

課題名 2A-1103 統合評価モデルを用いた世界の温暖化対策を考慮したわが国の温暖化政策の効果と影響
課題代表者名 増井 利彦（独立行政法人国立環境研究所社会環境システム研究センター 統合評価モデリング研究室室長）
研究実施期間 平成23～25年度
累計予算額 198,393千円（うち25年度61,044千円）
 予算額は、間接経費を含む。
本研究のキーワード 統合評価モデル、将来シナリオ、気候変動緩和策、エネルギーサービス需要、排出経路

研究体制

- (1)世界モデルを用いた気候安定化目標の実現可能性とその評価（（独）国立環境研究所）
- (2)わが国における温室効果ガス排出削減策の効果とその影響（みずほ情報総研株式会社）
- (3)社会の構成要素を記述するモデルの開発と将来シナリオへの適用（京都大学）

研究協力機関

武蔵野大学、立命館大学、慶應義塾大学
 中国 国家発展和改革委員会能源研究所、中国科学院広州能源研究所
 インド インド経営大学院アーメダバード校、ボパール建築計画研究所
 タイ アジア工科大学、タマサート大学、キングモンクット大学
 インドネシア ボゴール農業大学、バンドン工科大学
 マレーシア マレーシア工科大学
 ネパール アジア技術経営大学
 韓国 ソウル大学、国立環境研究院
 米国 スタンフォード大学、太平洋北西国立研究所
 オランダ 環境評価庁

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

2011年にダーバンで開催された気候変動枠組条約第17回締約国会議（COP17）以降、第一約束期間後の温室効果ガス排出削減の枠組みについて新たな局面に踏み出したといえる。こうした中、わが国では、2011年3月11日の東日本大震災と福島第一原子力発電所事故による原子力発電所の停止と再稼働、電力供給問題により、2020年以降の温室効果ガス排出量の削減についての再検討が求められ、2020年の温室効果ガス排出削減目標は、1990年比25%削減が撤回され、原子力発電による発電電力量を0にするという条件ながら、2005年比3.8%削減、1990年比3.1%増加という新たな目標がCOP19において公表されるなど、長期目標の実現を見据えた政策の見直しが迫られている。

（独）国立環境研究所、京都大学、みずほ情報総研が中心となってこれまでに開発してきたアジア太平洋統合評価モデル（AIM）は、わが国の温室効果ガス排出量削減の中期目標の検討において中核的な役割を担ってきた。環境省中央環境審議会中長期ロードマップ小委員会では、日本を対象としたAIMの技術選択モデル（AIM/Enduse [Japan]）と応用一般均衡モデル（AIM/CGE [Japan]）の結果が報告され、2011年度に開始された2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会においても様々な情報を提供してきた。また、各自治体においても、国の方針を受けた温室効果ガス削減に関する計画が徐々にではあるが提示されはじめている。これまでに提示されてきた大幅な温室効果ガス排出量の削減を達成するためには、革新的技術の導入、化石燃料から再生可能エネルギーへの大幅な転換、産業活動・ライフスタイルの大胆な低炭素化など大きな社会的変革が求められる。そうしたダイナミックな変革を社会的厚生を損なわずに達成するためには、目標とする社会に向う移行戦略を十分に練り、それを着実に実行する必要がある。とりわけ『新成長戦略』に見られたように、温暖化対策を起点とした新たな産業の創出など、温暖化対策には経済発展の推進力としての役割も期待されている。このように、現在行っている国レベルを対象としたマクロな分析とともに、対策をより現実的なものとして示すことができる詳細なモデルの開発が求められている。

一方、世界規模では、産業革命前からの気温上昇を2℃以下に抑えるためには、2050年までに世界全体の

二酸化炭素排出量を2005年比で50%～85%削減しなければならないとIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第4次評価報告書には指摘され、IPCC第5次評価報告書においても、長期的に2℃目標の実現のためには、温室効果ガス排出量の濃度を二酸化炭素換算で450ppmに安定化することが必要であることが示されている。IPCC第5次評価報告書に向けて、国際的な統合評価モデルコミュニティでは様々な分析が行われてきた。代表的なものとしては、気候モデルへの入力を目的としたRCPs(Representative Concentration Pathways)や、統合評価モデルのコンソーシアムでの将来シナリオの作成(IAMC: Integrated Assessment Model Consortium)、EMF(Energy Modeling Forum)による世界半減シナリオの評価、AME(Asia Modeling Exercise)によるアジアに焦点を当てた分析、SRES(Special Report on Emissions Scenarios)に代わる新たな社会経済シナリオであるSSPs(Shared Socio-economic Pathways)などである。

以上に示した国内外における排出目標等をとりまとめたものが図1であり、国際的な動向を踏まえつつ、国内の実現可能でかつ国際的にも有効な排出削減シナリオを描くことが喫緊の課題である。長期的な気候変動対策の目標である「産業革命前からの気温上昇を2℃に抑制する」ために必要な世界の温室効果ガス排出量の経路と、それと整合した日本の排出削減目標や対策を検討することは、国内及び国際的に不可欠な検討課題である。とりわけ、国内だけを対象とした分析ではなく、国際的な動向や分析結果も踏まえて分析を行うことは、今後の国際交渉や国内での対策強化においても重要な情報となりうる。

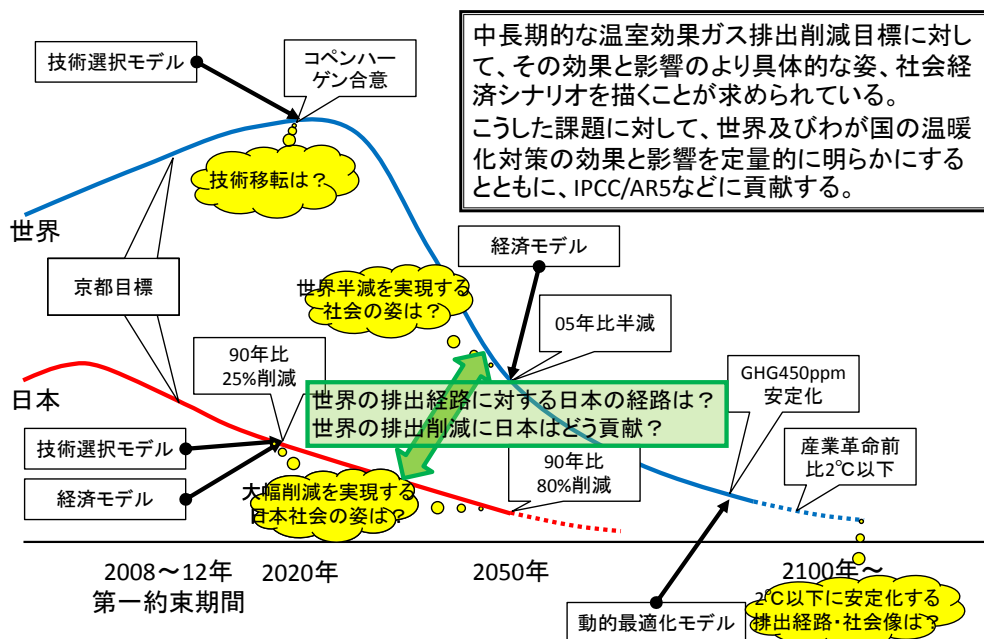


図1 気候変動問題の解決に向けて

2. 研究開発目的

本研究課題の目的は、日本及び世界を対象に、低炭素社会の構築に資する新しい技術の普及過程やその効果を、これまでのスケールより詳細に定量的に把握することが可能となるモデルを開発し、温室効果ガス排出削減の中長期目標の効果と影響を定量的に評価するとともに、そうした目標を実現した社会像を家計消費、物質ストック・フローの面から具体的に描写することである。具体的には、(1) 国際的な温室効果ガス排出量の削減目標について、これまでに開発してきた個々の世界モデル(技術選択モデル、応用一般均衡モデル、簡易気候モデルを含んだ動的最適化モデル)について、技術普及過程や再生可能エネルギー導入のポテンシャル、サービス需要量導出のためのモジュールなどを新たに開発し、これらを連携させた将来シナリオを定量化し、それらを世界の様々なモデルコミュニティに提供すること、(2) わが国を対象としてきた技術選択モデルや経済モデルの各部門における対策をさらに詳細に分析可能となるようなモジュールの開発を行い、前述の国際的な削減に対するわが国の温暖化対策目標を実現するための方策とその影響を定量的に明らかにすること、さらに、(3) 上記の温暖化対策を実現させるような社会像の検討とシナリオの叙述が可能となるような家計消費、物質ストック・フローの分野を対象にモデル開発を行い、それらを用いて将来像についての詳細な記述を行うこと、とする。図2に本研究で開発、改良したモデルとその関係を示す。

本研究の成果としては、わが国の温暖化政策に資するモデルの開発と、開発したモデルを用いた様々な温暖化対策の評価を定量的に行うことを目標としている。また、国際的には、IAMC(統合評価モデリングコンソーシアム)やEMF(エネルギーモデリングフォーラム)などの国際的な統合評価モデルコミュニティ、モデル比較研究への情報提供を通じて、IPCC第5次評価報告書に貢献することを目標とする。

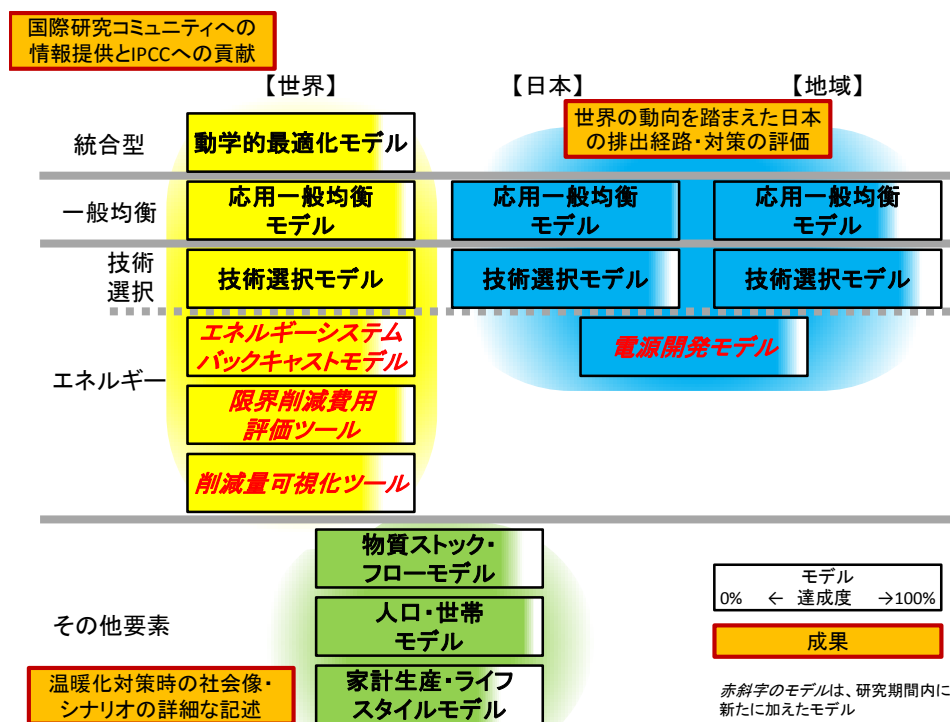


図2 本研究において開発、改良したモデル

3. 研究開発の方法

(1) 世界モデルを用いた気候安定化目標の実現可能性とその評価

1) 世界技術選択モデルを用いた気候安定化目標の評価

AIM/Enduse[Global]は、世界を対象とした技術選択モデルであるが、その成果を様々な国際比較研究プロジェクトに提供してきた。また、各国の中長期的な技術的な削減目標策定の議論に用いられてきた。特に、近年、産業革命以前と比べて2℃上昇以内に気温上昇を抑えるシナリオが注目されている。そこで、世界的に著名な国連環境計画による報告書Emission Gap Reportで議論されている、2℃シナリオ、2.5℃シナリオ、および3℃シナリオの世界の排出量経路（各シナリオとも66%以上の確率で達成するシナリオの幅のうち、中央値の値をここでは採用）を満たすときのAnnex IおよびNon Annex Iにおける排出経路の分析を、AIM/Enduse[Global]を用いて行った。またそれらの結果と2050年において炭素税を50ドル/tCO₂、100ドル/tCO₂、200ドル/tCO₂および400ドル/tCO₂を課したときの排出経路との比較を行った。

2) 限界削減費用評価のためのツール開発

本分析では、各国の最新の社会経済指標、活動量の情報を元に、各部門における将来の技術の見通しを考慮して、部門別に削減ポテンシャルを積み上げることで2020年および2030年における中期削減目標を評価した。ただし、前提条件の差異により結果が異なるため、主要な要因として挙げられる投資回収期間の違い（短期間、長期間）および炭素価格の違い（50、100、200、および1000ドル/tCO₂）を考慮して、日本、中国、韓国、モンゴルの限界費用曲線の特徴を分析した。また、発電部門におけるロックイン効果の影響も考察をした。

3) エネルギーシステムバックキャストモデル

逐次均衡で将来推計を行う技術選択モデルに対して、エネルギーシステムバックキャストモデルは、動学的最適化構造をもつモデルであり、技術選択モデルと同じ技術種をもつモデルである。想定された将来の目標に対して、どのタイミングでどの施策を導入することが最適であるかを分析することができる。

4) 世界CGEモデルを用いた将来シナリオの検討

IPCCが2000年に報告したSRESに代わる新しい社会経済シナリオとして国際的に開発が進められているSSPsの姿を定量的に明らかにするために、世界を対象としたCGEモデルを用いて分析を行った。SSPsは、緩和策のポテンシャルと適応策のポテンシャルの2軸からなるシナリオで、人口、GDP、技術進歩等のドライビングフォースに対応したエネルギー需給や土地利用変化等が定量的に提示される。推計に用いるモデルは、SSPsの定量化だけではなく、Ag-MIP（The Agricultural Model Comparison and Improvement Project）やISI-MIP（The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project）、ADVANCE（Advanced Model Development and

Validation for the Improved Analysis of Costs and Impacts of Mitigation Policies)、EMF等の国際比較研究にも適用しているモデルであり、SSPsの定量化とあわせて、各種国際比較研究で検討されている要素について、どのように定式化するか、前提となるシナリオを作成するかについての検討を行っている。特に、エネルギーや土地などの物質収支に注目してモデル化を行っている。

5) 削減量可視化ツール

モデル開発だけでなく、わかりやすさという視点から、英国で開発されてきた削減量可視化ツールをわが国に適用するためのモジュール開発やデータ収集についても行った。

(2) わが国における温室効果ガス排出削減策の効果とその影響

1) 日本を対象とした技術選択モデルを用いた2020年及び2030年の温室効果ガス排出削減目標の分析

これまでに開発してきた日本を対象とした技術選択モデルについて、東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所事故後の原子力発電所の稼働についていくつかの想定を行い、それぞれに対して温室効果ガスの排出削減の可能性について検討を行った。

2) 日本技術選択モデル(多地域版)の開発

日本を10地域に分割し、エネルギー起源の二酸化炭素以外の排出部門を含む全ての部門について、地域における気象条件の違いや人口構成、再生可能エネルギーの賦存量等の違いをエネルギー需給に反映させることができるように改良した多地域版の技術選択モデルの開発を行った。地域間の電力連系の増強なども技術オプションとして盛り込むことが可能であり、2050年までに温室効果ガス排出量を80%削減するというわが国の長期目標達成に照らした分析を実施した。

3) 日本経済モデルと技術選択モデルの統合によるわが国の排出削減目標の評価

これまでに開発してきた日本を対象とした応用一般均衡モデルに、技術選択モデルで対象とした様々な省エネ技術を組み込み、応用一般均衡モデルにおいて内生的に技術選択を行うことができるように改良した。これにより、経済的に見ても最も効果的な技術導入を行うとともに、技術選択モデルでは取り扱うことができないマクロ経済への影響についてもあわせて分析することが可能となる。開発したモデルを用いて、2013年11月に公表されたわが国の温室効果ガス排出削減目標の実現時の経済影響について分析を行った。

4) 日本を地域分割した応用一般均衡モデルの開発

一国を対象としたモデルによる分析では、平均的な日本の姿を対象としたものであり、各地の特性や資源を配慮したものではなく、地方政府レベルを対象に温暖化対策を検討するためのツールとしては、十分ではない。特に、2011年3月11日に発生した東日本大震災の経験から、東北地方のみが影響を受けたのではなく、サプライチェーンにより他の地域においても強い影響が見られた産業がある。このため、地域間の産業連関を内生化した応用一般均衡モデルの開発を行った。

本モデルは、わが国を9地域に分割して、財や生産要素の地域間での取引も考慮したモデルである。基準とするデータは、2005年を対象とした地域内産業連関表を用いて作成した競争輸入型地域産業連関表であり、発電部門や石炭・石油・ガス部門を詳細に分割した。

5) 多地域最適電源計画モデル

多地域最適電源計画モデルは、全国を都道府県単位で60地域に分割し、それぞれを実際の送電ネットワークおよび送電容量にあわせて想定した仮想的な送電線で結んだモデルであり、電力需要の大きさや発電所の立地は実際にあわせて設定する。電力需要は1時間ごとの値を外生的に設定し、費用最小化の最適化計算により毎時の発電所運用と年間の費用、二酸化炭素排出量を求めるものである。

(3) 社会の構成要素を記述するモデルの開発と将来シナリオへの適用

1) 人口・世帯モデル

将来の社会経済活動を推計する際の基礎となる人口・世帯数の将来推計を支援するために、人口・世帯モデルを開発した。人口推計は世界197地域を対象に、コーホート要因法に基づき、2100年までの都市・農村別、男女別、年齢階級別(5歳階級、0-4歳、5-9歳、…、90-94歳、95歳以上)人口を推計する。基準年(計算開始年)を2010とし、5年おきに計算する。一方、世帯推計は、世界103地域を対象に、世帯主率法に基づき推計する。推計対象地域全体は人口推計と同じだが、人口推計と比較して、世帯推計に必要なデータが集まりにくいいため、一部の国を集約して地域として取り扱った。本モデルを用いて、世帯種類別世帯数が推計される。

2) 家計生産モデル

家計生産モデルは、将来の家計の消費構造を推計するとともに、社会の変化等と環境負荷の変化の関係を明示するために開発されたモデルである。発展途上国でも入手可能なデータを用いて推計可能であり、比較的シンプルな推計構造にすることで各国に適用でき、さらに家庭ごみ組成別の家庭ごみ発生量を推計可能なツールを開発し、これを人口規模と1人あたりGDPの観点から主要なアジアの8か国（日本、中国、韓国、インド、インドネシア、マレーシア、ベトナム、タイ）に適用し、アジア各国の家庭ごみ発生量の実態の把握を試みた。

3) 物質ストック・フローモデルの開発

低炭素社会構築のためには、エネルギー集約素材の生産に係る二酸化炭素排出量の削減は必須であるが、エネルギー集約素材の代表的素材である鉄鋼は、社会インフラや、生産資本、輸送機器など人々が生活、また、経済活動を行うためには不可欠な幅広い財に使用されている。先進国では物的成熟度は高く、素材需要の駆動力は、その維持の段階になってきているが、途上国では、社会インフラや生産資本の整備が、今後の駆動力となる。物質ストック・フローモデルは、鉄鋼需要の削減可能性を検討することを目的とし、ストックが行うサービスのサービス需要からストックを構成する財とそこに含まれる鉄鋼需要までを整合性をもって推計するためのモデルである。

4. 結果及び考察

(1) 世界モデルを用いた気候安定化目標の実現可能性とその評価

1) 世界技術選択モデルを用いた気候安定化目標の評価

2050年に世界の温室効果ガス排出量を1990年比半減するという目標を達成する際の限界削減費用は、2020年に150ドル/tCO₂eq、2050年に600ドル/tCO₂eqであった。また、世界の追加投資額は2020年までに6.0兆ドル、2050年までに73兆ドルであり、本研究で想定した世界のGDPの1～2%程度に相当する規模であることが分かった。また、ロシアのように社会経済動向を考慮してもベースライン排出量ですでに1990年比排出量が25%減となる国もあれば、社会経済成長が著しい中国やインドにおいては、たとえ200ドル/tCO₂eqの炭素価格下であっても1990年比排出量が約倍増となる国もある。よって、2050年世界半減目標の議論においては、各国の社会経済や技術動向も踏まえ、より詳細に遷移過程について議論を詰めていく必要があるといえる。

2) 限界削減費用評価のためのツール開発

日本、中国、韓国、モンゴルを対象に本ツールを適用した。各国の社会経済の特徴によって差異はあるが、一般的に、0ドル/tCO₂以下では、運輸部門における高効率な乗用車やトラック、民生部門におけるLED照明、産業部門におけるボイラーの高効率化などの技術が有効であり、0～100ドル/tCO₂の間では、発電部門における風力発電、バイオマス発電、運輸部門におけるバイオマス燃料などの技術が有効である。また、100ドル/tCO₂以上になると太陽光発電も有効な対策となる。また、各国のエネルギー価格が異なるため同じ対策技術でもその費用対効果が異なるが、民生部門における断熱技術は、日本・韓国では0～100ドル/tCO₂の間、中国・モンゴルでは100ドル/tCO₂以上になると優位となり、発電部門における高効率ガス火力発電は中国・モンゴルでは0～100ドル/tCO₂の間、日本・韓国では100ドル/tCO₂以上になると優位な対策となる結果となった。

3) エネルギーシステムバックキャストモデル

なりゆき社会の場合には、世界全体の温室効果ガス排出量は2010年以降ほぼ直線で増加し、2050年には75GtCO₂eqまで増加する結果となった。一方、550ppmCO₂eq安定化ケースでは2050年までほぼ横ばい、450ppmCO₂eq安定化ケースでは2015年から削減が開始され、2050年には31.7GtCO₂eqとなった。

地域別に比較すると、日本と韓国を含むOECDアジアでは、炭素割当量なしシナリオでも温室効果ガス排出量は現状から横ばいであり、炭素割当量が与えられることで現状の排出量から半減以下まで削減が進むことが分かる。一方で、中国やASEAN諸国では、450ppmCO₂eq安定化シナリオを与えることで、現状と同程度の排出量が維持される。インドでは、炭素割当量を与えることでベースラインシナリオよりは削減が進むが、450ppmCO₂eq安定化シナリオでも、2050年の温室効果ガス排出量は現状の1.9倍に増加した。

4) 世界応用一般均衡モデルを用いた将来シナリオの検討

図3に示すようなSSP1からSSP3の社会像を、世界を対象とした応用一般均衡モデルを用いて定量的な分析を行った。温室効果ガス排出量は、2100年において90～160GtCO₂eq/年と大きな幅が見られ、緩和策に対する困難性が大きいSSP5やSSP3などで大きな値となっており、逆に緩和策に対する困難性が小さいSSP1やSSP4は小さな値となった。一次エネルギー供給量についても同様の傾向がみられる。2100年における気温上昇は排出量ほどの差が見られず、3.5～4.5℃となった。なお、SSPsで示されている社会像は温暖化対策を行わないなりゆ

き社会を描写したもので、今後は各SSPを起点に、対策ケースであるRCPsの再現を行う予定である。

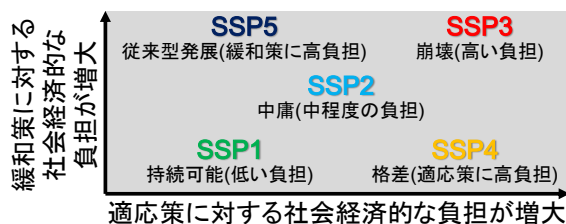
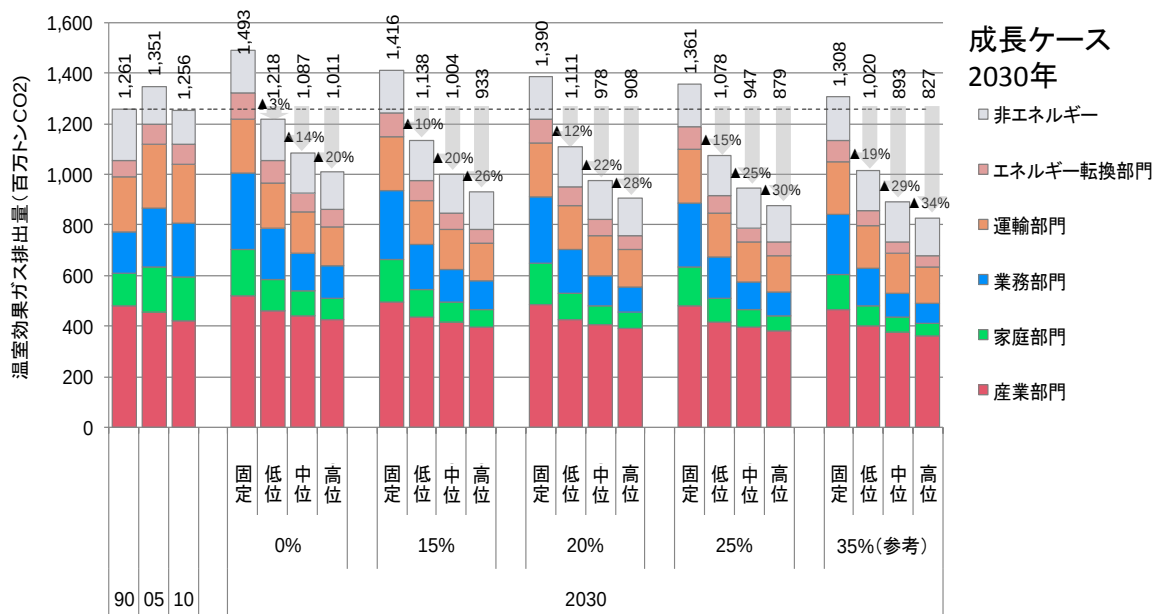


図3 SSPsにおける5つの社会像

(2) わが国における温室効果ガス排出削減策の効果とその影響

1) 日本を対象とした技術選択モデルを用いた2020年及び2030年の温室効果ガス排出削減目標の分析

成長ケース(2020年までの平均経済成長率を1.8%/年、それ以降を1.2%/年と想定)における2030年の温室効果ガス排出量は、図4に示すように、原子力発電がない場合で1990年比3~20%削減でき、原子力発電のシェアの上昇に応じて削減幅が増大することが明らかとなった。2030年までの累積の追加投資額(温室効果ガス排出量の削減のために追加的に支出された投資額の合計を割引率3%で計算)は、70兆~119兆円となるが、2030年までの省エネによるメリット(割引率3%で計算)は54兆~93兆円となり、2031年以降の省エネメリットも加味すると、85兆~147兆円と追加投資額を上回ることが示された。なお、2013年11月に発表された新たな2020年の排出削減目標(原子力発電による削減効果を見込まず、2005年比3.8%削減)は、温暖化対策の低位と中位の間に位置すると評価される。



注: 固定: 技術固定ケース。低位~高位: 温暖化対策導入ケース(対策の強度別に低位、中位、高位と設定)。

0%、15%、20%、25%、35%の各数値は、2030年の発電電力量に対する原子力発電の比率。

図4 成長ケースにおける2030年の部門別温室効果ガス排出量

2) 日本技術選択モデル(多地域版)の開発

電力の地域間連系が現状のまま、原子力発電が再稼働されない場合においても80%削減は可能であるが、2050年の限界削減費用は58,000円/tCO₂と非常に高額になることが明らかとなった(図5のケース①)。部門別にみると、2050年時点の主な排出源は産業、運輸、その他(エネルギー起源の二酸化炭素以外)であり、家庭・業務部門からの排出量はほぼ0となった。一方、図5のケース②では、地域間の電力連系が40万円/kWで増強できると仮定し、費用が最小化されるように連系の増強量を内生的に設定して、北海道及び東北地域における再生可能エネルギーを域外でも有効活用できるケースとした。ケース①からケース②に前提が変更されることで、2050年の地域間の連系線容量は、北海道本州間において60万から207万kW、東北東京間において235万kWから972万kW、中部北陸間において30万kWから46万kWにそれぞれ拡大され、北海道・東北の水力を除く再生可能エネルギーの供給量は940億kWhから1120億kWhに増加し、限界削減費用は53,000円/tCO₂となった。なお、このケースの限界削減費用は、電力連系を増強せずに原子力の再稼働を想定したケースにおける限界削減費用とほぼ同額となった。

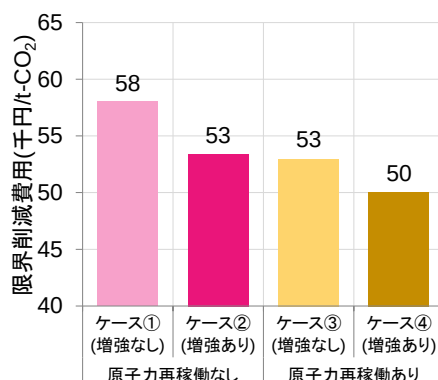


図5 多地域技術選択を用いた2050年における限界削減費用

3) 日本経済モデルと技術選択モデルの統合によるわが国の排出削減目標の評価

わが国を対象に、技術選択を組み込んだ応用一般均衡モデルを行って、2013年11月に報告されたわが国の温室効果ガス排出削減目標（2020年に2005年比3.8%削減）の経済活動への影響について評価した。技術選択モデルで選択された省エネ技術の代わりに従来型の省エネ技術の導入のみによって削減目標を達成すると想定した場合、エネルギー消費量を抑えるために活動水準を低下させることとなり、2020年のGDPはなりゆきケースと比較して2%以上減少する結果となった。一方、高水準な省エネ技術を選択肢に加えた場合、導入される技術は初期費用と1年分の運転費用で判断される設定となっているために、高水準な省エネ技術の導入は一部にとどまるものの、一度導入した省エネ機器による省エネ効果は、機器の廃棄時まで継続する。このため、高水準な省エネ技術の導入を促進するように、追加投資の費用の半分以上を補助する場合、2020年のGDPへの影響はなりゆきケースと比較して-0.7%にとどまる。さらに、高水準な省エネ技術の導入を促すために、補助率を90%まで高めると、高水準な省エネ技術の導入がさらに高まり、2020年のGDPは+0.05%と、なりゆきケースのGDPを超える結果となった。本分析の結果から、より高性能な省エネ技術を公的補助も与えながら導入することにより、削減目標を達成する上ではより経済成長を促し、場合によってはなりゆきケースをも上回る経済成長を遂げることも可能であることが明らかとなり、長期的な視点から削減のポテンシャルを実現するような省エネ技術の導入を促す施策の役割が重要となることを示した。

4) 日本を地域分割した応用一般均衡モデルの開発

2030年までを対象に、なりゆきケースの試算を行った。現状では各地域の特性を十分に反映できていないことから地域による差は明確ではないが、地域分割された技術選択モデルとの連携や再生可能エネルギーの賦存量の反映などを通じて、より詳細な分析を行うことができると考えている。

5) 多地域最適電源計画モデル

再生可能エネルギー導入量に複数のシナリオを想定し、複数の二酸化炭素排出量制約の下での最適電源構成及び発電量、蓄電池導入量を評価した。太陽光発電のシェアの増加に伴い、総発電容量が急激に増加する。これは、太陽光とその他の発電方式の設備利用率が異なることに起因する。80%削減ケースでは、全設備容量の約37%を太陽光発電設備が占めた。

(3) 社会の構成要素を記述するモデルの開発と将来シナリオへの適用

1) 人口・世帯モデル

将来の人口の変化に対応して、わが国の都市、農村別人口を年齢階層別に推計したり、世帯主率の変化を推計した。また、日本に適用したモデルをアジア主要国に適用し、各国の世帯数の推移等を推計し、将来のエネルギーサービス需要の推計時における基礎とした。

2) 家計生産モデル

家計におけるエネルギーサービス需要量の推移の観点から、中国の1人あたりエネルギーサービス需要量が2050年に日本に追い付くと仮定した場合のエネルギー需要量を推計した。エネルギー効率の改善を考慮しても中国の家庭部門におけるエネルギー需要量は2005年と比較して61%増となった。また、中国では、所得の増加とともに消費支出が増加し、その結果、家庭から排出される廃棄物は大幅に増加し、2030年には1人あたり廃棄物排出量、家庭部門全体からの廃棄物排出量は、ともに2005年比3倍近くになる結果となった。こうした結果から、低炭素社会を構築する上で家庭部門における取組の強化が必要となると考えられる。

3) 物質ストック・フローモデル

物質ストック・フローモデルによる分析の結果、現状の先進諸国の多くでは、1人あたり鉄鋼ストック量が4.9～10.6トンの範囲となった。途上国が先進国と同水準までサービス需要量が増加すると想定して、将来の鉄鋼ストック量を推計し、ストックに必要な需要量を推計した。推計式における技術水準や温暖化対策の水準に関する係数を2005年の値で固定した「対策なし」の場合、2050年の世界の鉄鋼需要量は27億トンとなるのに対して、サービス需要の管理、財ストックの効率改善、高性能素材の導入を想定した「対策あり」では、2050年の世界の鉄鋼需要量は16億トンとなった。財別では、機械類、輸送機械の需要による鉄鋼需要のシェアが多い結果となった。また、「対策あり」であっても、2050年まで鉄鋼需要量は2005年比で増加していることから、低炭素社会構築の視点からは、粗鋼生産における温室効果ガス排出原単位の削減のため、省エネ技術の開発・普及に加え、生産における電炉鋼の比率をどこまで上昇させることができるかが重要となる。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

これまで国を最小単位として扱ってきたモデルを、地域スケールについて詳細化することにより、各地域特性を反映させた温暖化対策の検討、評価を分析することが可能となった。特に、短期的に大幅な発電所新設が見込めない状況下において、東日本大震災以降における電力需給の安定化に向けてどの地域でどのような対策を講じることが効果的かを議論する素地を提供できると考えている。

社会の構成要素を記述するモデルの開発では、各国の特徴、発展段階を踏まえた分析が可能となり、将来シナリオの作成においても貴重な情報を提供することが可能となる。また、国際的に整備されている物量単位での各種統計では、欠損、不整合が大きいのが、物質ストック・フローモデルに関する研究により、金額、その他の各種統計と整合性が高く、また、網羅的な物質フローの把握が可能となった。

また、世界モデルに関する各種分析では、温暖化対策の国際比較研究プロジェクトや将来の社会経済シナリオ開発に参加、定量的な結果を提供することは、数理モデルや将来シナリオがもつ科学的な知見を社会に提供することにつながっている。特に、他のモデルと比較することで、低炭素社会の実現に向けてどのような将来像が描けるのか、そのための条件は何か、どの程度費用がかかりうるかを、よりロバストな形で検討することができるようになる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

わが国を対象とした技術選択モデル及び応用一般均衡モデルの結果については、環境省中央環境審議会 地球環境部会 2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会において報告するとともに、エネルギー・環境会議に対しても結果を報告してきた。技術選択モデルについては、小委員会に設置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グループにおいてモデルの分析結果を元に対策の方向性などについて検討が行われた。また、応用一般均衡モデルについては、道路特定財源の廃止による影響を環境省総合環境政策局環境経済課に、国内排出量取引に関する分析結果を環境省地球環境局市場メカニズム室「国内排出量取引制度の課題整理に関する検討会」に、それぞれ提供することを通じて、環境政策の推進に貢献してきた。

アジア主要国の研究者に対して実施したモデルのトレーニングは、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。このほか、アジア開発銀行のプロジェクトを通じた成果の提供も、北東アジア各国における温暖化対策の検討に貢献している。

<行政が活用することが見込まれる成果>

地域に分割したモデルを用いた分析結果は、国だけでなく、自治体における温暖化対策の検討において重要な役割を担う。とりわけ、気候や経済活動、再生可能資源の賦存量が多様なわが国において、自治体における温暖化対策を支援するツールが利用可能となることは、地域特性にあった対策を検討、提案することが可能となり、気候変動緩和策の実現に向けて大きく貢献することにつながる。

東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故により、わが国の温室効果ガス削減目標をエネルギー計画とともに再考することとなり、単一の対策に大きく依存する計画の問題点を浮き彫りにした。こうした反省を踏まえて、原子力の将来の想定に関する様々なシナリオの検討を行うとともに、発電部門において電力供給の安定性を犠牲にすることのない温暖化対策を検討するための基礎的情報を多地域最適電源計画モデルによって提示することができる。こうしたシナリオも、将来の温暖化対策を検討する上で重要な示唆を与えるものであり、温暖化緩和策の検討に不可欠なものである。

様々な国際比較研究プロジェクトへの参画を通じて、将来の多様なシナリオを描くことが可能となり、わが国における温暖化対策の議論に対して様々な情報を提供することが可能となっている。さらに、日本だけではなく世界が低炭素社会に向かう上で特に資金面で困難のある国々や地域に対して国際的な政策や枠組みでどのように支援していくかを検討するための基礎的な情報についても提供できる。

人口や物質フローの解析などは、低炭素社会を検討する上で不可欠な要因であり、将来社会を記述する上で重要となる様々な因子を整合的に示すことが可能である。

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) 金森有子・松岡譲: 土木学会論文集G(環境), 67 (6), II_363-II_374 (2011)
「エネルギーサービスの需給バランスを考慮した業務部門のエネルギー消費量推計について」
- 2) 白木裕斗・芦名秀一・亀山康子・森口祐一・橋本征二: エネルギー・資源学会論文誌, 33 (1), 1-10 (2012)
「多地域電源計画モデルを用いた2020年の日本電力部門における再生可能エネルギー導入シナリオの検討」
- 3) S. Ashina, J. Fujino, T. Masui, T. Ehara and G. Hibino: Energy Policy, 41, 584-598 (2012)
“A roadmap towards a Low-Carbon Society in Japan Using Backcasting Methodology: Feasible Pathways for Achieving an 80% Reduction in CO2 Emissions by 2050”
- 4) T. Hanaoka and M. Kainuma: Sustainability Science, 7(2), 117-137 (2012)
“Low-Carbon Transitions in the World Regions: Comparisons of Technological Mitigation Potentials and Costs in 2020 and 2030 by bottom-up analyses”
- 5) 藤森真一郎・増井利彦・松岡譲: 土木学会論文集G(環境), 69, 5, I_227-I_238 (2013)
「エネルギー機器情報を用いた応用一般均衡モデルの開発と緩和策の分析」
- 6) O. Akashi, T. Hanaoka, T. Masui and M. Kainuma: Climatic Change (2013)
“Halving global GHG emissions by 2050 without depending on nuclear and CCS”
- 7) 河瀬玲奈・松岡譲: 土木学会論文集G(環境), 69, 5, I_19-I_26 (2013)
「世界の財に含まれる鉄の蓄積量について」
- 8) 生津路子・藤森真一郎・松岡譲: 土木学会論文集G(環境), 69, 6, II_359-II_370 (2013)
「応用一般均衡モデルを用いたアジア地域における温室効果ガス排出量削減策の分析」

