



時 岡 達 志*

1. まえがき

大気大循環の研究は、大気中の大規模な流れの場の様子を明らかにし、その機構を解明することにある。したがって、以下に見るように、大気大循環論は気象学の中の多くの分野と密接に結び付いている。

そもそも大気中に流れを惹き起こす源は、太陽から地球および大気に与えられるエネルギー分布の不均一さである。この不均一さは、地球が丸いという幾何学的な原因の他に、地表面の状態や大気中の放射過程に関与する要素（雲、水蒸気、エアロゾル、二酸化炭素、オゾンなど）の分布に左右される。地表面の状態やこれらの要素の分布は、大気大循環によって影響を受け、相互に密接な結び付きを持ち、地球の気候を支配する大切な要素となっている。

熱源の不均一さから作り出される大規模な流れの様子をさらに複雑にさせているのは、地球の自転である。このために、大規模な流れは熱と同時に角運動量を輸送し、地球との間でその授受を行なっている。自転する大気の流れの性質の解明は、気象力学の中心テーマの一つであるばかりでなく、広く回転流体力学として研究が進められている。

大気大循環の実体は、観測技術の進歩にともなって、成層圏は言うに及ばず中間圏の様子まで明らかにされつつある。それと同時に、大気大循環の研究範囲も、対流圏ばかりでなく成層圏・中間圏に及んできている。

大気大循環の研究の一つの特徴は、大気のあるがままの状態を受動的に捉えるという事である。これは、大気大循環に限らず気象学あるいは地球科学全般に言えることでもある。たとえばある気象状況の解析をやろうと思っても、過去に適当な観測がないと、その気象状況が出現し、観測にひっかかるのを待つしかない。だから、同じ現象を再び観測したいと思っても、簡単には行かない。また、勝手に山を取ったり海を動かしてみるわけにもいかない。こういった困難を部分的に克服するものに、モデル実験がある。一つは室内回転流体力学実験で

り、一つは数値モデル実験である。

大気大循環の研究では、1950年代末から数値モデル作りが始められ、現在では、大循環モデルの開発およびモデルを用いた研究は大気大循環の研究の中で極めて重要な部分を占めるに至っている。最近では、大気大循環モデルを進展させて、気候の数値モデルを作り上げるための研究も進められている。

大気大循環の研究は大きく分けて、観測資料を基にした解析的研究、室内実験、理論的研究、数値モデル作りおよび数値モデルを用いた研究、の四つに分けることができよう。この内で、室内実験については、紙数の関係もありその部分は“回転流体力学”および“実験気象学”の手引を見て載くことにし、ここでは一切触れないことにする。

2. 大気大循環像を把握するために

まず、個々のテーマ別の文献の紹介に入る前に、大循環およびその研究に対する全体像を与えてくれる文献に触れておく。このためにうってつけのものとして、最近の大気大循環論（荒川、1958）と、地球の熱収支（片山、1962）が挙げられる。

前者では、観測結果の物理的解釈から始まり、エネルギー論や擾乱の発生、そして擾乱の役割に議論が進められている。当時としては、大気大循環の数値モデル研究は Phillips (1956) しかなく、その後この分野で展開される数々の成果がないのはこの論文の書かれた時代を思い起こさせるが、そこで述べられている大循環像は、現在も変わってはいない。まさに大循環論に関する古典的存在と言えよう。

後者は、前者ではほとんど触れられていない大循環の熱源を論じた総合報告である。熱の問題は、気候モデル作りとも関連して、これからますます多くの関心を集める分野になると思われる。

Lorenz (1967) は **The nature and theory of the general circulation of the atmosphere** を著わしている。この本には、Hadley に始まる古典的大気大循環論が紹介されていて、大循環像の変遷が手際よくまと

* T. Tokioka, 気象研究所。

められているとともに、Lorenz 自身の大気大循環に対する考え方に触れることができる。この時点までの論文；Lorenz (1955, 1960 a, b, 1962, 1963) から、この後の論文；Lorenz (1969 a, b, 1970, 1972) に至る、独創性に富む Lorenz の論文の流れを追う上でも非常に役に立つ。

菊池 (1974) は、大気大循環の維持機構に焦点をあてた解説を行っており、全体が手短かにまとめられている。

以上のものには成層圏以上の大循環は触れられていない。この領域をカバーするものとして、Holton (1975) の *The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere* が挙げられる。最近のトピックスも取り入れてあり、教科書的によくまとめられている。もっと手っ取り早く成層圏大循環の特徴を理解したい人は、成層圏突然昇温について (松野, 1971) や、成層圏の気象 (松野, 1977) が良い。突然昇温現象という一断面を通して、対流圏と成層圏の違いを明快に説明している。

Corby (1970) の編集になる *The global circulation of the atmosphere* は、10人の専門家が各専門分野について執筆したもので、大循環を構成する領域の大部分が収められている。荒川 (1958) とこの本を読めば、大気大循環のほぼ全貌を得たと言えよう。

大気大循環の研究を review したものとしては、Arakawa (1975) [日本語訳：田中 (1977)] が挙げられる。これは1970~74年の間に限って扱っているが、極めて手際よくまとめてあり、一読に値する。日本語のものでは、前回の手引中の廣田 (1969)、柳井 (1970) を参照されるとよい。また、外国文献集に収められている大気大循環・力学関係の論文については、新田 (1971)、廣田・新田・時岡 (1973) による紹介がある。

大気の下部境界面の7割を占める海洋は、大気大循環、とりわけ気候や気候変動を考える際に重要になってくる。この海洋中に生ずる大循環を概観するには、高野 (1974, 1977) が便利であろう。

3. 観測資料に基づく解析的研究

気象観測される領域は、上空に向かって拡大されてきた。ゾンデによって下部成層圏までカバーされていたのが、気象ロケットにより下部中間圏まで広がり、気象衛星の赤外放射観測からは上空のグローバルな気温分布が求められるようになってきている。Nimbus 4, 5号に搭載された Selective Chopper Radiometer (SCR) は、成

層圏界面高度までの、また Nimbus 6号の Pressure Modulator Radiometer (PMR) は、下部熱圏までの気温を算出するのに用いられている。また、赤外線の中の水蒸気による吸収帯の観測から、上部対流圏の水蒸気量の分布に関する情報も得られるようになってきている (Steranka・Allison・Salomonson, 1973; Morel・Desbois・Szejwach, 1978など)。

上空の観測領域拡大の反面、海洋上、低緯度帯および南半球といった観測点の少ない領域は依然として残っている。このようなデータ観測点の偏りは、大循環の解析をやる上で望ましくないことである。Oort (1978) は、データ解析に内在する誤差の分析を行ない、観測点分布の地理的偏りがもたらす大循環の実況像の歪の問題を扱っている。昨年末から開始された第一次 GARP (FGGE) では、上に挙げたようなデータの過疎地方から、豊富なデータが集められつつある。

これまでのデータの集積は、数々の解析的研究に用いられ、平均場や輸送量の統計、角運動量収支、水収支、エネルギーバランス、渦位のバランス、それに種々のスペクトル解析がなされている。

データ解析から得られる大気大循環の様子を知るのに最も便利な本として、*The general circulation of the tropical atmosphere, Vol. I & II* (Newell・Kidson・Vincent・Boer, 1972, 1974) が挙げられる。これは、Newell をリーダーとする MIT のグループが1957年7月から1964年12月までの期間について、330地点のゾンデ観測資料を基に解析したものの集大成である。45°S から 45°N の 100 mb 以下が特に詳しくなっていて、Kidson *et al.* (1969) および Newell *et al.* (1970) の結果も含まれている。Vol. I には、各季節毎の温度、風および子午面循環、角運動量収支、水蒸気量の解析が含まれる。Vol. II には、放射加熱、熱および運動エネルギー収支、雲量雨量分布、その他が述べられている。

Oort・Rasmusson (1971) は、北半球の大循環の統計を行なっている。データは MIT で編集したものの中の1958年5月から1963年4月までの5年間を用いていて、各月毎の統計値が10°S から 75°N、地上から50mbの領域で示されている。Oort (1977) では、さらに1968年5月から1973年4月までの5年間の資料も追加されている。

一方、Tomatsu (1976) は1964年10月から1965年9月までの一年間について、25°N から 75°N、地表から

10 mb までの範囲を、波数別にエネルギー解析を行なっている。各季節毎のエネルギー変換量、フラックスについて、対流圏と下部成層圏を対比させながら結果が示されている。

南半球の大循環は観測点が少なく、また一様に分布していないので、北半球に比較し、それだけ未知の部分があるし、また海陸分布の違いからくる大循環の差違が興味をひく所である。Newton (1972) によって編集された **Meteorology of the southern hemisphere** は、それまでの観測の集積をもとに、気象衛星資料も加えて南半球の大循環の様子を明らかにした総合報告である。衛星データを用いた、両半球のエネルギー、準停滞性の波の寄与率の比較は、Adler (1975) によって報告されている。

地球大気の絶対角運動量は、大気最下部で働くトルクと、山によって及ぼされるトルクによって変化する。後者は前者に比べて小さいが、半球規模で積分すれば、角運動量変化に対する両者の寄与は同程度になっている。

Newton (1971 a) は、地表面気圧図から各季節毎の山によるトルクを地球上で計算している。Oort・Bowman (1974) は、Newton よりは滑らかな地形を用いて、北半球での山によるトルクを5年間に互って計算し、その年々変動を議論している。地球上での角運動量のバランスについては、Newton (1971 b, 1972) を参照されたい。

大気中での角運動量の南北輸送については、Newell *et al.* (1972) が詳しい。この解析では、東西運動量の南北輸送は赤道上部対流圏に夏半球向き輸送のピークがあり、モンスーンに伴う循環の寄与が大きいことを示唆している。年間を通してみると、北半球が夏の時になされる北向き輸送が卓越し、角運動量は大気中では平均して南半球から北半球に向かって運ばれていることを示唆している。

地球および大気的全エネルギーバランスは、太陽から与えられる短波放射と、地球大気および地球の放出する長波放射の間のバランスで成り立っている。地球および地球大気に与えられるエネルギー量を定める地球惑星アルベドは、衛星による観測から約30%と計算され、(Vonder Haar・Suomi, 1971; Raschke *et al.*, 1973), それまで考えられていたよりも、地球は温度が高くより暗い惑星であるということが明らかにされた。残りの7割は地球および地球大気によって吸収されるが、その内

の7割強に当たる51%は海面を含む地表面で吸収される。このエネルギーは、上方に運ばれると同時に極方向に運ばれる。その運び手が気と海洋である。

Oort・Vonder Haar (1976) は、気象衛星による放射観測から要請される全熱輸送量と大気中で輸送される量 (Oort・Rasmusson, 1971) の差を基にし、大気中および海洋中に生ずる熱エネルギー蓄積量変化を考慮して、海洋が運ぶべきエネルギー量を北半球について各月毎に計算している。

これによると、亜熱帯域ではこれまで考えられていた以上に海による輸送が大きいたことが示されている。しかし、低緯度ハドレー循環の所では、上層ブランチでのポテンシャルエネルギーの極向き輸送と下層ブランチでの潜熱・顕熱の赤道向き輸送の差から、大気中の輸送量が決まるために、ハドレー循環に伴う質量輸送の計算精度が良いことが要請される。

したがって、量的な点では、現在の見積もり値はまだ将来変わる可能性が残されている。

大気を持つ内部エネルギー (I) + ポテンシャルエネルギー (P) は、大気的全エネルギーのほとんどを占めていて、運動エネルギー (K) は ($I+P$) に比べてわずか $1/2000$ 程度にしか過ぎない。そこで、Lorenz (1955) は運動エネルギー収支を議論する際便利な量として、有効位置エネルギー (A) という量を導入した。そして、 A , K をさらに、帯状平均場による量 A_Z , K_Z と、それからのズレによる部分 A_E , K_E に分け、 A_Z , A_E , K_Z , K_E からなるエネルギーダイアグラムを提唱した。現在なされている運動エネルギー解析には、全て有効位置エネルギーが用いられている。有効位置エネルギーに関する詳しい議論は、Dutton・Johnson (1967) を参照されるとよい。また、有効位置エネルギーに替わるものとして、Dutton (1973) は static entropic energy を導入し、それに基づくエネルギーダイアグラムを提案している。

A_Z , A_E , K_Z , K_E の間の収支については、対流圏、特に中高緯度地方の場合、数多くの人によって解析されていて、その基本像は既に確立されている。たとえば、Newell *et al.* (1974), Oort・Peixoto (1974), Peixoto・Oort (1974) 等を参照されると良い。擾乱部分を波数別に扱ったものについては、Tomatsu (1976) あるいは Saltzman (1970) 等の解析がある。

