

課題名	S-7 東アジアにおける広域大気汚染の解明と温暖化対策との共便益を考慮した大気環境管理の推進に関する総合的研究
課題代表者名	秋元 肇（一般財団法人 日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター所長）
研究実施期間	平成21～25年度
累計予算額	768,139千円（うち25年度140,746千円） 予算額は、間接経費を含む。
本研究のキーワード	越境大気汚染、アジア大気汚染、PM _{2.5} 、オゾン、ブラックカーボン、短寿命気候汚染物質（SLCP）、排出インベントリ、コベネフィットアプローチ、地域協力枠組み、大気・気候アジア科学パネル(ASPAC)

研究体制

- (1) 数値モデルと観測を総合した東アジア・半球規模のオゾン・エアロゾル汚染に関する研究
（独）海洋研究開発機構）
- (2) 東アジアにおける排出インベントリの高精度化と大気汚染物質削減シナリオの策定
（独）国立環境研究所）
- (3) 東アジアの大気汚染対策促進に向けた国際枠組とコベネフィットアプローチに関する研究
（金沢大学）

研究協力機関（国外機関のみ記述）

中国科学院大気物理研究所(IAP)、韓国国立環境科学院(NIER)、国際応用システム分析研究所(IIASA)

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

2000年代末における東アジア（北東アジアおよび東南アジア）におけるNO_xを初めとする大気汚染物質、および二酸化炭素の排出量は、欧州および北米を凌駕してそれぞれ全世界の30%を越え、この地域は世界的に見て大陸規模で最も排出量の多い地域となっている。このことが昨今の中国における激甚な大気汚染や我が国に対する越境大気汚染の増大をもたらしている根本原因であると同時に、半球大気汚染、気候変動の観点から、東アジアからの大気汚染物質および温室効果物質の排出削減に欧米を含めた全世界からの注目が集まっている由縁である。本研究は、我が国でこれまでオキシダント注意報が発令されたことがなかったいくつかの県で2008-2009年頃に初めて注意報が発令され、その原因の一つとして大陸からのO₃の越境輸送が指摘されたことを受け、そのソースレセプター関係を科学的に定量化するとともに、越境大気汚染問題の解決のための東アジアにおける大気環境管理に関する地域協力の在り方を提言することを目標として発足した。

本研究が2009年度（平成21年度）に発足した直後には、EUを中心に大気汚染物質と温室効果物質の同時削減を図る政策が打ち出され、短寿命気候汚染物質（SLCPs）への関心が国際的に高まりを見せたことを受けて、本研究には2010年度（平成22年度）からSLCPコベネフィットアプローチへの考え方を確立するためのサブテーマがテーマ3の中に追加された。この流れは2010年のUNEP報告書を経て、2011年における米国からのCCAC（Climate and Clean Air Coalition）提案をもって本格化した。我が国も2012年にCCACへ正式に参加し、本研究では見出された研究成果をもって、この新しい問題に関する知見を環境省にインプットしてきた。一方、この間2013年1-2月に中国北京でのPM_{2.5}による激甚大気汚染を機に、我が国でもその越境大気汚染に対する恐れと共にPM_{2.5}に対する関心が一気に高まった。このため本研究も研究の後半においては、我が国のPM_{2.5}汚染の実態解明と、中国からの越境輸送の定量化に関する観測とモデル研究に主眼が置かれた。

本研究は、我が国における大気汚染問題に関して、初めて自然科学者と社会・政策科学者が一体となったプロジェクトであり、昨今関心が高まっている科学と政策（science and policy）へ向けての一つの試金石でもあった。こうした研究の中から、東アジアでは科学と政策のインターフェースが構築されていないことが明確化され、具体的な提言として大気と気候に関するアジア科学パネル（ASPAC）の設立が提案され、現在UNEPを通じてその具体化へ向けた努力がなされている。

本研究は、大気環境管理に係わるこのような現実の国際的な動きと、同時進行的に遂行されたのが大きな特徴であり、2014年には日中韓環境大臣会合の下での政策対話が動き出し、今後こうした場における本研究の成果の活用が期待される。

2. 研究開発目的

本研究ではまず数値モデルと観測を統合し、アジア地域での観測を通じてモデルを精緻化すること、化学輸送モデルにより O_3 ・ $PM_{2.5}$ の東アジア域における越境汚染量、半球規模での大陸間輸送量、わが国における生成量を明らかにし、東アジア域からの寄与を定量化すること、我が国への越境汚染に直接関与する発生源地域を特定し、それらの地域における排出削減の我が国への感度を評価すること、削減により効率的な大気質改善をもたらす排出部門を把握すること、大気汚染物質削減の気候影響感度評価を行うことを目的とした。

ついで上記のモデル研究に利用されるアジア域における大気汚染物質の排出インベントリREASについて、衛星・地上観測データによる逆モデル計算と検証(トップダウン・アプローチ)、及び排出実態データに基づく排出量推計の改良(ボトムアップ・アプローチ)を行い、その高精度化を図り、REAS v.2を完成することを目的とした。また、中国における大気汚染物質の排出削減対策技術の地域ごとの導入水準とその削減効果を同定するための技術導入モデルを開発するとともに、統合評価モデルであるAIMを使用し、温暖化対策シナリオやアジアの低炭素社会シナリオをベースに、大気汚染物質削減シナリオを策定することを目的とする。

さらに東アジアにおける大気環境管理の枠組みの在り方を検討するため、アジア域および他地域における既存の環境協力イニシアチブの分析、主要関係国における交渉推進の制約要因、これまでの環境政策者、研究者等主要ステークホルダーのかかわり等の観点から分析を行い、合意形成プロセスの設計に向けた課題を明らかにする。それらの成果を踏まえ、東アジア地域に適した環境協力の枠組み案を提案するとともに、アジアにおける科学と政策のインターフェースを構築するための具体的な提言を行うことを目的とする。また、東アジアにおける大気汚染がどの程度深刻なものであるかを政策決定者に伝えるため、オゾン、 $PM_{2.5}$ によるヒトの健康影響、農作物影響およびその経済コスト等についてリスク分析を行い、科学的知見の政策決定への反映方法を検討する。さらに、気候変動と越境大気汚染、局地的大気汚染対策とのコベネフィットに焦点を当て、その経済的側面を分析すると共に、特に新たな課題として注目されるようになった短期寿命気候汚染物質(SLCP)と長寿命温室効果物質の大気質および気候変動への影響に関する科学的知見を確立し、国際的SLCP対策の確立に貢献する。

3. 研究開発の方法

それぞれのテーマ毎の研究開発の方法は以下に記すが、本研究ではプロジェクト全体の研究結果を政策決定者および一般に分かり易く発信するため、中間評価のコメントなどを参考にプロジェクトとしていくつかの重点課題をテーマ横断的に設定し、その取りまとめに力を注いだ。「結果および考察」と「政策決定者向けサマリー」は以下の6重点課題に沿ってまとめられており、括弧内に最も関連の強いテーマ番号を示した。

