今後も継続する仮定に基づき設定した。ただし、2008年から2013年の5年間に見られた変化の一部は非常に大きなものであり、単純にこの変化が2050年まで持続するとなると、一部に不整合（建て方割合が100%を超える）が生じる。そこでこれらの変化はここ10年続くものとして、その後2050年に向けて変化が線形で小さくなることとした。また本研究では、世帯を戸建住宅から集合住宅に誘導する場合について検討した。単純に全世帯類型について同じ変化率で戸建から集合住宅に誘導する住宅3についても検討した。次に、建て方別一世帯あたり床面積はここ15年ほど大きな変化がみられないため今後も一定であるものとした。都道府県別住宅の世帯類型別建て方割合及び都道府県別建て方別床面積はE-Stat<sup>14)</sup>を用いた。

以上の建て方の割合変化及び一世帯あたりの床面積に関する仮定により、一世帯あたりの住宅の床面積が変化する。この変化率と同率で冷暖房及び照明需要に影響するものとした。

### d. 機器の変化

本研究で取り扱う機器種はE-Stat<sup>11)</sup>で調査対象機器とし、その種類と基準年の効率一覧を表(4)-9に示す。基準年のストックされている機器の効率は、2005年に販売されていた製品の平均的な効率<sup>15), 16)</sup>を用いた。

将来の機器のストック効率は、次のように設定した。ガス・灯油機器については、近年10年程度機器効率の変化はほとんど見られないことから、今後変化しないものとした。電気機器は、機器によりエネルギー効率改善の速さが異なる。過去の機器効率の変化<sup>15), 17)</sup>及び今後の機器効率に

表(4)-9 基準年の機器の種類及び効率

機器種	エネルギー効率		機器種	エネルギー効率			
	基準年	5年変化率		基準年	5年変化率		
暖房	エアコン	5.5	1.03	給湯	旧式電気給湯器	1	1.01
	電気ストーブ等	1	1		エコキュート	3.8	1
	電気カーペット・こたつ	1	1		従来のガス給湯器	0.81	1
	電気蓄熱暖房器	0.9	1		エコウィル	0.855	1
	電気床暖房	4	1.01		エネファーム	0.86	1
	ガスストーブ類	0.825	1		灯油給湯器	0.87	1
	ガス温水床暖房	0.86	1	厨房	電磁調理器	0.79	1
	灯油ストーブ類	0.86	1		ガスコンロ	0.56	1
	灯油温水床暖房	0.9	1	照明	白熱球	1	1
	セントラル暖房システム	0.87	1		蛍光灯	2	1
冷房	エアコン	5	1.03		LPG	3	1.05
				その他	その他動力	1	1.03

表(4)-10 機器のシェア変化率

用途	地域	変化率(%/5年)	用途	地域	変化率(%/5年)	
暖房	北海道	灯油ストーブ類: -0.06	給湯	関東, 東海, 北陸, 近畿	従来のガス給湯器: -5	
	東北, 近畿1	灯油ストーブ類: -3		関東, 東海, 北陸, 近畿	灯油給湯器: -0.03	
	関東	灯油ストーブ類: -4		(北陸, 近畿: -0.05)		
	九州	灯油ストーブ類: -5		中国, 四国	エコキュート: 4.55	
	沖縄	灯油ストーブ類: -0.5		中国, 四国	従来のガス給湯器: -4	
	沖縄	電気ストーブ等: -0.5		中国, 四国	灯油給湯器: -0.5	
	北海道	エアコン: 0.05		九州1, 2, 3	エコキュート: 5.55, 5.05, 4.55	
	東北, 近畿1	エアコン: 2.99		九州1, 2, 3	従来のガス給湯器: -5, -4.5, -4	
	関東, 北陸, 東海,	エアコン: 3.99		九州	灯油給湯器: -0.5	
	近畿2,3, 中国, 四国			沖縄	エコキュート: 5	
	九州	エアコン: 4.99		沖縄	従来のガス給湯器: -4	
	沖縄	エアコン: 1		沖縄	灯油給湯器: -1	
	全地域	電気床暖房: 0.01		沖縄を除く全地域	旧式電気給湯器: -0.05	
	給湯	北海道, 東北		エコキュート: 1.15	厨房	全地域
北海道, 東北		従来のガス給湯器: -0.1	全地域	電磁コンロ: 0.1		
北海道, 東北		灯油給湯器: -1	照明	全地域		白熱球: -0.5
関東, 東海, 北陸, 近畿		エコキュート: 5.08		全地域		蛍光灯: -2
(北陸, 近畿: 5.1)				全地域		LED: 2.5

関する将来予測情報<sup>18)</sup>を参考にして、エネルギー効率改善率を設定した。

また機器の効率変化に加え、同じサービスを供給する機器のシェアが変化する。機器のシェアが変化しないケース、電化が進展ケースの2ケースを検討した。電化の進展するケース設定を表

表(4)-11 環境配慮型ライフスタイルによる需要変化

用途	需要変化
暖房	省エネ型ライフスタイルで、暖房需要が2050年に向けて10%削減。
冷房	省エネ型ライフスタイルで、冷房需要が2050年に向けて10%削減。
給湯	シャワーを好む人が増え給湯量が5年で2%ずつ削減。
その他	省エネ型ライフスタイルで、その他動力需要が2050年に向けて10%削減。

(4)-10に示した。暖房については灯油ストーブ類からエアコン、電気床暖房、給湯ではガスあるいは灯油給湯器からエコキュート、厨房についてもガス調理器から電磁調理器、照明はより高効率のLEDに遷移するよう設定しており、遷移率の違いは地域の普及率の違いによって設定した。

#### e. 気候の変化

気温の変化は、冷暖房需要に大きな影響を与える重要な要素である。将来は温暖化の進展による気温の上昇が推計されている。一方このような結果の不確実性についても指摘されている。そこで、原則単純に気温上昇により、暖房及び冷房需要がそれぞれ2050年に10%減少、増加する場合について推計したが、必要に応じ気候変動の影響がない場合も検討した。

#### f. ライフスタイルの変化

暮らし方の違いによりエネルギーサービス量に変化する可能性がある。そこで、2010年からサービスレベルが変化しないケース(FIX)、環境配慮型ライフスタイルの選択により需要が削減されるケース(LCS)の2種類を検討した。表(4)-11に環境配慮型ライフスタイルの内容を示す。

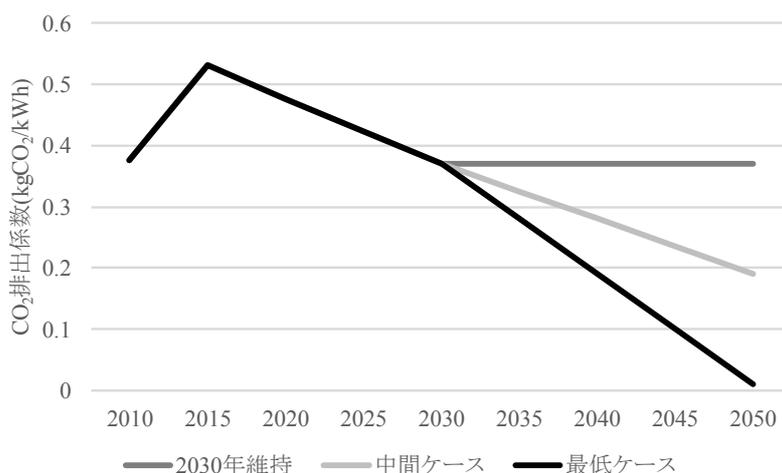
### 3) シナリオ

2) bからfで説明した将来の変化のうち、世帯分布の変化及び世帯人員数の変化、気温の変化は原則全てのシナリオに共通する変化とし、残りの変化の組み合わせにより、5種類のシナリオを考えた。表(4)-12にシナリオと変化の組み合わせを示す。

CO<sub>2</sub>排出量の推計結果は、排出係数によって大きく変化する。本研究では、灯油、ガスに関する排出係数は変化せず、電気については、2030年は電気事業連合会の目標<sup>19)</sup>である0.37kgCO<sub>2</sub>/kWhに向けて線形で減少し、2030年以降2050年に向けては3つのケース(図(4)-7)を検討した。一つは2030年レベルを維持するケース、もう一つは2050年に増井<sup>20)</sup>の代表的なケースである0.011kgCO<sub>2</sub>/kWhを達成するケース、もう一つはこの2つの中間ケースとした。

表(4)-12 シナリオ一覧

	FIX	BaU	LCS	LCS2	LCS3
住宅シナリオ	住宅1	住宅1	住宅1	住宅2	住宅3
機器効率・シェア	FIX	○	○	○	○
ライフスタイル変化	FIX	FIX	LCS	LCS	LCS



図(4)-7 電気の排出係数シナリオ

これらの設定を基にエネルギー消費量及びCO<sub>2</sub>排出量を推計したところ2015年の結果について、観測値よりも大きい結果となった。これについてはいくつかの理由が考えられる。1つは、東日本大震災後の電力の需給が逼迫したことに対応するために家庭部門において省エネ型ライフスタイルが定着した可能性があること、さらに、2000年から2010年頃に進んだ販売される主要家電機器の劇的な効率改善（例えば、冷蔵庫であれば電気消費量が1/3程度になった）が、家庭部門にストックされる機器の効率改善につながったこと、さらには手法や設定上の問題の可能性もありうる。本研究では、最初に挙げた2つを理由に対応するため以下の2つの設定を行った。1つは2000年から2015年にかけて全てのエネルギーサービスについて14%の需要削減があり、それが今後も定着するものと設定した。さらに、2010年から2015年にかけてその他動力の機器のエネルギー効率が10%改善するものとした。エネルギー効率改善についてはその他動力を構成する機器のうち、主要な機器である冷蔵庫とテレビのエネルギーシェア及びエネルギー効率の改善率から設定した。エネルギーサービス需要の改善については2015年の温室効果ガス排出量にあうように設定した。

#### 4. 結果及び考察

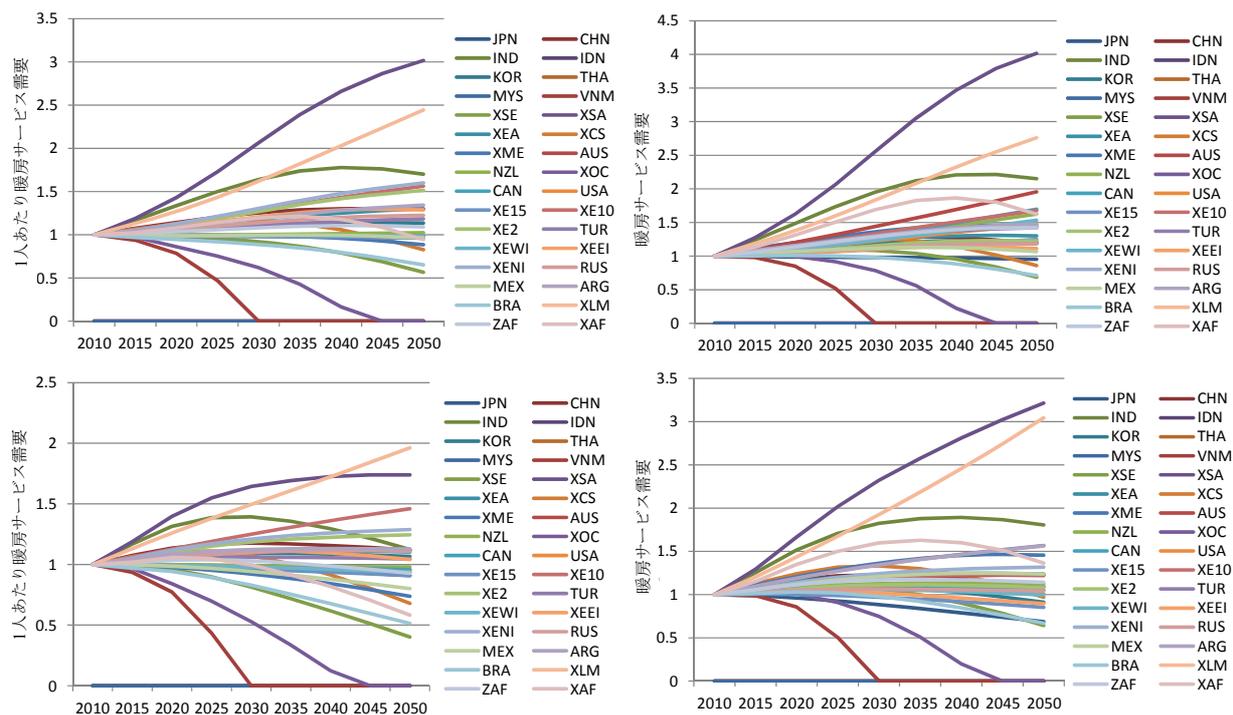
##### (1) 世界を対象にした家庭部門のエネルギー消費量推計の結果

###### 1) サービス需要量の将来推計結果

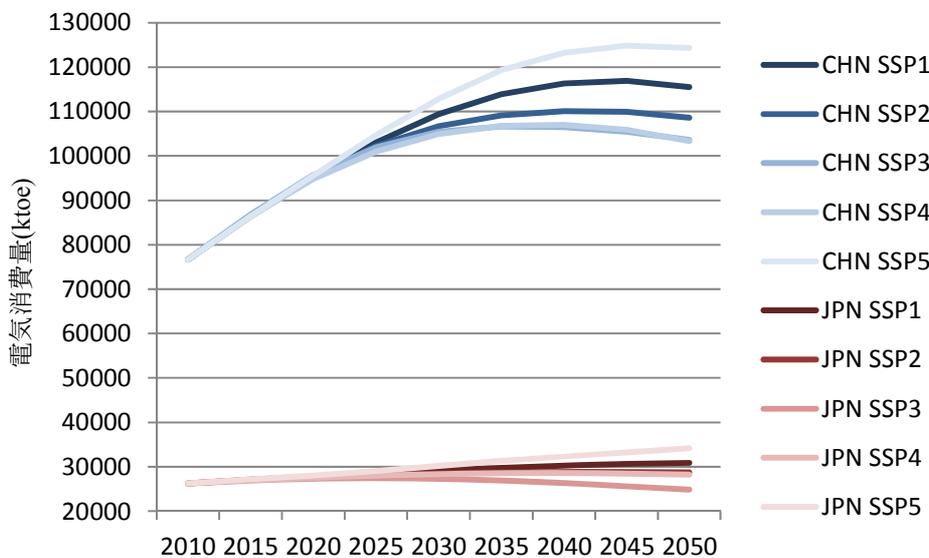
将来のエネルギーサービス需要量の推計結果を図(4)-8に示す。SSPシナリオ別に1人あたりGDPの違いにより、シナリオごとにエネルギーサービス需要量が大きく異なる結果となった。

暖房、冷房、照明、その他サービスについては、SSP5でもっともエネルギーサービス量の伸びが大きくなった。一方、SSP5では厨房サービスについてのエネルギーサービス量の伸びは最も小さくなった。日本では、2010年と比較して2050年の暖房のエネルギーサービス量は0.95倍となった。一方中国では、1.19倍となった。アジアではインフラの整備が進み2050年までの40年程度の間に着しい経済成長により様々なエネルギーサービスが発現する。一方、アフリカにおいては、さらに遅れて経済成長が進むことにより、アジア程のエネルギーサービスの発現は見られない。

SSP3ではあまり経済成長がないため、暖房、冷房、照明、その他サービスのエネルギーサービス量の伸びは、それ程大きくない。その場合においても、南アジア（XSA）では暖房サービスは



図(4)-8 エネルギーサービス需要の推計結果（上段：SSP5、下段：SSP3）



図(4)-9 日本と中国の電気消費量

2010年と比較して2050年に3.2倍となることがわかった。いくつかの地域では暖房需要が0になっているが、これは気温の上昇により暖房度日が0になることによるものである。

## 2) エネルギー消費量の将来推計結果

アジア地域に着目したエネルギー消費量の将来推計結果を図(4)-9と表(4)-12に示す。エネルギー機器については、電化の進展とエネルギー効率の改善のシナリオを設定したため、サービス需要

表(4)-12 SSP3及びSSP5における電気消費量（単位：ktoe）

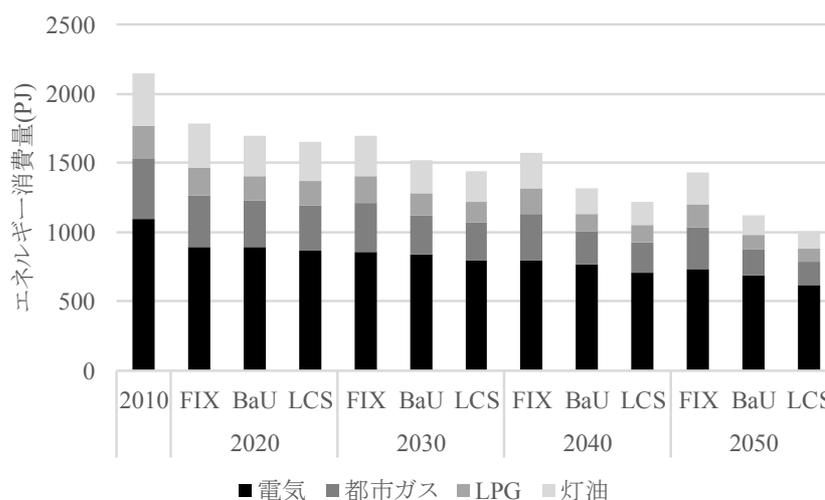
		2010		2030		2050		2030		2050	
CHN	BM	201362	SSP5	139542	57337	SSP3	140563	58146			
CHN	OTH	95644	SSP5	77378	55564	SSP3	79527	59296			
CHN	ELY	76688	SSP5	112875	124319	SSP3	105484	103627			
CHN	HET	28081	SSP5	27704	20554	SSP3	27344	20112			
IDN	BM	44694	SSP5	27254	13734	SSP3	29345	16623			
IDN	OTH	5998	SSP5	10807	13744	SSP3	11523	16420			
IDN	ELY	5169	SSP5	18331	41527	SSP3	19481	43607			
IDN	HET	0	SSP5	0	0	SSP3	0	0			
IND	BM	133256	SSP5	109944	65469	SSP3	121170	84539			
IND	OTH	32749	SSP5	61719	73744	SSP3	65640	91325			
IND	ELY	16135	SSP5	83961	193388	SSP3	74865	212789			
IND	HET	248	SSP5	242	202	SSP3	267	257			
JPN	BM	23	SSP5	24	24	SSP3	21	18			
JPN	OTH	21158	SSP5	14521	8320	SSP3	13291	6348			
JPN	ELY	26253	SSP5	30203	34171	SSP3	27299	24836			
JPN	HET	425	SSP5	527	617	SSP3	484	476			
KOR	BM	34	SSP5	19	0	SSP3	17	0			
KOR	OTH	12722	SSP5	12350	10498	SSP3	11373	8073			
KOR	ELY	5271	SSP5	10546	15918	SSP3	9152	10313			
KOR	HET	1779	SSP5	1671	1243	SSP3	1525	937			
MYS	BM	1699	SSP5	1302	811	SSP3	1415	1008			
MYS	OTH	679	SSP5	743	809	SSP3	806	1008			
MYS	ELY	1937	SSP5	3344	5263	SSP3	2946	4186			
MYS	HET	0	SSP5	0	0	SSP3	0	0			
THA	BM	6752	SSP5	4666	2634	SSP3	4834	2939			
THA	OTH	1607	SSP5	1744	1699	SSP3	1803	1886			
THA	ELY	2894	SSP5	6010	10420	SSP3	5229	8024			
THA	HET	0	SSP5	0	0	SSP3	0	0			

