

気象放射学入門

村 井 潔 三*

最近10年位の間に、放射の専門家達は人工衛星の問題に取り組む、放射を媒介として種々の気象要素の測定を行ない、これを如何にして数値予報の基礎資料として有効なものにするかという問題の解決に腐心している。これは一つの大きな流れとなって放射の問題の中心となり、各国の多数の研究者が参加しているのが現状である。人工衛星の測定というものが global なものであり、世界中共通の問題であるということからこれは当然のことであろう。また、測定の性質上間接的方法を採らざるを得ず、放射が極めて重要な要素となってくるわけである。赤外領域の特定の波長(水蒸気あるいは炭酸ガスの吸収帯)の放射強度の測定から水蒸気あるいは気温の垂直分布を求める問題はいわゆる Inverse problem の 1 種であって最も興味あるものの一つであるが、これは元来、実際の地球大気における放射伝達論として古くから取扱われていた問題そのものといってもよく、放射の中心課題であったわけである。

一方、気象要素の一つとしての放射、すなわち、日射および大気放射の問題も今日なお大きな問題として残され、ことにヨーロッパにおける研究はさかんであって多くの論議が交わされている。その第 1 は測定器の問題であって、日射、大気放射ともにその絶対値を知ることの困難さが問題の中心である。現在用いられている測器は、任意の場所、任意の時に検定し得るというのではなく、世界に一つしかない御神体ともいべき準器と比較して始めて実用に供し得るものである。また、測器の種類も種々雑多であって、おのおのその特徴を異にし、一律に検定することは難しい。このような近代的な測定を精密な測定として確立するための多くの研究が為されている。この他にも放射(紫外、可視、赤外)を利用した種々の気象要素の測定法もあり、放射が介入してくる問題は多岐にわたり、その応用問題は多種多様であると云えよう。

このような問題点を念頭におきながら必要な教科書、是非読んでおかねばならない文献等を挙げて見たい。

1 放射一般

上述のように一口に放射といっても応用分野は広範にわたっており、これ 1 冊読めば万事解決という教科書を得ることは難しい。一方、放射は気象要素の基本量として必ず気象学の教科書に採り上げられており、講座 No. 1、一般気象学の項に挙げられた教科書ならすべて放射のために一章をもうけて解説されているが、いざ役に立てようという段になるとこれだけでは不十分である。そこで放射専門の教科書ということになるのであるが、放射の問題全般にわたって懇切丁寧に書かれたものはそうたくさんはない。第一に挙げられるものは、**R. M. Goody (1964): Atmospheric Radiation I. Theoretical Basis** であろう、放射伝達の理論から始まって、気体による放射吸収の理論、地球大気における加熱冷却率の問題、散乱の理論そして最後に大気の運動に対する放射の作用にまで及んでいる。しかし、その中心は著者のもっとも得意とする気体による吸収理論であって、大半の頁数がこれに当てられている。

これと大体同じ内容を有し、ずっと簡潔に書かれ、しかも和文の教科書として**山本義一 (1954): 大気放射学**および**同 (1956): 気象放射学**がある。前者は内容としては Goody の著書とほぼ同じであり、後者は気象学講座、第 4 巻として書かれたもので、日射および大気放射の測定に関する項目まで含めて全般にわたって記述されている。何れも教科書としては小さいものであるが、短時間で要領よく理解する目的には適している。どちらかと言えば、前者は問題発掘の目的で読み、後者は放射に関する基本的概念を得ることを目的とするというふうに区別出来るかと思う。何れにしても放射を学び始めるに当たって真っ先に手にすべき書物である。

ロシア語で書かれているという条件を除けば、**K. Ya. Kondrat'yev** のいくつかの著書は放射の教科書として無視することの出来ないものである。**K. Ya. Kondrat'yev (1954): Radiant Energy of the Sun** は、いささか古い出版であるが、日射、すなわち短波長放射の問題を網羅しており、散乱の問題に重点がおかれ、太陽熱利用の問題にまで触れている。これに対し、**K. Ya. Kondra-**

