

○Environment Research and Technology Development Fund Final Research Report

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分	： 環境問題対応型研究（一般課題）
研究予定期間	： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度
課題番号	： 【1-2101】
体系的番号	： （JPMEERF20211001）
研究課題	： 「世界全域を対象とした技術・経済・社会的な実現可能性を考慮した脱炭素社会への道筋に関する研究」
Research Title	： A Study on Global Decarbonization Pathways Considering Technological, Economic and Social Feasibility
研究代表者	： 藤森 真一郎
研究代表機関	： 京都大学
研究分担機関	： 国立研究開発法人国立環境研究所、滋賀県立大学、名古屋大学、立命館大学、
研究協力機関	： 株式会社E-konzal、国立研究開発法人国際農林水産業研究センター、東京大学、国際応用システム分析研究所（IIASA）
研究領域	： 統合領域
キーワード	： ゼロエミッション、実現可能性、統合評価モデル、環境配慮型ライフスタイル

令和6（2024）年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書.....	1
I. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	1
2. 研究開発目的	1
3. 研究目標	1
4. 研究開発内容	2
5. 研究成果	6
5-1. 成果の概要	6
5-2. 研究目標の達成状況.....	13
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献.....	15
6. 研究成果の発表状況の概要.....	17
6-1. 成果の件数	17
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果.....	17
7. 国際共同研究等の状況	18
8. 研究者略歴	18
II. 成果の詳細.....	20
II-1 サブテーマ1「大規模温室効果ガス排出削減による経済的影響の評価と社会的な受容可能性の検討」	20
[サブテーマ1要旨]	20
1. サブテーマ1研究開発目的.....	20
2. サブテーマ1研究目標	20
3. サブテーマ1研究開発内容.....	20
4. サブテーマ1結果及び考察.....	25
5. サブテーマ1研究目標の達成状況.....	34
II-2 サブテーマ2「エネルギーシステム変革の技術的・経済的な実現可能性の検討」	35
[サブテーマ2要旨]	35
1. サブテーマ2研究開発目的.....	35
2. サブテーマ2研究目標	35
3. サブテーマ2研究開発内容.....	36
4. サブテーマ2結果及び考察.....	38
5. サブテーマ2研究目標の達成状況.....	46
II-3 サブテーマ3「食のライフスタイル変革と農業起源温室効果ガス削減技術導入の検討」	48
[サブテーマ3要旨]	48
1. サブテーマ3研究開発目的.....	48
2. サブテーマ3研究目標	48
3. サブテーマ3研究開発内容.....	48
4. サブテーマ3結果及び考察	53
5. サブテーマ3研究目標の達成状況.....	61
III. 研究成果の発表状況の詳細.....	62
(1) 成果の件数	62
(2) 誌上发表	62
(3) 口頭発表	67
(4) 知的財産権	73
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施.....	73
(6) マスメディア等への公表・報道等.....	74
(7) 研究成果による受賞.....	77
(8) その他の成果発表	78

別紙 公募審査・中間評価結果への対応

I. 成果の概要

<課題情報>

公募区分：	環境問題対応型研究（一般課題）
研究実施期間：	令和3（2021）年度～令和5（2023）年度
課題番号：	【1-2101】
研究課題：	「世界全域を対象とした技術・経済・社会的な実現可能性を考慮した脱炭素社会への道筋に関する研究」
研究代表者：	藤森 真一郎（京都大学、教授）
重点課題（主）：	【重点課題①】持続可能な社会の実現に向けたビジョン・理念の提示
重点課題（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）：	（1-1）持続的な脱炭素社会の実現に必要な革新的技術・社会変革の実現可能性評価に関する研究
研究領域：	統合領域

<キーワード>

ゼロエミッション
実現可能性
統合評価モデル
環境配慮型ライフスタイル

<研究体制>

サブテーマ1「大規模温室効果ガス排出削減による経済的影響の評価と社会的な受容可能性の検討」

<サブテーマ1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
京都大学	大学院工学研究科 都市環境工学専攻	教授	藤森 真一郎	
国立研究開発法人国立環境研究所	社会システム領域 経済・政策研究室	主任研究員	朝山 慎一郎	
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	スィルバエラン ディエゴ	

<サブテーマ1研究協力者>

機関名	部署名	役職名	氏名

株式会社E-konzal		代表取締役	榎原友樹
株式会社E-konzal		研究員	越智雄輝
国立研究開発法人国際農林水産業研究センター	社会科学領域	任期付研究員	Wu Wenchao
東京大学	未来ビジョン研究センター	准教授	杉山昌広
国際応用システム分析研究所 (IIASA)	Integrated Assessment and Climate Change Research Group	Director	Keywan Riahi
国際応用システム分析研究所 (IIASA)	Integrated Assessment and Climate Change Research Group	Research Group Leader	Volker Krey

サブテーマ2 「エネルギーシステム変革の技術的・経済的な実現可能性の検討」

＜サブテーマ2 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
京都大学	大学院工学研究科 都市環境工学専攻	助教	大城 賢	
名古屋大学	大学院環境学研究科	准教授	白木 裕斗	

＜サブテーマ2 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
なし			

サブテーマ3 「食のライフスタイル変革と農業起源温室効果ガス削減技術導入の検討」

＜サブテーマ3 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
立命館大学	理工学部	准教授	長谷川 知子	
国立研究開発法人国立環境研究所	社会システム領域	副領域長	高橋 潔	
立命館大学	理工学部	教授	橋本征二	2021年6月～2022年3月

＜サブテーマ3 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名

なし			
----	--	--	--

< 研究経費（間接経費を含む） >

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	19,403千円	5,820千円	25,223千円
2022	19,666千円	5,899千円	25,565千円
2023	19,666千円	5,899千円	25,565千円
合計	58,735千円	17,618千円	76,353千円

1. はじめに（研究背景等）

パリ協定のもと世界各国は長期気候目標としていわゆる2°C目標に合意し、さらに1.5°C以下に抑える目標も目指すこととなった。各国・日本国内の多くの地方自治体もゼロエミッションを目指すとしており、今世紀後半といった長期だけでなく、今世紀中盤までの短中期でいかに急速かつ大規模に温室効果ガス(GHG)排出量を削減できるかが当面の課題となっている。仮に2050年に排出量をゼロにすることを考えると、残り30年で毎年2-3GtCO₂（日本の排出量の約2倍）を世界全体で削減し続ける速度が必要になる。電力源はほぼすべてゼロエミッション電源に移行し、毎年2-3%ずつゼロエミッション電源の割合を増やす必要があり、寿命が30年以上の石炭施設の一部は早期退役させる必要がある。また、エネルギー消費側では急速に電化を進める（毎年2%以上）必要があるとされる。非エネルギー起源のGHGも急速な削減が求められ、我々の食の内容を低環境負荷にし、農業生産側でも最大限のGHG削減努力が必要である。IPCC等で示される世界のエネルギーや食料・土地利用システムに関するシナリオの作成には統合評価モデルが用いられてきたが、これまでの既存のモデル分析は強く実現可能性が問われず、技術的な観点でさえモデルの抽象度の高さにより評価が難しい部門が存在した。示されたシナリオが技術的・経済的・社会的な観点から実現可能なのかが問われている。

2. 研究開発目的

実社会はESG投資、脱石炭等、ゼロエミッションへと舵を切っており、より具体的なゼロエミッション実現への道筋や必要となる対策、社会の変化を明らかにすることは国際社会、日本にとって喫緊の課題である。従って、統合評価モデルの描写する世界の実現可能性を評価することが強く望まれる。そこで、本研究は「世界及び日本を対象として短中期的（2030-2050年）将来における脱炭素社会への道筋を、技術・経済・社会的実現可能性という観点から評価し、さらに実現可能性を高めるライフスタイル変革や環境政策を提示すること」を目的とする。

3. 研究目標

<p>全体目標</p>	<p>パリ協定の2°C、1.5°C目標の達成に必要な短中期的な削減努力の<u>実現可能性</u>を技術的・経済的・社会的な観点から検討し、これらを考慮した上で脱炭素社会ビジョンへの道筋をライフスタイル変革・技術革新や環境政策と併せて提示する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 技術的な観点は、エネルギー起源、農業起源排出量削減技術の普及スピード・マーケットシェア、座礁資産の規模で評価する ● 経済的な観点は、マクロ経済影響（GDP 損失、家計消費損失）と所得格差で評価する ● 社会的な観点は、統合評価モデルの入出力条件を一般の市民・専門家を含むステークホルダに問うことで評価する <p>環境政策は既存研究で一般に用いられる炭素税だけでなく、各種環境配慮型機器や対策への補助金等を想定する。ライフスタイル変革は既存文献を参考にしつつ、エネルギー需要低減や環境負荷を低減する（畜産物を減らした）食ライフスタイルを主として検討する。これらを統合評価モデルによるシナリオとして提示する。</p> <p>本課題で開発する日本を含むグローバルシナリオはインターネット上のデータベース、および一般向けに分かりやすくまとめた年次レポート形式で公開し、ESGやTCFDなどを含む広く環境に関連する企業戦略策定や日本の中央政府・地方自治体の環境政策策定時に使えるようにし、地域循環共生圏へ向けた参考資料となるようにする。</p> <p>なお、新型コロナウイルスにより生じた行動変容等の影響は統計等の観測情報が整ってき次第随時将来の社会経済条件に反映させる。</p>
<p>サブテーマ1</p>	<p>「大規模温室効果ガス排出削減による経済的影響の評価と社会的な受容可能性の検討」</p>
<p>サブテーマ1 実施機関</p>	<p>京都大学、国立環境研究所</p>
<p>サブテーマ1 目標</p>	<p>主として3つの項目が目標となる。</p> <p>① <u>統合評価モデルの経済モデル</u>、これまで IPCC の報告書等で活用されてきた一般均衡モデル AIM/CGE (Fujimori <i>et al.</i>, 2017) の改良及び家計の所得階級別消費構造を記述するモデルの開発・改良を行う。主としてマクロ経済や格差を中心にシナリオの定量化を行う。一般均衡モデルは大規模削減下のエネ</p>

	<p>ルギーや食料・農業システムの変化による GDP 等のマクロ経済影響と産業シフト等を推計し、家計モデルでは所得格差、ジニ係数等の指標を示す。</p> <p>② 統合評価モデルの入出力の<u>社会的な実現可能性</u>を評価する。ステークホルダ会合等を実施しそこで得られる制約等を統合評価モデルへフィードバックする。この社会的な実現可能性は、望ましさ(Desirability)も含めて評価する。</p> <p>③ サブ2、3から得られるライフスタイル、技術変革と環境政策を考慮し、実現可能な大規模削減下での経済システム全体及び格差をビジョンとして示す。また、研究成果のとりまとめとアウトリーチを担当し、<u>一般社会でシナリオが活用されるように、インターネットで情報を公開するシステム</u>を構築する。</p>
--	--

サブテーマ2	「エネルギーシステム変革の技術的・経済的な実現可能性の検討」
サブテーマ2 実施機関	京都大学、滋賀県立大学
サブテーマ2 目標	<p>主として2つの項目を目標とする。</p> <p>① 多様なエネルギー技術をできる限り具体的に扱うとともに、再生可能エネルギーの時間変動性を考慮するため、<u>高解像度の世界エネルギー技術モデルを開発</u>する。それをを用いて、個々の技術の普及速度を考慮した上で、急速な温室効果ガス削減の実現可能性を技術的側面から明らかにする。本研究で開発するエネルギー技術モデルは、日本を対象に <u>80%GHG 削減を幅広く分析し、近年中央環境審議会等への政策貢献を行ってきたモデル (Fujimori et al., 2019 Nature Communications 等)</u> をベースとして、世界全域への拡張・高解像度化といった大幅な改良を施す。</p> <p>② <u>ライフスタイル・社会変革のエネルギーシステムへの影響を定量的に示す</u>。そのためにエネルギーサービス需要の変化や新しい技術の導入などのシナリオを検討し、モデル分析を行う。具体的には、自動運転車の普及やエネルギー需要低減に関わる各種施策、革新的技術として水素エネルギーの活用、炭素貯留利用 (CCSU) や高性能蓄電池等をモデルへの入力とする。</p>

サブテーマ3	「食のライフスタイル変革と農業起源温室効果ガス削減技術導入の検討」
サブテーマ3 実施機関	立命館大学、国立環境研究所
サブテーマ3 目標	<p>主として以下の2つの項目を目標とする。</p> <p>① <u>統合評価モデルの食料・農業モデルの開発・改良</u>を行う。食料モデルは全世界国別 (180 か国程度) ・財別 (20 財程度) の将来の食料財の消費量を示す。食料需要モデルはこれまで AIM モデルとして用いてきたものをさらに高解像度化し、多様な食文化や社会属性に応じた食料消費を表現できるように改良する。また農業モデルを用いて農業起源の GHG 排出量及び削減可能量を地域別で示す。</p> <p>② <u>環境配慮型の食のライフスタイル</u>、低環境負荷農業生産などを考慮して、食と農業に関わる各種指標を定量的に示し、食と農業の側面から温室効果ガスの削減量を定量的に示す。</p>

4. 研究開発内容

研究全体としては以下の図0-1に示す3つのステップを取る (図にもステップと記載されている)。

ステップ1は、これまで開発してきた統合評価モデルを用いたパリ協定の長期目標に相当する排出削減目標下のシナリオの定量化である。この作業では将来の社会経済条件と排出経路を入力として、エネルギー導入量、食料消費、農業削減技術導入量及び経済指標を出力する。本課題の統合評価モデルは、IPCCのシナリオプロセス (SSPs) 等で活用されてきた世界経済モデルAIM/CGEをベースとする (サブ1)。この間サブ2、3では新しいエネルギー技術、食料・農業モデル開発をそれぞれ実施する。

ステップ2では、ステップ1の情報を基にして、実現可能性の評価を以下の2つ観点から実施する。その第一は、過去に観測されている指標と比較し、技術普及のスピード等から技術的・経済的な現実性、あるいは追加的努力がどの程度必要かを同定する。その第二は、ステークホルダ会合を実施することである。ここではより専門的な見地から現実的と判断できるレベルかどうか、及び一般市民から見て社会の変化が受容可能かどうかを問い、社会的な実現可能性として評価する。実現可能性の評価と並行して、従来のモデルから地域・部門・技術などの解像度を上げるモデル改良や新しく開発されたモデルの検証等を実施する。

ステップ3では、本課題で新しく開発する現実性の向上を行った統合評価モデルを用いたシミュレーション

ンを実施する。その際2種類の追加的な条件を入力する。ここでいう2種類とは、①ステップ1,2で得られた実現可能性条件と②実現困難な部門や領域における補完的な諸環境政策や革新的技術・ライフスタイル変革である。ここではサブ1,2,3それぞれで開発したモデルの境界条件等を情報交換することでテーマ間連携を行い、統合的なシナリオを描写する。本作業により、有効な環境政策及び、実現可能性を考慮したパリ協定長期目標実現へ向けた道筋を提示する。

また、研究目標として設定されていた、日本を含むグローバルシナリオのインターネット上のデータベース、および一般向けに分かりやすくまとめた年次レポート形式での公開については以下のwebサイトにて公開されている。https://athehost2.env.kyoto-u.ac.jp/projectdb/AIM_report2023

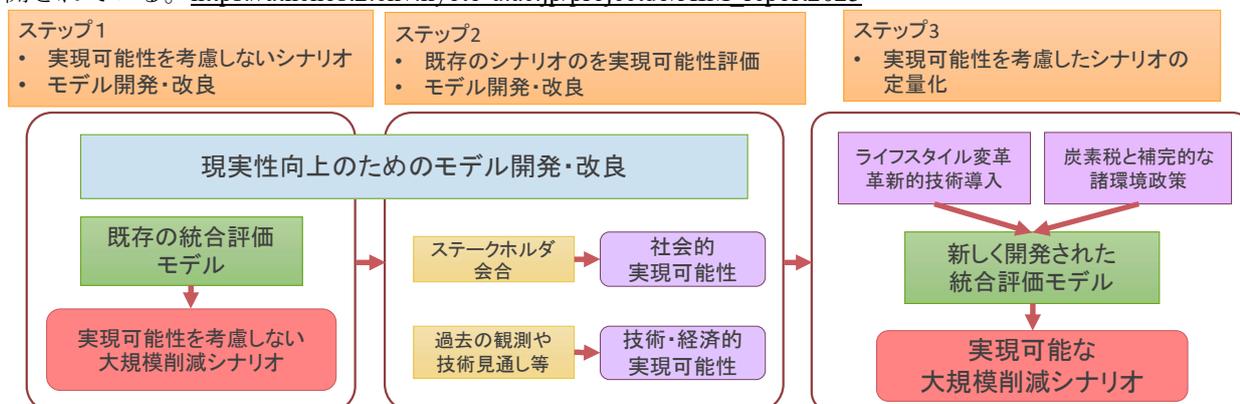


図 0-1 研究計画の全体像

【サブテーマ1】大規模温室効果ガス排出削減による経済的影響の評価と社会的な受容可能性の検討

サブテーマ1では、研究課題全体の中で社会経済的な側面に主としてフォーカスして長期シナリオの実現可能性について明らかにすることを目的とした。そのために以下3点を行った。すなわち、第一に統合評価モデルAIMの経済モデル、家計消費モデルの改良を行い（1-1）、経済的な側面の評価（1-2）を行うこと、第二に社会受容性の検討のためにフォーカスグループミーティングを実施すること（1-3）、第三に将来シナリオと過去の推移を比較し、その実現可能性を検討すること（1-4）、である。さらに当初の研究計画にはなかったが、近年の各国の気候変動政策の目まぐるしい状況と現在の研究コミュニティのギャップを考慮し、現状の国シナリオの問題点と研究コミュニティですべき、シナリオプロトコルの提案（1-5）を行った。ここではそれぞれ5つについて説明する。

（1-1）経済モデル開発：空気直接回収技術の経済モデルへの導入

負の排出を実現する技術の一つとして、大気から直接二酸化炭素を回収するDAC (Direct Air Capture)が近年注目を集めている。DACは液体吸収材または固体吸収材を用いて二酸化炭素を大気中から直接回収する技術である。BECCSや植林と比較して大規模な土地利用変化を必要としない一方で、吸収材から二酸化炭素を分離するために多くのエネルギーを必要とする。回収した二酸化炭素は油田やガス田、塩水帯水層に貯留することで負の排出を実現したり、再生可能エネルギー由来の水素と反応させることで、使用に際し排出を伴わない合成燃料の製造に利用が可能となる。

本研究では、応用一般均衡モデルであるAIM-HubモデルにおいてDACをモデル化し、1.5度目標にもとづく排出削減シナリオを推計した。パリ協定で示された1.5度目標をもとに設定した2050年までの二酸化炭素排出量を外生的に与える。そして、この排出量を達成するための炭素価格がモデル内で計算され、この炭素価格をもとに排出削減技術の導入量や排出削減に伴う経済的影響などが計算される。

本研究で設定するシナリオは、世界の平均気温上昇を1.5度未満に抑制する二酸化炭素排出削減シナリオと、DACの利用についての設定を組み合わせ作成する。また、ベースラインシナリオとして排出削減をおこなわないシナリオを作成する。すべてのシナリオにおいて将来の社会経済状況を、気候変動関連の研究において広く用いられている共通社会経済経路 (Shared Socioeconomic Pathways; SSPs)から中庸なシナリオであるSSP2シナリオに基づき設定する。

（1-2）経済的な実現可能性を上げる施策に関する検討

産業革命前と比較して1.5~2.0°Cの世界平均気温上昇にまたがる幅広い厳しい炭素予算の下で、気候変動の緩和コストを削減または取り除くために必要な条件を示す。カーボンプライシングに加え、幅広い社会変化の影響を捉えるため、4つの主要な社会経済・技術的転換、すなわち、①エネルギー需要の低下、②再生可能エネルギーと炭素回収・貯留 (CCS) のコスト低減につながるエネルギー供給システムの技術的進歩、③低肉食や食品廃棄物の削減など、環境に配慮した食品消費にシフト、④資本形成の刺激（これはすべてのセクターで使用できる一般資本）である。また、これらの対策をすべて実施するもう一つのシナリオも検討

した。これらのシナリオをそれぞれ「エネルギー-需要変化（EDC）」「エネルギー-供給変化（ESC）」「食料-システム-転換（FST）」「追加-資本-転換（ACF）」「統合-社会-技術-移行（IST）」とした。シナリオの背景にあるデフォルトの社会経済前提は、Shared Socioeconomic Pathways (SSP2)の中道シナリオに基づくものである。これらのデフォルト条件の上に、社会経済・技術的転換オプションを実装した。本研究では、気候変動緩和コストが負もしくはゼロとなる条件を、気候変動緩和による国内総生産（GDP）への悪影響がないことと定義し、ここでは、2021年から2100年までの世界合計 累積GDP損失を正味現在価値

（NPV）で表現している。なお、エネルギー需給や食料システムは、デフォルトの緩和シナリオでもカーボンプライシングに反応する。したがって、各セクターにおける上記の仮定は、炭素価格に対する反応にさらに追加的に起こる施策である。計算には一般均衡モデルであるAIM-Hubを用いた。

（1-3）歴史的なエネルギー消費の推移と将来シナリオの比較、およびその実現可能性の検討

本研究では長期気候緩和シナリオの実現可能性を定量化する評価手法について検討した。具体的には、長期気候緩和シナリオが要求する変化が、過去に観察された変化との対比においていかに位置付けられるかを、過去と将来それぞれの変化速度及び変化率の情報として取扱うことにより対比し、長期緩和シナリオの妥当性や実現可能性の程度や課題を明らかにした。なお、評価手法の構築にあたっては、IPCCの排出シナリオ特別報告書で提示された、歴史的推移と将来シナリオを頻度分布で比較する手法を参考にした。本研究の分析対象として、エネルギー強度、炭素強度、電化率の3つの指標を選定した。電化率については、工業部門、交通部門、家庭部門、業務部門の4つの部門別の指標の算出も行った。評価対象のシナリオとしては、一般均衡モデルであるAIM-Hubによるベースラインシナリオと、2.5°C、2°C、1.5°C、WB2Cの4本の気候緩和シナリオを選定した。

本研究では、各指標の変化速度及び変化率の分布を対象として、過去の観察と将来シナリオを比較することで、将来シナリオが要求する変化が、過去に起きた変化と比べてどのような位置付けとなるかを分析した。具体的には、各指標の推移のデータから、対象期間及び対象地域に含まれる変化速度及び変化率の情報を抽出し、この変化速度及び変化率から確率密度分布図と四分位値による箱ヒゲ図を作成し、シナリオごとに異なる変化速度及び変化率の分布の視覚化を行った。

（1-4）脱炭素シナリオの社会的な実現可能性に関する公衆認知の検討

これまで統合評価モデル研究では、パリ協定の2°C、1.5°C目標を達成しうる世界規模の温室効果ガス排出削減策について、定量的なシナリオ分析を通じて、その技術的・経済的な実現可能性が検討されてきた一方で、モデルで示される緩和シナリオの将来像が現実社会においてどのように認知、受容されるのかについてはほとんど検討されていない。パリ協定の気温目標達成に向けた脱炭素社会を実現するためには、定量的なモデル分析に加えて、モデルでは評価できない様々な社会的・政治的な課題を抽出することが重要となる。本研究では、定性的な社会調査手法である「フォーカスグループ調査」を用いて、統合評価モデルで示される緩和シナリオについての一般市民の公衆認知を明らかにし、より幅広い社会的な観点から緩和シナリオの実現可能性を検討する。特に、社会的な実現性では、シナリオの望ましさ（desirability）によっても実現性の認知は異なるため、「実現可能性」と「望ましさ」を区別した上で、両者の関係性を明らかにする。

フォーカスグループ調査は、年齢、性別、学歴、家族構成、職業・業種などを考慮して、似たような社会的バックグラウンドの個人を一つのグループに集めて、各グループで脱炭素シナリオの実現可能性及び望ましさについて議論する形でインタビューを実施した（各グループ6名の参加者×6グループ＝計36名）。

脱炭素シナリオとして、エネルギー分野のCO₂排出のみに絞った「ネットゼロCO₂排出」を達成する場合を想定して、エネルギー需給のあり方によって将来の社会像が大きく異なる次の三つのシナリオを例示した：二酸化炭素除去（CDR）による負の排出拡大で経済効率性を重視したシナリオ（CDR型）、行動変容による省エネや電化等の需要側の大幅な転換を重視するシナリオ（LED型）、コストはかかるものの二酸化炭素利用（CCU）を活用して新燃料製造による供給側の転換を重視したシナリオ（CCU型）。2回目の調査では、エネルギーシステムに加えて農業分野の非CO₂のGHG（主にメタン）排出も含めた「ネットゼロGHG排出」を達成する場合を扱った（表0-1を参照）。

表 0-1 異なる脱炭素シナリオの社会像の比較

シナリオ	経済効率性（CDR型）	ライフスタイル変革（LED型）	技術イノベーション（CCU型）
エネルギーシステム	化石燃料の継続利用・ CDRに強く依存	エネルギー需要減・ 需要側の電化促進	CCUで合成燃料・ 需要側電化は部分的
食システム	現状維持の対策・ 食肉需要は増加	植物由来の食への転換 ・食肉消費は大幅減	家畜肉を培養肉で代替 ・消費量は現状維持
CO ₂ 除去の依存度 （種類）	高い （BECCS）	低い （植林）	低い～中間 （DACCS）
経済的なコスト	安い	そこそこ	非常に高い
既存の社会インフラ	小さい	大きい	小さい

の変更度合			
リスク・副作用	生態系・食糧供給への悪影響	ライフスタイル転換を促す政策の実現性	未熟な技術の開発が失敗するリスク

(1-5) 現状の国シナリオの問題点と研究コミュニティとしてできること、シナリオプロトコルの提案
 2015年に採択されたパリ協定は、産業革命前から今世紀末までの地球の平均気温の上昇を2°Cより十分低く保つとともに、1.5°C以下に抑えるような努力をすることで合意した。この気候変動の抑制に求められる温室効果ガス（GHG）排出の大幅な削減については、日本でも2050年までにカーボンニュートラルを実現することが明言されており、他のいくつかの国も類似の今世紀中盤の目標(Long-term Strategy)を現在宣言している。気候変動問題はその問題の特性上、数十年後を見据えた目標設定とそれに向けた施策実行が必要であり、その見通しとして研究者が作成するシナリオが用いられてきた。しかし、パリ協定では目標を5年毎に更新する仕組みができており、さらに近年、国が宣言する目標は2030年目標も含めて高頻度で改訂されるようになり、研究者が作成したシナリオが数年で使えなくなるということが頻繁に起きるようになってきた。また、各国が気候政策をより真剣に考えるようになってきた今日、各国間での気候政策目標の違いやその意味、実現可能性や困難性、さらにエネルギーシステムや土地利用システムのマネジメント戦略等を比較評価分析することは必須と考えられる。そこで、本研究は従来考えていなかったような政策の不確実性に柔軟に対応できるようなシナリオの設計・フレームワークを提案した。本提案は日本だけでなく世界のどの国でも使うことができ、今後の世界の気候政策を後押しするのに有用であると考えられる。シナリオの提案を検討するにあたって考慮したのは以下の5つの条件を満たすような枠組みである。A)国際的な比較可能性、B)世界的な気候変動目標との適合性・整合性、C)政策との関連性、D)重要な国目標の不確実性に対処する能力、E)モデリングプロトコルの解釈に曖昧さがないシンプルな実装、である。

【サブテーマ2】 エネルギーシステム変革の技術的・経済的な実現可能性の検討

サブテーマ2は世界エネルギー部門ネットゼロ排出を達成する3つの代表的なシナリオの定量化（2-1）、世界を対象としたエネルギー需要部門における水素・合成燃料の評価（2-2）、世界を対象とした発電部門における水素・アンモニアの脱炭素化への貢献の評価（2-3）、および日本を対象としたエネルギーシステムモデルを用いた2050年脱炭素化シナリオの評価（2-4）を実施した。

（2-1）世界エネルギー部門ネットゼロ排出を達成する3つの代表的なシナリオの定量化

本研究では、世界エネルギーシステムモデルAIM-Technologyを用い、まずIMPに沿ったシナリオとして、CDRを大規模に行うシナリオ(1.5C-CDR)、電化等による需要部門の脱炭素化を進めるシナリオ(1.5C-DEC)について定量化を行うことで、技術・経済面でこれらの諸課題がどの程度の影響を及ぼすのかを明らかにした。さらに、CDRや需要側対策に依存しない新たな特徴的なゼロ排出シナリオとして、炭素回収利用(Carbon capture and utilization, CCU)を活用するシナリオ(1.5C-CCU)を定量化した。これは、大気中のCO₂を直接回収する技術(Direct air capture, DAC)と、太陽光・風力等の再生可能エネルギー電力起源の水素を用いた合成燃料、いわゆるe-fuelを最大限に活用し、CDRの実施を抑制しつつ、エネルギー需要側における電化等への急速な転換を回避するものである。本研究で用いたエネルギーシステムモデルAIM-Technologyは、世界全域を33地域に区分したボトムアップ型の逐次動学エネルギーシステムモデルであり、特に発電部門について各季節の代表日を1時間単位で分析する時間解像度を有している。

（2-2）世界を対象としたエネルギー需要部門における水素・合成燃料の評価

世界ネットゼロ排出の達成において、電化が比較的困難な分野における削減方策として、水素や合成燃料の利用が挙げられるが、AR6で示された緩和シナリオではこれらのエネルギーキャリアの導入を考慮したものはごく僅かであり、その脱炭素化への貢献に関する知見は限定的であった。本研究ではAIM-Technologyに、アンモニアを含む水素エネルギーキャリアの製造・輸送・消費技術、直接空気回収(DAC)等の回収CO₂からの合成燃料製造プロセスを追加し、大幅削減シナリオにおける水素・合成燃料の役割を評価した。

（2-3）世界を対象とした発電部門における水素・アンモニアの脱炭素化への貢献の評価

世界を対象に発電部門の脱炭素化における水素・アンモニアの貢献の可能性について評価を実施した。近年の緩和シナリオ研究では、石炭・ガス等の火力発電の早期退出、およびCCS等によるCO₂排出抑制はロバストな主要策の一つとされている。その手段の一つとして、再生可能エネルギー等から製造された水素・アンモニアは、単体での燃焼(専焼)に加えて、既存の石炭・ガス発電燃料への混合(混焼)も可能であることから、火力発電の脱炭素化に寄与する可能性が期待されてきた。しかし、IPCC AR6に含まれる緩和シナリオではほぼ考慮されておらず、発電部門への活用を含めた脱炭素化への貢献の可能性は明らかにされていなかった。そこで本研究では、AIM-Technologyにおいて混焼を含む水素・アンモニア発電を新たな技術オプションとして追加し、低排出シナリオにおけるその貢献について評価を行った。

(2-4) 日本の2050年脱炭素化に向けたシナリオ分析

日本の2050年ゼロ排出の達成に向けた方策としては、CDR実施のほか、ライフスタイル変革、水素エネルギーキャリアの導入（合成燃料含む）に加え、海外からのCO₂フリー水素・合成燃料、排出枠輸入も選択肢となる可能性がある。ただしそれらの輸入価格の見通しは明らかでなく、日本のネットゼロ排出の経済性評価は困難であった。本研究では、日本を対象としたエネルギーシステムモデル（AIM-Technology-Japan）を用いて5つの代表的なシナリオにおけるエネルギーシステム転換とそれに必要な緩和費用の評価を行った。① CN-CRは主にCDRの活用、② CN-AFは水素等の代替燃料（Alternative Fuel）の活用、③ CN-LD（Low Demand）では、産業生産量、輸送需要等のエネルギーサービス需要量の削減、④ CN-IM（IMport）では、水素エネルギーキャリアの輸入、⑤ CN-ET（Emission Trading）は海外からの排出枠の調達、を考慮したシナリオである。水素エネルギーキャリアの輸入価格や排出枠の調達価格はAIM-Technology-Globalによる世界全域を対象としたシナリオの推計結果を用いた。

【サブテーマ3】食のライフスタイル変革と農業起源温室効果ガス削減技術導入の検討

サブテーマ3では、研究計画に沿い、農業起源温室効果ガス削減可能量を推計するモデルの開発とその適用を行い（3-1）、経済モデルで食の内容の変化による各種環境影響等を分析した（3-2）。

(3-1) 農畜産業の生産と消費段階における温室効果ガス排出削減の推計

世界の温室効果ガス(GHG)のネットゼロ排出の達成において、非二酸化炭素の排出をもたらす農畜産業部門における排出削減が重要な役割を果たすと報告されている。近年では農畜産物の生産側のみならず、その消費側での対策についても提案がなされていることから、本研究では世界全体で農畜産業部門における生産側に加えて、消費側の対策である畜産物の消費制限を考慮した場合の温室効果ガス削減可能量と削減に伴う費用の推計を行った。応用一般均衡モデル(AIM-Hub)と農畜産業排出評価モデル(AFOLUB)を組み合わせ、メタン・亜酸化窒素の削減可能量と削減に伴う費用を算出する。AFOLUBは将来の活動量(作物の生産量、家畜生産頭数)、炭素価格を所与とし、GHG排出削減技術の詳細な情報から経済合理性に基づいて農畜産業におけるGHG排出量・削減量を算出する。本研究ではAFOLUBに入力する値、およびAFOLUBにより算出される値はすべて平均値のみで解析を行う。

(3-2) 畜産物の消費制限による環境および食料システムへの影響評価

GHG排出量削減取り組みの一つとして畜産物の消費抑制などの消費者による取組が報告されている。しかし、これまで畜産物の消費抑制による食料システムや土地利用への具体的な影響は評価されていない。本研究では畜産物の消費制限による環境および食料システムへの影響を明らかにすることを目的とする。具体的には、世界経済モデル（AIM-Hubモデル）を用いて、畜産物の消費制限による森林の炭素吸収量、GHG排出削減量、土地利用状況、窒素肥料投入量、水資源利用量を明らかにする。

緩和策を取る世界と取らない世界の2つのシナリオを用意し、経済モデルを用い分析し、畜産物の消費制限による影響の推計を行う。経済モデルには応用一般均衡モデル（AIM-Hubモデル）を用いた。AIM-Hubモデルに全要素生産性、作物単収見込み、土地利用データ、消費性向、気候政策、人口、GDPなどを入力し、GHG排出量、食料、土地利用などのデータの出力を行った。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

【サブテーマ1】大規模温室効果ガス排出削減による経済的影響の評価と社会的な受容可能性の検討

(1-1) 経済モデル開発：空気直接回収技術の経済モデルへの導入

図0-2（左）は1.5度_DACなしシナリオおよび1.5度_DACありシナリオにおけるDACとBECCSおよび植林による二酸化炭素回収量を示す。いずれのシナリオにおいても二酸化炭素排出制約が厳しくなるにつれて二酸化炭素回収量を大きく増加させている。1.5度_DACなしシナリオでは、2050年において11.8Gtの二酸化炭素が回収されており、そのうちBECCSが6.9Gtを占めている。1.5度_DACありシナリオでは、2050年において14.2Gtの二酸化炭素が回収されており、そのうちBECCSが4.4Gt、DACによる回収量が4.9Gtを占める結果を示した。1.5度_DACなしシナリオと1.5度_DACありシナリオを比較するとDACの導入によって植林による回収量は大きくは変化しない一方で、BECCSの利用量は減少した。しかし、DACによる回収量はBECCSの減少量を上回ったため、全体の二酸化炭素回収量は増加した。

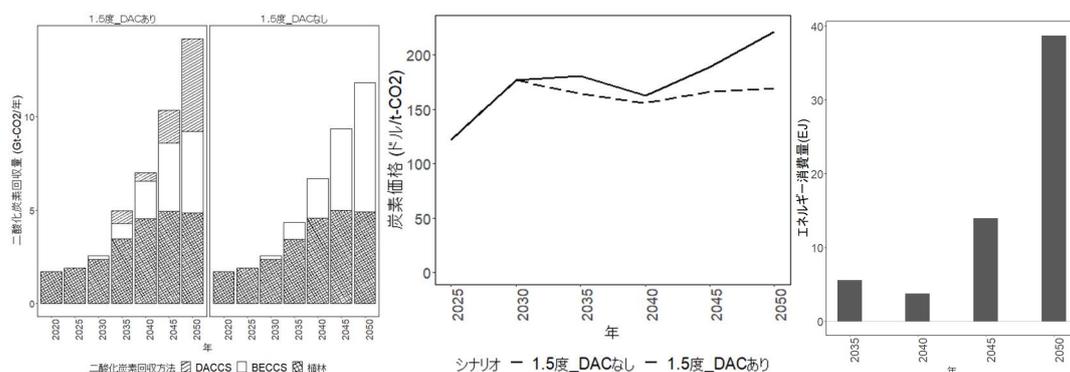


図 0-2 二酸化炭素回収量（左）と炭素価格（中央）と DAC によるエネルギー消費量（右）

図 0-2（中央）は 1.5 度_DAC なしシナリオと 1.5 度_DAC ありシナリオにおける 2050 年までの炭素価格の推計結果を示す。1.5 度_DAC なしシナリオでは、炭素価格が 2040 年以降増加し、2050 年には二酸化炭素 1 トンあたり 221 ドルに達した。1.5 度_DAC ありシナリオでは、DAC が導入されていない 2030 年において最も高い炭素価格が計算された。2035 年以降の炭素価格は横ばい傾向にあり、2050 年には二酸化炭素 1 トンあたり 168 ドルと計算された。次にエネルギーの変化についてみる。排出制約が厳しくなるとともに DAC によるエネルギーの消費量は増加し、2050 年において 38.7EJ のエネルギー消費量が推計された。

（1-2）経済的な実現可能性を上げる施策に関する検討

デフォルトシナリオでの GDP 損失から社会経済・技術移行シナリオでの損失を差し引いた GDP 損失の減少を分析した。炭素バジェットが 1000Gt CO₂ の場合、我々の推定値はこの範囲に収まる（図0-3 a 図中の緑の円参照）。これらは、エネルギーシステムの脱炭素化、非CO₂ 排出量の削減、経済構造の変化に関連する追加的なエネルギーシステムコストと関連している。緩和コストは炭素バジェットと逆相関しており、これは既存研究と整合的である。今世紀に亘る時系列を図1-9c に表す。炭素バジェットが厳しくなるにつれて、費用は増加する。CO₂ の排出量は、今世紀半ばの 2050-2070 年頃に正味ゼロとなり、エネルギーと土地利用の劇的な転換をもたらす。

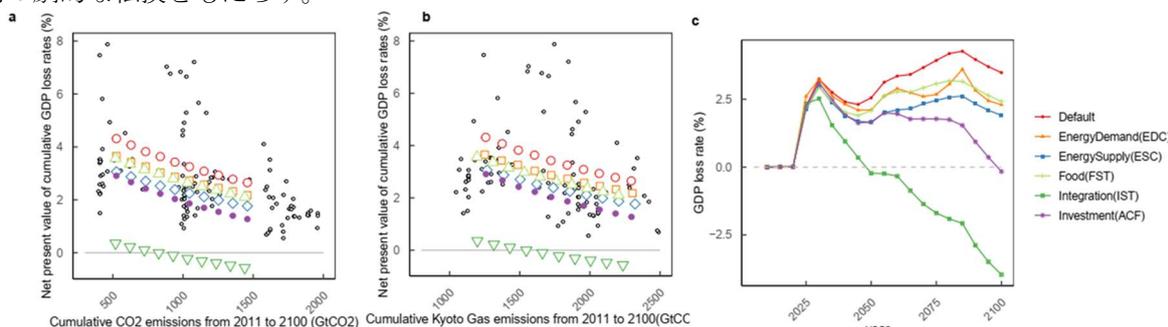


図 0-3 気候変動の緩和に関連する世界の政策コスト(GDP 損失率)。 a、b)2011 年から 2100 年までの CO₂(a) および京都ガス(b)の累積排出量に対する、さまざまなシナリオ(色付きの記号)および IPCC SR1.5 文献値(黒丸)における世界の累積 GDP 損失率の正味現在価値。 c) 1000Gt の CO₂ 予算の下での社会経済技術移行措置に関連する周期的な世界の GDP 損失率。

この気候変動緩和コストは、社会経済的技術的移行をそれぞれ実施するとデフォルトシナリオから減少する(図0-3)。社会経済技術移行対策をすべて実施した場合 (IST)、緩和コストはほぼゼロ、あるいはマイナスになる (図0-3 a)。炭素バジェットが 700Gt CO₂ よりも大きいシナリオでは、緩和コストがマイナスとなり、便益があることを意味する。炭素予算が厳しくなるにつれて、GDP 損失の軽減度合いは小さくなる。

今世紀初頭には GDP が減少するケースもあるが、1000Gt CO₂ の予算では、今世紀半ばにはゼロに近づき、今世紀後半には強いマイナスとなる(図0-3 c)。世紀末の GDP は 4.0% 増 (-4.0% GDP 減) を示している。他の予算ケースも同様の傾向を示している(図0-3 e)。

追加投資シナリオでは、4つの施策の中で最も大きな1.4%程度のGDP損失削減効果が得られる (図0-3a 紫色の丸印)。Additional-Investmentの前提には、資本形成の1%増が含まれており、これは一見小さく見えるが、最終的には最大の貢献となる。エネルギー供給の変化は、Additional-Investmentに続いて、GDPの損失を1.0%程度削減する。Food-System-TransformationとEnergy-Demand-Changeは、それぞれ0.62%、0.53%とほぼ同等にGDP損失の回復に貢献する。今世紀前半などの初期におけるこれらの施策の効果は小さく、施策ごとの差はない(図0-3c)であるのに対し、追加投資の長期的な効果は、今世紀後半から終盤にかけて大きい。2100年において、追加投資シナリオは3.7%のGDP増加を示している。一方、エネルギー供給変動やエネルギ

一需要変動は、2100年においてそれぞれ1.6%、1.1%と比較的小さい値を示している。

(1-3) 歴史的なエネルギー消費の推移と将来シナリオの比較およびその実現可能性の検討

図0-4(a1)にエネルギー強度、(a2)に炭素強度、(a3)に電化率の推移、(b1)にエネルギー強度の変化率、(b2)に炭素強度の変化速度、(b3)に電化率の変化速度の推移を示す。(c1~c3)に(b1~b3)に対応する項目の確率密度分布、(c1~c3)に対応する箱ヒゲ図を示す。変化率と変化速度は全て年率で表す。図0-4(a1)から、エネルギー強度は将来に向かって一定の割合で減少しながら収束していく対数関数的な傾向を示しており、炭素強度と電化率にはそのような傾向が無かったことから、以後の分析では、エネルギー強度については変化率、炭素強度と電化率については変化速度を対象として選択した。

エネルギー強度は図0-4(a1)から、エネルギー強度は、歴史的推移も将来シナリオも減少傾向を示し、過去と将来はスムーズに連続しているように見える。(b1)から、歴史的推移における変化率は3%減~2%増に分布が集中しつつ、年代が新しくなるほど負側に向かう傾向がある。将来シナリオにおける変化率は0%~3%増の範囲に変化率が分布し、これを外れる範囲に一部期間・一部地域のポイントがある。(c1)は、地域と期間と変化率の組合せである(b1)の情報から変化率のみを抽出してこれを確率密度分布で表した図である。X軸に変化率を、Y軸にその変化率に該当するデータのカウンツ数(ここで1カウンツは、全シナリオに共通の傾向として、負側に偏ったやや非対称な分布であり、中央値はマイナス1~1.5%付近にある。将来シナリオ5本は非常に類似した分布を持つ。歴史的推移は、中央値をほぼ共通する位置に持ちつつ、将来シナリオより広い分布となっている。炭素強度については(a2)に示す時系列データにおいて、歴史的推移を参照すると、炭素強度は全体に横ばいの傾向である。(b2)の変化速度からも、過去の明確な傾向は認めにくい。(c2)の確率密度分布からは、歴史的推移の中央値がほぼ0%の位置にあり、ここからも横ばい傾向であることが分かる。気候緩和シナリオである2.5°C、2°C、1.5°C、WB2Cの各シナリオでは、(c2)に示す分布は、歴史的推移の範囲を超えて負側にあり、その程度は気候制約が厳しくなるほどマイナス寄りで、広い分布となる傾向がある。1.5°CとWB2Cシナリオでは変化の分布が広い範囲に及んでおり、一つのシナリオ内に急激な削減を行う部分(地域・期間)とそうでない部分の両方の要素を含む。過去にない急激な変化を避ける観点からは、変化が緩やかな部分と急激な部分を相殺するような改善の余地がある。

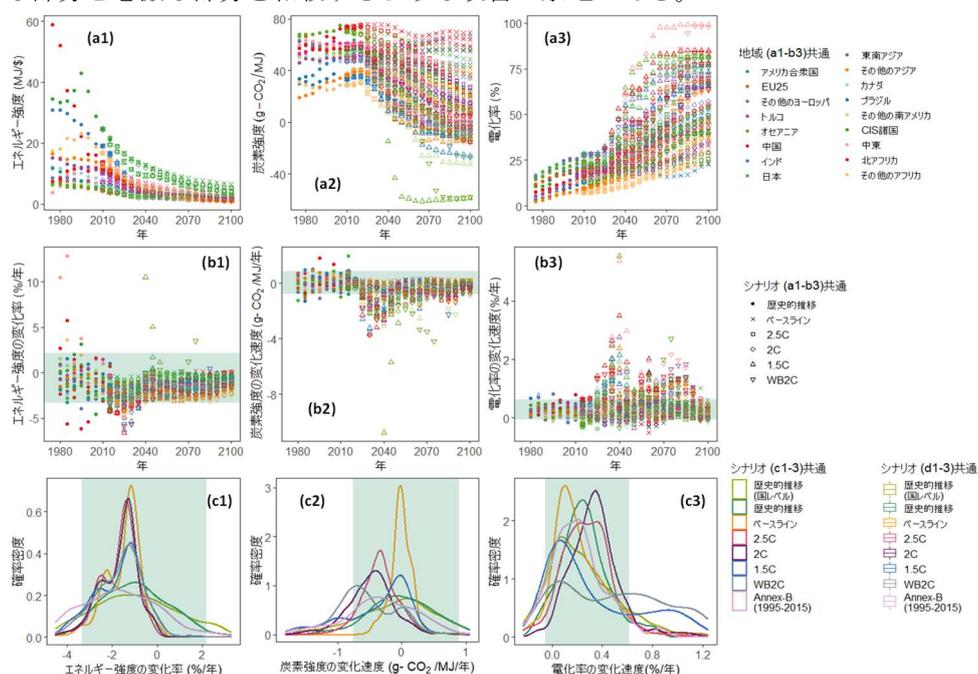


図0-4 各指標の (a)時系列、(b)変化率・変化速度の時系列、(c)変化率・変化速度の確率密度分布

(1-4) 脱炭素シナリオの社会的な実現可能性に関する公衆認知の検討

1回目(2022年度)のフォーカスグループ調査は図0-5で示す通り、グループ調査の参加者の間では、最も実現可能なシナリオの選択肢としてCDR型、その次にLED型が選ばれる傾向が強かったのに対して、最も望ましいシナリオの選択肢はCCU型に大きく偏重する結果となった。この結果の背景として、まずCDR型シナリオの認知に関していえば、経済的なコストの観点からより現実的なアプローチと捉える一方で、化石燃料の利用を継続し、CO₂の地下貯留(CCS)技術に過度に依存する対策は根本的な問題に解決につながらないという批判的な見方がインタビュー参加者の間に共通して確認された。LED型シナリオの認知については、需要側の電化促進はすでに実際に社会で起こっており、現実味のある対策として捉えられる反面、エネルギー需要を減らすために飛行機移動などの既存のライフスタイルを大幅に転換することには強い忌避感を示す

反応が多かった。このように、CDR型とLED型はそれぞれ異なる理由で実現可能だと認知される一方で、どちらのシナリオも社会的には望ましくないという捉え方が優勢であった。一方、CCU型の認知は、CDR型とLED型に対する参加者の相反した感情を埋めるような形で、費用の大きさゆえに実現可能性はあまり高くないものの、合成燃料で化石燃料を代替することで現状の社会インフラを大きく変更せず脱炭素を達成できるという点に強い期待を示し、三つのシナリオの中で最も望ましいという見方が大勢を占めた（図0-5）。

