Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費　終了研究成果報告書

全体の総括と統合的戦略評価
(S-14-1)

平成27年度～令和元年度
(2015～2019年度)

Comprehensive and Strategic Assessment

〈研究代表機関〉
国立大学法人 東京大学 生産技術研究所

〈研究分担機関〉
学校法人 東京都市大学
国立大学法人 九州大学

〈研究協力機関〉
国立大学法人 東京大学 大学院工学系研究科
公立大学法人 福島県立医科大学
みずほ情報総研株式会社
TCO2株式会社
農業・食品産業技術総合研究機構

令和2年5月

目次

Ⅰ．成果の概要 ・・・・・・・・ 1
１．はじめに（研究背景等）
２．研究開発目的
３．研究開発の方法
４．結果及び考察
５．本研究により得られた主な成果
６．研究成果の主な発表状況
７．研究者略歴

Ⅱ．成果の詳細
Ⅱ－１　多様な指標による気候変動対策の統合的多面的な評価 ・・・・・・・・ 21
（国立大学法人 東京大学 生産技術研究所）
要旨
１．はじめに
２．研究開発目的
３．研究開発方法
４．結果及び考察
５．本研究により得られた成果
６．国際共同研究等の状況
７．研究成果の発表状況
８．引用文献

Ⅱ－２　ライフサイクルアセスメントによる気候変動影響評価 ・・・・・・・・ 38
（学校法人 東京都市大学）
要旨
１．はじめに
２．研究開発目的
３．研究開発方法
４．結果及び考察
５．本研究により得られた成果
６．国際共同研究等の状況
７．研究成果の発表状況
８．引用文献

Ⅱ－３　主観的幸福度なども活用した気候変動対策の費用便益分析 ・・・・・・・・ 58
（国立大学法人 九州大学）
要旨
１．はじめに
２．研究開発目的
３．研究開発方法

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

Ⅲ．英文Abstract ・・・・・・・・ 75

Ⅰ．成果の概要

課題名　　S-14-1　全体の総括と統合的戦略評価
課題代表者名　沖 大幹　（国立大学法人 東京大学 生産技術研究所 教授）
研究実施期間　平成27年度～令和元年度（2015～2019年度）
研究経費（累計額）　241,705千円
（平成27年度：50,667千円、平成28年度：48,446千円、平成29年度：48,447千円、平成30年度：46,024千円、令和元年度：48,121千円）

本研究のキーワード　気候変動、適応策、緩和策、多面的評価手法、障害調整生命年、ライフサイクルアセスメント、主観的幸福度

研究体制
（１）多様な指標による気候変動対策の統合的多面的な評価
（国立大学法人 東京大学 生産技術研究所）
（２）ライフサイクルアセスメントによる気候変動影響評価（学校法人 東京都市大学）
（３）主観的幸福度なども活用した気候変動対策の費用便益分析（国立大学法人 九州大学）

研究協力機関
（１）　国立大学法人 東京大学 大学院工学研究科、公立大学法人 福島県立医科大学
（２）　みずほ情報総研株式会社、TCO2株式会社、農業・食品産業技術総合研究機構
（３）　特に記載すべき事項は無い

１．はじめに（研究背景等）

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第 5 次評価報告書が公開され、第 1 作業部会の報告書では地球の気候システムの温暖化は疑う余地がなく、人間活動が 20 世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因であった可能性が極めて高い（95 %以上の可能性）とされ、地表面気温だけではなくむしろ主に海洋の水温上昇としてその影響が現れていることが述べられている。

気候変動のメカニズム解明や、気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）の第 2 条に書かれた「危険な人為的干渉とならない温室効果ガスの濃度水準」がどのくらいであるのか、さらには気候変動によってどのような影響が生じるかに関する研究が鋭意進められているが、人類はそうした気候変動に対して常に無策であるわけではなく、気候変動が生じても持続可能な開発が担保されるような対策、いわゆる適応策の効果についても研究が進められている。

IPCC でも第 4 次報告書以来、第 2 作業部会の評価報告書では緩和策と適応策とは気候変動対策における車の両輪である、と位置づけられているが、つい最近まで両者は別の文脈で取り扱われることが多く、日本では適応策への取り組みが遅れていた。2013 年になってようやく適応策に関する省庁横断的な取り組みが始まったところであり、両者の統合的な実施による効果的で効率的な気候変動対策の計画立案支援、ならびにカンクン合意に基づく発展途上国向けの気候変動適応計画の策定に関わる国際交渉に資する研究開発が期待されている。

緩和策と適応策の効果性や効率性を評価するための判断材料の一つとして、費用効果分析あるいは費用便益分析が必要である。緩和策、適応策に伴う便益には、例えば、防災整備などによる well being の向上や安心感の獲得など、従来の経済的指標では扱いきれない便益もある。そこで、被害額や投資額といった従来の経済的指標に加えて、主観的幸福度や生計資本といった指標なども勘案して多面的に評価し、緩和策と適応策の効率的で効果的な実施策に関する知見が求められている。

２．研究開発目的

本テーマの最終目標は、プロジェクト全体を通して、主にグローバルを対象とし、緩和策と適応策のバランスを、国や地域のまとまりごとに評価することである。利用可能な CMIP5 の気候変動シナリオのうち、主に RCP 8.5 と RCP 2.6 の利用を念頭に置いている。また、研究成果を速やかに国際社会に発信するとともに気候変動政策に生かせる形での取りまとめも行う。これにより、気候変動対策における車の両輪と位置付けられている緩和策と適応策を同一の指標を用いて包括的に評価することで、両者の統合的な実施による効果的で効率的な気候変動対策の計画立案支援、ならびにカンクン合意に基づく発展途上国向けの気候変動適応計画の策定に関わる国際交渉に資することを可能とする。その全体の一翼を担うため、統合的戦略評価を行う。被害額や投資額といった従来の経済的指標に加えて、主観的幸福度や生計資本といった指標なども勘案して多面的に評価し、緩和策と適応策の効果的で効率的な実施策に関する知見を提供する。

次にサブテーマ間の連携について述べる。テーマ 1 では、戦略課題全体の総括として、テーマ間の研究調整、連携の促進、ならびに課題全体の進行管理の役割を担い、各テーマの成果を統合し、世界、各国、日本、地方自治体、個人としてどのように緩和策と適応策のバランスをとりつつ気候変動対策に取り組むのが効果的であり効率的であるかを様々な指標に照らして多面的に評価する（サブテーマ(1)）。また、そうした統合的な評価にあたっては、テーマ 2 やテーマ 3 の知見を集約化し、ライフサイクルアセスメント（LCA）の枠組みで人間健康や生物多様性といったエンドポイントでも気候変動対策の効果を明らかにできるようにする（サブテーマ(2)）。さらに、サブテーマ(2)とも連携しつつ主観的幸福度や障害調整生命年（DALY）などの指標も用いた気候変動の影響評価、すなわち緩和策や適応策の費用便益分析手法を開発し、サブテーマ(1)の統合評価で利用可能とする（サブテーマ(3)）。

３．研究開発の方法

（１）多様な指標による気候変動対策の統合的多面的な評価

1)　SSPシナリオを用いた日本の将来における環境負荷原単位の開発

将来起こりうる気候変動による被害を経験するため、緩和策と適応策両方の取り組みが有用であるが、それらによる負荷を含めた将来の被害推計が必要である。そこで、多様な指標による気候変動対策の統合的多面的評価のための基礎研究として、SSPシナリオを用いた日本の将来における環境負荷原単位の開発を行う。

緩和策と適応策に伴う、人間健康の被害や生態系の劣化といった温暖化による被害について、検討する。最後にそれぞれの被害を比較または統一可能にするために統合化を行う。

人間健康及び生態系の劣化による被害係数及び統合化係数はサブテーマ2によって開発/改良されるため、サブテーマ1では将来のCO_2排出原単位について検討する。既存の環境負荷原単位は大きく分けて積み上げ法と産業連関法によるものがあるが、評価範囲の広さやサプライチェーン全てを含めた評価が可能となるなどの利点から本研究では産業連関法を用いる。フローチャートは詳細版を参考にされたい（図3.1.1）。

2)　費用便益分析及び地域間産業連関表の調査

気候変動の費用便益分析の評価方法の確認や既存研究の把握のために文献調査を行った。また、本プロジェクトは全球を対象としているため、一国産業連関表ではなく、多地域間産業連関表を用いることが望ましい。そこで国際産業連関表の調査を行った。

3)　日本を対象とした主観的幸福度調査の実施と指標開発

これまで緩和策と適応策による効果を経済や環境負荷、健康被害や生物多様性といった複数の指標で評価されてきたが、対策と幸福度の関係が分析されてこなかった。そこで、本研究では、日本を対象に主観的幸福度調査の実施と指標開発を行った。

ここでは主観的幸福度指標開発について記載する。本研究が提案する指標は生存曲線(S(t))とSWB(subjective well-being)を組みあせたものであり、リスクによる影響の度合いや対策の効果を統合的に評価する(式(1)-3)。

$$\sum S_c(t) \times SWB_c(t) - \sum S(t) \times SWB(t) \qquad (1)\text{-}3$$

アンケートは日本の47都道府県、20代から60代の男女を対象に5,734名からサンプルを得た。これらの得られたデータは年齢階級、性別、居住都道府県を実際の構成に近くなるように調整している。今回はアンケート回答者が実感可能な対策として、堤防及びエアコンに関する質問をしている。さらに調査観察研究では単純に2群の平均を比較しても様々な背景要因から比較しても意味がないという批判を受ける可能性が高いため、傾向スコアマッチングを用いて主観的幸福度の差を推計した。さらにエアコン使用量の削減による緩和効果と主観的幸福度への影響を定量的に評価した。

4)　2011年タイ洪水による全球被害の算定

気候変動の影響により、将来的にも災害が増加すると予測されている。日本は輸入大国であり、自国が被災せずとも輸出相手国が被災すれば、間接的に被害を受ける。実際、2011年のタイ洪水では日本をはじめとした多くの国々がサプライチェーンの寸断による被害を受けた。しかし、それら全球的な被害総額や影響国・産業部門割合がどの程度なのかは分かっていない。そこで、本研究では2011年タイ洪水による全球被害の算定を行った。

ここでは2011年タイ洪水による影響が全球的にどう波及していくかを分析した。本研究において、影響は2つからなる。1つ目は洪水によって破壊された工場や機械、部品及び製品の被害である。2つ目は洪水によってストップし、本来は得られるはずだった機会損失である。シナリオとして、被害はその後、100％再建されると想定し、再建による環境負荷影響までを対象に推計を行った。実際、高いリスクマネジメントを有する企業ではサプライチェーンの寸断による影響を受けない事例もあるが、今回は被害の潜在性を含めるため、最大値を示した。推計手法は産業連関分析であり、サプライチェーンの上流と下流の双方を推計するため、前方連関モデルと後方連関モデルを用いた。また、産業連関表は世界最大の多地域間産業連関表Eoraを基にしている。被害と機会損失は国連よりデータを得た。環境負荷による被害額はLIME2を用いており、単位あたりのCO_2排出量から発生する健康被害と社会資産の損失が統合化され、価値(円)が示される。

5)　SSPシナリオ別将来予測型産業連関表の開発

将来の緩和策及び適応策の評価が求められている。しかし、LCAの分野では過去の統計値やヒアリングデータを基にした環境負荷データベースが整備されているのみであり、将来予測型環境負荷データベースは存在しない。そこでSSPシナリオを基に将来予測型環境負荷データベースを開発した。

S-14では将来の緩和策及び適応策の評価を検討している。上述した通り、従来のLCA分野における環境負荷データベースは過去の統計値やヒアリングデータを基に開発されているため、各国の数値は過去の経済構造や技術を反映した結果となる。これらの値を固定化し、将来の対策を評価するのは一つのシナリオとしてありうるが、それだけでは現実的ではない。一方、動的モデルであるCGEの分野ではSSPシナリオ別に将来の経済構造や環境負荷、労働に関するデータを作成している。そこで、本研究ではテーマ5が研究を進めているAIM/CGEのSSPシナリオ別年次別データ(GDPやCO_2等)をEora及びAIM/CGE部門対応表を介して、多地域間産業連関表Eoraに外装し、将来の産業連関表を開発した。多地域間国際産業連関表Eoraは180か国、約15000の産業部門を有する世界最大の産業連関表である。Eoraを使用することで各国間の輸出入を介した生産効率や技術影響等を加味することができる。EoraとAIM/CGEの部門対応表はこれまで存在しなかったため、開発した。将来の産業連関表に関しては2010年版EoraとAIM/CGEからの外装データを基にGRAS法を用いてSSP別に開発した。

6)　LCA手法を用いた生物多様性評価

多様な指標の一側面として、生物多様性が挙げられる。気候変動に加え、人口増加や生活水準の上昇に伴う土地改変が進むことにより、生物多様性が劣化している。これらは一国のみだけでなく、他国への輸出や輸入が深く関わっている。そこで本研究ではLCA手法を用いた生物多様性評価を行った。

土地改変による生物多様性の劣化を測るため、世界各国の年あたりの土地改変量及び最終消費を得ることが出来れば輸出入をも含めた世界各国の土地改変量が把握でき、さらに被害係数(LIME係数)を乗じることにより、世界各国の土地改変による被害推計が可能となる(式(1)-4)。

$$B_{ij} = d_{ij} \times (I - A)^{-1} \times F \times LIME2_{ij} \qquad (1)\text{-}4$$

ただし、Bは生物多様性の被害、dは1000US$あたりの土地改変量、Iは単位行列、Ａは投入係数行列、Fは最終需要、LIME2は土地改変による被害係数である。i及びjはそれぞれ多地域間国際産業連関表Eoraの14839部門に対応し、d、F、LIME2は対角行列となる。なお、データの年次は2011年を採用した。上記の方法により、世界各国の輸出入を加味した生物多様性の劣化損失を推計した。

なお、Eoraが網羅する地域は広大である。結果を分かりやすくするため、本研究では180か国を13地域に集約した。下記に集約した地域と略称を示す。

Africa: AF, Central Asia: CA, East Asia: EA, East South Asia: ESA, Europe: Euro, Japan: JP, Latin America and the Caribbean: LAC, North Asia: NA, Northern America: Nam, Oceania: O, ROW: ROW, South Asia: SA, West Asia: WA

7)　気候変動の総コストの統合評価

これまでの気候変動による影響評価は、セクターによって被害額や影響人口で推計されており、これらを単一指標でそれなりの解像度で示されたものはなかった。S-14の中で、ライフサイクルアセスメント（サブテーマ(2)）や一般均衡モデル（テーマ5）を用いた研究グループや、生態系における影響評価（テーマ2）や主要なセクターにおける費用便益分析（テーマ3）を実施する研究グループから出てくる成果を取り纏め、統合評価した。

本統合評価で利用した項目は、ここで統合した部門は、**表3.1.1**、**表3.1.2**を参照されたい。ここで統合するにあたり、いくつか注意すべき点があるので、その点は成果の詳細に記載した。

まず、総費用であるが、利用可能なデータ期間などの制約があるため、2001年から2100年までの総額である。そのうち、経済被害については、AIMから農業、冷暖房需要、熱関連超過死亡、労働生産性、低栄養、沿岸浸水、河川洪水、水力発電、火力発電の推計値が提供される。続いて、人間健康と生物多様性、社会資産のうちサンゴ礁と土地損失については、LIME3（Murakami et al., 2018）から推計した値を用いており、これらはWTP係数によって金銭換算されている。

このような定量評価で重要なのが、不確実性をしっかり示すことである。本研究では、AIMによる経済被害推定では取り扱ったGCMの数（5個）を不確実性の幅として表現している。LIMEによる経済被害（社会資産のうちサンゴ礁と土地損失）推定ではWTP係数に幅を持たせている。生態系影響については、RCPのみ（将来の土地利用を想定）に依存し、5つのGCM間のばらつきで不確実性が示される。健康影響（DALY）と生物多様性損失（EINES）では、その金銭換算に用いるLIME3のWTP係数の範囲をさらに考慮することで、不確実性を示している。

（２）ライフサイクルアセスメントによる気候変動影響評価

1)　気候変動を対象としたライフサイクル影響評価手法の開発と SCC（社会的炭素費用）の算定

「人間健康」「生物多様性」「社会資産」を対象として温室効果ガス単位量排出による潜在的な被害量増分を表す被害係数の開発を行った。健康影響では、社会経済シナリオによって被害が大きく異なることから SSP シナリオごとに算定した。CO2 単位量排出による追加的世界平均気温上昇量の推計は、簡易型気候モデル MAGICC5.3（Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change）v5.3 model（Wigley, 2008）を用いた。世界平均気温 1 ℃あたりの地域別疾病別の相対リスクについては、WHO（2014）の結果を基に疾病ごとに算出した。ここではなるべく包括的に評価することを目的として WHO（2014）において定量化されたすべての疾病（低栄養、マラリア、熱ストレス、洪水、下痢、デング）を対象にした。人口については SSP シナリオ別の人口データを参照した。死亡一件あたりの損失余命（DALY）については、WHO“Global Health Estimates（GHE）”から抽出したデータを基に算定を行った。

生物多様性の影響評価手法開発では、維管束植物 2,507 種を対象に気候変動による絶滅リスクの増分を算定し、これらを代表する被害係数を得た。気温上昇量の計算では健康影響と同様、MAGICC を用いた。気温と絶滅リスクの関係の推計については、気温 1 ℃あたりの絶滅割合を算出した。生物種ご

とに現在と将来の潜在的種分布面積を種分布モデル MaxEnt を用いて算定し、その差分から減少速度を得た。さらにその結果の逆数を取ることで一年あたりの絶滅リスクを求めた。MaxEnt モデルへのインプットデータについて、現在の分布データは GBIF より収集した 2,507 種を収集し、現在と将来の環境データ（土地利用変数 4 種、気候変数 7 種）は History Database of the Global Environment より得た。次に、潜在的絶滅リスクの合計を取った後に全評価種数で割って平均値を得て、評価対象種に乗じることで被害係数を得た。絶滅危惧種と非危惧種により、気候変化による影響の感度が異なるため、IUCN データを基にこれらを区別して算定した。

気候変動は人間社会、社会インフラ、各産業にも甚大な被害をもたらす。本研究では社会資産への影響の開発を他のテーマからの成果を活用しつつ実施した。従来 LCAにおいて評価に含めていた農作物、エネルギー資源、土地水没に加えて、新規にサンゴ礁、内陸洪水、海岸洪水、労働生産性を加えた計7項目を本研究の評価対象とした。社会資産被害係数は、単位量の温室効果ガスが追加排出されたことによって生じる社会資産の被害額と定義し、各項目の影響を経済指標で表した後、これらの結果の総和を取ることで係数を SSP シナリオごとに得た。

これらの過程を経て開発された被害係数はエンドポイントごとに異なる指標が採用されている（健康：損失余命、生物多様性：絶滅リスク、社会資産：経済指標）。本研究では、これらの異なる被害を SCC（Social Cost of Carbon：社会的炭素費用）の算定に利用した。経済価値化は LCA の影響評価手法 LIME を利用して被害量から経済指標に換算した。

2) 影響領域間のトレードオフ、コベネフィットを考慮した気候変動対策の LCA

有力な気候変動緩和策と適応策についてボトムアップ的な観点から分析するため、複数の対策を抽出して LCA を行うとともに、対策間の比較を行うためライフサイクルの視点に基づく費用対便益分析を行った。緩和策の評価においては、自動車、発電とプラスチックを取り上げて、LCA のメタ分析を通して、代表性を向上した気候変動の緩和策としての定量的評価を行った。国内外で行われている LCA の査読付きの論文を Google scholar、Science Direct に加え、LCA データベースを用いて収集した。収集した論文には LCA 結果が表形式やグラフ形式で記載されており、そこから標本値を抽出した。メタ分析に用いた論文数、標本数の情報を**表3.2.2**に示す。

表3.2.2：使用論文数及び標本数一覧。

	自動車	発電	プラスチック
論文数	27	71	29
標本数	547	2046	347

自動車の種類は、ガソリン車、ディーゼル車、ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車及び電気自動車（電力源別に、化石燃料由来、電力ミックス、非化石エネルギー）、燃料電池自動車、その他、の 11 種類に分類した。発電は、石炭及び天然ガス（それぞれ CCS あり、CCS なし）、石油、地熱、風力、原子力、水力、太陽熱、バイオマス、太陽光（シリコン系、単結晶シリコン、多結晶シリコン、アモルファスシリコン、テルル化カドミウム、ガリウムセレン、パネルの詳細不明）の 18 種類に分類した。プラスチックは、PE、PET（それぞれ石油由来、バイオマス由来）、PLA（キャッサバ由来、サトウキビ由来、トウモロコシ由来、ミックス由来）の 8 種類に分類した。ライフサイクル全体の評価を行うため、不足している段階は他の文献等より補う補正を行った。このようにして補正されたライフサイクル全体の GHG 排出量を用いて自動車、発電の分類別に箱ひげ図を作成した。プラスチックでは樹脂の製造段階の GHG 排出量を用いて箱ひげ図を作成した。

浄水器、海水淡水化プラント、空調機を対象に適応策の LCA を実施した。適応策の導入による便益は評価対象ごとに算定する必要がある。空調機導入による睡眠障害と疲労軽減についてはジャカルタを対象に調査したテーマ 4 の研究成果を活用した。海水淡水化プラントの導入による便益は淡水消費による被害係数（感染症、栄養失調）（Motoshita et al., 2014）を生産された淡水量に乗じることで算

定した。浄水器の利用による便益は WHO の水質ガイドラインより各地域の感染症リスクの軽減効果を損失余命に換算することで評価した。これらの結果と LCA の結果を統合することで、適応策ごとに費用対便益分析を行った。

それぞれのケーススタディを通じて得られた結果は導入可能量を考慮して限界費用曲線を緩和策と適応策についてそれぞれ作成した。これにより、優先的に導入すべき対策とその導入による効果の関係について得ることができる。

（３）主観的幸福度なども活用した気候変動対策の費用便益分析

①本研究ではまず、主観的幸福度アプローチを用いて日本国内の都道府県または地域間で緩和策及び適応策の価値がどれくらい異なるかという研究を行う際の基礎研究として、どのような個人属性を持つ人がどの程度の緩和策及び適応策をとるかという研究を行った。まず、都道府県レベルでの人工資本、人的資本、自然資本、社会関連資本のデータを収集した。次に、九州大学馬奈木俊介研究室が 2015 年に行った国内大規模調査のデータを用いて、個人レベルの気候変動対策行動の価値を推計した。大規模アンケート調査は 2015 年 12 月に九州大学馬奈木研究室が行った。アンケートはインターネットで回答する形式で行い、日本国内に居住する人を対象者とした。収数は 246,642 人となった。この調査結果を用いて、主観的幸福度アプローチにより各気候変動対策の価値を推計した。この文脈での主観的幸福度アプローチとは、ある特定の対策の実施価値を主観的幸福度単位で推計し、さらにその価値をちょうど補償する収入金額を推計することで金銭価値化する手法である。

②まず、緩和策・適応策への最適資源配分問題を定式化する。意思決定者は使用可能な資源量を賦与され、それを緩和策・適応策に配分し投入する。緩和策への投入量が増えるほど気候変動によって引き起こされる災害確率が低下し、適応策への投入量が増えるほど災害が起こった際に受ける被害が小さくなると仮定する。またそれぞれの策への追加的な投入によって得られる便益は逓減する、すなわち投入量が増えるにつれ追加の便益は小さくなる、と仮定する。このような状況において、使用可能な資源量の変化が最適な配分に与える影響が、異なる被害削減の関数型のもとでどのように変化するか調べる。

③本研究では生態系による蓄積・排出作用を既存の炭素循環モデルに加えることで、生態系の変化が炭素貯留に与える影響をモデルに組み入れた。さらに、経済活動から得られる我々の効用に生態系が存在することによる付加価値が与えられた場合の推計を可能とし、最適行動の変化傾向について分析を行った。分析対象となる行動変化については技術の選択も含まれており、短期的な CO2 削減効果が大きいものの長期的には生態系への悪影響をもたらしうる技術が、いかなる状況下で選択されるかについても検討した。

④最後に沿岸生態系が CO2 を吸収する役割を果たすことに着目し、沿岸生態系の面積を保全した場合の CO2 排出量と経済活動への影響を評価する。従来の DICE モデルに沿岸生態系が CO2 を吸収する働きをするというメカニズムを組み込んだうえで、異なる気候変動目標と異なる沿岸生態系保全シナリオの下で、CO2 排出量と経済活動がどのような影響を受けるかについて分析する。

４．結果及び考察

（１）多様な指標による気候変動対策の統合的多面的な評価

1)　SSPシナリオを用いた日本の将来における環境負荷原単位の開発

SSPシナリオ3における2020年GDP値を基にCO2排出原単位(ton-CO2/百万円)及びCH4排出原単位(ton-CO2eq/百万円)を推計した(図(1)-1)。部門数は2011年の基本分類396部門からエネルギー部門等を拡張し、408部門である。CO2排出原単位に関しては都市ガス、ガス火力、石油火力、石炭火力などのエネルギー部門が最も高い傾向を示したほか、二次産業の生コンクリートや塗装材料、三次産業の沿海・内水面輸送や自家輸送(貨物自動車)などの運送部門が高い傾向を示した。次にメタン排出原単位では米や肉牛、豚などの一次産業で高い傾向を示した。その影響により学校給食などの二次産業でもその波及効果を受けて値が大きくなっている。排出源として、米はそれ自体からのメタン排出ではなく、水田の土壌

中に存在する嫌気性微生物のメタン生成古細菌により生成されるものがほとんどである。野菜などからも肥料の由来のメタンは排出されるが、米由来のものよりは小さい。牛や豚、鶏由来のメタン排出も多いものの、牛の反芻由来のメタン排出が特に大きい。原単位の精度に関しては将来予測の値であるため、厳密な比較は難しいが、既存研究(Nansai et al., 2012)と全体の傾向は近いことが明らかになった。二酸化炭素やメタン以外の対象物質への適用や各部門別環境負荷の低下率を加味した検討及びサブテーマ3による生態系の付加価値の導入を行う。これにより、サブテーマ2が開発する影響評価係数への接続が可能となり網羅的な評価へと繋がる。また生態系の付加価値導入はこれまで評価されていなかったものが経済価値を持ってくるため、経済の構造が変異した結果、政策的な判断が異なってくると予想されることから検討を行うことが求められる。

2)　費用便益分析及び地域間産業連関表の調査

文献調査により、セクターによって、気候変動を起こす原因の考慮範囲や評価対象とする範囲、気候変動の影響領域に差異があることが分かった。そして、不確実性を扱う上で、仮定や評価結果を一つに絞ってしまうのではなく、起こりうる将来を複数想定して複数の評価結果を提示する”Agree-on-decisions” approachesの重要性を認識した。

次に前項1)で説明した将来の産業連関分析手法をグローバルに展開するには対象地域を多く含む網羅的な産業連関表が必要である。主要な多地域間産業連関表として、アジア国際産業連関表、 GTAPデータベース、 EXIOBASE、 WIODデータベース、 Eora多地域間産業連関表が挙げられ、それらを対象に調査を行った。詳細は、成果の詳細に譲るが、当然のことながら目的や開発する拠点によって対象地域の網羅範囲や産業部門の詳細度、環境負荷情報の有無、使用用途が大きく異なることが分かる。アジア国際産業連関表やGTAPデータベース、EXIOBASE、WIODデータベースは部門数が全ての国で共通しているため、比較する際に容易であるという優位性を持つ一方、Eora多地域間産業連関表は圧倒的な対象国と対象部門の網羅性、詳細性を有していることが分かった。

3)　日本を対象とした主観的幸福度調査の実施と指標開発

主観的幸福度係数を単純比較するため、生存年数は全て100年として、推計を行った。傾向として、全体的に男性よりも女性の方が幸福を感じる割合が高いものの、対策の有無の差(効用)は男性の方が大きい結果となった。河川堤防と海岸堤防に着目すると、これらは同じ傾向を示しており、男性の幸福度がより大きく反応している。次にエアコンに着目すると、男性はエアコンを適用した方が幸福度が高くなる一方、女性は適用しない方が幸福度が高い結果を示した。さらに会社よりも自宅のエアコンの方が効用が高く/低くなるなど、場所によって幸福度の効用に違いがでることが示された。

さらにエアコン使用量の削減による、熱中症や洪水による死亡リスク低下といった緩和効果と主観的幸福度の変化への影響に着目した。その結果、現在気候においても、洪水や熱中症による死亡リスクの大きさはエアコン使用を約2日程度控えた程度であり、気候変動が進んでもRCP2.6で約4.5日程度、RCP6.0で約6日程度にしか相当しない。このように、well beingの低下による影響は、思った以上に大きく、well beingを無視あるいは度外視した緩和策は合理的でない可能性を無視できない。

4)　2011年タイ洪水による全球被害の算定

2011年タイ洪水による全球被害の算定を行った。全球を含めた被害(Damage)は約660億US$、機会損失(loss)は約1600億US$であった。被害は全て復興させると仮定しても約920億US$のマイナスである。全体に占めるタイの被害及び機会損失割合はそれぞれ、全体の70%、60%である。その他が30%、40%を占めるが、大半はアジア及び欧州に集中しており、それ以外の地域では3%以下である。

操業停止による間接的機会損失は直接機会損失額が大きかった部門と基本的に一致する傾向を示した。また、機会損失が出た部門の関連部門(Rice millingやCanning Preserving of fish)はその部門に直接の機会損失が少なくても、波及効果によって影響を受けていることが確認された。一次産業は相対的にタイの自国比率が高い特徴を持つ一方で、二次産業(特に電子製品、部品、自動車関連)は海外比率

が高い特徴を持つ。これら二次産業の影響は海外では中国で約32億US$、日本で約19億US$などの先進国が多くみられた。また、娯楽や銀行でも機会損失の影響が一定割合見られる他、自国の生産比率が高い日本の米は影響が少ないなど特徴が示された。最後に建設によるCO2由来の被害額を推計した。排出されるCO2量は合計で1.3E+07t-CO2であり、これを金額に換算すると約3億US$である。内訳として人間健康による被害が86%、社会資産が14%となり、排出国はタイが70%、他国が30%である。

5)　SSPシナリオ別将来予測型産業連関表の開発

Eora及びAIM/CGEの部門対応表を用いてSSP1及び3シナリオの2020年から2100年までのCO_2量を各国別に推計した。シナリオ1の2020年では2.9E+10t- CO_2、2030年では3.2E+10t- CO_2、2040年では3.3E+10t- CO_2、2050年では3.3E+10t- CO_2、2060年では3.1E+10t- CO_2、2070年では2.9E+10t- CO_2、2080年では2.8E+10t- CO_2、2090年では2.6E+10t- CO_2、2100年では2.5E+10t- CO_2であった。それに対してシナリオ3の2020年では3.4E+10t- CO_2、2030年では4.1E+10t- CO_2、2040年では4.6E+10t- CO_2、2050年では5.2E+10t- CO_2、2060年では5.6E+10t- CO_2、2070年では6.0E+10t- CO_2、2080年では6.5E+10t- CO_2、2090年では7.0E+10t- CO_2、2100年では7.5E+10t- CO_2であった。

シナリオ1が2040年から2050年でCO_2がピークに達し、以降減少傾向に向かうのに対して、シナリオ3では、2100年まで排出量が増加し続ける傾向を示した。これは元々の外装データと一致する傾向である。国別に着目すると、SSP1ではアメリカ、中国、インド、ロシア及び日本で特に顕著な数値が見られた。SSP3では上記に加え、南アフリカを始めとしたアフリカ大陸の国々やアジア数か国も数値の増加が見られた。

6)　LCA手法を用いた生物多様性評価

土地改変による生物多様性の劣化とそれに伴う被害額を消費ベースと生産ベースで推計した。生産ベースは実際に生産した国であり、消費ベースは輸出入を加味した最終的な結果である。まず、2011年における世界の土地改変量は5.5億haであった。生産者ベースでみるとアフリカが59%、東アジアが20%、北アメリカが7%、オセアニアが6%、ラテンアメリカが5%、それ以外の国は1～0%となっている。消費者ベースでみると、アフリカや東アジアなどの発展途上国を多く有する地域は生産者ベースに比べて1～2%程度低い一方、日本やヨーロッパの先進国は1～2%程度高くなったことが分かる。これは発展途上国の輸出品目が広大な土地が必要な作物や家畜、林業などの一次産業が多い一方、先進国で輸出が多い品目は集約化可能かつ技術発展によって生産効率が上昇可能な二次産業であることが多いからである。これらによる絶滅種数は71種であり、4400億US$となる。消費者ベースと生産者ベースの傾向は土地改変と同じく、先進国と途上国の輸出入関係を示すものになったが、土地改変面積と異なり生産ベースでは東アジアが26%、東南アジアが25%、ラテンアメリカが21%、アフリカが13%、オセアニアが7%、南アジアが5%となるなど地域の傾向が異なった。これは特にアジアやラテンアメリカにおける単位当たりの影響が大きいことに由来する。

7)　気候変動の総コストの統合評価

まず経済被害を推計した。単位は、兆ドルである。経済被害とは、AIMが推計する農業生産性、飢餓、熱関連超過死亡、冷暖房需要、労働生産性、水力・火力発電、河川洪水、海面上昇による土地損失と、LIMEが推計する社会資産のうちサンゴ礁と土地水没になる。ここで海面上昇の影響が重複しているように見えるが、AIMでは沿岸浸水としてのGDPへの影響、LIMEでは人命損失（DALY）と土地損失（社会資本棄損）をそれぞれ計上している。いずれのシナリオ（SSPとRCPの組み合わせ）においても、熱関連超過死亡と労働生産性が多く、この2つで半数を占めるていることがわかる。それに続いて、サンゴ礁、土地損失（社会資本棄損）、冷暖房需要が続いている。またどのSSP（1、2、3）でも、二酸化炭素の排出量が多いほど経済被害の総額は大きい。一方で、二酸化炭素の排出量を固定させると、社会シナリオの選択による差が見える。地域分断といわれるSSP3が一番小さく、持続可能といわれるSSP1が一番多くなる。そのため、緩和策や適応策の実施が最も困難といわれるSSP3でもRCP8.5を避ければSSP1の社

会よりも経済被害が小さくなる。

次に健康被害をDALYで集計した。単位は百万年である。健康被害は、沿岸洪水、デング熱、下痢、マラリアを評価対象とした。デング熱はほかの3つと比べてとても小さく、どのシナリオでもマラリア、沿岸洪水、下痢の順に多い。また、多く二酸化炭素を排出するほど、社会が地域分断になればなるほど、健康被害は増加することが示された。LIMEによる生物多様性損失（EINES）を示す。ここでは維管束植物28万種のみを対象としている。二酸化炭素の排出量が増えれば、その分EINES、絶滅余命の逆数は不確実性が大きいものの増加することがわかる。

AIMで推計された緩和費用を合わせ、総計したものが、**図4.1.10（非公開）**と**図4.1.11（非公開）**である。単位は、兆ドルとGDP比（%）である。総計する際、健康被害は2.3E+4 US$/DALY（±7,900）、生物多様性は1.1E+10 US$/EINES（±1.1E+9）として経済換算した。また、社会資本（サンゴ礁、土地損失）は、WTP係数を2.5 US$/US$（±0.88）で換算した。基本的に二酸化炭素の排出量が増えれば、総費用の多くを占める、経済被害が増加し、緩和コストが減少するため、緩和費用がそもそも小さいSSP1では、二酸化炭素の排出量が増えると総費用も増加する。一方、SSP2とSSP3では、RCP2.6（SSP3には無い）からRCP4.5、RCP6.0と緩和費用が大きく減少するために総費用が減少し、RCP8.5では一転増加するパターンとなっている。

S-14によって世界で初めて全球における適応コストを出せるようになった。AIMやLCAにおいてもこれまで考慮されていなかった部門の計算が実施されるなど、まさに最先端の結果を取りまとめられた。このような情報は、世界がどの世界を選択するかを議論するにあたり、貴重な知見である。

