

204:102:301:306 (エアロゾル; 分野横断研究; 学際研究)

## 2. 大気エアロゾルの気候影響評価

竹村俊彦\*

### 1. エアロゾルの気候に対する影響

大気浮遊粒子状物質 (エアロゾル) には様々な種類が存在するが、代表例として、すす (黒色炭素)・有機物・二酸化硫黄から生成される硫酸塩・土壌粒子・海塩粒子が挙げられる。エアロゾルは、環境行政上、SPM (suspended particle matter) と呼ばれており、粒子の直径により PM10 (直径10 $\mu$ m 以下、厳密には空気動力学径10 $\mu$ m で捕集効率50%) や PM2.5 などと分類されることがある。四日市ぜんそくの主要原因が硫酸塩エアロゾルであったことから理解できるように、エアロゾルは主に呼吸器系に影響を及ぼす。また、光化学スモッグ発生時に白く霞んで見えるのはエアロゾルが原因であることからわかるように、視程悪化も招く。

こういった直感的に捉えやすいエアロゾルの特徴は、粒子の種類に応じて様々な過程を経ながら多様に変化しつつ、気候変動に対しても大きな影響をもたらすと考えられている。そのメカニズムは大別して2つに分けられる。1つ目の効果は、太陽放射や赤外放射を散乱したり吸収したりして、地表や大気を冷やしたり暖めたりする「直接効果」である (例えば Charlson *et al.* 1992)。エアロゾルが多いと大気が霞むということは、太陽光の散乱が大きくなっているということなので、直接効果は直感的に理解できるであろう。また、放射を吸収するエアロゾル (例えば黒色炭素) が存在すると、周辺大気が加熱して大気安定度が変化し、雲

生成に影響を及ぼす「準直接効果」という仮説も提唱されている。2つ目の効果は、雲・降水粒子を介した「間接効果」と呼ばれるものである。雲・降水過程においてエアロゾルは凝結核および氷晶核としての重要な役割を果たしているため、エアロゾルが増減すれば当然雲や降水・降雪の特性にも変化が生じる<sup>†1</sup>。間接効果は、さらに2つに分けることができる。まず、エアロゾル数の増減に伴って雲粒や氷晶の個数とサイズが変化して雲の反射率が変わることを第1種間接効果と言う (例えば Twomey *et al.* 1984)。さらにエアロゾル数の増減に伴う雲粒や氷晶の個数とサイズの変化は、雲から降水・降雪へ成長する速度も変化させる。この降水粒子の成長速度に対する効果を第2種間接効果と言う (例えば Albrecht 1989)。以上のエアロゾルの気候に対する影響に関する定性的図説は、IPCC (2007) の Figure 2.10 が分かり易い。

これらの効果は、気候変動を評価するための重要な指標の1つである「放射強制力」において大きな値を持つ。「放射強制力」とは、対流圏界面 (もしくは大気上端や地表面) における太陽放射や赤外放射のエネルギー収支の変化量で定義される。この量を対象物質ごとに見積もることで様々な物質の気候変動に対する相対的な重要度が議論されている。一般的に放射強制力が正の値であれば地球・大気系を暖め、負の値であれば冷やすことになる。国際的な気候変動問題への対応策の科学的根拠資料となる「気候変動に関する政府間パネル (IPCC; Intergovernmental Panel on Cli-

