



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	植生変化・エアロゾル複合効果がアジアの気候に及ぼす影響の評価
Author(s)	須藤, 健悟; 高田, 久美子; 竹村, 俊彦; 神沢, 博; 安成, 哲三
Citation	
Issue Date	2010-03-31
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/45172">http://hdl.handle.net/2115/45172</a>
Right	
Type	bulletin (article)
Additional Information	



Instructions for use

# 植生改変・エアロゾル複合効果がアジアの気候に及ぼす影響の評価

須藤 健悟<sup>1)</sup>, 高田久美子<sup>2)</sup>, 竹村 俊彦<sup>3)</sup>, 神沢 博<sup>1)</sup>, 安成 哲三<sup>4)</sup>

2010年1月28日受付, 2010年2月3日受理

アジア域では, 土地利用変化などに伴う植生改変およびエアロゾルの増加が顕著であり, これらの変動は陸面過程, 大気放射, および雲・降水を変化させ, アジヤモンスーンなどのアジア域気候に影響している可能性が大きい. 本研究では, 植生改変とエアロゾル変動の役割という観点から, 総合的に気候影響を検討している. 本論文では, 特に, 農地化などの土地利用変化が, 陸面, および硝酸塩や植生起源有機炭素などのエアロゾル成分の変動を通じて, どのように気候に影響するかについて, 全球化学・エアロゾル気候モデルを用いた最新の結果について紹介する.

## Coupled effects of land use and aerosols changes and their impacts on Asian climate

Kengo Sudo<sup>1</sup>, Kumiko Takata<sup>2</sup>, Toshihiko Takemura<sup>3</sup>, Hiroshi Kanzawa<sup>1</sup>, Tetsuzo Yasunari<sup>4</sup>

This study assesses the roles of aerosols in the past/present changes in Asian climate and monsoon, isolating impacts of individual aerosol components in the framework of the CCSR/NIES/FRCGC climate model (MIROC). Many recent studies suggest that increases in anthropogenic aerosols such as black carbon and sulfate may play a crucial role in Asian climate change as observed. Our previous studies also demonstrate the significance of aerosol increases (sulfate and carbonaceous aerosols) in the simulated precipitation changes in Asia (e.g., Arai et al., 2009). In this study, we particularly focus on the changes of nitrate and secondary organic aerosols (SOA) which are tightly linked to land use change in regions like Asia, but not treated in our previous aerosol studies. We newly introduced simulation of nitrate aerosol in our climate model. Our simulation shows that there are anomalously high concentrations of nitrate aerosol in South Asia (particularly around India and Bangladesh), coming from abundant ammonium and less sulfate components in this region. In India, free tropospheric mixing ratio and number concentration of nitrate in fine mode are both larger than those of sulfate in winter to early summer. Our study estimates large cooling (1-2 W m<sup>-2</sup>) in South Asia due to nitrate increase in terms of direct radiative forcing for 1850-2000. This result suggests nitrate aerosol may play an important role in the observed changes in Asian monsoon. In addition, we estimate changes in biogenic VOCs emissions associated with land use change during 1850-2000; biogenic VOCs like terpenes are important precursors of SOA. We estimate significant reduction (50-70%) in terpenes and other VOCs emissions in the central Eurasia, North America, and Asia due to intense cultivation and deforestation in these areas. Responding to the VOCs decreases during 1850-2000, our model calculates large reduction of SOA, leading to a positive direct radiative forcing (warming) of 0.5-1 W m<sup>-2</sup> in South Asia. This warming from SOA and cooling from nitrate aerosol which are both linked to land use change may compensate for each other in Asia.

1) 名古屋大学大学院環境学研究科

2) 海洋研究開発機構・地球環境変動領域

3) 九州大学応用力学研究所

4) 名古屋大学地球水循環研究センター

<sup>1</sup> Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan

<sup>2</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokohama, Japan

<sup>3</sup> Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Japan

<sup>4</sup> Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University, Nagoya, Japan

## 1. はじめに

大気中のエアロゾル変化や植生変化が気候変化に重要な影響を及ぼすことは広く認識されている。特に、エアロゾルの発生量、濃度変化、気候への影響については、1990年代のIPCCの活動を契機に多数の研究結果が上げられてきている。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）の排出量増加は顕著な正の放射強制力（ $\geq 0.5 \text{ W m}^{-2}$ ）を持ち温暖化を加速させる一方、二酸化硫黄（ $\text{SO}_2$ ）や揮発性有機化合物の排出増加に伴う硫酸塩や一部の有機炭素（OC）などの吸湿性エアロゾル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負の放射強制力（地球冷却効果）を持つとされている（図1）（e.g., Hansen and Sato, 2001; Takemura et al., 2005）。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) や Lau et al. (2006) 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、この領域でのモンスーン循環・降水の時空間的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ため、定量的な理解が求められる。また、一方で、森林破壊や農耕地拡大に伴う植生変化が地表面の熱・水収支の変化を通して気候システムに影響を及ぼすことは、1980年代以来広く認識されている。特にこれらのプロセスが、中国、インド、東南アジアを含むアジア地域では、モンスーン気候へ大きく影響することが懸

