

B-061 人間活動によるアジアモンスーン変化の定量的評価と予測に関する研究
 (3) 気候モデル「エアロゾル増減」実験によるアジアモンスーン変化の評価

名古屋大学大学院

環境学研究科 地球環境科学専攻

神沢博・須藤健悟

〈研究協力者〉 九州大学 応用力学研究所

竹村俊彦

名古屋大学大学院 環境学研究科 地球環境科学専攻

永尾一平・齊藤伸治

平成18～20年度合計予算額 31,936千円

(うち、平成20年度予算額 9,146千円)

※上記の合計予算額には、間接経費 6,861千円を含む

[要旨] 各種エアロゾルのアジアモンスーンへの影響を明らかにするために、化学・エアロゾル気候モデルを構築して、数値モデル実験を行い、以下のような成果を得た。1) 全球を対象としたエアロゾル気候モデルSPRINTARS内で扱われているエアロゾル・雲生成過程に関するスキーム整備を行った。また、エアロゾルおよびエアロゾル源気体の地表エミッションデータベースを、既存のものを基に、東アジア域の精緻化を中心に、整備した。2) 今後はアジア域で硫酸塩よりも硝酸塩の増加が見込まれることから、SPRINTARSにエアロゾル熱力学平衡モジュールを組み込み、化学気候モデルCHASERの活用により硝酸塩 (NO_3^-) のシミュレーションを新たに導入して、化学・エアロゾル気候モデルを構築し、診断計算を行って、モデル中の硝酸塩シミュレーションの妥当性を確認した。その結果、特にインド周辺において、アンモニウム濃度が高いために高濃度の硝酸塩が、放射・雲/降水過程への影響として、硫酸塩 (SO_4^{2-}) に匹敵する可能性があることを明らかにした。3) 水溶性のエアロゾルとしては、硫酸塩、硝酸塩の他に、有機炭素エアロゾルがある。そのうち、陸域植生から放出された炭化水素類が大気中で酸化されて生じる二次有機エアロゾル (SOA) は、森林から農地への転換などの土地利用変化に伴う植生種別変化や葉バイオマス変化などにより、大きく変化すると考えられる。アジア域でのこのSOA変化が、アジアモンスーンにどのように影響するかについて数値モデル実験を行うため、サブテーマ4と連携し、植生からのSOA エミッションデータを作成した。4) 土地利用変化などに伴う硝酸塩およびSOAの各エアロゾルの変化の気候影響を明らかにするため、過去(産業革命前)および現在の気候を再現する数値モデル実験を実施し、それぞれのエアロゾルの放射強制力を見積もった。この結果、特にインド・バングラデシュを中心とした南アジア域においては、硝酸塩増加による強い冷却効果 (-1 W m^{-2}) とSOA減少による強い加熱効果 ($+0.5$ から $+1 \text{ W m}^{-2}$) とが起こることを明らかにした。

[キーワード] エアロゾル、アジアモンスーン、気候モデル、間接効果、気候変動

1. はじめに

大気中の浮遊粒子（エアロゾル）は全球的な気候変動に関して重要な役割を演じていることが最近の研究で明らかになりつつある（e. g., IPCC第4次報告書: IPCC (2007)¹⁾）。人間活動（工業・交通・農業など）に伴う黒色炭素（煤; ブラックカーボン; BC）のエミッション量増加は、大気中のBC濃度上昇をもたらして、顕著な正の放射強制力（ $\geq 0.5 \text{ W m}^{-2}$ ）を生じさせ、温暖化を加速させる。一方、二酸化硫黄（ SO_2 ）や炭化水素類のエミッション増加に伴う硫酸塩や有機炭素（OC）などの吸湿性エアロゾルの大気中の濃度上昇は、太陽光反射や雲・降水過程の変調を引き起こして、負の放射強制力を生じさせ、冷却効果があるとされている（e. g., Hansen et al., 2001²⁾; Takemura et al., 2005³⁾）。特に東アジア域での影響に注目した場合、これらのエアロゾルが夏季アジアモンスーンの挙動に影響を与える可能性が最近の研究により示唆されている。例えば、Ramanathan et al (2005)⁴⁾ や Lau et al. (2006)⁵⁾ らのモデル研究が示すように、アジア域（主にインド）から排出されたブラックカーボンおよび土壌ダストがチベット高原とその周辺上で特徴的な加熱パターンを形成し、この地域でのモンスーン循環・降水の時空間パターンに影響を与えている可能性がある。このようなエアロゾルのアジアモンスーンへの影響は梅雨前線の形成過程を通じて日本付近の降水場にも波及し得る。したがって、これらのエアロゾルの影響に関する定量的な理解が求められる。

本研究では、エアロゾル気候モデルを基本モデルとして、それに化学気候モデルを組み合わせ、化学・エアロゾル気候モデルを構築し、各種エアロゾルのアジアモンスーンへの影響を精査する。この際、上述のモデル研究が示すようなブラックカーボン・土壌ダストなどによる直接的な放射効果（直接効果）だけでなく、吸湿性エアロゾル（硫酸塩、有機炭素）の雲・降水過程への影響（間接効果）も同時に評価する。

2. 研究目的

図1に示すように、過去数十年の各種のエアロゾル（硫酸塩、炭素性、海塩、土壌性など）およびエアロゾル源（二酸化硫黄気体など）のエミッション（排出）データを、化学・エアロゾル気候モデルに与えて、エアロゾルの時空間分布を計算し、各種のエアロゾルの放射強制力の空間分布の経年変化がアジアモンスーンのパターンの気候変化に及ぼす効果を、観測データと比較して評価する。各種エアロゾルのエミッションデータを増減させた数値モデル実験を行い、それぞれのエアロゾルの効果を評価する。なお、エアロゾルのうち、硫酸塩・硝酸塩、炭素性のものは人間活動によって著しく影響を受ける。土壌性のもの（黄砂などのダスト）および二次有機炭素エアロゾルは、人間活動による土地利用の変化が影響して変化する（サブテーマ4と関連する）。また、エアロゾルモデルの妥当性検討やスキーム改良（エミッション、硫酸塩・有機炭素エアロゾル生成過程など）を化学モデルと連携して行い、エアロゾルシミュレーションの高度化を図る。特に、本研究では、これまで扱われてこなかった硝酸塩エアロゾルの計算や、土地利用変化に伴う二次有機エアロゾル（SOA）の過程などをモデルに導入する。

サブテーマ3: エアロゾルのアジアモンスーンに対する影響

1. エアロゾルシミュレーション(CCSR/NIES/FRCGC GCM)の詳細な評価
2. 各種エアロゾルのモンスーンへの影響の分離と定量化
3. エアロゾルのモンスーンへ影響の雲間接効果スキーム依存性の評価
4. 温暖化との相互作用と将来予測

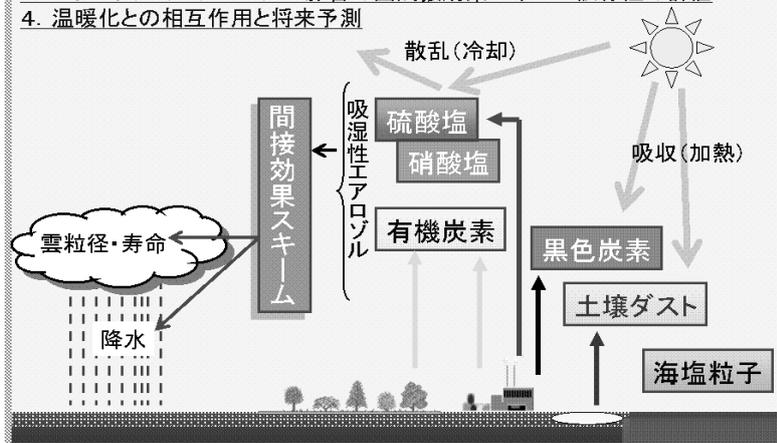


図1. サブテーマ3の目的と研究枠組み。

3. 研究方法

(1) エアロゾル気候モデル

表1. 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、テルペンのエミッションから簡単化して考慮。 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

本研究では、全球エアロゾル気候モデルSPRINTARS (Takemura et al., 2002⁶⁾, 2005³⁾)および全球化学気候モデル CHASER (Sudo et al., 2002⁷⁾) を軸としたモデル研究を行う。SPRINTARS モデルは、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)、および地球環境フロンティア研究センター (JAMSTEC/FRCGC) の共同で開発されている CCSR/NIES/FRCGC 大循環 (GCM) 気候モデル (MIROC) 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1)、これらの大気放射、雲・降水過程への影響を計算する。地表からのエミッション源に関しては、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）からのエミッションが考慮されている。土壌ダストのエミッションは、気候モデルMIROCのパーツである陸域モデル（MATSIRO）の中で風速、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。

エアロゾルの気候・気象場への影響は、大気放射に対する直接効果（加熱・冷却）と、雲・降水過程に対する間接効果（雲核増加、雲粒子長寿命化による雲量増加に伴う冷却）に大別されるが、SPRINTARSモデルでは、これらについて、各種パラメタリゼーションを使用した妥当な表現を行う（表2）。