<査読付論文に準ずる成果発表> (対象: 社会・政策研究の分野)

特に記載すべき項目はない。

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) M. Kainuma, S. Fujimori, N. Hanasaki, T. Masui and Y. Hijioka: Energy Modeling Forum 2011 Workshop on Climate Change Impacts and Integrated Assessment (CCI/IA), Snowmass, USA (2011)
“Key Challenges and Uncertainties in IAM for Energy-Landuse-Water Nexus”
- 2) T. Masui, S. Fujimori, T. Hasegawa, N. Hanasaki, Y. Shin, K. Takahashi, Y. Hijioka and M. Kainuma: The 5th IAMC Annual Meeting, Utrecht, Netherlands (2012)
“Application of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) toward new socio-economic scenario development integrating climate change mitigation, impact and adaptation”
- 3) T. Hasegawa, S. Fujimori, Y. Shin, K. Takahashi, T. Masui and A. Tanaka: 6th Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting, Tsukuba, Japan (2013)
“The Consequence of Climate Mitigation on Food Security”
- 4) S. Fujimori, T. T. Tran, M. Namazu, T. Masui, Y. Matsuoka, K. Jiang and P. R. Shukla: 6th Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting, Tsukuba, Japan (2013)
“Analyzing the energy demand of Low carbon development in China and India using AIM/CGE model”
- 5) 増井利彦・日比野剛: 第5回横幹連合コンファレンス, 高松 (2013)
「温室効果ガス排出削減目標の実現に向けた取り組みの先にあるもの」
- 6) 芦名秀一・藤野純一・増井利彦・日比野剛・松井重和: エネルギー・資源学会第32回研究発表会, 東京 (2013)
「2050年日本低炭素社会シナリオ及び実現ロードマップの再検討」

- 7) R. Kawase and Y. Matsuoka: International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials, Antalya, Turkey (2013)
“CO2 Emission Reduction through Steel Demand Change toward 2050 in Japan”

7. 研究者略歴

課題代表者: 増井 利彦

大阪大学工学部卒業、博士(工学)、現在、国立環境研究所社会環境システム研究センター室長

研究分担者

- 1) 日比野 剛

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

- 2) 松岡 譲

京都大学工学部卒業、工学博士、現在、京都大学大学院工学研究科教授

2A-1103 統合評価モデルを用いた世界の温暖化対策を考慮したわが国の温暖化政策の効果と影響

(1) 世界モデルを用いた気候安定化目標の実現可能性とその評価

(独) 国立環境研究所

社会環境システム研究センター 統合評価モデリング研究室

増井 利彦・高橋 潔・花岡 達也・金森 有子

社会環境システム研究センター 持続可能社会システム研究室

藤野 純一・肱岡 靖明・芦名 秀一

地球環境研究センター 気候変動リスク評価研究室

花崎 直太

<研究協力者>

(独) 国立環境研究所 社会環境システム研究センター

甲斐沼 美紀子・藤森 真一郎・岡川 梓・長谷川 知子・

Dai Hancheng・Diego Silva Herran・Rui Xing・Chan Park・

朝山 由美子

武蔵野大学

明石 修

立命館大学

島田 幸司

慶應義塾大学

森田 香菜子

平成23～25年度累計予算額：87,869千円

(うち、平成25年度予算額：27,036千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

世界の気温上昇を産業革命前と比較して2℃以下に抑えるという目標は、世界の首脳レベルでは合意されているものの、その実現に向けた具体的な道筋は未だ不透明である。こうしたなか、世界を対象とした技術選択モデルや応用一般均衡モデルを用いた分析から、温室効果ガスの具体的な削減経路についての検討を行い、EMF (Energy Modeling Forum) など様々な国際比較研究プロジェクトに参画して結果を提供し、世界を対象とした温室効果ガス排出削減にむけた知見を蓄積することを本サブテーマの目的とする。技術選択モデルによる分析結果から、2℃目標に相当する温室効果ガス濃度を450ppmに安定化させることは実現可能であり、その場合の限界削減費用は600ドル/tCO₂と評価された。また、IPCC SRES (Special Report on Emissions Scenarios) に代わる新たな社会経済シナリオとして検討が進められているSSPs (Shared Socio-economic Pathways) の定量化を、世界応用一般均衡モデルを用いて行ってきた。SSPsでは、緩和策、適応策の実施に向けた可能性 (Mitigative capacityとAdaptive capacity) によって5つのなりゆきの社会像 (温暖化対策を導入しない社会) が提示されており、開発した世界応用一般均衡モデルによる試算では、温室効果ガス排出量が2050年に66～104 GtCO₂eq、2100年には55～131 GtCO₂eqという結果が得られた。

[キーワード]

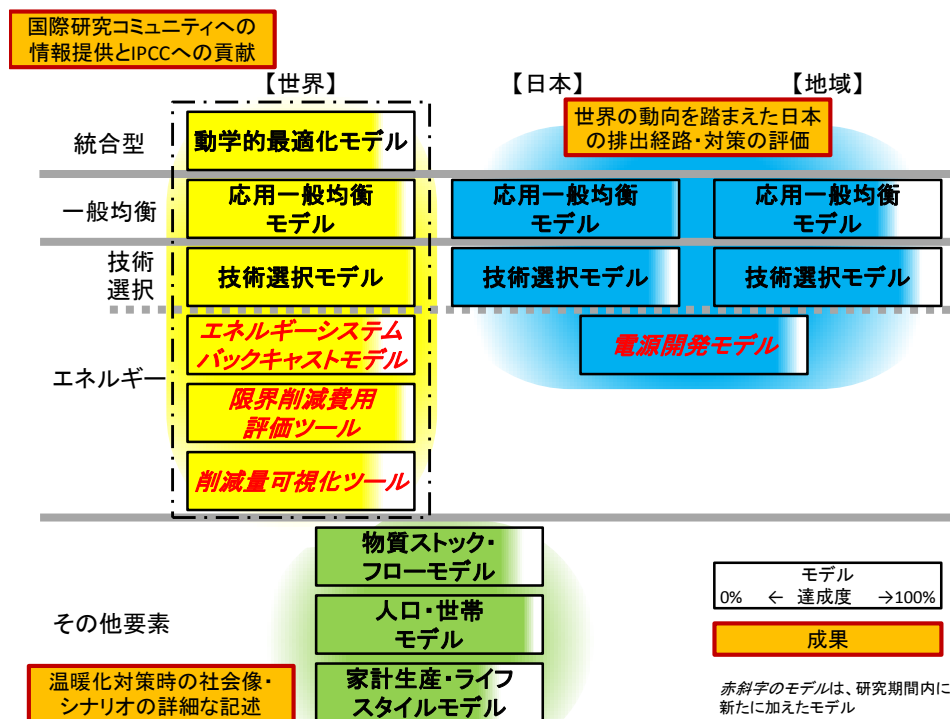
2℃目標、技術選択モデル、応用一般均衡モデル、将来シナリオ、限界削減費用

1. はじめに

IPCC第一作業部会から第三作業部会の第5次評価報告書が示され、地球温暖化の進行とその影響、対策に向けた取り組みに関する最新の知見がとりまとめられた。2010年にメキシコのカンクンで開催された気候変動枠組条約第16回締約国会議において、「産業化以前からの世界平均気温の上昇を2℃以内に収める観点から温室効果ガス排出量の大幅削減の必要性を認識する」とされたカンクン合意が採択された。IPCC第三作業部会が報告した第5次評価報告書¹⁾によると、66%の確率で産業革命前からの気温上昇を2℃以下に抑えるための温室効果ガス排出経路は450ppm安定化に相当し、現状の排出量の増加傾向を踏まえると、達成するには依然厳しい目標となっている。こうした状況の中、IPCC SRESに代わる新たな長期の将来シナリオ作成や、IPCC第5次評価報告書に向けたモデルの国際比較研究プロジェクトが実施され、省エネ技術や再生可能エネルギー等の対策に加えて、社会経済活動そのものの見直しなど、温室効果ガス排出量の削減に向けてあらゆる面での検討が行われてきた。

2. 研究開発目的

図(1)-1に、本研究課題全体が対象とするモデルと、本サブテーマで開発、改良したモデルの関係を示す。



図(1)-1 2A-1103で対象とするモデルとサブテーマ（１）で対象とするモデル（一点鎖線部分）

本サブテーマでは、世界を対象とした技術選択モデルと応用一般均衡モデルの開発、改良を行い、産業革命前と比較して世界の平均気温上昇を2℃以下に抑えるといった長期的な温暖化対策目標に対して、具体的な対策を提示することを目的としている。また、その一環として、国際比較研究プロジェクトに参画するとともに、IPCC SRESに代わる新たな社会経済シナリオであるSSPsの定量化を行うことも本サブテーマの目的の1つとしている。さらに、政策決定者との対話を意識して、より簡便に限界削減費用を評価するためのツールや、削減量を可視化するためのツールの開発を行うことも目的とする。

3. 研究開発方法

本サブテーマでは、世界を対象とした技術選択モデルと応用一般均衡モデルの開発、改良を通じて、長期的な気候変動対策の実現可能性とその影響を定量的に評価した。また、技術選択モデルをバックキャスティングモデルへと拡張したり、応用一般均衡モデルに技術選択のモジュールや土地利用変化のモジュールを組み入れたりすることで、多様な将来シナリオの叙述に対応できるようにモデルの拡張を行った。また、技術選択モデルや応用一般均衡モデルをアジア各国へ適用するためのトレーニングワークショップについても（独）国立環境研究所において開催した。

（1）世界技術選択モデル

世界技術選択モデル（AIM/Enduse [Global]）は、中長期的な温暖化緩和策の評価を行う技術経済モデルである。このモデルでは、詳細な温暖化対策技術を明示的に取り扱い、それらの普及量を推計することにより、将来の温室効果ガスの排出削減可能量や排出削減コストを評価し、また、特定の排出経路を実現するために必要な対策技術の選択のあり方を評価する。技術選択は、サービス需要（工業生産量、冷房需要、輸送量、農業生産量等）を充足するという条件下で、システム総費用（初期費用、運転費用、燃料費、炭素税）を最小化する線形計画問題として定式化されている。現行のモデルは世界を32 地域に区分し、約200～300種の温暖化対策技術を考慮している。主な対象ガスは京都6ガス（CO₂、CH₄、N₂O、HFCs、PFCs、SF₆）であり、分析期間は2005 年～2050 年である。このモデルの特徴は、エネルギー供給側のみでなく、最終エネルギー消費部門（産業、運輸、家庭、業務）や非エネルギー部門（農業、一般廃棄物、資源採掘、Fガス）についても技術情報を詳細に考慮した逐次動学型の分析をおこなうことができることである。本研究では、本モデルを用いて、EMFやAMPERE (Assessment of Climate Change Mitigation Pathways and Evaluation of the Robustness of Mitigation Cost Estimates)といった国際的なモデル比較研究に情報提供を行った。

（2）限界削減費用評価のためのツール開発

技術選択モデルが逐次動学型モデルであるのに対して、ある時点における技術選択の内訳およびその単位削減費用を明示することで、削減費用曲線を描くことができる静学型の分析ツールを開発した。本ツールでは、技術選択モデルと同じ枠組みおよび同じデータベースを用いて、部門別の削減ポテンシャルおよび削減費用の特徴の分析ができる。本分析では、各国の最新の社会経済指標やサービス需要量の情報を元に、各部門における将来の技術の見通しを考慮して、部門別に削減ポテンシャルを積み上げることで2020年および2030年における中期削減目標を評価した。

前提条件の差異により技術選択の結果が異なることが言えるが、その中でも特に主要な要因として挙げられる投資回収期間の違い（短期間、長期間）および炭素価格の違い（50、100、200、および1000ドル/tCO₂）を考慮して、各国の特徴を分析した。また、大規模なプラントやインフラなどは一度対策を取ると、その後の対策の変更が難しくなる（lock-inされてしまう）ため、特に発電部門におけるlock-in効果の影響も考察をした。

（３）エネルギーシステムバックキャストモデル

逐次均衡で将来推計を行う技術選択モデルに対して、エネルギーシステムバックキャストモデルは、動学的最適化構造をもつモデルであり、技術選択モデルと同じ技術種をもつモデルである。想定された将来の目標に対して、どのタイミングでどの施策を導入することが最適であるかを分析することができる。

気候変動安定化目標から導出される2000年から2050年までの炭素割当量（Carbon Budget）を満足させるための道筋を、世界を対象としたエネルギーシステムバックキャストモデルを用いて分析した。炭素割当量は、外部の気候モデルの分析結果を参考に450 ppm CO₂eq安定化ケースでは1,600 GtCO₂、550 ppm CO₂eq安定化ケースでは1,800 GtCO₂とした。また、合わせて原子力発電、炭素隔離貯留（Carbon Capture and Storage：CCS）、太陽光・風力およびバイオエネルギーそれぞれの将来の技術見通しに楽観シナリオと悲観シナリオを2種類想定し、その影響についても分析した。表(1)-1に、本解析にて実施したシナリオを一覧で示す。なお、技術については楽観シナリオを基準とし、いずれかの技術が悲観シナリオとなることとした。

表(1)-1 エネルギーシステムバックキャストモデルの解析に用いた将来シナリオの想定

シナリオ	概要
Base-AllTech	炭素割当量なし（ベースライン）シナリオ+全技術楽観シナリオ
Base-NucOff	炭素割当量なし + 原子力悲観シナリオ
Base-LimSW	炭素割当量なし + 太陽光・風力悲観シナリオ
Base-LimBio	炭素割当量なし + バイオエネルギー悲観シナリオ
450-AllTech	450 ppm + 全技術楽観シナリオ
450-NoCCS	450 ppm + CCS悲観シナリオ
450-NucOff	450 ppm + 原子力悲観シナリオ
450-LimSW	450 ppm + 太陽光・風力悲観シナリオ
450-LimBio	450 ppm + バイオエネルギー悲観シナリオ
550-AllTech	550 ppm + 全技術楽観シナリオ
550-NoCCS	550 ppm + CCS悲観シナリオ
550-NucOff	550 ppm + 原子力悲観シナリオ
550-LimSW	550 ppm + 太陽光・風力悲観シナリオ
550-LimBio	550 ppm + バイオエネルギー悲観シナリオ

（４）世界応用一般均衡モデル

本サブテーマでは、世界を対象とした逐次動学型の応用一般均衡（CGE）モデルの開発を行い、そのモデルを用いて、IPCCへの入力を目的とした社会経済シナリオ（SSPs: Shared Socio-economic Pathways）の開発や環境研究総合推進費S-6-1の温室効果ガス排出量の世界半減シナリオを作成してきた。このCGEモデルは、多地域・多部門モデルであり、IFPRI (International Food Policy Research Institute) が作成したStandard CGE model²⁾をベースにし、それに改良を加えたものである。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。本モデルは逐次型応用一般均衡モデルである。本研究では計算ステップは1年ずつとした。各部門には蓄積された資本があり、次の年になると前年まで蓄積された資本の一部を減耗し、新たに資本の蓄積を行ったものを追加する。この減耗率は一律4%とした。既存資本と新規資本はCES（Constant Elasticity of Substitution）関数（代替弾力性は5.0）を用いて合成するとした。資本の取り扱い、Putty-Clay型として、新規資本は価格に応じて投入量が異なり、既存資本は一度配備されると固定されるとした。従って、新規資本と既存資本は異なる市場を持っていると仮定している。

農業、林業、畜産業は、土地を投入要素とする。土地の投入量は(1)式に示すとおり生産量に土地生産性係数、および作付強度係数を乗じ、生産者価格にきわめて小さな弾性値を乗じた。

$$QLND_j = QA_j \cdot ci_j \cdot yi_j \cdot PA_j^{\lambda_j} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $QLND_j$ ：部門jの土地投入量、 QA_j ：部門jの生産量、 ci_j ：部門jの作付強度、 yi_j ：部門jの土地生産性、 PA_j ：部門jの生産者価格、 λ_j ：生産者価格に対する土地投入量弾性値

一般的なCGEモデルでは要素間の代替関係を表すCES等の関数を用いることが多いが、このような関数形を採用した理由は以下の通りである。CES関数では土地の収益次第で物理的に不適切な単収を実現してしまうことがあり得るが、こういった挙動を排除する必要がある。そこで、単純にレオンティエフ関数のように価格に対して投入量を変化させず、固定係数を乗じるということをはじめに想定した。しかし、固定係数である場合、土地のひっ迫度が非常に高い地域等でシナリオによってはモデルの求解が困難となる場合が発生するという技術的な問題が生じた。そこで、それらを解決するために、基本的にはレオンティエフ関数を念頭に置くが、求解が可能なようにフレキシビリティを持たせるために、価格弾性値を累乗した。

また、各部門の土地はさらにAEZ（Agro-Ecological Zone）別に分かれる。AEZはFAO（Food and Agricultural Organization）、IIASA（International Institute for Applied System Science）が共同で開発した農業生産性に関する土地の区分の方法であり、気温、降水、土壌などの条件から生物学的な潜在生産性を算定しているものである。そのシェアをロジット関数で選択するものとして定式化を行った。このロジット関数は離散選択にしばしば用いられる関数であり、(2)式に示すとおりである。式(2)は土地の収益に応じてその土地利用のシェアを決め、土地の収益が高くなるとその部門の土地利用シェアが高くなることを意味している。

$$ILS_{l,j} = \frac{\exp(\mu 1_{l,j} + \ln \pi_{l,j}^{\rho 1_j})}{\sum_{l \in L} \exp(\mu 1_{l,j} + \ln \pi_{l,j}^{\rho 1_j})} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $ILS_{l,j}$ ：部門jの土地区分AEZlのシェア、 $\pi_{l,j}$ ：土地区分AEZl、部門jの土地の収益、 $\mu 1_{l,j}$ 、 $\rho 1_j$ ：パラメータである。

式中の $\rho 1$ は先験的に与えられるパラメータであり、土地の収益に対する弾力性を表す。ここでは1という値を使用した。係数 μ は基準年の土地の収益と、土地利用シェアの情報をを用いてキャリブレーションする。

家計消費は効用関数として、(3)式で定義されるLES（Linear Expenditure System）関数を用いて、各財が選択される。LES関数は、基本的に価格に関係なく消費される γ と、予算制約下で所得や価

格に応じてその消費バスケットを変化させる β というパラメータで表現される。

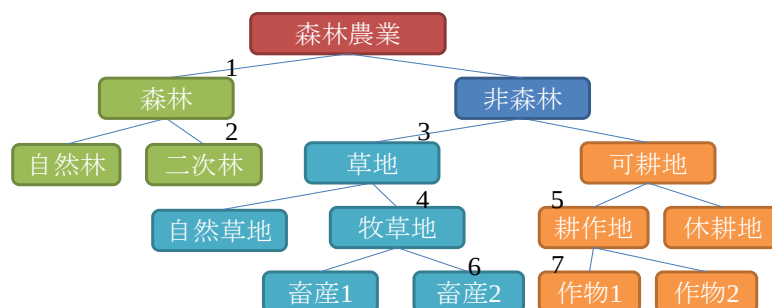
$$U = \prod_i (QH_i - \gamma_i)^{\beta_i} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 U ; 効用、 QH_i ; 財 i の購入量

購入量 QH の財 i のうち、エネルギー（電気、石油製品、ガス等）、穀類（米、小麦、その他穀類）については合計量をこの式で決定し、その内訳についてはロジット関数で決定する。所得弾力性を前提条件として与え、将来の効用関数を更新した。食料需要はFAOから得られた食料消費の見通しに基づいて所得弾力性を作成し与えた。

エネルギーとして利用できるバイオマスは、3種類を想定した。第一にトウモロコシやサトウキビなどの糖類から製造するバイオ燃料であり、通称第一世代バイオマスと呼ばれる。第二にセルロースからバイオ燃料を製造する通称第二世代バイオマスと呼ばれるもののうち、エネルギー用途専用の作物、たとえばスイッチグラス等を原料として製造するもの。第三に第二世代バイオマスのうち作物残渣や木材残渣などを原料として製造するものである。これらに従い、3種類の生産活動、生産関数を導入する。バイオ用途専用の作物の土地生産性は熱帯、温帯、冷帯でそれぞれ20、17.5、15t/haとした。また、第一世代バイオマスの原料は各地域でそれぞれ固有の財（例えば、北米ではその他穀類（トウモロコシ）、ブラジルでは砂糖）を想定した。

土地の分配には複数の枝分かれを持つロジット選択型関数を用いる。このロジット関数は、各地域、AEZ別に土地の所有者がいて、各作物や畜産、林業等に土地の分配をするときに土地の収益を基にしてそのシェアを決定していると仮定している。また、現在使用されている土地だけでなく、自然林等の未開拓地、休耕地等もその選択の中に入れる。土地利用の選択の状況を図(1)-2に示す。なお、ツンドラ、都市、岩場などはこの土地選択からは除外している。



図(1)-2 土地の分配

まずはじめ（図(1)-2の最上部において）に、土地所有者は所有している土地を、森林とするか、草地・農地となる非森林とするか、という選択を行う。森林の場合は管理された森林と自然林でわかれる。非森林の場合、次に草地か農地の選択となり、農地の場合は休耕地か作物生産に使われる農地の選択が行われ、さらに生産に使われる農地は作物別に分かれる。一方、草地は牧草として使用するかどうかが決められる。各段階の選択は、(2)式と同様の形で定式化している。(2)式中の係数 ρ 1は先験的に与えられるパラメータであり、土地利用変化の容易さを表す。

なお、長期的な分析と短期的な分析において、部門数や地域数は変更しており、特にSSPsのような2100年までといった長期の分析においては、地域数や部門数を統合して、簡略化した分析となっているようにしている。

(5) 削減量可視化ツール

モデル開発だけでなく、わかりやすさという視点から、英国で開発されてきた削減量可視化ツール³⁾をわが国に適用するためのモジュール開発やデータ収集についても行った。ここでは、エネルギー供給と需要に関する主要要因ごとに4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2：大多数のステークホルダーからみて、達成可能な削減努力を行う、レベル3：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、レベル4：物理・技術的境界に向けて努力する極めて野心的なもの）を選択することで、2050年までの5年ごとの温室効果ガス排出量の道筋、発電電力量、一次エネルギー供給等を提示することができる。

4. 結果及び考察

(1) 世界技術選択モデルを用いた解析

AIM/Enduse[Global]の成果は、様々な国際比較研究プロジェクトに提供されてきた。以下では、EMF27、AMPERE、Asia Modeling Exercise (AME)、世界技術積み上げモデル比較プロジェクト、アジア開発銀行の政策貢献、などに提供した結果を中心に説明する。

1) Energy Modeling Forum 27への参加とその結果

米国スタンフォード大学が中心となっていて行っている国際的なモデル比較プロジェクトであるEMF27に、AIM/Enduse[Global]は参加した。EMF27では、450ppmCO₂eq等の温室効果ガス濃度安定化目標を達成するための世界規模での対策シナリオの検討を行なっている。簡易気候モデルを組み込んだ動学最適化モデル（AIM/Impact[Policy]）を用いた分析から、2100年に温室効果ガス濃度を450ppmCO₂eqに抑えるためには、世界の温室効果ガス排出量を2050年に1990年比で約50%に削減する排出経路が示されている。AIM/Enduse[Global]では、この排出経路を前提に、2050年までを対象にした温室効果ガス排出量の大幅削減の技術的実現可能性について分析を行なった。

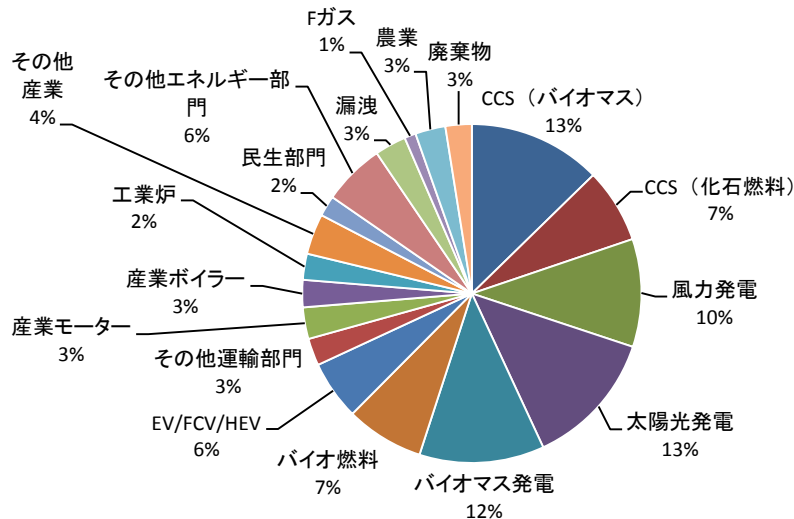
分析の結果、450ppmCO₂eq安定化シナリオの2050年までの温室効果ガス排出経路は技術的に達成可能であることが示された。しかし、目標を達成するためにはエネルギーシステムの大幅な変化が必要であることが分かった。このシナリオでは、図(1)-3に示すように、2050年の発電量のうち約75%を太陽光、風力、バイオマス、水力といった再生可能エネルギーが占める。さらに、CCS付きバイオマス発電といった正味の二酸化炭素排出量が負となる技術が導入される。2050年において温室効果ガス排出削減量が大きい上位5つの技術は、CCS、太陽光発電、風力発電、バイオマス発電、バイオ燃料であり、これらの技術で全削減量の約60%を占める。このほかに、省エネ等の最終エネルギー部門における技術が全削減量の約30%を占める。残りの約10%は、Fガス、農業、廃棄物などの非エネルギー部門が占める。

さらに、450ppmCO₂eq安定化シナリオにおける技術の役割を分析するために、主要技術の利用可能性や導入量に制約を課した場合のモデルシミュレーションを行った。具体的には以下の4つのケースについてシミュレーションを実施した。

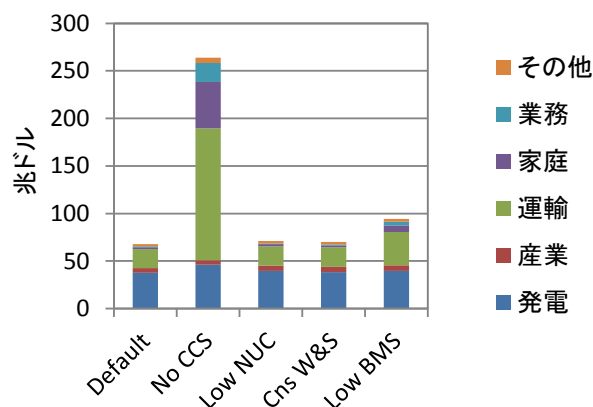
- ・ No CCSケース：CCSが利用可能でないケース
- ・ Low NUCケース：原子力発電がフェーズアウトするケース（現在、建設中あるいは計画中のものを除いて原子力発電所の新設がないと想定）

- ・ Cns W&S ケース：将来の風力発電、太陽光発電のコスト低減について保守的な想定を行ったケース
- ・ Low BMS ケース：世界のバイオエネルギーの総供給可能量を100EJ/年と想定したケース

分析の結果、すべてのケースにおいて450ppmCO₂eq安定化シナリオの温室効果ガス排出経路は達成可能であることが示された。しかし、達成にかかるコストはケースによって異なることが分かった。特に、将来CCSが利用可能でない場合には、目標達成のために必要な投資額が大きく増加することが分かった（図(1)-4参照）。これは、CCSを導入しないことによる発電部門や産業部門における温室効果ガス排出増分を運輸部門や民生部門における割高な技術（燃料電池トラックや超高断熱技術等）の導入で相殺する必要があるためである。なお、AIM/CGE[Global]の分析結果から、450ppmCO₂eq安定化シナリオでは、上記の対策技術に制約が課されると2070年以降に多くの場合で解が得られず、450ppmCO₂eq安定化シナリオの実現に向けては、あらゆる対策の導入が必要となることがわかる。



図(1)-3 450ppmCO₂eq安定化シナリオにおける技術別温室効果ガス排出削減量（2050年、世界）

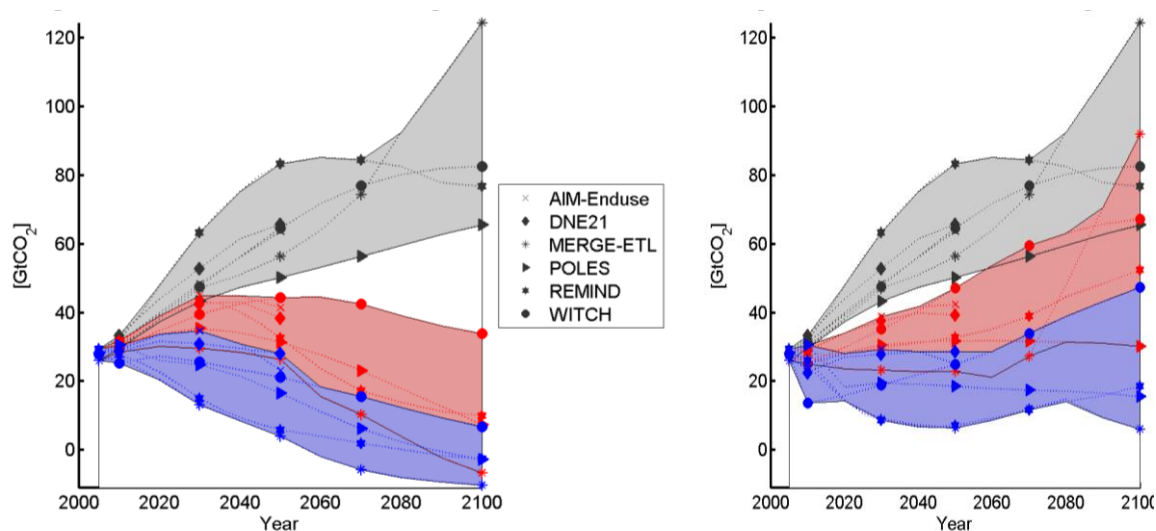


図(1)-4 450ppmCO₂eq安定化シナリオ達成にかかる投資費用（2005～2050年の累積、世界）

2) AMPERE (Assessment of Climate Change Mitigation Pathways and Evaluation of the Robustness of Mitigation Cost Estimates) への参加とその結果

「気候変動対策の経路評価とロバストな対策コスト評価」国際モデル比較プロジェクト (Assessment of Climate Change Mitigation Pathways and Evaluation of the Robustness of Mitigation Cost Estimates; AMPERE) とは、欧州委員会 (EC) の第7次研究枠組み計画 (FP7) の元で実施されている気候変動対策の統合評価モデルに関する国際モデル比較プロジェクトである。プロジェクトはPIK (Potsdam Institute for Climate Impact Research) が統括し、(独) 国立環境研究所はメンバーとして参画している。プロジェクトの目的は、複数の統合評価モデルの、特に経済に関する評価システムを比較することによって、気候変動対策の費用に関する知見を向上させることと、成果をIPCC第5次評価報告書も含めた国際的な研究コミュニティに提供することであり、これにより政策決定に対して気候変動対策費用見積もりに関するよりよい知見を提供することも目的としている。

図(1)-5に、GDPや人口等の前提条件をプロジェクトで共通化した調和プロセス (Harmonization) 後の世界CO₂排出量のモデル間比較の結果を示す。図(1)-5(a)において、上から炭素税なしケース、12.5ドル/tCO₂から指数増加するケース、50ドル/tCO₂から指数増加するケースを示し、本研究成果はAIM-Enduseの凡例で示された結果である。炭素税をかけないケースでは、2100年に向けて世界全体のCO₂排出量は3倍から4倍に増加すると予測されていることがわかる。指数増加する炭素税を課税するとCO₂排出量は減少し、特に50ドル/tCO₂から指数増加させるケースでは、いくつかのモデルにおいては2100年にゼロもしくはマイナスの排出量になると予測していることがわかる。一方、図(1)-5(b)に示すように50ドル/tCO₂や200ドル/tCO₂の一定額を課税し続けるケースでは、炭素税なしケースよりも世界全体のCO₂排出量は減少するが、指数増加するケースと比較すると削減量は小さくなく、2100年でも現状から半減程度が最大と予測していることがわかる。



(a) 上から炭素税なし、12.5ドル/tCO₂から指数増加、50ドル/tCO₂から指数増加の各ケース

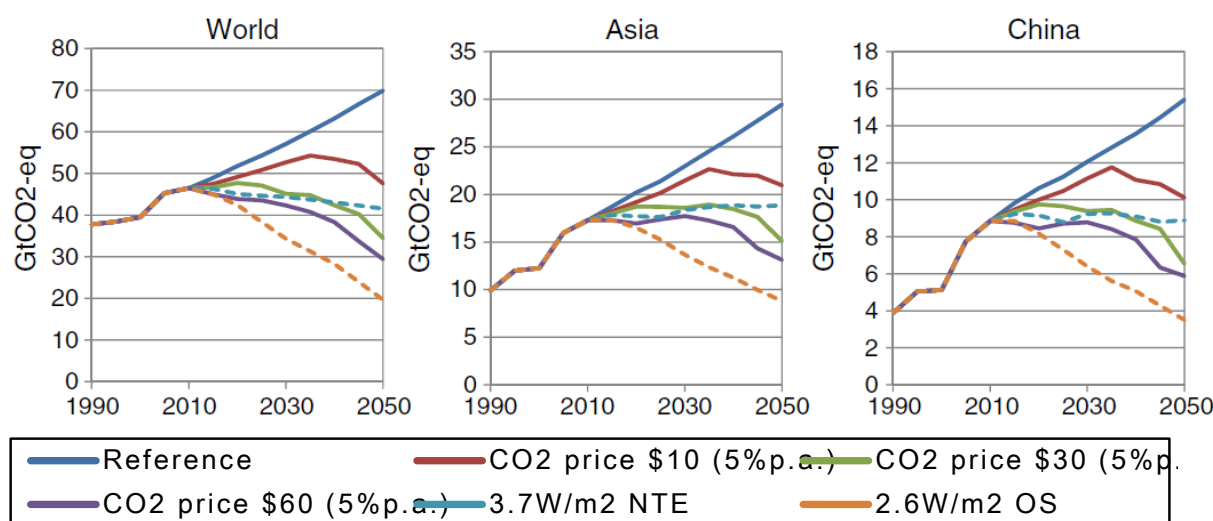
(b) 上から炭素税なし、50ドル/tCO₂固定、200ドル/tCO₂固定の各ケース

図(1)-5 世界CO₂排出量のモデル間比較 (調和後)

3) Asia Modeling Exerciseへの参加とその結果

米国スタンフォード大学が中心となって行っている国際的なモデル比較プロジェクトである Asia Modeling Exercise (AME)に、AIM/Enduse[Global]は参加した。AMEでは、特にアジア地域に注目し、世界の主要な研究機関によって開発された世界多地域多部門のトップダウンモデルとボトムアップモデルの両方の比較検証が行われた。分析対象シナリオは、炭素価格シナリオ（例えば、2020年の炭素価格を10ドル/tCO₂eq、30ドル/tCO₂eq、もしくは50ドル/tCO₂eqとし、そこから一定の割合で上昇させるシナリオ）および安定化濃度シナリオ（例えば、2100年までの安定化濃度目標を3.7 W/m²もしくは2.6W/m²とするシナリオ）であり、想定したシナリオ下におけるアジア主要国の排出量や電源構成などの挙動について検証が行われた。

まず、簡易気候モデルを組み込んだ動学最適化モデル（AIM/Impact[Policy]）によって2100年までの安定化濃度目標（3.7W/m²もしくは2.6W/m²）における世界の温室効果ガス排出量の排出経路を示し、AIM/Enduse[Global]では、その排出経路を前提とした2050年までの温室効果ガス排出量の大幅削減の技術的実現可能性について分析を行なった。AIM/Enduse[Global]による分析の結果の例を図(1)-6に示す。その結果、2℃目標シナリオに相当する2.6W/m²シナリオ（橙破線）は、世界およびアジアにおいて技術的には達成可能であることが示された。その実現のためには、炭素回収貯留技術（CCS）、太陽光発電、風力発電、バイオマス発電およびバイオ燃料が主要な5つの対策であり、2050年における全温室効果ガス排出削減量のうち約6割を占めることが分かった。特に、大幅な再生可能エネルギーの導入だけでなく、CCS付きバイオマス発電といった正味のCO₂排出量を負とする技術も必要とされる。特に、CCSやバイオマスに関してその導入制約を課した場合は、目的達成のために必要な2050年までの累積投資費用が大幅に上昇してしまうため、削減費用という観点から言えば、CCSとバイオマスに関する対策技術は2.6W/m²シナリオの実現のためには極めて重要な役割を示すことが分かった。