量の伸び程エネルギー消費量は増加していない。最もエネルギー消費量が大きくなるのはSSP5のケースであり、日本では、2010年と比較して2050年の電力消費量が1.3倍、中国では1.62倍となった。特にアジア等の発展途上国では、バイオマスから石炭や石油系燃料、電力へとエネルギーシフトが起きているが、例えば、中国であれば化石燃料の消費量は0.58倍になることが分かった。

シナリオ別に比較して、SSP3のケースでエネルギー消費量の伸びがもっとも小さくなった。この場合、日本では、2010年と比較して2050年の電力消費量が0.95倍、中国では1.35倍となった。

地域別の結果をみてみると、アジアではエネルギー消費量の増加が著しい。インド、マレーシアでは、SSP5ケースにおいて、それぞれ2050年に2010年と比較して11.9倍、2.7倍の電力が消費される。これらの伸びは、人口増加と経済成長によるものである。

アジアの途上国では1.35倍（SSP3における中国）から13.2倍（SSP3におけるインド）程度のエネルギー消費量の増加が予想され、エネルギー消費量の増加は、気候変動問題において非常に重要



図(4)-10 エネルギー消費量

な意味を持つことが予想される。現時点では、経済成長率と各種社会経済変数の間に非常に単純な関係式を設定し推計を行ったが、(1)現時点では考慮できなかった社会経済変数の将来シナリオの作成や(2)社会経済変数の将来シナリオを設定する際に経済成長率以外の関係を考慮すること、さらに(3)需要の発現がどのようなメカニズムで起きるのか、については今後も検討を続け、サービス需要量推計をより精緻に行うことが重要である。

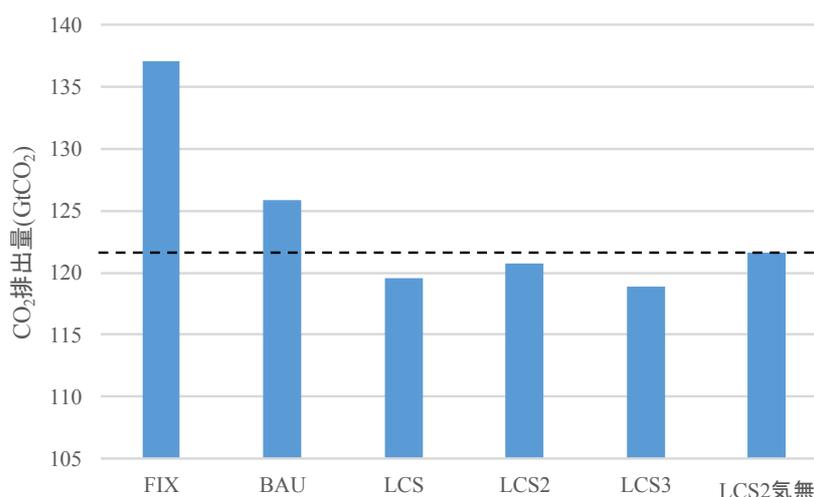
## (2) 日本を対象にした家庭部門のエネルギー消費量及びCO<sub>2</sub>排出量推計

### 1) エネルギー消費量推計結果

FIXケース、BaUケース及びLCSケースの2050年までのエネルギー消費量の推移を図(4)-10に示す。FIXケースとBaUを比較すると、特に2030年以降、機器効率及びシェアの変化により、灯油やガス機器の使用が減りエネルギー消費量が大きく削減できることがわかる。また、BaUとLCSを比較すると、ライフスタイルの変化により、エネルギー種別に2030年で約5%、2050年で約10%のエネルギー消費量が削減できることが分かった。電気についてもエネルギー消費量は削減するものの、2050年の電気消費量はFIX、BaU、LCSの各ケースにおいて2010年比で67%、62%、56%となった。

### 2) 2030年のCO<sub>2</sub>排出量

2030年のCO<sub>2</sub>排出量の結果を図(4)-11に示す。FIX、BaU、LCSの各ケースのCO<sub>2</sub>排出量は、それぞれ137、126、120GtCO<sub>2</sub>であり、削減目標の基準年(2013年)の排出量である201GtCO<sub>2</sub>と比較すると削減率はそれぞれ32%、37%、41%となった。すなわち、削減目標である122GtCO<sub>2</sub>(図(4)-11中の点線)を達成するためには、本研究で設定した機器効率及びシェアの変化だけでは不十分であり、エネルギーサービスそのものを削減するようなライフスタイルの変化が必要であることが明らかとなった。またLCS2、LCS3を比較すると、それぞれCO<sub>2</sub>排出量は121、119GtCO<sub>2</sub>であり、基準年排出量からの削減率はそれぞれ40%と41%となった。住宅の戸建/集合の選択により、CO<sub>2</sub>排出量に1%の影響があることも分かった。本研究では単純に床面積の違いのみを考慮したが、例えばエネルギー多消費型の地域からそうでない地域への移住なども考えると、さらに大きな効果



図(4)-11 2030年のCO<sub>2</sub>排出量

が得られる可能性がある。また気温上昇の影響を考慮しない場合で住宅2ケース（LCS2気無）の場合、環境配慮型ライフスタイルになったとしてもCO<sub>2</sub>排出量が122GtCO<sub>2</sub>であった。

### 3) 2030年の削減目標達成可能性の考察

4(2)で示した結果は電気の排出係数について0.37kgCO<sub>2</sub>/kWhが達成された場合である。すなわちLCSシナリオの場合でも、削減目標を達成するために必要となる電気の排出係数は、0.381kgCO<sub>2</sub>/kWhとなり、目標の達成可能性は十分にあるものの、家庭自体の努力と電気業界の努力なしには達成しえないものであることがわかる。家庭部門にできることは、高効率機器への買い替えがこれまでと同様のスピードで進むこと、また、省エネ型ライフスタイルがますます浸透することが必要である。

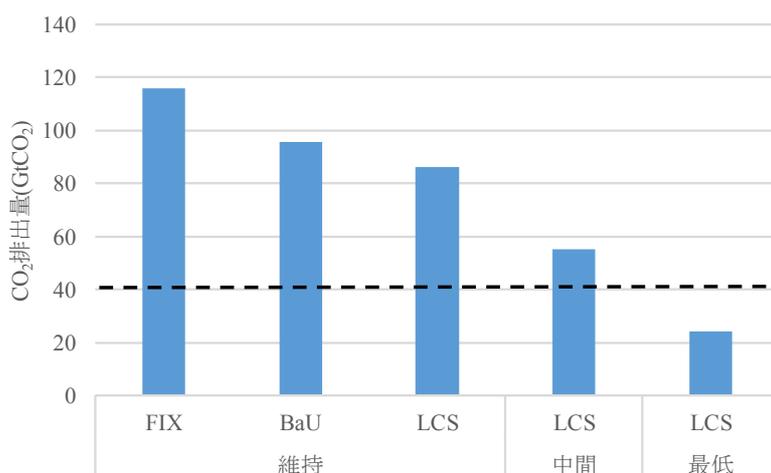
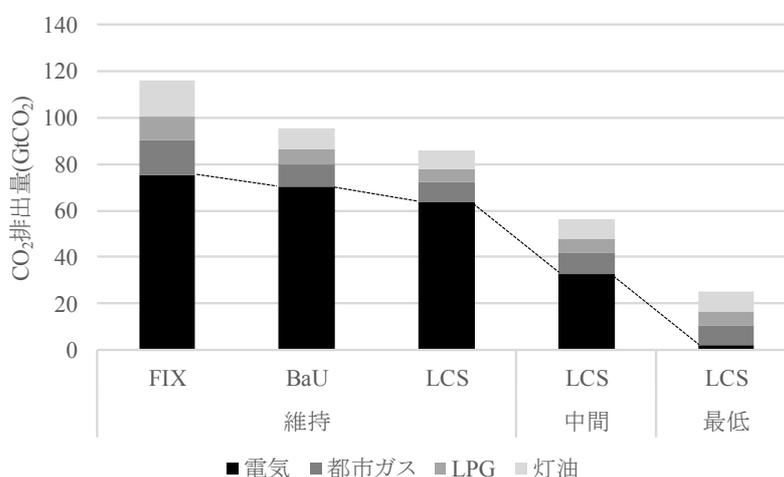
### 4) 2050年CO<sub>2</sub>排出量

2050年のCO<sub>2</sub>排出量の結果を図(4)-12に示す。温室効果ガス削減目標は明確に決まっていないが、仮に2013年比で80%削減を2050年の目標とし、図(4)-12中に点線で示した。LCSで電気の排出係数の維持ケース、中間ケース、最低ケースの場合のCO<sub>2</sub>排出量は、それぞれ86、55、24GtCO<sub>2</sub>であり、2013年比の排出量は43%、27%、12%となった。

### 5) 2050年の削減目標達成の可能性の考察

図(4)-12から明らかなように削減目標を達成したのはLCSで電気の排出係数を最低ケースとした場合だけであり、この時2013年比で約88%削減することが可能であった。LCSケースで80%削減をちょうど達成するようなCO<sub>2</sub>排出係数は0.104kgCO<sub>2</sub>/kWhであり現在よりも大きく低減させることが必要であることがわかる。

次に、2050年のCO<sub>2</sub>排出量がどのエネルギーに由来するものかを示したものが図(4)-13である。家庭部門においては、暖房、給湯、調理などにおいて、ガスや灯油を多く利用しており、このような生活スタイルが続いた場合を示したFIXシナリオの結果からも明らかなように、電気以外のエ

図(4)-12 2050年のCO<sub>2</sub>排出量図(4)-13 2050年のエネルギー種別CO<sub>2</sub>排出量

エネルギーによるCO<sub>2</sub>排出量がそれなりの量を占めている。大幅削減を達成するには、これらのエネルギーから電気に遷移させ、かつ電気の排出係数を大幅に削減することが重要であることは明らかである。

2050年に向けて本研究で設定した以上の技術革新、あるいは高効率な機器への技術遷移が起きる可能性はありうる。そのような場合は、電気の排出係数が0.104 kgCO<sub>2</sub>/kWhよりも高くても削減目標が達成する可能性がある。しかし、過去15年ほどの間に家電製品におけるエネルギー効率が劇的に改善したものの、近年は改善率が低くなっていることもあり、現時点では過剰な期待はすべきではない。

また、本研究では大きく2つの点について十分な検討が至っていない。1つは、家電製品の大型化や新規家電製品の登場による需要の増加である。家庭部門のエネルギー消費量が長らく増加を続けた要因の一つが家電製品の大型化や新規家電製品と登場によるエネルギーサービスの増加であることは間違いない。これらの変化は予想や設定が困難であること、部屋の床面積の増加がほとんど見られないこと等により、機器の大型化にも限界があると考え、本研究では現在以上には

ならないものとした。一方、近年温水便座トイレの普及などからも明らかなように、空間的な制約に関係なくエネルギーサービスが増加することもありうる。このようなエネルギーサービスの増加があると、結果で示した以上に削減が困難になる。

もう1つは、高齢化に伴う機器更新頻度の低下による影響である。少なくとも現在は高齢者ほど機器の買い替え頻度が低いことが明らかになっている<sup>12)</sup>。高効率の機器が開発されても、家庭に導入されなければストックベースでのエネルギー効率の改善が進まない。性能が良いことで故障率が下がり、それに加えて機器更新意欲が低下してしまうと販売ベースでの機器の効率改善よりも遅いスピードでしか実際の機器効率の改善が進まないことが懸念される。

機器の更新に関連して、もう1つ注意すべき点がある。多くの地域では適切な買い替え促進策等により電化の進展が可能かもしれないが、冬季の降雪のある北海道、東北、北陸等では、室内を急速かつ直接的にすぐ温めることから、部屋全単体の暖房、給湯を灯油でまかなうような大きな灯油タンクの付いた住宅が販売されている。このように家庭のエネルギーサービスを供給する機器が住宅と一体化した設備である場合、その更新速度は一般的な機器よりもはるかに遅くなる可能性があり、電化があまり進展しない可能性がある。これはCO<sub>2</sub>排出量の大幅削減を考えるうえでは非常に大きな問題になりうる。特に住宅そのものは一度建設されると30から40年程度は使用されることが多く、2050年という先の目標達成に向け、今すぐにもでも検討を進めるべき課題の一つといえる。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究では、これまでCO<sub>2</sub>排出量の削減が困難であった家庭部門について、家庭部門のエネルギー消費に関連する多角的な分析を行い、2030年あるいは2050年の削減目標の達成に必要な事項を明らかにした。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

温室効果ガスの削減に関して家庭のライフスタイルの変化による影響を評価する手法については、日本のみならず国際的にも関心が高まっている。本研究での手法及び成果は今後の国際的な議論への貢献の可能性もある。また、国内については、家庭部門における温室効果ガス削減に向けて実効性の高い環境配慮型ライフスタイルへスムーズに移行するよう国民への適切な呼びかけが可能になった。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

**(1) 誌上発表****<論文(査読あり)>**

- 1) 金森有子・有賀敏則・松橋啓介: 都市計画論文集, 50, 3, 1017-1024 (2016), 空き家率の要因分析と将来推計
- 2) 石河正寛・松橋啓介・有賀敏典・金森有子・栗島英明: 都市計画論文集, 51(3), 833-838 (2016), 空家の地域内分布に関する現況および将来推計一世帯数と住宅数の差分に着目して

**<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)>**

特に記載すべき事項はない。

**(2) 口頭発表(学会等)**

- 1) 金森有子・有賀敏典・松橋啓介: 環境科学会2015年会 (2015)  
「高齢期の住まい方に着目した高齢世帯のエネルギー消費量推計について」
- 2) 金森有子: 環境科学会2015年会 (2015)  
「家庭からの環境負荷のモデル推計と持続可能なライフスタイルに関する研究」
- 3) Kanamori Y.: 8th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting(2015)  
“Estimation of energy service demand and energy consumption in residential sector by 2050”.
- 4) Kanamori Y.: Expert workshop towards further collaboration between Japanese research community and IIASA(2017)  
“Research on Future Scenario for Sustainability Society -Focusing on household sector-“

**(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) 消費者大学講座「家庭における温暖化対策」(主催: 消費科学センター、2017年2月1日、消費科学センター会議室、観客約20名)にて講演

**(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) IEA(International Energy Agency): <http://www.ica.org/statistics/topics/energybalances/>, 2015年7月1日アクセス。“Energy Balances 2014”
- 2) 省エネルギーセンター: <http://seihinjyoho.go.jp/>, 2015年7月1日アクセス。“省エネ性能カタログ”
- 3) 例えば、Britannica : Encyclopaedia Britannca, 2000. “Britannica Book of the Year 2000”
- 4) World Bank : <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD>, 2015年7月1日アクセス。“GDP per capita”
- 5) Euromonitor International : 2010年ライセンス購入時にアクセスしたデータ。“Global Market Information Database (GMID)”
- 6) Michell T. D. and Johnes P. D : International journal of climatology. 25, 6, 693-712 (2005) “An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids”
- 7) O’Neill B. C., Kriegler E, Riahi K, Ebi K. L., Hallegatte S, Carter T. R., Mathur R and van Vuuren D. P: Cimate Change, 122, 387-400 (2014) “A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socio economic pathways”
- 8) 日本エネルギー経済研究所 : (財) 省エネルギーセンター (2015) , 「エネルギー・経済統計要覧」
- 9) 住環境計画研究所 : 省エネルギーセンター (2013) , 「2014家庭用エネルギーハンドブック」
- 10) 資源エネルギー庁省エネルギー対策課: 総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会(第17回) 参考資料1, pp.20, [http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004310/017\\_s01\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004310/017_s01_00.pdf), 2017年3月1日アクセス. , 「トップランナー基準の現状等について」
- 11) E-Stat :  
[https://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020101.do?\\_toGL08020101\\_&tstatCode=000001084775&requestSender=search](https://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020101.do?_toGL08020101_&tstatCode=000001084775&requestSender=search), 2017年3月1日アクセス., 「家庭からの二酸化炭素排出量の推計に係る実態調査全国試験調査」
- 12) 資源エネルギー庁 : [http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/results.html](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html), 2017年3月1日アクセス. 「総合エネルギー統計」
- 13) 松橋啓介, 有賀敏典 : 環境省環境研究総合推進費2-14-4(2)の成果 (2016) , 「2060年までの人口・世帯数推計」
- 14) E-Stat: <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/NewList.do?tid=000001063455>, 2017年3月1日アクセス. 「平成20年及び25年住宅・土地統計調査」
- 15) 省エネルギーセンター : 以前オンライン掲載時に印刷したもの (2005) , 「省エネ性能カタログ2005年冬」
- 16) 省エネルギーセンター : 以前オンライン掲載時に印刷したもの (2005) , 「ガス・石油機器の省エネ性能カタログ」
- 17) 資源エネルギー庁 : 例えば  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saving/general/more/pdf/summer2015.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/more/pdf/summer2015.pdf), 2016年3月1日アクセス. 「省エネ性能カタログ 各年夏版, 冬版」
- 18) AIM : [http://www-iam.nies.go.jp/aim/projects\\_activities/prov/2011\\_committee/ref2\\_02\\_rev.pdf](http://www-iam.nies.go.jp/aim/projects_activities/prov/2011_committee/ref2_02_rev.pdf),

