

大気大循環論の紹介

廣 田 勇*

1. ま え が き

前号の雲物理にひきつづき、本号では大気大循環を新たに学ぶ人々を対象に、大循環論の現状と問題点をきわめて簡単に概観し、加えていささかのこれに関連した文献を紹介することにしよう。

入門講座をはじめに当って一月号に述べたように、最近の気象学・大気科学の発展は目ざましく、各分野の細分化がますますはげしくなると同時に、個々の分野の進歩は境界領域のみならず他の多くの分野の成果を総合的にとり入れてゆくというように、細分化と総合化は常に車の両輪の役割りを果している。この事情は大気大循環論の場合特に顕著であり、従って大循環論の理解のためには非常に多くの背景を必要とすることになる。

気象学は言うに及ばず、大気放射、熱力学、数値予報、そして時には雲物理すらも大循環とは有機的関連を持っている。それらの個々のいわば特論については、いずれこの講座で順次紹介されてゆく予定なので、ここでは現在の大循環論に直接組み込まれているものを拾いあげて解説することにしよう。そのゆえに文献の示し方も図書分類の整然さには欠けるうらみがあるろうが、その一見雑然たる意味をこそ理解していただきたいと思う。

2. 大気大循環論の現状と問題点

Hadley (1735) 以来の古典的な大気大循環論は省略するとして、話はまず地球大気の実態の姿を全球的な観測資料の統計解析により浮き彫りにするところから始る。すなわち平均的な温度分布や風系、及びその季節的変動がどうなっているかを明らかにしなければならない。この仕事は主として1950年代の前半に Mintz や Starr & White 等によりなされた。これらの統計の結果として地球大気の Climatological な全ぼうが知られると、大循環の立場から説明されねばならない問題がいくつか提起される。まず大気全体の熱収支の問題がある。大気大循環の原動力が太陽からのエネルギーによっていることは言をまたないが、地球大気は輻射平衡の状態にあるのではなく、常にその非平衡をおぎなうための大規模運動

を生み出している。

さて、その大規模運動であるが、平均的な帯状流分布や3細胞の子午面循環の意味を理解するためには、高低気圧に代表される波動擾乱の力学が必要である。1950年前後に、Charney, Eady, Kuo 等により論じられた傾圧波・順圧波は、その後 Lorenz 等により大循環に果す役割りとしての意味づけがなされ、対流圏の大循環理論はその大筋においてほぼ完成されていると言ってよい。波動の力学理論の応用としていわゆる数値予報が生まれこれ又実用の域に達して久しいが、数値予報の延長としての大気大循環数値実験もまた現在の大循環論に欠かせない重要な地位を占めている。初期の Phillips の数値実験では、南北温度差による傾圧帯状流の生成と不安定波の発達という、いわば定性的な説明の段階であったが、最近の大気大循環数値実験の発展は目ざましく、平均状態はもとより、時間変動に伴う種々の物理量を殆ど定量的に一致する程に再現している。

大気大循環の概念的 understanding のために欠かせぬもう一つの側面は回転流体実験である。回転する流体の外壁と内壁とに温度差を与えて地球大気に見たて、その中に発達する傾圧波の諸特性をしらべるこの実験は現在でも数多く行なわれ、更に室内実験そのものを数値実験で再現する試みも行なわれつつある。しかし最近の理論によれば、回転流体実験で現われる波動は、必ずしも大気中の高低気圧波動とそのメカニズムにおいて同一ではなく、実験の場合には流体の粘性や壁での境界層が重要な役割りを果している点が注目されている。

大気大循環論は文字どおり地球大気全体を取扱うものであるが、実際には観測資料の問題と予報の要請との両面から、くわしい議論は中緯度対流圏に限られていることが多かつた。従って低緯度(熱帯)や高層(成層圏、中間圏)の大気大循環に関しては、むしろ将来の問題として未解決のまま残されている重要な点が多々ある。二三の例をあげるなら熱帯に関しては積雲対流と大規模運動の相互作用、赤道波動と準2年周期との関係、高層については冬の成層圏突然昇温現象……等々、観測、理論、数値実験のいずれの面からも今後の研究が必要とされ、大