図(1)-6 なりゆきシナリオと安定化濃度目標シナリオの推移

4) 世界技術積み上げモデルの比較検討と世界半減シナリオの技術的可能性に関する検討

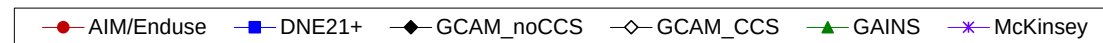
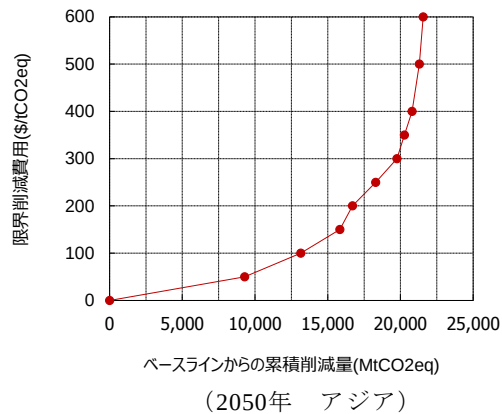
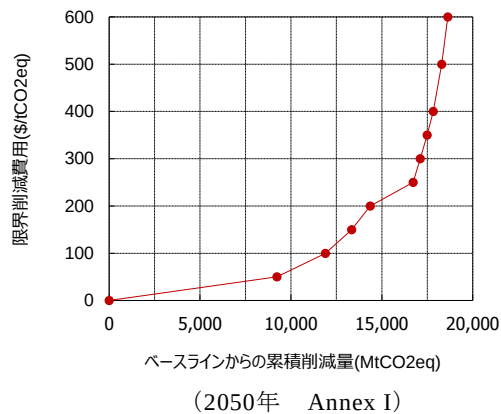
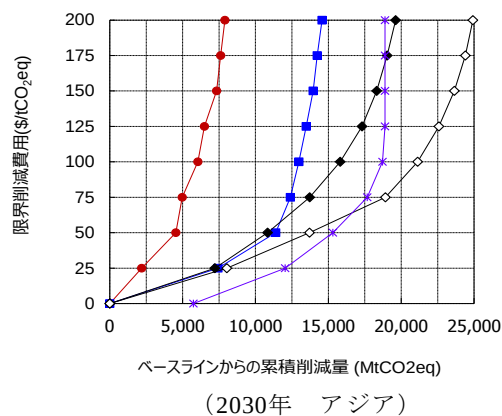
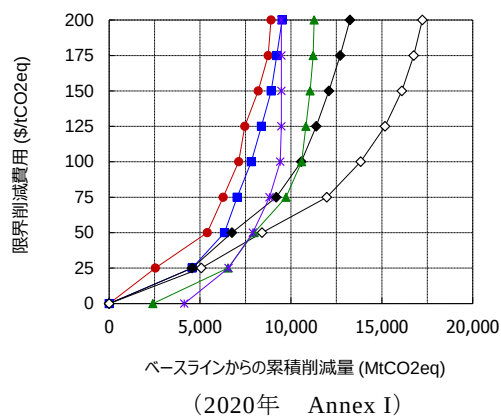
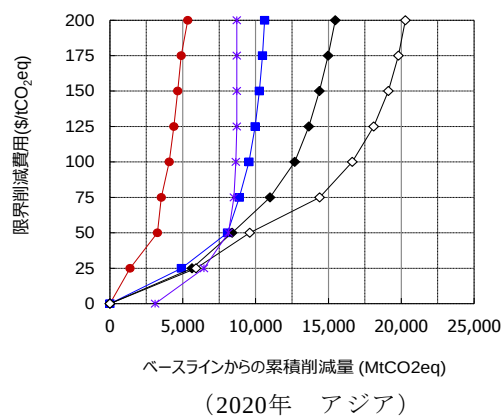
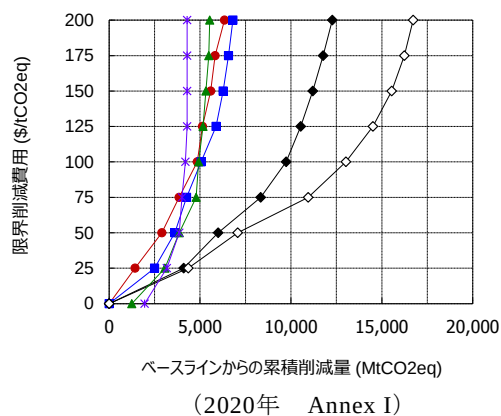
世界の主要な研究機関によって開発された世界多地域多部門技術積み上げモデルによる限界削

減費用および削減ポテンシャルの国際モデル比較研究を実施し、温室効果ガス排出主要国における2020年、2030年の技術的な削減ポテンシャルおよび費用について比較検討を行った。また、AIM/Enduse [Global]モデルを用いて、本国際モデル比較に分析結果を提供し、さらに2050年における世界の温室効果ガス半減目標を達成するための技術的な削減量およびその費用についても検討を行った。

IPCC第4次評価報告書第三作業部会の第11章において、ボトムアップ手法とトップダウン手法の部門別・コスト別の削減ポテンシャルが比較検討されていたが、用いられていたボトムアップモデルは1つのみであり、科学的根拠が十分ではなかったため、本国際モデル比較研究においては、世界の主要な世界多地域多部門モデルであり、かつ、対策技術を明示的に扱う技術積み上げ要素を取り込んだモデルであるGCAMモデル (PNNL, USA)、GAINSモデル (IIASA, Austria)、McKinseyモデル (McKinsey, International company)、DNE21+モデル (RITE, 日本) およびAIM/Enduse[Global]の結果を比較検証した。比較項目は、京都6ガスを対象とし、0～200ドル/tCO₂eqの炭素価格下における削減量・排出量の推移だけでなく、社会経済動態（人口、GDP）やベースライン排出量および部門別・エネルギー種別の内訳などについて、低炭素社会シナリオへの遷移過程を把握するために2020年、2030年の結果の詳細な分析を行った。また、主要排出国である米国、欧州27カ国、ロシア、中国、インドおよび日本の結果だけでなく、議定書 I 国 (Annex I)、Non-Annex I、OECD、non-OECD、AsiaおよびGlobalの結果についても分析を行った。その結果の例を図(1)-7に示す。

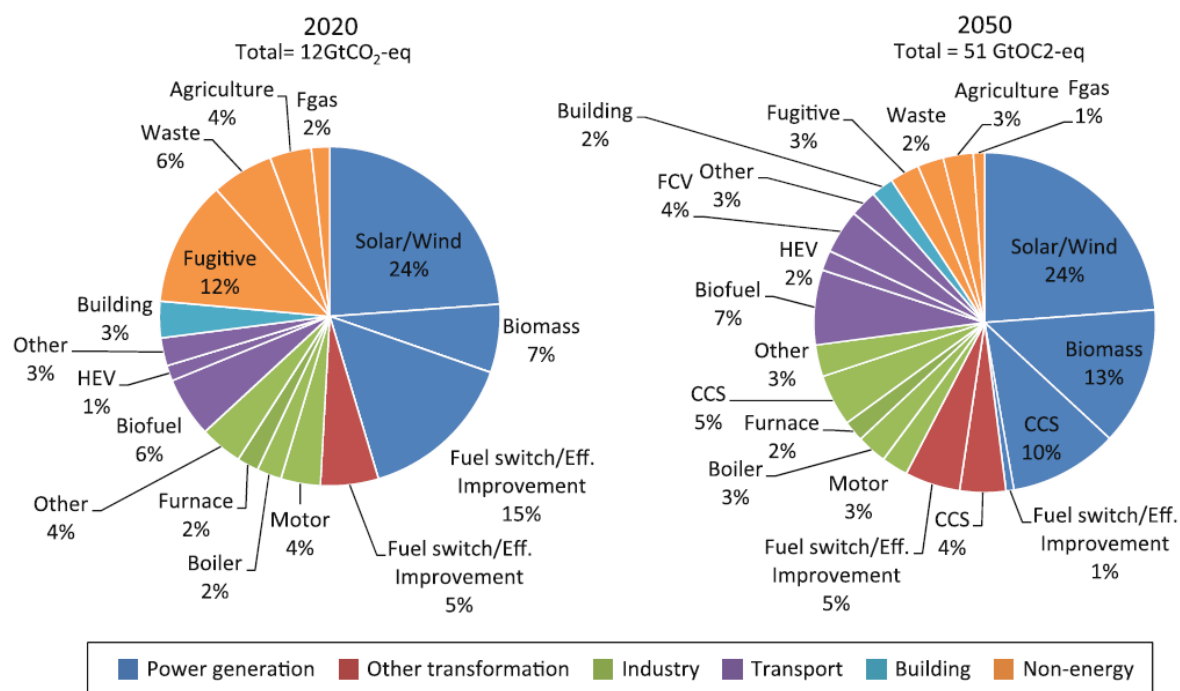
限界削減費用と削減ポテンシャルについて、世界を地域別・部門別に比較する際は、社会経済データの設定や、主要な対策技術の設定とその導入規模、特に原子力や再生可能エネルギーの電源構成や炭素回収貯留技術 (CCS) の有無やその導入規模の設定により、大きく結果が変わりうるものが定量的に示された。特に、中国やインドのような発展途上国においては、モデルによって大きく差異があり、対策技術の想定規模だけではなく、ベースライン排出量の想定の違いも結果に影響を与えることが分かった。

一方で、世界における2℃安定化濃度目標や2050年排出量半減目標シナリオを実現するためには、現在の社会経済発展状況の延長上ではなく、より厳しい排出削減対策が必要とされる。そこで、AIM/Enduse[Global]を用いて、2050年における世界の温室効果ガス半減目標を達成するための技術的な削減量およびそのコストと、その遷移過程について地域別・部門別・技術別に詳細に分析を行った。その結果の例を図(1)-8に示す。2050年世界半減目標を達成する際の限界削減費用は2020年に150ドル/tCO₂eq、2050年に600ドル/tCO₂eqであった。また、世界の追加投資額は2020年までに6.0兆ドル、2050年までに73兆ドルであり、本研究で想定した世界のGDPの1～2%程度に相当する規模であることが分かった。また各地域の遷移過程を分析するために2020年における1990年比排出量を比較すると、例えばロシアのように社会経済動向を考慮してもベースライン排出量ですでに1990年比排出量が25%減となる国もあれば、社会経済成長が著しい中国やインドにおいては、たとえ200ドル/tCO₂eqの炭素価格下であっても1990年比排出量が約倍増となる国もある。よって、2050年世界半減目標の議論においては、各国の社会経済や技術動向も踏まえ、より詳細に遷移過程について議論を詰めていく必要がある。



注：図はモデル比較の結果を示したもので、AIM/Enduseが本研究で開発したモデルである。
2050年については、他のモデルの情報提供がないために、AIM/Enduseのみとなっている。

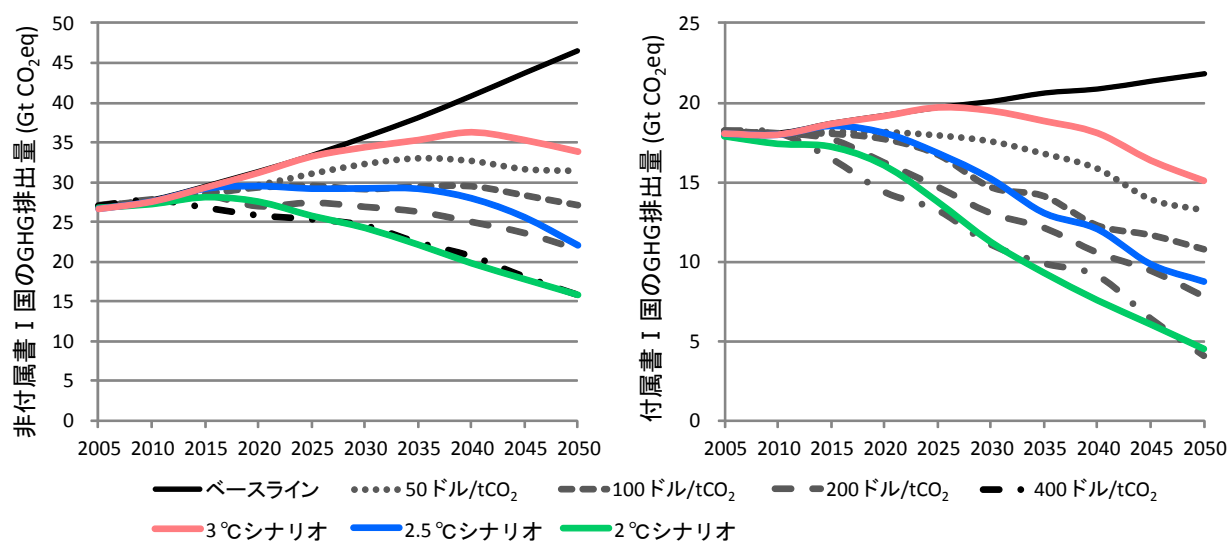
図(1)-7 限界削減費用とベースライン比削減ポテンシャルの比較結果



図(1)-8 2050年世界半減目標を達成する際の世界の技術別温室効果ガス排出削減量
(左：2020年、右：2050年)

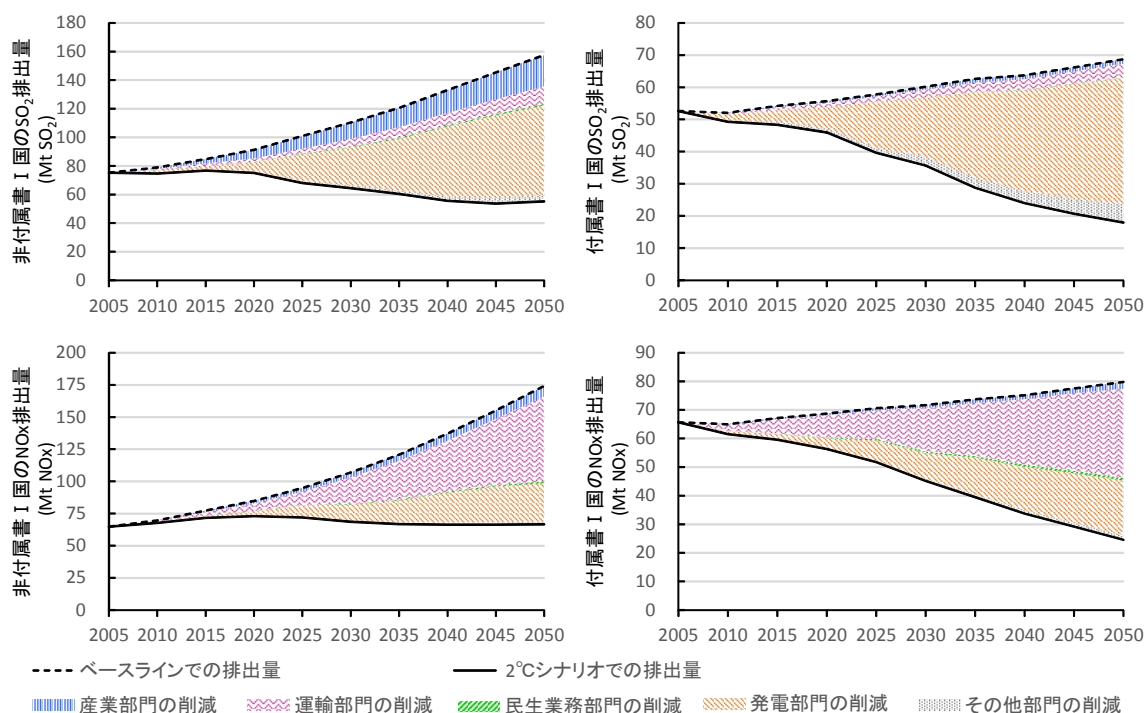
5) 2℃目標シナリオの技術的可能性と温室効果ガス及び大気汚染物質の潜在削減量に関する検討

AIM/Enduse[Global]は、世界を対象とした技術選択モデルであるが、その成果を上述のように様々な国際比較研究プロジェクトに提供してきた。また、各国の中長期的な技術的な削減目標策定の議論に用いられてきた。特に、近年、産業革命以前と比べて2℃上昇以内に気温上昇を抑えるシナリオが注目されている。そこで、世界的に著名な国連環境計画による報告書Gap Report⁴⁾で議論されている、2℃シナリオ、2.5℃シナリオ、および3℃シナリオの世界の排出量経路（注：各シナリオとも66%以上の確率で達成するシナリオの幅のうち、中央値の値をここでは採用）を満たすときのAnnex IおよびNon Annex Iにおける排出経路の分析を、AIM/Enduse[Global]を用いて行った。またそれらの結果と2050年において炭素税を50ドル/tCO₂、100ドル/tCO₂、200ドル/tCO₂および400ドル/tCO₂を課したときの排出経路との比較を行った。その分析例を図(1)-9に示す。その結果、現在の炭素価格市場の延長上相当と想定される50ドル/tCO₂シナリオでは、3℃シナリオは達成可能だが、2.5℃シナリオの達成には不十分であると分かった。IEAの報告書Energy Technology Perspective 2010では、450ppmシナリオの達成に2050年の炭素価格が175ドル/tCO₂と報告されているが、本研究の200ドル/tCO₂シナリオでは、UNEP報告書における2.5℃シナリオ相当であり、2℃目標の排出経路に至るには削減対策がまだ不十分であり、2℃シナリオ達成には400ドル/tCO₂相当の炭素税が必要とされる。2℃シナリオにおける2020年、2030年および2050年の2005年比削減率は、Annex Iにおいてはそれぞれ-10%、-37%および-75%であり、Non Annex Iにおいてはそれぞれ+3%、-9%および-41%であった。



図(1)-9 Annex IおよびNon Annex Iにおける温室効果ガス排出経路の分析

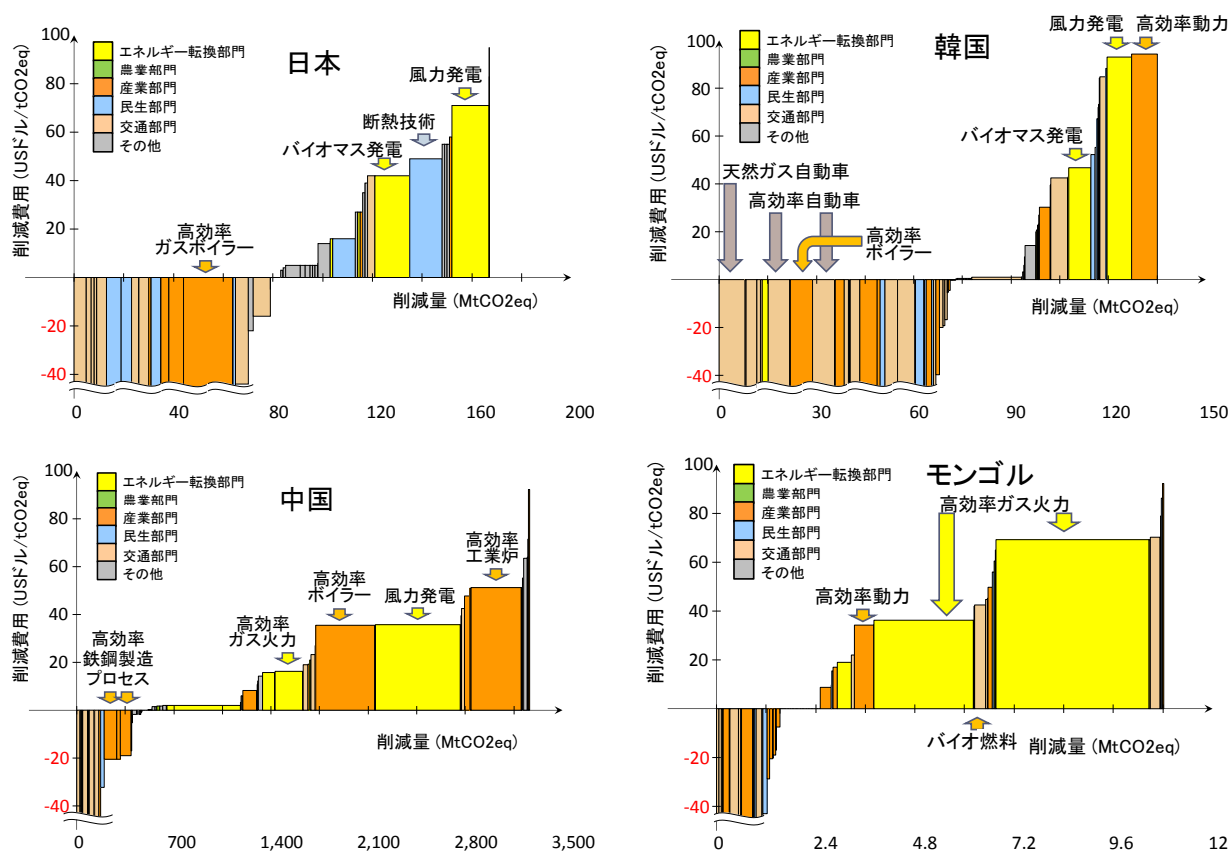
このように2°Cシナリオの達成には、現状の炭素価格よりも高額な価格となるが、エネルギー需要部門における省エネ技術の推進やエネルギー供給部門における大幅な燃料転換により、温室効果ガスだけではなく大気汚染物質も削減される。そこで、温暖化対策の副次的な便益として、エネルギー起源の大気汚染物質がどの程度削減されるか、その潜在削減量も含めて2°Cシナリオを評価する必要がある。そこで、大気汚染物質の削減量およびその要因分析の例を図(1)-10に示す。大気汚染物質によって主な排出源が異なるため、削減量および削減要因はAnnex IおよびNon Annex Iでその傾向は異なるが、主にSO₂は発電部門由来が大きいため、2°Cシナリオにおいて発電部門における温室効果ガス削減策がSO₂削減量にも大きく寄与していることが分かる。NO_xについては、発電部門だけではなく運輸部門からの排出量も大きいため、燃費の向上やガソリン車からハイブリッド車などへの代替などの効果が、NO_x削減量にも大きく寄与していることが分かる。



図(1)-10 Annex IおよびNon Annex Iにおける大気汚染物質排出経路の分析

(2) 限界削減費用比較ツールを用いた東アジアにおける限界削減費用の比較検討

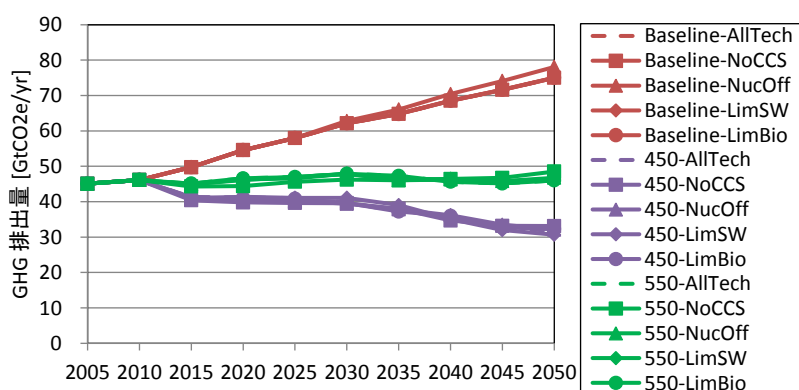
AIM/Enduseモデルと同様のデータベース構造による限界削減費用比較ツールを用いて、アジア開発銀行（ADB: Asia Development Bank）による「北東アジアにおける気候変動の経済評価および低炭素成長戦略（Economics of Climate Change and Low Carbon Growth Strategies in Northeast Asia）」に対して、北東アジア4カ国（日本、中国、韓国、モンゴル）における技術的な削減ポテンシャルおよび対策費用の分析を行い、北東アジアの低炭素成長戦略の議論に貢献をした。図(1)-11は、短い投資回収期間（約3年程度）のもとでの、100ドル/tCO₂の炭素価格下における日本、中国、韓国、モンゴルの2020年の削減費用曲線を示している。各国の社会経済の特徴によって差異はあるが、全般的に、0ドル/tCO₂以下では、運輸部門における高効率な乗用車やトラック、民生部門におけるLED照明、産業部門におけるボイラーの高効率化などの技術が有効であり、0～100ドル/tCO₂の間では、発電部門における風力発電、バイオマス発電、運輸部門におけるバイオマス燃料などの技術が有効である。また、100ドル/tCO₂以上になると太陽光発電も有効な対策となる。また、各国のエネルギー価格が異なるため同じ対策技術でもその費用対効果が異なるが、民生部門における断熱技術は、日本・韓国では0～100ドル/tCO₂の間、中国・モンゴルでは100ドル/tCO₂以上になると優位となり、発電部門における高効率ガス火力発電は中国・モンゴルでは0～100ドル/tCO₂の間、日本・韓国では100ドル/tCO₂以上になると優位な対策となる。投資回収年の差異については、日本において大きな影響がみられた。これは、他国と比べてエネルギー価格が高いため、投資回収期間を長く取ると、省エネ効果によるエネルギー回収分による費用削減効果が大きく見積もられるためである。逆に、エネルギー価格が安い途上国においては、投資回収期間を長く取ったとしても、初期費用を回収するだけの費用対効果が見込めず、省エネ効果が高い技術でも初期費用が高額な場合は優位な対策になりにくい、という傾向がみられた。



図(1)-11 日本、中国、韓国、モンゴルにおける2020年の削減費用曲線の比較

(3) エネルギーシステムバックキャストモデル

図(1)-12に、エネルギーバックキャストモデルを用いて、表(1)-1に示した各シナリオの世界全体の温室効果ガス排出量の推移を示す。

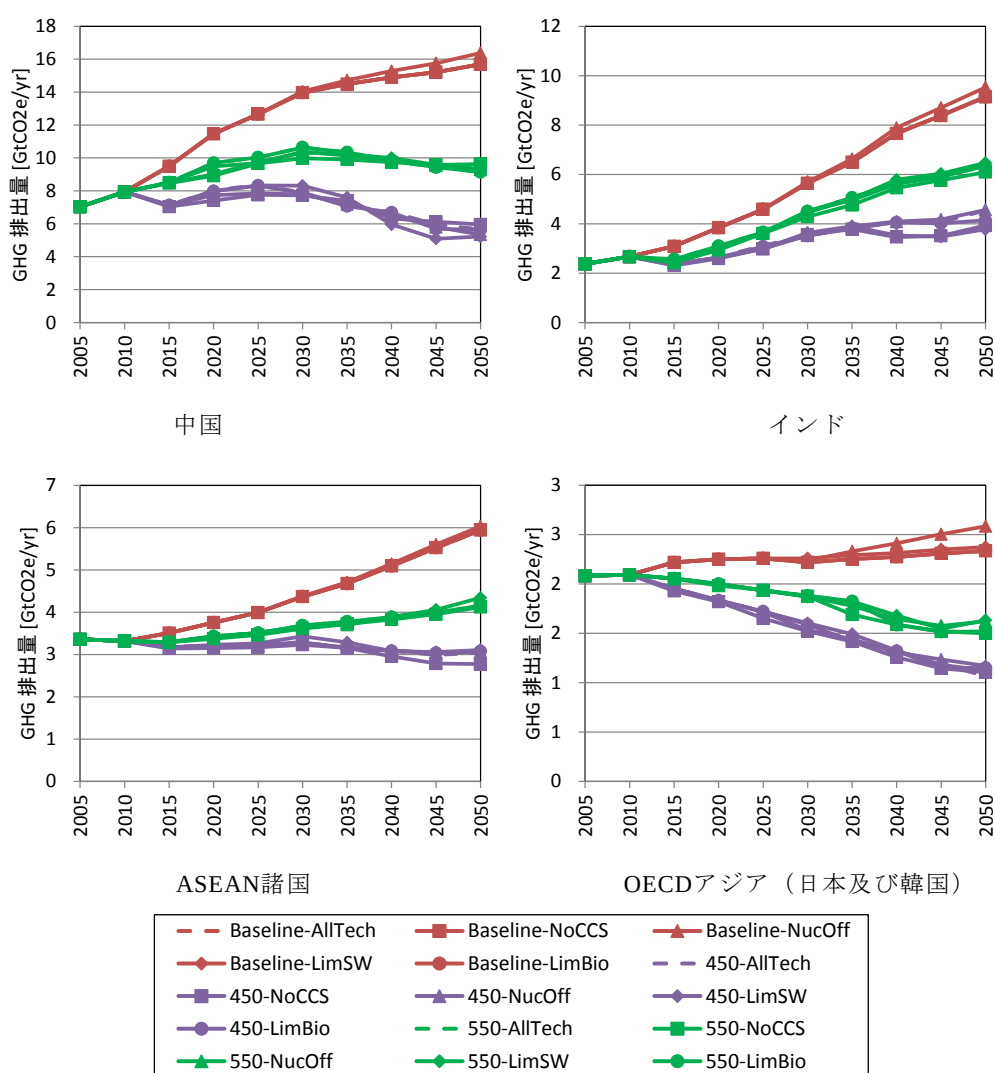


図(1)-12 世界温室効果ガス排出量の変化

炭素割当量がないなりゆき社会の場合には、世界全体の温室効果ガス排出量は2010年以降ほぼ直線で増加し、2050年には75GtCO₂eqまで増加する結果となった。一方、炭素割当量を与えること

で、世界全体の温室効果ガス排出量は減少し、550ppmCO₂eq安定化ケースでは2050年までほぼ横ばい、450ppmCO₂eq安定化ケースでは2015年から削減が開始され、2050年には31.7GtCO₂eqと炭素割当量なしシナリオの排出量と比較して、40%まで減少することがわかる。

地域別に比較すると、図(1)-13に示すようにOECDアジア（日本及び韓国）では、炭素割当量なしシナリオでも温室効果ガス排出量は現状から横ばいであり、炭素割当量が与えられることで現状の排出量から半減以下まで削減が進むことが分かる。一方で、中国やASEAN諸国では、450ppmCO₂eq安定化シナリオを与えることで、現状と同程度の排出量が維持される。インドでは、炭素割当量を与えることでベースラインシナリオよりは削減が進むが、450ppmCO₂eq安定化シナリオでも、2050年の温室効果ガス排出量は現状の1.9倍に増加することが分かる。



図(1)-13 アジア地域におけるシナリオ別温室効果ガス排出量の変化

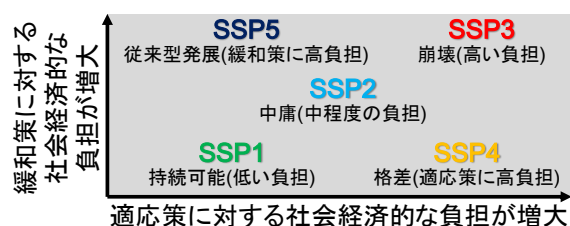
（４）世界応用一般均衡モデルを用いた新しい社会経済シナリオの定量化

SPPの作成に当たってはSMA (Scenario Matrix Approach)という方法が採用される。このSMAとは表(1)-2のようなシナリオのマトリクスを想定したもので、横軸はベースラインとなる社会経済シナリオ、縦軸は気候安定化目標、で構成される。横軸方向の社会経済シナリオは、人間活動の基礎的な社会経済的な側面、例えば、教育水準、人口、所得、所得分配、技術の進展、環境志向、土地利用規制などである。各シナリオはそれぞれで想定された世界観に従った定性的シナリオと定量的なシナリオを整合的に併せ持つ。気候安定化目標については、RCPsの4つの放射強制力を基本とする。

表(1)-2 SMAの概観

		社会経済シナリオ		
		SSP1	SSP2	...
気候安定化目標	8.5W/m ²			
	6.0W/m ²			
	4.5W/m ²			
	2.6W/m ²			

現在、5つのSSPを定量化する作業が、2014年の夏の公表を目指して進められている。それぞれの社会は、図(1)-14のように位置づけられている。気候緩和策に対する社会経済的な負担 (Mitigative capacity) と気候適応策に対する社会経済的な負担 (Adaptive capacity) である。これらは分野横断的にIPCCの第二作業部会と第三作業部会がこのシナリオを使って政策評価をするためこのような軸で設計されている。図(1)-14から、緩和策はSSP1とSSP4で容易に行うことができるのに対して、SSP3とSSP5では困難となる。適応策についてはSSP1とSSP5で容易に行うことが可能であるが、SSP4とSSP5で困難となることが読み取れる。定性的な叙述概要を表(1)-3に示す。



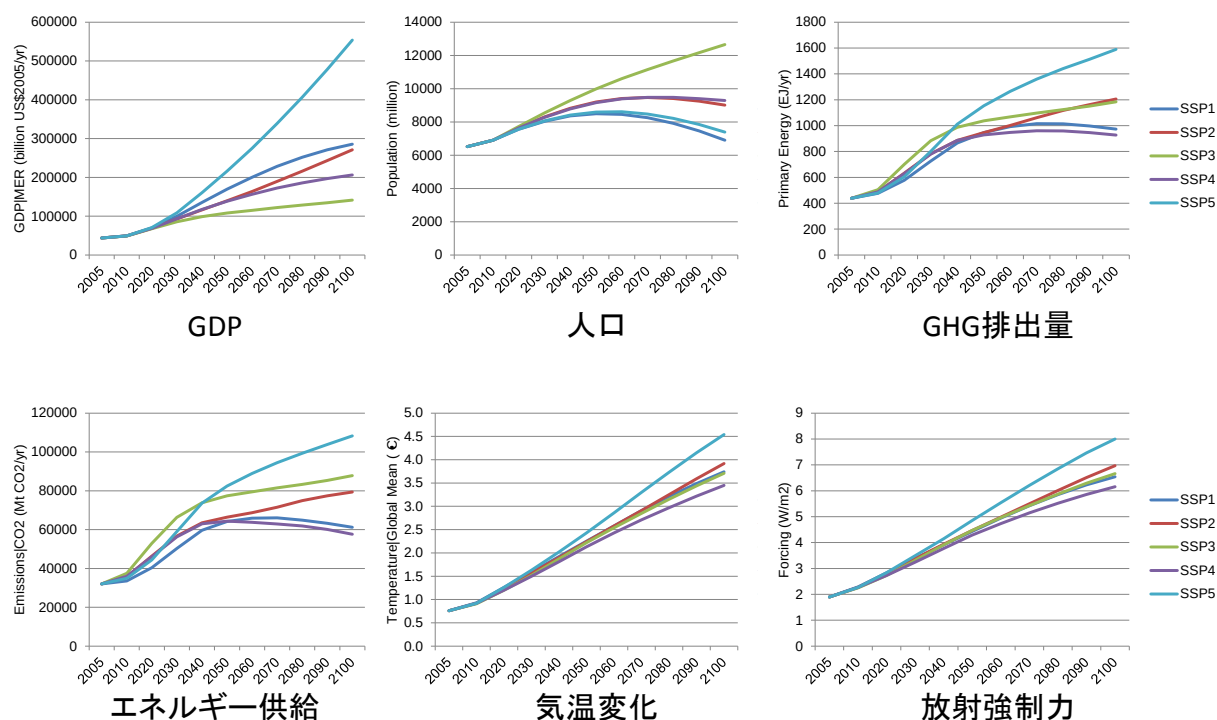
図(1)-14 SSPsにおける5つの将来像

図(1)-15は、主要な指標としてGDP、人口、温室効果ガス排出量、エネルギー供給量、気温変化、放射強制力をまとめたものである。GDP、人口はそれらを推計する専門チームから提供されたものであり、温室効果ガス排出量、エネルギー供給量は本サブテーマで改良した応用一般均衡モデルを用いて計算したもの、気温変化、放射強制力はそのAIM/CGEの結果を用いて簡易気候モデルで計算したものである。温室効果ガス排出量は最も大きいもので2100年において90～160GtCO₂eq/年と大きな幅があることがわかるが、緩和策に対する困難性が大きいSSP5やSSP3などで大きな値となっており、緩和策に対する困難性が小さいSSP1やSSP4は小さな値となっていることがわかる。

一次エネルギー供給量についても同様の傾向がみられる。気温上昇は排出量ほどの差が見られず、3.5～4.5℃となった。

表(1)-3 SSPsの5つの社会の概要

SSP1 (Sustainability／持続可能)：持続可能な社会へ向けて進む。一方で、資源消費強度が下がり化石燃料への依存度が下がる。これらを達成するための要素は、低所得国における急速な発展、国間、国の中での所得格差の解消、急速な技術進歩、環境汚染に対する高い認識である。低所得国の発展は、貧困ラインより下にいる人数を減少させる。これらの発展とともに適切に設計された都市化が低所得、中所得国で進展する。一方、高所得国は中程度の経済発展を成し遂げ、研究開発や技術移転を強くサポートする投資がなされる。世界全体としてはオープンでグローバリゼーションが進む。技術進歩は速く進むが、低汚染物質排出の技術、農業生産性の増加等、環境負荷を低減していくような技術進歩に重点が置かれる。消費は低物質依存、エネルギー強度が下がり、食料は動物性蛋白質の割合が低い。教育投資も進み、結果として人口成長は低い。同時にガバナンス、制度は問題解決に対して適切に設計される。ミレニアム開発目標は次の10年、20年で達成され、教育水準の高い人口が増え、安全な水へアクセスでき、衛生状態、医療アクセスなど気候変化に対する脆弱性を低減させる。
SSP2 (Continuation／中庸)：ここ数十年の過去のトレンドが継続する。開発目標はある程度達成へ向けて進展し、資源への依存度やエネルギー強度の低下は過去のスピードで進み、徐々に化石燃料依存度も下がる。低所得国の発展はすべての国で進むわけではなく、取り残される国も存在する。都市化も同様に進む国もあるが、進まない国もあり、居住地の状態も改善される国と悪化する国が存在する。大部分の国では政治的に安定し、貿易は世界全体で結合している。グローバリゼーションは遅いが進む。貿易障壁はエネルギー、農業、資本市場で残ることになる。情報のアクセスは世界全体で適切に管理されるが、一部の最貧国や資源国や島嶼国はその例外となり保護主義が残る。所得の増加は世界全体としては中程度の速度で進み、途上国と先進国の所得は徐々に縮まっていく。国内における所得格差は徐々に下がっていくが、南米、サブサハラ、インドなどの国では依然として大きな格差が残る。教育投資は大きくはなく、そのため低所得国では人口増加が徐々に進む。ミレニアム開発目標の達成は遅れ、安全な水へのアクセス、衛生状態、医療などは改善しない地域が残り、気候変化に対する脆弱性が残ることになる。
SSP3 (Fragmentation／崩壊)：世界は分断される。極度の貧困が残り、多くの国で大きく増加する人口の生活水準を維持するために奮闘することになる。地域はブロック化が進み、協力は進まない。世界全体として開発目標に失敗し、資源・化石燃料に対する依存は下がらない。各国は自国のエネルギーや食糧安全保障のために躍起になる。エネルギー、食料を含めて国際貿易は後退する。国際協調は進まず、技術進歩や教育に対する投資は限られたものとなる。そのために人口増加は非常に高い。低所得国における都市部は適切に計画されていない居住地が増える。エネルギー技術が進まず、エネルギー資源はローカルに限定され、さらに人口増加によって排出量は増加する。ガバナンスや制度は脆弱で、協力や調和に乏しい。人的資本に対する投資も小さく、格差は広がる。適応能力は低く、多くの国では気候変化に対して極めて脆弱となる。政治は貿易障壁を含む安全保障に重点が置かれる。
SSP4 (Inequality／格差)：非常に高い格差が、国間でも国内でも存在する。豊かなエリートが排出量を増大させ、多くの貧困層は低排出となる。貧困層は先進国、途上国問わず、気候変化に対して脆弱となる。エネルギー部門では資源枯渇、気候政策などに対するヘッジ戦略を取り、R&Dに対する投資が進み、比較的低コストで非化石燃料資源を使えるようになる。従って、緩和策の困難度は低くなる。ガバナンスやグローバリゼーションは高所得のエリートによって、それらの人々のために適切に運営されるが、多くの貧困層にとっては効果的でない。低人的資本の貧困層の割合が相対的に高く、適応策への困難度が高い。
SSP5 (Conventional Development／従来型発展)：社会的・経済的問題に対する解決策として、在来型の経済発展が進む。急速な在来型の経済発展は化石燃料に依存したエネルギーシステムを指向することになる。その結果排出量が増加し、緩和策への困難度が高くなる。人間開発目標は達成され、経済発展は著しく進み、極端現象による災害を軽減するためのインフラ投資が進み、生態系は非常によく管理されており、適応策への困難度は低くなる。