図4.1.10：気候変動対策の総費用評価。単位は、兆ドル。（非公開）

図4.1.11：気候変動対策の総費用評価。単位は、GDP比（%）。（非公開）

（２）ライフサイクルアセスメントによる気候変動影響評価

1)　気候変動を対象としたライフサイクル影響評価手法の開発とSCC（社会的炭素費用）の算定

健康影響の被害係数、すなわち、単位量の温室効果ガス排出による損失余命増分の合計値は1.3～2.0×10^{-6} 年/1kgCO2 であった。疾患の中では低栄養の影響が最大であり、これについでマラリアが大きく、下痢と沿岸洪水による影響が同等程度であった。上位三種の疾患はいずれもアジア、アフリカ地域で発生するものであり、気候変動による健康影響は地域差が極めて大きいことがわかった。一方、熱ストレスによる影響はこれらに比べると小さかった。先進国では熱ストレスによる影響は大きいが損失余命で表す場合、高齢者が主に影響を受けるため一件当たりの損失余命は他の疾患に比べて小さい。一方、低栄養やマラリアによる死亡被害の多くは 5 歳以下であることが多く、1 件当たりの損失余命が非常に大きい。これらの影響を受ける年齢層の違いが結果に表れた。

生物多様性の被害係数、すなわち、単位量の温室効果ガス排出による生物種の絶滅リスク増分の合計値は 1.6～4.6×10^{-9} （Extinction species/ton）と算定された。移動不能（NM）は移動可能（FM）より約 2 倍高かった。気候モデル間の差は相対的に小さかった。また、いずれの気候モデルも、危惧種（T）の影響が非危惧種（NT）より大きかった。1 ℃上昇あたりの絶滅割合は、移動能力と気候モデルの違いを考慮すると約 1 ～ 3 %と算定された。これは Urban（2015）の結果と整合した。本研究では 1 ℃上昇あたりの絶滅割合を地域ごとに算定できること特徴がある。各地域の固有種を抽出して、地域別の 1 ℃あたりの絶滅割合を算定した（**図4.2.2**）。その結果、オセアニア、欧州、アメリカ中部が高く、東アジアと北米は相対的に小さいことが示唆された。オセアニアやアメリカ中部は島嶼国が多く、特に移動による適応が他地域よりも困難であることが大きくなった要因として挙げられる。また、本研究では世界平均気温 1 ℃あたりの各地域の絶滅割合を算定しており、ロシアを含む欧州地域では他地域よりも気温上昇量が高いことが結果に影響した。

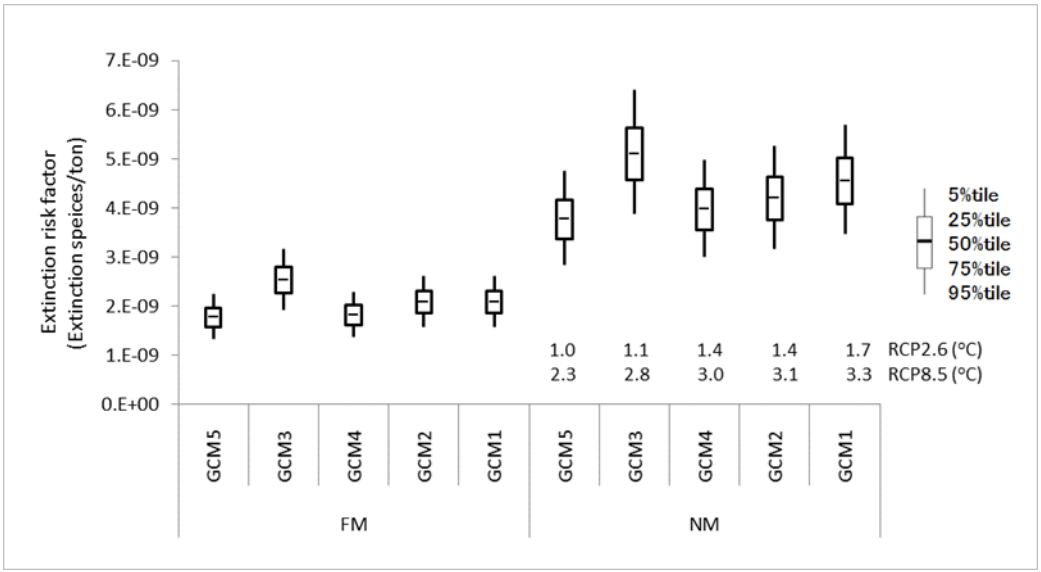

図 4.2.2：気候変動による生物多様性を対象とした被害評価係数（CO2 単位量排出による生物種の絶滅リスクの増分）の算定結果。

社会資産の被害係数、すなわち、単位量温室効果ガスを排出したときの社会資産の損失額は、0.06 ～ 0.11（US$/kg）であった。SSP 別では、将来経済成長が高いと想定される SSP 1 の被害係数が最も大きかった。項目別では、労働生産性の低下による損失が最も大きく、次いで内陸洪水、サンゴ礁、穀物、土地水没による影響が大きかった。一方、エネルギー消費と海岸洪水はこれらに比べて相対的に影響は小さかった。労働生産性への影響が最大であることは、統合評価モデルを用いた研究結果とほぼ同様な傾向を示した。全項目を積み上げた社会資産の被害係数では、Dong et al.（2019）が整理した CO2 の健康被害コスト（0.1 ～ 0.15 US$/kg-CO2）と生物多様性被害コスト（0.04 US$/kg-CO2）と同程度である。今回の研究を通して得られた新しい被害係数は、既存の社会資産を対象とした被害係数と比較して、10 倍以上大きかった（**図4.2.4**）。従来のLCAにおける社会資産の影響は評価範囲が狭く、主要な影響を考慮していなかったことから、今後当該項目に関する評価を算入することが強く求められる結果となった。

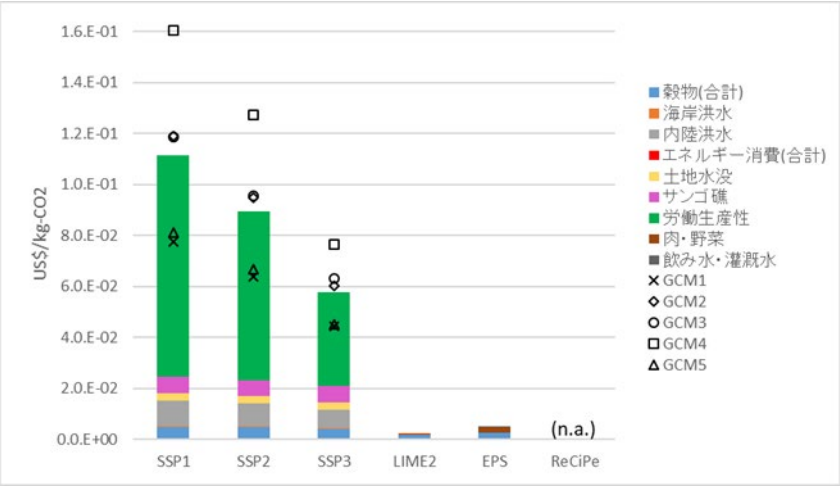

図4.2.4：SSP 別の社会資産被害係数（5GCM の平均値）と既存研究の比較。

被害係数の算定結果を集計することで社会的炭素費用（SCC）の算定を行った。その結果を**図4.2.6**に示す。合計は130US$となった。これは米国歴代政権が実施する SCC に比べて 3 ～ 20 倍程度大きい値となった。これは、本研究における評価範囲が広がったことと割引率を採用しなかったことによる影

響が大きい。SCC の内訳で見ると、最も「社会資産」への影響が大きく、全体のほぼ半分を占め、残りの半分については「人間健康」と「生物多様性」への影響はほぼ同等であった。10 億トンの CO2 を排出した場合、およそ 13 兆円の影響であり、日本の GDP のおよそ 3 %程度に相当する。

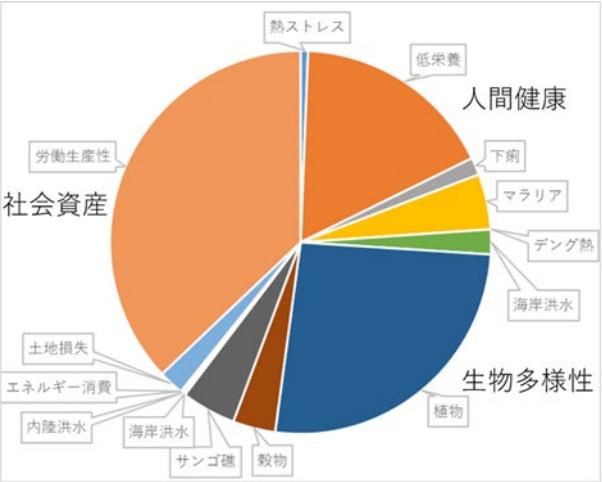

図 4.2.6：SCC の算定結果（SSP2）。

2)　　影響領域間のトレードオフ、コベネフィットを考慮した気候変動対策の LCA

自動車ライフサイクルのメタ分析を行った結果によればガソリン車、プラグインハイブリッド車（電力源が化石燃料由来）が最も GHG 排出量が大きく、0.23 kgCO2-eq/km であった。最も小さい GHG 排出量となったのは電気自動車の非化石エネルギーを使用した場合の 0.05 kgCO2-eq/km であり、最大で 1/5 程度まで削減することができることが分かった。使用段階で電気を使用するプラグインハイブリッド車、電気自動車では発電時の GHG 原単位によってライフサイクル排出量が大きく変化し、プラグインハイブリッド車では化石燃料由来の電力から非化石エネルギー由来の電力に変更することで約 50 %、電気自動車では約 75 %の GHG 削減効果があることがわかった。一般的に使用されている電力ミックスを用いた場合、ガソリン車と比較するとプラグインハイブリッド車では約 20 %、電気自動車では約 40 %の GHG 排出量の削減となった。

発電に関してライフサイクルのメタ分析を行った結果によれば、石炭（CCS なし）が最も GHG 排出量が大きく、およそ 1.00 kgCO2-eq/kWh であった。最も小さい GHG 排出量となったのは水力発電の場合で 0.01 kgCO2-eq/kWh であり、9 割以上の削減効果が確認された。CCS の効果としては、石炭の場合は 1/3 まで（1.00 kgCO_2-eq/kWh → 0.37 kgCO_2-eq/kWh）、天然ガスはおよそ半減（0.63 kgCO_2-eq/kWh → 0.30 kgCO_2-eq/kWh）となった。再生エネルギーに関する LCA 評価事例は多く、種類ごとに評価結果を得ることができた。再生エネルギー間の比較によれば、太陽熱と太陽光発電、バイオマスが相対的に大きく（中央値が 0.05 ～ 0.10 kgCO2-eq/kWh）、風力、原子力、水力が相対的に小さかった（中央値が 0.01 ～ 0.03 kgCO2-eq/kWh）。また特に太陽光発電の評価事例は多く、パネルの種類ごとに考察することが可能であった。

プラスチックに対するライフサイクルメタ分析を行った結果によれば、燃焼による直接排出を含まない場合は、PE はバイオマス由来と石油由来はほぼ同等（2.0 ～ 2.3 kgCO2-eq/kg）であったが、直接排出を含むと、石油由来はおよそ倍の 5 kgCO2-eq/kg-樹脂となった。従って、いずれが良いかは再生されるか否かにより結論が異なることが分かった。また、PLA を始めとした生分解性プラスチックは、原材料とする植物によってその結果が異なる（キャッサバで 1.29 kgCO2-eq/kg-樹脂、トウモロコシで 1.91 kgCO2-eq/kg-樹脂、サトウキビで 2.03kgCO2-eq/kg-樹脂）が、いずれも PE や PET よりも概ね小さかった。ただし、PLA ではトウモロコシ由来の環境負荷の幅が大きかった。トウモロコシは米国での生産が盛んであり 2004 年、2007 年、2010 年と複数年にわたって改善結果が公開されている。特に小さい値については将来目標とするエネルギー効率で計算を行った結果が含まれることが全体の結

果に影響した。

適応策の LCA では、空調機、浄水器、海水淡水化を対象に実施した。ライフサイクルを通じた環境影響の評価に加えてこれらの製品システムを導入することによる気候変動被害の低減量を合わせて計算した。例として空調機の評価結果を図4.2.10に示した。

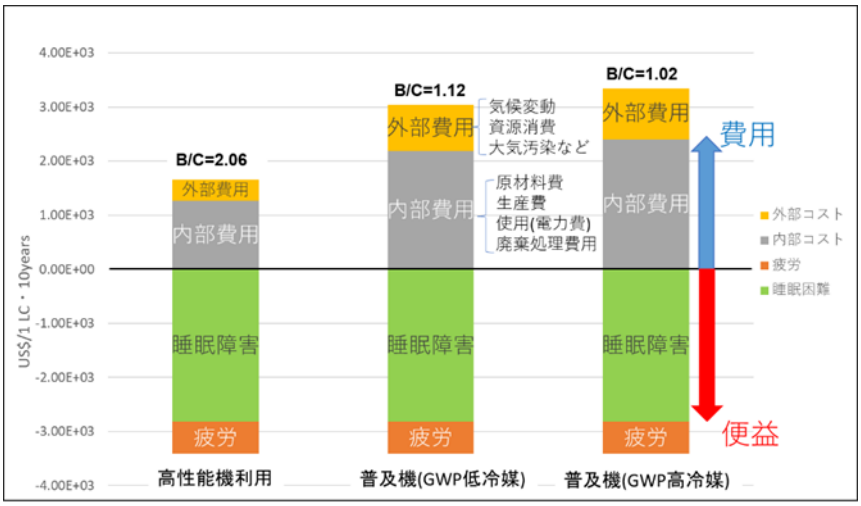

図 4.2.10：空調機を対象とした LCA、LCC 算定結果（機能単位はジャカルタで 10 年間使用）。

インドネシアの空調機普及の割合は低く、かつ、インバータが実装されておらず、GWP が高い冷媒が利用されている。負の値は空調機利用による便益（健康リスク低減）であり値が大きいほど効果は高く、正の値は空調機利用による費用であり値が小さいほうが望ましい。費用は LCC（ライフサイクルを通じて関係者が支払う費用の総計）と LCA（ライフサイクルを通じて発生する環境影響を費用換算したものの総計）で構成される。LCA の結果には気候変動、大気汚染、資源消費による影響が含まれる。普及機（GWP 高冷媒）のものを GWP が低い冷媒に変えた場合、気候変動への影響が低減されるとともに、使用時の電力消費量を若干抑えることができる。これにインバータを利用する高性能機を利用することで、大きな電力消費量低減効果が得られ、LCC、LCA いずれも普及機に比べて半減することができる。

一方、便益はテーマ 4 における研究成果を受けることで睡眠障害と疲労の軽減効果を損失余命の回避効果として表現した。GWP 高冷媒を利用した従来機の場合は費用と便益がほぼ同等であったが、高性能機の費用に対してはおよそ倍の便益を得ることができた（B/C= 2）。よって、緩和策と適応策を組み合わせることで空調機による気候変動対策効果は 2 倍に向上することが確認された。

（3）主観的幸福度なども活用した気候変動対策の費用便益分析

①どのような個人属性を持つ人がどの程度の緩和策及び適応策をとるかというプロビット推計の結果、先行研究と同様に持ち家のある人は緩和策や適応策をとる確率が高くなることが分かった。さらに緩和策及び適応策が重要だと考えている人、女性、結婚している人、学歴の高い人は緩和策及び適応策をとる確率が高くなることが分かった。

主観的幸福度アプローチによる分析の結果、最も価値のある対策行動は政府に依頼することとなり、回答者が所得の 21 %までは対策費用を負担してもよいと感じていることが推定された。政府が行う気候変動対策行動には堤防の設置や河川整備などが含まれる。次に価値が高いのは、省エネ電化製品の購入で、所得の 12 %に相当する。価値が有意に推計された結果の内、最も価値が低いのがごみ削減で、所得の 3 %に相当することが分かった。気候変動による災害に関する情報収集、居住地の変更、気候変動による災害に関する防災教育の受講は非常に低い価値が推計された。

②緩和策と適応策による被害削減の一般的な関数型の元では必ずしも資源量が限られているならば緩和策に集中すべきという結果が得られないことを明らかにした。特に、少額の適応策への投資が緩和策

への投資に比してより効果的であるような場合が当然考えられ、そのような場合には資源量が少ない場合でも適応策に集中すべきであるという結果が得られる。

少ない仮定の下で最適な適応策・緩和策への資源配分を特徴づけることは可能であるが、そのような組み合わせは無数に存在することが示された。そのため、モデルに実証的な結果をもとにした追加的な制約を置かない限りは、特定の特徴を持った最適配分の性質を示すことはできない。

③検証の結果、CO2 の漏洩率，大気への漏洩率，海洋酸性化による効用の低下の程度（ω）の違いによって，バックストップ技術の利用状況や，最適な排出量コントロール率に変化が見られることがわかった．具体的には、パラメータ ω が 0 から 100 まで変わると CO2 の排出量は大きく低下しており、海洋酸性化による効用の減少が大きいと CO2 をより抑制することが望ましくなることが分かった。次に、気温上昇目標のシナリオ別に分析したところ、厳しい目標を設定したときにリスクのあるバックストップ技術（BS2）が採用され、気候変動に伴う社会的なコストは長期的に急増することが分かった。さらに、バックストップ技術の選択について注目したところ、BS2 の選択により生態系が破壊された影響が我々の効用を大きく低下させる場合（ω が大きい場合），達成すべき目標がきつくなるにつれて，BS2 が用いられるようになるということがわかる．BS2 は将来の CO2 漏洩リスクを認めつつ、現在の CO2 を大きく削減する技術である。達成目標が厳しく設定されると結果として海洋酸性化のレベルは大きくならないので、ω が大きくなることによる効用の減少よりも CO2 削減目標達成が重視され、リスクのある技術が採用されることとなる。一見すると生態系を重視して厳しい目標を設定したにもかかわらず、緩やかな目標の際には利用されなかった環境負荷の大きい技術が用いられる可能性があるということになる。

④沿岸生態系の保全を行わなかった場合、自然による CO2 吸収量が低下するため、人為的努力によって CO2 を削減する割合が高くなる。そのため、厳しい気候変動目標が設定されると、沿岸生態系を保全しない場合は経済活動を大きく抑制して CO2 の排出を抑える必要に迫られることが示された。さらに、気候変動目標のシナリオ別の分析から、沿岸生態系の保全による経済活動へのインパクトが大きくなるのは、厳しい目標設定の下であることが分かった。

５．本研究により得られた主な成果

（１）科学的意義

本研究では、被害額や投資額といった従来の経済的指標に加えて、主観的幸福度や生計資本といった指標なども勘案して多面的に評価するため、ライフサイクルアセスメント（LCA）の枠組みは非常に有用かつ世界でも初めての試みが多い。これまで無かった LCA を用いた SSP シナリオに応じた健康影響や生物多様性、社会資産の被害係数を開発し、気候変動対策における定量評価を LCA で広く可能とした。特に、世界各地域の特徴を反映した評価結果を示したのは本研究が世界で初めてである。これらの影響を網羅した社会的炭素費用（SCC）の算定も世界で初めての試みである。人間健康、生物多様性、社会資産を網羅しつつ、ボトムアップ的なアプローチから算定された SCC の結果は透明性が高く、被害を低減するための優先順位を示すものとして注目される。緩和策の LCA では、自動車や電力といった主要産業分野においてメタ分析を活用した代表性の高い効果分析が可能で、従来技術からの代替のみでなく自然エネルギーやエコカーの間の比較分析も対応できることをあわせて確認できた。LCA 研究においてはほとんど実施されてこなかった適応策の評価を試み、費用と便益の関係についてライフサイクルの観点から評価することができた。一方、主観的幸福度を用いた研究では、気候変動対策行動の価値がどの程度あるかを推計、分析した結果、個人にとって最も価値のある対策行動は、所得の 21 %までは対策費用を負担してでも堤防の設置や河川整備など政府が行う気候変動対策行動を政府に依頼することであることを示し、まだ研究の蓄積が十分でない個人レベルでの緩和策及び適応策の価値を求めた。また、使用可能な資源の量によって最適な緩和策・適応策への資源配分比率がどのように変化するかについてより深い概念的な理解を与えた。特に、既存研究と異なり、被害削減の一般的な関数型の元では必ずしも資源量が限られているならば緩和策に集中すべきという結果が得られないことを明らかにした。最終的に、世界、各国、日本、地方自治体、個人としてどのように緩和策と適応策のバランスをとりつつ気候変動対策に取り組むのが効果的であり効率的であるかを様々な指標に照らして多面的に評価し、テーマ 1 だけでなく他テーマの成果も統合して世界で初めて全球における適応コストを出せるようになった。AIM や LCA においてもこれまで考慮されていなかった部門の計算が実施されるなど、まさに最先端の結果を最終的に取りまとめられたことが科学的に意義深い。

（２）環境政策への貢献

テーマ 1 において、得られた成果をすでに行政で活用した例としては、企業の環境経営の評価として、環境マネジメントの実施に LCA 利用支援を、長野県で活用されているほか、環境省の第四次環境基本計画点検指標検討会における次期環境基本計画策定の検討において、本研究成果である自然資本と新国富の試算結果を提示し、基本計画議論の作成に貢献した。一方、今後活用されることが見込まれる成果としては、主要なものとして、日本産業連関表及びSSPシナリオ（GDP）を用いた環境負荷原単位の将来推計を用いた環境負荷の将来予測による低炭素社会の実現への貢献、開発された LCA 手法を用いた生物多様性のホットスポット分析によるG20が目指す環境情報基盤の構築への寄与やグリーン購入を促進する基礎資料の提供、気候変動（Goal 13）以外のSDGs（Goal 6, 7, 12, 14, 15）の相互関係を考慮した総合的観点に基づく政策決定の支援、環境省の平成 27 年度重点施策Ⅲ「我が国の実績ある環境技術の海外需要を捉えた国際展開」の効果的な推進が挙げられる。

S-14全体の取り纏め成果としては、より社会に受け入れられるための多面的評価の一つとして、日本が年間排出している約10億tの二酸化炭素の削減による効果を示した。地球全体での平均気温の上昇を約0.0005℃分抑制し、100年間で130～200万人・年分の健康需要の損失と、全世界の30万種の維管束植物のうち1～3種の絶滅を回避でき、これを金銭換算すると、100年間で約5～9兆円、年間500～900億円相当の損失を回避でき、このような統合的かつ定量的な評価を用いた緩和策、影響・適応策費用推計と多面的な評価は、行政が気候変動対策の適切な計画立案に際して参照することに貢献する。

６．研究成果の主な発表状況

（１）主な誌上発表

＜査読付き論文＞

1) Kiguchi, M., J. Matsumoto, S. Kanae, and T. Oki: Front. Earth Sci., 4:42 (2016) doi:10.3389/feart.2016.00042.
Pre-monsoon rain and its relationship with monsoon onset over the Indochina Peninsula.

2) Shin, K.J., R. Nakakido, S. Horie, and S. Managi: PLOS ONE 11(3): e0151928 (2016)
The Effects of Community Attachment and Information Seeking on Displaced Disaster Victims' Decision Making.

3) Matsuki, Y. and S. Managi: Singapore Economic Review 61 (1): 196-217 (2016)
The Impact of Natural Disasters on Manufacturing: Plant-level Analysis for the Great Hanshin-Awaji Earthquake.

4) Onuma, H., K.J. Shin and S. Managi: International Journal of Disaster Risk Reduction 21: 148-158 (2017)
Household Preparedness for Natural Disasters: Impact of disaster experience and implication for future disaster risks in Japan.

5) Kumar, S. and S. Managi: Environment and Development Economics 21 (1): 109-133 (2016)
Carbon Sensitive Productivity, Climate and Institutions.

6) Sakamoto, T., K. Takase, R. Matsuhashi, and S. Managi: Energy Policy 98: 274-289 (2016)
Baseline of the Projection under a Structural Change in Energy Demand.

7) Fujii, H., and S. Managi: Ecosystem Health and Sustainability 2(10) (2016)
An Evaluation of Inclusive Capital Stock for Urban Planning.

8) Fujii, H. and S. Managi: Technological Forecasting & Social Change 112: 293-302 (2016)
Research and Development Strategy for Environmental Technology in Japan: A Comparative Study of the Private and Public Sectors.

9) Islam, M., K. Kotani, and S. Managi: Economic Analysis and Policy 49: 117-133 (2016)
Climate Perception and Flood Mitigation Cooperation: A Bangladesh Case Study.

10) Ono, Y., Y.-D. Kim, and N. Itsubo: Sustainability, 9(8), 1351 (2017) doi:10.3390/su9081351.
A Country-Specific Water Consumption Inventory Considering International Trade in Asian Countries Using a Multi-Regional Input-Output Table.

11) 野村実広、村上道夫、小野雄也：生産研究、l69(3)、171-175 (2017)
東京都における気温上昇と犯罪件数増加の関係.

12) 八坂慶仁、正畠宏一、伊坪徳宏：日本 LCA 学会誌、13(2)、164-171 (2017)
自動車のライフサイクル温室効果ガスのメタ分析.

13) Tang, L., M. Higa, N. Tanaka, and N. Itsubo: Int J Life Cycle Assess doi: 10.1007/s11367-017-1319-6 (2017)
Assessment of global warming impact on biodiversity using the extinction risk index in LCIA: A case study of Japanese plant species.

14) Kurniawan, R., and S. Managi: Sustainable Development 25 (6): 639-654 (2017)
Sustainable Development and Performance Measurement: Global Productivity Decomposition.

15) Ikeda, S., T. Tamaki, H. Nakamura, and S. Managi: Sustainability Science 12(6): 991-1006 (2017)
Inclusive Wealth of Regions: The Case of Japan.

16) Jayarathna1, L., R. Rajapaksa, S. Managi, W. Athukorala, B. Torgler, M.A. Garcia-Valiñas, and C. Wilson : Sustainable Cities and Society 32: 67-77 (2017)
A GIS based Spatial Decision Support System for Analyzing Residential Water Demand: A Case Study in Australia.

17) Rajapaksa, D., M. Zhu, B. Lee, V. Hoang, C. Wilson, and S. Managi: Land Use Policy 69: 317-325 (2017)
The Impacts of Flood Dynamics on Property Values?
18) Horie, S., and S. Managi: Journal of Regional Science 5(7): 840-857 (2017)
Why Do People Stay in or Leave Fukushima?
19) Tsurumi, T. and S. Managi: Journal of Happiness Studies 18(5):1275-1303 (2017)
Monetary Valuations of Life Conditions in a Consistent Framework: the Life Satisfaction Approach.
20) Halkos, G., and S. Managi: Environmental and Resource Economics 68(3): 753-775 (2017)
Measuring the Effect of Economic Growth on Countries' Environmental Efficiency: A Conditional Directional Distance Function Approach.
21) Kimura, M., K. Noda, T. Makino, H. Yamagata, S. Douangsavanh, K. Keokhamphui, H. Hamada, M. Kiguchi, T. Iida, and K. Oki: Paddy and Water Environment, 16, 519-531 (2018) doi:10.1007/s10333-018-0645-z
Seasonal characteristics of surface water quality in a wastewater catchment system of an urbanizing basin.
22) Tang, L., Y. Furushima, Y. Honda, T. Hasegawa, and N. Itsubo: Int J Life Cycle Assess doi: 10.1007/s11367-018-1561-6 (2018)
Estimating human health damage factors related to CO2 emissions by considering updated climate-related relative risks.
23) Urata, T., T. Yamada, N. Itsubo, and M. Inoue: Computers & Industrial Engineering 113, 779-792 (2018)
Supply chain network design and Asian analysis with material-based carbon emissions and tax.
24) Khanal, U., C. Wilson, S. Managi, B. Lee, V. Hoang, and R. Gifford: Environmental Economics and Policy Studies 20,2 (2018)
Psychological Influence on Survey Incentives: Valuing Climate Change Adaptation Benefits in Agriculture.
25) Rajapaksa, D., M. Islam, and S. Managi: Sustainability, 10, 4 (2018)
Pro-Environmental Behavior The Role of Public Perception in Infrastructure and the Social Factors for Sustainable Development.
26) Kurniawan, R., Y. Sugiawan, and S. Managi: Journal of Cleaner Production, 201 (2018)
Cleaner Energy Conversion and Household Emission Decomposition Analysis in Indonesia.
27) Kurniawan, R., and S. Managi: Sustainable Development 26: 596-605 (2018)
Measuring Long-Term Sustainability with Shared Socioeconomic Pathways using an Inclusive Wealth Framework.
28) Nozawa, W., T. Tamaki, and S. Managi: Journal of Cleaner Production, 186 (2018)
On Analytical Models of Optimal Mixture of Mitigation and Adaptation Investmentst.
29) Tamaki, T., W. Nozawa, S. Managi: Applied Energy, 205, 428-439 (2018)
Evaluation of the Ocean Ecosystem: Climate Change Modelling with Backstop Technologies.
30) Du, G., L. Yuan, K.J. Shin, and S. Managi: International Journal of Geographical Information Science 32 (4): 757-782 (2018)
A Comparative Approach to Modeling Multiple Urban Land Use Changes using Tree-based Methods and Cellular Automata: The Case of Greater Tokyo Area.
31) Yuan, L., K. Shin, and S. Managi: Ecological Economics, 153 (2018)
Subjective Well-being and Environmental Quality: The Impact of Air Pollution and Green Coverage in China.

32) 玉置哲也、野澤亘、馬奈木俊介：土木学会論文集、74.2 (2018)
地球温暖化による海洋環境への影響と新技術の導入.
33) Yokohata, T., K. Tanaka, K. Nishina, K. Takahashi, S. Emori, M. Kiguchi, Y. Iseri, Y. Honda, M. Okada, Y. Masaki, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, M. Yoshimori, T. Sueyoshi, K. Iwase, N. Hanasaki, A. Ito, G. Sakurai, T. Iizumi, M. Nishimori, W.-H. Lim, C. Miyazaki, A. Okamoto, S. Kanae, and T. Oki: Earth's Future, 7, 2 (2019)
Visualizing the interconnections among climate risks.
34) Karkour, S., Y. Ichisugi, A. Abeynayaka, and N. Itsubo: Sustainability 12 (5), 2002 (2019)
External-Cost Estimation of Electricity Generation in G20 Countries: Case Study Using a Global Life-Cycle Impact-Assessment Method.
35) Nakamura, K., and N. Itsubo: Water Resources and Industry 21, 100108 (2019)
Carbon and water footprints of pig feed in France: Environmental contributions of pig feed with industrial amino acid supplements.
36) Ichisugi, Y., T. Masui, S. Karkour, and N. Itsubo: Sustainability 11 (23), 6875 (2019)
Projection of National Carbon Footprint in Japan with Integration of LCA and IAMs.
37) Kondo, R., Y. Kinoshita, T. Yamada, N. Itsubo, and M. Inoue: Technologies and Eco-innovation towards Sustainability II, 301-313 (2019)
Effects of Carbon Tax on Low-Carbon and Economic Supplier Selection for Asian Assembly Product.
38) Ito, N., K. Takeuchi, and S. Managi: Economic Analysis and Policy, 61 (2019)
Do Battery-Switching Systems Accelerate the Adoption of Electric Vehicles? A Stated Preference Study.
39) Hein, W., C. Wilson, B. Lee, D. Rajapaksa, H. Moel, W. Athukorala, and S. Managi: Land Use Policy, 82 (2019)
Climate Change and Natural Disasters: Government Mitigation Activities and Public Property Demand Response.
40) Tsurumi, T., A. Imauji, and S. Managi: Kyklos, 72 (2019)
Relative Income, Community Attachment and Subjective Well-being: Evidence from Japan.
41) Roxburgh, N., D. Guan, K. Shin, W. Rand, S. Managi, R. Lovelace, and J. Meng: Global Environmental Change, 54(2019)
Characterising Climate Change Discourse on Social Media During Extreme Weather Events.
42) 堀江進也、馬奈木俊介：経済セミナー、706 (2019)
災害リスクとリスク管理.
43) Goeschl, T., and S. Managi: Economics of Disasters and Climate Change 3 (1): 3-21 (2019)
Public in-kind Relief and Private Self-insurance.
44) Rajapaksa, D., R. Gifford, B. Torgler, M. Garcia-Valiñas, W. Athukorala, S. Managi, and C. Wilson: Resources, Conservation & Recycling 149: 168-176 (2019)
Do Monetary and Non-monetary Incentives Influence Environmental Attitudes and Behavior? Evidence from an Experimental Analysis.
45) Tamaki, T., T. Okada, and S. Managi: Transportation Research Part D: Transport and Environment 67: 503-513 (2019)
Effect of Environmental Awareness on Purchase Intention and Satisfaction Pertaining to Electric Vehicles in Japan.
46) Fujii, H., and S. Managi: Technological Forecasting & Social Change 139:10-16 (2019)
Decomposition Analysis of Sustainable Green Technology Inventions in China.
47) Tamaki, T., W. Nozawa, and S. Managi: Carbon Balance and Management 14 (2019)
Controlling CO2 emissions for each area in a region: the case of Japan.

48) Supasri, T., N. Itsubo, S.H. Gheewala, and S. Sampattagul: Scientific Reports 10 (1), 1-13 (2020)
Life cycle assessment of maize cultivation and biomass utilization in northern Thailand.
49) Arai, R., M. Kiguchi, and M. Murakami: J. Happy Studies (forthcoming)
A quantitative estimation of the effects of measures to climate change on well-being: focus on non-use of air conditioners as a mitigation measure.
50) 八坂慶仁、正畠宏一、伊坪徳宏:日本 LCA 学会誌、(投稿中)
発電のライフサイクル温室効果ガスのメタ分析.
51) Maruta, S., A. Kitsuki, and S. Managi: Economics of Disasters and Climate Change (forthcoming)
Information Recognition Matters for Household Preparedness for Natural Disasters.
52) Nakamura, H., and S. Managi: Journal of Cleaner Production 256 (forthcoming)
Effects of subjective and objective city evaluation on life satisfaction in Japan.
53) Kumar, S., S. Managi, R. K. Jain: Energy Economics 86 (forthcoming)
CO2 Mitigation Policy for Indian Thermal Power Sector: Potential Gains from Emission Trading.

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

1) Managi, S. (Eds.) 2016. “The Wealth of Nations and Regions.” Routledge, New York, USA.

（２）主な口頭発表（学会等）

1) 小野雄也、伊坪徳宏、沖大幹：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
産業連関分析を用いた自動車の緩和策評価.
2) 沖大幹：日本生態学会第63回全国大会（2016）
Future Earth に向けた地球環境基盤情報の構築.
3) Ono, Y., M. Kiguchi, N. Itsubo, and T. Oki: Eco Balance conference (2016)
Vehicle’s mitigation assessment by using Input-Output analysis.
4) Takiuchi, T., Y. Ono, A. Oita, K. Noda, K. Oki, and T. Oki: Eco Balance conference (2016)
Projection of global nitrogen footprints under the future condition of food production and consumption.
5) 伊坪徳宏、湯龍龍、小野雄也、小関康雄、正畠宏一：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
気候変動の緩和策と適応策を対象としたライフサイクル評価.
6) 枝廣あかり、小関康雄、湯龍龍、伊坪徳宏：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
二酸化炭素回収貯留を対象としたLCAと費用対便益分析.
7) 小野雄也、伊坪徳宏、沖大幹：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
産業連関分析を用いた自動車の緩和策評価.
8) 小関康雄、伊坪徳宏：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
LCAを活用した気候変動緩和策の限界削減費用分析評価の一試行.
9) 八坂慶仁、伊坪徳宏、正畠宏一: 第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
自動車を対象としたLCAのメタ分析.
10) 湯龍龍、伊坪徳宏：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
気候変動適応策の評価を志向した影響評価手法の開発.
11) 野澤亘、玉置哲也、馬奈木俊介：環境経済・政策学会2016年大会（2016）
Development level and optimal mixture of adaptation and mitigation investments.
12) 玉置哲也、野澤亘、馬奈木俊介：経営学会主催WS『オペレーションズ・リサーチの最近の展開』(2016)
自然環境変化を考慮した気候変動経済モデルの構築.

