

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

統合評価モデルの改良とそれを用いた将来シナリオの定量化
(S-12-2)

平成26年度～平成30年度

Development of Integrated Assessment Model for SLCP Analysis and Quantification of Future Scenarios

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

みずほ情報総研株式会社

京都大学

〈研究協力機関〉

中国 国家発展和改革委員会能源研究所、中国科学院広州能源研究所、

中国環境科学研究院

インド インド経営大学院アーメダバード校、ボパール建築計画研究所、

アーメダバード大学

タイ アジア工科大学、タマサート大学、キングモンクット大学

インドネシア ボゴール農業大学、バンドン工科大学

マレーシア マレーシア工科大学

ネパール アジア技術経営大学

韓国 国立ソウル大学校、ソウル市立大学校、国立環境科学院

令和1年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 世界を対象とした統合評価モデルの改良とそれを用いた排出シナリオの定量化	20
（国立研究開発法人国立環境研究所）	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 国・地域を対象とした統合評価モデル開発と排出シナリオの定量化	55
（みずほ情報総研株式会社）	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-3 都市スケールにおける排出シナリオの定量化と大気汚染影響の評価	79
（京都大学）	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	

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

III. 英文Abstract 93

I. 成果の概要

課題名 S-12-2 統合評価モデルの改良とそれを用いた将来シナリオの定量化
 課題代表者名 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
 統合環境経済研究室 室長）
 研究実施期間 平成26～30年度
 累計予算額 274,833千円
 （うち平成26年度：58,470千円、平成27年度：55,547千円、平成28年度：52,770千円、
 平成28年度：55,408千円、平成28年度：52,638千円）
 累計予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 統合評価モデル、将来シナリオ、気候変動、SLCP（短寿命気候汚染物質）、
 温室効果ガス、大気汚染、相乗効果・相殺効果、アジア

研究体制

- (1) 世界を対象とした統合評価モデルの改良とそれを用いた排出シナリオの定量化
 （国立研究開発法人国立環境研究所）
- (2) 国・地域を対象とした統合評価モデル開発と排出シナリオの定量化（みずほ情報総研）
- (3) 都市スケールにおける排出シナリオの定量化と大気汚染影響の評価（京都大学）

研究協力機関

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

1. はじめに（研究背景等）

2015年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（COP21）では、各国が、産業革命前からの平均気温上昇を2℃未満に抑えることと、温暖化リスク低減と温暖化影響を減ずることに大きく貢献することを認識し、1.5℃未満に抑えるよう努力することが明記されたパリ協定に合意した。一方で、COP21までに各国が提出した約束草案に記載されている2020年以降の排出削減目標を積み上げても、2℃目標を達成する排出経路を大きく外れた状況であり、目標と現実の取り組みの間には大きなギャップが存在する。このことから、2℃目標の達成には、あらゆる手立てを講ずる必要があるといえる。

こうした状況の中、短寿命でありながら気温変化にも影響する短寿命気候汚染物質（SLCP）について対策を行い、長寿命の二酸化炭素等のGHG排出削減を補完しようといった動きが見られる。これは、途上国における大気汚染対策の対象となるガス種（BCやエアロゾル）も含まれており、特に大気汚染の深刻な途上国において受け入れられやすいと考えられ、近年、注目を集めている。UNEP(2011)が示している図1のように、長寿命のGHGのみならず、CH₄やBCなどの短寿命のSLCP対策を行うことは、将来の気候の安定化に向けて重要な取り組みになるといえる。

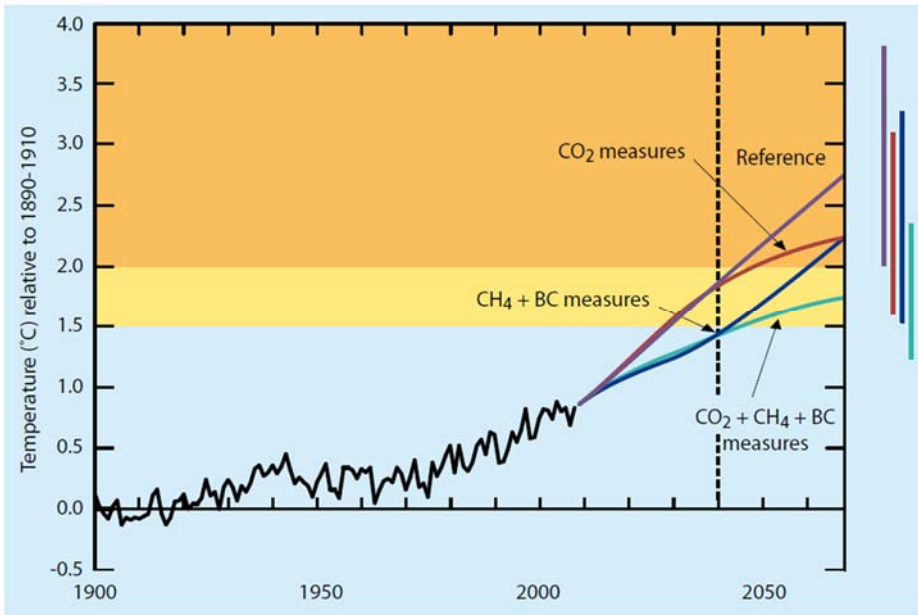


図1 UNEP(2011)に示されるCO₂対策とCH₄やBCも含めた対策時の気温上昇の変化

引用文献:

UNEP (2011) Near-term Climate Protection and Clean Air Benefits: Actions for Controlling Short-Lived Climate Forcers

2. 研究開発目的

本研究課題では、2°C目標等の将来の気候安定化の目標に向けて、世界、国、都市といった異なるスケールを対象に、それぞれの排出シナリオを定量化するためのモデルを開発するとともに、開発したモデルを用いて、様々な対策を含めた将来シナリオを定量化することを目的としている。特に、これまでの将来シナリオは長寿命の温室効果ガス(LLGHG)を対象として検討されてきたが、これをSLCPIに拡張したときの排出シナリオを、具体的な対策メニューに基づいて明らかにする。また、本研究課題で示される将来シナリオは、テーマ3において将来の気候変化や環境影響を評価する際の入力となり、そうした環境影響を踏まえた将来シナリオの分析も本研究課題の目的の1つとする。図2に、環境研究総合推進費S-12の全体像と本研究課題(S-12-2)の関係を示す。

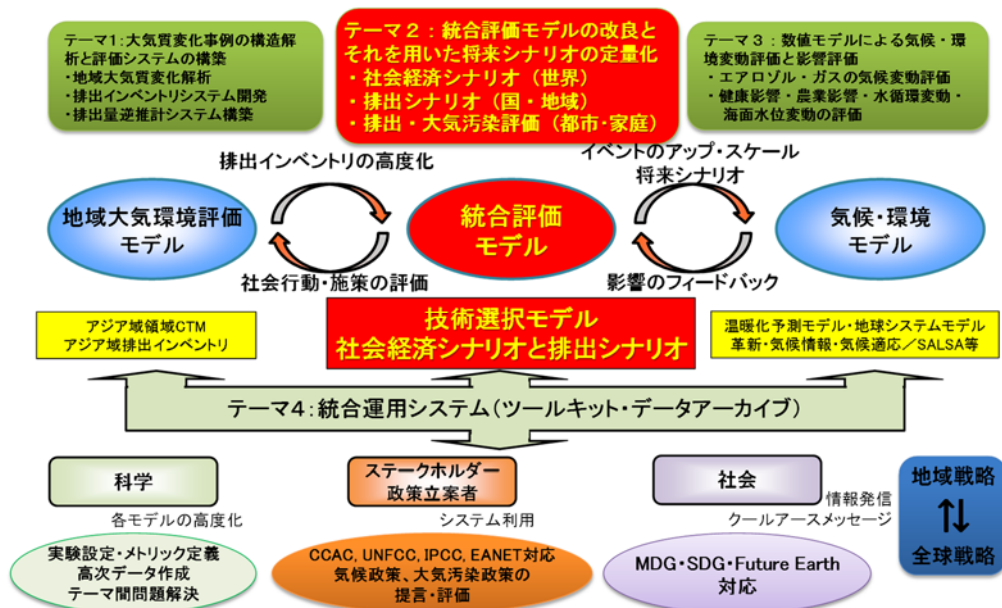


図2 環境研究総合推進費S-12の全体像と本研究課題(S-12-2;テーマ2)の位置付け

3. 研究開発の方法

本テーマでは、分析対象を世界、国、地方（都市、農村）といったスケールでモデル開発を行い、それぞれのスケールでの社会経済情報や排出インベントリが整合するように情報を共有して、将来の排出シナリオを定量化している。各サブテーマ間の関係を図3に示す。

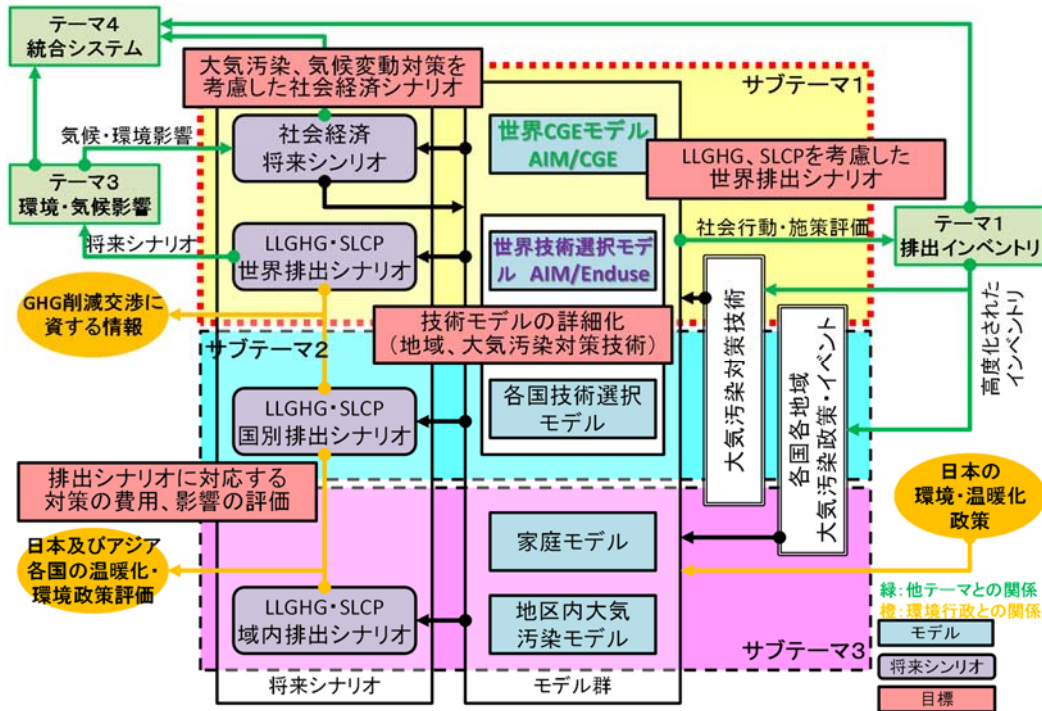


図3 S-12-2における各サブテーマ間の関係

(1) 世界を対象とした統合評価モデルの改良とそれを用いた排出シナリオの定量化

サブテーマ1では、これまで将来の世界の地域別GHG排出シナリオを提供してきた世界技術選択モデルであるAIM/Enduse [Global]について、SLCP対策についても検討が可能となるようにモデル改良を行い、世界地域別・部門別の将来のLLGHG及びSLCPの排出シナリオを定量的に明らかにすることを目的としている。世界を対象とした技術選択モデルの推計フローを図4に示す。このモデルでは、地域別・部門別の排出削減量や削減費用を比較できるように、主要なGHG排出国に注目して世界を32地域に分類し、評価対象部門はエネルギー供給部門、エネルギー需要部門、非エネルギー部門の主要な部門を網羅し、一国あるいは一地域に適用して、部門を統合して2050年までのシミュレーションを行う。

本研究は、主に3つの要素で構成されている。まず、将来の社会経済シナリオを定性的・定量的に設定する。世界各国の人口・GDPなどのなりゆき社会像については、IPCC AR5以降の国際モデル比較研究で用いられている共通社会経済シナリオ（SSP: Shared Socioeconomic Pathways）を用いた。SSPには5つの異なる社会像があるが、図5に温暖化対策と大気汚染対策の側面からみたSSPシナリオの概念を示す。本研究では、現在までの温暖化対策・SLCP対策・大気汚染対策の傾向の延長上の中庸ななりゆきの社会像（SSP2）をReferenceとして設定し、さらに対策が強化されていく社会像（SSP1）、現在の政策・対策がうまく進まない社会像（SSP3）の3通りについて分析した。次に、SSPシナリオで設定した将来の人口・GDPなどの社会経済動態をもとに、部門別のサービス需要推計モデル群を用いて、地域別・国別に粗鋼生産量、セメント生産量、旅客輸送量などの部門別の将来の最終サービス需要量を推計した。そして最後に、AIM/Enduse [Global]を用いて、上述で推計した部門別の最終サービス需要量を満たし、エネルギーの需要と供給が均衡した状況において、総費用（初期費用、運転費用などの合計）を最小化するように技術データベースから技術選択を評価し、将来のエネルギー・非エネルギー財の消費・削減量およびそれに伴う各種ガスの排出量・削減量を推計した。

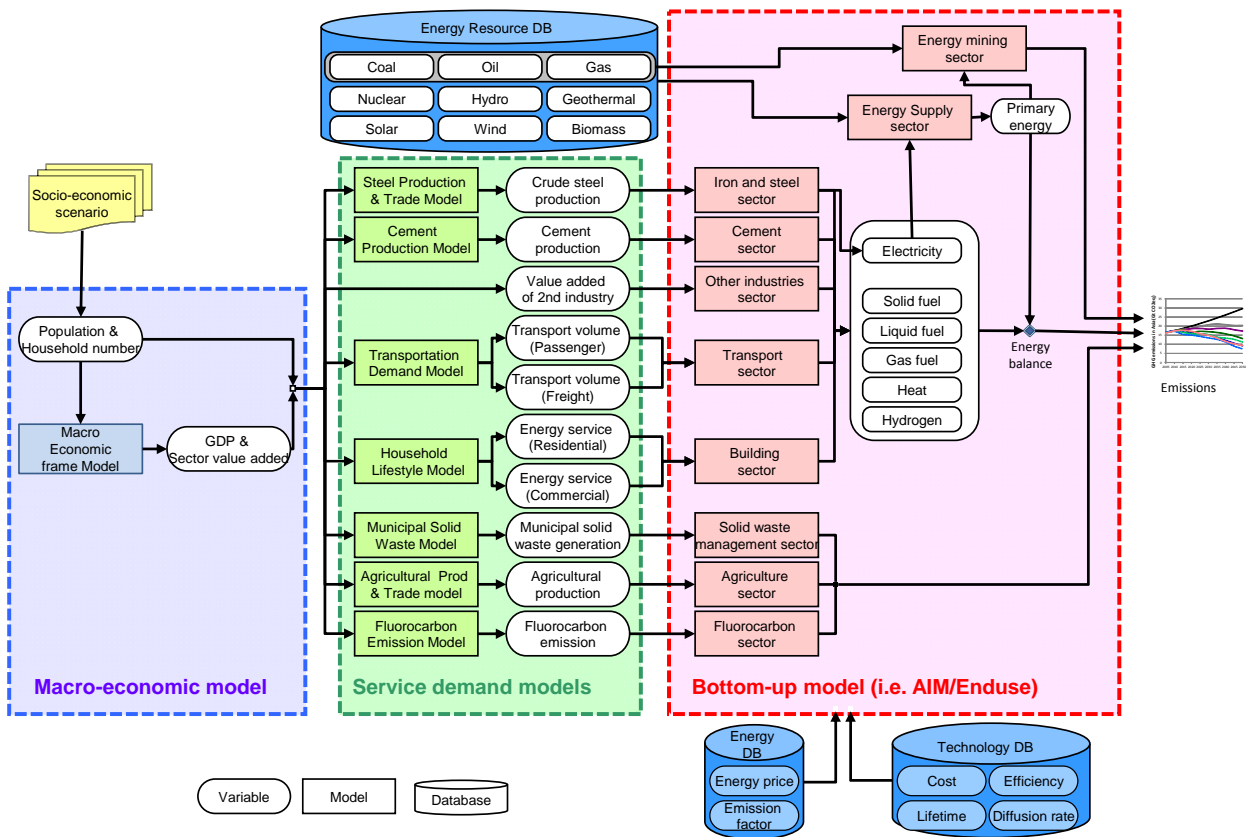


図4 世界を対象とした技術選択モデルの推計フロー

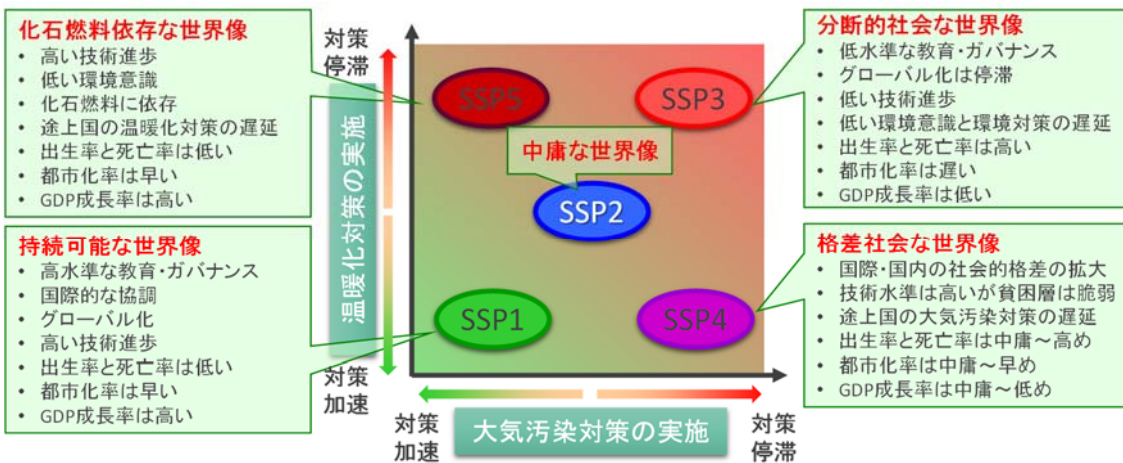


図5 なりゆき社会として想定した共通社会経済シナリオ(SSPシナリオ)の概要

ガス種別に主要な排出発生源が異なるため、発生源の特徴に応じて適切な対策を評価する必要がある。温暖化対策、SLCP対策、大気汚染対策について様々な対策技術があるが、大きく分類すると、①環境汚染物質の排出源に除去装置・回収装置を設置し直接的に排出削減する対策(例:脱硫装置、脱硝装置、集塵装置、CO₂分離回収装置等)、②燃料の品質の向上により排出削減する対策(例:燃料含有硫黄分の少ない燃料への転換)、③省エネルギー技術普及によってエネルギー消費量を減らすことで排出削減する対策(例:高効率機器による燃焼効率・発電効率の改善等)、④大規模な燃料転換や革新的技術の導入により再生可能エネルギーへの燃料転換することにより排出削減する対策(例:石炭から再生可能エネルギーへの転換、水素燃料技術の普及等)、の4つに分類され、同じ対策グループ内の対策でも対象とするエネルギー種・ガス種によって削減効果は異なるため、技術の組み合わせの評価が重要になる。対策の効果が期待される主要な部門・ガス種・技術種の概要を表1に示す。

表1 削減効果が期待される主要な排出部門、排出ガス種、排出量削減対策の概要

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂	NO _x	BC	OC	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	NH ₃	NM VOC
エネルギー供給部門	①③④			①②③④	①③④	①③④	①③④	①③④	①③④			
燃料採掘部門		①										
産業部門	①③④		③④	①②③④	①③④	①③④	①③④	①③④	①③④	③④		③④
運輸部門	③④		③④	①②③④	①③④					③④		③④
民生・業務部門	③④	③④	③④	③④	③④	③④	③④	③④	③④	③④		③④
廃棄物部門		①	①									
農畜産・農耕作部門		①	①								①	

同一ガス種で排出量が最も大きい部門
 同一ガス種で排出量が比較的大きい部門
 同一ガス種で排出量が次に大きい部門
 同一ガス種で排出量小さい(又はない)部門
 補足) ①～④は、主な4つの対策技術グループの分類を表す

本研究では、排出量及び削減効果の大きい部門・ガス種・対策技術種に注目し、温暖化対策、SLCP対策、大気汚染対策の広範囲な組み合わせと対策導入の効果を検討し、パリ協定で合意された2℃目標シナリオ相当の低炭素対策を導入したときの評価対象ガス種の同時削減効果や相殺効果の分析を行った。そして、テーマ1、テーマ3およびテーマ4とのテーマ間連携に向けて、大気汚染対策による健康被害・環境影響の軽減と温暖化対策およびSLCP対策による温暖化影響を評価することを目的とした「S12共通シナリオ」を開発した。特に、テーマ1、テーマ3とともに各評価対象ガス種の削減による環境影響・健康影響へのメリット・デメリットの最新の知見を整理し、1次大気汚染物質としてのSLCP(BC, CH₄)と、大気化学反応の結果で生成される二次大気汚染物質であるSLCP(対流圏O₃)の違いを考慮してSLCP削減シナリオを検討できるように、BCやCH₄の排出源に対する「直接的な削減対策」と、対流圏O₃の前駆物質であるNO_x, CO, NMVOCの排出源に対して対策を取ることで対流圏O₃生成を抑制する「間接的な削減対策」に注目し、広範囲な対策の組み合わせの差異による相乗・相殺効果の特徴を分析し、テーマ間連携に必要とされるSLCP削減シナリオを作成した。また、将来のなりゆきシナリオが、アジア諸国における評価対象ガス種について、テーマ1が開発した「アジア域排出インベントリスシステム(REAS)」の過去から現在までの時系列の傾向に準ずるように、将来排出シナリオの精緻化を行った。

本研究で用いる世界技術選択モデルは逐次動的最適化に基づいた分析手法であり、様々な知見と多大な計算時間が必要され、一般ユーザー向けではない。そこで、政策決定者を含めた一般ユーザーが独自にシナリオを検討し、評価対象ガス種の排出量、削減量だけでなく、環境影響や健康影響を簡易に評価できるように、テーマ1、テーマ3およびテーマ4と連携して、タブレット上でも挙動するブラウザ版簡易評価ツールを開発した。

また、サブテーマ2とともに、中国、インドの地域(中国の省やインドの州)の特徴を考慮した技術選択モデルの開発を行い、サブテーマ3とともに、家庭におけるエネルギー選択と電化による影響を考慮した技術選択モデルの開発を行い、温室効果ガス、SLCP、大気汚染物質の排出シナリオの推計を行った。このほか、テーマ3に提供した排出シナリオをダウンスケールしたメッシュデータは、地域別の活動毎に現状の排出を基礎としてパターンスケール化する簡易なツールを用いたものであるが、地域の環境影響を評価する際には、より詳細な評価が必要となる。とりわけ、大規模発生源と呼ばれる特に排出量の大きい排出源を特定することが重要となる。そこで、排出量のダウンスケールの際に、大規模発生源の変化を考慮することができるようなモデルの開発も行った。本研究で開発したダウンスケール手法では、中国の鉄鋼部門を対象に、シナリオで想定される将来のサービス需要量の増減を満たし、かつプラントの統廃合および新設の立地条件(土地制約、資源制約、インフラ制約、社会経済制約など)を考慮したものとなっている。

さらに、技術選択モデルに加えて、対策や環境影響による経済活動への影響を定量的に評価する国別の経済モデル(応用一般均衡モデルであるAIM/CGE)を大気汚染による健康被害等が分析できるように改良し、テーマ3等で分析された物理的な被害を経済的に評価した。特に、中国については、PM_{2.5}やO₃による健康影響について、医療サービスの増加や労働力の減少による影響が省別に反映できるようにモデルの改良を行った。

(2) 国・地域を対象とした統合評価モデル開発と排出シナリオの定量化

サブテーマ2では、国を対象に、「1. 地域スケールの技術選択モデルの開発」、「2. 地域毎のLLGHG、SLCP

排出シナリオの作成」、「3. 異なるスケールでのLLGHG、SLCP将来シナリオ定量化」に貢献することを目的としている。これらの目的1～3に資する作業として、① エンドオブパイプ技術のデータ構築、② エンドオブパイプ技術のデータを実装した技術モデルの開発それを用いた中国・インドの国レベルの排出量推計、③ 中国・インドの地域レベルの排出量推計を実施した。

作業①では、発電・産業部門のエンドオブパイプ技術の技術情報やコスト、市場規模等の情報について、文献値のデータの収集・整理を行い、作業②以下で用いるエンドオブパイプ技術のインプットに資するデータ構築を実施した。

作業②では、地域ごとの特性に合わせたLLGHGやSLCPの排出量の分析が可能となるよう、国別技術選択モデルAIM/Enduseの改良作業をまず実施した。具体的には、サブテーマ1で推計された大気汚染物質の排出量、及び排出除去技術の導入率を詳細に再現できるように、省エネルギー技術のメニューに加え、大気汚染対策技術のメニューを用意した技術モデルの構築を行った。推計に用いた改良前の技術選択モデルAIM/Enduseの推計フローは、図4に示したサブテーマ1で用いた世界モデルと同様のものである。これに対して、図6に示すように、発電部門と産業部門のタービンやボイラーから排出される大気汚染物質について「排煙脱硝装置」「集塵装置」「排煙脱硫装置」を、さらに脱硝装置の前の「燃焼条件調節」技術を用意した。すなわち、省エネルギー技術のみを想定していたエネルギー・サービスフローを変更して、大気汚染対策技術を配置するとともに、これらの大気汚染対策技術についても費用最小化による技術選択の再現を可能にするように改良を施した。

作業②において、このようにして収集したデータ及び改良版AIM/Enduseを用いて、中国、インドのなりゆきシナリオ、対策シナリオにおけるLLGHG及び一部のSLCP、またSLCPと関係性の深い大気汚染物質の国レベルの排出シナリオの検討を行い、排出量の推計や排出削減要因分析、気候変動緩和策及び大気汚染対策の導入コストの算定を行った。CO₂、SO₂、NO_x、BC、OC、PMを分析の対象とし、2010年を基準年として2050年まで推計を行った。サブテーマ1によって推計されたなりゆきシナリオ及び対策シナリオの世界レベルでの排出シナリオと整合するような中国・インドの国別の排出パスを制約条件として推計を実施した。なお、推計の実施に当たっては、中国能源研究所、インド経営大学院、アーメダバード大学、ポパール建築計画研究所の研究者と連携して、中国、インドにおけるCO₂、SO₂、NO_x、BC等の将来の排出動向、大気汚染対策技術の諸元（大気汚染物質削減量、普及率、等）、LLGHGならびにSLCPの排出動向に影響を及ぼす各種イベントに関するデータ収集を行った。

作業③では、作業②で創出した中国・インドの国レベルでの推計結果について、地域毎の社会経済指標のデータを用いてダウンスケールを実施し、CO₂やSO₂、BCなどの温室効果ガス・大気汚染物質・SLCPの排出動向について地域スケールでの排出量推計及び分析を実施した。

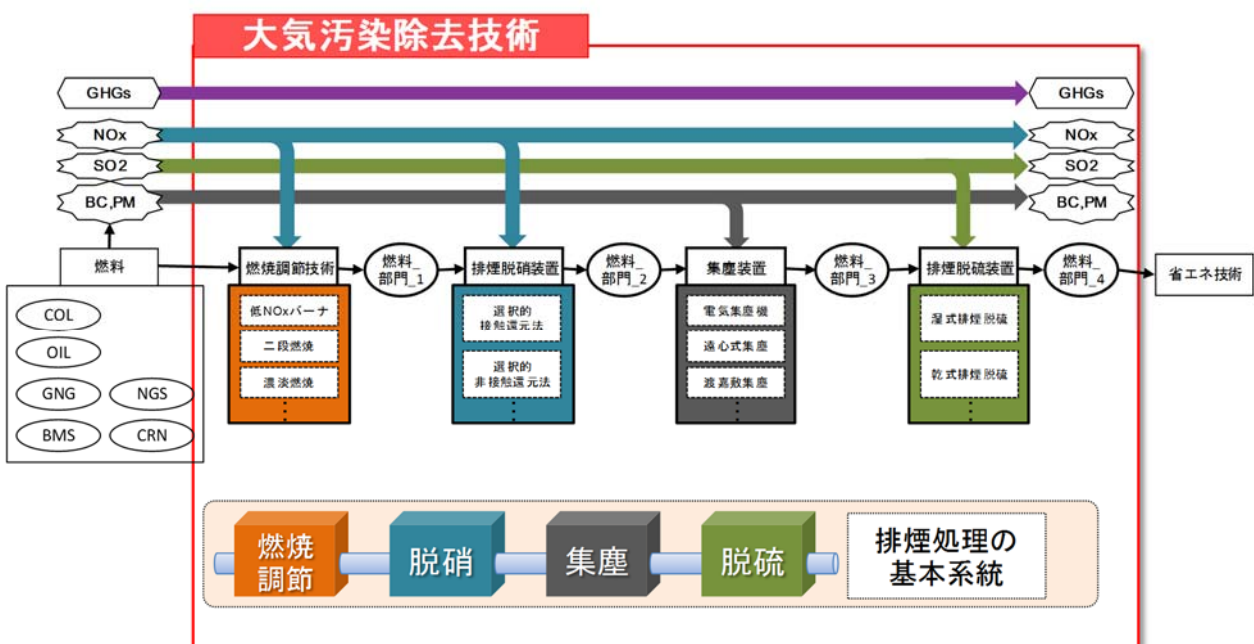


図6 国・地域を対象とした技術選択モデルにおいて改良した推計フロー

(3) 都市スケールにおける排出シナリオの定量化と大気汚染影響の評価

サブテーマ3では、都市や地方、家庭を対象としたLLGHGやSLCPの排出シナリオの推計やその前提となるエネルギー需給についての定量化を目的とした分析を行った。

家庭起源のLLGHGとSLCPの排出量を推計するために、まず、家庭での用途(調理、暖房、冷房、給湯、照明等)別に、国レベルだけでなく地域レベルでのエネルギー消費の状況を反映したエネルギー消費量の推計を行う必要がある。特に、調理や暖房のエネルギー消費の状況に関しては、推計対象国の気候や経済状況の地域的な特徴にも対応できる推計を行うことが重要となる。従来、家庭部門のエネルギー消費量の推計には、各部門のエネルギー需要を、回帰モデルを用いて推計する計量経済学的なアプローチで行われているが、このアプローチは国全体で一律な推計に適しており、エネルギー消費に関する地域的な特徴を反映した推計には向いていない。そこで、サブテーマ3では、推計対象国における地域別、都市・農村別の各用途のエネルギー消費量を、詳細な統計データの分析をもとに所得水準などの要素を組み込んで将来推計する手法を開発し、ボトムアップ的なアプローチによって、家庭起源のSLCP排出量を推計する。

まず、世界や国における排出シナリオと整合させるために、サブテーマ1で使用されているSSPと呼ばれる社会経済シナリオをダウンスケールし、民生部門における屋内大気汚染物質を対象とした排出シナリオの定量化を行う。分析には技術選択モデルであるAIM/Enduseを使用する。図7に分析のフローを示す。分析においては、エネルギーサービス需要量の推計を行うとともに、AIM/Enduseにおいて評価するエネルギー消費技術に関する情報の収集、さらには、屋内大気汚染を評価するための排出係数の見直し等を行った。対象とする物質は、BC、CO、NOX、OC、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NMVOCである。

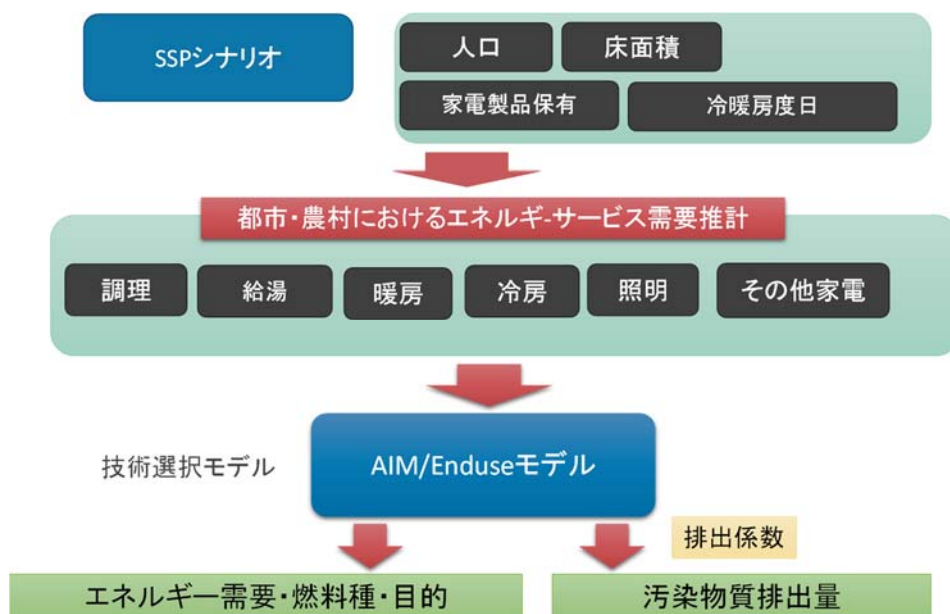


図7 家庭を対象とした詳細な汚染物質排出量の推計フロー

また、アジア各国の自家用車を含めた都市交通部門における温室効果ガスおよび大気汚染物質の排出量とその削減可能性を定量的に推計するために、AIM/Enduseモデルを用いて、日本・韓国・中国・インドネシア・インド・タイ6ヶ国について、2010年を基準年として、2050年までの将来推計を基準シナリオおよび排出税シナリオ、公共交通機関分担率向上シナリオ、組み合わせシナリオの4つで比較を行った(表2参照)。図8に分析に用いた推計フローを示す。

表2 交通起源の排出量推計で設定したシナリオ

コード	シナリオ名	定義
Ref	基準シナリオ	規制は設けない
CM1	排出税50	全ガスの排出に対して50US\$/tonの排出税を課す
CM2	公共交通向上シナリオ	旅客部門：鉄道の機関分担率が2035年に28.6%に達する。 貨物部門：鉄道の機関分担率が2035年に29.3%に達する。
CM3	組み合わせシナリオ	CM1とCM2の組み合わせ

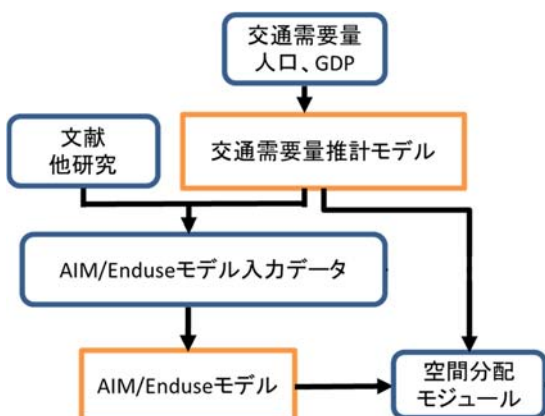


図8 交通起源大気汚染物質の推計フロー

また、家庭部門の用途別のエネルギー需要量の算定にあたっては、特に調理エネルギーの消費量の地域による違いを分析するため、中国を対象に、詳細な地域別、燃料種別の調理エネルギー需要量の推計を試みた。そのために、1人当たりの調理エネルギー消費量に関する調査・研究報告、調理エネルギー消費の燃料別シェアと調理用機器効率に関する調査・研究報告も収集し、調理エネルギー需要量を推計した。

4. 結果及び考察

(1) 世界を対象とした統合評価モデルの改良とそれを用いた排出シナリオの定量化

これまでに開発してきた世界を対象とした技術選択モデルであるAIM/Enduse [Global]について、温暖化対策、SLCP対策、大気汚染対策の検討が可能となるように改良し、パリ協定で合意された2°C目標シナリオ相当の低炭素対策を導入したときの評価対象ガス種の同時削減効果や相殺効果の分析を行った。また、テーマ1、テーマ3およびテーマ4とのテーマ間連携に向けて、大気汚染対策による健康被害の軽減と温暖化への影響の相対的な評価を目的にしたS12共通シナリオの探索を行った。

まず、技術選択モデルへの入力データとして必要な、将来の世界の地域別・部門別のサービス需要量を、サービス需要推計モデルを用いて推計した。将来のサービス需要量は、現在までの人口や経済成長などの社会経済指標とサービス需要量との相関関係に基づいて想定される関数およびパラメータだけでなく、将来の社会経済指標の動向によっても国別・部門別に特徴は異なる。そこで、国際モデル比較研究で用いられる共通社会経済シナリオ(SSP)を用いた。特に、現在までの温暖化対策・SLCP対策・大気汚染対策の傾向の延長上の中庸な社会像(SSP2)をReferenceとして設定し、さらに対策が強化されていく社会像(SSP1)、現在の政策・対策がうまく進まない社会像(SSP3)の3通りについて分析した。次に、推計されたエネルギーサービス需要量を満たし、各エネルギーの需要と供給が均衡するように総費用最小化のもとで技術選択をした結果による温室効果ガス、SLCP、大気汚染物質の排出量を分析した。その結果、2°C目標の実現に向けた低炭素社会シナリオは技術的に可能であり、大規模な燃料転換や省エネ技術の導入の促進により、大気汚染物質やSLCPの排出量も同時に大幅に削減できることが示された。

しかし、燃料燃焼によって排出されるSO₂、NO_xなどの大気汚染物質には地域的な冷却効果があるため、地球温暖化対策のための化石燃料から再生可能エネルギーへの転換は、大気汚染対策にもなるが、同時に温暖化を促進してしまう可能性がある。そこで、健康影響は軽減するが地域的な冷却効果の増加に影響を及ぼすSO₂削減と、健康影響の軽減および温暖化の低減の双方に影響を及ぼすBC削減に注目し、削減傾向の相関関係を分析したところ、従来のようなCO₂大幅削減に注目した温暖化対策ではSLCPの視点から不十分であり、温暖化を効率的に緩和するには、同時に効果的にSLCP削減対策を実施することが必要で、より広範な排出削減シナリオの可能性の探索が必要であることが示唆された。

そこで、2°C目標シナリオの実現に向けた低炭素対策を取りつつ、健康影響・環境影響を軽減させ、さらに2°C目標シナリオの実現を後押しするようなSLCP削減シナリオを検討し、テーマ1、テーマ3およびテーマ4とのテーマ間連携にむけたS12共通シナリオの探索を行った。国別・部門別・ガス種別に排出増減の傾向が異なり、またガス種別に大幅削減にむけた有効な対策の組み合わせが異なるため、様々な対策の組み合わせを分析し、最終的に表3に示すような9つのシナリオについて、相乗効果・相殺効果の傾向を解析した。その結果、CO₂排出経路およびGHG排出経路は類似していても、対策技術の組み合わせ次第で、大気汚染物質(SO₂、NO_x、OC、PM、CO、NMVOC)およびSLCP(BC)の排出経路は大きく異なることが分かった。特に、SLCP削減シナリオとして、BCやCH₄の排出源に対する「直接的な削減対策」と、NO_x、CO、NMVOCの排出源に対して対策を取ること対流圏O₃生成を抑制する「間接的な削減対策」に注目すると、1)発電部門における電源構成(石炭または再生可能エネルギーを優先する)、2)発電・産業部門におけるCO₂回収貯留、3)家庭・業務・運輸部門における電化率の促進、および4)発電・産業・運輸部門における除去装置導入の促進、に関する将来シナリオの設定が、結果に影響を与えることが分かった。対策の導入強度および組み合わせを考慮して開発したS12共通シナリオの結果について、図9に主要なガス種の排出経路、図10に主要なガス種の削減経路の相関関係を示す。その結果、1) BCを大幅削減しつつ、健康影響を考慮してSO₂も十分に削減し、2) 対流圏O₃の抑制のために前駆物質であるNO_x、CO、NMVOCを削減し、かつ大気中CH₄増加の抑制のためにNO_x、COを同時に削減し、3) SO₂、NO_x、NMVOC削減による地域的な冷却効果の低減(=温暖化影響の増加)による相殺効果、を考慮すると、「2°C目標を再生可能エネルギー強化、民生・運輸での電化促進、汚染除去対策は強化継続(2D-EoPmid-RESBLDTRT)」が、総合的にSLCP削減シナリオとして有効であると考えられた。

また、本モデルは政策決定者を含めた一般ユーザー向けではないため、ステークホルダーが独自にシナリオを検討し、評価対象ガス種の排出量、削減量だけでなく、環境影響や健康影響を簡易に評価できるように、テーマ1、テーマ3およびテーマ4と連携して、タブレット上でも挙動するブラウザ版簡易評価ツールAIM/SLCP (Scenario Lookup by Coalition for Protecting environment tool)を開発し、http://www-iam.nies.go.jp/aim/data_tools/S12/にて公開している。

表3 テーマ間連携に向けた9つのS12共通シナリオの概要

シナリオグループ	シナリオコード名	グラフ	主な低炭素対策・大気汚染対策・短寿命気候汚染物質対策の組合せ					
			除去対策強化	2度目標低炭素対策	CO ₂ 回収貯留(CCS)強化	再生可能エネルギー強化	民生部門電化強化	運輸部門電化強化
なりゆき	Ref							
除去対策のみ	EoPmid		Mid					
	EoPmax		Max					
2°C目標 +除去対策	2D-EoPmid-CCSBLD		Mid	✓	✓		✓	
	2D-EoPmax-CCSBLD		Max	✓	✓		✓	
	2D-EoPmid-RESTRT		Mid	✓		✓		✓
	2D-EoPmax-RESTRT		Max	✓		✓		✓
	2D-EoPmid-RESBLDTRT		Mid	✓		✓	✓	✓
	2D-EoPmax-RESBLDTRT		Max	✓		✓	✓	✓

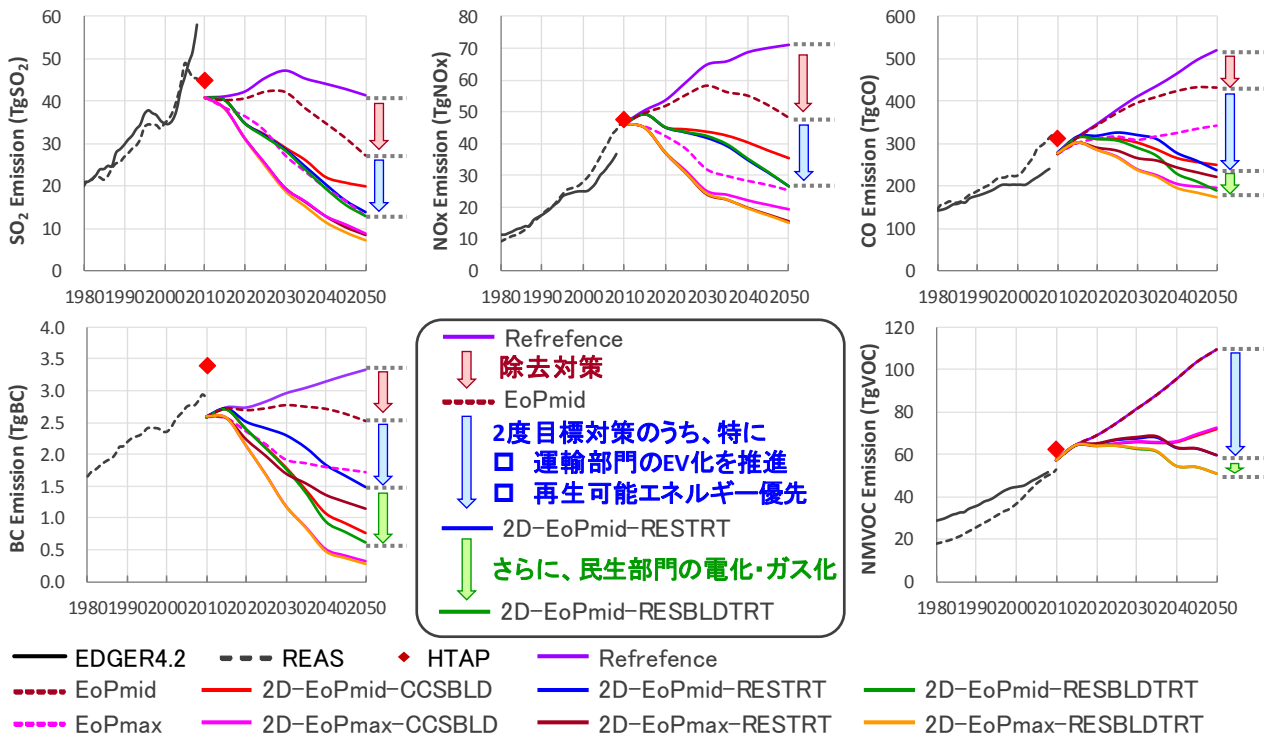


図9 テーマ間連携に向けたS12共通シナリオ:アジアのSLCP, 大気汚染物質の排出経路

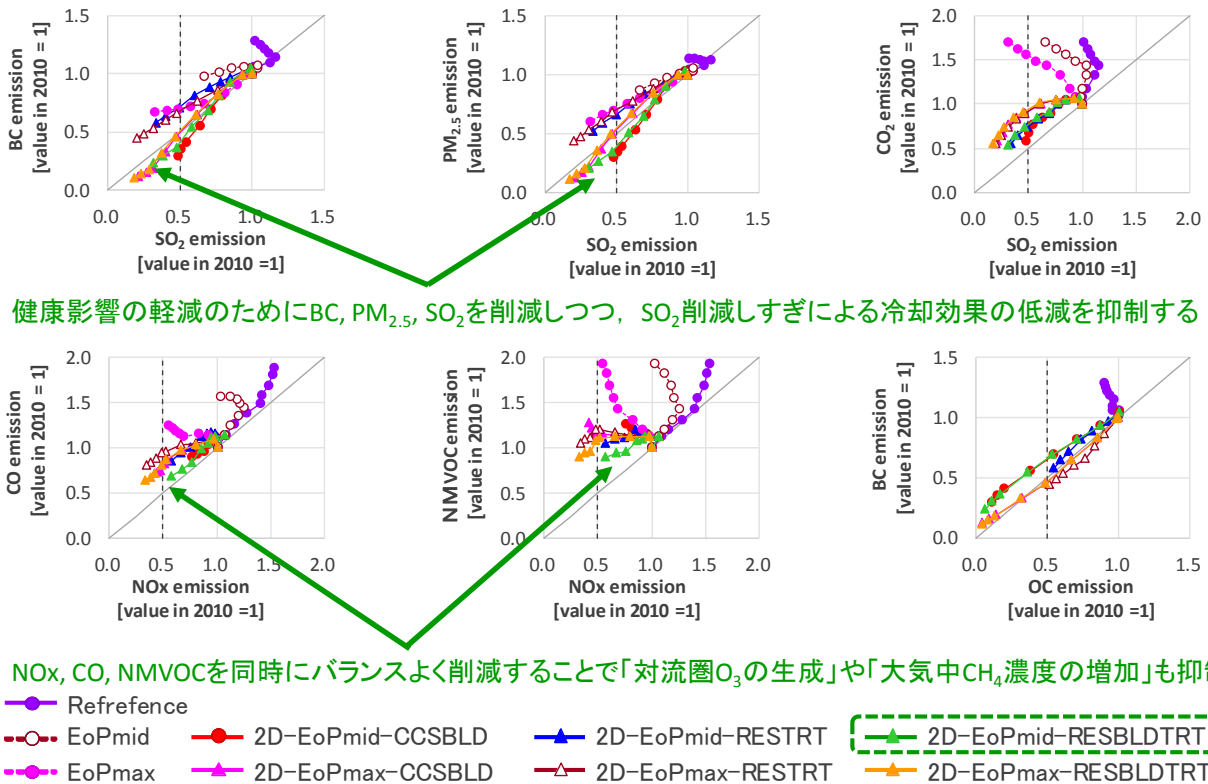


図10 アジアにおけるガス種別排出削減経路の相関関係(2010年値を基準として2050年までの評価)

本研究で開発した大規模発生源を考慮した排出量ダウンスケール手法を用いて、中国の鉄鋼業における大規模発生源がどのように変化するかを明らかにした。図11は、2030年と2050年における鉄鋼のプラント別生産量を2017年と比較したものである。この結果は、国全体の将来の鉄鋼需要量の増減に加えて、現在稼働しているプラントの寿命や、新設時の立地条件の制約を考慮し、プラントごとの位置とその生産量を示したものである。この大規模発生源情報を元に、国全体のSLCP, 大気汚染物質の排出量を配分し、地域別の特徴を評価した。

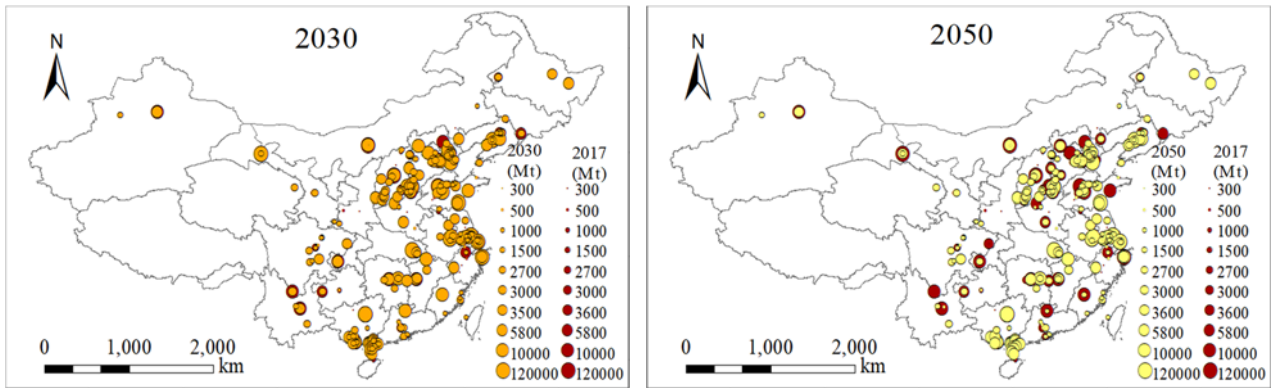


図11 中国の鉄鋼需要量の増減、プラントの統廃合(寿命)、現状の立地条件等を考慮した2030年、2050年のプラントの位置と生産容量(2017年の位置と生産容量との比較)

排出シナリオによる様々な影響を経済的な観点から評価するために、これまでに開発してきた応用一般均衡モデルと呼ばれる経済モデルAIM/CGEを、大気汚染の影響や気候変動影響を反映できるように改良したモデルを用いて、中国等における影響を評価した。図12は、2030年の中国省別のPM_{2.5}による影響を示したものである。2030年に大気汚染対策がない場合には923.7万人、大気汚染対策がある場合には233.5万人が、それぞれPM_{2.5}により死亡する結果となった。特に、河南省、山東省、江蘇省、河北省、四川省で死亡率が高い。また、PM_{2.5}による疾病は上気道疾患や喘息による通院患者が主で、2030年には対策がない場合に2.28億人、対策がある場合でも6600万人が罹患する結果となった。こうした疾病によって通院等に関する2030年の支出額は、それぞれ2063億元(GDPの0.11%)、533億元(GDPの0.027%)の追加的支出が発生する。大気汚染対策の導入により、健康被害が回避され、中国全体でGDPの0.3%の損失を回避することが可能であり、特に、上海、北京、天津、江蘇省、河南省、浙江省で対策による便益が大きい結果となった。同様の分析をオゾンについて行ったところ、2030年の中国におけるオゾンによる健康影響は、図13に示すように、なりゆきでGDPの0.034%に相当する結果となった。オゾンの場合、大気中での化学反応や自然起源の影響が大きいために、大気汚染対策を行っても被害は0.030%(0.004%の軽減)に止まることが示された。