2017年3月1日アクセス。「対策導入量等の根拠資料（2012年9月12日改訂版）」

19) 電気事業連合会：[https://www.fepec.](https://www.fepec.or.jp/news/__icsFiles/afieldfile/2015/07/17/20150717_CO2.pdf)

[or.jp/news/\\_\\_icsFiles/afieldfile/2015/07/17/20150717\\_CO2.pdf](https://www.fepec.or.jp/news/__icsFiles/afieldfile/2015/07/17/20150717_CO2.pdf), 2017年3月1日アクセス。「電気事業における低炭素社会実行計画」の策定について」

20) 増井利彦：[http://www.canon-igs.org/event/report/report\\_150723/pdf/20150723\\_masui.pdf](http://www.canon-igs.org/event/report/report_150723/pdf/20150723_masui.pdf), 2017年3月1日アクセス。「日本における2050年の温室効果ガス排出量を80%削減する経路の検討-DDPPにおける日本の分析結果から-」

## (5) 社会におけるエネルギー集約素材の蓄積からみた将来シナリオの検討

(平成26年～平成27年10月)

京都大学工学研究科都市環境工学専攻

河瀬 玲奈

(平成27年10月～平成28年度)

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

河瀬 玲奈

平成26～28年度累計予算額：10,934千円（うち平成28年度：1,335千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

低炭素社会の構築において、エネルギー集約素材である鉄鋼生産量の削減は必須の課題である。そこで、鉄鋼を含む財が供給するサービスの需要量からそれを提供するために必要な財ストック、および、素材生産にかかわる二酸化炭素排出量までを推計するマテリアルストック・フローモデルを構築し、鉄鋼が社会にどの程度蓄積し、再利用可能かを分析し、2050年までの日本における鉄鋼生産の必要量について低炭素社会実現の観点から定量的に評価した。

その結果、世界の鉄鋼需要量はなりゆきケースでは2050年に2005年比2.2倍に増加するが、対策最大導入ケースでは現状からほぼ横ばいとなり17.7億トンに留まった。一人あたりストック量で見ると、世界では6.0トン/人になり、2005年での先進諸国の一人あたりストック量の範囲の下限程度の値となった。対策最大導入ケースでは4.7トン/人であり、求められるサービス需要量を78%の鉄鋼ストック量で供給可能となることが示された。

日本の鉄鋼需要量は2020～2025年にピークを迎えたのち減少し、2035年以降は4000～5000万トンの範囲となることが示された。一人あたりストック量は12.9～15.1トン/人であった。鉄鋼生産量は、シナリオにより大きな幅を持ち、4,327万トン～1.49億トンとなった。

また、世界全体での鉄鋼部門からのCO<sub>2</sub>排出量は、スクラップの回収率の向上を見込むことで、最大32%の削減が可能となった。ただし、スクラップ由来の鉄鋼の質を考慮した需要側での制約を加味するとこの効果は6%にまで縮小してしまう。電炉鋼の質の改善が大きな課題であることが示された。

### [キーワード]

低炭素社会、脱物質化社会、鉄鋼需要量、鉄鋼ストック量、マテリアルストック・フローモデル

### 1. はじめに

産業部門は地球環境への負荷が大きく、例えば世界におけるエネルギー関連のCO<sub>2</sub>排出量は、全体の約40%にもなる<sup>1)</sup>。中でも鉄鋼産業はCO<sub>2</sub>排出量が大きく、全産業から排出されるCO<sub>2</sub>のうち、29%が鉄鋼部門由来である<sup>2)</sup>。低炭素社会の構築において、エネルギー集約素材である鉄鋼の生産量推計は必須の課題である。日本においては、例えば長期エネルギー需給見通し<sup>3)</sup>の検討や2050年に向けた2013年以降の対策・施策に関する報告書<sup>4)</sup>において、鉄鋼生産量はエネルギー需要量や

CO<sub>2</sub>排出量を決定する重要な要素として位置づけられている。世界においても同様であり、鉄鋼需要の増加が見込まれているが、その一方で温室効果ガス削減が求められている状況下において、どの地域でどれだけの生産を行うかは、重要な定量的情報である。

鉄鋼は社会に投入されたのち、社会資本や生産資本などの様々な形で社会に蓄積され、我々はこれらの財を利用することで財が供給するサービスを楽しんでいる。近年では、中国やインドなどの発展途上国の急激な経済成長と都市化の進展により、これらの財が供給するサービスに対する需要量が増加しており、財の生産に投入される鉄鋼の需要量は急激に伸びてきた。発展途上国は依然として成長段階にあり、今後も鉄鋼の需要量が増加していくと考えられる。一方で、先進諸国については、ある程度、物的に飽和しており、その維持に関する需要が主な鉄鋼需要の要因となっている。

世界合計でみると、需要量＝生産量の関係が成り立つが、各地域においては、需給差は大きく異なる。鉄鋼は貿易財であり、鉄鋼を投入し生産される財もまた貿易財であるものが多い。ゆえに、鉄鋼生産量は国内需要のみならず、世界の鉄鋼および製品（財）の生産分配に大きな影響を受ける。したがって、鉄鋼生産量を推計する際には、世界各地域の地域内需要とともに、鉄鋼や財の貿易を考慮する必要がある。

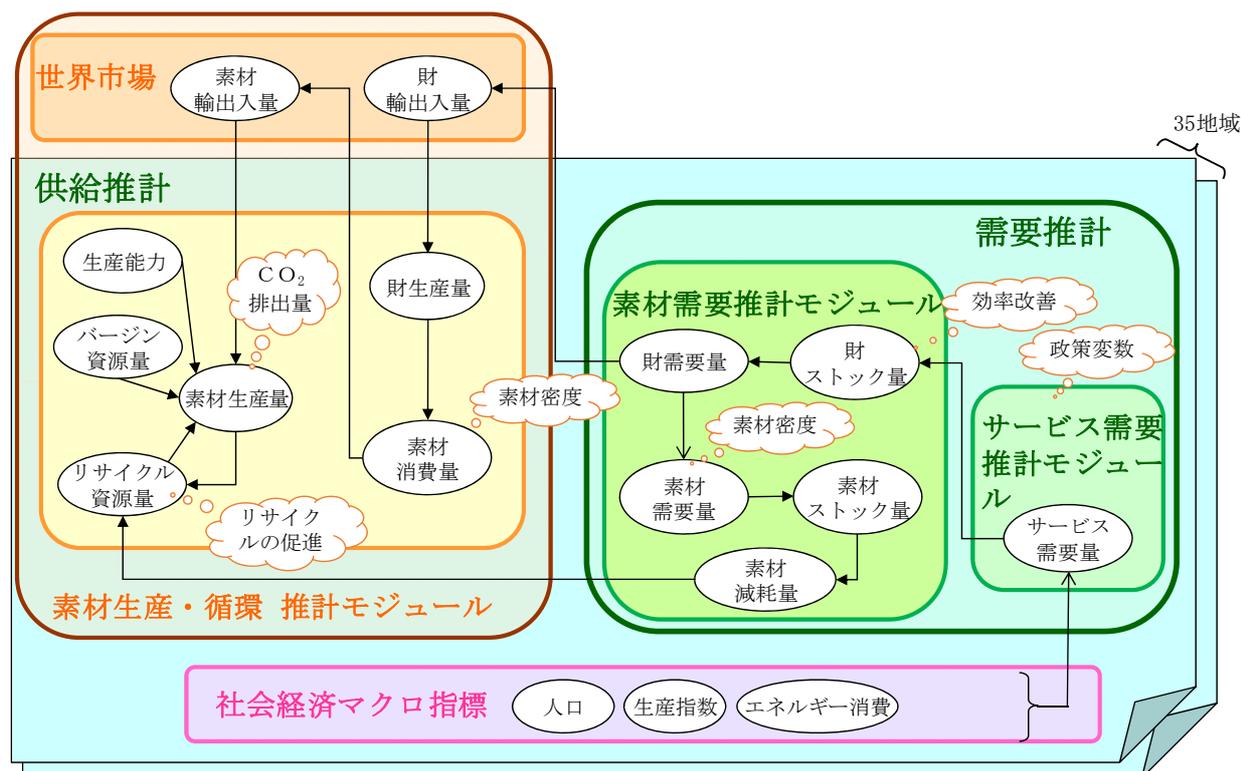
## 2. 研究開発目的

本研究では、素材ストック（財ストック）が提供するサービス需要から素材生産にかかわる二酸化炭素排出量までを推計するマテリアルストック・フローモデルを構築し、鉄鋼に対して適用することで、エネルギー集約素材である鉄鋼が社会にどの程度蓄積し、再利用可能かを分析し、2050年までの日本における素材生産の必要量について低炭素社会実現の観点から定量的に評価することを目的とする。具体的には、素材需要や二酸化炭素排出量の削減に関する社会経済的・技術的・政策的対策の収集・整理を行い、様々なシナリオの下での地域別素材需要量を推計し、鉄鋼需要や二酸化炭素排出量削減対策の効果分析を行った。また、地域別素材需要量、地域別鉄スクラップ発生量、技術力などから、鉄鋼の生産分配シナリオを検討し、地域ごとの素材生産量、素材生産に係る二酸化炭素排出量の推計を行った。日本における素材生産量を通して低炭素社会構築と脱物質化社会構築の関係性を考察した。

## 3. 研究開発方法

### (1) マテリアルストック・フローモデルの構築

マテリアルストック・フローモデルは、素材ストック（財ストック）が提供するサービス需要から素材生産にかかわる二酸化炭素排出量までを推計するモデルである。マテリアルストック・フローモデルは、次の3つのモジュールを内包し、社会経済指標の将来値および素材需要の削減を目的とする「需要対策シナリオ」、素材生産の地域偏在を決定する「生産分配シナリオ」を外生的に与えることにより、サービス需要量、その提供に必要な財ストック量（素材ストック量）、財生産量、素材需要量および素材生産量、二酸化炭素排出量を推計する。図(5)-1にマテリアルストック・フローモデルの全体図を示す。



図(5)-1 マテリアルストック・フローモデルの全体図

表(5)-1 地域分類

コード	国・地域名	コード	国・地域名	コード	国・地域名
1 JPN	: 日本	13 XSA	: その他南アジア	25 XEWI	: 西欧附属書 I 国
2 CHN	: 中国	14 XEA	: その他東アジア	26 XEEI	: 東欧附属書 I 国
3 IND	: インド	15 XCS	: その他中央アジア	27 ZAF	: 南アフリカ
4 IDN	: インドネシア	16 XME	: 中東諸国	28 XAF	: その他アフリカ
5 KOR	: 韓国	17 XLM	: その他中南米	29 RUS	: ロシア
6 THA	: タイ	18 CAN	: カナダ	30 MEX	: メキシコ
7 MYS	: マレーシア	19 USA	: アメリカ合衆国	31 ARG	: アルゼンチン
8 VNM	: ベトナム	20 XE15	: 初期EU加盟国	32 BRA	: ブラジル
9 TWN	: 台湾	21 XE10	: 中期EU加盟国	33 AUS	: オーストラリア
10 SGP	: シンガポール	22 XE2	: 後期EU加盟国	34 NZL	: ニュージーランド
11 PHL	: フィリピン	23 TUR	: トルコ	35 XOC	: その他オセアニア
12 XSE	: その他東南アジア	24 XENI	: その他ヨーロッパ		

マテリアルストック・フローモデルは世界35地域別モデルであり、それらがまとまって全体として世界モデルとなる（地域分類は表(5)-1参照）。推計期間は基準年を2005年とし、1900～2005年までの情報を整備することにより、2050年までの将来推計を行う。

### 1) サービス需要推計モジュールの概要

鉄鋼を主要な成分とする財が提供するサービスと社会経済マクロ指標との係わりを記述するモデルである。サービス需要量は、サービススケール指標とサービスレベル指標の積にて推計する。サービススケール指標とは、人口や生産指数などのマクロ社会経済指標であり、サービスレベル指標とは、一人あたり床面積や一人あたり輸送量などサービススケール指標あたりのサービス量

表(5)-2 サービス種の分類

サービス種の分類	コード ( <i>up</i> )	単位	サービス スケール指標	サービス レベル指標
1 住居	BDW	m <sup>2</sup>	世帯数	1戸あたり床面積
2 産業生産	PSC	PSC*1	生産指数	1
3 発電	ELE	kWh	発電量	1
4 旅客輸送	TPD	ps-km	人口	一人あたり輸送量
5 貨物輸送	TFD	ton-km	生産指数	生産指数あたり輸送量
6 農業用水	WAG	m <sup>3</sup>	農業用水需要量	1
7 工業用水	WID	m <sup>3</sup>	生産指数	生産指数あたり工業用水需要量
8 生活用水	WOK	m <sup>3</sup>	人口	一人あたり生活用水需要量
9 汚水処理	ISW	m <sup>3</sup>	人口	一人あたり汚水処理量
10 その他土木	IFR	IFRP*2	人口	一人あたり土木サービス需要量
11 その他工業製品	HSH	HSHP*2	人口	一人あたりその他工業製品需要

\*1 2005年を基準とする指数

\*2 2005年の日本の値を1とする指数

のことである。サービス種およびサービスごとのサービススケール指標とサービスレベル指標を表(5)-2に一覧する。

$$\cdot \text{サービススケール指標} \quad US_{r,t}^{up} = asd_{r,t}^{up} \cdot SI_{r,t}^{up} \quad \text{式(5)-1}$$

$$\cdot \text{サービス需要量} \quad U_{r,t}^{up} = US_{r,t}^{up} \cdot UL_{r,t}^{up} \quad \text{式(5)-2}$$

ここで、*up*:サービスの分類、*t*:年、*r*:地域、 $U^{up}$ :サービス*up*のサービス需要量、 $US^{up}$ :サービススケール指標、 $UL^{up}$ :サービスレベル指標、 $SI^{up}$ :社会経済指標、 $asd^{up}$ :サービススケール指標に関する係数である。

例えば、住居サービスの場合、サービススケール指数である世帯数は、世帯人員数をサービススケール指標に関する係数と人口（社会経済指標）から式(5)-1にて算出する。サービスレベル指数である一戸あたり床面積は、式(5)-3で推計する。

$$UL_{r,t}^{BDW} = FLH\_DWE_{r,t} = NHM\_TOT_{r,t} \cdot FLP\_DWE_{r,t} \quad \text{式(5)-3}$$

ここで、 $FLH\_DWE_{r,t}$ :一戸あたり床面積(m<sup>2</sup>)、 $NHM\_TOT_{r,t}$ :世帯人員数(人)、 $FLP\_DWE_{r,t}$ :一人あたり住居床面積(m<sup>2</sup>/人)である。

## 2) 素材需要推計モジュールの概要

サービス需要（サービス需要推計モジュールの出力）をインプットとし、地域内のサービス需要を満たすために必要となる財ストック量と現存する財ストック量との関係から、財ストックの動態式により財需要量を算出し、その生産に要する鉄鋼需要量を推計する。つまり、ここでの財需要量とは、国内の財ストックへの追加量であり、輸出する財は含めない。サービスとそれを供給する財の組み合わせを表(5)-3に示す。

表(5)-3 サービスと財の種類組み合わせ

サービスの種類	財の種類
住居	住居（構造別）
産業生産	生産資本（機械、各種設備）、業務用建築物（構造別）
発電	発電設備（汽力、水力）
旅客輸送	乗用車、バス、バイク、自転車、旅客車両、航空機、道路、鉄道
貨物輸送	トラック、貨物車両、船舶、港湾、（交通インフラ再掲割愛）
農業用水	灌漑設備
工業用水	工業用水設備
生活用水	生活用水供給設備（水道、その他水供給設備）
汚水処理	汚水処理設備（水洗、その他汚水処理設備）
その他土木	その他土木構造物（堤防、公園等）
その他工業製品	その他工業製品

素材需要推計モジュールの方程式群を以下に示す。本節で用いるサフィックスや変数を一覧する。

記号	説明
$up$	: サービスの分類（上付き）
$s$	: 財の分類（上付き）， $s1$ 及び $s2$ は， $s$ の別名
$t$	: 年（下付き）
$q$	: 素材の種類（ex. 高張力鋼，その他の鉄鋼）
$U^{up}$	: サービス $up$ のサービス需要量
$UG^{up,s}$	: 財ストック $s$ のサービス $up$ の供給量
$G^s$	: 財 $s$ のストック量
$asl^s$	: 財ストックの稼働率
$aus^s$	: サービス産出係数、財ストック一単位あたりのサービス供給量
$GI^s$	: 財のストックへの追加量
$rg^{s1,s2}$	: 1単位の財 $s1$ のストックの，財 $s2$ のストック需要量
$dm^{s,q}$	: 財 $s$ 一単位中の素材量（素材原単位）
$dw^s$	: 減耗率
$dp^s$	: 財生産におけるスクラップ発生率
$MS^s$	: 財 $s$ の素材のストック量
$MI^s$	: 財 $s$ のストックへの鉄鋼追加量
$MD^{s,q}$	: 財 $s$ の種類 $q$ の素材の需要量
$mm^{s,q}$	: 財 $s$ へ投入される種類 $q$ の素材の割合