図(1)-15 AIM/CGEを用いたSSPsの定量的情報暫定版

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

世界モデルに関する各種分析では、温暖化対策の国際比較研究プロジェクトや将来の社会経済シナリオ開発に参加、定量的な結果を提供することは、数理モデルや将来シナリオがもつ科学的な知見を社会に提供することにつながっている。特に、他のモデルと比較することで、低炭素社会の実現に向けてどのような将来像が描けるのか、そのための条件は何か、どの程度費用がかかりうるかを、よりロバストな形で検討することができるようになる。IPCCにおいても、モデル比較研究の結果等の多くが引用されており、科学的な知見の蓄積に貢献してきたと考えている。

また、統合評価モデルを用いた様々な将来シナリオの検討とその定量化は、これまで個別に検討されてきた項目を共通の枠組みで検討することが可能となった。SSPsの定量化において見られるように、対策の効果や影響を、異なる社会像との関係で整合的に提示することが可能となっている。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

アジア主要国の研究者に対して実施したモデルのトレーニングは、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。このほか、ADBのプロジェクトを通じた成果の提供も、北東アジア各国における温暖化対策の検討に貢献している。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

様々な国際比較研究プロジェクトへの参画を通じて、将来の多様なシナリオを描くことが可能となり、わが国における温暖化対策の議論に対して様々な情報を提供することが可能となっている。さらに、日本だけではなく世界が低炭素社会に向かう上で特に資金面で困難のある国々や地域に対して国際的な政策や枠組みでどのように支援していくかを検討するための基礎的な情報についても提供できるようになり、こうした情報は温室効果ガス排出量の削減目標に関する国際的な議論において、政府における利用が見込まれると考えている。

このほか、削減量可視化ツールについては、英国大使館の支援のもとで、利用方法に関するワークショップを開催するなど、行政による活用を見据えた活動を行っている。

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 IAMC (Integrated Assessment Modeling Consortium) : 国立環境研究所、EMF、IIASAが中心となって、世界の統合評価モデル研究者が参加している国際的な学術コミュニティ。SRESの後継を目的としたシナリオ作成にも積極的に関わっている。
- ② EMF (Energy Modeling Forum) : スタンフォード大が中心となって活動するモデル比較プロジェクト。
- ③ AMPERE (Assessment of Climate Change Mitigation Pathways and Evaluation of the Robustness of Mitigation Cost Estimates) : 欧州委員会の第7次研究枠組み計画の元で実施されている気候変動対策の統合評価モデルに関する国際モデル比較プロジェクト。
- ④ LIMITS (Low Climate Impact Scenarios and the Implications of Required Tight Emission Control Strategies) : 欧州で行われている大幅な温室効果ガス排出削減に向けた世界及び主要国を対象としたシナリオ開発プロジェクト。
- ⑤ SSPs (Shared Socio-economic Pathways) : IPCC次期評価報告書に向けて、統合評価モデルと影響研究の共通の枠組みを目的とした社会経済シナリオの開発。

また、IAMCやEMF等の国際モデル比較研究では、特に下記の機関と連携し作業を行った。

- ・米国 スタンフォード大学、太平洋北西国立研究所
- ・オランダ 環境評価庁

このほか、以下のアジアの機関に所属する研究者と共同研究を実施するとともに、各機関の若手研究者を対象としたモデルのトレーニングを実施した。

- ・中国 国家発展和改革委員会エネルギー研究所、中国科学院広州エネルギー研究所
- ・インド インド経営大学院アーメダバード校、ボパール建築計画研究所
- ・タイ アジア工科大学、タマサート大学、キングモンクット大学
- ・インドネシア ボゴール農業大学、バンドン工科大学
- ・マレーシア マレーシア工科大学
- ・ネパール アジア技術経営大学
- ・韓国 ソウル大学、国立環境研究院

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) A. Pattanapongchai, B. Limmeechokchai, Y. Matsuoka, M. Kainuma, J. Fujino, O. Akashi and Y. Motoki: GMSARN International Journal, 5 (3), 189-194 (2011)
“Subsidy for Clean Power Generation and CO2 Mitigation in Thailand: The AIM/Enduse Modeling”
- 2) 生津路子・藤森真一郎・松岡譲: 環境システム研究論文集, 67 (6), 255-266 (2011)
「応用一般均衡モデルを用いた日本における温室効果ガス削減目標の分析」
- 3) 金森有子・松岡譲: 土木学会論文集G(環境), 67 (6), II_363- II_374 (2011)
「エネルギーサービスの需給バランスを考慮した業務部門のエネルギー消費量推計について」
- 4) 白木裕斗・芦名秀一・亀山康子・森口祐一・橋本征二: エネルギー・資源学会論文誌, 33 (1), 1-10 (2012)
「多地域電源計画モデルを用いた2020年の日本電力部門における再生可能エネルギー導入シナリオの検討」
- 5) S. Ashina, J. Fujino, T. Masui, T. Ehara and G. Hibino: Energy Policy, 41, 584-598 (2012)
“A roadmap towards a Low-Carbon Society in Japan Using Backcasting Methodology: Feasible Pathways for Achieving an 80% Reduction in CO2 Emissions by 2050”
- 6) O. Akashi, Y. Hijioka, T. Masui, T. Hanaoka and M. Kainuma: Energy Economics, 34, S346-S358 (2012)
"GHG emission scenarios in Asia and the world: The key technologies for significant reduction"
- 7) A. Okagawa, T. Masui, O. Akashi, Y. Hijioka, K. Matsumoto and M. Kainuma: Energy Economics, 34, S391-S398 (2012)
“Assessment of GHG emission reduction pathways in a society without carbon capture and nuclear technologies”
- 8) T. Hanaoka and M. Kainuma: Sustainability Science, 7(2), 117-137 (2012)
“Low-Carbon Transitions in the World Regions: Comparisons of Technological Mitigation Potentials and Costs in 2020 and 2030 by bottom-up analyses"
- 9) O. Akashi and T. Hanaoka: Sustainability Science, 7(2), 139-156 (2012)
“Technological feasibility and costs of achieving a 50 % reduction of global GHG emissions by 2050: Mid- and long-term perspectives"
- 10) H. Dai and T. Masui: Energy Science and Technology, 4(1), 1-8 (2012)
“Assessing the Contribution of Carbon Emissions Trading in China to Carbon Intensity Reduction”
- 11) H. Dai, T. Masui, Y. Matsuoka and S. Fujimori: Energy Policy, 50, 736-750 (2012)
“The Impacts of China’s Household Consumption Expenditure Patterns on Energy Demand and Carbon Emissions towards 2050”

- 12) 長谷川知子・藤森真一郎・申龍熙・高橋潔・増井利彦：土木学会論文集G(環境), 68(5), I_227-I_236 (2012)
「気候変化が作物収量変化を通じて食料消費・経済に及ぼす影響のシナリオ分析」
- 13) 長谷川知子・藤森真一郎・申龍熙・高橋潔・増井利彦：土木学会論文集G(環境), 69, 5, 1-12 (2013)
「気候緩和策による食料消費への影響分析」
- 14) 藤森真一郎・増井利彦・松岡譲：土木学会論文集G(環境), 69, 5, I_227-I_238 (2013)
「エネルギー機器情報を用いた応用一般均衡モデルの開発と緩和策の分析」
- 15) 藤森真一郎・長谷川知子・増井利彦・高橋潔：土木学会論文集G(環境), 69, 6, II_35-II_46 (2013)
「エネルギー・農業・土地利用の長期的分析用の応用一般均衡モデル開発」
- 16) 生津路子・藤森真一郎・松岡譲：土木学会論文集G(環境), 69, 6, II_359-II_370 (2013)
「応用一般均衡モデルを用いたアジア地域における温室効果ガス排出量削減策の分析」
- 17) O. Akashi, T. Hanaoka, T. Masui and M. Kainuma: Climatic Change (2013)
“Halving global GHG emissions by 2050 without depending on nuclear and CCS”
- 18) P. Thepkhun, B. Limmeechokchai, S. Fujimori, T. Masui and R. M. Shrestha: Energy Policy, 62, 561-572 (2013)
“Thailand's Low-Carbon Scenario 2050: The AIM/CGE analyses of CO2 mitigation measures”
- 19) T. Hasegawa, S. Fujimori, Y. Shin, K. Takahashi, T. Masui and A. Tanaka: Environmental Science & Technology, 48, 1, 438-445 (2014)
“Climate Change Impact and Adaptation Assessment on Food Consumption Utilizing a New Scenario Framework”
- 20) S. Robinson, H. van Meijl, D. Willenbockel, H. Valin, S. Fujimori T. Masui, R. Sands, M. Wise, K. Calvin, P. Havlik, D. Mason d'Croz, A. Tabeau, A. Kavallari, C. Schmitz, J. P. Dietrich and M. von Lampe: Agricultural Economics, 45, 1, 21-35 (2014)
“Comparing supply-side specifications in models of global agriculture and the food system”
- 21) H. Valin, R. D. Sands, D. van der Mensbrugghe, G. C. Nelson, H. Ahammad, E. Blanc, B. Bodirsky, S. Fujimori, T. Hasegawa, P. Havlik, E. Heyhoe, P. Kyle, D. Mason, S. Paltsev, S. Rolinski, A. Tabeau, H. van Meijl, M. von Lampe and D. Willenbockel: Agricultural Economics, 45, 1, 51-67 (2014)
“The future of food demand: understanding differences in global economic models”
- 22) G. C. Nelson, D. van der Mensbrugghe, H. Ahammad, E. Blanc, K. Calvin, T. Hasegawa, P. Havlik, E. Heyhoe, P. Kyle, H. Lotze-Campen, M. von Lampe, D. Mason d'Croz, H. van Meijl, C. Müller, J. Reilly, R. Robertson, R. D. Sands, C. Schmitz, A. Tabeau, K. Takahashi, H. Valin and D. Willenbockel: Agricultural Economics, 45, 1, 85-101 (2014)
“Agriculture and climate change in global scenarios: why don't the models agree”
- 23) M. von Lampe, D. Willenbockel, H. Ahammad, E. Blanc, Y. Cai, K. Calvin, S. Fujimori, T. Hasegawa, P. Havlik, E. Heyhoe, P. Kyle, H. Lotze-Campen, D. Mason d'Croz, G. C. Nelson, R. D. Sands, C. Schmitz, A. Tabeau, H. Valin, D. van der Mensbrugghe and H. van Meijl: Agricultural Economics, 45, 1, 3-20 (2014)

“Why do global long-term scenarios for agriculture differ? An overview of the AgMIP Global Economic Model Intercomparison”

- 24) 石田裕之・小林翔太・鼎信次郎・長谷川知子・藤森真一郎・申龍熙・高橋潔・増井利彦・田中朱美：水工学論文集, 58 (2014)

「最新のシナリオフレームワークに基づいた将来の低栄養起因健康被害の推定」 (in press)

- 25) G. C. Nelson, H. Valin, R. D. Sands, P. Havlík, H. Ahammad, D. Deryng, J. Elliott, S. Fujimori, T. Hasegawa, E. Heyhoe, P. Kyle, M. Von Lampe, H. Lotze-Campen, D. Mason d’Croz, H. van Meijl, D. van der Mensbrugghe, C. Müller, A. Popp, R. Robertson, S. Robinson, E. Schmid, C. Schmitz, A. Tabeau and D. Willenbockel: Proceedings of the National Academy of Sciences, 111, 9, 3274-3279 (2013)

“Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks” (in press)

<査読付論文に準ずる成果発表> (対象：社会・政策研究の分野)

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 生津路子・藤森真一郎・松岡譲：環境衛生工学研究, 25 (3), 88-91 (2011)
「日本における温室効果ガス削減対策の評価：応用一般均衡モデルを用いた分析」
- 2) J. Fujino, O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow, eds. : Renewable Energy Sources Climate Change Mitigation, Cambridge University Press, 707-78 (2011)
“Renewable Energy in the Context of Sustainable Development.”
- 3) 藤野純一：産業と環境, 41 (2), 31-34 (2012)
「持続可能なアジア低炭素開発に向けてーアジア低炭素社会研究プロジェクトー」
- 4) 藤野純一：環境技術2013年3月号 (2013)
「アジア太平洋統合評価モデルを用いた定量的な温暖化対策立案支援」
- 5) 藤森真一郎・増井利彦：日本エネルギー学会誌, 92(3), 196-203 (2013)
「将来の気候変化を評価するための温室効果ガス排出経路と社会経済シナリオ」
- 6) T. Hanaoka, K. Fujiwara, Y. Motoki, G. Hibino and O. Akashi: The 8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik, Croatia, 0412-1-0412-15 (2013)
“Cobenefits of reducing non-CO2 emissions by achieving a 50% global GHG emissions reduction target by 2050”
- 7) Y. Kanamori: Proceedings of 16th conference of ERSCP and 7th conference of EMSU (2013)
“Estimation on residential energy consumption in Japan and China based on energy service supply-demand structure”

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Y. Kanamori and Y. Matsuoka: EEDAL 2011-6th International Conference on Energy Efficiency in

- Domestic Appliances and Lighting, Copenhagen, Denmark (2011)
 “Method for Estimation of Residential Energy Consumption Structure”
- 2) M. Kainuma, S. Fujimori, N. Hanasaki and Y. Hijioka: Workshop to Explore the New SMA/SSP Approach, Changwon, Korea (2011)
 “Integrated SMA/SSP: Research Experiments by the AIM group”
 - 3) M. Kainuma: Symposium on Low Carbon Asia Research Projects, Johor Bahru, Malaysia, ,(2011)
 “Action Plans towards Low-Carbon Cooperation in AsiaLessons Learned from Low-Carbon Scenario Study”
 - 4) M. Kainuma, S. Fujimori, N. Hanasaki, T. Masui and Y. Hijioka: ENERGY MODELING FORUM 2011 Workshop on Climate Change Impacts and Integrated Assessment (CCI/IA), Snowmass, USA (2011)
 “Key Challenges and Uncertainties in IAM for Energy-Landuse-Water Nexus”
 - 5) 藤森真一郎：環境科学会2011年会，西宮（2011）
 「新社会経済シナリオの構築」
 - 6) 花崎直太：環境科学会2011年会，西宮（2011）
 「新しい全球水資源温暖化影響評価に向けて」
 - 7) 肱岡靖明：環境科学会2011年会，西宮（2011）
 「温暖化影響評価・適応策検討のための統合評価モデルの開発」
 - 8) 高橋央・増井利彦：環境科学会2011年会，西宮（2011）
 「地域の温暖化対策における再生可能エネルギーの効果に関する分析」
 - 9) 田邊千英・増井利彦：環境科学会2011年会，西宮（2011）
 「消費者行動による循環型社会と低炭素社会の両立に関する分析」
 - 10) 肱岡靖明：化学工学 第43回秋季大会，名古屋（2011）
 「気候変動の影響と適応策」
 - 11) M. Kainuma: Seminar on Japan's Contribution to IIASA Activities, Vienna, Austria (2011)
 “Joint Research through AIM Model Development -What is AIM Model and What have been done-”
 - 12) K. Takahashi: Korea-Japan Joint Workshop for Climate Change Impact and Adaptation, Seoul, Korea (2011)
 “Introduction to Research Projects on Impact and Adaptation Analysis Conducted in Japan”
 - 13) 肱岡靖明：リスク工学研究会（RERM），つくば（2011）
 「温暖化の影響を考える」
 - 14) M. Kainuma: LIMITS Kick-Off Meeting, Milan, Italy (2011)
 “Asia Scenarios for a Low Carbon Society Possible Collaboration with LIMITS Project”
 - 15) 藤森真一郎：持続可能なアジア低炭素社会に向けた日本の役割 Japan's Role for Achieving Sustainable Low Carbon Societies in Asia, 東京（2011）
 「IPCC第5次評価報告書に向けた将来シナリオの検討：日本からの貢献とその意義」

- 16) T. Masui: 3rd Energy Modeling Forum 24 Global Study Working Group Meeting, Potsdam, Germany (2011)
“The EMF24 results of AIM/CGE [Global]”
- 17) O. Akashi: 3rd Energy Modeling Forum 24 Global Study Working Group Meeting, Potsdam, Germany (2011)
“Determinants of Energy Intensity: Energy Service Intensity and Technological Efficiency”
- 18) K. Riahi, J. Edmonds, J. Eom, M. Kainuma, T. Kram, V. Krey, E. Kriegler, T. Masui, R. Moss and V. Vliet: The Nature and Use of New Socioeconomic Pathways for Climate Change Research, Boulder, USA (2011)
“Overview of Narratives in Integrated Assessment Model SSP Experiments”
- 19) K. Takahashi: International Workshop on Theoretical and Empirical Approaches for Understanding Adaptation to Climate Change, Tokyo, Japan (2012)
“Introduction to Research Projects on Impact and Adaptation Analysis Conducted in Japan”
- 20) H. Shiraki, S. Ashina, O. Akashi, Y. Kameyama and Y. Moriguchi: 3rd IAEE Asian Conference, Kyoto, Japan (2012)
“The Impact of Nuclear Policy Changes on Climate Change Mitigation Policy in Asia”
- 21) M. Namazu, T. Masui, S. Diego and S. Ashina: 4th EMF27 study meeting, Stanford, USA (2012)
“Results of AIM/CGE [Global] for EMF27 and renewable potential”
- 22) O. Akashi: 4th EMF27 study meeting, Stanford, USA (2012)
“Availability of CCS and end-use technology choice in 450ppm scenario”
- 23) S. Fujimori, N. Hanasaki, S. Hasegawa, T. Masui, M. Kainuma, K. Takahashi and Y. Hijioka: Climate Change Impacts and Integrated Assessment (CCI/IA) Workshop XVIII, Snowmass, USA (2012)
“SSPs and industrial water by AIM modeling team”
- 24) 金森有子：環境科学会2012年会，横浜（2012）
「持続可能なライフスタイルを評価するためのモデルアプローチ」
- 25) 金森有子・増井利彦：環境経済・政策学会 2012年大会，仙台（2012）
「アジア地域における家計消費の変化とそれに伴う家庭ごみ発生量の推計」
- 26) 増井利彦・岡川梓：環境経済・政策学会 2012年大会，仙台（2012）
「わが国の温室効果ガス削減評価のためのモデル開発とその適用」
- 27) 藤野純一・芦名秀一・増井利彦・日比野剛・松井重和・大城賢：環境経済・政策学会2012年大会，仙台（2012）
「日本の2020年・2030年エネルギー・温暖化シナリオシミュレーション分析」
- 28) 長谷川知子・藤森真一郎・申龍熙・高橋潔・増井利彦第20回地球環境シンポジウム，京都（2012）
「気候変化が作物収量変化を通じて食料消費・経済に及ぼす影響のシナリオ分析」
- 29) Y. Kanamori: 2012 Berlin Conference on the human dimensions of global environmental change, Berlin, Germany (2012)
“Household consumption change and household waste generation from household activities in

Asian countries”

- 30) S. Fujimori, T. Masui, T. Hasegawa, N. Hanasaki, M. Kainuma, K. Takahashi and Y. Hijioka:
Netherlands Meeting on New Socioeconomic Pathways for Climate Change Research, Hague,
Netherlands (2012)
“An example of SSP usage by AIM”
- 31) T. Masui, S. Fujimori, T. Hasegawa, N. Hanasaki, Y. Shin, K. Takahashi, Y. Hijioka and M.
Kainuma: The 5th IAMC Annual Meeting, Utrecht, Netherlands (2012)
“Application of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) toward new socio-economic scenario
development integrating climate change mitigation, impact and adaptation”
- 32) T. Masui: 11th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Kyoto (2012)
“The Scale of Renewable Energy and CCS Deployments across the RCP Scenarios”
- 33) 増井利彦: 環境文明21シンポジウム: 日本のエネルギー・環境問題はこれからどうなる?, 東
京 (2012)
「2030年の温暖化対策に向けて」
- 34) 増井利彦: つくば研究学園都市記者会 国立環境研究所勉強会, つくば (2012)
「2030年に向けた温暖化対策について」
- 35) 増井利彦: 数学協働プログラム開始記念シンポジウム, 東京 (2013)
「将来の気候変動対策に向けた統合評価モデルと将来シナリオ」
- 36) 増井利彦: 全国地球温暖化防止活動推進センター社員総会講演, 東京 (2013)
「今、温暖化対策としてやるべきこと」
- 37) 増井利彦: 国立環境研究所春の一般公開, つくば (2013)
「実現可能な低炭素社会像の提案に向けて: 統合評価モデルによる日本の低炭素社会デザ
イン」
- 38) 増井利彦: うちエコ診断事業, 東京 (2013)
「今、温暖化対策としてやるべきこと」
- 39) T. Masui, S. Fujimori, T. Hasegawa, N. Hanasaki, K. Takahashi, and M. Kainuma: 36th Annual
IAEE International Conference, Daegu, Korea (2013)
“Next Generation Scenarios for Climate Assessment, the SSPs”
- 40) T. Masui: Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) Second Annual Meeting, Yokohama,
Japan (2013)
“Asian activities toward two degree target”
- 41) T. Masui: The 5th International Forum for Sustainable Asia and the Pacific, Yokohama, Japan
(2013)
“Emission Pathways toward the 2 Degree Target”
- 42) 増井利彦: 渋川市役所職員研修, 渋川 (2013)
「地球温暖化対策の最新動向と地方行政の役割」
- 43) 増井利彦: 渋川市・市民環境大学 (第3回: CO2を減らす取り組み), 渋川 (2013)
「地球温暖化の最新動向と温暖化防止に向けた取り組み」

- 44) 増井利彦：環境まちづくり町民講座（第2回），福島県新地町（2013）
「低炭素社会の実現と新地町への期待」
- 45) 増井利彦・日比野剛：環境経済・政策学会2013年大会，神戸（2013）
「簡易化した技術選択を統合した応用一般均衡モデルによるわが国温室効果ガス削減策の評価」
- 46) 大城賢・増井利彦：環境経済・政策学会2013年大会，神戸（2013）
「多地域技術選択モデルを用いたわが国のCO2削減シナリオの分析」
- 47) 奥島真一郎・岡川梓：環境経済・政策学会2013年大会，神戸（2013）
「日本におけるエネルギー貧困問題の可能性エネルギー価格上昇による低所得世帯および脆弱世帯への影響」
- 48) 増井利彦・日比野剛：第5回横幹連合コンファレンス，高松（2013）
「温室効果ガス排出削減目標の実現に向けた取り組みの先にあるもの」
- 49) D. Silva, S. Ashina and J. Fujino: 30th Conference on Energy, Economy, and Environment, Tokyo, Japan (2014)
“Study on the Feasibility of Wind Power Supply Across Asia Focusing on Electricity Transmission Costs”
- 50) 芦名秀一・藤野純一・増井利彦・日比野剛・松井重和：エネルギー・資源学会第32回研究発表会，東京（2013）
「2050年日本低炭素社会シナリオ及び実現ロードマップの再検討」
- 51) S. Fujimori, H. Lotze-Campen, M. von Lampe, P. Kyle, P. Havlik, H. V. Meijl and T. Hasegawa: 16th Annual Conference on Global Economic Analysis, Shanghai, China (2013)
“Impacts of increased bioenergy demand on global food markets: an AgMIP economic model intercomparison”
- 52) S. Fujimori, D. Silva, H. Dai and T. Masui: the Climate Change Impacts and Integrated Assessment (CCI/IA) Workshop XIX, Snowmass, USA (2013)
“Wind power energy from AIM point of view”
- 53) S. Fujimori, T. T. Tran, M. Namazu, T. Masui, Y. Matsuoka, K. Jiang and P. R. Shukla: 6th Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting, Tsukuba, Japan (2013)
“Analyzing the energy demand of Low carbon development in China and India using AIM/CGE model”
- 54) T. Hasegawa, S. Fujimori, Y. Shin, K. Takahashi, T. Masui and A. Tanaka: 6th Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting, Tsukuba, Japan (2013)
“The Consequence of Climate Mitigation on Food Security”
- 55) D. Silva, H. Dai, S. Fujimori and T. Masui: 6th Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting, Tsukuba, Japan (2013)
“Global assessment of onshore wind energy with transmission costs”
- 56) Y. Hijioka: 19th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan (2013)
“Recent research on climate change impacts assessment and adaptation policies in Japan”
- 57) M. Kainuma: Inception Meeting of SDSN's Deep De-Carbonization Pathways Project, Seoul, Korea

(2013)

“Research Project for Low Carbon Society -Japanese case studies by AIM (Asia-Pacific Integrated Model)-“

- 58) A. Okagawa and S. Okushima: Research Institute for the Environment and Trade (RIET) Symposium: Renewable Energy and US/Japanese Energy Policy - A Computational General Equilibrium Approach, Tokyo, Japan (2013)
“Energy Poverty in Japan: How Does the Energy Price Escalation Affect Low Income and Vulnerable Household?”
- 59) C. Schmitz, H. van Meijl, P. Kyle, S. Fujimori, A. Gurgel, P. Havlik, D. Mason, A. Popp, R. Sands, A. Tabeau, D. van der Mensbrugghe, M. Von Lampe, M. Wise, E. Blanc, T. Hasegawa and H. Valin: 16th Annual Conference on Global Economic Analysis, Shanghai, China (2013)
“An agro-economic model comparison of cropland change until 2050“
- 60) H. Shiraki and S. Ashina: 36th Annual IAEE International Conference, Korea (2013)
“Effects of Low Carbon Energy Transition on Future Fossil Fuel Prices with an Energy Resource Model”
- 61) D. Silva, S. Ashina, J. Fujino, H. Hashim, W. S. Ho and J. S. Lim: 36th IAEE International Conference, Tsukuba, Japan (2013)
“Evaluating renewable energy targets in local areas with an energy system model - Case study of Iskandar Malaysia”
- 62) Y. Kanamori: 16th Conference of the European Roundtable on Sustainable Consumption and Production (ERSCP) & 7th Conference of the Environmental Management for Sustainable Universities (EMSU), Istanbul, Turkey (2013)
“Estimation on residential energy consumption in Japan and China based on energy service supply-demand structure”
- 63) M. Kainuma: Opportunities and Challenges in China’s Energy Development - Energy Efficiency and Conservation, Singapore, Singapore (2013)
“Energy Efficiency and Conservation Strategies in Japan and Their Implications to China’s Future Energy Development”
- 64) K. Takahashi: The Fifth International Forum for Sustainable Asia and the Pacific (ISAP2013), Yokohama, Japan (2013)
“Projected Climate Change Impacts in Asia and Japan”
- 65) 高橋 潔：公開シンポジウム「気候変動がもたらす農林業への影響とその対策を考える」，東京 (2013)
「最近の世界の影響評価研究の動向と農林業研究への期待」
- 66) 高橋 潔：化学工学会第45回秋季大会，岡山 (2013)
「地球温暖化が引き起こす影響について」
- 67) 長谷川知子・藤森真一郎・高橋 潔・増井利彦：第4回シナリオ・イニシアティブ会合，東京 (2013)
「第6回IAMC年次総会/EMF30の報告」.

- 68) T. Hasegawa, S. Fujimori, S. Yonghee, K. Takahashi and T. Masui: Impacts World 2013: International Conference on Climate Change Effects, Potsdam, Germany (2013)
 “Global Assessment of Climate Change Impact on Food Systems”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) AIMトレーニングワークショップ（2011年6月6日～17日、国立環境研究所、参加者34名）
- 2) AIMトレーニングワークショップ・フォローアップ会合（2011年11月16日～18日、国立環境研究所、参加者8名）
- 3) シンポジウム：持続可能なアジア低炭素社会に向けた日本の役割（2011年11月22日、JICA研究所、参加者約200名）
- 4) 第17回AIM国際ワークショップ（2012年2月17日～19日、国立環境研究所、参加者86名）
- 5) AIMトレーニングワークショップ（2012年7月24日～8月2日、国立環境研究所、参加者20名）
- 6) AIMトレーニングワークショップ・フォローアップ会合（2012年12月10日～13日、国立環境研究所、参加者6名）
- 7) 第18回AIM国際ワークショップ（2012年12月14日～15日、国立環境研究所、参加者70名）
- 8) 第6回 Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC)年次会合（2013年10月28日～30日、国立環境研究所、参加者80名）
- 9) 第19回AIM国際ワークショップ（2013年12月14日～15日、国立環境研究所、参加者80名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 電気新聞，2011年7月11日
- 2) 日刊工業新聞，2011年7月12日
- 3) 建設通信新聞，2011年7月12日
- 4) 日刊自動車新聞，2011年7月14日
- 5) 電気新聞，2011年8月3日
- 6) 日刊自動車新聞，2011年8月4日
- 7) 建設通信新聞，2011年8月4日
- 8) 電気新聞，2011年8月31日
- 9) 日刊自動車新聞，2011年9月1日
- 10) 建設通信新聞，2011年9月1日
- 11) 化学工業日報，2011年10月20日
- 12) 電気新聞，2011年12月22日
- 13) 常陽新聞，2012年1月5日
- 14) 茨城新聞，2012年1月18日
- 15) エネルギーフォーラム57巻681号，2011年9月1日
- 16) 言論NPO（USTREAMにて配信），2011年5月23日

- 17) 言論NPO JFN系列（TOKYO FM），2011年7月27日
- 18) 言論NPO JFN系列（TOKYO FM），2011年8月3日
- 19) 福島民報，2012年4月8日
- 20) 読売新聞夕刊，2012年4月12日
- 21) 東京新聞夕刊，2012年4月12日
- 22) 毎日新聞，2012年4月13日
- 23) 産経新聞，2012年4月13日
- 24) 産経新聞大阪，2012年4月13日
- 25) 電気新聞，2012年4月13日
- 26) 化学工業日報，2012年4月13日
- 27) 電気新聞，2012年4月20日
- 28) 電気新聞，2012年4月27日
- 29) 日刊工業新聞，2012年5月10日
- 30) 毎日新聞，2012年5月10日
- 31) 電気新聞，2012年5月10日
- 32) 日刊建設工業新聞，2012年5月11日
- 33) 朝日新聞,夕刊，2012年5月23日
- 34) 毎日新聞,夕刊，2012年5月23日
- 35) 日経産業新聞，2012年5月24日
- 36) 電気新聞，2012年5月24日
- 37) 化学工業日報，2012年5月24日
- 38) 東京新聞，2012年5月24日
- 39) 茨城新聞，2012年5月24日
- 40) 電気新聞，2012年6月4日
- 41) 毎日新聞夕刊，2012年6月8日
- 42) 毎日新聞大阪，2012年6月8日
- 43) 毎日新聞，2012年6月8日
- 44) 毎日新聞，2012年6月9日
- 45) 愛媛新聞，2012年6月13日
- 46) 電気新聞，2012年7月6日
- 47) 日経産業新聞，2012年7月19日
- 48) 産経新聞，2012年7月22日
- 49) 読売新聞，2012年7月30日
- 50) 信濃毎日新聞，2012年8月5日
- 51) 福島民報，2012年8月5日
- 52) 四国新聞，2012年8月5日
- 53) 東京新聞，2012年9月15日
- 54) 東京新聞，2012年9月15日
- 55) テレビ朝日モーニングバード，2012年10月11日

56) 電気新聞, 2013年2月14日

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) IPCC Working Group III: Summary for Policy Makers, 5th Assessment Report of IPCC WG3 (2014)
- 2) H. Lofgren, R. L. Harris and S. Robinson: A Standard Computable General Equilibrium (CGE) model in GAMS, IFPRI (2002)
- 3) Department of Energy & Climate Change, UK: 2050 Pathways, <https://www.gov.uk/2050-pathways-analysis>
- 4) UNEP: Emission Gap Report 2013, UNEP (2013)

（２） わが国における温室効果ガス排出削減策の効果とその影響

みずほ情報総研株式会社

環境エネルギー第１部

日比野 剛・吉川 実・藤原 和也・元木 悠子・

高野 真之・大城 賢

<研究協力者>

（独）国立環境研究所 社会環境システム研究センター

増井 利彦・芦名 秀一

平成23～25年度累計予算額：84,527千円

（うち、平成25年度予算額：26,009千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

わが国における温室効果ガス削減に関する議論は、2011年3月11日に発生した東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所事故により大きく変化した。国際的な議論が進む中、原子力発電の再稼働の問題もあり、それまで目標としてきた2020年の温室効果ガス排出量を1990年比25%削減するための施策の議論から、改めて削減目標を検討し直す状況となった。本研究では、こうした状況の中、これまでに開発してきた技術選択モデルや応用一般均衡モデルを用いて、2020年及び2030年の削減量とその影響を、前提条件を見直して分析した。また、わが国の国土は地域によって人口、気象条件、産業構造が大きく異なり、さらに、再生可能エネルギーの供給ポテンシャルも地域によって偏在するなど、地域によって対策及びその影響が大きく異なる。こうしたことから、これまでに開発してきた日本を対象としたモデルを地域モデルに拡張し、温室効果ガス排出削減の可能性と影響について分析を行った。

わが国全体を対象とした技術選択モデルの結果、成長ケースにおいて2030年の温室効果ガス排出量は、原子力発電の稼働率を0%にしても1990年比3%～20%削減できることが示された。なお、2013年11月に公表された新しいわが国の温室効果ガス排出量の削減目標（2005年比3.8%減、1990年比に換算すると3.1%増）は、温暖化対策低位と中位の間に位置する目標となった。また、地域分割した技術選択モデルを用いて分析を行った結果、2050年の温室効果ガス排出量を1990年比80%削減する長期目標は、十分達成されることが示された。一方、応用一般均衡モデルによる温暖化対策の影響に関しては、技術選択を内生的に行うようにモデル改良を行い、長期的な視点で省エネ技術の選択が行われる場合には、2013年に設定された新しい2020年の削減目標の実現を経済的なロスなしに達成可能となることを示した。

【キーワード】

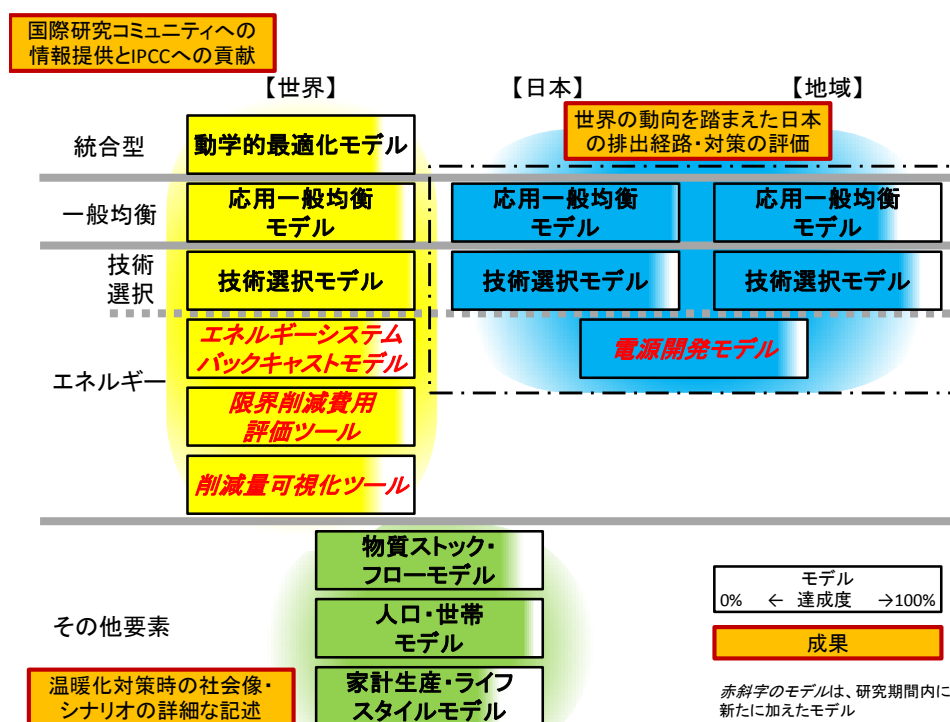
日本の温室効果ガス削減目標、技術選択モデル、応用一般均衡モデル、地域特性、限界削減費用

1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災以降、原子力発電所の再稼働をはじめとした電力供給の問題から、わが国の温暖化対策は大幅な見直しを迫られることとなった。その一方で、節電に対する取り組みが進むなど、温暖化対策に通じる動きも随所で見られるようになった。しかしながら、2013年11月にポーランドのワルシャワで開催された気候変動枠組条約第19回締約国会議において、わが国の2020年の温室効果ガス排出量の削減目標として、2005年比3.8%削減（1990年比に換算すると3.1%増加）が公表された。原子力発電所からの電力供給を0とした場合の数値とはいえ、2050年に1990年比80%削減という目標を掲げる日本としては、十分な数値とは言えない。2050年の目標を達成するために、長期的な展望に立った分析が求められている。

2. 研究開発目的

図(2)-1に、本研究課題全体が対象とするモデルと、本サブテーマで開発、改良したモデルの関係を示す。



図(2)-1 2A-1103で対象とするモデルとサブテーマ（2）で対象とするモデル（一点鎖線部分）

本サブテーマでは、2050年の温室効果ガス排出量を1990年比80%削減するというわが国の長期目標に向けて、技術的な可能性や課題、影響を分析するために、これまでに開発してきた日本を対象とした技術選択モデルや応用一般均衡モデルについて、東日本大震災後の社会経済状況の変化を踏まえた再計算を行うとともに、より具体的な温暖化対策の検討が可能となるように、これまでは国を対象としてきたモデルの境界を、地域に分割して、人口や気象条件、産業活動、再生可能資源の賦存量など、地域特性を反映させることができるように拡張したモデルの開発を行うことを目的とする。さらには、これまで前提と結果を相互にやりとりしてきた技術選択モデルと応

用一般均衡モデルについて、応用一般均衡モデルに簡易な技術選択を内生化させるモデルへと拡張し、気候変動緩和策の目標と技術選択、経済影響の関係について、これまで以上に整合的な結果を示すことを目的とする。

また、上記のモデルは、逐次動学で将来を記述するが、将来の目標を明確に定め、その目標に向かってどの時期にどのような対策を導入するかを検討するエネルギーシステムバックキャスティングモデルの開発もあわせて行う。

