

大気大循環論100年の歩み*

廣 田 勇**

1. はじめに

人類が地球を自転公転する惑星として捉えるようになるまでには、アリストテレスの昔からコペルニクス、ケプラー、ガリレイ、ニュートンの系譜につながる長い試練の時代があった。

それと同様に、中緯度の陸上における天気天候の経験から始まった気象学が、15~16世紀の大航海時代を経て地球全域の大規模な風系を知るようになり、やがてそれを自然法則の適用によって整理解釈することが出来るようになるまでには、17世紀の Halley, 18世紀の Hadley 等を嚆矢として現代の大気大循環論に至る300年もの長い道のりがあった。

このたび、日本気象学会の創立100周年をむかえるに当って、大気大循環論の100年にわたる歩みを概観してみることにした。そのためには、まず最初にこの小論の性格として、どのような視点から大循環論の歴史を論ずるかを明らかにしておくべきであろう。

その第一は時間軸の取り方で、本文では100周年に対応して一応1880年以降を扱うが、研究内容との関連で適宜前後関係を入れかえてゆく。年表作成が目標ではない。

更に重要なのは“大循環論”という枠組みの定義の問題である。大気の大循環を論ずることは、他の特定テーマの議論と違って、その対象とする内容が多岐にわたるばかりではなく、“大循環そのものを取り扱う研究”と“大循環に関与する個々の物理過程の研究”との二重構造を持っていることに注意しなければならない。たとえば積雲対流とか地形性波動とか、或いは境界層とか赤外

放射とかは、当初にはそれ自体の興味から出発した研究であったろうが、今やそれらは大循環論と密接に結びついている。よって本論ではそれらの部品(素過程)とその組合せから成る本体(複合過程)ととともに大循環論の枠組みに取り込むことにしよう(ただし本文では主として力学関係に限られることをお断わりしておく)。

さてこのように大循環の研究を部品と全体との両面から眺めようとするならば、次の着眼点として、種々の観測・統計や理論計算・数値モデル等の結果を記述した論文とは別に、それらの成果を総合してひとつの認識体系を構成しようとする試み自体が大循環論を支える大きな仕事であることに気がつく。事実このような試みは、大循環研究のそれぞれのエポックに対応して、エッセイとか総合報告とかの形式を取って現れてきている。そのマイルストーンが果たした役割を検討することも非常に興味深いので、この小論の第3章で紙数を割いてみるつもりである。

最後に、もうひとつの視点として、世界全体における大循環論の歴史と、我が国におけるそれとがこの100年の間どのようにかわって来たかを、個々の研究と認識体系構成との両面から論じてみたいと思う。いろいろな意味でこれはかなり難しい作業であろうが、日本気象学会100周年にとって、綺麗なまま避けて通るべき問題ではないと考えるからである。

だいぶ前置きが長くなったが、筆者の意図するところは御理解いただけたものと思う。本文には大循環に関する具体的な観測事実や計算結果を表わす図とか方程式などは何ひとつ示さない。そのような知識は必要に応じて個々の原論文や教科書から得るべきものである。むしろ本文では拙いながら歴史評論の筆法を借用して話を進めることにしたい。

* An historical review of general circulation studies during the last hundred years.

** Isamu Hirota, 京都大学理学部.

2. 5つのエポックとその性格

大気大循環研究における時代の流れを内容別にみて、とりあえずは便宜上次のような5つに区分してみる。

- (1) 大循環全体を定性的に論じた時代
(19世紀後半)
- (2) 波動力学の時代
(1920~1950年代)
- (3) 観測に基づく統計解析の時代
(第2次大戦後~1950年代)
- (4) 大循環数値モデルの時代
(1950年代後半~1970年代前半)
- (5) 観測の発展と新しい力学の時代
(1960年以降)

以下、これら5つのエポックの性格を、それぞれの時代の代表的な仕事を引用しながら概観してみよう。

2.1. 古典論の発展と限界

Halley, Hadley に端を発した古典的大気大循環論は、その後二世紀余にわたり、幾多の修正改良が試みられ続けた。19世紀のなかば頃までには Dove (1837), Maury (1855), Ferrel (1856), Thomson (1857) などの仕事があり、特に Ferrel の仕事はいわゆる三細胞説をはじめて提唱したこと（それ故に現在でも中緯度の間接子午面循環はしばしば Ferrel cell と呼ばれる）、コリオリ力を正しく扱い温度風の概念を用いたこと、地衡風調節の考えの萌芽が見られること、などの点において高く評価されている。

しかしながら、この頃までの大循環論の特徴は過去の研究の部分的な修正の努力に終始していたと言えなくもない。たとえば Hadley の角運動量保存則が両極域で非現実的な強すぎる西風をもたらすことを、仮想的な摩擦で押えようとするなどである。当時の大循環論の目標は、軸対称な（或いは仮想的な帯状平均場の）循環における各種物理量間のバランスを説明することにあったが、過去の説の修正に当っては、応急処置にとどまっていたが故に、悪く言えば“あちらを立てればこちらが立たず”式の印象は拭えない。更に大袈裟な言い方をすれば、そのことが古典的大循環論の限界を自ら示しているということに気付かなかった（或いは気付いても新しい方向が見つからなかった）ところに古典論の悲劇があった。

このあたりが丁度 100 年前に当る。19世紀の終りに至って、古典論の最後をかざる2つの仕事が見れた。すな

わち Oberbeck (1888) と Helmholtz (1888) である。Oberbeck の価値は、大循環を説明するために物理法則を適用するにあたって、従来の部分的定性的な使い方をやめ、摩擦の効果を含む力学方程式系の解を全体として求めようとしたところにあった。大循環というものを各種物理量がバランスした平衡状態として捉えようとするならば、これは正しい態度と言える。もちろん、彼の扱った方程式自身は不完全なものであったし、計算機の無い時代に数値解をきちんと求めることも不可能であった。しかし、彼の考え方は後の大循環数値モデルの思想を先取りしたものであったと言える。

これに対し、Helmholtz の議論の意義は、ハドレー説の修正として要請されてきた摩擦の効果に、渦（乱れ）という実体的な物理像を与えた点にある。彼の考えた渦は、現在の高気圧波動とは異なっていたが、帯状平均からのずれ、つまり東西方向の非一様性が渦動粘性係数という形で大循環に重要な役割を果していることを示唆している点において高く評価されるべきであろう。この思想は後に述べる Bjerknes らの仕事へと受け継がれてゆくこととなった。

大循環を軸対称運動の範囲でのみとらえる古典論は19世紀末に終焉を告げた。しかしながら、次の時代として波動が脚光を浴びようになるまで約30年間の空白がある。その間、古典論が限界に達し、かわって非軸対称運動を考えなければならぬという、いわば発想の転換をもたらす直接の動機となったものは一体何であったろうか。

考えられることのひとつは上層風の観測である。19世紀末までの大循環論はその正当性の保証をすべて地上で観測される風系と気温分布に求め、上層風に関しては推論の域を出るものではなかった（因にラジオゾンデの発明は1928年のことである）。このような状況を反映して、WMO の決議により上層雲の動きを世界的に観測する試みが1896~97年に行なわれ、その結果 Ferrel や Thomson の考えた大循環像に疑問を生ずることとなった。しかし現在の目から見て、この雲観測のプログラムは、その姿勢は買えるにしても波動論の進展に決定的な役割を果したとは言い難い。

一方、地上風の経験から嵐（低気圧）に代表される非一様運動の存在は夙に知られていたが、Helmholtz を除けば今世紀はじめて、低気圧とは軸対称大循環の場の中に生ずる副次的な運動にすぎないと見做されていた（たとえば Margules (1903) の低気圧に関するエネルギー

ギー論はそれ自体画期的な卓見ではあったが、その当時においては大循環論とのかかわり合いを持っていない。

結局のところ、波動論の出発点としては、特定の観測事実や計算結果というより、天才ヘルムホルツの思想がその後の30年間に醇化されていったと見るべきなのかも知れない（もし1900年頃の論文を詳細に調べれば、この点に関し非常に興味ある気象学史の問題が見つかりそうであるが、残念ながら今その余裕はない）。