念されている（Takata et al., 2009）。しかし、農耕活動に伴う硝酸塩エアロゾルや2次有機エアロゾル（SOA）の変動については影響評価がまだ十分にされていない。硝酸塩エアロゾルは、窒素酸化物とアンモニアを前駆気体としており、特に大気汚染や農業活動が顕著であるアジア域では、その重要性は高い。しかしながら、その生成過程のモデリングは現状では不十分である。さらに植生変化がエアロゾルの変化をもたらして気候に影響を及ぼすことも、指摘されているが、そのプロセスを定量的に評価した研究は極めて少ない。この植生変化→エアロゾル変化のプロセスには2種類ある。地面の露出度（葉面積指数 LAI に依る）や地表風速の変化（粗度に依る）に起因する soil dust の発生量の変化と、葉からの揮発性有機化合物（VOC）の発生量の変化である。前者は、SPRINTARS などのエアロゾル気候モデルでも考慮されている（e.g., Takemura et al., 2005）が、後者については、産業革命以前から21世紀末までのVOC発生量変化を全球スケールで推定した研究がようやく始まったばかりである（Tsigaridis et al., 2006; Heald et al., 2008）。植物起源の揮発性有機化合物（VOC）からSOAへの変換過程は、特にアジアモンスーン域での雲降水システム形成にも大きな役割を果たす可能性があるが、そのような研究はまだなされていない。

本研究では、モンスーン地域を中心とするアジアの過去100年～150年の気候変化・変動が、人間活動によるこの地域の植生変化とエアロゾル変化およびこれらの複合効果により、どのような影響を受けたかを、定量的に評価する。図1に示した通り、エアロゾルを中心とする大気微量成分の変動は、様々な側面で気候に影響を及ぼす。本研究では、ブラックカーボンや硫酸塩などの化石・バイオマス燃焼起源のエアロゾルだけでなく、上述

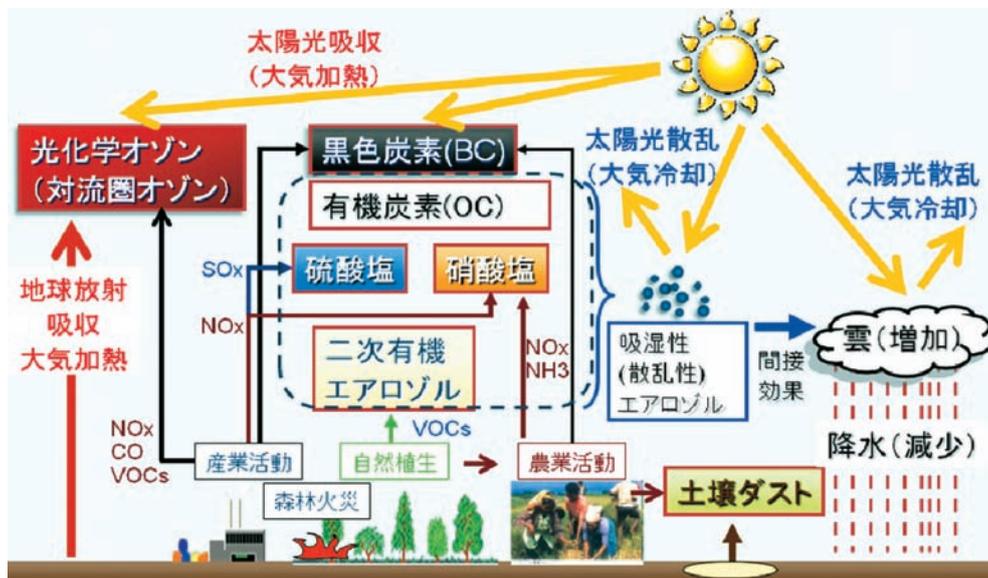


図1：エアロゾルやオゾンなどの大気微量成分の発生と気候影響。本研究では特に、自然植生の変動と農業活動に伴う二次有機エアロゾルと硝酸塩エアロゾルの効果に着目する。

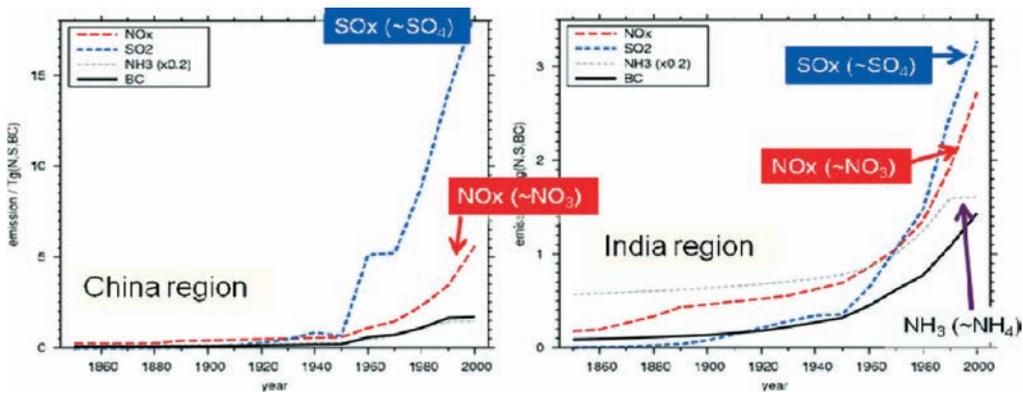


図2：中国域・インド域における，黒色炭素 (BC) およびエアロゾル前駆気体 (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NH<sub>x</sub>) のエミッション変動 (EDGAR-HYDE エミッション・インベントリ)。

