

課題名 2RF-1302 温室効果ガスおよび短寿命気候因子(SLCP)緩和策が引き起こす環境影響の能動的評価

課題代表者名 中島 映至 (東京大学 中島研究室 教授)

研究実施期間 平成25年度

累計予算額 10,461千円  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 環境質定量化・予測、環境変動、地球温暖化ガス排出削減、国際貢献

## 研究体制

- (1) 領域における排出変動の推計に関する研究((独)国立環境研究所)
- (2) 将来の発展と排出シナリオの定量化に関する研究((独)国立環境研究所)
- (3) 全球影響評価に関する研究(東京大学)

## 研究概要

### 1. はじめに(研究背景等)

短寿命気候因子(Short Lived Climate Pollutants; SLCP、エアロゾル、オゾン、メタンなど)は、長寿命温室効果ガス(Long Lived Green House Gas: LLGHG、CO<sub>2</sub>など)に比べて削減することは容易であると考えられている。また、大気汚染の改善の観点からもエアロゾル、オゾンおよびその前駆物質の削減は必須である。一方で、SLCPの削減過程で起こる気候影響は領域規模の気候変化を伴うために複雑であり、CMIP5(第5次気候モデル比較実験)などの最新の気候予測研究においても十分に検討されていないのが現状である。さらに、SLCPの削減方法には様々な技術的・政策的方法が想定され、LLGHGの削減との組み合わせも多数考えられる。そのため、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルを最大限に活かして多様な緩和策の中から最適な経路を選ぶ必要がある(科学的・技術的意義)。戦略推進費研究(S6,7,8,10)において、インベントリ、モデル群は完成しており、これらを組み合わせる時機は熟している。このような経路決定は、大気汚染削減と温暖化抑制の両面から社会にとって大きな利益をもたらす(社会的・経済的意義)。SLCPについてはIPCC評価報告書のみならず、半球規模の大気汚染物質の輸送に関するタスクフォース(TFHTAP)においてもエアロゾル、オゾンの輸送とその顕著な影響が報告されている。また、大気褐色雲(ABC)プロジェクトにおいても、アジア域の黒色炭素削減とその影響評価が重要課題となっており、さらにClimate and Clean Air Coalition(CCAC)においてもSLCPの積極的な削減策が検討されている。従って、国際的にも詳細で正確な科学的な知見を早急に準備する必要がある(国際的取り組み)。

### 2. 研究開発目的

本課題の目的は、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルを組み合わせた能動的な評価手法を開発し、それを用いた最適経路の提示と、温暖化抑制策策定のための科学的知見を提供する課題について、その実現可能性を検証する。適切なメトリックによる定量的なコスト評価も図り、施策選択のトレードオフの分析を行う。

### 3. 研究開発の方法

本課題研究は課題調査型研究(フィージビリティ・スタディ)であり、平成26年度以降の研究課題の設定に寄与することを大きな目的とする。そのため、基礎調査及び国際動向を整理するとともに、データやシミュレーションの基礎分析を行い、その上で、関連分野の研究者の国際的・学際的な研究体制及び体系的な研究計画を検討した。研究としては、「排出インベントリ・統合モデル・気候モデルを組み合わせた能動的な評価手法を開発し、それを用いて多様な緩和策の中から最適な経路の提示を行うこと」を想定しているため、必要な要素技術(領域化学輸送モデル、排出インベントリ・統合モデル・気候モデル、観測データ)について、適用可能性や実現可能性について検証した。

以下の3つのサブテーマを設定した。

サブテーマ(1): 領域における排出変動の推計に関する研究

サブテーマ(2): 将来の発展と排出シナリオの定量化に関する研究

サブテーマ(3): 全球影響評価に関する研究

#### (1) 領域における排出変動推計に関する研究

次年度からの戦略的研究においては、サブテーマ(1)は以下の研究スキームを策定している。

- 1) 削減対策効果を示すイベントを対象にして、観測データをもとに大気質の変化を検出する。
- 2) 化学輸送モデル(Chemical Transport Model; CTM)により大気質変化と排出量変化の関係を定量的に把握する。
- 3) イベント時の排出量変化を評価する排出インベントリシステムを構築する。
- 4) 対流圏衛星データ、地上観測データなどを用い、イベント時の排出変化量を逆推計する。
- 5) 領域CTMと排出インベントリを用いて、イベント時の環境変化量を再現し、削減対策の効果を定量的に説明するとともに、排出インベントリの対策応答性を検証しアジア太平洋統合評価モデル(AIM)の改良に活かす。
- 6) 4)、5)の結果を使って、対策感度を定量的に把握する。

#### (2) 将来の発展と排出シナリオの定量化に関する研究

LLGHGとSLCPの対策を検討するために必要となる将来シナリオの要件について、以下の各項目を調査し、本課題において適切なモデルの枠組みについて検討する。

- 1) 将来の社会経済活動の状況を適切に描写できるとともに、発展パターンによる差異を検討できる。
- 2) SLCPの影響をより適切に表現するために、排出源を可能な限り詳細化する。
- 3) LLGHG及びSLCPの将来排出シナリオを気候モデルに提供できる。
- 4) 将来の環境影響のフィードバックを検討することができるようなインターフェースをもつ。

また、これまでの環境研究総合推進費で行われてきた課題についてサーベイし、研究課題全体でどのような枠組みが適切かについて検討する。さらに、LLGHG及びSLCPの将来シナリオを評価する上で参考となるイベントについて調査を行う。

#### (3) 全球影響評価に関する研究

サブテーマ(1)および(2)により策定される短寿命気候因子(SLCP)および長寿命温室効果気体(LLGHG)の排出量データを用いて、気候モデルおよび大気質モデルによるシミュレーションを行い、気候・水循環・健康・農業に対するSLCP/LLGHGの影響を評価する。以下のようなフィジビリティ研究を行う。

- 1) 本研究課題で活用できる最適な気候モデル・大気質モデルを選定し、有益な環境影響評価を行え、かつ計算機資源を考慮したシミュレーションの仕様を検討する。
- 2) サブテーマ(1)および(2)により策定されるSLCP/LLGHGの多様な緩和策経路を想定し、気候変動・環境影響シミュレーションをテストする。
- 3) SLCP/LLGHGを統合的に考慮したシミュレーション結果をベースとした健康・農業などの影響評価をするための適切なメトリックを検討する。

## 4. 結果及び考察

### (1) 領域における排出変動の推計に関する研究

#### 1) 大気質データの収集調査とその使用の可能性

本研究の目的は、政府や自治体の政策や規制などによって、どの程度排出量が増減し、その結果として大気質がどの程度変化したかを定量的に関係づけることである。たとえば関東地域での排気ガスの規制による自動車などからの排出量を推定して、その結果に基づいてCTMでオゾンや粒子状物質(Particulate matter; PM)の濃度を計算し、観測データと比較することによって、規制の実効性を評価するシステムを構築しようとしている。したがって、収集すべき大気質のデータとしては以下の条件にあてはまる必要がある。すなわち、a) 政策や規制がある領域内で実施されていること、b) 政策や規制の対象や期間が明確であること、c) その地域での大気質データがある精度を持って継続的に収集されていること。このような条件を念頭に置いて、文献等を調査し、大気質データの収集と使用可能性について検討した。イベント事例には北京オリンピック、関東地域での排出ガス規制、南インドでの調理器具の変更に伴う黒色炭素(すす)排出削減の社会実験などがあった。

日本国内においては、対象とする領域や規制対象が明確であり、また、国内には1970年代から国内各地での大気観測データが収集されている。自動車排ガス規制などは、自動車からの排出係数や、自動車登録台数や交通量調査など活動量データも整備されており、最初に対象とすべき事例と考えられる。このほか揮発性有機

化合物 (Volatile Organic Compounds; VOC) 蒸発発生源対策や週末効果についても、調査データや研究例があり、大気質変化事例の研究対象になりうる。たとえば、東京や大阪など平日に活動量の多い都市部では、しばしば活動量の少ない休日や土日にオゾン濃度が高くなる傾向がある。これはオゾン生成を支配している VOC や窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) の量的バランスが変化するため起きると考えられる。自動車交通量など人為起源の活動量の変化が原因と考えられ、政策や規制ではないが、人間の行動パターンにより大気質が変化する事例として注目に値する。2011年に起きた東日本大震災についても、かなりエネルギー使用量が変化したと考えられるため、対象の候補と考えられる。

中国における経済発展は目覚ましく、エネルギー使用量が著しく増加し、大気汚染が深刻化している。統計データや観測データに対する評価を行う必要はあるが、2008年の北京オリンピック前後における統計データや大気観測データなどが、論文などで公表されているため、規制による排出量変化の事例として解析の候補になりうる。インドも近年経済発展が目覚ましいが、非都市域の一般家庭では調理や暖房にバイオマス燃料が使用されており、大気汚染の原因になっている。国連環境計画のアジア褐色雲プロジェクト (United Nations Environment Programme - Asian Brown Cloud project; UNEP-ABC) ではインド南部の地区で、家庭での調理を太陽光集光システムで行おうよう住民に働きかけ、なおかつ、その地区の四方で大気質を測定しデータを収集している (SURYA Project)。中島PIはSURYA Projectからデータ入手が可能であるため、この事例も解析の対象候補となると考えられる。

このような、日本、中国、インドの事例は、領域や対象が明確であり排出量変化や大気質の変化データを入手することが可能であるため、領域における排出変動推計に関する研究に有用であり、排出インベントリシステム構築に役立つと考えられる。

## 2) 大気質変化と排出量変化の定量的関係についての予備的計算と変化量の再現についての検証

中国では近年大気汚染が深刻となり、その影響が日本にも及んでいる。Regional Emission Inventory in Asia (REAS) などの排出インベントリでは、二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) については排出量が減少傾向にあるが、NO<sub>x</sub>、VOCなどは増加している。最新の排出量推計を用いたCTM (CMAQ) によるPM2.5の化学組成データと、過去の推進費や環境省などが行っている、全国での観測に基づく化学組成分析結果を比較した。それによると春季は九州など西日本で濃度が高く、硫酸塩の割合が高い。これは中国など大陸からの越境大気汚染を反映していると考えられる。一方で、夏は明確な西高東低の傾向はみられず、大陸の越境大気汚染の影響は相対的に小さく、国内の発生源の寄与が相対的に高いことを示唆している。要するに、春季と夏季で、気象パターンが異なることにより、異なる発生領域 (中国と日本) の異なる排出量の差をCTMの計算は反映している。このことは、大気質変化と排出量変化についてCTMを用いた予備的計算で、定性的にはあるが、変化量を再現できたと考えられる。しかしながら、CTMの計算結果と観測された各成分の濃度は異なっており、定量的な関係を再現するためには、排出インベントリやCTMについて改良する必要があることを示している。

## 3) 逆推計モデルを用いた予備的計算と検証

Mijilingらによる衛星観測結果を使用した逆推計モデルによる、北京周辺地域のNO<sub>x</sub>排出量推計結果を用いて、北京オリンピックにおける排出規制効果の予備的解析を行った。この逆推計結果とアジア地域の排出インベントリREASv2の北京周辺の排出推計量を比較したところ、① 2007年は、REASv2、逆推計結果共に月変動が比較的小さい、② 2008年は、REASv2と逆推計結果で夏の減少率の差が大きいという比較結果が得られた。逆推計の結果は、北京オリンピックが開催された夏以降、大幅にNO<sub>x</sub>排出量の減少が見られたが、REASv2ではあまり減少が見られなかった。一方、北京オリンピックが開催されなかった2007年にはREASv2と逆推計結果が比較良く整合する。これらのことは、① GOME2、OMIなど衛星データを用いた逆推計計算で、ある程度、排出量変化を推定できること、② REASv2では北京オリンピック時の排出規制等による効果を考慮してないため、リアルワールドとの乖離が大きいこと、③ 一方、特別な短期対策が実施されてない場合には、REASv2は逆推計結果と整合すること、を示している。これらのことから、① 衛星データに基づく逆推計によって大気質変化事例の解析が可能であること、② その結果を活用することにより排出インベントリの改良や対策効果の具体的な把握が可能であること、③ 一般的に統計データを用いる排出インベントリは数年の遅れが出るが、逆推計によって、数か月程度の遅れで排出量変化を推定することができること、等が明らかとなった。

## (2) 将来の発展と排出シナリオの定量化に関する研究

モデルの枠組みの検討課題として取り上げた①～④については、以下のような結果となった。

### 1) 将来の社会経済活動の状況の描写と発展パターンによる差異の検討

将来の社会経済シナリオとして、SSPs (Shared Socio-economic Pathways) の開発が進められており、そこで開発されているシナリオ群を本研究課題でも用いるものとする。なお、SSPsの定量化にあたっては、AIM/CGEも

情報提供をしており、AIM/CGEから社会経済シナリオを推計する。あわせて、SSPsでは表現されていない発展による差異についても、可能な限りAIM/CGEを用いて検討する。

## 2) SLCPの影響をより適切に表現するための排出源の詳細化

SLCPの検討にあたっては、排出量とともに排出源の特定が重要となる。このため、LPS(Large Point Source: 大規模発生源)の検討が可能なものは限り取り込み、さらに対策技術についても検討が可能となるような枠組みのモデル開発を行う。また、LPS以外についても排出源の解析が可能となるように、従来の国単位のモデルから、地域単位のモデルへの更新が必要となる。なお、産業における立地等については、国全体の意思決定が必要となる場合がある。これらのことを踏まえ、2)の課題に関しては、国及びそれらを細分化した地域を対象とした技術選択モデルを用いて、各国のLLGHG及びSLCP排出シナリオを検討するものとする。なお、従来の技術選択モデルは、LLGHGの排出シナリオの検討が中心であり、SLCP対策の検討においては不十分な点があることから、これらの対策技術も評価できるようなモデルの改善を行うことが必要である。

こうした詳細化に向けて、地域を対象とした情報の整備を行った。中国エネルギー統計年鑑をもとに、省別の都市部の家庭部門における2005年のエネルギー源別の消費量を調査した。また、韓国の地域別の家庭部門における2010年のエネルギー需給の用途別シェアも調査した。今後は、こうした統計情報をもとに、地域モデルの開発を進める予定である。

## 3) LLGHG及びSLCPの将来排出シナリオの気候モデルへの提供

2)の排出源の特定等については、国を対象としたモデルの活用を検討しているが、気候モデルとの連携に関しては、排出シナリオを世界に拡張する必要がある。このため、従来から開発を行ってきた世界規模の技術選択モデルをもとに、排出シナリオの検討を行う。なお、技術選択モデルはこれまでLLGHGの排出シナリオの検討が中心であったことから、SLCP対策においても技術等の組み合わせを検討できるように改良を行う。また、気候モデルへの情報提供にあたっては、気候モデルとの連携がスムーズにいくように、排出シナリオのダウンスケールについても検討を行う。ダウンスケールにあたっては、2)の国モデルの情報も活用して、LPSの特定化なども検討する。このように、世界モデルで対象とする国と、2)で分析される国の入力情報、結果は、整合させる必要がある。このため、これら2つの技術選択モデルの開発にあたっては、データベースやインベントリ情報を共有する。

具体的な政策に展開するためには、生活への影響などさらに詳細な分析も求められる。特に、経済成長著しいアジアでは、都市化やモータリゼーションの進展などの課題も多い。こうした状況を踏まえ、世界の社会経済シナリオと整合した、家庭レベルや地区レベルにおけるSLCPの排出シナリオとその影響を評価することも重要となる。本研究課題は、世界を対象とした分析ではあるが、詳細な視点での分析も可能となるように、家庭、地区レベルを対象とした将来シナリオの分析もあわせて行う。

## 4) 将来の環境影響をフィードバックさせるインターフェース

他テーマにおいて、気候モデル、環境モデルによる影響が分析、評価されるが、こうした影響が社会経済活動にフィードバックする可能性は十分にあるが、これまでのシナリオでは、そうしたフィードバックはほとんど考慮されていない。そこで、本課題では、様々な環境影響のフィードバックを取り込んだモデルの開発と、そうしたフィードバックも踏まえた将来の排出シナリオについて検討を行う。

上記の結果、統合評価モデルの枠組みを提示することができた。他の課題との連携や将来の発展経路と排出シナリオの定量化、政策への展開から、モデル構造は、世界モデル、国・地域モデル、地区・家庭モデルという3つのレベルを設定した。これらの3つのレベルのモデルは、整合するように情報の共有化を行う。気候モデルならびに排出インベントリとの連携については、世界モデルを介して行う。

将来の社会経済シナリオの検討そのものは、SSPsを基礎にするが、SLCP対策、温暖化対策についても別途検討する必要があり、SLCP対策やLLGHG対策の検討を行うための予備的な調査を行った。これまでにSLCPの排出に影響を及ぼす様々なイベントがあり、本課題においてもこうしたイベントを参考に、将来の削減の可能性について検討を行う。

## (3) 全球影響評価に関する研究

### 1) 本研究課題で活用できる最適な気候モデル・大気質モデルを選定し、有益な環境影響評価を行え、かつ計算機資源を考慮したシミュレーションの仕様を検討

人為起源温室効果ガスによる温室効果の増加はアジア域でほぼ均質な昇温をもたらすが、人為起源エアロゾルによる地表面での放射強制力は非常に不均質な冷却を生み出す。それによって引き起こされる夏季(JJAS)の降水量変化をMIROC大気・海洋混合層結合モデルによってシミュレーションした結果を見ると、エアロゾルの増加は非常に不均質な降水量変化をもたらすことがわかる。このようなエアロゾルの領域気候への影響は、放射収支の直接的な影響と雲場を変化させる間接効果、さらに広域のエネルギー収支の不均衡で起こる大気大循環の変化を通して起こっており、その結果生じる雲量変化や降水量変化は複雑である。もうひとつの重要な点

はこのような変化は、SST(海面温度)固定実験では得られず、海洋の応答を考慮して計算しなければならないことである。そのために、エアロゾルなどのSLCPの気候影響評価には最低限、大気・海洋混合層モデル、できれば大気・海洋結合系モデルを利用する必要がある。本研究では、調査の結果、MIROC大気・海洋結合系モデルの利用が最も適切であると結論する。このモデルは長寿命ガス過程のみならず、SPRINTARSエアロゾルモデルとCHASER大気化学モデルを含みSLCPの計算能力を持っている。その地球システムモデル(EMS)版では植生応答、炭素循環過程が組み込まれており、領域気候の変化が及ぼす植生変化などの計算が可能である。さらにこのモデルはCMIP気候モデル比較実験やIPCC評価報告書でも引用されており、モデル性能などが詳細に評価されている。ただし、MIROCシステムは膨大であり、それを運用できる専門の研究者が次期戦略課題に含まれることを推奨する。