3. 研究開発方法

(1) 日本を対象とした技術選択モデルによる2020年及び2030年の温室効果ガス削減目標の評価

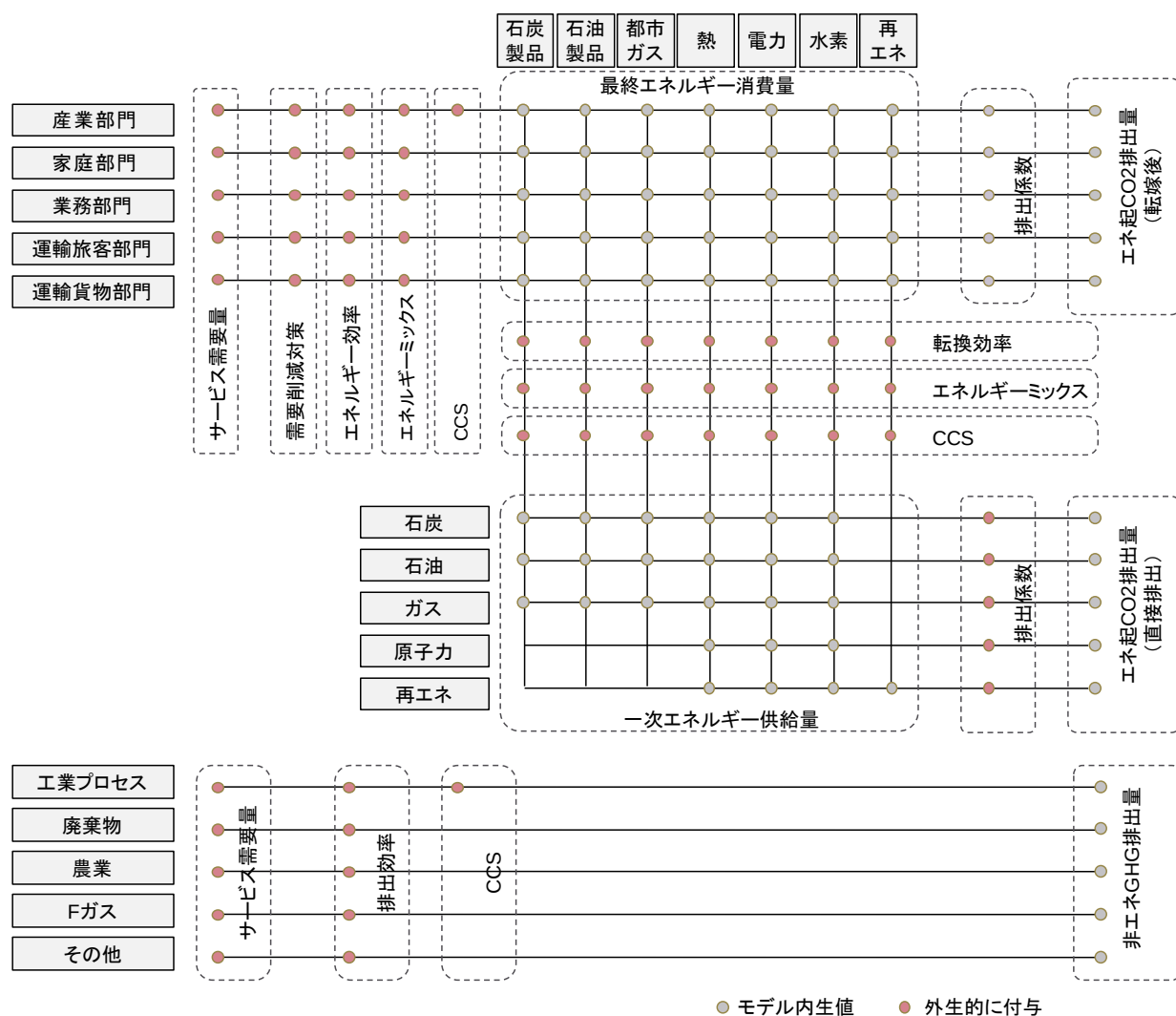
2011年3月11日の東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所事故は、わが国の電力需給だけでなく、温室効果ガス排出量の削減に対しても大きな影響をもたらした。特に、震災前の計画では、原子力発電所の稼働を多く見積もっていたことから、大幅な見直しが求められるようになった。日本を対象とした技術選択モデルを用いた分析では、原子力発電の稼働率を変化させて2020年及び2030年の温室効果ガス排出量の削減の可能性について検討した。

(2) 日本の中長期の温室効果ガス排出量推計モデルの開発

将来の活動量、エネルギー消費効率、エネルギー種構成の3つの要素の組み合わせによって、日本全体のCO₂排出構造を再現し、政策変数をそれらの要素に合わせて設定することで、対策導入後の温室効果ガス排出量を瞬時に把握することが可能な温室効果ガス長期推計モデルの開発を行った。推計手順は、まず、産業、家庭、業務、運輸旅客、運輸貨物の各部門について、サービス需要量、需要削減対策、エネルギー効率、エネルギーミックスの想定を付与することで、最終需要部門のエネルギー消費量を算定する。続いて、最終エネルギーの需要量を元に、エネルギー転換部門でも、エネルギー効率などの付与された想定から一次エネルギー供給量を算定する。排出係数を乗じてCO₂排出量の算定を行う。また、非エネルギー部門についての推計も可能で、6種の温室効果ガス排出量全てが計算できる（図(2)-2参照）。また、このモデルは要因分析ツールを持ち、どの対策が削減にどのように寄与しているか推計することができる。

低炭素社会を実現するために各排出源に必要な対策の強度を瞬時に把握することができるため、政策担当者とのコミュニケーションが容易になる。これまでに2050年の一時点を把握するためにこのようなツールを開発したが、中期目標と長期目標を整合のとれた枠組みで検討するために経年的に排出量などを把握するツールが求められて本開発を行った。本ツールでは将来排出量を5年刻みで把握することができるようになっている。なお、分析の対象とした主な技術は表(2)-1に示す通りである。

このモデルは技術のコホートを直接的には扱っていないため、新規導入量と保有量との関係を説明できない。しかし、それについては別途AIM/Enduseなどコホートデータを扱うことができるモデルにおいてストック効率を推計し、その結果を当モデルに反映させることで整合を保つことができる。



図(2)-2 中長期の温室効果ガス排出量推計モデルの概要

表(2)-1 分析に用いた主な対策技術

部門名	主な対策技術
産業部門	革新的鉄鋼技術、革新的セメント技術、革新的石油化学技術、革新的ガラス技術、産業用CCS、高効率動力技術、産業用ヒートポンプ、農林水産業の省エネ化
民生部門	高効率空調システム、高効率照明、高効率給湯システム、太陽熱温水器、高効率家電機器、高効率業務用電気機器、高効率IT機器、HEMS・BEMS
運輸部門	内燃自動車燃費改善、次世代自動車、バイオ燃料、旅客輸送管理システム、貨物輸送管理システム、高効率船舶、高効率鉄道、高効率航空機、
エネルギー供給	高効率火力発電、再生可能エネルギー発電、発電用CCS、電力需要調整システム、低炭素水素製造、定置型FC
非エネルギー	産業CCS、肥料・排泄物等の削減技術・管理、ノンフロンガス、廃棄物処理

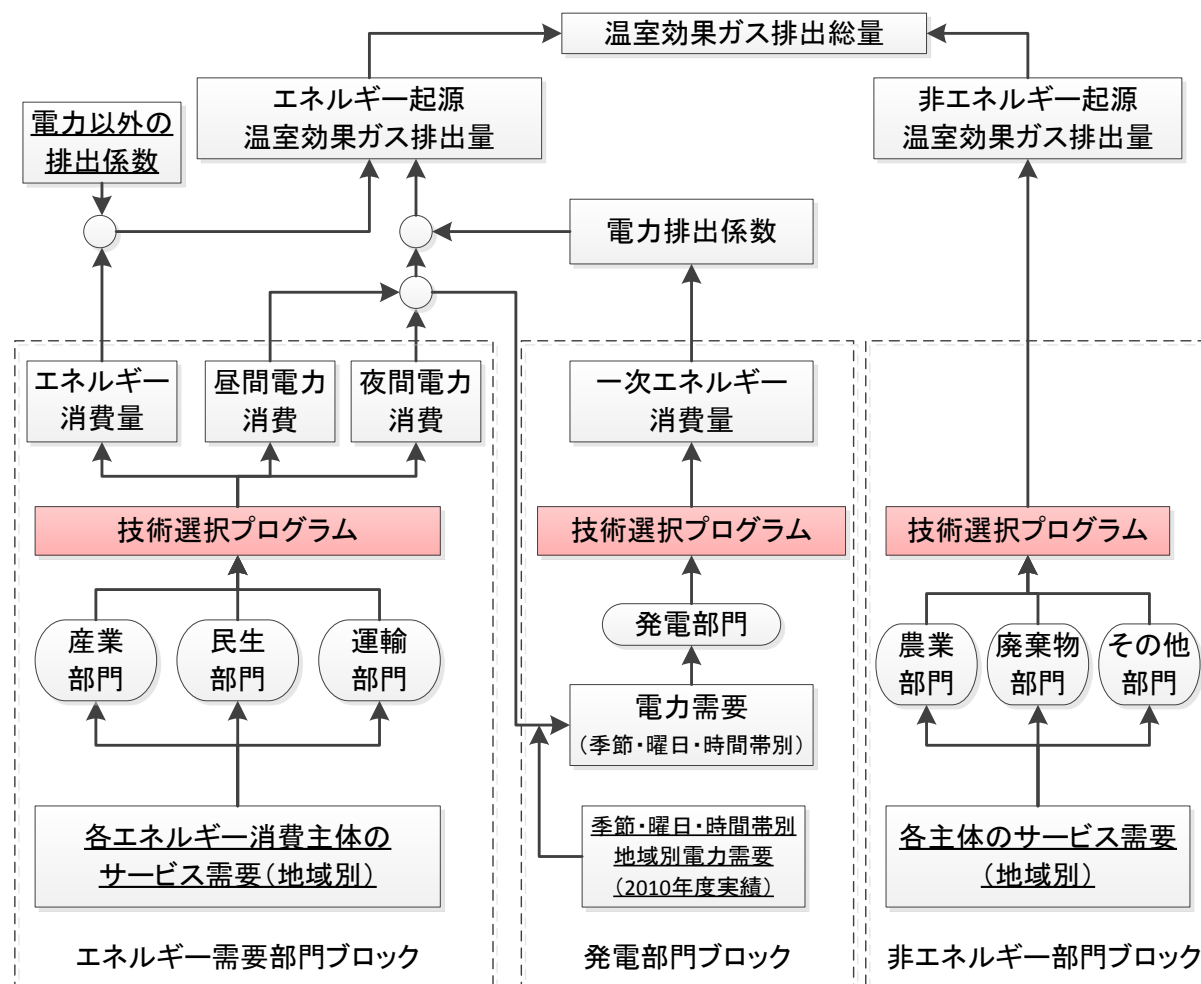
(3) 日本を対象とした技術選択モデル(多地域版)の開発

これまでの日本技術モデル(AIM/Enduse[Japan])を用いた分析では、対策技術のエネルギー効率や価格、部門別のエネルギー消費原単位について、地域ごとの分散を考慮せず、日本全国の平均値を用い、将来のエネルギー消費・温室効果ガス排出量の分析を行ってきた。そのため、産業

構造や気候条件等の地域特性に応じたエネルギー消費特性の差や、地域間連系線の制約を考慮した電力系統対策の効果・影響を考慮した分析を行うことが困難であった。最近では、電力中央研究所(2011)¹⁾にて、日本を対象とした多地域型のエネルギー技術選択モデルを用いた分析がなされているが、原子力依存度低減の想定下における2050年温室効果ガス80%減の検証は行われていない。

そこで、本研究では多地域エネルギー技術選択モデルを新たに構築し、原子力依存度低減の想定下で、2050年までに温室効果ガス80%減を達成するために必要となる対策導入量・費用を定量化するとともに、電力系統対策による再生可能エネルギー導入拡大の効果について検討を行った。

本モデルはAIM/Enduse[Japan]をベースに、日本全体を一般電気事業者10社の供給エリアに基づき10地域に分割し、10地域合計の総費用（固定費用と運転費用）を最小化するよう、1年ごとに技術選択が行われる形式となっている。推計対象とする温室効果ガスはエネルギー起源CO₂、非エネルギー起源CO₂、CH₄、N₂O、HFCs、PFCs、SF₆とした。推計フローの概要を図(2)-3に示す。



図(2)-3 技術選択モデルの推計フロー

発電部門については、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、季節別（夏・冬・中間期）、曜日別（平日・休日・ピーク発生日）、時間帯別（1日を3時間単位に8区分）に詳細化し、需要・供給量のバランスが確保されるようモデル化

した。ただし、太陽光・風力発電は3時間未満の時間間隔で出力変動が起こり得るため、太陽光はピーク時の供給力を設備容量の10%、風力はゼロに設定した。そのため、太陽光、風力発電が大量に導入された場合でも、火力発電等がバックアップ用の電源として常に確保される。ただし、電源別の短時間の負荷追従性や、最大・最小負荷率等の特性は、本モデルでは考慮されていない。

本モデルにおいて導入を想定した主な対策技術を表(2)-2に示す。従来のAIM/Enduse[Japan]では対象としていなかった地域間連系線増強を追加したことに加え、ヒートポンプ給湯器の寒冷地における効率低下など、地域に応じた技術特性を反映した点が従来のモデルからの変更点である。

表(2)-2 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、フェロコークス、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、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
その他	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 ₆ フリー化

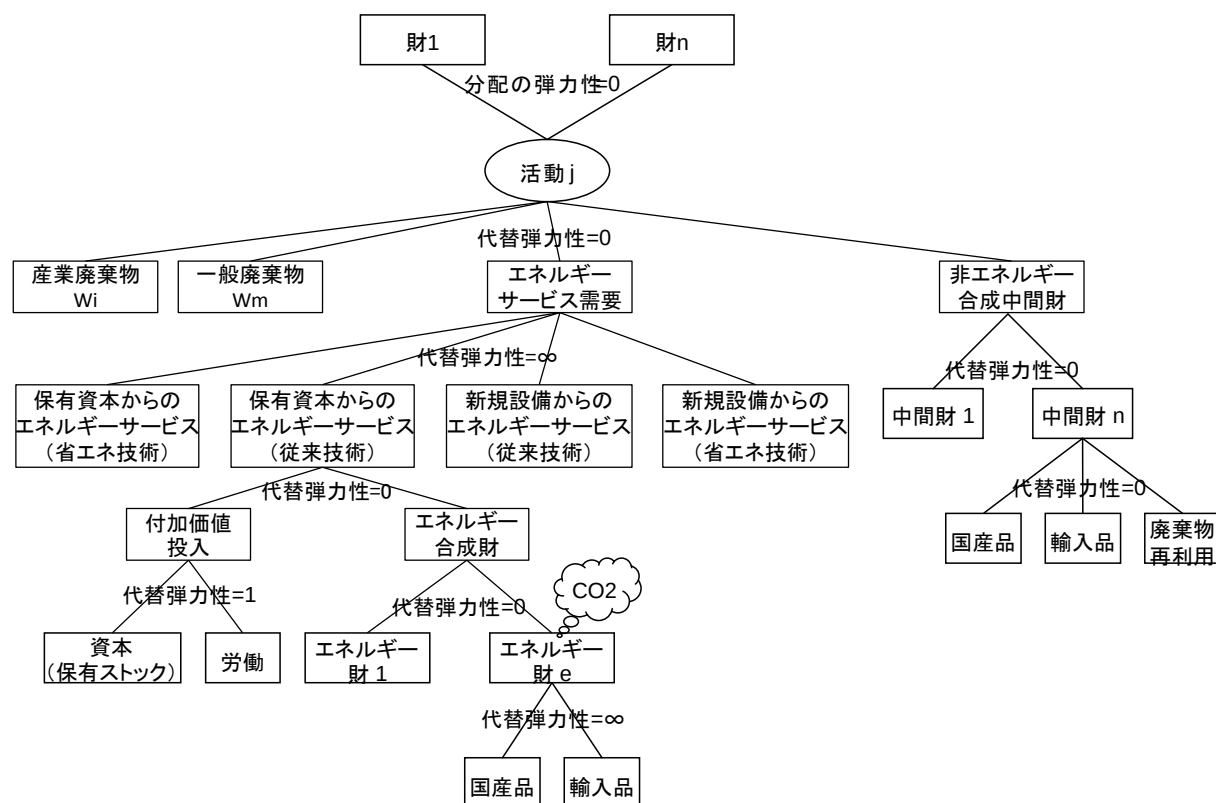
(4) 日本を対象とした応用一般均衡モデルの改良

これまで開発してきた1国モデルである応用一般均衡モデルは、日本を対象とした逐次型のモデルであり、基準年は2000年である。つまり、2000年の産業連関表をベースにモデルが構成されており、2001年以降については技術変化（全要素生産性やエネルギー効率改善）やそれまでの資本蓄積、生産年齢人口変化をもとに、均衡解を計算している。主な前提条件は、将来の経済成長率、貿易財の価格、エネルギー効率改善であり、発電部門に対しては、設備容量や設備利用率も入力している。

また、これまで、再生可能エネルギーから供給される電力については、水力発電の一部として組み込んできたが、太陽光発電及び風力発電については、それぞれ独立した部門となるようにモデルの改善を行った。具体的には、これらの部門が太陽光発電ユニットや風力発電用タービンを購入し、設置量に応じて発電が可能となり、売電による収入が家計の所得となるように設定した。また、設置量については外生的に与えるものとし、Enduseモデルの結果を反映できるようにしている。

なお、これまでに中央環境審議会等で行ってきた分析では、技術選択モデルの結果をもとに応用一般均衡モデルにおけるエネルギー効率改善を設定してきたが、様々な省エネ技術を組み込み、応用一般均衡モデルにおいて内生的に技術選択を行うことができるように改良した上で、わが国の温室効果ガス排出削減目標の検討も行った。これにより、経済的に見ても最も効果的な技術導入を行うとともに、技術選択モデルでは取り扱うことができないマクロ経済への影響についてもあわせて分析することが可能となる。

経済モデルの基本構造はこれまでのモデルと同じであるが、技術選択モデルの技術種を組み込むにあたって、エネルギーと技術を統合したエネルギーサービスの概念を導入した。つまり、エネルギーとそれを利用する技術を組み合わせることで、エネルギーサービス量が産出され、各部門ではエネルギーサービスを投入することで様々な活動を行うとした。こうしたモデルの改良にあたって、図(2)-4に示すように、生産関数を既存ストックによるもの、新規投資によるものに分割するとともに、新規投資による活動に関しては、新しい技術の導入が可能となるようにした。また、家庭においても家電製品などエネルギーを消費する機器については、新規購入機器と既に保有している機器に分けて評価するようにした。保有機器については、ストック量を推計し、帰属計算にて費用を想定した。



図(2)-4 技術選択を考慮した応用一般均衡モデルにおける生産構造

(5) 日本を地域分割した応用一般均衡モデルの開発

これまで、わが国における温暖化対策の経済活動への影響を評価するために、日本全体を1つの地域として定義された応用一般均衡モデルを用いて分析を行い、技術選択モデルで明らかになる対策技術の導入の効果、追加費用による影響を明らかにしてきた。一方で、こうした一国を対象とした分析では、平均的な日本の姿を対象としたものであり、各地の産業や気候条件を反映させたエネルギー需要特性や再生可能資源を配慮したものではなく、自治体レベルを対象に温暖化対策を検討するためのツールとしては、十分ではない。特に、2011年3月11日に発生した東日本大震災の経験から、東北地方のみが影響を受けたのではなく、サプライチェーンにより他の地域においても強い影響が見られた産業がある。こうした点は、全国を平均化した統計情報を用いるだけ

では必ずしも分析できるものではない。このため、地域間の産業連関を内生化した応用一般均衡モデルの開発を行った。

本モデルは、わが国を表(2)-3の9地域に分割して、財や生産要素の地域間での取引も考慮したモデルである。基準とするデータは、2005年を対象とした地域内産業連関表を用いて作成した競争輸入型地域産業連関表であり、部門は表(2)-4の55部門50財に集約している。非競争輸入型地域間産業連関表も公表されているが、それを直接使用しない理由は、a) 部門数が53部門と粗く発電部門が分離されていない、b) 数値そのものは地域内産業連関表から、各財の投入において地域間の構造は同じという仮定をもとに計算されており、各部門において投入される財の構造を見ると、実態と異なる可能性がある、c) 非競争輸入型のデータを用いたモデルでは内生変数の数が多くなり、モデルの運用という面から適切でない（計算時間がかかる）、といった理由による。また、地域内産業連関表をもとに競争輸入型地域間産業連関表を作成するにあたっては、基本分類表を用いるとともに、発電部門や石炭・石油・ガス部門を詳細に分割することを行った。

国を対象とした応用一般均衡モデルと同様に、技術選択モデルとの連携を目的としたモデルとなるように、基本構造は1国モデルと同様であるが、輸出・輸入以外に、移出・移入を検討する必要がある点が異なっている。動的な過程は、1国モデルと同様に各地域における成長率を設定し、それに見合うように各地域に対する投資（固定資本形成の需要）が行われる。

表(2)-3 地域モデルにおける各地域の定義と電力会社

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

表(2)-4 地域モデルにおける部門・財の区分

米	天然ガス	窯業・土石製品	石炭火力(電力)	鉄道輸送
小麦	食料品	鉄鋼	石油火力(電力)	道路輸送
その他農業	繊維工業製品	非鉄金属	ガス火力(電力)	水運
畜産	製材・木製品	金属製品	水力その他(電力)	航空輸送
農業サービス	家具・装備品	一般機械	自家発電(電力)	その他運輸サービス
林業	紙・パルプ	電気機械	都市ガス	通信・放送
漁業	出版・印刷	輸送機械	熱供給	公務
金属鉱物	化学	精密機械	水道	教育・研究
非金属鉱物	石油製品	その他製造業	廃棄物	医療・保健・社会保障・介護
石炭	石炭製品	建設	商業	対事業所サービス
原油	プラスチック製品	原子力(電力)	金融・保険・不動産	対個人サービス

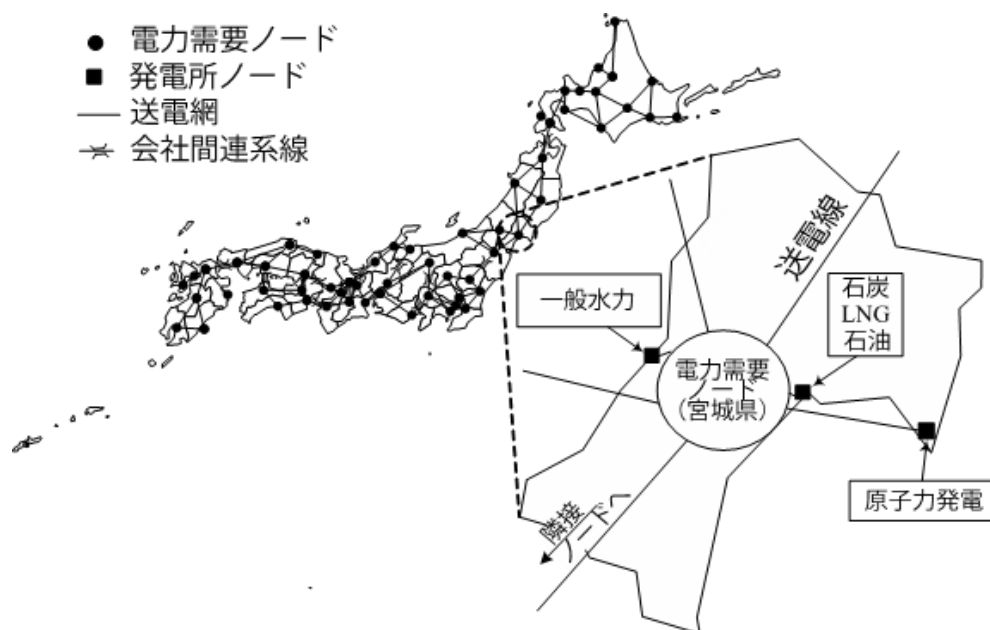
（６）多地域最適電源計画モデル

2011年3月11日に発生した東日本大震災およびそれに続く東京電力福島第一原子力発電所事故を受けた電力供給に占める原子力発電の割合が低下により、2011年春季および夏期には電力供給の逼迫を生じることになった。今後の原子力発電所再稼働の見通しが不確定な中では、今後も引き続き電力供給の逼迫が生じる可能性は高い。

わが国の電力供給システムは、電力会社の管轄地域ごとに10地域に分割されており、沖縄電力を除いた9電力会社では、隣接する電力会社との間に連系線が敷設されて相互に電力融通が可能な構造となっている。電力会社間の連系線は主として非常用に敷設されたものであるため、融通可能量は電力需要に比して十分大きいとはいえない。そのため、わが国全体で需要をまかなうに足る発電所設備容量が確保できたとしても、発電所の立地状態によっては一部の地域において深刻な電力不足が起こる可能性がある。そこで、本研究では電力需要の地域分散や発電所の立地、電力会社間連系線といったわが国電力部門の特徴を勘案して発電所の運用と電力需給バランスを検討できるモデルを用いて、原子力発電所のシェア低下を受けた電力の安定供給可能性を検討したものである。

解析は2015年を対象とし、電力需要は過去の傾向を参照して2010年から4%/年で増加していくと仮定した。また、原子力発電所を除いた発電所の設備容量は、現時点で2015年までに運転開始を予定している発電所のみを考慮して設定する。

多地域最適電源計画モデルは、全国を都道府県単位で60地域に分割し、それぞれを実際の送電ネットワークおよび送電容量にあわせて想定した仮想的な送電線で結んだモデルであり、電力需要の大きさや発電所の立地は実際にあわせて設定する。電力需要は1時間ごとの値を外生的に設定し、費用最小化の最適化計算により毎時の発電所運用と年間の費用、CO₂排出量を求めるものである。図(2)-5に多地域最適電源計画モデルの概要を示す。

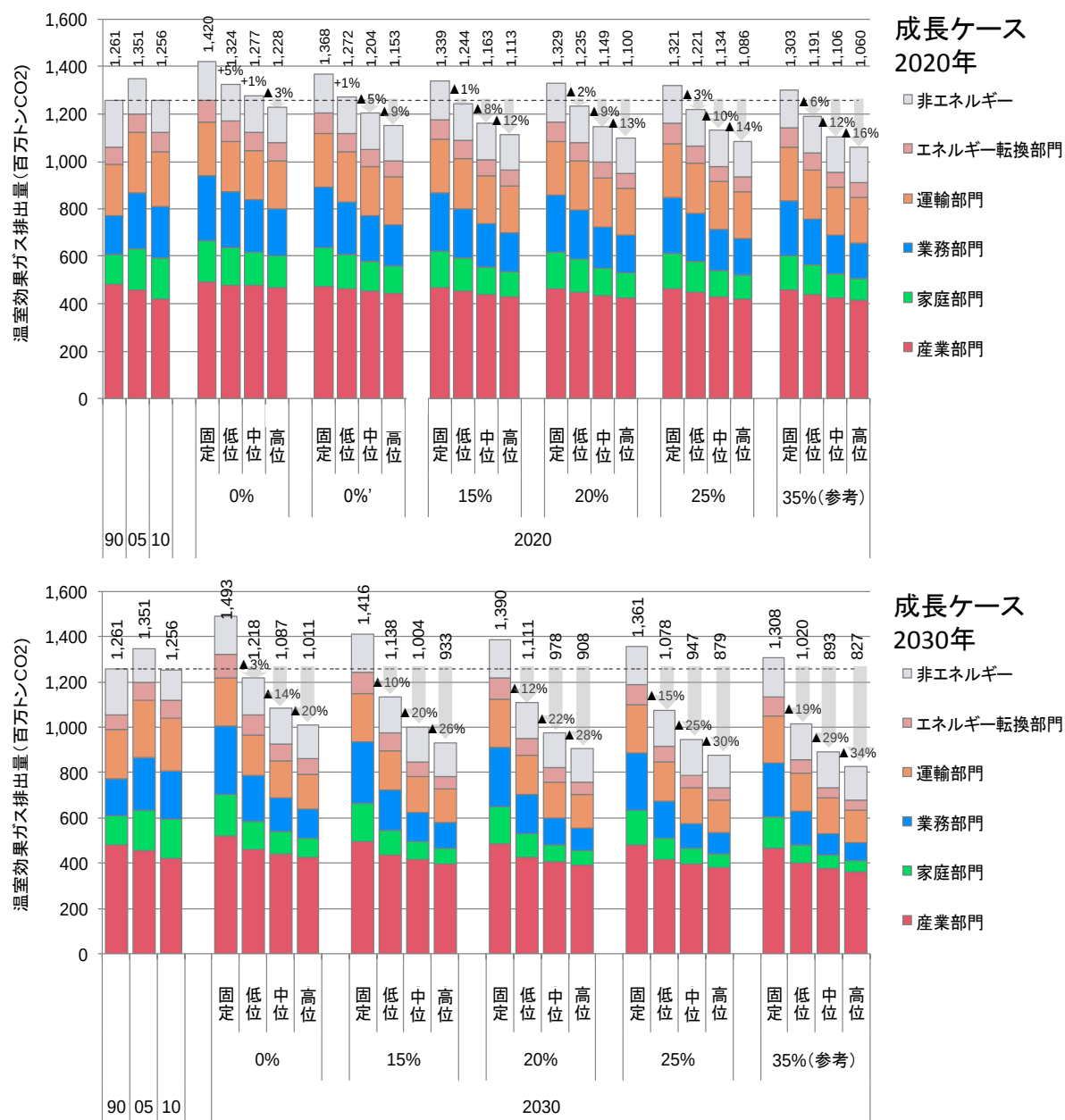


図(2)-5 多地域最適電源計画モデルの概要

4. 結果及び考察

(1) 日本を対象とした技術選択モデルを用いた2020年及び2030年の温室効果ガス削減目標の評価

これまでに開発してきた日本を対象とした技術選択モデルを対象に、東日本大震災の影響を踏まえた2020年及び2030年の温室効果ガス排出削減目標について再計算を行った。図(2)-6に結果を示す。



注：固定：技術固定ケース。低位～高位：温暖化対策導入ケース（対策の強度別に低位、中位、高位と設定）。0%、0%’、15%、20%、25%、35%の各数値は、2030年の発電電力量に対する原子力発電の比率。

図(2)-6 2020年（上）及び2030年（下）のわが国の温室効果ガス排出量とその部門別内訳（成長ケース）

2030年においては、原子力発電所の稼働率を0%としても、温室効果ガス排出量を1990年比3%～20%削減することが可能となることを示した。このことから、2050年の目標の達成に向けて、長期的な視点からの対策の推進が必要となることがわかる。また、2013年11月に気候変動枠組条約第19回締約国会議において公表されたわが国の新しい温室効果ガス排出量の削減目標は、対策低位から中位の間に相当することが示された。

（２）日本の中長期の温室効果ガス排出量推計モデルの開発

原子力発電について40年廃炉を前提とすると、2050年までに全ての原子力発電の稼働が停止する。その前提のもと、2050年の温室効果ガス排出量が1990年比80%削減を達成できるかどうかについて、開発した中長期温室効果ガス排出量推計モデルで検討した。これらの対策を織り込んだ将来の温室効果ガス排出量を図(2)-7に示す。

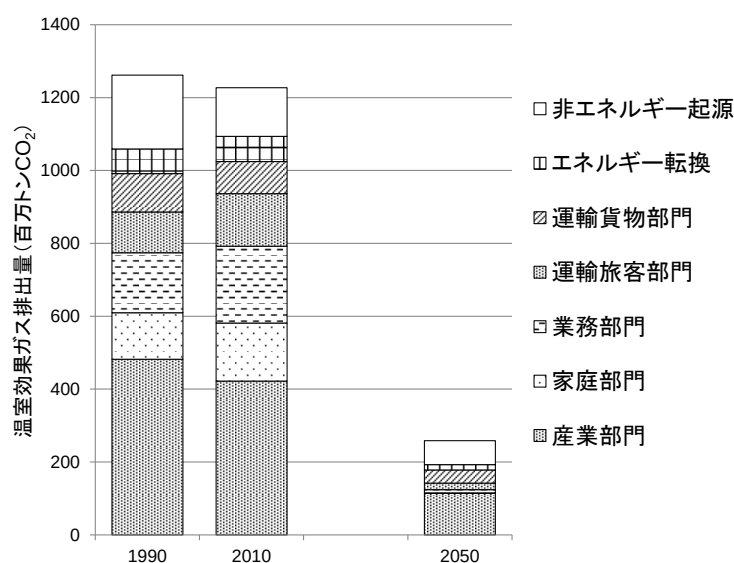
家庭部門、業務部門、運輸旅客部門については、電化の推進と電力の排出係数の低減の効果により2050年排出量はあわせて1990年排出量の2%を占める程度にまで少なくなっている。

一方、産業部門については鉄鋼やセメントにおける石炭利用、石油化学工業における石油利用、全ての業種における高温熱需要については、電力への代替が困難であり化石燃料依存が続く。鉄鋼、セメント、石油化学については炭素隔離貯留技術（CCS）を想定しているが、排出される全ての二酸化炭素を回収することは困難である。よって、革新的技術による省エネの推進、低温熱需要に対するヒートポンプ技術の適用、石炭・石油からのガス転換などを徹底して推進したとしても、2050年になっても1990年排出量の9%に相当する程度の排出が存在する。

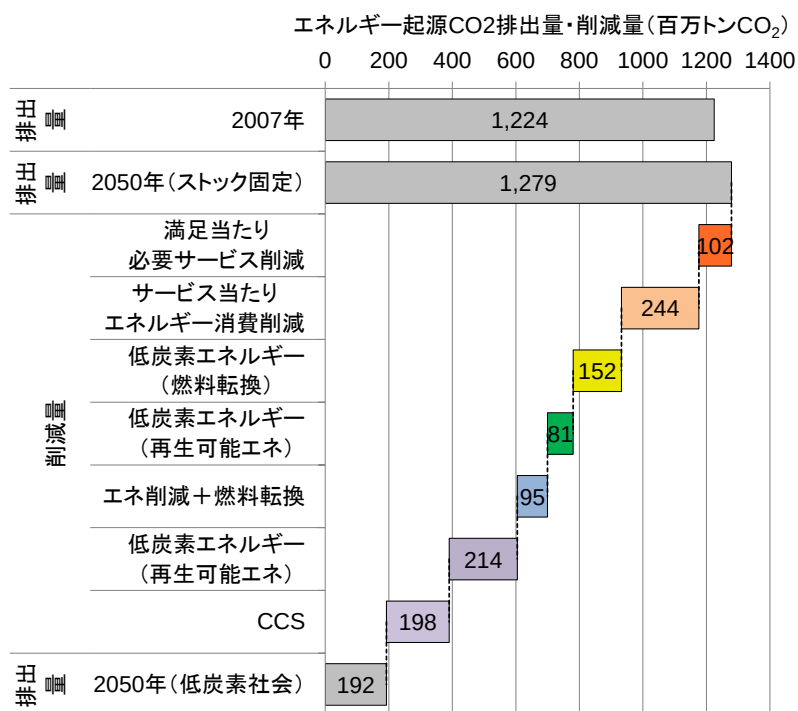
また、貨物自動車では長距離輸送貨物車について、電気自動車やハイブリッド自動車が適さないため、大幅に燃費を改善する技術がない状況にある。そのため、運輸貨物部門では2050年において3%に相当する程度の排出が存在する。

非エネルギー部門においては、農業起源、廃棄物起源の排出削減には限界がある(非エネルギー部門は1990年比5%に相当)。つまり、80%削減を実現するためには、残り20%を産業、運輸貨物、非エネルギー部門に割り当て、それら以外の家庭、業務、運輸旅客についてはほぼ排出量をゼロにしていかなければならないことがわかる。

2050年8割削減について、削減要因別に削減量を示したものが図(2)-8である。大幅削減のためには全ての要素が貢献しており、中でも省エネルギー、再生可能エネルギー、CCSが大きな役割を担っていることがわかる。



図(2)-7 温室効果ガス排出量



図(2)-8 2050年の二酸化炭素削減の内訳

(3) 日本を対象とした技術選択モデル(多地域版)の開発

原子力の稼働シナリオ(表(2)-5)、地域間連系線増強の有無に応じて、レファレンスケースに加え、6つの対策ケースについて、2050年までの温室効果ガス排出量の定量化を行った。対策ケースでは、2050年の温室効果ガス排出量が基準年比80%減となるよう、CO₂価格を2010年から2050年にかけて経過年に比例して増加させた。推計を実施したケースの一覧を表(2)-6に示す。

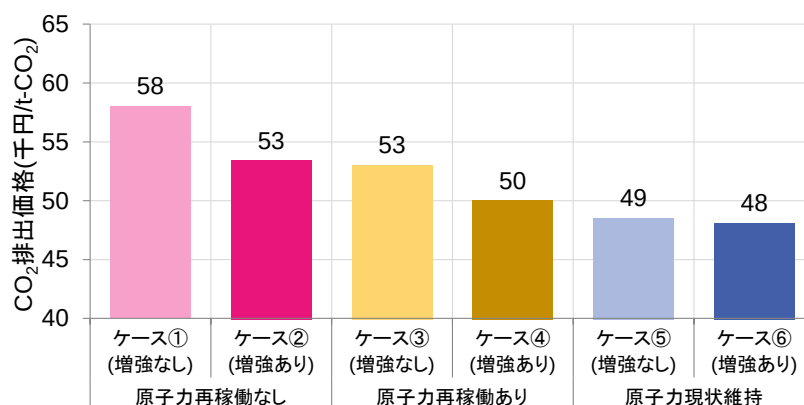
表(2)-5 原子力稼働シナリオの想定

再稼働なし	2014年度以降再稼働なし。2050年の発電電力量はゼロとなる。
再稼働あり	原子力規制委審査中の原子炉のうち、最古のもの(1984年)より新しいものは再稼働。以降はIEA WEO213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。新設2基(大間、島根3号)。設備利用率は70%。2050年の発電電力量は約500億kWh。
現状容量維持	福島第一・第二以外すべて再稼働、新設2基(大間、島根3号)、発電容量は2050年まで維持。設備利用率は70%。2050年の発電電力量は約2,600億kWh。

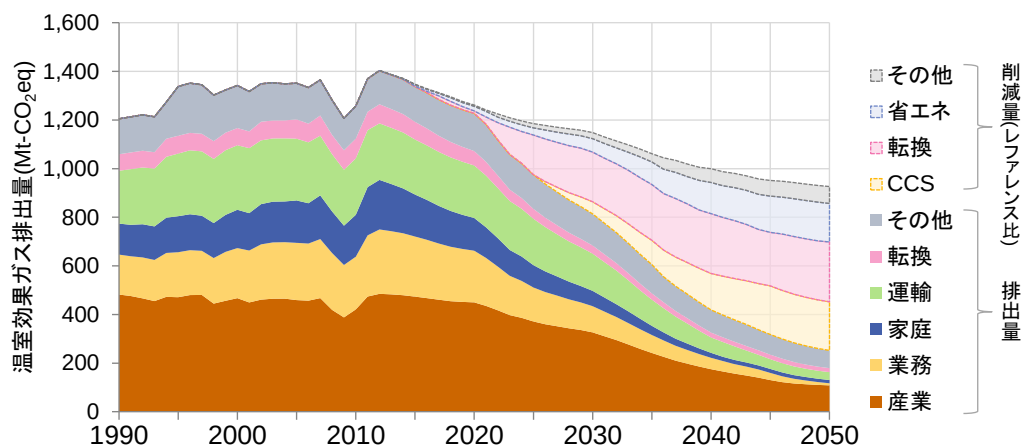
表(2)-6 シナリオ推計を実施したケース一覧

		地域間連系線	
		増強なし	増強あり
原子力 シナリオ	再稼働なし	排出制約なし：レファレンス 80%減：ケース①	80%減：ケース②
	再稼働あり	80%減：ケース③	80%減：ケース④
	現状容量維持	80%減：ケース⑤	80%減：ケース⑥