これらの結果を総合すると、モデルの定量シナリオではコスト効率性が重視される傾向にあるが、公衆認知においてもコスト効率性は社会的な実現可能性を示す指標として機能しているといえる。一方、シナリオの公衆認知はコスト効率性のみで捉えることはできず、特にLED型のような既存のライフスタイルからの大幅な転換を伴うシナリオは経済的成本ではなくライフスタイル変革に伴う社会的コストについて競合する捉え方があることが示された。特に、シナリオの実現可能性と望ましさの認知には大きなギャップが存在し、シナリオ選択の政策的な議論においては両者の違いを考慮した、より丁寧な議論が必要になる。

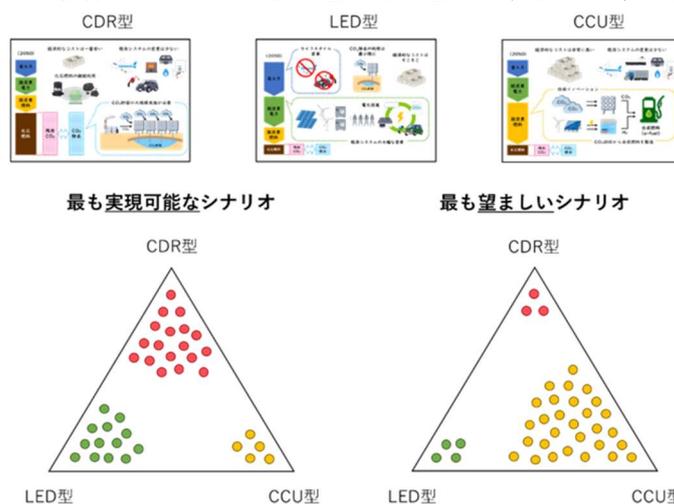


図0-5 1回目のフォーカスグループ調査の脱炭素シナリオの実現可能性と望ましさの認知

(1-5) 現状の国シナリオの問題点と研究コミュニティとしてできること、シナリオプロトコルの提案
 将来の緩和策の考えられうる排出経路の範囲を適切にカバーしつつ、各国間での比較を可能にする国シナリオのシステムティックかつ標準的なアプローチを提案した。ここでは、この枠組みを「国長期パスウェイ」(NLPs)と呼ぶ。このNLPsアプローチでは、単一の排出削減目標を指定するのではなく、LTSの目標年として一般的に考えられている2050年の排出削減率のシナリオをデフォルトセットとして設定することで、将来の国の気候目標の不確実性をヘッジすることを意図する。

シナリオは2種類に分類される。その第一はいわゆるベースラインで、気候変動緩和政策は除外されている。第二は、2050年の排出量削減目標を基準年比10~100%とし、その間を10%刻みで設定した気候シナリオである。本研究では、アジア諸国(中国、インド、日本、韓国、タイ、ベトナムの6カ国)を選び、一般均衡モデルであるAIM-Hubモデルを使用して定量化した。その例として日本の結果を示す(図0-6)。

ベースライン・シナリオ(BaU)では、期間を通じて排出量はほとんど変化しないが、CM30、CM40からCM100と名付けられた気候緩和シナリオでは、2030年にNDCの排出量削減目標26%を達成し、2050年には各数字が削減目標率を意味する。次に、各排出削減レベルに対するエネルギーシステムおよび経済への影響についてみる(図0-6 efg)。例えば、30~60%削減の下では、総エネルギー供給量はほぼ一定であるが、排出量100%削減のシナリオでは、ベースラインの約半分に供給量が低下することを意味する。つまり、60-70%の排出量削減の先には、エネルギー効率の改善と行動変容の両方を含む需要サイドの施策の大きな貢献が必要である。エネルギー源の構成については、CCSなどの低炭素エネルギー技術や再生可能エネルギーの寄与が削減レベルの上昇に伴って徐々に大きくなっている。緩和のためのマクロ経済費用は、より野心的な目標になるほど顕著に増加し(図0-6 f)、2050年の排出削減目標が80、90、100%の場合、それぞれGDP損失は3%、4%、4.5%となる。炭素価格は削減レベルに対してより感度が高く、100%削減シナリオでは5,000\$/tCO₂以上、90%と80%削減シナリオではそれぞれ約2,000\$/tCO₂まで急激に増加する。

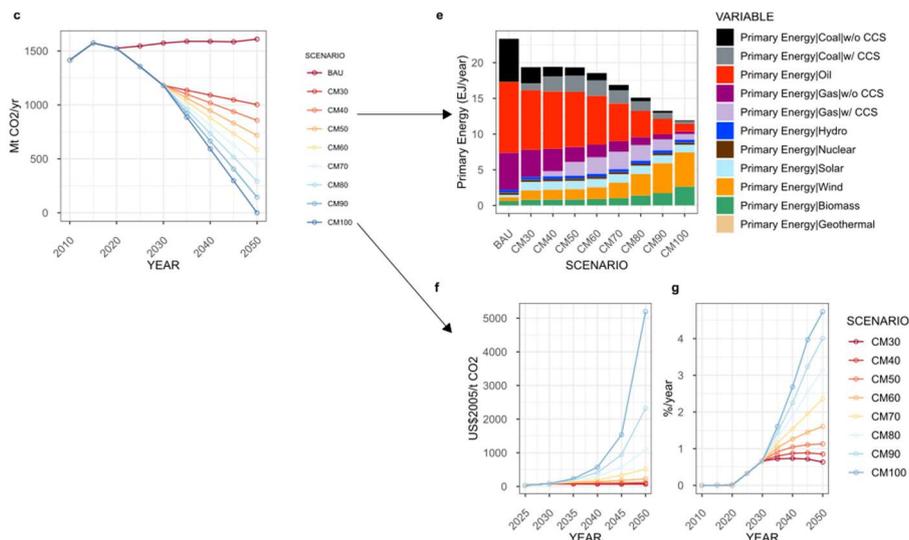


図 0-6 日本を事例とした国規模の長期シナリオ (NLP) の解釈の例示。e は 2050 年の一次エネルギー供給によるエネルギーシステムへの影響、f、g は GDP 損失率と炭素価格による政策コストへの影響を示す。

【サブテーマ 2】 エネルギーシステム変革の技術的・経済的な実現可能性の検討

(2-1) 世界エネルギー部門ネットゼロ排出を達成する 3つの代表的なシナリオの定量化

AIM-Technologyにより推計された、3つのシナリオ (1.5C-CDR、1.5C-DEC、1.5C-CCU) における2050年までの最終エネルギー消費構成を図0-7aに示す。1.5C-CDRは2050年時点で主に産業、運輸部門において化石燃料利用、CO₂排出が一定量残り、それをCDRの実施、主にBECCSによって相殺することでネットゼロを達成している。一方、1.5C-DEC、1.5C-CCUでは、CDR実施量は比較的少なく、1.5C-DECでは、大幅な電化、産業・運輸部門での水素 (アンモニア含む) 利用により最終エネルギー部門からの排出を削減している。一方、1.5C-CCUでは、電化・水素化技術の普及速度制約を受け、電化と水素の最終エネルギー部門における消費量は3つのシナリオ間で最も少ない。その代わりに、再生可能エネルギー起源の水素とCO₂の直接空気回収による合成燃料が用いられ、2050年までに世界の最終エネルギー総量の30%を満たす結果となった。

1.5C-CCUシナリオは、2050年における一次エネルギー供給に占める炭素を含むエネルギーの供給量 (化石燃料およびバイオマス) はIMP-Renと同程度の200EJ/年まで低下している。一方で、最終エネルギー部門では特に液体・気体燃料を中心に炭化水素燃料 (化石燃料、バイオマス、合成燃料) の消費量はIMP-Negに近く、300EJ/年程度に達する結果となっている (図0-7b)。これはDACによって大気中から回収した炭素を合成燃料として活用していることによるものであり、従来示されてきたIMPsに代表されるシナリオとは大きく異なる特徴である。1.5C-CCUでは、化石燃料・バイオマスやCCSへの依存、需要部門の急速な転換は抑制される一方、合成燃料を製造するため、2050年までに必要となる再生可能エネルギー発電量は、他のネットゼロシナリオの1.5倍程度、直接空気回収量は年間10Gt-CO₂以上に達する結果となった。また、CO₂ゼロ排出達成に必要な追加エネルギーシステム費用は、発電電力量の増加、DACや合成燃料製造設備の大規模導入に伴い、他のゼロ排出シナリオの約2倍に増加する結果となった。CCUを大幅に活用したシナリオは、需要転換等が遅れた場合の代替策となり得る一方で、費用やエネルギー供給側の課題も多いことから、電化等の対策も含めた包括的な戦略の重要性が示唆された。

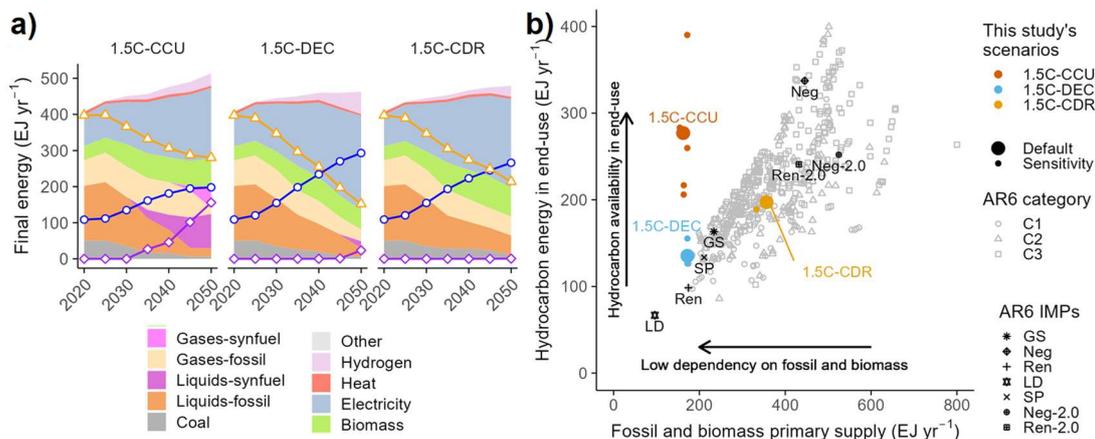


図 0-7 a) 最終エネルギー消費量。DAC の実施による電力・熱の消費はここには含んでいない。 b) 一次エネルギー供給と最終エネルギー消費量に占める炭化水素燃料の比較。炭化水素には化石燃料、バ

バイオマス、合成燃料を含む。灰色のプロットはAR6のC1-C3カテゴリの結果、黒色はIMPを表す。

(2-2) 世界を対象としたエネルギー需要部門における水素・合成燃料の評価

AIM-Technologyによる、CO₂排出制約、水素・合成燃料に関する技術シナリオ別の世界全体の最終エネルギー消費の推計結果を図0-8aに示す。水素や合成燃料の導入量はシナリオ間で幅があり、産業や運輸など、電化が困難な用途において水素・合成燃料が導入されるが、多くのシナリオでは最終エネルギー消費の5%以下に留まることが分かった。2°C目標を上回る水準の排出制約、CCSの利用制約が同時に課せられた状況など、特定の条件の下では、水素や合成燃料の導入が拡大し、導入率は最大で20%弱まで拡大する結果となった(図0-8b)。また、電力・バイオマスの利用拡大は、どのシナリオでも共通してみられる傾向であった。部門別では、民生ではCO₂削減率が高くなるほど電化が進む一方、水素の導入はほぼゼロであった。産業部門はCO₂削減率が対策なしケース比で70%を超えた程度から水素の導入がわずかに進むが、電化やバイオマスの寄与度の方が大きい。これは産業部門では電化が困難な分野が多い一方、バイオマスやCCSなどの利用も可能であるため、導入率は比較的限られたものと考えられる。運輸では、長距離輸送や船舶・航空を中心に水素・合成燃料導入が比較的進みやすい結果となった。ただし、水素や合成燃料は水素製造時のエネルギーロス、生産設備への追加コストから、ほとんどのケースで電力と比べて費用が高く、およそ1.5-2倍程度の生産費用がかかることが示された。以上より、水素・合成燃料は特定の条件下・部門において脱炭素化に寄与する可能性があるが、それ過度に依存することなく、電化やバイオマス、CCS利用など多様な対策オプションを踏まえた包括的な戦略の必要性が示唆された。

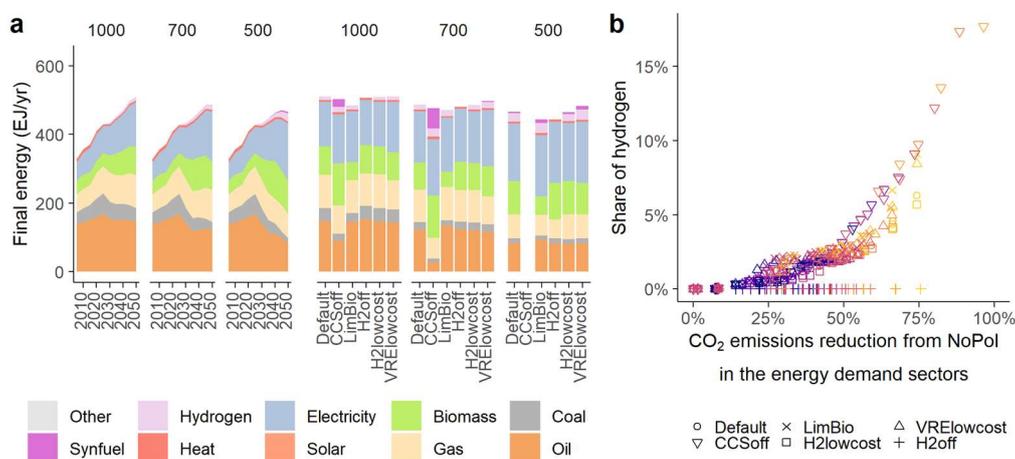


図0-8 a) 最終エネルギー消費。各パネル上の数字は累積CO₂排出量の値。面グラフはDefault(技術制約なし)シナリオの値、棒グラフは各シナリオにおける2050年の値を表す。b) CO₂削減率と水素(合成燃料含む)シェアの関係。

(2-3) 世界を対象とした発電部門における水素・アンモニアの脱炭素化への貢献の評価

AIM-Technologyによるシナリオ別の発電電力量構成の推計結果を図0-9aに示す。発電構成は排出シナリオによってある程度異なるが、2°Cや1.5°C目標を達成する想定の下では、火力発電の減少、太陽光・風力発電の増加は共通してみられる結果となり、2050年における火力発電による発電電力量は、20EJ/年以下に留まる結果となった。また、2050年に水素・アンモニア専焼・混焼発電が世界の発電量に占める割合は、最大で1%程度に留まる結果となった(図0-9b)。水素価格が大きく低下するシナリオでは、石炭・ガスいずれにおいても水素混焼設備の導入が進み、世界の火力発電設備の約半数が水素混焼設備付きとなる可能性が示された。しかし、これらの設備が1年のうちに稼働する期間は、太陽光・風力発電の出力が天候条件によって大きく低下するごくわずかな時間帯に留まる結果となった。さらに、水素の生産コストが大きく低下するシナリオでは、石炭火力については最大で2050年の座礁資産量は約半減(混焼なしケース比)する結果となったが、2030-40年頃では、座礁資産の抑制効果は限定的であった。水素混焼率が高くなるほど、石炭・ガスへの炭素税課税に伴うCO₂排出費用は低下する一方、水素・アンモニア調達による燃料費が増加する結果となり、水素混焼は必ずしも費用面では優位性の高いオプションではないことが示された。なお、発電部門における水素・アンモニアの利用は限定的となった一方、航空・輸送燃料としての水素・アンモニア利用は、先行研究と同様、比較的進みやすい結果となった。本成果より、発電部門では費用の観点から水素・アンモニアの役割は非常に限定的である一方、輸送部門では比較的有効な対策となり得ることから、様々な部門を横断した包括的な脱炭素化方策の検討が重要であることが示唆された。

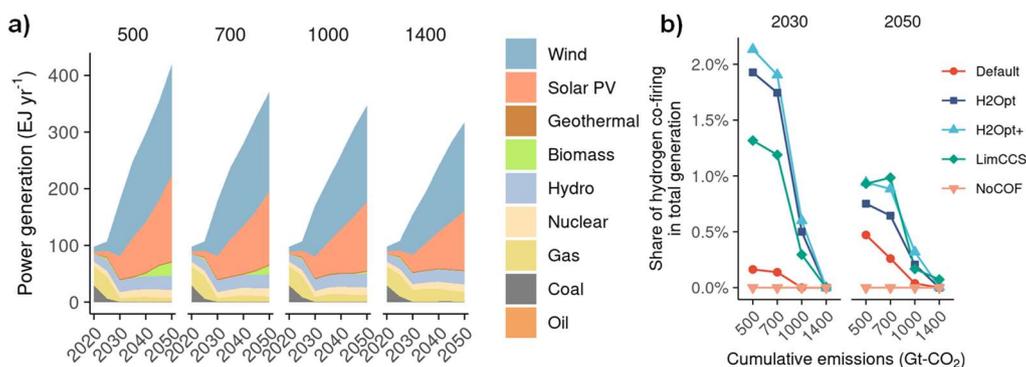


図 0-9 a) 発電電力量構成。標準的な技術想定 (Default) における結果。 b) 世界の総発電量に占める水素混焼・専焼火力発電による発電電力量のシェア。

(2-4) 日本の2050年脱炭素化に向けたシナリオ分析

AIM-Technology-Japanによるシナリオ別の日本の温室効果ガス排出量の推計結果を図0-10aに示す。いずれのシナリオでもエネルギー需要部門や非エネルギー起源CO₂、CO₂以外の温室効果ガスが2050年に残存し、これを負の排出量または排出枠の購入によって相殺している点は共通するが、残存排出量の量・構成はシナリオによって異なる。CN-CRとCN-ETでは、それぞれエネルギー供給部門とDACCSによる負の排出、排出枠の購入によって2050年ネットゼロ排出に到達したが、CN-AF、CN-LD、CN-IMは需要部門の残存排出が削減された。全シナリオで2050年の最終エネルギー消費に占める割合が最も多いのは電力であり、電化は主要な対策となる。それ以外のエネルギー構成はシナリオによって特徴が異なり、例えばCN-AFでは水素と合成燃料の増加、CN-LDではエネルギー需要総量の減少がみられる。排出量構成やエネルギー構成はシナリオによって大きく異なる一方、エネルギーシステム費用には大きな違いは見られず、従来の2050年80%削減シナリオと比べるといずれのシナリオも費用はその3-4倍となった(図0-10b)。ただし輸入額は大きく異なり、CN-IM、CN-ETシナリオでは、2050年のエネルギー・排出枠輸入額が現状の化石燃料輸入額を上回る結果となった(図0-10c)。輸入への依存は必ずしも費用面で優位とは限らず、国内対策の着実な実施も重要であることが示された。また海外対策を想定する場合は、海外での安価な水素・合成燃料調達などのエネルギー戦略の検討も重要であることが示唆された。

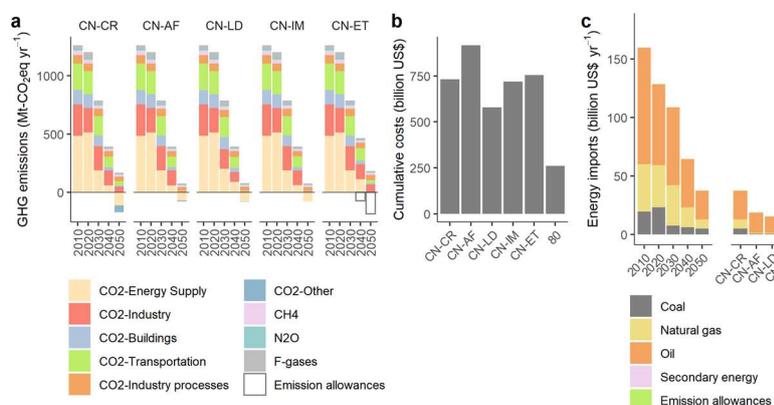


図 0-10 a) 日本の2050年までの温室効果ガス排出量。CO₂-OtherはDACCSを含む。 b)2021-2050年までの累積追加エネルギーシステム費用。 c) エネルギー・排出枠の輸入費用。左はCN-CRシナリオの輸入額推移、右は各シナリオの2050年値を示す。

【サブテーマ3】食のライフスタイル変革と農業起源温室効果ガス削減技術導入の検討

(3-1) 農畜産業の生産と消費段階における温室効果ガス排出削減の推計

2050年における世界全体での農畜産部門のGHG排出削減率は生産側のみを考慮したシナリオで50.2% (対策なしシナリオ比) に対し、生産と消費側両方を考慮したシナリオで69.9% (対策なしシナリオ比) となった。図0-11より、2050年時点のCMシナリオでの削減量は3444MtCO₂で、家畜反芻と農耕地土壌での削減が全削減量の80%近くを占める。一方、DEM_CMシナリオでは2050年の全削減量は4792 MtCO₂eq/年で、そのうち52% (2514MtCO₂eq/年) は消費側での削減、残りは生産側での削減となった。具体的には、2050年において家畜反芻では797MtCO₂eq/年、糞尿管理は195MtCO₂eq/年、稲作は350MtCO₂eq/年、農耕地土壌は936 MtCO₂eq/年の削減ポテンシャルとなった。これは農畜産物の消費側における取組みが20% (対策なしシナリオ比) 追加的に排出削減をもたらし、ネットゼロの達成において重要な役割を果たすことを示唆している。

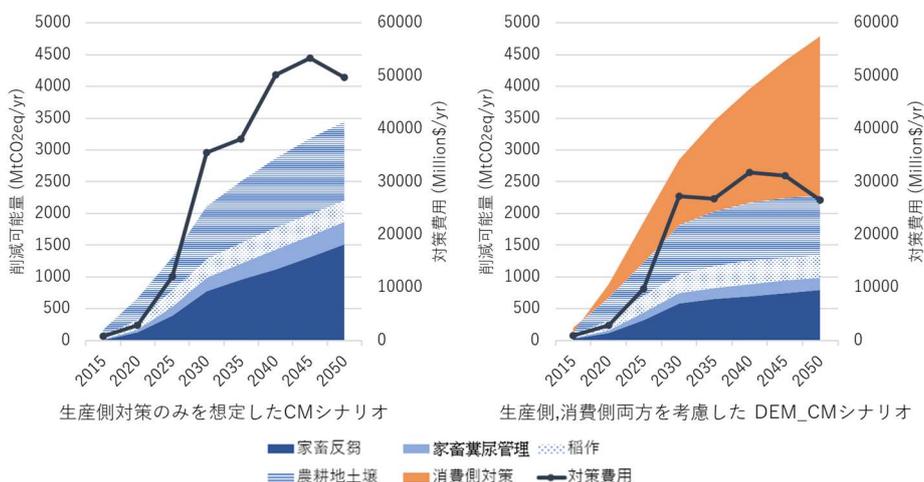


図 0-11 生産側対策のみを想定した CM シナリオ (左)、生産側、消費側両方を考慮した DEM_CM シナリオ (右) それぞれにおける農畜産業部門の排出削減可能量及び削減対策費用推移比較

(3-2) 畜産物の消費制限による環境および食料システムへの影響評価

世界全体で畜産物の消費制限を行ったところ、2050年において世界のGHG排出量は約962MtCO₂eq/年減少した。同時に、牧草地面積は約399Mha減少し、森林面積は約93Mha増加し(図0-12a)、それに伴い二酸化炭素吸収量は約236MtCO₂eq/年増加した。加えて、灌漑水量は200million m³/年減少し(図0-12b)、窒素使用量は3百万トン窒素換算量減少した(図0-12)。これらのことから、畜産物の消費制限はGHGの排出量削減だけでなく、森林保全や水資源や窒素肥料削減など環境保全の観点でも便益があることが示された。

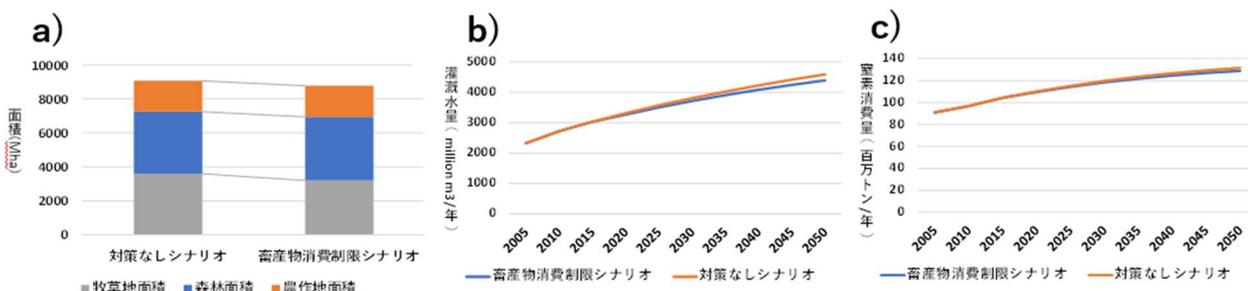


図 0-12 (図 3-12) 各シナリオにおける a) 面積利用状況変化、b) 灌漑水量推移、c) 窒素消費量推移

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況> 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「世界全域を対象とした技術・経済・社会的な実現可能性を考慮した脱炭素社会への道筋に関する研究」

全体目標	全体の達成状況
<p>パリ協定の2°C、1.5°C目標の達成に必要な短中期的な削減努力の実現可能性を技術的・経済的・社会的な観点から検討し、これらを考慮した上で脱炭素社会ビジョンへの道筋をライフスタイル変革・技術革新や環境政策と併せて提示する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 技術的な観点は、エネルギー起源、農業起源排出量削減技術の普及スピード・マーケットシェア、座礁資産の規模で評価する ● 経済的な観点は、マクロ経済影響(GDP 損失、家計消費損失) と所得格差で評価する ● 社会的な観点は、統合評価モデルの入出力条件を一般の市民・専門家を含むステークホルダーに問うことで評価する 	<p>脱炭素シナリオの実現可能性を包括的な観点から検討し、当初想定していた本研究の目標は着実に達成された。より具体的には、以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 技術的な観点では従来の統合評価モデルで扱えなかった水素、アンモニア、空気直接回収、農業関連技術などの革新的技術を扱うように大幅なバージョンアップを行った。そのモデルで、座礁資産の規模などの計算を行った。さらに実現可能性を上げるために、その座礁資産を減らす対策の可能性を示した。 ● 経済的な観点では、脱炭素シナリオのマクロ経済影響を評価し、そのマクロ経済影響を軽減する施策としてライフスタイル変更や技術革新などを評価した。 ● 社会的な観点では、統合評価モデルのシナリオの結果を用いてステークホルダー会合を実施し、脱炭素シナ

<p>環境政策は既存研究で一般に用いられる炭素税だけでなく、各種環境配慮型機器や対策への補助金等を想定する。ライフスタイル変革は既存文献を参考にしつつ、エネルギー需要低減や環境負荷を低減する（畜産物を減らした）食ライフスタイルを主として検討する。これらを統合評価モデルによるシナリオとして提示する。</p> <p>本課題で開発する日本を含むグローバルシナリオはインターネット上のデータベース、および一般向けに分かりやすくまとめた年次レポート形式で公開し、ESGやTCFDなどを含む広く環境に関連する企業戦略策定や日本の中央政府・地方自治体の環境政策策定時に使えるようにし、地域循環共生圏へ向けた参考資料となるようにする。</p> <p>なお、新型コロナウイルスにより生じた行動変容等の影響は統計等の観測情報が整ってき次第随時将来の社会経済条件に反映させる。</p>	<p>リオの実現可能性、望ましさの評価は必ずしも一致しないことを明らかにした</p> <p>そして、本課題で得られたシナリオデータおよび年次レポートについてはwebサイトにて公開した。これら当初研究目標に加えて以下を追加実施した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● IPCCの第7次報告書の主要課題と考えられる国シナリオの扱いについて研究コミュニティとしての提案をしてNature Climate ChangeのPerspectiveとして出版した ● 昨今の日本の気候政策状況を鑑みて、日本のカーボンニュートラル実現に向けた選択肢について検討を行いその成果をまとめた ● 課題全体の脱炭素シナリオとなる3つの代表的な定量シナリオを提示しOne Earthにて出版した <p>論文実績としても、Nature Climate ChangeやNature Communications等を含む査読論文数は55編（うち英文20編）を出版した。以上のように、研究計画に沿って研究を実施し研究目標を達成したうえで、さらに追加的に難易度の高い課題に取り組み、総じて学術的、環境政策上重要な成果を出していることをふまえ、「目標を大きく上回る成果をあげた」と自己評価する。</p>
--	---

<【サブテーマ1】達成状況> 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「大規模温室効果ガス排出削減による経済的影響の評価と社会的な受容可能性の検討」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
<p>主として3つの項目が目標となる。</p> <p>① 統合評価モデルの経済モデル、これまでIPCCの報告書等で活用されてきた一般均衡モデルAIM/CGE (Fujimori <i>et al.</i>, 2017) の改良及び家計の所得階級別消費構造を記述するモデルの開発・改良を行う。主としてマクロ経済や格差を中心にシナリオの定量化を行う。一般均衡モデルは大規模削減下のエネルギーや食料・農業システムの変化によるGDP等のマクロ経済影響と産業シフト等を推計し、家計モデルでは所得格差、ジニ係数等の指標を示す。</p> <p>② 統合評価モデルの入出力の社会的な実現可能性を評価する。ステークホルダ会合等を実施しそこで得られる制約等を統合評価モデルへフィードバックする。この社会的な実現可能性は、望ましさ(Desirability)も含めて評価する。</p> <p>③ サブ2、3から得られるライフスタイル、技術変革と環境政策を考慮し、実現可能な大規模削減下での経済システム全体及び格差をビジョンとして示す。また、研究成果のとりまとめとアウトリーチを担当し、一般社会でシナリオが活用されるように、インターネットで情報を公開するシステムを構築する。</p>	<p>研究目標の①から③を着実に実施した。</p> <p>①については当初の年度計画に沿って、世界経済モデルであるAIM-Hub (AIM-CGEから改名)を開発・改良し、新しい革新的な技術の評価、最新の気候政策の評価を経済的な面から実施した。また、家計所得を扱うモデルであるAIM/PHIの開発・改良を行い、貧困や格差の指標の定量化を行った。</p> <p>②については、社会的な側面からの実現可能性評価のためのフォーカスグループミーティングを2回実施し、それらの結果についてまとめた。</p> <p>③については、気候緩和策の社会経済的な実現可能性を高める対策として、経済的社会的以下2点の研究を行った。その第一は、経済的な側面で、ライフスタイル変化や技術革新ライフスタイル変化や技術革新により気候緩和費用を下げられ可能性を論じた。その第二は、気候緩和策が貧困や格差に及ぼす影響とその軽減策に、具体的には炭素税税収の還元の可能性、単純な炭素税以外の経済的な手段等について論じた。</p> <p>これらの当初予定してきた作業に加えて、今後の気候政策策定、IPCCの第7次報告書の主要課題として考えられる国シナリオについて研究コミュニティとしての提案し、Nature Climate ChangeのPerspectiveとして出版した。</p> <p>以上のように、研究計画に沿って研究を実施し、研究目標を達成したうえで、さらに追加的に研究コミュニティや政策として重要な成果を出していることをふまえ、「目標を大きく上回る成果をあげた」と自己評価する。</p>

<【サブテーマ2】達成状況> 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「エネルギーシステム変革の技術的・経済的な実現可能性の検討」

サブテーマ2目標	サブテーマ2の達成状況
<p>主として2つの項目を目標とする。</p> <p>① 多様なエネルギー技術をできる限り具体的に扱うとともに、再生可能エネルギーの時間変動性を考慮するため、高解像度の世界エネルギー技術モデルを開発する。それを用いて、個々の技術の普及速度を考慮した上で、急速な温室効果ガス削減の実現可能性を技術的側面から明らかにする。本研究で開発するエネルギー技術モデルは、日本を対象に80%GHG削減を幅広く分析し、近年中央環境審議会等への政策貢献を行ってきたモデル（Fujimori <i>et al.</i>, 2019 <i>Nature Communications</i> 等）をベースとして、世界全域への拡張・高解像度化といった大幅な改良を施す。</p> <p>② ライフスタイル・社会変革のエネルギーシステムへの影響を定量的に示す。そのためにエネルギーサービス需要の変化や新しい技術の導入などのシナリオを検討し、モデル分析を行う。具体的には、自動運転車の普及やエネルギー需要低減に関わる各種施策、革新的技術として水素エネルギーの活用、炭素貯留利用（CCSU）や高性能蓄電池等をモデルへの入力とする。</p>	<p>世界エネルギー技術モデルAIM-Technologyの改良について、対象範囲の世界全域への拡張、電力の需給を1時間単位で解析する分解能の追加、座礁資産、技術普及速度等の考慮について、一部は前倒しして研究を進め、2年目の段階で概ね完了した。</p> <p>さらに、当初計画になかった以下の2点について研究作業を行った。その第一は、昨今の日本の気候政策状況を鑑みて、当初計画にはなかったが日本のカーボンニュートラル実現に向けた選択肢について検討を行いその成果をまとめた。第二に、サブテーマ1におけるFG会合や課題全体のシナリオ設計の中心となる3つの代表的な定量シナリオについても、FG会合に提供した。</p> <p>3年目は、上記の3つのシナリオの定量化、および革新的エネルギー技術としての水素の脱炭素化への貢献について論文が受理・掲載され、それぞれ影響力の高いジャーナルであるOne Earth、Nature Communicationsに掲載された。研究計画・目標に記載した内容は十分に前もって達成したこと、研究期間内にそれらが上記のジャーナルに掲載されたことを踏まえ、「目標を大きく上回る成果をあげた」と自己評価する。</p>

<【サブテーマ3】達成状況>・・・・・・・・・・ 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「食のライフスタイル変革と農業起源温室効果ガス削減技術導入の検討」

サブテーマ3目標	サブテーマ3の達成状況
<p>主として以下の2つの項目を目標とする。</p> <p>① 統合評価モデルの食料・農業モデルの開発・改良を行う。食料モデルは全世界国別（180か国程度）・財別（20財程度）の将来の食料財の消費量を示す。食料需要モデルはこれまでAIMモデルとして用いてきたものをさらに高解像度化し、多様な食文化や社会属性に応じた食料消費を表現できるように改良する。また農業モデルを用いて農業起源のGHG排出量及び削減可能量を地域別で示す。</p> <p>② 環境配慮型の食のライフスタイル、低環境負荷農業生産などを考慮して、食と農業に関わる各種指標を定量的に示し、食と農業の側面から温室効果ガスの削減量を定量的に示す。</p>	<p>研究目標の①と②については当初の年度計画に基づき着実に実施した。①は多様な食文化や社会属性を考慮する世界190カ国・20財を対象とする食料消費モデルを開発し、将来の食料消費と飢餓リスク、環境への影響の評価を実施した。また、農業起源GHG削減可能量を推計するモデルの開発、それと経済モデルを用いた農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する分析を行った。</p> <p>②は農畜産業の生産と消費段階における取組みによる農畜産業由来温室効果ガス排出削減効果に関して分析を行った。これに加えて、経済モデルを用いて食事内容の変化による各種環境影響等を分析した。</p> <p>また、成果にはNature Climate Change誌などのNature姉妹誌での発表論文は4編含まれている。以上のように、研究計画に沿った取り組みを実施し、研究目標を達成したうえで、さらに追加的に研究コミュニティや政策上重要な成果を出していることをふまえ、「目標を大きく上回る成果をあげた」と自己評価する。</p>

5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

サブテーマ1では従来の統合評価モデリング研究分野では見られなかった、貧困や格差に関するモデリングを進めた点で先導性がある。本研究分野については他の欧米の競合グループでも少しずつ進んできている

のが、当グループが世界を先導している。また、研究分野を先導するようなPerspective論文を出すことで国際的な影響力を大きく向上した。

サブテーマ2では、エネルギーシステムモデルの開発を行い、本課題当初は送っていたエネルギーシステムモデルを世界最先端のレベルへと押し上げた。具体的には以下の2点で先進的なモデルとなっている。第一に、)アンモニア、水素、空気直接回収技術を導入したこと、第二に、通常年単位でエネルギー収支を取るが、本モデルは時間解像度を毎月の代表日の24時間でバランスさせてたことである。これら2つが実現したことにより、特に脱炭素化で重要な問題となりうる、再生可能エネルギーの変動性に対する対応を明示的に検討できるようになった。

サブテーマ3では、気候緩和策と農業土地利用システムの関係を明らかにした国際モデル比較論文をNature Sustainabilityで、気候影響の極端現象に注目した論文をNature Foodで出版し、世界を先導している研究が実施できた。また、長谷川はIPCCの第6次評価報告書のLead authorとしても重要な役割を担った。

<行政等に既に貢献した成果>

以下の3点が行政貢献に資する成果である。

- 資源エネルギー庁の総合資源エネルギー調査会基本政策分科会第44回（2021年6月30日）の資料7 P15-16に、本研究成果であるAIM-Hub、AIM/Technology（当時はAIM/Enduse）による試算結果が掲載され、カーボンニュートラルに向けた方策検討に貢献した。
- COP26のPolicy Briefの提供、第14回気候変動枠組条約（UNFCCC）科学上及び技術上の助言に関する補助機関（SBSTA）にてポスター発表をするなど、国際的な機会を通じて本研究成果が直接政策決定者へ届けられている。
- IPCC第6次評価報告書（特に第3作業部会報告書）への貢献を通じて、環境政策、特に国連気候変動枠組条約パリ協定の下で2023年に行われた第1回グローバルストックテイクや国内政策への貢献があった。同報告書では多くの成果が引用された。特に第3章（長期的な緩和シナリオ）や第4章（短中期的な緩和シナリオ、とりわけ国シナリオ）では100を超えるシナリオの提出をした。また、同報告書に対してはシナリオの提出だけでなく、主執筆者（長谷川：第3章）、貢献執筆者（藤森：第3章、第7章）が含まれていた。
- 2022年7月に国連で開催されたECOSOC（国連経済社会理事会）ハイレベルセグメントにおいて長谷川が研究成果を紹介するとともに議論へ貢献した。

<行政等に貢献することが見込まれる成果>

特になし

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	55
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	30
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	98
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	11
マスコミ等への公表・報道等：	50
研究成果による受賞：	20
その他の成果発表：	25

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
1	Fujimori, S., Krey, V., van Vuuren, D., Oshiro, K., Sugiyama, M., Chunark, P., Limmeechokchai, B., Mittal, S., Nishiura, O., Park, C., Rajbhandari, S., Silva Herran, D., Tu, T.T., Zhao, S., Ochi, Y., Shukla, P.R., Masui, T., Nguyen, P.V.H., Cabardos, A.-M., Riahi, K., (2021) A framework for national scenarios with varying emission reductions. <i>Nature climate change</i> 11(6), 472-480, doi:10.1038/s41558-021-01048-z.
9	西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2022) 二酸化炭素直接回収技術を考慮した応用一般 均衡モデルの開発および気候変動緩和策の評価. <i>土木学会論文集G（環境）</i> 78(5), I_417-I 427, doi:10.2208/jscejer.78.5 I 417.
13	Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K., Zhao, S., Sasaki, K., Takakura, J., Takahashi, K., (2023) Potential side effects of climate change mitigation on poverty and countermeasures. <i>Sustainability Science</i> 18, 2245-2257, doi:10.1007/s11625-023-01369-2.
14	Fujimori, S., Oshiro, K., Hasegawa, T., Takakura, J., Ueda, K., (2023) Climate change mitigation costs reduction caused by socioeconomic-technological transitions. <i>npj Climate Action</i> 2(1), 9, doi:10.1038/s44168-023-00041-w.
20	西本裕美, 藤森真一郎, (2023) 歴史的に観察された変化との対比に基づく長期気候緩和シナリオの評価方法. <i>土木学会論文集</i> 79(8), doi:10.2208/jscej.22-00209.
25	Oshiro, K., Fujimori, S., (2022) Role of hydrogen-based energy carriers as an alternative option to reduce residual emissions associated with mid-century decarbonization goals. <i>Applied Energy</i> 313, 118803, doi:10.1016/j.apenergy.2022.118803.

31	Oshiro, K., Fujimori, S., Hasegawa, T., Asayama, S., Shiraki, H., Takahashi, K., (2023) Alternative, but expensive, energy transition scenario featuring carbon capture and utilization can preserve existing energy demand technologies. <i>One Earth</i> 6(7), 872-883, doi:10.1016/j.oneear.2023.06.005.
36	Oshiro, K., Fujimori, S., (2024) Limited impact of hydrogen co-firing on prolonging fossil-based power generation under low emissions scenarios. <i>Nature Communications</i> 15(1), 1778, doi:10.1038/s41467-024-46101-5.
38	Hasegawa, T., Fujimori, S., Frank, S., Humpenöder, F., Bertram, C., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Gusti, M., Harmsen, M., Keramidas, K., Ochi, Y., Oshiro, K., Rochedo, P., van Ruijven, B., Cabardos, A.-M., Deppermann, A., Fosse, F., Havlik, P., Krey, V., Popp, A., Schaeffer, R., van Vuuren, D., Riahi, K., (2021) Land-based implications of early climate actions without global net-negative emissions. <i>Nature Sustainability</i> 4(12), 1052-1059 (2021), doi:10.1038/s41893-021-00772-w.
39	Hasegawa, T., Sakurai, G., Fujimori, S., Takahashi, K., Hijioka, Y., Masui, T., 2021b. Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs. <i>Nature Food</i> 2, 587-595, https://doi.org/10.1038/s43016-021-00335-4 .