・ サービス供給量と需要量のバランス 
$$U_t^{up} = \sum_s UG_t^{up,s} \quad \text{式(5)-4}$$

・ 財ストックのサービス供給量 
$$UG_t^{up,s} \leq aus^{up,s} \cdot asl_t^s \cdot G_t^s \quad \text{式(5)-5}$$

・ 財ストック間の関係 
$$G_t^{s2} = rg_t^{s2} \cdot \sum_{s1} G_t^{s1}$$

s2	s1
道路長さ	乗用車、バス、トラック
鉄道長さ	旅客鉄道車両＋貨物鉄道車両

・ 財ストックの動態式  $G_t^s = (1 - dw^s) \cdot G_{t-1}^s + GI_t^s$  式(5)-6

ただし、 $GI < 0$ となる場合には、 $GI = 0$ とする。

・ 素材需要量  $MD_t^{s,q} = dm^{s,q} \cdot mm^{s,q} \cdot GI_t^s$  式(5)-7

$$MI_t^s = \sum_q MD_t^{s,q} \quad \text{式(5)-8}$$

・ 財別素材ストック量  $MS_t^s = (1 - dw^s) \cdot MS_{t-1}^s + MI_t^s$  式(5)-9

### 3) 素材生産・循環推計モジュールの概要

素材生産・循環推計モジュールは、素材需要推計モジュールで推計された各地域における鉄鋼需要量を合計して、世界全体の鉄鋼需要量、つまり、鉄鋼生産量とし、その生産量の地域偏在を推計する。鉄鋼や鉄鋼を含む財の輸出入および鉄鋼の生産技術や鉄鋼生産量の決定要因とする製鋼法選択シナリオにより、各地域の製鋼法別鉄鋼生産量、および二酸化炭素排出量を推計する。

本節で用いるサフィックスや変数および製鋼法選択シナリオで共通して用いる定式化を一覧する。

$k$ : 誤差の種類を表すサフィックス(整数をとる)

$flgB_r$ : 2012年に転炉鋼生産がある地域は1をとるフラグ

$flgTX_{r,t}$ : 指標Xに生産量 > 消費量 (もしくは要求量) の関係が成立している時に1であるフラグ

$flgRX_{r,t}$ : 指標Xの成長率が正の時に1であるフラグ

$flgS_{r,t}$ : スクラップが供給量 > 消費量の時に1であるフラグ

$OBJ$ : 目的変数

$RX$ : 指標Xの年変化率

$BOF_{r,t}$ : 転炉鋼生産量

$EAF_{r,t}$ : 電炉鋼生産量

$CRS_{r,t}$ : 鉄鋼生産量

$BOFd_{r,t}$ : 転炉鋼要求量

$BOFdpr_{r,t}$ : 転炉の減耗率

$EAFdpr_{r,t}$ : 電炉の減耗率

$CNS_{r,t}$ : 鉄鋼消費量

$SCR_{r,t}$ : スクラップ余剰量

$er_{k,r,t}$ : 誤差

$flgRX$ は、指標となるXが必要量や消費量であることから、財の貿易シナリオや転炉鋼要求シナリオを決定した段階で算出される。そのため、製鋼法選択シナリオにおいて、生産量を推計する際には所与である。一方、 $flgTX$ や $flgS$ は、現状と次期の量との比較であることから、一期ごとに内生的に計算される。

すべての地域、年について、式(5)-10～16が成立する。

$$CRS_{r,t} = BOF_{r,t} + EAF_{r,t} \quad \text{式(5)-10}$$

$$CRS_{WLD,t} = \sum_r CRS_{r,t} \quad \text{式(5)-11}$$

$$BOF_{WLD,t} \geq \sum_r BOFd_{r,t} \quad \text{式(5)-12}$$

$$BOF_{r,t} \geq BOF_{r,t-1} * (1 - BOFdpr_{r,t}) \quad \text{式(5)-13}$$

$$EAF_{r,t} \geq EAF_{r,t} * (1 - EAFdpr_{r,t}) \quad \text{式(5)-14}$$

$$BOF_{WLD,t} - \sum_r BOFd_{r,t} = er_{1,t} \quad \text{式(5)-15}$$

$$OBJ_t = \sum_k \sum_r er_{k,r,t}^2 \rightarrow \min, \quad \forall t \quad \text{式(5)-16}$$

さらに、転炉鋼、電炉鋼それぞれにおいて、 $flgTX=1$ の関係が成立している地域においては、生産量が消費量を下回らないという式(5)-17と式(5)-18の制約をおく。

$$BOF_{r,t} \geq BOFd_{r,t}, \quad (flgTBOF_{r,t} = 1) \quad \text{式(5)-17}$$

$$CRS_{r,t} \geq CNS_{r,t}, \quad (flgTCRS_{r,t} = 1) \quad \text{式(5)-18}$$

各地域の鉄鋼生産量の推計式は、製鋼法選択シナリオにより異なるため、後述の製鋼法選択シナリオの特徴を示した表(5)-7のうち、F00R0ケースについて式(5)-10～18以外のケースごとの個別の定式化の例を示す。F00R0ケースでは、世界の消費見通しを参照するので、指標Xは転炉鋼では世界の転炉鋼要求量、電炉鋼では世界の鉄鋼消費量となる。要求量や消費量の年変化率に応じて生産量を決定する（式(5)-19、式(5)-20）。また、需給バランスは考慮しないが、生産量を大きく変化させないという式(5)-21を制約として与える。

$$flgB = flgRBOFd_{WLD,t} = 1 \text{の場合} \quad BOF_{r,t} \leq BOF_{r,t-1} \cdot RBOFd_{WLD,t} \quad \text{式(5)-19}$$

$$flgRCRS_{WLD,t} = 1 \text{の場合} \quad CRS_{r,t} \geq CRS_{r,t-1} \cdot RCRS_{WLD,t} \quad \text{式(5)-20}$$

$$EAF_{r,t} - EAF_{r,t-1} = er_{2,r,t} \quad \text{式(5)-21}$$

## (2) 将来シナリオの設定

将来シナリオとして、需要対策シナリオおよび生産分配シナリオを設定した。

### 1) 需要対策シナリオ

需要対策シナリオは、鉄鋼需要を削減するための各種対策の組み合わせである。なりゆきケー

表(5)-4 需要対策シナリオで導入される対策

対策	対策の内容
サービス需要の管理	一人あたり床面積の制御、構造別建築物のシェアの管理 パーソントリップの距離別シェアの制御、モーダルシフト 安全な水、衛生設備へのアクセス確保 適正なインフラ整備 豊かな生活水準の確保 など
財ストックの効率改善	空き家・空室率の改善 輸送機器の適正な積載率 生産資本の効率改善、高性能化 稼働率の向上 など
技術進歩	高性能素材の導入、素材の代替

表(5)-5 財の貿易シナリオ

コード	内容
GT1:	財ごとの各地域の生産シェアは2012年の値で一定とする。
GT2:	財ごとの主要生産国は2012年の生産量を維持する。世界全体の増加分は2012年からの需要の増加量のシェアでその他の地域に按分する。
GT3:	需要量=生産量になるように収束する。

スの他に、トレンド相当の対策を導入するケース、対策を最大限導入するケースの3つを想定した。鉄鋼需要を削減するための各種対策は、大きく分けて、サービス需要の管理、財ストックの効率改善、技術進歩の3つに分類される。

## 2) 生産分配シナリオ

生産分配シナリオは、財の貿易シナリオ、転炉鋼要求シナリオ、製鋼法選択シナリオの3つからなる。

### a. 財の貿易シナリオ

財の貿易シナリオは、鉄鋼の間接輸出入の幅を広くとるため3つを想定した（表(5)-5）。なお、貿易を想定するのは、貿易財（機械類、輸送機器、その他工業製品）のみである。

### b. 転炉鋼要求シナリオ

転炉鋼要求シナリオは、電炉での異なる技術進歩を想定するシナリオである。転炉鋼要求量は、通常の鉄鋼より高機能であるハイテンと高級鋼板類とする。鉄鋼の分類には、鋼種、形状や用途など様々な分類が存在するが、必ずしも製鋼法と一対一対応する訳ではない。また、一つの財の生産において、多様な鋼種、形状の鉄鋼が消費され、財に投入される鉄鋼ごとに製鋼法が割り当てられている訳でもない。しかしながら一般的に、形状別に条鋼類と鋼板類に大別した場合、鋼板類の方が質が高いとされ、また用途別では輸送機器や機械類にて高品質の鉄鋼が消費される。

B0ケース：鉄鋼生産技術を現状水準で固定、つまり、各財の鉄鋼消費量のうち転炉鋼要求量の比率を固定する。

表(5)-6 転炉鋼要求シナリオにおける各財の鉄鋼消費量における転炉鋼比率 (%)

	2012		2050	
	鋼板類シェア		転炉鋼要求シナリオ	
		うち転炉鋼比率	B0	B1
建築物	20	10	2	0
土木構造物	38	10	3.8	0
機械類	80	100	80	55
自動車	98	100	98	55
鉄道車両	80	100	80	55
船舶	87	100	87	55
その他輸送機器	60	50	30	15
その他工業製品	95	30	28.5	10

B1ケース：技術革新が進み、電炉においても鉄鋼需要量推計にて想定される機能を有するハイテンや高級鋼板類の生産が行われ、基準年と比較して各財の鉄鋼消費量における転炉鋼比率が大幅に減少する。本研究では現状比率の約半分相当を設定した。

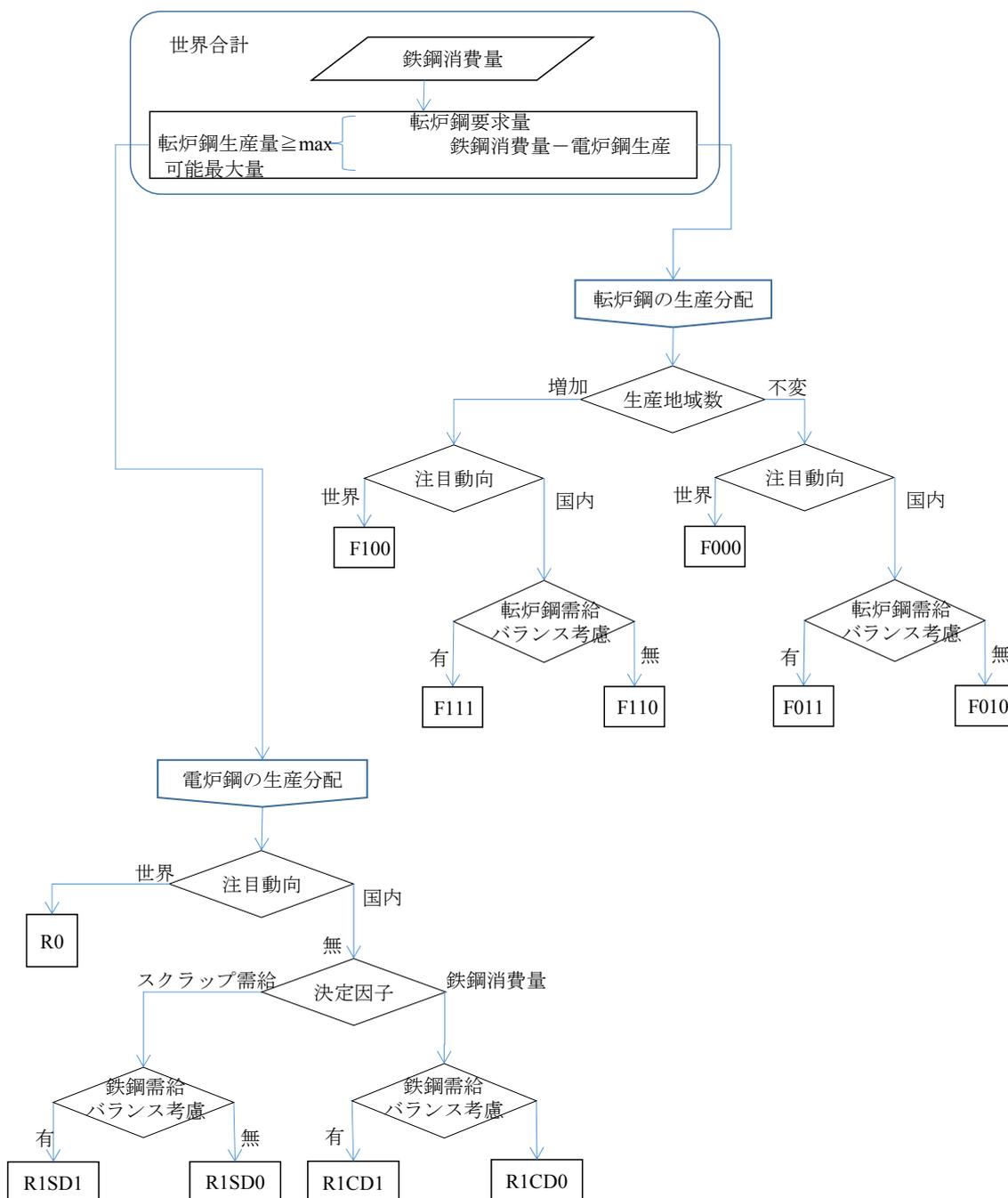
表(5)-6に財ごとの鉄鋼消費量における転炉鋼要求量の比率を基準年と2050年の設定値について示す。財ごとの鋼板類シェアは、鉄鋼統計要覧<sup>5)</sup>より算出した。

### c. 製鋼法選択シナリオ

製鋼法選択シナリオは、生産量の決定に関係する因子の組み合わせである。世界の鉄鋼消費量を所与とした条件下で、世界各地域がそれぞれ製鋼法選択シナリオに基づいて製鋼法別に生産量を決定する。生産量の決定に関係する因子は5つあり、①参照する鉄鋼消費量見通し、②転炉鋼生産における生産地域の数（転炉鋼を生産している地域数は2012年では35地域中26地域）、③転炉鋼の地域内需給バランス考慮の有無（地域内の転炉鋼生産量と転炉鋼要求量の需給バランス）、④鉄鋼全量の需給バランス考慮の有無（鉄鋼消費量と鉄鋼生産量の需給バランス）⑤電炉鋼生産量の決定因子（鉄鋼消費量見通しか、スクラップ余剰量か）である。製鋼別選択シナリオの分岐とコードを図(5)-2に示す。

注目する見通しでは、例えば世界を注目対象とする場合、地域内の消費見通しは考慮せず、転炉鋼、電炉鋼それぞれで、世界の転炉鋼要求量もしくは鉄鋼消費量の見通しを元に鉄鋼生産量を決定することを意味する。電炉鋼生産量で生産決定因子をスクラップ余剰量とする場合、地域内でのスクラップ余剰量を最小化することを目的関数とする。転炉および電炉でのスクラップ比率の上限はそれぞれ30%、112%とした。また、生産量の増減は設備容量の増減を伴い、特に高炉—転炉生産工程では急激な変化は困難である。そこで、増減の幅として、減少については減耗率以上の削減は行わないこと、増加については消費見通し相当以上の増加は行わないこと、を制約として与える。

図(5)-2に示される転炉鋼（BOF）の生産分配と電炉鋼（EAF）の生産分配を組み合わせると30通りの組み合わせができるが、本研究では、表(5)-7に示された4つのケースについて分析を行った。



図(5)-2 製鋼法選択シナリオの分岐点とコード

表(5)-7 分析した製鋼法選択シナリオのケースと特徴

製鋼法選択シナリオコード	注目する見通し	転炉鋼		電炉鋼	
		生産地域の数	需給バランスの考慮	決定因子	
F000R0	世界	不変	無	無	鉄鋼消費量
F010R1SD0	地域内	不変	無	無	スクラップ余剰量
F110R1SD1	地域内	増加	無	有	スクラップ余剰量
F111R1CD1	地域内	増加	有	有	鉄鋼消費量

表(5)-8 スクラップ回収率の設定

スクラップの種類		2007*1	設定値	WSA 2050目標値
自家発生			100	
加工			100	
老廃	合計	83	約90	90
	建築物	85	90	90
	土木構造物	85	90	90
	機械類	90(50)	90	95(75)
	乗用車	85	95	95
	バストラック	85	95	95
	鉄道車両		95	
	船舶		96	
	その他輸送機器		90	
	その他工業製品	69	75	75

\*1 WSAの報告値 Appliance 50%, containers 69%

スクラップ回収率は、自家発生および財の生産工程において発生する加工スクラップは、質が安定しており回収が容易であることから100%の回収を想定する。老廃スクラップは、2050年の回収率としてworldsteel(WSA)<sup>6)</sup>が財ごとに設定している目標値を用い、基準年から線形的に回収率を変化させる。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) サービス需要量の推計結果

鉄鋼需要量の駆動力である世界の2050年におけるサービス需要量を2005年比で示したものを表(5)-9に示す。世界全体でみると、サービス需要量の伸びは、なりゆきケースで1.5～2.7倍の範囲内にあり、サービス需要の駆動力であるマクロ社会経済指標の伸び率と同程度である。サービス需要の管理の対策導入により建築物と輸送サービスであるが、貨物輸送サービスで0.4ポイント分の差が生じているほかは、顕著な違いは見られない。

しかしながら、地域別にみると同じサービスであっても大きな幅がある。先進諸国では人口の伸びが小さいことや経済成長も途上国と比較すると緩やかであることから、1.1～3.0程度の比率がほとんどであり、3以上の値を有するのは、後期EU所属国とロシアの産業生産サービス、トルコの旅客輸送サービスのみである。日本をはじめとして、人口が駆動力となっている建築物や旅客輸送ではなりゆきケースであっても、減少がみられる地域もある。アジア諸国では、人口や経済成長の伸びが大きいことから、比率が5.0以上となるサービス種や地域も多くなった。貨物輸送サービスは生産指数が駆動力であるため、産業生産サービスの増加比率が大きな地域では、貨物輸送サービスの増加比率も大きくなっている。アジア以外の途上国地域では、サービス需要量の伸びは先進諸国よりは大きい地域が多いものの、2～5倍の範囲に留まるものが多く、5倍以上となるサービスは、その他アフリカのその他土木とその他工業製品のみであった。

