

大気乱流を勉強しようとする人へ

竹内清秀*

1. はじめに

筆者自身、はじめ気象測器に興味を持っていたが、観測の対象の性質をよく知らなければならぬと思ひ、大気乱流へと興味に向いていった。そして大気乱流研究グループ(同好の集りとして20年近く続いているグループで、筆者が世話役で月1回の集りをしている)に入れてもらった。この時、読んだ本のなかには **Sutton: Micrometeorology** があつた。また、ソ連の研究者たちの論文を訳した“大気乱流研究資料、大気乱流に関するソ連文献邦訳集”が4冊ガリ版で出された。前者は今となっては古色そう然としたものであるが、当時はまともなものとして面白く読むことができた。後の論文集は、現在の乱流研究の基礎となるような論文ばかりであつた。その後大気乱流の研究は急速に進歩し、以前の本は古くなり、それにかわつて新しい成書が出版された。いまこれらの書物を紹介しよう。大気乱流の学問は、つぎのような分野に分けることができるであろう。まず大気乱流の構造を調べる分野。風に例をとつて考えても、時間的にも空間にも非常に変動の多いことは、よく知られていることである。この変動などの構造を研究する分野である。つぎに、大気乱流の作用を考える分野である。たとえば、大気中での煙の拡散や、湖面からの蒸発などはこの分野にはいる。書物を紹介するうえで、自然と上にのべた分野にわけて話を進めることになる。

2. 大気乱流全般および大気乱流の構造について

まず大気乱流を力学的に理解するのによい教科書として、つぎの本がある。 **Lumley and Panofsky, 1964: The structure of Atmospheric Turbulence** は最近の研究結果までよく書かれている。この本は二つの部に分かれている。第1部には大気乱流を扱う基礎となる流体力学について書かれ、第2部には大気乱流の構造が相当詳しく記されている。地上20mか30mまでの接地層と呼ばれる気層の、平均風速分布や温度分布、風速や温度の変動の分散値、またそれらのスケールやスペクトルと

章を別にして書かれている。標準的な書物と思われる。

ほとんど同じときにソ連でも同じような書物が出版された。これは大気乱流の本というより、題名のように統計流体力学(一般乱流の機構)の書物である。 **Monin and Yaglom, 1965, 1967: Statistical Hydromechanics. Parts 1 and 2** がそれである。どちらもロシア語で書かれているが、第1巻の方は、1967年に合衆国政府から英訳本が出ている。さて第1巻には、乱流の基礎となる流体力学、相関関数、温度成層のある場合の乱流場、それから拡散現象に及ぶ。第2巻では変動のスペクトルや構造関数について詳しく書かれている。非常に部厚く文字通り重い感じがするが、著者の一人 Monin は有名な気象学者であるので、その書きぶりや参考文献も気象を勉強しているものにとって親しみやすい。わが国でも少し古いが小倉、1955: 大気乱流論があるが、地表付近の現象についてはほとんど触れていない。

はじめに教科書として少しむずかしい本をとり上げてしまった。特に Monin and Yaglom の本は、乱流専門家でも腹をすえて読むという種類のものである。これとは反対に、大気乱流のことばかりではないが、面白く気軽に読める本に **Munn, 1966: Descriptive Micrometeorology** がある。割りあい数式が少なく、本当にいろいろの大気乱流に関することが、しかも最近の研究成果までよく噛みくだいて紹介してある。事実、筆者は地下鉄東西線での通勤時に通読した。こういう楽しい入門書がわが国にもほしいものである。微気象学と題名はつけてあるが、地表面付近の大気乱流を概観するには非常によい書物であると思う。一読をすすめる。

以上は教科書であるが、大気乱流を概観する記述としては次のものがある。根本(1960)、竹内と伊藤(1966)、 **Obukhov and Yaglom (1967)** などである。初心者にも比較的わかりやすく書いてある。また井上が農業気象ハンドブック(1961)に書いた“耕地上の風”もわかりやすい。

大気乱流一般および構造に関する書物や論文をあげた

* 気象庁観測部産業気象課

が、もっと根本にさかのぼって研究したい方には乱流そのものを扱った書物が必要である。代表的なものの表題とごく簡単な注をあげておく。 **Batchelor, 1953: The Theory of Homogeneous Turbulence** (邦訳あり); **Townsend, 1956: The Structure of Turbulent Shear Flow**. この2冊はあまりにも有名。 **Hinze, 1959: Turbulence** は記述が丁寧。 **Schlichtung, 1955: Boundary Layer Theory** は古典的。 **Schubaure and Tchen, 1961: Turbulent Flow**; **Lee, 1961: Statistical Theories of Turbulence** この2冊はペーパーバック、小さく便利でよく書かれている。なお、温度成層のある場合についての流体力学の教科書として **Landau and Lifshitz, 1959: Fluid Mechanics** と **Yih, 1965: Dynamics of Nonhomogeneous Fluid** がある。