重点課題1：観測からみた越境大気汚染の実態(テーマ1)

重点課題2：越境大気汚染/国内汚染の寄与率の定量化と削減効果のアセスメント(テーマ1, 2)

重点課題3：アジアにおける大気汚染物質の排出インベントリの作成・活用(テーマ2, 1)

重点課題4：東アジア大気汚染の健康影響・植物影響の評価(テーマ3, 2, 1)

重点課題5：東アジアにおける越境大気汚染対策の改善に向けた取り組み(テーマ3, 2, 1)

重点課題6：大気汚染対策の気候変動対策との関わりと東アジアにおけるSLCPコベネフィットアプローチ(テーマ3, 1)

テーマ毎の研究開発の方法は以下の通りである。

(1)数値モデルと観測を総合した東アジア・半球規模のオゾン・エアロゾル汚染に関する研究

モデル研究では、全球規模およびアジア領域規模の化学輸送モデル(それぞれCHASERおよびWRF/CMAQ)を用い、タグ付きトレーサー法やエミッション感度法に基づき、 O_3 や $PM_{2.5}$ に関するソースレセプター解析と削減感受性を評価した。排出インベントリは随時最新のもの(テーマ2によるREAS v.2など)を用い、福江島での O_3 ・ $PM_{2.5}$ 観測結果などを用いて評価し、モデルの信頼性を高めるとともに、観測に見られる年々変動などの特徴を理解するための気象解析等を行った。全球化学・エアロゾル気候モデルCHASER-SPRINTARSについては有機エアロゾルの二次生成に関わる化学反応の種類拡大などの改良を行うとともに、各種排出シナリオが大気汚染物質濃度や気候(放射強制力および気温)にどのような影響を与えるかについて解析し、テーマ3のSLCPコベネフィットアプローチに対するデータ提供も行った。

観測研究では、日本西方を代表する福江島大気環境観測施設での通年観測(2009年2月-2014年3月)と集中観測(2009年5-6月)、中国江蘇省如東(2010年5-6月)、及び韓国済州島(2012年10-11月)での集中観測を実施し、東アジア広域大気汚染の実態を明らかにするとともに、領域モデルの比較検証解析を行った。さらに、東アジアライダー網およびNASAのCALIPSO衛星搭載ライダー観測による、アジア域のエアロゾル変動の解析や、エアロゾル・ガスについての複数種の衛星データを用いた時空間分布の解析

を行い、モデルを検証した。

(2) 東アジアにおける排出インベントリの高精度化と大気汚染物質削減シナリオの策定

エネルギー消費量などの活動量と、対応する排出係数を使用するボトムアップ法に基づき、高い空間・時間解像度と精度を持つアジア域排出インベントリREAS (Regional Emission inventory in ASia) version 2 (REAS v.2)を開発した。NO₂カラム濃度月平均値のシミュレーション及び衛星観測結果を基に、簡易型NO_x排出量逆推計モデルを開発し、そのモデルを用いて、REAS v.2の中国、韓国、日本におけるNO_x排出量トレンドの検証を行った。

大気汚染対策技術を導入することによる排出抑制効果と、そのために必要な費用を算定するための技術導入モデルを開発した。また、これまでに開発した世界を対象とした統合評価モデルであるAIM/CGE[Global]について、排出インベントリを更新するとともに、大気汚染対策を評価することができるようなモジュールの改良を行い、環境研究総合推進費S-6において示された低炭素社会シナリオにおける大気汚染物質の排出経路や社会経済活動の推移について定量的に評価した。得られたなりゆき社会(BAU)、低炭素社会、低炭素+大気汚染対策社会の3シナリオの活動量と、REAS v.2をベースに設定した現状対策と対策強化の2シナリオを組み合わせ、6種類のシナリオにおける2030年の将来排出量を推計した。

(3) 東アジアの大気汚染対策促進に向けた国際枠組とコベネフィットアプローチに関する研究

東アジアにおける多国間環境協力の展開、越境大気汚染に関する既存の地域協力枠組みについて文献調査等を中心に考察し、環境ガバナンスの現状やその背景にある地政学的な特性を明らかにした。一方、国際政治学分野における既存文献調査を行い、LRTAP条約、同議定書への合意に至る様々な影響要因を分析し、政策決定分析フレームワークを構築した。このフレームワークをアジアにおける既存の国際協力枠組みに適用し分析を行った。環境協力を推進していくためには、科学者や政策決定者間の一致した知識や共通の利益の構築が不可欠であり、「科学と政策のインターフェース」の構築が重要であることを指摘し、特に大気と気候に関するアジア科学パネル(ASPAC)の提案を行った。

これまで発表されてきた疫学的先行研究の知見及び手法により、PM_{2.5}とO₃のヒトの健康への影響と農作物への影響に関するリスク評価を行った。東アジアにおけるPM_{2.5}とO₃の空間的、時間的変化については、CMAQ/REASモデルの結果を我が国のオゾンに関してはモニタリングの実測値も使用した。

グローバルな気候変動と地域的な大気汚染を同時に分析できる長期的、一般均衡、動学、多地域、多部門のフレームワークを持つマクロ経済モデルであるAsia MERGE (Model for Evaluating the Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies) モデルを構築し、複数の政策シナリオのもとでの最適政策分析を行った。また、アジアにおけるSLCP削減の考え方を提言することを目的とし、NO_x/VOC、CH₄、BC削減の大気質および放射強制力への効果を評価した。また、気候変動対策シナリオと大気汚染対策シナリオを合わせたSLCP削減シナリオを評価するため、国際応用システム分析研究所(IIASA)との共同研究を行い、GAINS-modelの基準シナリオ、気候安定化シナリオ、大気汚染対策強化シナリオをもとに、全球放射強制力に対する影響と東アジアにおける大気質に対する影響を評価した。

4. 結果及び考察

(1) 観測からみた越境大気汚染の実態 (テーマ1)

長崎県福江島における観測から、環境基準告示(2009年9月)直後の1年間、PM_{2.5}が日平均値で35µg/m³を超える「高濃度日」が26日に上り(図1)、近くに汚染源のない離島でさえ、短期環境基準が満たされない問題を見出し、気流場の解析やBCの共存から越境大気汚染の影響が強いと結論づけた。その後福江島における観測は5年間にわたり継続したが、短期環境基準を超える高濃度日数は年間18~31日の間で高止まりの状況に変わりがないことが分かった。O₃についても、濃度が1時間値の環境基準である60ppbを上回る日数が過去5年度で32-47日あり、PM_{2.5}と合わせて顕著な越境大気汚染問題として認識すべきことが観測から示された。