検討すべきもう一点は、使用するモデルのスケールの相違である。領域研究で明らかになった大気質変化をAIM社会モデルによってアップスケールして、仮にそのような変化が全球的に起こったとしたシナリオを立て、SLCPの気候影響を評価しようとする、領域研究で使用される領域型大気化学モデルと気候影響評価で使用される気候モデルに組み込まれた大気化学モデルの整合性が問題になる。そのために、次期戦略課題では、このスケールの違いを把握するために、次世代型大気モデルNICAMを用いたシステムを並行して稼働することを推奨する。非静力学正20面体大気モデルNICAMはフラックス保存型差分スキームを利用しており、スペクトル型のMIROCモデルに比べて物質質量保存性が良い。かつ、準一様全球格子系の他に特定の領域に計算格子点をより多く配置するストレッチ格子系や特定の領域のみに計算資源を割り当てた領域計算が可能なダイヤモンド格子系という特殊空間格子を装備しているため、全球から日本付近までをシームレスに計算できる利点を有している。このシステムにSPRINTARSとCHASERを組み込んだNICAM+SPRINTARS+CHASERモデルが文部科学省RECCA/SALSAプロジェクトで開発されているので様々なスケールの現象を同一のモデルによって計算ができる。SPRINTARSとCHASERはMIROCにも組み込まれており、モデル間で整合性を調査する場合にも利点が多い。従って、次期戦略課題では、NICAM+SPRINTARS+CHASERの高度化と、領域計算モデルとの比較を行うことが重要である。

## 2) サブテーマ(1)および(2)により策定されるSLCP/LLGHGの多様な緩和策経路を想定し、気候変動・環境影響シミュレーションをテスト

前節で見たようにエアロゾルの放射強制力の領域気候への影響は大きく、その把握が重要である。放射強制力の評価法のひとつとして、NASAのCALIPSO/CALIOP衛星搭載ライダーとMODIS衛星イメージャーを利用した全エアロゾルの放射強制力の評価結果がある。衛星観測ではNASA/CALIPSOプロジェクトから得たエアロゾル成果物のバージョンが異なることによって放射強制力の値が大きく変化することが示されている。NASAのversion 3成果物はversion 2と比べて、晴天の場合は、海洋性エアロゾルの光学的厚さ(AOT)の増加によりとそれに伴う海上の一次散乱アルベド(SSA)の上昇が起こっている。またエアロゾル層が雲層より上か下かに存在する場合は、煙エアロゾル(Smoke)と汚染された土壌粒子(Polluted Dust)のAOTの減少が見られ、その結果、SSAが上昇している。そのためにエアロゾルの全球平均放射強制力はそれぞれ $-0.8 \text{ Wm}^{-2}$ と $-2.0 \text{ Wm}^{-2}$ となり、version 3の方がより大きな負の強制になっている。一方、MIROC+SPRINTARSモデルによる全球平均エアロゾル放射強制力は $-0.58 \text{ Wm}^{-2}$ であり、モデルとの整合性が新しいversionによる評価では取れなくなった。しかし、ライダーによるエアロゾル検知の詳細を見てみると未だに不確実な点もあり、今後、さらに衛星評価が変化する可能性も大きい。従って、衛星とモデルの両方を利用した放射強制力の評価は次期戦略課題においても重要な課題であると結論できる。

S-7戦略課題の須藤健悟氏によるMIROC+CHASERモデル結果では、人為起源、黒色炭素の放射強制力の地域分布は削減シナリオによって大きく異なることがわかる。一方で、SLCPの全球平均放射強制力は組成ごとの効果が正負相殺し合って削減シナリオに大きく依存しないと結論している。従って次期戦略課題では、全球平均の放射強制力の評価と同時に、放射強制力の地域分布の評価が重要な課題であると結論できる。なぜならば、このような放射強制力の地域差こそが降水量に大きな地域変化を生み出すからである。この事を確認するために、MIROC大気海洋結合モデルで計算した、黒色炭素の有無で起こる様々な大気パラメータの変化を調査した。それによると、黒色炭素の有無で、土壌粒子などの他のエアロゾル量の変化や雲凝結核数、上層雲の氷量などが変化することがわかった。これは黒色炭素の変化による直接・間接の放射強制力の場所的変化が大気の安定度や大気循環を変化させるために、例えば風速が変化して土壌粒子の巻き上げが変化するなど、様々な変化が起こることを意味している。従って、次期戦略課題では、このような気候系の様々な部分の相互作用を把握することが重要である。



### 3) SLCP/LLGHGを統合的に考慮したシミュレーション結果をベースとした気候・健康・農業などの影響評価をするための適切なメトリックを検討

前2つの節で述べてきたように、MIROC+SPRINTARS+CHASER気候モデルおよびNICAM+SPRINTARS+CHASER大気モデルによって大気中のSLCP計算とその影響評価が可能である。その例として、NICAM+SPRINTARS+CHASERで計算された地表付近の気象場から算定された体感温度・PM2.5・オゾン量の分布と、対応して計算されたそれぞれの原因による超過死亡数を2000年代の典型的な8月について調べた。次期戦略課題では、このような計算を通して、影響評価に関わる有効なSLCPに関するメトリックを定義する必要がある。本研究では、このようなメトリックの作成にとって重要な環境指標を洗い出した。定量的な影響評価のためには、これらの指標が依拠する領域区分や特異領域の定義の調査が必要である。また、これらを出力して、データベースとして整備する必要があり、そのプロトタイプを構築した。SLCPに関わる物質の排出インベントリの整備、それを利用した大気質のモデル結果、その影響に関するパラメータの表示等をユーザーとインタラクティブに行う必要がある。

サブテーマ(1)から(3)にわたる検討の結果、次期戦略課題は図1に掲げる構造で実施することが目的の達成にとって最適であると結論する。

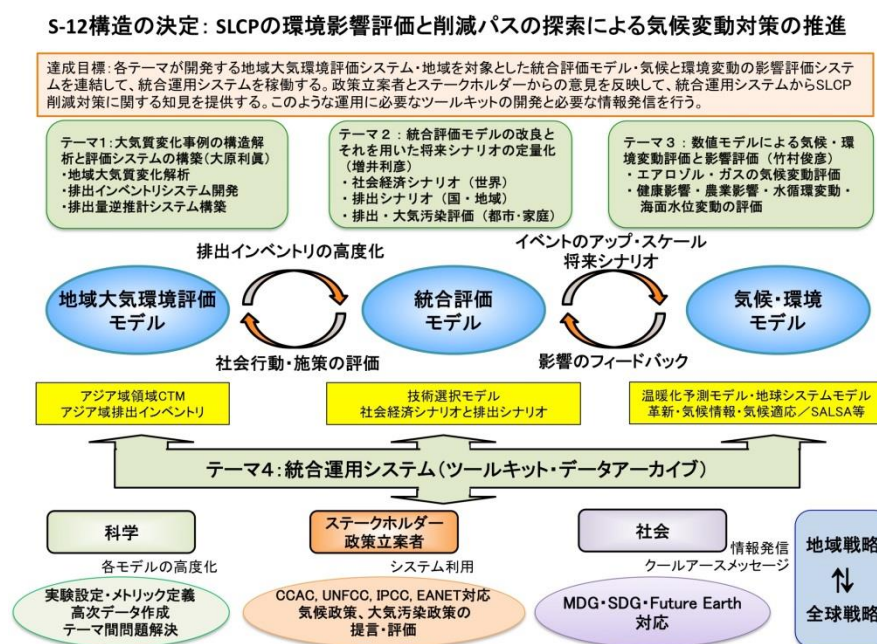


図1 次期戦略課題の構造のイメージ

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

SLCPおよびLLGHGを削減する組み合わせは多数考えられる。そのため、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルを最大限に活かして多様な緩和策の中から最適な経路を選ぶことが科学的・技術的にも重要である。これまで、戦略推進費研究(S6,7,8,10)で、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルは完成しており、これらを組み合わせる時機は熟している。本研究ではこれらを組み合わせて、大気汚染の削減と温暖化の抑制の両者を総合的に取り扱うことを目指していることが大きな科学的意義である。

SLCPの気候影響・農業影響・健康被害に関する最新のモデリング手法の検討と、利用すべきモデルの概略を定めることができた。NICAM+SPRINTARS+CHASERは全球スケールから領域スケールをシームレスにつなぐためのブリッジとなるべき世界的にユニークなモデルであり、これを既存のWRF-CMAQモデルや環境省のMASINGARモデルとともに運用するマルチモデル研究体制が確立できるメドが立ったのは、我が国のSLCP研究にとって重要な進歩である。本研究参加者が主となって提案した理研の京速計算機利用申請「全球規模大気環境汚染に関わる総合環境モデリング」が採択されたので、気候科学の最先端モデリング技術の確立の観点でも世界をリードできる。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

研究代表者は、WCRPの合同科学者会議(H25年5月)にオフィサーとして参加し、気候研究と環境問題に関する世界の研究をレビューし、その推進のための対策の決定に貢献した。IPCC第一作業部会の第5次報告書の作成に主執筆者として参加し、SLCPの放射強制力や気候影響に関する知見のとりまとめに貢献した。H25年9月にソウル大学で開催されたABC-SLCPワークショップに参加し、エアロゾルとSLCPの特性と影響評価に関する本研究の成果の発信を行った。また、CCAC事務局長のHelena Molin Vardes氏を含めて国際共同研究案件を検討した。UNEP/ABC-Asiaプロジェクトのサイエンスチーム主査として、アジア域の大気汚染物質の研究とアジアに分布するABC気候観測所の運用に貢献した。H25年2月にバンコックで開かれたCCACサイエンス会合に参加し、プロジェクト推進の諸案件の立案に参加した。また、本FS研究計画について発信をした。

### <行政の活用が期待できる成果>

多様な排出シナリオを用いて気候モデルおよび大気質モデルによるシミュレーションを行い、気候・水循環・健康・農業に対するSLCP/LLGHGの影響を具体的に評価し、低炭素社会・環境改善の実現に向けて、最適な緩和経路の選択のための科学的根拠資料の作成が可能となれば、IPCCへの貢献はもとより、UNFCCC、CCACへの貢献や、国際議論において日本がリーダーシップを発揮できる。

また、中国をはじめとしたアジア各国の排出シナリオと対策の効果、影響のフィードバックを定量的に示すことで、各国の大気汚染対策、温暖化対策を促進させる可能性があり、日本だけでなく、成長著しいアジア各国における環境政策、温暖化政策に大きく貢献できる。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付論文>

- 1) Fukuda, S., T. Nakajima, H. Takenaka, A. Higurashi, N. Kikuchi, T.Y. Nakajima, and H. Ishida, 2013: New approaches to removing cloud shadows and evaluating the 380-nm surface reflectance for improved aerosol optical thickness retrievals from the GOSAT/TANSO-Cloud and Aerosol Imager. *J. Geophys. Res.*, accepted.
- 2) Inomata Y., Kajino M., Sato K., Ohara T., Kurokawa J., Ueda H., Tang N., Hayakawa K., Ohizumi T., Akimoto H., 2013: Source contribution analysis of surface particulate polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in northeastern Asia by source-receptor relationships. *Environmental Pollution*, 182, 324-334
- 3) Nakajima, T., H. Takenaka, D. Goto, S. Misawa, J. Uchida, and T.Y. Nakajima, 2013: Measurements and modeling of the solar radiation budget. *Simulation*, 32, 199-207.
- 4) Nawahda A., Yamashita K., Ohara T., Kurokawa J., Ohizumi T., Chen F., Akimoto H., 2013: Premature mortality in Japan due to ozone. *Atmospheric Environment*, 81, 538-545
- 5) Oikawa, E., T. Nakajima, T. Inoue, and D. Winker, 2013: A study of the shortwave direct aerosol forcing using ESSP/CALIPSO observation and GCM simulation. *J. Geophys. Res.*, 118, 3687-3708, 2012, doi:10.1002/jgrd.50227.
- 6) Thepkhun, P., B. Limmeechochai, S. Fujimori, T. Masui, and R.M. Shrestha, 2013: Thailand's Low-Carbon Scenario 2050: The AIM/CGE analyses of CO<sub>2</sub> mitigation measures. *Energy Policy*, 62, 561-572.
- 7) Schutgens, N. A. J., M. Nakata, and T. Nakajima, 2013: Validation and empirical correction of MODIS AOT and AE over ocean. *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2455-2475, doi:10.5194/amt-6-2455-2013, 2013. Dai, T., D. Goto, N.A.J. Schutgens, X. Dong, G. Shi, and T. Nakajima, 2014: Simulated aerosol key optical properties over global scale using an aerosol transport model coupled with a new type of dynamic core. *Atmos. Environ.*, 82, 71-82.
- 8) 藤森真一郎, 増井利彦, 松岡譲: 土木学会論文集 G(環境), 69, 5, 1, 227-1, 268 (2013) 「エネルギー機器情報を用いた応用一般均衡モデルの開発と緩和策の分析」
- 9) Chatani S., Morino Y., Shimadera H., Hayami H., Mori Y., Sasaki K., Kajino M., Yokoi T., Morikawa T., Ohara T., 2014: Multi-model analyses of dominant factors influencing elemental carbon in Tokyo Metropolitan

Area of Japan. *Aerosol and Air Quality Research*, 14: 396–405

- 10) Dai, T., D. Goto, N.A.J. Schutgens, X. Dong, G. Shi, and T. Nakajima, 2014: Simulated aerosol key optical properties over global scale using an aerosol transport model coupled with a new type of dynamic core. Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C. F. S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara, and T. Nakajima, 2014: Application of a global onhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan, *Geoscientific Model Devevelopment Discussission*, 7, 131–179, doi:10.5194/gmdd-7-131-2014.
- 11) Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C. F. S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara, and T. Nakajima, 2014: Application of a global on hydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan, *Geoscientific Model Devevelopment Discussission*, 7, 131–179, doi:10.5194/gmdd-7-131-2014.

## (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Nakajima, T., 2013: Major scientific developments related to ABC-Asia., IGES Workshop, Hayama, Japan, 19 Feb. 2013.
- 2) 芦名秀一、藤野純一、増井利彦、日比野剛、松井重和: エネルギー・資源学会第32回研究発表会(2013)「2050年日本低炭素社会シナリオ及び実現ロードマップの再検討」
- 3) Nakajima, T., 2013: Satellite remote sensing of aerosols –Past, present and future–, International Workshop on “Inventory, Modeling and Climate Impacts of Greenhouse Gas emissions (GHG’ s) and Aerosols in the Asian Region”, 26–28 June 2013, Tsukuba.
- 4) Ohara, T., 2013: Regional Emission inventory in Asia (REAS) version 2 –. International Workshop on “Inventory, Modeling and Climate Impacts of Greenhouse Gas emissions (GHG’ s) and Aerosols in the Asian Region”, 26–28 June 2013, Tsukuba.
- 5) Takami, A., 2013: Ground observation of aerosols in North East Asia, International Workshop on “Inventory, Modeling and Climate Impacts of Greenhouse Gas emissions (GHG’ s) and Aerosols in the Asian Region”, 26–28 June 2013, Tsukuba.
- 6) Tsuruta, H., Nakajima, T., 2013: Biomass burning in Southeast Asia from field studies to satellite data analysis, International Workshop on “Inventory, Modeling and Climate Impacts of Greenhouse Gas emissions (GHG’ s) and Aerosols in the Asian Region”, 26–28 June 2013, Tsukuba.
- 7) T. Masui: Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) Second Annual Meeting, Yokohama, 2013 “Asian activities toward two degree target”
- 8) T. Masui: The 5th International Forum for Sustainable Asia and the Pacific, Yokohama, 2013 “Emission Pathways toward the 2 Degree Target”
- 9) Sugimoto N., Nishizawa T., Shimizu A., Matsui I. (2013) Studies on Characteristics and Distributions of Aerosols Using the Asian Dust and Aerosol Lidar Observation Network (AD-Net). The 3rd International Symposium on Atmospheric Light Scattering and Remote Sensing, Abstracts, 31
- 10) 杉本伸夫, 西澤智明, 清水厚, 松井一郎 (2013) ライダーネットワークによる東アジアのエアロゾルの動態把握. エアロゾル科学・技術研究討論会第30回, 同予稿集, 207–208.
- 11) Tsuruta, H., B. Thana, T. Takamura, D. Goto, T. Takemura, M. Yabuki, E. Oikawa, T. Inoue, and T. Nakajima (2013): Optical and chemical properties of atmospheric aerosols in Phimai, Thailand by surface measurements, satellite data analysis, and the SPRINTARS model, ABC-SLCP Symposium, Seoul, 8–10 September, 2013.
- 12) Nakajima, T., 2013: Prospects of using the UNEP/ABC-Asia project heritage for SLCP impact studies. ABC-SLCP Symposium, 9–11 Sept. 2013, Seoul.
- 13) S. Fujimori, T. T. Tran, M. Namazu, T. Masui, Y. Matsuoka, K. Jiang, P. R. Shukla: IAMC 6th Annual Meeting, Tsukuba, Japan, (2013)



- “Analyzing the energy demand of Low carbon development in China and India using AIM/CGE model”
- 14) T. Masui: Workshop on Comparative Study on Low Carbon Modeling for Indonesia, Jakarta, 2013  
“AIM Model for developing low carbon strategy –Economic impacts based on CGE model–”
  - 15) Sugimoto, N., “Development of EarthCARE ATLID data retrieval algorithm and validation plan using the ground-based lidar network”, ICAP 5th working group meeting: Recent Progress in Aerosol Observability for Global Modeling (ICAP2014), Tsukuba, 5–8 November, 2013.
  - 16) Nakajima, T., D. Goto, S. Misawa<sup>1</sup>, E. Oikawa<sup>1</sup>, M. Hashimoto<sup>1</sup>, J. Uchida, T. Dai, and N. Schutgens, M. Ohara, T. Masui, A. Takami, and T. Takemura: A strategy for studying the air pollution effects on climate and public health in Asia. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 9–13 Dec. 2013.
  - 17) Tsuruta, H., B. Thana, T. Takamura, M. Hashimoto, M. Yabuki, E. Oikawa, and T. Nakajima (2013): Chemical and optical properties of atmospheric aerosols in Phimai, Thailand by intensive surface measurements and satellite data analysis, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, 9–13 December 2013.
  - 18) Nakajima, T., 2014: Climate impacts of atmospheric aerosols and clouds. Invited lecture, European Research Course on Atmospheres (ERCA2014), organized by Université Joseph Fourier of Grenoble and CNRS, Grenoble (France), Jan. 27, 2014.
  - 19) Nakajima, T., 2014: What we learn from the Fukushima nuclear power plant accident? Invited lecture, European Research Course on Atmospheres (ERCA2014), organized by Université Joseph Fourier of Grenoble and CNRS, Grenoble (France), Jan. 28, 2014.
  - 20) Sugimoto, N., Nishizawa, T., Shimizu, A., Matsui, I. (2014) Aerosol characterization with lidar methods, International Conference on Optical Particle Characterization (OPC2014), 10–14 March, Tokyo.

