

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

1-2002 社会と消費行動の変化がわが国の脱炭素社会の実現に及ぼす影響

(JPMEERF20201002)

令和2年度～令和4年度

Impact of changes in socio-economic activity and consumption behavior on realization of decarbonized society in Japan

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

日本電信電話株式会社

埼玉県環境科学国際センター

みずほりサーチ&テクノロジーズ

京都大学

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和5年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 脱炭素社会達成及び社会課題解決に向けた個別課題分析	18
(国立研究開発法人国立環境研究所、日本電信電話株式会社、埼玉県環境科学国際センター)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 日本の脱炭素会シナリオの定量評価	33
(みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社、京都大学)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	49
IV. 英文Abstract	55

I. 成果の概要

課題名 1-2002 社会と消費行動の変化がわが国の脱炭素社会の実現に及ぼす影響
 課題代表者名 金森 有子 (国立研究開発法人国立環境研究所社会システム領域
 脱炭素対策評価研究室主任研究員)

重点課題 主：【重点課題②】ビジョン・理念の実現に向けた研究・技術開発

副：【重点課題⑦】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) (1-4) 地域循環共生圏・Society5.0 を踏まえた新たな長期
 シナリオによる脱炭素社会への道筋の研究

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

88,563千円 (合計額)

(各年度の内訳：令和2年度：31,325千円、令和3年度：27,958千円、令和4年度：27,280千円)

研究体制

(サブテーマ1) 脱炭素社会達成及び社会課題解決に向けた個別課題分析 (国立研究開発法人国立
 環境研究所、日本電信電話株式会社、埼玉県環境科学国際センター)

(サブテーマ2) 日本の脱炭素社会シナリオの定量評価 (みずほリサーチ&テクノロジーズ、京都
 大
 学)

研究協力機関

研究協力機関はない。

本研究のキーワード 脱炭素社会、消費行動、将来シナリオ、情報通信技術、地方特性

1. はじめに (研究背景等)

2015年に合意されたパリ協定では、全球気温上昇を工業化以前と比べて2℃に抑制する気候目標が合意された。そのために、今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡の達成 (脱炭素社会) が必要とされる。また、2018年に報告されたIPCC1.5℃特別報告書では、2050年に二酸化炭素の均衡が必要としている。わが国においてもこの達成に向け、2019年6月にはパリ協定に基づく成長戦略としての長期目標が閣議決定され、2050年に温室効果ガス排出量を80%削減、さらには今世紀後半のなるべく早い時期に脱炭素社会を実現する目標が長期低炭素発展戦略として気候変動枠組条約事務局に提出された。こうした温室効果ガス排出削減目標は2℃目標を意識した内容であったが、2020年10月に行われた所信表明で菅内閣総理大臣は、「2050年までに脱炭素社会を実現する」ことを明言し、2021年4月に米国・バイデン大統領が主催した気候サミットにおいて「2030年までに温室効果ガス排出量を2013年比46%削減する」ことを表明するなど、1.5℃目標を踏まえた目標への深掘りが示されている。

一方、わが国が直面する経済成長の鈍化や少子化・高齢化の進展、都市への人口集中等の社会変化により生じた様々な社会課題について、既存の社会生活基盤の維持だけでは更なる悪化が見込まれる。こうした課題によって前述の気候変動問題への関心は薄くなっているが、本来は社会課題の解決

と脱炭素社会の達成の両立を実現させることが必要である。第5期科学技術基本計画でIoTやAIを利用し消費者のニーズに対応した知識・情報が共有され、経済発展と社会課題の解決を両立する社会としてSociety5.0が提唱された。この社会が達成されると、社会システムや生活・消費行動が大きく変わり、上述の社会課題の解決が期待される。また、第5次環境基本計画では、環境、社会、経済の諸課題の統合的な解決に向け、地域資源を最大限活用し自立・分散型の社会を形成、地域の活力が最大限に発揮されることを目指す地域循環共生圏が提案された。さらに、2018年に報告された長期低炭素ビジョンにおいても、社会が抱える課題と脱炭素化に向けた課題の同時解決が強調されているが、これらの提案では定量的な姿や道筋は示されていない。IPCC第六次評価報告書では、消費行動や社会変化が脱炭素社会の実現に必要という背景のもとで章立てが構成されており、消費行動や社会の変化と脱炭素社会の構築の関係を明らかにすることは重要な課題である。

これまでも、我が国を対象とした温室効果ガス排出量の大幅削減に向けた課題は、環境研究総合推進費S-3「脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案手法の確立に関する総合研究プロジェクト」からはじまり、2-1702「パリ協定気候目標と持続可能開発目標の同時実現に向けた気候政策の統合分析」まで多く取り扱われてきたが、2050年の温室効果ガス排出量について実質ゼロを目指すとともに、日本の社会が抱える諸課題の解決も踏まえた分析は、本課題が初めてのものである。

2. 研究開発目的

2050年脱炭素社会の実現に向けた目標へと更新されているが、そのロードマップはいまだ明確ではなく、定量的な分析は喫緊の課題である。さらに、脱炭素社会の実現に向けた取り組みとともに、日本が抱える社会課題の解決については、叙事的なシナリオとしても十分ではない。こうした状況を踏まえ、本研究は、Society5.0や地域循環共生圏の提案を踏まえ、わが国が直面する社会課題の解決と、2050年までに脱炭素社会の実現を両立させるような社会及び生活・消費構造の変化を定量的に明らかにし、そうした変化を実現させる道筋を評価することを目的とする。

3. 研究目標

全体目標	<p>本研究では、わが国が直面する高齢化の進展に伴う多くの生活難民への対応や、地方の活力の喪失といった社会課題の解決に向け、ICTサービスの利用や都市・地域社会の構造の見直しにより生活・消費行動が変化する時に、脱炭素社会に及ぼす影響を定量的に評価することを目的としている。そこで、研究課題全体の達成目標を次の通り設定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・わが国の社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立する生活・消費行動について、情報通信技術の進展を踏まえた行動変容シナリオの構築。 ・家庭部門を対象に、その他部門とのセクターカップリングによる再生可能エネルギーの大量導入を前提とした脱炭素エネルギーシステムの実現に向けた技術シナリオの構築。 ・将来における消費者の行動変容と技術イノベーションを考慮した2050年の脱炭素社会の実現に向けた道筋の提示。 ・日本の社会経済シナリオと整合し、かつ地域（埼玉県）が抱える社会課題、地域資源を踏まえた脱炭素社会シナリオの作成。
サブテーマ1	脱炭素社会達成及び社会課題解決に向けた個別課題分析
サブテマリーダー/所属機関	金森有子/国立研究開発法人国立環境研究所
目標	社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立する生活・消費行動を提示する。特に社会課題の解決にむけて、社会及び消費者の行動に大きな影響を与えるICTサ

	ービスの進展を踏まえた分析を実施する。また、日本全国を対象とした将来シナリオや脱炭素社会実現に向けたロードマップと整合した地域社会の将来像を定量的に分析する。対象地域は全国5位の人口を抱えながら、今後高齢化が急速に進行する埼玉県とする。
サブテーマ2	日本の脱炭素社会シナリオの定量評価
サブテーマリーダー/所属機関	元木悠子/みずほリサーチ&テクノロジーズ
目標	サブテーマ1の分析結果をうけ、技術モデルを用いてわが国の社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立する社会経済シナリオを構築し、2050年に脱炭素社会の実現に向けた道筋を技術モデル、応用一般均衡モデルを用いた分析により明らかにする。

4. 研究開発内容

Society5.0や地域循環共生圏を踏まえてわが国が直面する社会課題の解決に向けた社会経済シナリオを作成し、社会及び生活・消費行動の変化を分析し、2050年の脱炭素社会の達成に及ぼす影響を定量的に評価する。本研究の全体像を図-4.1に示す。

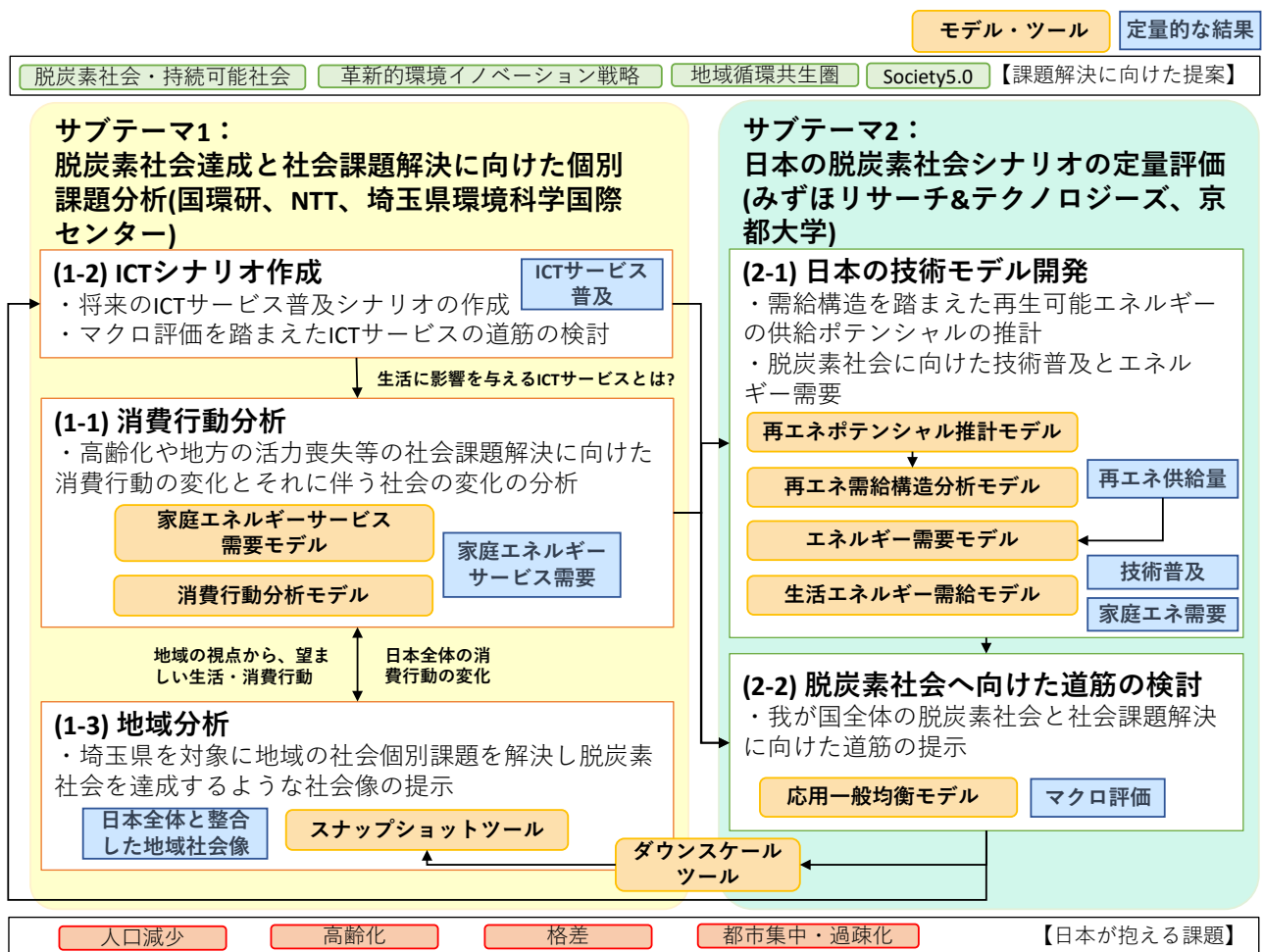


図-4.1 本研究の全体像

本研究では、2つのサブテーマを設定した。サブテーマ1では、高齢者や地方に係る社会課題の解決と脱炭素社会の実現を達成するために、「消費行動分析」「ICT（情報通信技術）シナリオの作成」「地域分析」の3つの研究課題を設定した。

サブテーマ2では、サブテーマ1-1と1-2で分析した結果を受けて、日本全国を対象とした社会経済シナリオを2つ程度作成し、シナリオ別にマクロフレーム（人口や経済活動指標）を踏まえた脱炭素社会達成に向けた道筋を定量的に明らかにする。

なお、当初の研究計画では、「日本における温室効果ガス排出量について、2030年には2013年比26%削減、2050年に80%削減、21世紀後半のできるだけ早い時期に脱炭素社会を目指す」ことを前提としていたが、背景に記載したように「2030年に2013年比46%削減、2050年に脱炭素社会を実現する」と排出削減目標の前倒しが本推進費実施中に公表された。こうした状況を受けて、各サブテーマともに、当初予定していた対策について更に深掘りするための取り組みについて初年度から検討した。

【サブテーマ1】脱炭素社会達成及び社会課題解決に向けた個別課題分析

(1) 消費行動分析

1) ライフスタイルシナリオの作成

消費行動分析では、社会課題に対応しかつ脱炭素社会を実現する消費行動を明らかにする。具体的には、消費支出や時間の配分やエネルギーサービス需要の変化について定量的なシナリオを提示する。そこで、まずシナリオの定量化のための準備作業として、脱炭素社会シナリオにおける生活・消費行動の基礎となる2050年のライフスタイルの叙述シナリオを作成した。作成は以下の4ステップからなる。

Step1：全国の市町村別人口推計結果をもとに、自治体別の人口変化、人口密度の変化を整理した。都市部では人口が比較的維持され、公共交通が維持できる可能性が高いが、それ以外では、高齢化、公共交通の衰退の問題に直面することが示唆された。

Step2：高齢化や過疎化に起因する生活上の問題には、各種生活サービスにアクセスできるかという点が大きく影響する。これまでは、人口規模と分布がまちづくりに大きく影響し、生活サービスの立地や地域の交通を決定してきた。現在の人口分布が生活サービスへのアクセスに関する新しいインフラや技術導入のスピードに影響するものと考え、日本を三大都市圏に含まれるか、人口が維持できているかどうか、の2つの軸を用いて4つの地域に分類【都市・維持/都市・減少/都市外・維持/都市外・減少】した。それぞれの地域で直面する社会課題を検討したところ、【都市・減少】【都市外・維持】では、人口の減少に伴い、生活サービスが撤退することにより地域の非効率化に起因する課題があげられた。また、【都市外・減少】では、さらに状況が悪化し、地域において生活サービスが存在しない状況による課題が挙げられた。いずれの状態でも、生活サービスへのアクセスが非常に大きな問題となることが明らかになった。特に高齢者や未就学児や低年齢の就学児の生活や通学等のための移動は課題となる。

Step3：Step2で明らかにした課題を克服するための技術やインフラ整備、制度を整理した。多くの生活サービスはオンラインサービスとすることや、各種生活サービスを集約させた拠点の利用とそれに合わせた自動運転の公共交通の整備等が考えられた。

Step4：Step3で明らかになった問題点を克服するためのアイデア間の不整合や、社会課題を解決するアイデアが他の問題を引き起こす可能性について検討した。さらに、脱炭素社会の構築に向けて、求められるライフスタイルの変化についても検討した。

2) 家庭部門エネルギーサービス需要推計

2050年までの家庭部門のエネルギーサービス需要推計を実施した。はじめに、1970年から2019年までの世帯当たりエネルギー消費量及び機器のエネルギー効率情報を用いて、エネルギーサービス量を推計し、推計されたエネルギーサービス量と気候、社会変数との関係を明らかにした。分析では、6種類（暖房、冷房、給湯、厨房、照明、その他動力）のエネルギーサービス種を設定した。ここで得られた関係式に、将来の気候、地域、社会変数の想定値を用いて、2050年までの家庭部門のエネルギーサービス需要を推計した。さらに、機器情報を想定し、2050年までのCO₂排出量を推計し、脱炭素社会実現に向けて鍵となる変化について明らかにした。分析ケースは2種類設定し、Case1は、エネルギーサービス

需要、機器情報等の設定通り分析したもので、Case2は、Case1に対して10%のさらなるサービス需要削減策が行われる場合である。

(2) ICTシナリオ作成

社会課題の解決と脱炭素社会の達成に向け、ICTの貢献が不可欠である。サブテーマ1-2では、ICTサービス／技術の将来普及について叙述的なシナリオを作成した上で、作成したシナリオをもとに、それらのICTサービス／技術が社会経済・環境側面及び人々の生活行動に及ぼす影響について、応用一般均衡モデルを用いて定量評価を行った。

1) 叙述シナリオの作成

市場調査レポートや予測情報等を参考に、各分野の生産性向上・効率化、生活のオンライン化による環境負荷の削減に着目し、次の4点を軸に2050年に向けての叙述シナリオを作成した。シナリオのもと、農業、製造、社会インフラ、生活といった十数の分野において将来普及が見込まれるICTサービス／技術を対象とした。

- ① 各生産・製造分野における自動化技術の発展を通じた労働の代替、生産性の大幅な向上
- ② AI/ビッグデータ分析技術による社会全体の最適化の実現
- ③ 運輸分野の技術発展による移動の効率化
- ④ オンライン化の進展による利便性の向上およびライフスタイルの変化

2) ICT普及の効果の定量化

(a) 個人向けICTサービスの普及状況推計

サブテーマ1-1消費行動分析に影響があると想定される個人向けICTサービスのみ対象に、過去の普及率や利用頻度などのデータを用いて、2050年までの各対象ICTサービスの普及状況を推計した。ここで、消費行動を表現するためには、人口あたりの利用者の割合のみならず、利用頻度や利用金額も考慮する必要があることから、これらを総括した指標として市場規模を推計した。2050年までの市場規模は、過去の市場規模の時系列データを技術普及曲線に当てはめて外挿することで求めた。技術普及曲線にはロジスティック曲線を用いた。

(b) ICTの普及による直接的な効果の推計方法

前述の叙述ICTシナリオに基づいて、各分野におけるICT導入の直接的な効果を推計した。例えば、農業分野では、自動運転トラクターや自動収穫ロボットなどの自動化技術、植物工場などの技術を取り上げた。金融分野では、キャッシュレス決済サービスをメインに取り上げている。キャッシュレス決済サービスの全面導入により、貨幣の削減、ATMなどの設備投資の削減、また銀行及び流通における現金の管理にかかる事務稼働の削減などの効果が期待される。それぞれの期待効果については、現時点における金額ベースで費用削減効果を関連情報に基づいて推計を行った。社会インフラ分野では、インフラモニタリング・予測・制御技術を取り上げている。それによるインフラサービスの設備の長寿命化効果として、例えば、水道設備の場合は、耐用年数で更新する場合と適切な時期に保全を行った際にかかる工事費用を調査し、工事費用の削減率を、インフラ業における土木・建設業の投入の削減率として効果を推計した。さらに、運輸分野では、自動運転の効果として、渋滞解消を通じた走行速度の改善と移動時間を用いたゲームや読書等の活動の増加を定量的に算定した。速度については、最も渋滞が深刻とされる東京都における、混雑時の速度と昼間(非混雑時)の速度の統計データを用いて、これらの速度の比率を自動運転による速度の改善率とした。時間の有効活用に関しては、一人一日あたりの運転時間とネット利用時間の統計データを調査し、運転時間の分だけネット利用時間が増加するとした。また、テレワークの導入による移動削減効果を日本全体の移動距離の削減率として算定した。日本全体のテレワークの利用見込み人数および一人当たりの通勤距離と旅客輸送総距離の比率を削減率とし、一般企業の出社削減率がオフィススペースの削減率にあたるものとして効果を算定した。

(c) GHGおよびGDPへの影響評価モデル

ICT導入による個別の直接的な効果をもとに、応用一般均衡モデル(CGEモデル)を用いて日本経済全体(GDP)及びGHG排出量の2050年までの影響を評価した。推計で用いた応用一般均衡モデルの構造を図

-1.2に示す。

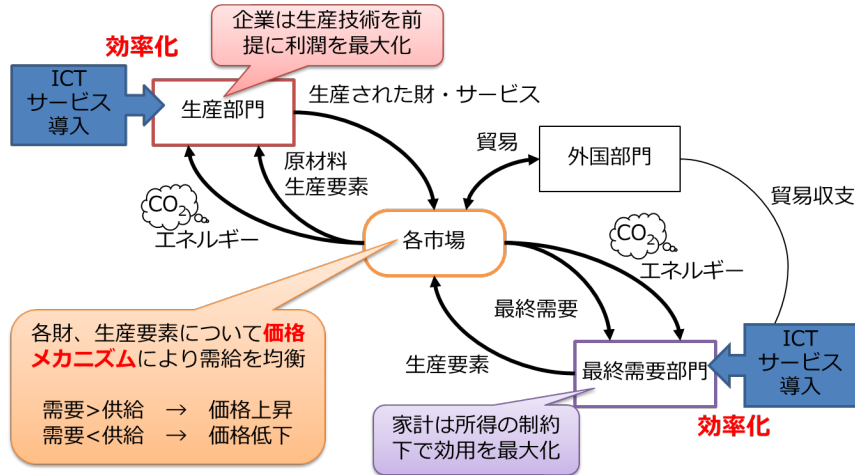


図-1.1 応用一般均衡モデルの構造

(3) 地域分析

地域分析では、社会経済データを駆使したシミュレーション分析を通じて、埼玉県が今世紀半ばまでに直面する社会課題の整理を行った。はじめに、国立環境研究所が公開している社会経済・気候データセットを用いて、2050年度時点の埼玉県の姿を描く3つのシナリオ（STM-SSPs）を作成した（表-1.2）。次に、埼玉県環境科学国際センターが開発した地域マクロ計量モデルにSTM-SSPsを入力することで、埼玉県の経済成長率を2050年度まで推計し、少子高齢化に伴う働き手の減少と労働生産性の伸び悩みが地域経済に与える影響を評価した。さらに、新たに開発した部門別エネルギー需要モデルを地域マクロ計量モデルと組み合わせて、エネルギー起源CO₂排出量の経年変動をシナリオ別に推計した。推計結果から埼玉県が自力で削減しなければならないCO₂排出量を算定し、カーボンニュートラルの達成に向けた取組の方向性を検討した。

1) 埼玉県2050年度シナリオ（STM-SSPs）

埼玉県が直面する社会課題を浮き彫りにするため、2050年度時点の社会像をSTM-SSP1、STM-SSP2、STM-SSP5という3つのシナリオで表現した。これらのシナリオは、国立環境研究所が開発した日本共有社会経済経路（日本SSP）をベースとしており、日本SSPのストーリーラインと整合するような人口、労働生産性、気温、電力排出係数の将来見通しを組み合わせで作成した（表-1.2）。

表-1.2 埼玉県2050年度シナリオ（STM-SSPs）の概要

シナリオ	人口	労働生産性	気温	電力排出係数
STM-SSP1	日本SSP1：比較的高い出生率、コンパクト+ネットワーク	緩やかに上昇：全業種で調整係数（図1を参照、2018年度＝1.0）が1.3まで上昇	SSP1-2.6（MIROC6）	電源の脱炭素化：令和3年版地球温暖化対策計画の2030年度目標を達成し、2050年度にはゼロ
STM-SSP2	日本SSP2：現状趨勢	伸び悩み：全業種で調整係数が1.1まで上昇	SSP2-4.5（MIROC6）	現状趨勢：2030年度目標は達成するが、それ以降は固定
STM-SSP5	日本SSP5：国外からの移民の流入、大都市圏に人口集中	顕著に上昇：全業種で調整係数が1.5まで上昇	SSP5-8.5（MIROC6）	火力発電に依存：現在（2018年度）の水準で固定
参考文献	日本版SSP別人口シナリオ第2版（国立環境研究所，2021）	過去のトレンドを踏まえて独自に設定	CMIP6をベースにしたCDFM手法による日本域バイアス補正気候シナリオデータ	現行の計画を踏まえて独自に設定

			Ver. 1.1 (石崎, 2021)	
--	--	--	---------------------	--

2) 地域マクロ計量モデル

経済成長に関連する社会課題を明らかにするため、地域マクロ計量モデルにSTM-SSPsの人口シナリオを入力し、埼玉県のエconomic成長率を2050年度まで推計した。地域マクロ計量モデルは、実質生産額の変動を県内就業者数と労働生産性の変動によって説明される。モデルのパラメータは業種別に推定される。モデルの中核を担う生産関数には、応答変数が実質生産額（対数）、説明変数が都道府県ダミー、年度ダミー、高齢化率、及び総労働時間数、オフセット項が県内就業者数（対数）であるようなガウシアン線形回帰モデルを仮定した。

3) 部門別エネルギー需要モデル

気候変動緩和策に関連する課題を明らかにするため、部門別エネルギー需要モデルを新たに開発し、STM-SSPsのもとで2050年度までの将来推計を実施した。エネルギーは電力と燃料の2種類であり、燃料は熱供給を含んでいる。産業・業務その他部門については、応答変数がエネルギー需要（対数）、説明変数が都道府県ダミー、年度ダミー、電力・都市ガス価格、及び冷暖房度日、オフセット項が実質生産額（対数）であるようなガウシアン線形回帰モデルを仮定し、前述の生産関数と同様にエラスティック・ネットのパラメータ推定を行った。家庭部門についても同様の構造をもつ統計モデルを仮定した。一方、運輸部門については、年齢別人口から自動車保有台数と鉄道輸送需要を推計したのち、エネルギー効率（単位活動量あたりエネルギー需要）を乗じてエネルギー需要に換算する方法を採用した。

4) 2050年までのCO₂排出量削減策の検討

地域統合評価モデルAIM/ExSSを用いた地域の脱炭素社会実現の定量的分析及び地域の特性を踏まえた脱炭素対策に関する検討を実施した。定量的な分析では、2050年までの業種別生産額の推計結果に基づき、埼玉県の将来CO₂排出量推計のためのマクロフレームを策定し、日本全体の脱炭素社会シナリオを参考にしながら、埼玉県に必要となる対策種やその導入強度を設定した。また、県内の市町村を対象とした地球温暖化対策についてヒアリングを実施し、埼玉県の脱炭素社会実現に向けた取組や障壁を整理した。

【サブテーマ2】日本の脱炭素社会シナリオの定量評価

サブテーマ2では、脱炭素社会の実現に向けた検討を可能にするように各種モデルの開発及びその実行のためのデータ収集・加工作業を行った。そして、サブテーマ1の分析結果をうけて、各種モデルを用いてわが国の社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立する社会経済シナリオを構築し、2050年までに脱炭素社会の実現に向けた道筋を分析によって明らかにした。技術モデルと応用一般均衡モデルモデルはそれぞれの自立的な分析を行うとともに、複数モデルを組み合わせることでエネルギー需給両面を踏まえた脱炭素社会実現に向けたロードマップを明らかにした。

技術モデルとして、AIM/エンドユースモデルを活用して、2050年における温室効果ガス排出量のネットゼロに至る経路について推計を行った。AIM/エンドユースモデルは個別のエネルギー機器の積み上げによって全体のエネルギー需給構造を定量的に表現しており、将来の各年における機器選択が全体のエネルギー消費量及びCO₂排出量を決定するモデルである。AIM/エンドユースモデルは後述するように複数モデルを組み合わせた分析に用いるが、それと並行して本モデル単独で、排出経路とエネルギー機器の座礁資産との関係に関する分析も行った。この分析には、地域別のエネルギー需給モデルと代表的な時期における24時間電源モデルを内包するモデル（AIM/Technology）を用いた。この分析では急速な温室効果ガス排出削減に伴う座礁資産（耐用年数前に停止・除却が必要となる設備の量）を定量化することを目的とし、設備の年間稼働率がゼロとなる場合を座礁資産の定義とした。排出削減の速度について複数のパターンを想定し、それぞれについて、設備の年間稼働率の推移を推計することで、座礁資産

