HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	モデリング研究によるエアロゾル気候影響評価
Author(s)	竹村, 俊彦
Relation	大気圏と生物圏の相互利用. 北海道大学低温科学研究所編
Citation	低温科学, 68, 137-142
Issue Date	2010-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/45173
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS68_019.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 68 （2010） 137-142

モデリング研究によるエアロゾル気候影響評価

竹村　俊彦[1)]

2010 年 2 月 25 日受付，2010 年 3 月 1 日受理

大気エアロゾルは，直接・準直接・間接効果，およびそれらの結果として起こる効果により気候変動に影響を及ぼす．エアロゾルの気候影響を評価するために，全球エアロゾル気候モデル SPRINTARS を開発してきた．本稿では，SPRINTARS を用いた研究を中心として，数値モデルによるエアロゾルの気候影響評価に関連する近年の研究の動向を紹介する．

Estimation of aerosol effects on climate by modeling studies

Toshihiko Takemura[1]

Atmospheric aerosols affect climate change through the direct, semi-direct, indirect, and their secondary effects. The author has developed a global aerosol climate model, SPRINTARS, to estimate the aerosol climate effects. In this manuscript recent trends related to studies on estimates of aerosol climate effects with numerical models, mainly SPRINTARS, are introduced.

1．エアロゾルの気候に対する影響

エアロゾルが気候変動を引き起こす効果として，大きく 3 つに分けることができる．1 つは，エアロゾルが太陽放射や赤外放射を散乱したり吸収したりすることにより，大気の放射収支が変化する「直接効果」である（Charlson et al., 1992）．エアロゾルによる太陽放射減衰を最初に示唆した人物は，ベンジャミン・フランクリンであると言われている（Ackerman, 1988）．フランクリンは，1783-1784 年の厳冬の理由として，エアロゾル直接効果を取り上げた．直接効果は，エアロゾルの粒径・複素屈折率・吸湿性といった物理化学的特性に大きく依存する．例えば，硫酸塩エアロゾルは主に太陽放射を散乱して宇宙空間へ戻してしまうため大気を冷却するが，黒色炭素エアロゾルは太陽放射・赤外放射を効率良く吸収するため大気を加熱する．2 つ目は，「間接効果」である．間接効果は，さらに 2 つに分類されている．水雲の核（凝結核）や氷雲の核（氷晶核）となるエアロゾルが，もし雲水の質量が変化せずに増加すると，雲粒や氷晶の 1 つ 1 つのサイズが小さくなり，太陽放射・赤外放射の散乱や吸収が強まる．これを，「第 1 種間接効果」や「雲アルベド効果」と呼ぶ（Twomey, 1974）．「第 2 種間接効果」や「雲寿命効果」と呼ばれている効果は，雲粒や氷晶の大きさが変化すると，降水・降雪へ成長する時間の変化をもたらすことを言う（Albrecht, 1989）．3 つ目は，太陽放射や赤外放射を吸収する特性を持つ黒色炭素やダスト粒子による「準直接効果」である（Hansen et al., 1997）．放射吸収性エアロゾルは周辺大気を加熱するため，大気安定度の変化や飽和水蒸気圧の変化により，雲生成に影響を及ぼすと考えられる．

1）九州大学応用力学研究所
[1] Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kazuga 816-8580, Japan

2．IPCC 評価報告書におけるエアロゾルの気候影響評価

気候に対する影響を定量的に評価するパラメータとして，「放射強制力」がある（竹村と中島，2009）．これは，気候に影響を及ぼす因子（気候強制因子）の量が変化した際の，太陽放射および赤外放射の放射収支の変化を示すものである．放射収支の変化を把握することは気候変動を議論する上でのベースとなること，また，気候強制因子が気候に作用するプロセスはそれぞれ異なるが，それらの影響を同一パラメータで比較できるという観点から，放射強制力は便利なものでもある．各国政府が気候変動対策の科学的根拠資料とする気候変動に関する政府間パネル（IPCC）（http://www.ipcc.ch/）の評価報告書では，対流圏での気候状態を固定して，気候強制因子の量が変化した場合の対流圏界面での放射収支の変化量を放射強制力と定義している．