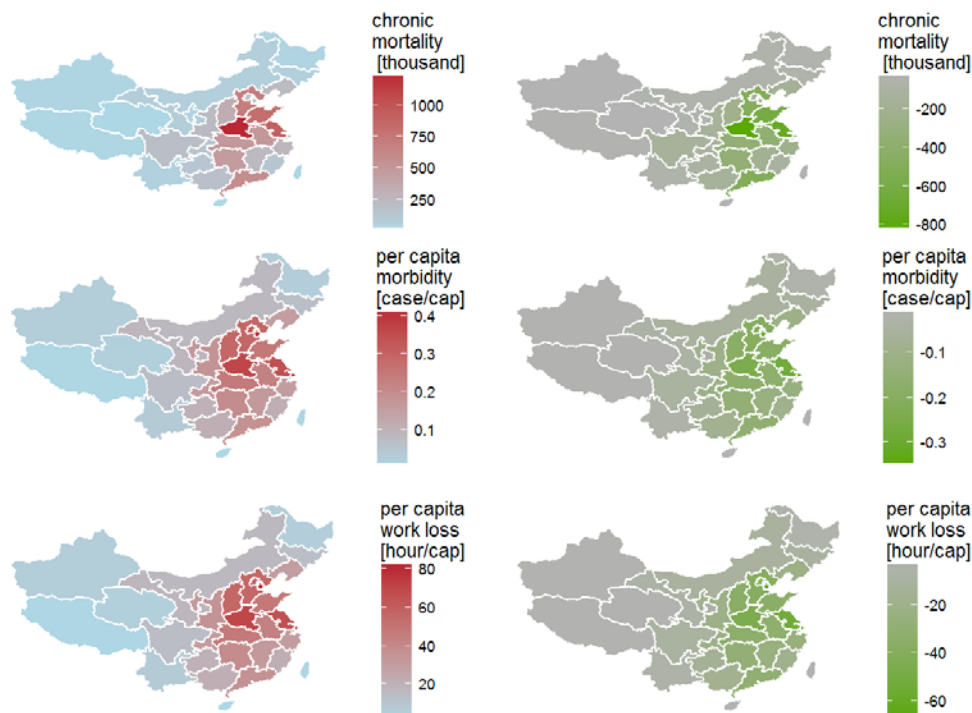


図12 中国省別のPM_{2.5}による健康被害への影響(左:大気汚染対策なし、右:大気汚染対策あり)

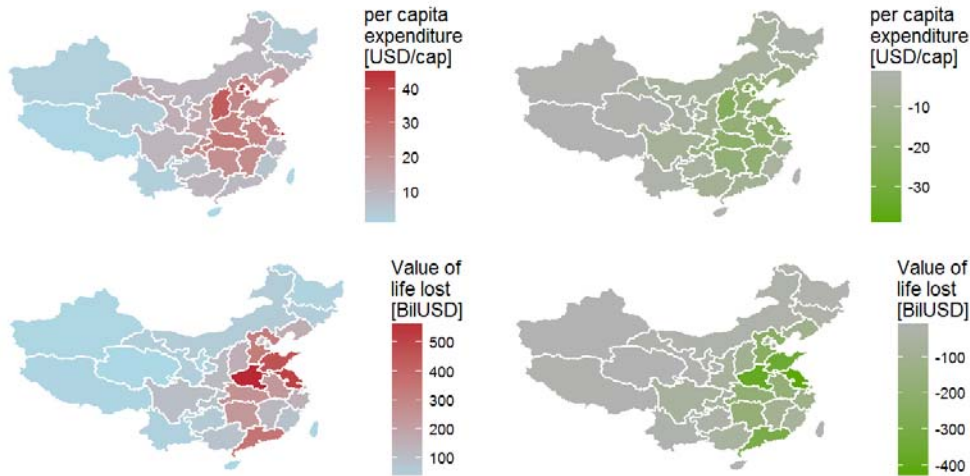


図12 中国省別のPM_{2.5}による健康被害への影響(左:大気汚染対策なし、右:大気汚染対策あり)(続き)

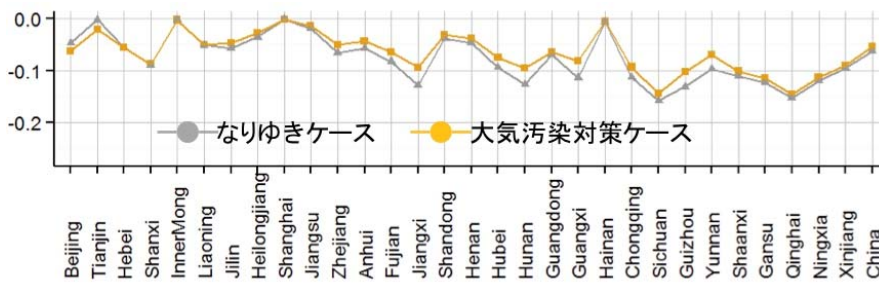


図13 2030年の中国省別のオゾンによる健康被害のGDPへの影響(%)

(2) 国・地域を対象とした統合評価モデル開発と排出シナリオの定量化

① エンドオブパイプ技術のデータ構築

エンドオブパイプ技術のデータ構築を実施した。図14に示す通り、エンドオブパイプ技術間では、脱硫装置の初期投資額が、脱硝装置及び集塵装置に比べ比較的高額であることが分かった。ただし同種の装置の中でもコストデータに幅がある点には留意が必要である。

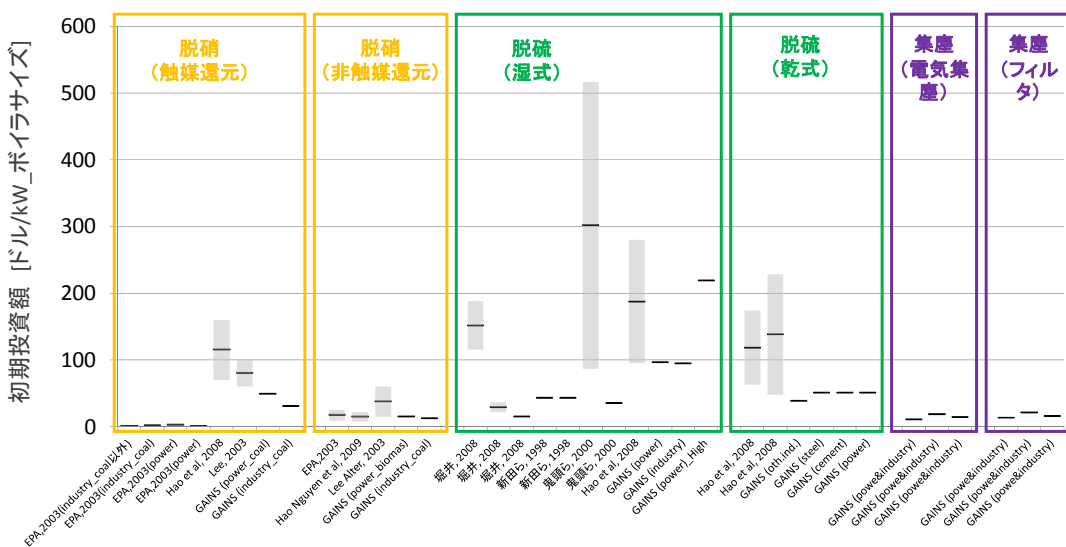


図14 エンドオブパイプ技術の初期投資額に関する文献値の比較

② 技術モデルの開発を用いた中国・インドの国レベルの排出量推計

開発・改良した国版の技術積上モデルAIM/Enduseを用い、中国及びインドのなりゆき及び対策シナリオにおける2010年(基準年)から2050年までの温室効果ガス、大気汚染物質及びSLCPの排出量の推計を行った。分析を実施した排出シナリオは、サブテーマ1の世界モデルで推計された、SSP2ベースの社会経済シナリオに基づく表3のシナリオのうち、1本のなりゆきと4本の対策シナリオに整合するものである。特に対策シナリオの1つである「2D-EoPmid-RESBLDTRT」は、世界レベルにおける気候変動緩和策及び大気汚染対策の双方の観点から相対的に望ましいとされ得ることから、部門別排出量、エンドオブパイプ技術の普及動向、気候変動緩和策がもたらす大気汚染物質・SLCPへの削減副次効果の推計といった詳細な分析を実施した。

図15には、中国2D-EoPmid-RESBLDTRTシナリオにおけるコスト最適化によるエンドオブパイプ技術の普及動向の推計結果を示す。脱硝装置については、発電部門・産業部門において2010年から2050年にかけて、普及率が上昇するか横ばいで推移するが、集塵・脱硫装置については、将来にかけて普及率が減少していく結果が見られる。これは、PM及びSO₂の排出係数が小さく、かつ集塵装置の設置が不要な天然ガスを利用した設備が増大していくためである。

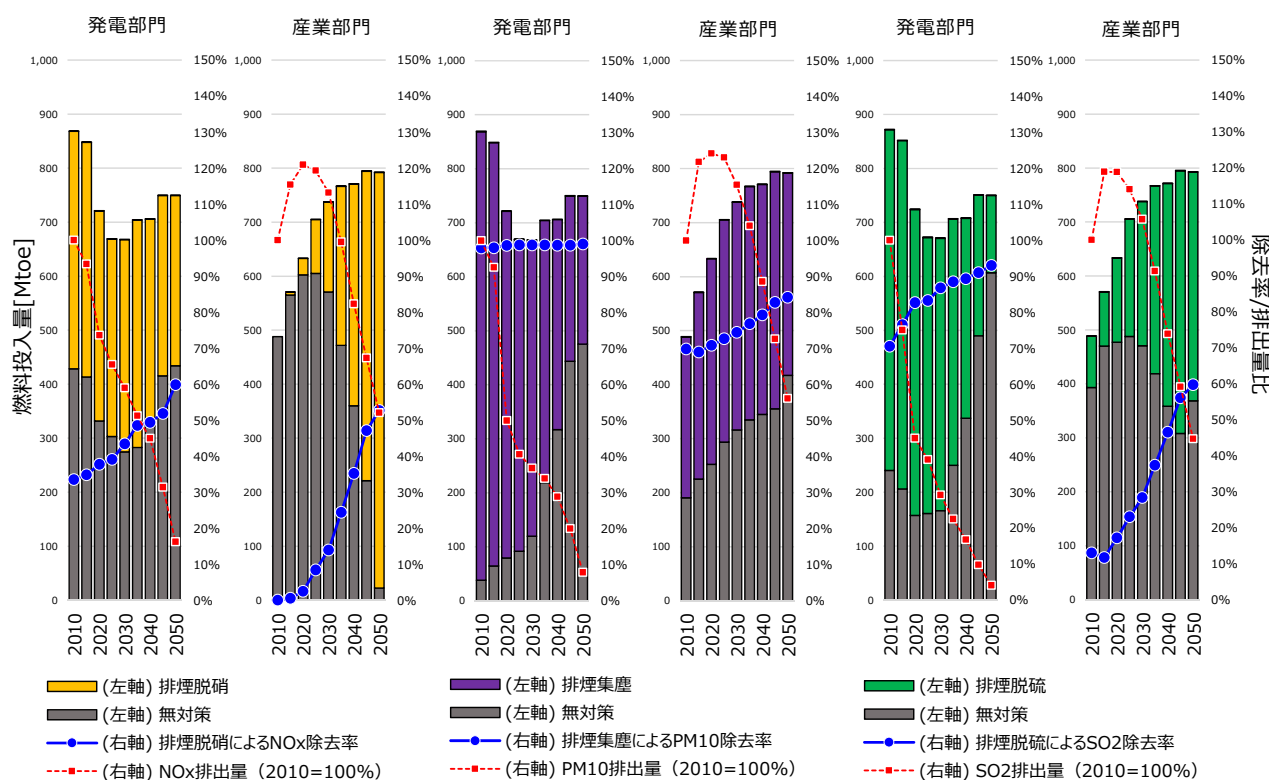


図15 中国2D-EoPmid-RESBLDTRTの脱硝(左)・集塵(中)・脱硫装置(右)の普及動向

また2D-EoPmid-RESBLDTRTシナリオに係る詳細な分析として、気候変動緩和策による副次的な削減効果を定量的に推計した。図16には、インドの2D-EoPmid-RESBLDTRTにおける、なりゆきシナリオからのSO₂・NO_x・BC排出削減寄与を、大気汚染対策である発電部門、産業部門のエンドオブパイプ技術、気候変動緩和策である電力の低炭素化及び需要側の省エネ・燃料転換に要因分解した分析結果を示す。インドのSO₂について、2010年での生成量に対する排出量の比率は96%となっている。2050年での削減寄与の内訳は、発電部門エンドオブパイプ5%、産業部門エンドオブパイプ0.4%、電力の低炭素化57%、需要側の省エネ・燃料転換38%となっており、気候変動緩和策に伴うSO₂削減効果の方が大きく、95%を占める結果となった。

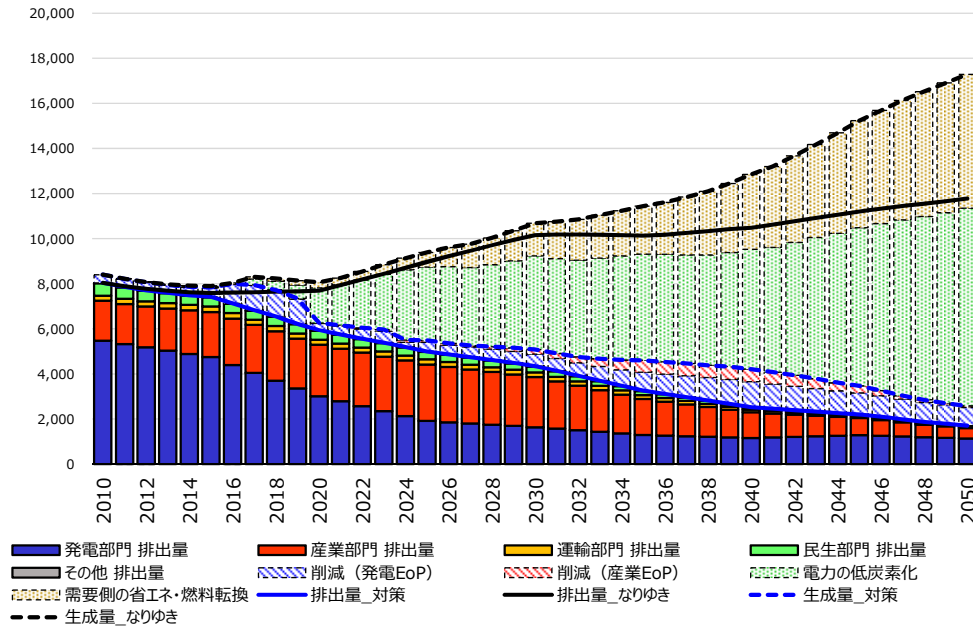


図16 インドの2D-EoPmid-RESBLDTRTのなりゆき比SO₂削減寄与

中国とインドにおける各対策シナリオについて、なりゆきケースを基準とした場合の2050年までの追加的投資の累積額についての結果を、図17に中国・インドの合算値で示した。大気汚染対策に要する費用は、気候変動対策に関連する省エネ技術などに要する費用と比較すると小さいことが明らかとなった。いずれの対策シナリオにおいても、総投資額に占めるエンドオブパイプ技術への投資の比率は、3～7%程度となり、2℃目標達成のための気候変動対策費用を含めた総累積追加的投資額は、シナリオによって大きく異なり、中国とインドの合計で2050年までに16～29兆ドルになると推計された。

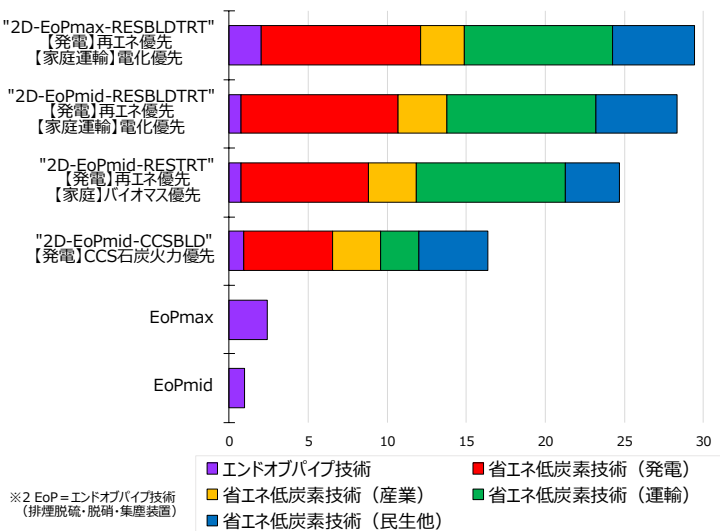


図17 2050年までのなりゆき比累積追加的投資額(中国・インドの合算値;単位:兆ドル)

③ 中国・インドの地域レベルの排出量推計

国スケールの排出量を州や省などの地域に按分(ダウンスケール)するツールを作成し、これを用いて中国・インドにおける地域別の排出シナリオの推計を実施した。ダウンスケールに用いる地域ごとの活動量指標の基準年実績及び将来年予測は、中国エネルギー研究所、アーメダバード大学、ポパール建築計画研究所の研究者と共同で収集した。このダウンスケールツールにより、国レベルでの多数の排出シナリオを作成した際に、これを簡易的に地域配分することが可能となり、州省レベルでの政策立案支援に資するものとなり得る。

(3) 都市スケールにおける排出シナリオの定量化と大気汚染影響の評価

世界や国における排出シナリオと整合させるために、サブテーマ1で使用されているSSPをダウンスケールした社会経済シナリオを用いて、民生部門における屋内大気汚染物質を対象とした排出シナリオの定量化を行った。分析においては、エネルギーサービス需要量の推計を行うとともに、AIM/Enduselにおいて評価するエネルギー消費技術に関する情報の収集、さらには、屋内大気汚染を評価するための排出係数の見直し等を行った。対象とする物質は、BC、CO、NO_x、OC、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NMVOCである。

中国を対象とした目的別の1人あたりのエネルギー需要量の推移を図18に示す。都市部、農村部ともに暖房需要が過半を占める。そのほか、家電や調理によるエネルギー需要量が多いことが分かる。

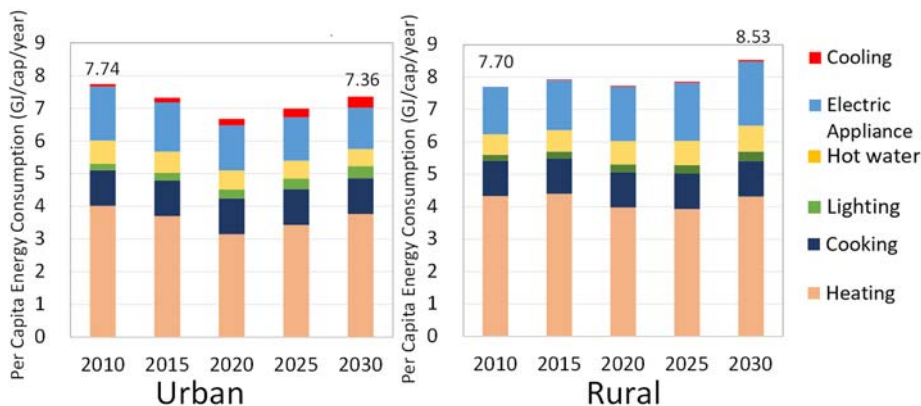


図18 中国における目的別のエネルギー需要量の推移

サブテーマ3では、家庭での用途(調理、暖房、冷房、給湯、照明等)別に、国レベルだけでなく地域レベルでのエネルギー消費の状況を反映した家庭起源のSLCP排出量の推計を目指しているため、特に、調理や暖房のエネルギー消費の状況に関しては推計対象国の気候や燃料使用状況の地域的な特徴にも対応できる推計を行うことが必要となる。そこで、中国を対象に、詳細な地域別、燃料種別の調理エネルギー需要量の推計を試みた。

まず、1人当たりの調理エネルギー消費量に関する調査・研究報告を収集し、都市と農村別にまとめたところ、農村では地域による差が大きいことがわかり(約18~38 MJ/(capita/day))、農村の地域による差(寒暖など)を考慮することを検討した。

中国では、東北部を中心とした寒冷地域の農村において「カン(kang)」という調理兼暖房用設備が設置されている。カンとは、台所のかまどで煮炊きしたときに発生する煙を居住空間の床下に通し、床を暖めることによって部屋全体をも暖める設備のことである。カン使用地域では調理エネルギー消費量はカンを使わない地域より大きいと考えられるので、農村を、カンを使用している地域(寒冷地域)とカンを使用していない地域(温暖地域)と区別して調理エネルギー消費量を算定することが、農村地域一律に算定するよりも、ライフスタイルを考慮したより実態に近い推計をすることにつながるのではないかと考えた。この区分で算定した結果、寒冷地域:約24.1 MJ/(capita·day)、温暖地域:約19.8 MJ/(capita·day)となり差が確認できた。よって、農村については、カンを使用している地域(寒冷地域)とカンを使用していない地域(温暖地域)と区別して調理エネルギー消費量を推定することとした。

一人当たり調理エネルギー消費量(都市、農村(寒冷地域、温暖地域)、調理エネルギー消費の燃料別シェア、調理用機器効率をデータから設定し、調理エネルギー需要量を推計した。図19に2010年の推計結果を示す。

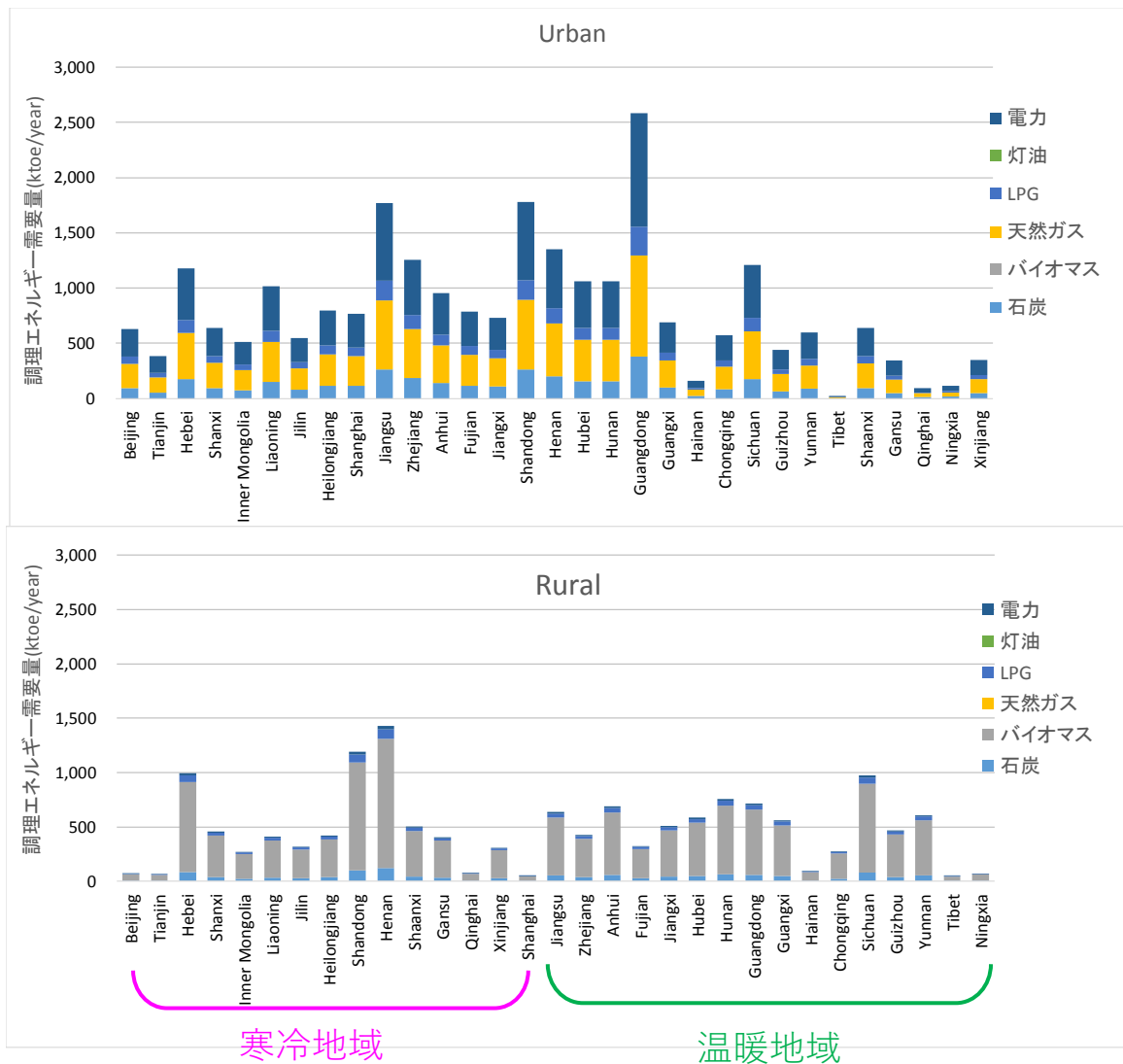


図19 地域別調理エネルギー需要量推計値(2010年)

(4) 全体のまとめと今後の課題

本研究では、SLCPの排出及び対策を評価するためのAIMモデルの改良と、それを用いたなりゆき社会や2°C目標達成に対応するSLCP、LLGHGの排出シナリオの定量化、環境影響がマクロ経済に及ぼす影響の評価、さらには簡易ツールとしてAIM/SLCPの開発とその公開を行った。分析の結果、2°C目標を達成し、健康影響をできるだけ軽減するような排出シナリオとして、「2°C目標の達成を再生可能エネルギーを中心に達成し、民生部門と運輸部門の電化を促進するとともに、汚染除去対策は強化を継続する」ケースが有効であることを明らかにし、そうしたシナリオを実現するための費用や取り組みについても明らかにした。以上の結果は、当初予定していた内容を概ね達成したものであると考えている。

本研究を通じて新たな課題も明らかになった。はじめに、将来の多様な将来像に対する排出シナリオの検討は中庸な社会像であるSSP2を中心に検討しており、他の社会像を対象とした分析については十分ではない。本研究で取り扱った技術的な側面と、社会経済活動そのものをどうトランジションさせるかというをあわせて議論することが今後の課題であると考えている。また、影響の評価については大気汚染対策を中心に行い、その他の気候変動影響については十分な検討ができていないことから、より総合的な観点からの分析が必要になると考えている。このほか、今回新たに開発したAIM/SLCPについても、シナリオを変更した場合の対応やより詳細な情報など維持管理において課題が残されている。さらに、2018年にIPCCから1.5°C特別報告書が出され、2°C目標だけでなく1.5°C目標の検討が求められるようになってきている。今回提示したようなSLCPの排出シナリオが1.5°C目標を達成する場合でも実現するのか、更なる検討が必要である。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

気候変動緩和策は、これまでCO₂をはじめとする長寿命のLLGHGの削減が中心であった。これに対して、短寿命のSLCP対策も含めて検討することは地域的な気候変動に対して影響が及ぶとされ、これを解明することは、全球レベルならびに地域における気候変動の緩和策と影響を予測、評価するにあたって極めて重要である。特に、SLCP対策がLLGHG削減策に対して補完的な役割を担うのか、あるいは、LLGHG対策に加えてSLCP対策を強化することが2°C目標の達成にどの程度寄与するか、さらには、すべての気体を同時に削減する経路が存在するか、を技術的な観点から明らかにすることは、今後の気候変動問題の解決策の検討において重要な情報であり、科学的な意義は大きい。

(2) 環境政策への貢献

SLCP対策は、大気汚染対策においても効果があり、温暖化対策と大気汚染対策の両方を検討することが可能となり、温暖化問題や大気汚染問題において効率的かつ効果的な政策の実現に向けての貢献とその意義は極めて大きい。特に、アジア地域においては、今後、大幅なLLGHG排出量の増加が見込まれるとともに大気汚染対策も急務であり、中国、韓国においてもS-12-2と同様の研究が各国政府の支援のもとで開始されている。こうした活動に関わる各国の研究者と相互に情報交換や研究協力を行い、本研究課題の成果を提供してきた。

また、本研究において政策決定者向けに開発した簡易ツールAIM/SLCPは、複雑なモデルによる計算結果をもとに、簡易にSLCP、大気汚染、温暖化対策による排出量変化やその影響等の政策効果を表示することができるツールである。こうしたツールを環境省に提示するとともに、第34回全国環境研究所交流シンポジウムにおいて出席者である地方の環境研究所職員に紹介した。

また、テーマ3の成果であるPM_{2.5}とオゾンに起因する健康影響、米の生産性について、想定した排出に対する物理的被害がもたらす経済影響(GDPへの影響)を明らかにするとともに、取り組みに必要な対策費用の見積もりを、限定的ではあるが評価することが可能となった。こうした結果を踏まえて、どのような施策を講ずることが社会全体の厚生を最大化させることができるかを検討することが可能となり、実効性のある気候変動緩和策、環境保全対策の実現が可能となる。

<行政が既に活用した成果>

本研究において政策決定者向けに開発した簡易ツールAIM/SLCPは、複雑なモデルによる計算結果をもとに、簡易にSLCP、大気汚染、温暖化対策による排出量変化やその影響等の政策効果を表示することができるツールである。こうしたツールを環境省との意見交換を通じて開発、提示するとともに、第34回全国環境研究所交流シンポジウムにおいて出席者である地方の環境研究所職員に紹介し、ツール使用に関するデモ等を行い、いくつかのフィードバックを得た。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究において収集した技術情報やこれまでの温暖化対策ならびに大気汚染対策の評価は、今後の温暖化対策、大気汚染対策の両方を検討する上で貴重な情報になると考えられる。また、テーマ3の成果であるPM_{2.5}とオゾンに起因する健康影響、米の生産性について、想定した排出に対する物理的被害がもたらす経済影響(GDPへの影響)を明らかにするとともに、取り組みに必要な対策費用の見積もりを、限定的ではあるが評価することが可能となった。こうした結果を踏まえて、どのような施策を講ずることが社会全体の厚生を最大化させることができるかを検討することが可能となり、実効性のある気候変動緩和策、環境保全対策の実現が可能となる。

特に、AIM/SLCPのようなツールはこれまでになく、これまで以上に研究と政策をつなぐ役割が期待される。なお、国内の政策決定者や国際的な議論において活用するには、地域の詳細化、対策技術の充実、影響評価の拡大などいくつか課題があり、今後、研究から実装に拡張していくことが必要である。

また、発展途上国における環境政策への貢献として、本研究で取り上げた経済発展の進展と利用されるエネルギー種の遷移は、単に費用だけでなく、インフラ整備なども考慮して検討された考え方を応用したものである。今後も経済発展が見込まれる地域においてこうした概念を適用することで、低炭素さらには脱温暖化社会の実現に向けたリープフロッグ的な発展を支援することが期待できる。

さらに、IPCC第六次評価報告書の作成に向けた活動が開始されているが、気候変動緩和策を取り扱う第三作業部会では、長期の排出シナリオとともに、短中期的な取り組みも取り上げられている。こうしたことから、本研究で明らかにした排出シナリオの成果をIPCC第六次評価報告書に提供することを予定している。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Dai, H., Masui, T. (2015) An Impact Assessment of Sustainable Technologies for the Chinese Urban Residential Sector at Provincial Level. *Environmental Research Letters*, 10(6)
- 2) Mittal, E., Hanaoka, T., Shukla, P.R., Masui, T. (2015) Air pollution co-benefits of low carbon policies in road transport: a sub-national assessment for India. *Environmental Research Letters*, 10(8)
- 3) Xie Y., Dai H., Dong H., Hanaoka T., Masui T. (2016) Economic impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in China: A provincial-level analysis. *Environmental Science and Technology*, 50 (9), 4836-4843
- 4) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Masui, T. (2017) Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions of China's Residential Sector: The Importance of Considering Energy Transition. *Sustainability*, 9, 614,
- 5) Park Chan, Xing R., Hanaoka T., Kanamori Y., Masui T. (2017) Impact of Energy Efficient Technologies on Residential CO₂ Emissions: A Comparison of Korea and China. *Energy Procedia*, (111), 689-698
- 6) 平山智樹, 藤原和也, 日比野剛, 花岡達也, 増井利彦 (2017) 大気汚染物質と短寿命気候汚染物質に及ぼす気候変動緩和策による副次効果の分析 -インドを例にして-. *環境システム研究論文集*,
- 7) Hanaoka T., Masui T. (2018) Co-benefits of Short-Lived Climate Pollutants and Air Pollutants by 2050 while achieving the 2 degree target in Asia. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 6 (3), 505-520
- 8) Xing R., Hanaoka T., Kanamori Y., Masui T. (2018) Achieving Chinas Intended Nationally Determined Contribution and its co-benefits: Effects of the residential sector. *Journal of Cleaner Production*, 172 (20), 2964-2977
- 9) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Masui, T. (2018) Achieving zero emission in China's urban building sector: Opportunities and barriers, *Current Option in Environmental Sustainability*, 30:115-122

<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。

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Xing R., Hanaoka T., Kanamori Y., Dai H., Masui T. (2014) Towards a low-carbon future in China's rural residential sector. *EcoBalance 2014*, -
- 2) Masui T. (2016) Research on GHG and SLCP emission scenario using AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and progress of S-12, ERTDF of MOEJ. *The Atmospheric Pollution, Climate Change Nexus in Asia: Implications for a New Development Agenda*, -
- 3) Hanaoka, T., Masui, T. (2017) Exploring the 2°C target scenarios by considering climate benefits and health benefits - role of biomass and CCS, *Energy Procedia*, 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-13)
- 4) 花岡達也, 増井利彦 (2017) 世界の温室効果ガス, 短寿命気候汚染物質, 大気汚染物質の緩和シナリオ:

気候変動対策と大気汚染対策のバランスの考察. 第33回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 同講演論文集, 311-314

- 5) 花岡達也, 増井利彦 (2018) 低炭素対策による相乗効果・相殺効果を考慮した短寿命気候汚染物質削減シナリオの評価. 第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 講演論文集, 497-502
- 6) Hirayama T., Hibino G., Hanaoka T., Masui T. (2019) GHGs, SLCPs and Air Pollutants Estimation by Asia-Pacific Integrated Model (AIM). China Energy Modeling Forum 2018 Annual Conference The 1st International Modeling Symposium on Co-benefits of Greenhouse Gas Emissions Reduction and Air Pollution Control, -

7. 研究者略歴

研究代表者

増井 利彦

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

研究分担者

1) 花岡 達也

慶應義塾大学理工学部卒業、東京大学大学院工学研究科修了、博士(工学)、現在、国立環境研究所 社会環境システム研究センター主任研究員

2) 日比野 剛

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

3) 倉田 学児

京都大学工学部卒業、博士(工学)、京都大学大学院工学研究科教授、2017年6月逝去

4) 島田 洋子

京都大学工学部卒業、博士(工学)、現在、京都大学大学院工学研究科准教授

II. 成果の詳細

II-1 世界を対象とした統合評価モデルの改良とそれを用いた排出シナリオの定量化

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 統合環境経済研究室 増井 利彦・花岡 達也

環境政策研究室 金森 有子

広域影響・対策モデル研究室 芦名 秀一・藤森 真一郎

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 甲斐沼 美紀子・田邊 千英・Xing Rui・
Dai Hancheng・Park Chan・Mittal Shivika・Xie Yang・
Zhang Runsen・Yaware Satish・Li Zhaoling・Marissa Malahayati・
Li Gen・Zhang Shiyao

平成26～30年度累計予算額：122,087千円（うち平成26年度：27,081千円、平成27年度：25,729千円、
平成28年度：24,443千円、平成29年度：24,443千円、平成30年度：20,391千円）
累計予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

サブテーマ1では、これまで将来の世界の地域別GHG排出シナリオを提供してきた世界技術選択モデル AIM/Enduse[Global]について、温暖化対策、SLCP対策、大気汚染対策の検討が可能となるように改良し、パリ協定で合意された2℃目標シナリオ相当の低炭素対策を導入したときの評価対象ガス種の同時削減効果や相殺効果の分析を行った。また、2℃目標シナリオの実現に向けた低炭素対策を取りつつ、健康影響・環境影響を軽減させ、さらに2℃目標シナリオの実現を後押しするようなSLCP削減シナリオを検討し、テーマ1、テーマ3およびテーマ4とのテーマ間連携にむけたS12共通シナリオを開発した。

まず、技術選択モデルへの入力データとして必要な、将来の世界の地域別・部門別のサービス需要量を推計するために、国際モデル比較研究で用いられる共通社会経済シナリオ（SSP）を用いて、将来の人口や経済成長などの社会経済指標を設定し、地域別・部門別の特徴を考慮したサービス需要量を推計した。次に、推計されたサービス需要量を満たし、各エネルギーの需要と供給が均衡するように総費用最小化のもとで技術選択をした結果による温室効果ガス、SLCP、大気汚染物質の排出量を分析した。その結果、2℃目標の実現に向け、大規模な燃料転換や省エネ技術の導入の促進により、大気汚染物質やSLCPの排出量も同時に大幅に削減できることが示された。しかし、燃料燃焼によって排出される大気汚染物質には地域的な冷却効果があり、大気汚染物質の削減は、同時に温暖化を促進してしまう可能性がある。そこで、SO₂とBCに注目し、削減傾向の相関関係を分析したところ、従来のようなCO₂大幅削減に注目した温暖化対策ではSLCPの視点から不十分であり、より広範な排出削減シナリオの探索が必要となった。

そこで、テーマ1、テーマ3およびテーマ4と連携し、S12独自のSLCPシナリオを検討した。国別・部門別・ガス種別に排出増減の傾向が異なり、またガス種別に大幅削減にむけた有効な対策の組み合わせが異なるため、温暖化対策、SLCP対策、大気汚染対策の広範囲な組み合わせと対策導入の効果を検討し、2℃目標シナリオ相当の低炭素対策を導入したときの対象ガス種の相乗効果・相殺効果を分析した。その結果、GHG排出経路は類似していても、対策技術の組み合わせ次第で、大気汚染物質およびSLCPの排出経路は大きく異なることが分かった。テーマ連携にむけた共通シナリオを解析した結果、「2℃目標の実現に向けて、再生可能エネルギー強化、家庭・業務・運輸での電化促進、大気汚染除去対策は強化継続をすすめる（2D-EoPmid-RESBLDTRT）シナリオ」が、総合的にSLCP削減シナリオとして有効であると考えられた。

また、世界技術選択モデルは一般ユーザー向けではないため、ステークホルダーが独自にシナリオを検討し、対象ガス種の排出量、削減量だけでなく、環境影響や健康影響を簡易評価できるように、テーマ1、テーマ3、テーマ4と連携し、タブレット上で挙動するブラウザ版簡易評価ツールを開発し、WEBに

公開した。

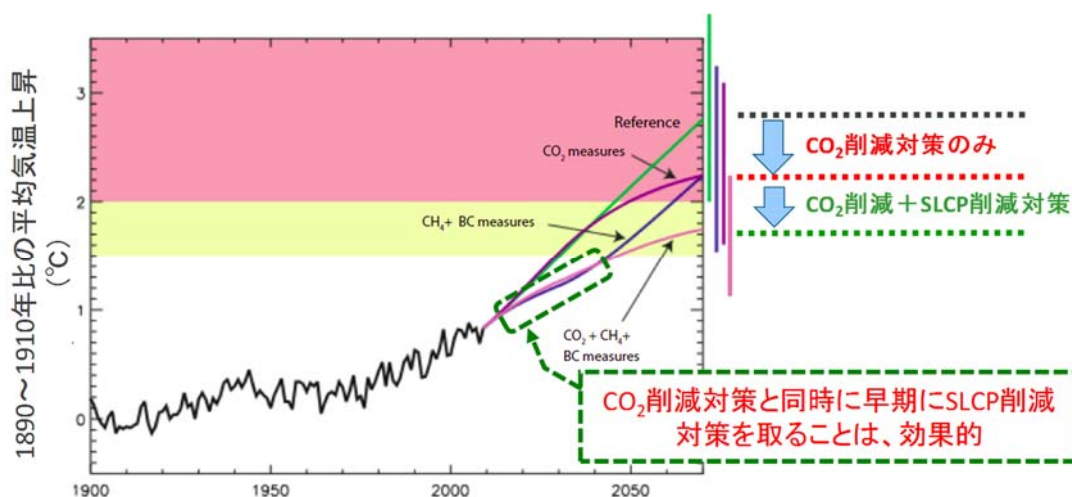
[キーワード]

将来排出シナリオ、短寿命気候汚染物質（SLCP）、温室効果ガス、大気汚染物質、相乗・相殺効果

1. はじめに

2015年12月にパリで開催された気候変動枠組条約（UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change）第21回締約国会議（COP21: 21st Conference of Parties）において、「産業革命前と比べて地球全体の平均気温上昇を2℃未満に抑えること（本研究では「2℃目標」と呼ぶ）」と、「温暖化リスク低減と温暖化影響を減ずることに大きく貢献することを認識し、1.5℃未満に抑えるよう努力すること（本研究では「1.5℃目標と呼ぶ）」が明記されたパリ協定が、UNFCCC加盟国によって合意された。一方で、COP21開催前の2015年9月末までにUNFCCC事務局に加盟各国が提出した温室効果ガス（GHG: Greenhouse gas）の排出削減に関する「各国が自主的に決定する約束草案（INDC: Intended Nationally Determined Contribution）」に記載されている2020年以降の世界各国の排出削減努力目標を積み上げて合計しても、2℃目標を達成する排出経路を大きく外れた状況であり、目標と現実の取り組みの間には大きなギャップが存在する。また、世界気象機関（WMO: World Meteorological Organization）によると、2015年の地球全体の平均気温は産業革命前と比べてすでに約1℃上昇しているため、COP21で合意した2℃上昇未満を実現するには、あと残り1℃上昇未満に抑える必要がある。気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）第五次評価報告書（AR5: 5th Assessment Report）では、世界の温室効果ガス排出量の急増により、1950年頃から平均気温が10年あたり0.12℃のスピードで上昇し続けていると指摘しているため、現在から残り1℃上昇未満を実現するには、気温上昇のスピードを抑えるように削減努力をさらに強化していく必要がある。これらのことから、2℃目標の達成には、あらゆる手立てを講ずる必要があるといえる。

一方で、大気汚染物質による健康影響が中国、インドなどの途上国で近年大きく注目されているが、大気汚染物質は気候変動にも影響を与えている。大気汚染物質には、温室効果を持つもの[主にブラックカーボン（BC）、対流圏オゾン（tropospheric O₃）]と、冷却効果を持つもの[硫酸化物（SO_x）、窒素酸化物（NO_x）、粒子状物質（PM）、有機炭素（OC）などを主とした大気エアロゾル]があるが、特に、温室効果を持つ大気汚染物質は、大気中での化学的な寿命が数日から数十年程度と比較的短いため、短寿命気候汚染物質（SLCPs: Short-Lived Climate Pollutants）と呼ばれている。これら大気汚染物質やSLCPであるBC、および温室効果ガスである二酸化炭素（CO₂）は、共に燃料燃焼由来の排出量が多くを占めているため、それらの発生源への対策は気候変動緩和対策と同時に大気汚染対策にもなりうる。特に、大気汚染は地域規模であり、健康に悪影響を与えるため身近な環境問題として認識されやすく、大気汚染の深刻な途上国においては対策の導入が受け入れられやすいと考えられ、近年、注目を集めている。こうした状況の中、短寿命ガスであるSLCPの対策を行い、長寿命の二酸化炭素、亜酸化窒素（N₂O）等のGHG排出削減を補完しようといった動きが見られ、UNEP（2011）が示している図（1）-1のように、長寿命GHG（LLGHG: Long-lived Greenhouse Gas）のみならず、CH₄やBCなどの短寿命のSLCP対策を行うことは、将来の気候の安定化に向けて重要な取り組みになると考えられている。



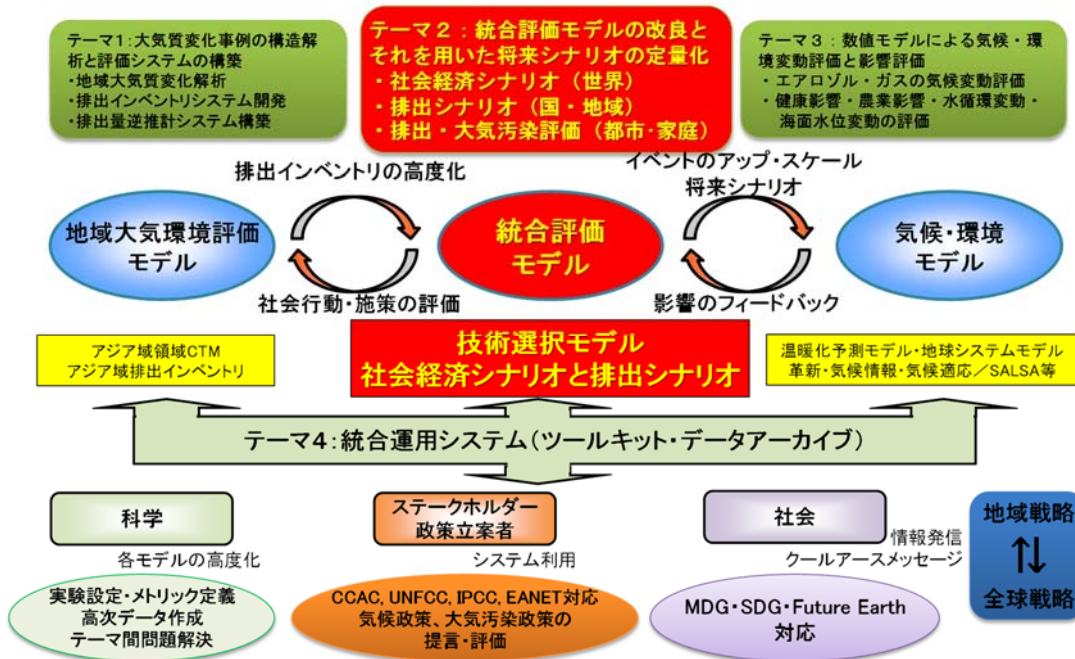
図(1)-1 UNEP/WMO (2011)に示されるCO₂対策とCH₄やBCも含めた対策時の気温上昇の変化

2. 研究開発目的

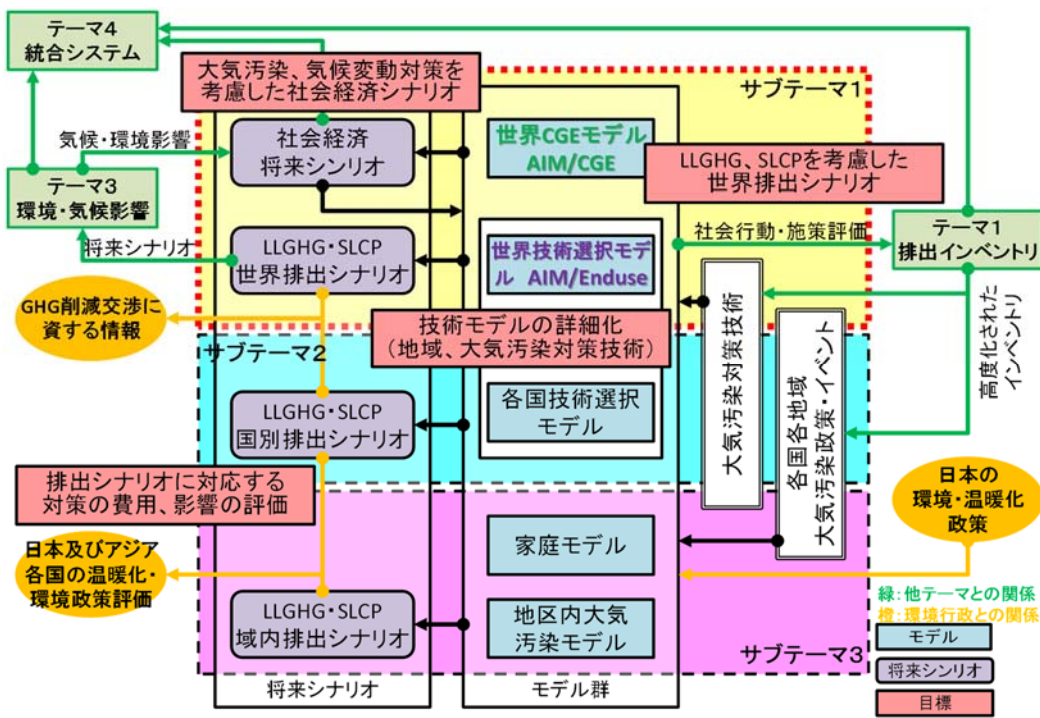
本研究課題 (S-12-2) 全体を通じて、2°C目標等の将来の気候安定化の目標に向けて、世界、国、都市といった異なるスケールを対象に、それぞれの排出シナリオを定量化するためのモデルを開発するとともに、開発したモデルを用いて、様々な対策を含めた将来シナリオを定量化することを目的としている。特に、本サブ課題S-12-2(1)では、これまで検討してきた長寿命のGHGを対象とした将来シナリオだけでなく、これをSLCPに拡張したときの排出シナリオを明らかにする。具体的には、2°C目標に向けた低炭素社会 (=CO₂大幅削減) を実現するような排出経路を考慮しつつ、低炭素対策とSLCP対策・大気汚染対策の組合せによるSLCP (BC、CH₄、対流圏O₃) や大気汚染物質 (SO₂、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、CO、NMVOC) の排出削減の相殺効果・相乗効果を評価し、排出削減シナリオの差異を評価することで、気候変動緩和対策、大気汚染対策、およびSLCP対策のバランスを考慮した将来シナリオを検討する。本サブ課題S-12-2(1)で検討する将来シナリオは、テーマ1で開発・改良された「アジア域排出インベントリシステム (REAS)」の過去から現在までの時系列の傾向に準ずるように、将来シナリオの精緻化を行い、また、テーマ3やテーマ4における将来の気候変化や環境影響を評価する際の入力情報となるように、テーマ間連携のためのS12独自のSLCP削減共通シナリオを開発する。

また、本サブテーマで用いる世界技術選択モデルは一般ユーザー向けではなく、様々な知見と計算時間が必要となるため、ステークホルダーが集まって対策を議論する中で結果をリアルタイムに提供することは難しい。テーマ1、テーマ3およびテーマ4と連携して、様々なシナリオの結果をあらかじめ解析し、モデルの結果と整合しつつ、主要な削減対策による排出削減効果を近似的ではあるが簡易に推計し、環境影響も簡略化推計式を用いて提示できるようにすることで、タブレット上の画面で対策技術導入レベルを一般ユーザーの操作により、瞬時に排出量や環境影響などが計算され、排出削減に向けた議論に貢献できるようにしたブラウザ版簡易評価ツールを開発する。図(1)-2に、環境研究総合推進費S-12の全体像と、本研究課題 (S-12-2) とのテーマ間連携の関係を示す。

図(1)-3に本研究課題 (S-12-2) の各サブテーマ間の関係を示す。本研究課題では、サブテーマ毎に世界から国、都市、家庭という異なるスケールを対象とした統合モデル開発を行い、分析を実施するが、サブテーマ1は、これらが有機的に統合するように将来の社会経済シナリオやインベントリ、対策技術に関する情報を共有化し、統合的な将来シナリオの検討する役割を担う。



図(1)-2 環境研究総合推進費S-12の全体像と本研究課題 (テーマ2 ; S-12-2) との連携関係



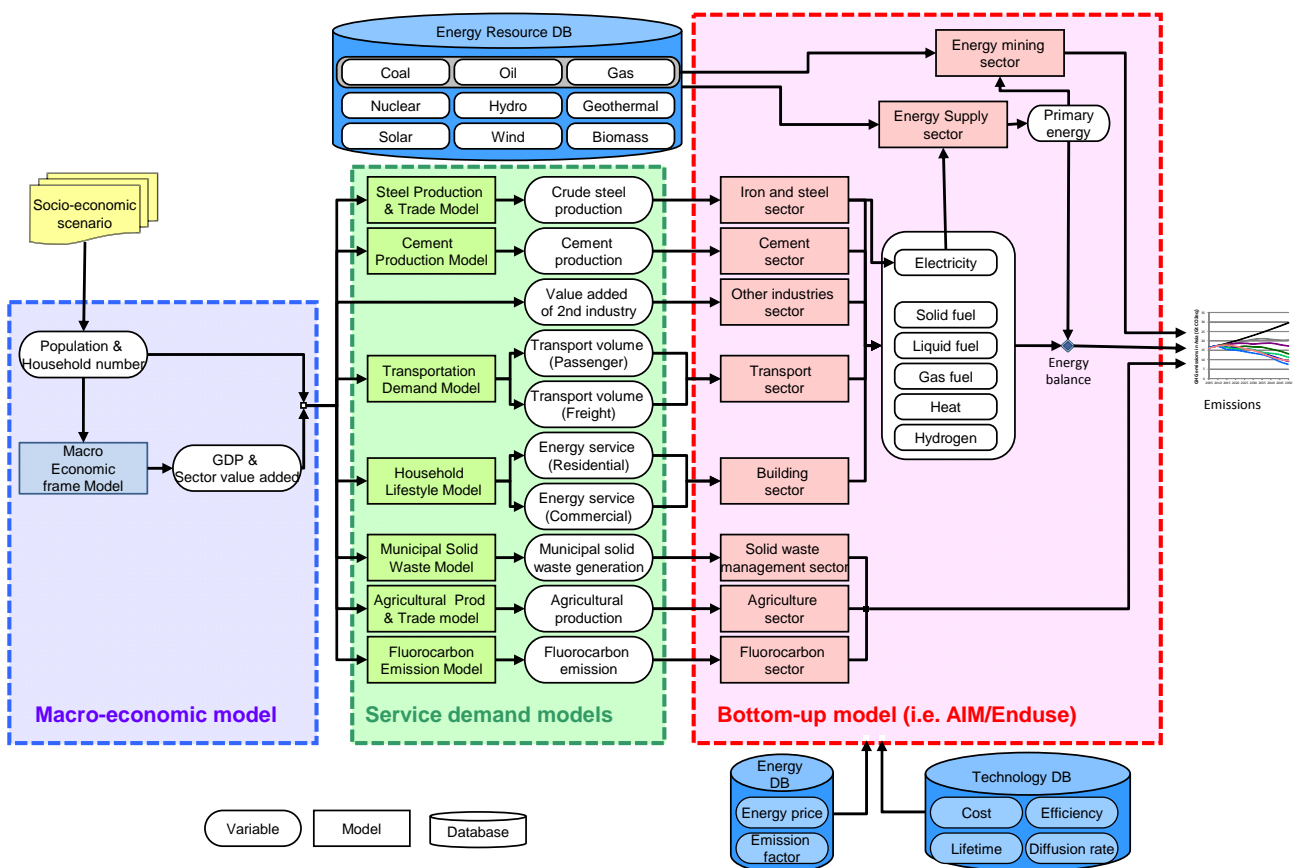
図(1)-3 推進費S-12-2における各サブテーマ間の関係およびサブテーマ1の役割

