

大気エアロゾルの環境への影響評価 — 気候変動と大気汚染 —

Influence of atmospheric aerosols on the environment
— Climate change and air pollution —

九州大学応用力学研究所 竹村 俊彦
Kyushu University Toshihiko Takemura

Suspended particle matters (aerosols) cause air pollution and then respiratory and circulatory diseases and poor visibility. Aerosols also affect the climate system through the direct, semi-direct, and indirect effects. As a whole, they cool the atmosphere against effects of greenhouse gases. In this review, recent trans-boundary air pollution from the East Asian continent to Japan and mechanisms of aerosol effects on the climate system are explained.

1. はじめに

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。代表例として、すす（黒色炭素・ブラックカーボン）・有機物・土壌粒子・海塩粒子・硫酸化合物から生成される硫酸塩・窒素化合物から生成される硝酸塩などが挙げられる。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（定義は空気動力学直径 $10\mu\text{m}$ で捕集効率が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。PM2.5は肺から血中に取り込まれて、循環器疾患を引き起こすとも言われている。また、大気汚染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。

以上のように、エアロゾルは大気環境を悪化させる物質であるとともに、気候変動を引き起こす物質でもある。世界各国・各組織での地球温暖化対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) から公表される評価報告書によると、エアロゾルはトータルとして温暖化を相殺する物質であり、気候変動の正確な評価のためには欠かすことのできない要素であることが示されている¹⁾。しかし、長寿命の温室効果気体 (CO_2 , N_2O 等)とは異なり、エアロゾルは時空間分布に大きな不均一性を持っていたり、エアロゾルの気候に対する影響のプロセスは多岐にわたったりすることから、定量的評価の不確実性が高いのが現状である。したがって、今後も研究を促進させていかなければならない分野である。

本稿では、大気中のエアロゾルの環境への影響に関して、気候に対する影響のメカニズムと近年の日本への越境大気汚染について、筆者のこれまでの研究とともに解説する。

2. 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、大別すると3つ挙げられる。1つは、エアロゾルが太陽放射や地表面・大気から射出される赤外放射を散乱したり吸収したりすることにより、大気系の放射収支が変化する「直接効果」である。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系を冷却するが、黒色炭素は太陽放射・赤外放射を効率良く吸収するため大気系を加熱する。2つ目は、「間接効果」である。エアロゾルは水雲の核（凝結核）や氷雲の核（氷晶核）となるが、もし雲水の質量が変化せずにエアロゾル数が増加すると、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）。そして、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、雲量が増える（これを「第2種間接効果」や「雲寿命効果」と呼ぶ）。また、土壌粒子や黒色炭素といった氷晶核となり得るエアロゾルが増加すると、過冷却状態にあった雲粒の凍結が促進されて氷晶となる。氷晶は、雲粒よりも降水・降雪への成長が早いため、氷晶核の増減により雲量が増えたと考えられる。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鉱物粒子による「準直接効果」である。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ている。

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。これは、気候に影響を及ぼす因子(気候強制因子)の量が変化した場合の、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。基本的に、大気の運動は、エネルギー収支、すなわち放射収支の不均衡を是正するために起こるものであるから、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。また、各気候強制因子は、それぞれ気候に作用するプロセスが異なるが、放射強制力は、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便利な指標でもある。放射強制力が正の値の場合は、地球表面および大気にエネルギーが入り過ぎていることを示しており、一般的に大気は温暖化する。負の値の場合は、その逆である。IPCC第4次評価報告書(AR4)¹⁾によると、長寿命温室効果気体(CO₂, CH₄, N₂O, 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、対流圏界面で+2.64 W m⁻²と評価されており、その評価の不確か率は10%と非常に小さい。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、それらの不確か率の幅は、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。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エアロゾルによる放射収支のトータルの変化を、IPCC AR4では-0.2~-2.3 W m⁻²と評価した。また、準直接効果の放射収支の変化は、IPCC AR4では独立した評価はなされていない。

筆者は、地球規模のエアロゾルの輸送および気候影響をシミュレートする数値モデルSPRINTARS (<http://sprintars.net>)を開発してきた²⁻⁵⁾。SPRINTARSは、大気中のエアロゾルの輸送過程(発生・移流・対流・拡散・変質・沈着)を計算するとともに、上述のエアロゾルの気候影響を大気大循環モデルと結合して計算する。SPRINTARSを用いて、人為起源エアロゾルの直接効果放射強制力を-0.1 W m⁻²、水雲に対する間接効果放射

強制力は-0.9 W m⁻²と評価し⁴⁾、IPCC AR4での評価に貢献した。その後、SPRINTARSでは、エアロゾルの氷晶核としての機能を考慮するように改良された⁵⁾。また、人為起源黒色炭素の準直接効果放射強制力を全球平均+0.1 W m⁻²未満と評価した⁶⁾。