の発生の可能性を分析した。

続いて、技術モデルの一つとして、電力の需給バランスを確保しつつ、再生可能エネルギー、特に太陽光発電や風力発電などの変動性再生可能エネルギー（Variable Renewable Energy、VRE）の導入量を拡大したエネルギーシステムの実現可能性を分析するために、本研究ではAIM/多地域電源計画モデル（Multi-regional Optimal Generation Planning Model、AIM/MOGPM）を用いた。AIM/MOGPMは、1時間ごとの電力需要とVREの出力パターンを入力として、年間のCO₂排出量上限や発電設備の出力変動量の上下限などの制約条件のもとで、解析対象年次ごとの総費用を最小とする最適化計算により、発電種別ごとの毎時発電量（電源運用）や設備容量の追加分を求めることができる線形計画モデルである。モデルでは、日本全国を一般送配電事業者の供給区域ごとに10地域に分割し、それぞれに電力需要や既設設備の発電設備容量を設定した。地域間には、実際の送電ネットワークを参考とした連系線を設定しており、地域をまたがった電力融通についても考慮することを可能としている。電力需要の毎時パターンは、基準年（2015年）については各電力会社の電力使用実績データに基づき設定し、将来については、基準年の需要パターンに年間需要の増減率を乗じて設定した。発電設備は、電力需要ノード近傍に立地すると想定し、発電設備別の設備容量は、基準年は地域別の実績値を用いるが、将来については最適化計算の結果に基づいて設定される。

電源計画モデルの分析には再生可能エネルギーのポテンシャル量に関する情報が必要であるため、そのポテンシャル量について推計・収集した。主に環境省におけるポテンシャル調査のデータを引用したが、風力発電については独自にメッシュ別ポテンシャル量を推計した。モデルを開発したモデルは、風速の毎時データと風車の性能情報から風力発電の理論的ポテンシャルを算定する。結果は5kmメッシュで1年間の毎時で算出され、日本の発電地域（power utility regions）の10地域別とグレード別で合計される。

また、一家庭における対策技術の導入に伴う投資効果を把握するために、一家庭における家電等のエネルギー消費に加え、太陽光パネルによる発電や定置蓄電池・ヒートポンプ給湯器による蓄エネを考慮した生活エネルギー需給モデルを開発した。2050年に一家庭で脱炭素化を達成する際の排出削減量、エネルギー消費量、脱炭素投資額および省エネ・創エネによるコストメリットを推計し、脱炭素生活像を定量的に提示した。対策技術にはエアコン、ヒートポンプ給湯器、IHコンロ、LED、高性能断熱材、太陽光パネル5kW、定置蓄電池10kWhを想定した。一家庭における1日における時間単位での機器利用を想定し、時間単位でのエネルギー需給バランスを確保した推計を行った。（Ⅰ）新築の戸建て住宅を想定するシナリオ（標準対策シナリオ）、（Ⅱ-i）（Ⅰ）の想定を既築改修のものに変更したシナリオ（既築改修シナリオ）、（Ⅱ-ii）（Ⅰ）の燃料費の想定を変更したシナリオ（燃料高騰シナリオ）、以上3つのシナリオを用意し、それぞれについて従来型技術を導入するケースと脱炭素技術を導入するケースでそれぞれエネルギー消費量やコストの推計を行い、その差分を取ることで家庭部門の脱炭素化に伴うエネルギー削減効果や追加投資額を推計した。

応用一般均衡モデルについては、日本を対象とした温室効果ガス排出量の削減に向けた取り組みの経済活動への影響を評価するために開発された応用一般均衡（CGE）モデル（AIM/CGE [Japan]）を用いた。2050年までに日本の温室効果ガス排出量を実質ゼロにする取り組みの評価をするために、技術カテゴリーの拡張、新たなエネルギー生産部門の創設、カーボンリサイクルを考慮したシナリオの更新、部門の拡張などの改良を行った。分析にあたり、次の3つのシナリオを用意した。①2030年にNDC（2013年比46%削減）を達成し、それ以降も同様の省エネ技術等を前提とするシナリオ（「NDC継続」シナリオ）、②2030年までは「NDC継続」シナリオと同じであるが、それ以降は2050年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロにするように対策を強化するシナリオ（「脱炭素」シナリオ）、③脱炭素社会の実現に向けた技術メニューは同じであるが、脱炭素技術の導入に際して長期を踏まえた意思決定が可能となるように、投資回収年数を3年から産業部門は20年、家計部門は10年に変更したシナリオ（「脱炭素2」シナリオ）。

以上のように各モデルの改良及びそれを用いた分析を行うとともに、複数のモデルを組み合わせ2050年における温室効果ガス排出量のネットゼロに至る経路について推計を行った。まず、その前段階

の予備的検討として、2050年を対象としたエネルギー需給構造の整合性を確保したスナップショット型のモデルの開発を行い、2050年において温室効果ガス排出量の大幅削減を実現するための日本のエネルギー需給構造および温室効果ガス排出構造について推計を行った。脱炭素社会の実現には大幅なエネルギーシステムのトランジションが必要となるため、その勘所を掴むことが主目的であった。排出量推計にあたり、対策の方向性や導入水準に応じて、①少ないエネルギー・マテリアルでも高い便益・効用が得られる社会への変容する「社会変容シナリオ」、②電化が難しい領域においても徹底した電化を推進する「電化シナリオ」、③水素、合成燃料など新燃料を電化が難しい領域に積極的に活用していく「新燃料シナリオ」、④あらゆる対策を総動員して脱炭素社会を実現する「ネットゼロ排出シナリオ」、以上4つのシナリオを想定した。

予備的な検討を終えた後にAIM/CGE、AIM/エンドユースモデル、AIM/MOGPMを組み合わせ、2050年における温室効果ガス排出量のネットゼロに至る経路について推計を行った。ここで用いたAIM/エンドユースモデルは、地域区分を有しない全国モデルであり、また、電力については年単位での需給整合のみを確保するver1.0を用いた。AIMエンドユースを用いて、産業部門、業務部門、家庭部門、運輸部門について、エネルギー技術の積み上げによって、エネルギー需要量の推計を行い、そのエネルギー需要量を満たすために必要なエネルギー供給量およびその構成について推計した。発電電力量については、電源モデルとの連携を図り、時間単位での需給と年単位での需給が整合するようにした。分析に考慮した対策技術は、前述のスナップショットと同様である。分析において、次の3つのシナリオを想定した。①エネルギー効率改善、再生可能エネルギー技術は計画通りに普及が進む一方で、革新的脱炭素技術については、その展開が十分に進まないことを前提とする脱炭素技術進展シナリオ（技術進展シナリオ、BAT）、② ①に加えて、2030年以降に加速度的に大規模展開されることが期待される革新的な脱炭素技術の展開が十分に進展し、2050年GHG排出ネットゼロを実現する革新的技術普及シナリオ（革新技術シナリオ、INT）、③ ②に加えて、デジタル化・循環経済の進展などの社会変容に伴って、人々の効用等を維持または向上させつつ財や輸送の需要が低減することを織り込み、2050年GHG排出ネットゼロを実現する社会変容シナリオ（社会変容シナリオ、STR）。これらのシナリオごとに将来のエネルギー消費量及びGHG排出量の推計を行った。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

【サブテーマ1】

(1) 消費行動分析

1) ライフスタイルシナリオ

今後日本が直面する様々な社会問題を、ICT等の技術の進展や住まい方の工夫により克服した姿を脱炭素社会のライフスタイルシナリオとして記述した。その概要は、高齢化や過疎化の進展等の社会問題への対応と生活の利便性の向上の観点から、ICTやIoTがさらに普及し、生活の様々なシーンで利用されるものである。一方、移動や家事に伴う運動が減少することによる健康への悪影響が懸念されるため、ウォーキング等の体力維持の趣味を持つ等の工夫についても言及したものである。

2) 家庭部門エネルギーサービス需要推計

技術の変化及び、社会経済変数の変化を用いて、将来のエネルギーサービス需要量を推計した。冷房は冷房度日の増加の影響を受け、需要量が大きく増加するものと推計された。一方、その他の用途はいずれも需要が減少するものと推計された。特に暖房は、冬季の温度上昇により暖房度日が全国的に減っている傾向が反映され、需要が大きく下がると推計された。

エネルギーサービス需要の推計結果を用いて将来のCO₂排出量を推計した結果を表-1.3に示す。2020年の統計値とCase1の結果の比較から、社会経済変数を用いた推計と現実の排出量の間には8%程度の乖離があることが明らかになった。この乖離を補正したCase1'を設定し、これに対して追加の需要削減策を検討した結果をCase2として算出した。Case1'の結果から、2030年のCO₂排出量の削減率は56%となり、

2030年の排出削減目標である66%減には達していないことがわかる。さらに10%の需要低減効果を含むCase2の場合、CO₂排出量の削減率は65%となり、ほぼ削減目標を達成できたと言える基準となった。

表-1.4の2050年CO₂排出量の結果から、CO₂排出量の削減に最も影響を与えたのは分担率の変更、すなわち電化の進展であることがわかる。2050年に向けて電気の排出係数が大幅に下がる想定としたため、電化を確実に進めることが、CO₂排出量の大幅削減に強く影響したことがわかった。2030年については、電気の排出係数が現在の半分程度になる想定ではあるが、まだ十分に低い値ではないことから、機器の高効率化がCO₂排出量の削減に影響することがわかる。

表-1.3 CO₂排出量の推計結果

統計値	Case1 排出量	Case1'				Case2		
		排出量	排出量の 2013年比	削減率	削減率	排出量	排出量の 2013年比	削減率
2013	208							
2020	167	181	167	80%	20%	167	80%	20%
2025		141	130	63%	37%	117	56%	44%
2030		100	92	44%	56%	73	35%	65%
2035		75	69	33%	67%	55	27%	73%
2040		52	47	23%	77%	38	18%	82%
2045		30	28	13%	87%	22	11%	89%
2050		11	10	5%	95%	8	4%	96%

※ 排出量の単位は、百万トンCO₂

表-1.4 主要な変化を2015年で固定した場合のCO₂排出量

単位: 100万tCO ₂	Case1	分担率 2015固定	機器効率 2015固定	エネルギー サービス 2015固定
2020	181	188 (104%)	190 (105%)	174 (96%)
2025	141	156 (110%)	157 (111%)	139 (98%)
2030	100	124 (124%)	117 (118%)	103 (103%)
2035	75	103 (138%)	90 (121%)	81 (108%)
2040	52	84 (162%)	64 (124%)	59 (114%)
2045	30	66 (218%)	39 (127%)	37 (121%)
2050	11	50 (473%)	14 (130%)	15 (138%)

※()内の数字は、Case1との比較を表す。

(2) ICTシナリオ作成

1) 個人向けICTサービスの普及状況推計

個人向けICTサービスについて、2020年から2050年までの市場規模を推計した。サービスによって拡大の幅があり、1.3倍（オンラインショッピング）～10倍程度（乗り物のシェアリング）に拡大する結果となった。フリマアプリや乗り物のシェアリングは利用者数、利用頻度・金額ともに今後拡大すると推計された。

2) ICTの普及による直接的な効果の推計

評価した具体的なICTサービス/技術と直接的な効果の一部を表-1.6に示す。農業分野では、自動収穫ロボットについて、収穫作業が農耕作業の中で約50%程度を示すため、全自動化することによって、農業部門への労働力投入が50%削減可能となる。金融分野では、今後キャッシュレス決済がほぼ100%達成する前提にけると、貨幣管理の稼働やATMなどの設備投資が大幅に削減できる。運輸分野では自動運転によって渋滞が解消され、速度が15%改善されることが見込まれる。生活分野においてはテレワークの普及により移動距離が減少し、家計から運輸部門への投入が19%減少、オフィススペースは、昨今の出社割合の目標が今後も継続することを前提として70%減少すると推計された。

表-1.6 調査対象としたICTサービス/技術と効果の例

分野	ICTサービス/技術	主な効果例	直接的な効果推計
農業	植物工場	生産の安定化	野菜生産部門への生産原材料投入が16%減
		労働代替	野菜生産部門への労働力投入が50%減
	自動収穫ロボット	労働代替	農業部門への労働力投入が50%減
製造	AI・IoT、産業用ロボット	生産性向上	製造部門への労働力投入が50%減
金融	キャッシュレス決済	設備投資削減	銀行部門への設備投資が5%減
		稼働削減	金融部門への労働力投入が15%減 小売部門への労働力投入が5%減
社会 インフラ	インフラモニタリング	設備の長寿命化	資源投入・工事費が57%減
		点検の稼働の削減	インフラ部門への労働力投入が25%減
運輸	自動運転	移動の効率化	渋滞解消による速度改善率15%
		移動時間の有効活用	家計からサービス業への需要2倍

ライフ	テレワーク	移動の削減	家計から運輸部門への需要19%減
		オフィス空間の削減	オフィス空間が70%減

3) GHGおよびGDPへの影響評価結果

応用一般均衡モデルによる評価結果から、ICTの更なる導入によりICTが現状維持の場合と比較して、2050年に約6%のGHG排出削減効果が得られると分かった（図-1.5）。特に、デジタルトランスフォーメーションやオンラインサービスの普及により、物流・輸送の効率化、人やものの移動削減によるGHG排出削減の効果が最も顕著である。今後は、輸送部門への効率化や需要削減につながるICTサービスの普及加速が脱炭素社会の実現に向けて非常に重要な役割を果たすことが示唆された。

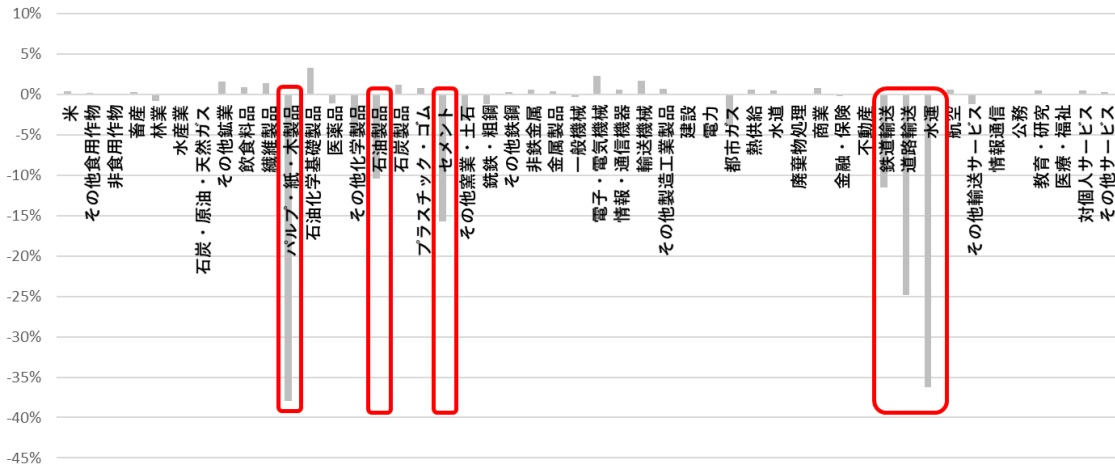
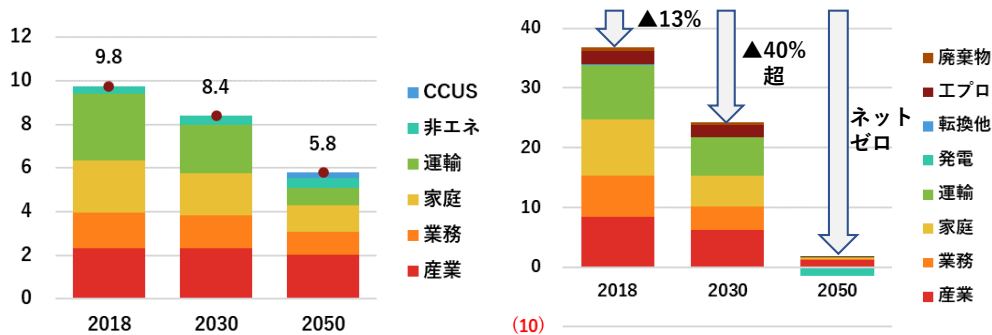


図-1.5 2050年におけるICT導入による部門別GHG排出量の変化（ICT現状維持と比較した場合）

(3) 埼玉県における2050年までのCO₂排出量削減策の検討

埼玉県で2050年に脱炭素社会を達成する場合の推計結果を図-1.7(a)及び図-1.7(c)として示す。最終エネルギー消費量は2050年に41%低減することとなった。エネルギー種構成はサブテーマ2の成果を踏まえ、電力比率が増加し、化石燃料消費を大幅削減させ、合成燃料の利用拡大を図ることで達成する。特に、埼玉県の産業構造を踏まえると、発電、セメント生産、廃棄物焼却由来のCO₂回収及びその利用・処分が必要になることがわかった。



(a) 部門別最終エネルギー消費量

(c) 部門別CO₂排出量

図-1.7 2050年における埼玉県のCO₂排出量削減策検討結果

【サブテーマ2】日本の脱炭素会シナリオの定量評価

AIM/エンドユースモデル（AIM/Technology）の分析から炭素回収貯留（CCS）を伴わない石炭火力発電は座礁資産となることが示された。特に2030年から50年にかけて急速な温室効果ガス排出削減を行った場合にはその量が大きくなる。エネルギー供給部門に加えて民生（家庭・業務）での座礁資産化が大

きいことも示された。これは家庭・業務部門においてガス・石油を使用する空調・給湯設備についても耐用年数前に停止・除却され、電気ヒートポンプ機器等の機器に代替する必要があるためである。

ただし、炭素への価格付けに加えて、エアコンや電気ヒートポンプ給湯機への補助金といったエネルギー技術政策を補完的に用いることで、家庭・業務部門で耐用年数前に除却が必要となる設備の量を、最大で約3分の1削減できることが明らかとなった（図-2.4(b)）。

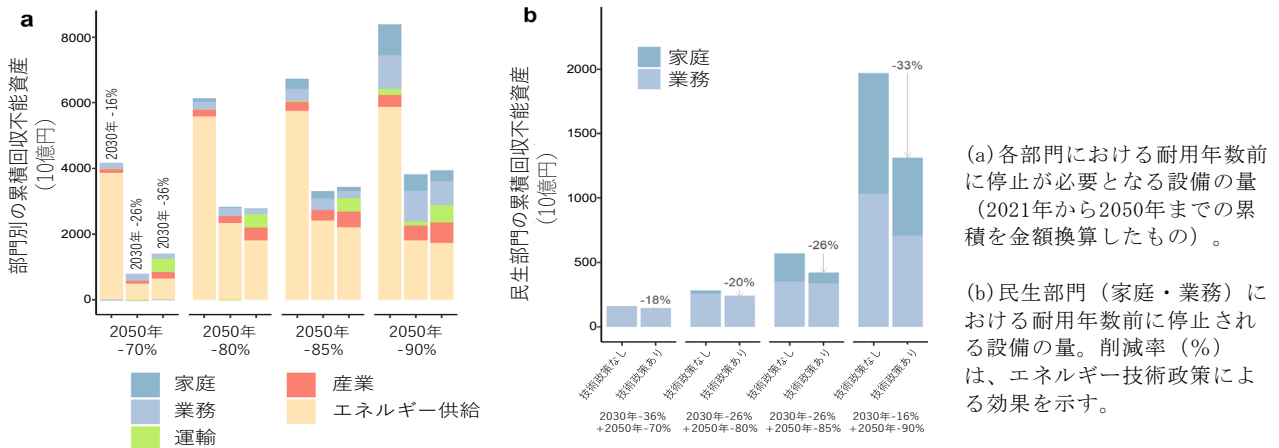
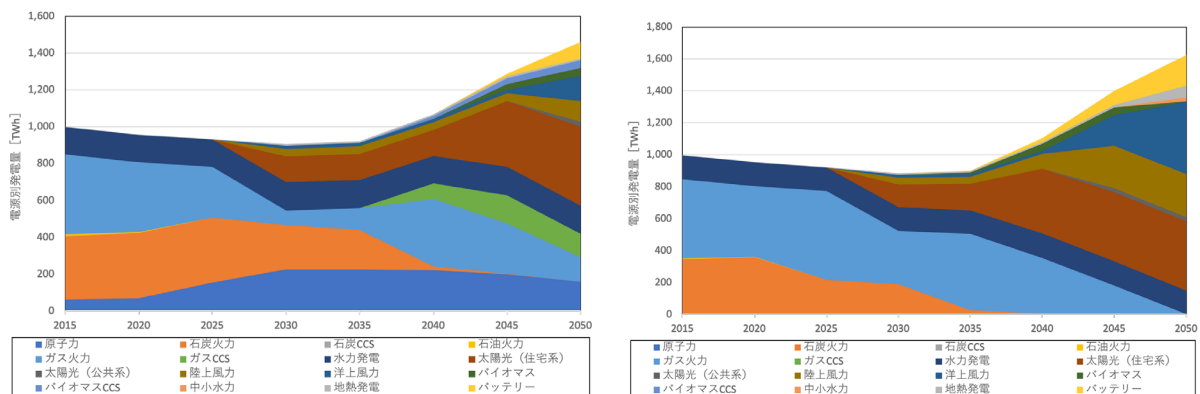


図-2.4 技術選択モデルによる結果

電源計画モデル (AIM/MOGPM) による分析において、CO₂制約あり・再エネ7割ケース (図-2.7a) では2035年以降は石炭火力発電が急激に縮小し、代わってCCS付きガス火力発電と再生可能エネルギー発電、特に太陽光発電と風力発電が大きく増加することが示された。また、風力発電の中でも陸上風力が優先的に導入され、洋上風力は2050年近くになってから導入が拡大する。CO₂制約あり・再エネ10割ケース (図-2.7b) では再エネ7割ケースよりも早期に再生可能エネルギーの導入が進み、また、再生可能エネルギー導入量の増加とともに時間的な需給バランスの確保のために蓄電池の導入量が大きく拡大する。この結果から、電力部門において再生可能エネルギーのみで2050年CO₂ゼロを達成するには、2030年を待たずに、可能な限り早い段階から再生可能エネルギーと蓄電池導入の推進を行う必要があることが示唆されるものである。

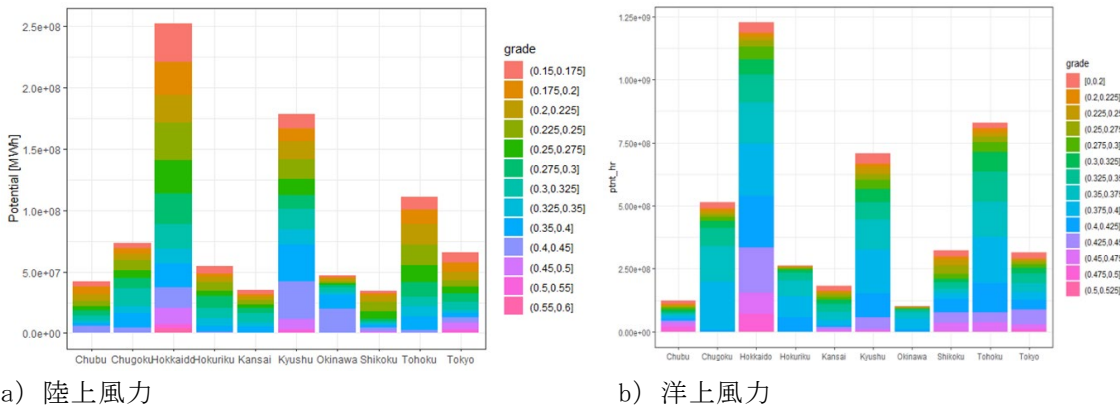


a) 再エネ7割ケース

b) 再エネ10割ケース

図-2.7 電源計画モデルによる結果

風力発電のポテンシャル分析からは、陸上風力 (2.2PWh/年)、洋上風力 (4.6PWh/年) とともに現状の日本の発電電力量を上回るポテンシャルを有し、それらは北海道、東北、九州に集中していること、また、陸上風力よりも洋上風力の方が年間設備利用率を高い水準で維持できる質の高い資源の割合が大きいことが示された。



a) 陸上風力 b) 洋上風力
 図-2.8 日本10地域グレード別年間理論的エネルギーポテンシャル

世帯に着目した分析では、太陽光パネルは投資効果が削減面だけでなく、経済面でも大きく、その他の経済面で有効性が劣る対策を補い、家庭全体として経済面でもプラスの効果を実現しつつ、家庭の脱炭素の実現を可能にすることが示された。

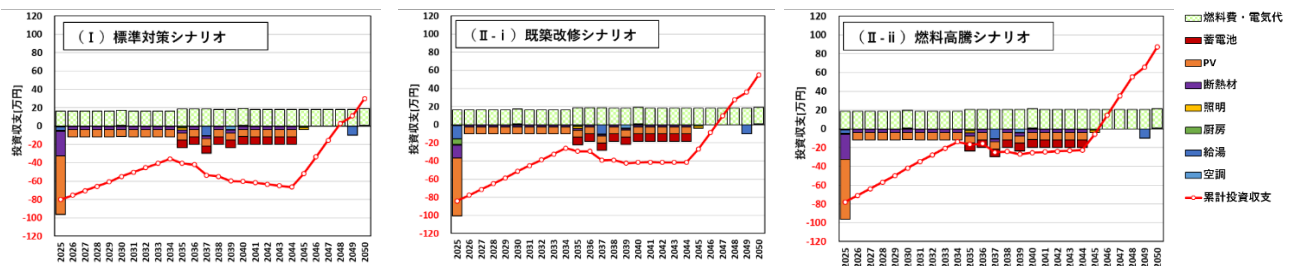
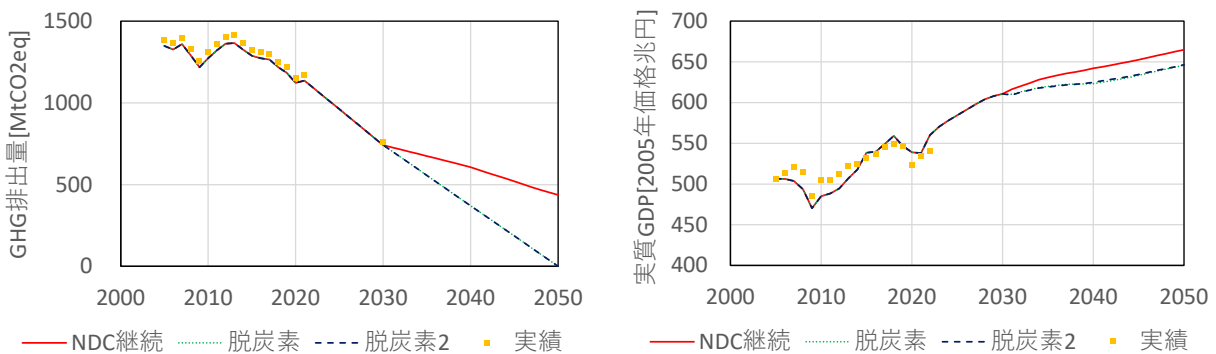


