

102:204:306:402 (エアロゾル直接効果；
エアロゾル間接効果；放射強制力)

3. 気候問題にかかわるエアロゾルの 直接・間接のシグナルについて

中 島 映 至*

1. エアロゾルの放射強制力

大気汚染が引き起こす著しい気候影響は、近年、広く理解され始めた。しかし、汚染物質は大気滞留時間が短いために、アジア域等の大規模な汚染域における分布は非常に不均質であり、また変動も激しい。そのために、その気候影響評価には、未だに大きな不確実性がある (Forster *et al.* 2007)。最近の研究によると、このような気候影響には様々なものがあることがわかる。対流圏オゾンをはじめとする微量気体は顕著な温室効果を示す。またエアロゾルの生成に影響を与えたり、雲水の酸性化を引き起こしたりする。エアロゾルは、太陽放射や地球放射を直接、散乱・吸収・射出し、地球放射収支を変化させる直接気候影響を及ぼす。近年の数十年の期間にわたって、アジア域等では地表面において太陽放射量が減少するいわゆる薄暮効果 (Dimming effect) や逆に増加する払暁効果 (Brightening effect) が起こっているいくつかの証拠がある。同時に、エアロゾルは様々な間接効果によって、放射収支、温度、雲量、降雨等が変化することが指摘されている (Wild *et al.* 2005; Che *et al.* 2005; Qian *et al.* 2006)。IPCC 第4次評価報告書では、放射強制を引き起こす間接効果として第1間接効果あるいはトゥミー効果 (Twomey *et al.* 1984) が挙げられている。この効果は、雲水総量が増加しない仮定のもとに、エアロゾルが雲核として働いた場合に起こる雲粒子数の増加と有効雲粒子半径の減少によって生じる雲の光学的厚さ、および雲反射率の増加を指す。また、有効粒子半径の減少に伴って降雨効率が増加するために、雲の寿命が伸び、雲水総量が増加する第2間接効果、あるいは雲寿命効果がある (Albrecht 1989)。

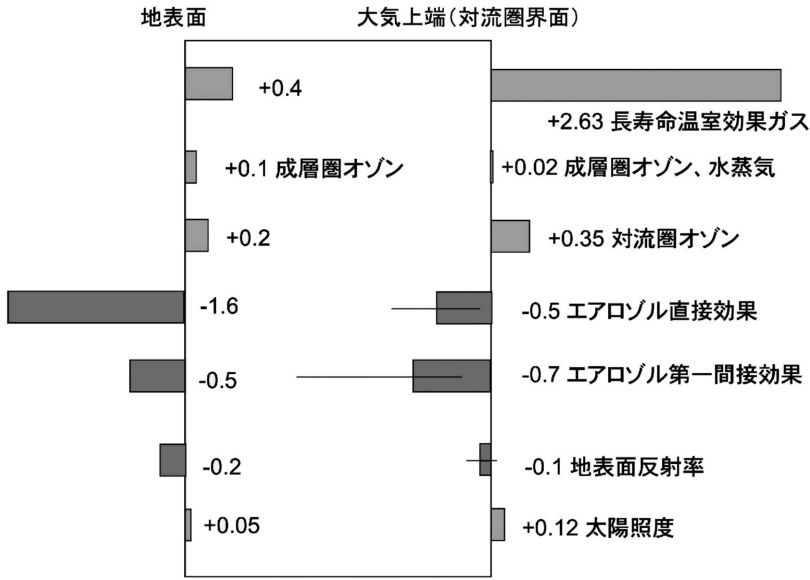
IPCC 第4次評価報告書では、雲寿命効果は気候強制力 (駆動力) ではなくフィードバックとして分類されている。しかし、この効果によって雲反射率が増加する時間スケールは1週間以内であり、そのような変化がさらに気候システムへ影響を与えることを考えると、気候強制として扱うべきであると思われる。