2.2. Hadley 循環から Rossby 循環へ

軸対称運動のみでバランスを考えようとする古典論が破綻した後、1920年代に入って、2つの新しい考え方が提唱された。そのひとつは Defant (1921) によるもので、彼は大循環論に乱流の混合距離の考え方を導入し、渦による熱の水平（南北）交換が重要であることを量的に指摘した。続いて Jeffreys (1926) は、角運動量保存の式の検討から、低気圧に伴う南北風と東西風の相関（現在の慣用記号で書けば $\overline{u'v'}$ ）が角運動量バランスにとって子午面循環による $\overline{u' \cdot v'}$ より重要であることを主張した。Defant の考えた渦とは、必ずしも低気圧（長波）そのものではなかったが、この両者の議論によって大循環における波動の果す役割が明確になったと言える。

しかしながらこの両者に共通して注意すべきは、低気圧の存在を経験的事実として知った上でその“作用”を論ずることと、その“成因”を解明することとは別のことだ、という点である。つまり、現実の大循環の説明には低気圧による熱や角運動量の輸送作用が不可欠であることがわかったにしても、それは低気圧の存在の必然性を証明したことにはならないからである。本文のまえがきの中で述べたように、この段階に至って大循環論を全体と部品とに分けて考える必要が生じてきたことになる。

部品としての波動の研究は Helmholtz の思想を受け継いだ V. Bjerknes とその協力者たち（いわゆるノルウェー学派）によって1920年頃から花開いた。J. Bjerknes は1919年に、現在でもなおしばしば引用される有名な前線のモデルを提出し、低気圧を極前線上に発達する不安定波動として捉えた。このモデルは更に Bjerknes と Solberg (1922) によって発展させられた。ノルウェー学派に端を発した低気圧波動の力学は、やがて J. Bjerknes and Godske (1936), J. Bjerknes and Holmboe (1944) を経て戦後の Charney (1947), Eady (1949) による傾圧不安定理論の確立へとつながってゆく。ただ

し、Charney や Eady の仕事はもちろんノルウェー学派の低気圧論に支えられたものであったが、彼等の論文の中にはもはや大循環そのものを直接説明するという意識は見られない。このことは以下の論点と合せて考えると、きわめて興味深く思われる。

一方、低気圧波動をあくまでも大循環との関連において研究することもノルウェー学派の重要な仕事であった。この線に沿った研究には Bergeron (1928) や V. Bjerknes (1933, 1937) があり、特に後者は baroclinicity の概念を確立するとともに古典論における Ferrell cell が、波動擾乱を考えることによってはじめて正しく解釈できることを示した。以後、大戦をはさんで1950年頃まで、大循環に果す波動の役割の議論は Rossby によって集大成された。Rossby の為した個々の仕事は多岐にわたり、一言で要約するのは難しいが、敢えて述べれば planetary vorticity という概念を中心に据えた点にあると言えよう（たとえば絶対渦度保存則の摂動から導かれる有名なロスビー波の西進公式はその一例である）。Rossby (1941) の考えた大循環像は必ずしも古典論のように一枚の図に集約できるものではない。平均帯状流の緯度高度分布に附随する角運動量バランスの機構を波動を媒介とした渦度輸送に置きかえて考えた複雑なモデルである。この考え方はおそらく Taylor (1915) による vorticity の mixing の議論にその根源のヒントを得たものと思われる。一方、気象力学の歴史の立場から言えば、大規模な運動の場を、運動方程式（運動量保存則）のままで見るか、それを一度空間微分した渦度方程式（絶対渦度保存則=Helmholtz の渦定理の拡張！）で見るかのちがいは、1950年代の準地衡風方程式系への準備でもあった。

いずれにせよ、1920年頃から始まった大気波動力学の研究は、30年の歳月をかけてロスビー循環の認識と傾圧不安定理論の確立という2つの大きな金字塔を打ち立てたことになる。この先から更に分化した枝である数値予報と長期予報に関しては、同じ100周年記念レビューにある岸保氏と朝倉氏の解説にゆだねる。

波動力学の時代の記述を終えるに当たって、くどいようだが、先に述べた大循環と波動との関係についてもう一度触れておきたい。

確かに大循環の平均場を説明するために波動が不可欠であることがわかった。そして、現実の平均帯状流の中で波動の発達する理由も不安定理論から説明された。しかしながら、たとえば中緯度西風ジェットに伴う角運動

量バランスの解釈として北東-南西の軸の傾きを持った波動下では $\overline{u'v'} > 0$ である, という説明だけでは不十分である. 一方, 上下と南北にシアーを持ったジェット流を基本場とする傾圧不安定波の固有解を求めてその南北構造が北東-南西に傾いていることを示したとしても (たとえば McIntyre (1970)) やはり不十分である. 何故なら, その結果は流れと波とが相互に矛盾なく存在していることを示しているにすぎないからである. 無矛盾性とは必ずしもその存在の必然性を意味するものではない. どうしてロスビー循環における波動は現実観測されるような形態と特性を持っているのか, という問題に対する満足すべき解答は現在でも尚与えられていないのである (これは定量的なことを言っているのではない. 従って, たとえば数値シミュレーションという手段はこの問題に対して無力である. それについてはまた後でふれよう.).

2.3. 観測事実の解明

ラジオゾンデの普及に伴い, 第二次世界大戦中の航空機の発達とも関連して, 1940年代から高層気象観測は急速に進展した. その結果, 大気大循環研究の性格は, 1930年頃までの限られた地上データのみによる推論から, 対流圏全層にわたる観測に基づいた実証へと変貌するに至った. そのほしりとも言うべきものは, 先に述べた Rossby の角運動量輸送の議論の裏づけとなつたいわゆる Jet Stream の発見である.

高層観測資料に基づく解析の意義は, 言うまでもなく, 大循環の三次元的様相を明らかにすることによって種々の問題提起を行うことと, 熱や角運動量バランスを種々の方程式を用いて説明する際に定量的な議論を要請することの両面にある.

このような大循環の観測的研究は大戦後まもなく Rossby 自身によって Chicago 大学で始められたが (1947), 更に組織的な解析は1940年代後半から50年代にかけて, Starr を首領とする MIT のグループと UCLA の Mintz 等によって行われた.

Starr 一派の仕事は, 気温や風速等の帯状時間平均分布 $[\bar{A}]$ はもちろんのこと, 運動量やエネルギーや水蒸気の global budget の議論に不可欠な $[A^*B^*]$ や $\bar{A}'B'$ の諸量を可能な限りのデータを用いて示したものである. この精力的なプロジェクトにより, 1950年代の半ばまでに今日多くのテキストに示されている観測事実の大筋 (すなわち climatology) がほぼ確立されるに至った. MIT のこの研究はその後の IGY (1957-58) データを

加えて南半球まで含めたものに拡張された. その集大成は70編に及ぶ論文をコンパイルした Project Report (Starr and Saltzman, 1966) に見られる. Starr にはじまる MIT の大循環研究の系譜はその後 Newell 等により引き継がれ, 熱帯や成層圏をも含めたより信頼のおける climatology (1972, 1974) を与えている.

一方, Starr 一派にくらべて論文の数は少ないながら, Mintz (1951, 1954, 1955) の仕事もまた大循環研究の本筋を正しく歩いた点において Starr と同格に評価されている. 詳細には触れないが, Fultz (1951), Hide (1958) らに始まる回転水槽実験も平均流と波動の実態を具体的に示すことによって大循環の理解を増す一助となった研究である. それと同じ意味で, 1950年代から始められた Scherhag 一派の成層圏解析 (いわゆるベルリンマップの発行) もまた, 突然昇温をはじめとする成層圏大循環研究の土台を支えた仕事として深く記憶にとどめておくべきであろう.

このように, 観測の集積によって大循環の実体が明らかになってくるにつれて, Rossby の仕事のところでも触れたように, 大循環とはもはや1枚や2枚の模式図で表現できるような簡単なものではないことが強く認識されるようになった. 従って観測的研究の第1幕が降りた1950年代の中頃に, 次の発展として2つの大きな筋道の芽ばえが生じてきたことは蓋し当然の成りゆきであったと言えよう. そのひとつは次に述べる大循環数値モデルであり, もうひとつは Lorenz (1955) の energetics に代表される新しい概念の導入である.

2.4. 大循環数値モデル

大気大循環をある条件のもとで支配方程式系全体の解として表現しようとする考えはすでに19世紀末の Oberbeck に見られる. 同様にある初期状態から出発して時間変化を追う試みは有名な Richardson (1922) の数値予報に端を発している.

1956年に Phillips がはじめて大循環の数値モデルを成功させた裏には更に次のような背景があった.