※この欄の成果番号は「III. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

以下の3点について国際共同研究を実施した。

- (1) 国別シナリオフレームワークの提案の際にはKeywan Riahi, Volker Krey (国際応用システム分析研究所 (IIASA))、Detlef Van Vuuren(オランダ環境研究所 (PBL))などと共に議論、検討を行い、*Nature Climate Change*のPerspectiveとして出版した。IPCCの第6次評価報告書の第3作業部会第4章ではこの論文に付随する各国のシナリオが多数引用され国際的に重要な成果となった。(成果一覧番号1)
- (2) グローバルモデル比較プロジェクトに参画し、その成果を得た。またこれらはIPCCの第6次評価報告書での主要な引用文献となった。当該研究は、Keywan Riahi, Volker Krey (国際応用システム分析研究所 (IIASA))、Detlef Van Vuuren(オランダ環境研究所 (PBL))、Elmar Kriegler(ポツダム気候影響 (PIK))などと実施した。(成果一覧番号39)
- (3) 生物多様性と気候変動緩和策の関係に関する研究をPetr Havlik, Keywan Riahi (国際応用システム分析研究所 (IIASA))とともにに行った。本分析は現在論文執筆中であり成果としてはないが、IIASAから環境省へ提出されている報告書内には成果が記載されている。

<相手機関・国・地域名>	
機関名	国・地域名 (本部所在地等)
国際応用システム分析研究所 (IIASA)	オーストリア、ルクセンブルグ
オランダ環境研究所 (PBL)	オランダ、ハーグ
ポツダム気候影響研究所 (PIK)	ドイツ、ポツダム

8. 研究者略歴

<研究代表者略歴>	
代表者氏名	略歴 (学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等)
藤森 真一郎	2009年度京都大学大学院工学研究科博士課程修了、博士 (工学) 専門は環境システム工学 2010年度より国立研究開発法人国立環境研究所特別研究員、任期付き研究員、 2018年度より京都大学大学院工学研究科准教授を経て、 現在、京都大学大学院工学研究科教授 国立研究開発法人国立環境研究所客員研究員、国際応用システム分析研究所客員研究員を兼任。 日本学術振興会賞、科学技術分野の文部科学大臣表彰受賞などの国内の主要な賞を中

	心に多数受賞歴を持つ
--	------------

＜研究分担者（サブテーマリーダー）略歴＞		
分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
大城 賢	東京工業大学大学院社会理工学研究科博士後期課程修了 博士（工学） みずほ情報総研株式会社チーフコンサルタントを経て、 現在、京都大学大学院工学研究科助教	2021年度 ～ 2024年度
長谷川 知子	京都大学大学院工学研究科博士課程修了 博士（工学） 2011年度より国立研究開発法人国立環境研究所特別研究員、任 期付き研究員を経て、 2019年度より立命館大学理工学部准教授を経て 2024年度より立命館大学理工学部教授 国立研究開発法人国立環境研究所客員研究員を兼任。 科学技術分野の文部科学大臣表彰受賞、ジュンアシダ賞などの 国内の主要な賞を中心に多数受賞歴を持つ	2021年度 ～ 2024年度

II. 成果の詳細

II-1 サブテーマ1 「大規模温室効果ガス排出削減による経済的影響の評価と社会的な受容可能性の検討」

[サブテーマ1 要旨]

サブテーマ1では、研究課題全体の中で社会経済的な側面に主としてフォーカスして長期シナリオの実現可能性について明らかにすることを目的とした。そのために以下3点を主として行った。すなわち、第一に統合評価モデルAIMの経済モデル、家計消費モデルの改良を行い、経済的な側面の評価を行うこと、第二に社会受容性の検討のためにフォーカスグループミーティングを実施すること、第三に将来シナリオと過去の推移を比較し、その実現可能性を検討すること、である。経済的な側面としては、気候緩和策のマクロ経済影響が実現可能性を困難にする要素の一つであるが、それは追加的な投資、ライフスタイル変革を伴うエネルギー需要の低減、再生可能エネルギーなどグリーン技術の費用通減などにより大部分は除去できることがわかった。また、社会的な側面の実現障壁となる分配への影響を貧困人口により評価し、気候緩和策により追加的に増加する貧困人口は炭素税税収の還元や途上国支援などを包括的に行うことで解消できることがわかった。代表的な3つの脱炭素シナリオに対する社会的な実現可能性を一般市民に問うた調査では、費用は重要な要素であることがわかったほか、実現可能性と望ましさが異なり、実際の政策策定にあってはこれらを考慮した施策の検討が望まれる。将来シナリオを過去の推移と比較した場合、エネルギー強度は過去の推移の範囲内であり、実現可能性は低いと思われるが、炭素強度は過去の推移と大きく異なり、大規模なシステム変化が求められることがわかった。

1. サブテーマ1 研究開発目的

サブテーマ1では、研究課題全体の中で社会経済的な側面に主としてフォーカスして長期シナリオの実現可能性について明らかにすることを目的とする。より具体的には、第一に気候緩和策に伴うマクロ経済費用は一般的に実現可能性を困難にする要素と考えられるが、それをいかに低減するのか、という点を明らかにする。第二に、気候緩和策、とりわけ炭素価格や炭素税に伴う分配の側面の潜在的な悪影響は緩和策の一つの懸念であるが、貧困人口に焦点を当て、それを定量化し、その悪影響をどのように取り除けるかを検討し、長期気候緩和の実現可能性に寄与することを狙う。第三に、長期シナリオの社会受容性をフォーカスグループミーティングを通して明らかにする。第四に、エネルギー統計などの過去の歴史的推移を分析し長期シナリオと比較することで、その実現可能性について検討する。第五に、上記の目的達成のために、経済モデルを中心にモデル開発を行う。

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「大規模温室効果ガス排出削減による経済的影響の評価と社会的な受容可能性の検討」
サブテーマ1 実施機関	京都大学、国立環境研究所
サブテーマ1 目標	<p>主として3つの項目が目標となる。</p> <p>① 統合評価モデルの経済モデル、これまで IPCC の報告書等で活用されてきた一般均衡モデル AIM/CGE (Fujimori <i>et al.</i>, 2017) の改良及び家計の所得階級別消費構造を記述するモデルの開発・改良を行う。主としてマクロ経済や格差を中心にシナリオの定量化を行う。一般均衡モデルは大規模削減下のエネルギーや食料・農業システムの変化による GDP 等のマクロ経済影響と産業シフト等を推計し、家計モデルでは所得格差、ジニ係数等の指標を示す。</p> <p>② 統合評価モデルの入出力の社会的な実現可能性を評価する。ステークホルダ会合等を実施しそこで得られる制約等を統合評価モデルへフィードバックする。この社会的な実現可能性は、望ましさ(Desirability)も含めて評価する。</p> <p>③ サブ2、3から得られるライフスタイル、技術変革と環境政策を考慮し、実現可能な大規模削減下での経済システム全体及び格差をビジョンとして示す。また、研究成果のとりまとめとアウトリーチを担当し、一般社会でシナリオが活用されるように、インターネットで情報を公開するシステムを構築する。</p>

3. サブテーマ1 研究開発内容

サブテーマ1は経済モデル(AIM-Hub)や家計消費を詳細に扱う貧困・家計所得(AIM-PHI)モデルの開発改良を行い、社会経済的なシナリオの実現可能性を向上させる施策に関する検討を行うこと、フォーカス

グループインタビューを通して社会的なシナリオの受容性を検討すること、過去のエネルギー統計などから歴史的な推移の現実性について分析し、将来シナリオの実現可能性について検討することが目標となる。研究計画に沿いながら、以下を実施した。ただし、(1-8)については近年の気候変動政策の変化と研究コミュニティのギャップを考慮し、当初の研究計画にはなかったが実施した。以下ではそれぞれについて説明する。

- (1-1) 経済モデル開発：空気直接回収技術の経済モデルへの導入
- (1-2) 経済的な実現可能性を上げる施策に関する検討
- (1-3) 社会経済的な実現可能性の一つの側面である気候緩和策の貧困への影響と家計モデルの改良
- (1-4) 社会的実現可能性の検討のためにフォーカスグループ調査
- (1-5) 京都市を対象とした将来のカーボンニュートラル実現に向けたシナリオ構築
- (1-6) 歴史的なエネルギー消費の推移と将来シナリオを比較し、その実現可能性の検討
- (1-7) 2021年のグラスゴー合意にあわせて各国が提出した排出目標の評価
- (1-8) 現状の国シナリオの問題点と研究コミュニティですべき、シナリオプロトコルの提案

(1-1) 経済モデル開発：空気直接回収技術の経済モデルへの導入

負の排出を実現する技術の一つとして、大気から直接二酸化炭素を回収するDAC (Direct Air Capture)が近年注目を集めている。DACは液体吸収材または固体吸収材を用いて二酸化炭素を大気中から直接回収する技術である。BECCSや植林と比較して大規模な土地利用変化を必要としない一方で、吸収材から二酸化炭素を分離するために多くのエネルギーを必要とする。回収した二酸化炭素は油田やガス田、塩水帯水層に貯留することで負の排出を実現したり、再生可能エネルギー由来の水素と反応させることで、使用に際し排出を伴わない合成燃料の製造に利用が可能となる。

本研究では、応用一般均衡モデルであるAIM-HubモデルにおいてDACをモデル化し、1.5度目標にもとづく排出削減シナリオを推計した。AIM-Hubモデルは、世界を17の地域に分割して推計を行う。モデルは、設定された社会状況や制約条件のもとで、エネルギー需給量や生産および消費活動の変化などを経済の均衡構造をもとに計算する。本研究では、パリ協定で示された1.5度目標をもとに設定した2050年までの二酸化炭素排出量を外生的に与える。そして、この排出量を達成するための炭素価格がモデル内で計算され、この炭素価格をもとに排出削減技術の導入量や排出削減に伴う経済的影響などが計算される。

AIM-HubモデルにおけるDACは、生産要素および天然ガスを投入し、大気由来の二酸化炭素を生産、売却する部門としてモデル化している。貯留部門は生産要素と大気由来の二酸化炭素を投入し、二酸化炭素の貯留サービスを提供し、負の排出を実現する部門としてモデル化している。生産関数には、他部門と同様にCES合成関数を用いており、労働と資本の間には代替関係（代替弾力性=0.4）を想定し、中間投入物はレオンティエフ型生産関数として定式化した。必要となる高温の熱エネルギーは天然ガスの燃焼により得ると仮定しているが、天然ガスの燃焼に伴う二酸化炭素についても全て回収され、地下に貯留されるものとした。

次に消費側について説明すると、DACにより回収された二酸化炭素は貯留部門でのみ消費され、合成燃料の製造などへの利用は想定していない。すなわち、貯留部門の活動量がDACの消費量を決めると仮定した。貯留サービスは最終消費の一つとして政府が消費するものとした。この貯留サービスは、DACを分析した研究の多くで示されているバックストップ技術としての役割を想定し、二酸化炭素の単位回収・貯留量当たりのコストが炭素価格と一致するまで消費される（回収を行う）とした。

本研究で設定するシナリオは、世界の平均気温上昇を1.5度未満に抑制する二酸化炭素排出削減シナリオと、DACの利用についての設定を組み合わせ作成する。また、ベースラインシナリオとして排出削減をおこなわないシナリオを作成する。すべてのシナリオにおいて将来の社会経済状況を、気候変動関連の研究において広く用いられている共通社会経済経路 (Shared Socioeconomic Pathways; SSPs)から中庸なシナリオであるSSP2シナリオに基づき設定する。

(1-2) 経済的な実現可能性を上げる施策に関する検討

産業革命前と比較して1.5~2.0°Cの世界平均気温上昇にまたがる幅広い厳しい炭素予算の下で、気候変動の緩和コストを削減または取り除くために必要な条件を示す。カーボンプライシングに加え、幅広い社会変化の影響を捉えるため、4つの主要な社会経済・技術的転換、すなわち、①エネルギー需要の低下、②再生可能エネルギーと炭素回収・貯留 (CCS) のコスト低減につながるエネルギー供給システムの技術的進歩、③低肉食や食品廃棄物の削減など、環境に配慮した食品消費にシフト、④資本形成の刺激（これはすべてのセクターで使用できる一般資本）である。また、これらの対策をすべて実施するもう一つのシナリオも検討した。これらのシナリオをそれぞれ「エネルギー-需要変化 (EDC)」「エネルギー-供給変化 (ESC)」「食料-システム-転換 (FST)」「追加-資本-転換 (ACF)」「統合-社会-技術-移行 (IST)」とした。シナリオの背景にあるデフォルトの社会経済前提は、Shared Socioeconomic Pathways (SSP2)の中道シナリオに基

づくものである。これらのデフォルト条件の上に、社会経済・技術的転換オプションを実装した。本研究では、気候変動緩和コストが負もしくはゼロとなる条件を、気候変動緩和による国内総生産（GDP）への悪影響がないことと定義し、ここでは、2021年から2100年までの世界合計 累積GDP損失を正味現在価値

（NPV）で表現している。なお、エネルギー需給や食料システムは、デフォルトの緩和シナリオでもカーボンプライシングに反応する。したがって、各セクターにおける上記の仮定は、炭素価格に対する反応にさらに追加的に起こる施策である。計算には一般均衡モデルであるAIM-Hubを用いた。

（1－3）社会経済的な実現可能性の一つの側面である気候緩和策の貧困への影響と家計モデルの改良

ここでは、統合評価モデル（IAM）を用いて、気候変動緩和政策が世界の貧困に与える影響を数値的に評価した。主に、気候変動緩和政策が貧困状況をネガティブに変化させるのか、ポジティブに変化させるのか、また、そのような変化をもたらす主な要因は何か、という疑問に答えようとした。気候変動の緩和は貧困にマイナスの影響を与える可能性があるとして推測されたため、このような副作用を軽減する可能性のある政策手段を論証しようとした。気候変動緩和と貧困の相互作用を理解することに主眼を置いているため、気候変動緩和に伴う価格や所得の変化が貧困をどのように変化させるかを主に調査した。本研究は、最終的には気候変動政策の立案、特にカーボンプライシングに関する政策手段の設計に貢献することを目指している。カーボンプライシングは、所得水準によって不均等に悪影響を及ぼす可能性があり、おそらく本研究はそのような政策立案の指針として利用されるであろう。実際の貧困を生み出している現状は複雑であり、それらを完全に表すことができないことは認める。したがって、ベースラインにおける貧困人口が、気候変動の緩和によってどのような影響を受けるかという方法で、我々の結果を解釈するのがよいと考えられる。なお、この研究では、気候変動の影響や、大気汚染の変化などの気候変動緩和の副作用は除外している。

本研究では、ベースライン、NDC、2°C、1.5°C（以下、WB2Cと1.5C）の4つのシナリオを分析した。背景となる社会経済前提としては、5つのSSPの中間として広く用いられているShared Socioeconomic Pathway 2（SSP2）を用いた。ベースラインは、追加的な気候政策なしで延長された2015年までの過去のトレンドを反映している。NDCシナリオでは、各国の排出量は、その国が気候変動枠組条約（UNFCCC）に提出したPAに関するNDCと一致すると仮定した（2020年以降に提出された更新は考慮されなかった）。WB2Cシナリオと1.5Cシナリオは、それぞれ2°Cと1.5°Cの気温変化と一致し、世界的に均一な炭素価格を仮定した。これは、すべての国が費用効率の高い方法で排出削減努力に参加することを意味する。貧困の指標には、国際的な文脈で広く用いられている1日1.90ドル（2011年購買力平価）の貧困ラインを用い、消費データに基づいて行われた。国別の貧困推計では、各国内の消費（所得）分布を考慮した。貧困の指標としては、主に2つの指標を用いた：貧困人口（貧困線下の絶対人口）と貧困率（総人口に対する貧困人口の比率）である。

シナリオ定量化のツールとしてAIMモデリングフレームワークを使用し、エネルギーシステム、土地利用、農業、温室効果ガス排出、気候を含むマクロ経済要因をグローバルに評価することができた。このモデルは、様々な世界的・国内的研究に適用されている。モデリングの枠組みの中核は、AIM-Hubモデルである。本研究では、AIM/PHI（貧困・家計・所得分布モデル）というモデルを使用し、特に各国内の所得分布と家計支出を計算し、貧困人口を分析した。このモデルは、所得区別に家計の財別消費を表すことができるため、所得と価格の要因を適切に特定できるという利点がある。

（1－4）社会的実現可能性の検討のためにフォーカスグループ調査

これまで統合評価モデル研究では、パリ協定の2°C、1.5°C目標を達成しうる世界規模の温室効果ガス排出削減策について、定量的なシナリオ分析を通じて、その技術的・経済的な実現可能性が検討されてきた一方で、モデルで示される緩和シナリオの将来像が現実社会においてどのように認知、受容されるのかについてはほとんど検討されていない。パリ協定の気温目標達成に向けた脱炭素社会を実現するためには、定量的なモデル分析に加えて、モデルでは評価できない様々な社会的・政治的な課題を抽出することが重要となる。本研究では、定性的な社会調査手法である「フォーカスグループ調査」を用いて、統合評価モデルで示される緩和シナリオについての一般市民の公衆認知を明らかにし、より幅広い社会的な観点から緩和シナリオの実現可能性を検討する。特に、社会的な実現性では、シナリオの望ましき（desirability）によっても実現性の認知は異なるため、「実現可能性」と「望ましき」を区別した上で、両者の関係性を明らかにする。

フォーカスグループ調査は、2022年度（1回目）と2023年度（2回目）の二回に分けて実施し、年齢、性別、学歴、家族構成、職業・業種などを考慮して、似たような社会的バックグラウンドの個人を一つのグループに集めて、各グループで脱炭素シナリオの実現可能性及び望ましきについて議論する形でインタビューを実施した（各グループ6名の参加者×6グループ＝計36名）。

脱炭素シナリオとして、1回目の調査ではエネルギー分野のCO₂排出のみに絞った「ネットゼロCO₂排出」を達成する場合を想定して、エネルギー需給のあり方によって将来の社会像が大きく異なる次の三つのシナリオを例示した：二酸化炭素除去（CDR）による負の排出拡大で経済効率性を重視したシナリオ（CDR型）、行動変容による省エネや電化等の需要側の大幅な転換を重視するシナリオ（LED型）、コストはかかるものの二酸化炭素利用（CCU）を活用して新燃料製造による供給側の転換を重視したシナリオ（CCU

型)。2回目の調査では、エネルギーシステムに加えて農業分野の非CO₂のGHG（主にメタン）排出も含めた「ネットゼロGHG排出」を達成する場合を扱った（表1-1を参照）。

2回目（2023年度）の調査では、1エネルギー分野のCO₂排出に加えて農業分野からの非CO₂のGHG（主にメタン）排出も含めた「ネットゼロGHG排出」を達成する脱炭素シナリオとして、＜経済効率性＞（エネルギーシステムはCDR型、食システムでは現状維持の対策で食肉消費は増加するシナリオ）、＜ライフスタイル変革＞（エネルギーシステムはLED型、食システムは植物由来の食への転換して食肉消費を大幅に減らすシナリオ）、＜技術イノベーション＞（エネルギーシステムはCCU型で、食システムは家畜肉を培養肉で代替し、食肉消費は減らないシナリオ）の三つのシナリオの実現可能性及び望ましさの公衆認知を検討した。

1回目と2回目のどちらの調査においても、表1-1に示す3つの異なる脱炭素シナリオの比較を通じて、グループインタビュー参加者に各シナリオの実現可能性及び望ましさを評価してもらい、そのシナリオの認知にどういった共通点または相違点があるのかを把握した。

表 1-1 異なる脱炭素シナリオの社会像の比較

シナリオ	経済効率性 (CDR型)	ライフスタイル変革 (LED型)	技術イノベーション (CCU型)
エネルギーシステム	化石燃料の継続利用・ CDRに強く依存	エネルギー需要減・ 需要側の電化促進	CCUで合成燃料・ 需要側電化は部分的
食システム	現状維持の対策・ 食肉需要は増加	植物由来の食への転換 ・食肉消費は大幅減	家畜肉を培養肉で代替 ・消費量は現状維持
CO ₂ 除去の依存度 (種類)	高い (BECCS)	低い (植林)	低い～中間 (DACCS)
経済的なコスト	安い	そこそこ	非常に高い
既存の社会インフラ の変更度合	小さい	大きい	小さい
リスク・副作用	生態系・食糧供給への悪 影響	ライフスタイル転換を促 す政策の実現性	未熟な技術の開発が失敗 するリスク

(1-5) 京都市を対象とした将来のカーボンニュートラル実現に向けたシナリオ構築

京都市では、2019年に全国の市町村で初となる2050年に二酸化炭素排出量実質ゼロを実現することを目標に掲げた。そこで本研究では、2050年までのCO₂排出量実質ゼロを達成するために、2040年、2050年の京都市が脱炭素社会を実現するための定量的な分析を行った。その際、人口、産業連関表、エネルギー消費量等のデータを用いて設定したシナリオにおけるCO₂排出量を推計した。この手法より、2050年のシナリオで導出された部門別のCO₂排出量、エネルギー消費量等からCO₂削減効果や再エネの導入効果等について分析し、排出目標を達成するにはどのような対策が必要になるか推計した。

本研究では、目標年を2040年、2050年、基準年を2015年とした。基準年として推計に必要なデータの入手が可能な最新の年を設定した。シナリオの枠組みを表1-2に示す。対象ガスはCO₂とし、部門を家庭、業務、産業、旅客輸送、貨物輸送に区分した。対象範囲は、地域内での企業と家庭のエネルギー消費、その地域を出発する交通によるエネルギー消費である。シナリオについては、京都市と日本全体のビジョンや計画をもとに2040年、2050年時点の社会経済状況、系統電力の電源構成および低炭素対策の導入についての異なる想定を準備し、これらの異なる想定を組み合わせた複数のシナリオを検討した。具体的には、系統電力の電源構成の想定による5つのシナリオと、低炭素対策の導入強度の想定による2つのシナリオを組み合わせた10のシナリオに、2050年CO₂排出実質ゼロの目標を達成するシナリオを加えた計11のシナリオを準備した。これまでの算定で、京都市の2018年CO₂吸収量は、235(k_t-CO₂)と示されている。対象としているのは、森林、農地、都市緑地による吸収量である。吸収量については、すべてのシナリオで同じ想定をした。

表 1-2 低炭素対策の強度に関するシナリオの想定

	低位	高位	目標達成
家庭	基準年より再エネの導入率は 増加するが、石油や天然ガス がエネルギー源に含まれる	再エネ電力100%	再エネ電力100%
業務			
第一次産業	石油や天然ガスが含まれる基 準年と等しいエネルギーシエ	石油30%、再エネ電力70%	再エネ電力100%
第二次産業	アを想定	石油・天然ガス70%、再 エネ電力30%	石油・天然ガス40%、 再エネ電力60%
運輸	基準年より再エネの導入率は 増加するが、石油や天然ガス がエネルギー源に含まれる	再エネ電力100%	再エネ電力100%

(1-6) 歴史的なエネルギー消費の推移と将来シナリオを比較し、その実現可能性の検討

本研究では長期気候緩和シナリオの実現可能性を定量化する評価手法について検討した。具体的には、長期気候緩和シナリオが要求する変化が、過去に観察された変化との対比においていかに位置付けられるかを、過去と将来それぞれの変化速度及び変化率の情報として取扱うことにより対比し、長期緩和シナリオの妥当性や実現可能性の程度や課題を明らかにした。なお、評価手法の構築にあたっては、IPCCの排出シナリオ特別報告書で提示された、歴史的推移と将来シナリオを頻度分布で比較する手法を参考にした。本研究の分析対象として、エネルギー強度、炭素強度、電化率の3つの指標を選定した。電化率については、工業部門、交通部門、家庭部門、業務部門の4つの部門別の指標の算出も行った。

評価対象のシナリオとしては、一般均衡モデルであるAIM-Hubによるベースラインシナリオと、2.5°C、2°C、1.5°C、WB2Cの4本の気候緩和シナリオを選定した。シナリオ名の2.5°C、2°C、1.5°Cは2100年の気温上昇量平均値を表し、WB2Cは66%以上の確率で2°Cの超過を回避することを表す。ベースラインシナリオは気候制約のない非介入シナリオである。

地域については、AIM-Hubによる全世界を17地域に分割した地域分類を用いた。以下、単に地域と言うときは、この17地域を指す。歴史的推移については、データソースによる国レベルの値と、これを17地域に合算した値の2種類のデータを整備し、17地域を主な比較対象として参照しつつ、国レベルの値も随時参照する。さらに、CO₂排出量の削減を行った対象の値を参照するために、国レベルのデータの一部を抜粋して、京都議定書の付属書B国の1995年～2015年の値から構成される集合Annex-Bを用意した。すなわち、本研究で扱う指標及びその算出に用いる変数として、表2に示すシナリオ・地域区分の組合せによる合計8集団のデータを整備した。シナリオを1つの母集団とみなし、1指標につき8集団分の変化速度及び変化率の分布を作成した。変化速度及び変化率の算出は5年ごとに行い、変化速度は年あたりの変化量を求めた。

本研究では、各指標の変化速度及び変化率の分布を対象として、過去の観察と将来シナリオを比較することで、将来シナリオが要求する変化が、過去に起きた変化と比べてどのような位置付けとなるかを分析した。具体的には、各指標の推移のデータから、対象期間及び対象地域に含まれる変化速度及び変化率の情報を抽出し、この変化速度及び変化率から確率密度分布図と四分位値による箱ヒゲ図を作成し、シナリオごとに異なる変化速度及び変化率の分布の視覚化を行った。また、最小値、最大値、中央値、平均値、標準偏差、5%分位点、95%分位点を算出し、シナリオごとに異なる変化率の分布について比較を行った。比較にあたっては、(1)変化の方向性が過去と共通であるか、(2)変化の大きさは過去に観察された範囲内であるか、(3)変化の大きさは過去に観察された範囲のうち極端な値に該当しないかを確認した。

(1-7) 2021年のグラスゴー合意にあわせて各国が提出した排出目標の評価

各国は2015年のCOP21に先立ってINDC (Intended Nationally Determined Contributions) を提出していたが、2020年から2021年にかけて更新されたNDC(以下、Updated NDC)を提出している。本研究では、Updated NDC実施時に必要となる対策やそれに伴う経済影響と、国際的な排出権取引の効果を明らかにし、国際的な排出取引メカニズムの活性化を促すことを目的とする。ただし、ここでいう排出権取引は実質的に排出枠の国間の移転を可能にするメカニズムを含み、パリ協定6条2項で対象となる二国間クレジット制度(Joint Crediting Mechanism ; JCM)等を含む。これらの目的を達成するため、まず、これまでのNDCとUpdated NDCを比較した際の経済やエネルギーシステムへの影響の変化について、経済モデルと排出推計モジュール、土地利用変化の推計に関するモジュールなどを組み合わせて開発されたAIM-Hubモデルを用いて分析を行う。また、Updated NDCにおける排出権取引の効果について分析する。

シナリオはBaselineシナリオ、INDC_w/oETシナリオ、INDC_w/ETシナリオ、Updated_NDC_w/oETシナリオ、Updated_NDC_w/ETシナリオの5つのシナリオを設定する。Baselineシナリオは排出削減を行わないシナリオである。INDCシナリオはINDCに沿った排出削減、Updated NDCシナリオはUpdated NDCに沿った排出削減を行い、それぞれ排出権取引 (emissions trading;ET) を導入する場合 (w/) と導入しない場合 (w/o) に関して推計を行った。NDCでは、各国が、排出量に関する目標、GDP強度に関する目標、再生可能エネルギーの導入量に関する目標など様々な形で目標を提出している。本研究では、ある特定の年からの削減率を示した目標、ベースライン排出量からの削減率を示した目標、排出量の絶対量を示した目標、ある特定の年からのGDP強度の削減率を示した目標の4つの目標に関して排出制約として導入した。排出量やGDP強度に関する目標については、資金援助などを条件に実施するNDC (以下、conditional NDC) と資金援助の有無などに関わらず無条件に実施するNDC (以下、unconditional NDC) のような複数の数値目標を設定している国がある。本研究では、各国の数値目標を排出目標の定義や記述の曖昧さ、複数の数値が言及されている等のパターンに応じて8通り場合分けして計算した。

(1-8) 現状の国シナリオの問題点と研究コミュニティですべき、シナリオプロトコルの提案

2015年に採択されたパリ協定は、産業革命前から今世紀末までの地球の平均気温の上昇を2°Cより十分低

く保つとともに、1.5°C以下に抑えるような努力をすることで合意した。この気候変動の抑制に求められる温室効果ガス（GHG）排出の大幅な削減については、日本でも2050年までにカーボンニュートラルを実現することが明言されており、他のいくつかの国も類似の今世紀中盤の目標(Long-term Strategy)を現在宣言している。気候変動問題はその問題の特性上、数十年後を見据えた目標設定とそれに向けた施策実行が必要であり、その見通しとして研究者が作成するシナリオが用いられてきた。しかし、パリ協定では目標を5年毎に更新する仕組みができており、さらに近年、国が宣言する目標は2030年目標も含めて高頻度で改訂されるようになり（例えば2、3年に1度）、研究者が作成したシナリオが数年で使えなくなるということが頻繁に起きようになってきた。また、各国が気候政策をより真剣に考えるようになってきた今日、各国間での気候政策目標の違いやその意味、実現可能性や困難性、さらにエネルギーシステムや土地利用システムのマネジメント戦略等を比較評価分析することは必須と考えられる。そこで、本研究は、従来考えていなかったような政策の不確実性に柔軟に対応できるようなシナリオの設計・フレームワークを提案した。本提案は日本だけでなく世界のどの国でも使うことができ、今後の世界の気候政策を後押しするのに有用であると考えられる。シナリオの提案を検討するにあたって考慮したのは以下の5つの条件を満たすような枠組みである。A) 国際的な比較可能性、B) 世界的な気候変動目標との適合性・整合性、C) 政策との関連性、D) 重要な国目標の不確実性に対処する能力、E) モデリングプロトコルの解釈に曖昧さがないシンプルな実装、である。

4. サブテーマ1 結果及び考察

サブテーマ1 研究開発内容で示した（1-1）から（1-8）の各項目別で研究結果を示す。

（1-1）経済モデル開発：空気直接回収技術の経済モデルへの導入

図1-1は1.5度_DACなしシナリオおよび1.5度_DACありシナリオにおけるDACとBECCSおよび植林による二酸化炭素回収量を示す。いずれのシナリオにおいても二酸化炭素排出制約が厳しくなるにつれて二酸化炭素回収量を大きく増加させている。1.5度_DACなしシナリオでは、2050年において11.8Gtの二酸化炭素が回収されており、そのうちBECCSが6.9Gtを占めている。1.5度_DACありシナリオでは、2050年において14.2Gtの二酸化炭素が回収されており、そのうちBECCSが4.4Gt、DACによる回収量が4.9Gtを占める結果を示した。1.5度_DACなしシナリオと1.5度_DACありシナリオを比較するとDACの導入によって植林による回収量は大きくは変化しない一方で、BECCSの利用量は減少した。しかし、DACによる回収量はBECCSの減少量を上回ったため、全体の二酸化炭素回収量は増加した。

図1-1は1.5度_DACなしシナリオと1.5度_DACありシナリオにおける2050年までの炭素価格の推計結果を示す。1.5度_DACなしシナリオでは、炭素価格が2040年以降増加し、2050年には二酸化炭素1トンあたり221ドルに達した。1.5度_DACありシナリオでは、DACが導入されていない2030年において最も高い炭素価格が計算された。2035年以降の炭素価格は横ばい傾向にあり、2050年には二酸化炭素1トンあたり168ドルと計算された。次にエネルギーの変化についてみる。排出制約が厳しくなるとともにDACによるエネルギーの消費量は増加し、2050年において38.7EJのエネルギー消費量が推計された。

経済的影響として、ベースラインシナリオと比較した際の2050年におけるGDP損失率と消費損失率を報告する。図1-2は1.5度_DACなしシナリオおよび1.5度_DACありシナリオとベースラインシナリオを比較した際の2050年のGDP損失率を示す。1.5度_DACなしシナリオでは、世界全体で6.3%の損失率が推計された。1.5度_DACありシナリオではこの損失率が4.9%まで下落し、GDP損失を21.7%改善する効果を示した。地域ごとの損失率に注目すると、1.5度_DACなしシナリオでは、旧ソビエト連邦において20.0%を超える非常に大きな損失率が推計された。また、中国とインドと中東および北アフリカにおいても8.0%を超える大きな損失率が推計された。反対にアメリカとヨーロッパ25か国とオセアニアおよび日本においてはGDPの損失率が3%を下回っている。1.5度_DACなしシナリオと1.5度_DACありシナリオを地域ごとに比較すると、すべての地域においてDACの導入によりGDP損失率を減少させている。特に、ブラジルと旧ソビエト連邦においてはDACの導入によってGDP損失率が3.0ポイント以上改善した。また、オセアニアとブラジルおよび日本においては、DACの導入によってGDP損失を40%以上改善する効果を示した。

図1-2は1.5度_DACなしシナリオおよび1.5度_DACありシナリオとベースラインシナリオを比較した際の消費損失率を示す。この図で示す消費には、政府からDACおよび貯留にかかるコストへの支払いを含んでいない。1.5度_DACなしシナリオでは、世界全体で8.5%の損失率が推計された。1.5度_DACありシナリオではこの損失率が8.2%まで下落し、消費の損失を4.1%改善する効果を示した。地域ごとの損失率に注目すると、1.5度_DACなしシナリオでは、旧ソビエト連邦と中国とインドにおいて15.0%を超える大きな損失率が推計された。日本とカナダと中東での消費の損失率は3%を下回っている。1.5度_DACありシナリオと1.5度_DACありシナリオを地域ごとに比較すると、17の地域のうち8地域においてDACの導入により消費の損失率を減少させている。特に、東南アジアとブラジルでは、消費損失を15%以上改善した。反対に17の地域のうち9地域においては消費損失が増加した。

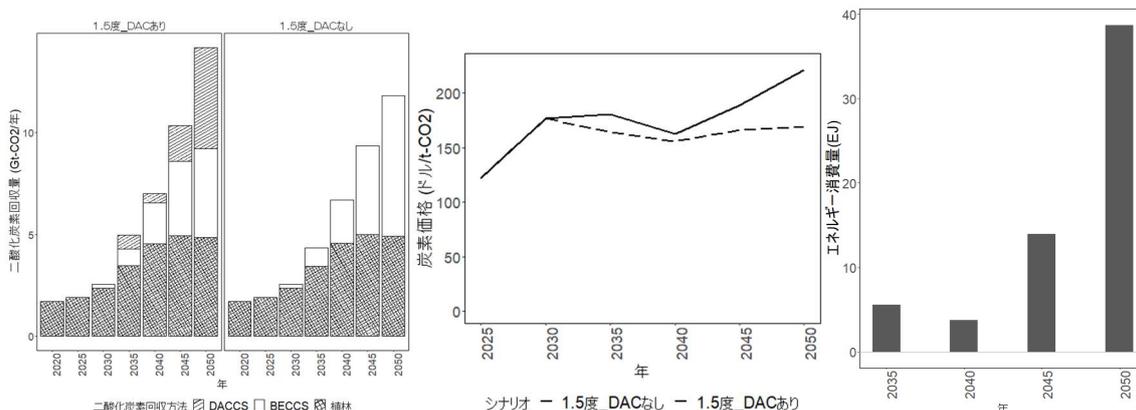


図 1-1 二酸化炭素回収量（左）と炭素価格（中央）と DAC によるエネルギー消費量（右）

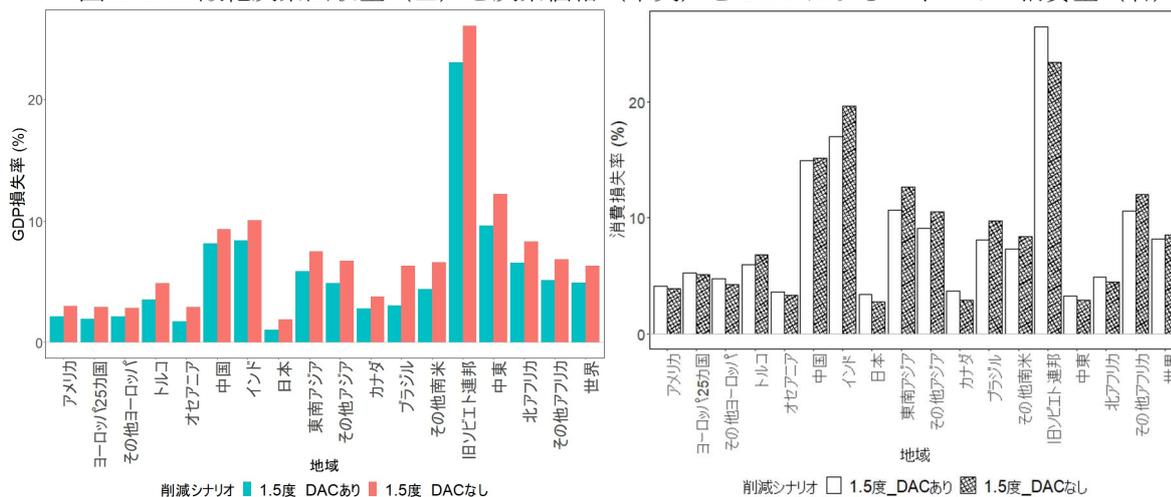


図 1-2 GDP（左）と消費（右）損失率

(1-2) 経済的な実現可能性を上げる施策に関する検討

デフォルトシナリオでのGDP損失から社会経済・技術移行シナリオでの損失を差し引いたGDP損失の減少を分析した。炭素バジェットが 1000Gt CO₂ の場合、我々の推定値はこの範囲に収まる (図1-3 a図中の緑の円参照)。これらは、エネルギーシステムの脱炭素化、非CO₂ 排出量の削減、経済構造の変化に関連する追加的なエネルギーシステムコストと関連している。緩和コストは炭素バジェットと逆相関しており、これは既存研究と整合的である。今世紀に亘る時系列を図1-3 cに表す。炭素バジェットが厳しくなるにつれて、費用は増加する。CO₂ の排出量は、今世紀半ばの2050-2070年頃に正味ゼロとなり、エネルギーと土地利用の劇的な転換をもたらす。

この気候変動緩和コストは、社会経済的技術的移行をそれぞれ実施するとデフォルトシナリオから減少する(図1-3)。社会経済技術移行対策をすべて実施した場合 (IST)、緩和コストはほぼゼロ、あるいはマイナスになる (図1-3 a)。炭素バジェットが 700Gt CO₂ よりも大きいシナリオでは、緩和コストがマイナスとなり、緩和をしたほうが、便益があることを意味する。炭素予算が厳しくなるにつれて、GDP損失の軽減度合いは小さくなる。500Gt CO₂ の予算では、デフォルトケースから 3.9%回復し、削減効果は 1000Gt CO₂ の予算よりも小さくなる。

今世紀初頭にはGDPが減少するケースもあるが、1000Gt CO₂ の予算では、今世紀半ばにはゼロに近づき、今世紀後半には強いマイナスとなる(図1-3 c)。世紀末のGDPは4.0%増 (-4.0%GDP減) を示している。他の予算ケースも同様の傾向を示している(図1-3 e)。

追加投資シナリオでは、4つの施策の中で最も大きな1.4%程度のGDP損失削減効果が得られる (図1-3 a 紫色の丸印)。Additional-Investmentの前提には、資本形成の1%増が含まれており、これは一見小さく見えるが、最終的には最大の貢献となる。エネルギー供給の変化は、Additional-Investmentに続いて、GDPの損失を1.0%程度削減する。Food-System-TransformationとEnergy-Demand-Changeは、それぞれ0.62%、0.53%とほぼ同等にGDP損失の回復に貢献する。今世紀前半などの初期におけるこれらの施策の効果は小さく、施策ごとの差はない(図1-3 c)であるのに対し、追加投資の長期的な効果は、今世紀後半から終盤にかけて大きい。2100年において、追加投資シナリオは3.7%のGDP増加を示している。一方、エネルギー供給変動やエネルギー需要変動は、2100年においてそれぞれ1.6%、1.1%と比較的小さい値を示している。

再生可能エネルギー (太陽光や風力など) の費用低下は、しばしば最大の要因と考えられています。我々

の結果は、このような変化が経済成長の一部である可能性を示しているが、その貢献度は限定的である。さらに重要なことは、本シナリオにおけるそれらの効果は、長期よりも短期において顕著であるということである。投資の効果は、基本的に累積資本投入によってもたらされ、今世紀後半に最大となる (図1-3 c)。意外なことに、統合シナリオのマクロ経済的インパクトの合計は、社会変革の変化の間いくつかの相互作用があるものの、個々のシナリオの合計とほぼ同じである (図1-3 d)。

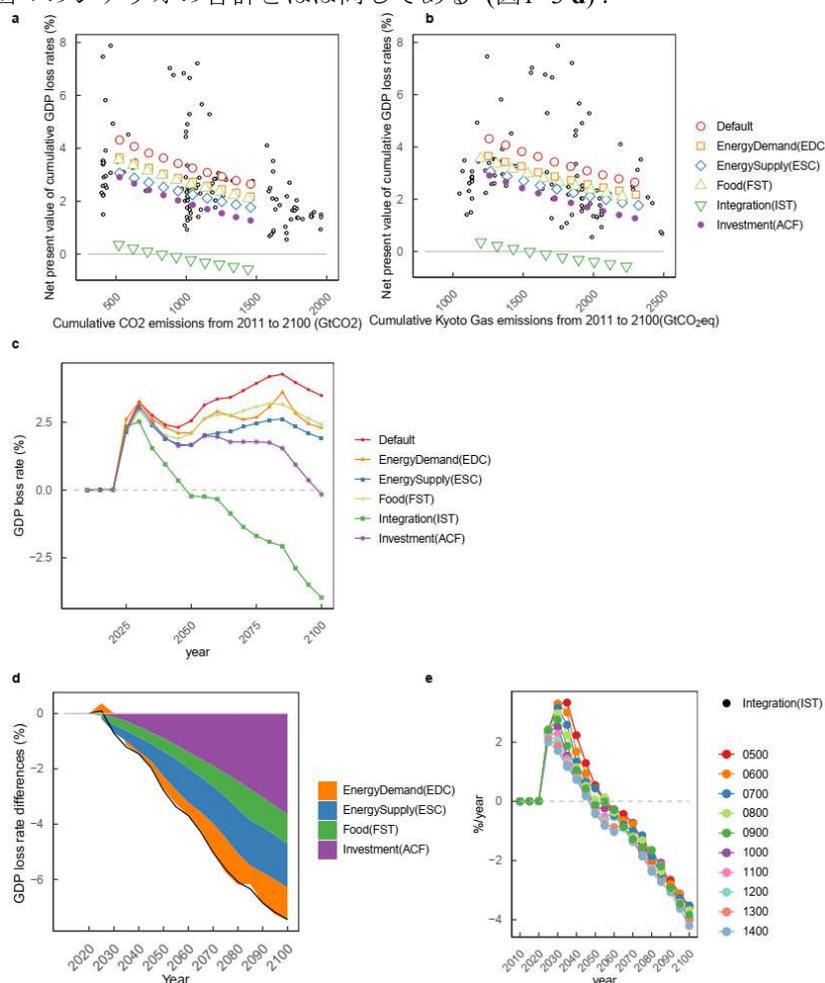


図 1-3 気候変動の緩和に関連する世界の政策コスト(GDP 損失率)。 a、b)2011 年から 2100 年までの CO₂(a) および京都ガス(b)の累積排出量に対する、さまざまなシナリオ(色付きの記号)および IPCC SR1.5 文献値(黒丸)における世界の累積 GDP 損失率の正味現在価値。c) 1000Gt の CO₂ 予算の下での社会経済技術移行措置に関連する周期的な世界の GDP 損失率。d)デフォルトの社会経済的条件から社会経済的・技術的の移行事例までの個々の構成要素の世界的 GDP 損失回復率。 e) 様々な炭素予算下での統合シナリオの GDP 損失率。

(1-3) 社会経済的な実現可能性の一つの側面である気候緩和策の貧困への影響と家計モデルの改良

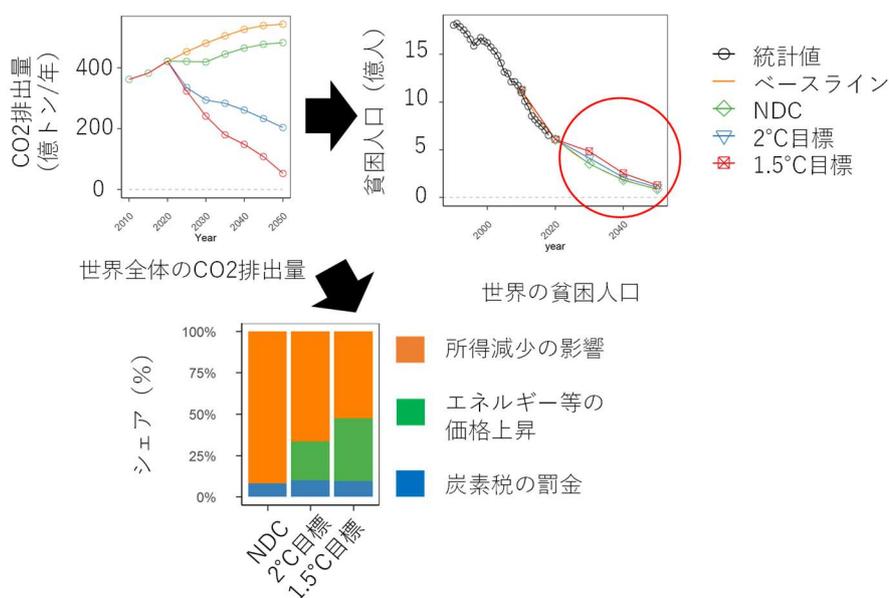
世界の貧困人口は、ベースラインシナリオでは2015年の7億3,600万人から2030年には3億5,500万人、2050年には9,000万人へと、今後数十年にわたって継続的に減少すると推定された。この強力な貧困削減の主な原動力は、ジニ係数である。これらの数値は、最近のCOVID-19パンデミックの影響を受けている可能性がある。貧困率も同様の傾向を示し、2015年、2030年、2050年のベースラインでは、それぞれ0.11から0.043、0.0097まで変化した。このベースラインに対して、気候変動緩和策により、WB2Cシナリオでは2030年に6,500万人、2050年に1,800万人の貧困人口が増加し、ベースラインレベルと比較して19%と21%の増加となった。ベースラインシナリオでは、経済成長により2050年の絶対的な貧困人口は非常に少なかったため、気候変動の緩和による2050年の絶対的な変化は比較的小さいと考えられる(図1-4 ab)。1.5CはWB2Cシナリオと同様の傾向を示したが、気候変動緩和の影響はWB2Cよりも大きかった。気候変動の緩和は、主に2つの方法でこれらの貧困指標を変化させた。第一に、排出削減による一般所得の減少がマクロ経済に影響を及ぼし、所得と生産(GDP)の伸びを減少させ、人口の消費分布を左方向に乖離させた。第二に、財・サービス価格、特にエネルギー関連財は、カーボンプライシングの影響を大きく受け、家計消費に各国内の分配効果をもたらした。この価格効果は、家計の支出構造によって逆進的または累進的となる可能性があり、世界全体では逆進的な結果となり、貧困人口の増加をもたらした。

気候変動緩和政策が貧困に悪影響を及ぼすことが明らかとなったので、こうした副作用を回避するための

対策を実施する必要がある。ここでは、可能性のある対策を以下の表にまとめた (表1-3)。

表 1-3 炭素税以外の気候変動緩和の政治手段とその長所と短所。「排出削減効率」と「排出削減効果」は、通常の炭素税条件下では+++、通常の条件下より影響力が低下する場合は++あるいは+で表している。

	排出削減効率	排出削減効果	貧困を減らすには	懸念事項
代替的な社会変革手段	+++	+++	マクロ経済の損失は緩和できる。	技術開発は不確実であり、頼るにはリスクが高すぎるかもしれない。
非炭素税制(補助金、規制、エネルギー基準、キャップ&トレード)	+	++	炭素税と価格効果の一部を排除することができる。	政府は、企業ごとの排出削減ポテンシャルと費用を知らないと、排出削減の効率は低くなり、経済的影響は炭素税の場合よりも深刻になる。
特定の事業者・世帯で炭素税免除	++	++	炭素税の影響は排除できる。	排出削減は保証されておらず、同レベルの排出削減を実現するには、より高い炭素価格が必要。
炭素税収入を低所得者層のために再利用	++	+++	すべての影響を排除することができる。	途上国の場合、税制が十分に確立されておらず、現実的な選択肢ではないかもしれない。
後発開発途上国における排出削減の免除	++	++	すべての影響を排除することができる。	国際的な合意が困難。フリーライダーの可能性もある。他の国でも追加的な排出削減が必要になる



2030年の貧困人口増加への各要素の寄与度

図 1-4 左上は世界全体のシナリオ別の CO₂ 排出量で赤の一番下が現在の国際的な目標である 1.5°C目標に相当。右上は貧困人口を表し、緩和策をとるシナリオで若干の貧困人口の増加がみられる。下図はその貧困人口の増加要因を割合で表したもので、所得減少と価格上昇の影響が主要な要因であることがわかる

(1-4) 社会的実現可能性の検討のためにフォーカスグループ調査

1回目 (2022年度) のフォーカスグループ調査は図1-5で示す通り、グループ調査の参加者の間では、最も実現可能なシナリオの選択肢としてCDR型、その次にLED型が選ばれる傾向が強かったのに対して、最も望ましいシナリオの選択肢はCCU型に大きく偏重する結果となった。この結果の背景として、まずCDR型シナリオの認知に関していえば、経済的なコストの観点からより現実的なアプローチと捉える一方で、化石燃料の利用を継続し、CO₂の地下貯留 (CCS) 技術に過度に依存する対策は根本的な問題に解決につながらないという批判的な見方がインタビュー参加者の間に共通して確認された。LED型シナリオの認知については、需要側の電化促進はすでに実際に社会で起こっており、現実味のある対策として捉えられる反面、エネルギー需要を減らすために飛行機移動などの既存のライフスタイルを大幅に転換することには強い忌避感を示す反応が多かった。このように、CDR型とLED型はそれぞれ異なる理由で実現可能だと認知される一方で、ど

これらのシナリオも社会的には望ましくないという捉え方が優勢であった。一方、CCU型の認知は、CDR型とLED型に対する参加者の相反した感情を埋めるような形で、費用の大きさゆえに実現可能性はあまり高くないものの、合成燃料で化石燃料を代替することで現状の社会インフラを大きく変更せず脱炭素を達成できるという点に強い期待を示し、三つのシナリオの中で最も望ましいという見方が大勢を占めた（図1-5を参照）。

これらの結果を総合すると、モデルの定量的な分析ではコスト効率性が重視される傾向にあるが、公衆認知においてもコスト効率性は社会的な実現可能性を示す指標として機能しているといえる。その一方で、シナリオの公衆認知はコスト効率性のみで捉えることはできず、特にLED型のような既存のライフスタイルからの大幅な転換を伴うシナリオについては経済的なコストからではなくそうしたライフスタイル変革に伴う社会的なコストについて競合する捉え方があることが示された。特に、シナリオの実現可能性と望ましさを認知には大きなギャップが存在し、シナリオ選択の政策的な議論においては両者の違いを考慮した、より丁寧な議論が必要になる。

食・農業分野の排出削減も含めた場合でも、各シナリオの全般的な認知には実現可能性と望ましさの間に大きな乖離があることが観察された。ただし、ライフスタイル変革シナリオの認知では、エネルギー需要を減らすことには好意的な一方で、食肉消費を減らすために食生活のあり方を変えることに対しては強い反発を示すような反応が多く見られた。また、技術イノベーションシナリオの認知も、エネルギー分野での合成燃料の普及には賛同するが、食分野での培養肉の普及には懐疑的な態度を示す参加者がいた。結果からは、全般的なシナリオのナラティブとしては整合的な対策であったとしても、エネルギー分野と食・農業分野ではその対策の是非にずれが生じることが示唆される。

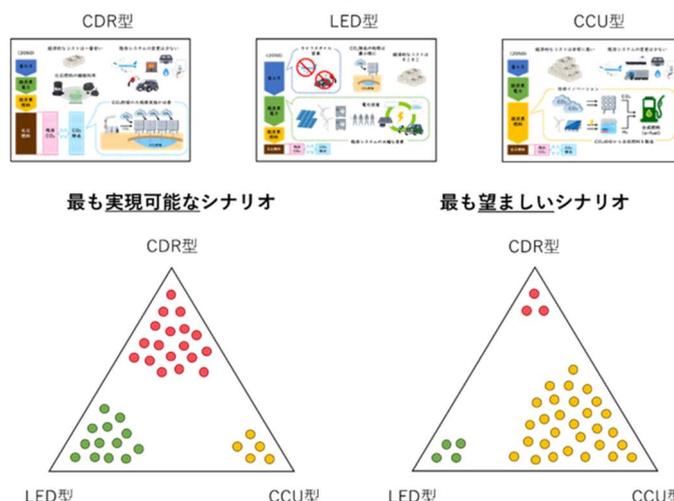


図 1-5 1 回目のフォーカスグループ調査の脱炭素シナリオの実現可能性と望ましさの認知

さらに、2回目の調査の分析では、図1-6に示すように、インタビュー参加者によるシナリオ認知を実現可能性と望ましさの二軸でマトリックス化して、その分布を示した。経済効率性シナリオについては「実現可能」「実現可能だが望ましくない」「望ましくない」の領域に各参加者の認知が分布していたのに対して、技術イノベーションシナリオの認知は「望ましい」「望ましいけど実現不可能」「実現不可能」の領域に分布していた。この結果は、経済効率性シナリオと技術イノベーションシナリオがシナリオの実現可能性と望ましさの認知で表裏の関係にあることを意味すると同時に、参加者の間では両者のシナリオの捉え方はある程度の一致した合意があることを示している。一方、ライフスタイル変革シナリオの認知は「望ましくないけど実現不可能」「実現可能」「望ましくない」「実現不可能かつ望ましくない」という領域に分布しており、人によってその認知に大きな違いと対立がある様が確認できる。いかにいえば、ライフスタイル変革に頼って脱炭素の達成を目指す政策の是非をめぐっては必然的に価値観の対立による政治的な論争が伴うと示唆される。翻って、こうしたシナリオの認知をめぐる政治的な論争の介在は現実社会におけるライフスタイル変革シナリオの実現可能性をより困難なものとする結果になると推察される。加えて、図1-6の認知マトリックスでは「実現可能かつ望ましい」の領域が空白で残されたように、実現可能性と望ましさの双方を同時に満たすシナリオは存在せず、実際の政策ではシナリオ間のトレードオフを示した上で、どういう側面を優先するのかを判断するための議論のプロセスが実現可能性を左右する重要な要素となり得る。

