

大気放射研究の進展

—エーロゾルと雲の放射効果の解明をめざして—*

浅 野 正 二**

1. はじめに

大気放射学は、大気-地表面を構成する物質と放射（電磁波）との相互作用ならびにその効果を研究の対象とする。近年、大気放射学は、温室効果気体やエーロゾル、雲などの変化に伴う気候変化を解明する上での理論基盤として、特に2つの応用研究面で大きく発展した。その1つは、大気要素の変化が、放射エネルギーの収支や空間分布を変調させて、気候の変化をもたらす効果の大きさを定量的に評価する分野である。他の1つは、大気リモートセンシングへの応用であり、地表面や人工衛星からの遠隔探査技術やデータ解析法の開発に大きく寄与した。後者では、1983年に始まった ISCCP (国際衛星雲気候計画)^{1,2)}や1990年代に開始された NASA の EOS (地球観測システム)³⁾に代表される人工衛星による地球観測が挙げられる。地上からの放射観測においても、1990年代に米国エネルギー省の ARM (大気放射観測)^{4,5)}による長期観測サイトや種々の全球規模観測ネットワーク（例えば、WCRP (世界気候研究計画)の下で推進されている BSRN (基準地表放射観測網)⁶⁾や NASA による AERONET (エーロゾルロボット観測網)⁷⁾など)が整備された。それらの観測データは各種の数値モデルや衛星リモートセンシングの検証・改良に役立っている。本稿では紙面の制限上、エーロゾルや雲が太陽放射に及ぼす効果に限定した最近の話題を通して、1980年代以降の大気放射研究の進展をみていく。

2. 日射収支に関する研究

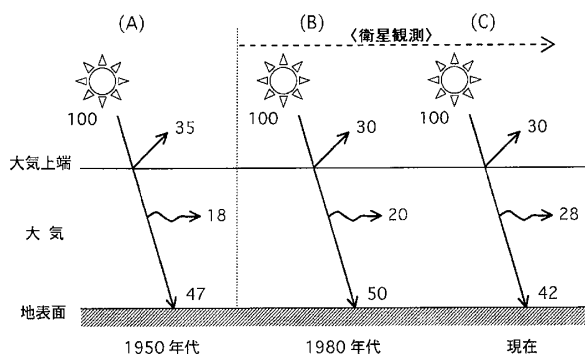
地球に入射する太陽放射エネルギー（以下、日射量と略記）の約30%は、空気分子やエーロゾル、雲などによる散乱および地表面での反射により宇宙空間へ散逸する。残り70%が大気および地表面で吸収されて、それらを直接加熱し、あるいは水蒸気を蒸発させる熱となる。大気-地表面系における日射量の分配は、気候を制御する重要な要因であり、その正確な見積りは前世紀を通して大気放射学の重要課題であった。

大気上端における太陽放射の収支については、衛星観測の発達により、かなりの精度で測定できるようになった。現在、その精度は、全球年平均の入射エネルギー (342 Wm^{-2}) に対する相対値で1%程度である。この値 (3.4 Wm^{-2}) は、大気中の二酸化炭素 (CO_2) の濃度を瞬間的に倍増した場合の温室効果の放射強制力 ($+4 \text{ Wm}^{-2}$) と同程度であることに留意されたい。上記の30%の反射率 (年平均惑星アルベド 0.30 ± 0.01) は衛星観測により得られた値である。また、大気上端に入射する太陽放射エネルギー（すなわち、太陽定数）には、黒点数の増減に対応した11年周期の振幅0.1%程度の変動があることも、衛星観測により明らかにされた⁸⁾。ただし、その大きさは認知されている地球温暖化の直接原因となり得るほどではないとされる。他方、地表面と大気中における日射吸収率に関しては、前世紀を通して研究者により、あるいは用いる観測データや数値モデルの違いにより、その見積りに大きな差異があった。最近、大気の吸収率の見積りは大きな値の方に、従って地表面における吸収率は逆に小さい値の方に収斂しつつある (第1図)⁹⁾。すなわち、大気は太陽放射を以前に考えていたよりも多く吸収する、という認識に変わってきた。現在、地表面および大気中における吸収率の最も確からしい値は、それぞれ42%および28%と見積もられて

* A review of the atmospheric radiation studies to understand the radiative forcing of aerosols and clouds.