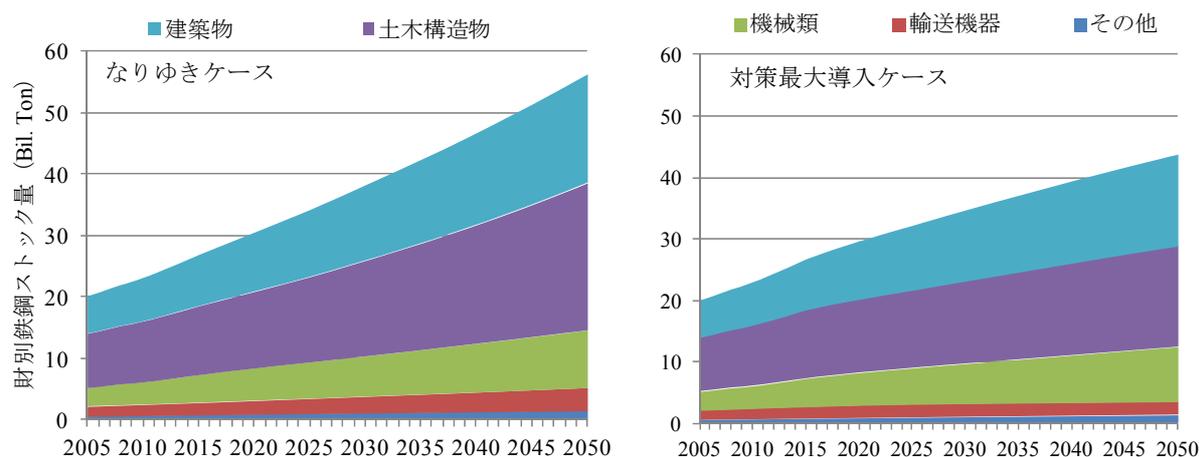
表(5)-9 2050年の世界のサービス需要量（対2005年比）の推計結果

地域	建築物	産業生産	旅客輸送	貨物輸送	水需要	その他土木	その他工業製品
日本	0.9	1.6	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0
アメリカ合衆国	1.4	1.7	1.4	1.4	1.2	1.0	1.0
初期EU所属国	1.2	1.8	1.1	1.4	1.2	1.1	1.0
中期EU所属国	1.1	2.7	1.7	2.2	1.8	1.3	1.0
後期EU所属国	0.9	3.1	1.7	2.9	2.2	1.4	1.4
カナダ	1.4	2.5	1.4	1.8	1.9	1.0	1.1
ロシア	1.1	3.5	1.5	2.3	2.4	1.1	1.2
オーストラリア	1.6	2.6	1.6	2.3	1.3	1.0	1.1
ニュージーランド	1.5	2.6	1.5	2.3	1.1	1.0	1.0
西欧附属書I 国	1.2	2.2	1.2	1.6	1.5	1.0	1.0
東欧附属書I 国	1.3	2.1	1.3	1.6	1.3	1.4	1.5
トルコ	1.6	2.7	3.5	2.4	1.3	2.2	2.5
中国	2.6	9.1	3.7	5.4	2.7	3.9	2.2
インド	3.3	6.9	3.0	4.1	2.1	6.1	3.4
インドネシア	3.1	7.9	3.6	5.7	1.4	6.5	3.8
韓国	1.6	2.8	2.1	2.2	1.2	1.2	1.1
シンガポール	1.8	2.0	2.0	1.9	3.0	1.8	1.0
タイ	2.4	4.6	2.7	3.5	1.2	4.1	1.5
台湾	1.3	3.0	2.0	2.4	1.7	1.2	1.0
マレーシア	2.8	5.1	2.6	3.6	2.5	1.8	1.4
フィリピン	2.7	4.8	4.8	3.9	1.4	3.2	3.1
ベトナム	3.1	7.2	4.5	6.5	1.3	5.5	4.4
その他東南アジア	3.0	6.8	2.9	5.5	1.2	7.0	8.1
その他南アジア	3.8	5.1	3.8	4.4	1.2	7.1	7.1
その他東アジア	2.3	3.1	2.0	2.3	1.4	1.2	3.8
その他オセアニア	3.5	3.3	2.8	3.5	2.9	1.6	4.1
その他ヨーロッパ	1.8	4.3	1.9	3.9	2.7	1.7	2.2
その他中央アジア	1.9	3.4	2.0	3.2	1.6	2.2	4.4
中東諸国	2.4	4.3	3.4	4.1	1.6	2.6	3.1
メキシコ	3.2	3.7	3.3	3.1	1.6	2.1	2.2
アルゼンチン	3.0	4.1	2.7	2.9	1.6	1.7	2.2
ブラジル	2.8	4.0	2.8	2.6	1.7	2.7	3.1
その他中南米	3.1	4.1	3.3	2.7	1.6	3.9	3.4
南アフリカ	1.4	3.6	2.4	3.1	1.5	1.8	2.7
その他アフリカ	4.3	7.5	4.2	4.8	1.9	5.8	9.2
世界（なりゆき）	2.2	2.7	2.1	2.4	1.6	1.5	1.6
世界（トレンド）	2.2	2.7	2.0	2.3	1.6	1.5	1.6
世界（対策最大導入）	2.1	2.7	2.0	2.0	1.6	1.5	1.6

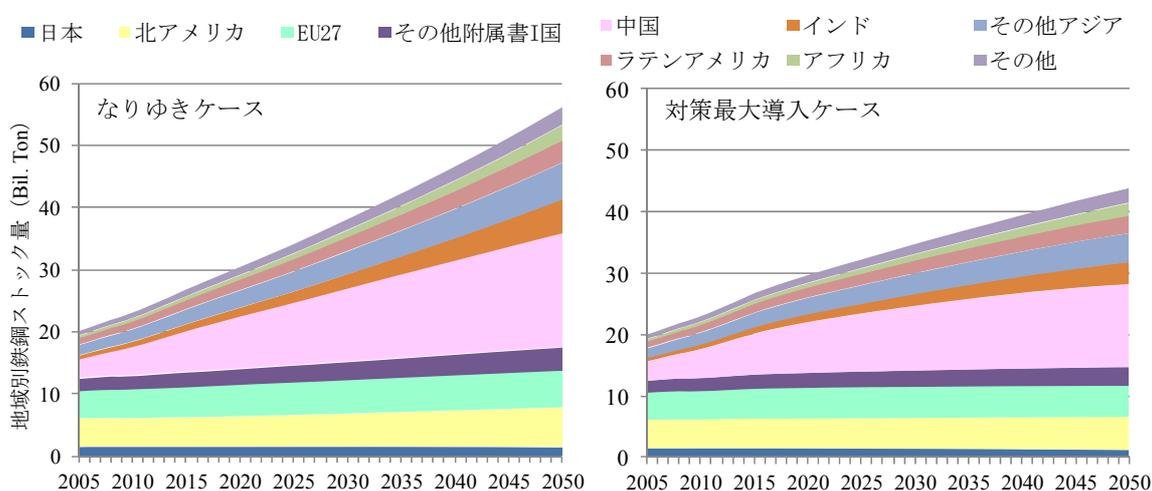
## （2）鉄鋼ストック量の推計結果

### 1）世界の鉄鋼ストック量

次に、これらのサービス需要を満たすための財ストック量を鉄鋼重量換算にて示す。ここでは、鉄鋼ストック量に最も大きな差が生じるなりゆきケースと対策最大導入ケースについて、世界全体での値を財別（図(5)-3）および地域別（図(5)-4）に示す。



図(5)-3 財別鉄鋼ストック量の推計値

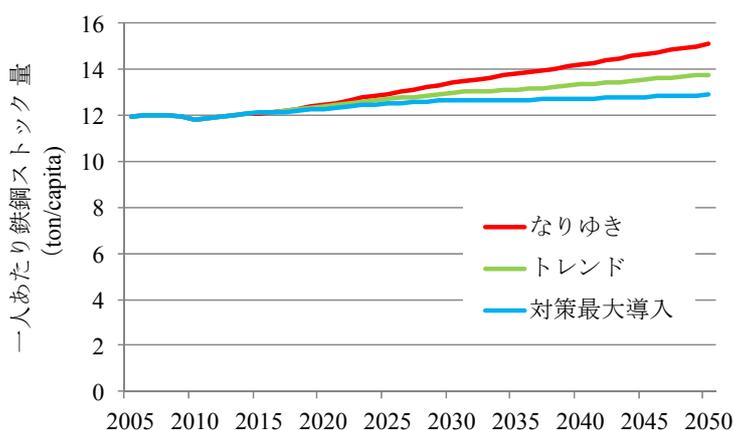


図(5)-4 地域別鉄鋼ストック量の推計値

サービス需要量が増加するため、鉄鋼ストック量は対2005年比で、なりゆきケースで2.8倍、対策最大導入ケースでは2.2倍となった。世界の一人あたり鉄鋼ストック量は、2005年の3.1トン/人から、なりゆきケースでは6.0トン/人になり、2005年での先進諸国の一人あたり鉄鋼ストック量の範囲の下限程度の値となった。対策最大導入ケースでは4.7トン/人であり、求められるサービス需要量を78%の鉄鋼ストック量で供給可能となることが示された。

財別のシェアは推計期間の2005～2050年において大きな変化はないが、絶対量では機械類や建築物にてそれぞれ3.1倍、2.9倍の増加となり、伸びが大きい。対策最大導入ケースでは、財ストックの効率改善とハイテンの導入による効果が大きな輸送機器での削減率が大きく、輸送機器で1.3倍（なりゆき：2.3）、土木構造物で1.9倍（なりゆき：2.7）の伸びに留まる。

鉄鋼ストック量を地域別にみると、なりゆきケースで途上国地域の伸びが大きく、先進諸国全体で1.4倍なのに対し、途上国地域では5.1倍の増加となった。これに伴い全体に占めるシェアは、途上国地域は2005年の38%から2050年には69%に増加する。途上国のなかでも伸び率が大きいのはインドであり8.9倍となる。次がアフリカと中国の5.9倍が続く。シェアとして大きいのは中国で



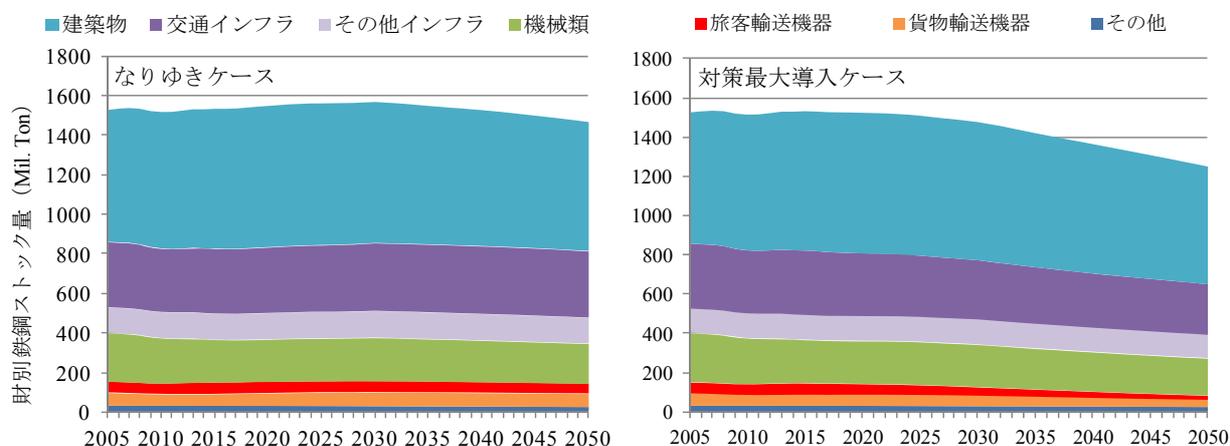
図(5)-5 日本の一人あたり鉄鋼ストック量の推計値

あり、2050年で33%を占めるに至る。対策最大導入ケースでは、途上国地域の鉄鋼ストック量の伸びは、3.9倍に留まり、インドの伸びも5.8倍である。

## 2) 日本の鉄鋼ストック量

日本の鉄鋼ストック量を一人あたりで示すと図(5)-5となる。対策最大導入ケースでも緩やかに増加し続け2050年で12.9トン/人に達する。一方でなりゆきケースでは、15.1トン/人にまで達する。対策最大導入ケースでは、なりゆきケースと比較して2050年で15%の削減となった。

なりゆきケースでは、一人あたり鉄鋼ストック量は増加していたが、鉄鋼ストック量の絶対量としては、ほぼ横ばいであり、2030年以降ゆるやかな減少となる（図(5)-6）。これは、サービス需要量の結果で示されたように、サービス需要量が産業生産サービスで1.6倍となる以外はほぼ1.0倍程度であることが要因である。その内訳は、機械類と建築物が減少するが、交通インフラは微増する。対策最大導入ケースでは、対2005年比で18%の削減となっており、交通インフラ、建築物の減少が鉄鋼ストック量削減の大きな要因となっている。絶対量としては小さいが、削減率が大きいのは旅客輸送機器であり、鉄鋼ストック量は対2005年比38%にまで減少する。

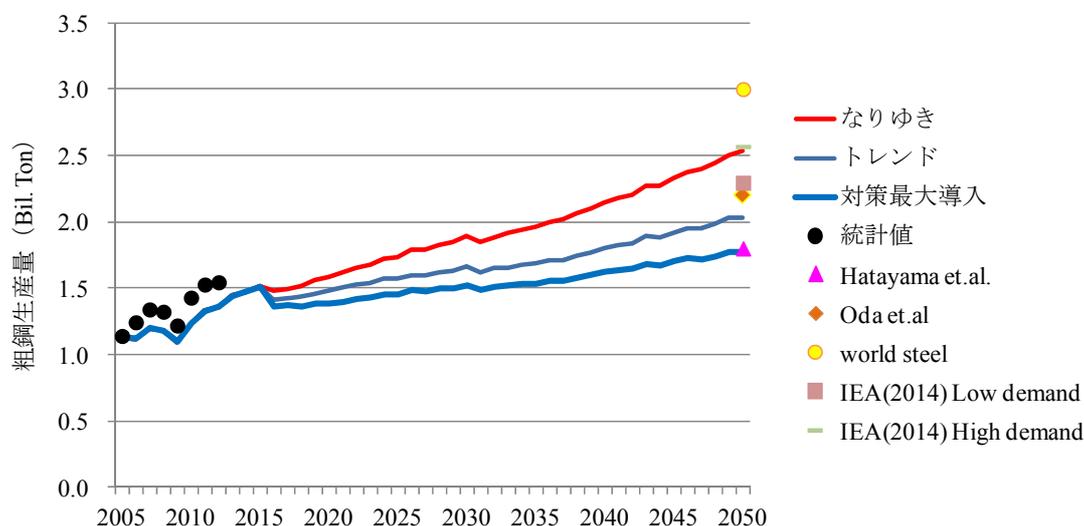


図(5)-6 日本の財別ストック量の推計値

### (3) 鉄鋼需要量の推計結果

#### 1) 世界の鉄鋼需要量

サービス需要の供給ために必要な鉄鋼ストック量を整備するために要求される世界の鉄鋼需要量を粗鋼生産量換算で既往の文献値<sup>7)・10)</sup>とともに図(5)-7に示す。

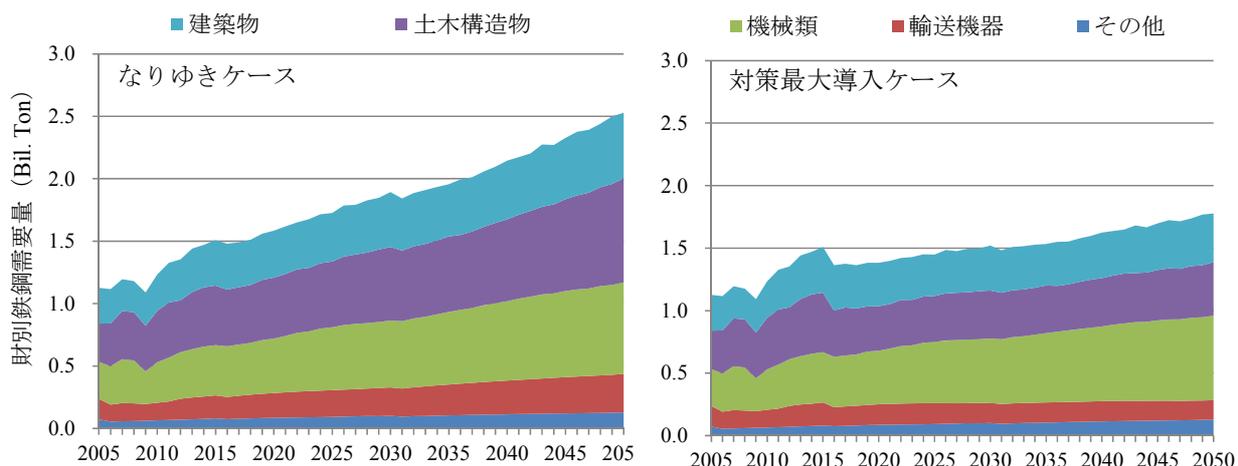


図(5)-7 世界の鉄鋼需要量（粗鋼換算）の推計値

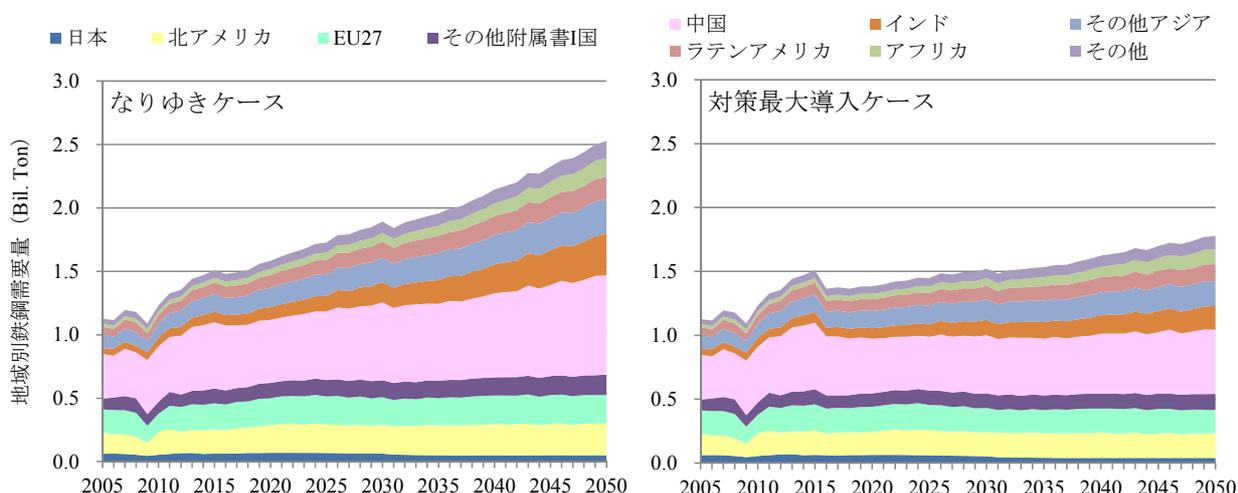
2050年の粗鋼生産量の範囲は17.7～25.3億トンとなり、なりゆきケースでは対2005年比2.2倍に増加するが、対策最大導入ケースでは鉄鋼需要量は2015年以降、ほぼ横ばいとなり17.7億トンに留まる。この推計値は、ほぼ既往の研究の範囲内であり、対策最大導入ケースは、既往の研究の下限程度である。なりゆきケースは、既往研究の上限であるworldsteelの30億トンよりは小さく、IEA推計値のHigh demandケース相当となった。