運動エネルギー消散量に関しては、Kung (1966, 1967, 1969), Wiin-Nielsen (1967) 等が挙げられる。

Surface friction は別にして、内部での消散量は運動エネルギー収支の残差として普通求められる。あるいは、運動エネルギースペクトルに関する乱流理論を用いることも可能であるが、いずれにせよ直接的に求められる量ではないので、値には不確かさが残る。大気中で起こる有効位置エネルギー生成量、有効位置エネルギーから運動エネルギーへの変換量はともに、長期的に見れば、大気中で運動エネルギー消散と大気から海へ与える運動エネルギーの和と釣り合う筈である。種々の解析から得られているこれらの値の比較は、たとえば、**Newell et al. (1970)** や **Oort・Peixoto (1974)** を参照されたい。

対流圏全体でみて、そのエネルギー像は明確になっているとは言え、特定な synoptic situation については必ずしも満足のゆくエネルギー像がまだ得られていない場合もある。その一つはブロッキング現象であろう。ブロッキングに関する研究の概要を知るには、**片山(1969)** の review が最適であり、ブロッキングに関連した文献についてもそれを参照されたい。ブロッキング現象について、明確なエネルギー像が得られていない一つの理由として、データ解析の方法自体に問題があるのかも知れない。ふつう、数学的取り扱いの簡単さから、帯状平均とそれからのズレという分け方を行なうが、こういうやり方がブロッキング現象を把握するのに必ずしも適当でない恐れがある。

従来のエネルギー解析と少し変わっているものの一例として、**Holopainen (1970)** が挙げられる。この論文では、波は定常部分と非定常部分に分けて扱い、北半球の定常擾乱のエネルギー収支が議論されている。Holopainen は、冬の場合、定常擾乱エネルギーは A_z からの交換で維持されていて、非断熱効果はエネルギー sink として働いているが、夏の場合、非断熱源によって作られた定常場のもつ有効位置エネルギーからの交換によって、定常擾乱が維持されることを示している。

ジェットと言えば、ややもすると帯状平均した風の中での最も強い所を思い浮かべ勝ちであるが、このジェットも決して東西方向に一樣にはなっていない。**Blackmon et al. (1977)** は、冬の北半球の9年間のデータを時間に関して variance と covariance に分け、low-pass (10~90日)、band-pass (2.5~6日) を施し、その地域特性を議論している。そしてさらに、季節的ジェットの維持機構が場所によって違うことを定性的に議論している。200 mb の高度のジェットの軸方向に対して垂直な方向の ageostrophic の風の成分を求めて

いて、ジェットが風下側に向かって加速している所では直接循環のセンスに、逆に風下に向かってジェットが弱まっている所では間接循環になっていることを示している。また、**Lau et al. (1978)** は、運動量フラックスの transient eddy による維持機構を調べ、海上地域で顕著な counter gradient の輸送を支えるものは ageostrophic correlation term であることを示している。

低緯度対流圏の大循環は、モンスーンをぬきにしては語れない。これまで、低緯度大循環というと **Hadley** 循環として片付けられていた感があるが、**Krishnamurti (1971 a, b)** は、1967年6~8月の200 mb 面高度の解析から、東西方向に不均一な流れ自体が低緯度大循環の特徴であることを強調している。冬期モンスーンについても、**Krishnamurti et al. (1973)** は、同様の点を指摘している。**Murakami・Unninayar (1977)**、**Murakami (1978)** は、冬のモンスーン期の波数解析から、熱帯域では波数間のエネルギー交換が擾乱と帯状流間の交換よりも顕著であることを示している。モンスーンに関しては、**金光 (1976)** の review や **GARP Publication Series, No. 18 (1976)** をも参照されたい。

中緯度帯の擾乱の時間・空間に関するスペクトル解析は数多くなされている。**Vinnichenko (1970)** は、風の場の擾乱の時間スケールに関する研究を行ない、長周期スペクトルと短周期スペクトルを合成して、1秒から5年周期の範囲をカバーするスペクトル図を示している。そのスペクトルは三つのピークを持ち、まず第一は年変化に対応するもの、次にはシノプティックスケールの擾乱に対応するもので、1~2ヶ月から3~4日周期帯にピークをもつもの、そして、1~3分程度の周期を持つものになっている。

波数空間での大規模な擾乱の運動エネルギースペクトルが、Kolmogorov の等方性3次元乱流論から期待されるものとは異なる事は、**Saltzman・Fleisher (1962)** によって示されたが、その後多くの解析から同様の事実が確かめられている (**Horn・Bryson, 1963**, **Wiin-Nielsen, 1967**, **Julian et al., 1970**, **Kao・Wendell, 1970** 等)。これらの解析から、波数8以上の所ではエネルギースペクトルは波数のマイナス3乗に近い分布をずる事が明らかになっている。**Morel・Larcheveque (1974)** は、Eole のデータを用いて200 mb 高度の拡散過程を調べたが、その結果から、運動エネルギースペクトルは100 km スケールまでマイナス3乗の形になっている事が間接的に推測される。温度バリアンスについ

でもスペクトル形が調べられていて (Kao, 1970, Steinberg *et al.*, 1971 等), 波数のマイナス 3 乗に近い形をしている事が明らかになっている。これらのスペクトル形に対する理論的説明は, Charney (1971) の準地衡風乱流論によってなされている。

成層圏の大循環については, 前述の Holton (1975) や Wallace (1973) が便利であろう。特に北半球の成層圏の climatology に関しては Labitzke (1972) を, また, 成層圏で顕著な超長波の振舞については 佐藤 (1977) の総合報告およびその引用文献を参照されたい。

成層圏の風は, 対流圏の風に比べて大きく季節変化するのが特徴である。また, 赤道近傍の風は特異な振舞をする事が明らかになっている。Reed (1965, 1966) は, Ascension と Barking Sands のロケット観測データの解析を行ない, 赤道成層圏は東風基調になっているが下部中間圏では西風基調である事, 赤道上空約 50 km 付近を中心にして半年周期で東西風が変動している事, Ascension の下部成層圏では約 26ヶ月周期で風が変動している事を発見した。これらの事実は, その後の多くの解析 (Angell・Korshover, 1970, Groves, 1972, Belmont・Dartt, 1973, Belmont・Dartt・Nastrom, 1974等) から, それらの全貌がより詳しく記述されるに至っている。さらに上空の中間圏および下部熱圏 (125 km) までの東西風・温度については, Groves (1972) がロケットや流星観測を基にして求めている。気象ロケットの解析からは, 約 65 km までの東西風 (Belmont *et al.*, 1974) と温度 (Nastrom・Belmont, 1975) が求められている。温度場で興味をひく点の一つは, 中間圏界面高度付近では夏半球の極よりも冬半球の極の方が高温になっていることである。

成層圏・中間圏の温度場の解析には, データが全球規模で得られる利点もあって衛星資料を用いた研究が盛んである。Barnett *et al.* (1975) はゾンデおよびロケット観測値と SCR から求めた値の相互比較を行ない, 上部対流圏・下部成層圏ではゾンデと SCR の差は 1°K 以下, ロケットと SCR の差は 3°K 以下である事を示している。Barnett (1974) は, 1970年11月から1年間について, SCR データから求めた温度の振舞を議論し, 南極における下部成層圏の季節変化は北極の約 2倍になっている事, しかし上部成層圏まで行けば両半球の差はみられない事を指摘している。また, Hartman (1976 a) は, 1973年の南半球の冬の成層圏の構造を SCR データから求めている。

成層圏・中間圏中の超長波についても, 衛星資料を用いた解析がなされている。Barnett (1955) は, 波数 1 の波の振舞を 16ヶ月間のデータから調べ, 成層圏では冬半球から夏半球に向かって赤道を越えて 30° 近辺まで波が影響を及ぼして, したがって, 波数 1 の振幅は赤道近辺で 6ヶ月周期で変動する結果を得た。Hirota (1976) は, この点を確認すると共に, 波数 1 の波は上部成層圏の中高緯度では年中両半球で卓越している事を示している。PMR のデータは, Hirota・Barnett (1977) によって解析され, 1975/76の北半球の冬には波数 1, 2 は 85 km 高度まで有意な振幅を持っている事を確認している。また, Hirota (1978) は赤道地域の解析を行ない, 10日周期程度の Kelvin 波らしい波を, 高度 25 km から 60 km の範囲内で検出している。

成層圏のエネルギー収支に関する研究は, データの関係から, Oort (1964) 以来ほとんど下部成層圏に限られている。Dopplick (1971) は, 1964年の北半球の 100 mb から 10 mb の領域について詳しい解析を行なっている。上昇流の計算には, 放射加熱項も考慮されている。この解析では, 対流圏から下部成層圏に向かって一年中エネルギーが輸送されていて, 冬には下部成層圏からさらに上部成層圏に向かってエネルギーが流れている事が示されている。 $A_E \rightarrow K_E$ の変換は, 冬を除いては小さいながら負の値になっていて, 下部成層圏の擾乱は対流圏からのエネルギーフラックスに大きく依存している。また, 加熱項は, 赤道下部成層圏の低温を反映して, 有効位置エネルギーの破壊, すなわち冷たい所を加熱し, 暖かい所を冷やすセンスになっている。Tamatsu (1976) の解析からも同様な結果が得られているが, $A_E \rightarrow K_E$ は冬にも負になっている。上部成層圏, 下部中間圏まで (100 mb から 0.2 mb) 含んだ南半球の領域での熱, 運動量, エネルギー収支解析については, 衛星資料を用いた試みが, Hartman (1976 b) によって報告されている。

成層圏大循環の中で注目すべき現象の一つは, 冬の突然昇温である。1952年の Scherhag による発見以来, 数多くの解析がなされている (たとえば Miyakoda, 1963; Julian・Labitzke, 1965; Murakami, 1965)。突然昇温現象は, その後気象衛星による赤外線放射の観測を通して, 現象の水平的広がりには冬の高緯度だけのものではなく, それに付随して, 冬半球 40° から夏半球にかけて降温が起こり (Fritz・Soules, 1970; Barnett, 1974), 垂直方向にも中間圏まで影響が及んでいる

(Hirota・Barnett, 1977) ことが分かってきた。これらの観測事実は、Matsuno (1971) のモデルが与える結果と一致するものであり、対流圏の準停滞性の超長波のエネルギーが好都合な条件の満たされた時、成層圏に流れていく現象である事が明らかにされた。

熱帯成層圏では、基本場に重なっている擾乱について詳しい解析がなされている。Matsuno (1966) や Longuet-Higgins (1967) のモデルから予測されていた混合ロスビー重力波 (Yanai・Maruyama, 1966; Maruyama, 1967 他) や、Kelvin 波 (Wallace・Kousky, 1968 他) の存在が確認され、それらの波の活動と帯状流の変動との間に密接な関連があることが指摘されている (Wallace・Kousky, 1968; Maruyama, 1969; Kousky・Wallace, 1971)。

中間圏に入って行くと、大気潮汐や下層から伝わってくる (かもしれない) 内部重力波の振幅が無視できなくなる。これらの記述については、高層大気力学の手引に譲ることとする。前出の Hirota・Barnett (1977) によると、冬の北半球では planetary 波がこの領域でも観測される事を示している。このような垂直スケールの大きい波については衛星資料から比較的容易に検出され得るが、垂直スケールの小さい波については、現在の資料だけでは解析はまだ困難であろう。現在計画の進められている MAP の成果が期待される所である。

4. 理論的研究

この部分は、気象力学・気象熱力学、回転流体力学と密接な関係があり、それらの手引も参照されたい。気象力学・熱力学の基礎的な事は、最近出版された小倉(1978)の気象力学通論が詳しく、それを読めば足りよう。力学や数値モデルを中心にしたものでは、Haltiner (1971) が良くまとめている。あまりに気象学に慣れてしまった人は、時には Eliassen・Kleinschmidt (1957) を読むのも良い。Charney (1974) の Planetary Fluid dynamics は、広範な内容を手際よくまとめている。理論的研究を展望するには最適のものと言えよう。

地球大気の大循環の一つの特徴は、静力学平衡が良く成り立つと共に、地衡風バランスも比較的良く成り立っている事である。この理由は、上記の教科書中のスケールアナリシス、地衡風調節 (これに関しては、Phillips, 1963 や Blumen, 1972 が詳しい) に書かれてあるが、これらの議論では、なぜ長波とか超長波の波動が作られるのかという事は何も説明しない。これを決めるものは、最終的には大循環を惹き起こす源である熱源分布と

いう事になる。では、なぜ現在の熱源分布で現在観測される大循環が惹き起こされるのか。この大循環論の中心課題を全て数値的方法にたよらないで理論的に取り扱うのは、大循環を支配している物理法測の非線型性から言って、なかなか困難なことである。

