



村 井 潔 三*

1960年代末から1970年代の前半の数年間、GARP計画のもとに大規模な放射測定が続き、多くの成果が得られた期間で、現在は、これを締めくくり次の課題への移行の時期といえよう。CAENEX, BOMEX 等の観測計画の中で行なわれた放射測定によって実際の混濁大気における放射収支の実態についての知見を増し、グローバルな測定法としての気象衛星における放射測定の技術は、ほぼ完成され完全に実用の域に達している。

このようにして、最近の放射の研究は貴重な成果を突らせつつあるが、これはまだ気象放射の最終の目的に達したわけではなく、その一ステップに過ぎない。すなわち、大気の運動の原動力としての放射がどういう役割を果たしているかの詳細が明瞭になるのはこれからの問題といえよう。そして、この問題の答に対する今後の発展は、気候変動の解明の問題、中層大気の機構解明の問題という1980年代に課せられた大問題の中で、一歩ずつ果たされるものと思われる。

さて、大げさな前おきはこのくらいにして、以下放射を学ぶための足がかりとなるような教科書、文献についての紹介を記す。もちろん、放射の基礎的概念についてはほとんど全ての気象学の教科書にその為の一章が設けられているので、これを理解することが重要であるのはいうまでもない。

放射と大気物質の相互作用の基礎過程は吸収と散乱である。吸収に関与する主要な物質は、水蒸気、炭酸ガス、オゾンであり、酸素と微量気体成分は高層大気で重要な役割を果たしている。散乱の過程では、空気分子の他にエアロゾルおよび雲等の水滴が関係する。大気中の放射は、これらの効果を受けながら伝播し、その時の上記諸物質の分布に対応して放射場を形成する。これは、放射伝達方程式の解として得られるわけであるが、その解法についての研究は放射研究の中核をなすものである。Chandrasekharをはじめとする天文学者によってそ

の基礎が築き上げられ、現在、地球における混濁大気へ応用されて多くの手法が用いられている。今後の課題としては、雲を含む現実の大気についての放射場の解明に向けての研究が盛んになると予想される。

以上、気象放射の立場、その重要な要素について簡単に触れてみたのであるが、この他にも問題は見出される筈であって、これから述べる文献の紹介も完全なものではないことを予めおことわりしておく。

1. 教科書

基礎を学ぶための教科書として先ず最初に、**Goody: Atmospheric Radiation** を挙げておく。15年前の印刷であるが、その光彩は失われておらず、放射を学ぶものにとって離すことのできない教科書といえよう。分子吸収に力点が置かれており、分子分光学の基礎から説き起こされており、大気中の吸収の理論が極めて丁寧に述べられている。これに対し、**Kondratyev: Radiation in the Atmosphere** は、放射全般にわたって広く、かつ平易に説明されており、観測資料なども非常に豊富に示されている。放射に関する知識を身につけるための好書といえる。同じ著者のもので、**Kondratyev: Radiative Heat Exchange in the Atmosphere** は大気中における長波長放射収支を主題としたもので、熱収支の問題の中での放射の役割についての教科書である。これは、元来ロシア語で書かれたものの英訳であるが、翻訳に際しては Goody と著者の十分な討論がなされており、原著書に忠実であり、訳者の独断もない。

日射を主体とした教科書としては、**Robinson: Solar Radiation** がある。きわだった特徴はないが、日射に対する常識的な知識を広くするには適した書物である。

和文の教科書は極めて古いものしか見当たらない。山本: 気象輻射学, 同: 大気輻射学であって、いずれも20年以上前の出版である。内容も前に挙げたものに比べて不足するが、要点を短時間に知ることができる。

* K. Murai, 気象研究所。

最も新しい著書としては、**Paltridge・Platt: Radiative Processes in Meteorology and Climatology** と **Kondratyev: Radiation Processes in the Atmosphere** がある。Paltridge の書では、著者は気象放射学が気象学から遊離している点に着目し、気象学の中における放射の役割を理解させるための記述に努力が払われている。Kondratyev の書は、1974年4月の World Meteorological Congress における講演の full text である。太陽常数、地表面の放射特性、放射収支、そしてエアロゾル、雲の効果に分類され、情報を要領よくまとめられており、全巻の約1/3を費して放射と力学の結びつきについて述べてある。今後の気象放射研究の指針の一つと考えられる。