財別の内訳では、土木構造物や建築物と比較して機械類の耐用年数が短いため、鉄鋼需要量においては機械類のシェアが鉄鋼ストック量と比較して大きく、なりゆきケースでは29%、対策最大導入ケースでは38%を占める（図(5)-8）。財ごとのシェアではなりゆきケースでは、2005年から2050年にかけて土木構造物が6%増加し輸送機器が3%減少する。一方で対策最大導入ケースでは、機械類が12%増加するのに対し、それ以外の財は減少する。特に輸送機器の6%の減少が大きい。これは、対策最大導入ケースではハイテンが導入され、輸送機器での導入率が高いためである。

地域別に鉄鋼需要量を示したのが図(5)-9である。鉄鋼需要量は、なりゆきケースにおける途上国地域の伸びの大きさが著しいことが分かる。世界の中で2050年まで中国のシェアがもっとも大きいのは、両ケースとも共通であり、なりゆきケースで2.2倍、対策最大導入ケースで1.6倍となる。北アメリカ地域（アメリカ合衆国、カナダ）も量は大きく増加しないが一定の需要量を保っており、対策最大導入ケースで1.1倍である。その他の先進諸国もなりゆきケースであっても、2050年まで鉄鋼需要量に大きな変化はなく最大でも2倍までに留まる。鉄鋼需要量が大きく伸びるのは鉄鋼ストック量が増加していたインドであり7.4倍で3.3億トンに達し、北アメリカ地域の鉄鋼需要量を超過する。次に増加率が大きいのはアフリカの6.2倍であるが、量として多いのはその他アジア



図(5)-8 世界の財別の鉄鋼需要量

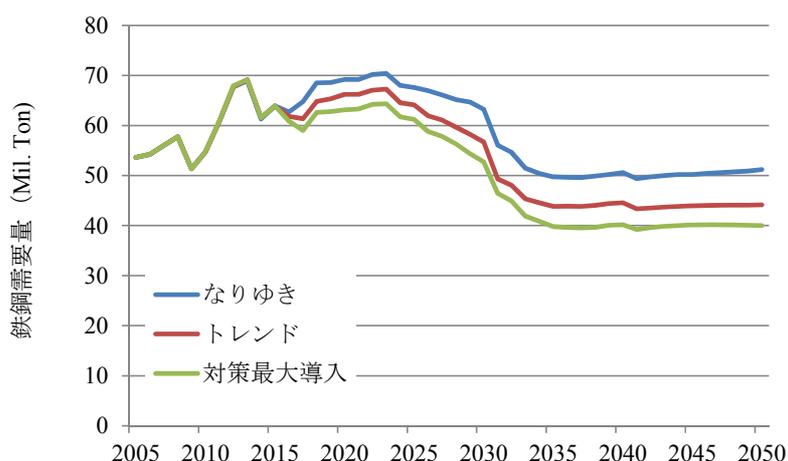


図(5)-9 世界の地域別の鉄鋼需要量

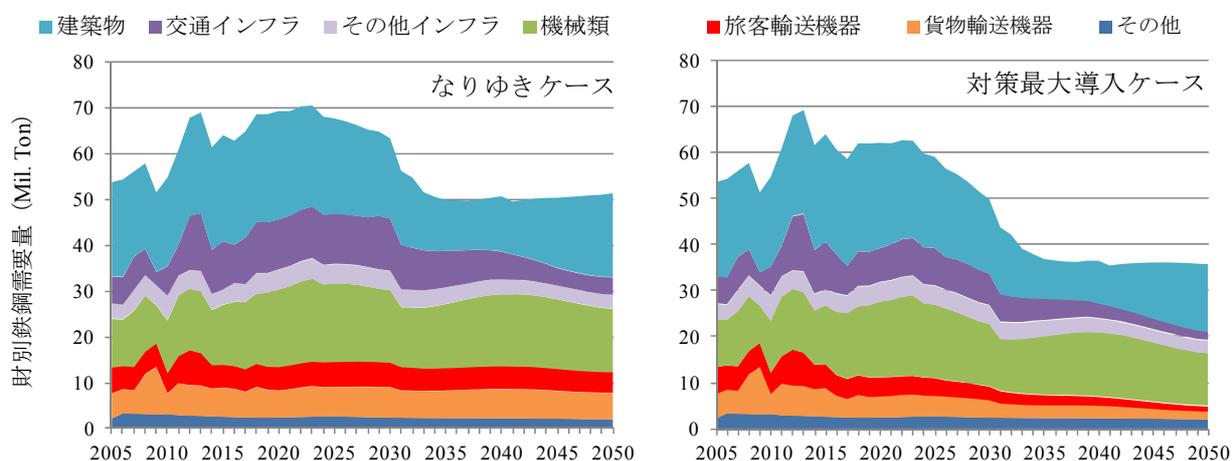
地域で2.4倍の2.8億トンとなり、その量は北アメリカ地域と同等程度に達するレベルである。対策最大導入ケースでは、削減量が多いのは中国の2.8億トン、次がその半分の削減量をもつインドである。それ以外の地域の削減率はあまり変わらず17～25%である。

## 2) 日本の鉄鋼需要量

日本の鉄鋼需要量は、2020～2025年の間にピークを迎え、2035年に向けて減少したのち横ばいとなる。2020年代前半に鉄鋼需要量が増加するのは建築物が原因で、1990年前後に建築された建築物が大量に減耗するため、財ストック量維持のための需要が増加するのである。それ以後は、人口の減少に伴い財ストック量の需要も減少するため、ストック整備のための需要も減少する。2045年以降、再び建築物需要の増加が発生し、鉄鋼需要の減少を抑制している。なりゆきケースでも大きく減少するのは交通インフラである。なりゆきケースで5,119万トン未満となり、2005年比で17%減となる。対策最大導入ケースでは35%の削減率となり4,001万トンにまで減少する。2050年において、なりゆきケースと対策最大導入ケースを比較すると22%の削減ポテンシャルが存在



図(5)-10 日本の鉄鋼需要量



図(5)-11 日本の財別鉄鋼需要量

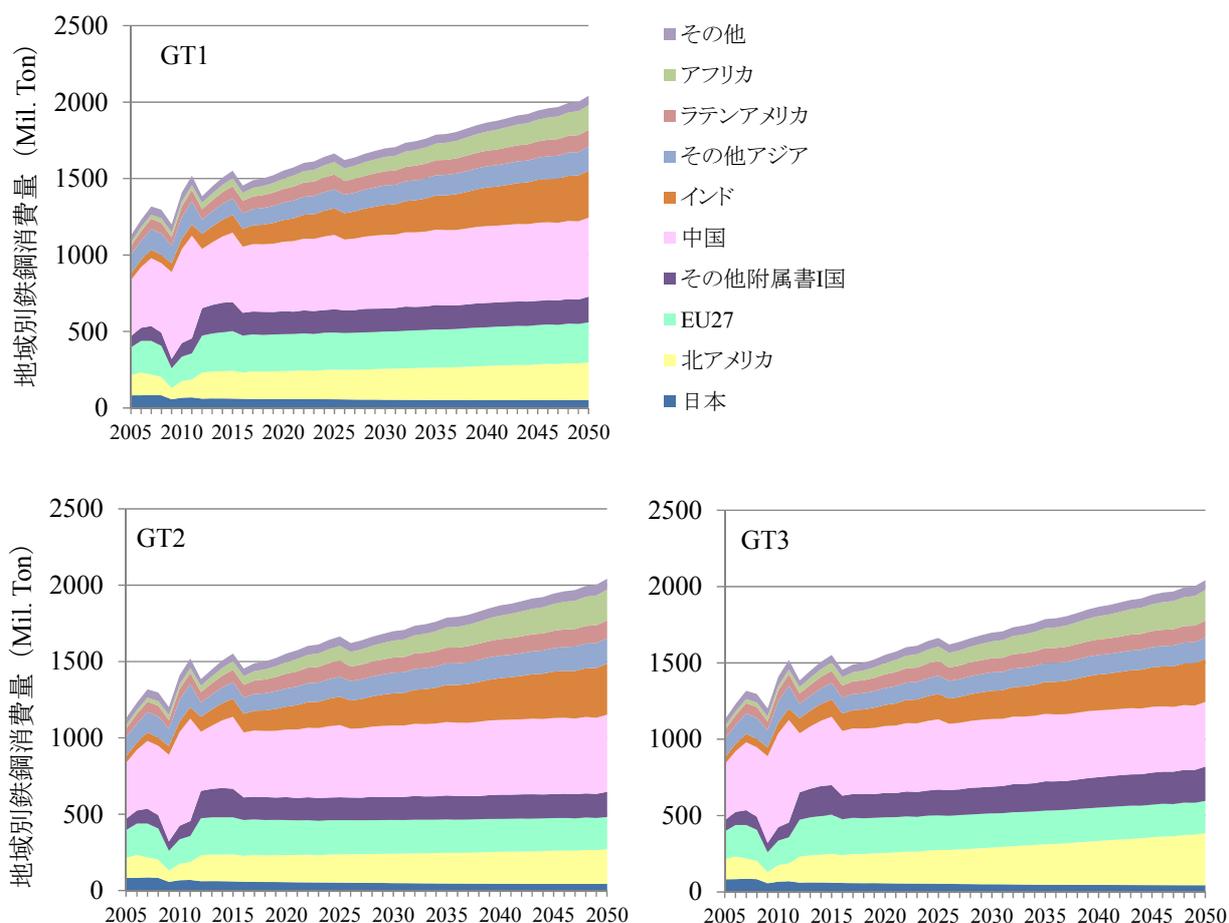
することが示せた。世界の動向と同じく、対策最大導入ケースでは、輸送機器の大きな減少が顕著である。財ストック量の減少に加え、ハイテン導入の貢献による。

#### (4) 鉄鋼生産量の推計結果

鉄鋼生産量の推計は、需要対策シナリオのうち、トレンドケースを所与として分析を行った。

##### 1) 鉄鋼消費量

鉄鋼生産量を決定する大きな要因となる鉄鋼消費量について示す。鉄鋼消費量は、世界全体では鉄鋼需要量（粗鋼生産量換算）に一致するが、貿易シナリオにより、地域別の鉄鋼消費量は異なる（図(5)-12）。しかしながら、地域別の鉄鋼消費量を合計で見ると、GT1ケースとGT2ケースには、大きな差は見られない。これは、GT2においても2012年における生産地域において、その生産量を将来に向けて維持しているためである。2012年以降は、先進国および中国の消費量はほぼ横ばいであり、その他の途上国での消費量の増加が著しい。一方でGT3ケースでは、鉄鋼需要量と鉄鋼消費量がバランスするシナリオであるが、北アメリカの伸びが顕著であり、中国がその他の

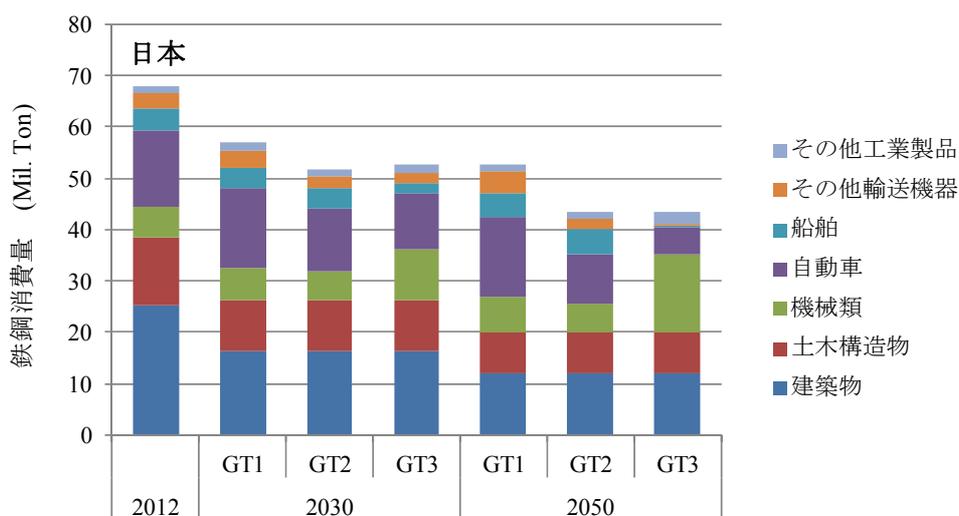


図(5)-12 地域別鉄鋼消費量

ケースと比較してやや減少する。2050年における各地域の世界に占めるシェアの差をケース間で比較すると、その値は5%以下に留まる。

日本の鉄鋼消費量は、いずれの財の貿易シナリオにおいても減少しており、2050年の鉄鋼消費量は4,327～5,278万トンとなる（図(5)-13）。非貿易財はいずれのシナリオも同量のため、貿易財の鉄鋼消費量がシナリオごとの差の原因となる。GT1ケースでは、貿易財はやや増加しているが、非貿易財の中でも特に建築物が大きく減少しているために、合計では減少となっている。貿易財は、2013年の世界の財別シェアを固定しているため、これらの財は財の固有単位では増加しているにもかかわらず、財一単位あたりの物質原単位が減少しており、これが貿易財の鉄鋼消費量が大きく増加していない原因となっている。

GT2とGT3ケースは、財の内訳は異なるものの、合計はほとんど同じである。GT2ケースでは自動車や船舶が多く機械類が少ないのに対し、GT3では逆転している。また、GT3ケースでは、2050年には需給バランスをとるシナリオであるため、需給差が縮小されている。



図(5)-13 財別鉄鋼消費量

表(5)-10 日本の転炉鋼要求量の変化率

転炉鋼要求シナリオ 財の貿易シナリオ	転炉鋼要求量変化率 (%/年)					
		B0			B1	
	GT1	GT2	GT3	GT1	GT2	GT3
2012-2030	-0.1	-1.1	-1.1	-1.3	-2.3	-2.3
2030-2050	0.0	-0.7	-1.2	-1.2	-1.9	-2.2

## 2) 転炉鋼要求量

鉄鋼消費量は、転炉鋼要求量に影響を大きな影響を与える。転炉鋼要求量が大きいののは、機械類や輸送機器であるが、図(5)-13に示される通り日本では鉄鋼消費量は減少しており、転炉鋼要求量も横ばい、もしくは減少となった。

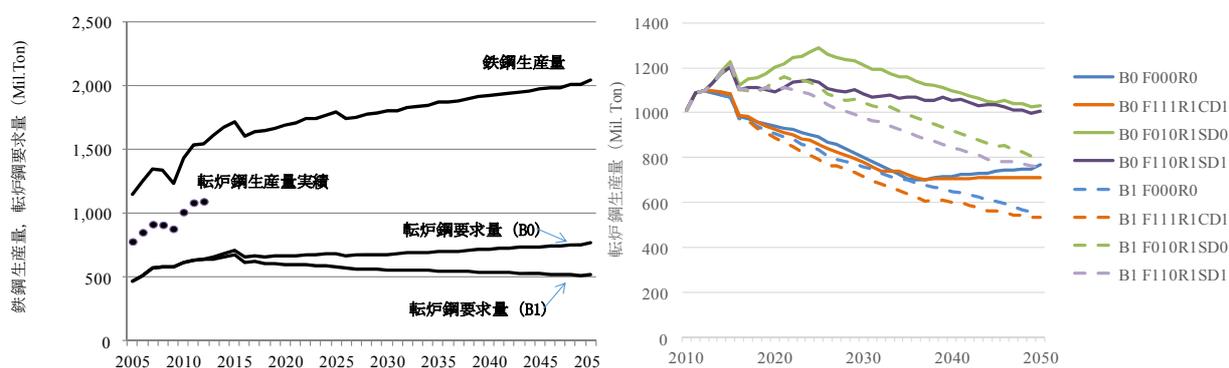
転炉鋼要求シナリオがB0ケースで貿易シナリオがGT1ケースの場合、転炉鋼要求量の変化率は、期間を通して-0.1~0%であり、転炉鋼要求量はほぼ横ばいであった(表(5)-10)。B0のGT3ケースとB1のGT1ケースの組み合わせでは、転炉鋼要求量の変化率に大きな差はない。B1ケースでは、高級鋼材における転炉鋼比率の減少のため、転炉鋼要求量の減少率は1.9%/年以上となっており、減耗率相当の変化率である。つまり、電炉鋼生産における技術革新を見込み、かつ、日本の転炉鋼国内消費のみを考えるのであれば、転炉は徐々に停止し、電炉で賄うことが可能であることが示された。

