

エアロゾルの気候影響に関するモデル研究

—2013年度日本気象学会賞受賞記念講演—

竹村俊彦*

1. はじめに

この度は、日本気象学会賞を授与され、大変光栄に存じますとともに、これまでの私の研究活動を支えてくださったすべての方々、そして共同研究をさせていただいたすべての方々に、深く感謝致します。これまでに数々の著名な先生方が受けられた賞を私にも授けられることとなり、身の引き締まる思いであります。今後も一層精進して、大変微力ながら、気象学および日本気象学会の発展に貢献できればと考えております。

本稿では、2013年度春季大会での受賞記念講演の内容を土台として、これまでに私が進めてきた研究や、共同研究者の皆様による発展研究について解説させていただきます。その前に、2002年に気象学会山本・正野論文賞を授与されたときの原稿を読み返してみました(竹村 2003)。当時は、私が中心となり開発してきた全球エアロゾル気候モデル SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) の骨格が出来上がってきた頃でした。対流圏主要エアロゾル粒子の地球全体の輸送過程と、大気大循環モデルの放射過程との結合により、エアロゾル直接効果放射強制力の計算ができるまで進んでいました。放射強制力とは、当該気候強制因子の変化に伴う太陽放射・地球放射の収支変化のことです(中島・竹村 2009)。その後、11年が経過しましたが、振り返ると、SPRINTARS の構築という研究のメインストリーム、SPRINTARS を用いた応用的な研究、そして様々な共同研究と、着実に歩みを進めることができた

と感じております。なお、本稿はこれまでの研究を網羅的に紹介するため、もし興味をお持ちになられた事項がありましたら、当該参考文献をお読み頂ければと思います。

2. エアロゾルの気候に対する影響

私の研究を紹介する前に、まずエアロゾルの気候に対する影響について、定性的な解説をさせていただきます。エアロゾルとは、固体や液体の微粒子が大気中に浮遊している系のことを指します。ちなみに、気象庁ではエアロゾルと表記しますが、それ以外の気象研究コミュニティや気象分野以外では、エアロゾルと表記することが多いようです(岩坂 2012)。その系を構成しているエアロゾル粒子は、おおよそ 1 nm から 100 μm と幅広い粒径を持っています。ただし、体積粒径分布(体積を基準にした粒径の頻度分布)は時間や場所には依存しますが、おおよそ半径 0.1 μm と 2 μm 前後にピークを持つ対数正規分布が 2 つ合わさったような形が典型的です。対流圏に存在する主要エアロゾル粒子としては、硫酸塩・有機物・黒色炭素・硝酸塩・鉱物(土壌)・海塩などが挙げられます。

エアロゾル粒子は、一般的には、健康影響や視程悪化を引き起こす大気汚染物質として認識されていると思います。しかし、この文章の読者であればご存知のとおり、エアロゾルは、その輸送過程が気象と密接に関係があるほか、気候変動を引き起こす効果を持っています。エアロゾルは、気候変動を定量的に評価したり予測したりする際に、鍵となる要素の 1 つであることが知られています。私が Lead Author (主執筆者) の 1 人として活動した、気候変動に関する政府間パネル(IPCC) 第 1 作業部会(WGI) 第 5 次評価報告書(AR5) (IPCC 2013) では、その効果を「エアロゾル・放射相互作用」と「エアロゾル・雲相互作用」の 2

* 九州大学応用力学研究所。
toshi@riam.kyushu-u.ac.jp

—2014年4月28日受領—
—2014年6月16日受理—

つに大別しています。

「エアロゾル・放射相互作用」は、エアロゾルが放射を散乱したり吸収したりすることにより、放射収支が変わることを指します。地球大気では、太陽放射と地球放射の散乱・吸収が対象となります。硫酸塩・多くの有機物・硝酸塩・海塩などの透明あるいは白っぽいエアロゾル粒子は、太陽放射を散乱する効果が大きいので、それらの濃度が上昇すると、正味として地球大気に入射する太陽放射が減少することになります。一方、黒色炭素などの濃色のエアロゾル粒子は、太陽放射を散乱しますが、吸収する効果の方が大きいため、それらの濃度が上昇すると、正味として地球大気に入射する太陽放射が増加することになります。それらの結果、地球大気の放射収支が変わり、気候変動を引き起こすと考えられます。これを「エアロゾル直接効果」ともいいます。

「エアロゾル・放射相互作用」には、付随的な効果もあります。黒色炭素などの濃色のエアロゾル粒子が増加すると、太陽放射を吸収することにより、その周辺大気が暖まります。すると、大気の不安定度が変わったり、飽和水蒸気圧が増加したりして、雲量に変化し、放射収支が変わる可能性があります。これを「エアロゾル準直接効果」ともいいます。

もう1つの「エアロゾル・雲相互作用」は、その名称のとおり、エアロゾル粒子が雲の凝結核や氷晶核になることを通した効果です。「エアロゾル間接効果」ともいいます。まず、水雲の場合を考えてみると、一般的に水雲は、地球放射を吸収する効果よりも、太陽放射を散乱する効果の方が大きいと考えられています。雲粒は、水蒸気が凝結核で凝結することにより生成されます。仮に、水雲の質量（雲水量）は変化せずに、凝結核となるエアロゾル粒子が増加するとします。その結果、雲粒のサイズが小さくなり、太陽放射の散乱が強まります（これを「第1種エアロゾル間接効果」ともいいます）。また、雲粒のサイズが小さくなると、それが成長して雨滴になるまでの時間が掛かってしまい、雲量が増加し、やはり太陽放射の散乱が強まる可能性があると考えられています（これを「第2種エアロゾル間接効果」ともいいます）。これらのエアロゾルと水雲の相互作用の過程により、地球大気の放射収支が変わります。凝結核になるエアロゾル粒子は、基本的に親水性の組成を持つものです。疎水性のエアロゾル粒子が、何らかの原因で親水性の物質によりコーティングされた場合も、凝結核となり得る

ようです。

水雲は、過冷却状態の雲粒に氷晶核が付着したり入り込んだりすることにより、氷晶が生成されて存在しています。また、氷晶核上で水蒸気が昇華することによっても生成されます。温度が低い上部対流圏では過冷却雲粒が自発的に凍結できますが（均質凍結）、より温度が高い下部対流圏では氷晶核の存在により氷晶が生成されます（不均質凍結）。したがって、氷晶核の存在量により水雲と氷雲の混合雲内での両者の存在比率が変わると、氷雲の方が水雲よりも成長が速いので、雲量が変わると考えられています。これらの過程により、地球大気の放射収支が変わる可能性があります。一般的に氷雲は、太陽放射を散乱するよりも、地球放射を吸収する効果の方が大きいと指摘されています。氷晶核になるエアロゾル粒子は、基本的には疎水性の組成を持つものであると考えられています。

エアロゾルが気候に及ぼす影響として、「エアロゾル・放射相互作用」にも「エアロゾル・雲相互作用」にも分類されていない効果もあります。例えば、黒色炭素が雪氷上に沈着すると、雪氷が汚れてアルベドが下がり、また、その結果として雪氷が太陽放射を吸収しやすくなり、雪氷が融解して地表面が表出して、やはりアルベドが下がります。その結果、正味として入射する太陽放射量が増加します。

以上のような様々な過程を通したエアロゾルの気候に対する影響を定量的に評価するために、数値モデルの構築を進めてきました。

3. 全球エアロゾル気候モデルの開発

3.1 開発の背景

私が大学院に入学した1990年代後半は、地球観測衛星搭載の受動型センサであるアメリカ海洋大気局（NOAA）の AVHRR（Advanced Very High Resolution Radiometer）などから得られるデータを用いて、エアロゾル粒子の全球分布が把握できるようになってきた時代でした（Higurashi *et al.* 2000）。また、アメリカ航空宇宙局（NASA）のゴダード宇宙飛行センター（GSFC）の研究グループにより、受動型センサを用いたエアロゾルの地上観測網である AERONET（Aerosol Robotic Network）の展開が本格化し始めた頃でもありました（Holben *et al.* 2001）。これらのデータにより、広域的なエアロゾル分布を把握できるようになりましたが、これらリモートセンシングのデータからエアロゾルの組成を分類す

ることは困難でした。また、当時は、特定の組成のみを扱った全球エアロゾル輸送モデルはいくつか存在していました (e.g., Langner and Rodhe 1991; Liousse *et al.* 1996)。これらのモデルは、限られた地上観測のサンプリングデータなどを用いて、計算結果の検証を行っていました。

そこで、リモートセンシングにより得られる広域的なエアロゾル分布を検証材料として利用できるように、対流圏に存在する主要エアロゾル粒子の輸送過程を同時に計算できるモデルの開発を開始しました。また、輸送過程だけではなく、地球規模の気候変動に対するエアロゾルの効果を定量的に評価できるモデルにすることを目標としました。私が大学院修士課程の学生として、東京大学気候システム研究センター（現在：大気海洋研究所）に入学した時、同じ研究室で日本学術振興会特別研究員の博士研究員として在籍していた岡本 創さん（現在：九州大学応用力学研究所）と、大学院生であった丸山祥宏さんが、鉱物粒子の輸送モデリングを開始していました（岡本 2014）。私は、指導教員である中島映至教授（現在：大気海洋研究所）と相談の結果、有機物および黒色炭素エアロゾルの輸送モデリングから始めることになりました。その後、岡本さんは異動、丸山さんは卒業し、実働部隊は私1人となりましたが、さらに、硫酸塩および海塩エアロゾルの輸送・化学過程も開発して、対流圏主要エアロゾルを同時に計算するための基本的なプログラミングを、修士課程で完成させることができました。その後、博士課程で、エアロゾル・放射相互作用と初期型のエアロゾル・雲相互作用のモデリング、九州大学応用力学研究所へ助手として赴任後は、エアロゾル・雲相互作用の高度化に取り組みました。