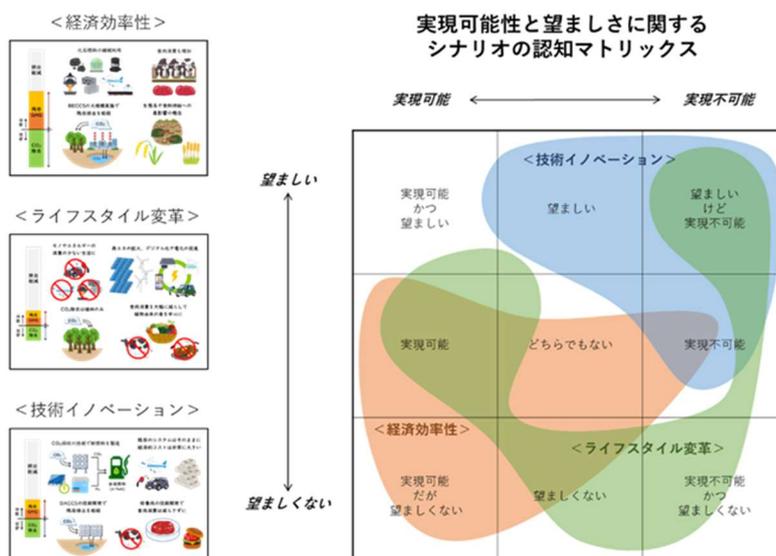


図 1-6 2 回目のフォーカスグループ調査（2023 年 7 月実施）における脱炭素シナリオの実現可能性と望ましさを認知マトリックス

(1-5) 京都市を対象とした将来のカーボンニュートラル実現に向けたシナリオ構築

2040 年に各高位シナリオを経由した 2050 年目標達成シナリオと、全更新低位シナリオの CO₂ 排出量を図 1-7a に示す。目標達成シナリオでは、2050 年 CO₂ 排出量が 231(kt-CO₂)となり、京都市の CO₂ 吸収量 235(kt-CO₂)を考慮したとき実質ゼロを実現できることが分かった。また、特に追加で対策を行わない全更新低位シナリオでは 2050 年に 4,512(kt-CO₂)となることが分かった。次に、各シナリオの CO₂ 排出量を部門別に推計した結果を図 1-7b に示す。2050 年目標達成シナリオでは、部門別にみると、家庭、業務、旅客輸送、貨物輸送部門で CO₂ 排出量ゼロを実現することができたが、産業部門・廃棄物分野ではそれぞれ 129(kt-CO₂)、102(kt-CO₂)となった。次に、2015 年から 2040 年の各高位シナリオ、2040 年の各高位シナリオから 2050 年の目標達成シナリオまでの二酸化炭素排出量削減速度を図 1-7c に示す。③更新なし高位シナリオのとき、2015 年から 2040 年では年平均 197(kt-CO₂/year)、2040 年から 2050 年では年平均 187(kt-CO₂/year)のペースで排出量が減少することが分かり、全シナリオの中で最も速度の差が少ないことが分かった。ここで「更新」は発電所の寿命に達すると修復し再度使用することを意味し、「早期撤退」は寿命に至る前の稼働停止を意味する。「全」は全ての火力発電所、「一部更新」は 2030 年までに寿命を迎える火力発電所のみ、「一部早期撤退」は 2015 年までに建設された火力発電所のみを対象とした。高位・低位は低炭素対策の実施強度を示す。目標達成は 2050 年に排出量実質ゼロになるまで対策を行うシナリオである。

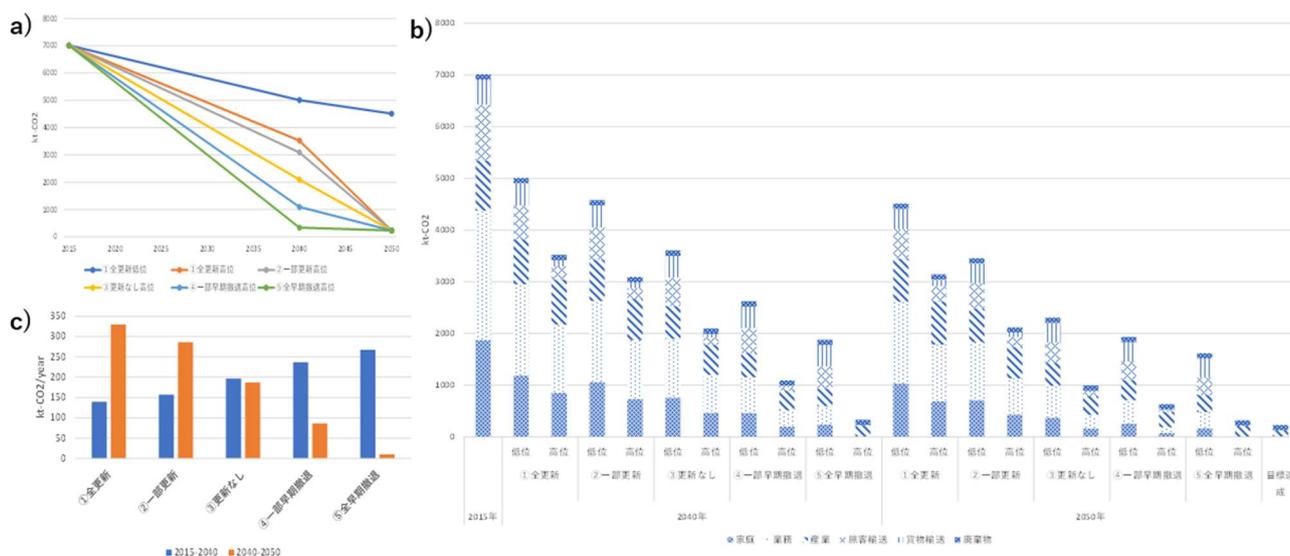


図 1-7 2040 年、2050 年 京都市二酸化炭素 a)排出量、b)部門別排出量、c)排出量削減速度

既存発電所の稼働可能年数を考慮し、複数のシナリオで京都市の2040年、2050年CO₂排出量を推計し、目標の2050年CO₂排出実質ゼロを達成し得る低炭素シナリオを作成した。その結果から以下の2点の結論を得た。第一に、京都市の目標である2050年CO₂排出実質ゼロを実現するためには、2050年までにすべての火力

発電所を撤退させ、低炭素対策の強度が高い高位シナリオに加え、第一次産業で再生可能エネルギー電力が100%、第二次産業で石油・天然ガスが40%、再生可能エネルギー電力が60%とする必要があることが分かった。上記条件の場合、排出量は231(kt-CO₂)となり吸収量235(kt-CO₂)を考慮したとき実質ゼロを実現できる。第二に、③更新なし高位シナリオのとき、2015年から2040年では年平均197(kt-CO₂/year)、2040年から2050年では年平均187(kt-CO₂/year)のペースで排出量が減少することが分かり、全シナリオの中で最も速度の差が少ないことが分かった。

以上のことから、目標である2050年二酸化炭素排出実質ゼロを実現するためには、野心的に低炭素対策を導入し、2050年までにすべての火力発電所を停止させる必要性が示唆された。また、2050年の排出量は231(kt-CO₂)となり、京都市による2018年の森林吸収量の算定結果235(kt-CO₂)を下回ることから、吸収量が現状と同等程度に維持されていれば実質ゼロを実現可能であることが示唆される。また、系統電力の電源構成の違いによる最大削減量の2,893(kt-CO₂)と、低炭素対策の実施強度の違いによる最大削減量の1,294(kt-CO₂)を比較した結果から、系統電力の電源構成の違いが二酸化炭素排出に大きく影響することが示唆された。

(1-6) 歴史的なエネルギー消費の推移と将来シナリオを比較し、その実現可能性の検討

図1-8(a1)にエネルギー強度、(a2)に炭素強度、(a3)に電化率の推移、(b1)にエネルギー強度の変化率、(b2)に炭素強度の変化速度、(b3)に電化率の変化速度の推移を示す。(c1~c3)に(b1~b3)に対応する項目の確率密度分布、(c1~c3)に対応する箱ヒゲ図を示す。変化率と変化速度は全て年率で表す。図1-8(a1)から、エネルギー強度は将来に向かって一定の割合で減少しながら収束していく対数関数的な傾向を示しており、炭素強度と電化率にはそのような傾向が無かったことから、以後の分析では、エネルギー強度については変化率、炭素強度と電化率については変化速度を対象として選択した。

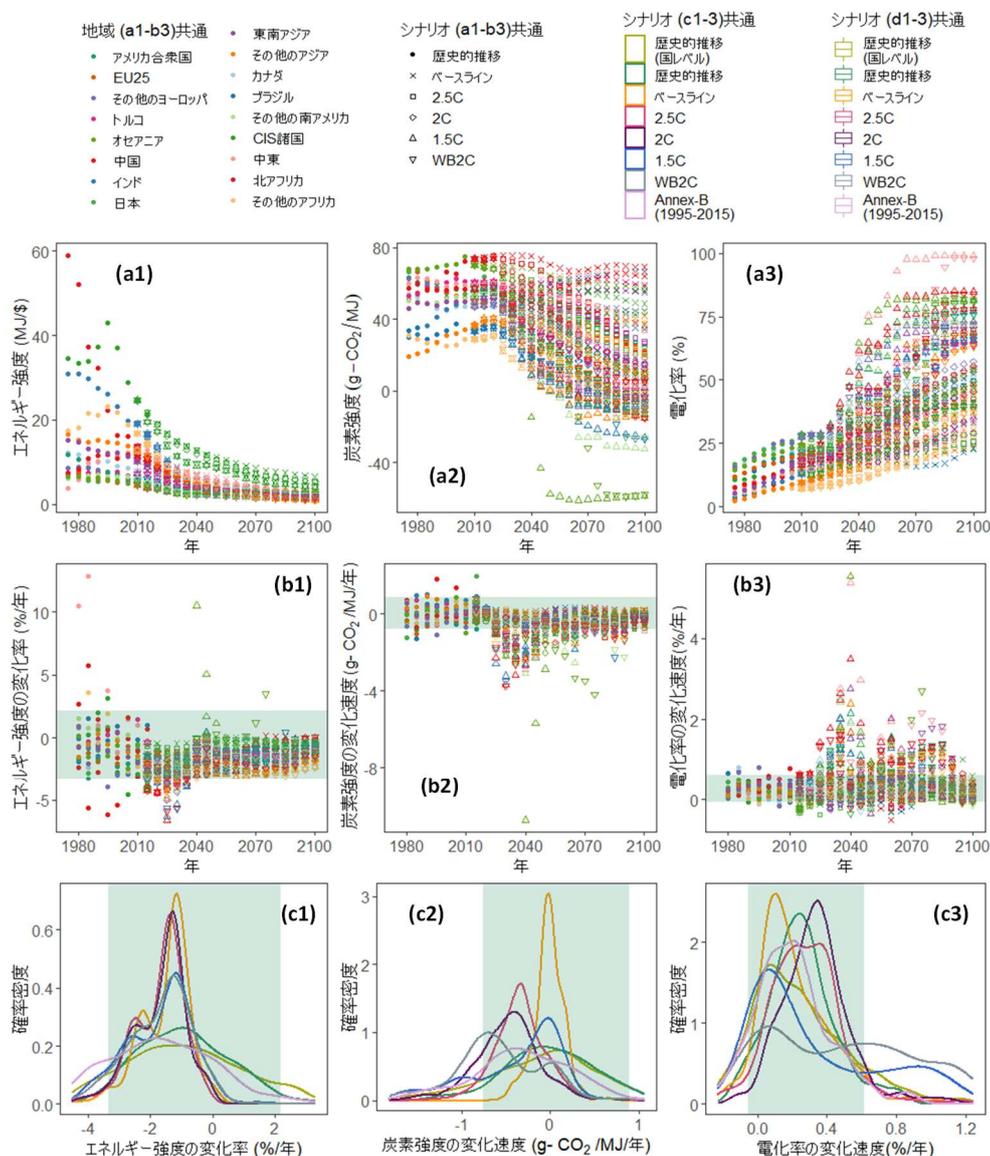


図 1-8 各指標の (a)時系列、(b)変化率・変化速度の時系列、(c)変化率・変化速度の確率密度分布

エネルギー強度は(a1)から、エネルギー強度は、歴史的推移も将来シナリオも減少傾向を示し、過去と将来はスムーズに連続しているように見える。(b1)から、歴史的推移における変化率は3%減～2%増に分布が集中しつつ、年代が新しくなるほど負側に向かう傾向がある。将来シナリオにおける変化率は0%～3%増の範囲に変化率が分布し、これを外れる範囲に一部期間・一部地域のポイントがある。外れた位置にあるポイントは、厳しい気候制約が前提となる1.5°C、WB2Cシナリオに属し、また期間では2020～2035年に集中している。

次に、変化率の分布によって上記の特徴が表現出来ているかを示す。(c1)は、地域と期間と変化率の組合せである(b1)の情報から変化率のみを抽出してこれを確率密度分布で表した図である。X軸に変化率を、Y軸にその変化率に該当するデータのカウンタ数(ここで1カウンタは、ある地域のある期の変化率であり、すなわち(b1)上の1点に相当する)を確率密度にした値を示す。(c1)及び後述する(d1)のX軸は、母集団全体から両端4%分位に相当する範囲をカットして表示している。全シナリオに共通の傾向として、負側に偏ったやや非対称な分布であり、中央値はマイナス1～1.5%付近にある。将来シナリオ5本は非常に類似した分布を持つ。歴史的推移は、中央値をほぼ共通する位置に持ちつつ、将来シナリオより広い分布となっている。

炭素強度については(a2)に示す時系列データにおいて、歴史的推移を参照すると、炭素強度は全体に横ばいの傾向である。(b2)の変化速度からも、過去の明確な傾向は認めにくい。(c2)の確率密度分布からは、歴史的推移の中央値がほぼ0%の位置にあり、ここからも横ばい傾向であることが分かる。気候緩和シナリオである2.5°C、2°C、1.5°C、WB2Cの各シナリオでは、(c2)に示す分布は、歴史的推移の範囲を超えて負側にあり、その程度は気候制約が厳しくなるほどマイナス寄りであり、広い分布となる傾向がある。1.5°CとWB2Cシナリオでは変化の分布が広い範囲に及んでおり、一つのシナリオ内に急激な削減を行う部分(地域・期間)とそうでない部分の両方の要素を含む。過去にない急激な変化を避ける観点からは、変化が緩やかな部分と急激な部分を相殺するような改善の余地がある。以上から、炭素強度に要求される変化は、ベースラインシナリオと2.5°C及び2°Cシナリオでは過去の推移の範囲内にあるが、1.5°CとWB2Cシナリオでは、この範囲にあるとは言えない。

電化率については(a3)及び(b3)によると、電化率の変化速度は、過去から将来に渡って継続して増加している。ベースラインシナリオは歴史的推移の延長に近い傾向を示し、気候緩和シナリオは気候制約が厳しくなるほど大きな変化速度が要求される結果となる。特に厳しい気候制約が課される1.5°C及びWB2Cシナリオでは、2030～2050年に大きな変化を経過した後に緩やかな変化となる特徴がある。(b3)の変化速度は年率0%～1%前半の範囲に分布が集中しつつ、特定期間や特定地域・シナリオで、この範囲を超える点がある。気候緩和シナリオの一部地域では2030年～2050年に増加方向に大きな変化速度が集中し、歴史的に観察された変化を超える領域に及んでいる。一方、負側(電化率が低下する方向)にも気候緩和シナリオの変化速度は分布している。(c3)から、電化率では全シナリオの分布の最頻値は年率0%～0.8%増の範囲にあり、その分布は重なる範囲が多いが、1.5°CとWB2Cシナリオでは、増加側に広がったなだやかな分布となっている。

(1-7) 2021年のグラスゴー合意にあわせて各国が提出した排出目標の評価

図1-9は世界17地域における2030年のGHG排出量のBaselineシナリオからの削減率を示す。AIM-Hubによる推計結果では、2030年の世界全体での年間GHG排出量は、INDCでは55.7GtCO₂eqであり、Updated NDCでは50.0GtCO₂eqである。地域別に削減率の変化を見ると、INDCと比較してUpdated NDCでは先進国を中心に削減率が大きく増加することが分かる。INDC_w/oETと比較して、Updated_NDC_w/oETシナリオにおいて削減率が低下している地域が見られるが、これはBaselineからの排出削減率をNDCとして提出している国に関して、INDC_w/oETシナリオではSSP2のベースラインシナリオから計算される2030年の数値を用いたのに対し、Updated_NDC_w/oETシナリオではBaselineの数値をNDC内で明記している国に関しては明記された数値を用いたことによるものである。NDC内で記されるBaselineの数値は、SSP2のベースラインシナリオから計算される2030年の数値より大きいことが多いため、留意されたい。排出権取引を導入した場合、Updated_NDC_w/oETシナリオで排出削減率の高い地域で排出削減率が低下し、排出削減率の低い地域で排出削減率が増加することで、地域間での排出削減率の差が小さくなることが確認できる。

図1-10(左)に世界17地域における2030年の炭素価格を示す。NDCのアップデートによって、多くの国・地域で排出削減量が増加することに伴い、炭素価格が増加することが確認できる。また、排出削減率の高い国・地域で炭素価格が大きくなる傾向が確認でき、日本やアメリカ、EUではUpdated_NDC_w/oETシナリオにおいて、炭素価格が200US\$2010/t CO₂より大きくなる。しかし、オセアニアやブラジル、その他アフリカでは排出削減率が高いが、炭素価格が比較的小さい。Updated_NDC_w/oETシナリオでは排出権取引を行うことにより、全ての国・地域で炭素価格が等しくなり、この時の炭素価格が54.3US\$2010/t CO₂となることが確認できる。日本やアメリカ、EU、オセアニア、ブラジル、その他アフリカにおいて排出権取引により、炭素価格が低下し、特に日本やアメリカ、EUでは200US\$2010/t CO₂以上の炭素価格の低下が確認できる。

図1-10(右)は世界17地域における2030年のBaselineシナリオからのGDP損失率を示す。世界全体でのGDP損失は、INDC_w/oETシナリオでは1.3%であるのに対し、Updated_NDC_w/oETシナリオでは2.8%であ

る。多くの国・地域でGDP損失の増加を確認でき、排出削減率の高い国・地域でGDP損失が大きくなる傾向が確認できる。しかし、中国や中東では排出削減率や炭素価格は低いが、GDP損失が比較的大きい。排出権取引の導入により、Updated NDC実施時の世界全体でのGDP損失は0.6%低下し、2.2%となる。また、INDCでは排出権取引の導入により、世界全体でのGDP損失率が0.1%(1.3%から1.2%)低下した。Updated NDCではINDCよりも排出権取引の導入によって世界全体でのGDP損失を大きく低下させることができると分かる。Updated NDCで排出権を輸入する先進国を中心に、排出権取引を導入することでGDP損失が減少する。一方で、旧ソ連や中国、インドといったUpdated NDCで排出権を輸出する地域を中心に、排出権取引を導入することによってGDP損失が増加する。

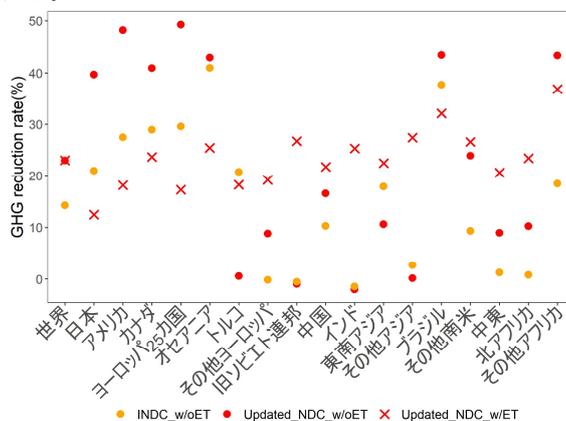


図 1-9 世界 17 地域の 2030 年におけるベースラインシナリオからの排出削減率(%)

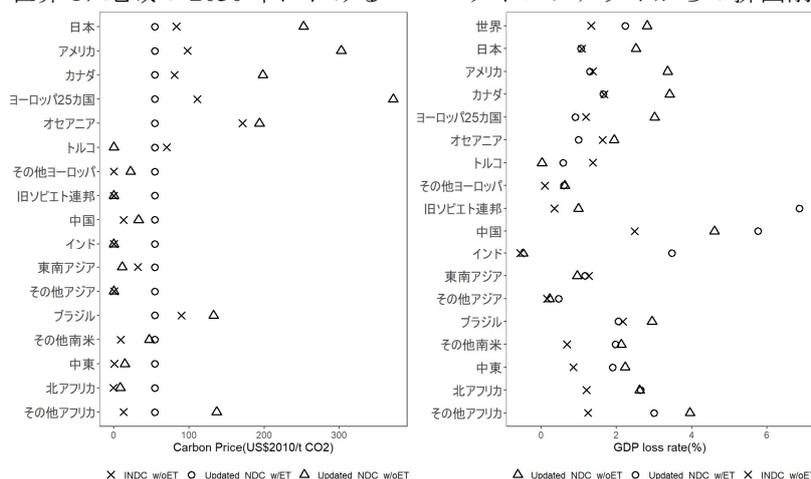


図 1-10 世界 17 地域の 2030 年における炭素価格 (左) (US\$2010/t CO₂)と GDP 損失率 (右)

(1-8) 現状の国シナリオの問題点と研究コミュニティですべき、シナリオプロトコルの提案

将来の緩和策の考えられうる排出経路の範囲を適切にカバーしつつ、各国間での比較を可能にする国シナリオのシステムティックかつ標準的なアプローチを提案した。ここでは、この枠組みを「国長期パスウェイ」(NLPs)と呼ぶ。このNLPsアプローチでは、単一の排出削減目標を指定するのではなく、LTSの目標年として一般的に考えられている2050年の排出削減率のシナリオをデフォルトセットとして設定することで、将来の国の気候目標の不確実性をヘッジすることを意図する。

シナリオは2種類に分類される。その第一はいわゆるベースラインで、気候変動緩和政策は除外されている。第二は、2050年の排出量削減目標を基準年比10~100%とし、その間を10%刻みで設定した気候シナリオである。2030年については、NDC目標を採用することができるが、条件付き目標・無条件目標などの複数の可能性がある。必ずしも2050年ではない年をカーボンニュートラル目標として発表している国もあるが、本研究の排出経路は、2050年以降も容易に直線的に外挿でき、ゼロエミッションのタイミングとその目標に向けて必要となる社会的な移行を評価することが可能である。排出ガスの対象はエネルギー起源CO₂排出をデフォルトとするが、その他のCO₂や非CO₂の排出は、場合に応じて含めることも可能とする。

本論文では、経済発展段階、経済規模、エネルギー消費パターンに大きな多様性を持つアジア諸国(中国、インド、日本、韓国、タイ、ベトナムの6カ国)を選び、一般均衡モデルであるAIM-Hubモデルを使用して定量化した。その例として日本の結果を示す(図1-11)。

ベースライン・シナリオ(BaU)では、期間を通じて排出量はほとんど変化しないが、CM30、CM40からCM100と名付けられた気候緩和シナリオでは、2030年にNDCの排出量削減目標26%を達成し、2050年には各

数字が削減目標率を意味する。次に、各排出削減レベルに対するエネルギーシステムおよび経済への影響についてみる(図1-11 efg)。例えば、30~60%削減の下では、総エネルギー供給量はほぼ一定であるが、排出量100%削減のシナリオでは、ベースラインの約半分に供給量が低下することを意味する。つまり、60-70%の排出量削減の先には、エネルギー効率の改善と行動変容の両方を含む需要サイドの施策の大きな貢献が必要である。エネルギー源の構成については、CCSなどの低炭素エネルギー技術や再生可能エネルギーの寄与が削減レベルの上昇に伴って徐々に大きくなっている。緩和のためのマクロ経済費用は、より野心的な目標になるほど顕著に増加し(図1-11 f)、2050年の排出削減目標が80、90、100%の場合、それぞれGDPの3%、4%、4.5%の損失まで上昇する可能性がある。炭素価格は削減レベルに対してより感度が高く、100%削減シナリオでは5,000\$/tCO₂以上、90%と80%削減シナリオではそれぞれ約2,000\$/tCO₂まで急激に増加する。厳しい削減目標では炭素価格が極端に高くなるが、これはエネルギー作物やBECCSのための面積がわずかしか残されていない日本では、マイナス排出の可能量が小さいためである。目標削減率60%以下では、期間中200\$/tCO₂よりも低い価格となる。

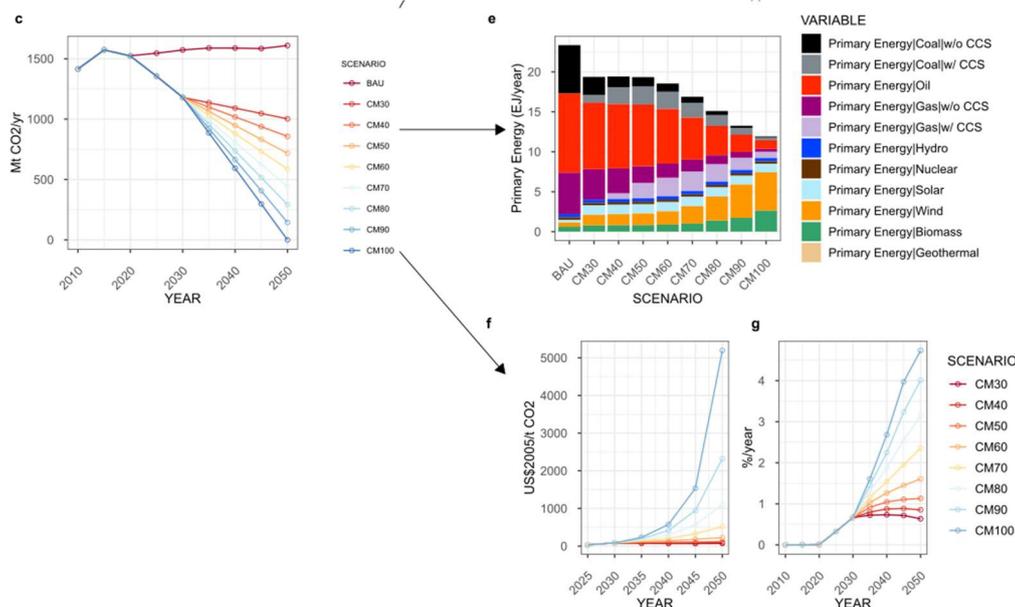


図 1- 11 日本を事例とした国規模の長期シナリオ (NLP) の解釈の例示。e は 2050 年の一次エネルギー供給によるエネルギーシステムへの影響、f、g は GDP 損失率と炭素価格による政策コストへの影響を示す。

5. サブテーマ 1 研究目標の達成状況

○研究目標の達成状況 [目標を大きく上回る成果をあげた]

研究目標の①から③を着実に実施した。そのうち①については当初の年度計画に沿って、世界経済モデルであるAIM-Hub (AIM-CGEから改名)を開発・改良し、新しい革新的な技術の評価、最新の気候政策の評価を経済的な面から実施した。また、家計所得を扱うモデルであるAIM/PHIの開発・改良を行い、貧困や格差の指標の定量化を行った。②については、社会的な側面からの実現可能性評価のためのフォーカスグループミーティングを2回実施し、それらの結果についてまとめた。③については、気候緩和策の社会経済的な実現可能性を高める対策として、以下2点についての研究を行い、いずれも国際誌に掲載された。その第一は、経済的な側面で、気候緩和費用を下げる施策の検討、すなわちライフスタイル変化や技術革新による緩和費用の低減効果の定量化を行い、その可能性を論じた。その第二は、気候緩和策が貧困や格差に及ぼす影響それらの軽減策に関するもので、炭素税税収の還元の可能性、単純な炭素税以外の経済的な手段や途上国に対する支援について論じた。

これらの当初予定してきた作業に加えて、今後の気候政策策定、IPCCの第7次報告書の主要課題としても考えられる国シナリオの扱いについて研究コミュニティとしての提案をしてNature Climate ChangeのPerspectiveとして出版した。今回の成果はIPCCの第1、2、3作業部会を見渡しても傑出した成果と考えられる。いずれの成果についても学界・社会への影響力の強い学術誌への掲載が出来ており、査読論文数は20編(うち英文9編)である。

以上のように、研究計画に沿った取り組みを実施し、研究目標を達成したうえで、さらに追加的に研究コミュニティや政策として重要な成果を出していることをふまえ、「目標を大きく上回る成果をあげた」と自己評価する。

II-2 サブテーマ2 「エネルギーシステム変革の技術的・経済的な実現可能性の検討」

〔サブテーマ2要旨〕

サブテーマ2はエネルギー部門を対象に、技術・経済的な観点から脱炭素化の実現可能性について検討を行った。その根本となる手法は世界エネルギーシステムモデルの改良であり、太陽光・風力発電の拡大の影響を考慮できるよう時間解像度を向上させるとともに、脱炭素化の実現可能性に影響の大きい革新的技術・ライフスタイル変化を評価できるよう改良を行った。本モデルを用いて、2050年頃に世界ネットゼロ排出を達成する3つの代表的なシナリオを定量化した。これまでIPCC-AR6で提示されていたCDR (Carbon dioxide removal) や電化等の削減オプションの評価に加えて、本研究では炭素回収利用 (Carbon capture and utilization) を活用したシナリオを、国際研究コミュニティの中でも初めて提示した。また、水素や合成燃料、直接食う改修といった革新的技術が脱炭素化に及ぼす影響についても評価を行った。全体的に、これらの技術の利用が大幅に拡大する状況は、電化やバイオマス、炭素回収貯留 (Carbon capture and Storage, CCS) の利用が制約された場合など限定的な状況下に留まることを明らかにした。環境政策への示唆としては、電化やバイオマス、CCS等が比較的容易・経済的な分野においてはそれらの普及を進めつつ、水素や合成燃料の利用は優先度が高い分野に留めるなど、分野横断的な脱炭素化戦略の必要性が挙げられる。

1. サブテーマ2 研究開発目的

サブテーマ2は、エネルギー部門を対象に、主に技術・経済的な側面から脱炭素化の実現可能性に関して評価を行うことを目的とした。本研究課題が開始された時点で、世界的に太陽光・風力発電のコスト低下のトレンドが見られており、長期の脱炭素化においてもこれらがエネルギーシステムの主力となる見通しがあった。しかしこれらの発電技術は天候条件等に応じた時間帯別の出力変動が大きく、その大規模な普及拡大を評価するためには時間解像度を向上させたエネルギーシステムモデルが必要であり、本サブテーマはそれを踏まえたモデル改良を目的の一つとした。また、太陽光・風力の拡大に加えて、エネルギー需要側の大規模な電化やエネルギー需要削減はエネルギーシステム脱炭素化の主要策の一つとされており、IPCC-AR6でもそれらを活用した代表シナリオ (IMP-Ren、IMP-LD) が提示された。しかし、エネルギー需要部門はライフスタイルと直結しており、その急速な転換には実現可能性の観点から課題も指摘されていた。そこで、これらに依存しない削減オプション、特に従来の統合評価モデルを用いた研究では十分に考慮されていなかった、水素や合成燃料といった技術が、エネルギー部門の脱炭素化にどの程度貢献し得るかを明らかにすることを目的とした。

2. サブテーマ2 研究目標

サブテーマ2	「エネルギーシステム変革の技術的・経済的な実現可能性の検討」
サブテーマ2 実施機関	京都大学、名古屋大学
サブテーマ2 目標	<p>主として2つの項目を目標とする。</p> <p>① <u>多様なエネルギー技術をできる限り具体的に扱うとともに、再生可能エネルギーの時間変動性を考慮するため、高解像度の世界エネルギー技術モデルを開発する。</u>それを用いて、個々の技術の普及速度を考慮した上で、急速な温室効果ガス削減の実現可能性を技術的側面から明らかにする。本研究で開発するエネルギー技術モデルは、日本を対象に80%GHG削減を幅広く分析し、近年中央環境審議会等への政策貢献を行ってきたモデル (Fujimori et al., 2019 Nature Communications 等) をベースとして、世界全域への拡張・高解像度化といった大幅な改良を施す。</p> <p>② <u>ライフスタイル・社会変革のエネルギーシステムへの影響を定量的に示す。</u>そのためにエネルギーサービス需要の変化や新しい技術の導入などのシナリオを検討し、モデル分析を行う。具体的には、自動運転車の普及やエネルギー需要低減に関わる各種施策、革新的技術として水素エネルギーの活用、炭素貯留利用 (CCSU) や高性能蓄電池等をモデルへの入力とす</p>

	る。
--	----

3. サブテーマ2 研究開発内容

サブテーマ2ではまず世界を対象としたエネルギーシステムモデルの高解像度化を行った。それを用い、世界全域を対象とした代表的な3つのネットゼロシナリオの定量化（2-1）を実施し、FG会合の設計・分析などを通じて、サブテーマ1と連携しつつ研究を実施した。また、様々な革新的技術・ライフスタイル・社会転換の評価として、エネルギー需要部門を対象とした水素・合成燃料の評価（2-2）、発電部門を対象とした水素・アンモニア専焼・混焼技術の評価（2-3）、その他個別の脱炭素化困難部門を対象とした革新技術、社会・ライフスタイル転換の影響評価（2-4）を実施した。さらに、日本を対象とした2050年脱炭素化シナリオの評価（2-5）を実施した。

（2-1）世界エネルギー部門ネットゼロ排出を達成する3つの代表的なシナリオの定量化

IPCC第6次評価報告書（第三作業部会）では、2050年頃に世界全体でのCO₂排出量をおよそゼロとする複数のシナリオが、例示的緩和経路（Illustrative Mitigation Pathways, IMPs）として示された。その主要なものとして、IMP-NegはバイオマスとCO₂回収・貯留（Carbon capture and storage, CCS）を組み合わせたBECCS（Bioenergy with carbon capture and storage）や植林による負の排出（Carbon dioxide removal, CDR）の大規模実施、IMP-LDはライフスタイルの転換や大幅な省エネ技術によるエネルギー需要の大規模な削減、IMP-Renは太陽光・風力発電を中心とした再生可能エネルギーの拡大と需要側の電化が特徴的な方策となっている。一方で、これらの方策の大規模な実施には、バイオ燃料の生産による食料安全保障との競合、CCS実施に必要なCO₂貯留地の確保・受容性の問題、民生や運輸部門等のエネルギー需要部門における急激なライフスタイル・技術転換の実現可能性などについて、課題が指摘されてきた。これらの課題を踏まえ、多様なCO₂ゼロ排出シナリオの可能性を模索することは、今後の気候政策への示唆やAR7に向けて、世界的な当該研究コミュニティにおける課題の一つにもなっている。そこで本研究では、世界エネルギーシステムモデルAIM-Technologyを用い、まずIMPに沿ったシナリオとして、CDRを大規模に行うシナリオ（1.5C-CDR）、電化等による需要部門の脱炭素化を進めるシナリオ（1.5C-DEC）について定量化を行うことで、技術・経済面でこれらの諸課題がどの程度の影響を及ぼすのかを明らかにした。さらに、CDRや需要側対策に依存しない新たな特徴的なゼロ排出シナリオとして、炭素回収利用（Carbon capture and utilization, CCU）を活用するシナリオ（1.5C-CCU）を定量化した。これは、大気中のCO₂を直接回収する技術（Direct air capture, DAC）と、太陽光・風力等の再生可能エネルギー電力起源の水素を用いた合成燃料、いわゆるe-fuelを最大限に活用し、CDRの実施を抑制しつつ、エネルギー需要側における電化等への急速な転換を回避するものである。

各シナリオの定量化にあたって、AIM-Technologyにおいて、その特徴に応じた前提条件を課した。例えば1.5C-DECは、CCSとバイオマス供給量について、IMP-Renと同一の条件（それぞれ年間4Gt-CO₂、100EJ）を設定した。1.5C-CCUは、1.5C-DECにおけるCCS、バイオマスに関する条件に加えて、エネルギー需要部門の電化・水素化技術の急速な拡大が制約された状況を想定し、これらの技術の新規導入シェアについて、SSP2（Shared Socioeconomic Pathway）の想定に基づいて制約を課した（Fricko et al., 2017）。CO₂排出経路は3シナリオとも同じであり、2050年に世界のエネルギー起源CO₂排出量をほぼゼロとするものである。

本研究で用いたエネルギーシステムモデルAIM-Technologyは、世界全域を33地域に区分したボトムアップ型の逐次動学エネルギーシステムモデルである。特に発電部門について各季節の代表日を1時間単位で分析する時間解像度を有しており、太陽光・風力発電等の時間変動を考慮することが可能である。対象とする部門は産業（鉄鋼・セメント・その他）、民生（家庭・業務）、運輸（旅客・貨物）、エネルギー供給（発電・水素転換・エネルギー採掘等）であり、各部門において個別のエネルギー技術の初期費用・運転費用・エネルギー効率等を設定している。モデル内では総エネルギーシステムコストを目的関数としてこれを最小化する線形計画問題を解くことで、各技術の新規導入量や稼働量が内生的に決定される。

（2-2）世界を対象としたエネルギー需要部門における水素・合成燃料の評価

世界ネットゼロ排出シナリオに関する先行研究では、エネルギー需要部門の対策はIMP-LDに代表される需要削減や、IMP-Renに代表される電化が主要な対策であり、電化が比較的困難、または経済性が相対的に低い分野、たとえば産業部門の還元・高熱需要や長距離輸送はいわゆる脱炭素化困難部門と指摘されていた。この分野における削減方策として、水素や合成燃料の利用が挙げられるが、AR6で示された緩和シナリオではこれらのエネルギーキャリアの導入を考慮したものはごく僅かであり、その脱炭素化への貢献に関する知見は限定的であった。本研究では世界エネルギーシステムモデル（AIM-Technology）に、アンモニアを含む水素エネルギーキャリアの製造・輸送・消費技術、直接空気回収（DAC）等の回収CO₂からの合成燃料製造プロセスを追加し、大幅削減シナリオにおける水素・合成燃料の役割を評価した。水素の製造技術としては、

再生可能エネルギー等を起源とする電解水素に加え、化石燃料・バイオマスからの転換（CCS付を含む）、を考慮した。合成燃料に用いる炭素は、DAC以外にも化石燃料・工業プロセス起源、バイオマス起源も考慮し、これらの選択はモデル内でエネルギーシステム費用最小化に基づき決定されるものとした。エネルギー需要側の技術としては、従来から考慮していた燃料電池車、家庭用燃料電池に加えて、水素還元製鉄、工業炉等の熱需要における水素利用、船舶等を追加した。合成燃料は各部門の液体・気体燃料を代替することが可能な想定とした。これらの技術パラメータは国際エネルギー機関（International Energy Agency, IEA）の見通し等に基づき設定した。CO₂排出削減シナリオとして2050年に世界のエネルギー起源CO₂排出量がほぼゼロとなるシナリオ（500C）のほか、2°C目標相当のシナリオ（1000C）など、様々な排出経路を想定した。また水素や合成燃料の製造コストが大きく低下するシナリオ（H2lowcost）、エネルギー部門の主要な緩和策であるCCSやバイオマスの利用可能性が制約されたシナリオ（LimCCS、LimBio）など、多様なエネルギー技術の前提条件を複数想定した上で、水素、合成燃料の貢献の可能性について評価を行った。

（2-3）世界を対象とした発電部門における水素・アンモニアの脱炭素化への貢献の評価

世界を対象に発電部門の脱炭素化における水素・アンモニアの貢献の可能性について評価を実施した。近年の緩和シナリオ研究やIPCC AR6では、パリ協定気候目標の実現に向けて、石炭・ガス等の火力発電の早期退出、およびCCS等によるCO₂排出抑制はロバストな主要策の一つとされている。その手段の一つとして、再生可能エネルギー等から製造された水素・アンモニアは、単体での燃焼（専焼）に加えて、既存の石炭・ガス発電燃料への混合（混焼）も可能であることから、火力発電の脱炭素化に寄与する可能性が期待されてきた。加えて、太陽光・風力発電は天候に応じた時間変動が大きく、これを一度水素化して貯蔵することで、出力抑制を削減し低炭素電力の有効利用にも寄与する可能性がある。しかし、AR6に含まれる緩和シナリオではほぼ考慮されておらず、またこれまで水素・アンモニアを対象とした先行研究についても、主に航空・船舶等の輸送部門や、鉄鋼等の産業部門を対象としたものが多く、発電部門への活用を含めた脱炭素化への貢献の可能性は明らかにされていなかった。そこで本研究では、AIM-Technologyにおいて混焼を含む水素・アンモニア発電を新たな技術オプションとして追加し、低排出シナリオにおけるその貢献について評価を行った。また電力の季節間貯蔵を考慮するため、モデルの電力需給の時間解像度を季節単位から月単位に向上させた。電力の季節間貯蔵オプションとしては、水素だけでなく、それと競合し得る他の電力貯蔵オプションを新たに追加し、評価を行った。水素、アンモニア混焼発電技術は、発電設備の新設時の導入に加えて、季節の火力発電の改修による導入も可能な想定とした。電気分解による水素製造技術や太陽光・風力発電のコストが大幅に低下するケース（H2Opt）など、幅広いシナリオを想定し、水素・アンモニアの活用の可能性について評価を行った。

（2-4）脱炭素化困難分野を対象とした需要部門別分析

ライフスタイル変容や革新的技術の評価として、個々の脱炭素化困難部門を対象に分析を実施した。

第一に、ライフスタイル・社会転換によるエネルギーサービス需要変化の効果の分析として、運輸部門を対象に、カーシェアリング、自動運転、ロードプライシングといった技術やサービスの影響を推計した。電化による脱炭素化が比較的容易である民生部門と比較して、運輸部門の長距離輸送等はいわゆる脱炭素化困難部門の一つに位置付けられており、先述の水素・合成燃料に関する研究でも明らかになったように、電化以外の対策は比較的削減コストが高い傾向にある。そのため、ライフスタイル転換等による需要削減の効果は比較的高いことが想定される。そこで本研究では、先述した対策の導入による輸送機関別の輸送量変化を文献に基づき想定し、世界全域を対象に2°C目標相当の緩和シナリオを対象に、AIM-Technologyを用いて分析を行った。ライフスタイル変容を含む交通政策の想定条件は以下のとおりである。まず都市部の交通需要はカーシェアリングの導入で走行距離が20%減少し、ロードプライシングによって乗用車の需要の20%が他の公共交通機関にシフトする事を考慮し、2020年から2050年にかけてどちらも都市部での普及率が100%になるよう設定した。貨物輸送はモーダルシフトによって車両輸送から鉄道輸送にシフトすることが可能と考えられるため、車両による貨物輸送需要の全体量のうち、少なくとも10%は適切なインフラ投資などによって鉄道輸送にシフトすることが可能であると仮定した。自動運転についてはレベル2以上の車両などの技術革新による燃費改善の他、乗用車需要の減少と自律信号機などによる渋滞の減少による改善が見込まれることから、2020年から2050年にかけて30%燃費が向上すると設定した。ライドシェアリングによる車両効率の向上は、積極的な普及によって2050年までに各車両の稼働率が10%向上するとした。

第二に、産業部門の一つである化学部門の脱炭素化方策について評価を行った。現状、化石燃料の1割程度は原料(Feedstock)用途として利用されており、その多くは化学部門に投入されている。産業部門の一部は脱炭素化困難部門として知られているが、化学部門を対象とした脱炭素化方策に関する先行研究は少ない。特に化石燃料の原料利用の代替策として、再生可能エネルギー電力等の低炭素電力由来の水素やバイオマス、CCUの活用が挙げられるが、統合評価モデル、エネルギーシステムモデルを用いてそれらの役割を評価した研究は限られていた。そこで本研究では、AIM-Technologyにおいて化学部門における一次化学品生産を明示的に考慮できるよう改良を加え、CCS等の他の削減オプションとの競合を考慮した上で、バイオマスや水素、CCU

の評価を行った。化学部門をモデル化するにあたって、エチレンやプロピレン、BTX (Benzene, Toluene, Xylene)をはじめとした高付加価値化学品 (High Value Chemical, HVC)、アンモニア、メタノールといった一次化学品を対象とした。一次化学品の生産技術に関しては、従来の化石燃料からの生産技術に加え、バイオマス利用技術や電解水素利用技術を考慮した。また、燃料燃焼および工業プロセスからのCO₂排出の回収を想定しており、それぞれの技術について追加費用・回収率を文献より設定した。

(2-5) 日本の2050年脱炭素化に向けたシナリオ分析

AIM-Technologyは、日本の2050年ゼロ排出の達成に向けた方策として、環境研究総合推進費2-1702では、CDRを用いたシナリオに関する分析を実施してきた (Oshiro et al., 2017, 当時のモデル名はAIM/Enduse v2.0)。ネットゼロ達成の方策としては、CDR実施以外にも、ライフスタイル変革、水素エネルギーキャリアの導入 (合成燃料含む) に加え、海外からのCO₂フリー水素・合成燃料、排出枠輸入も選択肢となる可能性がある。ただしそれらの輸入価格の見通しは明らかでなく、日本のネットゼロ排出の経済性評価は困難であった。本研究では、日本を対象としたエネルギーシステムモデル (AIM-Technology-Japan) を用いて5つの代表的なシナリオにおけるエネルギーシステム転換とそれに必要な緩和費用の評価を行った。

各シナリオの条件に付いて示す。① CN-CR (Carbon-dioxide Removal) はCCSについてモデルのデフォルト値から追加的な制約を設けず、モデル内で想定しているCCSの貯留ポテンシャルがすべて利用可能と想定した。この場合の最大年間貯留量は約300Mt-CO₂である。② CN-AFは水素等の代替燃料 (Alternative Fuel) の活用を想定する。シミュレーション条件としてのCN-CRとの違いは、CCS制約 (年間100 Mt-CO₂) のみであり、実際には水素以外にも電化やバイオマス拡大による対応も含まれる。③ CN-LD (Low Demand) では、産業生産量、輸送需要等のエネルギーサービス需要量について、先行研究 (Oshiro et al. 2021) のLoDemシナリオに基づき削減される想定とした。なおサービス需要は緩和の度合いにかかわらず削減される想定としており、サービス需要削減に必要となる追加的な費用は考慮していない。④ CN-IM (IMport) では、水素エネルギーキャリアの輸入を想定する。輸入可能なエネルギー種としてはアンモニア、合成燃料を対象とした。輸入価格はAIM-Technology-Globalによる1.5°C相当のシナリオにおける国際平均価格の推計結果を用いた。なお、このグローバルシナリオでは水素生成のエネルギー源はすべて再生可能エネルギー起源であり、合成燃料製造に用いられるCO₂はすべてバイオマスまたはDACに拠っているため、輸入され日本国内で消費または転換された場合のCO₂排出係数はゼロとした。なおアンモニア、合成燃料を直接エネルギー源として消費する場合に加えて、これらのエネルギーキャリアを水素に再転換する技術を追加した。⑤ CN-ET (Emission Trading) では、海外からの排出枠の調達を考慮し、国内での残存排出の相殺が可能となるよう設定した。排出枠は2030年以降に購入可能と仮定し、2050年に2010年の排出量比で20%までの調達を上限とした。これは少なくとも従来目標である2050年80%は国内で達成することを意味する。排出枠の調達価格はAIM-Technology-Globalによる世界全域を対象とした研究の1.5°C相当かつ限界費用均等化に基づくシナリオの炭素価格の値を用いた。

AIM-Technology-Japanは、グローバル版と同様のボトムアップ型エネルギーシステムモデルであるが、地域解像度や部門分割が異なっており、日本を対象に10地域区分を有するモデルである。発電部門の時間解像度はAIM-Technology-Globalと同様、1時間単位の需給バランスを考慮する。Oshiro et al., 2017で用いたモデルと比較した主な変更点として、まず回収したCO₂からの合成燃料製造技術として、合成液体燃料および合成メタンを考慮している。加えて、CO₂回収のオプションとして、エネルギー部門の化石燃料・バイオマス、工業プロセス起源CO₂からの回収に加えて、直接空気回収 (DAC) を考慮した。合成燃料・DACのエネルギー効率・費用等のパラメータはAIM/Technology-Globalと同様の想定を置いた。また、CN-IMにおける水素・合成燃料、排出枠の価格は、本研究課題におけるAIM-Technology-Globalによる1.5°Cシナリオの結果を用いた。