IPCC 第 1 作業部会（WG1）の最新報告書である第 4 次評価報告書（AR4）（IPCC, 2007）によると，長寿命温室効果気体（CO_2，CH_4，N_2O，ハロカーボン類）の産業革命から現在にかけての放射強制力の全球平均値は＋2.64 W m^{-2} と評価されており，その不確定性は 10％と非常に小さい．これは，気候状態を固定し（つまり気候フィードバックを考慮せず），気体濃度変化が正しく推定されていれば，長寿命温室効果気体の放射強制力は，ほとんど誤差なく評価できることを意味する．一方，エアロゾルの放射強制力の最尤値は，直接効果が－0.5 W m^{-2}，水雲に対する第 1 種間接効果が－0.7 W m^{-2} と評価されており，産業革命以降の気候影響を評価する上で無視できない量であることは間違いない．しかし，それらの不確定性の幅は，IPCC 第 3 次評価報告書（IPCC, 2001）よりは小さくなっているものの，直接効果では－0.1～－0.9 W m^{-2}，水雲に対する第 1 種間接効果では－0.3～－1.8 W m^{-2} と，依然として非常に大きい．以上の評価は，IPCC WG1 AR4 の第 2 章で扱っている他，IPCC 報告書全体にとって重要事項であるため，政策決定者向け要約（Summary for Policymakers；SPM）や技術要約（Technical Summary：TS）においても取り上げられている．なお，第 2 種間接効果は，現象そのものが雲量や降水効率といった気候状態の変化を伴うため，厳密には放射強制力を評価することができないが，気候フィードバックを含めた放射収支の変化を，－0.3～－1.4 W m^{-2} と評価した（Lohmann and Feichter, 2005）（IPCC WG1 AR4 第 7 章）．また，準直接効果の放射収支の変化に関しては，独立した評価はなされていない．

IPCC 評価報告書は，過去数年間の査読論文の記述をベースとしてまとめられる．IPCC AR4 におけるエアロゾル直接効果・間接効果の評価は，主に数値モデルによってなされており，個々のモデリング研究の他，全球エアロゾルモデル相互比較プロジェクト AeroCom が作成したプロトコルに基づいた実験を，各モデルにおいて行って集約した結果も用いられている（Kinne et al., 2006; Penner et al., 2006; Schulz et al., 2006; Textor et al., 2006, 2007）．AeroCom は，全球エアロゾルモデルを開発している研究者を中心とした，特定組織の傘下にないボランティアベースのプロジェクトであり，モデル間の相互比較やリモートセンシング観測との比較を通して，エアロゾルの気候影響評価やモデルの不確定性の現状把握を行っている．

上述の IPCC におけるエアロゾル放射強制力の評価の不確定性は，様々な数値モデルを用いて計算された結果のばらつきを示している．今後もその不確定性を低減する努力が求められており，AeroCom では，IPCC 第 5 次評価報告書（AR5）への貢献を念頭に置き，第 2 期実験を進めているところである．第 2 期実験のコントロールシミュレーションは，AeroCom が収集したエアロゾル関連排出量データを統一して使用し，2006 年の気象場で行う．排出量データには，燃料消費・森林火災・船舶・航空機起源の黒色炭素（BC）・有機炭素（OC）・二酸化硫黄（SO_2）と，火山起源 SO_2 が含まれる．その他の自然起源（土壌粒子や海塩粒子等）の排出量は，各モデルに任されている．また，産業革命以前の排出量を仮定したシミュレーションやエアロゾル直接効果を考慮しないシミュレーションも行い，人為起源および自然起源の直接効果放射強制力を算出する．さらに，1980～2008 年の hindcast シミュレーションを，1）年々変動を含む上述のエアロゾル関連排出量データを使用　2）2000 年の排出量データをすべての年に適用　3）年々変動を含む新しい IPCC 提供の排出量データを使用　4）IPCC 提供排出量データを適用して気象場は大気大循環モデル内部で計算されるものを使用（1）～3）は客観解析データを利用して気象場をナッジング）の 4 種類について実施する．なお，間接効果の評価に特化した実験はすでに実施済みである（Quaas et al., 2009）．

