

落し

(P66-67)

グロースベッター

第15巻 第2・3号 合併号

最近の気象衛星による成層圏・中間圏の 観測的研究.....	廣 田 勇.....	1
1881～1975年の北半球の気温変化 (紹介).....	古 賀 晴 成.....	10
WMC, ワシントンの全球解析資料.....	能 登 正 之.....	16
太陽定数の変化と大気大循環.....	朝 倉 正..... 田 中 康 夫	22
大気大循環 (総合報告 紹介).....	田 中 康 夫.....	35
編集後記.....	編 集 部.....	74

1977年6月

L. F. グループ

最近の気象衛星による成層圏・中間圏の観測的研究

廣 田 勇*

§ 1. はしがき

1960年4月1日にアメリカで打上げられた世界最初の気象衛星タイロス1号は地球大気の観測的研究の歴史に新しい1ページを開いた。以来十数年気象衛星による観測の技術は日進月歩の発展をとげ、今日では高層大気の研究にとって欠くべからざる重要な役割を果している。初期の、雲写真を漫然と眺めるだけの段階から脱却して、我が国でも研究に業務に積極的な利用方法が開発されてきている。ふりかえって見ると、主としてアメリカにおける気象衛星赤外放射観測に基づく研究紹介文を天気(廣田1972)に書いてからもう5年が経過した。その間、筆者自身も気象衛星観測資料の解析でいささかの仕事をする事ができたので、最近の話題を書きとめておくこともあながち無意味ではなからうと思う。折よく、1976年11月に東京大学宇宙航空研究所で開かれたMAP(Middle Atmosphere Program)のシンポジウム席上で表記の題目の講演をする機会を得た。このシンポジウム報告は別途に印刷出版されるが、参加者は気象分野の限られた一部の人々とエアロノミー関係者なので、重複をいとわず同種の報告を本誌に掲載させて頂くことにした。

長期予報もまた、日本やアジア地域の下層大気にとどまらず、今や全地球的な規模での問題意識を持ち、業務上でも世界全域にわたる各種の観測資料を集積し、着々とその解析作業が進められていると聞く。その意味からも、本文が長期予報にたずさわって居られる方々にとって何らかの参考になれば幸いである。

§ 2. 気象衛星観測の目的と意義

現在の気象衛星はその軌道や搭載測器などのちがいに、様々なものがあり、それらは当然観測の対象やその利用目的に応じて使い分けられる。例えば、対流圏の天気・天候の現状把握や予測(予報)の目的には、雲・水蒸気・気温・地面海面温度等の空間分布を知ることが必要である。一方、成層圏中間圏の大循環や大規模力学の研究目的には、グローバルスケールの気温や風系の観測が要請される。地球規模の大気運動に関しては、気温の水平垂直分布と大気下層での気圧分布とが知られば、静力学平衡及び地衡風平衡の仮定を用いることにより、全層にわたる気圧(密度)分布、運動の場を求めることができる。

話を高層大気にかぎるなら、そもそも成層圏中間圏の大気大循環とは太陽エネルギーの入射と大気赤外放射との差引き勘定によって決まる熱冷源を駆動力とし、気温分布と風系とがそこに内在す

* 京都大学理学部

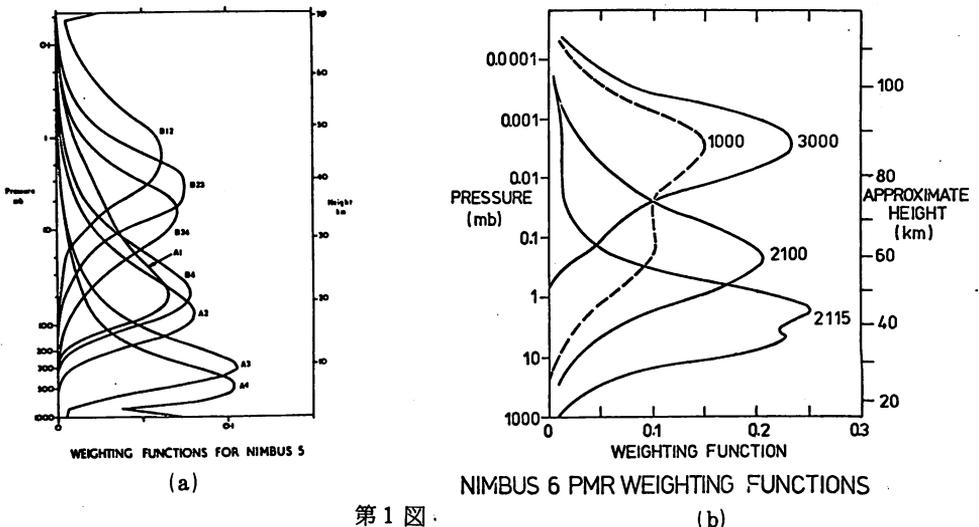
る波動擾乱によるさまざまな物理量の輸送とうまくバランスするようなシステムを構成しているといえる。従ってその解明のために、衛星から赤外放射計等によるリモートセンシングで気温分布を求めることの意義はきわめて大きいことになる。更に、大気の下層上層を問わず、軌道衛星による全球的観測が時間的にも連続して行なわれることは、従来の限られた陸上観測点のみでは知り得なかった均一なデータを提供する結果となり、つまりは地球規模の大気現象の解明に大きな貢献をなす。この見地に立って、以下赤外放射観測に基づく高層大気解析について話を進めよう。

§ 3. 衛星赤外放射観測の原理とその応用

すでにおなじみの読者も多いと思うが、衛星から気温の分布を測定する原理をまず簡単に述べておく。

大気の長波長放射を射出・吸収する基準気体として混合比がほぼ一定（約330 ppm）の炭酸ガス（ CO_2 ）をえらぶ。その 15μ 帯放射強度（radiance という）を衛星から測定すると、それはP1-anck 関数を媒介として大気の温度に関する情報を与える。具体的には、 15μ を中心とする僅かずつ異った波長域の上向き放射強度を独立に測定すると、中心の強い吸収率のチャンネルで得られる radiance は密度の大きい大気下層で吸収された残り、即ち上層大気の温度場からの寄与を意味し、逆に吸収の弱いチャンネルのものは下層の温度場を強く反映することになる。このことを利用して、気温の垂直分布を衛星軌道に沿った各点で求めることができる。実際には数多くのチャンネルの放射強度から逆算して気温分布を求めることは高度の技術を要するので、各チャンネルの radiance をそれぞれの高度のある厚さを持った大気層の平均温度と解釈し、独立にそのレベルの水平分布を解析することもしばしば行なわれている。

1960年代には、この原理に基づく観測が、主として30km以下の成層圏対流圏について行なわれた。その解析例については筆者の解説（1972）を参照されたい。



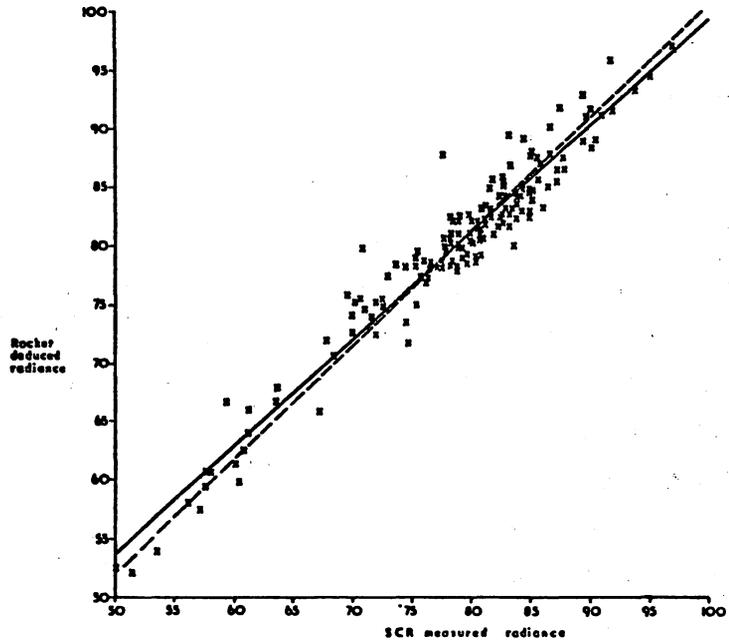
第1図

1970年代に入り、英国 Oxford 大学大気物理学教室で開発された SCR (Selective Chopper Radiometer) と PMR (Pressure Modulator Radiometer) はそれぞれ Nimbus 4号と5号、及び6号に搭載され、前者は高度50Kmの成層圏界面まで、後者は高度100Km(下部熱圏)までの気温測定に成功している。

幸いにして筆者も1975年から76年にかけて Oxford 大学に滞在しこれら最新の観測資料を使う機会に恵まれたので、以下 SCR 及び PMR を用いた最新のいくつかの解析例を筆者自身の結果も含めて紹介してみたい。

第1図(a), (b)はそれぞれ Nimbus 5号 SCR, 同6号 PMR の各チャンネルの荷重函数を示す。たとえば SCR のトップチャンネル B12 は高度45Km附近に中心を持ち、厚さ約20Kmの大気層の温度場の寄与を表現している。同様に PMR のトップチャンネル3000は下部熱圏(80~100Km)の気温の情報を提供する。

このような測定法による気温の観測精度は、例えば衛星軌道上にある気象ロケット観測地点での同時観測結果と比較することにより確かめられる。第2図はロケットによる気温の観測値を radiance に換算したものの(タテ軸)と SCR radiance (横軸)との比較を示す。(Barnett et al. 1975)。全体としての対応は良好で、radiance の偏差値 ΔR は絶対温度の偏差値 ΔT にはほぼ等しいので、



第2図

この図から個々の地点における誤差は高々数度以内であることがわかる。時間平均、空間平均を施し、長周期かつ大規模の現象のみを見る場合には、精度は更に向上する。

緯度平均した気温の子午面分布を第3図に例示する。これは Nimbus 4号 SCR による特定の日(13 December 1970)の例であるが、たとえば January の平均値なども同様な手法で得られる。(Barnett, 1974)。SCR によって求められた成層圏の子午面気温分布を、限られた地点でのロケット観測値の統計(例えば CIRA モデル)と比較してみるのも興味深い。Hirota et al. (1973)はその差の意味をプラネタリー波動と関連づけて論じた。

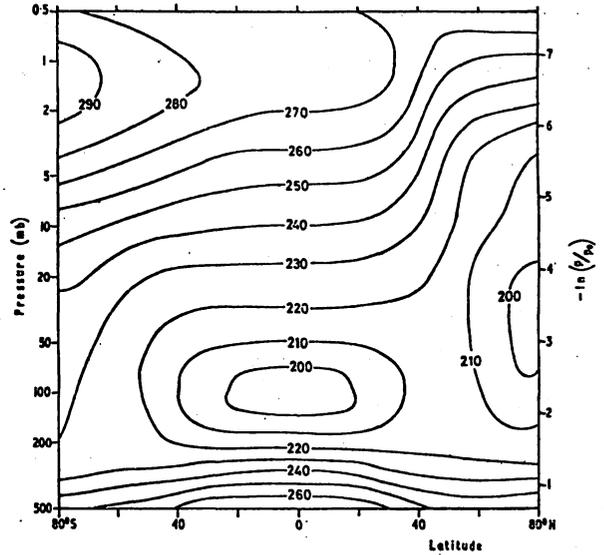
極軌道衛星によるグローバルに均一な気温測定結果は、単に静的な平均子午面分布を与えるのみならず、成層圏・中間圏大気温度場の特徴的な振舞についていくつかの興味ある事実を明らかにする。冬期成層圏に生起する最も spectacular な event である突然昇温現象も zonal mean temperature で見るとその特性が良く把握できる。突然昇温そのものに関しては、既に 60 年代のゾンデやロケットの観測解析から、それがプラネタリスケールの波動によって引き起こされるものであることが知られており、

その力学モデルも提出されている。(Matsuno, 1971)。しかし中間圏以高については僅かに限られた例数のロケット観測に基づく推測の域を出なかった。

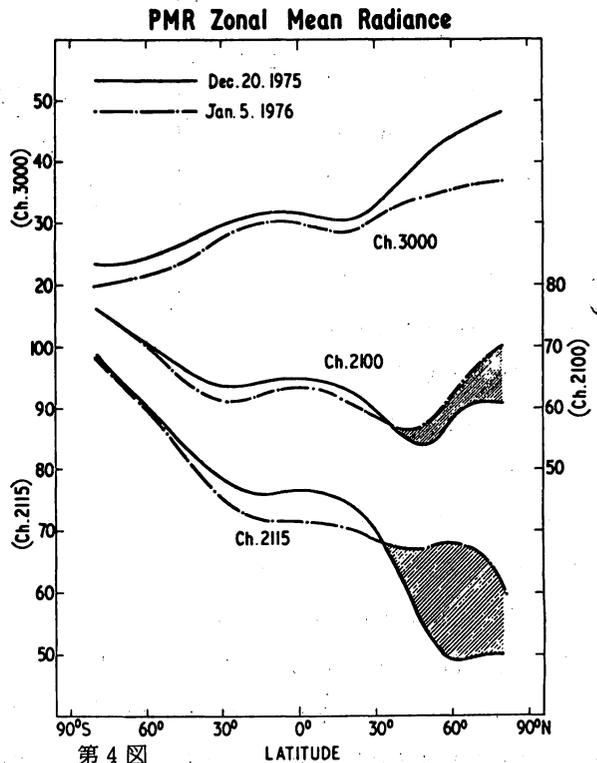
第4図は、1975年12月末から1976年1月はじめにかけて発生した北半球極域の突然昇温に対応する zonal mean radiance (temperature) の振舞いを、PMRの三つのチャンネルで表現したものである。(Hirota and Barnett, 1977)。

この昇温はあまり強いものではないが、それでも15日間で成層圏界面附近 (Ch. 2115) の高緯度の帯状平均気温が約 20°K 上昇し、その影響は中間圏 60 Km 附近 (Ch. 2100) にも達していることがわかる。同時に、冬極の昇温を補償する降温は 30°N 以南、南半球全域にも及んでいる。

これに対し、下部熱圏 (Ch. 3000) では極域も逆に降温していることがわかる。これらの観測事実の集積は、従来の突然昇温現象の理解を更に深め、成層圏中間圏大気全体にわたる定量的な議論を可能ならしめるものである。PMRは打上げ後まだ1年半しか経過していないが、



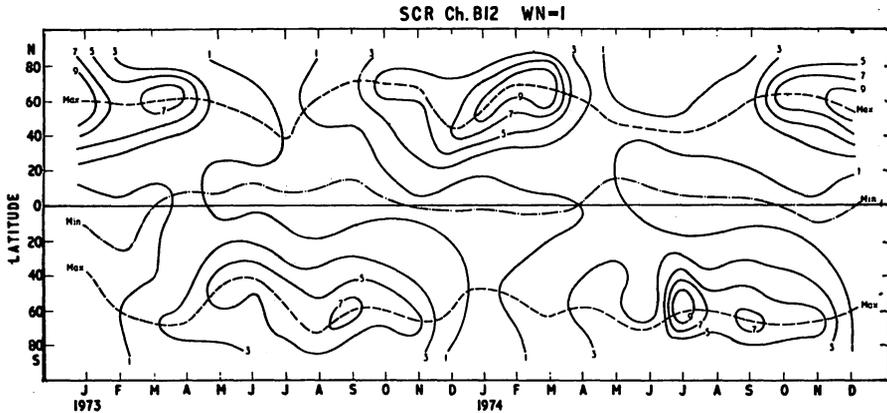
第3図



第4図

1976年末現在、観測とデータチェックは順調に続行されており、将来、南半球の冬も含めて、より顕著な昇温が観測されれば、我々は更に多くの知識を得ることができるであろう。