## 7. 研究者略歴

課題代表者: 中島 映至

東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程単位修得退学、現在、東京大学大気海洋研究所教授

研究分担者

1) 高見 昭憲

オックスフォード大学大学院 自然科学研究科修了、D.Phil(博士)、現在、(独)国立環境研究所 地域環境研究センター 副センター長

2) 大原 利真

北海道大学大学院 工学研究科修了、工学博士、現在、(独)国立環境研究所 フェロー

3) 杉本 伸夫

大阪大学大学院 基礎工学研究科修了、理学博士、現在、(独)国立環境研究所 フェロー

4) 増井 利彦

大阪大学大学院工学研究科修了、現在、(独)国立環境研究所室長

## 2RF-1302 温室効果ガスおよび短寿命気候因子(SLCP)緩和策が引き起こす環境影響の能動的評価

### (1) 領域における排出変動の推計に関する研究

(独) 国立環境研究所

地域環境研究センター	広域大気環境研究室	高見昭憲
地域環境研究センター	大気環境モデリング研究室	大原利眞
環境計測研究センター	遠隔計測研究室	杉本伸夫

平成25年度累計予算額：3,342千円

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

本課題研究は課題調査型研究（フィージビリティ・スタディ）であり、平成26年度以降の戦略研究課題の設定に寄与することを大きな目的とする。そのため、基礎調査及び国際動向を整理するとともに、データやシミュレーションの基礎分析を行った。サブテーマ（1）では、大気質データの収集調査とその使用の可能性、大気質変化と排出量変化の定量的関係についての化学輸送モデル（Chemical Transport Model；CTM）を用いた予備的計算と変化量の再現についての検証、逆推計モデルを用いた予備的計算と検証を行った。大気質データの収集調査では、国内の大気観測データの整備状況、国内での自動車排出規制を調査した結果、最初に検討する課題として自動車からの排出改善による大気質の変化事例を選択した。中国では2008年の北京オリンピック前後の大気データ、規制の内容、排出量変化などの情報も論文として出てきているため、解析可能な対象と考えられる。インドでは SURYA という社会実験が行われており、ここでは調理の方法を室内の燃焼から太陽光を用いた方法に変更している。同時に大気質データも収集されているため、SURYA も解析の対象になると考えられる。マルチスケール化学輸送モデルのプロトタイプを作成し、既存の排出インベントリを用い、東アジアスケールにおいて粒子状物質（Particulate Matter；PM<sub>2.5</sub>）を、CTMを用いて試算した。春季と夏季で、気象パターンが異なることにより、異なる発生領域（中国と日本）の異なる排出量の差を CTM の計算は反映している。このことから、大気質変化と排出量変化について CTM を用いた予備的計算で、定性的にはあるが、変化量を再現できたと考えられる。排出量の最新動向の把握や排出インベントリの検証のために、衛星等の観測データを使用した逆推計手法が有用である。窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）と一酸化炭素（CO）については、その有用性が確認されており、その他の硫黄酸化物（SO<sub>2</sub>）や揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds；VOC）、アンモニア（NH<sub>3</sub>）などに対する手法も開発・適用されつつある。これらのことから、地域大気質変化イベントにおける排出量変化を定量的に評価するために、逆推計手法が有効と考えられる。

#### [キーワード]

排出変動係数、化学輸送モデル、対流圏衛星データ、地上観測データ、逆推計モデル

## 1. はじめに

短寿命気候因子 (Short Lived Climate Pollutants ; SLCP、エアロゾル、オゾン、メタンなど) は、長寿命温室効果ガス (Long Lived Green House Gas: LLGHG、CO<sub>2</sub>など) に比べて削減することは容易であると考えられている。また、大気汚染の改善の観点からもエアロゾル、オゾンおよびその前駆物質の削減は必須である。SLCPの削減方法には様々な技術的・政策的方法が想定され、LLGHGの削減との組み合わせも多数考えられる。そのため、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルを最大限に活かして多様な緩和策の中から最適な経路を選ぶ必要がある。

## 2. 研究開発目的

本課題全体の目的は、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルを組み合わせた能動的な評価手法を開発し、それを用いた最適経路の提示と、温暖化抑制策策定のための科学的知見を提供する課題について、その実現可能性を検証することである。

本課題研究は課題調査型研究 (フィージビリティ・スタディ) であり、平成26年度以降の戦略研究課題の設定に寄与することを大きな目的とする。そのため、基礎調査及び国際動向を整理するとともに、データやシミュレーションの基礎分析を行い、その上で、関連分野の研究者の国際的・学際的な研究体制及び体系的な研究計画を検討した。研究としては、必要な要素技術 (領域化学輸送モデル、排出インベントリ、観測データ) について、適用可能性や実現可能性について検証した。

## 3. 研究開発方法

領域における排出変動推計に関する研究 (サブテーマ (1)) では、次年度からの戦略的研究のテーマ (1) において以下の研究スキームを策定している。

- 1) 削減対策効果を示すイベントを対象にして、観測データをもとに大気質の変化を検出する。
- 2) 化学輸送モデル (Chemical Transport Model; CTM) により大気質変化と排出量変化の関係を定量的に把握する。
- 3) 対流圏衛星データ、地上観測データなどを用い、排出変化量の逆推計を行う。
- 4) 逆推計モデルと排出インベントリを初期値として、イベント時の排出変化量を推計する。
- 5) 領域 CTM と排出インベントリを用いて、イベント時の環境変化量を再現し、削減対策の効果定量的に説明するとともに、排出インベントリの対策応答性を検証し社会経済モデルである Asian Pacific Integrated Model (AIM) の改良に活かす。
- 6) 4)、5) の結果を使って、対策感度を定量的に把握する。

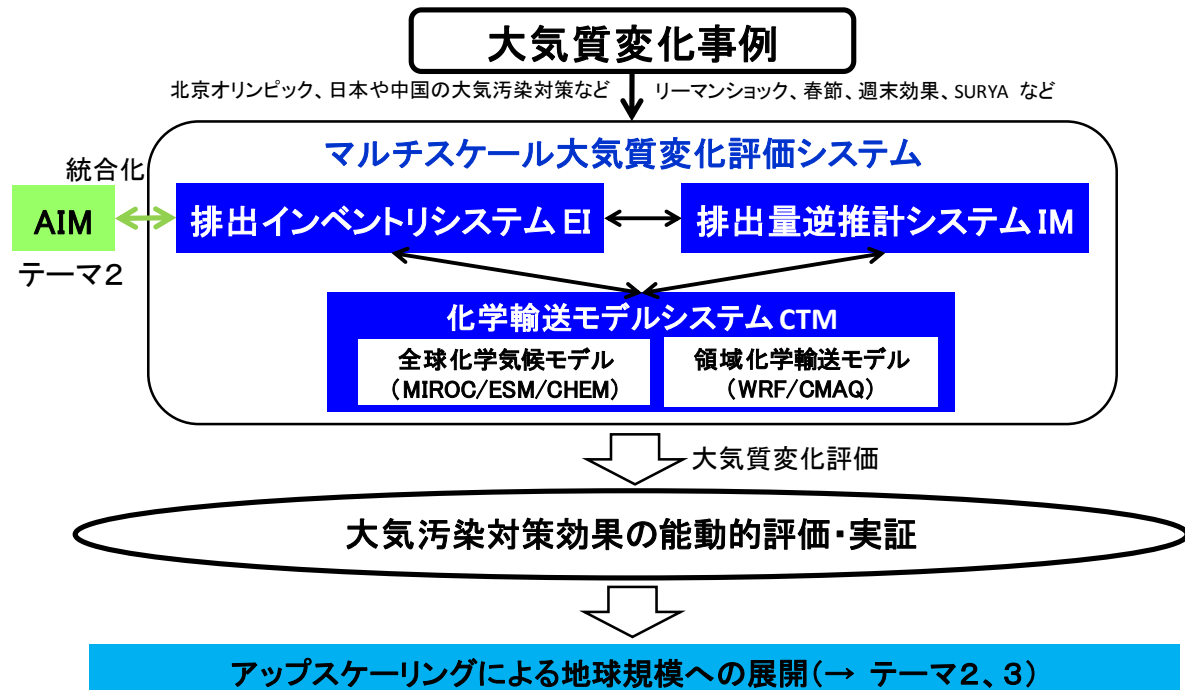
上記スキームの実現可能性を検討するため、以下の項目を検討した。

- I. 大気質データの収集調査とその使用の可能性。
- II. 大気質変化と排出量変化の定量的関係について CTM を用いた予備的計算と、変化量の再現についての検証。
- III. 逆推計モデルを用いた予備的計算と検証。

## 大気質変化事例の構造解析と評価システムの構築

アジアにおける大気質変化事例を対象として、

- ・変化要因や対策効果を定量的に分析して対策効果を評価
- ・大気汚染対策による大気質改善効果を定量的に評価可能なシステムを構築・検証



図(1)-1 戦略研究課題テーマ(1)で想定している研究スキーム

### 4. 結果及び考察

#### (1) 大気質データの収集調査とその使用の可能性

本研究の目的は、政府や自治体の大気環境対策などによって、どの程度排出量が増減し、その結果として大気質がどの程度変化したかを定量的に関係づけることである。たとえば関東地域での排気ガスの規制により、自動車などからの排出量が減少し、その排出量を排出係数や活動量から推定して、その排出量推定に基づいてCTMでオゾンや粒子状物質 (Particulate matter; PM) の濃度を計算し、観測データとの比較することによって、規制の実効性を評価するシステムを構築しようとしている。したがって、収集すべき大気質のデータとしては以下の条件にあてはまる必要がある。

- 政策や規制がある領域内で執行されていること。
- 政策や規制の対象や期間が明確であること。
- その地域での大気質データがある精度を持って継続的に収集されていること

このような条件を念頭に置いて、文献等を調査し、大気質データの収集と使用可能性について検討した。イベント事例には北京オリンピック、関東地域での排気ガス規制、南インドでの調理器具の変更に伴う黒色炭素(すす)排出削減の社会実験などがあった。その結果のサマリーを表(1)-1に示す。

表(1)-1 対象とする大気質変化事例（候補）

		事例	主要対象物質	時間スケール	空間スケール
日本	中長期対策	・SO <sub>x</sub> 規制 ・自動車排出ガス規制 ・ディーゼル車規制 ・VOC蒸発発生源対策	・SO <sub>x</sub> ・NO <sub>x</sub> , PM, O <sub>3</sub> ・NO <sub>x</sub> , PM ・VOC, O <sub>3</sub> , PM	10～数10年 (年単位)	Urban～ National
	社会経済影響	・週末効果 ・震災影響	・NO <sub>x</sub> , PM, O <sub>3</sub> ・多種	数年(平休日単位) 数年(月単位)	Urban～ National
中国	中長期対策	・11次五計のSO <sub>x</sub> 対策 ・都市汚染対策 ・酸性雨対策	・SO <sub>x</sub> , PM ・NO <sub>x</sub> , PM, O <sub>3</sub> ・NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , PM	5年(年単位) 10年程度(年単位) 10年程度(年単位)	Urban～ National
	短期対策	・北京オリンピック ・上海万博 ・広州アジア大会	・NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , PM ・NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , PM ・NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , PM	数か月～数年 (1週間程度単位)	Urban～ Regional
他	社会実験等	・Surya(南アジアのABC緩和実験) 等	・BC	数年 (年単位)	Local

日本国内においては、対象とする領域や規制対象が明確であり、また、国内には1970年代から国内各地での大気観測データが収集されている（図(1)-2）。二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）、一酸化炭素（CO）、浮遊粒子状物質（Suspended Particulate Matters: SPM）、オゾンの環境基準が設定されたのは1973年（昭和48年）、二酸化窒素（NO<sub>2</sub>）の環境基準が設定されたのは1976年（昭和51年）であり、そこには基準値とともに各種物質の測定方法も明記されているので、測定値も信頼できると考えられる。図(1)-2を見ると、1970年代にはSO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、COの濃度が急激に下がり、大幅に国内の大気環境が改善されたことがわかる。1980年代以降はSO<sub>2</sub>、非メタン炭化水素（Non-Methane HydroCarbon; NMHC）、COの濃度が緩やかに減少している。NO<sub>2</sub>に関しては、1980年代半ばから上昇傾向が見られたが、規制が強化された2000年以降減少傾向が見られる。2006年度から揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds; VOC）の排出削減の自主的取り組みが進められ、NMHCも減少傾向にある。

自動車からの排出係数（図(1)-3）や、自動車登録台数や交通量調査など活動量データも近年は整備されており、図(1)-1に示した、排出インベントリシステムを構築するために最初に取り組むべき事例は、自動車排気ガス対策と大気質変化事例と考えられる。しかし、古い年代（1970年代など）の排出量データなどを整備するのは難しいため、実際に検討可能なのは2000年代以降のデータが対象になると考えられる。

このほか表(1)-1に示したディーゼル車規制や週末効果についても、調査データや研究例もあり、大気質変化事例の研究対象になりうる。たとえば、関東地域における黒色炭素の量は2005年に比べ2010年頃には大気中の濃度が3分の1から5分の1程度に減少しており、これはディーゼル車から

の黒色炭素の排出規制の効果だと考えられる<sup>1)</sup>。また、東京や大阪など平日に活動量の多い都市部では、しばしば活動量の少ない休日や土日にオゾン濃度が高くなる傾向がある<sup>2)</sup>。これはオゾン生成を支配しているVOCや窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) の量的バランスが変化するため起きると考えられる。週末効果は自動車交通量や工場の活動量など人為起源の活動量が増えたためと考えられ、政策や規制ではないが、人間の行動パターンにより大気質が変化する事例として注目に値する。関東地区での自動車からの排出量推計、各種大気中の濃度測定などのデータがあるため、週末効果も最初に検討すべき事例と考えられる。

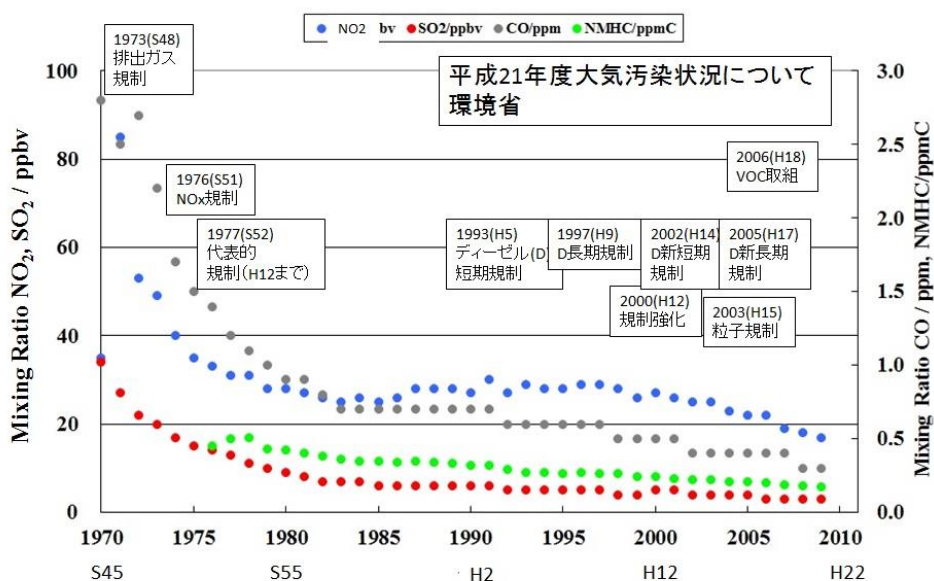
中国における経済発展が目覚ましく、エネルギー使用量が著しく増加している一方で、近年の報道などで知られている通り、大気汚染も深刻化している。統計データや観測データに対する評価を行う必要はあるが、中国からも2008年の北京オリンピック前後における統計データや大気観測データなどが、論文などで公表されているため、規制に対する排出量変化の事例として解析の候補になると考えられる<sup>3),4)</sup>。図(1)-4ではOkudaらの論文<sup>4)</sup>に記載されている数値データに基づき、2007年以前の北京における大気汚染物質の濃度と北京オリンピック (2008年夏) 時期の濃度を比較したものである。これも領域としては北京およびその周辺の大気質を反映しており、また規制対象などもある程度把握されているので、解析の対象となると思われる。データの精度については検証が必要と思われるが、一般的な大気化学研究の雑誌に掲載されているので、ある程度の精度はあると考えられる。これを見ると粗大粒子 (PM<sub>10</sub>)、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、エアロゾル中の硫酸イオン (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、黒色炭素 (Black Carbon : BC) は減少しており微小粒子 (PM<sub>2.5</sub>) はあまり変化が見られなかった。またエアロゾル中の硝酸イオン (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) は増加していた。中国あるいは北京市政府による規制としては工場の操業、自動車の規制などを行っているため、この期間の排出量推計が入手できれば、化学輸送モデルによる解析も可能と考えられる。Wang らは、既に、北京市内のオゾン、PM<sub>2.5</sub>濃度変動を、独自に作成したインベントリとCTMの一種であるCommunity Multi-scale Air Quality (CMAQ) モデルを用いて解析している<sup>5)</sup>。彼らはCMAQの結果が観測結果と一致したのは、自分たちのインベントリの推計がある程度の精度をもってなされているからだと主張している。これも検証は必要であるが、排出量がある程度の精度をもって推計可能であることを示している。Guoらは北京市内のPM<sub>2.5</sub>質量濃度変動と別のCTM (Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry ; WRF-Chem) を用いた解析を行っている<sup>3)</sup>。北京市内の4つの観測サイトにおけるTEOMをもちいた観測とシミュレーション結果と比較した。彼らは、上記Wangらの推計を基に、北京の排出量をオリンピック前後は35%、期間中は50%減らした場合と、全く減らさなかった場合をシミュレーションしたところ、排出量を減らした場合の方が比較的良好に観測結果と一致したと報告している。このように北京オリンピックについても、ある程度、観測や排出量データが論文として公開されているので、検証の意味も含めて、検討してみる価値はあると思われる。

インドも近年経済発展が目覚ましいが、一般家庭では調理にバイオマス燃料が使用されており、地域における大気汚染の原因になっている。国連環境計画とアジア褐色雲プロジェクト (United Nations Environment Programme – Asian Brown Cloud project ; UNEP – ABC Project) ではSURYAと称する社会実験を、ヒマラヤ、インド北部のヒンドゥスターン平野、インド南部のルーラルな地区で行っている<sup>6)</sup>。黒色炭素 (BC) は温暖化に寄与するため気候変動をもたらす、また、人の健康にも影響を及ぼす。バイオマス燃料を用いた家庭での調理から放出を抑制するため、太陽光集光システム (Parabolic domestic cookers) で調理を行うよう住民に働きかけている。健康へ