なぜ軸対称循環が地球の大循環として実現しないのかという事については、V. Bjerknes が考えたように、軸対称循環が不安定であるからと考えられている。観測から求められる帯状平均場には、すでに波の影響が入っているので、軸対称循環の安定性を議論するには実測からでは駄目で、そういう理想状態の解を何らかの方法で求めなければならない。Lorenz (1967, 1970) は、この理想状態の解を ideal Hadley circulation と呼び、その安定性を調べる必要性を強調している。意外にもこういった研究は少なく、これまでに Hunt (1973) の研究があるだけである。彼の結果は軸対称循環が不安定である事を示しているが、そこで得られた軸対称循環自身、とりわけ東西流分布は、モデルの closure condition に敏感に依存する事を指摘しておこう。

中高緯度帯で観測される波動擾乱は、ideal Hadley circulation の不安定性によって説明されることは、Hunt のモデルの改良を待つまでもなく、確かなことと言えよう。ideal Hadley circulation 内に形成されるような傾圧場中に発達する傾圧不安定波の理論は、Bjerknes・Holmboe (1944), Charney (1947), Eady (1949), Green (1960) その他の人々によって、いろいろな特色のあるモデルについて詳しく論じられている。また、南北方向に変曲点を持たない傾圧ジェット中の波動は、傾圧不安定 (Kuo, 1949) とはならず傾圧波動が生じ、熱を極向きに運ぶばかりでなく運動量のジェットへの集中をもたらし、ジェットを強める事もあり得る (McIntyre, 1970 等) 事が調べられている。傾圧波動が基本場に及ぼす影響については、たとえば Phillips (1954) は、2層流体という簡単な場合について議論している。後に出た、最初の大循環の数値実験として有名な Phillips (1956) では、両者の結果の比較がなされている。

基本場の不安定性により微小振幅擾乱が発達して行くと、基本場との間に相互作用が始まる。この非線型過程を論じたものに、Aihara (1963, 1964), Pedlosky (1970, 1971, 1972) 等がある。Pedlosky によると、steady wave solution が不安定な時 amplitude vacillation に似た現象が起こる事が示されている。

非線型過程を議論する方法として便利なものに、trun-

cated spectral system がある。この問題を最初に組織的に議論したものとして **Lorenz** (1960 b) の論文を挙げる事ができる。**Lorenz** (1962, 1963) は、後にその truncated system を用いて、回転円筒実験から得られている流体の性質を理論的に議論している。**Lorenz** (1963) の論文では vacillation 現象を取り扱っている。この論文では、外部条件が同じでも初期条件の違いによって解の統計的振舞に違いがあり得る事 (intransitivity) が示されている。流体のもつこの性質は、地球の気候を問題にする際に重要になってくる。

Simons (1972 a, b) は、truncated system を用いて波動と西風ジェット相互作用の研究を行ない、大気中で普通観測されるようなジェットは、傾圧性擾乱を安定化させるように働く事を示している。

非線型プロセスの取り扱いで、上述のものと対照的なものに乱流論がある。乱流論は、エネルギー源のない波数領域の (移流項による) 非線型プロセスに対し、それが近い波数同志の間で卓越している場合を議論する。大気中の大規模な流れは 2 次元流に近く、2 次元流ではエンストロフィーが保存されるために、流れは 3 次元流とは異なった特性を持つ (**Fjørtoft**, 1953). **Leith** (1967), **Kraichnan** (1967), **Batchelor** (1969) 等は、2 次元流の乱流論を展開し、一つの極端な状態として、エネルギーは波数間で正味のやり取りがなくエンストロフィーのみがより小さいスケールの擾乱に流れていく場合を考えると、運動エネルギースペクトルは波数のマイナス 3 乗に比例する事を示した。**Charney** (1971) は、実際の大気の運動は 2 次元流ではなく準地衡風の 3 次元流により近い事から準地衡風乱流論を展開し、この場合、運動エネルギーも温度バリエーションもそのスペクトルは波数のマイナス 3 乗に比例する事を示した。**Charney** の議論では、多くの大胆な仮定がなされていて、それらの条件付の結論であるにもかかわらず、データ解析の結果は準地衡風乱流論を支持するものになっている。

大気の流れを乱流とみなして、その振舞を統計的に記述する乱流モデルの研究も進んでいる。この方面に興味のある人は、**Leith** (1971), **Kraichnan** (1971 a, b), **Leith・Kraichnan** (1972) 等を読まれるとよい。これらのモデルは、運動エネルギーのスペクトル形や波数間の flux の議論ばかりでなく、**Lorenz** (1969 b) によって提起された大気の運動の predictability に関する研究 (**Leith**, 1971) にも用いられている。そして、予報モデルがいかに精密なものであっても、初期値に含まれる不

可避の誤差がもとになって、2~3 週間のうちに誤差から作られる誤差のスペクトル分布と、実測のスペクトル分布との差がなくなる事が示されている。また、このような乱流モデルから得られる結果は、数値モデルにつきもののサブグリッドスケールの現象と、グリッドで表現されるスケールの現象との間の相互作用のパラメタリゼーションを行なうための手掛かりをも与えてくれる (**Leith**, 1972)。

乱流モデル研究と思想的に近い系列に属するものに、境界層の turbulent closure model の研究がある (**Mellor**, 1973; **Mellor・Yamada**, 1974; **Yamada・Mellor**, 1975 等)。**Mellor・Yamada** (1974) は、系統的に closure model の簡略化を行ない、そのモデルによる境界層の変遷の再現性を論じている。この closure model は大気大循環モデルにも組み込まれて (**Miyakoda・Sirutis**, 1977) いて、良い結果を与える事が報告されている。

これまで不安定論というと、帯状平均場について議論するのが普通であった。しかし考えてみると、北半球の準定常場は決して zonal なものではない。帯状平均場の不安定論は、現実を高度に単純化してとらえたものであり、数学的に取り扱い易いという利点がある。しかし、こういう行き方に対する疑問が生ずるのも当然であろう。そして、そういう反省からより現実に近いより一般的な問題として、波を含んだ基本場の安定性の議論が生まれて来た。その端緒は、**Lorenz** (1963) に見ることができよう。**Matsuno・Hirota** (1966) では、基本場自体の定常性については注意が払われていないが、冬季の北半球で観測されるような超長波が発達した状況では、そのような流れ自体が順圧流体として不安定である事を、初期値問題として論じている。その後、**Lorenz** (1972) は順圧ロスビー波動の安定性を議論し、波動の振幅が十分大きいか、波数が十分大きい時は、そのようなロスビー波動は不安定になる事を示した。同様の議論は、**Gill** (1974), **Hoskins・Hollingworth** (1973) によっても展開されている。**Hoskins** (1973) は、ロスビー・ハウルビッツ波の安定性を数値的に調べ、波数 4 の波は波形がほとんど変わらないのに、波数 8 のあるものは数日のうちに波が崩れてしまい、ほとんどのエネルギーが帯状流に移り、ジェット状の流れができることを報告している。このような不安定は、現実の大気中にロスビー波が見つかりにくい理由とも考えられ、また見方を変えれば、先ほど出てきた 2 次元乱流を作り出す波数

間の非線型相互作用に他ならない (Lilly, 1973) とも言える。

大気大循環の時間平均パターンは東西に非一様であるが、これは大気下部の条件の非一様性に帰因する。その一つとして地形 (山) が考えられる。山は流れに対して障害物として働き、順圧流体中に生ずる Taylor column のような渦を作るし、内部重力波をも発生させる。さらに山の表面では、日射がある場合、太陽の短波放射吸収が起こりこれが山の上の気柱に潜熱・顕熱・長波放射エネルギーとして再放出される。同じ高度の大気中と比較して、いわば山の周囲には付加的な非断熱源がある事になり、こうしてまた、非一様の流れが作られる。もう一つは、たとえ地球の表面に山がなくても、表面を構成する物質の違いによる地表での熱吸収の違いから非一様な流れが作られる。たとえば、海水の単位体積当りの比熱は平均的土壌のそれに比べて大きい事を部分的に反映して、海上の気温の季節変動幅は、大陸上のそのほぼ4分の1となっている (たとえば Monin, 1974)。

ではいったい、観測から得られる準定常場にとって、これらの要因の中でどれがどの程度重要なのであろうか。この疑問に答えるべく、これまでに数多くの研究がなされている。Murakami (1967) の研究や Saltzman (1968) の review 以後も、Derome・Wiin-Nielsen (1971) その他多数の論文が出されており、線型モデルの定常な強制波の解が議論されている。たとえば、Derome・Wiin-Nielsen が、準地衡風2層モデルを用いて地表面気圧を与えて計算した結果では、実際に観測される準定常波に近い強制波の解が得られている。また、地形の効果も非断熱源の効果もほぼ同じ場所に擾乱を形成するが、地形による波の方が少し振幅が大きい事が指摘されている。

山の問題は、大循環モデルを用いた制御実験としても研究されている。Manabe・Terpstra (1974) は、1月の場合について山を入れた場合と入れない場合を比較し、シベリア高気圧の形成に山が重要である事を指摘している。成層圏中のアリューシャン高気圧も、Kasahara *et al.* (1973) と同様に山がある事によって初めて作られる事を示している。Kikuchi (1969, 1971, 1979) は、準地衡風のスペクトル大循環モデルを用いて、山と海陸分布による熱の影響の両方について調べていて、Kikuchi (1979) は、海陸分布による熱の影響のみを入れたモデルでは定常性擾乱は非常に弱いという結果を得ている。Hahn・Manabe (1975) は、南アジアのモン

soonと山の影響を議論している。亜熱帯ジェットがモンスーン開始の直前にチベットの南 (25°N) から夏の平均的位置 (45°N) へ急激に移ること、モンスーンがインド中部から北部にかけて入り込み、そこに低圧帯を維持する事、これらは山岳の影響に依っている事を示している。最近、中村 (1978) は数値実験から見た山岳の力学効果について、総合報告を行なっている。参照されたい。

波は、基本場が不安定であることから微小擾乱が発達してできると共に、他の場所で、ある原因から発生した有限振幅の波が伝わってきて波動が起きることも考えられる。後者は、いわゆる伝播論と言われるものである。Charney・Drazin (1961) は、planetary scale の波動の伝播条件を議論し、冬に比べて夏の成層圏にほとんど擾乱のない理由を明らかにしている。Eliassen・Palm (1960) は、定常山岳波によるエネルギー輸送の問題を取り扱った。この問題は、その後 Andrews・McIntyre (1976) や Boyd (1976) によって一般化され、定常な波と帯状平均場の関係が明らかにされている。近年では、これらの論文が除外して扱っていた critical level の近傍での振舞や、非定常伝播特性についての研究が進み、伝播波動と帯状平均場との相互作用に対する理解が深まり、Matsuno (1971) の突然昇温モデルや Lindzen・Holton (1968) の準2年振動モデルに取り入れられている理論の一般化がなされている。これに関しては、瓜生 (1976) による解説があり、これに関する文献もそれを参照して戴く事にして、ここでは割愛する。

上記の伝播論の展開の中で、現象を Lagrange 的観点から記述する事により、波束と平均場の関係が奇麗に整理される事が示されている (McIntyre, 1973; Uryu, 1974, 1975等)。また、Uryu は、波束の上方伝播に伴って流体粒子の位置は変化せずオイラー的な平均子午面循環は作られても、ラグランジュ的子午面循環はない事を示している。ラグランジュの見方は、大気中に漂う物質の輸送される過程を考える時にも重要になってくる (木田, 1977b)。Kida (1977a) は、単純化した大気モデルを走らせた結果をラグランジュ的に解析を行なっている。このモデルの状況を上記理論が全てカバーはしていないが、得られたラグランジュ的子午面循環には、波の輸送によって巻き起こされる物理量の収束発散から作られる循環 (たとえば中緯度の間接循環) は見られず、低緯度で上昇、高緯度で下降し、中緯度では水平混合が卓越するという、非常に単純なパターンが得られて

いる。

成層圏中の波動現象は何らかの不安定現象(Murray, 1960; McIntyre, 1972 等) というよりも、対流圏からの forcing に対して受動的に反応していると考えられるものが多い。Matsuno (1970) は、冬の代表的な風の分布を与え、境界条件として 500 mb の高度場を与えて、停滞超長波の解を求め、その特性を調べた。その結果、波数 1 の解は実測 (Hirota・Sato, 1969) と良く合う事を示した。波数 2 の解の振幅は小さ過ぎたが、Simmons (1974) による同様の研究では、波数 2 も充分再現し得ることが報告されている。これらの結果を見ると、波の南北スケールに比べてジェットの南北スケールは充分大きいという仮定の下で考えられていた wave guide の考え、すなわちジェットを避けて弱い西風中を伝わり易いのではないかという想像 (Dickinson, 1968) は、冬の成層圏では当たっていないと言える。