- (i) 観測事実に基づくロスビー循環のイメージの確立.
- (ii) 傾圧不安定理論をはじめとする長波の力学の発展.
- (iii) 電子計算機の実用化と数値計算技術の進歩.
- (iv) 上記 (iii) に基づく1950年代中頃の数値予報の成功.

つまり Phillips の目ざしたものは, 南北温度差を持

つ大気の中で発達する波動擾乱を1ヶ月以上にわたり時間積分(すなわち予報)することにより、その統計的性質をもって大循環の再現(シミュレーション)と見なそうとすることであった。この思想は現在でもそのまま通用する。もちろん彼の扱ったモデルは種々の制限から準地衡風二層という簡単なものであり、計算技術自体にも不備があったため意味のある結果は1ヶ月足らずにとどまったが、この仕事は当時の力学的な大循環像の力強い支えとなっただけでなく、1960年代の数値モデル時代への大きな飛躍台となった記念すべき成果であった。

以下、いくつかのモデルを取り上げる前に、このような数値モデルの大循環研究における意義を整理しておく。言え換えればそれは各種のモデルの価値判断をする基準となるはずである。

数値モデルの意義とは、

- (i) 力学、熱、境界条件等多くの物理過程を同時に扱えること。つまり現象の自由度(独立変数)を多く出来ること。
- (ii) 非線型項など数学的手段のみでは扱いが困難な問題も数値的に解けること。
- (iii) 定量的な議論が可能なこと。
- (iv) 条件を人為的に変え相互の比較が出来ること。
- (v) 観測不可能な(或いはまだ観測されていない)物理量を算定できること。

などにあると言ってよからう。

1960年代の前半に行われた GFDL (Smagorinski and Manabe, 1965) と UCLA (Mintz, 1964) では主として上記(i)~(iii)に対応して、観測される大循環に似たものを数値的に再現することに意が注がれた。少し遅れて始められた Leith (1965) と Kasahara and Washington (1967) もモデル作成の技術的な面を除けば同じ範疇に入る仕事である。これらのモデルに共通して言えることは、第1近似として大循環の数値シミュレーションに成功したこと、そして同時に再現に失敗した部分を露呈することにより、モデルに組み込まれた物理法則の適用の不完全さが新たな問題として浮び上がってきたこと、である。この後者の試行錯誤は、いわば医療と薬品開発の関係に似ている。あれこれ注射や投薬を試みてうまく完治するものを見つけ出そうというわけである。この段階での主たる問題点は、放射や対流など熱に関与する物理過程の取り扱い方や差分法などの計算スキームの改良であった。

しかしながら、もしこのような試みによって大循環が

ある程度うまく再現出来たととしても、それは用いられた方程式系や計算スキームが正当であったことを証明したにすぎないのではないか、という皮肉な疑問は常に残っている。大循環に限らず、確かに数値シミュレーションの成功だけではその物理過程を理解したことにならないのは、丁度特効薬の発見が必ずしも病気そのものの生理機構を解明したことにならないのと同じことである。2.2節の最後でふれたように、数値モデルによる初期値問題では解の無矛盾性は示せても存在の必然性は示せないからである。

1970年代に入って大気大循環モデルは更に活発に開発され、その性格も次第に枝別れして行った。そのいくつかを羅列すれば、成層圏を含む高層へ或いは北半球から全球への拡張、季節変化や年々変動を目標とした積分時間の延長、初期条件や境界条件を種々に変えたコントロール実験、大気海洋結合モデルや氷河期の再現の試み、等々枚挙にいとまがない。一方、上記(v)に対応して、大循環モデルの結果をあたかも観測データと対等に見なし、各種波動の力学的性質を解析する試みや、実測値から出発して実際の長期予報に役立てようとする努力なども GFDL モデルを中心として行われている。

しかしながら、繰り返して言えば、数値モデルというものの持つ宿命とも言うべき疑問、すなわち大循環モデルの結果によって我々は本当に大循環について何がわかったのか? という点については必ずしも明確な答は得られていない。それは古典論から近代論への移行の際に尻に出された問題である大循環本体と部品との総合認識という点にかかわっている事柄である。とりわけ、parameterization なる手段が、その哲学が不毛のまま、単なる便法として勝手にひとり歩きをしていることが多い現状を見ると、いっそうその感を深くする。1960年代から70年代へかけて咲き誇った大循環数値モデルが、長い大循環論の歴史の中でどのように位置づけられ評価されるかは、今しばし時を仮さねばならぬであろう。

2.5. 新しい観測と力学

大気大循環の本質の理解を求める努力の方向として、上に述べた数値モデルとは全く異なった流れの道筋も存在した。それは新しい物理概念を導入することによって、複雑な大循環の抽象化を試みることである。そのような態度は考えてみれば Hadley 以来一貫して続いていた大循環論の底流でもあった。低気圧の集合を乱流と考えた Defant 然り、傾圧波動として捉えたノルウェー学派然り、渦度に着目した Rossby また然りである。同じ

系列に並ぶものとして、温度の空間的非一様性が運動の生成の源であることを、available potential energy という新しい概念の導入によって整理解釈した Lorenz の卓見もまた大循環論の進歩に多大の貢献をもたらしたものであると言える。

これらの epoch-making な発想の源は、当然のことながら、観測に裏づけられた現象の事実にある。如何に大循環が複雑なものであるとはいえ、その複雑さとは単なる乱雑さではない。そこにははっきりとした特徴が見えるはずである。となれば、次に現れる新しい力学の発想をもたらすものは、観測の発展により見出された新しい現象の特徴であるにちがいない。事実、歴史は次のような好例を呈示している。

高層気象観測の発達により、1950年代には成層圏循環の特徴が対流圏とは非常に異なることが知られるようになった。そこではもはや前線や低気圧波動という考えは通用しない。成層圏には地球規模のスケールを持ったプラネタリー波動のみが卓越している。就中、Scherhag (1952) による冬季成層圏突然昇温の発見、Reed (1960) と Ebdon (1960) による赤道成層圏東西風準二年周期振動の発見はそれまでの常識を打ちやぶる画期的なものであった。

このような“特徴的な複雑さ”に対する力学の発展は Charney and Drazin (1961) と Eliassen and Palm (1961) による“波動エネルギーの垂直伝播”という概念の定式化に始まった。それに続く伝播理論の拡張と応用、数多い成層圏波動解析、更には Matsuno (1971) による突然昇温モデルとその発展、一方赤道に関しては同じく Matsuno (1966) の赤道 β -平面理論、Yanai-Maruyama (1966)、Wallace-Kousky (1968) による赤道波の発見、そして Lindzen-Holton (1968) による準二年周期振動モデル、等々の目ざましい進展が見られた。その詳細は同じく 100 周年レビューの松野氏の解説にゆずり、ここでは大循環論の見地からひとつの重要な点のみを指摘しておきたい。

突然昇温も準二年周期も、その本質を一口で言えば“伝播性波動と平均流との非線型相互作用”ということに尽きる。それは単にこの2つの特殊な現象の説明にとどまるだけでなく、そこから生れてきた wave action という概念に代表されるような、より普遍性のある新しい気象力学の確立であった。しかしそれと同時に、Charney と Drazin が夙に指摘した“非相互作用の定理”(ある条件下では波動は平均流の加速減速をもたらさないとい

うこと)もまた、大循環の本質の理解にとって極めて重要な新しい視野を開くものであった。

Hadley 循環の考えから Rossby 循環のそれに移行したとき、波の存在は平均場の説明にとって不可欠であった。確かに種々の波動は熱や運動量を輸送し、観測されるような大循環の子午面分布を構成している。しかし“非相互作用の定理”を逆手に取って、波が作り出す部分の子午面循環を(それが平均流と無関係であるが故に)最初から取り除いてしまったような大循環を考えることが出来るはずである(Holton and Wehrbein(1980)のモデルがそれを具体的に示している)。これこそまさに、250年前に生まれ100年前に死んだはずの古典論の新しい衣を着た再登場である、と言ってよいであろう。更に補足を加えるならば、この非相互作用の定理にまつわる一連の研究によって、Ferrel 以来の間接子午面循環に対して Euler 平均と Lagrange 平均の見地からはじめて明確な物理的解釈が与えられたのであり、その解釈をもたらした動機は、対流圏と成層圏における波動の持つ意味の違い—傾圧不安定波と伝播性内部ロスビー波—が正しく理解されたことによるものであった。