3. 近年の東アジア域での越境大気汚染

日本では、高度経済成長の副作用として各地で公害が社会問題となり、現在も訴訟が継続中の事例もある。しかし、様々な技術革新および施策により日本周辺の環境改善が図られ、一定の成果があげられた。一方、特にここ数年来、日本の大気環境の悪化が西日本を中心に顕著となっている。周囲に大規模な工場や幹線道路が無い離島でも大気が頻りに霞んだり、夏季よりも春季に光化学スモッグが発生しやすかったりすることなどから、越境汚染による影響が強いと考えられている。

気象庁では、エアロゾルによる視程悪化の際に、「煙霧」を観測することになっている。煙霧とは、相対湿度75%未満(この条件で霧を排除する)、視程10km未満の状態のことを指している。定義上は黄砂現象も煙霧に含まれることになるが、風上側での目視による黄砂現象の観測、および限られた観測点での能動センサ(ライダー)を用いた観測による黄砂の特徴(エアロゾルの非球形を示す高い偏光解消度)の検出を参照して、気象庁では黄砂と煙霧とを分別して発表するように努力している。筆者らは、過去20年の日本各地での煙霧と黄砂の観測時間の経年変化を解析し、特に九州において2000年あたりから煙霧の観測時間が上昇して、現在も長い観測時間が保たれていることを示した⁷⁾。一方、東京や大阪における煙霧の観測時間は、急激に減少していることがわかった。これらのことは、近年の日本での大気汚染は、ローカルな発生源ではなく、越境汚染が大きな要因を占めていることを強く示唆している。東アジア域の越境大気汚染については、約10年前から指摘されている⁸⁻⁹⁾。

大気汚染物質の濃度に関して、各国で物質ごとに環境基準が定められている。日本においては、例えば光化学オキシダントは、1時間値0.06ppm以下が環境基準であり、また、0.12ppm以上で光化学スモッグ注意報、0.24ppm以上で光化学スモッグ警報が該当自治体から発令されることになっている。一方、エアロゾルの環境基準は、PM10として、1時間値200μg/m³以下かつ1日平均値100μg/m³以下と定められているが、注意報・警報基準はないため、市民に注意喚起するためのシステムが確立されていない。

ただし、現在の日本において、PM10濃度がこれらの環境基準を超えるのは、基本的には非常に濃度の高い黄砂が飛来する場合だけしか考えられない。しかし、人為起源が多くを占め、肺胞など気道より奥に付着するため人体への影響が大きいと考えられているPM2.5（微小粒子状物質）に特化した環境基準は、1日平均値 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下かつ1年平均値 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下と2009年に定められたばかりであり、環境省測定局に順次測器を設置している途中である。注意報・警報基準が定められていない物質に関しては、高濃度時に受動的に情報を受け取ることは容易ではないが、黄砂および煙霧・光化学スモッグのリアルタイム観測情報や予測情報は、黄砂情報提供ホームページ (<http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/kosateikyoku/kosa.html>) および光化学オキシダント関連情報提供ホームページ (<http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/oxidant/>) にて得ることができる。

SPRINTARSは、前節で述べたとおり、大気エアロゾルによる気候変動を評価するために開発を進めてきたが、応用利用として、エアロゾル分布の週間予測システムを開発して運用している (<http://sprintars.net/forecastj.html>)¹⁰⁾。

4. おわりに

エアロゾルの大気中での輸送をシミュレートする数値モデルは、福島第一原子力発電所事故による放射性物質の放出事象に関して、応用的に利用された。その結果は、東日本スケールから全球スケールまで、すでに公表されている^{11),12)}。また、大規模火山噴火などの突発的事象にも、こういった数値モデルを適用できる。

エアロゾルの観測データを数値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数値モデルを改良するというのが一般的であった。しかし、データ同化手法を用いて、エアロゾルの観測値を数値モデルへ直接導入してシミュレーションを行うことが可能となってきた。これは、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測シミュレーションには非常に有効であると考えられる。SPRINTARSへのデータ同化手法の導入が進み¹³⁾、現在進めている内閣府「最先端・次世代研究開発支援プログラム」研究課題である「数値モデルによる大気エアロゾルの環境負荷に関する評価および予測の高精度化」（2010–2013年度）において、エアロゾル予測システムへもデータ同化手法を導入すべく研究を進めている。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, 996 pp., http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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, doi:10.5194/acp-9-3061-2009.
- 6) 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, doi:10.2151/sola.2011-046.
- 7) 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.
- 8) Takemura, T., I. Uno, T. Nakajima, A. Higurashi, and I. Sano, 2002: 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.
- 9) 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**(D23), 8659, doi:10.1029/2002JD003210.
- 10) 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.
- 11) Takemura, T., H. Nakamura, M. Takigawa, H. Kondo, T. Satomura, T. Miyasaka, and T. Nakajima, 2011: A numerical simulation of global transport of atmospheric particles emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Scientific SOLA*, **7**, 101–104, doi:10.2151/sola.2011-026.
- 12) Morino, Y., T. Ohara, and M. Nishizawa, 2011: Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G11, doi:10.1029/2011GL048689.
- 13) 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.