冬の成層圏に生ずる突然昇温の機構は謎とされていたが、発達した持続性のある準停滞性超長波の非定常伝播と、critical level absorption (Booker・Bretherton, 1967) の考えを組み合わせた Matsuno (1971) のモデルで、みごとに説明されている。

赤道下部成層圏中に発見された準 2 年周期の東西流変動についても、伝播論を基にしたモデルが提出されている (Holton・Lindzen, 1972; Plumb, 1977)。この仮説の検証は、精密なモデルを用いてはまだなされていない。

赤道上の高度 50~55 km に振幅のピークを持つ半年周期の東西流変動も、まだ決着をみていない問題である。大気潮汐波は、まだこの高度では帯状流に及ぼす影響は小さい (Fels・Lindzen, 1974)。可能性のあるものとしては、下部あるいは中高緯度からの波動の伝播による (Barnett, 1975; Hirota, 1978) と考えるものと、成層圏・中間圏循環の季節変化に伴って形成される cross-equatorial flow によって、東風が半年周期で加速されると考えるもの、あるいは、両者が相補っていると考えるものがある。

赤道上では、半年周期が現われる領域を含めて、65 km 位の高度までは年平均でみて西風になっている。これを説明する決定的研究もまだない。しかし、可能性のないものを消去して行くと、Kelvin 波のように西風運動量を運び得る波の伝播によるものではないかという考えが残ってくる。Hirota (1978) によるこの高度での Kelvin 波らしい波の検出は、この想像を現実性のある

ものに一步近づけたと言える。赤道地帯の問題については、熱帯気象学の手引をも参照されたい。

中間圏界面高度付近では、冬半球の極の方が夏半球の極よりも高温になっている。冬半球の極近傍では光化学的な熱源はなく、放射による加熱は考えられない。松野 (1976) は、大規模波動が西風の中を上方向伝播するのに伴って生ずる極向きの熱輸送と、大規模波動の減衰過程のかね合いで、高温が維持できる事を指摘している。

気候変動の研究は、学問的興味と共に社会的要請もあって、これからますます盛んになってくる分野であろう。そのための気候モデル作りも必要となってくる。気候モデルは、その性質から言って当然長時間の時間積分が必要になるので、現在の大気大循環モデルよりもずっと早く走るモデルが望まれる。気候モデルにとって重要な熱バランスを考える際には、運動(波動)自身は熱を輸送する一手段でしかなく、運動(波動)についての細かい情報にはあまり重点が置かれない。したがって、大気中の大規模な運動(波動)による輸送機構をパラメライズできれば、運動(波動)の記述は不必要という事になる。

大規模波動と帯状平均場を結び付ける一つのやり方は、Charney (1959, 1973) に遡る事ができよう。Charney は、まず最も発達しやすい傾圧不安定波の構造を線型論から決めておく、そしてこの波の形は変わらないとして、平均場から傾圧波が受け取るエネルギーが、Newtonian cooling によってその傾圧波の失なう有効位置エネルギーに等しくなるように、未定の傾圧波の振幅を決める。このやり方は shape assumption と言われている。実際には、有限振幅の波自身が帯状平均場を変えそれに伴って波の構造自身も変化するであろうが、この議論ではそういう過程は一切無視している。

こういう行き方に対して、大規模波動を乱流とみなし、それによる輸送を渦拡散でおき換えようという行き方もある。周知のように、傾圧波による運動量輸送はこのような拡散的な考えでは説明されない (Starr, 1968)。そこで、より保存性の高い準地衡風渦位を用い、これが拡散されるというモデルが Green (1970) によって提案されている。この考えは、Sela・Wiin-Nielsen (1971)、Wiin-Nielsen (1972) のモデルで用いられている。Stone (1972) は、Green に似たやり方で Richardson Number の変化も考慮した形を提案している。海面の温度予報に関しては、Adem (1975) は海流の影響を温度拡散に置き換えたやり方を行なっている。

Green のモデルは **White** (1977) によってその運動量輸送のパラメタリゼーションの特性が検討されている。このようなパラメタリゼーションのやり方について、その将来性を含めて、さらにモデルの検討がなされる必要を感じる。

Charney (1959, 1973) のような行き方を、**Lorenz** (1970) は wave motion approach と呼んでいるが、この行き方を発展させた一つの closed system が **Kim** (1973) によって提出されている。モデルは、山によって形成された停滞波と、動く波の存在を許し、これらと帯状平均場との相互作用から、動く波の最大成長率(波数空間の中で)を与えるモードが中立になるという条件の下に、大循環が決まるようになっている。

Kurihara (1970) の提案する統計力学モデルは、**Gambo-Arakawa** (1958) に述べられている、基本場と波動に関する統計量との間の feed back を許すプロトロピックモデルを、プリミティブ傾圧大気に拡張したものと言える。モデルでは、基本場および波動に関する統計量は予報されるようになっていて、**Kurihara** (1973) はこのモデルを用いて季節変化の再現を試みている。

波による輸送のパラメタリゼーションとして、以上のものと異なるアプローチが **Paltridge** (1975) によって採られている。**Paltridge** は、外から熱が与えられた時、エントロピーの生成率に関係した量が極小になるように大気中の熱輸送がなされるという仮定を導入して、熱輸送量を決める方式を試みている。このアプローチ自身興味あるものであると共に、**Paltridge** の用いた仮定自身が地球大気中でどの程度成り立っているのか、これまた興味ある問題である。

Schulman (1977) は、熱の垂直輸送のみある形のパラメタリゼーションを行ない、太陽から与えられる短波放射と、地球および地球大気が放出する長波放射の間で平衡状態に達しているという条件の下に、大気の色は熱機関としての効率が最大になるように決まるといふ、**Lorenz** (1960b) の導入した仮説を用いて、温度分布を求めている。こうして得られる温度分布は実際のものとよく似た特徴を持ち、その時の大気の色効率は3%程度と計算されている。実測データからは1~2%程度と見積もられているが、**Schulman** の得た値は実測に近いものになっている。振り返ってみると、これまでに大気大循環の研究の中で、熱力学第二法則の立場から大気大循環を位置づけるといったものが少ない事に気付く。この方面の研究も今後の興味あるテーマの一つと

言えよう。

Similarity theory は境界層の議論に登場してくるが、大気大循環に関する similarity theory が **Golitsyn** (1970) によって展開されている。そこでは、惑星大気の大循環全体を包含する理論的考察から、それぞれの惑星の大循環のあり様を決定している因子が導かれている。**Golitsyn・Zilitinkevich** (1972) では、この手法を進めて、運動エネルギー消散が境界層内でほとんど起こるような shallow atmosphere と、自由大気中でほとんど起こるような deep atmosphere について、惑星循環の様子を議論している。

5. 数値モデルによる研究

大気大循環を支配する法則の非線型性、室内実験モデルによる大気大循環シミュレーションの困難さから、数値モデルによる研究は、大気大循環の研究において重要な貢献をしている。数値モデルによる研究は、大きく分けて、数値モデル作りと数値モデルを用いた研究とに分けられる。数値モデル作りはさらに、数学的モデル作りと物理過程のモデル作りに分けられる。

大循環の数学的モデル作りにおいては、まずモデルは実際の大気と同様の統計的な特性を持つように作る事が要請される。この要請に応えるために、時間差分法、空間差分法とその計算安定性の議論から始まり、移流項の表現に関する水平差分法、静力学平衡に関する垂直差分法が開発されている。それらの開発において、特に物理保存則の満足度、波の分散特性の再現度に注意が払われている。

大循環モデル作りに関する数値計算法を知るには、**Mesinger・Arakawa** (1976)、**Haltiner**(1971)が最適であろう。スペクトル法に関しては、**GARP Working Group on Numerical Experimentation, Report No. 7** (1974) が詳しい。気象力学に用いられる数値計算法(新田他, 1972)や、最近出た数値予報:下(岸保他, 1978)も便利である。個々の論文としては、時間積分法に関するもので、効率的な explicit 法として **Ames** (1969)、semi-implicit 法については **Kwizak・Robert** (1971)、splitting 法は **Marchuk** (1974) がある。慣性重力波を押える時間積分法は、**Matsuno** (1966)、**Kurihara・Tripoli** (1976)、**Masuda** (1978) が議論している。空間差分法に関しては、**Arakawa** (1966, 1972)、**Arakawa・Mintz** (1974)、**Arakawa・Lamb** (1977)、垂直差分法に関しては **Tokioka** (1978) 等が挙げられる。気象の分野では、これまであまり用いられ

ていない有限要素法に関しては, Wang *et al.* (1972), Cullen (1974), Staniforth・Mitchell (1977) を参照されると良い。

水平差分法について, Arakawa (1966) は平面上の2次元流に対して, エネルギーとエンストロフィーを保存する差分式を導いている。この差分式を用いる事によって, 小さいスケールの擾乱へエネルギーが行きにくくなり, Phillips(1959)の指摘した non-linear instability を回避できることを示している。しかし, 球面上の発散順圧流体に関して, エネルギーと渦位の2乗を保存する差分法はまだ求められていない。そのための努力 (Sadourney, 1975等) が続けられている*。

モデルの上部境界の取り扱い方も, 現在まだ決着のついていない問題の一つである。 $\omega (=dp/dt)=0$ を $p=0$ の所で用いる事自体は問題ないが, その場合, モデルのトップの層の厚さは非常に部厚いものとなっており, その中の上下方向のサブグリッドスケールの現象をパラメタライズする必要がある。そういうやり方に対して, 有限の高さ (たとえば $p=p_1$) で $\omega=0$ を用いると, $p=p_1$ 面を通して空気の出入りを禁じてしまい, そのために波の反射が生じてしまう。上層大気中の現象をモデルでうまく再現するには, この点を解決する必要がある。一つの方法として, 上部境界近くの層に拡散項を入れる事があるが, それは有効な方法ではない (Arakawa・Mintz, 1974, Nakamura, 1976)。それに代わる一つの試みは Arakawa・Mintz に述べられている。

物理過程のモデル作りを概観するには, GARP Publication Series, No. 16 (1975; (気象研究ノート, 第132号, 1977に一部和訳あり)) が良い。これは, 気候モデル作りのために書かれたものであるが, そこに指摘されている事柄はほとんどそのまま現在の大気大循環モデル作りにもあてはまるものである。少し古くなるが, GARP Publication Series, No. 8(1972; 浅井, 1972による紹介あり)にも物理過程のモデル化の課題がまとめられていて, 参考になる。数値予報・上 (岸保他, 1978)にも詳しい review が載っている。

物理過程としては, 放射, 雲, 地表面, 海, cryosphere (雪, 氷, 海水, 氷床等), サブグリッド・スケール拡散

等が考えられる。放射に関与するものとして, オゾン, 二酸化炭素, 雲, エアロゾルがある。大気境界層は, 垂直方向の解像力の良いモデルでは, モデルである程度直接に記述され得るが, そうでない場合境界層のパラメタリゼーションも必要となる。

放射伝達を支配する式は積分方程式となっている。これを差分近似で解けば, 放射による冷熱源分布が求まる。これは一般的やり方であるが, 能率よく計算するための工夫がなされている (Arakawa・Mintz, 1974; Sasamori, 1968等)。放射に関与するものの中で, 変動の大きい水蒸気量はモデルで予報される。二酸化炭素や雲粒以外のエアロゾル量は, 普通モデルに時間空間の関数として与えられる。雲やオゾンはモデルによっては予報量として扱われている。

地表面のアルベードの変化は, 季節変化や気候を議論する際に重要になってくる。黒っぽい土の0.05, 海の0.07から, きれいな雪の0.9程度まで, アルベードは大きく変動する量である。アルベードを見積もる上で重要となる雪, 氷, 海氷は, モデルによっては予報されている。そのようなモデルでは, 適確な地表面温度決定が, 適確なアルベード決定の鍵となる。このためには, 大気下層に形成される大気境界層, すなわち, 境界面の影響を受けて乱流による垂直輸送が重要な役割を演ずる領域の取り扱いが重視される。

境界層のモデル化の方法としては, 乱流フラックスの取り扱い方の違いによって大きく二つに分けられる。一つは, 乱流フラックスをある乱流の closure model を用いて決めるやり方で, Mellor (1973) 他の研究がある。このやり方は, 少ない仮定で境界層の変遷を再現できるが, 垂直方向の層数を多くとる必要がある。他のやり方は, 観測から分かっている経験的事実を用いて乱流フラックスを推定する。このやり方では, さらに精度を上げるためには境界層の深さに関する情報も必要となる。境界層の深さの変動・発達に関しては, Ball (1960) 以来, 数多くのモデル (Lilly, 1968; Deardorff, 1976; Stull, 1973, 1976等) が提案されていて, それぞれ典型的な状況において妥当な結果が得られているが, 種々の型の境界層の変遷を統一的に取り扱うのは必ずしも容易ではない。そのための工夫が Arakawa・Mintz (1974) によって試みられている。