しかし、日本の粗鋼輸出比率は38.6%であり、高級鋼板類の比率が高く、世界市場に鉄鋼を供給している。転炉鋼生産においては、世界の転炉鋼要求量も決定因子である。転炉鋼要求量は、高級鋼板類に転炉鋼比率を乗じたものとハイテンのうち量の多いものにて定義されるが、ハイテンが導入されるトレンドケースと対策最大導入ケースでは、鋼板類の比率が小さな建築物や土木構造物において2020年以降にハイテンが転炉鋼要求量を決定する因子となった。

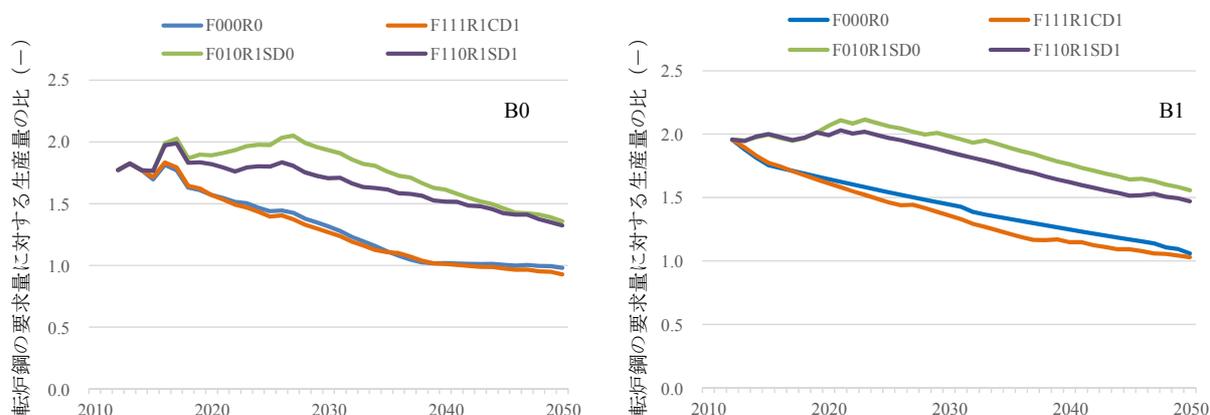
転炉鋼要求量は、機械類や輸送機器による鉄鋼消費量に影響を受けるが、鉄鋼消費量全体に占めるこれらの財のシェアは2012年から2050年にかけて45%から40%まで徐々に減少する。転炉鋼要

求量はB0シナリオではほぼ横ばいであり、B1ケースでは転炉鋼要求量がB0ケースと比較して減少しているが、その削減率は2050年で32%である。2012年には鉄鋼生産量に占める転炉鋼の割合は71%であるが、2050年には転炉鋼要求量が鉄鋼生産量に占める割合は25%にまで減少する（B1ケース）。

転炉鋼要求量は、B0ケースの2050年においても現状の転炉鋼生産量を超えることはなく、転炉鋼要求量となるまで現存の転炉鋼の生産能力を徐々に停止させることが可能であることが示された（図(5)-14、左）。一方で転炉鋼生産量は、同じ技術進歩を想定しても、製鋼法選択シナリオにより2億トン程度の幅が生じることになり、各地域が独自に生産量を決定することによる非効率の度合いが示された（図(5)-14、右）。転炉鋼について需給バランスを取ることを重要視しないF010R1SD0とF110R1SD1において、特に顕著である。転炉鋼について需給バランスを取ることが促進されなくとも、世界の転炉鋼需要の動向に注目しながら生産量を決定するF00R0シナリオでは、転炉鋼の需給バランスを取るF111R1CD1ケースとほぼ同じ生産量となった。F00R0とF111R1CD1ケースでは、転炉鋼生産量は2037年まで減少するものの、その後は、高張力鋼の導入量の増加などにとともにない、転炉鋼生産量が増加することとなる。また、鉄鋼生産における技術進歩の想定による転炉鋼生産量の差は、製鋼法シナリオごとに大きな差はなく、いずれにおいても約2億トンとなった。



図(5)-14 世界の鉄鋼生産量および転炉鋼要求量（左）、世界の転炉鋼生産量（右）



図(5)-15 転炉鋼要求量に対する転炉鋼生産量の比（世界）

転炉鋼要求量と製鋼法シナリオ別の転炉鋼生産量と比較すると（図(5)-15）、B0ケースでは転炉鋼要求量が現状から微増するため、転炉鋼生産が現状率相当で減少するケースにおいては、2035年あたりで生産量と要求量が一致し、その後は要求量が生産量となる。一方で、B1ケースでは、2050年ごろにようやく需給バランスに到達する。需給バランスを重要視しないケースでは、要求量に対し1.5倍もの量が生産され、個の最適解の集合が全体の最適解にはならないことが示された。

### 3) 鉄鋼生産量

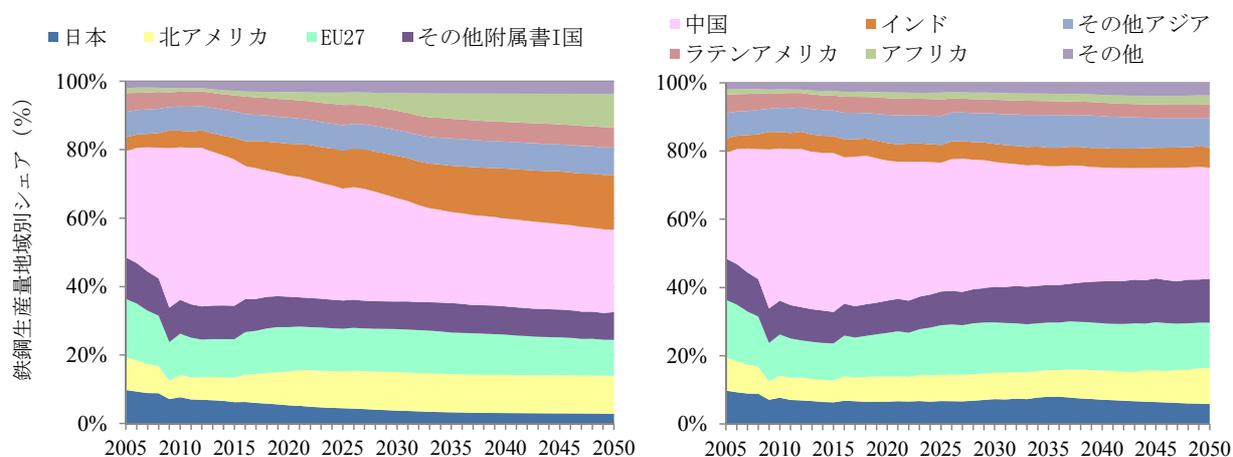
#### a. 世界の鉄鋼生産量の地域偏在

鉄鋼は貿易財であるため、鉄鋼消費量と鉄鋼生産量の地域偏在は異なる。貿易シナリオがGT2ケースの場合の二つの製鋼法選択シナリオにおける世界の鉄鋼生産量の地域別シェアを図(5)-16に示した。

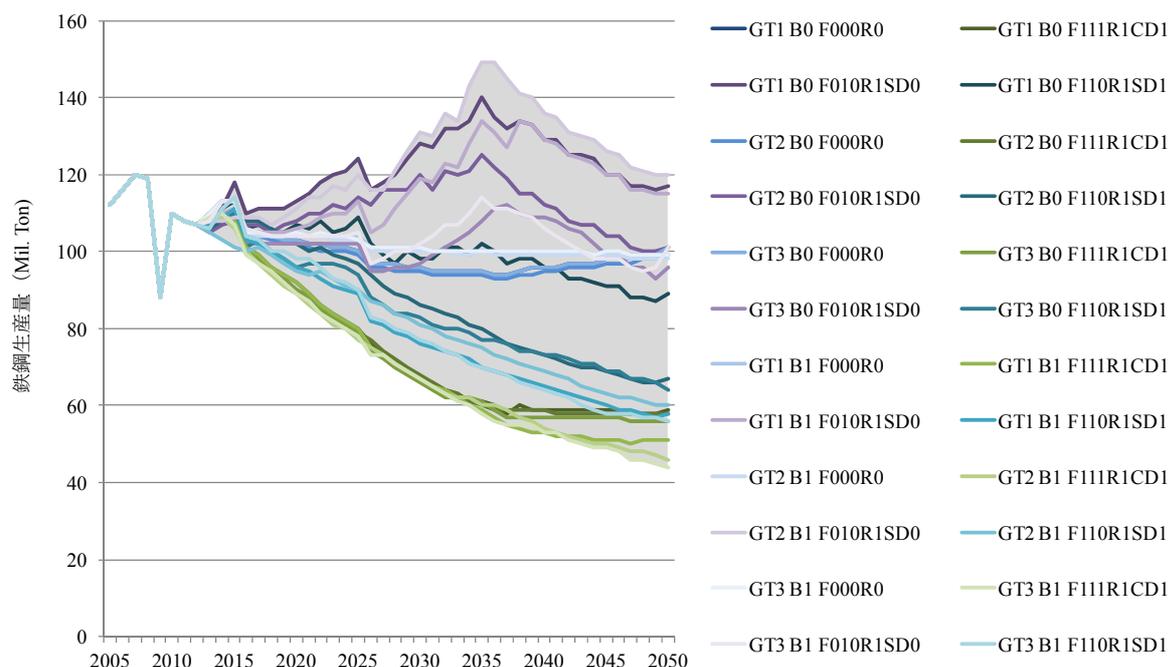
まず、左側のB0のF111R1CD1ケースでは、GT2で既存生産国では鉄鋼消費量が維持されることと、炉の減耗率以上のスピードでは鉄鋼生産量が減少しない制約のため、転炉鋼および鉄鋼全量の両方で需給バランスを取ろうとするシナリオでありながらも、先進地域のシェアは急激には減少せず緩やかなものとなる。インドやアフリカでは、需給に合わせて大きく生産量が増加するため、シェアの増加が顕著である。一方で、右側のB1のF010R1CD1ケースでは、鉄鋼の需給バランスは重視せず、スクラップの地域内利用が促進されるため、相対的にスクラップが大量に発生する先進地域での生産量が増加しやすく、緩やかな増加となり、途上国での生産量シェアはほぼ横ばい状態となった。

#### b. 日本の鉄鋼生産量

貿易シナリオ、転炉鋼要求シナリオおよび製鋼法選択シナリオの組み合わせ全24通りの推計結果より日本の鉄鋼生産量の幅を図(5)-17に示す。2012年には1.07億トンであった生産量は、2035年に1.49億トンにまで達するケースもあるが、2050年には最大1.2億トンにまで減少し、現状とあまり変わらない生産量となっている。幅の下限ではほぼ減耗率に従って減少しており、2050年には需給バランスが成立する程度の4,327万トンとなり、59%の減少となる。



図(5)-16 世界の鉄鋼生産量地域別シェア（左：GT2B0F111R1CD1、右：GT2B1F010R1SD0）



図(5)-17 日本の鉄鋼生産量の幅

財の貿易シナリオと転炉鋼要求シナリオの違いにより多少順序は入れ替わるものの、全体として鉄鋼生産量は、製鋼法選択シナリオが決定要因となった。図(5)-17に示される幅の中で上から順に、F010R1SD0、F000R0、F110R1SD1、F111R1CD1ケースの線が多かった。

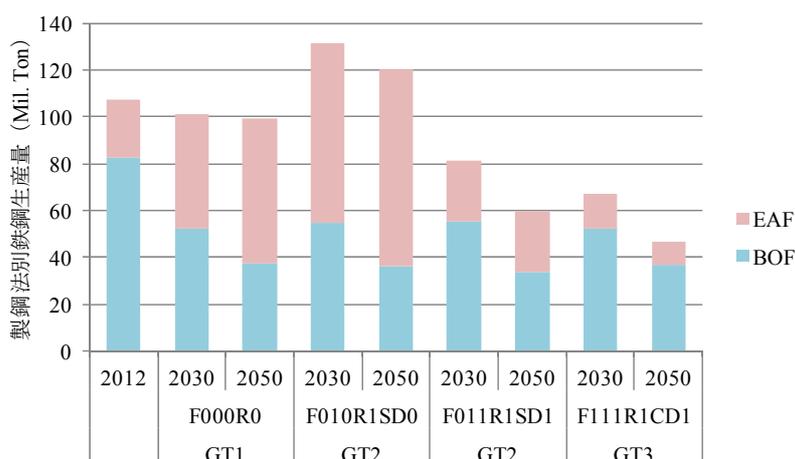
F010R1SD0ケースは、転炉鋼も電炉鋼も需給バランスを取らないことを考慮しないため、世界全体の鉄鋼消費量が増加している条件下では、鉄鋼生産を減少させるインセンティブが働かない。そのため、鉄鋼生産量が製鋼法選択シナリオの中では最も大きくなる。ただし、2035年以降は、他の地域の鉄鋼生産量増加の影響を受けて、減少がみられる。2035年までは大きく上昇するにも関わらず、それ以降減少しているが、これは、2035年頃から途上国においてもスクラップ発生量が多くなり電炉鋼生産量を増加させることにより、相対的に日本における優位性が低くなるためである。

F000R0ケースでは、世界の各地域がすべて世界の消費動向を参照して生産量を決定するため、世界における生産構造は、基準年と大きくは変わらない。また需給バランスも考慮しないため、一期前との変化が大きくないような生産決定を行うため、あまり変化がない。

F110R1SD1ケースでは、転炉鋼生産地域が増加することに加えて、鉄鋼消費量について需給バランスを取ろうとするため、生産量を増加させるインセンティブが働かず、鉄鋼生産量は緩やかに減少する。

F111R1CD1ケースは、転炉鋼、鉄鋼ともに需給バランスを取るシナリオである。日本の鉄鋼消費量は、2012年から2050年に向けて緩やかに減少していく。

生産分配シナリオのすべての組み合わせを考えた場合、自動車や機械類は最終製品であり、鉄鋼は素材であるという違いはあるものの、財の一つである。したがって、世界全体の将来シナリオを考えた場合、財貿易のシナリオと製鋼法選択シナリオに適合しやすい組み合わせがあると考



図(5)-18 日本の製鋼法別鉄鋼生産量 (B0ケース)

えられる。そこで、以下においては、製鋼法選択シナリオにそれぞれ一つの財貿易シナリオを1対1対応させて、考察を行う。

製鋼シナリオ法選択シナリオと財貿易シナリオの組み合わせは、F000R0ケースは世界が世界全体での動向から生産を決定することからGT1を、F010R1SD0とF110R1SD1ケースは転炉鋼の需給バランスを考慮しないシナリオであり地域内の技術優位性を維持しようとするシナリオであることからGT2を、F111R1CD1ケースは財の需給バランスをとるGT3と組み合わせる。

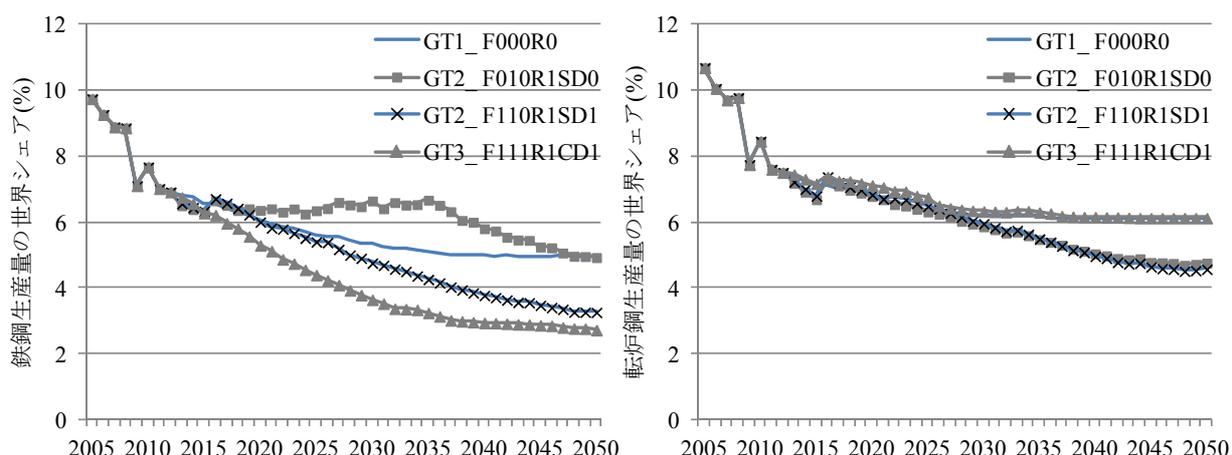
転炉鋼要求シナリオがB0ケースの場合を例として考察を行う。転炉鋼要求量はいずれのケースでも減少するため、シナリオごとの転炉鋼と2030年と2050年の製鋼法別鉄鋼消費量を見ると、F010R1SD0ケースの大幅な伸びは電炉鋼によるものであることが分かる(図(5)-18)。

F000R0ケースも、転炉鋼と鉄鋼消費量ともに、需給バランスを考慮しないシナリオではあるが、F010R1SD0ケースではスクラップの地域内消費を優先させるため、F000R0ケースと比較して世界の中で電炉鋼生産に優位性が生じ生産量が伸びている。また、F110R1SD1とF111R1CD1ケースは、双方とも鉄鋼の需給バランスを取ろうとするシナリオなのだが、F110R1SD1ケースでは、スクラップの国内消費を重要視するため電炉鋼消費量がF111R1CD1ケースと比べて大きくは減少しない。また、F000R0ケースは、国内需給は考慮せず世界動向により生産量を決定しているため、緩やかに増加する世界の鉄鋼消費量に合わせて電炉鋼生産量も伸びており、スクラップの国内消費を目指すF110R1SD1ケースより電炉鋼生産量が多くなる。

