

2. 室内実験—主として回転水槽実験

瓜 生 道 也*

1.

のっけから愚痴めいて恐縮ですが、編集部からの原稿依頼を気軽に引き受けてしまったものの、いざとりかかってみるとなかなか捗りません。参考として送られてきた前回の入門講座をみますと、それぞれの分野で教科書や論文が、数多くしかも寸評を添えて列挙されていて、単なる文献一覧だけではすまないようになっているものですから、系統的に勉強したことのない私にはことは深刻です。正直に申しまして、先の入門講座で気象力学の項に紹介されている教科書の類をみましても、まともに読んだことのないものがほとんどという態たらくですから、お恥ずかしい次第です。

そこで、「文献とはそもそも何なのだろう」——と居直ってみましょう。この間にはいくつもの答があり得るでしょうが、私の思いますのは、個々の文献は教科書であれ総合報告であれ論文であれ、すべてひとりのあるいは何人かの手になる「作品」として読むのもおもしろいのではないかということです。「傑作」もあれば「駄作」もあり得まじょうが、それは措くとして、ここで強調したいのは、それらの「作品」と読者である私たちとの関係が、小説などにおけるものとは決定的に異なっている、つまり私たちが「創作」も「批評」もやる（あるいはやろうとしている）読者である点です。そうであれば、先人の手になる文献を読むことは、自分が今何を解こうとしているかを自分に向かって明らかにする作業と切り離し得ません。その意味で、文献は自分の前に立ちあはだかる精神の壁のようなものであり、壁が壁として認識されないかぎりそれは反古に等しいでしょう。

しかし、こんなことを言ったところで、読者としての楽しみももちろんあります。自分が知らなかったことを教えてくれるもの、問題意識の深さ、問題提起の鋭さ、それらと一体となった語り口の鮮かさ——そういう仕事に出会うのは大きな楽しみです、それは読者の特権でもあります。

私はこんな調子でやってきたものですから、行きあた

りばったりからいまだに抜けきっておらず、これこれを勉強するにはこれを読めばよいとかあれを読まねばならぬといった助言や案内がうまくできません。もちろん、ある事柄を私が私なりに納得するために読み破らねばならなかった文献はいくつもありますし、教わるところ多いものもたくさんあります。それらが「必読」とすれば、私にとってそうであるにすぎませんし、それにまた、気象のことを勉強するのに何もその種の本や論文ばかり読むこともないのではないかと思ったりもします。いや、これは気象を知らない人間の僻みのようです。

そういうわけで、以下に紹介する文献は回転水槽実験関係のものを除いて、全く私の好みだけで選んだものです。繰り返しますが、それらは「……のための必読文献」といったものでは決してありません。ただ、私にはとてもおもしろくまた教えられるところ多いものにすぎません。その点で、従来の文献紹介とはやや異なっていると思いますが御寛容下さい。なお、回転水槽実験に関する文献は私の目に入ったかぎり網羅しております。これらにはいちいちコメントはつけていません。気象との関連の中で考えるとおもしろそうな点については触れましたが、個々の問題点については関心のある方がそれらの文献に目を通して整理・検討して頂きたいというのが私の希望です。

また、編集部の目論見があつてこのように別立てになっていますが、回転水槽実験は元来「回転流体力学」の項に入ってしかるべき項目であると思います。それで、遠藤昌宏さんの「回転流体力学を学ぶために」(天気, 1978年6月号, 459~462頁)を併せ参照して下さい。実を申しますと、私の文献リストは遠藤さんのものへの補遺としてつくったもので、別立てになつていてもその点には変わりありません。こんな情報でもお役に立てば幸いに存じます。

2.

今、手許に2冊の和書があります。1冊は 駒林誠：気象の科学¹ で、もう1冊は 松野太郎：台風² です。この種の本は「通俗書」と呼ばれて minor に思われがちですが、この2冊は決してそんなものではないと私は

* M. Uryu., 九州大学理学部物理学科大気物理研究室。

¹「天気」25.10.