第1図には大気上端と大気下端における1750年から2005年までの様々な気候強制要因による放射強制力を示す。対流圏オゾンが引き起こす放射強制力は $+0.35 \text{ Wm}^{-2}$ 程度である。大気上端におけるエアロゾルの放射強制力は、直接効果は黒色炭素のために -0.5 Wm^{-2} 程度と小さく、むしろ、第1間接効果によって産業革命以降、雲が光学的に厚くなり、明るくなっている効果が著しいとされている。しかし、ここには含まれない第2間接効果による効果も無視できないために、これらの合計は、温室効果ガスの放射強制力約 $+3.0 \text{ Wm}^{-2}$ の半分 ($+1.5 \text{ Wm}^{-2}$) にも及ぶ可能性があり、その場合は、現在評価されているエアロゾル効果だけでは地球は冷えずぎてしまう。従って、まだ詳細に評価されていない種々の間接効果まで含めて、エアロゾルの気候影響を今後、より正確に評価する必要がある。また、第1図は大気下端 (地表面) においてはエアロゾルの負の放射強制力が温室効果ガスによる正の放射強制力よりも絶対値で非常に大きい。特に、アジア域の各地域では第2図に示すように、 -10 Wm^{-2} を超える放射強制力が働いている。このような領域スケールの地表面日射の減少や大気の加熱によって、大気の安定度の変化や水平方向のエネルギー収束・発散が起こる。

大気汚染物質によるこのような大きな放射強制力は、アジア域等におけるエアロゾルの大きな光学的厚さと小さな一次散乱アルベドに起因している。特に、アジア域では乾燥域からの土壌性エアロゾルと大気汚

* 東京大学大気海洋研究所。

© 2011 日本気象学会

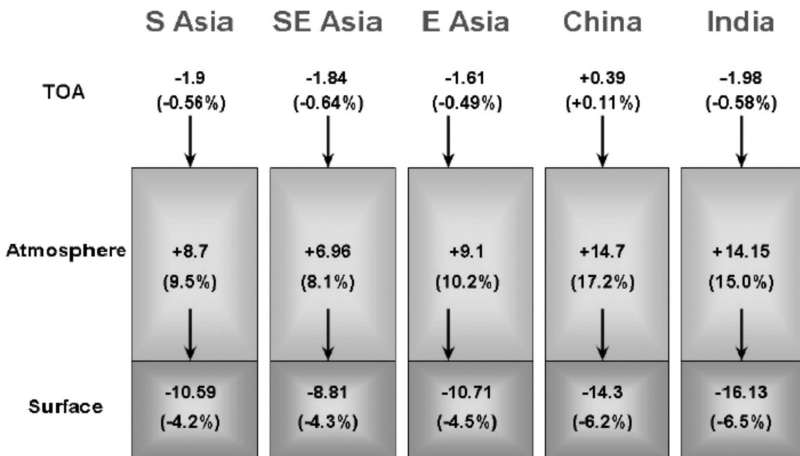


第1図 種々の気候変化要因による大気上端(実際には対流圏界面)(右)と地表面(左)の放射強制力(Wm⁻²), 1750年から2005年の期間の値。大気上端の値はIPCC第4次評価報告書によるもの、地表面の値は我が国のMIROC気候モデルによる算定値で、誤差幅は付けていない。(日本学術会議 2009)

AIRE, Pearl River Delta 実験などの大規模な総合観測が行われている。その中で、ダストエアロゾルが卓越するときに放射強制力の効率因子(波長500 nmにおける単位エアロゾル光学的厚さ当たりの放射強制力)が100 Wm⁻²を超える(通常は70 Wm⁻²程度)と言った東アジア域特有の現象が観測されている(Nakajima *et al.* 2007)。この場合は、黒色炭素と土壌粒子の混合状態を詳細に調査しないとわからない(Chuang *et al.* 2003)。現在、このような研究が必要になっている。

2. エアロゾルが引き起こす気候変化

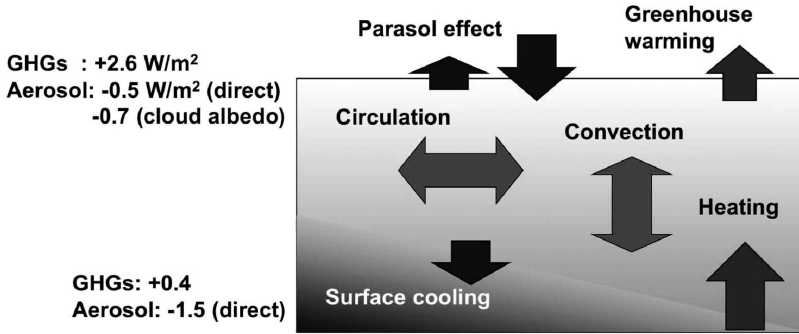
前節でみたように大気汚染物質、特にエアロゾルの放射強制力はきわめて大きい。その上、水平方向にも鉛直方向にもその影響は不均質である。そのために、第3図に模式的に示すように水平方向の循環と対流の変化が起こる(Rosenfeld 2000; Menon *et al.* 2002; Chung and Ramanathan 2007; Mukai *et al.* 2008)。実際に中国域で見られる長期の雲量変化や降雨量変化(Kaiser and Qian 2002; Endo *et al.* 2005; Zhang *et al.* 2007)についても、エアロゾルと温室効果ガス