\* 九州大学応用力学研究所。  
toshi@riam.kyushu-u.ac.jp  
© 2010 日本気象学会

<sup>†1</sup> 層積雲との関係については、この後の増永 (2010) による解説を参照のこと。

mate Change)<sup>†2</sup>」評価報告書では、対流圏界面での放射収支の変化を放射強制力と定義している。IPCCの最新評価報告書である第4次評価報告書(AR4; IPCC 2007)において、1750年から2005年にかけての二酸化炭素の増加に伴う放射強制力は全球平均で $+1.66 \text{ Wm}^{-2}$ と評価されているのに対し、エアロゾル量の変化に伴う放射強制力は合計(直接効果+第1種間接効果)で $-1.2 \text{ Wm}^{-2}$ と評価されており、気候変動を理解する上で、エアロゾルは無視できない存在であることを示している。しかし、増加した二酸化炭素による放射強制力は $+1.49 \sim +1.83 \text{ Wm}^{-2}$ と見積もられ、推定の誤差幅が $0.34 \text{ Wm}^{-2}$ なのに対し、増加したエアロゾルによる放射強制力の推定誤差幅は、直接効果が $-0.9 \sim -0.1 \text{ Wm}^{-2}$ と $0.8 \text{ Wm}^{-2}$ 、第1種間接効果が $-1.8 \sim -0.3 \text{ Wm}^{-2}$ と $1.5 \text{ Wm}^{-2}$ 、第2種間接効果が $-1.4 \sim -0.3 \text{ Wm}^{-2}$ と $1.1 \text{ Wm}^{-2}$ であり、依然として不確定性が大きいのが現状である。こういった気候に対する影響の定量的な評価の困難さは、エアロゾルが二酸化炭素のような物質に比べて時空間分布の変動が圧倒的に大きく、様々な化学組成・粒径に依存して大気放射の散乱・吸収や雲凝結核・氷晶核への寄与が異なってくることなどに起因している。

## 2. エアロゾルの観測とモデリングの現状

放射強制力を始めとしたエアロゾルの気候影響の評価は、モデルによるシミュレーションや人工衛星・地上等から得られた観測データによって行われている。前節で述べた通り、IPCC AR4においても依然としてエアロゾルの気候影響評価の不確定性が大きいことは事実であるが、研究の進展に伴い、評価の信頼度は着実に向上してきている。

まず、衛星観測研究としては、受動センサ(AVHRR, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)<sup>†3</sup>, MISR, POLDER, TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)<sup>†4</sup>等)から得られるデータの解析(リトリバル)により、エアロゾルや雲の全球水平分布の特性を把握する研究が推進されている。特に、AVHRRは1981年から、MODISは2001年から観測を継続しており、エアロゾル光学的

厚さやオングストローム指数(粒径の指標)の比較的長期のトレンドが検出可能となってきた(Mishchenko *et al.* 2007)。TOMSは紫外線を吸収するエアロゾル(黒色炭素や土壌粒子)のみ検出可能ではあるが、1978年から全球分布が得られている。地上からのエアロゾル観測としては、米国航空宇宙局(NASA)/GSFC(Goddard Space Flight Center)が中心となり運用しているリモートセンシング観測網AERONET(Aerosol Robotic Network)<sup>†5</sup>があり、世界300地点以上で観測が行われている。サンフォトメータという測器を用いて、エアロゾルの光学的厚さ・オングストローム指数・1次散乱アルベド・粒径分布等が得られる(Holben *et al.* 2001)。また、日本の研究グループがアジア域に展開している大気放射観測網SKYNET<sup>†6</sup>にもエアロゾル・雲の観測が含まれている。このほか、実際にエアロゾルのサンプルを直接採取して、化学組成等を分析する研究も長年行われている。

一方、エアロゾルの全球分布をシミュレートするモデルとして20個ほどが知られており、これらを用いた放射強制力の算出等、エアロゾルの気候影響評価も進められている。ただし、モデル数が多くなって評価の基準も様々なものが出てくると、不確定性をもたらす原因についての議論がかえって混乱する懸念がある。そこで、全球エアロゾルモデル相互比較プロジェクトAeroCom(Global Aerosol Model Intercomparison)<sup>†7</sup>が立案され、モデルの相互比較による現状での不確定性の把握、共通の排出量データを用いるなどの定められた規約に則ったシミュレーションの実施、観測データとの比較などを行っている(Kinne *et al.* 2006; Penner *et al.* 2006; Schulz *et al.* 2006)。AeroComは、世界気候研究計画(WCRP)および地球圏・生物圏国際協同研究計画(IGBP)傘下の大気化学・気候(AC&C)イニシアチブと連携している。また、これらとは別に、エアロゾルと雲の相互作用を詳細にシミュレートするなどのプロセス研究を目的としたモデルも数多く存在する。

<sup>†2</sup> <http://www.ipcc.ch/>

<sup>†3</sup> <http://modis.gsfc.nasa.gov/> ;  
<http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/>

<sup>†4</sup> <http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>

<sup>†5</sup> <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

<sup>†6</sup> <http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>

<sup>†7</sup> <http://nansen.ipsl.jussieu.fr/AEROCOM/> ;  
<http://dataipsl.ipsl.jussieu.fr/AEROCOM/DATA/synthesis.html>