思っております。ここは、いわゆる「専門書」や「専門の文献」を紹介すべき場所ではありまじょうが、私が敢えてこの2冊を取り上げる理由はおいおいわかって頂けると思っています。

駒林氏の「気象の科学」は、著者の問題意識の深さと広さ、恐るべき博覧強記、変幻自在な精神のはたらき——さしずめ大伝奇ロマンの趣きがあります。私は読みながら驚嘆すると共にしばしば頭がパンクしそうになりました。残念ながら紙幅が小さすぎて、いろいろな事柄が圧縮されすぎているきらいがありますが致しかたありますまい。「まえがき」にありますように、ヘルムホルツの路線ないし枠組を破ることに、著者の独創的なモチーフがあるので、おそらくそれゆえに、この本には、気象学に通常概念（たとえば地衡風や乾燥断熱減率といった）がほとんど登場しません。また、あちこちに著者独自の見解がちりばめられていますが、それらを理解するかどうかは、読者である私あるいは私たちの問題であり、それらに拮抗するものをつくってみるのも私たちの仕事でありまじょう。

なお、蛇足ながら、駒林氏がこの本とほとんど地づきのところで研究を発表されていることを申し添えておくのも無意味でないように思います。たとえば、最近もハドレー循環と古気候について、とてもおもしろい論文（Komabayashi, 1976）³が「気象集誌」に印刷されました。その論文は、この本の中で提起されているひとつの問題への著者の解答であり、しかもその解のための鍵はほとんどこの本の中にあります。いわゆる「通俗書」というものは、それを読んでも決して先端的な研究は理解できないように書かれているものですが、この本は著者の研究やその態度と一体となっていて、私たちをフロンティアのすぐそばまで案内してくれます。

松野氏の「台風」は、題名どおり台風だけについてなされた講演録で、台風の物理が簡にして要をえた文章で説き明かされています。しかし、私がここで言いたいのはそのことではありません。それは著者の「方法」についてであります。

まず、台風について解くべきいくつかの問題点が観測事実から提出され、それらを解いていきながら、解き方の問題点つまりその背後にある考え方が検討され留保すべきは留保しつつ、最後に全体が矛盾なく説明される機構にたどりつくという運びです。この方法は松野氏の論文作法そのものであります。たとえば、つとに有名な「突然昇温」の論文（Matsuno, 1971）⁴をお読みになれ

ば納得して頂けると思っています。言い換えますと、この本（講演録）は、著者が台風の問題を自分で解くという形で書かれているわけです。大変勉強になります。断わっておきますが、著者のような方法が唯一正しいなどと言っているではありません。それぞれの人にそれぞれのやり方があるわけですから。とはいえ、勉強することが方法を身につけることをひとつの本質としているとするならば、この本は研究の方法とはどういうものであるかを、そのひとつの典型を、裸形に近い姿で教えてくれると思います。この本もまた決して「通俗」などというしろものではありません。いわゆる専門書や学術雑誌の、しかも外国語で書かれたものでないと勉強にならないというのはつまらぬ先入感にすぎないと思います。先の駒林氏の本やこの本は、つくづくそのことを考えさせられます。

もうひとつ私には忘れがたい本をつけ加えさせて頂きます。それは、デカルト：方法序説⁵です。よく知られていますように、この本は、ものごとを考えるに当たって自分がどんなやり方をするかを、若い頃の思い出と共に語ったものです。おもしろいのは、この本が「光学」、「気象学」、「幾何学」という三つの試論を付録にもっていて、デカルトは自分のやり方の生きた見本をこれらの試論によって示しています。哲学上のややこしい問題には私は暗いですからここでいいたてつもりはありません。私が教えられるところ多いのは、本文もさることながら、「気象学」の第8章「虹について」です。これはデカルトにも自慢の作品だったようで、まず虹が雨上がりの空や噴水の近くで見られることから、夥しい数の水滴によって屈折・反射されてくる光であることが指摘され、そうであれば、空にひとつの大きな水滴を描いてその中を通してやってくる光のふるまいを調べればよい——という具合に議論が展開されていきます。ここには、デカルトの四つの規則①速断と先入見を排すること、②解こうとする問題をできるだけ小さな部分に分けること、③最も単純なものから始めて複雑なものへ至るように順序よく組み立てること、④すみずみまでよく見わたして考え落しがないかどうか検討すること⑤と呼ばれる彼のやり方が、ほぼ完璧に成功していることが読み取れます。私などデカルトのひそみにならおうと懸命ですが、なかなかうまくいかないのが現状です。とはいえ、「方法序説」は味深い一巻であり、ほんとうに多くのものを教えられます。なお、先の松野氏の「台風」がデカルト風に書かれているのも楽しい発