図-2.11 一家庭における各年の脱炭素投資と得られるコストメリット

応用一般均衡モデルの分析では、NDCの延長シナリオと比べて脱炭素社会に実現に向けて革新的な技術を加速度に導入させていくことで、その増加する投資に伴いGDPが低下することが示されたが、その程度はGDP増加率が0.43%から0.28%へと0.15ポイントの低下であり、成長は維持されることが分かった。



a) GHG排出量 b) 実質GDP
 図-2.12 応用一般均衡モデルによるGHG排出量・実質GDPの推移

複数のモデルを組み合わせ、2050年までに脱炭素社会の実現に向けた道筋を算定した。脱炭素社会の実現のためには、省エネ、電化、エネルギーの低炭素化が必要であり、2050年最終エネルギー消費量は2018年比半減程度、電化率は2018年3割から2050年5割に、2050年の発電構成は再生可能エネルギー、原子力、対策付火力発電（CCUS、アンモニア）の組み合わせによる脱炭素電源が100%となることが示された。また、脱炭素社会の実現は化石燃料の大幅な低減を通じて、エネルギー自給率の大幅な向上（11%（2018年）から66%（2050年））、エネルギー輸入額の大幅な低減（19兆円（2018年）から6兆円

(2050年)) となることが示された。分析では、デジタル化の進展や循環型社会の形成などに伴う社会変容がもたらす影響について推計したが、脱炭素社会の構築のための総投資額の低減や社会実装の制約・不確実性が高い革新的な技術に対する依存の低減に繋がるのが分かり、社会変容が脱炭素社会の実現性を高めることが示された。

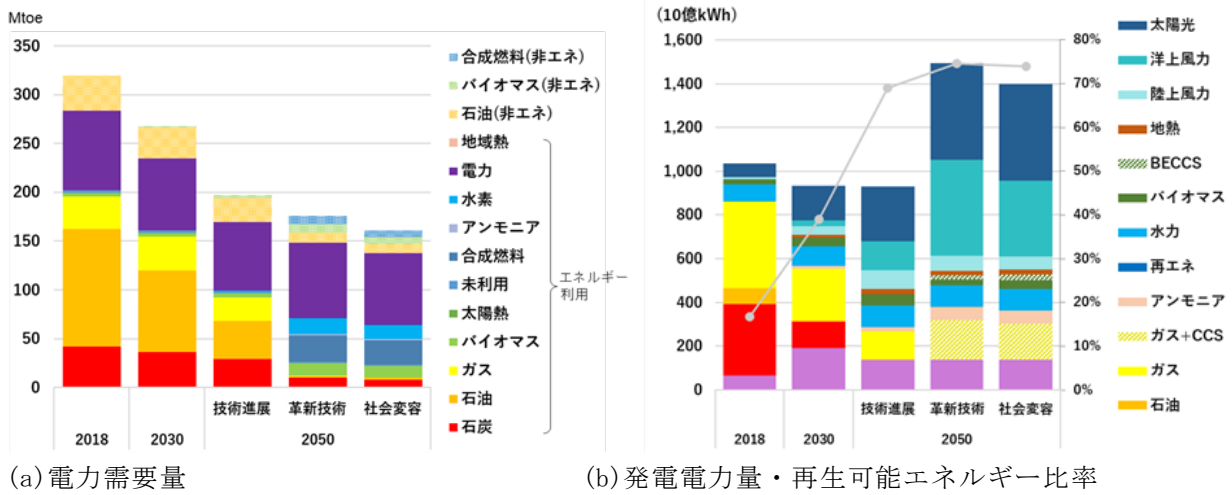


図-2.15 電力需要量・発電電力量

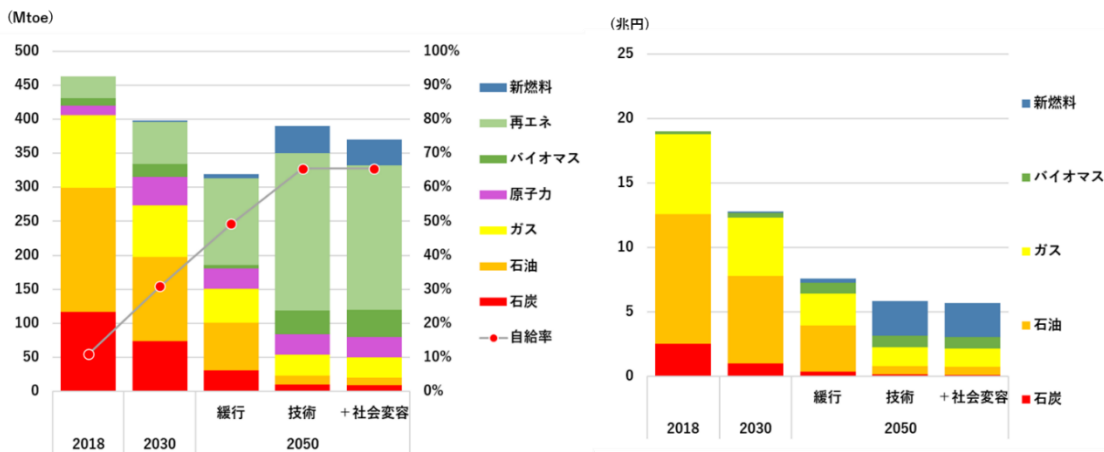


図-2.11 一次エネルギー国内供給・エネルギー輸入額

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

本課題の担当課室である環境省地球環境局総務課脱炭素社会移行推進室を通じて、資源エネルギー庁から、2050年の日本を対象とした脱炭素社会に関する分析結果を、総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会において報告するように依頼を受け、以下の対応を行い、エネルギー基本計画の策定に貢献した。

○総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会

第34回 2020年12月14日 スナップショット型モデルによる分析結果報告

第44回 2021年6月30日 複数モデルの組み合わせによる分析結果報告

第45回 2021年7月13日 上記分析結果に関する資料提出

また、中央環境審議会 地球環境部会 カーボンプライシングの活用に関する小委員会に分析の報告を行い、当該小委員会の中間とりまとめの作成に貢献した。

第16回 2021年6月21日 カーボンプライシング導入による排出削減効果と経済影響分析の報告

さらに、中央環境審議会 地球環境部会 地球温暖化対策計画フォローアップ専門委員会にも分析の報告を行い、脱炭素社会に向けた対策の方向性の議論の活発化に貢献した。

第5回 2023年4月28日 2050年脱炭素社会実現に向けた排出経路分析

埼玉県を対象とした分析については、その結果を埼玉県の温暖化対策課と共有し、地球温暖化対策実行計画の見直しに活用された。

AIM/Enduse [Japan]による日本のシナリオ分析結果について、個別の論文の結果および国内外のモデル比較研究を通じて、IPCC第6次評価報告書（AR6）WG3のシナリオデータベースに提出した。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>本研究では、わが国が直面する高齢化の進展に伴う多くの生活難民への対応や、地方の活力の喪失といった社会課題の解決に向け、ICTサービスの利用や都市・地域社会の構造の見直しにより生活・消費行動が変化する時に、脱炭素社会に及ぼす影響を定量的に評価することを目的としている。そこで、研究課題全体の達成目標を次の通り設定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・わが国の社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立する生活・消費行動について、情報通信技術の進展を踏まえた行動変容シナリオの構築。 ・家庭部門を対象に、その他部門とのセクターカップリングによる再生可能エネルギーの大量導入を前提とした脱炭素エネルギーシステムの実現に向けた技術シナリオの構築。 ・将来における消費者の行動変容と技術イノベーションを考慮した2050年の脱炭素社会の実現に向けた道筋の提示。 ・日本の社会経済シナリオと整合し、かつ地域（埼玉県）が抱える社会課題、地域資源を踏まえた脱炭素社会シナリオの作成。 	<p>目標を上回るの成果をあげた。本課題提案時には、日本の温室効果削減目標は、2050年に80%削減、今世紀後半早期に脱炭素社会の実現というものだったが、本推進費実施1年目の途中で、2050年に脱炭素社会を実現するという目標の前倒しが発表された。これに伴い、当初想定した以上の技術や対策を組み込んだ分析が必要となった。また、新型コロナウイルス感染症の影響で、これまで想定してきた将来の経済見通しや社会構造等も不確実な状況である中分析を進めた。このように、当初想定していた前提などを更新、深掘りするなどの追加的な業務が発生したが、それらに対応し分析を進めた。さらに目標の前倒しに伴い、政府の審議会等において、分析結果の紹介が多く求められる機会があった政策決定プロセスにも貢献した。</p>

サブテーマ1目標	目標の達成状況
<p>社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立する生活・消費行動を提示する。特に社会課題の解決にむけて、社会及び消費者の行動に大きな影響を与えるICTサービスの進展を踏まえた分析を実施する。また、日本全国を対象とした将来シナリオや脱炭素社会実現に向けたロードマップと整合した地域社会の将来像を定量的に分析する。対象地域</p>	<p>目標どおりの成果をあげた。設定した3つの課題が情報を共有し、当初の予定通り分析を実施することができた。具体的には、地域における各種社会課題を踏まえ、それらを解決する方策としてICTサービスが導入された場合の叙事的なライフスタイルシナリオを作成し、そのシナリオをベースに3つの課題でそれぞれ定量的な分析を実施し</p>

<p>は全国5位の人口を抱えながら、今後高齢化が急速に進行する埼玉県とする。</p>	<p>た。さらに、地域（埼玉県）については、2050年までの日本の社会経済状況を踏まえた脱炭素社会シナリオと整合する形で、2050年に埼玉県が脱炭素社会を実現するために必要なことを明らかにした。</p>
--	---

サブテーマ2 目標	目標の達成状況
<p>サブテーマ1の分析結果をうけ、技術モデルを用いてわが国の社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立する社会経済シナリオを構築し、2050年に脱炭素社会の実現に向けた道筋を技術モデル、応用一般均衡モデルを用いた分析により明らかにする。</p>	<p>目標を上回る成果をあげた。具体的には、脱炭素社会のシナリオ分析では、対象とすべき脱炭素技術の種類やその導入量が大きくなるため、これまでの分析フレームワークでは扱いにくいものもあった。そこで、技術モデル、応用一般均衡モデルの改良を行い、複数モデルの組み合わせによる分析フレームワークを構築し、脱炭素社会のために必要とされる具体的な技術とその導入量とともに、2050年に向けた排出経路を提示することが可能になった。分析結果は総合エネルギー調査会や中央環境審議会で紹介することができ、政策決定プロセスに貢献した。</p>

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

12件

<主な査読付き論文>

- 1) D. S. HERRAN, S. FUJIMORI: S Sustainability Science, 16, 489-501 (2021) Beyond Japanese NDC: energy and macroeconomic transitions towards 2050 in emission pathways with multiple ambition levels.
- 2) M. SUGIYAMA, S. FUJIMORI, K. WADA, K. OSHIRO, E. KATO, R. KOMIYAMA, D. S. HERRAN, Y. MATSUO, H. SHIRAKI and Y. JU: Sustainability Science, 16, 355-374 (2021)(IF:7.196), EMF 35 JMIP study for Japan's long-term climate and energy policy: scenario designs and key findings.
- 3) H. SHIRAKI, M. SUGIYAMA, Y. MATSUO, R. KOMIYAMA, S. FUJIMORI, E. KATO, K. OSHIRO and D. S. HERRAN: Sustainability Science, 16, 375-392 (2021) (IF:7.196), The role of renewables in the Japanese power sector: implications from the EMF35 JMIP.
- 4) K. OSHIRO, S. FUJIMORI: Sustainability Science, 16(2), 477-487. doi:10.1007/s11625-020-00862-2 (2020) Stranded investment associated with rapid energy system changes under the mid-century strategy in Japan.
- 5) K. OSHIRO, S. FUJIMORI, Y. OCHI, T. EHARA: Energy, 227, 120464. doi:10.1016/j.energy.2021.120464 (2021). Enabling energy system transition toward decarbonization in Japan through energy service demand reduction.
- 6) 金森有子: 土木学会論文集G (環境), 78, 6, II_215-II224 (2022) わが国の家庭部門における2030年及び2050年の温室効果ガス削減目標達成に関する分析.

- 7) 日比野剛, 芦名秀一, Silva Herran Diego, 増井利彦, 元木悠子, 平山智樹, 大田宇春: 地球環境, 27, 2, 77-86 (2022) 日本の2050年脱炭素シナリオ.
- 8) 金森有子: 地球環境, 27, 2, 121-126 (2022) 家庭部門による温室効果ガス排出量削減に向けた取組.
- 9) 張曉曦, 篠塚真智子, 原美永子: 地球環境, 27, 2, 105-112 (2022) 脱炭素社会の実現に向けたICTの役割と可能性.
- 10) G. HIBINO, S. ASHINA, D. S. HERRAN, T. MASUI, Y. MOTOKI, T. HIRAYAMA and T. OTA: Global Environmental Research, 26, 1&2, 11-21 (2023) Japan's quantitative emission scenario of GHG net zero and its implications for Asian countries.

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表 (査読なし)	13件
口頭発表 (学会等)	31件
「国民との科学・技術対話」の実施	23件
マスコミ等への公表・報道等	2件
本研究費の研究成果による受賞	0件
その他の成果発表	2件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

研究代表者

金森 有子

京都大学工学部卒業、工学博士、現在、国立研究開発法人国立環境研究所脱炭素対策評価研究室主任研究員

研究分担者

元木 悠子

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修了、博士 (政策・メディア)、現在、みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社サステナビリティコンサルティング第1部次長

II. 成果の詳細

II-1 脱炭素社会達成及び社会課題解決に向けた個別課題分析

国立研究開発法人国立環境研究所

社会システム領域	脱炭素対策評価研究室	金森 有子
社会システム領域	脱炭素対策評価研究室	芦名 秀一
社会システム領域		増井 利彦
社会システム領域	脱炭素対策評価研究室	Silva Herran Diego

日本電信電話株式会社

宇宙環境エネルギー研究所	原 美永子（令和3年度～令和4年度）
宇宙環境エネルギー研究所	張 曉曦
宇宙環境エネルギー研究所	篠塚 真智子
宇宙環境エネルギー研究所	田中 百合子（令和2年度）

埼玉県環境科学国際センター

温暖化対策担当	本城 慶多
温暖化対策担当	原 政之（令和2年度～令和3年度）

研究協力者

国立研究開発法人国立環境研究所

社会システム領域	脱炭素対策評価研究室	日比野剛（令和2年7月～令和4年度）
	地域計画研究室	石河正寛（令和4年度）

[要旨]

サブテーマ1では、高齢者や地方に係る社会課題の解決と脱炭素社会の実現を達成するために、「消費行動分析」「ICTシナリオ作成」「地域分析」の3つの研究課題を設定した。消費行動分析では、地域課題を洗い出し、課題を解決するためのICTサービスの普及について検討したライフスタイルシナリオを作成した。そのシナリオを基に、2050年までのエネルギーサービス需要及びCO₂排出量を推計し、脱炭素社会実現に向けて家庭部門で取り組むべき方策について検討した。その結果、電化の進展を確実に進めることが脱炭素社会実現に向けて非常に重要であることが分かった。また、エネルギーサービス需要そのものを減らすことも重要な方策であることが分かった。つまり、脱炭素社会の実現に向けて、消費行動を脱炭素型に切り替えていくことの重要性が確認された。ICTシナリオ作成では、主要なICTサービスの普及状況を把握したうえで、今後どのように普及していくかシナリオを作成し、応用一般均衡モデルでそれが経済とCO₂排出量に与える影響を分析した。その結果、ICTの普及によりCO₂排出量が6%削減できることがわかった。地域分析では、主に埼玉県に焦点を当てて分析を行った。社会経済データを駆使したシミュレーション分析を通じて、埼玉県が今世紀半ばまでに直面する社会課題の整理を行った。その結果、労働者不足による経済成長の鈍化と化石燃料の直接利用に依存した社会システムという大きな2つの課題を明らかにした。それらを踏まえてAIM/ExSSを用いて分析し、2050年に脱炭素埼玉を実現することが可能であることを示した。ただし、そのためには電化を進め、新燃料の利用が必須であることが分かった。

1. 研究開発目的

サブテーマ1では、わが国が直面する高齢化の進展に伴う多くの生活難民への対応や、地方の活力の喪失といった社会課題の解決に向け、ICTサービスの利用や都市・地域社会の構造の見直しにより生活・消費行動が変化する時に、脱炭素社会に及ぼす影響を3つの研究課題を設定し定量的に評価することを目的としている。3つの研究課題を通じて、わが国の社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立す

る生活・消費行動について、情報通信技術の進展を踏まえた行動変容シナリオの構築し、日本の社会経済シナリオと整合し、かつ地域（埼玉県）が抱える社会課題、地域資源を踏まえた脱炭素社会シナリオの作成を進める。

2. 研究目標

社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立する生活・消費行動を提示する。特に社会課題の解決にむけて、社会及び消費者の行動に大きな影響を与えるICTサービスの進展を踏まえた分析を実施する。また、日本全国を対象とした将来シナリオや脱炭素社会実現に向けたロードマップと整合した地域社会の将来像を定量的に分析する。対象地域は全国5位の人口を抱えながら、今後高齢化が急速に進行する埼玉県とする。

3. 研究開発内容

3-1：消費行動分析

3-1-1：ライフスタイルシナリオの作成

消費行動分析では、社会課題に対応しかつ脱炭素社会を実現する消費行動を明らかにする。具体的には、消費支出や時間の配分を踏まえてエネルギーサービス需要に変化について定量的なシナリオを提示する。そこで、まずシナリオの定量化のための準備作業として、脱炭素社会シナリオにおける生活・消費行動の基礎となる2050年のライフスタイルの叙述シナリオを作成した。作成は主に以下の4ステップからなる。

Step1：全国の市町村別人口推計結果（五味ら(2020)¹⁾の日本SSP2シナリオの結果）をもとに、自治体別の人口変化、人口密度の変化を整理した。2050年には上記シナリオで推計対象としている1683の自治体のうち、1109の自治体で2015年比の人口が70%未満となり、人口が増加する自治体はわずか91にとどまることが分かった。人口増加する自治体はほとんどが東京都、埼玉県、神奈川県、愛知県、福岡県、沖縄県に集中した。このことから、都市部では人口が比較的維持され、公共交通が維持できる可能性が高いが、それ以外では、高齢化、公共交通の衰退の問題に直面することが示唆された。

Step2：高齢化や過疎化に起因する生活上の問題には、各種生活サービスにアクセスできるかという点が大きく影響する。これまでは、人口規模と分布がまちづくりに大きく影響し、生活サービスの立地や地域の交通を決定してきた。現在の人口分布が生活サービスへのアクセスに関する新しいインフラや技術導入のスピードに影響するものと考え、日本を三大都市圏に含まれるか、人口が維持できているかどうか、の2つの軸を用いて4つの地域に分類【都市・維持/都市・減少/都市外・維持/都市外・減少】した。人口の維持・減少の基準は、人口総数や人口密度から判断し、三大都市圏とそれ以外で基準を変えることにする。基準自体は定量的な評価の際に、再度検討することにした。それぞれの地域で直面する社会課題を検討したところ、【都市・減少】【都市外・維持】では、人口の減少に伴い、生活サービスが撤退することにより地域の非効率化に起因する課題があげられた。また、【都市外・減少】では、さらに状況が悪化し、地域において生活サービスが存在しない状況による課題が挙げられた。いずれの状態においても、生活サービスへのアクセスが非常に大きな問題となることが明らかになった。特に高齢者や未就学児や低年齢の就学児の生活や通学等のための移動は課題となる。

Step3：Step2で明らかにした課題を克服するための技術やインフラ整備、制度を整理した。多くの生活サービスはオンラインサービスとすることや、各種生活サービスを集約させた拠点の利用とそれに合わせた自動運転の公共交通の整備等が考えられた。

Step4：Step3で明らかになった問題点を克服するためのアイデア間の不整合や、社会課題を解決するアイデアが他の問題を引き起こす可能性について検討した。さらに、脱炭素社会の構築に向けて、求められるライフスタイルの変化についても検討した。

3-1-2：家庭部門のエネルギーサービス需要推計

2050年までの家庭部門のエネルギーサービス需要推計を行うために、まず、1970年から2019年まで

の世帯当たりエネルギー消費量及び機器のエネルギー効率情報を用いて、エネルギーサービス量を推計し、推計されたエネルギーサービス量と気候、社会変数との関係を明らかにした。エネルギーサービスとは、機器稼働により享受できるサービスである。直接観測することが困難な変数であるが、人々の温室効果ガスの削減に向けた行動変容が直接影響する。そこでサービス量がどのように変化したか、そして今後どのように変化するかについて焦点をあてた分析を行う。エネルギー消費量、機器情報、エネルギーサービス量の関係は式(1)に示すとおりである。エネルギー消費量に関する観測値及び機器効率の変化を用いて、過去のエネルギーサービス量の参照値を推計した。

$$ES = \sum_d (E_d \cdot eff_d) \quad (1)$$

ES はエネルギーサービス量、 E_d は機器種 d のエネルギー消費量、 eff_d は機器種 d のエネルギー効率を示す。

分析では、6種類（暖房、冷房、給湯、厨房、照明、その他動力）のエネルギーサービス種を設定した。このうち、その他動力については、複数の用途が含まれる。例えば、冷蔵庫やテレビの使用はいずれもその他動力に含まれるが、異なるサービスを提供するため、同一基準でのエネルギーサービス量の想定が困難である。そのため、その他動力については、エネルギーサービス量ではなくエネルギー消費量の変化を直接推計することにした。

エネルギーサービス量は、すでに説明した通り式(1)から推計することができる。一方、その増減は、社会、地域特性、気候等の変化等により決定されるものと考えられる。各サービス種についてどのような変数で決定されるかについては、式(2)から式(8)に示す関係を想定した。

$$\text{暖房} \quad ES_{HT} = HDD \cdot FLR \cdot INT_{HT} \quad (2)$$

$$\text{冷房} \quad ES_{CL} = CDD \cdot FLR \cdot PNT_{CL} \cdot INT_{CL} \quad (3)$$

$$\text{給湯} \quad ES_{HW} = HWB \cdot PNT_{HW} \quad (4)$$

$$HWB = \frac{SBT_t + AHW_t \cdot RAHM_t}{SBT_B + AHW_B \cdot RAHM_B} \quad (5)$$

$$\text{厨房} \quad ES_{CK} = REH \cdot AHM \cdot INT_{CK} \quad (6)$$

$$\text{照明} \quad ES_{LT} = FLR \quad (7)$$

$$\text{その他動力} \quad ES_{OT} = PNT_{OT} \cdot EFF \cdot INT_{OT} \quad (8)$$

ES_s は用途 s のエネルギーサービス量、 HDD は暖房度日(14-14)、 CDD は冷房度日(14-14)、 FLR は平均床面積のそれぞれ基準年比を指す。 INT_s は用途 s のエネルギーサービスに関する強度の基準年比である。ここで強度とは、主に機器の使用方法的違いによるサービス量の違いを意味する。例えば冷房であれば、部屋の広さや気温はそれぞれ使用環境であるため強度の議論には含めない。具体的には、運転時間や温度設定がサービス強度になる。他にも厨房は鍋底から大きく炎をはみ出して使用するかどうかといったコンロの使い方の違いや、その他動力では、複数の機器で構成されるため運転時間、音量設定などが考えられる。尚、複数の機器で構成される故、サイズの違い等を強度に含めて検討することにした。 $PNT_{s,t}$ は用途 s を供給する機器の普及率の基準年比を意味する。ただし、 $PNT_{s,t}$ は浴槽の普及率、 HWB は入浴の給湯量のそれぞれ基準年比、 SBT_t は t 年の浴槽の給湯量とし、 SBT_B は基準年の給湯量を表す。 AHW_t はシャワー等浴槽以外で使用する給湯量、 AHW_B は基準年の給湯量を表す。 $RAHM_t$ は t 年の平均世帯人員数である。 REH は内食率、 AHM は世帯人員数、 EFF はその他動力における平均的な機器のエネルギー効率のそれぞれ基準年比である。式(2)-(8)に対し、将来の気候、地域、社会変数の想定値を用いて、2050年までの家庭部門のエネルギーサービス需要を推計した。さらに、機器情報を想定し、2050年までのCO₂排出量を推計し、脱炭素社会実現に向けて鍵となる変化について分析した。推計方法の詳細は、金森²⁾を参照して欲しい。分析ケースは2種類設定し、Case1は、金森²⁾に示したエネルギーサービス需要、機器情報等の設定通り分析したもので、Case2は、Case1に対して10%のさらなるサービス需要削減策が行われる場合である。

3-2: ICTシナリオ作成

社会課題の解決と脱炭素社会の達成に向け、ICTの貢献が不可欠である。そこでICTサービス/技術

の将来普及について叙述的なシナリオを作成した上で、作成したシナリオをもとに、それらのICTサービス／技術が社会経済・環境側面及び人々の生活行動に及ぼす影響について、応用一般均衡モデルを用いて定量評価を行った。

3-2-1：叙述シナリオの作成

市場調査レポートや予測情報等³⁾⁻⁶⁾を参考に、各分野の生産性向上・効率化、生活のオンライン化による環境負荷の削減に着目し、次の4点を軸に2050年に向けての叙述シナリオを作成した。シナリオのもと、農業、製造、社会インフラ、生活といった十数の分野において将来普及が見込まれるICTサービス／技術を対象とした。対象とするICTサービス／技術例を表-1.1に示す。

① 各生産・製造分野における自動化技術の発展を通じた労働の代替、生産性の大幅な向上

農業分野では、勘・経験がデータ化され、農機の無人運転やドローン・ロボットによる作業の自動化・省力化が進み、生産性が向上し、農業経営も高度化になる。それらの技術を通じて単位面積当たりの収穫量向上が実現されると同時に、労働力不足の課題が解消される。

製造業の分野において、従来の大量生産型については、ロボットや自動化による生産効率向上・規模経済の訴求を実現し、多くの生産現場では生産の自動化により労働力の投入が半分以下になる。多様性を求めるものについては、3D技術により個々の要求を対応可能になり、低コストで様々なオーダーメイド品の生産が実現される。

② AI/ビッグデータ分析技術による社会全体の最適化の実現

通信技術やIoTの進展とともに、あらゆるものがインターネットに接続できるようになり、AIやBigData分析技術、量子技術の発展により、社会全体最適化も実現する。

例えば、製造分野では、サプライチェーン管理システムをはじめ、生産・消費の完全な見える化により、最適な生産管理や、リードタイムの短縮、在庫管理コストの低減などが実現される。シェアリングエコノミーの一例として、遊休設備や工場・空きスペースのプラットフォーム開発・構築により、設備やスペースが最大限に活用され、新規設備生産需要・建物需要が大幅に削減される。金融分野では、キャッシュレス決済が大幅に普及し、ATMなどの設備製造需要、貨幣管理稼働などが削減される。

③ 運輸分野の技術発展による移動の効率化

自動運転技術やカーシェアリングの普及により物の輸送および人々の交通行動が変化する。貨物輸送や個人の移動における運転にかかる労力、乗り物の保有コストが大幅に低減する。また、自動運転の普及による渋滞解消、乗り物の原材料である資源利用の削減が実現される。

④ オンライン化の進展による利便性の向上およびライフスタイルの変化

買い物や仕事、学校・レジャー等のほとんどの行動をオンライン上で実施できるようになり、移動が大幅に削減され、個人の余暇時間が増加する。自動運転の普及により移動時間自体の有効活用が進む。家事や身の回りの用事などをロボットが代行するようになると、時間的な自由がさらに大幅に広がる。