福江島に加え、中国江蘇省如東、韓国済州島にて実施した集中観測から、PM_{2.5}の組成としては、硫酸・アンモニウムイオン・有機物が卓越する共通の傾向が見出された(図2は福江の例)。PM_{2.5}組成はモデルシミュレーションとも整合的であり、越境寄与解析などの適切さを担保したが、有機エアロゾルに関しては著しく過小評価しており、成因を把握するための研究を振興すること

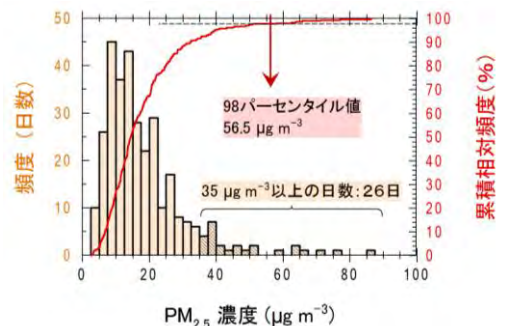


図1. 福江島における2009年9月9日から1年間の日平均PM_{2.5}質量濃度のヒストグラムと累積相対頻度(%)。

が、有機エアロゾルに関しては著しく過小評価しており、成因を把握するための研究を振興すること

が必要である。

如東での観測結果と2006年泰山での集中観測結果とから、中国中東部ではBC粒子の大気中寿命が4.1-5.7日と見積もられ、従来の知見(4.7-10日)より短いことを見出し、他の水溶性成分との内部混合によって除去が促進されている可能性が示唆された。さらに、 $\Delta BC/\Delta CO$ 比の計測から、冬小麦の収穫後の農業残渣野外燃焼からのBC発生量は従来想定約2倍に達する可能性が指摘された。

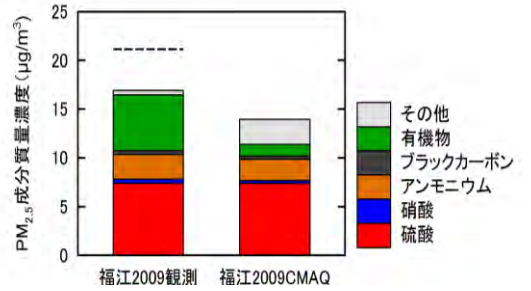


図2. 2009年春季、福江島での平均的なPM_{2.5}化学組成。左が観測、右がモデル結果。観測の点線はPM_{2.5}連続観測値。

(2)越境大気汚染/国内汚染の寄与率の定量化と削減効果のアセスメント(テーマ1, 2)

2010年通年モデルシミュレーションによるソースレセプター解析により、日本の地域別にPM_{2.5}の起源地域を算出した(表1)。大陸に近い西日本地域では、中国からの寄与が50%以上で、越境大気汚染の影響が大きい。一方関東では、国内寄与が中国寄与を上回る。日本のPM_{2.5}汚染改善のために必要な排出削減感度を求めたところ、中国・韓国で仮に人為起源物質の排出量を20%削減させると、福江島でのPM_{2.5}濃度は20%近く減少し、35µg/m³超過日数が大幅に減少し得ることが示された。

表1. 日本各地域におけるPM_{2.5}質量濃度に対する発生源地域別の寄与(%). 2010年通年での値。

評価地域 発生源地域	九州	中国	四国	近畿	北陸	関東
中国 (4地域合計)	61%	59%	59%	51%	55%	39%
朝鮮半島	10%	11%	8%	6%	5%	0%
日本	21%	25%	23%	36%	33%	51%

O₃については、日本における中国からの越境の寄与率は影響の大きい春季において、平均で12%と算出された。PM_{2.5}に比較してO₃に対する中国の寄与率が低い原因は、O₃の方が大気中寿命が長く、より遠方(欧米、成層圏など)からの影響も受けるため、またSO₂などPM_{2.5}前駆気体の発生量が中国で顕著に多いためと考えられる。国内O₃の1980-2005年の長期上昇トレンド(2.4ppbv/10年)のうち、36%は中国上空での生成量増加によるものと推定され、越境大気汚染の重要性が示された。北九州市や他都市(名古屋、大阪、新潟、さいたま)において、日中8時間値75ppb以下(米国環境基準)の達成には、日中韓で30%の削減が必要との結果が得られた。PM_{2.5}とO₃を比較すると、PM_{2.5}の方が越境汚染の寄与が大きい、中国発生源に対する対策による削減感度もPM_{2.5}の方が大きく、O₃の低減の方がより大きな削減幅が必要となることが分かった。

続いて、日本のPM_{2.5}およびO₃高濃度(それぞれ日最高8時間平均値75ppb超、日平均濃度35µg/m³超)日数の改善のために必要な部門別(輸送、産業、発電、家庭)排出量の削減感度を2005年のREAS排出量を元に見積もった。その結果、日本のO₃高濃度の改善には日本における輸送・産業部門、中国北部における産業・発電部門からのNO_x/VOCの排出量の削減が、PM_{2.5}高濃度日数の改善には、中国からの産業・発電部門からの人為汚染物質排出量の削減の効果が大きいことが示された。

本研究におけるオゾンの越境輸送に関するモデル研究の大きな成果の一つは、日中韓にとらわれがちな越境輸送問題を大陸間輸送や成層圏オゾンの寄与を含めて、より広域の視点からソースレセプター関係を見ることの重要性を指摘したことである。その一例として東アジア広域で見たO₃のソースレセプター関係を図3に示す。図に見られるように例えば中国をレセプターとしてみた場合、東南アジアやシベリアから流入する寄与も無視できず、特に東南アジアと中国との間の授受関係は大きいことが分かった。このことは北東アジアに東南アジアを加えた「東アジア」地域として、相互影響の多い、いわば利害関係地域を括りだすことができることを意味しており、科学的な合理性を以って国際協力を進める地域範囲を設定するのに重要な知見である。このことは本研究でのASPAC提案(テーマ3、重点課題5)に至る背景思想となった。