の硝酸塩エアロゾルや，SOA など，土地利用変化・植生改変やこれに伴う農業活動と深い関わりのあるエアロゾル種の変動にも着目する．アジア地域では石炭燃焼起源による硫酸塩に加え，NO<sub>x</sub>（農業・自動車起源）が増加傾向にあり（図2），このNO<sub>x</sub> 起源の硝酸塩の気候影響の定量化はアジア域気候の将来予測を検討するうえでも大変重要である．さらに，この地域の植生（土地利用）変化がエアロゾル起源物質の地表面からの生成を通して大気エアロゾル量変化を引き起こし，気候に影響するという複合効果の評価も重要である．本研究では，大気化学・エアロゾルモデル (CHASER-SPRINTARS) を用いて，エアロゾルの気候影響を評価する．これに加え，植生改変・エアロゾル複合効果（植生改変→ VOCs → SOA 生成過程）がアジア地域の気候変化に与える影響を，大気化学モデル CHASER，エアロゾルモデル SPRINTARS と大気大循環モデルの組み合わせにより，定量的に評価する．

## 2. 大気化学・エアロゾル気候モデル

本研究では，全球化学・気候モデル CHASER (Sudo et al., 2002) および全球エアロゾル・気候モデル SPRINTARS (Takemura et al., 2002, 2005) を軸としたモデル実験を行う．CHASER および SPRINTARS 両モデルは，東大・気候センター (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) で開発された CCSR/NIES/FRCGC 気候モデル (MIROC) を土台として，大気化学過程 (O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-CO-CH<sub>4</sub>-VOCs)，と，硫酸塩 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)，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，これらの大気放射，雲・降水過程への影響を計算する（図3）．地表からの排出源（エミッション）に関しては，窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>)，一酸化炭素 (CO)，揮発性有機化合物 (VOC)，アンモニア (NH<sub>3</sub>)，二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>)・BC・OC の化

