

課題名	B-051 アジアにおけるオゾン・ブラックカーボンの空間的・時間的変動と気候影響に関する研究		
課題代表者名	秋元 肇（独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター・大気組成変動予測研究プログラム）。		
研究期間	平成17-19年度	合計予算額	192,070千円（うち19年度 62,785千円） 上記の合計予算額には、間接経費44,323千円を含む

研究体制

- (1) 東アジア・中央アジアにおけるオゾン・ブラックカーボンの空間的・時間的変動に関する地上観測（独立行政法人海洋研究開発機構、独立行政法人国立環境研究所、首都大学東京）
- (2) 対流圏化学衛星データによるオゾン及び前駆体物質の空間的・時間的変動の解析（独立行政法人海洋研究開発機構、奈良女子大学）
- (3) アジアにおける大気汚染物質放出量の推定と将来予測（独立行政法人海洋研究開発機構）
- (4) 化学輸送モデルによる半球規模オゾン・ブラックカーボン汚染の解明（独立行政法人海洋研究開発機構、名古屋大学）
- (5) 化学気候結合モデルによるオゾン・ブラックカーボンの気候影響の評価（名古屋大学）

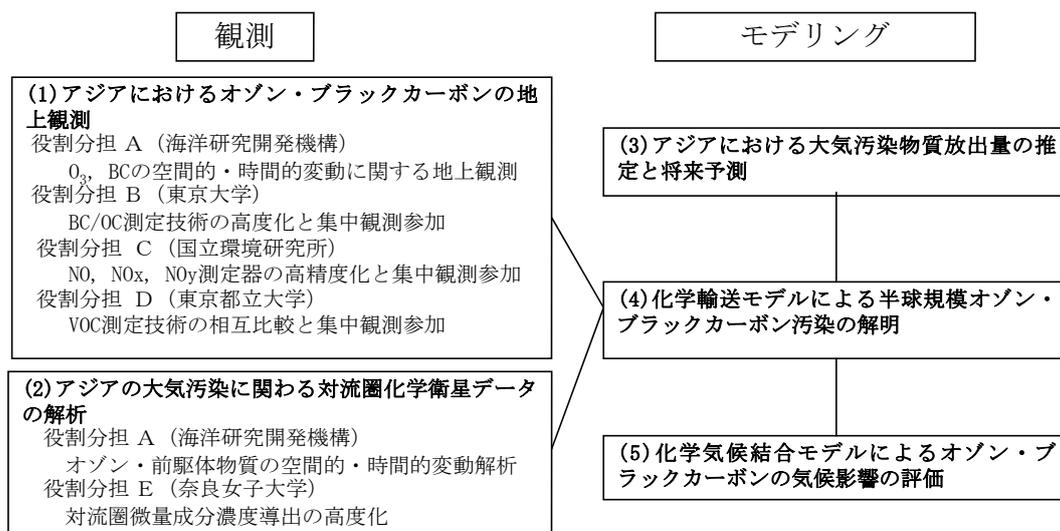
研究概要

1. 序（研究背景等）

地球温暖化の現象解明に関しては、これまで京都議定書の対象物質である長寿命温室効果ガスに関する研究が中心に行われてきたが、最近エアロゾル・オゾンなどの短寿命温暖化関連物質が地域的気候変動に及ぼす影響の重要性がIPCCなどでも指摘されてきている。しかしながら短寿命温暖化関連物質に関しては長寿命温室効果ガスに比べ、その温暖化影響研究が大きく立ち遅れているのが現状である。これら短寿命温暖化関連物質の内でも、特に温暖化影響の大きいと考えられている対流圏オゾンとブラックカーボンのアジアにおける空間的分布と時間的変動を明らかにし、これらの地域的気候変動への影響を評価することは、我が国の気候変動予測の面からも急務である。

本研究では中央アジアから東アジア域を対象に、オゾン・ブラックカーボンの地上における通年観測・集中観測、及び衛星データ利用によるアジア全域の観測、排出量インベントリの作成を通じて、アジア域におけるこれらの空間的・時間的変動を明らかにする。また、これまでエアロゾルの気候影響は、多くの化学種からなるエアロゾルの直接効果・間接効果が総体的に議論されることが多かったが、本研究ではオゾンと共に正の放射強制力を持つブラックカーボンの直接効果を取りだし、それらの気候影響を比較すると共に、長寿命温室効果ガスの地域的気候影響との違いを明らかにする。

本研究のサブテーマ構成と各研究機関役割分担スキームを下図に示す。



2. 研究目的

本研究では、アジア大陸内部の地上観測点において、無人連続測定可能な装置を用いた通年観測と、有人下で装置を調整しながら実施する短期集中観測とを併用することにより、オゾン、ブラックカーボン、CO, NO_x, VOCのアジア大陸部の大陸間・大陸内長距離輸送、オゾンの光化学収支、BC/OC/CO/NO_x/VOCなどの放出比の実態などを環境科学的に明らかにすることを最終年度における目的とする。特に、中国におけるBC排出インベントリの不確定性を低減するための高精度重量濃度データを提供すること、アジアにおけるオゾン・ブラックカーボン汚染の空間的分布・時間変動を定量化することを目指す。この目的のため欧米の対流圏化学衛星観測データを利用して東アジア域のNO₂、オゾンなどの分布を解析するとともに、衛星データ検証のため地上設置型の紫外可視分光計でMAX-DOAS法を用いてNO₂等の対流圏カラム濃度を連続的に測定する。

