

B- 1 気候変動の将来の見通しの向上を目指したエアロゾル・水・植生等の過程のモデル化に関する研究

(1) 対流圏エアロゾルおよび対流圏オゾンの気候影響に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

大気圏環境研究領域大気物理研究室

神沢 博*・日暮明子*・野沢 徹*

*地球温暖化研究プロジェクト気候モデル研究チーム併任

東京大学気候システム研究センター

中島映至・高橋正明・須藤健悟

九州大学応用力学研究所

竹村俊彦

平成12～14年度合計予算額 40,116千円

(うち、平成14年度予算額 14,795千円)

〔要旨〕本サブテーマでは、人為起源の対流圏エアロゾルと対流圏オゾンによる気候変化の不確定性を明らかにすることを目指し、輸送過程と化学反応などを組み込んだ全球気候モデルによって、二酸化硫黄、炭素等の排出に対応したエアロゾル・オゾン分布を得ること、ならびに、エアロゾル分布や雲の効果を取り入れ、その不確定性を考慮し、地球温暖化物質の増加時の全球気候モデルによる気候変動の評価を行うことを目的とし、以下の成果を得た。(1) 放射強制力に関するエアロゾルの直接効果(エアロゾルそれ自身が太陽放射を散乱・吸収する効果)および間接効果(エアロゾルが雲の凝結核となることによって雲の光学的・微物理学的特性を変化させる効果)につき、全球3次元エアロゾル輸送・放射モデル実験解析および衛星データ解析により、理解を深めた。直接効果につき、エアロゾルモデル解析の結果、エアロゾルの正味の冷却効果は、IPCC(2001)¹⁾の評価値よりも小さい可能性があることがわかった。間接効果については、依然として多くの不確定要素が含まれているものの、間接効果は直接効果よりも放射強制力が大きいという結果が得られた。(2) 改良開発した全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルについて、東アジア域に着目してモデルによるシミュレーション結果の詳細な検証を行い、良好な結果を得るとともに、モデルに人為起源物質排出量将来シナリオデータを与えて、エアロゾル分布の予測実験を行い、シナリオによっては、50年後に放射強制力が2倍近くになった。(3) 対流圏オゾンと硫酸エアロゾルの気候影響を同時に評価が可能な全球3次元対流圏オゾン光化学モデルを開発し、観測結果と比較し、良好な結果を得た。開発した全球3次元対流圏オゾン光化学モデルを用いて、対流圏オゾンの放射強制力の見積もりを行い、対流圏オゾンがメタンと同等の放射強制力を持つことを示した。対流圏オゾン化学の変動要因に関する実験を行い、エルニーニョ現象による熱帯域東西循環、対流パターン、水蒸気分布の変動が、観測された大規模なオゾン変動の主因であることを示した。(4) 将来の対流圏オゾンおよび硫酸エアロゾルの予測シミュレーションを行った結果、対流圏オゾンは、前駆気体の排出量の増加に対してほぼ直線的な増加をすることが示された。(5) 衛星リモートセンシングによるエアロゾル種別分類に関し、衛星データから、エアロゾルの光学的厚さ・粒径指標・光吸収性を同時推定するアルゴリズムを開発し、そのアルゴリズムをSeaWiFSセンサーのデータに適用し、砂塵性土壌粒子、炭素性粒子、硫酸塩粒子、海塩粒子の種別分類が可能であることを示した。(6) 衛星データによる対流圏エアロゾル光学特

性の過去約20年にわたる長期変動の解析を行うため、NOAA搭載AVHRRセンサーの校正の検討を行った。相対校正の方法を確立した。校正係数の絶対値の決定については、克服すべき問題とその解決法を具体的に検討した。

[キーワード] エアロゾル、オゾン、放射強制、衛星、モデル

1. はじめに

地球温暖化にともなう気候変化・気候変動の気候モデルによる将来の見通しが、影響評価・対策に十分に活かせるものとなるには、気候変動評価の不確定性の幅を明らかにする必要がある。多くの不確定性の中で重要なものとして、人為起源の対流圏エアロゾルと対流圏オゾンによる気候影響があげられる。対流圏エアロゾルの気候影響評価は、エアロゾルが基本的には日射の散乱による冷却効果を持ち、温室効果ガスによる温暖化効果を弱める効果があることから、気候研究における重要な課題として認識されている。しかしながら、4.1、4.3節にも述べるように、エアロゾルの効果の推定には大きな不確定性が含まれている。また、対流圏オゾンの温室効果についても、4.2節に述べるように、不確定性が大きい。

2. 研究目的

本サブテーマでは、人為起源の対流圏エアロゾルと対流圏オゾンによる気候変化の不確定性を明らかにすることを目指す。輸送過程と化学反応などを組み込んだ全球気候モデルによって、二酸化硫黄、炭素等の排出に対応したエアロゾル・オゾン分布を得る。またエアロゾル分布や雲の効果を取り入れ、その不確定性を考慮し、地球温暖化物質の増加時の全球気候モデルによる気候変動の評価を行う。

3. 研究方法

東京大学気候システム研究センター (CCSR) と国立環境研究所 (NIES) で開発された大気大循環気候モデル (CCSR/NIES AGCM) をベースに、対流圏エアロゾルおよびオゾンを組み込んだモデルの開発を行う。そのため、対流圏エアロゾルの要因を組み込む開発、エアロゾルの間接効果を表現するモデルの開発、対流圏オゾンモデル開発、エアロゾル・オゾン相互作用モデル開発、多波長衛星データによるエアロゾル光学特性推定アルゴリズムの開発、衛星データによる対流圏エアロゾル光学特性の長期変動の解析、等を行う。さらに、開発したモデルを利用して数値実験を行い、人為起源の地球温暖化関連物質の将来の排出に沿った気候の将来の見通しについて、その不確定性を含めた評価解析を行う。

4. 結果・考察

上記研究方法に即して研究を進め、以下のような結果が得られ、考察を加えた。

4.1 全球3次元対流圏エアロゾル輸送・放射モデル

(1) 全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルSPRINTARSの開発及びエアロゾル直接効果・間接効果の評価

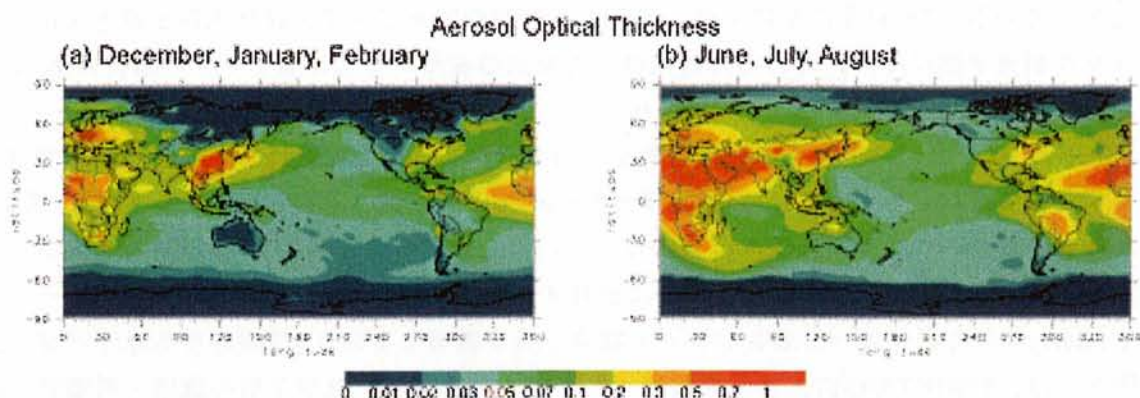


図1 SPRINTARSによるエアロゾルの光学的厚さの季節平均分布。(a)北半球冬季 (b)北半球夏季。

対流圏エアロゾルの気候影響評価の信頼度向上を目的として、対流圏主要エアロゾルである土壌粒子・炭素性粒子・硫酸塩・海塩粒子の輸送過程と放射過程を同時に扱う全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルSPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species)の開発を行った (Takemura et al., 2000², 2002a³)。SPRINTARSはCCSR/NIES AGCMをベースとしており、現在の水平分解能はT106 (約1.1度)、鉛直20層である。モデル内のエアロゾル輸送過程には、発生・移流・拡散・硫酸塩に関わる化学反応・雲や雨による除去・乾性沈着・重力落下が含まれる。また、AGCMの大気放射過程と結合していることにより、エアロゾルの種類毎の吸湿成長・粒径分布・波長依存の複素屈折率を考慮して、エアロゾルの光学特性や直接効果放射強制力の計算が可能である。また、エアロゾル数密度から雲粒数密度を診断するパラメタリゼーションを導入し、エアロゾルの間接効果放射強制力を計算することが可能となった。

図1に、SPRINTARSによって計算されたエアロゾルの光学的厚さの分布を示す。北半球中緯度の都市域 (東アジア・北アメリカ・ヨーロッパ) では、人為起源の硫酸塩や炭素性粒子により年間を通して、エアロゾルが光学的に厚い。アフリカ北部ではサハラダストの影響が目立つ。また、アラビア半島周辺では、北半球夏季にモンスーンによる強風の影響を受けて土壌粒子が大量に舞

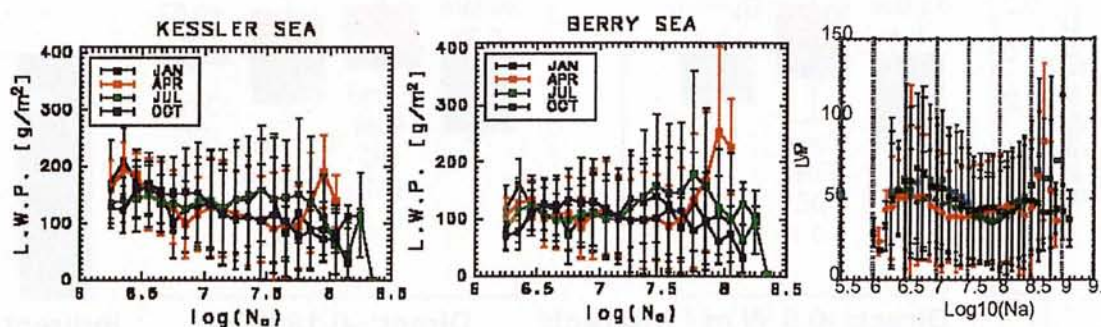


図2 雲水総量(L.W.P.)の気柱エアロゾル数濃度(N_a)依存性。平均値とエラーバーを示す。左2つのモデル値についてはKessler型の降水生成パラメタリゼーションとBerry型のものを用いた結果。右端の観測値は衛星センサーAVHRRから求めた1990年の1, 4, 7, 10月の4ヶ月平均。

い上がっている。7～11月にかけては、アフリカ南部やアマゾンで、森林火災・焼き畑により、エアロゾルが光学的に厚い。これらの特徴は人工衛星搭載センサによるデータの解析結果(Higurashi et al., 2000⁴⁾)や地上観測網のデータ(Holben et al., 2001⁵⁾)との一致度が高い。

SPRINTARSでは、エアロゾル間接効果を評価する際に、降水変換効率が雲水量だけではなくエアロゾル数濃度にも依存するBerry型の降水生成パラメタリゼーションを導入している。図2では、雲水総量の気柱エアロゾル数濃度依存性について、モデル値とAVHRRリモートセンシング値とを比較した。降水変換効率が雲水量のみに依存するKessler型の降水生成パラメタリゼーションよりも、Berry型の方がリモートセンシングの結果を良く説明しており、現実的であることが分かる。

図3には、SPRINTARSによる人為起源エアロゾルの年平均・全球平均の直接・間接効果放射強制力を、IPCC第3次報告書(IPCC, 2001¹⁾)の評価と合わせて示す。硫酸塩と化石燃料起源炭素性粒子に関してはIPCC評価値の不確定性の範囲内に入っているが、硫酸塩の強制力はIPCCの最尤値よりも33%小さい。森林火災起源炭素性粒子に関してはIPCCでは黒色炭素(BC)と有機炭素(OC)の分離を行っていないが、合計するとSPRINTARSの方が負の強制力を小さく見積もっている。結果として、人為起源エアロゾルによる直接効果放射強制力はIPCCでは -0.5 W m^{-2} なのに対し、SPRINTARSでは -0.18 W m^{-2} と計算された。エアロゾル光学特性に関し、SPRINTARSの結果と観測結果との比較を詳細に行い、直接効果放射強制力の計算結果の不確定性は約30%と見積もった。また、人為起源エアロゾルによる間接効果放射強制力は -1.0 W m^{-2} と計算された。リモートセンシング観測からの間接効果放射強制力の評価は -1.2 W m^{-2} 程度である(Nakajima et al., 2001⁶⁾)。従って、間接効果は直接効果よりも放射強制力が大きいと考えられる。但し、間接効果には依然として多くの不確定要素が含まれており、雲の微物理過程の観点等を導入したさらなる研究が必要である。

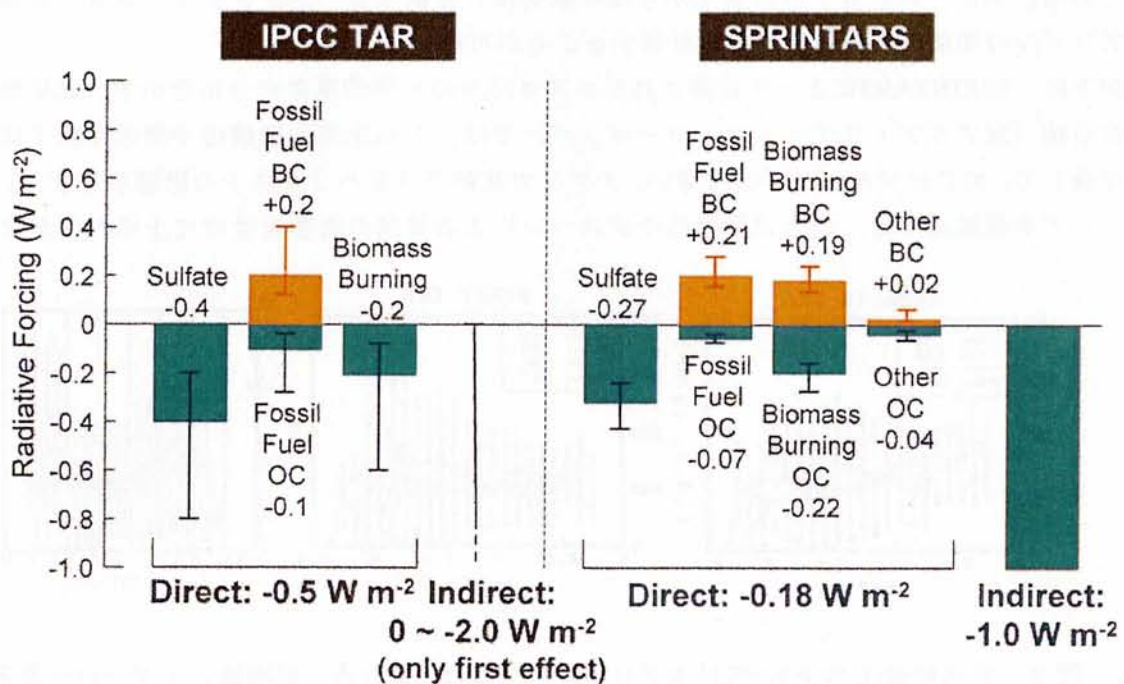


図3 人為起源エアロゾルによる直接効果・間接効果の放射強制力の年平均・全球平均値。
(左) IPCC第3次報告書 (右) SPRINTARS。

Year	2000 (W m^{-2})	2050(A2) (W m^{-2})	2050(B1) (W m^{-2})
OC	-0.29	-0.46	-0.32
BC	+0.33	+0.61	+0.42
Sulfate	-0.38	-0.63	-0.46

