

Environment Research and Technology Development Fund

環境省環境研究総合推進費終了研究等成果報告書

技術・社会・経済の不確実性の下での気候変動リスク管理オプションの評価
(S-10-4)

平成24年度～平成28年度

Evaluation of climate risk management options under technological,
social and economic uncertainties

東京理科大学
国立研究開発法人国立環境研究所
上智大学
公益財団法人地球環境戦略研究機関
一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〈研究協力機関〉

国立研究開発法人科学技術振興機構
国立研究開発法人海洋研究開発機構
国立研究開発法人森林総合研究所
東京大学
東京農工大学
長崎大学大学院、

平成29年5月

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

技術・社会・経済の不確実性の下での気候変動リスク管理オプションの評価

(S-10-4)

I. 成果の概要	.....	i
1. はじめに (研究背景等)	.....	ii
2. 研究開発目的	.....	ii
3. 研究開発の方法	.....	iii
4. 結果及び考察	.....	iv
5. 本研究により得られた主な成果	.....	vii
6. 研究成果の主な発表状況	.....	ix
7. 研究者略歴	.....	x
II. 成果の詳細		
(1) 総合的な確率的気候変動シナリオおよび影響シナリオの構築 (東京大学)	.....	1
要旨	.....	1
1. はじめに	.....	2
2. 研究開発目的	.....	3
3. 研究開発方法	.....	5
4. 結果及び考察	.....	9
5. 本研究により得られた成果	.....	2 5
6. 国際共同研究等の状況	.....	2 6
7. 研究成果の発表状況	.....	2 6
8. 引用文献	.....	2 9
(2) 1 複数主体の相互作用を考慮したエネルギー経済モデルの 開発動向調査と評価	.....	3 0
(上智大学)		
要旨	.....	3 0
1. はじめに	.....	3 1
2. 研究開発目的	.....	3 1
3. 研究開発方法	.....	3 2
4. 結果及び考察	.....	3 3
5. 本研究により得られた成果	.....	4 8
6. 国際共同研究等の状況	.....	4 9
7. 研究成果の発表状況	.....	4 9
8. 引用文献	.....	5 1
(2) 2 複数主体の相互作用を考慮したエネルギー経済モデルの 開発動向調査と評価	.....	5 2
(公益財団法人地球環境戦略研究機関)		
要旨	.....	5 2
1. はじめに	.....	5 3
2. 研究開発目的	.....	5 3
3. 研究開発方法	.....	5 3
4. 結果及び考察	.....	5 6
5. 本研究により得られた成果	.....	5 9
6. 国際共同研究等の状況	.....	5 9

7. 研究成果の発表状況	59
8. 引用文献	60
(3) 適応・ジオエンジニアリングを考慮した統合評価モデルの拡張と応用 (東京大学)	61
要旨	61
1. はじめに	62
2. 研究開発目的	62
3. 研究開発方法	64
4. 結果及び考察	66
5. 本研究により得られた成果	74
6. 国際共同研究等の状況	75
7. 研究成果の発表状況	75
8. 引用文献	79
(4) 温暖化対策のための適応ポテンシャル・コスト見積もりおよび社会経済 シナリオに関するメタ分析と統合評価モデルによる評価 (東京大学)	82
要旨	82
1. はじめに	83
2. 研究開発目的	84
3. 研究開発方法	84
4. 結果及び考察	86
5. 本研究により得られた成果	103
6. 国際共同研究等の状況	104
7. 研究成果の発表状況	104
8. 引用文献	107
III. 英文Abstract	110
(付録A) マルチモデル結果比較(詳細)	112
(付録B) リスクインベントリ表(詳細)	142

課題名 S-10-4 技術・社会・経済の不確実性の下での気候変動リスク管理オプションの評価

課題代表者名 森 俊介（学校法人 東京理科大学 理工学部 経営工学科）

研究実施期間 平成24～28年度

累計予算額 231,288千円（うち平成28年度：40,147千円） 予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 地球温暖化対策、不確実性、後悔値最小化、気候工学、多地域多部門モデル、適応策、SSP

研究体制

- （1）総合的な確率的気候変動シナリオおよび影響シナリオの構築（学校法人 東京理科大学）
- （2）1. 複数主体の相互作用を考慮したエネルギー経済モデルの開発動向調査と評価（学校法人 上智大学）
- （2）2. 複数主体の相互作用を考慮したエネルギー経済モデルの開発動向調査と評価（公益財団法人地球環境戦略研究機関）
- （3）適応・ジオエンジニアリングを考慮した統合評価モデルの拡張と応用（一般財団法人 エネルギー総合工学研究所）
- （4）適応ポテンシャル・コスト見積もりおよび社会経済シナリオに関するメタ分析と統合評価モデルによる評価（国立研究開発法人 国立環境研究所）

研究協力機関 科学技術振興機構、国立大学法人東京農工大学、国立大学法人東京大学、国立研究開発法人海洋研究開発機構、国立大学法人長崎大学大学院、国立研究開発法人森林総合研究所

1. はじめに

温暖化対策を進めるうえで、世界的かつ長期的な影響の定量的評価は中心的な課題であり、地球温暖化統合評価モデルが唯一のツールとして開発が進められてきた。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) でも数多くのモデルが定量評価に貢献している。

しかしながら、現在までの統合評価モデルは温暖化対策という長期的かつ不確実性の高い問題においてはなお十分な方法論を提供していない。温暖化の進行と影響の規模や時期、地域的分布、その社会経済影響、技術的緩和策の費用、適応策の考慮、気候工学(ジオエンジニアリング)の実施可能性などの様々な不確実性が避けられない。従来の多くのモデル開発ではパラメータの変化で不確実性を表現してきたが、このアプローチには現実の意思決定プロセスに適用するにはいくつかの限界が存在する。

第一に、期待値に基づく不確実性評価方法論では現実の決定問題におけるリスク回避の志向が反映され難い。第二に、複数の意思決定者が妥協点を探る合意決定プロセスでは通常最適解が一意に決まらないケースのあることが知られている。第三に、気候工学のように対策の特性についてなお未知である場合がある。第四に、適応策のように個別的な対策の場合、対策の種類の多様性や体系化がなされていない場合がある。また、現実の問題が大規模であるだけに、単一のモデルですべてを包括することには現実的でない。そこで、本課題では、プロジェクトの中で4つのモデルが同一のシナリオの設定のもとでシミュレーションを行い、結果の比較を行いつつ、各モデルの特長による独自の知見提供という2段階のアプローチをとることとする。

2. 研究開発目的

本テーマS10-4は、温暖化問題の不確実性に対し頑健な緩和策を定量的に求めるため、以下の4つのサブテーマの連携により、①共通将来シナリオに基づく4モデルの比較、②各モデルの特長を活かす独自の知見提供、により問題解決を目指す。これら4モデルはそれぞれサブテーマを担当し、図-1のように相互に接続される。各サブテーマの独自の目標課題を以下に示す。

サブテーマ（１）不確実下の意思決定方法に着目したエネルギー経済モデルの開発動向調査と拡張では、後悔値最小化法と多段階意思決定モデルの開発、参加地域と経済部門の部分参加の影響などを扱う。サブテーマ（２）複数主体の相互作用を考慮したエネルギー経済モデルの開発動向調査と評価では多地域・多部門一般均衡型逐次動学最適化モデルにより、ゲーム論的行動の帰結を明らかにする。サブテーマ（３）適応・ジオエンジニアリングを考慮した統合評価モデルの拡張と応用は、成層圏エアロゾル注入や太陽放射管理(SRM)など気候工学方法のコスト評価や適応のモデル導入を行う。サブテーマ（４）温暖化対策のための適応ポテンシャル・コスト見積もりおよび社会経済シナリオに関するメタ分析と統合評価モデルによる評価はマルチモデル評価のプラットフォームとなる共通社会シナリオや適応コスト等を調査及び評価し各モデルに提供する。

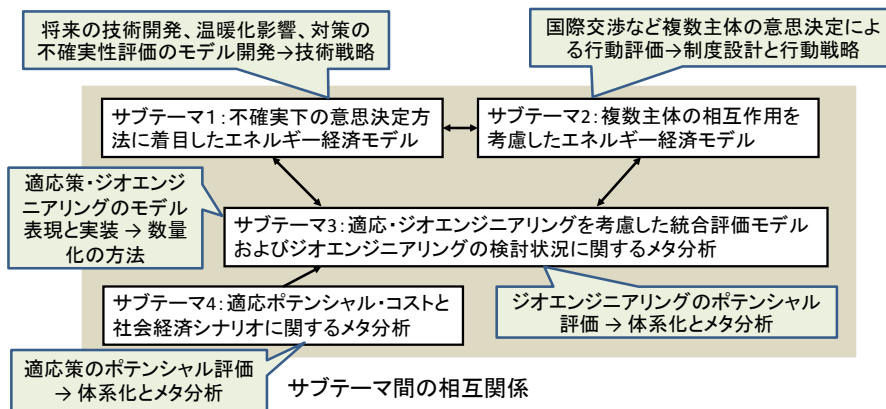


図-1 S10-4サブテーマ間の相互連携構造

3. 研究開発方法

(1) 不確実下の意思決定方法に着目したエネルギー経済モデルの開発動向調査と拡張

1) SSP-RCP-戦略ケースに対するマルチモデルによる比較

本課題では以下の4モデルが評価に参加し共通する知見と評価の幅を与える。①MARIA-14（通時的非線形最適化モデル、エネルギー、経済、土地利用、温暖化影響をすべて一体で解く）、②EMEDA-MER（多部門多地域応用一般均衡逐次動学的モデル）、③GRAPE（エネルギー・経済・土地利用モジュールを結合したモデルと気候変動モジュールのソフトリンクを持つ。陸域炭素収支、太陽放射等を扱う）、④AIM/CGE（農業部門、土地利用も詳細に記述する逐次動学応用一般均衡モデル）とりまとめはサブテーマ（１）が行うが、テーマを共通する課題である。

将来シナリオの共通設定として、2016年に世界気候変動研究コミュニティが公表したSSP-RCPシナリオのうちSSP1（持続可能社会）、SSP2（中庸型社会）、SSP3（分断型社会）を将来の社会像として、人口やGDPの想定を整合させた。このもとで1. 成り行きケース (BAU)、2. RCP6.0、3. RCP4.5、4. RCP2.6の放射強制力制約の「分析ケース」、さらにICA-RUS独自の「戦略ケース」、すなわち①気候感度(CS)に3.6℃を想定、②目標気温上昇(TG)を1.5℃、2℃および2.5℃の3種類を想定する場合を加える。加えて、SSP2においてTG20_CS36のケースにおける標準想定からの変化として、「21世紀半ばまで気候感度=3.0℃を想定していた計画を、実際の気候感度=4.5℃であったことが判明した場合に、あくまで目標温度上昇を実現しようとする学習シナリオ (CS30-45)」を含む6種の「バリエーションシナリオ」を設定した。本マルチモデル比較評価計算ケースとその結果を表-1に示す。

表-1 マルチモデルシミュレーションケースのまとめ

		SSP-1				SSP-2				SSP-3			
		MARIA	EMEDA	GRAPE	AIM	MARIA	EMEDA	GRAPE	AIM	MARIA	EMEDA	GRAPE	AIM
分析ケース	BAU	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	RCP6.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	RCP4.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	RCP2.6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
戦略ケース	TG25_CS36	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	TG20_CS36	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	TG15_CS36	○	×	○	○	×	×	○	○	×	×	○	×
TG20_CS36 ベースバリエーションシナリオ	LowCost					○		○					
	LowBiomass					○		○					
	LowNuclear					○		○					
	LowCCS					○		○					
	Adaptation					○							
	CS30-CS45					△		○					

(*1) tg以下の数値は目標気温×10、cs以下の数値は想定された気候感度×10を表す

(*2) ×：実行可能解を得られない、あるいは計算が異常終了する場合

(*3) △：目標温度上昇を完全には達成できなかったケース

また、2) 緩和策リスクインベントリ表とフロー図の作成ではIPCC-AR5報告書から緩和オプションの相互影響関係を取りまとめ、さらにフロー図で視覚化した。

このサブテーマの独自課題として、さらに3) 不確実性評価方法調査と後悔値最小化法による多段階意思決定モデルの開発では期待効用最大化に代わる新しい枠組みとして、後悔値をミンコフスキーの一般化距離による定式化を提案し、MARIAに多段階意思決定法を導入した。4) THERESIAモデルによる一国のエネルギー・環境政策の自国と世界に及ぼす影響分析では排出量制約に参加する国や部門が部分的である場合の影響評価を行った。5) 気候感度不確実性を考慮したMARIAの多段階意思決定モデルによる評価では、テーマS10-1の塩竈¹²⁾による気候観測データの蓄積による将来の大気温度の上昇の不確実性の解消プロセスについて多段階意思決定戦略評価を行い、情報の獲得の価値を計った。6) 世界最適行動としての2°C目標の意味と前提条件変化に対する行動変化のモデル化では、「合理的行動としての2°C目標」の定式化を提案し、前提条件の変化が導く行動変化を整合性ある最適行動として評価した。

(2) 1 不確実下の意思決定方法に着目したエネルギー経済モデルの開発動向調査と拡張

本サブテーマが扱う世界経済モデルEMEDAは、多地域多部門応用一般均衡モデルを構成し、気候変動モデルを組み込むことで多主体の動向とその影響を分析する。このモデルは産業部門別評価が可能な特徴を有する。このモデルにより①各地域が完全に利己的に振る舞った状況であるナッシュ均衡と、地域全体にとって効率的状況を達成可能なナッシュ交渉解を比較することで、多主体の行動様式の影響を複眼的にとらえる。②異常気象影響を含む気候変動の経済影響評価への拡張、さらに③AD-DICEモデルの定式化の応用による適応策導入効果のための拡張と地域別経済影響評価への拡張を行い、各地域・各産業の温暖化影響を評価しマルチモデルに結果を与えた。

(2) 2 不確実下の意思決定方法に着目したエネルギー経済モデルの開発動向調査と拡張

本研究では、ケインズ的な世界を前提としたコンパクトモデルを定式化した。この需要主導型モデルは不均衡を認めるモデル構造になっている。

(3) 適応・ジオエンジニアリングを考慮した統合評価モデルの拡張と応用

このサブテーマでは、気候工学的方法のコスト調査を文献に基づきメタ分析し、さらに適応策とともに統合評価モデルGRAPEに導入することで様々な社会状況の下で緩和策評価を行う。具体的には、文献に基づき1) 成層圏エアロゾル注入のコスト分析、2) 二酸化炭素直接空気回収のコスト分析を行い、さらにGRAPEの拡張により、3) バイオマスCCS分析のためのモデル詳細化と土地利用に与える影響評価、4) 太陽放射管理と緩和策の組み合わせによる温度安定化シナリオ分析、さらに5) 適応を組み込んだ分析の検討、を行いマルチモデル比較に情報を提供した。

温暖化ダメージ関数に緩和策の進展や適応策を組み込み、経済全体への影響を評価する。

(4) 適応ポテンシャル・コスト見積もりおよび社会経済シナリオに関するメタ分析と統合評価モデルによる評価では、統合評価モデルにおける既存文献を整理するとともに、本プロジェクトで共有可能な将来シナリオを取りまとめ、モデル共通のプラットフォームデータを提供する。具体的には、文献調査により1) 統合評価モデルでの入力として活用可能な適応ポテンシャル・費用に関するメタ分析、さらに2016年に整備されIPCCでも共通して用いられる新たな社会経済シナリオとして公表されたSSPの策定作業に参加して 2) 将来の社会経済シナリオの整理を行い、共通基盤データを提供した。また、3) 統合評価モデルによる適応策、緩和策の総合評価の試算ではAIM/CGEによる気候政策評価を行い、マルチモデル比較に情報を提供した。

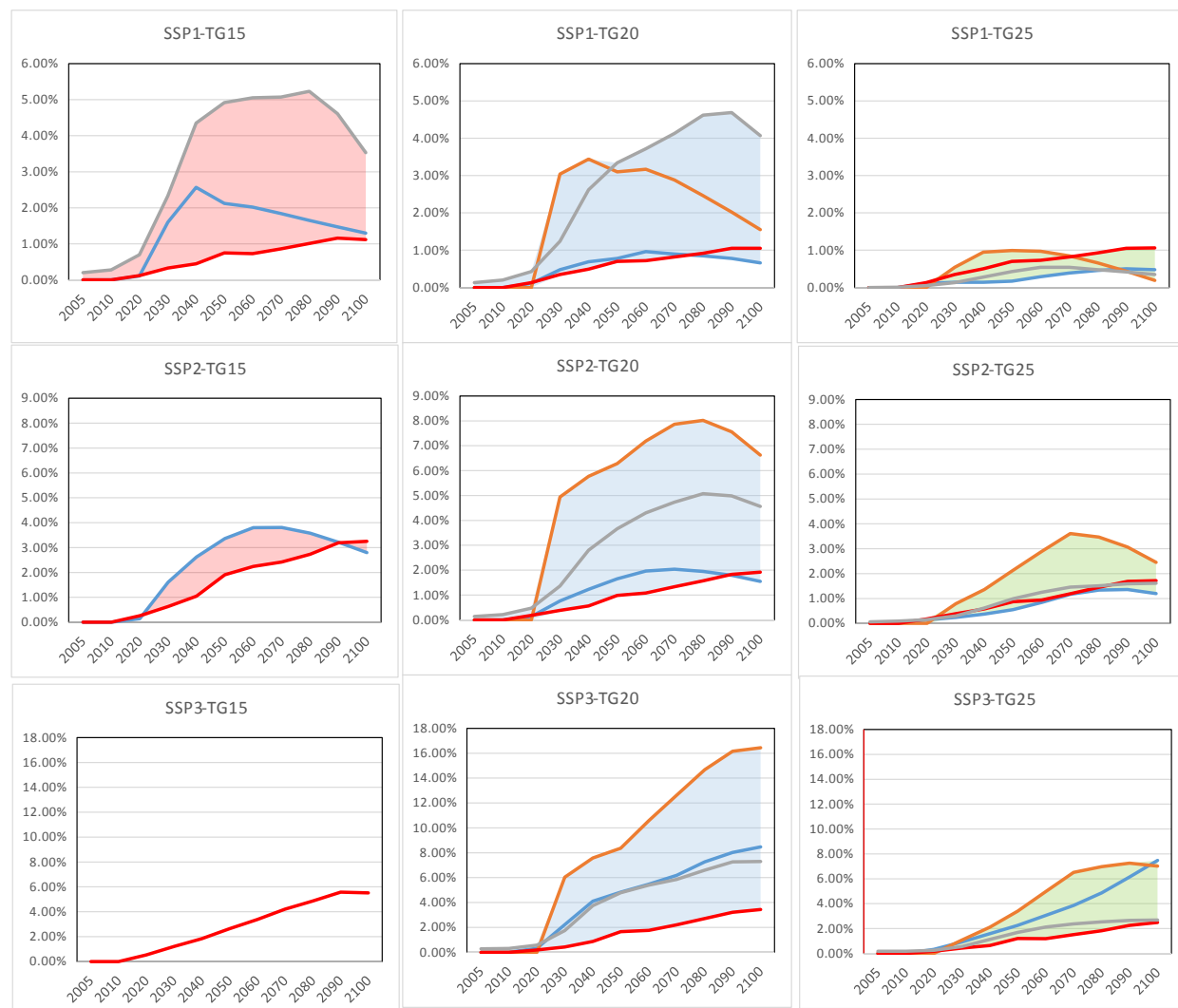
4. 結果及び考察

(1) 不確実下の意思決定方法に着目したエネルギー経済モデルの開発動向調査と拡張

テーマ共通課題である1) SSP-RCP-戦略ケースに対するマルチモデルによる比較では、4モデルの結果を取りまとめ、主要な指標、すなわちa. GHG排出・削減経路、b. GDPの損失、c. 最終エネルギー消費、d. 一次エネルギー供給の推移、e. エネルギー技術、f. 土地利用と食料需給、g. 産業部門・地域別影響、h. 緩和策に導入制約がある場合の対策評価についてモデル間の共通性と差異に関する知見を得た。

これらに基づく主要な知見として以下がある。GDP損失を見ると温暖化目標が厳しくなるにつれ実行可能性が明らかに低下し解を与えるモデルが減少した。1.5°C目標はSSP1シナリオからは実現可能性が高く、SSP3からは極めて困難となる。また温暖化制約の影響は世界的には比較的小さいが、影響の地域差は大きい。一次エネルギー供給に関しては、温暖化政策導入時に再生可能エネルギー主導か、バイオマス+CCS主導か、原子力主導

かモデルの解は広がりを見せている。言い換えれば、同じ気候目標の達成にも、社会にはなお選択の余地が大きいことが示された。エネルギー技術は1.5°C目標の場合に電源の急激な非化石化（原子力、再生可能）、各部門の電化による電力需要増、GRAPEではさらにBECCSについても2030年から大規模に導入されるという現実的な困難さが示唆された。土地利用と食料需給では、穀物生産量は、いずれのケースにおいても世界合計では温暖化対策による変化は小さいものの、地域的には大きな差が現れた。緩和策に導入制約がある場合、GDP損失率で見ると、CCS制約、バイオマス制約の影響は特定地域に大きく現れ、また21世紀半ばでの気候感度の想定変化は大きな損失上昇を生む。全体的に、厳しい温暖化対策は世界全体よりも経済影響の地域差が大きくなる傾向を示している。結果の例として、図-2 に世界のSSPごとのTG15, 20, 25ケースにおけるGDP損失率の推移を示す。



— : AIM — : GRAPE — : EMEDA — : MARIA

図-2 世界のSSP-目標温度別GDP損失率：1.5°C目標では解を与えるモデルが減少

2) 緩和策リスクインベントリ表とフロー図の作成では、テーマ1～3が作成した気候影響リスクのインベントリ表とは少し異なり、オプション間の連鎖はあまり明確ではない。

サブテーマ独自課題の結果としては、3) 不確実性評価方法調査と後悔値最小化法による多段階意思決定モデルの開発では、後悔値最小化意思決定は、期待効用最大化決定に比べ明らかに低いCO2経路を選択した。4) THERESIAモデルによる一国のエネルギー・環境政策の自国と世界に及ぼす影響分析では排出抑制への参加が一部である場合の炭素漏えいの大きさと、排出を消費財に体化すると「輸出財に体化された先進国のCO2排出による純排出量の削減」が発生した。5) 気候感度不確実性を考慮したMARIAの多段階意思決定モデルによる評価はShiogama (2016)による気候感度の不確実性解消プロセスを多段階意思決定モデルに導入した結果、1. 部分的な情報でも多段階意思決定戦略をとることは経済的な意義が認められる、2. 情報の価値は単純平均では2°C目標達成時には約2%に達する。6) 世界最適行動としての2°C目標の意味と前提条件変化に対する行動変化のモデル化は、前提条件の変化に対して2°C温度目標を柔軟に変化させるか、2°Cを無条件制約とするかで大きな経済的損

失の変化が現れた。

(2) 1 不確実下の意思決定方法に着目したエネルギー経済モデルの開発動向調査と拡張

i 多主体・多部門ゲーミングシミュレーションモデルの開発

マルチモデルへの共通的结果提供とともに、g. 産業部門・地域別影響に唯一結果を提供した。まず1) **多主体・多部門ゲーミングシミュレーションモデルの開発**では、EMEDAは8地域から構成される特徴をいかして、ゲーミングシミュレーションに中国と米国のみがゲームのプレイヤーとなる状況、および中国、米国、日本の三か国がプレイヤーとなる状況の、二つの場合のゲーミングシミュレーションを試みた。結果として2地域ゲームと3地域ゲームを比較すると、米国と中国の削減率はさほど変わりがなく結果に頑健性があること、全球平均気温の変化で見た場合、ナッシュ均衡とナッシュ交渉解の差は2100年時点で比較して0.1°C程度しかないことが示された。これは温暖化被害が貿易を通じ国内産業にも波及して悪影響を与えるため、利己的に行動する各地域は他地域を考慮する必要があるからである。また2) **異常気象影響を含む気候変動経済影響評価のための拡張**では熱帯低気圧の強度の増加に着目した温暖化経済被害関数の作成を行い、この被害関数をEMEDAに組み込み農業や生物多様性への経済的影響を評価した。3) **適応策導入効果のための拡張と地域別経済影響評価**では適応と被害の計算を可能とするモデルの拡張を行った。2100年で4度上昇となるSSP3・BaUでは、適応水準が次第に増加し、例えば日本で60%弱、アフリカで65%程度の高い適応率を得た。適応費用は日本でGDP比0.5%程度、アフリカでは1%以上と大きな地域差が確認された。また産業部門別評価では、第一次から第三次産業まで類似して温暖化政策によりOECDでの純輸出の大幅な減少やアジア地域での増加傾向が見られた。

(2) 2 不確実下の意思決定方法に着目したエネルギー経済モデルの開発動向調査と拡張

既存のエネルギー経済モデルが一般均衡および消費者の効用最大化を求めるのに対し、ここでは政策協調の政策ゲームを考え、目的関数に二次損失型目的関数を設定する定式化を行った。

(3) 適応・ジオエンジニアリングを考慮した統合評価モデルの拡張と応用

文献調査と、その結果のGRAPEへの導入によりマルチモデル評価に寄与する。1) **成層圏エアロゾル注入(SAI)のコスト分析**、2) **二酸化炭素直接空気回収(DAC)のコスト分析**では、文献調査等から、コストの不確実性の高さを明らかにし、SAIコストが既往研究よりも高価となる結果、およびDACが他の緩和技術より1 Mt-CO₂/年のCO₂回収コストが一桁高いといった試算結果を得た。

3) **バイオマスCCS分析のためのモデル詳細化と土地利用に与える影響評価**では、BECCSによるCO₂の回収は、バイオマス供給制約がない場合、2050年に6 GtCO₂ yr⁻¹、2100年には13.7 GtCO₂ yr⁻¹に達した。この時、エネルギー作物向け農地は、2050年に100 Mha、2100年に300 Mha利用された。バイオマス供給制約ありの場合、大規模BECCS (> 3.6 GtCO₂ yr⁻¹)は2040年から始まり、2050年に5.2 GtCO₂ yr⁻¹、2100年に9.7 GtCO₂ yr⁻¹に達した。エネルギー作物の土地利用は限られ、2050年に40 Mha、2100年に30 Mhaであった。4) **太陽放射管理(SRM)と緩和策の組み合わせによる温度安定化シナリオ分析**では、緩和策のみの場合に比べSRM導入を仮定すると世界GDP損失はほぼ半減した。これはSRM量が少量であっても経済影響が緩和されるためである。5) **適応を組み込んだ分析の検討**では緩和策よりも適応策をより多く活用した方がより経済的となったが、不確実性の大きさと、適応策ではティッピング現象が回避できない点にも留意の必要がある。

(4) 適応ポテンシャル・コスト見積もりおよび社会経済シナリオに関するメタ分析と統合評価モデルによる評価

1) **統合評価モデルでの入力として活用可能な適応ポテンシャル・費用に関するメタ分析**では、適応ポテンシャル・コスト見積りの情報を含む2006年以降の既存文献の網羅的な収集を実施し表に取りまとめを行った。現状では、世界全体を統一的に網羅した定量的データベースを作成できる段階には至っていない。2) **将来の社会経済シナリオの整理**では、SSPシナリオの作成作業に参加し、結果の分析を行った。SSPの記述的背景の差異から、例えば、SSP2及びSSP3の社会ともに目標が同じ場合において、ほぼ同じだけの一次エネルギー供給量になるという結果になったが、その内訳は、SSP3では原子力発電の比率が極めて低く、SSP2の方がCCSの比率が高くなる等の大きな差異がある。また、このような共有シナリオを利用することの長所と短所の整理を行った。このほか、食糧需給・土地利用を含むAIM、GRAPE、MARIAの3モデルに対して、SSP-RCP別の穀物別収率データを提供した。3) **統合評価モデルによる適応策、緩和策の総合評価の試算**として、AIM/CGEモデルによりマルチモデルアプローチにSSP-RCP-戦略ケースのシミュレーションデータを提供した。さらに、分析に当たって、CGEモデルが気候変動による影響や適応策をどのように捉えることができるか、またその結果はどのようなものなのかを整理した。また、気候変動影響や適応策をCGEモデルで扱うことの限界も整理した。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

リスクマネジメント策定戦略における不確実性について調査・体系化するとともに、従来の問題点の克服を目指しモデル構築の方法論の提供とモデル開発を行った。まず共通社会経済シナリオSSPと共通温暖化対策ケースRCPIに対して比較可能となるようモデルの前提条件を適合させ、共通した知見と相違する論点を明らかにした。マルチモデルの比較の結果、基本的な世界の趨勢が持続可能性を目指す世界像からは1.5℃目標でさえ比較的接近した結果が得られ、分断化された社会からは2℃目標達成も困難であった。また、温暖化政策による世界全体でのマクロ経済指標の変化が小さいのに対し、地域ごとの変化の大きさが共通の傾向として示され、温暖化対策の負荷分担の差異をどのように吸収するかが明らかとなった。

不確実性については地球環境問題のリスクマネジメントを、①繰り返しのない意思決定問題としての多段階意思決定法、②多地域・多部門の視点からの温暖化対策緩和策実施上の影響評価、③気候工学やBECCS等不確実性の高い温暖化対策技術の評価、モデル研究との協働による不確実下の意思決定のための方法論の拡張、④適応策の基本的な調査とマクロモデルによる検討、についてそれぞれ調査と方法論の開発により接近した。いずれも地球温暖化の不確実性に対する接近法としての科学的意義は大きいと考えられる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

2017年に中央環境審議会に取りまとめられた「気候変動適応策を推進するための科学的知見と気候リスク情報に関する取組の方針（中間取りまとめ）」では、温暖化による影響や適応を評価するための共通シナリオとしてSSPsが取り上げられ、日本版SSPsの作成に向けた調査研究を進めることが適当であると明記された。こうした点は、SSPsの定量的な情報とともに、本研究で整理したSSPsの役割が認識されたことによるといえる。

<行政が活用することが見込まれる成果>

温暖化対策行動の将来には、①温暖化の進行の水準、②温暖化影響、③対策コスト、④協調と競合を含む実施主体の行動、⑤革新的技術の可能性、など大きな不確実性が横たわっている。このような不確実性に対して、政策実施上2℃制約をどのようにとらえるのかは大きな課題となっている。本研究の知見はS10-1、S10-2、S10-3などとの横断的な情報の統合化により、国際的な場における不確実下のリスクマネジメントと温暖化政策の実装に対し定量的情報とその源、および政策決定のための科学的な裏付けを与えるものであり、これにより、温暖化対応政策を実装する際、どれほどの幅の不確実性が存在し、また対策費用の幅がどれほどになるのかの指針を与えた。特に、気候モデルとの協働による不確実性評価では、科学研究の蓄積とその経済効果の関係の評価は、環境研究の経済的価値を明らかにした初のものである。またもし前提条件に何らかの科学的知見による変化があった場合の対策費用の変化や、温度目標管理の柔軟性の意味を定量的に与えることができるようになった。

中でも、全世界的な影響とコストが受容可能な範囲であっても影響の地域差が場合によっては非常に大きく現れる可能性や、ベースラインとなる世界の社会経済像が持続可能性志向である世界観からは1.5℃目標世界に比較的接近し、分断化志向である場合では2℃目標世界は困難であるなど、温暖化政策だけでない社会経済・環境政策の在り方が温暖化影響緩和に大きく影響することは、気候変動政策以外の政策の副次的便益の大きさが重要なことを示すものである。

また、本課題に参加した2つの多地域多部門モデル(EMEDAとTHERESIA)は、具体的な中期的産業政策と環境政策の指針を提供する。EMEDAはどの地域のどの産業が温暖化と対策の影響を受けるかを明らかにした。またTHERESIAは炭素排出規制で以前から提案されている「セクトラルアプローチ」および「炭素排出の生産段階での勘定」か「消費財への体化」という具体的な政策に対し、炭素漏えいだけでなく参加部門や参加地域が限定的である場合にどのような影響が発生するかを示した。これは排出権取引や国際的な炭素課税政策における「実施上の不確実性とその効果」を事前評価するものであり、実務上も環境経済政策への寄与が大きいと考えられる。

気候工学は、温暖化対策の緊急避難的手段とみなされており実効性や経済性についてはなお不確かな点が多く、倫理的観点も加味すれば、必ずしもマクロなモデルのみで評価できる段階ではないが、事前に、「この技術ができるとすればどれほどの価値がありうるのか」は今後の対策を進めるうえで意義が大きいものと考えられる。

本研究で行った温暖化影響、適応ポテンシャルや費用に関する考察は、わが国における適応計画の更新や、これから適応計画を策定する国や自治体にとっても有効となる。また、適応策の実施に関する条件は、社会経済状況や気温の変化等によっても変わりうることから、政策としてどのような情報が必要となるかについての緩和策、適応策を統合した分析は、長期的な視点を持った削減シナリオの評価に不可欠であり、2020年以降の

目標策定の議論をはじめとした温暖化政策への貢献が期待される。

さらに、日本版SSPsの作成を含めて、今後追加での作業が必要となるが、世界を対象とした社会経済シナリオと整合する国内の社会経済シナリオは、日本における適応策の検討や、長期の低炭素開発戦略の策定にも大きく貢献するものであり、地方自治体を含めた行政機関において活用が見込まれる。また国際的には本研究の成果を本課題終了後に学術論文としてIPCC AR6に向け公表することで、我が国のこの研究分野での貢献と、世界における議論のリードを見込める。

6. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) S. Mori, T. Matsuo, M. Ohkura: *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 7, No. 6, pp.1106-1115 (2013) Minimum Regret Climate Policy with Act-Then-Learn Decision - A New Model Framework under Long-Term Uncertainties
- 2) 森田香菜子: *環境情報科学学術研究論文集*, 27, 247-252 (2013) REDD+に関わる制度間の相互作用とその管理: カンボジアとラオスの事例より
- 3) C. Le Quéré, R. Moriarty, E. Kato et al.: *Earth System Science Data*, 7, 47-85 (2015a) Global carbon budget 2014.
- 4) T. Washida, K. Yamaura and S. Sakaue: *International Journal of Global Warming*, Vol. 6, No. 4, pp. 466-499 (2014) Computable General Equilibrium Analyses of Global Economic Impacts and Adaptation for Climate Change: The Case of Tropical Cyclones
- 5) S. Fujimori, T. Hasegawa, T. Masui, K. Takahashi: *Food Security*, 6 (5), 685-699 (2014) Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions
- 6) 藤森真一郎、長谷川知子、増井利彦、高橋潔、シルバエランディエゴ、戴瀚程、脇岡靖明、甲斐沼美紀子: *土木学会論文誌G(環境)*, 71 (6), II_217-II_228 (2015) AIMによる新社会経済シナリオSSPの定量化とそのシナリオの特徴
- 7) 金丹、森俊介: *北東アジア経済研究*、第21号、PP. 139-147 (2015) 中国のエネルギー・環境政策の影響分析 - 勤学的多地域多部門統合評価モデルTHERESIAによる
- 8) A. Ahlström, M. R. Raupach, E. Kato et al.: *Science*, 348, 895-899. doi:10.1126/science.aaa1668 (2015) The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO2 sink.
- 9) S. Sakaue, K. Yamaura and T. Washida: *International Journal of Global Warming*, Vol. 8, No. 4, pp. 463-500 (2015) Regional and Sectoral Impacts of Climate Change Under International Climate Agreements
- 10) K. Nishina, A. Ito, E. Kato et al.: *Earth System Dynamics*, 6, 435-445, doi:10.5194/esd-6-435-2015 (2015) Decomposing uncertainties in the future terrestrial carbon budget associated with emission scenario, climate projection, and ecosystem simulation using the ISI-MIP result.
- 11) C. Le Quéré, R. Moriarty, E. Kato et al.: *Earth System Science Data*, 7, 349-396, doi:10.5194/essd-7-349-2015 (2015b) Global carbon budget 2015.
- 12) H. Shiogama, D. Stone, S. Emori, K. Takahashi, S. Mori, A. Maeda, Y. Ishizaki, M. R. Allen: *Scientific Reports*, [6:18903 | DOI: 10.1038/srep18903, Jan.11 (2016) Predicting future uncertainty constraints on global warming projections
- 13) S. Mori: *Journal of Economic Structures*, Vol.5, No.5, pp.1/22 (2016) A new approach of carbon emission allocation among stakeholders: an expansion of Multiregional and Multisectoral Dynamic Energy Economic Model THERESIA
- 14) 金丹、森俊介: *北東アジア経済研究*、第22号、PP. 43-55 (2016) 東アジア地域の中間財における国際分業の進展
- 15) P. Smith, S. J. Davis, E. Kato et al.: *Nature Climate Change*, 6, 42-50, doi:10.1038/nclimate2870 (2016) Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions.
- 16) Z. Zhu, S. Piao, E. Kato et al.: *Nature Climate Change*, 6, 791-795, doi:10.1038/nclimate3004 (2016) Greening of the Earth and its drivers.
- 17) L. Calle, J. G. Canadell, E. Kato et al.: *Environmental Research Letters*, 11, 074011, doi:10.1088/1748-9326/11/7/074011 (2016) Regional carbon fluxes from land use and land cover change in Asia, 1980-2009.
- 18) R. Moriyama, M. Sugiyama, A. Kurosawa, K. Masuda, K. Tsuzuki, Y. Ishimoto: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, DOI: 10.1007/s11027-016-9723-y (2016) The cost of stratospheric climate engineering revisited.
- 19) C. Le Quéré, R., R. M. Andrew, E. Kato et al.: *Earth System Science Data*, 8, 605-649,

- doi:10.5194/essd-8-605-2016 (2016) Global carbon budget 2016.
- 20) A. Arneth, S. Sitch, J. Pongratz, B. D., E. Kato et al.: Nature Geoscience, 10, 79-84, doi:10.1038/ngeo2882 (2017) Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed.
- 21) 黒沢厚志、加藤悦史、杉山昌弘、増田耕一: 化学工学会論文誌 (2017) パリ協定と気候変動対策技術 (in press)
- 22) S. Fujimori, M. Abe, T. Kinoshita, T. Hasegawa, H. Kawase, K. Kushida, T. Masui, K. Oka, H. Shiogama, K. Takahashi, H. Tatebe, M. Yoshikawa: PLOS ONE, 12 (1), e0169733-e0169733 (2017) Downscaling Global Emissions and Its Implications Derived from Climate Model Experiments
- 23) K. Yamaura, S. Sakaue and T. Washida: Japanese Journal of Agricultural Economics, Vol.19, (2017 in press) Regional and Sectoral Impacts of Global Warming and Agricultural Production: A Case of CGE Analyses

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) Mori S., Washida T., Kurosawa A., Masui T.: Our Common Future under Climate Change, Paris, France, July, 2015, Pathways to be Opened towards Low Carbon Society; Findings on Multi-model Comparison in ICA-RUS Project

他全83編

7. 研究者略歴

課題代表者: 森 俊介

東京大学大学院工学系研究科電気工学博士課程修了、工学博士、現在東京理科大学理工学部経営工学科 教授

研究分担者

- 1) 鷺田豊明

神戸大学大学院経済学研究科博士後期課程中退、博士 (経済学)、現在上智大学教授

- 2) 矢野貴之

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修了、博士 (経済学)、IGESを経て広島修道大学経済科学部准教授

- 3) 黒沢厚志

東京工業大学理工学研究科修了、博士 (工学)、現在エネルギー総合工学研究所プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員

- 4) 増井利彦

大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻修了、博士 (工学)、現在国立環境研究所室長

S-10-4 技術・社会・経済の不確実性の下での気候変動リスク管理オプションの評価

(1) 総合的な確率的気候変動シナリオおよび影響シナリオの構築

学校法人 東京理科大学 森 俊介

<研究協力者>

東京理科大学 金丹(H24～H27年度)・亀谷和久(H25～H27)・大西 悟(H28)

その他の研究協力機関等 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター 高瀬香絵

平成24～28年度累計予算額：65,515千円（うち平成28年度：13,741千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

地球温暖化対策オプションの社会経済への影響について、これまでも中長期エネルギー経済モデル開発と評価が行われ、温暖化政策評価に寄与してきた。しかしながら、既存のモデル開発には、気候変動と影響に関する不確実性の取り扱いの課題が残っている。

本サブテーマでは、本テーマに共通する2つの課題の総括と、特に不確実性に着目した4課題合計、すなわち以下の6つの研究課題を取り扱う。

まず、本テーマに共通した課題の取りまとめとして、

1) SSP-RCP-戦略ケースに対するマルチモデルによる比較

地球規模の環境問題対策の定量的な評価方法としては、まだ確立した方法がないため、各研究者が独自の方法で開発した何らかのモデルに依存することになる。しかし対象が大規模なため、何らかの簡略化が不可欠である。このため、単一のモデル評価ではなく複数の将来シナリオに対して複数のモデル評価により共通する知見と評価の幅に着目する接近法が広くとられている。本課題ではMARIA-14モデル（東京理科大学）、EMEDA-MERモデル（上智大学）、GRAPEモデル（エネルギー総合工学研究所）、AIMモデル（国立環境研究所）のモデルがSSP-RCPおよびSSP-独自戦略ケースの共通社会経済シナリオおよび温暖化対策シナリオに対してシミュレーションを行い、相互比較により共通する知見とモデル間の差異を明らかにした。

2) 緩和策リスクインベントリ表とフロー図の作成

IPCC-AR5報告書では、大気中の温室効果ガス濃度の安定化を図るためには、エネルギーの有効使用、そしてエネルギー生産、交通運輸、建築、工業、土地利用及び人間居住など各分野での更なる排出削減が必要とすると指摘し、技術措置や行動変化などを含めた様々な統治レベルや経済セクターで取り得る緩和策選択肢を提供した。ここで、これらのオプションの相互影響関係のとりまとめを別テーマ(S10-1～3)に倣い、表及びフローチャートで行うこととした。

次に、本サブテーマ独自の課題として、以下を行った。

3) 不確実性評価方法調査と後悔値最小化法による多段階意思決定モデルの開発

これまで用いられてきた不確実下の意思決定評価は、理論的にもっとも一貫性のある期待効用の最大化に着目している。これに対し繰り返しのない意思決定問題では、むしろ結果論に着目する最大後悔値最小化が現実的とも考えられる。しかしこの方法は蓋然性を考慮しないため極端なシナリオで解が決ま

る問題がある。そこで本研究では、統合評価モデルMARIAを拡張して後悔値を一般化距離で定式化し、期待効用最大化と比較することを目的とする。

4) 地域と部門の部分的参加による影響評価

環境政策の導入は、必ずしも世界一律かつ全産業に均等に課されるとは限らない。参加する地域が限定的であったり、特定の部門が排出権取引に参加しない可能性がある。ここではこのような制度の不確実性を多地域多部門モデルTHERESIAで評価する。

5) 気候感度不確実性を考慮したMARIAの多段階意思決定モデルによる評価

気候感度の不確実性の幅が観測データの蓄積により削減可能な場合、どのような行動をとるべきか、またそのような科学的蓄積にどれほどの経済的価値があるかを、気候モデル研究と協働することで評価することを目的とする。

6) 世界最適行動としての2°C目標の意味と前提条件変化に対する行動変化のモデル化

2°C目標への合意が現在の世界の何らかの意味での最適な行動の結果であるとした場合、無条件な最優先遵守目標でないとすると想定条件の変化によりどのような行動変化がとられるべきなのかの評価を行う。すなわち、価値判断に一貫性のもとで気候感度やCCS導入量に制約が加わった場合、排出経路や大気温制約がどのように変化するかの評価が可能となる。

[キーワード]

地球温暖化対策、不確実性、多段階意思決定、エネルギー技術戦略、多部門多主体モデル

1. はじめに

温暖化対策を進めるうえで、世界的かつ長期的な影響の定量的評価は中心的な課題であるもの、要因が複雑に絡み合うため評価は容易ではない。エネルギー経済モデルおよびこの拡張である地球温暖化統合評価モデルは、この唯一のツールとして開発が進められてきた。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)でも、新排出シナリオや第4次評価報告書、さらに第5次評価報告書で数多くのモデルが定量評価に貢献している。現在までのところ、近年のPindyck¹⁾やRosen²⁾の批判に見られるよう割引率の設定など課題を抱えつつも、温暖化対策オプションの評価と戦略策定に当たってはこのエネルギー経済モデルに基礎を置く統合評価モデルが定量評価を可能とする唯一のツールと言っても良い。

しかしながら、現在までの統合評価モデルは温暖化対策という長期的かつ不確実性の高い意思決定温暖化問題においては、なお十分な方法論を提供していない。従来のモデル開発においては多くのモデルが確定的なものであり、パラメータを様々に変えることで不確実性を表現してきた。しかしながらこのアプローチには現実の意思決定プロセスに適用するにはいくつかの限界がある。例えば既存の不確実性評価は主に将来の期待値に基づいてきたが、これは繰り返しのない現実の決定問題におけるリスク回避の志向が反映され難いなど、理論と現実行動との乖離が指摘されている。期待値に代わる接近法として最大後悔値最小化法が知られているものの、これは事象生起の蓋然性が無視され極端なケース設定で評価が下される問題がある。

このように、不確実性は地球環境問題においてきわめて重要である反面まだ研究が不十分な状況であり、モデルと現実の決定基準との間のギャップが指摘される一因となっている。

他方、現実の問題の大規模性を考えると、単一のモデルですべてを包括することには「実物大の地図の作成」という不可能かつ無意味な命題となる。いずれのモデルも何らかの断面に着目するが、できる

限り前提条件をそろえた上で特性の異なるモデルが共通した知見を導けばそれらは強い知見となろうし、結果が広がればそれらは選択の広さあるいは不確実性の幅を表すものとなろう。このような点から、近年では世界でMIPSと呼ばれるモデル比較プロジェクトが普及しつつある³⁾⁴⁾⁵⁾。しかしこれまで統合評価モデルは前提条件を一致させるのが困難であり相互比較による検討は今後の課題であった。本課題では、プロジェクトの中で4つのモデルが同一のシナリオの設定のもとでシミュレーションを行い、結果の比較を行った。

さらに、上記のサブテーマ間の協同作業に加え、本サブテーマ独自の課題として、不確実性をモデル上で扱うための様々な拡張を行った。

2. 研究開発目的

本テーマS10-4は、戦略研究プロジェクトS10全体の中で、エネルギー経済モデル方法論において不確実性に対処する方法論の既存研究調査を行うとともに新たな方法をモデル開発に導入してエネルギー経済モデルの開発を行い、リスク管理の基礎的な評価手段を提供することを目的とする。

1) マルチモデルによるモデル比較

まず構成の異なる4モデルが共通のシナリオと温暖化委政策の下にシミュレーションを行い、共通の知見と結果の差異を比較するマルチモデルアプローチをとる。ここで各サブテーマは①共通したシナリオのもとでシミュレーション結果を提供し、マルチモデルにより現在得られている科学的知識にもとづく共通した知見と結果の幅の解釈、さらに②各モデルの特徴による独自の知見の提供、の2側面の情報を提供する。本テーマS10-4は、このように4つのサブテーマが連携する。本テーマ全体の具体的課題をまず示す。

(1) 不確実下の意思決定方法に着目したエネルギー経済モデルの開発動向調査と拡張

ここでは将来の技術開発、温暖化影響、対策、および行動の不確実性に対する最適な意思決定行動を導くための方法論とモデル開発を行う。

(2) 複数主体の相互作用を考慮したエネルギー経済モデルの開発動向調査と評価

ここでは国際交渉など複数主体の意思決定行動の帰結を評価するモデル開発を行う。これは制度設計や行動戦略に関する指針を提供する。

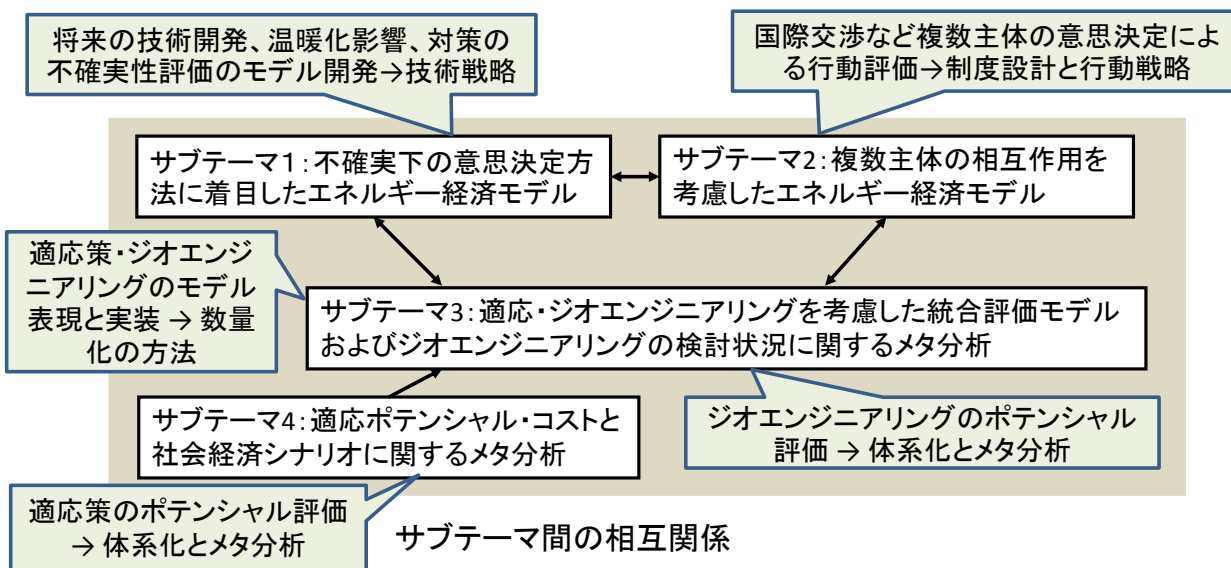
(3) 適応・ジオエンジニアリングを考慮した統合評価モデルの拡張と応用

ここでは適応策やジオエンジニアリングなど対策オプションとしての特性がまだ十分に知られていない課題に関する調査とモデル上での取り扱い方法の提供を目的とする。

(4) 温暖化対策のための適応ポテンシャル・コスト見積もりおよび社会経済シナリオに関するメタ分析と統合評価モデルによる評価

ここでは適応策についてそのポテンシャルとコスト、取り扱いに関するメタ分析を行う。

これら4サブテーマは図(1)-1のように相互に接続される。



図(1)-1 S10-4 4サブテーマ間の相互連携

2) リスクインベントリ表の作成

S10-4はS10のなかで対策オプションに着目するので、S10の影響評価にならない、対策オプション導入時のリスクインベントリとフローを視覚化する。上記2課題は、このS10-4-(1)の中で論じられるが、あくまでS10-4の共通課題であることを強調しておきたい。

本サブテーマS10-4-(1)は、不確実性評価に対して様々な角度から接近するために、以下のようにモデル方法の拡張を行う。

3) 不確実性評価方法調査と後悔値最小化法による多段階意思決定モデルの開発

これまで用いられてきた不確実下の意思決定評価は、理論的にもっとも一貫性のある期待効用の最大化に着目している。これに対し繰り返しのない意思決定問題では、むしろ結果論に着目する最大後悔値最小化が現実的とも考えられる。しかしこの方法は蓋然性を考慮しないため極端なシナリオで解が決まる問題がある。そこで本研究では、統合評価モデルMARIAを拡張して後悔値を一般化距離で定式化し、期待効用最大化と比較することを目的とする。

4) 地域と部門の部分的参加による影響評価

環境政策の導入は、必ずしも世界一律かつ全産業に均等に課されるとは限らない。参加する地域が限定的であったり、特定の部門が排出権取引に参加しない可能性がある。ここではこのような制度の不確実性を多地域多部門モデルTHERESIAで評価する。

5) 気候感度不確実性を考慮したMARIAの多段階意思決定モデルによる評価

気候感度の不確実性の幅が観測データの蓄積により削減可能な場合、どのような行動をとるべきか、またそのような科学的蓄積にどれほどの経済的価値があるかを、気候モデル研究と協働することで評価することを目的とする。

6) 世界最適行動としての2℃目標の意味と前提条件変化に対する行動変化のモデル化

2℃目標への合意が現在の世界の何らかの意味での最適な行動の結果であるとした場合、無条件な最優先遵守目標でないとすると想定条件の変化によりどのような行動変化がとられるべきなのかの評価を行う。すなわち、価値判断に一貫性があるとして行動目標に柔軟性を導入すると、例えば気候感度やCCS導入量に制約が加わった場合、排出経路や大気温制約がどのように変化するかを見る。

3. 研究開発方法

(1) 不確実下の意思決定方法に着目したエネルギー経済モデルの開発動向調査と拡張

1) SSP-RCP-戦略ケースに対するマルチモデルによる比較

地球規模の環境問題対策の定量的な評価方法としては、まだ確立した方法がないため、各研究者が独自の方法で開発した何らかのモデルに依存するほかはない。これらのモデルは、基本的にエネルギー技術評価ブロック、経済活動評価ブロックに加え、気候モデルブロック、土地利用評価ブロックなど複数分野の相互影響を定量的に扱う体系を持つ。しかし対象が大規模なため、シミュレーション計算のためにも結果の意味の抽出と理解のためにも、何らかの簡略化が不可欠である。例えば、経済活動をマクロ経済活動に一本化したり、通時的な最適化を時間断面ごとの最適化の繰り返し(逐次最適化)による表現がとられる。地球の空間分割、社会経済構造、将来の技術コスト、普及の上限、政策的問題などについても何らかの縮約と仮定が必要である。このため、単一のモデル評価ではなく複数の将来シナリオに対して複数のモデル評価により共通する知見と評価の幅に着目する接近法が広くとられるようになってきた。IPCC-SRES(2000)⁶⁾からIPCC-AR5⁷⁾はいずれも、この接近法をとる。また前述のEMF⁴⁾、AMPERE⁵⁾をはじめ数々のプロジェクトが進行中であり、今後の政策評価に不確実幅を含む知見を与えることが期待されている。本課題では以下の4モデルが評価に参加した。

i) MARIA-14モデル (東京理科大学)

構成: 長期通時的非線形最適化型モデル、エネルギー、経済、土地利用、温暖化影響をすべて一体で解く。経済活動はマクロ部門に集約。最終エネルギーサービス需要は一人当たり所得の関数として内生化され、割引効用現在価値の最大化を行う。

ii) EMEDA-MERモデル (上智大学)

構成: 多部門多地域応用一般均衡モデル。各年の均衡資本蓄積を逐次的に導出する動学モデル。

特徴: EMEDA (Evaluation Model for Environmental Damage and Adaption) は世界経済を対象とした応用一般均衡モデルであり、温暖化ガス排出とその気候への影響、気候変動による被害、および温暖化ガス排出削減費用も組み込まれている。世界を複数地域に分割し、また、一つの地域ごとに産業もまた分割される。複数主体による協力解のほか、利己的に決定するゲーム論的解の計算を実行可能である。今回、市場為替レートでGDPを表現するEMEDA-MERモデルを用いる。

iii) GRAPEモデル (エネルギー総合工学研究所)

構成: GRAPE (Global Relationship to Protect the Environment) モデルは、エネルギー・経済・土地利用モジュールを結合したモデルと気候変動モジュールのソフトリンクを持つ、特に気候モジュールは、炭素およびエネルギーの海洋移流・拡散、濃度および温度フィードバックを含む陸域炭素収支、太陽放射等を考慮したエネルギーバランス等を含む。世界を15地域に分割する。

iv) AIMモデル (国立環境研究所)

構成: AIM/CGEは世界全体を17地域、43部門に区分した応用一般均衡モデルである。農業部門、土地利用も詳細に記述する逐次動学型モデルである。

次いで、将来シナリオの共通設定を述べる。気候変動研究では、将来評価のための共通プラットフォームとしてSSP-RCPシナリオが提案されているが、本テーマではこのうちSSP1 (持続可能社会)、SSP2 (中庸型社会)、SSP3 (分断型社会) を将来の社会像として想定した。このもとで1. 成り行きケース (BAU)、2. RCP6.0、3. RCP4.5、4. RCP2.6の放射強制力制約ケースの合計3 × 4ケースに対して計算を行う。さ

らにその後ICA-RUS独自の戦略ケースとしてさらに異なるケースを想定し、この上でケース間、モデル間の比較により共通性の高い知見と相違点を探ることとする。ここで、S10テーマIよりこのSSP3シナリオに対するRCP6.0、RCP4.0、RCP2.6の温暖化進行ケースに対するトウモロコシ、大豆、コメ、冬小麦、春小麦の2100年までの国別平均収率推計値が提供されたので土地利用と食糧需給を持つAIM、GRAPE、MARIAの3モデルはこのデータを共通して用いることとする。地域分割はモデルごとに異なるため、モデル比較に際してはSSPに合わせることにし、結果を表(1)-1のように5地域に統合して分析を行った。

表(1)-1 SSP・RCPシナリオにおける地域区分

地域(略号)	地域の主要国	地域(略号)	地域の主要国
ASIA	中国、インド、そのほかアジア各国	OECD	米国他OECD30か国
LAM	ブラジル他ラテンアメリカ諸国	REF	旧ソ連・東欧(現EU加盟国を除く)
MAF	中東およびアフリカ諸国	WORLD	世界合計

さらにテーマ共通の不確実下の政策策定のために、独自の「戦略ケース」を設定している。これは、①気候感度(CS)は3.6℃を想定、②目標気温上昇(TG)を1.5℃、2℃および2.5℃の3種類を想定するものである。気候感度を3.6とすることにより、2100年での温度目標達成確率は約66%となる。ここで、それぞれの政策ケースは、S10テーマ1からAD-DICE簡易統合評価モデルによって計算された2100年までの累積炭素排出量制約を課すことで計算がなされる。加えて、SSP2においては感度分析のためにTG20_CS36のケースにおける標準想定からの変化として、「再生可能エネルギー低コストあるいは潜在的導入上限の拡大(Lcost)」、「バイオマス利用可能量への制約(Lbio)」、「原子力の不拡大制約(Lnuc)」、「CCS導入の不拡大(Lccs)」の4エネルギーシナリオ、「適応策の最大導入(ADP)」の1適応シナリオおよび「21世紀半ばまで気候感度=3.0を想定していた計画を、実際の気候感度=4.5であったことが判明した場合に、あくまで目標温度上昇を実現しようとする学習シナリオ(CS30-45)」の1不確実シナリオの計6種のバリエーションを設定した。本マルチモデル比較評価計算ケースを表(1)-2に示す。結果はきわめて多岐にわたるため、ここではCO2排出、GDP損失、一次エネルギー供給、穀物生産に関する結果のみ示す。それ以外の項目は付録に示す。

2) 緩和策リスクインベントリ表とフロー図の作成

IPCC-AR5報告書では、大気中の温室効果ガス濃度の安定化を図るためには、エネルギーの有効使用、そしてエネルギー生産、交通運輸、建築、工業、土地利用及び人間居住など各分野での更なる排出削減が必要とすると指摘し、技術措置や行動変化などを含めた様々な統治レベルや経済セクターで取り得る緩和策選択肢を提供した。ここで、これらのオプションの相互影響関係のとりまとめを影響評価テーマ(S10-1~3)に倣い、表及びフローチャートで行うこととした。

表(1)-2 マルチモデルシミュレーションケースのまとめ

		SSP-1				SSP-2				SSP-3			
		MARIA	EMEDA	GRAPE	AIM	MARIA	EMEDA	GRAPE	AIM	MARIA	EMEDA	GRAPE	AIM
分析ケース	BAU	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	RCP6.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	RCP4.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	RCP2.6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
戦略ケース	TG25_CS36	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	TG20_CS36	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	TG15_CS36	○	×	○	○	×	×	○	○	×	×	○	×
TG20_CS36	LowCost					○		○					
	LowBiomass					○		○					
	LowNuclear					○		○					
	LowCCS					○		○					
	Adaptation					○							
	CS30-CS45					△		○					

(*1) tg 以下の数値は目標気温×10、 cs 以下の数値は想定された気候感度×10を表す

(*2) ×: 実行可能解を得られない、あるいは計算が異常終了する場合

(*3) △: 目標温度上昇を完全には達成できなかったケース

3) 不確実性評価方法調査と後悔値最小化法による多段階意思決定モデルの開発

まず不確実性に着目した地球温暖化のモデル評価の動向を調査した。例えばMessner et.al. (1996)⁸⁾はエネルギー技術経済最適化において発電技術の将来の資本コストの不確実性に着目した。Nordhaus and Popp (1997)⁸⁾は生産額に対する温室効果ガス排出の比率と二酸化炭素排出削減率から排出削減コストに関して不確実性を設定した。二酸化炭素排出削減技術のコストが研究開発投資に依存するとするモデルでの分析例としてBaker and Adu-Bonnah (2008)¹⁰⁾が将来の削減コストについて三ケースを想定し最適な研究開発投資パスを計算した。Böhringer and Rutherford (2007)¹¹⁾は、新技術のコストが従来技術と競争的になる時期の不確実性に着目し、革新技术が経済的に利用可能となる時期として6ケースを想定して最適な二酸化炭素削減と研究開発投資の推移を計算した。準的なリアルオプション分析はPindyckによって環境政策の経済モデルに導入されている。このように、既存の研究も地球温暖化対策の不確実性に着目はしているものの、基本的に期待効用の最大化に着目している。

本研究では、まず期待効用最大化に代わる新しい枠組みとしての後悔値最小化を定式化する。次いで、様々な不確実性を設定し、期待効用最大化と後悔値最小化でどのように技術導入政策が変化するかを評価する。後悔値最小化戦略の定式化は以下である。まず将来の不確実性シナリオがSCN、システムの制御変数を $X(t)$ で表されるとする。このシナリオが既知となった際の最適な意思決定とその時の評価関数を $X^*(t; SCN)$ と $f(X^*(t; SCN))$ で表すものとする。ここで将来シナリオSCNを想定した意思決定を行ったにもかかわらず実際に起こった状態が scn' であったとすると最大後悔値は次のように表せる。

$$\text{Maxregret}(SCN) = \max_{scn'} \{f^*(scn') - f^*(SCN), 0\} \quad (1).3.3).1$$

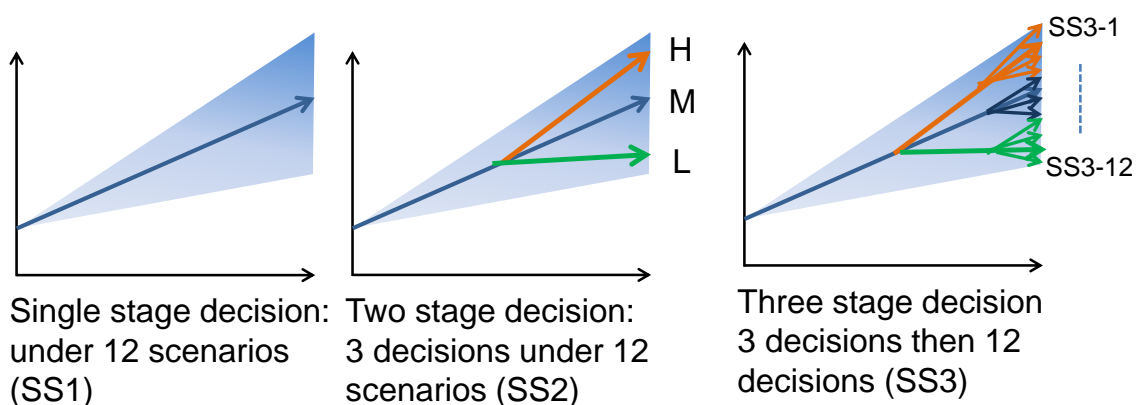
伝統的な最大後悔値最小化意思決定基準は、これを最小化するように $X(t)$ を決定する。しかしこの方法では、最悪の将来想定シナリオのみで行動が決まってしまう、その蓋然性については無視されるという問題点がある。そこで、本研究では、後悔値を

$$\text{Regret}(X; scn') = f^*(scn') - f^*(scn' | X) = D_UP(X; scn') - D_DN(X; scn') \quad (1).3.3).2$$

で与え、最適行動を

$$\min_X \left\{ \sum_{scn'} D_{-DN}(X; scn')^\theta \right\}^{1/\theta} \quad (1.3.3).3$$

で与えた。これは後悔値をミンコフスキーの一般化距離で表現したものであり、 $\theta \rightarrow \infty$ で従来型の最大後悔値最小化法に収束する。本研究ではさらにここに多段階意思決定法を導入し、ある時間がたつと次第に不確実性が解消される定式化を行った。ここでは図(1)-2のような3種類の意思決定基準を与えている。



図(1)-2 単一段階、2段階、および3段階の意思決定

ここでは、温暖化による経済損失がNordhausによる設定値の半分であるシナリオ1からその15倍の極端なケースまで12の不確実性シナリオを想定し、これにより原子力、炭素回収隔離(CCS)、バイオマス技術の導入政策がどのように変化するかを見た。

4) THERESIAモデルによる一国のエネルギー・環境政策の自国と世界に及ぼす影響分析

環境政策の導入は、必ずしも世界一律かつ全産業に均等に課されるとは限らない。現実には、参加する地域が限定的であったり、特定の部門が排出権取引に参加したり逆に制約を免除される可能性がある。このような緩和策政策実施の不確実性評価には、多地域・多部門のエネルギー経済モデルが必要となる。ここでは、担当者により開発が続けられてきたTHERESIAモデル¹²⁾を拡張して国間のエネルギー政策が時刻及び他国に及ぼす影響可能性や、排出量制約に参加する国や部門が部分的である場合の影響評価を行った。

5) 気候感度不確実性を考慮したMARIAの多段階意思決定モデルによる評価

気候感度の不確実性は温暖化政策を実施する上での大きな障害となっていることは周知であり、例えば2100年2℃制約目標達成のために必要な温暖化ガスの削減経路は気候感度により大きく変化する。他方、IPCC-AR5では気候感度の「推奨値」は出されておらず今後も気候感度が確定するとは見込まれていない。しかし、今後の観測データの蓄積により不確実性も次第に減少させることは期待できよう。本課題の成果の一つに、塩竈ら(H. Shiogama et.al. 2015)¹³⁾は15のGCMのシミュレーションから、観測データの蓄積により将来の大気温度の上昇をどの程度正確に再現できるかという計算実験を行った。この結果、温暖化ガス排出経路を変化させても2050年付近まで観測データを蓄積させれば、21世紀末の温度上昇を7割の確率で予測できること、また不確実性の完全な解消はできないことを導いた。

本研究では、先の(1).3.2)に示したMARIAの逐次意思決定の枠組みを用いてこの気候感度の不確実性のもとでの多段階意思決定戦略評価を行った。

ここで、3通りの意思決定プロセスの比較評価を行う。第一は情報により不確実性が解消されないとして意思決定を初期の1回のみ行う単一意思決定である。第二は上記の多段階意思決定(Act Then Learn:ATL)である。第三は事前に完全情報を得ているとする決定である(Learn Then Act:LTA)。不確実性によって行動を変えられないとする。LTAの結果を他の2つの意思決定方法と比較することで情報の獲得の価値を計ることができる。

6) 世界最適行動としての2°C目標の意味と前提条件変化に対する行動変化のモデル化

2°C目標に世界が合意し排出パスが厳格に守られたとしても、そこには大きな不確実性が残る。もこの不確実性のゆえに、排出管理が遵守されても2°C目標が達成できないことが分かった場合にどのような行動をとるべきかは大きな課題である。すなわち、2°C目標を無条件に受け入れるか、あるいは条件付で受け入れるかにより、不確実性への対処が大きく変わる。もしこの目標を無条件に守るべきものであるなら、どのような不確実性に対しても2°Cを達成するようコストを支払わねばならない。しかし条件付きであるなら、2°C目標が2.2°C目標に緩和されることも当然認められることになる。

実際、モデル開発の上では、DICE型経済損失関数では、2°C目標戦略を最適解とする損失パラメータを与えようとするのは困難であったことが知られており、2013年に公表されたDICE-2013Rでは、Sternの設定(0.1%/年の割引率とCRRA効用関数での弾力性 $\gamma=1$)、温暖化ガス排出抑制のパラメータ調整の組み合わせで2°C目標に近い解を最適解として導いていた。しかしこれまでの統合評価モデル研究では、極めて高い温度上昇による経済損失を仮定しない限り、2°C目標が最適解として選択されるのは困難であった。言い換えれば、「2°C目標を目指す行動とは、何を最適化しようとする行動なのか?」、あるいは、「どのような合理的基準に基づけば、2°C目標が最適解となるのか?」という問題にはこれまで考慮がされてこなかったといえる。本研究では温暖化世界を忌避するという行動を、これまでのような経済損失ではなく効用の温暖化による低下を導入することで表現する。そのうえで、前提条件の変化がもたらす一貫性ある行動変化を導くこととした。

まず、効用関数を次のように拡張する。

$$U(C, T) = u(C) / \{1 + \delta(T)\}, \quad u(C) = L \frac{(C/L)^{1-\gamma}}{1-\gamma} \quad (1)-1$$

$$\delta(T) = \phi \left(\frac{T}{T^*} \right)^\theta \quad \text{or} \quad \delta(T) = \phi \left(\frac{T - T_0}{T^* - T_0} \right)^\theta$$

Tは気温、T*は基準となる温度上昇値である。T=T*のとき、効用が ϕ だけ減少する。また、 $\theta = 2$, $T_0 = T_{1990}$ を仮定する。この ϕ を、「2°C上昇が最適行動になる」ように求めることとする。この評価関数の拡張により、前提条件が変わった場合にどのような行動が合理的であるかを導く。

4. 結果及び考察

1) SSP-RCP-戦略ケースに対するマルチモデルによる比較

本課題では、表(1)-2のマルチモデルシミュレーションケースのそれぞれのケースに対して、a. GHG排出・削減経路、b. GDP(MERおよびPPP)および消費の損失、c. エネルギー需給、d. 技術オプション、e. 土地利用と食糧需給、f. 産業部門・地域別影響の指標が世界全体および世界5地域に対して与えられる。

結果は多岐にわたるので、ここでは代表的な結果のみ示す。

なお、いずれの指標もモデル間で定義が異なることに注意が必要である。例えば、土地利用変化起源のCO₂、メタンなどの非炭素温暖化ガスを等価CO₂に換算するモデル(GRAPE、AIM)、エネルギー起源、土地利用変化分を初期値に上乗せし放射強制力に換算するモデル(MARIA)、温暖化ガス排出は経済活動からの変換係数により求めるモデル(EMEDA)がある。ここでは比較を容易にするため、AIMの地域別排出量を初期値に揃えている。