海面温度は, 大気大循環モデル実験では時間空間の関数として与えられる事が多いが, Manabe *et al.* (1975) は, 大気と海洋モデルを結合させて, 海面温度を予報し

*最近, Arakawa・Lamb (未発表) は, 発散順圧流体で, エネルギーとポテンシャルエンストロフィーの両方を保存する差分法の開発に成功し, 地形の効果がよく表現されるようになった事を指摘している。

て大循環モデルを走らせた。その結果は、大気の方については、海面温度を与えた時より概して悪くなっていて海面温度決定の精度が不充分である事が分かった。つまり、大きな熱溜である海と大気間のエネルギーの授受を正しく評価するためには、海面温度が正しくないといけないという事である。これは、気候モデル作りにとっては重要で、そのためには海の境界層モデルも必要となる。海の境界層モデルによる海面温度の日変化、年変化の再現には、既に一定の成果が得られている (Kraus・Turner, 1967; Denman・Miyake, 1973; Kim, 1976等)。

熱帯地方は大気大循環を惹き起こす熱源であるが、太陽から与えられるエネルギーはその大部分が海に吸収されてしまう。このエネルギーは潜熱として大気中に移り、大気中では Hadley 循環によって低緯度に潜熱エネルギーが集められる。これを上層大気へ運び上げる役目をになっているのが、巨大な積乱雲である (Riehl・Mulkus, 1958)。この巨大な積乱雲が上空に運び上げる潜熱エネルギーは、その大部分がポテンシャルエネルギーの形で亜熱帯の方へ運ばれる。このように、エネルギーの上方輸送という点で極めて重要な役割を演ずる積雲をはじめとして、雲全般に関するモデル化の問題について、Arakawa (1975) は考察を加えている。その論文では、Arakawa・Schubert (1974) の積雲のパラメタリゼーションの review の他に、雲量予報にとって重要な open cell・closed cell の維持機構に関する考察、雲の日変化、フロントに伴う雲系、巻雲の問題等が述べられている。

大気大循環モデルの成否をみる一つのポイントは、モデルでの超長波の再現性にある。これに関して次のような興味ある事実が示されている。Manabe *et al.* (1970) は、モデルの水平グリッドサイズを約 500 km と約 250 km にした場合について、比較実験を行なった。そして、250 km のモデルでは、フロントの組織化が良くなったのと同時に、超長波の振幅が増大し実測に近い運動エネルギースペクトルが得られるようになった。同様の結果は、Miyakoda *et al.* (1971b) の実験予報についても報告されているし、NCAR の山のないモデルで行なった同種の実験 (Welck *et al.*, 1971) でも指摘されている。これらの結果を総合すると、超長波の振幅を維持する上で、波同志の非線型相互作用も結構重要であることを示唆していると思われる。事実、Tomatsu (1976) の解析結果をみると、波数 1 のエネルギー収支では波同

志のやりとりの寄与が最重要項となっている。Tsay・Kao (1978) も、超長波 1, 3 の発達には波同志の非線型相互作用が重要であり、波数 8~10 程度のものの寄与も無視できない事を示している。

Manabe *et al.* は、グリッドを小さくすることにより、傾圧波動の記述が良くなり、非線型作用の結果超長波の記述が良くなったとしている。しかし、実際に観測されるような準停滞性超長波を再現するには、グリッドで表現される地形にตอบสนองした流れを作り出す非線型プロセスの記述も大切であろう。Arakawa・Lamb (未発表) は、後者の立場から、ポテンシャルエンストロフィーとエネルギーを保存する差分方式の開発を行なった。

大気大循環モデルは、モデル作りが始められて以来、より現実に近い、言い換えれば経験則依存度がより少なく、実際の物理法則にのっとったモデルに近づきつつある。しかし、現在のモデルでも既に断片的に指摘した様な点を含めて、改善の必要のある所を残している。これらの点は、これから改善されて、さらに現実大気に近い、いわば“標準大気大循環モデル”とも言うべきものへと発展していくことであろう。しかし、これは大循環モデルの一つの行き方であって、全てこうあるべきだと言うのではない。上のようなモデルは、現実に起こる大循環過程を、できるだけそれに近い形で再現するモデルである。したがって、必然的に情報量も多くなり、モデルも大掛かりになってくる。ところが、問題によってはある種の情報は必ずしも必要でなく、むしろ長時間の積分を手軽にやれる簡単なモデルが必要になる。気候変動に関係した問題を取り扱う時がそれである。そのようなモデル作りをする時に重要なのは、モデルの性能あるいは限界を明確に知る事である。このためには、モデルの結果と実測との比較を行なうのが一つの方法であろう。しかし、問題によっては実測でカバーしきれないような、あるいは地球大気が経験したことがないような場合が答えになり得るような時、モデルのチェックは実測のデータで行なっているだけでは不十分になる。こういう際に、“標準大気大循環モデル”が威力を発揮する。つまり、これを用いて単純化したモデルのチェックをすれば良いという事になる。これからの大循環のモデリングは、このように精密化と単純化という両方向に向かっていろいろな階層のモデルが作られて行く事になる。

モデルの多様化に伴って、それらのモデルを用いた種類の数値実験が数多くなされて来よう。その時に問題になってくる事は、モデルから得られる数多くの情報の中

から、意味のある情報とそうでないものを区別し、意味のある情報をいかに取り出すかという事である。この点に関係して、制禦実験結果の有意性を決めるための noise level の議論(Leith, 1973, 1975; Chervin *et al.*, 1974 等)がなされている。Chervin・Schneider (1976 a) は NCAR モデルを用いて noise level を見積もり、Chervin・Schneider(1976 b), Chervin *et al.*(1976) は異常海水温実験の結果の有意性の判定を試みている。

大気大循環モデルを用いた研究は、Phillips (1956) 以来、モデルの開発、計算機の進歩と共に数多くの大がかりのものがなされている。冬の対流圏のシミュレーションから始まって、季節変化、下部成層圏を含めたもの、さらに上層まで含んだもの、それに数値モデルの特性を生かした数々の制禦・感度実験がなされている。新田 (1970) による気象力学における数値シミュレーションには、1970年頃までのモデル研究が紹介されている。これは改めて言うまでもない事かも知れないが、数値モデルを用いた研究論文を読む際は、どういうモデルを用いて得た結果であるかという点を、はっきり確認しておく事は大切である。

GFDL* のグループは、Smagorinsky (1963) 以来、膨大な計算量を背景に活発な研究活動を続けている。まず最初は、水蒸気のない、そのかわり大気の減率は湿潤断熱減率を越えないモデル(Smagorinsky・Manabe・Holloway, 1965) から始められた。このモデルに水蒸気を取り入れたモデルの結果は、Manabe・Smagorinsky・Strickler (1965) で初めて議論され、そのモデルの熱帯地方の解析は Manabe・Smagorinsky (1967) に述べられている。Manabe *et al.* (1970) は、前述の通りグリッドサイズを変えて比較実験を行なった。Holloway・Manabe (1971) では、従来のモデルを発展させた新しいモデルの記述と共に、新しいモデルで得られた熱収支、hydrologic cycle の結果が議論されている。以後の研究では、このモデルが基本的に用いられている。Manabe *et al.* (1970) は、上のモデルの熱帯地方について解析を行なっている。下部成層圏を含む11層モデルを用いた季節変化のシミュレーションは Manabe *et al.* (1974) に述べられていて、特に成層圏の部分については Manabe・Mahlman (1976) で扱

われている。このモデルの結果のスペクトル解析は、熱帯地方について Hayashi (1974)、北半球の冬について Hayashi・Golder (1977) で述べられている。また、このモデルを3年間走らせた結果を元に、Manabe・Holloway (1975) は hydrologic cycle の季節変化を論じている。Manabe・Terpstra (1974)、Hahn・Manabe (1975) は、山の効果を議論している。前者は北半球の1月に、後者はアジアモンスーンに焦点を当てたものである。

この系列とは別に、大気と海洋を結合させたモデルの研究がなされている。Manabe(1969 a, b), Manabe・Bryan (1969) は、この問題を取り扱った最初の論文で、簡単な海陸分布をしたセクターモデルを用いて、海の運ぶ熱により中高緯度が暖められる事を示した。Wetherald・Manabe (1972) は、季節変化させることにより、高緯度地方の海面温度がさらに上昇し、現実の温度分布に近づく事を示している。Manabe・Bryan・Spelman (1975)、Bryan・Manabe・Pacanowski (1975) は、現実的な海陸地形分布をしたモデルを用いて、季節変化のない状態で計算を行なっている。大気海洋結合モデルを改良していく事は、それ自身興味深いだけでなく、気候モデル作りを進めていく上で、いわば気候モデルをチェックする標準の大循環モデルの役割を果たすものとして、重要な課題となっている。

これらの他に、GFDL では次のような制禦実験がなされている。Manabe・Wetherald (1975) は、大気中の二酸化炭素が2倍になった時の大気の応答について、Manabe (1969 a) に用いられたモデルを用いて調べている。Wetherald・Manabe (1975) は、同じモデルを用いて、太陽常数を変えた場合の大気の応答を論じている。また、Manabe・Hahn (1977) は、CLIMAP(「科学」, vol. 47, No. 10, 1977を参照)によって求められた1万8千年前の氷河期の夏の海面温度、地表面状態を与えてシミュレーションを行ない、現在と比較して熱帯地方の大循環の違いを論じている。

GFDL ではまた、大気大循環モデルを用いた実験延長予報の研究も同時に進められている(Miyakoda *et al.*, 1969, 1971 a, b 1972, 1973, 1974, 1976). Delsol *et al.* (1971) では surface boundary layer の parameterized process について、Miyakoda・Sirutis (1977) では大気境界層のパラメタリゼーションについて、比較テストを行なっている。

NCAR** のグループからも多くの結果が報告され

* Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NO-AA, Princeton, N.J.

** National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colo.

ている。モデルの記述に関しては、**Washington・Williamson** (1977) または **Kasahara・Washington** (1971) で扱われている。このモデルで記述される free oscillation の特性は、**Williams・Dickinson** (1976) によって調べられている。**Kasahara・Washington** (1971) は、地形の入った6層モデルで1月のシミュレーションを行なっている。この6層モデルのエネルギー解析は、**Baker et al.** (1977) に報告されている。**Kasahara et al.** (1973) では、下部成層圏を含んだ12層モデルで、1月の成層圏循環と地形効果が議論されている。このモデルの結果のスペクトル解析は、**Tsay** (1974) が行なっている。**Wellck et al.** (1971) は、山無しモデルで水平グリッドサイズの影響を調べ、GFDLモデルと同様の結果が報告されている。**Washington・Daggupaty** (1975) はアジア・アフリカモンスーン期の数値実験の解析を行なっているし、**Williams** (1976) はモデル中に生じた zonal standing wave の議論をしている。

NCAR モデルを短期予報に用いた結果は、**Bettge et al.** (1976) によって運動エネルギー収支解析されている。また、NCAR モデルと GFDL モデルによる予報の相互比較もなされている (**Baumhefner**, 1976)。

UCLA*) モデルは、2層モデルについて **Gates et al.** (1971)、3層モデルについて **Arakawa** (1972)、12層モデルについては **Arakawa・Mintz** (1974) に、また、12層モデルの断熱部分のみについては **Arakawa・Lamb** (1977) に詳しく述べられている。**Mintz et al.** (1972) は2層モデルで3年間の積分を行ない、季節変化の再現実験を行なっている。この実験では、同じ海面温度を与えておかつモデル大気の日平均値にかなりの年々変動が得られている。この2層モデルの基本部分は **Gates** (1973, 1975) の研究にも用いられ、1月の気候について、特に水蒸気・エネルギー収支に重点を置いて議論されている。7月の季候のシミュレーションとの比較は **Gates・Schlesinger** (1977) に報告されている。**Gates** (1976) は、同じモデルで、CLIMAP のデータを境界条件にして氷河期の気候シミュレーション

を行なっている。先ほどの **Manabe・Hahn** (1977) と対照されると良い。

UCLA 12層モデルは、成層圏を含み、水平・垂直差分に工夫がこらされている。積雲対流のパラメタリゼーションとしては、**Arakawa・Schubert** (1974) に基づくものが組み込まれており、境界層に関しては層雲の存在も許すモデルになっている。また、成層圏の熱源として重要なオゾン量も、単純化した光化学反応系を用いて予報するようになっている。

UCLA モデル (**Arakawa**, 1972) の断熱部分は、GISS** のモデル (**Sommerville et al.**, 1974) にも採用されている。GISS のモデルでは、垂直方向に9層とっている他に、放射の計算に特色がみられる。このモデルを用いて、**Sommerville et al.** (1974) は1月のシミュレーションについて、**Stone et al.** (1977) は1月と7月のシミュレーションの比較について議論している。**Tenenbaum** (1976) は、GISS モデルの結果のスペクトル解析とエネルギー解析を行なっている。また、**Stone et al.** (1974) は垂直方向の拡散効果の大循環に及ぼす影響を報告している。この他に、(短期予報 (**Druyan**, 1974)、延長予報 (**Druyan et al.**, 1975)、asynoptic data assimilation と延長予報 (**Jastraw・Nalem**, 1973) 等の研究も進められている。**Spar・Atlas・Kuo** (1976) は、1ヶ月予報から得られる1ヶ月平均パターンを基にした1ヶ月平均値予報を試みている。

イギリスの Meteorological Office には **Corby et al.** (1972, 1977) による大循環モデルがあり、これを用いた60日間の積分結果が **Gilchrist et al.** (1973) に報告されている。また、ECMWF***) でも、現在大循環モデル作りが進んでいる。

オーストラリアでは、スペクトル法による大循環モデル作りが進められている。そのモデルについては、**Bourke et al.** (1977) に述べられている。これとは別に、MIT では **Trenberth** (1973) のモデルを発展させたスペクトルモデル (**Cunnold et al.**, 1975) が作られていて、0.04 mb までの大気運動を3年間計算している。オゾンは簡単な光化学反応式を用いて計算した結果、観測値に近いオゾン分布が得られる事を示している。

海面温度異常の大気及ぼす影響は、気候変動あるいは長期予報の観点から関心を集めている問題である。太平洋東部の赤道付近には、偏東風の強弱による Ekman drift の違いから、海の湧昇流に強弱が現われ、偏東風

*) University of California at Los Angeles, Los Angeles, Calif.