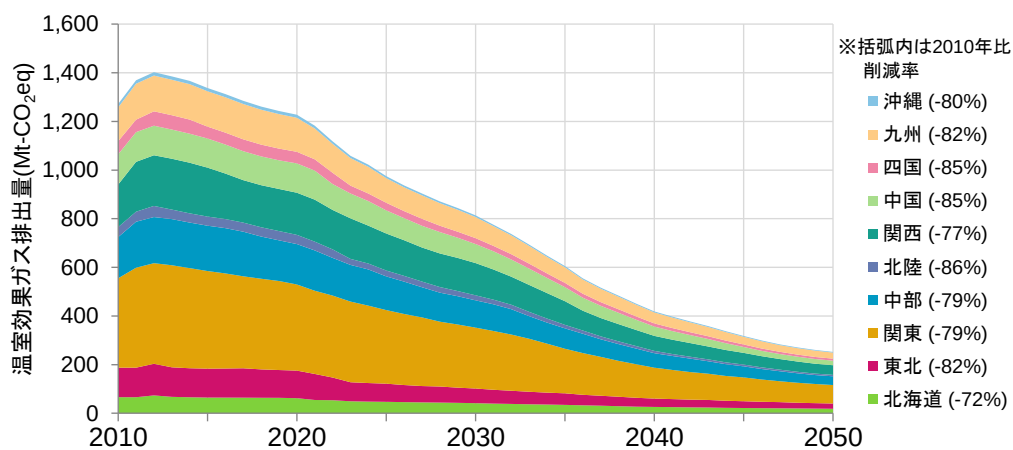
対策ケースにおけるCO₂価格は、図(2)-9に示すとおり、原子力再稼働・地域間連系線の増強がないケース①では2050年に約58,000円/tCO₂となった。一方、原子力発電の再稼働が行われるケース③、ケース⑤においては、ケース①と比べCO₂価格は約9%～17%低い水準となった。また、地域間連系線の増強が行われるケース②、④、⑥では、いずれもさらに8%程度低下する結果となった。特にケース②、ケース③のCO₂価格がほぼ同水準となったことから、原子力減による温室効果ガス排出増は、部分的には地域間連系線増強によって埋め合わせ得る可能性が示唆された。

図(2)-9 対策ケースにおける2050年80%減達成時のCO₂価格

部門別にみると、2050年時点の主な排出源は産業、運輸、その他（エネルギー起源CO₂以外）であり、家庭・業務部門からの排出量はほぼゼロとなった。ケース②における温室効果ガス排出量の推計結果を図(2)-10に示す。削減要因としては、発電を含む転換部門が最大であり（削減量の37%）、次いでCCS（30%）、需要部門の省エネルギー（24%）、その他（10%）の順となった。地域別に見ると、2010年比の温室効果ガス削減率は多少の地域差があるものの、多くの地域で70%～80%を超える結果となった（図(2)-11）。

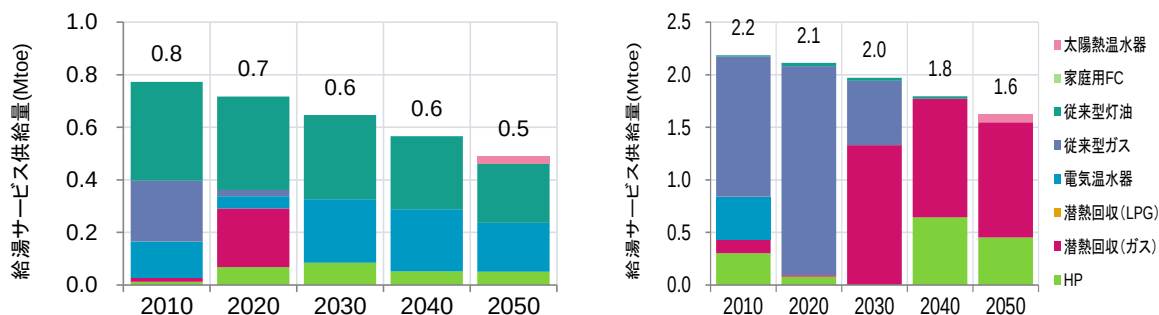


図(2)-10 温室効果ガス排出量の推計結果（部門別、ケース②）と削減内訳



図(2)-11 温室効果ガス排出量の推計結果（地域別、ケース②）

地域別の対策導入量の事例として、家庭用給湯器の地域別導入量を図(2)-12に示す。多くの地域において80%減ケースでは短期的には潜熱回収型ガス給湯器、長期的には電気ヒートポンプ（HP）温水器の導入量が増加する結果となったが、寒冷地である北海道では電気HP給湯器のエネルギー効率が相対的に低いこと、灯油の価格が相対的に安いこと等を反映して、2050年においても依然として従来型の灯油給湯器が約半数を占めることに加え、従来型の電気温水器の普及が電気HP給湯器の普及を上回る結果となった。一方で、関西地域においては潜熱回収型給湯器と電気HP給湯器の普及が進み、2050年には従来型の給湯器はすべて置き換わる結果となった。この結果に示されるように、モデルを多地域化したことで、地域別の気候条件等の特性の差が技術選択に及ぼす影響を加味することが可能となった。



図(2)-12 家庭用給湯器の導入量（左：北海道、右：関西）（ケース①）

今回の推計では、2050年80%減を達成する際のCO₂価格は、原子力が現状と同程度維持された場合でも約48,000円/tCO₂と、IEAによる世界的な価格（130～160ドル/tCO₂程度）に照らして高い水準となった。ただし、本研究で構築した日本技術モデル（多地域版）を適用したことで、地域間連系線増強によるCO₂価格の低減効果が最大で8%程度となることが明らかになり、特に原子力稼働量の少ないケースほどその有効性は高い結果となった。

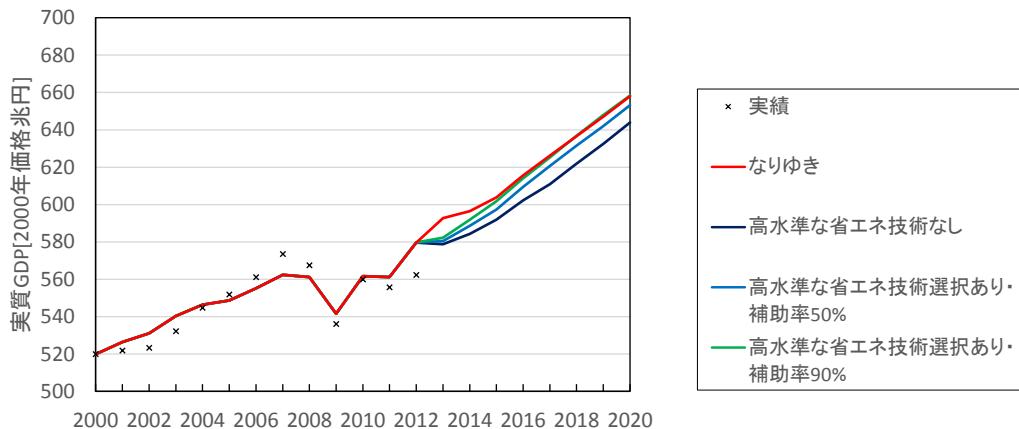
本研究の成果として、地域性を考慮した技術選択モデルを構築したことで、地域ごとの気候条件等の特性を反映することが可能となり、長期削減目標の達成に向けた対策の有効性が地域によって異なることが示された。また、省エネルギー・再生可能エネルギーの導入といった対策単体のみならず、地域間連系線増強に代表される、それらの導入障壁を除去する対策の導入が有効であることが示唆された。

（４）日本を対象とした応用一般均衡モデルの改良

これまで、応用一般均衡モデルによる分析では、将来の技術進歩率は外生として想定されており、本分析でも技術選択モデルの結果をもとに想定してきた。しかしながら、新しい技術の導入についても、モデル内で内生的に設定することが望ましく、これにより、個別技術の導入可能性とその影響を一体的に評価することが可能となる。

わが国を対象とした応用一般均衡モデルに、技術選択を組み込んだモデルの改良を行い、震災後の様々な状況を反映させて、2013年11月に報告されたわが国の温室効果ガス排出削減目標（2020年に2005年比3.8%削減）の経済活動への影響について評価した。ここでは、2013年から削減が開始されると仮定している。図(2)-13に結果を示す。技術選択モデルで選択された省エネ技術の代わりに従来型の省エネ技術の導入のみによって削減目標を達成すると想定した場合（図中の「高水準な省エネ技術なし」）、エネルギー消費量を抑えるために活動水準を低下させることとなり、2020年のGDPはなりゆきケースと比較して2%以上減少する結果となった。一方、高水準な省エネ技術を選択肢に加えた場合、導入される技術は初期費用と1年分の運転費用で判断される設定となっているために、高水準な省エネ技術の導入は一部にとどまるものの、一度導入した省エネ機器による省エネ効果は、機器の廃棄時まで継続する。このため、高水準な省エネ技術の導入を促進するように、追加投資の費用の半分を補助する場合（図中の「高水準な省エネ技術選択あり・補助率50%」）、2020年のGDPへの影響はなりゆきケースと比較して-0.7%にとどまる。さらに、高水準な省エネ技術の導入を促すために、補助率を90%まで高めると（図中の「高水準な省エネ技術選択あり・補助率90%」）、高水準な省エネ技術の導入がさらに高まり、2020年のGDPは+0.05%

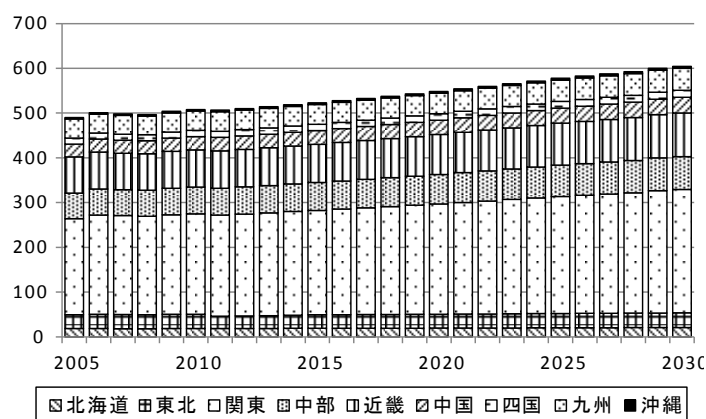
となりゆきケースのGDPを超える結果となった。なお、削減が開始される2013年ではどのケースにおいてもなりゆきケースと比較してGDPは低下しているが、これは短期的にはどのようなケースにおいても取り得る対策が限られていることを示している。これに対して、長期的な視点から、より高性能な省エネ技術を公的補助も与えながら導入することにより、2020年には削減目標を達成するとともに経済成長を回復させ、施策によってはなりゆきケースをも上回る経済成長を遂げることも可能であることを明らかにし、削減のポテンシャルを実現するような省エネ技術の導入を促す施策の役割が重要となることを示した。



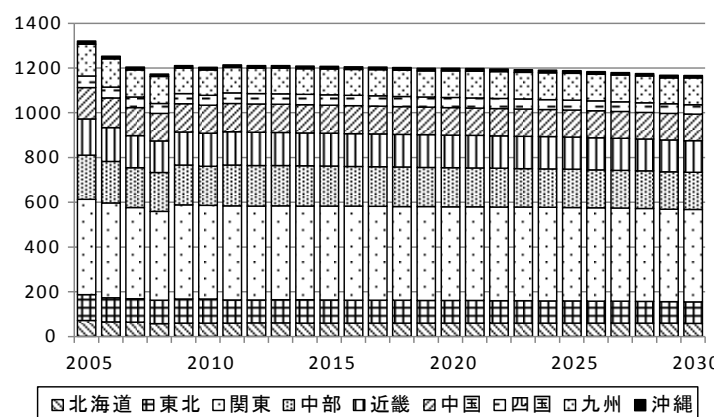
図(2)-13 2013年11月に報告された2020年目標達成時におけるGDPの推移

(5) 日本を地域分割した応用一般均衡モデルの開発

日本を9地域に分割した応用一般均衡モデルを用いて、温暖化対策を行わないなりゆきケースについて2030年まで計算した結果を、図(2)-14に示す。基準年のCO₂排出量については南齊・森口(2010)²⁾の産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)を参考に想定しているため、わが国が気候変動枠組条約事務局に提出している排出量とは値が異なっている。また、地域ごとの将来人口の変化は反映させてはいるが、2010年以降の経済成長率の設定は、各地域ともに同じと設定しているため、どの地域も同じような変化となっている。各地域における再生可能エネルギーの賦存量や温暖化対策の取り組みの相違については反映したものではないため、地域別の特徴を反映させるとともに、本サブテーマで開発された技術選択モデルと連携した上で、温暖化対策について分析することが残された課題である。。



GDP（2005年価格兆円）

CO₂排出量（二酸化炭素換算100万トン）

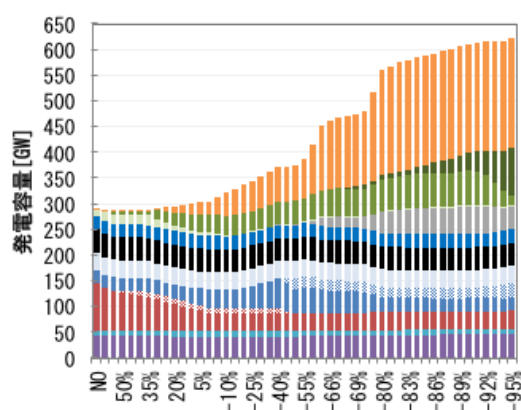
図(2)-14 地域連関モデルを用いた2030年までのなりゆき社会の結果

（6）多地域最適電源計画モデル

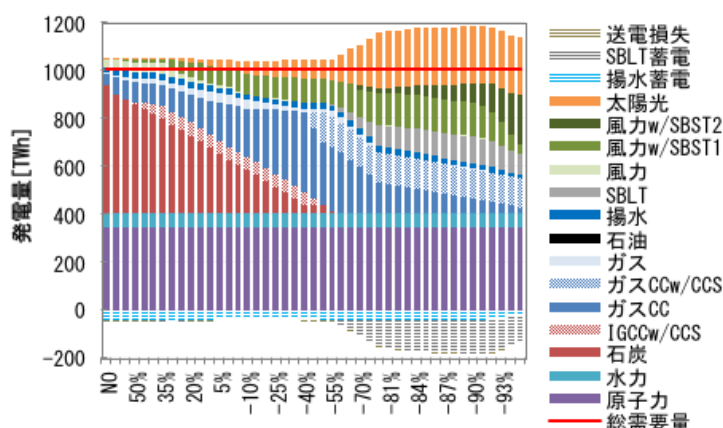
再生可能エネルギー導入量に複数のシナリオを想定し、複数のCO₂排出量制約の下での最適電源構成及び発電量、蓄電池導入量を評価した。CO₂排出削減制約別の総発電容量を図(2)-15(a)に示す。太陽光発電のシェアの増加に伴い、総発電容量が急激に増加することが確認できる。これは、太陽光とその他の発電方式の設備利用率が異なることに起因する。-80%ケースでは、全設備容量の約37%を太陽光発電設備が占めた。

CO₂排出削減ケース別の総発電量を図(2)-15(b)に示す。削減目標を課さないNOケースでは、再生可能エネルギーはほとんど導入されなかった。石炭火力のシェアの増加により、発電部門からのCO₂排出量は1990年比で67%増（484MtCO₂）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併設型石炭ガス化複合発電（IGCC）への転換が進み、並行して蓄電池併設風力発電（風力w/SBST1）の導入量が増加した。さらに厳しい排出目標下では、太陽光発電の導入が進み、-45%ケースより厳しい排出目標下では、CCS併設型IGCCの代わりにCCS併設型ガスコンバインドサイクルが使用される結果となった。CCSが導入量上限に達した-50%ケースより厳しい排出目標下では、太陽光発電およびSBLT（太陽光の増加に伴い発生する昼間の余剰電力や夜間の風力発電量を蓄電し、夕方や朝方に放電するという運用方式で使用）の導入量が増

加した。さらに-70%ケースより排出目標が厳しいケースでは負荷周波数制御（Load Frequency Control、LFC）能力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w/SBST2）のシェアが拡大した。再生可能エネルギーの導入増加にともないSBLTの発電・蓄電量が増加した結果、-90%シナリオでは総発電量が約2割増加した。



(a) 発電容量

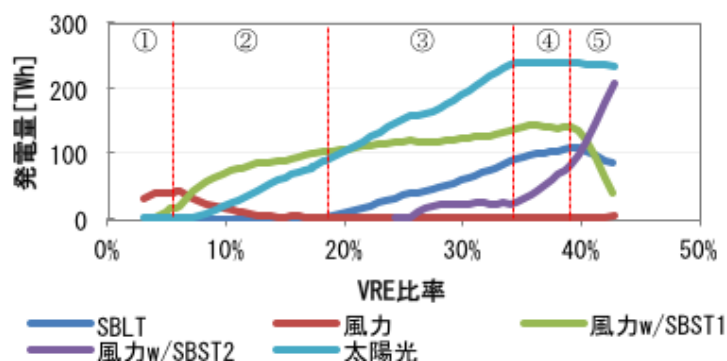


(b) 発電量

図(2)-15 CO₂排出削減ケース別の電源構成

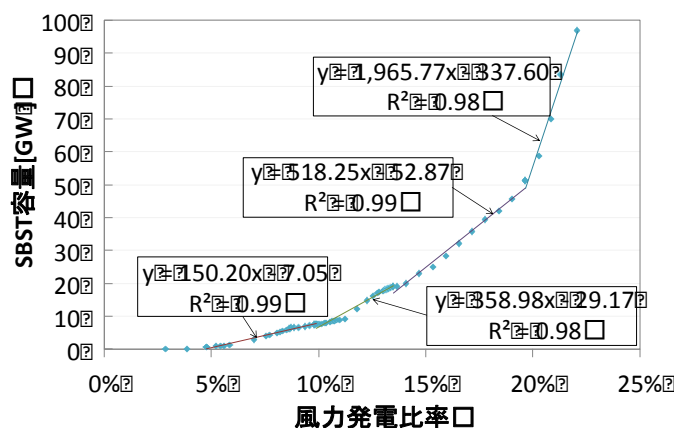
再生可能エネルギー比率と、蓄電池による発電量の関係を図(2)-16に示す。再生可能エネルギー比率は、再生可能エネルギーからの発電量の合計を総発電量で除することにより求めた。図からは、再生可能エネルギーの導入が5つの段階に分かれていることがわかる。図中の段階①は蓄電池の併設を伴わない風力発電の導入段階である。風況の良い地域の風力発電は太陽光よりも発電コストが安価なため、優先的に導入される。段階②は蓄電池併設型風力発電（風力w/SBST1）および太陽光発電の導入段階である。太陽光の導入に伴う長周期変動は、この段階ではガス火力や揚水によって調整される。段階③は風力w/SBST1、太陽光に加えてSBLTの導入が進む段階である。段階④は、太陽光がポテンシャル上限に達し、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w/SBST2)のシェアが増加する段階、段階⑤は厳しいCO₂排出削減制約により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た結果、風力w/SBST2のシェアが急激に増加する段階である。



図(2)-16 再生可能エネルギー比率とVRE・SBLTの発電量の関係

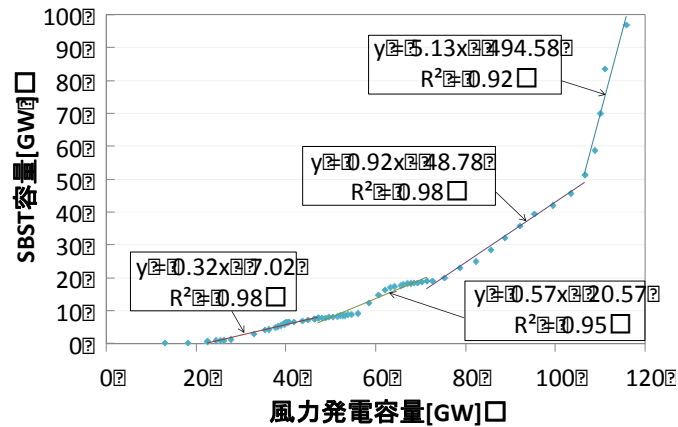
このような再生可能エネルギー導入の5つの導入段階を考慮して、各再生可能エネルギー設備導入段階の風力発電比率、および、太陽光発電比率の範囲を推計した。例として、風力発電比率とSBST容量の関係を図(2)-17に示す。風力発電比率の増加と共にSBSTの必要容量も増加した。風力発電比率とSBST容量の関係を回帰分析により求め、それらの交点から各再生可能エネルギー導入段階の風力発電比率の範囲を求めた結果、段階①は0%から4.8%、段階②は4.8%から10.5%、段階③は10.5%から14.4%、段階④は14.4%から19.7%、段階⑤は19.7%以上に相当することが分かった。つまり、総発電量に占める風力発電の比率が4.8%を超えた水準から、蓄電池容量の併設が必要となることがわかる。



図(2)-17 風力発電比率とSBST容量の関係

次に、再生可能エネルギーの発電容量と蓄電池の容量の関係を回帰分析により求めることで、各段階で再生可能エネルギーを1GW導入するにあたり追加的に必要となる蓄電池容量を推計した。例として、風力発電容量とSBST容量の関係を図(2)-18に示す。回帰分析の結果から、1GWの風力

発電容量の追加にあたり、段階②では0.33GW、段階③では0.54GW、段階④では0.92GW、段階⑤では5.1GWのSBSTの併設が必要となることが分かった。



図(2)-18 風力発電容量とSBST容量の関係

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで国を最小単位として扱ってきたモデルを、地域スケールについて詳細化することにより、再生可能エネルギーの賦存や地域の気候条件や産業、人口構成の違いから説明されるエネルギー需要構造など各地域特性や、電力会社間の連系の強化を反映させた温暖化対策の検討、評価を分析することが可能となった。特に、短期的に大幅な発電所新設が見込めない状況下において、東日本大震災以降における電力需給の安定化に向けてどの地域でどのような対策を講じることが効果的かを議論する素地を提供できると考えている。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

わが国を対象とした様々なモデルを用いた試算結果については、環境省中央環境審議会 地球環境部会 2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会において報告するとともに、エネルギー・環境会議に対しても結果を報告してきた。技術選択モデルについては、小委員会に設置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グループにおいてモデルの分析結果を元に対策の方向性などについて検討が行われた。また、応用一般均衡モデルについては、道路特定財源の廃止による影響を環境省総合環境政策局環境経済課に、国内排出量取引に関する分析結果を環境省地球環境局市場メカニズム室「国内排出量取引制度の課題整理に関する検討会」に、それぞれ提供することを通じて、環境政策の推進に貢献してきた。

<行政が活用することが見込まれる成果>

地域に分割したモデルを用いた分析結果は、国だけでなく、自治体における温暖化対策の検討において重要な役割を担いうる。とりわけ、気候や経済活動、再生可能資源の賦存量が多様なわが国において、自治体における温暖化対策を支援するツールが利用可能となることは、地

域特性にあった対策を検討、提案することが可能となり、気候変動緩和策の実現に向けて大きく貢献することにつながる。

東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故により、わが国の温室効果ガス削減目標をエネルギー計画とともに再考することとなり、単一の対策に大きく依存する計画の問題点を浮き彫りにした。こうした反省を踏まえて、原子力の将来の想定に関する様々なシナリオの検討を行うとともに、発電部門において電力供給の安定性を犠牲にすることのない温暖化対策を検討するための基礎的情報を多地域最適電源計画モデルによって提示することができる。こうしたシナリオも、将来の温暖化対策を検討する上で重要な示唆を与えるものであり、温暖化緩和策の検討に不可欠なものである。

6. 国際共同研究等の状況

サブテーマ（１）に記載のアジアの各機関との共同研究や、若手研究者に対するトレーニングについては、本サブテーマも共同で実施してきた。

7. 研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Pattanapongchai, B. Limmeechokchai, Y. Matsuoka, M. Kainuma, J. Fujino, O. Akashi and Y. Motoki: GMSARN International Journal, 5 (3), 189-194 (2011)
“Subsidy for Clean Power Generation and CO2 Mitigation in Thailand: The AIM/Enduse Modeling”
- 2) S. Ashina, J. Fujino, T. Masui, T. Ehara and G. Hibino: Energy Policy, 41, 584-598 (2012)
“A roadmap towards a Low-Carbon Society in Japan Using Backcasting Methodology: Feasible Pathways for Achieving an 80% Reduction in CO2 Emissions by 2050”

<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) T. Hanaoka, K. Fujiwara, Y. Motoki, G. Hibino and O. Akashi: The 8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik, Croatia, 0412-1-0412-15 (2013)
“Cobenefits of reducing non-CO2 emissions by achieving a 50% global GHG emissions reduction target by 2050”

（２）口頭発表（学会等）

- 1) 藤野純一・芦名秀一・増井利彦・日比野剛・松井重和・大城賢：環境経済・政策学会2012年大会，仙台（2012）
「日本の2020年・2030年エネルギー・温暖化シナリオシミュレーション分析」

- 2) 増井利彦・日比野剛：環境経済・政策学会2013年大会，神戸（2013）
「簡易化した技術選択を統合した応用一般均衡モデルによるわが国温室効果ガス削減策の評価」
- 3) 大城賢・増井利彦：環境経済・政策学会2013年大会，神戸（2013）
「多地域技術選択モデルを用いたわが国のCO2削減シナリオの分析」
- 4) 増井利彦・日比野剛：第5回横幹連合コンファレンス，高松（2013）
「温室効果ガス排出削減目標の実現に向けた取り組みの先にあるもの」
- 5) 芦名秀一・藤野純一・増井利彦・日比野剛・松井重和：エネルギー・資源学会第32回研究発表会，東京（2013）
「2050年日本低炭素社会シナリオ及び実現ロードマップの再検討」

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

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) 電力中央研究所：電力中央研究所報告Y10015 (2011)
「地域性を考慮した日本のエネルギー需給分析モデル(J-REM)の開発」
- 2) 南齊規介，森口祐一：独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター（2010）
「産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)：2005年表（ β ＋版）」
<http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/index-j.html>

（３） 社会の構成要素を記述するモデルの開発と将来シナリオへの適用

京都大学大学院工学研究科

松岡 謙・倉田 学児・河瀬 玲奈

<研究協力者>

（独）国立環境研究所 社会環境システム研究センター

金森 有子

平成23～25年度累計予算額：25,997千円

（うち、平成25年度予算額：7,999千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

気候変動緩和策を効果的に実現するためには、エネルギー効率改善の高い技術を導入するだけでなく、社会経済活動そのものを見直すことも必要となる。とりわけ、二酸化炭素排出量のシェアで30%を占める素材生産や、排出量の伸びが著しい民生部門を対象とした分析が必要不可欠となる。こうした背景のもと、鉄鋼生産及び家庭部門を対象に、温室効果ガス排出量の削減の可能性を検討するために、財のストックの観点に着目した鉄鋼生産モデルや将来の人口や世帯構造を定量化する人口・世帯モデル、家庭部門における活動を分析する家計生産モデルの開発を行い、気候変動緩和策に向けての社会経済活動のあり方について検討した。鉄鋼生産モデルの解析から、温暖化対策を行わない場合には2050年の世界の鉄鋼需要量は27億トンになるのに対して、サービス需要の管理、財ストックの効率改善、高性能素材の導入などの対策を行うことで、16億トンに減少することが明らかとなった。また、家庭部門におけるエネルギーサービス需要量の分析から、中国における1人あたりのエネルギーサービス需要量が、2050年に日本に追い付くと想定した場合、技術効率の効果を考慮しても中国のエネルギー需要量そのものは2005年と比較して61%増となり、家庭から排出される一般廃棄物についても、2050年には2005年比3倍になることが示された。こうした結果は、技術的な対策の重要性だけでなく、サービス需要量の見直しや対策が必要となることを示唆したものである。

〔キーワード〕

低炭素社会、エネルギーサービス需要、家計生産、マテリアルストック、鉄鋼

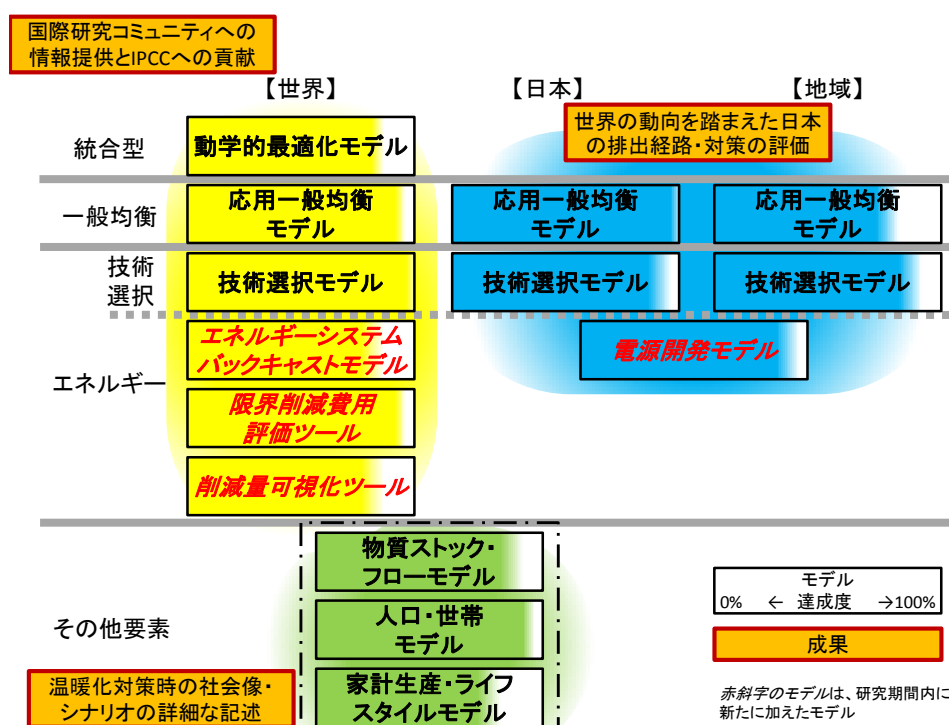
1. はじめに

2050年の温室効果ガス排出量を1990年比半減するような低炭素社会の実現に向けては、より効率的なエネルギー消費技術や再生可能エネルギーの導入が必要不可欠であるが、それだけで低炭素社会が実現されるわけではない。わが国においては、産業部門における温室効果ガス排出量が減少する傾向にあるのに対して、民生部門における温室効果ガス排出量は増加しており、生活の質を落とすことなくエネルギーサービス需要量そのものを見直すことも視野に入れなければならない。一方、産業部門においても製品の長寿命化や素材の高機能化等により、更なる削減の可能

性が残されていると考えられる。このように、社会の様々な側面を対象に、温室効果ガス排出量の削減の可能性を検討することは、低炭素社会を構築する上で重要になるといえる。とりわけ、今後の経済成長で温室効果ガス排出量の伸びが予測されている発展途上国に対しては、先進国が歩んできた途を追いかけるのではなく、独自の低炭素への途（リープフロッグ）を目指せるように、将来像を明確に提示することが求められている。

2. 研究開発目的

図(3)-1に、本研究課題全体が対象とするモデルと、本サブテーマで開発、改良したモデルの関係を示す。



図(3)-1 2A-1103で対象とするモデルとサブテーマ（3）で対象とするモデル（一点鎖線部分）

本サブテーマでは、将来の社会像をより具体的かつ明確に示すことができるようなモデルの開発、改良とそれらを用いた分析を行うことを目的とする。具体的には、将来シナリオを検討する差異の基礎である人口や世帯を推計する人口・世帯モデル、家計における消費や廃棄行動を定量化する家計生産モデル、財のストックに着目し、ストックの新設や更新の視点から必要となる財を計算し、将来の鉄鋼需要量を計算する物質ストック・フローモデルを対象に、モデルの開発、改良とそれらを用いた将来像の検討を行う。

3. 研究開発方法

（1）人口・世帯モデル

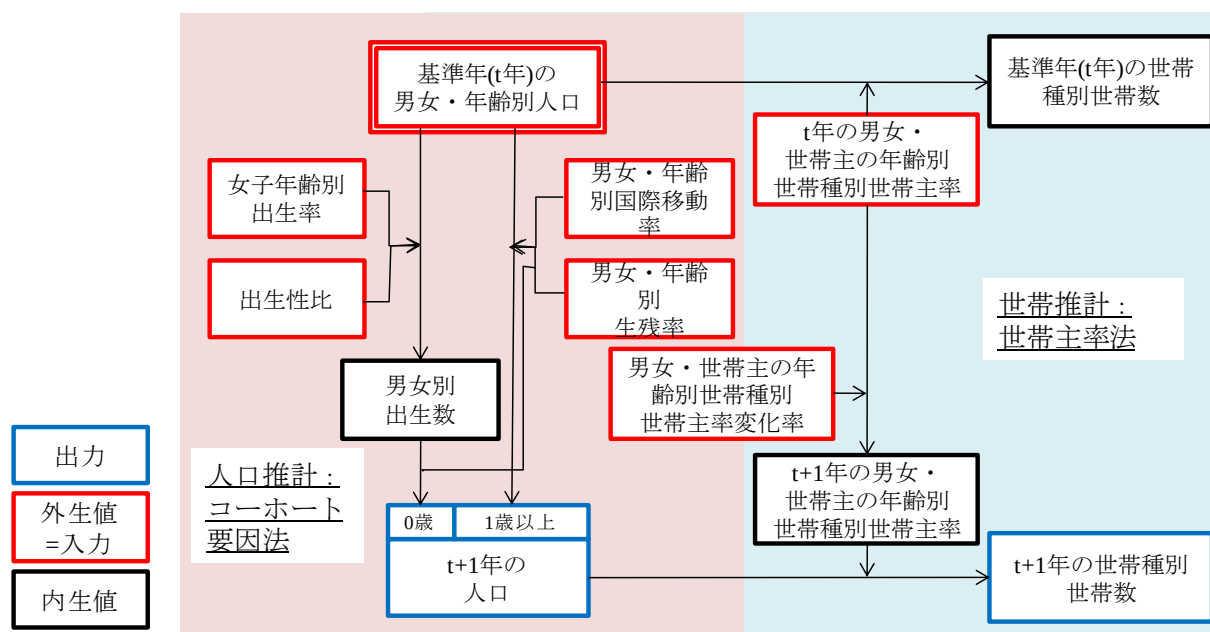
人口・世帯の将来推計を支援するために、人口・世帯モデルを開発した。推計の概要を図(3)-2に示す。以下、人口推計部分と世帯推計部分に分けて、モデルの説明をする。

1) 人口推計

人口推計は世界197地域を対象に、コーホート要因法に基づき、2100年までの都市・農村別、男女別、年齢階級別（5歳階級、0-4歳、5-9歳、…、90-94歳、95歳以上）人口を推計する。コーホート要因法とは、各コーホートについて、出生と死亡、純移動といった人口変動要因についてそれぞれ将来値を仮定し、それに基づいて将来人口を推計する方法である。基準年（計算開始年）を2010とし、5年おきに計算する。推計方法は以下a)～c)のとおりである。

- a) 基準年(t年)に男女別・年齢階級別人口を準備
- b) 出生率、出生性比、国際移動率、生残率のシナリオを設定
- c) a)とb)からt+5年の男女別・年齢階級別人口が推計される（a)に戻る）

また、都市部と農村部では生活様式や社会・経済状況が大きく異なることも多いため、都市・農村別人口の推計も行った。都市部・農村部の定義は国によって異なるが、国連の都市農村別人口推計の中でも、国間の定義の一致は行わず、各国の定義の下での変化を推計するものとなっているため、本研究でも同じ手法を用いた。都市・農村別人口は、UN(1974)¹⁾の手法を用い、過去の都市化のスピードを考慮した手法としている。



図(3)-2 人口・世帯モデルの概要

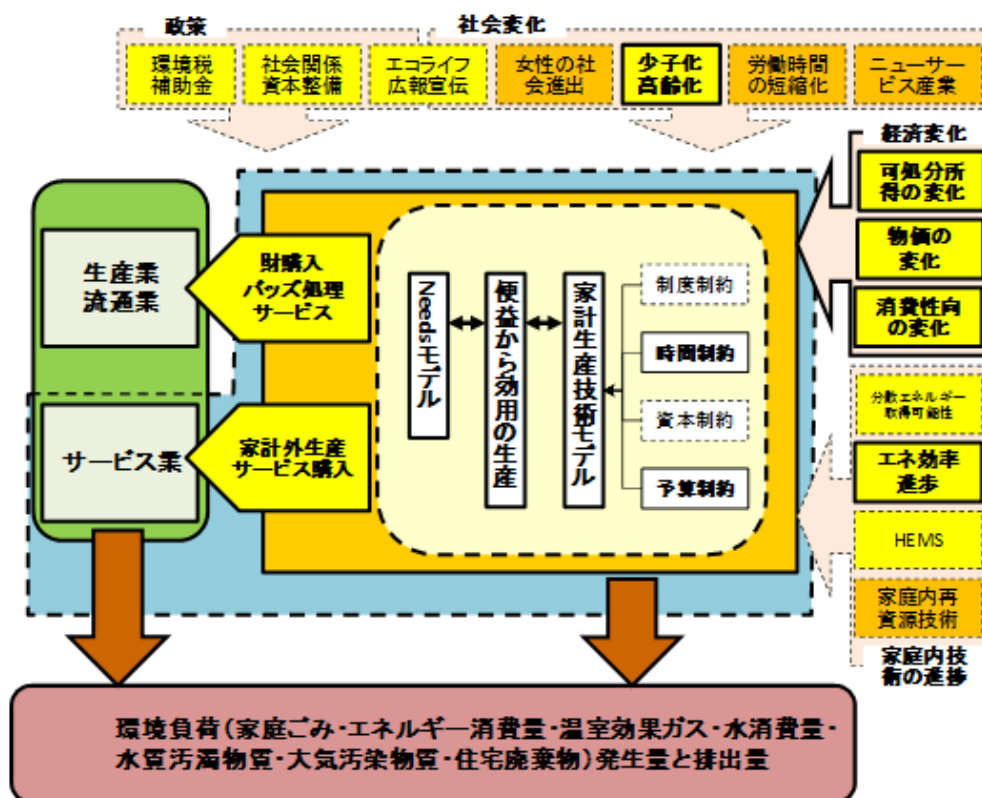
2) 世帯推計

世帯推計は世界103地域を対象に、世帯主率法に基づき推計する。世帯主率法とは人口に対し世帯主率を乗じて世帯主人口を求め、世帯主数＝世帯数として世帯数を求める方法である。非常に簡易な方法であり古くから用いられている手法の1つであるが、この簡易な世帯主率ですら、世界的に経年的にデータが整備されていないため、本手法の適用も容易ではない。推計対象地域全体は人口推計と同じだが、人口推計と比較して、世帯推計に必要なデータが集まりにくいいため、一部の国を集約して地域として取り扱った。本モデルを用いて、2050年までの世帯種別世帯数が推計される。推計方法は以下の通りである。