見です。

3.

少しばかり専門書を取り上げます。回転流体の力学は、元来、流体力学ですから、その方面の教科書で、どういうわけか気象の人の口の端にあまりのぼらないけれど、私にはとてもおもしろいと思えるものを2冊挙げておくことにします。ひとつは、**Landau・Lifshitzv: Fluid Mechanics**⁶、他は、**G. Birkhoff: Hydrodynamics**⁷です。前者はついに評判の高い「物理学教程」の中の1冊で、流体の物理の広範な問題がぎわめて高濃度に凝縮されていて、私など戸惑ったりしますが、物理の大もとに立ち返って考えなおそうするときさまざまなことを教えてくれる本だと思います。

G. Birkhoff は著名な数学者ですが、その Hydrodynamics は数ある流体力学の本の中できわだって特異なものです。性急な有効性にこだわるならば、おそらくこの本は役立ちません。けれども、何と云うか、論理学の本を読む楽しさがあります。著者は、ダランベールのパラドクスをはじめとする夥しい数のパラドクスを分析しつつ、そうした不合理な結果をもたらす解がどんな直観的な仮説に基づいて構成されたものかを執拗に（まことに！）追いかけて、流れの対称性や可逆性の破れ、不連続の出現、不安定性など流れのトポロジーの問題を抉り出し、また流れの相似性に関する厳密な理論を試み群論を展開するといった具合です。時には浮(憂)き世ばなれして、私たちの考え方を根本的に洗いなおしてみるのもおもしろいことではありますまいか。

4.

大気や海洋の流体力学をやっている人のために書かれたもので、これまたあまり評判にならないようですが、**C. Eckart: Hydrodynamics of Oceans and Atmospheres**⁸ は、地球流体力学にとってひとつのエポックを画する本であると私は思っています。著者は前書きの中で、この本は5~60年前に書かれてもよかった* と言っておりますが、なるほどなと思います。あちこちに重要な指摘がなされていて、たとえば、1次の摂動方程式から構成されるエネルギー方程式は2次だけれど、それは1次の量の2乗(の平均)という意味でそうであるにすぎないことやロスビー波が潮汐方程式の第2種の解であることなど。殊に後者の問題は、**Longuet-Higgins** (1968)⁹が潮汐方程式の固有解の全貌を調べ尽して終止符となったものです。気象力学ではあれほど馴染まれて

きたロスビー波が、発見以来約30年漸くその位置を明確にされたわけでした。これは「現象密着的」にすすめてきた学問の有様を象徴するでき事ですし、Eckartの前書きの中の慨嘆もうなずけるように思います。

この本の他にも、**O. M. Phillips: The dynamics of the upper ocean**¹⁰ や **J.G. Charney: Planetary Fluid Dynamics**¹¹ などが興味深くまた教えられるところ多いものがあります。なお、これは教科書ではありませんが、荒川昭夫: 最近の大気大循環論¹² は私には大変変俊に富む書物であり、自分の仕事と気象との連関を考えたときいつもお世話になるもののひとつです。おそらく他の適当な項目で適任の方が紹介されると思いますので、ここではこれ以上触れません。

5.