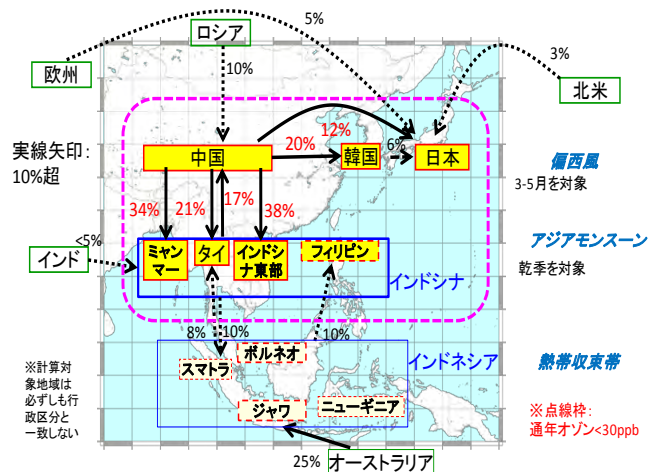


図3. 東アジア広域でみるO₃のソースレセプター関係。

(3) アジアにおける大気汚染物質の排出インベントリの作成・活用（テーマ2, 1）

図4は、本研究で作成されたアジア域エミッションインベントリREAS v. 2 における、2000-2008年にアジアで排出された人為起源大気汚染物質排出量の経年変化を示す。この期間に NO_x はアジア全域で約50%増加し、特に中国では、エネルギー消費量の増加に伴いほぼ倍増したが、近年その増加率がやや小さくなっている。アジア全域の2008年の排出量(2000-2008年の増加率)は、 SO_2 56.9 Tg (+34%)、 NO_x 53.9 Tg (+54%)、CO 359.5 Tg (+34%)、NMVOC 68.5 Tg (+46%)、 NH_3 32.8 Tg (+17%)、 PM_{10} 36.4 Tg (+45%)、 $\text{PM}_{2.5}$ 24.7 Tg (+42%)、BC 3.03 Tg (+35%)、OC 7.72 Tg (+21%)、 CH_4 182.2 Tg (+32%)、 N_2O 5.80 Tg (+18%)、 CO_2 16.0 Pg (+57%)と推計され、全ての物質について2000-2008年で排出量が増加している。東アジア地域における最大の排出国は中国であり、総排出量のトレンドはほぼ中国によって決まっている。中国の SO_2 排出量トレンドは、2000年から2006年まで排出量が増加した後、減少に転じた事が特徴的であるが、これは、中国の石炭火力発電所への脱硫装置の導入が大幅に進んだためである。中国の NO_x 排出量は2002年から急激に増加し、その後も増加傾向は継続されたが、2005年以降の増加率はやや抑えられていた。これは、大規模発電所への低 NO_x バーナーの導入や自動車排ガス規制の効果による。中国の排出量増加率が2000年代後半にやや減少している傾向は他の物質でも見られたが、 SO_2 の様な顕著な減少は認められていない。東南アジア域の排出量は中国に比べれば小さいが、近年、増加傾向にある。東南アジア諸国の中では、全物質についてインドネシアが最大の排出国となっている。日本などの先進国では、経済成長が比較的小さい上、発生源対策が実施されてきた事により、2008年における排出量は2000年から減少した。

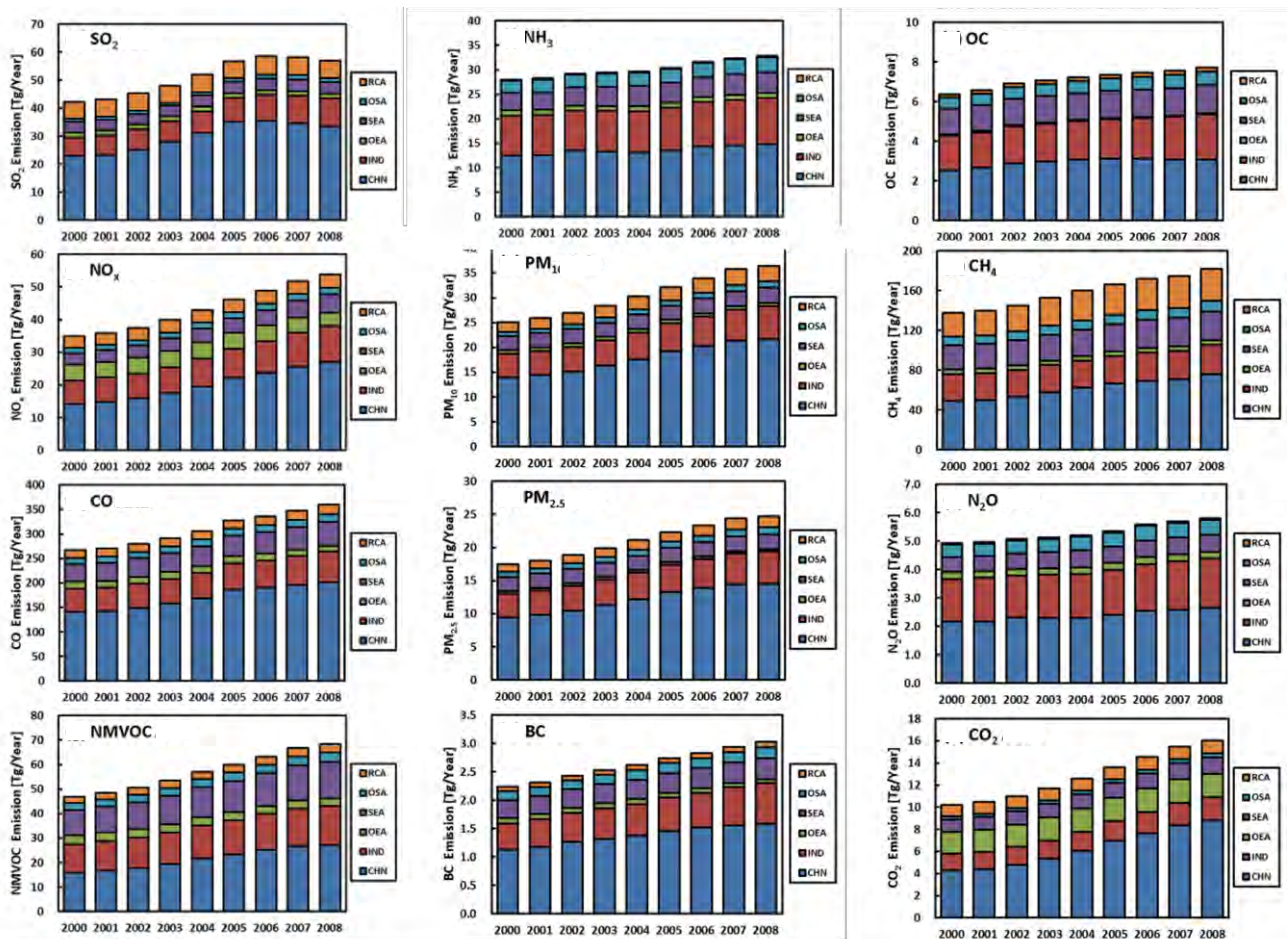


図4. アジアにおける大気汚染物質排出量の経年変化。(CHN: 中国、IND: インド、OEA: その他の東アジア、SEA: 東南アジア、OSA=その他の南アジア、RCA=中央アジア及びアジア域ロシア)。

2030年の排出量推計値の特徴は、EF2005シナリオ(現状対策ケース)の場合、2030年の排出量は2005年を大きく凌駕する事である。従って、大気汚染物質の排出量を低減するには、排出係数の低い燃料や設備の導入、大気汚染物質の後処理の普及、厳しい排ガス規制に適合した自動車の導入率を高める事が必須である。EF_Aシナリオ(対策強化ケース)の場合、粒子状物質で効果が大きく、例えばBCの2030年の排出量は2005年の30%まで減少する。一方、 NO_x は2005年とほぼ同じレベルまでしか排出量を抑える事ができず、 NO_x の場合、特に自動車起源の排出量に、より強い対策が必要であることが分かった。