4. サブテーマ2 結果及び考察

(2-1) 世界エネルギー部門ネットゼロ排出を達成する3つの代表的なシナリオの定量化

AIM-Technologyにより推計された、3つのシナリオ (1.5C-CDR、1.5C-DEC、1.5C-CCU) における2050年までのエネルギー起源CO₂排出量および最終エネルギー消費構成を図2-1に示す。1.5C-CDRは2050年時点で主に産業、運輸部門において化石燃料利用、CO₂排出が一定量残り、それをCDRの実施、主にBECCSによって相殺することでネットゼロを達成している。一方、1.5C-DEC、1.5C-CCUでは、CDR実施量は比較的少なく、すべてのエネルギー需要部門における排出削減がネットゼロ排出に寄与している。1.5C-DECは、大幅な電化、産業・運輸部門での水素 (アンモニア含む) 利用により最終エネルギー部門からの排出を削減している。合成燃料の利用は、液体燃料の一部を代替する程度に留まっている。一方、1.5C-CCUでは、電化・水素化技術の普及速度制約を受け、電化と水素の最終エネルギー部門における消費量は3つのシナリオ間で最も少ない。その代わりに、再生可能エネルギー起源の水素とCO₂の直接空気回収による合成燃料が用いられ、2050年までに世界の最終エネルギー総量の30%を満たす結果となった。特に液体燃料に占める合成燃料の割合が大きいが、気体燃料においても合成メタンが一定量消費されている。

1.5C-CCUシナリオは、バイオマスの利用制約やCCSの実施制約に伴い、2050年における一次エネルギー供給に占める炭素を含むエネルギーの供給量 (化石燃料およびバイオマス) はIMP-Renと同程度の200EJ/年まで

低下している。一方で、最終エネルギー部門では特に液体・気体燃料を中心に炭化水素燃料（化石燃料、バイオマス、合成燃料）の消費量はIMP-Negに近く、300EJ/年程度に達する結果となっている（図2-2a）。これはDACによって大気中から回収した炭素を合成燃料として活用していることによるものであり（図2-2b）、IMPに代表される従来のネットゼロシナリオは、エネルギーシステムにおける炭素の利用量そのものを大きく減らすか、化石燃料をある程度利用する代わりにCDRによって相殺するか、いずれかのパターンに属するものであったが、本研究で提示されたCCUを活用するシナリオは、それらとは大きく異なる特徴がある。これらの結果より、他のCO₂ゼロ排出シナリオでは必須とされてきた、自動車や家庭部門などのエネルギー需要部門における急速な電化、およびCDRの大規模実施を伴わず、CO₂ゼロ排出を達成し得るオプションが存在することが分かった。

1.5C-CCUでは、化石燃料・バイオマスやCCSへの依存、需要部門の急速な転換は抑制される一方、合成燃料を製造するため、2050年までに必要となる再生可能エネルギー発電量は、他のネットゼロシナリオの1.5倍程度（図2-3a）、直接空気回収量は年間10Gt-CO₂以上に達する結果となり、いずれもAR6で示された緩和シナリオの範囲を大きく超えている。また、CO₂ゼロ排出達成に必要な追加エネルギーシステム費用は、発電電力量の増加、DACや合成燃料製造設備の大規模導入に伴い、他のゼロ排出シナリオの約2倍に増加する結果となった（図2-3b）。この傾向は、水素や合成燃料の生産設備の費用が大幅に低下する想定下でも覆らず、CCUの大規模実施による脱炭素化は他のオプションと比較して費用面の課題が大きいことが示された。このCCUを大幅に活用したシナリオは、需要転換等が遅れた場合の代替策となり得る一方で、費用やエネルギー供給側の課題も多いことから、電化等の対策も含めた包括的な戦略の重要性が示唆された。

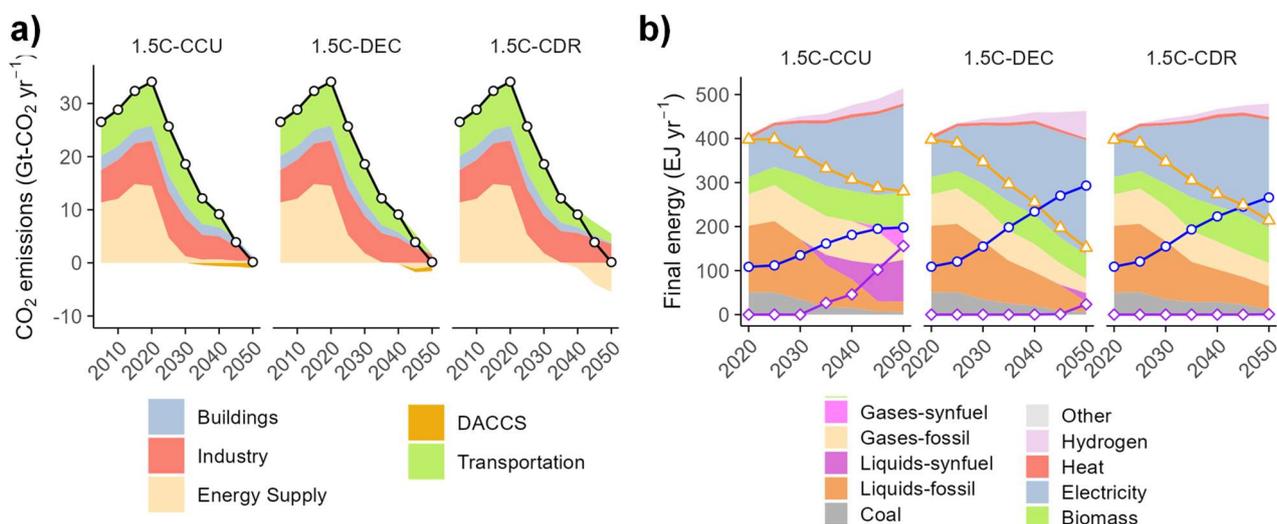


図 2-1 a) エネルギー起源 CO₂ 排出量。BECCS は Energy supply に含まれる。 b) 最終エネルギー消費量。DAC の実施による電力・熱の消費はここには含んでいない。

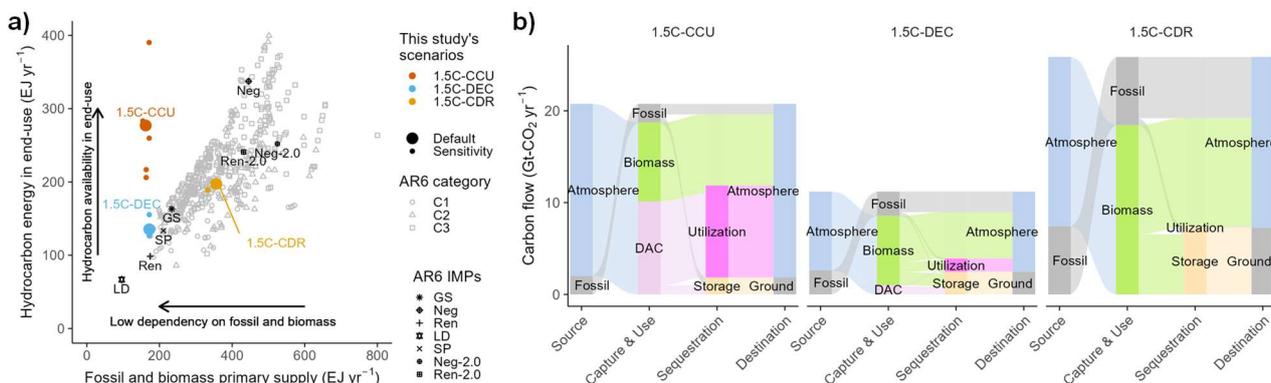


図 2-2 a) 一次エネルギー供給と最終エネルギー消費量に占める炭化水素燃料の比較。炭化水素には化石燃料、バイオマス、合成燃料を含む。灰色のプロットは AR6 の C1-C3 カテゴリの結果、黒色は IMP を表す。 b) エネルギー部門における炭素の回収、利用、排出・貯留量の比較。

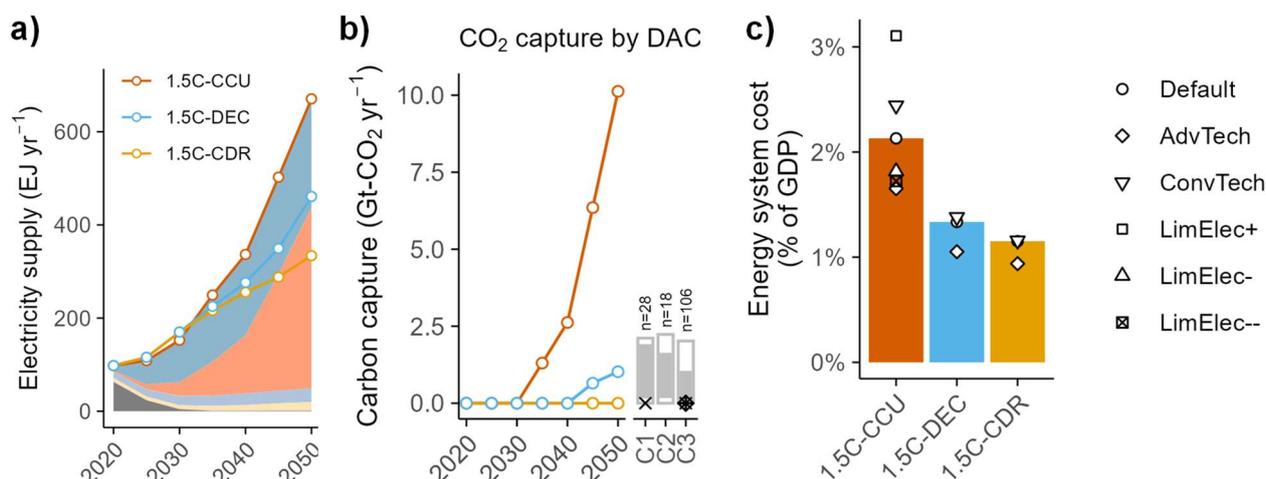


図2-3 a) 総発電電力量、積み上げグラフは1.5C-CCUの結果を示す。これには電力として最終消費されるものに加え、水素・合成燃料に転換される分やDAC向けの消費量を含む。b) DACによるCO₂回収量、ボックスプロットはAR6のカテゴリC1-C3のシナリオの分布を示す。c) 2050年までの累積エネルギーシステム費用。割引率5%で現在価値換算。

(2-2) 世界を対象としたエネルギー需要部門における水素・合成燃料の評価

図2-4 a)に、CO₂排出制約、水素・合成燃料に関する技術シナリオ別の世界全体の最終エネルギー消費の推計結果を示す。水素や合成燃料の導入量はシナリオ間で幅があり、産業や運輸など、電化が困難な用途において水素・合成燃料が導入されるが、多くのシナリオでは最終エネルギー消費の5%以下に留まることが分かった。電力・バイオマスの利用拡大は、どのシナリオでも共通してみられる傾向であった。2°C目標を上回る水準の排出制約、CCSの利用制約が同時に課せられた状況など、特定の条件の下では、水素や合成燃料の導入が拡大し、導入率は最大で20%弱まで拡大する結果となった(図2-4 b)。これはCCSの利用制約に伴いCDRの実施可能量が低下し、最終エネルギー消費部門における排出削減の必要性が高まったためである。

部門別にみると、民生ではCO₂削減率が高くなるほど電化が進む一方、水素の導入はほぼゼロであった(図2-5)。これは民生用途では、ヒートポンプ等により電化が比較的容易・経済的に実施可能であるためと考えられる。産業部門はCO₂削減率が対策なしケース比で70%を超えた程度から水素の導入がわずかに進むが、電化やバイオマスの寄与度の方が大きい。これは産業部門は民生に比べると電化が困難な分野が多く、それらの部門において水素や合成燃料の重要性は相対的に高いものの、バイオマスやCCSなどの利用も可能であるため、導入は比較的限られたものと考えられる。一方で運輸では、長距離輸送や船舶・航空を中心に水素・合成燃料導入が比較的進みやすい結果となった。ただし、水素や合成燃料は水素製造時のエネルギーロス、生産設備への追加コストから、ほとんどのケースで電力と比べて費用が高く、およそ1.5-2倍程度の生産費用がかかることが示された(図2-6)。以上より、水素・合成燃料は特定の条件下・部門において脱炭素化に寄与する可能性があるが、それ過度に依存することなく、電化やバイオマス、CCS利用など多様な対策オプションを踏まえた包括的な戦略の必要性が示唆された。

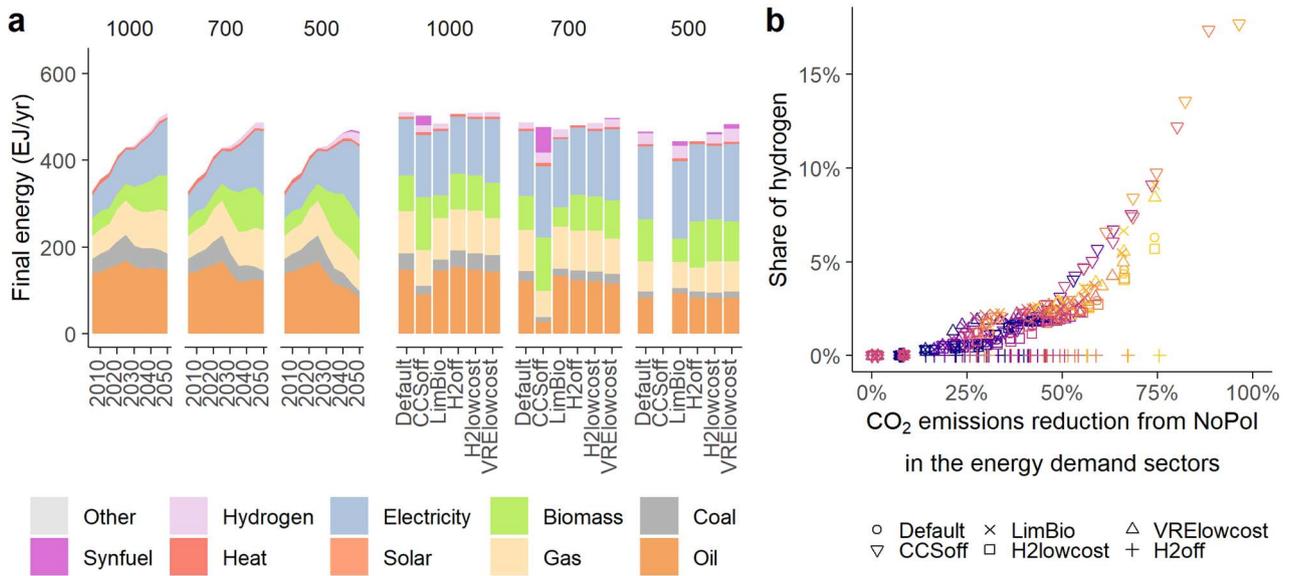


図 2-4 a) 最終エネルギー消費。各パネル上の数字は累積 CO₂ 排出量の値。面グラフは Default (技術制約なし) シナリオの値、棒グラフは各シナリオにおける 2050 年の値を表す。b) CO₂ 削減率と水素 (合成燃料含む) シェアの関係。

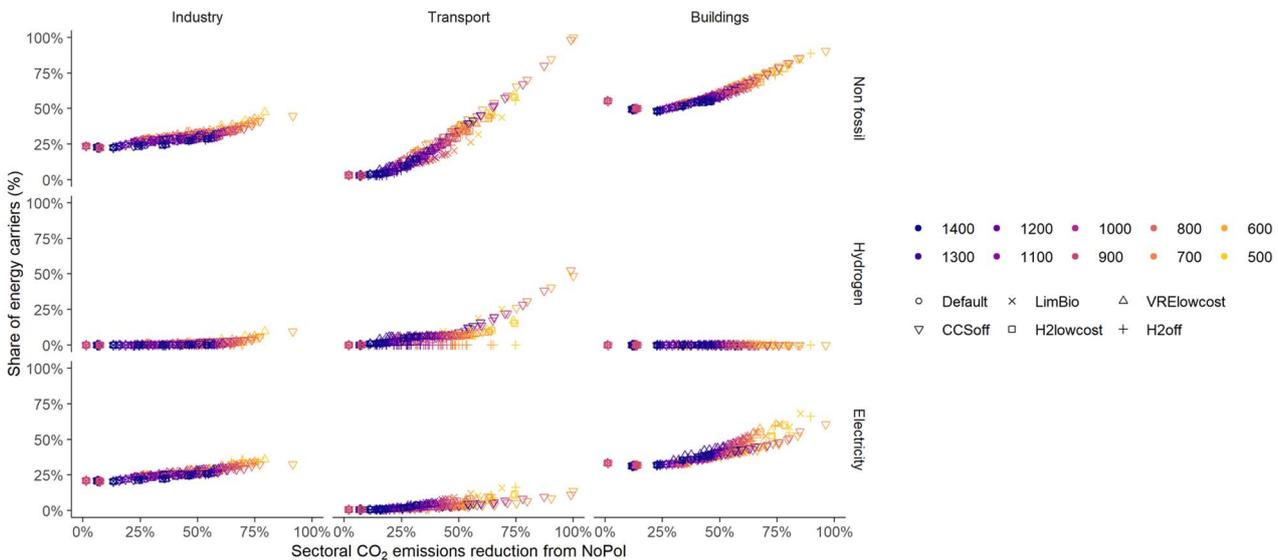


図 2-5 部門別の CO₂ 削減率と各エネルギーキャリア導入率の比較

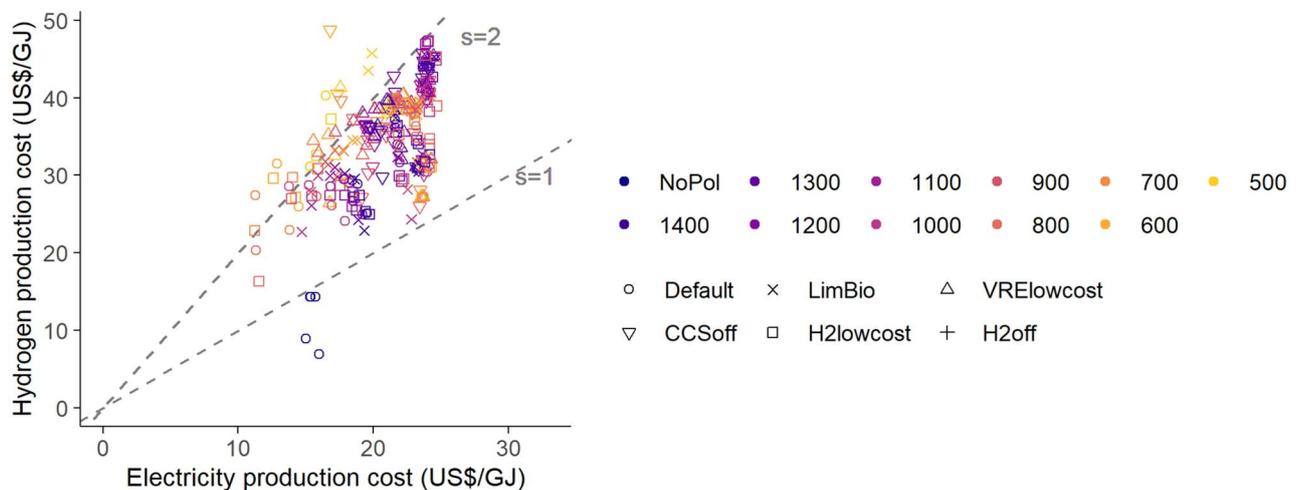


図 2-6 平均発電費用と平均水素製造費用の比較。点線は両者の費用が同一の場合 (s=1)、水素製造コストが電力の 2 倍となる水準 (s=2) を示す。

(2-3) 世界を対象とした発電部門における水素・アンモニアの脱炭素化への貢献の評価

図2-7 a)にシナリオ別の発電電力量構成を示す。発電構成は排出シナリオによってある程度異なるが、2°Cや1.5°C目標を達成する想定の下では、火力発電の減少、太陽光・風力発電の増加は共通してみられる結果となり、2050年における火力発電による発電電力量は、20EJ/年以下に留まる結果となった。また、2050年に水素・アンモニア専焼・混焼発電が世界の発電量に占める割合は、最大で1%程度に留まる結果となった(図2-7b)。発電電力量はごく僅かにとどまる一方で、水素価格が大きく低下するシナリオでは、石炭・ガスいずれにおいても水素混焼設備の導入が進み、世界の火力発電設備の約半数が水素混焼設備付きとなる可能性が示された(図2-8a)。しかし、これらの設備が1年のうちに稼働する期間は、太陽光・風力発電の出力が天候条件によって大きく低下するごくわずかな時間帯に留まるため、発電電力量は先述のように全体の1%程度に留まる結果となった。火力発電の座礁資産量を推計した結果について図2-8b)に示す。水素の生産コストが大きく低下するシナリオでは、水素混焼への改修によりCO₂排出係数が低下することで、石炭火力では最大で2050年の座礁資産量は約半減する結果となった。ただし座礁資産が多く発生する2030-40年頃では、座礁資産の抑制効果は限定的であった。

水素・アンモニア混焼発電の設備利用率が低下した要因として、燃料費の増加による発電コスト増加があげられる。図2-9に石炭・ガス火力発電の水素混焼率に応じた発電コスト(Levelized cost of electricity, LCOE)の内訳を示す。水素・アンモニアの混焼率が高くなるほど、改修に必要となる設備費は増加するが、発電コスト全体への寄与度は小さい。それ以外のコストについて、石炭・ガスへの炭素税課税に伴うCO₂排出費用は、水素混焼率が高くなるほど低下する一方、水素・アンモニア調達による燃料費が増加する結果となり、水素混焼は必ずしも費用面では優位性の高いオプションではないことが示された。水素混焼により発電コストが低下するケースにおいても、太陽光発電等の他のオプションと比べれば発電費用は高いため、水素混焼発電はベース・ミドルロード対応としては用いられなかったといえる。なお、発電部門における水素・アンモニアの利用は限定的となった一方、航空・輸送燃料としての水素・アンモニア利用は、先行研究と同様、比較的進みやすい結果となった。本成果より、発電部門では費用の観点から水素・アンモニアの役割は非常に限定的である一方、輸送部門では比較的有効な対策となり得ることから、様々な部門を横断した包括的な脱炭素化方策の検討が重要であることが示唆された。

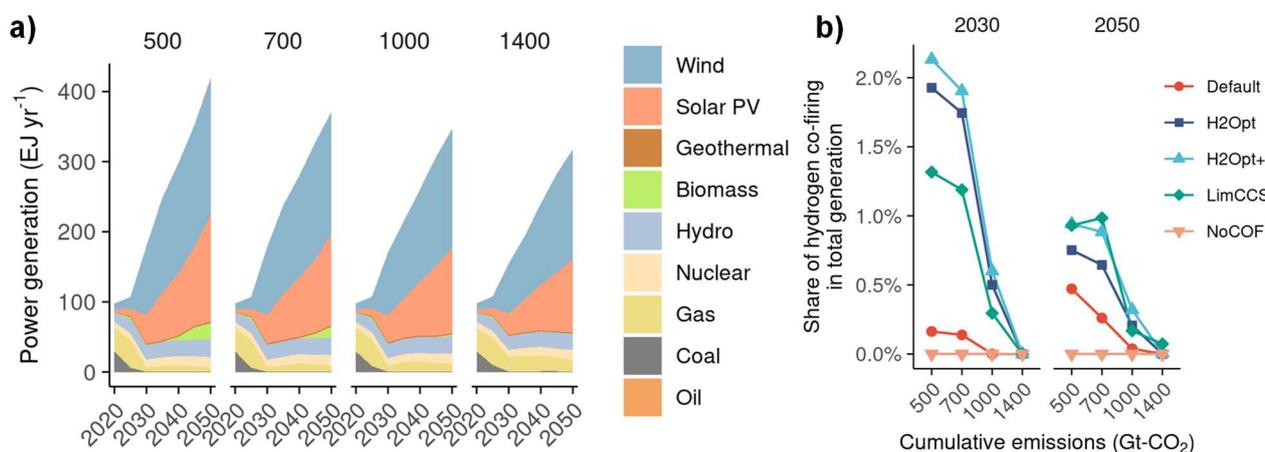


図 2-7 a) 発電電力量構成。標準的な技術想定 (Default) における結果。 b) 世界の総発電量に占める水素混焼・専焼火力発電による発電電力量のシェア。

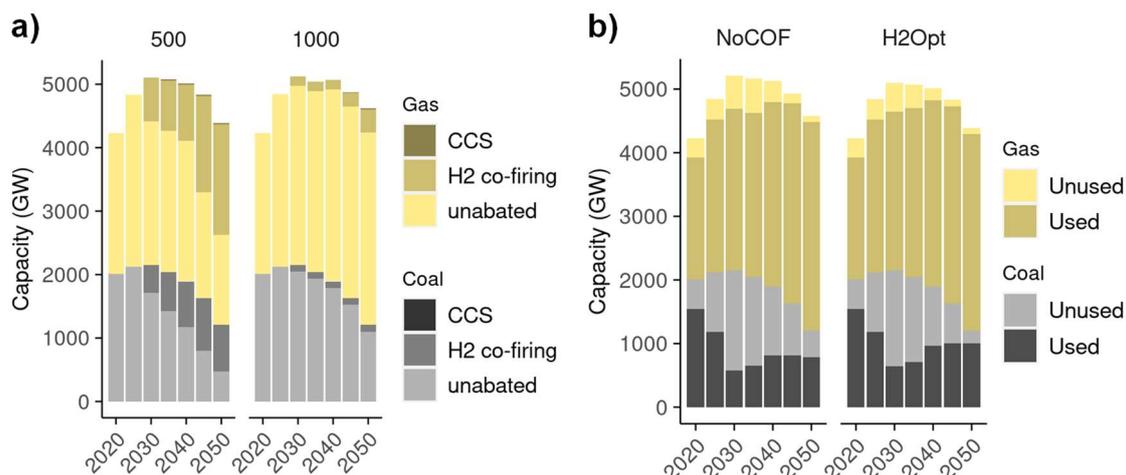


図 2-8 a) 石炭、ガス火力発電の発電容量内訳。水素生産コストが低下する想定シナリオ (H2Opt) の結果 b) 稼働状況別の石炭・ガス火力発電の発電容量内訳。500Gt シナリオ (1.5°C相当) の結果。

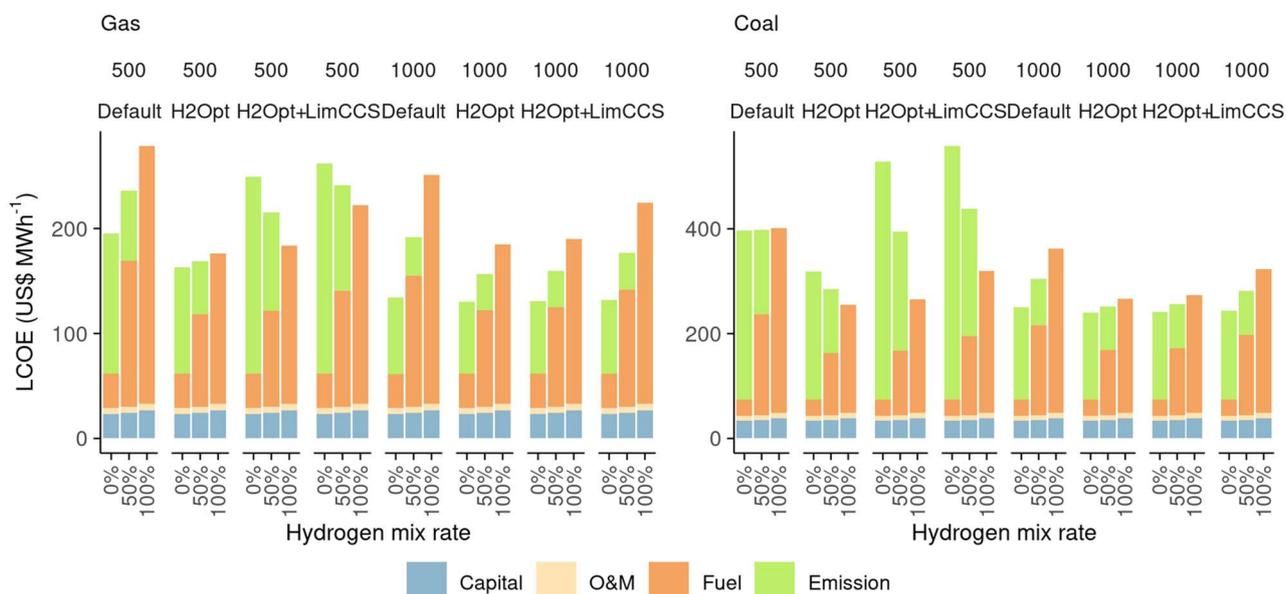


図 2-9 水素混焼率に応じた石炭・ガス火力発電の LCOE (Levelized cost of electricity) の比較。

(2-4) 脱炭素化困難分野を対象とした需要部門別分析

まず運輸部門におけるサービス需要変化を考慮した分析結果を図2-10に示す(土木学会論文集に掲載)。特段の追加的対策を講じないBaselineシナリオでは、旅客道路輸送需要量は2015年比で120%増加しており、貨物道路輸送需要量も134%増加する結果となった。追加的なサービス需要削減策、モーダルシフト等の対策を考慮したTransport_2Dシナリオでは、ロードプライシングやカーシェアリング等の需要抑制によって、都市部における道路旅客輸送需要を2015年比で94%の増加に抑制し、また一部は道路から鉄道にシフトする結果となった。これらのシナリオにおける運輸部門の最終エネルギー消費を図2-11 a)に示す。炭素価格のみを考慮し、追加的なサービス需要削減策を考慮しない2Dシナリオと比較して、輸送に関する諸対策を考慮したTransport_2Dでは、世界全体の運輸部門の最終エネルギー消費は2050年に約2割減少した。またバイオマスへの依存度も低減される結果となった。2Dシナリオにおける炭素価格は、追加的なサービス需要削減策を講じることで、2050年に3割程度減少する結果となった(図2-11 b)。

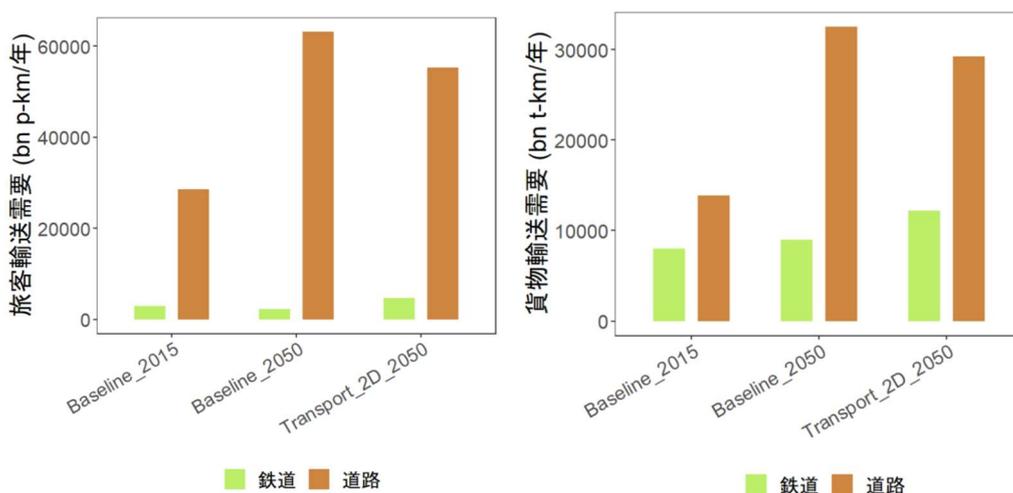


図 2-10 世界の旅客・貨物輸送量の推計結果

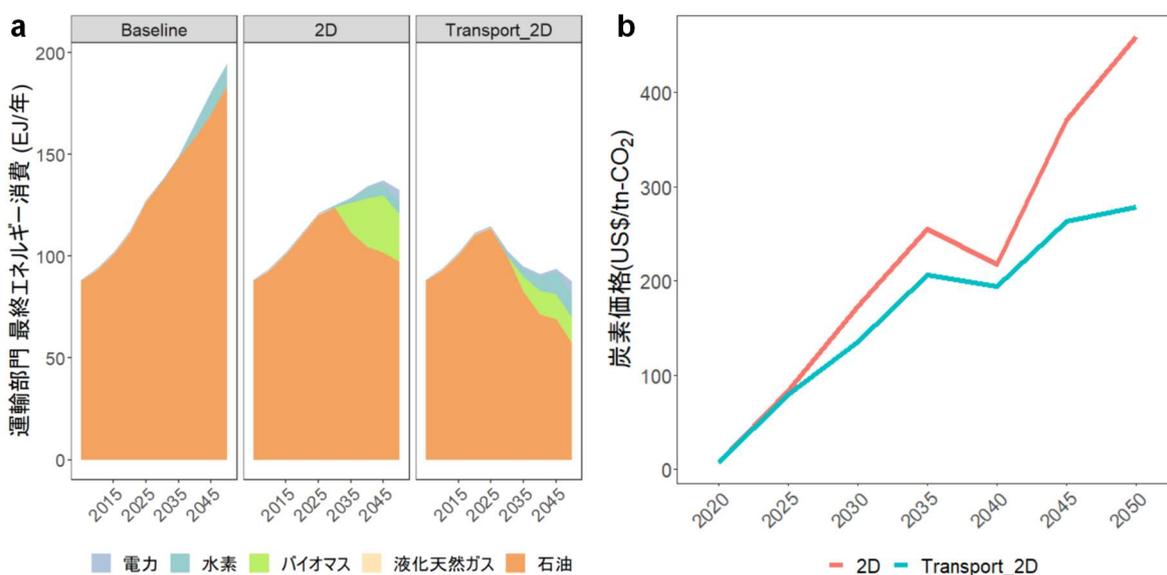


図 2-11 a) 世界全体の運輸部門の最終エネルギー消費。 b) 炭素価格

次に化学部門を対象とした分析結果を図2-12に示す（土木学会論文集に掲載）。ほとんどのシナリオにおいて、一次化学品の生産に占める最も多いエネルギー源はCCS付化石燃料であり、排出制約の厳しいシナリオでは、バイオマスが一部を代替する結果となった（図2-12）。また、CCSに強い制約を課さない限り水素・合成燃料はほとんど導入されない結果となった。これらの対策は比較的削減費用が高く、発電部門でのBECCSやDACCSの方が、削減費用が安いことによると考えられる。なおアンモニア製造では気候緩和下で一定程度電気分解水素が使用される結果となった。

各シナリオにおける一次化学品生産時における直接的なCO₂排出量、およびFeedstockに含まれる炭素に由来する間接的なCO₂排出量を図2-13に示す。なお間接CO₂排出には電力利用に由来するCO₂排出も含む。ここで直接CO₂排出に関しては、一次化学品生産プロセスへのCCSの導入が進むことに伴い500Cシナリオおよび500C-limBioシナリオでは2020年比で84%削減される結果となった。また、CCSの利用が制約される700C-NoCCSシナリオでも、500Cシナリオおよび500C-limBioシナリオと同等の水準まで直接CO₂排出の削減が進んでいるが、これは700C-NoCCSシナリオにおいて、バイオマスや電解水素を利用する生産技術の導入が拡大したことによると考えられる。一次化学品生産に伴う間接CO₂排出は、500Cシナリオでは2020年比で20%程度、最も排出削減が進む700C-NoCCSシナリオでも2020年比で45%程度の削減に留まっており、直接CO₂排出と比較して、特にFeedstock利用に伴うCO₂排出を削減することが比較的困難であることが示唆されている。技術シナリオ別の比較から、limBioシナリオでは将来的に見込まれる一次化学品の生産量増加に伴い、500C-limBioシナリオでも2020年比で間接CO₂排出が増加しており、費用対効果の高い間接CO₂排出の削減はバイオマスの利用可能性に依存すると考えられる。

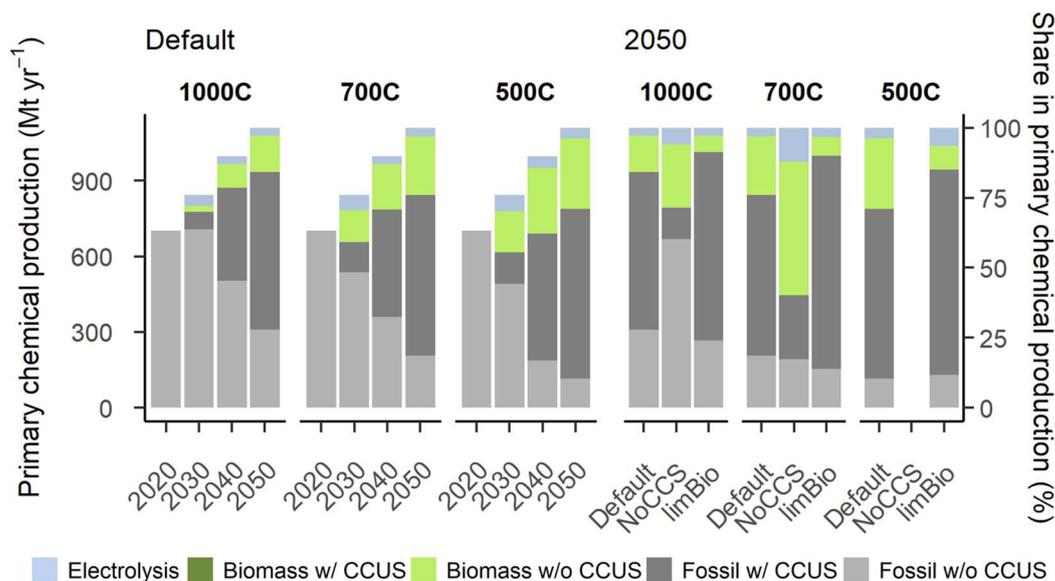


図 2-12 一次化学品の原料別生産量内訳

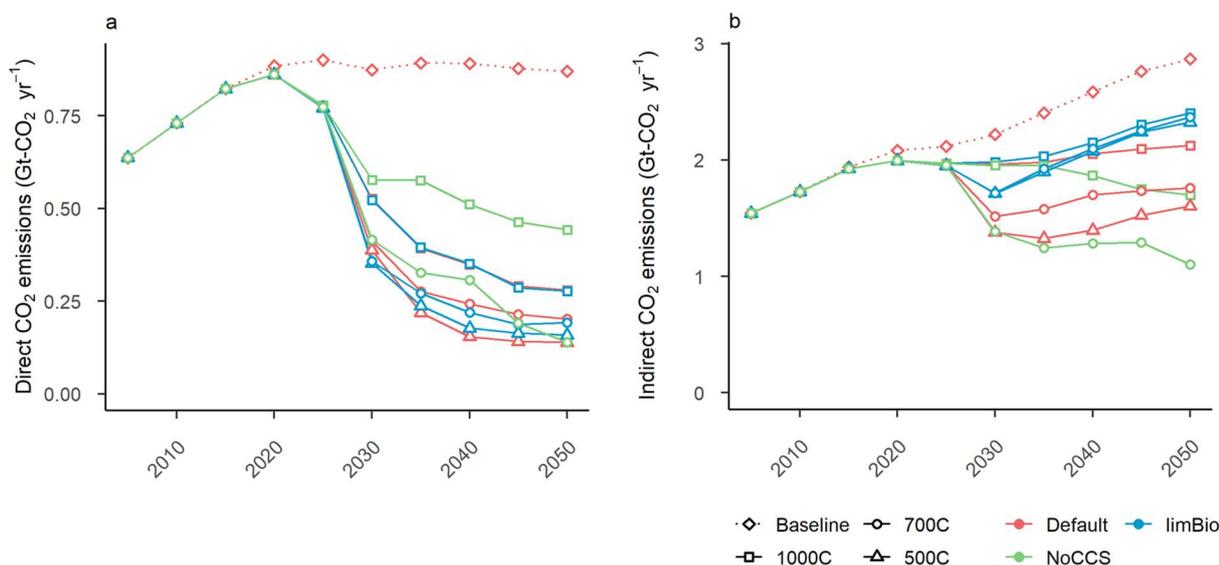


図 2-13 a) 一次化学品製造時の直接的な CO₂ 排出量。 b) Feedstock に含まれる炭素等に起因する間接的な CO₂ 排出量

(2-5) 日本の2050年脱炭素化に向けたシナリオ分析

図2-14 a)にシナリオ別の日本の温室効果ガス排出量の推計結果を示す。いずれのシナリオでもエネルギー需要部門や非エネルギー起源CO₂、CO₂以外の温室効果ガスが2050年に残存し、これを負の排出量または排出枠の購入によって相殺している点は共通するが、残存排出量の量・構成はシナリオによって異なる。まずCN-CRとCN-ETでは、エネルギー起源の産業、運輸部門、および工業プロセス・CO₂以外の排出が合計で150–200 Mt-CO₂eq程度残り、これをそれぞれエネルギー供給部門とDACCSによる負の排出、排出枠の購入によって2050年ネットゼロ排出に到達している。一方で民生部門の残存排出は大幅に削減されている。なおCN-ETシナリオでは、2050年に約180Mt-CO₂の排出枠を調達しネットゼロ排出を達成しており、排出枠調達による相殺を含まない実質的な国内温室効果ガス排出量は2010年比で約86%減となった。他方、CN-AF、CN-LD、CN-IMでは、民生部門に加えて産業・運輸部門の残存排出がCN-CRと比較して減少し、2050年の残存排出は合計で約80Mt-CO₂eqとなった。なおCN-LD、CN-AF、CN-IMでもCDRは一定量導入される結果となった。これは工業プロセス起源CO₂のうち、石灰石起源などCO₂回収や合成燃料代替が難しい部門、CO₂以外の温室効果ガス排出量のオフセットのためである。最終エネルギー消費量の推移を図2-14b)に示す。2050年時点での最終エネルギー消費に占める割合が最も多いのはいずれのシナリオでも電力であり、電化はどのシナリオでも主要な対策となることが示唆された。バイオマスもいずれのシナリオでも増加している。それ以外のエネルギー構成はシナリオによって特徴が異なり、CN-AFでは水素と合成燃料の増加、CN-LDではエネルギー需要総量の

減少により、CN-CRと比較して化石燃料の消費量が削減され、これが需要部門の残存排出の追加削減に寄与している。部門別では、民生は電化が大幅に進み、CN-CRやCN-ETでは特に電化率が高い。一方CN-AF, CN-LD, CN-IMでは、追加的な電化に加えて合成燃料がわずかに導入され、化石燃料はほぼゼロとなった。産業では、特にCN-AF・CN-IMでは電化・水素に加え合成燃料の導入も進み、石炭・ガスの消費を大きく減らしている。CN-LDでは主にエネルギー需要の削減が大きく寄与し、他のシナリオと比較して3割程度最終エネルギー消費量が削減された。運輸は特にシナリオ間での最終エネルギー消費構成の差が大きく、CN-CR・CN-ETでは石油製品が2~3割程度に減少し、電化・水素化が進む結果となった。またCN-AF, CN-LD, CN-IMでは化石燃料消費がほぼゼロとなり、電力・水素等の代替燃料のシェアが5割を占める結果となった。特にCN-IMは電化率がCNシナリオの中で最も低い一方、合成燃料の導入率が3割以上を占める結果となった。

排出量構成やエネルギー構成はシナリオによって大きく異なる一方、エネルギーシステム費用にはさほど大きな違いは見られず、従来の2050年80%削減シナリオと比べるといずれのシナリオも費用はその3-4倍となった(図2-15a)。ただし輸入額は大きく異なり、水素・排出枠輸入シナリオでは、2050年のエネルギー・排出枠輸入額が現状の化石燃料輸入額を上回る結果となった(図2-15b)。輸入への依存は必ずしも費用面で優位とは限らず、国内対策の着実な実施も重要であることが示された。また海外対策を想定する場合は、海外での安価な水素・合成燃料調達などのエネルギー戦略の検討も重要であることが示唆された。

本成果は土木学会論文集に掲載された。

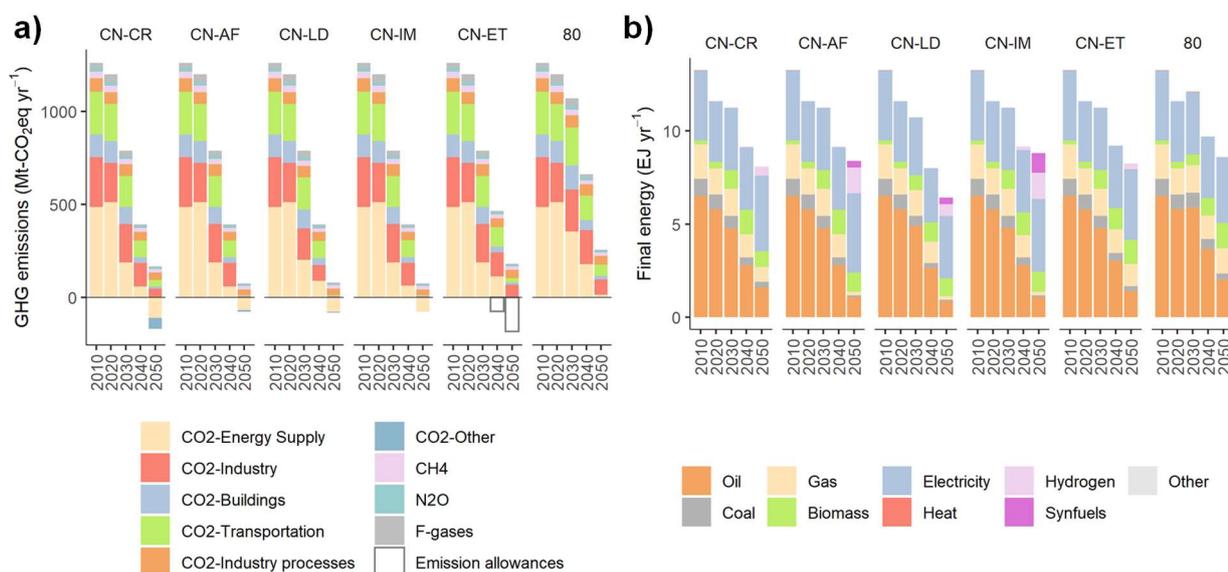


図 2-14 a) 日本の2050年までの温室効果ガス排出量。CO₂-OtherはDACCSを含む。b) 最終エネルギー消費。

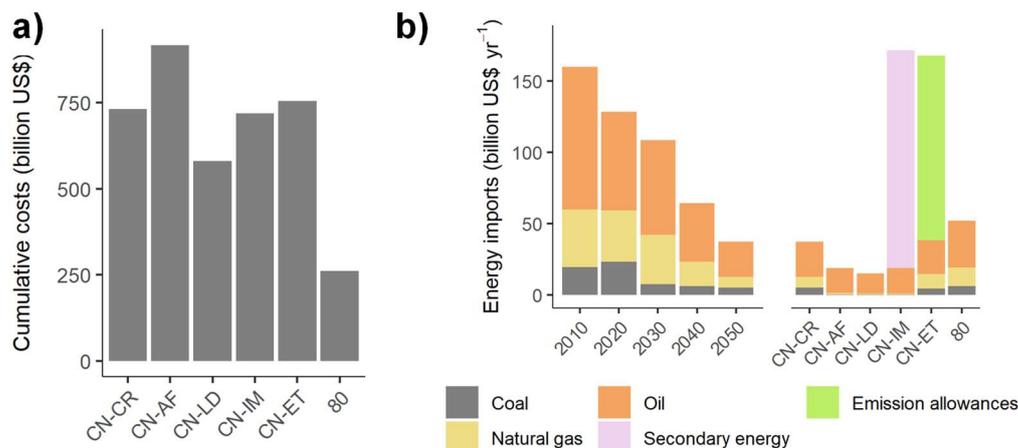


図 2-15 a)2021-2050年までの累積追加エネルギーシステム費用、b) エネルギー・排出枠の輸入費用。左はCN-CRシナリオの輸入額推移、右は各シナリオの2050年値を示す。

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

世界エネルギー技術モデルAIM-Technologyの改良について、対象範囲の世界全域への拡張、電力の需給を

1時間単位で解析する分解能の追加、座礁資産、技術普及速度等の考慮について、一部は前倒しして研究を進め、2年目の段階で既に概ね完了することができた。

さらに、当初計画になかった以下の2点について研究作業を行った。その第一は、昨今の日本の気候政策状況を鑑みて、当初計画にはなかったが日本のカーボンニュートラル実現に向けた選択肢について検討を行いその成果をまとめた。第二に、サブテーマ1におけるFG会合や課題全体のシナリオ設計の中心となる3つの代表的な定量シナリオについても、2年目の段階で概ね定量化を完了し、FG会合に十分に前もって提供した。

3年目は、上記の3つのシナリオの定量化、および革新的エネルギー技術としての水素の脱炭素化への貢献について論文が受理・掲載され、それぞれ影響力の高いジャーナルであるOne Earth、Nature Communicationsに掲載された。研究計画・目標に記載した内容は十分に前もって達成したこと、研究機関内にそれらが上記のジャーナルに掲載されたことを踏まえ、「目標を大きく上回る成果をあげた」と自己評価する。

サブテーマ2 参考文献

- FRICKO, O., HAVLIK, P., ROGELJ, J., KLIMONT, Z., GUSTI, M., JOHNSON, N., KOLP, P., STRUBEGGER, M., VALIN, H., AMANN, M., ERMOLIEVA, T., FORSELL, N., HERRERO, M., HEYES, C., KINDERMANN, G., KREY, V., MCCOLLUM, D. L., OBERSTEINER, M., PACHAURI, S., RAO, S., SCHMID, E., SCHOEPP, W. & RIAHI, K. 2017. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 251-267.
- OSHIRO, K., MASUI, T. & KAINUMA, M. 2018. Transformation of Japan's energy system to attain net-zero emission by 2050. *Carbon Management*, 9, 493-501.
- OSHIRO, K., FUJIMORI, S., OCHI, Y. & EHARA, T. 2021. Enabling energy system transition toward decarbonization in Japan through energy service demand reduction. *Energy*, 227, 120464.