3.2 輸送過程

全球エアロゾル気候モデルの開発の経緯を述べたところで、そのモデルの概要を説明します。モデルの名称 SPRINTARS は、著者が中学から大学まで陸上競技の短距離の選手 (sprinter) だったことにちなみ、趣味の1つであるジョギングの最中に思いつき、2002年頃に名付けました。最後の“S”は、多くの方々の貢献によりモデルが開発されていることを示したいと思い、複数形の意味を持たせるために付けました。sprintersとは綴りが1文字異なることで、インターネットでの検索などで紛れ込むこともありません。SPRINTARS は、東京大学大気海洋研究所気候システム研究系/国立環境研究所/海洋研究開発機構を中

心として開発されている全球大気海洋モデル MIROC (Watanabe *et al.* 2010) と結合する形で開発を進めてきました。陽に取り扱うトレーサーは、対流圏主要エアロゾルである硫酸塩・有機物・黒色炭素・鉱物・海塩と、硫酸塩の前駆気体である二酸化硫黄・硫化ジメチルです。これらエアロゾル粒子や前駆気体の一連の輸送過程（発生・移流・拡散・硫黄化学反応・沈着）を計算します。

鉱物・海塩・硫化ジメチルといった自然起源のエアロゾル粒子および前駆気体の発生量・発生場所は、数値モデル内部のパラメータを用いたパラメタリゼーションにより、タイムステップごとに計算します。例えば、海塩発生量は海面10 m 風速に依存し、鉱物は乾燥・半乾燥・耕作地帯での地上10 m 風速・土壌水分量・積雪量・葉面積指数の関数にしています。一方、人為起源のエアロゾル粒子および前駆気体の発生量・発生場所は、既存の排出量インベントリのデータベースを用います。主に化石燃料消費に関する排出量インベントリの代表例として、GEIA (Global Emissions Initiative), EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research), アジア域では REAS (Regional Emission Inventory in Asia) などがあります。また、時空間変動の大きい森林火災・焼き畑起源の物質については、地球観測衛星搭載センサにより検出されたホットスポットから推定された GFED (Global Fire Emissions Database) などのデータベースが存在します。その他、木材燃料消費起源や、有機エアロゾルが関わる特有の発生源（植物からの前駆気体発生など）も考慮されています。火山起源についても、既存のインベントリを用います。後に少し触れる様々なモデル相互比較プロジェクトでは、これらのインベントリをベースとして、独自の編集を行い、プロジェクト内の統一インベントリとすることがあります。

移流スキームは、MIROC の水蒸気やエアロゾル粒子などの大気微量成分の移流を表現するために、故・沼口 敦さんに作成頂いたフラックス形式のセミ・ラグランジュ (semi-Lagrangian) 法のスキームを用いています。沼口さんは、MIROC 自体の基礎を築いてくださった方であり、私が大学院在籍時に、同じ東京大学気候システム研究センターの教員でした。硫黄の化学反応は陽に計算しており、酸化剤である OH ラジカル・ H_2O_2 ・ O_3 の3次元分布は、MIROC と結合している対流圏化学気候モデル CHASER (Sudo *et*

al. 2002) からの出力を使用しています。沈着過程では、上層から落下してくる雨滴との衝突 (wash out) や、雲粒の成長による降水に伴う雲粒内のエアロゾル粒子の大気中からの除去 (rain out) といった湿性沈着、乱流や重力沈降により地表面に落下する乾性沈着について、モデル内で計算します。

空間分解能は MIROC 側の設定ですが、経度方向は等間隔で離散化されており、緯度方向は不等間隔のガウス格子です。物質輸送モデルの計算には時間が掛かり、かつメモリも多く必要であるため、研究開始当初の1990年代後半には、水平分解能は T21 (東西および全切断波数21, 緯度経度約5.6度) でした。その後の計算機能力の向上に伴い、現在では、ある程度の時間積分が必要である気候変動研究では、T42 (同約2.8度)・T85 (同約1.4度)・T106 (同約1.1度) が標準的な分解能となっています。後述のエアロゾル週間予測システムでは、T213 (同約0.56度) を実用化しているため、研究開始当初より空間分解能は1桁向上していることになります。鉛直分解能やタイムステップは、水平分解能や研究目的に適した設定にします。

モデル内でのエアロゾル粒子および前駆気体に関する予報変数は、水蒸気と同様に、気温や気圧が変化しても、周囲の空気と混合しなければ保存する量である質量混合比です。観測データによる比較・検証に用いる物理量 (質量濃度・光学的厚さなど) は、質量混合比からタイムステップごとに診断的に計算します。前述した広域分布が把握できるリモートセンシングを用いた観測データからは、エアロゾルの光学特性が得られるため、それを比較・検証材料として利用するためには、モデル側でもエアロゾル光学特性を診断する必要があります。その際には、エアロゾル組成ごとの粒径分布・吸湿成長・特定波長の複素屈折率を仮定して計算します。一般的には、エアロゾルの光学的厚さのほか、1次散乱アルベドや、エアロゾル粒径の指標であるオングストローム指数を検証材料として利用します。

SPRINTARS の輸送過程の開発については、Takemura *et al.* (2000) に記述があり、その後の改良については、Takemura *et al.* (2002a, 2005, 2009), Goto *et al.* (2011) に順次記載しています。

3.3 エアロゾル・放射相互作用

前述のように、私の研究の第一目的は、当初からエアロゾルによる気候変動の定量的評価でした。前節で述べたエアロゾルの輸送過程の開発を踏まえて、エア

ロゾル・放射相互作用を計算できるモデルの開発を次に進めました。これは、SPRINTARS を MIROC の大気放射過程と結合することにより実現させました。MIROC の大気放射過程は、中島先生が中心となり開発された discrete ordinate/adding (離散座標/加算法) の two-stream (2 流近似) コード (Nakajima *et al.* 2000) がベースです。これに、SPRINTARS で扱っているエアロゾルの組成ごとの単位体積あたりの消散係数・散乱係数・非等方因子を波長ごとにあらかじめ計算し、その数値を入力します。その際、前述のエアロゾル光学的厚さの計算のときと同様に、過去の研究を参照して、エアロゾル組成ごとの粒径分布・吸湿成長・波長依存の複素屈折率を仮定します。また、現在のところ、エアロゾル粒子は球形であると仮定し、有機物・黒色炭素以外は、異なる組成の粒子内での混合 (内部混合) はないと設定しています。有機物・黒色炭素が同じ発生源を持つ場合、化石燃料起源の黒色炭素50%質量分を除いて、それらが内部混合していると仮定しています。光学特性を計算する際に、内部混合や水との混合については、均質混合を仮定しています。

以上の構築を行い、かつ、輸送過程で計算された各エアロゾルの時空間分布を大気放射スキームへ引き渡すことにより、太陽放射および地球放射全体にわたるエアロゾルの効果をオンラインで計算できるようになりました。SPRINTARS の大気放射過程との結合については、Takemura *et al.* (2002a) に開発直後の記述があり、その後、改良が加えられています。

3.4 エアロゾル・雲相互作用

エアロゾル・雲相互作用は、SPRINTARS を MIROC の雲・降水過程および大気放射過程と結合して表現します。最初は、水雲に対するエアロゾル・雲相互作用のパラメタリゼーションを導入しました。開発当初は、親水性のエアロゾル数濃度に対して一意に雲粒数濃度が決まるという、観測研究から経験的に導かれた簡略版パラメタリゼーションを導入しました (Takemura *et al.* 2003)。その後、Köhler 理論に基づいたパラメタリゼーションを導入して、雲粒数濃度を計算するようにしました (Takemura *et al.* 2005)。これは、いわゆる曲率効果と溶質効果が含まれるパラメタリゼーションであり、エアロゾル組成ごとの特性が考慮されています。そして、雲粒数濃度と予報変数である雲水量から、雲粒有効半径を診断します。これにより、第1種間接効果と呼ばれている、エ

エアロゾル粒子の増減に伴う雲粒の散乱・吸収特性の変化を大気放射過程で表現しています。また、雲・降水過程において、雲粒数濃度に依存した autoconversion (雲粒から雨滴への成長) スキームを用いることにより、第2種間接効果と呼ばれている、エアロゾル粒子の増減に伴う雲水量と降水量の変化を表現しています。autoconversion スキームはいくつか提唱されていますが、現在の MIROC-SPRINTARS では、Berry (1967) のパラメタリゼーションを使用しています。エアロゾル・雲相互作用導入後、雲粒数濃度を予報変数としました。そのために、accretion (雨滴による雲粒の捕捉) による雲粒数濃度の変化も考慮するようにしました。