* 気象研究所高層物理研究部

t'yev (1950) : Transfer of Long-Wave Radiation in the Atmosphere は長波長放射の理論的取扱いについての教科書であるが、何れも年代的にはかなり古いことが気になる点である。この二冊を読みこなせば放射に関する極めて広範な知識が得られることは間違いないのであるが、ロシア語で書かれているという制限と、2冊一緒にするとかなり大部のものになるということで短日時に解決したい場合には不向きといえよう。幸いなことに極く最近に長波長放射についての教科書は英語の翻訳が出版されている。**K. Ya. Kondrat'yev (1965) : Radiative Heat Exchange in the Atmosphere** である。1954年の短波長放射の教科書に続くものとして著わされたもので、内容は山本：大気輻射学に対応するものであるが、記述はより詳しくなされており資料もこれよりは新しいものも入り込まれている。放射の基礎概念は勿論として、放射伝達論も丁寧に述べられており、標題の示す通り、放射による大気中の熱交換については詳細に記述されている。この様な点から、上記いくつかの教科書の中では最も実用的な名著として推奨出来るものである。教科書として最後に、**Ch. Perrin de Brichambaut (1963) : Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels** を挙げておく。重要な項目は網羅されており、それぞれ簡潔な解説がなされていて、辞典的利用のためには便利な本であるが仏語で書かれているのであまり一般的なものではない。

次に総合報告の主要なものを求めて見ると比較的新しいものの知識としては雑誌 *Applied Optics* 等にいくつかの立派な報告が見られるのであるが、基礎知識を得るためには次のものが好適と考えられる。**Compendium of Meteorology (1951), chap. II Radiation** および **chap. III Meteorological Optics** には **S. Fritz, F. Möller, A. Angstrom, H. Neuberger, Z. Sekera** および **K. Middleton** という諸大家が種々の部門について1950年までの研究にもとづいて述べてある。**Handbuch der Physik (1957), Band XLVIII: Geophysik, II** には **F. Möller, W.E.K. Middleton, Z. Sekera, J. Bricard**, および **H. K. Paetzold and E. Regener** による五つの重要な総合報告が載っている。この二つは著者も重複しており、標題も似たものが多いが、年代は *Handbuch* の方が新しく、内容的にも後者の方が充実しており、どちらかといえば *Handbuch* の方が好ましい。この他、重要な論文は **Selected Meteorological Papers No. 8, 9 Radiation Part 1, 2** に集められ

ており、1960年以前の極めて重要と思われるものが23篇集められている。非常に古いものも含まれているが、何れも歴史的価値のみでなく教科書としての値打ちを充分に持っている。

2 放射伝達理論

放射伝達の理論は大気放射の諸問題の根幹をなすものであるが、同時に *physical astronomy* における重要問題でもあり、理論の発展はほとんど天文学者によってなされている。つまり恒星あるいは惑星をはじめとするすべての天体から射出される放射が、星の周囲の気体を通して如何に伝達されて射出されるかという問題である。大気放射の問題は、この理論の地球大気への応用であって、大気を構成する物質による吸収あるいは散乱の現象を如何にして実際の大气に近いものとして取り入れて解を得るかということが重要課題となってくる。

放射伝達論の数学的解法に関する教科書としては

(1) **V.A. Ambartsumyan (Ed.) 1952) : Theoretical Astrophysics (Translated in English, 1958).**

(2) **Chandrasekhar (1950) : Radiative Transfer.**

(3) **V. Kourganoff (1952) : Basic Methods in Transfer Problems.**

(4) **V.V. Sobolev (1962) : A Treatise on Radiative Transfer (Translated in English, 1962).**

(5) **I.W. Busbridge (1960) : Mathematics of the Radiative Transfer.**

前述のようにこの問題は主として天文学者が興味を持って取り組んだ問題であって、多くの人の研究があり、いくつかの解法があるが、(1)の Ambartsumyan は、Principle of Invariance の思想に基づく半無限大気についての解法を導き、その思想は今日も重要なものとして受けつがれている。(2)の Chandrasekhar の方法は、その第一の特質として Polarization を考慮した方法であるといえよう。散乱に伴って生ずる偏光を Stokes parameter で表わし、大気中での多重散乱の結果として得られる散乱透過光と反射光をマトリックス表示を用いて美事な解法を示している。この方法に基き Rayleigh 大気の場合については Dave, Sekera 等が詳細な数値を表にして示している。Kourganoff の著書は形としては最も教科書的であるといえよう。著者が前文に述べているように、1例として選ばれた特定の問題(伝達方程式の解法)についてのいくつかの異った解法が説き示されてい

る。(4)の Sobolev の著書は比較的新しく英訳されたものであるが、著者の独特の解法が述べられている。層内に光源を有する場合についての問題に対し、Probability of quantum exit from the medium という概念を導入して取扱い、physical な記述によって説明がなされている。最後の Busbridge の書物はこれと対照的に極めて数学的な記述であって数学的厳密さを第一として方程式の解法を示した教科書である。前記 Kourganoff のものは彼女の協力を得ており、数学的取扱いについては間違いないといえよう。