II-3 サブテーマ3 「食のライフスタイル変革と農業起源温室効果ガス削減技術導入の検討」

[サブテーマ3要旨]

サブテーマ3は農業土地利用変化部門を対象に、食のライフスタイル変革と農業起源温室効果ガス削減技術導入の検討を行った。近年の気候安定化に向けた国際的な合意を受け、今後各国での脱炭素化の実現に向けて、具体的な方策の策定と大きな社会変革が求められる。そのなか、作物を中心とした食事内容への移行を含む食のライフスタイルの変更は有効な温室効果ガス排出削減対策となる。しかし、これまでの分析手法では、食料消費の表現が極めて粗い地域・財区分で扱われてきたため、将来の食料需要のベースとなる各国固有の食文化と、脱肉食などの食内容の大幅な変更について具体的に描写できないという課題があった。そこで、本サブテーマでは、多様な食文化や社会属性を考慮した食料消費内容の変化を記述する、世界190カ国・20財を対象とする食料需要モデルを開発し、それをを用いて将来の食料消費と環境への影響を評価した。分析から、新たに開発した食料需要モデルによる推計は従来の世界経済モデルAIM-Hubとの結果に大きな差異はなく、従来の世界モデルは世界全体や集約的な地域における将来の食料消費推移は十分とらえていたといえる。また、食内容の変更により、農地拡大の抑制を通じて、世界全体の農業土地利用由来の温室効果ガス排出量は低下することが示唆された。

また、世界の温室効果ガス(GHG)のネットゼロ排出の達成において、非二酸化炭素の排出をもたらず農畜産業部門における排出削減が重要な役割を果たすと報告されている。本サブテーマでは農業土地利用部門を対象に温室効果ガスの削減量とそれに伴う費用の推計を行った。このとき、従来の農畜産財の生産側の排出削減評価に加えて、作物中心とした食事内容への変更、畜産物消費抑制などの食料消費側での取り組みによる効果を明らかにした。結果として、生産側に加えて消費側での対策を実施することで2050年対策なしシナリオ比で約20%追加的に排出削減が可能であることが示された。

1. サブテーマ3研究開発目的

サブテーマ3は農業土地利用変化部門を対象に、食のライフスタイル変革と農業土地利用分野での温室効果ガス排出削減可能量の推計を行うことを目的とする。具体的には次の3点を行う。第一に、世界を対象とした国別・財別の食料需要モデルを開発し、これを用いて将来の食料消費変化に伴う環境影響評価を行うこと。第二に、農業起源温室効果ガス削減可能量を推計するモデル（AFOLUBモデル）を開発し、世界全体および各地域・国に適用することで農畜産業由来の温室効果ガス排出削減可能量を明らかにする。第三に、従来の農畜産財の生産側の排出削減評価に加えて、作物中心とした食事内容への変更、畜産物消費抑制などの食料消費側での取り組みによる排出削減効果と、その環境影響を明らかにする。

2. サブテーマ3研究目標

サブテーマ3	「食のライフスタイル変革と農業起源温室効果ガス削減技術導入の検討」
サブテーマ3実施機関	立命館大学、国立環境研究所
サブテーマ3目標	<p>主として以下の2つの項目を目標とする。</p> <p>① <u>統合評価モデルの食料・農業モデルの開発・改良を行う。</u>食料モデルは全世界国別（180か国程度）・財別（20財程度）の将来の食料財の消費量を示す。食料需要モデルはこれまでAIMモデルとして用いてきたものをさらに高解像度化し、多様な食文化や社会属性に応じた食料消費を表現できるように改良する。また農業モデルを用いて農業起源のGHG排出量及び削減可能量を地域別で示す。</p> <p>② <u>環境配慮型の食のライフスタイル、低環境負荷農業生産などを考慮して、食と農業に関わる各種指標を定量的に示し、食と農業の側面から温室効果ガスの削減量を定量的に示す。</u></p>

3. サブテーマ3研究開発内容

サブテーマ3では研究計画に沿い、①については、（3-1）世界を対象とした国別・財別の食料需要モ

デルを開発し、これを用いて将来の食料消費変化に伴う環境影響評価を行った。さらに、(3-2) 農業起源温室効果ガス削減可能量を推計するモデル(AFOLUBモデル)を開発し、これを経済モデルを組み合わせることで世界各国および大陸別に適用することで農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する分析を行った。これと並行して、②については、(3-3) 農畜産業の生産と消費段階にわけて、それぞれの温室効果ガス排出削減効果に関して分析を行った。最後に、(3-4) 経済モデルを用いて食の内容の変化による各種環境影響等を分析した。ここではこの4つについて説明する。

- (3-1) 世界を対象とした国・財別の食料需要モデルの開発と将来の食料消費変化に伴う環境影響評価
- (3-2) 世界を対象とした農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する研究
- (3-3) 農畜産業の生産と消費段階における温室効果ガス排出削減の推計
- (3-4) 畜産物の消費制限による環境および食料システムへの影響評価

(3-1) 世界を対象とした国・財別の食料需要モデルの開発と将来の食料消費変化に伴う環境影響評価

近年の気候安定化に向けた国際的な合意を受け、157カ国が国レベルのカーボンニュートラル目標を表明した。今後少なくとも10-20年間は、各国で脱炭素化の実現に向けて、具体的な方策の策定と大きな社会変革が求められる。そのなか、作物を中心とした食事内容への移行を含む食のライフスタイルの変更は有効な温室効果ガス排出削減対策となる。しかし、これまでの分析手法では、食料消費の表現が極めて粗い地域・財区分で扱われてきた。そのため、地域・農産財区分の粗い分析では将来の食料需要のベースとなる各国固有の食文化と、脱肉食などの食内容の大幅な変更について具体的に描写できないという課題があった。そこで、本研究では、多様な食文化や社会属性を考慮する世界190カ国・20財を対象とする食料消費モデルを開発し、これを用いて将来の食料消費と環境への影響を評価した。

同定するモデル式とモデル同定の流れを図3-1に示す。国別・財別食料需要モデル同定において財別に異なるモデル形を準備した。具体的には、畜産物と穀物以外の作物についてはlinear-log型(式1)を用いた。一方、穀物についてはまずSegmented regression型(式2)で総量を推計したのちlogit関数(式3)で財ごとに按分した。いずれも所得(一人当たりのGDP)を説明変数とし、一人一日当たりの財別消費量を被説明変数とした。数式内の変数Betaが後で述べる所得弾力性に相当する。食料消費データには国際農業機関による食料バランス表(FAO, 2023)、人口にはIHME(2023)、GDPにはWDI(World Bank, 2023)の情報を用いた。いずれも1961-2013年を対象とする。モデル同定では最小二乗法(Ordinary Least Squares, OLS)を用い、統計値からの乖離、モデルの再現性を評価する指標として自由度調整済み決定係数(以下R2値)を用いて判定した。

将来推計値についてはAIMの既存モデルによる推計値と比較することで結果の妥当性を確認した。比較には4つのシナリオを準備した。第一に世界の地域を集約的に扱う既存のAIM-Hubによる推計「BaU(AIM-Hub)シナリオ」、第二に今回同定した食料需要モデルの所得弾力性を用いた推計「BaU(fdm)シナリオ」、第三に食料需要モデルの推計に食料消費選好の変更を施した「食料政策(fdm)シナリオ」。ここでは、食料需要モデルの畜産物の所得弾力性を0.5を減らした。最後に、EAT-Lancetに基づく食料消費選好の変更を行う「食料政策(lancet)シナリオ」とした。

Linear-log regression

$$Y_{i,t,f} = \beta_{1f} \log X_{i,t} + \mu_i + \varepsilon \quad \dots (1)$$

Segmented regression

$$Y_{i,t,f} = \beta_{2f} \log X_{i,t} + \beta_{3f} (\log X_{i,t} - \psi) * f_{X,\psi} + \mu_i + \varepsilon \quad \dots (2)$$

Logit regression

$$\log \left(\frac{W_{i,t,f}}{1-W_{i,t,f}} \right) = \beta_{4f} \log X_{i,t} + \mu_i + \varepsilon \quad \dots (3)$$

i country *t* year *f* food group

$Y_{i,t,f}$ food demand(kcal/cap/day) $X_{i,t}$ GDP per capita ψ break point

$W_{i,t,f}$ food demand share μ_i country dummy ε error term

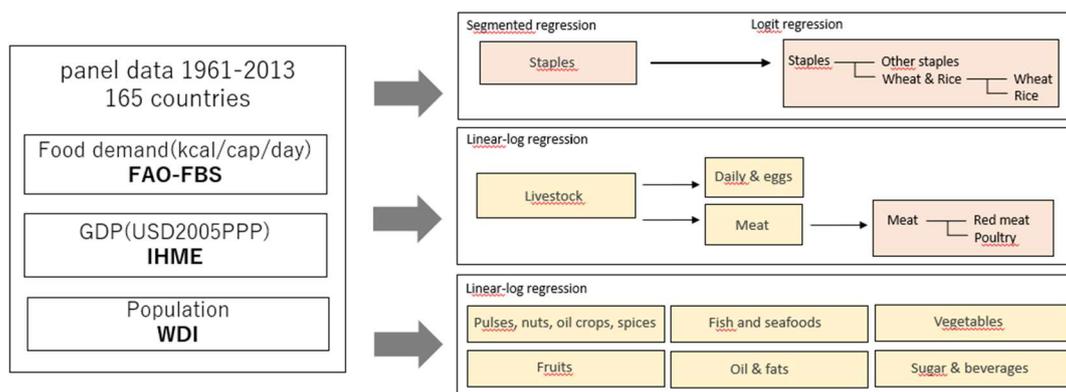


図 3-1 モデル同定の流れ

(3-2) 世界を対象とした農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する研究

パリ協定における1.5°C目標達成に向け、現在150か国以上がカーボンニュートラルを目標に掲げていることから、国別で削減シナリオの開発や具体的な削減技術の情報は有用な知見となりうる。本研究では、他部門と比べて未だ具体的な国レベルのシナリオが限定的な農畜産業部門に着目し、世界190ヶ国を対象として、各国レベルでの農畜産業由来の温室効果ガス(GHG)排出削減可能性、削減対策費用を解明し、各国の費用対効果の高い対策技術の提案を行うことを目的とした。

本研究では応用一般均衡モデル(AIM-Hub(Asia-Pacific Integrated Model/ Hub))と農畜産業排出評価モデル(AFOLUB)を組み合わせシミュレーションを実施した。AIM-Hubは、将来の人口、GDP、消費性向、農業技術発展を前提条件に将来の農業活動量、作物収量、土地利用変化、食料財やエネルギー価格、賃金などを推計する。これらをAFOLUBモデルに入力し、GHG排出量、GHG削減量、削減費用を算出する。AFOLUBモデルは長谷川ら(2012)によって開発されたモデルで、国・地域レベルで緩和策の具体的な情報に基づいて、AFOLU部門のGHG排出量・削減量を計算するボトムアップ型モデルである。将来の活動量(作物の生産量、家畜生産頭数)、炭素価格を所与とし、対策技術の詳細な情報に基づいて、本研究では農畜産業におけるGHG排出量・削減量を推計する。モデルでは、農畜産業等の生産者の排出量削減オプション(技術)の選択を、経済合理性(各期の利潤の最大化)を持って算定する。さらに、本モデルでは削減効果の評価法について複数個を準備しており、各期の許容最小削減量や費用に関する制約条件下での、対策オプションの導入量及び削減量を比較・検討している。表3-1にAFOLUBモデルが想定する農畜産業由来のGHG排出削減技術情報を示す。

本研究では温室効果ガス排出削減対策を実施しないシナリオ(BaU)、生産者側で対策を導入するシナリオ(CM)の2つのシナリオを想定した。CMシナリオではパリ協定の長期目標の達成を想定し、削減対策が導入されると設定した。本研究では、藤森ら(2016)⁷⁾が2°C目標に相当するシナリオについて推計した際に得られた炭素価格をCMシナリオに課し、GHG排出削減を促す追加的許容費用として想定した。図3-2に本研究で用いたモデル枠組み、AFOLUBが対象とする排出源、想定した炭素価格を示す。また、人口やGDPなどの将来の社会経済状況には共通社会経済シナリオSSP2を想定した。分析では、全世界190か国に上のモデルを適用する。その結果をOECD・EU加盟国、アジア、中南米、中東・アフリカ、旧ソ連周辺国の世界5地域に集約して示す。対象年は2005～2050年とする。

表 3-1 AFOLUB モデルが想定する農畜産業由来の GHG 排出削減技術情報

排出源	対策	初期費用 [ドル/頭] [ドル/ha]	維持管理費 [ドル/頭] [ドル/ha]	メタン排出 削減率[%]	亜酸化窒素 排出削減率 [%]	参考文献
家畜反芻	生産性が高い家畜種 への変更	0	79.8	41.0	—	Bates(1998), USEPA(2013), Harmsen et al.(2019)
	濃厚飼料の投与	0	148.5	39.4	—	Bates(1998), Graus et al.(2004), Shibata et al.(2010), USEPA(2013)
家畜糞尿 管理	糞尿のラグーン処理	505.8	1.4	85.0	—	Bates(1998, 2001), USEPA(1999, 2003, 2013)
	糞尿の嫌気発酵処理	630.8	2.8	85.0	—	Bates(2001), USEPA(2013)
	家庭での家畜排せつ 物由来のエネルギー 利用	35.0	0.9	50.0	—	USEPA(2006, 2013)
	糞尿堆肥化	0	17.2	90.0	—	Bates(1998)
稲作	窒素肥料の硫酸アン モニウムへの変更	0	20.0	50.0	—	Fumoto(2017), Graus et al.(2004), USEPA(2006)
	水田への間断灌漑の 導入	0	0	70.0	—	Fumoto(2017), USEPA(2006)
	稲わらの秋すき込み	0	20.0	50.0	—	Fumoto(2017), USEPA(2006)
農耕地土壌	不耕起栽培	0	0	—	3.6	USEPA(2006, 2013)
	肥料の高効率利用	0	2.2	—	47.0	Amann et al.(2005), Harmsen et al.(2019), Hendriks et al.(1998), USEPA(2006, 2013), Ussiri and Lal(2013)
	化学肥料の有機肥料 による置き換え	0	20.0	—	47.0	Harmsen et al.(2019), IPCC(2007), Smith et al.(2007), Ussiri and Lal (2013)
	被覆肥料の利用	0	700.0	—	47.0	Akiyama et al.(2010), Harmsen et al.(2019), USEPA(2006)
	硝化抑制剤を含む肥 料の利用	0	20.0	—	47.0	Harmsen et al.(2019)

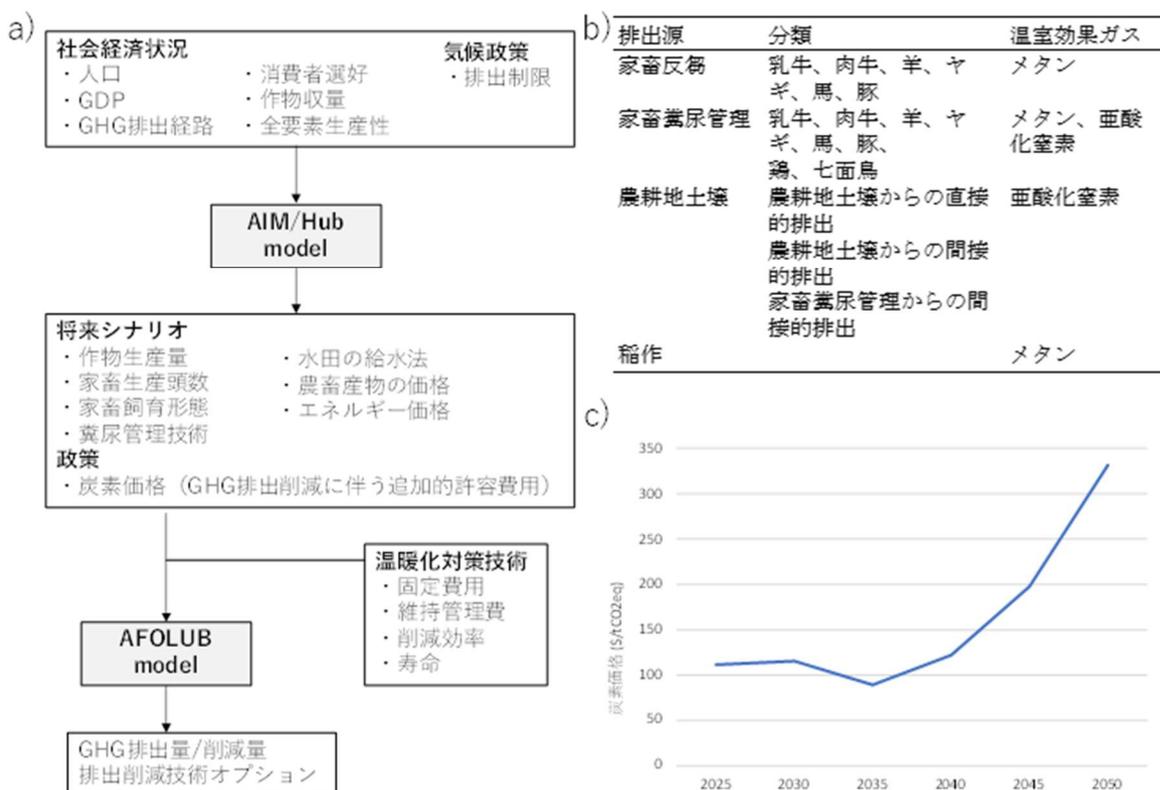


図 3-2 本研究で用いた a)モデル枠組み、b)AFOLUB モデルが対象とする排出源、c)想定した炭素価格

(3-3) 農畜産業の生産と消費段階における温室効果ガス排出削減の推計

世界の温室効果ガス(GHG)のネットゼロ排出の達成において、非二酸化炭素の排出をもたらす農畜産業部門における排出削減が重要な役割を果たすと報告されている。近年では農畜産物の生産側のみならず、その消費側での対策についても提案がなされていることから、本研究では世界全体で農畜産業部門における生産側に加えて、消費側の対策である畜産物の消費制限を考慮した場合の温室効果ガス削減可能量と削減に伴う費用の推計を行った。応用一般均衡モデル(AIM-Hub)と農畜産業排出評価モデル(AFOLUB)を組み合わせ、メタン・亜酸化窒素の削減可能量と削減に伴う費用を算出する。

本研究では、農畜産業部門の生産側でのGHG排出削減効果に加えて、その消費側での取り組みによる効果を定量化するために図3-3 a)に示す4つのシナリオを準備した。GHG排出削減対策を実施しないシナリオ(BaU)、農畜産業部門の生産者側で対策を導入するシナリオ(CM)、農畜産業部門の消費者側での取り組みとして肉食消費を制限するシナリオ(DEM)、また、生産者側と消費者側の両方を考慮したシナリオ(DEM_CM)を想定する。

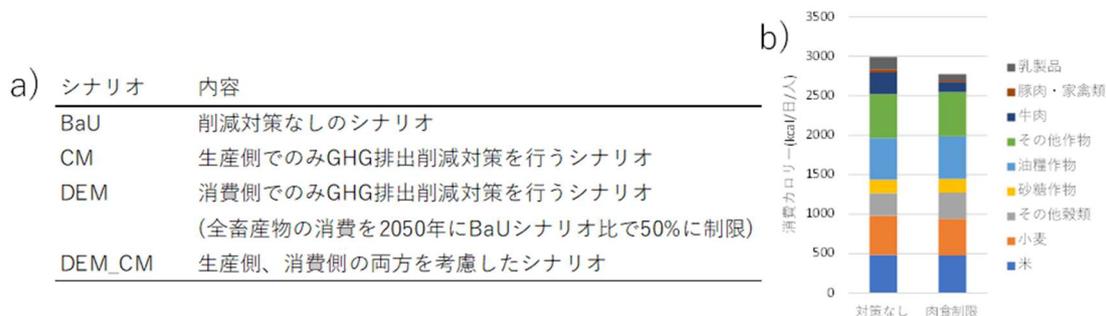


図 3-3 本研究で想定したシナリオ

CMシナリオではパリ協定の長期目標の達成を想定し、削減対策が導入されると設定した。本研究では、将来の活動量、炭素価格、農畜産物およびエネルギーの価格については藤森ら¹⁰⁾が2°C目標に相当するシナリオについて推計したものをを用い、炭素価格をAACとして代用した。

また、DEMとDEM_CMシナリオでは、すべての国・地域において全畜産物の消費を2050年で対策なしシナリオと比べて半減することを想定した。畜産物消費削減は、Hasegawa et al. (2015)と同じ方法で、畜産物の地域別所得弾力性を変化させることで再現した。具体的には、まずBaUあるいはCMシナリオでの食料需要の所得弾力性は、Bruinsma (2006)¹²⁾が想定する将来の一人あたり食料消費量と所得の変化から地域・財ごとの

食料消費の所得弾力性と調整係数を算定し、それを中間投入と最終消費の選好に関する基準年のパラメータとして用いている。さらに、畜産物については、1980～2009年の国別観測値から所得と一人当たり畜産物消費量の関数を推定し、これを中庸な畜産物消費の想定とする。そして、観測値の分布の範囲内で、所得増加に対して畜産物消費が非弾力的な方向にシフトした関数を畜産物消費制限シナリオでの所得と畜産物消費の関係を表す関数とする。この関数を用いて、将来の経年に伴う所得変化に応じて所得弾力性（関数の傾き）を基準年の値から変化させている。

さらに、DEMとDEM_CMシナリオでは、まず各国・地域の2050年の平均一人一日当たりの消費カロリーを算出し、その消費カロリーを達成するように将来のGDP変化と食料消費の変化から地域別の所得弾力性を算出し、それをモデルで所与とした。所得弾力性の想定を変えた国では将来の食料消費が変化し、それに対する農業財の価格変化を通じて、世界各国の需給・貿易が変化する仕組みになっている。人口やGDPなどの将来の社会経済状況には共通社会経済シナリオSSP2（GHG排出削減対策をしない場合）を想定した。対象地域は全世界、対象期間は2005～2050年とする。

AFOLUBによる2050年における世界全体の一人一日当たり消費カロリーの推定をシナリオ別に図3-3 bに示す。2050年における一人一日当たりの合計消費カロリーは、削減対策を行わなかった場合のBaUシナリオでは2990kcal/人/日、肉食を制限したDEMシナリオでは2773kcal/人/日となった。肉食を制限した場合、牛肉部門で145.1kcal/人/日、豚肉・家禽類部門で18.3kcal/人/日、乳製品部門で80.9kcal/人/日の消費を抑えることが可能となる。

（3-4）畜産物の消費制限による環境および食料システムへの影響評価

GHG排出量削減取り組みの一つとして畜産物の消費抑制などの消費者による取組が報告されている。しかし、これまで畜産物の消費抑制による食料システムや土地利用への具体的な影響は評価されていない。本研究では畜産物の消費制限による環境および食料システムへの影響を明らかにすることを目的とする。具体的には、世界経済モデル（AIM-Hubモデル）を用いて、畜産物の消費制限による森林の炭素吸収量、GHG排出削減量、土地利用状況、窒素肥料投入量、水資源利用量を明らかにする。

緩和策を取る世界と取らない世界の2つのシナリオを用意し、経済モデルを用い分析し、畜産物の消費制限による影響の推計を行う。経済モデルには応用一般均衡モデル（AIM-Hubモデル）を用いた。AIM-Hubモデルに全要素生産性、作物単収見込み、土地利用データ、消費性向、気候政策、人口、GDPなどを入力し、GHG排出量、食料、土地利用などのデータの出力を行った。

本研究では2つのシナリオを準備した。一つは、参照シナリオとして、畜産物消費制限を実施しないシナリオ（対策なし）を想定し、それに対し、畜産物の消費を減らす畜産物消費制限シナリオを準備した。畜産物消費制限シナリオでは、瓜本ら(2022)、Hasegawa et al.(2015)と同じ方法で変化させた。詳細は（3-3）を参照頂きたい。この結果、畜産物消費制限シナリオでは2050年において対策なしシナリオと比較し、畜産物の消費が世界全体で15%減少している。実際の地域別の変化率については図2に示す。さらに、畜産物の所得弾力性を低く想定した国・地域では将来の畜産物消費が低下し、それに伴い農業関連財の価格が変化する。それらを通じて世界各国の需要供給・貿易が変化する仕組みになっている。例えば、ある国の畜産物消費が低下すると、畜産物と飼料の価格が下がり、消費の減少と価格低下に応じて世界各国の生産・消費・貿易が決まるようになっている。

参考文献)

1. Fujimori S, Oshiro K, Shiraki H, Hasegawa T. Energy transformation cost for the Japanese mid-century strategy. *Nature Communications* 2019, **10**(1): 4737.

4. サブテーマ3 結果及び考察

（3-1）世界を対象とした国・財別の食料需要モデルの開発と将来の食料消費変化に伴う環境影響評価

図3-4に同定された地域別・財別所得弾力性を含むシナリオ間での所得弾力性を比較して示す。全体の傾向として作物において所得弾力性が低く、畜産物で高くなる傾向が示された。さらに、途上国の方が先進国に比べて高い所得弾力性を示した。これは所得水準が低いほど所得弾力性が高くなるという過去の傾向を反映したものである。

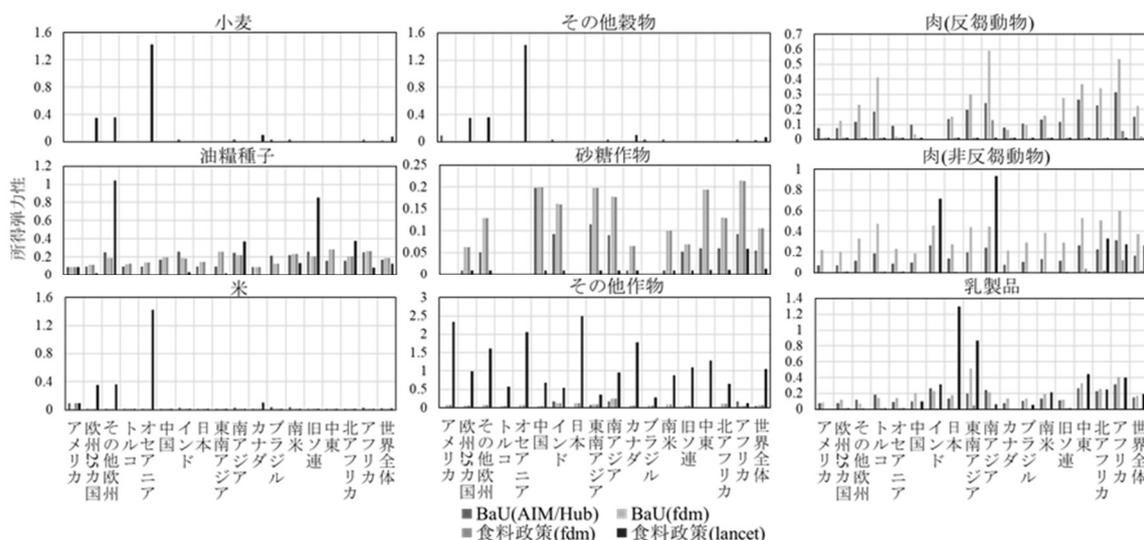


図 3-4 BaU(AIM-Hub)、BaU(fdm)、食料政策(fdm)、食料政策(lancet)シナリオの所得弾力性

世界17地域の2050年食料消費カロリーの結果について図3-5に示す。BaU(fdm)シナリオについて、BaU(AIM-Hub)と消費カロリーの総量や内訳の傾向に大きな差はない。このことからAIM-Hubで分析した食料消費は、より各国単位での食内容を詳細に描いた食料需要モデルと比較しても適当な結果であったと言える。また、2種類の食料政策シナリオにおいては、その他欧州とオセアニアの食料政策(lancet)を除いた各地域においてBaUの消費カロリーを下回る結果となった。環境意識の高いシナリオとEAT-Lancet推奨値の達成を設定したシナリオとして妥当な結果と言える。食料政策(fdm)と食料政策(lancet)の差は地域によって異なっているが、食料政策(fdm)の方が小麦等穀物の消費が大きく、食料政策(lancet)はその他作物の値が大きい傾向がある。

また分析からは、次の3点の結論が得られた。第一に、AIM-Hubと食料需要モデルの基本的な設定であるBaU(AIM-Hub)シナリオとBaU(fdm)シナリオの食料消費に大きな差はなく、AIM-Hubによる食料消費分析はより各国単位での食内容を詳細に描いた食料需要モデルと比較しても適当な結果であったと言える。第二に、食料政策(lancet)シナリオではアフリカ、東南アジア等複数の地域で飢餓リスク人口が大きく増加したが、食料政策(fdm)シナリオでは同様の事象は起こらなかった。これは食料政策(fdm)シナリオの所得弾力性の決定に用いた食料需要モデルの設定が地域間の食内容の差異や地域内での所得格差を反映しているためである。第三に、食料政策の実施を想定した(lancet)シナリオでは農地(エネルギー作物以外)の土地利用が増加する一方、牧草地面積が減少し、農業土地利用に由来する排出量は低下した。

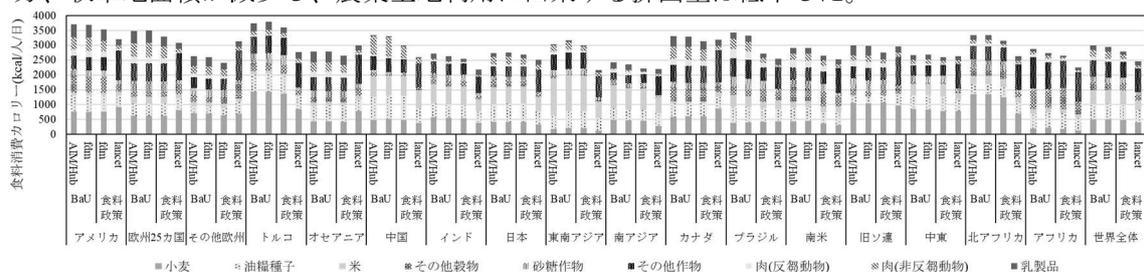


図 3-5 2050年世界17地域における食料消費カロリー

(3-2) 世界を対象とした農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する研究

図3-6 a)にシナリオ別の排出量推移を示す。対策を行わないBaUシナリオでは、農畜産業部門由来のGHG排出量は右肩上がりが増加し、2050年には7000MtCO₂eqとなり基準年2005年比1.6倍となる想定である。対して対策を行うCMシナリオでは、対策を実施すると想定した2030年より排出量は減少し、2050年には4400MtCO₂eqとなり、2050年排出量の37%に相当する2600MtCO₂eqの削減が見込まれる。世界全体での削減可能量の推移は図3-6 b)の通りである。2050年における世界全体での削減可能量は2600MtCO₂eqであり、うちCH₄は1700MtCO₂eq、N₂Oが910MtCO₂eqである。排出源別でみると家畜反芻が900MtCO₂eq、糞尿管理が320MtCO₂eq、稲作が470MtCO₂eq、農耕地土壌が910MtCO₂eqであり、農耕地土壌部門での削減が全体の35%を占める。

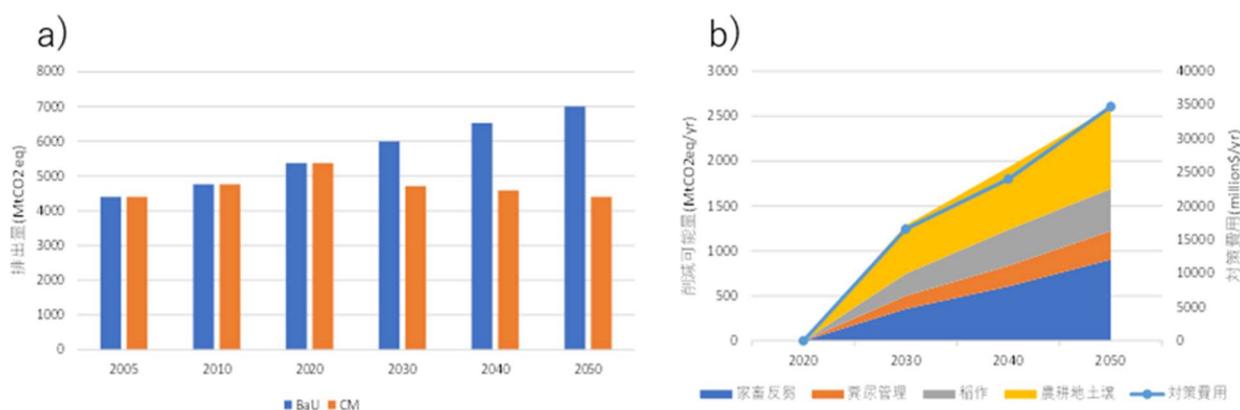


図 3- 6 世界全体での a)シナリオ別排出量推移、b)削減可能量推移（排出源別）

5地域の対策技術別削減可能量を図3-7 a)に示す。総削減量を見るとアジアで1400MtCO₂eq、OECD・EU加盟国で490MtCO₂eq、中東・アフリカで380MtCO₂eq、南米で300MtCO₂eq、旧ソ連周辺国で90MtCO₂eqであり、アジアでの削減が51%、OECD・EU加盟国からの削減が18%を占める。また、対策技術別対策費用を図3-7 b)に示す。総対策費用を見るとOECD・EU加盟国が171億\$、アジアが94億ドルであり、それぞれ全体の49%、27%を占める結果となった。また削減量1トンあたりの対策費用は全世界で13\$/tCO₂eq、地域別にみると最大がOECD・EU加盟国の35\$/tCO₂eq、最小がアジアの7\$/tCO₂eqとなった。全体として、削減可能量の大きい対策技術は、家畜反芻部門における「生産性が高い家畜種への変更」が670MtCO₂eq、次いで農耕地土壌部門における「化学肥料の有機肥料による置き換え」が350MtCO₂eqである。費用対効果の高い技術は、稲作部門の「窒素肥料の硫酸アンモニウムへの変更」が0.1\$/tCO₂eq、次いで同じく稲作部門の「稲わらの秋すきこみ」が0.2\$/tCO₂eqとなった。2050年における削減可能量はアジアでの削減が約半数を占めるが、中でも稲作からの削減が410MtCO₂eqと多く、約30%を占めることに特徴がみられる。

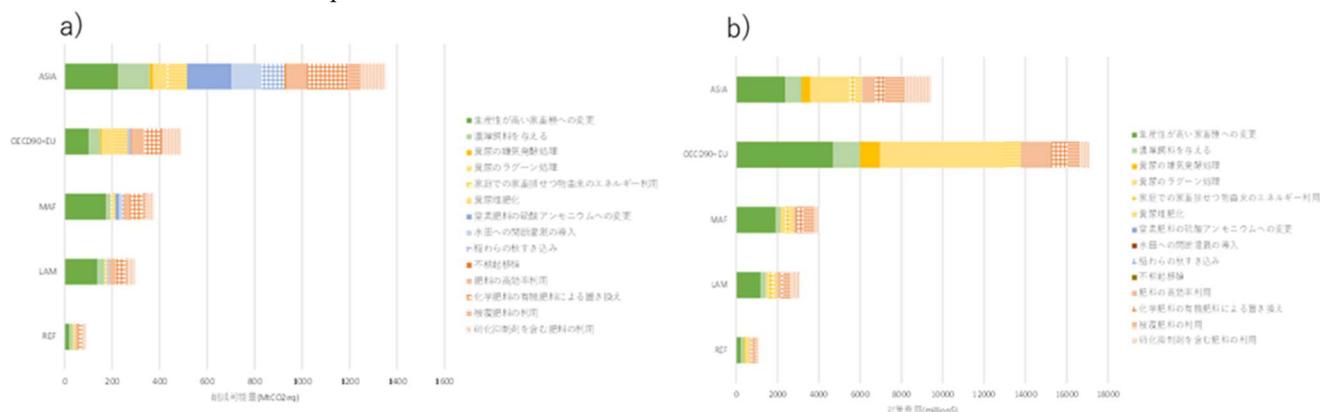


図 3- 7 2050 年における対策技術別 a)削減可能量（地域別）、b)対策費用（地域別）

図3-8に地域をまたぎ、2050年における世界の削減可能量の上位20カ国の結果を示す。技術別削減可能量に合わせて対策なしシナリオ比の削減率および削減量1tあたりの対策費用の結果をあげる。上位10か国のみで世界全体総削減量の60%、上位20カ国で73%を占める。最も削減可能量の多い国はインドで500MtCO₂eq、次いで中国330MtCO₂eq、アメリカ200MtCO₂eqとなった。上位20カ国中アジアが9か国、OECD・EU加盟国が5か国、中南米が3か国、中東・アフリカが2か国、旧ソ連周辺国が1か国という結果となり、やはりアジアでの削減が大きいことが明らかとなった。また、削減量1トンあたりの対策費用を見るとOECD・EU加盟国で高く、アジアで低い傾向にある。オーストラリアが最も高く60.2\$/tCO₂eq、バングラデシュが最も低く3.2\$/tCO₂eqである。削減率はまばらで平均は約40%である。

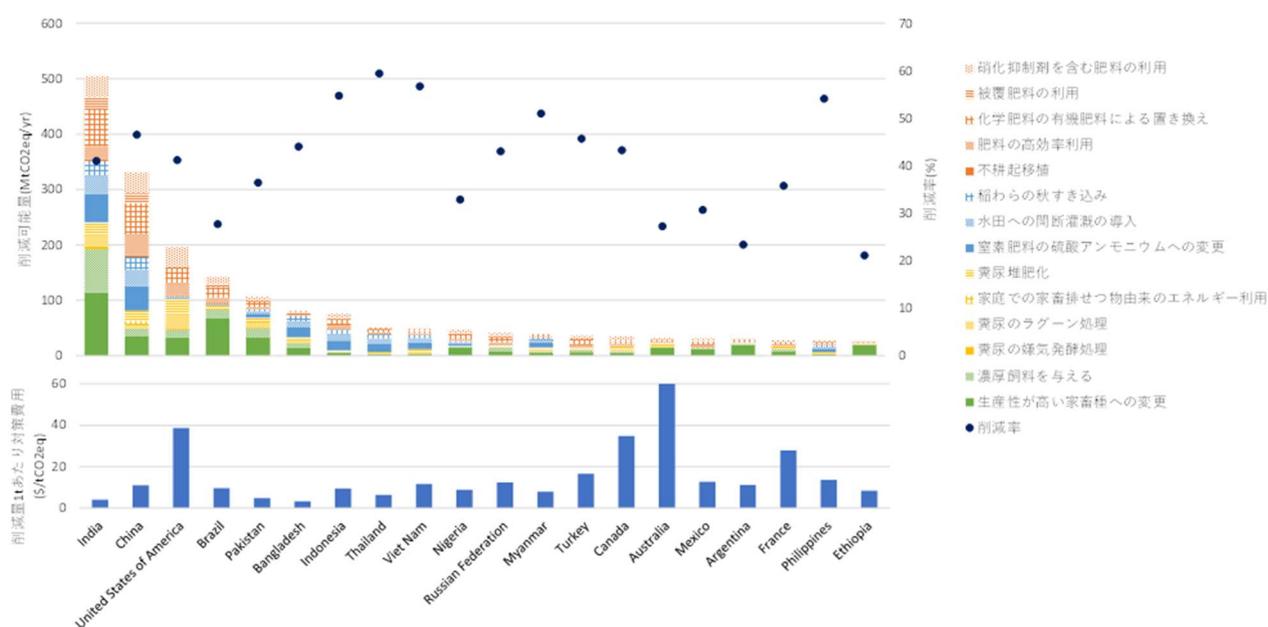


図 3-8 2050 年における対策技術別削減可能量および削減量 1t あたり対策費用 (上位 20 カ国)

図3-9 aは縦軸を2050年における削減率、横軸を削減量1トンあたりの対策費用とした全世界190か国の散布図である。これより地域や国ごとの特徴を考察する。アジアの特徴はやはり稲作からの削減が大きいことである。表1の削減技術データに示したように、稲作部門の対策技術は他部門の対策技術と比較して初期費用や維持管理費がかからない、あるいは安いかつ削減率も50-70%と比較的高い技術であることから、稲作部門での削減は全体的なコスト、削減量1トンあたりの対策費用を抑えることが可能であり、削減率も高くなると考えられる。OECD・EU加盟国は削減可能量に対して対策費用が高い。これは、他地域と比較して糞尿管理部門での削減が大きいことが要因であると考えられる。糞尿管理部門の対策技術である「糞尿のラグーン処理」や「糞尿の嫌気発酵処理」は初期費用がかなり高いため、先進国において積極的に導入される傾向があり、かつ対策費用はGDPに比例して上がるため、全体的なコスト、削減量1トンあたりの対策費用が高くなると考えられる。しかし、上記の2つの技術の削減率は85%と高いため削減率は全世界平均と比較して高くなる。中南米地域および中東・アフリカ地域は似た傾向を持つ。両地域とも畜産物の生産頭数が多いことから家畜反芻部門からの削減が半数を占め、中でも「生産性の高い家畜種への変更」による削減効果が大きい。しかし、途上国の多い地域であることからコストのかかる対策技術は選択されず、糞尿管理からの削減が少ないことが全体的なコスト、削減量1トンあたりの対策費用が低い要因であると考えられる。また、家畜反芻部門の対策技術は他部門と比較して削減率が低いものが多いため、両地域とも削減率が低い傾向にある。

以上より、カーボンニュートラル目標達成に貢献するには、削減可能量に対して対策費用を抑えることが可能なアジア地域で削減対策を実施することが重要であると考えられる。中でもインド、中国、パキスタンの3カ国のみでアジアの総削減量の70%を占めることから、これらの国で費用対効果の高い稲作部門での対策技術に力を入れることが経済的にも有効であると考えられる。

図3-9 bは190か国の1tあたりの対策費用と累積削減可能量をプロットしており、1tあたりの対策費用に対する総削減量や、対策費用の低い順に対策を行った場合の総削減可能量がわかる図となっている。具体的な数字を見ると、炭素価格を20\$/tCO₂以下に設定したときの削減可能量はアジアが最も大きく約1350MtCO₂eq、次いで中東・アフリカ地域が350MtCO₂eq、中南米地域が300MtCO₂eq、旧ソ連地域が100MtCO₂eq、OECD・EU加盟国が50MtCO₂eqであることが読み取れる。中でもアジアで1tあたり対策費用を10\$としたとき、16か国で910MtCO₂eq削減可能となり、これは全世界総削減可能量の35%を占める。また、削減量1tあたりの対策費用が低い順に5か国(スリランカ、モルディブ、バングラデシュ、ブータン、インド)で対策を行うと600MtCO₂eq削減可能となり、これは全世界総削減量の23%を占める値となることがわかる。

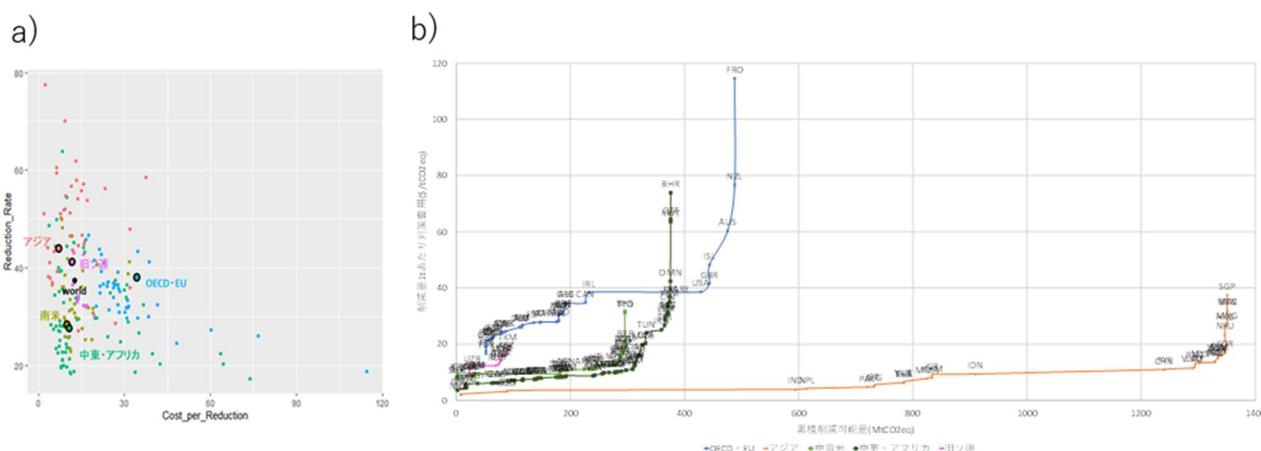


図 3- 9 a)削減率および削減量 1 トンあたりの対策費用散布図(2050 年、 全世界 190 各国)、b) 累積削減量と削減量 1 トンあたりの対策費用 (2050 年、 全世界 190 各国)

本研究では以下の結論を得た。第一に、農畜産業部門由来のGHG排出量について、対策を実施しないBaUシナリオでは右肩上がりで増加し、2050年には7000MtCO₂eqとなる想定であるのに対し、対策を実施するCMシナリオでは対策を導入する2030年以降減少し、2050年には4400MtCO₂eqとなる。これより2050年には排出量の37%に相当する2600MtCO₂eqの削減が見込まれることが明らかとなった。

第二に、2050年における世界全体での総削減対策費用は約347億\$となり、これは同年の全世界のGDPの0.02%に相当する。削減量1トンあたりの対策費用は世界平均13\$/tCO₂eqである。

第三に、削減可能量の大きい対策技術は、家畜反芻部門における「生産性が高い家畜種への変更」が660MtCO₂eq、次いで農耕地土壌部門における「化学肥料の有機肥料による置き換え」が350MtCO₂eqとなった。費用対効果の高い技術は、稲作部門の「窒素肥料の硫酸アンモニウムへの変更」が0.1\$/tCO₂eq、次いで同じく稲作部門の「稲わらの秋すきこみ」が0.2\$/tCO₂eqとなった。

第四に、2050年における削減可能量を地域別にみるとOECD・EU加盟国で490MtCO₂eq、旧ソ連周辺国で90MtCO₂eq、アジアで1400MtCO₂eq、中東・アフリカで380MtCO₂eq、中南米で300MtCO₂eqとなった。OECD・EU加盟国では糞尿管理、旧ソ連周辺国では農耕地土壌、アジアでは稲作、中東・アフリカおよび中南米地域では家畜反芻部門での削減が大きくなる傾向がみられた。カーボンニュートラル目標達成に貢献するには、費用対効果の高い稲作部門での削減効果が大きく、削減可能量に対して対策費用を抑えることが可能なアジア地域で削減対策を実施することが有効であると考えられる。