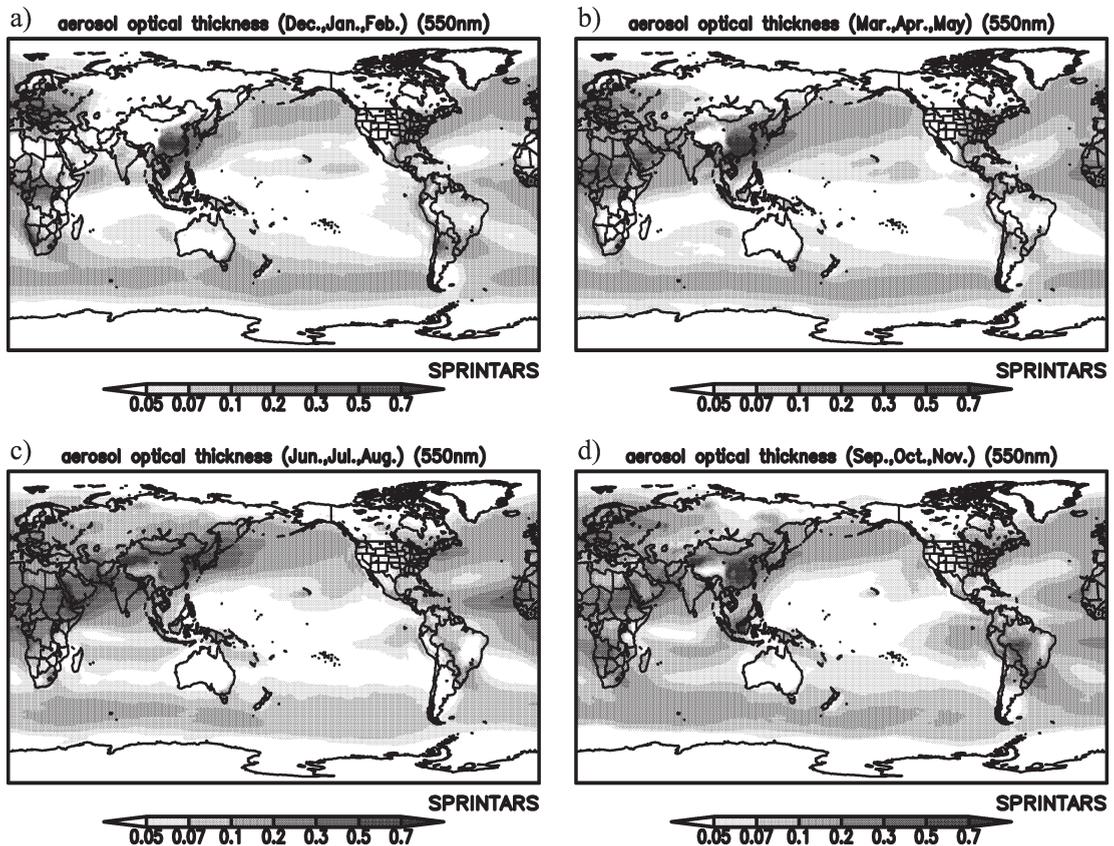
その後しばらくして、氷晶核数濃度と温度のみの簡略化されたパラメタリゼーションではあるものの、氷雲に対するエアロゾル・雲相互作用を導入しました (Takemura *et al.* 2009)。これにより計算された氷

晶数濃度を用いて、氷雲の第1種・第2種間接効果を計算できるようにしました。同時に、accretion (雪による氷晶の捕捉) や aggregation (氷晶同士の衝突) による氷晶数濃度の変化を考慮し、氷晶数濃度を予報変数としました。riming (雪による雲粒の捕捉) 過程も導入しました。

4. 気候モデルによるエアロゾルの気候変動評価

4.1 エアロゾルの全球分布

エアロゾルの気候に対する影響をモデルにより定量的に評価するためには、エアロゾル分布が適切に表現されていることが前提となります。前述のとおり、従来の1つの組成のみ扱うモデルの検証は、当該組成の地上でのサンプルから得られたデータとの比較が中心となりますが、長期的な (少なくとも1年以上継続される) サンプルは限られています。一方、SPRINTARS は、対流圏主要エアロゾルを同時に



第1図 SPRINTARS により標準的な設定で計算されたエアロゾル光学的厚さの季節平均分布。a) 12-2月, b) 3-5月, c) 6-8月, d) 9-11月。

扱っているため、地球観測衛星や地上からのリモートセンシングによる比較的均質な観測データを用いて、地上サンプルを得ることが困難な地域を含めた地球規模での検証ができます。

第1図には、標準的な現在気候の設定によるエアロゾル分布のシミュレーション結果を示しています。東アジア・南アジア・ヨーロッパ・北アメリカでは、年間を通して化石燃料起源のエアロゾル粒子が多く存在しています。また、森林火災や焼き畑により、毎年乾季にエアロゾル粒子が多くなる地域があり、アフリカ中部とインドシナ半島の北半球冬季、アフリカ南部と南アメリカの南半球冬～春季、シベリアの北半球春季、熱帯アジアの北半球秋季がそれに該当します。サハラ砂漠・中東・アジア内陸部では、砂漠起源の鉱物粒子が多く、南アメリカ（アタカマ砂漠）、アフリカ南部（カラハリ砂漠）、オーストラリアからも時々鉱物粒子が舞い上がります。南北両半球の緯度50度付近の海上の低圧帯では、強風により海塩の存在量が他の緯度帯よりも多くなっています。

シミュレーション結果は、地球観測衛星および地上観測網 AERONET によるエアロゾル光学特性（光学的厚さ・オンゲストローム指数・1次散乱アルベド）や、組成ごとの地表濃度観測との比較により、定量的に妥当であることが確認されました (Takemura *et al.* 2000, 2001, 2002a)。自然起源の1次粒子である鉱物や海塩は大粒子であり、自然起源の2次粒子や人為起源は小粒子であること、また、黒色炭素や鉱物は他のエアロゾル粒子と比較すると放射吸収性が強いことから、光学的厚さだけではなく、オンゲストローム指数と1次散乱アルベドも同時に比較すると、各エアロゾル組成の存在比率も間接的に検証していることとなります。

Takemura *et al.* (2000) では、SPRINTARS 輸送過程の開発と検証のほかに、重要なことを指摘しています。低緯度の大西洋上のエアロゾル光学的厚さは、北半球夏季では北緯20度付近が極大である一方、北半球冬季は北緯10度付近に極大があることが、地球観測衛星のデータから知られていました。これをサハラ砂漠起源の鉱物粒子のみで説明しようとする、サヘル地帯での大規模な人為的砂漠化を考えなければなりません (Tegen and Fung 1995)。その結果、IPCC 第3次評価報告書では、人為起源鉱物粒子の放射強制力を過大評価してしまう結果となりました (IPCC 2001)。しかし、SPRINTARS のシミュレーション

により、北半球冬季の北緯10度付近の極大は、この季節の森林火災起源エアロゾルを考慮すれば再現できることを見出しました。

ただし、地球観測衛星から得られたエアロゾル光学的厚さをモデルの検証材料として利用する場合に、注意しなければならない点があります。Kaufman *et al.* (2005) は、エアロゾル光学的厚さについて、NASA の地球観測衛星 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) から得られたデータと、SPRINTARS を含めた複数のモデルによる計算結果とを比較し、MODIS からの値の方が系統的に大きいことを示しました。一方、MODIS から得られた小粒子のみのエアロゾル光学的厚さと、モデルによる人為起源エアロゾルのみの光学的厚さは良い一致をみていることから、衛星観測データを解析する際に、鉱物や海塩といった自然起源の大粒子と雲粒とを混同する場合があることを指摘しています。

SPRINTARS と同様に、全球のエアロゾル分布をシミュレートするモデルは、現在では欧米を中心に多く存在しています。エアロゾル分布は時空間変動が大きいいため、モデルによる計算結果のばらつきが大きくなりがちです。そこで、全球エアロゾルモデルの結果を相互に比較し、かつ、様々な観測データと統括的に比較するプロジェクト AeroCom (Aerosol Model Intercomparison) が2003年に活動を開始しました。AeroCom では、モデル間の結果のばらつきの程度の把握や、ばらつきの原因の調査のために、これまでに様々な実験を提案し、その統一設定に基づいて、各参画モデルが計算を行ってきました。SPRINTARS は、アジアから唯一、AeroCom の活動当初から参画しています。AeroCom による全球エアロゾル分布の相互比較については、Kinne *et al.* (2006)、Koch *et al.* (2009)、Textor *et al.* (2006) などに詳細があります。

4.2 エアロゾルの放射強制力

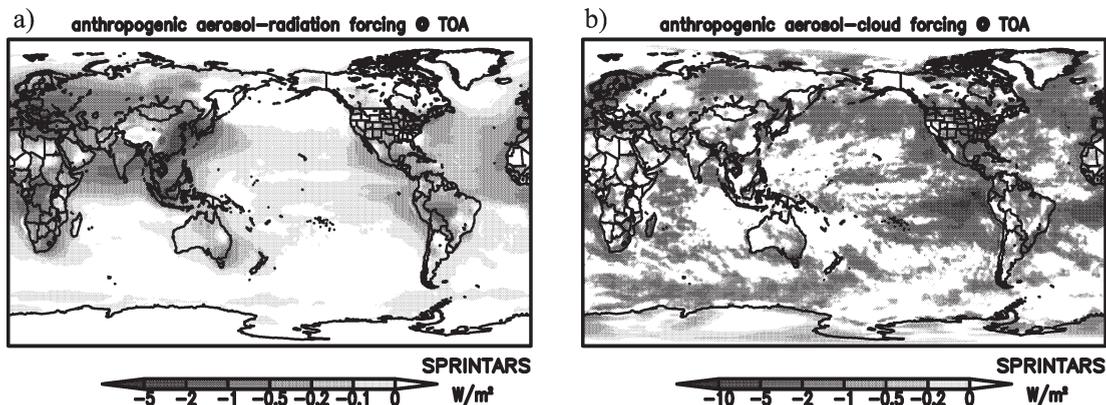
SPRINTARS によるエアロゾル・放射相互作用の放射強制力の計算のうち、直接効果については、Takemura *et al.* (2002a) で最初に評価し、その後、Takemura *et al.* (2005) で再評価しました。大気上端あるいは対流圏界面において、硫酸塩・有機物・硝酸塩・海塩などは負の直接効果放射強制力、黒色炭素は正の直接効果放射強制力を持ちます。鉱物粒子については、主に酸化鉄の含有率に放射吸収特性が左右され、直接効果放射強制力は正にも負にもなり得ます。