13) 湯龍龍、古島康、伊坪徳宏：第12回日本LCA学会研究発表会（2017）
共通社会経済シナリオSSPを用いたCO2の健康被害係数の開発.
14) 湯龍龍、大橋春香、松井哲哉、田中信行、伊坪徳宏：第12回日本LCA学会研究発表会（2017）
植物を対象としたCO2の生物種絶滅リスク係数の開発.
15) 小関康雄、森孝、伊坪徳宏：第12回日本LCA学会研究発表会（2017）
気候変動適応策としての浄水器を対象とした費用便益分析.
16) 小関康雄、伊坪徳宏：第51回日本水環境学会年会（2017）
気候変動適応策としての海水淡水化プラントの環境影響評価.
17) 伊坪徳宏、湯龍龍、小野雄也、小関康雄、正畠宏一、沖大幹：第12回日本LCA学会研究発表会（2017）
気候変動の緩和策と適応策を対象としたライフサイクル影響評価.
18) 八坂慶仁、伊坪徳宏、正畠宏一：第12回日本LCA学会研究発表会（2017）
メタ分析を駆使した電力のライフサイクル評価.
19) 小関康雄、伊坪徳宏：第51回日本水環境学会年会（2017）
気候変動適応策としての海水淡水化プラントの環境影響評価.
20) 野澤亘、玉置哲也、馬奈木俊介：日本経済学会2017年度春季大会（2017）
Development level and optimal mixture of adaptation and mitigation investments.
21) Matsumoto, J., T. Inoue, M. Kiguchi, N. Okami, F. Murata, M. Tanoue, A. Fukushima, Y. Yamane, T. Terao, T. Hayashi, T. Oki, and T. Kamahori, The 11th Annual ACRE Meeting, Tokyo Metropolitan University (2018)
Recent Japanese data rescue activities in monsoon Asia.
22) Kiguchi, M., and T. Oki, Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change (2018)
Comprehensive and Strategic Assessment.
23) 乃田啓吾、木村匡臣、牧野達哉、山縣聖、木口雅司、飯田俊彰、沖一雄、S. Douangsavanh、K. Keokhamphui、濱田浩正、水文・水資源学会2018年度研究発表会（2018）
ラオス・ビエンチャンの表流水水質の季節変動.
24) 八坂慶仁、伊坪徳宏、正畠宏一：第13回日本LCA学会研究発表会（2018）
バイオマスを対象としたLCA のメタ分析.
25) 湯龍龍、大橋春香、松井哲哉、田中信行、伊坪徳宏：第13回日本LCA学会（2018）
世界植物を対象としたCO2の種絶滅リスク係数の推計.
26) 古島康、湯龍龍、伊坪徳宏：第13回日本LCA学会研究発表会（2018）
共通社会経済シナリオSSPに基づいたCO2の健康被害係数の推計.
27) 深井大幹：Beijing Energy Conference (2018)
R&D Investment and Liberalization in a Clean Technology Market.
28) Kiguchi, M., N. Okami, F. Murata, M. Tanoue, A. Fukushima, Y. Yamane, T. Terao, T. Hayashi, T. Oki, T. Inoue, and J. Matsumoto, Inter-Institutional Symposium on Meteorological Research for Improved Water Resources Management (2019)
Change of rainfall characteristics in Bangladesh using 126-years record.
29) Matsumoto, J., H. Kubota, T. Inoue, M. Zaiki, T. Mikami, J. Hirano, T. Terao, F. Murata, M. Kiguchi, T. Hayashi, I. Akasaka, H. Fujinami, H. Kanamori, H. Kamahori, and N. Endo, ACRE-China, (2019)
Data rescue activities in Asian monsoon region under the ACRE-Japan.
30) Selim Karkour、湯龍龍、伊坪徳宏：第14回日本LCA学会研究発表会（2019）
Development of regionalized Life Cycle Impact Assessment method for African Countries.

７．研究者略歴

研究代表者

沖 大幹

東京大学総長特別参与・大学院工学系研究科教授。東京大学工学部卒業、博士(工学、1993年、東京大学)、気象予報士。東京大学生産技術研究所助教授、文部科学省大学共同利用機関・総合地球環境学研究所助教授などを経て、2006年東京大学教授。2016年10月より国際連合大学上級副学長、国際連合事務次長補も務める。地球規模の水文学および世界の水資源の持続可能性を研究。気候変動に関わる政府間パネル(IPCC)第5次報告書統括執筆責任者、国土審議会委員ほかを務める。生態学琵琶湖賞、日経地球環境技術賞、日本学士院学術奨励賞など表彰多数。水文学部門で日本人初のアメリカ地球物理学連合(AGU)フェロー(2014年)。書籍に『SDGsの基礎』(共著)、『水の未来 ― グローバルリスクと日本 』(岩波新書)、『水危機 ほんとうの話』(新潮選書)、『水の世界地図第2版』(監訳)、『東大教授』（新潮新書）など。

研究分担者

伊坪 徳宏

東京都市大学（旧 武蔵工業大学）環境学部教授、総合研究所環境影響評価手法研究センター長。1998年東京大学工学系研究科材料学専攻修了卒業、博士（工学）。1998年から社団法人産業環境管理協会において経済産業省LCA国家プロジェクトでライフサイクル影響評価手法を開発。2001年から独立行政法人産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センターにおいて環境影響評価手法LIMEの開発と産業界への応用研究に従事。2005年から東京都市大学（旧 武蔵工業大学）環境情報学部准教授。2011年から東京都市大学総合研究所環境影響評価手法研究センター長。2013年から東京都市大学（旧 武蔵工業大学）環境学部教授。

馬奈木 俊介

九州大学大学院工学研究科修士卒、米国ロードアイランド大学大学院博士卒(経済学専攻)。Ph.D.(経済学)。サウスカロライナ州立大学ビジネススクール講師、東京農工大学大学院助教授、横浜国立大学経営学部准教授、慶應義塾大学経済学部特別招聘助教授、仏ISEGマネジメントスクール客員教授、東北大学災害科学国際研究所准教授、東北大学大学院環境科学研究科環境・エネルギー経済部門准教授を経て、現在、九州大学大学院工学研究院都市システム工学講座主幹教授。九州大学都市研究センター長、経済産業研究所(RIETI)ファカルティフェローを兼任。

II. 成果の詳細

Ⅱ－１　多様な指標による気候変動対策の統合的多面的な評価

国立大学法人 東京大学 生産技術研究所　　沖 大幹
〈研究協力者〉
国立大学法人 東京大学 生産技術研究所　　木口 雅司・西島 亜佐子（2015年度）
小野 雄也（2015～2017年度）
戸井 真理（2015年度）
黒澤 綾子（2015～2018年度）・塚田由紀
武内 繭子（2018～2019年度）
国立大学法人 東京大学 大学院工学系研究科　片山 浩之
公立大学法人 福島県立医科大学　　村上 道夫

平成27年度～令和元年度研究経費（累計額）：116,110千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成27年度：25,304千円、平成28年度：24,022千円、平成29年度：23,961千円、
平成30年度：18,862千円、令和元年度：23,961千円）

［要旨］

緩和策と適応策の効果性や効率性を評価するための判断材料の一つとして、費用効果分析あるいは費用便益分析が必要である。緩和策、適応策に伴う便益には、例えば、防災整備などによるwell beingの向上や安心感の獲得など、従来の経済的指標では扱いきれない便益もある。そこで、被害額や投資額といった従来の経済的指標に加えて、主観的幸福度や生計資本といった指標なども勘案して多面的に評価し、緩和策と適応策の効率的で効果的な実施策に関する知見が求められている。本サブテーマは、テーマ1の目的である「プロジェクト全体を通して、主にグローバルを対象とし、緩和策と適応策のバランスを、国や地域のまとまりごとでの評価」を推進するために、複数の指標を用いた評価総合的な取りまとめを、多面的に実施する。気候変動対策における車の両輪と位置付けられている緩和策と適応策を同一の指標を用いて包括的に評価することで、両者の統合的な実施による効果的で効率的な気候変動対策の計画立案支援、ならびにカンクン合意に基づく発展途上国向けの気候変動適応計画の策定に関わる国際交渉に資することを可能とする。この統合的な評価は、被害額や投資額といった従来の経済的指標に加えて、主観的幸福度や生計資本といった指標なども勘案して多面的に評価され、気候変動の緩和策と適応策の効果的で効率的な実施策に関する知見が提供される。

主な結果としては、1)エアコン使用量の削減による、熱中症や洪水による死亡リスク低下といった緩和効果と主観的幸福度の変化への影響、2) 気候変動の総コストの統合評価があげられる。1)については、現在気候においても、洪水や熱中症による死亡リスクの大きさはエアコン使用を約2日程度控えた程度であり、気候変動が進んでもRCP2.6で約4.5日程度、RCP6.0で約6日程度にしか相当しない。このように、well beingの低下による影響は、思った以上に大きく、well beingを無視あるいは度外視した緩和策は合理的でない可能性を無視できないことが分かった。2)については、S-14の中で、ライフサイクルアセスメント（サブテーマ(2)）や一般均衡モデル（テーマ5）を用いた研究グループや、生態系における影響評価（テーマ2）や主要なセクターにおける費用便益分析（テーマ3）を実施する研究グループから出てくる成果を取り纏め、不確実性も表現した2001年～2100年の総コストが推計され、約450～800兆ドル、GDP比にして約3～7%となった。この統合評価の結果は今後の気候変動対策を検討する際に重要な情報となることが期待される。

［キーワード］

環境負荷原単位、産業連関表、主観的幸福度、ライフサイクル分析、生物多様性

１．はじめに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次評価報告書が公開され、第1作業部会の報告書では地球の気候システムの温暖化は疑う余地がなく、人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因であった可能性が極めて高い(95%以上の可能性)とされ、地表面気温だけではなくむしろ主に海洋の水温上昇としてその影響が現れていることが述べられている。

気候変動のメカニズム解明や、気候変動に関する国際連合枠組条約(UNFCCC)の第2条に書かれた「危険な人為的干渉とならない温室効果ガスの濃度水準」がどのくらいであるのか、さらには気候変動によってどのような影響が生じるかに関する研究が鋭意進められているが、人類はそうした気候変動に対して常に無策であるわけではなく、気候変動が生じても持続可能な開発が担保されるような対策、いわゆる適応策の効果についても研究が進められている。

IPCCでも第4次報告書以来、第2作業部会の評価報告書では緩和策と適応策とは気候変動対策における車の両輪である、と位置づけられているが、つい最近まで両者は別の文脈で取り扱われることが多く、日本では適応策への取り組みが遅れていた。2013年になってようやく適応策に関する省庁横断的な取り組みが始まったところであり、両者の統合的な実施による効果的で効率的な気候変動対策の計画立案支援、ならびにカンクン合意に基づく発展途上国向けの気候変動適応計画の策定に関わる国際交渉に資する研究開発が期待されている。

緩和策と適応策の効果性や効率性を評価するための判断材料の一つとして、費用効果分析あるいは費用便益分析が必要である。緩和策、適応策に伴う便益には、例えば、防災整備などによるwell beingの向上や安心感の獲得など、従来の経済的指標では扱いきれない便益もある。そこで、被害額や投資額といった従来の経済的指標に加えて、主観的幸福度や生計資本といった指標なども勘案して多面的に評価し、緩和策と適応策の効率的で効果的な実施策に関する知見が求められている。

２．研究開発目的

本サブテーマは、テーマ1の目的である「プロジェクト全体を通して、主にグローバルを対象とし、緩和策と適応策のバランスを、国や地域のまとまりごとでの評価」を推進するために、複数の指標を用いた評価総合的な取りまとめを、多面的に実施する。気候変動対策における車の両輪と位置付けられている緩和策と適応策を同一の指標を用いて包括的に評価することで、両者の統合的な実施による効果的で効率的な気候変動対策の計画立案支援、ならびにカンクン合意に基づく発展途上国向けの気候変動適応計画の策定に関わる国際交渉に資することを可能とする。この統合的な評価は、被害額や投資額といった従来の経済的指標に加えて、主観的幸福度や生計資本といった指標なども勘案して多面的に評価される。その結果、気候変動の緩和策と適応策の効果的で効率的な実施策に関する知見を提供する。これらを達成するため、本サブテーマでは、戦略課題全体の総括として、テーマ間の研究調整、連携の促進、ならびに課題全体の進行管理の役割を担いつつ、各テーマの成果を統合し、世界、各国、日本、地方自治体、個人としてどのように緩和策と適応策のバランスをとりつつ気候変動対策に取り組むのが効果的であり効率的であるかを様々な指標に照らして多面的に評価する。また、そうした統合的な評価にあたっては、テーマ2やテーマ3の膨大な知見を整理、集約しつつ、ライフサイクルアセスメント(LCA)の枠組みでの人間健康や生物多様性といったエンドポイントにおける気候変動対策の効果をサブテーマ(2)から、さらにサブテーマ(2)とも連携しつつ主観的幸福度や障害調整生命年(DALY)などの指標も用いた気候変動の影響評価、すなわち緩和策や適応策の費用便益分析手法をサブテーマ(3)から援用し、実施される。最終的にはテーマ5で得られた成果との比較、統合化を目指す。

３．研究開発方法

（１）SSPシナリオを用いた日本の将来における環境負荷原単位の開発

将来起こりうる気候変動による被害を軽減するため、緩和策と適応策両方の取り組みが有用であるが、それらによる負荷を含めた将来の被害の推計が必要である。そこで、本研究では、多様な指標による気候変動対策の統合的多面的な評価を行うための基礎研究として、SSPシナリオを用いた日本の将来

における環境負荷原単位の開発を行う。

まず、緩和策と適応策に伴う被害について検討する。ここでの被害とは人間健康の被害や生態系の劣化といった温暖化による被害を想定しており、最後にそれぞれの被害を比較または統一可能にするために統合化を行う。（式(1)-1）

$$\sum \left(activity_i \times CO_2\ Intensity_{cis}\right) \times DF_{h,\,b} \times IF \qquad (1)\text{-}1$$

ただし、$activity$=活動量、 i=製品やサービス、 $CO_2\ Intensity$=CO_2排出原単位、 c=国、 s=シナリオ、 DF=被害係数 、 h=人間健康、 b=生態系の劣化、 IF=統合化係数である。

人間健康及び生態系の劣化による被害係数及び統合化係数はサブテーマ2によって開発/改良される。よって、サブテーマ1では将来のCO_2排出原単位について検討を行った。既存の環境負荷原単位は大きく分けて積み上げ法と産業連関法によるものがあるが、評価範囲の広さやサプライチェーン全てを含めた評価が可能となるなどの利点から本研究では産業連関法を用いる。

$$CO_2\ Intensity(e) = d \times (I-A)^{-1} \qquad (1)\text{-}2$$

ただし、dは直接投入係数、Iは単位行列、Aは投入係数表である。**図3.1.1**に原単位算出手順を示す。

まず、各産業部門別環境負荷量（CO_2）はEora databaseを用いた。その後、該当する産業連関表の各産業部門に配分し、国内生産額で除することにより、直接投入係数表を作成した(STEP1)。次に2011年度版産業連関表を正方化した400分類からなる行列を作成した後、2011年の投入係数とSSPシナリオ(GDP)からRAS法を用いて、将来の逆行列係数表を算出した(STEP2)。最後に上記の積をとることで各産業における日本のCO_2原単位を算出した（STEP3)。

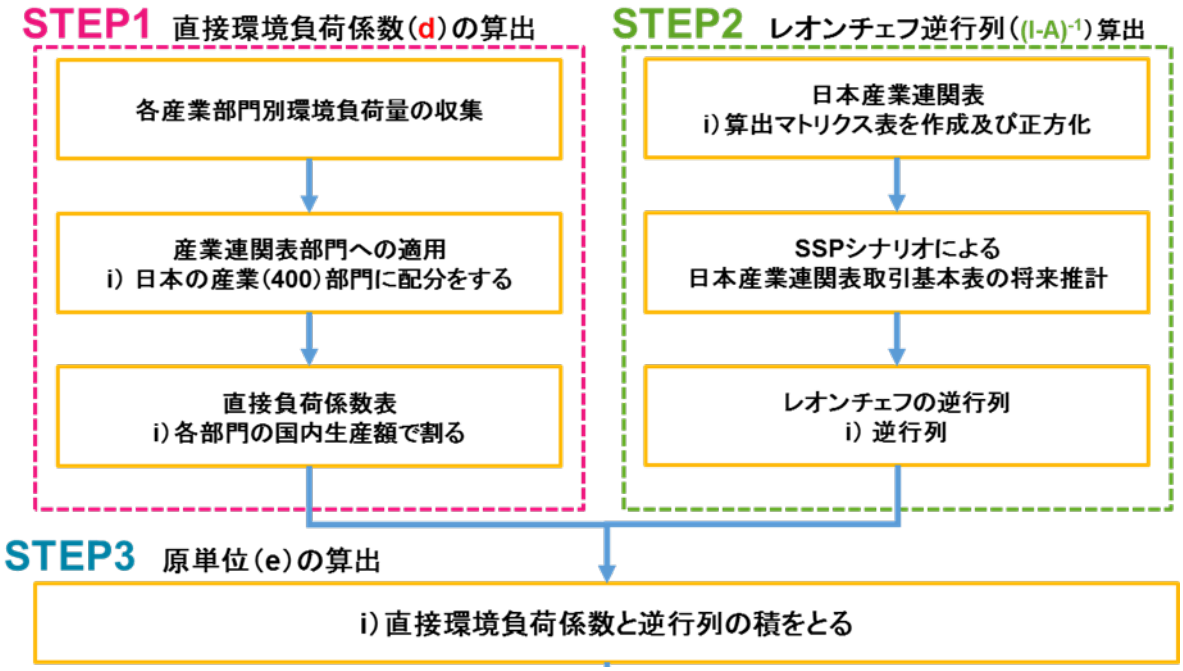

図3.1.1：環境負荷原単位推計までのフロー

（２）費用便益分析及び地域間産業連関表の調査

気候変動の費用便益分析の評価方法の確認や既存研究の把握のために文献調査を行った。また、本プロジェクトは全球を対象としているため、一国産業連関表ではなく、多地域間産業連関表を用いることが望ましい。そこで国際産業連関表の調査を行った。

（３）日本を対象とした主観的幸福度調査の実施と指標開発

これまで緩和策と適応策による効果を経済や環境負荷、健康被害や生物多様性といった複数の指標で評価されてきたが、対策と幸福度の関係が分析されてこなかった。そこで、本研究では、日本を対象

に主観的幸福度調査の実施と指標開発を行った。

ここでは主観的幸福度指標開発について記載する。本研究が提案する指標は生存曲線(S(t))とSWB(subjective well-being)を組みあせたものであり、リスクによる影響の度合いや対策の効果を統合的に評価する(式(1)-3)。

$$\sum S_c(t) \times SWB_c(t) - \sum S(t) \times SWB(t) \qquad (1)\text{-}3$$

このとき、S(t)は他テーマから、SWBはアンケート調査より得られる。アンケートは日本の47都道府県、20代から60代の男女を対象に5,734名からサンプルを得た。これらの得られたデータは年齢階級、性別、居住都道府県を実際の構成に近くなるように調整している。今回はアンケート回答者が実感可能な対策として、堤防及びエアコンに関する質問をしている。さらに調査観察研究では単純に2群の平均を比較しても様々な背景要因から比較しても意味がないという批判を受ける可能性が高いため、傾向スコアマッチングを用いて主観的幸福度の差を推計した。さらにエアコン使用量の削減による緩和効果と主観的幸福度への影響を定量的に評価した。

（４）2011年タイ洪水による全球被害の算定

気候変動の影響により、将来的にも災害が増加すると予測されている。日本は輸入大国であるため、自国が被災せずとも輸出国が被災すれば、間接的な被害を受けることになる。実際、2011年のタイ洪水では日本をはじめとした輸入国がサプライチェーンの寸断による被害を受けた。しかし、それら全球的な被害総額や影響国・産業部門割合がどの程度なのかは分かっていない。そこで、本研究では2011年タイ洪水による全球被害の算定を行った。

ここでは2011年タイ洪水による影響が全球的にどう波及していくかを分析した。本研究において、影響は2つからなる。1つ目は洪水によって破壊された工場や機械、部品及び製品の被害である。2つ目は洪水によってストップし、本来は得られるはずだった機会損失である。シナリオとして、被害はその後、100%再建されると想定し、再建による環境負荷影響までを対象に推計を行った。実際、高いリスクマネジメントを有する企業ではサプライチェーンの寸断による影響を受けない事例もあるが、今回は被害の潜在性を含めるため、最大値を示した。推計手法は産業連関分析であり、サプライチェーンの上流と下流の双方を推計するため、前方連関モデルと後方連関モデルを用いた。また、産業連関表は世界最大の多地域間産業連関表Eoraを基にしている。被害と機会損失は国連よりデータを得た。環境負荷による被害額はLIME2を用いており、単位あたりのCO_2排出量から発生する健康被害と社会資産の損失が統合化され、価値(円)が示される。

（５）SSPシナリオ別将来予測型産業連関表の開発

将来の緩和策及び適応策の評価が求められている。しかし、LCAの分野では過去の統計値やヒアリングデータを基にした環境負荷データベースが整備されているのみであり、将来予測型環境負荷データベースは存在しない。そこで本研究ではSSPシナリオを基に将来予測型環境負荷データベースの開発に着手した。

S-14では将来の緩和策及び適応策の評価を検討している。上述した通り、従来のLCA分野における環境負荷データベースは過去の統計値やヒアリングデータを基に開発されているため、各国の数値は過去の経済構造や技術を反映した結果となる。これらの値を固定化し、将来の対策を評価するのは一つのシナリオとしてありうるが、それだけでは現実的ではない。一方、動的モデルであるCGEの分野ではSSPシナリオ別に将来の経済構造や環境負荷、労働に関するデータを作成している。そこで、本研究ではテーマ5が研究を進めているAIM/CGEのSSPシナリオ別年次別データ(GDPやCO_2等)をEora及びAIM/CGE部門対応表を介して、多地域間産業連関表Eoraに外装し、将来の産業連関表を開発した。多地域間国際産業連関表Eoraは180か国、約15000の産業部門を有する世界最大の産業連関表である。Eoraを使用することで各国間の輸出入を介した生産効率や技術影響等を加味することができる。EoraとAIM/CGEの部門対応表はこれまで存在しなかったため、開発した。将来の産業連関表に関しては2010年版EoraとAIM/CGEからの外装データを基にGRAS法を用いてSSP別に開発した。

（６）LCA手法を用いた生物多様性評価

多様な指標の一側面として、生物多様性が挙げられる。気候変動に加え、人口増加や生活水準の上昇に伴う土地改変が進むことにより、生物多様性が劣化している。これらは一国のみだけでなく、他国への輸出や輸入が深く関わっている。そこで本研究ではLCA手法を用いた生物多様性評価を行った。

ここでは土地改変による生物多様性の劣化とそれに伴う被害額について記載する。上述した通り、本研究は土地改変による生物多様性の劣化を測るものであるため、世界各国の年あたりの土地改変量及び最終消費を得ることが出来れば輸出入を含めた世界各国の土地改変量が把握でき、さらに被害係数(LIME係数)を乗じることにより、世界各国の土地改変による被害推計が可能となる(式(1)-4)。

$$B_{ij} = d_{ij} \times (I - A)^{-1} \times F \times LIME2_{ij} \qquad (1)\text{-}4$$

ただし、Bは生物多様性の被害、dは1000US$あたりの土地改変量、Iは単位行列、Ａは投入係数行列、Fは最終需要、LIME2は土地改変による被害係数である。i及びjはそれぞれ多地域間国際産業連関表Eoraの14839部門に対応し、d、F、LIME2は対角行列となる。なお、データの年次は2011年を採用した。上記の方法により、世界各国の輸出入を加味した生物多様性の劣化損失を推計した。

なお、Eoraが網羅する地域は広大である。結果を分かりやすくするため、本研究では180か国を13地域に集約した。下記に集約した地域と略称を示す。

Africa: AF, Central Asia: CA, East Asia: EA, East South Asia: ESA, Europe: Euro, Japan: JP, Latin America and the Caribbean: LAC, North Asia: NA, Northern America: Nam, Oceania: O, ROW: ROW, South Asia: SA, West Asia: WA

（７）気候変動の総コストの統合評価

これまでの気候変動による影響評価は、セクターによって被害額や影響人口で推計されており、これらを単一指標でそれなりの解像度で示されたものはなかった。S-14の中で、ライフサイクルアセスメント（サブテーマ(2)）や一般均衡モデル（テーマ5）を用いた研究グループや、生態系における影響評価（テーマ2）や主要なセクターにおける費用便益分析（テーマ3）を実施する研究グループから出てくる成果を取り纏め、統合評価した。

本統合評価で利用した項目は、ここで統合した部門は**表3.1.1**、**表3.1.2**に出典なども含めて記載した。ここで統合するにあたり、いくつか注意すべき点があるので、その点に言及しながら手法を示す。

まず、総費用であるが、利用可能なデータ期間などの制約があるため、2001年から2100年までの総額である。そのうち、経済被害については、AIMから農業、冷暖房需要、熱関連超過死亡、労働生産性、低栄養、沿岸浸水、河川洪水、水力発電、火力発電の推計値が提供される。なお、熱関連超過死亡では手法はHonda et al. (2014)に準拠している。ここで、1)熱関連超過死亡は確率的生命価値（VSL）、2)沿岸浸水に人命被害や土地損失は含まれない、3)河川洪水に人命被害のWTP（Willing to pay）換算値が含まれる、の3点については注意が必要である。続いて、人間健康と生物多様性、社会資産のうちサンゴ礁と土地損失については、LIME3（Murakami et al., 2018）から推計した値を用いており、これらはWTP係数によって金銭換算されている。ここで海面上昇の影響については、AIMでは海岸浸水としてGDPへの影響、LIMEでは人命損失（DALY）と土地損失（社会資本棄損）をそれぞれ計上している。また、割引率を現時点で考慮していない点についても注意が必要である。

このような定量評価で重要なのが、不確実性をしっかり示すことである。本研究では、AIMによる経済被害推定では取り扱ったGCMの数（5個）を不確実性の幅として表現している。LIMEによる経済被害（社会資産のうちサンゴ礁と土地損失）推定ではWTP係数に幅を持たせている。生態系影響については、RCPのみ（将来の土地利用を想定）に依存し、5つのGCM間のばらつきで不確実性が示される。健康影響（DALY）と生物多様性損失（EINES）では、その金銭換算に用いるLIME3のWTP係数の範囲をさらに考慮することで、不確実性を示している。

表3.1.1：本統合評価で利用した項目のうち、AIMの結果を用いたもの。

部門	被害	シナリオ	金銭化	出典
農業生産性	GDP変化	5SSP×4RCP×5GCM	USD2005 (PPP) 17地域別に集約 VSLは国・年ごとに異なる（1人当たりGDPが多いほどVSLの値も大きい） OECD (2012)の指針に準拠	Fujimori et al. (2018) *Sustainability*
飢餓	GDP変化 死亡数（VSL）	5SSP×4RCP×5GCM		Hasegawa et al. (2016) *Climatic Change*
熱関連超過死亡	死亡数（VSL）	5SSP×4RCP×5GCM		高橋ら (2018) 土木学会論文集G（環境）
冷暖房需要	GDP変化	5SSP×4RCP×5GCM		Park et al. (2018) *Environ. Res. Letters*
労働生産性	GDP変化	5SSP×4RCP×5GCM		Takakura et al. (2017) *Environ. Res. Letters*
水力発電	GDP変化	5SSP×4RCP×5GCM		Zhou et al. (2018) *Climatic Change*
火力発電	GDP変化	5SSP×4RCP×5GCM		Zhou et al. (2018) *Energies*
河川洪水	被害額（EM-DAT） 死亡数（VSL）	5SSP×4RCP×5GCM		Kinoshita et al. (2018) *Environ. Res. Letters*
海面上昇	被害額（EM-DAT）	3SSP×4RCP×4GCM （5×4×3に補間して利用）		Tamura et al. (2019) *Climatic Change*

基本的に上記論文に基づいているが、SSP4・SSP5の結果についてはTakakura et al. (2019) Nature Climate Change が初出

部門	被害	シナリオ	金銭化	出典
緩和費用	GDP変化	5SSP×4RCP （存在しない組合せあり）	USD2005 (PPP)	Fujimori et al. (2017) *Global Environ. Change*

表3.1.2：評価項目と算定根拠の一覧。
レ点は本統合評価で利用した項目であり、AIMと重複する項目は用いていない。

		被害	評価範囲 (年次/地域)	シナリオ	出典	金銭化方法 (年次/地域)	出典
人間健康	栄養失調	死亡、障害	2100/全球	SSP	WHO (2014)	WTP(2013/なし)	LIME3 (Murakami et al. 2018)
✓	下痢	死亡、障害	2100/全球	SSP	WHO (2014)	WTP(2013/なし)	LIME3 (Murakami et al. 2018)
	熱ストレス	死亡、障害	2100/全球	SSP	WHO (2014)	WTP(2013/なし)	LIME3 (Murakami et al. 2018)
✓	マラリア	死亡、障害	2100/全球	SSP	WHO (2014)	WTP(2013/なし)	LIME3 (Murakami et al. 2018)
✓	デング熱	死亡、障害	2100/全球	SSP	WHO (2014)	WTP(2013/なし)	LIME3 (Murakami et al. 2018)
✓	沿岸洪水	死亡、障害	2100/全球	SSP	WHO (2014)	WTP(2013/なし)	LIME3 (Murakami et al. 2018)
生物多様性 ✓	維管束植物	種の絶滅	2100/全球	RCP	分布予測(森林総研)	WTP(2013/なし)	LIME3 (Murakami et al. 2018)
社会資産 ✓	サンゴ礁	分布面積	2070/global	RCP	Couce et al. 2013	WTP(2011,なし)	Costanza et al. 2014
✓	土地水没	水没面積	2100/global	RCP	Tamura et al. 2019	WTP(2011,なし)	Costanza et al. 2014
	穀物減産	生産量	2100/global	RCP/SSP	Iizumi et al. 2017	市価(2015?/地域)	本研究
	海岸洪水	被害額(EM-DAT)	2100/global	RCP/SSP	Tamura et al. 2019	市価(不特定/地域)	Tamura et al. 2019
	エネ消費	電力,灯油,都市ガス	2100/global	RCP/SSP	Hasegawa et al. 2016	市価(2015?/地域)	本研究
	内陸洪水	被害額(EM-DAT)	2100/global	RCP/SSP	Kinoshita et al. 2018	市価(不特定/地域)	Kinoshita et al. 2018
	労働生産性	追加的賃金	2100/global	RCP/SSP	Takakura et al. 2017	市価(不特定/地域)	Takakura et al. 2017

４．結果及び考察

（１）SSPシナリオを用いた日本の将来における環境負荷原単位の開発

SSPシナリオ3における2020年GDP値を基にCO2排出原単位(ton-CO2/百万円)及びCH4排出原単位(ton-CO2eq/百万円)を推計した(図(1)-1)。部門数は2011年の基本分類396部門からエネルギー部門等を拡張し、408部門である。CO2排出原単位に関しては都市ガス、ガス火力、石油火力、石炭火力などのエネルギー部門が最も高い傾向を示したほか、二次産業の生コンクリートや塗装材料、三次産業の沿海・内水面輸送や自家輸送(貨物自動車)などの運送部門が高い傾向を示した。次にメタン排出原単位では米や肉牛、豚などの一次産業で高い傾向を示した。その影響により学校給食などの二次産業でもその波及効果を受けて値が大きくなっている。排出源として、米はそれ自体からのメタン排出ではなく、水田の土壌中に存在する嫌気性微生物のメタン生成古細菌により生成されるものがほとんどである。野菜などからも肥料の由来のメタンは排出されるが、米由来のものよりは小さい。牛や豚、鶏由来のメタン排出も多いものの、牛の反芻由来のメタン排出が特に大きい。原単位の精度に関しては将来予測の値であるため、厳密な比較は難しいが、既存研究(Nansai et al., 2012)と全体の傾向は近いことが明らかになった。二酸化炭素やメタン以外の対象物質への適用や各部門別環境負荷の低下率を加味した検討及びサブテーマ3による生態系の付加価値の導入を行う。これにより、サブテーマ2が開発する影響評価係数への接続が可能となり網羅的な評価へと繋がる。また生態系の付加価値導入はこれまで評価されていなかったものが経済価値を持ってくるため、経済の構造が変異した結果、政策的な判断が異なってくると予想されることから検討を行うことが求められる。

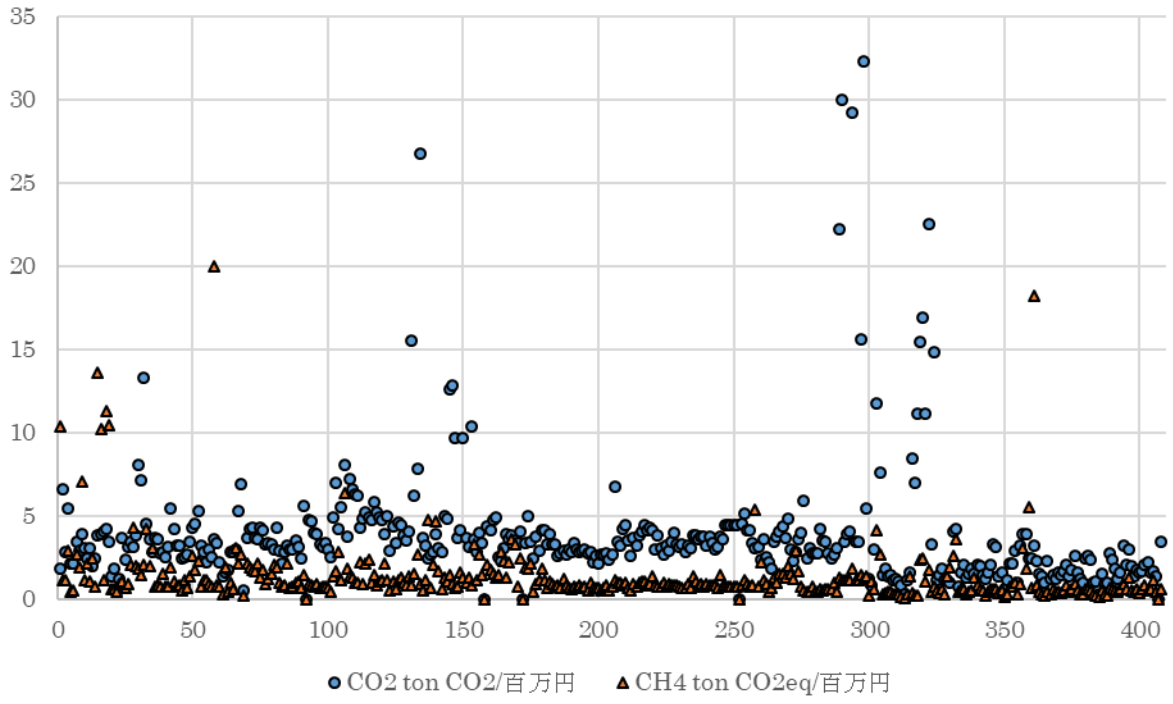

図4.1.1：CO_2及びCH_4排出原単位一覧

（２）費用便益分析及び地域間産業連関表の調査

文献調査により、セクターによって、気候変動を起こす原因の考慮範囲や評価対象とする範囲、気候変動の影響領域に差異があることが分かった。そして、不確実性を扱う上で、仮定や評価結果を一つに絞ってしまうのではなく、起こりうる将来を複数想定して複数の評価結果を提示する”Agree-on-decisions” approachesの重要性を認識した。

次に（１）で説明した将来の産業連関分析手法をグローバルに展開するには対象地域を多く含む網羅的な産業連関表が必要である。主要な多地域間産業連関表として、アジア国際産業連関表、 GTAPデ