次に、放射を扱うに当たってどうしても必要となる基礎過程、すなわち、散乱と吸収の理論であるが、先ず挙げられるべきは、**Van de Hulst: Light Scattering by Small Particles** であろう。Rayleigh 散乱から Mie 散乱まで、厳密かつ丁寧に述べられている。かなり古い出版であるが、基礎を学ぶには充分の書物である。これに対し、エアロゾルあるいは雲粒子の散乱関数（位相関数）の実際について述べたのが、**Deirmendjian: Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions** である。Mie 散乱の理論についても一通り述べられており、粒子の屈折率、粒径分布についての多数のモデルに対する位相関数の計算結果を表に示してあり、実用に供するにはいささか不十分といえるが、位相関数の概念を得るには便利であろう。**McCartney: Optics of the Atmosphere, Scattering by Molecules and Particles** も、散乱の基礎の解説から散乱大気中の放射伝達の取扱いを述べたもので、吸収を含む大気については巻を改めて著されることが予定されている。

放射伝達の問題は、先にも記したように、天文学の問題として多くの研究が積み重ねられ、Chandrasekhar によって完全な解が得られたわけである。これを単行本としてまとめたのが、**Chandrasekhar: Radiative Transfer** である。放射伝達方程式の解法の礎を築いたものとしてその価値は不変のものである。**Kourganoff: Basic Methods in Transfer Problem** もほとんど同じ時期に出版されたものであるが、これは著者のこの問題に関する長大な論文を Milne の薦めによって単行本として著したものである。著者がこの書の目的として述べているように、一つの問題に対する多くの解法を比較しながら解説し、読者が広く知識を身につけるといふこ

とに注意が払われている。この書の完成に当たり、Busbridge は著者の仏語の原稿の英訳を行なうと同時に、その中の一部を受け持っている。その後、彼女自身の著書として、**Busbridge: Mathematics of the Radiation Transfer** が出された。標題の通り、数学の問題としてとらえられた教科書である。

これらの研究を基として、その地球大気への応用が放射研究の一つの核をなしている。したがって、この問題に関する研究の成果は論文数としても枚挙にいとまのない程の数にのぼる。しかし、教科書として著わされているものは少なく、次の2冊が見当たる程度である。一つは、**Sobolev: A Treatise on Radiative Transfer** であって、ロシア語からの英訳である。もう一つは、**Feigelson: Calculation of the Brightness of Light in the Case of Anisotropic Scattering, Part 1 and 2** である。エアロゾルを含む大気の場合の問題は、位相関数の表現法、それに対応する解法を求めることであって、現在ではかなり実情に近い大気の状態に対する解が精度よく得られているのであるが、上記の著書は基礎を学ぶ場合にはまだまだ有益と考えられる。

エアロゾルの放射特性の研究は、前述の問題と関連して大きな発展を示しているが、未だ問題は残されている。エアロゾルは、放射だけでなく多くの分野で重要な要素として研究の対象となっている。その性質全般にわたって述べられている教科書として、**Davies: Aerosol Science** と **Twomey: Atmospheric Aerosols** がある。前者は、広く種々の性質について述べられており、その一章として光学的特性が含まれている。後者は、エアロゾルの生成の機構に関する最新の理論を含み、エアロゾルに興味を持つ研究者にとって魅力のある著作である。

最近の研究課題の中心は成層圏から中層大気へと拡大されているが、そこでは種々の微量成分がそれぞれ特有の役割を果たしている。このような、物質による放射の吸収、さらには高層における放射収支の問題が重要度を増し、気候変動に関わる問題の一つとして今後の大きな目標の一つとなりつつある。

この問題に関連する教科書として、永田・等松：**超高層大気の物理学**を挙げておく。これは、電離大気まで含む広い範囲の大気についての物理学であるが、放射を志す者にとっても重要な要素が多々含まれている。最後に、曲面大気中での散乱光について述べた著書として、**Rosenberg: Twilight** があるが、これは、人工衛星あ

