

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

(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 大学院環境学研究科 須藤 健悟
 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 秋元 肇

<研究協力者>

九州大学 応用力学研究所 竹村 俊彦

平成17～19年度合計予算額 4,273千円

(うち、平成19年度予算額 2,000千円)

※ 上記の合計予算額には、間接経費 987千円を含む

[要旨] 本サブ課題では短寿命大気汚染物質であり温暖化に対して正の影響(加熱)を及ぼす対流圏オゾンとブラックカーボンエアロゾルに注目し、これらの物質の変動が実際にどのように気候を変化させるかについて評価を行う。このために、全球の化学過程と気候のシミュレーションが行える化学・気候モデルを用いて対流圏オゾンとブラックカーボンの変動が及ぼす気候影響について感度実験を行う。まず、平成17年度では過去から現在までの人為起源汚染物質の放出(エミッション)による対流圏オゾンの増加量を見積もるための実験を行った。さらに、このオゾン変動による放射強制力を計算し、IPCC第4次報告書に向けたプロジェクトの枠組みにおいて、他のモデル結果と比較し、整理した。また、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。18年度の研究では、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。17年度の研究において化学・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。19年度では、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°C以上の大きな昇温パターンが見られた。

[キーワード] 対流圏オゾン、大気汚染、気候モデル、気候影響、エアロゾル

1. はじめに

対流圏オゾンやブラックカーボンは、IPCC第3次および第4次報告書（IPCC-TAR/AR4: IPCC(2001、2007)）にもあるように、気候に対して無視し得ない影響を持つことが認識されてきている。これまでの研究では、IPCC報告書の大多数の代表的研究を含め、対流圏オゾン及びエアロゾルの気候への影響を見積もる際に、瞬時の全球平均放射強制力のみを議論する傾向にある。放射強制力は二酸化炭素やメタンなど長寿命温室効果ガスによる温暖化影響を比較する上では有用な指標である。しかしながら、オゾンやエアロゾルのような短寿命大気汚染物質による気候への影響を評価する場合、その変動が「実際に」気候にどのような影響を及ぼすかについては、空間的・時間的な濃度の不均一性を考慮した見積もりが必要である。すなわちオゾンやブラックカーボンによる地域的放射強制力が働く場合には、二酸化炭素やメタン等の長寿命温室効果ガスによる気候変動の場合と比較して、全球平均では同程度の放射強制力であっても、地域的に異なった気候変化を与えることが予測される。そこで本研究においては、化学気候モデル(CHASER)を用いて、温暖化に対して正の影響を持つ対流圏オゾンおよびブラックカーボンについて、過去・現在・将来にわたる全球濃度分布と気候との相互作用を考慮した気候影響感度実験を行う。このような研究例はまだ非常に少なく、Mickley ら(2004)が、気候からのフィードバックは考慮されないオフラインモデルを用いてオゾンによる地域気候影響を計算し、二酸化炭素による温暖化影響と比較した例があるのみである。地域的な放射強制力が地域的な気候に与える影響を、長寿命温室効果ガスの影響と比較して評価することは、科学的にも非常に興味深く、本研究ではこの分野の先駆的研究を目指す。

2. 研究目的

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着目し、これらの気候影響を見積もる。方法としては放射強制力の計算による評価のみならず、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う。得られた結果により将来の気候変動予測の精度向上に貢献する。

3. 研究方法

(1) . 化学気候モデルとエアロゾル気候モデル

本研究では全球対流圏化学モデルCHASER (Chemical AGCM for Study of Atmospheric Environment and Radiative Forcing) (Sudo et al.、2002a、b、2003)とエアロゾルモデルSPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) (Takemura et al.、2000; 2002)を用いて対流圏オゾンおよびブラックカーボンの変動を見積もる。CHASERおよびSPRINTARSは、東京大学気候システム研究センター (CCSR)、国立環境研究所 (NIES)、海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター (FRCGC) で共同開発されてきた大気大循環気候モデル CCSR/NIES/FRCGC AGCM を土台としている。CHASERモデル中では化学反応に加え、大規模移流輸送、積雲対流による鉛直輸

送、人為・自然起源地表 emission、雷による NO_x 生成、湿性/乾性沈着が考慮され、光化学過程では対流圏光化学の基本サイクル(O₃-NO_x-HO_x-CO-CH₄) と非メタン炭化水素(NMHCs)の酸化反応、および不均一反応が考慮されている(表1)。本モデルで計算されたオゾンや各オゾン前駆気体の分布は各観測値と整合的であり、オゾン生成・消滅過程の表現の妥当性が確認されている(Sudo et al., 2002b)。

表1. 化学・気候モデルCHASER概略

基本モデル	CCSR/NIES/FRCGC GCM (5.7b) : 気候モデル
空間解像度	水平: T42(2.8°x2.8°), 鉛直: 32 layers (地表~40km)
輸送過程	グリッドスケール (flux-form semi-Lagrangian)+積雲対流, 鉛直拡散
化学過程	56 化学種, 142 化学反応 (気相,液相,不均一*) (1)O ₃ -HO _x -NO _x -CO-CH ₄ , (2)非メタン炭化水素 (NMHCs) 酸化, (3)SO ₂ , DMS 酸化 (硫酸塩エアロゾルシミュレーション) *不均一反応は N ₂ O ₅ , HO ₂ , RO ₂ ラジカルについて雲粒子、硫酸エアロゾル、および海塩粒子表面上で考慮 (高度 20km 以上の O ₃ , NO _y については衛星データなどで prescribe)
光解離定数	GCM放射スキーム中の紫外光を用いオンラインで計算 ※放射スキーム中では化学過程で計算されたオゾン、メタン、硫酸エアロゾルの分布を使用。
Emission (人為・自然)	産業・交通, 森林火災, 植生/土壌/海洋, 雷からの NO _x (NO _x , CO, CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₈ , C ₃ H ₆ , アセトン, イソプレン, テルペン, メタノール, SO ₂ , DMS)
Dry deposition (乾性沈着)	地表面の植生タイプ、気温、太陽光入射、積雪などの関数 [Wesely, 1989]
Wet deposition (湿性沈着)	Rain-out (in-cloud), wash-out (below-cloud), ice-sedimentation Reevaporation & reemission processes considered.

SPRINTARSエアロゾルモデルはCHASER同様に、CCSR/NIES/FRCGC 気候モデルを土台として、硫酸塩(SO₄²⁻)、黒色炭素・有機炭素(BC・OC)、土壌ダスト、海塩の各種エアロゾルの全球分布をシミュレートし(表2)、これらの大気放射、雲・降水過程への影響を計算する。地表からの排出源(エミッション)に関しては、二酸化硫黄(SO₂)・BC・OCの化石燃料燃焼(工業・交通・発電など)、森林火災、農業、住宅(暖房・調理等)からの排出が考慮されている。土壌ダストのエミッションは、気候モデルの陸域モデル中で風速、植生タイプ、葉面積指数(LAI)、土壌水分などの関数として与えられる。

本研究では、CHASERおよびSPRINTARSモデルにより過去~現在の対流圏オゾン・ブラックカーボンの全球分布変動を計算し、それぞれの放射強制力を見積もった上で、CCSR/NIES/FRCGC 気