表1 SPRINTARSによって計算されたエアロゾル種別の直接効果放射強制力の年平均・全球平均値。2000年、SRES A2シナリオ2050年、SRES B1シナリオ2050年の排出量を与えた場合のシミュレーション結果を示す。

(2) エアロゾル分布の将来予測

SPRINTARS及び人為起源物質排出量将来予測データを用いて、エアロゾル分布の予測実験を行った(Takemura et al., 2001⁷⁾)。排出量予測データは、IPCCのSpecial Report on Emissions Scenarios (SRES) (IPCC, 2000⁸⁾)に準拠して作成した。図4は、2000年(基準年)及びSRESのA2とB1シナリオを使用した2050年のシミュレーション結果を示す。A2, B1シナリオは、SRESの中で人為起源排出量予測がそれぞれ最大・最小になっているシナリオである。A2シナリオの実験においては、ヨーロッパや北米では50年後にはあまり変化が見られないが、東アジアではエアロゾルが増大することが示された。また、排出量が最小のB1シナリオに沿ったシミュレーションにおいても、東アジアではエアロゾルの増大が見られる。また、直接効果放射強制力も同時に計算されており、全球平均値を表1に示す。A2シナリオに沿った実験では、50年後にはいずれの物質でも放射強制力が2倍近くになると予測された。また、B1シナリオにおいても放射強制力は増加すると計算された。

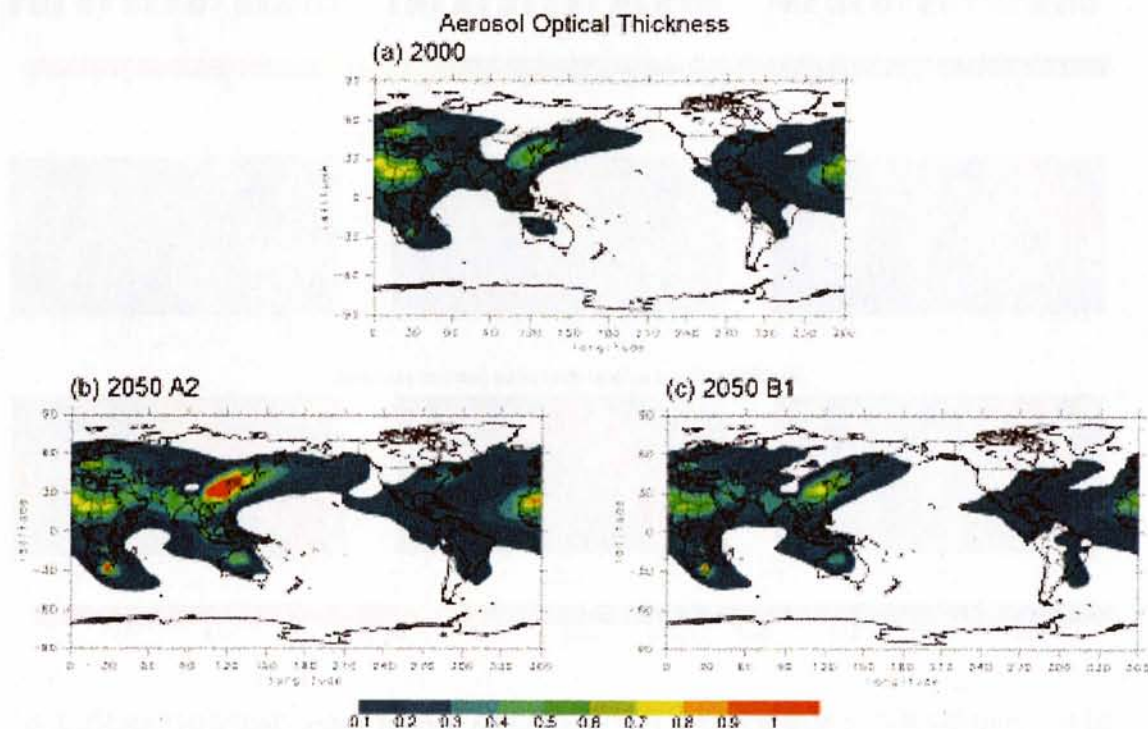


図4 SPRINTARSによるエアロゾルの光学的厚さの年平均分布。(a)2000年 (b)SRES A2シナリオを適用した2050年 (c)SRES B1シナリオを適用した2050年。

いずれのシナリオにおいても、東アジア域のエアロゾル増大による影響が全球平均値にも反映されている。経済発展が著しい東アジア域では今後数十年間で人為起源物質排出量の増大が続くと予測されることから、この地域での人為的な気候変動に特に着目すべきである。

(3) 黄砂及び人為起源エアロゾルの長距離輸送

(2) で示したように東アジア域のエアロゾルの挙動が将来の気候変動予測の重要な点の1つとなる。また、近年、東アジア域のエアロゾル観測例が増加してきたために、この地域のモデルの精度検証が可能となってきた。そこで、東アジア域に着目してシミュレーション結果の詳細な検証を行った。その一例として、図5には2001年4月の大規模黄砂現象時のSPRINTARSによるシミュレーション結果を、黄砂等の土壌粒子を検出することが可能な人工衛星搭載センサTotal Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)のデータの解析結果と合わせて示す(Takemura et al., 2002b⁹⁾)。黄砂がゴビ砂漠から舞い上がり、太平洋を横断し、北アメリカ西岸に到達する時空間輸送パターンをSPRINTARSは上手く再現していることが分かり、モデルの精度が高いことを裏付けている。また、黄砂と同時に、東アジア大陸沿岸を主発生源とする人為起源エアロゾルも太平洋上へ長距離輸送されていることがシミュレーションにより示された。

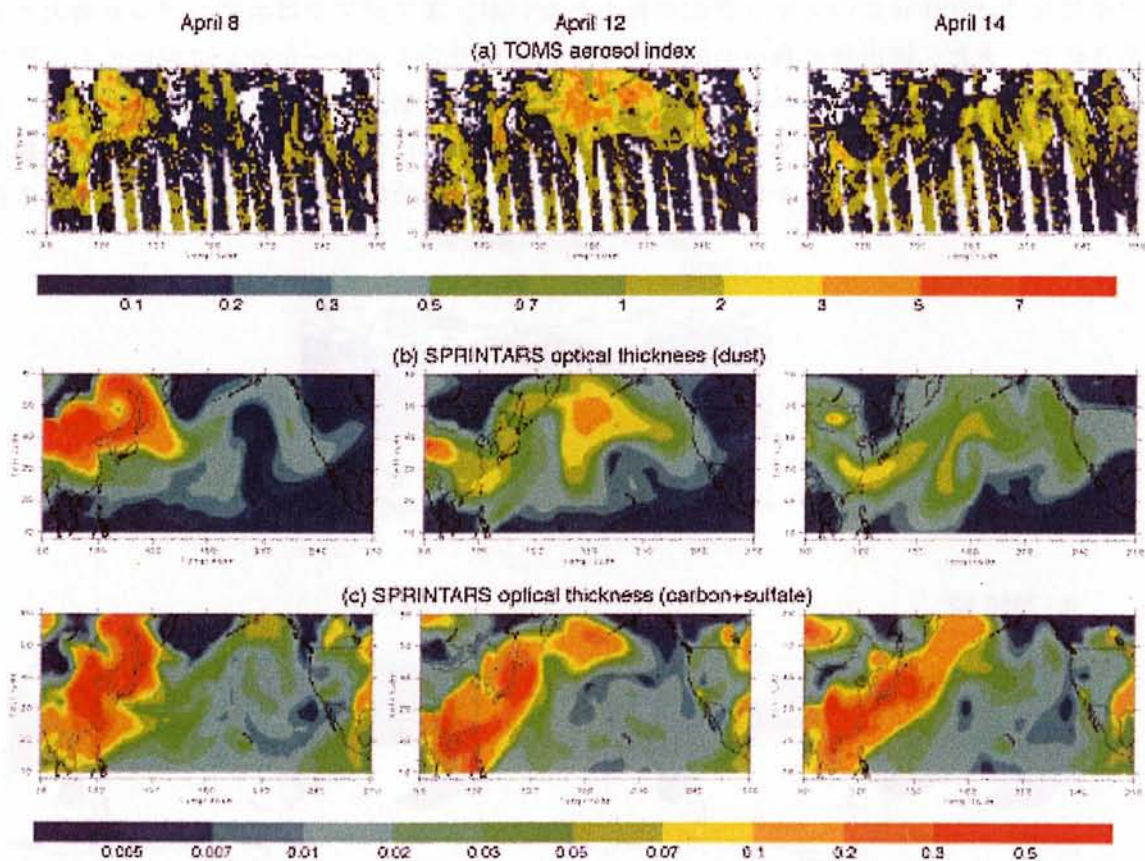


図5 2001年4月の大規模黄砂時における(a)TOMS aerosol index (b)SPRINTARSによる土壌粒子の光学的厚さ (c)SPRINTARSによる炭素性粒子と硫酸塩合計の光学的厚さの日平均分布。

4.2 全球3次元対流圏オゾン光化学モデル

(1) 対流圏オゾンモデル研究の背景と目的

産業革命以来の急速な人為起源気体放出 (emission) の増加は二酸化炭素 (CO_2) やメタン (CH_4) などの長寿命な物質のみならず、対流圏オゾン (O_3) を中心とする高反応性物質やエアロゾルなどの濃度を上昇させ大気組成に多大な変化をもたらしてきている。対流圏のオゾンはそれ自体が強力な温室効果ガスであり将来の気候変動に重要であるが、それに加えオゾンを中心とした化学反応過程は OH ラジカルの生成を通してメタンやハロカーボン類などの他の温室効果ガスや汚染物質の大気中での寿命・濃度をコントロールする力 (大気酸化能) を持つ。また酸性雨および気候変動にとって重要な硫酸エアロゾルの生成過程は大気中の過酸化水素 (H_2O_2) やオゾン、OH の濃度に大きく支配されるため将来の硫酸エアロゾル分布も対流圏オゾン化学場に大きく依存しながら変動していくと考えられる。したがって対流圏オゾン化学の変動が及ぼす気候・大気環境への影響の評価は重要であり、特に正確な気候変動予測のためには無視できない課題と認識されている。

対流圏オゾンやエアロゾルは大気中 (対流圏) での存在寿命が数日～数週間と短いため、空間的、時間的変動性が非常に高く、直接的な観測だけでは全球かつ定量的な分布の把握は難しい。そのためそれらの気候への影響を全球規模で考察するには全球数値モデルによるシミュレーションが必要である。これまでに対流圏オゾンのシミュレーションを行えるモデルは何例かあるが定量的にはいまだモデル間で不確定性を生じている段階であり、モデル構築と同時に観測データを用いた詳細なモデル評価が必要である。さらに対流圏オゾンが及ぼす気候影響を考察する場合には本サブテーマで構築を行ったモデル (Sudo et al., 2002a, b^{10), 11)} のように気候モデルと結合したオンライン化学結合モデルが必要である。加えて、上述のように対流圏オゾンの光化学過程は硫酸エアロゾルとの結びつきが非常に強いいため、現実的な将来気候変動予測のためには、対流圏オゾンのシミュレーションと結合して硫酸エアロゾルのシミュレーションを行えるモデル枠組みが要求される。また、対流圏オゾンの産業革命以前から現在までの増加が及ぼす放射強制力の見積もりには現状でも $0.2\text{--}0.6 \text{ W m}^{-2}$ (Houghton et al., 1995¹²⁾) と大きな不確定性がある。将来の対流圏オゾン変動がどの程度の気候影響を持つかという具体的な見通しのためには、産業革命以前の対流圏オゾンシミュレーションの評価などを含め、対流圏オゾンの放射強制力について、より詳細な評価・理解が求められている。対流圏オゾンの生成・消滅の過程は主にオゾン前駆気体の emission 変化に左右されるところが大きいと考えられているが、水蒸気量、大規模循環/対流による輸送などの気象場の条件とも密接に関連している。そのため、対流圏オゾンの将来に向けての変動過程を議論する際にも前駆気体 emission と気象場の両方による変動成分をそれぞれ考慮に入れる必要があるが、今後の地球温暖化による気象場変動が実際どのように対流圏の光化学に影響するかということや対流圏の化学が変動を受けることによって逆に気候変動にどのような影響があるかということについては現状ではよく分かっていない。

本研究は、対流圏光化学過程を表現可能な全球化学気候結合モデルの開発、およびこれを用いた対流圏オゾン・硫酸エアロゾルの気候影響評価を目的としており、特に対流圏オゾンによる気候変化の不確定性を明らかにすることを目指す。既存の大気大循環気候モデル (CCSR/NIES AGCM) をベースにオゾンを中心とした各種化学過程をオンラインで導入して対流圏オゾンの全球分布および収支を計算、それらの詳細な評価を行う。また、前述したように硫酸エアロゾル分布は気候変動にとって重要な要素であり、対流圏オゾン化学と密接に関連するため、本研究では硫酸エアロゾルの生成過程も上記化

学モデルにオンラインで組み込み、対流圏オゾン・硫酸エアロゾル相互作用モデルの構築を行う。また、エアロゾル種と同様に不確定性の高い対流圏オゾンの放射強制力についても、本研究で構築を行ったモデルを用いて見積もりを行う。さらに対流圏オゾン、硫酸エアロゾルの変動過程について実験を行い、将来の人為起源 emission 変化が及ぼす影響を解析する。