この事情はまさに、新しい観測に導かれた新しい力学概念が個別的な現象の説明から一般論へと昇華し、遂には大循環論そのものの発展をもたらしたのだという歴史的教訓を如実に示している好例である。その意味で、1970年代の GARP およびその集大成としての FGGE が今後の大循環論に如何なる貢献をもたらすかは、ひとえに、そのデータセットの中から新しい力学の問題意識が発掘されるか否かにかかっていると言えるであろう。

3. 認識論としての大循環論

すでに述べたように、大循環論とは個別的な現象とその複合過程の両面により成り立っているものであるから、全体像を構成するためには、ある明確な着眼点が必要とされるはずである。もしその着眼点が的を射たものであったならば、その線に沿った研究の発展が期待される。その意味で大循環論の歴史の中に随所に見られる総合像の確立、或いは認識体系の構成という作業もまた、個々の解析や計算結果とは別に、見逃してはならない重要な仕事である。

古典論の範囲では、全体と部品との分離が進んでいなかったため、2.1. 節で述べた論文そのものが総合像を作る努力でもあった。その色合いは Rossby (1941) あたりまで続いている。ところが、波動論が進展し独自の

世界を作り始めた1940年代の後半あたりから、大循環というものをどう考えれば良いかについての、いわば認識論が出されはじめた。それは明らかに研究レポートとはスタイルを異にした、エッセイ、レビュー、講演録、テキスト、といった形式の中に見出される。

たとえば Starr (1948) は先に述べた Jeffreys (1926) の $\overline{u'v'}$ の考えを再評価し、それ以後に展開される彼自身の膨大な観測統計に立ち向かう態度を確認している。

一方 Flohn (1950) は 20 世紀前半の 50 余編の関連論文を集約し、古典論と近代論とをいくつかの視点から比較対照することにより、前者を“鉛直循環説”、後者を“水平質量交換説”として特徴づけた。同じように、Palmén (1951) は英国気象学会の Symons memorial lecture で波動擾乱が大循環に果たす役割の重要性をあらためて強調した。この両者は必ずしも目新しいアイデアを提出したものではないが、Rossby, Starr, Mintz 等によりアメリカで急速に発展した大循環研究に劣らず、ドイツや北欧に生まれた近代論の思想がヨーロッパでも正しく受け継がれて行ったことを示す好例であり、その事情は次の Bolin の総合報告 (1952) にも当てはまる。

Bolin の議論は、過去の研究のおさらいにとどまらず、大循環に対する彼自身の視点を明確に打ち出した点において極めて優れたものである。この総合報告はまず大循環という言葉の定義の確認から説き起こし、当時出はじめていた Starr や Mintz の解析結果をふまえながら、単なる時間空間平均としての大循環よりも、index cycle に代表される循環場の変動に着目すべきことを強調している。次いでスケールの概念を用いて波動擾乱の記述の原理を明らかにし、数学的取り扱いの可能な簡略化・抽象化された大気モデルの構成が大循環の理解の為には不可欠であることを主張している。この論点は、2.4. 節で述べた 1950 年代後半に始まる大循環数値シミュレーションの方向とは一見相反するように思われるが、むしろ 2.5. 節の新しい力学の発展を示唆したものであると見ることが出来る。Bolin 自身は 1950 年代に数値予報と深く関係していたにもかかわらず、あくまでも原理的な認識を追い求めようとする態度の見られることは極めて興味深い。

全く同様な態度は Charney (1959) の仕事にも具体的に見られる。これは総合報告ではないが、Phillips (1956) の数値モデルの発展として、変数や層を増やし量的により現実大気に似せようとする方向は採らず、逆に波動をモード展開してその安定性や energetics を出来

るだけ簡単な形で表現することを試みている。その理念は彼がこの計算を simulation とは考えず theory と呼んでいることから明らかであろう。ロスビー循環としての大循環の原理を、このようにより簡単な数学的モデルで抽象化してゆく努力は、その後 Lorenz の一連の非線型振動論 (1960, 1962, 1963) へと発展して行く。

さて、Starr 一派に代表される観測的研究の蓄積、準地衡風方程式の完備による波動力学の充実、そして本格的大循環数値シミュレーションの成功、等々の状況を背景に、認識論としての大循環論の確立が Lorenz (1967) によって与えられた。

ジュネーブでの WMO 会議の席上、“大気大循環の本質と理論”と題して行われた講演の中で、Lorenz は Hadley (1735) の論文の冒頭の一節を引用することから始め、大気大循環を理解し説明するとはどういうことであるかについて、深い洞察を述べている。その要点は、現実大気に関する定量的な議論と、理想化された大気の本質に関する定性的な議論との意味するところを明確に識別することにある。この講演録の第 2～8 章は力学方程式系、観測事実、バランスの要請、エネルギー論、モデル実験、数値シミュレーション、波動理論等々の様々な見地から歴史的な数多くの研究結果をふまえた総合報告風に書かれているが、そこに一貫して流れている思想は、まさにハドレー以来求め続けてきた“真の理解とは何か”に対する解答の試みである。そこには Lorenz がいみじくも表題に選んだ“nature and theory”という言葉の持つ重みがずっしりと感ぜられる。彼の講演は、大循環論をデータと計算の集合体からそれを素材とした自然認識哲学にまで引き上げたものとして長く歴史に残るものであろう。

同じように、個々の事実からより普遍的な概念を引き出そうとする試みの例として、Starr (1968) も記憶に留めておくべきもののひとつである。彼は波動による運動量輸送 $\overline{u'v'}$ がジェットを維持するための集中化作用を持つことに着目し、いわゆる負粘性 (negative viscosity) の概念を提出した。彼は更にその議論を敷衍して他の惑星や太陽に共通して見られる運動量の集中化作用を論じている。ただし、この場合、共通の概念の適用例を集めることと、その概念の基礎固めをしっかりと行うことは別であることに注意しておく必要がある。ついでながら、ほぼ時を同じくして、地球大気大循環の一般化として Golitsyn (1970) による惑星大気大循環の統一理論が試みられたこともつけ加えておく。もっとも、

この仕事もまた、その後の発展が見られないが、ここにも Lorenz の言う現実的定量的議論と抽象的定性的議論との峻別の難しさがひそんでいるように思われる。

大循環に関する認識論として、もうひとつ指摘しておくべきものに、“地球流体力学”という考え方がある。これは、大気のみならず海洋も含めて、熱や重力や回転といった共通の要因に支配される地球上の流体運動を、抽象化した形で統一的に見直そうとする試みである。その芽ばえはすでに Rossby の仕事にも見られるし、先に述べた回転水槽実験で液体の運動を大気循環の analogy と見なした点にも伺える。このような見地からのまとめとして、古くは Eckart (1960) や Phillips (1963) があり、その後のものとしては Charney (1973) や Pedlosky (1979)、最近では Charney and Flierl (1981) などを挙げることができる。

しかしながら、Starr の negative viscosity と同様、この場合もまた、大気と海洋の類似点や共通点を拾い出すこととその現象の本質を理解することとを混同してはなるまい。一般的に言って、パラダイムの構築とは目的と手段の両面を兼ね備えているものである。その意味で、地球流体力学の意義は、その中から如何なる新しい着想が生まれ認識が深められたかという点に求められるべきであり、同時に、たとえば波による radiation stress といった概念が海洋力学の側から提出され、やがてそれが大気の場合にも適用されて成功をおさめるに至ったことの歴史的教訓も大切にせねばならない。

話を大気大循環そのものに戻そう。1970年代においては、少なくとも対流圏に関するかぎり、認識論としての大循環論は新しい視点を開くことなく停滞しているかの如く見える。しかしながら、古典論の終焉に当ってはヘルムホルツの天与の着想が波動論の発端となったこと、或いはまた突然昇温や QBO の例で述べたように新しい発展はむしろ一見意外なテーマから生れてくること、などを併せ考えると、今更ながら研究の歴史の流れにおける紆余曲折の難しさを感じざるを得ない。従って、今後の大循環論が如何なる方向に進むかの予測や示唆を与えることなど、到底この小論の及ぶところではない。唯ひとつだけ言えることは、大循環論の拡張として現在さかんに行われつつある気候の問題に関しても、個々の統計やモデル計算の具体的な内容とは別に、認識論としての気候論の確立が是非とも必要だ、ということである。その意味で上記の Lorenz の議論は気候論を考えるひとつの出発点と見なしても良いであろう。