候モデル（大気＋海洋コンポーネント）により長期平衡実験を実行し、それらの実際の気候影響を評価する。

表 2. SPRINTARSモデル概略

トレーサー	BC, OC, 硫酸塩、土壌ダスト、海塩、SO ₂ , DMS
エミッション	BC/OC : バイオマスバーニング、化石燃料燃焼、生物燃料燃焼、農業 ※二次有機OC生成については、テルペンemissionから単純化して考慮。 SO ₂ : 化石燃料燃焼、バイオマスバーニング、火山 DMS : 海洋プランクトン ダスト: GCM陸域（植生）モデル中で計算。 海塩 : 地表風速の関数として計算。
大気輸送	フラックスフォーム・セミラグランジアン法、Arakawa-Schubert積雲対流
硫黄化学	DMS + OH, SO ₂ + OH, S(IV) + {O ₃ /H ₂ O ₂ } ※、OH, O ₃ , H ₂ O ₂ : CHASERモデル(Sudo et al., 2002 ⁷⁾)による出力。
沈着deposition	(降水)湿性沈着、(地表)乾性沈着、重力降下

(2) . 入力エミッションデータ

本研究では対流圏オゾン前駆気体の産業起源エミッションに関してはEDGAR emission inventoryの枠組みで作成されたデータセット (HYDE) を用い、森林火災起源のemissionについては産業革命以前のエミッション量と人口の関数として表現した（本研究では、産業革命以前の森林火災エミッションとして現在のエミッション量の10%を仮定した; Lamarque et al (2005)などと同様）。

BCについては、特にアジア域起源のエミッションが重要である。特にインド域からのBC・OCのエミッションの影響は顕著であると考えられる。当領域のBC・OCに対しては、化石燃料燃焼起源に加え、農業・バイオマスバーニング・生物燃料燃焼などによる寄与も重要であるが、これらのエミッションは季節・時間変動性が大きく、特にBCによる大気加熱効果を議論する際には、少なくとも季節性（理想的には日々変動性）をモデル中で妥当に表現する必要がある。そこで、本研究では BC のバイオマスバーニング起源の emission に関しては、GFED (Global Fire Emissions Database: version 2 for 1997-2005) (van der Werf et al., 2006⁸⁾)の月平均データを利用し、季節性を考慮した。農業起源、生物燃料燃焼起源についても同様に季節性を導入した。しかしながら、実際に観測されるBCは数日スケールの時間変動性を持つことから、上記データに更に、ATSR (Along Track Scanning Radiometer) 衛星観測による地表ホットスポットデータ (Arino et al., 1999⁹⁾) を利用し、エミッションの時間分解能を5日に向上した。

一方で、BCの産業起源のエミッションに関しては、領域モデル用に開発されている inventory (http://www.cgrer.uiowa.edu/EMISSION_DATA/index_16.htm) データを東アジア域に適用し、精

緻化を図った。本研究では、BCエミッションデータ導入の妥当性を検討するため、本推進費課題により得られている中国域 BC 観測データと比較し、評価を行った（4. 結果考察参照）。

（3）．過去から現在までの全球オゾンおよびブラックカーボン変動が及ぼす気候応答の評価実験

1）．オゾン変動が及ぼす気候応答の評価実験

平成18年度は、過去（産業革命以前）から現在までの全球対流圏オゾン変動に対する気候感度実験を実施した。本研究では、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（大気大循環モデルに海洋混合層モデルを結合）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。

本研究では、過去から現在までの対流圏オゾン増加、成層圏オゾン減少、および長寿命温室効果気体増加（LLGHGs）の影響をそれぞれ個別に定量化するため、表3に示すような5種類のシナリオ実験を行った。対流圏オゾン増加については、その非一様な水平分布パターンがどのような役割を持つかについて考察するため、過去から現在までのオゾン増加分布を東西平均した（東西一様の）オゾン増加を与えた実験 LTm を設定した。それぞれの実験について、50年間分の積分を行い、後半20年間の出力結果を解析に用いた。また、気温変化の分布パターンについての議論を行うため、それぞれのシナリオについて、初期値による6つのアンサンブル計算を行った（1実験のみでは統計的に有意でない可能性があるため）。

表3．オゾンの気候平衡応答評価のための実験設定。

	Ctrl	L	LT	LTm	LTS
LLGHGs*1	過去	現在	現在	現在	現在
対流圏オゾン	過去	過去	現在	現在*2	現在
成層圏オゾン	過去	過去	過去	過去	現在

*1 長寿命温室効果気体（LLGHGs）は、CO₂、CH₄、N₂O、CFCsを考慮。 *2 東西一様のオゾン増加。

2）．ブラックカーボン変動が及ぼす気候応答の評価実験

前年度に引き続き、平成19年度には、現在までのブラックカーボン変動に対する気候感度実験を実施した。本研究では、CCSR/NIES/FRCGC 気候モデル（大気大循環モデルに海洋混合層モデルを結合）を土台としたSPRINTARSエアロゾルモデルにより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。

本研究では、BC、OC、および長寿命温室効果気体増加（LLGHGs）の影響をそれぞれ個別に定量化するため、表4に示すような4種類のシナリオ実験を行った。それぞれの実験について、50年間分の積分を行い、後半20年間の出力結果を解析に用いた。また、モデル計算実行上の問題により、BCについては、過去としては、実際にはゼロ・エミッションを仮定している。このため、BCについての気候影響は、その他の要素（オゾン、LLGHGs、OC）の見積もり（産業革命以前から現在の変化量に対応）に比して、大きくなる傾向があることに注意が必要である。

表4. BCの気候平衡応答評価のための実験設定。

	Ctrl	L	L0	LOB
LLGHGs*1	過去	現在	現在	現在
OC (有機炭素)	過去	過去	現在	現在
BC (黒色炭素)	過去*2	過去*2	過去*2	現在

*1 長寿命温室効果気体 (LLGHGs) は、CO₂、CH₄、N₂O、CFCsを考慮。 *2 実際にはゼロ (0) を仮定。

4. 結果・考察

(1) . オゾン分布変化とその気候影響

1) . 対流圏オゾン増加と成層圏オゾン減少

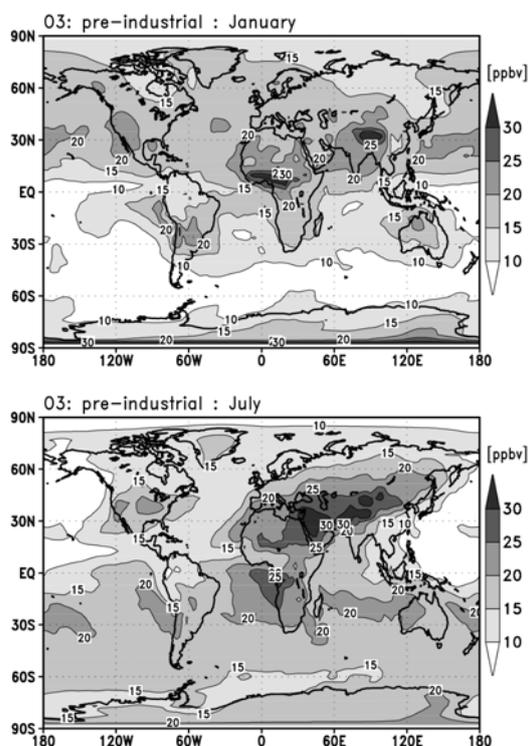


図1 : CHASERにより計算された産業革命以前の地表オゾン濃度分布 (ppbv) 。
1月 (上図) と7月 (下図) 。

過去 (産業革命以前) から現在までの前駆気体エミッション (CH₄、NO_x、CO、VOCs) 増加による対流圏オゾンの変動について化学・気候モデルCHASERを用いて再現実験を行い、観測との比較を行った上で、計算された対流圏オゾン変動量が及ぼす放射強制力の見積もりを行った。本実験では対流圏オゾン前駆気体の産業起源エミッションに関してはEDGAR emission inventory の枠組みで作成されたデータセット (HYDE) を用い、森林火災起源のemissionについては産業革命以前のエミッション量と人口の関数として表現した (本研究では、産業革命以前の森林火災エミッションとして現在のエミッション量の10%を仮定した; Lamarque et al (2005) などと同様) 。