(2) 対流圏化学結合気候モデルの開発

本研究で構築を行った全球光化学モデル (CHASER: CHemical AGCM for Study of atmospheric Environment and Radiative forcing, Sudo et al., 2002a¹⁰⁾) は、CCSR/NIES AGCM を土台として、対流圏における化学反応過程を AGCM 中の力学・物理過程と結合して計算を行う。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ている。光化学過程では対流圏光化学の基本サイクル (O_3 - NO_x - HO_x - CO - CH_4) 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。空間解像度は本研究では水平 $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ 、鉛直には地表から高度 40 km までの 32 層とした。本モデル中では化学過程で計算された対流圏オゾン (+メタン) の全球分布を使用して放射フラックスをオンライン計算しているため、対流圏オゾン (+メタン) の変動による気候影響を考察する際にも応用可能である。

図 6 は本モデルで計算した地表付近のオゾン濃度である (1、4、7、10 月)。1 月では北アフリカの森林火災の影響が特徴的であり、インド等の低緯度帯でのオゾン生成の様子が確認される。またこの時期の北半球中緯度のオゾン濃度には成層圏起源オゾンの寄与が約 40% あるという計算結果となっている。4 月では東アジア域の森林火災の影響が顕著であり、日本付近の地表

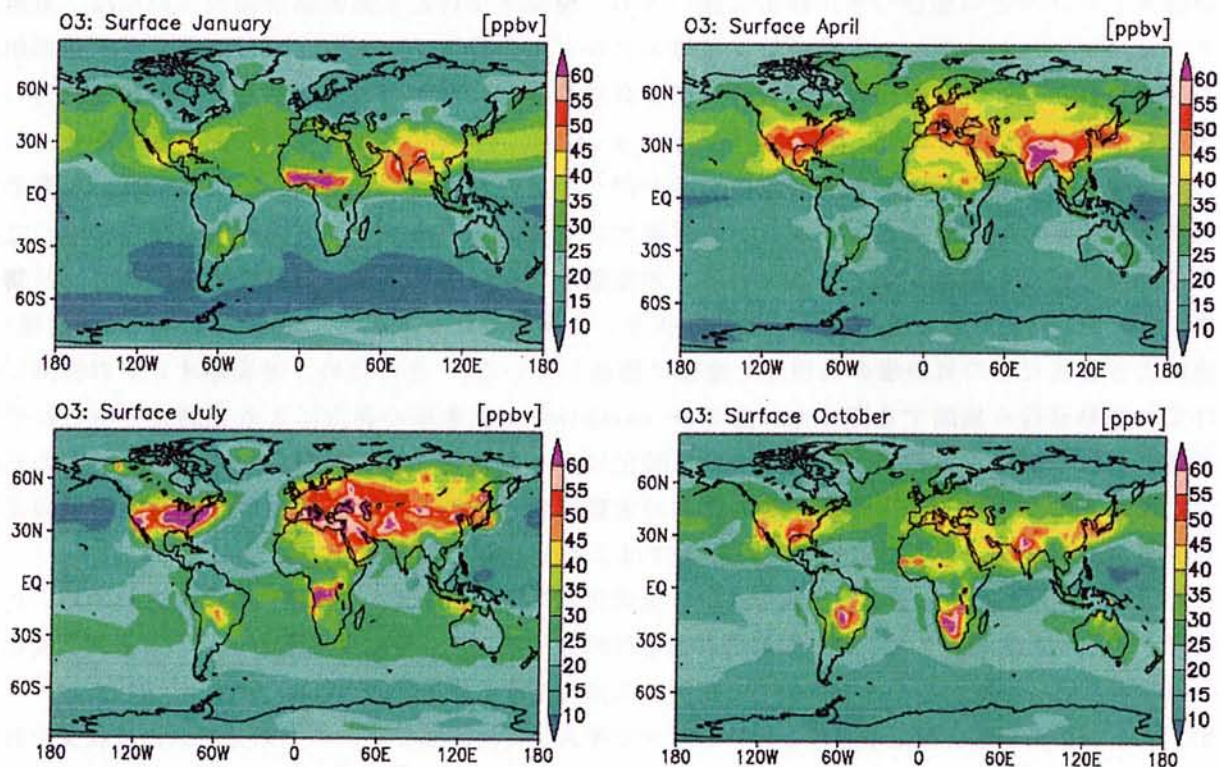


図 6 CHASERモデルで計算された地表オゾン濃度分布 (単位:ppbv)

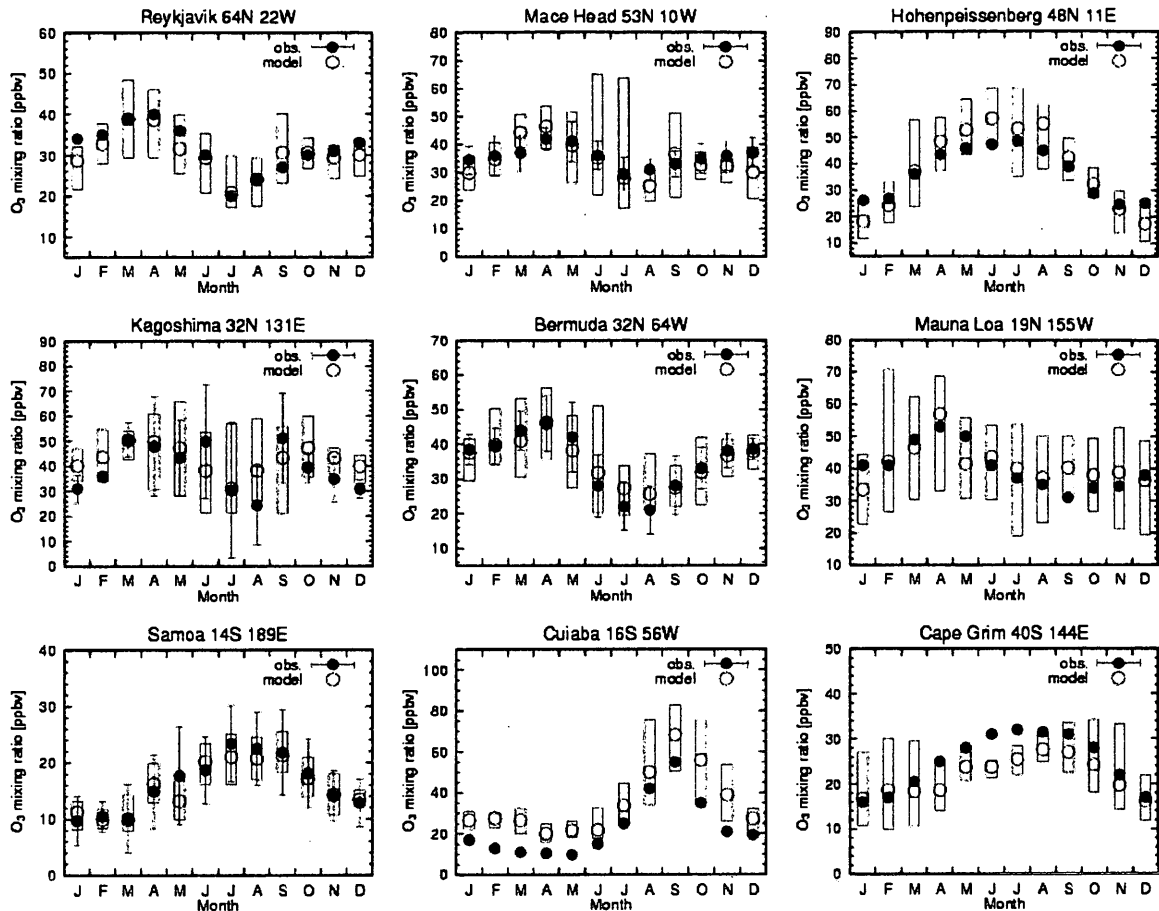


図7 CHASERモデルで計算された地表オゾン季節性の観測との比較。●：観測、○：モデル。ボックスは日々の計算のレンジを示す。

オゾン濃度にも影響を及ぼしている様子が確認される。7月では北半球大陸上の特に汚染域で高濃度オゾンが計算され、10月では南アメリカ、南アフリカでバイオマスバーニングの影響が計算されている。

上記モデルを用いて、対流圏オゾン、その前駆気体である、CO、NO_y、炭化水素類、OHなどの微量気体について、航空機観測などの各種観測データと比較して、モデルの定量的な再現性を評価した。図7は計算された地表オゾンの観測との比較の例であり、清浄大気での春季オゾン極大、汚染域での夏季オゾン生成(Hohenpeissenberg)、乾季のバイオマスバーニングによるオゾン生成(Cuiaba)などの対流圏オゾンの特徴的な季節変化が良く再現されていることが確認された。その他の各前駆気体の分布も各観測値とほぼ整合的であり、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., 2002b¹¹⁾)。また、モデルで計算された OH ラジカル濃度場による CH₄ の化学的寿命は 9.4 年と見積もられたが、これは IPCC (気候変動に関する政府間パネル) による見積もり 9.6 年 (Prather et al., 2001¹³⁾) と良く合致する。

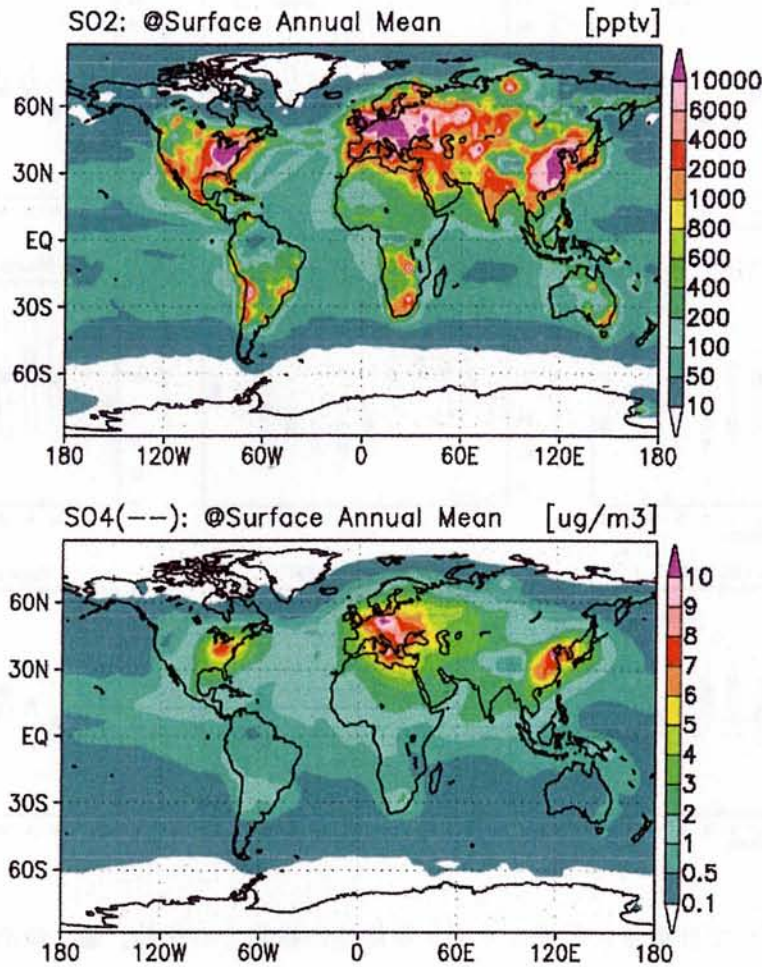


図8 CHASERモデルで計算された地表における年平均二酸化硫黄（上図）、硫酸エアロゾル（下図）分布。

（3）対流圏オゾン・硫酸エアロゾル相互作用モデル

本研究ではさらに上述した対流圏オゾンモデルへの硫酸エアロゾルのシミュレーションの組み込みを行った。モデル中に二酸化硫黄(SO_2)と DMS の emission 過程を考慮し、 SO_2 の気相・液相反応と DMS の気相酸化反応を導入した。各酸化反応は化学過程で計算されている O_3 、 OH 、 H_2O_2 濃度分布をオンラインで使用して計算を行う。 SO_2 の雲水中での液相酸化については雲水の水素イオン濃度すなわち pH の値によるところが大きいが、今回のモデル構築では雲水中の水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ は、

$$[\text{H}^+] = f_n \cdot ([\text{NO}_3^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{HSO}_3^-] + [\text{SO}_3^{2-}]) \quad (1)$$

と表し、アンモニア (NH_3^+)やカルシウム (Ca^{2+})などによる中和を考慮するため中和係数 f_n として 0.2 を用いた (Sudo, 2003¹⁴⁾)。

図8は本モデルで計算された SO_2 と硫酸エアロゾル (SO_4^{2-})の地表分布（年平均）である。特に北半球の汚染域（アメリカ、ヨーロッパ、東アジア）において高濃度 SO_2 （ ~ 10 ppbv）が計算されており、南アフリカや南米においてもバイオマスバーニング等の影響を受けて比較的高めの SO_2