さて、遅くなりましたが、回転水槽実験関係の文献に触れることにします。

5.1 回転水槽実験 (Rotating annulus experiment)^{17~46}

同軸2重円筒容器間に流体を入れ、その内外壁間に温度差を与えて容器全体を回転させる、いわゆる回転水槽実験は、**Hide** (1958)¹⁸ や **Fultz et al.** (1959)¹⁷ 以来もう20年を経っていますが、今なお数カ所の実験室で続けられています。測定は次第に精密化していますが、流れが完全に3次元であるのと場の変数が多いために、流れの全貌をつかみきるにはまだまだ時間を要すると思われる。最近、流体実験にドップラー・レーザーの技術が導入されるようになりましたが、3次元の流れ模様を描くまでには至っておりません。流体実験が物理実験として飛躍的に進展するには、流れの場の定量測定を可能にする技術開発が強力に推進されねばならないと思います。巻末に掲げた文献リストは、回転水槽実験およびそれに関する数値実験、理論にわたって目に入ったものすべてを網羅しました。

この実験に関する理論の方もまだ多くの未決の問題があります。殊に、流れの非線型不安定性は **Lorenz** (1962, 3)^{45, 46} の先駆的な仕事以後大きく解明がすすんだとは言いがたいですが、最近徐々に戦線膠着が解けはじめたようです。

なお、流れの不安定性の問題は、層流から乱流への転移の際、いくつかの中間状態を経るかという問題に関連して新たな注目を浴びるようになりました。たとえば、馴染み深いベナール型対流で申しますと、出現する運動様式をレイリー数とプラントル数のパラメータ空間で分けるとき、いくつかの領域に分かれるかという問題で

* この本の初版は1960年です。

す。Krishnamurti (1970)¹³ の実験によれば、プラントル数を一定にしてレイリー数を大きくしていきますと、対流のない状態、2次元(ロール状)対流、定常3次元対流、非定常3次元対流(2種類?)、乱流という具合になるわけです。また、回転角速度の異なる同心2重円筒間の粘性流体の運動(いわゆるテイラー渦)でも同じようなことが起こりますし、われわれの回転水槽実験でも温度差を一定にして回転数を上げていきますと、軸対称流(ハドレー循環)、定常波動(定常ロスビー循環)、非定常波動(ヴァシレーション、2~3種類)、乱流と流れが変化します。なぜ、どのようにして状態の数は決まるのか。逆に、層流から乱流への転移は上のよう有限回の転移を経て起こるのが一般的なかどうかという問題です。

この種の問題は、Lorenz (1963)¹⁴ がすでに早く考えています(予報可能性と関連して)。彼はベナール型対流を自由度2のモデルで取り扱い、解が全部不安定であることや二つの状態の間をランダムな周期でいきする解などおもしろい結果を得ています。このモデルは自由度が小さすぎて対流をよく表現しているとは考えにくいですが、それはそれとして、状態の不安定性の問題にとって興味ある論文です。回転水槽についても Lorenz (1963)¹⁴ は同じようなことを考えています。最近、東大の松田佳久さんが球面上の大気中に可能ないくつかの対流モードの組み合わせによって、金星成層圏の4日循環の生成機構を説明する試みを発表*されましたが、これは上の問題にも関連していてとてもおもしろく思います。いずれにしても、この種の問題はポアンカレ以来の力学系の理論と密接な関わりをもっていますし、また状態選択が何かポテンシャル・ミニマムといった原理(変分原理)で言い表わせるものかどうかといった問題とも関係していきましょう。大変魅力的です。

5.2. 角運動量の混合

回転流体の問題のひとつに、円筒容器に入れられた流体が容器と共に剛体回転しているとき、ランダムな乱れを加えてやると、その結果どんな平均流(回転状態)が生じるかというのがあまりす。角運動量や渦度の混合の問題です。

これは実験するのが手取り早いのですが、流体に正味のトルクを与えないように実験することや微弱な流れを測定することがとても困難であるために、まだうまくいっていないようです。Bretherton・Turner(1968)¹⁵ に

問題点が整理してあります。McEwan (1973)¹⁶ が慣性波の共鳴励起によって、実験的にこの問題に挑んでいますが、これは波による系統的な輸送ですから、ランダムな乱れによる混合とは少々色合いが異なっていると思います。

6.