3. 研究開発方法

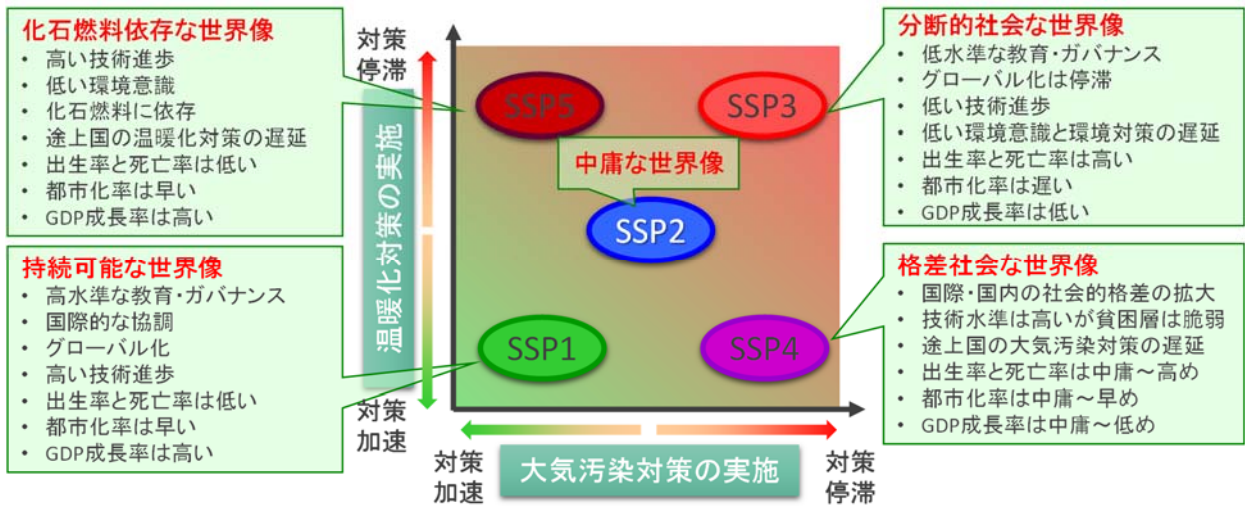
サブテーマ1では、これまで将来の世界の地域別GHG排出シナリオを提供してきた世界技術選択モデル AIM/Enduse [Global] について、SLCP対策についても検討が可能となるようにモデル改良を行い、世界地域別・部門別の将来のLLGHG及びSLCPの排出シナリオを定量的に明らかにすることを目的としている。世界を対象とした技術選択モデルの推計フローを図(1)-4に示す。このモデルでは、地域別・部門別の排出削減量や削減費用を比較できるように、主要なGHG排出国に注目して世界を32地域に分類し、特にアジア地域は日本、中国、インド、韓国、インドネシア、タイ、マレーシア、ベトナムなどと詳細に区分している。評価対象部門はエネルギー供給部門、エネルギー需要部門、非エネルギー部門の主要な部門を網羅し、一国あるいは一地域に適用して、部門を統合してシミュレーションを行う。

本研究は、主に3つの要素で構成されている。まず、将来の社会経済シナリオを定性的・定量的に設定する。世界各国の人口・GDPなどのなりゆき社会像については、IPCC AR5以降の国際モデル比較研究で用いられている共通社会経済シナリオ（SSP: Shared Socioeconomic Pathways）を用いた。SSPには5つの異なる社会像があるが、図(1)-5に温暖化対策と大気汚染対策の側面からみたSSPシナリオの概念を示す。本研究では、現在までの温暖化対策・SLCP対策・大気汚染対策の傾向の延長上の中庸ななりゆきの社会像（SSP2）をReferenceとして設定し、さらに対策が強化されていく社会像（SSP1）、現在の政策・対策がうまく進まない社会像（SSP3）の3通りについて分析した。

次に、SSPシナリオで設定した将来の人口・GDPなどの社会経済動態をもとに、部門別のサービス需要推計モデル群を用いて、地域別・国別に粗鋼生産量、セメント生産量、旅客輸送量などの部門別の将来の最終サービス需要量を推計した。そして最後に、世界技術積み上げモデル（AIM/Enduse[Global]モデル）を用いて、上述で推計した部門別の最終サービス需要量を満たし、需要と供給がバランスした状況において、総費用（初期費用、運転費用などの合計）が最小化になるように技術データベースから技術選択を評価し、将来のエネルギー・非エネルギー財の消費・削減量およびそれに伴う各種ガスの排出量・削減量を推計した。AIM/Enduseモデルは詳細な技術データベースを要し、地域別・部門別・エネルギー種別・ガス種別にエネルギー供給制約、サービス需要量制約、技術導入制約、排出量制約など各種制約下において、システムの総費用を最小化する逐次最適化の部分均衡モデルである。本研究では、化石燃料依存性や技術進歩度合等に関する定性的なSSPシナリオを元に、エネルギー制約や対策技術導入等の制約条件を設定し、改良した世界技術選択モデルに入力することで、将来の排出シナリオの推計を行った。



図(1)-4 世界を対象とした技術選択モデルの推計フロー



図(1)-5 なりゆき社会として想定した共通社会経済シナリオ（SSPシナリオ）の概要

どのような技術やエネルギーを用いてLLGHG排出量とともにSLCP排出量の削減を実現することができるかを評価する際に、ガス種別に主要な排出発生源が異なるため、発生源の特徴に応じて適切な対策を評価する必要がある。本研究では対策の導入による対象ガス種の同時削減効果や相殺効果を分析できるようにモデル改良を行うとともに、温暖化対策、SLCP対策、大気汚染対策の技術情報を更新し、数百種類の様々な技術対策を考慮した。それらの技術種は大きく下記の4つに分類され、同じ対策グループでも対象とするエネルギー種・ガス種によって削減効果は異なるため、技術の組み合わせの評価が重要になる。そこで、本研究では、排出量及び削減効果の大きい部門・ガス種・対策技術種に注目をして、対策導入の効果を分析した。対策の効果が期待される主要な部門・ガス種・技術種の概要を表(1)-1に示す。

- ① 環境汚染物質の排出源に除去装置・回収装置を設置し直接的に排出削減する対策（例：脱硫装置、脱硝装置、集塵装置、CO₂分離回収装置等）
- ② 燃料の品質の向上により排出削減する対策（例：燃料含有硫黄分の少ない燃料への転換）
- ③ 省エネルギー技術普及によってエネルギー消費量を減らすことで排出削減する対策（例：高効率機器による燃焼効率・発電効率の改善等）
- ④ 大規模な燃料転換や革新的技術の導入により、燃料が再生可能エネルギーへと転換することにより排出削減する対策（例：石炭から再生可能エネルギーへの転換、水素燃料技術の普及等）

表(1)-1 削減効果が期待される主要な排出部門、排出ガス種、排出量削減対策の概要

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂	NO _x	BC	OC	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	NH ₃	NMVOG
エネルギー供給部門	①③④			①②③④	①③④	①③④	①③④	①③④	①③④			
燃料採掘部門		①										
産業部門	①③④		③④	①②③④	①③④	①③④	①③④	①③④	①③④	③④		③④
運輸部門	③④		③④	①②③④	①③④					③④		③④
民生・業務部門	③④	③④	③④	③④	③④	③④	③④	③④	③④	③④		③④
廃棄物部門		①	①									
農畜産・農耕作部門		①	①								①	

同一ガス種で排出量が最も大きい部門
 同一ガス種で排出量が比較的大きい部門
 同一ガス種で排出量が次に大きい部門
 同一ガス種で排出量が小さい(又はない)部門
 補足) ①~④は、主な4つの対策技術グループの分類を表す

更新した技術データベースを用いて、温暖化対策、SLCP対策、大気汚染対策の組み合わせを検討し、パリ協定で合意された2℃目標シナリオ相当の低炭素対策を導入したときの評価対象ガス種の同時削減効果や相殺効果の分析を行った。そして、テーマ1、テーマ3およびテーマ4とのテーマ間連携に向けて、

大気汚染対策による健康被害・環境影響の軽減と温暖化対策およびSLCP対策による温暖化影響を評価することを目的とした「S12共通シナリオ」を開発した。共通シナリオの作成において、まず各評価対象ガス種の削減によるメリット・デメリットを考慮して検討し、その概要を表(1)-2に示す。次に、1) SLCPおよび粒子状物質であるBCおよびPM_{2.5}を削減するシナリオ（＝温暖化および健康被害の双方の軽減効果の比較が目的）、2) SO₂を削減するシナリオ（＝健康被害の軽減と地域的な冷却効果の減少の比較が目的）、3) NO_xを削減するシナリオ（＝健康被害の軽減と大気中CH₄増加による温暖化の比較が目的）、および4) 2℃目標シナリオ相当の低炭素対策とSLCP対策、大気汚染対策を組み合わせたシナリオ（＝健康被害、地域的な冷却効果、温暖化の側面からみた同時削減効果や相殺効果の比較が目的）を検討し、各シナリオの評価対象ガス種の排出経路を定量的に分析し、それぞれの特徴についての評価を行った。また、検討した共通シナリオの特徴を考察し、低炭素対策、大気汚染対策、SLCP対策を両立させるような排出経路を探索するために、対流圏O₃の生成や大気中CH₄濃度の増減の要因物質である一酸化炭素(CO)、非メタン炭化水素(NMVOC: Non-Methane Volatile Organic Compounds)も含めて、さらに考えられる特徴的な排出シナリオを分析した。

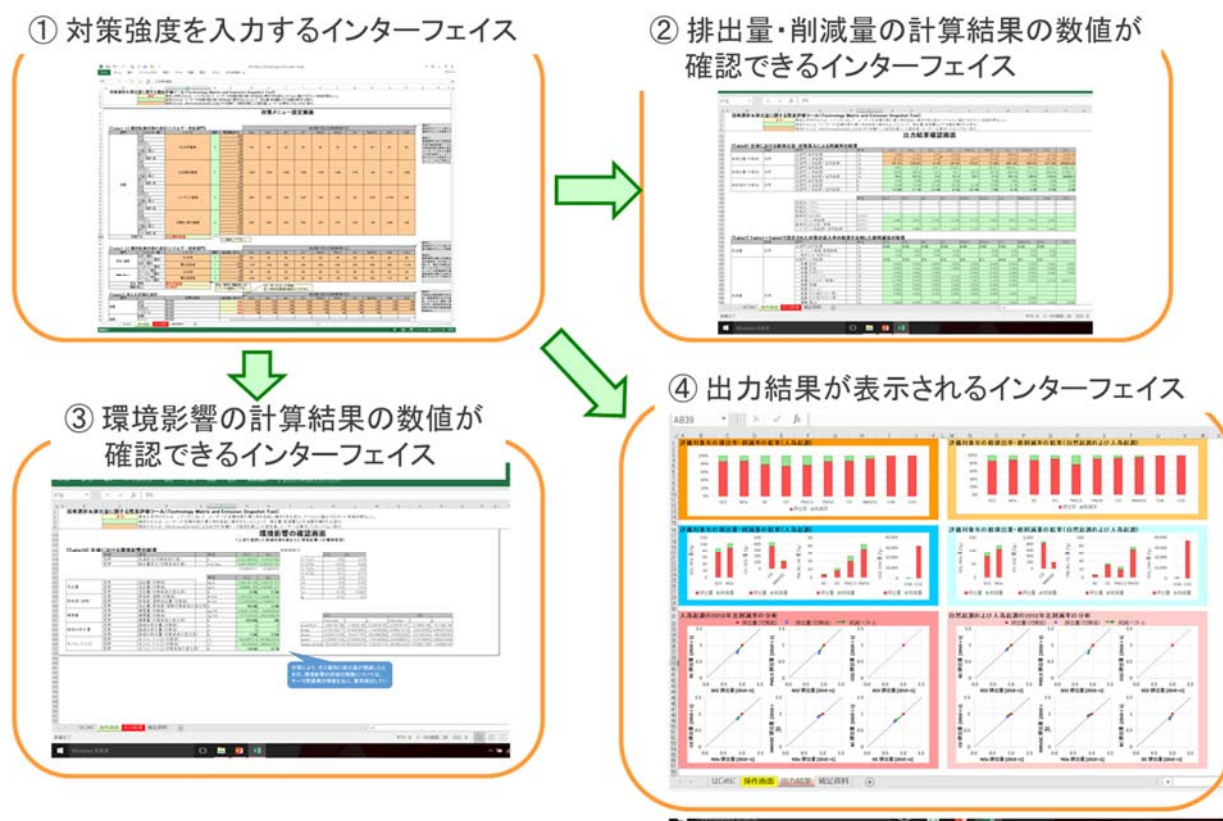
表(1)-2 短寿命気候汚染物質、大気汚染物質の削減によるメリット・デメリットの概要

SO ₂ 削減	メリット	➤ PM _{2.5} 成分である sulfate (硫酸塩) の減少による健康影響の軽減
	デメリット	➤ sulfate (硫酸塩) の減少による地域的な冷却効果の低減(=温暖化影響の増加)
BC&PM _{2.5} 削減	メリット	➤ 健康影響の軽減およびBC削減による温暖化影響の低減
	デメリット	➤ Biomass 燃焼由来BC削減と同時にOCも削減されることにより、地域的な冷却効果の低減(=温暖化影響の増加)
NMVOC削減	メリット	➤ 地域的な対流圏O ₃ の低減による温暖化影響と健康影響の軽減。 ➤ PM _{2.5} 成分の二次有機粒子(SOA: Secondary Organic Aerosol)減少による健康影響の軽減
	デメリット	➤ SOA減少による冷却効果の低減(=温暖化影響の増加)
NO _x 削減	メリット	➤ 地域的な対流圏O ₃ の低減による温暖化影響と健康影響の軽減 ➤ PM _{2.5} 成分である nitrate (硝酸塩) の減少による健康影響の軽減
	デメリット	➤ 大気中CH ₄ 濃度増加による温暖化影響の増加 ➤ nitrate (硝酸塩) の減少による冷却効果の低減(=温暖化影響の増加)
CO削減	メリット	➤ 対流圏O ₃ の低減による温暖化影響と健康影響の軽減 ➤ NO _x 削減と同時に削減をすることにより大気中CH ₄ 濃度の増加を抑制
	デメリット	➤ なし

アジア諸国における評価対象ガス種については、将来のなりゆきシナリオがテーマ1サブテーマ2「アジア域排出インベントリシステム (REAS)」が開発した過去から現在までの時系列の排出インベントリの傾向に準ずるように、基準年(2010年)の国別・部門別・ガス種別の排出量を調整する排出補正ツールをテーマ1と連携をして開発し、将来排出シナリオの精緻化を行った。また、サブテーマ2とともに、中国、インドの地域(中国における省やインドの州など)の特徴を考慮した技術選択モデルの開発を行い、なりゆきや温暖化対策における各ガスの排出量の予測等、いくつかの試算を行った。

本サブテーマで用いる世界技術選択モデルは逐次動的最適化に基づいた分析手法であり、排出シナリオの評価や結果の解釈が一般ユーザー向けではない。そこで、一般ユーザーが独自にシナリオを検討し、評価対象ガス種の排出量、削減量だけでなく、環境影響や健康影響を簡易に評価できるように、テーマ1、テーマ3およびテーマ4と連携して統合運用システムの開発を検討し、まず、それに向けてExcelで操作が可能な簡易評価ツールのプロトタイプを開発した。その開発概要を図(1)-6に示す。この簡易評価ツールは、世界を1つの地域とみなした基準年(2010年)の排出量を再現したものであり、世界技術選択モデルの結果と整合しつつ、排出量の大きい主要な排出部門および削減効果の大きい主要な削減対策に着目し、対策技術導入レベルの設定を一般ユーザーが操作することによって、簡易に排出量や環境影響などが評価できるものである。対策技術は国別・部門別・ガス種別に多種多様であるが、簡易評価ツールで設定する温室効果ガス、SLCP、大気汚染物質の対策技術については、①環境汚染物質の排出源への除去対策・回収対策(脱硫・脱硝・集塵装置など)、②省エネ対策、および③エネルギー転換対策(石炭から天然

ガス・再生可能エネルギーへの転換など)、の3つに分類し、代表的な高効率対策技術を考慮した。そして、対策導入量を任意で与えたときに、削減量の変化や特徴を表す計算結果が図示されるものである。次に、Excel版簡易評価ツールの内容、結果の表示例、挙動確認を踏まえ、PCだけでなくタブレット上でも容易に一般ユーザーが操作可能な、ブラウザ版簡易評価ツールを開発した。ブラウザ版では、一般向けの利便性を拡充するだけでなく、対象地域を世界およびアジア、評価対象年を2010年～2050年までの10年毎の評価が可能となるように開発した。



図(1)-6 統合運用システムの開発に向けた簡易評価ツールの開発の概要

また、サブテーマ2とともに、中国、インドの地域（中国の省やインドの州）の特徴を考慮した技術選択モデルの開発を行い、サブテーマ3とともに、家庭におけるエネルギー選択と電化による影響を考慮した技術選択モデルの開発を行い、温室効果ガス、SLCP、大気汚染物質の排出シナリオの推計を行った。

このほか、テーマ3に提供した排出シナリオをダウンスケールした $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ のメッシュデータは、地域別の活動毎に現状の排出を基礎としてパターンスケール化する簡易なツールを用いたものであるが、地域の環境影響を評価する際には、より詳細な情報が必要となる。とりわけ、大規模発生源と呼ばれる特に排出量の大きい排出源を特定することが重要となる。そこで、排出量のダウンスケールの際に、大規模発生源の変化を考慮することができるようなモデルの開発も行った。本研究で開発したダウンスケール手法では、中国の鉄鋼部門を対象に、シナリオで想定される将来のサービス需要量の増減を満たし、かつプラントの統廃合および新設の立地条件（土地制約、資源制約、インフラ制約、社会経済制約など）を考慮したものとなっている。

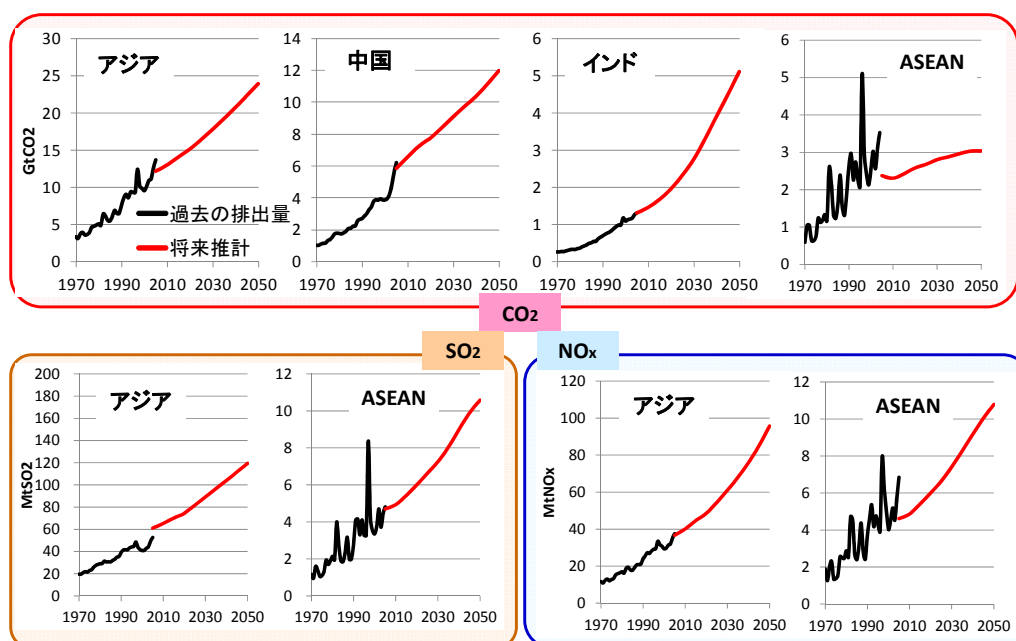
さらに、技術選択モデルに加えて、対策や環境影響による経済活動への影響を定量的に評価する国別の経済モデル（応用一般均衡モデルであるAIM/CGE）を大気汚染による健康被害等が分析できるように改良し、テーマ3等で分析された物理的な被害を経済的に評価した。特に、中国については、PM_{2.5}やO₃による健康影響について、医療サービスの増加や労働力の減少による影響が省別に反映できるようにモデルの改良を行った。

4. 結果及び考察

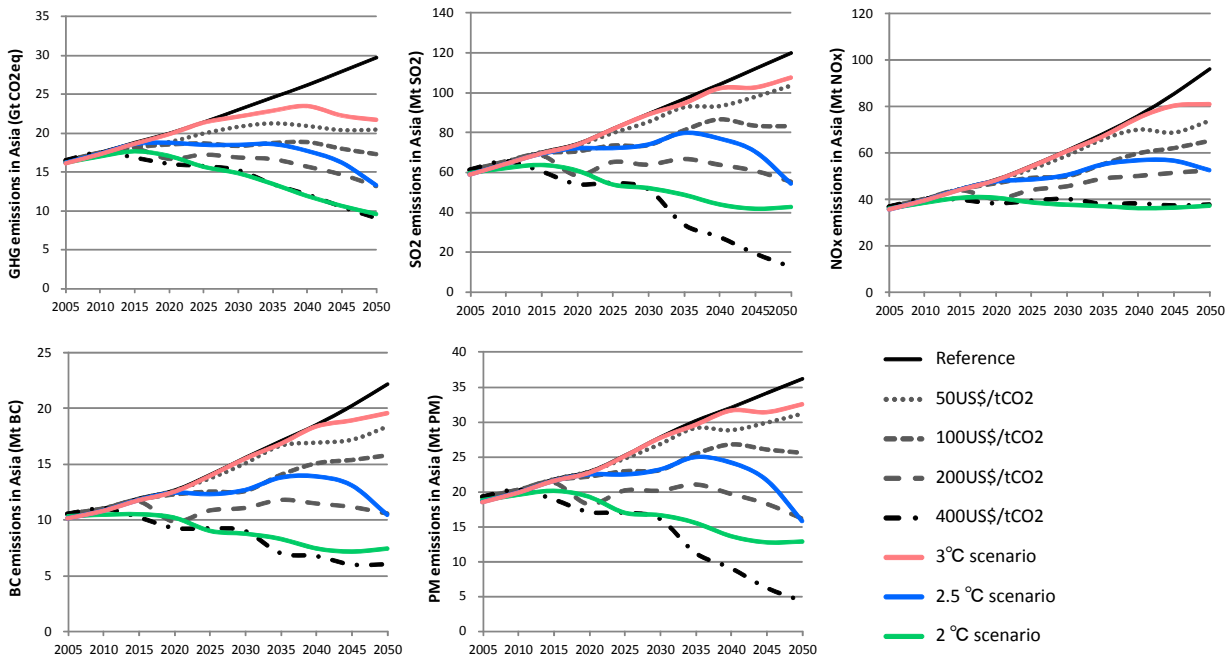
4-1 なりゆきシナリオおよび低炭素対策シナリオのCO₂および主要な大気汚染物質の挙動の分析

これまでに開発してきた世界を対象とした技術選択モデルであるAIM/Enduse[Global]について、大気汚染対策技術の組み込み等の改良を行うとともに、温暖化対策による大気汚染物質の排出量への影響について分析をおこなうには、まず、なりゆきシナリオにおけるCO₂および主要な大気汚染物質の排出量の挙動を確認する必要がある。そこで、化石燃料起源及び産業起源の各物質のなりゆきシナリオでの排出量を推計し、その結果とEDGER4.2による過去の排出量の傾向を比較検証した。図(1)-7に示す通り、過去の排出量の傾向を十分に再現できるモデル構築ができたことが確認された。

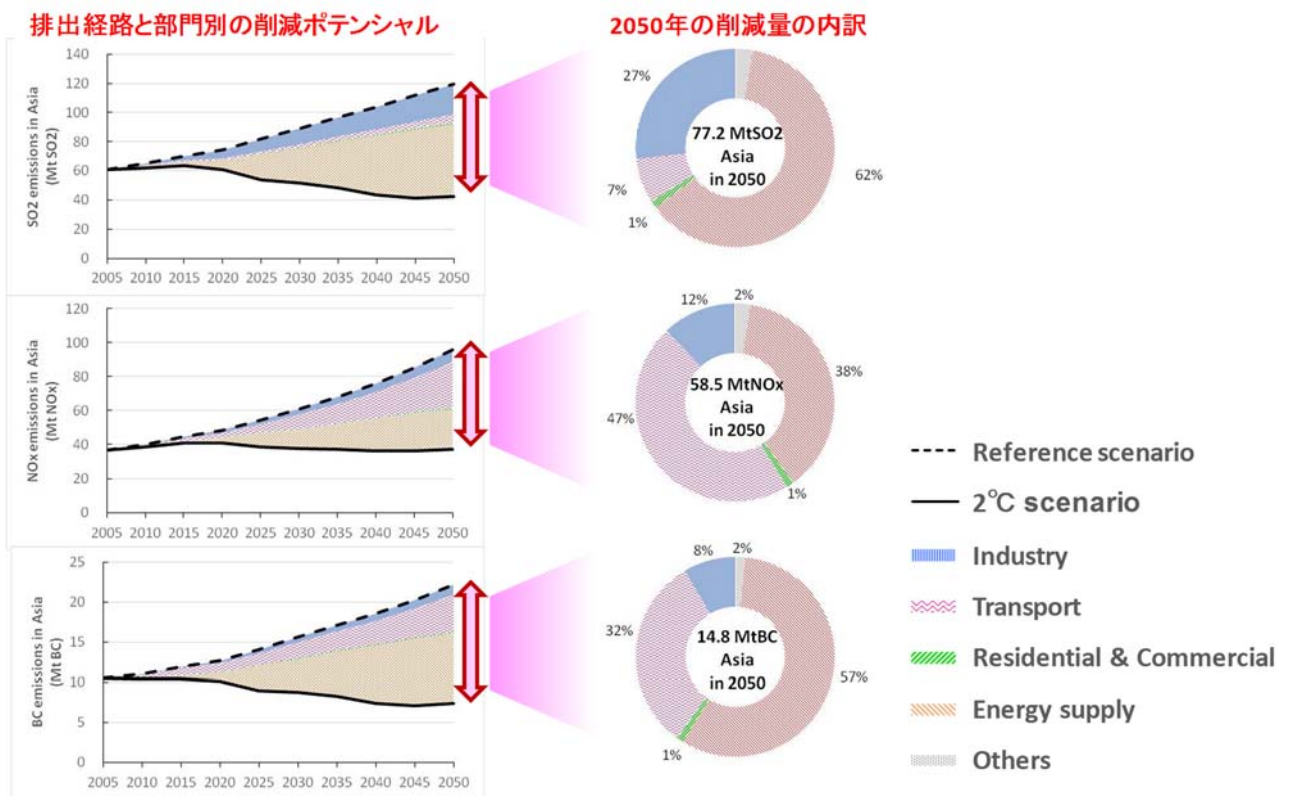
次に、低炭素対策を取ったときに、どの程度、大気汚染物質も同時に削減または増加するか、モデルの挙動を確認するために、削減対策シナリオの強度とその時の炭素価格の感度を評価した。まず、対策シナリオとして、Rogelj et al. (2011)がとりまとめたUNEP Emission GAP reportに掲載されている2°C目標シナリオ、2.5°C目標シナリオ、3°C目標シナリオのGHG排出経路を再現する（すなわち、GHG排出量を制約条件とする）ような対策技術選択と、その結果による大気汚染物質の排出経路について分析した。次に、欧州の排出量取引の炭素価格、クリーン開発メカニズムプロジェクトにおける炭素価格、国際エネルギー機関（IEA: International Energy Agency）が2°C目標相当のシナリオ分析で評価した炭素価格などを参考にして、2050年までの炭素価格の上昇を50US\$/tCO₂、100US\$/tCO₂、200US\$/tCO₂、400US\$/tCO₂と設定したときのGHG排出経路と大気汚染物質の排出経路について分析をした。その結果を図(1)-8に示す。本モデルによる炭素価格の感度は、2050年までに50US\$/tCO₂を課した場合、概ね3°C目標シナリオに相当し、2°C目標シナリオを達成するようなGHG排出量を実現する場合は、2050年に400US\$/tCO₂と高額になることが分かり、エネルギー供給側の低炭素化とエネルギー需要側の省エネ化など、様々な対策が必要である。また、アジアにおける2°C目標シナリオのGHG削減量は、2005年比で約45%減、なりゆきシナリオ比で約70%減であった。2°C目標シナリオを達成するような低炭素対策を取ったときのSO₂、NO_x、BC、PM_{2.5}の削減量を見ると、省エネ化の促進とエネルギー転換などによって、2050年までになりゆきシナリオ比で60~90%減となり、大幅に削減されることがわかった。また、主要な削減部門を分析した結果、図(1)-9より、ガス種別に主要な排出源および削減部門の特徴が異なり、SO₂は発電部門と産業部門、NO_xは運輸部門と発電部門、BCは発電部門と運輸部門が、主要な削減部門であることが試算された。



図(1)-7 AIM/Enduse [Global]を用いた地域別のなりゆきシナリオでの排出量



図(1)-8 AIM/Enduse [Global]を用いたアジアのGHG, SLCP, 大気汚染物質の排出経路



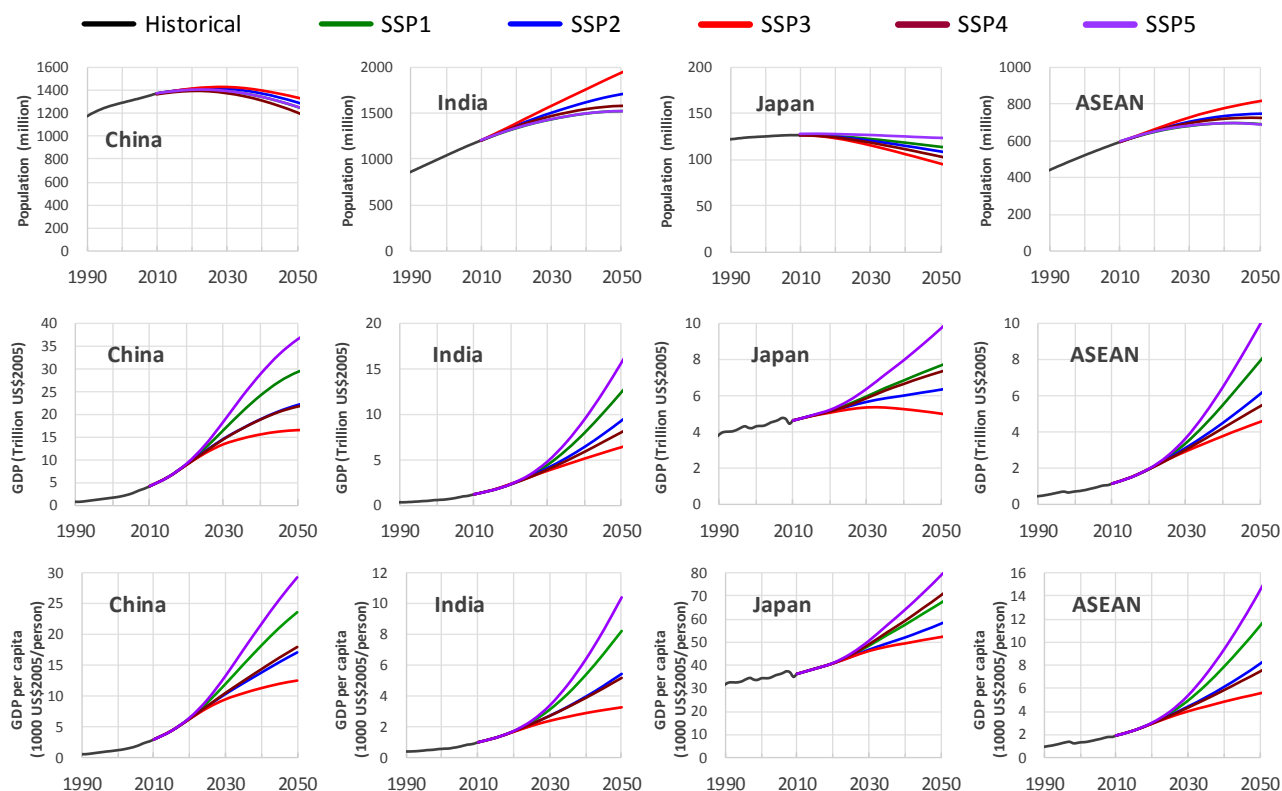
図(1)-9 AIM/Enduse [Global]を用いたアジアのGHG, SLCP, 大気汚染物質の削減要因

ただし、本分析では、なりゆきシナリオにおける家庭業務部門の電化率促進の設定が過大であったため、なりゆきシナリオですでにBCが大幅削減されており、2°C目標シナリオにおいて家庭業務部門のBC削減量が過少な試算になっていることが挙動解析によって判明し、SLCPの一つであるBCに対しては、家庭業務部門の電化率の設定は重要なパラメータであることが分かった。また、本分析では、大気汚染物質の除去装置を設定した効果は未考慮であるため、これら評価対象ガス種的大幅削減を評価するには、低炭素対策による削減効果だけでなく、除去対策も組み合わせて評価していく必要がある。

4-2 SSPシナリオにおける将来の人口・GDPなどの社会経済動態および部門別サービス需要推計

テーマ1、テーマ3およびテーマ4とのテーマ間連携に向けて、多様なシナリオを分析可能とするために、複数のなりゆきシナリオを分析した。そこで、世界各国の人口、GDPなどのなりゆき社会像については、国際モデル比較研究で用いられている共通社会経済シナリオ（SSP: Shared Socioeconomic Pathways）を用いた。SSPには、図(1)-5に示す通り、5つの異なる社会像があるが、シナリオおよび結果の解釈が分かりやすく比較分析できるように、本研究では、現在までの温暖化対策・SLCP対策・大気汚染対策の傾向の延長上の中庸なりゆきの社会像（SSP2）をReferenceとして設定し、さらに対策が強化されていく社会像（SSP1）、現在の政策・対策がうまく進まない社会像（SSP3）の3通りについて分析した。

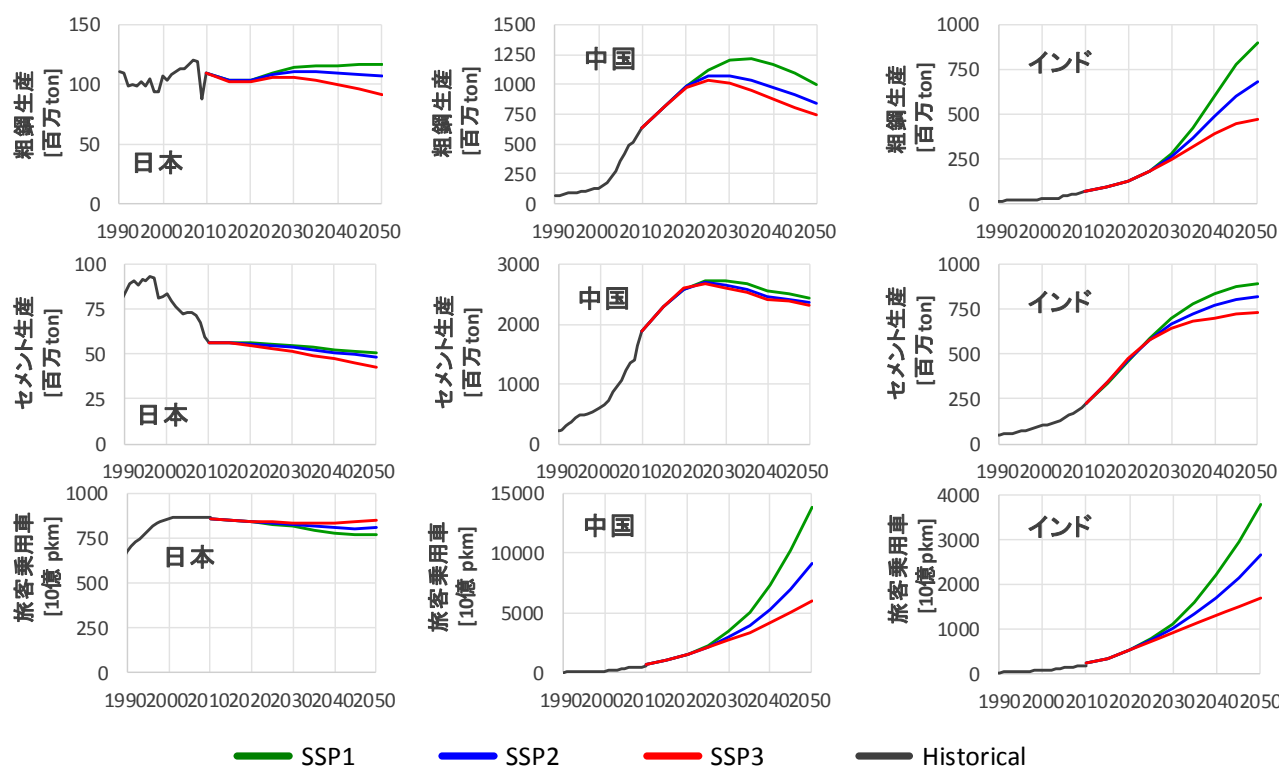
SSPシナリオでは、先進国・途上国の国別の特徴を考慮して社会経済・人口動態が想定されている。本研究では、過去から将来の部門別サービス需要量推計において、人口、GDPの想定を用いるが、過去の統計データと将来のSSPデータの間に不連続性があると、部門別サービス需要量推計の結果に影響を及ぼす。そこでまず、SSPシナリオ作成時に元とされた人口統計データ（United Nation, World Population Prospect 2012版）、GDP統計データ（World Bank, World Development Indicator 2014版）の時系列の挙動を確認し、SSPデータと2010年値で不連続性・不整合が見られる国については、統計データと一致するようにSSPデータを一部補正した。その結果を図(1)-10に示す。例えば、経済成長は多くの国においてSSP1>SSP2>SSP3と想定されているが、人口動態は国によって異なり、途上国では主にSSP3>SSP2>SSP1と想定され、その結果、1人当たりGDPは、多くの国においてSSP1>SSP2>SSP3と言う傾向である。また国別の傾向を見ると、中国では人口は2025~2030年でピークアウトし、減少に転じるが、1人当たりGDPは伸び続け、一方で、インドでは人口も1人当たりGDPも2050年まで伸び続けている。



図(1)-10 共通社会経済シナリオ（SSP）で想定されるアジアにおける人口、GDPの推移

これらの社会経済・人口動態の増減の特徴は、将来の各種活動量、エネルギー消費量、対策の強度等の分析において影響する主要な要因の一つである。そこで、SSPシナリオにおける社会経済・人口動態をもとに、部門別のサービス需要推計モデル群を用いて、地域別・国別に粗鋼生産量、セメント生産量、旅

客輸送量などの部門別の将来の最終エネルギーサービス需要量を推計した。その結果を図(1)-11に示す。将来のサービス需要量の推計結果は、過去における人口や経済成長などの社会経済指標およびサービス需要量の相関関係に基づいて想定される関数およびパラメータだけでなく、将来の社会経済指標のデータの動向によっても、国別・部門別にその特徴は異なるため、本研究で推計した将来の国別・部門別のサービス需要量の結果も、SSP1、SSP2、SSP3シナリオでその特徴が異なることが分かる。例えば、中国の人口は2025～2030年でピークアウトし、人口減少するが、インドは2050年までは人口が増加し続けるため、そのような傾向がサービス需要量の結果にもある程度の影響を与えている。



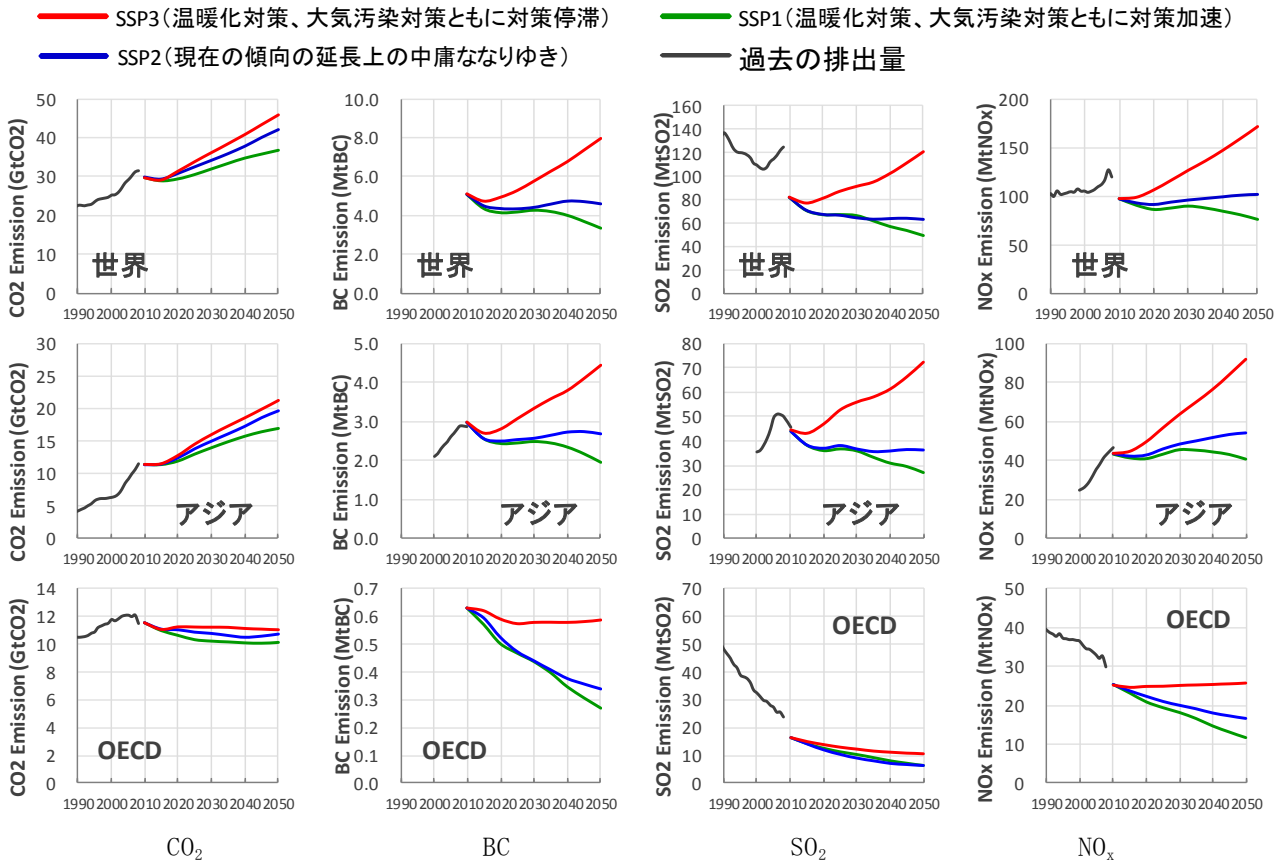
図(1)-11 アジア主要国におけるエネルギーサービス需要量の推計の例

4-3 SSPシナリオに基づいたなりゆきシナリオおよび低炭素対策シナリオの分析

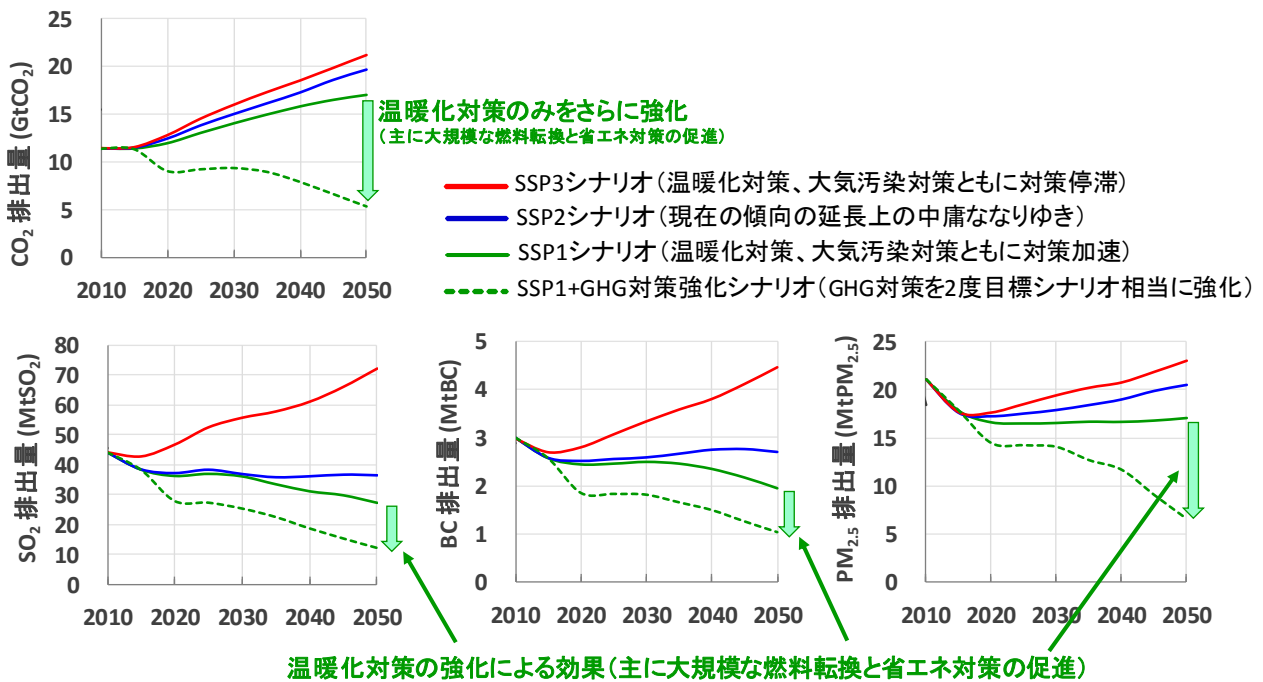
SSPシナリオに基づいて推計されたエネルギーサービス需要量を満たし、各エネルギーの需要と供給が均衡するように総費用最小化のもとで技術選択をした結果によるLLGHG、SLCP、大気汚染物質の排出量について、SSP1、SSP2、SSP3排出シナリオの結果を示す。図(1)-12は、化石燃料起源及び産業起源の各物質のなりゆきシナリオでの排出量の推計結果を、世界、アジア、OECDについて示したものである。また、図(1)-13はアジアについて詳細に示したものである。まずSSP3シナリオでは、将来のSLCP対策、大気汚染対策の導入の継続がうまく進まず、その導入レベルが現在の傾向程度のままと想定したため、経済活動の発展とともにサービス需要量が増加するほど、SO₂、PM_{2.5}、BC排出量は増加する傾向がみられる。一方で、SSP2シナリオでは、現在までの温暖化対策・SLCP対策・大気汚染対策の導入の傾向が将来も続く想定したため、SO₂、PM_{2.5}、BC排出量の増加傾向はSSP3シナリオよりも抑えられ、減少または横ばいの傾向がみられる。さらにSSP1では、SSP2よりも2030年以降の政策・対策の強化を徐々にすすめられていくと想定したため、SO₂、PM_{2.5}、BC排出量は削減傾向に向かうことが分かる。

ただし、CO₂排出量の傾向を見ると、世界およびアジア途上国において、SSP1、SSP2、SSP3シナリオのいずれにおいても増加しており、低炭素社会の実現に向けた傾向となっていない。そこで、SSP1シナリオをベースとし、アジアにおいて2050年排出量が2010年比で半減程度となるように、温暖化対策のみを強化したシナリオ(SSP1+GHG対策強化シナリオ)での排出結果も図(1)-13に示している。図(1)-13から、低炭素社会の実現に向けたシナリオは技術的に可能であり、特に、大規模な燃料転換や省エネ技術の導

入の促進により、大気汚染物質（SO₂、PM_{2.5}など）やSLCP（CH₄、BC）も排出量も同時に大幅に削減できることが示された。

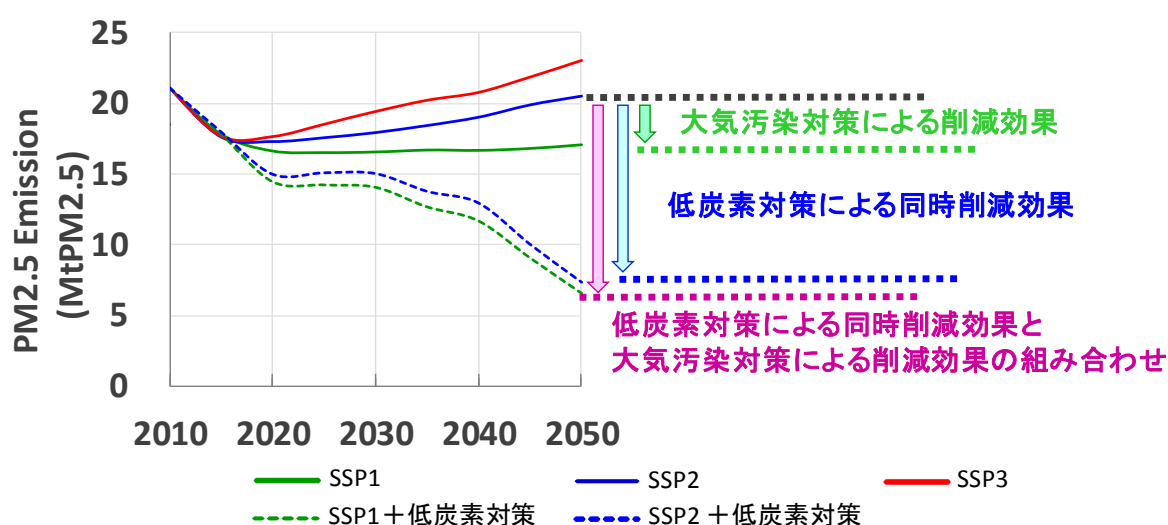


図(1)-12 AIM/Enduse [Global]を用いたなりゆきシナリオでの排出量（上段：世界、中段：アジア、下段：OECD）



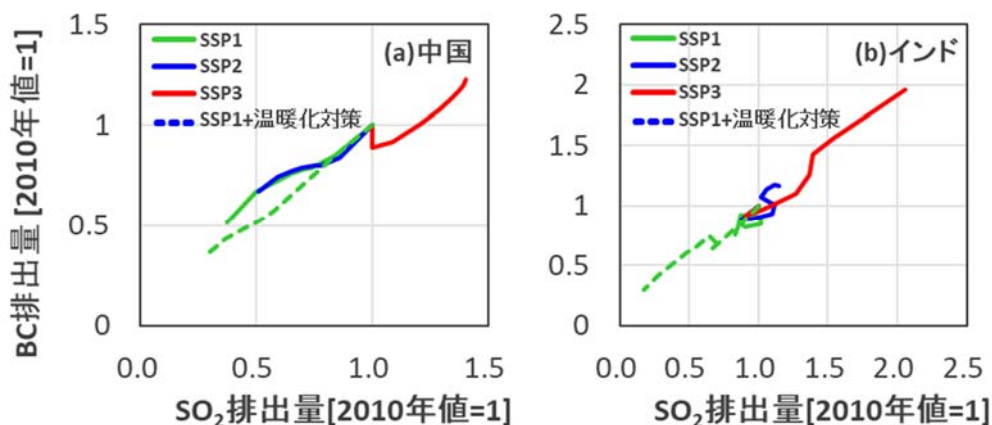
図(1)-13 アジアにおけるLLGHG、SLCP、大気汚染物質の排出量

次に、異なるなりゆきシナリオであるSSP2とSSP1に対して、2℃目標を達成するような同程度の低炭素対策をとったときの大気汚染物質（SO₂、PM_{2.5}など）やSLCP（CH₄、BC）の排出量の挙動を分析した。その結果の例として、図(1)-14にアジアにおけるPM_{2.5}排出量を示す。まず、低炭素対策による同時削減効果（例えば、「SSP2シナリオ」から「SSP2+低炭素対策シナリオ」への削減量）は、なりゆきシナリオの幅で考えられる大気汚染対策（例えば、「SSP2シナリオ」から「SSP1シナリオ」への削減量）よりも、大幅に削減量が多いことが分かる。一方で、低炭素対策を取った後に、異なるなりゆきシナリオであるSSP2とSSP1の大気汚染対策の導入率の差異を考慮しても（例えば、「SSP2+低炭素対策シナリオ」から「SSP1+低炭素対策シナリオ」への削減量）、その削減効果は限定的で、なりゆきシナリオの幅で考えられる大気汚染対策（例えば、「SSP2シナリオ」から「SSP1シナリオ」への削減量）よりも小さい。これは、低炭素対策を取ることでエネルギー転換が進み、大気汚染物質の排出源となる化石燃料消費量がすでに減っており、大気汚染対策の導入効果が小さくなるためである。したがって、低炭素対策後に大幅に大気汚染物質も削減する場合は、SSP1レベルよりもさらに大気汚染対策を強化する必要がある。