図1はCHASERで計算された産業革命以前の地表オゾン濃度分布である。全球的に現在よりも50-70%

低いオゾン濃度が計算されており、特に夏季海洋上では10ppbv以下の領域が広範囲に分布しているのが分かる。中緯度の大陸上では概ね20ppbv以上のオゾン濃度が計算されていて、森林火災エミッション（現在値の10%に設定）の影響が見られ（1月の北アフリカ、7月の中央アフリカ）、雷からのNO_x生成によるオゾン生成の寄与（7月中東・中央アジア）も確認される。しかしながら、このような地表オゾン濃度を観測値と比較すると、Mickley et al（2004）やLamarque et al（2005）と同様に、中緯度においてモデルは観測値を50-80%過大評価する傾向にあることが確認された。これに関しては土壌・雷からのNO_xエミッションもしくは森林火災エミッションをモデル中で過大評価していることが考えられるが、観測側に問題（過小評価）がある可能性もある。

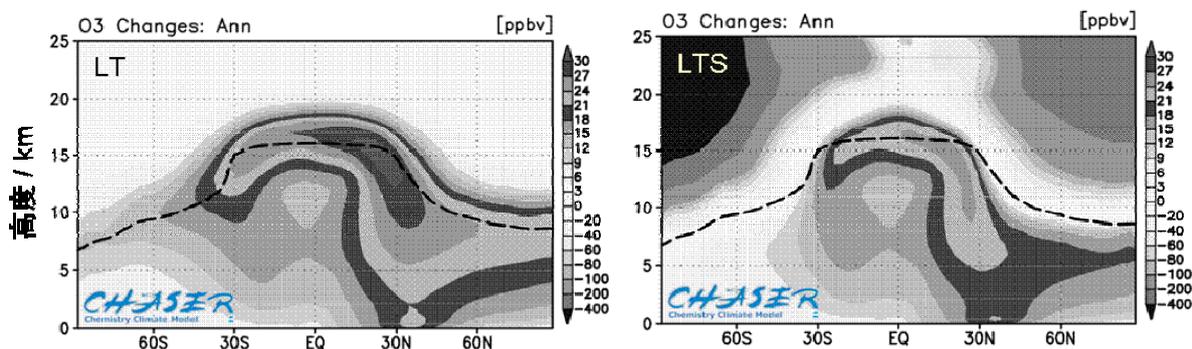


図2．前駆気体エミッション増加による対流圏オゾン増加（シナリオLT）の東西平均分布（左）と対流圏オゾン増加+成層圏オゾン減少（シナリオLTS）の分布（右）。

図2は実験シナリオLT（前駆気体エミッション増加による対流圏オゾン増加のみ考慮）および、シナリオLTS（対流圏オゾン増加に加え、成層圏オゾン減少を考慮）で用いるために再現計算を行ったオゾン分布変化である。エミッション増加のみでは、北半球対流圏界面を中心に顕著なオゾン増加が見られる。このようなオゾン増加は成層圏オゾン減少により大きく抑制されることがわかり、成層圏オゾン減少は対流圏へのオゾン流入量を減らし、対流圏下層のオゾンにも影響があることが確認される。表5はエミッション増加による対流圏オゾン増加（LT）および、さらに成層圏オゾン減少も加味した場合（LTS）についての全球・半球平均の対流圏オゾン変動量を示す。エミッション増加により約10DUのオゾン増加が計算され、成層圏におけるオゾン減少は対流圏オゾンを約1割減少させることがわかる。

表5．対流圏カラムオゾン量の変動（DU）

	全球	北半球	南半球
LT	+10.2	+12.4	+7.9
LTS	+9.2	+11.4	+6.9

図3は本研究で計算された過去から現在までのオゾン変動のオゾンゾンデ観測との比較である。オゾンゾンデ観測は1970年から2004年までのオゾン変動を示しているが、本研究のモデル結果は1850年から2000年間のオゾン変動に対応することに注意が必要であり、このため、特に汚染域に近い陸地上では、モデルで計算されている対流圏オゾン増加量は観測よりも大きく見積もられている。しかしながら、モデル計算による対流圏オゾン増加および成層圏オゾン減少などの特長的なオゾン変動プロファイルは観測と非常に整合的である。

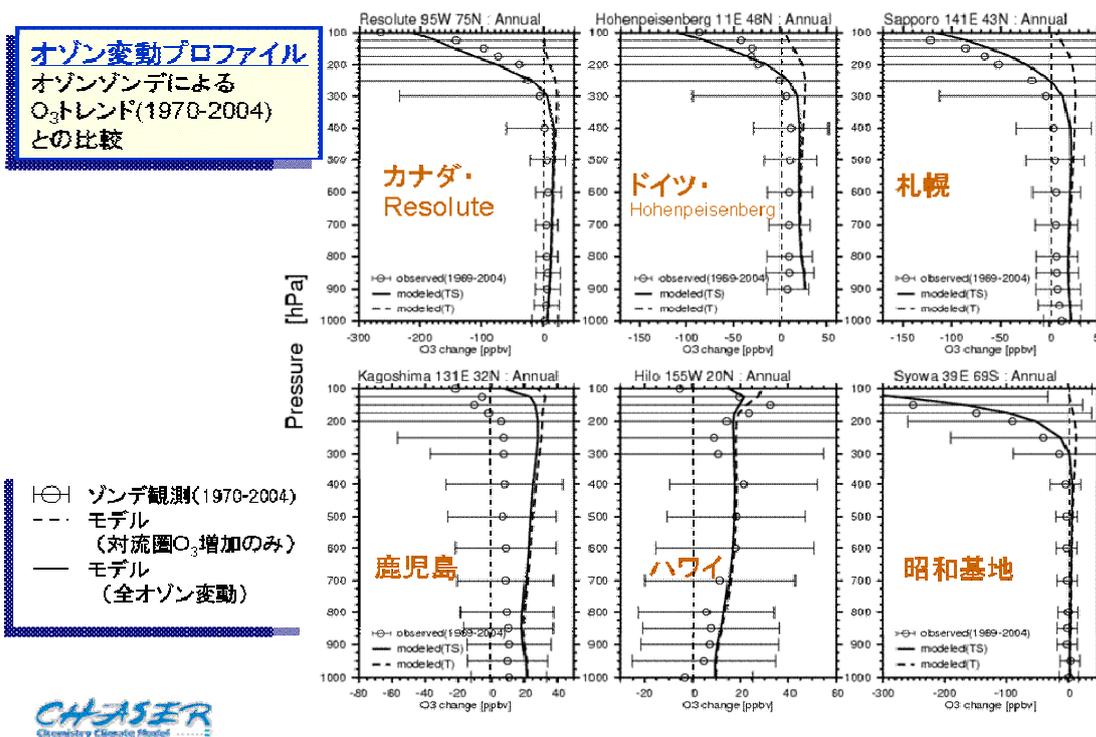


図3. オゾン高度プロファイルの変動についての、観測(丸)とモデルの比較(線)。観測(オゾンゾンデ)は1970-2004年までのオゾン変動を示し、モデルは1850年から2000年までのオゾン変動を示す。

2). オゾンの放射強制力

表6に本研究で計算された対流圏オゾン増加(産業革命以前~現在)による放射強制力(年平均)を整理した。全球平均では長波 0.40 Wm⁻²、短波 0.09 Wm⁻²で、合計約 0.5 Wm⁻² の強制であった。これはメタンの放射強制力と同等である。長波による放射強制は両半球中緯度で極大となり、北半球中緯度の夏季では 1 Wm⁻² もの大きな放射強制が計算された(図4)。短波による強制は地表アルベド分布を反映し、極域で大きく夏季には0.3-0.4 W m⁻² の値が計算された。また、上述のように本研究では産業革命以前のオゾン濃度レベルを過大評価している可能性があることを考え