表2. SPRINTARSモデルにおけるエアロゾル直接・間接効果の取り扱い。

直接効果：	間接効果
<ul style="list-style-type: none"> ・ GCM放射スキームに結合。 ・ 屈折率：波長、各種エアロゾルの粒径分布、吸湿成長に応じて与える。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 雲粒子数N_c：エアロゾル粒子数、粒径分布、鉛直流、曲率・溶質効果を考慮。 ・ 雲粒有効半径： $r = k \left(\frac{3}{4\pi\rho_w} \frac{\rho l}{N_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \rho l: \text{雲水量}$ ・ 降水生成率： $P = -\frac{dl}{dt} = \frac{\alpha d^2}{\beta + \gamma \frac{N_c}{\rho l}}$

なお、本研究の初期段階で、SPRINTARSエアロゾルモデル本体の最新版への更新作業を行った。これにより、各生成過程が陽に扱われ、これまで診断的に計算されていた雲水粒子数が、予報変数として計算されるようになった。また液滴だけでなく、雲氷に対する影響も扱えるようになっている。

(2) 硝酸塩エアロゾル計算の導入

エアロゾル気候モデルSPRINTARSと化学気候モデルCHASERを連携させ、硝酸塩(NO_3^-)のシミュレーションの追加および、硫酸塩シミュレーションの改善を行い、化学・エアロゾル気候モデルを構築した。CHASERモデルはSPRINTARSモデルと同様にCCSR/NIES/FRCGC GCM 気候モデル(MIROC)を基本にしており、対流圏オゾンを中心とした各種化学反応(NO_x - HO_x - CH_4 - CO - VOCs 反応系)、輸送過程、沈着過程が考慮されている。雲・降水過程に影響を与える吸湿性エアロゾルには、硫酸塩、硝酸塩、有機炭素(OC)エアロゾルがある。このうち、硫酸塩とOCについては、本研究の化学・エアロゾル気候モデルで既に扱っていたが、硝酸塩については、その生成過程が化学過程と関連して複雑であるため、無視されていた。本研究では、エアロゾル熱力学平衡モデル(ISORROPIA)(Nenes et al., 1998⁸⁾)のモジュールを化学・エアロゾル計算過程に新たに導入し、硫酸塩・アンモニウム塩・硝酸塩の複合系のシミュレーションを可能にした。そのモジュール導入に先立って、気候モデル用に計算を高速化する作業も行った。図2は本研究での硝酸塩・硫酸塩・アンモニウ

ム計算の枠組みを示す。平衡反応群からなるエアロゾル熱力学平衡モデル ISORROPIAのモジュール導入により、SPRINTARS・CHASERで計算される硫酸成分、硝酸成分、およびアンモニウム成分を、エアロゾル相(aerosol)と気相(gas)とにそれぞれ分離することができ、また、アンモニア・アンモニウムの硫酸塩(吸湿性)への影響も反映できるようになった。

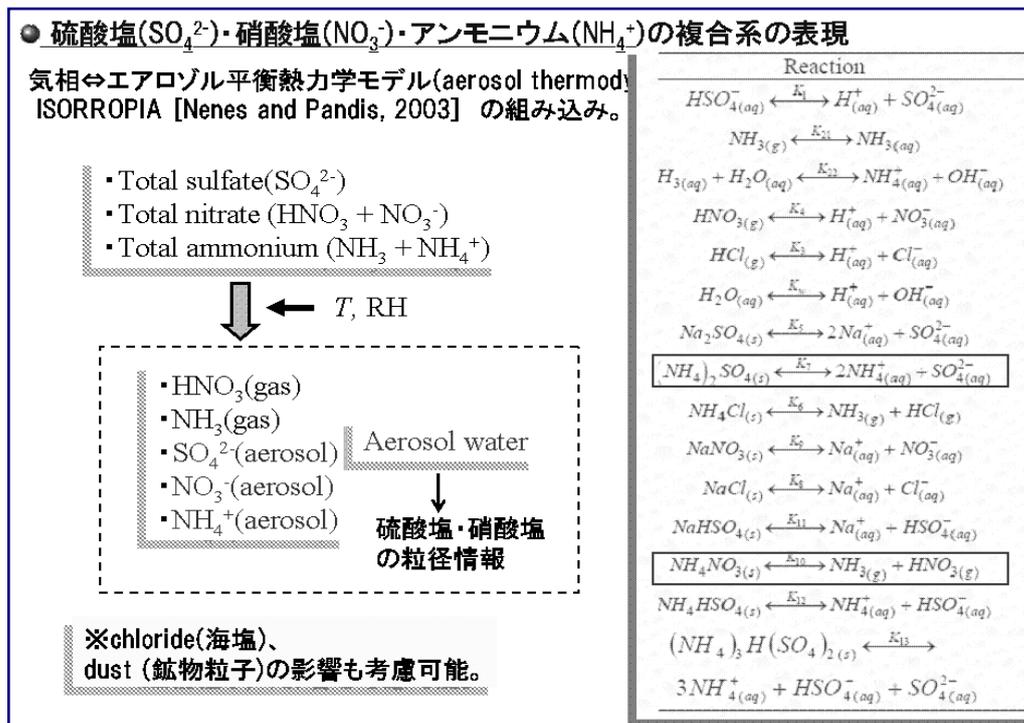


図2. SPRINTARSモデルへのエアロゾル熱力学平衡モデルの導入。右側に示す平衡反応により、硝酸成分(nitrate)、硫酸成分(sulfate)、アンモニア成分(ammonium)を気相とエアロゾルに分離する。エアロゾル上に付着する水分(Aerosol water)も計算可能。

図3に本研究で構築された化学・エアロゾル気候モデルの概略を示す。気候モデル本体のMIROCには大気エアロゾルモデルSPRINTARSが結合されており、硫酸塩、炭素性(BC/OC)粒子、土壌粒子、海塩粒子の計算が含まれるが、本研究により、大気化学モデルCHASERの化学反応過程と結合し、硝酸塩(NO₃⁻)粒子のシミュレーションが可能になった。さらに、植物起源の有機炭素エアロゾル(SOA)については、Kanakidou et al. (2005)⁹⁾などを参考にして、CHASERによるVOCs酸化過程を用い、より現実的な表現が可能となった。以上のように、本研究のモデル改良・精緻化により、農地化などの土地利用変化に伴う硝酸塩およびSOAの変化を含め、エアロゾル変化の気候・モンスーンへの影響について総合的な数値モデル実験・解析が可能となった。

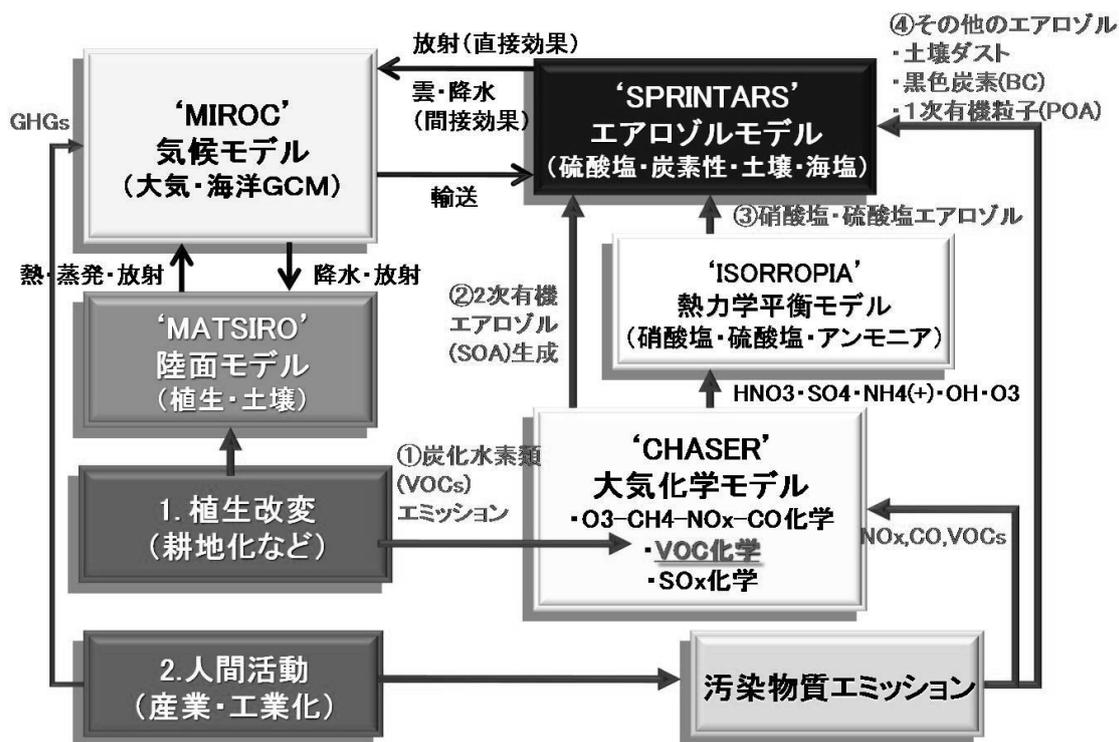


図3. 本研究で構築・精緻化された化学・エアロゾル気候モデルの全体概略図。

(3) 地表エミッションデータ

本研究の主たる対象は、アジア域起源のエアロゾルの影響である。特にインド域からのBC・OCのエミッションの影響が顕著であると考えられる。当地域の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エミッションに関しては、GFED (Global Fire Emissions Database: version 2 for 1997-2005) (van der Werf et al., 2006¹⁰)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、上記データに加えて、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., 1999¹¹) 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、上述のエミッションデータ導入の妥当性を検討するため、BCと同様のエミッション源を持つ一酸化炭素 (CO) をトレーサーとした数値モデル実験を行い、実験データを観測データと比較し、評価を行った。