(3-3) 農畜産業の生産と消費段階における温室効果ガス排出削減の推計

図3-10 aより、2050年における世界全体での農畜産部門のGHG排出削減率は生産側のみを考慮したシナリオで50.2% (対策なしシナリオ比) に対し、生産と消費側両方を考慮したシナリオで69.9% (対策なしシナリオ比) となった。2050年時点のCMシナリオでの削減量は3444MtCO₂で、家畜反芻と農耕地土壌での削減が全削減量の80%近くを占める (図3-10 b)。一方、DEM_CMシナリオでは2050年の全削減量は4792 MtCO₂eq/年で、そのうち52% (2514MtCO₂eq/年) は消費側での削減、残りは生産側での削減となった (図3-10 c)。具体的には、2050年において家畜反芻では797MtCO₂eq/年、糞尿管理は195MtCO₂eq/年、稲作は350MtCO₂eq/年、農耕地土壌は936MtCO₂eq/年の削減ポテンシャルとなった。これは農畜産物の消費側における取組みが20%(対策なしシナリオ比)追加的に排出削減をもたらし、ネットゼロの達成において重要な役割を果たすことを示唆している。

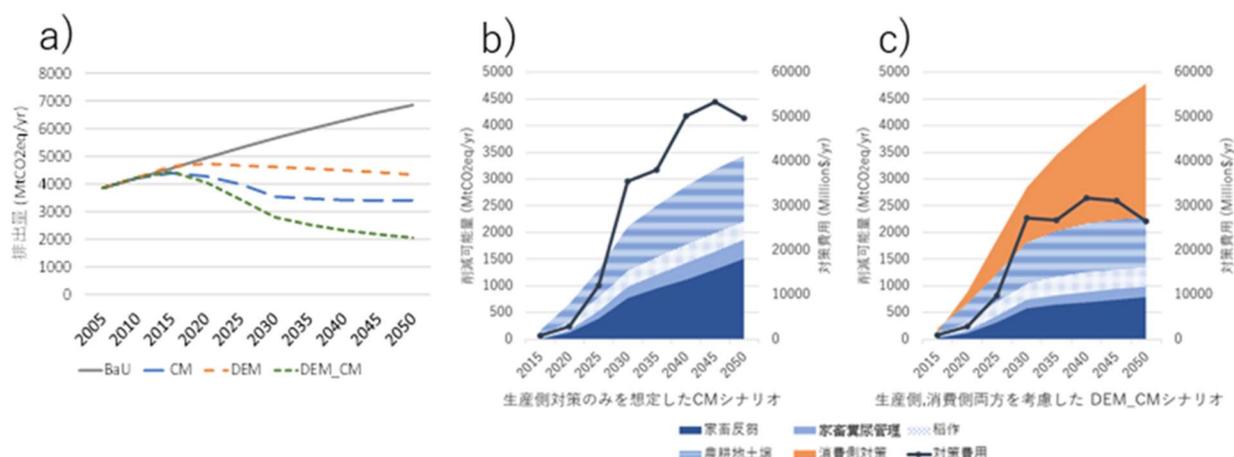


図 3-10 a)シナリオ別農畜産業由来の GHG 排出量推移、b)生産側対策のみを想定した CM シナリオ、c)生産側、消費側両方を考慮した DEM_CM シナリオそれぞれにおける農畜産業部門の排出削減可能量及び削減対策費用推移比較

次に図3-11に生産者、消費側両方で対策を行った場合の2050年における地域別排出削減可能量を、表3-2に世界全体の排出源別排出削減可能量及び削減対策別の削減可能量を示す。図3-11から、全削減可能量をみると、アフリカで840MtCO₂eq/年と最も大きく、次いでインドの817MtCO₂eq/年、中国の490MtCO₂eq/年と続き削減効果が高くなっていることがわかる。削減対策技術ごとにみると、世界全体では生産性の高い家畜種への変更(797MtCO₂eq/年)や化学肥料の有機肥料による置き換え(356MtCO₂eq/年)が大きな割合を占めている(表3-2)。地域別でみると、稲策が盛んなアジア地域では水田における削減対策効果が生産側での削減量の57%と大きく、畜産業が盛んな南米、インドなどでは畜産物の生産に関わる対策がそれぞれ生産側での削減量の58%、48%を占め、大きな削減効果が示された。また、畜産物の消費制限による効果は一人当たりの畜産物消費量は比較的小さいが人口が多いアフリカ・インドなどで高く、これは一人当たりの畜産物消費量が多い先進国の効果を上回る結果となった。このことから食料消費に関わる取組みの効果はその地域の消費量よりも人口に強く依存するとも言える。

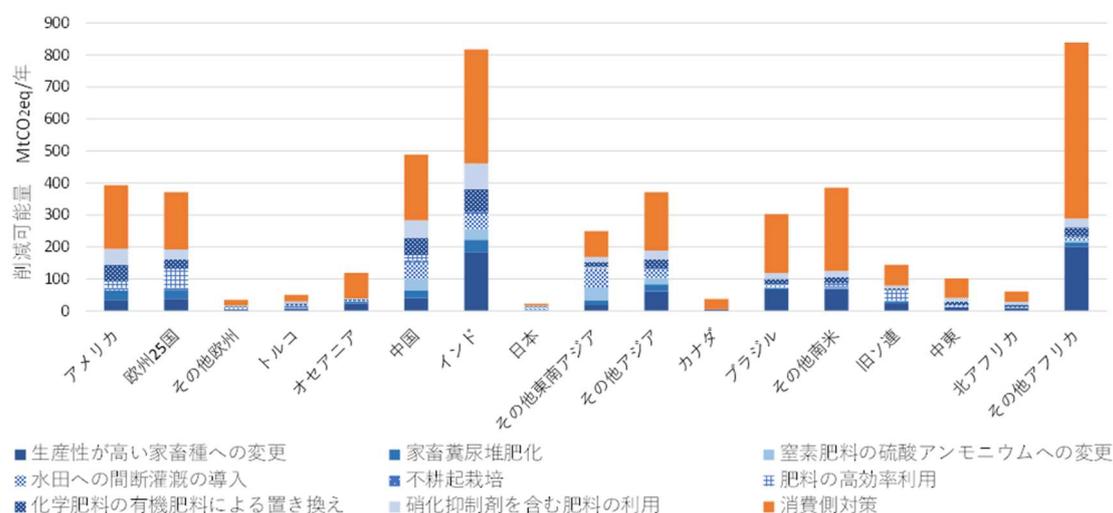


図 3-11 2050 年における生産、消費側での対策による地域別農畜産業部門由来の排出削減可能量

表 3-2 2050 年の世界全体における生産、消費側での削減対策別の削減可能量

	排出源	削減可能量 (MtCO ₂ eq/yr)	削減対策	削減可能量内訳 (MtCO ₂ eq/yr)
生産側	家畜反芻	796.7	生産性が高い家畜種への変更	796.7
	家畜糞尿管理	194.8	糞尿堆肥化	194.8
	稲作	392.1	窒素肥料→硫酸アンモニウム	146.0
			水田への間断灌漑の導入	204.4
	農耕地土壌	894.4	不耕起栽培	41.6
			肥料の高効率利用	172.8
			化学肥料→有機肥料	356.3
			硝化抑制剤を含む肥料の利用	365.2
消費側		2514.1		

本研究では以下の結論を得た。

- 2050年において各シナリオにおける排出量の想定は以下の通りである。生産側で対策を行うと想定した場合(CMシナリオ)では3412MtCO₂eq/年(2050年BaU比50.2%減)、消費側で対策を行うと想定した場合(DEMシナリオ)では4311MtCO₂eq/年(2050年BaU比36.7%減)、生産側、消費側両方を考慮した場合(DEM_CMシナリオ)では2063MtCO₂eq/年(2050年BaU比69.9%減)となった。このことから生産者側に加えて消費者側での対策を実施することで2050年対策なしシナリオ比で20%近く追加的に削減できることが示された。
- 生産側、消費側両方で対策を行う(DEM_CMシナリオ)と想定した場合、2050年世界全体での削減可能量は4792MtCO₂eq/年、削減率は69.9%(2050年のBaUシナリオ比)となった。2050年における温室効果ガスの削減に有効な対策としては、家畜反芻での生産性の高い家畜種への変更(797MtCO₂eq/年)や農耕地土壌での化学肥料の有機肥料による置き換え(356MtCO₂eq/年)があげられる。地域レベルではアジア地域では水田での対策効果、南米やインドでは畜産物生産に関する対策効果が高くなるなどの地域的な特徴が確認された。
- 畜産物の消費制限による効果はその地域の畜産物の消費量よりも人口に強く依存することが示唆された。すなわち、一人当たりの畜産物消費量は比較的少ないが人口が多いアフリカ・インドなどで高く、これは一人当たりの畜産物消費量が多い先進国の効果を上回る結果となった。このことから畜産物消費が比較的少ない途上国でどのように消費制限や食内容の変更を実施していくかが今後の課題となると言える。

本研究では、消費側の対策として全畜産物の消費を制限すると想定した。これは我々消費者の食生活が環境へもたらす影響を意識していくことで実現可能となるであろう。畜産物の消費を減らすことは健康に良いともされており、世界自然保護基金(World Wide Fund for Nature : WWF)14において、健康で持続可能な食事として、加工肉などの畜産物の消費を減らす代わりに、大豆や豆類、ナッツ類等の肉の代替品の消費を増やすなどの例が挙げられている。各個人が日々の食生活を見直し、畜産物の消費を減らすことでAFOLU部門が環境へもたらす負担を少しでも削減していくことが可能となるだろう。しかし、食生活の内容の変化は温室効果ガス削減につながるだけでなく、その他多方面の環境に影響を与えることも懸念される。過度に肉食を減らすことで、幸福度が下がってしまったり、食費が上がったり、健康への被害が出るなどの負の影響も想定される。これらは今後の課題となるだろう。

次に、本研究からカーボンニュートラル目標について考える。今回2050年における世界全体での削減率は生産、消費側両方を考慮したシナリオで69.9%(2050年対策なしシナリオ比)という結果が得られた。農畜産業部門における消費側での対策は、これまで検討されてきた生産側の対策と同等の削減効果が得られることが明らかとなった。今後あらゆる部門において、温室効果ガス削減に向けた技術開発や普及が進むと考えられる生産側対策に加え、消費側、需要側の対策も考慮することでカーボンニュートラルの目標を達成することは可能となるのではないかと考える。

(3-4) 畜産物の消費制限による環境および食料システムへの影響評価

世界全体で畜産物の消費制限を行ったところ、2050年において世界のGHG排出量は約962MtCO₂eq/年減少した。同時に、牧草地面積は約399Mha減少し、森林面積は約93Mha増加し(図3-12 a)、それに伴い二酸化炭素吸収量は約236MtCO₂eq/年増加した。加えて、灌漑水量は200million m³/年減少し(図3-12 b)、窒素使用量は3百万トン窒素換算量減少した(図3-12 c)。これらのことから、畜産物の消費制限はGHGの排出量削減だけでなく、森林保全や水資源や窒素肥料削減など環境保全の観点でも便益があることが示された。

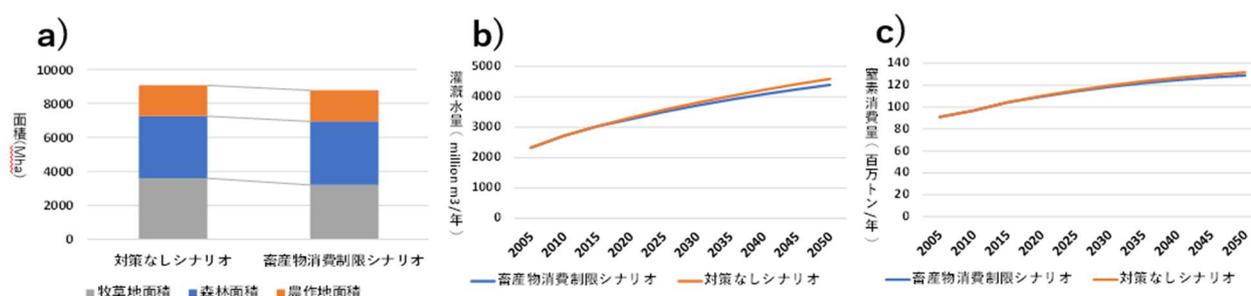


図 3-12 (図 0-12) 各シナリオにおける a) 面積利用状況変化、b) 灌漑水量推移、c) 窒素消費量推移

本研究ではまず、消費対策、生産対策、消費生産対策による世界全体の環境への影響を示す。環境への影響は、1)農畜産業由来GHG排出量、2)窒素肥料消費量、3)水消費量、4)土地利用状況の4つの項目について評価することで示す。その後、消費対策、消費対策Equ、生産対策による世界全体の飢餓リスク人口への影響を示す。特に飢餓リスク人口への影響を強く受けた4地域(中国、インド、東南アジア、アフリカ)について本章の最後に取り上げた。

次の4点のことが得られた。

第一に、GHG排出量の面における持続可能な農畜産業の生産消費のためには、農畜産業の生産より消費を見直すことがより効果的であることが示された(図3-13 a)。消費側による対策は、GHG排出量削減、水消費量削減において生産側による対策を大きく上回る結果を示した。一方で、生産側による対策の影響は極めて限定的であることから、現在よりGHG排出量と水消費量削減した農畜産業を可能にするためには消費側による対策が重要であるといえる。

第二に、消費側による対策は窒素肥料消費量を増加させる恐れが示された(図3-13 b)。消費側による対策では、食事内容変更により、たんぱく源となる豆類、野菜などの需要が高まる。これらの需要を満たすために農地面積を拡大し、生産量を増加させる。そのため、農地面積が増加することにより窒素消費量が増加している。一方で、畜産物の消費量は減少し、牧草地面積は減少する。

第三に、消費側による対策は飢餓リスクを高める恐れが示された(図3-14 a)。消費側の対策として取り入れた食料廃棄量削減には飢餓リスク人口を減少させる効果があるが、それ以上に食事内容の変更により、現在飢餓が報告されている地域の飢餓リスク人口を増加させる影響がある。しかし、食料分配の公平性を改善することで、食事内容の変更により増加する飢餓リスク人口の増加を抑制することが可能であることが明らかとなった。

第四に、消費側による対策を行う場合の飢餓リスク人口は中国、インド、東南アジア、アフリカの4地域が占める割合が高いが、食料分配の公平性を改善することで、東南アジアを除く地域で飢餓リスク人口が大幅に減少する(図3-14 b)。東南アジアについても食料分配の公平性を改善することで、飢餓リスク人口が減少するが、消費側の対策を行うことにより、2050年において約2億人の飢餓リスク人口が発生する恐れがある。東南アジアは他の3地域に比べ、過剰摂取人口が少ないため、食料分配性を向上させることによる影響が少なかったことが考えられる。

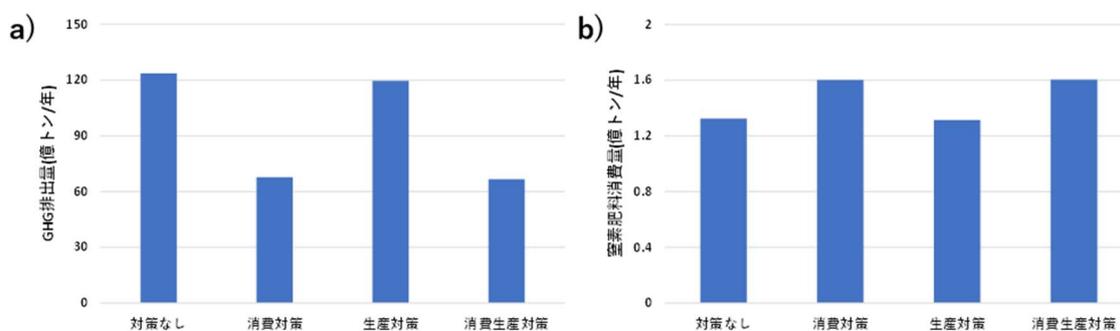


図 3-13 2050年 世界の異なるシナリオにおける a)農畜産業由来 GHG 排出量、b)窒素肥料消費量

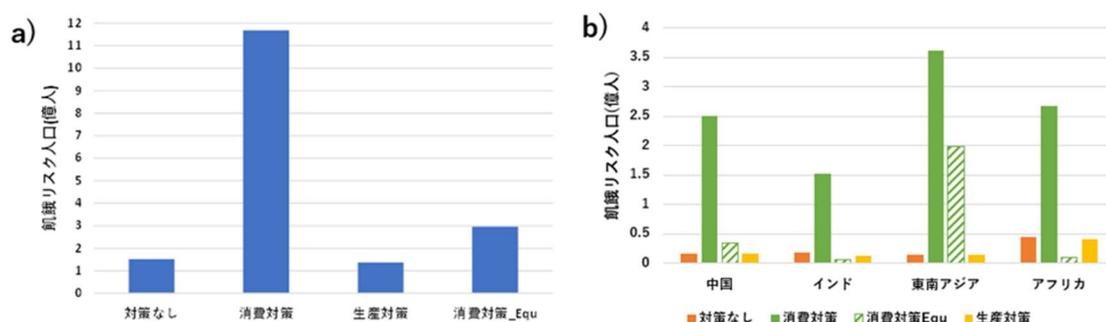


図 3-14 2050年 a)世界全体の飢餓リスク人口、b)4地域別の飢餓リスク人口

本研究は次の点において意義があると言える。

第一に、EAT-Lancet委員会が推奨する食事内容への移行において地球の環境の持続可能性の観点から留意が必要な点について明らかにした。まず、全体の作物生産量は減少するが、たんぱく資源となる豆類、野菜などの生産量の増加が必要である。そのため、農地面積が拡大し、窒素肥料消費量は増加する点に留意すべきである。

第二に、現在飢餓が報告されている地域については食事内容への移行をすることで飢餓リスク人口を増加させる恐れがあることを明らかにした。このような地域では、食料分配の公平性を改善するなどの取り組みを共に行うことで飢餓リスク人口の増加を抑えることが可能である。しかし、今回想定した食料分配性の向上が現実世界において適応可能であるかの検証は不十分であり、本研究の課題といえる。

5. サブテーマ3 研究目標の達成状況

○計画の進捗状況: [目標を上回る成果をあげた]

まず研究目標の①と②については着実に実施した。①については当初の年度計画に沿って、多様な食文化や社会属性を考慮する世界190カ国・20財を対象とする食料消費モデルを開発し、それをを用いて将来の食料消費と飢餓リスク、環境への影響の評価を実施した。また、これと並行して、農業起源温室効果ガス削減可能量を推計するモデル (AFOLUBモデル) の開発と、それを経済モデルと組み合わせて世界各国および地域別に適用することで農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する分析を行い、査読付き論文(濱本ら, 2022, 平野ら, 2022)として発表した。

②については、農畜産業の生産と消費段階にそれぞれにおける取り組みによる農畜産業由来温室効果ガス排出削減効果に関して分析を行った(瓜本ら, 2021)。これに加えて、経済モデルを用いて食事内容の変化による各種環境影響等を分析した(小野ら, 2021)。いずれも査読付き論文として発表した。

以上のように、研究計画に沿った取り組みを実施し、成果創出が出来ていることに加え、学界・社会への影響力の強い学術誌への投稿・掲載が出来ている。受理・掲載済の査読論文数は24編 (うち英文12編) であり、その中にはNature Climate Change誌、Nature Sustainability誌などのNature姉妹誌での発表論文は6編含まれている。これらのハイインパクト雑誌での論文は、サブテーマリーダーの長谷川が主執筆者を務めたIPCCの第6次報告書にも引用されている。さらに、本研究成果についてメディア等を通じて成果発信を多く行っており、社会への貢献ができています。また、本研究成果を踏まえた受賞には、第5回輝く女性研究者賞 (ジュニアシダ賞)、3年連続のHighly Cited Researchersなど、世界・日本トップクラスの表彰が含まれる。

以上のように、研究計画に沿った取り組みを実施し、研究目標を達成したうえで、さらに追加的に研究コミュニティや政策として重要な成果を出していることをふまえ、「目標を大きく上回る成果をあげた」と自己評価する。

III. 研究成果の発表状況の詳細

※この項目の成果番号は通し番号です。

(1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	55
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	30
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	98
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	11
マスコミ等への公表・報道等：	50
研究成果による受賞：	20
その他の成果発表：	25

(2) 誌上発表

<査読付き論文>

成果番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Fujimori, S., Krey, V., van Vuuren, D., Oshiro, K., Sugiyama, M., Chunark, P., Limmeechokchai, B., Mittal, S., Nishiura, O., Park, C., Rajbhandari, S., Silva Herran, D., Tu, T.T., Zhao, S., Ochi, Y., Shukla, P.R., Masui, T., Nguyen, P.V.H., Cabardos, A.-M., Riahi, K., (2021) A framework for national scenarios with varying emission reductions. <i>Nature climate change</i> 11(6), 472-480, doi:10.1038/s41558-021-01048-z.
2	Harmen, M., Kriegl, E., van Vuuren, D.P., van der Wijst, K.-I., Luderer, G., Cui, R., Dessens, O., Drouet, L., Emmerling, J., Morris, J.F., Fosse, F., Fragkiadakis, D., Fragkiadakis, K., Fragkos, P., Fricko, O., Fujimori, S., Gernaat, D., Guivarch, C., Iyer, G., Karkatsoulis, P., Keppo, I., Keramidas, K., Köberle, A., Kolp, P., Krey, V., Krüger, C., Leblanc, F., Mittal, S., Paltsev, S., Rochedo, P., van Ruijven, B.J., Sands, R.D., Sano, F., Streffer, J., Arroyo, E.V., Wada, K., Zakeri, B., (2021) Integrated assessment model diagnostics: key indicators and model evolution. <i>Environmental Research Letters</i> 16(5), 054046, doi:10.1088/1748-9326/abf964.
3	佐々木克哉, 藤森真一郎, 長谷川知子, 大城賢, (2021) 日本における所得階層を考慮した炭素税の家計消費への影響. <i>土木学会論文集G (環境)</i> 77(5), I_263-I_273, doi:10.2208/jscej.77.5_I_263.

4	西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2021) 世界およびアジアにおける二酸化炭素の地下貯留容量を考慮した気候変動緩和策の評価. 土木学会論文集G (環境) 77(5), I_251-I_262, doi:10.2208/jscejer.77.5 I 251.
5	Köberle, A.C., Daioglou, V., Rochedo, P., Lucena, A.F.P., Szklo, A., Fujimori, S., Brunelle, T., Kato, E., Kitous, A., van Vuuren, D.P., Schaeffer, R., (2022) Can global models provide insights into regional mitigation strategies? A diagnostic model comparison study of bioenergy in Brazil. Climatic Change 170(1-2), 2, doi:10.1007/s10584-021-03236-4.
6	Leblanc, F., Bibas, R., Mima, S., Muratori, M., Sakamoto, S., Sano, F., Bauer, N., Daioglou, V., Fujimori, S., Gidden, M.J., Kato, E., Rose, S.K., Tsutsui, J., van Vuuren, D.P., Weyant, J., Wise, M., (2022) The contribution of bioenergy to the decarbonization of transport: a multi-model assessment. Climatic Change 170(3), 21, doi:10.1007/s10584-021-03245-3.
7	Zhao, S., Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K., Sasaki, K., (2022) Poverty and inequality implications of carbon pricing under the long-term climate target. Sustainability Science 17(6), 2513-2528, doi:10.1007/s11625-022-01206-y.
8	関沢賢, 渡邊諒一, 藤森真一郎, 大城賢, 上田佳代, (2022) 全世界を対象とした異なるPM2.5由来の健康影響評価関数に関する研究. 土木学会論文集G (環境) 78(5), I_239-I_250, doi:10.2208/jscejer.78.5 I 239.
9	西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2022) 二酸化炭素直接回収技術を考慮した応用一般 均衡モデルの開発および気候変動緩和策の評価. 土木学会論文集G (環境) 78(5), I_417-I_427, doi:10.2208/jscejer.78.5 I 417.
10	渡邊諒一, 上谷明生, 関沢賢, 藤森真一郎, 長谷川知子, 大城賢, (2022) 世界全域を対象とした水平解像度を用いた大気汚染の影響評価. 土木学会論文集G (環境) 78(5), I_251-I_262, doi:10.2208/jscejer.78.5 I 251.
11	筒井紀希, 西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2022) 各国の2030年温室効果ガス排出目標更新を踏まえた排出量取引の有効性. 土木学会論文集G (環境) 78(5), I_405-I_416, doi:10.2208/jscejer.78.5 I 405.
12	藤森真一郎, 大橋春香, 越智雄輝, 長谷川知子, Buyaki, N.R., 松井哲哉, 平田晶子, 高橋潔, 土屋一彬, (2022) 生態系保全のための農業・食料消費・土地利用管理システムの変革. 土木学会論文集G (環境) 78(5), I_39-I_50, doi:10.2208/jscejer.78.5 I 39.
13	Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K., Zhao, S., Sasaki, K., Takakura, J., Takahashi, K., (2023) Potential side effects of climate change mitigation on poverty and countermeasures. Sustainability Science 18, 2245-2257, doi:10.1007/s11625-023-01369-2.
14	Fujimori, S., Oshiro, K., Hasegawa, T., Takakura, J., Ueda, K., (2023) Climate change mitigation costs reduction caused by socioeconomic-technological transitions. npj Climate Action 2(1), 9, doi:10.1038/s44168-023-00041-w.
15	Limmeechokchai, B., Rajbhandari, S., Pradhan, B.B., Chunark, P., Chaichaloempreecha, A., Fujimori, S., Oshiro, K., Ochi, Y., (2023) Scaling up climate ambition post-2030: a long-term GHG mitigation analysis for Thailand. Climate Policy 23(2), 168-183, doi:10.1080/14693062.2022.2126813.
16	Silva Herran, D., Ashina, S. 2023. Characterization of the proximity to urban areas of the global energy potential of solar and wind energies. Environmental Research Communications. 5 071001. Doi:10.1088/2515-7620/ace2b6
17	丸田有美, 藤森真一郎, 高倉潤也, 大城賢, 高橋潔, 長谷川知子, (2023) 世界を対象とした気候変動および気候変動緩和策による貧困影響の評価. 土木学会論文集 79(27), doi:10.2208/jscej.23-27040.
18	吉田大輝, 筒井紀希, 西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2023) 全世界を対象とした木材による鉄鋼・セメントの代替が気候変動緩和に与える影響の評価. 土木学会論文集 79(27), doi:10.2208/jscej.23-27030.
19	山崎航我, 藤森真一郎, 大城賢, 上谷明生, 関沢賢, (2023) 世界規模のNOx 排出削減がもたらす気候, 健康, 農業への影響に関する研究. 土木学会論文集 79(27), doi:10.2208/jscej.23-27011.
20	西本裕美, 藤森真一郎, (2023) 歴史的に観察された変化との対比に基づく長期気候緩和シナリオの評価方法. 土木学会論文集 79(8), doi:10.2208/jscej.22-00209.

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
21	松井そら, 大城賢, 藤森真一郎, 西浦理, (2021) 交通部門における技術・社会の変容が気候変動政策へ及ぼす影響. 土木学会論文集G (環境) 77(5), I_275-I_283, doi:10.2208/jscej.77.5 I 275.
22	大城賢, 藤森真一郎, (2021) パリ協定CO ₂ 排出削減目標の達成における水素エネルギーキャリアの役割の評価. 土木学会論文集G (環境) 77(5), I_197-I_207, doi:10.2208/jscej.77.5 I 197.
23	藤本穂乃佳, 白木裕斗, 村上一真, (2021) 住宅に対する住民評価の要因分析 - 省エネ性の影響 -, 土木学会論文集G (環境) 77(5), I_331-I_339, doi:10.2208/jscej.77.5 I 331.
24	Baptista, L.B., Schaeffer, R., van Soest, H.L., Fragkos, P., Rochedo, P.R.R., van Vuuren, D., Dewi, R.G., Iyer, G., Jiang, K., Kannavou, M., Macaluso, N., Oshiro, K., Park, C., Reedman, L.J., Safonov, G., Shekhar, S., Siagian, U., Surana, K., Qimin, C., (2022) Good practice policies to bridge the emissions gap in key countries. <i>Global Environmental Change</i> 73, doi:102472, 10.1016/j.gloenvcha.2022.102472.
25	Oshiro, K., Fujimori, S., (2022) Role of hydrogen-based energy carriers as an alternative option to reduce residual emissions associated with mid-century decarbonization goals. <i>Applied Energy</i> 313, 118803, doi:10.1016/j.apenergy.2022.118803.
26	森翔太郎, 西浦理, 大城賢, 藤森真一郎, (2022) 世界を対象としたネットゼロ排出シナリオにおける合成燃料の役割. 土木学会論文集G (環境) 78(5), I_451-I_461, doi:10.2208/jscej.78.5 I 451.
27	大城賢, 藤森真一郎, (2022) 日本の2050年ネットゼロ排出目標における残存排出量削減方策のシナリオ分析. 土木学会論文集G (環境) 78(5), I_429-I_439, doi:10.2208/jscej.78.5 I 429.
28	中間 蒼, 白木 裕斗, (2022) バイオマスエネルギーに着目した自治体レベルでのCO ₂ 大幅削減シナリオの検討 - 岡山県真庭市を対象として -, 土木学会論文集G (環境) 78(5), I_441-I_449, doi:10.2208/jscej.78.5 I 441.
29	國武星佑, 白木裕斗, 吉川直樹, (2022) 穀殻ガス化発電システムのライフサイクルアセスメント, 土木学会論文集G (環境) 78(5), I_87-I_94, doi:10.2208/jscej.78.5 I 87.
30	Ju, Y., Sugiyama, M., Shiraki, H., (2023) Perceived feasibility and potential barriers of a net-zero system transition among Japanese experts. <i>Commun Earth Environ</i> 4, 431. Doi:10.1038/s43247-023-01079-8.
31	Oshiro, K., Fujimori, S., Hasegawa, T., Asayama, S., Shiraki, H., Takahashi, K., (2023) Alternative, but expensive, energy transition scenario featuring carbon capture and utilization can preserve existing energy demand technologies. <i>One Earth</i> 6(7), 872-883, doi:10.1016/j.oneear.2023.06.005.
32	伊藤悠太, 白木裕斗, (2023) 市区町村スケールの脱炭素シナリオにおける合成燃料の導入可能性の検討 - 北海道釧路市を対象として -, 土木学会論文集 79(27), doi:10.2208/jscej.23-27038.
33	高鍋彩, 白木裕斗, (2023) エネルギー教育の方法と児童の知識習得・省エネ行動との関係に関する研究, 土木学会論文集 79(5), doi:10.2208/jscej.22-00270
34	森翔太郎, 大城賢, 藤森真一郎, (2023) 世界を対象としたエネルギーシステムモデルによる化学部門のCO ₂ 排出削減策の評価. 土木学会論文集 79(27), doi:10.2208/jscej.23-27039.
35	齋藤啓貴, 森翔太郎, 大城賢, 藤森真一郎, (2023) 気候変動が変動性再生可能エネルギーの供給ポテンシャルに与える影響の評価. 土木学会論文集 79(27), doi:10.2208/jscej.23-27009.
36	Oshiro, K., Fujimori, S., (2024) Limited impact of hydrogen co-firing on prolonging fossil-based power generation under low emissions scenarios. <i>Nature Communications</i> 15(1), 1778, doi:10.1038/s41467-024-46101-5.

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文
----------	-----------------

37	Ai, Z., Hanasaki, N., Heck, V., Hasegawa, T., Fujimori, S., (2021) Global bioenergy with carbon capture and storage potential is largely constrained by sustainable irrigation. <i>Nature Sustainability</i> 4(10), 884-891, doi:10.1038/s41893-021-00740-4.
38	Hasegawa, T., Fujimori, S., Frank, S., Humpenöder, F., Bertram, C., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Gusti, M., Harmsen, M., Keramidias, K., Ochi, Y., Oshiro, K., Rochedo, P., van Ruijven, B., Cabardos, A.-M., Deppermann, A., Fosse, F., Havlik, P., Krey, V., Popp, A., Schaeffer, R., van Vuuren, D., Riahi, K., (2021) Land-based implications of early climate actions without global net-negative emissions. <i>Nature Sustainability</i> 4(12), 1052–1059 (2021), doi:10.1038/s41893-021-00772-w.
39	Hasegawa, T., Sakurai, G., Fujimori, S., Takahashi, K., Hijioka, Y., Masui, T., (2021) Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs. <i>Nature Food</i> 2, 587-595, doi.org:10.1038/s43016-021-00335-4.
40	Riahi, K., Bertram, C., Huppmann, D., Rogelj, J., Bosetti, V., Cabardos, A.-M., Deppermann, A., Drouet, L., Frank, S., Fricko, O., Fujimori, S., Harmsen, M., Hasegawa, T., Krey, V., Luderer, G., Paroussos, L., Schaeffer, R., Weitzel, M., van der Zwaan, B., Vrontisi, Z., Longa, F.D., Després, J., Fosse, F., Fragkiadakis, K., Gusti, M., Humpenöder, F., Keramidias, K., Kishimoto, P., Kriegler, E., Meinshausen, M., Nogueira, L.P., Oshiro, K., Popp, A., Rochedo, P.R.R., Ünlü, G., van Ruijven, B., Takakura, J., Tavoni, M., van Vuuren, D., Zakeri, B., (2021) Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot. <i>Nature Climate Change</i> 11, 1063-1069, doi:10.1038/s41558-021-01215-2.
41	伊藤涼太郎, 長谷川知子, 藤森真一郎, 花崎直太, (2021) 世界を対象とした第二世代バイオマスエネルギーポテンシャル量の推計とそれに伴う水消費量・窒素肥料必要量の環境影響. <i>土木学会論文集G (環境)</i> 77, I_191-I_196, doi:10.2208/jscejer.77.5_I_191.
42	桑葉裕斗, 長谷川知子, 藤森真一郎, スィルバエランディエゴ, (2021) 世界における将来の土地利用変化を考慮した風力・太陽光エネルギーポテンシャル推計. <i>土木学会論文集G(環境)</i> 77(5), I_183-I_189, doi:10.2208/jscejer.77.5_I_183.
43	和田悠暉, 長谷川知子, (2021) 日米の食の変化を考慮した農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する研究. <i>土木学会論文集G (環境)</i> 77, I_177-I_182, doi:10.2208/jscejer.77.5_I_177.
44	Nyairo, R., Hasegawa, T., Fujimori, S., Wu, W., Takahashi, K., (2022) Socio-economic trajectories, urban area expansion and ecosystem conservation affect global potential supply of bioenergy. <i>Biomass and Bioenergy</i> 159, 106426, doi:10.1016/j.biombioe.2022.106426.
45	Rose, S.K., Popp, A., Fujimori, S., Havlik, P., Weyant, J., Wise, M., van Vuuren, D., Brunelle, T., Cui, R.Y., Daioglou, V., Frank, S., Hasegawa, T., Humpenöder, F., Kato, E., Sands, R.D., Sano, F., Tsutsui, J., Doelman, J., Muratori, M., Prudhomme, R., Wada, K., Yamamoto, H., (2022) Global biomass supply modeling for long-run management of the climate system. <i>Climatic Change</i> 172, 3, doi:10.1007/s10584-022-03336-9.
46	伊藤涼太郎, 長谷川知子, 藤森真一郎, (2022) 食内容を考慮したバイオマスエネルギーポテンシャル量の推計. <i>土木学会論文集G (環境)</i> 78(5), I_79-I_85, doi:10.2208/jscejer.78.5_I_79.
47	瓜本千紗, 藤森真一郎, 長谷川知子, (2022) 世界を対象とした農畜産業の生産と消費段階における温室効果ガス排出削減に関する研究. <i>土木学会論文集G (環境)</i> 78(5), I_463-I_471, doi:10.2208/jscejer.78.5_I_463.
48	高橋潔, (2022) 気候変動影響からみた日本の脱炭素社会構築：相互作用に注目して, <i>地球環境</i> , 27(2), 161-168.
49	小野泰照, 長谷川知子, 藤森真一郎, (2022) 畜産物の消費制限による環境および食料システムへの影響評価. <i>土木学会論文集G (環境)</i> 78(5), I_63-I_70, doi:10.2208/jscejer.78.5_I_63.
50	黒川和馬, 長谷川知子, 藤森真一郎, 山崎航我, (2023) 気候変動緩和策が対流圏オゾン変化を通じて食料消費および飢餓リスク人口にもたらす影響評価. <i>土木学会論文集</i> 79(27), doi:10.2208/jscej.23-27013.
51	増井利彦, 高橋潔, (2023) 脱炭素社会の実現に向けたモデル研究の状況と展望アジア太平洋統合評価モデルAIMを通じた考察, <i>環境科学会</i> 36(2), 83-93, doi:10.11353/sesj.36.83.

52	平原颯太郎, 関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 伊藤昭彦, 長谷川知子, (2023) 世界を対象とした対流圏オゾンによる植生のCO ₂ 吸収量への影響評価と気候変動緩和策への含意. 土木学会論文集 79(27), doi:10.2208/jscej.23-27012.
53	平野拳士朗, 瓜本千紗, 長谷川知子, (2023) アジア諸国を対象とした農畜産業由来の温室効果ガス排出量削減に関する研究. 土木学会論文集 79(27), doi:10.2208/jscej.23-27032.
54	濱本拓希, 長谷川知子, 瓜本千紗, (2023) 中南米地域を対象とした農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する研究. 土木学会論文集 79(27), doi:10.2208/jscej.23-27031.
55	杉山昌弘, 筒井純一, 高橋潔, (2024) 分野横断型シナリオ研究: 過去, 現在, 未来, 日本気象学会機関紙「天気」, 71(2), 57-68, doi:10.24761/tenki.71.2_57.

<査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

成果番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
56	Zhao, S., Fujimori, S., Oshiro, K., Hasegawa, T., (2021) Poverty and inequality implications of carbon pricing under the long-term climate target. Environmental & Sanitary Engineering Research 35(3), 135-137.
57	佐々木克哉, 藤森真一郎, 大城賢, 長谷川知子, (2021) 家計の消費行動変化を考慮した日本における炭素税の異なる所得階層への影響. 環境衛生工学研究 35(3), 141-143.
58	西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2021) 世界およびアジアにおける炭素地下貯留技術の物理的制約を考慮した気候変動緩和策の評価. 環境衛生工学研究 35(3), 144-146.
59	藤森真一郎, (2021) 気候変動緩和策評価のための統合評価モデル. 京都大学土木学会会報 59, 75-76.
60	ZHAO, S., Fujimori, S., OSHIRO, K., Sasaki, K., Hasegawa, T., (2022) Household energy security under stringent climate change mitigation goals of the Paris Agreement. Proceedings of the 30th Symposium on Global Environment, 83-88.
61	ZHAO, S., Fujimori, S., OSHIRO, K., Sasaki, K., Hasegawa, T., (2022) Household energy security under stringent climate change mitigation. Environmental & Sanitary Engineering Research 36(3), 60-62.
62	上谷明生, 関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 長谷川知子, 渡邊諒一, (2022) 世界全域を対象とした異なる水平解像度を用いた大気汚染の影響評価. 環境衛生工学研究 36(3), 51-53.
63	筒井紀希, 西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2022) 新しい国別排出目標下での排出権取引の有効性. 環境衛生工学研究 36(3), 69-71.
64	藤森真一郎, (2022) 気候緩和策研究の現状と課題. 環境衛生工学研究 36(3), 5-8.
65	Fujimori, S., Nishiura, O., Oshiro, K., Hasegawa, T., Shiraki, H., Shiogama, H., Takahashi, K., Takakura, J.y., Tsuchiya, K., Sugiyama, M., Asayama, S., (2023) Reconsidering the lower end of long-term climate scenarios. PLOS Climate 2, e0000318, doi:10.1371/journal.pclm.0000318.
66	関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 上田佳代, (2023) 異なる手法を用いた将来の全球PM2.5 および対流圏オゾン削減便益の経済価値評価, 第31回地球環境シンポジウム講演集. 土木学会 地球環境委員会, 滋賀県立大学, pp. 99-104.
67	関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 上田佳代, (2023) 将来の全球 PM2.5 および対流圏オゾン健康影響負担の経済的評価. 環境衛生工学研究 37(3), 57-59.
68	丸田有美, 藤森真一郎, 高倉潤也, 大城賢, 高橋潔, 長谷川知子, (2023) 世界を対象とした気候変動および気候変動緩和策がもたらす貧困人口への影響. 環境衛生工学研究 37(3), 74-76.
69	吉田大輝, 筒井紀希, 西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2023) 建設資材としての木材の利用促進が気候変動緩和に与える影響の評価. 環境衛生工学研究 37(3), 86-88.

70	山崎航我, 藤森真一郎, 大城賢, 上谷明生, 関沢賢, (2023) 世界を対象とした NOx 排出削減による気候、健康、農業への影響評価. 環境衛生工学研究 37(3), 54-56.
71	西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2023) 応用一般均衡モデルを用いた気候変動緩和における合成燃料の役割の分析. 環境衛生工学研究 37(3), 153-155.
72	西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2023) 脱炭素化の選択肢: 応用一般均衡モデルを用いたバイオマスと直接大気回収の比較研究, 第31回地球環境シンポジウム講演集. 土木学会 地球環境委員会, 滋賀県立大学, pp. 73-76.
73	筒井紀希, 藤森真一郎, 大城賢, (2023) 2050 年全世界ネットゼロ達成に向けた先進国の役割の評価, 第31回地球環境シンポジウム講演集. 土木学会 地球環境委員会, 滋賀県立大学, pp. 83-88.
74	藤森真一郎, (2023) 特集記事 寄附講座「住友電工グループ社会貢献基金・地球環境システム講座」の紹介. 環境衛生工学研究 37(2), 13-16.
75	平原颯太郎, 関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 伊藤昭彦, 長谷川知子, (2023) 全世界を対象とした対流圏オゾンによる植生の CO ₂ 吸収量への影響評価と気候変動緩和策の評価. 環境衛生工学研究 37(3), 83-85.

成果番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
76	松井そら, 藤森真一郎, 大城賢, 西浦理, (2021) 交通部門の社会変革が気候変動政策へ及ぼす影響, 環境衛生工学研究 35(3), 124-126.
77	関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 渡邊諒一, 上田佳代, (2022) 全世界を対象としたPM2.5由来の健康影響推計手法に関する検討. 環境衛生工学研究 36(3), 48-50.
78	森翔太郎, 西浦理, 大城賢, 藤森真一郎, (2022) 世界を対象とした2050年ネットゼロ排出達成における合成燃料の役割, 環境衛生工学研究 36(3), 66-68.
79	森翔太郎, 大城賢, 藤森真一郎, (2023) 世界を対象とした化学部門における CO ₂ 排出削減策としてのバイオマス・水素利用技術の役割. 環境衛生工学研究 37(3), 156-158.
80	筒井紀希, 藤森真一郎, 大城賢, (2023) 2050 年全世界ネットゼロ達成に向けた先進国の役割に関する研究. 環境衛生工学研究 37(3), 77-79.
81	齋藤啓貴, 森翔太郎, 大城賢, 藤森真一郎, (2023) 気候変動が太陽光および風力発電の供給ポテンシャルに与える影響の評価. 環境衛生工学研究 37(3), 80-82.

成果番号	【サブテーマ3】のその他誌上発表（査読なし）
82	桑葉裕斗, 長谷川知子, 藤森真一郎, 越智雄輝, (2022) 京都市を対象とした将来のカーボンニュートラル実現に向けたシナリオ構築(ポスター発表). 第30回地球環境シンポジウム講演集, 99-104.
83	佐々木克哉, 藤森真一郎, 大城賢, 長谷川知子, 趙詩雅, (2022) 異なる所得階層を考慮した家計の食糧需要モデルの開発, 第30回地球環境シンポジウム講演集.
84	市森将貴, 長谷川知子, 藤森真一郎, (2022) 世界を対象とした作物収量の向上が食料安全保障と環境にもたらす影響評価. 第30回地球環境シンポジウム講演集, 121-128.
85	小野泰照, 長谷川知子, 藤森真一郎, (2023) 世界を対象とした食料政策が環境と飢餓リスクにもたらす影響評価, 第31回地球環境シンポジウム講演集.