(4) 東アジア大気汚染の健康影響・植物影響の評価(テーマ3, 2, 1)

REAS v.1と以前のバージョンの領域化学輸送モデル(CMAQ/REAS)を用いて計算された、2000年、2005年及び2020年の汚染物質排出の3つの将来シナリオ(PSC:対策強化型シナリオ、REF:持続可能性追求型シナリオ、PFC:現状推移型シナリオ)による人の健康影響について、東アジアのPM_{2.5}とオゾン暴露によるヒトの死亡数の増加を、疫学的先行研究の知見と手法により推定した(図5)。また、オゾン暴露による東アジアの主要作物の減収量の推定と損失額の推定も行った。2005年におけるPM_{2.5}とO₃による影響を合わせた早期死亡数は中国で40-50万人、韓国、日本で約1万人と見積もられた。一方、東南アジアではベトナム、タイなどで大気汚染による早期死亡数が多いが、1千人前後の推計となっている。

さらに、東アジア各国の早期死亡数の確率的生命価値(VSL)を使って、大気汚染物質排出削減費用と比較した結果、PM_{2.5}とオゾンによる健康影響について、検討したケースではいずれも便益が費用を上回り、大気汚染物質排出削減対策を実施することの合理性が示唆された。

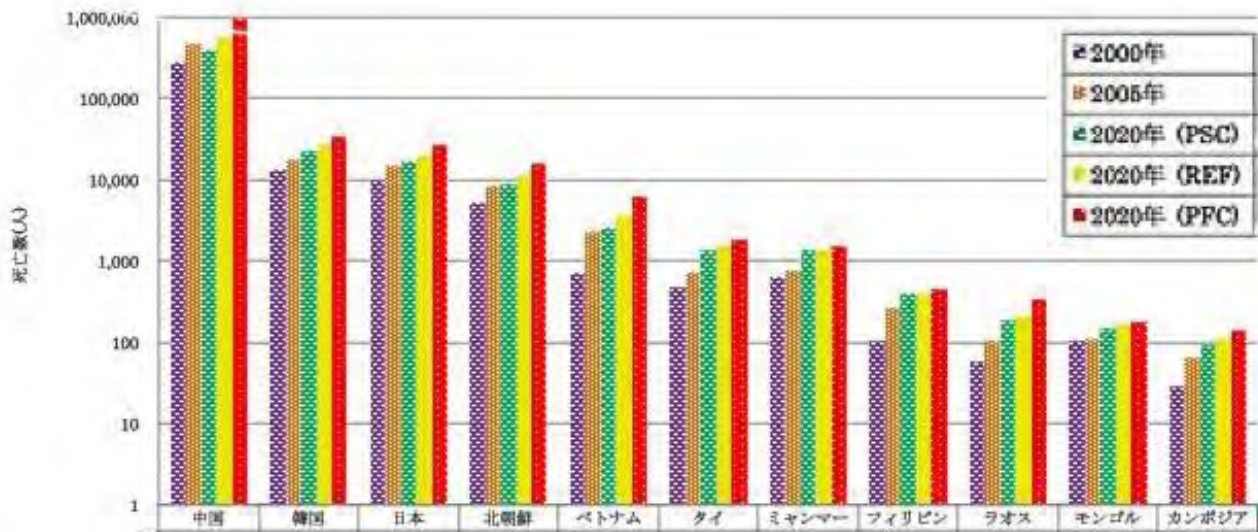


図5. 2000, 2005, 2020年(PSC, REF, PFCシナリオ)のPM_{2.5}とオゾンの曝露による死亡数。

ヒトの健康に対する大気汚染リスクの経済的価値への換算は、これまで我が国では特に公害の時代にヒトの命を金に換算することへの抵抗感が強かったため、我が国ではこの面の研究は遅れている。しかし、科学と政策を繋ぐ一つの大きなキーは科学的リスクと対策費用との経済的バランスを説得力を持って語ることであり、そのような橋渡しをするのがリスクコミュニケーターとよばれるタイプの研究者であり、今後我が国でもこうした研究を振興する必要があるものと思われる。本研究は予備的な段階の研究ではあるが、その推定はWHOなどの国際機関の推定値と大きくは異なっていない。

(5) 東アジアにおける越境大気汚染対策の改善に向けた取り組み(テーマ3, 2, 1)

東アジアにおける越境大気汚染問題の実情を考えた場合、各国が一丸となって地域全体としての大気汚染物質の排出削減を目指すような新たな原則に基づく地域協力の枠組みが必要であることを指摘した。アジアの多くの国では、国内大気汚染対策と越境大気汚染対策とが未分化であること、排出国における大気汚染対策の推進が他国への越境大気汚染対策としても大きな効果があることを踏まえ、従来欧米を中心として確立されていた「排出者責任」の考え方から、グローバルコモン的な考え方も加味した「対策費用に関する応能負担」の考え方への転換の必要性を指摘した。たとえばテーマ1からは中国における大気汚染物質排出量の削減が、日本のへの越境輸送にみられる以上の大気質改善効果を中国自身にもたらすこと、北東アジアに東南アジアを加えた「東アジア」地域が越境輸送を通じて相互影響の多い、利害関係地域を形成していることなどの知見が得られ、アジアにおける越境大気汚染を含む地域協力の枠組みの在り方への科学的合理性を持った根拠が提供された。

また科学と政治のインターフェースのあり方に関する分析がなされた。国際政治学の観点から分析した結果、科学的な知識が政策決定過程に影響を及ぼすためには、提供される知識が科学的であるのみならず、政策決定者にとって使用可能なものであり、信頼性、正当性および適切な発信という要件を満たす必要があることを明らかにした。また、インターフェースの有効性を高める上で、制度設計

のあり方が重要な役割を果たし、委員会の形態などの組織構造、科学者や科学機関の選定手続き、財源、参加者の属性、成果報告などの観点から検討することが重要であると指摘した。その際、科学コミュニティと政策コミュニティによる知識の共同生産を可能にするような社会プロセスの構築が不可欠であると指摘した。科学的知見の観点からは、「アジアの声」とともに正当性の確保という点でRegional・Global双方のレベルでの関与が求められる一方、科学と政策の相互作用の観点からは、政策履行（Implementation）という点でRegionalな取り組みが不可欠であると考えられる。

