

大気放射*

浅野 正二**

1. 大気放射学とは？

1.1. 放射はエネルギーを運ぶ

地球上の自然現象のエネルギー源は、太陽からの放射である。地球が受けた太陽放射エネルギーは、大気、海洋、陸面におけるさまざまな現象を経て、再び地球放射（赤外放射）の形で宇宙へ戻されている。太陽放射の入射と地球放射の放出との間に起こる大気-地表面系における放射の物理過程とその諸効果を研究対象とするのが、大気放射学（気象放射学とも言う）である。放射エネルギーの収束・発散は、大気や地表面における熱収支の重要な要素であるので、放射過程は、大はグローバルな気候の形成から小は接地層の気温分布、さらにはミクロな雲粒子の成長など、さまざまなスケールの気象現象と密接にかかわっている。このように放射過程はエネルギー輸送の重要な過程の一つであるから、大気放射に関する基礎的な記述は、気象学の入門的教科書にも必ず一章が設けられている。

1.2. 放射は情報を運ぶ

さて、放射はエネルギーを運ぶとともに、放射過程にかかわる物質についての情報も運ぶというもう一つの重要な動きを持つ。大気中での放射伝達過程の基となる放射と大気物質との相互作用は、水蒸気や二酸化炭素などの気体成分による吸収・射出、および雲粒子やエアロゾルなどの粒子による散乱である。放射は大気中を伝播する間に、吸収・射出や散乱の効果に応じた変質を受け、これら素過程にかかわる物質のその時々分布に応じた放射場を形成する。この伝播過程を理論的（数式的）に記述し、放射場を解くのが放射伝達理論である。大気物質の効果により変質を受けた放射の観測量をシグナルとして、（放射伝達過程を理論的にシミュレートすることにより）逆にその物質に関する情報を探るのがリモートセンシング技術であり、大気放射学の重要な応用分野の一つである。ここでは、放射の光源としては、太陽放射

や地球放射のような自然光源以外に、人工光源（レーザー光やマイクロ波など）も利用される。

このように、大気放射学の研究内容は、個々の素過程に関する基礎から幅広い応用まで多岐にわたり、研究方法も理論、室内実験、各種観測と、きわめて多様である。以下では、放射の基礎および主な応用分野である気候問題や衛星観測によるリモートセンシングとのかかわりを中心に、最近の進展と関連する文献の紹介を試みる。なお、紹介する文献は、入手が比較的容易で、筆者の職場（気象研究所）において閲覧可能なものに限った。

2. 大気放射学をめぐる最近の動き

80年代は、オゾン層破壊や温暖化問題など、地球環境をめぐる現象や問題が顕在化し、一般社会でも広く関心がもたれるに至った。気象学にとっても大きな変動の時代であったと言える。気象学を含む環境科学に対する社会の期待と要請も高まり、大気放射学の分野においても大きな動きがあった。気候の問題に関連しては、研究の主対象がエアロゾルに代わって、地球-大気系の放射収支に支配的役割を果たしている雲に移った。WCRPの一環として ISCCP（国際衛星雲気候計画）が実施されており、その検証のための雲と放射の大規模な野外観測が欧米や日本を中心に80年代後半に開始された。雲-放射-気候の相互作用の解明は、引続き90年代の中心課題となる。

また、温室効果気体の放射効果の評価やその濃度分布の正確な測定、それを含めた地球環境の全球的な変動監視が大きな課題となった。その流れとして、新しい地球観測衛星が次々と計画され、90年代後半に打ち上げられる運びとなっている。これらの新しい衛星では、多チャンネル化、時・空間およびスペクトルの高分解能化が一段と進む。さらに、衛星観測データの放射伝達理論に立脚したより精密で定量的な利用が一層もとめられる。このような動きの中で、放射・雲物理・力学、大気化学・放射・力学のカップリングなど他分野とのかかわりもますます密接となり、また研究法にしても理論、観測、解

* Atmospheric Radiation

** Shoji Asano, 気象研究所気象研究部

折, モデル実験が連携して総合的に押し進められることになろう。

3. 放射関連文献

80年代は, 放射関連の文献の出版においても盛り多い時期であった。代表的教科書の出版とともに, 関連した各種シンポジウムや国際学会の論文集が相次いで出版された。後者は, アメリカ気象学会, および放射の研究者であった Deepak が始めた出版活動に依るところが大きい。放射関連の最新の研究事情に関心のある方には, アメリカ気象学会のプロシーディング集や A. Deepak 社の出版物が参考になろう。