るいは気球などによる光学的測定の場合に参考となる。

2. 論文, 総合報告等

前節に述べたように、これからの気象放射の研究は気候変動と結びついて発展することが予想されるので、この問題に関する文献から紹介し、これに関連して必要とされる研究へとたどっていくことにする。もちろん気候変動の問題は、**Budyko**(1969; 1977)等によってかなり古くから取り扱われた問題であって、初期の論文数もかなりの数にのぼるが、新しい問題として取り上げた最初のものには **CIAP** の報告であろう。これは、成層圏汚染に関する全分野にわたる研究であって、その一節として、**Budyko**, **Sellers** の気候モデルの問題が論ぜられている。すなわち、**CIAP Monograph 4, Chap. 7**である。また、同じ報告の中の **Chap. 5** は、放射場に対するオゾン、エーロゾルの効果についてまとめたもので現在この問題の研究の先端を行く研究者の多数が執筆に当たっている。この問題の最終的解決は、放射対流平衡の場を正しく求めることにあるが、その計算を試みた研究として、**Manabe・Möller**(1961), **Manabe・Strickler** (1964), **Manabe・Wetherald**(1967) のものを挙げておく。

放射場に対するエーロゾルあるいは雲粒子の効果の研究は、放射研究の中心をなすものであって、長期に亘る多くの研究が認められる。1970年以後の重要と思われるものを数編並べてみる。**Plass・Kattawar** (1971), **Tanaka** (1971), **Braslaw・Dave** (1973), **Lacis・Hansen** (1974), **Wang・Domoto** (1974), **Liou・Sasamori** (1975) 等である。長波長放射伝達の問題としては、**Rogers・Walshaw** (1966), **Kuhn・London** (1969), **Liou** (1973) および **Samuelson** (1969) である。

これに対応する測定あるいは解析の結果についても多くの研究がある。放射収支の実態を直接測定するための立体的観測、これと併せて用いられる気象衛星の測定資料の解析についての文献は、**CAENEX**, **BOMEX**, **GAARS** 等の計画の報告として印刷されている。それぞれ **Kondratyev et al** (1974), **Reynolds et al.** (1975), **DeLuisi et al.** (1976) をリストに挙げておく。気象衛星資料の解析としては **Vonder Haar et al.** (1971), **Raschke et al.** (1973) は地球大気系の放射収支の平均状態を明確にしておき、放射収支の測定を目的とした衛星 **Nimbus 6 (ERB)** の解析結果は、**Jacobowitz et al.** (1979) によって報告されている。

気象衛星の発展に伴って急速に研究が進んだのが、**Inversion theory** である。気温鉛直分布の推定の方法はこの時期に集中した。**Wark et al.** (1971) と、新しいものとして **Smith et al.** (1979) だけを挙げておく。**Inversion** の方法は、日射測定を利用したエーロゾルの複素屈折率や粒径分布の推定にも応用され、**Dave**(1971) **Yamamoto・Tanaka** (1969), **Twitty** (1975) 等多数の研究がある。この方法を用いた室内実験による測定法も、エーロゾルの放射特性を求める有力な手法となっている。**Pritchard・Elliott** (1960), **Quiney・Carowell** (1972), **Blau et al.** (1970) 等は参考になろう。また、水蒸気の吸収係数も重要な要素として実験測定の対象となっている。近赤外については **Wyatt et al.**(1964), 赤外域については **Bignell** (1970) のみに止める。