4. 我が国における大循環論

これまでに、駆け足ながら過去 100 年にわたる大循環論の歴史を概観してきた。以下ではこれに対応して我が国における大循環論の歩みが如何なるものであったかを述べてみたいと思う。その際、視点としては、(i) 我が国における大循環研究が前章までに述べた世界の研究の流れにどう貢献したか、(ii) 国内国外を問わず従来の研究成果が総合像として我が国にどう定着したか、の 2 点に焦点を絞ることにする。

ただしこの場合、“我が国における研究”の定義をしておかなければならない。本論では一応、長期間外国に在住してその国の市民と対等の立場に居る日本人の仕事は除いて考えることにする。逆に日本の大学や気象庁等に所属している日本人が visitor の形で外国研究機関で行った研究は我が国の研究に含める(外国人が日本国内で行った研究は、大循環の場合実例が皆無なので考慮しなくても良からう)。

この定義を見て、大循環の研究には本来国境など無いから、日本と外国の区別をすること自体ナンセンスである、と考える人もあろう。研究者個人の立場にたてば、筆者自身もその考え方に賛成である。しかし、それを言うためには国際レベルで通用する研究実績を示すことが先決である。過去 100 年間に果してそれが為されてきたかどうか、まず客観的にながめてみる必要がある。もしあればよし、不幸にしてさにあらずばそのよって来たる所以を反省せねばなるまい。上に述べた第二の視点とはその意味も含んでいる。

しかしながら、このような主旨で我が国の大循環論をレビューしようとするならば、単にすぐれた論文をいくつか拾い出すだけではなく、必然的に他の仕事に対する批判を伴うこととなろう。生身の人間にとって、気象界先輩諸氏の仕事の批判をすることは極めて困難な作業である。だがそれを避けることは許されまい。いささか気は重い、歴史家の立場に徹して筆を進めることにしよう。

4.1. 我が国の大循環研究*

この項の最初に、まず北尾次郎の名前を挙げることにし誰しも異存がないであろう。1887年(明治20年)に独逸語で書かれた“地球大気の運動と回転性の嵐の理論”と題する彼の論文は、Oberbeck (1888)に魁けて古典論の範囲ながら大循環の特徴を力学方程式系の解として表

* 以下日本人の論文や著作は、欧文和文を問わずそのフルネームを漢字で示す。

現しようとした本格的なものであった。その背景となる 19 世紀中葉までの大循環論は、彼が若くして独逸留学中ヘルムホルツのもとで学んだものである。つまり、このような人材を生み出したのは明治維新政府であり、それを育てたのは西欧の学問的雰囲気だったと言える。従って、当時の我が国の学問レベルがほんのひと握りの西洋留学生者によってかろうじて支えられていた事を考えると、北尾のような先駆的研究が日本の気象界に根をおろし枝を広げてゆくことは望み得べくもなかったのであろう。

日本気象学会 75 年史の有住有介氏の論説によれば、明治時代の日本の気象学は役に立つものであることを旨とし、さらに悪い意味での国粹思想が西洋排斥の一般的風潮を作り出していたため、北尾の研究に限らず、近代的気象学は異端視されていたという。

漸く明治の後半に至って、岡田武松が「近世気象学」(1901)や「気象学講話」(1908)を書き、更に英文で梅雨論(1910)を発表するなど気象学としての研究の体裁が整ってきた。しかし、明治の終りから大正時代にかけては、大規模大気力学(大循環)に何らかの意味で関係するものとしては、僅かに藤原咲平(1922)の渦の研究と西村伝三(1926)の前線の研究が見られるだけである。同様に、昭和のはじめから大東亜戦争に至る十数年間も、岡田の気候論、堀口由己の台風論、中田良雄の梅雨論等、日本の気象に関する独自の優れた研究はあったが、地球規模でものを見る大循環論については、僅かに小平吉男、荒川秀俊、桜庭信一等の研究にその萌芽が感じられる程度である。

結局のところ、北尾を別格とすれば、1940 年頃までの我が国の大循環研究とは、その歴史的意義は充分認められるにしても、以後の発展とくらべて見ると、必ずしも近代気象学の本流を支えたとは言えない。これをして、岡田武松の学問的指導力の限界と見るのは酷に過ぎるであろうが、その点についてはまた後でふれる。いずれにせよ歴史は容赦なく時を流れせしめ、研究の旗手は次の世代へと移ってゆく。

中央気象台長が岡田から藤原へと受け継がれた丁度その頃、藤原の渦の思想に啓発された正野重方は、ノルウェー学派に始まる大気波動論の意義をいち早く認識し、彼自身の大気擾乱に関する一連の研究(1940, 1941)において我が国の現代気象力学の先覚者となった。世界的レベルで見て、正野の仕事が Rossby のそれに比肩するものであったとは言えないにしても、以下に述べるよう

な戦後の発展と考え合せると、我が国の気象学に対する正野の貢献は、岡田、藤原とはまた違った意味で、高く評価されて然るべきである。

大戦をはさむ 1940 年代における波動論の急速な進展をよそに、我が国は当時の国際社会情勢から約 10 年にわたる空白を余儀なくさせられたが、敗戦後の復興と国際交流の再開の結果、1950 年代に入って戦後の第 1 世代とも言うべき研究グループの芽が正野の指導下で生れはじめた。その代表的な仕事をいくつか挙げれば、岸保勘三郎(1950)の傾圧不安定理論、笠原 彰(1950)の Jet の維持機構に関する研究、毛利圭太郎(1953)の Jet の断面解析、松本誠一ら(1954)の Zonal index に関する議論、真鍋淑郎(1955)のエネルギー論、荒川昭夫(1957)の平均循環に関する研究などである。

しかし残念ながらこれらの仕事に代表される 1960 年頃までの我が国の研究もまた、2.2., 2.3. 節で述べた世界の大循環研究に積極的な貢献をしたとは言えない。そのひとつの例証として、前出の Bolin や Lorenz の総合報告の中に、この小論の意味での我が国の研究論文が一篇も引用されていない事からもわかるであろう(Lorenz の引用論文 150 編中に Arakawa の計算スキーム、Manabe の数値モデルがあるが、それらはアメリカ定住後の仕事である)。Bolin がスウェーデン人、Lorenz がアメリカ人であることを差し引いて考えてもなお、この落差は如何ともし難い。

一方、当時の日本の気象学がすべて世界の二流以下だったわけではない証拠として、中谷宇吉郎、山本義一、井上栄一、小倉義光らの仕事はすでに 1950 年代の Journal of Meteorology に多々引用されるなど国際的なレベルにあったことは記憶しておくべきである。

結局、大循環研究に関するかぎり、1950 年代の第 1 世代とは、欧米の研究を catch up し、その間に貯えた力を基礎として、やがて我が国の数値予報の定着と、アメリカにおける大循環モデルの発展に尽した点において、その存在価値が認められると言うべきであろう。

一方この系列から少し離れて、大循環の観測的研究を定着させたものに村上多喜雄の仕事がある。1951 年の梅雨論に始まる彼の研究は、その後突然昇温のエネルギー解析(1965)、戸松喜一と共同の対流圏大循環解析(1965)に代表されるように MIT の Starr の流れを汲み、やがて monsoon の研究の指導的立場に立つに至っている。特定の論文は挙げないが、同じ意味で高橋浩一郎、須田建、和田英夫、朝倉 正らの統計解析も大循環と長

期予報を結ぶ基礎を与えたものであった。

1960年代に入ると、数値予報や大循環数値モデルとは別の分野が開かれ始めた。これは 2.5. 節で論じたように、IGY (1957-58) を契機とする観測の発展、端的には突然昇温や準二年周期振動の発見に刺激された成層圏に高の大気への興味である。しかし、仄聞するところによると、1960年に東京で開かれた数値予報の国際シンポジウムの折、Charney 教授が例の Charney-Drazin (1961) の伝播理論を発表したところ、当時の我が国の力学研究者でその真意を理解できた者は皆無に近かったという。

このような状況の中で高層大気大循環の面白さと以後の発展の可能性とをいち早く感じとり、先駆的な仕事に着手したのが第 1 世代の最後に当たる都田菊郎であった。1963年の成層圏循環に関する彼の解析は、プラネタリー波動の作り出す間接子午面循環を具体的に示した点において、今なおしばしば引用されるほど国際的に高く評価されている。同じ頃、沢田竜吉が松島晟と共同で行った中間圏循環のモデル計算 (1964) もまた、Leovy (1964) のそれとならぶ独創的な仕事であった。