3.1. 大気放射全般の教科書

1は, 80年代に日本語で書かれた唯一の専門書である。次の2と重複する部分も多いが, 最近の大きな課題である「雲と放射」に一章を設けるなど, 新しい話題も積極的に取り上げている。5章「気体吸収帯と透過関数」は, 著者が最も得意とした分野だけに力が入っているが, 内容は初心者には多少高度かもしれない。2は, 大学の上級生あるいは大学院生クラスの教科書として書かれた。各章毎に演習問題がついている。光散乱理論と放射伝達理論が詳しく具体的に説かれている。これらの基礎理論と, 応用としてのリモートセンシング(特に衛星からの)および放射気候学を統一的に取り上げたことが特色である。

大気放射学の基礎理論を物理法則に基づいて解説した専門書として定評のあった(記述が難解であるとの評判もあった)Goodyの著書が, 25年ぶりに大幅に改訂され, 同じ表題で出版された。新書(3)は, 著者にエェロノミーの専門家であるYungを加え, リモートセンシングや散乱大気における放射伝達など, 旧版にはなかったテーマも含め, 新しい知見が盛り込まれた。表現も旧版にくらべて, 大分読みやすいものとなっているが, 基礎理論の解説という基本姿勢は保たれており, 内容も高度である。大学院生や専門技術者などが本格的に学ぶ場合, あるいは座右において辞書代わりに参照したりする場合に適した著書である。

3.2. 放射の素過程に関する文献

3.2.1. 光散乱

上記は, 大気放射学の全般の基礎に関する専門書であるが, 放射過程のそれぞれに関して更に深く学ぶには個別の専門書に頼る必要がある。光散乱に関する最近の著書としては, 4を薦めたい。基礎理論から応用まで広

範な内容を含んでおり, Mic散乱の計算プログラムが付いているので役立つ。5は, 光散乱の古典的名著のリプリント版であるが, その第I部は電磁波散乱理論のコンパクトな解説として今も有用である。

6は, 光散乱の基礎理論から偏光観測まで含んだ大気偏光に関する総合的な解説書である。光(電磁波)は, 散乱を受けると一部偏光するが, その偏光特性は散乱粒子についての多くの情報を含んでおり, 粒子の形状や大きさ, 空間姿勢などのリモートセンシング(例えば, ライダー偏光消滅, 偏波レーダーなど)への利用の可能性を持っている。偏光を利用した金星大気雲粒子のリモートセンシングの実例が7に示されている。地球大気雲やエアロゾルに対する定量的利用については, なお一層の研究が必要とされている。

雨滴や雲粒子による光の反射・屈折・回折(広義の散乱)などによる大気光学現象の解説書として, 8がある。豊富な写真や図解などにより, 光学現象のメカニズムが平易に説明されている。ながめるだけでも楽しい書である。

光散乱に関する原論文を学びたいとき, あるいはどの順序でどの論文を読んだら良いか知りたいような場合に適したものとして, 重要論文選集(9, 10)がある。9は個々の粒子による単散乱過程, 他方, 10は大気中での多重散乱過程及び大気光学現象に関する論文を中心に選ばれている。

大気微粒子による散乱に関連した未解決の問題としては, 巻雲などの氷晶粒子による散乱がある。幾何光学近似などにより, 理想的形状の氷晶による散乱を計算する手法が開発されているが, 実際の複雑多様な氷晶の散乱特性を計算する実用的方法, さらにその結果を検証する実測データもない。この点に関しては, 今後も引き続き努力が必要とされる。

3.2.2. 気体吸収

気体成分による吸収線に関する記述は, 1や3に詳しいが, それらは必ずしも初心者向きとは言えない。吸収線がどのような規則に従って現われるか, あるいは吸収線の形や強さはどのようにして決まるかを本格的に学ぶには, 分子分光光学や量子化学の教科書にたしかえる必要がある。ところで11には, 分子分光光学が必ずしも専門でない気象技術者など向けに, 気体による放射吸収の物理過程が平易に解説されている。