(4) 土地利用変化に伴う二次有機エアロゾル変化の再現

硫酸塩、硝酸塩と同様に水溶性のエアロゾルとしては、有機炭素エアロゾル (OC) がある。そのうち、陸域植生から放出された炭化水素類が大気中で酸化されて生じる二次有機エアロゾル (SOA: secondary organic aerosol) は森林から農地への転換などの土地利用変化により大きく変化すると考えられる。本研究では、特にアジア域での土地利用変化に伴う植生種別変化と葉バイオマス変化が、二次有機エアロゾルの変化を介し、アジアモンスーンにどのように影響するかについて数値モデル実験を行うため、サブテーマ4と連携し、植生からの SOA 前駆気体のエミッションデータなどの作成を行った。

まず、過去の土地利用変化に伴う SOA 変化を表現するため、サブテーマ4と連携し、土地利用変化による地表面タイプの変化（耕作地への転化など）および葉バイオマスの変化についての全球時系列データを作成した。この後、表3に示す各地表面タイプに対応するエミッション・ファクター (Guenther et al., 1995¹²) を利用し、SOAの前駆気体である炭化水素（テルペン類）のエミッション時系列データへの加工を行った。

表3. 気候モデル中の陸面モデル (MATSIRO) での地表面タイプのそれぞれごとのテルペン類 (二次有機エアロゾルの前駆気体) のエミッション効率 (単位葉バイオマス当りのエミッション・ファクター)。

		Terpenes
-1	sea surface (mixed layer)	0.0
0	sea surface	0.0
1	continental ice	0.0
2	broadleaf evergreen forest (=1 for SiB2)	0.6
3	broadleaf deciduous forest & woodland (=2 for SiB2)	0.8
4	mixed coniferous & broadleaf deciduous forest & woodland (=3 for SiB2)	1.0
5	coniferous forest & woodland (=4 for SiB2)	2.4
6	high latitude deciduous forest & woodland (=5 for SiB2)	0.8
7	wooded c4 grassland (=6 for SiB2)	1.0
8	shrubs & bare ground (=7 for SiB2)	0.8
9	tundra (=8 for SiB2)	0.8
10	cultivation (=9 for SiB2)	0.2
11	desert (=6 for SiB2)	0.8

(5) 各種エアロゾルの気候影響評価数値モデル実験

本研究では、上述のように改良・精緻化されたモデルにより、過去（産業革命以前）・現在についての再現数値モデル実験を実施し、各種エアロゾル変化に対する放射強制力を計算し、それぞれの気候影響を見積もった。

4. 結果・考察

(1) エミッションデータの検討

上述のように改良を行ったエミッションデータについて検討を行った。図4は化石燃料燃焼起源のBCおよびSO₂のエミッション（年平均）である。図5は、BCエミッションをバイオマスパーニ

ング、農業、生物燃料燃焼の3種類の起源に分け、1月、4月、7月の各月に対して示したものであり、アジア域のエミッションが特に春季に高いことが確認できる。しかしながら、最近のアジア域のBC観測によると、このようなBCエミッションを用いたモデル計算では、春季のバイオマスバーニング起源のBCが著しく過小評価される例が確認されており、今後、評価数値モデル実験を実施し、妥当性について検討する必要がある。

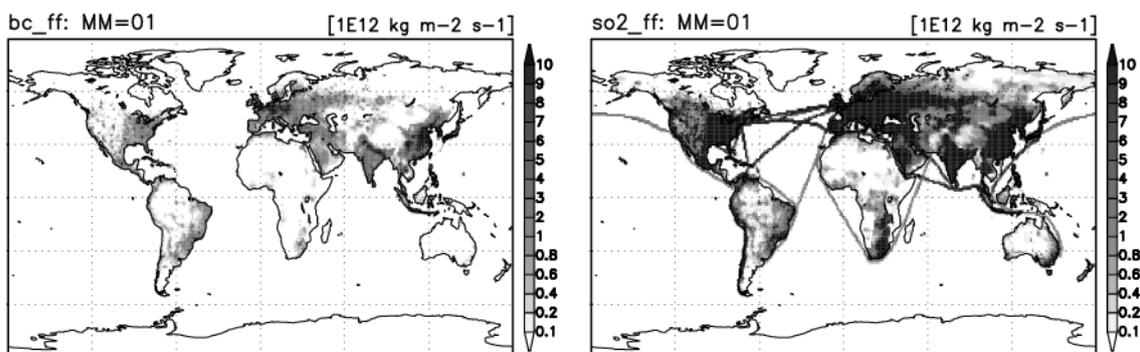


図4. 人為起源(化石燃料燃焼)による地表エミッション(年平均)。(左)ブラックカーボン (BC)、(右) 二酸化硫黄(SO₂)。

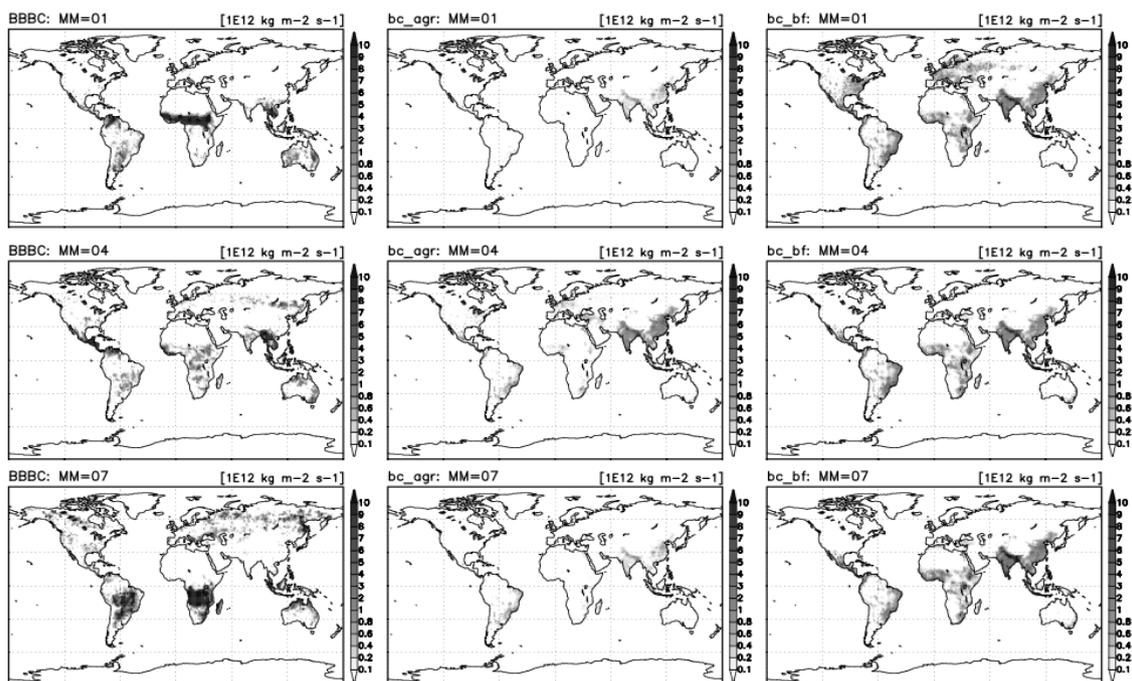


図5. ブラックカーボン (BC) 地表エミッション。起源：(左) 森林火災、(中) 農業、(右) 生物燃料燃焼。月平均：(上) 1月、(中) 4月、(下) 7月。

本研究では、BCエミッションと同様に一酸化炭素(CO)についても、同様のデータを用いてエミッションを作成し、観測との比較のための評価数値モデル実験を行った。図6は本研究で計算

された大気中のCOの濃度を日本上空の観測と比較した一例である。この図が示すように、日本の地表付近のCO濃度について年間を通じてモデルは観測値を過小評価する傾向にあり、アジア域COのエミッションをモデルが過小評価している可能性があることが示唆される。さらに、観測データにはバイオマスバーニング起源であると思われる短周期・イベント的なCO濃度変動が見られるが、モデルはこれを表現できていないように見える。したがって、バイオマスバーニング起源のエミッション量をモデルが過小評価している可能性があることが示唆される。