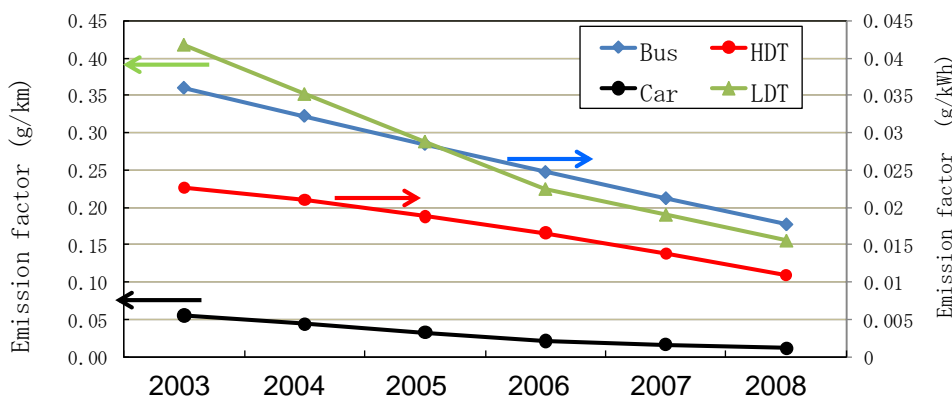


の影響や大気質の改善を監視するため、その地区の人々の健康データや大気質測定データを、携帯電話を用いて収集している。中島代表は SURYA Project からデータ入手が可能であるため、この事例も解析の対象候補となると考えられる。このような、日本、中国、インドの事例は、領域や対象が明確であり排出量変化や大気質の変化データを入手することが可能であるため、領域における排出変動推計に関する研究に有用であり、排出インベントリシステム構築に役立つと考えられる。

### 日本のSO<sub>2</sub>などの濃度の年平均値の推移

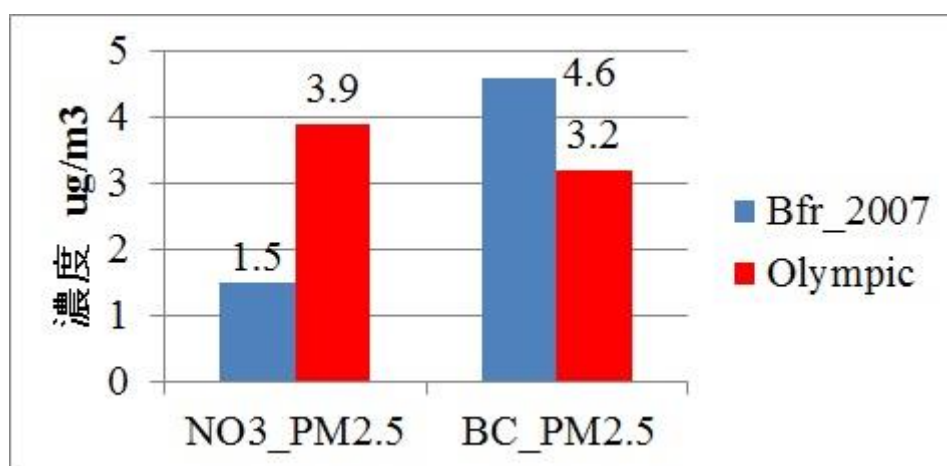
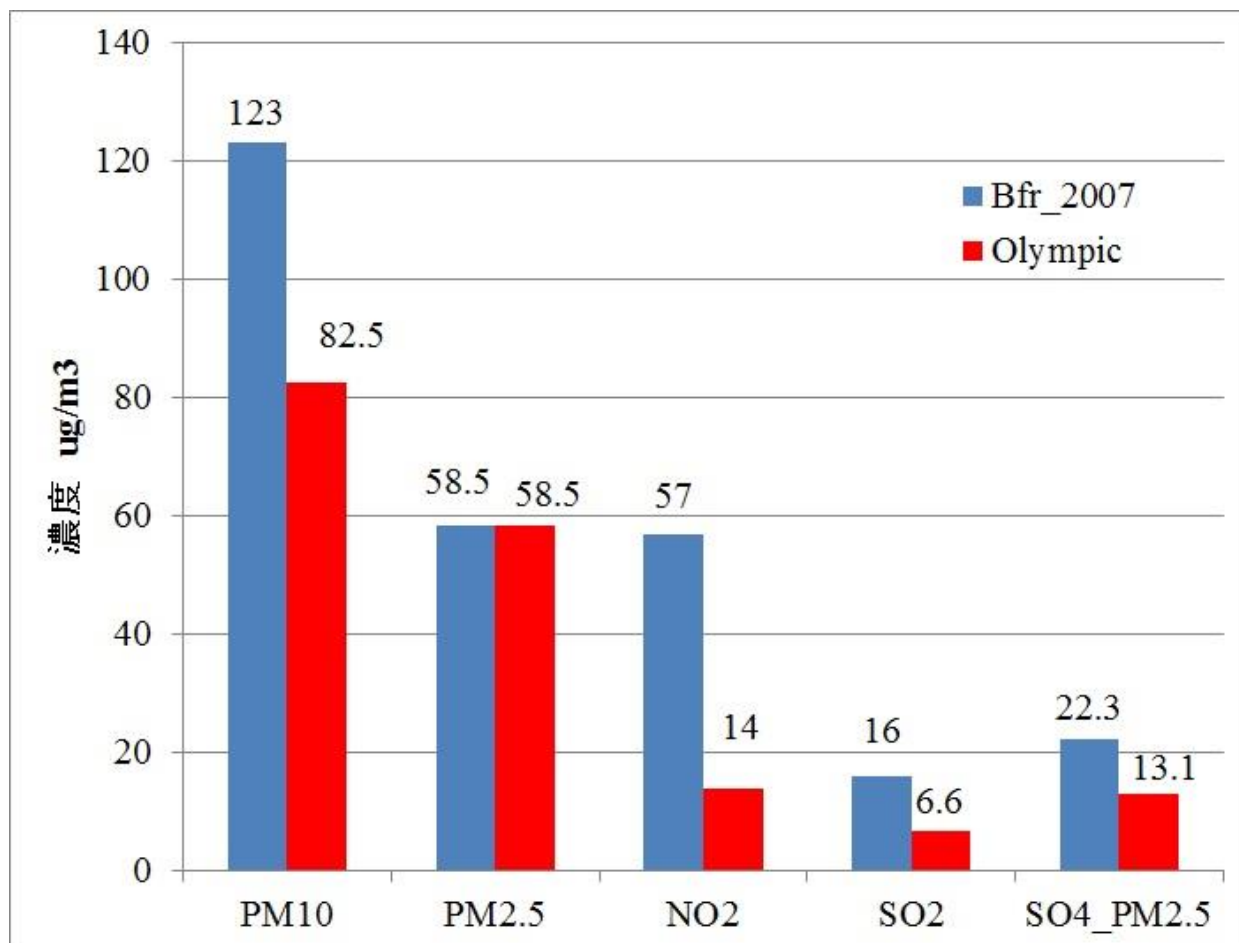


図(1)-2 国内におけるSO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、非メタン炭化水素（NMHC）、COの全国平均濃度の推移。環境省、平成21年度大気汚染状況についての報告書より作図。図中に主な自動車排出ガス、ディーゼル車排出規制、および、VOCの排出に対する自主的取り組みの年代を載せた。



図(1)-3 国内における各種自動車の排出係数の変化例。

自動車（Car）、軽トラック（Light Duty Track (LDT)) は左の軸、バス（Bus）、トラック（Heavy Duty Track (HDT)) は右の軸。



図(1)-4 北京における大気汚染物質の濃度変動。

2007年以前と北京オリンピック期間中（2008年7月1日から9月20日）の比較（文献3）をもとに作図）。Bfr\_2007は2007年以前のデータ、Olympicはオリンピック期間中のデータ。

## (2) 大気質変化と排出量変化の定量的関係についてCTMを用いた予備的計算と、変化量の再現についての検証

中国では近年大気汚染が深刻となり、冬季から春季にかけてはその影響が日本にも及んでいる。Regional Emission Inventory in Asia (REAS) などの排出量統計では、二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) については排出量が減少傾向にあると考えられているが、NO<sub>x</sub>、VOCなどは増加していると考えられている。排出インベントリは各種統計値を使用する為、データ整備に数年を要する。現在最新の REASver2でも排出インベントリは2008年が最新である。

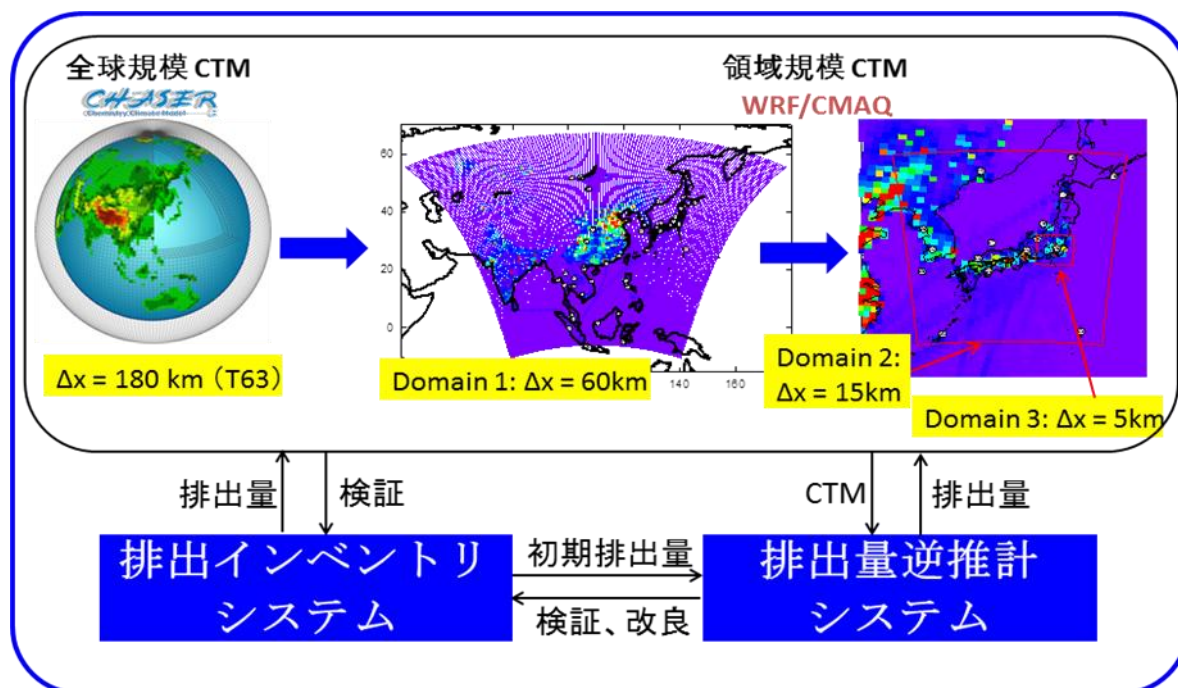
図(1)-5は、大気質変化と排出量変化の定量的関係を評価するための「マルチスケール大気質変化評価システム」の構成案を示す。(独)国立環境研究所等で開発してきた化学輸送モデルCTM(全球化学気候モデルMIROC-ESM-CHEMと領域化学輸送モデルWRF/CMAQ)をもとに、都市～アジアスケールの大気質変化事例の解析や対策効果の事前・事後評価が可能なマルチスケール化学輸送モデルシステムを構築する。本システムを国内とアジアにおける過去の大気質変化事例(短中期的な大気汚染対策、週末影響や長期休日影響、震災や経済変動の影響、大気環境改善のための社会実験などから抽出)に適用して、排出量変化と大気質変化の定量関係を評価する。更に、マルチスケール化学輸送モデルシステムと排出インベントリシステム、排出量逆推計システムを統合して「マルチスケール大気質変化評価システム」を構築し、地域大気質変化事例によって検証する。

図(1)-6は、マルチスケール化学輸送モデルのプロトタイプを作成し、既存の排出インベントリを用い、東アジアスケールにおいてPM<sub>2.5</sub>を試算した結果を示す。ここでは、モデル計算されたPM<sub>2.5</sub>の化学組成データと、過去の推進費や環境省などが行っている、全国での観測に基づく化学組成分析結果を比較している。これを見ると春季は九州など西日本で濃度が高く、硫酸イオン(図ではSO<sub>4</sub>と標記)の割合が高い。これは中国など大陸からの越境大気汚染を反映していると考えられる。一方で、夏は明確な西高東低の傾向はみられず、大陸の越境大気汚染の影響は相対的に小さく、国内の発生源の寄与が相対的に高いことを示唆している。要するに、春季と夏季で、気象パターンが異なることにより、異なる発生領域(中国と日本)の異なる排出量の差をCTMの計算は反映している。このことは、大気質変化と排出量変化についてCTMを用いた予備的計算で、定性的にはあるが、変化量を再現できたと考えられる。しかしながら、CTMの計算結果と観測された各成分の濃度は異なっており、定量的な関係を再現するためには、排出インベントリやCTMについて改良する必要があることを示している。

## (3) 逆推計モデルを用いた予備的計算と検証

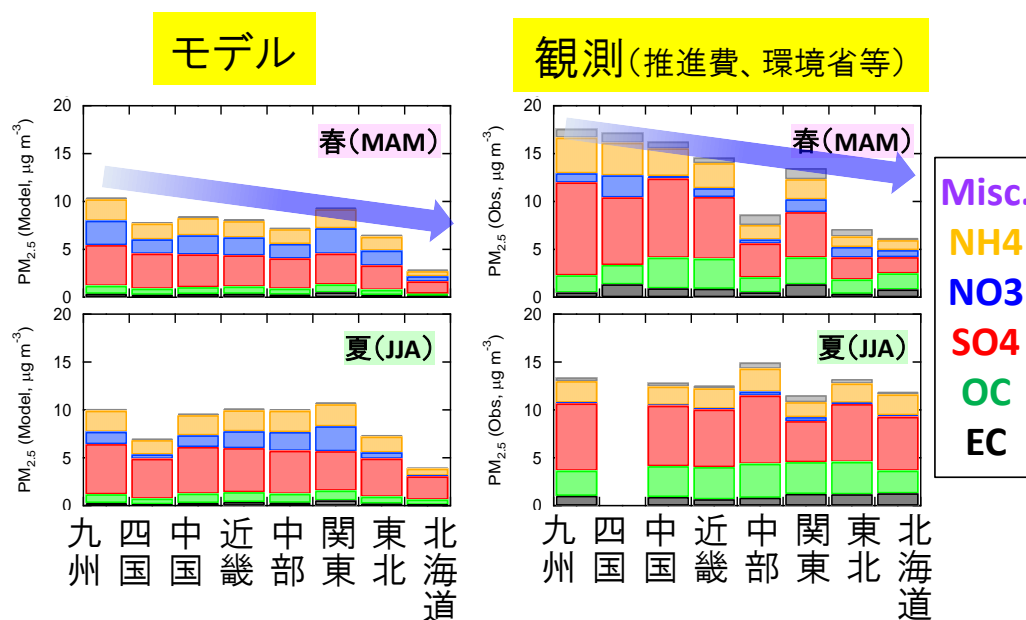
これまでに、排出量の最新動向の把握や排出インベントリの検証のために、衛星等の観測データを使用した逆推計手法が有用である。NO<sub>x</sub>とCOについては、その有用性が確認されており、その他のSO<sub>2</sub>やVOC、NH<sub>3</sub>などに対する手法も開発・適用されつつある。これらのことから、地域大気質変化イベントにおける排出量変化を定量的に評価するために、逆推計手法が有効と考えられる。

例えば、Mijilingらによる衛星観測結果を使用した逆推計モデルによる、北京周辺地域のNO<sub>x</sub>排出量推計結果を用いて、北京オリンピックにおける排出規制効果の予備的解析を行った。この逆推計結果とアジア地域の排出インベントリREASv2の北京周辺の排出推計量を比較したところ、



## マルチスケール大気質変化評価システム

図(1)-5 大気質変化と排出量変化の定量的関係を評価するシステムの概念図



図(1)-6 CTMを用いた粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) の組成計算結果と、観測結果の比較

- 2007年は、REASv2、逆推計結果共に月変動が比較的小さい
- 2008年は、REASv2と逆推計結果で夏の減少率の差が大きい

という比較結果が得られた。逆推計の結果は、北京オリンピックが開催された夏以降、大幅にNO<sub>x</sub>排出量の減少が見られたが、REASv2ではあまり減少が見られなかった。一方、北京オリンピックが開催されなかった2007年にはREASv2と逆推計結果が比較良く整合する。これらのことは、① GOME2、OMIなど衛星データを用いた逆推計計算で、ある程度、排出量変化を推定できること、② REASv2では北京オリンピック時の排出規制等による効果を考慮してないため、リアルワールドとの乖離が大きいこと、③一方、特別な短期対策が実施されていない場合には、REASv2は逆推計結果と整合すること、を示している。これらのことから、①衛星データに基づく逆推計によって大気質変化事例の解析が可能であること、②その結果を活用することにより排出インベントリの改良や対策効果の具体的な把握が可能であること、③一般的に統計データを用いる排出インベントリは数年の遅れが出るが、逆推計によって、数か月程度の遅れで排出量変化を推定することができること、等が明らかとなった。

さまざまな大気汚染物質に対して逆推計が試みられているが、ここでは一酸化炭素（CO）排出量の逆推定に絞って先行研究を挙げる。Heald et al. は解析的な手法（synthesis method）を適用し、衛星データ（Measurements of Pollution in the Troposphere ; MOPITT）と集中観測データから、CO排出量の逆推定を行った<sup>9)</sup>。Yumimoto and Uno はアジョイント法を用いて、地上観測データから中国における排出量の逆推定を行った<sup>10)</sup>。Kopacz et al. はアジョイント法を採用し、様々な衛星データを用いた逆推定と感度実験を行っている<sup>11)</sup>。Fortems-Cheiney et al. はアジョイント法を用い、衛星データから10年間のCO排出量の逆推定を行っている<sup>12)</sup>。アジョイント法は現業天気予報のデータ同化でも用いられている4次元変分法を基礎とした非常に強力な手法であるが、アジョイントモデルの開発コストおよび計算コストが非常に大きく、長期間の逆推定には依然として困難が残る。一方、弓本・鶴野は中国を対象に、グリーン関数法とタグ付きシミュレーションを組み合わせ、衛星で観測されたCOの鉛直プロファイルを拘束条件に、2005-2010年の長期に渡るにわたるCO排出量の逆推定を行った<sup>13)</sup>。そして、北京オリンピックによる排ガス規制（2008年）、リーマンショックに端を発した世界的な景気後退（2009年）など、排出量に大きな影響を与える事象について解析した。このような先行研究を踏まえ、今後、本研究目的に見合った具体的な逆推計手法を検討する必要がある。

## 5. 本研究により得られた成果

### （1）科学的意義

SLCPおよびLLGHGを削減する組み合わせは多数考えられる。そのため、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルを最大限に活かして多様な緩和策の中から最適な経路を選ぶことが科学的・技術的にも重要である。これまで、戦略推進費研究（S6, 7, 8, 10）で、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルは完成しており、これらを組み合わせる時機は熟している。本研究ではこれらを組み合わせ、大気汚染の削減と温暖化の抑制の両者を総合的に取り扱うことを目指していることが大きな科学的意義である。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

多様な排出シナリオを用いて気候モデルおよび大気質モデルによるシミュレーションを行い、気候・水循環・健康・農業に対するSLCP/LLGHGの影響を具体的に評価し、低炭素社会・環境改善の実現に向けて、最適な緩和経路の選択のための科学的根拠資料の作成が可能となれば、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change；**IPCC**）への貢献はもとより、気候変動枠組み条約（United Nations Framework Convention on Climate Change；UNFCCC）、Climate and Clean Air Coalition（CCAC）への貢献や、国際議論において日本がリーダーシップを発揮できる。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) Inomata Y., Kajino M., Sato K., Ohara T., Kurokawa J., Ueda H., Tang N., Hayakawa K., Ohizumi T., Akimoto H., 2013: Source contribution analysis of surface particulate polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in northeastern Asia by source-receptor relationships. *Environmental Pollution*, 182, 324-334
- 2) Nawahda A., Yamashita K., Ohara T., Kurokawa J., Ohizumi T., Chen F., Akimoto H., 2013: Premature mortality in Japan due to ozone. *Atmospheric Environment*, 81, 538-545
- 3) Chatani S., Morino Y., Shimadera H., Hayami H., Mori Y., Sasaki K., Kajino M., Yokoi T., Morikawa T., Ohara T., 2014: Multi-model analyses of dominant factors influencing elemental carbon in Tokyo Metropolitan Area of Japan. *Aerosol and Air Quality Research*, 14: 396-405
- 4) Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C. F. S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara, and T. Nakajima, 2014: Application of a global onhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan, *Geoscientific Model Devevelopment Discussission*, 7, 131-179, doi:10.5194/gmdd-7-131-2014.
- 5) Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C. F. S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara, and T. Nakajima, 2014: Application of a global on hydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan, *Geoscientific Model Devevelopment Discussission*, 7, 131-179, doi:10.5194/gmdd-7-131-2014.