- a) 2050年までの男女別・年齢階級別人口を準備。これらのデータは①-1の人口推計の結果を用いることにする。
- b) 男女別・年齢階級別世帯主率のシナリオを設定。
- c) a)とb)から各年の男女別・年齢階級別世帯主数を推計し、これを地域別に集約して世帯数とする。

(2) 家計生産モデル

家計生産モデルは、Becker(2008)²⁾の家計生産の考えをもとに構築するモデルである。すなわち、家計は所得制約と時間制約のもとで効用を最大化するような家計生産（財とそれを消費する時間を費やし便益を得ること）を行っていると考え。モデルでは、過去のデータに基づき家計の生産関数に関するパラメータを同定し、そのような考えのもとで今後も家計生産活動を行った場合の所得と時間の分配を計算することができる。家計生産モデルを用いて将来の家計の消費構造を推計するとともに、社会の変化等と環境負荷の変化の関係を明示することが可能となる。家計生産モデルの概念図を図(3)-3に示す。



図(3)-3 家計生産モデルの概念図

1) 家庭のエネルギーサービス需給に着目した解析

家計生産モデルに関連して大きく3つの解析を行った。1つは家庭のエネルギーサービス需要に着目し、その需要と供給の関係に焦点を当てた解析である。図(3)-3のNeedsモデルを掘り下げた内容になる。具体的には、(1) エネルギーサービスの定義を行い、(2) 2050年までの日本と中国の家庭部門についてエネルギーサービス需要シナリオ別のエネルギー消費量を推計し、解析を行った。

推計にあたり、エネルギーサービスは6種類（暖房・冷房・給湯・厨房・照明・その他）を設定し、サービス種別にエネルギーサービス需要を同定する変数を設定し、それらの将来シナリオを設定することでエネルギーサービス需要の将来シナリオを作成した。本推計では、エネルギーサービス需要の違いに焦点を当てるため、技術の進展に関するシナリオは1つとした。技術シナリオは、日本では電化の進展が進むシナリオ、中国では電化の進展と各機器のエネルギー消費効率の改善が進むシナリオとした。表(3)-1にエネルギーサービス需要シナリオ、表(3)-2に技術シナリオをそれぞれ示す。

表(3)-1 エネルギーサービス需要シナリオ

国	シナリオ	説明
日本	FIX	2010年の1人あたりエネルギーサービス需要レベルが続くものとした。
	BaU	1人当たり床面積、在宅時間(睡眠時間を除く)、肉食率、入浴方法（バスタブ利用かシャワーのみか）、機器の普及率に関して過去の傾向が2050年まで持続するものとした。
中国	FIX	2005年の1人あたりエネルギーサービス需要レベルが続くものとした。
	MAX	中国の1人あたりエネルギーサービス需要レベルが、2050年に日本のBAUシナリオにおける1人あたりエネルギーサービス需要レベルに追い付くものとした。
	CHN	暖房、冷房、厨房、照明、その他サービスについては、中国の1人あたりエネルギーサービス需要レベルが、2050年に日本のBAUシナリオにおける1人あたりエネルギーサービス需要レベルに追い付くものとした。入浴方法は文化に依存するため変化はないものと仮定し、1人あたり給湯需要は2005年のレベルから変化しないものとした。

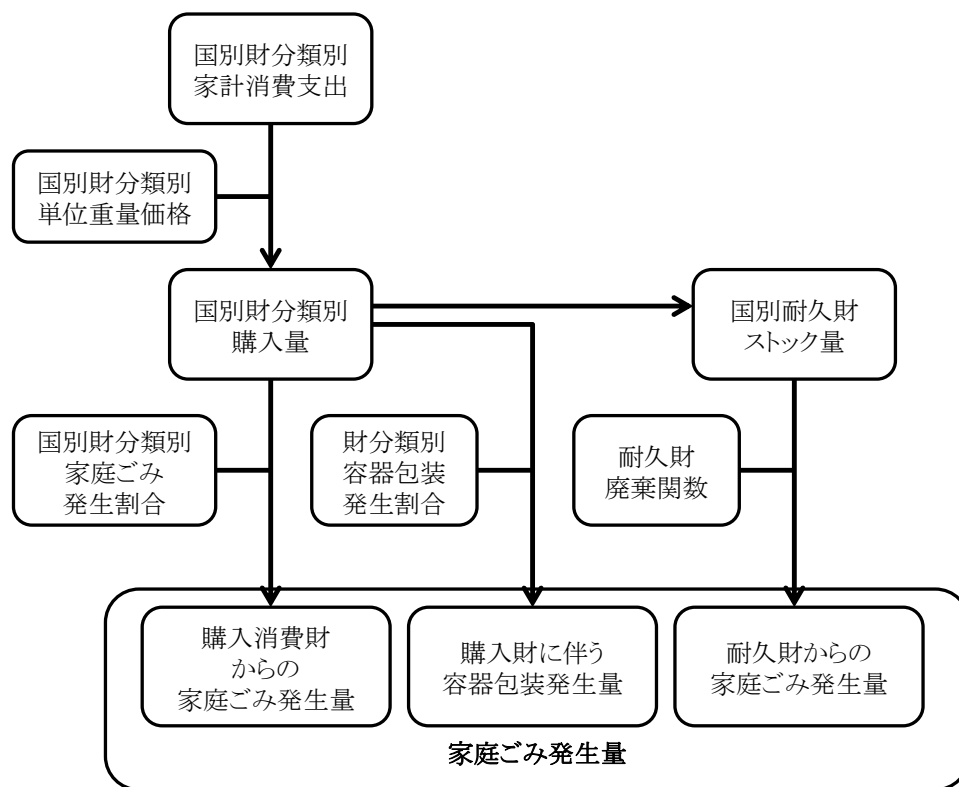
表(3)-2 技術シナリオ

国	2050年までの機器効率の変化に関するシナリオ	電化に関するシナリオ (電気製品の機器分担率の増加)
日本	エアコンとその他サービスに関する機器効率: 28.5%改善 厨房と給湯に関する電気機器の効率: 9% 改善	暖房: 15% → 74% 給湯: 13% → 53% 厨房: 24% → 44%
中国	全ての機器効率が日本の機器効率と同じレベルになる。 暖房と給湯に関するガス機器、石炭機器、灯油機器: 28.5%改善 厨房に関するガス機器、石炭機器、灯油機器: 6%改善 暖房と冷房に関するエアコン: 47%改善 その他サービスに関する機器: 28.5%改善	暖房: 3% → 30% 給湯: 4% → 20% 厨房: 4% → 24%

2) 家庭ごみ発生量推計ツールの開発

2点目の解析として、家計生産モデルを用いてアジア地域における廃棄物発生量予測に関する推計も行った。そのうち消費支出額から環境負荷発生量を推計するための変数の設定の精度を上げた。このことにより、1) 発展途上国でも入手可能なデータを用いて推計可能であり、2) 比較的シンプルな推計構造にすることで各国に適用でき、さらに3) 家庭ごみ組成別の家庭ごみ発生量を推計可能なツールを開発することができる。これを人口規模と1人あたりGDPの観点から主要なアジアの8か国（日本、中国、韓国、インド、インドネシア、マレーシア、ベトナム、タイ）に適用し、アジア各国の家庭ごみ発生量の実態の把握を試みた。具体的には、図(3)-4に示す推計フローに従って、アジア各国の家庭ごみ発生量を推計した。推計対象とする家庭ごみを1) 購入消費財の使用後に発生するごみ、2) 購入財に伴う容器包装、3) 耐久財からの家庭ごみ発生量の3つに分類し推計する。まず家計消費支出と財の価格から財の購入量を推計する。購入された財のうち消費財については、購入された年に家庭ごみとして発生されるものとする。容器包装についても、財の購

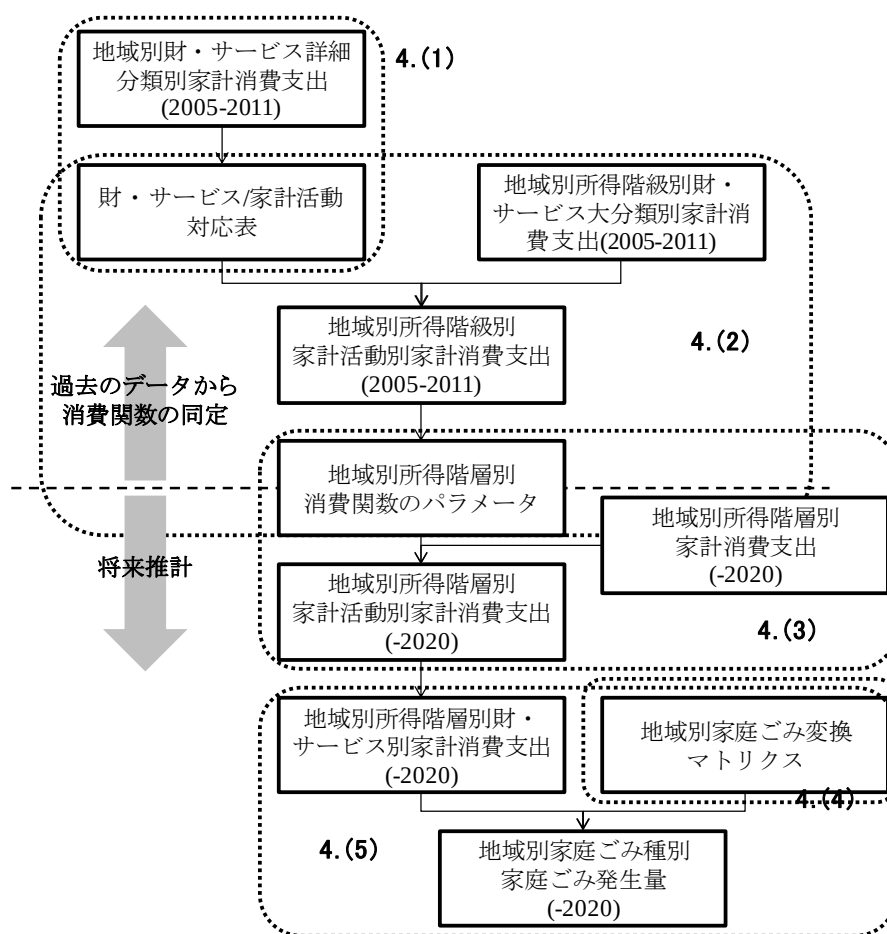
入量に応じて発生し財の購入年に廃棄されるものとした。耐久財は購入後家庭内で1年以上使用された後、家庭ごみとして発生するものとした。



図(3)-4 消費支出額から家庭ごみ発生量推計までの流れ

3) アジアにおける財・サービスの購入変化を考慮した家庭ごみ発生量の推計

家計生産モデルを用いた3点目の解析として、アジア地域における財・サービス購入に与える影響を推計し、それに基づき家庭からの廃棄物発生量の将来予測を行った。推計のフローを図(3)-5に示す。はじめに2005年から2011年の所得階級別家計活動別家計消費支出から需要関数のパラメータを同定する。次に所得階級別家計消費支出の2020年までの将来推計を行う。この結果と先ほど同定した需要関数のパラメータを用いて、2020年までの家計活動別家計消費支出を推計する。最後に、推計された家計活動別家計消費支出から家庭ごみ発生量を推計する。



図(3)-5 家計生産モデル・廃棄物発生モジュールの推計フロー

(3) 物質ストック・フローモデルの開発

低炭素社会構築のためには、エネルギー集約素材の生産に係るCO₂排出量の削減は必須である。しかしながら、エネルギー集約素材の代表的素材である鉄鋼は、社会インフラや、生産資本、輸送機器など人々が生活、また、経済活動を行うためには不可欠な幅広い財に使用されている。先進国では物的成熟度は高く、素材需要の駆動力は、その維持の段階になってきているが、途上国では、社会インフラや生産資本の整備が、今後の駆動力となる。このことから、鉄鋼需要の削減を検討するためには、鉄鋼ストックが行うサービス需要を満たしつつ、鉄鋼生産に関わるCO₂排出量を削減することが求められる。

そこで、本研究は、鉄鋼需要の削減可能性を検討することを目的とし、鉄鋼ストックが行うサービスのサービス需要から鉄鋼需要までを整合性をもって推計する物質ストック・フローモデルを構築した。将来推計については、温暖化対策を導入しない「対策なしケース」、様々な対策を導入した「対策ケース」を設定し、これを日本、また、世界全体に適用し、2050年までの鉄鋼需要、鉄鋼ストック量を推計することで対策導入による鉄鋼需要の削減の定量的効果を示した。

1) 基準年の財別鉄鋼ストック量の推計

将来の鉄鋼需要の推計には基準年の財別ストック量の情報が不可欠であるが、これは統計など

からは得られない。そこで、まず、基準年（2005年）の財別鉄鋼ストック量を地域別に推計した。なお、財の分類は、鉄鋼を主な構成要素とする製品を網羅的に扱い、その財の用途、財一単位の生産に投入される鉄鋼の量を考慮し、23種に集約した。ここで、鉄鋼ストック量は、社会にて使用されている財に含まれる量（in-use stock）が対象であり、使用された後、廃棄物として回収されないまま社会に蓄積されている量は含めない。推計は、鉄鋼の使用が本格的に始まった1900年から2005年まで行った。推計方法としては、まず、財を5種（大分類：建築物、機械類、輸送機器、土木構造物、その他）に集約し、地域別財別鉄鋼ストック量を1900～2005年の期間にて推計する。次に、2005年について財のストック量を用いて、23種（小分類）に分割した。

大分類での地域別鉄鋼ストックの推計は、(1)式を用いて行う。なお、1900年の初期値を0トンとした。変数の添え字は、 r が地域、 i が財、 t が年を示す。

$$MS_{r,t}^i = MS_{r,t-1}^i - MD_{r,t-1}^i + MI_{r,t}^i \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $MS_{r,t}^i$ ：ストック量、 $MI_{r,t}^i$ ：ストックへの追加量、 $MD_{r,t}^i$ ：減耗量 である。

ストックの減耗による廃棄物発生量は、(3)式で定義されるワイブル分布を用い、(2)式にて算出した。

$$MD_{r,t}^i = \sum_{tt \leq t-1900} MI_{r,t-tt}^i \cdot f^i(tt) \cdots \cdots (2)$$

$$f^i(tt) = \frac{\beta^i}{\eta^i} \left(\frac{tt}{\eta^i} \right)^{\beta^i-1} \exp \left\{ - \left(\frac{tt}{\eta^i} \right)^{\beta^i} \right\} \cdots \cdots (3)$$

ここで、 tt ：財の蓄積期間、 β ：形状パラメータ、 η ：尺度パラメータである。

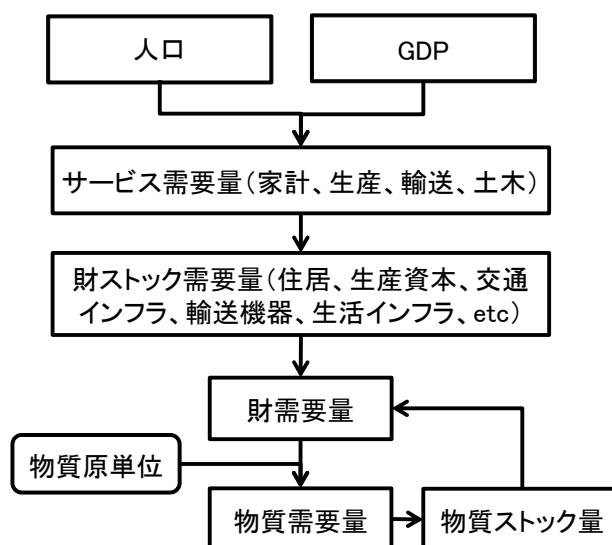
財別のストックへの追加量 MI （以下、投資量）は、1900-1970年、1971-2005年の別に設定した。1971～2005年の財別投資量は、貨幣単位や物量単位の各種統計と整合性がとれるよう調整計算を行い推計した物質勘定表の値を用いた。1970年以前は、日本は既往の文献から値を設定し、その他の地域は、鉄鋼の見掛け消費量に、財別投入シェアを乗じて推計した。財別投入シェアは、輸送機器は1900年のシェアを0%とし1971年の投資量の財別投入シェアの値と線形補完を行った。その他は、1971年のシェアで一定とした。これら2つの財のシェアを除いた残りのシェアを機械類、建築物、土木構造物に分割した。その分割については、先進諸国は、それぞれの財の生産が始まった時期、及び、日本の財別投入シェアを参考に設定した。なお、途上国における建築物への鉄鋼の投入は、1950年以降で見掛け消費量が発生する年に開始するものとした。

こうして推計した2005年の財別鉄鋼ストック量について大分類から小分類に分割した。方法は、財のストック量に日本の物質原単位を地域別調整係数を乗じて、大分類ごとに小分類での財別鉄鋼ストック量が小分類での鉄鋼ストック量と等しくなるよう調整計算を行った。

2) 物質ストック・フローモデルの開発

物質ストック・フローモデルでは、鉄鋼を対象に、世界を35地域に区分し、①物質（鉄鋼・セメント）が含まれている財ストックが提供するサービスについてサービス需要を推計し、②そのサービスを提供するために必要な財ストック需要量を推計する。③財ストック需要量を満たすための財需要量を計算し、④財生産のために投入される物質需要量を推計する。ここで、サービス

は家計、生産、輸送など11種類のサービス、財は住居、生産資本、輸送機器、インフラなど23種類を対象とした。



図(3)-6 物質ストック・フローモデルの推計のフロー

サービス需要量は、サービススケール指標にサービスレベル指標を乗じて算出される（(4)-(5)式）。財ストック需要量は、財ストックのサービス算出係数と稼働率から推計される（(6)式）。財ストック量の動態式から財需要量（(7)式）が推計され、最後に財需要量に物質原単位を乗じることで物質需要量が算出される（(8)式）。なお、地域のサフィックス、ストックの動態式以外の年のサフィックスは省略し、モデルの方程式群を示す。また、サービスとそれを供給する財ストックの組み合わせは、表(3)-3に示した。

$$U^{up} = US^{up} \cdot UL^{up} \dots\dots\dots(4)$$

$$US^{up} = asd^{up} \cdot SI^{up} \dots\dots\dots(5)$$

$$U^{up,s} = aus^{up,s} \cdot S^s \dots\dots\dots(6)$$

$$S_t^s = (1 - \delta^s) \cdot S_{t-1}^s + I_{t-1}^s \dots\dots(7)$$

$$M^s = d^s \cdot I_{t-1}^s \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 up ：サービスの種類、 s ：財の種類、 U^{up} ：サービス量、 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} ：サービススケール指標を規定するマクロ社会経済指標、 S^s ：財 s のストック量、 I^s ：財 s の需要量、 M^s ：財 s による物質需要量、 asd^{up} ：サービススケール指標に関する係数、 $aus^{up,s}$ ：サービス産出係数（財ストック s 1単位あたりのサービス up の産出量）、 δ^s ：減耗率、 d^s ：物質原単位（財1単位あたりの生産に投入される物質質量）である。

サービススケール指標に関する係数 asd 、サービス算出係数 aus 、サービスレベル UL 、物質原単位 d は2005年について世界35地域で整備した。なお、統計から関連する変数の報告値が得られない地域については、経済的・地理的に近い地域の値を引用した。

表(3)-3 サービスおよび財の種類と、その組み合わせ

サービスの種類 (up)	財の種類 (s)
住居	住居 (構造別)
その他家計	その他工業製品
産業生産	生産資本 (機械, 各種設備), 業務建築物
発電	発電設備 (汽力, 水力)
距離別旅客輸送	乗用車, バス, バイク, 自転車, 旅客車両, 飛行機
	道路, 鉄道, 空港
距離別貨物輸送	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	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

将来推計においては、係数の値を2005年の値で固定した対策なしケース、様々な対策を導入した対策ケースを設定した。なお、対策としては、表(3)-4に示したサービス需要の管理、財ストックの効率改善、高性能素材の導入を想定した。

表(3)-4 対策ケースの内訳

対策	2050年までの変化・改善
サービス需要の管理	建築：構造別シェアの変化 輸送：モーダルシフト
財ストックの効率改善	住居：空家率の削減 業務建築物：空室率の削減 発電設備：設備利用率の向上 生産資本（機械類）：稼働率の向上 輸送機器：積載率の向上 土木構造物：利用率の向上
高性能素材の導入	高張力鋼シェアの増加 (機械類, 輸送機器, 建築物, 土木構造物)

4. 結果及び考察

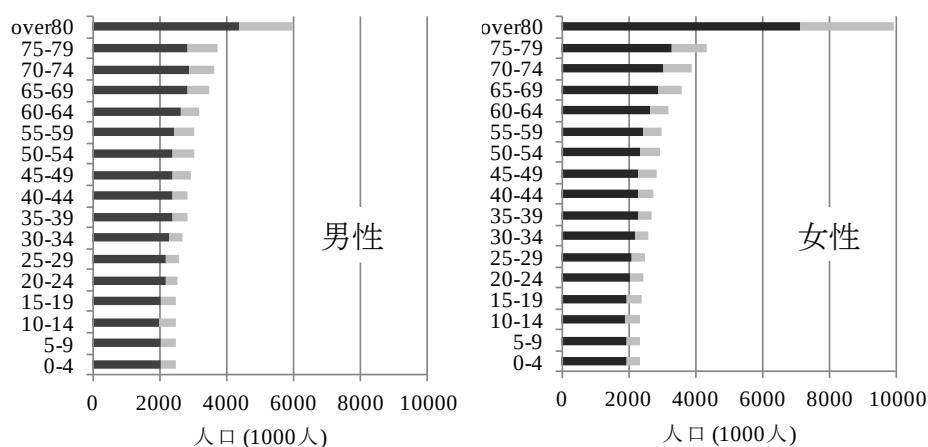
(1) 人口・世帯モデルを用いた将来推計

図(3)-7に、人口・世帯モデルを用いて推計した日本を対象とした2050年における都市・農村別男女別年齢階級別人口を示す。どの国でも高齢化が進み、年齢分布別人口のピークがピラミッドの上の方に移動しているのが分かる。また都市への人口流入が進み、インドでも人口の半分以上が都市に住むようになると推計された。

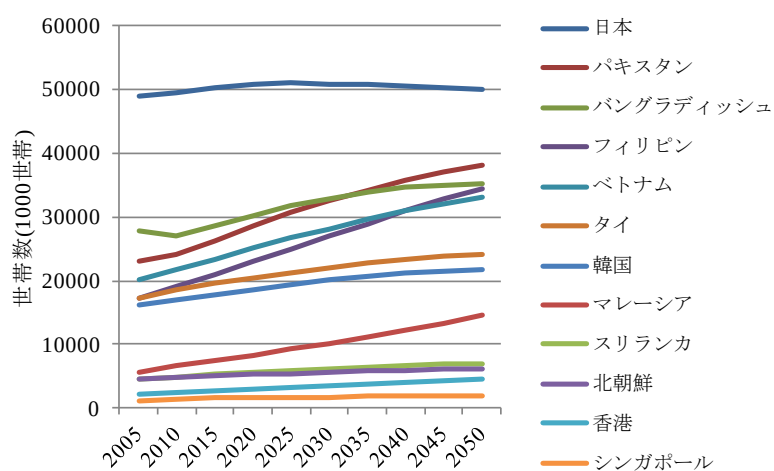
図(3)-8はアジア主要国を対象とした世帯数の推計結果を示す。日本は人口減少期に突入し、かつ、世帯人員数の減少率も低下しているため、世帯数は近い将来減少に転じることが示された。一方、多くのアジア地域では、今後も急激な人口増加が予想され、かつ、世帯人員数の減少が同時期に進むことが予想されるため、世帯数が急激に増加することが推計された。特に世帯数の増加率が激しい国として、パキスタン、ベトナム、フィリピン等が挙げられる。

図(3)-9は日本における世帯主率の推計結果をそれぞれ示す。これまでも高齢者が家族と一緒にではなく単身で住むように変化する傾向が見られたが、その傾向はますます強まることが想定され、75歳以上の男女共に、2050年の世帯主率は2005年の世帯主率と比べて高くなった。また、それ以

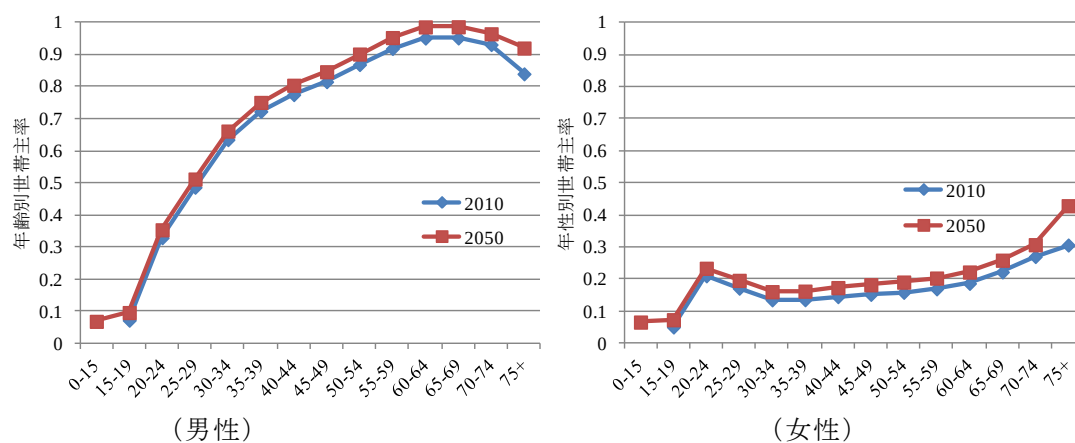
外の年齢でも、単身化や核家族化の傾向は相変わらず続くことが想定されるため、全年齢区分において、2050年の方が2005年よりも世帯主率は高くなった。



図(3)-7 日本の都市・農村別男女別年齢階級別人口(2050年) (黒：都市部 灰色：農村部)



図(3)-8 アジア主要国の世帯数の推移



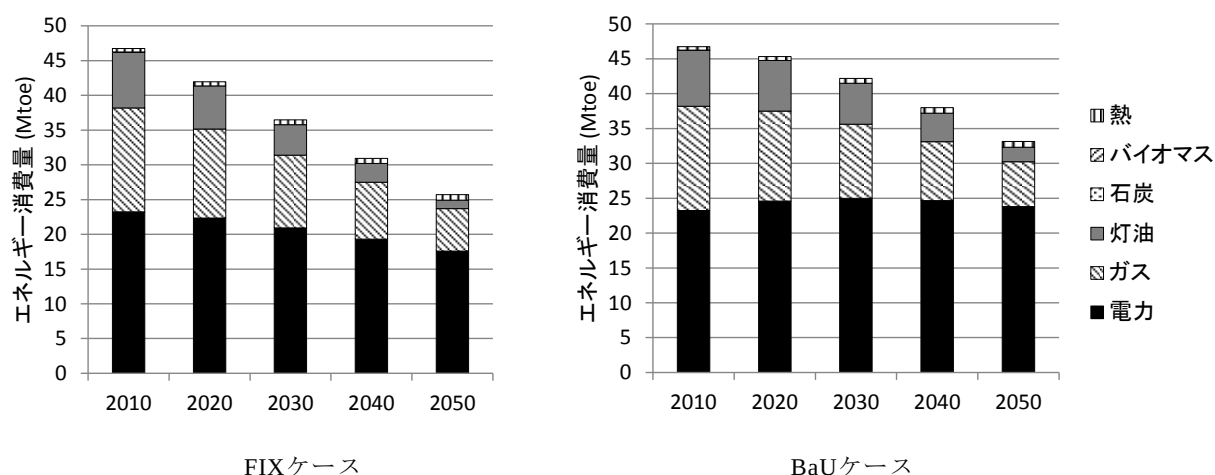
図(3)-9 日本における世帯主率の変化

（２）家計生産モデルを用いた分析

１）家庭のエネルギーサービス需給に着目した解析

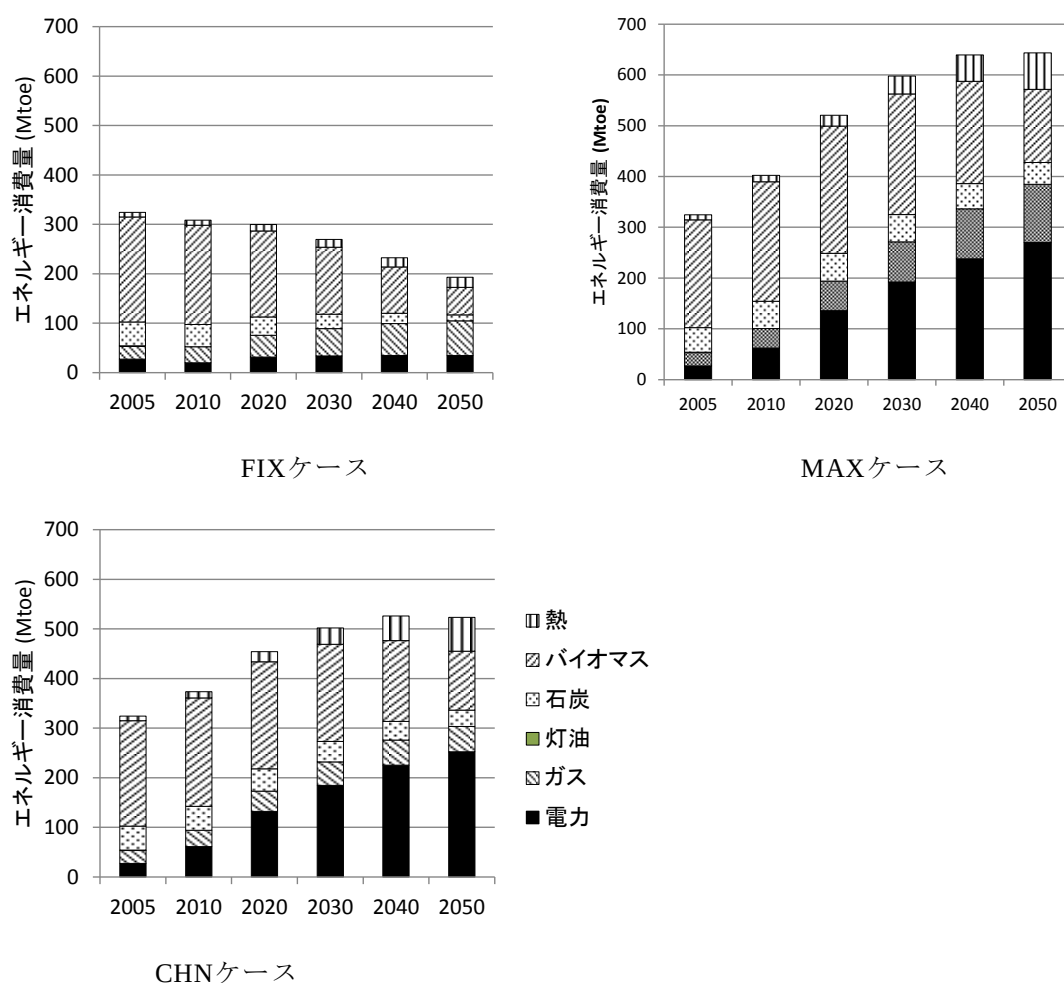
日本及び中国におけるエネルギーサービス需要レベル別のエネルギー消費量の推計結果をそれぞれ図(3)-10と図(3)-11に示す。

日本の結果を見ると、BaUケースでは29%の削減が可能であることがわかった。日本では2010年と比較して2050年には人口が25%減少するため、その影響も大きい。2050年に向けて日本の家庭部門におけるCO₂排出量の大幅削減を達成するには、厨房と給湯においてガスから電力へのエネルギー転換がどこまで進むかが非常に大きなポイントとなる。



図(3)-10 日本のエネルギー消費量

中国では2050年までに人口がピークを迎えるため、2050年の人口は2005年比で約3.5%減少している。また中国では2005年において平均的な機器のエネルギー効率が悪いいため、エネルギー効率の改善と、電化によるエネルギー消費量の減少が大きな意味を持つことがわかる。CHNケースでは2005年と比較して61%のエネルギー消費量の増加、MAXケースにおいて98%のエネルギー消費量の増加がそれぞれ見込まれることがわかった。いずれのケースもエネルギー消費量の大幅な増加を示しているが、この2つのケースの違いは、入浴方法の設定だけであり、日本のように給湯を大量に使う入浴をしないだけでも、将来のエネルギー消費量に無視できない大きな違いが表れることが明らかとなった。今回の推計では、需要シナリオの違いが緩和策の検討において非常に大きな意味を持つことを示すことが目的の1つであり、それが明確に示された結果となった。



図(3)-11 中国のエネルギー消費量

2) 家庭ごみ発生量推計ツールの開発

日本の家庭ごみ発生量推計結果を報告値と比較し、ツールの推計精度について確認する。表(3)-5に日本の2000年、2005年、2010年の家庭ごみ発生量の推計結果と報告値を示した。報告値を比較すると、比較的定常的にごみが発生する厨芥や紙類については、同じような数値となっているが、非定常的に発生するごみについては、報告値間により差があることがわかる。また容器包装からの家庭ごみ発生量については、回収率との密接に関係するものであり、やはり報告値間での差が見られる。本研究の推計結果と比較すると全体的には報告値のばらつき内に収まる結果になっており、一定レベル以上の精度をもったツールであるといえる。

表(3)-5 日本の家庭ごみ発生量推計結果

家庭ごみ	推計結果			報告値		
	2000年	2005年	2010年	京都市* ¹	岡山市* ²	福岡市* ³
合計	32521	32508	33127	36471* ⁴		
厨芥類	10766	10239	9590	13525	8368	13603
紙類	製品	9577	10360	6322	4465	7176
	容器包装	534	539	2687	1574	3014
繊維類	1672	1636	1535	924	1036	2087
プラスチック類	製品	585	571	553	515	2052* ⁵
	容器包装	2316	2359	3793	2888	3903
木片類	277	287	303	243	543	2138* ⁵
陶磁器類	268	249	238	188	192	399
ガラス類	製品	268	249	158	20	314
	容器包装	1835	1997	802	260	564
皮革・ゴム類	149	132	141	304	26	—
金属類	製品	298	282	334	750	1014
	容器包装	877	754	492	140	206
粗大ごみ	3100	2855	3090			

単位: 千トン

*1: 京都市の調査結果に合計値を乗じて計算。

*2: 岡山市の調査結果のうち、焼却ごみと埋立ごみの発生割合として計算。

*3: 福岡市の調査結果に合計値を乗じて計算。

*4: 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課の平成17年度の生活系廃棄物の値。

*5: プラスチック製品の値は皮革・ゴム類と合計した値。また、木片類には伐採くずを含む。

いくつか大きく推計結果が報告値と異なる部分について考察を加える。紙類の製品については、新聞紙の購入量も含めているため、推計結果が非常に大きくなっている。今回は発展途上国での家庭ごみ発生量を見るため、あえてリサイクル率は考慮していない。プラスチック類の容器包装は、ビニール袋や緩衝剤等は推計対象外であることが、過小推計に見える原因の1つであろう。また、金属類、ガラス類の容器包装についても、リサイクルを考慮していないことが過大推計に見える理由の1つである。金属類の製品については、推計結果で粗大ごみに分類した物の一部が金属類に入る場合もあり（例えば小さな機器など）、推計結果に影響したものと考えられる。

以上により、本ツールは精度を検証出来なかった部分を残すが、全体的には最初に示したツール開発の3つの条件（データの入手可能性、シンプルな推計構造、組成別の家庭ごみ発生量が推計可能）を満たしたものであると言えるだろう。構造がシンプルなため、パラメータの設定が結果に大きな意味を持つが、適切なパラメータを設定できれば、アジア各国の組成別家庭ごみ発生量の推計が可能である。

アジア各国の推計結果について考察する。はじめにアジアの発展途上国の都市固形廃棄物発生量の報告値一覧を表(3)-6に示す。これは各国の都市固形廃棄物発生量の統計値や推計結果、調査結果が混在したものである。また都市固形廃棄物の定義は国によって異なり、都市といっても首都があるような大都市の結果のみ示した国もあれば比較的小都市の結果まで含むものもある。これらの報告値からわかることは、1) 都市固形廃棄物の発生量にはかなり国内の都市レベルでも幅があるが、2) 少なくとも新興国の大都市では、先進国の都市レベルの都市固形廃棄物があることである。これらの情報を用いて推計結果の精度を比較するのは困難である。そこで、各国の代表

的な都市固形廃棄物発生量データを設定し、都市固形廃棄物に占める家庭ごみの割合の違いと都市と農村の廃棄物発生量の違いを仮定した報告値を作成し、推計結果との比較を試みた（表(3)-6）。報告値1として各国の都市固形廃棄物の発生量を設定し、都市固形廃棄物発生量のうち家庭ごみの割合が95%、70%、50%の場合の値を報告値2から報告値4として示した。さらに都市部と農村部では農村部の方が1人あたり都市固形廃棄物、あるいは家庭ごみ発生量が少ないことが予想されるため、農村部からの平均的な1人あたり廃棄物発生量が都市部からの発生量と比較して50%、33%、25%、17%だった場合を報告値5から報告値8とした。報告値1は、各国の報告値と1人あたりGDPを考慮して設定した。中国、マレーシア、タイは900g/人・日、インドネシア、ベトナムは大都市のデータしかわからなかったため、大都市のデータから少し低めに600g/人・日とし、インドは報告値が全体に低いため400g/人・日と設定した。結果を見ると、全体的に過小推計の可能性が高いことがわかる。過小推計になる明らかな原因は2つ挙げられる。1) 手法上の理由により容器包装や家庭への搬入物の一部は推計対象に含まれない、2) 推計に用いた価格の設定は都市部の情報しか得られなかったため、農村部が都市部より価格が安い場合過小推計になる。特に、今回のケースでは2) が過小推計の原因になっている可能性が高い。