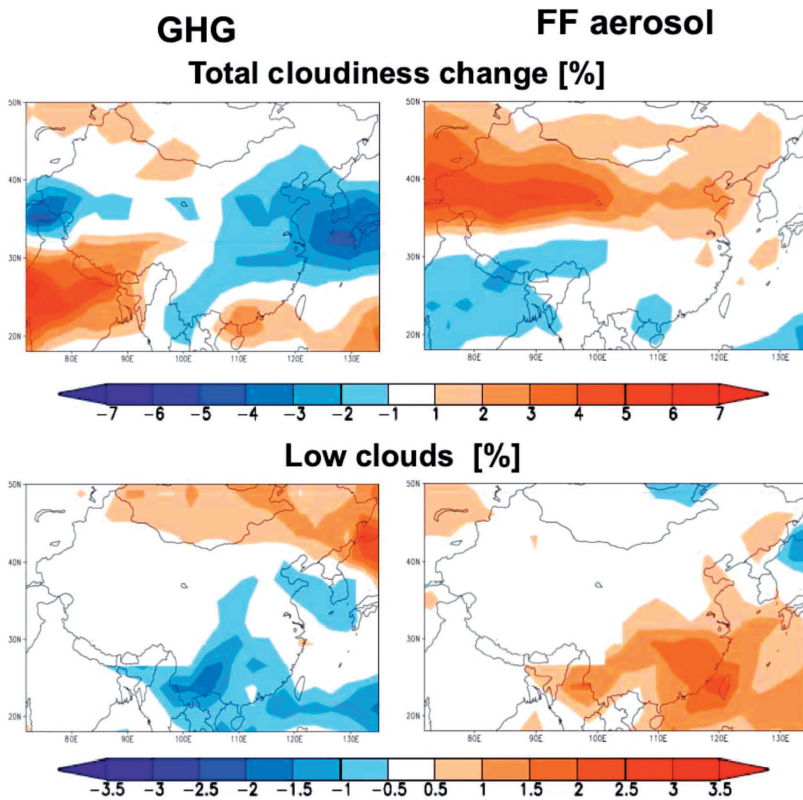
第2図 アジア域におけるエアロゾルの放射強制力(Wm⁻²) (Ramanathan *et al.* 2008)。TOAは大気上端, S Asia, SE Asia, E Asiaはそれぞれ南アジア, 東南アジア, 東アジアを示す。

染物質の混合が顕著であるために、エアロゾルの光学特性も非常に複雑である(Clarke *et al.* 2004; Moteki *et al.* 2007)。そのような汚染状態とその影響を調査するために、アジア域においてINDOEX, ACE-Asia, APEX, ABC-EAREX & APMEX, EAST-

による2つの異なる効果の重なりとして説明する研究がある(Takemura *et al.* 2005; Mukai and Nakajima 2009)。Menon *et al.* (2002)では黒色炭素の直接効果による降雨量の変化メカニズムを提案しているが、この研究では海面温度をあらかじめ与えた実験で



第3図 温室効果ガス (GHG) とエアロゾルの間接効果。地表面の冷却効果は大きな空間不均質性を伴う。



第4図 中国域における全雲量 (上) と下層雲量 (下) の産業革命以降の変化に関する海洋混合層数値実験の結果。人為起源温室効果ガス (GHG) と化石燃料起源エアロゾル (FF aerosol) の有無による感度実験 (Mukai *et al.* 2008)。

許した設定 (mixed layer ocean を導入) によって、地表面温度 (特に海面温度) の低下と大気加熱の両方を通して雲量と降雨の変化が起こるメカニズムを提案している。この場合、エアロゾルが光学的に厚ければ、黒色炭素による大気加熱が存在しなくても雲量と降雨には同様の変化が起こる。このメカニズムを考慮すると、中国域で観測されている雲量変化については第4図に示すように、東中国の南部、中部、北部では異なる雲タイプの変化で説明される。すなわち、南部では第2間接効果によって低層雲の寿命が伸びて、低層雲量が増加するが、大循環の変化により中上層雲量は減少するため、全雲量は減少する。北部ではこの中上層雲の増加が卓越して全雲量は増加する。その中間の中部では、第2間接効果が卓越して全雲量は主に低層雲量の増加によって増加する。