先覚者指導者としての都田や沢田の功績は、1960年代の後半から70年代前半にかけて、成層圏循環 (赤道を含む) の研究分野で多くの仕事をした第 2 世代を育てる土壌を作り出した点にもある。その影響を直接間接に受けたこの第 2 世代には、2.5. 節の新しい観測と力学の項で述べた柳井迪雄、松野太郎をはじめとして、廣田 勇や瓜生道也などが含まれている。この世代の研究成果が国際レベルの先端にあったことは、たとえば Holton の成層圏中間圏の monograph (1975) の中に彼等の研究が数多く引用されていることから証明されよう。もちろん、このような成果の生れた背景には、我が国における計算機事情の好転、国際交流の活発化、などの研究環境の進歩に加えて、基礎固めに苦勞した第 1 世代の有形無形の遺産や、アメリカに移住した人々の活躍による日本気象界への国際的な信用向上があったことも忘れてはなるまい。

この項の最後に、我が国における大循環モデル研究の歴史について触れておくべきであろう。

Phillips (1956) による準地衡風 2 層モデルの成功の後、大循環の数値シミュレーションの趨勢は大型高速計算機の助けを借りた多層プリミティブモデルへと向かっていった。我が国では IBM 704 の導入による数値予報の現業開始が1959年であり、数値予報に関してもすでに数年の立ち遅れがあった。このような困難な状況の中で松

本誠一 (1960) は Phillips モデルの拡張として準地衡風 5 層モデルによる大循環数値シミュレーションを試みた。しかしその芽は何故伸びなかったのであろうか。皮肉な見方をすれば、大型計算機による本格的なシミュレーションを目ざす人々は日本を去って条件の良いアメリカに移り、残ったグループの殆どは数値予報の枠の中に留まったからである、と言えなくもない (松本はその後メソ気象に転向しそこで成功をおさめるが、それはまた別なストーリーである)。このように戦後の第 1 世代がいわば米国移民型と国内残留型に色わけされてみえることは、第 2 世代がどちらかといえば無国籍型であるのときわめて対照的である。

その後十年間以上にわたり、我が国における大循環数値モデルの研究は僅かに菊池幸雄 (1969, 1971) のスペクトル法によるブロッキングのシミュレーションと片山昭 (1972) の UCLA モデルへの放射過程の導入の仕事があるのみである。しかしこの両者の孤軍奮闘は、後の気象研究所モデルへの礎石となった。

1970年代後半に入り、我が国の大学における計算機事情も改良された結果、東京大学の木田秀次 (1977) や中村一 (1978)、京都大学の岩嶋樹也ら (1979) など新しい大循環モデルの芽ばえが見られ始めている。気象研究所の筑波移転とともにはじめられた時岡達志や木田秀次らのモデル作成もその一環である。第 3 世代とも呼ぶべきこれらの仕事がどのような新しい問題意識のもとに発展し国際的な貢献をもたらすかは、もちろんすべてこれからの問題である。その前途は険しいであろうが、確固たる理念を持って進むことが望まれる。

4.2. 我が国における認識論

上に述べた我が国の大循環研究の歴史と、その中に見られる個々の仕事の評価を裏づけるために、この小論の最後に、大循環をどう捉えるかという認識論が我が国に定着していった跡を日本語で書かれた教科書や総合報告の中に探ってみることにしたい。

30年ほど前までの日本では、general circulation を“大気環流”と呼んでいたようである。戦前の我が国気象界の第一人者であった岡田武松は昭和12年 (1937) 出版の「気象学礎石」の中で80ページ余りを大気環流の議論に割いている。まず地球規模の風系を当時の観測事実に基づいて示した後、“大気の環流の数理論”と題して、Ferrel, 北尾, Oberbeck, Helmholtz 等19世紀の研究から Jeffreys や Phillips の1930年代に至るまでの結果を細かい数式のひとつひとつつまで含めて詳細に記述してい

る。これを見ると今更ながら当時の岡田の博学ぶりに感嘆せざるを得ない。しかしながら、それがあまりにも見事な程忠実な紹介であるが故に、現時点で見ていくつかの歴史的批判を禁じ得ない。その第一は、従来諸研究のまとめとしての、岡田自身の大気環流に対する見方がほとんど見当らないことである。欧米の学問の受け売りがすなわち日本の学問であるのは明治以来の体質である、と言ってしまうばそれまでであるし、岡田ひとりが良くそれを為し得たことは確かなのであるが、今昔の感に耐えない。

岡田について言えば、敢えて自説という形で論じなくても、紹介内容の取捨選択が自ずからひとつの認識の筋道を形作っているのだとする考えもあろう。しかし岡田の教科書の章立てが、環流論の3章あとに颶風（低気圧擾乱）の議論を置き、しかもその両者が殆ど独立に書かれているところを見ると、岡田にとって古典論から近代論への移行、すなわち波動擾乱の大循環に果す役割の重要性という認識が無かったと言わざるを得ない。もちろんこれは岡田個人の責任ではない。Rossbyの出現まで1930年代の大循環論が世界的に混迷期にあったのは先に見たとおりである。しかし昭和19年（1944）出版の岡田の「理論気象学」を見てもやはりその内容は変わっていない。この本が戦争末期でしかも岡田の晩年（70歳）の出版であることを割引いて考えても、結局のところ、近代的大循環論の我が国への定着は、岡田に代表される世代によっては為され得ず、終戦後の1950年代へと持ち越されたと見るべきであろう。

1950年代に入り、戦後の成果をふまえた大循環論の紹介が再開された。たとえば桜庭信一（1951）は予報研究ノートの総合報告の形で“最近の大気環流論”と題し、Rossby以後の発展をいち早く理解しているし、松本誠一（1953）はBolin（1952）のレビューの全訳を地球物理学文献抄に載せている。特に前者の桜庭の解説文には、Flohn（1950）のテキストの長所短所を指摘するなど、単なる紹介の域を脱して、独自の解釈を与えようとする努力の跡が見られる。

同じ頃、正野重方（1953）は岩波の「科学」に発表した“新しい大気大循環論”の中で、古典論から近代論に至る研究の歴史を詳しく述べたあと、“物理的には擾乱は大循環の不可欠な要素なのである。したがって大気の擾乱の研究が直ちに大循環の研究ともなるのである。”（原文のまま）と1940年来の彼自身の大気擾乱に関する研究が大循環論の正鵠を射ていたことを高らかに宣言して

いる。そしてRossby以後の研究を比較検討した後、大循環とはもはや一枚の模式図に示されるような単純明解なものではなく、多くの物理機構の組み合わせからなる複雑なものであるという認識を新たにしている。正野の論説はその後の大循環研究の長い道のりを予測したものであり、“世界の気象学の中心問題が大循環にあるのは誠に宜なるかなである”と胸を張って結んでいる。思えばその十数年前、大気擾乱の研究がロスビーの亜流であると先輩から酷評されたとき、色をなして反論した若き日のことが正野の胸に去来していたのかも知れない。時に正野42歳。その後正野自身は直接大循環に関する論文は殆ど書かなかつたが、彼の指導下で戦後の第1世代の活躍があったことを想うと、岡田、藤原以来の中央気象台の伝統がその時点でひとつの実を結んだといつて良いであろう。

2.2., 2.3. 節で述べた1950年代前半までの波動力学の成立と観測統計の蓄積のまとめとして、毛利圭太郎と松本誠一は「大気大循環」(1956)を書いた。この教科書は当時の我が国の気象界が僅か10年足らずの間に大循環研究の先端を理解し消化した様子を良く表わしている。題材の選び方、章立てともに当時のものとしては非常に良くまとまっているという印象を受ける。その上、部分的にせよ我が国の研究結果が取り込まれている点において、戦前の教科書には見られない斬新さが感ぜられる。

しかし、再び歴史家の目で批判をするならば、この本の出た1956年という時代が、Phillipsに始まる大循環数値モデルとLorenzに始まる新しい概念の導入のちょうど幕開けに当る、まさに大循環論の第4時代の前夜であったことをこの本から伺い知ることは出来ない。その意味での我が国における幕引きが荒川昭夫（1958）の手によってなされるまで、更に2年かかっている。

荒川の“最近の大気大循環論”はその取り扱っている題材に関する限り、前記毛利、松本のテキストと殆ど変わらない。しかし認識論として見た場合、他の総合報告や教科書とはいくつかの点において全く異なっている。その第1点は、従来の多くの研究論文を引用する際にその結果を紹介するというよりもむしろ根底にある考え方を述べ、併せて著者自身の考え方を表面に打ち出すことを明言していることである。第2に観測事実を提示した後、解決さるべき問題点を著者自身の言葉で5項目に焦点をしばっていることである。更に第3点として、大循環の理解が未来予測につながってゆくべきことを強調している。これはまさにPhillipsに始まった数値シミュ