**<査読付論文に準ずる成果発表> (対象：社会・政策研究の分野)**

特に記載すべき事項はない。

**<その他誌上発表(査読なし)>**

- 1) 大原利眞、2013：最近のPM2.5汚染問題をどのように考えるか. 科学, 83, 420-424
- 2) 大原利眞、2013：中国における大気汚染の現状. 環境と公害, 43, 45-50
- 3) 大原利眞、2013：PM2.5の越境大気汚染の現状. 医学の歩み, 247, 657-661

**(2) 口頭発表(学会等)**

- 1) Ohara, T., 2013: Regional Emission inventory in Asia (REAS) version 2 -. International Workshop on “Inventory, Modeling and Climate Impacts of Greenhouse Gas emissions (GHG’s) and Aerosols in the Asian Region”, 26-28 June 2013, Tsukuba.
- 2) Takami, A., 2013: Ground observation of aerosols in North East Asia, International Workshop on “Inventory, Modeling and Climate Impacts of Greenhouse Gas emissions (GHG’s) and Aerosols in the Asian Region”, 26-28 June 2013, Tsukuba.
- 3) Sugimoto N., Nishizawa T., Shimizu A., Matsui I. (2013) Studies on Characteristics and Distributions of Aerosols Using the Asian Dust and Aerosol Lidar Observation Network (AD-Net). The 3rd International Symposium on Atmospheric Light Scattering and Remote Sensing, Abstracts, 31
- 4) 杉本伸夫, 西澤智明, 清水厚, 松井一郎 (2013) ライダーネットワークによる東アジアのエアロゾルの動態把握. エアロゾル科学・技術研究討論会第30回, 同予稿集, 207-208.
- 5) Sugimoto, N., “Development of EarthCARE ATLID data retrieval algorithm and validation plan using the ground-based lidar network”, ICAP 5th working group meeting: Recent Progress in Aerosol Observability for Global Modeling (ICAP2014), Tsukuba, 5-8 November, 2013.
- 6) Sugimoto, N., Nishizawa, T., Shimizu, A., Matsui, I. (2014) Aerosol characterization with lidar methods, International Conference on Optical Particle Characterization (OPC2014), 10-14 March, Tokyo

**(3) 出願特許**

特に記載すべき事項はない。

**(4) シンポジウム、セミナー等の開催(主催のもの)**

- 1) International Workshop on “Inventory, Modeling and Climate Impacts of Greenhouse Gas emissions (GHG’s) and Aerosols in the Asian Region” (平成25年6月26-28日、つくば国際会議場会議室406、観客約100名)

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

特に記載すべき事項はない。

## (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) Kondo, Y., K. Ram, N. Takegawa, L. Sahu, Y. Morino, X. Liu, T. Ohara, Reduction of black carbon aerosols in Tokyo: Comparison of real-time observations with emission estimates *Atmos. Environ.*, 54, 242-249 (2012)
- 2) 神成陽容, 大原利眞, オゾン週末効果反転現象のメカニズム, 大気環境学会誌, 44, 82-90 (2009)
- 3) Guo, Y., X. Liu, C. Zhao, and M. Zhang, Emission controls versus meteorological conditions in determining aerosol concentrations in Beijing during the 2008 Olympic Games, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12437-12451 (2011)
- 4) Okuda, T., Matsuura S., Yamaguchi, D., Umemura, T., Hanada, E., Orihara, H., Tanaka, S., He, K., Ma, Y., Cheng, Y., Liang, L., *Atmos. Environ.* 45, 2789-2794 (2011)
- 5) Wang, S., Zhao, M., Xing, J., Wu, Y., Zhou, Y., Lei, Y., He, K., Fu, L., Hao, J., *Environ. Sci. Technol.*, 44, 2490-2496 (2010)
- 6) SURYA Project, <http://www.projectsurya.org/>
- 7) Mijling, B., R. van der A, K. Boersma, M. Van Roozendaal, I. De Smedt, and H. Kelder, Reductions of NO<sub>2</sub> detected from space during the 2008 Beijing Olympic Games, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L13801 (2009)
- 8) Mijling, B. and R. van der A, Using daily satellite observations to estimate emissions of short-lived air pollutants on a mesoscopic scale. *J. Geophys. Res.*, 117, D17, doi:10.1029/2012JD017817 (2012)
- 9) Heald, C. L., Jacob, D. J., Jones, D. B. A., Palmer, P. I., Logan, J. A., Streets, D. G., Sachse, G. W., Gille, J. C., Hoffman, R. N., Nehr Korn, T., Comparative inversion analysis of satellite (MOPITT) and aircraft (TRACE-P) observations to estimate Asian sources of carbon monoxide, *J. Geophys. Res.*, 109, D15S04 (2004)
- 10) Yumimoto, K., Uno, I., Adjoint inverse modeling of CO emissions over Eastern Asia using four-dimensional variational data assimilation, *Atmos. Environ.*, 40, 6836-6845 (2006)
- 11) Kopacz, M., et al., Global estimates of CO sources with high resolution by adjoint inversion of multiple satellite datasets (MOPITT, AIRS, SCIMACHY, TES), *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 855-876 (2010)
- 12) Fortems-Cheiney, A., Chevallier, F., Pison, I., Bouququet, P., Szopa, S., Deeter, N., Clerbaux, C., Ten years of CO emissions as seen from Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT), *J. Geophys. Res.*, 116, D05304 (2011)
- 13) 弓本桂也, 鶴野伊津志, グリーン関数法を用いた一酸化炭素排出量の長期間逆推定, 大気環境学会誌, 47, 162-172 (2012)

## (2) 将来の発展と排出シナリオの定量化に関する研究

(独) 国立環境研究所 社会環境システム研究センター 増井利彦

<研究協力者>

(独) 国立環境研究所 社会環境システム研究センター 統合評価モデリング研究室

芦名 秀一・花岡 達也・Dai Hancheng・Xing Rui・  
Park Chan

京都大学大学院 工学研究科

倉田 学児

中国 国家発展和改革委員会能源研究所 Jiang Kejun

中国 環境科学研究院 Gao Qingxian

韓国 ソウル大学 Lee Dong-Kun

韓国 国立環境科学院 Song Chang-Keun

インド 経営大学院アーメダバード校 Priyadarsh Shukla

平成25年度予算額：1,899千円

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

本サブテーマでは、長寿命温室効果ガス、短寿命気候汚染物質を対象に、将来の気候変化、環境変化を分析、予測するための基礎となる将来シナリオの開発について検討を行った。また、本サブテーマに関連する中国、韓国における研究動向を調査するとともに、各国の大気汚染対策に関する政策状況についてもヒアリング等を行った。その結果、大気汚染対策を検討するために必要な分析の枠組みとして、気候条件やエネルギー需要構造などの地域特性を反映できる詳細な領域を評価するための統合評価モデルの開発が必要となり、その基礎となる情報収集や予備的なモデル開発を行った。また、将来の大気汚染物質の排出量の変化について検討するために、過去の排出量の変化に影響を及ぼしたイベントについて調査し、将来シナリオ作成の基礎とした。

### [キーワード]

統合評価モデル、地域シナリオ、エネルギー、長寿命温室効果ガス、短寿命気候汚染物質

### 1. はじめに

IPCC第5次評価報告書が公表され、気候変動問題は重要な問題であることが示されるとともに、すでに様々な影響が見られる問題となっており、国際的に共有されている「産業革命前と比較して世界平均気温を2℃以下に抑える」という認識に向けて、対策が急務となっている。一方で、この問題における先進国と途上国における対立は解消しておらず、これまでの排出に対して責任を有する先進国と、今後排出量が大幅に増大することが予想される発展途上国では、互いの主張を繰り返している。このような中、国際的な枠組みにおいても、各国が取り組むことができる目標を独自に提示することが定められ、2015年末に開催される気候変動枠組み条約締約国会議(COP21)

での議論に向けて、2015年3月に各国が排出削減目標を提出するように定められた。一方で、途上国では温室効果ガス排出削減の動機は小さくなく、いまだに大気汚染対策に対する動機の方が大きい。このことから、単寿命の気候汚染物質でもあるSLCP (Short-Lived Climate-Forcing Pollutants) と長寿命の温室効果ガスであるLLGHG (Long-Lived GreenHouse Gases) の排出削減を同時に取り組むことの共便益 (Co-benefit) や、長期的な視点からのSLCPとLLGHGの対策の組み合わせが有効であることを定量的に示すことは、途上国における対策を促すとともに、地球規模の温暖化対策においても効果的と考えられる。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマでは、今後も経済発展が見込まれるアジアにおいて、将来のLLGHGとSLCPの排出削減を同時に実現させるようなモデルの開発を進めるための情報収集を行うとともに、モデルを用いて定量化する将来シナリオの基礎情報として、これらのガスの排出量に影響を及ぼした様々な過去のイベントについて調査することを目的としている。

(独) 国立環境研究所では、これまでにLLGHG排出削減を目的にAIM (Asia-Pacific Integrated Model) の開発を行い、様々な気候変動緩和策の評価を行ってきた。LLGHG対策は、全球レベルが対象であり、排出に関する詳細な地理情報は十分に検討されなかった。一方で、SLCPの排出においては、影響を検討する上で、どこで排出されるかといった情報も重要になる。また、SLCP対策を検討する上で必要となる技術情報についても既存のモデルでは十分ではなく、SLCPとLLGHGの同時削減に関する将来シナリオを定量化するためには、それぞれに関わる技術情報についても検討する必要がある。

## 3. 研究開発方法

LLGHGとSLCPの対策を検討するために必要となる将来シナリオの要件について、以下の各項目を調査し、本課題において適切なモデルの枠組みについて検討する。

- 1) 将来の社会経済活動の状況を適切に描写できるとともに、発展パターンによる差異を検討できる。
- 2) SLCPの影響をより適切に表現するために、排出源を可能な限り詳細化する。
- 3) LLGHG及びSLCPの将来排出シナリオを気候モデルに提供できる。
- 4) 将来の環境影響のフィードバックを検討することができるようなインターフェースをもつ。また、これまでの環境研究総合推進費で行われてきた課題についてサーベイし、研究課題全体でどのような枠組みが適切かについて検討する。さらに、LLGHG及びSLCPの将来シナリオを評価する上で参考となるイベントについて調査を行う。

## 4. 結果及び考察

モデルの枠組みの検討課題として取り上げた1)～4)については、以下のような結果となった。

- (1) 将来の社会経済活動の状況を適切に描写できるとともに、発展パターンによる差異を検討できる。

将来の社会経済活動を対象としたシナリオとしては、SSPs (Shared Socio-economic Pathways) の開発が進められており、そこで開発されている5つのシナリオ群を本研究課題でも用いるものと

する。なお、SSPsの定量化にあたっては、AIM/CGEも情報提供をしていることから、AIM/CGEを社会経済シナリオを推計するモデルと位置づける。あわせて、SSPsでは表現されていないような発展による様々な差異についても、可能な限り、AIM/CGEを用いて検討することとする。

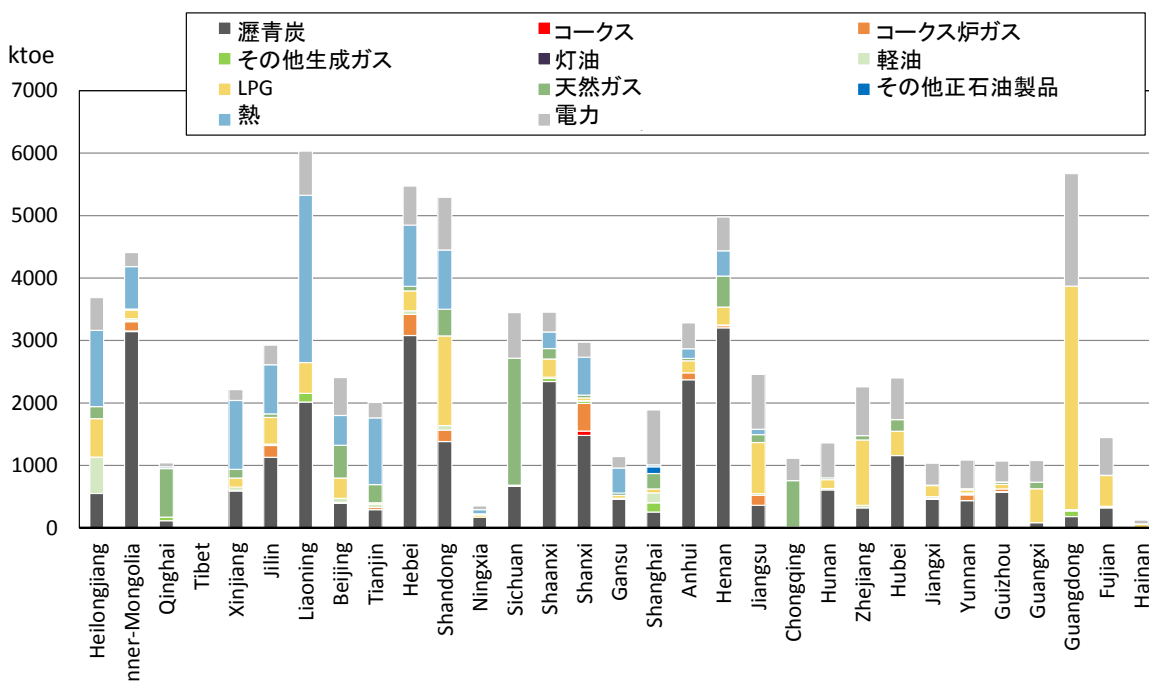
### **(2) SLCPの影響をより適切に表現するために、排出源を可能な限り詳細化する。**

東アジアにおけるPM2.5問題に見られるように、SLCPの検討にあたっては、排出量そのものとともに、どこで排出されたかという排出源の特定が重要となる。このため、排出源の特定が容易となるように、LPS (Large Point Source : 大規模発生源) の検討が可能なものについては、できる限り取り込めるようにし、さらに対策技術についても検討が可能となるような枠組みのモデル開発を行う。また、LPS以外についてもできるだけ排出源の解析が可能となるように、従来の国という単位でのモデルから、地域へとダウンスケールしたモデルへの更新が必要となる。なお、地域モデルであっても排出源である産業立地等については、地域内で意思決定されるものではなく、国全体の意思決定が必要となる場合がある。これらのことを踏まえ、(2)の課題に関しては、国及びそれらを細分化した地域を対象とした技術選択モデルを用いて、各国のLLGHG及びSLCP排出シナリオを検討するものとする。なお、従来の技術選択モデルは、LLGHGの排出シナリオの検討が中心であり、SLCP対策の検討においては不十分な点があることから、これらの対策技術も評価できるようなモデルの改善を行うことが必要である。

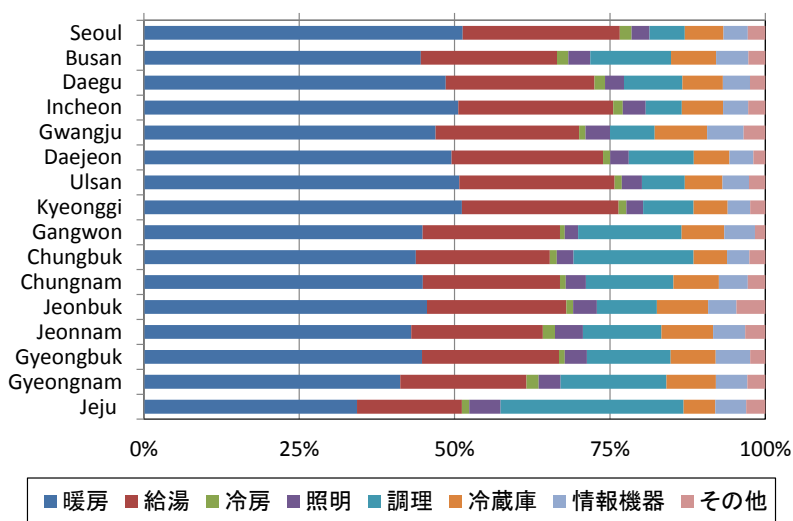
こうした詳細化したモデル化に向けて、地域を対象とした情報の整備を行った。図(2)-1は、中国エネルギー統計年鑑をもとに、省別の都市部の家庭部門における2005年のエネルギー源別の消費量を示したものである。また、図(2)-2は、韓国の地域別の家庭部門における2010年のエネルギー需給の用途別シェアを示したものである。こうした統計情報をもとに、地域モデルの開発を進める予定である。