一方、どのような光学特性を持つエアロゾル粒子であっても、太陽放射は減衰して地表面へ到達するので、地表面の直接効果放射強制力は負の値となります。以下では、対流圏界面での放射強制力について述べます。第2図aには、推定された産業革命時のエアロゾルおよび前駆気体の発生量を基準とした場合の、現在のエアロゾル・放射相互作用の放射強制力の計算結果を示します。これを見ると、化石燃料消費による大規模な発生源を持つアジア・ヨーロッパ・アメリカや、森林火災や焼き畑による大規模な発生源を持つアフリカ・南アメリカ・東南アジアで絶対値が大きくなります。雲が存在しない晴天大気を仮定した場合、ほとんどの地域で人為起源エアロゾルの直接効果放射強制力は負の値となります。一方、通常の雲分布の場合は、北太平洋で正の直接効果放射強制力となることがあります。これは、低層雲内もしくは低層雲よりも上層に、太陽放射を強く吸収する黒色炭素のようなエアロゾル粒子が存在すると、放射吸収が強化され、硫酸塩などの負の強制力を上回ることがあるためです (Takemura *et al.* 2002a)。SPRINTARSでは、人為起源エアロゾルによる直接効果放射強制力の全球・年平均値は、 -0.1 Wm^{-2} と評価されました (Takemura *et al.* 2005)。このうち、黒色炭素は $+0.4 \text{ Wm}^{-2}$ と評価されました。

また、エアロゾル・放射相互作用のうち、準直接効果については、エアロゾルの輸送過程と放射過程とを結合した時点で計算に含まれていますが、独立して評価したのが Takemura and Uchida (2011) です。人

為起源黒色炭素が境界層内に集中しやすいアジア域では、エアロゾル準直接効果により大気が不安定化して、雲水量が増加する傾向となることを示しました。一方、アフリカや中南米で森林火災・焼き畑起源の黒色炭素が多い地域・季節では、火災による対流により、自由対流圏まで黒色炭素が輸送されるため、大気が安定化して雲水量が減少する傾向となることも示しました。黒色炭素による準直接効果の放射強制力は、全球・年平均値では $+0.06 \text{ Wm}^{-2}$ と評価されましたが、黒色炭素の時空間分布は偏りが大きいため、地域気候に影響を与え得る効果となる場合もあることを示唆しました。

SPRINTARSによるエアロゾル・雲相互作用の評価は、水雲に対して Takemura *et al.* (2005) で行いました。Köhler 理論に基づいたパラメタリゼーションを導入することにより、雲粒有効半径について、地球観測衛星 MODIS のデータから得られた全球分布と定量的整合性を取ることができるようになりました。また、雲放射強制力は Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) の観測データと、降水量は Global Precipitation Climatology Project (GPCP) の観測データと比較を行い、シミュレーションの妥当性を確認しました。それらを踏まえて、人為起源のエアロゾル・雲相互作用による放射強制力は、全球・年平均で -0.9 Wm^{-2} と計算されました。うち、第1種間接効果は -0.5 Wm^{-2} と評価しました。人為起源のエアロゾル・雲相互作用についても、エアロゾル・放射相互作用と同様に、人為起源エアロゾルが多い地域



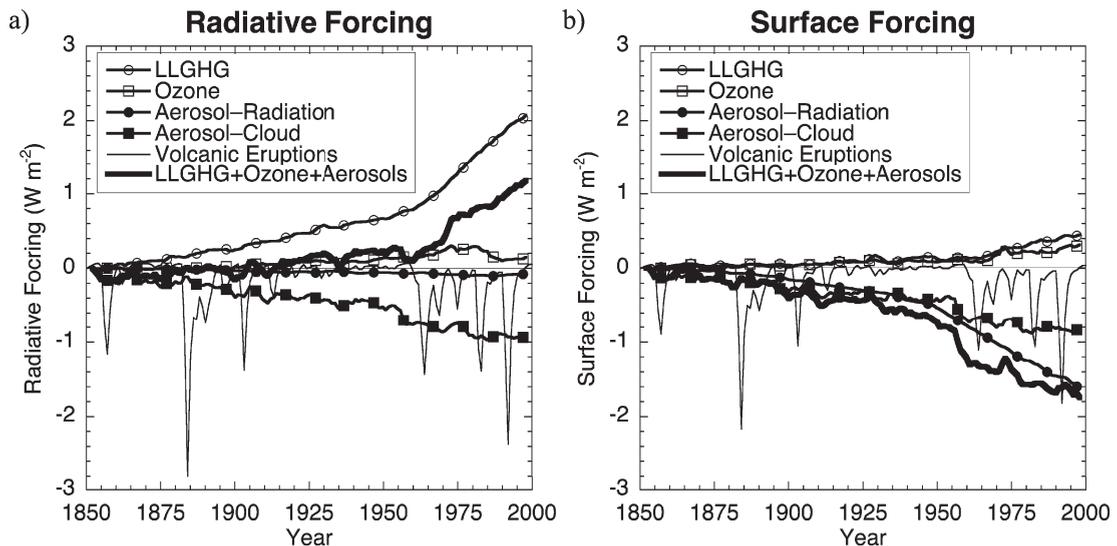
第2図 産業革命時を推定したエアロゾルおよび前駆気体の発生量を基準とした場合の MIROC-SPRINTARS により計算された現在のエアロゾル有効放射強制力の年平均分布。a) エアロゾル・放射相互作用、b) エアロゾル・雲相互作用。

で絶対値が大きくなりますが、雲量が多く、相対的にエアロゾル粒子が少ない海上の方が、より感度が高くなります。したがって、人為起源エアロゾルが輸送される風下側の海上でも、放射強制力が大きくなる傾向にあります(第2図b)。なお、人為起源エアロゾル・雲相互作用を評価する際には、エアロゾルの排出量インベントリを現在および産業革命時にする2つの実験の差を解析することになります。これらの実験では、海面温度や海水については同一のデータを与えているため海のゆっくりとした応答は含まれませんが、エアロゾルの差に伴う早い応答の気候変化は含まれることとなります。この方法により算出された放射強制力を、IPCC AR5では新たに「有効放射強制力 (effective radiative forcing)」と定義しました。

また、過去・現在・将来のエアロゾル分布について、IPCC AR5で使用された排出量シナリオ Representative Concentration Pathways (RCPs) を用いて、SPRINTARSにより計算を行いました(Takemura 2012)。その結果、硫酸塩については、どのシナリオでも先進国地域ではすでに減少傾向にあり、途上国地域でも最も排出量の少ないシナリオの場合は、減少傾向に入りつつあることを示しました。一方、有機物や黒色炭素は、先進国でもはっきりとした減少傾向とはなっていないことも示しました。ただし、いずれのシナリオでも、21世紀末には人為起源エ

アロゾルが現在よりも大きく減少することが予測され、エアロゾル・放射相互作用とエアロゾル・雲相互作用両者の負の放射強制力がゼロに近づくと評価しました。したがって、大気汚染対策が進み、エアロゾル粒子が減少してくると、長寿命の温室効果気体による地球放射エネルギー過多の状態がより顕著になることを示唆しています。また、自然起源エアロゾル分布の将来予測も行い、温暖化に伴い、鉱物粒子は乾燥域でのさらなる乾燥化により、海塩粒子は北極海の海水融解による海面表出により、いずれも発生量が増加することが示されました。

以上の研究成果を記した私が筆頭著者の論文 (Takemura *et al.* 2000, 2002a, 2005, 2009; Takemura and Uchida 2011; Takemura 2012) は、IPCC AR5 (IPCC 2013) および第4次評価報告書 (AR4) (IPCC 2007) に引用され、IPCCによる気候変動評価に貢献しました。また、Takemura *et al.* (2006) に掲載した1850–2000年の気候強制因子ごとの放射強制力の時系列を示した図(第3図)は、改訂版がそのままIPCC AR4 (IPCC 2007; Figure 2.23) にも掲載されました。この図は、主要気候強制因子の放射収支に対する役割の変遷を示したほか、人間活動による地表面の放射収支は負であり、エアロゾルが最も寄与していることを明示しました。SPRINTARSが参画しているAeroComやACCMIP (Atmospheric Chemis-



第3図 MIROC-SPRINTARSにより計算された主要気候強制因子による1850–2000年の全球平均放射強制力。
a) 対流圏界面, b) 地表面。

try and Climate Model Intercomparison Project) においては、エアロゾル放射強制力のモデル間相互比較が行われました (Penner *et al.* 2006 ; Schulz *et al.* 2006 ; Myhre *et al.* 2013 ; Shindell *et al.* 2013 ; Stier *et al.* 2013). その結果は、IPCC AR4およびAR5で重要な役割を果たしました。