近年の分光測定技術や計算機の発達にともない, 微量気体成分の分光測定や大気透過率の計算においても,

個々の吸収線スペクトルを精密に求める傾向が強まっている。このような仕事に必要な吸収線パラメータのデータベースが AFGL (米国防空地球物理学研究所) で編集されている(12)。同じく AFGL からは、大気透過率計算のための実用的プログラムも公表されており、米国気候資料センターを通して購入することができる。これには、低分解能スペクトル計算用の LOWTRAN プログラム13と、高分解能用の FASCOD プログラム14があり、リモートセンシングの分野で広く利用されている。これらのプログラムは、吸収線パラメータなどの更新とともに改訂がなされている。

温室効果をもたらす各種の微量気体の吸収線パラメータの決定や、水蒸気、水、氷などの吸収係数(特に近赤外域から赤外域にかけて)の見直しが求められている。

3.2.3. 放射伝達理論・計算法

大気中での放射の伝達過程を記述する放射伝達方程式には、仮想的条件の場合を除いて、一般に厳密な解析解はない。80年代までにさまざまな問題に対応して数多くの近似解法・数値計算法が開発されており、現在では、ほとんどの問題に対して原理的には任意の精度で放射場を計算することが出来る。これには、近年の計算機能力の進歩に依るところが大きい。ただし、実際の雲や地表面のように水平方向に光学特性の変化する不均質な媒質に対しては、実用的な計算法はまだ開発されておらず、今後に残された課題の一つとなっている。

70年代後半から80年代にかけて、IAMAP 放射委員会を中心に、さまざまな放射計算法の相互比較と適用限界・誤差などの問題点の整理作業が行われた。その報告が、散乱大気に対しては15に、赤外放射に関しては16にまとめられている。多重散乱過程を含む放射伝達の計算に関しては、17も参考になる。特に、この本には数多くのケースに対する数値表が付いているので、自分で作成したプログラムの結果をチェックするのに役立つ。

18は、農業気象や太陽エネルギー関係の技術者などを対象に、傾斜面を含むさまざまな地表面での日射量の計算法を説いた実用的な書である。また、地上での太陽放射観測についても一章を設けている。

大気大循環モデルにおいては、放射過程の計算には計算機資源とのかかわりで、パラメタリゼーション等の特別な工夫が必要とされるが、このあたりの問題点の理解には19が参考になろう。

3.3. 気候問題に関連した文献

地球温暖化の主原因と目される CO₂ などの微量気体

成分の放射効果(温室効果)の解説については、啓蒙書(例えば20)を含め数多くの出版物に見られる。科学的レビューとしては、21や22などがある。

放射過程を通して雲が気候形成にどのような役割を果たしているかを理解することが、気候変化の予測精度を高める上でも不可欠のこととされ、関連した研究が活発に行われている。この問題に対する現状を知るのに最適の書23が近いうちに出版される。これには最新の研究成果のみでなく、放射の基礎過程についても系統立った記述がなされており、教科書としても薦められる(筆者は、目次と一部の章を内読したのみであるが)。24には、多少古いものであるが60~70年代にソ連で行なわれた雲と放射の観測・研究を中心に多くのデータが含まれており、高緯度地方の雲の放射特性を知るのに役立つ。

ユーロゾルの放射効果には、太陽放射を散乱することによる直接的効果と、雲形成とのかかわりで雲の光学的性質に影響を及ぼすことによる間接的効果がある。ユーロゾルの直接的な放射効果は、雲の放射効果の1/10以下の大きさであるが、これに関する研究はこれまでの大気放射学の大きな課題の一つであった。最近では雲に関連した間接的効果に研究の重心が移りつつある。このあたりの動きが最近のシンポジウム報告集25に見てとれる。ユーロゾルの放射効果に関する知見が、“核の冬”のシミュレーション研究に応用され話題になった(26)。雲とユーロゾル(特に対流圏ユーロゾル)については、衛星観測などにより、それらの光学特性と全球分布に関するデータ・ベースを作り上げてゆくことも今後に残された課題である。

植物群落などさまざまな地表面の放射特性と境界層における放射収支に関しては、27や28に詳細な解説がある。他方、成層圏から中間圏にかけての中層大気においては、放射過程がその場の温度構造を支配しており、また、大気化学-放射-力学の相互作用が重要な過程となっている。このあたりの理解には29が参考になる。