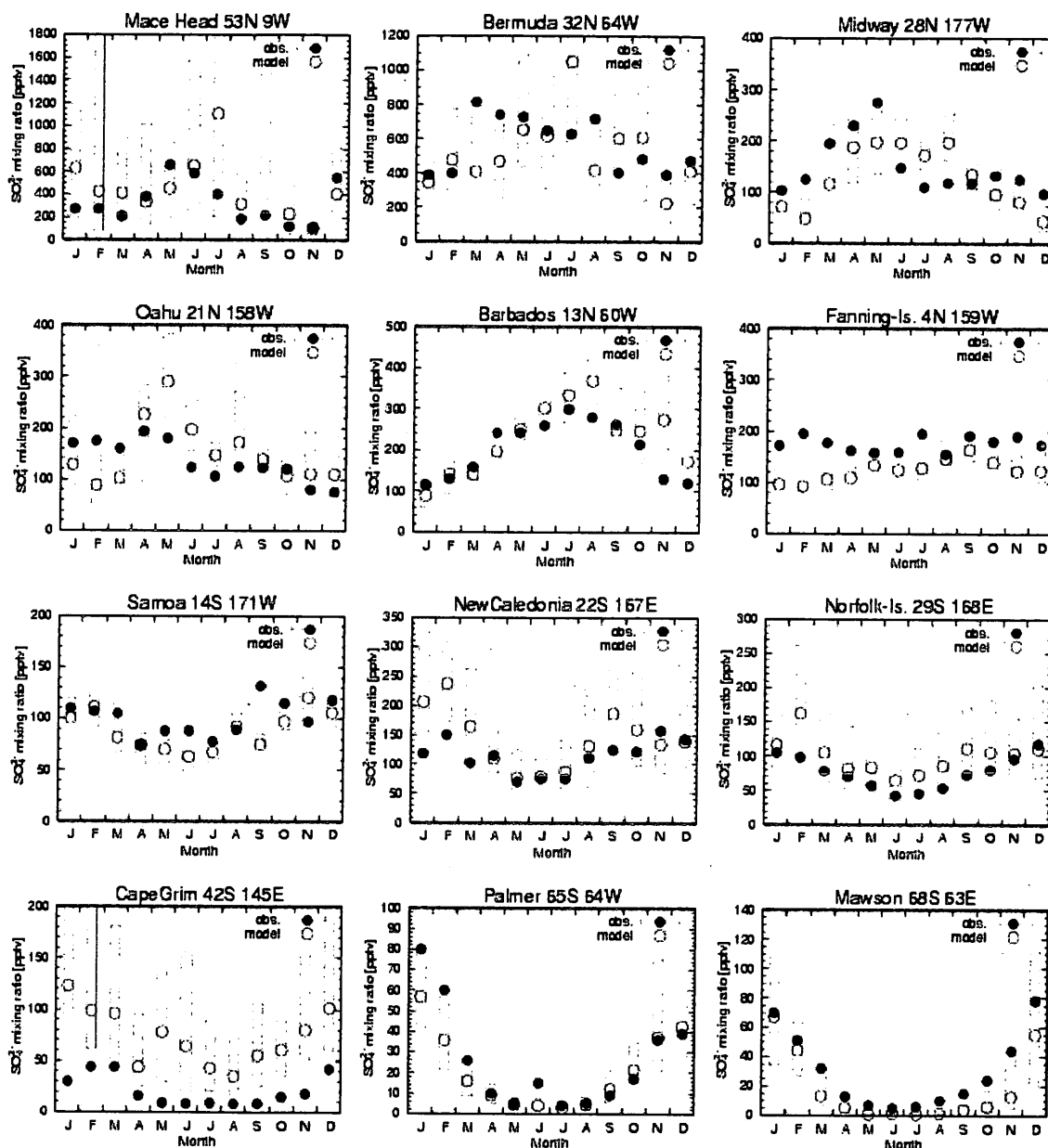


図9 CHASERモデルで計算された地表硫酸エアロゾル濃度の季節性の観測との比較。

●：観測、○：モデル。ボックスは日々の計算のレンジを示す。

濃度(～1ppbv)が見られる。硫酸エアロゾル分布は基本的には SO_2 分布を反映したものであり、上記汚染域で $5\text{--}10\ \mu\text{g m}^{-3}$ と計算されている。

また、計算された硫酸エアロゾル濃度の季節変化と観測データとの比較を行った結果(図9)、今回構築を行ったモデルは概して観測で得られるような硫酸エアロゾルの濃度レベル・季節変動を良く再現できていることが確認されたが、観測と不整合な場合もある(例：図9、Cape Grim)。したがって、雲水 pH の扱いも含めてさらなる検証・改良が必要である。

本モデル中では計算された硫酸エアロゾル濃度は各タイムステップにおいて化学過程で考慮されている不均一反応に反映されるが、今回の実験では N_2O_5 など反応取り込み係数 γ が 0.1 相当

の物質は硫酸エアロゾル上の不均一反応により汚染域境界層内では時定数 30秒～ 5分程度で効率的に除去されることが計算された。このような N_2O_5 などのエアロゾル表面上での不均一反応は NO_x や HO_x の濃度にも影響するのでオゾン生成に対する影響も少なくないことが確認された。

今回の計算で見積もられた硫酸エアロゾルの全球収支では、 SO_2 と H_2O_2 の液相反応による生成 25.3 TgS/yr に対し、 O_3 との液相反応は 11 TgS/yr と計算され汚染域での雲水 pH の低下の影響が反映されている (pH 値が低いほど O_3 との反応は抑制される)。年間平均の硫酸エアロゾル全球総量は本モデルでは 0.56 TgS と計算されており、同様に CCSR/NIES AGCM をベースに開発されたエアロゾルモデル (Takemura et al., 2000²⁾) の結果よりも約 10% 大きい、これは特に液相反応の取り扱いの違いによるものと考えられる。

(4) 対流圏オゾンの放射強制力の計算

本研究で構築を行った化学結合 GCM を用いて対流圏オゾンの放射強制力の計算を行った。計算は産業革命以前から現在までの対流圏オゾン増加が及ぼす対流圏界面での放射強制力について行い、産業革命以前の実験ではオゾン前駆気体の産業起源 emission をゼロにし、森林火災起源については現在の 10% までに減少させた。植物・海洋からの非メタン炭化水素類の emission や雷からの NO_x 生成は現在と同じ量の emission を考慮した。

この計算では対流圏オゾンの放射強制力は長波吸収による $+0.4 \text{ W m}^{-2}$ と短波吸収による $+0.085 \text{ W m}^{-2}$ を合わせて $\sim +0.49 \text{ W m}^{-2}$ と見積もられた (表 2)。これはメタンが持つ放射強制力と同等の値であり、将来の気候変動においても対流圏オゾンが重要な役割を演じることが示唆される。図 10 は計算された対流圏オゾン増加による放射強制力分布 (DJF, JJA) であるが、空間的にも季節的にも変動が大きいことが確認される。北半球冬季 (DJF) では北アフリカのバイオマスバーニングの影響やインドなどの低緯度帯でのオゾン汚染の影響を反映して北半球中低緯度で $0.5\text{--}1.0 \text{ W m}^{-2}$ のオゾンによる放射強制力が計算されている。北半球夏季 (JJA) では、ヨーロッパ、東アジア域の汚染によるオゾン生成を反映し中東付近で $\sim 1.5 \text{ W m}^{-2}$ と、二酸化炭素に匹敵する放射強制が計算されている。このような放射強制力の見積もりは、モデル中の雲の分布に少なからず左右されるが、本実験で雲がない clear-sky の状態で対流圏オゾン放射強制力の見積もりを行った場合と比較すると (表 2)、雲の効果により長波強制は 25% 減少し、逆に短波強制は 38% の増大となり、合計では 14% の増加になることが確認された。

本研究で見積もられた対流圏オゾンの放射強制力 0.49 W m^{-2} は過去の代表的な研究の範囲 0.28 W m^{-2} (Berntsen et al., 1997¹⁵⁾) $\text{--}0.62 \text{ W m}^{-2}$ (Marenco et al., 1994¹⁶⁾) に入るが、単位ドブソンユニット (DU) あたりのオゾン増加に対する放射強制感度は、本研究では $0.047 \text{ W m}^{-2} \text{ DU}^{-1}$ であり、これは過去の研究 ($0.035\text{--}0.040 \text{ W m}^{-2} \text{ DU}^{-1}$) に比べて大きめである。また、今回の

表 2 CHASERモデルで計算された対流圏オゾンの放射強制力 (対流圏界面における)。

	Whole-sky (雲あり)			Clear-sky (雲なし)		
	全球	北半球	南半球	全球	北半球	南半球
長波 (Wm^{-2})	0.402	0.485	0.319	0.498	0.609	0.386
短波 (Wm^{-2})	0.085	0.107	0.063	0.053	0.069	0.037
合計 (Wm^{-2})	0.487	0.592	0.382	0.551	0.678	0.423

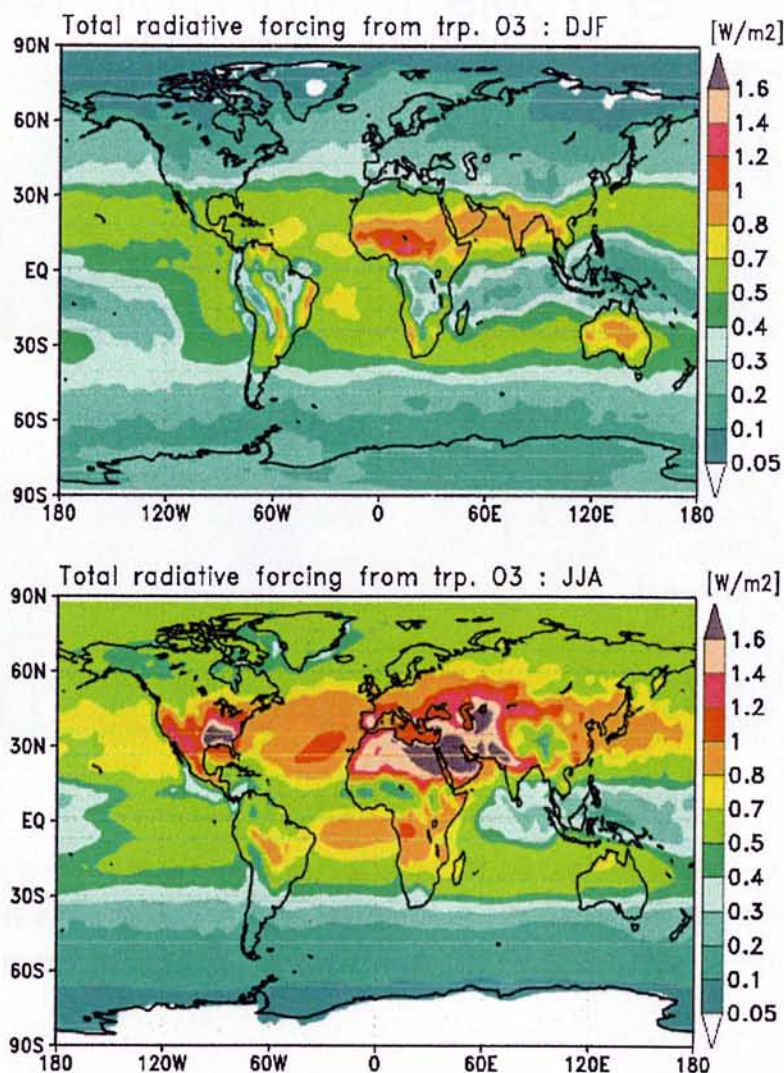


図 10 CHASERモデルにより見積もられた対流圏オゾンの放射強制力（産業革命以前→現在）分布。上図：北半球冬季（12、1、2月平均）、下図：北半球夏季（6、7、8月平均）。単位： W m^{-2} 。

計算では植物起源の非メタン炭化水素や土壌・雷からの NO_x 放出は産業革命以前も現在も同一と仮定しているが、これらの要素の産業革命以前/現在の差異を適切に考慮しないと、産業革命以前の対流圏オゾン量を過大評価し、結果的に放射強制力を過小評価する傾向にあるという報告 (Mickley et al., 2001¹⁷⁾) があるので、産業革命以前のシミュレーションについて更に評価が必要である。

（5）対流圏オゾンの変動過程に関する実験

対流圏オゾンを中心とした対流圏光化学の変動過程について、上記（2）および（3）節で構築を行った化学モデルを用いて実験を行った。

①熱帯域対流圏オゾンの変動過程

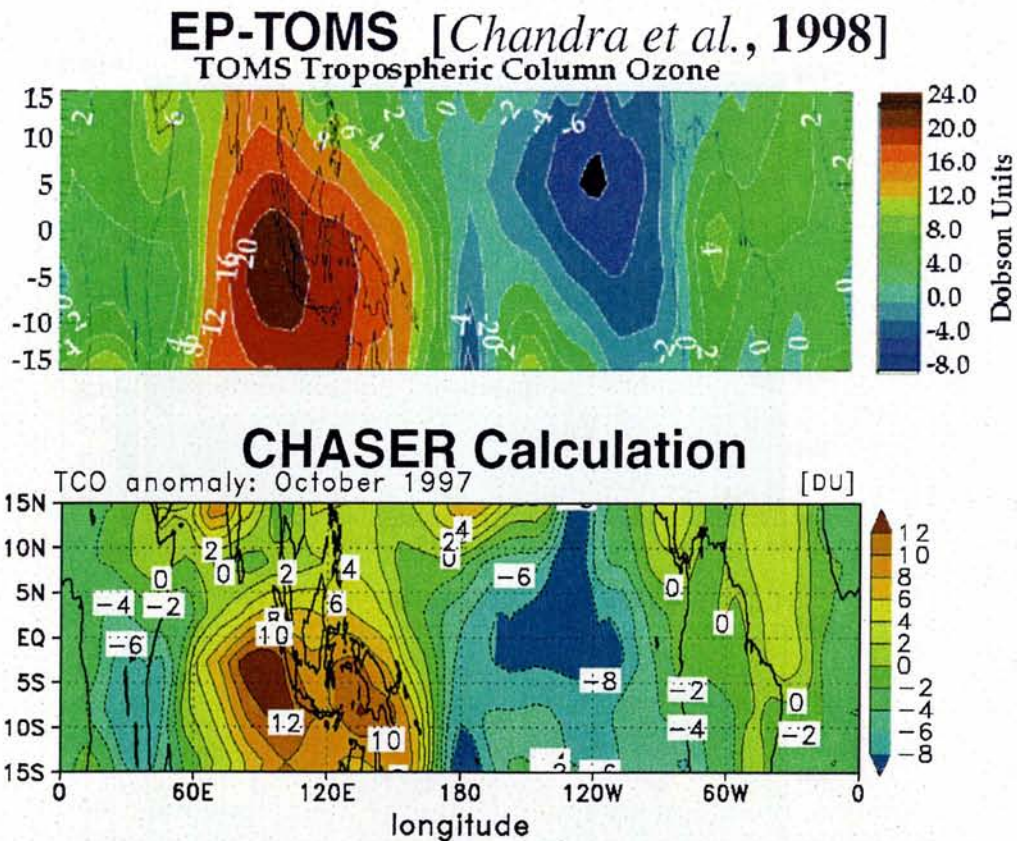


図 1 1 エルニーニョ現象（1997年）時の赤道域（15N-15S）対流圏オゾン全量のアノマリ（1997年から1996年を引いた値）。衛星センサーTOMS観測（上図）と CHASERモデル計算（下図；Sudo and Takahashi, 2001¹⁸⁾）。モデル計算（下図）はエルニーニョ現象による気象場の変動成分のみを考慮。

前述のように対流圏オゾン化学は気象場の変動に大きく左右される。本研究では気象場と光化学の結び付きが特に強い熱帯域に注目し、1997-1998年のエルニーニョ現象時に観測された大規模な熱帯域オゾン変動についてモデルにより再現実験を行い、熱帯域の気象場がオゾン分布決定にどのような役割をしているかを調べた。実験ではモデルにエルニーニョ時の海面水温変動、風速、水蒸気分布のデータを与えてエルニーニョ現象を再現し、光化学過程への影響を評価した。この実験では観測で得られた大規模なオゾン変動パターンが良く再現された（図 1 1）。この実験によって、エルニーニョ時の熱帯域東西循環（Walker 循環）、積雲対流分布の東西シフトと水蒸気分布の変動がオゾン生成および消滅の過程に大きく変動を与え、図 1 1に見られるような大規模かつ顕著なオゾン分布変動を引き起こしていたことがモデルにより初めて確認された（Sudo and Takahashi, 2001¹⁸⁾）。特に、インドネシア域のオゾン増大に関してはこの時期に同時に起きた森林火災による影響も大きいと考えられるが、本実験は、観測されたオゾン増大の約半分はエルニーニョ現象に伴う気象場変動の影響のみで説明しうることを示している。