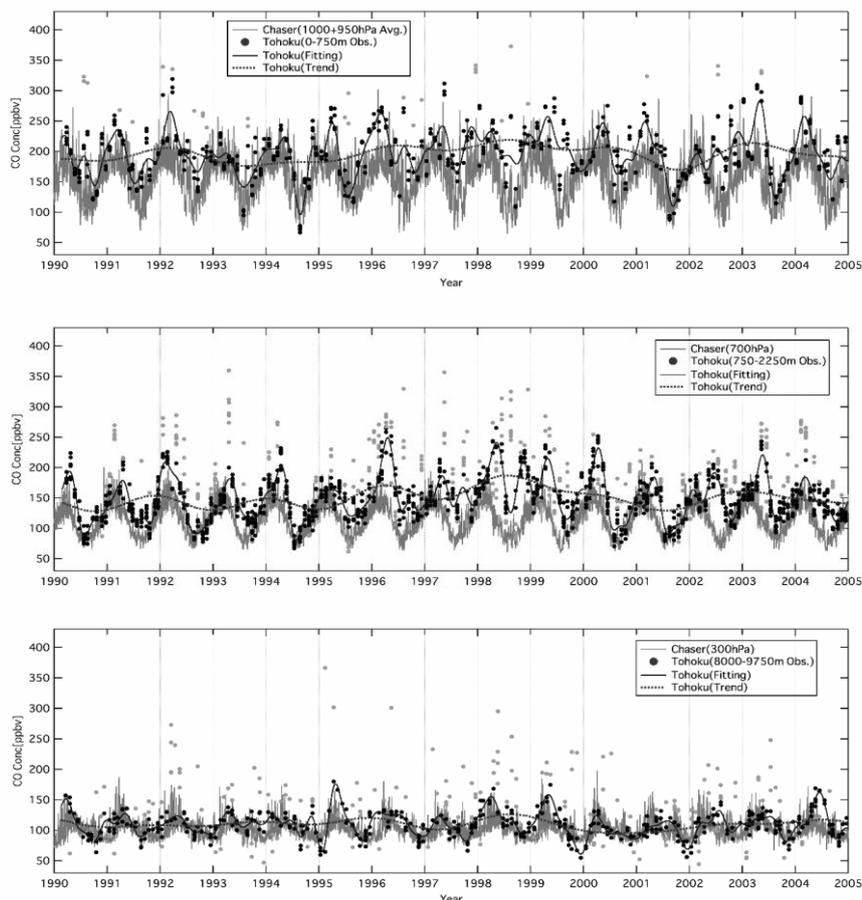


図6. 日本上空における一酸化炭素 (CO) 濃度の観測データとモデル結果の比較 (1990-2004年)。(上) 950 hPa、(中) 700 hPa、(下) 300 hPa。縦軸に幅があるように見える実線がモデル。その他は観測。

(2) 硝酸塩エアロゾルのシミュレーション

本研究では、エアロゾル熱力学モデルを新たに導入し、エアロゾル気候モデルSPRINTARS内で硝酸塩エアロゾルの計算を可能にした。モデルで計算された硝酸塩の分布を確認すると、境界層内では、北米、欧州、アジア域で高濃度の硝酸塩が見られた。これは、前駆気体である窒素酸化物 (NO_x) のエミッション分布を反映したものである。また、インド・バングラデシュの周辺では、特に高濃度の硝酸塩エアロゾルが計算された (図7)。これは、この地域では農業起源のアンモ

ニアのエミッションが多く、逆に硫酸塩は少ないため、硝酸成分と豊富なアンモニアが結合して塩を生じやすく、エアロゾルで存在する硝酸成分が極めて高いためである。

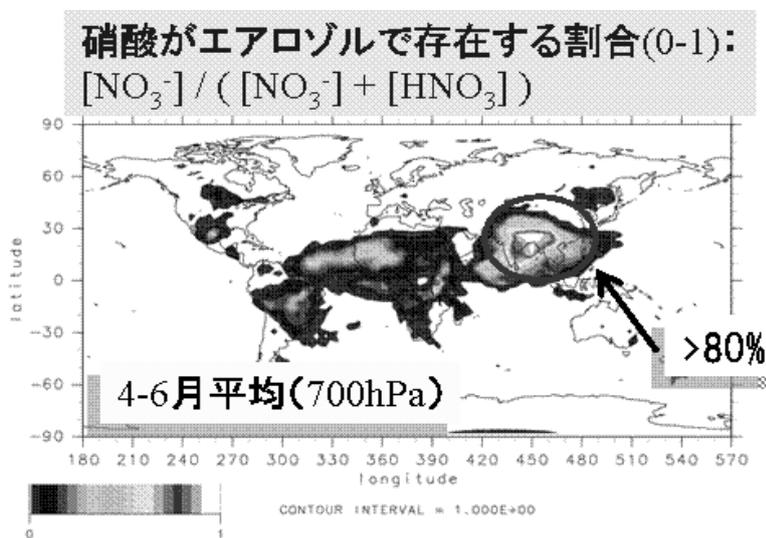


図7. 硝酸成分のうち、エアロゾルで存在するものの割合 (%)。4-6月、高度700 hPa。

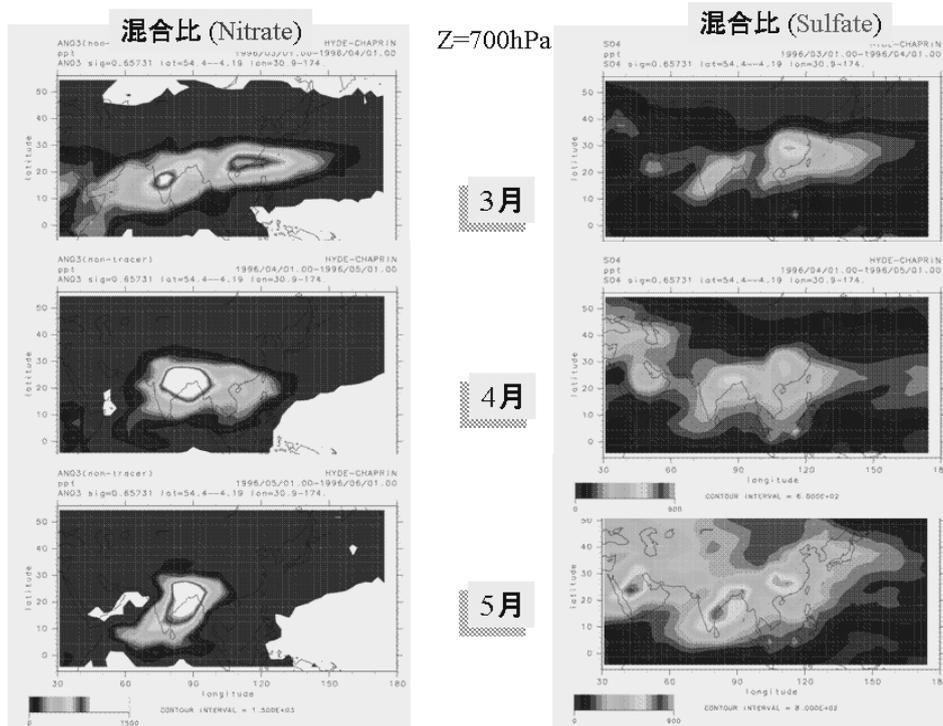


図8. 本研究で計算された硝酸塩 (Nitrate) エアロゾル (左) と硫酸塩 (Sulfate) エアロゾル (右) のアジア域における分布 (混合比)。グレースケールは左右で異なって見えるが、同一のスケールである。左図で白く抜けている部分 (バングラデシュ付近) は特に濃度が高いことを示している。

このように、インド・バングラデシュ周辺で局所的に高い硝酸塩エアロゾル濃度は、冬季から夏季前にかけて顕著であり、境界層より上の高度域では硫酸塩濃度を大きく上回ることが分かった(図8)。また、この地域において、硝酸塩は、粒子数密度としても硫酸塩より大きい(図9)ため、雲・降水過程にも大きく関与しているはずである。したがって、この地域の硝酸塩がアジアモンスーンに少なからず影響している可能性が強いことが分かる。さらに、硝酸塩の前駆気体である窒素酸化物は、アジア域(インド、中国)において今後も増加する見込みが強いため、硝酸塩が将来のアジアモンスーンに顕著に影響する可能性があることも示唆される。