3.4. 衛星放射気候学に関する文献

気候学上の重要因子である大気上端や地表面における放射収支、それを左右する雲分布や地表面アルベドなどの放射パラメータの地球規模スケールでの分布と変動の観測には、人工衛星が唯一の手段であり、近年衛星観測データを用いた放射気候学の研究が盛んになっている。そして、時間・空間分解能と測定精度の一層の向上が期待されており、データの解析法も放射理論に基づく、より正確なものが要求される。この分野の解説は教科書(1,

2)にもあるが、10年程前に書かれた30は、その後の研究発展の動向を的確に指摘しており一読に値する。気候研究における衛星観測の役割に関する詳細な解説としては、31がある。地球放射収支観測衛星(ERBE)とそのデータ利用に関する総合報告が、*Rev. of Geophys* (32)に特集されている。

3.5. 衛星リモートセンシングに関する文献

先に触れたように、90年代後半に各種の地球観測衛星の打ち上げが予定されており、衛星による地球観測の新たな時代の幕開けとなる。これからの衛星観測では多様な目的に応じて紫外域からマイクロ波域までの広い範囲の放射観測と、各放射計における多チャンネル化、それぞれのチャンネルの高分解能化が促進される。また、レーザー光など人工光源を利用した能動型観測も今後一層発展しよう。

さて、新しい地球観測衛星の計画については、33や34に詳しい。34は、放射理論の基礎を含め、センサー、データ受信・処理、更にさまざまな分野への応用例までの衛星によるリモートセンシングの基礎知識を概説した入門書である。35は英文の入門書であるが、大気リモートセンシングの原理を理解するのに適している。今後一層の発展が期待されているマイクロ波によるリモートセンシングの入門書としては、36がある。

ここでは、大気放射学を学ぼうとしている人、あるいは日々の仕事の中で放射に関連した事柄に出会っている人など大気放射に何らかの“渇き”をいただいている人に、井戸のありかを示したに止まる。その井戸に渇きをいやすに十分な質と量の水があるかどうか、それは各人の渇きの度合によろう。本稿が渇きをいやす旅の出発点となれば幸いである。

文 献

- 1) 会田 勝, 1982: 大気と放射過程. 東京堂出版, 280 pp.
- 2) Liou, K.-N., 1980: "An introduction to atmospheric radiation" Academic Press, 392 pp.
- 3) Goody, R.M. and Y.L. Yung, 1989: Atmospheric radiation: Theoretical basis (Second Edition). Oxford Univ. Press, 519 pp.
- 4) Bohren C.F. and D.R. Huffman, 1983: Absorption and scattering of light by small particles. John Wiley & Sons, Inc., 530 pp.
- 5) van de Hulst, 1981: Light scattering by small particles. (リプリント版) Dover, 470 pp.
- 6) Coulson K.L., 1988: Polarization and intensity

of light in the atmosphere. A. Deepak Publishing, 596 pp.

- 7) 川端 潔, 1987: 惑星大気内エアロゾルのリモートセンシング, 気象研究ノート, 第155号 (日本気象学会), 1-34.
- 8) Greenler, R., 1980: Rainbows, halos, and glories. Cambridge Univ. Press, 195 pp. (最近, 廉価な Paperback 版が, 同社から出版された.)
- 9) Kerker, M., (Ed.), 1988: Selected papers on light scattering. Part one and part two. SPIE Milestone Series, Vol. 951, SPIE Optical Engineering Press.
- 10) Bohren, C.F. (Ed.), 1988: Selected papers on scattering in the atmosphere. SPIE Milestone Series, Vol. MS7, SPIE Optical Engineering Press.
- 11) McCartney, E.J., 1983: Absorption and emission by atmospheric gases: The physical processes. John Wiley & Sons, Inc., 320 pp.
- 12) Rothman, L.S., R.R. Gamache, A. Goldman, L.R. Brown, R.A. Toth, H.M. Pickett, R.L. Poynter, J.-M. Flaud, C. Camy-Peyret, A. Barbe, N. Husson, C.P. Rinsland, and M.A.H. Smith, 1987: The HITRAN database: 1986 edition. *Appl. Optics*, 26, 4058-4097.
- 13) Kneizys, F.X., E.P. Shettle, W.O. Gallery, J.H. Chetwynd, Jr., L.W. Abreu, J.E.A. Selby, S.A. Clough, and R.W. Fenn, 1983: Atmospheric transmittance/radiance: Computer Code LOWTRAN6. AFGL-TR-83-0187, AFGL, 200 pp.
- 14) Clough S.A., F.X. Kneizys, E.P. Shettle, and G.P. Anderson, 1986: Atmospheric radiance and transmittance: FASCOD2. 6th conf. atmos. radiation (Amer. Meteor. Soc). 141-144.
- 15) Lenoble, J. (Ed.), 1985: Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres: standard computational procedures. A. Deepak Publishing, 300 pp.
- 16) Luther, F.M., R.G. Ellingson, Y. Fouquart, S. Fels, N.A. Scott, and W.J. Wiscombe, 1988: Intercomparison of radiation codes in climate models (ICRCCM): longwave clear-Sky result—a workshop summary. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 69, 40-48.
- 17) van de Hulst H.C., 1980: Multiple light scattering—table, formulas, and applications (Vol. 1 and 2). Academic Press, 739 pp.
- 18) Iqbal, M., 1983: An introduction to solar radiation. Academic Press, 390 pp.
- 19) Stephens, G.L., 1984: The parameterization