ータベース、 EXIOBASE、 WIODデータベース、 Eora多地域間産業連関表が挙げられ、それらを対象に調査を行った。まず、アジア国際産業連関表は日本貿易振興機構アジア経済研究所がアジア環太平洋地域の経済相互依存関係を分析するために開発を行った。データの対象年次は1975、 1985、 1990、 1995、 2000、 2005年の原則5年ごとに作成される。既存の多地域間産業連関表の多くが90年代からのデータを発表していることからアジア国際産業連関表のタイムシリーズデータコレクションは相対的に長期であると言える。最新版である2005年の対象国は内生国10か国（インドネシア、マレーシア、フィリピン、シンガポール、タイ、韓国、日本、アメリカ、中国、台湾）と外生国は4か国（香港、EU、インド、その他の世界）であり、部門数は各国ごとに76部門の細分類、24部門の中分類、7部門の大分類に分かれている。次にGTAP(Global Trade Analysis Project)データベースは国際的政策課題を定量的に解析するためのツールとしてアメリカのパデュー大学が中心となって開発が進められている。データの対象年次は1990、 1992、 1995、 1997、 2001、 2004、 2007年であり、対象地域や部門数は当初のGTAP1では15地域、37部門であったが、現在のGTAP8では129地域、57部門と網羅性が大きく向上している。また、利用者別エネルギー量及びCO2排出量、用途別土地利用データなどが搭載されており、これらのデータを使ったケーススタディや応用例がGTAP web site上に2000以上も示されている。EXIOBASEは2007年から2011年に実施されたプロジェクトEXIOPOL(A New Environmental Accounting Framework Using Externality Data and Input-Output Tools for Policy Analysis)によって開発された。開発の目的は環境負荷の外部コストを正しく把握すること及び細かい産業や製品分類や地域間の整合性を持った多地域間産業連関表を開発することでEUに対し政策支援をすることである。そのため、データの対象年次は2000年及び2007年とタイムシリーズデータが少ないものの、対象地域は世界経済の95％を含む43か国、163の産業分類と30を超える環境負荷データを有している。WIOD（World Input-Output Database）はグローバルかつ時系列データを有し、様々な社会経済的・環境的指標を含むことを目標として2009年から2012年までの3年間の期間で開発された。データの対象年次は1995-2007年であり、対象地域は27のすべてのEU諸国と13の主要国からなる40か国である。これは世界経済の85％を占めるものの、産業分類は35部門である。その他、部門別エネルギー種別のエネルギー消費量やCO2排出量、土地利用や資源、水消費を有している。最後にEora多地域間産業連関表は各国の統計局の原データを詳細な部門数を用いること、可能な限りの国をカバーすること、時系列データを有すること、不確実性の情報を提供することを目標にオーストラリアのシドニー大学で開発された。これにより、データの対象年次は1990-2011年までの各年データであり、対象国は187か国と世界で最大である。部門数は15909部門であり、国や地域によって最小25部門から最大500部門に分かれる。更に環境指標は温暖化物質や大気汚染物質、水消費や土地利用、エコロジカルフットプリントなど35種類と多岐に渡る。また、多地域間産業連関表の構築を自動で行うソフトウェアAISHAを開発・適応したことにより、今後も世界規模の多地域間産業連関表が安定して開発されることが予想される。ここまで世界の多地域間産業連関表の特徴をまとめてきた。当然のことながら目的や開発する拠点によって対象地域の網羅範囲や産業部門の詳細度、環境負荷情報の有無、使用用途が大きく異なることが分かる。アジア国際産業連関表やGTAPデータベース、 EXIOBASE、 WIODデータベースは部門数が全ての国で共通しているため、比較する際に容易であるという優位性を持つ一方、Eora多地域間産業連関表は圧倒的な対象国と対象部門の網羅性、詳細性を有していることが分かった。以上を基に今後、（１）の研究を地域間産業連関表ベースにした推計へ発展することを検討する。これにより、日本だけでなく世界各国のサプライチェーンを含んだ将来推計が可能になると期待される。

（３）日本を対象とした主観的幸福度調査の実施と指標開発

主観的幸福度係数を単純比較するため、生存年数は全て100年として、推計を行った（**表4.1.1**）。

傾向として、全体的に男性よりも女性の方が幸福を感じる割合が高いものの、対策の有無の差(効用)は男性の方が大きい結果となった。河川堤防と海岸堤防に着目すると、これらは同じ傾向を示しており、男性の幸福度がより大きく反応している。次にエアコンに着目すると、男性はエアコンを適用した方が幸福度が高くなる一方、女性は適用しない方が幸福度が高い結果を示した。さらに会社よりも自

宅のエアコンの方が効用が高く/低くなるなど、場所によって幸福度の効用に違いがでることが示された。

表4.1.1：損失幸福度余命推計結果

	河川堤防			海岸堤防			エアコン(自宅)			エアコン(会社)		
	有	無	差	有	無	差	有	無	差	有	無	差
全体	63.9	61.0	2.9	64.0	61.6	2.4	63.3	60.9	2.6	61.4	61.7	-0.3
男	58.0	53.8	4.2	60.7	56.3	4.4	59.7	54.0	5.7	55.5	55.3	0.2
女	70.2	67.9	2.3	67.0	65.8	1.2	64.3	67.7	-3.4	66.4	68.3	-1.9

さらにエアコン使用量の削減による、熱中症や洪水による死亡リスク低下といった緩和効果と主観的幸福度の変化への影響に着目した（図4.1.2）。その結果、現在気候においても、洪水や熱中症による死亡リスクの大きさはエアコン使用を約2日程度控えた程度であり、気候変動が進んでもRCP2.6で約4.5日程度、RCP6.0で約6日程度にしか相当しない。このように、well beingの低下による影響は、思った以上に大きく、well beingを無視あるいは度外視した緩和策は合理的でない可能性を無視できない。

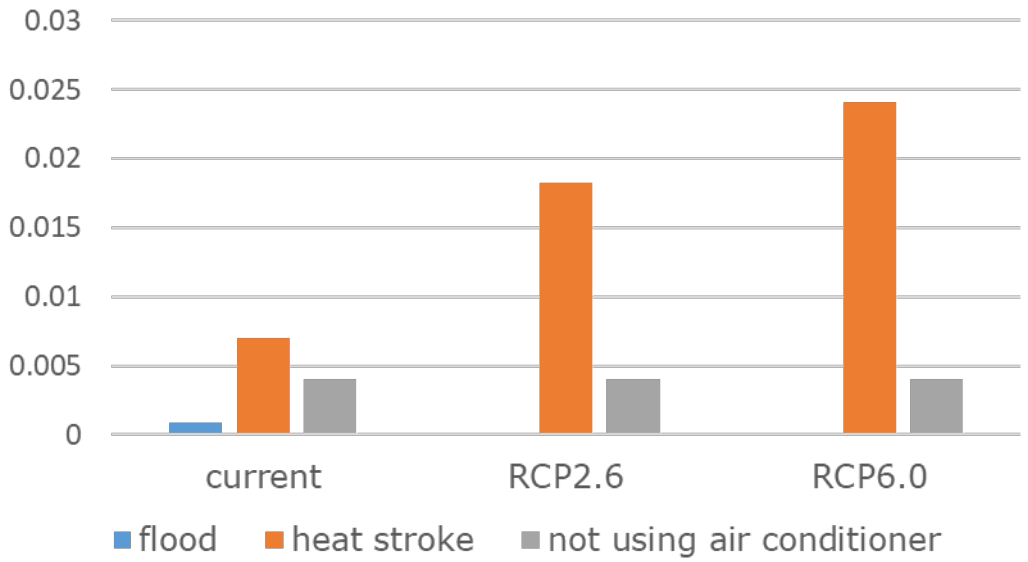

図4.1.2：エアコンを一年に一日使用を控える状況設定の場合の損失幸福余命。

（4）2011年タイ洪水による全球被害の算定

2011年タイ洪水による全球被害の算定を行った。下記に示す(表4.1.2)。全球を含めた被害(Damage)は約660億US$、機会損失(loss)は約1600億US$であった。被害は全て復興させると仮定しても約920億US$のマイナスである。全体に占めるタイの被害及び機会損失割合はそれぞれ、全体の70%、60%である。その他が30%、40%を占めるが、大半はアジア及び欧州に集中しており、それ以外の地域では3%以下である。

操業停止による間接的機会損失は直接機会損失額が大きかった部門と基本的に一致する傾向を示した(図4.1.3)。また、機会損失が出た部門の関連部門(Rice millingやCanning Preserving of fish)はその部門に直接の機会損失が少なくても、波及効果によって影響を受けていることが確認された。一次産業は相対的にタイの自国比率が高い特徴を持つ一方で、二次産業(特に電子製品、部品、自動車関連)

は海外比率が高い特徴を持つ。これら二次産業の影響は海外では中国で約32億US$、日本で約19億US$などの先進国が多くみられた。また、娯楽や銀行でも機会損失の影響が一定割合見られる他、自国の生産比率が高い日本の米は影響が少ないなど特徴が示された。最後に建設によるCO_2由来の被害額を推計した。排出されるCO_2量は合計で1.3E+07t-CO_2であり、これを金額に換算すると約3億US$である。内訳として人間健康による被害が86%、社会資産が14%となり、排出国はタイが70%、他国が30%である。

表4.1.2：2011年タイ洪水による全球被害結果。

Country & Region (1000US$)	Direct Damage	①Total Damage	Direct Loss	Indirect Loss(supply)	Indirect Loss(demand)	②Total Loss	③ = ① - ② Total(*-1)
Thailand	2.1.E+07	4.6.E+07 (70%)	2.4.E+07	4.9.E+07 (54%)	2.4.E+07 (56%)	9.7.E+07 (61%)	5.1.E+07
Others	0.0.E+00	2.0.E+07 (30%)	0.0.E+00	4.2.E+07 (46%)	1.9.E+07 (44%)	6.1.E+07 (39%)	4.2.E+07
Asia	2.1.E+07	5.7.E+07 (86%)	2.4.E+07	6.2.E+07 (68%)	3.4.E+07 (79%)	1.2.E+08 (76%)	6.4.E+07
- Asia (Thailand)	2.1.E+07	4.6.E+07 (70%)	2.4.E+07	4.9.E+07 (54%)	2.4.E+07 (56%)	9.7.E+07 (61%)	5.1.E+07
- Asia (-Thailand)	0.0.E+00	1.0.E+07 (16%)	0.0.E+00	1.3.E+07 (15%)	1.0.E+07 (24%)	2.4.E+07 (15%)	1.3.E+07
Europe	0.0.E+00	5.6.E+06 (9%)	0.0.E+00	2.1.E+07 (23%)	5.4.E+06 (12%)	2.6.E+07 (17%)	2.1.E+07
Africa	0.0.E+00	2.4.E+05 (0%)	0.0.E+00	2.6.E+06 (3%)	2.4.E+05 (1%)	2.9.E+06 (2%)	2.6.E+06
ROW	0.0.E+00	1.6.E+05 (0%)	0.0.E+00	5.8.E+05 (1%)	1.6.E+05 (0%)	7.5.E+05 (1%)	5.8.E+05
Latin America and the Caribbean	0.0.E+00	4.7.E+05 (1%)	0.0.E+00	1.5.E+06 (2%)	4.4.E+05 (1%)	1.9.E+06 (1%)	1.5.E+06
Oceania	0.0.E+00	8.6.E+05 (1%)	0.0.E+00	2.3.E+06 (3%)	8.1.E+05 (2%)	3.2.E+06 (2%)	2.3.E+06
Northern America	0.0.E+00	2.0.E+06 (3%)	0.0.E+00	1.0.E+06 (1%)	2.0.E+06 (5%)	3.0.E+06 (2%)	9.6.E+05
Total	2.1.E+07	6.6.E+07	2.4.E+07	9.1.E+07	4.4.E+07	1.6.E+08	9.2.E+07

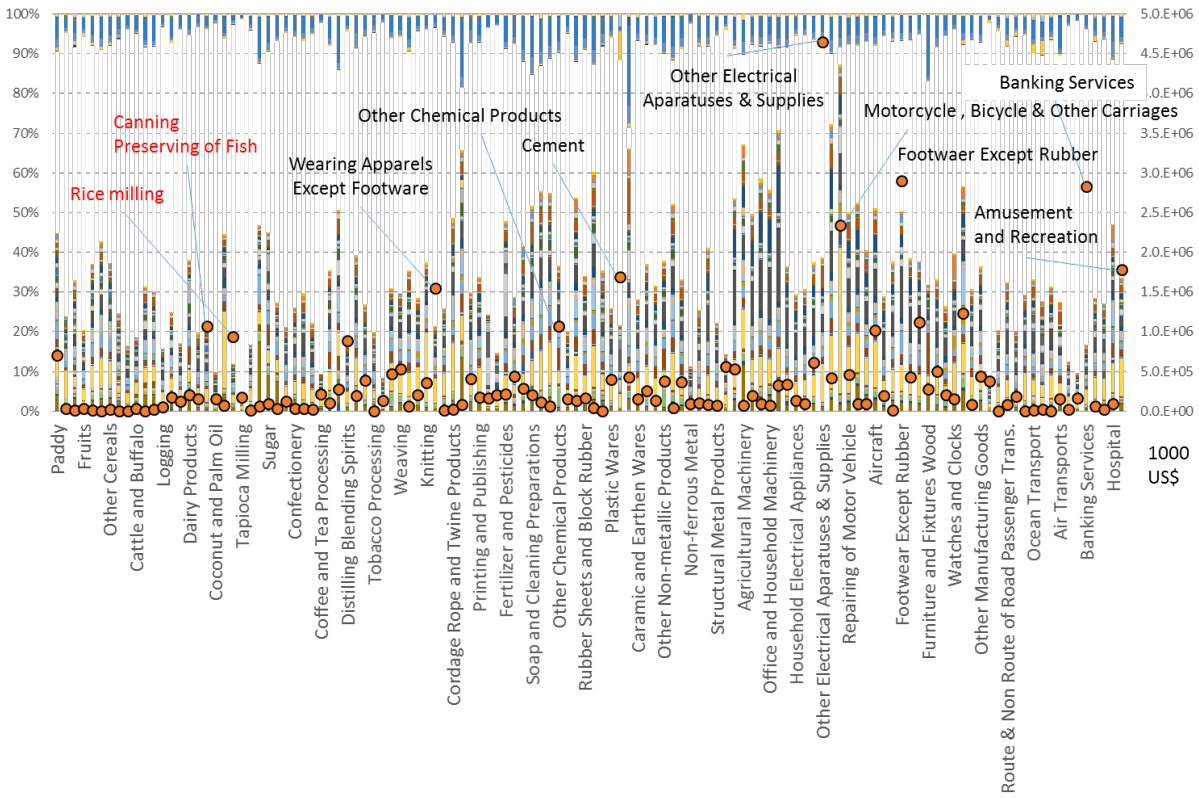

図4.1.3：間接的機会損失。

（５）　SSPシナリオ別将来予測型産業連関表の開発

Eora及びAIM/CGEの部門対応表を用いてSSP1及び3シナリオの2020年から2100年までのCO_2量を各国別に推計した(**図4.1.4**)。シナリオ1の2020年では2.9E+10t- CO_2、2030年では3.2E+10t- CO_2、2040年では3.3E+10t- CO_2、2050年では3.3E+10t- CO_2、2060年では3.1E+10t- CO_2、2070年では2.9E+10t- CO_2、2080年では2.8E+10t- CO_2、2090年では2.6E+10t- CO_2、2100年では2.5E+10t- CO_2であった。それに対してシナリオ3の2020年では3.4E+10t- CO_2、2030年では4.1E+10t- CO_2、2040年では4.6E+10t- CO_2、2050年では5.2E+10t- CO_2、2060年では5.6E+10t- CO_2、2070年では6.0E+10t- CO_2、2080年では6.5E+10t- CO_2、2090年では7.0E+10t- CO_2、2100年では7.5E+10t- CO_2であった。

シナリオ1が2040年から2050年でCO_2がピークに達し、以降減少傾向に向かうのに対して、シナリオ3では、2100年まで排出量が増加し続ける傾向を示した。これは元々の外装データと一致する傾向である。国別に着目すると、SSP1ではアメリカ、中国、インド、ロシア及び日本で特に顕著な数値が見られた。SSP3では上記に加え、南アフリカを始めとしたアフリカ大陸の国々やアジア数か国も数値の増加が見られた。

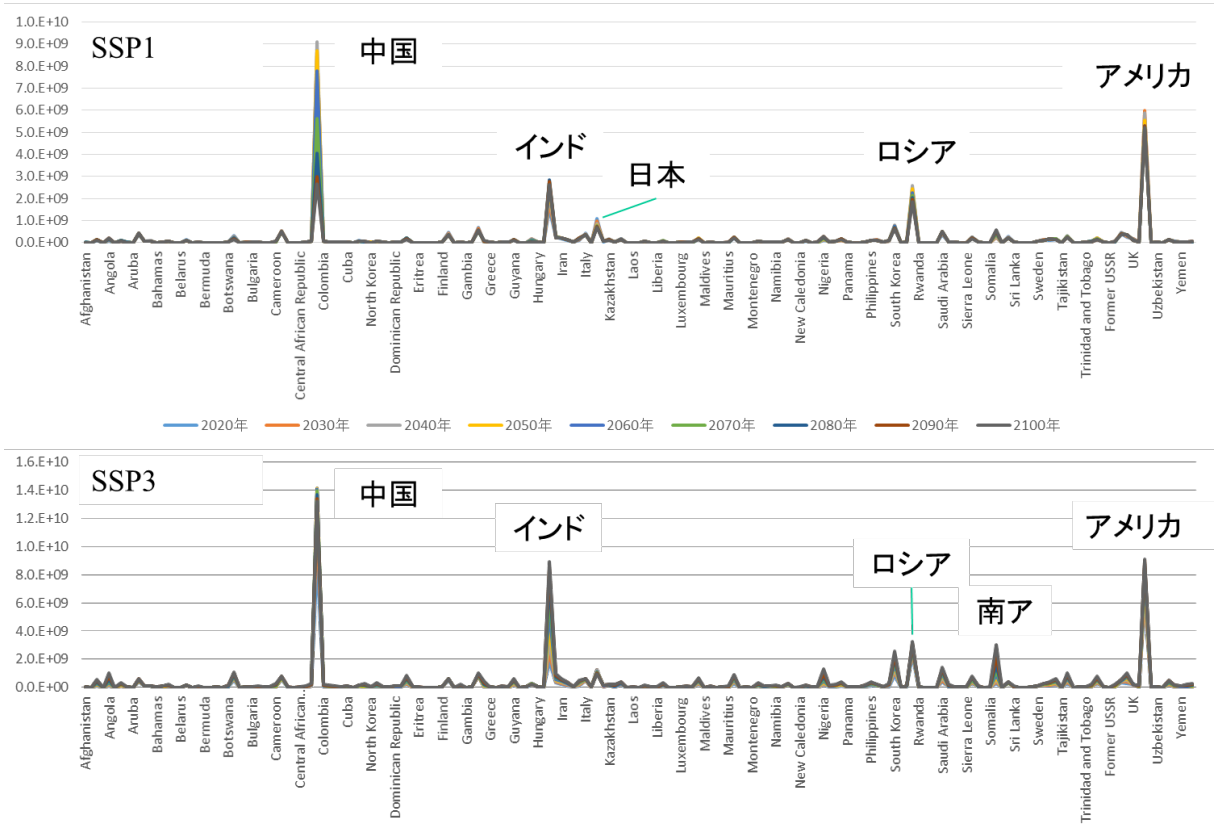

図4.1.4：SSP別年次別CO_2排出量。

（６）LCA手法を用いた生物多様性評価

土地改変による生物多様性の劣化とそれに伴う被害額を消費ベースと生産ベースで推計した(**図4.1.5**)。生産ベースは実際に生産した国であり、消費ベースは輸出入を加味した最終的な結果である。まず、2011年における世界の土地改変量は5.5億haであった。生産者ベースでみるとアフリカが59%、東アジアが20%、北アメリカが7%、オセアニアが6%、ラテンアメリカが5%、それ以外の国は1～0%となっている。消費者ベースでみると、アフリカや東アジアなどの発展途上国を多く有する地域は生産者ベースに比べて1～2%程度低い一方、日本やヨーロッパの先進国は1～2%程度高くなったことが分かる。これは発展途上国の輸出品目が広大な土地が必要な作物や家畜、林業などの一次産業が多い一方、先進国で輸出が多い品目は集約化可能かつ技術発展によって生産効率が上昇可能な二次産業であることが多いからである。これらによる絶滅種数は71種であり、4400億US$となる。消費者ベースと生

産者ベースの傾向は土地改変と同じく、先進国と途上国の輸出入関係を示すものになったが、土地改変面積と異なり生産ベースでは東アジアが26%、東南アジアが25%、ラテンアメリカが21%、アフリカが13%、オセアニアが7%、南アジアが5%となるなど地域の傾向が異なった。これは特にアジアやラテンアメリカにおける単位当たりの影響が大きいことに由来する。

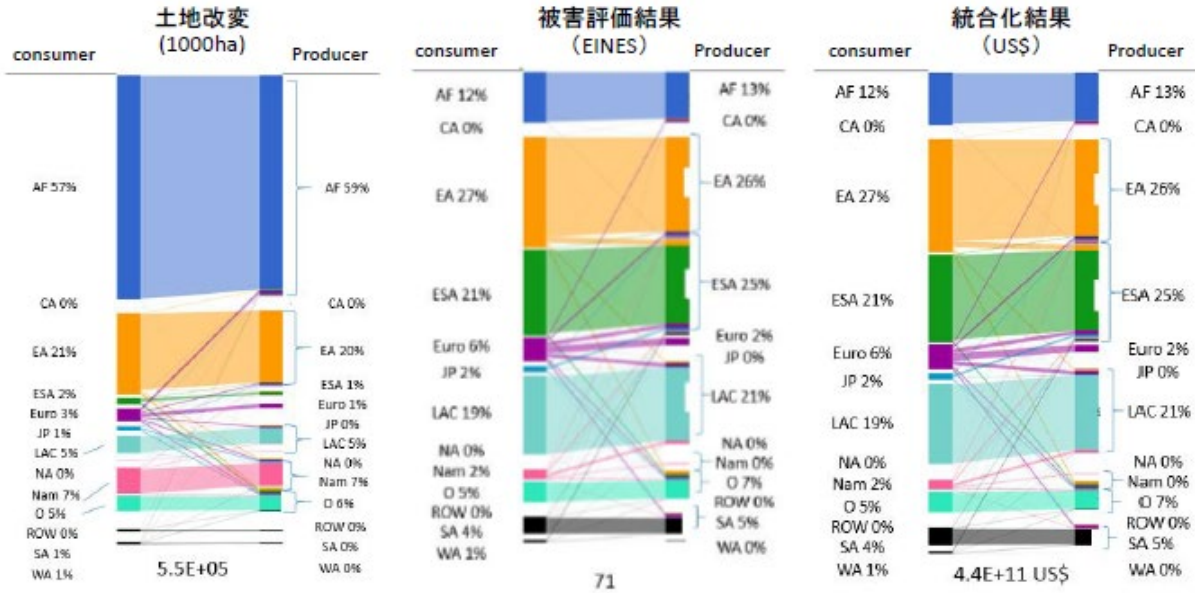

図4.1.5：土地改変による生物多様性の劣化被害。

（７）気候変動の総コストの統合評価

３（７）で述べた手法に基づき、以下結果を述べる。まず、経済被害を**図4.1.6（非公開）**に示す。単位は、兆ドルである。経済被害とは、AIMが推計する農業生産性、飢餓、熱関連超過死亡、冷暖房需要、労働生産性、水力・火力発電、河川洪水、海面上昇による土地損失と、LIMEが推計する社会資産のうちサンゴ礁と土地水没になる。改めて記載するが、海面上昇の影響が重複しているように見えるが、AIMでは沿岸浸水としてのGDPへの影響、LIMEでは人命損失（DALY）と土地損失（社会資本棄損）をそれぞれ計上している。いずれのシナリオ（SSPとRCPの組み合わせ）においても、熱関連超過死亡と労働生産性が多く、この2つで半数を占めるていることがわかる。それに続いて、サンゴ礁、土地損失（社会資本棄損）、冷暖房需要が続いている。またどのSSP（1、2、3）でも、二酸化炭素の排出量が多いほど経済被害の総額は大きい。一方で、二酸化炭素の排出量を固定させると、社会シナリオの選択による差が見える。地域分断といわれるSSP3が一番小さく、持続可能といわれるSSP1が一番多くなる。そのため、緩和策や適応策の実施が最も困難といわれるSSP3でもRCP8.5を避ければSSP1の社会よりも経済被害が小さくなる。

次に健康被害をDALYで集計したものを**図4.1.7（非公開）**に示す。単位は百万年である。健康被害は、沿岸洪水、デング熱、下痢、マラリアを評価対象とした。デング熱はほかの3つと比べてとても小さく、どのシナリオでもマラリア、沿岸洪水、下痢の順に多い。また、多く二酸化炭素を排出するほど、社会が地域分断になればなるほど、健康被害は増加することが示された。LIMEによる生物多様性損失（EINES）を**図4.1.8（非公開）**に示す。ここでは維管束植物28万種のみを対象としている。二酸化炭素の排出量が増えれば、その分EINES、絶滅余命の逆数は不確実性が大きいものの増加することがわかる。

図4.1.9（非公開）は、AIMで推計された緩和費用である。単位は、兆ドルである。当然、二酸化炭素の排出量低く抑えようとするRCP2.6で最も大きい。

以上を総計したものが、**図4.1.10（非公開）**と**図4.1.11（非公開）**である。単位は、兆ドルとGDP比（%）である。総計する際、健康被害は2.3E+4 US$/DALY（±7,900）、生物多様性は1.1E+10 US$/EINES（±1.1E+9）として経済換算した。また、社会資本（サンゴ礁、土地損失）は、WTP係数を

2.5 US$/US$（±0.88）で換算した。

図4.1.6：経済被害評価（単位は、兆ドル）。（非公開）

図4.1.7：総健康被害（DALY）評価。単位は、百万年。（非公開）

図4.1.8：生物多様性損失（EINES）評価。（非公開）

図4.1.9：緩和費用の評価。単位は兆ドル。（非公開）

図4.1.10：気候変動対策の総費用評価。単位は、兆ドル。（非公開）

図4.1.11：気候変動対策の総費用評価。単位は、GDP比（%）。（非公開）

基本的に二酸化炭素の排出量が増えれば、総費用の多くを占める、経済被害が増加し、緩和コストが減少するため、緩和費用がそもそも小さいSSP1では、二酸化炭素の排出量が増えると総費用も増加する。一方、SSP2とSSP3では、RCP2.6（SSP3には無い）からRCP4.5、RCP6.0と緩和費用が大きく減少するために総費用が減少し、RCP8.5では一転増加するパターンとなっている。

S-14によって世界で初めて全球における適応コストを出せるようになった。AIMやLCAにおいてもこれまで考慮されていなかった部門の計算が実施されるなど、まさに最先端の結果を取りまとめられた。のような情報は、世界がどの世界を選択するかを議論するにあたり、貴重な知見である。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本サブテーマで得られた成果における科学的意義は下記のとおり整理される。

① 2011年度版日本産業連関表及びSSPシナリオ（GDP）を用いて将来の産業連関表及び環境負荷原単位を推計した。これにより、将来の環境負荷の推計可能となった。また、CO2だけでなく、対象物質を変えることでその他の環境負荷原単位への応用が可能となり、かつ費用便益分析や地域間産業連関表の調査を行ったことでそれぞれの特徴を把握した。

② 日本を対象とした主観的幸福度指標を開発した。本手法を活用することにより、これまで検討されていなかった主観的幸福度という側面を考慮した検討が可能となる。

③ 2011年タイ洪水による全球被害の算定を行った。これまで、全球を網羅した被害算定は行われておらず、またどの国のどの産業が特にリスクを持つのかは明らかにされてこなかった。本研究結果を用いることで、各産業はリスクに対する検討が可能となった。また洪水リスクシミュレーションなどと結合することで他国や地域でのケーススタディの検討が可能となる。

④ SSPシナリオ別将来予測型産業連関表の開発のためにEoraとAIM/CGEの結合作業を行った。これまでLCA分野では将来推計等は基本的に現在または過去の技術を基に検討が行われてきたが、本研究を活用することで、将来の緩和策及び適応策の評価が可能となる。

⑤ LCA手法を用いた生物多様性評価を行った。本研究では世界各国の土地改変と生物多様性の劣化の関係及び関係国、部門までを推計した。これにより、生物多様性のホットスポットが分かりかつ影響を与える産業やリスクとしてのホットスポット分析が可能となる。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

特に記載すべき事項は無い。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

① 日本産業連関表及びSSPシナリオ（GDP）を用いた環境負荷原単位の将来推計は、環境省が進める低炭素社会実現に必要となる環境負荷の将来予測に貢献することが見込まれる。具体的には将来提供される製品やサービスを含めたケーススタディ等の評価を行う際、汎用的なデータベースとして活用することができる。また、サブテーマ2の影響評価係数と並行して用いることにより将来の被害算定や統合化まで評価可能となる。

② 本サブテーマで開発された日本を対象とした主観的幸福度指標は、経済や環境負荷、健康や生物多様性、社会資産の損失といった側面に加えて、これまで検討されていなかった主観的幸福度という側面を考慮した検討を可能し、より多面的な側面を含めた検討を行政サイドが実施することが見込まれる。

③ 2011年タイ洪水による世界規模での算定は、洪水による直接的な被害（家やビル、部品など）を100％復元した場合の環境負荷由来の内部コスト及び外部コストを含んでいる。そのため、これまでの単純な被害推計（環境負荷由来の内部コストを含まない）ではなく、内部コストを含めた検討が今後可能となり、被災した際の復旧復興事業の策定に貢献する。また、被災国だけでなく、どの国のどの産業が特にリスクを持つのかが明らかになったことで、各産業におけるリスク検討が可能となり、サプライチェーンがグローバル化する中での企業のBCM策定の促進を図ることができるようになった。また洪水リスクシミュレーションなどと結合することで他国や地域でのケーススタディの検討が可能となった。

④ SSPシナリオ別将来予測型産業連関表の開発のために実施されたEoraとAIM/CGEの結合は、これまで将来推計でベースとされた現在または過去の技術に頼らず、将来の緩和策及び適応策の評価が可能となった。

⑤ LCA手法を用いた生物多様性評価により、生物多様性のホットスポットが分かりかつ影響を与える産業やリスクとしてのホットスポット分析が可能となった。また、SSPシナリオと結びつけることで将来の土地改変による影響を推計・分析することが可能となった。これらの結果は政策考案の一資料として利用することができる。

６．国際共同研究等の状況

・地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）

国際協力機構（JICA）と科学技術振興機構（JST）が連携して推進する、地球規模課題対応国際科学技術協力プログラムは、1)日本と開発途上国との国際科学技術協力の強化、2)地球規模課題の解決と科学技術水準の向上につながる新たな知見や技術の獲得、これらを通じたイノベーションの創出、そして3)キャパシティ・ディベロップメントの3つのポイントの達成を目指している。このプログラムのなかで、研究代表者が推進している「タイ国における統合的な気候変動適応戦略の共創推進に関する研究（ADAP-T）」プロジェクト（研究代表者：沖大幹（東京大学生産技術研究所教授）、2015～2020年度）では、超学術研究による観測・予測技術の水災害リスクへの活用と、適切な適応策構築と実現への貢献を目的としている。ADAP-Tは、タイ国カセサート大学（共同研究代表者：Thanya Kiatiwat工学部准教授）を相手国研究代表機関とし、主たる共同研究機関には気候変動適応策の取り纏め機関であり国連気候変動枠組条約（UNFCCC）のフォーカルポイントでもある天然資源環境省環境政策計画局（ONEP）や気候変動適応策の実装・実働部隊である、気象局や灌漑局を含んでいる。そのため、本サブテーマで獲得された知見を提供することで実際に行政機関の反応や海外展開を可能としている。さらに環境省が推進するAP-PLAT事業へのADAP-Tで得られた知見の提供や、国家適応計画やそのガイドラインの策定支援を行っており、それらの活動に我々の知見が援用されている。

７．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

1) Kiguchi, M., J. Matsumoto, S. Kanae, and T. Oki: Front. Earth Sci., 4:42 (2016) doi:10.3389/feart.2016.00042
Pre-monsoon rain and its relationship with monsoon onset over the Indochina Peninsula.
2) Ono, Y., Y.-D. Kim, and N. Itsubo: Sustainability, 9(8), 1351 (2017) doi:10.3390/su9081351.
A Country-Specific Water Consumption Inventory Considering International Trade in Asian Countries Using a Multi-Regional Input-Output Table.
3) 野村実広、村上道夫、小野雄也：生産研究、169(3)、171-175 (2017)
東京都における気温上昇と犯罪件数増加の関係.
4) Kimura, M., K. Noda, T. Makino, H. Yamagata, S. Douangsavanh, K. Keokhamphui, H. Hamada, M. Kiguchi, T. Iida, and K. Oki: Paddy and Water Environment, 16, 519-531 (2018) doi:10.1007/s10333-018-0645-z.
Seasonal characteristics of surface water quality in a wastewater catchment system of an urbanizing basin.
5) Yokohata, T., K. Tanaka, K. Nishina, K. Takahashi, S. Emori, M. Kiguchi, Y. Iseri, Y. Honda, M. Okada, Y. Masaki, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, M. Yoshimori, T. Sueyoshi, K. Iwase, N. Hanasaki, A. Ito, G. Sakurai, T. Iizumi, M. Nishimori, W.-H. Lim, C. Miyazaki, A. Okamoto, S. Kanae, and T. Oki: Earth's Future, 7, 2 (2019)
Visualizing the interconnections among climate risks.
6) Arai, R., M. Kiguchi, and M. Murakami: J. Happy Studies (forthcoming)
A quantitative estimation of the effects of measures to climate change on well-being: focus on non-use of air conditioners as a mitigation measure.