また本研究では、ロシア・アジア部及び中央アジア諸国を含めたアジア域での1995年から将来2020年までのオゾン・エアロゾル前駆体物質、ブラックカーボンの排出インベントリを構築し、これを領域化学輸送モデル及びGCMベースの全球化学気候モデルCHASERに提供して、アジア域におけるオゾンとエアロゾルのより精度の高い領域規模分布とその将来予測、放射強制力の推定を可能にすることを目指す。構築されたエミッションデータなどを用い、アジア域における過去、及び現在のオゾン濃度の季節変動および空間分布、我が国のオゾン濃度に対する成層圏起源オゾン、ヨーロッパ・北米起源オゾン、東アジア内のオゾン生成、東南アジア、南アジア、中央アジアなどからの寄与を半球規模大気汚染の視点から数値的に明らかにする。また、将来排出量データを用いて、2020年のオゾンに関わる大気質の将来予測実験を実施する。

さらに、本研究の最終的な目的の一つは地球温暖化に対して正の影響（加熱）を持つ対流圏オゾンとブラックカーボンについて、気候モデルを用いた気候感度実験を行い、全球規模の対流圏オゾン・ブラックカーボン変動が気温場や降水などの気候・気象に実際にどのように影響するかについての定量的な評価を行ない、将来の気候変動予測の精度向上に貢献することである。

3. 研究の方法及び結果

(1) 東アジア・中央アジアにおけるオゾン・ブラックカーボンの空間的・時間的変動に関する地上観測

大きな正の放射強制力を有する対流圏オゾンとブラックカーボン(BC)に着目し、測定空白域であった東～中央アジア地域での通年観測を実施した。観測結果から、濃度レベル・季節変化・日変化の特徴を見出した。中国のオゾン濃度は5-6月と9月頃に極大を示し、真夏は海洋性清浄大気の流入により極小となること、中央アジアでは夏季に極大となることがわかった。泰山・黄山でのBC濃度の年平均値(MAAP装置による)はそれぞれ2.3, 1.0 $\mu\text{gC}/\text{m}^3$ であり、中国中東部において、BCによる大気上端での放射強制力は、二酸化炭素に匹敵しうることがわかった(表1)。キルギス観測サイトではBC濃度は非常に低く、平均値は0.10 $\mu\text{gC}/\text{m}^3$ であった。オゾン汚染が極大となる季節を狙い、2006年6月に、中国中東部(Central East China)におけるオゾンの輸送、光化学収支、BC, OC(有機エアロゾル), CO, NO_x, 揮発性有機化合物(VOC)などの濃度レベル、濃度比を明らかにすることを目的とした集中観測を泰山にて実施した。BC濃度を4種の装置で測定することで濃度を50%以下の不確かさで決定することができた。華北平原一帯で6月上旬に収穫を終えた冬小麦の農業廃棄物を野外で燃焼させることが汚染物質濃度が非常に高くなる原因の1つであること、観測された前駆体濃度を用いたオゾン光化学生成速度の計算から、一日に60ppbv程度のオゾンが主にNO_x-limitedの条件下で生成していること、モデルとの比較から、BC, オゾン前駆体の排出量統計値が過小評価さ

表1. 各種温室効果物質による、全球および中国中東部における大気上端での放射強制力の見積もり。

化学種	sensitivity	全球			中国中東部		
		濃度(現在)	濃度(産業革命前)	放射強制力(W m ⁻²)	濃度(現在)	濃度(産業革命前)	放射強制力(W m ⁻²)
CO ₂	0.01677 W m ⁻² ppm ⁻¹	379 ppm	280 ppm	1.66	390 ppm	280 ppm	1.84
CH ₄	0.00045 W m ⁻² ppb ⁻¹	1774 ppb	715 ppb	0.48	1900 ppb	715 ppb	0.54
O ₃	0.032 DU ⁻¹	40 DU	30 DU	0.32	50 DU	30 DU	0.64
BC	1.25 W mg ⁻¹	0.4 mg m ⁻²	0.2 mg m ⁻²	0.25	1.5 mg m ⁻²	0.2 mg m ⁻²	1.63

CH₄, O₃の現在・産業革命前の濃度は概算である。

れていることが指摘された。またVOC, 含酸素揮発性有機化合物(OVOC), NO, NO₂, NO_yの観測結果から、比較的酸化が進んだ大気が測定されたことがわかった。2007年9-10月には、中国・北京郊外の蟒山において集中観測を実施し、ブラックカーボン測定法の再比較を行うとともに、エアロゾル化学成分のうち、硫酸アンモニウム、有機物、硝酸アンモニウムがエアロゾル散乱を支配していることを明らかにした。