**) Goddard Institute for Space Studies, NASA, N.Y.

***) European Center for Medium-Range Weather Forecasts, Blacknell, Berkshire, England.

が強く湧昇流の強い時は海面温度は低くなる。ペルーでは、海面温度が異常に高い時をエルニーニョと呼んでいる。Bjerknes (1969, 1971) は、このようにして生ずる海水温度変化が大気に及ぼす影響を調べ、東西の温度傾度から惹き起こされる Walker circulation を通しておこる変化と、南北の温度傾度から惹き起こされる Hadley circulation を通して起こる変化がある事を見つけた。前者は当然モンスーン循環にも影響を及ぼし、後者は亜熱帯ジェットやアリューシャン低気圧にも変動を与える。Rowntree (1972) は、後者の変動を確かめるべく、GFDL の半球モデルを用いて数値実験を試みた。結果は、Bjerknes の解析から得られていた変動がモデルにも検出され、赤道海水温異常がアリューシャン低気圧にまで影響を及ぼすという Bjerknes の説を裏付けるものであった。Spar (1973, a, b, c) は、UCLA 2層モデルを用いて、太平洋の中・高緯度の海水温度異常の影響を論じているし、Houghton *et al.* (1974) は NCAR モデルで大西洋の海水温異常の影響を調べている。南半球中緯度の暖水域の及ぼす影響については、Simpson・Downey (1975) がモデル実験を行なっている。

Pike (1971, 1972) は、大気と海洋の間の相互作用を理解するために、東西方向には一様である2次元モデルを作り、ITCZ が赤道上に作られない理由を説明している。もっと現実的に海陸の分布を取り入れた大気・海洋間の相互作用を許す気候モデル作りの試みは、Webster・Lau (1977) によってなされている。

火山爆発による火山灰が気候に及ぼす影響は、Hunt (1977) が議論している。Hunt は、赤道上で火山爆発があった場合を想定し、GFDL モデルを用いて実験を行なった。モデルでは、火山灰(エアロゾル)が大循環によって拡散し、それに応じて放射が変化し、温度場に影響が伝わり、それによってまた運動場も変わり得るようになっている。このモデルおよび火山活動と気候の問題に関しては、山元 (1977) の review を参照されたい。

気候変動を惹き起こし得る正のフィードバック機構の一つに、雪とか氷の出現による地表面アルベドの増大と地表気温の結び付きがある。Budyko (1969) や Sellers (1969) 達は、このフィードバック機構の入った簡単な気候モデルを作り、その解を検討した結果、太陽から与えられるエネルギーは現在のままであっても、現在のような気候の他に、雪や氷が全くない状態と、その反対に全地球上が雪や氷に覆われてしまう白い地球も、

安定な解として存在する事を示している。Wetherald・Manabe (1974) は、GFDL のセクターモデルを用いて白い地球の可能性を調べている。そして、現在の太陽放射の下でも初期に白い地球として出発すると、彼等のモデルでも白い地球は安定な解として存在するという結果を得ている。Fletcher *et al.* (1973) は、UCLA 2層モデルを用いて、冬期の北極海の海水の影響を調べている。北極海の海水がある場合とない場合を比較し、海水がない場合、北米よりもユーラシア大陸上に大きい影響が出ることが報告されている。気候変動に関する数値実験に関しては、“気候変動論”をも参照されたい。

6. あとがき

大気大循環論は、気象学の中の多くの分野と密接に結びついていて間口が広いので、その全体を展望し、バランスを失わないように大気大循環に関する研究・文献を紹介するという事は、筆者には荷の勝ちすぎたことであつた。恐らくアンバランスを感じられる箇所がいくつもある筈であろうが、そこは本稿で取り上げた文献中の引用文献や、この続入門講座シリーズの中の関連の分野の紹介を、ぜひ参照され、補っていただきたい。

書き終わってみて、私見を述べ過ぎた感じがし、説明を短かくして全体をもっとコンパクトにした方が良かったも思ったが、批判的に読んでもらえれば、大循環の研究のなかみを知ってもらうにはこのままの方がかえって良いかも知れないと思ひ直し、そのままにしておいた。

この手引の読者の中から、大循環の研究をやりとうという人が一人でも多く出てくれれば幸いである。

最後に、コメントをいただいた気象庁電子計算室の新田尚氏に感謝致します。

文 献

- Adem, J., 1975: *Tellus*, 27, 541-551.
 Aihara, M., 1963: *J. Met. Soc. Japan*, 41, 82-108.
 Aihara, M., 1964: *J. Met. Soc. Japan*, 42, 139-162.
 Ames, W.F., 1969: *Numerical methods for partial differential equations*, Nelson, London, 291 pp.
 Andrews, D.G. and M.E. McIntyre, 1976: *J. Atmos. Sci.*, 11, 2031-2048.
 Angell, J.K. and J. Korshover, 1970: *J. Geophys. Res.*, 75, 543-550.
 荒川昭夫, 1958: 気象研究ノート, 9, 229-362.
 Arakawa, A., 1966: *J. Comp. Phys.*, 1, 119-143.
 Arakawa, A., 1972: Design of the UCLA general circulation model, Numerical Simulation of Weather and Climate, Tech. Rept. No. 7,

- Dept. Met., UCLA.
- Arakawa, A. and Y. Mintz, 1974: The UCLA atmospheric general circulation model, Notes distributed at the workshop, 25 March-4 April, 1974. Dept. Met., UCLA.
- Arakawa, A. and W.H. Schubert, 1974: *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
- Arakawa, A., 1975: In "The physical basis of climate and climate modelling", GARP Publ. Series, No. 16, 183-197.
- Arakawa, A., 1975: *Rev. of Geophysics and Space Physics*, **13**, 668-680. [田中康夫 (訳), 1977: *グロースベッター*, **15**, 35-73]
- Arakawa, A. and V.R. Lamb, 1977: In "Methods in Computational Physics", **17**, 174-265, Academic Press.
- 浅井富雄, 1973: *天気*, **20**, 7-28.
- Baker, W.E., E.C. Kung and R.C. Sommerville, 1977: *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1384-1401.
- Ball, F.K., 1969: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **86**, 483-494.
- Barnett, J.J., 1974: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **100**, 505-530.
- Barnett, J.J., 1975: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **101**, 835-845.
- Barnett, J.J., R.S. Harwood, J.T. Houghton, C. G. Morgan, C.D. Rodgers and E. J. Williamson, 1975: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **101**, 423-436.
- Batchelor, G.K., 1969: *Phys. Fluids*, Suppl. II, **12**, 233-239.
- Baumhefner, D.P., 1976: *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 1175-1177.
- Belmont, A.D. and D.G. Dartt, 1973: *J. Geophys. Res.*, **78**, 6373-6376.
- Belmont, A.D., D.G. Dartt and G.D. Nastrom, 1974: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **100**, 203-211.
- Bettge, T.W., P.J. Smith and D.P. Baumhefner, 1976: *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 1242-1254.
- Bjerknes, J. and J. Holmboe, 1944: *J. Met.*, **1**, 1-22.
- Bjerknes, J., 1969: *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 163-172.
- Bjerknes, J., 1971: *天気*, **18**, 221-226. [林 良一, 遠藤昌宏訳]
- Blackmon, M.L., J.M. Wallace, N.-C. Lau and S.L. Mullen, 1977: *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1040-1053.
- Blumen, W., 1972: *Rev. of Geophysics and Space Physics*, **10**, 495-528.
- Booker, J.R. and F.P. Bretherton, 1967: *J. Fluid Mech.*, **27**, 513-529.
- Bourke, W., B. McAvaney, K. Puri and R. Thurling, 1977: In "Methods in Computational Physics", **17**, J. Chang, ed., 267-324, Academic Press.
- Boyd, J.P., 1976: *J. Atmos. Sci.*, **33**: 2285-2291.
- Bryan, K., 1969: *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 806-827.
- Bryan, K., S. Manabe and R.C. Pacanowski, 1975: *J. Phys. Oceanogr.*, **5**, 30-46.
- Budyko, M.I., 1969: *Tellus*, **21**, 611-619.
- Charney, J.G., 1947: *J. Met.*, **4**, 135-162.
- Charney, J.G., 1959: In "The atmosphere and the sea in motion, The Rossby memorial volume", 178-193, Rockefeller Institute Press.
- Charney, J.G. and P.G. Drazin, 1961: *J. Geophys. Res.*, **66**, 83-110.
- Charney, J.G., 1971: *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1087-1095.
- Charney, J.G., 1973: In "Dynamic Meteorology (ed. P. Morel)", 97-351, D. Reidel Publ. Co. Holland.
- Chervin, R.M., W.L. Gates and S.H. Schneider, 1974: *J. Atmos. Sci.*, **31**, 2216-2219.
- Chervin, R.M. and S.H. Schneider, 1976a: *J. Atmos. Sci.*, **33**, 391-404.
- Chervin, R.M. and S.H. Schneider, 1976b: *J. Atmos. Sci.*, **33**, 405-412.
- Chervin, R.M., W.M. Washington, and S.H. Schneider, 1976: *J. Atmos. Sci.*, **33**, 413-423.
- Corby, B.A., ed., 1970: *The global circulation of the atmosphere*, London, Roy. Met. Soc.
- Corby, G.A., A. Gilchrist and R.L. Newson, 1972: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **98**, 809-832.
- Corby, G.A., A. Gilchrist and P.R. Rowntree, 1977: In "Methods in Computational Physics", **17**, 67-110, Academic Press.
- Cullen, M.J.P., 1974: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **100**, 555-562.
- Cunnold, D., F. Alyea, N. Phillips and R. Prinn, 1975: *J. Atmos. Sci.*, **32**, 170-194.
- Deardorff, J.W., 1976: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **102**, 563-582.
- Delsol, F., K. Miyakoda, and R.H. Clarke, 1971: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **97**, 181-208.
- Denman, K.L. and M. Miyake, 1973: *J. Phys. Oceanogr.*, **3**, 185-196.
- Derome, J. and A. Wiin-Nielsen, 1971: *Mon. Wea. Rev.*, **99**, 564-576.
- Dickinson, R.E., 1968: *J. Atmos. Sci.*, **25**, 984-1002.
- Dopplick, T.G., 1971: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **97**, 209-237.
- Druryan, L.M., 1974: *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 269-279.
- Druryan, L.M., R.C.J. Sommerville, and W.J. Quirk, 1975: *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 779-795.