図(1)-14 アジアにおけるPM_{2.5}排出量

ところで、地球温暖化対策のための化石燃料消費から再生可能エネルギーへの転換は、同時に大気汚染対策にもなるが、燃料燃焼によって排出されるSO₂、NO_xなどの大気汚染物質には地域的な冷却効果がある。そのため、地球温暖化対策によって削減される大気汚染物質によっては新たな温暖化を促進してしまう可能性がある。例えば、SO₂削減は、健康影響の軽減につながるが、地域的な冷却効果も低減するため、温暖化影響の増加に影響を及ぼす。一方で、SLCPの一つであるBC削減は、健康影響の軽減および温暖化の低減の双方に影響を及ぼす。そこで、SO₂とBCに注目し、2010年の値を基準としたときの、中国およびインドのSO₂およびBCの削減傾向の相関関係を図(1)-15に示す。これらのなりゆきのSSPシナリオによるインドと中国のBCとSO₂排出量の関係はどのシナリオも似ており、SLCP削減シナリオとしては比較的限られ十分ではない。そのため、温暖化を効率的に緩和するには、同時に効果的なSLCP削減対策を実施することが必要であり、より広範な排出削減の可能性についての探索が必要であることがわかった。



図(1)-15 中国、インドにおけるSO₂とBCの排出削減傾向の関係

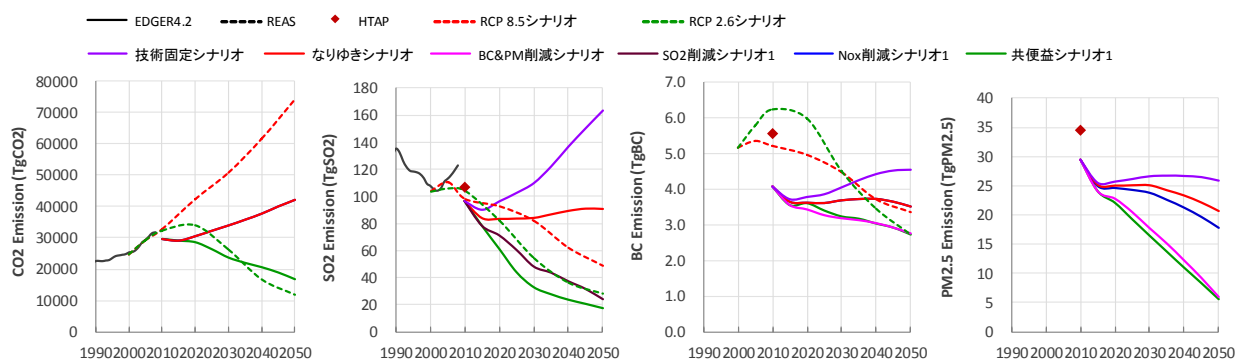
4-4 温室効果ガス削減対策とSLCP削減対策を同時実現するシナリオの探索

温暖化対策、SLCP対策、大気汚染対策の検討が可能となるように改良した、世界を対象とした技術選択モデルであるAIM/Enduse [Global]を用いて、パリ協定で合意された2℃目標シナリオ相当の低炭素対策を導入したときの評価対象ガス種の同時削減効果や相殺効果の分析を行った。また、テーマ1、テーマ3およびテーマ4とのテーマ間連携に向けて、大気汚染対策による健康被害の軽減と温暖化への影響の相対的な評価を目的にした共通シナリオの探索を行った。評価対象ガス種(CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆, SO₂, NO_x, BC, OC, PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NMVOC)のうち、健康被害と温暖化への影響の評価において代表的なガス種であるCO₂, SO₂, BC, PM_{2.5}に注目をして、共通シナリオの枠組みを検討した。検討した共通シナリオの概要を表(1)-3に、また世界の排出経路の結果を図(1)-16(a)に示す。なお、なりゆきシナリオは、上述で評価したSSP2を用いている。テーマ間連携共通シナリオの結果と比較のために、世界の排出インベントリについてはEDGER4.2およびHTAPの結果を、世界の将来排出シナリオについてはIPCC第五次評価報告書で用いられたRCP8.5シナリオおよびRCP2.6シナリオの結果を図(1)-16(a)に参考として示す。また、基準年排出量を基準(2010年排出量=1)としたとき、将来のガス種別排出量がどの程度の増加・減少傾向なのか排出経路の特徴を分析するために、主要なガス種の関係性を表したものを図(1)-16(b)に示す。

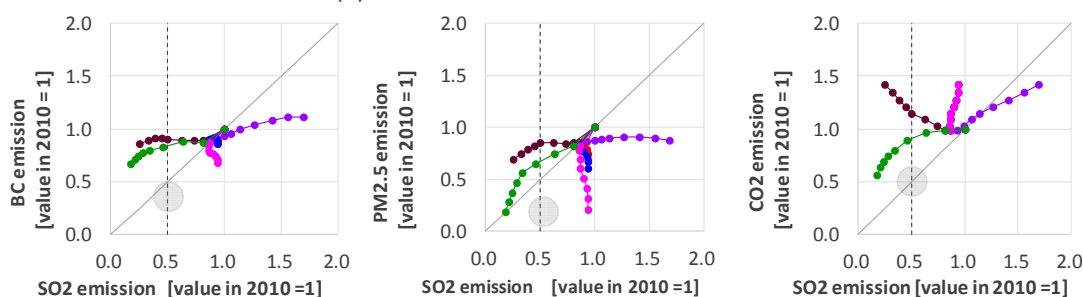
技術固定シナリオはSLCPおよび大気汚染物質について、基準年レベル以上の除去装置(End-of-Pipe)対策を導入していないため、活動量の増加とともにSO₂, BC, PM_{2.5}などの排出量が増加し、排出削減の面から最悪の将来像を表している。一方で、BC&PM削減シナリオ、SO₂削減シナリオ1、NO_x削減シナリオ1では、SLCPおよび大気汚染物質を最大限削減するために、2050年までにEnd-of-Pipe対策を世界中で100%普及させる最善の将来像を表している。そして共便益シナリオ1では2℃目標相当の低炭素対策を取ったうえで、End-of-Pipe対策を世界中で100%普及させる像を表している。健康被害の軽減と温暖化影響の減少の両立を考えると、SO₂については、健康影響の観点からは大幅に削減したいが地域的な冷却効果の観点からは程々の削減レベルで留めるのがよいかもしれない。またBCについては、健康影響の観点だけでなく温暖化影響の観点からも大幅に削減したいが、BCの発生源はOCの発生源と多くが共通しており、BCを大幅に削減するとOCも大幅に削減され、OCは地域的な冷却効果があるため、BCの削減についてもある程度のレベルで留めるのがよいかもしれない。一方で、PM_{2.5}は健康影響の観点から可能な限り削減するのがよく、またCO₂はIPCC第五次評価報告書の結果より、2℃目標の達成にむけて2050年までに2010年比で50%減以上を実現する必要がある。そのような観点から共通シナリオの排出経路に関する評価チャートの結果を分析すると、いずれのシナリオも低炭素対策、大気汚染対策、SLCP対策を十分に両立させるような排出経路とは言えず、例えば2050年の結果が図(1)-16(b)に網掛けで示すような範囲にない。そのため、ここで検討した共通シナリオの対策技術の組み合わせの内容をさらに吟味し、健康被害の軽減と温暖化影響の軽減を両立させるようなシナリオを、さらに探索していく必要がある。

表(1)-3 S12テーマ間連携に向けた9つの共通シナリオの概要

シナリオ	概要
① 技術固定シナリオ	技術は基準年で固定。活動量増とともに、各ガス種が排出量増となる最悪シナリオ。
② なりゆきシナリオ	現状の政策・対策の傾向が継続するような基準シナリオ。
③ BC&PM削減シナリオ	end of pipe対策を強化し、 BC&PMのみを大幅に削減 するシナリオ。
④ SO ₂ 削減シナリオ1	end of pipe対策を強化し、 SO₂のみを大幅に削減 するシナリオ。
⑤ SO ₂ 削減シナリオ2	end of pipe対策をなりゆきシナリオよりも推進し、 SO₂のみをある程度削減 するシナリオ。 (健康影響の軽減と地域的な冷却効果について、シナリオ④との比較が目的)
⑥ NO _x 削減シナリオ1	end of pipe対策を強化し、 NO_xのみを大幅に削減 するシナリオ。
⑦ NO _x 削減シナリオ2	end of pipe対策をなりゆきシナリオよりも推進し、 NO_xのみをある程度削減 するシナリオ。 (健康影響の軽減と大気中CH ₄ 増による気候影響について、シナリオ⑥との比較が目的)
⑧ 共便益シナリオ1	シナリオ③、④、⑥の SLPC 、 大気汚染の大幅削減対策 の組み合わせ、および 2℃目標シナリオ相当の低炭素対策 によるSLCPs、大気汚染物質の同時削減効果を考慮したシナリオ。
⑨ 共便益シナリオ2	シナリオ③、⑤、⑦の SLCP 、 大気汚染対策 の組み合わせ、および 2℃目標シナリオ相当の低炭素対策 によるSLCPs、大気汚染物質の同時削減効果を考慮したシナリオ。 (健康影響の軽減、地域的な冷却効果、大気中CH ₄ 増による気候影響について、end of pipe対策や低炭素対策による共便益効果のシナリオ⑧との比較が目的)



(a)世界のガス種別の排出経路



(b)世界の排出経路の評価チャート

図(1)-16 テーマ間連携に向けた共通シナリオに関する世界の排出経路の探索とその評価チャート

そこで、健康被害の軽減と温暖化への影響への対策を両立するようなシナリオの探索を実施した。対策技術の組み合わせを検討する際に、国別・部門別・ガス種別に主要な排出源の傾向が異なるため、多種多様な組み合わせが考えられる。表(1)-3の共通シナリオの結果の特徴を解析したところ、End-of-Pipe対策の導入量だけでなく、エネルギー転換、電源構成および炭素隔離貯留(CCS)の設定が結果に大きな影響を与えることが分かった。そこで、表(1)-3の共便益シナリオの内容をさらに吟味し、2℃目標相当の低炭素対策を導入しつつ、主要な対策の導入強度を変化させた下記の4つのシナリオを分析した。

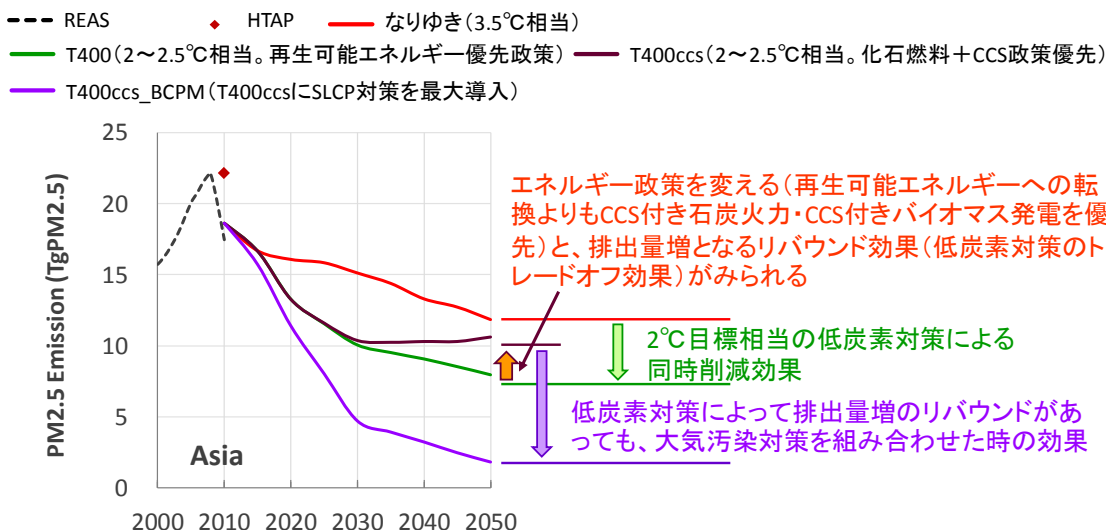
- 1) T400シナリオ： 化石燃料よりも再生可能エネルギーの普及を優先するシナリオ、
- 2) T400ccsシナリオ： 再生可能エネルギーよりもCCS付き石炭火力発電やCCS付きバイオマス

発電を優先するシナリオ、

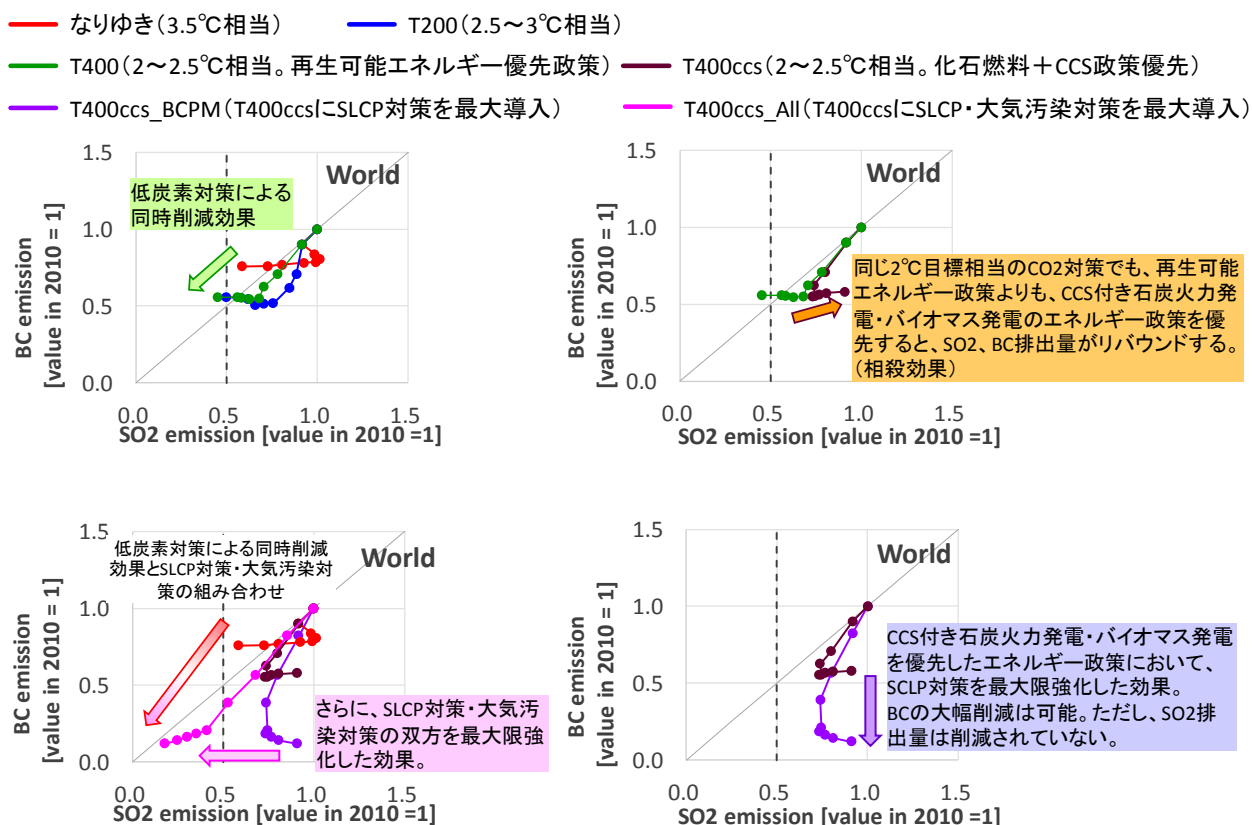
- 3) T400ccs_BCPMシナリオ： T400ccsシナリオに加えてBC&PM対策を最大導入するシナリオ
- 4) T400ccs_Allシナリオ： T400ccsシナリオに加えて、BC&PM対策だけでなく、SO₂、NO_x対策も最大導入するシナリオ

各シナリオの排出経路の特徴を表す例として、アジアにおけるPM_{2.5}排出経路の結果を図(1)-17に示す。その結果、2℃目標相当の低炭素対策による同時削減効果がみられるシナリオ(T400シナリオ)に対して、エネルギー政策を変えるシナリオ(T400ccsシナリオ)では、2℃目標相当の達成にむけて再生可能エネルギーへの転換ではなくCCS付き石炭火力・CCS付きバイオマス発電を極端に優先するように設定すると、例えば図(1)-17に示すPM_{2.5}排出のように、ガス種によっては排出量増となるリバウンド効果(低炭素対策によるトレードオフ効果)が見られた。しかし、低炭素対策によって排出量増のリバウンドがあっても、さらに大気汚染対策を組み合わせ、BCやPMを除去する集塵装置を強化すると(T400ccs_BCPMシナリオ)、リバウンド効果を打ち消し、PM_{2.5}排出を大幅削減できることが分かった。

そこで、健康被害の軽減と温暖化影響の減少の両立の観点から、SO₂およびBCに注目し、それらの削減傾向の特徴を分析した評価チャートの例を図(1)-18に示す。低炭素対策の観点からみると、再生可能エネルギーも、CCS付き石炭火力発電やCCS付きバイオマス発電も両方とも有効な対策であるが、SLCPおよび大気汚染物質の観点からみると、どちらの対策を選択するかによって大きな差異が生じる。再生可能エネルギーを選択すれば、CO₂削減だけでなくSLCP・大気汚染物質の同時削減効果がみられるが、CCS付き石炭火力発電・バイオマス発電を選択すると、低炭素対策としてCO₂が削減されてもSLCP・大気汚染物質の排出量が増加する相殺効果の方が大きくなる。そこでEnd-of-Pipe対策を導入し、SLCP・大気汚染物質を削減すれば、低炭素対策によって排出量増となるリバウンド効果を打ち消すことができる。このように低炭素対策、大気汚染対策、SLCP対策の組み合わせおよびその導入強度を工夫することによって、健康被害の軽減と温暖化影響の軽減を両立させるようなシナリオが検討可能となることが分かった。



図(1)-17 シナリオの差異による排出経路の特徴：アジアにおけるPM_{2.5}排出量



図(1)-18 健康被害の軽減と温暖化影響の減少の両立に向けた排出シナリオの検討と排出経路の評価

4-5 S12テーマ間連携に向けたSLCP削減シナリオの開発

これまでのモデル開発およびシナリオ分析により、国別・部門別・ガス種別に排出増減の傾向が異なり、ガス種別に大幅削減に向けた有効な対策の組み合わせが異なるため、対策の組み合わせ次第で相乗効果・相殺効果があることが分かった。そこで、2°C目標シナリオの実現に向けた低炭素対策を取りつつ、健康影響・環境影響を軽減させ、さらに2°C目標シナリオの実現を後押しするようなSLCP削減シナリオを検討し、テーマ1、テーマ3およびテーマ4とのテーマ間連携に向けた共通シナリオを開発した。

本研究では、SLCPとしてBC、CH₄および対流圏O₃の削減に注目をした。このとき、1次大気汚染物質としてのSLCP (BC, CH₄) と、大気化学反応の結果で生成される二次大気汚染物質である対流圏O₃の違いを考慮してSLCP削減シナリオを検討できるように、BCやCH₄の排出源に対する「直接的な削減対策」と、対流圏O₃の前駆物質であるNO_x, CO, NMVOCの排出源に対して対策を取ることで対流圏O₃生成を抑制する「間接的な削減対策」の二通りに注目した。また、テーマ3による最新の研究成果より、大気汚染物質であるNO_xを削減すると大気化学反応により大気中CH₄が増加し、温暖化が促進されてしまい、一方で、NO_x削減と同時にCO削減を実施できれば、大気化学反応による大気中CH₄の増加を抑制できることが示唆された。そのため、同一地域内においてNO_xとCOを同時に削減することは、大気中CH₄の増加を抑制するだけでなく、対流圏O₃の生成を抑制するため、SLCP削減対策の観点からみると間接的に重要な対策と分かった。このような、最新の研究知見も考慮し、表(1)-2に示すSLCPや大気汚染物質の削減による特徴を踏まえて、SLCP (BC, CH₄, 対流圏O₃) の増加・減少に影響を与える直接的な削減対策と間接的な削減対策の両方を考慮して、広範囲な対策の組み合わせを試算し、その差異による相乗・相殺効果の特徴と程度を分析し、テーマ間連携に必要なとされるSLCP削減シナリオを完成させた。

具体的には、燃料燃焼起源のSLCPであるBCと大気汚染物質であるSO₂, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NMVOCの排出経路に差異が生じるように、かつ現状の技術対策で実現可能な低炭素対策・大気汚染対策・SLCP対策の組合せを検討した。例えば、2°C目標に向けて省エネ対策を促進すれば、部門別・ガス種別に削減効果に差異があるものの、すべてのガス種が削減方向に向かう共便益効果がある。また、発電部門において再生可能エネルギーを促進すれば、すべてのガス種が削減方向に向かう相乗効果があるが、特に石炭

火力の割合が大きい国ほどCO₂だけでなくSO₂の削減効果も顕著に表れる。一方で、CCS付き石炭火力を促進すれば、CO₂は大幅削減されるがSO₂は逆に増加するため、健康影響の軽減のためには脱硫装置のさらなる普及対策も同時に取り組む必要がある。また民生・業務部門や運輸部門で電化を促進すれば、発電部門の電源構成次第で、BC、OC、PM_{2.5}、NO_x、CO、NMVOCは削減・増加のどちらにも動き、相乗効果・相殺効果の双方が考えられる。本研究では様々な対策の組合せを検討したが、特にSO₂、NO_x、PM_{2.5}、BC、CO、NMVOCの排出経路に顕著な差異が得られた表(1)-4に示すシナリオを定量的に評価して比較した。なお、テーマ間連携として、過去における各ガスの排出量については、テーマ1で改訂された排出インベントリであるREASの結果と整合するように基準年排出量を補正した。また、テーマ3に対しては、各ガスの将来の排出量について、部門別に0.5度メッシュ排出量に変換（ダウンスケール）したデータを提供し、テーマ横断での排出シナリオの推計を実施した。

Ref: 大気汚染対策や気候変動緩和対策について、現状の政策・対策の傾向が将来も継続するような基準シナリオ。（SSP2シナリオをベースとしている）。

EoPmax: SO₂、NO_x、BC、OC、PM_{2.5}、PM₁₀への除去装置(EoP: End-of-Pipe)対策を、Refシナリオに対して”最大限に”導入するシナリオ。具体的には発電・産業・運輸部門に対して、EoP対策を2050年までに全世界で100%導入を想定

EoPmid: SO₂、NO_x、BC、OC、PM_{2.5}、PM₁₀へのEoP対策を、Refシナリオよりも強化するシナリオ。具体的には発電・産業・運輸部門に対して、EoP対策を2050年までに先進国では100%導入、途上国では現状の水準から50%程度の追加導入を想定

2D: 2°C目標の達成に向けたシナリオ。具体的にはエネルギー供給部門・需要部門の双方での省エネ対策、電源構成の低炭素化、民生・業務・運輸での電化率の促進などを想定。2050年の炭素価格は400US\$/tCO₂

CCS: 2Dシナリオにて、特に発電部門で再生可能エネルギーよりCCS付き石炭火力発電を優先的に導入

RES: 2Dシナリオに、特に発電部門でCCS付き石炭火力発電より再生可能エネルギーを優先的に促進

BLD: 2Dシナリオに、特に民生・業務部門での電化を加速する。具体的には2050年までに先進国だけでなく途上国もオール電化に近づく。また電化が難しい民生・業務の用途では石炭・灯油・バイオマスではなくガス化する。

TRT: 2Dシナリオに、特に運輸部門での電化を加速する。具体的には世界で2040年以降はEV車が大幅普及。また内燃機関車が残る場合は、2050年までにバイオ燃料混合50%とする。

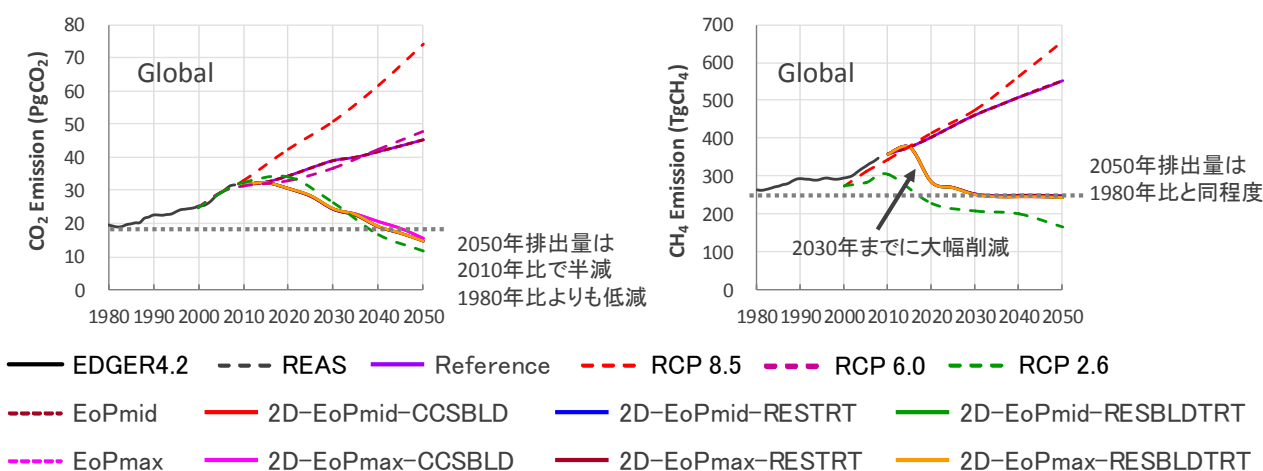
表(1)-4 S12テーマ間連携に向けた9つの共通シナリオの概要

シナリオグループ	シナリオコード名	グラフ	主な低炭素対策・大気汚染対策・短寿命気候汚染物質対策の組合せ					
			除去対策強化	2度目標低炭素対策	CO ₂ 回収貯留(CCS)強化	再生可能エネルギー強化	民生部門電化強化	運輸部門電化強化
なりゆき	Ref							
除去対策のみ	EoPmid		Mid					
	EoPmax		Max					
2°C目標 +除去対策	2D-EoPmid-CCSBLD		Mid	✓	✓		✓	
	2D-EoPmax-CCSBLD		Max	✓	✓		✓	
	2D-EoPmid-RESTRT		Mid	✓		✓		✓
	2D-EoPmax-RESTRT		Max	✓		✓		✓
	2D-EoPmid-RESBLDTRT		Mid	✓		✓	✓	✓
	2D-EoPmax-RESBLDTRT		Max	✓		✓	✓	✓

本研究の推計結果による世界のCO₂排出経路、CH₄排出経路とIPCC AR5で用いられた代表濃度経路シナリオ(RCP: Representative Concentration Pathways)による排出経路の比較を図(1)-19に示す。

Referenceの結果は、将来の最終サービス需要量の想定や現状の延長上にあるなりゆき対策の内容など

によって排出量経路は変わるが、本研究のReferenceの世界のCO₂排出経路はRCP6.0相当であった。EoPmid, EoPmaxシナリオは低炭素対策を取っていないため、Referenceと同様のCO₂排出経路である。また2°C目標シナリオのCO₂排出経路はRCP2.6相当（約2°C上昇相当）である。複数の2°C目標シナリオは対策の組合せや導入強度が異なるが類似したCO₂排出経路であり、世界の2050年CO₂排出量は2010年比で半減、1980年よりも低減し、アジアの2050年CO₂排出量は2000年と同程度まで低減する。またSLCPであるCH₄に関して世界の排出経路を見ると、複数の2°C目標シナリオの排出経路はほぼ同様である。これはCH₄の主な排出源が非燃料燃焼起源である農畜産、廃棄物および化石燃料採掘の漏洩部門であり、低炭素対策や大気汚染対策の組み合わせの違いの影響を受けないためである。

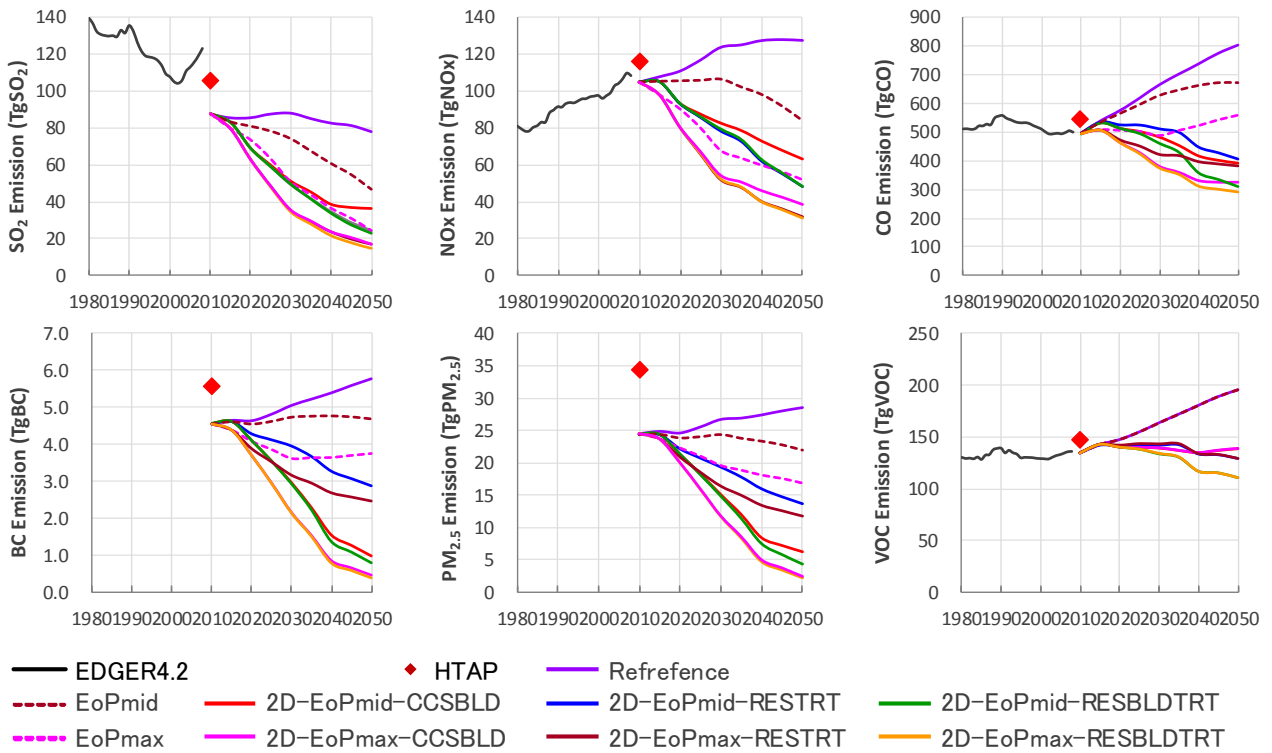


図(1)-19 テーマ間連携に向けた共通シナリオ：世界のCO₂、CH₄の排出経路

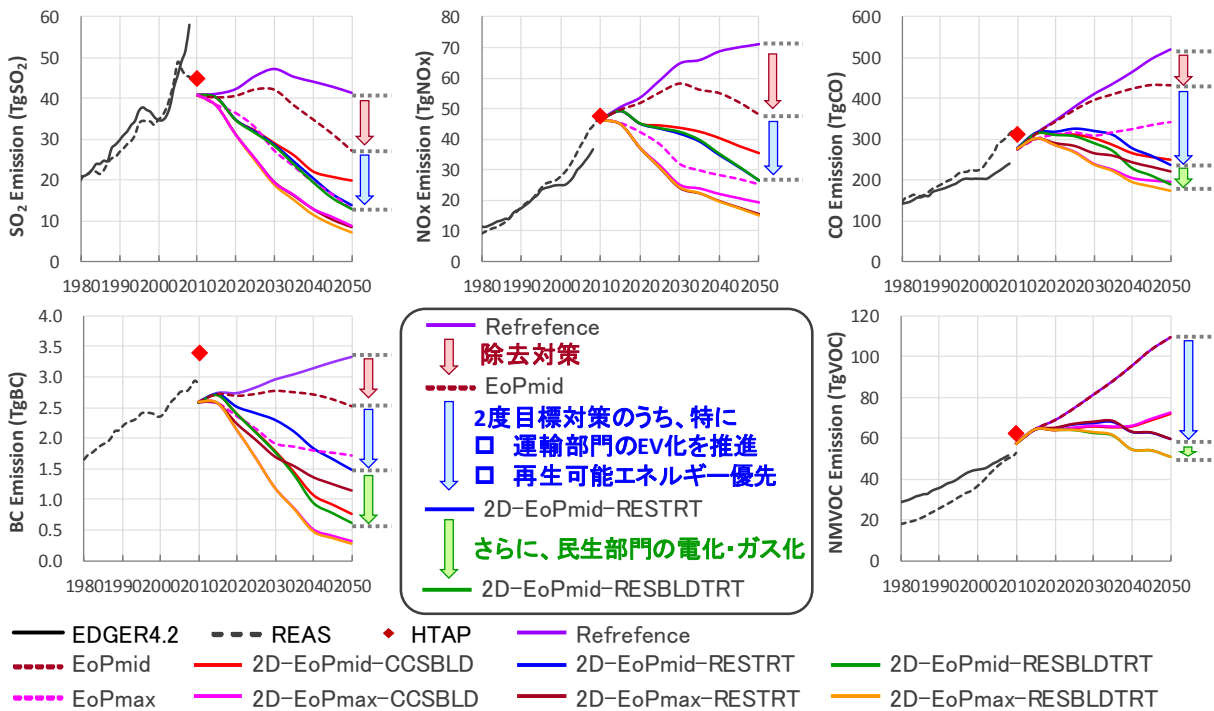
世界の大気汚染物質やSLCPのうち、特にアジアの挙動が重要である。そこで、世界およびアジアにおけるBC, SO₂, NO_x, PM_{2.5}, CO, NMVOCの排出経路を図(1)-20および図(1)-21に示す。図(1)-19より複数の2°C目標シナリオのCO₂排出経路は類似しているが、低炭素対策・大気汚染対策・SLCP対策の組み合わせによって、SO₂, NO_x, BC, PM_{2.5}, CO, NMVOCの排出経路は大きく異なる。下記に代表的な特徴を考察する。

- 1) SO₂は、2D-EoPmid-CCSBLDの場合、除去対策の導入の効果よりCCS付き石炭火力発電の導入の効果が上回り、十分に削減されずに、排出量リバウンドが起こる。
- 2) SO₂は、2D-EoPmax-RESTRT, 2D-EoPmax-RESBLDTRT, 2D-EoPmax-CCSBLDの排出経路は類似。つまり低炭素対策の組合せの効果よりも、除去対策をMAXにした効果の方が大きく、どの排出経路も類似。
- 3) NO_xは、2D-EoPmax-RESTRT, 2D-EoPmax-RESBLDTRTの排出経路は類似（SO₂と同じ理由）。2D-EoPmax-CCSBLDは2030年までは類似だが、2030年以降の差は運輸部門の電化・バイオ燃料化の導入強度の差異による。
- 4) SO₂とNO_xは、2D-EoPmid-RESBLDTRT, 2D-EoPmid-RESTRT, EoPmaxの2050年排出量は類似。つまり、除去対策のみMAXにした場合と、除去対策はMIDだが再生可能エネルギー促進を組合せた場合の効果は同程度。
- 5) BCは、2D-EoPmid-RESBLDTRTや2D-EoPmid-CCSBLDの方がEoPmaxよりも削減効果大きい。つまりBCの大幅削減には民生業務部門の電化・ガス化が効果的。
- 6) BCは、2D-EoPmid-CCSBLD, 2D-EoPmid-RESBLDTRTは2040年頃まで排出経路は類似。それ以降の差は、運輸部門の電化・バイオ燃料化の導入強度の差異による。
- 7) BC, PM_{2.5}は、2D-EoPmax-CCSBLD, 2D-EoPmax-RESBLDTRTの排出経路は類似。民生業務部門の電化・ガス化と除去対策MAXが組み合わさると、最大限まで削減される。
- 8) NMVOCは、除去対策の導入強度の差異によって排出結果に影響を与えず、低炭素対策の組合せ（RESBLDTRT, RESTRT, CCSBLD）次第で挙動が変わる。

9) CO は、低炭素対策の組み合わせおよび運輸部門の排ガス対策の強化次第で挙動が変わる。2D-EoPmax-CCSBLD, 2D-EoPmax-RESBLDTRT は2040年頃まで排出経路が類似し、主に民生業務の電化・ガス化の効果により、2040年以降の差は、運輸部門の電化・バイオ燃料化の導入強度の差異による。



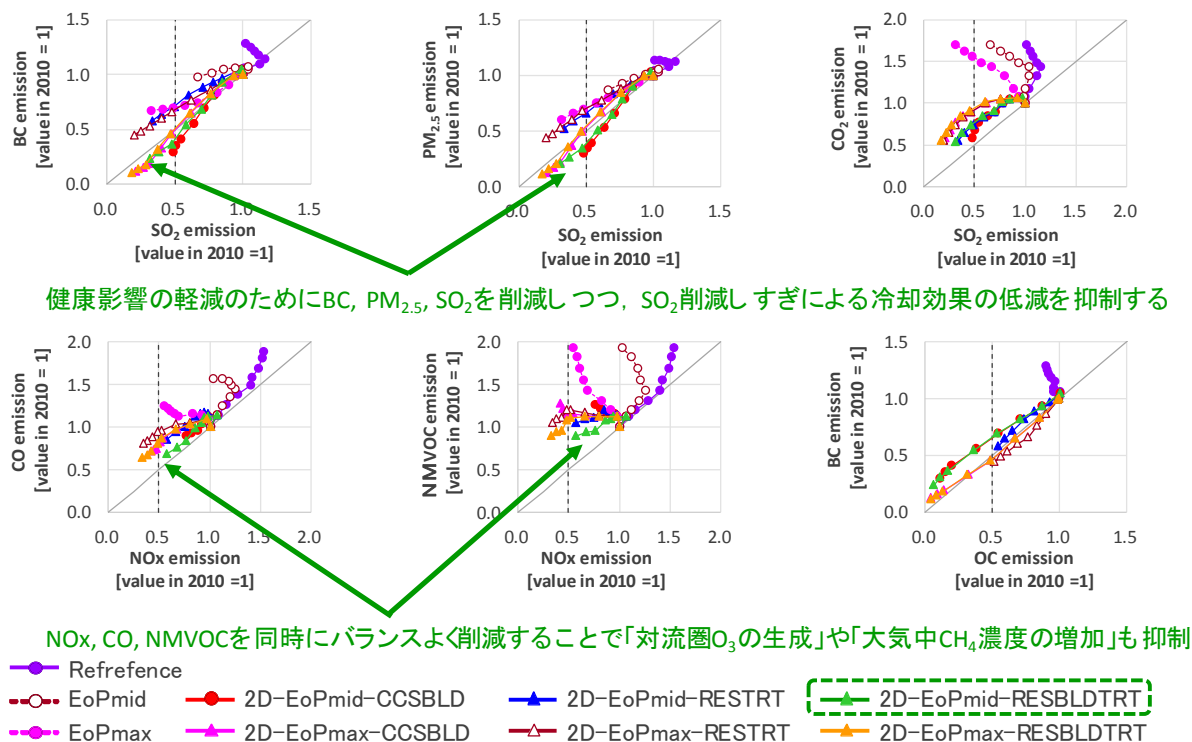
図(1)-20 テーマ間連携に向けた共通シナリオ：世界のSLCP，大気汚染物質の排出経路



図(1)-21 テーマ間連携に向けた共通シナリオ：アジアのSLCP，大気汚染物質の排出経路

SLCPであるBC, CH₄および対流圏O₃の前駆物質であるNO_x, CO, NMVOCは、様々な対策を組合せることに

よって、アジアは最大でそれぞれ2010年比で89%減、22%減、67%減、37%減、11%減（またReference比で92%減、50%減、79%減、67%減、54%減）となった。そこで、燃料燃焼由来の排出量への低炭素対策と大気汚染対策を考慮したこれらのシナリオに対して、SLCP削減シナリオとして直接的な削減対策の効果と間接的な削減対策の効果の程度を分析するために、図(1)-21について主要なガス種間の削減経路の相関関係を評価した結果を図(1)-22に示す。



図(1)-22 アジアにおけるガス種別排出削減経路の相関関係(2010年値を基準として2050年までの評価)

BCを大幅削減しつつ、健康影響を考慮してSO₂も十分に削減するには、2D-EoPmid-CCSBLD, 2D-EoPmax-CCSBLD, 2D-EoPmid-RESBLDTRT, 2D-EoPmax-RESBLDTRTのいずれかがよい。ただし、SLCP対策としてBCを大幅削減するために、民生業務部門で電化・ガス化を大幅促進すると、BC-OC相関図より、冷却効果のあるOCも同時に大幅削減されることに留意が必要である。もう一つのSLCP対策として対流圏O₃の抑制には前駆物質であるNO_x, CO, NMVOCの削減が重要であり、また、大気中CH₄の増加の抑制には同時にNO_x, COの削減が重要であることを考慮すると、2D-EoPmid-RESBLDTRTや2D-EoPmax-RESBLDTRTが効果的なSLCP削減シナリオだと考えられる。一方で、SO₂, NO_x, NMVOC削減による地域的な冷却効果の低減(=温暖化影響の増加)による相殺効果を考慮すると、結論として、「2°C目標を再生可能エネルギー強化、民生・運輸での電化促進、汚染除去対策は強化継続(2D-EoPmid-RESBLDTRT)」が総合的にSLCP削減シナリオとして有効であると考えられる。

4-6 S12テーマ間連携に向けたブラウザ版簡易評価ツールの開発

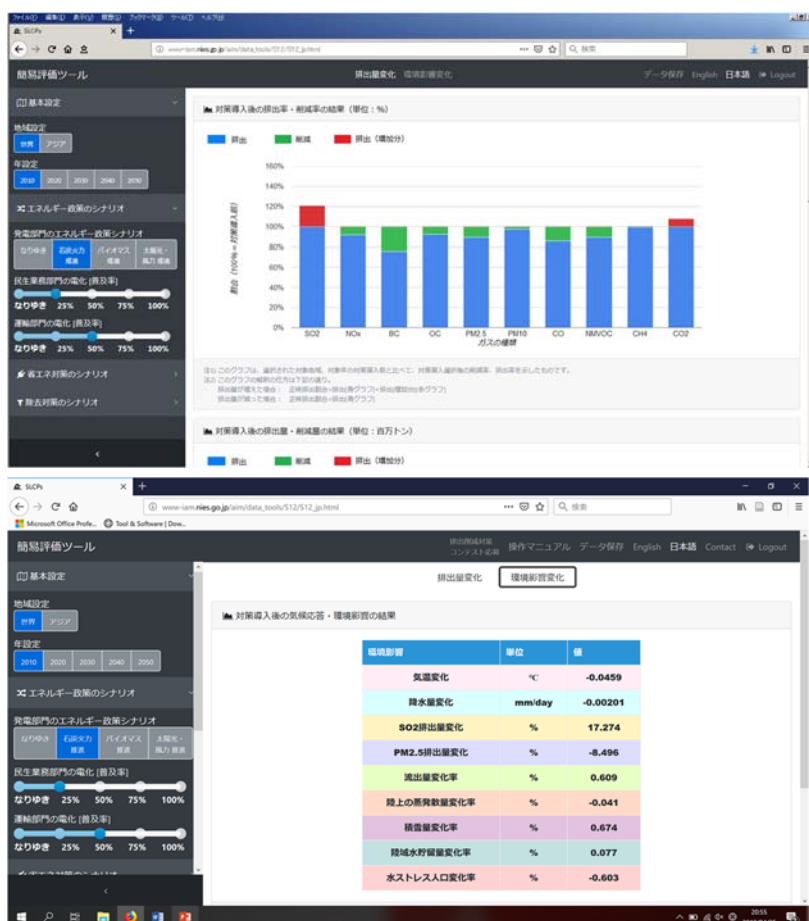
本研究により、アジアの最新のSLCP排出インベントリであるREASと整合したSLCP排出削減対策を検討することができ、排出削減対策に必要な技術選択の評価が可能になった。将来のなりゆきの社会経済シナリオであるSSPシナリオを基礎として、健康重視シナリオ、温暖化対策重視シナリオなど広範囲なSLCP排出経路の探索を行なった結果、環境被害や気候影響が異なるシナリオの存在が明らかになった。このように、本研究で開発したAIM/Enduseモデルの条件を変更することで、様々な将来シナリオの検討が可能となったが、こうしたモデルを使ってシミュレーションを行うには、データ構築やプログラミングなど様々な知見と計算時間が必要となる。このため、ステークホルダーが集まって目標や対策を議論している最中にモデルを使って試算し、その結果を議論に提供するという事は難しい。

そこで、AIM/Enduseモデルで計算した様々なシナリオの結果をあらかじめ解析しておき、モデルの結果と整合しつつ、排出量の大きい主要な排出部門および削減効果の大きい主要な削減対策に着目し、排出削減効果を近似的ではあるが簡易に推計し、さらには気候モデルの結果を解析し、簡略化推計式を用いて環境影響も提示できるようにすることで、対策技術導入レベルの設定を一般ユーザーが操作することによって、リアルタイムで排出量や環境影響などの議論に貢献できるようにしたブラウザ版簡易評価ツールAIM/SLCP (Scenario Lookup by Coalition for Protecting environment tool) を開発した。Web上の公開画面を図(1)-23に示す。AIM/SLCPツールは、PCだけでなくタブレット上でも容易に一般ユーザーが操作可能となるように設計を工夫し、ユーザーが評価対象地域として「世界」および「アジア」、評価対象年として「2010年～2050年」までの10年毎の評価が可能となるように開発した。



図(1)-23 AIM/SLCP (SLCPの将来排出量を予測する技術選択型のモデルAIM/Enduse) のWebページ (http://www-iam.nies.go.jp/aim/data_tools/S12/)

また、AIM/SLCPツール操作画面の例を図(1)-24に示す。排出量変化の分析画面では、削減対策メニューが操作しやすくなるように、「エネルギー政策のシナリオ」、「省エネ対策のシナリオ」および「除去対策のシナリオ」と、まず大きく3つの分類に分類している。そして、エネルギー政策では、発電における電源構成や家庭・業務・運輸での電化率の想定について、省エネ対策では、代表的な高効率省エネ対策の導入率の想定について、除去対策では、脱硫・脱硝・集塵装置などの導入率の想定について、ユーザーが任意で対策導入量を設定することができ、削減量の変化や特徴を表す計算結果が画面上に図示される。また、環境影響変化の分析画面では、対策導入量の変動に応じて計算される排出量変化に基づいて、簡略化推計式を用いて全球の環境影響変化の結果が計算され、その結果が画面上に一覧表でされる。なお、「世界」を選択したときの環境影響変化は、世界全体の環境影響変化の平均値を表し、「アジア」を選択したときの環境影響変化は、アジア域での排出が変化したときの世界全体の環境影響変化の平均値を表している。なお、環境影響評価は推計式を簡略化しているため、BC排出量の変化とSOx排出量の変化による環境影響の変化量・変化率を考慮した結果であり、その他のガス種の排出量変化による環境変化への影響については含まれていないことに留意が必要である。



図(1)-24 AIM/SLCPツールの操作画面の概要：排出量変化（上図）および環境影響変化（下図）の画面

4-7 サブテーマ間連携：中国・インドの地域詳細化モデルの開発

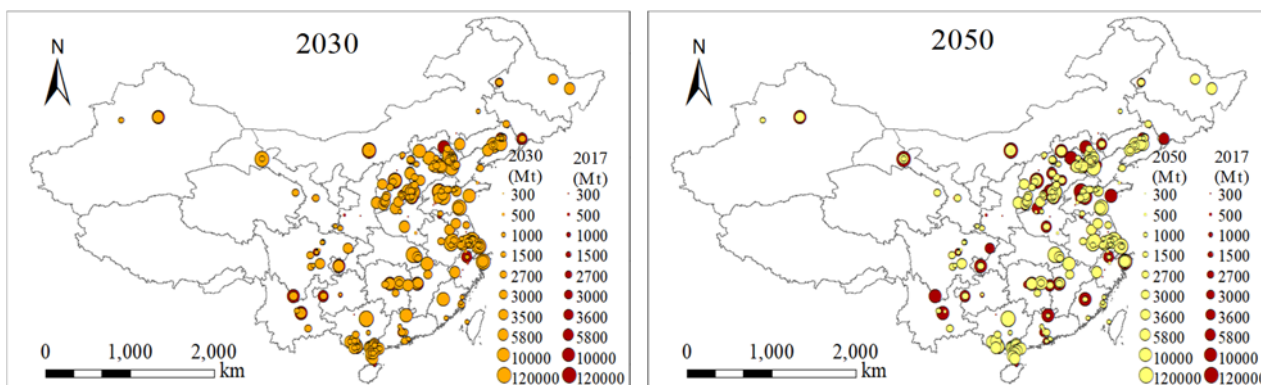
サブテーマ間の連携として、中国、インドにおける民生部門を対象とした地域詳細化モデルの開発とそれを用いた2℃目標に対応する排出量の推移等に関する分析を行った。分析結果は、サブテーマ3の4-4にて報告する。

4-8 大規模発生源を考慮した排出量ダウンスケール手法の開発

将来の気候変動影響を評価するために、テーマ3及び4に対して、本サブテーマ1のAIM/Enduse[Global]の結果を $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ のメッシュデータにダウンスケールした情報を提供してきた。ここでは、地域別、排出源別に基準年のメッシュデータをもとに将来をパターンスケリングする方法を用いてきたために、各部門ではメッシュ間の相対的な排出量の比率は現状から将来において変化しない（ただし、部門別の排出量は異なるので、部門合計ではその比率は変化する）。こうした結果は、特に大気汚染など地域情報が必要な場合には適しているとはいえず、とりわけ大規模発生源と呼ばれる排出量の大きい排出源を特定することが重要となる。そこで、排出量のダウンスケールの際に、大規模発生源の変化を考慮することができるようなモデルの開発も行った。なお、将来の大規模発生源の立地は、政治的要因など上記の条件以外の要因の影響も大きいと考えられ、予測そのものは極めて困難であるが、過去の立地の変化等を踏まえて、一定の条件下で最も蓋然性の高い立地状況を把握するために開発したものである。本モデルでは、シナリオとして想定される将来のサービス需要量の増減を満たし、かつプラントの統廃合および新設の立地条件（土地制約、資源制約、インフラ制約、社会経済制約など）を考慮したものとなっている。

本研究で開発した大規模発生源を考慮した排出量ダウンスケール手法を用いて、中国の鉄鋼業における大規模発生源がどのように変化するかを明らかにした。図(1)-25は、2030年と2050年における鉄鋼のプラント別生産量を2017年と比較したものである。この結果は、国全体の将来の鉄鋼需要量の増減に加

えて、現在稼働しているプラントの寿命や、新設時の立地条件の制約を考慮し、プラント位置とその生産量を示したものであり、この大規模発生源情報を元に、国全体のSLCP、大気汚染物質の排出量を配分し、地域別の特徴を評価した。



図(1)-25 中国の鉄鋼需要量の増減、プラントの統廃合(寿命)、現状の立地条件等を考慮した2030年、2050年のプラントの位置と生産容量(2017年の位置と生産容量との比較)