ると、実際のオゾン増加量はさらに大きくなる可能性もあり、その際の放射強制力は本研究の見積もりよりもさらに大きくなることに注意が必要である。産業革命以前のオゾン分布シミュレーションに関しては自然起源エミッション（雷・土壌など）に対する感度実験などにより、さらに詳細に検討する必要がある。また図4(c)が示す通り、対流圏オゾン増加の水平分布パターンは放射強制力の分布に大きく影響することが示唆される（特に中東および赤道域大西洋）。

表 6 : エミッション変動に伴う対流圏オゾン増加による放射強制力 (Wm^{-2})。

	whole-sky			clear-sky		
	Global	N.H.	S.H.	Global	N.H.	S.H.
長波	0.402	0.485	0.319	0.498	0.609	0.386
短波	0.085	0.107	0.063	0.053	0.069	0.037
合計	0.487	0.592	0.382	0.551	0.678	0.423

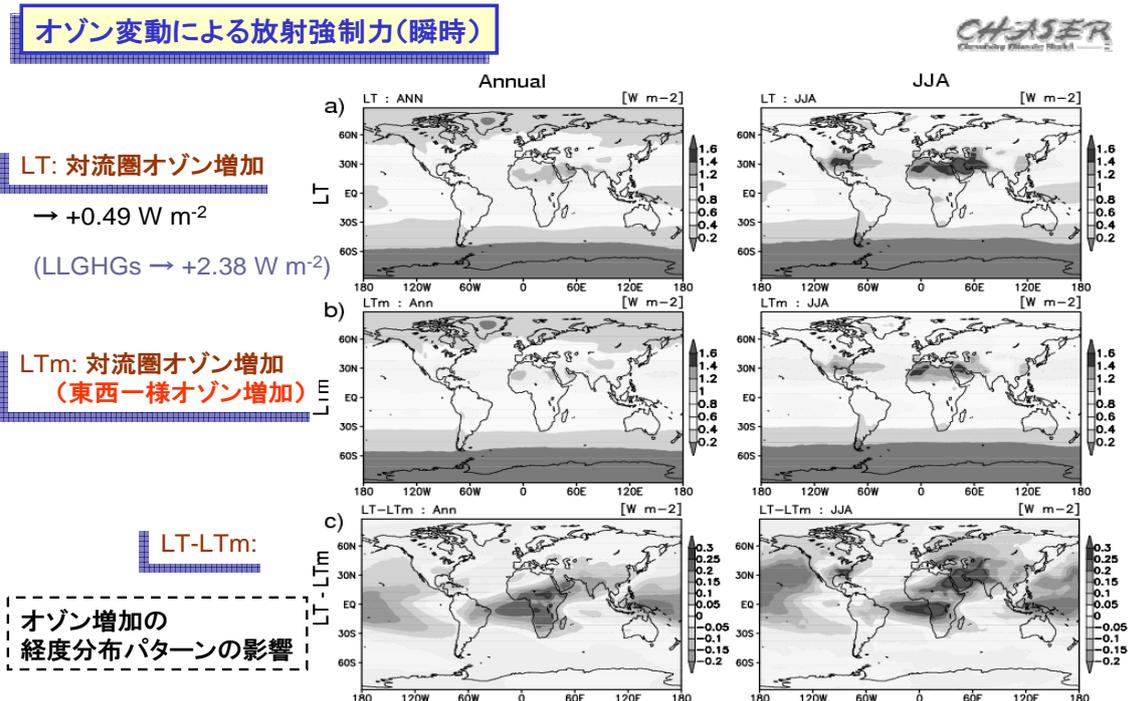


図4. 本研究で計算された対流圏オゾンの放射強制力分布。年平均(左)とJJA(右)。

3). IPCC第4次報告書関連プロジェクト

IPCC 第4次報告書に関連するモデル間相互比較プロジェクトにCHASERモデルを用いて参加した。このプロジェクトでは対流圏・成層圏オゾンの放射強制力や関連化学過程について実験・解析を行った(Gauss et al., 2005など)。ここでは本プロジェクト内で行われた全球オゾン分布変動による放射強制力のモデル計算結果について報告する。本モデル間相互比較実験においては過去から現在までの対流圏オゾン変動のみならず成層圏オゾン変動の影響も考慮に入れた。対流圏・成層圏オゾンの全球変動量の比較を図5に示す。CHASERによる結果はモデルアンサンブルの中では平均的な値を示した。各モデルの右側の棒グラフは気候変動による影響を示すが、CHASERモデルによる結果は他のモデルに比べ小さい。これはSudo et al (2003) が示したように、温暖化により対流圏下層の水蒸気が増加したことによるオゾン減少と成層圏からのオゾン流入量の増加が相殺したためである。表7は各モデルによる対流圏・成層圏オゾン変動による放射強制力の見積もり結果である。ここでもCHASERによる結果はモデルアンサンブルの中でほぼ平均にあるようである。この実験結果が示すように、オゾンの放射強制力の見積もりには対流圏オゾン変動のみならず、成層圏のオゾン変動および気候変動と結合した議論が必要である。

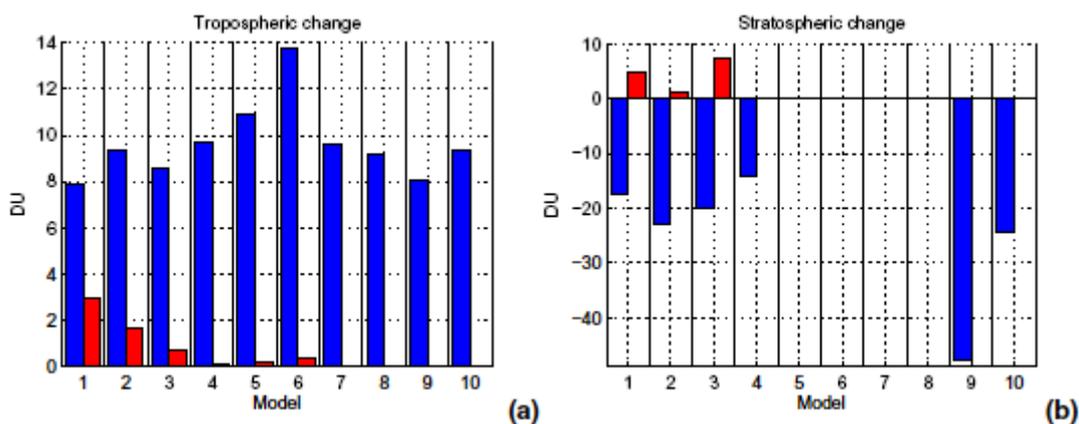


図5：IPCC-AR4関連プロジェクトに参加した各モデルによる対流圏・成層圏オゾン変動（1850-2000年）の変動（全球平均カラム量:ドブソン単位の変動）。本研究のCHASERモデルはModel-No.4。

表7：IPCC-AR4関連プロジェクト参加モデルによる対流圏・成層圏オゾン変動の放射強制力(Wm^{-2}) (adjusted forcing) の計算（本研究のCHASERは4番目）。「SW」は短波強制、「LW」は長波強制、「T」は対流圏オゾン変動、「S」は成層圏オゾン変動による強制をそれぞれ示す。