温暖化対策ではエネルギー作物や森林などバイオマスを利用する技術が期待されている。さらに、バイオマス燃焼時に発生するCO₂をCCSと組み重ねるBECCSは、大気中の二酸化炭素を削減するオプションに期待があるが食糧需給との競合が問題となる。ここでは、農業と生態系評価(テーマ2)からSSP × RCP × 主要作物(トウモロコシ、コメ、ダイズ、春コムギ、冬コムギ)別の収率変化データを受け取り、土地利用変化と農作物生産、食糧需給を内生的に計算するMARIA、GRAPE、AIMの3モデルが評価を与えた。ただし、いずれもマクロレベルでの実行可能性を見るため簡易化されておりグリッドごとの詳細な気候変動の影響を評価するものではない。

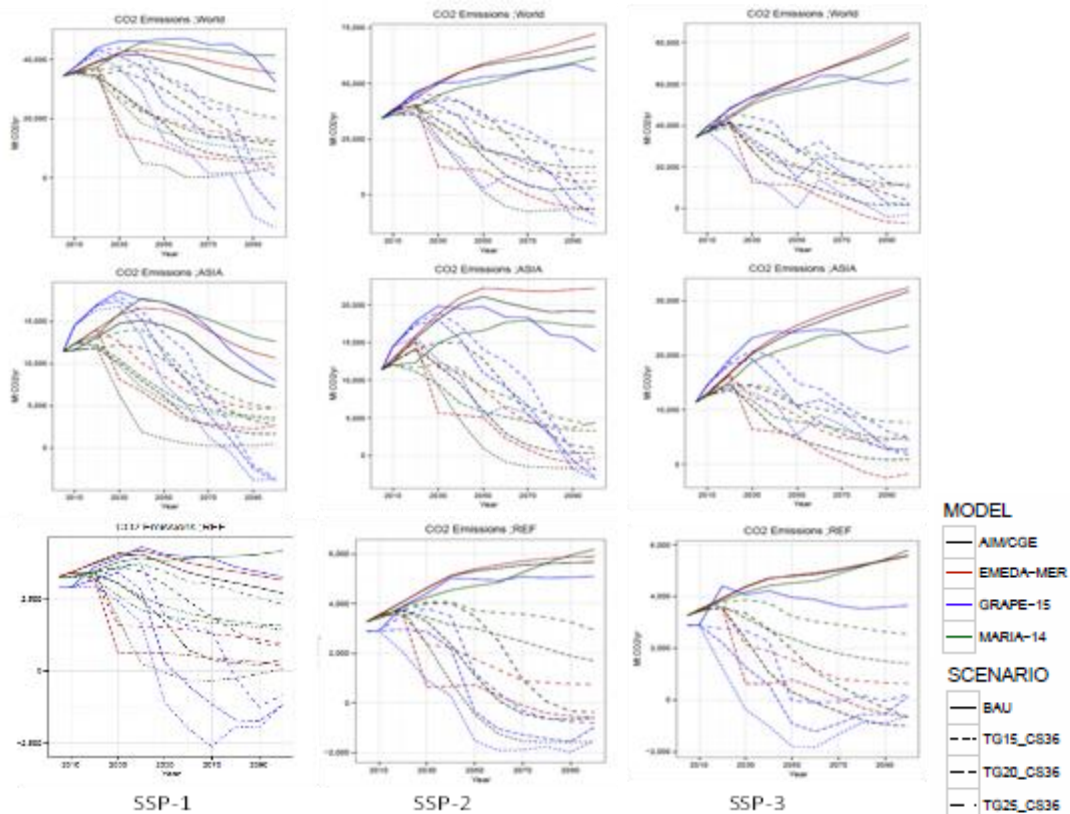
以下では、複数の統合評価モデル(MARIA、EMEDA、GRAPE、AIM)のうち、出力提供した評価指標について、戦略ケースを取り上げ、その概要を示す。ここではいくつかの評価指標について世界合計の他、世界5地域のうちOECDに次ぐ経済規模のASIAと特徴的なREF地域の結果についても合わせ示す。なおOECD地域の推移はほぼ世界合計と同じ形状を示すが、これらは付録に示すこととする。またエネルギー技術ではTG20_CS36ケースを取り上げる。

a. GHG 排出・削減経路

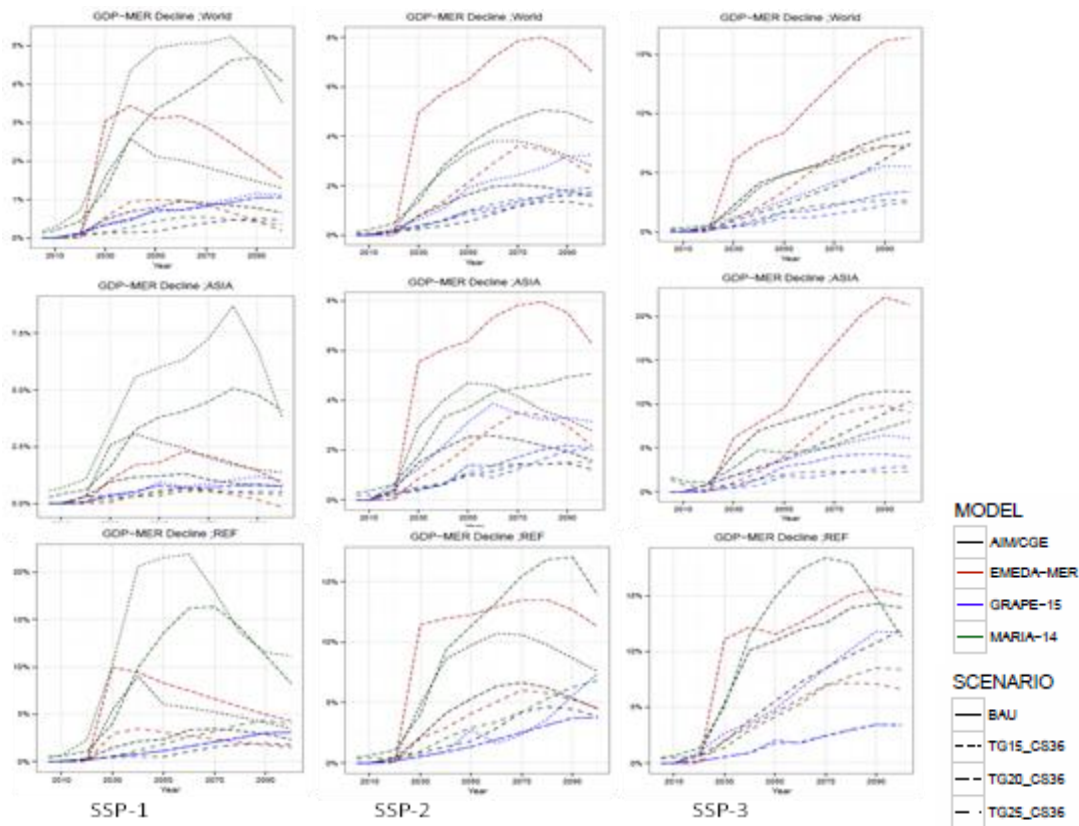
GRAPEは21世紀末に近づくにつれ急激な削減経路を示すのに対し、EMEDAとMARIAは比較的早期の削減経路を示す。GRAPEが21世紀末にBECCSの大量導入による「負の排出」を顕著にしている点は特徴的である。

b. GDP の損失

表(1)-2の結果も示すよう、温暖化目標が厳しくなるにつれ実行可能解を得られないモデルが増える。1.5°C目標はSSP1シナリオからは実現可能性が高く、SSP3からは極めて困難となる。また温暖化制約を課す場合の影響の地域差は大きい。消費は、ほぼGDPと同様の傾向であるが地域差は大きい。SSP1ではGRAPEは1-2%の損失と比較的軽微な範囲にとどまる。EMEDAは地域により消費が増大する場合があります地域差の拡大が示唆される。MARIAはGDPの場合と同様、世界全体でほぼ4-5%程度の損失を示すが途上国地域では損失が大きくなる傾向を示した。なお、ほぼ2°C目標に対応するIPCC-AR5-WG3-Chapter6に示された、430-480ppmCO₂eq. 濃度抑制ケースでの2100年時点のGDP損失幅は2%~12%(中央値5%)であったことと比較すると、今回の4モデルはこれに比べれば狭い幅に収束しているといえる。



図(1)-3 世界及びAISA, REF地域のCO₂排出経路



図(1)-4 世界及びAISA, REF地域のGDP損失率

また、構成の異なるモデル群が一貫性のある結果を与えているかを見るため、世界全体のGDP損失についてメタ分析を行った。エネルギー技術を持つAIM、GRAPE、MARIAについて回帰分析を行った結果、

$$\text{SSP1: GDP-L} = 0.0025 + 0.104\text{FE-L} - 0.09\text{RNW} + 0.690\text{GDP-L}(-1)$$

(5.18) (9.98) (9.45) (19.6)

補正後 $R^2=0.962$

$$\text{SSP2: GDP-L} = 0.0013 + 0.023\text{CO2-L} - 0.00058\text{CCS} - 0.044\text{NUC} - 0.057\text{RNW} + 0.914\text{GDP-L}(-1)$$

(2.41) (9.42) (8.84) (4.43) (8.81) (22.7)

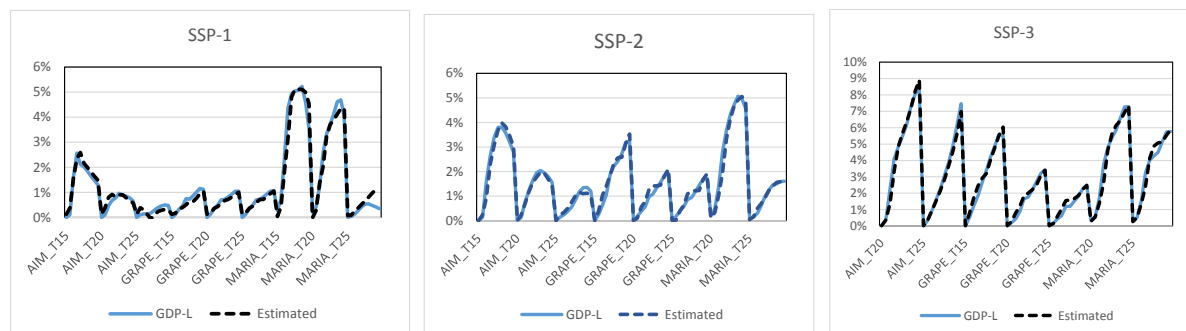
補正後 $R^2=0.973$

$$\text{SSP3: GDP-L} = 0.0004 + 0.025\text{CO2-L} - 0.00067\text{CCS} - 0.027\text{NUC} + 0.950\text{GDP-L}(-1)$$

(0.45) (7.26) (6.20) (2.82) (29.4)

補正後 $R^2=0.979$

を得た。ただし、GDP-L、FE-L は世界合計 GDP 損失率及び最終エネルギー需要低下率を、CCS は炭素回収貯蔵量(Gt-CO2)を、RNW、NUC は非バイオマス再生可能エネルギー(PJ)および原子力(PJ)である。分析の適合度と結果を図(1)-5に示す。このように、本モデル群は多様性と同時に、SSP ごとに一貫性のある結果を与えていることを示唆している。



図(1)-5 世界 GDP 損失率に関するメタ分析

c. 最終エネルギー消費

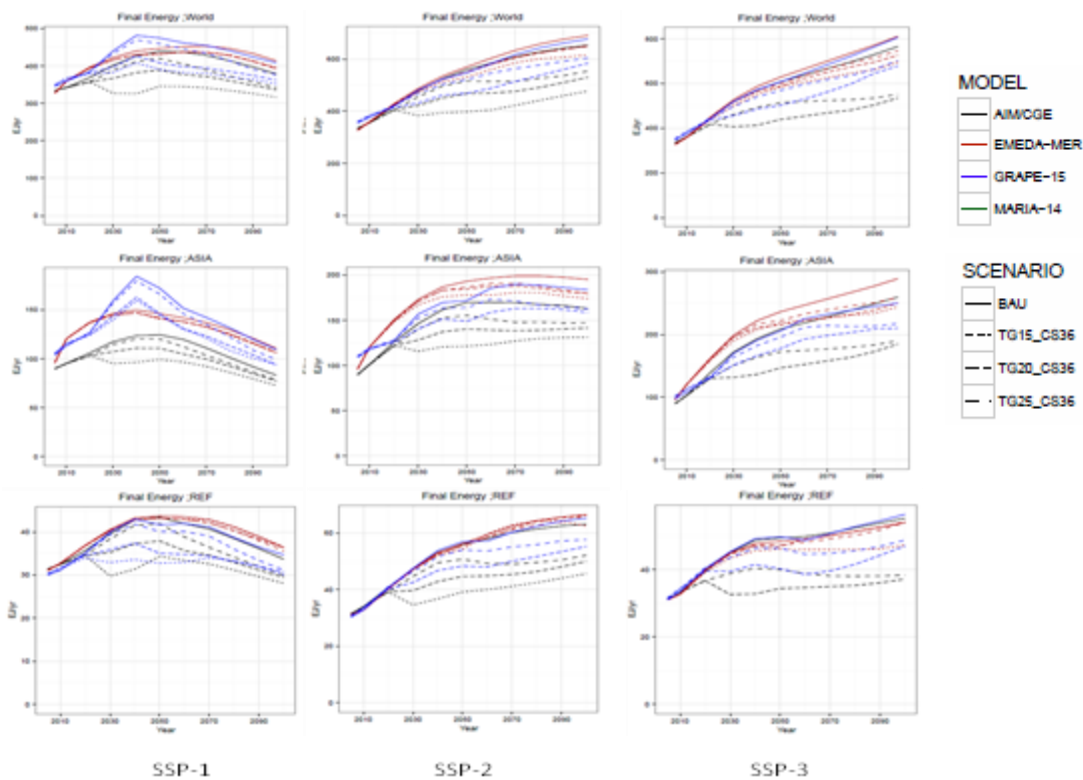
最終消費エネルギーのBAUからの戦略ケースによる変化は、パターンとしては同一の傾向を示す。ただし数値的にはモデル間の差異が明確化する。これはエネルギー消費の柔軟性に関する仮定が悲観的か楽観的かの差と見られる。

d. 一次エネルギー供給の推移

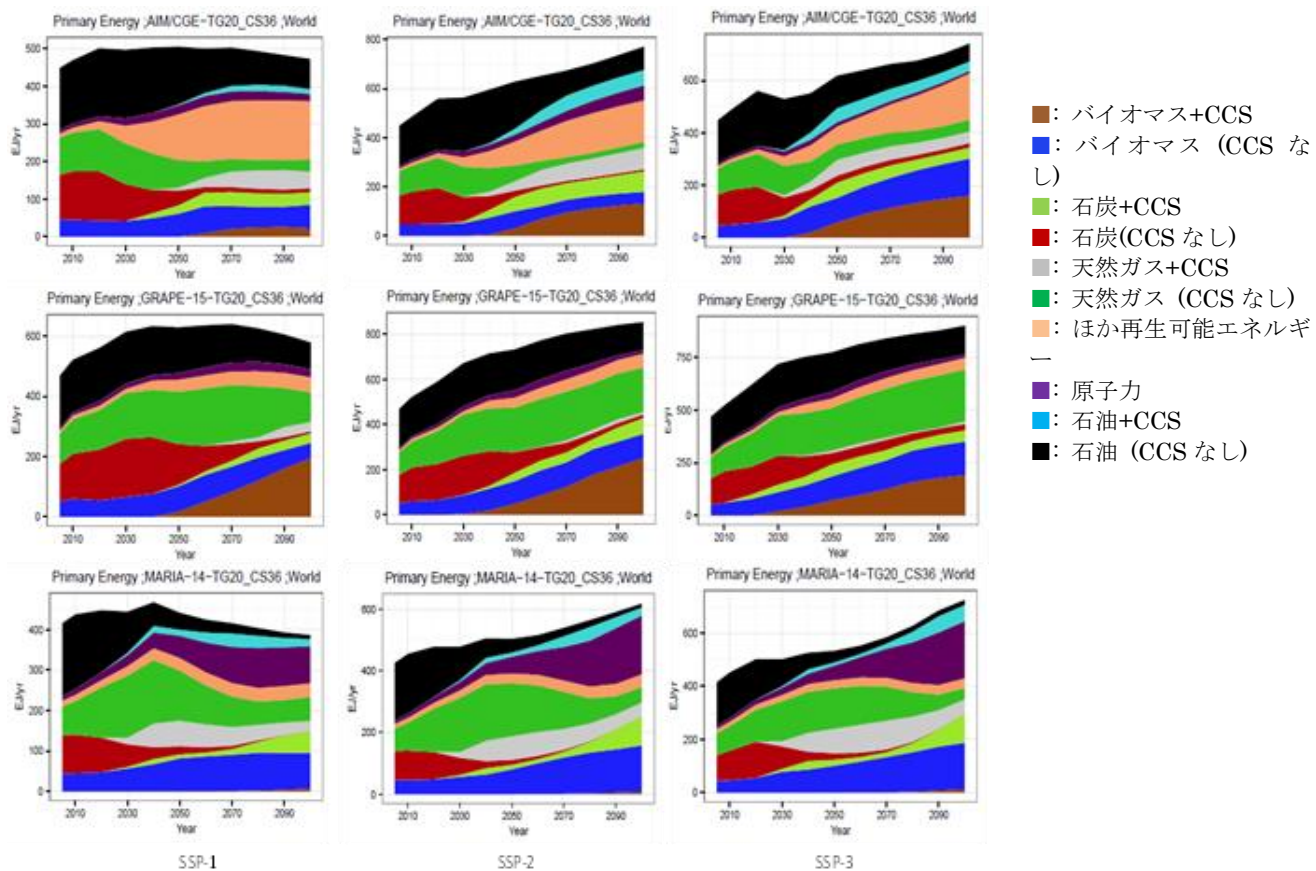
戦略ケースでも、再生可能エネルギー主導か、バイオマス+CCS主導か、原子力主導かモデルの解は広がりを見せている。言い換えれば、同じ気候目標の達成にも、社会にはなお選択の余地が大きいことを示す。同時に、これらの技術はいずれも一長一短があり、決定打になるのではないことも示唆している。

e. エネルギー技術

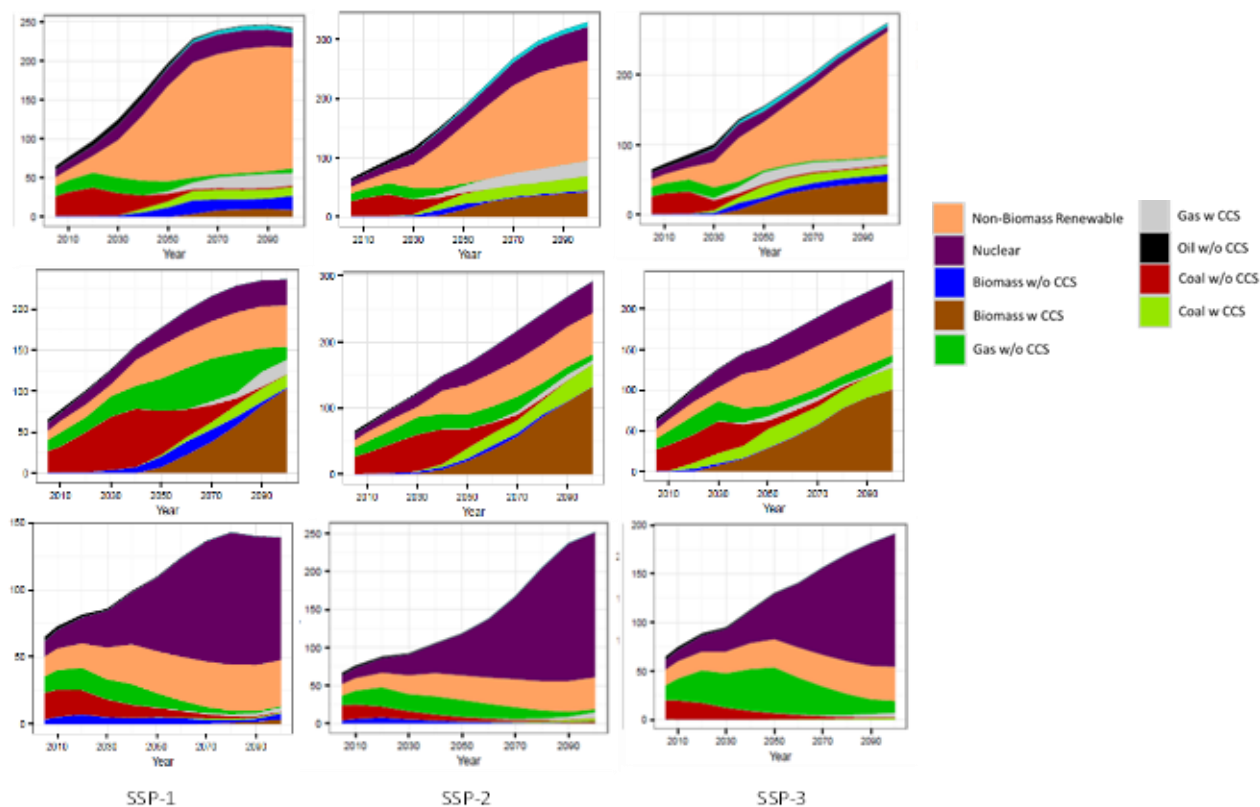
T15S36の場合には、各モデルとも2030年段階から厳しい対策、すなわち、電源の急激な非化石化（原子力、再生可能）、各部門の電化による電力需要増が開始され、GRAPEではさらにBECCSについても2030年から大規模に導入されている。これらは、数値解として得られてはいるものの、現実的にはかなり厳しい条件であるといえる。2100年の段階では、戦略による技術導入の違いはほとんど見られなくなることも、各モデルの結果において明らかになった。



図(1)-6 世界および ASIA, REF 地域の最終エネルギー消費



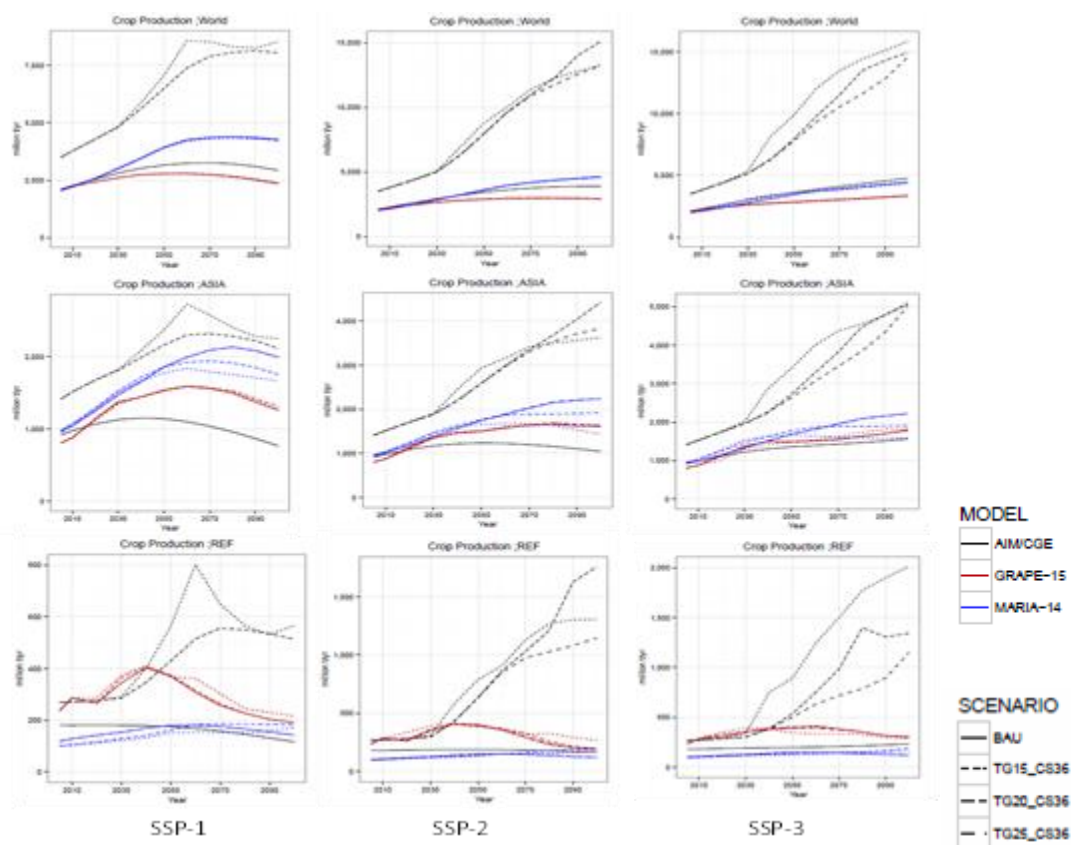
図(1)-7 TG20_CS36ケースにおけるモデル別世界一次エネルギー供給



図(1)-8 TG20_CS36ケースにおけるモデル別世界電源構成(EJ)

f. 土地利用と食料需給

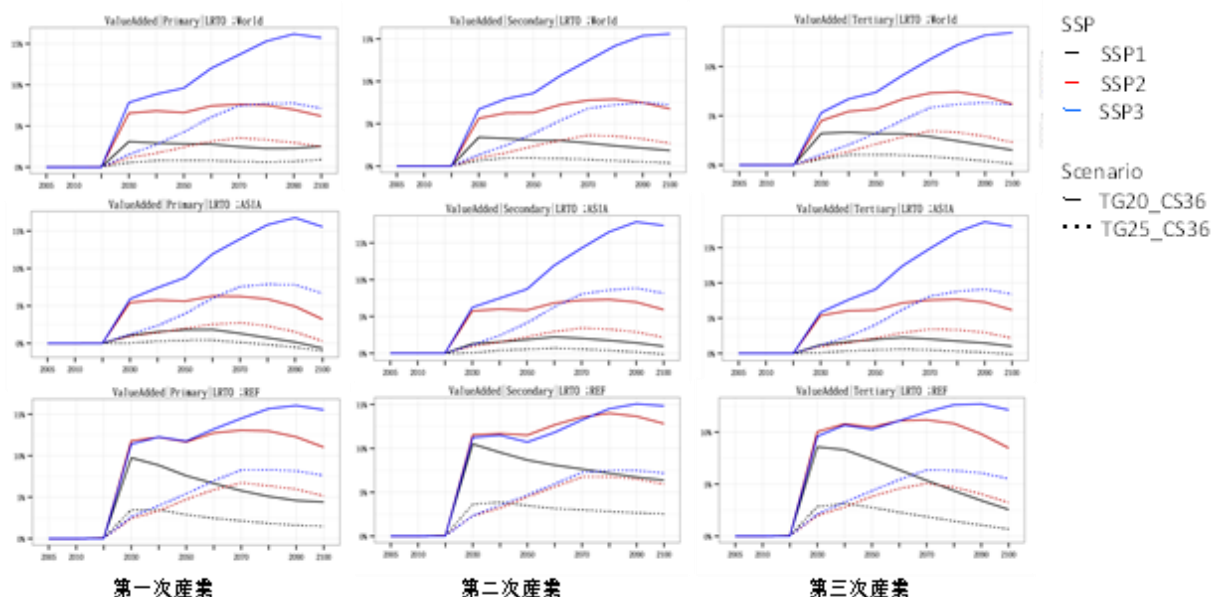
穀物生産量は、戦略ケースにおいても世界全体での穀物生産に温暖化対策の差による変化は小さいものの、地域的には大きな差が現れる。収率では、モデルによる穀物種の扱いの差があるものの、モデルごとに見れば穀物の平均的収率は戦略ケース間であまり大きな差は生じていない。ただし温暖化対策時の地域差は大きい。耕地面積では、モデルによる穀物種の扱いの差があるものの、モデルごとに見れば、AIMを除き耕地面積の推移に世界全体では戦略ケース間であまり大きな差は生じていない。



図(1)-9 世界およびASIA、REFにおける穀物生産の推移

g. 産業部門・地域別影響

戦略選択肢別付加価値・増加率では、T20S36ではSSP2やSSP3で付加価値の大幅な減少が見られ、旧ソ連やアフリカは特に高い減少率となった。T25S36においても、SSP3ではやや高い減少率が見られた。地域別付加価値成長率では、分析ケースと同様、アジアの高成長率の急激な低下、アフリカにおける高成長の持続、先進国の低い成長率への収束が見られた



図(1)-10 世界およびASIA、REFにおける温暖化対策による付加価値減少率(産業種別)

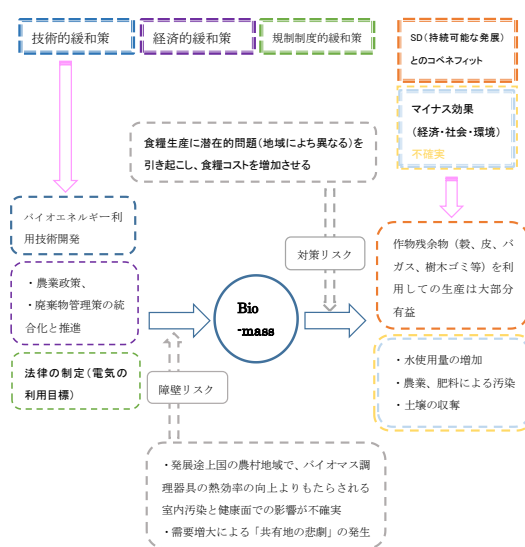
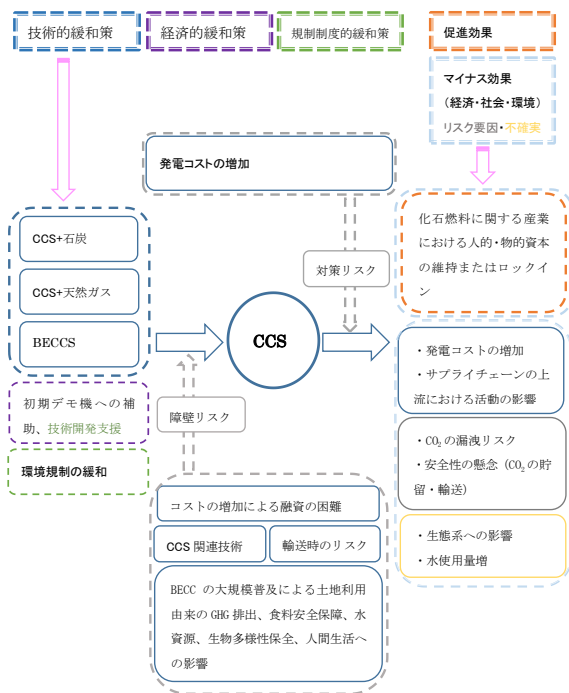
h. 緩和策に導入制約がある場合の対策評価

さらに、緩和策の導入可能量が想定から外れた場合の影響評価を行った。具体的には、SSP2シナリオをもとに、気候感度3.6 (CS3.6: 温度目標達成確率66%) に対して、目標上昇温度上限を2.0°Cのケースにおいて標準想定からの変化として、「再生可能エネルギー低コストあるいは潜在的導入上限の拡大 (Lcost)」、「バイオマス利用可能量への制約 (Lbio)」、「原子力の不拡大制約 (Lnuc)」、「CCS導入の不拡大 (Lccs)」の4エネルギーシナリオ、「適応策の最大導入 (ADP)」の1適応シナリオおよび「21世紀半ばまで気候感度=3.0を想定していた計画を、実際の気候感度=4.5であったことが判明した場合に、あくまで目標温度上昇を実現しようとする学習シナリオ (CS30-45)」の1不確実シナリオの計6種のバリエーションシナリオを設定した。経済影響を表(1)-3に示す。

表(1)-3 緩和策に導入制約を想定した場合の世界 GDP 損失率(%)

地域	年	GRAPE					MARIA				
		制約なし	バイオマスエネルギー制約	CCS制約	再生可能エネルギー促進	原子力制約	制約なし	バイオマスエネルギー制約	CCS制約	再生可能エネルギー促進	原子力制約
		TG20_CS36	TG20_CS36_L bio	TG20_CS36_L CCS	TG20_CS36_L cost	TG20_CS36_L nuc	TG20_CS36	TG20_CS36_L bio	TG20_CS36_L CCS	TG20_CS36_L cost	TG20_CS36_L nuc
World	2030	0.38%	0.38%	0.88%	0.41%	0.38%	1.36%	1.52%	1.37%	1.14%	2.79%
World	2050	0.90%	1.14%	2.39%	0.88%	1.07%	3.66%	5.86%	3.74%	2.98%	7.99%
World	2100	1.92%	2.38%	4.64%	1.82%	2.09%	4.56%	8.71%	4.98%	3.27%	14.25%
ASIA	2030	0.42%	0.38%	1.80%	0.48%	0.42%	1.77%	2.43%	1.77%	1.48%	3.90%
ASIA	2050	1.40%	1.80%	3.53%	1.09%	1.61%	3.70%	5.62%	3.72%	2.47%	8.23%
ASIA	2100	2.07%	2.85%	5.63%	2.08%	2.14%	3.07%	12.36%	5.07%	3.86%	19.83%
LAM	2030	0.44%	0.41%	0.46%	0.49%	0.41%	0.83%	1.20%	0.87%	0.57%	2.87%
LAM	2050	1.04%	1.02%	2.43%	1.06%	1.04%	2.83%	4.51%	2.91%	2.42%	4.63%
LAM	2100	2.29%	2.23%	3.80%	2.26%	2.33%	4.26%	8.27%	4.40%	3.23%	11.21%
MAF	2030	0.75%	0.72%	1.01%	0.81%	0.74%	2.87%	4.13%	2.90%	2.39%	5.57%
MAF	2050	1.40%	1.37%	4.50%	1.41%	1.38%	6.32%	9.99%	6.78%	4.04%	15.63%
MAF	2100	2.91%	3.83%	7.19%	2.96%	3.50%	3.03%	7.50%	6.11%	3.92%	13.97%
OECD	2030	0.27%	0.31%	0.48%	0.29%	0.29%	0.73%	0.83%	0.73%	0.64%	1.13%
OECD	2050	0.56%	0.64%	1.00%	0.53%	0.61%	2.26%	3.01%	2.26%	1.73%	3.96%
OECD	2100	0.92%	1.00%	1.55%	0.89%	0.95%	2.58%	3.85%	2.64%	1.99%	5.71%
REF	2030	0.33%	0.52%	0.51%	0.56%	0.51%	4.01%	8.51%	4.03%	3.54%	10.40%
REF	2050	1.33%	1.49%	3.67%	1.37%	1.30%	11.34%	27.24%	11.69%	8.15%	30.88%
REF	2100	3.77%	3.74%	10.03%	3.76%	3.76%	13.88%	28.70%	16.46%	5.51%	47.63%

経済影響について、GRAPE では、CCS 導入制約の影響が大きく、世界全体では最大で 2.5%程度の変化

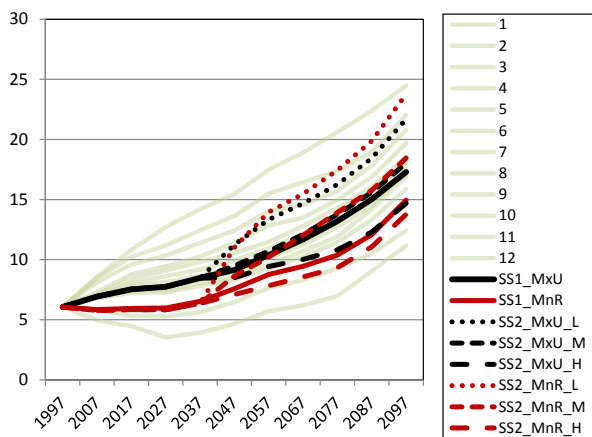


図(1)-11 CCSのイベント波及フロー

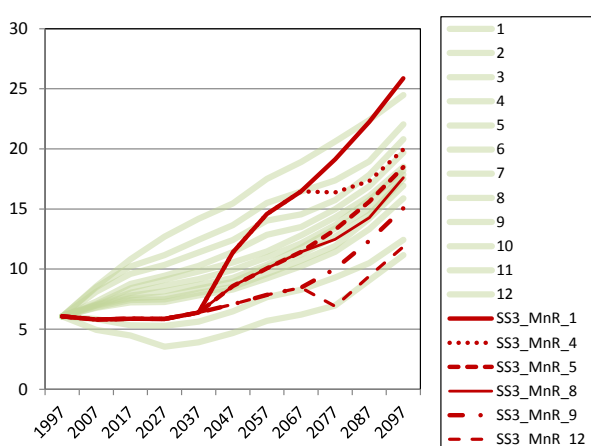
図(1)-12 バイオマスのイベント波及フロー

3) 不確実性評価方法調査と後悔値最小化法による多段階意思決定モデルの開発

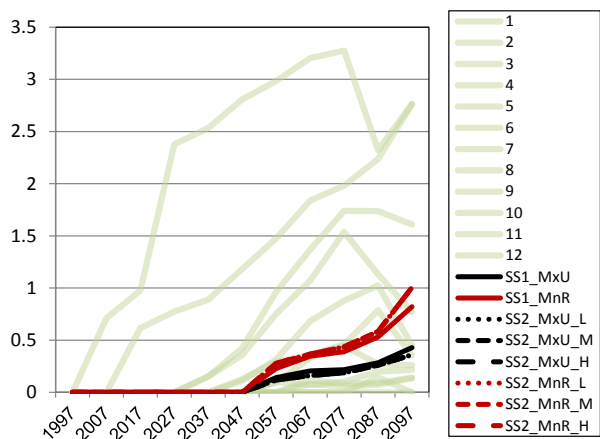
ここでは、不確実性に対する意思決定基準が最適行動に及ぼす影響を見るため、温暖化による経済損失率にNordhausがDICEモデルで与えた経済損失⁹⁾をシナリオ2とし、損失をその1/2とするシナリオ1からその15倍の極端なケースまで12の不確実性シナリオを想定し、これにより原子力、炭素回収隔離(CCS)、バイオマス技術の導入政策がどのように変化するかを見た。結果の一例として炭素排出経路の意思決定策による変化、CCS導入の変化をそれぞれ図(1)-13と図(1)-14に示す。このように後悔値最小化意思決定は、期待効用最大化決定に比べ明らかに低いCO2経路を選択する。またCCS導入も後悔値最小化決定方式がより導入規模が大きいものの、全体としては温暖化損失があまり大きくない場合の想定に近くなることが示された。



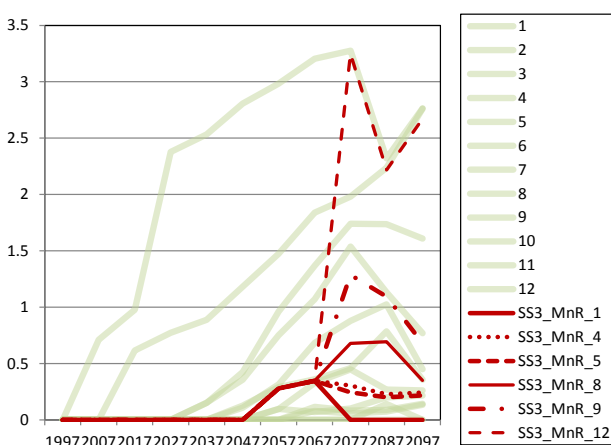
図(1)-13(a) 単一段階意思決定(SS1)と2段階意思決定(SS2)における期待効用最大化(MxU)と後悔値最小化法(MnR)におけるCO2排出経路比較
淡色の1-12は不確実性がない場合の最適経路



図(1)-13(b) 3段階意思決定(SS3)における期待効用最大化(MxU)と後悔値最小化法(MnR)におけるCO2排出経路比較
淡色の1-12は不確実性がない場合の最適経路



図(1)-14(a) 単一段階意思決定(SS1)と2段階意思決定(SS2)における期待効用最大化(MxU)と後悔値最小化法(MnR)におけるCCS導入量経路比較
淡色の1-12は不確実性がない場合の最適経路



図(1)-14(b) 3段階意思決定(SS3)における期待効用最大化(MxU)と後悔値最小化法(MnR)におけるCCS導入量経路比較
淡色の1-12は不確実性がない場合の最適経路

このように、本研究では将来の不確実性への繰り返しのない場合の対応として、従来の期待効用最大化よりも予防保全的な行動に近い後悔値最小化基準を取り入れる方法論を開発しシミュレーションを行った。この結果、後悔値に着目すると期待効用最大化よりも低炭素排出戦略が好まれる傾向を得た。

4) THERESIAモデルによる一国のエネルギー・環境政策の自国と世界に及ぼす影響分析

環境政策の導入は、必ずしも世界一律かつ全産業に均等に課されるとは限らず、参加国が限定的であったり、特定の部門が排出権取引に参加しない場合がありうる。このような緩和策政策実施の不確実性評価には、多地域・多部門のエネルギー経済モデルが必要となる。ここでは、担当者により開発が続けられてきた多地域多部門動的エネルギー経済モデルTHERESIAモデル¹²⁾を拡張して国間のエネルギー政策が時刻及び他国に及ぼす影響可能性や、排出量制約に参加する国や部門が部分的である場合の影響評価を行った。このモデルは世界を15地域に分け、12非エネルギー産業部門と7エネルギー種のフローを明示的に扱うモデルである。

ここでは以下のようなシナリオを設定しシミュレーションを行った。

まずCO2排出削減シナリオとして、ベースライン (BAU) および全地域全産業部門のBAU)からの15%削減(W-85)および30%削減(W-70)のシナリオを設定する。ここでは30%削減のケースのみを示す。次に、部門別部分参加シナリオとして、INS(鉄鋼業)、CPG(化学製品)のみにベースライン (BAU)からの15%削減、30%削減を行うケースを設定する。

地域の部分参加として、表(1)-5の15地域注9地域が参加する場合をシナリオA、さらにMCM、SAM、INDが加わったケースをシナリオBとする。

CO2排出を上流の生産側(排出国)ですべて勘定するか、あるいは生産財に体化させ消費側で勘定するかは今なお議論の続く課題である。排出勘定の方法とし、排出値ベース(A1、B1)、消費ベース(A2、B2)、財ベース(A3、B3)に対して評価を行う。

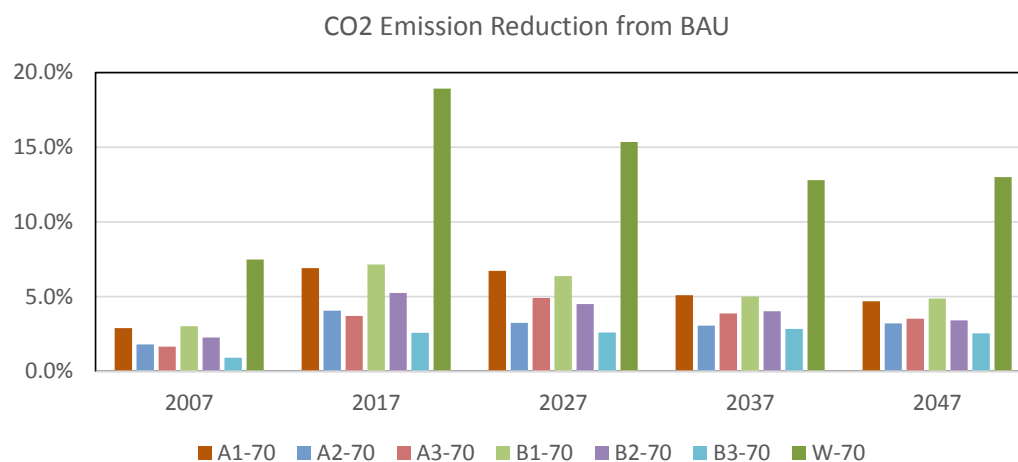
表(1)-5 一部の地域のみがCO2排出削減に参加する場合の部分参加シナリオA

1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0
USA	MCM	BRA	SAM	WEP	EEP	FSU	AFR	JPN	CHN	IND	ASN	TME	ANZ	XAP

1: 排出削減に参加 0: 排出削減に不参加

* シナリオBではシナリオAにMCM(メキシコ)、SAM(南アメリカ)、IND(インド)が加わる。シナリオWでは全世界が参加する。

図(1)-15 には一例として鉄鋼、化学製品に対してのみBAUから30%排出削減を課す場合の世界全体でのCO2削減率である。電力部門や輸送部門に排出規制がかからないが、参加地域の影響の差は明らかである。



図(1)-15 排出削減が部分的地域および特定産業に対してのみBAUから30%削減を課せられる場合の世界全体のCO2排出削減率の変化。A1, B1は生産国排出責任CO2排出量、A2, B2は貿易財に炭素輸出入を体化した場合の調整済み排出量、A3, B3は全財にCO2排出を体化させた消費国責任によるCO2排出

当然ながら参加地域が増えるほど世界全体での削減は増加する。しかしBシナリオとWシナリオの比較からわかるよう、部分参加である限り漏えいは大きな割合で発生することが分かる。また、しばしば指摘される「輸入財に体化された先進国のCO2排出による純排出量の増加」と同時に、「輸出財に体化された先進国のCO2排出による純排出量の削減」が発生して後者が上回るため工業製品生産が先進国に戻って

しまうという経済成長の均等化の観点からは好ましいとは言えない傾向も観測された。

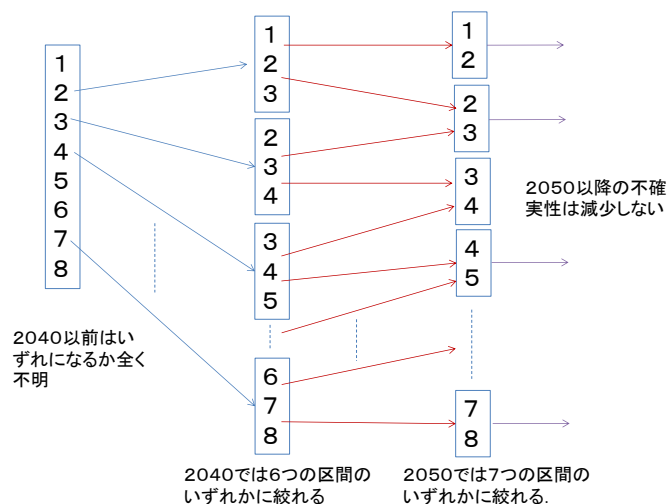
5) 気候感度不確実性を考慮したMARIAの多段階意思決定モデルによる評価

塩竈(2016)は、既存の文献に基づき、気候感度が対数正規分布するものと仮定し、これを表(1)-6のような8つの等確率の区間に分割した。

表(1)-6 気候感度不確実性の分布：下段は区間平均値。8個の区間はいずれも等確率

Scenario	1	2	3	4	5	6	7	8
CS	2.285	2.665	2.935	3.165	3.415	3.695	4.055	4.725

21世紀初頭ではどの区間が真の気候感度であるかは不明であるが、観測データが蓄積されれば、2040年には不確実性を3/8に、さらに2050年には2/8にまで絞られることが塩竈らの研究で得られたので意思決定の時点初期時点、2040年および2050年の3時点とし、2040年時点では8つのうち隣り合う3の区間のいずれかに、2050年時点ではさらにそのなかの隣り合う2つの区間のいずれかが明らかになるものとする。しかしその後は不確実性はほとんど解消しないとする。すなわち、多段階意思決定の枠組みは図(1)-16のようになる。



図(1)-16 多段階意思決定における塩竈による気候感度不確実性の解消プロセスのフロー

このような不確実性の区間が次第に縮小するプロセスは現実の逐次意思決定でもしばしば現れるものと考えられる。この不確実性の区間に重複があるため、同じ結果に至る場合に経路依存性が発生する。そのため不確実区間を排他的に分割する既存のAct Then Learn(ATL)のアルゴリズムはそのままでは適用できない。ここでは、表(1)-7のように気候感度を排他的な区間に分けた6つのモデルの実行により経路依存性を近似した。

表(1)-7 24通りの経路を持つATL問題の6モデルへの分割

	Scenario	1	2	3	4	5	6	7	8
	CS	2.285	2.665	2.935	3.165	3.415	3.695	4.055	4.725
A	Stage-1	{123}	{123}	{123}	{456}	{456}	{456}	{78}	{78}
	Stage-2	{12}	{12}	{3}	{45}	{45}	{6}	{78}	{78}
B	Stage-1	{123}	{123}	{123}	{456}	{456}	{456}	{78}	{78}
	Stage-2	{1}	{23}	{23}	{4}	{56}	{56}	{78}	{78}
C	Stage-1	{1}	{234}	{234}	{234}	{567}	{567}	{567}	{8}
	Stage-2	{1}	{23}	{23}	{4}	{56}	{56}	{7}	{8}
D	Stage-1	{1}	{234}	{234}	{234}	{567}	{567}	{567}	{8}
	Stage-2	{1}	{2}	{34}	{34}	{5}	{67}	{67}	{8}
E	Stage-1	{12}	{12}	{345}	{345}	{345}	{678}	{678}	{8}
	Stage-2	{12}	{12}	{34}	{34}	{5}	{67}	{67}	{8}
F	Stage-1	{12}	{12}	{345}	{345}	{345}	{678}	{678}	{678}
	Stage-2	{12}	{12}	{3}	{45}	{45}	{6}	{78}	{78}

(注) 緑で塗られたセルが図1-2のATL問題の経路に対応する。最終的には1-8のシナリオのいずれかが実現

ここでは、地域をSSP5地域に統合した。また今回は2100年で産業革命前から2.0°C上昇の制約の場合を示す。この場合も、表(1)-7の各モデルの求解には3-4週間を要する。また、以下では図(1)-16のATL逐次意思決定に加え、完全情報が当初から得られていたとする場合のLTA意思決定および不確実性が解消しないとする場合の1段階意思決定の3通りの結果を比較する。ここでは2100年時点の温度上昇を2.0度以下とする制約を与えているが、気候感度の高い2ケースでは実行不可能となった。そこでこの2ケースに対しては2100年2.5°Cに制約を緩和している。

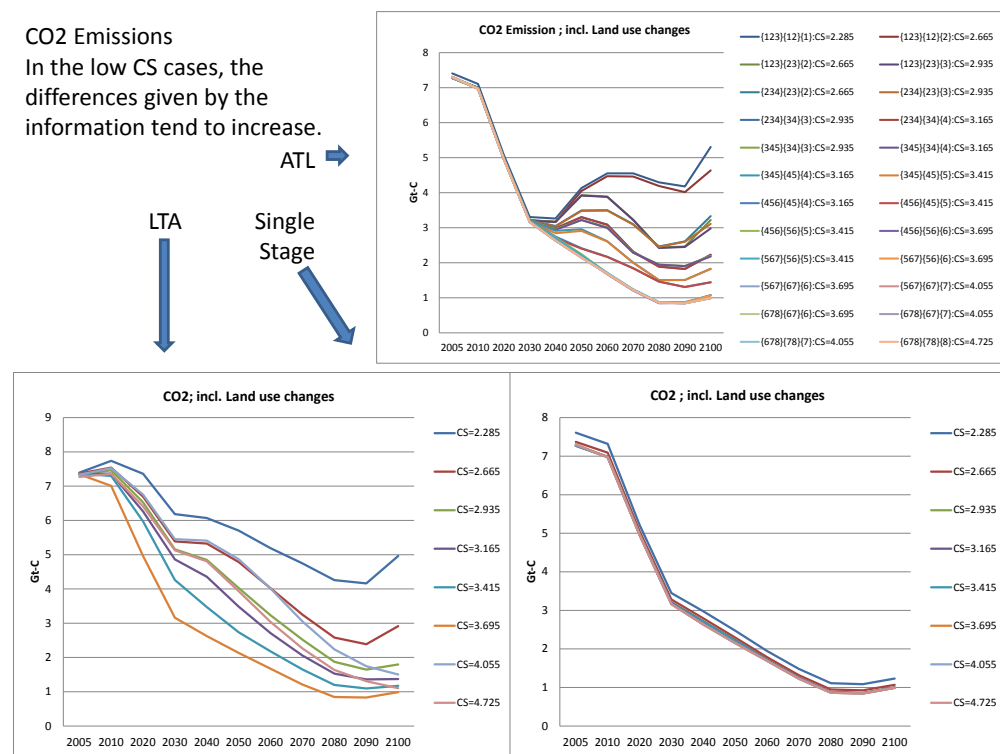
以下、単一意思決定、多段階意思決定(ATL)、事前完全情報意思決定(LTA)3通りの意思決定戦略の比較を示す。結果の例として図(1)-17に世界CO2排出経路の推移を示す。このように、21世紀中の観測情報の有無はCO2排出経路や温暖化に大なる影響を与えることが分かる。そこで、次いでこの情報の価値評価を2000-2100年間のGDP期待値の差で比較する。結果を表(1)-8に示す。この表から、次のことが分かる。

1. 完全情報が得られないとしても、情報を得て多段階意思決定戦略をとることは経済的な意義が認められる、
2. 情報の価値は目標温度が低いほど急激に増加する、
3. 情報の価値は単純に平均すると2°C目標達成時には約2%に達する。これは気候科学研究への世界的な支出を正当化するものである。

6) 世界最適行動としての2°C目標の意味と前提条件変化に対する行動変化のモデル化

なぜ2°C目標が合意されたのかを再考すると、そこには将来の気温上昇に対する何らかの合理的根拠があるべきである。一般に、平均気温の上昇は、経済活動への直接的影響だけでなく様々なリスクをもたらす。完全予見の市場では内部化できないような大きな外部不経済を発生させるとする見方のほか、「そのような世界は気に入らない」という経済的特質以外の価値判断に世界が合意したとも考えられる。そこで、本研究では、温暖化世界を忌避するという行動を、これまでのような経済損失ではなく効用の温暖化による低下を導入することで表現する。そのうえで、前提条件の変化がもたらす一貫性ある行動変化を導くこととした。評価のための効用関数を(1)-1式のように拡張した場合、温度上昇に対する効用損失パラメータ ϕ をDICEモデルの経済損失のDM倍に変化させ、大気平均気温とCO2排出経路及び累積排出量がどのように変化するかを見た。この結果DM=4.5の場合、AD-DICE CS30_TG20における累積排出量とほぼ同じ値を得た。すなわち、社会が2°C世界を好むとするなら、「気候感度3.0°C、エネルギー効率の進展、バイオマス利用やCCS潜在性とコスト、省エネルギーの可能性(GDP1%追加支出により50%の輸送部門省

エネ可能)」の上で、3°C上昇による効用損失をおよそ経済市場損失のほぼ4.5倍と見積もった世界観を、現時点で世界各国が共有した、といえることになる。



図(1)-17 3通りの意思決定戦略による世界合計CO2排出経路の比較

表(1)-8 温度目標と意思決定方法による情報の期待価値評価の比較

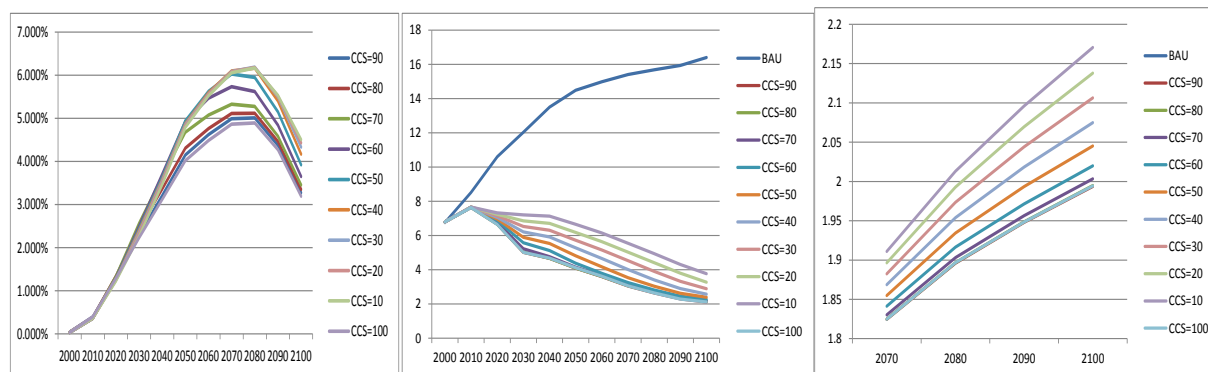
Target	Decision making	Cum.GDP in T\$	Value of information in T\$	per year in G\$	Value of Information in %
2.5 degree	LTA:Full information	14589.2	116.08	1289.8	0.802%
	ATL:Learning information	14581.7	108.53	1205.9	0.750%
	Single Stage	14473.2	0.00	0.0	0.000%
2.0 degree	LTA:Full information	14163.5	528.43	5871.5	3.876%
	ATL:Learning information	13933.2	298.12	3312.4	2.186%
	Single Stage	13635.1	0.00	0.0	0.000%

この想定した条件の変更に対する最適な意思決定の変化を示す。

① CCS 導入量制約の変化に対する GDP 損失、CO2 排出経路および大気温上昇の変化

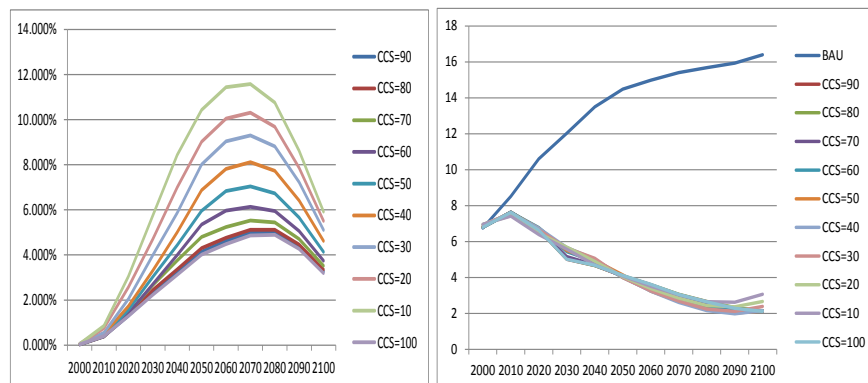
ここではCCS導入量の変化に対して一貫性がありかつ柔軟な行動がとられた場合、2°C目標がどのように変化するかを見る。図(1)-18にGDP損失、CO2排出経路および大気温上昇の変化を示す。CCS制約に合わせてCO2排出も上昇し、大気温度も2.17°Cまで上昇する。しかしGDP損失は6%程度にとどまる。図(1)-19

のように、もし2°C制約を絶対条件とすると、GDP損失は最大で12%近くに増加する。この差が行動の柔軟性の差となる。同様の傾向は、輸送用省エネルギーの可能性でも観測された。



(a) GDP 損失の変化 (b)CO2 排出経路の変化(Gt-C) (c)大気温度の変化(2070-2100)

図(1)-18 CCS導入量制約の変化に対するGDP損失、CO2排出経路および大気温上昇の変化



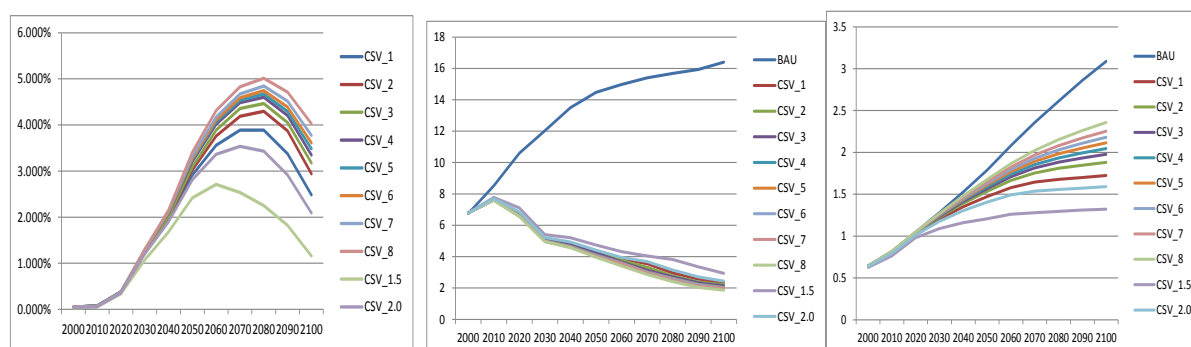
(a) GDP損失の変化 (b)CO2排出経路の変化(Gt-C)

図(1)-19 CCS導入量制約の変化に対するGDP損失、CO2排出経路および大気温上昇の変化：

2°C上昇制約を課した場合

② 気候感度の想定変化に対する GDP 損失、CO2 排出経路および大気温上昇の変化

気候感度の想定変化に対する最適経路の変化を示す。表(1)-6の気候感度等確率区分の中央値を用いると、結果は図(1)-20のようになる。



(a) GDP 損失の変化 (b)CO2 排出経路の変化(Gt-C) (c)大気温度の変化

図(1)-20 気候感度の変化に対するGDP損失、CO2排出経路および大気温上昇の変化

図(1)-20(c)にあるよう、気候感度の変化に対して目標温度は1.3℃から2.4℃まで変化する。(b)に示すよう、CO2排出経路の違いはさほど大きくなく、規準となる想定がほぼそのまま保たれる。この結果、GDP損失は最大でも5%となる。また、重要な知見として、低い気候感度(CSV=1.5℃および2.0℃)においても排出経路はさほど増加せず、結果的に温度上昇は1.3℃および1.6℃にとどまっている点があげられる。想定した効用関数は基準となる想定のもとで2℃目標に達するが、気候感度が低い場合はさらに低い温度上昇を是とする世界観であることが明らかである。

これまで、温暖化政策の策定において、様々な不確実性が大きな障害となってきたことは言うまでもない。ことに、2℃制約そのものは他の様々な制度上の基準と同様、「0か1か」のような絶対的な閾値があるわけではないため、その根拠はあくまで合意の結果である。そのため、前提条件が想定から外れた場合、「どの程度の緩和が適当か」あるいは「絶対的に守るべき目標なのか」というような疑問はどうしてもついて回ることになる。これに対し、本研究では、「仮に世界が2℃制約に合意したとするとそこにはどのような価値判断が背後にあるのか」に着目し、これと一貫した行動規範のもとで前提条件が変わったとすると、それはどのような世界になるか、を導くというこれまでにないやや逆問題的アプローチをとっている。結果は、基準となる2℃目標の価値観と整合的な行動基準の下でどの程度の目標緩和がなされるかと、その場合の経済的損失の変化等を導くものであり、「2℃か否か」ではない新たな基準を導いたものと考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究は、地球環境問題における対策上重要な課題であるリスクマネジメント策定戦略において、従来のエネルギー経済モデル評価では不十分であった不確実性の取り扱いの問題に、方法論とモデル実装の側面から接近し、さらに他のテーマの知見を班資する枠組みを提供することを目指した。多段階意思決定問題において期待値以外の基準がモデル評価に導入された例は、これまで見られない。本研究では、このような不確実性の取り扱いに対して、調査・体系化するとともに、新たなモデル構築の方法論の提供とモデル開発を行った。さらに気候科学の不確実性を気候モデルと協働して評価した。

共通社会経済シナリオSSPと共通温暖化対策ケースRCPに対して比較可能となるようモデルを修正し計算を行い、共通した知見と相違する論点を明らかにした。マルチモデルの比較の結果、世界全体での変化の小ささと、地域ごとの変化の大きさが共通して示され、温暖化対策の負荷分担の差異をどのように吸収するかが明らかとなった。

不確実性については地球環境問題のリスクマネジメントを、①繰り返しのない意思決定問題としての多段階意思決定法、②温暖化対策緩和策実施上の不確実性としての地域と部門の部分的参加の影響評価、③気候モデル研究との協働による不確実下の意思決定のための方法論の拡張、④「仮に世界が2℃制約に合意したとするとそこにはどのような価値判断が背後にあるのか」に着目し、前提条件の変化に対する一貫した規範のもとでの行動目標の変化を評価した。いずれも実データによるモデルで表現した従来にない方法の開発成果である。

(2) 環境政策への貢献

本研究は、温暖化の①温暖化の進行の水準、②温暖化影響、③対策コスト、④革新的技術の可能性、

などの大きな不確実性に対して、S10-1、S10-2、S10-3などとの横断的な情報の統合化により、国際的な場における不確実下のリスクマネジメントと温暖化政策の実装に対し定量的情報とその源、および政策決定のための科学的な裏付けを与える。これにより、温暖化対応政策を実装する際、どれほどの幅の不確実性が存在し、また対策費用の幅がどれほどになるのかの指針を与えた。特に、気候モデルとの協働による不確実性評価では、科学的研究の蓄積とその経済効果の関係の評価は、環境研究の経済的価値を明らかにした初のものである。またもし前提条件に何らかの科学的知見による変化があった場合の対策費用の変化や、温度目標管理の柔軟性の意味を定量的に与えることができるようになった。これにより温暖化政策だけでない社会経済・環境政策の在り方が温暖化影響緩和に大きく影響することは、気候変動政策以外の政策の副次的便益の大きさが重要なことを示すものである。

また、本研究の多地域多部門モデルTHERESIAは、炭素排出規制で以前から提案されている「セクターアプローチ」および「炭素排出の生産段階での勘定」か「消費財への体化」という具体的な政策に対し、炭素漏えいだけでなく参加部門や参加地域が限定的である場合にどのような影響が発生するかを示した。これは排出権取引や国際的な炭素課税政策における「実施上の不確実性とその効果」を事前評価するものであり、実務上も環境経済政策への寄与が大きいと考えられる。

<行政が既に活用した成果>

特記する事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究の成果を本課題終了後に学術論文としてIPCC AR6に向け公表することで、我が国のこの研究分野での貢献を見込む。

6. 国際共同研究等の状況

特記する事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Shunsuke Mori, Takehiko Matsuo, Masashi Ohkura, "MINIMUM REGRET CLIMATE POLICY WITH ACT-THEN-LEARN DECISION - A NEW MODEL FRAMEWORK UNDER LONG-TERM UNCERTAINTIES", *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol.7, No.6, pp.1106-1115, 2013
- 2) 金丹、森 俊介、「中国のエネルギー・環境政策の影響分析 一勤学的多地域多部門統合評価モデルTHERESIAによる」、北東アジア経済研究、第21号、PP. 139-147、2015年8月
- 3) H. Shiogama, D. Stone, S. Emoril, K. Takahashi, S. Mori, A. Maeda, Y. Ishizakil & M. R. Allen, "Predicting future uncertainty constraints on global warming projections", *Scientific Reports*, | 6:18903 | DOI: 10.1038/srep18903, Jan. 11, 2016
- 4) Shunsuke Mori, "A new approach of carbon emission allocation among stakeholders: an expansion

of Multiregional and Multisectoral Dynamic Energy Economic Model THERESIA”, Journal of Economic Structures, Vol.5, No.5, pp.1/22, 2016, DOI 10.1186/s40008-016-0036-9

- 5) 金丹、森 俊介、「東アジア地域の中間財における国際分業の進展」北東アジア経済研究、第22号、PP.43-55、2016年7月

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) Shunsuke Mori, Takehiko Matsu and Masashi Ohkura, "MINIMUM REGRET CLIMATE POLICY WITH ACT-THEN-LEARN DECISION - A NEW MODEL FRAMEWORK UNDER LONG-TERM UNCERTAINTIES", 12th IAEE European Energy Conference, Sep.8-12(Venice, Italy), 2012
- 2) Shunsuke Mori, "The Min-max Regret and the Max Expected Utility Strategies for the Climate Policy Evaluations under Uncertainties by the expansion of Integrated Assessment Model MARIA", 5th Integrated Assessment Modeling Conthosium 2012, November 12-13, 2012, Foundation of Renswoulde, Utrecht (Netherlands)
- 3) 高橋 弦太, 森 俊介, 亀谷 和久, 「地球環境統合評価モデルMARIAの拡張と不確実下の意思決定分析」、第29回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、砂防会館(東京)、2013年1月29-30日
- 4) Shunsuke Mori, " Contribution of CCS, Nuclear Power and Biomass under Uncertainty - Decision making on Min-max Regret and Max Expected Utility Strategies", International Energy Workshop 2013, June 19-21, Mariott Hotel, Paris, France
- 5) Shunsuke Mori, " A New Approach of Carbon Emission Allocation among Stakeholders: An Expansion of Multiregional and Multisectoral Dynamic Energy Economic Model THERESIA", 6th Integrated Assessment Modeling Conthosium 2013, October 28-30, 2013, National Institute of Environmental Studies (国立環境研究所), Tsukuba, (Japan)
- 6) 金丹, 「アジアの貿易を通じた二酸化炭素排出構造の分析—2007年アジア国際産業連関表の推計を通じて」, 比較経済体制学会第12回（秋期）大会, 2013年11月
- 7) 金丹, 「日中韓の相互依存関係からみた環境負荷構造の変化」, 韓国東北亜経済学会2014年年次大会, 2014年1月
- 8) 永井咲千, 森 俊介, 亀谷和久, 「発展途上国におけるエネルギーへの量的・質的アクセスと貧困・教育・健康の関連分析」、第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、砂防会館(東京)、2014年1月
- 9) Shunsuke Mori, "An Expansion of an Integrated Assessment Model for the Assessment of Adaptation Effects", International Energy Workshop 2014, June 5-7, Xijian Hotel, Beijing, China, 2014
- 10) Shunsuke Mori, "The Effects of Sectoral and Regional Participation in Global Warming Mitigation Coalitions based on Multiregional and Multisectoral Dynamic Energy Economic Model THERESIA", 22-th International Input-Output Association, 13-18, July, 2014, ISEG, Lisbon(Portugal), 2014
- 11) Shunsuke Mori, Yuya Makishita and Kazuhisa Kamegai, "A TWO STAGE ENERGY PLANNING MODEL INTEGRATING POWER EXPANSION AND REGIONAL ENERGY SYSTEMS FOR THE