- Dutton, J.A. and D.R. Johnson, 1967: In "Advances in Geophysics", 12, 333-436, Academic Press.
- Dutton, J.A., 1973: *Tellus*, 25, 89-110.
- Eady, E.T., 1949: *Tellus*, 1, No. 3, 33-52.
- Eliassen, A. and E. Kleinschmidt, 1957: Dynamic meteorology, *Handbuch der Physik*, Bd. 48, 1-154.
- Eliassen, A. and E. Palm, 1960: *Geophys. Publ.*, 22:, 1-23.
- Fels, S.B. and R.S. Lindzen, 1974: *Geophys. Fluid Dyn.*, 6, 149-191.
- Fjørtoft, R., 1953: *Tellus*, 5, 225-230.
- Fletcher, J.O., Y. Mintz, A. Arakawa and T. Fox, 1973: WMO Tech. Note, No. 129.
- Firitz, S. and S.D. Soules, 1970: *J. Atmos. Sci.*, 27, 1091-1097.
- Fritz, S. and S.D. Soules, 1972: *Mon. Wea. Rev.*, 100, 582-589.
- Gambo, K. and A. Arakawa, 1958: Prognostic equations for predicting the mean zonal current, Tech. Rept. No. 1, Numerical Weather Prediction Group, Tokyo.
- 岸保勘三郎他, 1978: 気象研究ノート, 134, 上, 下, 1-424.
- GARP Publication Series No. 8, 1972: Parameterizations of sub-grid scale processes.
- GARP Publication Series No. 16, 1975: The physical basis of climate and climate modelling.
- GARP Publication Series. No. 18, 1976: The monsoon experiment.
- GARP Working Group on Numerical Experimentation, 1974: Report of the international symposium on spectral methods in numerical weather prediction, Copenhagen, 12-16 August 1974, Report No. 7.
- Gates, W.L., E.S. Batten, A.B. Kahle and A.B. Nelson, 1971: A documentation of the Mintz-Arakawa two-level atmospheric general circulation model, Rand Rept. R-877-ARPA.
- Gates, W.L., 1973: *Mon. Wea. Rev.*, 101, 412-425.
- Gates, W.L., 1975: *J. Atmos. Sci.*, 32, 449-477.
- Gates, W.L., 1976: *J. Atmos. Sci.*, 33, 1844-1873.
- Gates, W.L. and M.E. Schlesinger, 1977: *J. Atmos. Sci.*, 34, 36-76.
- Gilchrist, A., G.A. Corby and R.L. Newson, 1973: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 99, 2-34.
- Gill, A.E., 1974: *Geophys. Fluid. Dyn.*, 6, 29-47.
- Golitsyn, G.S., 1970: *Icarus*, 13, 1-24.
- Golitsyn, G.S. and S.S. Zilitinkevich, 1972: *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 8, 455-461.
- Green, J.S.A., 1960: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 86, 237-251.
- Green, J.S.A., 1970: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 96, 157-185.
- Groves, G.V., 1972: *Planet. Space Sci.*, 20, 2099-2112.
- Hahn, D.G. and S. Manabe, 1975: *J. Atmos. Sci.*, 32, 1515-1541.
- Haltiner, G.J., 1971: Numerical weather prediction, John Wiley & Sons, Inc., 317 pp.
- Hartmann, D.L., 1976a: *J. Atmos. Sci.*, 33, 1141-1154.
- Hartmann, D.L., 1976b: *J. Atmos. Sci.*, 33, 1789-1802.
- Hayashi, Y., 1974: *J. Atmos. Sci.*, 31, 180-218.
- Hayashi, Y. and D.G. Golder, 1977: *J. Atmos. Sci.*, 34, 236-237.
- 廣田 勇, 1969: 天気, 16, 129-132.
- 廣田 勇, 新田 尚, 時岡達志, 1973: 天気, 20, 499-503.
- Hirota, I. and Y. Sato, 1969: *J. Met. Soc. Japan*, 47, 390-402.
- Hirota, I., 1976: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 102, 757-770.
- Hirota, I., and J.J. Barnett, 1977: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 103, 487-498.
- Hirota, I., 1978: *J. Atmos. Sci.*, 35, 714-722.
- Holloway, J.L., Jr. and S. Manabe, 1971: *Mon. Wea. Rev.*, 99, 335-370.
- Holopainen, E.O., 1970: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 96, 626-644.
- Holton, J.R. and R.S. Lindzen, 1972: *J. Atmos. Sci.*, 29, 1076-1080.
- Holton, J.R., 1975: The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere, *Met. Monogr.* 15, No. 37, 216 pp.
- Horn, L.H. and R.A. Bryson, 1963: *J. Geophys. Res.*, 68, 1059-1064.
- Hoskins, B.J., 1973: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 99, 723-745.
- Hoskins, B.J. and A. Hollingsworth, 1973: *J. Atmos. Sci.*, 30, 150-153.
- Houghton, D.D., J.E., Kutzbach, M. McClintock and D. Suchman, 1974: *J. Atmos. Sci.*, 31, 857-868.
- Hunt, B.G., 1973: *Tellus*, 25, 337-354.
- Hunt, B.G., 1977: *Mon. Wea. Rev.*, 105, 247-260.
- Jastraw, R. and M. Halem, 1973: *Bull. Amer. Met. Soc.*, 51, 490-513.
- Julian, P. and K. Labitzke, 1965: *J. Atmos. Sci.*, 22, 597-610.
- Julian, P., W. Washington, L. Hembree and C.

- Ridley, 1970: *J. Atmos. Sci.*, **27**, 376-387.
- 「科学」, 47 No. 10, 1977; 特集: 新しい氷河時代像, 岩波書店.
- 金光正郎, 1976: *天気*, **23**: 533-549.
- Kao, S.-K., 1970: *J. Atmos. Sci.*, **27**, 1000-1007.
- Kao, S.-K. and L. Wendell, 1970: *J. Atmos. Sci.*, **27**, 359-375.
- Kasahara, A. and W.M. Washington, 1971: *J. Atmos. Sci.*, **28**, 657-701.
- Kasahara, A., T. Sasamori and W.M. Washington, 1973: *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1229-1251.
- 片山 昭, 1962: *気象研究ノート*, **13**, 101-169.
- 片山 昭, 1969: *グロースベッター*, **7**, 2号.
- Kida, H., 1977a: *J. Met. Soc. Japan*, **55**, 71-88.
- 木田秀次, 1977b: *天気*, **24**, 415-430.
- Kidson, J.W., D.G. Vincent and R.E. Newell, 1969: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **95**, 258-287.
- Kikuchi, Y., 1969: *J. Met. Soc. Japan*, **47**, 29-54.
- Kikuchi, Y., 1971: *J. Met. Soc. Japan*, **49**, Special Issue, 564-572.
- 菊池幸雄, 1974: *天気*, **21**, 113-126.
- Kikuchi, Y., 1979: *Pap. Met. Geophys.*, **30**, to be published.
- Kim, J.-W., 1973: The influence of large-scale topography and thermally forced planetary circulations, Ph. D. Thesis, Univ. of California, Los Angeles.
- Kim, J.-W., 1976: *J. Phys. Oceanogr.*, **6**, 686-695.
- Kousky, V.E. and J.M. Wallace, 1971: *J. Atmos. Sci.*, **28**, 162-169.
- Kraichnan, R.H., 1967: *Phys. Fluids*, **10**, 1417-1423.
- Kraichnan, R.H., 1971a: *J. Fluid Mech.*, **47**, 513-524.
- Kraichnan, R.H., 1971b: *J. Fluid Mech.*, **47**, 525-535.
- Kraus, E.B. and J.S. Turner, 1967: *Tellus*, **19**, 98-106.
- Krishnamurti, T.N., 1971a: *J. Appl. Met.*, **10**, 1066-1096.
- Krishnamurti, T.N., 1971b: *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1342-1347.
- Krishnamurti, T.N., M. Kanamitsu, W.J. Koss and J.D. Lee, 1973: *J. Atmos. Sci.*, **30**: 780-787.
- Kurihara, Y., 1970: *J. Atmos. Sci.*, **27**, 847-870.
- Kurihara, Y., 1973: *J. Atmos. Sci.*, **30**: 25-49.
- Kurihara, Y. and G.J. Tripoli, 1976: *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 761-764.
- Kung, E.C., 1967: *Mon. Wea. Rev.*, **95**, 593-606.
- Kung, E.C., 1969: *Mon. Wea. Rev.*, **97**: 573-581.
- Kung, E.C., 1970: *Mon. Wea. Rev.*, **98**: 911-916.
- Kuo, H.L., 1949: *J. Met.*, **6**, 105-122.
- Kwizak, M. and A.J. Robert, 1971: *Mon. Wea. Rev.*, **99**, 32-36.
- Labitzke, K. et al., 1972: *Meteorologische Abhandlungen, Band 100/Heft 4,5. Freien Universität, Berlin.*
- Lau, N.-C., H. Tennekes and J.M. Wallace, 1978: *J. Atmos. Sci.*, **35**, 139-147.
- Leith, C.E., 1967: *Phys. Fluids*, **11**: 671-673.
- Leith, C.E., 1971: *J. Atmos. Sci.*, **28**, 145-161.
- Leith, C.E., 1972: In "Parameterization of sub-grid scale processes", GARP Publication Series, No. 8, 40-51.
- Leith, C.E. and R.H. Kraichnan, 1972: *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1041-1058.
- Leith, C.E., 1973: *J. Appl. Met.* **12**: 1066-1069.
- Leith, C.E., 1975: In "The Physical basis of climate and climate modelling", GARP Publ. Series. No. 16, pp 137-141.
- Lilly, D.K., 1968: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **94**, 292-309.
- Lilly, D.K., 1973: *J. Atmos. Sci.*, **30**: 145-147.
- Lindzen, R.S. and J.R. Holton, 1968: *J. Atmos. Sci.*, **25**: 1095-1107.
- Lorenz, E.N., 1955: *Tellus*, **7**, 157-167.
- Lorenz, E.N., 1960a: *Tellus*, **12**, 243-254.
- Lorenz, E.N., 1960b: In "Dynamics of Climate", (P.L. Pfeffer, ed.), 86-92, Pergamon Press.
- Lorenz, E.N., 1962: *J. Atmos. Sci.*, **19**, 39-51.
- Lorenz, E.N., 1963: *J. Atmos. Sci.*, **20**, 448-464.
- Lorenz, E.N., 1967: The nature and theory of the general circulation of the atmosphere. WMO-No. 218, TP 115, pp 161.
- Lorenz, E.N., 1969a: *Bull. Amer. Met. Soc.*, **50**: 345-349.
- Lorenz, E.N., 1969b: *Tellus*, **21**, 289-307.
- Lorenz, E.N., 1970: in "The global circulation of the atmosphere (ed. B.A. Corby)", 3-23, London, Roy. Met. Soc..
- Lorenz, E.N., 1972: *J. Atmos. Sci.*, **29**, 298-264.
- Longuet-Higgins, M.S., 1967: *Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A*, **262**, 511-607.
- Manabe, S., J. Smagorinsky and R.F. Strickler, 1965: *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 769-798.
- Manabe, S. and J. Smagorinsky, 1967: *Mon. Wea. Rev.*, **95**, 155-169.
- Manabe, S., 1969a: *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 739-774.
- Manabe, S., 1969b: *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 775-805.