* 東京大学理学部地球物理教室

循環論が将来切り開くべき新しい分野であると言えよう。

3. 文献紹介

この項だけを読む読者のために、重複をいとわず大循環に関連した文献を紹介することにしよう。

3-1 一般向解説

大循環論の要点をあまり数式に頼らず平易に解説したものは岩波の『科学』にしばしば掲載されている。正野(1953)は当時明らかになったばかりの実測を理論的に説明する方向を示し、松本(1960)、栗原(1965)は大循環の数値実験の発展ぶりをレビューしている。松本は主として Phillips の仕事を、栗原は Mintz-Arakawa 及び Smagorinsky グループの結果をまとめている。最近の GARP (地球大気開発計画) の宣伝をも兼ねて小倉・柳井(1967)は大気科学としてのこれからの気象学の方角を語り、柳井・小倉・山本・岸保(1967)はそれぞれ熱帯気象、大気と海洋の相互作用、大気放射、数値実験について GARP 計画が大気大循環論に果たす役割りを最先端の話題をひいて解説している。一般向けとは言え、これらの解説は簡潔にして要を得た密度の高さ、文章の格調の良さ等から言っても優に専門家の一読に値する。

日本気象学会では、主として高等学校の地学教師を対象とした夏期大学講座をすでに二年間開催したが、その講義録の中に菊池(1967)、廣田(1968)の大気大循環論の初歩的解説がある。

1月号の一般気象学の手引きにも紹介してあるが、一般向き解説書として近年出色の小倉(1968)；大気の科学は大気大循環論を中心に書かれているとの見方も出来る。大気のすがた、低気圧の実体、数値予報、熱経済の各章が大循環の章で見事に集約されている。豊富な図が要を得て配置されているのも大きな特色と言えよう。

物事を理解するのに、まず数式を持って来ないと気のすまない人と、式が無くてもわかるものはわかるはずという考えの人が居ると思うが、上記諸解説はつまりその後者向きと言うべきであろう。必ずしもレベルの差ではない。その好例のひとつが E.N. Lorenz (1966) : *The circulation of the atmosphere.* である。

3-2 教科書・総合報告

大気大循環論のみを表題にかかげた教科書の類は意外と少い。大学教養課程か学部前半程度のレベルの教科書

風のスタイルを取ったものに都田(1964)：大気の運動がある。数式は殆ど使っていないが、話の筋道が整然としていること、用語が緻密であること、波動現象の物理的意味づけがしっかり書かれていること、等の特色を持っている。残念ながらこの小冊子は天文学講座の一分冊として入っているため、あまり知られていない。

旧版の気象学講座の中には、毛利・松本(1956)：大気大循環がある。前半は『総観的立場より見た大循環』として観測事実の現象論的まとめがなされ、後半は『理論的立場より見た大循環』として種々の輸送量と波動の関係が数式を使って量的に議論されている。傾圧波の大循環の意味づけが少し不足のようにも思われるが、文献の引用が1954年までであり、つまり Lorenz (1955)、Phillips(1956)以前の大循環論であるという位置づけも出来よう。この地人書館の気象学講座19巻は最近よそおいを新たに新気象学叢書と銘うって書き直されつつあり、そのひとつとして大循環論の名も見えるが未だ上梓のはこびに至っていないのは惜しまれる。

気象研究ノートの総合報告というよりは、教科書とも言うべきものに荒川(1958)：最近の大気大循環論がある。全体で134ページにわたるこの報告は、その構成と云い、物理的洞察の深さと云い、或いは説明の緻密さと云い、すべての面で大循環論に関する名著の名に値する大作である。前書きで著者自身が述べているように、これは単なる他の論文の紹介ではなく著者の考え方をはっきりと打ち出している。内容も前半は実測結果の物理的解釈に重点を置き、次にエネルギー論、傾圧不安定理論を具体的な方程式の導き方で詳細に論じている。更に回転流体実験、大循環数値実験にも議論が及び、現在から見ても10年前という古さをいささかも感じさせないところはさすがである。労作であるだけに簡単に通読するというわけにはいかないが、大循環を本格的に勉強しようとする人には是非一読をすすめたい。

外国の著作に目をむけると、スタンダードの教科書と言えるものはあまり見当らない。それで教科書というより広い意味での高度の解説書として最近の E.N. Lorenz (1967) : *The nature and theory of the general circulation of the atmosphere* と V.P. Starr (1968) : *Physics of negative viscosity phenomena* の2冊をあげておこう。前者は WMO の会議に於けるロレンツ教授の講演をまとめたもので、題目は平易のようだがオーソドックスな構成のなかにロレンツ一流の深い哲学的色彩が感じられる。(尚、本書は測候時報