先に述べたように、極軌道衛星による全球の連続観測は、一日以上の時間スケールを持つ大規模現象の解析に好適である。従って、radiance temperature の空間（水平）分布を調和解析することによりプラネタリー波動の構造や時間的変動を調べることも良く行なわれている。第5図はHirota (1976) による SCR Ch. B12 (成層圏界面高度) の東西波数1の季節変化を示す。この解



第5図

析は daily の波の振幅を月毎に統計したものであり、所謂定常波と非定常波の両方が含まれている。中高緯度では南北両半球とも冬期にその振幅が大きい。これに対し、赤道領域では冬半球の影響が2~3カ月遅れて出現し、4月と10月頃、つまり春分と秋分の約1カ月後に赤道領域での波の振幅が最大になることがわかる。換言すれば、中高緯度の波が明白な1年周期を示すものに対し、低緯度では半年周期が卓越することになる。このプラネタリー波動の季節変動が、赤道中間圏の帯状流半年周期振動と良い対応を持っていることも示唆されている。(Barnett, 1975, Hirota, 1976)。

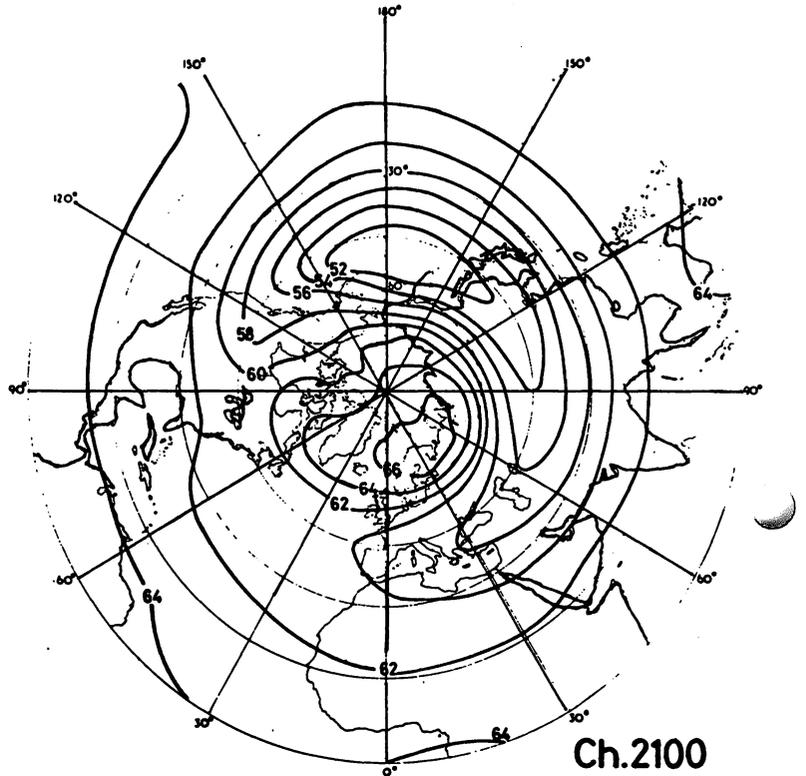
PMRの出現は、更に中間圏以高のプラネタリー波動に関して定量的な波数解析を可能にした。第6図はPMRのCh. 2100 (約60 Km) とCh. 3000 (約90 Km) で見た1976年1月の冬期北半球月平均温度場を示す。数字の単位は絶対温度プラス定数と考えて良い。一見してプラネタリー波動が下部熱圏にまで侵入していることが知られよう。緯度別・高度別の調和解析の結果、波数1と2の波が成層圏から連続的な位相角の傾きを持ってつながっていることがわかる。振幅の最大値は中間圏にあり、その卓越緯度は polar-night jet の中心 (約45°N) より有意に極側に偏倚している。(Hirota and Barnett, 1977)。

高層大気中のプラネタリー波動は、下層に励起源を持つ強制内部ロスビー波の伝播問題として理論的に解釈され、詳しい数値計算も行われている。(Matsuro, 1970, Simmons, 1974)。しかしながら、これらのモデル計算の verification は従来の成層圏観測にかぎられており、その結

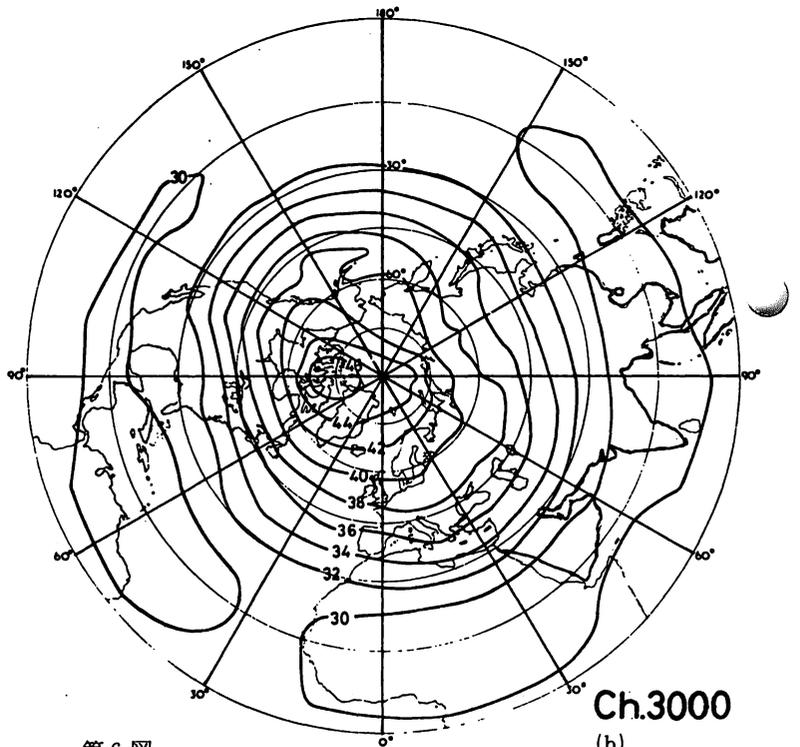
果はここに示した中間圏以上の観測結果と必ずしも一致していない。言い換えれば、この新しい観測結果は従来の伝播理論の再検討を要請していることになる。おそらく、成層圏以下ではあまり重要視されていなかった radiative damping と有限振幅波の非線型効果の定量的な導入が必要であろう。

中間圏における突然昇温前後のプラネタリー波動の非定常的振舞いも興味ある問題である。例えば従来いくつかの議論のあった、電離層D-regionの winter anomaly と突然昇温との関連も、その重要なリンクは伝播性プラネタリー波動であると考えられるので、PMRによる中間圏熱圏の波動解析にける期待は大きい。

これまで述べてきたように、衛星赤外放射観測によって得られる情報は主として気温であり、風に関しては直接の観測はできない。しかし、地衡風近似の許されるような大規模かつ長周期の運動に関しては、



Ch.2100
(a)

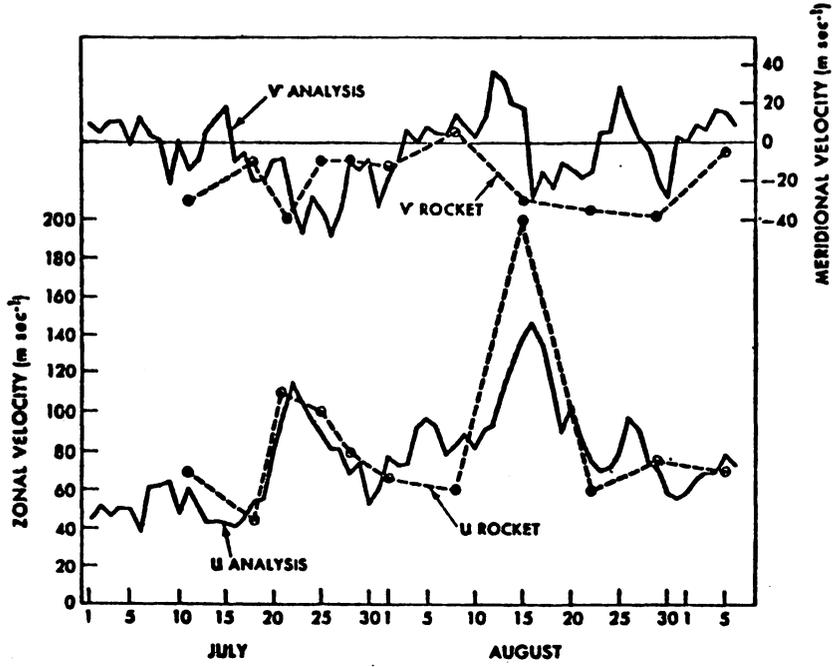


Ch.3000
(b)

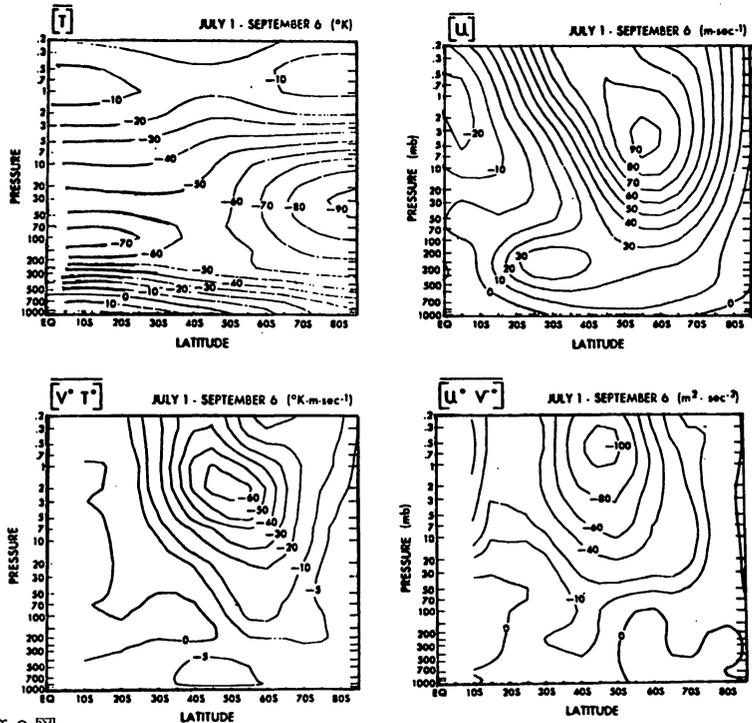
第6図

ゾンデ観測値を下部境界条件として用い、温度風の仮定によって衛星の気温データから上層の風を推定することができる。

第7図は、南半球上部成層圏の風について、Nimbus 5号 SCRのデータから推算した東西風及び南北風を、南極大陸の Moledezhnaia のロケット観測値と比較したものである (Hartmann, 1976)。風速の絶対値の小さい南北風については誤差は大きいが、極夜ジェットの卓越する東西風成分についてはロケット観測と良い対応を示している。Hartmannは更に、これらの風の計算値から、波動擾乱に伴う南北の熱及び運動量のフラックス $[V^*T^*]$, $[U^*V^*]$ を求め、緯度平均の温度場、東西風系との対応を論じている (第8図)。両方のフラックスとも、中緯度の上部成層圏で極向きの最大値を持つ。第7図の南北風 v の calibration に見られる如く、このフラックスの見積りにはかなりの誤差



第7図



第8図

が含まれていると考えられるが、従来の大循環論で全くの空白領域であった南半球成層圏の熱輸送・運動量輸送の見積りが行われることは、衛星観測の重要性を改めて認識させるに足るものと言えよう。

中間圏の風の estimate に関してはまだ組織的な解析は行なわれていない。Hirota と Barnett (1977) は第 4 図に示した突然昇温時に対応して、中間圏極夜偏西風がプラネタリー波動の伝播の結果東風加速を受け、2 週間の前後で中緯度 60 Km 高度の帯状平均流が 80 m/sec から 40 m/sec まで変化したことを PMR のデータから示した。

以上、最近の解析例として、平均気温分布、プラネタリー波動、風速場の算定についていくつかの結果を紹介した。これら、気象衛星観測資料の活用は、既存のデータについて現在でも活発に研究が続行されている。と同時に、次の観測ステップとして、より高度の観測計画も着々と進められている。一例をあげるなら、1978 年打上げ予定の Nimbus G に搭載される LRIR (Limb Radiance Inversion Radiometer) や SAMS (Stratosphere And Mesosphere Sounder) は、観測の領域、対象、精度を更に高め、近い将来、高層大気に関する情報をますます充実させるものになると期待されている。

§ 4 おわりに

気象衛星観測資料の高層大気大循環研究への応用例を紹介したついでに、最近筆者がいささか思うところを述べさせて頂いて本文の締めくくりとしたい。

1970 年代の気象学の世界的な趨勢のひとつに GARP (国際地球大気開発計画) がある。個々のプログラムは多様であるが、その中心的な目標は要するに天気予報の精度向上であると言って良い。その根底にあるのは、我々はまだ、対流圏の天気現象さえ良くわかっていないという事実である。それは金と労力を注ぎこんで観測を増やし大型計算機を駆使することのみによって解決される問題とは限らない。日々の天気を支配する大気大循環そのものに、まだまだ知られざる側面が多々あるからである。数値予報という原理的手段が確立されているかに見える短期予報に於てさえそうである。ましてや長期予報に至っては、いかなる予測原理が存在するものかさえ必ずしも明確ではないように思われる。

然るに一方、社会活動の進展に伴い、業務として要請される予測情報の内容はますます高度なものとなってきている。その好例として、最近、食糧問題とも関連して気候変動の議論がさかんである。これに関するシンポジウムがあちこちで開かれ、街中の書店には解説書がとりどりに並んでいる。社会的関心の高まりが学問の進歩に力のかすことはまことに結構であろうが、だがしかし一カ月前の予測さえ難しい大気の振舞いが、そう簡単な気候変動予測を可能にするものであろうかという疑問はぬぐえない。我々は気象学の現状をもっと冷静に評価し、もっと謙虚な態度で臨むべきではないだろうか。氷河期が来ようが来まいが、今現在要求されるのは、気候つまり大気大循環の様

相とその機構が如何なるものであるのか、もっと基本的な立場から観測を増やし解析を進め理論的考察を深めて行くことであろうと思われる。

その意味で、本文で述べたような高層大気の研究も、よしんばそれが俄かに明日からの予報に直結しないものであっても、自然を知り、大循環の理解を深める為のひとつひとつとして、着実に歩を進めるべきものであろうと信じている。

[終]

参考文献

- Barnett, J. J., 1974 : *Quart. J. Roy. Met. Soc.* vol. 100, 505-530.
....., 1975 : *Ibid.* vol. 101, 835-845.
..... et al. 1975 : *Ibid.* vol. 101, 423-436.
Hartmann, D. L., 1976 : *J. Atmos. Sci.* vol. 33, 1141-1154.
Hirota, I., 1976 : *Quart. J. Roy. Met. Soc.* vol. 102, 859-872.
..... and J. J. Barnett, 1977 : *Ibid.* vol. 103 (in press)
..... et al. 1973 : *J. Met. Soc. Japan* vol. 51, 353-363.
Matsuno, T., 1970 : *J. Atmos. Sci.*, vol. 27, 871-883.
....., 1971 : *Ibid.* vol. 28, 1479-1494.
Simmons, A. J., 1974 : *Quart. J. Roy. Met. Soc.* vol. 100, 76-108.
廣田 勇, 1972 : *天気*, vol. 19, No 6

Борзенков И. И., Спирин Л. П., Стехновский Д. И.