最後にひと言。実験に意欲を感じておられる方々は、やりたいことをじっくり検討して、それにふさわしい装置をつくってやってしまう方がおもしろいのじゃないでしょうか——文献も大切でしょうが、やっているうち、問題がいろいろと見つかるように思います。ただ怪我には十分お気をつけになって下さい。私は真夜中に実験していて指の骨を折ったことがあり、いささかみじめな気持ちになりました。

実験の文献紹介とはいいいながら、技術的な事柄には一切触れませんでした。巻末文献リストの中の論文には大てい書かれていますので御参照下さい。

これで私の役目を終わらせて頂きますが、とても偏ったものになって申し訳ありません。こんなものでも何かの参考になれば幸いです。

文 献

(回転水槽実験関係文献は17から64までにひとまとめ)

- 1) 駒林 誠, 1973: 気象の科学, NHKブックス, 196, 250 pp.
- 2) 松野太郎, 1975: 台風, 東京大学公開講座, 21, 「天災と人災」, 35-67.
- 3) Komabayashi, M., 1976: J. Met. Soc. Japan, 54, 91-95.
- 4) Matsuno, T., 1971: J. Atmos. Sci., 28, 1479-1494.
- 5) デカルト, 1637: 方法序説および三つの試論, 「デカルト著作集1」三宅徳嘉他訳, 白水社(1976年), 498 pp.
- 6) Landau, L. D. and E. M. Lifshitz, 1963: Fluid Mechanics, Pergamon Press, 536 pp.
- 7) Birkhoff, G., 1960: Hydrodynamics, Princeton Univ. Press, 184 pp.
- 8) Eckart, C., 1960: Hydrodynamics of oceans and atmospheres, Pergamon Press, 290 pp.
- 9) Longuet-Higgins, M. S., 1968: Phil. Trans. Roy. Soc. London, A, 262, 511-607.
- 10) Phillips, O.M., 1966: The dynamics of the upper ocean, Cambridge Univ. Press, 261 pp.
- 11) Charney, J. G., 1973: Planetary Fluid Dynamics, 'Dynamic Meteorology. (ed. Morel), Reidel Publ. Co., 97-352.
- 12) 荒川昭夫, 1958: 最近の大気大循環論, 気象研究ノート, 9, 229-362.