4-9 将来シナリオに関する環境影響の経済評価

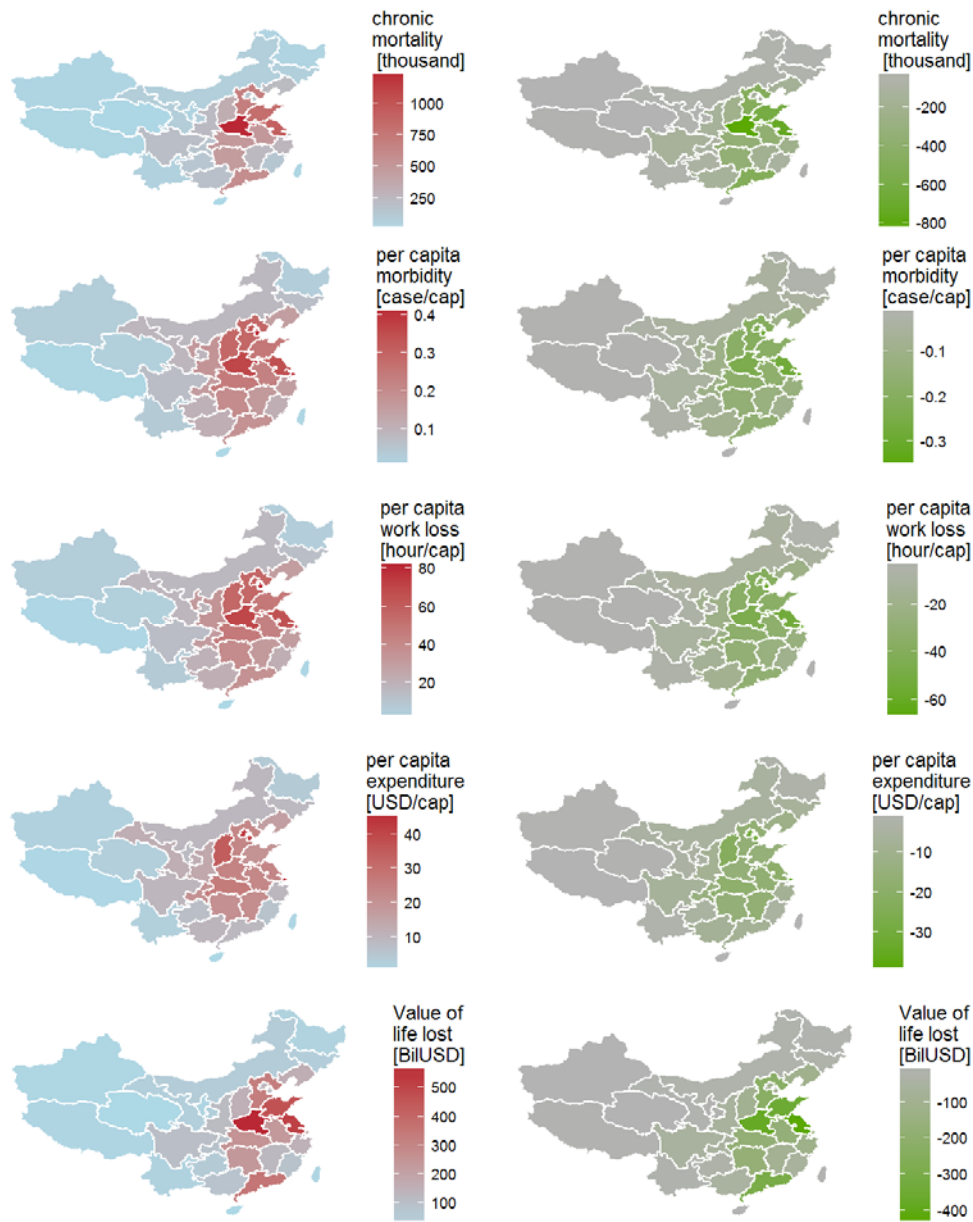
本研究では排出シナリオの定量化が中心であるが、対策導入においては導入に要する費用や便益の評価も重要となる。サブテーマ2においては対策導入に必要な費用の定量化を行っているが、本サブテーマでは、環境影響による被害や対策による被害の軽減について、マクロ経済の観点から分析を試みた。

環境変化によるマクロ経済影響を評価するために、国別の応用一般均衡モデルであるAIM/CGE [Country]を改良した。様々な気候変動影響、環境影響が考えられるが、大気汚染に起因する健康被害を対象に分析を行っている。過去における大気汚染物質の濃度(曝露量)を説明変数、健康被害(死亡率、疾病率)を被説明変数とする回帰式を推定し、得られた回帰式に将来の大気汚染物質の濃度を適用することで将来の大気汚染に起因する一次の健康被害を推計する。さらに、直接的な健康被害から労働力や医療サービス需要量の変化をパラメータ化し、そうした影響による経済活動への影響をAIM/CGEを使って試算を行った。

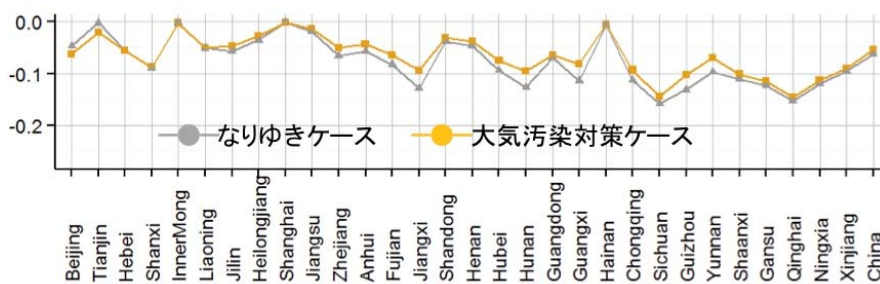
図(1)-26は、2030年の中国省別のPM_{2.5}による影響を示したものである。なお、ここで前提とした2030年の大気汚染物質の濃度は、テーマ3から提供されたものではなくIIASAのGAINSモデルの結果を用いたものである。2030年に大気汚染対策がない場合には923.7万人、大気汚染対策がある場合には233.5万人が、それぞれPM_{2.5}により死亡する結果となった。特に、河南省、山東省、江蘇省、河北省、四川省で死亡率が高い。また、PM_{2.5}による疾病は上気道疾患や喘息による通院患者が主で、2030年には対策がない場合に2.28億人、対策がある場合でも6600万人が罹患する結果となった。こうした疾病によって通院等に関する2030年の支出額は、それぞれ2063億元(GDPの0.11%)、533億元(GDPの0.027%)の追加的支出が発生する。大気汚染対策の導入により、健康被害が回避され、中国全体でGDPの0.3%の損失を回避することが可能であり、特に、上海、北京、天津、江蘇省、河南省、浙江省で対策による便益が大きい結果となった。同様の分析をO₃について行ったところ、2030年の中国におけるオゾンによる健康影響は、図(1)-27に示すように、なりゆきでGDPの0.034%に相当する結果となった。O₃の場合、大気中での化学反応や自然起源の影響が大きいため、大気汚染対策を行っても被害は0.030%(0.004%の軽減)に止まり、PM_{2.5}の結果と比較してマクロ経済への影響は小さいことが示された。

このほか、テーマ3との連携として、テーマ3で推計されたPM_{2.5}とO₃による健康影響により労働力が減少する結果と、米の生産性変化の結果を、中国、インドを対象としたAIM/CGEに適用し、マクロ経済影響について分析を行った。影響が大気汚染によるものと健康被害と米の生産性変化という限定的なものであるため、サブテーマ2で評価された2℃目標や大気汚染対策に要する対策費用の合計と比較すると影響の軽減は小さいものとなっている。ただし、特に気候変動による影響は多方面に及ぶとともに、2050

年以降に気温が更に上昇し、気候変動影響もさらに顕著になることが予想されることから、影響の更なる評価とそれらを取り込んだマクロ経済影響の評価が必要であり、これらは今後の課題である。



図(1)-26 中国省別のPM2.5による健康被害への影響（続き；左：大気汚染対策なし、右：大気汚染対策あり）



図(1)-27 2030年の中国省別のオゾンによる健康被害のGDPへの影響（%）

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

気候変動緩和策は、これまでCO₂をはじめとする長寿命の温室効果ガスの排出削減が中心であった。これに対して、短寿命のSLCP対策も含めて検討することは地域的な気候変動に対して影響が及ぶとされ、これを解明することは、全球レベルならびに地域における気候変動を予測するにあたって極めて重要であり、科学的な意義は大きい。特に、SLCP対策がLLGHG削減策に対して補完的な役割を担うのか、あるいは、LLGHG対策に加えてSLCP対策を強化することが2℃目標の達成にどの程度寄与するかを明らかにすることは、今後の気候変動問題の解決策の検討において重要な情報であり、科学的な意義は大きい。

また、大気汚染対策と気候変動緩和策を同時に検討することの科学的なメカニズムや効果を解明することは、効率的な対策を実現することに貢献し、環境政策への貢献も期待できることから、科学的意義も大きい。

(2) 環境政策への貢献

SLCP対策は、大気汚染対策においても効果があり、温暖化対策と大気汚染対策の両方を検討することが可能となり、温暖化問題や大気汚染問題において効率的かつ効果的な政策の実現に向けての貢献とその意義は極めて大きい。特に、アジア地域においては、今後、大幅なLLGHG排出量の増加が見込まれるとともに大気汚染対策も急務であり、アジア主要国、都市といった大気汚染が深刻な地域を対象とした分析を通じて、将来のLLGHG排出量の削減も検討した政策の検討が可能となる。

また、本研究課題において収集する技術情報やこれまでの温暖化対策ならびに大気汚染対策の評価は、今後の温暖化対策、大気汚染対策の両方を検討する上で貴重な情報になると考えられる。さらに、本研究課題では、最終的には大気汚染からの影響もフィードバックさせた将来シナリオを検討することを想定しており、どのような施策を講ずることで社会全体の厚生を最大化させることができるかを検討することが可能となる。

本サブテーマ1を中心に開発したブラウザ版簡易ツールAIM/SLCPは、複雑なモデルによる計算結果をもとに、簡易にSLCP、大気汚染、温暖化対策による排出量変化やその影響等の政策効果を表示することができるツールである。タブレット上でも動作が可能な、こうしたツールを開発することは、政策担当者をはじめとするステークホルダー自らが簡易に対策の効果を瞬時に把握することが出来ることから、大気汚染、温暖化対策の議論に貢献できると考えている。

<行政が既に活用した成果>

本研究において政策決定者向けに開発した簡易ツールAIM/SLCPは、複雑なモデルによる計算結果をもとに、簡易にSLCP、大気汚染、温暖化対策による排出量変化やその影響等の政策効果を表示することができるツールである。こうしたツールを環境省との意見交換を通じて開発、提示するとともに、第34回全国環境研究所交流シンポジウムにおいて出席者である地方の環境研究所職員に紹介し、ツール使用に関するデモ等を行い、いくつかのフィードバックを得た。

<行政が活用することが見込まれる成果>

サブテーマ1によって作成したS12共通シナリオで得られた温暖化対策、SLCP対策および大気汚染対策の相乗・相殺効果に関する世界・アジアにおける将来シナリオの知見は、世界およびアジアの中長期戦略における日本の貢献を議論する上で、有益な情報をもたらすだけでなく、特にアジア諸国の気候変動緩和策と大気汚染対策の特徴を把握する上で重要な情報となると考えられる。特にアジアでは高い経済成長が見込まれており、本研究で取り上げた経済発展の進展と利用されるエネルギー種の遷移は、単に費用だけでなく、インフラ整備なども考慮して検討された考え方を応用したものである。今後も経済発展が見込まれる地域において本研究成果をもとに脱温暖化に向けた政策の検討や立案を行うことで、低炭素社会、さらには脱温暖化社会の実現に向けたリープフロッグ的な発展を支援することが期待できる。

また、IPCC第六次評価報告書の作成に向けた活動が開始されているが、気候変動緩和策を取り扱う第

三作業部会では、長期の排出シナリオとともに、短中期的な取り組みも取り上げられている。ここで作成したS12共通シナリオの知見や結果が、IPCC第六次評価報告書に引用されることが期待される。

6. 国際共同研究等の状況

国立環境研究所で行っているAIMプロジェクトやスタンフォード大学が主催するEMF（エネルギーモデリングフォーラム）、IAMC（統合評価モデリングコンソーシアム）等を通じて、以下の各機関の研究者から情報提供や排出シナリオに関する情報提供、各国を対象としたモデル開発支援等を受けるとともに、共同で論文執筆等を実施した。

Prof. Xiulian Hu, Prof. Kejun Jiang（中国・国家発展和改革委員会エネルギー研究所）
 Prof. Daiqing Zhao（中国・中国科学院広州エネルギー研究所）
 Prof. Qingxian Gao（中国・中国環境科学研究所）
 Prof. P. R. Shukla（インド・インド経営大学院アーメダバード校、アーメダバード校）
 Prof. Manmohan Kapshe（インド・ボパール建築計画研究所）
 Prof. Ram Shrestha（タイ・アジア工科大学、ネパール・アジア技術経営大学）
 Dr. Bundit Limmeechokchai（タイ・タマサート大学）
 Prof. Sirintornthep Towprayoon, Dr. Savitri Garivait（タイ・キングモンクット大学）
 Prof. Rizaldi Bore（インドネシア・ボゴール農業大学）
 Dr. Retno Dewi, Dr. Ucok Siagian（インドネシア・バンドン工科大学）
 Prof. Ho Chin Siong（マレーシア・マレーシア工科大学）
 Prof. Donkun Lee（韓国・国立ソウル大学校）
 Prof. Chan Park（韓国・ソウル市立大学校）
 Dr. Jae-Hyun Lim, Cheol-Soo Lim（韓国・国立環境科学院）

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Dai, H., Masui, T. (2015) An Impact Assessment of Sustainable Technologies for the Chinese Urban Residential Sector at Provincial Level. *Environmental Research Letters*, 10(6)
- 2) Mittal, E., Hanaoka, T., Shukla, P. R., Masui, T. (2015) Air pollution co-benefits of low carbon policies in road transport: a sub-national assessment for India. *Environmental Research Letters*, 10(8)
- 3) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Dai, H., Masui, T. (2015) Energy Service Demand Projections and CO₂ Reduction Potentials in Rural Households in 31 Chinese Provinces. *Sustainability*, 7, 15833-15846
- 4) Xie Y., Dai H., Dong H., Hanaoka T., Masui T. (2016) Economic impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in China: A provincial-level analysis. *Environmental Science and Technology*, 50 (9), 4836-4843
- 5) Cheng B., Dai H., Wang P., Xie Y., Chen L., Zhao D., Masui T. (2016) Impacts of low-carbon power policy on carbon mitigation in Guangdong Province, China. *Energy Policy*, 88, 515-527
- 6) Dai H., Xie X., Xie Y., Liu J., Masui T. (2016) Green growth: The economic impacts of large-scale renewable energy development in China. *Applied energy*, 162, 435-449
- 7) Mittal S., Dai H., Fujimori S., Masui T. (2016) Bridging greenhouse gas emissions and renewable energy deployment target: Comparative assessment of China and India. *Applied energy*, 166, 301-313
- 8) Mittal, S., Dai, H., Fujimori, S., Hanaoka, T., Zhang, R. (2017) Key factors influencing the global passenger transport dynamics using the AIM/Transport model. *Transport Research Part D*, 55, 373-388

- 9) Xu T., Geng Y., Dai H., Fujita T., Wu R., Liu Z., Masui T., Xie Y. (2016) The effects of household consumption pattern on regional development: A case study of Shanghai. *Energy*, 103, 49-60
- 10) Wu R., Dai H., Geng Y., Xie Y., Masui T., Xu T. (2016) Achieving China's INDC through carbon cap-and-trade: Insights from Shanghai. *Applied Energy*, 184, 1114-1122
- 11) Xie Y., Dai H., Dong H., Hanaoka T., Masui T. (2016) Economic impacts from PM2.5 pollution-related health effects in China: A provincial-level analysis. *Environmental Science and Technology*, 50 (9), 4836-4843
- 12) 平山智樹, 藤原和也, 日比野剛, 花岡達也, 増井利彦 (2017) 大気汚染物質と短寿命気候汚染物質に及ぼす気候変動緩和策による副次効果の分析 -インドを例にして-. *環境システム研究論文集*, 73 (6), II_301-II_308
- 13) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Masui, T. (2017) Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions of China's Residential Sector: The Importance of Considering Energy Transition. *Sustainability*, 9, 614,
- 14) Park Chan, Xing R., Hanaoka T., Kanamori Y., Masui T. (2017) Impact of Energy Efficient Technologies on Residential CO₂ Emissions: A Comparison of Korea and China. *Energy Procedia*, (111), 689-698
- 15) Dong H., Dai H., Geng Y., Fujita T., Liu Z., Xie Y., Wu R., Fujii M., Masui T., Tang L. (2017) Exploring impact of carbon tax on China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 596-603
- 16) Wu R., Dai H., Geng Y., Xie Y., Masui T., Liu Z., Qian Y. (2017) Economic Impacts from PM2.5 Pollution-Related Health Effects: A Case Study in Shanghai. *Environmental Science & Technology*, 51 (9), 5035-5042
- 17) Zhang, R., Fujimori, S., Hanaoka, T. (2018) Contribution of the transport sector to climate change mitigation: Insights from a global passenger transport model coupled with a computable general equilibrium model. *Applied Energy*, 211(1):76-88
- 18) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Masui, T. (2018) Achieving China's Intended Nationally Determined Contribution and its Co-benefits: Effects of the Residential Sector. *Journal of Cleaner Production*, 172(20): 2964-2977
- 19) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Masui, T. (2018) Estimating energy service demand and CO₂ emissions in the Chinese service sector at provincial level up to 2030, *Resources, conservation and recycling*, 134: 347-360
- 20) Hanaoka T., Masui T. (2018) Co-benefits of Short-Lived Climate Pollutants and Air Pollutants by 2050 while achieving the 2 degree target in Asia. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 6 (3), 505-520
- 21) Xing R., Hanaoka T., Kanamori Y., Masui T. (2018) Achieving zero emission in China's urban building sector: Opportunities and barriers, *Current Option in Environmental Sustainability*, 30:115-122

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 藤森真一郎, 増井利彦 (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. *環境情報科学*, 43 (3), 35-41
- 2) 花岡達也 (2015) 大気汚染と気候変動の双方に共通する対策. 国立天文台編, *環境年表 平成27-28年*, 丸善, 112-113
- 3) 高橋潔, 増井利彦, 花崎直太, 藤森真一郎 (2015) 影響評価の前提となるシナリオ. 三村信男監修, *気候変動適応策のデザイン, クロスメディア・マーケティング*, 54-60
- 4) 花岡達也 (2017) 気候変動対策と大気汚染対策の促進. 国立天文台編, *環境年表 平成29-30年*, 丸善, 107-108

- 5) 増井利彦 (2018) 統合評価モデルとシナリオ. 温暖化対策費用. 環境経済・政策学会編, 環境経済・政策学事典, 丸善, 194-195 196-197
- 6) 増井利彦 (2019) 国立研究開発法人国立環境研究所における低炭素研究プログラムPJ3 世界を対象とした低炭素社会実現に向けたロードマップ開発手法とその実証的研究. Japan Engineering & Technology Intelligence, 67 (1), 102-105

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Xing R., Hanaoka T., Kanamori Y., Masui T. (2014) Impacts of low-carbon technologies for the Chinese residential sector at the provincial-level, Energy Systems Conference 2014, London, the U.K.
- 2) Hanaoka, T. (2014) Co-benefits of reducing air-pollution in ASEAN by 2050 while achieving 2 °C global temperature limit target, International Workshop on Air Quality in Asia, Ha Noi, Viet Nam
- 3) Park, C. Hanaoka, T., Masui, T., Lee, D. (2014) GHG and air Pollution emissions pathways under SSP and RCP, and reduction potentials in the Korean residential sector, The 2nd ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan
- 4) Xing R., Hanaoka T., Kanamori Y., Dai H., Masui T. (2014) Impacts of Energy-saving technologies the Chinese residential sector at the provincial-level, The 2nd ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan
- 5) Hanaoka, T., Masui, T., Fujiwara, K., Motoki, Y., Hibino, G. (2014) Co-benefits of reducing air-pollution in Asia while achieving a 50 % global GHG emissions reduction target by 2050, The 2nd ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan
- 6) Xing R., Hanaoka T., Kanamori Y., Dai H., Masui T. (2014) Towards a low-carbon future in China's rural residential sector, EcoBalance 2014, Tsukuba, Japan
- 7) Hanaoka, T., Kanamori, Y. Fujii, M. (2014) Analyses of Municipal Solid Waste Generations in Asia for estimating CH₄ emission, Seventh International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases (NCGG-7), Amsterdam, The Netherlands
- 8) 増井利彦 (2014) 温暖化政策における政策決定と統合評価モデル. 国際比較日本研究センター研究会「環境政策における科学的知見と政策過程」, つくば
- 9) Masui T. (2014) Quantifying the Costs and Benefits on SLCP Action. 6th International Forum for Sustainable Asia and the Pacific (ISAP), Yokohama, Japan
- 10) Park C., Masui T., Hanaoka T., Lee D. (2014) Impacts of socio-economic change and climate change on Korean regional energy service demand in residential sector. EAAERE 2014, Busan, Korea
- 11) Dai H., Masui T. (2014) Exploring China's energy scenario towards 2030 with a multi-region CGE model. The 4th IAEE Asian Conference, Beijing, China
- 12) Fujimori S., Hasegawa T., Masui T. (2014) EMF30 SLCP - AQ AIM/CGE implementation. EMF30.2 Working Group Meeting'Non-Kyoto Forcing Bio-Energy Land use & Air Quality Considerations in Llobal Energy and Climate Policy Scenarios', Maryland, USA
- 13) Mittal S., Hanaoka T., Shukla P.R, Masui T. (2015) Assessing Air Quality Co-Benefits from Climate Change Mitigation Policies In The Transport Sector: Sub-National Level Analysis. The 20th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
- 14) Xing R., Hanaoka T., Kanamori Y., Dai H., Masui T. (2015) Impacts of Low-Carbon Technologies for the Chinese Rural Residential Sector at Provincial-level. The 20th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
- 15) Park, C., Hanaoka, T., Lee, D.K., Masui, T. (2015) Potential GHG and Air-Pollutant Emission

- Pathway in the Korean Residential Sector under RCP-SSP scenarios, The 20th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
- 16) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Dai, H., Masui, T. (2015) An Assessment of Low-Carbon Technologies for the Chinese Rural Residential Sector at Provincial-level, The 20th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
 - 17) Mittal, S. Hanaoka, T., Shukla, P.R. & Masui, T. (2015). Assessing Air Quality Co-Benefits from Climate Change Mitigation Policies In The Transport Sector: Sub-National Level Analysis, The 20th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
 - 18) Hanaoka, T. (2015) Overview of S-12-2 Project and Progresses in FY2014 -Assessing Emissions of Long-Lived GHGs and Short-Lived Climate Pollutants in Asia -, The 20th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
 - 19) Hanaoka, T. (2015) AIM Modeling Activities for Assessing Emissions of Long-Lived GHGs and Short-Lived Climate Pollutants by AIM/Enduse[Global] Model, TF-HTAP/TFIAM Workshop on Global Emissions Scenarios to 2050, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria
 - 20) Hanaoka, T. (2015) Importance of Research Collaborations and GHG Emissions Inventory Development in Asia toward Achieving the Global 2°C Temperature Change Limit Target, Japan-China Research Workshop - On the Road to Paris: Enhancing Common Understanding of Major Emitters' policies, Energy Resources Institute (ERI), Beijing, China,
 - 21) Hanaoka, T. (2015) GHG and SLCP emissions projections in Asia and Intended Nationally Determined Contributions, The International Workshop on Land Use/Cover Changes and Air Pollution in Asia, Bogor, Indonesia,
 - 22) 花岡達也, 金森有子, 藤井実 (2015) アジアにおける一般廃棄物埋立由来のCH₄排出量の将来推計, 第43回環境システム研究論文発表会講演集, pp.165-170, 北海道, 日本
 - 23) Xie, Y., Dai, H., Dong, H., Hanaoka, T., Masui, T. (2015) Economic impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in China: A provincial-level analysis, The 21th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
 - 24) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Masui, T. (2015) Energy service demand projections and CO₂ mitigation potentials in rural households in 31 Chinese provinces, The 21th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
 - 25) Hanaoka, T. (2015) Assessment of GHGs and SLCPs emissions projections in Asia based on SSP scenarios by using AIM/Enduse[Global]. The 21th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
 - 26) Xie, Y., Dai, H., Dong, H., Masui, T., Hanaoka, T. (2016) Economic impacts from PM_{2.5} and ozone pollution-related health effects in China, The 11th International Air Quality Conference-Science and Application, Milan, Italy
 - 27) 増井利彦 (2015) 低炭素社会の実現に向けて. 龍谷大学環境サイエンスコース 地球温暖化防止講演会, 京都
 - 28) Masui T. (2015) Development of GHG and SLCP emission scenarios using AIM (Asia-Pacific Integrated Model). Emissions scenario workshop on development of LLCPs/SLCPs emission scenarios based on future socio-economic change of East Asia, Seoul, Japan
 - 29) Masui T. (2015) Research project related to short-lived climate pollutants. Bridging Atmospheric Science and Policy in Asia: Areas for Collaboration, Tokyo, Japan
 - 30) Masui T. (2015) Assessment of INDCs toward 2 degree target based on AIM (Asia - Pacific Integrated Model). Policy Research Workshop on How to enhance climate actions to meet a long-term goal, New Delhi, India
 - 31) Masui T. (2015) Contribution of AIM (Asia - Pacific Integrated Model) to INDCs in Asia. Policy

Research Workshop on How to enhance climate actions to meet a long-term goal, New Delhi, India

- 32) 増井利彦 (2015) 企業活動と暮らしの今後? ~緩和と適応~. 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
- 33) Masui T., Hijioka Y., Kim S.K., Lim J.H., Gao Q. (2015) Research Collaboration for Low Carbon Development in Three Countries. The 12th Tripartite Presidents Meeting among NIES, NIER and CRAES, Yeosu, Korea
- 34) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Masui, T. (2016) Achieving China's intended Nationally Determined contribution: Role of the residential sector, 16th Conference of the Science Council of Asia, Colombo, Sri Lanka
- 35) Dai, H., Xie, Y., Masui, T., Hanaoka, T. (2016) Economic Impacts from Air Pollution-related Health Effects in China: A provincial analysis, 2016 International Conference on Air Benefits and Cost and Attainment Assessment, Shaighai, China
- 36) Park, C., Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Masui, T. (2016) Impact of energy efficient technologies on residential CO₂ emissions: a comparison of Korea and China, Sustainability in Energy and Buildings, Turino, Italy
- 37) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Masui, T. (2016) Greenhouse gas and air pollutants emissions of China's urban residential sector: Analysis on household energy transition, International Conference on Sustainable Development, New York, U.S.A,
- 38) Hanaoka, T., Masui, T. (2016) Mitigation potentials of Short-Lived Climate Pollutants and air pollutants by 2050 while achieving the low-carbon society in Asia, 11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment systems, Lisbon, Portugal
- 39) Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Masui, T. (2016) Mitigation Potentials in the Chinese Commercial Sector at Provincial Level up to 2030, EcoBalance 2016, Kyoto, Japan
- 40) Hanaoka, T. (2016) Long-Lived GHGs, Short-Lived Climate Pollutants, air pollutants emissions projections and reductions in Asia and the World, International Workshop on Landuse and Emissions in South/Southeast Asia, Ho Chi Minh, Viet Nam
- 41) Hanaoka, T., Masui, T. (2017) Exploring the 2°C target scenarios by considering climate benefits and health benefits - role of biomass and CCS, Energy Procedia, 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-13), Lausanne, Switzerland
- 42) Hanaoka, T. (2016) Cobenefits and tradeoffs of reducing GHGs, SLCPs and air pollutants emissions when exploring the 2 °C target scenarios, The 22nd AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
- 43) Hanaoka T. (2016) Future Emissions Scenarios of Greenhouse Gases, Air Pollutants, Short-Lived Climate Pollutants by AIM. ITEC Symposium-next generation automotive technology: social benefits and diffusion policy, Kyoto, Japan
- 44) Masui T. (2016) Integrated Assessment using AIM (Asia-Pacific Integrated Model) toward low carbon society. Carbon Emission Pathways for Bangladesh, Dhaka, Bangladesh
- 45) 増井利彦 (2016) 並木小学校スタイル科 お仕事先生. 並木小学校スタイル科授業, つくば
- 46) Masui T. (2016) Research on GHG and SLCP emission scenario using AIM (Asia - Pacific Integrated Model) and progress of S - 12, ERTDF of MOEJ. The Atmospheric Pollution, Climate Change Nexus in Asia: Implications for a New Development Agenda, Hayama, Japan
- 47) Masui T. (2016) Top-down/Bottom-up Integration with AIM (Asia-Pacific Integrated Model). International Workshop on Integrated Modeling, Seoul, Korea
- 48) Masui T. (2016) Introduction of AIM, Asia - Pacific Integrated Model. NIES and ITRI Workshop on AIM - Taiwan, Hsinchu, Taiwan

- 49) Masui T. (2016) Top-down/Bottom-up Integration with AIM (Asia-Pacific Integrated Model). NIES and ITRI Workshop on AIM-Taiwan, Hsinchu, Taiwan
- 50) Hanaoka, T., Masui, T. (2017) Global Emissions Scenarios on SLCPs, GHGs, and Air Pollutants - Evaluation on Cobenefits and Tradeoffs of Mitigation Measures -, International Workshop on SLCP emissions and impacts in East Asia, Tokyo, Japan
- 51) Hanaoka, T. (2017) Impacts of Economic Development and Urbanization in South/Southeast Asia for Estimating Future GHGs Emissions - CH₄ Emissions from Landfill -, Land Cover/Land Use Change SARI International Regional Science Meeting in South/Southeast Asia, Chaing Mai, Thailand
- 52) Hanaoka, T., Masui, T. (2017) Effects of Promoting Electrification and Energy Efficiency Improvement in the Building Sector for Achieving of the Climate Target Keeping below 2°C, 9th international Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting, California, USA
- 53) Hanaoka, T. (2017) GHGs, SLCPs, Air Pollutants Mitigation Scenarios in Asia and World, - Cobenefits and Tradeoffs of Low Carbon Measures -. The 23rd AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
- 54) 花岡達也, 増井利彦 (2017) 世界の温室効果ガス, 短寿命気候汚染物質, 大気汚染物質の緩和シナリオ: 気候変動対策と大気汚染対策のバランスの考察. 第33回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京
- 55) Masui T. (2017) National Mitigation Target and Scenarios. International Workshop of a Study on Assessing ClimateChange Impacts and Policy Development in Korea, Seoul, Korea
- 56) Masui T. (2017) NDC and Long-term GHG reduction target of Japan. Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) 6th Annual Meeting, Bangkok, Thailand
- 57) Xie Y., Dai H., Zhang Y., Hanaoka T., Masui T. (2017) Health and Economic Impacts of Ozone Pollution in China: a provincial level analysis. Vision Forum for international Young Scholars, Beijing, China
- 58) 花岡達也, 増井利彦 (2018) 低炭素対策による相乗効果・相殺効果を考慮した短寿命気候汚染物質削減シナリオの評価, 第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 497-502, 東京, 日本
- 59) Hanaoka, T. (2018) Emission Projections, Synergies and Tradeoffs of mitigating SLCPs, air pollutants and GHGs in Asia and the World, International Regional Science Meeting “Land Cover/Land Use Changes and Impacts on Environment in South/Southeast Asia”, Manila, Philippines
- 60) 花岡達也, 増井利彦 (2018) 温室効果ガス排出削減対策による共便益効果・相殺効果と短寿命気候汚染物質削減シナリオの評価, 日本気象学会2018, 仙台, 日本
- 61) Hanaoka, T. (2018) Cobenefits and Tradeoffs of Combinations of GHGs, SLCPs and Air Pollutants Mitigation Measures -Overview of S12 project -, The 24th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
- 62) Li, Z., Hanaoka, T. (2018) Future Emissions Distribution of CO₂ and Air Pollutants in Chinese Iron and Steel Industry by Developing Large-Point-Source (LPS) Downscale Model, AGU Fall meeting, Washington, D.C., USA
- 63) 花岡達也 (2018) パリ協定と中長期将来予測-2度目標の実現に向けて-. 同志社大学ITECセミナー, 京都
- 64) Hanaoka T. (2018) Synergies and Tradeoffs of mitigating SLCPs, air pollutants and GHGs while taking low-carbon measures toward the 2°C target. International Workshop on Assessment of co-benefit approach: Methodological issues and evaluation tools, Tokyo, Japan

- 65) Hanaoka T. (2018) Key factors for developing AIM/Enduse[Global] Model - CO2 and non-CO2 mitigation analyses in Energy sectors and non-energy sectors -. 2018 Nagoya International Modelling Seminar, Nagoya, Japan
- 66) Hanaoka T. (2018) Emissions Projections of GHGs and Air Pollutants in the Transport Sector and Importance of Improving National GHG Inventories. the 16th workshop on GHG Inventory in Asia, New Delhi, India
- 67) Masui T. (2018) Science-based methods for analyzing future society and emissions - Overall integrated assessment model and its roles -. Capacity Building Workshop on Low Carbon Development for Lao PDR and Cambodia, Vientiane, Lao
- 68) Masui T. (2018) Model and policy making process. LoCARNet 7th Annual Meeting Program, Jakarta, Indonesia
- 69) Hirayama T., Hibino G., Hanaoka T., Masui T. (2019) GHGs, SLCPs and Air Pollutants Estimation by Asia - Pacific Integrated Model (AIM). China Energy Modeling Forum 2018 Annual Conference The 1st International Modeling Symposium on Co-benefits of Greenhouse Gas Emissions Reduction and Air Pollution Control, Beijing, China
- 70) 増井利彦 (2019) 長期低炭素戦略に向けた長期ビジョン. 自動車技術会第5回大気環境技術・評価部門委員会, 東京
- 71) Masui T. (2019) Overall of AIM (Asia - Pacific Integrated Model). Technical workshop France-Japan, Paris, France

(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) S-12主催の公開シンポジウムでは、第1回、第2回、第4回、第5回で講演
- 花岡達也 (2015) アジアにおける温室効果ガスと短寿命気候汚染物質の排出削減の可能性, S-12公開シンポジウム「地球温暖化と大気汚染による影響権限に向けたあらたな取り組み, 東京
- 花岡達也 (2016) AIMモデルによる大気汚染物質の排出シナリオ. S12プロジェクト一般公開シンポジウム「地球温暖化と大気汚染による影響の軽減に向けた新たな取り組み-短寿命気候汚染物質の影響評価とその削減対策-」, 東京
- 花岡達也 (2018) SLCP 削減シナリオの構築と排出削減策による共便益効果・相殺効果. S12プロジェクト一般公開シンポジウム「地球温暖化と大気汚染による影響の軽減に向けた新たな取り組み-短寿命気候汚染物質の影響評価とその削減対策-」, 京都
- 増井利彦 (2019) 気候変動と大気汚染を考慮した将来の排出シナリオ. 環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-12 第5回公開シンポジウム, 東京
- 2) 簡易ツールであるAIM/SLCPをhttp://www-iam.nies.go.jp/aim/data_tools/S12/にて公開し、2018年12月（エコプロ2018でのデモ）～2019年2月まで同ツールを使った大気汚染対策コンテストを実施した（Webへのアクセス数は400件以上）。

(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

UNEP/WMO (2011) Integrated Assessment of BC and tropospheric O₃

Rogelj J., Hare W., Lowe J., van Vuuren D.P., Riahi K., Matthews B., Hanaoka T., Jiang K., Meinshausen M. (2011) Emission pathways consistent with a 2 degrees C global temperature limit. Nature Climate Change, 1(8):413-418, DOI: 10.1038/NCLIMATE1258

II-2 国・地域を対象とした統合評価モデル開発と排出シナリオの定量化

みずほ情報総研株式会社

環境エネルギー第1部

日比野 剛・藤原 和也・平山 智樹・元木 悠子・吉川 実・
不破 敦・高野 真之・楊 鵬

平成26～30年度累計予算額：93,370千円（うち平成26年度：18,971千円、平成27年度：18,021千円、平成28年度：17,120千円、平成29年度：19,758千円、平成30年度：19,500千円）
累計予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

サブテーマ2では、「1. 地域スケールの技術選択モデルの開発」「2. 地域毎の長寿命温室効果ガス（LLGHG）、SLCP排出シナリオの作成」「3. 異なるスケールでのLLGHG、SLCP将来シナリオ定量化に貢献すること」を目的としている。これらの目的1.～3.に資する作業として、①エンドオブパイプ技術のデータ構築、②エンドオブパイプ技術のデータを実装した技術モデルの開発それを用いた中国・インドの国レベルの排出量推計、③中国・インドの地域レベルの排出量推計を実施した。

作業①では、発電・産業部門のエンドオブパイプ技術の性能やコスト、市場規模等について、文献値の収集・整理を行い、以下で用いるAIM/Enduseのインプットに資するデータ構築を実施した。

作業②では、地域ごとの特性に合わせたLLGHGやSLCPの排出量の分析が可能となるよう、国別技術選択モデルAIM/Enduseについて、省エネルギー技術のみを想定していたエネルギー・サービスフローを変更して、大気汚染対策技術を配置するとともに、これらの大気汚染対策技術についても費用最小化による技術選択の再現を可能にするように改良を施した。さらに改良版AIM/Enduseを用いて、中国、インドのなりゆきシナリオ、対策シナリオにおけるCO₂、SO₂、NO_x、BC、OC、PMの国レベルの排出シナリオの定量化分析を実施した。排出シナリオはサブテーマ1によって推計された、SSP2ベースのなりゆきシナリオ及び対策シナリオの世界レベルでの排出パスと整合するような制約条件を課して推計を実施した。

特に対策シナリオの1つである「2D-EoPmid-RESBLDTRT」は、世界レベルにおける気候変動緩和策及び大気汚染対策の双方の観点から相対的に望ましいとされ得ることから、部門別排出量、エンドオブパイプ技術の普及動向、気候変動緩和策がもたらす大気汚染物質・SLCPへの削減副次効果の推計といった詳細な分析を実施した。コスト最適化によるエンドオブパイプ技術の普及動向の推計結果によると、例えば中国では、脱硝装置については、発電部門・産業部門において2010年から2050年にかけて、普及率が上昇するか横ばいで推移するが、集塵・脱硫装置については、将来にかけて普及率が減少していく結果が見られた。また2D-EoPmid-RESBLDTRTシナリオに係る詳細な分析として、気候変動緩和策による副次的な削減効果の推計においては、例えばインドの2D-EoPmid-RESBLDTRTにおけるSO₂排出量では、2050年でのなりゆき比削減寄与の内訳は、エンドオブパイプ5%、電力の低炭素化57%、需要側の省エネ・燃料転換38%となっており、気候変動緩和策の寄与が95%を占める結果となった。

なりゆきを基準とした場合の2050年までの追加的投資の累積額の推計も実施した。大気汚染対策に要する費用は、気候変動対策に関連する省エネ技術などに要する費用と比較すると小さいことが明らかとなった。いずれの対策シナリオにおいても、総投資額に占めるエンドオブパイプ技術への投資の比率は、3～7%程度となり、2℃目標達成のための気候変動対策費用を含めた総累積追加的投資額は、シナリオによって大きく異なり、中国とインドの合計で2050年までに16～29兆ドルになると推計された。

作業③では、作業②で創出した中国・インドの国レベルでの推計結果について、地域毎の社会経済指標のデータを用いたダウンスケールを実施し、CO₂やSO₂、BCなどの地域スケールでの排出量推計及び分析を実施した。ダウンスケールする本ツールにより、国レベルでの多数のシナリオ分析を実施した際に、これを簡易的に地域配分することが可能となり、州省レベルでの政策立案支援に資するものとなり得る。

[キーワード]

将来排出シナリオ、短寿命気候汚染物質（SLCP）、副次効果、対策コスト、地域ダウンスケール

1. はじめに

アジア各国は著しい発展を遂げており、エネルギー消費も急激な増加を見せている。エネルギー消費の増大は長寿命温室効果ガスと大気汚染物質、短寿命気候汚染物質（SLCP）の排出量増加に直結するため、地球温暖化の進行や、中国やインドをはじめとするアジア諸国での大気汚染の深刻化が問題となっている。一方で、排出のレベルは、国の発展段階や産業構造などによって異なり、さらに、同一国内においても、人口や産業の集積度などにより異なる。このため、温室効果ガスや大気汚染物質の排出削減対策を効率的に推進していくためには、どの場所で、どのような対策が効果的かを、地域スケールで把握することが必要不可欠である。

AIM (Asia-Pacific Integrated Model) チームが開発してきたAIM/Enduseモデルは、エネルギー技術の積み上げによって全体の排出量とそれを実現する技術やエネルギーの組み合わせを定量化する技術選択モデルである。このような技術積み上げモデルをLLGHGやSLCPの将来排出の分析に用いることは、発生源に対する有効な対策を対策技術レベルで定量的に示すことができるため、具体的な政策提言が可能となる。

2. 研究開発目的

サブテーマ2では、「1. 地域スケールの技術選択モデルの開発」「2. 地域毎の長寿命温室効果ガス（LLGHG）、SLCP排出シナリオの作成」「3. 異なるスケールでのLLGHG、SLCP将来シナリオ定量化に貢献すること」を目的としている。これらの目的1.～3.に資する作業として、①エンドオブパイプ技術のコストデータ構築、②エンドオブパイプ技術のデータを実装した技術モデルの開発とそれを用いた中国・インドの国レベルの排出量推計、③中国・インドの地域レベルの排出量推計を実施した。

3. 研究開発方法

サブテーマ2では、「1. 地域スケールの技術選択モデルの開発」「2. 地域毎の長寿命温室効果ガス（LLGHG）、SLCP排出シナリオの作成」「3. 異なるスケールでのLLGHG、SLCP将来シナリオ定量化に貢献すること」を目的としている。これらの目的1.～3.に資する作業として、①エンドオブパイプ技術のデータ構築、②エンドオブパイプ技術のデータを実装した技術モデルの開発とそれを用いた中国・インドの国レベルの排出量推計、③中国・インドの地域レベルの排出量推計を実施した。

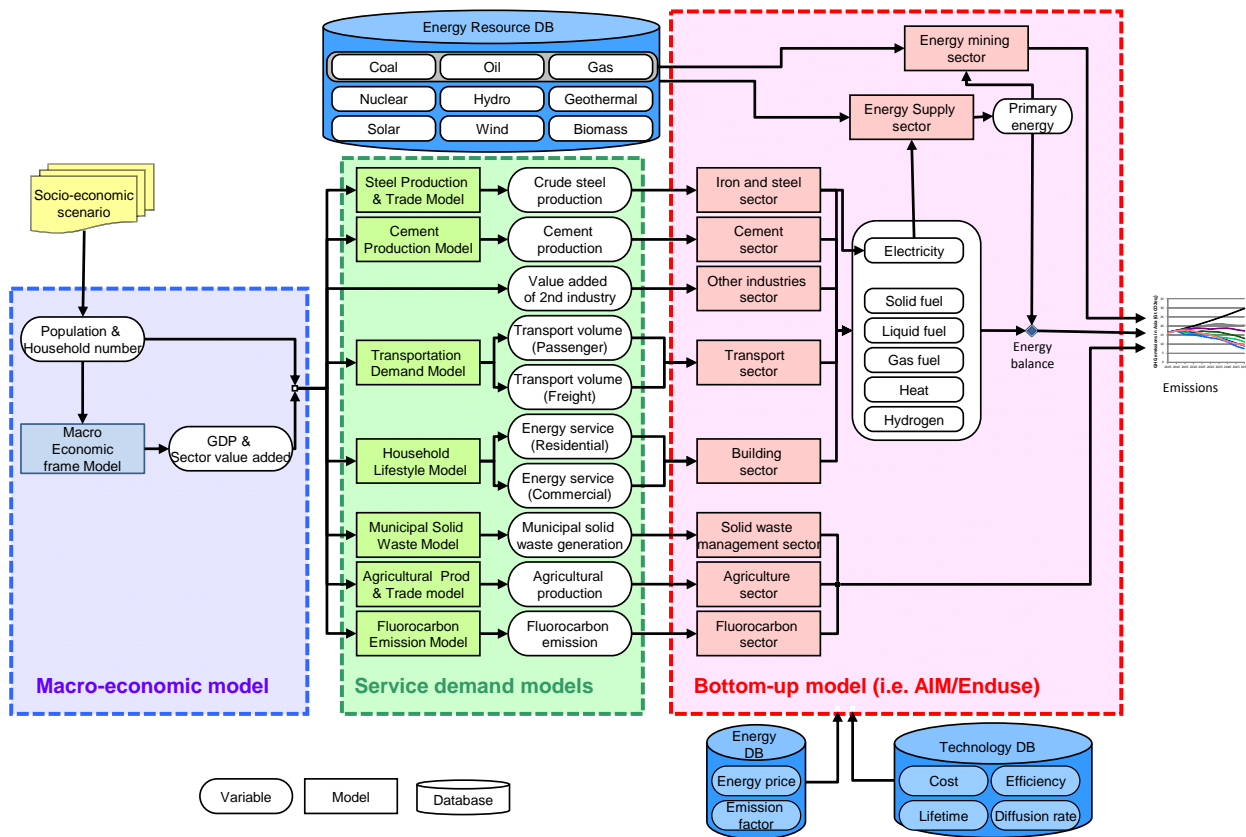
作業①では、発電・産業部門のエンドオブパイプ技術の技術情報やコスト、市場規模等の情報について、文献値のデータの収集・整理を行い、作業②以下で用いるエンドオブパイプ技術のインプットに資するデータ構築を実施した。

作業②では、地域ごとの特性に合わせたLLGHGやSLCPの排出量の分析が可能となるよう、国別技術選択モデルAIM/Enduseの改良作業をまず実施した。具体的には、サブテーマ1で推計された大気汚染物質の排出量、及び排出除去技術の導入率を詳細に再現できるように、省エネルギー技術のメニューに加え、大気汚染対策技術のメニューを用意した技術モデルの構築を行った。推計に用いた改良前の技術選択モデルAIM/Enduseの推計フローを図(2)-1に示す。これは例えば「鉄鋼生産」というサービスを提供する複数の技術や機器のメニューを揃えた上で、将来の活動量想定や政策情報に基づくエネルギー価格、炭素価格、排出量制約などの条件の下、費用最小化による技術選択を行う線型数理計画モデルであり、サブテーマ1で用いたモデルと同様のものである。これに対して、図(2)-2に示すように、発電部門と産業部門のタービンやボイラーから排出される大気汚染物質について「排煙脱硝装置」「集塵装置」「排煙脱硫装置」を、さらに脱硝装置の前の「燃焼条件調節」技術を用意した。すなわち、省エネルギー技術のみを想定していたエネルギー・サービスフローを変更して、大気汚染対策技術を配置するとともに、これらの大気汚染対策技術についても費用最小化による技術選択の実現を可能にするように改良を施した。

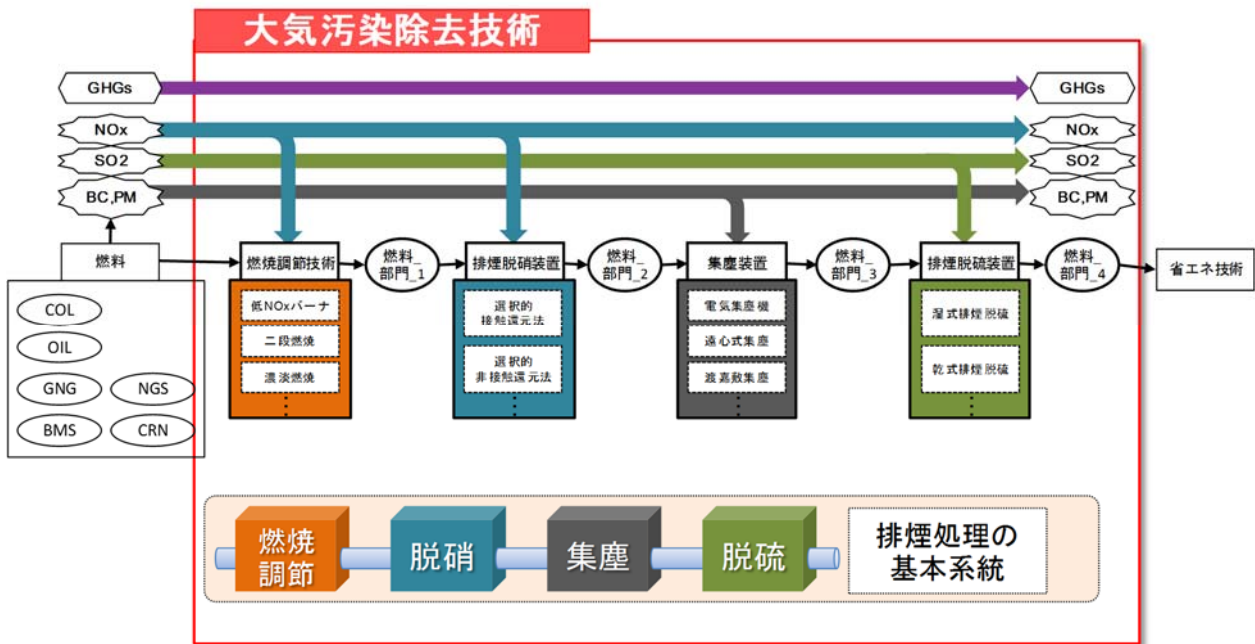
作業②において、このようにして収集したデータ及び改良版AIM/Enduseを用いて、中国、インドのな

りゆきシナリオ、対策シナリオにおけるLLGHG及び一部のSLCP、またSLCPと関係性の深い大気汚染物質の国レベルの排出シナリオの検討を行い、排出量の推計や排出削減要因分析、気候変動緩和策及び大気汚染対策の導入コストの算定を行った。CO₂、SO₂、NO_x、BC、OC、PMを分析の対象とし、2010年を基準年として2050年まで推計を行った。サブテーマ1によって推計されたなりゆきシナリオ及び対策シナリオの世界レベルでの排出シナリオと整合するような中国・インドの国別の排出パスを制約条件として推計を実施した。なお、推計の実施に当たっては、中国エネルギー研究所、インド経営大学院、アーメダバード大学、ポパール建築計画研究所等の研究者と連携して、中国、インドにおけるCO₂、SO₂、NO_x、BC等の将来の排出動向、大気汚染対策技術の諸元（大気汚染物質削減量、普及率、等）、LLGHGならびにSLCPの排出動向に影響を及ぼす各種イベント、一国及び地域別の活動量に関するデータ収集を行った。

作業③では、作業②で創出した中国・インドの国レベルでの推計結果を、地域毎の社会経済指標のデータを用いたダウンスケールを実施し、CO₂やSO₂、BCなどの温室効果ガス・大気汚染物質・SLCPの排出動向について地域スケールでの排出量推計及び分析を実施した。



図(2)-1 世界を対象とした技術選択モデルの推計フロー（国地域モデルと共通部分）



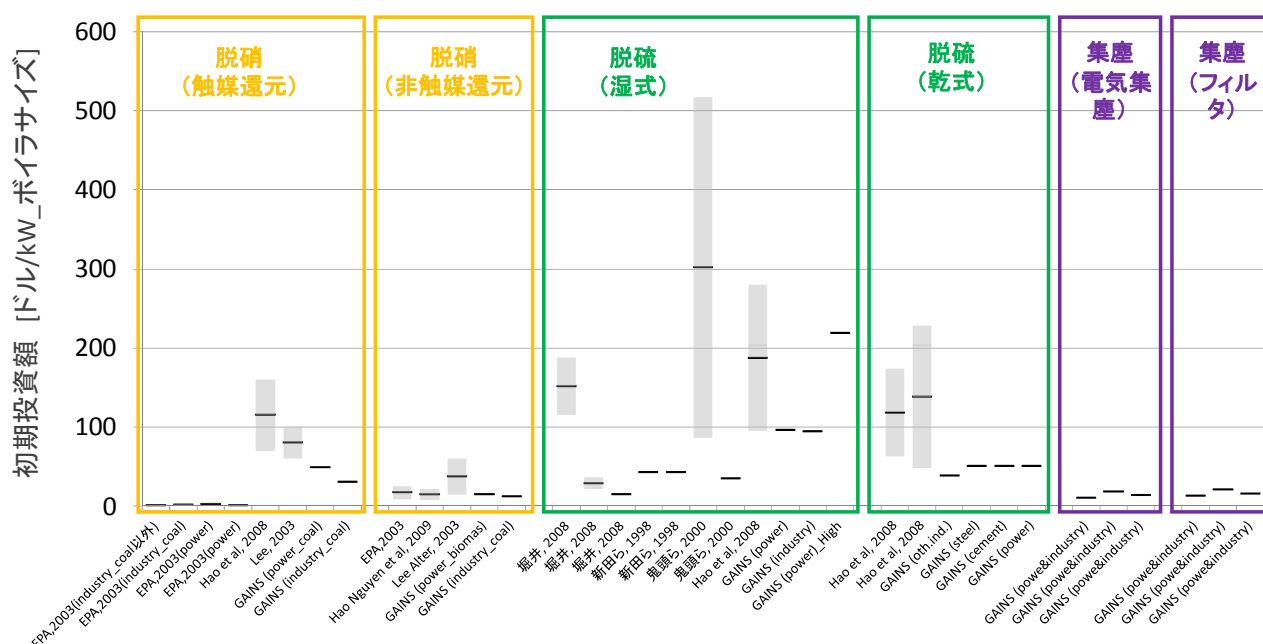
図(2)-2 国・地域を対象とした技術選択モデルにおいて改良した推計フロー

4. 結果及び考察

① エンドオブパイプ技術のデータ構築

エンドオブパイプ技術のデータ構築を実施した。特に以下では、発電用及び産業用のエンドオブパイプ技術の初期投資額について、EPAとIIASAのGAINSを含め、文献値のデータの収集・整理を行った結果を示す。初期投資額については、そのコストの単位が文献により異なることがある。代表的な単位として貨幣単位/kWボイラサイズ、貨幣単位/TJエネルギー入力、貨幣単位/cfm (cfmはcubic feet per minuteの略で、排出ガスの体積流量と等価) 等があり、文献間でのコストの比較を行う場合は単位の変換が必要になる場合がある。また、ガス排出量平均削減費用として貨幣単位/tonを掲載する文献も多いが、平均削減費用は計算の前提となる燃料種や燃焼機関の性能等による想定が難しく、単位の変換が困難である。サブテーマ2において、文献値の比較検討可能性と、AIM/Enduseの入力用データへの応用可能性の観点から、コストの単位が貨幣単位/kWボイラサイズであるものに限って、排煙脱硝装置（触媒還元/非触媒還元）、排煙脱硫装置（湿式/乾式）、集塵装置（電気集塵機/濾過式集塵機）のコストデータの整理を行った結果を図(2)-3に示す。なお図(2)-3では文献のコストに幅がある場合に灰色の帯で示し、黒線はその中間値を示す。