＜その他誌上発表（査読なし）＞

1) 沖 大幹：岩波新書 (2016)
「水の未来」

（２）口頭発表（学会等）

1) 小野 雄也、伊坪 徳宏、沖 大幹：第11回日本LCA学会研究発表会 (2016)
産業連関分析を用いた自動車の緩和策評価」
2) 沖 大幹：日本生態学会第63回全国大会 (2016)
「Future Earth に向けた地球環境基盤情報の構築」
3) Y. Ono, M. Kiguchi, N. Itsubo, and T. Oki: Eco Balance conference (2016)
"Vehicle's mitigation assessment by using Input-Output analysis"
4) T. Takiuchi, Y. Ono, A. Oita, K. Noda, K. Oki, and T. Oki: Eco Balance conference (2016)
"Projection of global nitrogen footprints under the future condition of food production and consumption"
5) J. Matsumoto, T. Inoue, M. Kiguchi, N. Okami, F. Murata, M. Tanoue, A. Fukushima, Y. Yamane, T. Terao, T. Hayashi, T. Oki, and T. Kamahori, The 11th Annual ACRE Meeting, Tokyo Metropolitan University (2018)
"Recent Japanese data rescue activities in monsoon Asia"

6) M. Kiguchi, and T. Oki, Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change (2018)
"Comprehensive and Strategic Assessment"
7) 乃田啓吾、木村匡臣、牧野達哉、山縣聖、木口雅司、飯田俊彰、沖一雄、S. Douangsavanh、K. Keokhamphui、濱田浩正、水文・水資源学会2018年度研究発表会 (2018)
「ラオス・ビエンチャンの表流水水質の季節変動」
8) M. Kiguchi, N. Okami, F. Murata, M. Tanoue, A. Fukushima, Y. Yamane, T. Terao, T. Hayashi, T. Oki, T. Inoue, and J. Matsumoto, Inter-Institutional Symposium on Meteorological Research for Improved Water Resources Management (2019)
"Change of rainfall characteristics in Bangladesh using 126-years record"
9) J. Matsumoto, H. Kubota, T. Inoue, M. Zaiki, T. Mikami, J. Hirano, T. Terao, F. Murata, M. Kiguchi, T. Hayashi, I. Akasaka, H. Fujinami, H. Kanamori, H. Kamahori, and N. Endo, ACRE-China, (2019)
"Data rescue activities in Asian monsoon region under the ACRE-Japan"

（３）知的財産権

特に記載すべき事項はない。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

1) 一般公開シンポジウム「気候変動～その影響と対策」（主催：環境省環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクトS-14、2015年6月6日、東京大学生産技術研究所、観客約100名）にて講演
2) 東大駒場リサーチキャンパス公開（2015年6月5～6日、参加者5,409名）にて成果紹介
3) 一般公開シンポジウム「二つの温暖化－都市化と気候変動－」（主催：環境省環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクトS-14、2016年6月4日、東京大学生産技術研究所、観客約100名）にて講演
4) 東大駒場リサーチキャンパス公開（2016年6月3～4日、参加者5,345名）にて成果紹介
5) 一般公開シンポジウム「パリ協定後の世界」（主催：環境省環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクトS-14、2017年6月3日、東京大学生産技術研究所、観客約100名）にて講演
6) 東大駒場リサーチキャンパス公開（2017年6月2～3日、参加者6,182名）にて成果紹介
7) 一般公開シンポジウム「気候変動の影響の適応への道筋」（主催：環境省環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクトS-14、2018年6月9日、東京大学生産技術研究所、観客約100名）にて講演
8) 東大駒場リサーチキャンパス公開（2018年6月8～9日、参加者6,660名）にて成果紹介
9) 一般公開シンポジウム「気候変動影響研究と対策の最前線」（主催：環境省環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクトS-14、2019年5月8日、京都市国際交流会館、観客約100名）にて講演
10) 東大駒場リサーチキャンパス公開（2019年5月31日～6月1日、参加者6,543名）にて成果紹介

（５）マスコミ等への公表・報道等

1) 建設通信新聞（2015年11月27日、「予測精度を高め能力引き出す」）
2) 日本経済新聞（2016年3月17日、「気候変動を踏まえた「想定外」の自然外力への対応について」）
3) 讀賣新聞（2016年5月29日、書評、「水の未来」）
4) 日本経済新聞（2016年6月5日、書評、「水の未来」）
5) 東京新聞（2016年6月9日、「1910年のパリ大洪水」）
6) 建設新聞（2016年9月9日、「地形・地盤は安定を求めて絶えず動く」）
7) 建通新聞（2016年11月29日、「100人が水リスク学ぶ」）
8) 建設通信新聞（2017年7月10日、「自然・人為災害と対策を考える」）

9)　朝日新聞（2017年12月16日、「増える豪雨とダム」）
10）東京新聞（2018年2月4日、「世界の水資源」）
11）京都新聞（2019年5月13日、「温室ガス算定 最新科学で」）

（６）その他

特に記載すべき事項は無い。

８．引用文献

特に記載すべき事項は無い。

Ⅱ－２　ライフサイクルアセスメントによる気候変動影響評価

学校法人 東京都市大学　　伊坪 徳宏

〈研究協力者〉
学校法人 東京都市大学　　小関 康雄
みずほ情報総研株式会社　　内田 裕之・古島 康
TCO2株式会社　　正畠 宏一・八坂 慶仁
農業・食品産業技術総合研究機構　　湯 龍龍

平成27～令和元年度研究経費（累計額）：62,656千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成27年度：12,529千円、平成28年度：12,232千円、平成29年度：12,295千円、
平成30年度：13,630千円、令和元年度：11,969千円）

［要旨］
本研究では複数のエンドポイントを網羅した気候変動の影響評価手法を開発し、複数の緩和策と適応策を対象に影響領域間のトレードオフやコベネフィットを考慮した LCA を実施した。
1)　気候変動を対象としたライフサイクル影響評価手法の開発と SCC（社会的炭素費用）の算定
IPC AR5 WG2 の記載内容とテーマ 2、3、4 の研究成果を反映しつつ、影響評価手法 LIME が対象とするエンドポイント「人間健康」「社会資産」「生物多様性」「一次生産」を網羅した気候変動の評価手法の開発を行う。運命分析、影響分析、被害分析に分け、これらを開発・統合することで被害係数、すなわち単位量の環境負荷に対するエンドポイントの潜在的な被害量を求めた。運命分析では複数の気候モデルを活用して CO2 排出による気候変化などを算定した。影響分析では気候変化による生物種の分布変化や農作物の収量変化などを求めた。被害分析ではこれらの影響を「生物種の絶滅リスク変化」といった被害指標に集約した。被害係数は、テーマ 3 の結果を活用して適応策のある場合とない場合のそれぞれを算定する。これらの結果に LIME の重みづけ係数を乗じて SCC（1 単位の環境負荷に対する支払意思額）を算定した。ここで得られた結果はサブテーマ 1 における統合的多面評価に活用された。
2)　複数の緩和策と適応策を対象とした LCA
CO2 濃度の安定化シナリオで対象となっている、再生可能エネルギー（太陽光発電、風力発電など）、CCS、省エネルギー（LED、自動車、冷暖房、断熱材利用など）を対象にした LCA を行った。さらに、気候変動の適応策として海水淡水化、空調機、防潮堤を取り上げてこれらの導入による被害の低減効果を LCA に加えることでライフサイクルの視点から見た費用対便益分析を行った。インベントリ分析では、関係者ヒアリングに基づく一次データの利用を優先しつつ、ecoinvent などの二次データも活用した。影響評価では上述の 1) の成果と LIME3 を用いて、被害評価と統合化を行った。複数の緩和策と適応策を網羅した統合化結果は横断的に費用対便益分析に活用され、サブテーマ(1)の統合的多面評価に活用された。

［キーワード］
LCA、SCC、LCC、費用対便益分析

１．はじめに

製品ライフサイクルの環境影響を定量的に評価する LCA はすでに多くの温暖化対策に適用されている。国連環境計画がバイオ燃料に関する複数の LCA 研究論文を整理した報告によれば、概ねバイオ燃料は石油燃料より CO2 排出量は低いものの、水消費や土地利用、富栄養化など他の環境影響に対する

影響は石油よりも高く、包括的な観点からみた環境配慮が必要であることを警告した。欧州委員会が2013 年に発行した LCA 実施に基づくグリーン調達の推奨文書は、温暖化のほか、資源消費、生態毒性などを含む 14 種類の影響領域を評価範囲に含むことを要求している。

一方で、多岐に渡る影響領域について評価しても、これらの間でトレードオフが発生した際の対応に課題が残る。近年の LCA 研究は影響領域間で比較できるエンドポイントタイプの手法が注目されている。しかし、エンドポイントタイプの手法はまだ発展途上の段階でありさらなる検討が求められていた。特に、気候変動については、生物多様性に対する影響評価に関する具体的な提案は限定的で、農作物・水資源・森林資源・水産資源などの社会資本に関する影響を網羅した手法は提案されていない。このような状況下で実施された LCA は気候変動の影響を過小評価するとともに、緩和策や適応策に対する効果も過小評価することになる。

これまでに複数の緩和策について LCA が各分野で実施されているが、評価者が異なるため、評価範囲や手法が異なり、対策間で比較することが困難であった。また、適応策に関する LCA の実施は限定的であり、主に緩和策を中心に検討してきた企業等が気候変動の適応を具体的に実施するための基礎情報が限られていた。そこで本研究では、①気候変動に関するエンドポイントタイプの影響評価手法を新規に開発するとともに、②日本発で最新のエンドポイントタイプの影響評価手法である LIME3 に適用して共通の評価基盤の下で複数の緩和策・適応策に対するLCAを実施した。

２．研究開発目的

先に述べた背景を受けて本研究では以下を目的とした検討を行った。

1)　気候変動を対象としたライフサイクル影響評価手法の開発と SCC（社会的炭素費用）の算定

2)　複数の緩和策と適応策を対象とした LCA

続いて、上記に項目について詳述する。

1)　気候変動を対象としたライフサイクル影響評価手法の開発と SCC（社会的炭素費用）の算定

影響評価手法 LIME が対象とするエンドポイント「人間健康」「社会資産」「生物多様性」を網羅した評価手法の開発を行う。被害係数（1 単位の温室効果ガス排出による被害量増分）は、テーマ 2、3 の研究成果を反映して最新のモデルとパラメータをもとに算定する。得られた結果を LIME3 の重みづけ係数に乗じて SCC（1 単位の環境負荷に対する支払意思額）を算定する。得られた成果はサブテーマ(1)の統合的多面評価の要素として活用する。

2)　複数の緩和策と適応策を対象とした LCA

複数の緩和策と適応策を取り上げて LCA を行う。緩和策には再生可能エネルギー（太陽光発電、風力発電など）、CCS、自動車、プラスチックを取り上げ、適応策には防潮堤、海水淡水化、空調機を評価対象とする。気候変動に加えて、大気汚染や資源消費、水消費といった気候変動対策のコベネフィットやトレードオフについて考慮するとともに、ライフサイクルコストの算定と合わせた費用対便益分析を実施する。得られた成果はサブテーマ(1)の統合的多面評価の要素として活用する。

３．研究開発方法

1) 気候変動を対象としたライフサイクル影響評価手法の開発と SCC（社会的炭素費用）の算定

①　SSP シナリオ別の健康影響の被害評価手法の開発

過去に SRES シナリオに注目した分析を通じて、将来社会像に応じて気候変動による被害量は大きく異なることがわかった。現在、RCP と SSP シナリオ別に注目した被害評価の開発事例はないことから、両シナリオ別に CO2 健康被害係数を算定するための検討を行った。計算式は以下に示す。

$$DF_{RCP,SSP} = \left(AD_{RCP,SSP} - D_{RCP,SSP}\right) / \Delta CO_2$$

$$AD_{RCP,SSP} = \sum_i \sum_r \sum_t \left(AT_{t,r,RCP} \times R_{t,r,i} \times M_{t,r,i,SSP} \times P_{t,r,SSP} \times S_{r,i}\right)$$

$$D_{RCP,SSP} = \sum_i \sum_r \sum_t \left(T_{t,r,RCP} \times R_{t,r,i} \times M_{t,r,i,SSP} \times P_{t,r,SSP} \times S_{r,i}\right)$$

DF: RCP, SSP: RCP 別、SSP 別の CO2 健康被害係数（DALY/kg）

ΔD：CO2 を追加排出された場合の健康被害（DALY）
D：CO2 を追加排出しない場合の健康被害（DALY）
T: 気温増分（度）
R: 気温 1 度上昇あたり相対リスクの増分（%/度）
M: ベースライン死亡率（%）
P: 人口（person）
S: 死亡一件あたりの損失余命（DALYs/case）
RCP: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5
SSP: SSP1, SSP2, SSP3, SSP4, SSP5
t: 2000 - 2080; r: 世界 21 地域; i: 熱ストレス、栄養失調、デング、マラリア、下痢、沿岸洪水

健康被害係数の算定にあたり、CO2 単位量排出による追加的世界平均気温上昇量の推計は、従来の MAGICC5.3 簡易型気候モデルを用いた。世界平均気温 1 ℃あたりの地域別疾病別の相対リスクについては、温暖化がない場合の死亡率（ベース死亡率）に対する温暖化が起こった場合の死亡率の増加率と定義し、WHO（2014）の結果を基に将来社会シナリオ別に算出した。温暖化がない場合のベース死亡率の将来予測については、Tang et al.（2015）で採用された方法を踏襲した。Tang et al.（2015）では、WHO（2004）において推計された 2030 年までの疾病別の死亡率とその死亡率の推計に用いられる GDP/cap データを基に、GDP/cap と死亡率の関係を抽出してから、SRES 別の GDP/cap に応じた死亡率を 2100 年までに推計している。本研究は同様の方法を用いて、SSP 別に死亡率を推計した。人口については SSP シナリオ別の人口データを参照した。また死亡一件あたりの損失余命（DALY）については、WHOによる“Global Health Estimates（GHE）”から抽出したデータを基に算定を行った。

② 気候変動による生物多様性のライフサイクル影響評価手法開発

維管束植物 2,507 種を対象に気候変動による絶滅リスクの増分を算定し、これらを代表する被害係数の算定を行った。被害係数の算定方法は以下の三段階で構成される。

・気温上昇量の計算： 1 ton-CO2 の追加排出による 100 年間の気温上昇量を算定する。MAGICC（Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change）v5.3 model（Wigley, 2008）を用いた。SRES A1B の CO2 排出シナリオにおける 2000 年から 2100 年まで時系列の世界平均気温上昇量を算定する。次に、2010 年に 1 Gt-C を追加排出した場合の 2100 年までの世界平均気温を算出する。最後に、気温上昇量の差分を CO2 排出量 1 ton あたりに換算し、100 年間の気温上昇量を得た。

・気温と絶滅リスクの関係の推計：100 年間において、気温 1 ℃あたりの絶滅割合を算出する。まずは、種ごとに潜在的絶滅種数を推計する（式 4）。次に、絶滅割合は評価した潜在的絶滅リスクの合計を全評価種数で割って平均値を得た（式 3）。最後に、複数の RCP で算出した絶滅割合の差と世界平均気温上昇量の差の関係から算出した（式2）。絶滅危惧種と非危惧種は、気候変化による影響の感度が異なるため、IUCN データを基にこれらを区別して算定した。現在と将来の潜在的種分布面積は、種分布モデル MaxEnt を用いた。MaxEnt モデルへのインプットデータについて、現在の分布データは GBIF より収集した 2,507 種を収集し、現在と将来の環境データ（土地利用変数 4 種、気候変数 7 種）は History Database of the Global Environment (http://themasites.pbl.nl/tridion/en/themasites/hyde/index.html)より得た。

・係数の算定：上記2段階の結果に世界の植物種数（30 万種）を乗じて、1 ton-CO2 あたりの潜在的絶滅種数を算出した。係数の不確実性については、以下のパラメータを考慮した。

①ΔT(℃/kg)：気候感度 3 ℃（1.5～6、正規分布）。②絶滅閾値：1 km^2（0.1～10、一様分布）。

$$DF_{G,M} = \Delta T \times \left(EP_{G,M}^{NT} \times (N/2) + EP_{G,M}^{T} \times (N/2)\right) \quad (1)$$

$$EP_{G,M} = \left(E_{G,M,RCP8.5} - E_{G,M,RCP2.6}\right)/\left(TEMP_{G,RCP8.5} - TEMP_{G,RCP2.6}\right) \quad (2)$$

$$E_{G,M,RCP} = (1/n) \times \sum_n \left(100 \times \left(1/Y_{n,G,M,RCP}\right)\right) \quad (3)$$

$$1 = A_n \times \left(a_{n,G,M,RCP}/A_n\right)^{Y_{n,G,M,RCP}/100} \quad (4)$$

$DF_{G,M}$: 気候モデル別、移動能力別の絶滅リスク係数（Extinction species/ton-CO_2）
$EP^{NT}_{G,M}$: 気候モデル別、移動能力別の 1 ℃あたりの非危惧種の絶滅割合（%/℃）
$EP^{T}_{G,M}$: 気候モデル別、移動能力別の 1 ℃あたりの危惧種の絶滅割合（%/℃）
$E_{G,M,RCP}$: 気候モデル別、移動能力別、RCP 別の 100 年間（1970-2070）における危惧種/非危惧種の絶滅割合（%）
Yn: 危惧種 or 非危惧種 n の絶滅までの所要年数（year）
an: 危惧種 or 非危惧種 n の 2070 年時の分布面積（km2）
An: 危惧種 or 非危惧種 n の 1970 年時の分布面積（km2）

③　気候変動による社会資産のライフサイクル影響評価手法開発

気候変動は人間社会、社会インフラ、各産業にも甚大な被害をもたらす。LCA における気候変動の被害係数は、欧州では健康と生物多様性への影響が中心であり、社会資産への被害が欠落している（JRC, 2011）[1)]。LIME は社会資産被害係数を算定するが、評価範囲が土地水没、穀物減産、エネルギー消費に限られ、近年急速に発展する気候変動の影響評価研究の知見を反映することが求められる。

本研究は評価範囲の網羅性を高めるための検討を行った。まずは、IPCC 第 4 次報告書にて報告される社会資産に該当する項目を整理したうえで、確信度が高い、かつ、主要リスクと分類される項目を抽出し、評価すべき項目とした。次に、評価すべき項目の中に定量的評価可能な項目を抽出した結果、LIME 手法が考慮する項目にサンゴ礁、内陸洪水、海岸洪水、労働生産性を加えた計 7 項目を本研究の評価対象とした(**図3.2.1**)。

社会資産被害係数は、単位量の温室効果ガスが追加排出されたことによって生じる社会資産の被害額と定義する。SSP 別の係数の算定方法は式（1）に示す。各項目で考慮される被害の内訳、および係数算定で使用されるデータは**表3.2.1**にまとめた。

$$DF_{SSP} = \Delta C \cdot RF \cdot \frac{D_{SSP,RCP8.5} - D_{SSP,RCP2.6}}{RF_{RCP8.5} - RF_{RCP2.6}} \quad (1)$$

DF_{SSP}: SSP 別の社会資産被害係数（US$/kg-CO2）
ΔC: 1kg-CO2の追加排出による 100 年間の CO2 濃度増分（(ppb･year)/kg）
RF: CO2 濃度と放射強制力の関係（(W/m^2)/ppb）
$D_{SSP,RCP}$: SSP と RCP の組合せ別の気候変動による 100 年間累積の被害額（US$）
RF_{RCP}: RCP 別の放射強制力の 100 年間累積値（(W/m^2)･year）

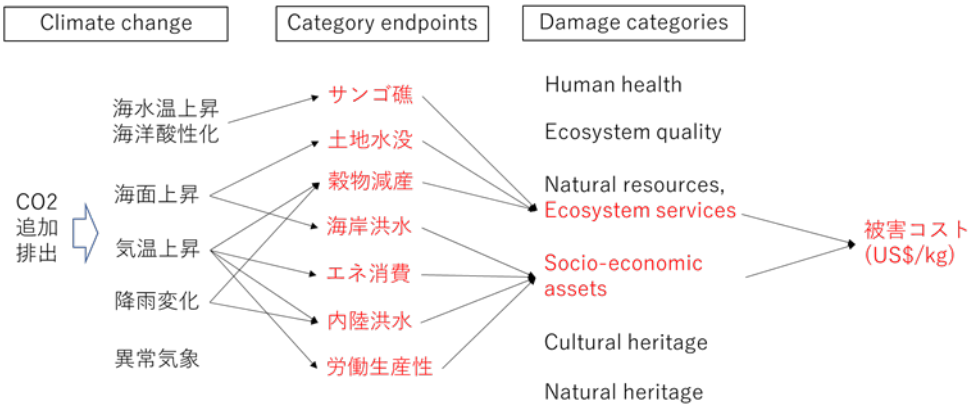

図3.2.1：社会資産被害係数の算定フローと評価範囲。

表3.2.1：社会資産被害係数の算定に使用した項目ごとのデータ。

項目	被害	評価範囲(年次/地域)	シナリオ	出典	金銭化方法(年次/地域)	出典
サンゴ礁	分布面積	2070/global	RCP	Couce et al. 2013	WTP(2011,なし)	Costanza et al. 2014
土地水没	水没面積	2100/global	RCP	Tamura et al. 2019	WTP(2011,なし)	Costanza et al. 2014
穀物減産	生産量	2100/global	RCP/SSP	Iizumi et al. 2017	市価(2015?/地域)	本研究
海岸洪水	被害額(EM-DAT)	2100/global	RCP/SSP	Tamura et al. 2019	市価(不特定/地域)	Tamura et al. 2019
エネ消費	電力,灯油,都市ガス	2100/global	RCP/SSP	Hasegawa et al. 2016	市価(2015?/地域)	本研究
内陸洪水	被害額(EM-DAT)	2100/global	RCP/SSP	Kinoshita et al. 2018	市価(不特定/地域)	Kinoshita et al. 2018
労働生産性	追加的賃金	2100/global	RCP/SSP	Takakura et al. 2017	市価(不特定/地域)	Takakura et al. 2017

④　社会的炭素費用（SCC）の算定

①～③までの結果に LIME3 の重みづけ係数を乗じて得られた結果の和を取ることで SCC を算定した。LIME3 の重みづけ係数には、G20 のアンケート調査（6,400 件）に基づき算定された支払意思額（被害 1 単位を回避するために支払うことができる金額の平均値）を用いた。

2）影響領域間のトレードオフ、コベネフィットを考慮した気候変動対策の LCA

①　緩和策のライフサイクルアセスメント

自動車、発電とプラスチックを対象としたライフサイクルのメタ分析を通して、地球温暖化の緩和策としての定量的分析の実施可能について検討を行った。

研究の進め方は、日本国内、国外で行われている自動車を対象とした LCA が行われている査読付きの論文を Google scholar を用いて収集した。発電に関しては、NREL が発表した発電のメタ分析論文と、その論文に記載されていた参考文献から、査読付き論文を収集した。また、LCA ソフトウェア SimaPro に搭載されている ecoinvent データベースに含まれる各発電プロセスに特性化係数を適用した結果を収集した。プラスチックに関しては、Google Scholar と Science Direct を使用して、査読付き論文と報告書を収集した。発電と同様に SimaPro に搭載されている ecoinvent データベースと USLCI データベースに含まれるプラスチックプロセスに特性化係数を適用した結果を収集した。合わせて IDEA データベースに掲載された、特性化済みのプロセス結果を収集した。収集した論文には LCA 結果が表形式やグラフ形式で記載されており、そこから標本値を抽出した。論文で与えられる情報がグラフのみの場合、自動車におけるグラフからの数値の推計は、パソコンの画面を定規で計測し、高さと最大値の比から求めた。発電とプラスチックにおけるグラフからの数値の推計は、ソフトウェア（Graphcel）を用いた。メタ分析に用いた論文数、標本数の情報を表3.2.2に示す。

表3.2.2：使用論文数及び標本数一覧。

	自動車	発電	プラスチック
論文数	27	71	29
標本数	547	2046	347

自動車の種類は、ガソリン車、ディーゼル車、ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車及び電気自動車（電力源別に、化石燃料由来、電力ミックス、非化石エネルギー）、燃料電池自動車、その他、の 11 種類に分類した。発電は、石炭及び天然ガス（それぞれ CCS あり、CCS なし）、石油、地熱、風力、原子力、水力、太陽熱、バイオマス、太陽光（シリコン系、単結晶シリコン、多結晶シリコン、アモルファスシリコン、テルル化カドミウム、ガリウムセレン、パネルの詳細不明）の 18 種類に分類した。プラスチックは、PE、PET（それぞれ石油由来、バイオマス由来）、PLA（キャッサバ由来、サトウキビ由来、トウモロコシ由来、ミックス由来）の 8 種類に分類した。

収集した LCA 結果は論文やプロセスによって対象とされていた段階が異なりライフサイクル全体での評価が出来なかった。そこで、自動車に関しては、バッテリー段階、その他製造段階、使用段階、廃棄段階、の 4 段階、発電に関しては、燃料製造段階、建造段階、発電段階、廃棄段階の 4 段階に分類して、整理を行った。プラスチックに関しては、樹脂の製造段階のみを抽出し、廃棄段階は全量焼却として理論値の当てはめを行った。次にライフサイクル全体の評価を行うため、プラスチックを除き不足している段階を補う補正を行った。補正に用いる数値は自動車別、発電別の標本の段階ごとの平均値を用いた。プラスチックでは補正を行わず、バイオマス由来の CO2 吸収量、廃棄段階の CO2 排出量を取り除いた。このようにして補正されたライフサイクル全体の GHG 排出量を用いて自動車、発電の分類別に箱ひげ図を作成した。プラスチックでは樹脂の製造段階の GHG 排出量を用いて箱ひげ図を作成した。

② 適応策のLCA

浄水器、海水淡水化プラント、空調機を対象に適応策のライフサイクルアセスメントに基づく評価を実施した。浄水器の評価では、手軽に使えるピッチャー型の精密ろ過膜（MF）式と、大量に処理できる電動型の逆浸透膜（RO）式の 2 種類を選び、対象国は、水不足が予想される国の中で、水質データの公開があるガーナ地区を選んだ。本研究では、MF 浄水器と RO 浄水器をそれぞれ単独に導入した場合と、都市部に RO 浄水器を田舎部に MF 浄水器を導入した場合の、3 つの浄水器導入シナリオで評価した。

海水淡水化プラントの環境影響評価では、3 つの方式（多段フラッシュ蒸発式：MSF、多重効用蒸発式：MED、逆浸透膜式：RO）の海水淡水化プラントを対象とした。一次データを国内の事例から得て、導入に伴う気候変動による被害低減効果と当該施設導入と運用に伴う環境影響の双方を算定し、両者のバランスを考慮した分析を行った。空調機は日本、ジャカルタを対象に使用による熱中症の回避効果（適応策）の評価に加えて、インバータの導入による省エネ効果（緩和策）の双方を考慮した LCA、LCC を行った。

４．結果及び考察

1) 気候変動を対象としたライフサイクル影響評価手法の開発と SCC（社会的炭素費用）の算定

① SSP シナリオ別の健康影響の被害評価手法の開発

健康被害係数の算定結果を**図4.2.1**に示した。

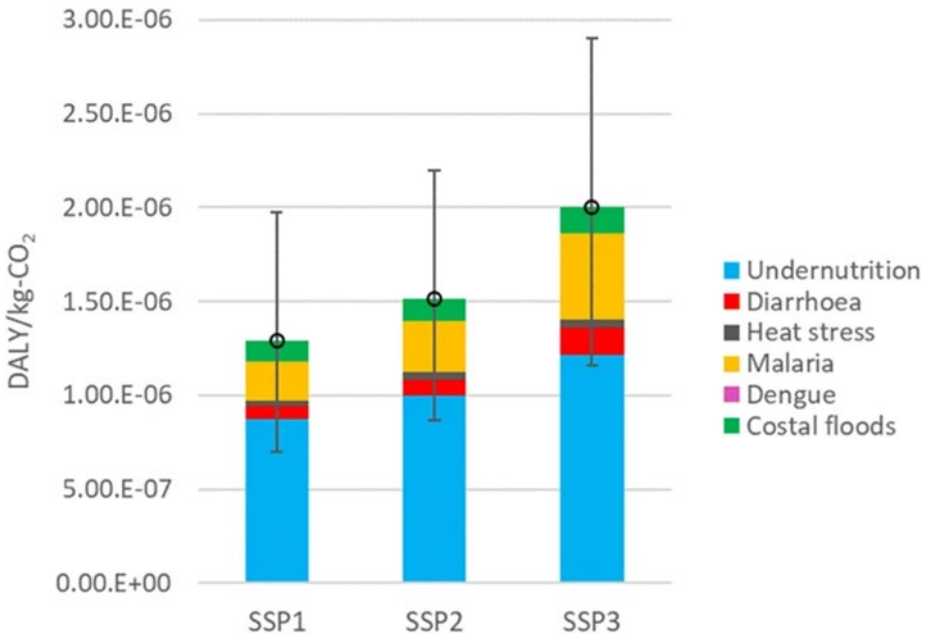

図 4.2.1：人間健康を対象とした被害係数の算定結果（縦軸は 1kg-CO2 排出による損失余命）。

複数の疾患による損失余命の合計値は 1.3～2.0×10^{-6}年/1kg-CO2 であった。疾患の中では低栄養の影響が最大であり、これについでマラリアが大きく、下痢と沿岸洪水による影響が同等程度であった。上位三種の疾患はいずれもアジア、アフリカ地域で発生するものであり、気候変動による健康影響は地域差が極めて大きいことがわかる。一方、熱ストレスによる影響はこれらに比べると小さかった。先進国では熱ストレスによる影響は大きいが損失余命で表す場合、高齢者が主に影響を受けるため一件当たりの損失余命は他の疾患に比べて小さい。一方、低栄養やマラリアによる死亡被害の多くは 5 歳以下であることが多く、1 件当たりの損失余命が非常に大きい。これらの影響を受ける年齢層の違いが結果に表れている。

② 気候変動による生物多様性のライフサイクル影響評価手法開発

気候モデル（GCM）と移動能力（FM/NM）の違いを考慮した絶滅リスク係数は 1.6～4.6×10^{-9}（Extinction species/ton）と算定された（**表4.2.1**）。移動不能（NM）は移動可能（FM）より約 2 倍高かった。気候モデル間の差は相対的に小さかった。また、いずれの気候モデルも、危惧種（T）の影響が非危惧種（NT）より大きかった。

表 4.2.1：気候モデル（GCM）と移動能力（FM/NM）別の植物絶滅リスク係数。

			Additional temperature rise per ton-CO_2 (°C/ton)	Relationship between extinction ratio and temperature: Extinction ratio (100/%) RCP2.6	Extinction ratio (100/%) RCP8.5	Temperature rise (°C) RCP2.6	Temperature rise (°C) RCP8.5	Extinction ratio per °C (100/%/°C)	Number of plant species (thousand)	Extinction risk factors (Extinction species/ton)	
FM	GCM5	NT	5.0E-13	0.005	0.016	1.0	2.3	0.009	150	6.5E-10	1.6E-09
		T		0.008	0.025			0.013		9.4E-10	
	GCM3	NT	5.0E-13	0.007	0.032	1.1	2.8	0.015	150	1.1E-09	2.3E-09
		T		0.011	0.037			0.015		1.2E-09	
	GCM4	NT	5.0E-13	0.008	0.024	1.4	3.0	0.010	150	7.2E-10	1.6E-09
		T		0.016	0.035			0.012		9.0E-10	
	GCM2	NT	5.0E-13	0.009	0.028	1.4	3.1	0.011	150	8.0E-10	1.9E-09
		T		0.014	0.039			0.014		1.1E-09	
	GCM1	NT	5.0E-13	0.013	0.030	1.7	3.3	0.010	150	7.9E-10	1.9E-09
		T		0.019	0.043			0.014		1.1E-09	
NM	GCM5	NT	5.0E-13	0.021	0.046	1.0	2.3	0.019	150	1.4E-09	3.4E-09
		T		0.023	0.057			0.027		2.0E-09	
	GCM3	NT	5.0E-13	0.032	0.081	1.1	2.8	0.030	150	2.3E-09	4.6E-09
		T		0.038	0.090			0.031		2.4E-09	
	GCM4	NT	5.0E-13	0.030	0.067	1.4	3.0	0.023	150	1.7E-09	3.6E-09
		T		0.038	0.080			0.025		1.9E-09	
	GCM2	NT	5.0E-13	0.031	0.075	1.4	3.1	0.025	150	1.9E-09	3.8E-09
		T		0.036	0.082			0.026		1.9E-09	
	GCM1	NT	5.0E-13	0.039	0.082	1.7	3.3	0.026	150	1.9E-09	4.1E-09
		T		0.044	0.092			0.029		2.2E-09	

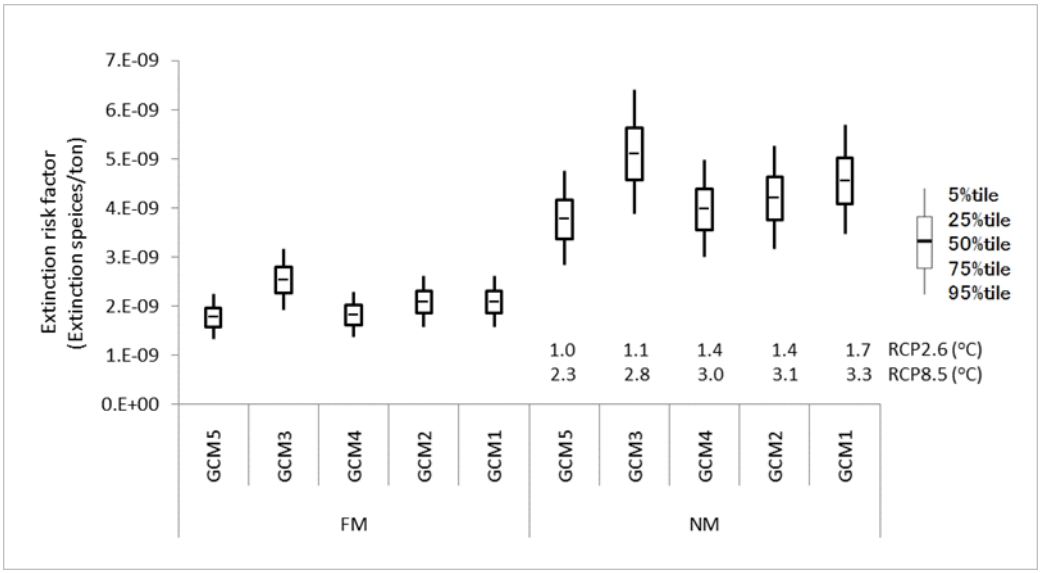

図 4.2.2：気候変動による生物多様性を対象とした被害評価係数（CO2 単位量排出による生物種の絶滅リスクの増分）の算定結果。

生物多様性を対象とした被害係数の評価結果を**図4.2.2**に示した。これは一単位当たりの CO_2 排出に

伴う生物種の絶滅リスクの増分を示す。生物種の移動を可能としたとき（FM）と移動ができないものとしたとき（NM）の差が大きかった。気候モデル別の結果を比較すると、必ずしも気温上昇量のみに影響しているわけではないことがわかる。これは、種の分布変化は気温のほかに、降雨量にも影響されるが、気候モデル間の将来降雨量の予測結果間の差が大きいことが考えられる。

1 ℃上昇あたりの絶滅割合は、移動能力と気候モデルの違いを考慮すると約 1 ～ 3 %と算定された。これは Urban（2015）の結果と整合する。本研究では 1 ℃上昇あたりの絶滅割合を地域ごとに算定できること特徴がある。各地域の固有種を抽出して、地域別の 1 ℃あたりの絶滅割合を算定した（**図4.2.3**）。その結果、オセアニア、欧州、アメリカ中部が高く、東アジアと北米は相対的に小さいことが示唆された。オセアニアやアメリカ中部は島嶼国が多く、特に移動による適応が他地域よりも困難であることが大きくなった要因として挙げられる。また、本研究では世界平均気温 1 ℃あたりの各地域の絶滅割合を算定しており、ロシアを含む欧州地域では他地域よりも気温上昇量が高いことが結果に影響した。

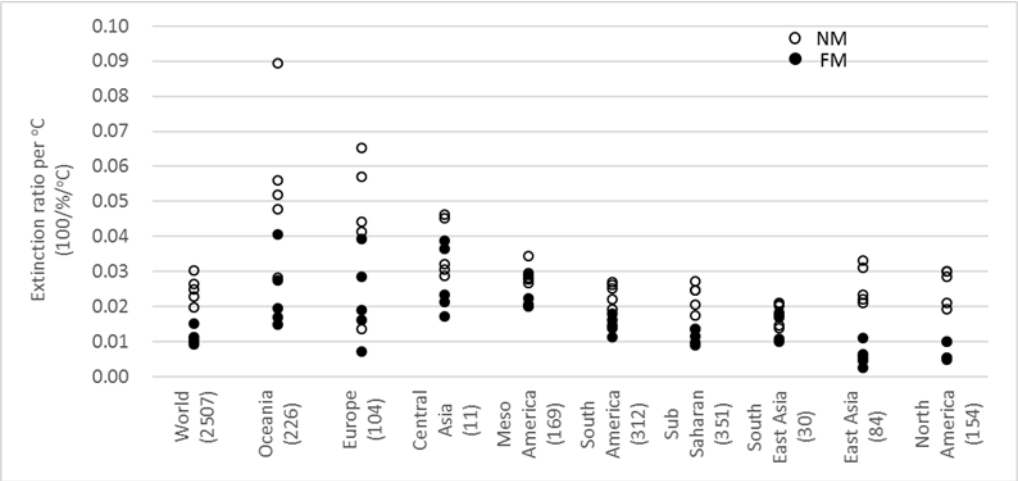

図 4.2.3：1℃あたりの絶滅割合の地域性（括弧内はサンプル数）。

③　社会資産を対象とした被害評価手法の開発

CO2 の社会資産被害係数を SSP 別に算定した結果、GCM の平均値では、0.06～0.11（US$/kg）であった（**図4.2.4**）。SSP 別では、将来経済成長が高いと想定される SSP1 の被害係数が最も大きかった。被害の絶対値ではなく、GDP に占める割合でみると SSP3 が最も大きい。また、項目別では、労働生産性の低下による損失が最も大きく、次いで内陸洪水、サンゴ礁、穀物、土地水没による影響が大きかった。一方、エネルギー消費と海岸洪水はこれらに比べて相対的に影響は小さかった。

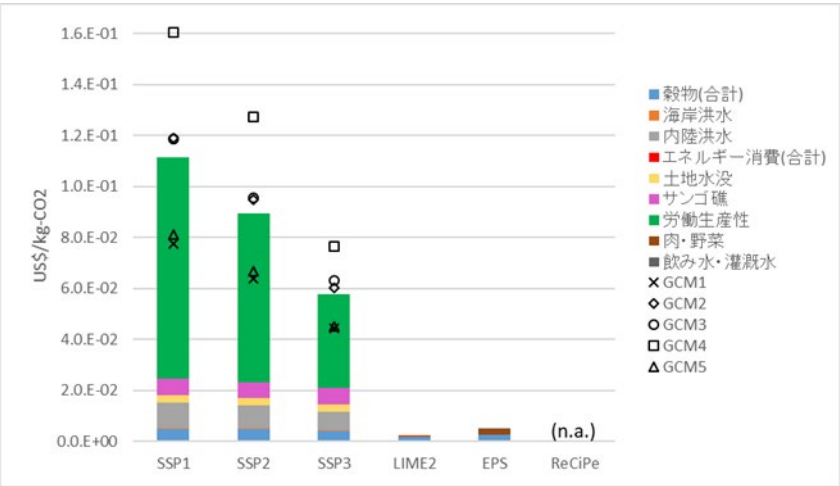

図4.2.4：SSP 別の社会資産被害係数（5GCM の平均値）と既存研究の比較。

労働生産性への影響が最大であることは、統合評価モデルを用いた研究結果とほぼ同様な傾向を示した（**図4.2.5**）。全項目を積み上げた社会資産の被害係数では、Dong et al.（2019）[2)]が整理した CO2 の健康被害コスト（0.1～0.15 US$/kg-CO2）と生物多様性被害コスト（0.04 US$/kg-CO2）と同程度である。今回の研究を通して得られた新しい被害係数は、既存の社会資産を対象とした被害係数と比較して、10 倍以上大きかった（**図4.2.4**）。従来の LCA における社会資産の影響は評価範囲が狭く、主要な影響を考慮していなかったことから、今後当該項目に関する評価を算入することが強く求められる結果となった。