3．全球エアロゾル気候モデル SPRINTARS を用いた近年の研究

SPRINTARS（Takemura et al., 2000, 2002, 2005, 2009）は，東京大学気候システム研究センター（CCSR）／国立環境研究所（NIES）／海洋研究開発機構地球環境変動領域（RIGC）（旧：地球環境フロンティア研究センター（FRCGC））の大循環モデル（GCM）である MIROC に結合したエアロゾルモデルであり，対流圏主要エアロゾルである黒色炭素・有機炭素・硫酸塩・土壌・海塩を扱う．一連の輸送過程（発生・移流・拡散・化学反応（硫黄）・湿性沈着・乾性沈着・重力落下）の他に，エアロゾル種毎の複素屈折率・粒径分布・吸湿成長を考慮してエアロゾル直接効果を計算する．また，エアロゾルが雲の凝結核・氷晶核として機能する過程を通して雲・降水に変化を及ぼすエアロゾル間接効果も含まれる．SPRINTARS を用いた研究成果は，IPCC AR4（IPCC, 2007）に多数採用された（Takemura et al., 2000, 2001, 2002, 2005）．

CCSR/NIES/FRCGC では，SPRINTARS が導入された GCM を用いて，温室効果気体（CO_2，CH_4，N_2O，CFCs）・オゾン（対流圏・成層圏）・エアロゾル直接効果・エアロゾル間接効果（第 1 種・第 2 種）・火山性成層圏エアロゾル・太陽放射量・土地利用の変化による放射強制力の 1850～2000 年の経年変化を，対流圏界面と地表面とで求めた（図 1）（Takemura et al., 2006）．全球平均地表気温は，20 世紀前半と後半に上昇した一方，20 世紀中盤には変化なし若しくはわずかに下降したことが知られている．地表気温が上昇している時期には，合計放

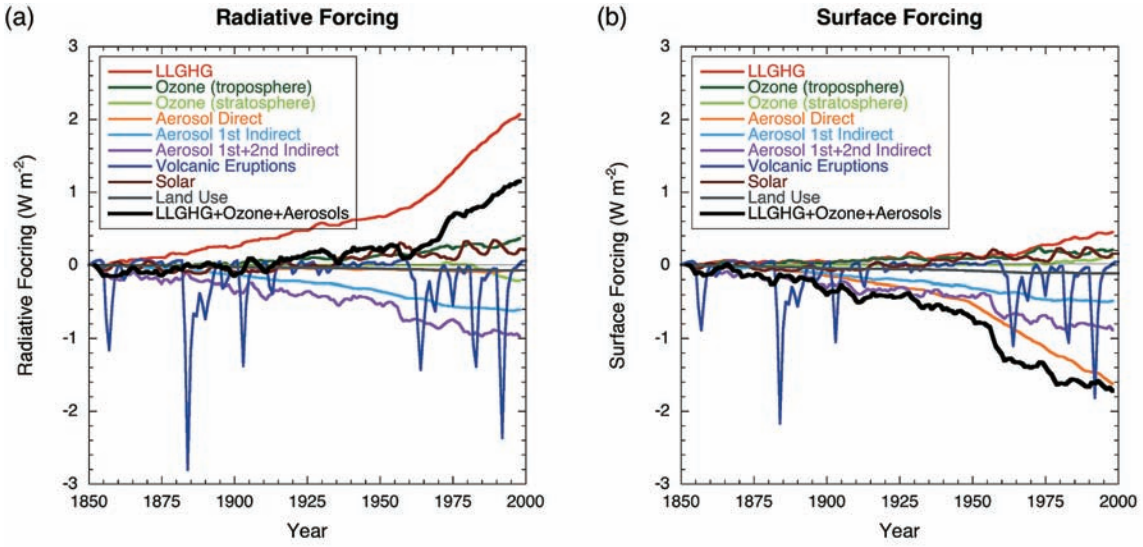

図 1：(a)対流圏界面，(b)地表面における様々な気候強制因子による全天大気での 1850～2000 年の全球平均瞬時放射強制力の経年変化（Takemura et al., 2006）．成層圏火山起源エアロゾル以外は 5 年移動平均を示す．