	SW T	SW S	LW T	LW S	Net T	Net S
ULAQ	0.044	0.16	0.25	-0.15	0.29	0.013
DLR_E39C	0.057	0.24	0.26	-0.16	0.32	0.078
NCAR_MACCM	0.054	0.18	0.29	-0.15	0.34	0.033
CHASER	0.063	0.10	0.31	-0.19	0.37	-0.095
STOCHEM_HadGEM1	0.073		0.30		0.38	
UM_CAM	0.078		0.45		0.53	
LMDzINCA	0.067		0.27		0.33	
STOCHEM_HadAM3	0.092		0.34		0.43	
UIO_CTM2	0.057	0.45	0.21	-0.70	0.26	-0.250
FRSGC_UCI	0.065	0.25	0.28	-0.13	0.34	0.122

4) ． 全球オゾン分布変動の気候影響評価

本研究の実験結果から、産業革命以前から現在までの対流圏オゾン増加は、対流圏のほとんどの領域で $+0.2^{\circ}C$ 以上の昇温をもたらすことが分かり、雲・海氷分布の変動を反映して熱帯域上部対流圏および極域地表付近で特に大きな昇温（ $+0.4\sim 0.5^{\circ}C$ ）が計算された（図6）。このような対流圏オゾン増加による昇温は、長寿命温室効果気体（LLGHGs）による影響の約20%に相当し、対流圏の温暖化に大きく寄与していることが示された。一方、下部成層圏では対流圏オゾン増加による成層圏への長波放射の減少によって、特に低緯度域で $-1.0^{\circ}C$ 程度の降温（寒冷化）が計算されており、成層圏オゾン量への影響も示唆される。また、このような降温は LLGHGs による温度変化プロファイルとは違った高度構造を持っており、LLGHGs よりも低い高度領域で降温を生じていることにも注意が必要である。また、成層圏オゾンの減少は短波・長波過熱の減少を起し、

下部成層圏で更なる降温を生じている。成層圏オゾン減少は低緯度域上部対流圏でも降温を起しているが、これは放射的な影響だけでなく、対流圏へのオゾン流入量が減ったことによる上部対流圏オゾン減少にも起因する。

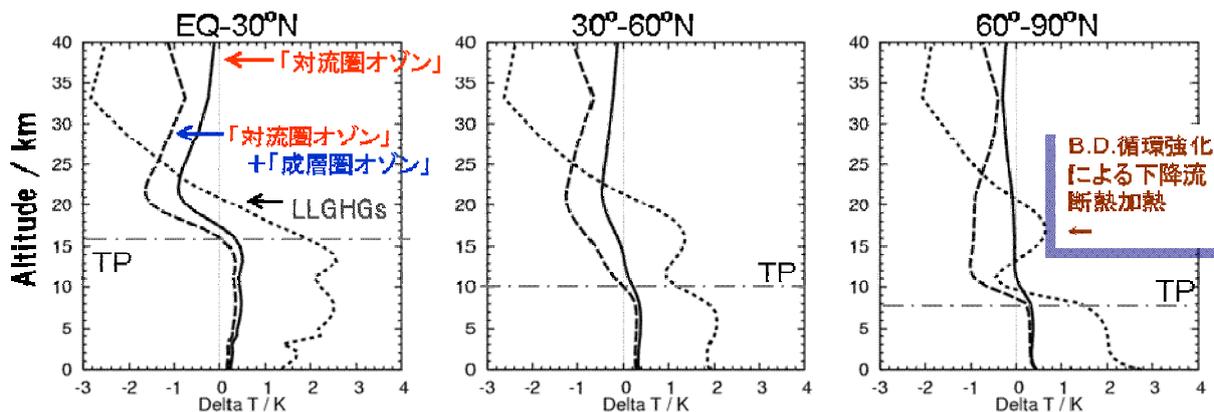


図6. 産業革命以前から現在までの対流圏オゾン増加（実線）および長寿命温室効果気体（LLGHGs）増加（破線）が鉛直気温分布へ及ぼす影響（北半球各緯度帯）。破線は対流圏オゾン増加に加え、成層圏オゾン減少も考慮した場合の気温変動。

表8. 全球平均地表気温への影響 ΔT (°C)。

	全球	北半球	南半球
対流圏オゾン増加	+0.28	+0.31	+0.25
成層圏オゾン減少	-0.04	-0.05	-0.04
LLGHGs増加	+2.23	+1.78	+2.78

※ 長寿命温室効果気体（LLGHGs）は、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、CFCsを考慮。

表8に対流圏オゾン増加・成層圏オゾン減少および LLGHGs 増加の全球平均地表（2m）気温への影響を示す。対流圏オゾンによる地表気温の昇温は LLGHGs の影響の約14%に匹敵し、地表気温の上昇に対しても全球的に重要な影響があることが計算された。本研究では対流圏オゾン増加に対する気候感度として、 $0.57 \text{ K m}^2 \text{ W}^{-1}$ が得られた。これは Mickley et al. (2004) の結果 $0.64 \text{ K m}^2 \text{ W}^{-1}$ とも整合的である、しかしながら、本研究で使用しているCCSR/NIES/FRCGC 気候モデル自体の気候感度特性については更に調査が必要である。成層圏オゾンの減少については -0.04°C の地表気温低下をもたらすと計算された。これには、成層圏でのオゾン減少による長波吸収（温室効果と同義）の減少による放射的な冷却効果だけでなく、成層圏から対流圏へのオゾン流入量が減り、対流圏オゾンが減少するという間接的な効果も大きい。

図7は対流圏オゾン増加および LLGHGs 増加が東西平均の地表（2m）気温に与える影響を示した

ものである。極域付近では、双方ともに海氷の融解の影響が顕著であるが、北半球では、南半球よりも LLGHGs に対して対流圏オゾンの寄与が大きく、LLGHGs 増加による昇温の20-40%に相当する昇温（温暖化）が計算されている。

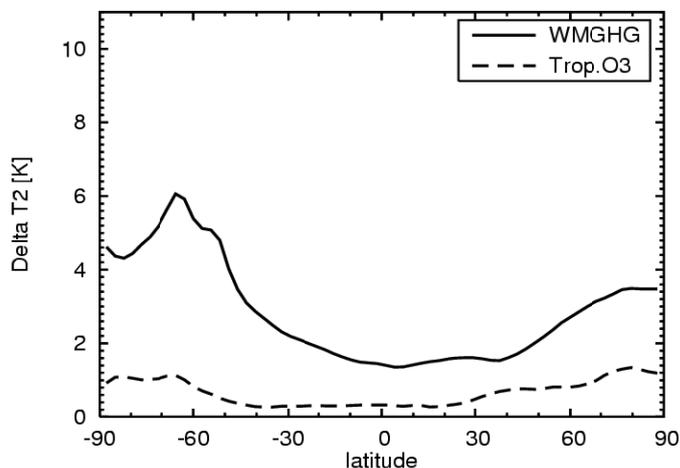


図7. 産業革命以前から現在までの対流圏オゾン増加（破線）および長寿命温室効果気体（WMGHGs）増加（実線）が地表（2m）気温（東西平均）に与える影響 ΔT (°C)。図は年平均を示す。

上で見たように、対流圏オゾンの増加も全球的な地球温暖化に顕著に寄与することが分かったが、本研究では、このような対流圏オゾン増加の地表気温への影響は、特に北半球において、局所的に非常に大きな昇温をもたらすことが示された。図8は対流圏オゾン増加に対する地表気温変動を示したものである。図が示す通り、北米、中東、および西太平洋の各領域で特に顕著な昇温（0.5-1.0°C）が計算され、これは本研究で計算したLLGHGs増加による昇温の20-30%に匹敵する。これは主に、本研究でこれまでに議論した対流圏オゾンの放射強制力分布の非一様な水平分布を反映したものであると解釈され、特に、夏季の中東付近の高い昇温シグナルはこの領域における顕著なオゾン放射強制力（図4参照）にも対応しており、Mickley et al. (2004)の結果と整合的である。