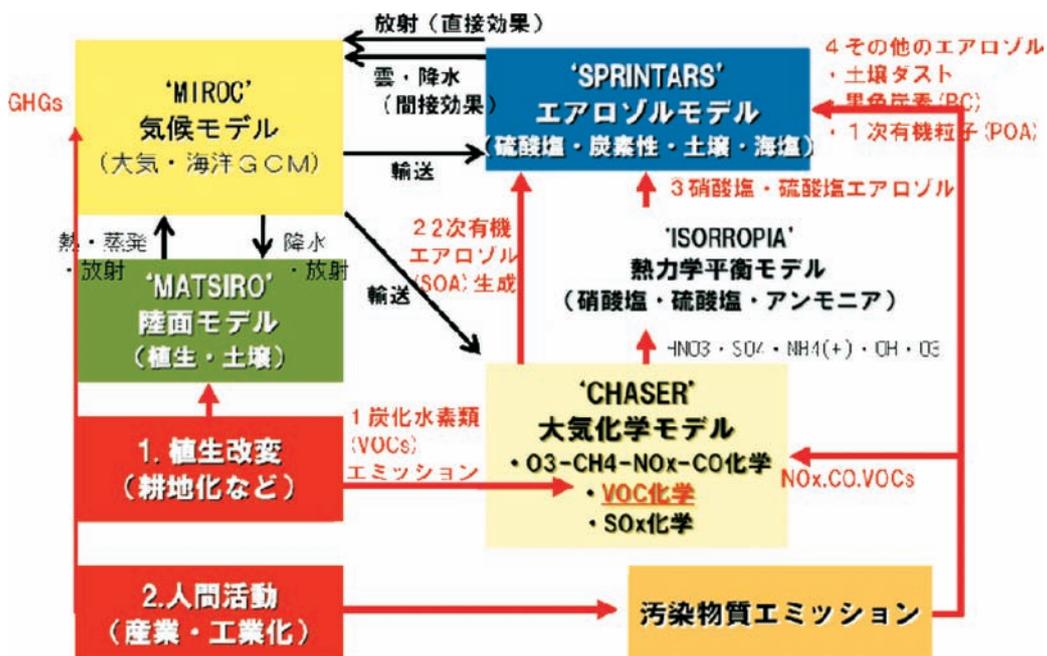


図3：CCSR/NIES/FRCGC 気候モデルにおける，大気化学・エアロゾル計算の枠組み。

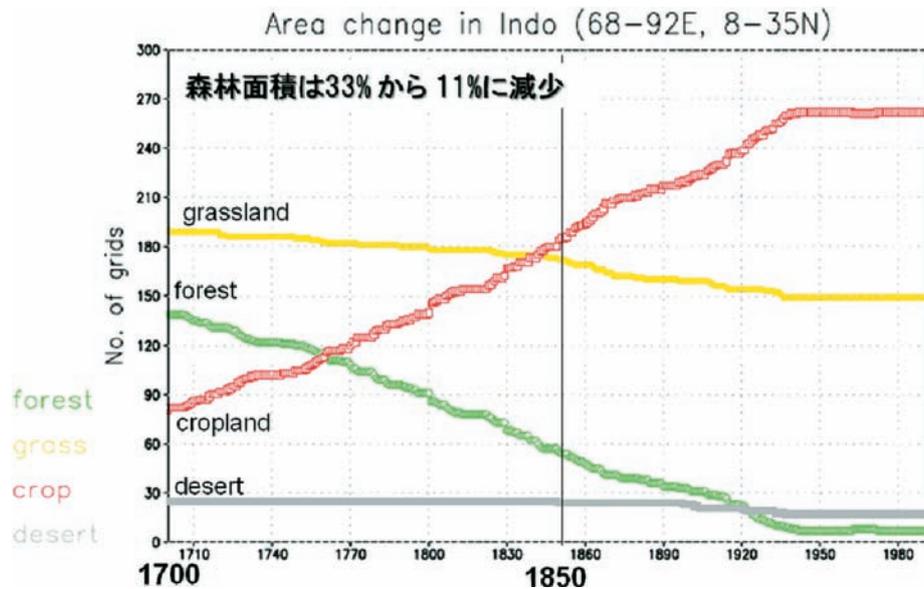


図4：アジア域における、各植生タイプ面積（モデル中のグリッド数として）の変動（1700年～1990年）。

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。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。

本研究で特に着目する硝酸塩エアロゾルについては、CHASERとエアロゾル熱力学平衡モデル（ISORROPIA）（Nenes et al., 1998）を連携して計算を行う。また、植生起源の二次有機エアロゾル（SOA）の生成についても、CHASER中でSOA反応生成スキーム（Kanakidou et al., 2005）を用いて、計算する。本研究では、テルペンおよびイソプレンの酸化反応によるSOA生成（気相反応のみ）を考慮する。硝酸塩については、土壌ダストや海塩粒子も含んだ粗大モード（粒径1～50  $\mu\text{m}$ ）の成分も重要であるが、本研究では、ファインモード（粒径1  $\mu\text{m}$ 以下）に単体で存在する硝酸アンモニウム成分のみを気候影響の計算対象とする。CHASERによる硝酸塩および硫酸塩のシミュレーション結果は、欧州、北米、およびアジア域における地表観測ネットワーク（EMEPやEANETなど）で得られる時空間分布とも概ね整合的である。植生起源のSOAについては、現状では観測データが不足しているため、シミュレーションの系統的な検証は困難であるが、南米における観測（Artaxo et al., 2002, Decesari et al., 2006）や他のモデル研究（Heald et al., 2008）と矛盾しないシミュレーション結果を得ている。

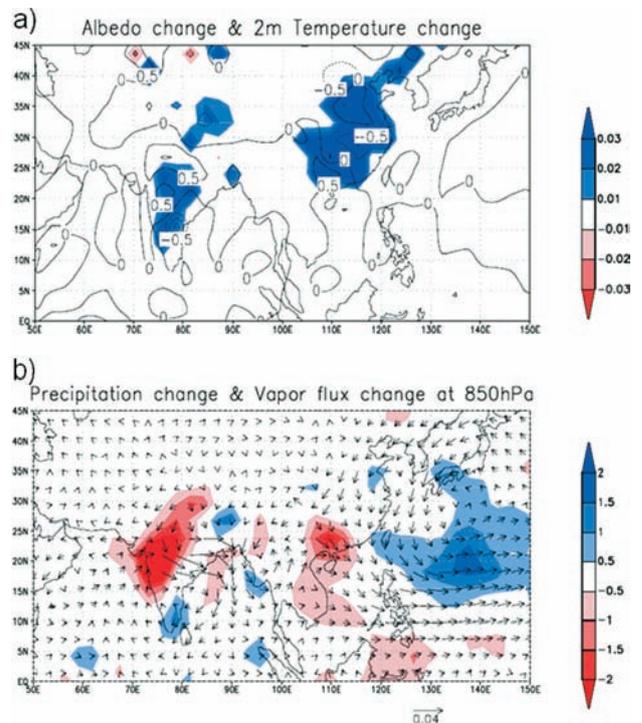


図5：1700年から1850年の耕地化が及ぼす気象・気候場への影響（Takata et al., 2009）。(a)アルベド（カラー）と2m気温（黒コンター）の変動、(b)降水量（カラーコンター）と水蒸気フラックス（矢羽）の変動。

### 3. 植生変化による気象学的変動

土地利用変化などによる植生変化は、地表面の反射率（アルベド）や粗度、および水蒸気・熱の大気との交換量を変化させ、気象と気候に直接的に影響する。本研究の枠組みにおいて、これらの変化がアジア域気候およびアジアモンスーンに顕著に影響することがモデル実験により確認されている。アジア域においては、図4のように、特に17～20世紀中頃にかけて、植民地化などの影