### **(3) LLGHG及びSLCPの将来排出シナリオを気候モデルに提供できる。**

(2)の排出源の特定等については、国を対象としたモデルの活用を検討しているが、気候モデルとの連携に関しては、排出シナリオを世界に拡張する必要がある。このため、従来から開発を行ってきた世界規模の技術選択モデルをもとに、排出シナリオの検討を行うものとする。なお、技術選択モデルはこれまでLLGHGの排出シナリオの検討が中心であったことから、SLCP対策においても技術等の組み合わせを検討できるように改良を行う。また、気候モデルへの情報提供にあたっては、気候モデルとの情報のやりとりがスムーズにいくように、排出シナリオのダウンスケールについても検討を行う。ダウンスケールにあたっては、(2)の国モデルの情報も活用して、LPSの特定化なども検討する。このように、世界モデルで対象とする国と、(2)で分析される国の入力情報、結果は、整合させる必要がある。このため、これら2つの技術選択モデルの開発にあたっては、データベースやインベントリ情報の共有化などについても作業を行う。



注：チベットはデータがない。中国エネルギー統計年鑑をもとに作成  
 図(2)-1 中国・都市部の家庭部門におけるエネルギー需要（2005年）



図(2)-2 韓国の家庭部門におけるエネルギー需給の用途別シェア（2010年）

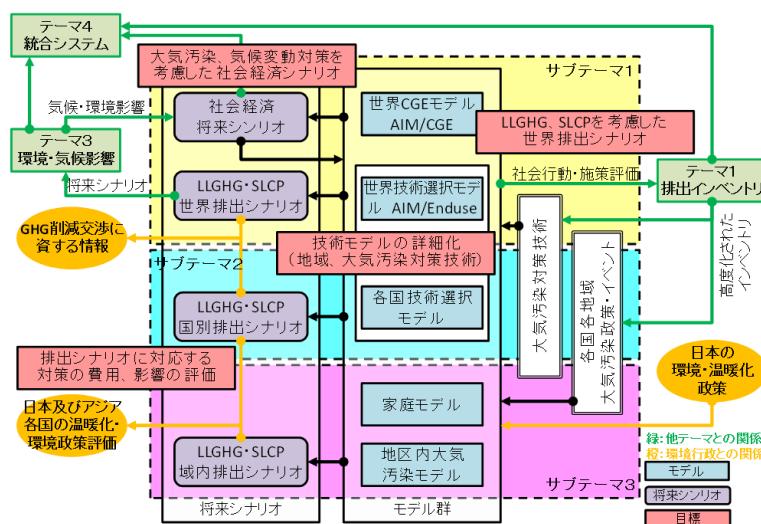
具体的な政策に展開するためには、生活への影響などさらに詳細な分析も求められる。特に、経済成長著しいアジアでは、都市化やモータリゼーションの進展など、解決すべき社会面の課題も多くある。こうした状況を踏まえ、グローバルな社会経済シナリオと整合した、家庭レベルもしくは地区レベルにおけるSLCPの排出シナリオとその影響を評価することも重要となる。本研究課題は、グローバルなスケールを対象とした分析ではあるが、詳細な視点での分析も可能となるように、家庭、地区レベルを対象としたモデルの開発、将来シナリオの分析もあわせて行う。



(4) 将来の環境影響のフィードバックを検討することができるようなインターフェースをもつ。

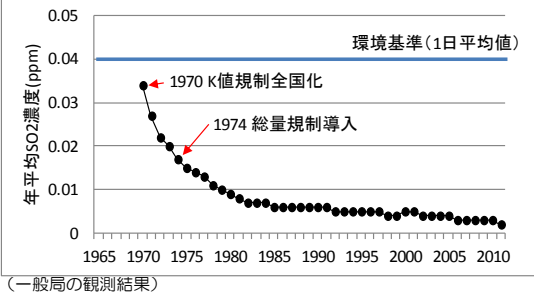
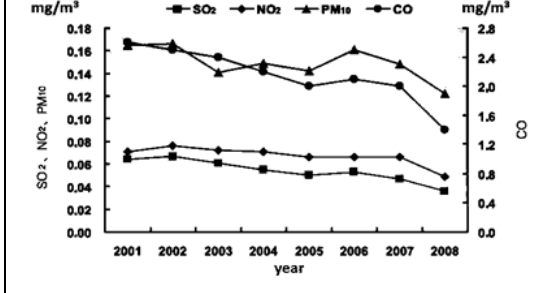
他テーマにおいて、気候モデル、環境モデルによる影響が分析、評価されるが、こうした影響が社会経済活動にフィードバックする可能性は十分にあるが、これまでのシナリオでは、そうしたフィードバックはほとんど考慮されていない。そこで、本課題では、様々な環境影響のフィードバックを取り込んだモデルの開発と、そうしたフィードバックも踏まえた将来の排出シナリオについて検討を行う。

上記の結果、図(2)-3に示すような統合評価モデルの枠組みを提示することができた。他の課題との連携や将来の発展経路と排出シナリオの定量化、政策への展開から、モデル構造は、世界モデル、国・地域モデル、地区・家庭モデルという3つのレベルを設定した。これらの3つのレベルのモデルは、それぞれ、将来シナリオ、排出シナリオに関して、整合性をもつように、情報の共有化を行うものとする。気候モデルならびに排出インベントリとの連携については、世界モデルを介して情報提供を行う。



図(2)-3 LLGHG及びSLCPを対象とした将来排出シナリオを検討する統合評価モデルの枠組み

将来の社会経済シナリオの検討そのものは、SSPsを基礎にするが、SLCP対策、温暖化対策についても別途検討する必要がある。そこで、SLCP対策やLLGHG対策の検討を行うにあたっての予備的な調査を行った。図(2)-4は調査結果の一部である。これまでにSLCPの排出に影響を及ぼす様々な取り組みやイベントが行われてきており、本課題においてもこうしたイベントを参考に、将来の削減の可能性について検討を行う。

<p>番号 対象国 イベント 期間 開始 終了 概要 対象地域 対象物質 SOx NOx 粒子状物質 その他 削減効果</p>	<p>1 日本 大気汚染防止法の導入 1968年 継続中 ・環境基本法で定められた「環境基準」の達成を目標に実施されているもの。 ・固定発生源（工場や事業場）から排出又は飛散する大気汚染物質について、物質の種類ごと、施設の種類・規模ごとに排出基準（*1）等を設定。 ・1968年導入、主な改正は、1970年改正（規制対象全国化など）、1974年改正（総量規制方式導入など） ・指定地域（1968年）→全国（1970年） ・都道府県が条例によってより厳しい基準を定めることが可能（上乗せ排出基準）。</p> <p>対象 対象 対象 各種物質を含む（*2）</p>  <p>（一般局の観測結果）</p>	<p>4 中国 北京オリンピック（準備期間） 2001年 2008年 ・北京市は、2001年五輪招致時に「SO2、CO、NO2、PMを毎日測定する」と宣言。対象地域（6省）をメンバーとした「北京五輪大気質保障ワーキンググループ」を結成し、「五輪期間中北京大気質保障措置」を策定・実施。具体的には、煤塵、自動車、産業に起因する大気汚染に対して、160項を超える措置を実施した（注1）。</p> <p>・北京市</p> <p>対象 対象 対象 対象 CO</p> 
<p>出典</p>	<p>1. 環境省水・大気環境局大気環境課, 平成24年4月, <a href="http://www.env.go.jp/air/osen/law/">http://www.env.go.jp/air/osen/law/</a> 2. <a href="http://www.gepr.org/ja/contents/20130401-02/">http://www.gepr.org/ja/contents/20130401-02/</a></p>	<p>北京市環境保護局 (<a href="http://www.bjepb.gov.cn/">http://www.bjepb.gov.cn/</a>)</p>
<p>備考</p>	<p>（*1）排出基準は以下の通り。 1. 一般排出基準：ばい煙発生施設ごとに国が定める基準 2. 特別排出基準：大気汚染の深刻な地域において、新設されるばい煙発生施設に適用されるより厳しい基準（いおう酸化物、ばいじん） 3. 上乗せ排出基準：一般排出基準、特別排出基準では大気汚染防止が不十分な地域において、都道府県が条例によって定めるより厳しい基準（ばいじん、有害物質） 4. 総量規制基準：上記に挙げる施設ごとの基準のみによっては環境基準の確保が困難な地域において、大規模工場に適用される工場ごとの基準（いおう酸化物及び窒素酸化物）  （*2）各種物質は以下の通り。 1. 煤煙 ・物の燃焼等に伴い発生するSOx ・燃焼・電気の使用に伴い発生する煤塵(いわゆるスス) ・燃焼・合成・分解に伴い発生する有害物質（カドミウム及びその化合物、塩素及び塩化水素、フッ素、フッ化水素及びフッ化ケイ素、鉛及びその化合物、NOx） 2. 揮発性有機化合物 ・大気中に排出され、又は飛散した時に気体である有機化合物（政令で定める物質を除く） 3. 粉塵 ・物の破碎、選別その他の機械的処理又は堆積に伴い発生し、又は飛散する物質 4. 有害大気汚染物質 ・継続的に摂取される場合には人々の健康を損なうおそれがある物質で大気の汚染の原因となるもの。優先取組物質として22物質を選定 5. 自動車排出ガス ・自動車及び原動機付自転車の運行に伴い発生するCO、炭化水素、鉛化合物、NOx、粒子状物質</p>	<p>（注1）具体的には以下の通り。 ・市中心部の20トン以下のボイラー16,000台をクリーンエネルギー型に切り替え ・四大石炭発電所の改造（脱硫装置、脱硝装置の設置） ・環境基準を満たさないタクシー（5万台強）とバス（1万台強）を、環境基準に適合したものに更新 ・汚染物質を排出する企業を多数整理（対象は、ガソリンスタンドやタンク車の改造または利用停止、有機化工場の生産停止、石油化学工場（プラント名：化工二場）の生産停止、鉄鋼工場（プラント名：首都鋼鉄）の生産削減、揮発物質関連企業の整顿または生産停止、郊外のセメント工場・砂利工場・レンガ工場の生産停止）した。</p>

図(2)-4 SLCP排出に影響を及ぼすイベントの調査結果の一例

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

これまでに行ってきた国を対象とした統合評価モデルによる分析を、より詳細な地域を対象にモデル化を進めることは、SLCPの影響等を検討する上で極めて重要な情報を提供することが可能となり、科学的な貢献は大きい。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

中国をはじめとしたアジア各国の排出シナリオと対策の効果、影響のフィードバックを定量的に示すことで、各国の大気汚染対策、温暖化対策を促進させる可能性があり、日本だけでなく、成長著しいアジア各国における環境政策、温暖化政策に大きく貢献できる。

## 6. 国際共同研究等の状況

中国国家発展と改革委員会エネルギー研究所の Jiang Kejun 教授ならびに韓国ソウル大学の Lee Dong-Kun 教授、インド経営大学院アーメダバード校の P.R.Shukla 教授と共同で、中国ならびに韓国、インドにおける LLGHG 及び SLCP を対象とした統合評価モデル開発とそれをを用いた将来排出シナリオ作成に関して共同研究を行っている。また、(独) 国立環境研究所の日韓中 3 カ国環境研究機関長会合のもとで連携している中国環境科学研究院の Gao Qingxian 教授と韓国国立環境科学院 Song Chang-Keun 博士と、3 カ国における LLGHG と SLCP の対策の重要性、政策的な意義について意見交換を行った。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) P. Thepkhun, B. Limmeechokchai, S. Fujimori, T. Masui and R. M. Shrestha : Energy Policy, 62, 561-572 (2013)  
“Thailand’s Low-Carbon Scenario 2050: The AIM/CGE analyses of CO<sub>2</sub> mitigation measures”
- 2) 藤森真一郎, 増井利彦, 松岡謙 : 土木学会論文集 G(環境), 69, 5, I\_227-I\_268 (2013)  
「エネルギー機器情報を用いた応用一般均衡モデルの開発と緩和策の分析」

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) 芦名秀一、藤野純一、増井利彦、日比野剛、松井重和 : エネルギー・資源学会第32回研究発表会 (2013)  
「2050年日本低炭素社会シナリオ及び実現ロードマップの再検討」

- 2) T. Masui: Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) Second Annual Meeting, Yokohama, 2013  
“Asian activities toward two degree target”
- 3) T. Masui: The 5th International Forum for Sustainable Asia and the Pacific, Yokohama, 2013  
“Emission Pathways toward the 2 Degree Target”
- 4) S. Fujimori, T. T. Tran, M. Namazu, T. Masui, Y. Matsuoka, K. Jiang, P. R. Shukla: IAMC 6th Annual Meeting , Tsukuba, Japan, (2013)  
“Analyzing the energy demand of Low carbon development in China and India using AIM/CGE model”
- 5) T. Masui: Workshop on Comparative Study on Low Carbon Modeling for Indonesia, Jakarta, 2013  
“AIM Model for developing low carbon strategy -Economic impacts based on CGE model-”

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

### (3) 全球影響評価に関する研究

東京大学 大気海洋研究所

中島映至

<研究協力者>

東京大学 大気海洋研究所

鶴田治雄、井上豊志郎、山田裕子

平成25年度予算額：5,220千円

予算額は、間接経費を含む。

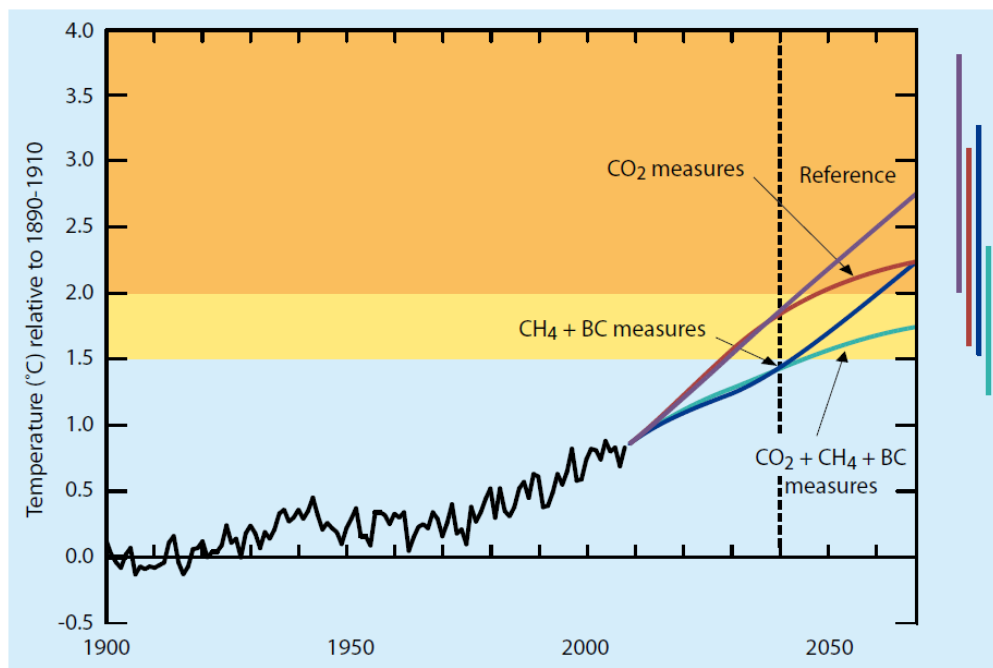
#### [要旨]

最適な気候モデル・大気質モデルを選定し、シミュレーションの仕様を検討した。選定したモデルを用いてShort-Lived Climate Pollutants /Long-Lived Green House Gases (LLGHG) の多様な緩和策経路を想定して、気候変動・環境影響シミュレーションをテストした。その結果と、先行研究による影響評価を考慮すると、SLCPとLLGHGが引き起こす放射強制力の地域分布は削減シナリオによって異なり、複雑な領域気候変化を引き起こす可能性があることが示された。また、水循環・健康・農業などの影響評価のために役立つメトリックを検討した。

[キーワード] 短寿命気候因子 (SLCP)、気候変動、黒色炭素、放射強制力

#### 1. はじめに

短寿命気候因子 (Short Lived Climate Pollutants ; SLCP、エアロゾル、オゾン、メタンなど) は、長寿命温室効果ガス (Long Lived Green House Gas: LLGHG、CO<sub>2</sub>など) に比べて削減することは容易であると考えられている。また、大気汚染の改善の観点からもエアロゾル、オゾンおよびその前駆物質の削減は必須である。一方で、SLCPの削減過程で起こる気候影響は領域規模の気候変化を伴うために複雑であり、CMIP5などの最新の気候予測研究においても十分に検討されていないのが現状である。さらに、SLCPの削減方法には様々な技術的・政策的方法が想定され、LLGHGの削減との組み合わせも多数考えられる。そのため、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルを最大限に活かして多様な緩和策の中から最適な経路を選ぶ必要がある (科学的・技術的意義)。先行の戦略推進費研究 (S6, 7, 8, 10) において、インベントリ、モデル群は完成しており、これらを組み合わせる時機は熟している。このような経路決定は、大気汚染削減と温暖化抑制の両面から社会にとって大きな利益をもたらす (社会的・経済的意義)。SLCPについてはIPCC評価報告書のみならず、半球規模の大気汚染物質の輸送に関するタスクフォース (TFHTAP) においてもエアロゾル、オゾンの輸送とその顕著な影響が報告されている。また、大気褐色雲 (ABC) プロジェクトにおいても、アジア域の黒色炭素削減とその影響評価が重要課題となっている (図(3)-1)。さらにClimate and Clean Air Coalition (CCAC) においてもSLCPの積極的な削減策が検討されている。従って、国際的にも詳細で正確な科学的知見を早急に準備する必要がある (国際的取り組み)。



図(3)-1 異なる削減経路による温度上昇の違い (UNEP, 2010<sup>1)</sup>; 2011<sup>2)</sup>)

## 2. 研究開発目的

本課題の目的は、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルを組み合わせた能動的な評価手法を開発し、それをを用いた最適経路の提示と、温暖化抑制策策定のための科学的知見を提供する課題について、その実現可能性を検証する。適切なメトリックによる定量的なコスト評価も図り、施策選択のトレードオフの分析を行う。

## 3. 研究開発方法

サブテーマ（1）および（2）により作成される短寿命気候因子（SLCP）および長寿命温室効果気体（LLGHG）の排出量データを用いて、気候モデルおよび大気質モデルによるシミュレーションを行い、気候・水循環・健康・農業に対するSLCP/LLGHGの影響を評価する。以下のようなフィージビリティ研究を行う。