エンドオブパイプ技術間では、脱硫装置の初期投資額が、脱硝装置及び集塵装置に比べ比較的高額であることが分かった。ただし同種の装置の中でもコストデータに幅があり、例えば脱硝装置（触媒還元）ではおよそオーダー3つ分の開きがあるとの知見が得られた。



出典：EPA (2003), Air Pollution Control Technology Fact Sheet Flue Gas Desulfurization, Hao Nguyen, Anthony L Morrison and Peter F Nelson (2008), Analysis of Pollution Control Costs in Coal Based Electricity Generation, Technology Assesment Report, Centre for Science and Environment (2016), Cleaning the Air Pollution-control technology for coal-based power plants, 堀井伸浩 (2008), 日中技術協力の鍵は-中国における脱硫技術普及からのインプリケーション, 第4回地球環境シンポジウム「地球温暖化防止のための将来枠組みのあり方を考える」, 新田義孝, 鬼頭浩文 (1998), 脱硫コストの予備調査, 学振未来WG3-2, 鬼頭浩文, 岡良浩, 酒井裕司, 定方正毅 (2000), 脱硫アクティビティの選択肢と費用, 学振未来WG3-12, EPA (2003), Air Pollution Control Technology Fact Sheet SCR, Hao Nguyen, Anthony L Morrison and Peter F Nelson (2008), Analysis of Pollution Control Costs in Coal Based Electricity Generation, Technology Assesment Report, Lee Alter, Constance Senior, Brooke Shiley, Bradley Adams and Rui Afonso, Summary of Emission Controls Available for Large Stationary Sources of NOx and PM, Reaction Engineering International, Centre for Science and Environment (2016), Cleaning the Air Pollution-control technology for coal-based power plants, EPA (2003), Air Pollution Control Technology Fact Sheet SNCR, IIASA (2016), GAINS East Asia

図 (2)-3 エンドオブパイプ技術の初期投資額に関する文献値の比較

② 技術モデルの開発を用いた中国・インドの国レベルの排出量推計

開発・改良した技術積上モデルAIM/Enduseを用い、中国のなりゆき及び対策シナリオにおける2010年（基準年）から2050年までの温室効果ガス、大気汚染物質及びSLCPの排出量の推計を行った。前提とする社会経済シナリオとして、SSPシナリオ（Shared Socioeconomic Pathways、共通する社会経済シナリオ）から、分析するなりゆき及び対策シナリオの社会経済動向として、どちらもSSP2をベースとしたシナリオを用いた。各SSPの想定については下記の通りである。

SSP3シナリオ・・・教育水準、ガバナンスともに低水準であり、途上国と先進国の格差は拡大する。

技術水準は低く、国際社会は分断されている。出生率は下がらず人口は21世紀を通して増加する。適応策は困難であり、かつGHG排出量も増大し、緩和策の導入は困難となる。

SSP2シナリオ・・・SSP1とSSP3の間に位置する中庸的な世界。

SSP1シナリオ・・・教育水準、ガバナンスともに高水準であり、国際的に協調し、その結果技術進歩も高い。教育水準の向上に伴い出生率は下がり、人口は低位で推移する。高い教育水準は適応策を容易にするとともに、高い技術水準がGHG排出量を低下させ、緩和策も比較的容易に行える。

分析を実施した排出シナリオは、サブテーマ1の世界モデルで推計された、SSP2ベースの社会経済シナリオに基づく1本のなりゆきと4本の対策シナリオに整合するものである。各シナリオで採用する低炭素対策・大気汚染対策・SLCP対策特長を表(2)-1に示す。EoPmid及びEoPmaxは、それぞれエンドオブパイ

ブ技術による大気汚染対策・SLCP対策強度の中位及び高位を示す。2Dでは、CO₂をはじめとする温室効果ガスの排出量が、2℃目標達成相当となるように設定されていることを表す。CCS・RES・BLD・TRTは2℃目標相当の温室効果ガス排出量削減を達成するための低炭素対策の方向性を示すもので、それぞれCCS利用優先・再エネ導入優先・民生部門における電化推進・運輸部門における電化推進を表す。これらの組み合わせとして、2℃目標相当の対策シナリオとして「2D-EoPmid-CCSBLD」、「2D-EoPmid-RESTRT」、「2D-EoPmid-RESBLDTRT」、「2D-EoPmax-RESBLDTRT」の4シナリオと、なりゆきとして低炭素対策・大気汚染対策・SLCP対策を現状延長とした「REF」の5本のシナリオについて、中国・インドの国別モデルを用いて排出量の推計を実施した。対象物質はCO₂、SO₂、NO_x、BC、OC、PM₁₀、PM_{2.5}とした。

なお、対策シナリオの1つである「2D-EoPmid-RESBLDTRT」は、サブテーマ1の分析結果から、世界レベルにおける気候変動緩和策及び大気汚染対策の双方の観点から相対的に望ましいとされ得るとの仮説が得られていることから、本シナリオについては、部門別排出量、エンドオブパイプ技術の普及動向、気候変動緩和策がもたらす大気汚染物質・SLCPへの削減副次効果、中国・インド内の地域別排出量推計といった詳細な分析を実施した。

表(2)-1 なりゆき・対策シナリオの低炭素対策・大気汚染対策・SLCP対策の特長

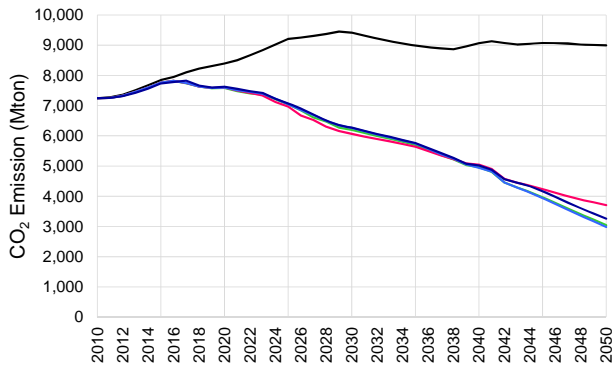
シナリオ	シナリオコード	主な低炭素対策・大気汚染対策・SLCP対策の組合せ						
		EoPmid	EoPmax	2D	CCS	RES	BLD	TRT
なりゆき	Ref							
2℃目標	2D-EoPmid-CCSBLD	✓		✓	✓		✓	
2℃目標	2D-EoPmid-RESTRT	✓		✓		✓		✓
2℃目標	2D-EoPmid-RESBLDTRT	✓		✓		✓	✓	✓
2℃目標	2D-EoPmax-RESBLDTRT		✓	✓		✓	✓	✓

中国及びインドにおけるCO₂、SO₂、NO_x、BC、OC、PM₁₀、PM_{2.5}排出量の5つのシナリオ別推計結果を、図(2)-4～図(2)-10及び図(2)-11～図(2)-17に示す。CO₂について、2D-EoPmid-CCSBLD、2D-EoPmid-RESTRT、2D-EoPmid-RESBLDTRT、2D-EoPmax-RESBLDTRTの4シナリオの排出量は、どれも中国・インドともになりゆき比で半減以下程度となる。SO₂、NO_x、BC、OC、PM₁₀、PM_{2.5}について、CCSを優先する2D-EoPmid-CCSBLDでは、再エネを優先する2D-EoPmid-RESBLDTRT、2D-EoPmax-RESBLDTRTよりも排出削減の強度が低いことから、同程度のCO₂排出パスを描く複数のシナリオにおいて、採用する低炭素対策の方向性によって、大気汚染物質とSLCPの排出量が異なるとの知見が得られた。また、運輸部門のみでの電化を促進する2D-EoPmid-RESTRTと、運輸部門に加え民生部門でも電化を大幅に進める2D-EoPmid-RESBLDTRTを比較すると、特にBC、OC、PM₁₀、PM_{2.5}の排出量において、2D-EoPmid-RESBLDTRTの排出削減が著しく進んでいることが分かる。これは、2D-EoPmid-RESTRTにおいては、電化を推進しない民生部門でバイオマス燃料に大きく依存していることが原因であり、特に大気汚染の観点から見たPMによる健康被害削減に、民生部門の電化が大きく寄与し得る可能性が示唆された。

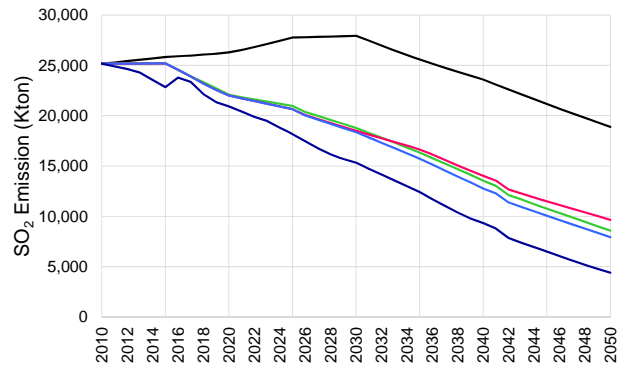
図(2)-18～図(2)-25では、中国のなりゆきシナリオであるREF及び対策シナリオである2D-EoPmid-RESBLDTRTのCO₂、SO₂、NO_x、BC直接排出量の推計結果を、部門別の内訳を示してグラフ化した。CO₂排出量は、なりゆき及び対策シナリオでそれぞれ2030年に9,413Mton及び6,258Mton、2050年に8,996Mton及び2,987Mtonとなった。部門別の内訳で見ると、対策シナリオでは発電部門での脱炭素化が進展し、2050年には441MtonCO₂のネガティブエミッションを実現している。また、CCSによるCO₂回収は産業部門においても進展する。そのほかなりゆきシナリオと対策シナリオを比較すると、2050年にかけて主に運輸部門起源のCO₂排出量が減少する結果となった。SO₂排出量は、なりゆき及び対策シナリオでそれぞれ2030年に27,933Kton及び18,356Kton、2050年に18,883Kton及び7,936Ktonとなった。部門別の内訳で見ると、対策シナリオでは特に発電部門での排出削減が進展しているほか、産業部門と家庭・業務部門での削減も進展する結果となった。NO_x排出量は、なりゆき及び対策シナリオでそれぞれ2030年に34,778Kton及び22,922Kton、2050年に35,898Kton及び11,523Ktonとなった。部門別の内訳で見ると、な

りゆきから対策シナリオにかけて、主に運輸部門での排出削減の進展が顕著に見られる。BC排出量は、なりゆき及び対策シナリオでそれぞれ2030年に1,307Kton及び816Kton、2050年に1,561Kton及び344Ktonとなった。部門別の内訳で見ると、なりゆきから対策シナリオにかけて、運輸部門と家庭・業務部門での排出削減が大きく進展する。産業部門でのエンドオブパイプによる対策も進み、対策シナリオでは2050年に運輸部門の排出量が割合として大きく残るとの結果を得た。

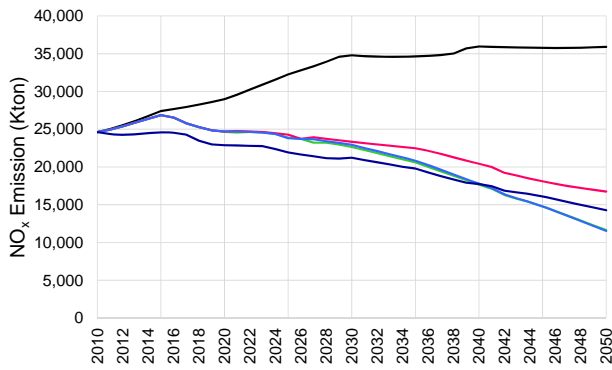
図(2)-26～図(2)-33では、インドのなりゆきシナリオであるREF及び対策シナリオである2D-EoPmid-RESBLDTRTのCO₂、SO₂、NO_x、BC直接排出量の推計結果を、その部門別の内訳を示してグラフ化した。CO₂排出量は、なりゆき及び対策シナリオでそれぞれ2030年に2,570Mton及び1,447Mton、2050年に4,630Mton及び1,756Mtonとなった。部門別の内訳で見ると、対策シナリオでは特に発電部門での低炭素化が顕著に見られ、これには発電部門CCSによるCO₂回収の寄与も含まれる。また、2050年にかけて主に運輸部門、産業部門起源のCO₂排出量が減少する結果となった。SO₂排出量は、なりゆき及び対策シナリオでそれぞれ2030年に10,155Kton及び4,349Kton、2050年に11,776Kton及び1,709Ktonとなった。部門別の内訳で見ると、対策シナリオでは発電部門、産業部門、家庭・業務部門、運輸部門のいずれにおいても削減が進展する結果となった。NO_x排出量は、なりゆき及び対策シナリオでそれぞれ2030年に14,374Kton及び8,405Kton、2050年に18,157Kton及び5,593Ktonとなった。部門別の内訳で見ると、なりゆきから対策シナリオにかけて、運輸部門での排出削減の進展が顕著に見られる。2050年のBC排出量は、なりゆき及び対策シナリオでそれぞれ2030年に831Kton及び456Kton、2050年に953Kton及び57Ktonとなった。部門別の内訳で見ると、なりゆきから対策シナリオにかけて、運輸部門と家庭・業務部門での排出削減が大きく進展する。発電部門でのエンドオブパイプによる対策も進み、対策シナリオでは2050年に運輸部門の排出量が残るのみとなる結果を得た。



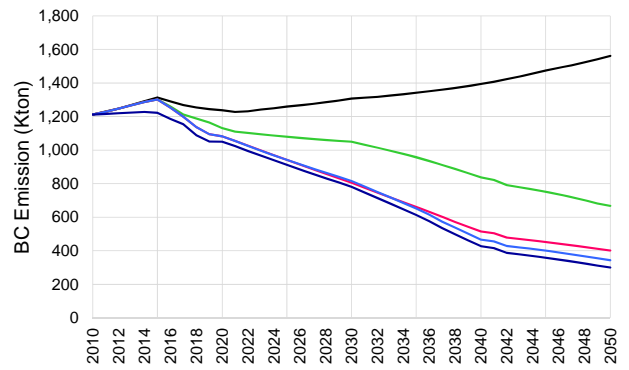
図(2)-4 中国のCO₂排出量の推計結果



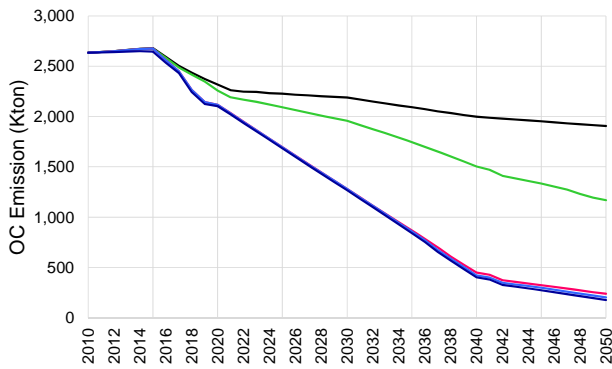
図(2)-5 中国のSO₂排出量の推計結果



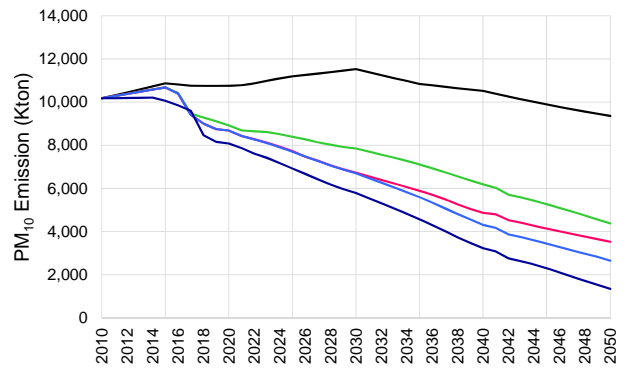
図(2)-6 中国のNO_x排出量の推計結果



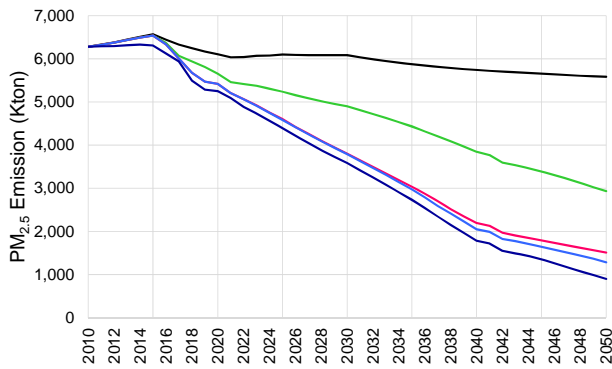
図(2)-7 中国のBC排出量の推計結果



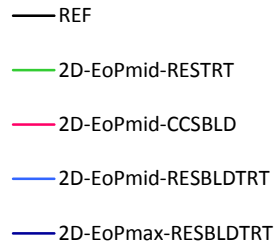
図(2)-8 中国のOC排出量の推計結果

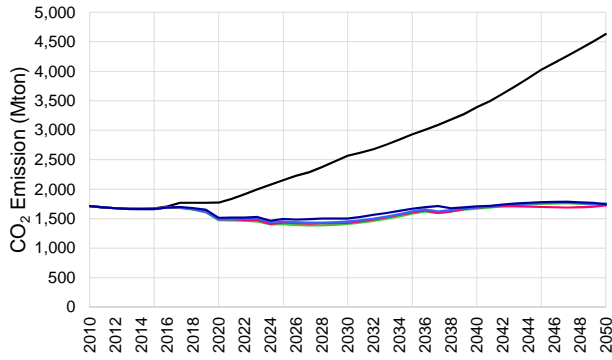


図(2)-9 中国のPM₁₀排出量の推計結果

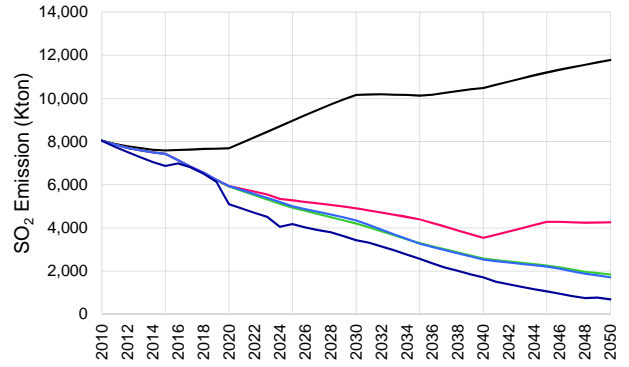


図(2)-10 中国のPM_{2.5}排出量の推計結果

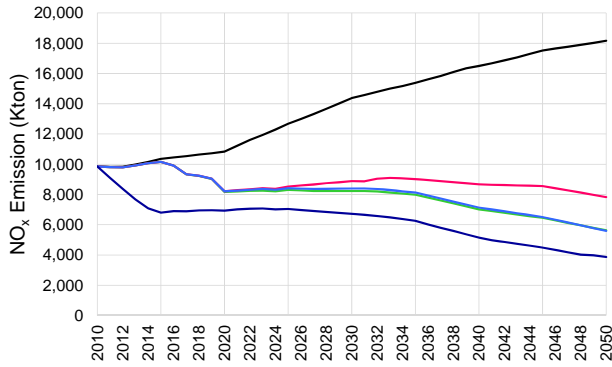




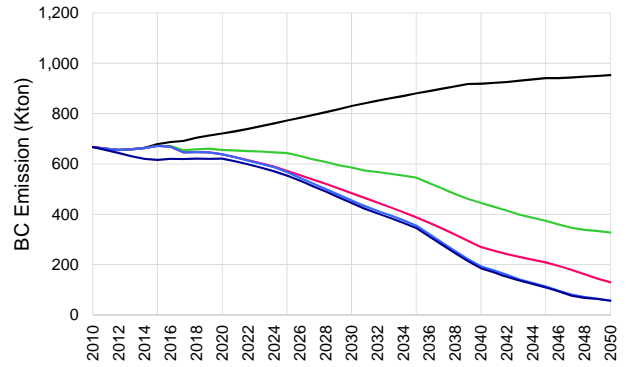
図(2)-11 インドのCO₂排出量の推計結果



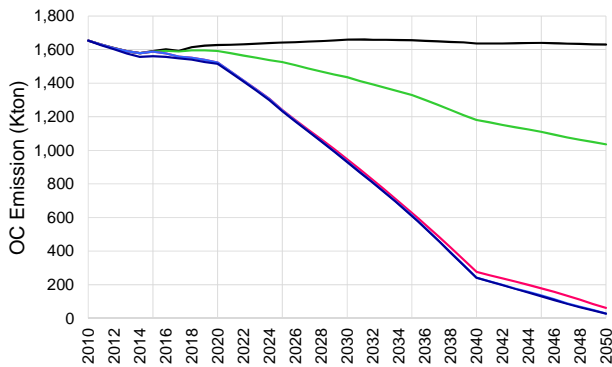
図(2)-12 インドのSO₂排出量の推計結果



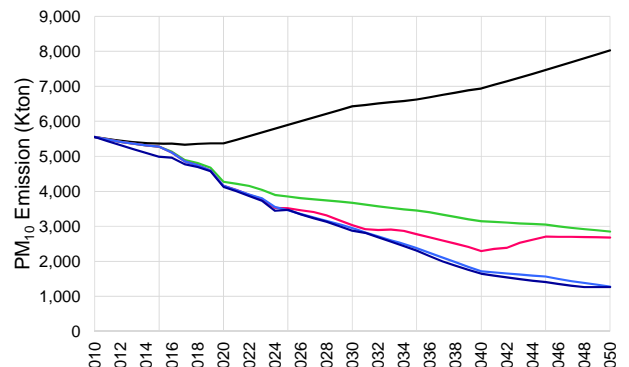
図(2)-13 インドのNO_x排出量の推計結果



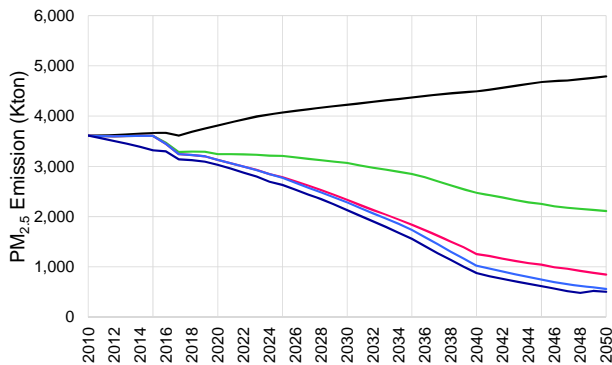
図(2)-14 インドのBC排出量の推計結果



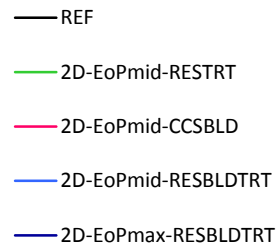
図(2)-15 インドのOC排出量の推計結果

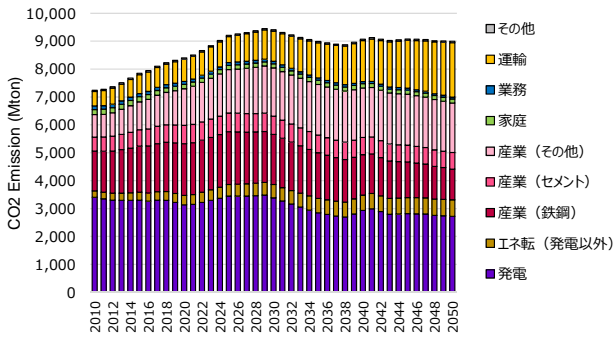


図(2)-16 インドのPM₁₀排出量の推計結果

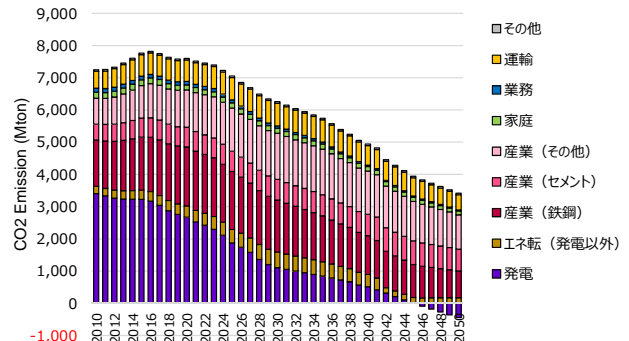


図(2)-17 インドのPM_{2.5}排出量の推計結果

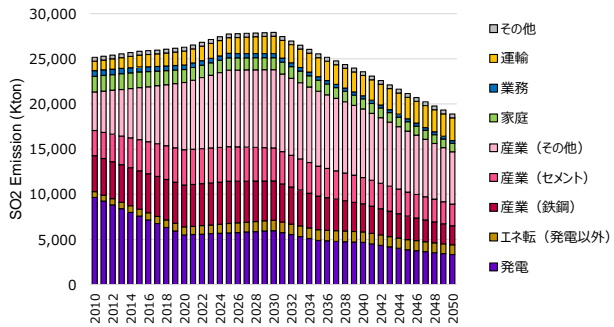




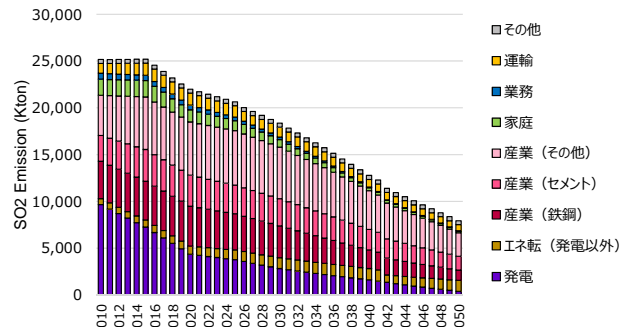
図(2)-18 中国REF (なりゆきシナリオ) のCO₂部門別排出量



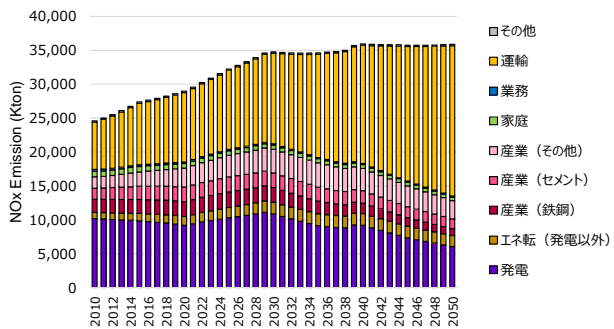
図(2)-19 中国2D-EoPmid-RESBLDTRTのCO₂部門別排出量



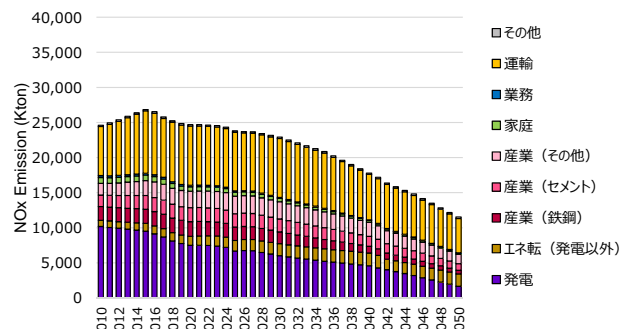
図(2)-20 中国REF (なりゆきシナリオ) のSO₂部門別排出量



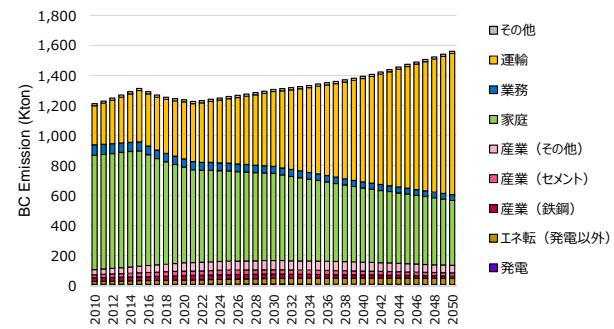
図(2)-21 中国2D-EoPmid-RESBLDTRTのSO₂部門別排出量



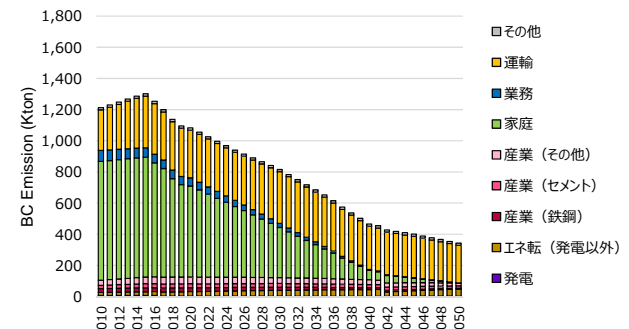
図(2)-22 中国REF (なりゆきシナリオ) のNO_x部門別排出量



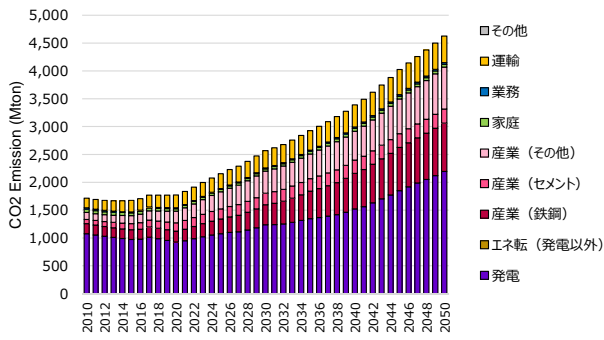
図(2)-23 中国2D-EoPmid-RESBLDTRTのNO_x部門別排出量



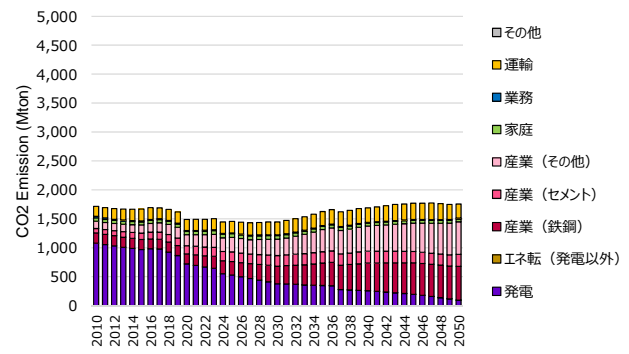
図(2)-24 中国REF (なりゆきシナリオ) のBC部門別排出量



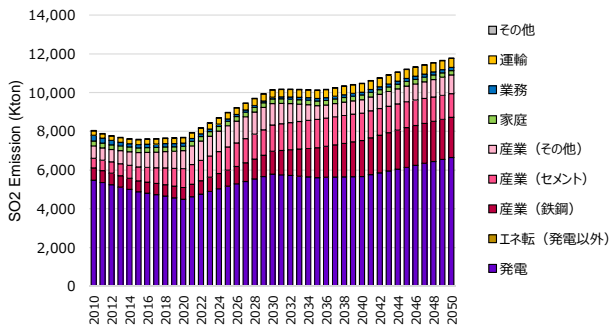
図(2)-25 中国2D-EoPmid-RESBLDTRTのBC部門別排出量



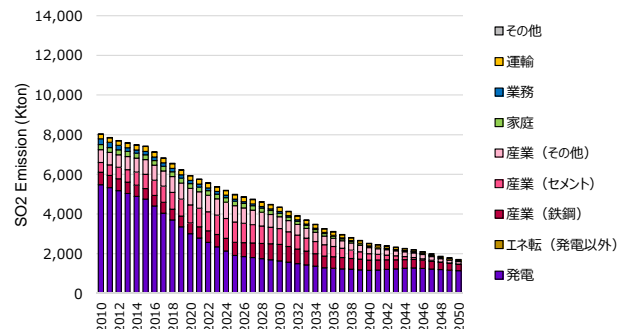
図(2)-26 インドREF (なりゆきシナリオ) の CO₂部門別排出量



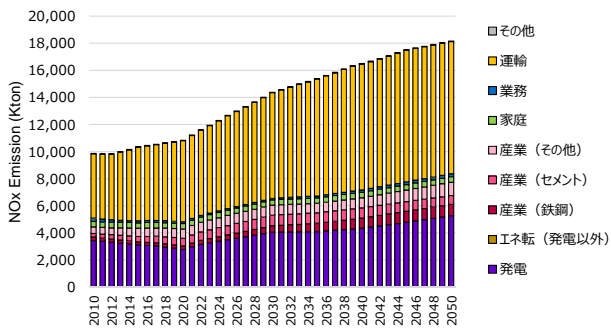
図(2)-27 インド2D-EoPmid-RESBLDTRTの CO₂部門別排出量



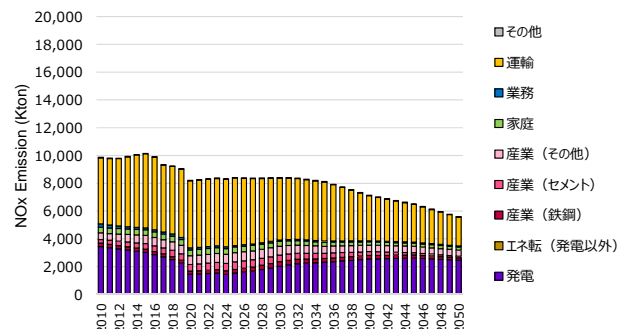
図(2)-28 インドREF (なりゆきシナリオ) の SO₂部門別排出量



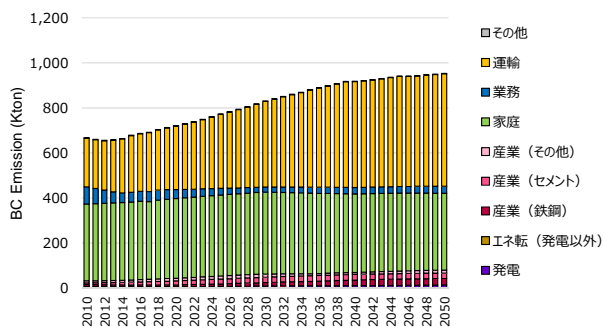
図(2)-29 インド2D-EoPmid-RESBLDTRTの SO₂部門別排出量



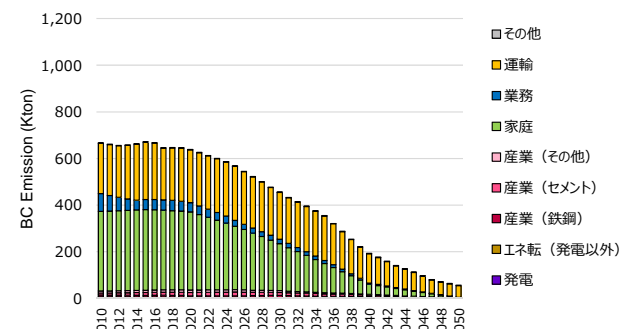
図(2)-30 インドREF (なりゆきシナリオ) の NOx部門別排出量



図(2)-31 インド2D-EoPmid-RESBLDTRTの NOx部門別排出量



図(2)-32 インドREF (なりゆきシナリオ) の BC部門別排出量



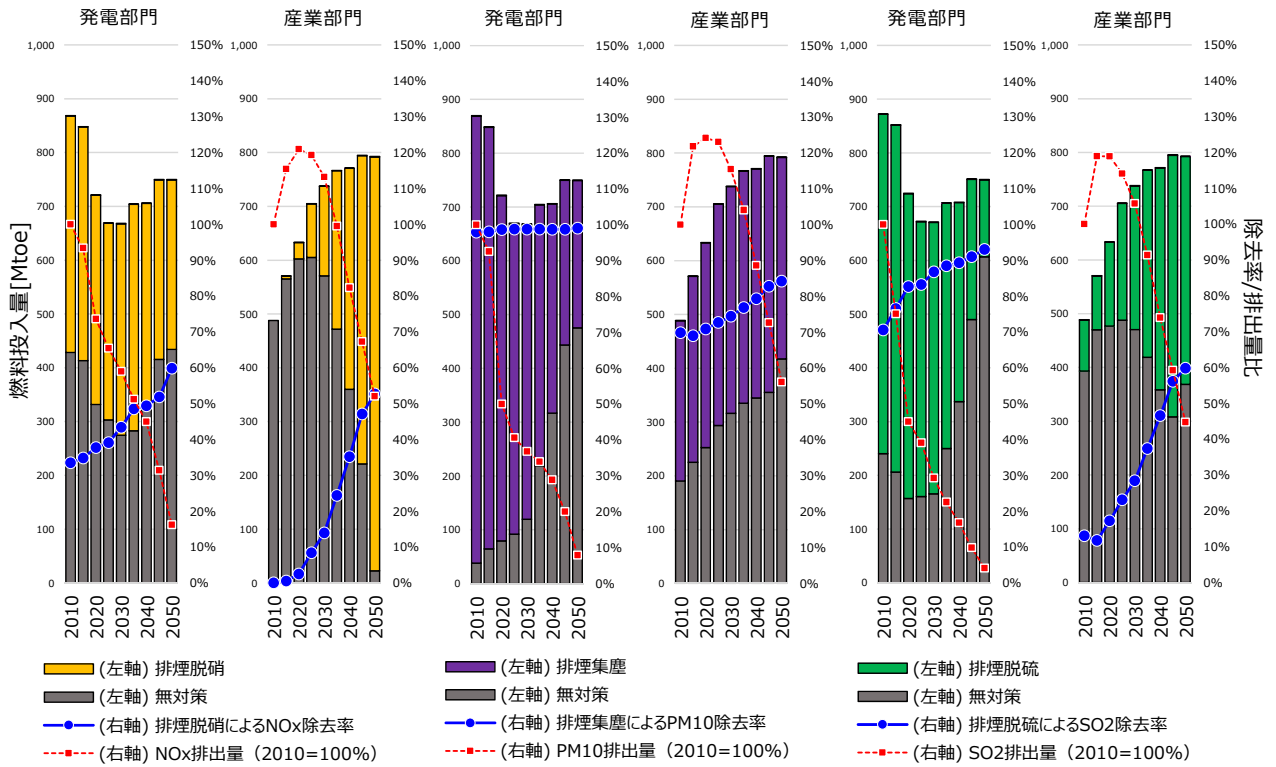
図(2)-33 インド2D-EoPmid-RESBLDTRTの BC部門別排出量

引き続き2D-EoPmid-RESBLDTRTシナリオに係る詳細な分析として、発電部門と産業部門（鉄鋼製造業、

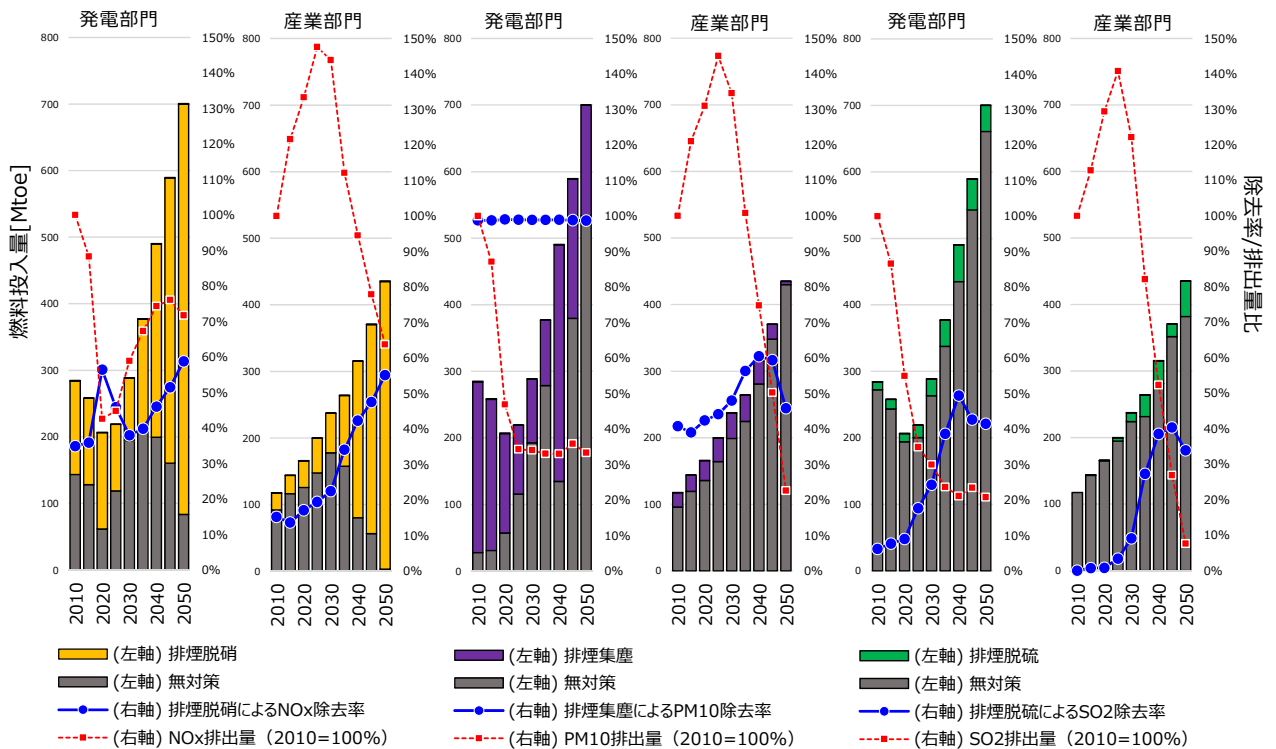
セメント製造業、その他産業)において、中国及びインドでのコスト最適化によるエンドオブパイプ技術の普及動向を推計した。その結果を図(2)-34、図(2)-35に示した。棒グラフの排煙処理装置付き(黄色/紫色/緑色)と無対策(灰色)の比を見ることで、投入エネルギーベース(左軸)での排煙脱硝装置・集塵装置・排煙脱硫装置の普及率を見ることができる。また、青色の折れ線グラフ(右軸)は、燃料の燃焼によって生成したNO_x・PM10・SO₂のうち、排煙処理装置によって除去できた削減量の比率を示す。さらに赤色の折れ線グラフ(左軸)は、発電部門・産業部門のNO_x・PM10・SO₂排出量(除去後)を、2010年=100%として示した。

図(2)-34によると、中国の脱硝装置について、発電部門では2010年から2050年にかけて、5割前後の普及率を維持する結果となった。発電部門のNO_x平均除去率は2010年の34%から2050年には60%まで上昇し、当該部門のNO_x排出量は2050年に2010年比▲84%となる。産業部門の脱硝装置は、2010年の普及率ゼロから2050年にかけてほぼ100%まで上昇する。産業部門のNO_x平均除去率は2050年には53%まで上昇し、当該部門のNO_x排出量は2050年に2010年比で▲48%となる結果を得た。集塵装置について、発電部門では2010年の時点で普及率が9割以上となっているが、2050年にかけては4割程度まで下がる結果となった。これは、PMの排出係数が小さく、かつ集塵装置の設置が不要な天然ガスを利用した設備が増大していくためである。発電部門のPM10の平均除去率は2050年までほぼ100%に近い値で推移し、当該部門のPM10排出量は2050年に2010年比▲92%となる。産業部門の集塵装置は、2010年から2050年にかけて、5割前後の普及率を維持する結果となった。産業部門のPM10平均除去率は2010年の70%から2050年には84%まで上昇し、当該部門のPM10排出量は2050年に2010年比で▲53%となる結果を得た。脱硫装置についても、天然ガスの利用に伴い、集塵装置の普及動向と同様の傾向が一部見られる。発電部門では、2010年の時点で普及率が7割以上となっているが、2050年にかけては2割程度まで下がる結果となった。これは、SO₂の排出係数が小さく、脱硫装置の設置が不要な天然ガスを利用した設備が増大していくためである。発電部門のSO₂平均除去率は2010年の71%から2050年には93%まで上昇し、当該部門のSO₂排出量は2050年に2010年比▲96%となる。産業部門の脱硫装置では、2010年の普及率2割程度から2050年には5割程度まで上昇する結果となった。産業部門のSO₂平均除去率は2010年の13%から2050年には60%まで上昇し、当該部門のSO₂排出量は2050年に2010年比で▲55%なる結果を得た。

図(2)-35によると、インドの脱硝装置について、発電部門では2010年の普及率5割程度から2050年には9割程度まで上昇する結果となった。発電部門のNO_x平均除去率は2010年の35%から2050年には59%まで上昇し、当該部門のNO_x排出量は2050年に2010年比▲28%となる。産業部門の脱硝装置は、2010年の普及率2割程度から2050年にはほぼ100%まで普及する。産業部門のNO_x平均除去率は2010年の15%から2050年には55%まで上昇し、当該部門のNO_x排出量は2050年に2010年比で▲36%となる結果を得た。集塵装置について、発電部門では2010年の時点で普及率が9割となっているが、2050年にかけては2割程度まで下がる結果となった。これは中国と同様に、PMの排出係数が小さく、かつ集塵装置の設置が不要な天然ガスを利用した設備が増大していくためである。発電部門のPM10の平均除去率は2050年までほぼ100%に近い値で推移し、当該部門のPM10排出量は2050年に2010年比▲67%となる。産業部門の集塵装置は、2010年から2050年にかけて、1割前後の普及率を維持する結果となった。産業部門のPM10平均除去率は2010年の41%から2050年には46%で推移し、当該部門のPM10排出量は2050年に2010年比で▲77%となる結果を得た。脱硫装置について、発電部門では2010年から2050年にかけて、1割前後の普及率を維持する結果となった。発電部門のSO₂平均除去率は2010年の6%から2050年には41%まで上昇し、当該部門のSO₂排出量は2050年に2010年比▲79%となる。産業部門の脱硫装置では、2010年の普及率ゼロから2050年には1割程度まで上昇する結果となった。産業部門のSO₂平均除去率は2050年には34%まで上昇し、当該部門のSO₂排出量は2050年に2010年比で▲92%となる結果を得た。なお、インドについて一部で不連続な変化が見られるが、これは発電部門と産業部門において、将来にかけての活動量(発電電力量及び素材生産量)の増大による排出量の増加と、低炭素対策・大気汚染対策の推進による削減効果が交錯していることが原因である。



図(2)-34 中国2D-EoPmid-RESBLDTRTの脱硝(左)・集塵(中)・脱硫装置(右)の普及動向



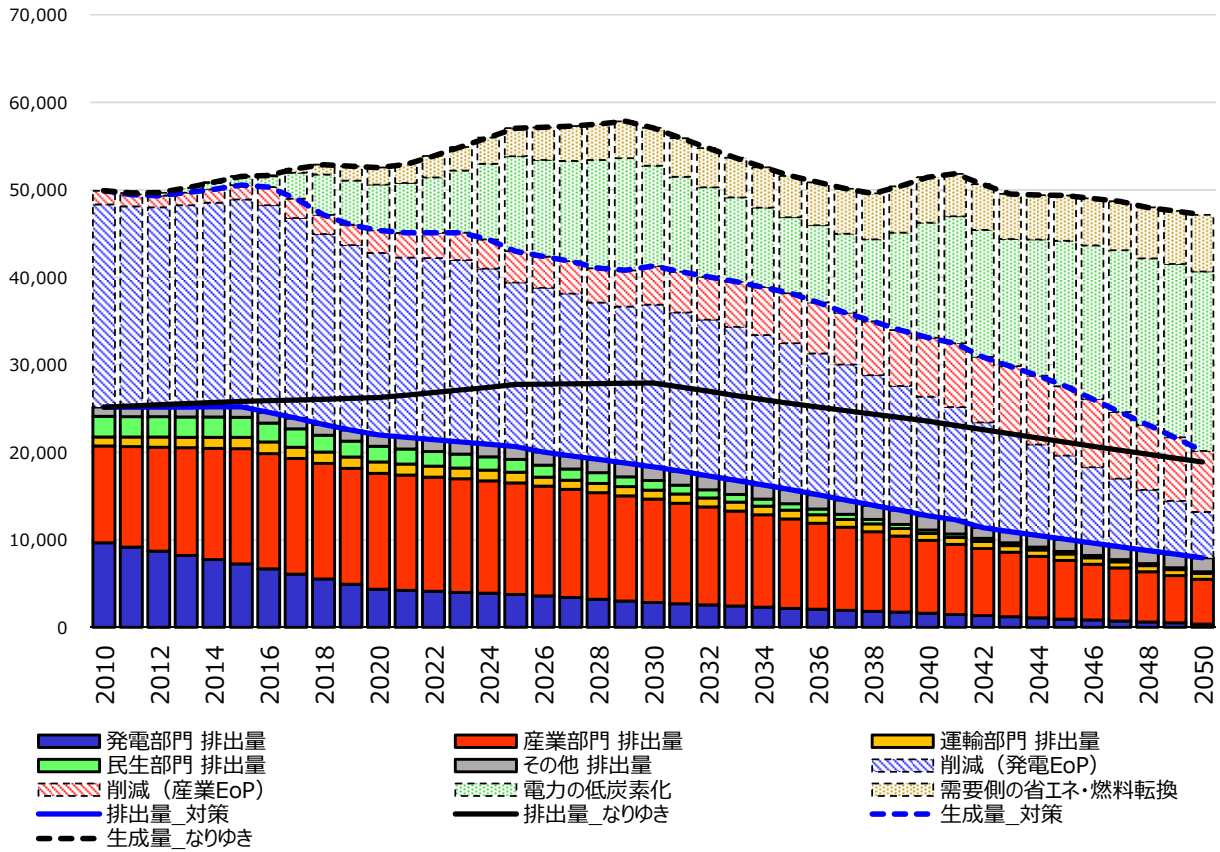
図(2)-35 インド2D-EoPmid-RESBLDTRTの脱硝(左)・集塵(中)・脱硫装置(右)の普及動向

引き続き2D-EoPmid-RESBLDTRTシナリオに係る詳細な分析として、気候変動緩和策による副次的な削減効果の推計結果を示す。対策シナリオにおける大気汚染物質、SLCPの排出量は、エンドオブパイプ技術による直接除去による大気汚染対策に加え、省エネルギーや燃料転換、電化と再生可能エネルギー電源の組み合わせなど気候変動緩和策による副次的な削減効果が見込まれる。そこで中国・インドの2D-EoPmid-RESBLDTRTにおける、なりゆきシナリオからのSO₂・NO_x・BC排出削減寄与を、大気汚染対策である発電部門、産業部門のエンドオブパイプ技術、気候変動緩和策である電力の低炭素化及び需要側の省エネ・燃料転換に要因分解した分析結果を、図(2)-36～図(2)-41に対象物質別に示す。図内の実線グラフは対象物質の排出量、破線グラフは対象物質の生成量(=発電・産業部門でのエンドオブパイプ技術による除去前の排出量)を示し、なりゆきシナリオの生成量(黒色破線)から対策シナリオの排出量(青色実線)の間を削減寄与と見なして分析を行った。なお、気候変動緩和策の寄与は、なりゆきシナリオと対策シナリオの排出量の差分のうち、発電部門の差分を「電力の低炭素化の寄与」、残りを「需要側の省エネ・燃料転換」として簡易的に区分したものである。この「電力の低炭素化の寄与」「需要側の省エネ・燃料転換」については、気候変動緩和策が大気汚染物質に与える副次削減効果と見なすことができる。