(2) アジアの大気汚染に関わる対流圏化学衛星データの解析

急速なエネルギー需要の増大によって大気汚染が深刻化している東アジア(特に中国・華北平原)において、対流圏中のオゾン及びその前駆気体(NO_xやVOC等)の空間的・時間的変動を定量的に理解することは急務である。その為には衛星を使って対流圏中の化学微量成分を地球規模で観測することが非常に有効であるが、東アジアの汚染地域では衛星データの検証に不可欠な独立観測は皆無に等しく、広域大気汚染の実態の定量的理解を困難にさせている。こういった問題を克服するために、本研究では衛星データの検証に最適な地上設置型の紫外可視分光計(MAX-DOAS)を開発するとともに、必要な解析ソフトウェア(非線形最小二乗法を用いたスペクトルフィッティング法・モンテカルロ法を用いた放射伝達モデル)も開発し、平成18年6月に世界で初めて中国・華北平原での観測を実施した。観測は本プロジェクト・サブテーマ1の中国泰山集中観測の枠組みの中で実現された。国際協力の下で整備した対流圏NO₂カラム濃度の衛星データと比較したところ、衛星データには系統的に約20%の正のバイアスがあり、ランダム誤差は約8%と小さいことが分かった(図1)。したがって、図で示されている空間分布パターンはほぼ正しいことが分かった。他方、これまで衛星から長期にわたって観測された対流圏NO₂カラム濃度データを解析したところ、その季節変動・年々変動パターンは領域モデルで定性的に良く再現されることが分かった。また、対流圏オゾンのカラム濃度についても衛星データとオゾンゾンデデータを比較し、衛星データに約10%の正のバイアスがあり、ランダム誤差は15-30%程度であることが分かった。これらの成果により、今後は衛星データとモデルの比較結果を定量的に解釈できるようになるなど、モデルを精密に検証する上で不可欠な科学的基盤を築くことができた。オゾンについてはさらに、オゾンゾンデデータの長期データも併せて解析し、札幌・つくば・鹿児島では対流圏オゾン濃度の増加速度が近年鈍化している一方で、那覇では2000年以降、高濃度イベントが頻繁に観測されたことが分かった。

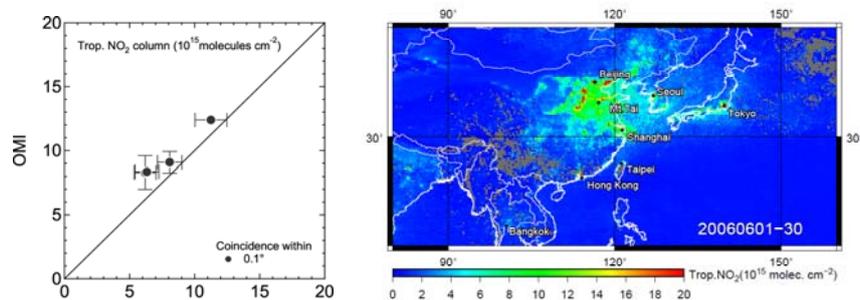


図1. (左) 中国華北平原における対流圏NO₂カラム濃度の衛星データ(OMIデータ)とMAX-DOASデータの相関図。(右) OMIが2006年6月に観測した対流圏NO₂カラム濃度の分布。

(3) アジアにおける大気汚染物質放出量の推定と将来予測

アジア地域におけるオゾン・エアロゾル前駆体物質(窒素酸化物(NO_x)、非メタン揮発性有機化合物(NMVOC)、二酸化硫黄(SO₂)、一酸化炭素(CO))と炭素粒子(ブラックカーボン(BC)、オーガニックカーボン(OC))の排出量を1980~2020年について算定し、アジア地域排出インベントリ REAS 1.1 (Regional Emission inventory in Asia Version 1.1)を開発した。REAS 1.1は、アジア地域の過去から将来における人為起源の大気汚染排出量を対象に開発された最初のインベントリであり、統一的方法論に基づいて排出量を推計していること、主要な人為発生源と大気汚染物質をほぼカバーしていること、などの特徴がある。代表的なオゾン・エアロゾル前駆体物質である窒素酸化物(NO_x)は、2000年におけるアジア全体の排出量が年間2,730万トンであり、中国(41%)とインド(17%)の排出量が非常に多い。最大の排出国である中国では、石炭火力発電所(34%)、工場等の石炭燃焼(25%)、自動車等の石油燃焼(25%)が大きな割合を占める。また、NO_x排出量は1980年から2003年の間に2.8倍に増加し、中でも中国における増加は3.8倍と非常に大きい。さらに、将来の排出シナリオ(中国については持続可能性追求型(REF)、対策強化型(PSC)、現状推移型(PFC)の3種類、その他の国については1種類)を設定し、2020年までの将来排出量を予測した。その結果によると、2020年における中国のNO_x排出量は、REFとPFCでは、2000年に較べて、それぞれ、1.4倍、2.3倍に増加する。一方、PSCでは、2000年レベルに比べ、わずかではあるが減少する。しかし、2000年以降の排出量や燃料消費量の増加傾向や衛星観測結果などから判断すると、現在のNO_x排出量は既にPFCシナリオの2020年予測値付近まで達している可能性がある(図2)。さらに、旧ソ

連（アジア域）の1980～2005年におけるNO_x、SO₂、CO、BC、OCの燃料燃焼起源排出量を推計し、ユーラシア大陸東部をカバーする排出インベントリを構築した（図3）。

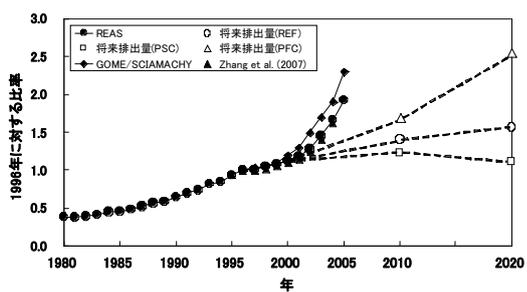


図2. 中国のNO_x排出量の1980～2020年の変化。対流圏観測衛星GOME/SCIAMACHYは、同衛星で観測された中国北部平野地域におけるNO₂対流圏カラム濃度の年平均値の推移を示す。