響を強く受け、森林 (forest) 面積の減少、農地 (cropland) 面積の増加が顕著に現れている。

図5は、特に植生変化が盛んであった、1700年から1850年にかけて、地表面の変動が、アジア域において地表気温や降水場にどのように影響するかについて、モデル実験した結果である (Takata et al., 2009)。地表面気温変動は、農地化などに伴う陸面反射率の増加 (白色化) に対応し、インド中西部や中国南部で顕著な低温化が見られる。また、農地化による地表面粗度の減少は、南アジアや東南アジアにおいて、下層の水蒸気フラックスの収束を減少させ、降水量の減少が引き起こされることも示されている。これは農地化によりアジアモンスーンが弱められたことを示唆するものである。さらに、アジアモンスーンと太平洋高気圧は対の現象として強化 (あるいは弱め) されるため、モンスーンの弱めと同時に、西北太平洋域では、太平洋高気圧が弱められ、降水量の増加が計算されている。

#### 4. エアロゾルの気候影響と植生変化の役割

本研究では、人為起源のエアロゾルの影響も含めた気候影響解析も行っている。図6は、MIROC 気候モデルにより計算された20世紀中のアジア域の降水変動トレンドである (荒井他, 2007)。温室効果気体増加の影響と同時に、硫酸塩やブラックカーボンを中心とした人為・産

業起源エアロゾルの変動も降水変動に大きく寄与していることが示唆される。

さらに、本研究では、植生変化および農地化によるエアロゾル変動がどのような気候影響を及ぼすかについても実験・解析を進めている。3節で述べたように、植生変化は気象場の変動により、気候に直接的に影響すると考えられるが、上述の通りエアロゾルの変動を介した間接的な影響も重要である。そこで、本研究では、過去の植生変化に伴う(1)硝酸塩エアロゾルの増加、および(2)植生起源の二次有機エアロゾル (SOA) の減少の2点に着目し、気候影響評価を行った。

硝酸塩の増加は、主に農地化に伴う窒素肥料の使用による大気中の窒素酸化物 (NOx) と家畜の増加等によるアンモニア (NHx) の増加によるものである。また、植生起源 SOA の減少は、森林伐採などの土地利用変化により、SOA の前駆気体である VOCs (テルペン類やイソプレン) の大気中への放出の減少に起因する。植生起源 SOA の変動については、温暖化等の気候変動に伴う地表気温・降水量の変動や、大気二酸化炭素濃度の変動に伴う葉の気孔開度の変動による植生起源 VOC 放出量変化の影響もあり得る。しかしながら、過去の植生変動に関する限り、人為的な植生変化の方が支配的要因であると考えられるので、ここでは植生変化による効果のみに着目する。図7は、1850年から2000年間の硝酸塩エアロゾルの増加がもたらす (対流圏界面における) 放射

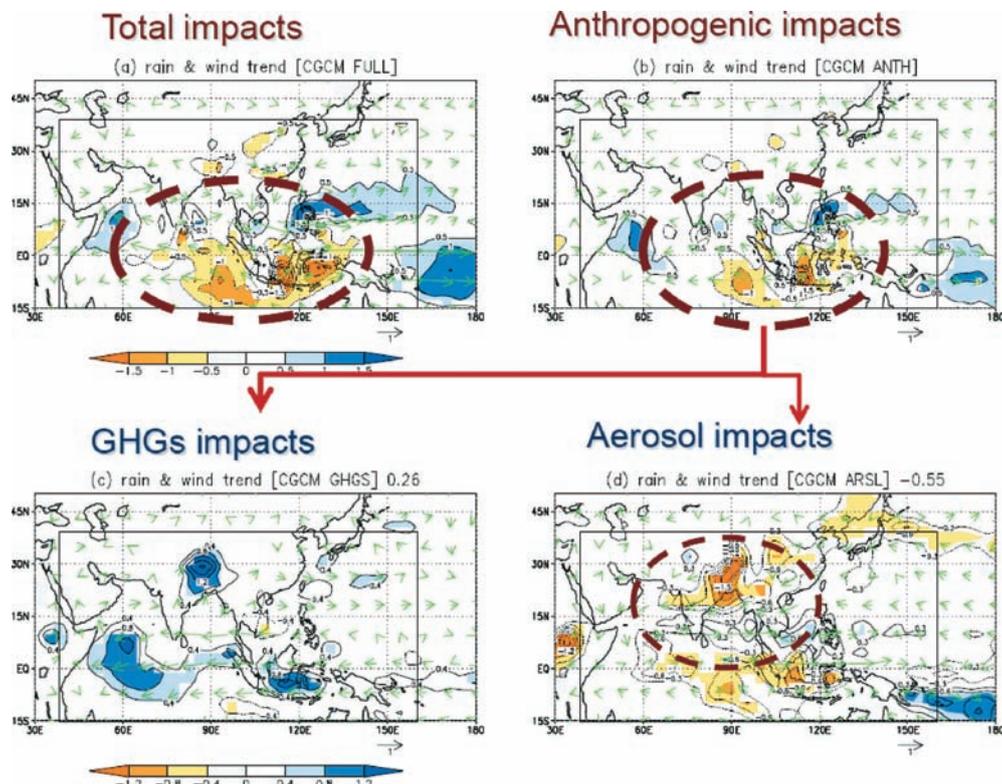


図6：MIROC モデルにより計算された、20世紀中の各種要因によるアジア域降水場の100年間の変動トレンド。影響のほとんどは人為起源の要因 (Anthropogenic impacts) で説明され、温室効果気体の変動とエアロゾルの変動 (GHGs および Aerosol impacts) が、それぞれ異なった方向の影響を及ぼすことがわかる (荒井他, 2007)。