射強制力は対流圏界面で主に温室効果気体により上昇し，地表では大きな変化が見られない．一方，20 世紀中盤には，合計放射強制力は対流圏界面で大きな変化がなく，地表では主にエアロゾル直接・間接効果により下降していることが示されている．これらのことから，放射強制力の変化量は気温変化と密接な関係のあることが示唆される．主要気候強制因子全ての放射強制力の産業革命以降の経年変化を対流圏界面だけでなく地表でも示したことは，人為起源による気候変動を考察する上で非常に有用であると考えられる．

SPRINTARS を使用した近年の応用研究として，現在から約 2 万 1 千年前の最終氷期極大期（LGM）におけるダストのシミュレーションが挙げられる（Takemura et al., 2009）．全球合計ダスト発生量は，現在気候と比較して 2.4 倍であるという結果が得られた（図 2）．この原因として，約 60%は強風や少降水量といった気象要素であり，残りは乾燥域の拡大であることを示唆した．また，計算されたダスト沈着フラックスは，氷床コアや海洋堆積物の解析から得られたデータとおおむね良い一致が見られた．ただし，南極大陸では，計算されたダスト沈着フラックスは過小評価しており，その原因解明を含めて今後の課題である．LGM におけるダストの直接効果放射強制力は，対流圏界面で約$-0.0\ \mathrm{W\ m^{-2}}$，地表面で$-0.4\ \mathrm{W\ m^{-2}}$と計算され，これら負の強制力は現在気候の約 2 倍であるという結果が得られた．また，氷晶核プロセスを考慮したダストの間接効果放射強制力を評価したところ，LGM では現在気候と比較して，正の強制力が約$0.9\ \mathrm{W\ m^{-2}}$小さいという結果が得られた．以上のことから，氷期に大気中のダスト量が多いことにより，その直接・間接効果を通して寒冷な気候を形成する 1 つの大きな要因になっていることを示唆した．

前節で述べたように，IPCC 最新報告書においても，エアロゾルの気候影響の評価には依然として大きな不確定性が存在する．その不確定性を低減する 1 つの大きな試みが，「データ同化」手法の適用である．エアロゾル分布をシミュレートする数値モデルにおける地上・人工衛星・航空機・船舶等から観測されるデータの従来の利用法は，数値モデルから出力されるある物理量を，同地