本研究はテーマ 3、テーマ 5の研究成果を社会資産への影響項目を反映させることで、LCA における社会資産被害係数の網羅性を大幅に向上することができた。なお、以下の限界を留意されたい。1)特に台風など自然災害の頻度増加による影響が本研究に考慮されていないため、さらなる評価範囲の拡張が求められる。2)土地水没については、土地利用区分が粗いなど信頼性を向上することが求められる。3)社会資産の被害額は、割引率を導入していないため、長期的な影響を過大評価する傾向がある。

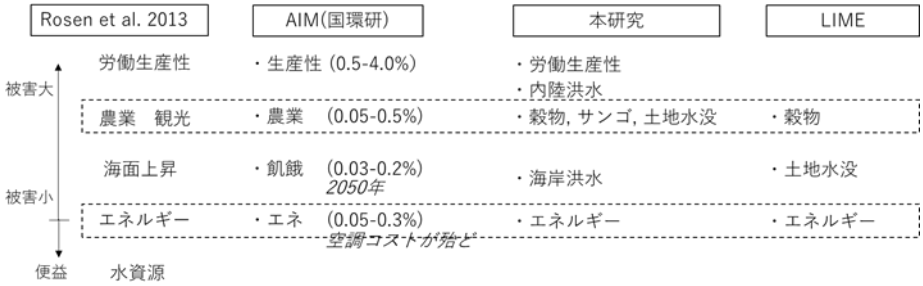

図 4.2.5：既存研究における項目間の関係（図中の数値は GDP に対する割合を示す）。

④　社会的炭素費用（SCC）の算定

被害係数の算定結果を集計することで社会的炭素費用（SCC）の算定を行った。その結果を**図4.2.6**に示した。

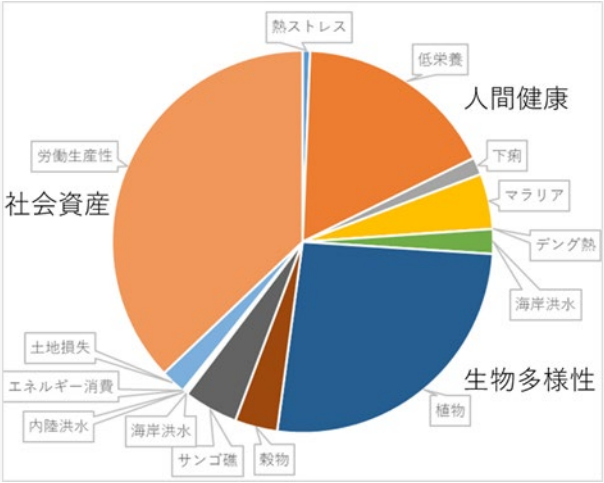

図 4.2.6：SCC の算定結果（SSP2）。

合計は 130 US$/1ton-CO2と算定された。米国における SCC 算定は歴代政権で実施されているが（2013 年実施時は平均値 42 $、2017 年実施時は 7 $）、これらに比べるとかなり大きい値になった。これは、本研究における評価範囲が広がったことと割引率を採用しなかったことによる影響が大きい。SCC の内訳で見ると、最も「社会資産」への影響が大きく、全体のほぼ半分を占め、残りの半分については「人間健康」と「生物多様性」への影響はほぼ同等であった。10 億トンの CO2 を排出した場合、およそ 13 兆円の影響であり、日本の GDP のおよそ 3 %程度に相当する。

2) 影響領域間のトレードオフ、コベネフィットを考慮した気候変動対策の LCA

① 緩和策のライフサイクルアセスメント

自動車に関して、ライフサイクルのメタ分析を行った結果を**図4.2.7**に示す。中央値で見た場合にガソリン車、プラグインハイブリッド車（電力源が化石燃料由来）が最も GHG 排出量が大きく、0.23 kgCO2-eq/km であった。最も小さい GHG 排出量となったのは電気自動車の非化石エネルギーを使用した場合の 0.05 kgCO2-eq/km であった。

使用段階で電気を使用するプラグインハイブリッド車、電気自動車では発電に使用される燃料によって GHG 排出量が大きく変化し、プラグインハイブリッド車では化石燃料由来の電力から非化石エネルギー由来の電力に変更することで約 50 %、電気自動車では約 75 %の GHG 削減効果があることが明らかとなった。一般的に使用されている電力ミックスを用いた場合、ガソリン車と比較するとプラグインハイブリッド車では約 20 %、電気自動車では約 40 %の GHG 排出量の削減となった。

発電に関してライフサイクルのメタ分析を行った結果を**図4.2.8**に示す。中央値で見た場合に石炭（CCS なし）が最も GHG 排出量が大きく、1.00 kgCO2-eq/kWh であった。最も小さい GHG 排出量となったのは水力発電の場合で 0.01 kgCO2-eq/kWh であった。石炭と天然ガスについて、CCS の有無で分けた場合、石炭（CCS なし）は 1.00 kgCO_2-eq/kWh、石炭（CCS あり）は 0.37 kgCO_2-eq/kWh、天然ガス（CCS なし）は 0.63 kgCO_2-eq/kWh、天然ガス（CCS あり）は 0.30 kgCO_2-eq/kWh となった。なお、天然ガスの CCS ありは標本が 1 つだったため結果の代表性という観点で課題が残った。今回の結果によれば、CCS を導入することにより石炭では約 60 %、天然ガスでは約 50 %の GHG 排出量削減が可能であることが確認された。太陽光で、最も大きい GHG 排出量となったのはパネルがシリコン系の 0.16 kgCO_2-eq/kWh の場合で、最も小さい GHG 排出量となったのはガリウムセレンの 0.06 kgCO_2-eq/kWh であった。これらの違いについて、開発・生産時期に応じた考察を検討する必要がある。

プラスチックに関してライフサイクルのメタ分析を行った結果を**図4.2.9**に示す。直接排出を含まない結果では、PE はバイオマス由来の排出量が 2.32 kgCO2-eq/kg-樹脂、石油由来では 2.00 kgCO2-eq/kg-樹脂とバイオマス由来がGHG排出量は大きくなった。ここから廃棄段階からの直接排出を含んだ場合、バイオマス由来からは燃焼時の CO2 排出がなく、直接排出を含んだ場合であっても CO2 排出量の増加はない。石油由来の PE は廃棄段階からの直接排出を含むと、5.15 kgCO2-eq/kg-樹脂となり、バイオマス樹脂よりも大きい結果となった。

PET では直接排出を含まない結果では、石油由来で 2.87 kgCO2-eq/kg-樹脂、バイオマス由来で 2.06 kgCO2-eq/kg-樹脂と石油由来が大きい結果となった。廃棄段階の直接排出において、PET は実態として 100 %バイオマスで生産が出来ないため炭素構成比を石油：バイオマス＝ 8 ： 2 として算定した。そのためバイオマス由来であっても廃棄段階からの直接排出が含まれる。直接排出を含んだ結果は石油由来で 5.16 kgCO2-eq/kg-樹脂、バイオマス由来で 3.89 kgCO2-eq/kg-樹脂となった。PLA ではバイオマス由来のみしか存在せず、原材料とする植物によってその結果が異なった。中央値で見ると複数の植物を混合したミックスが最も小さくなり、0.87 kgCO2-eq/kg-樹脂となり、キャッサバで 1.29 kgCO2-eq/kg-樹脂、トウモロコシで 1.91 kgCO2-eq/kg-樹脂、サトウキビで 2.03 kgCO2-eq/kg-樹脂の順となった。PLA は原材料によって GHG 排出量は異なるが、その中央値は PE や PET よりも大きくなることはないことが明らかとなった。PLA では特にトウモロコシからの排出はその幅が大きい。これは複数の文献にリファレンスされている Ingeo の論文によるものであり、文献によっては、掲載されている Ingeo の GHG 排出量をそのまま引用している場合と原材料となるトウモロコシが成長段階で吸収した CO2 排出量を戻した結果を引用している場合の、2 パターンが存在した。また Ingeo の文献は 2004 年、2007 年、2010 年と複数年にわたって公開されており、後年になるにつれて GHG 排出量がより小さい結果となっていた。特に小さい値については将来目標とするエネルギー効率で計算を行った結果であるため PLA 生産時の GHG 排出量が小さくなった。

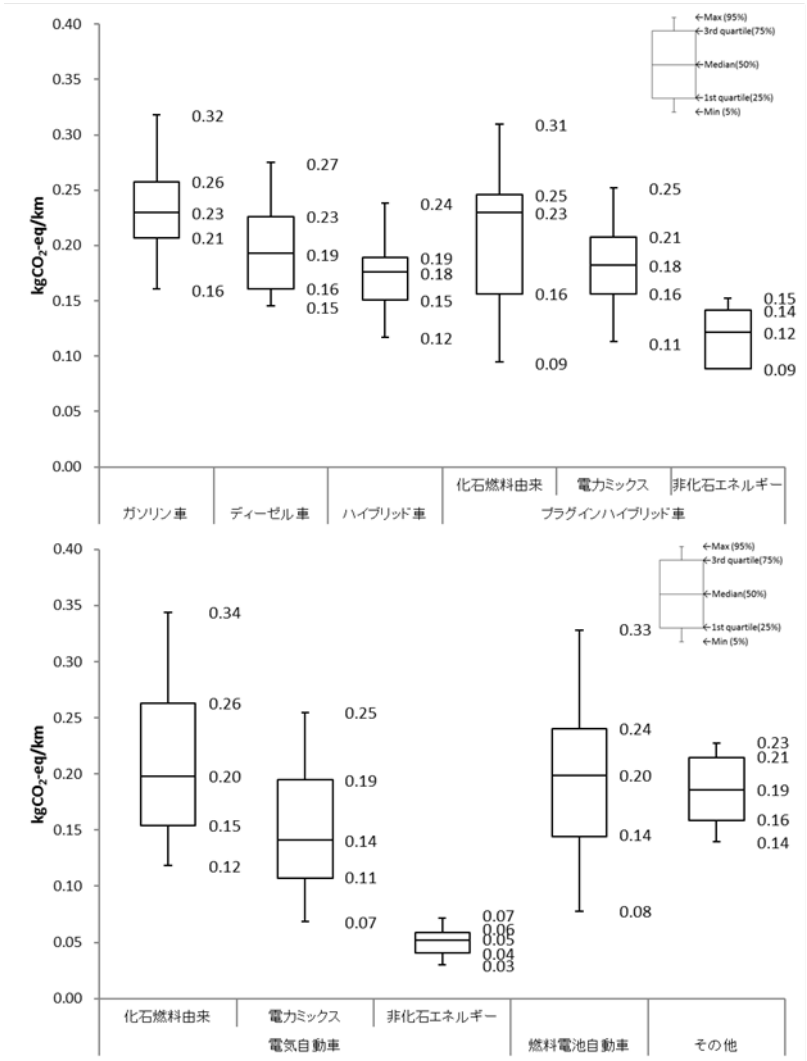

図 4.2.7：自動車のライフサイクル GHG 排出量 メタ分析結果。

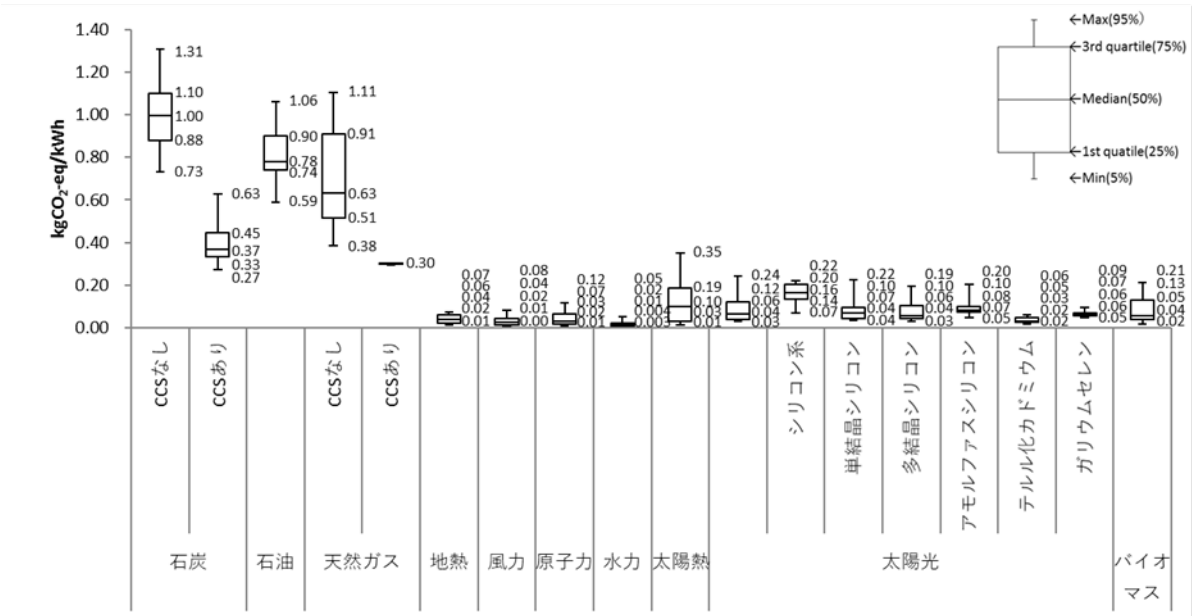

図 4.2.8：発電のライフサイクル GHG 排出量 メタ分析結果。

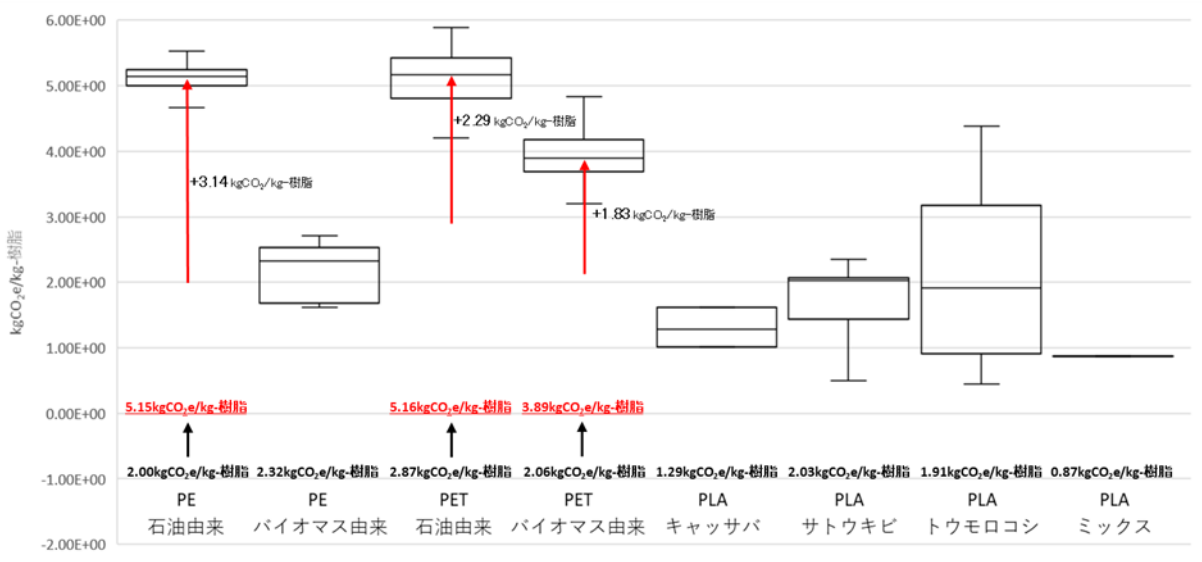

図 4.2.9：プラスチックの GHG 排出量 メタ分析結果。

② 適応策のライフサイクルアセスメント

ここでは、空調機を対象に実施した評価結果を例に図4.2.10に示した。インドネシアの空調機普及の割合は低く、かつ、インバータが実装されておらず、GWP が高い冷媒が利用されている。負の値は空調機利用による便益（健康リスク低減）であり値が大きいほど効果は高く、正の値は空調機利用による費用であり値が小さいほうが望ましい。費用は LCC（ライフサイクルを通じて関係者が支払う費用の総計）と LCA（ライフサイクルを通じて発生する環境影響を費用換算したものの総計）で構成される。LCA の結果には気候変動、大気汚染、資源消費による影響が含まれる。普及機（GWP 高冷媒）のものを GWP が低い冷媒に変えた場合、気候変動への影響が低減されるとともに、使用時の電力消費量を若干抑えることができる。これにインバータを利用する高性能機を利用することで、大きな電力消費量低減効果が得られ、LCC、LCA いずれも普及機に比べて半減することができる。

一方、便益はテーマ 4 における研究成果を受けることで睡眠障害と疲労の軽減効果を損失余命の回避効果として表現した。GWP 高冷媒を利用した従来機の場合は費用と便益がほぼ同等であったが、高性能機の費用に対してはおよそ倍の便益を得ることができた（B/C= 2）。よって、緩和策と適応策を組み合わせることで空調機による気候変動対策効果は 2 倍に向上することが確認された。

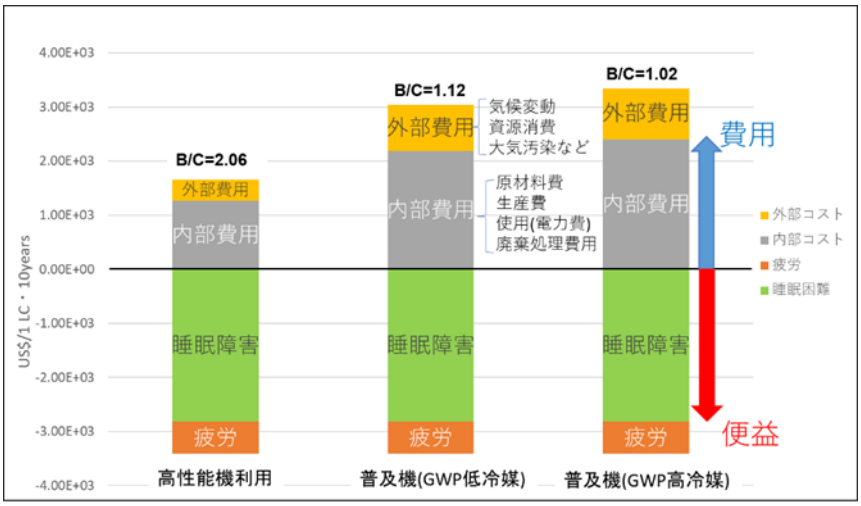

図 4.2.10：空調機を対象とした LCA、LCC 算定結果（機能単位はジャカルタで 10 年間使用）。

ここまでに対象とした「自動車」、「発電」は主要な国別、「バイオマス」については全世界で限界削減費用曲線を作成し、適応策についても同曲線に示した。対象別のシナリオ及び対象国を以下に示

す（表 4.2.2）。

表 4.2.2：緩和策の対象及び対象国。

対象	対象国	将来シナリオ	備考
自動車	米国	2030 年に販売されるガソリン車を電気自動車に代替	中国、インドの 2 ヶ国では二輪車が一般的な移動手段のためガソリン二輪車→電動二輪車へ代替も計算した
	日本		
	中国		
	インド		
	欧州		
発電	米国	2025 年の発電ミックスを NPS（New Policies Scenario）シナリオから SDS(Sustainable Development Scenario)シナリオに変更	将来シナリオは IEA の発行する World Energy Outlook 2018 に掲載されているものを利用した
	日本		
	中国		
	インド		
	欧州		
バイオ PE バイオ PET	全世界	2030 年に生産される石油由来 PE と PET をバイオ PE、PET に代替	将来の生産量は比例式から算出をした

次に上記を計算した結果を示す（図 4.2.11）。

国	手段	導入数		削減CO2e マイナスは増加	LCC（C：費用）	LCA（B：削減は費用）	GHG削減コスト	C/B	B/C
		値	単位	tCO2e	$	$	$/tCO2e	$/$	$/$
US	電気自動車導入	3,360,000	台	1.87E+08	3.90E+10	1.79E+10	2.09E+02	2.18	0.46
	発電ミックス変更	4,373	TWh/年	4.97E+08	8.12E+10	1.49E+10	1.63E+02	5.44	0.18
JP	電気自動車導入	880,000	台	9.63E+06	8.93E+09	7.22E+06	9.28E+02	1236.67	0.00
	発電ミックス変更	1,044	TWh/年	7.68E+07	1.35E+10	9.45E+08	1.76E+02	14.32	0.07
CN	電気自動車導入	13,500,000	台	9.77E+07	2.63E+11	1.56E+07	2.69E+03	16865.71	0.00
	電動二輪車導入	34,450,200	台	9.88E+07	-1.10E+11	1.07E+10	-1.11E+03	-10.24	-0.10
	発電ミックス変更	8,486	TWh/年	8.60E+08	7.59E+09	2.58E+10	8.83E+00	0.29	3.40
IN	電気自動車導入	2,010,000	台	-2.03E+07	2.19E+10	-6.91E+09	-1.08E+03	-3.16	-0.32
	電動二輪車導入	1,000,000	台	3.87E+06	-2.32E+09	1.10E+07	-6.00E+02	-210.43	-0.00
	発電ミックス変更	2,431	TWh/年	4.25E+08	1.35E+10	3.36E+10	3.18E+01	0.40	2.49
RER	電気自動車導入	4,800,000	台	1.61E+08	5.03E+10	1.56E+10	3.12E+02	3.22	0.31
	発電ミックス変更	4,337	TWh/年	1.67E+08	4.18E+10	2.38E+09	2.51E+02	17.55	0.06
GLO	バイオPE導入	340,079	t	9.40.E+05	1.53E+08	5.81E+06	1.63E+02	26.30	0.04
	バイオPET導入	282,438	t	3.51.E+05	1.63E+08	4.83E+06	4.64E+02	33.72	0.03

図 4.2.11：緩和策計算結果一覧。

これらの結果を合わせて限界削減費用曲線を作成した（図 4.2.12）。作成には Marginal Abatement Cost Curve chart drawing（http://tamc.github.io/macc/）を利用した。グラフの縦軸は C/B（費用・便益比）とし、横軸は便益 B：被害削減総額（US$ million/年）で表した。つまり、気候変動等の被害 1 単位を抑制するために支払う費用を安い順に並べ、横軸には対策の導入可能量から得られる便益額を示した。従って、面積が対策導入のために必要となる費用となる。

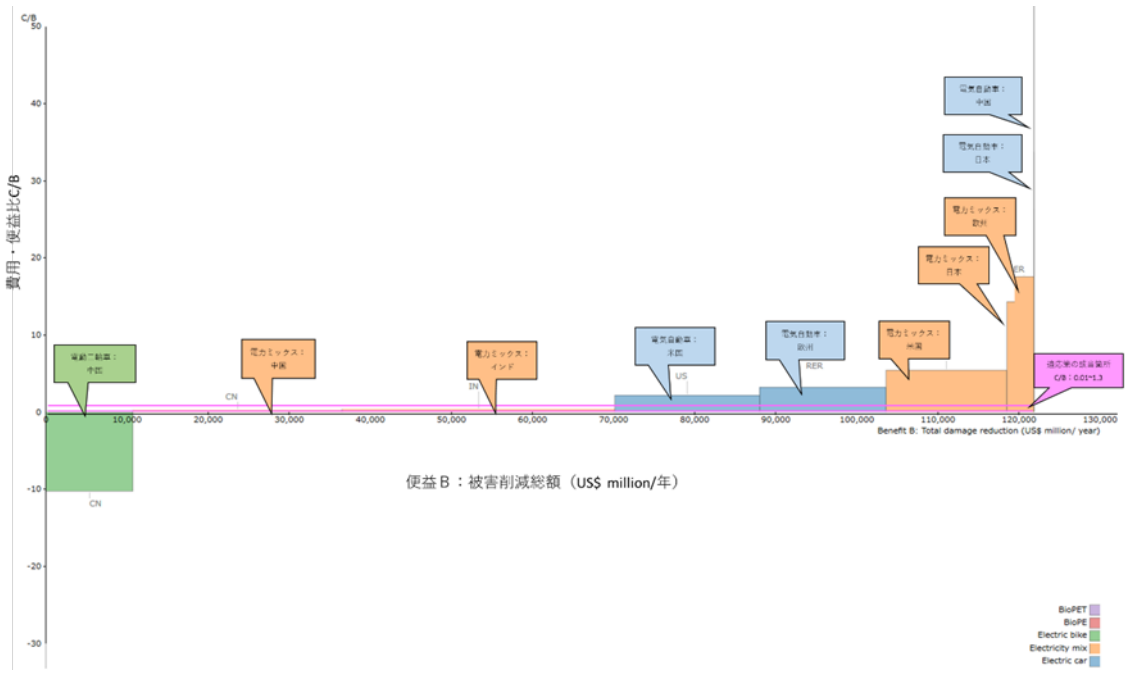

図 4.2.12：限界削減費用曲線。

中国のガソリン二輪車を電動二輪車に変更した場合はライフサイクルコストがマイナス、つまり導入したほうが総費用は安くなることから最も効果が高いものと推定された。これは中国の電力単価が安いことに起因する。一方で将来同程度インドのガソリン車を電気自動車へ置き換える事は便益が得られない（B が負値）ことがわかった。これはインドではガソリン車の利用は小型が多く使用に関わる環境負荷は相対的に小さいことと、電力は石炭火力発電が多く大気汚染や気候変動による影響が大きく電気自動車に変更してもむしろ電気自動車の方が LCA の結果が大きくなったことによる。米国と欧州では電気自動車の導入効果は日本や中国よりも大きいものと推定された。米国の場合は走行距離が長くかつ、大型車の利用が多いため電気自動車による導入効果が相対的に高いことがわかった。欧州の場合、走行距離は米国ほどではないが、電力消費の環境負荷原単位が低く、ガソリンから変更することの効果が大きいことによる。日本は生涯走行距離が他国に比べて短く、初期投資分の回収に時間を要する。

桃色の線の間は適応策の C/B で 0.01～1.3 を表している。この幅よりも C/B が低い場合は優先的に緩和策を実施することが望まれ、1.3 よりも大きい場合は適応策の優先的実施を検討する価値があることを示す。

図 4.2.13 に複数の適応策を対象とした限界削減費用曲線を示した。

費用便益比（C/B）の値の小さい順に左から並べると、大まかには、点滴栽培、海水淡水化、浄水器の順になった。なかでも点滴栽培は便益額が相対的に大きかった。導入時と利用時の費用が安く、かつ、水の消費を抑えつつ収量を増加することが見込まれるためである。海水淡水化は中東や北アフリカといった水賦存量が少ない途上国では淡水の供給による便益が大きく見込まれた。浄水器については、浄化する方法に RO（逆浸透膜）を利用する方が効率が高いものと考えられた。これは、使用寿命が長くライフサイクルコストがカートリッジの交換を要する MF（精密ろ過膜）に比べて安いことによる。このように、適応策の方法によって、C/B は大きく異なるものの、それらの多くは 1 より小さく、これらの導入による一定の効果があるものと見込まれた。

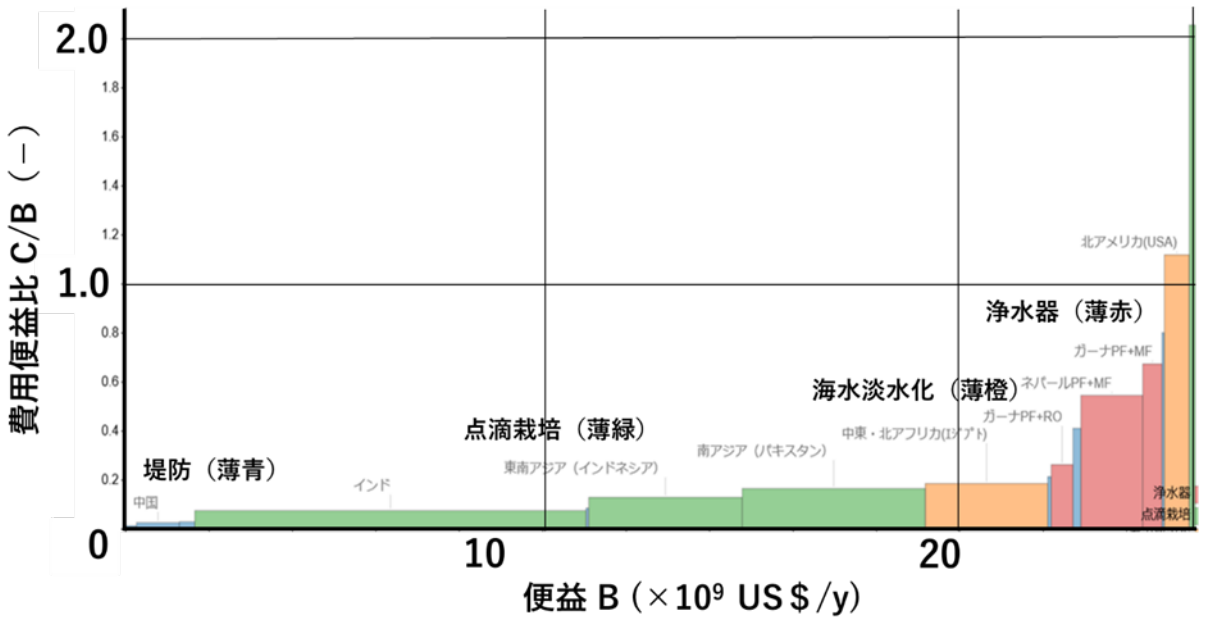

図 4.2.13：気候変動適応策の費用便益（C/B)分析結果。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

SSP シナリオに応じた健康影響の被害係数の開発は、LCA 研究としてははじめて成果である。これにより LCA において、緩和策と適応策の双方に注目した健康被害の評価を LCA で実施できるようになった。生物多様性に注目した被害係数の開発では、世界を対象に、かつ、生物種ごとに気候変動による生息分布の変化を算定し、これらの結果に由来する絶滅リスクの変化までを算定した。特に、世界各地域の特徴を反映した評価結果を示したのは本研究が世界で初めてである。社会資産に対する被害係数の開発は LCA 研究のなかでほとんど実施されてこなかったが、本研究では労働生産性やサンゴ礁への影響も含めるなど大幅に評価範囲を拡張することができた。これらの影響を網羅した社会的炭素費用の算定も世界的に初めての試みである。人間健康、生物多様性、社会資産を網羅しつつ、ボトムアップ的なアプローチから算定された SCC の結果は透明性が高く、被害を低減するための優先順位を示すものとして注目される。SCC の算定結果は米国政権の研究成果よりも数倍高い結果となったが、それだけ気候変動対策を優先して実施することを示すものとして位置づけられる。

緩和策のライフサイクルアセスメントでは、自動車や電力といった主要産業分野においてメタ分析を活用した代表性の高い効果分析を行うことができることを確認した。従来技術からの代替のみでなく、自然エネルギーやエコカーの間の比較分析も対応できることをあわせて確認できた。LCA 研究においてはほとんど実施されてこなかった適応策の評価を試みた。費用と便益の関係についてライフサイクルの観点から評価することができた。

以下に本研究の独創的な点を挙げた。

【適応策の LCA 実施】一般に LCA は CO2 排出量などのインベントリ分析の実施が前提となる。したがって多くの気候変動対策に対する LCA は緩和策に対するものであり、適応策に関する評価は極めて少なかった。本研究では、適応策を導入した場合の便益を定量化することより、複数の適応策のLCA を行うことが可能になり、緩和策との比較を行うことが可能となった。

【気候変動の影響の網羅性】欧州の最先端の影響評価手法といわれる Recipe は、気候変動の評価では「人間健康」と「生態系の質」の変化を評価するが、IPCC AR5 WG2報告書で列挙した農作物、水産資源、淡水などの影響が含めていない。本研究では、上記に加えて「社会資産」を新規に含めることで環境影響の過小評価を回避できた。

【評価指標の明快さ】本研究では人間健康や生態系といった被害量のほか、環境影響を経済指標で統合化した。これにより米国政府が採用する気候変動対策の費用対便益分析を実施することが可能とな

った。関係者間における環境コミュニケーションの促進に貢献する。

【全球規模の評価】欧州の LCA 手法はおもに評価地域を欧州に限定するなど、地理的な評価範囲は限られていた。本プロジェクトでは、気候変動などの地球規模の影響領域のみでなく、光化学オキシダントなどのリージョナルレベルの影響領域も世界規模で評価する。これにより、環境影響の発生地点の特徴を反映したグローバルサプライチェーンの LCA を実施することが可能になる。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

長野県が企業における環境マネジメントの実施に LCA の利用を支援している。本研究の成果は企業の環境経営の評価に活用されている。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

行政が活用することが見込まれる成果は、以下の 4 点である。

- G8 環境大臣会合において、UNEP 国際資源パネルによるマテリアルフットプリントの報告を取り上げ、気候変動や水、生物多様性、資源循環などの側面についてライフサイクルやサプライチェーンに注目した対策実施の重要性を指摘した。本研究の成果は、気候変動の緩和と適応をライフサイクルの視点に注目した結果を示すもので、G20 が目指す環境情報基盤の構築に寄与するものと期待される。
- LCA による包括的な評価は気候変動のほか他の影響領域への関係について定量的に評価することを可能にする。SDGs でいう気候変動（Goal 13）に加えて、水（Goal 6）、生物多様性（Goal 14、15）、エネルギー（Goal 7）、持続可能な消費と生産（Goal 12）への影響が含まれており、これらの相互関係を考慮した総合的な観点に基づく政策意思決定を支援する。
- LCA は製品やサービスに注目したボトムアップ的な評価である。今回の結果を通じて、グリーン購入などの調達を促進するための基礎資料として活用されることが期待される。
- エコカーや海水淡水化など日本が高い技術力を持つ気候変動対策に対してコベネフィットを含めた LCA 結果を世界に発信することができる。地球規模の環境問題解決に向けたリーダーシップを発揮するとともに、海外におけるグリーン購入の促進と日本企業のさらなるグリーンイノベーション創出へと展開することに貢献する。これは環境省の平成 27 年度重点施策Ⅲ「我が国の実績ある環境技術の海外需要を捉えた国際展開」の効果的な推進につながる。

６．国際共同研究等の状況

本サブテーマにおける国際共同研究等の状況について、以下の通り 6 例を挙げる。

- タイにおける稲作の影響評価に本研究の成果を活用した。その結果は Scientific Report 誌において採択された。
- インドネシアにおいて浄水器を導入した際の環境評価研究を行っており、本研究の成果を活用した分析へと展開させている。浄水器の使用に関する一次データはインドネシアの大学との共同調査で得られたデータを活用した。
- 空調機の LCA においてはタイの現地工場から生産に関する一次データを入手した。この結果はアジア地域における空調機の適応策としての影響評価に活用された。
- 本研究の成果は UNEP/SETAC ライフサイクルイニシアティブにおいて共有され、LCA 研究の水準を把握するための基礎資料として位置づけられた。影響評価の作業部会 GLAM（Global guidance for Life cycle impact Assessment Method）において引用され、今後のアクションプランに関する議論に活用される予定である。
- G20 を対象にした電力の影響評価では、欧州で開発されたインベントリデータを活用した。その結果は欧州研究機関との意見交換を通じて信頼性向上のための議論がなされ、Sustainability 誌に公開された。

- アジア各国における緩和策と適応策を対象とした LCA 実施に向けたプロジェクト研究に発展させていく方向である。

７．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

1) 八坂慶仁、正畠宏一、伊坪徳宏：日本LCA学会誌、13(2)、164-171 (2017)
自動車のライフサイクル温室効果ガスのメタ分析.
2) Tang, L., M. Higa, N. Tanaka, and N. Itsubo: Int J Life Cycle Assess doi: 10.1007/s11367-017-1319-6 (2017)
Assessment of global warming impact on biodiversity using the extinction risk index in LCIA: A case study of Japanese plant species.
3) Tang, L., Y. Furushima, Y. Honda, T. Hasegawa, and N. Itsubo: Int J Life Cycle Assess doi: 10.1007/s11367-018-1561-6 (2018)
Estimating human health damage factors related to CO2 emissions by considering updated climate-related relative risks.
4) Urata, T., T. Yamada, N. Itsubo, and M. Inoue: Computers & Industrial Engineering 113, 779-792 (2018)
Supply chain network design and Asian analysis with material-based carbon emissions and tax.
5) Karkour, S., Y. Ichisugi, A. Abeynayaka, and N. Itsubo: Sustainability 12 (5), 2002 (2019)
External-Cost Estimation of Electricity Generation in G20 Countries: Case Study Using a Global Life-Cycle Impact-Assessment Method.
6) Nakamura, K., and N. Itsubo: Water Resources and Industry 21, 100108 (2019)
Carbon and water footprints of pig feed in France: Environmental contributions of pig feed with industrial amino acid supplements.
7) Ichisugi, Y., T. Masui, S. Karkour, and N. Itsubo: Sustainability 11 (23), 6875 (2019)
Projection of National Carbon Footprint in Japan with Integration of LCA and IAMs.
8) Kondo, R., Y. Kinoshita, T. Yamada, N. Itsubo, and M. Inoue: Technologies and Eco-innovation towards Sustainability II, 301-313 (2019)
Effects of Carbon Tax on Low-Carbon and Economic Supplier Selection for Asian Assembly Product.
9) Supasri, T., N. Itsubo, S.H. Gheewala, and S. Sampattagul: Scientific Reports 10 (1), 1-13 (2020)
Life cycle assessment of maize cultivation and biomass utilization in northern Thailand.
10) 八坂慶仁、正畠宏一、伊坪徳宏：日本LCA学会誌、（投稿中）
発電のライフサイクル温室効果ガスのメタ分析.