②対流圏オゾン光化学場の将来予測実験

将来に向けて対流圏オゾンを中心とした光化学過程がどのように変化するかについて予測実験を行った。本研究では emission 変化と気候変動による気象場変化の両方の効果を考慮するため、

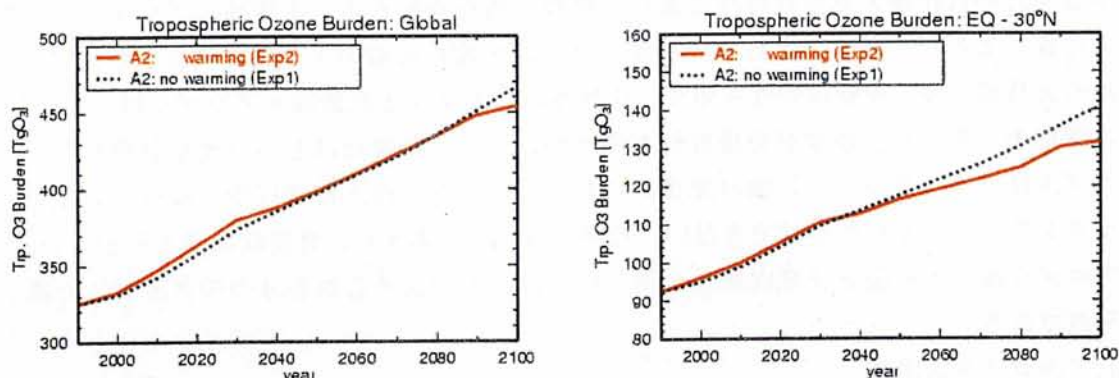


図 1.2 対流圏オゾンの全球総量 (TgO_3) の時間発展 (1990 → 2100 年)。左図：全球、右図：赤道 - 30°N。赤実線：温暖化考慮、青点線：温暖化非考慮。

emission 変化のみの実験 (Exp1) と emission 変化に加え気候変動 (温暖化) を考慮した実験 (Exp2) の 2 種類の実験を実行した。これらの実験では、emission 変化、気候変動はともに IPCC SRES-A2 シナリオに従った。Exp2 の気候変動の予測ではモデル中で CO_2 等の温室効果気体濃度を増加させるとともに、CCSR/NIES 大気海洋結合モデルにより予測された海面水温と海水分布を与えた (この結合モデルは高い気候感度を持ち、将来の気候変動の予測では他のモデルに比べ高めの温度上昇を予測する傾向にあることに注意が必要である)。

対流圏オゾン総量は Exp1 ではほぼ直線的に増加し、2050 年で 23%、2100 年では約 44% の増加が計算された (図 1.2)。Exp2 では水蒸気増加によるオゾン破壊の活発化のため対流圏下層では Exp1 に比べてオゾン増加は概して緩和されるが、温暖化によるハドレー循環および成層圏循環の強化により、成層圏からのオゾン流入が増加し中上部対流圏では Exp1 以上のオゾン増加が計算され、結果として全球総量では図のように Exp1 とほぼ同じ増加傾向が得られた。また、汚染域の境界層中では温暖化による温度上昇により正味のオゾン生成が活発化することがこの実験で確認された。さらにこの実験においては、将来の硫酸エアロゾルの分布及び生成過程が、特にインド等の低緯度域におけるオゾン、 H_2O_2 、OH 濃度などの対流圏化学場の変動に大きく影響されることを確認している (Sudo, 2003¹⁸⁾)。

4.3 衛星リモートセンシングによる全球エアロゾル特性の推定

エアロゾルの気候影響評価の制度向上を図るために、衛星リモートセンシングによるエアロゾル種の推定とエアロゾル特性の長期変動解析を試みた。

(1) 衛星リモートセンシングによるエアロゾル種別分類に関する研究

① エアロゾルタイプ

気候学上重要なエアロゾルには、サハラダストや黄砂に代表される土壌性エアロゾル、化石燃料の消費や焼き畑・森林火災などのバイオマス燃焼による炭素性エアロゾル、人間活動から発生する SO_2 や海中プランクトンから大気中に放出された硫黄化合物から生成される硫酸塩エアロゾル、波立ちなどにより海から大気中に放出される海塩エアロゾルがあるが、これら 4 種のエアロ

ゾルはそれぞれ粒径と光吸収特性において異なる特性を有する。土壌性エアロゾルは、発生源土壌の性質による若干の違いはあるが、数 $\sim$ 10 μm 程度の比較的大きな粒径をもち、紫外から短波可視の波長域で強い光吸収特性を示す。炭素性エアロゾルと硫酸塩エアロゾルはともに、1 μm 以下の微粒子であるが、前者が光吸収性を持つのに対し、後者はほとんど光を吸収しない。海塩エアロゾルは他のエアロゾルに比べ光学的に非常に薄い、海上にほぼ均一に分布しているため、バックグラウンドとして無視できない。粒径は数 μm と大きく、光吸収はほとんどない。つまり、エアロゾル粒子の粒径と光吸収特性が得られれば、おおよそこれら4つのタイプに分類することが可能である。

② アルゴリズム開発

エアロゾル種別分類を行うためには、エアロゾルの粒径と光吸収特性を同時推定する必要があるが、粒径については、衛星搭載センサーの可視・近赤外の2波長データより、エアロゾルの光学的厚さと粒径指標を推定する2チャンネル法が我々のグループによって開発されている(Higurashi and Nakajima, 1999¹⁹⁾; Higurashi et al., 2000⁴⁾)。一方、光吸収特性については、紫外波長を用いて土壌性やバイオマス燃焼起源のエアロゾルが検出できることが示されている(Herman et al., 1997²⁰⁾)。

そこで、2波長アルゴリズムを短波長側に拡張し、短波可視 $\sim$ 可視 $\sim$ 近赤外の4波長データを用いて、エアロゾルの光学的厚さ・粒径指標・光吸収性を同時推定するアルゴリズムを開発した(Higurashi and Nakajima, 2002²¹⁾)。アルゴリズムは、大きく2つの段階から構成されている。まず、吸収性の有無に対応した2つのエアロゾルモデルを用意し、それぞれについて2チャンネル法を適用し、エアロゾルの光学的厚さと粒径指標の推定を行う。次に、その推定された光学的厚さと粒径指標から短波可視チャンネルでの輝度を求め、それを観測値と比較することで、光吸収性の

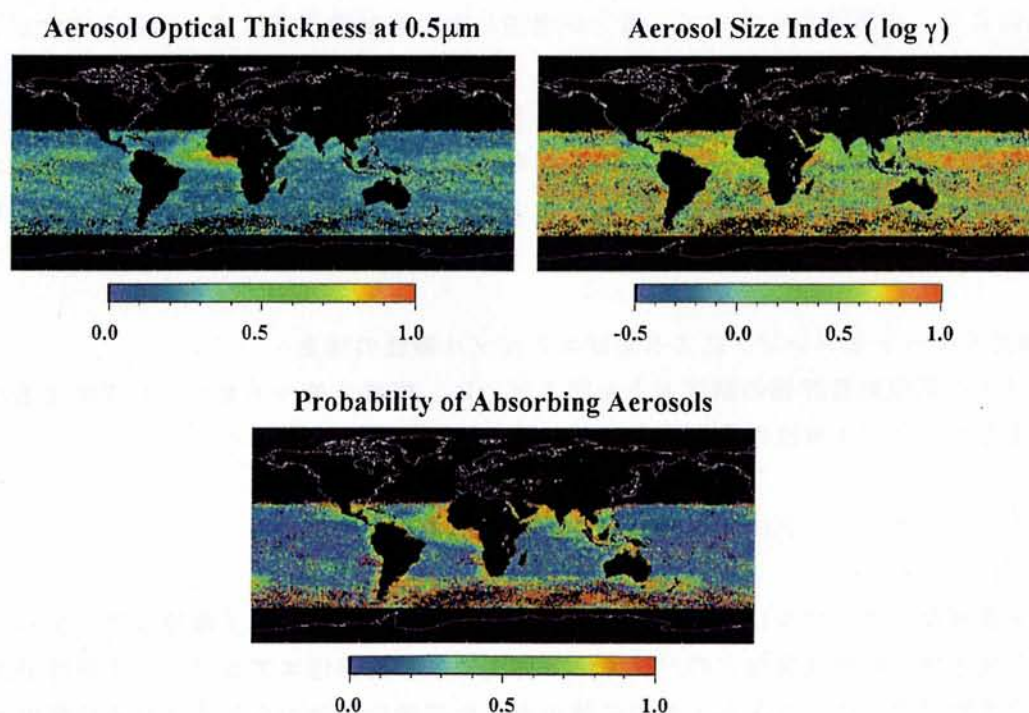


図13 1998年1月のエアロゾルタイプの光学的厚さ、粒径パラメータ、光吸収性

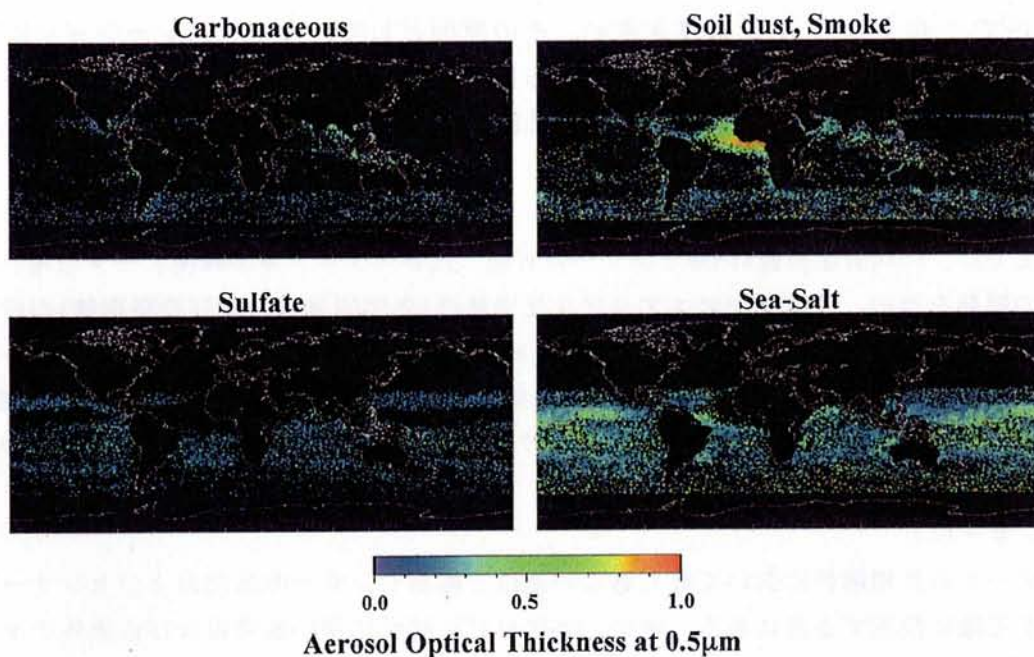


図14 1998年1月のエアロゾルタイプ毎の光学的厚さ

有無についての判別を行う。得られた粒径指標と光吸収性からエアロゾルタイプの分類を行う。

③ 解析結果・考察

このようにして開発したアルゴリズムを、短波可視 ($0.4\mu\text{m}$) から近赤外までのチャンネルをもつ SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor) センサーの1998年1, 4, 7, 10月のデータに適用し、解析を行った。図13に1998年1月のエアロゾルの光学的厚さ、粒径パラメータ、光吸収性の分布を、図14にエアロゾルタイプ毎の光学的厚さを示す。ここでの粒径パラメータは、小粒径モードと大粒子モードの比で、値が大きいほど大粒子の寄与が高いことを示す。光学的厚さの分布を見ると、アフリカ大陸の西岸から、大量のエアロゾルが大西洋に流れ出ているのが分かる。我々のグループによって別途開発された全球3次元エアロゾルモデル(Takemura et al., 2000²⁾)によれば、この区域には2種類の異なる起源のエアロゾルが分布している。北半分はサハラ砂漠からの砂塵性粒子、南半分は中部・南部アフリカの焼き畑から放出された炭素系粒子である(4.1節参照)。このことから、ここに分布するエアロゾルは光吸収性を示すと考えられるが、光吸収性の図では、アフリカ西部から大西洋に向かって吸収性のエアロゾルが分布していて、まさにその予想とよく一致している。しかし、モデルで炭素系粒子が分布している領域でも、粒子の大きさは土壌性粒子と大きく違ってない。このため、衛星解析では、土壌性・煙という1つのタイプとして分類されている。このように、焼き畑から発生した煙の中には、粒子が大きいために土壌性粒子と区別できない粒子が含まれているようである。また、インドをはさんでベンガル湾からアラビア海までの広い範囲にも、光吸収性エアロゾルが分布している。この区域は、光学的厚さとしては大きくないが、モデルにより再現されたインドの焼き畑に起因する炭素系粒子の分布と一致している。他の季節についても理にかなった結果が得られている。

以上のように、衛星データから導かれた分布は、モデルの結果とも概ね一致することが分かった。しかし、光学的厚さの見積もりについては、衛星データ解析結果の方がモデルの結

果に比べて、0.1 から 0.2 程度大きい。その原因として、キャリブレーションに不確定性が残されていることや、元の衛星データから雲ピクセルを完全に除去できていないこと、等が考えられるが、これについては今後更に調査していく必要がある。

(2) 全球エアロゾル特性の長期解析

これまでに、NOAA衛星搭載AVHRRセンサーの可視・近赤外チャンネル輝度データを用いたアルゴリズムの開発を行い、地球上でのエアロゾル光学特性(光学的厚さおよび粒径指標)の推定が可能となった(Higurashi and Nakajima, 1999¹⁹⁾)。AVHRRは、近年エアロゾル観測用に設計されている衛星センサーに比べ広帯域で、吸収気体による影響が含まれるなどデータの取り扱いが難しいが、1981年から現在までの20年以上にわたるデータ蓄積があり、全球規模でのエアロゾルの長期変動を把握するのに適している。