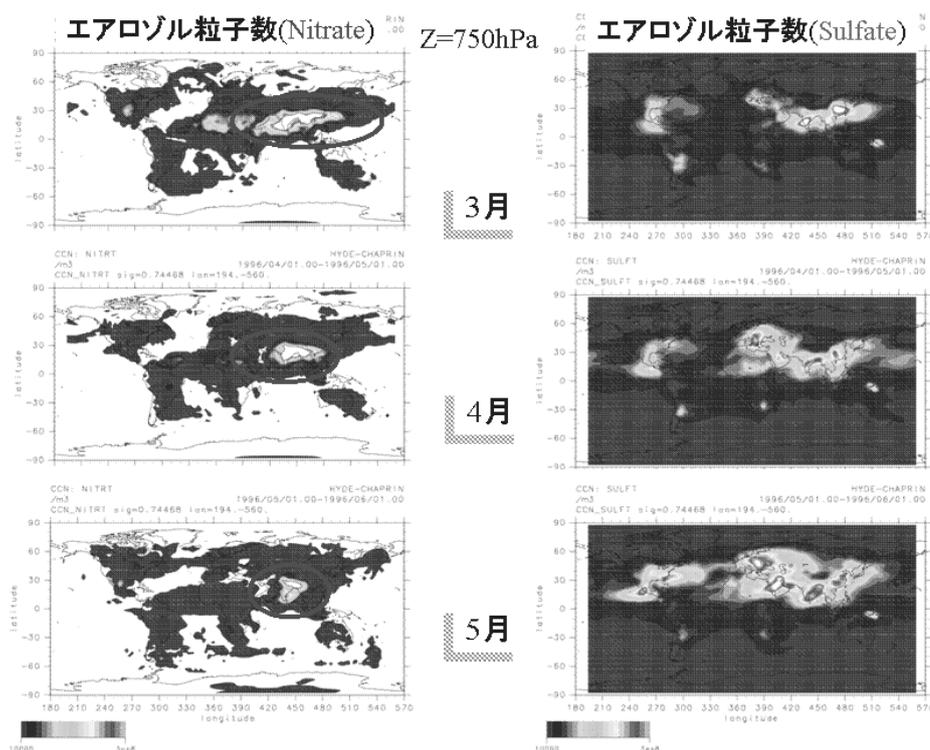


図9. 本研究で計算された硝酸塩 (Nitrate) エアロゾル (左) と硫酸塩 (Sulfate) エアロゾル (右) の粒子数密度分布。

(3) 土地利用変化に伴う二次有機エアロゾル変化

過去の土地利用変化に伴う SOA 変化を表現するため、サブテーマ4と連携し、土地利用変化による地表面タイプの変化(耕作地への転化など)および葉バイオマスの変化についての全球データを作成した(図10)。アジア域では顕著なバイオマス量の減少が見られる。また、北米およびユーラシア大陸中高緯度においても、同様の減少が確認される。これらの地域では、バイオマス量の減少と同時に植生タイプの改変(主に森林から耕作地への農地転換)が認められる。SOA前駆気体である炭化水素(テルペン類など)のエミッションはバイオマス量に比例し、そのエミッション効率(単位バイオマス量当たりのエミッション量)は表3に示した通り耕作地よりも森林の方が高い(Guenther et al., 1995¹²)ので、土地利用変化に伴うこれら炭化水素のエミッションの変化は、SOAの顕著な減少につながる。

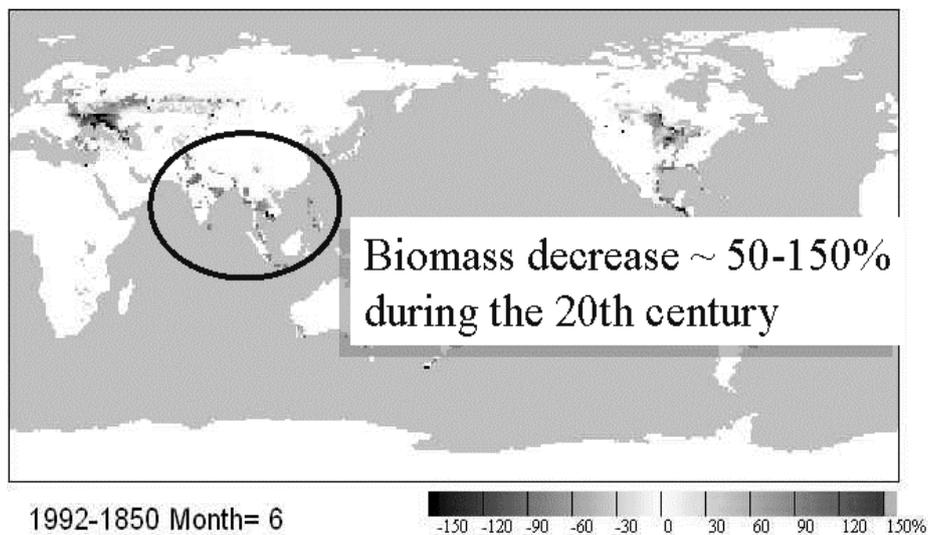


図 1 0. 産業革命以前から現在までの葉バイオマスの変化量。

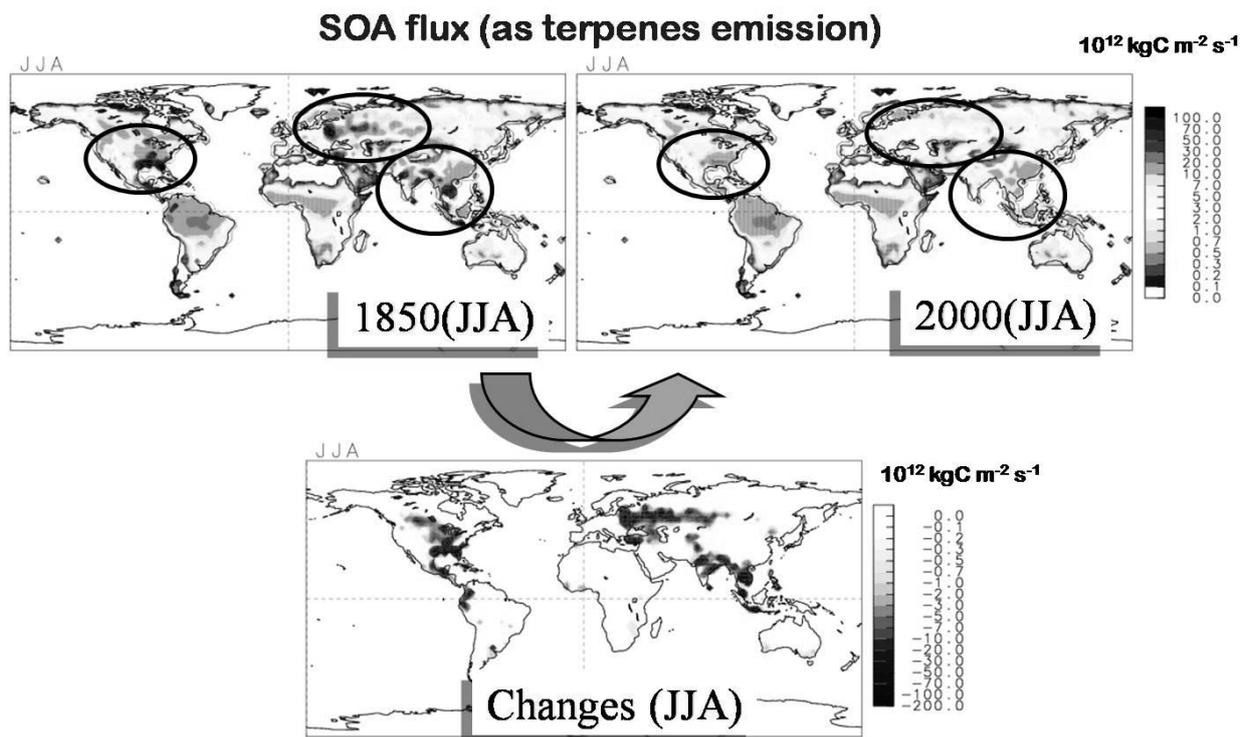


図 1 1. 産業革命以前（1850年）から現在（2000年）までの土地利用変化に伴う有機炭素エアロゾル（SOA）のエミッション変化分布（JJA：北半球夏季）。上図は1850, 2000年それぞれの状態のエミッション分布を示し、下図はそれらの変化の分布を示す。

図 1 1 は、本研究で計算された土地利用変化に伴う北半球夏季のSOAエミッション量の変化を示

す。上述の通り、1850-2000年間のバイオマス量減少および植生タイプの改変により、北米、ユーラシア、南アジア域においてSOA発生量は著しく減少していることが分かる。これらの地域におけるSOA発生量の1850年から2000年間の推移を図12に示す。北米、ユーラシアでは、20世紀前半までの期間における減少が顕著であるが、アジア域に関しては、1920年から1980年までの減少量が特に大きく、1850年～2000年間に60%以上も減少していることが分かる。アジア域におけるこのような顕著なSOA発生量の減少は、土地利用変化に伴うSOA変化が20世紀後半のアジアモンスーン変化に少なからず寄与している可能性があることを示唆するものである。