以上の考察からアジアの科学者が大気汚染問題に関する認識を共有できるような知的共同体（epistemic community）の必要性を指摘し、その具体化の方策として、大気と気候に関するアジア科学パネル（Asia Science Panel for Air and Climate: ASPAC）を提案した。ASPACの目的として、アジアの科学者間で、また科学者と政策決定者間での共通の理解の醸成、欧米の科学者に対する大気汚染と気候変動問題に関するアジアの科学者の見解の発信、統合的アプローチに対する国際的なイニシアチブへの発展などを提案した。ASPACに関する合意形成のステップとして、「アジアのハイレベル科学者アドホック会合（Ad Hoc High-Level Scientists Meeting for Asian Air Pollution）」でアジアの科学者の知的共同体の必要性とASPACの具体的形態についてアジアの主要な科学者の間で合意することを提案した。2014年3月にはアドホック会合の準備会合を開催し、ASPAC及びアドホック会合に関するアジアの主要な科学者の意見を整理・分析した。政策決定者への具体的働きかけとして以下の方式を提案し、環境省の政策に反映された：(1)環境省からUNEPへの拠出金を活用して2014年度に第1回アドホック会合を開催する、(2)複数回のアドホック会合を経て、ASPAC設立をアジアの主要な科学者の合意として政策決定者に要請する勧告を採択する、(3)採択された勧告は、大気汚染に関する政府間のプラットフォームで議論し、政府間の合意形成を図る。

(6)大気汚染対策の気候変動対策との関わりと東アジアにおけるSLCPコベネフィットアプローチ (テーマ3, 1)

短寿命気候汚染物質（SLCPs、具体的にはブラックカーボン（BC）、対流圏オゾン（ O_3 ）、およびオゾン前駆体物質）の削減対策が、2030-50年の中期的気候変動対策にとって極めて重要であることがUNEPレポート（2011）やCCAC（Climate and Clean Air Coalition）で提案され施行されている。本研究では具体的なSLCP削減対策として、 O_3 低減のために欧米が CH_4 対策のみを考慮しているのに対し、東アジアでは NO_x/VOC 対策が重要であることを提言した。すなわち、欧米では大気汚染対策が既に一段落していることから、気候変動への関心が高いが、東アジアでは大気汚染対策への社会的インセンティブが高いためである。

具体的には、北東アジアで NO_x/VOC の人為排出量を半減した場合、 CH_4 を半減した場合、更にこの両者を共に半減した場合に地表付近の O_3 濃度がどのように変化するかを O_3 の8時間平均値が75ppbを超える日数について調べた。 CH_4 半減実験では、現状に比べて高濃度 O_3 の日数はほとんど変化しないかむしろ微増するのに対し、 NO_x/VOC 半減実験では、 O_3 高濃度の日数は顕著に減少することを明らかにした。更に、 NO_x/VOC と CH_4 を同時に半減した場合は、 O_3 の高濃度日は更に一層減少することを示した（図6）。

一方、これらオゾン前駆体物質の削減に伴う気候変動影響を評価するために、圏界面での放射強制力（RF）の変化を計算したところ、 NO_x/VOC の半減では O_3 の低減によるRFのかなりの低下がみられ、 CH_4 との同時削減によりその効果は更に大きくなることが分かった。一方、 NO_x の削減は NO_x からの硝酸エアロゾルの減少をもたらす、エアロゾル濃度の減少は温暖化を促進するので、これを加味するとほとんど気候変動抑止に寄与しない可能性がある。これに対し CH_4 半減の場合は主として自由対流圏の O_3 の低減によって O_3 によるRFは減少するが、その効果は NO_x/VOC 半減の場合より小さい。しかし CH_4 半減の場合は温室効果ガスとしての CH_4 自身の低減によるRFの低下が非常に大きく、気候変動抑止に大きく寄与することが分かった。

このように、地表オゾン濃度の低減には NO_x/VOC の削減が、RFの低下には CH_4 の削減が有効であること、

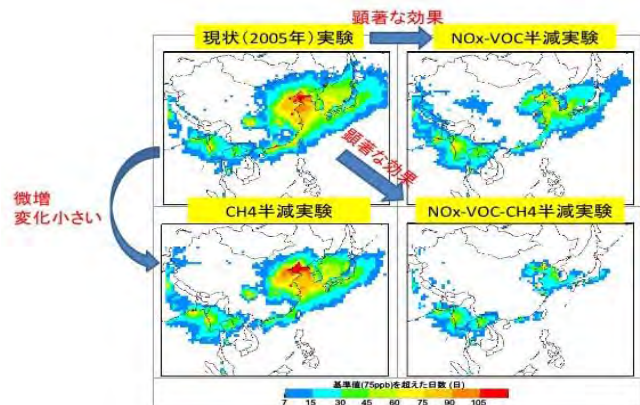


図6. 北東アジアの NO_x/VOC 、 CH_4 を半減した場合の地表付近 O_3 8時間平均値の75ppb超過日数の変化。

O₃濃度、RFのいずれに対してもNO_x/VOCとCH₄の同時削減が、それぞれ単独の削減より更に有効であることが分かった。これらの結果から本研究では、東アジアにおけるSLCPコベネフィットアプローチとしてはNO_x/VOCの削減とCH₄の削減を同時に行うべきことを提言した。また、NO_x/VOCの排出削減はPM_{2.5}濃度の低減にも有効である。一方、ブラックカーボンの排出削減は、PM_{2.5}の低減に対しても有効であることが示された。