- Manabe, S. and K. Bryan, 1969: *J. Atmos. Sci.*, **26**, 786-789.
- Manabe, S., J.L. Holloway, Jr. and H.M. Stone, 1970: *J. Atmos. Sci.*, **27**, 580-613.
- Manabe, S., J. Smagorinsky, J.L. Holloway, Jr. and H.M. Stone, 1970: *Mon. Wea. Rev.*, **98**, 175-212.
- Manabe, S. and T.B. Terpstra, 1974: *J. Atmos. Sci.*, **31**, 3-42.
- Manabe, S., D.G. Hahn and J.L. Holloway, Jr., 1974: *J. Atmos. Sci.*, **31**, 43-83.
- Manabe, S., K. Bryan and M. J. Spelman, 1975: *J. Phys. Oceanogr.*, **5**, 3-29.
- Manabe, S. and J.L. Holloway, Jr., 1975: *J. Geophys. Res.*, **80**, 1617-1649.
- Manabe, S. and R.T. Wetherald, 1975: *J. Atmos. Sci.*, **32**, 3-15.
- Manabe, S. and J.D. Mahlman, 1976: *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2185-2217.
- Manabe, S. and D.G. Hahn, 1977: *J. Geophys. Res.*, **82**, 3889-3911.
- Marchuk, G.I., 1974: Numerical methods in weather prediction, Academic Press, pp 277. (First published in Russian in 1967)
- Maruyama, T., 1967: *J. Met. Soc. Japan*, **45**, 391-408.
- Maruyama, T., 1969: *J. Met. Soc. Japan*, **47**, 245-254.
- Masuda, Y., 1978: *J. Met. Soc. Japan*, **56**, 187-196.
- Matsuno, T., 1966a *J. Met. Soc. Japan*, **44**, 25-43.
- Matsuno, T., 1966b: *J. Met. Soc. Japan*, **44**, 85-88.
- Matsuno, T. and I. Hirota, 1967: *J. Met. Soc. Japan*, **44**, 122-128.
- Matsuno, T., 1970: *J. Atmos. Sci.*, **27**, 871-883.
- Matsuno, T., 1971: *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1479-1494.
- 松野太郎, 1971: *天気*, **18**, 483-491.
- 松野太郎, 1976: *日本気象学会秋季大会予講集*, **30**, 125.
- 松野太郎, 1977: *科学*, **47**, 2-10, 岩波書店.
- McIntyre, M.E., 1970: *J. Fluid Mech.*, **40**, 273-306.
- McIntyre, M.E., 1972: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **98**, 165-174.
- McIntyre, M.E., 1973: *J. Fluid Mech.*, **60**, 801-811.
- Mellor, G.L., 1973: *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1061-1069.
- Mellor, G.L. and T. Yamada, 1974: *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791-1806.
- Mesinger, F. and A. Arakawa, 1976: Numerical methods used in atmospheric models, GARP Publication Series, No. 17.
- Mintz, Y., A. Katayama and A. Arakawa, 1972: In "Survey Conference Proceedings of the climatic impact assessment program, Cambridge, Mass., 1972", ed. A.E. Barrington, 194-216, U.S. Dept. of Transportation.
- Miyakoda, K., 1963: Tech. Rep. No. 14, Univ. Chicago.
- Miyakoda, K., J. Smagorinsky, R.F. Strickler, and G.D. Hembree, 1969: *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 1-76.
- Miyakoda, K., R.F. Strickler, C.J. Nappo, P.L. Baker and G.D. Hembree, 1971: *J. Atmos. Sci.*, **28**, 481-499.
- Miyakoda, K., R.W. Moyer, H. Stambler, R.H. Clarke and R.F. Strickler, 1971: *J. Met. Soc. Japan*, **49**, Special Issue, 521-536.
- Miyakoda, K. and O. Talagrand, 1971: *Tellus*, **23**, 310-317.
- Miyakoda, K., G.D. Hembree, R.F. Strickler, and I. Shulman, 1972: *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 836-855.
- Miyakoda, K. and L. Umschied, Jr., 1973: *Mon. Wea. Rev.*, **101**, 603-616.
- Miyakoda, K., J.C. Sadler and G.D. Hembree, 1974: *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 571-591.
- Miyakoda, K., L. Umschied, D.H. Lee, J. Sirutis, R. Lusen and F. Pratte, 1976: *J. Atmos. Sci.*, **33**, 561-591.
- Miyakoda, K. and J. Sirutis, 1977: *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, **50**, 445-487.
- Monin, A.S., In "The physical basis of climate and climate modelling", GARP Publication Series, No. 16, 201-205.
- Morel, P. and M. Larcheveque, 1974: *J. Atmos. Sci.*, **31**: 2189-2196.
- Morel, P., M. Desbois and G. Szejwach, 1978: *Bull. Amer. Met. Soc.*, **59**, 711-714.
- Murakami, T., 1965: *J. Met. Soc. Japan*, **43**, 262-283.
- Murakami, T., 1967 *J. Met. Soc. Japan*, **45**, 205-231.
- Murakami, T. and M.S. Unninayar, 1977: *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1024-1038.
- Murakami, T., 1978: *J. Met. Soc. Japan*, **56**, 215-231.
- Murray, F.W., 1960: *J. Geophys. Res.*, **65**, 3273-3305.
- Nakamura, H., 1976: *J. Met. Soc. Japan*, **48**, 129-146.
- 中村 一, 1978: *天気*, **25**, 623-648.
- Nastrom, G.D. and A.D. Belmont, 1975: Periodic

- variations in stratospheric temperature from 20-65 km at 80°N to 30°S, NASA CR-137478.
- Newell, R.E., D.G. Vincent, T.G. Dopplick, D. Ferruzza and J.W. Kidson, 1970: In "The global circulation of the atmosphere", ed. G.A. Corby, 42-90, Roy. Met. Soc., London.
- Newell, R.E., J.W. Kidson, D.G. Vincent and G.J. Boer, 1972: The general circulation of the tropical atmosphere, I, MIT Press.
- Newell, R.E., J.W. Kidson, D.G. Vincent and G. J. Boer, 1974: The general circulation of the tropical atmosphere, II, MIT Press.
- Newton, C.W., 1971a: J. Atmos. Sci., 28, 623-628.
- Newton, C.W., 1971b: J. Atmos. Sci., 28, 1329-1341.
- Newton, C.W., ed., 1972: Meteorology of the southern hemisphere, Met. Monogr. 13, No. 35, pp 263.
- Newton, C.W., 1972: In "Meteorology of the southern hemisphere", Met. Monogr., 13, No. 35, 215-246.
- 新田 尚, 1970: 気象研究ノート, 103, pp 128.
- 新田 尚, 1971: 天気, 18, 315-318.
- 新田 尚他, 1972: 気象研究ノート, 110, pp 158.
- 小倉義光, 1978: 気象力学通論, 東大出版会, pp 260.
- Oort, A.H. 1964: Tellus, 16, 309-327.
- Oort, A.H. and E.M. Rasmusson, 1971: Atmospheric circulation statistics, NOAA Prof. Pap., 5 pp 323.
- Oort, A.H. and J.P. Peixóto, 1974: J. Geophys. Res., 79, 2705-2719.
- Oort, A.H. and H.D. Bowman, 1974: J. Atmos. Sci., 31, 1974-1982.
- Oort, A.H. and T.H. Vonder Haar, 1976: J. Phys. Oceanogr., 6, 781-800.
- Oort, A.H., 1977: The Inter-annual Variability of Atmospheric Circulation Statistics, NOAA Prof. Pap., 8, pp 76.
- Oort, A.H., 1978: Mon. Wea. Rev., 106, 174-195.
- Paltridge, G.W., 1975: Quart. J. Roy. Met. Soc., 101, 475-484.
- Pedlosky, J., 1970: J. Atmos. Sci., 27, 15-30.
- Pedlosky, J., 1971: J. Atmos. Sci., 28, 587-597.
- Pedlosky, J., 1972: J. Atmos. Sci., 29, 53-63.
- Peixóto, J.P. and A.H. Oort, 1974: J. Geophys. Res., 79, 2149-2159.
- Phillips, N.A., 1954: Tellus, 6, 273-286.
- Phillips, N.A., 1956: Quart. J. Roy. Met. Soc., 82, 123-164.
- Phillips, N.A., 1959: In "The atmosphere and the sea in motion, The Rossby memorial volume", 501-504, Rockefeller Institute Press.
- Phillips, N.A., 1963: Rev. Geophysics, 1, 123-176.
- Pike, A.C., 1971: Mon. Wea. Rev., 99, 469-477.
- Pike, A.C., 1972: Mon. Wea. Rev., 100, 424-433.
- Plumb, R.A., 1977: J. Atmos. Sci., 34: 1847-1858.
- Raschke, E., T.H. Vonder Haar, W.R. Bandeen and M. Pasternak, 1973: J. Atmos. Sci., 30, 341-364.
- Reed, R.J. 1965: Bull. Amer. Met. Soc., 46, 374-387.
- Reed, R.J., 1966: J. Geophys. Res., 71, 4223-4233.
- Riehl, H. and J.S. Mulkus, 1958: Geophysica, 9, 503-538.
- Rowntree, P.R., 1972: Quart. J. Roy. Met. Soc., 98, 290-321.
- Saltzman, B. and A. Fleisher, 1962: J. Atmos. Sci., 19, 195-204.
- Saltzman, B., 1968: Met. Monogr., No. 30, Amer. Met. Soc., 4-19.
- Saltzman, B., 1970: Rev. Geophys. Space Phys., 8, 289-302.
- Sadourney, R., 1975: J. Atmos. Sci., 32, 680-689.
- Sasamori, T., 1968: J. Appl. Met. 7, 721-729.
- 佐藤康雄, 1977: 天気, 24, 135-151.
- Schulman, L.L., 1977 J. Atmos. Sci., 34, 559-580.
- Sela, J. and A. Wiin-Nielsen, 1971: Mon. Wea. Rev., 99, 460-468.
- Sellers, W.D., 1969: J. Appl. Met. 8, 392-400.
- Simmons, A.J., 1974: Quart. J. Roy. Met. Soc., 100, 76-108.
- Simons, T.J., 1972a: J. Atmos. Sci., 29, 38-52.
- Simons, T.J., 1972b: Mon. Wea. Rev., 100, 145-152.
- Smagorinsky J., 1963: Mon. Wea. Rev., 91: 99-164.
- Smagorinsky, J., S. Manabe and J.L. Holloway, Jr., 1965: Mon. Wea. Rev., 93: 727-768.
- Sommerville, R.C.J., P.H. Stone, M. Halem, J. E. Hansen, J.S. Hogan, L.M. Druryan, G. Russel, A.A. Lasis, W.J. Quirk and J. Tenenbaum, 1974: J. Atmos. Sci., 31: 84-117.
- Spar, J., 1973a: Mon. Wea. Rev., 101, 91-100.
- Spar, J., 1973b: Mon. Wea. Rev., 101, 554-563.
- Spar, J., 1973c: Mon. Wea. Rev., 101, 767-773.
- Spar, J., R. Atlas and E. Kuo, 1976: Mon. Wea. Rev., 104, 1215-1241.
- Starr, V.P., 1968: Physics of negative viscosity phenomena, McGraw-Hill, New York, pp 254.

- Steinberg, H.L., A. Wiin-Nielsen and C.H. Yang, 1971: *J. Geophys. Res.*, **76**, 8629-8640.
- Staniforth, A.N. and H.L. Mitchell, 1977: *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 154-169.
- Steranka, J., L.J. Allison and V.V. Salomonson, 1973: *J. Appl. Met.*, **12**, 386-395.
- Stone, P.H., 1972: *J. Atmos. Sci.*, **29**, 405-418.
- Stone, P.H., W.J. Quirk and R.C. J. Sommerville, 1974: *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 765-771.
- Stone, P.H., S. Chow and W.J. Quirk, 1977: *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 170-194.
- Stull, R.B., 1973: *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1092-1099.
- Stull, R.B., 1976: *J. Atmos. Sci.*, **33**, 1260-1267.
- 高野健三, 1974: サイエンス, **4**, 55号, 93-105, 日本経済新聞社.
- 高野健三, 1977: 海の大循環, いるかぶっくす, #3, 海洋出版社.
- Tenenbaum, J., 1976: *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 15-30.
- Tokioka, T., 1978: *J. Met. Soc. Japan*, **56**, 98-111.
- Tomatsu, K., 1976: Spectral atmospheric energy budget over the northern hemisphere during Oct. 1964-Sept. 1965. Tech. Rept. No. 1, Forecast Res. Laboratory, Meteorol. Res. Inst., Tokyo, pp 193.
- Trenberth, K.E., 1973: *Mon. Wea. Rev.*, **101**, 287-305.
- Tsay, C. -Y., 1974: *J. Atmos. Sci.*, **31**, 330-339.
- Tsay, C. -Y. and S. -K. Kao, 1978: *Tellus*, **30**, 1-14.
- Uryu, M., 1974: *J. Met. Soc. Japan*, **52**, 481-490.
- Uryu, M., 1975: *J. Met. Soc. Japan*, **53**, 45-54.
- 瓜生道也, 1976: 天気, **23**, 3-22.
- Vinnichenko, N.K., 1970: *Tellus*, **22**, 158-166.
- Vonder Haar, T.H. and V.E. Suomi, 1971: *J. Atmos. Sci.*, **28**, 305-314.
- Wallace, J.M. and V.E. Kousky, 1968: *J. Atmos. Sci.*, **25**, 900-907.
- Wallace, J.M., 1973: *Rev. of Geophysics and Space Physics*, **11**, 191-222.
- Wang, H. -H. and P. Halpern, 1972: *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 738-746.
- Washington, W.M. and S.M. Daggupaty, 1975: *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 105-114.
- Washington, W.M. and D.L. Williamson, 1977: In "Methods in Computational Physics", **17**, 111-172, Academic Press.
- Webster, P.J. and K.M.W. Lau, 1977: *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1063-1084.
- Wellck, R.E., A. Kasahara, W.M. Washington and G. De Santo, 1971: *Mon. Wea. Rev.*, **99**: 673-683.
- Wetherald, R.T. and S. Manabe, 1972: *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 42-59.
- Wetherald, R.T. and S. Manabe, 1975: *J. Atmos. Sci.*, **32**, 2044-2059.
- White, A.A., 1977: *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **103**, 93-120.
- Wiin-Nielsen, A., 1967: *Tellus*, **19**, 540-559.
- Wiin-Nielsen, A., 1972: *Geophys. Publ.*, **28**, 1-45.
- Williams, D.L. and R.E. Dickinson, 1976: *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 1372-1391.
- Williams, J., 1976: *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 249-259.
- Yamada, T. and G. Mellor, 1975: *J. Atmos. Sci.*, **32**, 2309-2329.
- 山元竜三郎, 1977: 天気, **25**, 81-102.
- Yanai, M. and T. Maruyama, 1966: *J. Met. Soc. Japan*, **44**, 291-294.
- 柳井迪雄, 1970: 天気, **17**, 441-444.