Изменение температуры воздуха Северного полушария за период 1881—1975 гг.

《Метеорология и Гидрология》, 1976, №7, 27—35.

ボルゼンコフ他：1881～1975年の北半球気温変化

古賀晴成* (紹介)

この研究の目的は、1881～1975年までの北半球の温度変化を紹介することである。1881年から1960年の期間については、ボエイコフが求め《北半球気温偏差図》〔6〕に発表されている。1961～1975年についてはソ連の中央気象局が作成した同様の図がある〔10〕。

$\varphi_k = 20, 25, 30, \dots, 85^\circ \text{N}$ の14の緯度圏に対する気温偏差の平均値を、緯度10度巾にとって、前述の図から求めた（1881～1960年についてはスピーリンが求めている〔12〕）。

1881～1940年と1961～1969年の気温偏差値は、観測点の多い緯度帯については1881～1935年を平均値として、観測点の少ない緯度帯については1881～1960年を平均値として求めた。また、1941～1960年の偏差値は、1881～1960年を平均値として、1970～1975年の偏差値は、1931～1960年を平均値として求めた。したがって、1881～1975年の95年間にわたって同一視できる偏差値を得るためには、修正をする必要がある。

次の記号を導入する。

$i = 1881, 1882, \dots, 1975$ —— 年号

$j = 1, 2, \dots, 12$ —— 月数

$k = 1, 2, \dots, 14$ —— 緯度帯番号

T_{ijk} —— 気温

$N_{jk}(i_1 \dots i_2) = \frac{1}{i_2 - i_1 + 1} \sum_{i=i_1}^{i_2} T_{ijk}$ —— (i_1, i_2) 期間の平均温度

$t_{ijk} = T_{ijk} - N_{jk}(1881, 1975)$ —— 95年平均値からの気温偏差

t'_{ijk} —— 最初に得られた偏差値

前に述べたことから

$$t_{ijk} = t'_{ijk} + \begin{cases} \Delta 1_{jk} & 1881 \leq i \leq 1940, 1961 \leq i \leq 1969 \\ \Delta 2_{jk} & 1941 \leq i \leq 1960 \\ \Delta 3_{jk} & 1970 \leq i \leq 1975 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta 1_{jk}, \Delta 2_{jk}, \Delta 3_{jk}$ —— 次の条件から求めた修正値。

*気象庁予報部電計室

第1の条件は、各緯度の各月に対する95年間の偏差の総和は零になることから

$$\sum_{i=1881}^{1975} T_{ijk} = 0 \quad (2)$$

第2, 第3の条件は次式で与えられる。

$$\Delta 2_{jk} = N_{jk} (1881, 1960) - N_{jk} (1881, 1975) = \frac{1}{80} \sum_{i=1881}^{1960} t_{ijk} \quad (3)$$

$$\Delta 3_{jk} = N_{jk} (1931, 1960) - N_{jk} (1881, 1975) = \frac{1}{30} \sum_{i=1931}^{1960} t_{ijk} \quad (4)$$

(2)(3)(4)式を(1)に代入すると、各(j, k)の値に対し、3つの一次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} 69\Delta 1_{jk} + 20\Delta 2_{jk} + 6\Delta 3_{jk} &= -\sum_{i=1881}^{1975} t'_{ijk} \\ 60\Delta 1_{jk} - 60\Delta 2_{jk} &= -\sum_{i=1881}^{1960} t'_{ijk} \\ 10\Delta 1_{jk} + 20\Delta 2_{jk} - 30\Delta 3_{jk} &= -\sum_{i=1931}^{1960} t'_{ijk} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

修正値 $\Delta 1_{jk}$, $\Delta 2_{jk}$, $\Delta 3_{jk}$ を求めた後は、(1)式を利用して同質の気温偏差を得ることができる。隣接する緯度圏の温度には密接な関係がある〔2〕ので、4つの緯度帯(87.5~72.5°N, 72.5~57.5°N, 57.5~37.5°N, 37.5~17.5°N)と熱帯を除いた北半球全域(87.5~17.5°N)の気温の永年変化を調べる。緯度帯平均は、次式で求めた。

$$\tilde{t}_{ijk_1 k_2} = \sum_{k=k_1}^{k_2} t_{ijk} \cos \varphi_k / \sum_{k=k_1}^{k_2} \cos \varphi_k \quad (6)$$

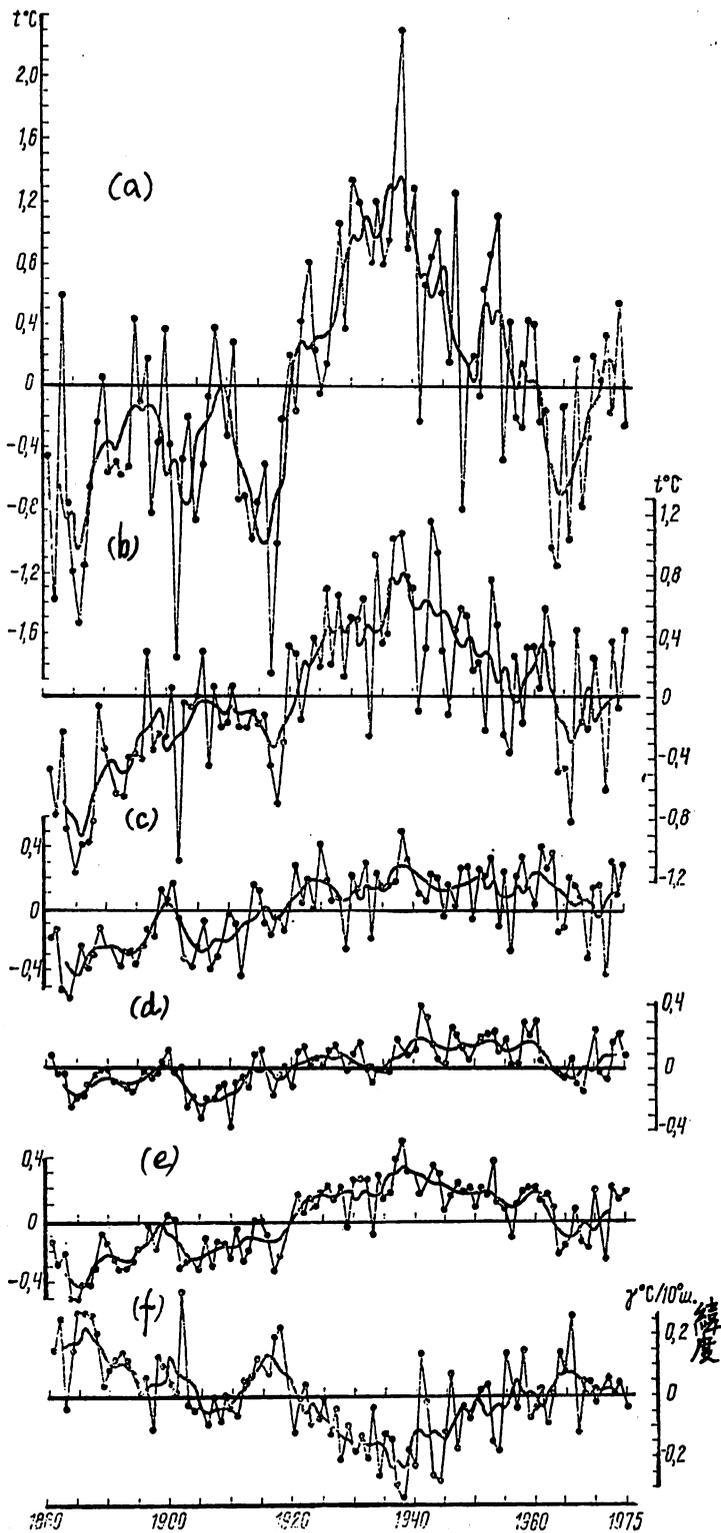
第1図に年平均気温偏差とその5年平滑値を示す。次にこの図に見られる特徴を述べる。

1881年から1930年代の半ばまで、熱帯地方を除く北半球の気温(87.5~17.5°N)は上昇した。その後次第に下降し、60年代の中頃極小となった。この気温変化については多くの研究者の研究対象となり、原因追求がなされた〔3, 4, 16その他〕。最近発表された1975年を含む資料によると、温度下降は60年代に北半球の大部分の領域で終り、明瞭な昇温傾向が現われている。

最近の12年間で、87.5~17.5°N帯の温度は0.3~0.4℃高くなっている。よく知られているように、特に気温変化が大きいのは高緯度であり、寒候期である。事実、87.5~72.5°N帯の平均気温は、約1℃上昇し、寒候期はさらに大きい。

高中緯度から低緯度へ移ると、気温変化の振幅が減少するだけでなく位相も遅れる。

第1図には、77.5~22.5°N帯での平均南北温度勾配 r の変化も示してある(f図)。この値は〔7〕から求めたものである。平均南北温度勾配と北半球の平均気温変化との間には、確実に関係があることがわかる。



第1図 北半球の各緯度帯における気温偏差とその5年平滑値
 a) 87.5~72.5° N
 b) 72.5~57.5° N
 c) 57.5~37.5° N
 d) 37.5~17.5° N
 e) 87.5~17.5° N
 f) 75~25° Nの緯度帯における平均南北温度勾配

各緯度帯の北半球月平均気温と南北温度勾配の月平均値との統計的特徴についてもう少し詳しく

月	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	年	δ
85	-31,6	-32,9	-31,3	-24,2	-11,8	-3,6	-1,1	-2,1	-8,9	-17,5	-26,2	-30,5	-18,5	0
80	-28,7	-29,2	-28,4	-21,6	-10,0	-1,9	0,7	-0,5	-5,6	-13,9	-22,3	-26,7	-15,7	-1,1
75	-25,3	-26,0	-24,3	-17,3	-7,7	-0,2	2,5	1,9	-1,8	-9,5	-19,1	-22,8	-12,5	-1,1
70	-24,3	-23,9	-20,3	-13,0	-3,7	3,8	7,8	6,4	1,9	-6,6	-16,2	-21,3	-9,1	-1,3
65	-21,3	-19,5	-15,1	-6,7	2,2	9,1	12,4	10,5	5,2	-3,4	-13,1	-19,4	-4,9	-1,8
60	-14,8	-13,5	-8,5	-1,5	5,4	10,5	13,7	12,5	8,1	1,5	-6,9	-12,5	-0,5	-1,6
55	-9,7	-8,2	-4,2	2,1	7,6	11,9	14,4	14,1	10,3	4,7	-1,7	-7,0	2,9	-1,6
50	-6,2	-5,2	-1,0	5,3	10,3	14,1	16,9	16,6	13,0	7,6	1,0	-3,9	5,7	-1,9
45	-0,7	-0,2	3,4	8,9	13,2	16,9	19,7	19,8	16,9	11,4	5,6	1,3	9,7	-2,1
40	5,7	6,6	9,2	13,3	17,0	20,3	23,3	24,1	20,8	16,6	11,1	7,3	14,6	-2,6
35	11,2	11,4	13,5	17,2	20,2	23,3	25,9	26,5	24,3	20,2	15,9	12,1	18,5	-2,9
30	15,2	15,8	17,8	20,5	23,5	26,0	27,7	27,7	26,5	23,2	19,6	16,5	21,7	-2,5
25	19,0	19,5	21,3	23,7	25,9	27,4	28,1	28,2	27,4	25,5	22,9	20,1	24,1	-1,4
20	22,3	22,9	24,2	25,9	27,3	28,1	28,2	28,3	27,8	27,0	25,3	23,2	25,9	-0,8
87,5-72,5	-27,5	-28,2	-26,8	-19,9	-9,2	-1,3	1,3	0,3	-4,3	-12,3	-21,3	-25,4	-14,5	-0,9
72,5-57,5	-19,5	-18,3	-13,9	-6,3	1,9	8,2	11,6	10,2	5,4	-2,3	-11,5	-17,2	-4,3	-1,6
57,5-37,5	-2,1	-1,2	2,4	7,8	12,4	16,1	19,0	19,0	15,7	10,5	4,5	0,0	8,7	-2,1
37,5-17,5	17,2	17,6	19,4	22,0	24,4	26,3	27,5	27,7	26,6	24,1	21,1	18,2	22,7	-1,9
87,5-17,5	2,0	2,6	5,4	10,0	14,6	18,2	20,4	20,3	17,6	13,0	7,6	3,7	11,3	-1,8
Y	-9,6	-9,6	-9,3	-8,1	-6,5	-5,3	-5,0	-5,3	-6,1	-7,3	-8,8	-9,2	-7,5	-

表 1. 海面上のゾーナル平均気温 (°C) と平均南北温度勾配 γ (°C/10°) (1881 ~ 1975年)

緯度	月	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
85		2,64	2,37	2,26	1,37	1,31	0,84	0,85	1,00	1,70	2,31	2,76	
80		2,53	2,06	1,95	1,26	1,10	0,72	0,75	0,85	1,53	2,12	2,47	
75		2,09	1,64	1,64	1,19	0,92	0,67	0,67	0,69	1,16	1,76	2,02	
70		1,87	1,46	1,43	1,15	0,77	0,65	0,59	0,56	1,14	1,38	1,67	
65		1,54	1,45	1,27	0,96	0,72	0,63	0,53	0,58	0,92	1,23	1,44	
60		1,39	1,24	0,95	0,71	0,51	0,48	0,42	0,47	0,72	0,97	1,21	
55		1,19	1,02	0,82	0,61	0,43	0,39	0,45	0,41	0,61	0,88	1,02	
50		1,11	0,99	0,88	0,58	0,39	0,31	0,38	0,39	0,52	0,75	0,88	
45		0,89	0,89	0,69	0,45	0,36	0,29	0,36	0,37	0,42	0,52	0,68	
40		0,56	0,68	0,44	0,33	0,31	0,29	0,31	0,32	0,35	0,38	0,47	
35		0,38	0,53	0,35	0,31	0,30	0,28	0,27	0,29	0,30	0,34	0,35	
30		0,31	0,42	0,34	0,31	0,28	0,22	0,19	0,24	0,28	0,28	0,30	
25		0,25	0,35	0,29	0,27	0,24	0,19	0,16	0,19	0,22	0,24	0,27	
20		0,24	0,28	0,26	0,24	0,23	0,17	0,14	0,20	0,21	0,22	0,20	
87,5-72,5		2,27	1,83	1,78	1,16	1,01	0,65	0,68	0,70	1,33	1,92	2,24	
72,5-57,5		1,39	1,24	1,10	0,84	0,60	0,53	0,43	0,46	0,83	1,05	1,26	
57,5-37,5		0,83	0,75	0,61	0,41	0,29	0,25	0,29	0,32	0,41	0,52	0,64	
37,5-17,5		0,25	0,36	0,27	0,25	0,22	0,17	0,14	0,15	0,21	0,23	0,25	
87,5-17,5		0,48	0,46	0,38	0,29	0,25	0,21	0,19	0,21	0,33	0,38	0,41	
Y		0,41	0,37	0,35	0,26	0,18	0,14	0,13	0,13	0,24	0,33	0,39	

表2. 月平均気温の緯度別標準偏差 (°C) と平均南北温度勾配 γ (°C/10°)