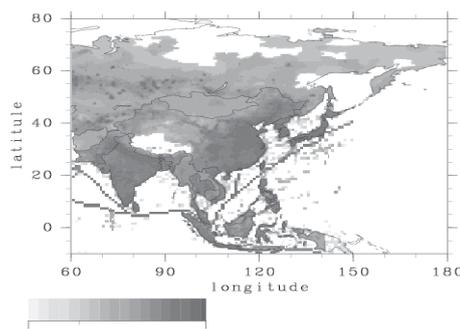


図3. ユーラシア大陸東部の2000年のNO_x排出量分布。単位はトン/年/メッシュ（経緯度0.5度）で、表示はlogスケールである。

（4）化学輸送モデルによる半球規模オゾン・ブラックカーボン汚染の解明

対流圏オゾンのソース・リセプター関係を明らかにするための手法として、全球化学輸送モデルを用いた「タグ法(Tagged Method)」を開発し、全球の代表的リモート地点の対流圏オゾンに対するそれぞれの発生源地域からの寄与を年間を通じて調べた。代表的リモート地点であるMace Head, Bermuda, Samoaなどに対しても、一般に北米、ヨーロッパ、アジアの汚染地域からの寄与は、40%以上に達することが分かった。特に中国の境界層、アジアの自由対流圏からの影響は、北半球のほぼ全域で認められた(図4)。また、6-9月にはアジアの自由対流圏からのオゾンが、上部対流圏におけるアジアから南半球への半球間長距離輸送によって、南太平洋に5-10ppbの大きな寄与を与えていることが分かった。同様に南米からの半球間輸送が日本、北太平洋、米国に大きな影響を与えていることが分かった。一方、ゼロエミッション法によって、我が国の首都圏に対する、ヨーロッパ、北米、中国、南・東南アジア、我が国自身、成層圏などからの寄与を2-4月の3ヶ月間について調べた。3ヶ月平均でのこれらの地域からの寄与は、それぞれ3.9, 3.0, 4.4, 0.8, 9.4, 12.2 ppbと見積もられ、平均値では大陸間輸送によるヨーロッパ、北米からの寄与を合わせると中国からの影響を上回ることが示された。但し、ヨーロッパ、北米からの影響は毎日ほぼ一定で、余り大きな日々変動は見られないのに対し、中国からの影響は非常にepisodicであり、平均値だけではその重要性が議論できない。特にオゾン濃度が80ppbを超える高濃度日に関して見ると、日本起源のオゾンが主要因となっている日と、日本起源と中国起源のオゾンの寄与が重要である日とがあることが分かった。

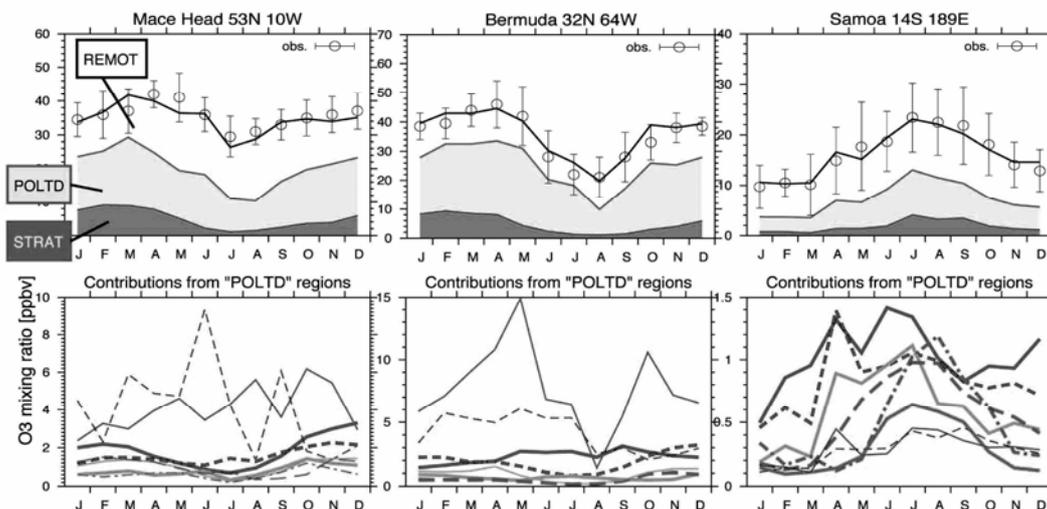


図4. リモート地域(Mace Head, Bermuda, Samoa)における地表オゾン季節変化の観測値と発生源地域寄与別計算値。

領域化学輸送モデルを用いて東アジア域内の排出量に起因する光化学生成オゾン濃度を調べた結果、夏季には我が国の領域内の前駆体物質排出による我が国自身への寄与が増大するが、年間を通して長距離輸送による影響を強く受けており、特に、冬季から早春にかけてその寄与が大きい事が示された。2020年の現状推移型排出量予測値を用いて将来予測実験を行なった結果、わが国自身のNO_xの排出量が減少すると予測されるにも関わらず、夏季(6~8月)の3ヶ月平均で約6ppb増加することが分かった。また、中国華北平原のオゾンは夏季平均値で約18ppb増加する。また特に、日本域では3月から6月のオゾン濃度の月平均値が、光化学オキシダントの我が国の環境基準レベル60ppbを超えると予測された。