つぎに、地球物理学も含めての境界層の国際シンポジウムが4年から5年おきに開かれている。これらのプロシーディングが発行されているが、研究者には非常に参考になる。最近のものをつぎにあげる。これは大気拡散を主題にしたものであるが大気乱流全般にわたっているのに **Frenkiel and Sheppard (eds.), 1959: Atmospheric Diffusion and Air Pollution**. **Frenkiel (ed.), 1912: Fundamental Problems in Turbulence and Their Relation to Geophysics** は1961年マルセイユでのシンポジウムのプロシーディングであり、**Bowden, Frenkiel, and Tani (eds.), 1967: Boundary Layers and Turbulence** は1966年東京で行なわれたものの成果である。いずれも第一線の研究者の発表論文集である。論文数も多く、たとえば最後のものは概要だけのものも入れれば80ぺん近くになる。上のものとは異なるが、ソ連における300mの観測塔で得られた大気乱流研究の論文集が出版されている。 **Byzova (ed.): Investigation of the Bottom 300-meter Layer of the Atmosphere** がそれであり、イスラエルで英訳されている。いわゆる接地層よりも高い300mまでの気層を扱ったものとして興味のある論文集である。

この項の最後に、その困難性のためにあまり扱われなかった問題で最近その重要性がさげばれているものに海上気象の問題がある。 **Roll, 1965: Physics of the Marine Atmosphere** はこの問題を取りあげている。最近の研究成果までもとり入れてよくまとめているとはいえないが、海上の風や温度の場について書いてある。

しかし最近この分野で一番注目されている問題“大気と海洋の相互作用”についての記述が少ない。

3. 大気乱流の作用について

大気乱流の作用として一般に、乱流拡散と輸送が考えられる。大気乱流拡散についてはよい教科書がある。 **Pasquill, 1962: Atmospheric Diffusion** (邦訳あり) は、拡散の基礎となる大気乱流の構造から解きおこし、拡散係数を使用して解析的に微分方程式を解く実例もあげてある。また、各地で得られた拡散の実験結果が丹念に整理されて紹介され、どこに問題があるかを示している。後半には、在来の気象資料から大気拡散を推定する方法が述べられ、この分野では誰れでも知っている英国法もここにまとめて記されている。温度の高い煙の拡散には考慮しなければならない有効煙突高の実際問題も扱われている。大気拡散を扱う人たちは必ず読むべき書物である。

つぎに大気拡散のハンドブックとして次の書物が考えられる。一つは最近、合衆国で出版された書物である。 **Slade(ed.), 1968: Meteorology and Atomic Energy, 1968**は1955年同じ題名で出版されたものの大改訂で、全く書き改められたといつてよい。まず、一般気象や局地気象と拡散との関係が記され、現在提案されている各種拡散式が説明されている。さらに各地で行なわれた拡散実験がかなり詳しく紹介されている。わが国にも大気汚染研究全国協議会第三小委員会編、 **1965: 大気汚染気象ハンドブック**がある。伊東氏を委員長としておもに気象庁関係者によって書かれたものである。第3章に大気拡散が書かれている。ページ数は少ないがよくまとめられている。しかし本当の初心者には少しむずかしいかも知れない。つぎに面白い本がある。一般気象観測の資料から大気拡散を推定する演習書である。 **Turner, 1967: Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates**. 英国気象法を基礎として現実に当面する問題について、非常にやさしいものから相当複雑な問題まで解答つきで説明されている。もちろん各種必要なグラフや表が付されている。合衆国気象局が研修生用に作ったテキストではあるまいか。

「大気輸送の問題に移ろう。この分野で有名な教科書がある。少し古いのが **Priestley, 1959: Turbulent Transfer in the Lower Atmosphere** である。100ページを少しこえる小冊子ながら、オーストラリアで行なわれた野外実験の成果に基礎をおいた理論を展開している。とくに著者の得意とする自由対流や強性対流の考え方がよ

く書かれている。今でもよく引用される教科書である。

WMOから二三のテクニカル・ノートが出ているが、内容が古いし散漫である。ワーキング・グループの編集となれば致し方ないかも知れない。輸送理論の総合報告として、竹内(1968)がある。8ページにすぎないこの方面の研究の現況がわかるようになっている。またWebb (1965)も実用面からの総合報告であり、詳しい文献が付してある。