* 1978年日本気象学会春季大会

- 13) Krishnamurti, R., 1970: *J. Fluid Mech.*, **42**, 295-320.
- 14) Lorenz, E. N., 1963: *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130-141.
- 15) Bretherton, F. P. and J. S. Turner, 1968: *J. Fluid Mech.*, **32**, 449-464.
- 16) McEwan, A.D., 1973: *Geophys. Fluid Dyn.*, **5**, 283-311.
- 回転水槽実験関係文献 (17~42実験, 43~64理論, (数値実験も含む)).
- 17) Fultz, D., R.R. Long, G.V. Owens, W. Bohan, R. Keylor and J. Weil, 1959: *Met. Monogra.*, *Amer. Met. Soc.*, **4**, 1-104.
- 18) Hide, R., 1958: *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A*, **250**, 441-478.
- 19) Riehl, H. and D. Fultz, 1957: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **83**, 215-331.
- 20) —, 1958: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **84**, 389-417.
- 21) Bowden, M. and H.F. Eden, 1965: *J. Atmos. Sci.*, **22**, 185-195.
- 22) Fowles, W.W. and R. Hide, 1965: *J. Atmos. Sci.*, **22**, 541-558.
- 23) Hide, R., 1969: Some laboratory experiments on free thermal convection in a rotating fluid subject to a horizontal temperature gradient and their relation to the theory of the global atmospheric circulation, 'The global circulation of the atmosphere' (ed. Corby), *Roy. Met. Soc. London*, 196-221.
- 24) Keiser, J.A.C., 1969: *Tellus*, **21**, 789-805.
- 25) ———, 1970: *Tellus*, **22**, 275-287.
- 26) Pfeffer, R. L., W. W. Fowles, J. Fein, and J. Buckley, 1970: *Pure and Appl. Geophys.*, **81**, 263-271.
- 27) Hide, R. and P.J. Mason, 1970: *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A*, **268**, 201-232.
- 28) Kaiser, J. A. C., 1972: *Geophys. Fluid Dyn.*, **3**, 159-186.
- 29) Ketchum, 1972: *J. Atmos. Sci.*, **29**, 665-679.
- 30) Douglas, H. A., R. Hide, and P. J. Mason, 1972: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **98**, 247-263.
- 31) Douglas, H.A. and P.J. Mason, 1973: *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1124-1134.
- 32) Fein, J. S., 1973: *Geophys. Fluid Dyn.*, **5**, 213-248.
- 33) Hide, R. and P.J. Mason, 1975: *Ad. in Phys.*, **24**, 47-100.
- 34) Mason, P. J., 1975: *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A*, **278**, 397-445.
- 35) Fein, J. S. and R. L. Pfeffer, 1976: *J. Fluid Mech.*, **75**, 81-112.
- 36) Gent, P. R. and H. Leach, 1976: *J. Fluid Mech.*, **77**, 769-788.
- 37) Kaiser, J. A. C., 1977: *Dyn. Atmos. Oceans*, **1**, 323-343.
- 38) Matsuwo, N., M. Uryu, and R. Sawada, 1976: *J. Met. Soc. Japan*, **54**, 339-350.
- 39) —, 1977: *J. Met. Soc. Japan*, **55**, 248-259.
- 40) Uryu, M. and N. Matsuwo, 1977: *J. Met. Soc. Japan*, **55**, 409-413.
- 41) Fowles, W. W. and R. L. Pfeffer, 1969: *J. Atmos. Sci.*, **26**, 100-108.
- 42) Pfeffer, R. L. and Y. Chiang, 1967: *Mon. Wea. Rev.*, **95**, 75-82.
- 43) Davies, T. V., 1959: *J. Fluid Mech.*, **5**, 592-621.
- 44) Robinson, A. R., 1959: *J. Fluid Mech.*, **6**, 599-620.
- 45) Lorenz, E. N., 1962: *J. Atmos. Sci.*, **19**, 39-51.
- 46) ———, 1963: *J. Atmos. Sci.*, **20**, 448-464.
- 47) Barcilon, V., 1964: *J. Atmos. Sci.*, **21**, 291-299.
- 48) Hide, R., 1967: *Phys. Fluids*, **10**, 56-68.
- 49) Hunter, C., 1967: *J. Fluid Mech.*, **27**, 753-778.
- 50) McIntyre, M. E., 1968: *J. Fluid Mech.*, **32**, 625-655.
- 51) Merilees, R. E., 1968: *J. Atmos. Sci.*, **25**, 1003-1014.
- 52) Williams, G.P., 1967: *J. Atmos. Sci.*, **24**, 144-161.
- 53) ———, 1967: *J. Atmos. Sci.*, **24**, 162-174.
- 54) Tokioka, T., 1970: *J. Met. Soc. Japan*, **48**, 293-314.
- 55) Drazin, P. G., 1970: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **96**, 667-676.
- 56) Pedlosky, J., 1970: *J. Atmos. Sci.*, **27**, 15-30.
- 57) ———, 1971: *J. Atmos. Sci.*, **28**, 587-597.
- 58) ———, 1972: *J. Atmos. Sci.*, **29**, 53-63.
- 59) Drazin, P.G., 1972: *J. Fluid Mech.*, **55**, 577-588.
- 60) Merilees, P.E., 1972: *J. Met. Soc. Japan*, **50**, 214-225.
- 61) Williams, G. P., 1971: *J. Fluid Mech.*, **49**, 417-449.
- 62) ———, 1974: *J. Fluid Mech.*, **62**, 643-655.
- 63) Smith, R.K., 1976: *J. Fluid Mech.*, **79**, 289-306.
- 64) Pedlosky, J., 1977: *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1898-1912.