- 1) 本研究課題で活用できる最適な気候モデル・大気質モデルを選定し、有益な環境影響評価を行うことができ、かつ計算機資源を考慮したシミュレーションの仕様を検討する。
- 2) サブテーマ（1）および（2）により策定されるSLCP/LLGHGの多様な緩和策経路を想定した、気候変動・環境影響シミュレーションをテストする。
- 3) SLCP/LLGHGを統合的に考慮したシミュレーション結果をベースとした、健康・農業などの影響評価をするための適切なメトリックを検討する。

## 4. 結果及び考察

### (1) 最適な気候モデル・大気質モデルの選定と、有益な環境影響評価およびシミュレーション仕様の検討

図(3)-2に示すように、人為起源温室効果ガスによる温室効果の増加はアジア域でほぼ均質な昇温をもたらすが、人為起源エアロゾルによる地表面での放射強制力は非常に不均質な冷却を生み出す。図にはそれによって引き起こされる夏季(JJAS)の降水量変化をMIROC大気・海洋混合層結合モデルによってシミュレーションした結果も示すが、エアロゾルの増加は非常に不均質な降水量変化をもたらすことがわかる。このようなエアロゾルの領域気候への影響は、放射収支の直接的な影響と雲場を変化させる間接効果、さらに広域のエネルギー収支の不均衡で起こる大気大循環の変化を通して起こっており、その結果生じる雲量変化や降水量変化は複雑である<sup>3),4),5)</sup>。

図(3)-2でのもうひとつの重要な点はこのような変化は、SST(海面温度)固定実験では得られず、海洋の応答を考慮して計算しなければならないことである。そのために、エアロゾルなどのSLCPの気候影響評価には最低限、大気・海洋混合層モデル、できれば大気・海洋結合系モデルを利用する必要がある。本研究では、調査の結果、MIROC大気・海洋結合系モデルの利用が最も適切であると結論する。このモデルは長寿命ガス過程のみならず、SPRINTARSエアロゾルモデルとCHASER大気化学モデルを含みSLCPの計算能力を持っている。その地球システムモデル(EMS)版では植生応答、炭素循環過程も組み込まれており、領域気候の変化が及ぼす植生変化などの計算が可能である。さらにこのモデルはCMIP気候モデル比較実験やIPCC評価報告書でも引用されており、モデル性能などが詳細に評価されている。ただし、MIROCシステムは膨大であり、それを運用できる専門の研究者が次期戦略課題に含まれることを推奨する。

検討すべきもう一点は、使用するモデルのスケールの相違である。領域研究で明らかになった大気質変化をAIM社会モデルによってアップスケールして、仮にそのような変化が全球的に起こったとしたシナリオを立て、SLCPの気候影響を評価しようとする、領域研究で使用される領域型大気化学モデルと気候影響評価で使用される気候モデルに組み込まれた大気化学モデルの整合性が問題になる。そのために、次期戦略課題では、このスケールの違いを把握するために、次世代型大気モデルNICAMを用いたシステムを並行して稼働することを推奨する。非静力学正20面体大気モデルNICAM<sup>6),7),8)</sup>はフラックス保存型差分スキームを利用しており、スペクトル型のMIROCモデルに比べて物質保存性が良い。かつ、準一様全球格子系の他に特定の領域に計算格子点をより多く配置するストレッチ格子系や特定の領域のみに計算資源を割り当てた領域計算が可能なダイヤモンド格子系という特殊空間格子を装備しているので、全球から日本付近までをシームレスに計算できる利点を有している。このシステムにSPRINTARSとCHASERを組み込んだNICAM+SPRINTARS+CHASERモデルが文部科学省RECCA/SALSA<sup>9)</sup>プロジェクトで開発されているので、図(3)-3に示すような様々なスケールの現象を同一のモデルによって計算ができる。SPRINTARSとCHASERはMIROCにも組み込まれており、モデル間で整合性を調査する場合にも利点が多い。従って、次期戦略課題では、NICAM+SPRINTARS+CHASERの高度化と、領域計算モデルとの比較を行うことが重要である。

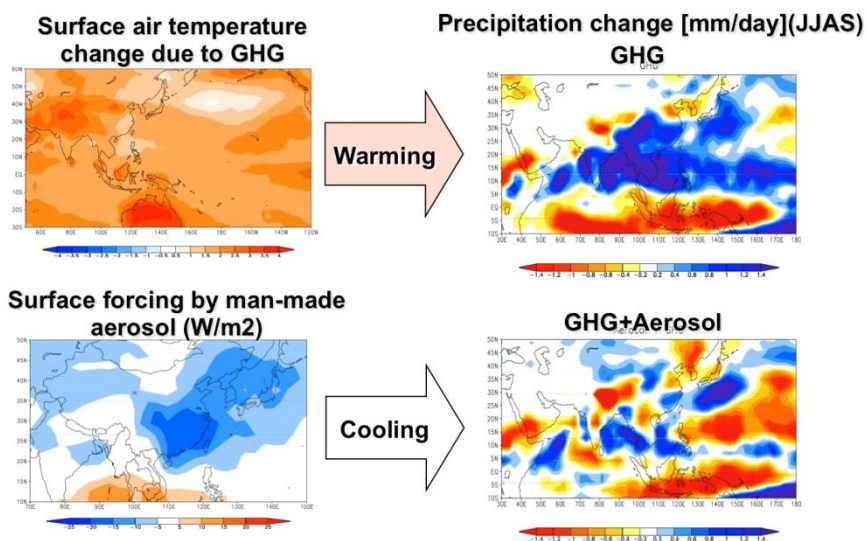
## (2) SLCP/LLGHGの多様な緩和策経路を想定した気候変動・環境影響シミュレーションテスト

前節で見たようにエアロゾルの放射強制力の領域気候への影響は大きく、その把握が重要である。放射強制力の評価法のひとつとして、NASAのCALIPSO/CALIOP衛星搭載ライダーとMODIS衛星イメージャーを利用した全エアロゾルの放射強制力の評価結果を図(3)-4に示す。図は、衛星観測ではNASA/CALIPSOプロジェクトから得たエアロゾル成果物のバージョンが異なることによって放射強制力の値が大きく変化することが示されている。NASAのversion 3成果物はversion 2と比べて、晴天の場合は、海洋性エアロゾルの光学的厚さ(AOT)の増加と、それに伴う海上の一次散乱アルベド(SSA)の上昇が起こっている。またエアロゾル層が雲層より上か下かに存在する場合は、煙エアロゾル(Smoke)と汚染された土壌粒子(Polluted Dust)のAOTの減少が見られ、その結果、SSAが上昇している。そのためにエアロゾルの全球平均放射強制力はそれぞれ $-0.8 \text{ Wm}^{-2}$ と $-2.0 \text{ Wm}^{-2}$ となり、version 3の方がより大きな負の強制になっている。一方、MIROC+SPRITNARSモデルによる全球平均エアロゾル放射強制力は $-0.58 \text{ Wm}^{-2}$ であり、モデルとの整合性が新しいversionによる評価では取れなくなった。

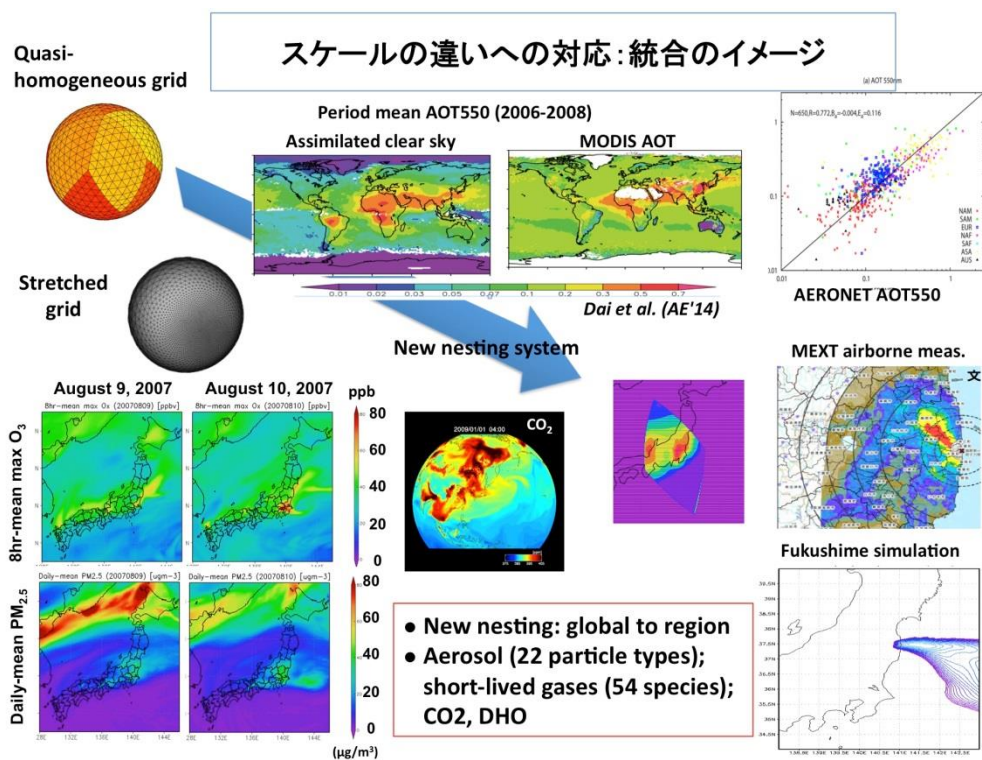
しかし、ライダーによるエアロゾル検知の詳細を見てみると未だに不確実な点もあり、今後、さらに衛星評価が変化する可能性も大きい。従って、衛星とモデルの両方を利用した放射強制力の評価は次期戦略課題においても重要な課題であると結論できる。

図(3)-4に、S-7戦略課題の須藤健悟氏による、MIROC+CHASERモデルによって評価された人為起源黒色炭素の放射強制力を同時に示す<sup>10)</sup>。図には3つのSLCP削減シナリオに沿った数値実験の結果が示されているが、この図から、黒色炭素の放射強制力の地域分布は削減シナリオによって大きく異なることがわかる。一方で、須藤氏によると、SLCPの全球平均放射強制力は組成ごとの効果が正負相殺し合って削減シナリオに大きく依存しないと結論している。従って次期戦略課題では、全球平均の放射強制力の評価と同時に、図(3)-4に示すような放射強制力の地域分布の評価が重要な課題であると結論できる。なぜならば、図(3)-2に示すように、このような放射強制力の地域差こそが降水量に大きな地域変化を生み出すからである。この事を確認するために、図(3)-5にMIROC大気海洋結合モデルで計算した、黒色炭素の有無で起こる様々な大気パラメータの変化を示す。図によると、黒色炭素の有無で、土壌粒子などの他のエアロゾル量の変化や雲凝結核数、上層雲の氷量などが変化することがわかる。これは黒色炭素の変化による直接・間接の放射強制力の場所的变化が大気の安定度や循環を変化させるために、例えば風速が変化して土壌粒子の巻き上げが変化するなど、様々な変化が起こることを意味している。従って、次期戦略課題では、このような気候系の様々な部分の相互作用を把握することが重要であると結論できる。

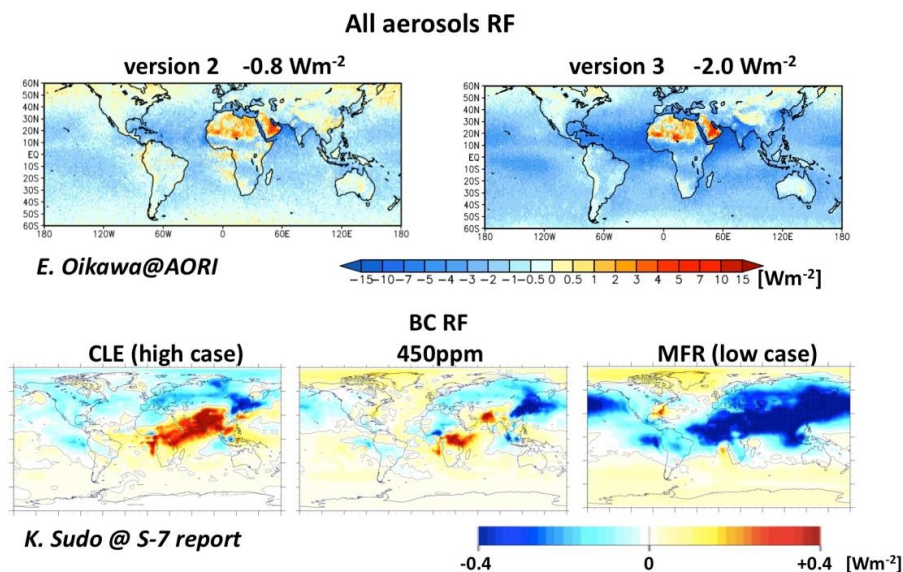




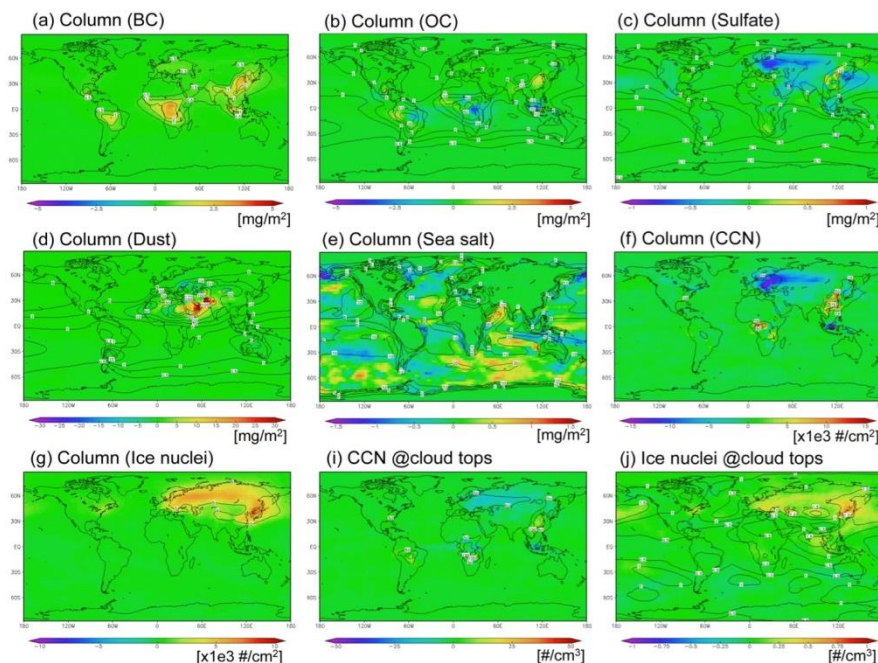
図(3)-2 大気・海洋混合層結合モデルによってシミュレーションされた人為起源温室効果ガスによる地表面気温の増加(左上)と、人為起源エアロゾルによる地表面での放射強制力(左下)。それによって引き起こされる夏季(JJAS)の降水量変化(右上と右下)。Mukai and Nakajima (2009)の結果<sup>1)</sup>から作成。



図(3)-3 NICAM+SPRINTARS+CHASERモデルによる異なるスケールの様々なシミュレーション



図(3)-4 CALIOP衛星搭載ライダーとMODIS衛星イメージャーを利用した人工衛星からの全エアロゾルの放射強制力の評価（上図）と、MIROC+CHASERモデルによって評価された3つのSLCP削減シナリオ（CLE, 450ppm, MFR）における人為起源黒色炭素の放射強制力の変化（下図；S-7戦略課題 須藤健悟氏報告, 2013から<sup>10)</sup>）。人工衛星からの評価では、NASAのversion 2成果物（左上）とversion 3成果物（右上）を利用した結果を示す。また全球平均の放射強制力も示す。



図(3)-5 MIROC-CGCMによる”BC×1”実験と”BC×0”実験で計算された環境場の差の水平分布：(a) BC、(b) 有機炭素エアロゾル (OC)、(c) 硫酸塩、(d) 土壌粒子、(e) 海塩粒子、(f) 雲凝結核鉛直積算量、(g) 氷晶核鉛直積算量、(i) 雲凝結核の雲頂付近数濃度、(j) 氷晶核の雲頂付近数濃度の場合。

### (3) 気候・健康・農業などの影響評価をするための適切なメトリックの検討

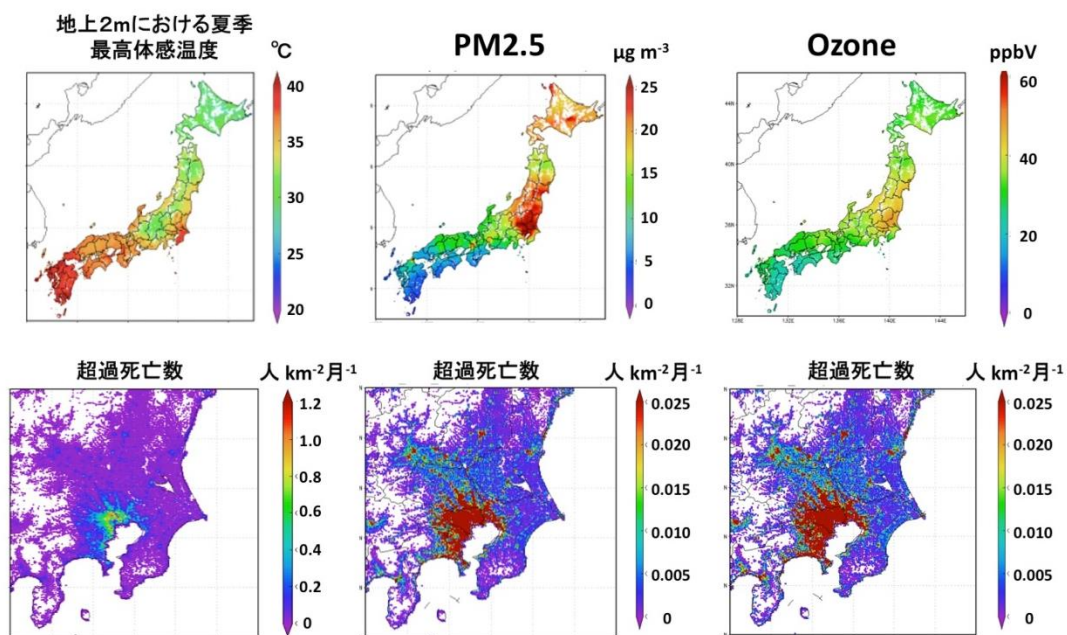
前2つの節で述べてきたように、MIROC+SPRINTARS+CHASER気候モデルおよびNICAM+SPRINTARS+CHASER大気モデルによって大気中のSLCP計算とその影響評価が可能である。その例として、図(3)-6にNICAM+SPRINTARS+CHASERで計算された地表付近の気象場から算定された体感温度・PM2.5・オゾン量の分布と、対応して計算されたそれぞれの原因による超過死亡数を2000年代の典型的な8月について示す。図には示さないがストレッチ格子による計算なので、全球からアジア域における場がそれぞれの空間スケールで得られている。次期戦略課題では、このような計算を通して、影響評価に関わる有効なSLCPに関するメトリックを算定する必要がある。表(3)-1には、このようなメトリックの作成にとって重要な環境指標を示す。定量的な影響評価のためには、これらの指標が依拠する領域区分や特異領域の定義の調査が必要である。また、これらを出力して、データベースとして整備する必要がある。図(3)-7には構築すべきデータベースのイメージを示す。SLCPに関わる物質の排出インベントリの整備、それを利用した大気質のモデル結果、その影響に関するパラメータの表示等をユーザーとインタラクティブに行う必要がある。