この他にも、放射に関連する重要な課題、それに関する多くの文献があり、以下のリストも不十分であることを御了承願いたい。

文 献

教科書

- Goody, R.M., 1964: *Atmospheric Radiation, I, Theoretical Basis*, Oxford, 436 pp.
- Kondratyev, K. Ya., 1969: *Radiation in the Atmosphere*, Academy Press, 912 pp.
- , 1965: *Radiative Heat Exchange in the Atmosphere*, Pergamon, 411 pp.
- Robinson, N., 1966: *Solar Radiation*, Elsevier, 347 pp.
- 山本義一, 1954: 大気放射学, 岩波, 174 pp.
- , 1956: 気象放射学, 気象学講座, 第4巻, 地人書館, 117 pp.
- Paltridge, G.W. and C.M.R. Platt, 1976: *Radiative Processes in Meteorology and Climatology*, Elsevier, 318 pp.
- Kondratyev, K. Ya., 1972: *Radiative Processes in the Atmosphere*, 2nd IMO Lecture, WMO-No. 309, 214 pp.
- Van de Hulst, H.C., 1957: *Light Scattering by Small Particles*, John Wiley, 470 pp.
- Deirmendjian, D., 1969: *Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions*, American Elsevier, 290 pp.
- McCartney, E.J., 1976: *Optics of the Atmosphere, Scattering by Molecules and Particles*, John Wiley, 408 pp.
- Chandrasekhar, S., 1950: *Radiative Transfer*, Oxford, 393 pp.
- Kourganoff, V., 1952: *Basic Methods in Transfer*

- Problem, Oxford, 281 pp.
- Busbridge, I.W., 1960: Mathematics of the Radiation Transfer, Cambridge Univ. Press, 143 pp.
- Sobolev, V.V., 1962: A Treatise on Radiative Transfer, Van Nostrand, 317 pp.
- Feigelson, E.M. *et al.*, 1960, 1963: Calculation of the Brightness of Light in the Case of Anisotropic Scattering, Part 1. and 2, Consultants Bureau Inc. New York, 104 pp., 226 pp.
- Davies, C.N. (ed.), 1966: Aerosol Science, Academy Press, 468 pp.
- Twomey, S., 1977: Atmospheric Aerosols, Elsevier Sci. Pub. Co., 302 pp.
- 永田 武, 等松隆夫, 1973: 超高層大気の物理学, 物理学選書, 第6巻, 裳華房, 453 pp.
- Rosenberg, G.V., 1966: Twilight, Plenum Press, 358 pp.
- 論文, 総合報告等**
- CIAP Monograph 4, Chap. 7, 1975: Modeling of the Perturbed Climate for CIAP., 66 pp.
- , Chap. 5, 1975: Radiation in the Natural and Perturbed Troposphere, 102 pp.
- Budyko, M.I., 1969: The effect of solar radiation variation on the climate of the earth, *Tellus*, 21, 611-619.
- , 1977, On present-day climatic changes, *Tellus*, 29, 193-204.
- Manabe, S. and F. Möller, 1961: On the radiative equilibrium and heat balance of the atmosphere, *Mon. Wea. Rev.*, 89, 503-532.
- and R.F. Strickler, 1964: Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment, *J. Atmos. Sci.*, 21, 361-385.
- and R.T. Wetherald, 1967: Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity, *J. Atmos. Sci.*, 24, 241-259.
- Plass, G.N. and G.W. Kattawar, 1971: Radiance and Polarization of the earth's atmosphere with haze and clouds. *J. Atmos. Sci.*, 28, 1187-1198.
- Yamamoto, G. and M. Tanaka, 1972: Increase of global albedo due to air pollution, *J. Atmos. Sci.*, 29, 1405-1412.
- Braslaw, N. and J.V. Dave, 1973: Effect of aerosols on the transfer of solar energy through realistic model atmospheres, Part I and II, *J. Appl. Met.*, 12, 601-619.
- Lacis, A. A. and J.E. Hansen, 1974: A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 31, 118-133.
- Wang, W.C. and G.A. Domoto, 1974: The radiative effect of aerosols in the earth's atmosphere, *J. Appl. Met.*, 13, 521-534.
- Liou K.N. and T. Sasamori, 1975: On the transfer of solar radiation in aerosol atmospheres, *J. Atmos. Sci.*, 32, 2166-2177.
- Rogers, C.D. and C.D. Walshaw, 1966: The computation of infrared cooling rate in planetary atmospheres, *Q. J.R.M.S.*, 92, 67-91.
- Kuhn, W.R. and J. London, 1969: Infrared radiative cooling in the middle atmosphere (30-110 km), *J. Atmos. Sci.*, 26, 189-204.
- Liou, K.N., 1973: A numerical experiment on Chandrasekhar's discrete-ordinate method for radiative transfer, *J. Atmos. Sci.*, 30, 1303-1326.
- Samuelson, R.E., 1969: The thermal radiation field emitted by anisotropically scattering cloudy planetary atmospheres, *Icarus*, 10, 258-273.
- Kondratyev, K. Ya. *et al.*, 1974: Spectral radiative flux divergence and its variability in the troposphere in the 0.4-2.4 μ region, *Appl. Opt.*, 13, 478-486.
- Reynolds, D.W. *et al.*, 1975: The effect of solar radiation absorption in the tropical troposphere, *J. Appl. Met.*, 14, 433-444.
- De Luisi, J.J. *et al.*, 1976: Results of a comprehensive atmospheric aerosol-radiation experiment in the southwestern United States, Part I and II, *J. Appl. Met.*, 441-463.
- Vonder Haar, T.H. and V.E. Suomi, 1971: Measurements of the earth's radiation budget during a five-year period, *J. Atmos. Sci.*, 28, 305-314.
- Raschke, E. *et al.*, 1973: The annual radiation balance of the earth-atmosphere system during 1969-70 from Nimbus measurements, *J. Atmos. Sci.*, 30, 341-364.
- Jacobowitz, H. *et al.*, 1979: The first 18 months of planetary radiation budget measurements from the Nimbus ERB experiment, *J. Atmos. Sci.*, 36, 501-507.
- Wark, D.Q. *et al.*, 1966: Indirect measurements of atmospheric temperature profiles from satellite, I ~ IV, *Mon. Wea. Rev.* 94, 351-479.
- Smith, W.L. *et al.*, 1979: The use of interferometric radiance measurements for sounding the atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 36, 566-575.
- Dave, J.V., 1971: Determination of size distribution of spherical polydispersions using scattered radiation data, *Appl. Opt.*, 10, 2035-2044.
- Yamamoto, G. and M. Tanaka, 1968: Determination of aerosol size distribution from spectral attenuation measurements, *Appl. Opt.* 8, 447-453.
- Twitty, J.T., 1975: The inversion of aureole measurements to derive aerosol size distributions,