3-2-2：ICT普及の効果の定量化

1) 個人向けICTサービスの普及状況推計

3-1消費行動分析に影響があると想定される個人向けICTサービスのみ対象に、過去の普及率や利用頻度などのデータを用いて、2050年までの各対象ICTサービスの普及状況を推計した。ここで、消費行動を表現するためには、人口あたりの利用者の割合のみならず、利用頻度や利用金額も考慮する必要があることから、これらを総括した指標として市場規模を式(9)を用いて推計した。

$$M=P \times R \times C \times F \quad (9)$$

ここで、Mは市場規模(円)、Pは人口(人)、Rは普及率(%), Cは1回あたりの利用金額(円)、Fは利用回数である。ある年からの市場規模の増加が、利用人数、利用回数、利用金額の増加とみなした。

2050年までの市場規模は、過去の市場規模の時系列データを技術普及曲線に当てはめて外挿することで求めた。技術普及曲線にはロジスティック曲線を用いた。ロジスティック曲線は製品・サービスの普

表-1.1 評価対象とするICTサービス/技術

分野	サービス/技術	分野	サービス/技術
1. 農業	1-1. 植物工場	7. 医療	7-1. いつでもドクター
	1-2. 収穫ロボット		7-2. 個人データ管理
	1-3. 自動トラクター		7-3. 超早期に疾患の予測・予防
	1-4. 食品情報流通システム		7-4. 介護ロボット
2. 教育	2-1. 学校のDX化推進		7-5. 電子カルテ
3. 製造業	2-2. オンライン教育	8. 社会インフラ	8-1. インフラモニタリング・予測・制御技術
	3-1. 生産流通管理		8-2. 電力需要予測
	3-2. 中古品利用	9. 運輸	9-1. 自動運転
	3-3. AI/IoT・産業用ロボット		9-2. カーシェアリング
	3-4. 電子調達		10. 生活
3-5. 設備シェアリング	10-2. 自動翻訳		
4. 金融	4-1. キャッシュレス決済	10-3. 遠隔会議	
5. 公務	4-2. 電子債権		
	5-1. スマート自治体		
6. 流通・サービス	5-2. 電子入札		
	6-1. バーチャル観光		
	6-2. 自動調理		
	6-3. 自動配達		
	6-4. ドローン輸配送		
	6-5. 電子商取引		
	6-6. 音楽系コンテンツの電子化		
	6-7. 映像系コンテンツの電子化		
	6-8. PCソフトの電子化		
6-9. 書籍の電子化			

及を表すために広く用いられている。各サービスについて、ロジスティック曲線のパラメータを求め、2050年の市場規模を推計した。

2) ICTの普及による直接的な効果の推計方法

前述の叙述ICTシナリオに基づいて、各分野におけるICT導入の直接的な効果を推計する。例えば、農業分野では、自動運転トラクターや自動収穫ロボットなどの自動化技術、植物工場などの技術を取り上げている。自動収穫ロボットの導入による労働代替効果は、農作業全体のうち収穫作業が占める比率を参考に設定を行った。金融分野では、キャッシュレス決済サービスをメインに取り上げている。キャッシュレス決済サービスの全面導入により、貨幣の削減、ATMなどの設備投資の削減、また銀行及び流通における現金の管理にかかる事務稼働の削減などの効果が期待される。それぞれの期待効果については、現時点における金額ベースで費用削減効果を関連情報に基づいて推計を行った。社会インフラ分野では、インフラモニタリング・予測・制御技術を取り上げている。それによるインフラサービスの設備の長寿命化効果として、例えば、水道設備の場合は、耐用年数で更新する場合と適切な時期に保全を行った際にかかる工事費用を調査し、工事費用の削減率を、インフラ業における土木・建設業の投入の削減率として効果を推計した。さらに、運輸分野では、自動運転の効果として、渋滞解消を通じた走行速度の改善と移動時間を用いたゲームや読書等の活動の増加を定量的に算定した。速度については、最も渋滞が深刻とされる東京都における、混雑時の速度と昼間(非混雑時)の速度の統計データを用いて、これらの速度の比率を自動運転による速度の改善率とした。時間の有効活用に関しては、一人一日あたりの運転時間とネット利用時間の統計データを調査し、運転時間の分だけネット利用時間が増加するとした。また、テレワークの導入による移動削減効果を日本全体の移動距離の削減率として算定した。日本全体のテレワークの利用見込み人数および一人当たりの通勤距離と旅客輸送総距離の比率を削減率とし、一般企業の出社削減率がオフィススペースの削減率にあたるものとして効果を算定した。

3) GHGおよびGDPへの影響評価モデル

ICT導入による個別の直接的な効果をもとに、応用一般均衡モデル (CGEモデル) を用いて日本経済全体

(GDP) 及びGHG排出量の2050年までの影響を評価した。応用一般均衡モデルの構造は図-1.1に示す。モデルの詳細は、サブテーマ2を参照する。

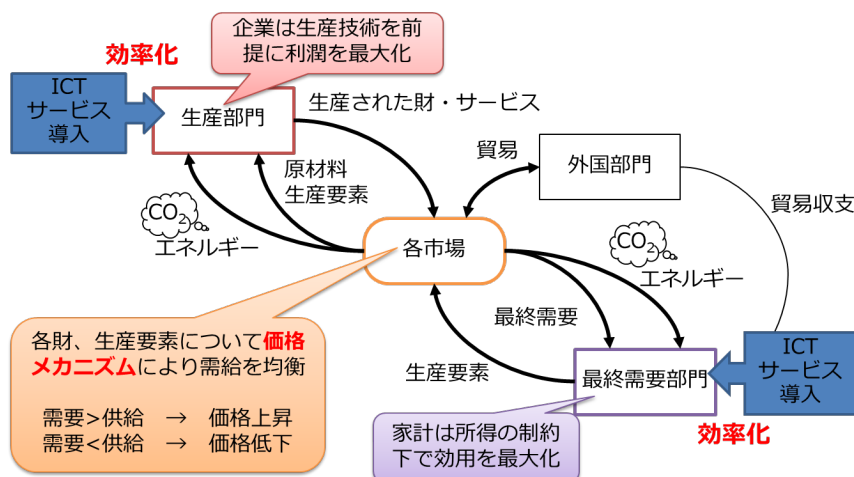


図-1.1 応用一般均衡モデルの構造

3-3：地域分析

地域分析では、多種多様な社会経済データを駆使したシミュレーション分析を通じて、埼玉県が今世紀半ばまでに直面する社会課題の整理を行った。はじめに、国立環境研究所が公開している社会経済・気候データセットを用いて、2050年度時点の埼玉県の姿を描く3つのシナリオ（STM-SSPs）を作成した。次に、埼玉県環境科学国際センターが開発した地域マクロ計量モデルにSTM-SSPsを入力することで、埼玉県の経済成長率を2050年度まで推計し、少子高齢化に伴う働き手の減少と労働生産性の伸び悩みが地域経済に与える影響を評価した。さらに、新たに開発した部門別エネルギー需要モデルを地域マクロ計量モデルと組み合わせ、エネルギー起源CO₂排出量の経年変動をシナリオ別に推計した。推計結果から埼玉県が自力で削減しなければならないCO₂排出量を算定し、カーボンニュートラルの達成に向けた取組の方向性を検討した。

3-3-1：埼玉県2050年度シナリオ（STM-SSPs）

埼玉県が直面する社会課題を浮き彫りにするため、2050年度時点の社会像をSTM-SSP1、STM-SSP2、STM-SSP5という3つのシナリオで表現した。これらのシナリオは、国立環境研究所が開発した日本共有社会経済経路（日本SSP）^{7),8)}を基に、日本SSPのストーリーラインと整合するような人口、労働生産性、気温、電力排出係数の将来見通しを組み合わせ作成した（表-1.2）。STM-SSP1では、出生率が比較的高く、労働生産性も緩やかに上昇し、2050年度までに電源の脱炭素化が達成される。世界全体で緩和策が導入されており、埼玉県の気温上昇は抑制されている。一方、STM-SSP5では、国外から流入した移民によって労働力を賄っており、労働生産性は顕著に上昇するものの、火力発電への依存度は高いままである。世界全体として緩和策が不足しており、埼玉県では気温上昇が進行している。STM-SSP2は各要素について現状趨勢を仮定した成り行きシナリオである。なお、いずれのシナリオも地方自治体を実施する追加的な緩和策の影響を織り込んでいない。STM-SSPsは、地方自治体によるコントロールが難しい要素について、不確実性の幅を定量的に示すためのツールである。

3-3-2：地域マクロ計量モデル

経済成長に関連する社会課題を明らかにするため、地域マクロ計量モデル（図-1.2）にSTM-SSPsの人口シナリオを入力し、埼玉県の経済成長率を2050年度まで推計した。地域マクロ計量モデルは、Honjo et al. (2021)⁹⁾を簡略化したものであり、実質生産額の変動を県内就業者数と労働生産性の変動によって説明する。産業分類は、産業部門が18区分、業務その他部門が12区分の計30区分であり、モデルのパラメータは業種別に推定される。モデルの中核を担う生産関数には、応答変数が実質生産額

(対数)、説明変数が都道府県ダミー、年度ダミー、高齢化率、及び総労働時間数、オフセット項が県内就業者数(対数)であるようなガウシアン線形回帰モデルを仮定した。パラメータの推定には正則化法の一つであるエラスティック・ネット¹⁰⁾を使用し、予測に寄与しない説明変数はモデルから除外した。エラスティック・ネットのハイパーパラメータは交差検証法で決定した。学習データは、1都6県(茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県)の2006～2018年度をカバーするパネルデータであり、内閣府「県民経済計算」、総務省統計局e-Stat「社会・人口統計体系」、気象庁データ等を用いて作成した。

表-1.2 埼玉県2050年度シナリオ(STM-SSPs)の概要

シナリオ	人口	労働生産性	気温	電力排出係数
STM-SSP1	日本SSP1：比較的高い出生率、コンパクト+ネットワーク	緩やかに上昇：全業種で調整係数表-1.7を参照、2018年度=1.0)が1.3まで上昇	SSP1-2.6 (MIROC6)	電源の脱炭素化：令和3年版地球温暖化対策計画の2030年度目標を達成し、2050年度にはゼロ
STM-SSP2	日本SSP2：現状趨勢	伸び悩み：全業種で調整係数が1.1まで上昇	SSP2-4.5 (MIROC6)	現状趨勢：2030年度目標は達成するが、それ以降は固定
STM-SSP5	日本SSP5：国外からの移民の流入、大都市圏に人口集中	顕著に上昇：全業種で調整係数が1.5まで上昇	SSP5-8.5 (MIROC6)	火力発電に依存：現在(2018年度)の水準で固定
参考文献	日本版SSP別人口シナリオ第2版(国立環境研究所, 2021)	過去のトレンドを踏まえて独自に設定	CMIP6をベースにしたCDFM手法による日本域バイアス補正気候シナリオデータ Ver. 1.1(石崎, 2021)	現行の計画を踏まえて独自に設定

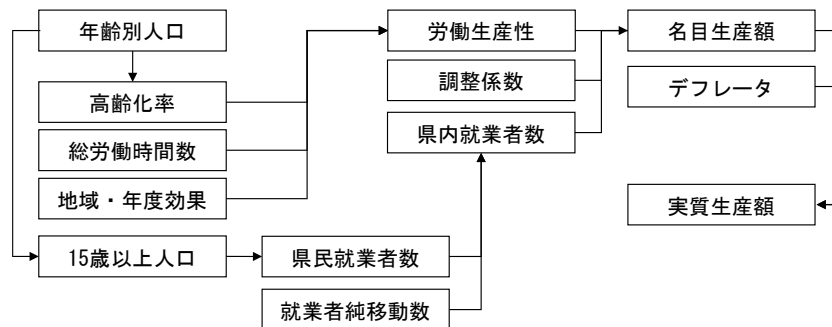


図-1.2 地域マクロ計量モデルの構造

3-3-3：部門別エネルギー需要モデル

気候変動緩和策に関連する課題を明らかにするため、図-1.3に示す部門別エネルギー需要モデルを新たに開発し、STM-SSPsのもとで2050年度までの将来推計を実施した。エネルギーは電力と燃料の2種類であり、燃料は熱供給を含んでいる。産業・業務その他部門については、応答変数がエネルギー需要(対数)、説明変数が都道府県ダミー、年度ダミー、電力・都市ガス価格、及び冷暖房度日、オフセット項が実質生産額(対数)であるようなガウシアン線形回帰モデルを仮定し、前述の生産関数と同様にエラスティック・ネットでパラメータ推定を行った。産業分類は、産業部門が12区分、業務その他部門が12区分の計24区分であり、地域マクロ計量モデルと比べて簡素化されている。家庭部門についても同様の構造をもつ統計モデルを仮定した。一方、運輸部門については、年齢別人口から自動車保有台数と鉄道輸送需要を推計したのち、エネルギー効率(単位活動量あたりエネルギー需要)を乗じてエネルギー需要に換算する方法を採用した。自動車は乗用車、バス、トラック、二輪車の4区分、鉄道は貨物と旅客の2区分である。学習データは、1都6県の2007～2018年度をカバーするパネルデータであり、資源

エネルギー庁「都道府県別エネルギー消費統計」、日本銀行「企業物価指数」、総務省統計局「消費者物価指数」、総務省統計局e-Stat「社会・人口統計体系」、国土交通省「貨物・旅客地域流動調査」、自動車検査登録情報協会データ、気象庁データ等を用いて作成した。

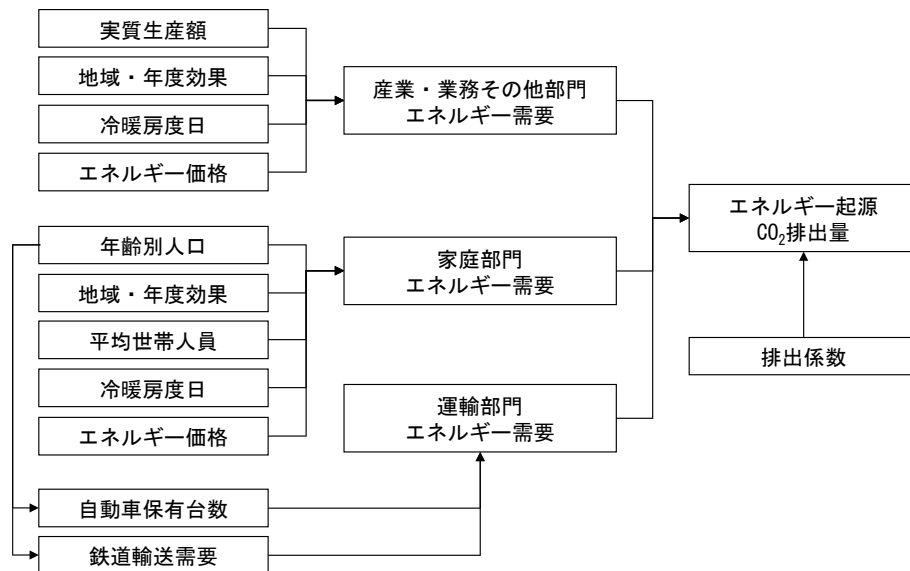


図-1.3 部門別エネルギー需要モデルの構造

3-3-4：2050年までのCO₂排出量削減策の検討

地域統合評価モデルAIM/ExSSを用いた地域の脱炭素社会実現の定量的分析及び地域の特性を踏まえた脱炭素対策に関する検討を実施した。埼玉県を含む1都6県の2050年までの業種別生産額（30区分）の推計結果に基づき、埼玉県の将来CO₂排出量推計のためのマクロフレームを策定した。これに考慮する対策種やその導入強度について、日本全体の脱炭素社会シナリオを参考にし、埼玉県における将来CO₂排出量を推計した。また、県内の市町村を対象としたヒアリングを実施し、埼玉県の脱炭素社会実現に向けた取組や障壁を整理した。

4. 結果及び考察

4-1：消費行動分析

4-1-1：ライフスタイルシナリオの作成

今後日本が直面する様々な社会問題を、ICT等の技術の進展や住まい方の工夫により克服した姿を脱炭素社会のライフスタイルシナリオとして記述した。

[ライフスタイルシナリオ]

高齢化や過疎化の進展等の社会問題への対応と生活の利便性の向上の観点から、ICTやIoTがさらに普及し、生活の様々なシーンで利用される。例えば、買い物はオンラインショッピング、医療や教育、役所・銀行・その他の事務的なサービスもオンラインサービスの利用が増加する。このようなオンラインサービスは人口密度が減少し分散的に暮らす地域の人や高齢者にとって、生活の利便性や快適性を担保する重要なインフラとなる。ICTの技術進展は、より現実味のある意思疎通を可能にするが、直接人と人が意思疎通することの必要性、重要性が認識されることから、人々が分散的に住む地域には生活サービスの拠点づくりが進み、拠点の利用とオンラインサービスの利用が併用される。また、自動運転技術が使われるようになり、特に過疎地域の高齢者の移動の中心的な役割を果たす。働き方は、在宅勤務等のリモートワークが普及する。日常生活では、IoT家電の普及やオンラインサービスの利用により無駄が減ることから、家庭のエネルギーサービス需要が下がる。さらに、ICTの利用は教育や就業の選択の幅が広がり、貧富の差や地域格差を是正することが可能になる。一方、移動や家事に伴う運動が減少

することによる健康への悪影響が懸念されるため、ウォーキング等の体力維持の趣味を持つ、あえて家事を自分で行う等の工夫が求められる。

4-1-2：家庭部門のエネルギーサービス需要推計

技術の変化及び社会経済変数の変化を用いて、将来のエネルギーサービス需要量を推計した結果を図-1.4に示す。冷房は、2020年から著しく需要が増加しているようにみえるが、2015年が夏季の温度が極めて低く、需要が小さかったことによる影響である。冷房は冷房度日の増加の影響を受け、需要量が増加するものと推計された。一方、その他の用途はいずれも需要が減少するものと推計された。特に暖房は、冬季の温度上昇により暖房度日が全国的に減っている傾向が反映され、需要が大きく下がると推計された。

将来のCO₂排出量の推計結果を表-1.3に示す。2020年の統計値とCase1の結果の比較から、社会経済変数を用いた推計と現実の排出量の間には8%程度の乖離があることが明らかになった。この乖離の原因は主に2点考えられる。第1に、エネルギーサービス量の参照値に用いたデータと日本のGHG排出量の推計に用いるエネルギー消費量に乖離があるため、エネルギーサービス量推計に用いた変数が十分でなかった可能性、第2に本研究における設定以上にエネルギー効率の改善やサービス強度の低下が起きた可能性である。本研究ではこの乖離を補正したCase1'を設定し、Case1'に対して追加の需要削減策を検討した結果をCase2として算出した。Case1'の結果から、2030年のCO₂排出量の削減率は56%となった。現在よりは大きく削減できているものの、2030年の排出削減目標である66%減には達していない。さらに10%の需要低減効果を含むCase2の場合、CO₂排出量の削減率は65%となり、ほぼ削減目標を達成できたと言える基準となることが分かった。2050年については電化がかなり進み電力の排出係数を0としたことから、家庭部門のCO₂の排出量はほとんどないものと推計された。ただし、わずかながら排出されるため、ガスや灯油といった化石燃料の使用が残る部分については、合成燃料への代替等の検討も必要になる。

表-1.4の2050年CO₂排出量の結果から、CO₂排出量の削減に最も影響を与えたのは分担率の変更、すなわち電化の進展であることがわかる。2050年に向けて電気の排出係数が大幅に下がる想定としたため、電化を確実に進めることが、CO₂排出量の大幅削減に強く影響したことがわかった。2030年については、電気の排出係数が現在の半分程度になる想定ではあるが、まだ十分に低い値ではないことから、機器の高効率化がCO₂排出量の削減に影響することがわかる。

Case2では現在よりもさらに10%の需要を削減する方策が必要であることを示したが、現時点ではその方策を詳細に設定できていない。例えば、住宅の断熱性能を高める、徹底した無駄の削減を行うといったことが考えられる。ここでは、住宅の断熱性能を取り上げて考えてみる。住宅は一度建てられると長期間使用されることから、国立環境研究所AIMプロジェクトチーム¹¹⁾の試算結果によると、2030年以降の新規住宅が全てZEH基準で建築されたとしても、2050年のストックベースでZEH基準を満たす住宅は40%程度となる。また極めて古いS55年型、無断熱型の住宅も25%程度残存することとなる。それでも、それでも、冷暖房需要において10%程度の需要の低減は十分見込めるだろう。一方で、住宅の断熱性が向上しても、冷暖房時に適切に部屋の開口部を閉じないと断熱の効果が十分に得られないことから、技術の普及だけでなく意図を理解して暮らし方を工夫する必要がある。

また、10%の需要削減では全ての世帯が均等に10%削減する必要はなく、全体として10%削減できればよい。例えば、電力消費量の多い世帯から順にプロットすると上位10%程度の世帯については、他の世帯と比較すると電力消費量が極めて高いことがわかる。これは、全ての地域、全てのエネルギー種、全ての月に共通する傾向である。エネルギー消費量が極めて多い上位10%に含まれる世帯のエネルギー消費量を上位10%レベルの世帯のエネルギー消費量まで減らすだけでも6%程度エネルギー消費量を削減できる。このようなエネルギー多消費世帯が、消費量を削減するような施策について検討することも必要だろう。

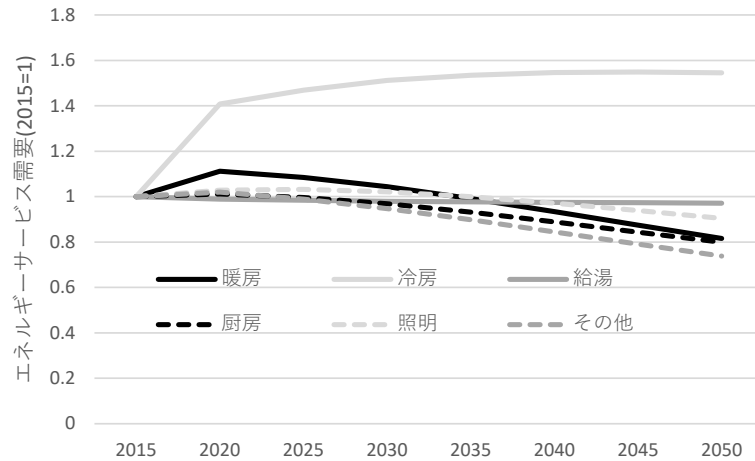


図-1.4 エネルギーサービス需要の変化

表-1.3 CO₂排出量の推計結果

統計値	Case1 排出量	Case1'				Case2		
		排出量	排出量の 2013年比	削減率	排出量	排出量の 2013年比	削減率	
2013	208							
2020	167	181	167	80%	20%	167	80%	20%
2025		141	130	63%	37%	117	56%	44%
2030		100	92	44%	56%	73	35%	65%
2035		75	69	33%	67%	55	27%	73%
2040		52	47	23%	77%	38	18%	82%
2045		30	28	13%	87%	22	11%	89%
2050		11	10	5%	95%	8	4%	96%

※ 排出量の単位は、百万トンCO₂

表-1.4 主要な変化を2015年で固定した場合のGHG排出量

単位:	Case1	分担率	機器効率	エネルギー
100万tCO ₂		2015固定	2015固定	サービス
				2015固定
2020	181	188 (104%)	190 (105%)	174 (96%)
2025	141	156 (110%)	157 (111%)	139 (98%)
2030	100	124 (124%)	117 (118%)	103 (103%)
2035	75	103 (138%)	90 (121%)	81 (108%)
2040	52	84 (162%)	64 (124%)	59 (114%)
2045	30	66 (218%)	39 (127%)	37 (121%)
2050	11	50 (473%)	14 (130%)	15 (138%)

※()内の数字は、Case1との比較を表す。

4-2: ICTシナリオ作成

4-2-1: 個人向けICTサービスの普及状況推計

各ICTサービスについて、2020年から2050年までの市場規模の推移に関する推計結果を表-1.5に示す。サービスによって拡大の幅があり、1.3~10倍程度に拡大する結果となった。既に普及が進んでいるオンラインサービスは他のサービスと比べて拡大の幅が小さかった。フリマアプリや乗り物のシェアリングは利用者数、利用頻度・金額ともに今後拡大すると推計された。

表-1.5 個人向けICTサービス（例）の市場規模の推計結果(億円)

サービス	2020年	2030年	2050年
食事の宅配	6,000	10,000	12,000
フリマアプリ	6,000	13,000	45,000
乗り物のシェアリング	2,000	7,000	22,000
オンラインショッピング	193,000	255,000	270,000

4-2-2：ICTの普及による直接的な効果の推計

評価した具体的なICTサービス／技術と直接な効果の一部を表-1.6に示す。農業分野では、いくつかの技術について直接の導入効果を推計した。例えば、農業分野では、自動収穫ロボットについて、収穫作業が農耕作業の中で約50%程度を示すため、全自動化することによって、農業部門への労働力投入が50%削減可能となる。金融分野では、今後キャッシュレス決済がほぼ100%達成する前提にすると、貨幣管理の稼働やATMなどの設備投資が大幅に削減できる。例えば、貨幣管理の稼働削減について、貨幣を管理する銀行及び流通（小売り）におけるそれぞれのコストと、金融部門と小売り部門のそれぞれの人件費の比率から、金融部門への労働力投入が15%、小売部門への労働力投入が5%削減できると推計した。運輸分野では自動運転によって渋滞が解消され、自動車の走行速度が昼間時間帯の水準になることで、速度が15%改善されることが見込まれる。また、人間による運転が一切不要になる場合、乗車時間をゲームや読書などの娯楽に充てることができる。現状、1人あたりの娯楽の時間と運転時間がほぼ等しいため、娯楽の時間が現状の2倍になり、家計からサービス業への需要が2倍になるとした。生活分野においてはテレワークの普及により通勤が不要になり、移動距離の減少の推計から、家計から運輸部門への投入が19%減少すると推計した。オフィススペースは、昨今の出社割合の目標が今後も継続することを前提として70%減少すると推計した。

表-1.6 調査対象としたICTサービス／技術と効果の例

分野	ICTサービス／技術	主な効果例	直接的な効果推計
農業	植物工場	生産の安定化	野菜生産部門への生産原材料投入が16%減
		労働代替	野菜生産部門への労働力投入が50%減
	自動収穫ロボット	労働代替	農業部門への労働力投入が50%減
製造	AI・IoT、産業用ロボット	生産性向上	製造部門への労働力投入が50%減
金融	キャッシュレス決済	設備投資削減	銀行部門への設備投資が5%減
		稼働削減	金融部門への労働力投入が15%減 小売部門への労働力投入が5%減
社会 インフラ	インフラモニタリング	設備の長寿命化	資源投入・工事費が57%減
		点検の稼働の削減	インフラ部門の労働力投入が25%減
運輸	自動運転	移動の効率化	渋滞解消による速度改善率15%
		移動時間の有効活用	家計からサービス業への需要2倍
ライフ	テレワーク	移動の削減	家計から運輸部門への需要19%減
		オフィス空間の削減	オフィス空間が70%減