- ASSESSMENT OF SOLAR AND CGS", IAEE Europe 2014, 28-31, Oct., 2014, LUISS University, Rome (Italy), 2014
- 12) 下川 史人, 森 俊介, 亀谷 和久, 「世界化石燃料市場短期モデルの構築と需給シミュレーション」、第33回エネルギー・資源学会研究発表会、大阪国際交流センター(大阪)、2014年6月10-11日
 - 13) 神崎 浩之, 森 俊介, 亀谷 和久, 「生産価格の地域差を考慮した天然ガス需給世界市場分析」、第33回エネルギー・資源学会研究発表会、大阪国際交流センター(大阪)、2014年6月10-11日
 - 14) 金丹, 森 俊介 「中国のエネルギー・環境政策の影響分析ー動学的多地域多部門統合評価モデル THERESIAによる」、環太平洋産業連関学会第25回大会, 2014年11月
 - 15) 金丹, 森 俊介, 増井利彦, 黒沢厚志 「SSP・RCPシナリオの下での気候変動による環境・経済影響評価」、韓国東北亜経済学会2015年年次大会, 2015年2月
 - 16) Shunsuke Mori, Toyooki Washida, Atsushi Kurosawa and Toshihiko Masui, "Pathways to be Opened towards Low Carbon Society - Findings on Multi-model Comparison in ICA-RUS Project", Our Common Future, July, 2015, Paris, (Poster)
 - 17) 金丹・森俊介 「SSP・RCPシナリオの下での最終需要変化によるアジア地域経済への環境経済影響」北東アジア学会第21回大会、2015年10月
 - 18) 金丹・森俊介 「東アジアにおける国際分業の進展」環太平洋産業連関分析学会第26回大会、2015年11月
 - 19) 金丹・森俊介 「SSP・RCP情景下気候変動的環境経済影響評価」台湾国立政治大学国際事務学院・現代中国学会・韓中社会科学学会・韓国東北亜経済学会共同学術大会、2015年12月
 - 20) Shunsuke Mori and Hideo Shiogama, "The Value of Scientific Information on Climate Sensitivity Uncertainty", EnviroInfo 2016, 14-16, Sep., 2016, Berlin, Germany
 - 21) Shunsuke Mori, "WHY DO WE PREFER BELOW 2 DEGREE WARMING WORLD AND HOW DO WE ACT IN THE DIFFERENT CONDITIONS?", 1ST AIEE ENERGY SYMPOSIUM, Current and Future Challenges to Energy Security, November 30- December 2, 2016 - Milan, Italy

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- (1) H. Shiogama, D. Stone, S. Emoril, K. Takahashi, S. Mori, A. Maeda, Y. Ishizakil & M. R. Allen, "Predicting future uncertainty constraints on global warming projections", Scientific Reports, | 6:18903 | DOI: 10.1038/srep18903, Jan. 11, 2016
 に関してプレスリリースを行った (2016年1月15日)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Robert S. Pindyck, 2013. "Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us?," *Journal of Economic Literature*, American Economic Association, vol. 51(3), pages 860-72, September
- 2) Richard A. Rosen and Edeltraud Guenther, "The economics of mitigating climate change: What can we know?," *Technological Forecasting & Social Change*, No.2, Vol27, 2014
- 3) CMIP - Coupled Model Intercomparison Project, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>, (retrieved, 27/3/2017)
- 4) Energy Modeling Forum, <https://emf.stanford.edu/>, (retrieved, 27/3/2017)
- 1) AMPERE, <http://ampere-project.eu/web/>, (retrieved, 27/3/2017)
- 2) Special Report on Emission Scenarios, Cambridge Press (UK), 2000
- 3) Mitigation of Climate Change, IPCC Fifth Assessment Report, Cambridge Press (UK), 2014, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- 4) Messner, S., Golodnikov, A. and Gritsevskii, A. (1996). A stochastic version of the dynamic linear programming model MESSAGE III. *Energy*, 21, pp.775-784.
- 5) Nordhaus, W. D. and Popp, D. (1997). What is the value of scientific knowledge? An application to global warming using the PRICE model. *The Energy Journal*, 18, pp.1-45
- 6) Baker, E. and Adu-Bonnah, K. (2008). Investment in risky R&D programs in the face of climate uncertainty. *Energy Economics*, 30, pp.465-486
- 7) Böhringer, C. and Rutherford, T. F. (2007). Innovation, uncertainty and instrument choice for climate policy. Paper presented at Annual Congress of the Verein für Socialpolitik, Munich
- 8) Shunsuke Mori, "A new approach of carbon emission allocation among stakeholders: an expansion of Multiregional and Multisectoral Dynamic Energy Economic Model THERESIA", *Journal of Economic Structures*, Vol.5, No.5, pp.1/22, 2016
- 9) H. Shioyama, D. Stone, S. Emori, K. Takahashi, S. Mori, A. Maeda, Y. Ishizaki & M. R. Allen, "Predicting future uncertainty constraints on global warming projections", *Scientific Reports*, Jan.11, 2016

(2) 1. 複数主体の相互作用を考慮したエネルギー経済モデルの開発動向調査と評価

学校法人 上智大学 鷲田 豊明

〈研究協力者〉

上智大学 坂上 紳・山浦 紘一(H24)

その他の研究協力機関等 国立大学法人 東京農工大学 山浦 紘一(H25～H28)

平成24～28年度累計予算額：41,118 千円（うち平成28年度：6,237千円）

予算額は、間接経費を含む。

【キーワード】 多地域多部門一般均衡モデル、ゲーム論、異常気象、生物多様性、部門別評価

【要旨】

複数主体の問題については、これまで、気候変動問題において重要な要素となるゲーム論的な相互作用ないし不確実性を考慮した分析事例はあるものの、それらを同時に扱う例は非常に限られている。本研究では温室効果ガス排出などを巡る国際交渉の動向が政策の決定とその結果に大きな影響を与える状況をふまえ、地球温暖化問題に対する利害の一致しない複数の意思決定主体の相互作用を明示的に定式化するモデル開発を行った。

本研究では、気候変動問題において重要な要素である複数国間の相互作用と不確実性を扱うもので、新しいアプローチを試みた。また、これと並行して、多地域多産業の特性を活かし、社会経済シナリオ(SSP)と放射強制力シナリオ(RCP)を用いた地球温暖化による経済影響の各地域各産業への直接影響と間接影響をそれぞれ明らかにした。具体的には、将来の社会の不確実性を考慮するため、放射強制力シナリオや気温上昇目標を特定化した戦略選択肢シナリオなどの複数の社会経済シナリオを併用し、将来の様々な不確実的な状況下を想定した多地域多産業における地球温暖化の被害や温室効果ガス(GHG)排出削減費用の増加による経済影響を解明した。さらに、これらのモデルのさらなる改善のため、サイクロン強度増加・生物多様性減少・貿易を考慮した農業部門など各分野における地球温暖化による社会経済影響を明らかにした。

平成24年度では気候変動問題における温室効果ガスの削減行動についてゲーム理論的「相互作用」を導入した統合評価モデルEMEDAを構築した。

平成25年度ではEMEDAモデルを精緻化させ、ゲーム理論を用いた各国間のGHG排出削減行動の相互作用を前提とした排出削減パスをシナリオごとに地域別・部門別に社会経済影響評価を行った。この社会経済影響評価では地域ごと、部門ごとに異なる特徴が明らかになったが、これは従来のGHG排出削減交渉におけるゲーム理論的研究においては解明されていなかった点である。

平成26年度には、複数のSSPシナリオにおいて各RCPおよび戦略シナリオについて対策評価を行い、地域別・産業別の経済影響評価を行った。このように様々な最新の社会経済シナリオやGHG排出シナリオ、温暖化対策を考慮した地域・部門別の社会経済への影響を明らかにした点は新たな知見である。

平成27年度には、これまでに明らかになった経済影響をより詳しく解明するための要因分析を行い、

地球温暖化の直接的影響だけでなく間接的影響も地域・産業で異なり、特に間接的影響は途上国を中心に大きいことがわかった。

平成28年度には、最新版のSSPシナリオのもとで多地域多部門における社会経済影響評価を行い、SSPシナリオ間の違いがより明確になることが示された。さらに、パリ協定における温度目標（2度目標）に対応した適応費用を計算した結果、より将来に地球温暖化への適応が増加するとともに、アジアやアフリカ地域を中心に適応費用が大きくなる結果が得られた。

本研究では、これまで国際的に見てもほとんど明らかにされていなかった最新の社会経済シナリオや排出シナリオ、温暖化対策を考慮した統合評価モデルEMEDAによる全球地域別・部門別の社会経済影響を解明した。

1. はじめに

現在までの統合評価モデルは温暖化対策という長期的かつ不確実性の高い意思決定温暖化問題においては、なお十分な方法論を提供していない。実際、温暖化の進行と影響の規模や時期、地域的分布、その社会経済影響、さらに適応策の考慮、ジオエンジニアリングなどにおいては様々な不確実性が避けられない。この不確実性には、温暖化の自然科学的知見に関するもののほか、技術の実現可能性やコストがある。さらに具体的な対策を取る際には便益と費用、想定しうるリスクなどが幅広く多様な形で存在する。これにより温暖化対策を取ることに伴って国家間、地域間、産業部門間、所得階層間などで、どのように便益と費用を分担するかについて、相互に利害の対立が生じる。さらに現世代と将来世代の間でも競合が発生しうる。

なかで、複数主体の問題については、これまで、気候変動問題において重要な要素となるゲーム論的な相互作用ないし不確実性を考慮した分析事例はあるものの、それらを同時に扱う例は非常に限られている。本研究では温室効果ガス排出などを巡る国際交渉の動向が政策の決定とその結果に大きな影響を与える状況をふまえ、地球温暖化問題に対する利害の一致しない複数の意思決定主体の相互作用を明示的に定式化するモデル開発を行った。

2. 研究の目的

本S10-4テーマにおいては、4つのサブテーマ連携によるマルチモデルアプローチと独自性を活かした知見の提供という2つの角度から研究を行う。本サブテーマはこのうちの複数主体の問題を多地域多部門一般均衡逐次動学モデルで接近し、社会経済シナリオ(SSP)と放射強制力シナリオ(RCP)を用いた地球温暖化による経済影響の各地域各産業への直接影響と間接影響をそれぞれ明らかにする。具体的には、将来の社会の不確実性を考慮するため、放射強制力シナリオや気温上昇目標を特定化した戦略選択肢シナリオなどの複数の社会経済シナリオを併用し、将来の様々な不確実的な状況下を想定した多地域多産業における地球温暖化の被害や温室効果ガス(GHG)排出削減費用の増加による経済影響を解明し、さらに、これらのモデルのさらなる改善のため、サイクロン強度増加・生物多様性減少・貿易を考慮した農業部門など各分野における地球温暖化による社会経済影響を明らかにすることを目的とする。

1) ゲーム論的シミュレーションのためのモデル開発と実行

気候変動問題における温室効果ガスの削減行動についてゲーム理論的「相互作用」を導入したシミュレーションを行う。地域間関係及び部門間の経済影響について、世界協調行動とゲーム論的行動によりどのような差異が発生するかをシミュレーションにより見る。

2) 気候変動による経済影響の分析

多地域多部門モデルの特徴に、さらに気候変動がもたらす異常気候の影響や生物多様性への影響が、各国の経済にどのように影響するかを見る。

3) 適応策の導入効果

モデルの定式化を拡張し、適応策の導入効果と気候政策の関連を分析する。

3. 研究開発方法

複数主体の行動（政策の決定と実践）の相互作用が気候変動の現実を与える影響を考慮するために、現実の世界経済の定量的モデル化と気候変動メカニズムの統合が不可欠と考える。そこで、本研究では、世界経済モデルでは、貿易も組み込んだ、多地域、他部門の応用一般均衡モデルを構成し、気候変動モデルにはNordhaus等によって精緻化されてきた比較的単純なモデルを援用し、それらを統合したモデルによって、多主体の動向とその影響を分析する。このような試みは、経済モデルをNordhaus (2012)によるRICEモデルをベースにしたものでは、既に試みられているが、世界貿易など現実経済の動向への影響を具体的にとらえる点では弱点を持っている。相互作用そのものについては、ゲーム論的均衡を軸に分析するのが適切である。この点で、従来の研究は提携型の協力ゲーム均衡として分析を試みているが、本研究では、各主体が完全に利己的に振る舞った状況の均衡としてのナッシュ均衡と、世界的な効率的状況を達成可能な、ナッシュ交渉解を比較することによって、多主体の行動様式の影響を複眼的にとらえることができる。また、このようなモデルを構成することによって、気候変動による被害や、適応の影響、それに伴うリスクが、交渉にどのような影響を与えるかを分析することができ、本プロジェクト全体にテーマに対する貢献を明確にすることが可能となる。

このモデルは、各地域が完全に利己的に振る舞った状況であるナッシュ均衡と、それら地域全体にとって効率的状況を達成可能なナッシュ交渉解を比較することで、多主体の行動様式の影響を複眼的にとらえることができた。さらに、ナッシュ均衡やナッシュ交渉解などそれぞれの状況において利得だけでなく、全球平均気温がどのように変化し、各地域・各産業がどのような温暖化影響を受けるかを計算する方法も検討し、様々なシナリオにおいて温暖化影響の経済評価を行う。具体的には、温暖化対策が全くない場合、温暖化対策が十分行われる場合、米国と中国がゲーム論的行動をとる場合、さらに日本もゲーム論的行動をとる場合のそれぞれについて、2100年までの全球平均気温、各地域・各産業の実質GDP、実質付加価値の変化等を計算した。これにより、温室効果ガスの削減がどのように各地域・各部門に被害や便益をもたらしているかを詳細に評価することが可能となった。

このモデルは、(1)1)で述べた共通社会経済シナリオ(SSP)および代表的濃度シナリオ(RCP)の代表的シナリオにそって、EMEDAで部門別・地域別の経済影響評価のシミュレーションを行った。気候変動モデルとしては、他モデルと合わせるため、市場為替レート(MER)ベースで地域別に集計を行い、経済成長率と人口増加率とCO2排出係数の変化率については、SSPに従って調整し、SSP1・SSP2・SSP3の各シナリオに基づいて計算を行った。複数の気候感度を想定し、各RCPケース、各戦略選択肢について計算を行った。これらの計算結果については、データベースとしてまとめられ、他のモデルとの比較などに活用された。

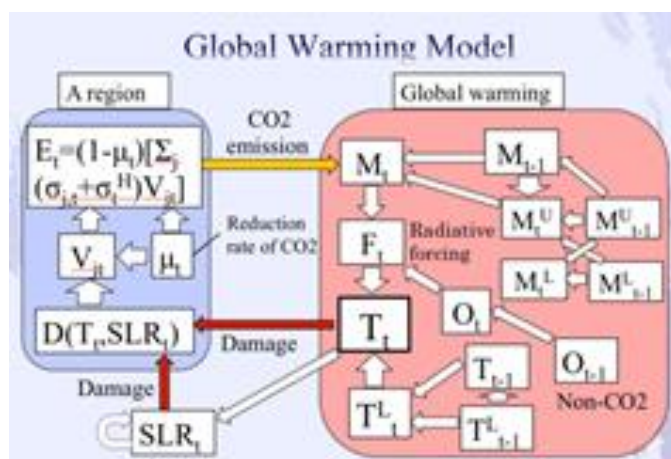
さらに開発したモデルにおける地球温暖化の経済影響評価を、地球温暖化による被害額の変化率・GHG排出削減費用の変化率・その他の要因による変化率に分解し、各地域・各産業における経済のより詳細な変化を分析した。また、被害関数にAD-DICE型の適応モデルを導入することで、適応水準による地球温

暖化の経済影響評価の違いや、各シナリオにおける適応費用や地球温暖化影響などをより詳細にSSP別・地域別で分析できるモデルへの拡張によりさらに2016年度にはSSPシナリオを最新のものに更新し、RCP・戦略選択枝シナリオについて多地域多部門の経済影響評価を行い、従来と比較しSSP間により大きな差異が生じる事を示した。また、パリ協定における気温上昇目標に合わせたシナリオについて適応費用の推計を行い、地域間や温度目標による大きな差異を確認した。また、SSP-RCPシナリオ下で農業部門へのより詳細な経済影響評価関数の導入も試み、他産業への経済影響の波及効果を推計する。

4. 結果及び考察

i 多主体・多部門ゲーミングシミュレーションモデルの開発

本研究では、まず、世界経済を対象にした一般均衡型のモデルと気候変動モデルを組み込んだ形で、ゲーム論的分析が可能か否かについて、世界的な研究動向の調査が必要になった。まずニューヨーク州立大学のYang教授(Nordhaus教授とともにRICEモデルを作成した研究者)とともに一般均衡モデル構成の可能性をレビューするとともに、世界的研究動向に関する文献調査を行なった。結果として、きわめて単純化された仮想的なモデルを構成し、本研究の目指している方向でのゲーム論的分析が可能であることを示した。



図(2)-1 気候モデルの概要

これをふまえて、まずプロトタイプとなるべきモデルの構築に移った。世界経済モデルとしては、第一に、鷲田によって既に構成されていた世界貿易を含む静的応用一般均衡モデルEMEDAをベースにした。気候変動は本質的に同学的状況の中で分析されるべきなので、EMEDAの逐次動学化を行なった。逐次動学化は、隔年の一般均衡によって実現した投資を次期資本ストックに加える形で行なわれる。また、労働については、国連の中位推計をもとにした。また、動学的経路がAR5に向けて開発されているSSP (Shared Socioeconomic Pathways) の5つのシナリオのうち、適度な人口増加のもとで経済が成長するシナリオ1に与えられている経済成長経路に一致するように、全要素生産性TFPが変化するように設定した。

EMEDAの気候変動モデルとしては図(2)-1で表されるNordhausのDICE/RICE2010モデル(Nordhaus, 2012)にある気候モデルを用いることにした。経済モデルに、GTAP7データ

表(2)-1 EMEDAの地域産業分類

Regions	Sectors
1 Japan	1 Agriculture
2 China	2 Forestry
3 USA	3 Fishing
4 EU25_WEurope	4 Extraction
5 FSU_EEurope	5 LightMnfc
6 OAsiaOceania	6 HeavyMnfc
7 OAmerica	7 TransComm
8 Africa	8 OthServices

ベースから二酸化炭素排出量を取り出し、本モデルに適合するように排出係数を求め、被害関数については、DICE/RICE2010のものをそのまま用いた。

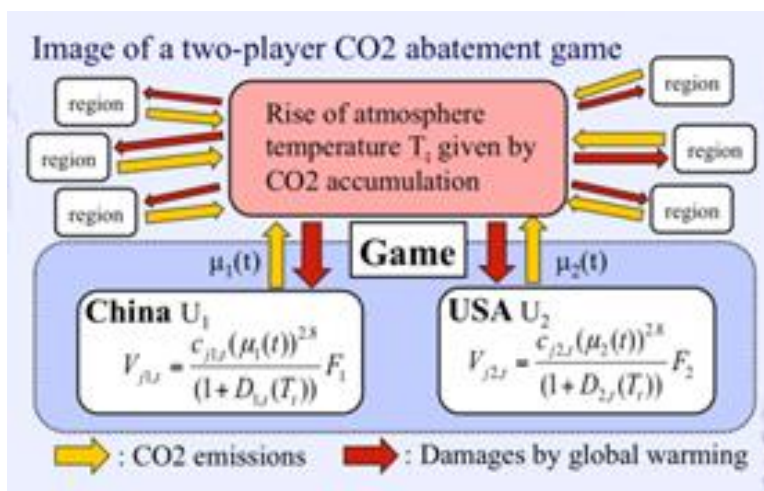
EMEDAの地域分割では表(2)-1にあるように8地域に分割し一つの地域が8産業から構成されているモデルとしている。そして、それぞれの地域が、プレーヤーとして戦略を選択するゲーム状況を考察することにした。

各地域が選択する戦略は、2004年から2100年までの温室効果ガスの削減経路全体を一挙に選択するものとした。具体的には、現在各地域がコペンハーゲン合意などで宣言している、ないしは想定している削減経路をベースラインの削減シナリオ(Base)とし、表(2)-2で表されるように、そのうちどれくらいの割合で削減するかを戦略とした。また、ゲームに参加する主体としては、全ての主体が同時に参加するのは、計算不可が過大になりすぎるので、削減量の大きな中国と米国のみがゲームのプレーヤーとなる状況、および中国、米国、日本の三か国がプレーヤーとなる状況の、二つの場合のシミュレーションを試みた。なお、それぞれの場合に、その他の地域は、ベースラインの削減戦略をとっていると想定している。中国と米国のみが参加した場合のゲームの戦略を図(2)-2に示している。それぞれが11の戦略を持ち、戦略1は、中国の場合ベースラインの25%の削減で、戦略11は、全く削減しない戦略である。他の削減状況の計算もしているが、均衡に影響を与えないので省略している。

このゲームのペイオフ(利得)は、2004年から2100年までの各地域が得られる消費からの効用の割引合計として扱う。このペイオフが、動学的EMEDAによって計算される。ゲームは、オープンループのワンショットゲームで、初期時点に、すべての削減パスを決定するものである。

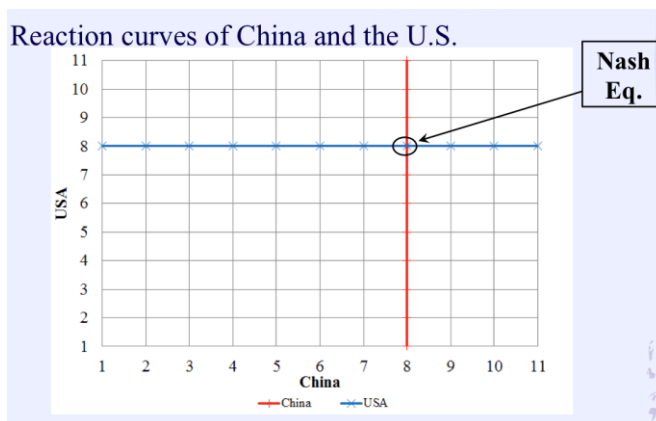
表(2)-2 中国と米国の戦略

	China	USA		China	USA
Strategy 1	0.250 μ' _{China}	0.50 μ' _{USA}	Strategy 7	0.100 μ' _{China}	0.20 μ' _{USA}
Strategy 2	0.225 μ' _{China}	0.45 μ' _{USA}	Strategy 8	0.075 μ' _{China}	0.15 μ' _{USA}
Strategy 3	0.200 μ' _{China}	0.40 μ' _{USA}	Strategy 9	0.050 μ' _{China}	0.10 μ' _{USA}
Strategy 4	0.175 μ' _{China}	0.35 μ' _{USA}	Strategy 10	0.025 μ' _{China}	0.05 μ' _{USA}
Strategy 5	0.150 μ' _{China}	0.30 μ' _{USA}	Strategy 11	0	0
Strategy 6	0.125 μ' _{China}	0.25 μ' _{USA}			

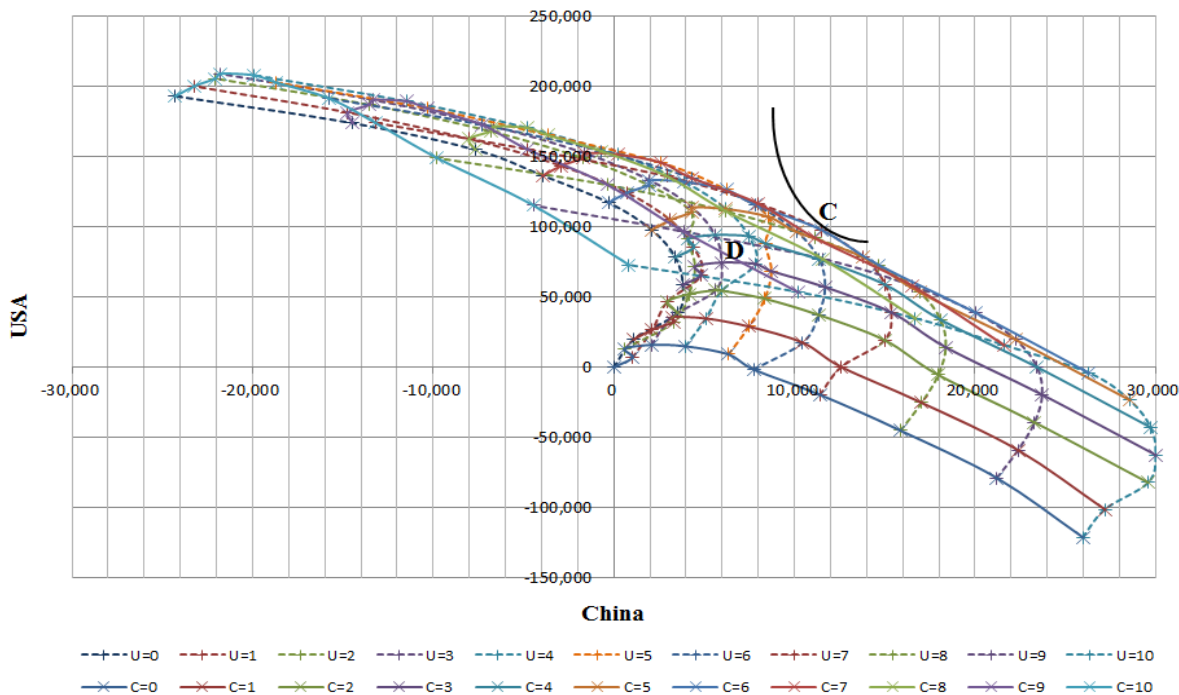


図(2)-2 中国・米国CO2排出削減ゲーム

中国と米国の2プレーヤーゲームの結果を図(2)-3のように反応曲線（割引率3%を仮定）で示そう。ナッシュ均衡は、図にある反応曲線の交点となる。すなわち、中国と米国が完全に利己的に行動した均衡としてのナッシュ均衡は、削減しないではなく、ある程度の削減、中国はベースラインの7.5%程度の削減、米国は、同じく15%程度の削減は行なうことになる。一方、交渉決裂した場合の実現状態をここで得られたナッシュ均衡とした上での、ナッシュ交渉解は、中国がベースラインの17.5%、同じく米国はベースラインの35%の削減をした状態となる。交渉解は、パレート最適性という、本質的な効率性を持った状況である。この二つの解を、米国と中国の利得の組み合わせによって表現したものが図(2)-4のような状況である。各曲線は1国の戦略を固定したときの2国の利得の動きを示し、それぞれの交点が、二つの国が特定の戦略を選んだ結果としての利得である。利得は排出削減なしシナリオを基準として計算しており、ナッシュ均衡の点Dとナッシュ交渉解の点Cがそれぞれ図に示されている。



図(2)-3 米国と中国の反応曲線とナッシュ均衡解



図(2)-4 ナッシュ均衡解とパレート最適解の比較

この研究によって、さまざまな気候変動に関わるリスクが、各主体のとりうる気候変動対策としての戦略に与える影響を分析することが可能なモデルを組み上げることができた。

また、EMEDAによりフィットした気候変動モデルを組み込むことを踏まえ、我々で温暖化被害関数の作成も行っている。まず、気候変動の影響として、熱帯低気圧の強度の増加に着目した温暖化経済被害関数の作成を行った。この被害関数をEMEDAに組み込み、温度上昇シナリオ別の世界16地域における16産業別の経済影響について推計を行った。

次いで、このEMEDAにより各地域が戦略的に行動する場合における経済影響を分析した。各地域が選択する戦略は、2004年から2100年までの温室効果ガスの削減経路全体を一挙に選択するものとした。表(2)-3は、上記の2地域ゲームと、拡張された3地域ゲームの戦略それぞれを示している。左は、中国と米国のみが参加した2地域ゲームの戦略である。それぞれが11の戦略を持ち、戦略0は全く削減しない戦略(None)で、戦略10は中国の場合ベースラインの25%の削減である。右図は、中国と米国に加え日本も参加した場合の戦略である。より多くの排出削減を行う他の戦略の計算も試みたが、均衡に影響を与えないので省略している。

表(2)-3 2地域ゲームと3地域ゲームの戦略

China		USA		Japan	China	USA
0 0% μ' China	6 15% μ' China	0 0% μ' USA	6 30% μ' USA	0 0% μ' Japan	0 0% μ' China	0 0% μ' USA
1 2.5% μ' China	7 17.5% μ' China	1 5% μ' USA	7 35% μ' USA	1 5% μ' Japan	1 5% μ' China	1 10% μ' USA
2 5% μ' China	8 20% μ' China	2 10% μ' USA	8 40% μ' USA	2 10% μ' Japan	2 10% μ' China	2 20% μ' USA
3 7.5% μ' China	9 22.5% μ' China	3 15% μ' USA	9 45% μ' USA	3 15% μ' Japan	3 15% μ' China	3 30% μ' USA
4 10% μ' China	10 25% μ' China	4 20% μ' USA	10 50% μ' USA	4 20% μ' Japan	4 20% μ' China	4 40% μ' USA
5 12.5% μ' China		5 25% μ' USA		5 25% μ' Japan	5 25% μ' China	5 50% μ' USA

このゲームのペイオフ（利得）は、2004年から2100年までの各地域が得られる消費・貯蓄・政府支出からの効用の割引合計として扱う。このペイオフが、動学的EMEDAによって計算される。ゲームは、オープンループのワンショットゲームで、初期時点に、すべての削減パスを決定するものである。

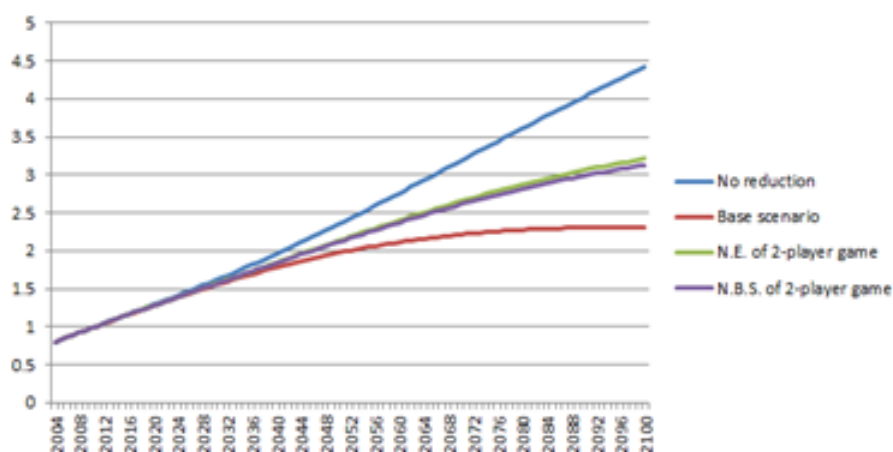
中国と米国の2地域ゲームの結果におけるナッシュ均衡(NE)とナッシュ交渉解(NBS)を、米国と中国のベースシナリオに対する削減率の組で表したものが表4-(2). 41-4左である（時間選好率を1, 3, 5, 10%で計算）。表(2)-4右は、この2国に加えて日本もゲームに参加した3地域ゲームにおける2つの解である。

表(2)-4 2地域ゲーム(中国, 米国)と3地域ゲーム(日本, 中国, 米国)の結果

時間選好率	ナッシュ均衡	ナッシュ交渉解	時間選好率	ナッシュ均衡	ナッシュ交渉解
1%	(7.5%, 20%)	(20%, 45%)	1%	(5%, 10%, 20%)	(25%, 20%, 40%)
3%	(7.5%, 15%)	(15%, 35%)	3%	(5%, 10%, 20%)	(25%, 15%, 30%)
5%	(7.5%, 15%)	(12.5%, 25%)	5%	(5%, 5%, 10%)	(25%, 15%, 30%)
10%	(5%, 10%)	(7.5%, 15%)	10%	(5%, 5%, 10%)	(15%, 10%, 20%)

ナッシュ均衡では、各地域は他の地域の戦略を所与としたうえで、完全に利己的に行動したときに自分の利得が最大となる戦略を選んでいる。この場合、ナッシュ均衡において、各地域は削減しないでは

なく、ある程度の削減を行なうことになる。一方、交渉決裂した場合の実現状態をここで得られたナッシュ均衡とした上で、各地域が協調したときの結果を表すのがナッシュ交渉解である。交渉解は、地域全体にとってのパレート最適性という、本質的な効率性を持った状況である。ナッシュ交渉解における削減率は、ナッシュ均衡よりは上回るがベースラインよりは下回る。また、2地域ゲームと3地域ゲームを比較すると、米国と中国の削減率はさほど変わりがなく、結果に頑健性があることがわかる。



図(2)-5 ナッシュ均衡解とナッシュ交渉解の全球平均気温の推移

各解では、時間選好率が低下するほど削減率が増加する。また、2つの解を比較すると、時間選好率の低下に伴い2つの解における削減率の差が広がる傾向にあることがわかる。このような結果は、時間選好率の低下に伴い、各地域にとって将来の利得がより重要となるため温室効果ガスの削減による将来の利得増加の効果が高まり、さらに協調時の将来利得はより大きく増加するからだと考えられる。

なお、この結果を全球平均気温の変化で見た場合、図(2)-5でわかるように、ナッシュ均衡とナッシュ交渉解の差は2100年時点で比較して0.1°C程度しかない。この理由は、我々のモデルが貿易構造も含んでおり、他地域が受ける被害が貿易を通じ国内産業にも波及して悪影響を与えるため、利己的に行動する各地域は他地域を考慮する必要があるからである。

また、解の頑健性を調べるため、2地域ゲームに参加しない他の地域が全く削減しない場合、2つの解がどのように変化するかも分析したが、中国の削減率がやや増加するだけで、変化は少なかった。

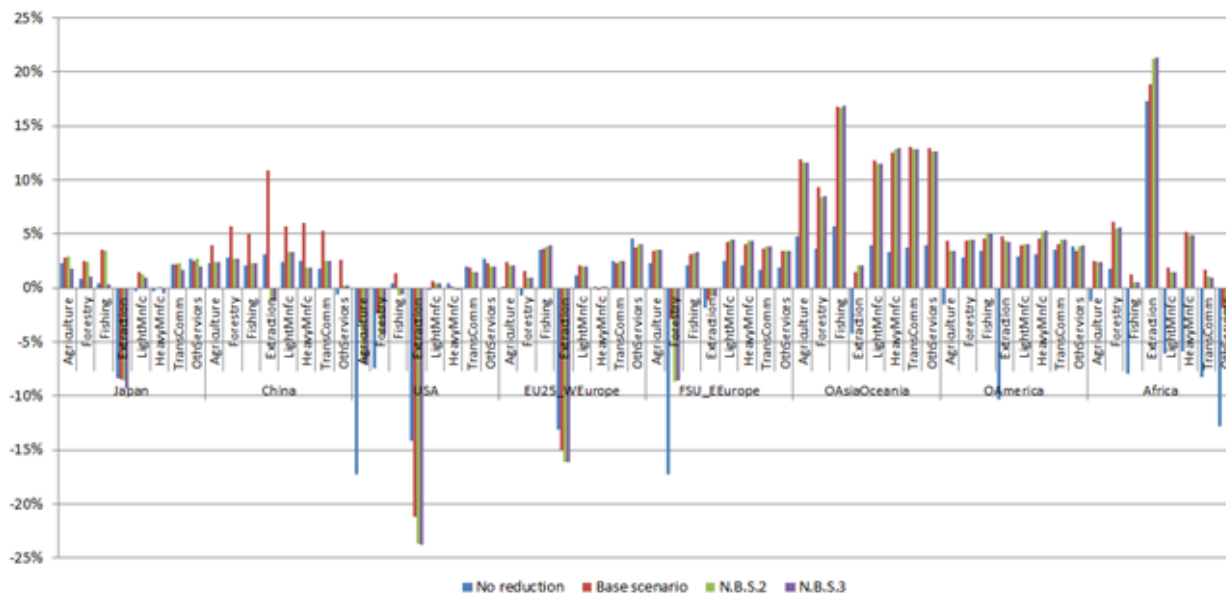
表(2)-5 地域シナリオ別GDP損害額の比較

Region	None	Base	2-player game		3-player game	
			N.E.	N.B.S.	N.E.	N.B.S.
Japan	-1.8%	-2.6%	-2.7%	-2.7%	-1.4%	-1.4%
China	-1.9%	-7.5%	-2.2%	-2.2%	-2.2%	-2.2%
USA	-1.2%	-1.6%	-0.9%	-1.0%	-0.9%	-0.9%
EU25_WEurope	-2.4%	-2.3%	-2.4%	-2.4%	-2.4%	-2.5%
FSU_EEurope	-0.7%	-3.4%	-3.7%	-3.7%	-3.7%	-3.7%
OAsiaOceania	-1.7%	-12.3%	-12.2%	-12.2%	-12.2%	-12.2%
OAmerica	-1.5%	-3.8%	-4.1%	-4.1%	-4.1%	-4.1%
Africa	2.5%	-6.3%	-6.4%	-6.4%	-6.4%	-6.4%

次に、各地域のシナリオ別の2050年の実質GDP損害率については表(2).4, 1-5で表される。全体的に、

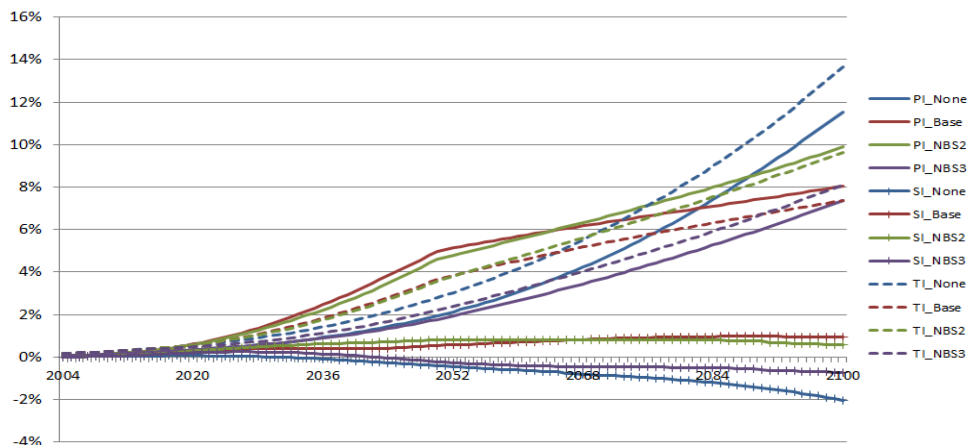
排出削減費用の増加に伴い、削減なしの場合と比べて被害が増加する。特に、途上国における被害は先進国より大きい傾向にある。

図(2)-6は、21世紀全体における各地域・各部門の地球温暖化による影響を計算するため、毎期の実質付加価値の被害額の現在価値総和から損害率を計算したものである。この図より、同じ地域でも部門によって損害率が大きく異なり、また、同じ部門でも地域間で損害率が大幅に異なることがわかる。また、交渉解をみると、温室効果ガスの削減率の増加によって、日本・中国・米国は経済が成長するが、他地域の各部門では経済が縮小する傾向にある。



図(2)-6 各地域・各部門における実質付加価値の現在価値のシナリオ別損害率

最後に、図(2)-7は日本の第一次産業(PI)、第二次産業(SI)、第三次産業(TI)の実質付加価値の損害率の時系列推移である。これをみると、日本は農林水産業やサービス業で大きな被害を受け、さらにそれが拡大していくが、温室効果ガスの削減率の増加により将来の被害が大幅に抑えられることがわかる。なお、米国や中国とはこの傾向が異なっており、各地域の分析や地域間比較が今後重要だと思われる。



図(2)-7 日本における各部門の実質付加価値の地球温暖化によるシナリオ別損害率

ii 異常気象影響を含む気候変動経済影響評価のための拡張

このモデルはさらに、気候変動影響を内生化するよう拡張された。熱帯低気圧の強度の増加に着目した温暖化経済被害関数の作成を行い、この被害関数をEMEDAに組み込み、温度上昇シナリオ別の世界16地域における16部門別の経済影響の推計を行う。この場合、地球温暖化による生物多様性への影響をみるため遺伝資源由来医薬品産業を1部門として独立させ、生物多様性の損失による被害関数を構築することで気温上昇ごとに16地域・17部門の経済影響の計測を試みた。

気候変動モデルとしては、従来と同様にNordhausのDICE/RICE2010モデルにある気候モデルを用い、経済モデルに、GTAP7データベースから二酸化炭素排出量を取り出し、本モデルに適合するように初期時点のCO2排出係数を求め、被害関数については、DICE/RICE2010のものをそのまま用いた。地域分割では、前年度と同様、8地域に分割し一つの地域が8部門から構成されているモデルとしている。GDPの評価においては、他モデルと合わせるため、市場為替レート(MER)ベースで地域別に集計を行った。経済成長率と人口増加率とCO2排出係数の変化率については、SSPに従って調整を行い、SSP1・SSP2・SSP3の各シナリオに基づいて計算を行った。SSPのうち、SSP1シナリオは適応策・緩和策ともに容易に行える、高い教育・技術水準の社会シナリオである。一方、SSP3シナリオは教育・技術水準は低く、適応策・緩和策を行うことは困難な社会シナリオである。SSP2シナリオはこれらの中庸シナリオとされており、人口成長、技術進歩、経済成長について過去数十年の成長の傾向がそのまま続く状況を考えている。このため、これらのSSPシナリオを考慮することで、多様な状況について地球温暖化の影響評価を行うことが出来る。この際、気候感度については、3.0℃とより厳しい4.5℃を想定した。排出ケースについては、GHG排出削減を行わないリファレンスケースに加え、RCPについてはRCP2.6、RCP4.5およびRCP6.0、さらに全球平均大気気温の上昇幅に関する戦略選択肢として、T15(1.5℃以下)、T20(2℃以下)、T25(2.5℃以下)、T30(3.0℃以下)を考えた。

表(2) -6 EMEDAモデルの部門分類と地域分類

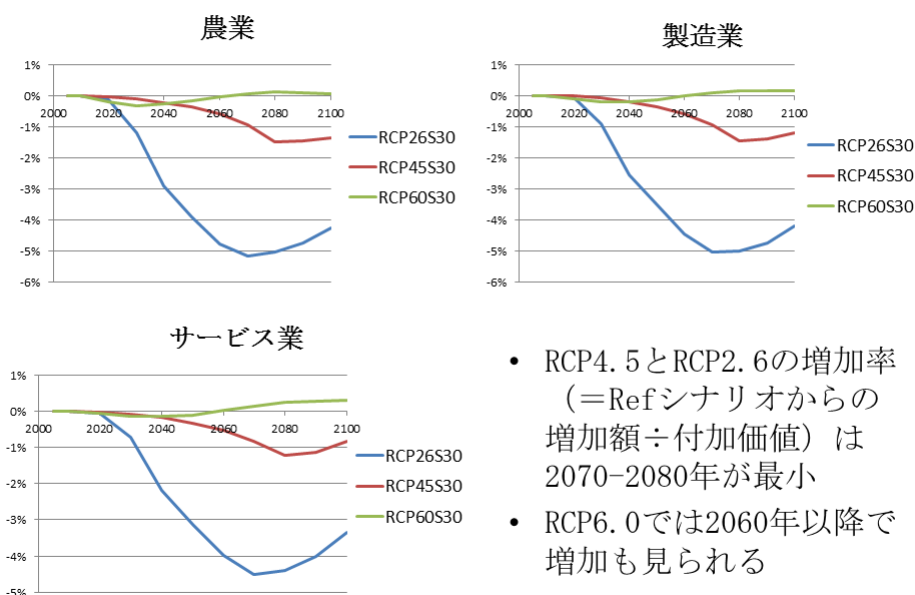
EMEDA部門と3産業・3部門との対応表			EMEDA地域とIIASA5地域との対応表	
Sectors (EMEDA)	3産業	3部門	Regions (EMEDA)	Regions (IIASA)
Agriculture	第一次産業	農業	Japan	OECD
Forestry			USA	
Fishing			OECD8 (EU25_WEurope)	
Extraction	第二次産業		FSU_EEurope	REF
LightMnfc		製造業	China	ASIA
HeavyMnfc			OAsiaOceania	
TransComm	第三次産業	サービス業	OAmerica	LAM
OthServices			Africa	MAF

以下では、特にSSP2シナリオ、気候感度3.0℃(S30)の場合に注目する。なお、評価は表(2).4.1-6で表されるように、3産業部門、5地域に集計を行う。まず、RCPケースの評価について記載する。リファレンスケースに加え、RCPについてはRCP2.6、RCP4.5およびRCP6.0の場合の結果を示す。

まず、RCPの変化が各部門の付加価値に与える影響を見る。図(2)-8は、リファレンスと比べた各部門の付加価値変化率を示す。全体としての傾向をみると、RCP6.0では、今世紀後半に温暖化被害の緩和でリファレンスレベルよりもより付加価値水準の高い状況が現れている。一方、RCP2.6では、当初、リフ

アレンスレベルより大きく下がるものの、のちに急激な回復傾向が表れている。これは、今世紀後半に、GHG排出削減の実質的な効果が現れることによるもので、RCP2.6シナリオが持っている長期的優位性を示している。RCP4.5はRCP6.0よりは増加率が低下するが、RCP2.6と比較すると温暖化被害はかなり低くなっている。また、産業別に見ると、今世紀後半におけるプラス傾向は、サービス業が最も高く、農業が相対的に低い。サービス業の回復が見られるのは、先進国における温暖化被害の緩和が大きい可能性が考えられる。

RCP別付加価値・増加率 (SSP2)



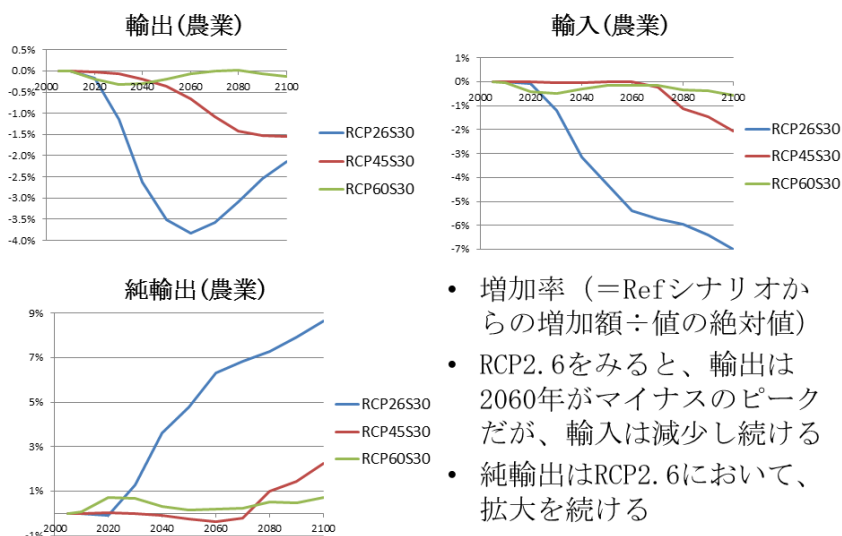
図(2)-8 RCPケースにおける世界全体での産業別付加価値の変化

RCPケースのより詳細な結果として、RCPの変化がアジアの農業部門の貿易活動に与える影響を見る。リファレンスの場合と比べた農業部門の輸出・輸入・純輸出の変化の増加率で示するのが図(2)-9である。輸出から見ると、特徴的な動きは、RCP2.6の場合、今世紀後半からの回復傾向が鮮明に現れる。すなわち、強力な温暖化対策によって、アジアの農業の回復が強まり、輸出が増加する。これに対して、アジアの農産物の輸入は、放射強制力の低下により一貫して減少している。これは、輸入自体は増加しても大幅なGHG削減に伴う排出削減費用の負担によるGDP減少のため、輸入が減少してしまうからだと考えられる。この輸入の減少は輸出の減少を上回るため、結果として、アジアの農産物の純輸出は一貫して増加している。また、この純輸出の増加がRCP2.6において最も顕著に表れていることは特筆すべき点である。なお、製造業やサービス業においては、逆にRCP2.6において純輸出が減少する傾向にある。次に、戦略選択肢別の評価を行う。戦略選択肢については、GHG排出削減を行わないリファレンスケースに加え、T20S30（目標気温2.0℃以下）、T25S30（目標気温2.5℃以下）、さらにT30S30（目標気温3.0℃以下）のケースもとりあげる。なお、T15S30（目標気温1.5℃以下）のケースについては、制約が厳しくEMEDAで実行可能解を得られなかったため除外する。

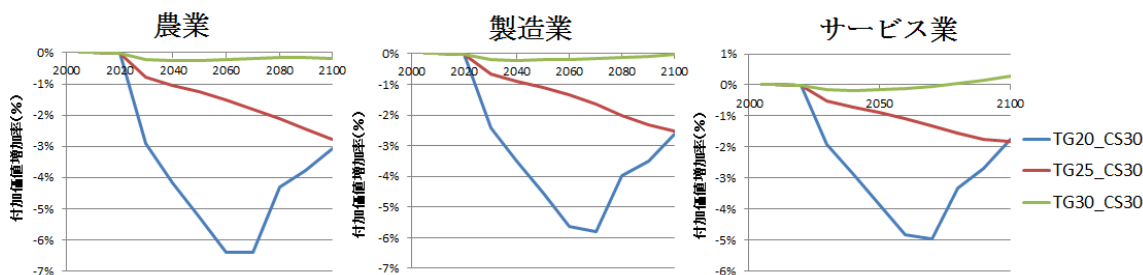
まず、戦略選択肢の変化によって各部門の付加価値に与える影響を見る。図(2)-10では、リファレンスと比べ、各部門の付加価値が各年でどれだけの差になっているかの比率が現れている。分析ケースの

結果と比較すると、T20S30では全体的に付加価値の減少率が高く、分析ケースのRCP2.6と比較的近い動きをする。しかし、分析ケースではその後の回復がわずかであったが、戦略ケースの場合、2070年以降で減少率が著しく緩和している点が異なっている。これは、2°C以下に抑えるためには、早期のGHG排出削減が必要であるが、それを達成すれば、その後はGHG排出削減を少し緩めても2°C以下が達成できるからである。詳細をみると、T20S30における減少率は農業で最大6%、製造業やサービス業で最大5%である。一方、T25S30はRCP4.5、T30S30はRCP6.0とそれぞれ似た傾向となり、T25S30は3%以下で低い減少率が今世紀末まで少しづつ拡大していく一方、T30S30では減少率はほぼゼロとなる。

農業の輸出・輸入・純輸出のRCP別増加率 (SSP2, RCP)

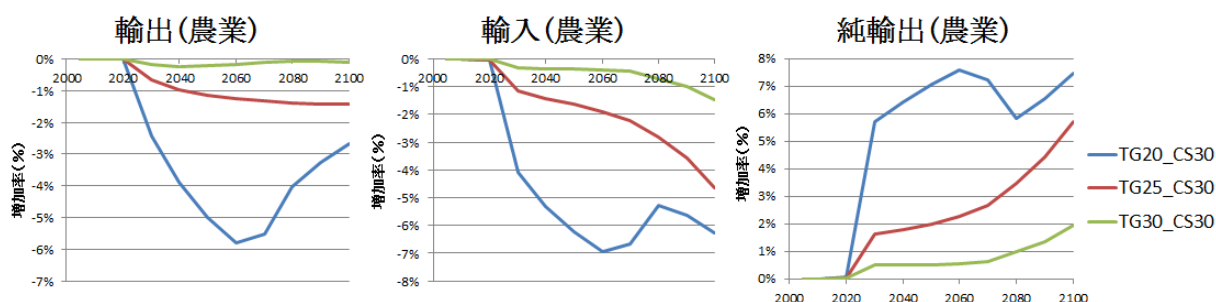


図(2)-9 RCPケースにおけるアジアの農業の輸出・輸入・純輸出のRCP別増加率



図(2)-10 戦略ケースにおける世界全体での産業別付加価値の変化率

戦略選択肢別でリファレンスの場合と比べたアジアの農業部門の輸出・輸入・純輸出の変化をそれぞれの増加率で見たのが図(2).4.1-11である。まず、輸出については全体的に付加価値増加率と似た動きを示し、T20S30で減少率が最も大きく、T30S30で最も小さい。分析ケースと比較すると、これは分析ケースの農業部門とも近い傾向である。一方、輸入については、減少率が最も大きいT20S30ではRCP2.6と似た傾向ではあるが2080年前後では減少率が一度低下する点が異なる。次に減少率の大きいT25S30ではRCP4.5とは異なり減少率が上昇し続ける傾向にある。このため、純輸出でみると、T20S30はRCP2.6より2080年以降の増加率が低くなる一方、T25S30の増加率はT20S30より低いRCP4.5よりは高くなる。



図(2)-11 戦略ケースにおけるアジアの農業の輸出・輸入・純輸出のRCP別増加率

iii 適応策導入効果のための拡張と地域別経済影響評価

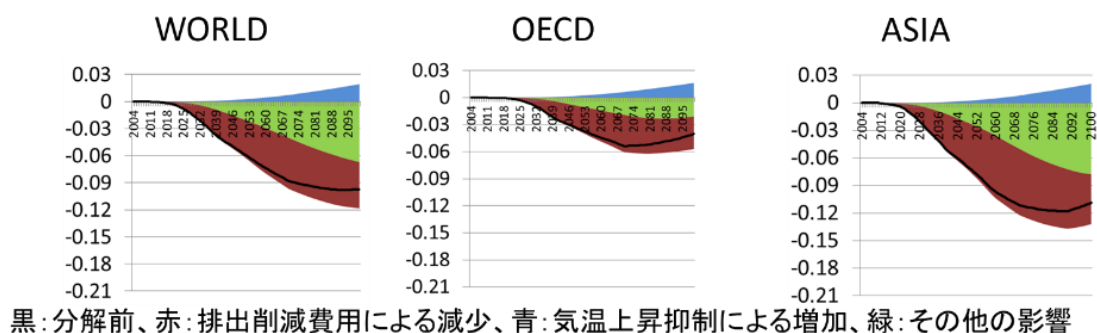
この研究では、社会経済シナリオが世界各地の対策評価にどのような影響を与えるか計算し、RCP・戦略選択肢の各ケースにおける産業別の対策評価を比較することができるよう拡張を加えた。さらに、各SSPにおいて適応を導入したモデル構築と被害の計算を可能とするよう拡張を行った。気候変動モデルとしては、NordhausのDICE/RICE2010モデルにある気候モデルを用いた。経済モデルに、GTAP7データベースから二酸化炭素排出量を取り出し、本モデルに適合するように排出係数を求め、気候関連関数や被害関数については、DICE/RICE2010のものを用いた。

地域分割では、前年度までと同様、8地域に分割し一つの地域が8部門から構成されているモデルとしている。このもとで、2100年以降の放射強制力を安定させるRCP2.6、RCP4.5、RCP6.0の各シナリオと最もGHG排出量が多いBaUシナリオにおけるシミュレーションを行い、温暖化被害の分解を行った。温暖化被害の要因分解の方法としては、従来はシナリオごとにGDPや付加価値を直接比較して経済の変化をみていたが、その地球温暖化にともなうGDPの変化率(g^{TL})を、以下の式で表されるように、GHG排出削減費用の変化率(g^{MT})・地球温暖化によるGDPの変化率(g^{DMD})・その他の要因(g^{VF})による変化率の3要因に分解し、それぞれの大きさを計算した。

$$g_{c,j,t}^{TL} = g_{c,j,t}^{MT} + g_{c,j,t}^{DMD} + g_{c,j,t}^{VF} \quad (2).1$$

ここでcはシナリオ、jは地域、tは時点を表す。BaUを基準にすると、各シナリオにおける地球温暖化によるGDPの変化率は気温の低下に伴い常にプラスとなるが、一方でGHG排出量を減らすための排出削減量の増加に伴いGHG排出削減費用の変化率は常にマイナスとなる。その他の変化については、プラスもマイナスもとりの値であるが、通常はBaUと比較してマイナスとなる傾向が強い。

図(2)-12は最も温暖化被害が大きいSSP3・RCP2.6シナリオにおける世界全体、先進国、アジア諸国の温暖化被害の分解(GDP比)を表す。ここでの被害はBaUシナリオとの実質GDPの比較より計算されている。このシナリオでは、2100年で世界全体ではBaU比でマイナス10%もの実質GDPの減少が発生するが、特にアジアはマイナス12%と大きい。この大きな要因はGHGの排出削減にともなう費用の増大であるが、その直接効果に加え、特にGHGの排出削減費用が大きい第二次産業の経済の縮小が農業やサービス業など他産業にも波及して経済全体を押し下げるといった間接的な効果も大きく影響する。この結果、直接被害よりさらに大きく地域全体で実質GDPが減少してしまう。ただ、これらの影響については地域間で差異が確認でき、特にアジア・アフリカ・東欧諸国では直接効果・間接効果のいずれも先進国・中南米より大きくマイナスになる傾向がみられる。



図(2)-12 SSP3・RCP2.6シナリオにおける温暖化被害の分解（GDP比）

適応については、de Bruin, Dellink and Tol (2009)が開発したAD-DICEモデルを参考にパラメータを推計し、EMEDAにおける被害関数を適応費用とそれ以外の被害に分解した。パラメータの推計については、EMEDAで用いられているRICE2010の被害関数の関数形（気温上昇幅と海面上昇幅についてそれぞれ線形・二次）に沿う形で被害関数の関数形を新たに設定し、地域別にパラメータの推計を行った。

適応前の地球温暖化被害率GDは、以下の式

$$GD_t = \alpha_1 T_t + \alpha_2 T_t^{\alpha_3} + (\beta_1 SLR_t + \beta_2 SLR_t^{\beta_3})(Y_t/Y_{2004})^{0.25} \quad (2).2$$

で特定化されている。ここで、 t は時点、 Y は地域別GDP、 T は気温上昇幅、 SLR は海面上昇幅を表し、 α_1 、 α_2 、 α_3 、 β_1 、 β_2 は推計されるパラメータである。なお、従来のAD-DICEモデルは気温上昇幅についてのみ考慮した関数形であったが、計算したところ、気温上昇幅だけではなく海面上昇についてもAD-DICEの関数形に導入しないと誤差が大きくなってしまいうことが判明したため、それも考慮した形で海面上昇幅にまで拡張した関数形を用いている。

次に、適応後の被害率RDについては

$$RD_t = GD_t (1 - P_t) \quad (2).3$$

と適応前の被害率を利用して定義されている。ここで P は適応水準を表しており、 P が大きくなるほど地域全体が受ける地球温暖化の被害額が小さくなる。ただ、適応水準を上げるほど適応費用がより大きくなるため、経済が悪影響を受ける。この関係は、適応費用 PC として以下の式

$$PC_t = \gamma_1 P_t^{\gamma_2} \quad (2).4$$

で表される。ここで γ_1 、 γ_2 は推計されるパラメータである。これを用いて、適応後に地域全体が受ける地球温暖化の被害率 D は

$$D_t = RD_t + PC_t \quad (2).5$$

で表される。この関数とEMEDAの被害関数の割引残差二乗和（割引率3%）が最小となるようにSSP2シナリオにおいてパラメータを推計した。その結果が表(2)-7になる。

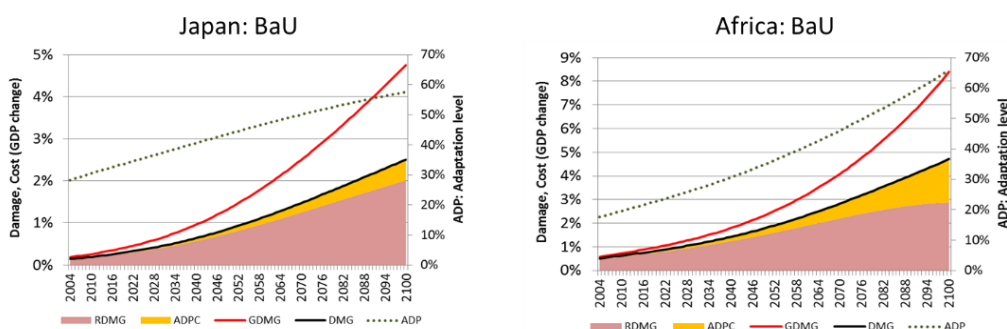
他のSSPについては、SSP2より適応費用が大きくなると想定されるSSP3とSSP4については γ_1 を30%上昇させ、一方でSSP2より適応費用が小さいSSP1とSSP5については γ_1 を30%低下させることで対応した。このパラメータを用いることで、各SSPにおける温暖化被害を適応費用と適応後の温暖化被害に分解すること

ができる。図(2)-13はSSP3のBaUシナリオにおける日本とアフリカの適応導入前後の温暖化被害についての図である。適応前の被害率がGDMG、適応後の被害率がRCMG、適応費用がADPC、適応後の総被害率がDMGで表される。適応率ADPは、地球温暖化への適応によって減少した温暖化被害の割合を表す。

表(2)-7 SSP2シナリオにおける適応パラメータの推計値

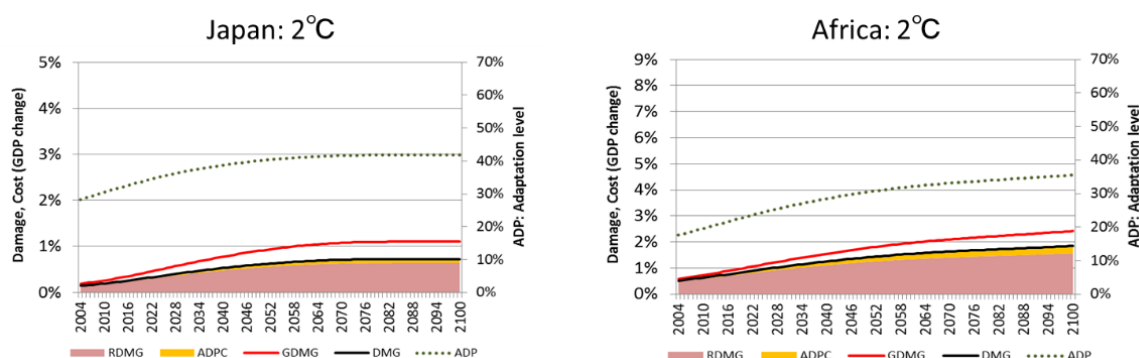
	alpha1	alpha2	alpha3	gamma1	gamma2	beta1	beta2	beta3
Japan	0.001111	0.001328	2.572114	0.081668	5.569272	0.001985	1E-10	2.79825
China	0.00032	0.000433	3.426687	0.104324	4.719225	0.045739	1E-10	1.474894
USA	0.001514	0.000773	2.902599	0.043936	5.054373	0.000638	1E-10	2.468597
OECD	0.000734	0.001404	2.426221	0.415125	6.617158	0.015799	1E-10	2.503264
FSU_EEurope	0.001537	0.000536	3.11881	0.028435	4.67275	0.000903	1E-10	3.071826
OAsiaOceania	0.005226	0.000656	3.200542	0.067599	4.317817	0.007832	0.007515	6.764548
OAmerica	0.002263	0.000867	2.718128	0.07174	5.243493	-6.2E-05	1E-10	1.970427
Africa	0.006196	0.000375	3.604284	0.049928	3.022689	0.006252	0.02105	7.477292

SSP3・BaUでは、将来になると最大4℃程度の気温上昇となるため、温暖化被害の抑制のために適応水準が次第に増加し、2100年には日本で60%弱、アフリカで65%程度の高い適応率となり、これによって温暖化被害が大きく抑えられることがわかる。また、このとき、適応費用は日本でGDP比0.5%程度だが、アフリカでは1%以上となり地域によって差が生じることも確認できる。



図(2)-13 SSP3・BaUシナリオにおける適応導入前後の適応費用と温暖化被害（GDP比）

一方、図(2)-14はSSP3のICA-RUSの2℃シナリオにおける日本とアフリカの適応導入前後の温暖化被害を示す。このとき、気温上昇は2100年まで2℃以下に抑えられるため、適応水準は40%前後とある程度低い水準に抑えられている。このためGHG排出量の抑制によって適応費用が非常に低くなる。ただ、このときGHGの排出削減費用は2℃目標を達成するために非常に高くなっているため、経済全体としては地球温暖化に伴うGDPの減少がBaUより大きくなっている点に注意する必要がある。以上のように、この研究では、世界各地域のとり気候変動対策としての戦略に与える影響を分析することが可能なモデルがより精緻化され、各シナリオにおける世界経済への影響評価をより詳細に計算することができた。



図(2)-14 SSP3・2°Cシナリオにおける適応導入前後の適応費用と温暖化被害（GDP比）

iv 多地域・多部門別評価

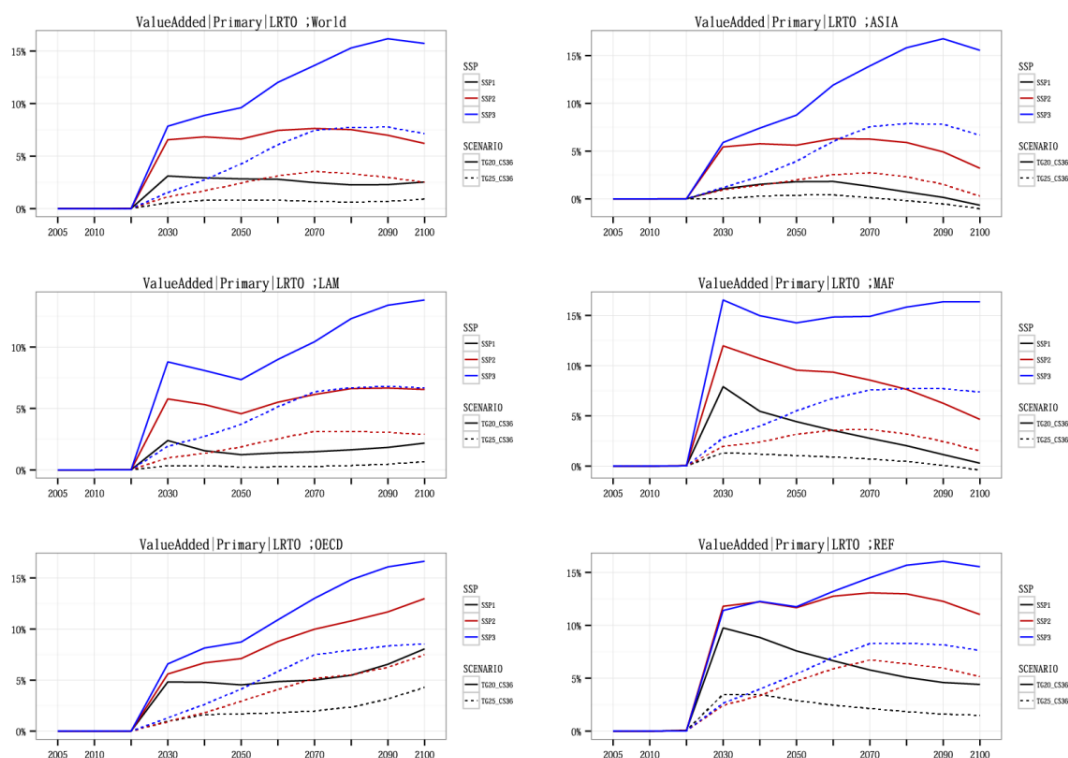
続いて、EMEDAの特徴としての多部門・多地域の結果を示す。EMEDAは、世界を8地域に分割し、それぞれの地域について8産業に分割した分析を行う。以下の分析では、農業、製造業、サービス業の主要3部門に注目する。また、産業については、第一次産業、第二次産業、第三次産業に分解し、地域については、IIASAの分類に合わせて5地域に統合している。シミュレーション開始年は2004年で、最終年は2100年、1年刻みのシミュレーションとなる。産業構造の変化やOECD諸国・アジア地域の貿易についての影響をみる。推計期間は2004年から2100年まで、気候感度は3.0°Cに固定し、SSPについてはSSP1、SSP2、SSP3を用いる。戦略選択肢については、GHG排出削減を行わないリファレンスケースに加え、T20_S36（気候感度3.65°Cで目標気温2.0°C以下）、T25_S36（気候感度3.65°Cで目標気温2.5°C以下）のケースもとりあげる。なお、T15_S36（気候感度3.65°Cで目標気温1.5°C以下）のケースについては、制約が厳しくEMEDAで実行可能解を得られなかったため除外する。

初めに、戦略選択肢の変化によって各部門の付加価値に与える影響をみたい。各産業部門における影響の差が小さかったため、以下では農業など第一次産業に注目する。図(2)-15では、リファレンスと比べ、第一次産業の付加価値が各年でどれだけ減少したかの比率が現れている。分析ケースの結果と比較すると、T20_S36では全体的に付加価値の減少率が高く、分析ケースのRCP2.6を上回る。これは、2°C以下に抑えるためには、早期のGHG排出削減が必要であり、それが高い排出削減費用をもたらすからである。詳細をみると、T20_S36における減少率は上昇傾向にあり、SSP1では3%程度、SSP2では各産業で6%程度、SSP3では各産業で最大で15%程度となり、特にSSP3において大幅な減少がみられた。地域別では旧ソ連・アフリカの影響が大きい。

一方、T25_S36では、各産業部門の付加価値の減少率はT20_S36より低く、SSP1ではほぼ0%、SSP2では各産業で最大3%程度、SSP3では各産業で最大で6%程度となり、SSP3においては依然としてやや高い減少率がみられた。地域別の差はそれほど見られない。これは、T20_S36と比較してGHG排出削減の負担、つまり排出削減費用が低いためである。

次に、より詳細な経済の動きを見るため、BaUと比較した各戦略選択肢別のOECD諸国・アジア地域の輸出・輸入の減少率の推移を見る。第一次産業の輸出・輸入の減少率を表す図(2)-16、図(2)-17を見ると、T20_S36では、OECD諸国の輸出の減少率は上昇傾向であり、SSP1で最大10%、SSP3で最大20%以上の減少率となるが、輸入の減少率はそれと比較して著しく低いため、純輸出では大幅な減少となる。一方でアジア地域はSSP3では輸出も輸入も最大15%以上と大きく減少するが、SSP1やSSP2での減少率はその半分以

下となり、純輸出では増加傾向にある。T25S36では、全体的に減少率は低下するが、SSP3などではOECD諸国の輸出やアジアの輸入の減少率が依然としてやや高く、OECD諸国の輸入については増加も見られる。

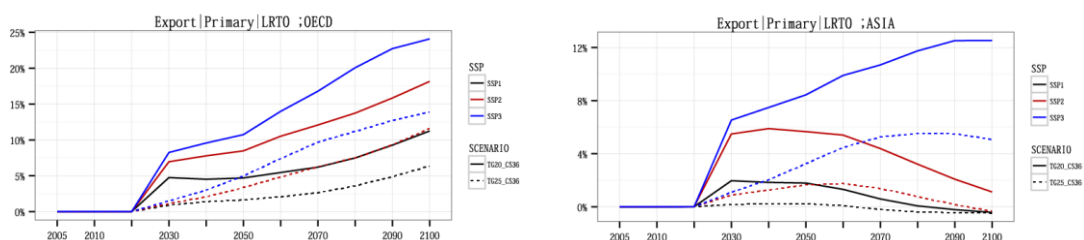


図(2)-15 戦略選択肢別付加価値減少率推移 (第一次産業)

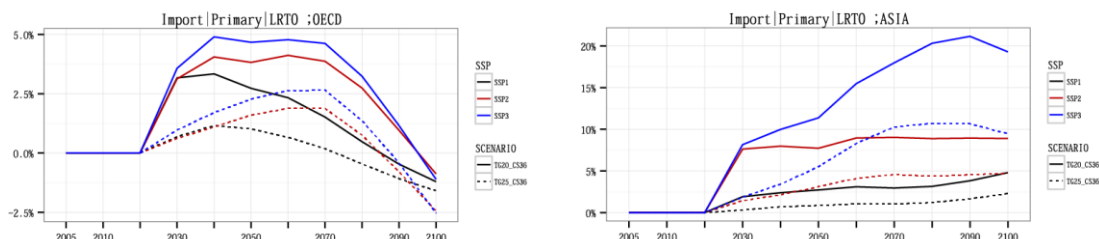
これらの傾向は、第二次産業、第三次産業でも類似している。各産業において大きな差異がみられない理由としては、緩和費用はCO2排出が多い第二次産業が相対的に他産業より大きいなど産業間で異なるものの、資本や労働など生産要素の代替が産業間で働くことで第二次産業の最終的な付加価値減少幅が小さくなり、他産業の減少幅が大きくなるためだと考えられる。