また、領域モデルに対してもタグ法が開発され、この手法を用いてサブテーマ1で得られた中国における観測データの解析がなされた。

(5) 化学気候結合モデルによるオゾン・ブラックカーボンの気候影響の評価

化学・気候モデルCHASERを用いて、産業革命以前から現在にかけてのオゾン分布変動を計算し、計算結果の評価を行った。CHASERにより計算されたオゾン分布変動はオゾンゾンデによる観測データとほぼ整合的であり、対流圏オゾン増加だけでなく、成層圏オゾン減少の効果も適切に表現できていることが確認された。産業革命以前から現在までの全球オゾン変動に対する気候感度実験を実施し、結果についての詳細な評価を行った。化学・気候モデルCHASERによって計算されたオゾン変動分布をオフラインでCCSR/NIES/FRCGC気候モデルに与えて平衡応答実験を実行し、気候場(地表気温・降水)への応答を定量的に解析した。本平衡応答実験では、海洋混合層モデルを用いて行い、50年間の積分の上、最後の20年間分の結果を解析に使用した。その結果、1850-2000年の対流圏オゾン変動により、+0.3℃の気候応答(全球平均2m気温変化)が得られ、これはその他の温室効果気体(CO₂ + CH₄ + N₂O + CFCs)の変動に対する応答 +2.2℃(本実験)の14%であり、対流圏オゾン変動が全球気候に対して無視できない影響を持つことが示された。このような対流圏オゾン増加の顕著な気温影響は地表のみならず、対流圏全体で確認された。また、対流圏オゾン増加により成層圏下部(低緯度域)で-1.0℃程度の強い降温(寒冷化)が生じることや、地表昇温に対しては、とくに北半球で特徴的な水平パターンを持つことなどが明らかにされた。

ブラックカーボン(BC)変動が及ぼす気候影響を明らかにする研究を実施した。本研究で計算されたBCの放射強制力は全球平均で0.5 Wm⁻²であり、本研究で得られている対流圏オゾンによる放射強制力 0.49 Wm⁻²に非常に近い値であった。BCによる地表気温上昇は約0.5℃であり、夏季の北米、欧州、そして特にアジア大陸中央で1℃以上の大きな昇温パターンが見られた。これらの研究を通じて得られたオゾンとブラックカーボンによる産業革命以来の放射強制力の東西平均緯度分布を図5に示す。

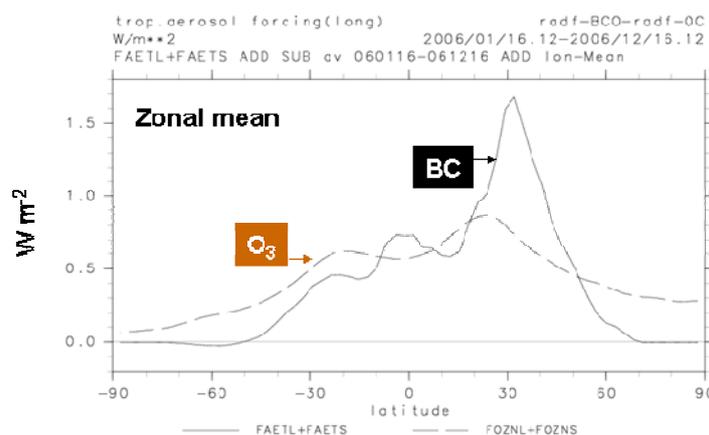


図5. 対流圏オゾンおよびブラックカーボンによる放射強制力 (W m^{-2}) の緯度分布(東西平均)。

4. 考察

(1) 東アジア・中央アジアにおけるオゾン・ブラックカーボンの空間的・時間的変動に関する地上観測

これまで測定の空白域であった中国内陸部および中央アジア地域において、世界に先駆けて、BC、オゾンおよびその前駆体であるCOについて通年観測を行い、これらの地域での濃度時空間変動を明らかにするとともに、大陸内、大陸間長距離輸送の実態を解析するために欠かせないデータを取得

した。泰山集中観測において、50%以下の不確かさでBC濃度を決定できたことは、factor of 4ともいわれている中国におけるBC排出量統計値の不確かさを減少させるのに十分である。また、中国中東部の広域汚染の実態が全世界的に注目され始めた中で、本年度我々が行った泰山集中観測は、中国中東部のほぼ中心において実施された世界初のオゾン前駆体・エアロゾル成分の総合集中観測であり、6月には農業廃棄物の野外燃焼が汚染成分の重要な発生源となっていること、オゾン生成がNO_x-limitedの条件下で起こっていることを現場観測から初めて明らかにした。また、モデルとの比較からエミッションインベントリがほぼ全ての化学成分について過小評価となっていることを明らかにしたことも、東アジアの大気環境の現状を環境科学的に正確に把握する意味で、大きな進歩であった。北京郊外の蟒山での集中観測において、ブラックカーボン濃度の測定法による違いを再検証できたこと、エアロゾル化学成分と光学パラメータの対応付けができたことも成果として重要である。

(2) 対流圏化学衛星データによるオゾン及び前駆体物質の空間的・時間的変動の解析

本研究で実施した衛星データ解析および衛星と独立な観測データ(MAX-DOASやオゾンゾンデ)の解析は、アジア域における大気汚染ガス(オゾンと前駆気体)の衛星データの精度・信頼性を高める。それにより、これまで困難であった衛星データとモデルの定量的な比較に道を開き、モデルの検証研究を格段に発展させるものと期待される。さらには、現在打ち上げられている欧米の対流圏化学衛星センサーのアジア域におけるデータ利用を促進し、ひいては、アジアからの越境大気汚染を抑止する国際的抑止戦略の一助として、アジア大気汚染衛星実現に向けた議論への発展が期待される。

(3) アジアにおける大気汚染物質放出量の推定と将来予測

アジア地域における1980～2003年の大気汚染物質排出量を推計し、それが急激に増加していることを定量的に明らかにした。一方、排出量推計には大きな不確かさ(uncertainty)を伴うため、対流圏観測衛星等の観測データに基づくインバース推計(トップダウン・アプローチ)と各国の排出実態を把握する調査研究(ボトムアップ・アプローチ)を組み合わせ、不確かさを低減する努力をしていく必要がある。また、旧ソ連(アジア域)については、非燃焼系起源排出量とNMVOC排出量の推計が今後の課題としてあげられる。