① センサー校正

衛星データの長期解析において最も難しい点は、衛星センサーの劣化およびセンサー交代による違いを正確に校正する点にある。特に、エアロゾル解析に用いる可視及び近赤外チャンネルはon-boardでの校正ができないため、より深刻である。チャンネル i ($i=1$: 可視、2: 近赤外) で受信されたカウント値 C_i は以下のように輝度値 R_i に変換される。

$$R_i = S_i(C_i - C_{i,0}) \quad (2)$$

$C_{i,0}$ は宇宙空間のカウント値、 S_i は校正係数である。 $C_{i,0}$ はほぼ一定の値であり、宇宙空間でのデータに基づきNOAAより発表されている。問題となるのは S_i で、NOAAの発表値には問題があることがMishchenko et al. (1999)²²⁾により報告されている。特に、粒径指標は、可視チャンネルと近赤外チャンネルの相対関係を用いて推定されるため、校正の影響を受けやすく、より精度の高い校正係数が要求される。そこで、それぞれのチャンネルの校正係数を個別に絶対検定するのではなく、2つのチャンネルの相対値を押さえた上で、絶対値を決定するという2つのステップにより校正係数決定を行うこととする。

② 校正係数比の決定

相対校正については、熱帯域の積乱雲の反射率が一定であることを利用する方法が有効である(Vermote and Kaufman, 1995²³⁾)。以下の条件で雲ピクセルの選定を行い、ピクセル毎に計算された理論計算値とカウント値から校正係数比を決定する。

緯度: 北緯15度～南緯15度

経度: 東経100度～東経230度

太陽天頂角: 60度未満

衛星天頂角: 10度未満

相対方位角: 130度～180度

輝度温度(チャンネル4): 220度～225度

このようにして求められた校正係数比の時系列を図15に示す。この間、衛星の交代が3回行われているが、いずれの号数においてもおよそ ± 0.02 の精度で決定された。

③ 校正係数の絶対値の決定

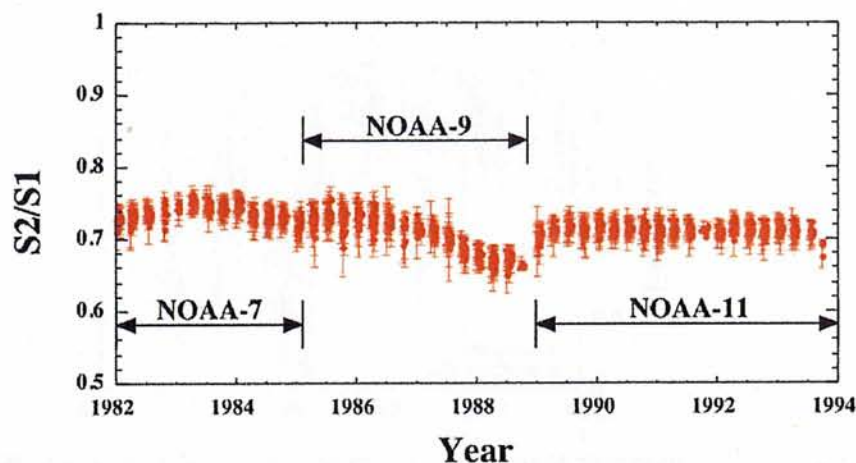


図15 雲の反射率を用いて得られたAVHRRセンサーのチャンネル1と2の校正係数比の時系列。

校正係数の絶対値の決定には地上観測データが不可欠である。近年ではセンサー校正に適した地上観測法が開発されてきているが、1980年まで遡ったデータの入手は困難である。そのため、データ蓄積のある直達日射観測データを用いて絶対値の決定をする必要がある。直達日射観測が行われている気象庁14官署のデータを手し、以下の手順で校正係数決定を試みた。(i) 観測地点の衛星データを抽出する；(ii) 解析に必要な補助データ(海上風速、水蒸気量、オゾン量)をNCEP気象グリッドデータおよびTOMS オゾン全量データより時空間内挿し、求める；(iii) 衛星のカウント値を、雲の反射率から求められた校正係数比を用いて輝度値に変換する(但し、 S_1 は仮定)。；(iv) 得られた輝度値から、通常の2チャンネル法の解析を行い、光学的厚さとオングストローム指数の推定を行う；(v) 推定された光学的厚さとオングストローム指数、補助データを用いて、直達日射計算を行う；(vi) 様々な S_1 に対し、直達日射の計算値と観測値の比較を行い、両者が一致するよう S_1 を決定する。

上記方法により決定された S_1 の時系列を図16に示す。決定された値には0.1~0.3あるいはそれ以上の大きな変動が日単位で見られるが、センサーの劣化は非常に時間的に緩やかなものであり、こうした大きな変動は示さない。エアロゾル解析に十分な精度で係数決定を行うためには、

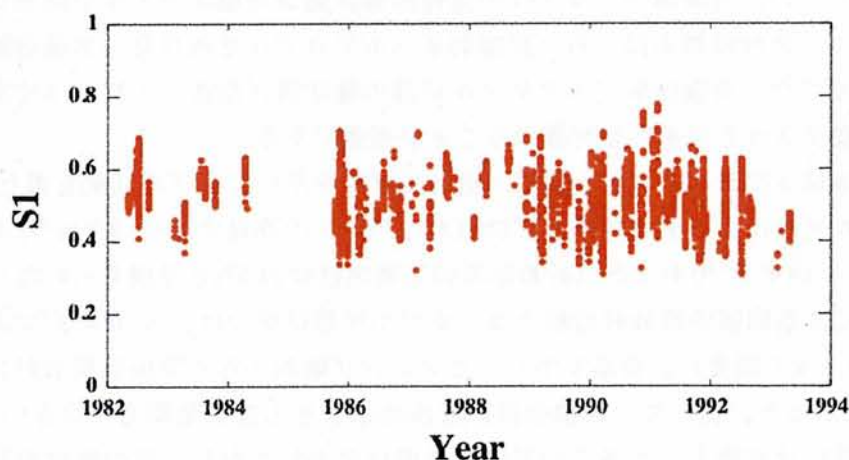


図16 地上直達放射観測データに基づき決定された AVHRRチャンネル1の校正係数

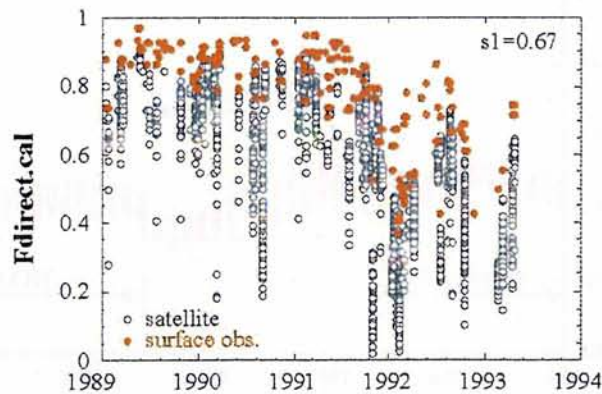


図17 チャンネル1の校正係数 S_1 を0.67に固定し計算された直達放射量と地上観測値

まずは短い時間スケールでのばらつきを取り除く必要があると考えられる。

図17は、ある S_1 値(ここでは 0.67 を仮定した場合)で計算された直達放射と地上観測値をプロットしたものである。図から分かるように、地上観測・衛星観測ともに雲の影響を受けた曇天時のデータが多く含まれており、それらを解析から排除する必要性が示された。1つの方法としては、ここから直達放射が最大となるデータのみを選択することが考えられる。また、解析で用いている水蒸気などの補助データや理論計算で仮定されている大気モデルと、現実大気との不一致もまたばらつきの原因の1つと考えられ、これにより生じる誤差についても評価していく必要がある。

5. 本研究により得られた成果

対流圏エアロゾルと対流圏オゾンの気候影響について、全球3次元モデルや衛星データを用いて、以下の成果を得た。

(1) 東京大学・気候システム研究センター(CCSR)と国立環境研究所(NIES)で開発されている大気大循環気候モデル(CCSR/NIES AGCM)に、対流圏主要エアロゾルである土壌粒子・炭素性粒子・硫酸塩粒子・海塩粒子の輸送過程と放射過程を同時に扱う全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルの開発を行い、対流圏エアロゾルの気候影響評価が可能なモデルを開発した。このモデルは、エアロゾルの放射強制力のうち、直接効果(エアロゾルそれ自身が太陽放射を散乱・吸収する効果)ばかりでなく間接効果(エアロゾルが雲の凝結核となることによって雲の光学的・微物理学的特性を変化させる効果)を計算することが可能である。

(2) 開発した全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルを用いて以下の結果を得た。

・人為起源エアロゾルによる直接効果放射強制力は、IPCCの評価では -0.5 W m^{-2} なのに対し、モデル計算結果では -0.18 W m^{-2} であった(計算結果の不確定性は約30%と見積もられた)。また、人為起源エアロゾルによる間接効果放射強制力は、モデル計算結果では、 -1.0 W m^{-2} であった(IPCCの評価では、 $0 \sim -2 \text{ W m}^{-2}$ 程度)。衛星リモートセンシング観測からの間接効果放射強制力の評価は -1.2 W m^{-2} 程度であった。従って、間接効果は直接効果よりも放射強制力が大きいと考えられる。ただし、間接効果には依然として多くの不確定要素が含まれており、雲の微物理過程の観点等を導入したさらなる研究が必要である。

・モデルに人為起源物質排出量将来予測データを与えて、エアロゾル分布の予測実験を行った。IPCCのA2シナリオに沿った実験では、50年後には、放射強制力が2倍近くになると予測された。また、B1シナリオにおいても放射強制力は増加すると計算された。いずれのシナリオにおいても、東アジア域のエアロゾル増大による影響が全球平均値にも反映されている。

・東アジア域に着目してモデルによるシミュレーション結果の詳細な検証を行った。黄砂がゴビ砂漠から舞い上がり、太平洋を横断し、北アメリカ西岸に到達する時空間輸送パターンをモデルは上手く再現していることが分かり、モデルの精度が高いことを裏付けている。また、黄砂と同時に、東アジア大陸沿岸を主発生源とする人為起源エアロゾルも太平洋上へ長距離輸送されていることがシミュレーションにより示された。

(3) CCSR/NIES AGCM に対流圏化学過程を導入し、対流圏オゾンの気候影響をオンラインで評価可能な全球3次元対流圏オゾン光化学モデルを開発した。また、そのモデルの化学過程に硫酸エアロゾルの生成過程を組み込むことで対流圏化学と硫酸エアロゾルの結合シミュレーションを可能にし、対流圏オゾンと硫酸エアロゾルの気候影響を同時に評価できるモデルとした。

(4) 開発した全球3次元対流圏オゾン光化学モデルを用いて以下の結果を得た。

・対流圏オゾンの放射強制力の見積もりを行った。対流圏オゾンの産業革命以前から現在までの増加が及ぼす放射強制力は $+0.49 \text{ W m}^{-2}$ (長波 0.4 + 短波 0.09) と見積もられ、対流圏オゾンがメタンと同等の放射強制力を持つことが示された。また特に北半球夏季の汚染域では $\sim +1.5 \text{ W m}^{-2}$ と二酸化炭素に匹敵する放射強制力が計算された。

・対流圏オゾン化学の変動要因に関する実験を行った。1997年のエルニーニョ現象時に観測された対流圏オゾン変動について再現実験を行い、エルニーニョ現象による熱帯域東西循環、対流パターン、水蒸気分布の変動が、観測されたような大規模なオゾン変動の主因であることを示した。したがって、将来の対流圏オゾン変動の要因として気象場・気候の変動による影響が無視できないことが示唆された。

・将来の対流圏オゾンおよび硫酸エアロゾルの予測シミュレーションを行った結果、対流圏オゾンは、前駆気体の排出 (emission) 量の増加に対してほぼ直線的な増加をすることが示され、IPCCのSRES-A2シナリオの場合、現在から2100年までに約44%の対流圏オゾン増加が計算された。また、将来の硫酸エアロゾル分布は、特に低緯度域のオゾン、 H_2O_2 、OHの濃度変動に大きく依存しながら変動することが示された。

(5) 衛星リモートセンシングによるエアロゾル種別分類に関し、衛星データから、エアロゾルの光学的厚さ・粒径指標・光吸収性を同時推定するアルゴリズムを開発した。このようにして開発したアルゴリズムを、短波可視 ($0.4 \mu\text{m}$) から近赤外までのチャンネルをもつ SeaWiFS センサーのデータに適用し、解析を行った。砂塵性土壌粒子、炭素性粒子、硫酸塩粒子、海塩粒子の種別分類が可能となった。この結果を全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルの結果と比較検討し、例えば、アフリカ大陸の西岸から大量のエアロゾルが大西洋に流れ出ており、北半分はサハラ砂漠からの砂塵性土壌粒子、南半分は中部・南部アフリカの焼き畑から放出された炭素性粒子であることなど、理に適った結果が得られた。

(6) 全球でのエアロゾル特性 (光学的厚さおよび粒径指標) の長期変動の解析を、1981年から現在までの20年以上にわたるデータ蓄積があるNOAA衛星搭載AVHRRセンサーの可視・近赤外チャンネル輝度データを用いて行った。衛星データの長期解析において最も難しい点は、衛星センサ

一の劣化およびセンサー交代による違いを正確に校正する点にある。相対校正については、熱帯域の積乱雲の反射率が一定であることを利用する方法を適用し、その有効性を確認した。校正係数の絶対値の決定については、データ蓄積のある直達日射の地上観測データを用いて、校正係数決定を試みた。推定された校正係数の日単位のばらつきを取り除く必要があること、地上観測・衛星観測ともに雲の影響を受けた曇天時のデータを解析から排除する必要があること、解析で用いている水蒸気などの補助データや理論計算で仮定されている大気モデルと現実大気との不一致により生じる誤差についても評価していく必要があることがわかった。

6. 引用文献

- 1) IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change): Climate Change 2001: The Scientific Basis. J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, D. Xiaosu, K. Maskell, and C. A. Johnson, Eds., Cambridge Univ. Press, 896 pp., 2001.
- 2) Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima: Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, **105**, 17853-17873, 2000.
- 3) Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben, and S. Kinne: Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *J. Climate*, **15**, 333-352, 2002a.
- 4) Higurashi, H., T. Nakajima, B. N. Holben, A. Smirnov, R. Frouin, and B. Chatenet: A study of global aerosol optical climatology with two-channel AVHRR remote sensing. *J. Climate*, **13**, 2011-2027, 2000.
- 5) Holben, B. N., D. Tanré, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. S. Schafer, B. Chatenet, F. Lavenue, Y. J. Kaufman, J. Vande Castle, A. Setzer, B. Markham, D. Clark, R. Frouin, R. Halthore, A. Karneli, N. T. O'Neill, C. Pietras, R. T. Pinker, K. Voss, and G. Zibordi: An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *J. Geophys. Res.*, **106**, 12067-12097, 2001.
- 6) Nakajima, T., A. Higurashi, K. Kawamoto, and J. E. Penner: A possible correlation between satellite-derived cloud and aerosol microphysical parameters. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1171-1174, 2001.
- 7) Takemura, T., T. Nakajima, T. Nozawa, and K. Aoki: Simulation of future aerosol distribution, radiative forcing, and long-range transport in east Asia. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **79**, 1139-1155, 2001.
- 8) IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change): Special Report on Emissions Scenarios. N. Nakicenovic, and R. Swart, Eds., Cambridge Univ. Press, 612 pp., 2000.
- 9) Takemura, T., I. Uno, T. Nakajima, A. Higurashi, and I. Sano: Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(24), 2158, doi:10.1029/2002GL016251, 2002b.
- 10) Sudo, K., M. Takahashi, J. Kurokawa, and H. Akimoto, CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description, *J. Geophys. Res.*, **107**, 10.1029/2001JD001113, 2002a.
- 11) Sudo, K., M. Takahashi, and H. Akimoto, CHASER: A global chemical model of the troposphere 2. Model results and evaluation, *J. Geophys. Res.*, **107**, 10.1029/2001JD001114, 2002b.
- 12) Houghton, J.T., et al., *Climate Change 1994: The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge Univ. Press,

New York, 1995.