4-2-3：GHGおよびGDPへの影響評価結果

応用一般均衡モデルによる評価結果から、今後、日本全体でICTの更なる導入により、ICTが現状維持の場合と比較して、2050年に約6%のGHG排出削減効果が得られると分かった。特に、デジタルトランスフォーメーションやオンラインサービスの普及により、物流・輸送の効率化、人やものの移動削減によるGHG排出削減の効果が最も顕著である。今後は、輸送部門への効率化や需要削減につながるICTサービスの普及加速が脱炭素社会の実現に向けて非常に重要な役割を果たすことが示唆された。

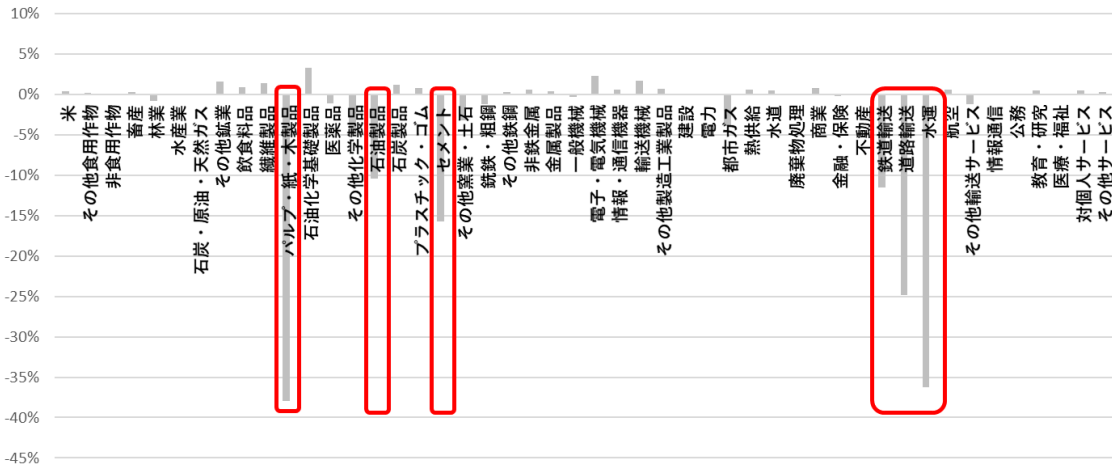


図-1.5 2050年におけるICT導入による部門別GHG排出量の変化（ICT現状維持と比較した場合）

4-3：地域分析

4-3-1：埼玉県の社会課題その1：働き手の不足による経済成長の減速

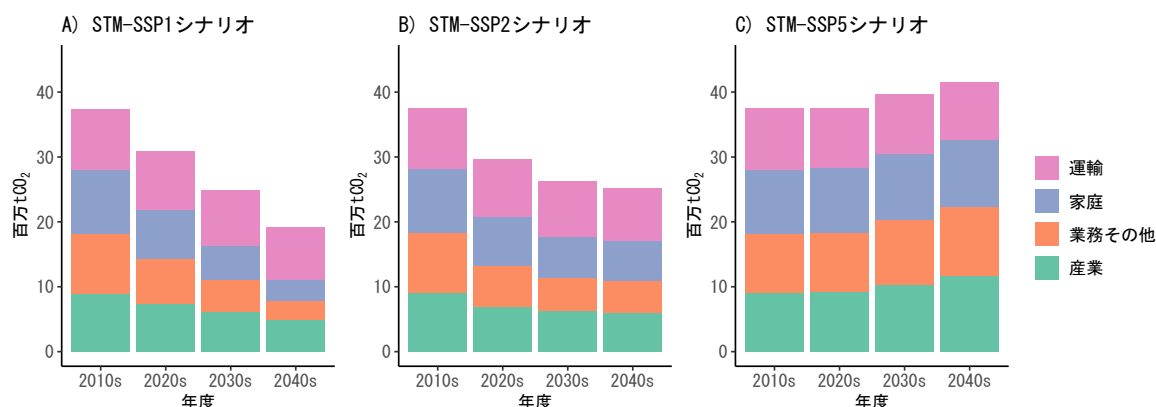
埼玉県は急速に進行する高齢化に直面しており、人口減少への対応は県政にとって喫緊の課題となっている。表-1.7は、地域マクロ計量モデルの推計結果から作成した埼玉県のマクロフレームである。ここでは、2050年度における埼玉県の県内総人口、県内就業者数、労働生産性、経済成長率をシナリオ間で比較している。現状趨勢を仮定するSTM-SSP2の場合、県内総人口の減少に伴って県内就業者数が減少し、2050年度の経済成長率はマイナスとなっている。働き手の減少は、国外からの移民の流入を想定するSTM-SSP5でも起こっており、何らかの施策によって回避することは難しいように思われる。人口減少社会で経済成長を維持するには、働き方改革やデジタル化を進めて労働生産性を底上げする必要があると言われている。STM-SSP1とSTM-SSP5は労働生産性が上昇する未来を想定しているが、どちらのシナリオでも2050年度の経済成長率は0～1%に留まっている。働き手の減少に伴う生産規模の縮小を克服するには、ヒトが行う作業を効率化するだけでなく、人工知能とロボットを労働力として積極的に活用していく必要がある。

表-1.7 埼玉県のマクロフレーム（2050年度時点）

STM-SSP1シナリオ	STM-SSP2シナリオ	STM-SSP5シナリオ
県内総人口 656万人 2015年度比9.7%減少	県内総人口 632万人 2015年度比13.1%減少	県内総人口 695万人 2015年度比4.3%減少
県内就業者数 276万人 2015年度比8.9%減少	県内就業者数 269万人 2015年度比11.2%減少	県内就業者数 296万人 2015年度比2.3%減少
労働生産性（実質） 967万円/人 2015年度比34.8%上昇	労働生産性（実質） 815万円/人 2015年度比13.7%上昇	労働生産性（実質） 1122万円/人 2015年度比56.4%上昇
経済成長率（実質） +0.2%	経済成長率（実質） -0.4%	経済成長率（実質） +0.8%

4-3-2：埼玉県の社会課題その2：化石燃料の直接利用に依存した社会システム

埼玉県は毎年およそ4千万トン（CO₂換算、以下同様）の温室効果ガスを排出しており、化石燃料の直接・間接利用に由来するCO₂が排出量全体の8割以上を占めている¹²⁾。部門別エネルギー需要モデルにSTM-SSPsを入力して得られたエネルギー起源CO₂排出量の経年変動を図-1.6に示す。ただし、長期的な傾向を見やすくするため、年別値の代わりに2010年代、2020年代、2030年代、2040年代の期間平均をプロットしている。火力発電に強く依存した状態で経済成長を追求するSTM-SSP5では、CO₂排出量が増加傾向を示しているが、その他のシナリオでは減少傾向を示している。電源の脱炭素化を達成するSTM-SSP1に注目すると、産業・業務その他・家庭部門のCO₂排出量が顕著に減少する一方で、運輸部門のCO₂排出量にはほとんど変化が見られない。2050年度時点の排出削減率は2013年度比マイナス60.2%に留まり、カーボンニュートラルには程遠い状況となっている。この推計結果は、埼玉県の社会システムが化石燃料の直接利用に強く依存していることを意味する。大規模な発電所をもたない埼玉県では、県外の電気事業者が実施している緩和策に「ただ乗り」しようとするインセンティブが働く。しかし、空調や給湯の電化が進まないかぎり、電源の脱炭素化による排出削減効果は限定的であり、2050年度のCO₂排出量である1,631万トンは埼玉県が自力で削減しなければならない。特に運輸部門の排出削減は、エンジンの電気自動車または燃料電池車への転換、及び合成燃料（e-fuel）の普及が前提となっており、国のエネルギー政策に影響を与える可能性がある。

図-1.6 埼玉県エネルギー起源CO₂排出量の推計結果4-3-3：2050年までのCO₂排出量削減策の検討結果

AIM/ExSSを用いて埼玉県でカーボンニュートラルを達成できる状況を推計した。推計結果を図-1.7に示す。最終エネルギー消費量は2030年に14%、2050年に41%低減することとなった。エネルギー種構成は日本全体の分析結果（サブテーマ2の成果）を踏まえ、電力比率が増加し、化石燃料消費を大幅削減させ、合成燃料の利用拡大を図ることで達成する。その結果、CO₂排出量は2013年比で2030年40%以上削減でき、2050年はネットゼロを達成できた。特に、埼玉県の産業構造を踏まえると、発電、セメント生産、廃棄物焼却由来のCO₂回収及びその利用・処分が必要になることがわかる。

また、県内の市町村を対象としたヒアリングを実施した結果、地方公共団体実行計画（区域施策編）の策定や脱炭素先行地域をはじめとして、地域の脱炭素化に積極的に取り組む自治体では、ESG経営に取り組む大企業や新電力との連携等様々な連携が進みあることが明らかになった。一方、多くの自治体では域内のGHG排出量を正確に把握できておらず、施策の効果検証に支障をきたしていることも明らかになった。

地域の脱炭素化は、地域の特徴により実現の難易度が異なる。そのため、地域内でできる対策で脱炭素を目指すのではなく、地域内外で適切な連携を進めていくことで、日本全体の脱炭素社会実現を目指すことが大切である。

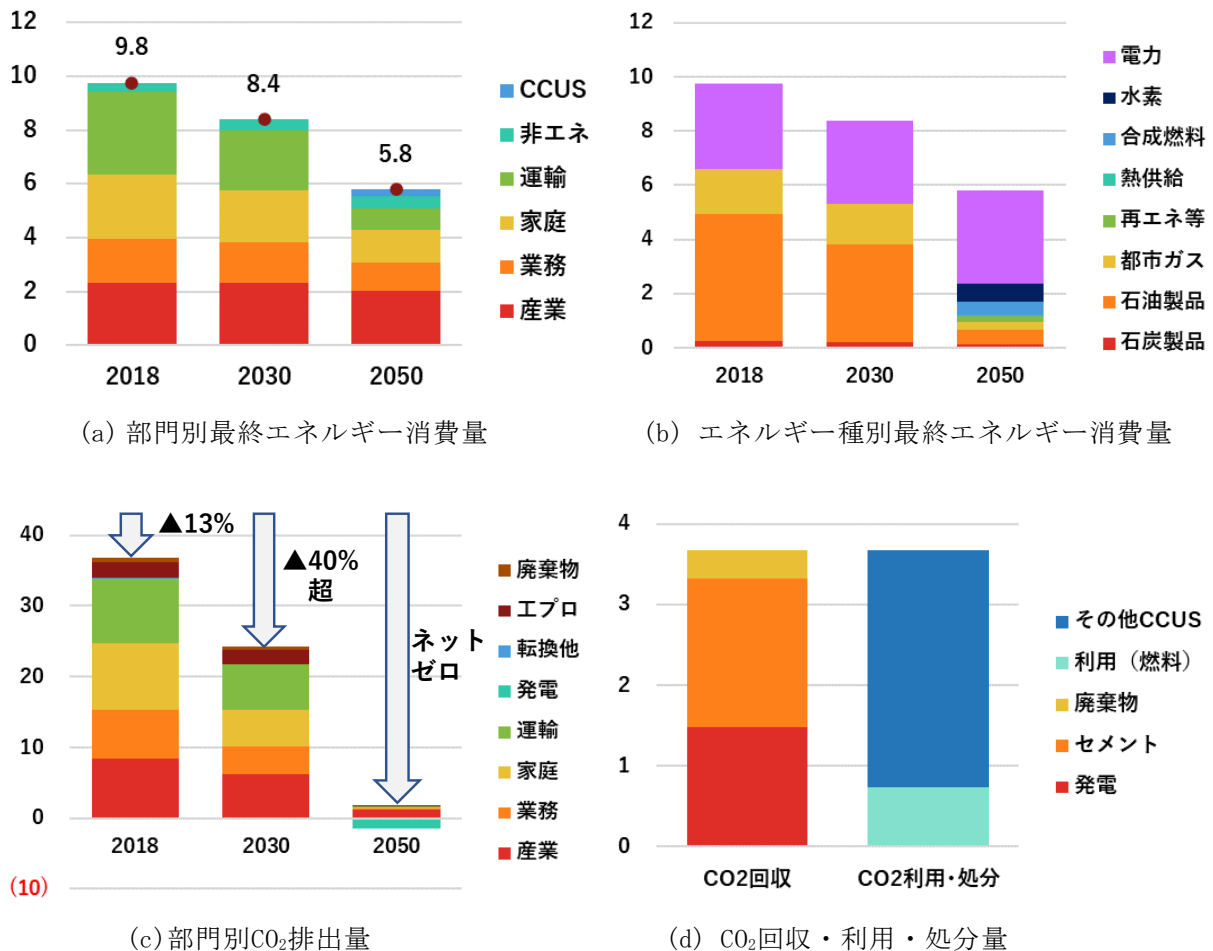


図-1.7 2050年における埼玉県のCO₂排出量削減策検討結果

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ1は、設定した3つの課題が情報を共有し、当初の予定通り分析を実施することができた。具体的には、地域における各種社会課題を踏まえ、それらを解決する方策としてICTサービスが導入された場合の叙事的なライフスタイルシナリオを作成し、そのシナリオをベースに3つの課題でそれぞれ定量的な分析を実施した。さらに、地域（埼玉県）については、2050年までの日本の社会経済状況を踏まえた脱炭素社会シナリオと整合する形で、2050年に埼玉県が脱炭素社会を実現するために必要なことを明らかにした。以上より、研究目標どおりの成果をあげたものと考えている。

6. 引用文献

- 五味馨, 金森有子, 松橋啓介(2020) 日本SSP市区町村別人口推計 環境研究総合推進費2-1805 (気候変動影響・適応評価のための日本版社会経済シナリオの構築) の成果, 国立環境研究所社会システム領域ディスカッションペーパー, 2020-01,
<https://www.nies.go.jp/social/dp/dpindex.html> (2021年6月1日アクセス)
- 金森有子(2022) わが国の家庭部門における2030年及び2050年の温室効果ガス削減目標達成に関する分析, 土木学会論文集G(環境), 78, 6, II_215-II_224.
- 菅史人(2021) 2050年に向けた産業メガトレンド, 住友商事グローバルリサーチ.
- 武田洋子(2020) 未来社会構想2050, 三菱総合研究所.
- 次世代人工知能技術社会実装ビジョン作成検討会(2016) 次世代人工知能技術社会実装ビジョン,
<https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/ai/1kai/siryo4-2.pdf> (2020年6月1日アクセス)
- 川口伸明(2020) 2060 未来創造の白地図, 技術評論社.

- 7) H. Chen, K. Matsuhashi, K. Takahashi, S. Fujimori, K. Honjo and K. Gomi: Sustainability Science, 15, 985-1000 (2020) Adapting global shared socio-economic pathways for national scenarios in Japan.
- 8) 松橋啓介, 高橋潔 (2020) 日本版SSP (社会経済シナリオ) の叙述とイメージ, 国立環境研究所社会システム領域ディスカッションペーパー, 2020-03.
- 9) K. Honjo, K. Gomi, Y. Kanamori, K. Takahashi and K. Matsuhashi (2021) Long-term projections of economic growth in the 47 prefectures of Japan: An application of Japan shared socioeconomic pathways, Heliyon, 7, e06412.
- 10) H. Zou and T. Hastie: Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), 67, 301-320 (2005) Regularization and variable selection via the elastic net.
- 11) 国立環境研究所AIMプロジェクトチーム(2021)日本の2050年脱炭素社会を実現する分析結果, https://www-iam.nies.go.jp/aim/projects_activities/prov/2021_2050Japan/20210630_NIES.pdf (2022年3月31日アクセス)
- 12) 埼玉県環境部温暖化対策課, 埼玉県環境科学国際センター: 2022年度埼玉県温室効果ガス排出量算定報告書 (2020年度算定値) .

II-2 日本の脱炭素社会シナリオの定量評価

みずほリサーチ&テクノロジーズ

サステナビリティコンサルティング第1部

(同上)

(同上)

(同上)

(同上)

(同上)

(同上)

元木 悠子

日比野 剛 (令和2年4月～令和2年6月)

小山田和代 (令和2年4月～令和3年5月)

平山 智樹

川村 淳貴 (令和2年4月～令和3年6月)

長島 圭吾 (令和2年4月～令和2年6月)

大田 宇春 (令和3年7月～令和4年度)

京都大学

工学研究科都市環境工学専攻

大城 賢

研究協力者

国立研究開発法人国立環境研究所

社会システム領域 脱炭素対策評価研究室

増井 利彦

社会システム領域 地域計画研究室

芦名 秀一

社会システム領域 脱炭素対策評価研究室

Silva Herran Diego

社会システム領域 脱炭素対策評価研究室

日比野 剛 (令和2年7月～令和4年度)

[要旨]

脱炭素社会の実現に向けた検討を可能にするように各種モデルの開発及びその実行のためのデータ収集・加工作業を行う。そして、サブテーマ1の分析結果をうけて、各種モデルを用いてわが国の社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立する社会経済シナリオを構築し、2050年までに脱炭素社会の実現に向けた道筋を分析によって明らかにした。技術モデルからは、脱炭素社会の実現に向けた経路によっては、発電・民生部門において座礁資産が増大する可能性があることが示された。また、脱炭素社会の実現において発電部門では太陽光発電と風力発電が大きな役割を占めること、その割合が大きくなるについて需給バランスを確保するために蓄電池の導入量が大きく拡大することが示された。風力発電のポテンシャル分析からは、陸上風力、洋上風力ともに現状の日本の発電電力量を上回るポテンシャルを有するが、洋上風力の方が年間設備利用率を高い水準で維持できる質の高い資源の割合が大きいことが示された。世帯に着目した分析では、太陽光パネルは投資効果が削減面だけでなく、経済面でも大きく、その他の経済面で有効性が劣る対策を補い、家庭全体として経済面でもプラスの効果を実現しつつ、家庭の脱炭素の実現を可能にすることが示された。応用一般均衡モデルの分析では、NDCの延長シナリオと比べて脱炭素社会に実現に向けて革新的な技術を加速度に導入させていくことで、その増加する投資に伴いGDPが低下することが示されたが、その程度はGDP増加率が0.43%から0.28%へと0.15ポイントの低下であり、成長は維持されることが分かった。

さらに複数のモデルを組み合わせて、2050年までに脱炭素社会の実現に向けた道筋を算定した。脱炭素社会の実現のためには、省エネ、電化、エネルギーの低炭素化が必要であり、2050年最終エネルギー消費量は2018年比半減程度、電化率は2018年3割から2050年5割に、2050年の発電構成は再生可能エネルギー、原子力、対策付火力発電（CCUS、アンモニア）の組み合わせによる脱炭素電源が100%となることが示された。また、脱炭素社会の実現は化石燃料の大幅な低減を通じて、エネルギー自給率の大幅な向上（11%（2018年）から65%（2050年））、エネルギー輸入額の大幅な低減（19兆円（2018年）から6兆円（2050年））となることが示された。分析では、デジタル化の進展や循環型社会の形成などに伴う社会変容がもたらす影響について推計したが、脱炭素社会の構築のための総投資額の低減や社会実装の制約・不確実性が高い革新的な技術に対する依存の低減に繋がることが分かり、社会変容が脱炭素社会の実現性を高めることが示された。

1. 研究開発目的

Society5.0 や地域循環共生圏の提案を踏まえ、わが国が直面する社会課題の解決と、脱炭素社会の実現を両立させるような社会及び生活・消費構造の変化を定量的に明らかにし、そうした変化を実現させる道筋を評価する。そのために、将来における消費者の行動変容と技術イノベーションを考慮した今世紀後半早期の脱炭素社会の実現に向けた道筋を提示する。また、家庭部門を対象に、その他部門とのセクターカップリングによる再生可能エネルギーの大量導入を前提とした脱炭素エネルギーシステムの実現に向けた技術シナリオを構築する。

2. 研究目標

サブテーマ1の分析結果をうけ、技術モデルを用いてわが国の社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立する社会経済シナリオを構築し、2050年に脱炭素社会の実現に向けた道筋を技術モデル、応用一般均衡モデルを用いた分析により明らかにする。

3. 研究開発内容

サブテーマ2では、脱炭素社会の実現に向けた検討を可能にするように各種モデルの開発及びその実行のためのデータ収集・加工作業を行った。そして、サブテーマ1の分析結果をうけて、各種モデルを用いてわが国の社会課題の解決と脱炭素社会の達成を両立する社会経済シナリオを構築し、2050年までに脱炭素社会の実現に向けた道筋を分析によって明らかにした。技術モデル（3-1）と応用一般均衡モデル（3-2）はそれぞれの自立的な分析を行うとともに、複数モデルを組み合わせることでエネルギー需給両面を踏まえた脱炭素社会実現に向けたロードマップを明らかにした。

3-1 技術モデル

3-1-1：技術選択モデル（AIM/エンドユースモデル）

AIM/エンドユースモデルを活用して、2050年における温室効果ガス排出量のネットゼロに至る経路について推計を行った。AIM/エンドユースモデルは個別のエネルギー機器の積み上げによって全体のエネルギー需給構造を定量的に表現しており、将来の各年における機器選択が全体のエネルギー消費量及びCO₂排出量を決定するモデルである。AIM/エンドユースモデルは後述するように複数モデルを組み合わせた分析に用いるが、それと並行して本モデル単独で、排出経路とエネルギー機器の座礁資産との関係に関する分析も行った。この分析には、地域別のエネルギー需給モデルと代表的な時期における24時間電源モデルを内包するモデル（AIM/Technology）を用いた。この分析では急速な温室効果ガス排出削減に伴う座礁資産（耐用年数前に停止・除却が必要となる設備の量）を定量化することを目的とし、設備の年間稼働率がゼロとなる場合を座礁資産の定義とした。なお電源については、年間（24時間×代表日）を通じて稼働しなかった場合のみを座礁資産としてカウントしており、例えば電力需要のピーク発生日に1時間でも稼働した場合は、バックアップ電源として利用されているとみなし、座礁資産には含めないこととした。また座礁資産の金額換算においては、座礁資産化した設備の容量に、当該設備の年価を掛けることで算出を行った。本分析では、排出削減の速度について複数のパターンを想定した。排出削減については、前述の通り各排出シナリオにおいて設定した排出パスを排出量上限として課す方法を用いており、すべての部門について内生的に共通の炭素価格が課される状況を想定している。加えて、技術政策あり・なしの2ケースを想定し、前者においては民生部門の電化技術の初期費用への補助金を設定した。具体的には民生部門におけるエアコンおよび電気ヒートポンプ給湯機に対して、初期費用の1/3に対し補助金を設定した。

3-1-2：電源計画モデル

電力の需給バランスを確保しつつ、再生可能エネルギー、特に太陽光発電や風力発電などの変動性再生可能エネルギー（Variable Renewable Energy、VRE）の導入量を拡大したエネルギーシステムの実現可能性を分析するため、本研究ではAIM/多地域電源計画モデル（Multi-regional Optimal

Generation Planning Model、AIM/MOGPM) を用いた。AIM/MOGPMは、1時間ごとの電力需要とVREの出力パターンを入力として、年間のCO₂排出量上限や発電設備の出力変動量の上下限などの制約条件のもとで、解析対象年次ごとの総費用を最小とする最適化計算により、発電種別ごとの毎時発電量（電源運用）や設備容量の追加分を求めることができる線形計画モデルである。本研究では、発電設備として原子力発電、石炭火力発電、CCS付き石炭火力発電、石油火力発電、ガス火力（ボイラー）発電、ガスコンバインドサイクル発電、一般水力発電、揚水式水力発電、太陽光発電、風力発電（陸上・洋上）、中小水力発電、地熱発電、バイオマス発電、CCS付きバイオマス発電、蓄電池を考慮しており、それぞれについて設定した設備費、運転維持費、燃料費の合計を総費用としている。

モデルでは、図-2.1に示すように日本全国を一般送配電事業者の供給区域ごとに10地域に分割し、それぞれに電力需要や既設設備の発電設備容量を設定する。地域間には、実際の送電ネットワークを参考とした連系線を設定しており、地域をまたがった電力融通についても考慮することを可能としている。電力需要は、一般送配電事業者の本社所在地に設置した電力需要ノードで地域全体を代表することとした。電力需要の毎時パターンは、基準年（2015年）については各電力会社の電力使用実績データに基づき設定し、将来については、基準年の需要パターンに年間需要の増減率を乗じて設定した。電力需要量はAIM/エンドユースモデルで推計した電力需要量を10地域別・毎時単位にダウンスケールして設定した。需要量は3-3-2に後述する2つのシナリオ（革新技术シナリオ、社会変容シナリオ）の値を用いて分析した。発電設備は、電力需要ノード近傍に立地すると想定し、発電設備別の設備容量は、基準年は地域別の実績値を用いるが、将来については最適化計算の結果に基づいて設定される。

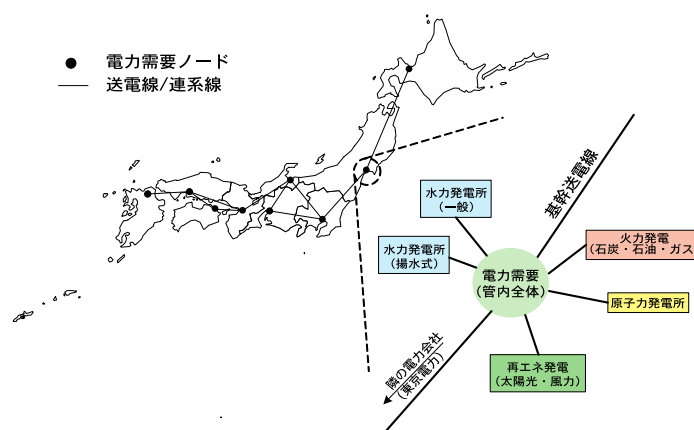


図-2.1 AIM/MOGPMの地域区分と連系ネットワーク

再生可能エネルギー発電設備の導入量（設備容量）は最適化計算を通じて決定されるが、本分析においてはその上限量（ポテンシャル量）は環境省の再生可能エネルギー情報提供システム（REPOS）の都道府県ごとのシナリオ別導入可能量を地域別に集計して設定した。毎時発電量は、設備容量に外生的に設定した地域別の毎時稼働率を乗じて求めるが、モデルでは需要を超過し、また揚水式水力発電や蓄電池でも貯蔵できない発電量については、解列できるものと想定した。

3-1-3：再生可能エネルギーポテンシャル推計

日本全国における風力発電のエネルギーポテンシャルを推計して分析するために、地理情報データを用いたモデルを開発した。こうしたモデルの出力は、電源計画モデルに必要となる再生可能エネルギーの利用可能量として入力される。モデルの特徴として、風速の毎時データと風車の性能情報に基づいて、風力発電の理論的ポテンシャルを求める。結果は5kmメッシュで1年間の毎時で算出され、日本の発電地域（power utility regions）の10地域別とグレード別で合計される。元のデータはJRA55のデータベースになり、2010年を対象になる。想定風車は3.4MW、90メートルの高さ、90メートルのrotor diameterで、cut-in、cut-offとrated風速はそれぞれ3m/s、25m/sと13m/sである。