### 3. エアロゾルの気候影響評価の不確定性低減へ向けた今後の展望

前節で述べた通り、最近約10年間で、大気エアロゾルの観測は現場観測・衛星観測ともデータがかなり蓄積されてきており、また、エアロゾルモデルも著しく高度化してきた。しかし、エアロゾルの気候に対する影響の定量的評価には、IPCC AR4における評価の不確定性が示す通り、依然として課題が多い。現在進められている研究の中で、エアロゾルの気候影響評価の不確定性低減に貢献すると考えられる取り組みの主なものを以下に挙げる。

#### 3.1 エアロゾル気候影響シミュレーションのより詳細な解析

エアロゾルが気象場に与える影響を具体的に解析するためのモデルシミュレーションに関する研究は近年になって盛んに行われるようになってきた。しかしながら、多くのパラメタリゼーションを含んだ複数のモデルにより各研究者が個別に研究を進めている段階であり、例えば、エアロゾルの影響による降水量をはじめとした水循環の変化について、定性的な議論を行う段階には達していないなどの問題を抱えている。モデル間の相互比較を含めて、シミュレーション結果のより詳細な解析が求められている。

#### 3.2 エアロゾル・雲の鉛直分布観測

エアロゾルおよび雲の鉛直分布を把握することは、エアロゾル間接効果の解明に重要である他、エアロゾルと雲の相対的な高度が直接効果にも影響することが知られているため、非常に重要である。これまで既に数多く行われてきているのは、航空機を用いてエアロゾル・雲の鉛直分布を測定する観測である。近年では、そういった鉛直分布の観測を国立環境研究所<sup>\*8</sup>やEARLINET (European Aerosol Research Lidar Network)<sup>\*9</sup>等のレーダやライダを用いて地上や船舶から行うことも可能となり、各地域のデータが急速に蓄積されている。さらに、CloudSat<sup>\*10</sup>、CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)<sup>\*11</sup>、EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)<sup>\*12</sup>等の人工衛星搭載の能動センサにより、広域的な3次元分布

をとらえる観測が開始もしくは計画されている。これらのデータとエアロゾルモデルとの比較も行われ始めている (例えば Okamoto *et al.* 2008; Uno *et al.* 2009)。

#### 3.3 雲解像モデルへのエアロゾル過程の導入

計算機リソースの問題等から、雲解像モデルにエアロゾル輸送過程を導入することは今まで非常に困難であった。しかし、例えば日本においては、全球雲解像モデルNICAM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model)<sup>\*13</sup> (Satoh *et al.* 2008) にエアロゾル気候モデル SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species)<sup>\*14</sup> (Takemura *et al.* 2000, 2005) が組み込まれ、水平解像度3.5kmのシミュレーションが試みられている。将来的には、雲を比較的陽に表現できる雲解像モデルを用いて、雲・エアロゾル相互作用のシミュレーションが行われ、その気候影響評価の不確定性が低減されていくことが期待される。

#### 3.4 モデルでの氷晶核プロセスの考慮

現在のほとんどの気象・気候モデルでは、エアロゾルの氷晶核としての機能を考慮していない氷雲のパラメタリゼーションが行われている。氷雲の微物理プロセス自体に解明されていない部分が多いが、氷雲量や氷晶粒径が氷晶核の数や化学的特性に依存していることが観測的事実から指摘されている (Pruppacher and Klett 1997)。このため、これらを可能な限り適切に表現できるパラメタリゼーションを気候変動シミュレーションに導入することが求められている。

#### 3.5 データ同化手法を用いたモデルの精度向上及びエアロゾル排出量の推定

エアロゾルの観測データをモデルで利用する従来の方法は、シミュレーション結果を観測値と比較してモデルを改良するというのが一般的であった。しかし、4次元変分法やアンサンブル・カルマンフィルタといったデータ同化手法<sup>\*15</sup>を用いて観測値とモデルを融合することは、高い精度を求められる過去の短・中期 (数日～数年) のシミュレーションや予報シミュレーションには非常に有効であると考えられる。また、エアロゾルモデルで不確定性の最も高い要素の1