に朝倉博士の訳文が掲載中である)。後者の negative viscosity とは一見奇異な表題だが、ジェットストリームの如き集中現象を、地球大気のみならず海洋循環、太陽大気、更には銀河の渦状構造にまで敷衍して論じている。気宇廣大なる人には話のタネとしても面白かるう。

3-3 論文・雑誌

本講座は大循環論のオリジナルな論文そのものを逐一紹介することをその旨とはしていないので、ここでは大循環のやや古典的論文集として日本気象学会編 (1960): **Selected meteorological papers** のうち **General circulation Part I, II** を示すにとどめよう。1948~1959年にわたる大循環論のマイルストーンとも言うべき22編の論文が集められている。なお、最近日本気象学会ではこのシリーズの続編として1960年以降の論文集を編集していると聞く。

その他大循環に関連のある和文雑誌として気象庁電子計算機室: オメガと気象庁長期予報管理官室: グロス・ベッターのふたつをあげておこう。両者とも大循環関係の論文紹介や解説がしばしば掲載されている。

3-4 関連分野の文献

大気大循環に直接関連した放射の総合報告として気研ノートに関原・朝倉・嘉納・村井・片山(1957): 地球大気の熱経済がある。具体的な数表を多く用い記述的に解説してある。同じ系列に気研ノートの総合報告として片山(1962): 地球の熱収支があり、新しいところでは村上(1968): 大気大循環の変動、片山(1969): 大気大循環と熱がある。いずれも大循環論における熱の取り扱い方の最近の方法が具体的に詳細に説明されている。

気象力学に関しては、いずれこの講座でくわしい説明がある予定なので簡単に二三だけ触れておく。正野(1960): 気象力学はその第12章偏西風帯の力学の部分で2次元順圧波の議論がくわしい。気研ノート17巻の小倉(1966): 最近の気象力学(I) は大学院レベルの教科書で方程式の取り扱いがきわめて厳密である。第4章地衡風平衡の部分では擾乱の持つ物理的意味づけも親切に書かれてある。ついでに同じ意味で N.A. Phillips (1963): **Geostrophic motion** も加えておこう。

回転流体に関しては従来不思議と日本になじみがうすく、従って日本人の手になる総合報告らしきものは見当たらない。それで本家の D. Fultz (1959): **Studies of thermal convection in a rotating cylinder**

with some implications for large-scale atmospheric motions をあげよう。実験の写真が豊富な総合報告である。もうひとつ最近のまとめとして、H.P. Greenspan (1968): **The theory of rotating fluid** がある。題目からわかるとうりこれは理論が主となっている。はじめのほうでのべたように、最近ではしかしながら回転流体実験を俄かに地球大気の大循環と結びつけることが疑問視されて来ていることを注意しておこう。

その他大循環論として未解決の分野は低緯度と高層大気であるが、熱帯低緯度については「天気」に柳井(1967): 熱帯気象学の展望があり、熱帯における大規模擾乱の問題点が浮き彫りにされている。成層圏については気象学会の成層圏に関するシンポジウム記事、朝倉・村上・根山(1965)、同じく杉本・関口(1966): の二つが平易な解説である。同じころグロス・ベッターに書かれた都田(1965): 成層圏の大気循環(I) はオゾンと放射平衡を中心にした総合報告である。他に最近行なわれた超長波のシンポジウムの解説として廣田(1968)と新田には成層圏循環を中心とした大規模波動擾乱についての総合報告がある。成層圏・中間圏に関する本格的な総合報告として R.J. Murgatroyd et al (1965): **The circulation in the stratosphere mesosphere and lower thermosphere.** を最後にあげておこう。論文の引用は非常に豊富であり、高層大気循環の諸問題概観するにはきわめて好適である。

以上きわめて羅列的に文献の紹介を行なったが、読んでおわかりのように大循環と一口に言っても分野が多岐にわたるため、これ一冊読めば充分というものはないし、又ここに示したものすべてを読む必要も毛頭ない。