3-1-4：一家庭における技術選択のシナリオ分析

一家庭を対象にした分析においては、一家庭における給湯・冷暖房・家電製品等によるエネルギー消費のほか、太陽光パネルによる自家発電や蓄電池・ヒートポンプ給湯機を用いた蓄エネを考慮したエネルギー需給量を推計し、将来のCO₂排出量、エネルギー消費量、脱炭素投資額および省エネ・創エネによるコストメリットを各年で推計する生活エネルギー需給モデルを開発した。本モデルでは、初年度に各機器・設備の初期投資額を計上した上で、計算終了年度にかけて耐用年数を迎える機器の置き換え

に要する投資額、および各機器で消費するエネルギー消費とその光熱費を経年で推計する。導入する機器の性能や優先利用するエネルギー種、エネルギー価格、太陽光パネルや蓄電池の導入有無などの想定に対して複数のシナリオを与えることで、家庭部門における省エネ・脱炭素技術によるコストメリットやエネルギーの削減効果、CO₂排出削減効果を推計することができる。具体的には、従来型技術を導入するケースを「現状継続ケース」、対策技術を最大限導入するケースを「脱炭素住宅ケース」とし、脱炭素住宅ケースと現状継続ケースを比較することで、2025年から2050年にかけて得られるCO₂削減効果、エネルギー消費削減効果および脱炭素化に必要な追加投資額と得られるコストメリットの定量的な推計を行った。また、新築の戸建て住宅を想定するシナリオを「(I)標準対策シナリオ」、新築の想定を既築改修のものに変更したシナリオを「(II-i)既築改修シナリオ」、燃料費の想定を変更したシナリオを「(II-ii)燃料高騰シナリオ」とし、各シナリオにおいて現状継続ケースと脱炭素住宅ケースの推計を行い、その差分を取ることで家庭部門の脱炭素化に伴うエネルギー削減効果や追加投資額を推計した。既築改修シナリオは既存の住宅ストックへの影響を分析するため、燃料高騰シナリオは将来的に化石燃料需要が減少した際の価格高騰の影響、あるいは政策により化石燃料に炭素税が賦課された際の影響を分析するため、それぞれ作成したシナリオである(表-2.1)。

表-2.1：本分析において考慮するシナリオの概要

シナリオ名	対象住宅	標準対策シナリオとの違い
(I) 標準対策シナリオ	戸建住宅(新築)	-
(II-i) 既築改修シナリオ	戸建住宅(既築)	・壁体の断熱改修は考慮せず、窓のみ高断熱なものへの交換を考慮。 ・ヒートポンプ給湯器とIHコンロの導入時に、ガス管の撤去・電線の配線のための工事費用を考慮。
(II-ii) 燃料高騰シナリオ	戸建住宅(新築)	・ガス価格が高位(2023年1月水準相当)で推移することを想定。

標準対策シナリオでは、2025年に東京都内に3人世帯の戸建て住宅を新築することを想定した。脱炭素住宅ケースでは、エアコン、ヒートポンプ給湯器、IHコンロ、LED、高性能断熱材、太陽光パネル5kW、定置蓄電池10kWhを対策として導入することを想定した。標準対策シナリオを例に、ケースごとに導入する機器の想定を表2-2に整理する。定置蓄電池以外の対策は新築時の2025年から20年間のローンを、定置蓄電池は2035年から10年間のローンを組んで導入することを想定した。エネルギーを消費する機器については時間別の稼働パターンを設定し、太陽光発電の時間別の発電量と併せて、一家庭における一日の需要家曲線(ロードカーブ)を夏期、冬期、中間期の3つの時期別に作成した。標準対策シナリオの脱炭素住宅ケースを例に、一家庭における一日のロードカーブの想定を図2-1に整理する。太陽光パネルにより発電された電力は、家庭内の電力需要と定置蓄電池の蓄電可能量に応じ、①機器需要に合わせ即座に消費される、②定置蓄電池に充電される、③系統に売電される、のいずれかが選択されるものとした。電力価格は東京電力エナジーパートナーの家庭用料金として26円/kWhを、都市ガス価格には東京ガスの基準単位料金として130円/m³を想定した。系統電力の排出係数は、2025年は東京電力エナジーパートナーの2020年度の公表値である0.44kgCO₂/kWhとし、2030年に地球温暖化対策計画の0.25kgCO₂/kWhとなり、以降2050年にかけて0kgCO₂/kWhになるよう線形減少することを想定した。都市

表-2.2：本分析において考慮するシナリオの概要

設備	現状継続ケース	脱炭素住宅ケース	寿命
空調	ガスストーブ	エアコン	14年
給湯	ガス給湯器	ヒートポンプ給湯器	12年
厨房	ガスコンロ	IHコンロ	10年
照明	蛍光灯	LED	(蛍光灯)3年 (LED)10年
断熱材	等級4	等級6	-
太陽光発電	-	PVパネル(5kW)	26年
定置蓄電池	-	定置蓄電池(10kWh)	16年

※ベースロード機器、燃料価格、排出係数等、上記の対策以外の想定は共通

ガスの排出係数は、東京ガスが公表する2.21kgCO₂/m³が将来にかけて一定であることを想定した。これらより一家庭のエネルギー収支を求め、2025年から2050年まで各年のCO₂排出量、エネルギー消費量、脱炭素投資額および省エネ・創エネによるコストメリットを推計した。また、標準対策シナリオから一部のパラメータを修正した前述の2つのシナリオにおいても同様の推計を行った。

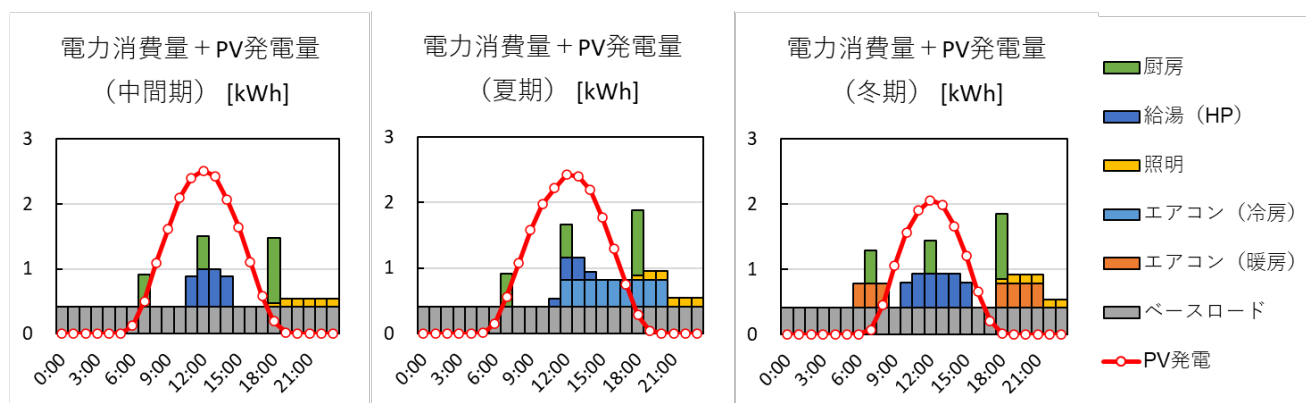


図-2.2 一家庭における一日のエネルギー需要家曲線（ロードカーブ）の想定
（標準対策シナリオ脱炭素住宅ケース）

3-2：応用一般均衡モデル

国立環境研究所では、これまでに温室効果ガス排出量の削減に向けた取り組みの経済活動への影響を評価するために、日本を対象とした経済モデルである応用一般均衡（CGE）モデルAIM/CGE [Japan]の開発とそれを用いた分析を行ってきた。2050年における日本の温室効果ガス排出削減目標が80%削減から実質ゼロに強化されたことを受けて、本推進費においては、技術選択モデルであるAIM/Enduse [Japan]等で示された2050年までに日本の温室効果ガス排出量を実質ゼロにする取り組みの評価をAIM/CGE [Japan]を用いて行ってきた。分析において改良した点は以下の通りである。

- ①温室効果ガス排出量の実質ゼロを実現するために新たに想定された技術（負の排出技術を含む）が導入可能となるよう、技術のカテゴリーを増加した。
- ②バイオ燃料、水素やアンモニアなど新たなエネルギー種の導入が可能となるように、各部門のエネルギー投入構造を更新するとともに、これらのエネルギー種を生産する部門を追加した。
- ③技術選択モデルによるゼロシナリオに対応したCCS導入量や合成燃料の製造に必要な炭素のリサイクル量などを反映するようにシナリオを更新した。
- ④技術選択モデルとの整合性や将来シナリオの展開を踏まえて、部門の見直しを行った（従来の40部門から48部門に拡張（エネルギー供給の追加は除く））。

モデルの基本構造は、これまでに開発してきたAIM/CGE [Japan]と同様である。生産部門は利潤最大化、家計部門は効用最大化を想定し、2005年を基準にパラメータをキャリブレーション法で計算し、1年ごとに技術進歩や消費行動の変化を反映させたパラメータに対して、価格メカニズムを通じてすべての市場や部門が均衡するように計算が行われる。

生産部門では前年までに導入された資本を用いた生産と、新たな設備投資を資本として用いた生産があり、省エネ等の脱炭素技術は新たな設備投資による生産において、追加投資を負担した上で選択される。選択された脱炭素技術は、新たな設備において選択されると、投下された設備投資に応じて翌年以降もその技術を用いた生産が可能となる。また、家庭におけるエネルギー需要は、自家用車に関するものとそれ以外に分けられ、それぞれ新規の設備（自動車や家電製品など）の購入の際に省エネ製品の選択が可能で、省エネ製品が選択されればその効果が翌年以降も継続するとしている。なお、脱炭素技術の導入においては、AIM/Enduse [Japan]で想定されている追加費用が必要になるとしている。

AIM/Enduse [Japan]の分析において想定しているシナリオは、下記の3つである。「NDC継続」シナリオは、2030年にNDC（2013年比46%削減）を達成し、それ以降も同様の省エネ技術等を前提とするシナリオである。「脱炭素」シナリオは、2030年までは「NDC継続」シナリオと同じであるが、それ以降は2050年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロにするように対策を強化するシナリオである。「脱炭素2」シナリオは、脱炭素社会の実現に向けた技術メニューは同じであるが、脱炭素技術の導入に際して長期間を踏まえた意思決定が可能となるように、投資回収年数を3年から産業部門は20年、家計部門は10年に変更したものである。なお、3つのシナリオともに、発電部門の電源構成は、AIM/Enduse [Japan]の結果

を上限として設定している。

3-3：複数モデルの組み合わせによる分析

3-3-1：スナップショット型モデルを用いた予備的検討

日本において2050年に脱炭素社会を実現するという新たな目標に対応するために、2050年を対象としたエネルギー需給構造の整合性を確保したスナップショット型のモデルの開発を行い、2050年において温室効果ガス排出量の大幅削減を実現するための日本のエネルギー需給構造および温室効果ガス排出構造について推計を行った。この分析は1年目目実施され、モデルの組み合わせによる分析を実施する前の予備的検討として位置づけられた。脱炭素社会の実現には大幅なエネルギーシステムのトランジションが必要となるため、その勘所を掴むことが主目的である。部門別のサービス量、用途別・エネルギー種別のエネルギー効率、用途別・エネルギー種別のエネルギー種構成の想定を行うことで、日本全体のエネルギー需給構造及びCO₂排出量を算定するツールを既存のアカウントリングツールであるExSSツールの概念をもとに作成し、今回の分析に用いた。2050年の脱炭素社会を実現するためには必要な対策とその導入量、ネットゼロによる削減効果、分析に考慮した対策技術としては、省エネルギー技術、再生可能エネルギー技術に加え、水素、合成燃料などの新燃料、CCUS・カーボンリサイクル、ネガティブエミッション技術も対象とした。2050年の排出量推計にあたり、対策の方向性や導入水準に応じて、①少ないエネルギー・マテリアルでも高い便益・効用が得られる社会への変容する「社会変容シナリオ」、②電化が難しい領域においても徹底した電化を推進する「電化シナリオ」、③水素、合成燃料など新燃料を電化が難しい領域に積極的に活用していく「新燃料シナリオ」、④あらゆる対策を総動員して脱炭素社会を実現する「ネットゼロ排出シナリオ」、以上4つのシナリオを想定した。

3-3-2：複数モデルの組み合わせによる分析

IM/CGE、AIM/エンドユースモデル、AIM/MOGPMを組み合わせて、2050年における温室効果ガス排出量のネットゼロに至る経路について推計を行った。ここで用いたAIM/エンドユースモデルは、地域区分を有しない全国モデルであり、また、電力については年単位での需給整合のみを確保するver1.0を用いた。マクロフレームについては、経済成長はSSP2における経済成長率の想定、人口は国立社会保障・人口問題研究所による見通しを参照し、AIM/CGEによって推計した将来の社会・経済構造をもとにして、想定した。AIM/エンドユースを用いて、産業部門、業務部門、家庭部門、運輸部門について、エネルギー技術の積み上げによって、エネルギー需要量の推計を行い、そのエネルギー需要量を満たすために必要なエネルギー供給量およびその構成について推計した。発電電力量については、電源モデルとの連携を図り、時間単位での需給と年単位での需給が整合するようにした。分析に考慮した対策技術は、前述のスナップショットと同様である。分析において、3つのシナリオを想定した。

1) 脱炭素技術進展シナリオ（略称：技術進展シナリオ、BAT）：エネルギー効率改善、再生可能エネルギー技術について2030年まで計画通りに普及が進み、2030年以降もその速度で普及が進展する。その一方で、2030年以降に加速度的に大規模展開されることが期待される革新的脱炭素技術については、その展開が十分に進まないことを前提とする。

2) 革新的技術普及シナリオ（略称：革新技術シナリオ、INT）：1)に加えて、2030年以降に加速度的に大規模展開されることが期待される革新的な脱炭素技術の展開が十分に進展し、2050年GHG排出ネットゼロを実現するシナリオである。

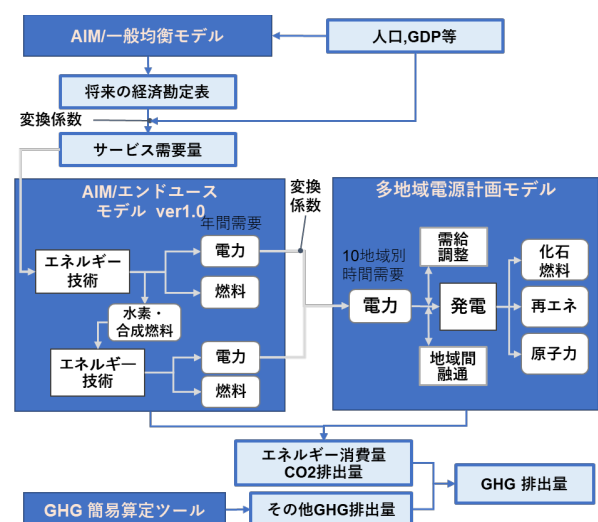


図-2.3 本分析におけるモデル構成

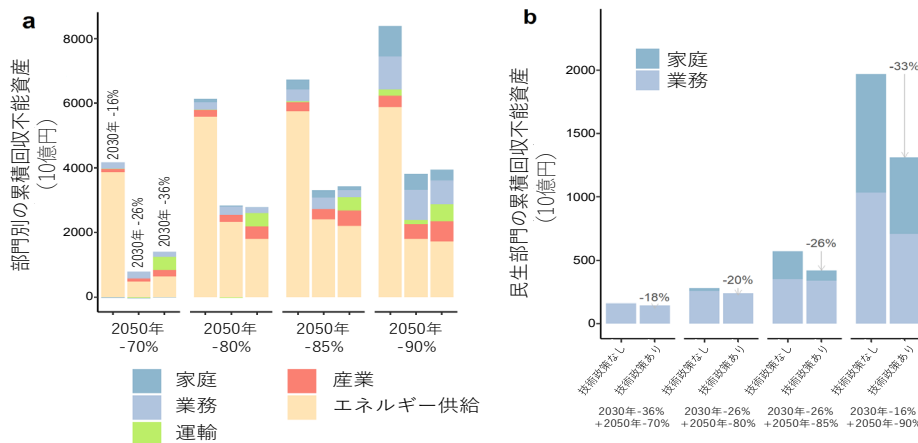
3) 社会変容シナリオ (略称: 社会変容シナリオ, STR) : 2) に加えて、デジタル化・循環経済の進展などの社会変容に伴って、人々の効用等を維持または向上させつつ財や輸送の需要が低減することを織り込み、2050年GHG排出ネットゼロを実現するシナリオである。これらのシナリオごとに将来のエネルギー消費量及びGHG排出量の推計を行った。

4. 結果及び考察

4-1: 技術モデル

4-1-1: 技術選択モデル (エンドユースモデル)

図-2.4(a)に2050年までの累積の座礁資産額を示す。最も座礁資産額が大きいのはエネルギー供給部門であった。特に2030年から50年にかけて急速な温室効果ガス排出削減を行った場合の影響が大きく、炭素回収貯留 (CCS) を伴わない石炭火力発電はそのほとんどが座礁資産となった。ただし2030年26%削減、またはそれ以上の削減を達成することで、停止が必要な設備の量は約半分に削減される結果となり、エネルギー供給部門の座礁資産額も大幅に低下する結果となっている。また2050年90%削減といったシナリオでは、エネルギー供給部門に加えて需要部門での座礁資産額が増大しており、特に民生 (家庭・業務) での座礁資産化が大きい。これは家庭・業務部門においてガス・石油を使用する空調・給湯設備についても耐用年数前に停止・除却され、電気ヒートポンプ機器等の機器に代替する必要があるためである。民生部門の座礁資産化は、2030年の削減量を36%に引き上げた場合でも、2050年90%シナリオでは増加しているため、上記のような削減を炭素への価格付け (いわゆる炭素税) のみで達成した場合、このような負の影響が生じることが明らかとなった。ただし、炭素への価格付けに加えて、エアコンや電気ヒートポンプ給湯機への補助金といったエネルギー技術政策を補完的に用いることで、家庭・業務部門で耐用年数前に除却が必要となる設備の量を、最大で約3分の1削減できることが明らかとなった (図-2.4(b))。本研究の結果より、大幅かつ急速な温室効果ガス排出削減に伴う負の影響を緩和する際には、炭素への価格付けに加えて、低炭素化に資する電化等の技術への補助金等、技術政策を組み合わせる包括的な政策を講じることの有効性が示唆された。



(a)各部門における耐用年数前に停止が必要となる設備の量 (2021年から2050年までの累積を金額換算したもの)。(b)民生部門 (家庭・業務) における耐用年数前に停止される設備の量。削減率 (%) は、エネルギー技術政策による効果を示す。

図-2.4 技術選択モデルによる結果

4-1-2 電源計画モデル

図-2.5に、本研究で設定した電力需要量を示す。電力需要は、最終需要部門での需要量は毎時で設定したが、水素等の新燃料製造用の電力需要は、所与とした年間の合計値を満たしていれば、供給力が確保できる範囲でいつ新燃料を製造してもよいとし、具体的なタイミングは最適化計算により決定されるものとした。なお、非常に低い稼働率の設備が導入されることを避けるために、分析では新燃料製造設備の稼働率下限を60%とおいた。

各シナリオにおいて、発電部門におけるCO₂制約の有無で「CO₂制約なし」ケースと「CO₂制約あり」ケースの2つをおいた。なお、新燃料製造用需要は、脱炭素対策として導入されることから、CO₂制約がない場合には国内で製造するインセンティブはないものと考えられることから、CO₂制約ありケースでのみ考慮することとした。また、再生可能エネルギー導入量については、2030年以降は、少なくとも長期エネルギー需給見通しは達成すると想定している。

図-2.6に、社会変容シナリオのCO₂制約なしケースの電源構成の変化を示す。発電量の大きな部分は石炭火力発電と天然ガス火力発電、原子力発電が担う傾向が2050年まで続くことがわかる。再生可能エネルギーは、2030年の長期エネルギー需給見通しの水準までは導入されるが、以降はいずれも横ばいのみで新規導入は進まない。

CO₂制約ありケースの結果（図-2.7a）を見ると、CO₂制約なしケースと比較して、2035年以降は石炭火力発電が急激に縮小し、代わってCCS付きガス火力発電と再生可能エネルギー発電、特に太陽光発電と風力発電が大きく増加することがわかる。また、風力発電の中でも陸上風力が優先的に導入され、洋上風力は2050年近くになってから導入が拡大する。

以上に加えて、本研究では2050年に再生可能エネルギーと蓄電池のみで電力供給が可能かの分析として、2050年まで原子力発電とCCS付き火力発電・バイオマス発電が利用できない場合を想定して試算（再エネ10割ケース）を行った。このケースの電源構成の変化（図-2.7b）を見ると、CO₂制約ありケースよりも早期に再生可能エネルギーの導入が進み、また、再生可能エネルギー導入量の増加とともに時間的な需給バランスの確保のために蓄電池の導入量が大きく拡大することがわかる。この結果から、電力部門において再生可能エネルギーのみで2050年CO₂ゼロを達成するには、2030年を待たずに、可能な限り早い段階から再生可能エネルギーと蓄電池導入の推進を行う必要があることが示唆されるものである。

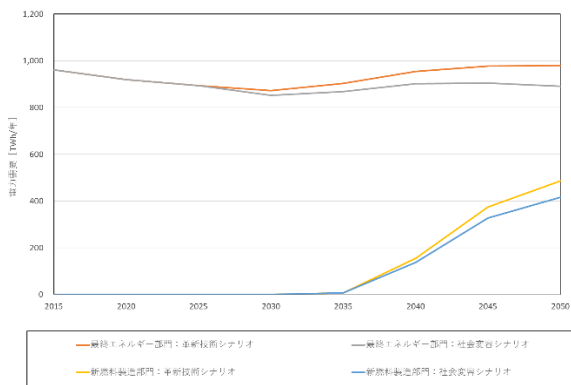


図-2.5 電力需要及び新燃料製造用需要の想定

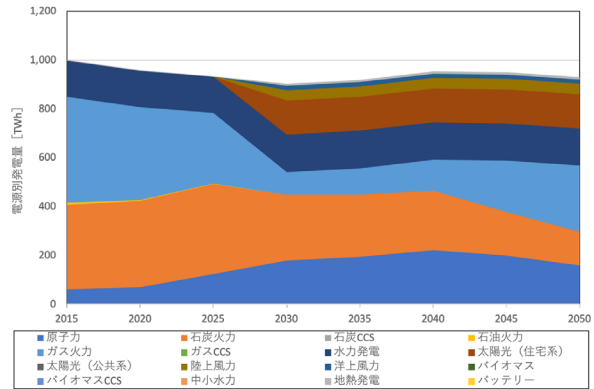
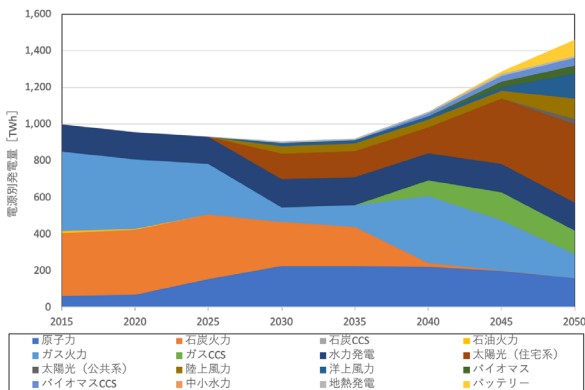
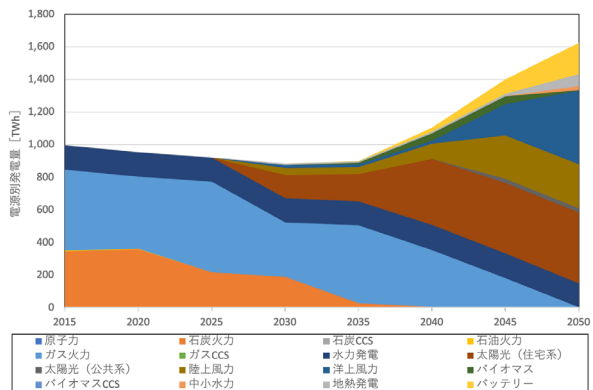