4.3 エアロゾルによる気候変化

SPRINTARS は、MIROC が IPCC 第 3 次評価報告書 (TAR) (IPCC 2001) へ貢献した時から、MIROC のエアロゾル過程のモデルとして利用されてきました。TAR の時は、エアロゾル質量混合比と数濃度をオフラインで計算した後、MIROC の放射過程と雲・降水過程にそれらを入力し、エアロゾル光学特性のテーブルと、雲・エアロゾル相互作用の簡略版パラメタリゼーションおよび雲粒有効半径変化を導入して、エアロゾルによる気象場の変化を計算しました。AR4 の時には、これをオンライン化し、AR5 の時には、さらに雲・エアロゾル相互作用を Köhler 理論ベースのパラメタリゼーションで表現するようにしました。ただし、IPCC でのモデルによる気候変動評価のベースとなる CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) のこれまでのプロトコルでは、エアロゾルの気候影響について可能な解析は限られています。そこで、CMIP 以外の実験を別途行い、エアロゾルによる気候変化をいくつか解析してきました。

例えば、Takemura *et al.* (2005) では、MIROC-SPRINTARS を用いて、人為起源エアロゾルの放射強制力を算出したほかに、海洋混合層モデルを結合して、エアロゾル・放射相互作用および水雲に対するエアロゾル・雲相互作用による気象要素の変化を解析しました。この研究では、現在気候において、エアロゾルの効果は、温室効果気体による地上気温上昇を全球平均で約40%を抑えていること、その気温上昇の抑制は、エアロゾル粒子が多い地域で効果が大きいことを示しました。また、エアロゾルの効果は、熱帯収束帯の位置を南に移動させることも示しました。

Takemura *et al.* (2007) では、同様に海洋混合層モデル版の MIROC-SPRINTARS を用いて、いわゆるエアロゾル間接効果 (雲粒径と雲寿命の変化) による雲・降水の変化と、エアロゾルの全般的な効果に伴う水循環変動による雲・降水の変化との相対的な重要度について、大西洋領域に着目して解析しました。その結果、北アメリカ東海岸からの人為起源エアロゾルの流出域である北半球中緯度と、森林火災起源エアロ

ゾルの流出域であるアフリカ南部西岸では、エアロゾル間接効果が勝って雲水量の増加がみられました。一方、その他の地域では、水循環の変動による効果の方が大きく、雲水量が減少する場合もあることが示されました。

Kawase *et al.* (2011) では、海洋大循環モデルを含む MIROC-SPRINTARS を用いて、アフリカ南部での20世紀中の降水変化について解析を行いました。モデルでは、赤道から南緯15度にかけて、観測でみられる南半球夏の降水量の減少が再現されています。様々な設定による実験を行ったところ、その時期に赤道付近で顕著となる森林火災起源の黒色炭素エアロゾルの増加にその理由があることが示唆されました。黒色炭素の増加により、地上へ到達する太陽放射量が減少して地上からの水蒸気蒸発量が減少したこと、また、大西洋上での上昇流強化による東西循環を介した熱帯アフリカ地域での下降流偏差が生じたことが、降水量の減少につながるメカニズムであると推測しました。

Quaas *et al.* (2009) は、エアロゾル光学的厚さの変化に対する様々な雲に関する物理量の変化について、AeroCom 参画モデルのうち、雲・エアロゾル相互作用を考慮しているモデルの結果を解析しました。地球観測衛星 MODIS から得られたデータに対しても、同じ解析を適用したところ、多くの数値モデルでは、エアロゾル光学的厚さの変化に対する雲粒数濃度や雲水総量の変化が、衛星観測と比較して過大であることを見出しました。ただし、SPRINTARS は他のモデルよりも感度が低く、MODIS データの解析結果に近い傾向を示しました。

5. SPRINTARS を用いた応用・発展研究

SPRINTARS は、エアロゾルの気候に対する影響を解析・評価することを第一目的として開発・利用されてきましたが、現在では様々な研究において利用されたり拡張されたりしています。以下では、その主な例を紹介します。これら以外にも、SPRINTARS による計算結果を提供した研究が多数なされています。

5.1 最終氷期極大期 (LGM) の鋳物粒子のシミュレーション

氷床コアや海底堆積物などの解析から、氷期には間氷期よりも大気中の鋳物粒子が多かったことが知られています。これをモデルで再現して、その主因を定量的に解明するために、最終氷期極大期 (LGM) の気

候条件においてMIROC-SPRINTARSを用いたシミュレーションを行いました (Takemura *et al.* 2009)。その結果、LGM時には、現在気候と比較して2.4倍程度の鉱物粒子の発生があり、その沈着量は海底堆積物などのデータとおおよそ一致しました。現在気候と比較した全球合計の鉱物粒子発生量増加分のうち、約6割は現在気候よりも風が強く、かつ降水量が少ないという気候条件、約4割は現在気候との植生の相違が原因であるという結果を得ました。ただし、アジア内陸部では、植生の相違の方が原因として大きいということを示唆しています。また、南極では他の地域よりも沈着量が2~4桁程度小さくはありますが、モデルによるシミュレーション結果は、氷床コアから解析されたデータよりも過小評価傾向にありますので、これを解明するのは今後の課題です。

Takemura *et al.* (2009) では、現在とLGMとの鉱物粒子による放射強制力の差も算出しました。鉱物粒子は太陽放射を散乱する特性のほかに、太陽放射や地球放射を吸収する特性も持っています。そのため、散乱と吸収が相殺されて、エアロゾル・放射相互作用では、現在気候と比較して対流圏界面では全球平均で -0.01 Wm^{-2} にすぎない放射強制力であることを示しました。一方、雲・エアロゾル相互作用においては、現在気候よりも全球平均で -0.9 Wm^{-2} であるという結果でした。ただし、LGM時の鉱物粒子の光学特性や、鉱物粒子の氷晶核としての機能のモデル内での表現方法など、定量的に検討すべき課題が残っています。氷期の気候に鉱物粒子がどの程度寄与したのかという疑問は、古気候分野でホットな話題の1つですので、今後も詳細な研究を進めていく必要があるでしょう。

5.2 地球システムモデル中のSPRINTARS

MIROCをベースとした地球システムモデルMIROC-ESMの開発が進められています (Watanabe *et al.* 2011)。MIROCと同様に、MIROC-ESMのエアロゾルのコンポーネントはSPRINTARSです。MIROC-ESMは、CMIP Phase5時点での仕様において、すでにIPCC AR5 (IPCC 2013) にも貢献しています。この仕様で、SPRINTARSと前述の対流圏化学気候モデルCHASERとは結合しています。現在は、さらに各コンポーネント内の開発・改良を進めているほか、コンポーネント間の相互作用について様々な過程を取り扱うように研究を進めています。エアロゾルに関わる過

程では、例えば、海洋生態系との相互作用、鉱物粒子に含まれる鉄の海洋への供給、海洋生態系からのエアロゾル前駆気体の発生などは、興味深いプロセスです。今後、地球システムモデルを用いた研究や研究成果を目にする機会は、国際的に増加するでしょう。

5.3 全球雲解像モデルへの導入

これまで説明したとおり、SPRINTARSは、静力学方程式系の大気大循環モデルが使われているMIROCと結合させる形で開発を進めてきました。最近では、非静力学方程式系の全球雲解像モデルNICAM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model) (Satoh *et al.* 2008) にも結合させる開発を進めており、研究成果が出始めています。Suzuki *et al.* (2008) では、雲粒有効半径と雲頂温度との関係について、NICAM-SPRINTARSの計算結果を地球観測衛星のデータと比較し、地域ごとの特性を再現できていることを示しました。つまり、清浄な大気では、雲底よりも雲頂に近いほど雲粒有効半径が大きい、つまり雲粒が成長している一方、東アジアなどのエアロゾル粒子の多い地域では、雲粒が成長しにくいことを、NICAM-SPRINTARSで再現できました。これは、エアロゾルモデルと対流を陽に表現できる雲解像モデルとが結合したことにより、表現可能となった事象です。

NICAM-SPRINTARS、あるいはCHASERとも結合したNICAM-CHEMでは、従来の大気大循環モデルよりも、エアロゾル・雲相互作用をより直接的に表現できるほか、そもそも全球を水平分解能数kmでエアロゾルや微量気体の分布をシミュレートできるという長所があります。ただし、そのためには当然大きなコンピュータのリソースが必要であり、今後のコンピュータの発展を待たなければならない側面もあります。NICAMでは、領域を限定した設定や、ストレッチ格子により着目したい領域のみを高分解能にする設定も可能であるため、それらの設定を活用すれば、現在でも様々な研究をすることが可能です。将来的に、NICAM-CHEMは、エアロゾル分布のシミュレーションや、エアロゾルの気候影響を評価するための主要ツールとなるでしょう。

5.4 データ同化手法の適用

気象予報や再解析データ作成などでは、データ同化は一般的になっていますが、これをエアロゾルや微量気体の濃度に対しても適用しようという研究が活発化しています。SPRINTARSを用いた研究としては、

アンサンブルカルマンフィルタを適用して、エアロゾル地上観測網 AERONET から得られる光学的厚さとオングストローム指数のデータを同化するシステムが開発されています (Schutgens *et al.* 2010)。その結果は、地球観測衛星 MODIS や、日本の研究グループによりアジアを中心に世界各地に展開している地上観測網 SKYNET といった独立した観測データとの比較・検証を行い、エアロゾル光学的厚さに対するデータ同化の適用は、おおむね計算結果を改善する傾向にあることを示しました。また、Yumimoto and Takemura (2011) では、アンサンブルカルマンフィルタを用いて地球観測衛星 MODIS から得られたエアロゾル光学的厚さのデータを SPRINTARS に導入して、期間限定ではあるものの、エアロゾル直接効果放射強制力の計算を行いました。独立した AERONET による観測データと比較し、過小評価傾向にある同化前の光学的厚さは、同化後に全般的に改善されることを示しました。その結果、エアロゾル直接効果放射強制力は、同化前と比較して、太陽放射・地球放射とも、絶対値が約80%増加するという結論を得ました。さらに、Yumimoto and Takemura (2013) では、SPRINTARS に4次元変分法を適用するシステムの開発がなされました。これにより、観測されたエアロゾル濃度の観測データから、逆計算を解くことにより、エアロゾル粒子の発生量を推定することが可能となります。