(4) 化学輸送モデルによる半球規模オゾン・ブラックカーボン汚染の解明

本研究によって全球化学輸送モデル及び領域モデルに対するタグ法が開発され、対流圏オゾンの全球スケール、領域スケールでのソース・リセプター関係を定量的に評価出来る手法が確立されたことは大きな成果であった。タグ法とは異なるゼロエミッション法により、4-6月のわが国の首都圏のオゾンに対する、世界の各汚染地域からの寄与が初めて定量的に推定された。本研究によって具体的に首都圏の光化学大気汚染に対する中国の影響が、わが国自身の寄与、ヨーロッパ、北米と共に初めて定量的に推定されたことは、今後わが国の光化学スモッグ抑止政策へ向けての基盤作りに貢献がなされたものと思われる。本研究では早春の3ヶ月間だけについての計算がなされたが、今後夏季を含む通年での推定がなされる必要がある。オゾンの場合タグ法はそのオゾンがどこで生成されて輸送されてきたかが特定されるが、そのオゾン前駆体がどこで放出されたものかは特定できない。それに対してゼロエミッション法は、指定された領域で放出された前駆体による寄与分を推定することが出来るが、オゾン生成の非直線性などの誤差を含む可能性がある。このようにタグ法と、ゼロエミッション法は相補的であるので、今後は両者を併用することが望ましい。

(5) 化学気候結合モデルによるオゾン・ブラックカーボンの気候影響の評価

本研究では、全球オゾンとブラックカーボン(BC)の分布変動が及ぼす気候影響を、気候モデルによる数値実験により明らかにした。オゾンについては対流圏オゾン、成層圏オゾンそれぞれの変動が及ぼす気候影響を定量化した。オゾン・BCが及ぼす対流圏の昇温パターンについても解析を行い、放射強制力分布との関係などを評価したが、さらに雲過程も含めた解析が必要である。本研究では、海洋部分として混合層モデルを用いて計算した気候平衡応答(50年間積分)を気候影響として解析に用いた。しかしながら、より現実的な定量化のためには、さらに大気海洋結合モデルを用いた実験・評価が必要である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 中国内陸部・中央アジア地域におけるBC, オゾンの季節変化の特徴、中国中東部での光化学オゾン生成速度、レジームを現場観測から明らかにした。また、農業廃棄物の野外燃焼が汚染成分の重要な発生源となっていることや、CO、BCなどの化学成分についてエミッションインベントリが過小評価となっていることを明らかにした。泰山・嶗山での集中観測におけるブラックカーボンの測定法の比較では、測定の問題点を明らかにし、今後系統的な解釈を可能にする上で重要な、初期的知見を得た。中国中東部におけるブラックカーボンによる大気上端での放射強制力は、二酸化炭素による値とほぼ同レベルであることが初めて明らかとなった。

2) これまで困難であった衛星データとモデルの定量的比較に関して、本研究の成果により比較結果を定量的に解釈できるようになるなど、モデルを精密に検証する上で不可欠な科学的基盤を築くことができた。

3) アジア地域の大气汚染に起因する気候影響を解明する上で必要な、過去から将来における総合的なアジア域排出インベントリを構築した。

4) 対流圏オゾンのソース・リセプター関係を全球規模で初めて明らかにした。これまで、ヨーロッパ、北米、アジアの大陸毎に他の大陸からの影響を評価した研究は数多く見られるが、全球規模でそれぞれの発源地域、リモート地域からの影響を定量的に明らかに出来たことは本研究の大きな科学的成果である。一方、我が国の首都圏に対する我が国自身の排出による影響、中国を初めとするアジア内の長距離輸送、大陸間輸送の相対的な大きさ、東アジアにおける2020年のオゾン濃度の増加が初めて定量的に試算された。

5) 大気汚染物質のうち、気候に正の影響（加熱効果）を持つとされる対流圏オゾンとブラックカーボンに着目し、これまで未解明であったそれらの気候影響を定量的に明らかにした。このような実験・解析例はこれまでの研究になく、気候変動理解および気候モデルの高度化に大きく寄与した。

(2) 地球環境政策への貢献

1) 地球温暖化の視点からは、政策的にもこれまでは長寿命温室効果ガスが対象とされてきたが、途上国を含めた温室効果ガスの削減の議論の中では、大気汚染と温暖化の同時抑制を目指す、コベネフィットの議論が現実味を帯びてきている。コベネフィットの議論においては、省エネルギーなどの技術的対策と共に、その理論的背景として大気汚染物質の温暖化影響に関する科学的知見が重要である。大気汚染物質の中でもオゾンとブラックカーボンの削減は具体的に温暖化対策に資するものであり、本研究で得られた、それらの温暖化・気候影響への定量的な評価は、直接的にもコベネフィットの議論に貢献するものである。

2) 大気汚染と温暖化の相互作用を考える上で、大気汚染物質の大きな発生源である中国の影響を正しく評価することは極めて重要であるが、様々な制約から中国国内における観測データに基づくモデル評価にはこれまで多くの困難があった。本研究で中国の研究者と共同で行われた観測とモデル解析は、今後コベネフィットのみならず、越境大気汚染に対処する国際的な枠組みの議論にも貢献するものと思われる。

3) 東アジアにおける越境大気汚染問題に対しては中国の発源地域における大気汚染の正確な情報が不可欠であるが、本研究により今後オゾンの越境輸送の研究に本格的に取り組むための準備がなされた。