図(2)-18が地域別の適応費用を現す。適応費用については、CO2排出を削減せず最も気温が上昇するBaUシナリオ、パリ協定で決められた目標である2度シナリオに対応するRCP2.6に加え、中間的なRCP4.5シナリオや、パリ協定で努力目標として定められた1.5度シナリオについても分析を行った。図(2)-19が1.5度シナリオにおける各地域の適応率と適応水準である。RCP2.6・RCP4.5・BaUにおいては、それぞれのCO2排出水準において適応費用と温暖化被害の和を最小にする最適な適応水準を選択している。また、1.5度シナリオについては、RCP2.6のCO2排出水準において温暖化被害を1.5度水準まで抑えるように過剰適応を行った場合を分析している。

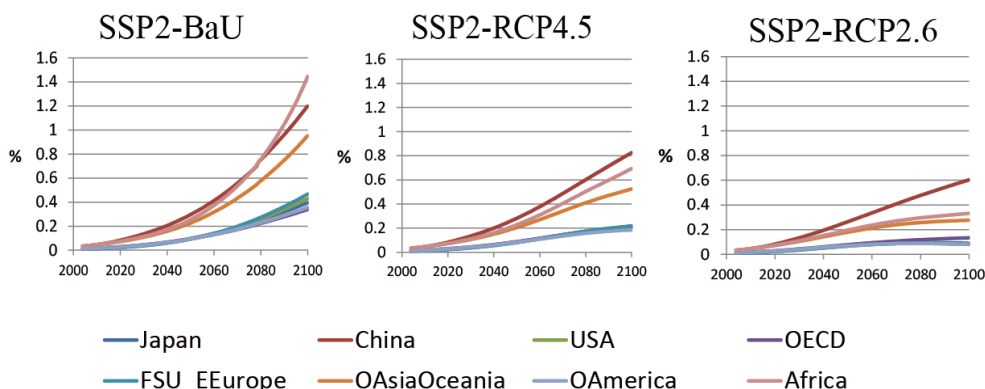
この結果、BaU・RCP2.6・RCP4.5では主に中国などアジア地域やアフリカ地域における適応費用が高くなる一方、1.5度シナリオでは、これらの地域に加え日本、EU、中南米などの地域でも適応費用が高くなるのが観察された。パリ協定では途上国における適応への負担の大きさが問題視されていたが、それらは2度シナリオでも問題になることが確認され、さらに1.5度シナリオでは先進国を含むより多くの地域で適応費用が高くなるのがわかり、さらなる適応への対応が必要となる可能性が出るのが示唆された。



図(2)-16 OECD諸国・アジア地域における地域別輸出の減少率（第一次産業）

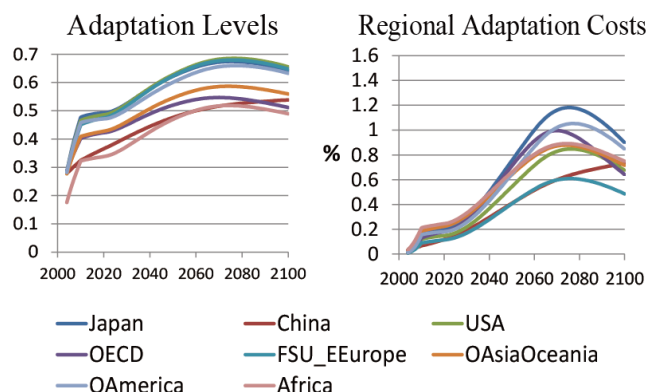


図(2)-17 OECD諸国・アジア地域における地域別輸入の減少率（第一次産業）



図(2)-18 SSP2における地域別適応費用（GDP比）

最後に、Anthoff and Tol (2014)が開発したFUNDモデルにおける農業部門に対する地球温暖化の経済影響関数を16地域16部門のEMEDAの静学モデルに導入し、2050年における農業部門における地球温暖化の経済被害の影響を推計した。シナリオとしては、SSP2とRCP2.6を用い、各地域の産業部門・地域別・産業別影響を分析した。表(2)-4は農業被害があるときのSSP2-RCP2.6における各産業の付加価値の変化額を示している。この結果、アメリカやEUなど一部の地域では全農業部門で経済成長が起き、日本などでは一部の農業部門で経済成長が見られ、他の地域でも農業への直接影響の相殺による減少が見られるなど、全体の傾向として直接影響と比較し農業部門への最終的な影響は低下する代わりに他部門へ比較的大きな影響が生じる事が示された。また、SSP1やSSP3においても分析も行ったが、大きな違いは見られなかった。



図(2)-19 SSP2における地域別適応水準（割合）・適応費用（GDP比：1.5度シナリオ）

表(2)-8 SSP2-RCP2.6における農業被害による各産業の付加価値の変化額

Table 3. Damage differences between the EMEDA baseline and the EMEDA with SSP2 agricultural damages in 2050 for each region (2004US\$million)

	Japan	China	USA	India	Russia	S. Korea	EU_25	Oceania	East Asia	SE. Asia	South Asia	N. America	L. America	MENA	SSA	ROW
Paddy Rice	-2.570	-14.470	1.534	-34.630	0.002	-0.004	2.220	0.072	0.571	-31.040	-13.014	-0.137	-3.179	-0.892	-7.970	-1.205
Wheat	0.000	-8.487	13.731	-30.102	-2.617	0.026	2.355	-0.768	0.008	-2.765	-4.916	0.868	-9.072	-9.793	-7.114	-9.828
Cereal Grain n.e.c.	0.019	-4.119	3.343	-18.528	-4.230	0.103	1.010	-0.402	0.076	-5.060	-0.304	-3.815	-10.742	-3.802	-30.158	-8.780
Grains & Crops	-0.821	-4.763	0.909	-14.310	0.003	-0.021	1.079	0.257	0.150	-6.957	-5.131	0.030	-0.756	-0.063	-0.724	0.156
Meat & Livestock	-0.650	-148.540	51.710	-279.140	-7.680	1.850	65.400	-0.907	4.018	-78.600	-73.490	-7.180	-88.940	-33.710	-219.210	-53.500
Forestry	1.872	-84.950	0.950	-56.260	-9.145	0.184	6.530	-5.220	1.592	-24.940	-37.720	-8.990	-59.340	-17.160	-35.980	-28.620
Fishing	0.017	-10.680	-0.069	-4.716	-0.274	0.011	-0.650	-0.197	0.000	-2.262	-0.592	-0.344	-1.090	-0.266	-2.809	-0.899
Mining & Extraction	0.097	-9.000	0.089	-2.601	-0.154	0.017	-0.270	-0.101	0.005	-3.490	0.104	-0.630	-1.696	-0.859	-3.046	-1.044
Processed Rice	-0.271	-38.430	-1.800	-57.780	-3.280	-0.666	-14.610	-5.050	-1.428	-25.660	-6.626	-9.860	-37.030	-1.800	35.000	-29.800
Processed Food	0.200	-42.580	4.700	-53.270	-4.867	0.010	-4.300	-1.360	1.320	-30.430	-10.153	-11.310	-37.420	-8.080	-22.200	-19.420
Textile & Clothing	11.660	-61.160	28.150	-35.200	0.502	7.227	41.100	1.635	13.040	-2.670	-67.680	10.290	-0.620	1.021	-3.046	2.640
Light Manufacturing	0.300	-75.400	-1.800	-37.170	-1.110	-2.560	-29.000	-3.140	-0.250	-11.560	-5.171	-6.400	-19.600	-3.680	-11.410	-13.910
Heavy Manufacturing	-2.395	-152.073	11.105	-71.731	-2.638	-13.808	-42.056	-4.343	-14.024	-59.686	-8.430	-19.523	-45.632	-2.879	-17.745	-27.232
Utilities & Const.	-13.300	-56.200	-33.900	-70.860	-8.770	-2.390	-40.200	-6.460	-1.490	-4.680	-11.770	-7.860	-23.200	-15.620	-13.990	-24.100
Trans. Comm.	-29.000	-136.600	-53.000	-140.100	-15.400	-10.230	-65.000	-15.600	-4.800	-33.900	-61.900	-17.700	-44.600	-25.300	-63.720	-51.800
Other Services	-55.000	-119.400	-217.000	-116.300	-17.900	-8.300	-300.000	-29.300	-5.200	-15.400	-5.020	-45.600	-63.800	-53.100	-85.100	-67.500

5. 本研究開発により得られた成果

(1) 科学的意義

複数主体の問題については、これまで、気候変動問題において重要な要素となるゲーム論的な相互作用ないし不確実性を考慮した分析事例はあるものの、それらを同時に扱う例はとても限られている。本研究は、気候変動問題において重要な要素である複数国間の相互作用と不確実性を扱うもので、新しいアプローチを試みた。本研究により、交渉と経済分析の融合について新しい成果が得られた。

平成24年度では気候変動問題における温室効果ガスの削減行動についてゲーム論的な相互作用を導入した統合評価モデルを構築した。平成25年度ではその統合評価モデルを精緻化させ、ゲーム論的な相互作用を前提とした排出削減パスの各シナリオについての影響評価を地域別・部門別に行った。この影響評価では地域ごと、部門ごとに異なる影響が見られたが、この結果は、従来のゲーム論的な研究においては指摘されてこなかった点である。平成26年度には、複数のSSPシナリオにおいて各RCPケース・戦略ケースについて対策評価を行い、データをまとめ、産業別の経済評価を行った。このように様々な最新の社会経済シナリオや排出シナリオ、温暖化対策における地域・部門別の結果は、従来の研究ではあまり得られなかった点である。平成27年度には、経済影響の要因分解を行い、地球温暖化の直接影響以外の間接影響も各産業各地域で異なり、途上国を中心に大きな影響があることがわかった。平成28年度には、パリ協定における温度目標に対応した適応費用の推計を行い、アジアやアフリカを中心に適応費用が大きくなる結果が得られた。このように様々な最新の社会経済シナリオや排出シナリオ、温暖化対策

における地域・部門別の結果は、従来の研究ではあまり得られなかった点である。

(2) 環境政策への貢献

多地域多部門モデルによる経済政策評価はこれまで貿易政策や通貨政策などで実績がある。これに対し、国際的視点からの環境政策評価は、この経済モデルの援用による一般均衡論の枠組みにおける炭素税評価などを数えるのみ、本研究のような包括的な環境影響やゲーム論評価はなされていない。特に、世界協調ゲームと利己的ゲームの間に大きな差が生じないという知見は、今後の環境政策に寄与するところが大きいと考えられる。

6. 国際共同研究などの状況

複数主体の相互作用を考慮した世界経済モデルの開発の研究に関し、2013年2月23日、24日に海外からの研究者としてZili Yang教授 (State University of New York at Binghamton) およびJohan Eyckmans教授 (The Hogeschool-Universiteit Brussel) を招き、国際ワークショップを上智大学において開催した。本プロジェクトに関して、” Computable General Equilibrium Analyses of Global Economic Impacts and Adaptation for Climate Change: A Game Approach” および ” Computable General Equilibrium Analyses of Global Economic Impacts and Adaptation for Climate Change: The Case of Tropical Cyclones” の二つの論文を発表し、両教授も含め内外の研究者との間で議論を深め、今後の研究の発展方向に重要な示唆を得ることができた。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- (1) T. Washida, K. Yamaura and S. Sakaue, "Computable General Equilibrium Analyses of Global Economic Impacts and Adaptation for Climate Change: The Case of Tropical Cyclones",
International Journal of Global Warming, Vol.6, No.4, pp.466-499, 2014
- (2) S. Sakaue, K. Yamaura and T. Washida, "Regional and Sectoral Impacts of Climate Change Under International Climate Agreements",
International Journal of Global Warming, Vol.8, No.4, pp.463-500, 2015
- (3) K. Yamaura, S. Sakaue and T. Washida, "Regional and Sectoral Impacts of Global Warming and Agricultural Production: A Case of CGE Analyses",
Japanese Journal of Agricultural Economics, Vol.19, 2017 (in press)

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表 (査読なし) >

- (1) S. Sakaue, K. Yamaura and T. Washida, "Computable General Equilibrium Analyses of Global Climate Agreements: A Multi-sector and Multi-region Dynamic Model", 地球環境学、第12号、2017 (in press)

(2) 口頭発表 (学会等)

- (1) T. Washida : Keynote Lecture, The 9th International Symposium on Novel Carbon Resource Sciences, Kyushu University, Japan, 2012 ``Computable General Equilibrium Analyses of Global Economic Impacts and Adaptation for Climate Change.” (報告者：鷺田豊明)
- (2) 鷺田豊明、坂上紳、山浦紘一：第 15 回環境・資源経済学ワークショップ、東北大学 (2013) ``Computable General Equilibrium Analyses of Global Economic Impacts and Adaptation for Climate Change: A Game Approach.” (報告者：鷺田豊明)
- (3) 鷺田豊明、坂上紳、山浦紘一：六甲フォーラム、神戸大学 (2013) ``Computable General Equilibrium Analyses of Global Economic Impacts and Adaptation for Climate Change: A Game Approach.” (報告者：鷺田豊明)
- (4) T. Washida, S. Sakaue, and K. Yamaura : International Workshop on Game Theory and Simulation Model for Climate Change, Sophia University, Japan, 2013 ``Computable General Equilibrium Analyses of Global Economic Impacts and Adaptation for Climate Change: A Game Approach.” (報告者：鷺田豊明)
- (5) T. Washida, K. Yamaura, and S. Sakaue : International Workshop on Game Theory and Simulation Model for Climate Change, Sophia University, Japan, 2013 ``Computable General Equilibrium Analyses of Global Economic Impacts and Adaptation for Climate Change: The Case of Tropical Cyclones.” (報告者：山浦紘一)
- (6) T. Washida, S. Sakaue, and K. Yamaura : Environment Economics Seminar, University of Gothenburg, Sweden, 2013 ``Computable General Equilibrium Analyses of Global Economic Impacts and Adaptation for Climate Change: A Game Approach.” (報告者：鷺田豊明)
- (7) T. Washida, S. Sakaue, and K. Yamaura : Western Economic Association International 10th Biennial Pacific Rim Conference, Keio University, Japan, March 14-17, 2013 ``Computable General Equilibrium Analyses of Global Economic Impacts and Adaptation for Climate Change: A Game Approach.” (報告者：坂上紳)
- (8) 鷺田豊明、坂上紳、山浦紘一：環境経済・政策学会 2013 年大会、神戸大学 (2013) ``Computable General Equilibrium Analyses of Global Climate Agreements: A Game Approach.” (報告者：坂上紳)
- (9) 鷺田豊明、山浦紘一、坂上紳：環境経済・政策学会 2013 年大会、神戸大学 (2013) 「気候変動が遺伝資源由来医薬品産業に及ぼす影響評価：応用一般均衡世界モデル EMEDA による分析」 (報告者：山浦紘一)
- (10) 坂上紳、山浦紘一、鷺田豊明：環境経済・政策学会 2014 年大会、法政大学 (2014) ``Regional and Sectoral Economic Impacts of Climate Change Under RCP and SSP Scenarios.” (報告者：坂上紳)
- (11) 坂上紳、山浦紘一、鷺田豊明：環境経済・政策学会 2015 年大会、京都大学 (2015) ``Decomposition of Regional and Sectorial Economic Impacts of Climate Change under RCP and SSP Scenarios.” (報告者：坂上紳)
- (12) K. Yamaura, S. Sakaue and T. Washida : 2016 AESJ annual meeting, Akita Prefectural University, Japan, 2016, ``Regional and Sectoral Impacts of Global warming and agricultural production: A CGE analyses.” (報告者：山浦紘一)
- (13) 坂上紳、山浦紘一、鷺田豊明：日本経済学会 2016 年度春季大会、名古屋大学 (2016) ``Decomposition of Regional and Sectorial Economic Impacts of Climate Change under RCP and SSP Scenarios.” (報告者：坂上紳)

- (14) 坂上紳、山浦紘一、鷺田豊明：環境経済・政策学会 2016 年大会、青山学院大学 (2016) ``An Economic Analysis on Climate Impacts with Adaptation to Climate Change under SSP and RCP Scenarios.” (報告者：坂上紳)
- (15) K. Yamaura, S. Sakaue and T. Washida : 2017 AESJ annual meeting, Chiba University, Japan, 2017 ``Global and Regional Agricultural Impacts on Climate Change and the Paris Agreement.” (報告者：山浦紘一)

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

2013年2月23日、24日に海外からの研究者としてZili Yang教授 (State University of New York at Binghamton) およびJohan Eyckmans教授 (The Hogeschool-Universiteit Brussel) を招き、国際ワークショップを上智大学において開催した。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

1. Anthoff, D. and R. S. J. Tol (2014) The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND), Technical Description, version 3.9. Available at: <http://www.fund-model.org/versions>.
2. de Bruin, K. C., R. B. Dellink and R. J. S. Tol (2009). AD-DICE: an implementation of adaptation in the DICE model. *Climatic Change* 95(1): 63-81.
3. Nordhaus, W. D. (2012) RICE-2010 and DICE-2010 models, mimeo. Available at: <http://nordhaus.econ.yale.edu/RICEmodels.htm> (accessed 5 October 2012).

(2) 2. 複数主体の相互作用を考慮したエネルギー経済モデルの開発動向調査と評価

公益財団法人地球環境戦略研究機関 矢野 貴之(H24-25)
H26より 広島修道大学へ異動

その他の研究協力機関等

早稲田大学現代政治経済研究所 杉野 誠

(※) 担当者である矢野 貴之は平成 26 年に広島修道大学に異動し、その後、本サブテーマの継続が困難になったとの本人の申し出により、平成 26 年度をもってこのサブテーマは終了となった。

平成24～28年度累計予算額：8,931千円（うち平成26年度：3,456千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

気候変動問題の経済的な分析では、不確実性と国家間相互依存関係を前提とした数量的な分析が特に重要であると考えられる。そこで、本研究では、不確実性と相互依存関係を取り入れたエネルギー経済モデルの開発とシミュレーションを行う。まずゲーム理論と不確実性をういたエネルギー経済モデルの開発動向を調査し、エネルギー経済モデルにおける国家間相互作用のモデルについて検討した。次いで国際産業連関表をベースに中間需要と最終需要の合計により生産を決定する需要主導型経済サブモデルを含み、気候変動や被害についてはNordhausの統合評価型モデルを基本的に踏襲した小型のエネルギー経済モデルを定式化した。さらに、エネルギー経済モデル全体を制約条件として二次損失型目的関数を最小化することで、気候変動に対する政策反応関数を導出した。これにより、ある経済が政策を施行する際に考慮する政策目標変数に対する優先度の強弱を導入することができるようにした。エネルギー経済モデルの多くは、モデル開発動向の調査を行った。国連気候変動枠組条約締約国会議における交渉の現状からも明らかのように、気候変動の緩和に向けた国際間合意を得るのは極めて難しくなっている。国家間の利害が複雑に交錯し、ある一つの国の行動にも不確実性が伴い、さらに相互依存関係が複雑化している。また、気候変動が長期的な課題であることから、不確実性も重要な要素となっている。これらから、気候変動問題の経済的な分析では、不確実性と国家間相互依存関係を前提とした数量的な分析が特に重要であることが分かる。そこで、本研究では、不確実性と相互依存関係を取り入れたエネルギー経済モデルの開発とシミュレーションを行う。不確実性についてはモンテカルロ法を中心に、相互依存関係についてはゲーム論や政策協調のこれまでの成果を取り入れつつ、シミュレーションを行った。

1. はじめに

地球温暖化対策評価のためにこれまで様々なエネルギー経済モデルが開発されてきた。これらのほとんどは生産関数による最適成長モデルが前提となっており、市場均衡により最適解が決まるとされている。しかしながら、現実の経済の挙動は①需要が主導する、②必ずしも市場が何等かの効用関数の最大化のように挙動しない、という側面が存在する。このような立場からの経済は、ケインズ的世界観と呼ばれる。この世界においては、市場は必ずしも一般均衡を前提とせず、縦の費用構成を構成する項目の合計（生産費用の積み上げ）から名目での国別産業別生産を決定し、その名目の国別産業別生産を、販路構成から決定した実質の国別産業別生産で除すことで価格を求める。これらの国別産業別での生産

と価格は、整合的になるように同時に決定される。また、市場に参加する多主体プレーヤもまた、必ずしも何等かの効用関数の最大化ではなく、局面局面で何らかのルールにより行動するとする見方も可能である。そこで、本研究では、従来とは異なる方法論に基づく定式化を行うとともに、モンテカルロ法による不確実性を明示的に扱うゲーミングシミュレーションを可能とするためのコンパクトなモデル開発を行う。

2. 研究の目的

気候変動問題の経済的な分析では、不確実性と国家間相互依存関係を前提とした数量的な分析が特に重要であると考えられる。そこで、本研究では、不確実性と相互依存関係を取り入れたエネルギー経済モデルの開発とシミュレーションを行う。

まず、ゲーム理論と不確実性を用いたエネルギー経済モデルの開発動向を調査し、エネルギー経済モデルにおける国家間相互作用のモデルについて検討する。次いで、国際産業連関表をベースに中間需要と最終需要の合計により生産を決定する需要主導型経済サブモデルを含み、気候変動や被害についてはNordhausの統合評価型モデルを基本的に踏襲した小型のエネルギー経済モデルを定式化し、シミュレーションを行い現実の各国の行動を模擬できるようにする。これにより、他のサブテーマと同様の共通シミュレーションプラットフォームであるSSPならびにRCPの各シナリオに基づくシミュレーション分析を行い、国際的な比較分析や政策論議のための基盤を形成する。この時、同時にゲームにおける政策反応関数をより現実的にする試みとモンテカルロ法以外の不確実性の導入について検討を加えることを目指す。

3. 研究の方法

まず、モデル開発動向の調査を行った。国連気候変動枠組条約締約国会議における交渉の現状からも明らかのように、気候変動の緩和に向けた国際間合意を得るのは極めて難しくなっている。国家間の利害が複雑に交錯し、ある一つの国の行動にも不確実性が伴い、さらに相互依存関係が複雑化している。また、気候変動が長期的な課題であることから、不確実性も重要な要素となっている。これらから、気候変動問題の経済的な分析では、不確実性と国家間相互依存関係を前提とした数量的な分析が特に重要であることが分かる。そこで、本研究では、不確実性と相互依存関係を取り入れたエネルギー経済モデルの開発とシミュレーションを行う。不確実性についてはモンテカルロ法を中心に、相互依存関係についてはゲーム論や政策協調のこれまでの成果を取り入れつつ、シミュレーションを行う。この目的のため、平成24年度は、ゲーム理論と不確実性を用いたエネルギー経済モデルの開発動向を調査し、エネルギー経済モデルにおける国家間相互作用の定式化について検討した。

また、(1) 不確実下の意思決定方法に着目したエネルギー経済モデルの開発動向調査と拡張と同様に、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第4次評価報告書や『気候変動の経済学: スターン・レビュー』(Stern 2007)などを参考にして、社会経済対策の抽出、社会経済対策がもたらす機会とリスクについての調査を行った。

次いでモデル構築を行う。まず、アジア経済研究所のBRICs国際産業連関表を、経済サブモデルを開発するための主要データとして設定した。国際産業連関表では、横に販路構成(中間需要と最終需要)、縦に費用構成(中間投入と付加価値)が示されている。これまでの多くのエネルギー経済モデルは、経済成長モデルにより経済サブモデルを描いているため、生産関数が前提となっており、供給側つまり国際産業連関表でいうところの縦の費用構成に基づいて国別産業別生産が決定される。これらに対して、

本研究では、ケインズ的な世界を前提として、横の販路構成が生産を決定すると考える。そして、縦の費用構成を構成する項目の合計（生産費用の積み上げ）から名目での国別産業別生産を決定し、その名目の国別産業別生産を、販路構成から決定した実質の国別産業別生産で除することで価格を求める。これらの国別産業別での生産と価格は、整合的になるように同時に決定される。

この需要主導型モデルの特徴は、一般均衡を必ずしも前提としていないという点にある。エネルギー経済モデルでは、計算可能な一般均衡モデルにより経済を描写するのが基本であるが、需要と供給が一致するように価格を調整するため、全ての市場で均衡を達成することができる。しかし、2008年の世界的な不況時に提唱されたグリーン成長戦略は、低炭素化を通じて経済を不況から立ち直らせることを主眼としており、その際の重要な指標として失業率が挙げられていた。本研究で用いる需要主導型モデルは、不均衡を認めるモデル構造になっており、気候変動対策や複数国間の相互作用によって各経済の失業がどのような影響を受けるのかを明らかにすることができる。

なお、地域と産業の分類は表(2).2-1の通りで、7地域・7産業部門になっている。このように、本研究で用いるエネルギー経済モデルは小型になっている。複数国間の相互依存を組み込むためには繰り返し計算が必要である。大型のモデルでは繰り返し計算の実行可能性が必ずしも担保できないため、経済サブモデルはできうる限りコンパクトにしている。さらに、経済サブモデルの定式化も簡素化し、計算の実行可能性を確保するようにした。

また、経済以外の気候変動と被害の定式化については、NordhausのDICEモデルのものを使用している。気温上昇により、国別産業別生産の損失という形で被害が生じるようになっている。CO₂

排出については、経済サブモデルで決定される生産にCO₂排出係数を乗じることで求め、その結果を気候変動サブモデルにリンクさせる構造になっている。国別産業別でのCO₂排出のデータは、BRICs国際産業連関表にはないので、37部門分類のWorld Input-Output Database (WIOD)のCO₂排出データをBRICs国際産業連関表の7部門分類に整合するように統合し、その統合したデータから計算した。

次いで、政策反応関数の定式化を行う。既存のエネルギー経済モデルには、一般均衡という特徴だけでなく、消費者の効用の流れを最大化するようにモデルを解くという特徴もある。経済理論上は効用を最大化するというの正しい論理であるものの、効用は計測できるものでもなく、政策を考えるときに政策担当者が注視している変数との間にギャップがあることを昨年度に指摘した。そこで、本研究では政策協調のフレームワークを応用して政策ゲームを考えることにした。

政策ゲームを考える上で鍵を握るのが目的関数である。ここでは、次の二次損失型目的関数を設定した。

$$F_{i,t} = \sum_{s=0}^m \left(P_{i,t+s} - \bar{P}_{i,t+s} \right)^2 + w_{Ci} \sum_{s=0}^m \left(CO2_{i,t+s} - \overline{CO2}_{i,t+s} \right)^2 + w_a \left(\tau_{i,t} - \bar{\tau}_{i,t} \right)^2 \quad (2)2-1$$

ここで、 $F_{i,t}$ は*t*期の第*i*国の目的関数、 $P_{i,t+s}$ は第*i*国の*t+s*期の物価、 $CO2_{i,t+s}$ は第*i*国の*t+s*期のCO₂排出、 $\tau_{i,t}$ は第*i*国の*t*期の政策手段（炭素税を想定）、 w_{Ci} は第*i*国の物価の二次損失にかかるウェイト、 τ_{Ci} は

表(2)2-1: 地域分類・産業分類

	地域	産業
1	ブラジル	農林水産業
2	中国	鉱業
3	インド	製造業
4	日本	電気・ガス・水道
5	EU	建設
6	ロシア	商業・運輸
7	米国	その他サービス

第*i*国の政策手段の二次損失にかかるウェイト、バーがついている変数はそれらの理想値となっている。この目的関数では、*t*期において無限大ではなく *m*期先まで考慮するようになっている。各期の政策手段の決定は、超長期的視野で行われるのではなく、数期先の状態を考えながら行い、数期の決定を積み重ねて長期に至ると想定している。なお、(2-2-1)式では、政策手段が気候変動対策であるが、CO₂排出以外に物価も政策目標変数として含まれている。これは、CO₂排出のみとすると経済への影響を考慮せずに政策運営をしてしまうことになり、経済への損害が大きくなることが考えられるためである。経済を代表する政策目標変数としてはGDPないし経済成長率が代表的ではある。しかし、二次損失型ではGDPが増えるほど、もしくは経済成長率が高いほどペナルティを与えることになる。一方、物価については、インフレーションもデフレーションもよいものとはされていない。つまり、上がりすぎても下がりすぎても、政策運営上問題となる。このような経済変数の性質を考慮して、ここでは経済を代表する変数として物価を選択した。

この二次損失型目的関数を、エネルギー経済モデルを制約として最小化すると次の政策反応関数を得ることができる。

$$\tau_{i,t} = \bar{\tau}_{i,t} - \frac{1}{w_{\bar{a}}} \sum_{s=0}^m (P_{i,t+s} - \bar{P}_{i,t+s}) \left(\frac{\partial P_{i,t+s}}{\partial \tau_{i,t}} \right) - \frac{w_{Ci}}{w_{\bar{a}}} \left\{ \sum_{s=0}^m (CO2_{i,t+s} - \overline{CO2}_{i,t+s}) \left(\frac{\partial CO2_{i,t+s}}{\partial \tau_{i,t}} \right) \right\} \quad (2) 2-2$$

この政策反応関数をエネルギー経済モデルに組み込むことで、政策目標とそれらに対する優先度に応じた政策を導出することが可能になった。

ゲーミングシミュレーションに際しては、ここでは上記の行動ルールに基づく協調ゲームをまず想定する。ここで、政策協調を *K* 国間で行うとすると次のように各国の目的関数の加重平均をとった国際的目的関数を用いる。

$$F_{A,t} = \sum_i^K \omega_i F_{i,t} \quad (2) 2-3$$

ここで、 $F_{A,t}$ は国際的目的関数、 ω_i は第 *i* 国の目的関数に対するウェイトである。(2-2-3)式の国際的目的関数を最小化する場合は、自国の政策手段で自国のみならず外国の政策目標変数にも対応することになる。

しかしこの協調ゲームを、本研究で扱っている気候変動問題に当てはめるとなると、自国の炭素税で他国のCO₂排出の削減を行うということになる。気候変動枠組み条約締約国会議で各国の温室効果ガス削減目標値の設定が極めて困難になっている状況を鑑みると、目標と政策手段の両者に関して協調ゲームのフレームワークを用いるというのは非現実的であると言わざるを得ない。フリーライダー問題が生じかねない気候変動においては、非協調ゲームが中心とならざるを得ない。よって、本研究では、政策ゲームの設定を次のように行う。

- ゲーム I : 物価と CO₂ 排出について独自の理想値
- ゲーム II : CO₂ 排出の理想値についてはコペンハーゲン合意の値

ゲームIは、物価についてもCO₂排出についても独自の政策目標を持つ。政策目標についても政策手段について協調しない、いわゆる非協調ゲームと考えることができる。ゲームIIは、CO₂排出については気候変動枠組み条約締約国会議のコペンハーゲン合意によるものをその理想値として使用するものである。物価については各国の判断に基づく理想値を、CO₂排出については国際的な合意に基づく理想値を使用することから目標に関して部分協調となっている。一方、政策手段については、国際的な目的関数を前提としているわけではなく、自国の政策手段を自国の政策目標に対してのみ適用しているため非協調といえる。つまり、ゲームIIは、目標：部分協調・政策手段：非協調のゲームである。

4. 結果と考察

開発したエネルギー経済モデルを本テーマ全体の目的に合致させシミュレーションを行うには、SSPシナリオへの調整作業がまず必要である。

SSPとRCPは、世界各国のエネルギー経済モデルの分析で用いられているシナリオである。これらのシナリオを適用することは、他のモデル分析と比較する上で非常に重要な意味を持ちうる。ゲーム論的なシミュレーション分析の基盤となるものである。

SSPの重要な変数として人口とGDPがあるが、本モデルでは人口変数は導入していないため、GDPのみチューニングを行った。また、本モデルは中間需要と最終需要の合計が総生産を決定する需要主導型モデルであり、計算可能な一般均衡モデルでよく用いられるような付加価値関数は持ち合わせていない。よって、GDPを構成する項目に調整係数を乗じる形でチューニングを行った。その方法は、次の通りである。

地域別産業別付加価値を構成するのは、地域別産業別賃金、地域別産業別営業余剰、地域別産業別資本減耗、地域別産業別での間接税 - 補助金である。これら4つの項目について足し上げると地域別産業別付加価値を求めることができる。この地域別産業別付加価値を産業について足し上げるとマクロで付加価値、つまりGDPとなる。SSPのGDPの比率とモデルが算出するGDPの比率、つまり（SSPのGDP/モデルが算出するGDP）を間接税 - 補助金以外の付加価値構成項目に乗じて調整を行った。まず、地域別産業別賃金給であるが、これは地域別産業別賃金率に地域別産業別雇用量を乗じることで説明できる。ここで地域別産業別雇用量を地域別産業別付加価値の関数として、次のように調整した。

$$L_j^k = \phi^k \alpha_j^k VAR_j^k \quad (2)2-4$$

ここで、 L_j^k はk地域j産業の雇用量、 α_j^k はk地域j産業の雇用係数、 VAR_j^k はk地域j産業の付加価値である。地域別産業別営業余剰と地域別産業別資本減耗も同様に、当該地域当該産業の付加価値の関数として表現し、次のように調整した。

$$YC_j^k = \phi^k \beta_j^k VAR_j^k \quad (2)2-5$$

$$DEP_j^k = \phi^k \gamma_j^k VAR_j^k \quad (2)2-6$$

ここで、 YC_j^k はk地域j産業の営業余剰、 DEP_j^k はk地域j産業の資本減耗、 β_j^k と γ_j^k はk地域j産業におけ

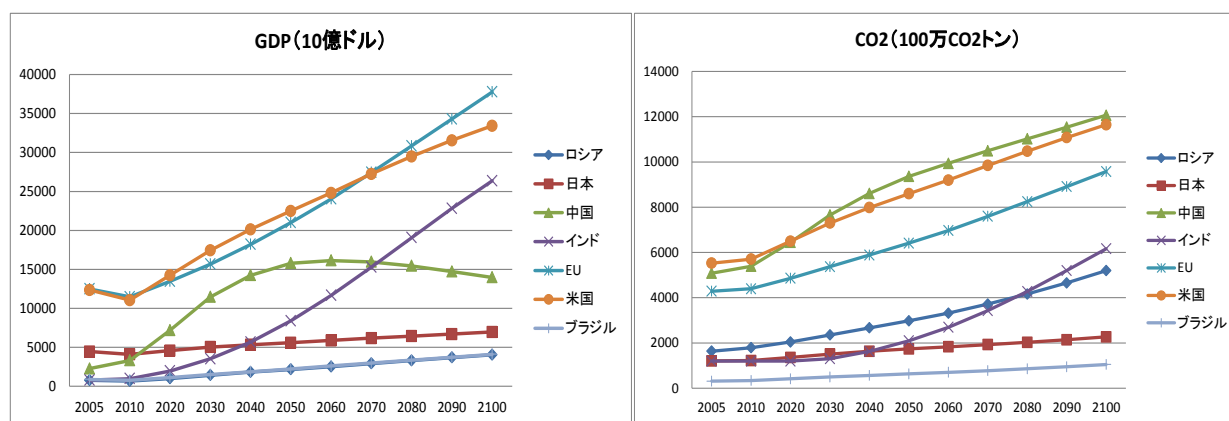
るパラメータである。地域別産業別付加価値を構成する間接税 - 補助金については、その係数が税率を意味することと、付加価値よりも生産そのものに課せられていると考えられることから、調整係数は乗じなかった。

ここでは、SSP2の結果について示す。

表(2)2-1は、モデルが算出した各地域のGDPの当該地域のSSP2でのGDPからの乖離率を示したものである。日本については、乖離が8%以内でおさまっているものの、ロシア、中国、ブラジルでは20%以上と高めになっている。図(2)2-1が示すように2005年から2100年にかけての推移については概ねその傾向を捉えているものの、いずれも負となっており、モデルの解がSSP2の値よりも通年で低くなっている。

表(2)2-1 解のSSP2からの乖離率 (%)

	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
ロシア	-27.089	-28.255	-28.842	-29.121	-29.203	-29.259	-29.311	-29.299	-29.251	-29.156
日本	-7.691	-7.690	-7.562	-7.384	-7.346	-7.448	-7.457	-7.297	-6.957	-6.349
中国	-20.272	-22.982	-23.633	-23.785	-23.795	-23.696	-23.526	-23.278	-22.940	-22.507
インド	-18.625	-18.906	-18.804	-18.306	-17.684	-17.252	-17.049	-16.982	-16.988	-17.041
EU	-13.239	-13.438	-13.619	-13.884	-14.157	-14.392	-14.583	-14.723	-14.830	-14.914
米国	-15.782	-16.650	-17.195	-17.554	-17.821	-18.051	-18.255	-18.424	-18.571	-18.696
ブラジル	-23.109	-23.298	-23.408	-23.478	-23.525	-23.548	-23.543	-23.512	-23.441	-23.312



図(2)2-1 モデルが算出したGDPとCO₂の推移

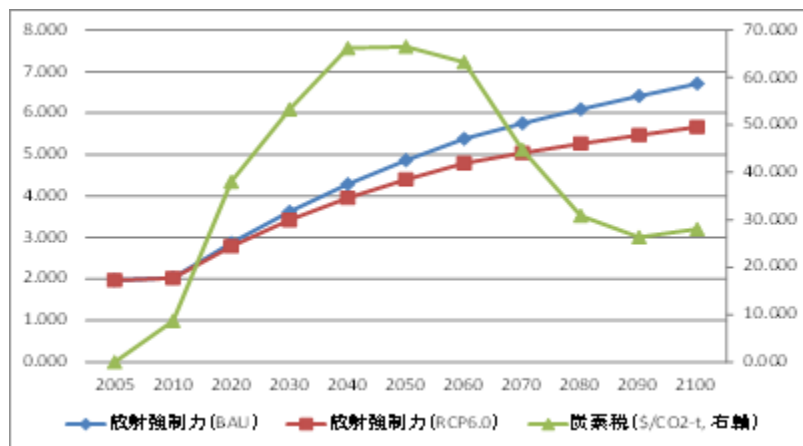
RCPに関する調整は、世界共通の炭素税を導入することで行った。炭素税は、次式で示される政策反応関数に従い決定した。

$$\tau_t = a + b \frac{(F_t - \bar{F}_t)}{\bar{F}_t} \quad (2)2-4$$

ここで、 τ_t はt期の世界共通炭素税 (\$/CO₂トン)、 F_t はt期の放射強制力、 \bar{F}_t はt期の放射強制力の理想値 (extended DICEモデルにより求められた値、RCPのシナリオ別) である。 a と b はパラメータである。ゲームにおける政策反応関数をより現実的にする試みとして、欧州と北米東部の排出権価格のデータを用いて、RCPのシナリオごとに (2). 2. 4-4式を計量経済学的に推定した。不均一分散が想定されるので、Whiteの修正を行った標準誤差を使用している。その推定結果は、表(2). 2. 4-2の通りである。RCP6.0ヶ

ースでの放射強制力、炭素税の推移を求めた例を図(2).2.4-2に示す。

放射強制力とその理想値よりも高くなった時、炭素税を課税ないし税率を上げてCO₂排出を削減するため、パラメータ*b*の符号はプラスでなければならない。表(2).2.4-2を見ても分かるように、パラメータ*b*はいずれのRCPにおいてもプラスとなっており、符号条件は満たしている。一方、自由度修正済み決定係数は0.4以下でいずれも低く、当てはまりは必ずしも良いとは言えない。



図(2)2-2 SSP2-RCP6.0シナリオでの放射強制力と炭素税

表(2)2-2 政策反応関数の推定結果

	<i>a</i>			<i>b</i>			Adj. <i>R</i> ²
	推定値	標準誤差	p値	推定値	標準誤差	p値	
RCP2.6	46.614	8.023	0.000	247.806	50.978	0.000	0.350
RCP4.5	48.287	8.345	0.000	272.037	55.838	0.000	0.351
RCP6.0	47.317	8.138	0.000	290.750	59.500	0.000	0.352
RCP8.5	48.702	8.376	0.000	239.708	48.835	0.000	0.356

注) Adj. *R*²は自由度修正済み決定係数。

また、環境と経済の安定的な成長を考慮し、政策反応関数の説明変数に消費者物価も加えた次式も推定してみた。

$$\tau_t = a + b \frac{(F_t - \bar{F}_t)}{\bar{F}_t} + c \frac{(PCP_t - \overline{PCP}_t)}{\overline{PCP}_t} \quad (2)2-5$$

ここで、 PCP_t は*t*期の消費者物価、 \overline{PCP}_t は*t*期の消費者物価の理想値である。しかし、パラメータ*c*は、全てのRCPについて統計的有意とはならなかった。このため、本研究では放射強制力のみを説明変数として用いる(2).2.4-4式を採用している。

本サブテーマでは、またリアルオプション・モデル(坂上 2007)、ポートフォリオ・モデル(Springer 2003; Bohringer and Loschel 2008)、確率的動的計画法(Golub, Narita and Schmidt 2011)について検討を加えた。

連続時間での動的計画法により最適化を行う確率的動的計画法が本来適用されるべき手法と考えられ

る。実際に、ゲームかつ確率的動的計画法を適用して気候変動に関する交渉問題を扱っている例として Courtois and Tazdaït (2007)があるが、その計算が膨大であることから、3地域での分析にとどまっている。3地域での分析では、科学的な意義を見出すことはできても、政策インプリケーションをも導くのは非常に困難である。さらに、本研究で使用しているモデルは、必ずしも各経済主体の最適化行動から行動方程式を導いてはいないことや使用しているデータが単年度であることもあって、リアルオプション・モデル、ポートフォリオ・モデルならびに確率的動的計画法を適用する意義は薄いと言える。

本研究で不確実性を導入するべきは、限定的なデータにより推定された政策反応関数における気候変動に関する変数に付与されたウェイトにある。このウェイトは、その地域の気候変動に対する政策スタンスを表している。もちろん、将来的にリアルオプション・モデル、ポートフォリオ・モデルならびに確率的動的計画法を適用することは否定しないものの、計算負荷なども考慮すると当面はウェイトの不確実性を表す方法として Alberth and Hope (2007)や Bosetti et al. (2008)のようにモンテカルロ法を適用すれば十分であると判断される。

5. 本研究開発により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究が提案するケインズ型需要駆動モデルによる市場均衡を仮定しない多主体モデルという提案はこれまでに例がなく、新しい貢献である。研究活動が3年で終了したため、このモデルは未完成に終わったが、マルチモデルでの比較に至れば、興味深い知見を導いたものと予想される。

(2) 環境政策への貢献

モデルが完成に至らなかったため、この段階ではモデル結果からの環境政策への貢献は認められないものの、コンパクトで操作可能性が高く、かつ、現実的な各国行動をシミュレートできるモデルツールは、他に例がないだけに政策ツールとしての貢献が期待できた。

6. 国際共同研究などの状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

特に記載すべき事項はない。

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- (1) Alberth, Stephan and Chris Hope. 2007. "Climate Modelling with Endogenous Technical Change: Stochastic Learning and Optimal Greenhouse Gas Abatement in the PAGE2002 Model." *Energy Policy* 35, no. 3: 1795-1807.
- (2) Bohringer, Christoph and Andreas Loschel. 2008. "Climate Policy-Induced Investments in Developing Countries: The Implications of Investment Risks." *World Economy* 31, no. 3: 367-392.
- (3) Bosetti, Valentina, Alexander Golub, Anil Markandya, Emanuele Massetti and Massimo Tavoni. 2008. "Abatement Cost Uncertainty and Policy Instrument Selection under a Stringent Climate Policy: A Dynamic Analysis." FEEM Working Paper no. 15.2008, Fondazione Eni Enrico Mattei.
- (4) Courtois, Pierre and Tarik Tazdait. 2007. "Games of Influence in Climate Change Negotiations: Modeling Interactions." *Ecological Modeling* 204, no. 3-4: 301-314.
- (5) Golub, Alexander, Daiju Narita and Matthias G. W. Schmidt. 2011. "Uncertainty in Integrated Assessment Models of Climate Change: Alternative Analytical Approaches." FEEM Working Paper no. 02.2011, Fondazione Eni Enrico Mattei.
- (6) Springer, Urs. 2003. "International Diversification of Investments in Climate Change Mitigation." *Ecological Economics* 46, no. 1: 181-193.

(3) 適応・ジオエンジニアリングを考慮した統合評価モデルの拡張と応用

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

プロジェクト試験研究部	地球環境グループ	黒沢 厚志
プロジェクト試験研究部	新エネルギーグループ	森山 亮
プロジェクト試験研究部	水素エネルギーグループ	石本 祐樹
プロジェクト試験研究部	原子力グループ	都筑 和泰 (H24-H26年度)
プロジェクト試験研究部	地球環境グループ	加藤 悦史 (H27-H28年度)

<研究協力者>

一般財団法人	エネルギー総合工学研究所	都筑 和泰 (H27-H28年度)
国立大学法人	東京大学	杉山 昌広
国立研究開発法人	海洋研究開発機構	増田 耕一
国立大学法人	長崎大学大学院	竹下 貴之

平成24～28年度累計予算額：92,895千円（うち平成28年度：17,739千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

近年注目を集めながらもなお技術・コストいずれも不確実性の大きいジオエンジニアリングについて、コストや効果、副次的リスクなどについての技術開発動向を文献調査した。また適応策のモデル化の検討と合わせ、データの精査とモデル拡張作業を実施した。これらジオエンジニアリングのうち、バイオエネルギー利用におけるCCS (BECCS)および太陽放射管理について、拡張したモデルを利用し気候変動対策のモデル評価を行った。

成層圏エアロゾル注入(SAI)の実施コストは従来言われているコストと比較すると数倍から数十倍高くなることがわかった。既存の航空技術を用いた場合のSAI実施コストは放射強制力 $2\text{W}/\text{m}^2$ に換算すると、90billion US\$/年になり、アポロ計画など大規模プロジェクトの予算よりも高く、アメリカ、中国の軍事予算に匹敵し、個人の資産では賄えないものであることがわかった。

直接空気回収(DAC)技術の実施コスト、必要なエネルギーについて、先行研究をレビューし、その不確実性を把握した。簡易なモデルを用いて回収規模1Mt-CO₂/年のCO₂回収コストを評価した結果、57,000円/t-CO₂とCCS等他の緩和技術に比較して1桁程度高いことが分かった。また、DAC技術のエネルギー原単位からDAC技術を用いてグローバルなCO₂削減に寄与するには膨大なエネルギー需要が生じることがわかった。

モデル拡張については、BECCSに関する技術コスト、エネルギーフロー、土地利用影響のモデル実装に関し詳細化を行い、2度目標シナリオにおける最適なBECCS利用と土地利用に与える影響を評価した。また、緩和策にSRMを組み合わせた分析により、SRMの潜在的経済価値を確認した。

適応策のモデル化については、文献調査により現状を把握するとともに、統合評価モデルに適応モデルを組み込んだ計算を実施できるようにした。そのモデルで試算を行い、緩和と適応のバランスの在り方について、論点を整理することができた。

[キーワード]

気候工学、ジオエンジニアリング、二酸化炭素除去、太陽放射管理、適応

1. はじめに

二酸化炭素(CO₂)などの温室効果ガスの排出量は伸び続けており、全球平均気温上昇を産業化前に比較して2度を十分下回る程度に抑えるといった国際目標に対し、緩和策や十分でない可能性、また目標が達せなかった場合における適応策の大幅な強化を考慮する必要がある。こうした状況の下で、一部の科学者は、人類が直接的に気候システムに介入し気温を低下させるか、または必要な濃度レベルに影響を与える程度までCO₂を大気から直接回収するという気候工学(ジオエンジニアリング)について検討をしている。

気候工学の概念自体は古いが、緩和策の動機減少への懸念から、最近まで積極的議論が行われてこなかった。しかし、2009年の英国 Royal Societyの気候工学に関する総合的な報告書¹⁾の発行、2011年開催のIPCC気候工学専門家会合報告書²⁾における気候工学の定義、IPCC第5次評価報告書³⁾でのレビュー対象化、全米研究評議会報告書⁴⁾などで議論が活性化している。気候工学のオプションは2種類に大別される。その一つは気候システムのエネルギー収支に介入して気温上昇を打ち消そうとする方法であり、そのほとんどの提案は、直接的または間接的に太陽放射の反射を増やす手法で、太陽放射管理(solar radiation management, SRM)と呼ばれる。もう一つは大気中から温室効果物質を減らす方法であり、そのほとんどは、CO₂を直接的または間接的に除去するもので、CO₂除去(carbon dioxide removal, CDR)と呼ばれる。負の排出である「ネガティブエミッション」を含めた超低排出シナリオを可能とするためには、バイオマスCCSなどのCDRが必須の手段になる。検討内容は科学技術的なものに加え社会的受容性や国際枠組など社会的なものについても始まっている。気候工学の概要については杉山らの文献を参照されたい⁵⁾。

ジオエンジニアリングのように対策の可能性が指摘されていても、その特性および副作用については未知である場合がある。また、適応策のように個別的な対策の場合、各々の特性はある程度知られているものの、対策の種類が多く体系化がなされていないなどの理由で、地球温暖化対策という大規模かつ長期的な視点からの包括的かつ総合的な位置づけが難しい問題がある。このように、ジオエンジニアリングおよび適応については、現時点では統合的なモデル研究が不十分な状況であり、モデルと現実の政策決定基準との間のギャップが指摘される一因となっている。ジオエンジニアリング、あるいは大規模な気候システムへの人為的介入は非常に議論のある技術であるが、多くの調査が必要でありそれら調査が有用であることに疑いはない。気候変動のリスク管理は、究極的には、緩和、適応、R&Dの加速、さらには気候工学間の選択ではなく、それらの戦略的な複合であると言え、状況に応じた重要性があるといえる。

なお、気候工学そのものやその実施については、活発な議論が行われている段階で、専門家の間でも実施の是非に関する意見の一致はなく、慎重に検討すべきであると認識されている。本研究においても、ジオエンジニアリングの評価は、気候変動リスクに対する対策オプション研究と位置づけており、実施に関して特定の立場をとるものではない。

2. 研究開発目的

適応策やジオエンジニアリングなど対策オプションとしての特性がまだ十分に知られていない課題に関する調査とモデル上での取り扱い方法の提供を目的とする。近年注目を集めながらもなお技術・コストいずれも不確実性の大きいジオエンジニアリングについては、コストや効果、技術的成立性、副次的

リスクなどについての技術開発動向を文献調査するとともに、適応策と合わせ具体的にモデルに実装するための作業を行う。それらの情報をモデルに入力する手法を開発しモデルによる分析を実施する。その結果から適応策やジオエンジニアリングの実施の有無が緩和策を含めた気候変動対策全体に与える影響を分析する。

1) 成層圏エアロゾル注入のコスト分析

気候工学で最も関心を呼んでいるのは入射太陽光を反射する太陽放射管理 (Solar Radiation Management, SRM)、特にその中の成層圏エアロゾル注入 (Stratospheric Aerosol Injection, SAI) である。IPCCによればこうした技術の評価するために多数の評価軸があるが、特に重要であるのは実施のコストである。というのも実施に法外な金額がかかる手法は議論の対象から排除されるからである。SAIの見積もりコストは非常に安価であると考えられている。Royal Societyによると、緩和策と比べてオーダーで3桁ほど低いとされる¹⁾。ある経済学者は(安すぎて)「信じがたい incredible」と述べたほどである。

しかし、こういった数字は限られた、比較的粗い見積もりに基づいていた^{6),7)}。最近になってようやくAurora社の報告書⁸⁾およびその後の論文⁹⁾において詳細なコスト評価が発表された。

本研究では既往の文献におけるSRMのコスト評価結果を再分析することによって、これまでになされた安価な評価結果の矛盾点を明確にすること、また、矛盾点を取り除くことによってコスト評価結果がどのように変わるのかを検討する。気候変動緩和策や気候工学(の内SAI)のガバナンスに対するグローバルな戦略に資することを目的とした。

2) 二酸化炭素直接空気回収のコスト分析

気候工学のもう一つの分類であるCDRに分類される手法のうち、大気中の二酸化炭素を直接回収し貯留する二酸化炭素直接空気回収(DAC、Direct Air Capture)技術は、成層圏エアロゾルと比較して、大気から二酸化炭素を回収するため、環境への副作用が少ないと考えられるが、大型化とその実施コストが大きな課題とみなされている。DAC技術は、アルカリ性の液体吸着剤(例:水酸化ナトリウム水溶液と水酸化カルシウムの組み合わせ)と固体吸着剤を使う技術の2種類に大別できる。これらの技術は、大学の研究者が設立したベンチャー企業(例:Carbon EngineeringやGlobal Research Technologies)が実証機の作成や吸着剤の開発を行っている。本研究ではDACを超長期の地球環境影響評価を行う統合評価モデルで取り扱う技術オプションの一つとするため、DAC技術のコスト、CO₂回収に必要なエネルギー消費量等を把握することを目的とする。

3) バイオマスCCS分析のためのモデル詳細化と土地利用に与える影響評価

バイオマスエネルギーと組み合わせたCCS(Bio-Energy with Carbon Capture and Storage, BECCS)は大気中のCO₂を植物によって回収し、エネルギー転換において発生するCO₂を地層に恒久的に貯蔵することによってネガティブエミッションを生み出すプロセスである。このプロセスではバイオマスによるエネルギー生産が主であり、副次的にネガティブエミッションが達成できることから、ネガティブエミッション技術の選択肢の中で、近い将来の利用において、コスト・技術的な面で最も潜在能力がある技術であると言われている。本研究では統合評価モデルGRAPE(Global Relationship Assessment to Protect the Environment)¹⁰⁾に対して幅広いBECCSプロセスの原料および技術オプションを導入することにより、実情に合ったネガティブエミッション技術が検討できるようにすることである。また、バイオエネルギーの原料のうち、エネルギー作物、農作物残差、家畜糞尿等、資源量のポテンシャルが土地利

用によるものについては、プロセスモデルによる現実的な単収を利用することによって、土地利用に与える影響を解析することを目的とした。

4) 太陽放射管理と緩和策の組み合わせによる温度安定化シナリオ分析

気候変動枠組条約のもとで、2020年以降のポスト京都議定書の温室効果ガス(GHG)削減枠組に関する交渉の結果、2015年にパリで開催された第21回気候変動枠組条約締約国会議(COP21)において世界各国がGHG削減に参加するパリ協定に合意し、その後2016年に発効に至っている。従来は先進地域中心だった排出上限が、世界各国が提出した約束草案(Intended Nationally Determined Contributions, INDC)に基づいた温室効果ガス削減を自主的に達成することで合意した。目標年次は2030年としているものが多いが、それらの削減を積み上げても、気候変動の影響が顕在化しないレベルへの長期GHG経路とのギャップがあるとされている¹¹⁾、これらの前提を折り込んだ国別詳細分析は政策ニーズも高く、2°C目標達成のため世界全体での削減量の積み上げを一要素とするGlobal Stocktakeに対応するため、地球環境システム分析モデルによる重要分析課題のひとつとなっている。各国または地域から提出されているINDC排出量は、基準年、削減目標年、達成のための条件(資金援助や技術支援を含む)、目標の種類(ベースライン比、絶対値、原単位等)、およびGHGの種類やその排出部門において様々であり、定量的な分析が非常に難しい。そのような状況ではあるが、各国研究機関や国際機関が、2030年付近のGHG排出量を推定するとともに、長期的な気候安定化を前提条件とした場合の長期的なGHG排出経路を描く試みを行っている。

そこで、暫定的アプローチとして、2030年までのGHG排出パスを公表されている世界全体のINDC積上量にほぼ固定し、その後の気候安定化条件を満足するために必要な対策を検討することを目的とする。対策は、GHG削減(緩和策)、およびSRMの2種類とした。気候変動後の状態に対応する適応策も対策のポートフォリオに含めるべきであるが、本分析では検討範囲から除外した。

5) 適応を組み込んだ分析の検討

本研究の目標は、統合評価モデルに適応を考慮するルーチンを組み込んで解析を実施し、適応の在り方を評価することにある。しかしながら、適応についてはコスト等の基礎データが不十分であり、それを統合評価モデルに組み込んだ事例はほとんど存在しないという状況であった。また、主要な解析ツールであるGRAPEについては、ダメージ関数を考慮した計算の実績がほとんどないという状況であった。以上を踏まえて本研究の目的は、①適応をモデルに組み込む研究について現状を把握すること、②予備的評価として統合評価モデルGRAPEでダメージ関数を考慮した試算を行い妥当な解が得られることを確認すること、③その上で、GRAPEに適応の効果を組み込み、分析を行うこと、④その結果を踏まえて適応の在り方について検討することとした。

3. 研究開発方法

適応・ジオエンジニアリングを統合評価モデルで取り扱った事例はほとんどなく、基本的なデータについても、そのデータを統合評価モデルに組み込む手法についても、十分な検討が行われてはいない。そこで、まず、幅の広い文献調査を行い、様々なジオエンジニアリング技術について、コスト、技術的課題、副作用などについての調査を実施した。文献の選定にあたっては、より網羅的、総合的な評価を実施しているものを優先するように留意した。また調査に際しては、単に報告されている数値をマッピングするだけでなく、コスト評価の前提条件についても精査し、必要に応じて独自の調査結果を含んだ追加的な分析を行うこととした。さらに、専門家に対するヒアリング調査も実施し、より専門的な知見を効率よく収集することとした。さらに統合評価モデルによる試算も実施した。太陽放射管理(SRM)

については、必要な物量や散布する高度に着目し、コスト評価の更なる精緻化を進めた。また、ヒアリング調査やS10-5との共同で社会的側面についての理解を進めた。二酸化炭素除去（CDR）のうち、バイオエネルギーCCS（BECCS）については、CCS実証プロジェクトサイトへのヒアリングを含め、包括的な調査を実施した。直接空気回収については、まず文献で主要な素過程について調査するとともに、報告されている手法について、ヒアリング調査による技術的な分析も実施した。適応については、サブテーマ4と共同で、コスト、技術的課題などについての調査を実施するとともに、先行事例を参考にしつつ統合評価モデルに取り入れるための定式化を実施した。その結果も含めGRAPEで計算を実施して気候損失が経済全体に与える影響を検討した。さらに、リスク管理戦略レポートの作成に向け、複数のSSP、RCP・戦略シナリオに対してモデルの計算を実施した。

1) 成層圏エアロゾル注入のコスト分析

本研究ではSAIの実施に関わる総コストを分析した。通常、SAIを実施するためにはエアロゾル物質を購入し、成層圏まで運搬した後、散布する必要がある。実施に関わる総コストを式で表すと以下の通りとなる。

$$T = (L + P + D)F/E$$

ここで、 T は総コスト（\$/y）、 L , P , D はそれぞれ単位重量当たりのエアロゾルの運搬、調達（購入）および、散布コスト（\$/t）、 F は放射強制力（ W/m^2 ）、 E は冷却効率（ $(W/m^2)/(t/y)$ ）である。

最初に、既往の論文、雑誌の記事、レポートなどから上記SAIの実施コストに関わる様々な情報を収集した。対象としたSAIの技術はロケット、大砲、飛行船、航空機など様々であり、対象としたエアロゾルも硫酸を中心としてガス（ SO_2 や H_2S など）や固体物質（ TiO_2 やすすなど）など様々である。

ここでは既往の論文などの情報が多い、航空機を用いた硫酸エアロゾルの散布に関するコスト再分析について説明する。再分析では2つの主な仮定を用いた。一つ目は放射強制力当たりのSAIの実施に関わるコストはエアロゾルの運搬コストを冷却効率で除すことによって近似できるということである。情報収集の結果、硫酸エアロゾルの調達コストと散布コストは運搬コストに比べて十分小さいことがわかった。従って、SAIの実施に関わる総コストを以下の式で近似した。

$$T \approx L \cdot F/E$$

上式では総コストと放射強制力が比例関係に見えるが、実際には運搬コストや冷却効率がエアロゾル物質の投入量に依存して変化するため、非線形の関係にある。そこで、もう一つの仮定ではベンチマークのための基礎として $2W/m^2$ の放射強制力を設定することとした。運搬コストと冷却効率については収集した文献から、可能な限り非線形性を解析に組み込んで検討した。

2) 二酸化炭素直接空気回収のコスト分析

統合評価モデルで取り扱う技術オプションの一つとするため、DAC技術の実施コスト、必要なエネルギーについて、先行研究をレビューし、その不確実性を把握した。さらに、DAC技術の簡易なモデルを作成し、実施コストや必要なエネルギーに高い感度を持つパラメーターを評価した。文献調査と並行して、有識者へのヒアリングを実施した。また、DAC技術を取り扱う企業をサーベイし、CO2回収コストをはじめとする情報を分析、取りまとめた。

3) バイオマスCCS分析のためのモデル詳細化と土地利用に与える影響評価

原料オプションの検討として、各種バイオマスの性状に関する文献データ¹²⁾⁻²¹⁾を収集整理した。次の

で、様々なバイオマス転換技術の中から、実用化技術として、燃焼、熱ガス化、メタン発酵、バイオディーゼル製造、およびエタノール発酵を抽出し、同じく文献データ^{22)~31)}を収集整理した。エネルギーのアウトプットとしては電力、気体燃料および液体燃料を想定し、現実的な組み合わせをバイオマスエネルギーフローとして選定した。整理したデータを用い、バイオエネルギー利用でのCCSあり・なしにおける発電プロセス(燃焼、ガス化、メタン発酵)、BTL(ガス化)、エステル化(バイオディーゼル)、エタノール製造(第一世代、第二世代)の各技術における、規模ごとの製造コスト、エネルギー効率、投資コスト、O&Mコスト、Load factorに関し、GRAPE拡張としてモデル化を行い実装した。またバイオマスフィードストックについても、バイオエネルギー作物と共に、モデル内で内省的に計算される食料向け農作物、家畜生産を考慮した残差利用フローを追加し、土地利用とリンクした形でのバイオエネルギー資源利用を実装した。

この新規BECCSフローを実装したモデルを用い、SSP2シナリオにおいて50%確率で2100年に2度目標を達成可能とする、2011年-2100年積算排出量1400GtCO₂を満たすエネルギーシステムを解析し、どういったバイオエネルギー資源と変換プロセスがBECCSとして最適利用されるか、またその時の土地利用を分析した。さらに、バイオエネルギー利用の持続可能性の検討として、年間のバイオエネルギー供給量に制約として上限150 EJ yr⁻¹と持たせた場合の感度分析を行い、BECCS利用における影響を検討した。

4) 太陽放射管理と緩和策の組み合わせによる温度安定化シナリオ分析

予備的評価として、以前に開発した10地域版の統合評価モデルGRAPEを用い、GHG排出に対する制約を与えないベースライン試算を試算した。2030年の世界GHG排出量がINDCのそれと近かったことから、2030年までのエネルギーシステム、土地利用・農業に関する変数をほぼ固定して、それ以降のGHG排出経路の検討を実施した。なお、2010年以降の基準エネルギー需要については、従来値をそのまま用いていることもあり、直近の情勢を必ずしも反映していない。

5) 適応を組み込んだ分析の検討

まず適応策及びその実施コストに関する文献調査を実施した。適応のコスト評価については、サブテーマ4と連携を取り、世界銀行³²⁾などの検討結果等を参照した。また、統合評価モデルでの適応の取扱については、AD-DICE³³⁾がほぼ唯一の先例といってもよく、その内容を詳細に分析した。ダメージ関数を考慮した計算については、GRAPEの10地域簡易版において、試算を行うこととした。ダメージ関数には不確実性が大きいことから、その係数を大きく変更し、緩和策の進展や経済全体への影響を評価することとした。その上で、AD-DICEと同じ関数系をGRAPEの10地域モデルに組み込み、様々な試算を実施した。並行して、AD-DICEの関数系に対して、解析的な分析を行い、モデルの計算結果の解釈に活用した。

4. 結果及び考察

1) 成層圏エアロゾル注入のコスト分析

図(3)-1にSAI実施コストの再分析結果を示す。グラフの左側に青系の色で示した領域が既存の航空技術を用いた場合の分析結果、右側にオレンジ系の色で示した領域が将来的に気候工学に適した航空技術が開発された場合の分析結果である。

また、色の濃い領域は本研究開発で再見積りした結果で、色の薄い領域は既存の文献に基づいた結果である。

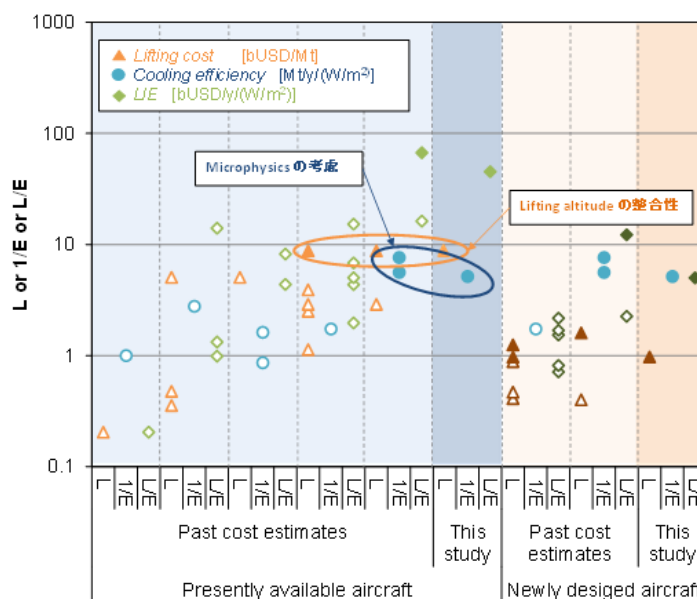
まず、既存の航空技術を用いた試算結果について説明する。三角形のプロットで示したエアロゾルの運搬コストについて見ると、0.2から8.8billion US\$/Mtの範囲で分布しているが、実際に気候モデルなどで検討されているエアロゾルの注入高度（～25km）を考えると、8.8billion US\$/MtのF-15戦闘機を利用したケース（技術）のみ適用可能であった（矛盾しているプロットを白抜きで示す）。

一方、丸プロットで示した冷却効率の逆数（単位放射強制力当たりの必要エアロゾル量）について見ると、0.86から7.65(Mt/y)/(W/m²)までの幅がある。冷却効率は報告されている文献が新しいほど低い値になり、特に微物理過程を考慮したものほど低くなるのが分かった。従って、エアロゾルの注入高度の矛盾を取り除き、最新の冷却効率を考慮すると、SAIの実施コスト0.2から10billion US\$/y/(W/m²)の既往の研究に対し、45billion US\$/y/(W/m²)まで増加することが分かった。

2) 二酸化炭素直接空気回収のコスト分析

DAC技術は、多様な観点から研究が進められている段階であり、多くの論文や学会の報告書があるが、図(3)-2に示すように、その実施コストの幅は、102-103 USD/t-CO₂と広範囲に分布している。DAC技術の実施コストは、低いコスト(100-200USD/t-CO₂)、中庸(300-500USD/t-CO₂)、高いコスト(1000USD/t-CO₂)の3つに分類できる。

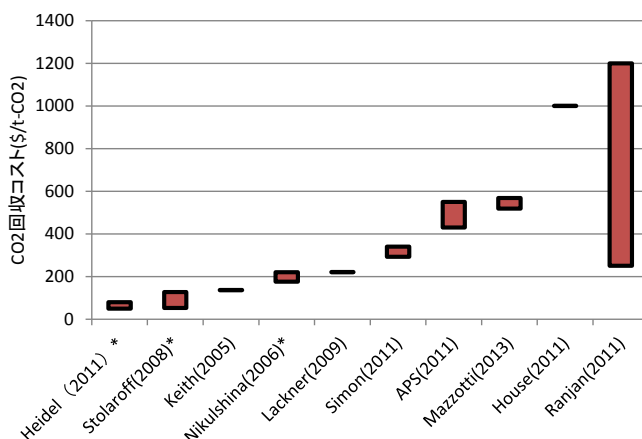
低いコスト(100-200USD/y-CO₂)の文献では、製紙工程のNaOHとCa(OH)₂を用いるプロセスと類似であることを利用して、各プロセスのコストを見積もっている³⁵⁾。中庸(300~500USD/t-CO₂)の文献³⁶⁾では、物質バランス、エネルギーバランスから必要な物量等を求め、積み上げでコストを算出している。高いコスト(1000USD/t-CO₂)の文献^{37), 38)}では、具体的なプロセスや設備費は検討していないが、大気からのCO₂の分離反応を熱力学的に考察し、理論的に必要な最小エネルギーを評価し、様々な分離プロセスの濃度とコストの経験則から、実際には最小エネルギーの20~100倍のエネルギーを投入しなければならないため、高コストであると述べている。



図(3)-1 SAI実施コストの再分析結果

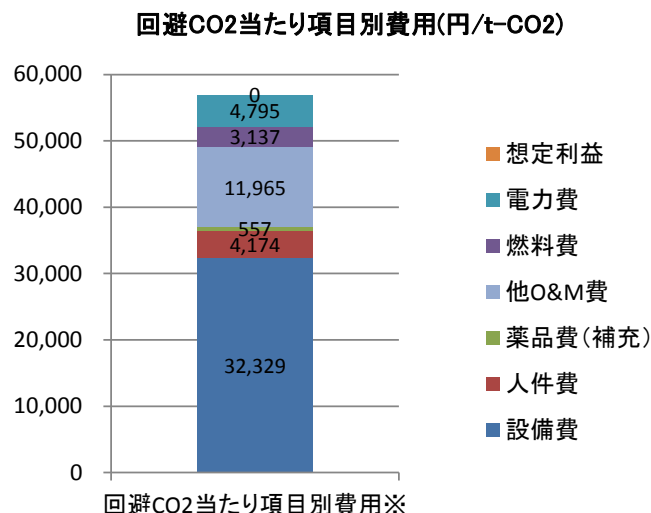
出典：R. Moriyama, M. Sugiyama, A. Kurosawa, K. Masuda, K. Tsuzuki, Y. Ishimoto, The Cost of Stratospheric Climate Engineering Revisited, Mitig Adapt Strateg Glob Change (2016) Fig.4³⁴⁾に追記

このように学術論文では、DAC 技術に含まれる要素技術は、既存の工業的に利用されているプロセスからの推定やソフトウェアを用いた計算結果が多い。しかしながら、気候工学としての二酸化炭素回収を目的とした大規模な実機が存在しないため、コスト・効率の想定やコスト算定方法に高い不確実性が存在する。これらが各文献で示されたコスト算定結果に大きな幅を生じる要因として考えられる。