“入門講座”というたてまえからすれば、初心の人が勉強を進めてゆくための指針をも与えるべきであろうが、それは若輩の筆者にとってあまりにも荷が重すぎる。ただひとことだけ言えることは、大気大循環の如き複雑多岐な問題を考えるときに是非必要な条件として、常に全体像を明確にとらえながら個々の細かい議論を展開していったほうがいいということである。他の分野の専門家が「勉強・研究」ではなく「理解」しようとするときにも、やはり事情は同じことであろうと思われる。谷一郎先生の「流れ学」のまえがきの中に「数理解析が流体の運動を決定するかの如く思い込む学生がいては困る云々」の言葉があったが、これも思うに、似た事情を指しているのではなからうか。本講座の前半で大循環論の平易とも思われる解説にかなりのウエイトを置いたのも、その轍を踏むのを避けたつもりであった。

文献 (本文中の文献を掲載順に並べた)

一般向解説

- 正野重方, 1953: 新しい大気大循環論 I, II, 科学, **23**. 332-338, 406-416.
 松本誠一, 1960: 大気大循環の数値実験, 科学, **30**, 442-447.
 栗原宜夫, 1965: 数値実験による大気大循環の解明, 科学, **35**. 647-652.
 小倉義光・柳井迪雄, 1967: 気象学から大気科学へ, 科学, **37**. 73-77.
 柳井迪雄・小倉義光・山本義一・岸保勘三郎, 1967: 大気大循環研究の展望, 科学, **37**. 132-147.
 菊池幸雄, 1967: 大気大循環, 日本気象学会編・夏期大学講座講義録. 41-45.
 廣田 勇, 1968: 大気大循環論の思想的基盤, 同上, 23-27.
 小倉義光, 1968: 大気科学, 日本放送協会, NHKブックス, 222p. 280円.
 Lorenz, E.N., 1966: The circulation of the atmosphere, American Scientist, **54**. No. 4. 402-420.

教科書・総合報告

- 都田菊郎, 1964: 大気の運動, 新版新天文学講座(5), 地球の物理, 83-118. 恒星社厚生閣
 毛利圭太郎・松本誠一, 1956: 大気大循環, 120p. 気象学講座第13巻, 地人書館, 280円.
 荒川昭夫, 1958: 最近の大気大循環論, 気象研究ノート, 9巻4号, 229-362.
 Lorenz, E.N., 1967: The nature and theory of the general circulation of the atmosphere, 161p, WMO, Geneva.
 Starr, V.P., 1968: Physics of negative viscosity phenomena, 256p, McGraw-Hill, \$9.95.

論文集・国内雑誌

- 日本気象学会編, 1960: Selected meteorological papers, Vol. 1, 2, General circulation, Part I, II, 気象庁電子計算機室: オメガ
 気象庁長期予報管理官室: グロスベッター

関連分野の文献

- 関原 強・朝倉 正・嘉納宗靖・村井潔三・片山 昭, 1957: 地球大気の熱経路, 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.
 片山 昭, 1969: 大気大循環と熱, グロスベッター7巻2号, 1-64.
 正野重方, 1960: 気象力学, 岩波全書, 284p. 岩波書店, 430円
 小倉義光, 1966: 最近の気象力学(I), 気象研究ノート, 17巻1号, 1-61.
 Phillips, N.A., 1963: Geostrophic motion. Review of Geophysics, **1**. 123-176.
 Fultz, D. et al 1959: Studies of thermal convection in a rotating cylinder with some implications for large-scale atmospheric motions. Meteorological monographs Vol. 4, No. 21. 104p.
 Greenspan, H.P., 1968: The theory of rotating fluid, 300p. Cambridge Univ. Press, \$15.00
 柳井迪雄, 1967: 熱帯気象学の展望, 天気14巻3号, 73-91.
 朝倉 正・村上多喜雄・根山芳晴, 1965: 成層圏に関するシンポジウム, 天気12巻7号, 217-230.
 杉本 豊・関口理郎, 1966: 成層圏気象に関するシンポジウム, 天気13巻1号, 11-25.
 都田菊郎, 1965: 成層圏の大気循環(I), グロスベッター, 3巻4号1-48.
 廣田 勇, 1968: 超長波の力学に関する問題点, 気象研究ノート95号, 62-79.
 新田 尚, 1968: 対流圏と下部成層圏の相互作用における長波, 超長波の役割, 同上, 80-108.
 Murgatroyd, R.J., et al 1965: The circulation in the stratosphere mesosphere and lower thermosphere. WMO Tech. note No.70. 206p.

☆文献の選択に当っては新田尚の有益なコメントを頂いたことを追記して謝意を表したい。