なお、植生からのSOAの生成の基礎データを得るため、炭化水素のうち、非メタン炭化水素類(NMHCs: non-methane hydrocarbons)の名古屋における1年間の観測データを解析した。その結果、植生活動に伴って放出されたとと思われるイソプレンの濃度が5月から9月に高く、夏においては、濃度にOHラジカルとの化学反応速度定数を乗じた値で比べると、イソプレンはNMHCs全体の約40%を占めた。これは、大都市の名古屋においても、OHラジカル濃度の高い夏において、SOAの生成が促進されることを示唆している。

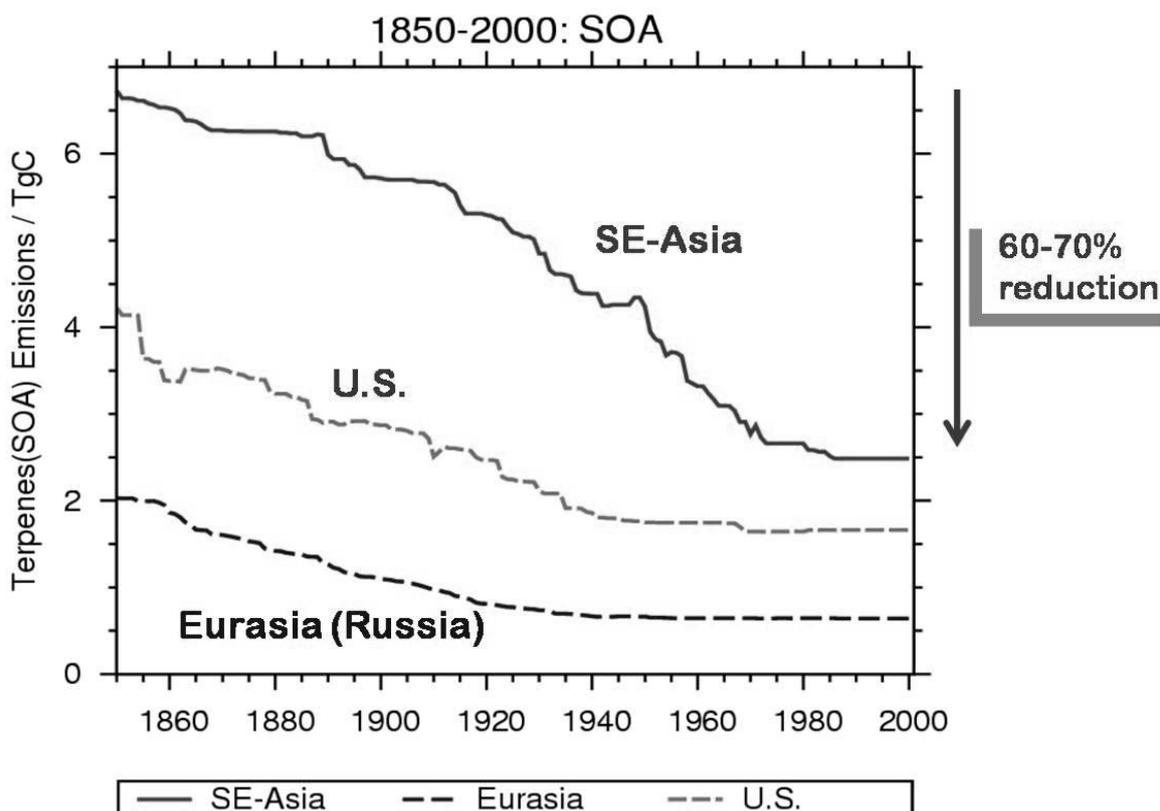


図12. 東南アジア (SE-Asia)、北米 (U.S.)、ユーラシア (Eurasia) におけるSOA発生量の推移 (1850-2000年)。

(4) 各種エアロゾルの光学パラメータおよび放射影響

本研究で精緻化された化学・エアロゾル気候モデルにより各種エアロゾルの光学パラメータを計算し比較を行った。図13は各種エアロゾル成分による光学的厚さを示す。インドなどの南ア

アジア域および中国域では炭素性エアロゾルと硫酸塩エアロゾルの寄与が顕著であり、光学的厚さも0.1-0.4と大きい。本研究で硝酸塩エアロゾルのシミュレーションを新た導入したことにより、中国域や南アジア域で、硝酸塩の光学的厚さは0.1-0.2と計算されており、その放射への影響は無視できないことが確認された。