このように領域ごとの雲と降雨変化のメカニズムは複雑である。ただ、このような雲場や降雨場の変化は、実際に観測されたパターンに似ており、熱源・冷源の原因に関わらずモンスーン循環に伴う特徴的な変動パターンを構成している側面があるので、この方

あるために、各種のフィードバックが考慮されておらず、実際に起こっている変化を十分に説明したとは言えない。これに対して Mukai *et al.* (2008) と Mukai and Nakajima (2009) では海面温度の変化を

面から変化を解析することも重要である (Kimoto 2005; Wang 2007)。このような温室効果ガスやエアロゾルの直接・間接の効果を人工衛星から調査するために、エアロゾルの光学的厚さ、オングストローム指

数（エアロゾルの粒径の指標）、雲量、雲光学的厚さ、雲有効粒子半径、雲水総量との相関が調べられているが、これらは未だに、大循環モデルの結果と違いが見いだされている。特に、陸上の雲の間接効果のモデリングは難しい（Kawamoto *et al.* 2004；Nakajima and Schultz 2009）。

3. 結論と提案

- (1) エアロゾルが領域と全球の気候に与える影響には様々なメカニズムがある。我々の理解のレベルは高くない。
- (2) 今後よく調べる必要があるのは、エアロゾルが引き起こす地表面温度の変化を通じた大循環の変化である。
- (3) 観測された雲量、雲特性、降雨量などの時系列は、温室効果ガスとエアロゾルの両方の影響を受けて変化している証拠がある。従って、両方の影響に関するより総合的なモデルシミュレーションとデータ解析が必要である。その場合、土地利用変化の影響も同時に評価する必要がある。Takata *et al.* (2009) によると19世紀における植生変化の影響は大きい。20世紀についても植生、エアロゾル、温室効果ガスの複合効果を調べる必要がある。

以上の点を明らかにするためには次の研究が必要である。

- (a) エアロゾルの物理的、化学的特性のモデリングを改善する必要がある。そのような改善のために観測と室内実験が必要である。
- (b) 領域と全球の気候変化のメカニズムを理解するために、雲とエアロゾルの変化を表現できる非静力学モデルを確立する必要がある。それを通して、雲の形成とエアロゾル・雲相互作用に関するより良いシミュレーションを行う必要がある。
- (c) アジア域のエアロゾル・雲・放射場に関する研究ネットワークを発達させる必要がある。

略語一覧

ABC-EAREX : Atmospheric Brown Clouds - East Asian Regional Experiments (<http://abc-gosan.snu.ac.kr/>)
 ACE-Asia : Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment (<http://saga.pmel.noaa.gov/>)

Field/aceasia/
 APEX : Asian Pacific Particle Environment Change Studies
 APMEX : Atmospheric Brown Cloud Post Monsoon Experiment
 EAST-AIRE : East Asian Study of Tropospheric Aerosols - International Regional Experiment (http://www.atmos.umd.edu/~yuan/web_proj/station.htm)
 INDOEX : Indian Ocean Experiment (<http://www-indoex.ucsd.edu/>)
 MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate

参考文献

- Albrecht, B. A., 1989 : Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, **245**, 1227-1230.
 Che, H. Z., G. Y. Shi, X. Y. Zhang, R. Arimoto, J. Q. Zhao, L. Xu, B. Wang and Z. H. Chen, 2005 : Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961-2000. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L06803, doi : 10.1029/2004GL022322.
 Chuang, P. Y., R. M. Duvall, M. S. Bae, A. Jefferson, J. J. Schauer, H. Yang, J. Z. Yu and J. Kim, 2003 : Observations of elemental carbon and absorption during ACE-Asia and implications for aerosol radiative properties and climate forcing. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8634, doi : 10.1029/2002JD003254.
 Chung, C. E. and V. Ramanathan, 2007 : Relationship between trends in land precipitation and tropical SST gradient. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L16809, doi : 10.1029/2007GL030491.
 Clarke, A. D., Y. Shinozuka, V. N. Kapustin, S. Howell, B. Huebert, S. Doherty, T. Anderson, D. Covert, J. Anderson, X. Hua, K. G. Moore II, C. McNaughton, G. Carmichael and R. Weber, 2004 : Size distributions and mixtures of dust and black carbon aerosol in Asian outflow : Physicochemistry and optical properties. *J. Geophys. Res.*, **109**, D15S09, doi : 10.1029/2003JD004378.
 Endo, N., B. Ailikun and T. Yasunari, 2005 : Trends in precipitation amounts and the number of rainy days and heavy rainfall events during summer in China from 1961 to 2000. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 621-631.
 Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. V. Dorland, 2007 : Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. in *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis, Contribu-*