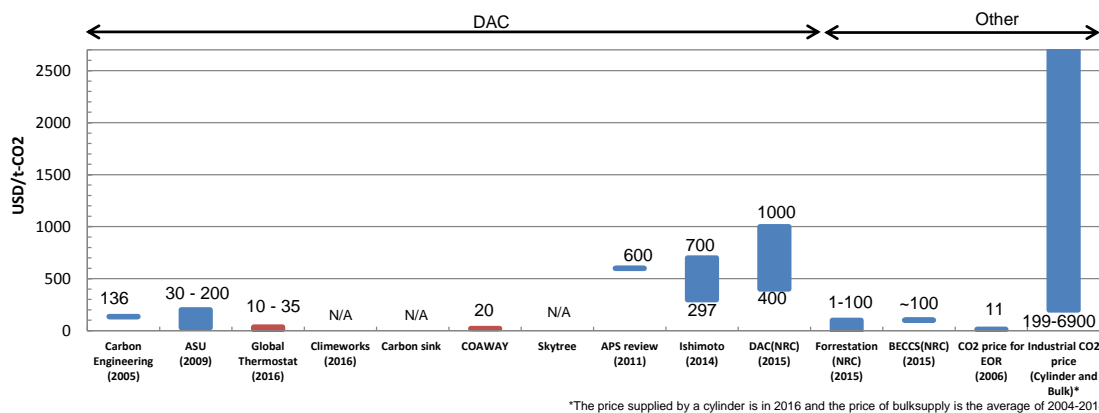


図(3)-2 DACの実施コストの不確実性(主に学術論文による。*はシステムの一部の評価)

図(3)-3に他のCDR技術との比較を含んだ企業および各機関のレポートにおけるDACコストの不確実性を示す。図からわかるようにベンチャー企業の主張するコストは、米国物理学会や米国科学アカデミーのコストよりも小さい値となっている。これは、設計の違いや要素機器のコストの考え方が異なるという意見もある³⁹⁾。図(3)-4にDACの回避CO2当たりのコスト分析の結果を示す。回収規模は、1Mt-CO2/年を想定した。設備費や人件費については、APS⁴⁰⁾、電力・熱原単位は、Baciocchi⁴¹⁾、燃料・原料価格はIEA⁴²⁾を用いて試算を行った。試算結果は、57,000円/t-CO2と、CCS等他の緩和技術に比較して1桁程度高いことが分かった。またユーティリティ費用や原単位、設備費等で感度分析を行った結果、コストは約33000~77000円/t-CO2に分布することがわかった。



図(3)-4 DACの回避CO2当たりのコスト分析の結果

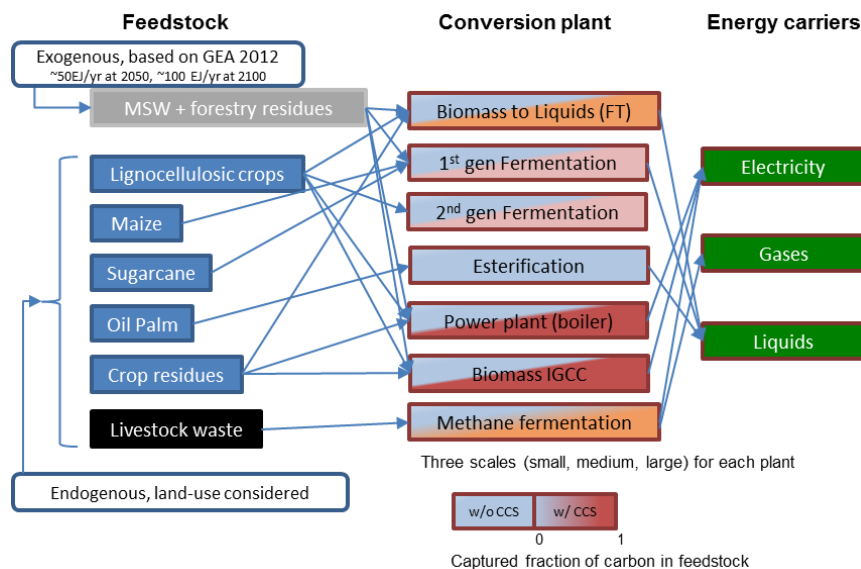


図(3)-3 DACの実施コストの不確実性(企業・各機関のレポート、他のCDR技術との比較)
本研究で用いたエネルギー原単位を用いると、1Gt-CO2/年の回収には、511TWh/年の電力、210 Mtoe/

年の燃料が必要と計算できる。また、プロセスにおける副反応やリサイクルの程度に依存するが、膨大な水やケミカルの供給が必要となる。このように、DAC技術を用いてグローバルなCO₂削減に寄与するには膨大なエネルギーや資源が必要であることがわかった。

3) バイオマスCCS分析のためのモデル詳細化と土地利用に与える影響評価

各種バイオマスから様々な転換技術を経て、エネルギーを製造するさいのコストや効率に関する情報が整理できた。また、各技術におけるCO₂の回収率についても同様に整理した。



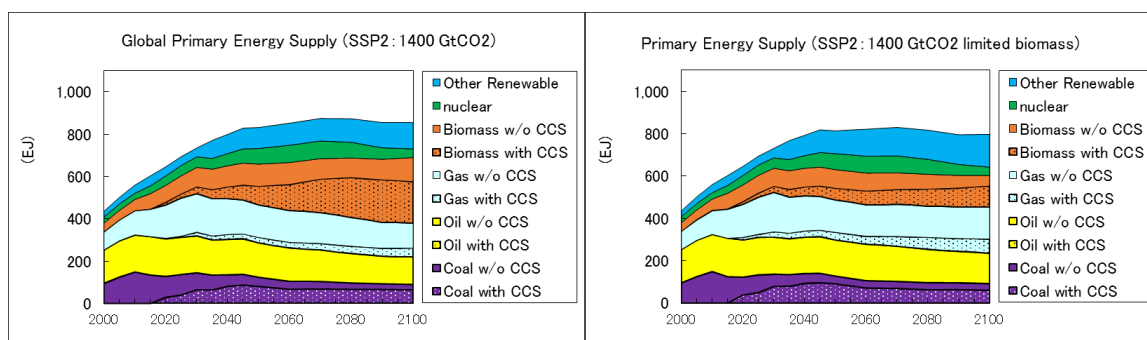
図(3)-5 GRAPEモデル拡張における、バイオエネルギー詳細プロセスごとのCCSあり・なしとしたフロー概念図

この詳細BECCSフロー(図(3)-5)を実装したモデルを用い、SSP2シナリオにおいて50%確率で2100年に2度目標を達成可能とする、2011年-2100年積算排出量1400GtCO₂を満たすエネルギーシステムを解析し、どういったバイオエネルギー資源と変換プロセスがBECCSとして最適利用されるか、またその時の土地利用を分析した。さらに、バイオエネルギー利用の持続可能性の検討として、年間のバイオエネルギー供給量に上限制約を150 EJ yr⁻¹ と持たせた場合の感度分析を行い、BECCS利用における影響を検討した。

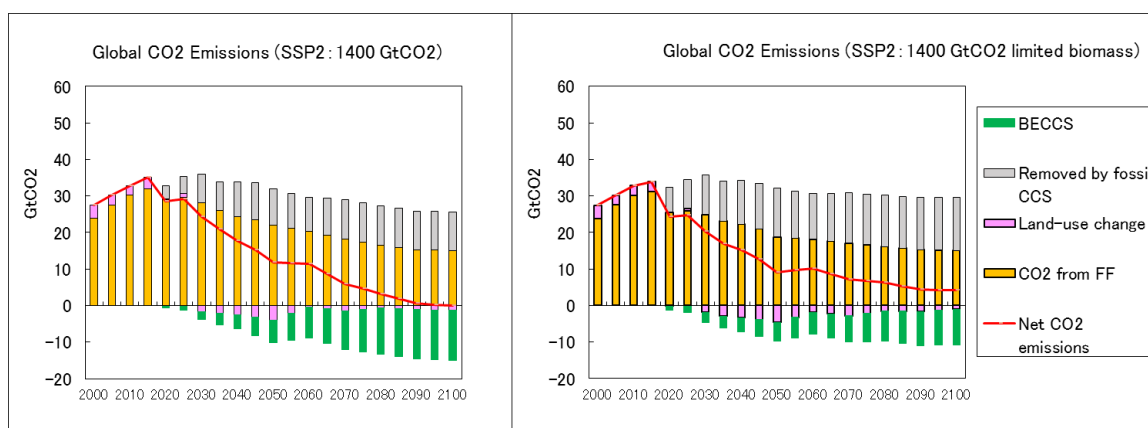
バイオマス供給上限に外生的制約を持たせないケースでは、バイオエネルギー供給は2050年で192 EJ yr⁻¹、2100年に310 EJ yr⁻¹となり、2100年におけるバイオエネルギー供給のうち197 EJ yr⁻¹がBECCSとして利用された。一方、バイオエネルギー供給に制約を持たせた場合、2050年に143 EJ yr⁻¹に達し、それ以降2100年にむけ、制約上限の150 EJ yr⁻¹が利用された。この場合、2100年において、100EJ EJ yr⁻¹がBECCSとして利用された(図(3)-6)。

BECCSによる大規模CO₂の回収(> 3.6 GtCO₂ yr⁻¹)は、バイオマス供給制約がない場合2030年から開始され、2050年には6 GtCO₂ yr⁻¹、2100年には13.7 GtCO₂ yr⁻¹に達した。この時、エネルギー作物向け農地は、2050年に100 Mha、2100年に300 Mha利用された。発電部門によるBECCSが大部分をしめ、2050年には回収量の80%、2100年でも84%を占めた。一方、バイオマス供給制約ありの場合、大規模BECCSは2040年から始まり、2050年に5.2 GtCO₂ yr⁻¹、2100年に9.7 GtCO₂ yr⁻¹に達した。バイオマス供給制約なしの場合に比べ、発電セクターのBECCS割合は増え、2050年に回収量の91%、2100年には99.8%が発電部門によるBECCSとなった(図(3)-7)。また、バイオマス供給制約ありの条件では、エネルギー作物の土地利用は

限られ、2050年に40 Mha、2100年に30 Mhaであった。



図(3)-6 1400GtCO2積算排出量制約での一次エネルギー供給量。左) バイオマス供給量制約なし、右) バイオマス供給量 150 EJ yr⁻¹ 制約あり。



図(3)-7 1400GtCO2積算排出量制約でのCO2排出パス。左) バイオマス供給量制約なし、右) バイオマス供給量 150 EJ yr⁻¹上限制約あり。

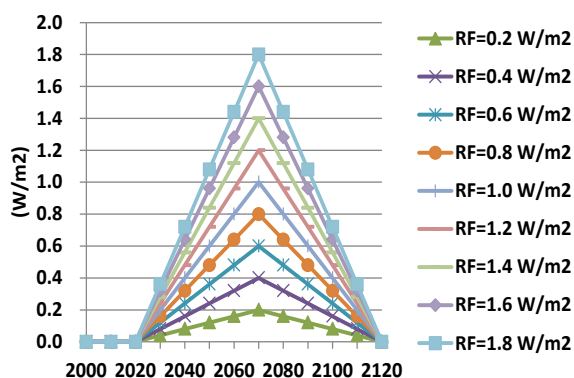
これら詳細BECCSモデル実装および解析により、コスト最適なBECCS利用シナリオを描くことが可能となった。バイオマス資源供給をフル活用する場合、発電部門と燃料生産部門の両者ともBECCSに利用され、2度目標の排出パスに大きく貢献することがわかった。一方、バイオマス資源利用に持続可能性を考慮し制約をもたせた場合、発電部門におけるBECCS利用が一層重要な意味を持ち、さらには近未来における排出削減が必要であることが示された。また持続可能性の観点から、バイオマス資源利用としては、土地利用に対する影響の小さい林業残差および都市廃棄物の利用が重要であり、このような資源を用いたBECCS発電施設のスケールアップに関する早期のRD&Dが重要であることが分析により明らかになった。

4) 太陽放射管理と緩和策の組み合わせによる温度安定化シナリオ分析

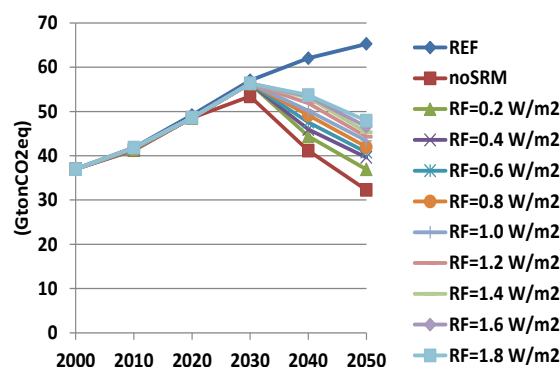
SRMの実施費用はAurora社報告⁸⁾を参考に10億ドル/W/m²と仮定し、全球平均気温が産業革命以降2℃以下に抑制されるという前提条件で、SRMの有無に関する感度分析を実施した。試算ケースは、レファレンス(GHG削減なし)、2℃達成ケース群10ケースの計11ケースである。2℃達成ケース群は、緩和策のみ(SRMなし)、およびSRMありの9ケースで構成した。

SRMの技術基盤がまだ確立していないこと、実施にあたっては国際合意が必要であることから、2030年以降にSRMが徐々に導入可能であるとし、導入量に一定の上限を設定して感度分析を実施した。導入タ

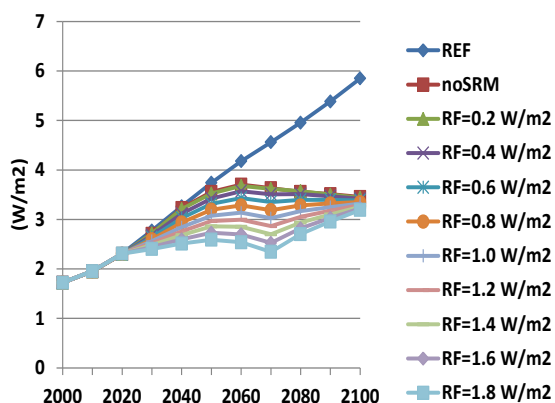
イミシングと上限に関する先行研究としては、2020年以降、RCP4.5相当の放射強制力変化速度を半分にするのと同様なSRM効果を付加すると温度上昇を遅延させることができるとする研究⁴³⁾があり、その設定を参考に導入量に上限を課した。SRM効果はピーク値である2070年の放射強制力で0.2~1.8W/m²である（図(3)-8）。温室効果ガス排出量は、レファレンスの場合、ほぼ線形に増加し、2℃達成ケース群では、緩和策のみの場合、2050年までに30GtonCO₂eq程度まで削減されるが、SRMのみの場合、許容されるGHG排出が増加する（図(3)-9）。SRMを含む放射強制力は、レファレンスの場合ほぼ線形に増加し、21世紀末に約6W/m²に達するが、2℃達成ケースでは、おおむね2~4W/m²の範囲に分布した（図(3)-10）。このことは、結果として想定導入上限値までSRMが導入されるという結果が得られたことを意味している。産業革命以降の温度上昇は、レファレンスでは、ほぼ線形に増加するのに対し、2℃達成ケースでは、SRMが導入可能な場合は、2℃に達するタイミングが遅れ、遅れる程度はSRM量に依存することが示された（図(3)-11）。



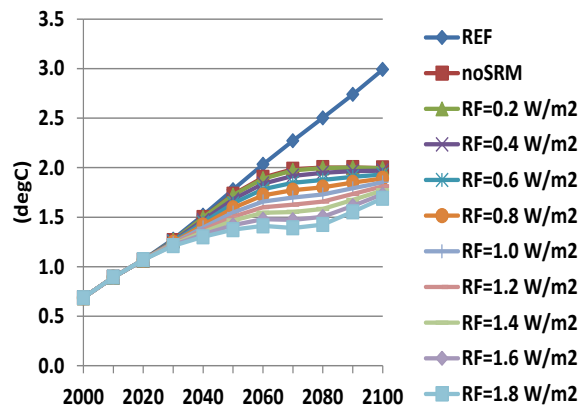
図(3)-8 想定した放射強制力削減効果上限値



図(3)-9 世界GHG排出量

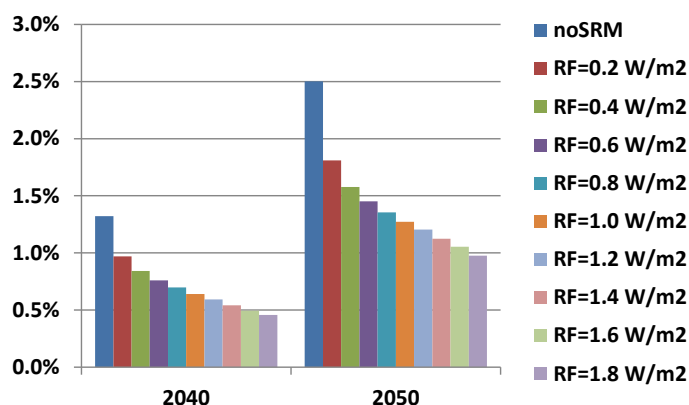


図(3)-10 放射強制力



図(3)-11 温度上昇

2℃達成ケースのGDP損失（対レファレンス）は、緩和策のみの場合は2050年で2~3%であるが、SRM導入を仮定している場合は、同時期の1W/m²ケース（2050年での放射強制力低減効果0.6W/m²）での損失はほぼ半減した（図(3)-12）。その理由は、相対的に限界削減費用の高い対策を行わなくてもよくなるので、SRM量が少量であっても経済影響が緩和されるためである。



図(3)-12 リファレンスからの世界GDP損失

5) 適応を組み込んだ分析の検討

i 適応のモデル化

AD-DICEにおいては、適応の効果をモデル化するにあたり、ダメージ関数を適応無しのダメージ関数と適応の効果・コストに分離するというを行っている。すなわち、適応なしのダメージ関数というものを想定し、適応によるダメージの減少とそれに必要なコストを定式化している。具体的には、以下のような表式となっている。

$$\textcircled{1} \text{GD} = \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^{\alpha_3}$$

$$\textcircled{2} \text{RD} = (1 - \text{PT}) \text{GD}$$

$$\textcircled{3} \text{PC} = \gamma_1 \text{PT}^{\gamma_2}$$

$$\textcircled{4} \text{DC} = \text{RD} + \text{PC}$$

①式が適応無しのダメージ関数であり、係数 α_3 は2程度の実数である。②式において、PTは適応の度合いで、0~1の値をとる無次元量である。RDが適応後にも残っている気候ダメージであり、これを残留ダメージと称する。③式のPTは適応のコストであり、これは適応の度合いPTのべき関数で表現する。適応を考慮したダメージ関数DCは残留ダメージRDと適応コストPCの和で表現される。

AD-DICEにおいては、各係数は、AD-DICEの最適解のダメージ関数DCが元のDICEのダメージ関数と一致するように調整されている。その係数は表(3)-1の通りであり、本研究においても、この値を標準的な値とすることとした。

表(3)-1 パラメーターテーブル

パラメーター	α_1	α_2	α_3	γ_1	γ_2
値	0.0012	0.0023	2.32	0.115	3.6

ii ダメージ関数を考慮した統合評価モデル

GRAPEにおけるダメージ関数は、以下のバランス式で与えることとした。これは、気候変動への対応もGDPの一部となるという解釈に基づく。

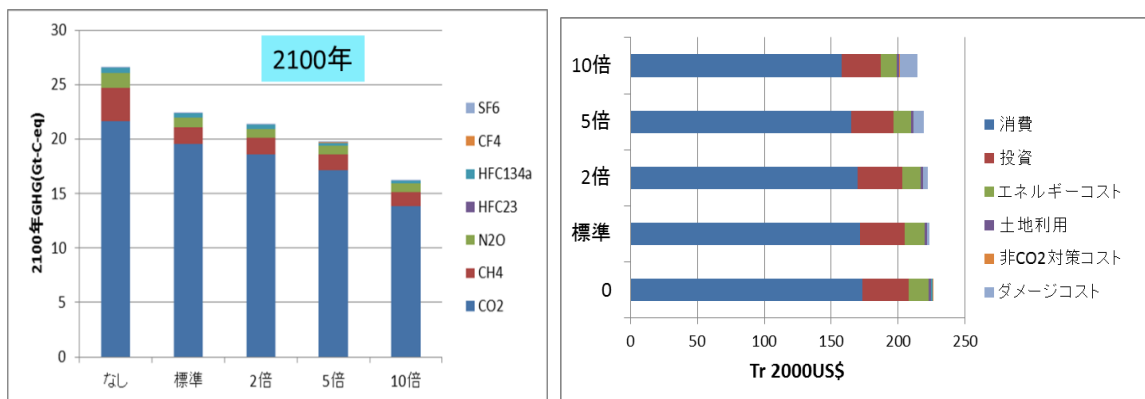
$$\text{GDP} = \text{消費} + \text{投資} + \text{エネルギーコスト} + \text{土地利用} + \text{ネット輸出} \\ + \text{非CO2削減コスト} + \text{気候変動ダメージコスト}$$

ダメージ関数については、単純な二次関数型のダメージ関数を使用することとした。より具体的には、レファレンス温度上昇 (=3°C) に対するレファレンスGDPロスを、先進国で2%、途上国で1.5%、寒冷地で1.0%と設定の上、以下の式で与えることとした。

$$\text{気候変動ダメージコスト} = \alpha \text{ (任意係数)} \times \text{レファレンスGDP} \times (\Delta T / \text{レファレンス温度上昇})^2$$

予備的な検討として、この係数 α を広い範囲(0~10倍)で変更しその影響を評価した。その結果、以下の知見が得られた(図(3)-13、(3)-14参照)⁴⁴⁾。

- 気候影響が大きいと温室効果ガスの削減は着実に進むが、本計算条件では係数を10倍にするといった極端な値を入力してもゼロエミッションに近いような削減策は実施されない。
- 温室効果ガスとしてはCO₂の他、CH₄、N₂Oの寄与も無視できない。
- 本計算のように、「気候影響に対する対応もGDPの一部」と考えると、気候影響が直接GDPを下げるわけではない。気候影響により、消費や投資が減少し、その蓄積としてGDPが低下する。
- GDP低下量は気候ダメージと概ね同程度



図(3)-13 GHG排出のダメージ関数の係数依存性 図(3)-14 GDPのダメージ関数の係数依存性

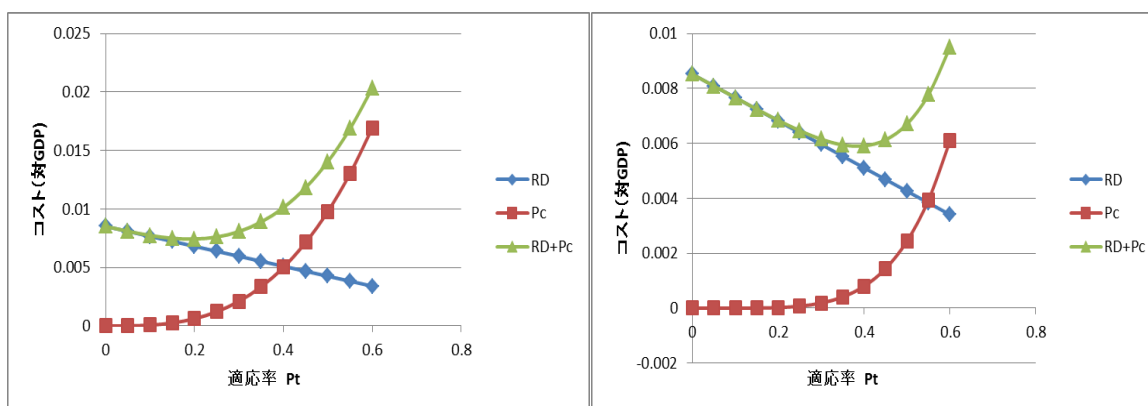
iii 適応策を組み込んだ最適計算

まず、CO₂制約なしでの適応なし・あり及びCO₂制約ありで適応ありの3ケースについて試算を行った。その結果、適応ありの最適解はもとのダメージ関数とほぼ同等となることが確認できた。次に適応コストの係数である γ_2 の感度を評価した。この係数が大きくなると、適応コストが上昇しにくくなるため、適応の度合いが大きくなると予想されるが、そのイメージを図3に示す。残留ダメージRDがPTの上昇に対して直線的に減少していくのに対し、適応コストはPT²で上昇する。正味のダメージDCはRD+PTであり、下に凸の曲線となる。標準的な値である3.6程度では適応の度合いPTは0.2~0.3程度であるのに対し、10程度にするとPTは0.5程度まで上昇する。GRAPEの計算においても、 γ_2 を幅広く変更して計算を実施し、上記分析と矛盾しない結果が得られた。

iv 緩和と適応のバランスの検討

図(3)-13で示した通り、気候ダメージを標準的値の10倍という設定をした場合でさえ、2°C目標を実現するような厳しい緩和策は経済最適解にはならないということが判明した。また、最適値より大きな適応策を実施すると、結局DCが大きくなるため、モデルの最適解はむしろ緩和を進行させる方向になるということも判明した。すなわち、経済最適という条件では適応の度合いは温度で決まる最適値に固定さ

れ、いわゆる緩和と適応のトレードオフは評価できない。同様に緩和の度合いを制約条件にすると、適応の度合いは温度で決まる最適値に固定される。



図(3)-15 ダメージ及び適応コストの γ_2 依存性（気温上昇1.5°C）（左： $\gamma_2=3$ 、右： $\gamma_2=5$ ）

「気候ダメージ（RD）を2°C目標実現時と同等にする」ということを制約条件とした場合には、適応度を高くとれば、緩和の温度目標を高くとることが可能となるといった形で、経済最適解から追加的に実施する適応コストと緩和コストの比較が可能となる。その結果、適応コストは緩和の経済影響を明らかに下回るということが示された。

このように、本モデルの想定条件においては、「経済原理を踏み越えて気候影響によるダメージを抑えよう」とする場合、緩和策を中心に対応するよりも適応策をより多く活用した方がより経済的であるという結果になる。ただし、適応の度合いの上限やコストの適応度合い依存性には不確実性が大きい。また、適応を大規模に導入したとしても、グリーンランド氷床の崩壊といったティッピング現象が回避できるわけではないという点にも留意をする必要がある。緩和と適応のバランスの在り方については、今後も引き続き検討が必要である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

SAIの実施コストは従来言われているコスト（a few billion dollar）と比較すると数倍から数十倍高くなることがわかった。本研究開発で得られた既存の航空技術を用いた場合のSAI実施コストは放射強制力 $2\text{W}/\text{m}^2$ に換算すると、90billion US\$/年になり、アポロ計画など大規模プロジェクトの予算よりも高く、アメリカ、中国の軍事予算に匹敵し、個人の資産では賄えないものであることがわかった。

DAC技術の実施コスト、必要なエネルギーについて、先行研究をレビューし、その不確実性を把握した。簡易なモデルを用いて回収規模1 Mt-CO₂/年のCO₂回収コストを評価結果、57,000円/t-CO₂とCCS等他の緩和技術に比較して1桁程度高いことが分かった。また、DAC技術のエネルギー原単位からDAC技術を用いてグローバルなCO₂削減に寄与するには膨大なエネルギー需要が生じることがわかった。

BECCSフローの詳細モデル化により、2度目シナリオでの発電、運輸における最適なBECCS利用経路の分析結果を得た。また、持続可能性を考慮した場合、林業残差および都市廃棄物の利用が重要であり、このような資源を用いたBECCS発電施設のスケールアップに関する早期のRD&Dが重要であること

が分析により明らかになった。

緩和策にSRMを組み合わせた分析により、SRMの潜在的経済価値を確認した。ただしSRMは本当に安価に実施できるのかについては評価範囲や前提条件を変更すると、その実施コストが大きく変わることが報告されている。また、SRMの大規模実施が潜在的に与える影響については、火山噴火というアナログ事例があり、気候モデルを用いた数値実験が行われているものの、因果関係を含めて完全に理解されているわけではない。さらに、SRMの実施自体にも、社会的な合意が必要であり、倫理的な問題、研究開発や実施におけるガバナンスの諸課題をクリアしていく必要がある。その意味で、今回の分析は予備的な試みである。

適応策のモデル化についての現状を把握するとともに、統合評価モデルに適応モデルを組み込んだ計算を実施できるようにした。そのモデルで試算を行い、緩和と適応のバランスの在り方について、論点を整理することができた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

ネガティブエミッション技術に関するレビュー論文(Smith et al. 2016)作成に貢献した。この文献はIPCC AR6、IPCC 1.5°C特別報告書でのCDR技術情報および研究方向の基盤となるものである。また、Moriyama et al. (2016)はこれまで低く見積もられてきた成層圏エアロゾル注入コストに対する再評価をおこなった。

6. 国際共同研究等の状況

Stanford大学のJohn Weyant教授が主催するEnergy Modeling Forum (EMF) 33として現在進行中の、バイオエネルギーおよびBECCSに関連する統合評価モデル比較に、GRAPEモデルを用い参加した。この結果を用い、IPCC AR6、IPCC 1.5°C特別報告書に今後貢献予定である。

土地利用変化に関するGlobal Carbon Project (GCP)による炭素排出の影響評価研究に参加し、Calle et al. 2016; Arneth et al, (2016)として出版した。また、土地利用影響評価モデルを用い、GCPにおける基礎的な陸域炭素循環研究に参加した (Le Quéré et al. 2015a, 2015b, 2016; Ahlström et al. 2015; Zhu et al. 2016)。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) A. Ahlström, M. R. Raupach, G. Schurgers, B. Smith, A. Arneth, M. Jung, M. Reichstein, J. G. Canadell, P. Friedlingstein, A. K. Jain, E. Kato, B. Poulter, S. Sitch, B. D. Stocker, N. Viovy, Y. P. Wang, A. Wiltshire, S. Zaehle, N. Zeng: Science, 348, 895-899. doi:10.1126/science.aaa1668 (2015) The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink.
- 2) C. Le Quéré, R. Moriarty, R. M. Andrew, G. P. Peters, P. Ciais, P. Friedlingstein, S. D. Jones, S. Sitch, P. Tans, A. Arneth, T. A. Boden, L. Bopp, Y. Bozec, J. G. Canadell, L. P. Chini, F. Chevallier, C. E. Cosca, I.

- Harris, M. Hoppema, R. A. Houghton, J. I. House, A. K. Jain, T. Johannessen, E. Kato, R. F. Keeling, V. Kitidis, K. Klein Goldewijk, C. Koven, C. S. Landa, P. Landschützer, A. Lenton, I. D. Lima, G. Marland, J. T. Mathis, N. Metz, Y. Nojiri, A. Olsen, T. Ono, S. Peng, W. Peters, B. Pfeil, B. Poulter, M. R. Raupach, P. Regnier, C. Rödenbeck, S. Saito, J. E. Salisbury, U. Schuster, J. Schwinger, R. Séférian, J. Segsneider, T. Steinhoff, B. D. Stocker, A. J. Sutton, T. Takahashi, B. Tilbrook, G. R. van der Werf, N. Viovy, Y.-P. Wang, R. Wanninkhof, A. Wiltshire, and N. Zeng: *Earth System Science Data*, 7, 47-85 (2015a) Global carbon budget 2014.
- 3) K. Nishina, A. Ito, P. Falloon, A. D. Friend, D. J. Beerling, P. Ciais, D. B. Clark, R. Kahana, E. Kato, W. Lucht, M. Lomas, R. Pavlick, S. Schaphoff, L. Warszawski, and T. Yokohata: *Earth System Dynamics*, 6, 435-445, doi:10.5194/esd-6-435-2015 (2015) Decomposing uncertainties in the future terrestrial carbon budget associated with emission scenario, climate projection, and ecosystem simulation using the ISI-MIP result.
 - 4) C. Le Quéré, R. Moriarty, R. M. Andrew, J. G. Canadell, S. Sitch, J. I. Korsbakken, P. Friedlingstein, G. P. Peters, R. J. Andres, T. A. Boden, R. A. Houghton, J. I. House, R. F. Keeling, P. Tans, A. Arneeth, D. C. E. Bakker, L. Barbero, L. Bopp, J. Chang, F. Chevallier, L. P. Chini, P. Ciais, M. Fader, R. A. Feely, T. Gkritzalis, I. Harris, J. Hauck, T. Ilyina, A. K. Jain, E. Kato, V. Kitidis, K. Klein Goldewijk, C. Koven, P. Landschützer, S. K. Lauvset, N. Lefèvre, A. Lenton, I. D. Lima, N. Metz, F. Millero, D. R. Munro, A. Murata, J. E. M. S. Nabel, S. Nakaoka, Y. Nojiri, K. O'Brien, A. Olsen, T. Ono, F. F. Pérez, B. Pfeil, D. Pierrot, B. Poulter, G. Rehder, C. Rödenbeck, S. Saito, U. Schuster, J. Schwinger, R. Séférian, T. Steinhoff, B. D. Stocker, A. J. Sutton, T. Takahashi, B. Tilbrook, I. T. van der Laan-Luijkx, G. R. van der Werf, S. van Heuven, D. Vandemark, N. Viovy, A. Wiltshire, S. Zaehle, N. Zeng: *Earth System Science Data*, 7, 349-396, doi:10.5194/essd-7-349-2015 (2015b) Global carbon budget 2015.
 - 5) P. Smith, S. J. Davis, F. Creutzig, S. Fuss, J. Minx, B. Gabrielle, E. Kato, R. B. Jackson, A. Cowie, E. Kriegler, D. P. van Vuuren, J. Rogelj, P. Ciais, J. Milne, J. G. Canadell, D. McCollum, G. Peters, R. Andrew, V. Krey, G. Shrestha, P. Friedlingstein, T. Gasser, A. Grubler, W. K. Heidug, M. Jonas, C. D. Jones, F. Kraxner, E. Littleton, J. Lowe, J. R. Moreira, N. Nakicenovic, M. Obersteiner, A. Patwardhan, M. Rogner, E. Rubin, A. Sharifi, A. Torvanger, Y. Yamagata, J. Edmonds, and C. Yongsung: *Nature Climate Change*, 6, 42-50, doi:10.1038/nclimate2870 (2016) Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions.
 - 6) Z. Zhu, S. Piao, R. B. Myneni, M. Huang, Z. Zeng, J. G. Canadell, P. Ciais, S. Sitch, P. Friedlingstein, A. Arneeth, C. Cao, L. Cheng, E. Kato, C. Koven, Y. Li, X. Lian, Y. Liu, R. Liu, J. Mao, Y. Pan, S. Peng, J. Peñuelas, B. Poulter, T. A. M. Pugh, B. D. Stocker, N. Viovy, X. Wang, Y. Wang, Z. Xiao, H. Yang, S. Zaehle, N. Zeng: *Nature Climate Change*, 6, 791-795, doi:10.1038/nclimate3004 (2016) Greening of the Earth and its drivers.
 - 7) L. Calle, J. G. Canadell, P. Patra, P. Ciais, K. Ichii, H. Tian, M. Kondo, S. Piao, A. Arneeth, A. B. Harper, A. Ito, E. Kato, C. Koven, S. Sitch, B. D. Stocker, N. Viovy, A. Wiltshire, S. Zaehle, B. Poulter: *Environmental Research Letters*, 11, 074011, doi:10.1088/1748-9326/11/7/074011 (2016) Regional carbon fluxes from land use and land cover change in Asia, 1980-2009.
 - 8) R. Moriyama, M. Sugiyama, A. Kurosawa, K. Masuda, K. Tsuzuki, Y. Ishimoto: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, DOI: 10.1007/s11027-016-9723-y (2016) The cost of stratospheric climate engineering revisited.
 - 9) C. Le Quéré, R. M. Andrew, J. G. Canadell, S. Sitch, J. I. Korsbakken, G. P. Peters, A. C. Manning, T. A. Boden, P. Tans, R. A. Houghton, R. F. Keeling, S. Alin, O. D. Andrews, P. Anthony, L. Barbero, L. Bopp, F. Chevallier, L. P. Chini, P. Ciais, K. Currie, C. Delire, S. C. Doney, P. Friedlingstein, T. Gkritzalis, I. Harris, J. Hauck, V. Haverd, M. Hoppema, K. Klein Goldewijk, A. K. Jain, E. Kato, A. Körtzinger, P. Landschützer, N. Lefèvre, A. Lenton, S. Lienert, D. Lombardozi, J. R. Melton, N. Metz, F. Millero, P. M. S. Monteiro, D. R. Munro, J. E. M. S. Nabel, S. Nakaoka, K. O'Brien, A. Olsen, A. M. Omar, T. Ono, D. Pierrot, B. Poulter, C. Rödenbeck, J. Salisbury, U. Schuster, J. Schwinger, R. Séférian, I. Skjelvan, B. D. Stocker, A. J. Sutton, T. Takahashi, H. Tian, B. Tilbrook, I. T. van der Laan-Luijkx, G. R. van der Werf, N. Viovy, A. P. Walker, A. J. Wiltshire, S. Zaehle: *Earth System Science Data*, 8, 605-649, doi:10.5194/essd-8-605-2016 (2016) Global carbon budget 2016.
 - 10) A. Arneeth, S. Sitch, J. Pongratz, B. D. Stocker, P. Ciais, B. Poulter, A. D. Bayer, A. Bondeau, L. Calle, L.

P. Chini, T. Gasser, M. Fader, P. Friedlingstein, E. Kato, W. Li, M. Lindeskog, J. E. M. S. Nabel, T. A. M. Pugh, E. Robertson, N. Viovy, C. Yue, S. Zaehle: *Nature Geoscience*, 10, 79–84, doi:10.1038/ngeo2882 (2017) Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed.

- 11) E. Kato, R. Moriyama, A. Kurosawa: 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-13), *Energy Procedia*, doi:10.1016/j.egypro.2017.03.1748 (2017) A sustainable pathway of bioenergy with carbon capture and storage deployment. (in press)
- 12) 黒沢厚志、加藤悦史、杉山昌弘、増田耕一: 化学工学会論文誌 (2017) パリ協定と気候変動対策技術 (in press)
- 13) Y. Ishimoto, M. Sugiyama, E. Kato, R. Moriyama, K. Tsuzuki, A. Kurosawa: FCEA White Paper Series (in review) Putting costs of direct air capture in context. (in review)

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 黒沢厚志、森山亮、村上嘉孝: 日本エネルギー学会誌、第92巻、第3号 (2013)、「バイオエネルギーCCS」
- 2) 杉山昌広、朝山慎一郎、岩崎杉紀、小杉隆信、原口正彦、森山亮: 天気、62巻、第1号、33-41、日本気象学会 (2015)「気候工学(ジオエンジニアリング)国際会議」
- 3) 黒沢厚志: 環境情報科学 第44巻 第1号、2015年3月 (2015)、「バイオエネルギーCCSと気候工学」
- 4) 増田耕一: ペトロテック、第38巻、第7号、21-25、石油学会 (2015)、「気候工学—ジオエンジニアリング、意図的気候改変—」
- 5) 加藤悦史: エネルギー・資源、38、16-18、エネルギー・資源学会 (2017)、「パリ協定とネガティブエミッション技術」
- 6) 杉山昌広、増田耕一: エネルギー・資源、38、69-73、エネルギー・資源学会 (2017)、「気候工学(太陽放射管理)研究の最新動向」
- 7) 加藤悦史: 計測と制御、第56巻、第5号、計測自動制御学会 (2017、in press)、「二酸化炭素を回収し貯留する技術」
- 8) 杉山昌広: 計測と制御、第56巻、第5号、計測自動制御学会 (2017、in press)、「技術で地球は変えられるか?～気候工学(ジオエンジニアリング)～」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 杉山昌広、黒沢厚志、増田耕一、都筑和泰、森山亮、石本祐樹: 環境経済政策学会 2012年度大会 東北大学、2012年9月 (2012)、「気候工学と気候政策: レビュー」
- 2) M. Sugiyama, A. Kurosawa, K. Masuda, K. Tsuzuki, R. Moriyama, Y. Ishimoto: AGU 2012 Fall Meeting, December 2012 (2012), “Assessing benefits and costs of climate geoengineering for an integrated assessment model.”
- 3) 森山亮、黒沢厚志、杉山昌広、増田耕一、都筑和泰、石本祐樹: 第29回エネルギーシステム・経済・コンファレンス、エネルギー・資源学会、2013年1月 (2013)、「気候工学のコスト分析 ～太陽放射管理」
- 4) A. Kurosawa: Bio-energy and CCS(BECCS) – Options for Brazil, IEA/IIASA BECCS Workshop,

- University of Sao Paulo, June 2013 (2013), “Biomass-Energy R&D and CCS Status in Japan.”
- 5) M. Sugiyama: Short presentation at 4th Interdisciplinary Summer School on Geoengineering, Harvard University, August 2013 (2013), “Engineering consideration on stratospheric aerosol injection.”
 - 6) M. Sugiyama : Short presentation at 4th Interdisciplinary Summer School on Geoengineering, Harvard University, August 2013 (2013), “Geoengineering research in Japan.”
 - 7) 石本祐樹、黒沢厚志、杉山昌広、増田耕一、都筑和泰、森山亮: 第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、砂防会館(東京)、2014年1月 (2014)、「気候工学のコスト分析 ～二酸化炭素直接空気回収」
 - 8) 黒沢厚志: 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2014年大会、パシフィコ横浜、2014年5月 (2014)
「統合評価モデルの構造と気候モデルとの連携」
 - 9) 黒沢厚志: 第33回エネルギー・資源学会研究発表会、大阪国際交流センター、2014年6月 (2014)、「気候工学の現状と課題」
 - 10) R. Moriyama, M. Sugiyama, A. Kurosawa, K. Masuda, K. Tsuzuki, Y. Ishimoto: Climate Engineering Conference (CEC) 2014, Berlin, August 2014 (2014), “Exploring the engineering parameter space of stratospheric aerosol injection.”
 - 11) M. Sugiyama, A. Kurosawa, K. Masuda, R. Moriyama, Y. Ishimoto, K. Tsuzuki: Climate Engineering Conference (CEC) 2014, Berlin, August 2014 (2014), “Mapping technology choices of climate engineering onto social concerns.”
 - 12) 黒沢厚志: 化学工学会 第46回秋季大会、九州大学、2014年9月 (2014)、「気候工学の現状と課題」
 - 13) R. Moriyama, M. Sugiyama, A. Kurosawa, K. Masuda, K. Tsuzuki, Y. Ishimoto: American Geophysical Union (AGU) Fall meeting, San Francisco, December 2014 (2014), “Re-examining the cost of stratospheric aerosol injection.”
 - 14) 黒沢厚志: 低温工学・超電導学会冷凍部会例会、2015年1月 (2015)、「気候変動対策に関する国際動向－科学・政策・CCS」
 - 15) 黒沢厚志: 第28回環境工学連合講演会、日本学術会議、2015年5月 (2015)、「0「環境工学としての化学工学 - Future Earthへの貢献」
 - 16) 都筑和泰、黒沢厚志、増田耕一、石本祐樹、森山亮: 第34回エネルギー・資源学会研究発表会、砂防会館、2015年6月 (2015)、「統合評価モデルGRAPEによる気候ダメージの影響評価及びその適応」
 - 17) E. Kato: Open seminar on negative emissions: Bridging societal and mitigation needs, Hokkaido University, Japan, Global Carbon Project, September 2015 (2015), “2nd generation agricultural biomass.”
 - 18) A. Kurosawa: Open seminar on negative emissions: Bridging societal and mitigation needs, Hokkaido University, Japan, Global Carbon Project, September 2015 (2015), “CCS pilot in Tomakomai - Introduction of CCS and negative emissions.”
 - 19) 黒沢厚志、森山亮、杉山昌広、増田耕一、石本祐樹、加藤悦史、都筑和泰: 第32回エネルギー・資源・経済コンファレンス、エネルギー資源学会、2016年2月 (2016)、「統合評価モデルを用いた太陽放射管理分析」
 - 20) 加藤悦史、黒沢厚志: 第32回エネルギー・資源・経済コンファレンス、エネルギー資源学会、2016年2月 (2016)、「地球規模の炭素循環および持続可能なネガティブエミッションシナリオ研究」
 - 21) 加藤悦史: シンポジウム「COPパリ協定と今後のIPCC報告書」、主催公益財団法人地球環境産業技術研究機構、2016年3月 (2016)、「ネガティブエミッションの必要性と限界」

- 22) 黒沢厚志: 化学工学会 第48回秋季大会、徳島大学、2016年9月 (2016)、「気候工学研究の現状」
- 23) 黒沢厚志、杉山昌広、森山亮、石本祐樹、加藤悦史、増田耕一、都筑和泰: 環境経済政策学会 2016年大会、2016年9月 (2016)、「気候工学研究の現状」
- 24) E. Kato, R. Moriyama, A. Kurosawa: 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-13), 14-18 November 2016, Lausanne, Switzerland (2016), “A sustainable pathway of bioenergy with carbon capture and storage deployment.”
- 25) E. Kato, R. Moriyama, A. Kurosawa: AGU 2016 Fall meeting, 12-16 December 2016, San Francisco, USA (2016), “Efficient and sustainable deployment of bioenergy with carbon capture and storage in mitigation pathways.”
- 26) E. Kato: GCP/MaGENT Pre-Workshop, IIASA, March 1, 2017, Latest Land Use Modeling and Scenario Developments (2017), “Results from ICA-RUS project on BECCS analysis, and recent progress and challenges in bioenergy implementation in GRAPE model.”

E. Kato: GCP/MaGNET Workshop, IIASA, March 2-3, 2017, Land use related negative emission technologies (LUNETs) – their implications on food security and relevant SDGs – (2017), “Feedstock and conversion process of bioenergy system for the anticipated sustainable BECCS.”

(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) 第28回環境工学連合講演会、－Future earth 工学が果たす役割について－、2015年5月 (2015) (主催: 日本学会会議 土木工学・建築学委員会学際連携分科会、2015年5月15日において黒沢が招待講演)
- 2) Open seminar on negative emissions: Bridging societal and mitigation needs, Hokkaido University, Japan, Global Carbon Project, September 2015 (2015) (主催: Global Carbon Project、2015年9月2日、北海道大学のオープンセミナーにて加藤、黒沢が講演)
- 3) 2015年度 第2回エンジニアズサロン、温暖化対策技術～緩和、適応、気候工学 (主催: 特定非営利活動法人 日本プロフェッショナルエンジニアリング協会、2015年10月14日、東京にて森山が解説、対話討論)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Royal Society: (2009) Geoengineering and Climate: Science, Governance and Uncertainty; Royal Society,
- 2) IPCC: (2012) Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Geoengineering.
- 3) IPCC: (2014) Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press.
- 4) NRC: (2015) Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration and Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth; National Research Council of National Science Academy,

- National Academy Press,
[http://nas-sites.org/americasclimatechoices/public-release-event-climate-intervention-reports/\(2015\)](http://nas-sites.org/americasclimatechoices/public-release-event-climate-intervention-reports/(2015)) (アクセス日2017年3月30日)
- 5) 杉山昌広、西岡純、藤原正智; 天気、58, 577-598 (2011) 気候工学 (ジオエンジニアリング)
 - 6) National Academy of Sciences: (1992) Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation, and the Science Base.
 - 7) A. Robock, A. Marquardt, B. Kravitz et al.: Geophys. Res. Lett., 36, L19703 (2009) Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering.
 - 8) J. McClellan, J. Sisco, B. Suarez, G. Keogh: Aurora Flight Sciences, US01-001; AR10-182 (2011) Geoengineering Cost Analysis, Final Report.
 - 9) J. McClellan, D. W. Keith and J. Apt: Environ. Res. Lett., 7, (2012) Cost analysis of stratospheric albedo modification delivery systems.
 - 10) A. Kurosawa: Multigas Mitigation: The Energy Journal, Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Change Policy Special Issue, International Association for Energy Economics, pp.275-288. (2006) An Economic Analysis Using GRAPE Model.
 - 11) UNFCCC: FCCC/CP/2015/7 (2015) Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions (ADVANCE VERSION).
 - 12) A. Angelis-Dimakis et al.: Renew. Sustain. Energy Rev. 15, 1182–1200 (2011) Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources.
 - 13) ECN: ECN Phyllis classification. Available at: <https://www.ecn.nl/phyllis2/Browse/Standard/ECN-Phyllis>.
 - 14) H. C. J. Franco et al.: Sci. Agric. 70, 305–312 (2013) Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil.
 - 15) S. J. Hassuani, M. R. L. V. Leal, I. de C. Macedo: Biomass power generation, PNDU (2005) Sugar cane bagasse and trash.
 - 16) Z. Liu, A. Xu, B. Long: Energy Power Eng. 3, 325–331 (2011) Energy from Combustion of Rice Straw: Status and Challenges to China.
 - 17) F. G. Manwiller: Wood Science 8, 384-388 (1975) Wood and Bark Moisture Contents of Small-Diameter Hardwoods Growing on Southern Pine Sites.
 - 18) R. Saidur, E. A. Abdelaziz, A. Demirbas, M. S. Hossain, S. Mekhilef: Renew. Sustain. Energy Rev. 15, 2262–2289 (2011) A review on biomass as a fuel for boilers.
 - 19) B. Sliz-Szkliniarz, J. Vogt: Renew. Sustain. Energy Rev. 16, 752–763 (2012) A GIS-based approach for evaluating the potential of biogas production from livestock manure and crops at a regional scale: A case study for the Kujawsko-Pomorskie Voivodeship.
 - 20) GreenFacts. Available at: <http://www.greenfacts.org/en/biofuels/figtableboxes/biofuel-yields-countries.htm>.
 - 21) BioenergyNet.com. Available at: <http://www.bioenergy.net/articles/technology/biomass/251-significant-biomass-properties-part-1-moisture-content>.
 - 22) D. Klein, N. Bauera, B. Bodirskya, J. P. Dietricha, A. Popp: GHGT-10, Energy Procedia, 4, 2933-2940 (2011) Bio-IGCC with CCS as a long-term mitigation option in a coupled energy-system and land-use model
 - 23) J. S. Rhodes, D. W. Keith: Biomass and Bioenergy 29, 440–450 (2005) Engineering economic analysis of biomass IGCC with carbon capture and storage.

- 24) EPRI: (2011) Program on Technology Innovation: Integrated Generation Technology Options.
- 25) ECOFYS: IEAGHG (2011) Potential for Biomass and Carbon Dioxide Capture and Storage.
- 26) IEA (2007) Energy Technology Essentials.
- 27) IRENA (2012) Renewable energy technologies: cost analysis series.
- 28) IEA (2012) Technology Roadmap Bioenergy for Heat and Power.
- 29) Y. Zhu, SA T. Rahardjo et al.: Pacific Northwest National Laboratory (2011) Techno-economic Analysis for the Thermochemical Conversion of Biomass to Liquid Fuels.
- 30) N. Seifkar et al.: An MIT Energy Initiative Report (2015) Biomass to Liquid Fuels Pathways: A Techno-Economic Environmental Evaluation.
- 31) T. R. Fortenbery: University of Wisconsin-Madison, Department of Agricultural & Applied Economics (2005) Biodiesel Feasibility Study: An Evaluation of Biodiesel Feasibility in Wisconsin.
- 32) World Bank: (2011) Economics of adaptation to climate change - Synthesis report.
- 33) K. C. de Bruin, R. B. Dellink, R. S. J. Tol: Climatic Change, 95, 63-81 (2009) AD-DICE: An implementation of adaptation in the DICE model.
- 34) R. Moriyama, M. Sugiyama, A. Kurosawa et al.: Mitig Adapt Strateg Glob Change (2016) The Cost of Stratospheric Climate Engineering Revisited.
- 35) D. W. Keith et al.: Climatic Change, 74, 17-45. (2006) Climate Strategy with CO₂ Capture from the Air.
- 36) M. Mazzotti et al.: Climatic Change, 118, 119–135 (2013) Direct air capture of CO₂ with chemicals: optimization of a two-loop hydroxide carbonate system using a countercurrent air-liquid contactor.
- 37) K. Z. House et al.: PNAS, 108, 20428–20433 (2011) Economic and energetic analysis of capturing CO₂ from ambient air.
- 38) M. Ranjan and H. Herzog: Energy Procedia, 4, 2869-2876 (2011) Feasibility of air capture.
- 39) G Holmes and D. W. Keith: Plil. Trans. R. Sco. A 370, 4380-4403, doi:10.1098/rsta.2012.0137 (2012) An air-liquid contactor for large-scale capture of CO₂ from air.
- 40) American Physics Society: (2011) Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals.
- 41) Renato Baciocchi et al.: Chemical Engineering and Processing, 45, 1047–1058 (2006) Process design and energy requirements for the capture of carbon dioxide from air.
- 42) IEA: (2013) World Energy Outlook 2013
- 43) D. W. Keith and D. G. MacMartin: Nature Climate Change, 5, 201-206 (2015) A temporary, moderate and responsive scenario for solar geoengineering.
- 44) 都筑和泰、黒沢厚志、増田耕一、石本祐樹、森山亮: 第34回エネルギー・資源学会研究発表会、砂防会館、2015年6月 (2015) 統合評価モデルGRAPEによる気候ダメージの影響評価及びその適応

(4) 温暖化対策のための適応ポテンシャル・コスト見積もりおよび社会経済シナリオに関するメタ分析と統合評価モデルによる評価

国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター 増井利彦

国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター 久保田泉・岡川梓

その他の研究協力機関等 国立研究開発法人国立環境研究所 藤森真一郎・長谷川知子（平成25年度より）・森田香菜子（平成25年慶應義塾大学、平成26年から国立研究開発法人森林総合研究所）

平成24～28年度累計予算額：22,828 千円（うち平成28年度：2,430千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

気候変動問題は様々な要因が複雑に関連し、科学的な知見に加え、政策的な対応も求められている課題である。これまでは、気候変動の予測、影響・適応策の評価、緩和策の評価といった個別の科学的知見が深められてきた。一方で、RCP（代表的濃度経路）やSSP（共通社会経済シナリオ）のように、各分野の連携も進展している。地球温暖化対策を効果的、効率的に行うためには、将来起こりうる社会経済状況を踏まえた上で、導入しうる緩和策、適応策を把握することが求められ、そのためには実際に導入されている施策を体系的に整理するとともに、それらの効果を定量的に検討することが必要不可欠である。

温暖化影響や影響を軽減するための適応策については、これまで地域性、分野の特性が極めて強い課題であったが、近年は世界銀行やOECDの報告書にみられるように、世界規模や幅広い分野を対象とした評価が行われつつある。ただし、これらは分析範囲に広げただけで、様々な分野における気温上昇別の適応策導入による効果の推定など、適応策を適切に実現していくための更なる情報整理は、統合評価モデルの入力として活用する上で欠かすことができない。また、こうした既存の適応策の導入について技術的なオプションのみならず、導入を促進するための経済的、法的、制度的なオプションをあわせて検討することは、適応策をより効果的に導入する上で重要となる。

将来の社会経済シナリオについては、IPCCへの入力を目的として、SSPと呼ばれる共通社会経済シナリオの開発が国際的に進められており、これらの作業やシナリオとあわせて検討することは、作業を効率化するだけでなく、国際的なシナリオ研究に対して入力することも可能となり、国際的な貢献も期待できる。

さらには、上記の情報が統合評価モデルにおいて利用可能となるかを確認することは、整理された情報の付加価値を向上させることにもつながる。これまでの統合評価モデルによる適応策の評価は、限られた情報を活用するということから、極めて限定的な分野、地域を対象としていたが、前述の整理された情報をもとにすることで、より広い分野を対象に蓋然性の高い分析を行うことが可能となる。本サブテーマは、このような本プロジェクト全体のテーマである「地球規模の気候変動リスク管理戦略」への貢献のためのマルチモデル評価のための共通プラットフォームとしてのデータベースを提供し、さらにAIM/CGEモデルによりこのマルチモデル比較作業に参加し独自のシミュレーション結果を提供した。

[キーワード]

適応策、共通社会経済シナリオ、ベンチマークデータ、マルチモデル、AIM/CGEモデル

1. はじめに

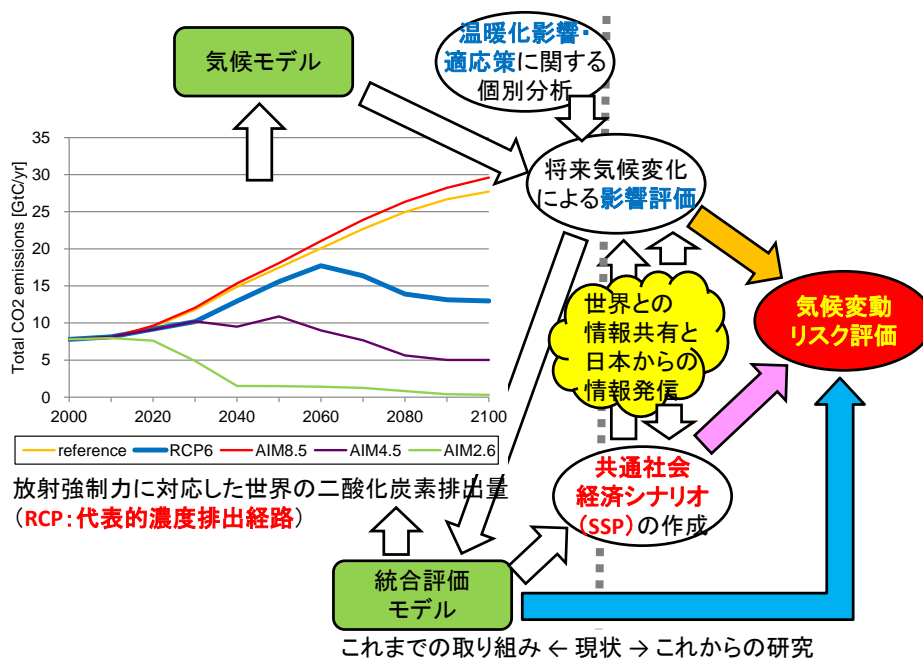
気候変動問題は様々な要因が複雑に関連し、科学的な知見に加え、政策的な対応も求められている課題である。これまでは、気候変動の予測、影響・適応策の評価、緩和策の評価といった個別の科学的知見が深められてきた。一方で、RCP（代表的濃度経路）やSSP（共通社会経済シナリオ）のように、各分野の連携も進展している。地球温暖化対策を効果的、効率的に行うためには、将来起こりうる社会経済状況を踏まえた上で、導入しうる緩和策、適応策を把握することが求められ、そのためには実際に導入されている施策を体系的に整理するとともに、それらの効果を定量的に検討することが必要不可欠である。

温暖化影響や影響を軽減するための適応策については、これまで地域性、分野の特性が極めて強い課題であったが、近年は世界銀行やOECDの報告書にみられるように、世界規模や幅広い分野を対象とした評価が行われつつある。ただし、これらは分析範囲に広げただけでなく、様々な分野における気温上昇別の適応策導入による効果の推定など、適応策を適切に実現していくための更なる情報整理は、統合評価モデルの入力として活用する上で欠かすことができない。また、こうした既存の適応策の導入について技術的なオプションのみならず、導入を促進するための経済的、法的、制度的なオプションをあわせて検討することは、適応策をより効果的に導入する上で重要となる。

将来の社会経済シナリオについては、IPCCへの入力を目的として、SSPと呼ばれる共通社会経済シナリオの開発が国際的に進められており、これらの作業やシナリオとあわせて検討することは、作業を効率化するだけでなく、国際的なシナリオ研究に対して入力することも可能となり、国際的な貢献も期待できる。

さらには、上記の情報が統合評価モデルにおいて利用可能となるかを確認することは、整理された情報の付加価値を向上させることにもつながる。これまでの統合評価モデルによる適応策の評価は、限られた情報を活用するということから、極めて限定的な分野、地域を対象としていたが、前述の整理された情報をもとにすることで、より広い分野を対象に蓋然性の高い分析を行うことが可能となる。また、テーマ4サブテーマ3で提示されるジオエンジニアリング等新たに提案される緩和策も含めて、統合評価モデルにより定量分析された結果は、他のサブテーマとの比較検討等を通じて、今後の課題や見通しを広く抽出し、効果的、効率的な温暖化政策を行うための重要な方法となるとともに、本プロジェクト全体のテーマである「地球規模の気候変動リスク管理戦略」への貢献が期待できる。

図(4)-1に本研究の全体像を示す。



図(4)-1 研究の全体像

2. 研究開発目的

本研究の目的は以下の3点にまとめられる。

1) 適応ポテンシャル・コストの見積もりについて、既存研究並びに本研究プロジェクトの他テーマ等の成果を収集、整理し、これらの情報をもとに統合評価モデルへの入力が可能となるようにメタ分析を行うとともに、適応策を促進するための制度面でのオプションを整理することを目的とする。

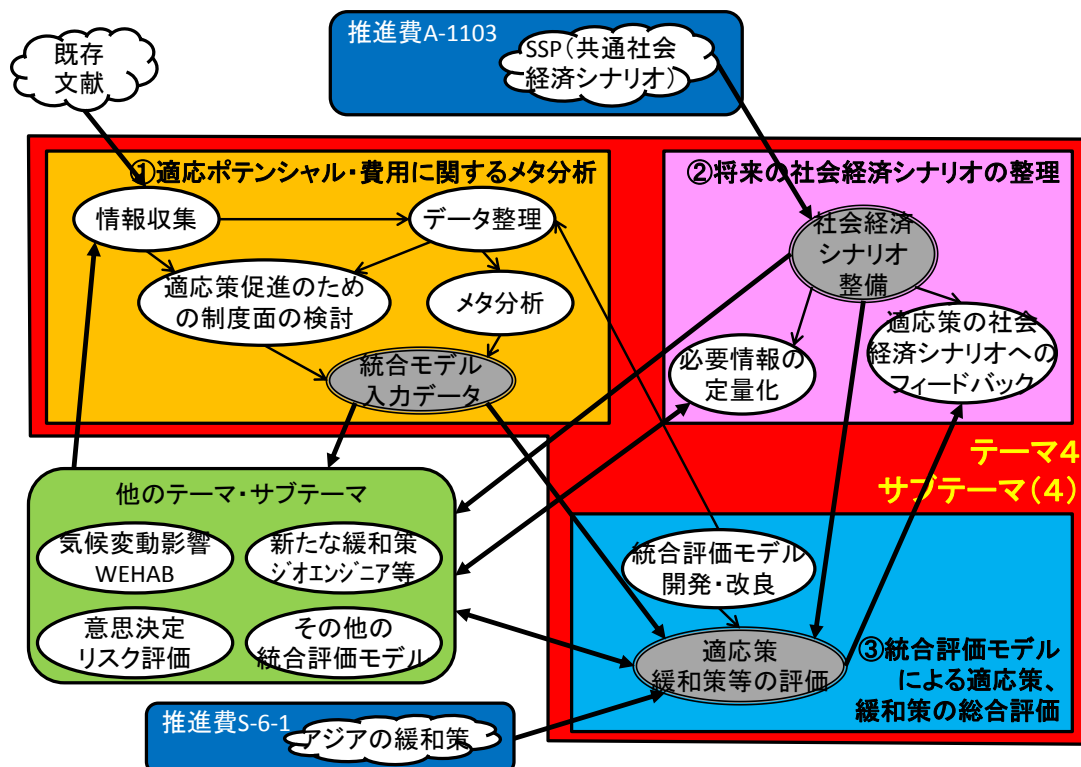
2) 本研究プロジェクト全体で共有される社会経済シナリオを、SSP（共通社会経済シナリオ）をもとにとりまとめて提示するとともに、各チームからの要望をフィードバックさせたシナリオセットを提示することを目的とする。

3) 整理した情報や他のテーマ、サブテーマで得られる知見である適応策やジオエンジニアリング等を含めた様々な緩和策を考慮して、統合評価モデルによる温暖化対策の評価を行うことで、「地球規模の気候変動リスク管理戦略」に資する各施策の課題や効果を明らかにすることを目的とする。

上記の3つの目的にあわせてサブサブテーマを形成し、研究を実施してきた。

3. 研究開発方法

図(4)-2に、本研究の3つのサブサブテーマの概要と他のテーマ、サブテーマ等との関係を示す。全球を対象とした統合評価モデルにおいて適応策に関する情報を入力することを目的として、既存文献を整理するとともに、本プロジェクトで共有可能な将来シナリオをとりまとめ、それらの情報を統合評価モデルに入力することで、適応策、緩和策の総合評価を行うことが本研究の概要である。以下に、サブサブテーマ毎に本年度実施した研究開発方法を示す。



図(4)-2 本研究の各サブサブテーマと他テーマ等との関係

1) 統合評価モデルでの入力として活用可能な適応ポテンシャル・費用に関するメタ分析

適応策は、地域特性が強く、全球を対象とした費用等の見積もりは、必ずしも十分に行われていない状況にある。そこで、本研究では、適応ポテンシャル・コストの見積り事例について、既存文献（学術論文及び国際機関、国、非政府組織等による報告書等）を網羅的に収集・整理した。調査した文献には、2014年に報告されたIPCC第二作業部会の第五次評価報告書から、温暖化による影響、適応策に関する定量化情報も含んでいる。このほか、2015年末に行われた気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）に向けて各国が提出したINDC（Intended Nationally Determined Contributions）も内容を確認し、適応策に関する記述の有無、適応策の実施に必要な費用の水準を取りまとめた。また、INDCにおいて適応策に関する記述を行っている国や適応策に関する情報をWEBにて公表している欧州各国を中心に、各国の適応計画、適応戦略に関する情報について取りまとめを行った。

2) 将来の社会経済シナリオの整理

将来の様々な活動は不確実であり、正確に予測することはできない。しかしながら、様々な状況を検討し、不確実な将来に備えることは可能である。社会経済シナリオは、そうした将来を検討する上で、基盤的なものであり、温暖化の分野においてもこれまでに気候変動に関する政府間パネル（IPCC）のSRES（Special Report on Emissions Scenarios）など、様々なシナリオが示され、2016年に、新たな社会経済シナリオとしてSSPs（Shared Socio-Economic Pathways）が報告された。SSPは、当初はIPCC第五次評価報告書を目指して作成されていたが、作業が大幅に遅れ、最終的な報告は2016年となった。このため、本研究でも、共通シナリオの長所、短所を明確化し、共通シナリオの意味を明確化するとともに、来年度以降に作成する共通シナリオが備えるべき要件を明らかにするなどの作業を経て、本研究で共通に用いる定量シナリオとして導入することとした。まずは、AIMを用いて定量化されたSSPsの予備的な結果を

整理し、各テーマ、サブテーマに提供した。特に、SSPsの定量化に参加してきた経緯を踏まえ、各サブテーマでSSPsを定量化する際のベンチマークのデータを提供した。また、他テーマとの結果の比較を目的とした農業関連指標について利用可能となるようにプログラムの修正等を行った。こうした情報をもとに、各社会像及び戦略ケースの特性や違いについて分析を行った。

3) 統合評価モデルによる適応策、緩和策の総合評価の試算

統合評価モデルを用いて緩和策の評価を行った分析は、国際的には、エネルギーモデリングフォーラム(EMF)やその成果を引用したIPCC等、日本においても第二約束期間における目標設定に関する評価等、分析事例は数多く見られる。一方で、適応策についての評価は、影響の地域特性が強いために、全球を対象とした分析は多くない。

このため、本研究では、統合評価モデルの中心となる応用一般均衡(CGE: Computable General Equilibrium)モデルを使って、気候変動による影響や適応策を評価することを目的として新たなモデル開発を行うために、これらの効果を議論している文献を中心にレビューを行い¹⁾で収集された情報を統合評価モデルに組み入れ、戦略ケースにおいて緩和策のみならず適応策も評価するためのモデルに必要な要件について検討を行った。さらに、適応策と緩和策についての総合戦略をどのように策定すればよいか、また、総合戦略の策定に向けて必要な基礎情報のあり方について、検討を行った。

このほか、本プロジェクトで提示された対策インベントリ開発作業として、適応策とそれを導入した場合のリスクについて整理を行った。

4. 結果及び考察

(4) 適応ポテンシャル・コスト見積もりおよび社会経済シナリオに関するメタ分析と統合評価モデルによる評価

1) 統合評価モデルでの入力として活用可能な適応ポテンシャル・費用に関するメタ分析

適応ポテンシャル・コスト見積りの情報を含む2006年以降の既存文献の網羅的な収集を実施した。収集にあたっては、インフラや沿岸域などIPCCの区分に基づく温暖化影響分野を可能な限りカバーすること、全球規模だけでなく地域・国レベルの文献も含めることを目指した。収集した文献は、文献タイプ、著者、発行年、文献タイトル等の基本的情報を含む一覧表形式で整理を行った。また、こうした文献の中から、適応ポテンシャル・コスト見積りに関して、まず、主として全球規模、複数部門を対象に検討を実施している文献の抽出を行い、その上で、抽出した文献の概要を把握・整理した。整理を行うにあたっては、温室効果ガス排出シナリオやベースラインシナリオ、適応費用算出の過程や適応策の内容、被害額に関する情報に特に着目した。抽出した文献のうち、適応コスト費用推計手法の代表的な事例として取り上げられているWorld Bank(2006、2010)及びUNFCCC(2007)、並びに、3つの統合評価モデルを用いて緩和と適応の相互関係を含めた検討を行っているOECD(2010)について、定量的評価に資する数値情報を分野別の情報を含む表形式で整理を行った(表(4)-1)。とりまとめにあたっては、特に、適応ポテンシャル・コスト見積りの前提となる温室効果ガス排出シナリオやベースライン条件、温暖化の影響による想定被害額、適応策の内容、適応費用に関連する定性的情報を抽出し、表から文献ごとに適応費用推定の過程を把握することが可能となるよう整理した。

また、2014年に公表されたIPCC第二作業部会の第五次評価報告書(IPCC, 2014)のほか、UNEP(2014)やEuropean Commission(2014)、U.S. National Climate Assessment(2014)等のサーベイを行い、温暖化影響、適応策の定量的評価に関する最新の情報を収集し、とりまとめを行った。表(4)-2にIPCC第五次

評価報告書におけるサーベイの結果を、表(4)-3にその他収集した気候変動影響、適応策の費用等の定量的情報の例を示す。さらに、IPCC第五次評価報告書以降に出版された引用文献に示した各文献を収集し、メタ分析に資する情報の整理を行った。表(4)-4に、各文献の要約部分で示されている影響、適応策の費用の推定について示す。