- 13) Prather, M. et al., *Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases, In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge Univ. Press, New York, 2001
- 14) Sudo, K., Changing process of global tropospheric ozone distribution and related chemistry: a study with a coupled chemistry GCM, Ph.D thesis, 187pp., Univ. of Tokyo, Japan, 2003.
- 15) Berntsen, T. K., I. S. A. Isaksen, G. Myhre, J. S. Fuglestad, F. Stordal, T. Als vik, Larsen, R. S. Freckleton, and K. P. Shine, Effects of anthropogenic emissions on tropospheric ozone and its radiative forcing. *J. Geophys. Res.*, **102**, 28,101-28,126, 1997.
- 16) Marenco A., H. Gouget, P. Nedelec, J. P. Pages, and F. Karcher, Evidence of a long-term increase in tropospheric ozone from Pic du Midi data series: Consequences: Positive radiative forcing, *J. Geophys. Res.*, **99**, 16,617-16,632, 1994.
- 17) Mickley, L. J., D. J. Jacob, and D. Rind, Uncertainty in preindustrial abundance of tropospheric ozone: Implications for radiative forcing calculations, *J. Geophys. Res.*, **106**, 3389-3399, 2001.
- 18) Sudo, K. and M. Takahashi, Simulation of tropospheric ozone changes during 1997-1998 El Nino: Meteorological impact on tropospheric photochemistry, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4091-4094, 2001.
- 19) Higurashi, A., and T. Nakajima: Development of a two channel aerosol retrieval algorithm on a global scale using NOAA / AVHRR. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 924-941, 1999.
- 20) Herman, J. R., P. K. Bhartia, O. Torres, c. Hsu, C. Seftor, and E. Celarier: Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16911-16922, 1997.
- 21) Higurashi, A. and T. Nakajima: Detection of aerosol types over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(17), 1836, doi: 10.1029/ 2002GL015357, 2002.
- 22) Mishchenko, M. I., I. V. Geogdzhayev, B. Cairns, W. B. Rossow, and A. A. Lacis: Aerosol retrievals over the ocean by use of channels 1 and 2 AVHRR data: sensitivity analysis and preliminary results. *Appl. Opt.*, **38**, 7325-7341, 1999.
- 23) Vermote, E., and Y. J. Kaufman: Absolute calibration of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views. *Int. J. Remote Sensing*, **16**, 2317-2340, 1995.

7. 国際共同研究等の状況

本研究課題によって開発されたモデルは、地球温暖化実験に適用することにより、次期IPCC第4次アセスメント第一作業部会に貢献する研究となる。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

<学術誌 (査読あり)>

- ① A. Higurashi, T. Nakajima, B. N. Holben, A. Smirnov, R. Frouin, and B. Chatenet: *J. Climate*, **13**, 2011-2027 (2000).
“A study of global aerosol climatology with two channel AVHRR remote sensing”
- ② T. Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, T. Nakajima: *J.*

- Geophys. Res., 105, 17853-17873 (2000).
- “Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins”
- ③ K. Kawamoto, T. Nakajima, and T. Y. Nakajima: J. Climate, 14, 2054-2068 (2001)
“A global determination of cloud microphysics with AVHRR remote sensing”
 - ④ S. Kinne, U. Lohmann, S. Ghan, R. Easter, M. Chin, P. Ginoux, T. Takemura, I. Tegen, D. Koch, M. Herzog, J. Penner, G. Pitari, B. Holben, T. Eck, A. Smirnov, O. Dubovik, I. Slutsker, D. Tanre, O. Torres, M. Mishchenko, I. Geogdzhayev, A. Chu, and Y. Kaufman: J. Geophys. Res., in press.
“Monthly averages of aerosol properties: A global comparison among models, satellite data and AERONET ground data”
 - ⑤ M. Kuji, and T. Nakajima: SPIE, 4150, 225-234 (2001).
“Retrieval of cloud geometrical parameters using remote sensing data”
 - ⑥ H. Masunaga, and T. Nakajima: J. Atmos. Sci., 58, 2455-2467 (2001)
“The effective cloud fraction of broken clouds obtained by multistream radiative transfer. Part I: Longwave radiation”
 - ⑦ T. Nakajima, A. Higurashi, K. Kawamoto, and J. Penner: Geophys. Res. Lett., 28, 1171-1174 (2001).
“A possible correlation between satellite-derived cloud and aerosol microphysical parameters”
 - ⑧ K. Sudo and M. Takahashi: Geophys. Res. Lett., 28, 4091-4094, (2001)
“Simulation of tropospheric ozone changes during 1997-1998 El Nino: Meteorological impact on tropospheric photochemistry”
 - ⑨ K. Suzuki, T. Nakajima, A. Numaguti, T. Takemura, K. Kawamoto, and A. Higurashi: Proceedings of SPIE, 4150, 349-356 (2001).
“Effect of aerosol on cloud field with satellite-derived data and GCM simulation”
 - ⑩ T. Takemura, T. Nakajima, T. Nozawa, and K. Aoki: J. Meteorol. Soc. Japan, 79, 1139-1155 (2001).
“Simulation of future aerosol distribution, radiative forcing, and long-range transport in East Asia”
 - ⑪ M. Chin, P. Ginoux, S. Kinne, O. Torres, B. N. Holben, B. N. Duncan, R. V. Martin, J. A. Logan, A. Higurashi, and T. Nakajima: J. Atmos. Sci., 59, 461-483 (2002).
“Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sun photometer measurements”
 - ⑫ A. Higurashi and T. Nakajima: Geophys. Res. Lett., 29(17), 1836, doi: 10.1029/ 2002GL015357 (2002).
“Detection of aerosol types over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data”
 - ⑬ J. E. Penner, S. Y. Zhang, M. Chin, C. C. Chuang, J. Feichter, Y. Feng, I. V. Geogdzhayev, P. Ginoux, M. Herzog, A. Higurashi, D. Koch, C. Land, U. Lohmann, M. Mishchenko, T. Nakajima, G. Pitari, B. Soden, I. Tegen, L. Stowe: J. Atmos. Sci. 59, 441-460 (2002).
“A comparison of model- and satellite-derived aerosol optical depth and reflectivity”
 - ⑭ K. Sudo, M. Takahashi, J. Kurokawa, and H. Akimoto: J. Geophys. Res., 107, 10.1029/2001JD001113 (2002)

“CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description”

- ⑮ K. Sudo, M. Takahashi, and H. Akimoto: J. Geophys. Res., 107, 10.1029/2001/JD001114 (2002)

“CHASER: A global chemical model of the troposphere 2. Model results and evaluation”

- ⑯ T. Takemura, T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben, and S. Kinne: J. Climate, 15, 333-352 (2002)

“Single scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model”

- ⑰ T. Takemura, I. Uno, T. Nakajima, A. Higurashi, and I. Sano: Geophys. Res. Lett., 29, 2158, doi:10.1029/2002GL016251 (2002).

“Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia”

- ⑱ T. Takemura, T. Nakajima, A. Higurashi, S. Ohta, and N. Sugimoto: J. Geophys. Res., in press, doi: 10.1029/2002JD003210 (2003).

“Aerosol distributions and radiative forcing over the Asian-Pacific region simulated by SPRINTARS”

<学術誌（査読なし）>

- ① 向井苑生・日暮明子：月刊海洋，32，302-308（2000）

「エアロゾルのリモートセンシング」

- ② 岡本創・竹内延夫・竹村俊彦・沼口敦・中島映至・丸山祥宏：月刊海洋，32，309-314（2000）.

「エアロゾルモデルの現状と課題：次世代観測」

- ③ 日暮明子：エアロゾル研究，16，99-104（2001）

「衛星搭載放射計によるエアロゾル光学特性の導出－可視・近赤外波長からみえるもの－」

- ④ A. Higurashi, and T. Nakajima: Proceeding of AMS 11th conference on atmospheric radiation, 59-62 (2002)

“Aerosol type classification with SeaWiFS four-channel radiance data”

- ⑤ M. Sekiguchi, T. Nakajima, K. Kawamoto, and A. Higurashi: Proceeding of AMS 11th conference on atmospheric radiation, J137-J138 (2002)

“Global and regional correlations between aerosol and cloud parameters”

- ⑥ K. Suzuki, T. Nakajima, A. Numaguti, T. Takemura, K. Kawamoto, and A. Higurashi: Proceeding of AMS 11th conference on cloud physics (2002).

“GCM-simulated and satellite-retrieved cloud-aerosol interaction”

- ⑦ 竹村俊彦：月刊エコインダストリー，7(11)，38-43（2002）.

「大気汚染粒子の長距離輸送および環境影響シミュレーション」

<書籍>

- ① T. Matsuno and H. Kida, Eds.: Present and Future of Modeling Global Environment Change: Toward Integrated Modeling, Terra Scientific Publishing Company, 458pp, 77-87 (2001).

“Effects of Man-Made Air Pollution on the Climate. Present and Future of Modeling Global Environmental Change (T. Nakajima, A. Higurashi, K. Kawamoto, and T. Takemura)”

- ② T. Matsuno and H. Kida, Eds.: Present and Future of Modeling Global Environment Change:

Toward Integrated Modeling, Terra Scientific Publishing Company, 458pp, 15-28 (2001).

“Projections of future climate change in the 21st century simulated by the CCSR/NIES CGCM under the IPCC SRES scenarios (T. Nozawa, S. Emori, A. Numaguti, Y. Tsushima, T. Takemura, T. Nakajima, A. Abe-Ouchi and M. Kimoto)”

- ③ Y. Sasano, J. Wang, and T. Hayasaka, Eds.: Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds II, Proceedings of SPIE, Vol. 4150, SPIE - The International Society for Optical Engineering, 249-257 (2001).

“Global three-dimensional simulation and radiative forcing of various aerosol species with GCM (Takemura, T., H. Okamoto, A. Numaguti, K. Suzuki, A. Higurashi, and T. Nakajima)”

- ④ W. L. Smith and Y. Timofeyev. Eds.: IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation, A. Deepak Publishing, 1360pp. 733-736 (2001).

“Global three-dimensional simulation and radiative forcing of various aerosol species (T. Takemura, H. Okamoto, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima)”

<報告書類等>

特に記載すべき事項なし

(2) 口頭発表

- ① 日暮明子・臼井崇行・中島映至：日本気象学会 2000 年春季大会，つくば，2000 年 5 月
「衛星リモートセンシングによるエアロゾル研究」
- ② 野沢徹・江守正多・沼口敦・竹村俊彦・中島映至・阿部彩子・木本昌秀：日本気象学会 2000 年度春季大会，つくば，2000 年 5 月
「大気海洋結合モデルによる将来の気候変化見通し実験における対流圏エアロゾルの気候影響」
- ③ 須藤健悟・高橋正明・秋元肇：日本気象学会 2000 年春季大会，つくば，2000 年 5 月
「CCSR/NIES AGCM を用いた対流圏光化学モデリング：オゾン・関連気体の全球分布と対流圏オゾンの収支について」
- ④ 須藤健悟・高橋正明・秋元肇：日本気象学会 2000 年春季大会，つくば，2000 年 5 月
「ENSO時の森林火災及び気象場の変動による対流圏オゾン量増加について- 全球3次元光化学モデルを用いた数値実験 -」
- ⑤ 鈴木健太郎・中島映至・竹村俊彦・沼口敦・河本和明・日暮明子：日本気象学会 2000 年春季大会，つくば，2000 年 5 月
「エアロゾルの雲の場への影響 - GCM と衛星観測の両面から -」
- ⑥ 竹村俊彦・岡本創・沼口敦・日暮明子・中島映至：日本気象学会 2000 年春季大会，つくば，2000 年 5 月
「全球 3 次元エアロゾルモデル - (2) on-lineモデルの結果検証」
- ⑦ 竹村俊彦・中島映至・岡本創・沼口敦：日本気象学会 2000 年春季大会，つくば，2000 年 5 月
「全球 3 次元エアロゾルモデル - (3) 全球分布と放射強制力」
- ⑧ T. Takemura, H. Okamoto, A. Numaguti, K. Suzuki, A. Higurashi, and T. Nakajima: Western Pacific Geophysics Meeting (WPGM), Tokyo, Japan, June 2000.