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

特に記載すべき事項は無い。

＜その他誌上発表（査読なし）＞

特に記載すべき事項は無い。

（２）口頭発表（学会等）

1)　伊坪徳宏、湯龍龍、小野雄也、小関康雄、正畠宏一：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
気候変動の緩和策と適応策を対象としたライフサイクル評価

2)　枝廣あかり、小関康雄、湯龍龍、伊坪徳宏：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
二酸化炭素回収貯留を対象としたLCAと費用対便益分析

3)　小野雄也、伊坪徳宏、沖大幹：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
産業連関分析を用いた自動車の緩和策評価

4)　小関康雄、伊坪徳宏：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
LCAを活用した気候変動緩和策の限界削減費用分析評価の一試行

5)　八坂慶仁、伊坪徳宏、正畠宏一: 第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
自動車を対象としたLCAのメタ分析

6)　湯龍龍、伊坪徳宏：第11回日本LCA学会研究発表会（2016）
気候変動適応策の評価を志向した影響評価手法の開発

7)　湯龍龍、古島康、伊坪徳宏：第12回日本LCA学会研究発表会（2017）
共通社会経済シナリオSSPを用いたCO2の健康被害係数の開発

8)　湯龍龍、大橋春香、松井哲哉、田中信行、伊坪徳宏：第12回日本LCA学会研究発表会（2017）
植物を対象としたCO2の生物種絶滅リスク係数の開発

9)　小関康雄、森孝、伊坪徳宏：第12回日本LCA学会研究発表会（2017）
気候変動適応策としての浄水器を対象とした費用便益分析

10) 小関康雄、伊坪徳宏：第51回日本水環境学会年会（2017）
気候変動適応策としての海水淡水化プラントの環境影響評価

11) 伊坪徳宏、湯龍龍、小野雄也、小関康雄、正畠宏一、沖大幹：第12回日本LCA学会研究発表会（2017）
気候変動の緩和策と適応策を対象としたライフサイクル影響評価

12) 八坂慶仁、伊坪徳宏、正畠宏一：第12回日本LCA学会研究発表会（2017）
メタ分析を駆使した電力のライフサイクル評価

13) 小関康雄、伊坪徳宏：第51回日本水環境学会年会（2017）
気候変動適応策としての海水淡水化プラントの環境影響評価

14) 八坂慶仁、伊坪徳宏、正畠宏一：第13回日本LCA学会研究発表会（2018）
バイオマスを対象としたLCA のメタ分析

15) 湯龍龍、大橋春香、松井哲哉、田中信行、伊坪徳宏：第13回日本LCA学会（2018）
世界植物を対象としたCO2の種絶滅リスク係数の推計

16) 古島康、湯龍龍、伊坪徳宏：第13回日本LCA学会研究発表会（2018）
共通社会経済シナリオSSPに基づいたCO2の健康被害係数の推計

17) Selim Karkour、湯龍龍、伊坪徳宏：第14回日本LCA学会研究発表会（2019）
Development of regionalized Life Cycle Impact Assessment method for African Countries.

（３）出願特許

特に記載すべき事項は無い。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

1)　KPMGあずさサステナビリティ株式会社主催セミナーにおいて、自然資本プロトコルとカーボンプライシングの実務に関して講演（2017年2月23日、会場：KPMGあずさサステナビリティ株式会社）

2)　夢ナビLIVEにおいて高校生向けにグローバル企業のサステナビリティ経営と気候変動対策について講演（2017年7月22日、会場：東京ビッグサイト）

3) エコプロダクツ展示会において研究成果を公開、説明（2017年12月、会場：東京ビッグサイト）
4) 夢ナビLIVEにおいて高校生向けにグローバル企業のサステナビリティ経営と気候変動対策について講演（2018年7月14日、会場：東京ビッグサイト）
5) 日経ESG主催セミナーにおいて生物多様性への影響評価手法とその活用方法について講演（2018年8月6日、会場：TKP 赤坂駅カンファレンスセンター）
6) 名古屋大学主催講演会においてLCAの評価手法と気候変動対策への事例評価結果について講演（2018年11月30日、会場：名古屋大学）
7) エコプロダクツ展示会において研究成果を公開、説明（2018年12月、会場：東京ビッグサイト）
8) 蚕糸学会にて基調講演（2019年3月19日、会場：東京農工大学）
9) 夢ナビLIVEにおいて高校生向けにグローバル企業のサステナビリティ経営と気候変動対策について講演（2019年6月8日、会場：東京ビッグサイト）
10) LCA日本フォーラムにおいて招待講演（2019年6月19日、会場：霞が関プラザホール）
11) トークショーにおいて気候変動問題とその影響の回避方法について講演（2019年6月23日、会場：VIRRAGE TENNOUZU）
12) 長野県企業担当者を対象に気候変動の評価方法とわかることについて講演（2019年8月11日、会場：塩尻インキュベーションプラザ（ＳＩＰ））
13) タイの研究者とタマサート大学学生を対象にLCAの実施方法と気候変動対策の評価例について講演（2019年8月8日、会場：MTEC、バンコク）
14) 愛知県の企業環境担当者を対象にLCAにおける生物多様性評価手法と気候変動対策の評価について講演（2019年8月22日、環境パートナーシップ・ＣＬＵＢ（ＥＰＯＣ）自然共生社会分科会主催、会場：名古屋商工会議所）
15) スイスチューリヒ工科大学（ETH）主催のワークショップ（第72回 LCA Discussion Forum）においてLCAの統合化方法とSCCについて講演（2019年9月9日、会場：オンライン）
16) 三菱ケミカル主催の講演会においてLCAの基礎と気候変動対策を対象とした評価結果について講演（2019年9月27日、会場：三菱ケミカル愛知事業所）
17) 気候変動により顕在化しているリスクとその程度について講演（2019年10月11日、SHIBUYA QWS Presents クエスチョン・カンファレンス、会場：Plug and Play SHIBUYA、渋谷）
18) かわさき国際環境展においてLCAとSDGsについて講演するなかで気候変動の緩和と適応について紹介（2019年11月14日、会場：カルッツ川崎）
19) 慶応義塾大学主催SFC Open Research Forum 2019において気候変動による食への影響とその適応策について講演、コメント（2019年11月23日、会場：東京ミッドタウン）
20) SPEED研究会主催セミナーにおいて気候変動の適応と緩和を推進する都市の活動について最新のカーボンフットプリントの評価例と合わせて講演（2019年12月6日、会場：東京ビッグサイト会議棟）
21) エコプロダクツ展示会において研究成果を公開、説明（2019年12月、会場：東京ビッグサイト）

（５）マスコミ等への公表・報道等

1) 中日新聞、東京新聞、北陸中日新聞日曜版においてLCAの特集記事を掲載（世界と日本　大図解シリーズ　No.1440、地球が危ない　気候非常事態宣言、2020年「パリ協定」本格始動、「見える化」で目指す脱炭素社会）（掲載日2019年1月19日）。

（６）その他

1) 湯龍龍（2017）：気候変動の緩和策と適応策を対象としたライフサイクル評価、第30回環境工学連合講演会、東京、2017年5月23日。

８．引用文献

1) Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First edition November 2011. EUR 24571 EN. Luxemburg. Publications Office of the European Union; 2011

2) 2) Dong Y., Hauschild M., Sørup H., Rousselet R., Fantke P. (2019) Evaluating the monetary values of greenhouse gases emissions in Life Cycle Impact Assessment. Journal of Cleaner Production doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.205

Ⅱ－３　主観的幸福度なども活用した気候変動対策の費用便益分析

国立大学法人 九州大学　　馬奈木 俊介

〈研究分担者〉
国立大学法人 九州大学　　中村 寛樹（2015年度）、慎 公珠（2015年度）
玉置 哲也（2015～2018年度）、比嘉 一仁（2016年度）
野澤 亘（2016～2018年度）
深井 大幹（2017～2018年度）、田中 義孝（2019年度）

〈研究協力者〉
国立大学法人 九州大学　　比嘉 一仁（2015年度）、野澤 亘（2015年度）
池田 真也（2015～2017年度）
若松 美保子（2015～2019年度）
中村 寛樹（2016年度）、慎 公珠（2016年度）

平成27～令和元年度研究経費（累計額）：62,939千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成27年度：12,834千円、平成28年度：12,192千円、平成29年度：12,191千円、
平成30年度：13,531千円、令和元年度：12,191千円）

［要旨］

まず、個人レベルの気候変動対策のための緩和策及び適応策の価値の推計に関する研究では、16 の気候変動対策行動の価値がどの程度あるかを推計した。分析の結果、最も価値のある対策行動は政府に依頼することとなり、次いで省エネ電化製品の購入となり、まだ研究の蓄積が十分でない個人レベルでの緩和策及び適応策の価値を求めた。

次に、使用可能な資源の量によって最適な緩和策・適応策への資源配分比率がどのように変化するかについてより深い概念的な理解を与えた。特に、既存研究と異なり、被害削減の一般的な関数型の元では必ずしも資源量が限られているならば緩和策に集中すべきという結果が得られないことを明らかにした。

さらに、これまで検証が十分でなかった生態系・経済・環境の相互作用及び、環境保全技術の異質性をモデル化して分析した。社会の生態系への評価が高い場合は CO2 の排出量が減少する傾向があると同時に、場合によっては長期的な環境負荷が高い技術が採用されうることも示された。

最後に、気候変動対策を分析するうえで沿岸生態系の影響が与える影響は無視できるものではなく、とくに厳しい気候変動目標下ではそれが明らかになることが分かった。

［キーワード］

主観的幸福度、適応策・緩和策、最適資源配分、CEEM モデル、沿岸生態系

１．はじめに

気候変動に対する国際的取り組みは、気候変動の結果もたらされる自然災害を回避し、経済・社会の持続可能な発展を達成することを目的としている。しかし、議論と合意は必ずしも迅速には進んでいない。国際会議での意思決定が遅滞する原因の一つとして、緩和・適応に関する費用と便益の各国間での整合的な把握の困難さがあげられる。気候変動の抑制に必要な費用は産業的、技術的な側面が大きく関わり、所得などの伝統的に用いられてきた富の概念が用いられる。また、気候変動の抑制がもたらす便益は、回避されうる天候不順などによる農業の不振や自然災害による被害などから推計されるため、これも伝統的な富の概念を用いて議論される。しかし、先進国と発展途上国、あるいは先進国間・途上国間でも、資源・生態系などの自然資本をはじめとする環境の質に対してそれぞれ異なる考慮の度合いを示すため、伝統的な富と環境の質の両方を含んだ議論をする際に、南北問題のような地域間あるいは世代間公平が問題となり合意を取りにくくなっている。この問題を解消するためには、伝統的富と環境の質を統合した包括的富の導入を行い、これにもとづいた費用・便益を定量的に把握することで、最適な水準での緩和・適応政策を決定することが必要と考えられる。ただし、緩和策については各国・各地域が密接に関係していることから、よりグローバルな視点での費用・便益の把握が求められる一方で、適応策については、各地域特有の事情を加味することが必要なために、よりローカルな視点での把握が求められる。また、先に述べたように、経済的富と環境の質のそれぞれに対するウェイト付は、地域レベル・国レベルで異なる。すなわち、包括的富の評価は市民による主観に大きく依存すると考えられる。このため、本研究では主観的幸福度を、推計に際してよりバイアスの少ないと考えられている Life Satisfaction Approach を用いて推計する。

緩和策と適応策の効果性や効率性を評価するための判断材料の一つとして、費用効果分析あるいは費用便益分析が必要である。緩和策、適応策に伴う便益には、例えば、防災整備などによる well being の向上や安心感の獲得など、従来の経済的指標では扱いきれない便益もある。そこで、被害額や投資額といった従来の経済的指標に加えて、主観的幸福度や生計資本といった指標なども勘案して多面的に評価し、緩和策と適応策の効率的で効果的な実施策に関する知見が求められている。

２．研究開発目的

サブテーマ(3)主観的幸福度なども活用した気候変動対策の費用便益分析では、４つの研究を以下で示す目的に沿って実施した。

①個人レベルの気候変動対策のための緩和策及び適応策の価値の推計に関する研究

本研究では、主観的幸福度なども活用した気候変動対策の費用便益分析を行うための基礎研究として、個人レベルでの気候変動対策のための緩和策・適応策に関する研究を行う。これによって、個人レベルでの緩和策・適応策の取り組みを決定する要因を探る。さらに、以下に続く３つの研究で、気候変動対策のための緩和策・適応策に関する理論的な研究を進めた。

②緩和策・適応策への最適資源配分と利用可能な資源量との関係

緩和策・適応策への資源配分に関する既存の研究では、資源が少ない場合、緩和策に集中すべきであるという結果が得られていた。この研究では、従来の研究で使用されたモデルの仮定を緩めることでなぜ既存研究のような結果が得られるか、また適応策に集中すべきであるという結果が得られるのはどのような状況かを明らかにする。

③気候変動による生態系への影響を考慮した経済モデルの開発

風力発電などの再生可能エネルギーや CCS(Carbon capture and storage) などの二酸化炭素を閉じ込める技術はバックストップ技術と呼ばれている．このような技術は、保管場所や輸送パイプからの二酸化炭素の漏洩やそれに伴う海中の酸性化など、生態系への影響も指摘されている．生態系のサービスは食物連鎖などの要素が複雑に絡み合っており、その影響は決して軽視できるものではない。そこで、気候変動による生態系への影響も考慮した CEEM (Dynamic Integrated Climate-Ecosystem-economy model) の開発を行い、環境保全技術が生態系に与える影響の検証、1.5 度目標，2 度目標を目指す際の経済的影響の分析を目的として研究を行った。

④沿岸生態系の保全を考慮した経済モデルの開発

従来の気候変動に関する環境と経済の統合モデルでは、本来は環境に大きなインパクトを与えているにもかかわらず、計算の都合上、分析に十分組み込まれていない要素があるとされる。そこで本研究ではそのような要素の一つと考えられる沿岸生態系の影響を、経済活動と環境保全の相互作用を分析するフレームワークに組み込み、気候変動対策が経済と環境にもたらす効果に何か従来とは違った影響が現れるか否かを検討する。

３．研究開発方法

① 個人レベルの気候変動対策のための緩和策及び適応策の価値の推計に関する研究

気候変動対策の適切な目標を提示するのは容易ではない一方、地域レベルでの気候変動対策には一定の成功がみられる。そこで、個人レベルの気候変動対策について、幸福度アプローチによる対策行動の価値の推計を行う。個人レベルで取っている緩和策の決定要因を推定した論文に Osberghaus（2015）がある。その論文はドイツにおいて、洪水対策としての緩和策に関して、どのような個人属性が決定要因となるかを分析している。その研究では過去に洪水被害を受けた家計や持ち家がある家計において、高い確率で緩和策をとる結果を得ている。さらに持ち家がある家計の内、将来被害を受けると考えている家計においても緩和策をとる確率が高くなることは適応策をとるシグナルと考えることができると述べている。

そこで本研究ではまず、主観的幸福度アプローチを用いて、日本国内の都道府県または地域間で緩和策及び適応策の価値がどれくらい異なるかという研究を行う際の基礎研究として、どのような個人属性を持つ人がどの程度の緩和策及び適応策をとるかという研究を行った。まず、都道府県レベルでの人工資本、人的資本、自然資本、社会関連資本のデータを収集した。**表 3.3.1** は収集したデータの一覧である。

表3.3.1：人工資本、人的資本、自然資本、社会関連資本のデータ。

Capital forms	Items	Data source
Produced capital	-	The number of workers -National Census
Natural capital	Agricultural land	Cultivated area -Yearly Survey Planted area - Yearly Survey
	Forest (Timber)	Growing stock of planted forest - Agriculture and Forestry Census
	Forest (Non-timber)	Natural forest area - Agriculture and Forestry Census
	Fishery	The number of sea fishery workers - Fishery Census
Human capital	-	The number of employees - National Census Average Educational Attainment (Average years of schooling) - National Census
Health capital	-	Life expectancy of age group by gender - Life table Population of age group by gender - National Census

次に、九州大学馬奈木俊介研究室が 2015 年に行った国内大規模調査のデータを用いて、個人レベルの気候変動対策行動の価値を推計した。大規模アンケート調査は 2015 年 12 月に九州大学馬奈木研究室が行った。アンケートはインターネットで回答する形式で行い、日本国内に居住する人を対象者とした。収数は 246,642 人となった。大規模アンケート調査では主観的幸福度編、市政評価編、交通・移動編、人口移動・転居編、完全自動運転・電気自動車編、環境政策・計画編及び個人属性が含まれ

表3.3.2：個人の気候変動対策としての緩和策及び適応策についての質問票。

項目	対象	回答の種類	気候変動による災害(洪水・ゲリラ豪雨・干ばつ・大気汚染など、地震・津波・噴火などの災害は**含まない**)への対策に関する考えをお聞きいたします。
Q	全員	一つ選択	気候変動による災害(洪水・ゲリラ豪雨・干ばつ・大気汚染など**は含み**、地震・津波・噴火などの災害**は含まない**)のための「災害発生の原因を抑制する対策(二酸化炭素排出量の削減など)」はどの程度重要だと思いますか？
5			大変重要である
4			重要である
3			どちらともいえない
2			重要でない
1			まったく重要でない
0			わからない
Q	全員	一つ選択	気候変動による災害(洪水・ゲリラ豪雨・干ばつ・大気汚染など**は含み**、地震・津波・噴火などの災害**は含まない**)のための「被害の影響を軽減する対策」はどの程度重要だと思いますか？
5			大変重要である
4			重要である
3			どちらともいえない
2			重要でない
1			まったく重要でない
0			わからない
Q	全員	二つ以上選択可能	気候変動による災害(洪水・ゲリラ豪雨・干ばつ・大気汚染など**は含み**、地震・津波・噴火などの災害**は含まない**)対策に関して、あなたが過去5年間で、普段行っている、または行った行動を全てお選びください。
1			気候変動による災害に関する情報収集（ニュース・新聞等から）をする
2			住んでいる地域の気候変動による災害ハザードマップ等の確認
3			居住地(河川などから離れて暮らす)・居住様式(より高い階に住む)の変更
4			気候変動による災害に対する避難訓練に参加する
5			身近な自主防災組織に加わる
6			気候変動による災害を補償する保険(火災・地震保険等以外)へ加入
7			気候変動による災害に関する防災教育を受ける
8			気候変動による災害時用の防災用品（食料備蓄品など）の購入
9			気候変動による災害時の避難施設や避難経路の把握・確認
10			大気汚染を気にして、マスクを装着する
11			クールビズ・ウォームビズを実施している
12			熱中症対策をしている
13			行政に災害対策(河川堤防の設置、排水システムの強化、貯水池の整備など)を依頼する
14			自宅で冷房・暖房の温度調整に関して、推奨されている温度に設定する
15			徒歩・自転車、または公共交通機関を積極的に利用する
16			自家発電システム(太陽光発電システムなど)の設置
17			ごみを減らす
18			エコカー・省エネ電化製品に買い替えた
19			自然環境保全活動(植林など)に参加した
20			ガーデニング(グリーン・カーテンなど)をしている
21			あてはまるものはない

る。個人レベルでの気候変動対策としての緩和策及び適応策に関する調査は、環境政策・計画編に含まれ、質問票**表3.3.2**を作成し、回答者全員が対象となっている。

推計には、幸福度関数アプローチを用いた。この方法は幸福度が所得、個人属性（年齢、性別、世帯人数など）、16 の気候変動対策行動の関数で構成されているとして、所得と気候変動対策行動それぞれの限界代替率として計算される。対策行動には、情報収集、ハザードマップの確認、居住地の変更、自主防災組織に加盟、保険の購入、防災訓練、防災用品の購入、クールビズ＆ワームビズ行動、熱中症対策、行政に災害対策を依頼、出勤時の交通手段の変更、自家発電システムの設置、ごみ削減、省エネ電化製品の購入、自然環境保護活動の参加、ガーデニングが含まれる。**表3.3.3**はどれくらいの人がそれぞれの対策行動をとっているかを表している。**表3.3.3**が示すように、対策行動の中で、一番多くの人がとっている行動はクールビズ&ワームビズ行動であった。次に情報収集、ごみ削減が続いた。

一方、居住地の変更、政府に対策を依頼、自然環境保護活動への参加をしている人の割合は 10 %未満だった。

表3.3.3：気候変動対策行動の実施率。

Actions	Mean (%)
Cool Biz & Warm Biz	46.807
Information	41.779
Trash reduction	40.784
Heatstroke prevention	35.630
Hazard map	33.715
Transportation shift	28.511
Gardening	20.933
Energy-saving appliances	13.165
Emergency goods	12.763
Insurance	10.452
Training	9.785
Disaster prevention organization	9.110
Solar power	6.628
Living place	6.378
Government	2.462
Afforestation	2.150

② 緩和策・適応策への最適資源配分と利用可能な資源量との関係

まず、緩和策・適応策への最適資源配分問題を定式化する。意思決定者は使用可能な資源量を賦与され、それを緩和策・適応策に配分し投入する。緩和策への投入量が増えるほど気候変動によって引き起こされる災害確率が低下し、適応策への投入量が増えるほど災害が起こった際に受ける被害が小さくなると仮定する。またそれぞれの策への追加的な投入によって得られる便益は逓減する、すなわち投入量が増えるにつれ追加の便益は小さくなる、と仮定する。このような状況において、使用可能な資源量の変化が最適な配分に与える影響が、異なる被害削減の関数型のもとでどのように変化するか調べる。

③ 気候変動による生態系への影響を考慮した経済モデルの開発

本研究では生態系による蓄積・排出作用を既存の炭素循環モデルに加えることで、生態系の変化が炭素貯留に与える影響をモデルに組み入れた。さらに、経済活動から得られる我々の効用に生態系が存在することによる付加価値が与えられた場合の推計を可能とし、最適行動の変化傾向について分析を行った。**図3.3.1**はモデルの概要を示した図である。このような中で最適な技術の選択についても分析をおこなった。

④ 沿岸生態系の保全を考慮した経済モデルの開発

最後に沿岸生態系が CO2 を吸収する役割を果たすことに着目し、沿岸生態系の面積を保全した場合の CO2 排出量と経済活動への影響を評価する。**図3.3.2**はモデルの概要を示している。従来の DICE モデルに沿岸生態系が CO2 を吸収する働きをするというメカニズムを組み込んだうえで、異なる気候変動目標と異なる沿岸生態系保全シナリオの下で、CO2 排出量と経済活動がどのような影響を受けるかについて分析する。

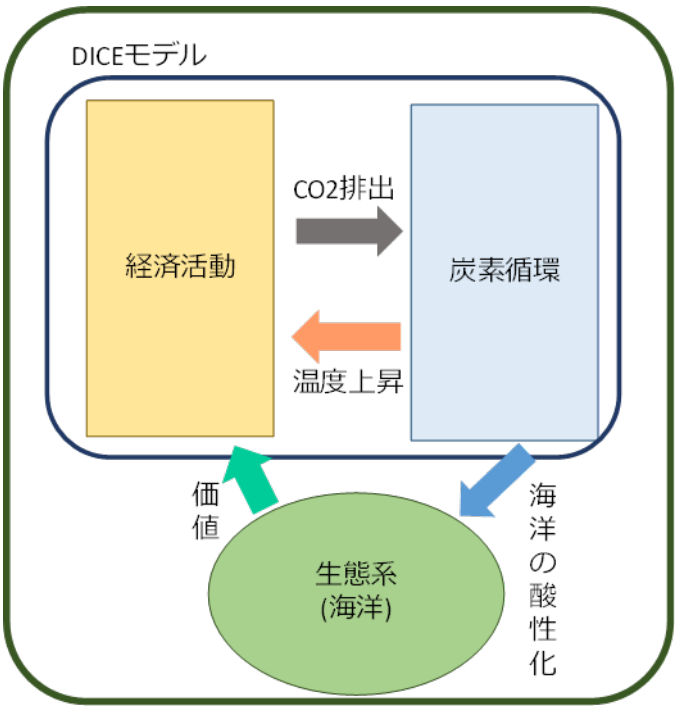

図3. 3. 1：気候変動による生態系への影響を考慮したモデル。

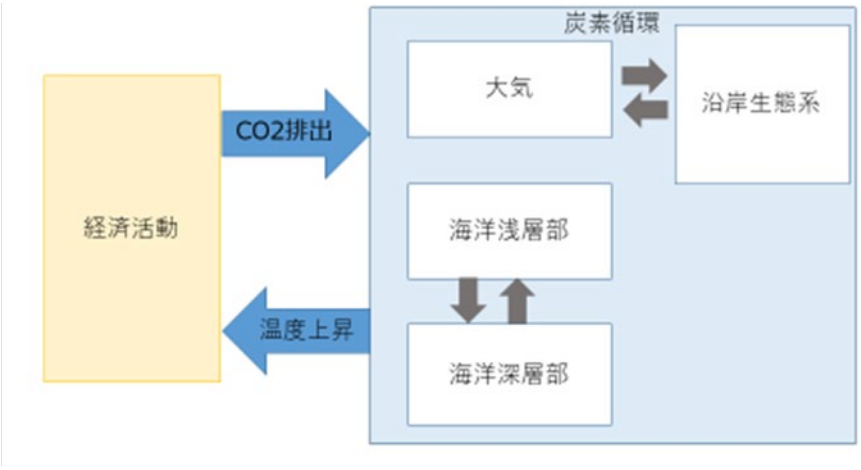

図3. 3. 2：沿岸生態系の変動を考慮したモデル。

４．結果及び考察

① 個人レベルの気候変動対策のための緩和策及び適応策の価値の推計に関する研究

どのような個人属性を持つ人がどの程度の緩和策及び適応策をとるかというプロビット推計の結果が**表4. 3. 1**である。先行研究と同様に持ち家のある人は緩和策や適応策をとる確率が高くなることが分かった。さらに緩和策及び適応策が重要だと考えている人、女性、結婚している人、学歴の高い人は緩和策及び適応策をとる確率が高くなることが分かった。

気候変動対策としての緩和策及び適応策の価値の推計結果が**表4. 3. 2**と**図4. 3. 1**である。分析の結果、最も価値のある対策行動は政府に依頼することとなり、回答者が所得の 21 %までは対策費用を負担してもよいと感じていることが推定された。政府が行う気候変動対策行動には堤防の設置や河川整備などが含まれる。次に価値が高いのは、省エネ電化製品の購入で、所得の 12 %に相当することが分かった。価値が有意に推計された結果の内、最も価値が低いのがごみ削減で、所得の 3 %に相当することがわかった。気候変動による災害に関する情報収集、居住地の変更、気候変動による災害に関する防災教育の受講は非常に低い価値が推計された。

表4.3.1：個人の属性と緩和策・適応策の実施状況との関連：プロビット回帰分析の結果。

被説明変数	緩和策・適応策	緩和策	適応策
持ち家ダミー	1.200***	1.113***	1.204***
	(0.033)	(0.026)	(0.031)
重要度_緩和策	1.407***	1.271***	1.381***
	(0.021)	(0.021)	(0.020)
重要度_適応策	1.412***	1.288***	1.416***
	(0.021)	(0.022)	(0.021)
ln(個人年収)	1.140***	0.975	1.130***
	(0.027)	(0.019)	(0.027)
女性ダミー	1.715***	1.657***	1.465***
	(0.047)	(0.040)	(0.039)
結婚ダミー	1.311***	1.077***	1.286***
	(0.035)	(0.026)	(0.033)
高卒ダミー	1.274**	1.167	1.197
	(0.157)	(0.131)	(0.139)
専門学校/短大卒ダミー	1.508***	1.328**	1.374***
	(0.184)	(0.148)	(0.159)
大卒ダミー	1.484***	1.379***	1.349***
	(0.178)	(0.151)	(0.153)
修士/博士卒ダミー	1.648***	1.440***	1.514***
	(0.205)	(0.166)	(0.178)
都道府県ダミー	Y	Y	Y
その他コントロール変数	Y	Y	Y
サンプルサイズ	202,227	202,227	202,227
Pseudo R-squared	0.173	0.173	0.173

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

表4.3.2：気候変動対策行動の価値。

Actions	Values (% in income)	S.E.
Government	20.830***	(3.986)
Energy-saving appliances	11.890***	(1.892)
Hazard map	9.856***	(1.366)
Solar power	9.208***	(2.331)
Disaster prevention organization	6.883***	(2.346)
Afforestation	5.526	(3.737)
Heatstroke prevention	4.368***	(1.523)
Cool Biz & Warm Biz	4.361***	(1.465)
Emergency goods	4.253**	(2.023)
Transportation shift	3.732**	(1.497)
Gardening	3.240*	(1.659)
Insurance	3.016	(1.924)
Trash reduction	2.877**	(1.427)
Living place	2.501	(1.817)
Training	2.291	(1.751)
Information	1.139	(0.875)

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

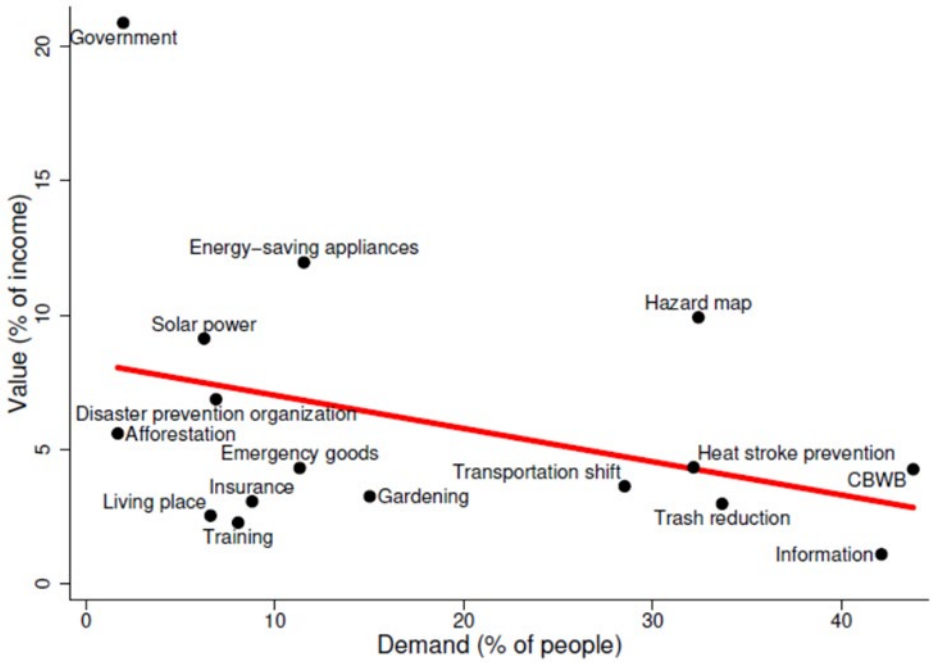

図4.3.1：気候変動対策行動の価値と需要。

② 緩和策・適応策への最適資源配分と利用可能な資源量との関係

緩和策と適応策による被害削減の一般的な関数型の元では必ずしも資源量が限られているならば緩和策に集中すべきという結果が得られないことを明らかにした。特に、少額の適応策への投資が緩和策への投資に比してより効果的であるような場合が当然考えられ、そのような場合には資源量が少ない場合でも適応策に集中すべきであるという結果が得られる。

ここでは次のようなモデルを考えた。

$$\max_{B\geq 0, D\geq 0} -\eta(D)g(B) \quad s.t. B + D \leq Y$$

モデルが想定する社会では利用可能な資源 Y を緩和策への投資、$B \geq 0$、と適応策への投資、$D \geq 0$、に配分する。η は実現する被害、g は被害の確率分布と解釈し、ともに減少関数とする。つまり、適応策・緩和策はともに被害削減に有益で、一方の対策への投資が他方の対策への投資の必要性を薄れさせているという定式化をしている。ここで η と g が一定の条件を満たすとき、最適な適応策と緩和策は資源量 Y の関数として一意に定まる。さらに、最適な適応策への投資 D^* に対する緩和策への投資 B^* を R(Y) とする。また、$F_\eta(D) = {-\eta'(D)}/{\eta(D)}$、$F_g(B) = {-g'(B)}/{g(B)}$、$\hat{R}(D) = {D}/{F_g^{-1}(F_\eta(D))}$とすると資源量 Y の増加による最適な R(Y) への効果は次のように表せる。

$$\frac{\mathrm{dR(Y)}}{\mathrm{dY}} = \frac{\mathrm{d}\hat{R}(D^*(\mathrm{Y}))}{\mathrm{dY}}\frac{\mathrm{d}D^*(\mathrm{Y})}{\mathrm{dY}}$$

この時、R(Y) と $\hat{R}(D)$ の符号が一致する。さらに、$\hat{R}$ と D が一定の条件を満たすとき、最適な適応・緩和策を生み出す η と g を見つけることが出来る。このような組み合わせは無数に存在するため、モデルに実証的な結果をもとにした追加的な制約を置かない限りは、特定の特徴を持った最適配分の性質を示すことはできない。

ここで、例を二つ示す。$g(B) = B^{-\theta}$、$\eta(D) = D^{-\gamma}$とすると、$\mathrm{R(Y)} = \frac{\gamma}{\theta}$ となることがわかる。この時、最適な適応・緩和策の比率は資源量に依存しないことになる。一方で、$g(B) = B^{-\theta}$、$\eta(D) = e^{-aD}$ とした場合、R(Y) は次のように与えられる。

$$R(Y)=\begin{cases}0 & for\ \ Y\in(0,\theta/a)\\ \dfrac{Y-\theta/a}{\theta/a} & for\ \ Y\in(\theta/a,\infty)\end{cases}$$

この場合は、資源量がある閾値を越えると、最適な適応・緩和策の比率は資源量について増加していくことがわかる。

図4.3.2と**図4.3.3**では特定の関数形のもとでもパラメータ次第で最適配分の性質が変わることを数値例で示している。ここでは η と g を次のように設定する。

$$g(B)=\exp(-bB^{\pi})$$
$$\eta(D)=\exp(-aD^{\sigma})$$

ここで

$$\frac{\mathrm{d}\hat{R}(\mathrm{D})}{\mathrm{dD}}=\left[\frac{\sigma}{\pi}\right]^{\frac{1}{1-\pi}}\left[1-\frac{1-\sigma}{1-\pi}\right]D^{-\frac{1-\sigma}{1-\pi}}$$

となるので、$\sigma>\pi$ の時に適応・緩和の比率は資源量に対して減少する一方で、$\sigma<\pi$ は増加する。ここでは $a=b=1$ とし、**図4.3.2**では $\sigma=0.25$、$\pi=0.5$ と設定し、**図4.3.3**では $\sigma=0.5$、$\pi=0.25$ とした。

左側の図に、緩和策（mitigation）と適応策（adaptation）の被害削減量が投入量によってどのように変化するかを示している。このような状況では最適な投資比率（適応策への投入/緩和策への投入）は、右の図が示す通り資源量が少ない場合に高く、多い場合に少なくなる。また既存の研究では、逆に**図4.3.3**のように少額の緩和策への投資が適応策への投資に比してより効果的であるような場合を検討していたことも指摘した。