図-2.6 CO₂制約なしケースでの発電構成の変化



a) 再エネ7割ケース

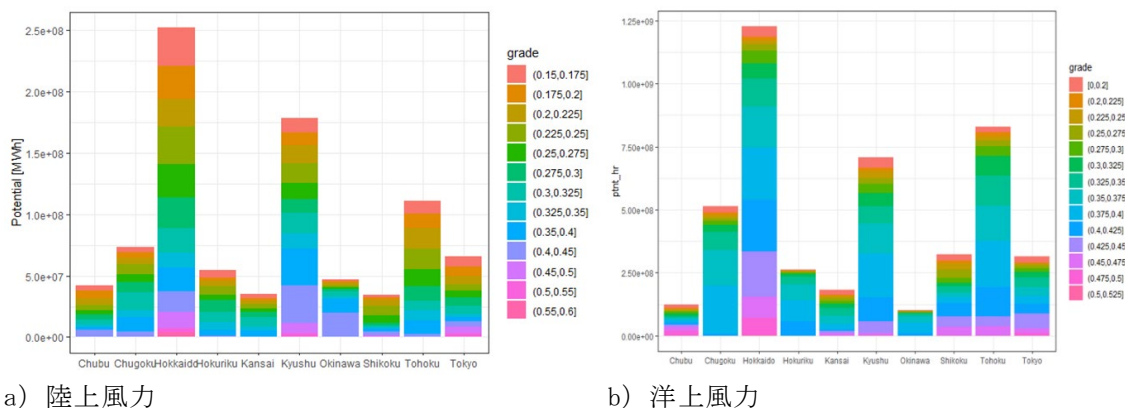


b) 再エネ10割ケース

図-2.7 CO₂制約ありの発電構成の変化

4-1-3 再生可能エネルギーポテンシャル推計

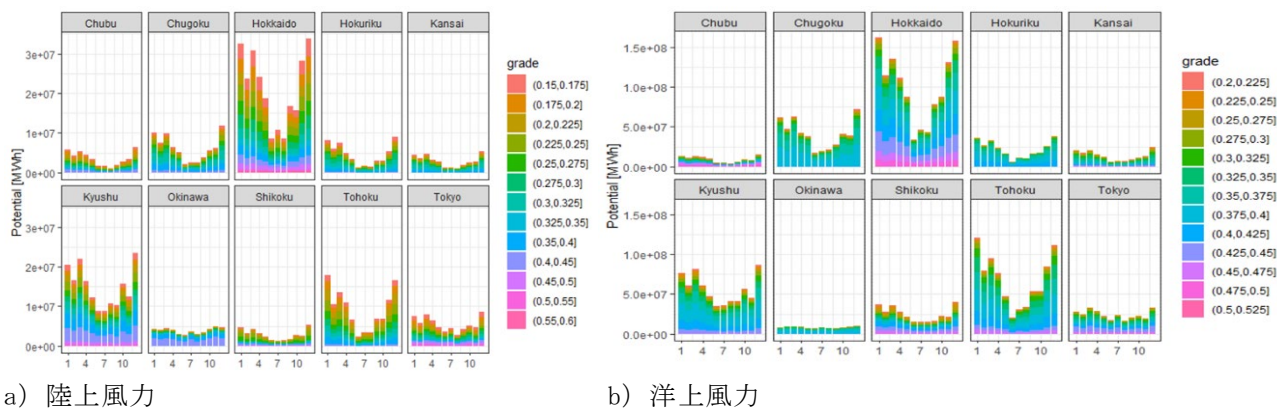
推計の結果として、風力発電の年間理論的ポテンシャルは陸上の場合2.2PWh/年で、北海道、東北と九州に集中することがみられた（全国の割合としてそれぞれ26%、17%、13%）。洋上の場合は、年間のポテンシャルが4.6PWh/年であり、陸上風力と同様の地域に集中された（それぞれ27%、18%、15%）。年間平均設備利用率（グレード）の分析による、陸上風力エネルギーポテンシャルが主に低グレードの資源で構成されており（全ポテンシャルの66%が20%以下の設備利用率である）、高グレードの資源が主に北海道に位置していることが分かった。洋上風力の場合、エネルギーポテンシャルが中グレードと高グレードの資源で構成されている（約80%のポテンシャルが20%以上の設備利用率である）。エネルギーポテンシャルの年内分布は、両方陸上風力と洋上風力が12月から3月にかけて多くなっていることであり、どの地域において同じパターンがみられた。



a) 陸上風力

b) 洋上風力

図-2.8 日本10地域グレード別年間理論的エネルギーポテンシャル



a) 陸上風力

b) 洋上風力

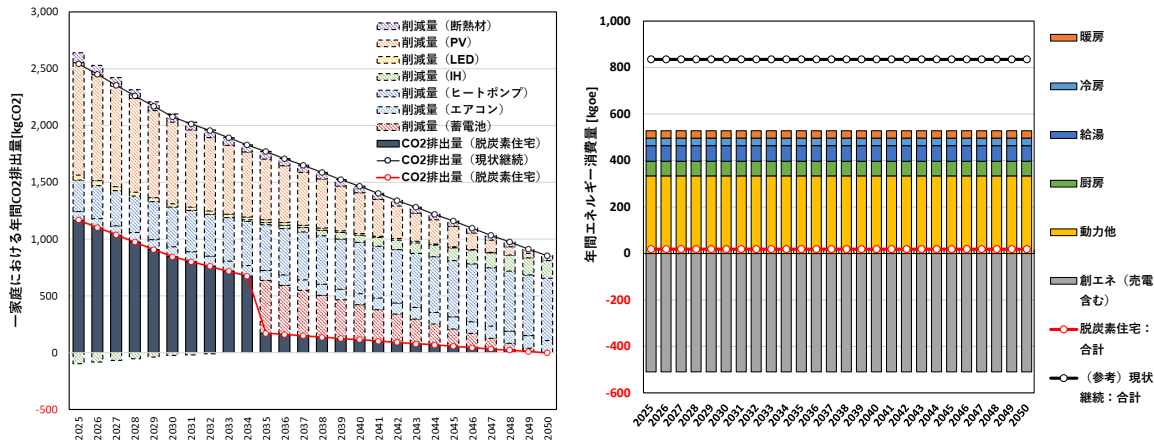
図-2.9 日本の10地域グレード別月別理論的エネルギーポテンシャル

4-1-4 一家庭における技術選択のシナリオ分析

標準対策シナリオにおける一家庭における各年のCO₂排出量の推計結果を図-2.10aに示す。系統電力の排出係数が2050年にかけてゼロに減少することを想定しているため、現状継続ケースでも排出量の低減が見られる。脱炭素住宅ケースにおける現状継続ケースからの累積CO₂排出量の削減量（黒色実線と赤色実線の差分の累積）は76%となった。特にヒートポンプ給湯器と太陽光パネルによる排出削減量が大きく、これらの対策の有用性が示唆された。また、特に太陽光パネルは系統電力の排出係数が低減される将来よりも足元の方が削減効果が大きいため、早期の対策導入が効果的であることが示唆された。

標準対策シナリオにおける一家庭における各年のエネルギー収支の推計結果を図-2.10bに示す。棒グラフに示す各機器でのエネルギー消費量が、マイナス方向の棒グラフで示す太陽光による自家発電量等によって96%賄われ、結果的に赤色実線に示すエネルギー収支がほぼゼロになる。脱炭素住宅ケースにおける現状継続ケースからのエネルギー消費削減量は、需要側機器の省エネのみでは37%に留まるが、太陽光パネルによる自家発電を考慮すると98%に達する。排出削減の観点だけでなく、エネルギー

消費量の削減の観点からも太陽光パネルの導入が効果的であることが示唆された。



a) CO₂排出量

b) エネルギー消費収支

図-2.10：一家庭におけるCO₂排出量・エネルギー消費収支（標準対策シナリオ）

一家庭における各年の脱炭素投資と得られるコストメリットの推計結果を図-2.11に示す。正の値が省エネ・創エネによって得られるコストメリット、負の値が脱炭素投資額である。また本分析では補助金は考慮していない。いずれのシナリオでも、特に太陽光パネルによる自家発電の影響により、2050年までに省エネ・創エネによるコストメリットのみで脱炭素投資を回収することが可能であることが示された。標準対策シナリオでは2050年の累計投資収支は30万円のプラスとなった。既築改修シナリオでは標準対策シナリオよりも断熱材の導入量が少なく、その分投資額が抑えられ、IHコンロやヒートポンプ給湯器導入時の配線工事費用の増加分を加味しても、2050年の累計投資収支は55万円のプラスと標準対策シナリオよりも大きくなった。燃料高騰シナリオでは、ガス価格の高騰に伴い省エネによるコストメリットが大きくなるため、2050年の累積投資収支は87万円のプラスとなった。また最終的に累計投資収支が正に転じるタイミングについて、最も早いもので、脱炭素投資によるコストメリットが出やすい燃料高騰シナリオの2046年であるが、それでも新築時の2025年から20年間は脱炭素投資を回収できない。損益分岐点の遅れは、消費者の主観的割引率に基づく省エネ脱炭素投資の判断を忌避する要因になるため、早期の対策導入を促すためにも、脱炭素投資への補助が必要であることが示唆された。

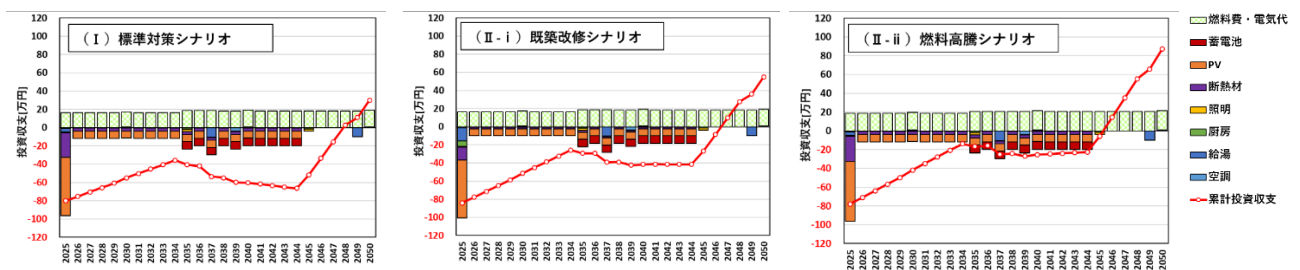


図-2.11 一家庭における各年の脱炭素投資と得られるコストメリット

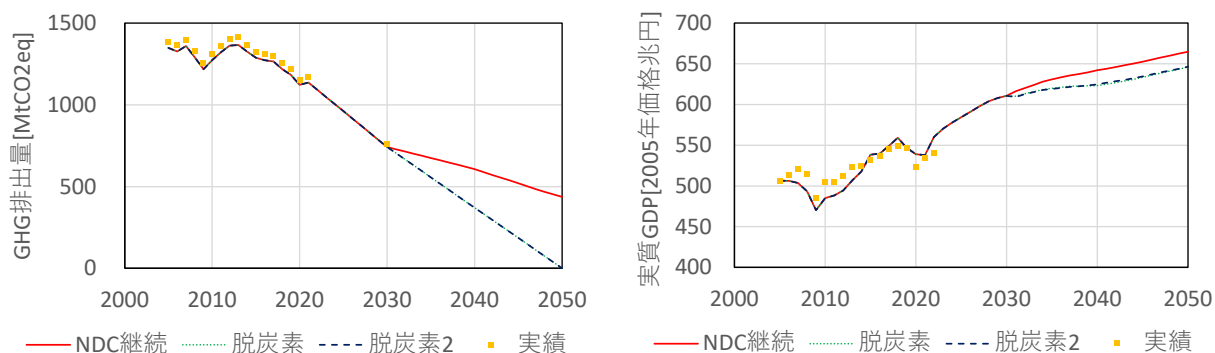
4-2：応用一般均衡モデル

AIM/CGE [Japan]を用いた2050年脱炭素社会シナリオの結果（温室効果ガス排出量と実質GDPの推移）を図-2.12に示す。「NDC継続」シナリオにおける2050年の温室効果ガス排出量は440MtCO₂eqとなり、2030年のNDCを達成するために必要となる技術では2050年脱炭素社会は実現できない結果となった。脱炭素社会を実現する「脱炭素」シナリオでは、温室効果ガス排出量は実質ゼロとなるが、2050年の実質GDPは「NDC継続」シナリオと比較して2.8%の低下となった。なお、「脱炭素」シナリオにおいても2030年以降の経済成長率は年率0.28%であり、「NDC継続」シナリオの年率0.43%と比較して年率0.15ポイントの低下に過ぎない。2050年において脱炭素を実現するための温室効果ガスの限界削減費用は4.9万円/tCO₂eqとなり、2030年から2050年にかけての年平均の追加費用（省エネ投資+再エネ投資）

は、「NDC継続」シナリオで11兆円、「脱炭素」シナリオで16兆円となった。また、2050年における発電電力量は、「NDC継続」シナリオにおいて0.95PWhであるのに対して、「脱炭素」シナリオでは合成燃料の生産により1.4PWhに増加している。

これに対して、脱炭素技術の導入に当たって長期的な視点を踏まえた「脱炭素2」シナリオでは、脱炭素技術の導入が加速し、2030年以降の年平均追加投資額は17兆円に増加するが、GHG排出削減ポテンシャルは増加し、2050年の実質GDPは「脱炭素」シナリオと比較して1兆円回復するとともに、更なる省エネが進むことから、発電電力量は3TWh低下する結果となった。なお、経済活動の回復にともなって、限界削減費用は5.2万円/tCO₂eqへと上昇する。

以上の結果から、脱炭素社会の実現に向けて、2030年のNDCの達成から取り組みを加速させる必要があること、それによる経済活動への負の影響は生じるものの経済成長の維持は可能であり、温室効果ガス排出削減をもたらす技術を加速させることでその影響は小さくなることが明らかとなった。



a) GHG排出量

b) 実質GDP

図-2.12 応用一般均衡モデルによるGHG排出量・実質GDPの推移

4-3：モデルの組み合わせによる分析

4-3-1：スナップショット型モデルを用いた予備的検討

技術モデルなどによる経路分析の前に、スナップショット型のモデルを用いて、2050年のエネルギー需給構造の把握するための予備的検討を行った。

最終エネルギー消費量は2050年ネットゼロ排出を実現する場合（Zeroシナリオ）において2018年比で4割減となり、化石燃料の消費量が大幅に減少し、合成燃料や電力が大きな割合を占める。2050年における水素の需要は、最終消費部門だけでなく、合成燃料の生産用途の需要もあり、例えば、Zeroシナリオでは1,500PJ、水素シナリオでは3,800 PJとなり、2018年度における最終消費部門の都市ガス需要量（1,073PJ）を大幅に上回る量に達する。電力の需要については、最終消費部門だけでなく、水素の生産用途の需要もあり、例えば、Zeroシナリオでは1兆5千億kWh、水素シナリオでは2兆3千億kWhとなり、2018年度における電力需要（1兆kWh）を大幅に上回る量に達することが示された。発電については、2050年において全てのシナリオにおいて、ほぼ全量が脱炭素電源となる。再生可能エネルギー発電の内訳については、導入ポテンシャルの大きさから太陽光発電と風力発電が主力となる。

2050年の温室効果ガスの排出量については、省エネ・再エネ推進、化石燃料起源のCO₂に対するCCUS、電化推進、水素利用を組み合わせ、エネルギー起源CO₂以外の温室効果ガスの排出削減を強化しても、現状比で1割程度の温室効果ガスの排出量が残存してしまう。そのために、それを相殺するためのネガティブエミッション技術（森林吸収、バイオマスエネルギー炭素回収貯留、その他）の導入が必要となることが示された。ここで得られた知見を活かして、複数モデルの組み合わせによる分析に移行した。

4-3-2 複数モデルの組み合わせによる分析

一般均衡モデルであるAIM/CGE、技術選択モデルであるAIM/エンドユースver1.0、多地域電源計画モデルであるAIM/MOGPMを組み合わせ用いて、技術進展シナリオ（BAT）、革新技術シナリオ（INT）、

社会変容シナリオ（STR）に応じた2050年までのGHG排出経路を推計した。以降にその推計結果を示す。

産業部門、業務部門、家庭部門、運輸部門を合計した最終エネルギー消費部門の最終エネルギー消費量の2018年、2030年、2050年値を図-2.13に示す。経済的に利用可能な脱炭素エネルギーの利用可能量には限界・制約があるので、エネルギー効率の向上によってどれだけエネルギー需要を低減することができるかが、ネットゼロの実現の鍵となる。最終エネルギー消費量は、それぞれのシナリオにおいて2018年比で39%、46%、50%の削減となり、最大で2018年比で半減となる可能性が示された。また、エネルギー種の構成を見ると、化石燃料の割合が低下し、電力の割合が増加している。燃焼機器から電力機器に転換していくこと、具体的には、産業プロセスにおける加熱や民生の暖房・給湯などを燃料燃焼から電力のヒートポンプ利用に転換すること、自動車を内燃機関車から電気自動車への転換することは、エネルギー効率の向上につながる。さらに再生可能エネルギーのポテンシャルは太陽光発電や風力発電に多く存在し、電化推進はこれらのポテンシャルを顕在化させることにつながる。2018年において最終エネルギー消費量（非エネルギー利用を除く）に占める電力の割合は29%であるが、2050年ではBAT42%、INT52%、STR54%となっている。産業プロセスや運輸の貨物輸送など電化が難しい領域では、新燃料利用が求められる。INTとSTRでは2050年における新燃料の割合が3割を超えている。INTとSTRにおいて残存する化石燃料は鉄鋼、セメントの石炭利用である。これらはCO₂回収によって大気中への直接放出はされない。INTとSTRでは、電力、新燃料、CCUSの組み合わせによって、CO₂排出の大幅削減を可能にするエネルギー構成になっている。

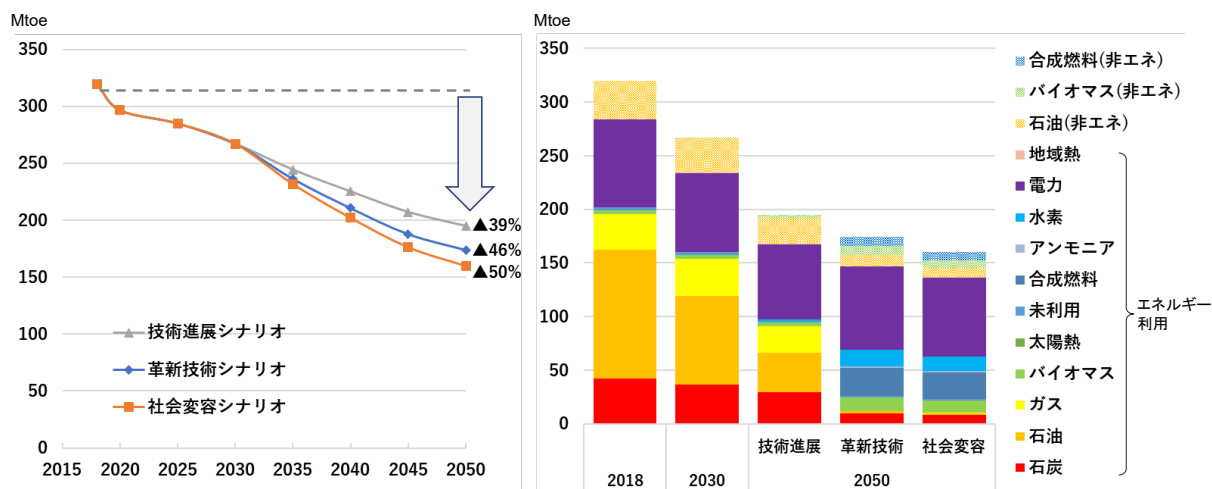


図-2.13：最終エネルギー需要

前述の通り、最終需要部門において新燃料利用は増大する。それぞれの新燃料について、INTとSTRの両シナリオにおいてその用途を概観する（図-2.14）。水素需要量は43～47石油換算百万トン(Mtoe)であり、そのうち、最終需要部門における需要は全体の3割程度であり、残りは合成燃料生産のための需要である。合成燃料はCO₂と水素の反応によって生産されるため、合成燃料の国内生産量に応じてそのための水素需要が発生する。本分析では合成燃料について需要の30%を輸入とし、70%を国内生産すると想定した。2050年の合成燃料の需要量は32～35Mtoeで産業用（非エネルギー利用分も含む）が8割程度を占める。同年のアンモニアの需要量は14Mtoeで、船舶用もあるが、大半が発電用である。水素の生産方法は化石燃料から生産するグレー水素、化石燃料から生産するが生産段階で発生するCO₂に対して回収・貯留を行い大気中への放出を回避するブルー水素、再生可能エネルギー発電によって生み出された電力を用いた水の電気分解によるグリーン水素に大別されるが、国内で生産する場合にはグリーン水素を前提とする。水素についても、合成燃料と同様に需要に対する国内生産の割合は70%とした。グリーン水素であるために水素需要の拡大に伴い、それに伴う電力需要量が増大することになる。2018年及び2050年における電力需要量を図-2.15(a)に示す。2050年INTとSTRの電力需要量は2018年比33～43%増加した。最終消費部門（産業+業務+家庭+運輸）の需要量は大きな変化はないが、新燃料生産用（主に水素生産のための電気分解用途）の需要が増加した。

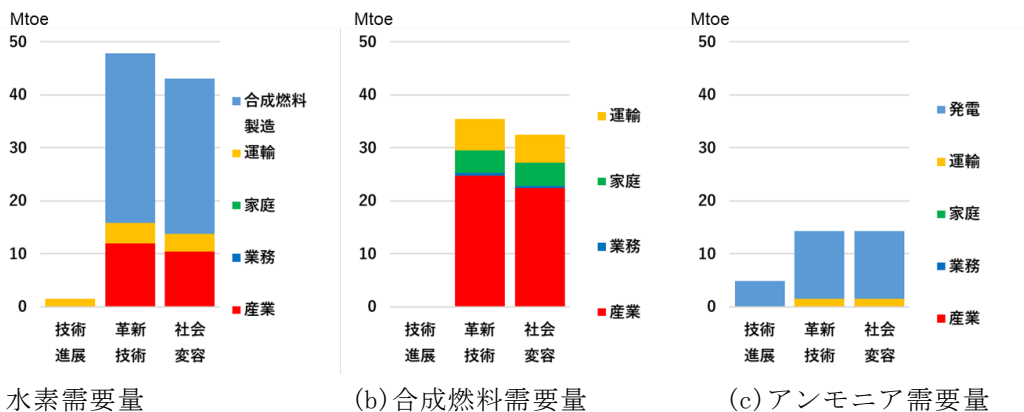


図-2.14：2050年新燃料需要量

発電電力量の推計にはAIM/多地域電源計画モデルを用い、時間単位での需給バランスが確保されていることを確認している。技術選択モデルによって推計された最終エネルギー消費部門の電力需要を一般送配電事業者の供給区域（10地域）別に年間8,760時間にダウンスケールしたものをを用いた。また、余剰電力については、各地域における水素製造設備の稼働率が60%を上回るという条件のもと、水素製造のために利用されるとした。水素と合成燃料生産用の需要については、地域や時間の制約なしで生産が行われることを想定した。なお、本分析はバイオマス火力を除く再生可能エネルギー発電の比率の上限を7割としたものである。前述の電力需要を満たすための発電電力量を図-2.15(b)に示す。図-2.15(a)と図-2.15(b)における需要と供給の総量の違いは、送配電損、蓄放電、系統解列に伴う損失によるものである。発電電力量に占める脱炭素電源の割合は、2018年23%から2050年には100%に達した。発電電力量に占める再生可能エネルギー発電の割合は、2018年17%から2050年にはINTとSTRではそれぞれ75%、74%に達した。特に、太陽光と洋上風力の発電量が大きく、2050年においてINTとSTRで太陽光はともに444TWh、洋上風力はそれぞれ2050年432TWh、338TWhとなった。

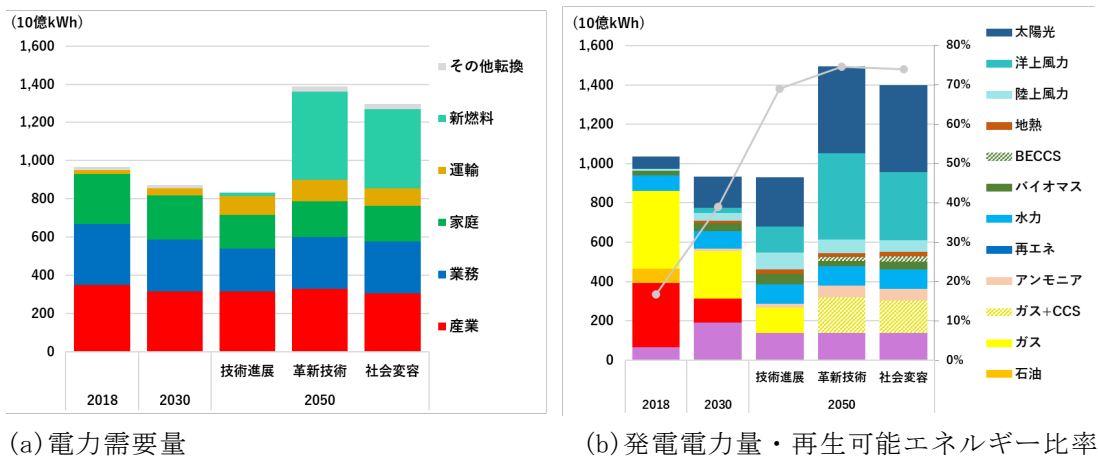
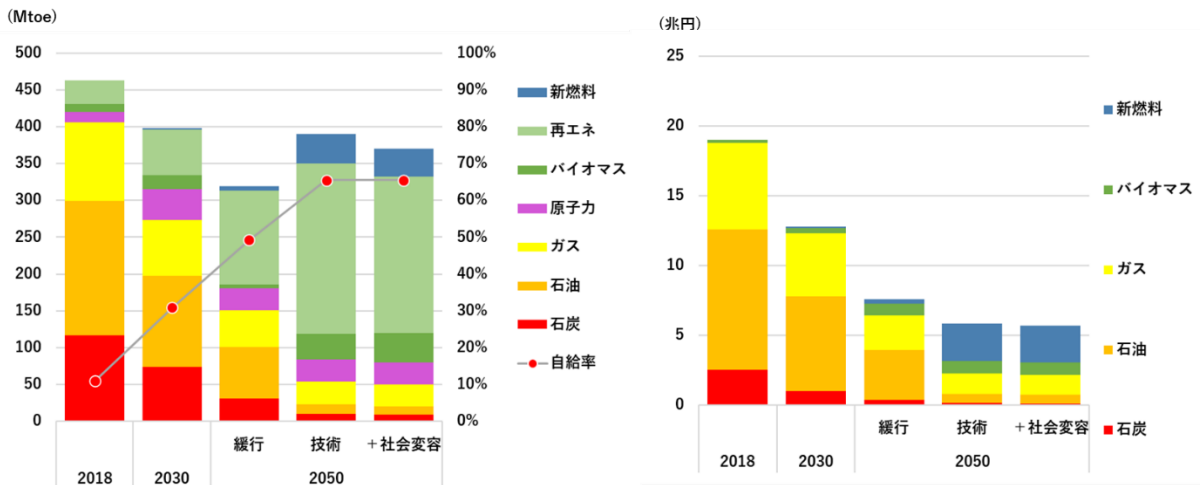


図-2.15：電力需要量・発電電力量

一次エネルギー国内供給は、現状ではほぼ100%輸入に依存する化石燃料が総量の8割以上を占めるが、2050年には再生可能エネルギーがINTとSTRでは7割程度を占めるようになる。そのためにエネルギー自給率が大幅に向上する。2018年には11%であるが、INTとSTRでは2050年には66%になる。エネルギー輸入額も2018年のエネルギー純輸入額は19兆円程度であるが、化石燃料に対する依存の低下によって輸入額は2050年には約10兆円以上低下する。（技術進展シナリオと革新技術・社会変容シナリオを比較すると、更なるCO₂の削減は自給率の向上につながる。一方で、輸入額については、新燃料の一定程度輸入に依存することもあって両者に大きな差はない。）



a) 一次エネルギー国内供給・エネルギー自給率 b) エネルギー輸入額
 図-2.16：一次エネルギー国内供給・エネルギー輸入額

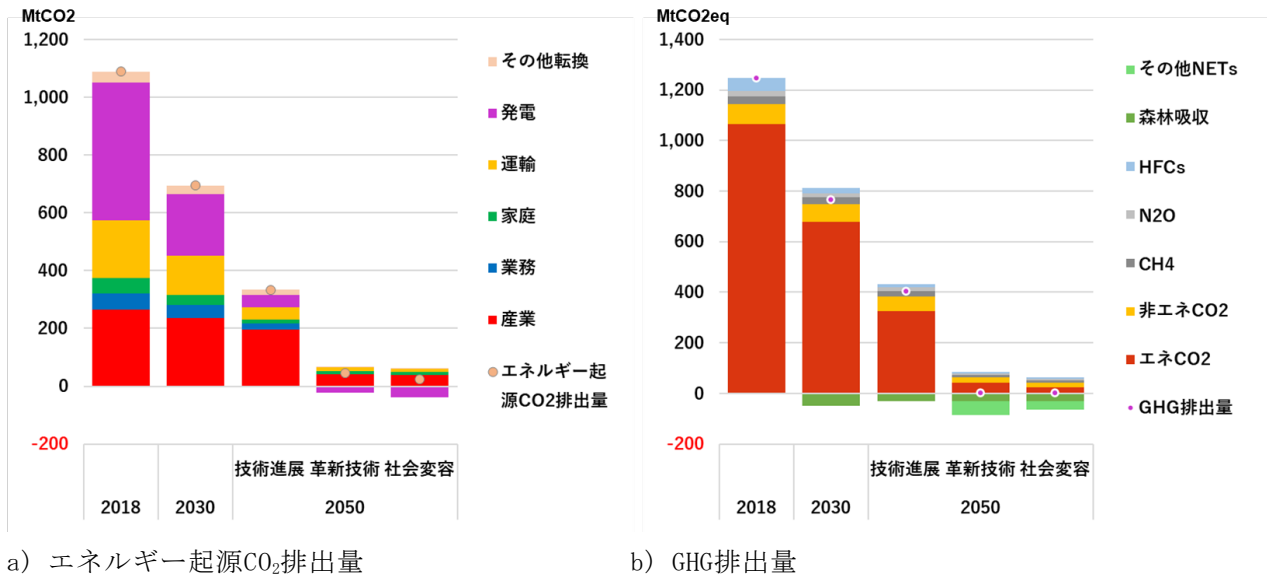
2050年におけるCO₂回収量の上限を1.5億tCO₂と想定して分析を行った。GX実現に向けた基本方針において2050年の貯留量の目安を1.2億~2.4億tCO₂としており、その値を参考に設定した。図-2.17(a)に各シナリオにおける2050年のCO₂回収量の内訳を示す。産業部門の鉄鋼、セメント、有機化学、発電部門のガス火力とバイオマス火力からの回収で構成される。社会変容シナリオでは革新技術シナリオよりもバイオマス火力発電からのCO₂回収が増加している。このことは、社会変容シナリオでは循環型社会の形成により素材生産が革新技術シナリオも低位であることから素材生産のためのCO₂回収量が少なくすみ、その分、バイオマス発電由来のCO₂回収を多くすることができるためである。図-2.17(b)には各シナリオにおけるCO₂利用量・貯留量の内訳を示す。回収されたCO₂の3分の1が合成燃料に利用され、残りの約1億tCO₂が地下等に貯留される。なお、本分析では合成燃料に利用されたCO₂については合成燃料の消費段階でCO₂排出量をカウントしている。



a) CO₂回収量 b) CO₂利用量・貯留量
 図-2.17：CO₂回収量・利用量・貯留量

エネルギー起源CO₂排出量を図-2.18(a)に示す。技術進展シナリオにおける2050年のエネルギー起源CO₂排出量では全ての部門において化石燃料消費が残存し、合計の排出量は3億tCO₂を超える。革新技術・社会変容シナリオにおいてはBECCSの導入もあり、発電部門における排出はマイナスに転じるが、化石燃料由来の炭素を含む合成燃料の消費もあり、全体としてCO₂排出量が残存する。GHG排出量は図-2.18(b)に示すようにエネルギー起源CO₂以外のガスについても排出量が残存する。しかし、森林吸収などのネガティブ排出対策によってオフセットし、ネットゼロ排出となっている。現状、ネガティブ排出を行っている、つまり大気中のCO₂を回収している活動は森林によるCO₂吸収であり、日本においては2020年度に57MtCO₂の吸収が計上されている¹⁾。しかし、人口林の高齢級化が進んで、森林吸収量は減少