レーションが25年後の今日、力学モデルによる長期予報の試みへとつながってきた筋道を誤たず予言しているものである。当時の長期予報が専ら経験則や相関法に依存していたことを考えると、これは卓見と言えるであろう。そして最後に、将来の問題点のひとつとして小規模擾乱と熱の効果の重要性を指摘している。これもまた、後の荒川自身による積雲の parameterization (1974) と UCLA モデルの原点を見る思いがする。

以上を総合すれば、荒川のこの論説はその物理的洞察と見通しの深さにおいて、Lorenz のそれに匹敵するものであり、大循環論に関して戦後の第1世代が国内に残した最大の遺産であったと言ってもほめ過ぎではない。

その後1960年代から70年代にかけて、大循環数値モデルの一見華やかな結果に眩惑され、確固たる理解なしにそのアウトプットのみを紹介する解説書の類はいくつか出たが、総合像を作る試みはなされなかった。この20年間の空白は、まさに第1世代と第3世代の数値モデルに関するギャップを意味している。

むしろ、大循環モデルとは無関係の立場にあった第2世代の中から、瓜生(1976)、廣田(1981)、松野(1981)島崎達夫と共著)のような著作が生れている。これらの扱っている内容や対象は三者三様ながら、いずれもその根底には大気大循環に対する独自の思想がひそんでいる。同じことは、我が国における地球流体力学の定着に貢献した木村竜治の作品(1979)についても言える。もちろんこれらの著作もまた、後に続く世代がそこに盛り込まれた問題意識を受けとめて世界をリードする新しい仕事を生み出すことによって評価されるべきものであることは言をまたない。

5. おわりに

以上大気大循環論の100年にわたる歩みを、研究と認識、世界と我が国の対比をそれぞれ縦糸と横糸にして概観してきた。

おそらく、学会会の中には、100年祭という行事そのものに意義を認めない方もあろう。確かに100という数字自体には何の意味もない。しかし、本文で再三強調してきたように、個々の研究論文の集積がある時期にひとつの認識体系を構成し、それを指導原理として次の時期の発展があるという歴史のサイクルは大循環論の場合とて例外ではない。筆者自身、たまたま現在が、過去の歴史を振り返り将来の展望を行う良い時機だと思ったからである。

ただしこの小論は読んでおわかりのとおり、独断と偏見に満ち満ちたものとなった。題材や文献の選択にも遺漏は多々あったろう。しかし開き直って言えば、そもそも歴史とはその著者の眼を通して見たときはじめて歴史たり得るものである。また後半部では先輩同輩諸氏に対し無礼に過ぎる批判も述べたが、本来評論とは批評される側を基準として批評する側の力量を測る作業でもあった。その意味でこの拙ない史論の試みに対する批判もまた読者諸賢にゆだねることとして筆を擱く。

謝 辞

本文の執筆にあたって種々の貴重な御意見を寄せて下さった瓜生道也・木村竜治・野上 豊の諸氏に厚く感謝の意を表します。

文 献

- Arakawa, A., 1957: On the maintenance of zonal mean flow, *Papers in Met. and Geophysics*, 8, 39-54.
- and W. Shubert, 1974: Interaction of cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, *J. Atmos. Sci.*, 31, 674-701.
- 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, 134 pp.
- Bergeron, T., 1928: Über die dreidimensional verknüpfende wetteranalyse, *Geophys. Publ.*, 111.
- Bjerknes, J., 1919: On the structure of moving cyclones, *Geophys. Publ.*, 1, 8.
- and C.L. Godske, 1936: On the theory of cyclone formation at extratropical fronts, *Astrophys. Norv.*, 1, 199-235.
- and H. Solberg, 1922: Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation, *Geophys. Publ.*, 3, 18.
- and J. Holmboe, 1944: On the theory of cyclones, *J. Met.*, 1, 1-22.
- Bjerknes, V., J. Bjerknes, T. Bergeron and H. Solberg, 1933: *Physikalische Hydrodynamik*, Berlin, Springer, 797 pp.
- , 1937: Application of line integral theorems to the hydrodynamics of terrestrial and cosmic vortices, *Astrophys. Norv.*, 2, 263-339.
- Bolin, B., 1952: Studies of the general circulation of the atmosphere, *Advance in Geophys.*, 1, 87-118.
- Charney, J.G., 1947: The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current, *J. Met.*, 4, 135-162.
- , 1959: On the theory of the general circulation of the atmosphere, *The Atmosphere*

- and the Sea in Motion (The Rossby Memorial Volume), 178-193.
- , 1973: Planetary fluid dynamics, *Dynamic Meteorology*, Reidel Publ. Company, 97-352.
- and P.G. Drazin, 1961: Propagations of planetary scale disturbances from the lower into the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **66**, 83-110.
- and G.R. Flierl, 1981: Ocean analogues of large-scale atmospheric motions, *Evolution of physical oceanography*. MIT Press, 504-548.
- Defant, A., 1921: Die Zirkulation der Atmosphäre in den gemäßigten Breiten der Erde, *Geograf. Ann.*, **3**, 209.
- Dove, H.W., 1837: *Meteorologische Untersuchungen*, Berlin, Sandersche Buchhandlung, 344.
- Eady, E.T.; 1949: Long waves and cyclone waves, *Tellus*, **1**, 33-52.
- Ebdon, R.A., 1960: Notes on the wind flow at 50 mb in the tropical and sub-tropical regions in January 1957 and January 1958, *Q.J. Roy. Met. Soc.*, **86**, 540-543.
- Eckart, C., 1960: *Hydrodynamics of oceans and atmospheres*, Pergamon Press, 290 pp.
- Eliassen, A. and E. Palm, 1961: On the transfer of energy in stationary mountain waves, *Geophys. Publ.*, **22**, 1-23.
- Ferrel, W., 1856: An essay on the winds and the currents of the ocean, *Nashville J. Medicine and Surgery*, **11**, 287-301.
- Flohn, H., 1950: Studien zur allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre, *Ber. Deut. Wettd.*, **18**, 1-20.
- 藤原咲平, 1922: 渦動の一性質向対称の原理と其気象学上の応用, *気象集誌*, 第4号, 77-92.
- Fultz, D., 1951: Experimental analogies to atmospheric motions, *Compendium of meteorology*, 1235-1248.
- Gambo, K., 1950: The criteria for stability of the westerlies, *Geophys. Notes*, **3**, 1-13.
- Golitsyn, G.S., 1970: A similarity approach to the general circulation of planetary atmospheres, *Icarus*, **13**, 1-24.
- Hadley, G., 1735: Concerning the cause of the general trade winds, *Phil. Trans.*, **29**, 58-62.
- Helmholtz, H.V., 1888: Über atmosphärische Bewegungen, *Sitz-Ber. Akad. Wiss. Berlin*, 647-663.
- Hide, R., 1958: An experimental study of thermal convection in a rotating baroclinic fluid, *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A* **250**, 442-478.
- 廣田 勇, 1981: 大気大循環と気候, 東京大学出版会, 121 pp.
- Holton, J.R., 1975: The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere, *Met. Monograph.*, **15**, 218 pp.
- and W.M. Wehrbein, 1980: A numerical model of the zonal mean circulation of the middle atmosphere, *Pure. Appl. Geophys.*, **118**, 284-306.
- Iwashima, T., S. Moriyama and R. Yamamoto, 1979: A spectral model for the study of the atmospheric general circulation, *J. Met. Soc. Japan*, **57**, 97-111.
- Jeffreys, H., 1926: On the dynamics of Geostrophic Winds, *Q.J. Roy. Met. Soc.*, **52**, 85-104.
- Kasahara, A., 1950: On the dynamical mechanism of high tropospheric jet stream, *Geophys. Note*, **3**, No. 31, 1-10.
- and W. Washington, 1967: NCAR global general circulation model of the atmosphere, *Mon. Wea. Rev.*, **95**, 389-402.
- Katayama, A., 1972: A simplified scheme for computing radiation transfer in the troposphere, *Tech. Rept.*, **6**, UCLA.
- Kida, H., 1977: A numerical investigation of the atmospheric general circulation and stratospheric-tropospheric mass exchange, *J. Met. Soc. Japan*, **55**, 52-88.
- Kikuchi, Y., 1969: Numerical simulation of the blocking process, *J. Met. Soc. Japan*, **47**, 29-54.
- , 1971: Influence of mountain and land-sea distribution on blocking action, *J. Met. Soc. Japan*, **49**, Special Issue, 564-572.
- 木村竜治, 1979: 流れの科学, 東京大学出版会, 212 pp.
- Kitao, D., 1887: Beiträge zur Theorie der Bewegung der Erdatmosphäre und der Wirbelstürme, *J. College Sci., Imperial Univ. Japan*, **1**, Part II, 113-209.
- Leith, C.E., 1965: Numerical simulation of the earth's atmosphere, *Methods in Phys.*, **4**, 1-28.
- Leovy, C.B., 1964: Simple models of thermally driven mesospheric circulations, *J. Atmos. Sci.*, **21**, 327-341.
- Lindzen, R.S. and J.R. Holton, 1968: A theory of the quasi-biennial oscillation, *J. Atmos. Sci.*, **25**, 1095-1107.
- Lorenz, E.N., 1955: Available potential energy and the maintenance of the general circulation, *Tellus*, **7**, 157-167.
- , 1960: Maximum simplification of the dynamic equations, *Tellus*, **12**, 243-254.