4. その他の分野との関連

大気乱流の構造は種々の他の分野と深く関係し合っている場合も多い。たとえば、航空機の設計や航空機の運行には大気乱流の性質をよく知る必要がある。1961年イギリスで行なわれたシンポジウムのプロシーディングが出版されている。**Ministry of Aviation 1963: Atmospheric Turbulence and its Relation to Aircraft** には、大気乱流の構造に関する論文が多いが、飛行機の設計に際して大気乱流を考慮すべきこと、飛行機の大気乱流に対する応答性なども論じられている。

構造物に対する風の影響は非常に大きな問題である。国際的な会合が4年ごとに開催され、そのたびにプロシーディングが出されている。この前は1967年カナダのオタワで行なわれ、**Wind Effects on Buildings and Structures** と名づけて発行されている。

電波や音の伝播にも大気乱流は大きな役割りをしている。乱流の構造との関係を述べた教科書で有名なのは、**Tatarski, 1961: Wave Propagation in a Turbulent Medium** (英訳版)である。最近、同じ著者の同じような内容の書物が出版されたらしい。この方面の勉強をする人にとっては必読の書であろう。

5. 資料

一般に学問を進めて行くには適切な資料が必要である。気象学ではこの観がさらに深い。大気乱流の勉強して行く上ではとくに観測資料を欠かすことができない。

一般の気象資料と違って研究所の技術報告などとして発行される場合が多い。それで一般の人には目につかないことも多い。しかし広く利用される資料は意外に数が少ない。これらをあげておこう。**Lettau and Davidson (eds.), 1957: Exploring the Atmosphere's First Mile. Vols. I and II** は1853年合衆国ネブラスカ州の平原で行なわれた非常に大規模な観測の結果をのせている。温度・風速は16mくらいまで詳しく測られており、摩擦応力や熱流束など普通の解析に必要なものは全部出ている。非常に利用価値の多い資料である。つぎに**Barad (ed.), 1958: Project Prairie Grass. Vols. I and II**, および**Haugen (ed.), 1959: Project Prairie Grass. Vol. III** は上記と同じ場所で1956年行なわれた拡散実験の観測値をのせたものである。拡散濃度ばかりでなく、拡散の解析に必要な気象観測はことごとく行なわれてる。合衆国ではこれらのほか二三の観測資料が印刷されている。イギリスでは、**Rider (1954)** が、オーストラリアでは**Swinbank (1955)**, **Swinbank and Dyer (1968)** が有名である。わが国でこれらに匹敵するものがないのは残念である。

6. おわりに

さて、大気乱流を勉強しようとする人は、具体的にどうしたらよいのだろう。自分の経験から言って、まず研究グループを作るか、現にあるグループ(大気乱流研究グループ)に入会することをすすめる。一人でこつこつ励むのもよいが、全体の研究の様子を知り討論を繰り返すことにより啓発されることとが非常に多い。そして適当な教科書を読まれるとよい。本当に初心者の人ならば**Munn**の本がよいであろう。気象力学をある程度勉強した人ならば**Lumley and Panofsky**がよい。現象の方に特に興味のある方は第2部から始めてもよい。筆者は一人でも多く同好の士が集まり大気乱流の研究活動をさらに活発にしたいものと願っている。

参考になる書物・文献(本文にあらわれた順にならべる)

1. 大気乱流全般および構造に関するもの 教科書

Lumley, J.L. and H.A. Panofsky, 1964: The structure of Atmospheric Turbulence. John Wiley & Sons, New York.

Monin, A.S. and A.M. Yaglom, 1965 and 1967: Statistical Hydromechanics. Parts 1 and 2. Nauka (F.M.L.), Moscow. (English Translation, 1967: Statistical Hydromechanics. Part 1. Joint Publications Research Service, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, U.S. Dept. of Commerce, 小倉義光, 1955: 大気乱流論. 地人書館. LWashington, D.C.)

Munn, R.E., 1961: Descriptive Micrometeorology. Academic Press, New York.

総合報告

1969年12月

根本 茂, 1960: 大気乱流. 測候時報, **27**, 240-247.

竹内清彦・伊藤昭三, 1966: 大気乱流研究の展望. 天気, **13**, 313-324.

Obukhov, A.M. and A.M. Yaglom, 1967: Progress in Atmospheric Turbulence Investigations. *Izv. Atmos. and Oceanic Phys.*, **3**, 207-211 (English Translation).