- tion 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, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Kaiser, D. P. and Y. Qian, 2002 : Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954 - 1998 : Indication of increased haze pollution?, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2042, doi : 10.1029/2002GL016057.
- Kawamoto, K., T. Hayasaka, T. Nakajima, D. Streets and J.-H. Woo, 2004 : Examining the aerosol indirect effect over China using SO₂ emission inventory. *Atmos. Res.*, **72**, 353-363.
- Kimoto, M., 2005 : Simulated change of the east Asian circulation under global warming scenario. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L16701, doi : 10.1029/2005GL023383.
- Menon, S., J. Hansen, L. Nazarenko and Y. Luo, 2002 : Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, **297**, 2250-2253.
- Moteki, N., Y. Kondo, Y. Miyazaki, N. Takegawa, Y. Komazaki, G. Kurata, T. Shirai, D. R. Blake, T. Miyakawa and M. Koike, 2007 : Evolution of mixing state of black carbon particles : Aircraft measurements over the western Pacific in March 2004. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L11803, doi : 10.1029/2006GL028943.
- Mukai, M. and T. Nakajima, 2009 : Potentiality of aerosols in changing the precipitation field in Asia. *SOLA*, **5**, 97-100.
- Mukai, M., T. Nakajima and T. Takemura, 2008 : A study of anthropogenic impacts of the radiation budget and the cloud field in East Asia based on model simulations with GCM. *J. Geophys. Res.*, **113**, D12211, doi : 10.1029/2007JD009325.
- Nakajima, T., and M. Schulz, 2009 : What do we know about large-scale changes of aerosols, clouds, and the radiation budget? in Strüngmann Forum Report : Clouds in the Perturbed Climate System, Their Relationship to Energy Balance, Atmospheric Dynamics, and Precipitation, Chapter 17, J. Heintzenberg and R. J. Charlson (eds.), MIT Press., Cambridge, 597 pp.
- Nakajima, T., S.-C. Yoon, V. Ramanathan, G.-Y. Shi, T. Takemura, A. Higurashi, T. Takamura, K. Aoki, B.-J. Sohn, S.-W. Kim, H. Tsuruta, N. Sugimoto, A. Shimizu, H. Tanimoto, Y. Sawa, N.-H. Lin, C.-T. Lee, D. Goto and N. Schutgens, 2007 : Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24S91, doi : 10.1029/2007JD009009.
- 日本学術会議, 2009 : 地球温暖化問題解決のために 一知見と施策の分析, 我々の取るべき行動の選択肢一. 日本学術会議, 74pp.
- Qian, Y., D. P. Kaiser, L. R. Leung and M. Xu, 2006 : More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L01812, doi : 10.1029/2005GL024586.
- Ramanathan, V., *et al.*, 2008 : Atmospheric Brown Clouds : Regional Assessment Report with Focus on Asia. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 39pp.
- Rosenfeld, D., 2000 : Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, **287**, 1793-1796.
- Takata, K., K. Saito and T. Yasunari, 2009 : Changes in the Asian monsoon climate during 1700-1850 induced by preindustrial cultivation. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **106**, 9586-9589.
- 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. A., M. Piepgrass and T. L. Wolfe, 1984 : An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo. *Tellus*, **36 B**, 356-366.
- Wang, C., 2007 : Impact of direct radiative forcing of black carbon aerosols on tropical convective precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L05709, doi : 10.1029/2006GL028416.
- Wild, M., H. Gilgen, A. Roesch, A. Ohmura, C. N. Long, E. G. Dutton, B. Forgan, A. Kallis, V. Russak and A. Tsvetkov, 2005 : From dimming to brightening : Decadal changes in solar radiation at earth's surface. *Science*, **308**, 847-850.
- Zhang, X., F. W. Zwiers, G. C. Hegerl, F. H. Lambert, N. P. Gillett, S. Solomon, P. A. Stott and T. Nozawa, 2007 : Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, **448**, 461-465.