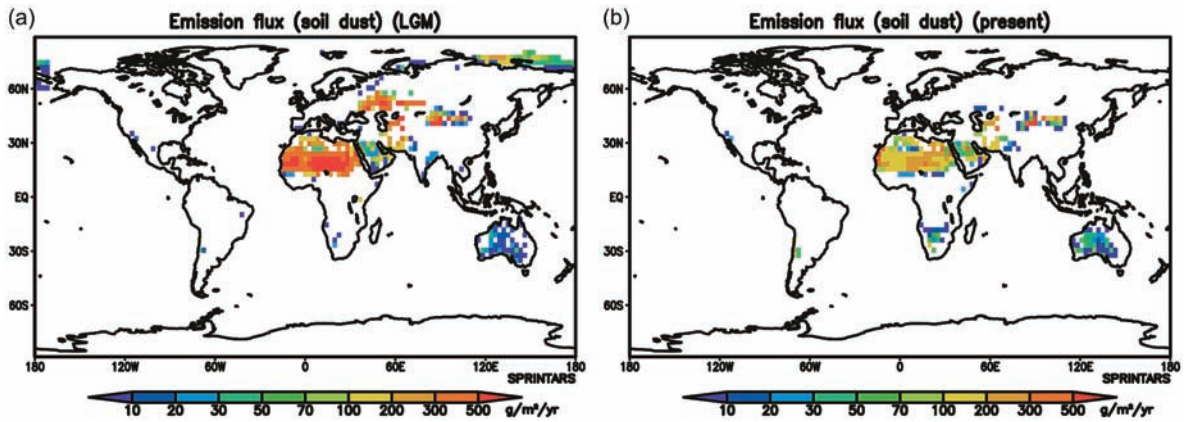

図 2：(a)LGM，(b)現在気候における年間合計ダスト発生フラックスの全球分布（Takemura et al., 2009）．

点・同時刻・同物理量の観測値と単純に比較して，数値モデルの改良に活用する，というものであった．しかし，データ同化は，数値モデルと観測データとを融合し，数値モデルにより計算されたある時刻の大気の状態を観測データで直接修正して最適な推定値を求める．例えば，MODIS や CALIOP といった衛星搭載センサおよび AERONET や SKYNET といったリモートセンシング地上観測網から得られるエアロゾルのデータを，4 次元変分法（4D-Var）やアンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）といったデータ同化手法を適用して SPRINTARS へ導入する研究が進められている（図 3）（弓本ら，2009）．データ同化手法を適用した数値モデルの出力は，高精度な再解析データとして各方面で利用されることが考えられる．また，数値モデルによるエアロゾル分布の不確定性を生む大きな要因の 1 つが，使用する排出量インベントリおよび排出量推定式の誤差である．基本的に，自然起源エアロゾルの場合は，数値モデル内部のパラメータを用いた経験的推定式により発生量とその時空間分布を決定し，人為起源エアロゾルは，資源・エネルギー消費量の国別統計値等をベースとして推定される．「経験的」である以上は誤差が含まれており，統計量自体やそれをベースとした推定方法にも当然誤差が含まれている．これら排出量推定の不確定性を低減する可能性が，データ同化手法にはある．データ同化の大きな特徴の 1 つとして，基本的に物理化学法則に則って構築されている数値モデルを介することにより，直接観測されない物理量を推定することができることが挙げられる．この特徴を用いて，エアロゾル排出量を逆推定することが原理的に可能である．

SPRINTARS は，MIROC のみではなく，CCSR/NIES/RIGC の地球システムモデルである MIROC-ESM（Kawamiya et al., 2005）や，全球雲解像モデル NICAM（Satoh et al., 2008）にも導入されている．地球システムモデルには，大気エアロゾルモデルや大気化学モデルの他，海洋化学生物モデル・炭素循環モデル・動態植生モデル等が結合しており，IPCC AR5 では主要な役割を果たすであろう．NICAM は地球シミュレータを利用して全球水平解像度 3.5 km の非静力学モデルとして開発されてきたが，次世代スーパーコンピュータでも運用予定となっており，次世代気候モデルとしての地位を確立していくものと思われる．NICAM に SPRINTARS を導入したシミュレーションをテスト的に計算したところ，GCM と比較して，雲粒有効半径の分布や，エアロゾル量と雲水総量との関係が，衛星観測値に近い傾向を示すことが確認されている（Suzuki et al., 2008）．

SPRINTARS ホームページ（http://sprintars.net/）では，1980 年以降のシミュレーション結果を閲覧できる他，エアロゾル分布週間予測を毎日更新・公開している（竹村，2009）．予測のページは，専門家向けの「詳細版」と一般向けの「簡易版」とがあり，簡易版の日本語ページでは，エアロゾルの種類を黒色炭素・有機炭素・硫酸塩エアロゾルの合計である「大気汚染粒子」と，土壌性エアロゾルである「黄砂」とに大別し，東アジア域の週間予測動画を掲載している他に，日本を 12 地域におおよそ分割して，「少ない」「やや多い」「多い」「非常に多い」の 4 段階で分かり易く表示している．