また、2015年11-12月にパリで開催された気候変動枠組条約第21回締約国会議に先立って、条約事務局に提出された各国のINDCs (Intended Nationally Determined Contributions) から、温暖化による被害や適応策に関する記述を抽出、整理を行った。図(4)-3に、INDCの提出状況と適応策に関する記述の有無を示す。適応策に関する記述を行っている地域は発展途上国がほとんどで、先進国は適応策に関する記述が見られなかった。適応策についての記述が見られる国についても、定量的な評価までを行っている国はわずかである。また、こうしたとりまとめから、各国において重点と見なしている分野が異なることがわかる。なお、こうした費用の評価とは別に、適応計画においても分野別の課題等が示されている。

また、あわせて、適応策に関する研究が進んでいるヨーロッパ諸国とINDCにおいて適応策の記載が見られたアジアの国々について、各国における適応計画や適応戦略の有無について調査した。なお、多くの国の適応策に関する情報は、各国語で記述されていることが多く、英語による情報提供は限られていた。

適応策については、地域特性が高く、また、想定される影響も各国の産業や関心によっても異なっており、フランスなど。地域住民や地域産業に対する情報提供を目的として詳細なメッシュで情報を提供している国も見られる。ただし、各国の適応計画については、情報がWeb等で行われている場合においても、ほとんどの国で現地語による記述に止まっている場合が多い。パリ協定にも記載されている適応能力を向上させるためには、各国における情報や取り組みを世界的に共有化することで、対策を効果的、効率的に検討することが可能となる。

表(4)-1 適応ポテンシャル・コスト見積り事例のとりまとめ例

空間スケール	研究例	推計手法			適応コスト推計結果		備考
		予測の前提	適応の内容	その他特徴	年額(億ドル)	GDP比	
全球	世界銀行(2006)	気温2~3度上昇	既存の投資フローにおいて気候リスクを伴う分野への追加的投資	現在の気候への適応不足は考慮しない。	90-410	無し	USD 2000年価格
	世界銀行(2010)	適応費用の定義 開発に追加的な費用 ベースライン セクターごとに発展過程を設定 GHGシナリオ IPCC SRES A2 気候シナリオ NCAR, CISRO 対象年次 主に2010-2050年 適応レベル 気候変動のない場合の福利レベルへの回復 割引率 ゼロ	公的ハード対策のみ。 インフラ、 沿岸域、 水供給・河川洪水、 農業、 漁業、 健康、 森林・生態系、 極端気象 単独で漁業分野を含むのはこれが初の試みとしている。	現在の気候への適応不足は考慮しない。 各分野で用いるモデルが取扱う適応オプション以外は考慮していない。	全分野 NCARシナリオ(多雨) 895-1,018 CISROシナリオ(乾燥) 768-883	NCARシナリオ(多雨) 2010-49年: 0.22-0.12% CISROシナリオ(乾燥) 2010-49年: 0.17-0.11%	USD 2005年価格
	UNFCCC(2007)	適応費用の定義 開発に追加的な費用 ベースライン セクターごとに発展過程を設定 GHGシナリオ IPCC SRES A1B, B1, IS92a 対象年次 主に2010-2030年	インフラ、 沿岸域、 水供給、 農業、 林業及び漁業、 健康、 自然生態系	対象部門により費用推計の費用が異なる。	80-1,300 12(A1B), 11(B1) 110(A1B), 90(B1) 140 40-50 120-220	無し	USD 2005年価格
	Agrawal a. S., et al. (OECD)(2010)	適応費用の定義 被害を削減するための投資額 ベースライン モデルごとに設定 気候モデル AD-DICE, AD-RICE, AD-WITCH 対象年次 2005-2100年 割引率 3%	沿岸域、 農業、 健康、 居住地及び生態系、 その他気候変動に脆弱な市場、 非市場部門、 極端気象 フロー、ストック、キャパシティに関する適応を考慮	DICE, RICE, WITCHの3つのモデルの下、適応と緩和のトレードオフ効果を考慮。	無し	DICE 2100年: 0.28% WITCH 2100年: 0.19% (NPV換算)	コストは最適なレベルでの適応、緩和無し時の値。

表(4)-2 IPCC第2作業部会第5次評価報告書からの温暖化影響に関する定量的な分析結果のサーベイ

規模	著者	発行年	タイトル	セクター	内容
全球	Ebi, K.L	2008	Adaptation costs for climate change-related cases of diarrhoeal disease, malnutrition, and malaria in 2030	健康	下痢症、栄養不足、マラリアへの適応費用を、(1)現状の罹患者数、(2)3つの病気に関する2030年での予測相対リスク、(3)現在の処置費用(費用は将来も変わらないと仮定)、を用いて3つの気候シナリオの下で推計。社会経済状況の変化は限定的に考慮。
南米 (ブラジル)	Margulis, S., C. Dubeux, and J. Marcovitch (coords.)	2011	The Economics of Climate Change in Brazil: Costs and Opportunities	農業、 エネルギー	一般均衡モデルを用いて、気候変動の無い将来のブラジル経済をシミュレーション。気候変動の影響は、モデルの農業/畜産業/エネルギーセクターに反映。気候変動の有無における社会経済トレンドは、ブラジルおよび周辺地域の経済への費用便益の観点で考慮。
全球	Nicholls, R. and R. Tol.	2006	Impacts and responses to sea level rise: a global analysis of the SRES scenarios over the twenty-first century	沿岸域	堤防の建設、レクリエーション価値を維持するための養浜、沿岸域住民の移住をシミュレーション。
欧州 (英国)	Purvis, M., P. Bares, and C. Hayes	2008	A probabilistic methodology to estimate future coastal flood risk due to sea level rise	洪水	海面上昇や土地利用の不確実性を踏まえて確率的表現を用いたシミュレーションを実施。沿岸洪水のリスクを検討。
アジア (インド)	Ranger, N., S. Hallegatte, S. Bhattacharya, M. Bachu, S. et al.	2011	A preliminary assessment of the potential impact of climate change on flood risk in Mumbai	洪水	ムンバイにおける洪水の直接・間接影響を、異なる再現期間、気候変動の有無で検討。100年に1度の規模のイベントで、直接被害は2080年には18.9億ドルに上る。間接影響を含めると、合計で24.35億ドル。住居品質及び排水システムの改善により被害額を低減することが可能。全住民が保険に加入したとすると、間接影響の方が大きくなる。
アフリカ(10カ国)	Seo, S.N. and R. Mendelsohn.	2008	Animal husbandry in Africa: climate change impacts and adaptations	農業	計量経済手法を用いて、畜産業を対象に、生産量を維持するための経済的手法を検討。適応の選択肢は、場所、時期、気候状況により異なる。
全球	Ward, P.J., K.M. Strzepek, et al.	2010	Partial costs of global climate change adaptation for the supply of raw industrial and municipal water: a methodology and application	水資源	2050年まで、気候変動のないレベルでサービスを維持するために必要な水供給及び洪水防護への費用は、乾燥気候モデルで197億ドル/年、湿潤気候モデルで144億ドル/年と推定(SRES A2シナリオ)。排水処理や下水システムといった都市インフラの費用は、乾燥気候モデルで130億ドル/年、湿潤気候モデルで275億ドル/年(共にSRES A2シナリオ)と推定。

表(4)-3 気候変動影響、適応策の費用等の定量的情報の例

文献	分野	ベースライン	排出シナリオ/社会経済シナリオ	気候シナリオ/気候モデル	対象年次	備考
Ebi, K. L. (2008). Adaptation costs for climate change-related cases of diarrhoeal disease, malnutrition, and malaria in 2030	健康 (下痢症、マラリア、 栄養失調)	本研究が参照するWHO GBDではIPCC Is92aをBAUシ ナリオとしてい る。	本研究が参照するWHO GBDでは以下3つの シナリオを設定している。 ①. IPCC Is92a (BAUシナリオ)、 ②. 2210年までに750ppm CO2で安定、 ③. 2170年までに550ppm CO2で安定。	本研究が参照するWHO GBDではHadCM2を用いて いる。	2030	WHOのGBD (Global Burden of Disease)は、2000-2030年を対象 に、気候変動など26項の健康リス クを評価。 気候変動の影響は、2100年に 154,000人の死者(これは550万 DALYsに該当)を生じさせ、その内 の約50%はマラリアによるものと予 測。
Margulis, S., C. Dubeux, and J. Marcovitch (coords.). (2011). The Economics of Climate Change in Brazil: Costs and Opportunities.	農業、 エネルギー	1961年～1990 年。	SRES A2およびB2シナリオをブラジルに適用 したA2-BR及びB2-BRシナリオ。 2050年のGDP: A2-BRで-0.5%(7,190億レアル)、B2-BRで -2.3%(3.655兆レアル)。※割引率 1%。 1人当たりGDP: A2-BRで-534レアル、B2-BRで-1,603レアル。 水力発電量: -31.5%(A2-BR)～29.3%(B2-BR)。※最も水 量が減った時に供給可能な電力量の変化。 平均的な水量における発電量は+2.7% (A2-BR)～+1.1%(B2-BR)。 代表的な農産物の生産量: 大豆:-34%(A2-BR)～-30%(B2-BR)、 とうもろこし:-15%(両シナリオ)、 コーヒー:-17%(A2-BR)～-18%(B2-BR)。	HadCM3(全球モデル) HadRM3P PRECIS(地域モ デル):水平解像度 50km、 鉛直方向 19層。 アマゾン及び北東部では、 2100年に平均地上気温が5 度(A2-BR)および3度 (B2-BR)上昇。	気候予測 は2071 年～ 2100年。 適応は 2050年。	第3章では気候変動が「水資源」 「エネルギー」「農業生産」「土地利 用」「アマゾン地域の生物多様性」 「沿岸地域」「ブラジル北東部」の環 境・経済・社会に与える影響を検討 している。 気候変動対策をとらない場合の費 用と対策(緩和と適応)をとった場 合の費用は9ページに整理してい る。 農業における、A2-BRおよび B2-BRシナリオでの適応策費用と その費用対効果を45ページに整理 している。

表(4)-3 気候変動影響、適応策の費用等の定量的情報の例(つづき)

文献	適応策の前提条件	適応策の内容	適応策の効果	被害額	適応費用	適応策費用原単位
Ebi, K. L. (2008). Adaptation costs for climate change-related cases of diarrhoeal disease, malnutrition, and malaria in 2030	仮定条件: 1. 2030年までの罹患者数は現在の人数にて一定とする。 2. 2030年以降の罹患者数はWHOのGBD調査による、気候変動による相対的リスク評価に基づき、追加的的患者数を予測する。 3. 期間にわたって処置費用単価は現在と同額で一定とする	1. 下痢症 a. 授乳プログラム、ロタウィルス・コレラ・麻疹予防接種、 b. 水供給・衛生の改善。 2. 栄養失調 授乳プログラム、サバイバルプログラム(栄養剤の提供)、成長モニタリング、カウンセリング。 3. マラリア a. 防虫蚊帳とアルテメシニンベースの混合療法、妊婦に対する予防処置(presumptive treatment in pregnancy)、 b. aと屋内での殺虫剤散布。	記載なし	記載なし。	2030年において、排出シナリオごとに、 ①USD5,852百万～USD17,957百万、 ②USD3,992百万～USD12,603百万、 ③USD3,333百万～USD10,689百万。	1. 下痢症 a. USD15.09/5歳以下の児童(USD0.71～USD104.30)。 b. USD53/5歳以下の児童(USD25～USD81)。(表記は2001年USD価値) 2. 栄養失調 USD17.40～USD23.09/子供(保守的との指摘もあり。Edejer et al.など) 3. マラリア a. アフリカD及びE地域で、Int\$88.5、 b. Int\$123.5。 (これら費用はDALYから算定)
Margulis, S., C. Dubeux, and J. Marcovitch (coords.). (2011). The Economics of Climate Change in Brazil: Costs and Opportunities.	記載なし。	農業(米、綿花、コーヒー、豆、大豆、とうもろこし) ・遺伝子組換え作物の開発 ・灌漑 エネルギー ・153TWh(B2-BR)～162TWh(A2-BR)の追加発電設備の導入(天然ガス、バイオガス、風力など)	遺伝子組換え作物の開発に対する費用対効果は6%(大豆)～23%(とうもろこし)。 ※費用対効果は数値が大きいほど効率が低い。 灌漑の費用対効果は、20%(とうもろこし)～136%(豆)。	最もSLRが大きいシナリオで、極端現象が発生するとすれば、リスクの高い沿岸域の資産価値は1,360億リアル～2,075億リアル。	遺伝子組換え作物の開発: 米、綿花、コーヒー、豆、大豆、とうもろこしの6品目に対して合計10億リアル/年。 灌漑: 米は1.97億リアル/年、豆は4.94億リアル/年、とうもろこしは3.09億リアル/年。 ※現在灌漑を用いて栽培している作物のみ考慮。 追加発電設備費用: USD480億(B2-BR)～USD510億(A2-BR)。	記載なし。

表(4)-4 気候変動影響、適応策に関する費用の推定

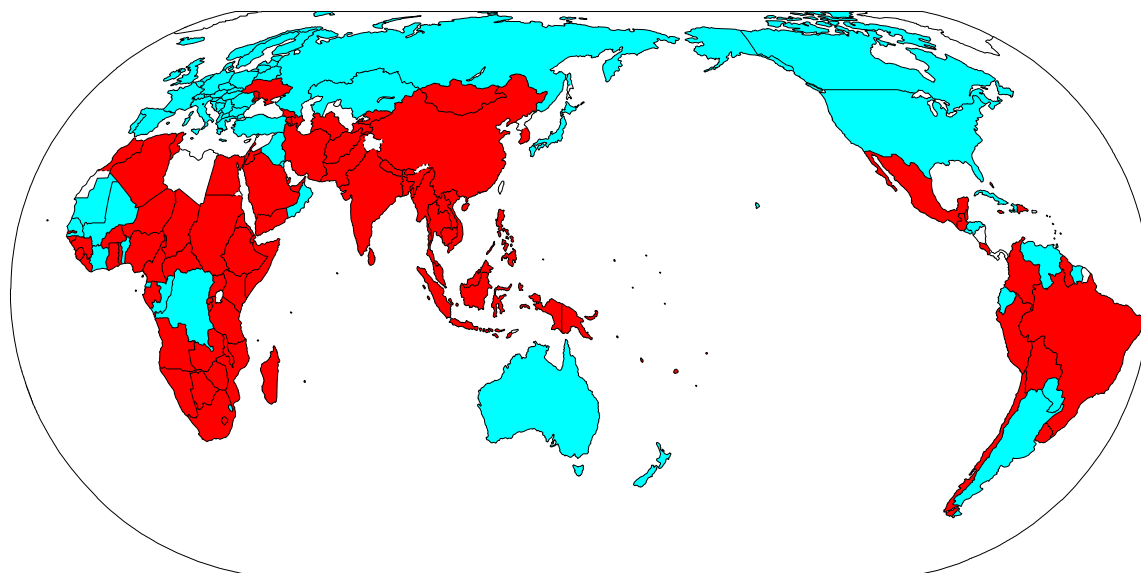
文献	対象、地域、年		金額		概要
①	沿岸、アメリカ、2100	影響	5	兆\$	GHG排出削減行動をしなかった場合の資産被害額
①	沿岸、アメリカ、2100	影響	810	10億\$	費用対効果が高い適応策をとった場合の資産被害額
①	健康、アメリカ、2100	影響	110	10億\$	Mitigation scenarioの労働損失減少額
①	健康、アメリカ、2100	影響	2.6-3.0	10億\$	Mitigation scenarioの水不足被害減少額
①	電力供給、アメリカ、2050	適応策	10-34	10億\$	Mitigation scenarioの電力供給システムにかかる費用削減額
①	インフラ、アメリカ、2100	適応策	4.2-7.4	10億\$	Mitigation scenarioの道路適応費用削減額
①	インフラ、アメリカ、2100	適応策	0.05-6.4	10億\$	Mitigation scenarioの都市排水適応費用削減額
①	インフラ、アメリカ、2100	適応策	3.1	10億\$	Mitigation scenarioの沿岸部資産被害および適応費用の削減額
①	水資源、アメリカ、2100	影響	2.8	10億\$	Mitigation scenarioの洪水被害減少額
①	水資源、アメリカ、2100	影響	11-180	10億\$	Mitigation scenarioの水不足による被害減少額
①	農林業、アメリカ、2100	影響	6.6-11	10億\$	Mitigation scenarioの農業被害減少額
①	農林業、アメリカ、2100	影響	0.52-1.5	10億\$	Mitigation scenarioの林業被害減少額
②	沿岸、オーストラリア、2100	影響	226	10億\$	海面が1.1m上昇した時の沿岸部の氾濫による被害額
②	沿岸、クイーンズランド南東、2030	影響	2	10億\$	海面が0.2m上昇した時の被害増加額
②	沿岸、クイーンズランド南東、2070	影響	3.9	10億\$	海面が0.5m上昇した時の被害増加額
②	沿岸、全世界、2050	影響	1	兆\$	沿岸部氾濫による被害額
③	沿岸、アメリカ南東沿岸部およびメキシコ湾、2030	影響	2-3.5	10億\$	沿岸部荒天による年間費用
③	沿岸、アメリカ、2030	影響	7.3	10億\$	ハリケーンの規模拡大による年間被害増加額
③	沿岸、アメリカ、2030	影響	35	10億\$	ハリケーン及び沿岸部荒天の年間総被害額
③	沿岸、アメリカ、2050	影響	66-106	10億\$	BaUにおける沿岸部資産の損害額
③	沿岸、アメリカ、2100	影響	238-507	10億\$	BaUにおける沿岸部資産の損害額
③	沿岸、アメリカ、2100	影響	701	10億\$	20分の1の確率で水没する沿岸部資産
③	沿岸、アメリカ、2100	影響	730	10億\$	高潮の危険にさらされる資産
③	沿岸、アメリカ南東沿岸部およびメキシコ湾、2100	影響	42	10億\$	海面上昇によるハリケーン及び沿岸部荒天の年間被害額
③	沿岸、アメリカ、2100	影響	108	10億\$	ハリケーンの規模拡大による年間被害増加額
⑤	雇用、EU、2050	適応策	0.5	% 2050 GDP	reference scenarioの気候変動に伴う適応費用
⑤	雇用、EU、2050	影響	29	10億€	reference scenarioの運輸部門の雇用
⑤	雇用、EU、2050	影響	24	10億€	reference scenarioの環境部門の雇用
⑤	雇用、EU、2050	影響	19	10億€	reference scenarioの衛生部門の雇用
⑤	雇用、EU、2050	影響	13	10億€	reference scenarioの農業部門の雇用
⑤	雇用、EU、2050	影響	12	10億€	reference scenarioの保険・金融サービス部門の雇用
⑤	雇用、EU、2050	適応策	1.0	% 2050 GDP	ambitious scenarioの気候変動に伴う適応費用
⑧	沿岸、アメリカ南東、2050	影響	48.2-68.7	10億\$	海面上昇に伴う沿岸部資産の損害額
⑧	沿岸、アメリカ南東、2050	影響	107	10億\$	100年に1度の確率で起こる既存資産のリスク
⑧	沿岸、ルイジアナ、2030	影響	19.8	10億\$	海面上昇に伴う沿岸部資産の損害額
⑧	沿岸、ルイジアナ、2050	影響	33.1-44.8	10億\$	海面上昇に伴う沿岸部資産の損害額
⑧	沿岸、フロリダ、2030	影響	5.6-14.8	10億\$	海面上昇に伴う沿岸部資産の損害額
⑧	沿岸、フロリダ、2030	影響	14.8-23.3	10億\$	海面上昇に伴う沿岸部資産の損害額
⑧	沿岸、アメリカ南東、2050	影響	3.6-6.8	10億\$	ハリケーン及び沿岸部荒天の年間被害額
⑧	沿岸、テキサス、2030	影響	167-222	100万\$	ハリケーン及び沿岸部荒天の年間被害

					額
⑧	沿岸、テキサス、2050	影響	483-648	100万\$	ハリケーン及び沿岸部荒天の年間被害額
⑬	洪水、EU27、2011-2040	影響	20	10億€	A1Bシナリオでの年間損害

表(4)-4 気候変動影響、適応策に関する費用の推定 (つづき)

文献	対象、地域、年		金額		概要
⑬	洪水、EU27、2041-2070	影響	46	10億€	A1Bシナリオでの年間損害
⑬	洪水、EU27、2071-2100	影響	98	10億€	A1Bシナリオでの年間損害
⑬	洪水、EU27、2011-2040	影響	9	10億€	A1Bシナリオでの気候変動による損害
⑬	洪水、EU27、2041-2070	影響	19	10億€	A1Bシナリオでの気候変動による損害
⑬	洪水、EU27、2071-2100	影響	50	10億€	A1Bシナリオでの気候変動による損害
⑬	洪水、EU27、2011-2040	影響	15	10億€	E1シナリオでの年間損害
⑬	洪水、EU27、2041-2070	影響	42	10億€	E1シナリオでの年間損害
⑬	洪水、EU27、2071-2100	影響	68	10億€	E1シナリオでの年間損害
⑬	洪水、EU27、2011-2040	影響	5	10億€	E1シナリオでの気候変動による損害
⑬	洪水、EU27、2041-2070	影響	20	10億€	E1シナリオでの気候変動による損害
⑬	洪水、EU27、2071-2100	影響	30	10億€	E1シナリオでの気候変動による損害
⑬	洪水、EU27、2011-2040	影響	8	10億€	A1Bシナリオで最低限の洪水対策によって得られる便益
⑬	洪水、EU27、2041-2070	影響	19	10億€	A1Bシナリオで最低限の洪水対策によって得られる便益
⑬	洪水、EU27、2071-2100	影響	50	10億€	A1Bシナリオで最低限の洪水対策によって得られる便益
⑬	洪水、EU27、2011-2040	適応策	1.7	10億€	A1Bシナリオで最低限の洪水対策に必要な費用
⑬	洪水、EU27、2041-2070	適応策	3.4	10億€	A1Bシナリオで最低限の洪水対策に必要な費用
⑬	洪水、EU27、2071-2100	適応策	7.9	10億€	A1Bシナリオで最低限の洪水対策に必要な費用

注：文献欄の数字は、引用文献の数字に一致する。ここで示したものは、各文献の要約部分に明記されているもののみである。



■ INDCに適応策の記述がある国 ■ INDCに適応策の記述がない国（緩和策のみの国）

図(4)-3 INDCの提出状況と適応策に関する記述の有無

2) 将来の社会経済シナリオの整理

社会経済シナリオとして共通に使用するシナリオの長所、短所を明確化し、共通シナリオの意味を明確化するとともに、来年度以降に作成する共通シナリオが備えるべき要件を明らかにした。共通シナリオとしての利点と問題点を表(4)-7にとりまとめる。S-10全体を対象とした統合化会議や各チームに対する意見調査を踏まえ、S-10全体として共通シナリオを作成することは有意義であると判断されたため、共通シナリオ作成に向けて作業を開始した。

表(4)-7 共通シナリオの利点と問題点

利点	問題点
<ul style="list-style-type: none"> ・各チームの分析が整合的になる。最終的な成果として、説明が容易になる。 ・多くの研究者が参画しているプロジェクトでのシナリオであり、今後の標準的なシナリオとなりうる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・既にシナリオを設定し、分析を介している研究グループにとっては、二度手間になる。 ・各チームが納得できるシナリオを作成することは非常に難しい。 ・シナリオを提供できるまでに時間がかかる。

次に、S-10において必要となるシナリオの要件について以下の通り整理した。

- ・シナリオの目的：各チームで行う分析において共有する将来シナリオであり、プロジェクト全体の成果としての基盤となる将来シナリオとする。
- ・シナリオとして明示する項目：統合評価モデルの入出力である人口、GDP、産業構造（部門別負荷価値など）、ライフスタイル（消費構造）、温室効果ガス排出量のほか、参考データとして簡易気候モデルから計算される将来の気温上昇についても明示する。また、定量化の背景にある定性的（叙述的）なストーリーラインについても提示する。
- ・空間解像度：統合評価モデルの出力を用いることから、全球、アジアやヨーロッパといった地域、国を基本単位とする。なお、更に詳細な解像度（たとえば地方や0.5度メッシュなど）へのダウンスケールについては、今後更に検討する。
- ・対象年次と時間解像度：シナリオ間での温暖化の影響が明確に差別化できることと、これまでの統合評価モデルによる分析の経験から、2100年までを対象とする。また、2100年までの年次についても経年的に提示する。なお、時間解像度の単位は当面は年とし、更なる詳細化については今後検討する。

本研究プロジェクトでは、SRESに代わるシナリオとして整備が進められているSSPs（作成方法等については、Moss et al. (2010)を参照）を基礎として、将来シナリオを整理することとするが、それにあたって、表(4)-8に示すように、これまでに開発されている世界を対象としたシナリオを対象に、それぞれを用いることの長所、短所をとりまとめた。

また、SSPsについては、2016年秋までに最終的な定量的、定性的なシナリオが公表された。図(4)-4はAIM/CGEで計算し、共有したSSPsで示される5つの将来社会について、結果を示したものである。なお、図5には、S-10全体で取り組んだ戦略ケースの結果もあわせて示している。GDPは、社会像によって大きく変化するのに対して、対策による影響は社会像の違いほどは大きくない。また、CO2排出量やエネルギー消費量についても、社会像の違いによる際は大きいですが、同じ社会像

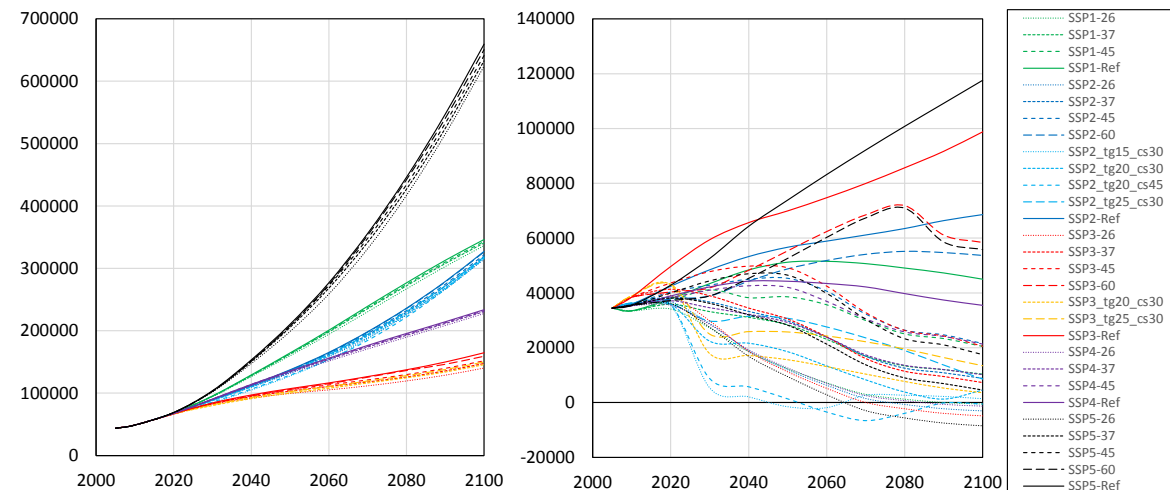
であっても温暖化対策によって大きく異なる。取り得る対策の違いは、二酸化炭素の価格（排出削減のための限界削減費用）にも表れており、厳しい排出削減目標を選択するのであれば、社会像そのものを選択する必要があることを示唆したものとなっている。

なりゆきであるSSPとそれぞれのSSPに対する対策ケース（本課題における戦略ケースを含む）について分析を行った。例えば、SSP2及びSSP3の社会ともに目標が同じ場合において、ほぼ同じだけの一次エネルギー供給量になるという結果になったが、その内訳は異なっており、SSP3では原子力発電の比率が極めて低く、2100年でも現状の2倍以下である。また、SSP2の方がCCSの比率が高くなっている。これに対してSSP3ではバイオマス、太陽光のシェアがSSP2のそれよりも大きくなっており、地域のエネルギーに依存した対策となっていることがわかる。このように、将来気温上昇の目標が同じであっても、選択される対策は大きく異なることがわかる。

地域的に相違点についても分析を行った。OECD90における一次エネルギー供給量について、Refシナリオにおいて一次エネルギー供給量もSSP3の方が少なくなっている。一方、SSP2において原子力が多く導入されているが、その他のエネルギーの導入比率についてSSP2とSSP3において顕著な差は見られない。一方、アジア（日本は除く）については、RefにおいてSSP3の方が一次エネルギー供給量は多く、その大部分が石炭となっている。対策時においても石炭のシェアが比較的高く、SSP2と比較してSSP3では、CCSを導入しない石炭消費の比率が高い。原子力も世界全体やOECD90と同様にSSP2の方が大きくなっており、代わってSSP3では、太陽光やバイオマスの比率が高くなっている。以上のように、世界全体と先進国、アジアの結果はそれぞれ異なったものとなっており、対策を検討する際に地域特性（資源賦損量、発展段階など）を踏まえることが必要といえる。「共通だが差異ある取り組み」を具体化する上でも、こうした地域や国による相違は十分に検討する必要がある。

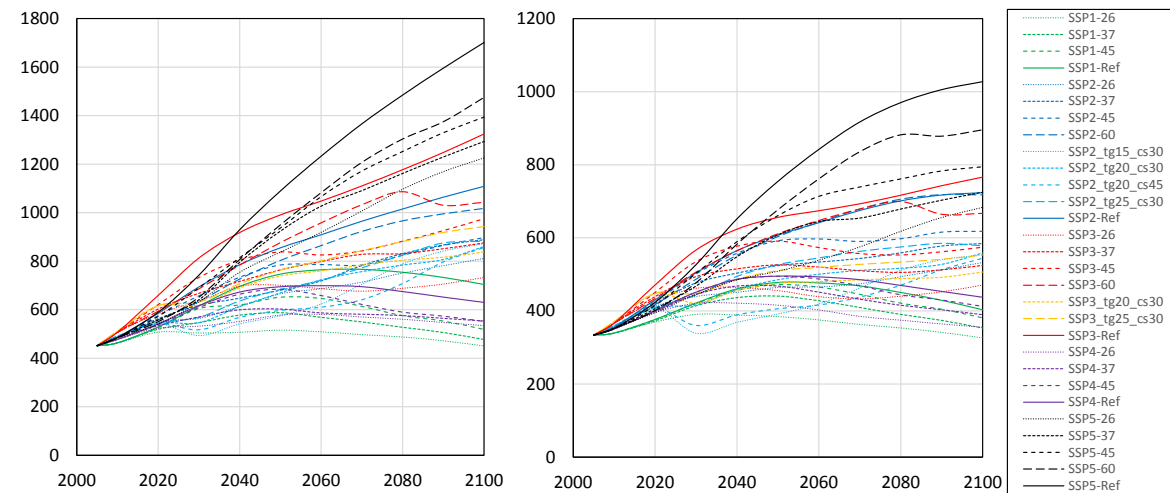
表(4)-8 既存シナリオを用いることの長所と短所

シナリオ	長所	短所
SRES	<ul style="list-style-type: none"> 既に多くの研究がSRESをベースに検討されており、比較等が容易。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状（2005年や2010年）で、すでにズレが発生している。このため、SRESにあわせた再計算をどのようにするか注意が必要。 最新の気候モデルは対応していない（パターンスケールで対応か？）。
推進費S-6	<ul style="list-style-type: none"> 既に、S-6において定量化が行われている。 推進費間の連携を図ることができる（S-7においても使用）。 	<ul style="list-style-type: none"> 国際標準ではなく、ローカルなシナリオ。 気候モデルが対応していない（パターンスケールで対応か？）。 基本的に2050年まで。2100年以降は別途、想定し直す必要がある。
SSPs	<ul style="list-style-type: none"> 今後数年間は、世界シナリオの標準となる可能性が高い。 GDPや人口などは、国別に提供される予定。 	<ul style="list-style-type: none"> まだ、シナリオが確定していない。 5つの将来シナリオを基準としており、数を絞る必要がある一方、それぞれは、かなり偏ったシナリオとなる可能性があり、一部だけを切り出すことの意味を明確にする必要がある。



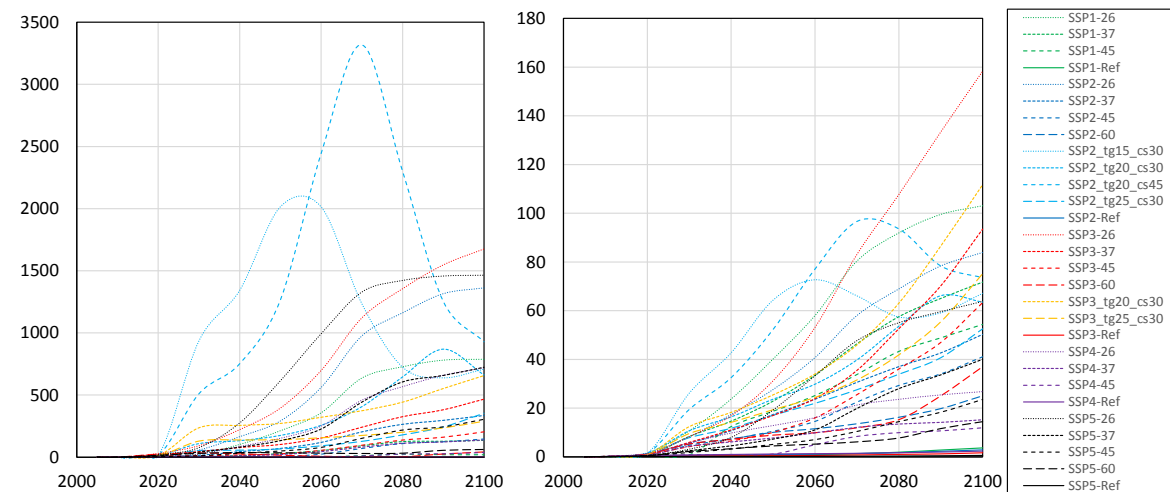
a. GDP (単位：2005年価格10億ドル)

b. CO2排出量 (100万トンCO2)



c. 一次エネルギー供給 (単位：EJ)

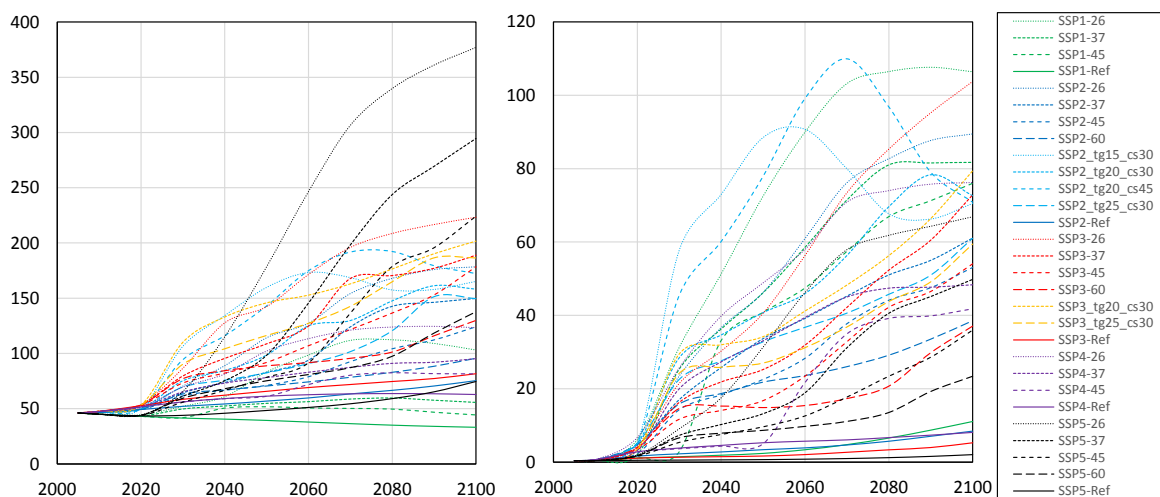
d. 最終エネルギー消費 (単位：EJ)



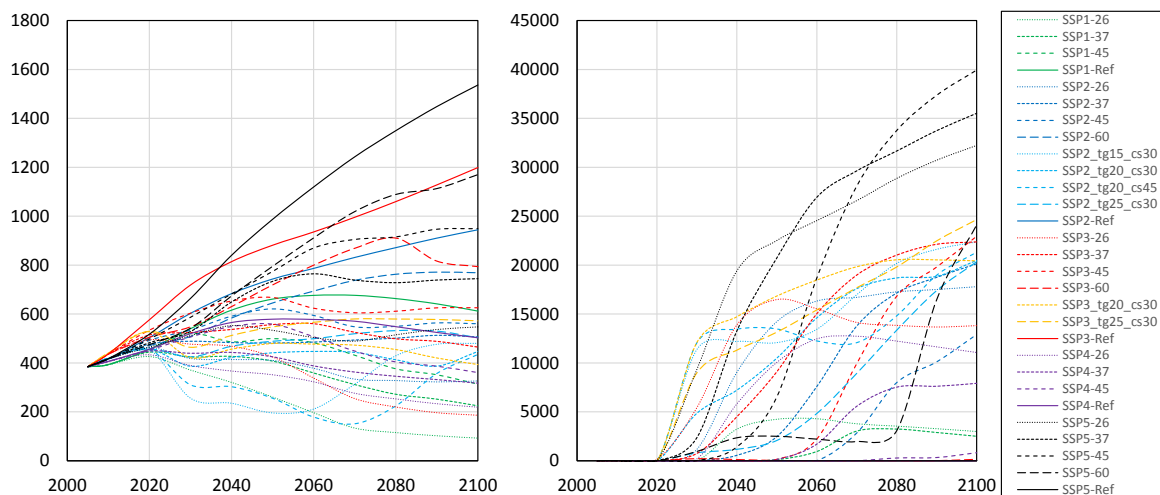
e. 炭素価格 (単位：2005年価格\$/tCO2)

f. 太陽光発電供給量 (単位：EJ)

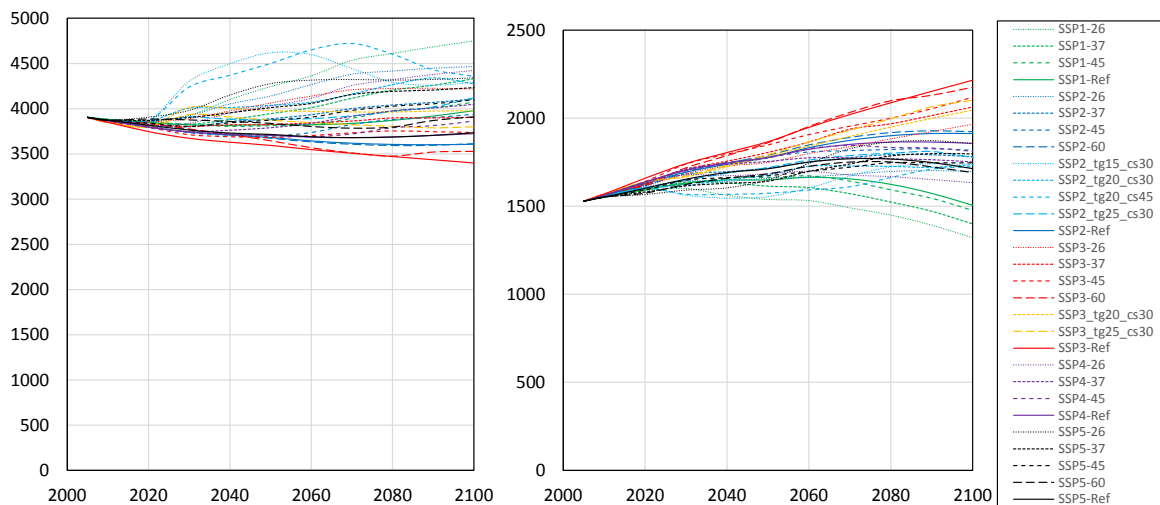
図(4)-5 SSPsの5つの社会像における各指標の推移 (世界全体)



g. バイオマスエネルギー供給量 (単位: EJ) h. 風力発電供給量 (単位: EJ)

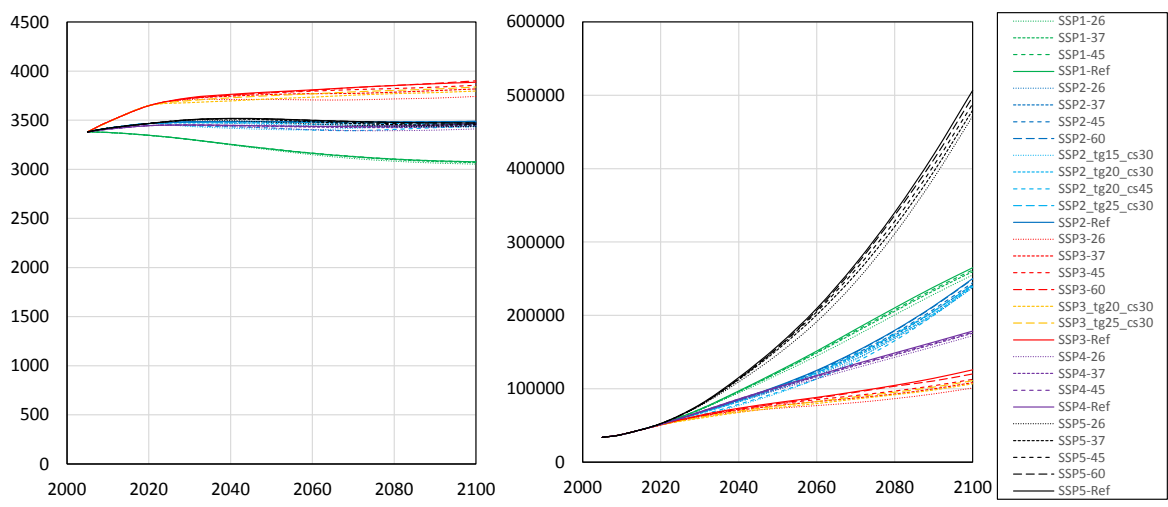


i. 化石燃料供給量 (単位: EJ) j. CCS導入量 (100万tCO2)



g. 森林面積 (単位: 100万ha) h. 農地面積 (単位: 100万ha)

図(4)-4 SSPsの5つの社会像における各指標の推移 (世界全体; 続き)



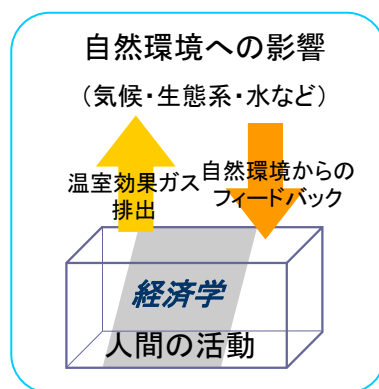
i. 牧草地面積 (100万ha) j. 最終消費 (2005年価格10億ドル)

図(4)-4 SSPsの5つの社会像における各指標の推移 (世界全体; 続き)

3) 統合評価モデルによる適応策、緩和策の総合評価の試算

分析に当たって、CGEモデルが気候変動による影響や適応策をどのように捉えることができるか、またその結果はどのようなものなのかを整理した。CGEモデルとは、外生的なショックが起こった場合に、社会会計表と呼ばれる財・サービスの取引マトリックスがどのように変化するか?を計算することができるシミュレーションモデルである。CGEモデルはミクロ経済学の一般均衡理論に基づいて構築されており、生産者の利潤最大化行動と消費者の効用最大化行動によってモデルの挙動が裏付けられている。部分均衡分析が1つの市場に注目するのに対して、一般均衡分析は複数市場とその相互作用に注目するものである。したがって、CGEモデルは、例えば貿易自由化、環境税の導入、省エネ技術の低廉化といった、財・サービス間の相対価格を変化させるような政策変更が行われた場合に、どの経済主体にどんな影響が出るのか?を分析するのに強力なツールとして、世界的に広く使用されている。

気候変動による影響をCGEモデルで評価するというのは、気候変動影響により、社会経済活動の基盤となる資本、労働、資源の変化や、それによる各経済主体への波及効果を分析することである。ここで重要なことは、CGEモデルは人間活動を経済という断面で捉えたものであり、「排出された温室効果ガスによってどのような気候変動が起こり、それによる経済へのフィードバックはどんなものなのか」はモデルの外にあるということである (図(4)-6)。したがって、気候変動による経済への影響をCGEモデルに外生的ショックとして入力するためには、モデルに存在する経済変数の変化に変換する作業が必要となる



図(4)-6 気候変動影響を対象としたモデルの概念

候変動により、ある地域の海面が何m上昇するということがわ
や堤防、砂浜の喪失量から、資本の損失額がいくりに相当するのかを計算し、その値を外生的ショックとしてシミュレーション分析を行うといった作業が必要となる。以下では、各分野の影響

をCGEモデルでどのように扱っているのかを、分野別にまとめる。

水資源をCGEモデルで扱っている文献は、他の影響分野に比べると数が多い（Diao X. and Roem T., 2003、Calzadilla A., Rehdanz K., and Tol R. S. J., 2010など）。CGEモデルで扱う水資源は、市場水と非市場水に分けられる。市場水とは、水道事業を通じて供給される水である。利用者は水を利用することの対価として水道料金を水道事業者を支払っていることから、市場水は社会会計表に計上されている。一方、非市場水とは、利用者が河川や湖沼などから直接取水するものであり、価格がゼロであることから社会会計表には表れない。CGEモデルで非市場水を扱うには、非市場水を生産要素の1つとして捉え、取水量を社会会計表に加える。ただし、価格がゼロであることから、社会会計表には表れる数字はゼロである。渇水が起こり、非市場水の供給量に制約がかかると、非市場水の利用の機会便益としてシャドウプライスが発生し、経済全体の非市場水の利用量が供給制約を超えないように調整されるというメカニズムを導入した。

Bosello et al. (2006)は、気候変動による健康影響と、その適応策の効果をCGEモデルで評価している。彼らは、気温上昇によるマラリアやデング熱といった昆虫媒介疾病の発生率や死亡率の変化と一人当たり所得との関係を既存文献の調査によって得ており、それを労働生産性の低下に換算し、CGEモデルに外生的ショックとして与えている。また、医療サービス需要の所得弾力性と、各疾病の医療費のデータを用いて、患者の増加にともなう医療サービス需要の増加の関係を導出し、医療サービス需要の変化をCGEモデルで考慮することにも成功している。

Ochudho et al. (2012)は、おける森林火災、害虫の大量発生によるカナダの林業への影響と、適応策（害虫駆除、森林防火、作付変更）の効果を評価している。気候変動による林業の生産性変化、森林火災増加、害虫被害増加による森林供給量への影響は既存文献から得ているが、林業で植付されている品種への影響までは特定されていない。したがって、それにより林業および製材業の生産量にどんな影響があるかまでは情報を得ていない。そこで彼らは、森林供給量の減少率が生産量の減少率に一致すると仮定して分析を行っている。また、どのような情報に基づいて適応策の費用と効果を特定し、それをどのようにCGEモデルに導入するかが問題となるが、本論文は、専門家から妥当な値を示してもらい、それを使用している。

ヨーロッパでは、気候の良い地域への旅行ニーズが高いと考えられ、気候変動による観光への影響が研究対象とされている。Bosello et al. (2011)では、Hamburg Tourism Model (HTM) (Bigano et al., 2007)という国内および海外旅行のニーズを推計するモデルの結果が用いられており、家計のmarket service sector（レクリエーションを含む）への支出の変化として考えられている。

農業分野への影響を評価している文献では、気温変化・CO2濃度による収量の変化を説明する作物モデルの結果が使用されており、生産性の変化という形でCGEモデルに取り込まれている。

海面上昇を扱っている文献では、いずれも他のモデルとの連携がクローズアップされている。Bosello et al. (2012)は、DIVA model (Vafeidis et al., 2008)の結果を使って、沿岸域の土地と資本の減少という形でショックを与えている。

次に、気候変動影響や適応策をCGEモデルで扱うことの限界も整理した。

気候変動による影響や適応策は、都市スケール、あるいは流域スケールといった地域スケールの問題である。また、影響の出る地域の分布は、国境で区切られるものではない。それに対して世界CGEモデルの空間解像度はせいぜい国である。これは、国際的に利用可能な経済データが国単位で整備されていることと、それゆえにCGEモデルを構築する際に広く使用されているデータベー

スもまた、国単位のデータとなっていることに由来している。したがって、CGEモデルで扱うにふさわしい影響分野は限定される上、国全体の平均的な影響の評価となってしまう。

次に、時間スケールの問題をどう考えるかは慎重に議論される必要がある。CGEモデルで捉えているのは短くても1年単位の影響でしかないのに対して、農業、観光への影響は季節性があると考えられる。農業でいえば、登熟期に雨が降らないのか、慢性的な干ばつに見舞われるようになるのかによって影響が異なると考えられるが、このような季節性をCGEモデルで考慮した例は見つからなかった。

また、ほとんどの文献で、別の気候変動影響を評価するモデルの結果がCGEモデルにある経済変数の変化に変換して使用されている。このようなモデルの連携をする場合には、影響評価モデルの結果がどのような仮定を持つものなのか、その仮定はCGEモデルの仮定と矛盾するものではないのかを慎重に確認して使用する必要があるだろう。また、気候変動影響の多くは自然災害の生起確率の増加として示されているが、確率現象をCGEモデルでどのように捉えるかについても議論が必要であるといえる。

統合評価モデルを用いて適応策、緩和策をマクロな統合的な指標ではなく温暖化の影響を受ける各事象を個別に評価するためには、対象とする影響、適応策の分野を適切にモデルに組み込むとともに、将来のストーリーラインと整合するように、分野を表現することができるような変数の選定およびそれらを用いた定式化が必要となる。また、SSPsでは、将来の社会像を定義するにあたって、Mitigative capacityとAdaptive capacityについて、それぞれ高い、低いという軸が設けられており、将来の社会像の描写において、Mitigative capacityやAdaptive capacityの違いを明確に表現することが求められる。こうしたことから、より適切に緩和策と適応策を表現することができるような統合評価モデルの構築に向けて、作業を行った。今年度は、農業、土地利用分野における統合評価モデルの組み込みについて検討を行うとともに、2)で示した5つのSSPsに対応する予備的なシミュレーションを行った。

今回用いる統合評価モデルは、応用一般均衡型の世界モデルであり、様々な効率変化を前提として、財や生産要素の市場について需給を均衡させるように活動水準を計算する。このため、農業、土地利用を対象にモデル化するにあたって、Adaptive capacityを表現するために必要となる因子として、以下の10の変数を取り上げた。

- ・ 人口及び人口構造
- ・ 食料分配の公平性
- ・ 灌漑率
- ・ 木材生産性
- ・ 土地変化の家畜弾力性
- ・ GDP
- ・ 作物収量
- ・ 家畜土地生産性
- ・ 食料消費の所得弾力性
- ・ 貿易弾力性

これらの各変数が、5つの社会像の想定にあわせて変化することで、将来のAdaptive capacityが変化するとみなす。2)においてSSPsで示される社会の姿（方向性）とその主要な結果を示したが、Adaptive capacityの高いSSP1やSSP5では、食料生産にかかわる効率が向上し、1人当たりの食料消費量は増加する一方、食料生産のための土地資源は現状と比較して少なくよく、森林面積は増加する傾向となる。逆に、Adaptive capacityの小さいSSP3やSSP4では食料消費量は相対的に小さいにも関わらず、食料生産のための土地を確保しなければならず、森林面積は小さくなるといった特徴がみられた。

S-10-4を通じては、モデル間における農業生産性の比較や土地利用の変化についても比較を行った。今年度は基礎的な分析として、土地利用変化について検討を行った。図(4)-5のgからjに森林及び農地面積の推移を示すとともに、最終消費の推移を示す。人口の増大により、SSP3の社会において農地面積や牧草地面積は最も急速に拡大し、それに伴って森林面積は減少する。一方、SSP1では21世紀末には現状と同じ程度の農地にとどまり、世界の森林面積は2%程度拡大する。緩和策の導入によって影響を受けるのは、森林面積と農地面積であり、排出削減目標が高いほど森林面積は増大し、逆に農地面積は減少する結果となった。なお、最終消費全体でみると、一次産業の占める比率は小さいために、影響は農地面積ほど大きく変動はしていない。

また、戦略ケースについては、21世紀前半に大幅な削減を開始することを前提としているためにSSPのレファレンスやRCPの再現と比較すると変動幅が大きい。また、戦略シナリオによっては、限界削減費用が2000ドル/tCO₂を超えるなど極めて高くなっており、シミュレーションとして解は得られているが、実現可能性について十分に検討する必要があるといえる。戦略ケースとして、現在、排出削減目標と気候感度について検討されているが、そうした項目とともに、技術の効率改善の速度や普及の速度など、社会、経済に関する様々な前提についてもあわせてシナリオを提示することが必要となるであろう。

1)で見たように、温暖化による影響や適応策の導入に必要な費用は、国によって大きく異なる。また、各国において重要と考える分野も異なることから、適応策に関する取り組みは被害の大きさだけでなく、各国の主要産業などによっても、国や地域によって大きく異なることが予想される。さらに、2)で分析したように、緩和策における取り組みも、地域の資源賦損量や発展の程度によって違うことが明確になっている。こうした状況下において、望ましい適応策と緩和策の総合的な評価の方法について検討を行った。

緩和策に関しては、今回の2)の分析においても世界一律の炭素価格を仮定している。つまり、限界削減費用という観点から、先進国と途上国において同じ負担を求めていることになっている。たとえば、所得水準に応じて求められる温室効果ガス排出削減の水準を変えたり、INDCで多くの途上国が求めたように、ある一定量以上の対策は先進国の援助によって実現するということが必要となるであろう。

一方、適応策の観点については、定量化されている影響や適応策の費用が先進国を対象としたものであり、モデル化そのものが容易ではない。まずは、途上国における定量的な情報を収集し、モデルに反映させることが必要となる。INDCにおいて、いくつかの国がこうした評価を行っているのは、進展であると言えるが、影響は地域による違いが大きいため、特定の国ではなく、できるだけ多くの国においてこうした取り組みや評価が行われることが必要である。限られた資金の中でどのような適応策に対して重点的に取り組むかについては、評価が困難であり、できるだけ多くの試算と結果をもとにした議論が必要になるであろう。また、緩和策とは反対に、将来の気温上昇に関する目標が厳しくなればなるほど、適応策にかかる費用は小さくなる。こうした費用と便益のバランスについても統合評価モデルによって検討することが重要になるといえる。

特に、温暖化による影響は地域によって大きく異なり、その結果、適応策の導入とその効果も、各国によって大きく異なる。こうしたことから、モデルを用いて適応策等の評価を行うためには、各国の影響や適応策について情報を把握し、それらをモデルに組み込んだ上で分析する必要がある。しかしながら、現状では、そうした取り組みは、食料による饑餓リスクへの影響など個別の

問題に限定されており、温暖化影響全体の取り組みに関しては十分ではない。一方、温暖化影響全体を評価する手法としては、気温上昇の関数として定義される影響関数を組み込んだ例がある。しかしながら、この手法では、すべての影響が統合して評価されており、どの影響が重大な被害をもたらすかといった詳細な評価を行うことができない。

現時点では、世界規模のモデル化に対して、分野と地域について網羅的な情報は存在しないことから、モデルによる評価を直接行うことは不可能である。そこで、どのような情報の整備が必要となるかについて検討を行った。

a. 温暖化影響に関して、分野横断的で地域情報を含んだ全球規模のデータベースの整備

上記にも述べたとおり、温暖化の様々な影響を網羅的に取り扱うとともに、全球規模で取りまとめた情報は皆無である。また、温暖化影響のモデル化の際には、気温上昇に対する影響の相違も考慮する必要がある。同時に、適応策に関して分野別に費用と効果を示した情報も必要となる。本S-10プロジェクトでは、水や食料など項目毎に全球レベルの影響について、定量的な分析が行われた。こうした情報は、今後の温暖化影響、適応策を評価する上で重要な情報になるといえる。

b. 社会経済状況に対する温暖化の影響や適応策の効果と感度

SSPsに関する分析から、将来の社会経済状況が変わると、緩和策への取り組みの強度が変わることを示した。温暖化影響や適応策の効果についても同様である。適応策によって現状で見込まれている影響の軽減について、社会経済や気温上昇によってどれだけ効果が異なるかについても明らかにすることが重要となる。

c. 多様な適応策の可能性

例えば、温暖化によって食料への影響が生じる場合、より温暖化に強い品種を栽培するということが従来の適応策として取り上げられてきた。一方で、米への影響が深刻になるのであれば、小麦など他の食料へのシフトということも適応策の1つとして検討できる（文化的な背景もあり、容易ではないが）。2)で見たように、緩和策については、省エネ、低炭素エネルギー、サービス需要量の削減など複数の対策が検討されているが、適応策についてもどのような可能性があるのかを検討することが必要となる。また、適応策をどの水準まで実現するかといった検討も今後の課題であるといえる。一般的には、温暖化による被害がない状況まで回復させることが適応策と見なされているが、経済的、社会的に甚大な影響を及ぼさない水準まで回復させるということも、選択肢の1つとなる。緩和策と同様に、個別の影響について、どの水準まで被害を軽減することが、費用便益の観点から望ましいかを検討することも重要な課題の1つである。

4) 対策インベントリのとりまとめ

適応策は、温暖化によって生じる影響や被害を抑制するために実施するものであり、本来は、温暖化のリスクを軽減するために導入される対策である。ここでは、そうした適応策を導入することによって生じるリスクを検討した。

適応策によるリスクは、実施される個々の適応策の内容によって異なるが、a. 経済活動も含めた人間社会へのリスク、b. 自然生態系の改変に伴うリスク、に大別できる。また、適応策の導入にあたっては、想定される気候変動予測に対するリスク（気候変動を過剰に見積もると費用負担等が大きくなり過小に見積もると適応策の容量を超える影響が生じる）も考慮することになる。

適応策導入の制約、障壁は、①物理・生態学面、②技術面、③経済・財政面、④社会・文化面、⑤制度面、⑥情報・認知面、⑦人材育成面があり、特に①と②については、適応策の限界に関連

する。また、適応策導入に必要な費用をどのように拠出するかといった費用負担の問題だけではなく、④～⑥に示す社会、文化、伝統等に起因する課題もあり、克服すべき課題が数多く存在する。なお、適応策の実施に当たって必要な費用の推計については、World Bank(2010)などで見積もられている例も見られるが、十分であるとは言えない。表(4)-9に、環境省の地球温暖化影響・適応研究委員会報告書における適応策導入の分野を中心に、世界銀行等の報告書を参考に作業を行った結果を示す。

表(4)-9 適応策を対象とした対策インベントリ

大分類	中分類	小分類	適応策	制約・障壁	人間社会へのリスク	生態系へのリスク
食料分野	農業	穀類・果樹	高温耐性の向上・高温回避	物理・生態学面 技術面 経済・財政面 社会・文化面 制度面 情報・認知面 人材育成面	・費用負担(導入費用、開発費用)に伴うリスク ・産業としての発展性 ・土地利用変更に伴うリスク ・生活基盤の変更に伴うリスク ・エネルギー需要の増加に伴うリスク	・品種改良、樹種変更による生態系への影響 ・生態系変化に伴うリスク
		牧畜	畜産・飼料作物				高温回避・適地移動
	水産業	回遊魚・沿岸魚・養殖	生態系変化への適合・適地移動			
水環境・水資源分野	水供給		貯留地の確保・地下水利用			
	水需要対策		効率改善			
	水環境管理		富栄養化・塩水対策			
	治水対策					
自然生態系(植生・土地)分野	森林生態系	自然林・人工林・里山	保護地域の見直し			
	沿岸生態系	海洋・淡水・干潟	環境負荷削減・河畔林保全			
防災・沿岸分野	土地利用変更	土地利用・建築様式変更	緩衝地や堤防の整備・建物様式の変更			
	防災体制強化	情報提供・支援	避難路の整備・防災訓練			
	モニタリング		観測			
健康分野	暑熱		保健指導			
	感染症		ワクチン接種・衛生改善			
国民生活・都市生活分野	安全なくらし	家屋・居住地域	建物強化・移転			
	健康なくらし	暑さ・水環境	熱中症対策・体調管理			
	経済的に豊かなくらし	暑さ・食生活	天候デリバティブ活用・新産業育成			
	快適なくらし	暑さ	リフォーム・病害虫駆除			
	文化	生態系	緑化・保護対策			

5. 本研究開発により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究の実施により、これまで全球を対象とした評価が十分ではなかった適応策について、統合評価モデルにおいて個別に分析することが可能となり、これまでの科学的な知見を踏まえた温暖化の適応策、緩和策の評価を行うことが可能となる。また、あわせて、様々な社会経済シナリオにおける影響の差異についても評価することが可能となり、将来の発展のあり方そのものを検討するきっかけともなる。現在、こうした研究は国内において十分とはいえないが、本研究が先頭に立つとともに、IPCCやEMF、IAMC(統合評価モデリングコンソーシアム)などの国際的な活動を通じて、国内における研究の広がりや分析の深化を期待することができる。

なお、全球を対象とした詳細な評価は、データ等の不足から本研究においても十分に行うことはできなかったが、世界規模の統合評価モデルを用いて分析するためにどのような情報が必要となり、また、現状においてどのような情報が不足しているかを明らかにすることができた。本来、緩和策と同様に、適応策においても様々な経路が考えられるが、それぞれの経路を評価するに当たっての検討すべき内容を示すことができたと考えている。

(2) 環境政策への貢献

適応ポテンシャルや費用に関する分析結果は、環境省適応計画策定に向けた温暖化予測手法等検討専門家委員会をはじめ、適応策に関する検討会に対して重要な情報の基礎を提供することができたと考えている。また、緩和策、適応策を統合した分析では、長期的な視点を持った削減シナリオの評価が可能となり、2020年以降の目標策定の議論をはじめとした長期の温暖化政策への貢献が期待される。

また、本研究で行った温暖化影響、適応ポテンシャルや費用に関する考察は、わが国における適応計画の更新や、これから適応計画を策定する国や自治体にとっても有効となる。また、適応策の実施に関する条件は、社会経済状況や気温の変化等によっても変わりうることから、政策としてどのような情報が必要となるかについての緩和策、適応策を統合した分析は、長期的な視点を持った削減シナリオの評価に不可欠であり、2020年以降の目標策定の議論をはじめとした温暖化政策への貢献が期待される。

<行政が既に活用した成果>

2017年に中央環境審議会で取りまとめられた「気候変動適応策を推進するための科学的知見と気候リスク情報に関する取組の方針（中間取りまとめ）」では、温暖化による影響や適応を評価するための共通シナリオとしてSSPsが取り上げられ、日本版SSPsの作成に向けた調査研究を進めることが適当であると明記された。こうした点は、SSPsの定量的な情報とともに、本研究で整理したSSPsの役割が認識されたことによるといえる。

<行政が活用することが見込まれる成果>

日本版SSPsの作成を含めて、今後追加での作業が必要となるが、世界を対象とした社会経済シナリオと整合する国内の社会経済シナリオは、日本における適応策の検討や、長期の低炭素開発戦略の策定にも大きく貢献するものであり、地方自治体を含めた行政機関において活用が見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

特記する事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 6) 森田香菜子：環境情報科学学術研究論文集，27，247-252（2013）
“REDD+に関わる制度間の相互作用とその管理：カンボジアとラオスの事例より”
- 7) S. Fujimori, T. Hasegawa, T. Masui, K. Takahashi: Food Security, 6 (5), 685-699 (2014)
“Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions.”
- 8) 藤森真一郎，長谷川知子，増井利彦，高橋潔，シルバエランディエゴ，戴瀚程，肱岡靖明，甲斐沼美紀子：土木学会論文集G(環境)，71 (6)，II_217-II_228 (2015)
“AIMによる新社会経済シナリオSSPの定量化とそのシナリオの特徴”
- 9) Fujimori S., Abe M., Kinoshita T., Hasegawa T., Kawase H., Kushida K., Masui T., Oka K., Shiogama H., Takahashi K., Tatebe H., Yoshikawa M.: PLOS ONE, 12 (1), e0169733-e0169733 (2017)
“Downscaling Global Emissions and Its Implications Derived from Climate Model Experiments. ”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

1. 藤森真一郎・増井利彦：日本エネルギー学会誌，印刷中（2013）
“将来の気候変化を評価するための温室効果ガス排出経路と社会経済シナリオ”
2. 久保田泉：季刊環境研究，171，95-102（2013）
“気候変動影響への適応支援のための資金供与制度の現状と課題”
3. 藤森真一郎，増井利彦：環境情報科学，43（3），35-41（2014）
“統合評価モデルを用いた気候緩和策分析及び新シナリオプロセスにおけるその役割”
4. Ahammad, H., Heyhoe E., Nelson G., Sands R., Fujimori S., Hasegawa T., van ver Mensbrugge D., Blanc E., Havlik P., Valin H., Kyle P., Mason d’Croz D., van Meijl H., Schmitz C., Lotze-Campen H., von Lampe M., Tabeau A. : In: Elbehr A. eds., Climate change and food systems: global assessments and implications for food security and trade, Food Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 294-309 (2015)
“The role of international trade under a changing climate: Insights from global economic modelling”

(2) 口頭発表（学会等）

1. Morita, K. : The Conference of Sustainable Business in Asia, Bangkok, Thailand, May, 2012
“Enhancing Biodiversity Co-Benefits of REDD”
2. Okagawa A. and Masui T. : European Association of Environmental and Resource Economists 19th Annual Conference, Prague, Czech Republic, June, 2012
“An Economic Evaluation of Water Resource Allocation During Water Shortage Using A Multiregional Computable General Equilibrium Model”
3. Fujimori S. , Hanasaki N., Hasegawa S., Masui T., Kainuma M., Takahashi K. and Hijioka Y. : Climate Change Impacts and Integrated Assessment (CCI/IA) Workshop XVIII, Snowmass, USA, July, 2012
“SSPs and industrial water by AIM modeling team”
4. 森田香菜子：環境科学会2012年会，横浜，2012年9月
“REDD+の制度設計に関する研究：カンボジアとラオスの事例より”
5. Masui T., Fujimori S., Hasegawa T., Hanasaki N., Shin Y., Takahashi K., Hijioka Y. and Kainuma M. : The 5th IAMC Annual Meeting, Utrecht, Netherlands, November, 2012
“Application of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) toward new socio-economic scenario development integrating climate change mitigation, impact and adaptation”
6. 久保田泉，高橋潔，江守正多：日本リスク研究学会第24回年次大会，同講演論文集，24，191-196，彦根，2012年11月
“地球温暖化問題におけるリスクアプローチの概念整理とその適用に向けた課題抽出”
7. Kubota, I. : Aid & International Development Forum (AIDF) in Asia-Pacific, Bangkok, Thailand, January, 2013
“Financing Climate Change Adaptation”

8. Morita, K.: Earth System Governance Tokyo Conference: Complex Architectures, Multiple Agents, Tokyo, January, 2013
“Interplay Management for Effective REDD Governance”
9. Kubota, I.: The 3rd Asia-Pacific Climate Change Adaptation Forum, Incheon, Republic of Korea, March, 2013
“Governance of the Green Climate Fund”
10. K. Morita: International Studies Association Annual Convention 2013, San Francisco, USA, April, 2013
“Managing Interplay in Climate Change and Biodiversity”
11. Shinichiro Fujimori, H. Lotze-Campen, von Lampe M., Kyle P., Havlik P., Meijl H.V, Hasegawa T.: 16th Annual Conference on Global Economic Analysis, Shanghai, June, 2013
“Impacts of increased bioenergy demand on global food markets: an AgMIP economic model intercomparison”
12. Schmitz C., van Meijl H., Kyle P., Fujimori S., Gurgel A., Havlik P., Mason d, Popp A., Sands R., Tabeau A., van der Mensbrugghe D., Von Lampe M., Wise M., Blanc E., Hasegawa T., Valin H.: 16th Annual Conference on Global Economic Analysis, Shanghai, June, 2013
“An agro-economic model comparison of cropland change until 2050”
13. Hanasaki N. and Fujimori S., “A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways”, the Climate Change Impacts and Integrated Assessment (CCI/IA) Workshop XIX, Snowmass, July, 2013
14. 久保田泉: 環境経済・政策学会2013年大会, 神戸, 2013年9月
“英米の適応計画策定及び実施に関する比較分析”
15. 松本健一、森田香菜子: 環境経済・政策学会2013年大会, 神戸, 2013年9月
“Adaptation Financing in Developing Countries in the Asian Region”
16. 森田香菜子、松本健一: 環境経済・政策学会2013年大会, 神戸, 2013年9月
“Institutional Linkages for Ecosystem-Based Adaptation”
17. Fujimori S.: Workshop on Global Climate Risks Forum, Seville, Spain, December, 2014
“AIM/Global climate impact studies with CGE model and future perspectives.”
18. Fujimori S., Hasegawa T., Masui T. and Takahashi K.: 18th Annual Conference on Global Economic Analysis, Melbourne, Australia, June, 2015
“Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions.”
19. 増井利彦: 第24回東芝グループ環境展, 川崎, 2015年6月
“気候変動のリスクと機会.”
20. Fujimori S.: Climate Change Impacts & Integrated Assessment XXI (CCI/IA), Snowmass, USA, July, 2015
“Integrated assessment model with agricultural impact.”
21. Mori S., Washida T., Kurosawa A., Masui T.: Our Common Future under Climate Change, Paris, France, July, 2015
“Pathways to be Opened towards Low Carbon Society; Findings on Multi-model Comparison in ICA-RUS Project.”
22. ハク マオ, 長谷川知子, 松岡 譲: 土木学会第23回地球環境シンポジウム, 札幌, 2015年9月

“An assessment of GHG emissions and mitigation potential from Agriculture, Forestry and Other Land-Use in Cambodia(カンボジアにおける農業・土地利用部門の温室効果ガス排出削減に関する検討).”

23. 久保田泉：環境科学会2015年会，吹田，2015年9月
“気候変動影響適応のための資金メカニズムにおける衡平性.”
24. 藤森真一郎，長谷川知子，増井利彦，高橋潔，シールバエランディエゴ，戴瀚程，肱岡靖明，甲斐沼美紀子：第43回環境システム研究論文発表会，札幌，2015年10月
“AIMによる新社会経済シナリオSSPの定量化とそのシナリオの特徴.”
25. 増井利彦：環境文明21シンポジウム 気候変動時代をどう乗り越えていくか，東京，2015年10月
“企業活動と暮らしの今後？ ～緩和と適応～.”
26. 増井利彦：プレCOPイベント「COP21に向けて」，東京，2015年11月
“INDCにおける緩和策、適応策の評価に向けて.”
27. 長谷川知子，藤森真一郎，高橋潔，増井利彦：第32回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，東京，2016年2月
“気候緩和策による食料安全保障への影響分析.”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

引用文献（文献番号は表(4)-4の番号に対応する）

- (1) World Bank (2006) Clean energy and development: Towards an investment framework.
- (2) UNFCCC (2007) Investment and Financial Flows: UNFCCC to Address Climate Change.
- (3) OECD (2010) Plan or React? Analysis of Adaptation Costs and Benefits Using Integrated Assessment Models.
- (4) World Bank (2010) The costs to developing countries of adapting to climate change -New methods and estimates-: Consultation Draft.
- (5) IPCC (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Cambridge University Press.