以上のように、放射伝達の理論を学ぶための教科書はかなり豊富と言えるのであるが、これを実際の地球大気に応用する段になるとまた別の困難さが現われてくる。これが気象放射学の理論の中心となるわけであって、ことに最近では人工衛星による測定にこれを如何に適用するかという問題が多く研究されている。W. M. Elsasser (1942): Heat Transfer by Infrared Radiation in the Atmosphere は大へん古い総合報告ではあるが、水蒸気を含む吸収大気内の伝達を論じ、吸収帯としていわゆる Elsasser model を用いて計算を行なっている。さらに、後に山本 (1952) によつて改良された Radiation chart の基礎も示している。散乱大気中の放射伝達を取扱ったものとしては、E. M. Feigelson et al. (1960): Calculation of the Brightness of Light in the Case of Anisotropic Scattering (I), (II) を挙げておく。ソ連の科学アカデミーの大気物理の数人のグループによる研究結果であって、実際の大気に適用出来るような Scattering function の形を実測値をもとにして決定し伝達方程式の解を successive approximation によつて求め、かなり詳しい数値を表にして示してある。

3 短波長放射

ここで問題にする短波長放射とは、地上に到達する昼間の光、いわゆる日射の中に含まれる 0.3μ 付近から 5μ 付近までの放射をさしている。問題の中心は大気中に浮遊する微小粒子(エーロゾル)による散乱の現象であって、吸収としては紫外域のオゾン吸収および近赤外域の水蒸気による吸収である。日射に関する知識を得るための教科書としては 1 に充分述べられているが、その他には N. Robinson (1966): Solar Radiation がある。数人の人によつて書かれたものを Robinson が編集したもので新しい出版である。

微小粒子による散乱の問題については、H.C. Van de Hulst (1957): Light Scattering by Small Particles

が先づ第一に挙げられる。粒子による光の散乱に関する Mie の理論の解説、偏光の取扱い等の基本概念について物理的に親切な解説をほどこし、多くの場合についての応用が示されている。地球大気内での散乱に伴う偏光の問題は前節の Chandrasekhar によつてその基礎は尽されていると言えようが、これを引き継いだのが Sekera を中心とするグループの研究である。これについては Selected Paper 中の S. Chandrasekhar (1951): Polarization of the Sunlit Sky および Handbuch der Physik 中の Z. Sekera (1957): Polarization of Skylight がある。G.V. Rozenberg (1966): Twilight (A study in atmospheric optics) はこの節に掲げておくのが適当かと思う。副題に示される如く大気中での光の散乱についての取扱いが述べられている。H. C. Van de Hulst (1952): Scattering in the Atmosphere of the Earth and the Planets は G. P. Kuiper (Ed.) (1952): The Atmosphere of the Earth and Planets の第3章として書かれたもので重要な一節である。

大気オゾンは大気中に含まれる吸収物質の一つとして扱われるが、オゾン層を形成するという点で独特の問題を持っている。Compendium 中には、Upper Atmosphere の part に F. W. P. Cötz, R. A. Craig の報告があり、Handbuch der Physik には、H. Paetzold and E. Regener のものが載っている。また、Ch. Fabry (1950): L' ozone atmosphérique は吸収係数の数値は古きに過ぎる様であるが、基礎知識のための教科書である。

4 長波長放射

長波長放射の波長域としては、地表および大気が放射する範囲であつて 5μ 付近から $20\sim 30\mu$ 位までの領域が問題となるが、長波長放射の教科書はとりもなおさず放射の教科書と考えてよく、1 に挙げられた教科書がそのままこの項に当てはめられる。このことは気象現象に対する放射の役割というものが長波長放射による大気の加熱冷却の効果によつて果されているということから当然のことと言える。気象放射と銘打って書かれた書物である限り、この問題が終局の目的とならざるを得ないのである。ただし、放射が気象力学に如何に結びつくかという問題は別であつて、放射の教科書ではその解決は得られない。これに関しては、講座 No. 3 大気大循環の中の関連分野の項に挙げられている総合報告が同じく関連分野の文献という意味で貴重であることを記しておく。この他、地表面における熱収支として ブドウイコ

(1959 内島訳): 地表面の熱収支がある。農業気象との関連では重要なものである。総合報告として気研ノートに榎根勇 (1968): 地表面の熱収支と水収支がある。

5. 放射測定

気象衛星の測定の主体は赤外放射の測定であるが、これに伴って赤外放射による表面温度測定の技術は近年著しく発達してきている。その要因は赤外放射の検出器の発達にあると考えられるが、この問題は気象の問題から離れて了うので細かい話は触れないことにして次の教科書を一つだけ記すことにしておく。R. A. Smith, F. E. Jones and R. P. Chasmar (1957): **The Detection and Measurement of Intra-red Radiation.**