6. 研究者略歴

課題代表者：秋元 肇

1940年生まれ、東京工業大学理工学部卒業、理学博士、現在、海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター・プログラムディレクター

主要参画研究者

(1) 1)：金谷有剛

1973生まれ、東京大学理学部卒業、現在、海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター主任研究員・サリダー

2)：谷本浩志

1973生まれ、東京大学理学部卒業、現在、国立環境研究所主任研究員

3)：駒崎雄一

1963生まれ、慶応義塾大学理工学部卒業、東京大学先端科学技術研究センター助教授、現在、海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター・サブリーダー（2006年4月より）

4) : 加藤俊吾

1971生まれ、東京大学工学部卒業、現在、首都大学東京准教授

(2) 1) : 入江仁士

1974生まれ、茨城大学理学部卒業、国立環境研究所研究員、現在、海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター研究員

2) : 金谷有剛（同上）

3) : 林田佐智子

1957生まれ、京都大学理学部卒業、国立環境研究所研究員、現在、奈良女子大学理学部教授

(3) 大原利眞

1954生まれ、北海道大学工学部卒業、静岡大学教授、現在、国立環境研究所室長、地球環境フロンティア研究センター・サブリーダー兼任

(4) 1) : 秋元 肇（同上）

2) : 須藤健悟

1975生まれ、東京大学理学部卒業、海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター研究員、現在、名古屋大学准教授（2006年4月より）

(5) 須藤健悟（同上）

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

- 1) Tanimoto, H., H. Mukai, Y. Sawa, H. Matsueda, S. Yonemura, T. Wang, S. Poon, A. Wong, G. Lee, J.Y. Jung, K.R. Kim, M.H. Lee, N.H. Lin, J.L. Wang, C.F. Ou-Yang, C.F. Wu, H. Akimoto, P. Pochanart, K. Tsuboi, H. Doi, C. Zellweger, J. Klausen, Direct assessment of international consistency of standards for ground-level ozone: Strategy and implementation toward metrological traceability network in Asia, *J. Environ. Monit.*, doi:10.1039/b701230f, 9, 1183-1193, 2007.
- 2) Inomata, S., H. Tanimoto, S. Kameyama, U. Tsunogai, H. Irie, Y. Kanaya, and Z. Wang, Technical Note: Determination of formaldehyde mixing ratios in polluted air with PTR-MS: Laboratory experiments and field measurements, *Atmos. Chem. Phys.* 8, 273-284, 2008.
- 3) Irie, H., Y. Kanaya, H. Akimoto, H. Tanimoto, Z. Wang, J.F. Gleason, and E.J. Bucsela, Validation of OMI tropospheric NO₂ column data using MAX-DOAS measurements deep inside the North China Plain in June 2006, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 8243-8271, 2008.
- 4) Taketani, F., Y. Kanaya, and H. Akimoto, Kinetics of Heterogeneous Reactions of HO₂ Radical at Ambient Concentration Levels with (NH₄)₂SO₄ and NaCl Aerosol Particles, *J. Phys. Chem. A.*, 112/11 2370-2377, 2008.
- 5) Wagner, T., et al., Comparison of Box-Air-Mass-Factors and Radiances for Multiple-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy (MAX-DOAS) Geometries calculated from different UV/visible Radiative Transfer Models, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1809-1833, 2007.
- 6) Noguchi, K., et al., Validation and comparison of tropospheric column ozone derived from GOME measurements with ozonesondes over Japan, SOLA, 3, 041-044, doi:10.2151/sola.2007-011, 2007.
- 7) Uno, I., et al., Systematic analysis of interannual and seasonal variations of model-simulated tropospheric NO₂ in Asia and comparison with GOME-satellite data, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1671-1681, 2007
- 8) Inomata, S., et al., Technical note: Determination of formaldehyde mixing ratios in polluted air with PTR-MS: laboratory experiments and field measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 273-284, 2008.
- 9) Irie, H., et al., First retrieval of tropospheric aerosol profiles using MAX-DOAS and comparison with lidar and sky radiometer measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 341-350, 2008.
- 10) Irie, H., et al., Validation of OMI tropospheric NO₂ column data using MAX-DOAS measurements deep inside the North China Plain in June 2006, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 8243-8271, 2008
- 11) Yan, X. et al., Bottom-up estimates of biomass burning in mainland China, *Atmos. Environ.*, 40, 5262-5273, 2006.
- 12) Akimoto, H. et al., Verification of energy consumption in China during 1996-2003 by using satellite observational data, *Atmos. Environ.*, 40, 7663-7667, 2006
- 13) Ohara, T. et al., An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4419-4444, 2007.
- 14) Uno, I. et al., Recent Trends and projections in Asian Air Pollution, *J. Disas. Res.*, 2, 163-1724, 2007.