J. Atmos. Sci., 32, 584-591.
 Pritchard, B.S. and W.G. Elliott, 1960: Two instruments for atmospheric optics measurements, J. Opt. Soc. Amer., 50, 191-202.
 Quiney, R.G. and A.I. Carswell, 1972: Laboratory measurements of light scattering by simulated atmospheric aerosols, Appl. Opt., 11, 1611-1618.

Blau, H.M., *et al.*, 1970: A prototype cloud physics laser nephelometer, Appl. Opt. 9, 1798-1803.
 Wyatt, P.J. *et al.*, 1964: The infrared transmittance of water vapor, Appl. Opt., 3, 229-241.
 Bignell, K.J., 1970: The water-vapor infrared continuum, Q.J.R.M.S., 96, 390-403.



続 気象学入門講座

- 気象学へのガイダンス (25.4)
 [基礎コース]
 気象解析の手引き (25.5)
 気象力学・気象熱力学 (25.6)
 気象放射学への手引き (26.10)
 高層大気物理学入門 (25.5)
 雲物理学・降水物理学 (25.8)
 大気電気学・大気化学 (25.12)
 気象観測と気象器械
 気象統計について (25.7)
 気候学
 生活と気象 (25.6)
 [アドヴァンスト・コース]
 気象予測論 (25.7)

これからの予定

- 回転流体力学を学ぶために(25.6)
 対流論 (25.6)
 中小規模現象の気象学 (25.11)
 大気大循環論 (26.2)
 エーロゾルの気象学
 気候変動論
 熱帯気象学 (25.8)
 高層大気力学の諸問題 (25.9)
 高層大気物性 (26.3)
 大気境界層の物理
 衛星気象学 (25.8)
 レーダ気象学
 惑星気象学 (25.7)
 自動気象観測(隔測)・通報システ

(太字は既に掲載されたもの、カッコ内は掲載された巻号)

- 応用気象学
 大気汚染 (26.10)
 実験気象学 (25.10, 26.5)
 天候・気候変化の気象学
 海洋気象学 (25.9)
 極地気象学 (26.9)
 気象災害論 (25.9)
 気象教育論
 気象データ処理法 (26.4)
 [研究のすすめ方]
 最近の気象資料 (26.8)
 論文の書き方
 気象学教科書・参考書のリスト