述べよう。1881～1935年の平均海面気温は、資料〔11〕によりスピーリンが決定したものである。1931～1960年については〔1〕の値を採用した。

前述の修正値 $\Delta 1jk$, $\Delta 3jk$ を考慮し、次の式を利用して1881～1975年の95年間の《平均》気温を得ることができる。

$$N_{jk}^*(1881, 1975) = N_{jk}^*(1881, 1935) + \Delta 1jk \quad (7)$$

$$N_{jk}^*(1881, 1975) = N_{jk}^*(1931, 1960) + \Delta 3jk \quad (8)$$

この*は海面での《平均値》を表わす。この2式から得られた《平均値》の差は、海面での気温を算出する際に、垂直温度勾配として $5^\circ/\text{Km}$ を採用したときと、 $6^\circ/\text{Km}$ を採用したときとの違いである。

表1に(7)式を使用して得た1881～1975年のゾーナル平均の《平均値》を示す。

表2に月別、緯度別の標準偏差値を示す。寒候期の各月の値は、暖候期の各月の値よりも大きく、低緯度で1.5倍、高緯度で3倍になっている。また緯度が高いほど大きく夏は5倍、冬は約10倍になる。

(訳者注)

この他、表1には〔14〕の研究で求められた δ 、〔8〕の研究を利用した気温偏差時系列のスペクトル解析結果が表3に掲載されているが原論文を見ないと紹介できないので省略させていただいた。

参考文献

1. 北半球の対流圏と下部成層圏における温度、密度、気圧、風、ゼオポテンシャルの気候図、分冊1、気圧、海面温度、現地温度の月平均値。1931～1960年。
2. ボルセンコフ他：北半球緯度別月平均気温の空間分布と永年変化
3. ブディコ：人間が気候に与える影響
4. ブディコ他：現在の気候変化
5. ビニコフ：1881～1969年の北半球気温の空間的、時間的変動スペクトル
6. 北半球気温偏差図
7. ポリヤーク：気象要素の時間的変化傾向
8. ポリヤーク：数値解析法
9. リュビンシュタイン：北半球の気温変動の構造
10. 総観気象報告 北半球 1961～1975年
11. サハリン他：北半球の気圧、気温、降水量
12. スピリーン：北半球月平均気温の永年変化について
13. スピリーン：北半球の気圧と気温の緯度平均

WMC, ワシントンの全球解析資料

能登正之*

気象庁では昭和49年度に長期予報管理官室が長期予報課に昇格するとともに、長期予報業務の拡充・整備を行ってきた。資料面での整備計画のひとつである、米国大気海洋庁（NOAA）の全球解析資料の利用についてはWMOにおける格子点資料通報式（Gridcord）の採用準備や米国における新電算機システムの更新など理由で実施が大幅に遅れていたが、昨年（昭和51年）4月8日12 GMTの解析値から入電するようになったので、この資料について簡単に紹介する。

1. 世界気象監視計画の全球解析資料

世界気象機関のWWW（世界天候監視計画）は、天候予報の現業組織体系に準じて、GOS（Global Observing System）、GTS（Global Telecommunication System）、GDPS（Global Data-Processing System）の3つの基本組織で構成されている。よく知られているGARPは、これら現業組織を理論・研究の面から支援するための計画といえることができる。

これらの基本組織のうちGDPSはGOSのネットワークによって観測データを集収（品質管理を含む）、処理、保管、提供を任務としており、必要に応じて即時または非即時に資料集収、提供を行う。即時的な資料の集収、提供はGTSの通信網によって行なわれる。WWWの任務は各国気象中枢（NMC, National Meteorological Center）、地区中枢（RMC, Regional Meteorological Center）および世界気象中枢（WMC, World Meteorological Center）によって分担される。

WMCはメルボルン、モスクワ、ワシントンの三カ所にあるが、GDPSに関する任務は半球ないし全球の資料の集収、処理、保管および提供にある。半球領域および全球領域の解析と予報はWMCの主要な任務である。

すなわち、いま気象庁が入手しつつある全球解析資料は、このような国際協力の組織によって提供される資料である。WMCの全球解析および予報資料は表1のようになっているが、これらの資料は、利用を希望するWMO加盟国からRMCを通じて特定WMC（およびWMO）に要請があるとWMC、RMCの能力、通信回線の状況、優先度を考慮したうえで資料提供の可否が決定されることになっている。

現在、気象庁がワシントンから受信している全球資料は、第1表のうち、1000、700、500、300、200、100、50、30mbで各等圧面の高度、気温、風（風向風速）の毎日12GMTの解析値である。ただし、300mbと30mbは20°N以北の等圧面高度だけである。データの密度は両極近傍と85°N～85°Sの間を緯経度5度間隔で、一要素当たり2528格子点で全球がカバーされている。

*気象庁長期予報課

表 1. OVERALL LIST OF OUTPUT PRODUCTS OF WMC

I. Analyses

1. Surface
2. 850 mb
3. 700 mb
4. 500 mb
5. 300 mb
6. 250 mb
7. 200 mb
8. 150 mb
9. 100 mb
10. 70 mb
11. 50 mb
12. 30 mb
13. 20 mb
14. 10 mb
15. Relative topography, in particular 500/1000 mb
16. Jet stream
17. Tropopause
18. Nephanalyses
19. Digitized cloud mosaics *
20. Mapped radiometric data *
21. Land and sea-surface temperature *
22. Snow and ice cover
23. Storm alerts *

II. Prognoses

24. Surface
25. 800 mb
26. 700 mb
27. 500 mb
28. 300 mb
29. 250 mb
30. 200 mb
31. 150 mb
32. 100 mb
33. 70 mb
34. 50 mb
35. 30 mb
36. 20 mb
37. 10 mb
38. Relative topography, in particular 500/1000 mb
39. Precipitation (quantitative) or vertical motion
40. 30-day mean surface
41. 30-day mean 500 mb

III. 5-day, 15-day and 30-day mean values

42. Surface
43. 500 mb
44. Relative topography 500/1000 mb
45. Sea-surface temperature (preferably anomaly)

* Based on satellite information

2. ワシントン WMC の全球解析法

ここで、ワシントンの全球解析の方法について述べておく必要がある。詳細については、客観解析の専門家の解説によることとし、ここでは概要を述べる。

各 WMC や RMC が放送している解析や予報については、それらの方法について利用者が知っていて、適切に利用することが必要であり、解析と予報の方法やモデルは WMO に報告、登録されている (表 2)。現在ワシントンの WMC が採用している全球解析の方法は、観測されたジオポテンシャル高度と風に対して Hough function を用いたスペクトル法である。

使用する関数は緯度 ϕ の Hough function $H_m^l(\sin \phi)$ 、経度 λ の三角関数、気圧 p の経験直交

表 2. SPECIFICATIONS OF THE PROCEDURES OR MODELS USED TO
GENERATE THE DATA FIELDS

Centre	Code figure of code 2677 mm *	Specifications
WMC Melbourne	10	Cressman type multilevel numerical analysis
	40	Baroclinic filtered equation model 6-level
	60	Baroclinic primitive equation spectral model 6-level
WMC Moscow	40	Hemispherical 6-level model using "full" hydrodynamic equation
WMC Washington	10	Objective Analysis (NH, Cressman Type)
	11	Objective Analysis (Global, Hough Function Type)
	30	Barotropic
	32	Barotropic Mesh
	41	Baroclinic (PE) 6 Layer Model

* 国際気象通報式 FM47-V (GRID code) で用いる解析または予報の方法、またはモデルの分類番号

関数 $P_n(p)$ である。ここで l は経度における波数、 m は Hough function の次数 ($m = 1 \sim 24$)、 n は気圧に関する鉛直関数 (vertical function) の次数である。これらにより、観測された気象要素、高度 z 、風速成分 u 、 v は次のように表わされる。

$$z = \sum_f \sum_m \sum_n \{ a_{m,n}^l \cos l\lambda + b_{m,n}^l \sin l\lambda \} H_m^l(\sin \varphi) P_n(p)$$

$$u = \sum_l \sum_m \sum_n \{ c_{m,n}^l \cos l\lambda + d_{m,n}^l \sin l\lambda \} U_m^l(\sin \varphi) P_n(p)$$

$$v = \sum_l \sum_m \sum_n \{ c_{m,n}^l \sin l\lambda - d_{m,n}^l \cos l\lambda \} V_m^l(\sin \varphi) P_n(p)$$

ここで、 $a_{m,n}^l$ 、 $b_{m,n}^l$ 、 $c_{m,n}^l$ 、 $d_{m,n}^l$ は展開係数、 $U_m^l(\sin \varphi)$ 、 $V_m^l(\sin \varphi)$ は $H_m^l(\sin \varphi)$ と関係する風速成分関数である。展開係数を求めるには反復法によることになるが、結果は一種の最小自乗法の応用である。解析はまずひと組みの係数の推定値を得ることから始められるが、このことはデータスパーエリヤにおける解析の精度に対して重要である。解析の first guess として persistence guess または利用できるときは全球の12時間予報値が用いられている。級数展開が緯度および経度について波数24で切断され、SFCから50mbまでの大気を代表するのに7コの気圧関数がある場合には、結果は通常用いられる polar stereographic projection 上の 381 Km 格子による解析と同程度の解像力があると公的には言われている。詳しくは Flattery (1971, 1968)

および Longuet-Higgins (1968) を参照されたい。

3. 全球解析資料の利用

ワシントン以外の WMC における全球解析がどの程度進んでいるかはよく分らない。また、ワシントンの解析が、とくに熱帯や成層圏の解析精度において問題がないわけではない。しかし、ワシントンの全球観測データの集収能力とこの種の解析に関する経験の大きさからして、現時点では、これらはルーチンの利用できる最良で唯一の全球解析資料であろう。

この全球解析を利用しようとする主たる目的は、large scale (たとえば熱帯を考えるならば波長 1000~5000Km) ないしは planetary scale (波長 5000Km 以上) を対称としているので、ワシントンの資料は利用できる精度をもっている。これ以下のスケールの現象に対しては注意深い利用が必要であり、この点を考えるならば、これらの解析資料を盲目的に利用するのではなく、何らかのモニタリングは必要なことである。このような考慮がはられるならば、この全球資料は planetary scale の動気候学に新しい知見を加えることになり、長期予報技術上検討が進んでいない熱帯と中緯度の相互作用、南北両半球の相互作用、赤道を横切る質量やエネルギーの流れなどが明らかにされるだろう。当面、台風の発生、モンスーン、梅雨に関する両半球循環の相互作用、亜熱帯高気圧の消長に関する熱帯と中緯度および南半球の影響の仕方などが興味の対象となろう。

4. おわりに

先に述べたように、この資料は WWW 計画から生れた貴重な製品である。WWW 計画は国連の人間環境計画 (UNEP) の一環でもある。地球の有限な資源と環境をどのように有効に使うかが現在の課題である。全球資料処理組織は、そのような状況から生れたものであり、この資料が多くの研究者に利用されることを期待したい。

参 考 文 献

窪田正八・今井 勇：全球資料処理組織作業委員会，第 1 回会議最終報告，測候時報

39, 6. 245 - 258

宮川 和：WWW について，グロスベッタ-5, 3. 6 - 14

WMO: Guide on the Global Data Processing System Vol. 1, Organization, Practice and Procedures of the Global Data Processing System, WMO-No 305, 1976.

WMO: Volume B, Weather Reporting, Data Processing. WMO-No 9, (Doc. 1974 ed.)

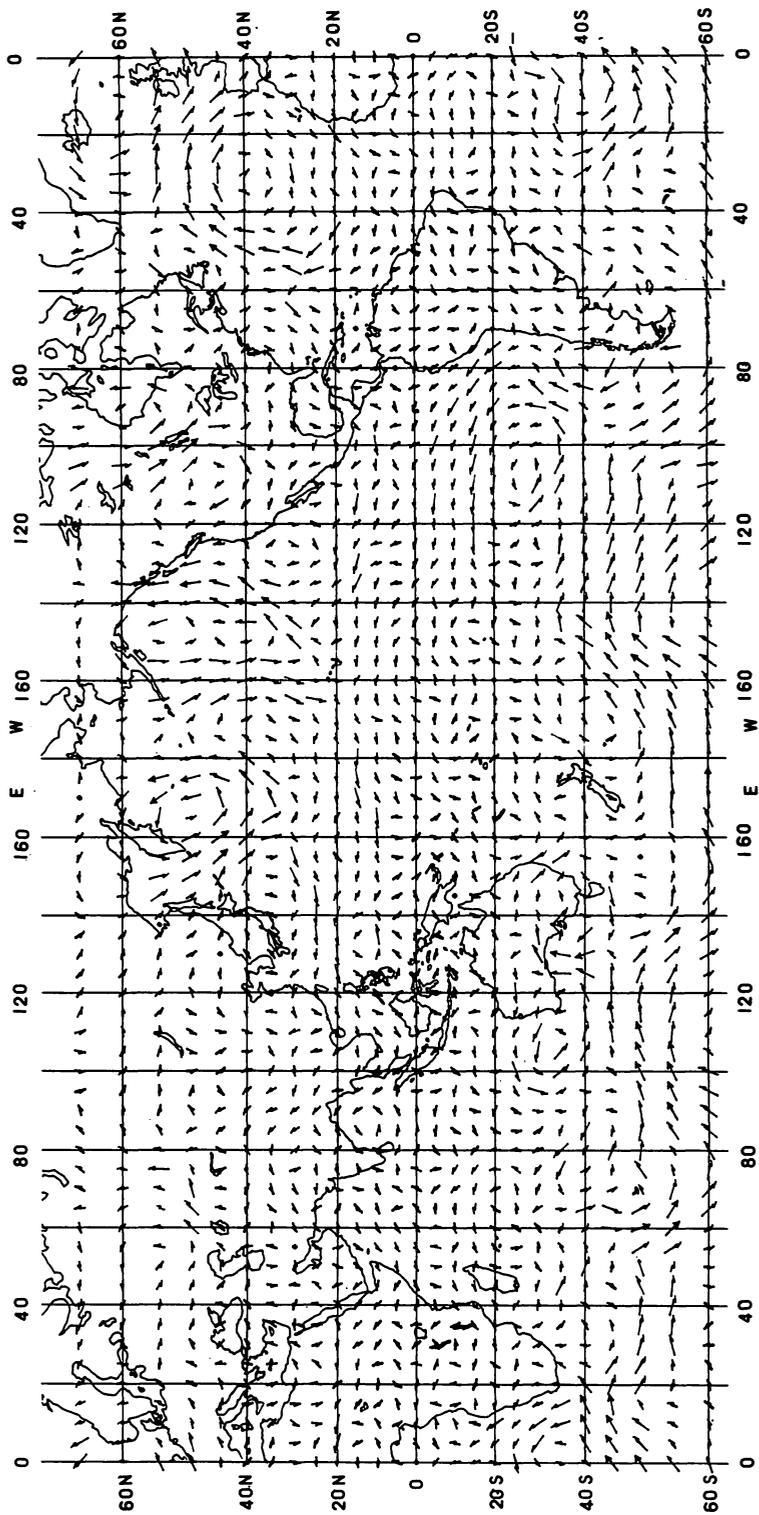
Flattery, T. W.: "Hough Functions". Technical Report No 21. to National Science Foundation. (Grant NSF-GP-471), University of Chicago, Department of the Geophysical Science, March, 1967.

—————: "Spectral models for global analyses and forecasting." Technical Report No 242, Air Weather Service, U. S. Force, pp. 42-54
April 1971.

Longuet-Higgins, M. S.: The Eigenfunctions of Laplace's tidal equation on a sphere. Transactions of the Royal Society of London, Vol. 262, pp. 511~607, February 1968.