- of radiation for numerical weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.* 112, 826-867.
- 20) 田中正之, 1988: 温暖化する地球. 読売新聞社, 227 pp.
 - 21) 気象庁気候変動対策室, 1991: 気候変動に関する政府間パネル (IPCC), 気候変動の科学的評価—第1作業部会による IPCC への報告— 355 pp.
 - 22) Michell, J.F.B., 1989: The “greenhouse” effect and climate change. *Rev. Geophys.*, 27, 115-139.
 - 23) Liou, K.-N., 1991: Radiation and cloud processes in the atmosphere: theory, observation and modeling. Oxford Univ. Press (in print).
 - 24) Feigelson E.M., 1984: Radiation in a cloudy atmosphere. D. Reidel Publishing Company, 293 pp.
 - 25) Hobbs, P.V. and M.P. McCormick (Ed.), 1988: Aerosols and climate. A. Deepak Publishing, 486 pp.
 - 26) Pittcock, A.B., T.P. Ackerman, P.J., Crutzen, M.C. MacCracken, C.S. Shapiro, R.P. Turco, 1986: Environmental consequence of nuclear war. Vol. 1. Physical and atmospheric effects. *Scope* 28, John Wiley & Sons, 359 pp.
 - 27) Dickinson, R.E., 1983: Land surface processes and climate—surface albedos and energy balance. in “Theory of climate” (Ed. by B. Saltzman), *Advances in Geophys.*, 25, Academic Press, 305-353.
 - 28) Oke, T.R., 1987: Boundary layer climates. (Second Edition), Methuen, 435 pp.
(旧版には斉藤・新田による日本語訳「オーク: 境界層の気候」(1980, 朝倉書店)がある.)
 - 29) 松野太郎, 1981: 温度構造と放射平衡, 大気科学講座 3・成層圏と中間圏の大気 (松野・島崎著), 第3章, 東京大学出版会, 75-126.
 - 30) 会田 勝, 1982: 衛星観測資料による放射気候学, 気象研究ノート, 第145号(日本気象学会), 1-19.
 - 31) Ohring, G. and A. Gruber, 1983: Satellite radiation observations and climate theory. in “theory of climate” (Ed. by B. Saltzman), *Advances in Geophys.*, 25, Academic Press, 237-304.
 - 32) Special Session: Earth radiation budget experiment (ERBE), *Rev. Geophys.*, Vol. 24, No. 2, May 1986, 350-468.
 - 33) 土屋 清(編), 1990: 地球監視のための人工衛星計画, 気象研究ノート, 第169号(日本気象学会), 120 pp.
 - 34) 土屋 清(編), 1990: リモートセンシング概論, 朝倉書店, 327 pp.
 - 35) Houghton, J.T., F.W. Taylor and C.D. Rodgers, 1984: Remote sounding of atmospheres, Cambridge Univ. Press, 343 PP.
 - 36) 古濱洋治, 岡本謙一, 増子治信, 1986: 人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング, 電子通信学会, 275 pp.