(3) 口頭発表

<口頭発表（国際学会等・査読付き）>

特に記載すべき事項はない。

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
86	Fujimori, S., (2021) Scientific Working Group on Evaluation and Diagnostics, Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021, online. (The meeting Time Zone is UTC.).
87	Fujimori, S., Oshiro, K., Hasegawa, T., (2021) Conditions for low-carbon green growth, Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021, online. (The meeting Time Zone is UTC.).
88	Nishiura, O., Fujimori, S., Oshiro, K., (2021) An assessment of global and Asian climate change mitigation measures considering carbon capture and storage constraints (Poster Session), Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021, online. (The meeting Time Zone is UTC.).
89	Nyairo, R., Hasegawa, T., Fujimori, S., Wenchao, W., Takahashi, K., (2021) Socio-economic trajectories, urban area expansion and ecosystem conservation affect global potential supply of bioenergy (Poster Session), Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021, online. (The meeting Time Zone is UTC.).
90	Zhao, S., Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K., Sasaki, K., (2021) Poverty and inequality implications of carbon pricing under the long-term climate target (Poster Session), Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021, online. (The meeting Time Zone is UTC.).
91	Zhao, S., Fujimori, S., Oshiro, O., Hasegawa, T., (2021) Poverty and inequality implications of carbon pricing under the long-term climate target, Forty-third Symposium of Environmental & Sanitary Engineering Research, online.
92	桑葉裕斗, 長谷川知子, 藤森真一郎, スィルバエランディエゴ, (2021) 世界における将来の土地利用変化を考慮した風力・太陽光エネルギーポテンシャル推計, 第29回地球環境シンポジウム（オンライン開催）.
93	佐々木克哉, 藤森真一郎, 大城賢, 長谷川知子, (2021) 家計の消費行動変化を考慮した日本における炭素税の異なる所得階層への影響, 第43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム（オンライン開催）.
94	佐々木克哉, 藤森真一郎, 長谷川知子, 大城賢, (2021) 日本における所得階層を考慮した炭素税の家計消費への影響, 第29回地球環境シンポジウム（オンライン開催）.
95	西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2021) 世界およびアジアにおける二酸化炭素の地下貯留容量を考慮した気候変動緩和策の評価, 第29回地球環境シンポジウム（オンライン開催）.
96	西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2021)世界およびアジアにおける炭素地下貯留技術の物理的制約を考慮した気候変動緩和策の評価, 第43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム（オンライン開催）.
97	Asayama, S., (2022) Can carbon removal technologies be compatible with the managed decline of fossil fuels?, The International Conference on Fossil Fuel Supply and Climate Policy, Oxford, U.K.
98	Asayama, S., (2022) Seeing like a carbon budget manager: The promise and peril of using carbon removal as budgeting tools, 2nd International Conference on Negative CO ₂ Emissions, Göteborg, Sweden.
99	Asayama, S., (2022) The politics of crafting and assessing feasible scenarios: Muddled between 'plausibility' and 'desirability' of projected futures, Scenarios Forum 2022, IIASA, Laxenburg.
100	Fujimori, S., Oshiro, K., Hasegawa, T., Shiraki, H., Takakura, J., Takahashi, K., (2022) Climate change cost decomposition, Fifteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2022, College Park, MD, USA.
101	Fujimori, S., SCHAEFFER, R., (2022) Scientific Working Group on National Scenarios, Fifteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2022, College Park, MD, USA.
102	Fujimori, S., van Vuuren, D., van Soest, H., Riahi, K., van Ruijven, B., (2022) A harmonized scenario framework can help to align national climate policies with global goals. Pathways for

	Asia (Poster Session), Fourteenth meeting of the SBSTA research dialogue, World Conference Center Bonn, Germany (online).
103	Jansakoo, T., Watanabe, R., Uetani, A., Sekizawa, S., Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K., (2022) Comparison of global air pollution impacts across horizontal resolutions (Poster Session), Fifteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2022, College Park, MD, USA.
104	Nishiura, O., Fujimori, S., Oshiro, K., (2022) An assessment of direct air capture to meet the long-term climate target of the Paris Agreement using a computable general equilibrium model (Poster Session), Fifteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2022, College Park, MD, USA.
105	Asayama, S., (2022) Can carbon removal technologies be compatible with the managed decline of fossil fuels?, The International Conference on Fossil Fuel Supply and Climate Policy, Queen's College, Oxford, UK.
106	Asayama, S., (2022) Seeing like a carbon budget manager: The promise and peril of using carbon removal as budgeting tools, 2nd International Conference on Negative CO ₂ Emissions, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
107	Asayama, S., (2022) The politics of crafting and assessing feasible scenarios: Muddled between 'plausibility' and 'desirability' of projected futures, Scenarios Forum 2022, Laxenburg, Austria.
108	Silva, D., (2022) A method for evaluating the distance to urban areas for the solar energy potential, <Honorable Award: Oral>, Grand Renewable Energy 2022 International Conference, Online.
109	Tsutsui, T., Nishiura, O., Fujimori, S., Oshiro, K., (2022) Effectiveness of emissions trading under the updated national emissions targets by 2030, Fifteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2022, College Park, MD, USA.
110	Zhao, S., Fujimori, S., (2022) Household energy security under stringent climate change mitigation, Forty-fourth Symposium of the Environmental & Sanitary Engineering Research, Kyoto University Clock Tower Centennial Hall.
111	Zhao, S., Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K., Sasaki, K., (2022) Household energy security under stringent climate change mitigation goals of the Paris Agreement, the 30th Symposium on Global Environment (Poster Session), Hokkaido University.
112	Zhao, S., Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K., Sasaki, K., (2022) Household energy security under stringent climate change mitigation to achieve the long-term temperature goal of the Paris Agreement, Fifteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2022, College Park, MD, USA.
113	Zhao, S., Fujimori, S., Oshiro, K., Hasegawa, T., Sasaki, K., (2022) Poverty and equity implications of national climate change mitigation policies in line with the Paris Agreement, Scenarios Forum 2022, Hybrid: Onsite (Laxenburg Conference Center, Austria)+ Online.
114	上谷明生, 関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 長谷川知子, 渡邊諒一, (2022) 世界全域を対象とした異なる水平解像度を用いた大気汚染の影響評価, 京都大学環境衛生工学研究会 第44回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館交際交流ホール.
115	西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2022) 二酸化炭素直接回収技術を考慮した応用一般均衡モデルの開発および気候変動緩和策の評価 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
116	渡邊諒一, 上谷明生, 関沢賢, 藤森真一郎, 長谷川知子, 大城賢, (2022) 世界全域を対象とした異なる水平解像度を用いた大気汚染の影響評価, 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
117	筒井紀希, 西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2022) 各国の2030年温室効果ガス排出目標更新を踏まえた排出量取引の有効性, 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
118	筒井紀希, 西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2022) 新しい国別排出目標下での排出権取引の有効性, 京都大学環境衛生工学研究会 第44回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館交際交流ホール.
119	藤森真一郎, (2022) 気候緩和策研究の現状と課題, 京都大学環境衛生工学研究会 第44回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館交際交流ホール(招待講演)

120	藤森真一郎, 大橋春香, 越智雄輝, 長谷川知子, Buyaki, N.R., 松井哲哉, 平田晶子, 高橋潔, 土屋一彬, (2022) 生態系保全のための農業・食料消費・土地利用管理システムの変革, 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
121	Bertram, C., Riahi, K., Ruijven, B.v., Brutschin, E., Drouet, L., Luderer, G., Kriegler, E., Mandaroux, R., Fosse, F., Vrontisi, Z., Fragkiadakis, D., Fujimori, S., Silva, D., Tagomori, I., Boer, H.-S.d., Daioglou, V., Hultman, N., Cui, R., Iyer, G., Schaeffer, R., Baptista, L.B., Rochedo, P., (2023) Feasibility of peak temperature targets in light of governance constraints, Sixteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2023, Hilton Molino Stucky, Venice, Italy.
122	Brutschin, E., Bertram, C., Pianta, S., Bosetti, V., Riahi, K., Fricko, O., Ruijven, B.v., Drouet, L., Richter, O., Rodrigues, R., Fosse, F., Vrontisi, Z., Fragkiadakis, D., Fujimori, S., Silva, D., Tagomori, I., Daioglou, V., Schaeffer, R., Baptista, L.B., (2023) Addressing Regional Feasibility Concerns in the Race to Net Zero, Sixteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2023, Hilton Molino Stucky, Venice, Italy.
123	Emmerling, J., Andreoni, P., Charalampidis, I., Dasgupta, S., Dennig, F., Vandyck, T., Feindt, S., Fragkiadakis, D., Fragkos, P., Fujimori, S., Gilli, M., Grottera, C., Guivarch, C., Kornek, U., Kriegler, E., Malerba, D., Marangoni, G., Méjean, A., Nijssse, F., Piontek, F., Simsek, Y., Soergel, B., Taconet, N., Young-Brun, M., Zheng, Y., Zhao, S., Tavoni, M., (2023) A Multi-Model Assessment of Inequality and Climate Change, Sixteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2023, Hilton Molino Stucky, Venice, Italy.
124	Jansakoo, T., Sekizawa, S., Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K., (2023) Climate change mitigation through dietary change and food loss reduction co-benefits air quality and human health, Sixteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2023, Hilton Molino Stucky, Venice, Italy.
125	Maruta, Y., Fujimori, S., Takakura, J., Oshiro, K., Takahashi, K., Hasegawa, T., (2023) Global poverty implications of climate change and its mitigation, sixteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2023, Hilton Molino Stucky, Venice, Italy.
126	Asayama, S., Fujimori, S., Oshiro, K., Shiraki, H., Sugiyama, M., (2023) Straddle the gap between feasibility and desirability: public perception of net-zero energy scenarios with and without large-scale CDR, 2023 Radboud Conference on Earth System Governance, Nijmegen, The Netherlands.
127	Asayama, S., Fujimori, S., Oshiro, K., Shiraki, H., Sugiyama, M., (2023) Swinging between feasible and desirable futures: Exploring public perception of the narratives of net-zero energy scenarios in Japan, RGS-IBG Annual Conference, London, UK.
128	Silva, D., (2023) Effect of governance constraints on long-term scenarios of global decarbonization. 29thAIM International Workshop, Tsukuba, Japan.
129	Silva, D., (2023) Regional supply-cost curves for solar and wind energy reflecting technological progress. 16th IAMC Annual Meeting 2023, Venice, Italy.
130	Silva, D., (2023) Effect of technology progress on the global potential of solar and wind energies, 39th Conference on Energy, Economy, and Environment, Tokyo, Japan.
131	Su, X.S., Takahashi, K., Yokohata, T., Tanaka, K., Fujimori, S., Takakura, J.y., Shiogama, H., Xiong, W., (2023) Developing an Integrated Assessment Model to determine the best cost-benefit paths to reduce GHG emissions for SSP1-5 (Poster Session), Sixteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2023, Hilton Molino Stucky, Venice, Italy.
132	Yamazaki, K., Fujimori, S., Oshiro, K., Uetani, A., Sekizawa, S., (2023) Assessing the climate, health, and agricultural impacts of global NOx emission reductions(Poster session), sixteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2023, Hilton Molino Stucky, Venice, Italy.
133	西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2023) 脱炭素化の選択肢: 応用一般均衡モデルを用いたバイオマスと直接大気回収の比較研究 (ポスター発表), 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
134	関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 上田佳代, (2023) 将来の全球 PM2.5 および対流圏オゾン健康影響負担の経済的評価, 京都大学環境衛生工学研究会 第45回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館国際交流ホール.

135	関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 上田佳代, (2023) 異なる手法を用いた将来の全球 PM2.5 および対流圏オゾン削減便益の経済価値評価 (ポスター発表), 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
136	丸田有美, 藤森真一郎, 高倉潤也, 大城賢, 高橋潔, 長谷川知子, (2023) 世界を対象とした気候変動および気候変動緩和策がもたらす貧困人口への影響, 京都大学環境衛生工学研究会 第45回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館国際交流ホール.
137	丸田有美, 藤森真一郎, 高倉潤也, 大城賢, 高橋潔, 長谷川知子, (2023) 世界を対象とした気候変動および気候変動緩和策による貧困影響の評価, 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
138	吉田大輝, 筒井紀希, 西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2023) 建設資材としての木材の利用促進が気候変動緩和に与える影響の評価, 京都大学環境衛生工学研究会 第45回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館国際交流ホール.
139	吉田大輝, 筒井紀希, 西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2023) 全世界を対象とした木材による鉄鋼・セメントの代替が気候変動緩和に与える影響の評価, 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
140	山崎航我, 藤森真一郎, 大城賢, 上谷明生, 関沢賢, (2023) 世界を対象とした NOx 排出削減による気候、健康、農業への影響評価, 京都大学環境衛生工学研究会 第45回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館国際交流ホール.
141	西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, (2023) 応用一般均衡モデルを用いた気候変動緩和における合成燃料の役割の分析 (ポスター発表), 京都大学環境衛生工学研究会 第45回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館国際交流ホール.
142	平原颯太郎, 関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 伊藤昭彦, 長谷川知子, (2023) 全世界を対象とした対流圏オゾンによる植生の CO ₂ 吸収量への影響評価と気候変動緩和策の評価, 京都大学環境衛生工学研究会 第45回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館国際交流ホール.
143	山崎航我, 藤森真一郎, 大城賢, 上谷明生, 関沢賢, (2023) 世界規模の NOx 排出削減がもたらす気候、健康、農業への影響に関する研究, 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
144	Silva, D., (2024) Estimation of the global energy potential of onshore wind based on hourly data. 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京.

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表 (学会等・査読なし)
145	Ju, Y., Sugiyama, M., Shiraki, H., (2021) Perceived Feasibility of Japan's decarbonization transition: Expert Perspectives, 14th IAMC Annual Meeting 2021, online.
146	Oshiro, K., Fujimori, S., (2021) The role of hydrogen-based energy carriers in meeting the decarbonization goals of the Paris Agreement, Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021, online. (The meeting Time Zone is UTC.).
147	Shiraki, H., (2021) Assessment of generation mix in 2030 using high resolution power dispatch model (Poster Session), The 27th AIM International Workshop, online.
148	VAN SOEST, H., Reis, L.A., Baptista, L.B., Bertram, C., Despres, J., Drouet, L., den Elzen, M., Fragkos, P., Fricko, O., Fujimori, S., Grant, N., Harmsen, M., Iyer, G., Keramidias, K., Koeberle, A., Krieger, E., Malik, A., Mittal, S., Oshiro, K., Riahi, K., Roelfsema, M., van Ruijven, B., Schaeffer, R., Silva Herran, D., Tavoni, M., Unlu, G., Vandyck, T., van Vuuren, D., (2021) A Global Roll-out of Nationally Relevant Policies can Bridge the Emissions Gap, Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021, online. (The meeting Time Zone is UTC.).
149	松井そら, 大城賢, 藤森真一郎, 西浦理, (2021) 交通部門における技術・社会の変容が気候変動政策へ及ぼす影響, 第29回地球環境シンポジウム (オンライン開催) .
150	松井そら, 藤森真一郎, 大城賢, 西浦理, (2021) 交通部門の社会変革が気候変動政策へ及ぼす影響, 第43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム (オンライン開催) .

151	大城賢, 藤森真一郎, (2021) パリ協定CO ₂ 排出削減目標の達成における水素エネルギーキャリアの役割の評価, 第29回地球環境シンポジウム (オンライン開催) .
152	藤本穂乃佳, 白木裕斗, 村上一真, (2021) 住宅に対する住民評価の要因分析 - 省エネ性の影響 -, 第29回地球環境シンポジウム (オンライン開催) .
153	白木裕斗, (2021) 電力需要の不確実性を考慮した電力システム分析, 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 (オンライン開催) .
154	Oshiro, K., Fujimori, S., (2022) The potential of carbon capture and utilization for global net-zero emission energy systems, Fifteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2022, College Park, MD, USA.
155	Oshiro, K., Fujimori, S., Sugiyama, M., (2022) IAMC data template applications and extensions in Japan and Asian modelling activities, Scientific Working Group on Data Protocols and Management, Fifteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2022, College Park, MD, USA.
156	関沢賢, 渡邊諒一, 藤森真一郎, 大城賢, 上田佳代, (2022) 全世界を対象とした異なるPM2.5由来の健康影響評価関数に関する研究, 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
157	関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 渡邊諒一, 上田佳代, (2022) 全世界を対象としたPM2.5由来の健康影響推計手法に関する検討, 京都大学環境衛生工学研究会 第44回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館交際交流ホール.
158	森翔太郎, 西浦理, 大城賢, 藤森真一郎, (2022) 世界を対象とした2050年ネットゼロ排出達成における合成燃料の役割, 京都大学環境衛生工学研究会 第44回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館交際交流ホール.
159	森翔太郎, 西浦理, 大城賢, 藤森真一郎, (2022) 世界を対象としたネットゼロ排出シナリオにおける合成燃料の役割 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
160	大城賢, 藤森真一郎, (2022) 日本の 2050 年ネットゼロ排出目標における残存排出量削減方策のシナリオ分析 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
161	Diwana, F.A., Tagomori, I., Morais, T.N., Cho, C., Moon, J., Eom, J., Fujimori, S., Oshiro, K., Tran, T.-T., Agarwal, S.S., Anjum, S., Chaudhury, S., Hernadez, T., Buira, D., Tovilla, J., Analítica, T., Limmeechokchai, B., Pradhan, B.B., Chaichaloempreecha, A., Vishwanathan, S.S., Vastrapur, Vuuren, D.v., Schaeffer, R., (2023) What do the net-zero ambitions mean for the Paris Agreement goals? A country-based analysis, Sixteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2023, Hilton Molino Stucky, Venice, Italy.
162	森翔太郎, 大城賢, 藤森真一郎, (2023) 世界を対象とした化学部門における CO ₂ 排出削減策としてのバイオマス・水素利用技術の役割 (ポスター発表), 京都大学環境衛生工学研究会 第45回シンポジウム, 京都大学 百周年時計台記念館国際交流ホール.
163	森翔太郎, 大城賢, 藤森真一郎, (2023) 世界を対象としたエネルギーシステムモデルによる化学部門の CO ₂ 排出削減策の評価, 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
164	筒井紀希, 藤森真一郎, 大城賢, (2023) 2050 年全世界ネットゼロ達成に向けた先進国の役割の評価 (ポスター発表), 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
165	齋藤啓貴, 森翔太郎, 大城賢, 藤森真一郎, (2023) 気候変動が変動性再生可能エネルギーの供給ポテンシャルに与える影響の評価, 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
166	伊藤 悠太, 白木 裕斗, (2024) 複数の脱炭素燃料を考慮した市区町村スケールでの脱炭素シナリオ分析 —福岡県北九州市を対象として—, 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京大学.

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表 (学会等・査読なし)
167	伊藤涼太郎, 長谷川知子, 藤森真一郎, 花崎直太, (2021)世界を対象とした第二世代バイオマスエネルギーポテンシャル量の推計とそれに伴う水消費量・窒素肥料必要量の環境影響, 第29回地球環境シンポジウム (オンライン開催) .

168	和田悠暉, 長谷川知子, (2021) 日米の食の変化を考慮した農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する研究, 第29回地球環境シンポジウム (オンライン開催) .
169	Hasegawa T., (2022) Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs, The 28th AIM International Workshop, National Institute for Environmental Studies, online.
170	Hasegawa T., (2022) How do we reconcile a long-term climate goal and sustainable development?, 2022 ECOSOC High-level Segment, United Nations Headquarters, New York.
171	伊藤涼太郎, 藤森真一郎, 長谷川知子, (2022) 食内容を考慮したバイオマスエネルギーポテンシャル量の推計 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
172	瓜本千紗, 藤森真一郎, 長谷川知子, (2022) 世界を対象とした農畜産業の生産と消費段階における温室効果ガス排出削減に関する研究, 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
173	桑葉裕斗, 藤森真一郎, 越智雄輝, 長谷川知子, (2022) 京都市を対象とした将来のカーボンニュートラル実現に向けたシナリオ構築(ポスター発表), 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
174	高橋潔, (2022) 気候変動の影響 -IPCC最新評価報告書の概要と今後の課題-, 京都大学環境衛生工学研究会第44回シンポジウム.
175	佐々木克哉, 藤森真一郎, 大城賢, 長谷川知子, 趙詩雅, (2022) 異なる所得階層を考慮した家計の食料需要モデルの開発. 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
176	市森将貴, 長谷川知子, 藤森真一郎, (2022) 世界を対象とした作物収量の向上が食料安全保障と環境にもたらす影響評価 (ポスター発表), 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
177	小野泰照, 長谷川知子, 藤森真一郎, (2022) 畜産物の消費制限による環境および食料システムへの影響評価, 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
178	Wu Y., Leclere D., Frank S., Fujimori S., Byers E., Fricko O., Gusti M., Hasegawa T., Havlik P., Krey V., Lessa-Derci-Augustynczyk A., Riahi K., Takahashi K., Tsuchiya K., (2023) Navigating land-use strategies toward ambitious climate and biodiversity targets, Sixteenth IAMC Annual Meeting 2023.
179	黒川和馬, 長谷川知子, 藤森真一郎, 山崎航我, (2023) 気候変動緩和策が対流圏オゾン変化を通じて食料消費および飢餓リスク人口にもたらす影響評価. 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
180	小野泰照, 長谷川知子, 藤森真一郎, (2023) 世界を対象とした食料政策が環境と飢餓リスクにもたらす影響評価. 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
181	平原颯太郎, 関沢賢, 藤森真一郎, 大城賢, 伊藤昭彦, 長谷川知子, (2023) 世界を対象とした対流圏オゾンによる植生のCO ₂ 吸収量への影響評価と気候変動緩和策への含意. 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
182	平野拳士朗, 瓜本千紗, 長谷川知子, (2023) アジア諸国を対象とした農畜産業由来の温室効果ガス排出量削減に関する研. 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
183	濱本拓希, 長谷川知子, 瓜本千紗, (2023) 中南米地域を対象とした農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する研究. 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.

(4) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ1】の実施状況
----------	----------	---------------

184	2021	藤森真一郎, 京都大学「京都大学カーボン・ニュートラル推進フォーラム キックオフ・シンポジウム ―地球社会の調和ある共存に向けて―」, (2021年7月19日、参加者約500名、オンライン開催) 「なぜカーボン・ニュートラルなのか」講演.
185	2021	藤森真一郎, 大阪府立茨木高校「学問発見講座」, (2021年7月10日、参加者30名程度) 「2050年を科学的手法で占う: 気候変動問題への学際的アプローチ」.
186	2022	藤森真一郎, 山形県立米沢興譲館高校の京都大学藤森研究室訪問と研究討論会, (2022年12月6日、参加者10名程度) 「温室効果ガスの削減による持続可能な社会について」.
187	2023	朝山慎一郎, 「第31回地球環境シンポジウム」にて一般公開シンポジウム「ネットゼロシナリオの実現可能性を考える」(滋賀県立大学交流センター、ハイブリッド開催), (2023年9月20日、参加者50名程度) 「ネットゼロシナリオの公衆認知～実現可能性と望ましさの観点から～」.
188	2023	藤森真一郎, 「第31回地球環境シンポジウム」にて一般公開シンポジウム「ネットゼロシナリオの実現可能性を考える」(滋賀県立大学交流センター、ハイブリッド開催), (2023年9月20日、参加者50名程度) 「気候変動緩和研究の最前線 ～ネットゼロの実現可能性を考える～」.
189	2023	藤森真一郎, 大手前高松高等学校の京都大学藤森研究室訪問と研究討論会, (2023年8月3日、参加者30名程度) 「温室効果ガス排出削減策の評価や、地球環境保護への理解を深める」.

成果番号	実施年度	【サブテーマ2】の実施状況
190	2022	白木裕斗, 筑波大学附属坂戸高校「農と環境II」, (2022年10月28日、11月18日、参加者54名) 「長期的視点に立ったエネルギー選択を考える視点」.
191	2022	白木裕斗, 富山高等専門学校「環境・エネルギー実習」, (2022年10月17日、11月7日、11月14日、参加者44名) 「次世代エネルギーワークショップ質疑応答」.
192	2023	大城賢, 「第31回地球環境シンポジウム」にて一般公開シンポジウム「ネットゼロシナリオの実現可能性を考える」(滋賀県立大学交流センター、ハイブリッド開催), (2023年9月20日、参加者50名程度) 「ネットゼロを達成するエネルギーシステムの定量評価」.

成果番号	実施年度	【サブテーマ3】の実施状況
193	2023	長谷川知子, コラボしが21「地球温暖化対策と企業のCO ₂ 削減対策セミナー」, (2023年9月12日、ハイブリッド開催) 「脱炭素社会の絵姿と地域・企業の役割」講演.
194	2023	長谷川知子, 滋賀県立大学「第31回地球環境シンポジウム 一般公開シンポジウム」, (2023年9月20日、ハイブリッド開催) 「ネットゼロシナリオの実現可能性を考える」モデレーター.

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
195	日本経済新聞 (2021年4月11日、日曜版、日刊第48519号(12版)、サイエンス (第26面)、「電気自動車が「排ガス」 電池製造でCO ₂ 再エネに期待」)
196	NHK BS1スペシャル (2021年4月18日放映、シリーズ“2030未来への分岐点”「暴走する温暖化地球の危機」に関する取材協力)

197	NHK BS1スペシャル (2021年4月25日放映、シリーズ“2030未来への分岐点”第2回「飽食の悪夢～水・食料クライシス～」に関する取材協力)
198	成果の記者発表 (2021年5月28日、於京都大学・東京大学・国立環境研究所、「世界各国の2050年の温室効果ガス削減目標を分析するための国際的な研究フレームワークの提案」)
199	日本経済新聞 電子版(2021年5月28日0:00、「京大・東大・国立環境研、世界各国の2050年の温室効果ガス削減目標を国横断的に分析するための枠組みを提案」)
200	環境ビジネスオンライン(2021年6月1日、「京大・東大・環境研、世界各国のGHG排出削減目標を分析できる枠組みを発表」)
201	産経ニュース(ウェブ版) (2021年6月28日、「【経済24時】EV化 狙いは自国産業拡大欧州、中国打破の戦略を」)
202	成果の記者発表 (2021年7月6日、於国立環境研究所・ポツダム気候影響研究所・立命館大学・京都大学、「水資源の制約が世界規模でのバイオエネルギー生産にもたらす影響を推定」)
203	成果の記者発表 (2021年8月10日、於京都大学・立命館大学・農業・食品産業技術総合研究機構・国立環境研究所、「将来の不確実性を考慮に入れた飢餓リスクとその対応策の算定」)
204	環境展望台 (2021年8月10日、「京大と立命大など、不確実性下における飢餓リスクの大きさを算定」)
205	財経新聞 (2021年8月11日、IT・サイエンス、「温暖化に伴う極端な気象現象が飢餓人口に与える影響 京大らが推計」)
206	日本農業新聞 (2021年8月12日、総合1面 12版 P1、「温暖化加速で飢餓リスク増 穀物備蓄の追加必要 京大など算出」)
207	成果の記者発表 (2021年10月8日、於立命館大学・京都大学、「大規模な二酸化炭素除去技術に依存しない温室効果ガス排出削減とそれが土地利用と食料システムへ与える影響」)
208	NHKスペシャル (2023年2月5日(日)放映、混迷の世紀 第7回「灼熱地球の恐怖 ～ウクライナ侵攻 もう一つの危機～」に関する取材協力)
209	成果の記者発表 (2023年5月19日、於京都大学・立命館大学・国立環境研究所・北海道大学、「社会経済・技術の変革による脱炭素化費用の低減」)
210	京都大学新聞, p. 6. (2023年7月1日、「工学研 脱炭素化の経済的な負担軽減へ 技術革新の効果を算出」)
211	成果の記者発表 (2023年7月7日、於京都大学・立命館大学・国立環境研究所、「気候変動対策が貧困にもたらす影響とそれに対する対応策」)
212	テレ朝 news (2023年7月14日、「気候変動対策で「絶対的な貧困」が世界で1千万人単位で増加も 京大教授が指摘」)
213	MIT Technology Review (2023年7月25日、「気候変動対策の実施により貧困が増加する可能性＝京大など」)
214	ASCII.jp x ビジネス. (2023年7月25日、「気候変動対策の実施により貧困が増加する可能性＝京大など」)
215	朝日新聞デジタル(2023年7月25日、「待ったなしの温室効果ガスの削減、ただし貧困撲滅の妨げのおそれも」)
216	大学ジャーナルオンライン (2023年7月30日)、「脱炭素化に強い副作用、世界の貧困が拡大する可能性」)
217	THE SANKEI NEWS (2023年8月5日)、「地球温暖化対策の副作用 アジアの貧困人口倍増 京大など予測」)
218	大下容子ワイド!スクランブル. テレビ朝日 (2023年8月11日、「世界的な気候変動対策影響で貧困人口が増大?」)
219	朝日新聞 夕刊 (2023年8月31日、「温暖化対策、貧困撲滅と両立は 再エネ投資で所得減・炭素税など物価押し上げ 京大などのチーム分析」)

成果番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
220	成果の記者発表（2022年3月2日、於京都大学、「世界の脱炭素社会実現に向けた水素エネルギーの役割 ―電化・バイオマスも組み合わせた包括的なエネルギー政策が重要―）」
221	日刊工業新聞（2022年3月8日、23面（科学技術・大学）、「電化・バイオマス重要 水素、製造コスト面に課題 京大、50年脱炭素シナリオ予測」）
222	成果の記者発表（2023年7月14日、於京都大学・立命館大学・国立環境研究所、「炭素回収利用を用いた新たなエネルギー移行シナリオ：既存のエネルギー利用技術を維持できるが高コスト」）
223	日刊工業新聞. 21面 科学技術・大学（2023年7月17日、「合成燃料、世界エネ需要3割代替 コストは高く 京大が試算」）
224	MIT Technology Review（2023年7月18日、「合成燃料活用でCO ₂ ゼロ排出を達成する新シナリオ=京大など」）
225	成果の記者発表（2024年3月4日、於京都大学、「低排出シナリオにおいて水素混焼が火力発電の延命に及ぼす影響は限定的」）
226	朝日新聞Digital.（2024年3月4日、「火力の水素・アンモニア代替、世界発電量の1%だけ 2050年試算」）
227	環境新聞オンライン（2024年3月20日、「水素・アンモニア発電 貢献「限定的」と指摘 京都大」）
228	日本経済新聞 電子版（2024年3月24日、「水素・アンモニア、発電の1%に 京大チームが予測」）
229	朝日新聞（2024年3月26日、21面（科学・環境）、「水素・アンモニア発電、脱炭素への貢献は限定的 世界の発電量に占める割合1%程度 京大試算」）

成果番号	【サブテーマ3】のメディア報道等
230	エコせん（2021年4月号（No.72）、2-3頁、インタビュー京の地球人「多角的な視点が地球を守るカギ」）
231	農業協同組合新聞（2021年8月17日、「将来の不確実性を考慮 飢餓リスクと対応策を算定 京大、農研機構など」）
232	JA com 農業協同組合新聞（2021年8月17日、「将来の不確実性を考慮 飢餓リスクと対応策を算定 京大、農研機構など」）
233	マイナビニュース（2021年10月11日、「早期の温室効果ガス排出削減による土地利用と食料システムへの影響、立命館大が調査」）
234	Tech powered by マイナビニュース（2021年10月11日、「早期の温室効果ガス排出削減による土地利用と食料システムへの影響、立命館大が調査」）
235	毎日新聞（2022年9月21日、全国版、12-13頁、「気候変動 危機の連鎖 農業と食 守るために」）
236	毎日新聞（2023年4月18日、くらしナビ面 15頁、「気候変動議論の土台 IPCC報告書―執筆者に聞く「ポイント」―」）
237	少年写真新聞（2023年7月8日、「食育まんが 温暖化で農業はどうなるの？」）
238	朝日新聞（2023年8月22日、21頁、「10月は「音楽をサステイナブルに」」）
239	朝日新聞（2023年10月17日、「「SDGs ミライテラス」19日開催」）
240	オンライン番組 SDGs ミライテラス（2023年10月19日、第15回「音楽をサステイナブルに～生物多様性に向き合う～」）

241	NHK サイエンス（2023年11月19日、「優れた女性研究者に贈られる賞の表彰式 東京」）
242	Yahooニュース（2023年11月20日、「第5回「輝く女性研究者賞」に立命館大・長谷川、室蘭工大・太田氏」）
243	科学技術復興機構 サイエンスポータル（2023年11月20日、「第5回「輝く女性研究者賞」に立命館大・長谷川、室蘭工大・太田氏」）
244	科学新聞 The Science News（2023年12月1日、「輝く女性研究者賞 2氏に」）

(7) 研究成果による受賞

成果番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
245	2021年、The Reuters Hot List, 日本人トップの23位にランクイン 世界で最も影響力のある環境科学者1000人をロイターが発表、藤森真一郎.
246	2021年11月、Highly Cited Researchers 2021（高被引用論文著者）、藤森真一郎.
247	2021年12月4日、The Award for Extraordinary Contributions to the field of Integrated Assessment Modeling (ECA)、Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC)、藤森真一郎.
248	2021年9月29日、地球環境論文奨励賞「アジア各国における温室効果ガス大幅削減に必要な対策とその経済的影響の要因分析」、土木学会 地球環境委員会、西浦理.
249	2022年、第19回（令和4（2022）年度）日本学術振興会賞、藤森真一郎.
250	2022年、Research.comの選出するTop Environmental Sciences Scientist in Japan（環境科学分野）で、日本人11位、世界で867位にランクイン、藤森真一郎.
251	2022年11月、Highly Cited Researchers 2022（高被引用論文著者）、藤森真一郎.
252	2022年12月25日、Honorable Award: Oral presentation award “A method for evaluating the distance to urban areas for the solar energy potential”、Grand Renewable Energy 2022 International Conference、Silva Herran Diego.
253	2023年、Research.comの選出するTop Environmental Sciences Scientist in Japan（環境科学分野）で、日本人24位、世界で1773位にランクイン、藤森真一郎.
254	2023年11月、Highly Cited Researchers 2023（高被引用論文著者）、藤森真一郎.

成果番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
255	2021年9月29日、地球環境論文賞（JSCE GEE Award）「アジアにおける温室効果ガス短期削減目標が2050年までのエネルギー投資に及ぼす影響」、土木学会 地球環境委員会、大城賢、藤森真一郎、長谷川知子、明石修.
256	2022年7月30日、研究奨励賞、京都大学環境衛生工学研究会、森翔太郎.
257	2023年9月、地球環境論文奨励賞「世界を対象としたネットゼロ排出シナリオにおける合成燃料の役割」、土木学会 地球環境委員会、森翔太郎.
258	【授与決定】2024年9月、地球環境論文奨励賞「気候変動が変動性再生可能エネルギーの供給ポテンシャルに与える影響の評価」、土木学会 地球環境委員会、齊藤啓貴.

成果番号	【サブテーマ3】の研究成果による受賞
------	--------------------

259	2021年、The Reuters Hot List,日本人2位の77位にランクイン 世界で最も影響力のある環境科学者1000人をロイターが発表、長谷川知子.
260	2021年11月、Highly Cited Researchers 2021 (高被引用論文著者)、長谷川知子.
261	2022年、Research.comの選出するTop Environmental Sciences Scientist in Japan (環境科学分野) で、日本人45位、世界で2720位にランクイン、長谷川知子.
262	2022年11月、 Highly Cited Researchers 2022 (高被引用論文著者)、長谷川知子.
263	2023年 11月、第5回輝く女性研究者賞 (ジュンアシダ賞)、長谷川知子.
264	2023年11月、Highly Cited Researchers 2023 (高被引用論文著者)、長谷川知子.

(8) その他の成果発表

成果番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
265	Fujimori, S., (2021) Model results for Asian decarbonization pathways, ENGAGE: Stakeholder Workshop Asian Decarbonization Pathways, online.
266	藤森真一郎, (2021) なぜカーボン・ニュートラルなのか. 京都大学カーボン・ニュートラル推進フォーラム キックオフシンポジウム 「地域社会の調和ある共存に向けて」(招待講演).
267	藤森真一郎, (2021) 長期気候緩和シナリオ研究とカーボンニュートラル(講演 話題提供2), 日本学術会議近畿地区会議学術講演会「2050年までに何をすべきか カーボンニュートラル」, 京都大学 国際科学イノベーション棟シンポジウムホール+オンライン配信併用.(招待講演).
268	藤森真一郎, (2021) 特別講演「気候変動と食糧安全保障の関係について」, ムーンショット型農林水産研究開発事業『サイバーフィジカルシステムを利用した作物強靱化による食料リスクゼロの実現』シンポジウム～ 2050年、食料リスクのない豊かな社会を目指して ～, オンライン (招待講演) .
269	Fujimori, S., (2022) AIM modeling and recent on-going research activities, IAMC Webinar: AIM modeling and community activities, online.
270	Fujimori, S., Hasegawa, T., (2022) Food security implications of climate change mitigation, NARO-FFTC International Symposium " Climate Change and Food System - synergies of adaptation and mitigation, and advanced utilization of climate information for sustainable and climate-resilient agriculture", Tsukuba International Congress Center (Epochal Tsukuba)and online.
271	藤森真一郎, (2022) カーボンニュートラルの絵姿 「長期的な見通しと課題」, 日立返仁会関西地区 2022年度第2回オンライン講演会, オンライン.
272	藤森真一郎, (2022) カーボンニュートラルの絵姿：長期的な見通しと課題, 日本学術会議：カーボンニュートラルに関する学術フォーラム.(招待講演).
273	藤森真一郎, (2022) 気候変動とカーボンニュートラル, 令和3年度建設リサイクル講演会.
274	藤森真一郎, (2022) 統合評価モデル及び緩和分析とシナリオ研究, 国立環境研究所 気候危機対応研究イニシアティブ ウェビナー「気候変動シナリオについて世界では今何が議論されているか?—Scenarios Forum 2022報告」, オンライン.
275	藤森真一郎, (2022) 統合評価モデル研究の最前線, 東京大学気候と社会連携研究機構発足記念シンポジウム「気候・生態系と社会の共進化を探る」, 東京大学伊藤国際学術研究センター.(発表とパネルディスカッション) .

276	Fujimori, S., (2023) AIM modeling framework for the scenario quantification of sustainable development pathways, Sustainable Development Goals: How do we meet them?, Leiden, Netherland.
277	Fujimori, S., (2023) Need for mitigation, transformative action and future scenarios (invited), Outreach event on the IPCC Sixth Assessment Report key findings and their relevance to Asia, Pullman Grande, Sukhumvit, Bangkok.
278	Maruta, Y., Fujimori, S., Takakura, J., Oshiro, K., Takahashi, K., Hasegawa, T., (2023) Influence of Climate Change and its Mitigation Measures on Global Poverty (Poster session), The 29th AIM International Workshop, Tsukuba, Ibaraki, Japan.
279	Nishiura, O., Fujimori, S., Oshiro, K., (2023) Comparative Analysis of Biomass-Based and Direct Air Capture-Based Technologies for Decarbonization (Poster session), The 29th AIM International Workshop, Tsukuba, Ibaraki, Japan.
280	Yoshida, H., Tsutsui, T., Nishiura, O., Fujimori, S., Oshiro, K., (2023) Assessment of the Impacts of Wood Substitution for Steel and Cement in Building Materials on Climate Change Mitigation (Poster session), The 29th AIM International Workshop, Tsukuba, Ibaraki, Japan.
281	藤森真一郎, (2023) 気候変動と脱炭素社会, 気候変動問題の解決に向けた下水道の果たす役割, 土木学会講堂およびZOOMオンライン.
282	藤森真一郎, (2024) 気候変動と脱炭素社会 ー革新的技術が果たす役割ー, 「カーボンサイクルイノベーションコンソーシアム」全体会議、京都大学.

成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
283	Nakama, S., Shiraki, H., (2022) Analysis of CO ₂ emission reduction scenario in the municipal scale focusing on biomass energy: A case of Maniwa, Okayama, Japan (Poster Session), the 28th AIM International Workshop, online.
284	Mori, S., Nishiura, O., Oshiro, K., Fujimori, S., (2023) An Assessment of the Role of Synthetic Fuels in Mitigating the Rapid End-Use Technology Transition in NetZero Emissions Scenarios (Poster session), The 29th AIM International Workshop, Tsukuba, Ibaraki, Japan.

成果 番号	【サブテーマ3】のその他の成果発表
285	Hasegawa, T., (2022) How do we reconcile a long-term climate goal and sustainable development?, 2022 ECOSOC High-level Segment, United Nations Headquarters, New York.
286	Hasegawa, T., (2022) How do we reconcile a long-term climate goal and sustainable development?, DFG-Heinz Maier-Leibnitz-Prize Online Conference, livestream on YouTube, online.
287	Takahashi, K., (2023) Estimating the global economic impacts of a future climate, Snowmass Workshop - Climate Action in a World of Multiple Priorities.
288	高橋潔, (2023) Food, biodiversity, and climate change - Scenario analyses using Asia-Pacific Integrated Assessment Model: AIM -, STS forum COP 28 Special Symposium on Regional Action on Climate Change “Agriculture, Food, Biodiversity and Climate Change”.
289	長谷川知子, (2024) 「Impacts of Climate Change and mitigation on Global Food Security」講演, 理化学研究所「第2回理研CSRS”Carbon neutrality and the beyond”ワークショップ」.

Abstract

[Research Title]

A study on global decarbonization pathways considering technological, economic and social feasibility

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Shinichiro Fujimori
(PI ORCID) :	ORCID 0000-0001-7897-1796
Principal Institution :	Kyoto University Katsura campus, Nishikyo-ku Kyoto City, Kyoto, JAPAN Tel: +81-75-383-3367 E-mail: fujimori.shinichiro.8a@kyoto-u.ac.jp
Cooperated by :	Kyoto University, graduate school of engineering
Keywords :	Zero-emissions, Feasibility, integrated assessment model, life-style change

[Abstract]

This research (1) developed and improved an innovative integrated evaluation model and evaluate its technical and economic feasibility through quantitative scenario analysis. The integrated assessment model is based on the AIM model, which has been widely used in various places such as the IPCC and international model comparison studies, and adds new energy and food models to it. In particular, the project improved the representation of technology types, sector classifications, regional classifications, etc., which had been treated abstractly, and approach the feasibility of scenarios. (2) Based on the quantitative information, clarify the social feasibility through stakeholder meetings, etc. (3) Taking into account the results, an improved integrated evaluation model was used to evaluate the economy, emissions, energy supply and demand, and food, with additional input conditions such as the introduction of innovative technology, lifestyle changes, and various environmental policies other than carbon taxes. The project quantified consumption, etc. and showed a path to achieving large-scale GHG reductions.

The project consists of three subthemes from the perspective of method and subject. Theme 1 examines feasibility from an economic and social perspective, and the economic model combining the applied general equilibrium model (AIM-Hub) and a model that deals with household income and consumption structures on a micro level was used to deal with macroeconomics and inequality. In addition, the subtheme held stakeholder meetings and examined the feasibility of the scenarios by socially questioning the output of the integrated assessment model and the latest scientific knowledge obtained from this research. Theme 2 mainly examined feasibility from an energy technology perspective. Energy system model was developed with the most advanced power sector resolution. Theme 3 examines its feasibility from the perspective of agriculture and food, quantifying the details of food demand and developing a model that depicts the lifestyle of food and its closely related health effects. As a contribution to environmental policy, the project contributed to long-term climate policies in Japan, and provided continuous inputs of research findings into international reports such as the IPCC.

[References]

- Fujimori, S., Oshiro, K., Hasegawa, T., Takakura, J., Ueda, K., (2023) Climate change mitigation costs reduction caused by socioeconomic-technological transitions. *npj Climate Action* 2(1), 9, doi:10.1038/s44168-023-00041-w.
- Oshiro, K., Fujimori, S., Hasegawa, T., Asayama, S., Shiraki, H., Takahashi, K., (2023) Alternative, but expensive, energy transition scenario featuring carbon capture and utilization can preserve existing energy demand technologies. *One Earth* 6(7), 872-883, doi:10.1016/j.oneear.2023.06.005.
- Hasegawa, T., Fujimori, S., Frank, S., Humpenöder, F., Bertram, C., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Gusti, M., Harmsen, M., Keramidas, K., Ochi, Y., Oshiro, K., Rochedo, P., van Ruijven, B., Cabardos, A.-M., Deppermann, A., Fosse, F., Havlik, P., Krey, V., Popp, A., Schaeffer, R., van Vuuren, D., Riahi, K., (2021) Land-based implications of early climate actions without global net-negative emissions. *Nature Sustainability* 4(12), 1052–1059 (2021), doi:10.1038/s41893-021-00772-w.

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).

別紙

【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
採択時コメント「テーマとして重要であり、研究体制もしっかりしている。」	叱咤激励のコメントとして受け止め、研究成果を最大限出せるように尽力いたしました。
採択時コメント「低炭素社会実現に向けた具体的な施策や企業の脱炭化の実現に貢献されることを期待する。脱温暖化を宣言した国が増えるなかで、日本では JEPX のスポット市場価格が上がるなどの 問題点が出てきている。容量市場も新電力の普及の障害となっているという記事もある。脱炭素社会にスムーズに転換できるような施策の提案を期待する。」	計上額未満では人材の確保が困難であり物価上昇等の影響もあったため、計画通りとした。
採択時コメント「所得分布など解像度の高い情報を必要とするが、世界規模で入力情報を集められるのか、また、それらの精度は確保できるのか。成果の活用には人々や各セクターの行動変容が求められると思われるが、成果の理解しやすい提示を期待する。」	家計所得の分布はGini係数、所得を用いて推計しました。この手法は世界銀行などで一般的に使われている手法になります。強い仮定にはなりますがそれをベースとした成果もいくつか査読付き論文として発表することができ、学術分野内でも一定の評価を得ていると考えられます。
採択時コメント「農業システムの変革は、IPBES や GBO5 でも重要課題に指摘しているので、その方向性なども意識して研究を進めてほしい。」	IPBESなどは生態系への波及効果等と理解し、生態系に関する分析も進めました。当該分野で著名な国際応用システム分析研究所 (IIASA) との国際共同研究として現在研究論文のとりまとめ作業を行っており、IPBESなどへも重要なインプットになるものと考えております。
採択時コメント「現在取り組まなければならない喫緊の課題であり、成果を期待する。環境省はライフスタイルの変革を重視しているようであるが、本申請では食だけを取り上げているところが疑問である。衣食住すべてを含むライフスタイルを考えなおすという発想が必要ではないか。」	ご指摘はごもっともと考えられ、本研究では食のライフスタイルに加えて、最終的にはエネルギー需要を低減するライフスタイルもシナリオ内に考慮して対応しました。
採択時コメント「実績のある研究者による提案であり、重要な視点が含まれているので、成果を期待する。短中期的取り組みとしてはCO ₂ などの長寿命GHG だけでなくSLCP なども解析対象とすべきだと思うが、それは課題中に組み込まれているのか。SLCP に関する研究は別途行われているが、モデルなどでは総合的に取り組むべきではないかと考える。」	SLCPについても重要な課題と認識しており、少なくともCH ₄ の排出量がどのようになるのかといったことは本課題でも扱い特に食料・農業の対応策の中で成果が上がりました。また最終的には全球の大気化学モデルを用いて、特に食のライフスタイルや一般的な気候緩和策がCH ₄ 、NO _x 、NH ₃ の排出量変化を通じてどのように大気汚染状況 (PM _{2.5} の濃度やオゾン) に影響を与えるのか、さらにはそこから健康影響や作物生産性影響がどう変わるかという点について検討を行い、ご指摘の点は一定程度対応できたと考えておりま

	す。
採択時コメント「1) 抽出された乗り越えるべき障壁に関して、乗り越えの可否を判断する基準がどの様に設定されていくのか明確になって欲しい。」	こちらは各シナリオにおける結果を相対的に比較した中から判断していきましました。例えば代表的な3つのシナリオの中のCCUを用いるシナリオでは費用が問題となる可能性が高いであるとか、エネルギー需要を落とすシナリオでは、どちらかという技術的な対応もそうであるが人々の意識に働きかける対策が重要になるがそれが現実的に可能かどうか、といった形です。
2) 政策へ展開するにあたって、脱炭素社会システムの設計とシステムの実装・運用の方法論が分かり易く説明できるようにするとよい。」	当課題ではシミュレーションモデルを用いて長期にわたる推計を行うことから、実際に運用する政策レベルまで方法論のところまで落とし込むことは少し難しいと感じました。ただし、出てきた結果の解釈をするところで、炭素税の導入の是非や炭素税税収の使い方などについては具体的な政策として提言しており、一定の対応はできたかと認識しております。
3) 目標とする社会の脱(低)炭素レベルによって、モデルの内容や各種予想等に用いられるデータ・知見が変わるであろう。成果であるモデルを利用して政策策定を行う側(環境省)から当座の脱(低)炭素の目標を提示することが、効率的なモデル開発・構築を実現するのではないか。」	環境省とは適宜コミュニケーションを重ねてきました。研究の設計段階、成果を見てもらい、それに対して意見を頂き、例えば環境省としてはライフスタイル変革などを重視しているということなどがわかってきたため、代表的なシナリオの中にもそれを取り上げたものを入れました。
採択時コメント「実行体制、実績、シナリオの明確性ともに高い。息の長い課題なので、若い研究集団の発展を望む。」	叱咤激励のコメントとして受け止め、研究成果を最大限出せるように尽力いたしました。
採択時コメント「質問に対する回答も的確であり、大いに期待したい。シナリオ分析の結果を解釈して、ESGが企業行動へ指針を与えるという側面でESGの論点を捉えることになっているが、ESG型の企業行動がサプライチェーンやバリューチェーンを通して、エネルギー産業に影響を与えていることをESGの産業効果として大胆に組み込めないか検討して欲しい。」	エネルギー産業自体がどのように変わっていくかという点についてはシナリオ分析を通して示すことができました。ただ、個別の産業のサプライチェーンまでを本課題内で扱うことは研究資源を考慮すると少し困難であると考えましたが、ESG等で個別企業に活用してもらえるシナリオを一般に公開しておりますので、そちらを活用していただければと考えております。
採択時コメント「これまでのAIMの実績から考えると、分析的には一定の成果は期待できる。ただ、この研究から、10年後の新しいESGやTCFDのような仕組みを創出することができるのだろうか?」脱炭素社会への道筋」というと、大胆な設計論に踏み込むような考え方が要るのではないか。」	3つのかなり異なる道筋を示せたと思っています。モデル分析なので一定の抽象度の高さはありますが、今までにないCCUを大規模に使うシナリオなどは脱炭素の将来像に対して新しい概念を提唱し、それに対して定量的な情報を付加した形で成果を発表できたかと認識しております。
採択時コメント「我が国や世界各国でのカーボンニュートラル宣言を踏まえ、今後大幅な削減が求められており、社会受容性をふまえたより高解像度のシナリオ分析が必要であり、この研究の意義は非常に高く、環境行政に大いに貢献する。限られた時間とリソースではあるが、成果を出し、政策に生かしていく観点から、日本の国レベル、自治体レベルでの高解像度で実	自治体レベルでのシナリオを作成すること自体は本課題の範囲を超えているので残念ながらできませんでした。ただ国レベルのシナリオについてはデータを公開し、一般にアクセスできる状態にしました。地方自治体・国・企業を問わず、是非とも活用していただければと考えております。

<p>現可能なシナリオ研究を期待する。環境省では建物や移動に係る面的なCO₂ 排出量を見える化する都市炭素マッピング手法の開発を来年度から自治体と連携をして構築し、将来シナリオを検討することとしている。例えば、このような環境省事業とも密接に連携しながら、地域及び国の政策に活用できる脱炭素社会への道筋の研究が求められている。」</p>	
<p>中間評価コメント「カーボンニュートラルに向けて、シナリオ A、B、C が説得力のある形で示され、1.5°C安定化に向けた実現可能性を考慮した脱炭素社会のシナリオ分析を実施している点は高く評価する。IPCC への貢献や論文発表で十分に成果を挙げており、ライフスタイル変革、革新技術の導入や環境政策について具体的な記述があることから、国際的・国内的政策へのインプットとして期待できる。ステークホルダーグループとの関係では、消費生活や循環経済といった切り口での効果をどう見せるかという観点も重要である。本研究で提案されているシナリオは脱炭素の視点からなされているが、他の重要な社会的要請、例えば、生物多様性保全、地域循環共生圏にも資するよう、統合的に考えて頂くことを期待する</p>	<p>ステークホルダーグループとの関係については、一般市民を対象にしたことから人々の生活・消費について実際に考えてもらいそこから含意を得ました。循環経済については対象とする範囲を超えており、対応することが難しかったです。一方、他の重要な社会的要請については例えば生物多様性保全で明示的に研究を行いました。当該分野で著名な国際応用システム分析研究所（IIASA）との国際共同研究として現在研究論文のとりまとめ作業を行っており、IPBESなどへも重要なインプットになるものと考えております。</p>