\*8 <http://www-lidar.nies.go.jp/>

\*9 <http://www.earlinet.org/>

\*10 <http://cloudsat.atmos.colostate.edu/>

\*11 <http://www-calipso.larc.nasa.gov/>

\*12 <http://www.jaxa.jp/projects/sat/earthcare/>

\*13 <http://nicam.jp/hiki/>

\*14 <http://sprintars.net/>

\*15 4次元変分法やアンサンブル・カルマンフィルタなどについては、この後の三好 (2010) による解説を参照のこと。

つが、データベースの入力やモデル内部での計算による排出量の時空間分布であるが、データ同化手法を使って逆推定する試みも行われつつある (Yumimoto *et al.* 2008).

### 3.6 氷期・間氷期スケールの気候形成におけるエアロゾルの効果に関する研究

乾燥域から大気中に舞い上がる土壌粒子は、土壌水分低下・乾燥域拡大・海面低下による陸地拡大・強風などにより、間氷期よりも氷期の方が多かったと推測されている。そうした推測は、氷床コアや海洋堆積物のデータからも裏付けられている (Petit *et al.* 1999)。したがって、土壌粒子の直接・間接効果による気候影響は、氷期と間氷期とでは定量的に大きく異なると考えられる。また、土壌粒子に含まれる鉄分は海洋植物の栄養分となることから、土壌粒子の沈着量が增大することにより氷期における大気中の二酸化炭素濃度の低下に寄与していた可能性が示唆されている (Bopp *et al.* 2002)。さらに、海塩粒子・自然発生的な森林火災起源のエアロゾル・植物起源の気体から生成されるエアロゾルなどは、気象・気候条件に大きく左右されるため、氷期と間氷期との間では定量的に分布が異なると考えられる。極端に気候が異なる状態におけるエアロゾルの気候に対する影響の研究を進めることにより、本質的な理解と現代の気候変動の定量的評価が向上する可能性がある。

以上列挙したように、エアロゾルの気候影響評価に関する研究課題は数多く残されており、今後ますます精力的な取り組みが求められている。

### 参考文献

- Albrecht, B. A., 1989 : Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, **245**, 1227-1230.
- Bopp, L., K. E. Kohlfeld, C. Le Quéré and O. O. Aumont, 2002 : Dust impact on marine biota and atmospheric CO<sub>2</sub> in glacial periods. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**, A91.
- Charlson, R. J., S. E. Schwartz, 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.
- Holben, B. N., D. Tanre, 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, 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, 996 pp.
- 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. 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, 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.
- 増永浩彦, 2010 : 層積雲 : 気象と気候をつなぐ「失われた環」. *天気*, **57**, 204-207.
- Mishchenko, M. I., I. V. Geogdzhayev, W. B. Rossow, B. Cairns, B. E. Carlson, A. A. Lacis, L. Liu and L. D. Travis, 2007 : Long-term satellite record reveals likely recent aerosol trend. *Science*, **315**, 1543.
- 三好建正, 2010 : データ同化への誘い, *天気*, **57**, 208-211.
- Okamoto, H., T. Nishizawa, T. Takemura, K. Sato, H. Kumagai, Y. Ohno, N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui and T. Nakajima, 2008 : Vertical cloud properties in the tropical western Pacific Ocean : Validation of the CCSR/NIES/FRCGC GCM by shipborne radar and lidar. *J. Geophys. Res.*, **113**, D24213, doi : 10.1029/2008JD009812.
- Penner, J. E., J. Quaas, T. Storelvmo, T. Takemura, O. Boucher, H. Guo, A. Kirkevåg, J. E. Kristjansson and O. Seland, 2006 : Model intercomparison of indirect aerosol effects. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 3391-3405.
- Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Rits, E. Saltzman and M. Stievenard, 1999 : Climate and

- atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, **399**, 429-436.
- Pruppacher, H. R. and J. D. Klett, 1997 : *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Kluwer Academic Publishers, 954pp.
- 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, doi : 10.1016/j.jcp.2007.02.006.
- 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.
- 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. 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.
- Twomey, S., M. Piepgrass and T. L. Wolfe, 1984 : An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo. *Tellus*, **36B**, 356-366.
- 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, doi : 10.1038/ngeo583.
- Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu and D. M. Winker, 2008 : Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 2869-2884.
-