** Shoji ASANO, 東北大学大学院理学研究科大気海洋変動観測研究センター。

© 2007 日本気象学会



第1図 全球平均・年平均状態の太陽放射収支。大気上端に入射する太陽放射エネルギーを100 (342 Wm^{-2} 相当) としたときの地表面-大気系における分配の代表的な見積り。(A) 1950年代, (B) 1980年代, (C) 現在 (2006年)。

いるが¹⁰⁾, なお $\pm 2\%$ 程度の不確定性が残る。

日射量分配の見積りが収斂するまでに, 大きな論争があった。主な争点は, 大気大循環モデル (GCMs) により計算される晴天日の地表面日射量が観測値に比べて大きいこと¹¹⁾, また, 雲の日射吸収率の測定値と放射モデルによる計算値とが著しく違うことであった^{9,12)}。前者については, 日射収支の観測値とモデル計算値とが大気上端で合うならば, 地表面における不一致は大気中での吸収の違いを意味する。地表面日射量の観測データは, BSRN⁶⁾や Global Energy Balance Archive (全球熱収支アーカイブ)¹³⁾などの拡充および衛星観測からの推定技術¹⁴⁾の進歩により, 1990年代に大きく改善された。その結果, 多くの GCMs が地表面に達する日射量を過大に評価していたことが判明した¹¹⁾。その主な原因は GCMs の放射スキームにおける水蒸気, 特に連続吸収帯による吸収の過小評価, およびエアロゾルの効果の不備にあった。

他方, 後者の雲による日射の吸収に関する論争は, 雲の「異常吸収」問題と称され, その真偽あるいは原因をめぐって最近まで激しい論争が続いた。観測値と放射モデル計算値との不一致は数十年にわたって専門家を悩ませてきたが, 雲の「異常吸収」問題として大きくクローズアップされたのは, 1995年にアメリカの著名な研究者達が「異常吸収」の存在を主張する3編の論文^{15,16,17)}を発表したことが契機となった。この本質は, 空間的に極めて不均質で時間変化の激しい雲による日射吸収の観測および計算の難しさにある。その後も混乱は続いたが, 観測データや解析手法の再吟味¹²⁾, さらに日米における実験観測^{5,18)}などを経て,

2000年代に入って「異常吸収」の証拠はないとの合意に達し, この論争に対する一応の決着をみた。すなわち, 現在の観測および放射モデルの誤差の範囲内では両者は整合し, 「異常吸収」と呼ばれるほどの大きな不一致はないことが確認された^{19,20)}。この過程で気象研究所グループによる航空機観測は問題解決に貴重な貢献をなした^{18,20)}。雲の「異常吸収」問題をめぐる経緯は, 参考文献^{9,12)}に詳しい。

日射収支に関連して最近注目されている問題に, 地表面に達する全天日射量の長期変動がある。精密な地上観測データの蓄積によって, 長期変動の解析が可能となった。そして, 1950年代後半から1990年にかけて, 世界の多くの観測地点で年平均の全天日射量が減少していることが報告された。この減少傾向は“global dimming”と名づけられた²¹⁾。“global dimming”は, 誤解を招くあいまいな呼称であるが, 地表面に達する全天日射量が世界規模で長期に渡って減少する傾向のことを指す。1960~90年の30年間の減少率は, 世界平均で $4\sim 6\%$ ($6\sim 9 \text{ Wm}^{-2}$ に相当) 程度と見積もられているが, 北半球の中緯度域で減少傾向が最も顕著であった。この期間に太陽定数の減少傾向はないので, “global dimming”の原因はエアロゾル, 特に人為起源エアロゾルの増加によると考えられている²¹⁾。なお, 全天日射量の減少傾向は, 多くの地域で1990年前後に止まり, その後は逆に増加傾向 (“global brightening”) に転じたと報じられている²²⁾。これは, 世界的に大気汚染に対する規制が強化され, 大気の透過率が回復しつつあることによるとされる。ただし, 全天日射量の長期変動は, 晴天日に限らず全天候の観測データに見られる傾向であるので, エアロゾルのみならず雲との相互作用を含んだ複合効果によると推測される。また, この長期変動が地球温暖化や地域の気候変動に対して, どのような影響を与えたかなどの興味深い課題を提起している。