今後は、エアロゾルや微量気体に対するデータ同化手法のさらなる改良を必要とするほか、日本が開発主体である GCOM-C, EarthCARE, GOSAT2, ひまわりといった地球観測衛星からのデータ、国立環境研究所の研究グループにより展開されている地上ライダーによるエアロゾル観測のデータなどを、データ同化を介してモデルに適用することが期待されます。データ同化は計算コストがかかりますが、気象・気候研究の主要ツールである観測とモデルとを直接結びつける技術として、エアロゾルや微量気体の分野でも非常に重要な役割を担っていくと思われれます。

5.5 アジア域の越境大気汚染と黄砂のシミュレーション

前述の通り、SPRINTARS はエアロゾルの気候に対する影響を全球で評価するという目的のために開発を進めてきました。そのためにはエアロゾル分布を適切に計算することが前提であり、それは地域規模でも同様です。現在のアジア域は、地球上で最も大気汚染

が深刻な地域であり、それに関わる研究の重要性は以前から広く認識されてきました。その観点から、主にアジア域でのエアロゾル粒子の越境飛来について、SPRINTARS を用いた研究を行ってきました。Takemura *et al.* (2002b, 2003) では、2001年春季の人為起源エアロゾル粒子と黄砂の長距離輸送現象について、風速・気温・比湿に対して再解析データを用いてナッジングしながら、SPRINTARS による再現実験を行いました。その結果は、現場観測のサンプリングデータや地球観測衛星から解析されたデータ、地上ライダー観測との比較により、おおむね良く再現されているという結果を得ることができました。また、東アジアのエアロゾルの統合的研究であった APEX (Asian Atmospheric Particle Environmental Change Studies) で行われた2000年12月と2001年4月の集中観測の解析にも、SPRINTARS が利用されました (Nakajima *et al.* 2003)。

その後、エアロゾルの鉛直分布を解析できるライダーを搭載した地球観測衛星 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) から得られた2007年5月の黄砂の長距離輸送現象時のデータと、SPRINTARS によるシミュレーション結果とを比較したところ、黄砂の輸送高度は両者で良く一致していることを確認しました (Eguchi *et al.* 2009)。また、Uno *et al.* (2009) では、同じ2007年5月の黄砂イベントについて、タクラマカン砂漠起源の黄砂が高度8~10 kmへ上昇し、13日間かけて地球を1周する現象を CALIPSO のデータから解析しました。この現象の再現に SPRINTARS で成功し、黄砂の輸送経路の解析に活用されました。

アジア域のエアロゾルに関する研究は、アジアを中心に数多くの研究者により世界各国で活発に行われています。その中で、SPRINTARS の結果を用いた共同研究も数多くなされてきました。今後も、アジアの大気汚染に関わる研究において、SPRINTARS が活用されると考えています。

5.6 エアロゾル分布週間予測システムの開発

前節で紹介したとおり、SPRINTARS は全球モデルではあるものの、特定の領域、特にアジア域のエアロゾル濃度の日々変動といったスケールの再現性も高いことが確認できていました。そこで、所属研究室の上司である鶴野伊津志教授がすでに「化学天気予報」システム CFORS (Uno *et al.* 2003) により、数日先

までの東アジア域の黄砂と硫酸塩エアロゾルの予測を行っていたことを参考にさせて頂き、SPRINTARSを用いた全球のエアロゾル週間予測システムの開発をしました。竹村(2009)に説明がありますが、現在ではいくつか仕様が異なる点もあるため、ここで改めて予測システムの紹介をします。

化石燃料消費起源の有機物・黒色炭素・二酸化硫黄の排出量インベントリは、標準的なデータベースを用いており、現在はHTAP(Hemispheric Transport of Air Pollutants)の第2期実験用にコンパイルされたデータベースを使用しています。森林火災・焼き畑は時空間変動が大きいので、MODISにより検出されるホットスポットのデータFIRMS(Fire Information for Resource Management System)から、有機物・黒色炭素・二酸化硫黄に変換されたデータを使用しています。水平風速と気温は、NOAAのGlobal Forecast System(GFS)のデータを用いてナッジングをかけています。また、海面水温もNOAA/GFSのデータを使用しています。以上のデータを計算前に取得してファイル形式等を変換し、計算日の約1日前から8日分の積分を行い、計算後はホームページに掲載する図表を作成するという一連のプロセスを、毎日定時に全自動で行っています。計算は現在のところ、九州大学応用化学研究所のスーパーコンピュータを使用しており、日本時間の毎日早朝に情報が更新されます。現在運用中のシステムでは、水平分解能をT213(緯度経度約0.56度)、鉛直分解能を20層としています。

計算結果の公開は、研究成果を発信するという目的で、2007年から開始しました(<http://sprintars.net/2014.6.4>閲覧)。研究成果の社会への還元という観点から、気象や大気環境の専門家でなくても理解しやすい情報を発信するために、「簡易版」のホームページを作成しました。このページでは、PM2.5の主成分である硫酸塩・有機物・黒色炭素の「大気汚染粒子」と、アジア域の鉱物エアロゾルである「黄砂」の2種類に簡易的に分類し、それぞれのアジア域の週間予測動画を閲覧することができます。英語の簡易版ページには、これらの全球動画も併せて掲載しています。また、日本語の簡易版ページでは、閲覧者が一目で予測情報をチェックできるように、当日と翌日は6時間ごと、6日後までは1日ごとの「大気汚染粒子」と「黄砂」の地上付近の濃度について、日本を12地域に分割して、「非常に多い」「多い」「やや多い」「少ない」の

4段階で表示させています。エアロゾルの高濃度の状態を予測するという観点から、3時間平均値のなかの最大値を基準として4段階表示しています。なお、簡易版では、モデル最下層と2層目($\sigma=0.98$)の平均質量濃度を利用しています。

隣国で以前から深刻となっていたPM2.5による大気汚染について、隣国国内で2013年1月以降広く報道されたことをきっかけに、日本でもPM2.5「騒動」が起きました。ご存知のとおり、日本への越境大気汚染は、西日本、特に九州地方で以前から影響を及ぼしていましたが(山口・竹村 2011)、2013年以降の急速な社会的関心の高まりに伴い、SPRINTARSエアロゾル週間予測の情報利用者が急増しました。現在では、テレビや地方紙での気象情報の1つとして転載されています。しかし、国民に広く利用される情報であることを考えると、このシステムを運用しているのが実質的に私1人であるというのは、望ましい態勢ではありません。国民にわかりやすい形で、高精度の予測情報が公的機関から提供されるようになることが望まれます。

5.7 福島第一原子力発電所事故に伴う大気中の放射性物質の輸送シミュレーション

2011年3月11日の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故は、ヨウ素131・セシウム134・セシウム137などの放射性物質を大気中に放出する結果となりました。これらの大気中での挙動については、気象学が対象としている領域の1つであることは明らかです。しかし、研究コミュニティでは、緊急時に学術的観点からの情報を各方面へ提供する態勢が整備されておらず、事故直後には専門的知見を対策に活用することができませんでした。この点については議論を続けていかなければなりません。少なくとも学術的観点からの事後検証を行い、その結果を公表することは重要です。そこで、SPRINTARSを用いて、福島第一原子力発電所から放出されるパッシブトレーサーに近い微粒子の長距離輸送シミュレーションを、事故直後から行いました。ただし、当時は実験設定のための情報が非常に限定的であったため、放出量の時間変化を考慮せず、単位量のエアロゾルを放出し続けるという設定で計算を行いました。つまり、世界各地へ到達する輸送経路と、初期到達時の発生源近傍との相対量を推測するための計算ということになります。

計算の結果、放出開始から4日後の3月18日には、微粒子は太平洋を越えて米国西海岸に到達したもの

の、濃度は原発近傍の 10^{-8} のオーダーまで低下したことを示しました。その後、放出開始から6日後にはアイスランド周辺に達し、その後、ヨーロッパへ到達したと計算されました。これらは、原発起源と考えられる放射性物質が各地で検出されたタイミングと一致しました。原発からは3月14-16日に大量の放射性物質が放出されたと推定されていますが、14-15日に東日本を通過した低気圧によって強い上昇気流がもたらされ、ジェット気流の高さにまで放射性物質が輸送されたと推測されます。なお、原発から福島県内の北西方向への大量の放射性物質の沈着をもたらしたのも、この低気圧による地表付近の南東風と降雨と考えられています。2011年3月中旬の日本付近は、寒気の張り出しが強く、日本上空の偏西風が特に強かったこと、また、偏西風は、カリフォルニア上空から北米大陸・大西洋を経てアイスランド付近に軸があり、その軸に沿って原発から放出された物質を遠方に効果的に輸送したことを計算結果は示しています。

以上のSPRINTARSを用いた計算・解析の結果は、査読を経て、事故から2ヶ月後に日本気象学会のSOLAに受理、さらにその1ヶ月後に掲載されました(Takemura *et al.* 2011a)。また、事故が起こった国の学術界から世界へ向けてより広く情報を発信するという観点から、American Geophysical Unionの学会誌EOSにも記事を投稿・受理されました(Takemura *et al.* 2011b)。可能な限り迅速に学術論文として公開できたと考えており、その後の学術界による領域モデルを用いた空間分解能の高いシミュレーションの実施・解析などに続く最初の道筋を作ることができたと考えています。