- 15) Yamaji, K. et al., Future prediction of surface ozone over East Asia using Models-3, community multiscale air quality modeling system and regional emission inventory in Asia, *J. Geophys. Res.*, 113, D8306, doi:10.1029/2007JD008663, 2008.
- 16) Yamaji, K., T. Ohara, I. Uno, H. Tanimoto, J. Kurokawa, and H. Akimoto, Analysis of seasonal variation of ozone in the boundary layer in East Asia using the Community Multi-scale Air Quality model: What controls surface Ozone level over Japan?, *Atmos. Env.*, 40(10), 1856-1868, 2006.
- 17) 秋元 肇大気汚染物質の大陸間輸送と半球規模汚染、大気環境学会誌、41、A1-A8、2006.
- 18) Uno, I., Y. He, T. Ohara, K. Yamaji, J. Kurokawa, M. Katayama, Z. Wang, K. Noguchi, S. Hayashida, A. Richter, and J. P. Burrows, Systematic analysis of interannual and seasonal variations of model-simulated tropospheric NO₂ in Asia and comparison with GOME-satellite data, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1671-1681, 2006.
- 19) Uno, I., T. Ohara, K. Yamaji, and J. Kurokawa, Recent Trends and Future Projections in Asian Air Pollution, *Journal of Disaster Research*, 2(3), 163-172, 2007.
- 20) Sudo, K., and H. Akimoto, Global source attribution of tropospheric ozone: Long-range transport from various source regions, *J. Geophys. Res.*, 112, D12302, doi:10.1029/2006JD007992, 2007.
- 21) 栗林 正俊、大原 利眞、山地 一代、中国におけるオゾンによる稲作影響の現状評価と将来予測、大気環境学会誌、43(1)、55-66、2008.
- 22) Yamaji, K., T. Ohara, I. Uno, J. Kurokawa, P. Pochanart, and H. Akimoto, 2008, Future Prediction of Surface Ozone over East Asia using Models-3 Community Multiscale Air Quality Modeling System (CMAQ) and Regional Emission Inventory in ASia (REAS), *J. Geophys. Res.*, 113, D08306, doi:10.1029/2007JD008663, 2008.
- 23) V. Eyring, D. S. Stevenson, A. Lauer, F. J. Dentener, T. Butler, W. J. Collins, K. Ellingsen, M. Gauss, D. A. Hauglustaine, I. S. A. Isaksen, M. G. Lawrence, A. Richter, J. M. Rodriguez, M. Sanderson, S. E. Strahan, K. Sudo, S. Szopa, T. P. C. van Noije, O. Wild, Multi-model simulations of the impact of international shipping on atmospheric chemistry and climate in 2000 and 2030 *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 6, 8553-8604, 2006, SRef-ID: 1680-7375/acpd/2006-6-8553, 2006.
- 24) Gauss M., G. Myhre, I. S. A. Isaksen, W. J. Collins, F. J. Dentener, K. Ellingsen, L. K. Gohar, V. Grewe, D. A. Hauglustaine, D. Iachetti, J.-F. Lamarque, E. Mancini, L. J. Mickley, G. Pitari, M. J. Prather, J. A. Pyle, M. G. Sanderson, K. P. Shine, D. S. Stevenson, K. Sudo, S. Szopa, O. Wild, and G. Zeng, Radiative forcing since preindustrial times due to ozone change in the troposphere and the lower stratosphere, *Atmos. Chem. and Phys.*, 6, 575-599, 2006.
- 25) Dentener F., D. Stevenson, K. Ellingsen, T. van Noije, M. Schultz, M. Amann, C. Atherton, N. Bell, D. Bergmann, I. Bey, L. Bouwman, T. Butler, J. Cofala, B. Collins, J. Drevet, R. Doherty, B. Eickhout, H. Eskes, A. Fiore, M. Gauss, D. Hauglustaine, L. Horowitz, I. Isaksen, B. Josse, M. Lawrence, M. Krol, J. F. Lamarque, V. Montanaro, J. F. Muller, V. H. Peuch, G. Pitari, J. Pyle, S. Rast, J. Rodriguez, M. Sanderson, N. H. Savage, D. Shindell, S. Strahan, S. Szopa, K. Sudo, R. Van Dingenen, O. Wild, G. Zeng, The global atmospheric environment for the next generation, *Environ. Sci. Technol.*, 40(11); 3586-3594. DOI: 10.1021/es0523845, 2006.
- 26) Dentener, F., J. Drevet, J. F. Lamarque, I. Bey, B. Eickhout, A. M. Fiore, D. Hauglustaine, L. W. Horowitz, M. Krol, U. C. Kulshrestha, M. Lawrence, C. Galy-Lacaux, S. Rast, D. Shindell, D. Stevenson, T. Van Noije, C. Atherton, N. Bell, D. Bergman, T. Butler, J. Cofala, B. Collins, R. Doherty, K. Ellingsen, J. Galloway, M. Gauss, V. Montanaro, J. F. M. ler, G. Pitari, J. Rodriguez, M. Sanderson, S. Strahan, M. Schultz, F. Solmon, K. Sudo, S. Szopa, O. Wild, Nitrogen and Sulphur Deposition on regional and global scales: a multi-model evaluation, *Global Biogeochem. l Cycles*, 20, GB4003, doi:10.1029/2005GB002672, 2006.
- 27) van Noije, T. P. C., H. J. Eskes, F. J. Dentener, D. S. Stevenson, K. Ellingsen, M. G. Schultz, O. Wild, M. Amann, C. S. Atherton, D. J. Bergmann, I. Bey, K. F. Boersma, T. Butler, J. Cofala, J. Drevet, A. M. Fiore, M. Gauss, D. A. Hauglustaine, L. W. Horowitz, I. S. A. Isaksen, M. C. Krol, J.-F. Lamarque, M. G. Lawrence, R. V. Martin, V. Montanaro, J.-F. Muller, G. Pitari, M. J. Prather, J. A. Pyle, A. Richter, J. M. Rodriguez, N. H. Savage, S. E. Strahan, K. Sudo, and S. Szopa, Multi-model ensemble simulations of tropospheric NO₂ compared with GOME retrievals for the year 2000, *Atmos Chem. Phys.*, 6, 2943-2979, 2006.

(2) 査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）

なし