次に、表(3)-7にアジア8か国の家庭ごみ発生量の推計結果をまとめた。先進国である日本や韓国では2000年から2010年にかけてほぼ横ばいであるが、発展途上国ではインドを除きここ10年ほどでも家庭ごみ発生量が増加していることがわかる。発展途上国ではここ10年間の人口増加も著しいため、表(3)-7に示したように国全体の家庭ごみ発生量を見ると、中国やマレーシアではここ10年でも家庭ごみ発生量が2倍になっており、他の発展途上国でも著しい増加をしていることがわかる。

図(3)-12に1人あたりGDP（購買力平価換算値）と家庭ごみ発生量の関係を示した。今回の推計結果は購買力平価に換算した1人あたりGDPが増えるほど家庭ごみ発生量が増加しており、この点からも本推計結果が妥当な結果であると判断できる。

表(3)-6 アジアの発展途上国の推計値と報告値の比較

	中国		インド		インドネシア		マレーシア		ベトナム		タイ	
	MSW	家庭ごみ	MSW	家庭ごみ	MSW	家庭ごみ	MSW	家庭ごみ	MSW	家庭ごみ	MSW	家庭ごみ
推計値		152		70		92		335		69		260
報告値1	900		400		600		900		600		900	
報告値2		855		380		570		855		570		855
報告値3		630		280		420		630		420		630
報告値4		450		200		300		450		300		450
報告値5	662	331 - 628	260	130 - 247	433	216 - 411	774	387 - 735	390	195 - 371	603	302 - 573
報告値6	580	290 - 551	212	106 - 202	376	188 - 357	731	366 - 695	319	159 - 303	502	251 - 477
報告値7	542	271 - 515	190	95 - 181	349	175 - 332	711	356 - 675	285	143 - 271	455	227 - 432
報告値8	503	251 - 478	167	83 - 158	322	161 - 306	690	345 - 656	250	125 - 238	405	203 - 385
都市化率 ³⁷⁾	47%		30%		44%		72%		30%		34%	
GDP ^{*1}	6819		3039		3885		13706		2875		7673	

単位: g/人・日

報告値1 都市固形廃棄物発生量の値

報告値2 都市固形廃棄物発生量のうち95%が家庭ごみであるとした場合

報告値3 都市固形廃棄物発生量のうち70%が家庭ごみであるとした場合

報告値3 都市固形廃棄物発生量のうち50%が家庭ごみであるとした場合

報告値4 農村部の1人あたり都市固形廃棄物（家庭ごみ）発生量が都市部の50%の量であるとした場合

報告値5 農村部の1人あたり都市固形廃棄物（家庭ごみ）発生量が都市部の33%の量であるとした場合

報告値6 農村部の1人あたり都市固形廃棄物（家庭ごみ）発生量が都市部の25%の量であるとした場合

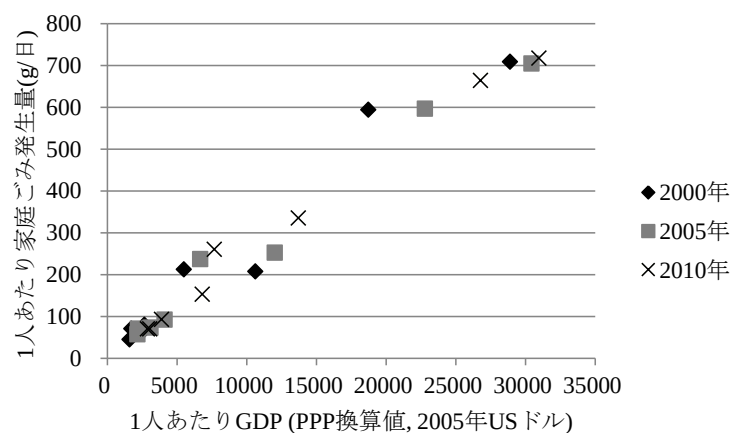
報告値7 農村部の1人あたり都市固形廃棄物（家庭ごみ）発生量が都市部の17%の量であるとした場合

*1: 2010年の1人あたりGDP (PPP換算値, 2005年USドル)

表(3)-7 アジアの家庭ごみ発生量

国	2000		2005				2010			
	1人あたり	全国	1人あたり	2000年比	全国	2000年比	1人あたり	2000年比	全国	2000年比
日本	709	32521	705	0.99	32507	1.00	717	1.01	33127	1.02
中国	79	36715	92	1.17	44087	1.20	152	1.92	74510	2.03
韓国	594	9964	597	1.01	10250	1.03	664	1.12	11321	1.14
インド	70	27044	70	1.00	29335	1.08	70	0.99	31086	1.15
インドネシア	66	5174	73	1.10	6089	1.18	92	1.39	8066	1.56
マレーシア	207	1771	252	1.22	2404	1.36	335	1.62	3471	1.96
ベトナム	45	1281	57	1.28	1736	1.36	69	1.55	2219	1.73
タイ	212	4889	237	1.12	5765	1.18	260	1.22	6549	1.34

単位 発生量: g/人・日 全国: 千トン

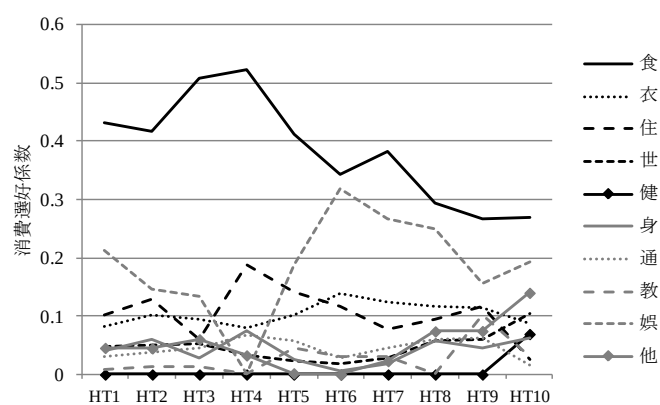


図(3)-12 1人あたりGDPと家庭ごみ発生量の関係

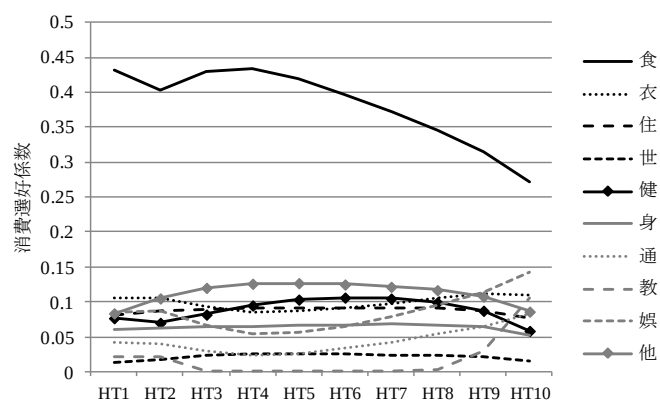
3) アジアにおける財・サービスの購入変化を考慮した家庭ごみ発生量の推計

まず、家計活動に関する重要なパラメータである選好係数 a_{ha} と準消費支出 $p_{ha}b_{ha}$ の推計結果を図(3)-13～図(3)-16に示す。選好係数 a_{ha} は食などの生活に必需な家計活動においては、所得階級が高いほど小さくなることが予想され、基準消費支出 $p_{ha}b_{ha}$ は、所得階級が高くなるにつれ、生活に最低限必要であると考えられるレベルも高くなることが予想されるため、所得階級が高い程、大きくなることが予想される変数である。

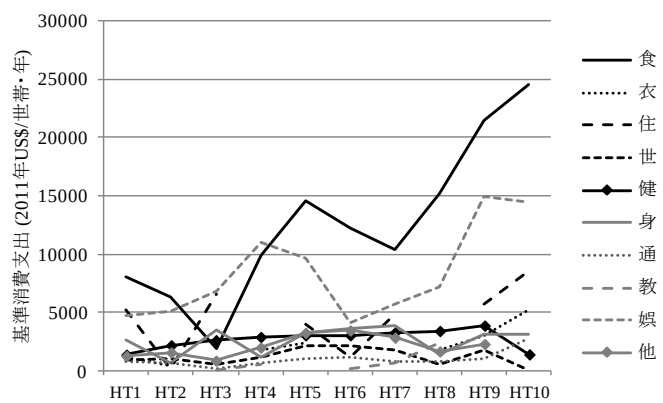
中国のような発展途上国では、高所得階級ほど家計活動別基準消費支出は大きくなった。選好係数について高所得階級を低所得階級と比較すると、食といった生活に必需な活動については低くなり、教養娯楽（娯）のような家計活動については高くなる傾向が見られた。一方、日本の結果を見ると、基準消費支出については最低所得階級(HT1)と最高所得階級(HT10)の家計ではHT10の方が全体的に高いこと、また低所得家庭と高所得家計においては高所得家計の方が教養娯楽への選好係数が高いなどの傾向がみられるものの、中国で観察された所得階級の違いによるきれいな傾向は見られない。日本のような先進国では、所得階級が低いといっても、世界全体のレベルからすれば十分に満足いく生活ができる水準に達しており、所得が増えればより娯楽や利便性の高い財・サービスの消費が増えるといった考え方によらない消費活動が行われている。このような傾向は韓国にも見られ、先進国を解析する際には、適切な世帯分類の設定や需要関数の見直しが必要であり、今後の検討課題の1つとしたい。



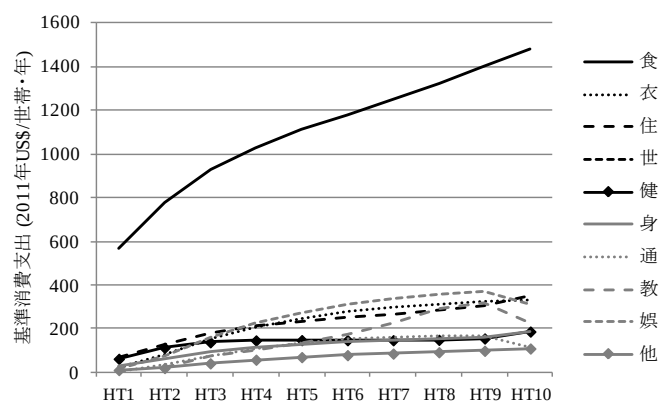
図(3)-13 日本の消費選好係数



図(3)-14 中国の消費選好係数



図(3)-15 日本の基準消費支出



図(3)-16 中国の基準消費支出

これらを用いた将来の消費支出額の推計結果を表(3)-8に示す。全体的に過去のデータを非常によく再現できている。全ての国に共通してみられる傾向は、高所得層では消費支出額の増加が著しいのに対し、低所得層では、高所得層と比較すると増加率が低い、もしくは、基準年よりも消費支出額が減少する傾向もみられた。日本や韓国といった先進国では、全体的に消費支出額が伸び悩んでいるが、途上国の高所得階層ではかなり消費支出額が増加することが分かる。インドネシアでは全所得階層に対し同じような割合で消費支出額が増加するのに対し、中国、インド、インドネシアでは高所得階層の方の伸びが低所得階層よりも大きくなっている。特に中国に関してはその傾向が非常に激しい結果となった。

表(3)-8 消費支出推計結果まとめ

10 ³ US\$/世帯		HT1			HT3			HT5			HT8			HT10		
		推計値	統計値	基準年比	推計値	統計値	基準年比	推計値	統計値	基準年比	推計値	統計値	基準年比	推計値	統計値	基準年比
日本	2005	24.3	25.3	1.0	42.8	43.6	1.0	54.2	55.3	1.0	71.2	71.3	1.0	101.2	97.2	1.00
	2010	21.8	21.8	0.9	41.9	41.7	1.0	51.1	51.2	0.9	68.6	68.0	1.0	101.3	102.2	1.00
	2015	19.6		0.8	41.6		1.0	47.9		0.9	66.2		0.9	102.6		1.01
	2020	17.3		0.7	43.1		1.0	44.2		0.8	64.1		0.9	109.2		1.08
中国	2005	1.6	1.4	1.0	2.7	2.5	1.0	3.3	3.1	1.0	4.2	4.2	1.0	5.7	6.3	1.00
	2010	1.4	1.1	0.8	2.9	2.6	1.1	4.1	3.8	1.2	6.3	6.3	1.5	12.3	14.0	2.17
	2015	1.3		0.8	3.3		1.2	4.9		1.5	8.7		2.1	21.5		3.79
	2020	1.2		0.8	3.6		1.4	5.9		1.8	11.5		2.7	34.6		6.10
インド	2005	1.1	1.1	1.0	2.2	2.2	1.0	2.9	2.9	1.0	4.4	4.4	1.0	7.8	7.8	1.00
	2010	1.3	1.2	1.2	2.6	2.6	1.2	3.6	3.6	1.2	5.5	5.4	1.3	10.2	10.0	1.30
	2015	1.5		1.4	3.2		1.5	4.4		1.5	6.9		1.6	13.2		1.68
	2020	1.7		1.6	3.8		1.8	5.4		1.8	8.6		2.0	16.9		2.15
インドネシア	2005	1.6	1.5	1.0	3.1	3.0	1.0	4.1	4.0	1.0	5.9	5.9	1.0	9.8	10.0	1.00
	2010	1.9	1.8	1.2	3.7	3.7	1.2	5.0	5.0	1.2	7.3	7.4	1.2	12.5	12.9	1.28
	2015	2.2		1.4	4.7		1.5	6.4		1.6	9.8		1.7	17.7		1.80
	2020	3.2		2.0	6.4		2.1	8.6		2.1	12.6		2.1	21.5		2.19
韓国	2005	12.2	12.0	1.0	18.8	18.6	1.0	23.5	23.3	1.0	32.4	32.3	1.0	52.9	52.9	1.00
	2010	12.0	11.8	1.0	18.8	18.7	1.0	24.0	23.9	1.0	33.8	33.7	1.0	56.9	56.9	1.08
	2015	11.6		1.0	19.0		1.0	24.7		1.1	35.8		1.1	62.7		1.19
	2020	11.3		0.9	19.3		1.0	25.7		1.1	38.2		1.2	70.2		1.33
マレーシア	2005	3.6	3.6	1.0	8.2	8.2	1.0	11.8	11.7	1.0	19.1	19.1	1.0	40.1	40.1	1.00
	2010	4.2	4.2	1.2	9.8	9.7	1.2	14.2	14.1	1.2	23.7	23.5	1.2	52.8	52.1	1.32
	2015	5.0		1.4	11.8		1.4	17.4		1.5	29.7		1.5	69.2		1.72
	2020	6.1		1.7	14.6		1.8	21.7		1.8	37.5		2.0	90.7		2.26

最後に将来の家庭ごみ発生量の推計結果を表(3)-9に示す。日本では、人口の減少と消費支出の伸び悩みといった理由により、家庭ごみ発生量の推計結果は横ばいとなった。一方、日本以外のアジア諸国では、いずれの国も家庭ごみ発生量が増加すると推計された。本推計の対象国の中では、日本に次ぎ消費支出額が伸び悩むと推計された韓国でも、2020年における家庭ごみ発生量は2005年比で1.36倍、中国、インドネシア、マレーシアでは3倍近く、インドでも2倍近くになることが推計された。1人あたり家庭ごみ発生量の結果を見ると、中国が非常に高い増加率を示し2020年の発生量は2005年と比較して、2.67倍となった。

表(3)-9 廃棄物発生量推計結果まとめ

国全体(単位: 10 ³ t)		2005	2010	2015	2020
日本	廃棄物発生量	12753	12719	12614	12602
	増加率		100%	99%	99%
中国	廃棄物発生量	31921	46635	65641	90683
	増加率		146%	206%	284%
インド	廃棄物発生量	23085	28662	35438	43702
	増加率		124%	154%	189%
インドネシア	廃棄物発生量	3674	5110	7409	10392
	増加率		139%	202%	283%
韓国	廃棄物発生量	3082	3538	3904	4207
	増加率		115%	127%	136%
マレーシア	廃棄物発生量	688	991	1407	1984
	増加率		144%	205%	288%
1人あたり(単位: kg/人・年)		2005	2010	2015	2020
日本	廃棄物発生量	99.8	99.9	100.2	102.1
	増加率		100%	100%	102%
中国	廃棄物発生量	24.6	34.9	48.1	65.5
	増加率		142%	196%	267%
インド	廃棄物発生量	20.9	24.0	27.7	32.0
	増加率		115%	132%	153%
インドネシア	廃棄物発生量	16.8	22.0	30.3	40.9
	増加率		131%	181%	244%
韓国	廃棄物発生量	64.0	72.4	79.2	85.3
	増加率		113%	124%	133%
マレーシア	廃棄物発生量	26.3	35.1	46.6	61.8
	増加率		133%	177%	235%

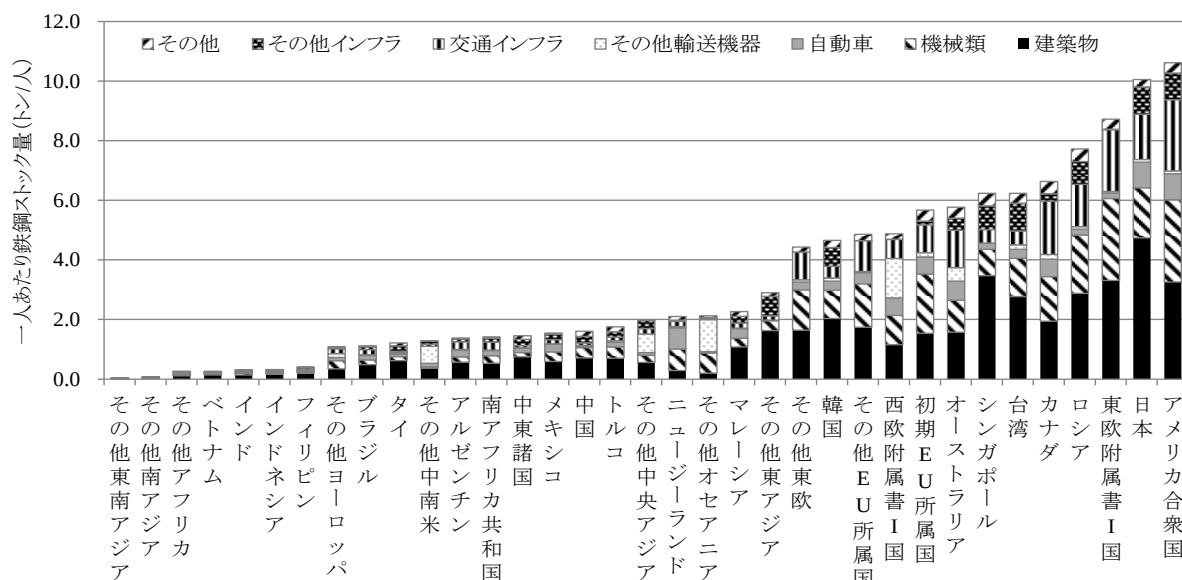
(3) マテリアルストック・フローモデル

図(3)-17は、推計された現状の鉄鋼ストック量を1人あたりに換算して示したものである。先進諸国では多くの地域で、4.9～10.6トン/人の範囲となった。先進諸国の中で一番少ないのは、トルコの1.8トン/人、次にニュージーランドが少なく、これら2地域はその他の先進諸国の範囲から大きくかけ離れている。先進諸国並みに1人あたり鉄鋼ストック量が多い途上国は、台湾とシンガポールの6.2トン/人であり、初期EU所属国やオーストラリア以上の値となっている。これらの地域に共通することは、新興国の中でも経済発展のレベルが比較的高い地域であることが挙げられ、経済発展のレベルが高い国は、物質成熟度も高いといえる。

先進諸国の間でも1人あたり鉄鋼ストック量には大きな幅があり、その要因は、今後の途上国の

1人あたり鉄鋼ストック量の飽和レベルを探るうえで重要である。地域別に財別鉄鋼ストック量を見ると、その最大の要因が建築物であることが分かる。例えば、日本とその他EU所属国とでは2.7倍もの差がある。先進諸国では、住宅供給はほぼ満たされており、鉄鋼を多用する構造での1戸あたり延べ床面積の大きな増加がない限り、今後、住居ストック量に大きな変化はない。また、人口に大きな増加がないことから就業者数の大きな増加も見込まれず、業務用床面積の大きな増加も想定されない。このことから、今後もこの差が継続し、1人あたり鉄鋼ストック量の飽和レベルに影響を与えることが想定される。1戸あたり延べ床面積、就業者1人あたり業務床面積、及び、その構造の動向が途上国の鉄鋼ストック量のレベルを決定するといえる。

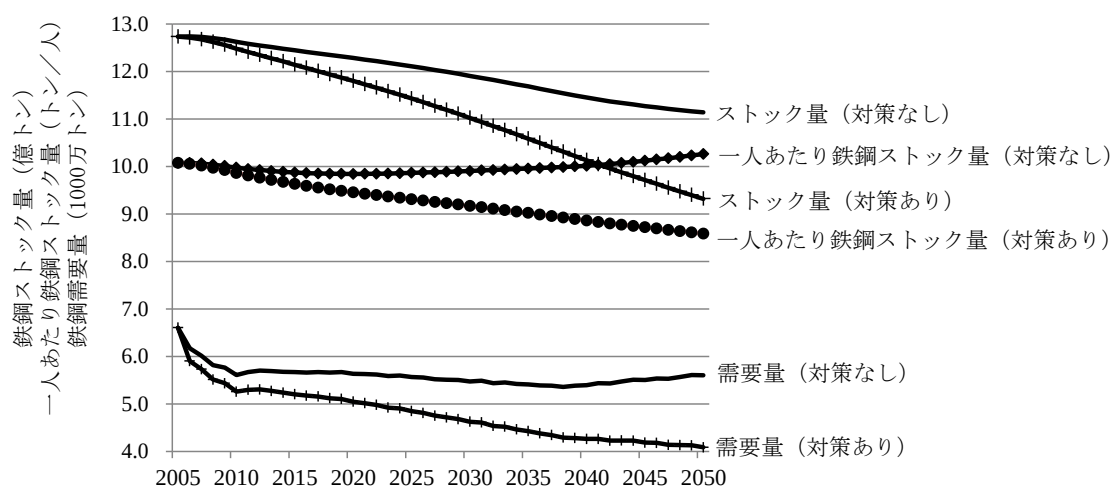
次に大きな割合を占めているのは機械類、交通インフラであるが、機械類の値が大きい地域の方がやや多い。交通インフラの整備については、輸送量における機関分担率と共に、国土面積も重要な要素であると考えられる。しかしながら、アメリカ合衆国の交通インフラは、日本の1.6倍に留まり、国土面積の比と比較すると、はるかに小さい。初期EU所属国の他、相対的に自動車の割合が小さなロシアやその他東欧附属書I国では、道路よりも鉄道の鉄鋼ストック量が多かった。



図(3)-17 1人あたり鉄鋼ストック量 (トン/人)

図(3)-18に、わが国を対象とした鉄鋼需要量、鉄鋼ストック量、1人あたり鉄鋼ストック量の推計結果を示す。

わが国の鉄鋼ストック量は、いずれのシナリオでも減少し、対策なしケースが11.1億トン、対策ありケースが9.3億トンとなる。これは、日本においては、サービス需要の主な駆動力となる人口が2005年比で0.86倍と減少することが要因である。2005年との比較では対策ありケースでは27%減、2050年における対策なしケースとの比較では15%減となった。これを1人あたり鉄鋼ストック量で見ると、対策なしケースでは、2005年比で0.87倍となっているが、人口が0.86倍となるために1人あたりの鉄鋼ストック量は10.3 トン/人と増加した。対策ありケースでは2005年比15%減の8.6 トン/人となり、本研究で想定した対策や技術を導入することにより、1人あたり鉄鋼ストック量を1.7 トン/人削減可能なことが示された。

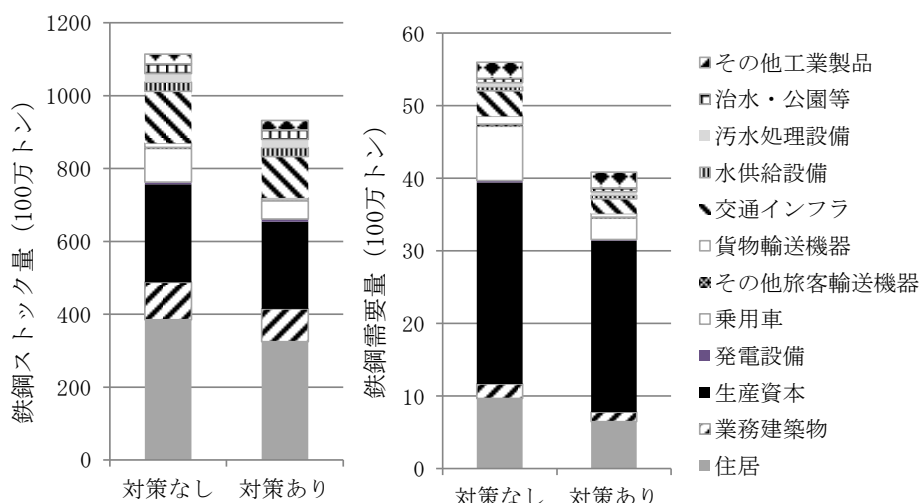


図(3)-18 需要量、ストック量、1人あたりストック量の推移

サービス需要量を供給するために必要となる鉄鋼ストック量が減少するために、わが国における鉄鋼需要量も減少する。対策なしケースは2010年以降ほぼ横ばいであり2050年で5,602万トン/年である。対策なしケースと比較して対策ありケースでは27%の削減となった。すなわち、対策ありケースでは2005年比38%削減となり、4,087 万トン/年となる。

2050年のわが国における鉄鋼需要量、鉄鋼ストック量の内訳を図(3)-19に示す。鉄鋼ストック量では、建築物（住居＋業務）が最も大きなシェアを占め、生産資本、交通インフラが続く。ストックにおける財シェアは、2005～2050年までの期間、大きく変化しない。また、建築物や土木構造物は対策ありケースでは財ストックの効率改善などの効果で削減がみられるものの、減耗率が小さいため、2050年までの間に入れ替わる量が少なく、鉄鋼ストック量に大きな減少は見られない。これは、言い換えると、脱物質化社会構築のためには、早急な対応が必要であることに他ならない。対策なしケースと対策有ケースを比較すると、他の財より比較的減耗率の大きな乗用車のストック量の変化が顕著である。これは、サービス需要の減少に伴う財ストックの減少に加え、高張力鋼の導入の効果である。

鉄鋼ストック量と鉄鋼需要量では財別シェアが大きく異なり、鉄鋼需要量では減耗率の大きな生産資本のシェア50%前後となっており、大きい。鉄鋼需要量の削減は、高張力鋼の導入による効果が大きく、住居、乗用車、交通インフラで大きな効果が得られている。

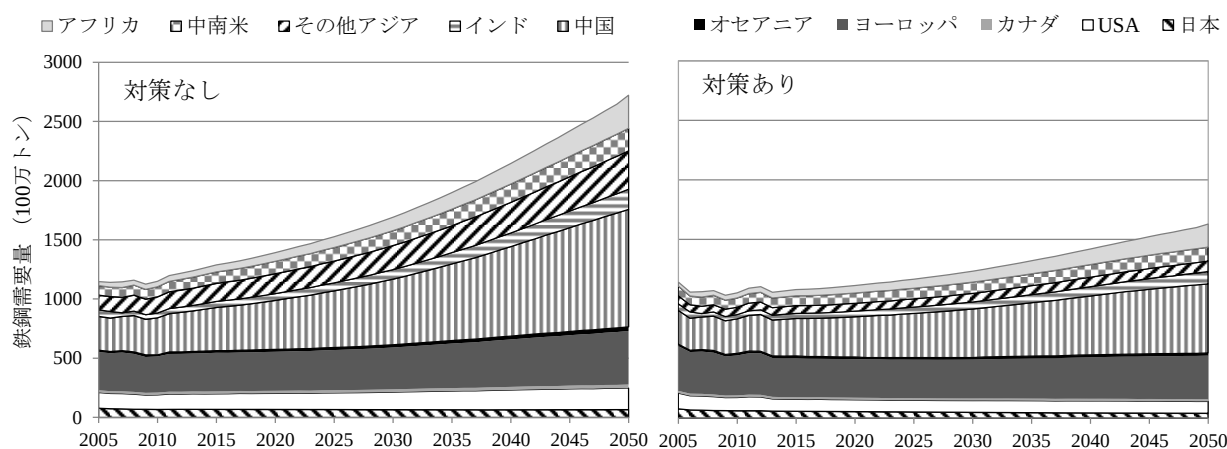


図(3)-19 わが国における鉄鋼ストック量、鉄鋼需要量（2050年）

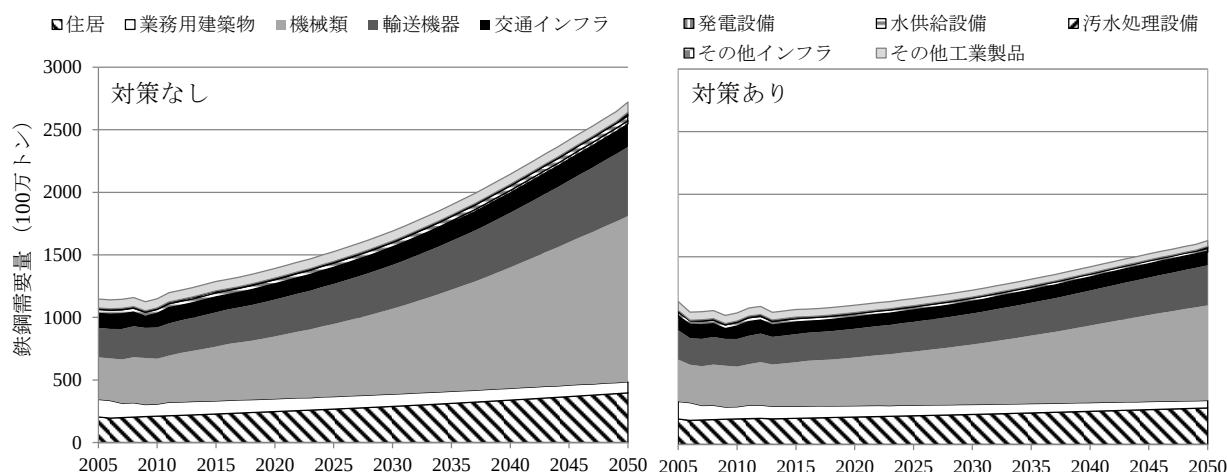
世界の鉄鋼需要量について、地域別、財別に、対策ありと対策なしのケースをそれぞれ図(3)-20及び図(3)-21に示した。対策なしケースでは、世界の鉄鋼需要量は2050年で27億トンに達する。途上国の需要増加が著しく、2050年で73%を占める。このうち、中国は36.4%、その他アジアは11.9%である。対策ありケースでは、16億トンにとどまり、対策なしケースと比較して40%の削減効果が見込まれる。削減量が多いのは需要量も多い中国をはじめとした途上国であるが、削減率でみると、その他アジアの72%についてUSAの56%が大きい。

財別にみると、機械類の需要が突出しており、次に輸送機器、住居が続く。機械類の需要の駆動力が生産額であり、生産額は2050年は2005年比3.6倍であるため、伸びが大きくなっているが、対策ケースでは、効率改善により43%の削減効果が見込まれる。住居では効率改善に加え、高張力鋼の導入も30%を想定しているが、その削減効果は26%に留まる。

対策ケースであっても、2050年まで世界の鉄鋼需要量は2005年比で増加しており、低炭素社会構築の観点からは、粗鋼生産における温室効果ガス排出原単位の削減は必須である。生産における電炉鋼の比率をどこまで上昇させることができるかが、重要となる。



図(3)-20 地域別鉄鋼需要量の推移



図(3)-21 財別鉄鋼需要量の推移

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

社会の構成要素を記述するモデルの開発では、各国の特徴、発展段階を踏まえた分析が可能となり、将来シナリオの作成においても貴重な情報を提供することが可能となる。また、国際的に整備されている物量単位での各種統計では、欠損、不整合が大きい、物質ストック・フローモデルに関する研究により、金額、その他の各種統計と整合性が高く、また、網羅的な物質フローの把握が可能となった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

物質ストック・フローモデルは、環境省地球環境局の「横断的な課題検討会」、マクロフレームワーキンググループにおいて利用され、将来シナリオに対応する鉄鋼生産量について推計結果を提供した（生産維持ケースや輸出通減ケースなど）。

<行政が活用することが見込まれる成果>

人口や物質フローの解析などは、低炭素社会を検討する上で不可欠な要因であり、将来社会を記述する上で重要となる様々な因子を整合的に示すことが可能となった。こうした情報を提示するモデルをもとに、低炭素社会の実現に向けた政策の検討やその評価が可能になると考えている。

特に、高齢化問題など、わが国が直面する課題とあわせて低炭素社会の実現に向けた課題に答えるために、将来人口や世帯数の変化を柔軟に検討できるモデルは行政にも有用であると考えている。

6. 国際共同研究等の状況

サブテーマ（1）に記載のアジアの各機関との共同研究や、若手研究者に対するトレーニングについては、本サブテーマも共同で実施してきた。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) A. Pattanapongchai, B. Limmeechokchai, Y. Matsuoka, M. Kainuma, J. Fujino, O. Akashi and Y. Motoki: GMSARN International Journal, 5 (3), 189-194 (2011)
“Subsidy for Clean Power Generation and CO2 Mitigation in Thailand: The AIM/Enduse Modeling”
- 2) 生津路子・藤森真一郎・松岡譲: 環境システム研究論文集, 67 (6), 255-266 (2011)
「応用一般均衡モデルを用いた日本における温室効果ガス削減目標の分析」
- 3) 金森有子・松岡譲: 土木学会論文集G(環境), 67 (6), II_363- II_374 (2011)
「エネルギーサービスの需給バランスを考慮した業務部門のエネルギー消費量推計について」
- 4) 河瀬玲奈・松岡譲: 土木学会論文集G(環境), 69, 5, I_19-I_26 (2013)
「世界の財に含まれる鉄の蓄積量について」
- 5) 藤森真一郎・増井利彦・松岡譲: 土木学会論文集G(環境), 69, 5, I_227-I_238 (2013)
「エネルギー機器情報を用いた応用一般均衡モデルの開発と緩和策の分析」
- 6) 生津路子・藤森真一郎・松岡譲: 土木学会論文集G(環境), 69, 6, II_359-II_370 (2013)
「応用一般均衡モデルを用いたアジア地域における温室効果ガス排出量削減策の分析」
- 7) R. Kawase and Y. Matsuoka: Energy Policy, 63, 1126-1138 (2013)
“Reduction targets under three burden-sharing schemes for 50% global GHG reduction toward 2050”

<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) 生津路子・藤森真一郎・松岡譲: 環境衛生工学研究, 25 (3), 88-91 (2011)
「日本における温室効果ガス削減対策の評価: 応用一般均衡モデルを用いた分析」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Y. Kanamori and Y. Matsuoka: EEDAL 2011-6th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting, Copenhagen, Denmark (2011)
“Method for Estimation of Residential Energy Consumption Structure”
- 2) S. Higashi, R. Kawase and Y. Matsuoka: International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials, Antalya, Turkey (2013)
“A Study on World Steel Demand Considering Service Demand Change”
- 3) R. Kawase and Y. Matsuoka: International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials, Antalya, Turkey (2013)

“CO2 Emission Reduction through Steel Demand Change toward 2050 in Japan”

- 4) R. Kawase, S. Higashi and Y. Matsuoka: The 9th International Symposium on Social Management Systems, Sydney, Australia (2013)

“World Steel Demand Reduction Potential towards 2050”

- 5) S. Fujimori, T. T. Tran, M. Namazu, T. Masui, Y. Matsuoka, K. Jiang and P. R. Shukla: 6th Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting, Tsukuba, Japan (2013)
“Analyzing the energy demand of Low carbon development in China and India using AIM/CGE model”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

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) United Nations (UN): United Nations publication (1974).
“Manual VIII. Methods for Projections of Urban and Rural Population”
- 2) G. S. Becker: Transaction publishers, pp.45-50 (2008)
“Economic Theory, Third printing”

Assessment of Impacts of Climate Policy in Japan in the Backdrop of Global Climate Policy Using Integrated Assessment Model

Principal Investigator: Toshihiko MASUI

Institution: National Institute for Environmental Studies
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan
Tel: +81-29-850-2524 / Fax: +81-29-850-2572
E-mail: masui@nies.go.jp

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

[Abstract]

Key Words: Integrated assessment model, Future scenario, Climate change mitigation, Energy service demand, Emission pathways

The purposes of this research are (1) to develop and to revise the models assessing the new technology diffusion toward the low carbon society in both Japan and the world, (2) to quantify the potential of GHGs (greenhouse gases) emission reduction and its economic impacts, and (3) to describe the society from the viewpoint of household consumption and material stock and flow in detail.

The global CGE (computable general equilibrium) model quantified the SSPs (Shared Socio-economic Pathways) as the five future reference societies in the world. The societies SSP1 to SSP5 are classified from the viewpoints of mitigative capacity and adaptive capacity. In order to represent the various aspects of society such as energy, technology, resource, land use and so on, the global CGE model has been revised. Based on the Global Enduse model, which is a technology selection model minimizing the total cost including initial cost and running cost, the necessary technologies are assessed to achieve the 450ppm scenario, and compared with the results of other integrated assessment models at the international comparison research platforms such as EMF (energy modeling forum).

In the analysis on climate policy in Japan, we also used the Enduse model and the CGE model. After the Great East Japan Earthquake and the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident, the future scenarios in Japan were drastically changed. The Enduse model assessed that the GHGs in 2030 could be reduced by 3% to 20% to the 1990 level even though all nuclear power plants would be shut down. As per our simulation results, the new mitigation target of Japan of 3.8% reduction compared to the 2005 level is located between low and middle mitigation levels. Moreover, the regionally disaggregated Enduse model has also been developed, and used to assess the possibilities of the GHG mitigation target in 2050 of 80% reduction to 1990 level from the viewpoint of differences among regions of renewable energy potentials and energy service demands. In addition, the CGE

model was revised to include the technology selection internally. According to the results of the revised CGE model, the introduction of advanced energy saving technologies could bring net benefit in 2020 to achieve the above new target.

The results of the Household Production model underscored the necessity of reducing energy service demand to achieve low carbon society in the world. According to the results of the Material Stock and Flow model, increase of the global steel demand in the future can be moderated by introducing various efficiency improvement measures including high performance products, but even in that case, the absolute steel demand itself will increase.