IIASAの基準シナリオに従って2030年における全球放射強制力の変化と、北東アジアにおけるオゾン、PM_{2.5}の濃度の変化を、全球化学気候モデルおよび、領域化学輸送モデルを用いて評価を行った。産業革命以来の温暖化を2°C以内に抑えることを目指してCO₂等価温室効果ガス濃度を450ppmに抑える“450 ppm”シナリオでは東アジアにおける大気汚染の改善はほとんど期待できないことが分かったので、本研究では“450 ppm”シナリオから更にNO_x, VOCおよびBCを約30%削減する“450ppm-cntr”シナリオをIIASAのGAINSモデルに従って作成した。この場合の東アジアの大気汚染の改善を評価した結果、かなりの程度の地表オゾンとPM_{2.5}の改善がもたらされることが示された。現状の30%削減を目指す考え方は(テーマ1 重点課題2)で見出された越境O₃対策のための削減率と整合しており、一つの具体的目安となるものと思われる。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- ・ 本研究でソースレセプタ関係推定に用いられた汚染寄与率算定手法は、物質収支や起源推定のための普遍的な方法論と言えるもので、寄与率の値を明らかにしたことに加えて、手法確立の科学的価値が高い。現場・衛星観測と数値モデルを統合し、東アジアにおけるO₃・PM_{2.5}に関する広域大気汚染の実態や年々変動傾向を掴み、変動要因に関して排出量変動と気象場変動とを分離して解析することにより、越境輸送の定量化の信頼性を著しく高めることができた。
- ・ 本研究で開発された排出インベントリREAS v.2は、詳細発生源毎の排出量と主要発生源毎の排出量グリッドデータがインターネットを通じて一般に公開され、また、国際的なモデル間相互比較研究(MICS-Asia, TF HTAP)の排出インベントリに採用された。これらを通して、世界各国の大気質、気候変動に関する研究に活用され、大気環境科学の発展に大きく貢献した。また、REAS v.2は、衛星観測データを基にした排出量逆推計モデルに関する国際研究プロジェクトGlobEmissionでも活用され、ボトムアップ、トップダウン両アプローチから、排出インベントリ研究の国際的な推進・発展に貢献した。
- ・ 本研究において実施した中国、韓国、タイ、日本の政策分析は、政治学・政策科学分野の研究が未だ非常に限定されている東アジアにおいて重要な学術的意義を持つ。特に、アジア地域の越境大気汚染という文脈から、東アジアのガバナンスについて初めて行われた検討は社会科学的に意義が大きい。オゾン、エアロゾルのリスク評価はこれまで大気濃度に関してはモデルの計算結果を用いた研究が全てであったが、本研究で日本のオゾンについて初めてモニタリングデータを使用した影響評価がなされ、これまでのリスク評価の不確実性を定量的に明らかにした。また、東アジアにおけるSLCP対策の在り方について初めて科学的分析を行い、オゾン対策としてCH₄削減に加えてNO_x/VOC削減が優先されるべきであることを明らかにした。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- ・ 本研究による地域協力の枠組み提案は、大気環境管理の議論に関し世界条約の問題点を明らかにし、環境省の東アジア大気環境政策に対し、アジア等の地域協力の枠組みを検討することが適切との明確な方向性を与えた。
- ・ 本研究では、東アジアで科学的な知見を基礎にした地域大気環境政策を進めるため、東アジアにおける科学者の認識共同体を形成することが中・長期的に極めて重要であると指摘し、そのための具体的なステップとしてアジアの科学者によるハイレベル会合の開催を提唱した。これらの提案は、環境省の平成26年度予算に反映され、UNEP及びクリーン・エア・アジアとの国際協力の中に組み込まれた。
- ・ 環境省におけるCCAC(Climate and Clean Air Coalition to Reduce Short-Lived Climate Pollutants)に関する政策形成に際し、本研究によるSLCP研究の成果は、政策決定の基礎となる科学的情報を提供した。特に、対流圏のオゾン対策として、欧米がメタンを重視するのに対し、東アジアではNO_xとVOCの対策がコベネフィットという観点から特に重要であることを指摘したことは、日本及びアジアのSLCP戦略に多大な影響を及ぼした。
- ・ 日本政府におけるTEM、特に大気汚染に関するハイレベル政策対話、EANET、NEASPEC、日中韓LTP

等への対処方針形成に際して有益な情報を提供した。また、具体的にはTEMNの下「日中韓光化学オキシダント科学研究ワークショップ」第2～4回（平成21年12月、平成23年2月、11月）において、本研究の科学的研究成果が最新の知見として交換された。

- ・ 環境省の「光化学オキシダント調査検討会」、「越境大気汚染・酸性雨対策検討会」における報告書の取りまとめにおいて、本研究で開発した排出インベントリREAS v.2の知見が活用された。また「光化学オキシダント調査検討会」報告書には衛星観測から示唆された中国からのNO_x排出増や、我が国のO₃起源（生成地域別寄与）が取り上げられた。
- ・ 環境省・中央環境審議会・微小粒子状物質等専門委員会（平成26年3月12日）では、PM_{2.5}対策の検討に際し、我が国地域別のPM_{2.5}に対する越境大気汚染・国内汚染の寄与率を定量化した本研究の結果が参考資料として配付された。
- ・ 本研究において計算された地上ライダーによるエアロゾル消散係数が、環境省「黄砂による健康影響調査検討WG」において、人為汚染交絡因子の指標として利用され、また環境省「黄砂実態解明調査WG」において煙霧現象の解析を行う際に利用された。
- ・ 国際的なモデル間相互比較や、IPCC第5次報告書に向けたACCMIPやCCMIへ参加し、本課題のCHASER-SPRINTARSモデルによる実験結果もIPCC第5次報告書に採用された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・ アジアにおける大気汚染の新たな枠組みに関する提案は、UNEPによる「アジア太平洋地域の大気に関する準地域会合」等で今後議論されることがUNEPと合意されている。
- ・ 大気汚染対策分野における国際協力枠組みのための新たな原則提案は、今後国連国際法委員会への報告に盛り込まれ、国連として議論される予定である。
- ・ 途上国においては、少なくとも短期的には、経済合理性の観点から大気汚染対策が主であり温暖化対策が従であることを定量的に明らかにした。このような認識を政策決定者が共有することにより、途上国との環境協力やコミュニケーションがより円滑になると期待される。
- ・ 大気汚染による影響/被害の科学的な評価に関し、東アジアでのオゾンとPM_{2.5}による影響/被害を明らかにし、対策費用との費用便益分析を実施した。その結果を共有することにより、東アジアでの大気汚染対策の加速化が期待される。
- ・ REAS v.2はアジア地域の温暖化対策、大気汚染対策、及びそれらの共便益を考慮した大気環境政策を検討する上で基礎となるデータであり、TEMNやEANET等を通して広域大気汚染政策への貢献が期待できる。
- ・ 本研究によって、中国の地域ごとに「費用対効果の高い」対策を提案することが可能になった。更に、温暖化対策と大気汚染対策の関係を把握し、大気汚染対策技術の効果を分析することが可能になったことから、特に発展途上国において喫緊の課題である大気汚染対策と、重要性が認識されつつも取り組みが進まない温暖化対策を同時に検討することが可能となった。

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>（全76件中）

- 1) 金谷有剛、竹谷文一、入江仁士、駒崎雄一、高島久洋、鶴野伊津志：大気環境学会誌，45，289-292（2010）
「九州福江島における通年PM_{2.5}質量濃度測定値の大気環境短期基準超過」
- 2) T. NAGASHIMA, T. OHARA, K. SUDO and H. AKIMOTO: Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 11305-11322 (2010)
“The relative importance of various source regions on East Asian surface ozone”
- 3) A. NAWAHDA, K. YAMASHITA, T. OHARA, J. KUROKAWA and K. YAMAJI: Water, Air, and Soil Pollution, 233, 3445-3459 (2012)
“Evaluation of premature mortality caused by exposure to PM_{2.5} and ozone in East Asia: 2000, 2005, 2020”
- 4) K. YAMAJI, I. UNO and H. IRIE: Atmospheric Environment, 55, 475-482 (2012)
“Investigating the response of East Asian ozone to Chinese emission changes using a linear approach”
- 5) T. SEKIYA and K. SUDO: Journal of Geophysical Research, 117, doi:10.1029/2012JD018054 (2012)
“Role of meteorological variability in global tropospheric ozone during 1970-2008”
- 6) S. ITAHASHI, I. UNO, H. IRIE, J. KUROKAWA and T. OHARA: Atmospheric Chemistry and Physics,