対流圏オゾン増加の地表(2m)気温への影響:

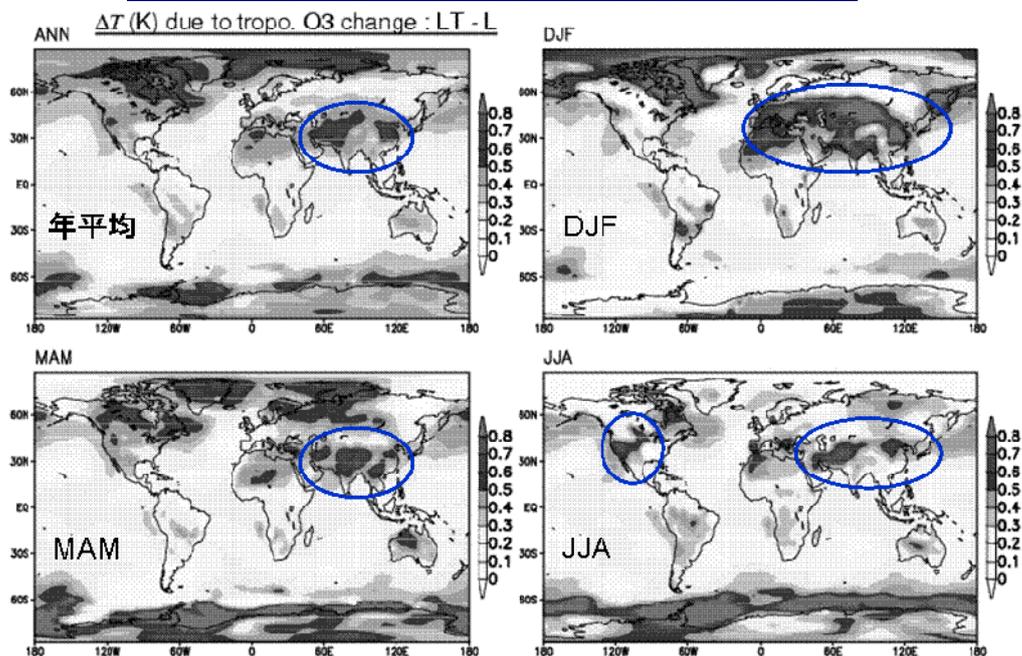


図8. 対流圏オゾン増加による地表気温上昇 (°C) :

平成17、18年度では、特に対流圏オゾン増加の影響評価を重点的に行ったが、19年度は引き続きブラックカーボンエアロゾルの影響についても実験・解析を実行し、対流圏オゾンの影響と併せて複合的な影響評価を行った。

(2) . ブラックカーボン (BC) 分布変化とその気候影響

1) . BCモデル計算の観測データによる評価

BCの気候影響を定量化する実験に先立って、本研究で使用するエアロゾルモデルSPRINTARSによるBC計算を観測と比較し、その評価を実施した。図9は2006年6月の中国・泰山におけるBC・OC濃度時系列について、モデル計算と観測(本推進費課題による集中観測)を比較したものである。モデルは、BC・OC濃度ともに、観測で得られている値を概ね良く再現していることが分かる。しかしながら、森林火災によると思われるBC濃度上昇などはモデルでは良く再現されておらず、エミッションの導入方法について更なる検討が必要である。

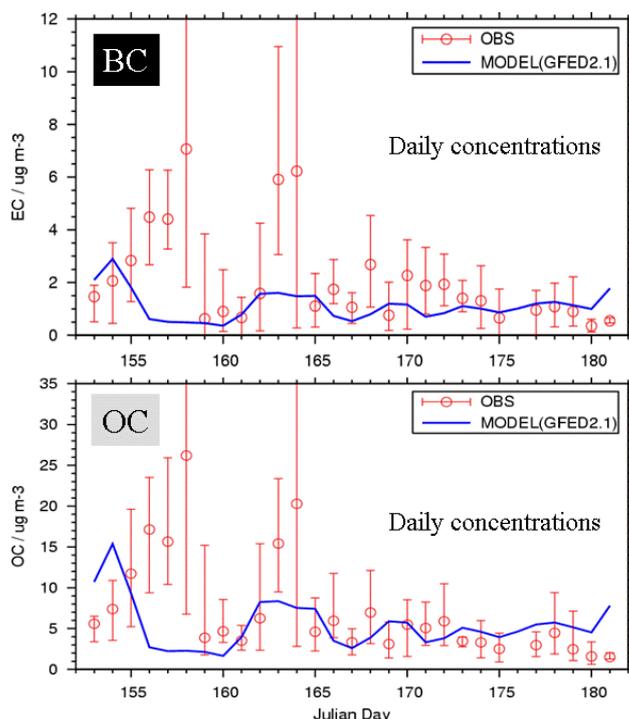


図9. エアロゾルモデルSPRINTARSにより計算された中国（泰山）におけるBC（EC）・OC濃度の観測（本推進費課題B051による2006年6月集中観測）との比較。

2) . BCの放射強制力

本研究ではBCの放射強制力および気候影響として、産業革命以前から現在までのBC増加量に対応した影響ではなく、現在のBC濃度全体量に対する影響を見積もった。

図10は本研究で計算されたブラックカーボン（BC）による放射強制力である。特に北半球夏季（JJA）で、インドや中国域において、 3 Wm^{-2} 以上の強い強制力が計算されている。また、BCによる強制力分布は雲の有無により、大きく異なることが図から分かる（Takemura et al., 2005）。全球平均のBC強制力（全天大気）は、本研究では、 0.52 Wm^{-2} と見積もられ、これは対流圏オゾン増加による放射強制力(0.48 Wm^{-2})と同程度である。しかし、前述の通り、本研究のBC強制力は、現在のBC全量に対する値であるので、産業革命以前からの増加に対するBCの放射強制力は約10%程度低くなるはずである（したがって、よりオゾンの放射強制力に近くなる）。

図11は対流圏オゾン増加による放射強制力とBC（現在量）の放射強制力の比較である（東西平均緯度分布）。BCは特に中低緯度で大きな強制力を及ぼし、特に北半球中緯度につよい正の放射強制力を持つことが分かる。一方、対流圏オゾン増加による強制力は比較的高緯度まで、広く分布しているようである。このように緯度分布に違いが見られるが、放射強制力の絶対値としては、オゾンとBCはお互いに似たような効果を持つことが示された。