3. エアロゾルと雲の放射強制力に関する研究

気候系のある要素の変化が, 系の放射収支に及ぼす効果を定量的に表す指標として, 放射強制力 (radiative forcing) の概念が用いられる。ある要素の放射強制力は, それが変化したときに生じる対流圏界面における放射収支の変化量として定義され, モデル計算により算出される²³⁾。エアロゾルの放射強制力は, エアロゾル自身が放射を散乱・吸収することによる直接効果と, 雲粒子の凝結核となり, 雲の光学特性や寿命を変

えることによる間接的効果とに分けられる²⁴⁾。気候変動に関連する大気放射の研究は、ここ20年ほどの間、エアロゾルと雲の放射強制力の解明に多大の努力が注がれ、急速に進展した。その展開をIPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change; 気候変動に関する政府間パネル) の第1作業部会報告書における人為起源エアロゾルの扱いの推移をもとに概観する。

初刊のIPCC1990²³⁾では、硫黄成分の排出に伴う硫酸エアロゾルの増大による気候影響が懸念された。ただし、その記述は、温室効果気体に関する分量の1/10程度であり、補足的な扱いであった。続く1992年の「IPCC 第1次報告書補遺」²⁵⁾において、人為起源硫酸エアロゾルの直接効果の冷却作用によって、CO₂などによる温室効果のかなりの部分が相殺される可能性が指摘された。その後GCMsへのエアロゾル効果の組み込みが急速に進み、1994年刊行の「放射強制力」特集号²⁶⁾において、人為起源の硫酸エアロゾルとバイオマス燃焼エアロゾルの直接放射強制力の定量的評価が初めて報告された。1995年の第二次報告書²⁷⁾では、人為起源エアロゾルに関する記述が、放射強制力の章において温室効果気体と同格の「節」扱いになり、量的にも増大した。ここでは、上記2種類のエアロゾルに加えて、煤粒子の直接放射強制力の見積りがなされた。他方、間接放射効果に対しては冷却作用の可能性を指摘するにとどまり、エアロゾルと雲の相互作用に関する科学理解が極めて低いレベルにあることが強調された。さらに、産業革命後の全球年平均した気温変化の気候モデルによる再現実験がなされ、温室効果気体と共に硫酸エアロゾルを考慮した方が観測値と整合することが示された。加えて、1991年のPinatubo火山噴火後の気温変化をうまく再現できることを示し、気候モデルにおけるエアロゾル効果の妥当性を保証した。2001年の第三次報告書²⁸⁾では、人為起源エアロゾルとして鉱物ダストの直接放射強制力の評価が加わった。また、間接放射強制力の問題がクローズアップされて、直接放射強制力の記述と同列に扱われた。ただし、その定量的評価に関しては依然として不確定性が大きく、科学理解度も「極めて低いレベル」に止まった。

このように1990年代に気候モデルの改良が進み、人為起源エアロゾルの直接放射効果の評価能力が急速に向上した。これは、エアロゾルや雲の物理・化学特性と放射特性に関する知見が大幅に改善されたことによる。ただし、エアロゾルと雲は依然として気候変動予測の最大の不確定要因となっており、両者の形成・変

質過程や相互作用に関する科学理解の改善が重要課題である。2000年代に入って、関連の研究は急速に拡大し、発表される論文数も爆発的に増えている。例えば、評価に用いられる各種の数値モデルは数量・性能共に拡充した^{29,30)}。また、種々の大規模な実験観測^{31,32)}が実施され、雲とエアロゾルの衛星観測技術^{33,34)}の進歩も著しい。