日射および大気放射の測定は序文にも述べたように未だに多くの問題を残している。一番の問題点は検定の困難さということである。すなわち、標準となる光源、日射の場合には太陽に近い波長分布をもった人工光源、大気放射の場合には常温における完全黒体を、検定装置として種々の放射計に取付けられるような形で得ることが難しい。これ等の問題に関する研究は北欧において多く為されているが、適当な総合報告は見当たらない。ただWMO から出されている Technical Note の一つとして No. 85 (1967): **Précisions des Mesures Pyhéliométriques** は日射測定における現在の問題点が多くの人によって論ぜられており、R. Bertrand (1968): **Contribution a l'étude expérimentale des pyrradiomètres No. 1.2** は長波長放射計の検定の問題についての報告であって、入手困難なことが欠点であるが、測定の基本問題を知るには有益な論文である。

文献一覧

1. 放射一般 [教科書]

- Goody, R.M. (1964): Atmospheric Radiation, I Theoretical Basis, Oxford, 436p. ¥4,500
 山本義一 (1954): 大気放射学。岩波 174p. ¥400
 山本義一 (1956): 気象学講座, 第4巻, 気象放射学, 地人書館. 117p. ¥300.
 Kondrat'yev K. Ya. (1954): Radiant Energy of the Sun (Russian), Gidrometeoizdat, 600p.
 Kondrat'yev, K. Ya. (1950): Transfer of Long-Wave Radiation in the Atmosphere (Russian), Gostekhizdat
 Kondrat'yev, K. Ya. (1965): Radiative Heat Exchange in the Atmosphere, Pergamon Press, 411p. ¥6,000
 Brichambaut, P. de (1963): Rayonnement Solaire et échanges radiatifs naturels, Gauthier-Villars

300p. 46.5fr.

2. 放射伝達論 [教科書]

- Ambartsumyan, V. A. (1958) Theoretical Astrophysics (英訳), Pergamon Press. (原文1952)
 Chandrasekhar, S. (1950): Radiative Transfer Oxford, 393p. \$2,25
 Kourganoff, V. (1952): Basic Methods in Transfer Problem, Oxford, 281p. ¥2,400
 Soboleu. V.V. (1962): A Treatise on Radiative Transfer (英訳), Van Nostrand, 317p. ¥3,900
 Busbridge, I.W. (1960): Mathematics of the Radiative Transfer, Cambridge Univ. Press 143p.

[論文総合報告]

- Elsasser, M. (1942): Heat Transfer by Infrared Radiation in the Atmosphere, Selected Met. Pap. No.8 (日本気象学会), Radiation part 1.
 Feigelson, E.M. et al. (1960, 1963): Calculation of the Brightness of Light in the Case of Anisotropic Scattering I. II (英訳), Consultants Bureau Inc. New York, 104p., 226p. ¥4,000

3. 短波長放射 [教科書]

- Robinson, N. (1966): Solar Radiation, Elsevier publishing Co. ¥8,100
 Van de Hulst, H.C. (1957): Light Scattering by Small Particles, John Wiley, 470p. ¥4,800
 Kuiper, G. P.: The Atmosphere of the Earth and Planets.
 Rozenberg, G.V. (1966). Twilight, Plenum Press, 358p. \$ 20.0
 Fabry, Ch. (1950): L'ozone atmosphérique, C. N. R.S. 278p. 9fr.

4. 長波長放射 [教科書]

- ブドゥイコ, ユム. イ (1959): 地表面の熱収支(和訳), 河川水温調査会. 181p.

[論文, 総会報告]

- 関原彊, 他(1957): 地球大気の大熱経済, 気象研究ノート, 8巻2号 134-164
 片山昭 (1962): 地球の熱収支, 気象研究ノート, 13巻2号, 101-169.
 村上多喜雄 (1968): 大気大循環の変動 気象研究ノート. 97号, 313-326.
 榎根勇 (1968): 地表面の熱収支と水収支 気象研究ノート, 98号, 342-356.

5. 放射測定 [教科書]

- Smith, R. A., F. E. Jones and R. P. Chasmar (1957): The Detection and Measurement of Infra-red Radiation Oxford, 458p. ¥4,200.

[論文, 総合報告]

- WMO Technical Note No. 85 (1967), 22fr.s
 Bertrand, R. (1968): Contribution à l'étude expérimentale des pyrradiomètres No.1,2, Institut Royal Météorologique de Belgique.