4．おわりに

地球システムモデル MIROC-ESM には，上述の通り，大気圏と生物圏の相互作用が導入されている．観測

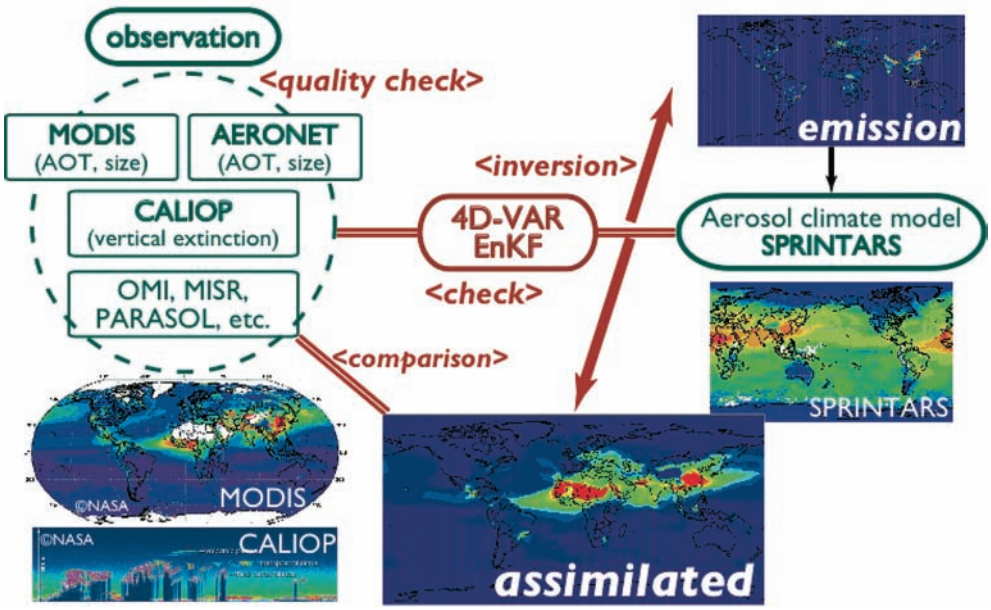

図 3：SPRINTARS へのデータ同化手法適用の概念図．

とともに地球システムモデルを用いた研究が推進されることにより，当該分野の地球規模の現象に関して，定量的な評価が向上するものと思われる．

エアロゾルの気候に対する影響の評価に大きな不確定性があるということは，裏を返せば，研究すべき余地がまだまだあるということであり，特に若手研究者の積極的で質の高いアクティビティーが求められるところである．エアロゾルが気温や水循環にどのような変化をもたらすかを定量的に評価することで，精度の高い気候変動の将来予測，ひいては気候システム形成の解明という大きな課題に貢献することが期待できる．

略語一覧

AeroCom：全球エアロゾルモデル相互比較プロジェクト（http://nansen.ipsl.jussieu.fr/AEROCOM/）．モデル間の相互比較やリモートセンシング観測との比較を通して，エアロゾルの気候影響評価やモデルの不確定性の現状把握を行っている．

AERONET（Aerosol Robotic Network）：受動型センサであるサンフォトメータを用いてNASA Goddard Space Flight Centerが中心となり展開しているエアロゾルのリモートセンシング観測網．

AR4（4th Assessment Report）：IPCC第4次評価報告書．

AR5（5th Assessment Report）：IPCC第5次評価報告書．

CALIOP（Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization）：NASA CALIPSO衛星に搭載されたレーザーレーダー（ライダー）．エアロゾルの鉛直分布の観測が可能．

GCM（General Circulation Model）：大循環モデル．大気大循環モデル（AGCM）と海洋大循環モデル（OGCM）とで構成される．

IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）：気候変動に関する政府間パネル．世界気象機関（WMO）と国連環境計画（UNEP）とにより1988年に設立．

LGM：最終氷期極大期．現在から最も近い氷期において最も寒冷であった時期．

MIROC：東京大学気候システム研究センター（CCSR）／国立環境研究所（NIES）／海洋研究開発機構地球環境変動領域（RIGC）（旧：地球環境フロンティア研究センター（FRCGC））が開発した大循環モデル．

SPRINTARS（Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species）：全球エアロゾル輸送・気候モデル（http://sprintars.net/）．大気浮遊粒子状物質（エアロゾル）による気候システムへの影響及び大気汚染の状況を地球規模でシミュレートするために開発された数値モデル．

MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer）：NASA Terra/Aqua衛星に搭載された多波長受動センサ．

NICAM（Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model）：東京大学気候システム研究センター（CCSR）／海洋研究開発機構（JAMSTEC）により開発されている全球雲解像モデル（http://nicam.jp/hiki/）．

SKYNET：日本のコミュニティーが中心となりアジア域に展開しているエアロゾル・雲・放射観測網（http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/）．

WG1：IPCC第1作業部会．気候変動を科学的に評価する部会．

謝辞

SPRINTARSを用いた研究は，主に国立環境研究所スーパーコンピュータシステムを利用しています．本稿の内容の一部は，文部科学省科学研究費補助金（21681001），環境省地球環境総合推進費（RF-091），三井物産環境基金（R08-D035）の支援を受けています．

参考文献

Ackerman, T. P. (1988), Aerosol in climate modeling, in *Aerosols and Climate*, edited by P. V. Hobbs, and M. P. McCormick, A. Deepak Publishing, 335–348.