サブテーマ(1)から(3)にわたる検討の結果、次期戦略課題は図(3)-8に掲げる構造で実施することが目的の達成にとって最適であると結論する。

表(3)-1 SLCP関連の気候・健康・農業影響評価に重要な環境指標

環境指標	評価・用途
領域ごとの気象場・大気安定度	温暖化緩和指標、健康被害、農業影響
特異領域における降水量(夏季)	SLCP間接気候効果指標、農業影響
SLCP大気上端放射強制力の領域差	SLCP間接気候効果指標
SLCP地表面放射強制力の領域差	SLCP間接気候効果指標、領域気候変化指標
SLCP高濃度域面積(ホットスポット)	SLCP緩和策指標、健康被害
PM2.5都市域平均・領域平均	健康被害
黒色炭素量都市域平均・領域平均	健康被害、雪氷域影響
黒色炭素および土壌粒子の混合状態	エアロゾルSSA、放射強制力
オゾン量都市域平均・領域平均	健康被害、農業被害
直達日射・散乱日射	農業被害



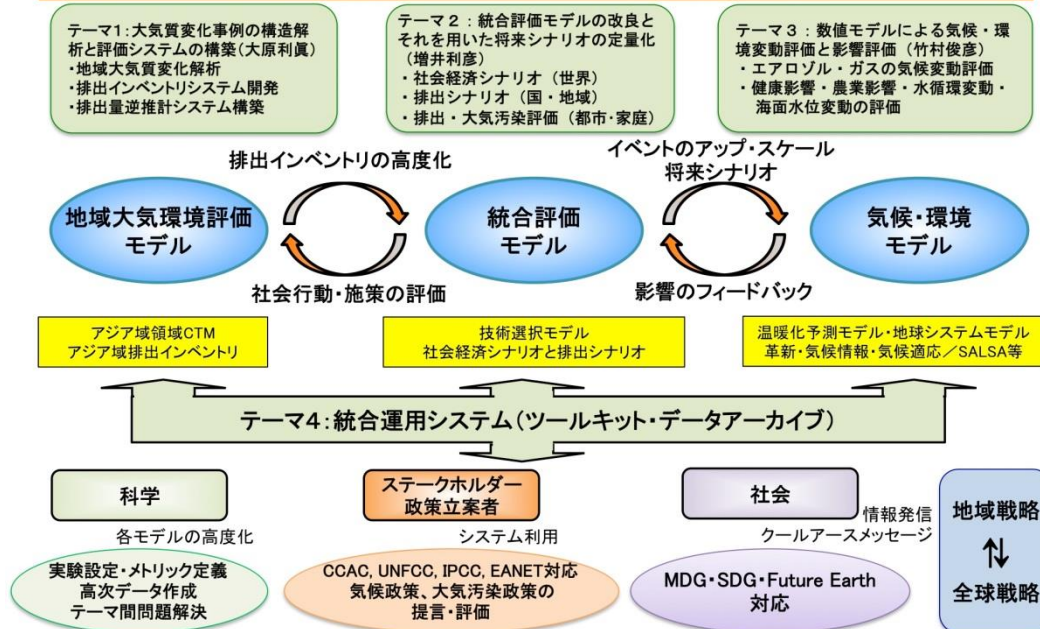


図(3)-6 熱関連健康被害と大気汚染関連健康被害のパラメータと、それが引き起こす超過死亡数。2000年代の典型的な8月の例。RECCA/SALSAモデルシステムによる評価。(SALSA平成25年度報告書)

図(3)-7 次期戦略課題におけるデータベースの構築のイメージ

## S-12構造の決定：SLCPの環境影響評価と削減パスの探索による気候変動対策の推進

達成目標：各テーマが開発する地域大気環境評価システム・地域を対象とした統合評価モデル・気候と環境変動の影響評価システムを連結して、統合運用システムを稼働する。政策立案者とステークホルダーからの意見を反映して、統合運用システムからSLCP削減対策に関する知見を提供する。このような運用に必要なツールキットの開発と必要な情報発信を行う。



図(3)-8 次期戦略課題の構造のイメージ

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

SLCPおよびLLGHGを削減する組み合わせは多数考えられる。そのため、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルを最大限に活かして多様な緩和策の中から最適な経路を選ぶことが科学的・技術的にも重要である。これまでの戦略推進費研究(S6, 7, 8, 10)で、排出インベントリ・統合モデル・気候モデルは完成しており、これらを組み合わせる時機は熟している。本研究ではこれらを組み合わせて、大気汚染物質削減と温暖化抑制の両者を総合的に取り扱うことを目指すことが大きな科学的意義である。

SLCPの気候影響・農業影響・健康被害に関する最新のモデリング手法の検討と、利用すべきモデルの概略を定めることができた。NICAM+SPRINTARS+CHASERは全球スケールから領域スケールをシームレスにつなぐためのブリッジとなるべき世界的にユニークなモデルであり、これを既存のWRF-CMAQモデルや気象庁のMASINGARモデルとともに運用するマルチモデル研究体制が確立できるメドが立ったのは、我が国のSLCP研究にとって重要な進歩である。本研究参加者が主となって提案した理研の京速計算機利用申請「全球規模大気環境汚染に関わる総合環境モデリング」が採択されたので、気候科学の最先端モデリング技術の確立の観点でも世界をリードできる。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

#### 【行政が既に活用した成果】

研究代表者は、WCRPの合同科学者会議（H25年5月）にオフィサーとして参加し、気候研究と環境問題に関する世界の研究をレビューし、その推進のための対策の決定に貢献した。IPCC第一作業部会の第5次報告書の作成に主執筆者として参加し、SLCPの放射強制力や気候影響に関する知見のとりまとめに貢献した。H25年9月にソウル大学で開催されたABC-SLCPワークショップに参加し、エアロゾルとSLCPの特性と影響評価に関する本研究の成果の発信を行った。また、CCAC事務局長のHelena Molin Vardes氏を含めて国際共同研究案件を検討した。UNEP/ABC-Asiaプロジェクトのサイエンスチーム主査として、アジア域の大気汚染物質の研究とアジアに分布するABC気候観測所の運用に貢献した。H25年2月にバンコックで開かれたCCACサイエンス会合に参加し、プロジェクト推進の諸案件の立案に参加した。また、本FS研究計画について発信をした。

#### 【行政の活用が期待できる成果】

多様な排出シナリオを用いて気候モデルおよび大気質モデルによるシミュレーションを行い、気候・水循環・健康・農業に対するSLCP/LLGHGの影響を具体的に評価し、低炭素社会・環境改善の実現に向けて、最適な緩和経路の選択のための科学的根拠資料の作成が可能となれば、IPCCへの貢献はもとより、UNFCCC、CCACへの貢献や、国際議論において日本がリーダーシップを発揮できる。

また、中国をはじめとしたアジア各国の排出シナリオと対策の効果、影響のフィードバックを定量的に示すことで、各国の大気汚染対策、温暖化対策を促進させる可能性があり、日本だけでなく、成長著しいアジア各国における環境政策、温暖化政策に大きく貢献できる。

## 6. 国際共同研究等の状況

- ・ IPCC-AR5第8章Lead Authorとして、人為起源放射強制力に関する知見の評価を行った。国内幹事会のメンバーとして国内案件の対応に参加した。
- ・ 世界気候研究計画（WCRP）合同科学委員会（JSC）のオフィサーとして、JSC会合（2013.5、ブラジル）に参加し、世界の気候研究の振興に関する対応を行った。
- ・ UNEP大気の色雲アジアプロジェクト（ABC-Asia）のサイエンスチーム主査として、サイエンスチーム会合とABC・CCACに関する国際シンポジウムを開催して知見の発信に務めた（2013.9、ソウル）。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) Fukuda, S., T. Nakajima, H. Takenaka, A. Higurashi, N. Kikuchi, T.Y. Nakajima, and H. Ishida, 2013: New approaches to removing cloud shadows and evaluating the 380-nm surface reflectance for improved aerosol optical thickness retrievals from the GOSAT/TANSO-Cloud and Aerosol Imager. *J. Geophys. Res.*, accepted.
- 2) Nakajima, T., H. Takenaka, D. Goto, S. Misawa, J. Uchida, and T.Y. Nakajima, 2013:

- Measurements and modeling of the solar radiation budget. *Simulation*, **32**, 199-207.
- 3) Oikawa, E., T. Nakajima, T. Inoue, and D. Winker, 2013: A study of the shortwave direct aerosol forcing using ESSP/CALIPSO observation and GCM simulation. *J. Geophys. Res.*, **118**, 3687-3708, 2012, doi:10.1002/jgrd.50227.
  - 4) Schutgens, N. A. J., M. Nakata, and T. Nakajima, 2013: Validation and empirical correction of MODIS AOT and AE over ocean. *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 2455-2475, doi:10.5194/amt-6-2455-2013, 2013. Dai, T., D. Goto, N.A.J. Schutgens, X. Dong, G. Shi, and T. Nakajima, 2014: Simulated aerosol key optical properties over global scale using an aerosol transport model coupled with a new type of dynamic core. *Atmos. Environ.*, **82**, 71-82.
  - 5) Dai, T., D. Goto, N.A.J. Schutgens, X. Dong, G. Shi, and T. Nakajima, 2014: Simulated aerosol key optical properties over global scale using an aerosol transport model coupled with a new type of dynamic core. Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C. F. S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara, and T. Nakajima, 2014: Application of a global onhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan, *Geoscientific Model Devevelopment Discussission*, **7**, 131-179, doi:10.5194/gmdd-7-131-2014.
  - 6) Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C. F. S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara, and T. Nakajima, 2014: Application of a global on hydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan, *Geoscientific Model Devevelopment Discussission*, **7**, 131-179, doi:10.5194/gmdd-7-131-2014.

#### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 中島映至、2013: 広域大気汚染の問題と大気清浄化に向けた努力. 岩波科学、83, 433-438.

#### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) Nakajima, T., 2013: Major scientific developments related to ABC-Asia., IGES Workshop, Hayama, Japan, 19 Feb. 2013.
- 2) Nakajima, T., 2013: Satellite remote sensing of aerosols –Past, present and future–, International Workshop on “Inventory, Modeling and Climate Impacts of Greenhouse Gas emissions (GHG’s) and Aerosols in the Asian Region”, 26-28 June 2013, Tsukuba.
- 3) Tsuruta, H., Nakajima, T., 2013: Biomass burning in Southeast Asia from field studies to satellite data analysis, International Workshop on “Inventory, Modeling and Climate Impacts of Greenhouse Gas emissions (GHG’s) and Aerosols in the Asian Region”, 26-28 June 2013, Tsukuba.
- 4) Tsuruta, H., B. Thana, T. Takamura, D. Goto, T. Takemura, M. Yabuki, E. Oikawa, T. Inoue, and T. Nakajima (2013): Optical and chemical properties of atmospheric aerosols in Phimai, Thailand by surface measurements, satellite data analysis, and the SPRINTARS model, ABC-SLCP Symposium, Seoul, 8-10 September, 2013.
- 5) Nakajima, T., 2013: Prospects of using the UNEP/ABC-Asia project heritage for SLCP impact studies. ABC-SLCP Symposium, 9-11 Sept. 2013, Seoul.
- 6) Nakajima, T., D. Goto, S. Misawa, E. Oikawa, M. Hashimoto, J. Uchida, T. Dai, and

N. Schutgens, M. Ohara, T. Masui, A. Takami, and T. Takemura: A strategy for studying the air pollution effects on climate and public health in Asia. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 9-13 Dec. 2013.

- 7) Tsuruta, H., B. Thana, T. Takamura, M. Hashimoto, M. Yabuki, E. Oikawa, and T. Nakajima (2013): Chemical and optical properties of atmospheric aerosols in Phimai, Thailand by intensive surface measurements and satellite data analysis, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, 9-13 December 2013.
- 8) Nakajima, T., 2014: Climate impacts of atmospheric aerosols and clouds. Invited lecture, European Research Course on Atmospheres (ERCA2014), organized by Université Joseph Fourier of Grenoble and CNRS, Grenoble (France), Jan. 27, 2014.
- 9) Nakajima, T., 2014: What we learn from the Fukushima nuclear power plant accident? Invited lecture, European Research Course on Atmospheres (ERCA2014), organized by Université Joseph Fourier of Grenoble and CNRS, Grenoble (France), Jan. 28, 2014.

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

ABC-SLCP Symposium, Seoul National University, Korea, 8th-10th September 2013; 参加者50名

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 中島映至、鶴田治雄（2014）：マイナビスチューデント記事「中国の大気汚染は深刻さを増しています！近い将来、早死にする人が倍に!？」  
[http://student.mynavi.jp/freshers/column/2014/01/post\\_550.html](http://student.mynavi.jp/freshers/column/2014/01/post_550.html) 2014年1月5日
- 2) 中島映至、鶴田治雄、上田佳代（2014）：花王マイカジスタイル（ウェブマガジン取材協力）「なぜこわい？PM2.5が私たちの身体に与える影響」<http://mykaji.kao.com/8175/> 2014年2月10日
- 3) 中島映至、鶴田治雄、上田佳代（2014）：花王マイカジスタイル「目に見えないから不安・・・PM2.5、どのように対策すべき？」<http://mykaji.kao.com/8178/> 2014年2月19日、
- 4) 中島映至、鶴田治雄、上田佳代（2014）：花王マイカジスタイル「現在の大气中のPM2.5濃度を知るなら「そらまめ君」」<http://mykaji.kao.com/8183/> 2014年2月20日
- 5) 中島映至、鶴田治雄、上田佳代（2014）：花王マイカジスタイル「洗濯物を干してもOK？PM2.5の影響と家事対策」<http://mykaji.kao.com/8190/> 2014年2月21日

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) UNEP, 2010: The Emission Gap Report, ISBN: 978- 92-807-3134-7.
- 2) UNEP, 2011: Summary for decision makers on the integrated assessment of black carbon and



- tropospheric Ozone. Twenty-sixth session of the Governing Council/Global Ministerial Environment Forum, Nairobi, 21-24 Feb. 2011, UNEP/GC.26/INF/20.
- 3) Mukai, M., and T. Nakajima, 2009: Potentiality of aerosols in changing the precipitation field in Asia. *SOLA*, 5, 97-100, doi:10.2151/sola.2009-025.
  - 4) Mukai, M., T. Nakajima, and T. Takemura, 2008: A study of anthropogenic impacts of the radiation budget and the cloud field in East Asia based on model simulations with GCM. *J. Geophys. Res.*, 113, D12211, doi:10.1029/2007/JD009325, 2008.
  - 5) Zhang, H., Y. Qing, T. Nakajima, M.M. Nakata, L. Peng and HE. Jihnai, 2013: Influence of changes in solar radiation on changes of surface temperature in China. *Acta Meteorol. Sinica*, 27, 87-97, doi: 10.1007/s13351-013-0109-8.
  - 6) Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, S. Iga, (2008) : Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *Journal of Computational Physics*, the special issue on Predicting Weather, Climate and Extreme events, 227, 3486-3514, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006.
  - 7) Tomita, H. and Satoh, M. (2004) : A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, 34, 357-400.
  - 8) Tomita, H. (2008) : A stretched grid on a sphere by new grid transformation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 107-119.
  - 9) SALSA, 2014: 大気環境物質のためのシームレス同化システム構築とその応用, 文部科学省地球観測技術等調査研究委託事業 平成25年度報告書, 2014年3月.
  - 10) 須藤, 2013 : S-7戦略課題 須藤健悟氏報告

Assessment of Environmental Effects Caused by Various Mitigation Plans of Greenhouse Gases (GHGs) and Short-lived Climate Pollutants (SLCPs)

Principal Investigator: Teruyuki NAKAJIMA

Institution: The University of Tokyo

5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8568, Japan

Tel / Fax: +81-(0)4-7136-4401

E-mail: teruyuki\_nakajima@aori.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by: National Institute for Environmental Studies

[Abstract]

Keywords: Evaluation of the environmental quality and prediction, Environmental change, Reduction of global warming gases, International contribution

(1) Information of regional air quality data, chemical transport models (CTM), and emission inventories of Short-Lived Climate Pollutants (SLCP) were evaluated. In Japan, car exhaust regulations have been put for long time and data for emission factors, car numbers, air quality etc have been well documented. The week-end effect for ozone variability is an example of human activities to change the air quality. Beijing Olympic in China and Surya project in India are other examples to study the effect of regulations and human activities on air quality. A CTM simulated observed seasonal variations of chemical composition data, i.e., high sulfate in spring in the western Japan due to trans-boundary air pollution and no clear trend in summer. Therefore, we conclude that it is feasible to study the effect of emission variability on air quality using CTMs. In this regard, an improvement of the emission inventory REASv2 is necessary by use of an inversion method to reflect the satellite-observed reduction of air pollution in Beijing area during the Olympic game.

(2) In order to assess countermeasures to reduce future SLCP and LLGHG (Long Lived GreenHouse Gases), models are required 1) to draw the various future socio-economic activities in an appropriate manner, and assess the different development pathways; 2) to resolve a detailed spatial distribution of emission sources to assess SLCP impacts; 3) to provide future emission scenarios of LLGHG and SLCP to climate and environment models; 4) to have a function to assess future climate and environmental changes. As a result, a framework of the integrated assessment model to assess LLGHG and SLCP emissions is proposed to consist of three different scales; global scale, national scale, and local and house scale. Moreover, we collected the information of events which

affected the LLGHG and SLCP emissions in the past.

(3) Optimal models were identified for climate modeling and air quality modeling to evaluate the global impacts of SLCP and LLGHG. We surveyed necessary conditions and model parameters for carrying out various simulations of the impact studies to seek the optimum mitigation scenario among various paths. Models thus identified were tested for simulation of changes in the climate and environment along a mitigation path. It is found that complicated regional climate changes will be caused through changes in the regional radiative forcing of SLCP and LLGHG. A set of relevant metrics were also studied for evaluating the water cycle, agriculture, and public health.