第1図の説明: これはWMC, Washington, すなわち, 実際にはNOAAのNMCによる全球解析の例で, 1976年11月2日12Zの解析から1000mb面の風の分布を気象庁の自動画像機で描画させたものである。データは緯・経度5°ごとにあり, 両極まであるが, メルカトル図を用いたので高緯度の図は省略してある。

注: 最近(1977年6月)のNOAAからの連絡によると, ヨーロッパ諸国からの要望に応じて北半球20°N以北の解析通報を早めるため, この領域については, これまでのHough Functionによらず, 6層のプリミティブモデルによる客観解析結果を報ずることになったとのことである。その他の熱帯域及び南半球域については従来どおり, Hough Functionによる最終解析値が通報される。



第1图 1976年11月2日, 1200 Z 1000 MB WIND FIELD
(DATA: WMC, WASHINGTON)

太陽定数の変化と大気大循環

一帯状平均モデルによる数値シミュレーション

朝倉 正*・田中康夫*

1. はじめに

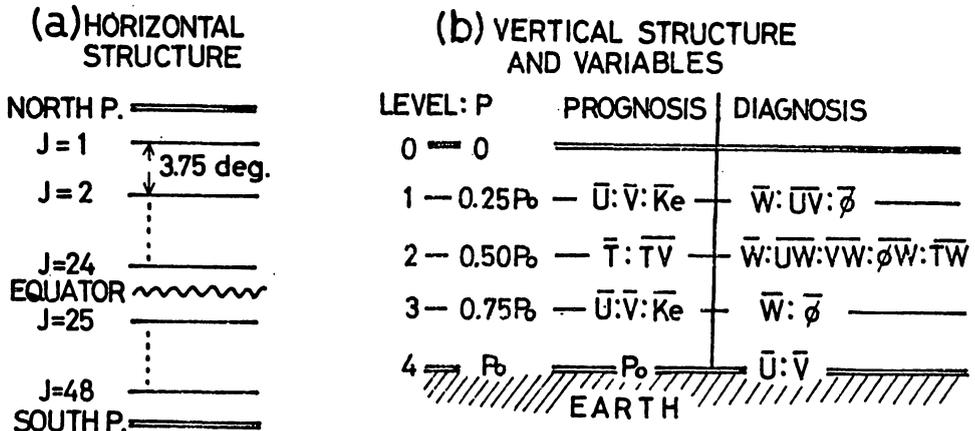
異常気象や気候変動の問題が近年盛んに議論され大いに関心が持たれている。大気大循環の変動をもたらす外的要因としては、太陽からの電磁波の変化、宇宙じんの変化等々が考えられるが、いずれにしても大気全体が受ける太陽からの放射エネルギーの変化につながるであろう。また、内的要因としては炭酸ガス、火山噴出物、その他の変化が考えられるが、これらも放射バランスに影響を与えると考えられる。このような意味で、太陽放射の変化は大気大循環の変動に対する大きな要因の一つと考えられる。

この調査では帯状平均モデルを用いて、太陽定数の変化が大気大循環に及ぼす影響を数値シミュレーションし、定性的な解析を試みた。

2. モデルの簡単な説明

2.1 モデルの構造と物理過程

用いた数値モデルは Kurihara (1970, 1973) によって開発された統計力学 (zonal mean) モデルと殆んど同じだが、熱過程については改良したものをを用いた。



第1図：モデル大気の(a)南北構造、(b)鉛直構造と計算される諸量。

モデル大気の構造を第1図に示す。大気は南北方向には、南極と北極間を同じ幅（緯度 3.75°）をもつ 48 個の zonal rings に分けている。鉛直方向には σ 座標を用い、大気の上限 ($p = 0$) と地表面 ($p = p_0$) の間は 2 層に分けられる。基本方程式は帯状平均したものを用い、予報する量

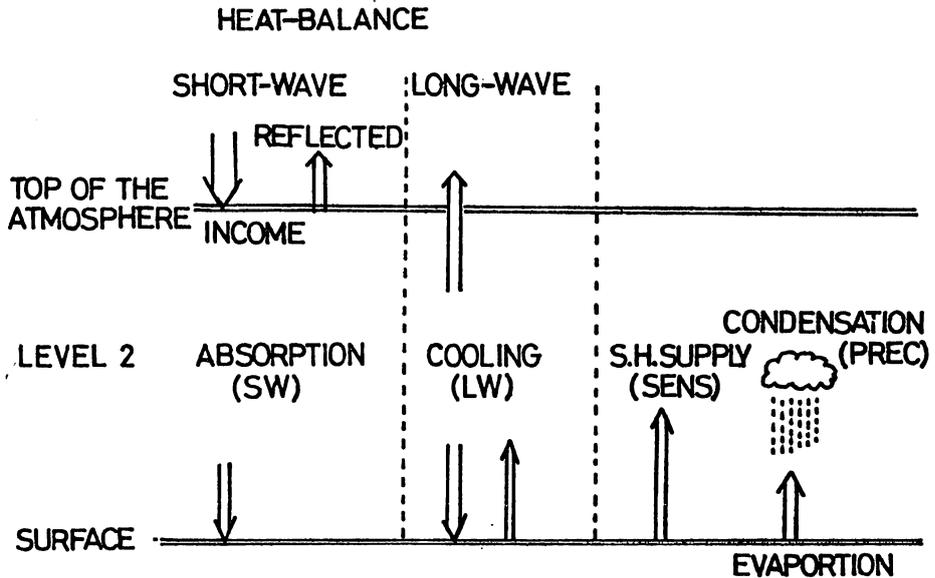
* 気象庁長期予報課

第1表

求めるべき量	対応する式	必要な量	外力
$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$	運動方程式	$\bar{U}, \bar{V}, \bar{\sigma}, \overline{U'V'}, \overline{U'\sigma'}$	摩擦力
$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t}$	"	$\bar{U}, \bar{V}, \bar{\sigma}, \overline{V'^2}, \overline{U'^2}, \overline{V'\sigma'}, \bar{\phi}$	"
$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t}$	熱力学の式	$\bar{T}, \bar{V}, \bar{W}, \overline{T'V'}, \overline{T'W'}$	非断熱加熱
$\frac{\partial \bar{p}^*}{\partial t}, \bar{\sigma}$	質量保存の式	$\bar{p}^*, \bar{V}, \bar{\sigma}$	
$\frac{\partial \overline{Ke}}{\partial t}$	うず運動エネルギーの式	$\overline{Ke}, \bar{U}, \bar{V}, \bar{\sigma}, \overline{U'V'}, \overline{U'^2}, \overline{V'^2}, \overline{U'\sigma'}, \overline{V'\sigma'}, \overline{T'W'}, \overline{\phi'\sigma'}, \overline{V'F'}$ $\bar{a} (\overline{KeV'} + \overline{\phi'V'})$	まさつによる仕事
$\frac{\partial \overline{T'V'}}{\partial t}$	線型化された準地衡風うず度方程式	$\bar{U}, \bar{V}, \overline{V'W'}, \overline{T'V'}$ M, ℓ^2	
$\frac{\overline{U'W'}}{\overline{T'W'}}, \frac{\overline{V'W'}}{\overline{\phi'W'}}$	"	$\frac{\overline{U'V'}}{\overline{T'V'}}, \frac{\overline{V'^2}}{\ell^2}$	
$\overline{U'V'}$	気柱での角運動量収支		地表面でのストレス
$\bar{\phi}$	静力学の式		
\bar{a}	準地衡風運動方程式		
M (じょう乱の位相速度) ℓ (じょう乱のスケール)	理論, 観測にもとづく経験式		

等は第1表にまとめてある(記号は慣用のものを用いてある)。これらの諸量は第1図に示されている各レベルで、各々の zonal ring 毎に計算される。

モデルに含まれている熱過程を第2図に示してある。放射スキームは Smagorinsky (1963) に採用されたものと同じものを用いた。地表面からの長波放射を求めるために、Mintz-Arakawaモデルとほぼ同様な地表面での熱バランスの式を採用した事が熱関数の改良点の一つである。地表面で

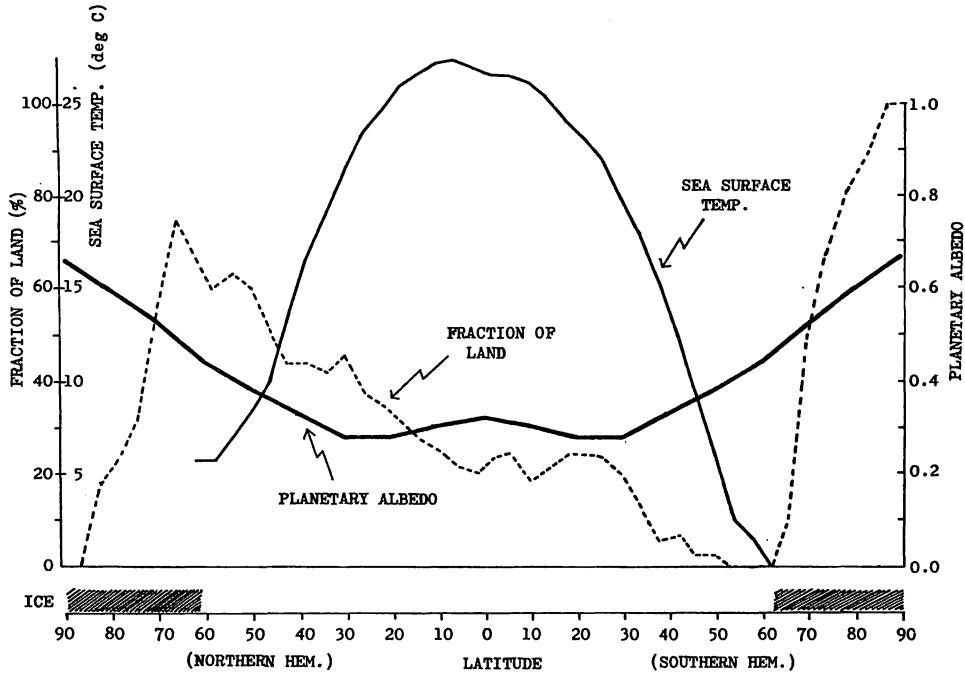


第2図：モデル大気の熱過程。非断熱効果は大気中層（レベル2）に適用される。の熱バランスは、地表面に達する長波・短波放射、大気への顕熱輸送、地表面からの水蒸気の蒸発による潜熱、及び地表面からの長波放射がバランスするように決められ地表面の温度を求める。この熱バランスの式は陸上（裸地、陸水、海水）に適用されるが開水面には適用されない（氷の無い海は、境界条件として与えられた温度の熱浴と考えた）。降水量は海面からの水蒸気補給と水蒸気の flux-divergence の差として計算する。顕熱輸送の時間変化は傾圧波の理論及び観測結果をもととして得られた特定の波長の波によってもたらされる（詳細は Kurihara (1970) を参照）。相対角運動量のうずによる南北輸送は、地表摩擦によって得たトルクを上層での運動量の flux-divergence が補償していると仮定する。また、じょう乱の運動エネルギーの南北成分と東西成分の大きさは等しいと仮定した。

2.2 境界条件と時間積分

第3図に主な境界値を示している。プラネタリーアルベドは Smagorinsky (1963) と同じで赤道に関して対称と仮定した。海面温度、陸・海水分布は Mintz-Arakawa モデルで使われているものを用いた。これらの境界条件は年平均値に固定されており季節変化は考慮されていない。海陸分布が熱関数に与える影響は、各 zonal ring での陸と海の面積の比により地表面（陸・海）からの熱の効果を比例配分して求められ、これも改良点の一つである。

太陽定数を変えた場合の時間積分に用いるイニシャルデータを得るために、全球が陸におおわれている場合について太陽定数を 2.0 Ly/sec にとり太陽放射を季節変化させながら静止大気から2年間時間積分を行った。この予備計算の最終日（12月31日）の状態を本計算の初期値（1月1日）として用いた。この時点から海陸分布をモデルに入れて次の三つの異った太陽定数の場合について更に3年間の時間積分を行った。即ち、Normal case（以後N-caseと呼ぶ）で太陽定数は2.0



第3図：主な境界条件。これらは計算期間中、図の値に固定される。

ly/sec, Increased case (I - case)で太陽定数を3%増加させた場合、及び、Decreased case (D - case)で定数を3%減少させた三つの場合である。

これらの各ケースの時間積分結果について、3年目と2年目の対応する期間を daily の状態で比較してみると殆んど平衡に達していることが解ったので、解析期間としては3年目の1月～12月までを選んだ。

2.3 計算の問題点

太陽定数の変動は、Kondratyeva & Nikolsky (1969)によると約3%の変化の可能性がある。また Budyko (1969)は直達日射に約2%の変化が見られたと評価している。Wetherald & Manabe (1975)は+2～-4%の変化について計算を行った。

太陽定数自体の変化は不明だが、対流圏に達する短波放射はオゾン、dust その他の影響により数%は変り得るであろう。

また、このモデルには、いわゆる feed-back 機構が含まれていないが、Kurihara (1973)によるとこのモデルで大気大循環の季節変化の特徴を大体再現できているので、太陽定数の変化による大循環の変化の特徴を、定性的に議論することはできるであろう。

3. 太陽定数の変化と北半球平均非断熱加熱及び気温の変化

大気系の外的熱源である太陽放射を変えると、大気はその変化にバランスするように非断熱・断熱過程に変化を生じ、大気大循環は変えられるであろう。ここでは、太陽定数の減少が大循環の主な

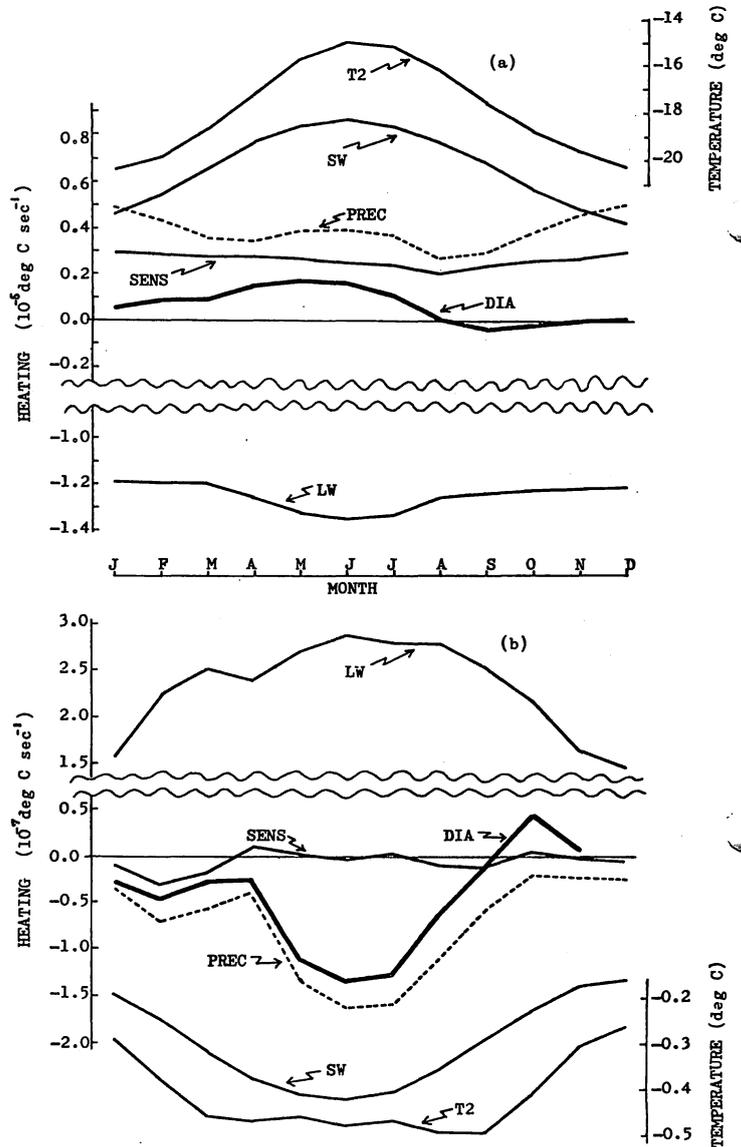
非断熱過程にどのような変化をもたらし、気温にどんな影響を与えるかを調べた。太陽定数を増加させた場合は、減少させた場合と殆んど逆のセンスの変化が起るが定量的には両者は多少異なる点もある。