Albrecht, B. A. (1989), Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness, *Science*, **245**, 1227–1230.

Charlson, R. J., S. E. Schwarz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley Jr., J. E. Hansen, and D. J. Hofmann (1992), Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, **255**, 423–430.

Hansen, J., M. Sato, and R. Ruedy (1997), Radiative forcing and climate response, *J. Geophys. Res.*, **102**, 6831–6864.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001), *Climate Change 2001: The Physical Science Basis*, edited by J. T. Houghton et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007), *Climate Change 2007: The Scientific Basis*, edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignorand, and H. L. Miller, Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA 996 pp.

Kawamiya, M., C. Yoshikawa, T. Kato, H. Sato, K. Sudo, S. Watanabe, and T. Matsuno (2005), Development of an Integrated Earth System Model on the Earth Simulator, *J. Earth Sim.*, **4**, 18–30.

Kinne, S., M. Schulz, C. Textor, S. Guibert, Y. Balkanski,

S. E. Bauer, T. Berntsen, 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. Kirkevag, 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, O. 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.

Lohmann, U., and J. Feichter (2005), Global indirect aerosol effects: a review, *Atmos. Chem. Phys*., **5**, 715–737.

中島映至，竹村俊彦（2009），放射強制力，*天気*，**56**，997–999.

Penner, J. E., J. Quaas, T. Storelvmo, T. Takemura, O. Boucher, H. Guo, A. Kirkevag, J. E. Kristjansson, and O. Seland, 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. Kristjansson, X. Liu, Y. Balkanski, L. J. Donner, P. A. Ginoux, P. Stier, J. Feichter, I. Sednev, S. E. Bauer, D. Koch, R. G. Grainger, A. Kirkevag, T. Iversen, O. 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. Comp. 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. Kirkevag, X. Liu, V. Montanaro, G. Myhre, J. E. Penner, G. Pitari, S. Reddy, O. 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.

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.

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), imulation of future aerosol distribution, radiative forcing, and long-range transport in east Asia, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **79**, 1139–1155.

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**, 333–352.

Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima, and T. Nakajima, Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model (2005), *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., 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.

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.

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. Kirkevag, J. E. Kristjansson, M. Krol, A. Lauer, J. F. Lamarque, X. Liu, V. Montanaro, G. Myhre, J. Penner, G. Pitari, S. Reddy, O. 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.

Textor, C., M. Schulz, S. Guibert, S. Kinne, Y. Balkanski, S. Bauer, T. Berntsen, T. Berglen, O. Boucher, M. Chin, F. Dentener, T. Diehl, J. Feichter, D. Fillmore, P. Ginoux, S. Gong, A. Grini, J. Hendricks, L. Horowitz, P. Huang, I. S. A. Isaksen, T. Iversen, S. Kloster, D. Koch, A. Kirkevag, J. E. Kristjansson, M. Krol, A. Lauer, J. F. Lamarque, X. Liu, V. Montanaro, G. Myhre, J. E. Penner, G. Pitari, S. Reddy, O. Seland, P. Stier, T. Takemura, and X. Tie (2007), The effect of harmonized emissions on aerosol properties in global models - an AeroCom experiment, *Atmos. Chem. Phys*., **7**, 4489–4501.

Twomey, S. (1974), Pollution and the planetary albedo, *Atmos. Environ*., **8**, 1251–1256.

弓本桂也，竹村俊彦，江口健太，鵜野伊津志(2009)，エアロゾル輸送モデルとデータ同化，*エアロゾル研究*，**24**，256–261.