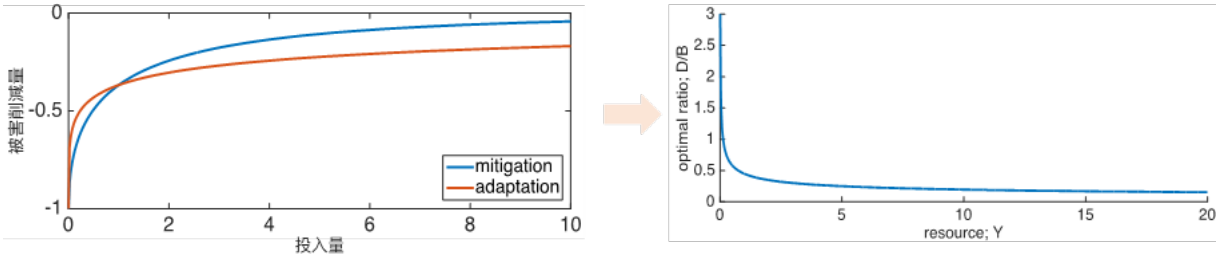

図4.3.2：被害削減関数と最適配分比率；資源が少ない場合に適応策に集中すべき場合。

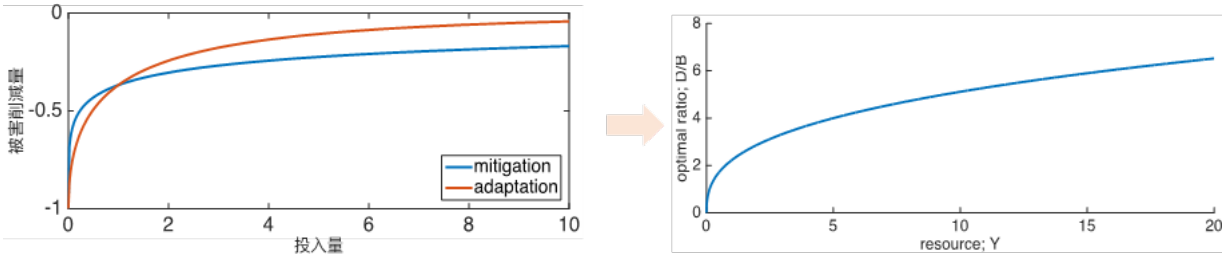

図4.3.3：被害削減関数と最適配分比率；資源が少ない場合に緩和策に集中すべき場合。

③気候変動による生態系への影響を考慮した経済モデルの開発

本研究で用いるモデルでは、効用関数を以下のように設定している。

ここで、T は期間、$U[\cdot]$ は効用、$c(t)$ は t 期の消費、$L(t)$ は t 期の労働量、$G(t)$ は海洋酸性化レベル、ρ は割引率である。また、ω は海洋酸性化が効用に与える影響を決定するパラメータが、言い換えれば、我々がどの程度海洋酸性化に対して関心を持っているかを示すものであり、ω の値が大きければ海洋酸性化に関心が高く、小さければ関心が低いことを示す。ここでは、このパラメータ ω を変化させることで、海洋酸性化に対する関心の程度によって最適な CO2 の排出がどの程度変化するか分析を行った。さらに、t 期における技術および資本を A(t)、K(t) とすると、この社会における生産額 Q(t) は以下のような温暖化による被害率 $\Omega(t)$ を加味した、資本集約度 γ の Cobb-Douglas

型の産出量 $Q_{net}(t)$ と CO2 排出制限による生産額低下率 $\Lambda(t)$ を考慮した値で与えられる。

$$Q(t) = Q_{net}(t) - \Lambda(t)A(t)K(t)^{\gamma}L(t)^{1-\gamma}$$
$$Q_{net}(t) = A(t)K(t)^{\gamma}L(t)^{1-\gamma}[1-\Omega(t)]$$

$$\Lambda(t) = \theta_1(t)p(t)\mu(t)^{\theta_2}$$

$$\Omega(t) = \psi_1(t)T_{AT}(t) + \psi_2(t)T_{AT}(t)^2$$

ここで $\theta_1(t)$、θ_2、$\psi_1(t)$、および $\psi_2(t)$ は調整係数、$\mu(t)$ は排出量コントロール率で、$p(t)$ はバックストップ技術、$T_{AT}(t)$ は大気温の上昇量である。厳しい目標が設定された場合は $\mu(t)$ を高く設定する必要があり、生産の低下につながる。バックストップ技術コスト $p(t)$ は初期コスト、pback と技術コストの低下率、gback の関数として以下のように示される。

$$p_r(t) = pback_r(1-gback_r)^{t-1}$$
$$p_c(t) = pback_c(1-gback_c)^{t-1}$$

今回は環境負荷がない技術 BS1、$p_r(t)$、と排出削減効果は大きいが長期的な環境負荷リスクがある BS2、$p_c(t)$、の二種類の技術を用いる。生産額から排出量コントロールの対象とならなかった部分の一定割合が人為的な排出量、$E_{Ind}(t)$ として放出され、平均気温上昇につながる。BS2 を用いた場合、$E_{out}(t)$ を抑えつつも、CO2 の漏洩リスク、$l(t)$ を負うことになる。BS1 を用いた際の生産活動による排出量、$E_{Ind}(t)$、BS2 を用いた場合の排出量、$E_{out}(t)$、と BS2 による貯蔵量、V(t) は次のようになる。ただし、x(t) は BS2 の利用割合である。

$$E_{Ind}(t) = \sigma(t)(1-\mu(t))A(t)K(t)^{\gamma}L(t)^{1-\gamma}$$
$$E_{out}(t) = \sigma(t)\mu(t)x(t)A(t)K(t)^{\gamma}L(t)^{1-\gamma}$$
$$V(t+1) = (1-l(t))V(t) + E_{out}(t)$$

大気温と海水温の上昇量、$T_{AT}(t)$ と $T_{OC}(t)$ は以下のようになる。

$$T_{AT}(t) = T_{AT}(t-1) + \xi_1\{F(t) - \xi_2 T_{AT}(t-1)\} - \xi_3\{T_{AT}(t-1) - T_{OC}(t-1)\}$$

$$T_{OC}(t) = T_{OC}(t-1) - \xi_4\{T_{AT}(t-1) - T_{OC}(t-1)\}$$

ここで ξ は調整係数である。また、$F(t)$ は放射強制力を示しており、人為的排出によって大気や海洋に貯留した CO2 に依存する。最後に海洋酸性化レベル G(t) は、人為的排出量と漏洩リスクに影響を受けて決定される。ここでは、最初に示した通時的な効用を最大化させるように、経済活動やこれら 2 つのバックストップ技術が選択される。

図4.3.4は海洋酸性化への関心の違いによって、CO2 排出量、平均気温上昇、排出量コントロール、Social Cost of Carbon がどのような影響を受けたかについての結果を示している。パラメータ ω が 0 から 100 まで変わると CO2 の排出量は大きく低下しており、海洋酸性化による効用の減少が大きいと CO2 をより抑制することが望ましくなることが分かった。具体的にみると、ω= 0 の時 2060 年ごろに約 45 GTCO2 / yr で最大年間排出量を迎えているが、ω= 100 の場合には、2040 年ごろに約33 GTCO2 / yr でピークとなり 2085 年には排出量が 0 にまで落ちている。つまり、より早い段階で CO2 を排出しないような技術への移行がすすめられることがうかがえる。これに伴い、平均気温上昇量も ω= 0 と ω= 100 の場合では 0.5 度近く差が生じる可能性が見て取れる。

ここでは、さらに、2 度目標や 1.5 度目標が定められたときに、社会に及ぶ負担がどの程度のものになるか考える。2 度目標、1.5 度目標における社会的炭素費用（以下 SCC とする）を Nordhaus によって開発された DICE モデルと CEEM（3 種類の ω）で推計した結果が**表4.3.3**となる。ここでは、DICE モデルによる環境への影響を一切考慮しない場合を基準としている。DICE モデルによる 2 度目標の SCC は 2015 年から 47.6、216.4、561.8（$ / tCO2）と経年的に増加しており、基準と比べると、それぞれ約 2.6、4.1、4.7 倍となる。一方、CEEM（ω= 0）の場合、2 度目標の SCC は 2015 年以降は 43.9、199.2、790.4（$ / tCO2）と増加しており、基準と比べると、それぞれ約 2.4、3.7、

6.6 倍となる。つまり、CEEM（ω= 0）で分析した場合、近い将来の SCC は DICE モデルに比べて低い値になるが、遠い将来における SCC は DICE モデルよりも急激に高くなることが分かる。これは、CEEM（ω= 0）では BS2 が用いられていることに由来する。BS2 は初期において安価で CO2 を抑えることが出来るが、長期的な漏洩は防げないため SCC が高くなると考えられる。次に 1.5 度目標の SCC に着目する。SCC は 2 度目標よりも大きいものの、DICE モデルと CEEM モデルの乖離率は 1.5 度目標の方が小さくなっており、BS2 が利用されにくくなっていることが背景にあると考えられる。

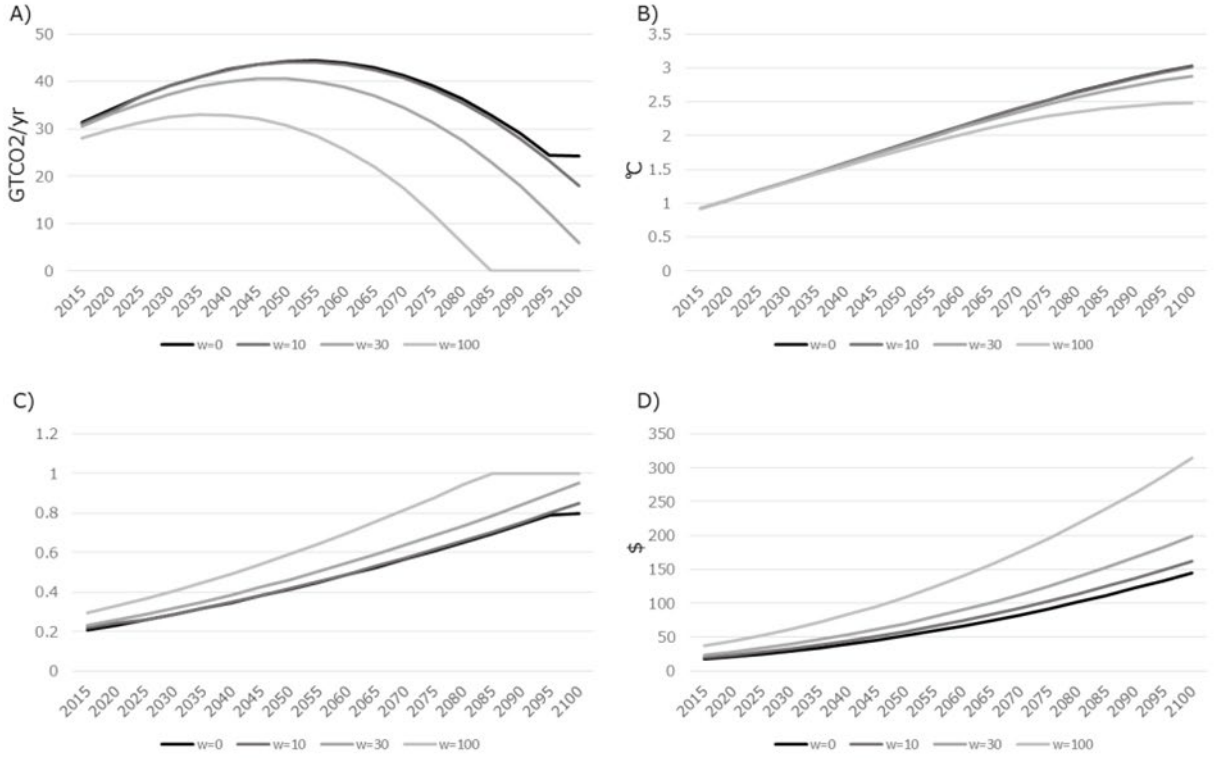

図4.3.4：ω の変化によるA）CO2 排出量、B）平均気温上昇、C）排出量コントロール、D）Social Cost of Carbon

また、**図4.3.5**は BS2 の利用率を表したものである。CCS の利用期間に着目すると、最適化（目標無し）下では、ω=0の場合、2095年まで利用されているのに対し、ωが増加すると急激に利用期間は短くなり、ω= 30 の時点ですでに利用されなくなっている。2 度目標下では、ω= 0 の場合の利用期間は 2070 年代頃までであり、最適化（目標無し）下に比べて短いものの、ω= 30 の場合においても 2060 年代頃までは利用したほうが好ましいことがわかる。さらに、1.5 度目標下では、ω= 0 の場合においても BS2 の利用は 2030 年頃までというかなり短い期間であるものの、ω= 30、100 の場合においてもその利用期間はほとんど変わらず、利用するほうが良いという結果になっている。

つまり、生態系への影響が我々の効用をあまり低下させない場合（ω が小さい場合）には、達成すべき目標をきつくするにつれて、BS2 の利用期間を短くしていく傾向にある。それに対して、生態系への影響が我々の効用を大きく低下させる場合（ω が大きい場合）、達成すべき目標がきつくなるにつれて、BS2 が用いられるようになるということがわかる。BS2 は将来の CO2 漏洩リスクを認めつつ、現在の CO2 を大きく削減する技術である。達成目標が厳しく設定されると結果として海洋酸性化のレベル G(t) は大きくならないので、ω が大きくなってもそれに伴う効用の減少 ωG(t) よりも CO2 削減目標達成が重視され、リスクのある技術が採用されることとなる。一見すると生態系を重視して厳しい目標を設定したにもかかわらず、緩やかな目標の際には利用されなかった環境負荷の大きい技術が用いられる可能性があるということになる。

表4.3.3：DICE モデルと CEEM による SCC（$ / tCO2）

シナリオ	2015	2030	2050	2090
DICE				
基準	18.6	30.6	53.2	119.8
最適化 (目標無し)	17.7	29.3	51.5	120.6
2 度目標	47.6	94.4	216.4	561.8
1.5 度目標	196.2	406.4	1080.5	4833.1
CEEM $\omega = 0$				
最適化 (目標無し)	17.7	29.4	51.7	122.3
2 度目標	43.9	86.3	199.2	790.4
1.5 度目標	194.7	402.2	1072.1	5824
CEEM $\omega = 30$				
最適化 (目標無し)	23.7	39.4	70.1	167.8
2 度目標	46.2	88.7	197.2	592
1.5 度目標	194.8	400.5	1061	5605.6
CEEM $\omega = 100$				
最適化 (目標無し)	36.9	61.3	109.3	263.1
2 度目標	54.8	100.1	207.6	503.7
1.5 度目標	193.5	391.3	1020.2	5137.6

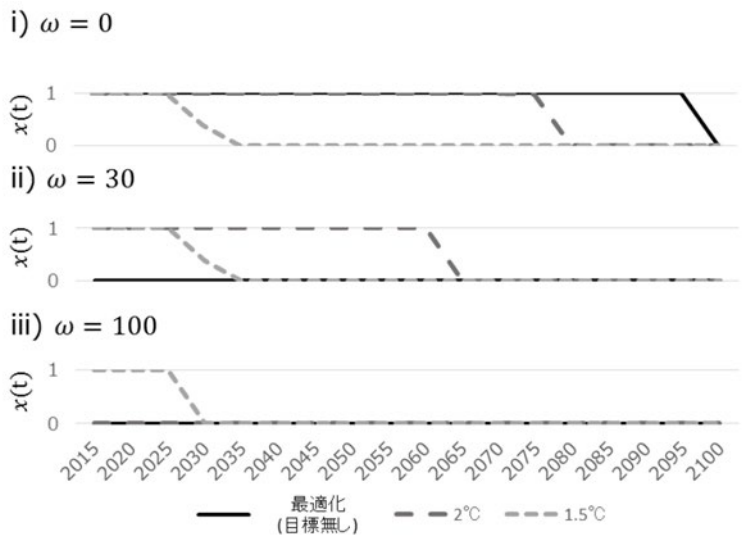

図4.3.5：各目標における CCS の利用率推計結果

④　沿岸生態系の保全を考慮した経済モデルの開発

最後に、沿岸生態系による CO2 吸収を考慮した場合の気候変動に対する規制が経済活動にもたらす影響について考察する。図4.3.6は排出量をもっとも抑えた低位安定シナリオである RCP 2.6、次いで行為安定シナリオである RCP 6.0、最後に温室効果ガス最大排出量に相当する RCP 8.5それぞれにおいて、沿岸生態系を保全した場合（青線）と保全した場合（オレンジ線）の CO2 排出量の推移を示している。

図4.3.7の左の図はシナリオ別における経済活動に起因する CO2 排出量である。黒の線は沿岸生態系による CO2 吸収速度が変化しないことを想定している。一方、気候変動によって沿岸生態系の CO2 吸収速度は低下し、生態系の面積を維持（保全）できないのであれば青線のような CO2 排出量の経路をたどる。これは、オレンジの線で示される沿岸生態系の面積を維持した場合と比べても、経済活動をより厳しく制限して排出量を抑えなければならないということが分かる。そのため 2.5度目標を実現す

るにはより一層経済活動を抑えなければならなくなる。右図は目標達成に伴って生じた経済損失を示したものである。同時に沿岸生態系を保全すると、経済損失を大きく抑えることが出来ることも示唆している。

図4.3.8は RCP 6.0 と RCP 8.5 の場合における CO2 排出量と産出額の推移を推計したものである。RCP 6.0 と RCP 8.5 においては、いずれの場合も**図4.3.7**のように産出額が減少することもない一方で、CO2 排出量は増加あるいは横ばいで推移する。さらに**図4.3.9**は沿岸生態系の保全効果を検証した結果を示しているが、いずれの場合も経済活動に比べて沿岸生態系に由来する CO2 の増加分はごくわずかである。そのため、多少の産出量の減少はあっても、近い将来において沿岸生態系の保全効果の有無による差はほとんどない。逆に、厳しい気候変動目標値が設定された場合は、沿岸生態系の保全が大きな効果をもたらす可能性があることが分かった。

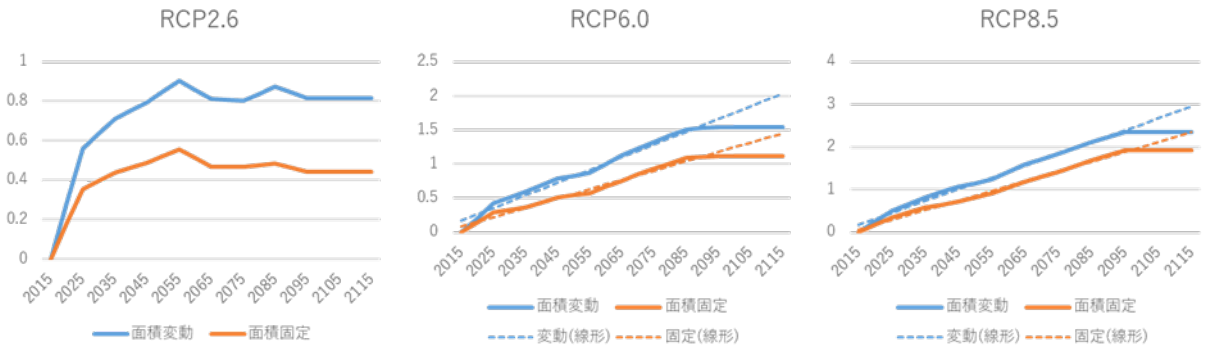

図4.3.6：シナリオ別 CO2 排出量の推移。

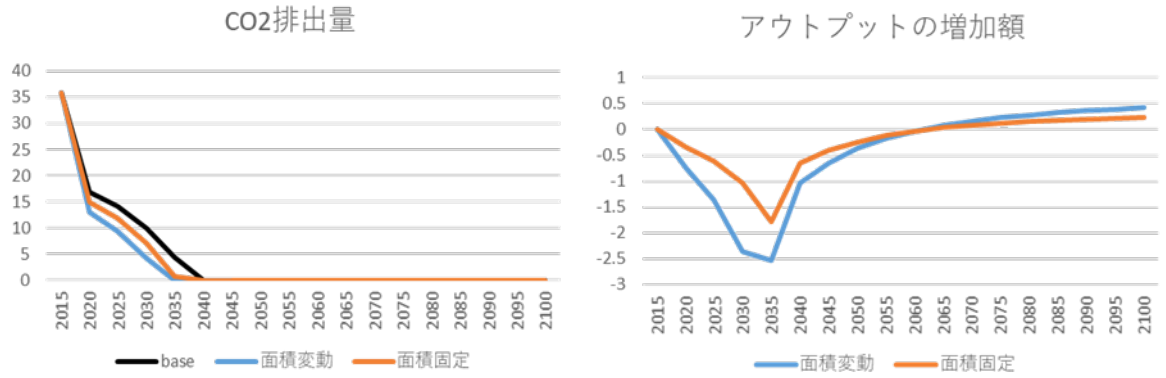

図4.3.7：沿岸生態系保全シナリオ別の気候変動目標の効果。

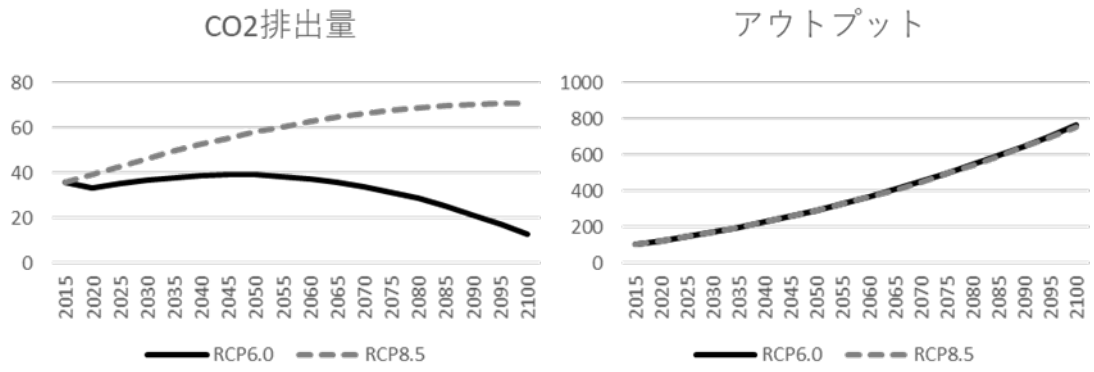

図4.3.8：気候変動目標シナリオ別の CO2 排出量と生産額の予想経路。

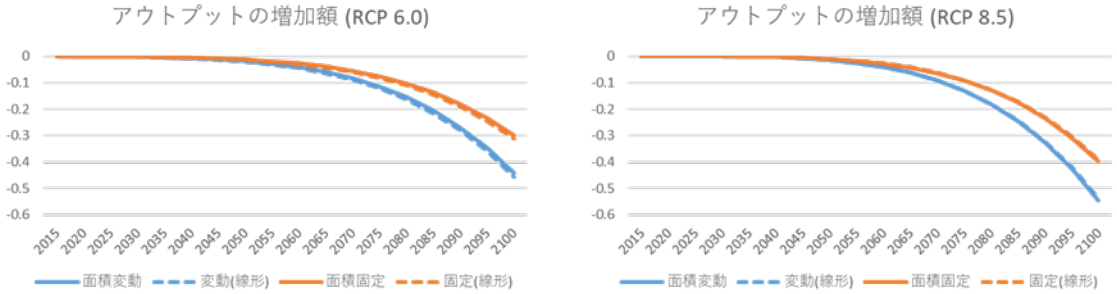

図4.3.9：緩和された気候変動シナリオ下での生態系保全の効果。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

①個人レベルの気候変動対策のための緩和策及び適応策の価値の推計に関する研究では、16の気候変動対策行動の価値がどの程度あるかを推計した。分析の結果、最も価値のある対策行動は堤防の設置や河川の工事などの適応策・緩和策を政府に陳情・請願する行動となった。次いで省エネ電化製品の購入となり、まだ研究の蓄積が十分でない個人レベルでの緩和策及び適応策の価値を求めた。②既存研究では資源量が限られているならば緩和策に集中すべきという結果が導かれることが多いが、そのような結果は適応策・緩和策によって環境への被害が緩和される影響を表す関数の形によって変化することを明らかにした。適応策・緩和策の望ましい組み合わせや政策的な影響を考えるにあたって、その分析に用いるモデルの仮定を検証し、正当化すべきであるという課題を示した点で科学的意義は大きい。③これまで検証が十分でなかった生態系・経済・環境の相互作用及び、環境保全技術の異質性をモデル化して分析した。温室効果ガスを抑制する技術の中には生態系への負担が大きい技術も存在する。本研究は、そのような環境保全技術が生態系に与える影響がどの程度のものかを示した意味で、新規性のある研究と言える。結果として、社会の生態系への評価が高い場合はCO2の排出量が減少する傾向があると同時に、場合によっては長期的な環境負荷が高い技術が採用されうることなどが示された。④本研究は、環境と経済の相互作用を検証するにあたって、捨象した要素がいくつか考えられるが、それぞれの捨象した要素の影響の大小を検証した研究と位置付けられる。その結果、今まで十分にモデルに組み込まれていなかった気候変動対策を分析するうえでの沿岸生態系の影響について、その影響は無視できるものではなく、とくに厳しい気候変動目標下ではそれが顕著になることが分かった。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

環境省の第四次環境基本計画点検指標検討会における次期環境基本計画策定の検討において、本研究成果である自然資本と新国富の試算結果を提示し、基本計画議論の作成に貢献した。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

特に記載すべき事項は無い。

６．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項は無い。

７．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

1) Shin, K.J., R. Nakakido, S. Horie, and S. Managi: PLOS ONE 11(3): e0151928 (2016)
The Effects of Community Attachment and Information Seeking on Displaced Disaster Victims' Decision Making.

2) Matsuki, Y. and S. Managi: Singapore Economic Review 61 (1): 196-217 (2016)
The Impact of Natural Disasters on Manufacturing: Plant-level Analysis for the Great Hanshin-Awaji Earthquake.
3) Onuma, H., K.J. Shin and S. Managi: International Journal of Disaster Risk Reduction 21: 148-158 (2017)
Household Preparedness for Natural Disasters: Impact of disaster experience and implication for future disaster risks in Japan.
4) Kumar, S. and S. Managi: Environment and Development Economics 21 (1): 109-133 (2016)
Carbon Sensitive Productivity, Climate and Institutions.
5) Sakamoto, T., K. Takase, R. Matsuhashi, and S. Managi: Energy Policy 98: 274-289 (2016)
Baseline of the Projection under a Structural Change in Energy Demand.
6) Fujii, H., and S. Managi: Ecosystem Health and Sustainability 2(10) (2016)
An Evaluation of Inclusive Capital Stock for Urban Planning.
7) Fujii, H. and S. Managi: Technological Forecasting & Social Change 112: 293-302 (2016)
Research and Development Strategy for Environmental Technology in Japan: A Comparative Study of the Private and Public Sectors.
8) Islam, M., K. Kotani, and S. Managi: Economic Analysis and Policy 49: 117-133 (2016)
Climate Perception and Flood Mitigation Cooperation: A Bangladesh Case Study.
9) Kurniawan, R., and S. Managi: Sustainable Development 25 (6): 639-654 (2017)
Sustainable Development and Performance Measurement: Global Productivity Decomposition.
10) Ikeda, S., T. Tamaki, H. Nakamura, and S. Managi: Sustainability Science 12(6): 991-1006 (2017)
Inclusive Wealth of Regions: The Case of Japan.
11) Jayarathna1, L., R. Rajapaksa, S. Managi, W. Athukorala, B. Torgler, M.A. Garcia-Valiñas, and C. Wilson : Sustainable Cities and Society 32: 67-77 (2017)
A GIS based Spatial Decision Support System for Analyzing Residential Water Demand: A Case Study in Australia.
12) Rajapaksa, D., M. Zhu, B. Lee, V. Hoang, C. Wilson, and S. Managi: Land Use Policy 69: 317-325 (2017)
The Impacts of Flood Dynamics on Property Values?
13) Horie, S., and S. Managi: Journal of Regional Science 5(7): 840-857 (2017)
Why Do People Stay in or Leave Fukushima?
14) Tsurumi, T. and S. Managi: Journal of Happiness Studies 18(5):1275-1303 (2017)
Monetary Valuations of Life Conditions in a Consistent Framework: the Life Satisfaction Approach.
15) Halkos, G., and S. Managi: Environmental and Resource Economics 68(3): 753-775 (2017)
Measuring the Effect of Economic Growth on Countries' Environmental Efficiency: A Conditional Directional Distance Function Approach.
16) Khanal, U., C. Wilson, S. Managi, B. Lee, V. Hoang, and R. Gifford: Environmental Economics and Policy Studies 20,2 (2018)
Psychological Influence on Survey Incentives: Valuing Climate Change Adaptation Benefits in Agriculture.
17) Rajapaksa, D., M. Islam, and S. Managi: Sustainability, 10, 4 (2018)
Pro-Environmental Behavior The Role of Public Perception in Infrastructure and the Social Factors for Sustainable Development.
18) Kurniawan, R., Y. Sugiawan, and S. Managi: Journal of Cleaner Production, 201 (2018)
Cleaner Energy Conversion and Household Emission Decomposition Analysis in Indonesia.
19) Kurniawan, R., and S. Managi: Sustainable Development 26: 596-605 (2018)

Measuring Long-Term Sustainability with Shared Socioeconomic Pathways using an Inclusive Wealth Framework.
20) Nozawa, W., T. Tamaki, and S. Managi: Journal of Cleaner Production, 186 (2018)
On Analytical Models of Optimal Mixture of Mitigation and Adaptation Investmentst.
21) Tamaki, T., W. Nozawa, S. Managi: Applied Energy, 205, 428-439 (2018)
Evaluation of the Ocean Ecosystem: Climate Change Modelling with Backstop Technologies.
22) Du, G., L. Yuan, K.J. Shin, and S. Managi: International Journal of Geographical Information Science 32 (4): 757-782 (2018)
A Comparative Approach to Modeling Multiple Urban Land Use Changes using Tree-based Methods and Cellular Automata: The Case of Greater Tokyo Area.
23) Yuan, L., K. Shin, and S. Managi: Ecological Economics, 153 (2018)
Subjective Well-being and Environmental Quality: The Impact of Air Pollution and Green Coverage in China.
24) Ito, N., K. Takeuchi, and S. Managi: Economic Analysis and Policy, 61 (2019)
Do Battery-Switching Systems Accelerate the Adoption of Electric Vehicles? A Stated Preference Study.
25) Hein, W., C. Wilson, B. Lee, D. Rajapaksa, H. Moel, W. Athukorala, and S. Managi: Land Use Policy, 82 (2019)
Climate Change and Natural Disasters: Government Mitigation Activities and Public Property Demand Response.
26) Tsurumi, T., A. Imauji, and S. Managi: Kyklos, 72 (2019)
Relative Income, Community Attachment and Subjective Well-being: Evidence from Japan.
27) Roxburgh, N., D. Guan, K. Shin, W. Rand, S. Managi, R. Lovelace, and J. Meng: Global Environmental Change, 54(2019)
Characterising Climate Change Discourse on Social Media During Extreme Weather Events.
28) 玉置哲也、野澤亘、馬奈木俊介：土木学会論文集、74,2 (2018)
地球温暖化による海洋環境への影響と新技術の導入.
29) 堀江進也、馬奈木俊介：経済セミナー、706 (2019)
災害リスクとリスク管理.
30) Goeschl, T., and S. Managi: Economics of Disasters and Climate Change 3 (1): 3-21 (2019)
Public in-kind Relief and Private Self-insurance.
31) Rajapaksa, D., R. Gifford, B. Torgler, M. Garcia-Valiñas, W. Athukorala, S. Managi, and C. Wilson: Resources, Conservation & Recycling 149: 168-176 (2019)
Do Monetary and Non-monetary Incentives Influence Environmental Attitudes and Behavior? Evidence from an Experimental Analysis.
32) Tamaki, T., T. Okada, and S. Managi: Transportation Research Part D: Transport and Environment 67: 503-513 (2019)
Effect of Environmental Awareness on Purchase Intention and Satisfaction Pertaining to Electric Vehicles in Japan.
33) Fujii, H., and S. Managi: Technological Forecasting & Social Change 139:10-16 (2019)
Decomposition Analysis of Sustainable Green Technology Inventions in China.
34) Tamaki, T., W. Nozawa, and S. Managi: Carbon Balance and Management 14 (2019)
Controlling CO2 emissions for each area in a region: the case of Japan.
35) Maruta, S., A. Kitsuki, and S. Managi: Economics of Disasters and Climate Change (forthcoming)
Information Recognition Matters for Household Preparedness for Natural Disasters.
36) Nakamura, H., and S. Managi: Journal of Cleaner Production 256 (forthcoming)

Effects of subjective and objective city evaluation on life satisfaction in Japan.
37) Kumar, S., S. Managi, R. K. Jain: Energy Economics 86 (forthcoming)
CO2 Mitigation Policy for Indian Thermal Power Sector: Potential Gains from Emission Trading.

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

1) Managi, S. (Eds.) 2016. “The Wealth of Nations and Regions.” Routledge, New York, USA.

＜その他誌上発表（査読なし）＞

1) Tamaki, T., W. Nozawa, and S Managi. “VDICE: An Integrated Assessment model for Climate, Economy and Ecosystem”, with Tamaki, T. and S. Managi, in Managi, S. (ed.), The Wealth of Nations and Regions, Routledge, pp.74-90, 2017.
2) Nozawa, W., T. Tamaki, and S. Managi. “On Analytical Models of Adaptation-Mitigation Investment Problems”, with Tamaki, T. and S. Managi, in Managi, S. (ed.), The Wealth of Nations and Regions, Routledge, pp.91-97, 2017.

（２）口頭発表（学会等）

1) 野澤亘、玉置哲也、馬奈木俊介：日本経済学会 2017 年度春季大会（2017）
Development level and optimal mixture of adaptation and mitigation investments
2) 野澤亘、玉置哲也、馬奈木俊介：環境経済・政策学会 2016 年大会（2016）
Development level and optimal mixture of adaptation and mitigation investments
3) 玉置哲也、野澤亘、馬奈木俊介：経営学会主催 WS『オペレーションズ・リサーチの最近の展開』(2016)
自然環境変化を考慮した気候変動経済モデルの構築
4) 深井大幹：Beijing Energy Conference (2018)
R&D Investment and Liberalization in a Clean Technology Market

（３）知的財産権

特に記載すべき事項はない。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

８．引用文献

特に記載すべき事項はない。

III. 英文Abstract

Comprehensive and Strategic Assessment

Principal Investigator: Taikan OKI
Institution: Institute of Industrial Science,
The University of Tokyo
4-6-1 Komaba, Meguro, Tokyo 153-8505, JAPAN
Tel: +81-3-5452-6382 / Fax: +81-3-5452-6383
E-mail: s14-info@rainbow.iis.u-tokyo.ac.jp
Cooperated by: Tokyo City University, Kyushu University

[Abstract]

Key Words: Climate change, adaptation, mitigation, Estimation method by various metrics, Life cycle assessment, Subjectivewellbeing

In order to construct sustainable society by integrated approach for mitigation and adaptation, how effectively and efficiently the climate change issues can be solved with delicate balances between mitigation and adaptation under limited economical and human resources were assessed quantitatively, and it was utilized for supporting climate change policy developments as risk management.

Comprehensive assessment of relevant risks associate with climate change, among various global risks challenging to human beings, and synthetic strategy to minimize the risks of climate change under limited economical and human resources are required. In this theme, as a core team of this project, research coordination, promotion of collaboration, and progress management are operated. The results from all the themes under S-14 was integrated, and evaluated using various indices how effectively and efficiently the climate change issues can be solved with delicate balances between mitigation and adaptation. Results from theme 2 and 3 were synthesized in order to reveal the impacts of mitigation and adaptation to climate change by endpoint indicators such as human health and biodiversity using the framework of LCA (life cycle assessment). Cost-benefit analysis method for mitigation and adaptation utilizing metrics, such as subjective wellbeing and DALY (disability-adjusted life years), was developed in collaboration within theme 1, and contributed for the synthesized assessment. As a whole, S-14 targets global scale, and assesses the balances between mitigation and adaptation to climate change by countries or regions. The research outcomes were immediately published in international journals, and, at the same time, summarized, translated, and utilized for supporting climate change policy developments.

Generaly, the LCA is utilized given the fact that the inventory analysis of CO2 emission was prepared. That is, the LCA is mainly utilized for the mitigation to climate change, and it is rare the LCA is utilized for

the adaptation to climate change. To make the benefit of the adaptation to climate change quantitatively, it is available that we treate the LCA for multi adaptation counter measures and we can compare that with mitigation counter measures. Moreover it was integrated the damage amount and environmental impact into the economic index. As a result, it is enable to use the cost-benefit analysis of climate chang counter measues, and it makes the communication with other field easy. On the other hand, we presented the deep conceputual understanding about how the appropriate balance between mitigation and adaptation changes under limited economic and human resources. Finally, we successfully showed the integrated strategic assessment including impact of social wealth, human health, and ecosystem as economic index. Total cost is 450-800 trillion US$, that is, the GDP-ratio is about 3-7 %.