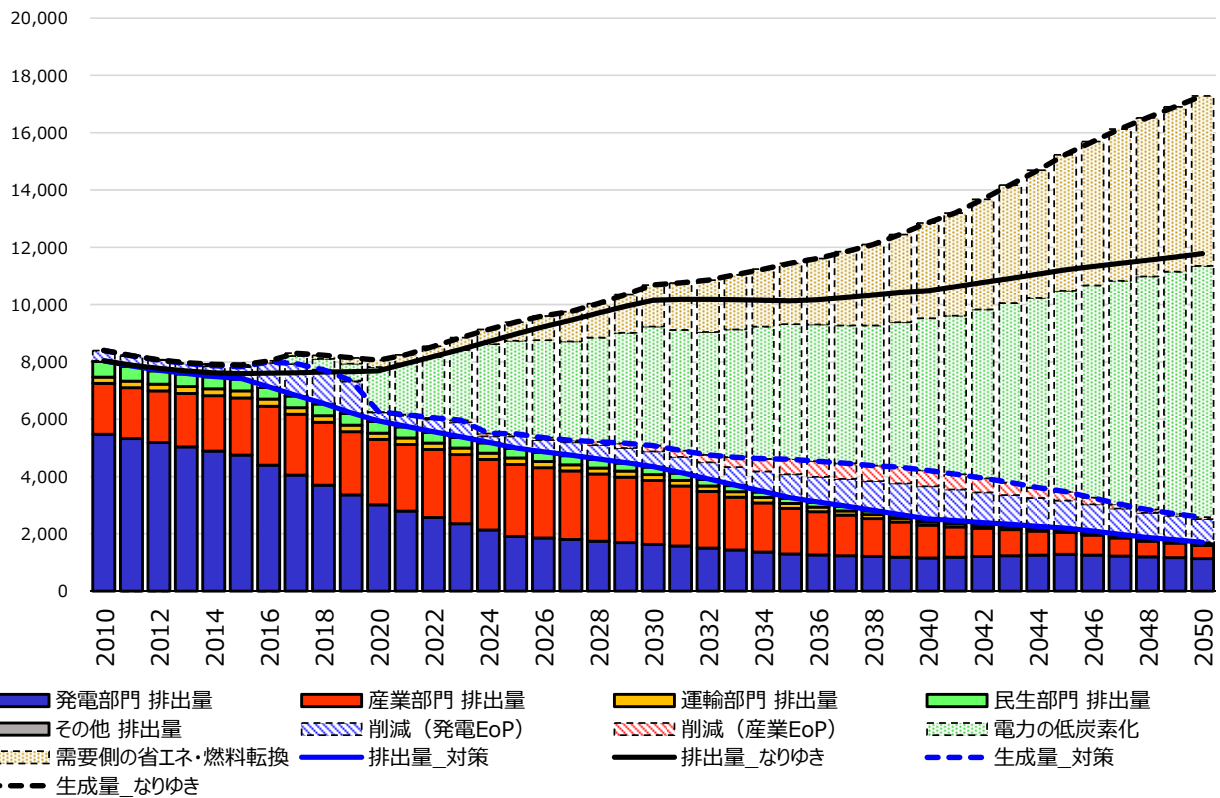
中国のSO₂について、2010年での生成量に対する排出量の比率は50%となっている。2050年での削減寄与の内訳は、発電部門エンドオブパイプ14%、産業部門エンドオブパイプ17%、電力の低炭素化50%、需要側の省エネ・燃料転換18%となっており、気候変動緩和策の寄与が68%を占める結果となった。NO_xについて、2010年での生成量に対する排出量の比率は83%となっている。2050年での削減寄与の内訳は、発電部門エンドオブパイプ10%、産業部門エンドオブパイプ12%、電力の低炭素化24%、需要側の省エネ・燃料転換54%となっており、気候変動緩和策の寄与が78%を占める結果となった。BCについて、2010年での生成量に対する排出量の比率は65%となっている。2050年での削減寄与の内訳は、発電部門エンドオブパイプ5%、産業部門エンドオブパイプ14%、電力の低炭素化17%、需要側の省エネ・燃料転換64%となっており、気候変動緩和策の寄与が81%を占める結果となった。

インドのSO₂について、2010年での生成量に対する排出量の比率は96%となっている。2050年での削減寄与の内訳は、発電部門エンドオブパイプ5%、産業部門エンドオブパイプ0.4%、電力の低炭素化57%、需要側の省エネ・燃料転換38%となっており、気候変動緩和策の寄与が95%を占める結果となった。NO_xについて、2010年での生成量に対する排出量の比率は83%となっている。2050年での削減寄与の内訳は、発電部門エンドオブパイプ23%、産業部門エンドオブパイプ4%、電力の低炭素化24%、需要側の省エネ・燃料転換49%となっており、気候変動緩和策の寄与が73%を占める結果となった。BCについて、2010年での生成量に対する排出量の比率は49%となっている。2050年での削減寄与の内訳は、発電部門エンドオブパイプ9%、産業部門エンドオブパイプ0.1%、電力の低炭素化51%、需要側の省エネ・燃料転換39%となっており、気候変動緩和策の寄与が90%を占める結果となった。

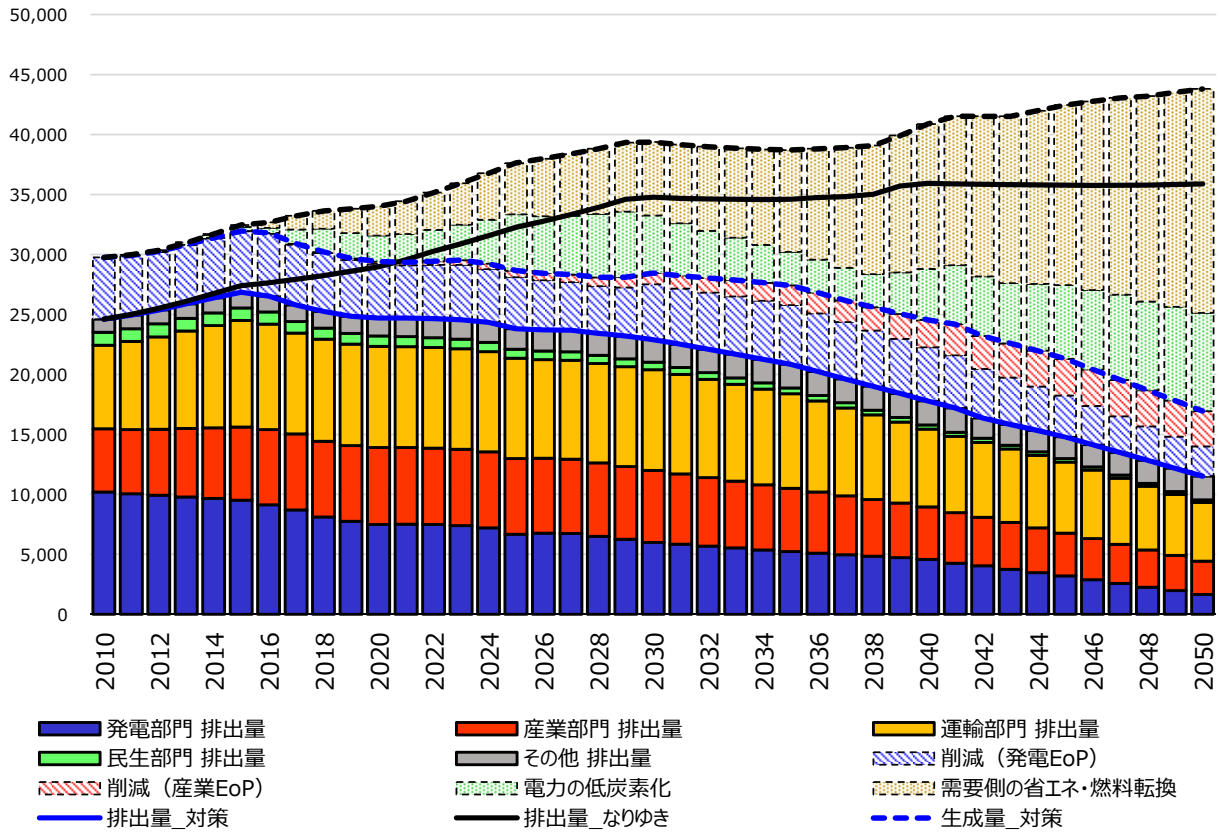
このように、温室効果ガスの排出削減を目的とした気候変動緩和策の推進がもたらす、大気汚染物質及びSLCPの排出削減副次効果は、エンドオブパイプによる直接対策と比較して同等かそれ以上の削減効果となりえることが定量的に示された。



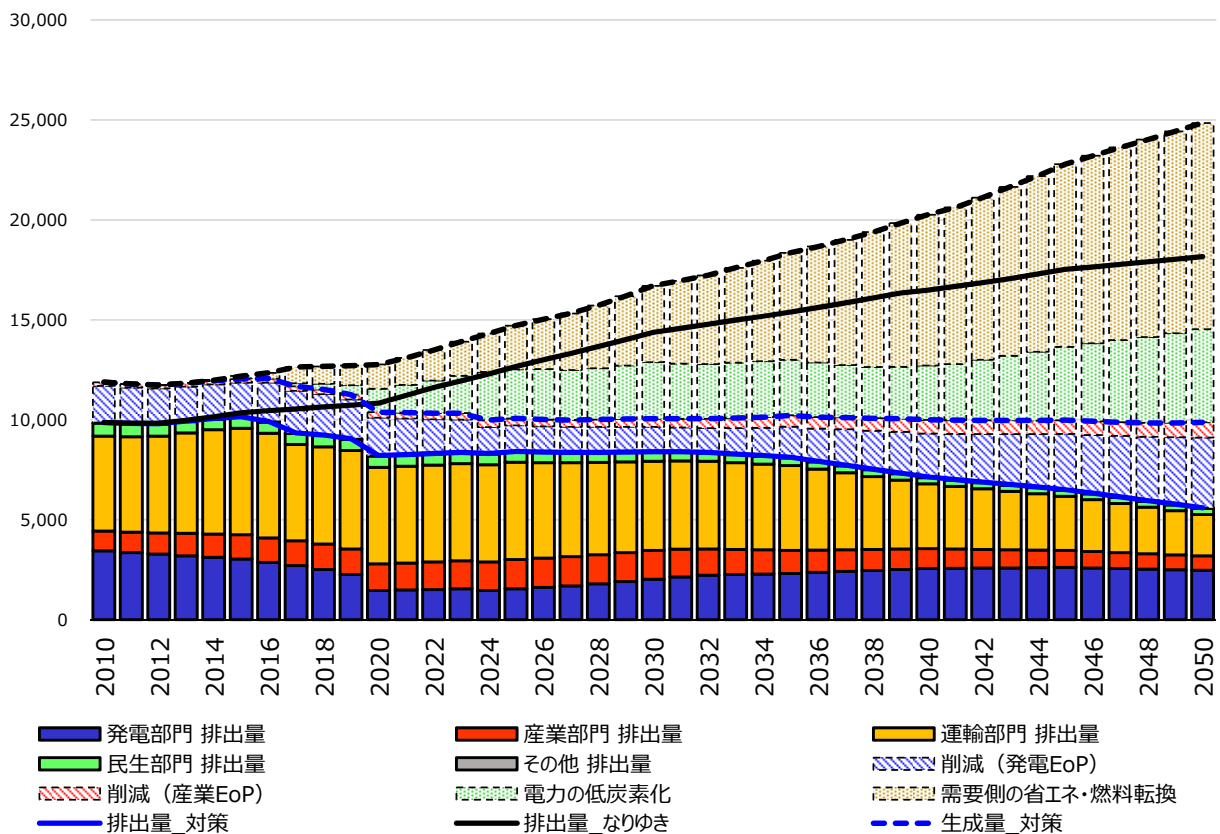
図(2)-36 中国の2D-EoPmid-RESBLDTRTのなりゆき比SO₂削減寄与



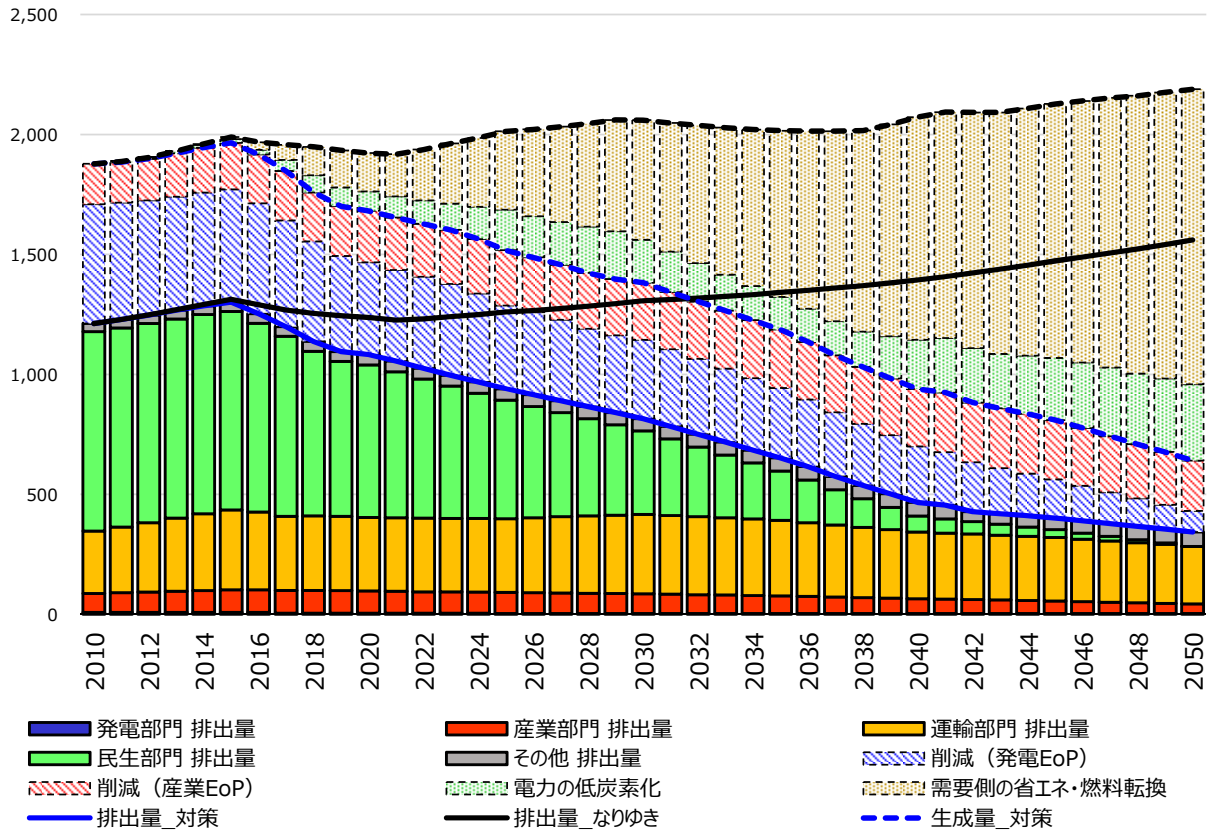
図(2)-37 インドの2D-EoPmid-RESBLDTRTのなりゆき比SO₂削減寄与



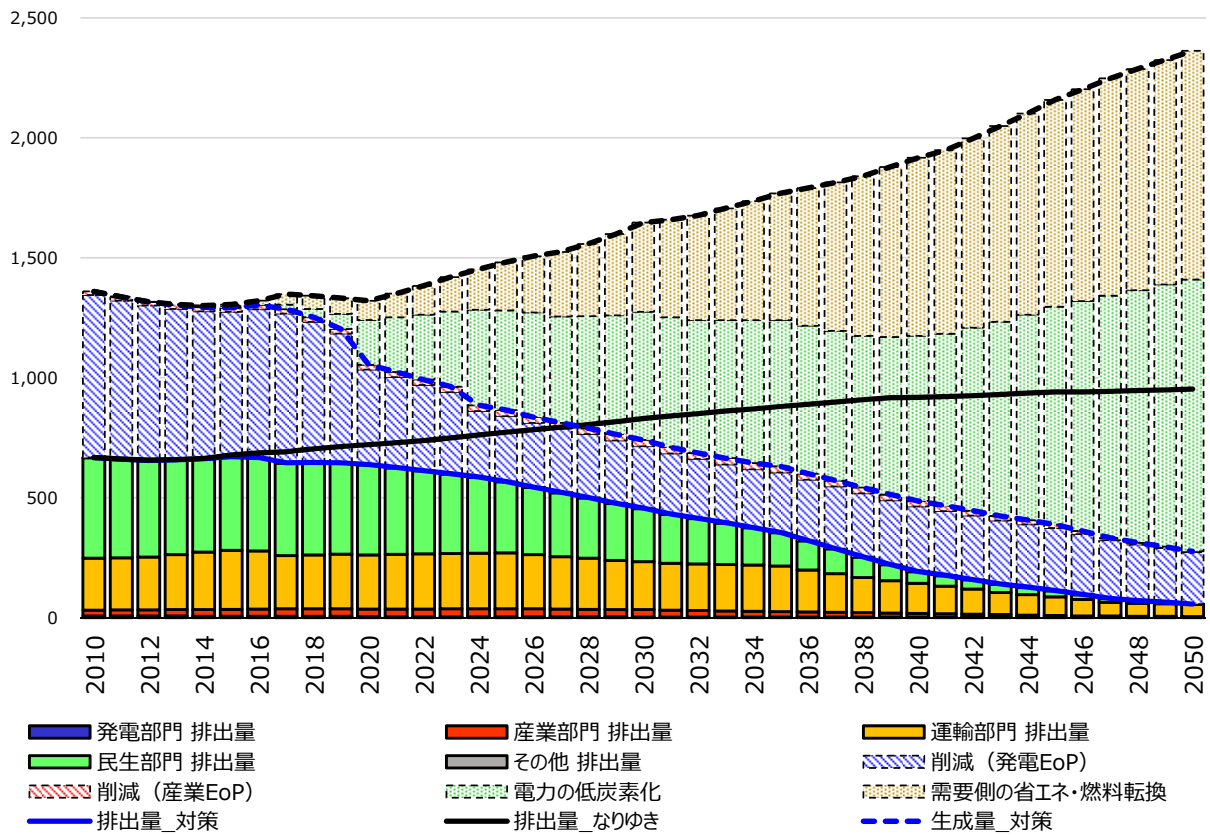
図(2)-38 中国の2D-EoPmid-RESBLDTRTのなりゆき比NOx削減寄与



図(2)-39 インドの2D-EoPmid-RESBLDTRTのなりゆき比NOx削減寄与

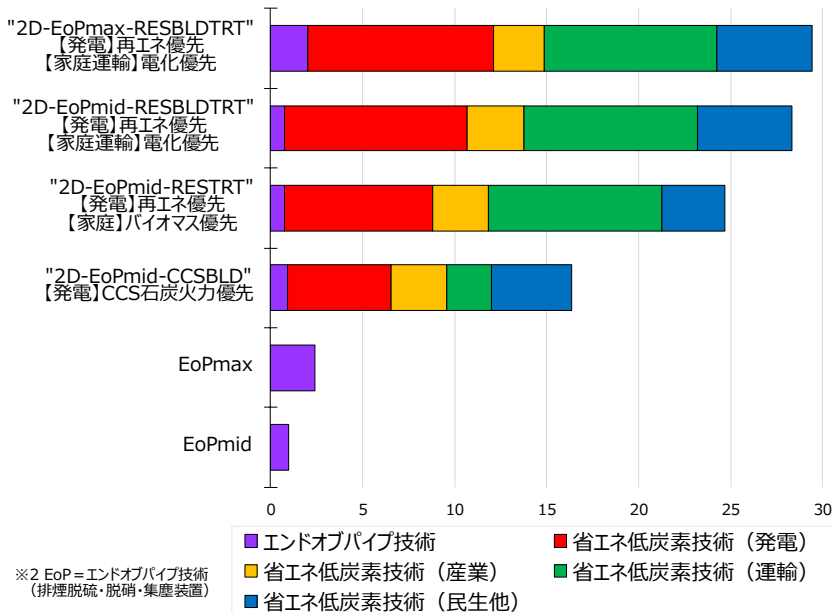


図(2)-40 中国の2D-EoPmid-RESBLDTRTのなりゆき比BC削減寄与



図(2)-41 中国の2D-EoPmid-RESBLDTRTのなりゆき比BC削減寄与

図(2)-42には、開発・改良した技術積上モデルAIM/Enduseを用い、中国とインドにおける各対策シナリオについて、なりゆきケースを基準とした場合の2050年までの追加的投資の累積額についての結果を、中国インドの合算値で示した。大気汚染対策に要する費用（エンドオブパイプ技術）は、気候変動対策に関連する省エネ技術などに要する費用と比較すると小さいことが明らかとなった。いずれの対策シナリオにおいても、総投資額に占めるエンドオブパイプ技術への投資の比率は、3～7%程度となり、2℃目標達成のための気候変動対策費用を含めた総累積追加的投資額は、シナリオによって大きく異なり、中国とインドの合計で2050年までに16～29兆ドルになると推計された。



図(2)-42 2050年までのなりゆき比累積追加的投資額（中国・インドの合算値；単位：兆ドル）

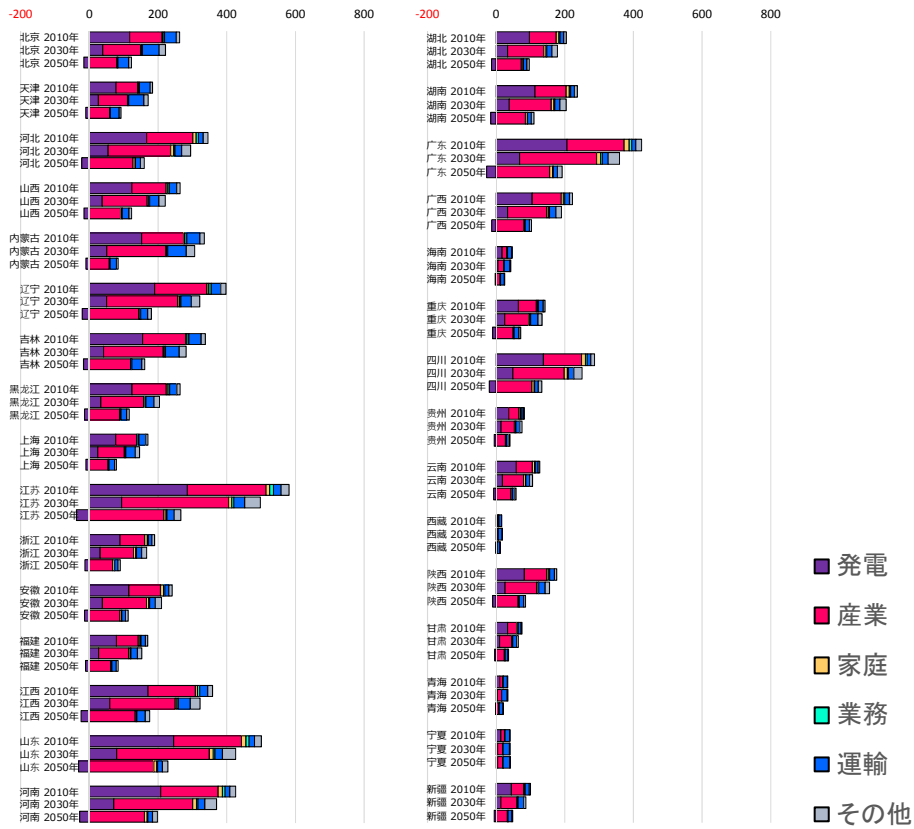
③ 中国・インドの地域レベルの排出量推計

国スケールの排出量を州や省といった地域に按分（ダウンスケール）するツールを作成し、これを用いて中国・インドにおける地域別の排出シナリオの推計を実施した。本ツールは、部門別の排出量に対して、関連する活動量を積み付け指標として用いて地域別に按分するものである。地域ごとの活動量指標の基準年実績及び将来年予測は、中国能源研究所、インド経営大学院、アーメダバード大学、ポパール建築計画研究所等の研究者と共同で収集した。排出量の部門区分と、当該排出量を按分するために用いた活動量指標の対応は表(2)-2の通りである。

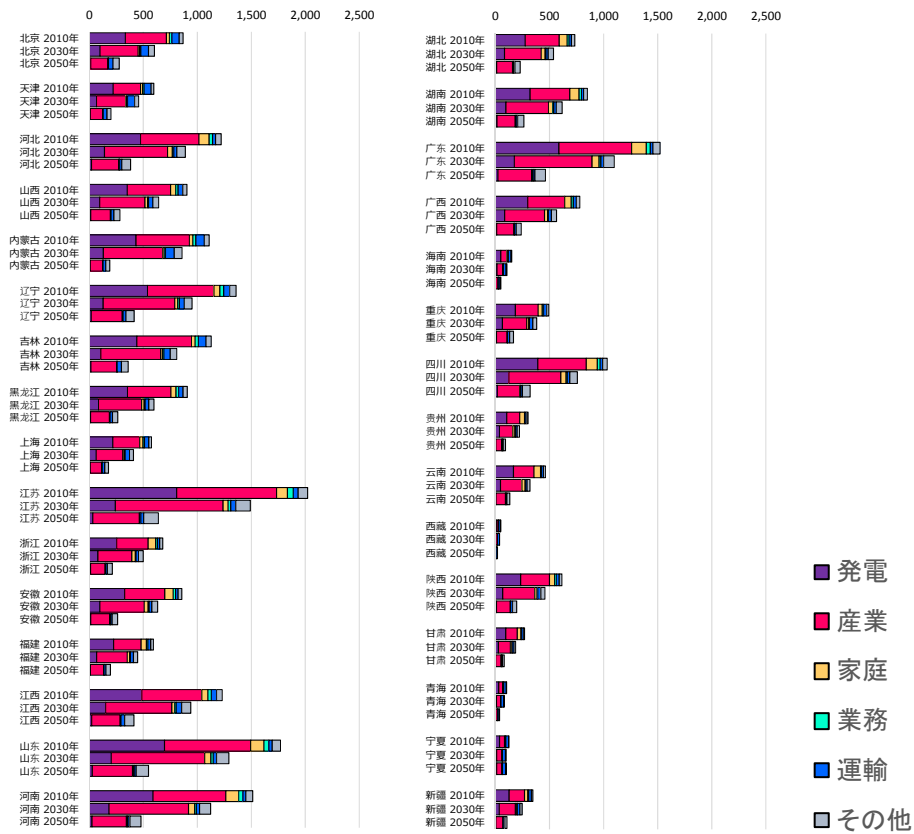
表(2)-2 地域別排出量の推計に用いた活動量指標

発電部門	電力需要、GRP
産業部門	第2次産業GRP、GRP
家庭部門	人口
業務部門	第3次産業GRP、GRP
運輸部門	旅客・貨物輸送量、GRP per capita
その他	GRP

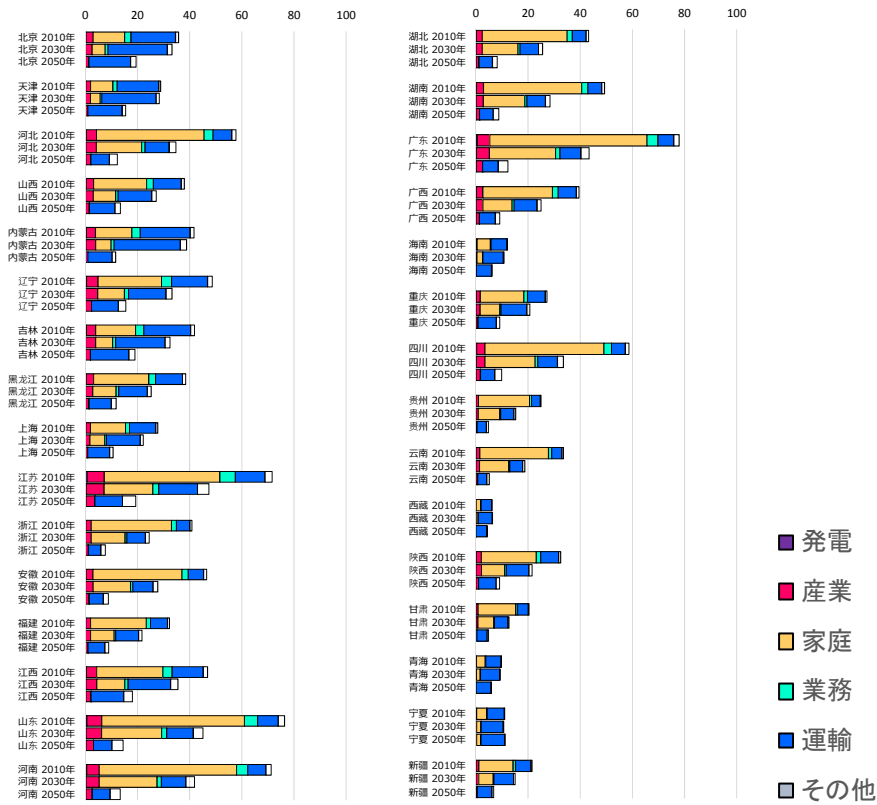
図(2)-43～図(2)-45に2010年、30年、50年における中国の31省地域別の2D-EoPmid-RESBLDTRTのCO₂、SO₂、BCの排出量結果を、図(2)-46～図(2)-48に同年のインドの17地方別の2D-EoPmid-RESBLDTRTのCO₂、SO₂、BCの排出量結果を、それぞれ示す。本ダウンスケールツールにより、国レベルでの多数のシナリオ分析を実施した際に、これらを簡易的に地域配分することが可能となり、州省レベルでの政策立案支援に資するものとなり得る。



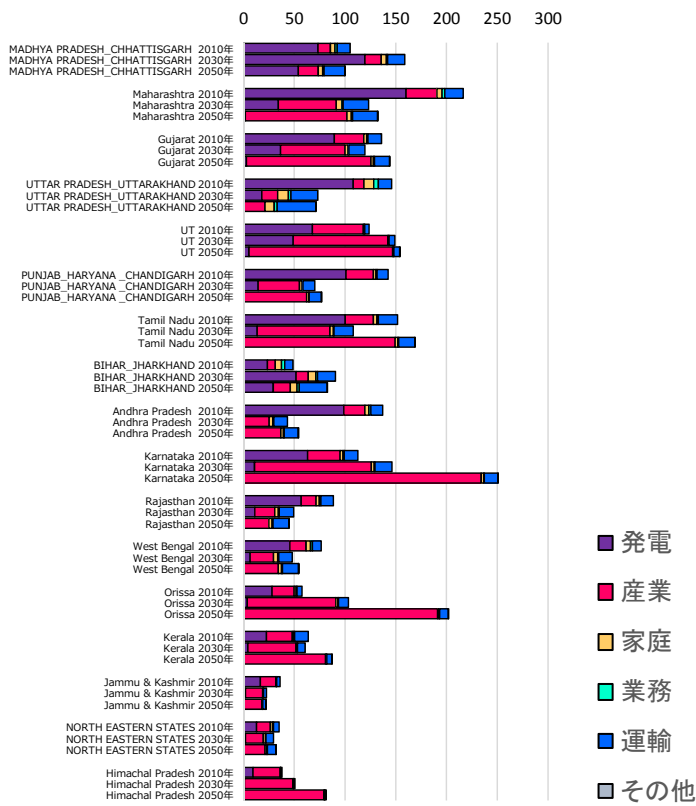
図(2)-43 中国の2D-EoPmid-RESBLDTRTの31省別CO₂排出量 (単位: Mton)



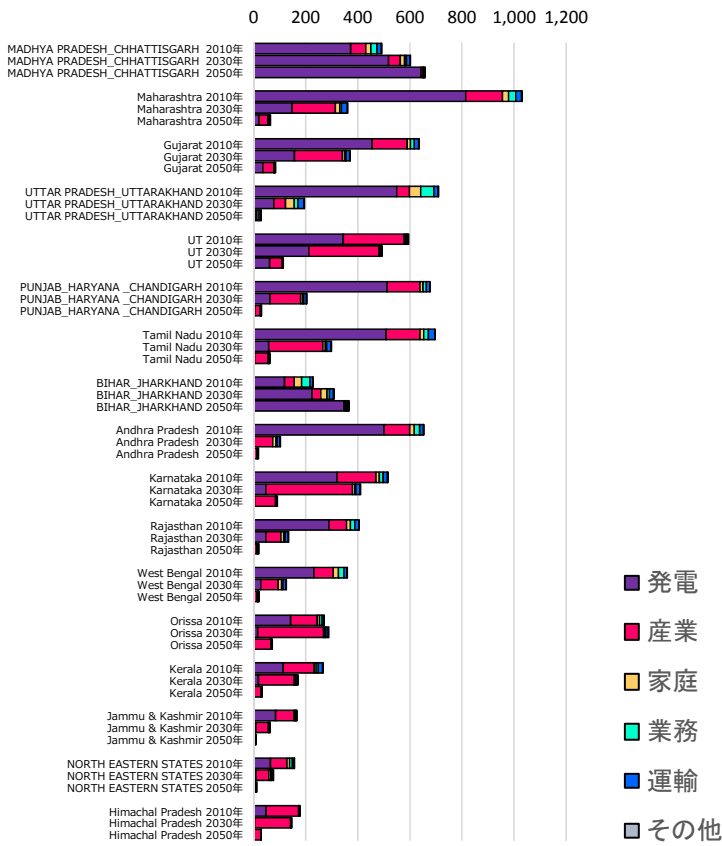
図(2)-44 中国の2D-EoPmid-RESBLDTRTの31省別SO₂排出量 (単位: 1000ton)



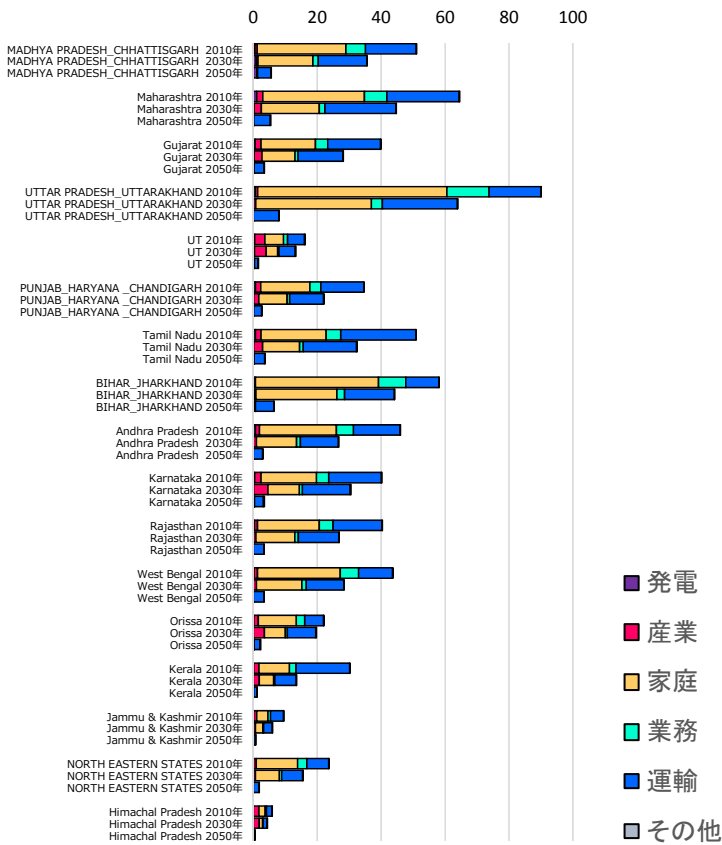
図(2)-45 中国の2D-EoPmid-RESBLDTRTの31省別BC排出量 (単位：1000ton)



図(2)-46 インドの2D-EoPmid-RESBLDTRTの17地域別CO2排出量 (単位：Mton)



図(2)-47 インドの2D-EoPmid-RESBLDTRTの17地域省別SO₂排出量 (単位: 1000ton)



図(2)-48 インドの2D-EoPmid-RESBLDTRTの17地域別BC排出量 (単位: 1000ton)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

気候変動緩和策は、これまでCO₂をはじめとする長寿命の温室効果ガスの排出削減が中心であった。これに対して、短寿命のSLCP対策も含めて検討することは地域的な気候変動に対して影響が及ぶとされ、これを解明することは、全球レベルならびに地域における気候変動を予測するにあたって極めて重要であり、科学的な意義は大きい。特に、SCLP対策がLLGHG削減策に対して補完的な役割を担うのか、あるいは、LLGHG対策に加えてSLCP対策を強化することが2℃目標の達成にどの程度寄与するかを明らかにすることは、今後の気候変動問題の解決策の検討において重要な情報であり、科学的な意義は大きい。また、大気汚染対策と気候変動緩和策を同時に検討することの科学的なメカニズムや効果を解明することは、効率的な対策を実現することに貢献し、環境政策への貢献も期待できることから、科学的意義も大きい。

サブテーマ2の排出シナリオの詳細分析の結果から、運輸部門のみでの電化を促進する2D-EoPmid-RESTRTと、運輸部門に加え民生部門でも電化を大幅に進める2D-EoPmid-RESBLDTRTを比較すると、特にBC、OC、PM₁₀、PM_{2.5}の排出量において、2D-EoPmid-RESBLDTRTの排出削減が著しく進んでおり、このことから大気汚染の観点から見たPMによる健康被害削減に、民生部門の電化が大きく寄与し得る可能性が示唆された。削減の要因分析の結果からは、温室効果ガスの排出削減を目的とした気候変動緩和策の推進がもたらす、大気汚染物質及びSLCPの排出削減副次効果は、エンドオブパイプによる直接対策と比較して同等かそれ以上の削減効果となりえることが定量的に示された。

(2) 環境政策への貢献

SLCP対策は、大気汚染対策においても効果があり、温暖化対策と大気汚染対策の両方を検討することが可能となり、温暖化問題や大気汚染問題において効率的かつ効果的な政策の実現に向けての貢献とその意義は極めて大きい。特にアジア地域においては、今後、大幅なLLGHG排出量の増加が見込まれるとともに大気汚染対策も急務であり、アジア主要国、都市といった大気汚染が深刻な地域を対象とした分析を通じて、将来のLLGHG排出量の削減も検討した政策の検討が可能となる。

また、本研究課題において収集する技術情報やこれまでの温暖化対策ならびに大気汚染対策の評価は、今後の温暖化対策、大気汚染対策の両方を検討する上で貴重な情報になると考えられる。さらに、本研究課題では、最終的には大気汚染からの影響もフィードバックさせた将来シナリオを検討することを想定しており、どのような施策を講ずることで社会全体の厚生を最大化させることができるかを検討することが可能となる。

特に環境政策に資するコストの算定という観点からは、サブテーマ2において実施した、気候変動緩和策と大気汚染対策に要する追加的コストの分析結果からは、気候変動対策に関連する省エネ技術などに要する費用と比較すると小さいこと、いずれの対策シナリオにおいても、総投資額に占めるエンドオブパイプ技術への投資の比率は、3～7%程度となるが2℃目標達成のための気候変動対策費用を含めた総累積追加的投資額は、シナリオによって大きく異なることなどが具体的な示唆として得られた。また、サブテーマ2で開発したダウンスケールするツールにより、国レベルでの多数のシナリオ分析を実施した際に、これを簡易的に地域配分することが可能となり、州省レベルでの政策立案支援に資するものとなり得る。

<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>

サブテーマ2によって算出された、気候変動緩和策と大気汚染対策のための追加的コストの分析結果、また気候変動緩和策が大気汚染物質の削減量に及ぼす副次効果の分析の結果は、今後の中国・インドをはじめとするアジア諸国の政策決定者が下す意思決定に有益な情報をもたらすだけでなく、我が国がこ

これらの国に対して政策支援を行う際にも、当該諸国の気候変動緩和策と大気汚染対策の特性を理解する上で、有意義な情報となるものと考えられる。具体的には、気候変動緩和策と大気汚染対策に要する追加的コストの分析結果、およびはそれによる気候変動緩和策が大気汚染物質の削減量の分析結果は、日本での政策決定に資するに留まらず、中国・インドをはじめとしたアジア諸国へ我が国が政策立案支援の際にも、政策の予算規模と期待される削減効果を見積もる際に大いに活用することが可能である。加えてダウンスケールするツールを用いた地域細分化を実施することで、州や省レベル等の地方レベルでの政策立案支援にも資するものとなる。

また、IPCC第六次評価報告書の作成に向けた活動が開始されているが、気候変動緩和策を取り扱う第三作業部会では、13章において国や地方の政策、制度が扱われ、本サブテーマで作成した排出削減に向けた対策のメニューとその効果、費用に関する情報は、IPCC第六次評価報告書に貢献することが期待される。

6. 国際共同研究等の状況

中国、インドにおける将来の排出動向、大気汚染対策技術の諸元（大気汚染物質削減量、普及率、等）、LLGHGならびにSLCPの排出動向に影響を及ぼす各種イベントに関するデータ収集等を行うに当たり、以下の各機関の研究者と提携して実施した。

Prof. Kejun Jiang（中国・国家発展と改革委員会エネルギー研究所）

Prof. P. R. Shukla（インド・インド経営大学院アーメダバード校、アーメダバード大学）

Prof. Manmohan Kapshe（インド・ボパール建築計画研究所）

7. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 平山智樹，藤原和也，日比野剛，花岡達也，増井利彦（2017）大気汚染物質と短寿命気候汚染物質に及ぼす気候変動緩和策による副次効果の分析 -インドを例にして-。環境システム研究論文集，73(6)，II_301-II_308

<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) Hirayama T., Fujiwara K., Hibino G. (2017) Analysis on co-benefits of climate change mitigation actions on air pollutants and SLCP -Case study in India-, International workshop on SLCP emissions and impacts in East Asia, Kashiwa, Japan
- 2) Hirayama T., Hibino G., Hanaoka T., Masui T. (2019) GHGs, SLCPs and Air Pollutants Estimation by Asia - Pacific Integrated Model (AIM). China Energy Modeling Forum 2018 Annual Conference The 1st International Modeling Symposium on Co-benefits of Greenhouse Gas Emissions Reduction and Air Pollution Control, Beijing, China

（3）出願特許

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) 2019年12月に行われたエコプロ2018では、サブテーマ1と共同で簡易ツールであるAIM/SLCPのデモを実施した。

(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

特に記載すべき事項はない。

II-3 都市スケールにおける排出シナリオの定量化と大気汚染影響の評価

京都大学大学院工学部研究科

都市環境工学専攻

倉田 学児・島田 洋子・河瀬 玲奈

その他の研究協力機関等 京都大学大学院工学部研究科都市環境工学専攻 郭 敏娜・Xing Rui

平成26～30年度累計予算額：59,376千円（うち平成26年度：12,418千円、平成27年度：11,797千円、平成28年度：11,207千円、平成29年度：11,207千円、平成30年度：12,747千円）
累計予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

短寿命気候汚染物質（SLCP）の家庭部門からの排出が気候影響、屋外大気汚染および室内空気汚染の各々に重要な寄与をしているために排出削減策の策定が重要かつ喫緊の課題である。こうしたことから、サブテーマ3では、大気汚染モデル群および都市・家庭モデルの全体設計を行なった上で、国レベルだけでなく地域レベルでのエネルギー消費の状況を反映し、家庭起源のGHGとSLCPの排出を推計するモデルの開発を行なうことを目的としている。開発にあたっては、中国およびインドを対象に過去データを用いた再現性の検証・既往モデルの改良を行い、将来推計に耐えうるモデルの開発を試みるとともに、他の国の地域レベルでの推計にも適用できる汎用性をもったモデルの活用を目指す。

家庭起源のGHGとSLCPの排出量を推計するために、まず、家庭での用途（調理、暖房、冷房、給湯、照明等）別に、国レベルだけでなく地域レベルでのエネルギー消費の状況を反映したエネルギー消費量の推計を行う必要がある。特に、調理や暖房のエネルギー消費の状況に関しては、推計対象国の気候や経済状況の地域的な特徴にも対応できる推計を行うことが重要となる。従来、家庭部門のエネルギー消費量の推計には、各部門のエネルギー需要を、回帰モデルを用いて推計する計量経済学的なアプローチで行われているが、このアプローチは国全体で一律な推計に適しており、エネルギー消費に関する地域的な特徴を反映した推計には向いていない。そこで、サブテーマ3では、推計対象国における地域別、都市・農村別の各用途のエネルギー消費量を、詳細な統計データの分析をもとに所得水準などの要素を組み込んで将来推計する手法を開発し、ボトムアップ的なアプローチによって、家庭起源のSLCP排出量を推計した。まず、世界や国における排出シナリオと整合させるために、サブテーマ1で使用されているダウンスケールされたSSPと呼ばれる社会経済シナリオを用いて、民生部門における屋内大気汚染物質を対象とした排出シナリオの定量化を、技術選択モデルであるAIM/Enduseを使用して行なった。中国を対象として目的別の1人あたりのエネルギー需要量の推移を推計した結果、都市部、農村部ともに暖房需要が過半を占めること、家電や調理によるエネルギー需要量が多いことが明らかになった。

家庭での用途（調理、暖房、冷房、給湯、照明等）別に、国レベルだけでなく地域レベルでのエネルギー消費の状況を反映した家庭起源のSLCP排出量の推計を行なう際、特に、調理や暖房のエネルギー消費の状況に関しては推計対象国の気候や燃料使用状況の地域的な特徴にも対応できる推計を行うことが必要となる。そこで、中国を対象に、詳細な地域別、燃料種別の調理エネルギー需要量の推計を試みた。まず、1人当たりの調理エネルギー消費量に関する調査・研究報告を収集し、都市と農村別にまとめたところ、農村では地域による差が大きいことがわかり（約18～38 MJ/(capita/day)）、農村の地域による差（寒暖など）を考慮することを検討した。中国では、東北部を中心とした寒冷地域の農村において「カン（kang）」という調理兼暖房用設備が設置されている。カンとは、台所のかまどで煮炊きしたときに発生する煙を居住空間の床下に通し、床を暖めることによって 部屋全体をも暖める設備のことである。台所で調理する際の排気を利用した暖房システムだが、炊事を行わない時も暖房用としてかまどに火を常時入れておく場合もある。カンは伝統的な住まい方においては就寝だけでなく食事、接客、団らん、くつろぎなどが行われる家族の生活空間の中心として位置づけられており、単なる暖房設備ではなく、その地方の伝統や生活習慣を構成する大きな要因となっている。この区分で算定した結果、寒冷地域：約24.1 MJ/(capita・day)、温暖地域：約19.8 MJ/(capita・day)となり差が確認できた。よって、農村に

については、カンを使用している地域（寒冷地域）とカンを使用していない地域（温暖地域）と区別して調理エネルギー消費量を推定することとした。一人当たり調理エネルギー消費量（都市、農村（寒冷地域、温暖地域）、調理エネルギー消費の燃料別シェア、調理用機器効率をデータから設定し、調理エネルギー需要量を推計した。

[キーワード]

家庭部門、エネルギー需要量、調理エネルギー消費量、短寿命気候汚染物質（SLCP）、室内空気汚染

1. はじめに

黒色炭素（ブラックカーボン、BC: Black Carbon）や対流圏オゾンなどの短寿命気候汚染物質（SLCP: Short-Lived Climate Pollutants）は、健康影響や生態系影響を引き起こす大気汚染物質であると共に、気候を温暖化させる特性を持つことから、その気候や環境への影響の定量的評価と削減策の提示が、気候変動の緩和にも貢献することになる。WHOは、発展途上国の大気汚染の主要な排出源は、家庭での調理や暖房のための石炭やバイオマス燃料の燃焼であり、屋外だけでなく室内の空気汚染による健康リスクを引き起こすと報告している。BCの排出源は、欧米の先進国ではディーゼルエンジンからの排出、ラテンアメリカでは屋外のバイオマス燃料の燃焼、アフリカではバイオマス燃料の屋外と調理での燃焼、東アジアでは産業や家庭での石炭使用とバイオマス燃料による調理がメインである。特に、中国やインドでは住宅での暖房や調理によるバイオマス燃料の燃焼による排出が支配的であると報告されている。

このように、SLCPの家庭部門からの排出は、気候影響、屋外大気汚染および室内空気汚染の各々に重要な寄与をしていることから、その排出削減策の策定は重要かつ喫緊の課題である。

2. 研究開発目的

1. で示した背景を踏まえ、サブテーマ3では、大気汚染モデル群および都市・家庭モデルの全体設計を行なった上で、国レベルだけでなく地域レベルでのエネルギー消費の状況を反映し、家庭起源のGHGとSLCPの排出を推計するモデルの開発を行なうことを目的としている。開発にあたっては、中国およびインドを対象に過去データを用いた再現性の検証・既往モデルの改良を行い、将来推計に耐えうるモデルの開発を試みるとともに、他の国の地域レベルでの推計にも適用できる汎用性をもったモデルの活用を目指す。

3. 研究開発方法

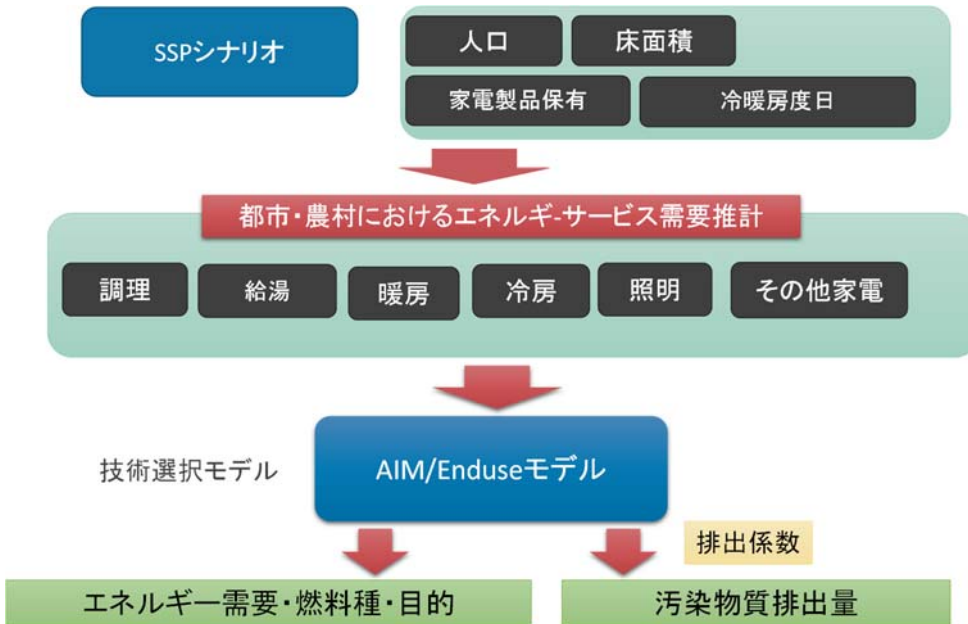
家庭起源のGHGとSLCPの排出量を推計するためには、まず、家庭での用途（調理、暖房、冷房、給湯、照明等）別に、国レベルだけでなく地域レベルでのエネルギー消費の状況を反映したエネルギー消費量の推計を行う必要がある。特に、調理や暖房のエネルギー消費の状況に関しては、推計対象国の気候や経済状況の地域的な特徴にも対応できる推計を行うことが重要となる。従来、家庭部門のエネルギー消費量の推計には、各部門のエネルギー需要を、回帰モデルを用いて推計する計量経済学的なアプローチで行われているが、このアプローチは国全体で一律な推計に適しており、エネルギー消費に関する地域的な特徴を反映した推計には向いていない。そこで、サブテーマ3では、推計対象国における地域別、都市・農村別の各用途のエネルギー消費量を、詳細な統計データの分析をもとに所得水準などの要素を組み込んで将来推計する手法を開発し、ボトムアップ的なアプローチによって、家庭起源のSLCP排出量を推計する。

4. 結果及び考察

4-1 屋内大気汚染物質を対象とした都市スケールでの家庭部門排出シナリオの定量化

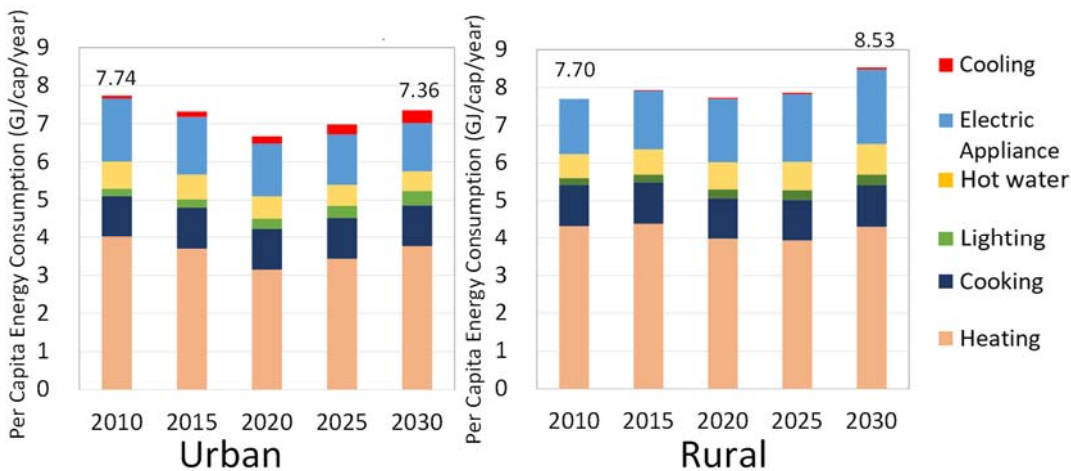
世界や国における排出シナリオと整合させるために、サブテーマ1で使用されているダウンスケールされたSSPと呼ばれる社会経済シナリオを用いて、民生部門における屋内大気汚染物質を対象とした排出シナリオの定量化を行った。分析には技術選択モデルであるAIM/Enduseを使用した。図(3)-1に分析のフ