このモデルでは正味の非断熱加熱 (DIA) は第2図に示す4要素の寄与の和として計算される。即ち、太陽放射の吸収 (SW), 地表面からの顕熱補給 (SENS), 降水に伴う凝結熱の放出 (PREC), 及び、長波放射による正味の冷却 (LW) である。

第4図にはこれらの各要素の北半球・月平均値の季節変化を示してある。第4-a図はN-case, 第4-b図はD-caseとN-caseの差: (D-N)-case(太陽定数を3%減らした時に生じる変化量)である。また、第5図に各要素の年平均値の緯度分布を示した。第5-a図はN-case, 第5-b図は(D-N)-caseである。第4・5図中には気柱の平均気温 (T_2)も描いてある。

北半球平均では第4-b図より、非断熱加熱 (DIA) に最も寄与しているのは降水量 (PREC) の変化であることがわかる。長波・短波放射 (LW, SW) の減少量はシステマティックな季節変化を示しており、顕熱補給 (SENS) は北半球平均では余り大きな変化はない。

年緯度平均では第5-b図より、降水量 (PREC)



第4図 非断熱効果〔降水量 (PREC), 顕熱補給 (SENS), 長波放射冷却 (LW), 短波放射加熱 (SW), およびこれらの正味の和 (DIA)〕と気層平均気温 (T_2) の北半球月平均値の季節変化。(a): N-case, (b): (D-N)-case。

及び顕熱補給 (SENS) が大きな変化をしていることが見出される。即ち、太陽定数の減少は特に降水量に変化をもたらし、次いで顕熱補給に影響を与える。降水量および顕熱補給の変化の特徴は次のようにまとめられる。

3.1 降水量 (凝結熱: PREC)

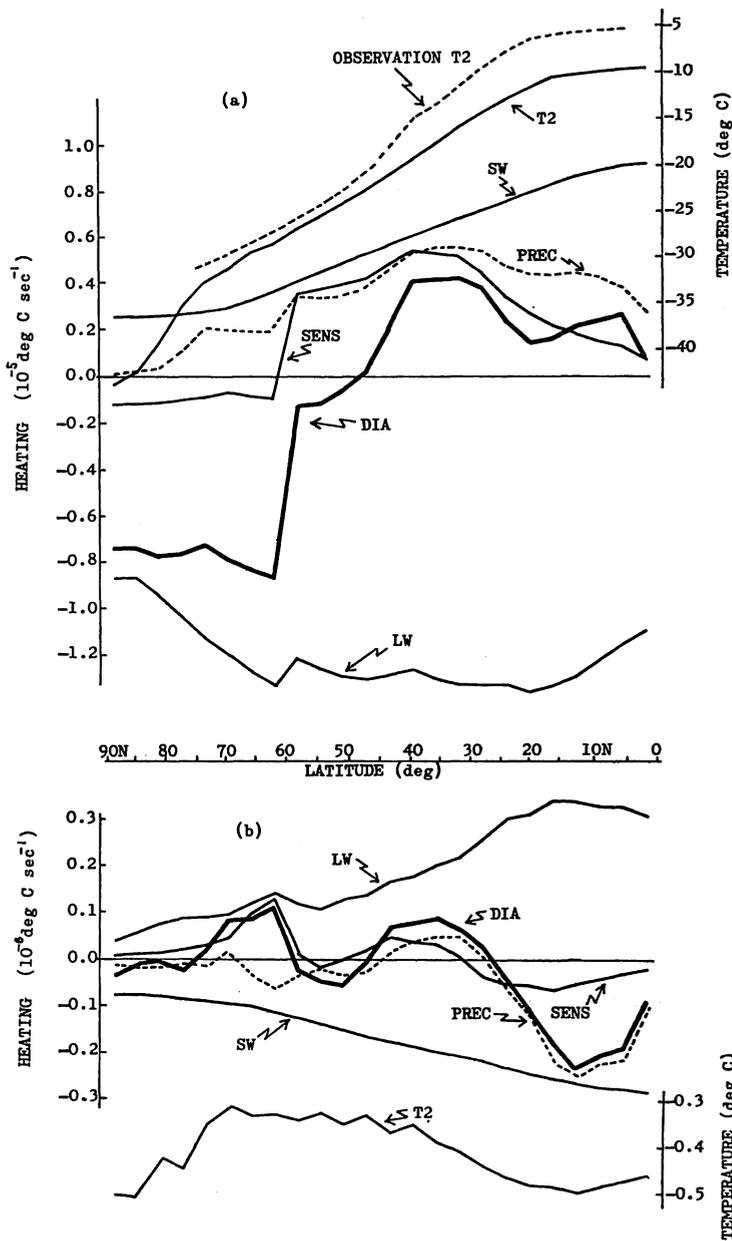
太陽定数が減ると、特に夏に低緯度で降水量が減るのが特徴的である。この効果が大循環に大きな変化をもたらす。

第4-b図に示すように、太陽定数の減少は北半球平均でN-caseに比べて約2%の年間降水量の減少をもたらし、減少量は6月(夏)に最大となり4%に達する。年平均緯度分布を第5-b図で見ると、特に熱帯での減少が著しく13°Nでは6%減少する。また、中緯度(30~40°N)ではやや増加するのも注目される。45°N以北では減少する。

3.2 顕熱補給 (SENS)

第4-b図では、北半球平均では太陽定数の変化は顕熱補給に大きな変化をもたらさない。しかし、年平均緯度分布を第5-b図で見ると、熱帯では補給は弱まり中緯度(40°N付近)では強まっている。50~60°Nでは地表からの補給は弱まる。また、60~75°Nでは大気から地表への補給(冷却効果)が弱まり、相対的な加熱効果が生じているのが注目される。

3.3 非断熱加熱 (DIA) および平均気温 (T₂)



第5図：第4図と同じ。但し、年平均緯度分布。

これらの降水量と顕熱補給の変化により非断熱加熱 (DIA) の変化が殆んど決定される。第 4-b 図で解るように、北半球平均の DIA の減少は殆んど降水量 (PREC) によってもたらされ、6 月には減少量は 8% に達する。

年平均緯度分布では (第 5-b 図)、加熱は熱帯では主に降水量の減少によって弱まり 13°N では 11% 弱まる。中緯度 (35°N 付近) では降水量および顕熱補給の増加により加熱は強まる。50 ~ 60°N では顕熱補給および降水量の減少により冷却が 8% 強まり、更に高緯度の間接循環の上昇流域に当る $60\sim 75^{\circ}\text{N}$ 付近では顕熱補給の変化により冷却が弱まる。このように非断熱加熱は緯度毎にやや複雑な変化が生じるが、その変化量の N-case に対する割合は太陽定数の変化量 (3%) に較べると非常に大きくなっている。

この非断熱加熱の変化によって、熱帯では加熱が弱まり中緯度 ($30\sim 45^{\circ}\text{N}$) では強まるので、これらの緯度帯間の非断熱加熱のコントラストは N-case に較べて小さくなる。 $50\sim 60^{\circ}\text{N}$ では冷却が強まるので、中緯度 ($30\sim 45^{\circ}\text{N}$) の加熱の強化域との間では加熱量のコントラストは強まることとなる。更に高緯度 (70°N 付近) では冷却が弱まる。太陽定数の減少によって生じたこれらの非断熱加熱の不均衡は、大循環の変化によって補償されている。

平均気温 (T_2) は太陽定数の減少により全球的に低くなるが、減少量は夏に熱帯および極地方で最も大きい。北半球平均では (第 4-b 図) 減少量は 8 月に最大で約 -0.5°C である。年平均緯度分布では (第 5-b 図) 熱帯および極地方で減少量が最も大きく約 -0.5°C で、 $60\sim 70^{\circ}\text{N}$ で最も小さく約 -0.3°C となり、低緯度と高緯度 (70°N) 間の気温傾度は弱まり、特に 30°N 付近の弱まりが著しい。

4. 北半球平均での非断熱加熱の変化と大気大循環の変化

太陽定数が減少すると、非断熱加熱は前節に述べたように各緯度帯で異なった変化をし、特定の緯度帯を暖め (冷し) 続ける。一方、各緯度帯の年平均気温の年毎の変化は殆んど無いから (季節変化のみだから)、非断熱加熱の変化は大気大循環の過程の変化により解消されているはずである。この節では、太陽定数の減少によってひき起された非断熱加熱の不均衡が大循環の過程でどのように解消されているかを、エネルギー過程に着目して調べた。

気柱の平均気温 (total potential energy に対応) の時間変化は、非断熱加熱 (DIA)、うずおよび平均流による顕熱水平収束による加熱 (EDDY/MEAN S.H.)、うずおよび平均鉛直流による断熱加熱 (有効位置エネルギーと運動エネルギー間の変換に対応: $C(\overline{T'W'})$, $C(\overline{T\overline{W}})$)、および熱拡散の各効果の正味の和として求められる。これらの諸効果が各緯度でバランスして平均気温の (長時間の) 時間変化は殆んど 0 となっている。

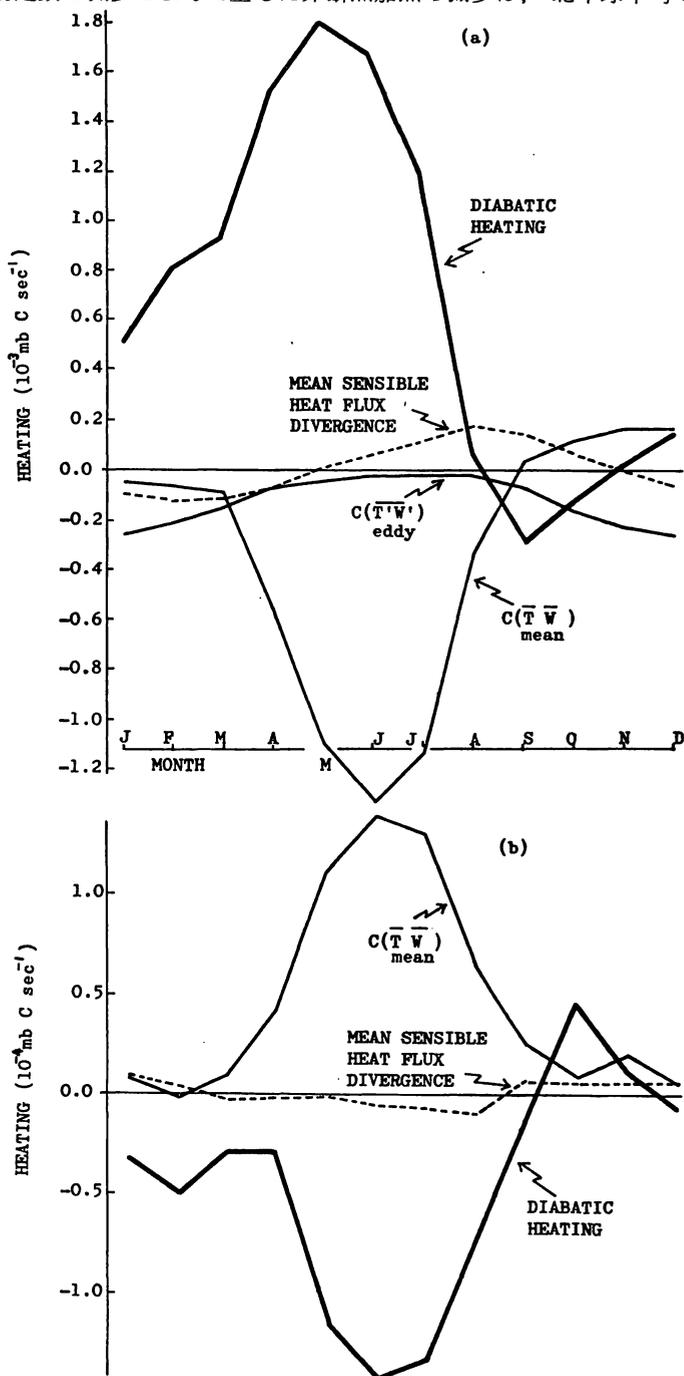
これらの諸要素の北半球・月平均値の季節変化を第 6 図に、年平均緯度分布を第 7 図に示す。両図とも a は N-case、b は (D-N)-case である。

第6-b図で特徴的なのは、太陽定数の減少によって生じた非断熱加熱の減少は、北半球平均ではその殆んどが平均上昇流の弱まりによる断熱冷却の弱まりとバランスしていることである。また、緯度分布では(第7-b図参照)非断熱加熱の変化は主に平均鉛直流および顕熱うず輸送の効果の変化により補償されている。熱拡散および鉛直流のうず成分による効果は小さい。一方、平均流による顕熱輸送にも興味ある特徴が見出される。

北半球平均では(第6-b図)、非断熱効果(DIA)の弱まりを平均鉛直流による効果($C(\bar{T}\bar{W})$)の変化が補っている(平均上昇流の弱まりに伴う断熱冷却の弱まりに対応する)。この $C(\bar{T}\bar{W})$ の変化はDIAの弱まりに対応して6月(夏)最も弱くなり、年平均の減少量はN-caseの15%に達する。太陽定数の減少は平均子午面循環に非常に大きな影響を与えていることが解る。

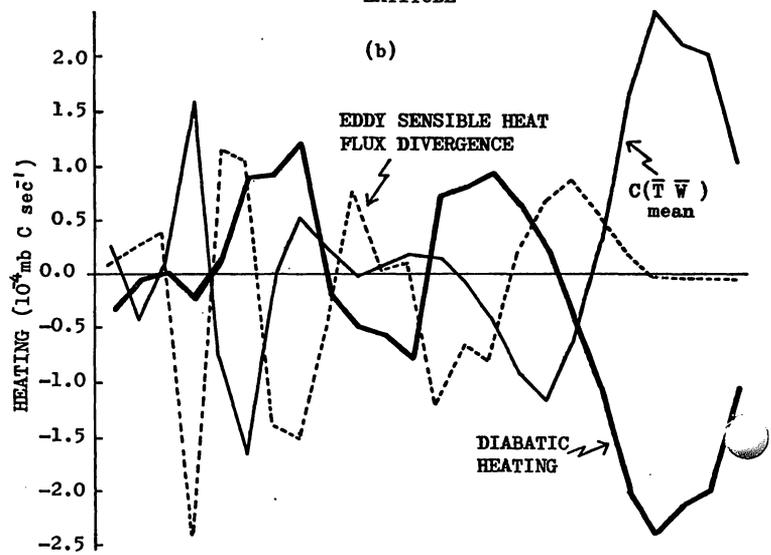
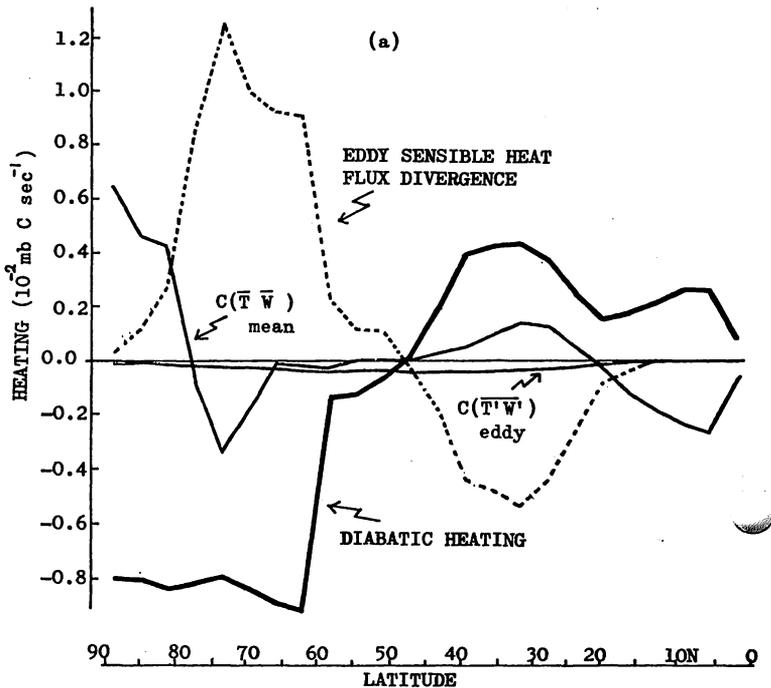
第6図