4. 放射基礎研究の発展

上記の研究における近年の急速な発展は、基礎としての大気放射学³⁵⁾の着実な進展に支えられている。具体的事例として、大気の放射過程や放射特性に関する知見の充実が挙げられる。種々の温室効果気体を含めた気体吸収に関しては、HITRAN^{36,37)}やGEISA³⁸⁾などの吸収線データベースの拡充があり、これらは随時更新されている。これにより温室効果気体の放射強制力の精確な評価や高分解能分光測定による大気リモートセンシングが可能となる。また、水蒸気の連続吸収帯パラメータの改善³⁹⁾は、モデル計算値と観測値との不一致の問題解決につながった¹¹⁾。一方、エアロゾルの物理・化学特性や光学特性のデータベース化も進んでいる^{38,40)}。気体吸収と粒子散乱が共存する現実大気中における放射伝達の計算において、それらを統一的にパラメータ化する手法として相関 k -分布法が開発された⁴¹⁾。その効率的な計算スキームが実用化され、従来の吸収帯モデルに替えて、多くのGCMsに導入されている。また、大気粒子、特に非球形粒子による光散乱理論の研究も大きく進展し、さまざまな計算モデルが開発された⁴²⁾。さらに、雲のような三次元的に不均質な媒質中の放射伝達の研究では、モンテカルロ法による計算の高速化が図られる一方で、さまざまな解析的な解法の開発が進んでいる⁴³⁾。三次元放射伝達の研究は、衛星リモートセンシングや数値モデルの高解像度化が進むにともない、曇天大気や複雑な地表面の放射伝達計算において重要性が増している。これら放射モデルの開発研究における近年の傾向として、モデルの相互比較が活発に行われ、有効性や精度の検証が組織的になされている^{44,45)}。

5. おわりに

本稿では、放射観測の進展について詳しく述べる余裕がなかったが、近年のリモートセンシング技術や放射機器の進歩には目を見張るものがある。特に冒頭に挙げたEOS³⁾などによる衛星観測は、気候変動の研究

において、高度化する気候モデルとともに不可欠な道具になっている。新たな展開として、2006年4月の雲レーダーとライダーを搭載したCLOUDSAT/CALIPSO衛星の打ち上げにより⁴⁶⁾、能動型リモートセンシングを統合した雲とエアロゾルの三次元分布の観測⁴⁷⁾が現実のものとなった。エアロゾルや雲の気候影響の解明は、今後も大気放射研究の重要課題であり続けるが、これらを受けて次の段階に進む。特に、雲-気候フィードバックの解明が、大きな研究課題になるものと予想される。そして研究の推進には、大気放射学を基盤にして、関連する広範な専門分野を結集した総合研究の戦略がますます重要になる。