- (6) UNEP (2014) Adaptation Gap Report
- (7) European Commission (2014) Climate Impacts in Europe, The JRC PESETA II Project
- (8) U.S. National Climate Assessment (2014) Climate Change Impacts in the United States
- (9) USEPA (2015) Climate Change in the United States: Benefits of Global Action. United States Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs, EPA 430-R-15-001 (文献①)
- (10) Will Steffen, John Hunter and Lesley Hughes (2014) Counting the Costs: Climate Change and Coastal Flooding, Climate Council of Australia (文献②)
- (11) Risky Business (2014) The Economic Risks of Climate Change in the United States: A Climate Risk Assessment for the United States, Risky Business. (文献③)
- (12) White House (2014) The Cost of Delaying Action to Stem Climate Change. (文献④)
- (13) European Commission (2014) Assessing the Implications of Climate Change Adaptation on Employment in the EU, Triple E Consulting – Energy, Environment & Economics. (文献⑤)
- (14) OECD (2015), Climate Change Risks and Adaptation: Linking Policy and Economic, OECD Publishing, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264234611-en> (文献⑥)
- (15) OECD (2015), National Climate Change Adaptation: Emerging Practices in Monitoring and Evaluation, OECD Publishing, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264229679-en> (文献⑦)
- (16) Risky Business (2015) The Bottom Line on Climate Change: Come Heat and High Water, Climate Risk in the Southeastern U.S. and Texas, Risky Business. (文献⑧)
- (17) Dellink, R. et al. (2014) Consequences of Climate Change Damages for Economic Growth: A Dynamic Quantitative Assessment, OECD Economics Department Working Papers, 1135, OECD Publishing, <http://dx.doi.org/10.1787/5jz2bxb8kmf3-en> (文献⑨)
- (18) Sue Wing, I. and E. Lanzi (2014) Integrated Assessment of Climate Change Impacts: Conceptual Frameworks, Modelling Approaches and Research Needs, OECD Environment Working Papers, 66, OECD Publishing, <http://dx.doi.org/10.1787/5jz2qcjsrvzx-en> (文献⑩)
- (19) Hinkel, J. et al. (2014) Coastal Flood Damage and Adaptation Costs under 21st Century Sea-level Rise, PNAS, 111, 9, 3292-3287, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1222469111 (文献⑪)
- (20) Delavane Diaz (2014) Estimating Global Damages from Sea Level Rise with the Coastal Impact and Adaptation Model (CIAM), FEEM Working Paper Series. (文献⑫)
- (21) Citation. Feyen, L. and Watkiss, P. (2011) Technical Policy Briefing Note 3. The Impacts and Economic Costs of River Floods in Europe, and the Costs and Benefits of Adaptation. Results from the EC RTD ClimateCost Project. In Watkiss, P (Editor), 2011. The ClimateCost Project. Final Report, the Stockholm Environment Institute (文献⑬)
- (22) Bosello F., Eboli F. and Parrado R. (2011), “Climate change impacts in the Mediterranean: a CGE analysis”, GTAP conference paper. https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=3624
- (23) Bosello, F., Roson, R., and Tol, R.S.J. (2006) “Economy-wide estimates of the

- implications of climate change: Human health,” *Ecological Economics*, Elsevier, vol. 58(3), pages 579-591, June.
- (24) Diao, X. and Roem, T. (2003) “Can a water market avert the ‘double-whammy’ of trade reform and lead to a ‘win-win’ outcome?,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 45 (3), 708-723.
- (25) Calzadilla A., Rehdanz K., and Tol R.S.J. (2010) “The economic impact of more sustainable water use in agriculture: A computable general equilibrium analysis,” *Journal of Hydrology*, 384(3-4), 292-305.
- (26) Ochuodho, T.O., Lantz, V.A., Lloyd-Smith, P. and Benitez, P. (2012) “Regional economic impacts of climate change and adaptation in Canadian forests: A CGE modeling analysis,” *Forest Policy and Economics*
- (27) 環境省 地球温暖化影響適応研究委員会(2008) 地球温暖化影響・適応研究委員会報告書
- (28) The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank(2010) *Economics of Adaptation to Climate Change: Synthesis report*
- (29) UNFCCC(2011) *Assessing the Costs and Benefits of Adaptation Options*

S-10-4 Evaluation of Climate Risk Management Options Under Technological, Social and Economic Uncertainties

Leader:	Shunsuke Mori	Tokyo University of Science
Sub-leaders:	Toyoaki Washida	Sophia University
	Takayuki Yano	Institute for Global Environmental Studies (-2014)
	Atsushi Kurosawa	The Institute of Applied Energy
	Toshihiko Masui	National Institute for Environmental Studies

Key Words: Mitigation, Multimodel approach, Uncertainty, Geoengineering, Multisector-multi subject model, Adaptation

[Abstract]

Various scientific and the societal uncertainties in the climate change policies are still the barrier for the implementation of concrete actions. The preferable and acceptable decision making should be established from the risk management perspectives with quantitative information on the impacts and mitigation options.

To deal with the above views, four different type integrated assessment models, i.e. MARIA(TUS), EMEDA(Sofia Univ.), GRAPE(IAE) and AIM/CGE(NIES), join this subject to provide the common information with respect to societal impacts of global warming strategies as well as different views under the same future assumptions given by the SSP(SSP-1,2 and 3), RCP (BAU, RCP2.6, 4.5 and 6.0) and ICA-RUS original scenarios(2.5, 2.0 and 1.5 degree target under 3.6 climate sensitivity). Some additional stories are also evaluated for SSP-2 to see the uncertainties on some expected technologies such as biomass, CCS and nuclear. Learning scenario is also adopted. Thus 3*(4+3)+4 simulation cases are examined by four models. Crop yields are also provided by ICA-RUS by scenario.

This theme consists of two subjects: first, based on the same assumptions on future population, macro-economic growth, final energy demand and carbon emissions, four models generate simulation runs. Then we compare the model results with respect to carbon emission pathways, GDP-MER, GDP-PPP, consumptions, final energy demand patterns, primary energy supply technologies, detailed energy technologies, land use and food supply-demand patterns commonly provided by the models for the above 25 cases. Second, each model activity provides specific findings reflecting its unique properties. For instance, MARIA has been expanded to deal with the multi-stage decisions under uncertainties collaborating with climate researchers. EMEDA provides multi-sectoral views as well as the gaming behavior. GRAPE assesses the possibility of the

geo-engineering options and AIM provides adaptation data.

The multi-model simulation results show some remarkable findings: (1) GDP loss under 2.0 degree target ranges around 2-5% through the 21th century, (2) primary energy supply patterns diverge among models even in the stringent climate target. This suggests the remaining differences on the assumptions as well as the future technology potentials, and (3) the conflict between biomass energy utilization including BECCS and food supply seems to be moderate, but other issues such as the water supply infrastructure and the distribution of food should be still examined further. In total, the 2.0 degree target world seems near from the sustainability oriented society while very far from divided world.

(付録A) マルチモデル結果比較(詳細)

ここでは本文で省略したマルチモデル比較結果の詳細を示す。

① GHG 排出・削減経路

図A. 1. _1~3にSSP1~SSP3の世界および地域別のCO₂排出経路を示す。従来と同様、初期値はAIMに揃えている。このようにGRAPEは21世紀末に近づくにつれ急激な削減経路を示すのに対し、EMEDAとMARIAは比較的早期の削減経路を示す。GRAPEが21世紀末にBECCSの大量導入による「負の排出」を顕著にしている点は特徴的である。地域ごとにみるとモデル間の差は拡大する。

SSP2からSSP3となるにつれ、全モデルにおいてBAUと戦略ケースとの乖離は拡大している。またSSP3ではTG15_CS36は全モデルで解を与えないため、比較的モデル間の差が小さくなっているように見える。ここでも、GRAPEが21世紀後半に急激な削減経路を与えるのに対し、他のモデルは21世紀前半での削減を示している。これはモデルで設定した割引率の差や将来技術、特にCCSの導入可能性の設定の違いを示唆している。この点は、のちの(2)dエネルギー技術でより明確になる。

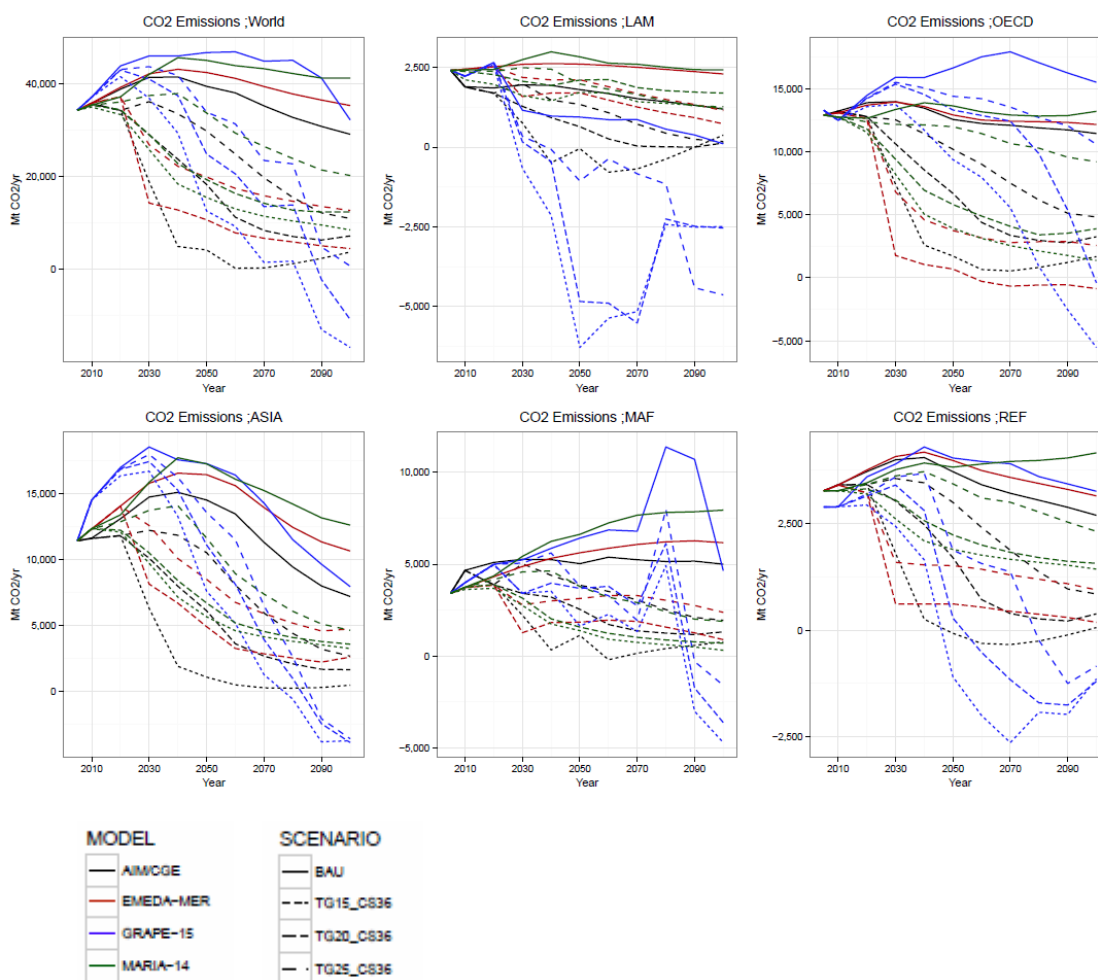


図 A. 1.1 SSP1 シナリオにおける世界及び各地域の CO₂ 排出経路

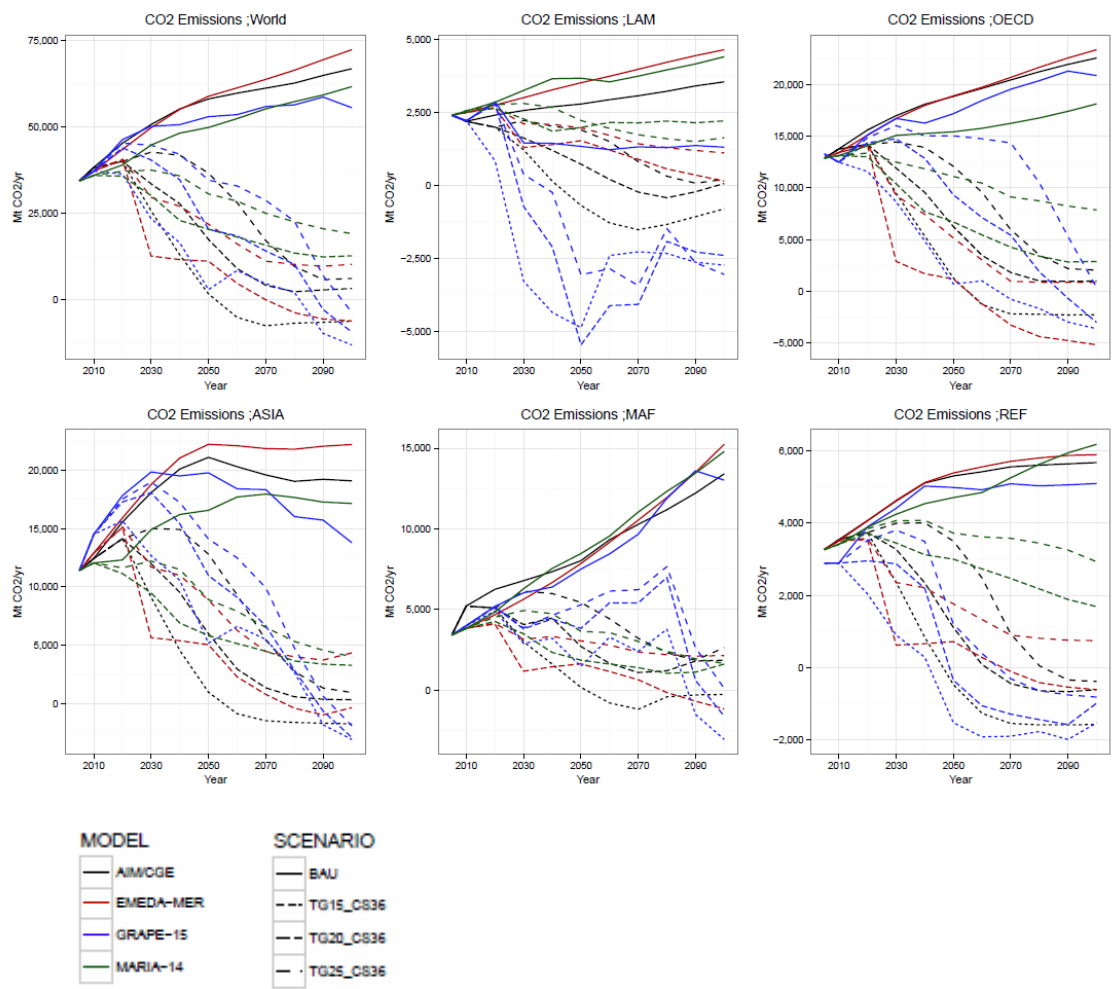


図 A.1.2 SSP2 シナリオにおける世界及び各地域の CO₂ 排出経路

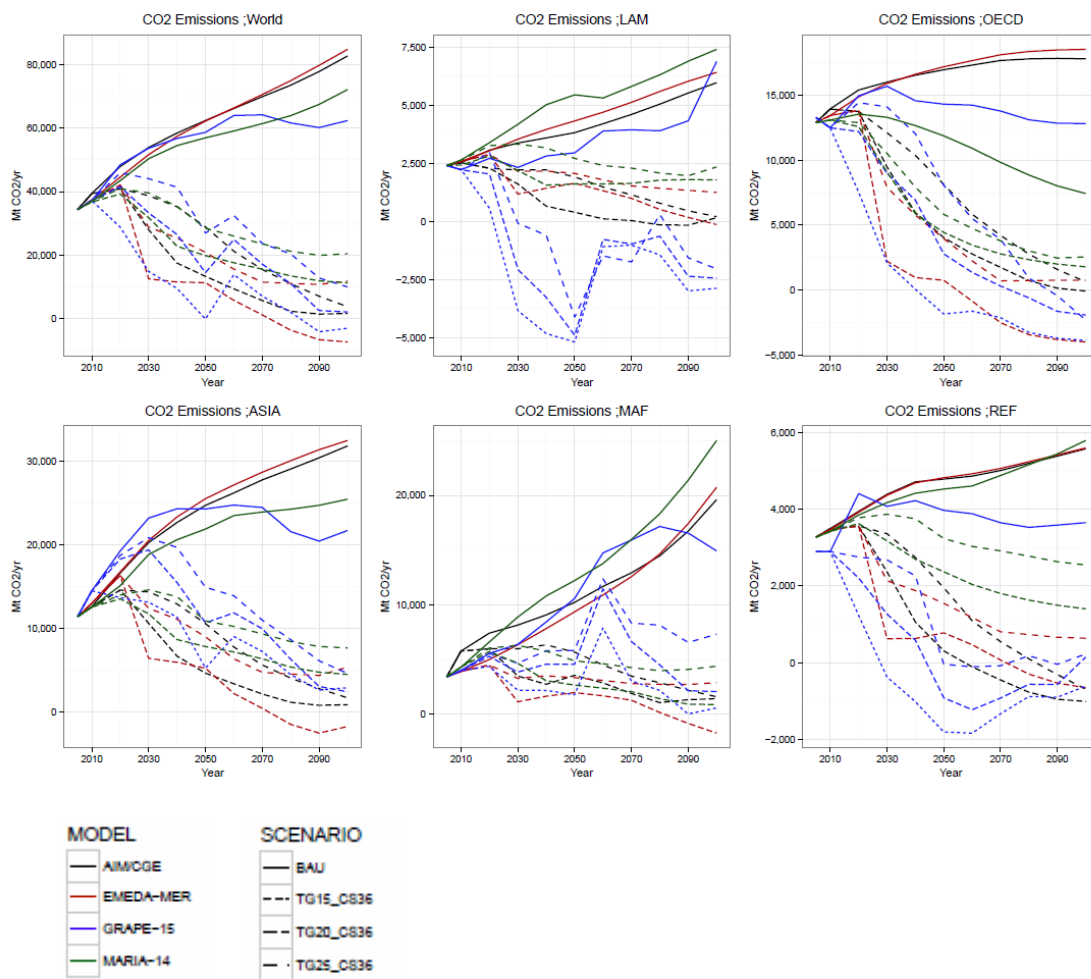


図 A.1.3 SSP3 シナリオにおける世界及び各地域の CO₂ 排出経路(注: TG15_CS36 ケースでは GRAPE 以外は解を与えない)

② GDP とその損失

TG20_CS36ケースにおいては4モデルともSSP1で2-4%前後、SSP2ではほぼ3-8%前後の損失を世界全体で示しているが、EMEDAはSSP2においてやや損失が大きくなる傾向を示す。SSP3においてはいずれのモデルも損失が急増し、AIM、MARIAが全世界で約7%、EMEDAは17%の損失に達する。これに対してGRAPEはやや低めで4%の損失を与える。ただしTG15_CS36ケースではEMEDAは解を与えず、SSP1では他3モデルが、SSP2ではAIMとGRAPEのみが、SSP3ではGRAPEのみが解を与える状況となる。このように1.5°C目標はSSP1シナリオからは実現可能性が高く、SSP3からは極めて困難となる。

ここでは、GDP-MERの経路と損失率について、図 A.1.4~1.9にSSP1シナリオからSSP3シナリオまで、地域別及び世界合計について示す。

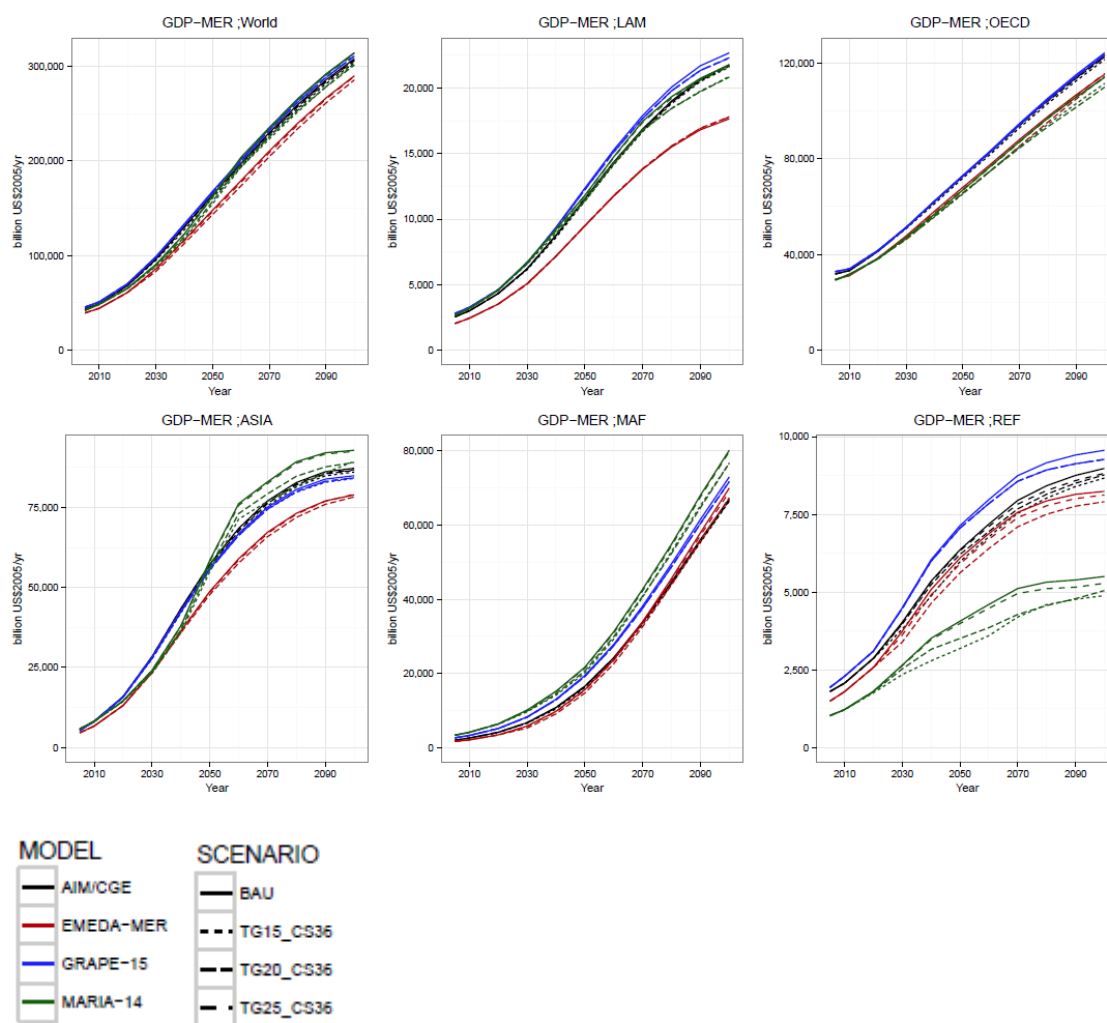


図 A.1.4 SSP1における GDP-MER 地域別推移 (10 億 US\$)

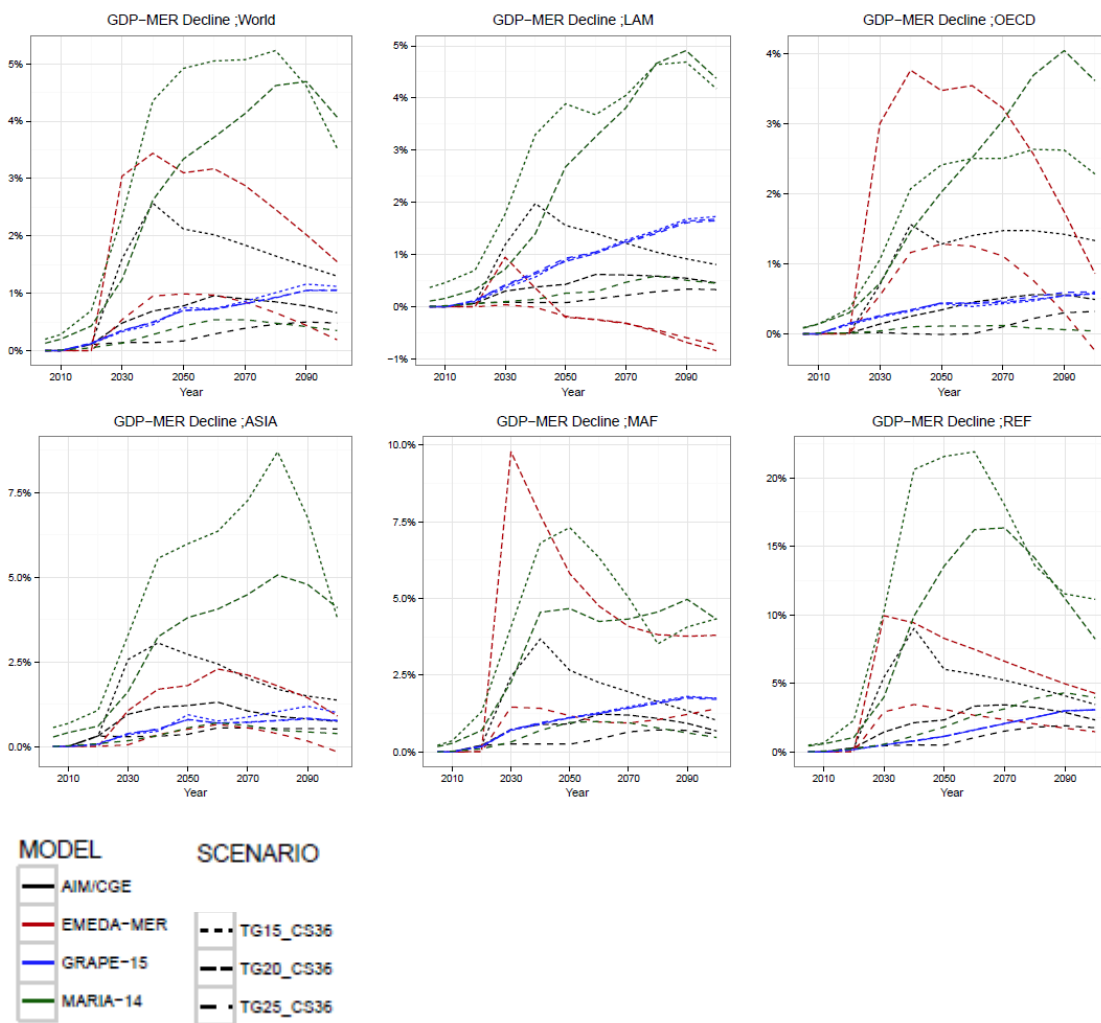


図 A.1.5 SSP1 における GDP-MER 地域別損失率

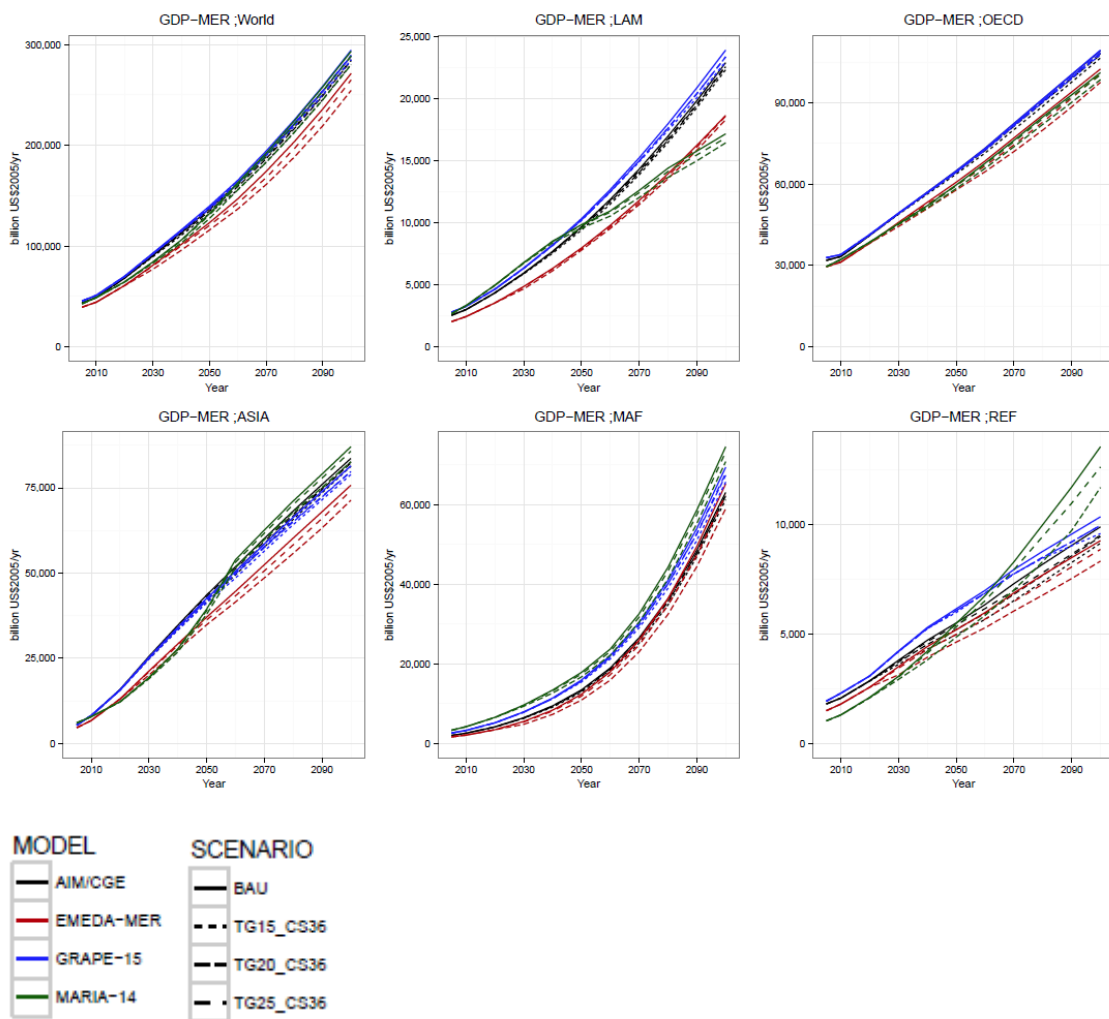


図 A. 1.6 SSP2 における GDP-MER 地域別推移 (10 億 US\$)

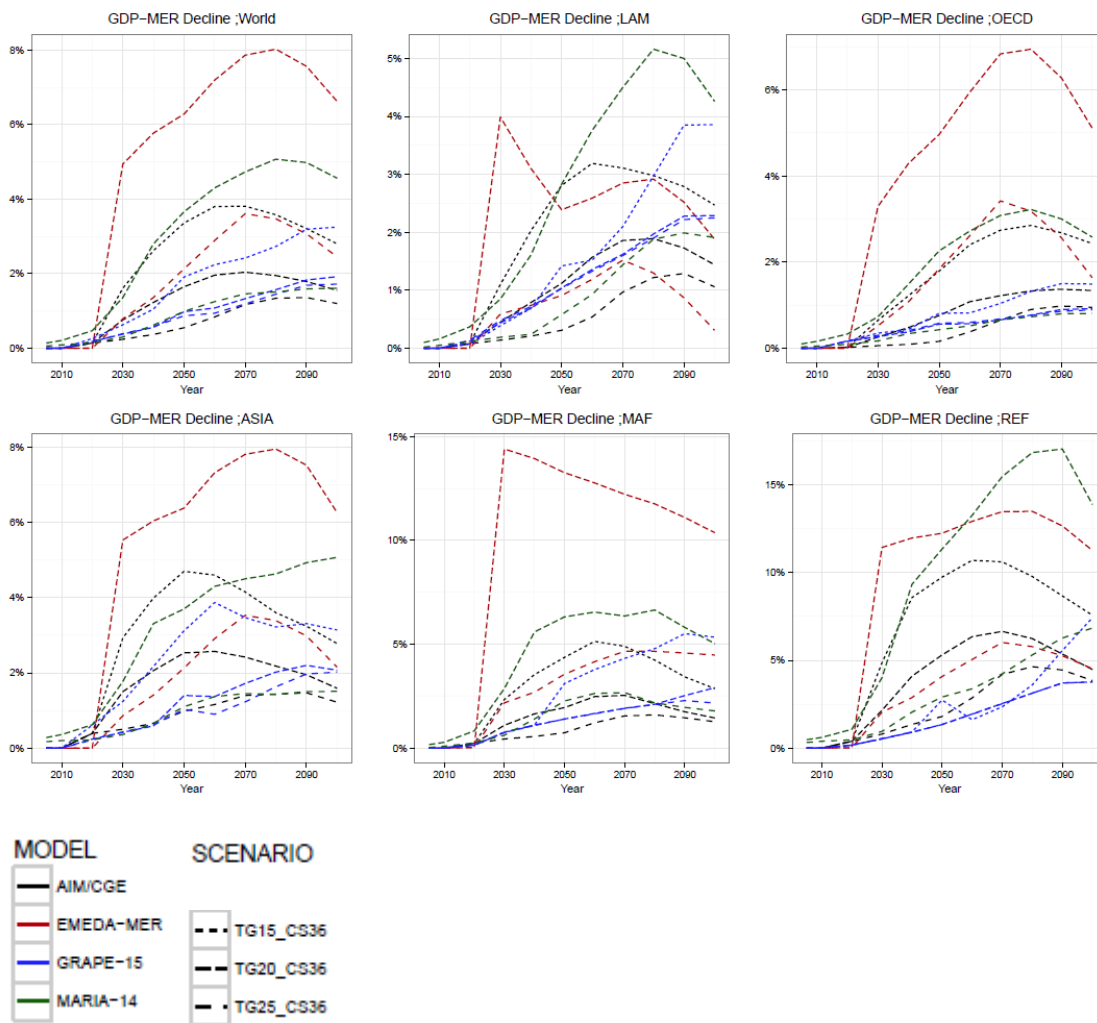


図 A. 1.7 SSP2 における GDP-MER 地域別損失率 (注:1.5°C 制約ケースでは EMEDA、MARIA は実行可能解を与えない)

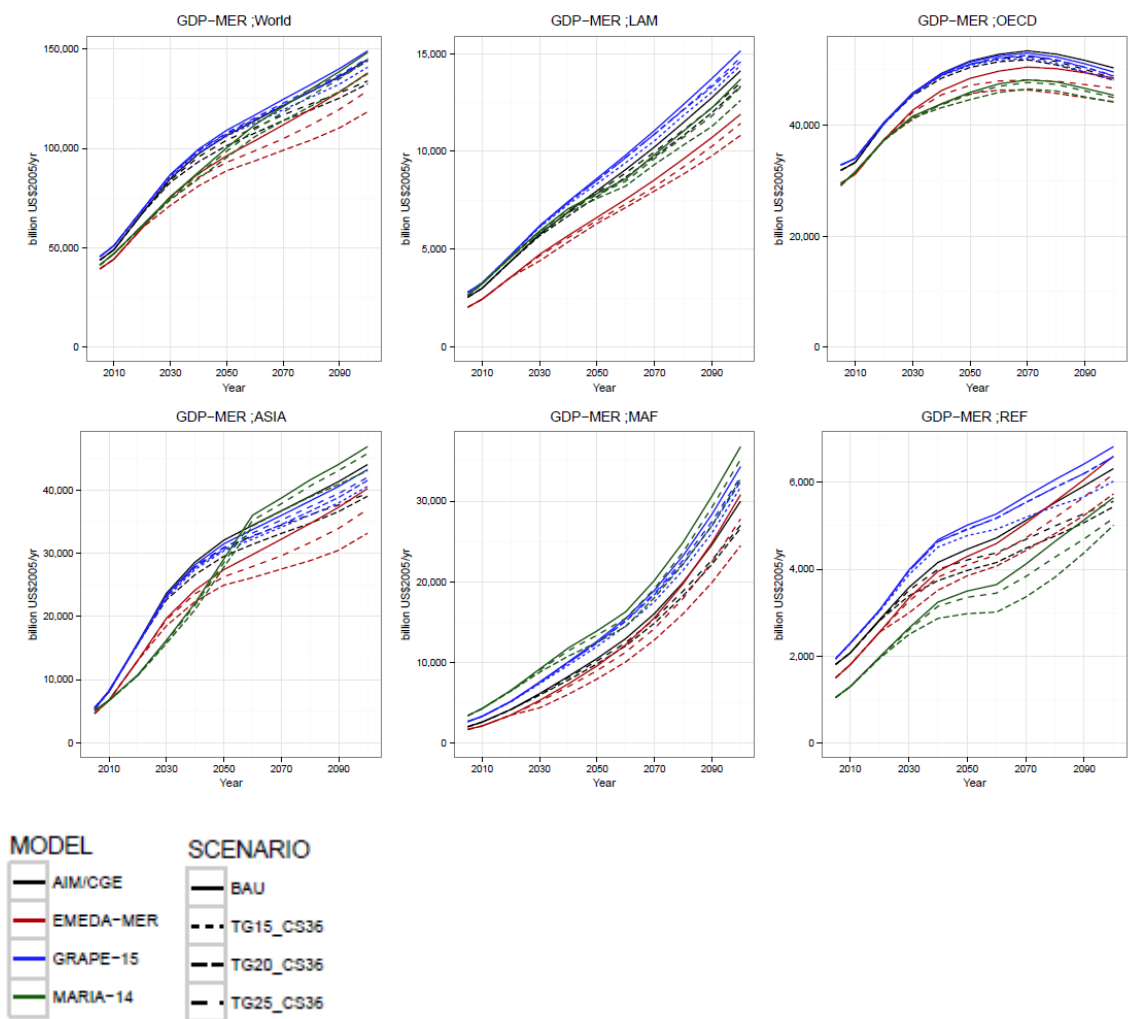


図 A.1.8 SSP3における GDP-MER 地域別推移 (10 億 US\$) (注: TG15_CS36 ケースでは GRAPE のみ実行可能解を与えた)

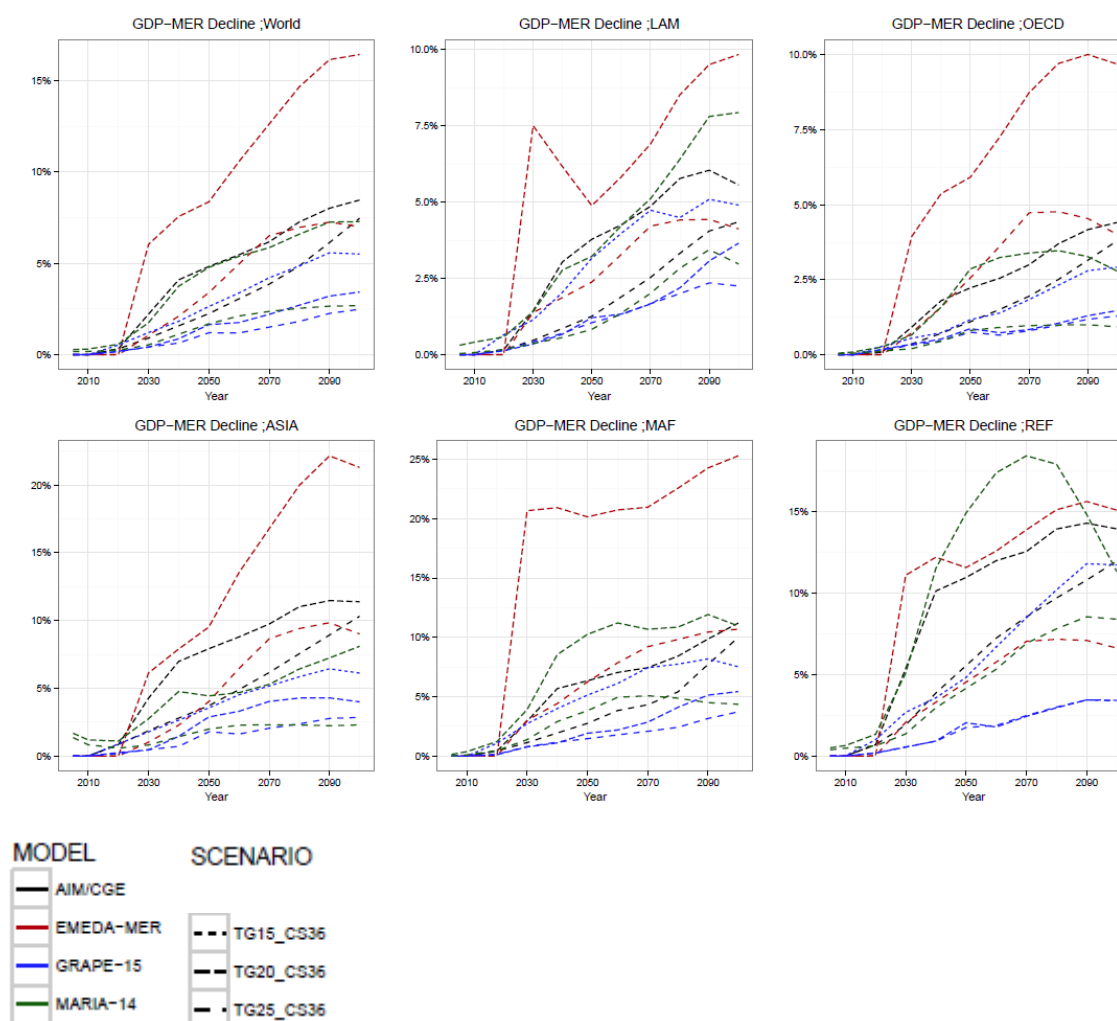


図 A.1.9 SSP3における GDP-MER 地域別損失率 (注: TG15_CS36 ケースで AIM は 2060 年以降の解を与えない。EMEDA、MARIA も解を与えない)

これらの図 A. が示すよう、戦略ケース間の GDP の低下は REF、LAM、MAF など化石燃料依存度の高い地域で顕著に表れており、SSP1 から SSP2、さらに SSP3 シナリオにかけて温暖化対策導入が次第に困難となる状況が示唆されている。温暖化対策導入のためにはこれらの地域が排出削減にどのように、またそのために負担の分担を世界でどのように行うかの政策的合意が、実装のための必要な条件となることが予想される。

③ 一次エネルギー供給

再生可能エネルギー主導か、バイオマス+CCS 主導か、原子力主導かモデルの解は広がりを見せている。言い換えれば、同じ気候目標の達成にも、社会にはなお選択の余地が大きいことを示す。同時に、これらの技術はいずれも一長一短があり、決定打になるのではないことも示唆している。他方、見かけ上の一次エネルギー供給の数値上の広がりには、原子力や再生可能エネルギーの変換効率の定義の差によるところが大きい。

図 A.1.10~12 に各 SSP シナリオにおける一次エネルギー供給の地域別推移を示す。気候目標に

対する一次エネルギー供給の柔軟性に関しては、最終エネルギーと同様の傾向が見られた。

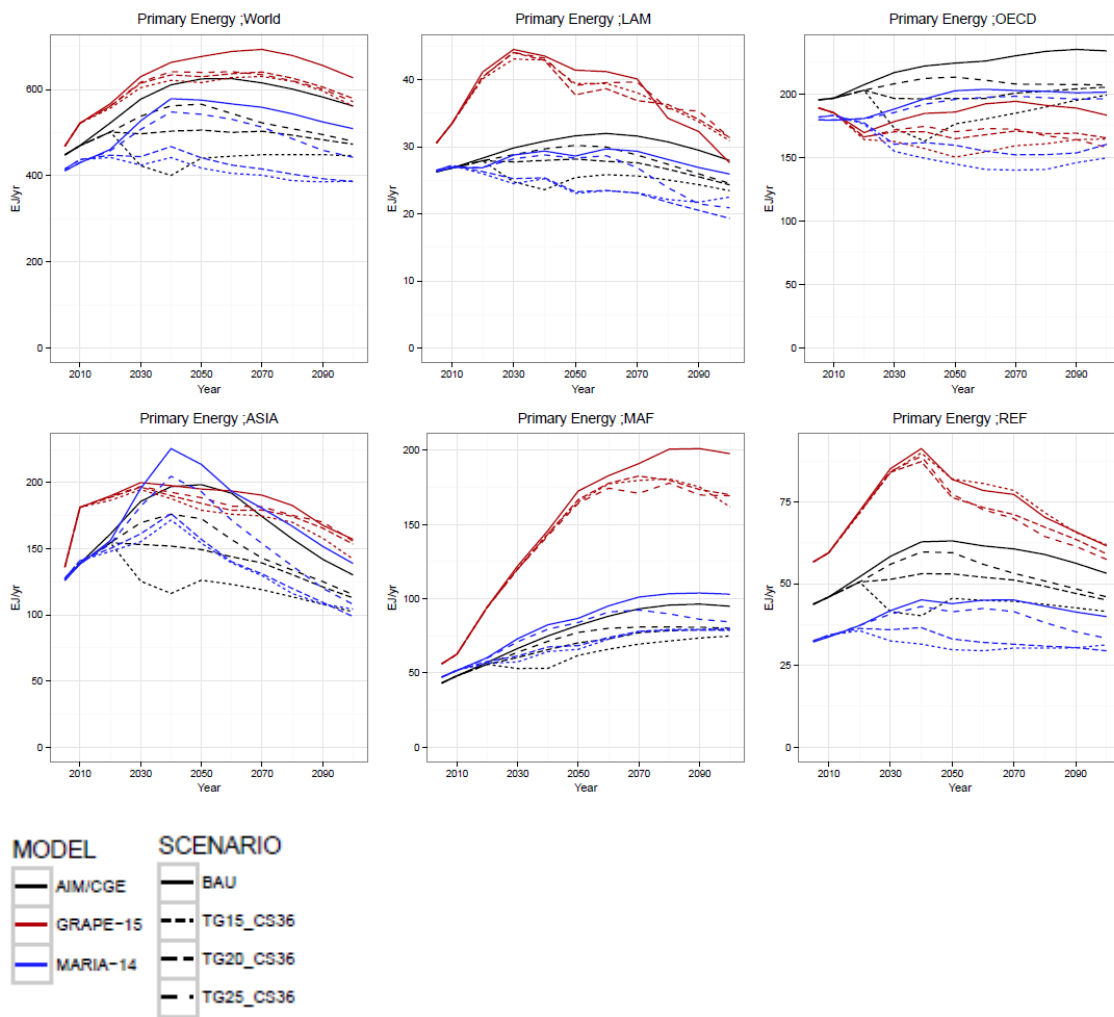


図 A.1.10 SSP1 シナリオにおける一次エネルギー供給のケース間比較 (EJ/年)

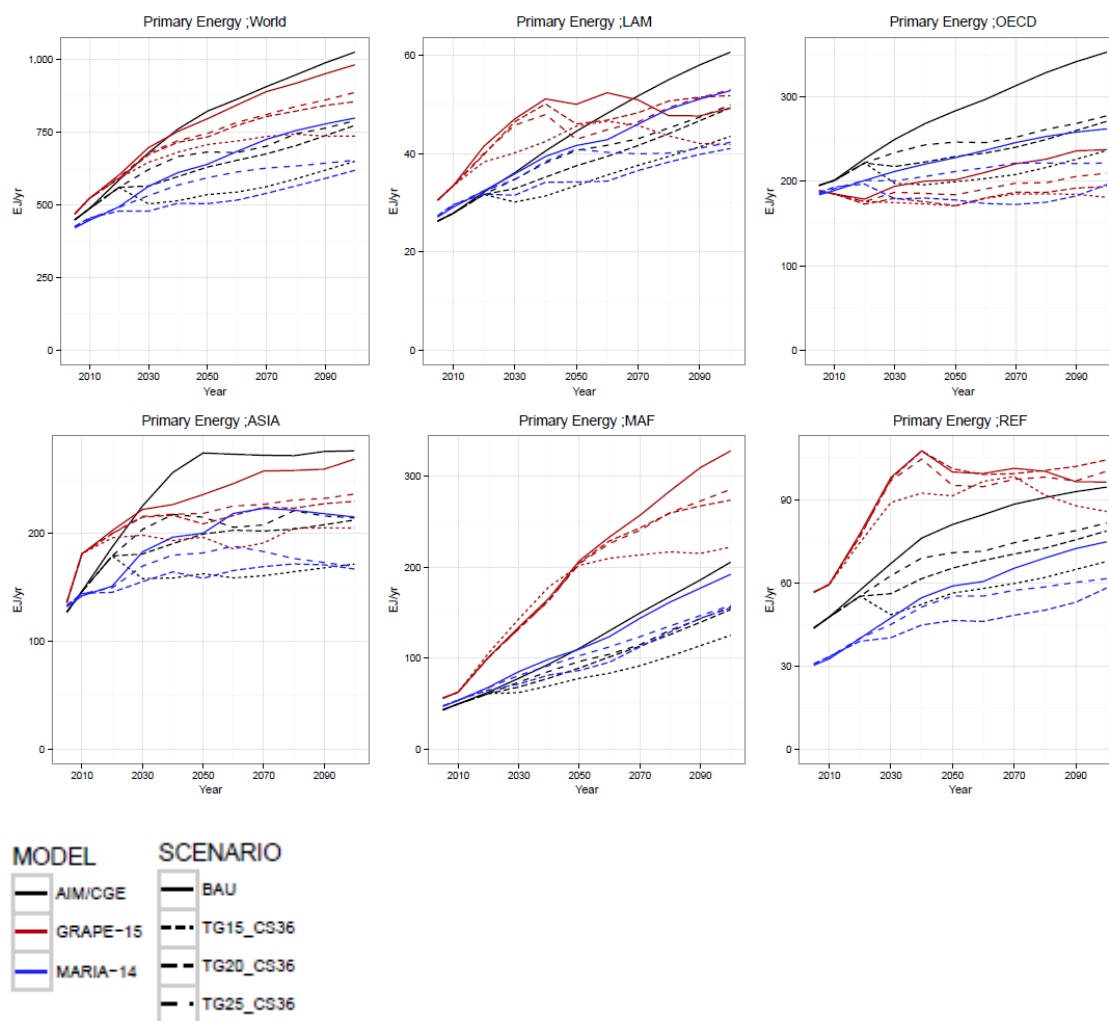


図 A.1.11 SSP2 シナリオにおける一次エネルギー供給のケース間比較 (EJ/年)

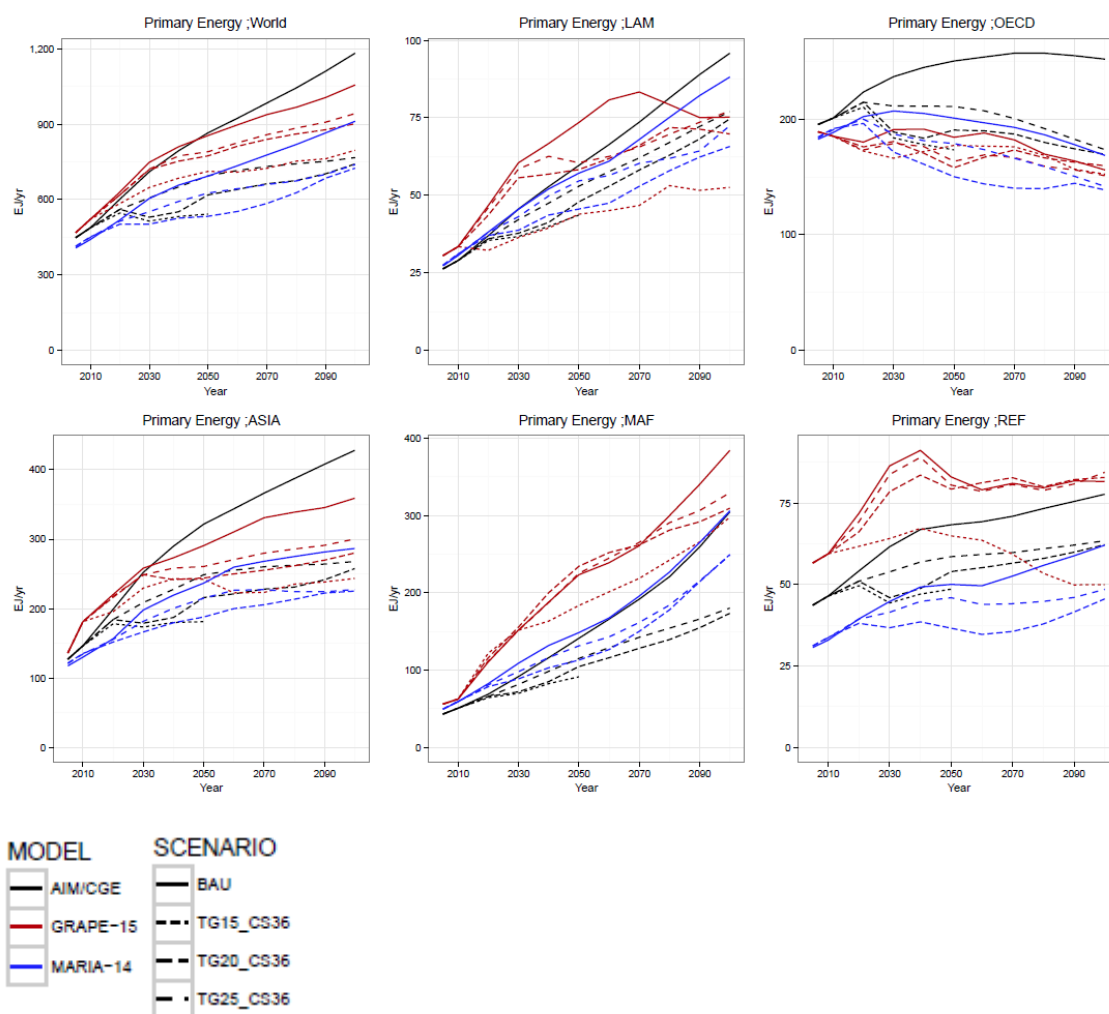
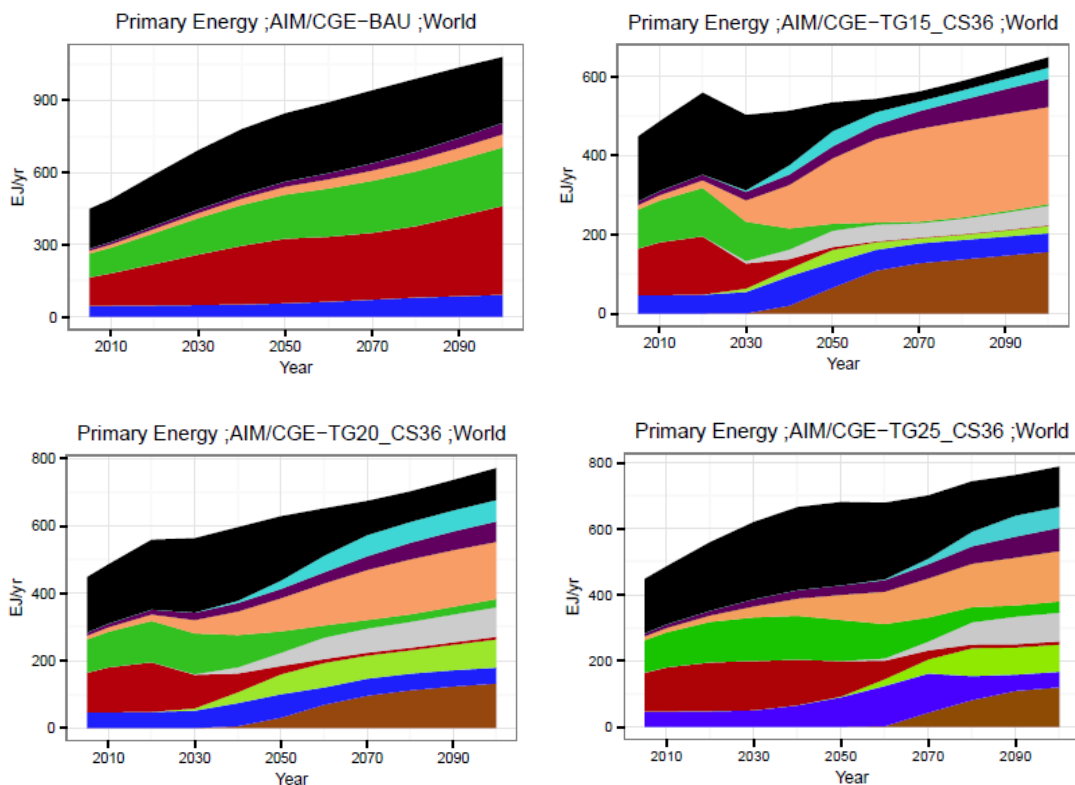


図 A.1.12 SSP3 シナリオにおける一次エネルギー供給のケース間比較 (EJ/年) (注: TG15_CS36 は GRAPE のみ解を得た)

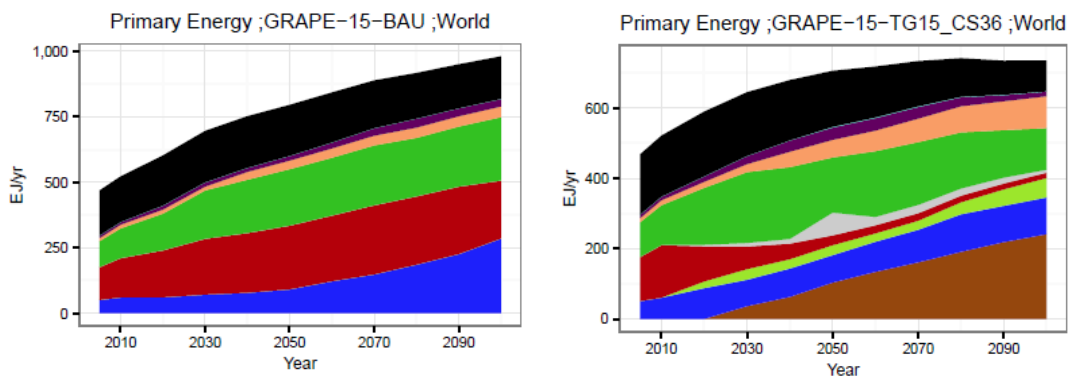
世界全体の一次エネルギー供給の構成について、図 A.1.13～15にモデルの結果を比較しつつ示す。ここではSSP2ケースのみ取り上げる。各モデルが温暖化対策目標を厳しくするにつれ、どのような技術を中心にみているかの差異が明確である。AIMでは太陽光、風力などの非バイオマス再生可能エネルギーのシェアが拡大するとともに、エネルギー供給全体が最終エネルギー消費の縮小とともに低下している。GRAPEはバイオマス+CCSへの期待が大きい。MARIAはバイオマス（CCSなし）、石炭+CCSおよび原子力が中心となっている。GRAPEがCCSに対し大きな期待を寄せ今世紀末に世界的に負の排出を導くのに対し、MARIAはできるだけ早期に炭素排出を削減し、負の排出量となることを避ける傾向がある。AIMは両者の中間的であり、原子力ではなく再生可能エネルギーに期待を寄せている。

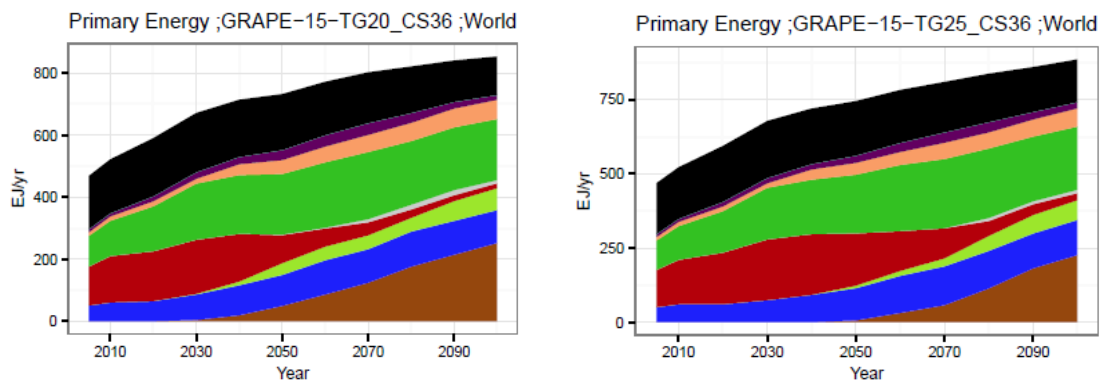
このようなモデルによる将来エネルギーシナリオの広がり、温暖化対策になお選択の余地があり、CCS、再生可能エネルギー、原子力のどのオプションが好ましいか（あるいは好ましくないか）は、リスクに対する異なる世界観がありうることを示すと同時に、いずれの技術も現在の段階では決定的な対策とはならないことをも示している。



■ : バイオマス+CCS
 ■ : バイオマス (CCSなし)
 ■ : 石炭+CCS
 ■ : 石炭
 ■ : 天然ガス+CCS
■ : 天然ガス (CCSなし)
 ■ : ほかに再生可能エネルギー
 ■ : 原子力
 ■ : 石油+CCS
 ■ : 石油 (CCSなし)

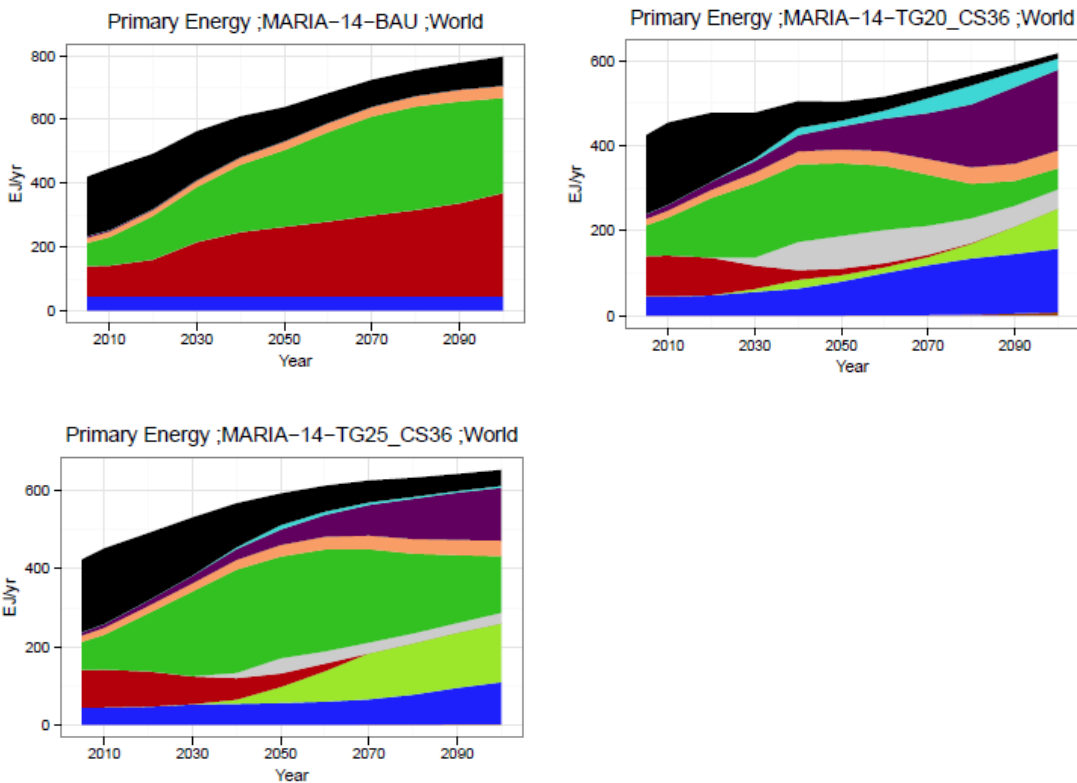
図 A.1-13 SSP2 シナリオの AIM-CGE 一次エネルギー供給構成の世界合計推移 (EJ/Year)





■ : バイオマス+CCS ■ : バイオマス (CCSなし) ■ : 石炭+CCS ■ : 石炭 ■ : 天然ガス+CCS
■ : 天然ガス (CCSなし) ■ : ほかに再生可能エネルギー ■ : 原子力 ■ : 石油+CCS ■ : 石油 (CCSなし)

図 A.1-14 SSP2 GRAPE 一次エネルギー供給構成の世界合計推移 (EJ/Year)



■ : バイオマス+CCS ■ : バイオマス (CCSなし) ■ : 石炭+CCS ■ : 石炭 ■ : 天然ガス+CCS
■ : 天然ガス (CCSなし) ■ : ほかに再生可能エネルギー ■ : 原子力 ■ : 石油+CCS ■ : 石油 (CCSなし)

図 A.1.15 SSP2 シナリオの MARIA 一次エネルギー供給構成の世界合計推移 (EJ/Year)

④ 電力供給

各モデルとも、T15からT25にわたる戦略の変化が技術オプションに与える影響はある程度見ら

れたが、各SSP内における定性的な傾向は戦略間でおおよそ同一であった。ただし、電力構成の時間変化傾向はモデルごとに異なっており、選択肢は単一ではないことを示唆している。また、SSPが異なることによって、各モデルとも技術プシヨンの利用に細かな違いが見られたが、こちらもモデル間の違いがSSPの違いよりも大きな要因となっていた。

④ -1AIM モデルの電源構成

AIMモデルのSSP2における電源構成を図A. 1. 16に示す。どの戦略においても、風力・太陽光といったバイオマス以外の再生可能エネルギーと原子力の導入が大きく進み、特にバイオマス以外の再生可能エネルギーの導入速度は非常に高く、最も制約の厳しいT15S36を見てみると、2030年から2060年に掛ける拡大率がたの戦略に比べ非常に高くなっていた。

総電力量に関しては、T20S36→T15S36の間で大きく増加しているが、これは、二酸化炭素削減のために産業や民生の熱需要あるいは運輸需要の電化が促進されることに相当する。

バイオマスエネルギーに関しては、T25S36からT15S36に向かってCCS付きのバイオエネルギー（BECCS）発電が早い時期に導入される傾向があった。また、どの戦略においても21世紀末にはバイオマス発電はほぼCCS付きのもので占められている。

化石燃料による発電は、どの戦略においてもCCS付き天然ガス火力発電が一定の割合で21世紀末に向けて利用されるが、CCS付き石炭火力については戦略間で違いがあり、T15S36においては導入がほとんどなされない。CCSなし化石燃料火力発電は、どの戦略においても2080年以降ほぼゼロとなり利用されなくなる。

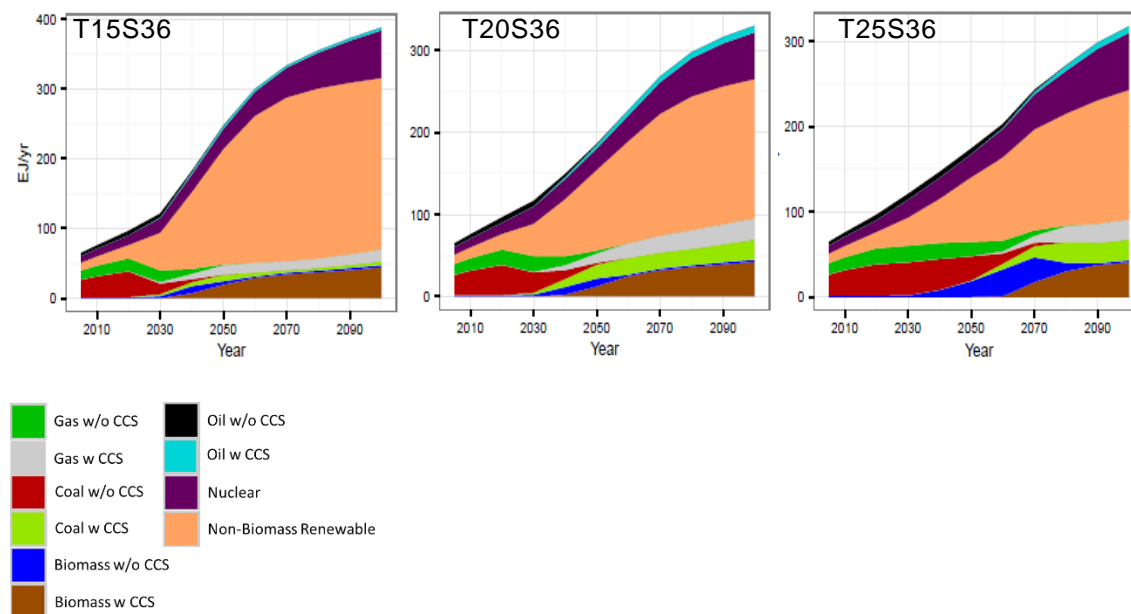


図 A.1.16 AIM SSP2 の電源構成の時間変化 (T15S36, T20S36, T25S36)

図 4-2-2-②-d-1_3 にSSP1 の計算結果、図 4-2-2-②-d-1_4にSSP3の結果を示す。SSP2 と若干の違いはあるが、定性的な傾向は同一である。細かな違いとしては、SSP1ではBECCS発電がSSP2に比べると利用量が少なく、SSP3においては、原子力発電の割合は小さくなり、逆にBECCS発電のシェアが相対的に大きくなっている。

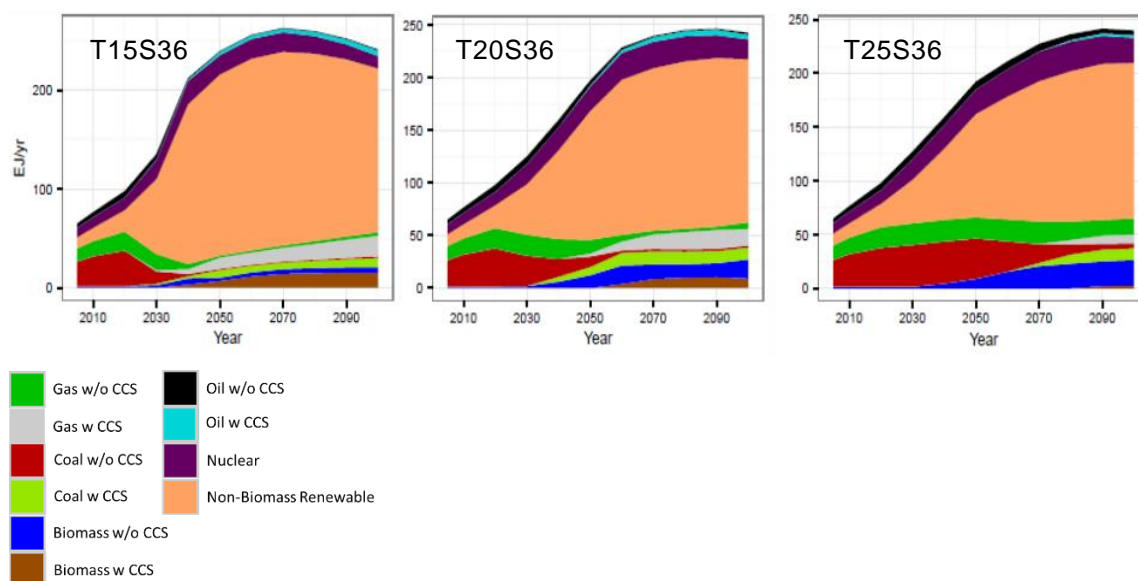


図 A. 1.17 AIM SSP1の電源構成の時間変化 (T15S36, T20S36, T25S36)