強制力の分布を示す。インド北部や中国域において、 $1 \text{ W m}^{-2}$  以上の強い冷却を生じていることがわかる。中国域については、硝酸塩の前駆体となる  $\text{NO}_x$  の大部分は工業起源であるが、インド北部については、農業（肥料）起源の  $\text{NO}_x$  の比率が高い。図には、アフリカや南米においても、比較的強い冷却があることが示されているが、これは、対流雲中の雷により生成される  $\text{NO}_x$  と、森林火災による  $\text{NO}_x \cdot \text{NH}_x$  の増加の複合的な効果である。本研究では、硝酸塩の全球・年平均の放射強制力は  $-0.06 \text{ W m}^{-2}$  と見積もられた。これは硫酸塩による強制力 ( $-0.2 \sim -0.3 \text{ W m}^{-2}$ ) と比較しても重要であり、特に北半球では顕著な冷却効果 ( $-0.11 \text{ W m}^{-2}$ ) を及ぼしている。

次に、植物起源 SOA の減少の影響を評価する。全球的な有機エアロゾルのソースとしては、植生起源の SOA はおよそ  $30 \text{ Tg yr}^{-1}$  と見積もられており (Heald et al., 2008)、これは人為・産業起源のソース強度と比べても無視できない。本研究では、モノテルペンとイソプレンについて、植生変化に伴う、全球のエミッション分布変動を推定し、その上で、CHASER モデルによる SOA 生成計算を介して、有機エアロゾル濃度への影響、およびこれに付随する気候影響を評価した。植物起源 VOCs の発生量  $F$  は、基本的には以下の式で表現される (Guenther et al., 1995)。

$$F = D\varepsilon\gamma \quad (1)$$

$D$  はバイオマス量 ( $\text{kg m}^{-2}$ ) であり、 $\varepsilon$  は植生タイプごとの放出係数 (エミッション・ファクター) ( $\text{mgC kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )、 $\gamma$  は気温と太陽光に対する補正係数である。これにより、図 8 に示されるような植生タイプの変更および、バイオマス量の減少による、VOCs の発生量  $F$  の

変化が推定される。このようにして、計算を行った過去の植生変化による VOCs エミッション変動を図 9 に示す。主に、アジア域、北米、ヨーロッパ (ロシア) の各領域で顕著な VOCs 放出の減少が計算されており、とくにアジア域における 1980 年までの減少傾向が際立っている。テルペン類は高緯度の針葉樹林帯などからも夏季に放出されるため、北米やヨーロッパ付近でも比較的大きな減少傾向を示すが、イソプレンについては、放出源が熱帯域に集中しているため、アジア以外ではそれほど大きな減少は見積もられていない。図 10 はこのように計算された植物起源 VOCs の減少が有機エアロゾルの放射強制力としてどの程度の気候影響を及ぼすかについて示す (直接効果のみで間接効果は考慮せず)。有機エアロゾルは大気中で太陽光を散乱・反射するため、有機エアロゾルの減少は、正の放射強制力を引き起こす。

図が示す通り、アジア域、北米、ロシア域において強い正の放射強制力 (加熱効果) が確認される。特に、夏季の東南アジア、北米においては、 $3 \text{ W m}^{-2}$  以上の強い加熱が生じており、アジアモンスーン変動に対して重要な役割を果たしている可能性が示唆される。特に、アジア域においては、このような植生起源 SOA 変動による強い加熱効果は、炭素性エアロゾルによる加熱に匹敵する強度を持つことがわかり、大変重要である。本モデル計算においては、植生変化による SOA 変動が及ぼす全球平均の放射強制力は、 $\sim 0.1 \text{ W m}^{-2}$  と見積もられ、テルペンに比べ、イソプレンからの SOA 生成の寄与とその変動が支配的であった。面白いことに、アジア域の領域規模での放射収支を考察する場合、上で述べた硝酸塩の増加による負の放射強制力と、この SOA 減少による正の放射強制力が打ち消し合い、土地利用変化がエアロゾルを介して及ぼす正味の強制力としては、それほ