井上栄一, 1961: 耕地上の風. 農業気象ハンドブック, 2-16. 養賢堂.

教科書 (大気乱流を深く理解するため)

Batchelor, G.K., 1953: *The Theory of Homogeneous Turbulence*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

(邦訳, 巽友正訳, 1960: 乱流理論. 吉岡書店)

Townsend, A.A., 1956: *The Structure of Turbulent Shear Flow*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Hinze, J.O., 1959: *Turbulence*. McGraw-Hill, New York.

Schlichting, H., 1955: *Boundary Layer Theory*. Pergamon Press, London.

Schubauer, G.B. and C.M. Tchen, 1961: *Turbulent Flow*. Princeton Univ. Press, Princeton.

Lee, C.C., 1961: *Statistical Theories of Turbulence*. Princeton Univ. Press, Princeton.

Landau, L.D. and E.M. Lifshitz, 1959: *Fluid Mechanics*. Pergamon Press, London.

Yih, C.S.,: *Dynamics of Nonhomogeneous Fluid*. MacMillan, New York.

論文集

Frenkiel, F.N. and P.A. Sheppard (eds.), 1959: *Atmospheric Diffusion and Air Pollution*. *Advances in Geophysics*, **6**. [Geophys. Union, Washington, D.C.]

Frenkiel, F.N. (ed), 1962: *Fundamental Problems in Turbulence and their Relation to Geophysics*. *American [of Phys., New York]*

Bowden, K.F., F.N. Frenkiel, and I. Tani (eds), 1967: *Boundary Layers and Turbulence*. American Inst. Byzova, N.L.(ed.), 1965: *Investigation of the Bottom 300-meter Layer of the Atmosphere*. I.P.S.T., Jerusalem.

教科書 (海上気象)

Roll, H.U., 1965: *Physics of the Marine Atmosphere*. Academic Press, New York.

2. 大気拡散に関するもの

教科書

[産業公害防止協会]

Pasquill, F., 1962: *Atmospheric Diffusion*. D. Van Nostrand, London. (邦訳, 竹内清秀他, 1968: 煙の拡散.

ハンドブック

[Ridge.

Slade, D.H.(ed.), 1968: *Meteorology and Atomic Energy*. 1968. U.S. Atomic Energy Commission, Oak

大気汚染研究全国協議会第三小委員会編, 1965: 大気汚染気象ハンドブック. コロナ社.

ワークブック

Turner, D.B., 1967: *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. N.C.A.P.C., Cincinnati.

3. 大気輸送に関するもの

教科書

Priestley, C.H.B., 1959: *Turbulent Transfer in the Lower Atmosphere*. Univ. of Chicago Press, Chicago.

総合報告

竹内清秀, 1968: 輸送理論, 北陸豪雪調査報告, 気象庁技術報第660号, 400-407.

[**6**, 27-58.

Webb, E.K., 1965: *Aerial Microclimate*. Chapter 2 in "Agricultural Meteorology", Meteor. Monographs,

[Office, London.

Ministry of Aviation, 1963: *Atmospheric Turbulence and its Relation to Aircraft*. Her Majesty's Stationery

Tatarski, V.I., 1961: *Wave Propagation in a Turbulent Medium*. McGraw-Hill, New York.

5. 資料

Lettau, H.H. and B. Davidson (ed.), 1957: *Exploring the Atmosphere's First Mile*, Vols. I and II, Pergamon Press, London.

Barad, M.L. (ed.), 1958: *Project Prairie Grass, A Field Program in Diffusion*, Vols. I and II. Geophysical Research Paper, No. 59, Air Force Cambridge Research Center, Bedford, Mass.

Haugen, D.A. (ed.), 1959: *Project Prairie Grass, A Field Program in Diffusion*, Vol. III. Geophysical Research Paper, No., 59, Air Force Cambridge Research Center, Bedford, Mass.

Rider, N.E., 1954: *Eddy Diffusion of Momentum, Water Vapour, and Heat near the Ground*. *Phil. Trans. Roy. Soc., A* **246**, 481-501.

Swinbank, W.C., 1955: *An Experimental Study of Eddy Transport in the Lower Atmosphere*. *Tech. Pap., No. 2, Div. Meteor. Phys., C.S.I.R.O., Australia*.

Swinbank, W.C. and A.J. Dyer, 1968: *Micrometeorological Expeditions, 1962-1964*. *Tech. Pap., No.17, Div. Meteor. Phys., C.S.I.R.O., Australia*.