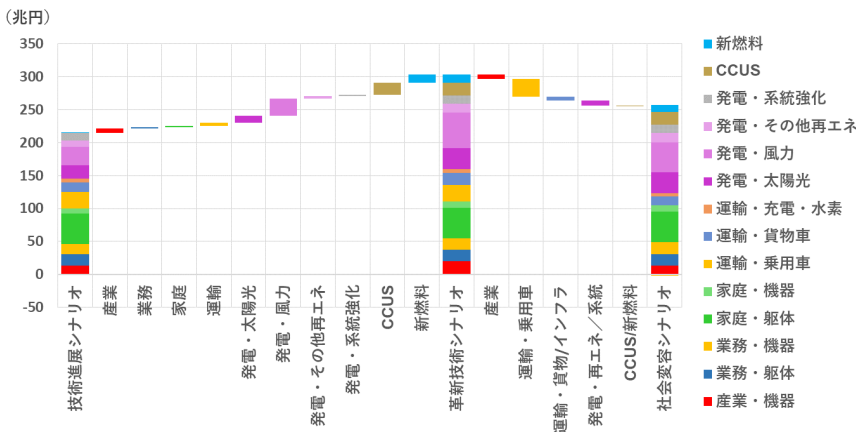
傾向にあり²⁾、吸収量の大幅な増加へと転じさせるのは難しい。そのため、その他のネガティブ排出対策として、CCS付バイオマスエネルギー（BECCS）、直接空気回収（DAC）、バイオ炭、ブルーカーボン管理などにも依存することになる。これらについては現状において研究開発段階で、導入・普及段階に至っていない。日本の排出実質ゼロの実現性を高めるために、これらの技術の研究開発の促進及び導入加速化が求められる。

a) エネルギー起源CO₂排出量

b) GHG排出量

図-2.18：エネルギー起源CO₂排出量・GHG排出量

GHGネットゼロ排出を実現するために必要とされる対策技術の投資額の推計を行った。図-2.19にBAT、INT、STRの各シナリオにおける総投資額と各シナリオ間の投資額の差を対策技術別に示したものである。投資額は技術・対策導入率を現状水準で固定した場合における投資額との比較であり、期間における投資額を単純に累積した値である。機器固定費用に対する投資額の積み上げであり、そこには、維持管理費用、研究開発費用、政策費用は含まれていない。また、対象とした対策技術はエネルギー起源CO₂排出量（石灰石由来も含む）の対策費用が対象で、その他GHGの排出削減やBECCSを除くネガティブ排出対策のための費用は含まれていない。投資額はBATにおいて200兆円程度になっている。特に家庭の躯体対策（断熱性の強化）、乗用車の対策（電気自動車の普及）、太陽光・風力発電の普及が大きな金額になっている。INTとBATとの比較から、GHGネットゼロの実現のためには、2030年以降、大規模に加速度的な展開が期待される技術に対して、100兆円規模の投資額を増加させていくことが必要であることが分かった。特に、太陽光・風力発電、CCUS、新燃料生産の金額が大きくなっている。INTとSTRにおける投資額に着目すると、社会変容はエネルギーシステムに対する投資額を低減させる効果を有することがわかる。自動車シェアリングによる自動車購入金額の低減、財需要の低減による産業生産設備や貨物輸送機器への投資低減、電力需要低減による再生可能エネルギーや新燃料関連への投資低減などによって、総投資額はSTRはINTよりも50兆円程度の投資低減に繋がっている。加えて投資額だけでなく、技術的・社会的な制約・不確実性が高い、新燃料、変動性の高い電力、ネガティブ排出対策などに対する依存を低減することにも繋がっている。社会変容が脱炭素社会の実現性を高めることに繋がることが分かった。



- 注1) 技術・対策導入率を現状水準で固定した場合（固定シナリオ）における投資額との比較。期間における投資額を単純に累積した値。機器固定費用に対する投資額であり、維持管理費用、研究開発費用、政策費用は含まれていない。
- 注2) エネルギー起源CO₂排出量の削減及びセメント生産プロセスのCO₂回収のための費用が対象で、その他GHG削減やBECCSを除くネガティブ排出対策のための費用は含まれていない。

図-2.19：累積脱炭素投資額（2021～2050年）

5. 研究目標の達成状況

脱炭素社会のシナリオ分析では、対象とすべき脱炭素技術の種類やその導入量が大きくなるため、これまでの分析フレームワークでは扱いにくいものもあった。そこで、技術モデル、応用一般均衡モデルの改良を行い、複数モデルの組み合わせによる分析フレームワークを構築することによって、脱炭素社会のために必要とされる具体的な技術とその導入量とともに、2050年に向けた排出経路を提示することが可能になった。分析結果は総合エネルギー調査会や中央環境審議会で紹介することができ、政策決定プロセスに貢献した。当初の目標を上回る成果をあげたと言える。一方で、本分析では数種のシナリオ分析を行ったが、将来における社会や技術の不確実性を考慮するとより多くのシナリオ分析が必要となる。様々な要素に着目した幅広いシナリオ分析は今後の課題と言えよう。

6. 引用文献

- 1) 国立環境研究所（2022）日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2020年度）,
<https://www.nies.go.jp/gio/archive/ghgdata/index.html>（2022年4月13日アクセス）
- 2) 農林水産省（2021）みどりの食料システム戦略（参考資料）,
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/attach/pdf/team1-153.pdf>（2023年3月31日アクセス）

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) D. S. HERRAN and S. Fujimori: Sustainability Science, 16, 489-501 (2021) (IF:7.196)
Beyond Japanese NDC: energy and macroeconomic transitions towards 2050 in emission pathways with multiple ambition levels.
- 2) 金森有子: 土木学会論文集G(環境), 78, 6, II_215-II224 (2022) わが国の家庭部門における2030年及び2050年の温室効果ガス削減目標達成に関する分析.
- 3) 金森有子: 地球環境, 27, 2, 121-126 (2022) 家庭部門による温室効果ガス排出量削減に向けた取組.
- 4) 張曉曦、篠塚真智子、原美永子: 地球環境, 27, 2, 105-112 (2022) 脱炭素社会の実現に向けたICTの役割と可能性

【サブテーマ2】

- 1) Y. JU, M. SUGIYAMA, E. KATO, Y. MATSUO, K. OSHIRO and D. S. HERRAN: Sustainability Science, 16, 411-427 (2021) (IF:7.196), Industrial decarbonization under Japan's national mitigation scenarios: a multi-model analysis.
- 2) M. SUGIYAMA, S. FUJIMORI, K. WADA, K. OSHIRO, E. KATO, R. KOMIYAMA, D. S. HERRAN, Y. MATSUO, H. SHIRAKI and Y. JU: Sustainability Science, 16, 355-374 (2021) (IF:7.196), EMF 35 JMIP study for Japan's long-term climate and energy policy: scenario designs and key findings.
- 3) H. SHIRAKI, M. SUGIYAMA, Y. MATSUO, R. KOMIYAMA, S. FUJIMORI, E. KATO, K. OSHIRO and D. S. HERRAN: Sustainability Science, 16, 375-392 (2021) (IF:7.196), The role of renewables in the Japanese power sector: implications from the EMF35 JMIP.
- 4) K. OSHIRO and S. FUJIMORI: Sustain Sci, 16(2), 477-487. doi:10.1007/s11625-020-00862-2 (2020) Stranded investment associated with rapid energy system changes under the mid-century strategy in Japan.
- 5) K. OSHIRO, S. FUJIMORI, Y. OCHI, T. EHARA: Energy, 227, 120464. doi:10.1016/j.energy.2021.120464 (2021). Enabling energy system transition toward decarbonization in Japan through energy service demand reduction.
- 6) S. SAKAMOTO, Y. NAGAI, M. SUGIYAMA, S. FUJIMORI, E. KATO, R. KOMIYAMA, Y. MATSUO, K. OSHIRO, D. S. HERRAN: Sustain Sci, 16(2), 395-410. doi:10.1007/s11625-021-00935-w (2021) Demand-side decarbonization and electrification: EMF 35 JMIP study.
- 7) 日比野剛, 芦名秀一, Silva Herran Diego, 増井利彦, 元木悠子, 平山智樹, 大田宇春: 地球環境, 27, 2, 77-86 (2022) 日本の2050年脱炭素シナリオ.
- 8) G. HIBINO, S. ASHINA, D. S. HERRAN, T. MASUI, Y. MOTOKI, T. HIRAYAMA and T. OTA: Global Environmental Research, 26, 1&2, 11-21 (2023) Japan's quantitative emission scenario of GHG net zero and its implications for Asian countries.

<その他誌上発表(査読なし)>

【サブテーマ1】

- 1) 増井利彦: 経済, 298, 44 - 53 (2020)
「パリ協定が提起した気候変動問題」
- 2) 増井利彦: Indust, 35, 12, 7-11(2020)

「低炭素社会から脱炭素社会へ」

- 3) 増井利彦：環境技術会誌、182, 9-11 (2021)
「脱炭素社会の実現に向けて取り組むべきこと」
- 4) 増井利彦：環境と文明、29, 1, 3-4 (2021)
「脱炭素社会をどう実現するか?」
- 5) 増井利彦：エネルギーレビュー、41, 6, 11-14 (2021)
「2050年脱炭素社会実現への課題 環境研究の視点からの考察」
- 6) 田中百合子、張曉曦、篠塚真智子：NTT技術ジャーナル2021年4月号、33 (2021)
「持続可能かつ包摂的な社会の実現をめざしたESG経営科学技術」
- 7) 増井利彦：常陽産研NEWS、375, 8-9 (2022)
「脱炭素社会をどのように実現するか?」
- 8) 増井利彦：環境と公害、52, 1, 48-54 (2022)
「カーボンプライシング」
- 9) 増井利彦：OriOri, 65, 5-11 (2023)
「食のギモン調査隊が行く16 「2050年カーボンニュートラル」なんて本当に実現可能なの?」
- 10) 本城慶多：ぶぎん地域経済研究所ぶぎんレポート、272 (2023)
「埼玉県における気候変動対策の現状と課題」
- 11) 芦名秀一：電気学会誌2月号 特集2050年カーボンニュートラル実現に向けた日本のエネルギー需給モデルの研究動向、143, 2, 79-82 (2023)
「AIMモデルを用いた2050年脱炭素社会実現に向けた分析」

【サブテーマ2】

- 1) 藤森真一郎、大城賢：クリーンエネルギー、30, 2, 55-61 (2020).
「大規模CO₂排出削減に伴う座礁資産 日本の長期戦略を事例にした分析」
- 2) 大城賢：環境衛生工学研究、34, 2, 11-14 (2020)
「日本の中長期温室効果ガス排出削減シナリオのモデル分析」

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) 張曉曦、篠塚真智子、久田正樹、田中百合子、金森有子、増井利彦：第16回日本LCA学会研究発表会 (2021)
「ICTによる農業分野課題解決および国内GHG排出削減への貢献」
- 2) 篠塚真智子、張曉曦、久田正樹、田中百合子、金森有子、増井利彦：2021年電子情報通信学会総合大会 (2021)
「ライフスタイルのICT化による環境影響評価」
- 3) AIMプロジェクトチーム：第34回総合資源エネルギー調査会基本政策分科会 (2020)
「2050年脱炭素社会実現の姿に関する一試算」
- 4) 増井利彦：2020年度経営者「環境力」クラブ第1回会合 (2020)
「コロナの経験を踏まえた脱炭素社会への取り組み」
- 5) D. S. HERRAN, S. FUJIMORI：13th IAMC Annual Meeting 2020 (2020)
“Insights and challenges for Japan’s 2040 emission target considering multiple ambition levels.”
- 6) D. S. HERRAN, S. FUJIMORI：第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2021)
“Assessment of alternative pathways for Japan’s 2040 emission reduction target.”
- 7) 増井利彦：東京理科大学総合研究院 再生可能エネルギー研究部門 第1回シンポジウム 再生

- 可能エネルギー技術の最新動向 (2021)
「2050年脱炭素社会を目指して」
- 8) 増井利彦：自然エネルギーシフトコミュニティ 第4回理想社会フォーラム (2021)
「持続可能な社会の世界モデルになる日本のエネルギー需給システムの理想像とは？」
- 9) 増井利彦、高橋潔：環境科学会2021年会 (2021)
「脱炭素にむけたモデル研究の状況と研究展望」
- 10) T. MASUI, G. HIBINO, S. ASHINA, D. S. HERRAN, Y. KANAMORI. : Pre - Conference of Society for Environmental Economics and Policy Studies 2021 Challenges of Decarbonization Policies and Technological Innovations toward Carbon Neutral Societies in East Asia (2021)
“Challenges of Decarbonization Policies and Technological Innovation toward Carbon Neutral Society in Japan.”
- 11) 増井利彦：再生可能エネルギー経済学講座 第2回再エネ講座公開研究会【部門C】 (2021)
「AIMを用いた炭素税によるCO2排出削減効果の試算. 」
- 12) T. MASUI : Japan - Germany Exchange on Climate Research Policy and Cooperation (2021)
“Assessment of carbon tax in Japan toward Carbon Neutral Society.”
- 13) T. MASUI, G. HIBINO : LCS-RNet 12th Annual Meeting (2021)
“Contribution of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) to decarbonized society in Asia.”
- 14) 増井利彦：地球環境に関するアカデミアと金融界のワークショップ(2021)
「AIM (アジア太平洋統合モデル) を用いた2050年脱炭素社会の定量化」
- 15) 金森有子：第50回環境システム研究論文発表会(2022)
「わが国の家庭部門における2030年及び2050年の温室効果ガス削減目標達成に関する分析」
- 16) D. S. HERRAN : 15th IAMC Annual Meeting (2022)
“Analysis of the quality of wind energy resources in Japan with gridded data.”
- 17) S. ASHINA : TGSW2022 (2022)
“Role of Local Actions toward a Decarbonized Society: Our Experiences and Future Perspectives”
- 18) Y. KANAMORI : OECD expert Workshop on Environmental Policies: Social and Economic Outcomes (2022)
“Analysis to achieve a carbon neutral society using AIM (Asia-Pacific Integrated Model).”
- 19) T. MASUI : International Conference on Systems Analysis for Enabling Integrated Policy Making (2022)
“Development of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and its application to assess roadmap toward decarbonization society.”
- 20) 増井利彦：俯瞰ワークショップ「これからの持続可能な大気環境に関する研究開発の枠組みについての小検討会」(2022)
「脱炭素社会と大気環境」
- 21) 芦名秀一：東京工業大学InfoSyEnergy研究/教育コンソーシアム 第5回研究ワークショップ
「カーボンニュートラルに向けた再生可能エネルギー導入拡大による統合コストの増大メカニズムとその抑制策を考える！」(2022)
「2050年脱炭素社会実現に向けたシナリオ～AIMモデルによる分析～」
- 22) T. MASUI : Training on formulating low GHG policies based on quantitative approach (2022)
“Introduction of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and its application to assess

- long-term strategies.”
- 23) 増井利彦：「環境と公害」セミナー：脱炭素実現に向けて(2022)
「カーボンプライシング」
- 24) 増井利彦：第10回日台環境協議 (2022)
「Asia-Pacific Integrated Model (アジア太平洋統合モデル；AIM)とは？」
- 25) T. MASUI：50th Year of ASEAN-Japan Friendship and Cooperation Commemoration Dialogue on Science, Technology and Innovation (2023)
“Collaboration between ASEAN and Japan toward decarbonized society.”
- 26) X. Zhang, M. Shinozuka, M. Hara, T. Masui, Y. Kanamori：Going green GARE INNOVATION 2023 (2023)
“A study on environmental impact assessment in a drastic future pioneered by ICT.”

【サブテーマ2】

- 1) 日比野剛：エネルギー・資源学会「2050年に向けた日本のエネルギー需給」研究委員会2020年度シンポジウム(2020)
「我が国の脱炭素社会検討における社会経済シナリオ」
- 2) M. SUGIYAMA, S. FUJIMORI, K. WADA, K. OSHIRO, E. KATO, R. KOMIYAMA, D. S. HERRAN, Y. MATSUO, H. SHIRAKI, Y. JU, S. SAKAMOTO：Thirteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) (2020)
“EMF 35 JMIP study for Japan’s long-term climate and energy policy: scenario designs and overview.”
- 3) 杉山昌広、藤森真一郎、和田謙一、加藤悦史、小宮山涼一、松尾雄司、大城賢、Diego Silva Herran：第39回エネルギー・資源学会研究発表会 (2020)
「日本の長期気候政策の評価：EMF 35 JMIP プロジェクト」
- 4) M. SUGIYAMA, S. FUJIMORI, K. WADA, K. OSHIRO, E. KATO, A. KUROSAWA, R. KOMIYAMA, D. S. HERRAN, Y. MATSUO, H. SHIRAKI, S. SAKAMOTO, Y. JU：23rd Annual Conference on Global Economic Analysis (2020)
“EMF 35 JMIP study: preliminary results and implications for Japan’s climate change mitigation.”
- 5) K. OSHIRO, S. FUJIMORI：Thirteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) (2020)
“Measuring stranded investment associated with transformation of energy supply and demand sectors in Japan.”

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1・2共同】

- 1) 国民対話シンポジウム「日本の2050年脱炭素社会」（主催：国立環境研究所社会環境システム研究センター・環境再生保全機構環境研究総合推進費2-1908、1-2002、1-2003、2021年3月10日、オンライン開催、アクセス数144名）をサブテーマ1・2共同で主催した。当日の報告資料はhttps://www-iam.nies.go.jp/aim/event_meeting/2021_ertdf_symposium/2021_ertdf_symposium.html に掲載。

【サブテーマ1】

- 1) 戸田市立戸田東中学校での講演「地球温暖化問題と持続可能な開発目標（SDGs）」（2020年10月8日、参加者60名）
- 2) 第23期地域環境リーダー育成講座（主催：認定NPOアクト川崎・川崎市、2020年9月27日、川

- 崎市高津市民館、参加者約40名)にて講演
- 3) キヤノン電子株式会社での講演「温室効果ガス排出ゼロの世界を想像する」(2021年3月17日、オンライン開催、参加者15名)
 - 4) 埼玉県立伊奈学園中学校での講演「地球温暖化問題と持続可能な開発目標(SDGs)」(2021年6月3日、伊奈学園中学校、参加者30名)
 - 5) 日本の脱炭素化を考えるための世界の科学者からの気候変動10の最新メッセージ シンポジウムでの講演「2050年に日本で脱炭素社会を実現するために」(2021年6月9日、オンライン開催、参加者約100名)
 - 6) 第24期地域環境リーダー育成講座(主催:認定NPOアクト川崎・川崎市、2021年7月4日、川崎市高津市民館、参加者約40名)にて講演
 - 7) シノドストークラウンジ 啓蒙の限界プロジェクト 第2回での講演「各家庭で求められる温暖化対策とは。」(2021年7月10日、オンライン開催、参加者約15名)
 - 8) エコプロオンライン2021における環境再生保全機構出典物内で講演「脱炭素社会と社会課題の解決の両立は可能か?」(2021年11月25日~12月17日、オンライン開催)
 - 9) 第5回超スマート社会推進フォーラム「持続可能な脱炭素社会に向けたライフスタイル」(主催:東京工業大学超スマート社会推進コンソーシアム、2022年3月10日、オンライン開催、観客約400名)にて講演
 - 10) WWFジャパン 第2回「スクール・パリ協定2022」での講演「IPCC 第6次報告書 第3作業部会 緩和策に関する研究の最新動向」(2022年3月16日、オンライン開催、参加者約40名)
 - 11) 日本学術会議公開シンポジウム 2050年カーボンニュートラル実現に向けたエネルギーシナリオでの講演「脱炭素社会の実現に向けた取り組みと役割」(2022年4月1日、オンライン開催、参加者約200名)
 - 12) JCI連続ウェビナー 第2回「エネルギー危機と気候変動対策:クリーンエネルギー戦略に求められるものは何か」での講演「IPCC第6次評価報告書が提起した気候対策の緊急性-第3作業部会報告を中心に」(2022年5月13日、オンライン開催、参加者約100名)
 - 13) 一般社団法人地球温暖化防止全国ネット第20回社員総会での講演「IPCC AR6(気候変動に関する政府間パネル第6次評価報告書)から地域の取り組みを考える」(2022年6月21日、オンライン開催、参加者約50名)
 - 14) 日本技術士会埼玉県支部CPD講演会(2022年6月25日、埼玉県環境科学国際センター、参加者29名)にて講演
 - 15) 第二期『環境文明塾』第一回講座にて講演「目指すべき将来像としての脱炭素社会」(2022年7月22日、オンライン開催、参加者15名)
 - 16) 北海道根室振興局管内自治体職員向け勉強会(主催:北海道根室振興局、2022年8月18日・19日、北海道中標津町役場内・北海道根室振興局内、参加者約40名(合計))にて講演
 - 17) 彩の国環境大学基礎課程(2022年9月3日、オンライン、参加者約100名)にて講演
 - 18) 法政大学2022年度秋学期人間環境セミナーの授業「カーボンニュートラルに向けた温室効果ガス削減の見通し」(2022年10月12日、参加者約250名)
 - 19) 上尾市環境推進協議会環境学習会で(2022年10月22日、上尾公民館、参加者約30名)にて講演
 - 20) 令和4年度青森県消費生活大学講座「私たちにできる温暖化対策は何か? ~身近な温暖化対策に取り組むために~」(主催:、2022年10月26日、青森県県民福祉プラザ、観客約100名)にて講演
 - 21) 朝霞市地球温暖化対策職員研修(2022年11月18日、朝霞市役所、参加者約60名)にて講演
 - 22) エコアクション21審査員向け研修会での講演「中小事業者における脱炭素とSDGs活用方法」(2022年12月9日、オンライン開催、参加者約30名)
 - 23) 埼玉県環境科学国際センター講演会(2023年2月6日、埼玉県環境科学国際センター、参加者約200名)にて講演

(4) マスコミ等への公表・報道等**【サブテーマ1】**

- 1) 日本経済新聞（2020年12月15日「再エネ拡大へ送電網の強化を 排出ゼロで研究機関提言」）
- 2) 日本経済新聞（2020年3月23日「脱炭素で30年目標策定 削減幅拡大、首相が米に説明へ」）

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

特に記載すべき事項はない。

(6) その他の成果発表

- 1) 国立環境研究所 AIM のホームページにおいて、本推進費の成果の一部である 2050 年脱炭素社会実現に向けた分析結果を公表している。
https://www-iam.nies.go.jp/aim/projects_activities/prov/index_j.html#2050ep
- 2) 研究成果の一部は、埼玉県地球温暖化対策実行計画（第2期）改正版の策定に活用された。
<https://www.pref.saitama.lg.jp/a0502/ontaikeikaku.html>

IV. 英文Abstract

Impact of changes in socio-economic activity and consumption behavior on realization of decarbonized society in Japan

Principal Investigator: Yuko KANAMORI, Yuko MOTOKI, Xiaoxi ZHANG, Keita HONJO, Ken OSHIRO
 Institution: National Institute for Environmental Studies, Tsukuba City, Ibaraki, JAPAN

Tel: +81-29-850-2955 / Fax:+81-29-250-2572

E-mail: kanamori@nies.go.jp

Cooperated by: Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT), Center for Environmental Science in Saitama, Mizuho Research & Technologies, Kyoto University

[Abstract]

Key Words: Decarbonized society, Consumption behavior, Scenario analysis, Information and communication technology, Regional characteristics

In this research, we developed a socio-economic scenario towards the solution of the social issues facing Japan based on the concepts of “Society 5.0” and “Regional circular and ecological sphere”, to analyze the changes in society and consumption behavior, and to assess the impacts due to the achievement of a decarbonized society in 2050. In sub-theme 1, in order to solve social issues related to the elderly people and to rural areas while aiming for a decarbonized society, the analysis was carried out focusing on the following 3 points: changes in lifestyle and consumption behavior, changes in society through ICT (information and communication technology) services, and actions in local communities. In sub-theme 2, two socio-economic scenarios targeting the whole of Japan were developed, based on the results of the analyzes in sub-theme 1. Based on the socio-economic factors (population and economic activity indicators) and the level of regional self-reliance, the pathway for achieving a decarbonized society was clarified quantitatively.

As a result, in order to realize a decarbonized society in Japan, energy conservation, electrification, and low-carbon energy are necessary. The final energy consumption in 2050 is about half of the 2018 level, and the electrification rate increases from 30% in 2018 to 50% in 2050. Also, it was shown that the power generation mix in 2050 becomes 100% decarbonized by combining renewable energy, nuclear power, and thermal power generation with decarbonization measures (CCUS, ammonia). In addition, the realization of a decarbonized society will lead to a significant increase in the energy self-sufficiency rate (from 11% in 2018 to 65% in 2050) and a significant reduction in energy imports (19 trillion yen in 2018 to 6 trillion yen in 2050) through a drastic reduction in fossil fuel consumption. In the analysis, we estimated the impact of social changes accompanying the progress of digitalization and the formation of a circular society. It was found that these changes will lead to a reduction in the amount of total investment, and to a lower dependence on innovative technologies with constraints and high uncertainty of social implementation for building a decarbonized society. In summary, it was shown that social transformation increases the feasibility of a decarbonized society.