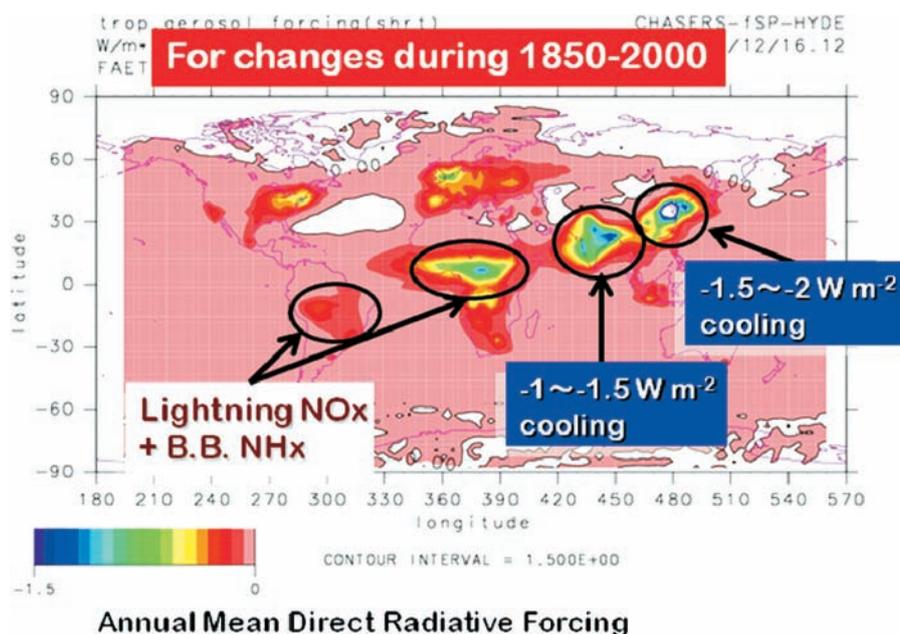


図 7: 硝酸塩エアロゾルの増加 (1850-2000 年) による年平均放射強制力 ( $\text{W m}^{-2}$ ) の全球分布。

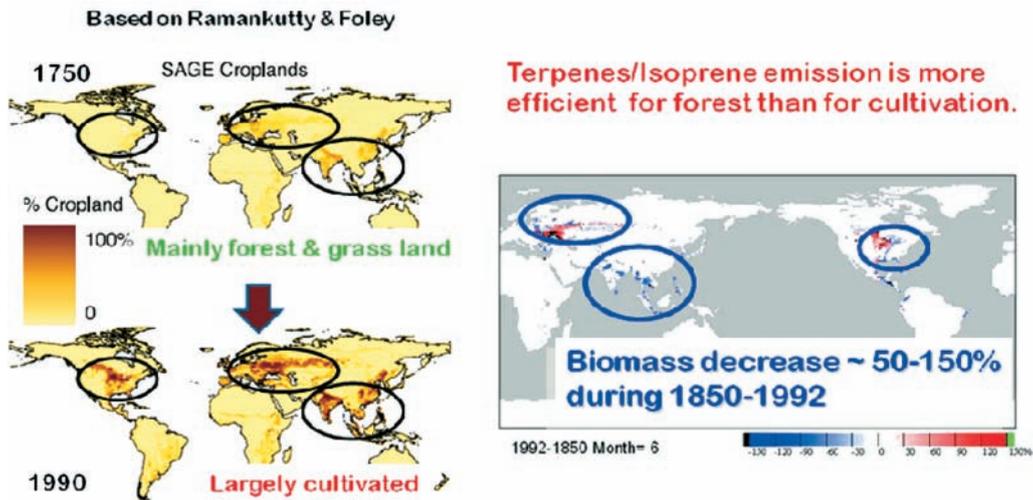


図8：過去の植生変化による地表面（植生）タイプの変化(左)と、バイオマス量の変動(右)。

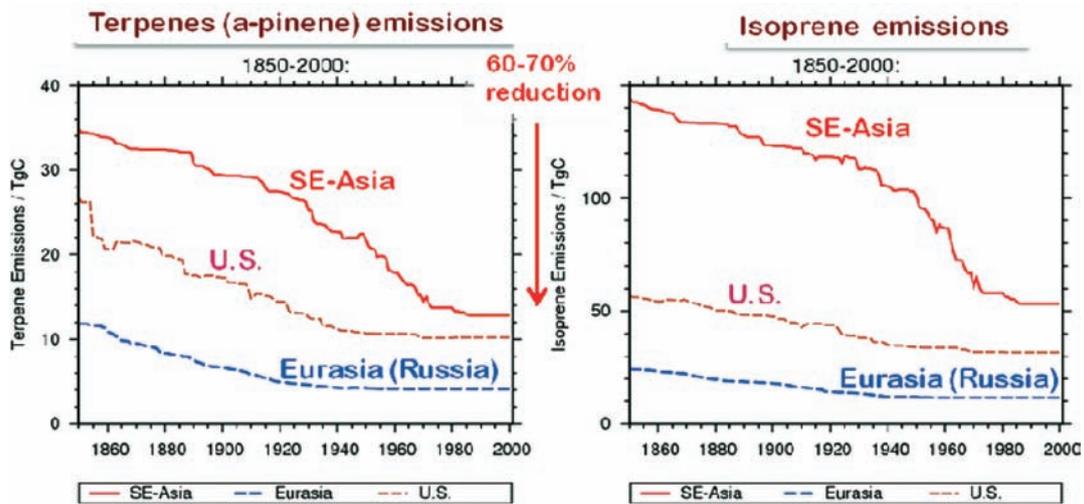


図9：過去（1850～2000年）の植生変化に伴う植生起源 VOCs の放出量の変化（東南アジア，北米，ロシア付近の各領域）．左はテルペン，右はイソプレンのエミッションを示す．