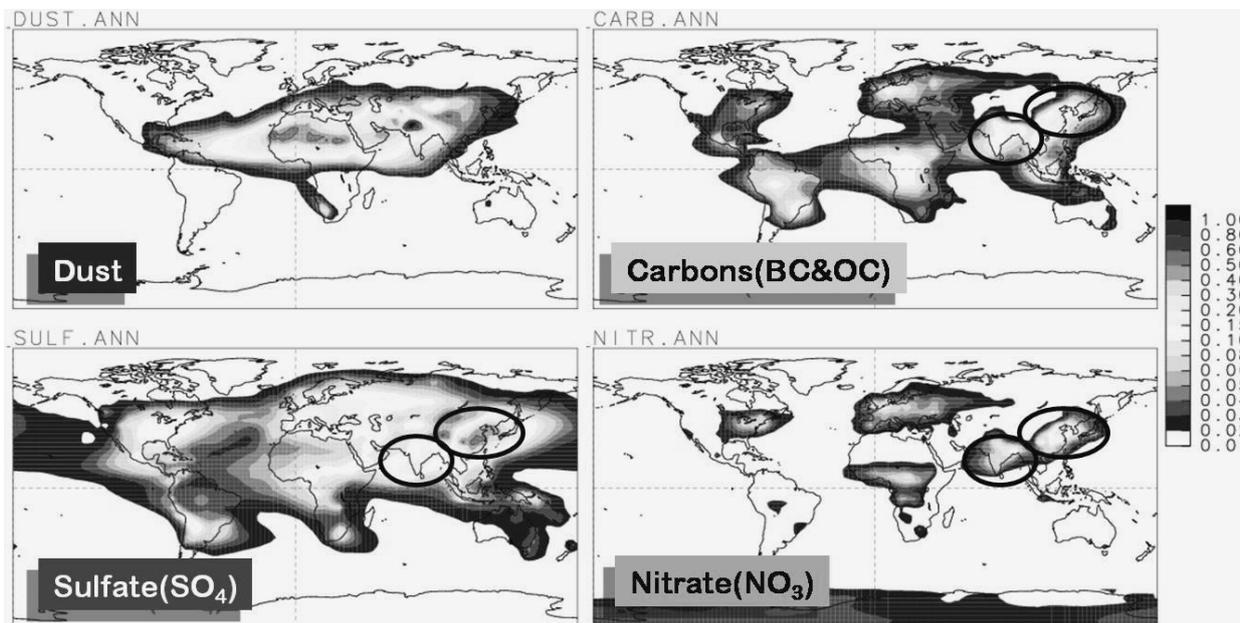


図 1 3 . 各種エアロゾル（ダスト、炭素性、硫酸塩、硝酸塩）による光学的厚さ（年平均）。

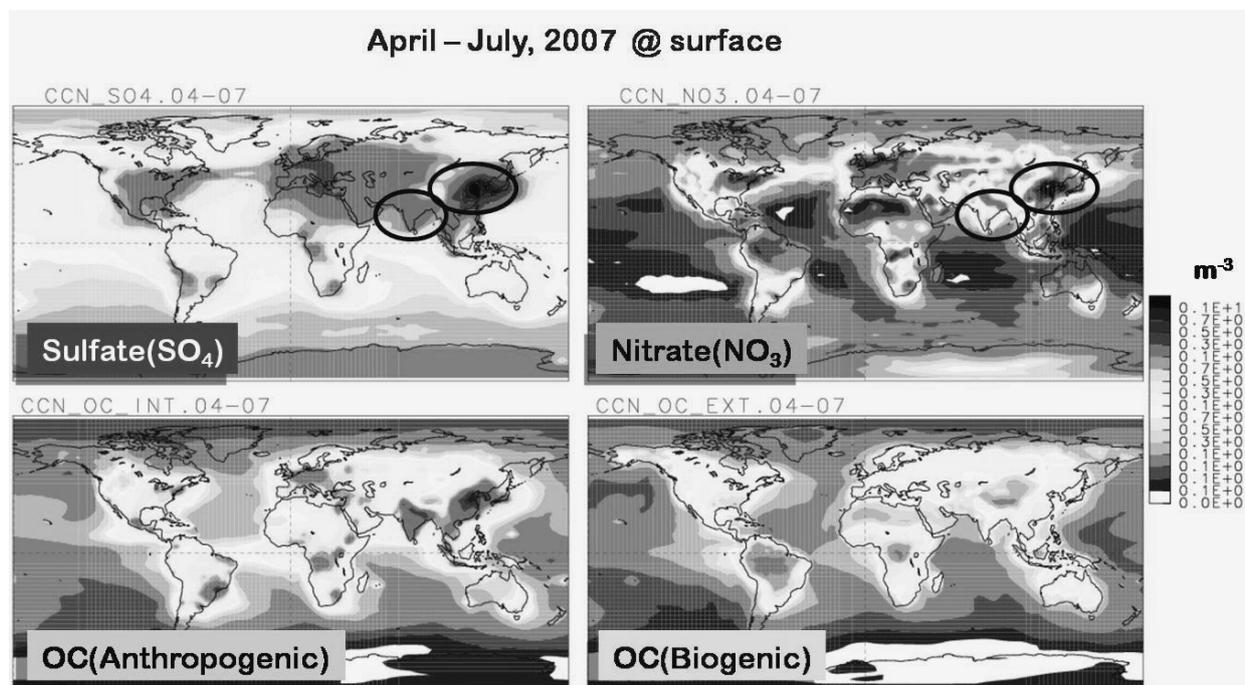


図 1 4 . 地表における各種エアロゾル（硫酸塩、硝酸塩、炭素性（人為起源、生物起源））の雲凝結核（CCN）への寄与の分布（4月-7月平均）。

同様に、雲・降水間接効果を介した気候影響を見積もるため、水溶性エアロゾル（硫酸塩、硝酸塩、有機炭素）の雲凝結核（CCN）への寄与を計算した（図14）。これにより、それぞれのエアロゾルの寄与は特に中国域で大きく、地表付近では、硝酸塩が硫酸塩に匹敵する寄与を持つことが確認された。

（5）土地利用変化に伴うエアロゾル変化による気候影響

上に示したエアロゾルのうち、硝酸塩の前駆気体は窒素酸化物（ NO_x ）およびアンモニア（ NH_3 ）であり、南アジア域ではこれらの主要なソースは農業である。また、植物起源の有機炭素エアロゾルも、前述の通り、植生タイプやバイオマス量に大きく依存して発生量が変わり、森林から農地への転換などの土地利用変化に大きく影響される。したがって、農地転換などの土地利用変化は硝酸塩、有機炭素の各エアロゾルの変化を介してアジア域の気候、モンスーンに影響を与えている可能性がある。本研究では、このような土地利用変化に伴うエアロゾル変化に着目し、その放射強制力を計算し、気候影響を検討した。

図15は、産業革命以前から現在までの硝酸塩の増加による放射強制力の計算結果である。硝酸塩はインド、バングラデシュ、および中国域において、 $-1\sim-2\text{ W m}^{-2}$ であり、強い冷却を生じていることが確認できる。これは図7、8で議論したとおり、これらの地域において農業起源の窒素酸化物および、アンモニアのエミッション増加量が大きいためであり、この傾向は特にバングラデシュにおいて顕著である。その他、北米および欧州においても冷却効果が計算されているが、これらは主に産業起源の窒素酸化物増加を反映するものである。

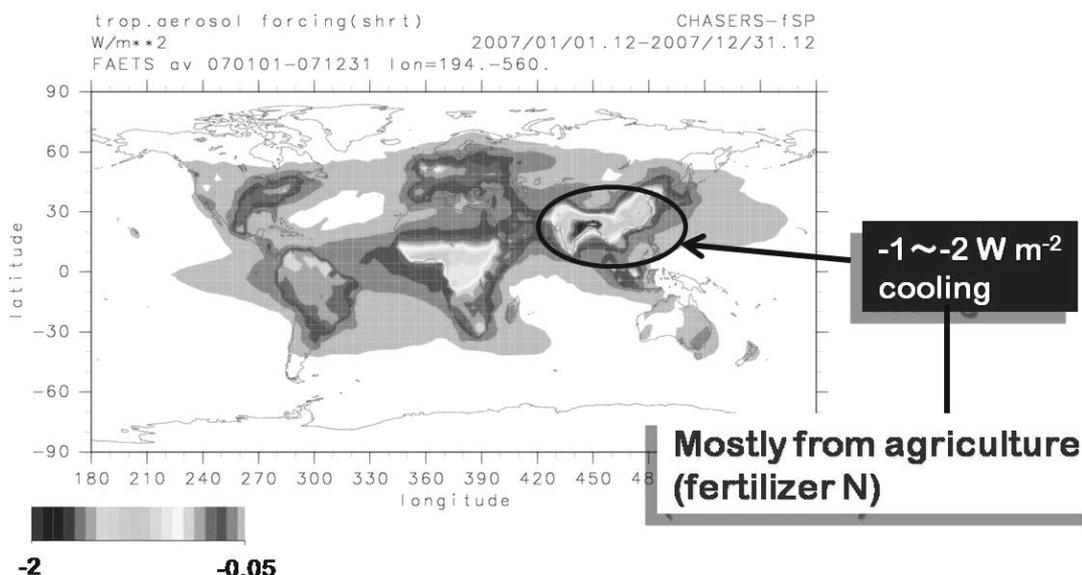


図15. 産業革命以前から現在までの硝酸塩エアロゾル増加による年平均放射強制力（ W m^{-2} ）。

次に、土地利用変化に伴う有機炭素エアロゾルの減少に伴う放射強制力を計算した（図16）。ここで、有機炭素エアロゾル発生量の土地利用変化による変化は上述(3)項に記述した通りである。北半球夏季には、北米、ユーラシア、南アジア域において、有機炭素エアロゾルの減少による強

めの加熱強制力が働いている。南アジア域の夏季では、特にインドシナ半島で、 1 W m^{-2} 以上の強い加熱が計算されている。

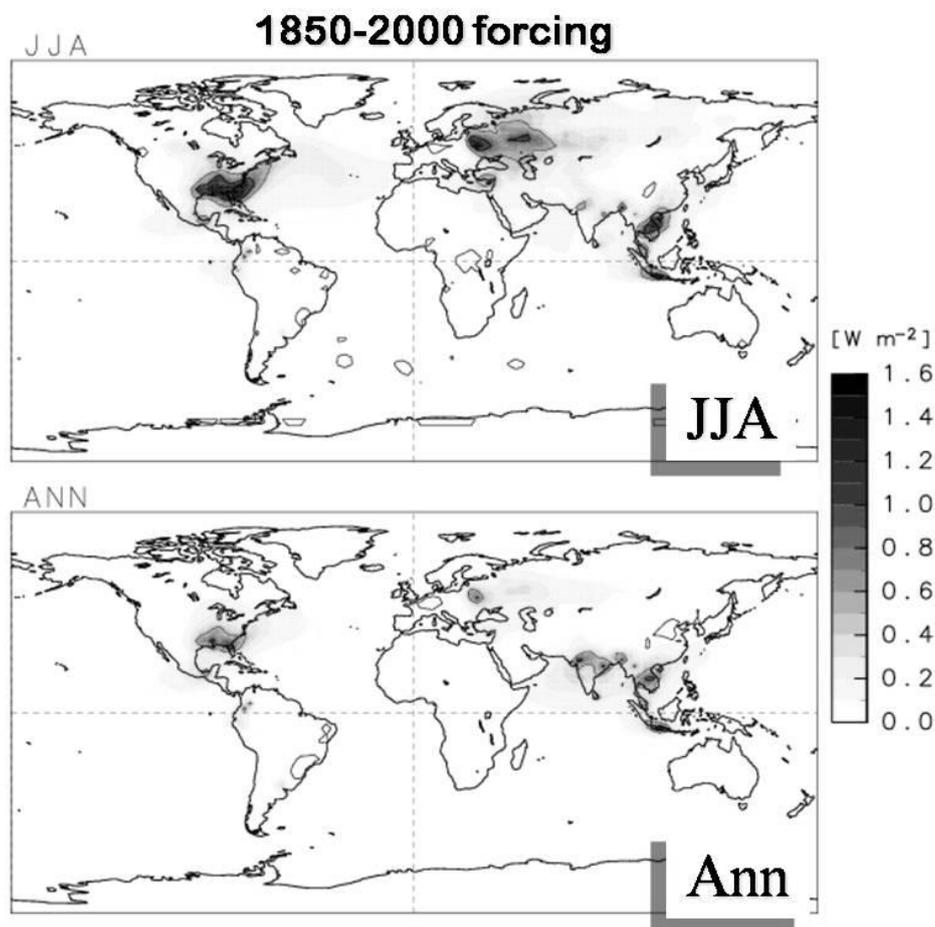


図 16. 産業革命以前から現在までの植物起源有機炭素エアロゾルの減少による放射強制力 (W m^{-2})。上図は北半球夏季 (6-8月) 平均、下図は年平均。

表 4. 硝酸塩および植物起源有機炭素エアロゾル (SOA) の変化に伴う放射強制力 (W m^{-2})。

	全球	北半球	南半球
硝酸塩 (NO_3^-)	-0.09	-0.14	-0.05
有機炭素 (SOA)	+0.05	+0.08	+0.02

以上のように、過去から現在までの土地利用変化は、とくに南アジア域において硝酸塩および有機炭素エアロゾルの変化を引き起こし、この地域の気候変動およびモンスーン変動に寄与してきた可能性が示唆される。しかしながら、農地化などによる土地利用変化は、硝酸塩の増加による冷却、有機炭素エアロゾルの減少による加熱という、それぞれ逆方向の効果を及ぼすことに注