ローを示す。分析においては、エネルギーサービス需要量の推計を行うとともに、AIM/Enduseにおいて評価するエネルギー消費技術に関する情報の収集、さらには、屋内大気汚染を評価するための排出係数の見直し等を行った。対象とする物質は、BC、CO、NO_x、OC、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NMVOCである。

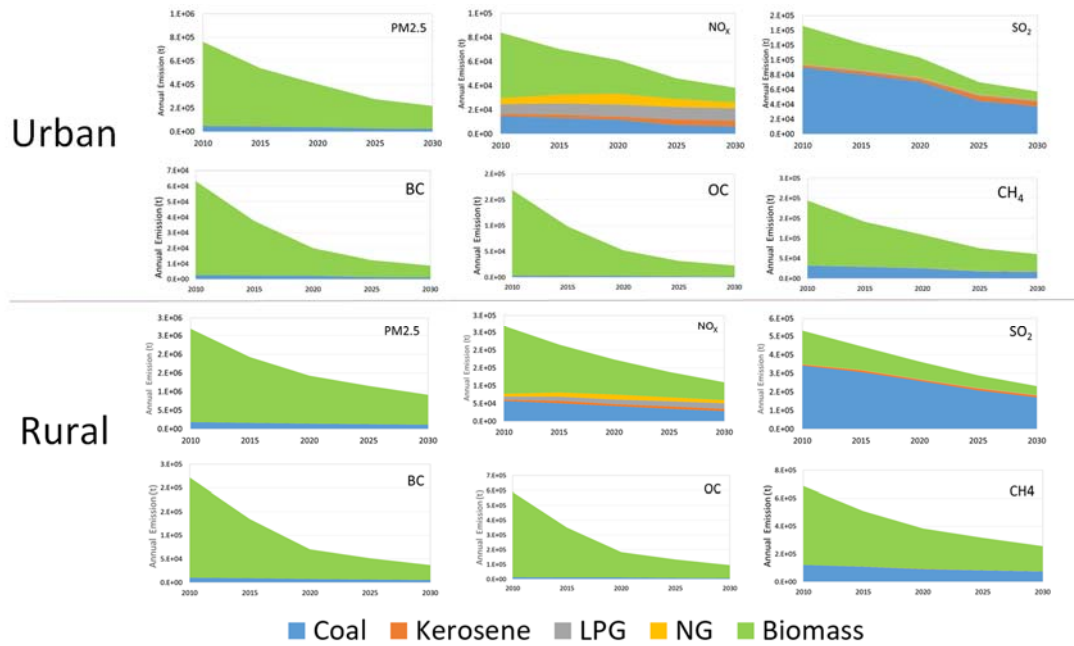


図(3)-1 家庭を対象とした詳細な汚染物質排出量の推計フロー

中国を対象とした目的別の1人あたりのエネルギー需要量の推移を図(3)-2に示す。都市部、農村部ともに暖房需要が過半を占める。そのほか、家電や調理によるエネルギー需要量が多いことが分かる。こうしたエネルギーサービス需要に対して、AIM/Enduseを適用して、将来の技術、燃料種とその需要量を推計し、様々な物質を対象とした屋内大気汚染物質の排出量を推計した。図(3)-3は、都市及び農村別の各汚染物質の排出量について、燃料源別に示したものである。バイオマス燃料の消費量が大幅に減少することから、都市及び農村両地域において汚染物質の排出量は削減される。また、石炭の寄与も同様である。一方、都市のNO_xについては、灯油やLPGによる寄与が高くなる結果となった。これは、暖房や調理において燃料転換が生じた結果である。



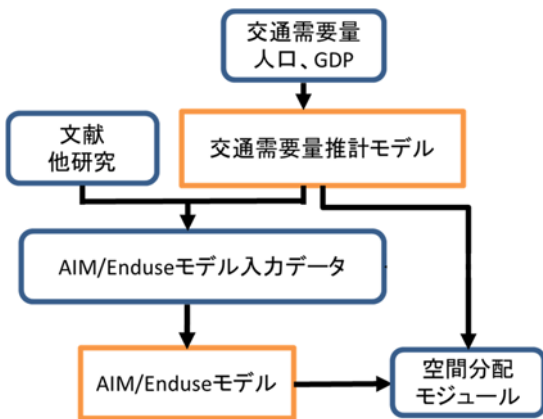
図(3)-2 中国における目的別のエネルギー需要量の推移



図(3)-3 中国における屋内大気汚染物質の排出量の推移

4-2 アジア各国の交通部門における大気汚染物質排出量の推計

アジア各国の自家用車を含めた都市交通部門における温室効果ガスおよび大気汚染物質の排出量とその削減可能性を定量的に推計するために、AIM/Enduseモデルを用いて、日本・韓国・中国・インドネシア・インド・タイの6ヶ国について、2010年を基準年として、2050年までの将来推計を基準シナリオおよび排出税シナリオ、公共交通機関分担率向上シナリオ、組み合わせシナリオの4つで比較を行った(表(3)-1参照)。図(3)-4に推計フローを示す。



図(3)-4 交通起源大気汚染物質の推計フロー

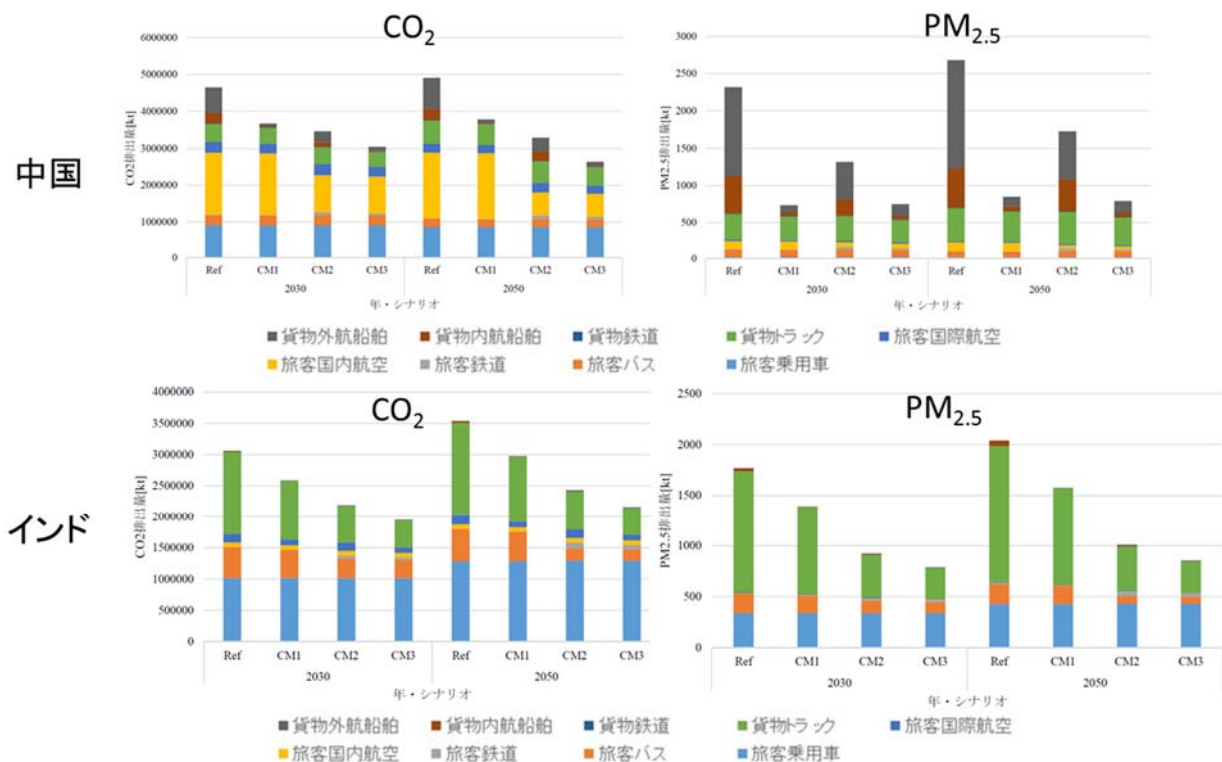
表(3)-1 交通起源の排出量推計で設定したシナリオ

コード	シナリオ名	定義
Ref	基準シナリオ	規制は設けない
CM1	排出税50	全ガスの排出に対して50US\$/tonの排出税を課す
CM2	公共交通向上シナリオ	旅客部門:鉄道の機関分担率が2035年に28.6%に達する。 貨物部門:鉄道の機関分担率が2035年に29.3%に達する。
CM3	組み合わせシナリオ	CM1とCM2の組み合わせ

図(3)-5に中国およびインドについての推計結果を示す。

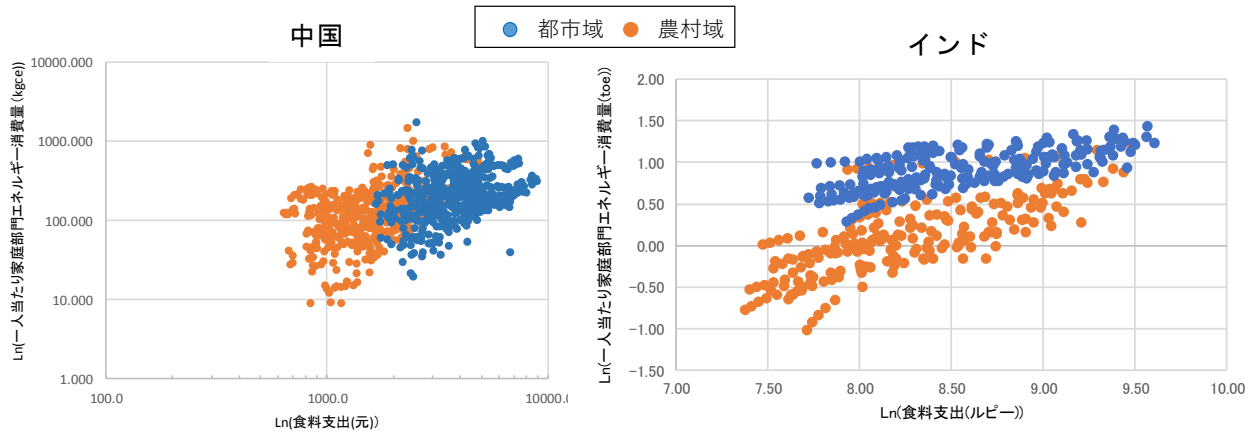
中国では、CM1シナリオでは、Refシナリオと比較して大きな削減効果が確認できた。本シナリオで課した50US\$/tonという排出税はただちに導入することは難しいと考えられるが、それに見合う大きな効果があることが確認できた。CM2シナリオにおいては、全体としてCM1シナリオには劣るものの大きな削減効果が確認された。また、2040年以降のCO₂排出量ではCM1シナリオよりも大きな削減効果が確認された。中国全土を対象とした本研究でも早期の鉄道整備がもたらす排出量の削減効果が確認できた。

インドでは、Refシナリオにおいては2050年での排出量は2010年と比較して大きく増加した。特に乗用車と貨物トラックの排出量が大きくなっている。交通需要量推計モデルでは旅客部門における乗用車の機関分担率は2010年では21%、2050年では41%と推計されたことからインドにおける自動車需要の爆発的な増加が予想される。このような事情を反映して、他国と比較してCM2シナリオの削減効果が大きく、特にインドにおいては早期からの鉄道整備が排出量の削減に大きく寄与することが示された。

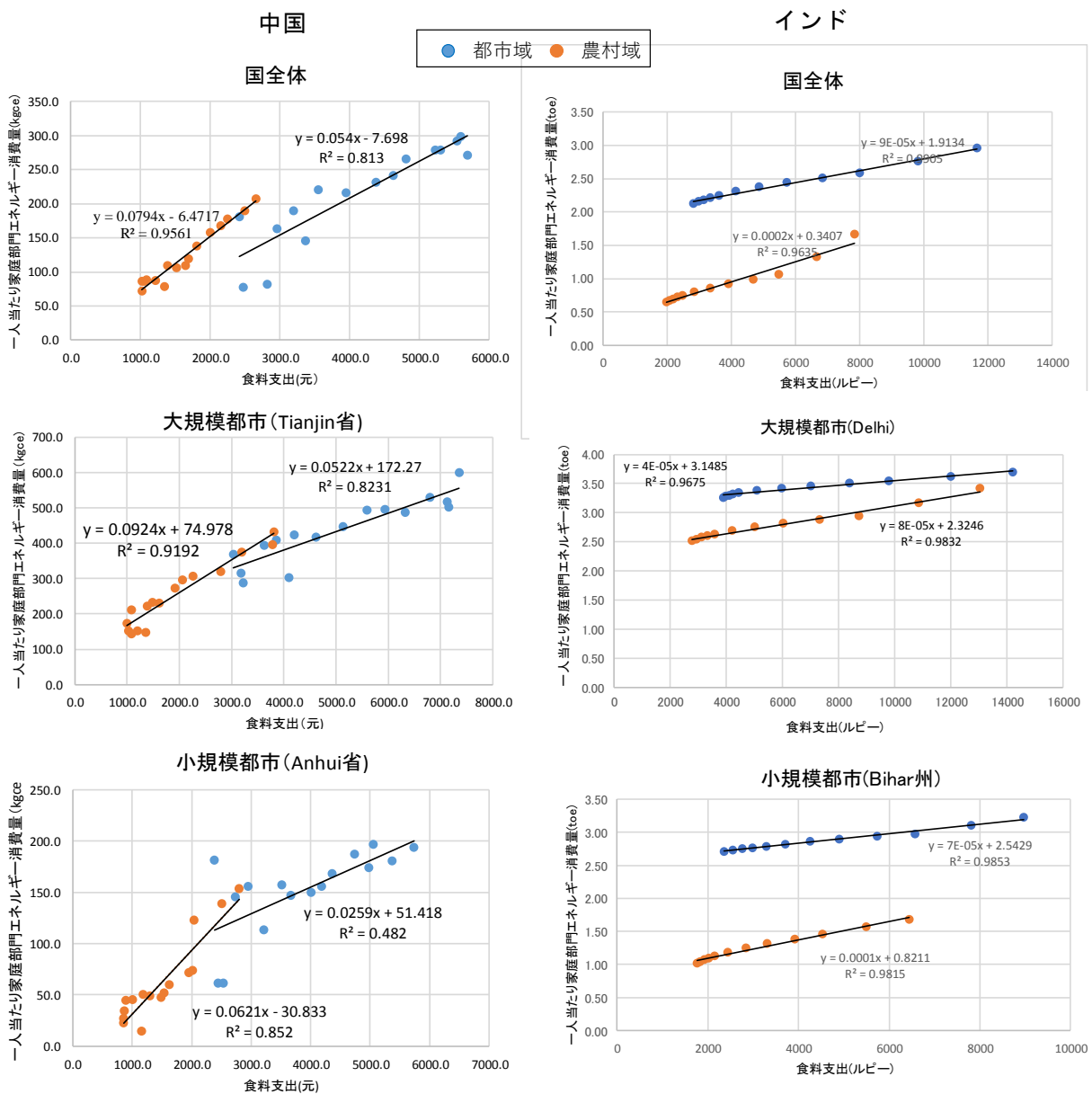
図(3)-5 中国およびインドにおける交通起源のCO₂とPM_{2.5}の排出量と削減ポテンシャル

4-3 ボトムアップ的アプローチによる家庭部門の調理エネルギー需要量推計手法の開発

調理起源のSLCPの排出量が多い中国とインドを対象に、家庭部門エネルギー消費量と家計状況(食料支出)の関係を統計的に分析した結果を図(3)-6と図(3)-7に示す。



図(3)-6 中国およびインドにおける各地域(都市・農村)の食料支出と一人当たり家庭部門エネルギー消費量の相関

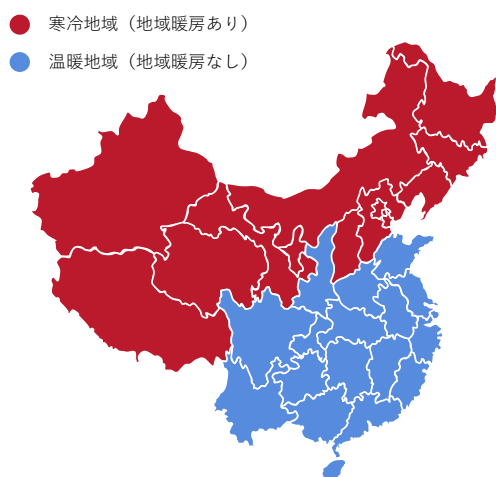


図(3)-7 中国およびインドの国全体、大規模都市および小規模都市の都市・農村別の食料支出と一人当たり家庭部門エネルギー消費量の相関

図(3)-6と図(3)-7に示す相関分析において、中国のデータは2000～2015年、インドのデータは2000年～2011年の、家計食料支出および家庭部門における一人当たり家庭部門エネルギー消費量(バイオマス燃料消費量を除く)の年間統計値を用いている。図(3)-6は中国およびインドの各地域(都市・農村)の食料支出と一人当たり家庭部門エネルギー消費量のデータを全てプロットして都市域と農村域に色分けしたものである。また、図(3)-7において、大規模都市とは「人口が多く経済水準が高い地域」、小規模都市とは「人口が少なく経済水準が比較的低い地域」を示している。図(3)-6と図(3)-7分析結果から、食料支出と消費エネルギー消費量の関係式を導出して、家庭起源のSLCP排出量の将来推計を行うことは、可能だが、サブテーマ3では、家庭での用途(調理、暖房、冷房、給湯、照明等)別に、国レベルだけでなく地域レベルでのエネルギー消費の状況を反映した家庭起源のSLCP排出量の推計を目指しているため、特に、調理や暖房のエネルギー消費の状況に関しては推計対象国の気候や燃料使用状況の地域的な特徴にも対応できる推計を行うことが必要となる。

そこで、中国を対象に、詳細な地域別、燃料種別の調理エネルギー需要量の推計を試みた。まず、1人当たりの調理エネルギー消費量に関する調査・研究報告を収集し、都市と農村別にまとめたところ、農村では地域による差が大きいことがわかり(約18～38 MJ/(capita/day))、農村の地域による差(寒暖など)を考慮することを検討した。

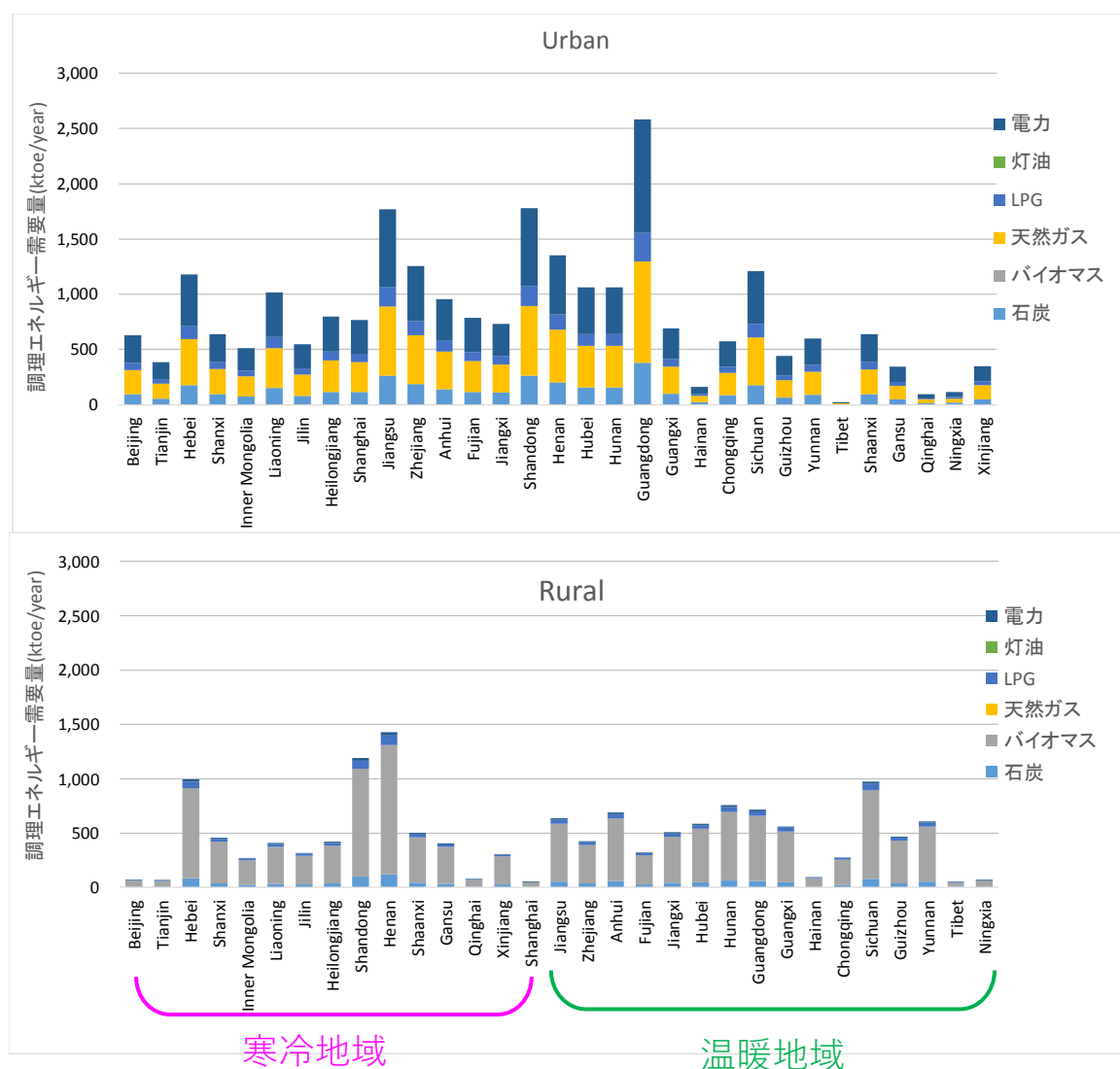
中国では、東北部を中心とした寒冷地域の農村において「カン(kang)」という調理兼暖房用設備が設置されている。カンとは、台所のかまどで煮炊きしたときに発生する煙を居住空間の床下に通し、床を暖めることによって部屋全体をも暖める設備のことである。台所で調理する際の排気を利用した暖房システムだが、炊事を行わない時も暖房用としてかまどに火を常時入れておく場合もある。カンは伝統的な住まい方においては就寝だけでなく食事、接客、団らん、くつろぎなどが行われる家族の生活空間の中心として位置づけられており、単なる暖房設備ではなく、その地方の伝統や生活習慣を構成する大きな要因となっている。そして、カンは就寝だけでなく食事、接客、団らん、くつろぎなどが行われるため、用途が集中し混在して使用される(韓, 2015)。カンの燃料としては、薪や石炭が使用されている。カン使用地域では調理エネルギー消費量はカンを使わない地域より大きいと考えられる。そこで、農村を、カンを使用している地域(寒冷地域)とカンを使用していない地域(温暖地域)と区別して調理エネルギー消費量を算定することが、農村地域一律に算定するよりも、ライフスタイルを考慮したより実態に近い推計をすることにつながるのではないかと考えた。図(3)-8に、寒暖による地域区分の設定を示す。



図(3)-8 寒暖による地域区分

この区分で算定した結果、寒冷地域：約24.1 MJ/(capita・day)、温暖地域：約19.8 MJ/(capita・day)となり差が確認できた。よって、農村については、カンを使用している地域(寒冷地域)とカンを使用していない地域(温暖地域)と区別して調理エネルギー消費量を推定することとした。図(3)-9に2010

年の推計結果を示す。



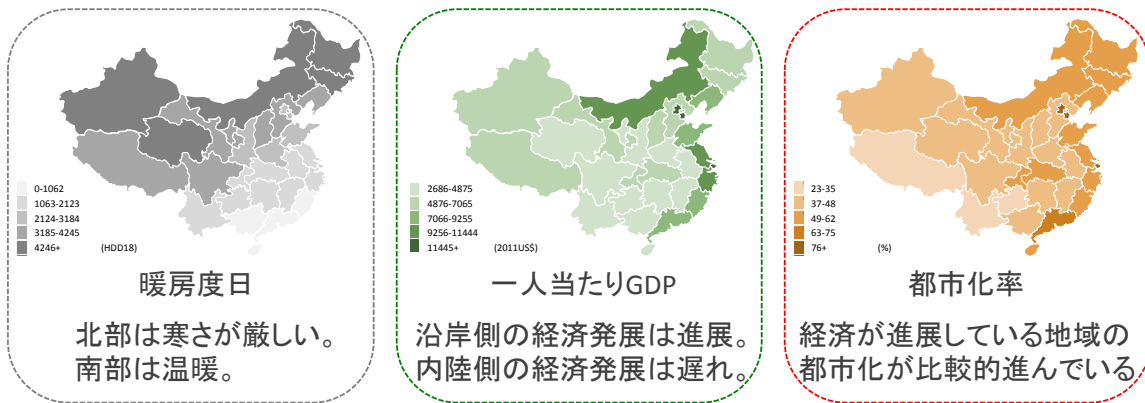
図(3)－9 地域別調理エネルギー需要量推計値 (2010年)

4-4 ボトムアップ的アプローチによる家庭部門と業務部門のエネルギー需要量推計手法の開発

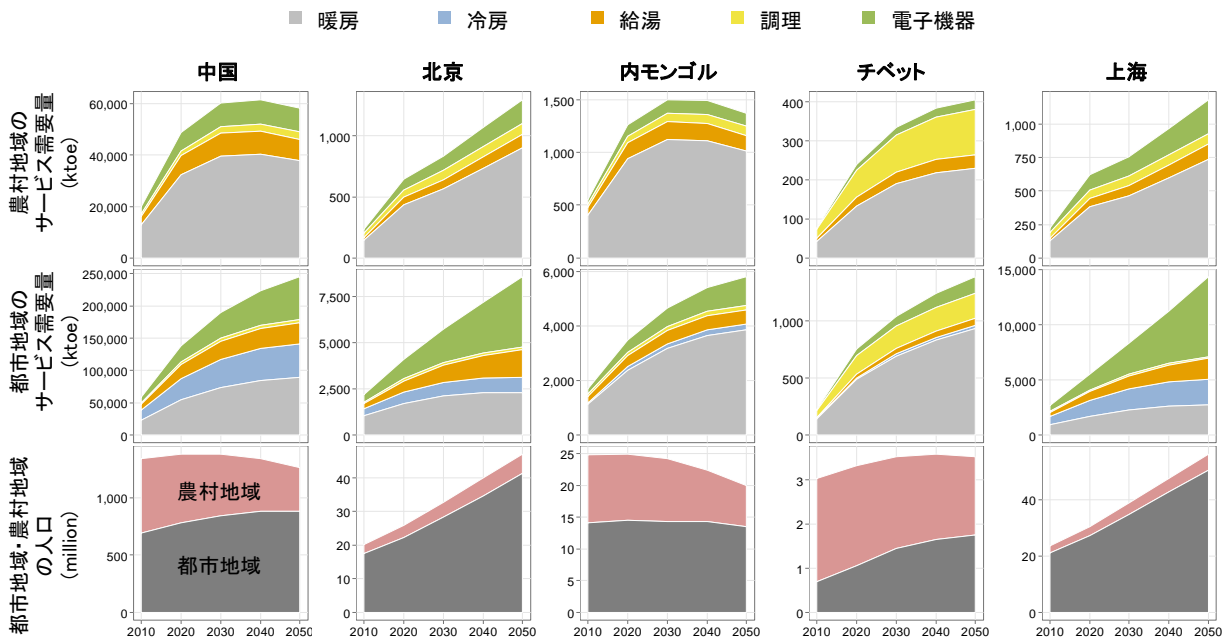
サブテーマ1及び2と共同で、中国、インドの地域（中国における省やインドの州など）の特徴を考慮した技術選択モデルの開発を行うとともに、家庭におけるエネルギー選択と電化による影響を考慮した技術選択モデルの開発を行い、温室効果ガス、SLCP、大気汚染物質の排出シナリオの推計を行った。

アジアは多様である中、中国一国をみても国土が広いので省別にさらに特徴が異なる。図(3)-10に示すように、経済レベルの差異によって、対策技術の導入のしやすさに影響があり、また、都市地域と農村地域では家庭部門で使用されている燃料種が異なるので都市化率の差異によって影響があり、さらに南北の気候区分も異なるため、寒暖の差異によって、暖房需要・冷房需要の想定が大きく異なる。このような過去から現在までの地域別の特徴と変遷を考慮し、省別・都市農村別の将来シナリオを分析した。図(3)-11に家庭部門のエネルギー需要シナリオ、図(3)-12に業務部門の活動量シナリオ、図(3)-13に中国の代表的な4地域都市部における家庭起源の排出量を示す。図(3)-13は中国において、なりゆきケースから、炭素税等を導入する対策ケースへの排出量の変化についての分析結果である。中国の4つ都市・省における都市部家庭部門のCO₂、SO₂、NO_x、PMの排出量を見ると、石炭暖房が主流となっている寒冷地方のBeijing（北京）とHeilongjiang（黒龍江省）では、CO₂排出量に占める暖房の寄与が大きい。一方で温暖なShanghai（上海）とGuangdong（広東省）では、家電製品による間接排出の寄与が大きい。暖房は

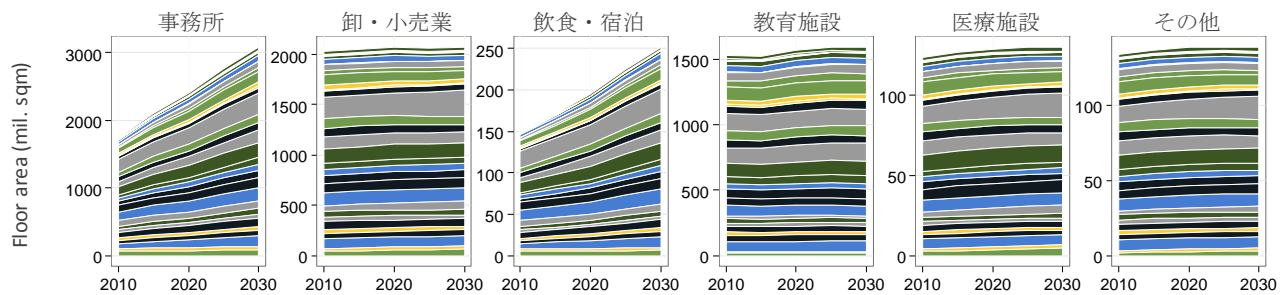
CO₂だけでなく大気汚染物質であるSO₂、NO_x、PMの排出量にも大きく寄与している一方で、給湯は都市ガスのシェアが大きいいため、SO₂の排出量にはほとんど寄与しない。またNO_xとPMに関しては、温暖地域であるShanghaiとGuangdongからはほとんど排出されないことが示された。



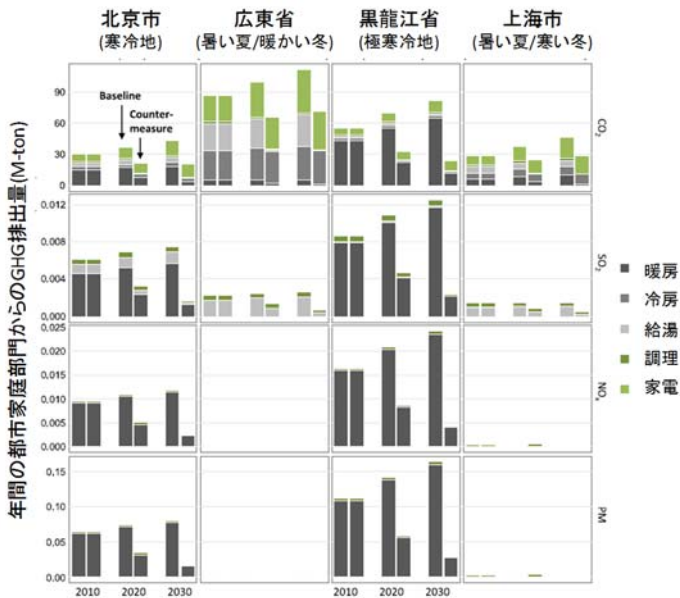
図(3)-10 基準年(2015年)における中国31省の地域別の主な特徴の例



図(3)-11 中国31省の地域別の特徴を考慮した家庭部門のエネルギー需要シナリオ

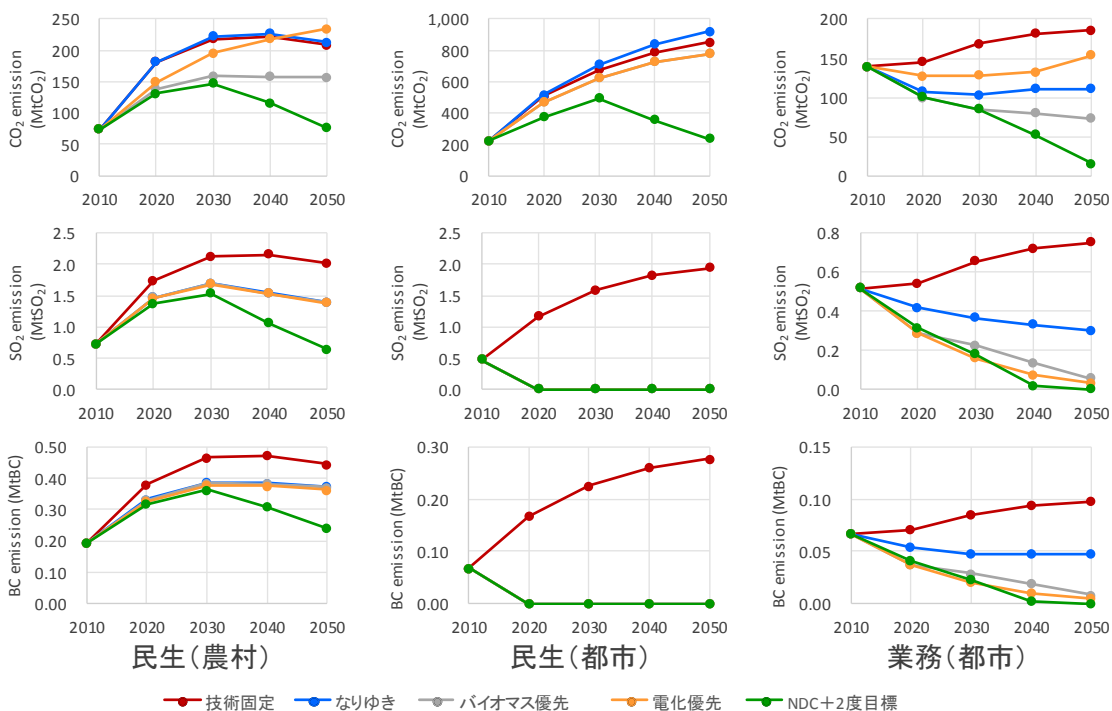


図(3)-12 中国31省の地域別の特徴を考慮した業務部門の活動量(業務床面積)シナリオ



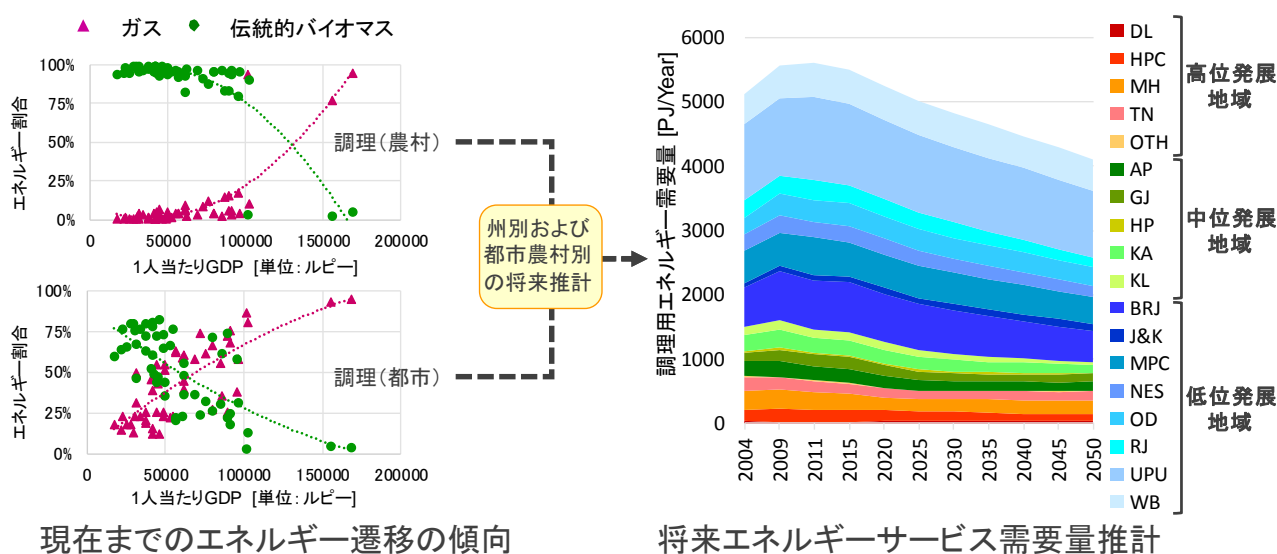
図(3)-13 中国の代表的な4地域都市部における家庭起源の排出量

また、図(3)-14に中国31省の地域別の特徴を考慮した家庭・業務部門をまとめた大幅排出削減シナリオの結果を示す。民生（都市）における排出量に占める主なエネルギー種は石炭であり、排出量制約を課すことにより、石炭から電気、天然ガスまたは第二世代バイオマスへエネルギー転換され、SO₂やBCは大幅に削減される。一方、民生（農村）は伝統的バイオマスに大きく依存し、バイオマスはカーボンニュートラルであるため、例えば、電化が促進（バイオマスから電気へ転換）するとCO₂排出は逆に増加していく。業務（都市）では、伝統的バイオマスは使われず、石炭、ガス、電気が主なエネルギー種であるため、低炭素社会に向けた大幅削減制約（NDC+2度目標）を課すことで、エネルギー転換および省エネが促進され、CO₂だけでなく同時にSO₂やBCも大幅削減される。ただし、低炭素社会に向けた大幅削減制約（NDC+2度目標）下でも、民生（農村）では安価な伝統的バイオマスが一定量が残るため、BC削減効果は限定的で、低炭素対策だけでなく室内大気汚染の視点からの対策も重要であると言える。



図(3)-14 中国31省の地域別の特徴を考慮した家庭・業務部門の大幅排出削減シナリオ

インドにおいては、中国のように南北の気候区分の寒暖の差異は小さいが、中国と同様に大きな州と小さな州によって経済レベルの差異が大きく、対策技術の導入のしやすさに影響があり、また、都市地域と農村地域では家庭部門で使用されている燃料種が異なるので都市化率の差異を十分に考慮する必要がある。特に、家庭部門を見ると調理に用いるエネルギー消費が最も大きいので、調理の分析が重要になり、またエネルギー消費の内訳をみると、バイオマスまたは都市ガスが大きな割合を占め、農村と都市で消費割合の特徴が大きく異なる。そこで35州別の都市・農村の1人当たり調理エネルギーに占めるバイオマスと都市ガスの割合の傾向と1人当たりGDPの傾向の相関関係を分析し、現在までのエネルギー変遷を考慮して、将来の調理用エネルギー需要量を推計した。その結果を図(3)-15に示す。この結果を踏まえ、S-12共通シナリオで議論した家庭部門における将来の電化率の促進が、インドにおいてどの程度蓋然性があるのか、さらに議論を深める必要がある。



図(3)-15 インド35州の地域別の特徴を考慮した家庭部門（調理）に用いるエネルギー需要シナリオ

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

気候変動緩和策は、これまでCO₂をはじめとする長寿命の温室効果ガスの排出削減が中心であった。これに対して、短寿命のSLCP対策も含めて検討することは地域的な気候変動に対して影響が及ぶとされ、これを解明することは、全球レベルならびに地域における気候変動を予測するにあたって極めて重要であり、科学的な意義は大きい。特に、SLCP対策がLLGHG削減策に対して補完的な役割を担うのか、あるいは、LLGHG対策に加えてSLCP対策を強化することが2℃目標の達成にどの程度寄与するかを明らかにすることは、今後の気候変動問題の解決策の検討において重要な情報であり、科学的な意義は大きい。

また、大気汚染対策と気候変動緩和策を同時に検討することの科学的なメカニズムや効果を解明することは、効率的な対策を実現することに貢献し、環境政策への貢献も期待できることから、科学的意義は大きい。特に、本サブテーマの成果を通じて、気候区分の差異、都市・農村といった経済発展途上やエネルギー構成の差異などを詳細に考慮した推計手法を検討することにより、よりアジア途上国の現場・現状に即した将来への遷移過程の評価することができるようになり、将来の対策導入における課題や障壁を検討する上で重要な情報を示唆することできるようになった。

家庭部門や地域において対策を行う上で、発生源の推定は重要であるが、詳細な情報は個別に研究として取り組まれているのが実態である。本サブテーマにおいて取り組んだ家庭部門における詳細なエネルギー需要の推計方法は、他の国や地域においても汎用性があり、対策の検討においても重要な基礎情報として活用することが可能であり科学的意義は大きい。

(2) 環境政策への貢献

SLCP対策は、大気汚染対策においても効果があり、温暖化対策と大気汚染対策の両方を検討することが可能となり、温暖化問題や大気汚染問題において効率的かつ効果的な政策の実現に向けての貢献とその意義は極めて大きい。特に、アジア地域においては、今後、大幅なLLGHG排出量の増加が見込まれるとともに大気汚染対策も急務であり、アジア主要国、都市といった大気汚染が深刻な地域を対象とした分析を通じて、将来のLLGHG排出量の削減も検討した政策の検討が可能となる。

また、本研究において収集する技術情報やこれまでの温暖化対策ならびに大気汚染対策の評価は、今後の温暖化対策、大気汚染対策の両方を検討する上で貴重な情報になると考えられる。さらに、本研究課題では、最終的には大気汚染からの影響もフィードバックさせた将来シナリオを検討することを想定しており、どのような施策を講ずることが社会全体の厚生を最大化させることができるかを検討することが可能となる。

発展途上国におけるSLCPの主要な排出源は、家庭での調理や暖房のための石炭やバイオマス燃料の燃焼であり、SLCPの家庭部門からの排出は、気候影響、屋外大気汚染および室内空気汚染の各々に重要な寄与をしていることから、その排出削減策の策定は重要かつ喫緊の課題である。家庭起源のGHGとSLCPの排出量を推計するために、本サブテーマ3において開発した、家庭での用途(調理、暖房、冷房、給湯、照明等)のうち、特に調理に注目して、推計対象国における地域別、都市・農村別の各用途のエネルギー消費量を、詳細な統計データの分析をもとに所得水準などの要素を組み込んで将来推計するボトムアップ的なアプローチによる推計手法は、エネルギー消費に関する地域的な特徴を反映した家庭起源のGHGとSLCP排出の将来推計を可能にし、アジア諸国の政策決定者が気候変動緩和策と大気汚染対策における家庭部門への施策を提案する上で有益な情報をもたらすだけでなく、我が国がこれらの国に対して政策支援を行う際にも、当該諸国の特性を理解する上で、有意義な情報となるものと考えられる。

<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>

家庭や地域において大気汚染対策や温暖化対策に取り組む際に、気象条件や生活様式と関連させて取り組みを実施することで、より効果的、効率的な成果が期待できることから、本研究の成果はその基礎情報として、地方政府での活用が期待される。特に、発展途上国への支援を考えたとき、所得の増加や都市化の影響は無視できず、発展段階に応じた取り組みを提供する際の情報として成果を活用することが可能である。

6. 国際共同研究等の状況

詳細な部門に関するデータ収集については、下記の研究者と共同研究を通じて行った。

Prof. Xiulian Hu, Prof. Kejun Jiang (中国・国家発展和改革委員会エネルギー研究所)

Prof. P. R. Shukla (インド・インド経営大学院アーメダバード校、アーメダバード校)

Prof. Manmohan Kapshe (インド・ボパール建築計画研究所)

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。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 郭敏娜, 倉田学児, 松岡譲 (2014) 中国での家庭部門のエネルギー消費量と燃料使用に伴う室内PM_{2.5}曝露量推計. 学会誌EICA, 19(2/3), 166-175.

- 2) 増田卓弥, 倉田学児, 松岡譲: 環境衛生工学研究, 29, 3, 106-109 (2016)
「沿道拡散モデルを利用した都市内の大気汚染物質濃度分布の推計手法の開発」
- 3) 橋本知明, 倉田学児, 松岡譲, 妹尾賢: 環境衛生工学研究, 29, 3, 110-113 (2016)
「大気化学輸送モデルを用いた中国都市部でのPM_{2.5}汚染の現状と対策効果の定量化」

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Kurata G. (2014) Estimation of emissions and health impact of air pollutant from residential sector in Asia. 16th GEIA (Global Emissions Initiative) Conference, Boulder.
- 2) 山本恭佑, 妹尾賢, 倉田学児 (2014) アジア地域のPM_{2.5}による健康影響の定量化. 第36回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム, 京都.
- 3) Lalitaporn P., Kurata G. and Matsuoka Y. (2014) Long-term Satellite Observation for Particulate Matter, CO, and NO₂ Air Pollution over Thailand and Intercomparison with Model. AOGS (Asia Oceania Geosciences Society) 11th Annual Meeting, Sapporo.
- 4) 倉田学児 (2014) 中国では何が起きているのか?—中国での室内汚染および交通起源の沿道大気汚染を考慮したPM_{2.5}曝露量推計—. 市民セミナー: 黄砂と共に飛来する越境化学物質-水環境と健康に対する影響を考える-, 東京・大阪.
- 5) 倉田学児, 妹尾賢, 松岡譲 (2014) 冬季の東アジアのPM_{2.5}越境汚染に対する排出部門別寄与の解析. 第55回大気環境学会年会, 松山.
- 6) 倉田学児, 倉本直哉, 妹尾賢, Lalitaporn P., 松岡譲 (2014) マレーシア・ジョホールバル州における煙霧の連続観測と越境運送の数値シミュレーション. 第26回環境システム計測制御(EICA)研究発表会, 大津.
- 7) Xu X.H., Kurata G., Yu B.Y., Jiang K. J., Matsuoka Y., : The 13th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality (ASAAQ13), Kobe, Japan, 2015
“A Study of the Effectiveness of Air Pollution Prevention and Control Action Plan for Central China Provinces”
- 8) 倉田学児, 山本恭祐: 第57回大気環境学会年会, 札幌, 2016年9月 “マレーシアにおける低炭素社会計画と大気汚染緩和の共便益の推計”
- 9) 郭敏娜, 倉田学児: 第57回大気環境学会年会, 札幌, 2016年9月 “国の家庭部門における都市・農村別の用途別、燃料種別のエネルギー消費量の将来推計”
- 10) 許星哈, 倉田学児: 第57回大気環境学会年会, 札幌, 2016年9月 “中国中部地域における大気汚染防止施策の評価に関する研究”
- 11) Gakuji Kurata: IGAC 2016 Science Conference, Breckenridge, USA, September 2016 “Evaluation of the co-benefits of low carbon policies on residential sector in Asian region for air pollution abatement”
- 12) Andik Pribadi, Gakuji Kurata: The Fourth Joint Seminar of Japan and Indonesia Environmental Sustainability and Disaster Prevention (ESDP-2016), Bandung, Indonesia, October 2016
“Multi-year Emissions Inventory from Biomass Burning in Indonesia during 2006-2015”
- 13) Andik Pribadi, Gakuji Kurata: The 3rd International Symposium on LAPAN-IPB Satellite for food security and Environmental Monitoring 2016 (LISAT-FSEM 2016), Bogor, Indonesia, October 2016 “Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions from Land and Forest Fire in Indonesia during 2015 based on Satellite Data”
- 14) Gakuji Kurata: The 22nd AIM International Workshop, Tsukuba, Japan, December 2016 “SLCP emission from Residential sector and its impact in Asia”
- 15) 津郷修平: 第39回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム, 京都, 2017年7月 “複数の代表濃度経路下でのSLCPの全球分布の推計”
- 16) Andik Pribadi: 2017年度大気環境学会近畿支部研究発表会, 大阪, 2017年12月 “Assessment of

biomass burning impact on air quality during 2015 fire season in Indonesia using WRF-CMAQ modeling system”

(3) 出願特許

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) S-12主催の公開シンポジウムでは、第3回、第4回で講演

倉田学児：環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-12第3回公開シンポジウム『地球温暖化と大気汚染による影響の軽減に向けた新たな取り組み－短寿命気候汚染物質(SLCP)の影響評価とその削減対策－』，東京，2017年1月“アジア地域の家庭部門からの大気汚染物質の排出量とその影響”

島田洋子：環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-12第4回公開シンポジウム『地球温暖化と大気汚染による影響の軽減に向けた新たな取り組み－短寿命気候汚染物質(SLCP)の影響評価とその削減対策－』，京都，2018年1月“アジア地域の家庭部門からの大気汚染物質の排出量とその影響”

(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

韓 犇(2015)：「中国東北部農村の暖房エネルギー消費に関する研究：カンと農業廃棄物の利用の視点から」，九州大学学位論文，<https://doi.org/10.15017/1543986>.

III. 英文Abstract

Development of Integrated Assessment Model for SLCP Analysis and Quantification of Future Scenarios

Principal Investigator: Toshihiko MASUI

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

Cooperated by: Mizuho Information Research Institute, Kyoto University

[Abstract]

Key Words: Integrated assessment model, Future scenarios, Climate change, SLCP (Short-lived climate pollutants), LLGHG (Long-lived greenhouse gas), Synergy effect and trade-off effect, Air pollution, Asia

Paris Agreement which was agreed at the COP21 of UNFCCC in 2015 recommends holding the increase in the global average temperature to well below 2°C above pre-industrial levels and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5°C above pre-industrial levels, recognizing that this would significantly reduce the risks and impacts of climate change. On the other hand, there are big gaps between the emission pathways to achieve the 2°C target and actual emission trajectory. In order to bridge these gaps, the measures to reduce the short-lived climate pollutants (SLCP) become important. Especially in Asia, the emissions are expected to increase, and appropriate treatment of pollutants will be desired. In this research, the existing Asia-Pacific Integrated Model (AIM) was revised to assess the emission reduction of not only the greenhouse gases but also the SLCP. Based on the revised model, the appropriate emission pathways to achieve the 2°C target and air pollution reduction were explored.

By using the revised AIM/Enduse [Global] model, the SLCP and GHG emission pathways to achieve the 2°C target were quantified. Among the scenarios, enhancement of pollution reduction by using End of Pipe technologies, renewable energy and electrification in building and transportation sectors are among the key features of the recommended SLCP scenario for attaining 2°C target controlling CH₄ and tropospheric O₃. The typical emissions were downscaled into 0.5 degree cells, and the downscaled data were provided to other themes in this project.

In the national scale analysis, the necessary technology costs to achieve the 2°C target in China and India were assessed using the AIM/Enduse [China] and AIM/Enduse [India], respectively. It is found that the costs to achieve the air pollution management are relatively smaller than those to reduce the GHG emissions. In addition, macro-economic impacts in China due to the health damages by PM_{2.5} and ozone were also assessed using the multi-province computable general equilibrium model for China, AIM/CGE [China]. In China, GDP loss in 2030 will be avoided by introducing the air pollution reduction measures, but the economic impact of PM_{2.5} will be larger than that of ozone. Among the provinces in China, Beijing, Shanghai and Tenjing will gain more economic benefit by introducing the air pollution

reduction options.

In urban scale and household scale analysis, the relationship between energy demand and other factors such as income level and local climate condition is assessed and the energy demand is estimated corresponding to the service demand. In urban areas in China, the outdoor air pollution is more severe. On the other hand, in rural areas, the indoor air pollution is more severe because of the energy service demand of heating and cooking. These results reflect the difference of lifestyles in urban and rural areas.

From the simulation analyses on the various scales, the emission pathway to satisfy the 2 °C target and air pollution reduction can be proposed, but another new pathway may be explored further. At the discussion on the emission reduction target, the numerical results will be presented for the stakeholders. Based on the various simulation results from the AIM/Enduse [Global], the simple assessment tool: AIM/SLCP (Scenario Lookup by Coalition for Protecting environment tool) was developed to promote the discussion among the various stakeholders and opened through the website: http://www-iam.nies.go.jp/aim/data_tools/S12/.