年平均緯度分布を第7-b図で見ると、熱帯(20°N以南)では上昇流は弱まり、中緯度では(30°Nを



エネルギー変換項〔非断熱加熱(DIA), 南北流のうず成分および平均流成分による顕熱輸送による加熱(EDDY/MEAN S.H.F.D), 鉛直流のうず成分および平均流成分による potential エネルギーと運動エネルギー間の変換量 [$C(\bar{T}\bar{W}')/C(\bar{T}\bar{W})$] の北半球月平均値の季節変化。(a): N-case, (b): (D-N)-case。

中心に) 下降流が弱まって Hadley 循環の弱まりが明瞭である。一方, 40~50°N では下降流がやや強まり, 高緯度 (70°N 付近) では上昇流が強まって間接循環は強化される。即ち, 熱帯の非断熱加熱の弱まりは平均上昇流の弱まりに伴う断熱冷却の弱まりで補償されている。中緯度 (30°N 付近) では非断熱加熱の強まりは下降流の弱まりによる断熱冷却の弱まり (相対的な加熱の強まり) とバランスしている。25°N 付近を中心に顕熱うず輸送による冷却効果が弱まっており, 直接循環の弱まりに対応してじょう乱も弱まり南から北への顕熱輸送が弱まったためと推測される。一方, 中緯度の非断熱加熱の強化域内 (30~45°N) の 45°N 付近では非断熱加熱の強まりは, 顕熱うず輸送による冷却の強まりによって補償



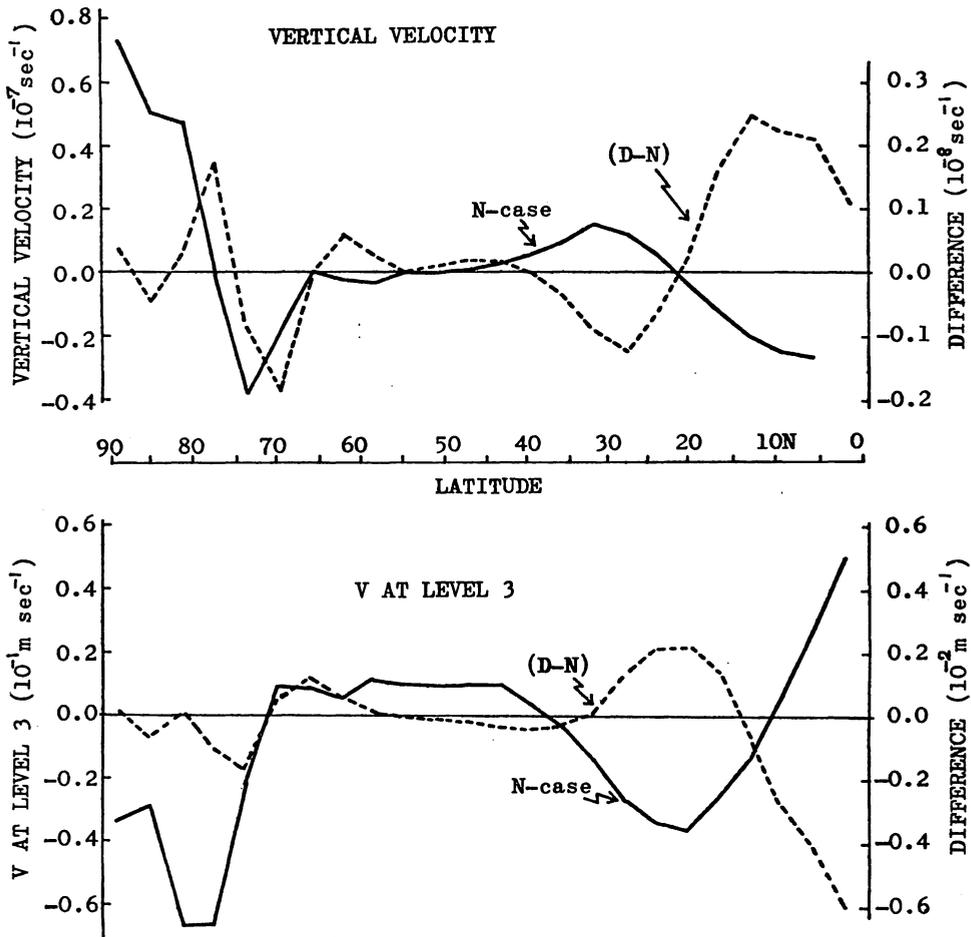
第7図: 第6図と同じ。但し, 年平均値緯度分布。

される。このうず輸送による冷却の強まりは, 間接循環の強まりに対応して中緯度の北部でじょう乱による北への熱輸送が活発化することによるものと考えられる。50°N 付近の非断熱冷却の強まりは下降流の強まりに伴う断熱加熱の強化と相殺している。高緯度の非断熱冷却の減少域 (相対的な加熱強化域: 60~75°N) では, 間接循環の上昇流の中心域に当る 70°N 付近を中心に上昇流の強化による断熱冷却の強まりが見られ, 65°N 付近では顕熱うず輸送による加熱効果の弱まり: 相対的な冷却効果が見られる。第7-b 図中の顕熱うず輸送による効果の南北分布を見ると, 太陽定

数の減少によって北への熱輸送は特に 50°N 、 70°N 付近を中心に（南北分布として相対的に N-case より）強化されているようである。特に 50°N 付近の強まりは間接循環の強まりと関連がある。年平均緯度分布で見ると、太陽定数の変化は、じょう乱にも大きな影響を与えていることがわかる。

顕熱平均流輸送による加熱効果は、極での輸送量を 0 と仮定しているので、北半球平均の収束による加熱（冷却）は南半球から（へ）の顕熱の流入（流出）を表している。第 6-b 図によると、太陽定数の減少によって夏の南半球からの顕熱の流入（冬の流出）は弱まっており、Hadley 循環の弱まりに対応して両半球の相互作用は弱まることとなる。

第 8 図に年平均鉛直流($\bar{\sigma}$)および下層（約 750 mb）での南北流の緯度分布を示す。この図には N



第 8 図：(a)：約 500 mb（レベル 2）での鉛直流($\bar{\sigma}$)と (b)：約 750 mb（レベル 3）での帯状平均南北流 (V_3) の年平均値緯度分布。実線：N-case、破線：(D-N)-case。

-case および (D-N)-case の様子を示しているが、上に述べた低緯度の直接循環の弱まりと間接循環の強化が更に明瞭に見られる。

以上に述べたように、非断熱効果の変化に伴い循環は変るが、この非断熱加熱の変化をもたらす

大きな要因は降水量の特に熱帯での変化である。結果を更に詳しく調べると、太陽定数の減少に伴う降水量の減少は7月に10°N付近でN-caseの7%に達してそこでの非断熱加熱を10%弱める。この降水量の減少は、直接循環の弱まりで地表風が弱まって水蒸気の地表からの補給が減少すること、および、10°N付近での水蒸気収束量の減少によってもたらされる。7月の10°N (Hadley循環の上昇流の中心域)における上昇流は、太陽定数の3%の減少に対して10%弱くなり直接循環は非常に大きな変化を生じる。

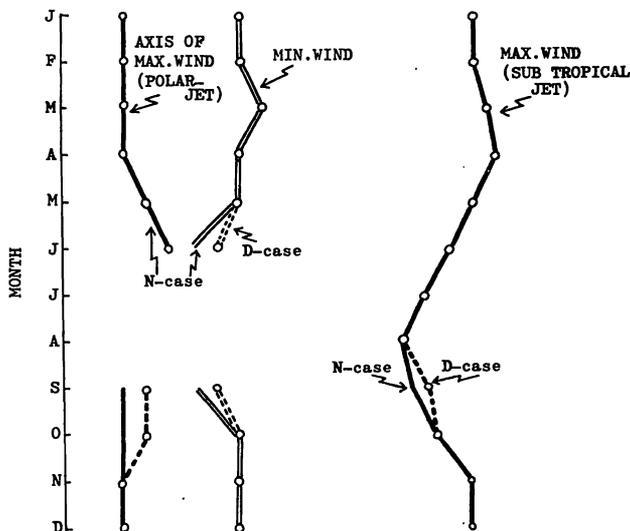
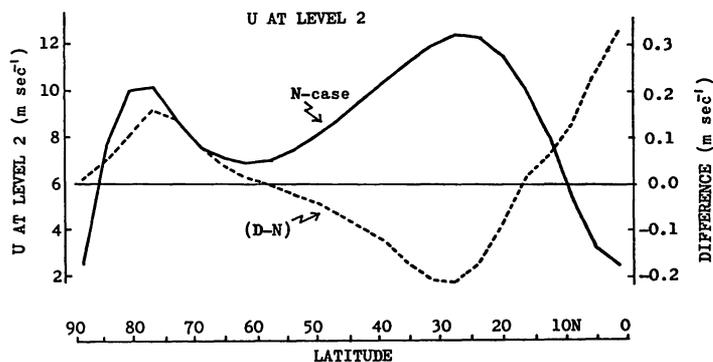
5. 平均帯状流の変化

太陽定数を減らすと気温場は3.3で述べたように熱帯と極地方で減少が大きく60°N付近で減少が小さくなる。南北の気温傾度は熱帯と60°N間では弱まり、特に30°N付近では最も弱まる。第9-a図に示すように中層(約500mb)の平均東西風は温度場の変化と対応して30°Nを中心にサブジェットの弱まりが見られる。また第9-b図にはジェット軸の位置(緯度)の季節変化を示すが、太陽定数の変化による位置の変化は殆んど見られない。

6. まとめ

以上の要点をまとめて模式的に第10図に示す。太陽定数の減少により次のような変化がもたらされる(第10図参照)。

降水量は熱帯で特に減少し非断熱加熱を弱める。一方、中緯度(30~45°N)



第9図:(a)年平均帯状流の緯度分布。(b)帯状流の強風軸(Sub-tropical-jetとpolar-jet)と弱風軸の緯度の季節変化。実線:N-case, 破線:(D-N)-case。

HIGH LATITUDES		MIDDLE LATITUDES	LOW LATITUDES	
(75-60N)	(60-50N)	(45-30N)	(20N-)	
	(-)	(+)	(-)	PRECIPITATION
(+)	(-)	(+)	(-)	SENSIBLE HEAT SUPPLY
(-):COOLING (+);relative warming	(+):COOLING	(+):WARMING	(-):WARMING	DIABATIC HEATING
(+):ASCENDING	(+):DESCENDING	(-):DESCENDING	(-):ASCENDING	VERTICAL MOTION
	(+):HEAT FLUX	(-):HEAT FLUX		HEAT FLUX
	(+):FERREL CIRCULATION	(-):HADLEY CIRCULATION		CIRCULATION

第 10 図：太陽定数の減少による大気大循環の変化。(+)は強化・増大，(-)は弱化・減少。

では降水量と地表からの顕熱補給の増加により非断熱加熱は強まる。また 50~60°N では降水量および顕熱補給の減少により非断熱冷却は強まる。更に高緯度 (70°N) では地表への顕熱補給の弱まりにより非断熱冷却は弱まる (相対的加熱効果が現われる)。即ち非断熱効果では熱帯と中緯度の加熱率の contrast は小さくなる。

上に述べた不均衡を解消するために 10°N 付近を中心に上昇流が弱まり 30°N 付近では下降流は弱まる。また 25°N 付近では顕熱うず輸送による (仮想的) 冷却が弱まる。即ち直接循環の弱まりが見られる。また 40~50°N では下降流がやや強まり 70°N 付近では上昇流が強まり間接循環は強まる。間接循環の変化に伴い顕熱うず輸送は 50°N 付近で強まり 45°N 付近ではこの効果による冷却が強まっている。

Wetherald & Manabe によると、太陽定数の減少は降水量の減少をもたらす直接循環を弱め間接循環を強める結果となっており、我々の結果とも一致する。平均気温の減少は熱帯と極地方で大きくなり、他の研究と定性的に一致するが、Wetherald & Manabe, MacCracken & Potter (1976), Budyko (1969) などと較べると 1-order 小さい。Oort & Rasmusson (1971) の観測結果と較べると、帯状平均したジェット軸はサブジェットに対応するものだけが観測され、我々の計算に出てきたポーラージェットは実測では見られないし、運動量輸送などについても量的な不一致が見られるが、大まかな季節変化としては実測と大体良い傾向的な一致を見せている。

我々のモデル計算での定量的な不一致は種々の点によってもたらされているであろう。例えば、このモデルは feed-back mechanism を含んでおらず、境界条件を年平均値に固定している。またその他の重要な要素 (山の効果、定常波による効果等) を無視しているためによる影響も大きいであろう。しかし、定性的には reasonable な結果が得られたと思われる。

謝辞：計算を行うにあたって元モデルを提供された NCAR の栗原宣夫氏、および、有益な助言

をいただいた気象大学校の片山昭氏に感謝致します。また、気象庁長期予報課の皆様にはこの研究期間中大変お世話になりました。

参 考 文 献

- Budyko M. I., 1969 : The effect of solar radiation variation on the climate of the earth. *Tellus*, 21, 5.
- Gates et al., 1971 : A Documentation of the Mintz-Arakawa Two-level Atmospheric General Circulation Model.
- Kurihara Y., 1970 : A Statistical-Dynamical Model of the General Circulation of the Atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 27.
- _____, 1973 : Experiments on the Seasonal Variation of the General Circulation in a Statistical-Dynamical Model. *J. Atmos. Sci.*, 30.
- Kondratyev Y. K. and Nikolsky H. I., 1969 : Solar radiation and solar activity. *Quar. J. R. Met. Soc.*, 96.
- MacCracken M. C. and Potter G. L., 1975 : Comparative Climatic Impact of Increased Stratospheric Aerosol Loading and Decreased Solar Constant in a Zonal Climate Model. *Proceedings of the WMO/IAMAP Symposium on Long-Term Climatic Fluctuation.*
- Oort A. H. and Rasmusson E. M., 1971 : Atmospheric Circulation Statistics. NOAA Professional Paper 5
- Smagorinsky J., 1963 : General circulation experiments with the primitive equations. I : The basic experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 91.
- Wetherald R. T. and Manabe S., 1975 : The Effects of Changing the Solar Constant on the Climate of a General Circulation Model. *J. Atmos. Sci.*, 32.