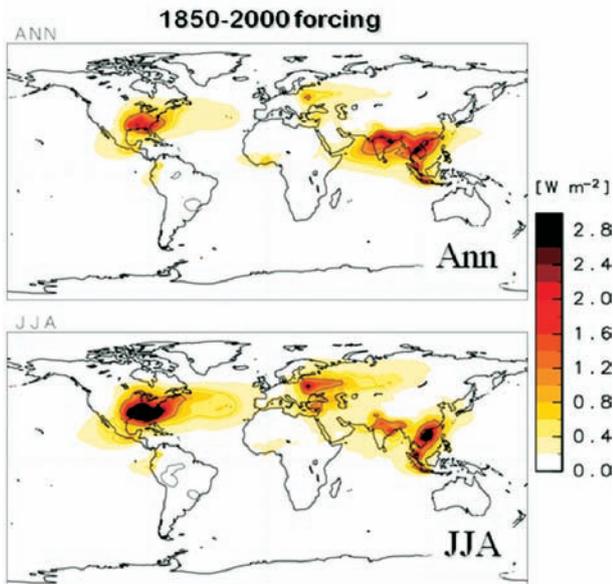


図10：CHASER-SPRINTARS モデルにより計算された，植生変化に伴う VOCs 減少による SOA 減少が及ぼす放射強制力（1850-2000年）．上は年平均，下は北半球夏季（JJA）．

ど大きくない可能性も考えられる．しかしながら，エアロゾルについては，雲・降水変動を介した間接効果も考慮に入れる必要があるため，より詳細な実験・議論が必要である．

#### 4. まとめ

本研究では，大気化学およびエアロゾルの計算を含む気候モデルにより，エアロゾル・植生変化の気候影響について，実験・解析を行っている．これまでの研究により，植生変化は地表面アルベド，粗度などの変動により直接的に気候に影響するだけでなく，硝酸塩や二次有機エアロゾルの変動を介し，間接的に気候に顕著に影響する可能性が強いことが判明した．今後は，エアロゾルの雲・降水に与える影響も加味しながら，より精緻な再現シミュレーションを行って行く予定である．さらに，モデル実験のみならず，日照や降水に関連する観測データとも融合した解析が必要である．また，この研究では，

植生からの VOCs 発生や, VOCs の酸化反応による SOA 生成過程などについて, 多くの不確定性要因が存在することにも注意が必要であり, 各プロセスについてのさらに詳細な評価により, 不確定性の低減が求められる。

## 5. 謝辞

本研究は, 環境省・地球環境研究総合推進費(B-061 および B-092) による支援を頂いて実施しております。

## 参考文献

- Artaxo, P., J. V. Martins, M. A. Yamasoe, A. S. Procopio, T. M. Pauliquevis, M. O. Andreae, P. Guyon, L. V. Gatti, and A. M. C. Leal (2002), Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in Rondonia, Amazonia, *J. Geophys. Res.*, **107** (D20), 8081, doi:10.1029/2001JD000666.
- Decesari, S. M., et al. (2006), Characterization of the organic composition of aerosols from Rondonia, Brazil, during the LBA-SMOCC 2002 experiment and its representation through model compounds, *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 375-402.
- 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.
- 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.
- Ramanathan V, Chung C, Kim D, Bettge T, Buja L, Kiehl JT, Washington WM, Fu Q, Sikka DR, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Takata, K., K. Saito, and T. Yasunari (2009), Changes in the Asian monsoon climate during 1700-1850 induced by preindustrial cultivation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, doi:10.1073/pnas.0807346106.
- Nenes A, Pandis SN, Pilinis C (1998). ISORROPIA: A new thermodynamic equilibrium model for multiphase multicomponent inorganic aerosols, *Aquat. Geoch.*, **4**, 123-152.
- 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.
- Guenther A. et al., A global model of natural volatile organic compound emissions, *J. Geophys. Res.*, **100**, 8873-8892, 1995.
- Tsigaridis, K., M. Krol, F. J. Dentener, Y. Balkanski, J. Lathi ere, S. Metzger, D. A. Hauglustaine, and M. Kanakidou (2006) Change in global aerosol composition since preindustrial times, *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 5143-5162.
- Heald C. L., et al. (2008), Predicted change in global secondary organic aerosol concentrations in response to future climate, emissions, and land use change, *J. Geophys. Res.*, **113**, D05211, doi:10.1029/2007JD009092.
- 荒井美紀・宮坂貴文・野沢徹・永島達也・木本昌秀, 「アジアモンスーン域の夏季降水変動パターンに対するエアロゾルの影響」, 京都大学防災研究所特定研究集会「異常気象と長周期変動」, 京都, 2007年11月