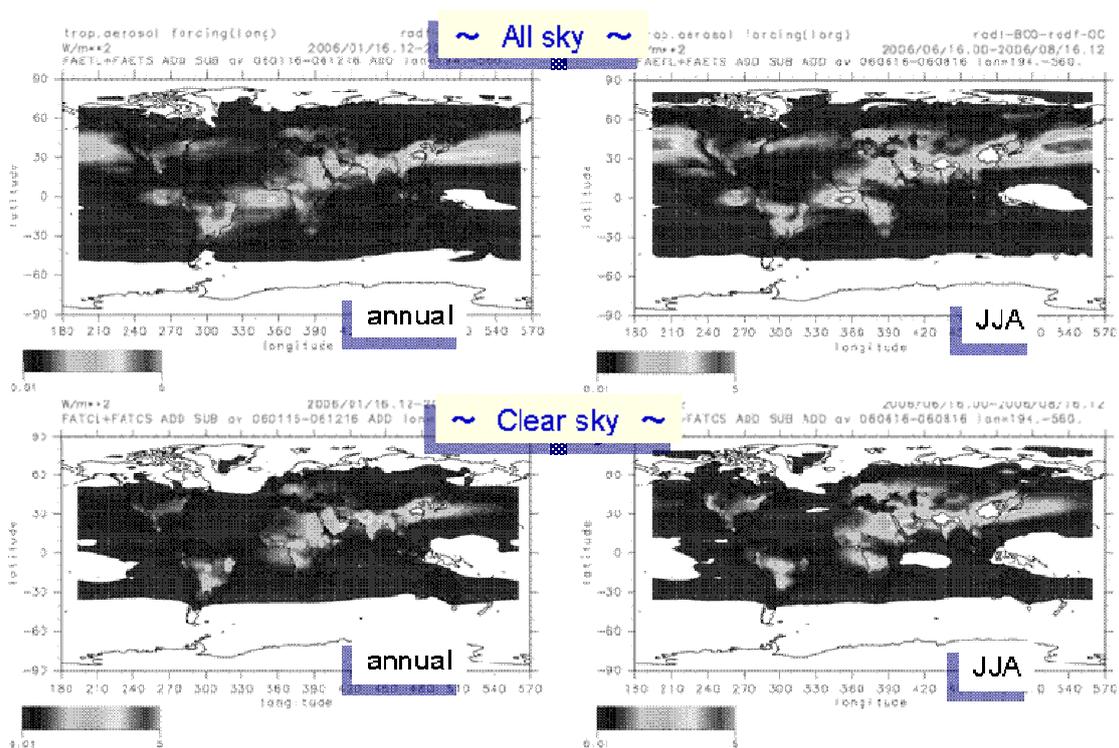


図10. BCの放射強制力分布（年平均：左とJJA：右）。全天強制（上）と晴天強制（下）。

表9. BC（現在量）の放射強制力（ wm^{-2} ）

	全球	北半球	南半球
All-sky（全天大気）	+0.52	+0.75	+0.30
Clear-Sky（晴天大気）	+0.30	+0.47	+0.14

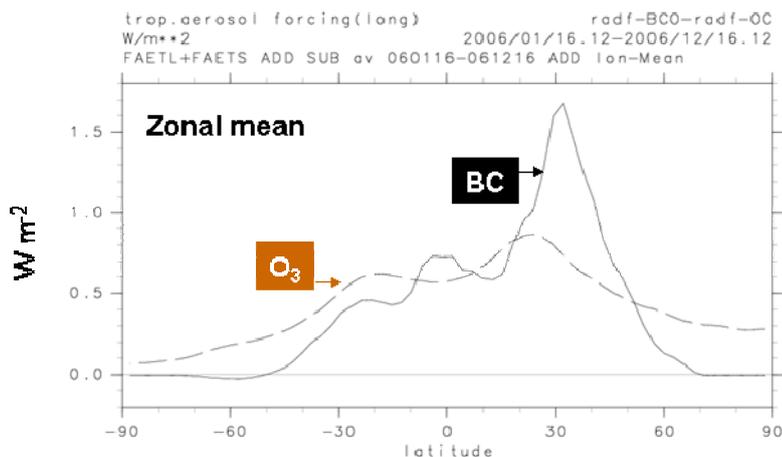


図 1 1. 本研究で計算された対流圏オゾン増加およびBCの放射強制力（東西平均緯度分布）。

3) . 全球BC変動の気候影響評価

図12は本研究で計算されたBC（現在量）に対する気候応答を示す。北半球夏季（JJA）の北米やアジア大陸中央部で顕著な昇温（ 1.5°C 以上）が計算されている。このようなBCに対する昇温パターンは基本的には、BC放射強制力に基づくものであると考えられるが、循環場の変化、雲・降水過程の変化などを介した影響について、今後さらに明らかにしていく必要がある（現時点では、インド域の気温変動は降水場変動と密接な関係があることが判明している）。BCによる気温変動は、全球平均で 0.49°C （北半球 0.51°C 、南半球 0.44°C ）と見積もられた。この値はBCの現在量に対するもの（BCゼロからBC現在量の差分の効果）であることを考慮すると、産業革命以前のBC量から現在までの増加量がおよぼす温暖化効果は、対流圏オゾン増加による温暖化影響（上述；約 0.3°C ）に近いものであると言える。

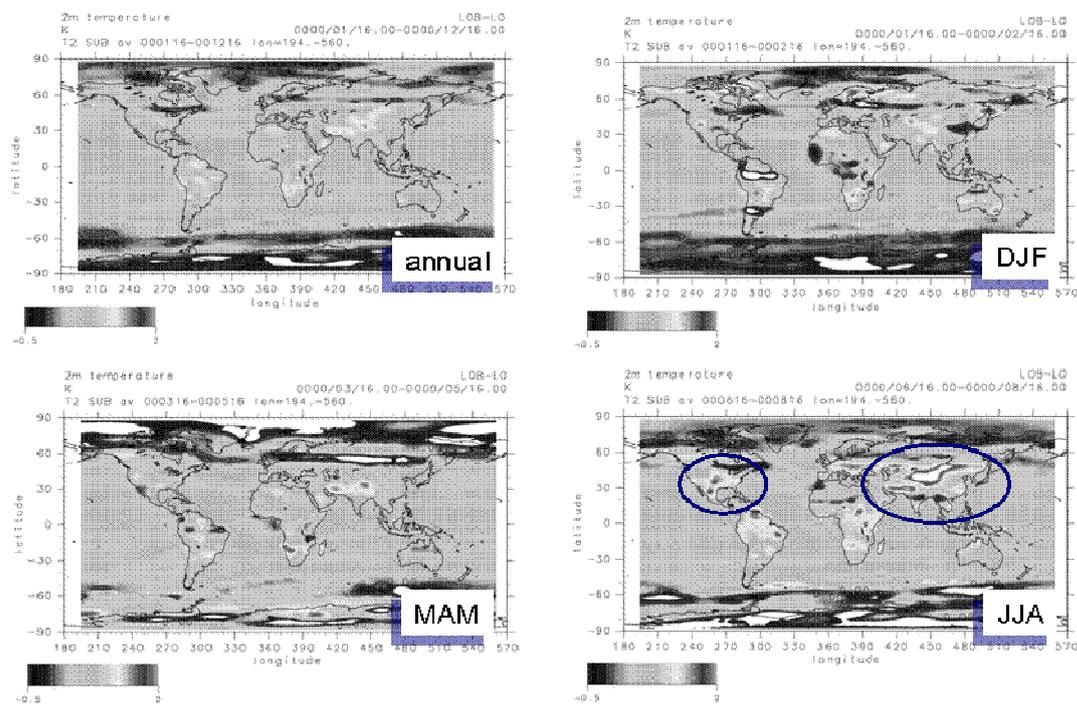


図 1.2. BC（現在量）に対する地表気温の応答（℃）。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本サブテーマでは、気候モデルを用いて、対流圏オゾンおよびブラックカーボンエアロゾルの気候への影響を定量的に評価する。平成17、18年度では全球オゾン分布の変動を定量的に明らかにする実験を実施、さらに対流圏オゾン増加の気候影響についての詳細な実験・評価を行い、対流圏オゾンの増加が地球温暖化に対して全球規模で大きな影響を与えることが定量的に明らかにされた。また、地表気温への影響についても特徴的な水平パターンを持つことが示された。このような実験・結果は世界的に見ても未だ例が少なく、定量的な気候変動理解に向けて、貢献するところが大きい。平成19年度にはBC増加の気候影響を定量的に評価する実験を実施し、全球平均としてはBC増加が対流圏オゾン増加と同程度の温暖化を引き起こすことを明らかにした。このような結果は、これまでの研究では明らかにされていなかった点であり、科学的意義も大きい。