参考文献

- 1) ISCCP : International Satellite Cloud Climatology Project ; <http://isccp.giss.nasa.gov/>
- 2) Rossow, W. B. and R. A. Schiffer, 1999 : Bull. Amer. Meteor. Soc., **80**, 2261-2287.
- 3) EOS : Earth Observing System ; <http://eosps.gsfc.nasa.gov/>
- 4) ARM : Atmospheric Radiation Measurement ; <http://www.arm.gov/>
- 5) Ackerman, T. P. and G. M. Stokes, 2003 : Physics Today, **56**, 38-44.
- 6) BSRN : Baseline Surface Radiation Network ; <http://www.gewex.org/bsrn.html>
- 7) AERONET : AErosol RObotic NETwok ; <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- 8) Foukal, P. *et al.*, 2006 : Nature, **443**, 161-166.
- 9) 浅野正二, 2002 : 天気, **49**, 83-89.
- 10) Ohmura, A., 2006 : In "IRS2004 : Current Problems in Atmospheric Radiation (Ed., Fischer and Sohn)", A. Deepack Publsing, 327-330.
- 11) Wild, M., 2005 : Geophys. Res. Lett., **32**, doi : 10.1029/2005GL 022421.
- 12) Li, Z., 2004 : In "Observation, Theory and Modeling of the Atmospheric Variability (Ed. Zhu)", World Scientific Pub. Co., 437-456.
- 13) Gilgen, H. and A. Ohmura, 1999 : Bull. Amer. Meteor. Soc., **80**, 831-850.
- 14) Pinker, R. T. *et al.*, 1995 : Remote Sens. Environ., **51**, 108-124.
- 15) Cess, R. D. *et al.*, 1995 : Science, **267**, 496-499.
- 16) Ramanathan, V. B. *et al.*, 1995 : Science, **267**, 499-503.
- 17) Pilewskie, P. and F. P. J. Valero, 1995 : Science, **267**, 1626-1629.
- 18) Asano, S. *et al.*, 2000 : J. Geophys. Res., **105**, 14761-14775.
- 19) Ackerman, T. P. *et al.*, 2003 : J. Geophys. Res., **108**, 4273, doi : 10.1029/2002JD002674.
- 20) Asano, S. *et al.*, 2004 : J. Atmos. Sci., **61**, 3082-3096.
- 21) Stanhill, G. and S. Cohen, 2001 : Agric. For. Meteor., **107** : 155-278.
- 22) Wild, M., 2005 : Science, **308**, 847-850.
- 23) IPCC, 1990 : Climate Change, The IPCC Scientific Assessment, Cambridge Univ., Press.
- 24) 浅野正二, 1999 : エアロゾル研究, **14**, 214-220.
- 25) IPCC, 1992 : Climate Change 1992, The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, Cambridge Univ., Press.
- 26) IPCC, 1994 : Radiative Forcing of Climate Change, WMP/UNEP.
- 27) IPCC, 1995 : Climate Change 1995, The Science of Climate Change, Cambridge Univ., Press.
- 28) IPCC, 2001 : Climate Change 2001, The Scientific Basis, Cambridge Univ., Press.
- 29) Hansen, J. E. *et al.*, 2005 : J. Geophys. Res., **110**, D018104, doi : 10.1029/2005JD005776.
- 30) Takemura, T. *et al.*, 2005 : J. Geophys. Res., **110**, D02202, doi : 10.1029/2004JD005029.
- 31) Sienfeld, J. H. *et al.*, 2004 : Bull. Amer. Meteor. Soc., **85**, 367-380.
- 32) Nakajima, T. *et al.*, 2003 : J. Geophys. Res., **108**, 8658, doi : 10.1029/2002JD003261.
- 33) Kaufman, Y. J. *et al.*, 2002 : Nature, **419**, 215-223.
- 34) Anderson, T. L. *et al.*, 2005 : Bull. Amer. Meteor. Soc., **86**, 1795-1809.
- 35) Liou, K. N., 2002 : An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition), Academic Press, 577pp.
- 36) HITRAN : HIGH resolution TRANsmision molecular absorption database ; <http://cfa-www.harvard.edu/HITRAN/>
- 37) Rothman, L. S. *et al.*, 2005 : JQSRT, **96**, 139-204.
- 38) GEISA : Gestion et Etude des Informations Spectroscopiques Atmosphériques ; <http://ara.lmd.polytechnique.fr/htdocs-public/products/GEISA/HTML-GEISA/index.html>
- 39) Clough, S. A. *et al.*, 1992 : J. Geophys. Res., **97**, 15741-15760.
- 40) Hess, M. *et al.*, 1998 : Bull. Amer. Meteor. Soc., **79**, 831-844.
- 41) Lacis, A. A. and V. Oias, 1991 : J. Geophys. Res., **96**, 9027-9063.
- 42) Mishchenko, M. I. *et al.* (Eds), 2000 : Light Scattering by Nonspherical Particles, Academic Press, 690pp.
- 43) Marshak, A. and A. B. Davis (Eds), 2005 : 3D Radiative Transfer in Cloudy Atmospheres, Springer, 686pp.
- 44) Ellingson, R. G. and Y. Fouquart, 1991 : J. Geophys. Res., **96**, 8925-8927.
- 45) Cahalan, R. F. *et al.*, 2005 : Bull. Amer. Meteor. Soc., **86**, 1275-1293.
- 46) http://www.nasa.gov/mission_pages/calipso/main/index.html
- 47) Stephens, G. L. *et al.*, 2002 : Bull. Amer. Meteor. Soc., **83**, 1771-1790.