6. 今後の展開

最後に、エアロゾルのモデリング研究に関わる直近の課題について、これまでに挙げていて重複する点もありますが、簡単に述べておきます。気候モデルにおいて大きな改良の余地が依然としてあり、かつモデル全体のパフォーマンスに大きく影響を及ぼす1つが、雲スキームです。autoconversionパラメタリゼーションの検証および改良、霧雨(ドリズル)の予報変数化と放射過程での陽的取り扱い、放射過程での氷晶の形状を考慮した取り扱いなど、エアロゾル・雲相互作用に関する課題は多岐に渡ります。これらは雲の微物理過程に関わることなので、静力学方程式系のモデルだけではなく、雲解像モデルでも共通の課題です。

また、地球システムモデルでの各コンポーネント間の相互作用の精緻化は、非常に興味深い研究です。それにより、広範な分野間連携も一層促進されていくでしょう。大気汚染の観点からは、輸送モデルにおいて、粒子成長過程を陽に取り扱うなどのエアロゾルの微物理特性の精緻化、日本全域あるいはアジア全域の水平分解能数kmのエアロゾル濃度予測などは、社会的要請もあることから、取り組まなければならない課題でしょう。さらに、エアロゾルに対するデータ同化手法の適用は、気候変動研究・大気汚染研究の両方にとって、また、地球観測衛星から得られるデータを最大限活用するという点からも、より実用的にしていかなければならないでしょう。そして、私自身のそもそもの研究目的である、気象場および気候変動に対するエアロゾルの具体的な影響については、まだ分からないことだらけです。取り組みたいこと、取り組まなければならないことが沢山あります。共同研究して頂ける多くの研究者の方々とともに、これらの課題を解決していければと考えております。

謝辞

私の研究活動は、非常に多くの方々のおかげにより成り立っております。東京大学の中島映至教授には、私の大学院入学時の具体的な研究テーマ設定から始まり、現在まで様々な共同研究をさせて頂きました。九州大学の鶴野伊津志教授には、私の九州大学赴任以来、共同研究をさせていただきだけでなく、独立して研究に集中できるように様々な配慮を頂いてきました。SPRINTARSの駆動部であるMIROCの開発は、故・沼口 敦先生、住 明正先生(国立環境研究所)、木本昌秀教授(東京大学)、野沢 徹教授(岡山大学)、江守正多博士(国立環境研究所)、渡部雅浩准教授(東京大学)、須藤健悟准教授(名古屋大学)、渡邊真吾博士(海洋研究開発機構)、小倉知夫博士(国立環境研究所)、阿部彩子准教授(東京大学)、他多くの方々の貢献によります。中島研究室の先輩・同輩・後輩である岡本 創教授(九州大学)、中島 孝教授(東海大学)、木村俊義博士(JAXA)、日暮明子博士(国立環境研究所)、對馬洋子博士(UK Met Office)、増永浩彦准教授(名古屋大学)、河本和明教授(長崎大学)、片桐秀一郎博士(東北大学)、丸山祥宏氏、黒田俊介氏、鈴木健太郎博士(NASA JPL)、関口美保准教授(東京海洋大学)、中田真木子博士(近畿大学)、五藤大輔博士(国立環境研究所)、佐藤陽祐博士

(理化学研究所), 他多くの方々とは, これまでに共同研究をさせて頂いたり, 様々な面でお互いに支え合って研究活動をしたりしてきました。大学院時に所属していた東京大学気候システム研究センターの教職員・先輩・同輩・後輩の方々, 大学学部時代を過ごした東北大学の早坂忠裕教授・中澤高清教授・先輩・同輩の方々には, 研究活動初期の段階で, いろいろとお世話になりました。現在の研究室の出身者である原由香里博士(九州大学)・弓本桂也博士(気象研究所), 他の方々や, 現構成員の方々には, 日々お世話になっております。株式会社ウェザーマップの方々には, 大学院時代に, 気象は生活に密着した分野であるという感覚を身につけるきっかけを作って頂きました。故・Dr. Yoram J. Kaufman は, NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) で1年間私を受け入れてくださり, 貴重な共同研究や経験をさせて頂きました。現在の主要な国際共同研究の場である AeroCom を主導して頂いている Dr. Michael Schulz (Norwegian Meteorological Institute), Dr. Stefan Kinne (Max Planck Institute for Meteorology), Dr. Mian Chin (NASA GSFC), 他の方々, 国内で共同研究をさせて頂いている杉本伸夫博士(国立環境研究所), 青木一真教授(富山大学), 他多くの方々にも謝意を表します。そして, 家族と両親へ, ありがとうございます。

参 考 文 献

- Berry, E. X., 1967: Cloud droplet growth by collection. *J. Atmos. Sci.*, **24**, 688-701.
- Eguchi, K., I. Uno, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, N. Sugimoto and Z. Liu, 2009: Trans-pacific dust transport: integrated analysis of NASA/CALIPSO and a global aerosol transport model. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 3137-3145.
- Goto, D., T. Nakajima, T. Takemura and K. Sudo, 2011: A study of uncertainties in the sulfate distribution and its radiative forcing associated with sulfur chemistry in a global aerosol model. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 10889-10910.
- Higurashi, A., T. Nakajima, B. N. Holben, A. Smirnov, R. Frouin and B. Chatenet, 2000: A study of global aerosol optical climatology with two-channel AVHRR remote sensing. *J. Climate*, **13**, 2011-2027.
- Holben, B. N., D. Tanré, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. S. Schafer, B. Chatenet, F. Lavenu, 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, 2001: An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *J. Geophys. Res.*, **106**, 12067-12097.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- 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, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535pp.
- 岩坂泰信, 2012: エアロゾル. *天気*, **59**, 1079-1082.
- Kaufman, Y. J., O. Boucher, D. Tanré, M. Chin, L. Remer and T. Takemura, 2005: Aerosol anthropogenic component estimated from satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17804, doi:10.1029/2005GL023125.
- Kawase, H., T. Takemura and T. Nozawa, 2011: Impact of carbonaceous aerosols on precipitation in tropical Africa during the austral summer in the twentieth century. *J. Geophys. Res.*, **116**, D18116, doi:10.1029/2011JD015933.
- Kinne, S., M. Schulz, C. Textor, S. Guibert, Y. Balkanski, S. E. Bauer, T. Bernsten, T. F. Berglen, O. Boucher, M. Chin, W. Collins, F. Dentener, T. Diehl, R. Easter, J. Feichter, D. Fillmore, S. Ghan, P. Ginoux, S. Gong, A. Grini, J. Hendricks, M. Herzog, L. Horowitz, I. Isaksen, T. Iversen, A. Kirkevåg, S. Kloster, D. Koch, J. E. Kristjansson, M. Krol, A. Lauer, J. F. Lamarque, G. Lesins, X. Liu, U. Lohmann, V.