- “Global three-dimensional distribution and radiative forcing of various aerosol species with GCM”
- ⑨ A. Higurashi, T. Nakajima, and T. Usui: 2000 International Radiation Symposium, St. Petersburg, Russia, July 2000.
“Optical characterization of aerosols from multi-channel radiances derived from AVHRR and ocean color sensors”
- ⑩ T. Nakajima, A. Higurashi, K. Kawamoto, J. E. Penner, T. Takemura, and K. Suzuki: 2000 International Radiation Symposium, St. Petersburg, Russia, July 2000.
“An estimation of the radiative forcing of indirect effects of anthropogenic aerosols from satellite remote sensing and climate modeling”
- ⑪ T. Takemura, H. Okamoto, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima: 2000 International Radiation Symposium, St. Petersburg, Russia, July 2000.
“Global three-dimensional simulation and radiative forcing of various aerosol species”
- ⑫ K. Sudo, M. Takahashi and H. Akimoto: The XVIV Quadrennial Ozone Symposium, Sapporo, Japan, July 2000.
“Development of a photochemical GCM for the troposphere: Some experiments on the tropospheric ozone changes”
- ⑬ T. Nozawa, S. Emori, A. Numaguti, T. Takemura, T. Nakajima, A. Abe-Ouchi, and M. Kimoto: AGS Workshop on Global Climate Change, Zurich, August 2000.
“Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate projections including climate effects of various aerosols under the IPCC SRES scenarios”
- ⑭ T. Takemura, T. Nakajima, H. Okamoto, A. Numaguti, and A. Higurashi: Conference on Visibility, Aerosols and Atmospheric Optics, Vienna, Austria, September 2000.
“Three-dimensional simulation and radiative forcing of various tropospheric aerosols with atmospheric general circulation model”
- ⑮ T. Takemura, H. Okamoto, A. Numaguti, K. Suzuki, A. Higurashi, and T. Nakajima: SPIE's 2nd International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space, Sendai, Japan, October 2000.
“Global three-dimensional simulation and radiative forcing of various aerosol species with GCM”
- ⑯ T. Takemura, and T. Nakajima: Seventh International Conference on Atmosphere Sciences and Applications to Air Quality (ASAAQ) and Exhibition, Taipei, Taiwan, October-November 2000.
“A global modeling of aerosol radiative characteristics”
- ⑰ K. Sudo, M. Takahashi and H. Akimoto: The SPARC 2000 2nd General Assembly of The SPARC/WCRP Project, Mar Del Plata, Argentina, November 2000.
“Modeling study of stratospheric effect on the distribution and budget of tropospheric ozone, and its annual variation”
- ⑱ 須藤健悟・高橋正明・秋元肇：第 11 回大気化学シンポジウム，豊橋，2001 年 1 月
「熱帯域対流圏オゾン分布と変動について：3D 化学モデルを用いた考察」
- ⑲ 中島 孝・Yi Liu・日暮明子・中島映至・内山明博：日本気象学会 2001 年春季大会，東京，2001 年 5 月

- 「MODISが観測した APEX-E1期間中の雲・エアロゾル」
- ② 関口美保・中島映至・鈴木健太郎・河本和明・日暮明子・竹村俊彦：日本気象学会 2001 年春季大会，東京，2001 年 5 月
「地球放射収支におけるエアロゾルの影響に関する研究」
- ③ 須藤健悟・高橋正明・秋元肇：日本気象学会 2001 年春季大会，東京，2001 年 5 月
「CCSR/NIES AGCM を用いた対流圏光化学モデリング モデルの現状：非メタン炭化水素の導入」
- ④ 竹村俊彦・中島映至・野沢徹・青木一真：日本気象学会2001年春季大会，東京，2001 年
「エアロゾル輸送モデルを用いた東アジアにおける将来のエアロゾル分布予測実験。」
- ⑤ A. Higurashi, A., and T. Nakajima: IAMAS 2001, Austria, July 2001.
“Statistics of aerosol optical properties derived from satellite remote sensings”
- ⑥ Y. Liu, A. Higurashi, T. Nakajima, and T. Y. Nakajima: IAMAS 2001, Austria, July 2001.
“Retrieval of aerosol properties from MODIS data during APEX-E1 period”
- ⑦ K. Sudo, M. Takahashi, H. Akimoto: IAMAS2001, Innsbruck, Austria, July 2001.
“A three dimensional study of the global distribution and budget of tropospheric ozone and its precursors: Climatology and annual variation”
- ⑧ K. Suzuki, T. Nakajima, A. Numaguti, T. Takemura, M. Sekiguchi, A. Higurashi, and K. Kawamoto: IAMAS 2001, Austria, July 2001.
“GCM-simulated and satellite-retrieved aerosol-cloud interaction”
- ⑨ A. Higurashi and T. Nakajima: The 4th APEX International Workshop, Kyoto, Japan, September 2001.
“Aerosol optical properties in the East Asia during the APEX-E1 and -E2 derived from SeaWiFS four-channel data”
- ⑩ T. Y. Nakajima, H. Masunaga, Y. Liu, A. Higurashi, T. Takamura, and T. Nakajima: The 4th APEX International Workshop, Kyoto, Japan, September 2001.
“Interim results from APEX satellite remote sensing group”
- ⑪ M. Sekiguchi, T. Nakajima, K. Suzuki, K. Kawamoto, and A. Higurashi: The fifth International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME, Nagoya, Japan, October 2001.
“A study of atmospheric radiation budget in Asia”
- ⑫ 日暮明子・中島映至：日本気象学会 2001年秋季大会，岐阜，2001年 10月
「SeaWiFS を用いた APEX 観測域におけるエアロゾル型分類」
- ⑬ 中島 孝・Yi Liu・日暮明子・増永浩彦・中島映至・高村民雄・内山明博：日本気象学会 2001 年秋季大会，岐阜，2001年 10月
「ACE-Asia期間中の衛星による雲・エアロゾル観測」
- ⑭ 竹村俊彦・中島映至：日本気象学会2001年秋季大会，岐阜，2001年 10月
「土壌性エアロゾルの複素屈折率」
- ⑮ T. Y. Nakajima, H. Masunaga, Y. Liu, A. Higurashi, T. Takamura, T. Nakajima: The first ACE-Asia Data Workshop, California, USA, October-November 2001.
“Interim Results from APEX Satellite Remote Sensing Group”

- ③② A. Higurashi, and T. Nakajima: The first ACE-Asia Data Workshop, California, USA, October-November 2001.
“Aerosol type classification with SeaWiFS during APEX-E2 / ACE-Asia”
- ③③ T. Takemura, T. Nakajima, H. Okamoto, and I. Uno, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2001.
“Modeling study of aerosol global distribution and radiative forcing”
- ③④ 須藤健悟・高橋正明・秋元肇：全球化学モデル CHASER（非メタン炭化水素/不均一反応のインパクト）：3次元および0次元モデル version による検証．第12回大気化学シンポジウム，豊橋，2001年12月
- ③⑤ K. Sudo, M. Takahashi, and H. Akimoto: The CCSR Workshop for the Next-generation Climate Models, Awaji-Yumebutai, Japan, March 2002.
“Tropospheric chemistry and its changing processes: a global modeling study using CHASER”
- ③⑥ T. Nakajima, A. Higurashi, Y. Liu, T. Nakajima, and H. Masunaga: AGU 2002 spring meeting, Washington, DC, USA, May 2002.
“Aerosol Characterization with Satellite Remote Sensing over Ocean”
- ③⑦ H. Wang, T. Y. Nakajima, A. Higurashi, T. Nakajima, R. T. Pinker, I. Laszlo: AGU 2002 spring meeting, Washington, DC, USA, May 2002.
“Multi-Satellite Approach to Estimate Radiative Fluxes over the Oceans”
- ④① 日暮明子：日本気象学会 2002年春季大会，大宮，2002年5月
「気候変動とエアロゾル研究」
- ④② 竹村俊彦：日本気象学会2002年春季大会，大宮，2002年5月
「APEX-E2/ACE-Asia期間中のエアロゾル輸送・放射モデルを用いたシミュレーション」
- ④③ 須藤健悟・高橋正明・秋元肇：日本気象学会 2002 年春季大会，大宮，2002年 5月
「熱帯対流圏界領域・上部対流圏におけるオゾン収支：全球3次元化学モデルを用いた考察」
- ④④ A. Higurashi, and T. Nakajima: AMS 11th conference on atmospheric radiation, Ogden, Utah, June 2002.
“Aerosol type classification with SeaWiFS four-channel radiance data”
- ④⑤ M. Sekiguchi, T. Nakajima, K. Kawamoto, and A. Higurashi: AMS 11th conference on atmospheric radiation, Ogden, Utah, June 2002.
“Global and regional correlations between aerosol and cloud parameters”
- ④⑥ K. Suzuki, T. Nakajima, A. Numaguti, T. Takemura, K. Kawamoto, and A. Higurashi: AMS 11th conference on atmospheric radiation, Ogden, Utah, June 2002.
“GCM-simulated and satellite-retrieved cloud-aerosol interaction”
- ④⑦ T. Takemura, T. Nakajima: AMS 11th Conference on Atmospheric Radiation, Ogden, USA, June 2002.
“Global distributions of aerosol optical properties simulated with the SPRINTARS”
- ④⑧ A. Higurashi, and T. Nakajima: The 5th APEX International Workshop, Miyazaki, Japan, July 2002.

“Aerosol type classification with SeaWiFS four channel radiance data in the APEX E2 / ACE-Asia”

- ④⑧ T. Takemura and I. Uno: The 5th APEX International Workshop, Miyazaki, Japan, July 2002.
“Simulation during APEX-E1 and APEX-E2/ACE-Asia by regional and global aerosol models”
- ④⑨ T. Takemura: EarthCARE Workshop, Tokyo, Japan, July 2002.
“Simulation of global aerosol transport-radiative processes based on atmospheric general circulation model”
- ⑤⑩ T. Takemura, T. Nakajima, and I. Uno: 7th Scientific Conference of the International Global Atmospheric Chemistry Project (IGAC), Crete, Greece, September 2002.
“Simulation of aerosol distributions during ACE-Asia and APEX-E2 with the SPRINTARS”
- ⑤⑪ T. Takemura, T., I. Uno, and T. Nakajima: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2002.
“Distribution and radiative forcing of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia simulated by SPRINTARS”
- ⑤⑫ M. Sekiguchi, T. Nakajima, K. Kawamoto, A. Higurashi, I. Sano, and S. Mukai: 8th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality, Tsukuba, Japan, March 2003.
“A study of the direct and indirect effects of aerosols using global satellite datasets of aerosol and cloud parameters”
- ⑤⑬ K. Sudo, M. Takahashi, T. Nozawa, H. Kanzawa, and H. Akimoto: 8TH International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality, Tsukuba, Japan, March 2003.
“Simulation of future ozone pollution and acid deposition: a global model study”
- ⑤⑭ M. Takahashi, K. Sudo: SPARC-IGAC Joint Meeting, Giens - France, April 2003.
“Stratosphere/Troposphere exchange process to global tropospheric ozone”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

- ① 日暮明子：日本気象学会山本・正野論文賞，2000年10月
- ② 竹村俊彦：日本気象学会山本・正野論文賞，2002年10月

(5) 一般への公表・報道等

- ① テレビ朝日「すてきな宇宙船地球号」（温暖化見通し実験について2分ほど紹介）2000年7月16日
- ② NHK教育「サイエンスアイ」（温暖化見通し実験について2分ほど紹介）2000年12月16日
- ③ NHKスペシャル「エネルギーシフト」（温暖化見通し実験について1分ほど紹介）2001年2月10日
- ④ CS放送「サイエンスチャンネル」（温暖化見通し実験について3分ほど紹介）2001年3月17日
- ⑤ 日暮明子：共同通信社へ黄砂飛来時の衛星画像提供（北海道、室蘭日報、秋田さきがけ、山

形、岩手日報、北日本、上毛、東奥日報、茨城、千葉日報、東京、南日本、山陽新聞等で
2001年4月14日付朝刊に掲載)

- ⑥ 日暮明子：TBS ニュースの森へ黄砂飛来の衛星画像提供、2001年4月
- ⑦ 日暮明子：フジテレビ・スーパーニュースへ黄砂飛来の衛星画像提供、2001年4月
- ⑧ 日暮明子：黄砂飛来時の衛星画像の高校副読本「生物図説」（秀文堂）への提供、2001年。
- ⑨ 中島映至，GMS 衛星から得られたピナツボエアロゾルの光学的厚さ分布図の高校教科書(数研出版)への提供、2001年。
- ⑩ 中島映至，竹村俊彦：50年後日本の空かすむ？ 汚染物質倍増の試算。2001年8月1日付読売新聞夕刊。
- ⑪ 中島映至，朝日新聞社「私の視点」投稿記事：環境監視 アジアの空見守る「目」を。2001年9月1日付け朝日新聞朝刊。
- ⑫ 神沢 博：大気海洋大循環気候モデルの開発とモデルによる温暖化予測実験。地球環境研究総合推進費公開シンポジウム，東京国際フォーラム，東京，2001年12月5日。
- ⑬ 日暮明子：環境儀 (NIES Research Booklet) (No. 8 April 2003, 衛星が捉えた黄砂画像の提供)
- ⑭ 中島映至：地球温暖化と時間。「時間と時- 今日を豊かにするために」(広中平祐・金子務・井上慎一編，376pp.，日本学会事務センター学会出版センター)，173-186，2002年。
- ⑮ 竹村俊彦，中島映至，鶴野伊津志：黄砂2割が米へ到達 視界悪化 他物質も影響。2002年4月9日付朝日新聞朝刊。
- ⑯ 竹村俊彦，中島映至，鶴野伊津志：大気汚染 黄砂で予測。2002年4月9日付毎日新聞朝刊。
- ⑰ 竹村俊彦，中島映至，鶴野伊津志：黄砂をコンピュータで再現。2002年4月9日NHKニュース7。
- ⑱ 竹村俊彦，中島映至，鶴野伊津志：黄砂北米まで 大気汚染物質も同時に。2002年4月16日付読売新聞朝刊。
- ⑲ 竹村俊彦：黄砂時のシミュレーション結果の図の提供。高校情報科教科書「モデル化とシミュレーション」(実教出版)，2002年。
- ⑳ 竹村俊彦：国境を越える汚染物質。イミダス2003別冊，51，2003年。

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

- ① T. Nakajima: A lead author, Chapter 6 "Radiative Forcing of Climate Change" A. in IPCC TAR (Third Assessment Report) "Climate Change 2001: The Scientific"
- ② T. Nakajima: A contributing author, Chapter 5 "Aerosols, their Direct and Indirect Effects" in IPCC TAR (Third Assessment Report) "Climate Change 2001: The Scientific" in IPCC TAR (Third Assessment Report) "Climate Change 2001: The Scientific"
- ③ A. Higurashi: A contributing author, Chapter 5 "Aerosols, their Direct and Indirect Effects" in IPCC TAR (Third Assessment Report) "Climate Change 2001: The Scientific"
- ④ T. Nozawa: A contributing author, Chapter 9 "Projections of Future Climate Change" in IPCC TAR (Third Assessment Report) "Climate Change 2001: The Scientific"
- ⑤ H. Kanzawa: A reviewer for IPCC TAR WG I in IPCC TAR (Third Assessment Report) "Climate Change 2001: The Scientific Basis"

- ⑥ 中島映至,「政策対談 明日への架け橋」(#79 京都議定書)出演,2001年10月6日,BS
ケーブル放送.