13,11247-11268 (2013)

“Trend analysis of tropospheric NO₂ column density over East Asia during 2000-2010: Multi-satellite observations and model simulations with the updated REAS emission inventory”

- 7) M. KANADA, L. DONG, T. FUJITA, M. FUJII, T. INOUE, Y. HIRANO, T. TOGAWA and Y. GENG: Energy Policy, 61, 1322-1331 (2013)
 “Regional disparity and cost-effective SO₂ pollution control in China: A case study in 5 mega-cities”
- 8) N. KANIE, P.M. HAAS, S. ANDRESEN, G. AULD, B. CASHORE, P.S. CHASEK, J.A. PUPPIM DE OLIVEIRA, S. RENCKENS, O.S. STOKKE, C. STEVENS, S.D. VANDEVEER, and M. IGUCHI: Environment, 55, 14-30 (2013)
 “Green pluralism: Lessons for improved environmental governance in the 21st century”
- 9) J. KUROKAWA, T. OHARA, T. MORIKAWA, S. HANAYAMA, G. JANSSENS-MAENHOUT, T. FUKUI, K. KAWASHIMA, and H. AKIMOTO: Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 11019-11058 (2013)
 “Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2”
- 10) 大泉 毅、秋元 肇、金谷有剛、永島達也、櫻井達也、大原利眞、佐藤啓市: 大気環境学会誌, 48, 181-187 (2013)
 「我が国の光化学オゾン汚染の8時間平均値による評価」
- 10) S. ZHOU and M. ELDER: International Journal of Sustainable Society, 5, 232-49 (2013)
 “Regional air quality management in China: The 2010 guideline on strengthening joint prevention and control of atmospheric pollution”

<査読付論文に準ずる成果発表> (対象:社会・政策研究の分野) (全17件中)

- 1) 鈴木克徳: 環境情報科学, 42, 28-33 (2014)
 「越境大気汚染に関する国際情勢と今後の展望」
- 2) N. Kanie, S. Andresen and P.M. Haas: Routledge (2014)
 “Improving Global Environmental Governance: Best practices for architecture and agency”

(2)主な口頭発表(学会等) (全440件中)

- 1) J. KUROKAWA, T. OHARA: GlobEmission User Workshop, Frascati, Italy (2013)
 “REAS version 2 and comparison with GlobEmission products”
- 2) K. SUZUKI: Saltsjöbaden V. Taking International Air Pollution Policies into the Future Session on Air pollution Agreements - Going for Global Governance of the Troposphere, Gothenburg, Sweden (2013)
 “Development in international policy and governance - Asian perspective - ”
- 3) H. TANIMOTO, S. KUDO, X. PAN, S. INOMATA, S. SAITO, Y. KANAYA, Z. WANG: AGU Fall Meeting, San Francisco (2013)
 “Emissions of oxygenated volatile organic compounds from open crop burning in Yangtze River Delta region, China”

7. 研究者略歴

プログラムリーダー: 秋元 肇、東京工業大学大学院理工学研究科修了、博士(理学)、
 現在、一般財団法人日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター所長

テーマリーダー:

- (1) 金谷有剛、東京大学大学院理学系研究科修了、博士(理学)、
 現在、独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境変動領域 大気組成研究チームリーダー
- (2) 大原利眞、北海道大学大学院工学研究科修了、博士(工学)、
 現在、独立行政法人国立環境研究所 地域環境研究センター長
- (3) 鈴木克徳、東京大学工学部都市工学科卒業、
 現在、金沢大学環境保全センター長・教授

Scientific Analysis of Regional Air Pollution and Promotion of Air Pollution Management in East Asia Considering Co-benefits

Principle Investigator: Hajime AKIMOTO

Institution: Asia Center for Air Pollution Research (ACAP)
1182 Sowa, Nishi-ku, Niigata-shi, Niigata 959-2144, Japan
Tel: +81-25-263-0551 / Fax: +81-25-263-0556
E-mail: akimoto@acap.asia

Cooperated by: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), National Institute for Environmental Studies (NIES), and Kanazawa University

[Abstract]

Key Words: Transboundary air pollution, Asian air pollution, PM_{2.5}, Ozone, Black Carbon, Short-lived climate pollutants (SLCP), Emission inventory, Co-benefit approach, regional cooperation framework, Asia Science Panel for Air and Climate (ASPAC)

In order to cope with transboundary air pollution issues of PM_{2.5} and ozone (O₃) in Japan, this project targets to fill the gaps of the interface between science and national/international policy on atmospheric environment. Robust quantitative source-receptor relationships for PM_{2.5} and O₃ were obtained through scientific studies integrating field observation, modeling, and emission inventories. Meanwhile, international framework of regional cooperation on atmospheric management in East Asia was analyzed in terms of political and policy science. Based on the review of existing air pollution-related initiatives, the research identified major factors to be included in the cooperative regional framework and their possible options. Lack of epistemic community among scientists, and scientists-policy makers interface was identified as a deficit in in East Asia. In order to effectively promote regional cooperation, Asia Science Panel for Air and Climate (ASPAC) was proposed.

Springtime ozone over Japan was contributed from various source regions; 12% from China, 22% from Japan, and 7% from Europe/North America. PM_{2.5} over western Japan was contributed from China by >50%, while that in Kanto region was most contributed by domestic emission. Typically 30% and 20% reduction in anthropogenic emissions of precursors from Japan/China/Korea and China/Korea would effectively reduce number of days with elevated concentrations over Japan for O₃ and PM_{2.5}, respectively. Preliminary results suggested that emission reduction in the power and industry sectors in China would effectively reduce ozone and PM_{2.5} over Japan and China.

Regional Emission Inventory in Asia was updated as version 2 (REAS v.2) for 2000-2008 with higher spatial (0.25 degree) and temporal (monthly) resolution than in version 1, and the covered area has been expanded to include Asian part of Russia and Central Asia in addition to South, Southeast and Northeast Asia. The REAS v.2 was validated by a top-down approach using an inverse modeling technique with satellite observation especially for NO_x emissions in China.

In order to reduce emissions of air pollutants in East Asia, effectiveness of SLCP (Short-lived Climate Pollutants) co-benefits approach has been studied. The research clarified the importance of air pollution mitigation in Asia, which has much higher incentive than climate control. For O₃ reduction as an SLCP, the importance of NO_x/VOC control was discussed as compared to the preferential methane control in the European and North American view. It was revealed that in order to prevent ozone pollution near the ground level NO_x/VOC reduction is much more effective, while methane reduction is more effective to reduce radiative forcing. Simultaneous reduction of both NO_x/VOC and methane is therefore recommended in East Asia.