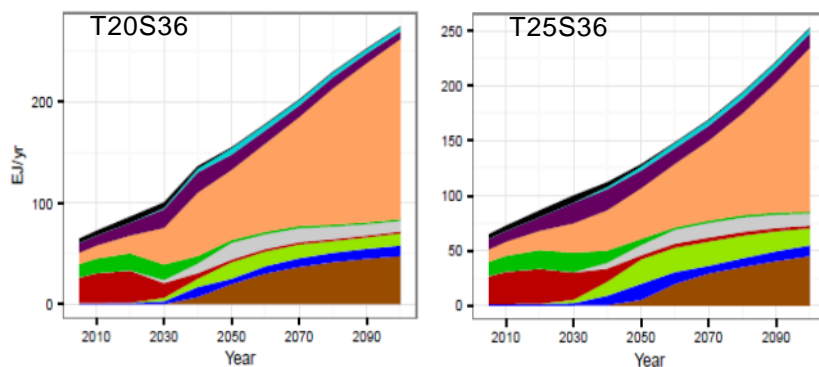


図 A. 1.18 AIM SSP3の電源構成の時間変化 (T20S36, T25S36)

② GRAPE モデルの電源構成

GRAPEモデルのSSP2では、AIMと同様、どの戦略においても2030年以降原子力や再生可能の導入が進むが、バイオマス以外の再生可能エネルギーの拡大はAIMと比較し緩やかである。2050年以降において、どの戦略においてもBECCS発電が大規模に導入され、21世紀末では120EJ/yr前後の利用となる。また、その導入は、T20、T15に向けて前倒しとなる。

図A. 1. 19にGRAPEモデルのSSP2の電源構成を示す。総電力の傾向は2050年まではAIMとよく似ているが、2030年から2060年にかけてAIMのT15では総電力がさらに大きく伸びるのに対し、GRAPEでは各ケースの差異が小さくなっている。AIMとGRAPEでは、バイオマスも含めた再生可能エネルギーによる発電量の増加傾向は同様な傾向を示すが、内訳が大きく異なり、GRAPEでは2100年に向けBECCS発電を多く利用するような電源構成となっている。BECCS発電を大量に行うことによって、CCSなしの天然ガス発電が21世紀末において利用されているという差異も存在した。

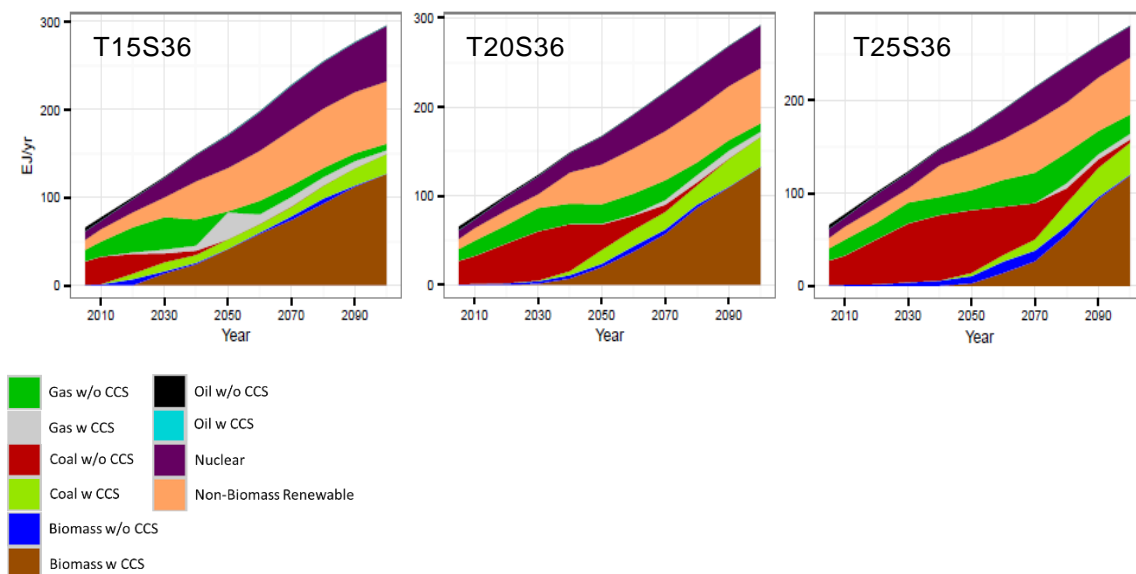


図 A. 1.19 GRAPE SSP2の電源構成の時間変化 (T15S36, T20S36, T25S36)

SSP1、SSP3における電源構成の変化の傾向はSSP2と定性的には同じであるが、SSP1ではCCSなしの化石燃料発電が比較的遅くまで利用される傾向がみられた。SSP3については、CCS発電への依存度が他のSSPよりも大きくなっていった。

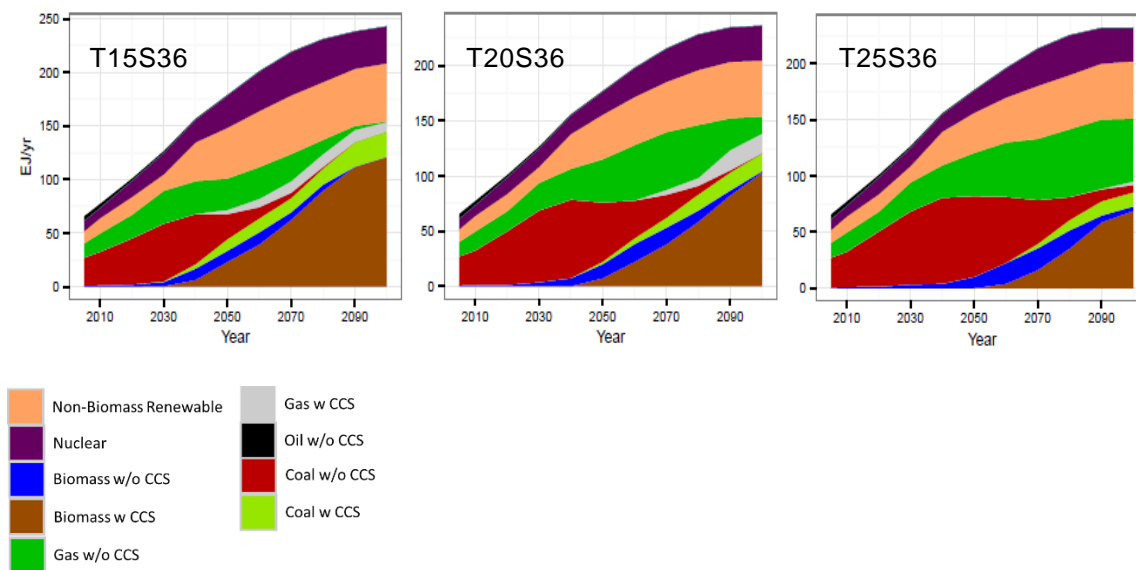


図 A. 1.20 GRAPE SSP1の電源構成の時間変化 (TG25, TG20, TG15)

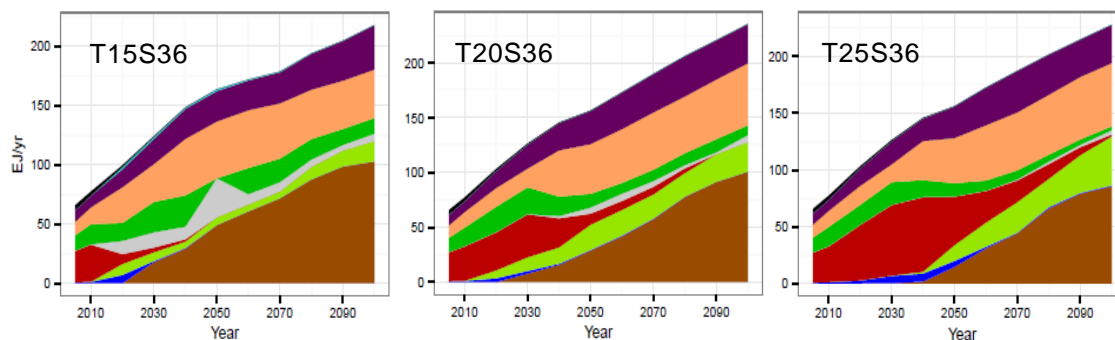
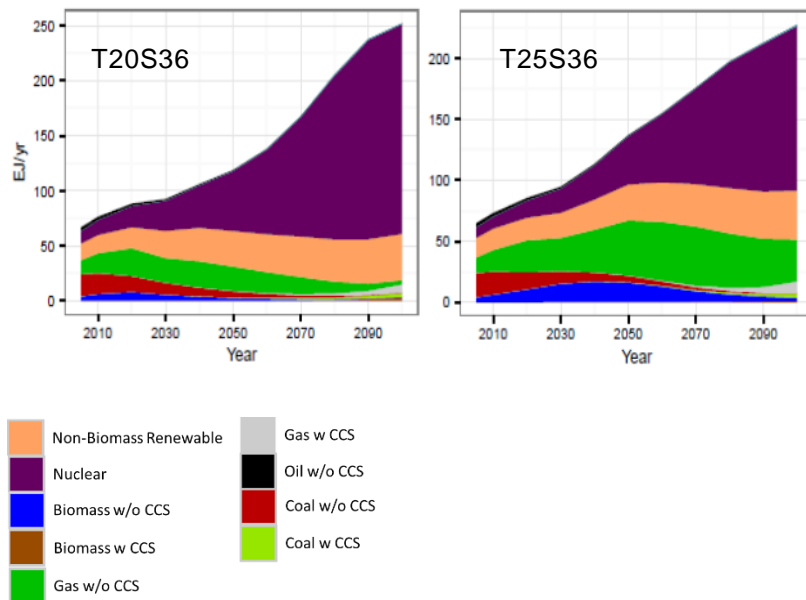


図 A. 1. 21 GRAPE SSP3の電源構成の時間変化 (TG25, TG20)

③ MARIA モデルの電源構成

中庸なシナリオであるSSP2において、T20S36では2030年から2080年にかけて電力需要が急増し、増加分は原子力の大きな拡大と、バイオマス以外の再生可能エネルギーの緩やかな増加によって供給されている。どの戦略に於いても21世紀後半においては原子力が大きな役割を果たす。

図 A. 1. 22に、T20とT25の電力構成の変化を示す。MARIAモデルは、原子力に対して楽観的な想定となっており、T25 のケースにおいても、2100年に原子力が電力供給の大半を占めるような構成となっている。T20に向けCO₂ 制約を厳しくしていくと、電力量が増加する。この電力消費増と低炭素化に対応するため、前述したように、原子力の急激な伸びが2030年から2080年にみられ、CCSなしの天然ガス発電はT25に比べ大きく減少した。



図A. 1. 22 MARIA SSP2の電力構成の時間変化 (T20S36, T25S36)

図 A. 1. 23、図A. 1. 24にSSP1とSSP3の計算結果を示す。SSP1では、SSP2に比べ総電力量が大きく下がる上で原子力発電量が減っており、相対的な再生可能エネルギーのシェアが高い結果となった。戦略間の違いとしては、T15とT20の間の違いはみられない一方、T25においてはCCSなし天然

ガス火力、バイオマス発電が多く導入されていた。SSP3ではSSP2と定性的な傾向は変わらないが、CCS発電のシェアはさらに低く抑えられる傾向にある。MARIAではSSP1からSSP3のT20戦略においてBECCS発電は2100年においても3-6 EJ/yr⁻¹とほとんど利用されていない。

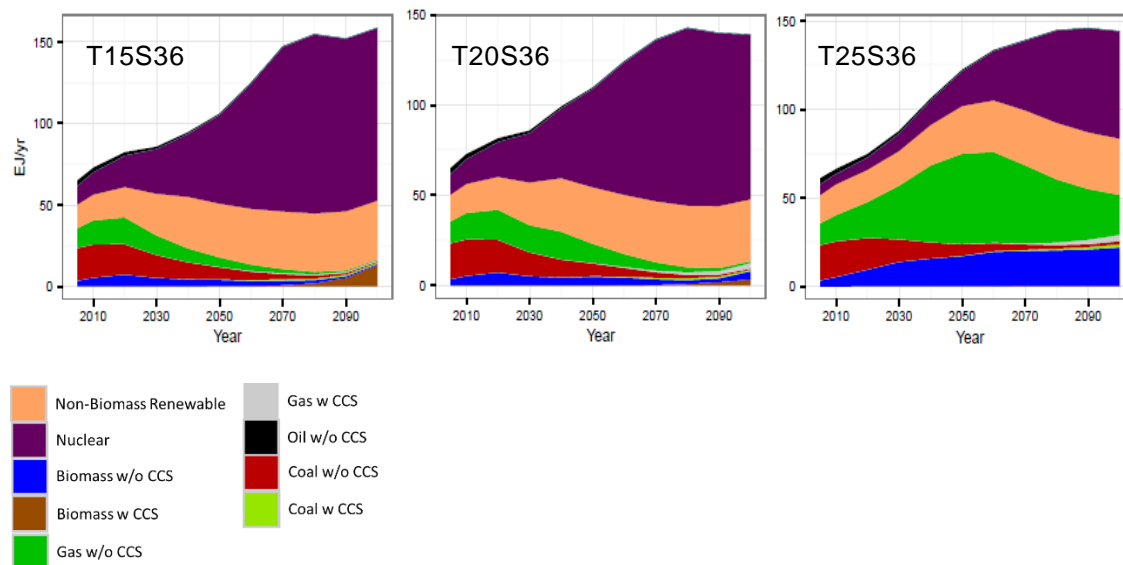


図 A. 1. 23 MARIA SSP1の電源構成の時間変化 (T15S36, T20S36, T25S36)

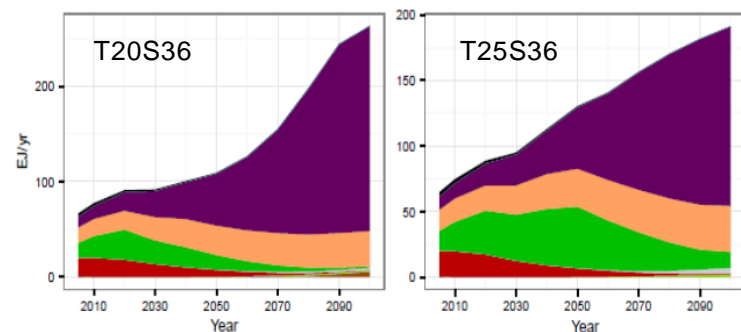


図 A. 1. 24 MARIA SSP3の電源構成の時間変化 (T20S36, T25S36)

⑤ 土地利用と食料需給

ここでは穀物生産と収率の推移を示す。各モデルが対象とする農作物の範囲に差があるものの、世界全体で見れば耕地面積、生産量、収率とも世界的にはBAUから大きな差は発生せず、バイオマス利用と食糧供給の競合は深刻でないことが示唆されている。しかし、地域的には大きな差が発生している。これは収率が温暖化ケースごとに地域差が大きくなるという仮定に依存するためであるが、地域間の格差拡大の懸念を示唆するものである。

図 A. 1. 25-27に穀物生産の地域別推移を示す。モデルにより取り扱う農産物の種類が異なるため直接比較はできないものの、戦略ケース間の変化は世界的には小さい。すなわち、食糧需給に関しては温暖化対策戦略によって大きな変化を受けていないと言えることになる。しかし地域差には大きな変化がみられる。ことに、LAM、MAF地域においてはGRAPEとMARIAが相反する動きをしている。

全体的には穀物生産に対しては気候変動の影響は、世界全体で小さく、地域ごとには大きいという知見が得られる。これは一方で国際貿易による地域的な変動が吸収されているという知見と同時に、食糧需給に関する地域間格差の拡大につながる可能性があるという懸念も含む。このため、解釈には注意が必要である。

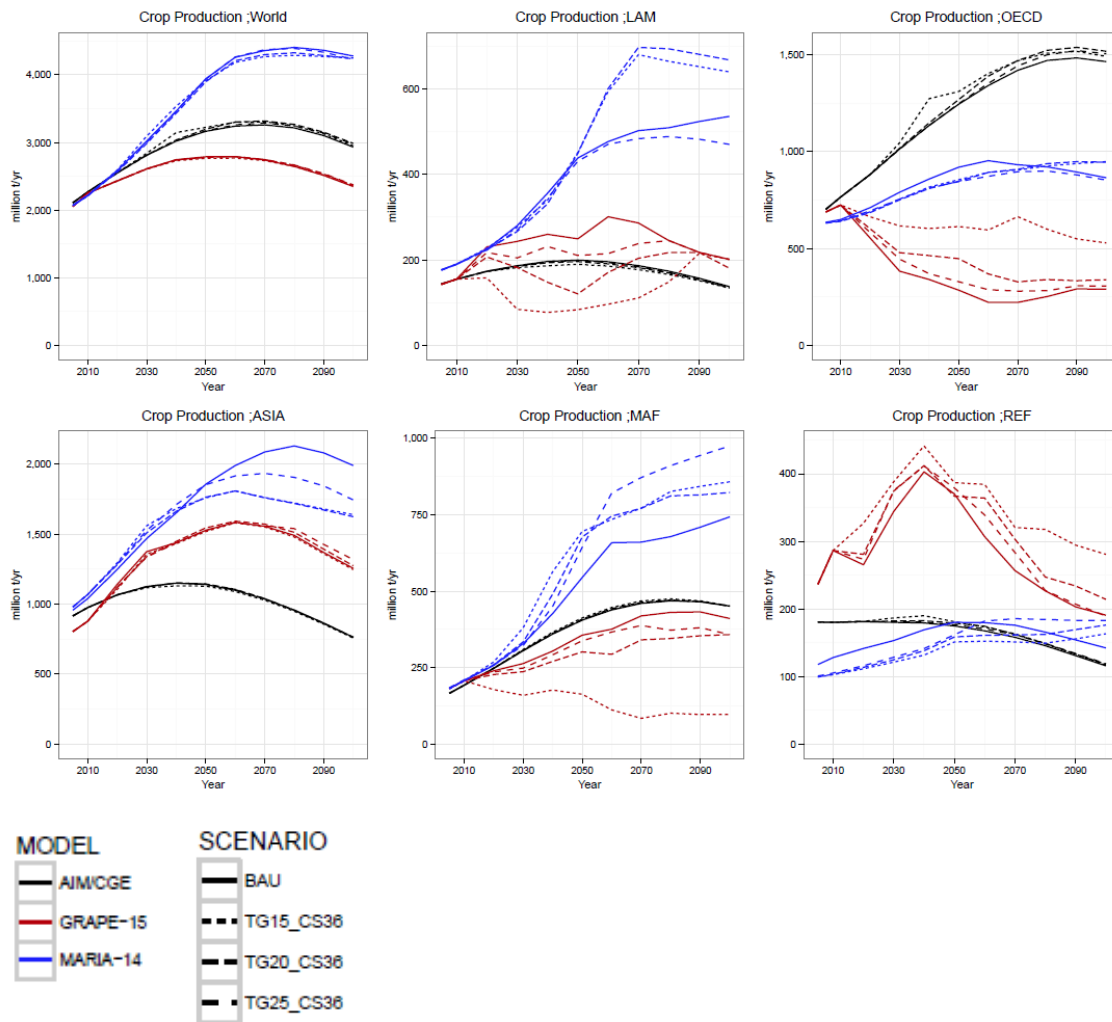


図 A. 1.25 SSP1 における穀物生産の戦略・地域別推移比較

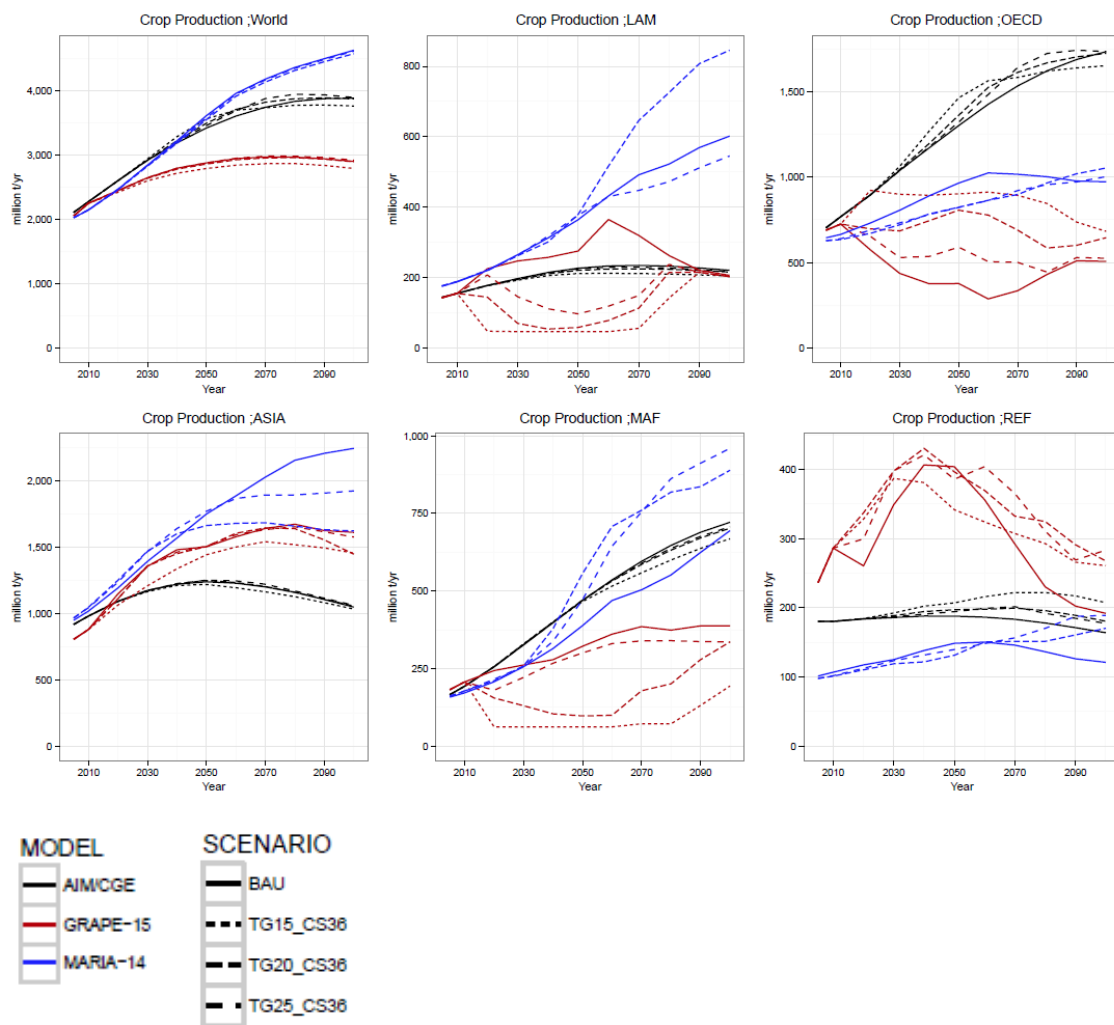


図 A. 1.26 SSP2 における穀物生産の戦略・地域別推移比較

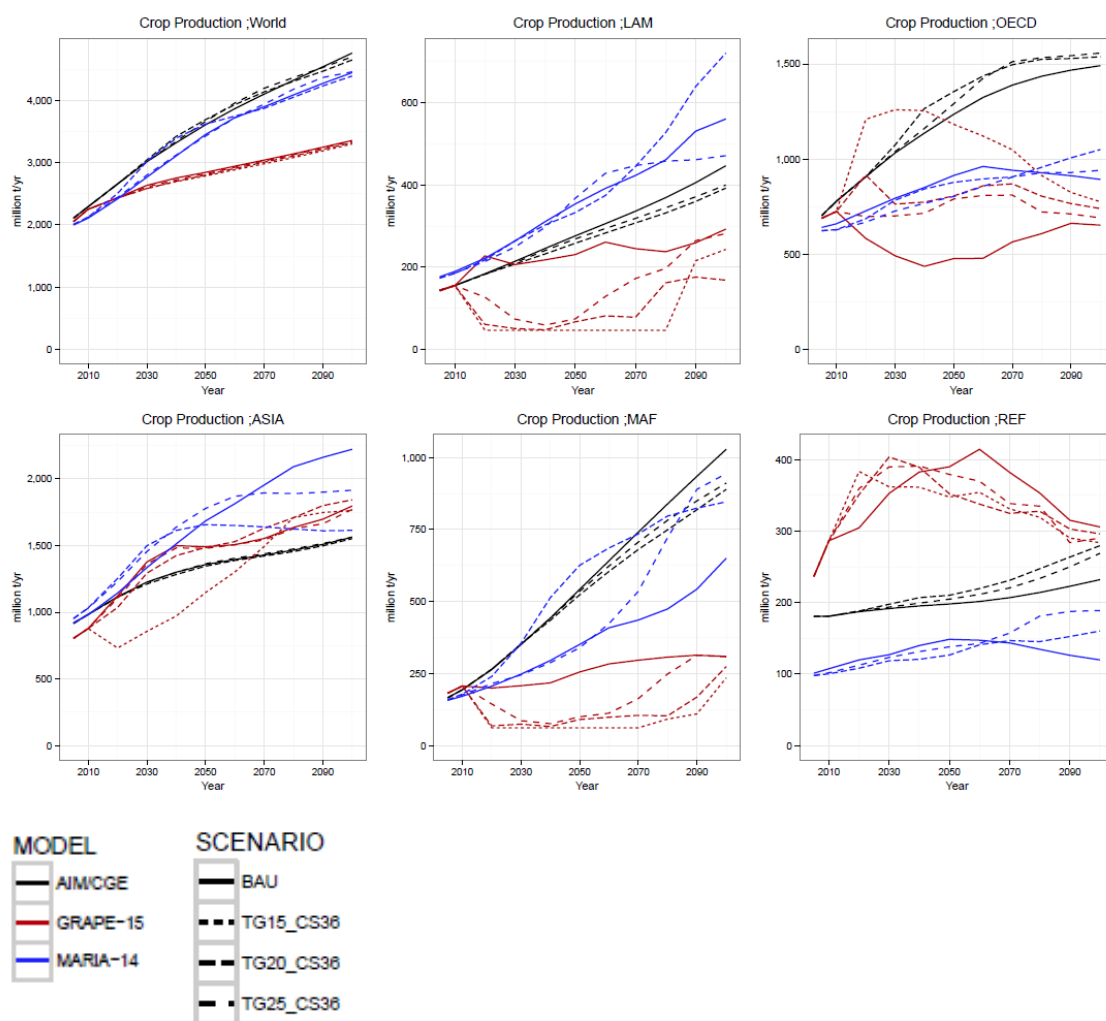


図 A.1.27 SSP3における穀物生産の戦略・地域別推移比較

収率の推移については、モデルによる穀物種の扱いの差があるものの、モデルごとに見れば穀物の平均的収率は戦略ケース間であまり大きな差は生じていない。ただし地域差と温暖化対策時の差は大きい。このことは、結果の楽観的な解釈に留保条件を与えるものである。例えば、GRAPEではREF地域において一貫した収率低下がある反面、SSP3では生産は21世紀半ばに2005年の2倍近い上昇を示している。これは大幅な耕地面積の増加を示唆する。またOECDでは同様に収率は一貫して低下するものの、温暖化の進行と対策による穀物生産は拡大から縮小まで大きな差を生んでいる。このような耕地面積の急激な変化は土地利用、生態系の影響の大きさや、水管理などマネジメント上も課題を生むことになるためである。

図 A. 1. 28～30に平均収率の推移を示す。国ごとの温暖化進行シナリオごとの主要穀物種類別の収率は前述のように農業技術環境研究所から提供された共通の値を用いる。作物別にみるとトウモロコシはCO₂濃度の上昇と温暖化の進行で収率が低下するのに対し、コメ、コムギ等は逆に上昇する傾向を示す。またこれらの変化にも地域差がある。作物をどこでどれだけ生産するかは、土地利用制約のもとでバイオマスエネルギー生産とのバランスを見ながら決定されるため、結果として平均収率には差異が発生する。この結果、MARIAでは温暖化対策を進めるとかえって収率が

低下するのに対し、GRAPEでは変化が小さく、かえって今世紀末には温暖化対策により収率は増加する。

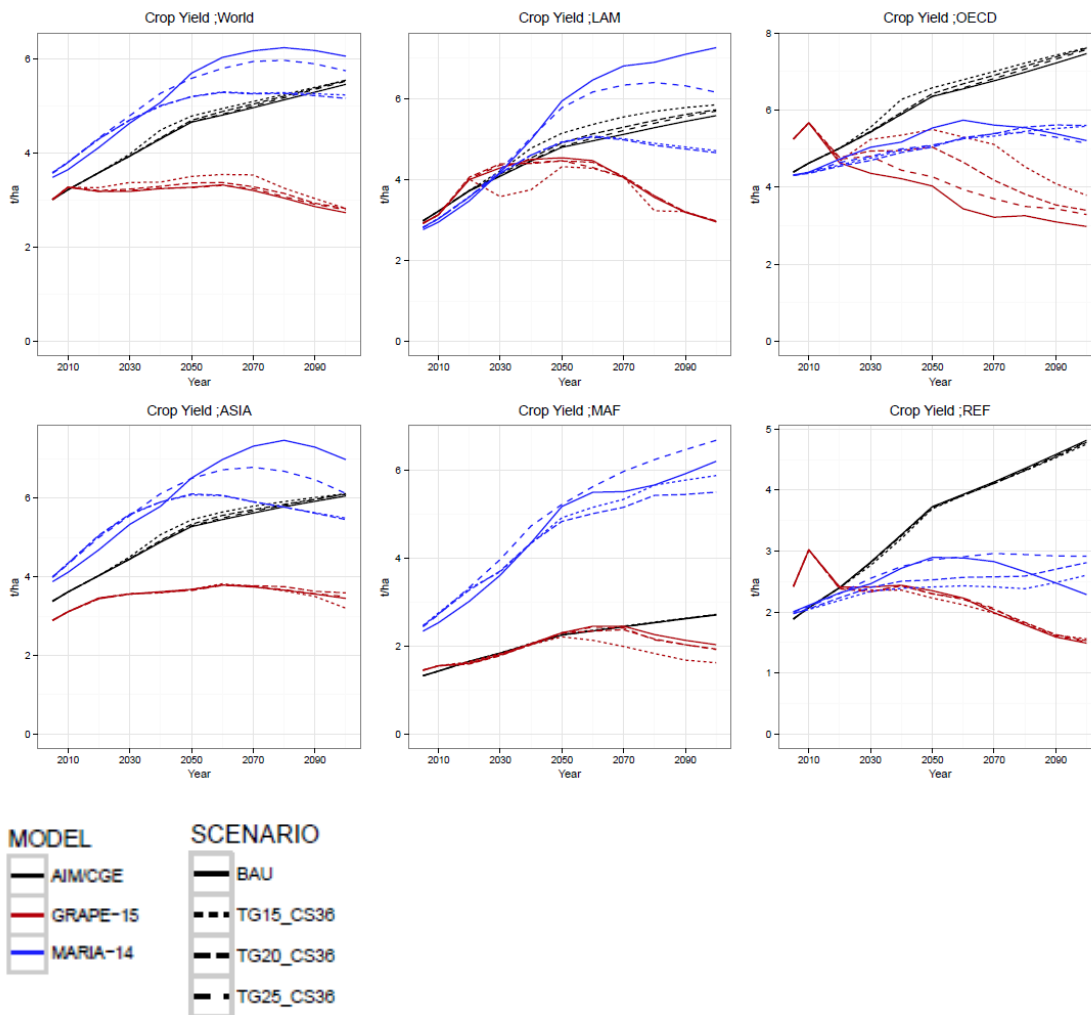


図 A. 1.28 SSP1 における平均穀物収率の戦略・地域別推移

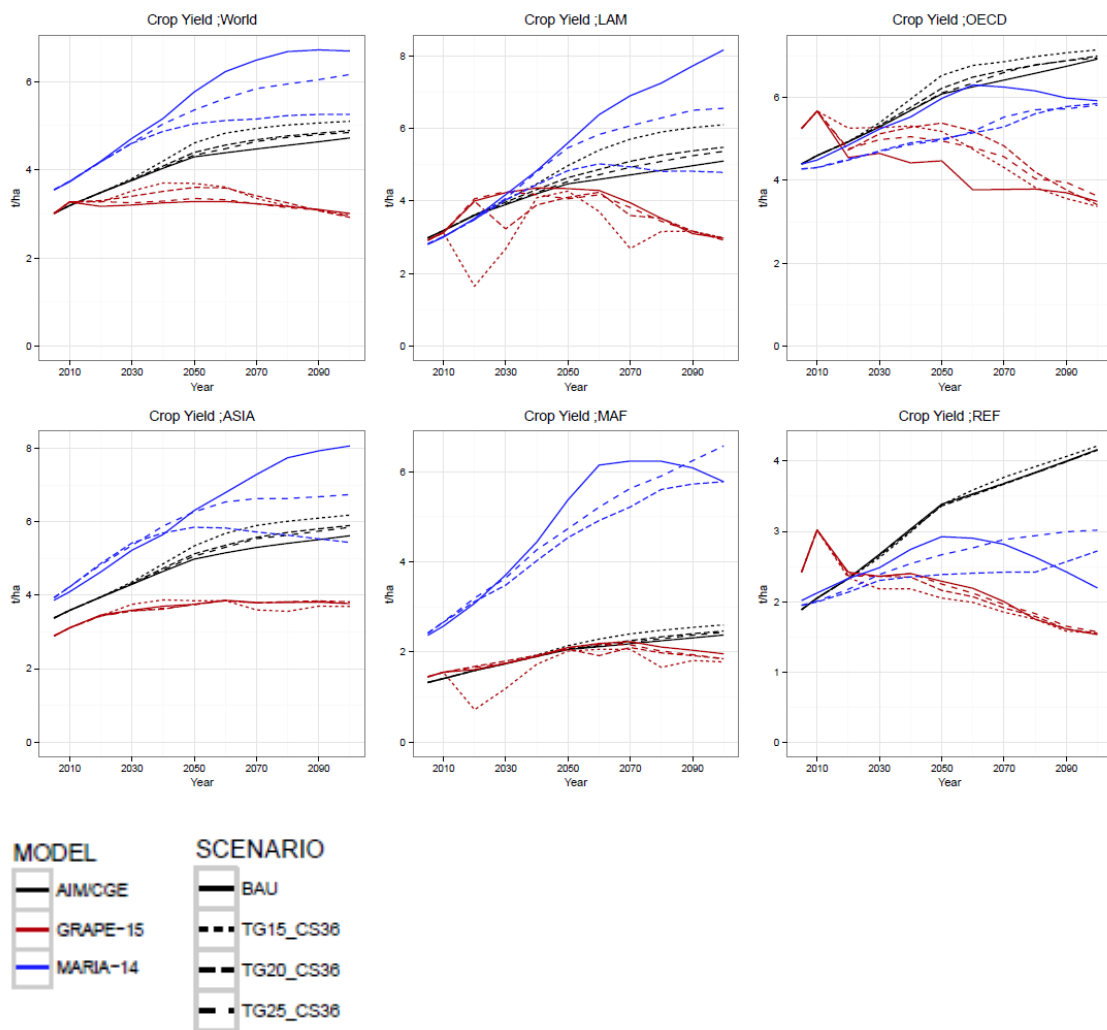


図 A. 1.29 SSP2 における平均穀物収率の戦略・地域別推移

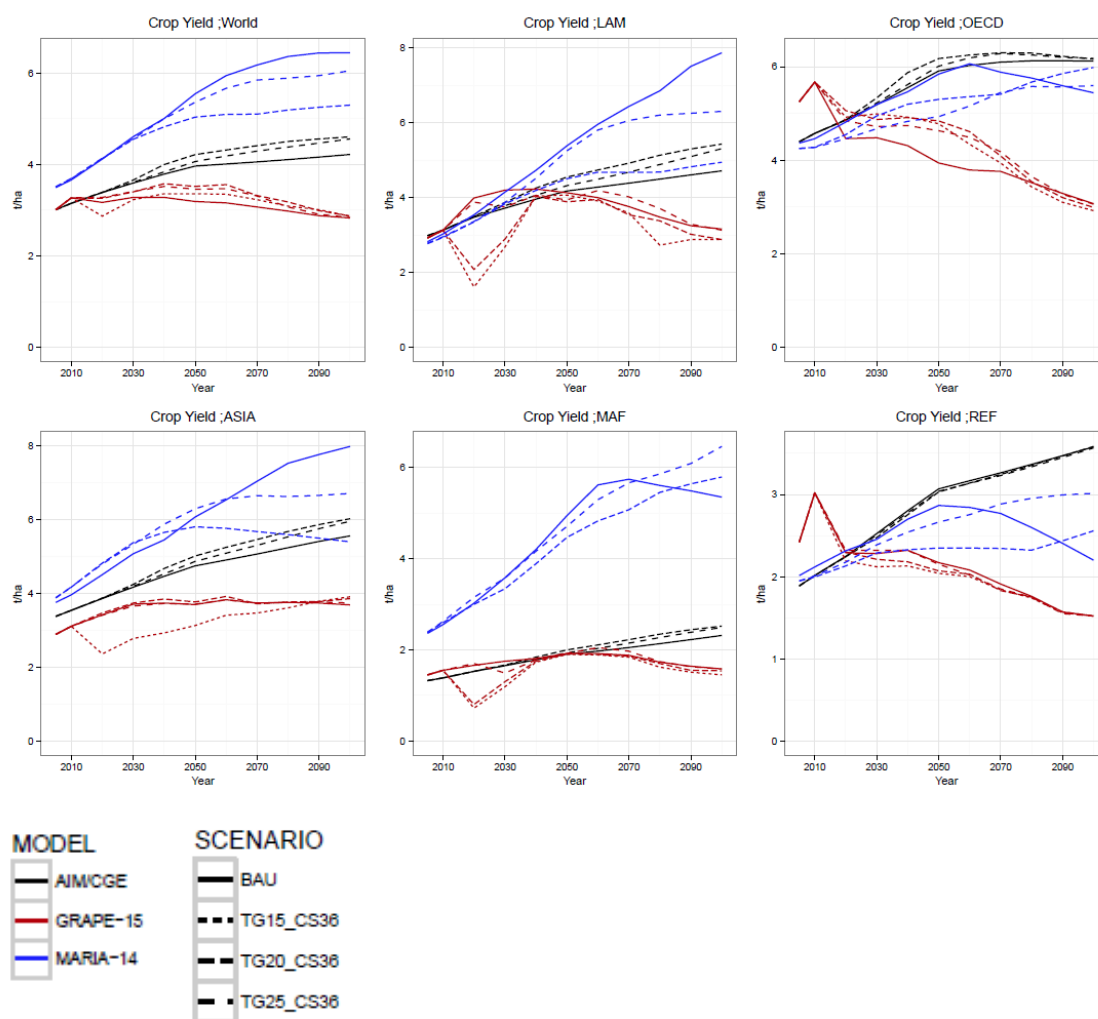


図 A. 1.30 SSP3 における平均穀物収率の戦略・地域別推移

⑥ 産業構造への影響

a. 部門別付加価値変化率

初めに、戦略選択肢の変化によって各部門の付加価値に与える影響をみたい。図 A.1.31～A.1.33 では、リファレンスと比べ、第一次産業、第二次産業、第三次産業の付加価値がそれぞれ各年でどれだけ減少したかの比率が現れている。T20_S36 では全体的に付加価値の減少率が高い。これは、2°C 以下に抑えるためには、早期の GHG 排出削減が必要であり、それが高い排出削減費用をもたらすからである。詳細をみると、T20_S36 における減少率は上昇傾向にあり、SSP1 では 3%程度、SSP2 では各産業で 6%程度、SSP3 では各産業で最大で 15%程度となり、特に SSP3 において大幅な減少がみられた。地域別では旧ソ連・アフリカの影響が大きい。一方、T25_S36 では、各産業部門の付加価値の減少率は T20_S36 より低く、SSP1 ではほぼ 0%、SSP2 では各産業で最大 3%程度、SSP3 では各産業で最大で 6%程度となり、SSP3 においては依然としてやや高い減少率がみられた。地域別の差はそれほど見られない。これは、T20_S36 と比較して GHG 排出削減の負担、つまり排出削減費用が低いた

めである。

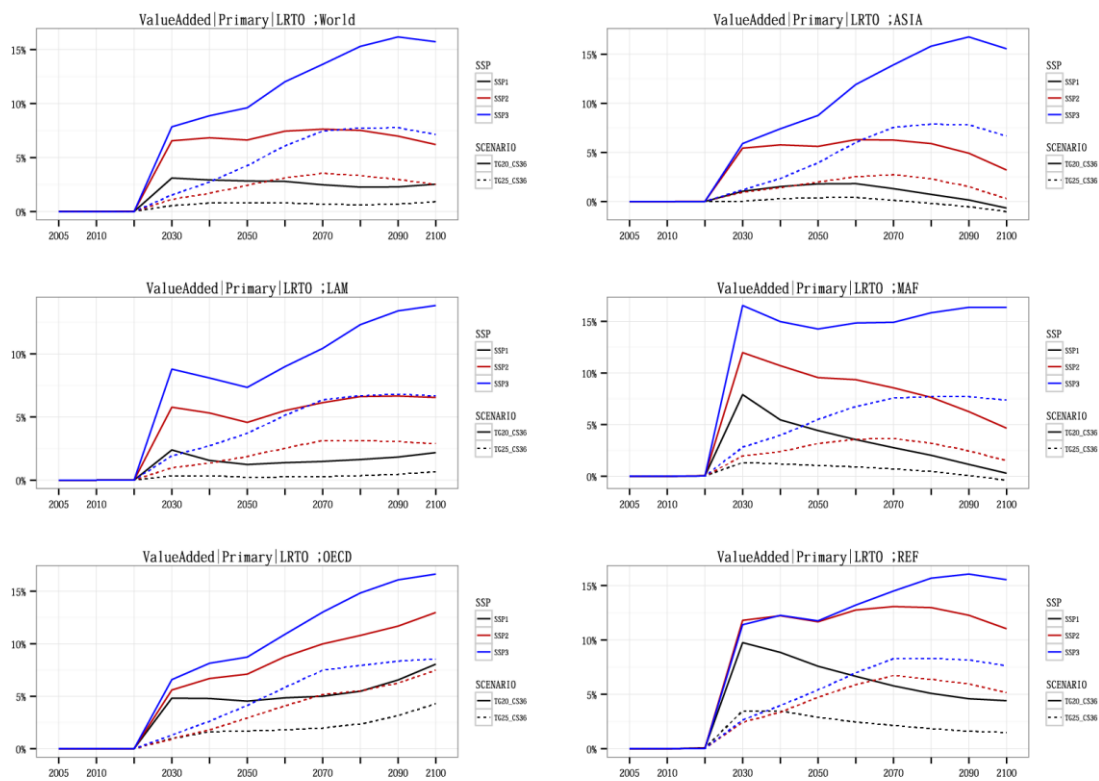


図 A.1.31 戦略選択肢別付加価値減少率推移 (第一次産業)

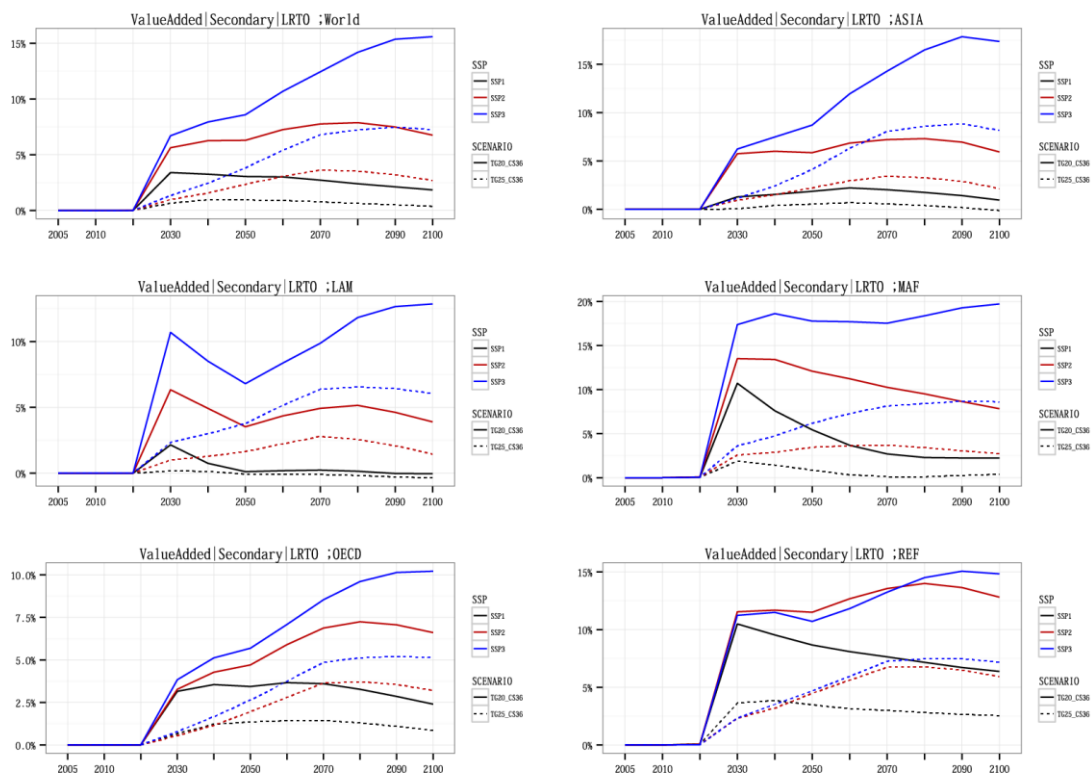


図 A.1.32 戦略選択肢別付加価値減少率推移 (第二次産業)

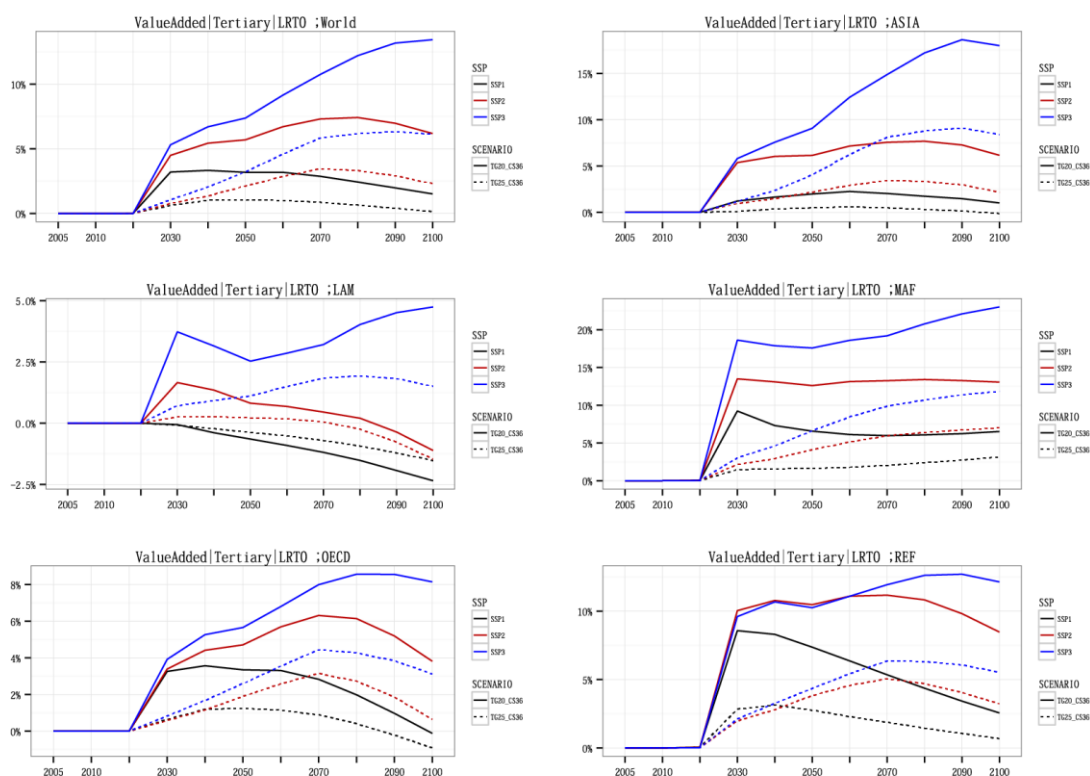


図 A.1.33 戦略選択肢別付加価値減少率推移 (第三次産業)

b. 地域別付加価値成長率

経済成長率の視点で T20_S36 と T25_S36 の地域別の影響を見たのが図 A.1.34～A.1.36 である。全体としての特徴は、分析ケースと同様、アジアの高成長率の急激な低下、アフリカにおける高成長の持続、先進国の低い成長率への収束である。ただ、T20_S36 においては、早期に GHG 排出削減を行うため、一部の地域では排出削減費用増加に伴う成長率の低下が T25_S36 より顕著である。産業別では、規模の小さい第一次産業の成長率が最も高く、規模の大きい第三次産業が最も低くなっている。

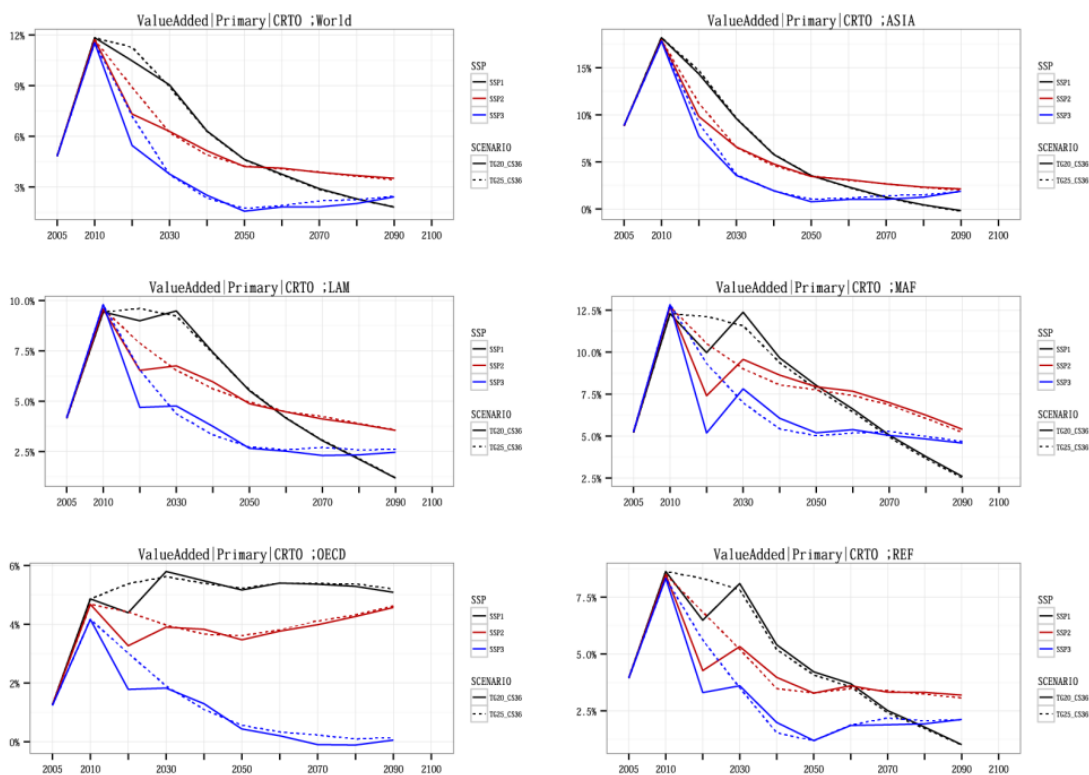


図 A.1.34 地域別付加価値成長率推移 (第一次産業)

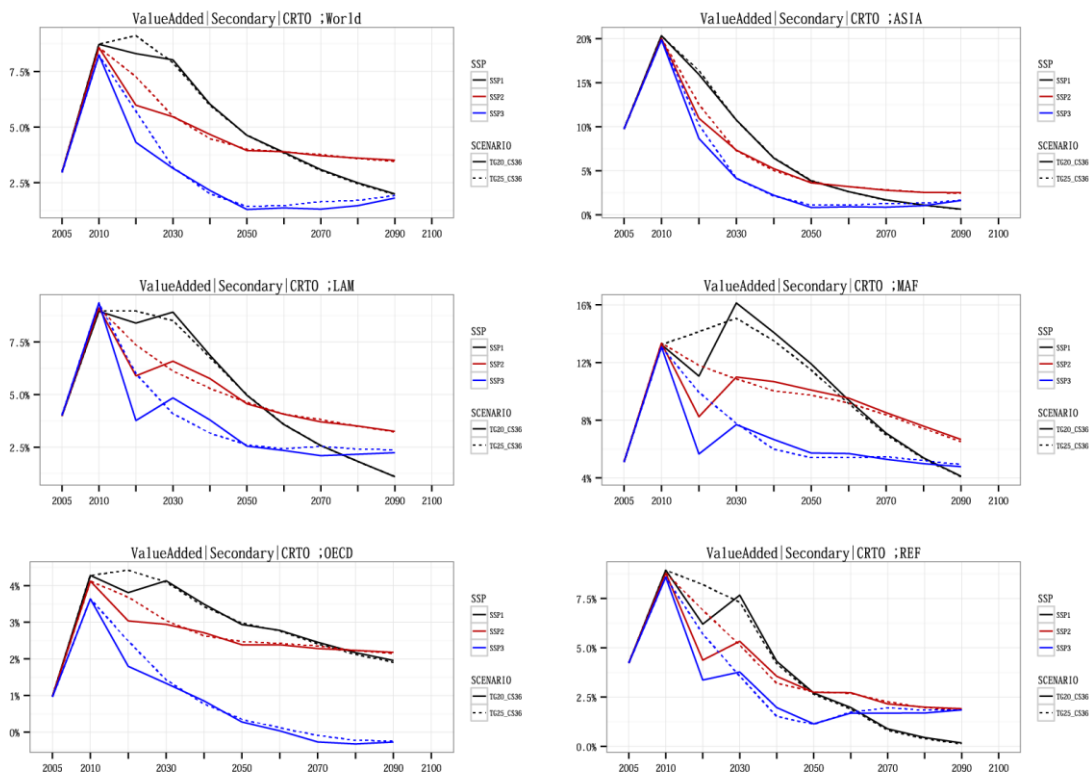


図 A.1.35 地域別付加価値成長率推移 (第二次産業)

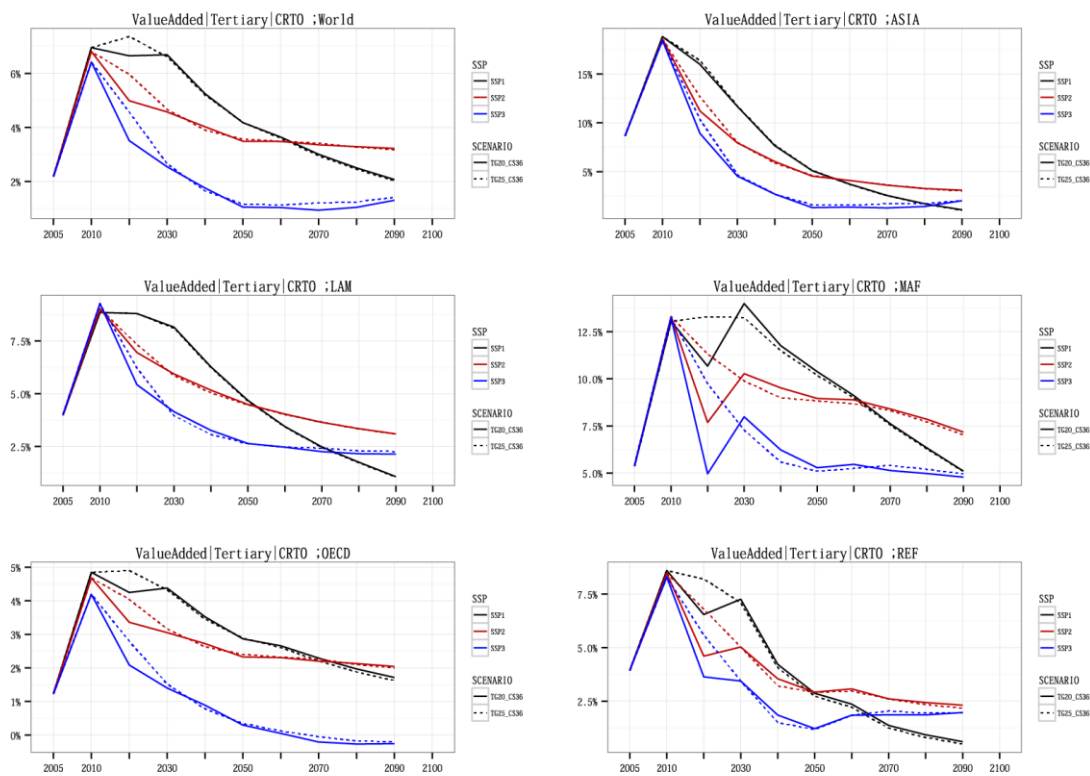


図 A.1.36 地域別付加価値成長率推移 (第三次産業)

c. 第二次産業の輸出・輸入の分析ケース別減少率

第二次産業の輸出・輸入の減少率を表す図 A.1.37、図 A.1.38 を見ると、第二次産業では、OECD 諸国・アジア地域とも排出削減が厳しい T20S36 では SSP3 を中心に輸出も輸入も減少率が高まる傾向にあり、OECD 諸国は 10%前後、アジア地域は 15%以上に達する。特に OECD 諸国は輸入の減少率が第一次産業より高いため、純輸出は増加する。一方、アジア地域では輸出も輸入も同程度の減少率となり、純輸出は減少する。また、T25_S36 では、全体的に減少率は低下し、OECD 諸国では輸入の増加もみられる。

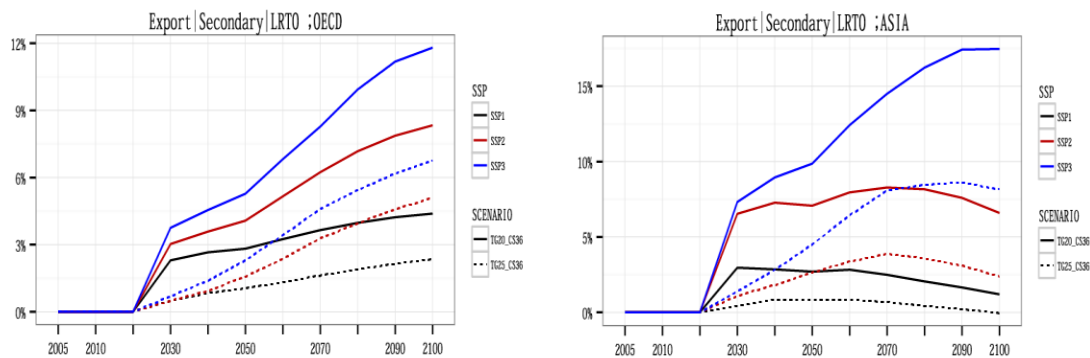


図 A.1.37 OECD 諸国・アジア地域における地域別輸出の減少率 (第二次産業)

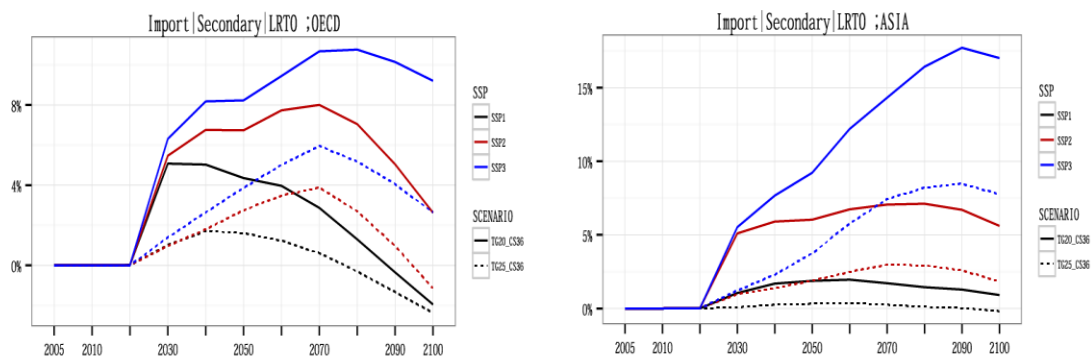


図 A.1.38 OECD 諸国・アジア地域における地域別輸入の減少率 (第二次産業)

(2) 社会経済対策

IPCC AR4 WGIII										
スターン報告										
その他										
対策			対策導入時に発生する機会				対策導入時に発生するリスク			
大分類	中分類	小分類	世界	国家・政府	企業	個人・家計	世界	国家・政府	企業	個人・家計
経済的措置	税・課徴金	炭素税		・優れた費用対効果				・エネルギー需要の非価格弾力性 ・課税ポイントの設定 ・導入の政治的難しさ ・エネルギー関連税制との整合性		
	排出権取引	オークション方式		・確実なGHG排出削減				・初期配分の方法 ・排出権を適用する産業の選定 ・排出権を適用する生産プロセスにおける段階の決定(上流、下流など)		
		無償配分方式						・無償であることの国民の許容		
	補助金 その他インセンティブ	・研究開発補助 ・投資税額控除 ・価格支援(例: 固定価格買い取り制度)など		・補助金費用負担の公平性 ・政治的な導入しやすさ				・化石燃料補助や農業補助との整合性	・財政コスト	
・化石燃料補助削減 ・農業補助削減など										
規制措置	規制・基準	・技術基準 ・性能基準 など		・個々の事例への細かい対応				・GHG削減コストと技術情報の入手コスト		
	自主規制			・固有文化へのなじみやすさ						
社会的措置	情報手段	情報公開制度 教育 など							・情報公開にかかるコスト	

IPCC AR4 WGIII スターン報告 その他			対策によって発生する機会				対策によって発生するリスク				定量化の可能性	研究事例の多寡	ICA-RUSでの分析可能性	
大分類	中分類	小分類	世界	国家・政府	企業	個人・家計	世界	国家・政府	企業	個人・家計	A:定量的情報あり B:局所的情報のみ C:定性的情報のみ D:不明	A:多 B:中 C:少 D:不明	A:大 B:中 C:小 D:不明	
経済的措置	税・課徴金	炭素税		・エネルギー安全保障の改善 ・税収・課徴金収入			フリーライダー	・不明確なGHG排出削減量 ・効果が逆であるイノベーションとの整合性 ・税収・課徴金収入の使途 ・モニタリング制度と費用	競争力の損失 生産量の低下		A	A	A	
	排出権取引	オークション方式		・排出権売却収入 ・排出権分配における公平性の確保	・イノベーションの促進 ・低炭素投資	低炭素投資		・炭素リーカーズ ・世界全体でのGHG排出増加の可能性	・排出権売却収入の使途 ・企業の価格支配の可能性 ・モニタリング制度と費用	・排出権の価格不安定性 ・競争力の損失 ・生産量の低下	逆選性	A	A	A
		無償配分方式		・エネルギー安全保障の改善								・炭素排出費用の負担		
補助金 その他インセンティブ		・研究開発補助 ・投資税額控除 ・価格支援(例:固定価格買い取り制度)など	・国際技術開発協力の促進					・一度導入する困難な撤廃や削減 ・モニタリング制度と費用	・技術のスピルオーバー(知的財産権の保護)		A	A	B	
		・化石燃料補助削減 ・農業補助削減など				・イノベーションの促進 ・低炭素技術の普及 ・競争力向上		・低炭素投資以外の投資のクラウドアウト		・低所得層のエネルギーアクセスの悪化				
規制・基準	規制・基準	・技術基準 ・性能基準 など	・規制や基準の世界共通化	・比較的確実なGHG排出削減	・低炭素新技術普及の促進			・時代に合った規制・基準の更新 ・技術情報の入手費用 ・削減費用の情報の入手費用 ・モニタリング制度と費用	・規制対策コストの負担 ・イノベーションへのつながりやすさ ・費用対効果の悪化		B	A	D	
	自主規制				・イメージアップ ・社会への貢献 ・低い対策コスト	・対策未導入企業への対策導入の誘得しやすさ								
社会的措置	情報手段	情報公開制度 教育 など	・国際協賛生成の可能性	・他の緩和策とのシナジー効果	・気候変動対策実施への国民的理解	・環境意識の保持		・不明瞭な費用対効果 ・モニタリング制度と費用	・情報公開にかかるコスト		B	B	D	

(4). 適応策

大分類	中分類	小分類	適応策	適応策の詳細	適応策によるリスク	実施する上での留意		
食料	農業	農業全般	普及指導員からの情報収集と整理、普及指導員への指導	普及指導員からの情報収集と整理、普及指導員への指導	普及指導員からの情報収集と整理、普及指導員への指導	高断りによる人手不足		
		コメ	高断り	高断り	高断り	高断り	高断りによる人手不足	
			高断りの向上	高断りの向上	高断りの向上	高断りの向上	高断りによる人手不足	
		コメ以外の穀類	経済的経営の移換	経済的経営の移換	経済的経営の移換	経済的経営の移換	水利慣行による制約	
			家畜の飼育環境	家畜の飼育環境	家畜の飼育環境	家畜の飼育環境	水利慣行による制約	
		果樹	果樹	果樹	果樹	果樹	規模変更のリスク	
			茶・野菜	茶・野菜	茶・野菜	茶・野菜	規模変更のリスク	
		畜産	畜産	畜産	畜産	畜産	コスト増	畜産削減が必要
			乳製品(飼料作物)	乳製品(飼料作物)	乳製品(飼料作物)	乳製品(飼料作物)	コスト増	畜産削減が必要
		水産	水産	水産	水産	水産	消費地に輸送する場合、コスト、鮮度の問題が課題	新しい漁場国で地場産品として発售するかどうかは不透明
水産	水産		水産	水産	コスト増	畜産削減が必要		
水環境・水資源分野	水供給	地下水の採取と涵み上げ(POC-AH)	地下水の採取と涵み上げ(POC-AH)	地下水の採取と涵み上げ(POC-AH)	地下水の採取と涵み上げ(POC-AH)	コスト増	交通機材や安全管理の面でコスト増	
		貯水池と貯水池の増設(POC-AH)	貯水池と貯水池の増設(POC-AH)	貯水池と貯水池の増設(POC-AH)	貯水池と貯水池の増設(POC-AH)	コスト増	コスト増	
		雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	コスト増	コスト増	
		河川敷の緑地化(雨水貯留)POC-AH)	河川敷の緑地化(雨水貯留)POC-AH)	河川敷の緑地化(雨水貯留)POC-AH)	河川敷の緑地化(雨水貯留)POC-AH)	コスト増	コスト増	
		雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	コスト増	コスト増	
		雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	コスト増	コスト増	
		雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	コスト増	コスト増	
		雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	コスト増	コスト増	
		雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	コスト増	コスト増	
		雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	雨水貯留量の拡大(POC-AH)	コスト増	コスト増	
水需要対策	水需要対策	水需要対策	水需要対策	水需要対策	コスト増	コスト増		
	水需要対策	水需要対策	水需要対策	水需要対策	コスト増	コスト増		
水環境管理	水環境管理	水環境管理	水環境管理	水環境管理	コスト増	コスト増		
	水環境管理	水環境管理	水環境管理	水環境管理	コスト増	コスト増		
治水対策	治水対策	治水対策	治水対策	治水対策	コスト増	コスト増		
	治水対策	治水対策	治水対策	治水対策	コスト増	コスト増		

途上国	農業	技術オプション	技術	作付時期の調整 品種改良 灌漑地域や土壌の改善 作付場所の移動			
			情報・知識	気候変動の予測と適応策 作物の選別			
			法制	農産物市場の保護			
		政策オプション	人材	農産物市場の保護			
		社会経済オプション	経済システム	土地利用の最適化 農産物の生産と消費の調整 農産物の貯蔵			
	水資源	技術オプション	技術	灌漑システムの改善 水の節約・再利用 水質改善の確保			
			情報・知識	水資源の管理 水質改善のためのモニタリング			
			法制	水資源の管理			
		政策オプション	人材	水質改善のためのモニタリング			
		社会経済オプション	経済システム	水質改善のためのモニタリング			
	生態系・生物多様性	技術オプション	技術	生態系サービスの保護 持続可能な農業の促進 生態系サービスの保護			
			情報・知識	生態系サービスの保護 生態系サービスの保護			
			法制	生態系サービスの保護			
		政策オプション	人材	生態系サービスの保護			
		社会経済オプション	経済システム	生態系サービスの保護			
	防災・沿岸	技術オプション	技術	沿岸地域の保護 沿岸地域の保護 沿岸地域の保護			
			情報・知識	沿岸地域の保護 沿岸地域の保護			
			法制	沿岸地域の保護			
		政策オプション	人材	沿岸地域の保護			
		社会経済オプション	経済システム	沿岸地域の保護			
	人間の健康	技術オプション	技術	人間の健康 人間の健康 人間の健康			
			情報・知識	人間の健康 人間の健康			
			法制	人間の健康			
		政策オプション	人材	人間の健康			
	社会経済オプション	経済システム	人間の健康				
産業				産業			
出典							
① 開発を目的に行った取組が取組の目的にもなるケース							
② 気候変動への適応の概念を網羅する設計・実施に組み入れられるケース (Climate Proofing)							
③ 気候変動への適応そのものが取組の目的となるケース							
気候変動に対する特定の影響に対するアプローチ(気候リスクに気づくアプローチ)							
気候変動に対する特定の脆弱性に対する能力を向上させること							
脆弱性に対する特定の脆弱性を軽減するアプローチ(脆弱性に対するアプローチ) 社会やコミュニティが脆弱性に対する脆弱性に対する脆弱性を軽減するアプローチ							