(2) 地球環境政策への貢献

地球大気化学国際協同計画(IGAC)の国内委員会（日本学術会議・第3部）において、大気化学・エアロゾルと気候との相互作用に関する今後の見通し、およびワーキンググループ立ち上げに関して、本研究の化学・気候結合モデル CHASER による成果を提示し、貢献した（日本学術会

議・第3部・第1回、第2回IGAC国内委員会議事録)。本研究で新たに得られる成果についても、積極的に広報・環境政策への貢献に努める。

6. 引用文献

- (1) IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson, Eds., Cambridge University Press, 881pp.
- (2) IPCC (2007) (気候変動に関する政府間パネル) 第4次報告書.
- (3) Mickley, et al. (2004) Climate response to the increase in tropospheric ozone since preindustrial times: A comparison between ozone and CO₂ forcing, *J. Geophys. Res.*, 109, D05106, doi:10.1029/2003JD003653.
- (3) Takemura T, T. Nozawa, S. Emori, T.Y. Nakajima, T. Nakajima (2005) Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model, *J. Geophys. Res.*, 110, doi:10.1029/2004JD005029.
- (6) Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B.N. Holben, and S. Kinne (2002) Single-Scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model, *Journal of Climate*, 15, 4, 333-352.
- (7) Sudo, K., M. Takahashi, J. Kurokawa, and H. Akimoto (2002a): CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description. *J. Geophys. Res.*, 107, 10.1029/2001JD001113.
- (8) Sudo, K., M. Takahashi, and H. Akimoto (2002b): CHASER: A global chemical model of the troposphere 2. Model results and evaluation. *J. Geophys. Res.*, 107, 10.1029/2001/JD001114.
- (9) Sudo, K., M. Takahashi, and H. Akimoto (2003): Future changes in stratosphere-troposphere exchange and their impacts on future tropospheric ozone simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2256 10.1029/2003GL018526.
- (10) van der Werf, G. R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, P. S. Kasibhatla, and A.F. Arellano (2006) Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3423-3441.
- (11) Arino, O., J.-M. Rosaz, and J.-M. Melinotte (1999) World Fire Atlas with AVHRR and ATSR, Proceedings of the IUFRO Conference on Remote Sensing and Forest Monitoring, Rogow Poland.
- (12) Gauss, M., Myhre, G., Isaksen, I. S. A., Grewe, V., Pitari, G., Wild, O., Collins, W. J., Dentener, F. J., Ellingsen, K., Gohar, L. K., Hauglustaine, D. A., Iachetti, D., Lamarque, J.-F., Mancini, E., Mickley, L. J., Prather, M. J., Pyle, J. A., Sanderson, M. G., Shine, K. P., Stevenson, D. S., Sudo, K., Szopa, S. and Zeng, G (2006): Radiative forcing since preindustrial times due to ozone change in the troposphere and the lower stratosphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 6, pp 575-599, 24-2.

7. 国際共同研究等の状況

IPCC 第4次報告書に関連するモデル間相互比較プロジェクトに関連し、CHASERモデルを用いて共同研究を行った。このプロジェクトでは対流圏・成層圏オゾンの放射強制力や関連化学過程について実験・解析を行っている（Dentener et al., 2006; Gauss et al., 2006; van Noije et al. 2006）。

さらにIGAC・IGBP（地球大気化学国際協同計画・地球圏－生物圏国際協同研究計画）の大気化学・気候相互作用に関する国際研究プログラム（AC&C: Atmospheric Chemistry and Climate）に関しても、会合等を通じ、IGAC・IGBPの研究プロジェクトに参加した。

8. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

- 1) Sudo, K., and H. Akimoto (2007) Global source attribution of tropospheric ozone: Long-range transport from various source regions, *J. Geophys. Res.*, 112, D12302, doi:10.1029/2006JD007992
- 2) 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 *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 6, 8553-8604, 2006, SRef-ID: 1680-7375/acpd/2006-6-8553.
- 3) 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, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 575-599, 2006.
- 4) Dentener F., D. Stevenson, K. Ellingsen, T. van Noije, M. Schultzl, 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, *Environmental Science & Technology*, 40(11); 3586-3594. DOI: 10.1021/es0523845, 2006.
- 5) 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. Müller, 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 Biogeochemical Cycles*, 20, GB4003, doi:10.1029/2005GB002672, 2006.
- 6) 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. Müller, 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, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 2943-2979, 2006.

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) Sudo, K., Akimoto H., and Takahashi M., Source attribution of global tropospheric O₃ and CO: where do they come from ?, *International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences*, Beijing, China, 1-11 August, 2005.
- 2) Sudo, K., Akimoto H., and Takahashi M., Past/Future Climate change impacts on atmospheric chemistry in a chemistry coupled climate model, 1st ACCENT Symposium, Urbino, Italy, 12-16th September, 2005.
- 3) Sudo, K., Atmospheric chemistry and aerosols modeling in the FRCGC Earth System model, 1st German-Japan Workshop on Numerical Climate Modeling, Kashiwa, Chiba, Japan, 31st Oct – 1st Nov, 2005.
- 4) Sudo, K., Takigawa M., Nagashima T., and Takahashi M., Chemistry-Aerosol modeling in the FRCGC Earth System Model, 1st UJCC International Workshop on Current Problems in Earth System Modelling, Yokohama, Japan, 24-25th Nov., 2005.
- 5) 須藤健悟, 秋元肇、高橋正明: 第16回大気化学シンポジウム、豊川市民プラザ、豊川、2006年1月11-13日「オゾン・COの全球分布・収支の起源と全球規模長距離輸送」
- 6) Sudo, K., Akimoto H., Hirenzaki M., K. Iwao, and Takahashi M., Source attribution of global O₃ and CO: climatology and interannual variability, Joint IGAC/CACGP/SOLAS/WMO Symposium: Atmospheric Chemistry at the interfaces, 17-23 September 2006, Cape Town, South Africa.
- 7) 須藤健悟、秋元肇、“対流圏オゾン変動の気候影響評価: 化学気候モデル実験による初期結果”、第17回大気化学シンポジウム、豊川市民プラザ、2007年1月10-12日。
- 8) 須藤健悟、“対流圏オゾンの熱帯域マッデン・ジュリアン振動”、第17回大気化学シンポジウム、豊川市民プラザ、2007年1月10-12日。
- 9) 須藤健悟、高橋正明、秋元肇、“全球対流圏オゾンの変動要因: エミッション・気候・成層圏オゾンの各変動の影響”、日本気象学会2006年度春季大会、つくば国際会議場、2006

年5月21-24日。

- 10) 須藤健悟、秋元肇、”産業革命以前から現在までの対流圏オゾン変動が気候に及ぼす影響”、日本地球惑星科学連合2007年大会、千葉幕張メッセ、2007年5月22日。
- 11) 須藤健悟、秋元肇、”全球オゾン分布変動の気候影響: 化学気候モデルによる気候応答実験”、日本気象学会2007年秋季大会、北海道大学、2007年10月15日。
- 12) 須藤健悟、秋元肇、”全球オゾン変動に対する気候応答: 20世紀中の対流圏オゾン増加および成層圏オゾン減少の影響”、第13回大気化学討論会、2007年11月28日。
- 13) Sudo, K. and H. Akimoto, “Climate Response to Global Ozone Changes: Impacts of Tropospheric Ozone Increase and Stratospheric Ozone Decrease During the 20th Century”, 米地球物理学会2007年秋季大会 (AGU Fall meeting), 2007年12月14日。

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。