意が必要である。表4は、全球および半球平均の硝酸塩、有機炭素エアロゾルの放射強制力である。硝酸塩による放射強制力は北半球平均で -0.14 W m^{-2} の冷却であるが、そのうち 0.08 W m^{-2} は有機炭素エアロゾル減少による加熱で打ち消されていることがわかる。

本研究では、各エアロゾルの光学パラメータや放射強制力を評価し、アジア域の気候・モンスーン変動に対する影響について検討を行った。水溶性エアロゾルについては、雲・間接効果を介した影響も併せて検討する必要がある、より総合的な研究に繋げる必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本サブテーマでは、各種エアロゾルのアジアモンスーンへの影響を個別に精査することを目的としており、特にエアロゾルの放射・雲・降水への影響過程などについて、科学的解明が行われた。本研究では、エアロゾルモデルに新たに硝酸塩のシミュレーションを導入し、モデル評価を行った。さらに、過去から現在までの硝酸塩増加による放射強制力を評価した。その結果、ベンガラデシュなどの南アジア域を中心、アジアにおいて硝酸塩が顕著な気候影響を及ぼしていることが判明した。また、過去の土地利用変化に伴う二次有機エアロゾル(SOA)の変化をモデル計算に導入し、その放射強制力の定量化も行い、有機炭素エアロゾルの減少が南アジア域において顕著な加熱効果を及ぼしていることが確認された。これらは、これまでの研究にはない、新しい知見であり、エアロゾルのアジアモンスーンへの影響の定量的な理解に大きく貢献する成果である。また、全球的な気候変動理解に向けた研究としても重要な進展である。

(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研究に関する今後の見通しの検討、およびそのためのワーキンググループ立ち上げに関して、本サブテーマで構築・改良が進められている、化学・エアロゾル・気候結合モデルによる結果を提示し、貢献した(日本学術会議・第3部・第1,2,および第3回IGAC国内委員会議事録)。今後、本研究で得られた成果を、学術論文としてまとめてゆくとともに、積極的に広報し、さらに、IPCC第5次評価報告書などへ貢献することなどを通して、環境政策への貢献に努める。

6. 引用文献

- 1) IPCC (2007): Climate Change (2007), The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 996pp.
- 2) Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lacis, A., Oinas, V. (2001), Trends of measured climate forcing agents, Proc. Natl. Acad. Sci., 98, 14778-14783, doi:10.1073/pnas.261553698.
- 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.
- 4) Ramanathan, V., Chung, C., Kim, D., Bettge, T., Buja, L., Kiehl, J.T., Washington, W.M.,

- Fu, Q., Sikka, D. R., Wild, M. (2005), Atmospheric brown clouds: impact on South Asian climate and hydrologic cycle, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 102, 5326–5333, doi:10.1073/pnas.0500656102.
- 5) Lau K. M., M. K. Kim, K. M. Kim (2006), Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-006-0114-z.
- 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, *J. Climate*, 15, 4, 333–352.
- 7) Sudo, K., M. Takahashi, J. Kurokawa, and H. Akimoto (2002), CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description, *J. Geophys. Res.*, 107, 10.1029/2001JD001113.
- 8) Nenes, A., Pandis, S. N., Pilinis, C. (1998), ISORROPIA: A new thermodynamic equilibrium model for multiphase multicomponent inorganic aerosols, *Aquat. Geoch.*, 4, 123–152.
- 9) Kanakidou, M., J. H. Seinfeld, S. N. Pandis, I. Barnes, F. J. Dentener, M. C. Facchini, R. Van Dingenen, B. Ervens, A. Nenes, C. J. Nielsen, E. Swietlicki, J. P. Putaud, Y. Balkanski, S. Fuzzi, J. Horth (2005), Organic aerosol and global climate modelling: a review, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1053–1123.
- 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, *Proc. IUFRO Conf. Remote Sensing and Forest Monitoring*, Rogow, Poland.
- 12) Guenther, A., Hewitt, C. N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., McKay, W. A., Pierce, T., Scholes, B., Steinbrecher, R., Tallamraju, R., Taylor, J., and Zimmerman, P. (1995), A global model of natural volatile organic compound emissions, *J. Geophys. Res.*, 100, 8873–8892.

7. 国際共同研究等の状況

本研究で用いている化学モデル CHASER およびエアロゾルモデル SPRINTARS を用いて、大気汚染の半球規模長距離輸送に関するプロジェクト (HTAP) に参加した (<http://aqm.jrc.it/HTAP/>)。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) Saito, S., I. Nagao, and H. Kanzawa: *Japan. Atmos. Environ.*, 43, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.04.031 (2009)

“Characteristics of ambient C₂-C₁₁ non-methane hydrocarbons in metropolitan Nagoya”

(in press)

<その他誌上発表（査読なし）>

なし。

(2) 口頭発表（学会）

- 1) 須藤健悟, 高橋正明, 秋元肇, 全球対流圏オゾンの変動要因, 2006: 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, つくば, 2006年5月21-24日.
- 2) Sudo, K., Akimoto H., Hirenzaki M., K. Iwao, and Takahashi M., 2006: Source attribution of global O₃ and CO: climatology and interannual variability, Joint IGAC/CACGP/SOLAS/WMO Symposium: Atmospheric Chemistry at the interfaces, Cape Town, South Africa, 17-23 September 2006.
- 3) 須藤健悟, 秋元肇, 2007: 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, 豊川, 2007年1月10-12日.
- 4) 須藤健悟, 2007: 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, 豊川, 2007年1月10-12日.
- 5) 須藤健悟, 秋元肇, 2007: 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.
- 6) Kanzawa, H., and T. Kuwahara, 2007: Global distribution of precipitable water, saturated precipitable water, and relative precipitable water as derived from observational and reanalysis data sets. Session JMS009 Hydrological Cycle, Precipitation and Precipitation Systems, IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2-13 July 2007.
- 7) 須藤健悟, 秋元肇, 2007: 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年度秋季大会, 北海道大学, 札幌, 2007年10月15日.
- 8) 須藤健悟, 秋元肇, 2007: 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, 名古屋, 2007年11月28日.
- 9) Sudo, K. and H. Akimoto, 2007: Climate response to global ozone changes: Impacts of tropospheric ozone increase and stratospheric ozone decrease during the 20th century, AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco, 14 December 2007.
- 10) Sudo K., 2008: Changes in tropospheric chemistry and their impacts on climate: roles of climate change and the stratosphere, SPARC 4th General Assembly, Bologna, Italy, 31 August - 5 September 2008.
- 11) Sudo K., and H. Akimoto, 2008: Climate response to global ozone changes: impacts of tropospheric ozone increase and stratospheric ozone decrease during the 20th century, IGAC 10th International Conference, Annecy, France, 7-12 September, 2008.
- 12) 須藤健悟, 秋元肇, 2008: 半球規模大気汚染のシミュレーション, 第14回大気化学討論会, 地球フロンティア, 横浜, 2008年10月29-30日.

(3) 出願特許

なし。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし。

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし。

(6) その他

以下の一般向け講演を行った。

- 1) 神沢博：地球温暖化問題に関する科学アセスメントとしてのIPCC報告書について．第13回日本気象学会中部支部公開気象講座「地球温暖化」，名古屋大学，名古屋，2007年8月26日．（講演要旨集，p. 1-9）
- 2) 神沢博：21世紀、我々が体験する（地球）環境の世界－気候科学から（地球）環境問題を考える－．「テクノ未来塾」第101回「ニューテクノ・フォーラム」，愛鉄連厚生年金基金会館，名古屋，2008年3月29日．
- 3) 神沢博：地球の気候変化に関する科学的理解の現状．シンポジウム「環境問題の核心とは何か」，名古屋大学環境学研究科，名古屋，2008年8月1日．（「人間・社会環境学の構築ワークショップ報告書5（シリーズX）」，名古屋大学大学院環境学研究科社会環境学専攻，2009年3月，p. 14-21）
- 4) 神沢博：地球温暖化は何故起こるのか．名古屋大学ラジオ公開講座：「地球温暖化時代」に生きる，東海ラジオ放送（1332KHz），2008年8月10日，06:30～07:00．
- 5) 神沢博：地球環境問題としてのオゾン層破壊と地球温暖化：人為起源排出物質の大気への影響．オゾン層保護推進大会，愛知県・愛知県フロン回収・処理推進協議会主催，名古屋国際会議場，名古屋，2008年9月16日．
- 6) 神沢博：地球温暖化は何故起こるのか．名古屋大学公開講座「地球温暖化時代」に生きる，名古屋大学，名古屋，2008年9月18日．（テキスト：p. 37-41）
- 7) 神沢博：気候モデルによる地球気候の再現と「予測」．名古屋大学公開講座「地球温暖化時代」に生きる，名古屋大学，名古屋，2008年9月25日．（テキスト：p. 42-46）