- Montanaro, G. Myhre, J.E. Penner, G. Pitari, S. Reddy, Ø. Seland, P. Stier, T. Takemura and X. Tie, 2006: An AeroCom initial assessment — optical properties in aerosol component modules of global models. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 1815–1834.
- Koch, D., M. Schulz, S. Kinne, C. McNaughton, J. R. Spackman, Y. Balkanski, S. Bauer, T. Berntsen, T. C. Bond, O. Boucher, M. Chin, A. Clarke, N. De Luca, F. Dentener, T. Diehl, O. Dubovik, R. Easter, D. W. Fahey, J. Feichter, D. Fillmore, S. Freitag, S. Ghan, P. Ginoux, S. Gong, L. Horowitz, T. Iversen, A. Kirkevåg, Z. Klimont, Y. Kondo, M. Krol, X. Liu, R. Miller, V. Montanaro, N. Moteki, G. Myhre, J.E. Penner, J. Perlwitz, G. Pitari, S. Reddy, L. Sahu, H. Sakamoto, G. Schuster, J. P. Schwarz, Ø. Seland, P. Stier, N. Takegawa, T. Takemura, C. Textor, J. A. van Aardenne and Y. Zhao, 2009: Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 9001–9026.
- Langner, J. and H. Rodhe, 1991: A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle. *J. Atmos. Chem.*, **13**, 225–263.
- Liousse, C., J.E. Penner, C. Chuang, J. J. Walton, H. Eddleman and H. Cachier, 1996: Global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols. *J. Geophys. Res.*, **101**, 19411–19432.
- Myhre, G., B. H. Samset, M. Schulz, Y. Balkanski, S. Bauer, T. K. Berntsen, H. Bian, N. Bellouin, M. Chin, T. Diehl, R. C. Easter, J. Feichter, S. J. Ghan, D. Hauglustaine, T. Iversen, S. Kinne, A. Kirkevåg, J.-F. Lamarque, G. Lin, X. Liu, M. T. Lund, G. Luo, X. Ma, T. van Noije, J.E. Penner, P. J. Rasch, A. Ruiz, Ø. Seland, R. B. Skeie, P. Stier, T. Takemura, K. Tsigaridis, P. Wang, Z. Wang, L. Xu, H. Yu, F. Yu, J.-H. Yoon, K. Zhang, H. Zhang and C. Zhou, 2013: Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 1853–1877.
- 中島映至, 竹村俊彦, 2009: 放射強制力. *天気*, **56**, 997–999.
- Nakajima, T., M. Tsukamoto, Y. Tsushima, A. Numaguti and T. Kimura, 2000: Modeling of the radiative process in an atmospheric general circulation model. *Appl. Opt.*, **39**, 4869–4878.
- Nakajima, T., M. Sekiguchi, T. Takemura, I. Uno, A. Higurashi, D. Kim, B. J. Sohn, S.-N. Oh, T. Y. Nakajima, S. Ohta, I. Okada, T. Takamura and K. Kawamoto, 2003: Significance of direct and indirect radiative forcings of aerosols in the East China Sea region. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8658, doi:10.1029/2002JD003261.
- 岡本 創, 2014: 能動型地球観測センサーによる雲・エアロゾル特性に関する研究—2011年度日本気象学会賞受賞記念講演—. *天気*, **61**, 133–150.
- Penner, J. E., J. Quaas, T. Storelvmo, T. Takemura, O. Boucher, H. Guo, A. Kirkevåg, J. E. Kristjánsson and Ø. Seland, 2006: Model intercomparison of indirect aerosol effects. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 3391–3405.
- Quaas, J., Y. Ming, S. Menon, T. Takemura, M. Wang, J. E. Penner, A. Gettelman, U. Lohmann, N. Bellouin, O. Boucher, A. M. Sayer, G. E. Thomas, A. McComiskey, G. Feingold, C. Hoose, J. E. Kristjánsson, X. Liu, Y. Balkanski, L. J. Donner, P. A. Ginoux, P. Stier, B. Grandey, J. Feichter, I. Sednev, S. E. Bauer, D. Koch, R. G. Grainger, A. Kirkevåg, T. Iversen, Ø. Seland, R. Easter, S. J. Ghan, P. J. Rasch, H. Morrison, J.-F. Lamarque, M. J. Iacono, S. Kinne and M. Schulz, 2009: Aerosol indirect effects — general circulation model intercomparison and evaluation with satellite data. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 8697–8717.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3486–3514.
- Schulz, M., C. Textor, S. Kinne, Y. Balkanski, S. Bauer, T. Berntsen, T. Berglen, O. Boucher, F. Dentener, S. Guibert, I. S. A. Isaksen, T. Iversen, D. Koch, A. Kirkevåg, X. Liu, V. Montanaro, G. Myhre, J.E. Penner, G. Pitari, S. Reddy, Ø. Seland, P. Stier and T. Takemura, 2006: Radiative forcing by aerosols as derived from the AeroCom present-day and pre-industrial simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 5225–5246.
- Schutgens, N. A. J., T. Miyoshi, T. Takemura and T. Nakajima, 2010: Applying an ensemble Kalman filter to the assimilation of AERONET observations in a global aerosol transport model. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 2561–2576.
- Shindell, D. T., J.-F. Lamarque, M. Schulz, M. Flanner, C. Jiao, M. Chin, P. J. Young, Y. H. Lee, L. Rotstayn, N. Mahowald, G. Milly, G. Faluvegi, Y. Balkanski, W. J. Collins, A. J. Conley, S. Dalsoren, R. Easter, S. Ghan, L. Horowitz, X. Liu, G. Myhre, T. Nagashima, V. Naik, S. T. Rumbold, R. Skeie, K. Sudo, S. Szopa, T. Takemura, A. Voulgarakis, J.-H. Yoon and F. Lo, 2013: Radiative forcing in the ACCMIP historical and future climate simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 2939–2974.

- Stier, P., N. A. J. Schutgens, N. Bellouin, H. Bian, O. Boucher, M. Chin, S. Ghan, N. Huneeus, S. Kinne, G. Lin, X. Ma, G. Myhre, J. E. Penner, C. Randles, B. Samset, M. Schulz, T. Takemura, F. Yu, H. Yu and C. Zhou, 2013: Host model uncertainties in aerosol radiative forcing estimates: results from the AeroCom prescribed intercomparison study. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 3245–3270.
- 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**, 4339, doi:10.1029/2001JD001113.
- Suzuki, K., T. Nakajima, M. Satoh, H. Tomita, T. Takemura, T. Y. Nakajima and G. L. Stephens, 2008: Global cloud-system-resolving simulation of aerosol effect on warm clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L19817, doi:10.1029/2008GL035449.
- 竹村俊彦, 2003: 全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルを用いたエアロゾルの分布及び放射強制に関する研究—2002年度山本・正野論文賞受賞記念講演—. *天気*, **50**, 425–435.
- 竹村俊彦, 2009: 大気エアロゾル予測システムの開発. *天気*, **56**, 455–461.
- Takemura, T., 2012: Distributions and climate effects of atmospheric aerosols from the preindustrial era to 2100 along Representative Concentration Pathways (RCPs) simulated using the global aerosol model SPRINTARS. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 11555–11572.
- Takemura, T. and T. Uchida, 2011: Global climate modeling of regional changes in cloud, precipitation, and radiation budget due to the aerosol semi-direct effect of black carbon. *SOLA*, **7**, 181–184.
- Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi and T. Nakajima, 2000: Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, **105**, 17853–17873.
- Takemura, T., T. Nakajima, T. Nozawa and K. Aoki, 2001: Simulation of future aerosol distribution, radiative forcing, and long-range transport in East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 1139–1155.
- Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben and S. Kinne, 2002a: Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *J. Climate*, **15**, 333–352.
- Takemura, T., I. Uno, T. Nakajima, A. Higurashi and I. Sano, 2002b: Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2158, doi:10.1029/2002GL016251.
- Takemura, T., T. Nakajima, A. Higurashi, S. Ohta and N. Sugimoto, 2003: Aerosol distributions and radiative forcing over the Asian-Pacific region simulated by Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS). *J. Geophys. Res.*, **108**, 8659, doi:10.1029/2002JD003210.
- Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima and T. Nakajima, 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, **110**, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- Takemura, T., Y. Tsushima, T. Yokohata, T. Nozawa, T. Nagashima and T. Nakajima, 2006: Time evolutions of various radiative forcings for the past 150 years estimated by a general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L19705, doi:10.1029/2006GL026666.
- Takemura, T., Y. J. Kaufman, L. A. Remer and T. Nakajima, 2007: Two competing pathways of aerosol effects on cloud and precipitation formation. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04802, doi:10.1029/2006GL028349.
- Takemura, T., M. Egashira, K. Matsuzawa, H. Ichijo, R. O'ishi and A. Abe-Ouchi, 2009: A simulation of the global distribution and radiative forcing of soil dust aerosols at the Last Glacial Maximum. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 3061–3073.
- Takemura, T., H. Nakamura, M. Takigawa, H. Kondo, T. Satomura, T. Miyasaka and T. Nakajima, 2011a: A numerical simulation of global transport of atmospheric particles emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *SOLA*, **7**, 101–104.
- Takemura, T., H. Nakamura and T. Nakajima, 2011b: Tracing airborne particles after Japan's nuclear plant explosion. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, **92**, 397–398.
- Tegen, I. and I. Fung, 1995: Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *J. Geophys. Res.*, **100**, 18707–18726.
- Textor, C., M. Schulz, S. Guibert, S. Kinne, Y. Balkanski, S. Bauer, T. Berntsen, T. Berglen, O. Boucher, M. Chin, F. Dentener, T. Diehl, R. Easter, H. Feichter, D. Fillmore, S. Ghan, P. Ginoux, S. Gong, A. Grini, J. Hendricks, L. Horowitz, P. Huang, I. Isaksen, T. Iversen, S. Kloster, D. Koch, A. Kirkevåg, J. E. Kristjánsson, M. Krol, A. Lauer, J. F. Lamarque, X. Liu, V. Montanaro, G. Myhre, J. Penner, G. Pitari, S. Reddy,

- Ø. Seland, P. Stier, T. Takemura and X. Tie, 2006: Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 1777–1813.
- Uno, I., G. R. Carmichael, D. G. Streets, Y. Tang, J. J. Yienger, S. Satake, Z. Wang, J.-H. Woo, S. Guttikunda, M. Uematsu, K. Matsumoto, H. Tanimoto, K. Yoshioka and T. Iida, 2003: Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8668, doi:10.1029/2002JD002845.
- Uno, I., K. Eguchi, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, M. Uematsu, Z. Liu, Z. Wang, Y. Hara and N. Sugimoto, 2009: Asian dust transported one full circuit around the globe. *Nature Geosci.*, **2**, 557–560.
- Watanabe, M., T. Suzuki, R. O'ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe and M. Kimoto, 2010: Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, **23**, 6312–6335.
- Watanabe, S., T. Hajima, K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Okajima, T. Nozawa, H. Kawase, M. Abe, T. Yokohata, T. Ise, H. Sato, E. Kato, K. Takata, S. Emori and M. Kawamiya, 2011: MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 845–872.
- 山口慶人, 竹村俊彦, 2011: 煙霧と黄砂の観測時間の経年変化. *天気*, **58**, 965–968.
- Yumimoto, K. and T. Takemura, 2011: Direct radiative effect of aerosols estimated using ensemble-based data assimilation in a global aerosol climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L21802, doi:10.1029/2011GL049258.
- Yumimoto, K. and T. Takemura, 2013: The SPRINTARS version 3.80/4D-Var data assimilation system: development and inversion experiments based on the observing system simulation experiment framework. *Geosci. Model Dev.*, **6**, 2005–2022.

Modeling Studies on Aerosol–Climate Interaction

Toshihiko TAKEMURA*

* *Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Fukuoka 816–8580, Japan.*
E-mail: toshi@riam.kyushu-u.ac.jp

(Received 28 April 2014; Accepted 16 June 2014)