- , 1962: Simplified dynamic equations applied to the rotating-basin experiments, *J. atmos. Sci.*, 19, 39-51.
- , 1963: The mechanics of vacillation, *J. Atmos. Sci.*, 20, 448-464.
- , 1967: The nature and theory of the general circulation of the atmosphere, WMO No. 218, 161 pp.
- Manabe, S., 1955: On the development and energetics of the westerly waves, *J. Met. Soc. Japan*, 33, 76-88.
- Margules, M., 1903: Über die Energie der Stürme, *Jahrb. Zentralanst. Met. Vienna*, 1-26.
- Matsumoto, S., 1960: A numerical experiment using a five-level geostrophic model, *Proc. Int. Symp. Num. Wea. Pred.*, 557-576.
- , H. Ito, and A. Arakawa, 1954: On the horizontal transfer of angular momentum and its relation to the local zonal index tendency on the 500 mb surface, *Papers in Met. and Geophys.*, 5, 134-143.
- Matsuno, T., 1966: Quasi-geostrophic motions in the equatorial area, *J. Met. Soc. Japan*, 44, 25-43.
- , 1971: A dynamical model of the stratospheric sudden warming, *J. atmos. Sci.*, 28, 1479-1494.
- 松野太郎, 島崎達夫, 1981: 成層圏と中間圏の大気, 大気科学講座3, 東京大学出版会, 279 pp.
- Maury, M.F., 1855: The physical geography of the sea, New York, Harper, 287 pp.
- McIntyre, M.E., 1970: On the non-separable baroclinic parallel flow instability problem, *J. Fluid Mech.*, 40, 273-306.
- Mintz, Y., 1951: The geostrophic poleward flux of angular momentum in the month of January 1949, *Tellus*, 3, 195-200.
- , 1954: The observed zonal circulation of the atmosphere, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 35, 208-214.
- , 1955: Final computation of the mean geostrophic flux of angular momentum and of sensible heat in the winter and summer of 1949, Final Report 5, Dept. of Met. UCLA.
- , 1964: Very long-term global integration of the primitive equations of atmospheric motion, WMO Tech. Note No. 66, 141-155.
- Miyakoda, K., 1963: Some characteristic features of winter circulation in the troposphere and the lower stratosphere, *Tech. Rept. No. 14*, Dept. Geophys. Sci., Univ. of Chicago, 93 pp.
- Mohri, K., 1953: On the fields of wind and temperature over Japan and adjacent waters during winter of 1950-1951, *Tellus*, 5, 340-358.
- 毛利圭太郎, 松本誠一, 1956: 大気大循環. 地人書館, 120 pp.
- 村上多喜雄, 1951: 梅雨明けの機構, *気象集誌*, 29, 162-175.
- Murakami, T., 1965: Energy cycle of the stratospheric warming in early 1958, *J. Met. Soc. Japan*, 43, 262-283.
- and K. Tomatsu, 1965: Energy cycle in the lower atmosphere, *J. Met. Soc. Japan*, 43, 73-89.
- Nakamura, H., 1978: Dynamical effects of mountains on the general circulation of the atmosphere, *J. Met. Soc. Japan*, 56, 317-367.
- Newell, R.E., J.W. Kidson, D.G. Vincent and G.J. Boer, 1972, 1974: The general circulation of the tropical atmosphere and interactions with extratropical latitudes, 1 (1972), 258 pp., 2 (1974), 371 pp. The MIT Press.
- 日本気象学会, 1957: 日本気象学会75年史.
- , 1975: 気象百年史.
- 西村傳三, 1926: 関東地方に起りし不連続面について. *気象集誌*, 4, 33-41.
- Oberbeck, A., 1888: Über die Bewegungsercheinungen der Atmosphäre, *Sitz-Ber. Akad. Wiss. Berlin*, 383-395, 1129-1138.
- Okada, T., 1910: On the Bai-U or rainy season in Japan, 中央気象台欧文報告第5号.
- 岡田武松, 1901: 近世気象学.
- , 1908: 気象学講話, 岩波書店.
- , 1937: 気象学礎石(上), 岩波書店, 464 pp.
- , 1944: 理論気象学(下), 岩波書店, 257 pp.
- Palmen, E., 1951: The role of atmospheric disturbances in the general circulation, *Q.J. Roy. Met. Soc.*, 77, 337-354.
- Pedlosky, J., 1979: *Geophysical Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, 624 pp.
- Phillips, N.A., 1956: The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment, *Q.J. Roy. Meteor. Soc.*, 82, 132-164.
- , 1963: Geostrophic motion, *Rev. of Geophys.*, 1, 123-176.
- Reed, R.J., 1960: The circulation of the stratosphere, Paper presented at Amer. Met. Soc., Boston, January 1960, 12 pp.
- Richardson, L.F., 1922: Weather prediction by numerical process. Cambridge Univ. Press, 236 pp.
- Rossby, C.G., 1941: The scientific basis of modern meteorology, Yearbook of agriculture, U.S. Dept. of Agriculture, 599-655.

- , 1947: On the distribution of angular velocity in gaseous envelopes under the influence of largescale horizontal mixing processes, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 28, 53-68.
- 桜庭信一, 1951: 最近の大気環流論, 予報研究ノート, 2巻8号, 1-44.
- Sawada, R. and A. Matsushima, 1964: Thermally driven annual atmospheric oscillations as a cause of dynamic heating of the winter polar upper atmosphere, *J. Met. Soc. Japan*, 42, 97-108.
- Scherhag, R., 1952: Die explosionsartigen stratosphärener Warmungen des Spätwinters 1951-1952, *Ber. Deut. Wettd.*, 6, 51-63.
- Smagorinsky, J., S. Manabe and J.L. Holloway, Jr., 1965: Numerical results from a nine-level general circulation model of the atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 93, 727-768.
- Starr, V.P., 1948: An essay on the general circulation of the earth's atmosphere, *J. Met.*, 5, 39-43.
- , 1968: *Physics of negative viscosity phenomena*, McGraw Hill, 256 pp.
- and B. Saltzman, 1966: Observational studies of the atmospheric general circulation, *Sci. Rept. 2*, Dept. of Met. MIT.
- Syono, S., 1940: Studies on atmospheric disturbances, Part I. *J. Met. Soc. Japan*, 18, 354-364.
- , 1941: Studies on atmospheric disturbances, Part II ~ V. *J. Met. Soc. Japan*, 19, 16-22, 44-57, 243-253, 401-417.
- 正野重方, 1953: 新しい大気大循環論 I, II. *科学*, 23, 332-338, 416-422.
- Taylor, G.I., 1915: Eddy motion in the atmosphere, *Phil. Trans.*, A 215, 1-26.
- Thomson, J., 1857: Grand currents of atmospheric circulation, *British Assoc. Meeting*, Dublin.
- 瓜生道也, 1976: 波とそのまわりの平均運動, *天気*, 23, 3-22.
- Wallace, J.M. and V.E. Kousky, 1968: Observational evidence of Kelvin waves in the tropical stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 25, 900-907.
- Yanai, M. and T. Maruyama, 1966: Stratospheric wave disturbance propagating over the equatorial Pacific, *J. Met. Soc. Japan*, 44, 291-294.