転炉鋼生産量は、2030年には1,087万トンの差があるものの2050年にはその差は549万トンにまで縮まっており、いずれのシナリオも2005年の約半分となる。

世界における日本の位置づけを示す。鉄鋼生産量の世界に占めるシェアは、2005年以降中国の台頭により2005年の11.4%から2012年の6.9%に急激に減少してきた。世界全体での鉄鋼生産量が増加する中、鉄鋼生産量は減少傾向にあるため、シェアも減少傾向となり(図(5)-19)、鉄鋼生産量合計では、F000R0とF010R1SD0ケースでは4.9%、他の二つのケースは3%前後となる。2035年頃に鉄鋼生産量が増加するF010R1SD0ケースであっても、シェアとしては大きく伸びておらず、7%程度を維持するに留まっている。

一方で、日本において比較的技術優位性がある転炉鋼においては、世界に占めるシェアは、鉄



図(5)-19 日本の鉄鋼生産量の世界に占めるシェア（左：鉄鋼全量、右：転炉鋼）

表(5)-11 CO<sub>2</sub>排出量の比較（2050年）

設定条件	なりゆき ケース		対策最大導入ケース		
	MtCO <sub>2</sub>	tCO <sub>2</sub> /tCS	MtCO <sub>2</sub>	tCO <sub>2</sub> /tCS	
2005	2,010	1.75			
2010	2,576	1.80			
	28%	3%			
供給側 制約	100%	2,255	0.84	1,366	0.71
	12%		-52%	-32%	-59%
90%	2,575	0.96	1,644	0.86	
	28%		-45%	-18%	-51%
需要側	2,575	0.96	1,888	0.99	
制約	28%		-6%	-44%	

\*tCS 粗鋼トン

\*% の段は2005年からの変化率

鋼生産量合計と比べてやや高いもののF000R0とF111R1CD1ケースで6.1%程度であり、他の二つは4%後半にまで減少する。鉄鋼生産量も、転炉鋼生産量のみをみても、世界に占める日本のシェアは、本研究で想定したシナリオでは大きく伸びることはないことが確認された。

B0ケースの場合のみを例として取り上げたが、B1シナリオの場合、世界全体での転炉鋼要求量が減少するので、それに伴い各国の転炉鋼生産量も減少する。世界で全体的に減少するので、シェアで見ると、B0ケースの場合との違いは1%に満たなかった。

#### （5）鉄鋼部門からの二酸化炭素排出量の推計

2050年における世界の鉄鋼部門からのCO<sub>2</sub>排出量を表(5)-11に示す。

2050年の粗鋼生産量は、両ケースとも2005年と比較して増加したが、CO<sub>2</sub>排出量は電炉鋼比率の増加により最大28%の増加に留まる。2010年から比較すると差はなく、2010年以降のCO<sub>2</sub>排出量は、電炉への転換の対策をとることでほぼ増加を抑制できることになる。CO<sub>2</sub>排出量の削減率が最大となるのは、対策最大導入ケースで老廃スクラップの回収率を100%も想定した場合であり、32%を

達成する。なりゆきケースと比較すると対策最大導入ケースで15～39%の削減がみられ、財ストックの効率改善やハイテンの導入といった対策の効果が定量的に示された。需要側からの制約を考慮すると対策最大導入ケースであっても6%の削減となってしまう、大きな削減は見込めない。一方で、粗鋼一トンあたりのCO<sub>2</sub> 排出量でみると、転炉から電炉への転換によるCO<sub>2</sub>排出量原単位の減少に伴う削減効果をみるのが可能となり、なりゆきケースで50%前後、対策最大導入ケースでは最大59%の削減が示された。

#### (6) 新シナリオ (SSPs : Shared Socioeconomic Pathways) を用いた鉄鋼需要量の将来推計

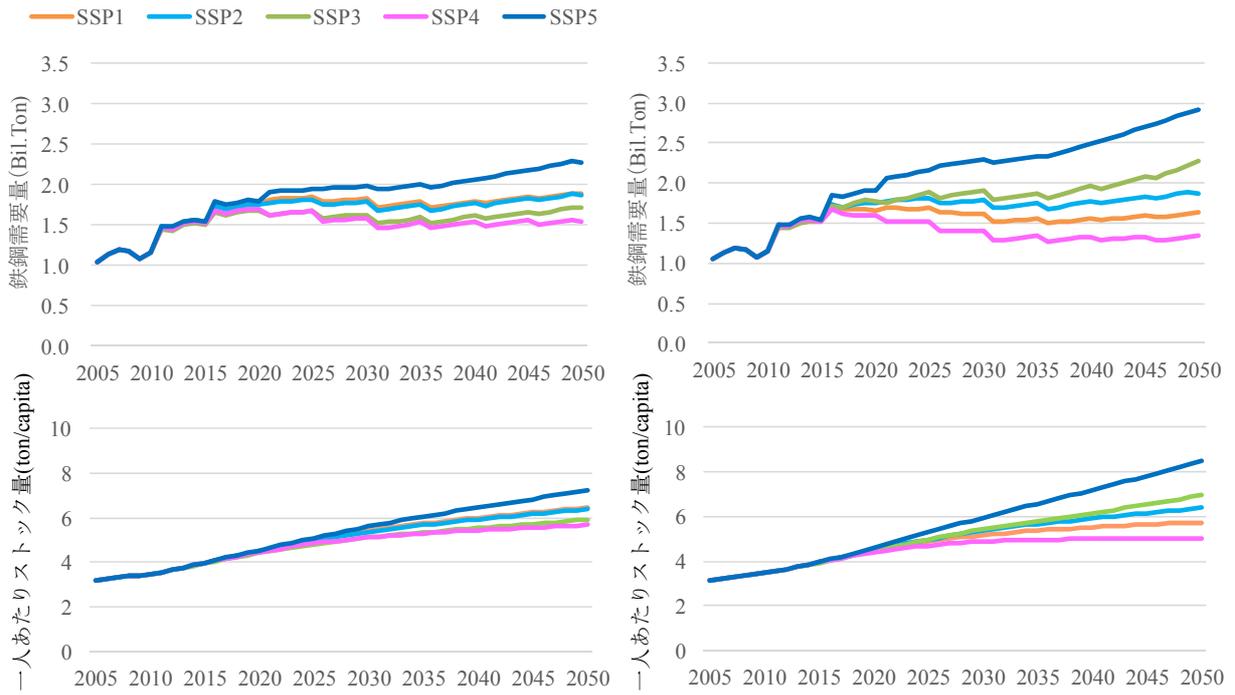
鉄鋼は貿易財であり、世界の鉄鋼需要の動向に生産量は影響を受ける。鉄鋼需要は、社会経済シナリオに影響を受けるため、世界の社会経済シナリオについて、IPCCのSSPsを想定した場合の推計を行った。新シナリオでは、緩和策と適応策の導入の違いを軸とした5つの社会経済シナリオがあるが、新シナリオの緩和策の想定を中心に、マテリアルストック・フローモデルで設定されている需要対策シナリオの3つのケースにおける対策導入率との関連付けを行い、表(5)-12に示す通り設定した。

世界の社会新シナリオでは、シナリオごとに人口やGDPなど鉄鋼需要の駆動力が異なるため、鉄鋼需要の変化は、駆動力の変化および対策導入率の差の双方に起因する。そこで、まず、すべてのシナリオに中位の対策を導入した場合の鉄鋼需要量や鉄鋼ストック量を推計し、対策導入に起因する削減効果との差を比較した。

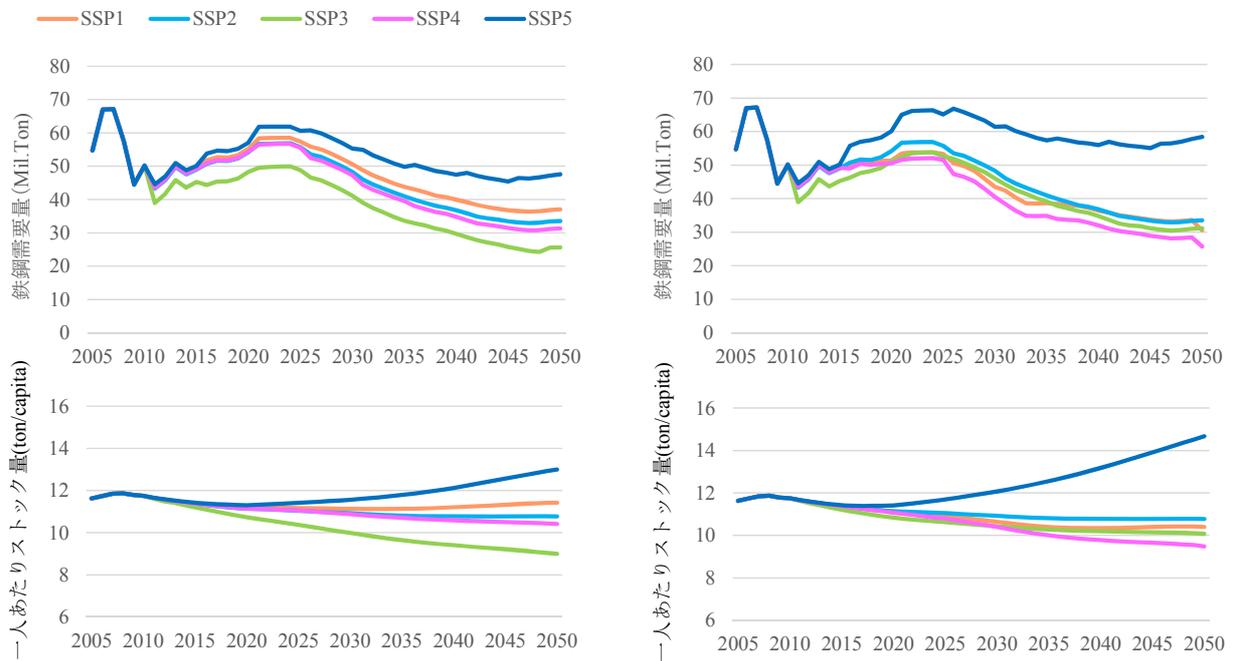
世界全体では、社会経済シナリオの差のみでは、鉄鋼需要量はSSP5でやや増加するほかは、ほとんど横ばいであり、2050年では15～23億トンの範囲となり、一人あたり鉄鋼ストック量も6トン/人程度となった(図(5)-20)。対策導入率を変化させると、鉄鋼需要量では、2050年ではほぼ倍の差が生じ、最大のSSP5シナリオでは29億トンに達した。一人あたりストック量は、最小のSSP4シナリオでは5 トン/人に留まるが、SSP5シナリオでは、8.4トン/人に到達しており、これは、現在の先進国のレベルの範囲の下限に相当する。つまり、世界平均が現在の先進国のレベルの物的水準になるということである。SSP2シナリオは6.4トン/人であり、トレンド相当のシナリオでは基準年の3.1トン/人から2倍になると推計された。

表(5)-12 新シナリオと鉄鋼需要削減対策導入の組み合わせ

新シナリオ	対策導入	シナリオの内容
SSP1	対策最大導入	最大限の対策導入率をすべての地域で想定
SSP2	トレンド	対策導入率はトレンド相当
SSP3	なりゆき	なりゆきシナリオのイメージ。対策はほとんど入らない。
SSP4	対策最大導入	高い対策導入率
SSP5	なりゆき	低い対策導入率



図(5)-20 世界の新シナリオの分析結果 (左：対策導入無、右：対策導入有)



図(5)-21 日本の新シナリオの分析結果 (左：対策導入無、右：対策導入有)

日本では人口が減少しており、鉄鋼需要量減少の主要因となっている。一番減少の大きなSSP3シナリオで24%減（対2010年）である（図(5)-21）。5つのシナリオの中でSSP5シナリオ以外は、大きな差はなく、同じような軌跡となる。SSP5シナリオでは、鉄鋼需要量は、2020年代にピークを迎えたのち緩やかに減少し、2050年には6,000万トンとなる。その他のシナリオは、2050年の約3000万トンに向けて減少し続ける。一人あたりストック量は、SSP5シナリオでは増加し続け、14.7トン/人に達するが、その他のシナリオでは、微減の10トン/人で横ばいである。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

日本の将来シナリオを検討するうえで、重要な要素となる鉄鋼生産量の見通しについて、技術だけではないサービス需要の変化も考慮し、さらに、世界的な動向も加味しながら分析することが可能となった。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

将来の鉄鋼需給の見通し分析結果を中央環境審議会地球環境部会2020年以降の地球温暖化対策検討小委員会の下に組織されたマクロフレームワーキンググループへ提供することで、モデル分析結果を元にした将来の低炭素社会に向けた道筋や排出経路のあり方についての議論へ貢献した。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

特に記載すべき事項はない。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) 河瀬玲奈、松岡譲：土木学会論文集G(環境), 70, 6, II\_239-II\_247(2014), 2050年における世界の鉄鋼部門からのCO<sub>2</sub>排出量削減ポテンシャルの推計
- 2) 河瀬玲奈、松岡譲：土木学会論文集G(環境), 71, 5, I\_383-I\_391 (2015), 世界における生産分配を考慮した日本の鉄鋼生産量の推計

#### <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）>

特に記載すべき事項はない。

**(2) 口頭発表 (学会等)**

- 1) R. Kawase and Y. Matsuoka: The joint 11th International Society for Industrial Ecology (ISIE), Socio-Economic Metabolism section conference and the 4th ISIE Asia-Pacific conference, Melbourne, Australia, 2014  
“World Steel Stock and Demand towards 2050”
- 2) R. Kawase: XIII International Conference on Environment, Energy and Waste Management, Zurich, Switzerland, 2015  
“Feasibility of Iron Scrap Recycling with Considering Demand-Supply Balance”
- 3) R. Kawase and Y. Matsuoka: ISIE conference 2015 Taking Stock of Industrial Ecology, Guildford, United Kingdom, 2015  
“What is the Effective Countermeasure to Reduce Material Stock and Demand? – A Case Study of Steel –“
- 4) R. Kawase: The 3rd PC and the 10th SSMS International Conference, Bandung, Indonesia, 2015  
“Global CO<sub>2</sub> emission reduction potential by scrap recycling”
- 5) R. Kawase: 18th International Conference on Environmental and Ecological Engineering, Paris, France, 2016  
"A Range of Steel Production in Japan towards 2050"
- 6) R. Kawase : International Society for Industrial Ecology (ISIE) 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, Nagoya, Japan, 2016  
“Global Steel Production towards 2050 “

**(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**

特に記載すべき事項はない。

**(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) International Energy Association (IEA): Energy technology transitions for industry, 2009.
- 2) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) : the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- 3) 経済産業省長期エネルギー需給見通し小委員会:  
[http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/](http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/) (アクセス日 :

2015.06.18)

- 4) 環境省: 2013年以降の対策・施策に関する報告書  
<https://funtoshare.env.go.jp/roadmap/from2013.html> (アクセス日 : 2015.06.18)
- 5) 日本鉄鋼連盟: 鉄鋼統計要覧 各年版, 日本鉄鋼連盟.
- 6) World Steel Association (worldsteel): Fact Sheet -The three Rs-, 2011.
- 7) Hatayama H., Daigo I., Matsuno Y., and Adachi Y.: Outlook of the World Steel Cycle Based on the Stock and Flow Dynamics, Environmental Science & Technology, Vol.44, 6457-6463, 2011.
- 8) worldsteel : The Future of the Global Steel Industry. – Challenges and Opportunities, IMnI 39th Annual Conference, 2013.
- 9) Oda J., Akimoto K., Tomoda T.: Long-term global availability of steel scrap, Resources, Conservation and Recycling, 81, 81-91, 2013.
- 10) International Energy Association (IEA): Energy Technology Perspective 2014, IEA, 2014.

## **Research on Evaluation of Mitigation Strategies to Achieve Long-term Reduction Targets of Greenhouse Gases in Japan and the World**

Principal Investigator: Shuichi ASHINA

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)  
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN  
Tel: +81-29-850-2227 / Fax: +81-29-850-2572  
E-mail: ashina.shuichi@nies.go.jp

Cooperated by: Kyoto University, Lake Biwa Environmental Research Institute, Mizuho Information & Research Institute, Inc.

[Abstract]

**Key Words:** Low Carbon Society, Integrated Assessment Models, Scenario, Emission Pathways, Climate Change Mitigation, Paris Agreement, Intended Nationally Determined Contributions, Macro frame

Japan has a target of 80% GHG reduction in 2050 as compared to 1990 level. After 2011, Japan's energy policy was forced to change from conventional way of thinking which relied on nuclear power as one of the key energy sources for both stable energy supply and GHG reductions. Low Carbon Society scenario also faces revision after the Fukushima accident and change in domestic/international situation. Such new Low Carbon Society scenarios and roadmaps for achieving drastic reduction of Greenhouse Gas Emissions in Japan need to include new viewpoints such as behavior change for energy saving, acceleration of renewable energy diffusion, economic growth through low carbon actions, dematerialization of lifestyle, and utilization of material stocks.

This study aimed to establish methodology for designing visions/scenarios and implementation strategies for achieving low carbon society in Japan by the year 2050 through the use of integrated assessment models. For the new socio-economic scenarios, the study placed emphasis not only on industrial structure but also on lifestyle, energy consumption behavior, and energy-intensive material production and stock. Through the study, we proposed concrete strategy for achieving Japan Low Carbon Society by 2050 and determine mid-term (esp. 2030) GHG reduction target in line with long-term target of 80% reduction. As a part of this we proposed new growth patterns and innovation strategies in order to achieve Low Carbon Society in Japan.

For this purpose, we have developed several types of integrated assessment models, such as AIM/Enduse Model, AIM/Backcast model and AIM/CGE model. In addition to these models some sector-specific models for lifestyles, material stocks and electricity generation have also been developed.

The project shows that Japan's reduction targets in mid- and long-term are feasible, and it is important to accelerate three actions for achieving the target: improvement of energy efficiency in demand side, reduction of emissions factors in the power sector, and fuel shift to electricity in demand side sectors.

The project has also developed shared socioeconomic pathways (SSPs) designed primarily to be used by the climate-modeling and impact, adaptation, and vulnerability communities. We used AIM/CGE[Global] to quantify the SSP3 marker scenario, which illustrates a particular storyline in the IAMs that were adopted to quantify SSPs. The design of SSP3 has taken into account tough challenges for both mitigation and adaptation.