General Circulation of the Atmosphere

Akio Arakawa (UCLA)

— Reviews of Geophysics and Space Physics, July 1975, Vol.13, No.3 —

(抄訳) 田中康夫*

はじめに

Lorenz (1970) は大気大循環の一つの考え方を提示したが、その考え方は一般に受け入れられるものであって次のようにまとめられる：もしも地表面に不規則性(凹凸)が無くて全く同じ様に熱せられるならば数学的には定常な軸対称の循環が起り得る。たとえ地表面に不規則性があったとしても数学的には定常的な循環は起り得る(すなわち、移動性低気圧や同様な transient-eddies の無いような循環である)。しかし、この様な循環はバロクリニックには不安定であって、現実の循環が非常に発達した大規模な移動性うずを伴っているのは正にこの不安定によるのである。これらの移動性のうずは循環の軸対称な成分から有効位置エネルギーを受けとり、運動エネルギーのいくらかを摩擦により失う。これらのうずは圏界面付近で亜熱帯の緯度帯を横切って極方向に大量の角運動量、及び対流圏中・下層では中緯度帯を横切り極方向に大量の熱を輸送する。この結果、低緯度では直接(子午面)循環(Hadley循環)、中緯度では関接循環が引きおこされ、これ等の循環が貿易風と中緯度の地上の西風を維持している。直接循環は大量の水蒸気を赤道方向に運び赤道に大量の雨を降らし、この降水に伴う潜熱の放出が低緯度の直接循環を更に強めることとなる。

大気大循環の基本的な考え方はその後4年間は変化は無かった。しかし近年、観測、理論研究、数値実験、室内実験などを総合して大循環の過程に対する我々の理解は非常に進んで来た。特に、観測値の蓄積ができて大循環のより確かな統計量を計算でき、惑星流体力学の非線型過程に対する理論研究が数多く出され、また、大循環モデルは改良が続けられてシミュレーションに広く用いられるようになった。

OBSERVATIONAL STUDIES (観測値の解析)

Mean values, variances and transports

Oort and Rasmusson (1971) は主に北半球の観測点の1958年5月～1963年4月までの5年間の毎日の高層データ(MITのデータライブラリー)を基礎資料として用い、北半球の月平均・緯度平均の大循環統計量を計算した。風速成分・気温・ジオポテンシャル・比湿の緯度平均値・分散・南北輸送が緯度(10°S～75°Nまで5°毎)と高度(地表から50 mbまで)の関数として月毎に示

*気象庁長期予報課

されている。停滞性のうず及び平均子午面循環による鉛直輸送も示されている。これとは別に、Oort and Rasmusson (1970), Oort (1971), Rasmusson (1972) は平均子午面循環, エネルギー南北輸送, 水蒸気南北輸送の季節変化を詳しく調べている。

Newell 他は Kidson et al. (1969) と Newell et al (1970) の研究を拡張して 2 冊の本にまとめた (Newell et al., 1972, 1974 a)。これらの本には熱帯及び熱帯外の大循環の季節毎の統計量がまとめられており, 更に, 1957 年 7 月~1964 年 12 月間の $45^{\circ}\text{S}\sim 35^{\circ}\text{N}$ の領域にある殆んど全ての高層及びレーダー観測点のデータをまとめてある。 $45^{\circ}\text{S}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 間の地上から 100 mb 間について, この本には風速成分, 気温, 風速成分の variance, 気温とモーメントの南北輸送の季節平均値を, 各地点毎に載せてあり, 又, これらの帯状平均値も載せてある。また, 熱帯における湿度のパラメーターの月平均統計量 (Rasmusson, 1972), 対流圏及び下部成層圏における放射加熱分布 (Dopplick, 1974) 及び全エネルギーバランスとエネルギーサイクルに関する章も含まれている。

これらの結果を見ると, 熱帯の Hadley 循環の季節変化が非常に大きいことが解る。冬と夏には Hadley 循環は赤道に関して非常に非対称である。冬半球のセルが Hadley 循環を支配しており地表付近で夏半球に赤道を超えて大きな質量輸送を行っている。夏半球のセルは (多分地表付近の他は) 極端に弱くなっている。冬半球から夏半球への圏界面付近での赤道を越えての大きな角運動量うず輸送もまた大きな特徴である。

南半球の大循環の統計量は, 観測所が不均一なので余り明らかではない。Van Loon et al (1972) の研究は最近の知識のまとめと言えよう。特に 1971 年 9 月~1972 年 12 月間に行なわれた Eole 実験 (Morel and Bandeen, 1973. 参照) などのコンスタントレベルバルーンを用いた最近の研究で 200 mb での南半球の大循環の新しい情報が得られているが, これには次のような非常に困難な点がある。即ち, 限られた数の準ラグランジュ的なバルーンの観測値からオイラー的な統計量を導き出す困難さであり, これは Dyer (1973) と Webster and Curtin (1974) により検討されている。Morel and Desbois (1974) と Webster and Curtin (1974) は別々に Eole のデータを解析して風速成分と気温の帯状平均値の年変化を示した。さらに, Morel and Desbois は時間平均場でかなり大きな経度方向の変動の存在を示し, それは波数 1 と 4 が卓越していることによることを示した。Webster and Curtin は運動量と顕熱の南北輸送及びエネルギー変換量を計算した。Webster and Keller (1974) は運動エネルギーの平均流成分とうず成分のスペクトル解析を行った。その結果によると, 運動エネルギーとそれらの比の両者に対して周期が 20 日の明らかなピークが現れた。東西方向の波数と周波数でのスペクトル解析では, 20 日周期のパワーの大部分は超長波によるものである事が解った。

Eole のデータを使って Morel and Larcheveque (1974) は 200 mb 面での水平うず拡散過程を調査した。その結果, 拡散は 1000 Km のスケールまでは大体均一, 等温位, 定常過程であること

が解った。推論される運動エネルギースペクトルは波数の -3 乗に非常に良く比例し、これは、乱流がほぼ準地衡風のであることを示している。この結果は注目すべきものである。というのは、オイラー的データのスペクトル解析が出来ないスケールを説明しているからである。

Angular momentum and mean zonal kinetic energy balance

最近出版された平均気圧図を用いて、Newton (1971 a) は山によるトルクの全球分布を季節毎に4カ月計算した。熱帯外では、先のWhiteの計算のように、山によるトルクは摩擦によるトルクと大体同じ符号である。しかし、熱帯では符号が同じでない季節もある。Newton (1971 b)は、これらの山によるトルク、地表面摩擦によるトルクと大気中での輸送の可能な限りの情報をまとめて全球の角運動量バランスの合成図を作った。この結果はNewton (1972)によって更に詳しく検討されている。Oort and Bowman (1974)はMIT大循環データライブラリを用いて山によるトルクを5年間月毎に計算し、月平均トルクの年毎の変動を示した。彼等の結果は、平滑化した山と異った計算方法により計算されたものだが、Newtonの結果と比較検討された。

Newell et al (1972)は新しくまとめた熱帯での大循環の統計量を用いて、全球の角運動量バランスを詳しく議論した。その議論には定常子午面循環、定常じょう乱、移動性じょう乱が平均東西風の維持に果たす役割も考慮されている。

平均東西運動エネルギーの維持という点からStarr et al (1970)は、北半球の大部分では種々のじょう乱の全ての効果としての角運動量の上方への輸送は平均角速度のこう配と逆向になっているようだと指摘した。これは、水平方向だけでなく、鉛直方向にも“負粘性効果 - negative viscosity effect (Starr 1968)”が存在することを意味している。この問題はStarr (1973)により更に研究された。

Water and total energy balance

この問題はNewell et al (1970)によって包括的なレビューがなされた。降水量 P と蒸発量 E との差は直接的に両者を観測して見積るか又は間接的に水蒸気の収束量から見積られる。Newton (1972)は直接法を用いて全球の水バランスを季節毎に議論した。 P と E の測定に不正確さはあることを認めながらも、彼はそれらの結果が熱帯ではより信頼できるものだと言っている。一方、Rasmusson (1972)は自分で編集した水蒸気輸送のデータを使い間接法を用いて $P-E$ を計算し、Budyko (1958)により見積られた E の直接的な値を用いて P を計算した。この方法で水バランスを赤道域、北半球の熱帯域及び熱帯外の地域について月毎に議論した。

全エネルギーバランスに関しては更に不明確である。ハドレー循環による輸送では、顕熱及び潜熱の赤道方向への輸送よりもポテンシャルエネルギーの極向きの輸送の方がわずかに大きい。従って、この正味の輸送はハドレー循環の鉛直構造を評価する時の小さな誤差によって非常に異なってくる。

海洋によるエネルギーの輸送や季節別の蓄積は更に知られていない。また、全地球・大気系の放射収支では理論計算と観測の間には多くの矛盾がある。

気候状態を求めるための放射伝達モデルを用いた放射収支の計算が改良され南半球にまで拡張されてきた (London and Sasamori, 1971; Sasamori et al., 1972; Doppliek, 1972, 1974; Haurwitz and Kuhn, 1974)。これらの計算は全エネルギーバランスを決るためには非常に重要である。しかし、研究者によって計算結果に矛盾があり、また、計算結果と衛星から測った大気の上端での値との間にも矛盾がある。

Vonder Haar and Suomi (1971) は 1962~1966年の 39 カ月間にわたり衛星から測った地球・大気系の放射収支の観測値をまとめた。この調査の結果、地球は以前に考えられていたよりも暖く暗い星であることが解った (全球平均のアルベドは以前考えられていた 35%ではなく 30%、有効黒体放射温度は 251°Kではなく 254°Kである)。1969~1970年の Nimbus3からの最近の高解像度の観測によって、上の結果が検証された (Raschke et al., 1973)。

熱帯のアルベドが (以前の値よりも) 小さいので、海洋・大気系は以前に考えられていたよりも多くのエネルギーを極方向に運ばなければならない。即ち更に多くの、大気によるエネルギー輸送又は海洋によるエネルギー輸送が要求される訳である。Vonder Haar and Oort (1973) は北半球の海洋による年間の極向きエネルギー輸送を、衛星観測から要求される全エネルギー輸送と Oort (1971)によって計算された大気だけによる輸送との差として求めた。彼等の計算によると、(大気・海洋による) 全エネルギー輸送の極大域である 30~35°Nでは、海洋が全エネルギーの 47%を輸送し、海洋輸送が最大である 20°Nでは全エネルギーの 74%を海が輸送している。この結果は、海洋による輸送の大きさ、その大気に対する役割の重要さの両者共に以前の評価よりも大きい事を示している。

しかし、Oort は多くのデータを使って計算したにもかかわらず、熱帯では大気による輸送が小さく見積られている可能性がある。Newton (1972) は Hadley 循環によるエネルギー輸送を見積る際には不確定さがかなりあることを指摘し、彼はその輸送を大気の熱収支から間接的に計算した。彼の計算によると海洋によるエネルギー輸送は Vonder Haar and Oort の結果よりもかなり小さい。

Newell et al. (1974 a) は、新しく編集した熱帯での大気の熱輸送の結果を用いて、全エネルギーバランスを解りやすく解説した。その結果によると 20°Nでの年間の大気による輸送は $1.24 \times 10^{22} \text{ cal yr}^{-1}$ である。Newell et al. は大気上端での衛星観測値を全て信用した訳ではなかった。彼等によると、大気・海洋系で運ばれる全エネルギーは 20°Nで $2.63 \times 10^{22} \text{ cal yr}^{-1}$ となるべきである (一方、Vonder Haar and Oortによると $3.49 \times 10^{22} \text{ cal yr}^{-1}$ である)。従って、Newton et al. によって間接的に導かれた海洋による輸送は 20°Nでは $1.39 \times 10^{22} \text{ cal yr}^{-1}$ であり、これは Vonder Haar and Oort による海洋での輸送量 $2.58 \times 10^{22} \text{ cal yr}^{-1}$ の約半分である。この小さい方の値をとってみても、海洋による輸送は以前に考えられていたものより大きい。

Available potential energy and kinetic energy balance

Newell et al. (1970) は大気のエネギーサイクルの包括的なレビューを行った。最近の Newell et al. (1974a) による研究は、新しく編集された統計量にもとづいて大気のエネギーサイクルをさらに詳しく述べている。Saltzman (1970) は大気のエネギーサイクルの多くの観測的な研究を東西方向の波数領域の形で簡潔にまとめた。

Holopainen (1970) は定常波のエネギーバランスの調査を行った。彼の結果によると、冬には zonal 有効ポテンシャルエネギーからの変換が定常波の主なエネギー源であり、断熱効果が主なエネギーシンクである。しかし夏には定常じょう乱は熱的に引き起される循環を形成するようである。夏冬ともに、移動性じょう乱は定常じょう乱を破壊する効果を持つ。エネギーに関する限り、山の役割は相対的に小さい。

Kung (1970, 1971; Kung and Merritt, 1974) は運動エネギーバランスの研究を続けている。彼は運動エネギーの式中の気圧傾度と摩擦力による仕事を現す項の北アメリカ上での緯度・高度分布を1年間計算した。両項とも全緯度で極大値の一つは大気境界層にあり、あと一つは極大は中緯度を除いて対流圏上部にある。

Potential vorticity balance

Green (1970) が指摘したように (理論研究の節参照)、大気の運動場と気温場に依存するうず位の輸送を考えると大気の輸送過程を更に深く調べることが出来る。うず位は運動だけに依存する他の量よりも更に保存性があるし、角運動量とは異り、平均こう配に沿って運ばれるようである。

Wiin-Nielsen and Sela (1970) は準地衡風うず位の南北輸送を北半球の中緯度で1年間について計算した。その結果では、輸送は一般に平均こう配に沿っており約 800 mb より上層の対流圏の大部分で南向きである。この計算されたうず位輸送を用いて、うず位のバランスから要求される大気中の年平均熱源を求めた。この結果は大気の熱源の他の計算と良く一致している。

Spectral analysis

中緯度のじょう乱のスペクトル解析は、周波数領域、東西波数 (又はルジャンドル多項式の次数) 領域又は東西波数・周波数領域について多くの著者によってなされている。

Vinnichenko (1970), Chiu (1973) と Hartman (1974) は周波数領域でのスペクトル解析を行った。Vinnichenko はワシントン州での月平均風の成分を用いた。低周波数に対するその結果と高周波に対する他の研究から得られた結果を結びつけて彼は1秒~5年の周期にわたる運動エネギー・スペクトルを作った。それによると、スペクトルは3つの主要な領域に分けることが出来る: 鋭い1年の最大値、周期が1~2か月から3~4日にわたるシノプティック (又はマクロスケール) な最大値及び周期1~3分のミクロスケールの最大値である。しかし、自由大気ではミクロス

ケールの最大値はスペクトルの永続的な特徴ではない。大西洋の2隻の観測船の冬期の観測値を用いてHartman は運動エネルギー、気温及びジオポテンシャル分散のスペクトルを求め、北向きの運動量と熱輸送を高さの関数として求めた。このスペクトルによると4~5日周期を持ちやすいパロクリニック不安定な移動波があることが解った。さらに、選択周期がおおよそ30日の低周波で分散が非常に大きい。この時間スケールを持つ大気じょう乱の観測される特徴をSawyer (1970)は議論した。Chiu は北アメリカ大陸及び近くの島の12の観測所のデータを用いて運動エネルギーのスペクトルを求めた。この結果によると、周期が数日のピークは顕著でないか、ほんのわずかに目立つだけであり、全体のスペクトルはレッドノイズに似ている。

多くの著者によると、東西波数が8以上の領域の運動エネルギースペクトルは波数の凡そ -3 乗(少くとも -2 乗より早い)の割合で崩壊する(Julian et al., 1970; Kao and Wendell, 1970; Kao et al., 1970 a; Julian and Cline, 1974)。同じ崩壊率が気温分散スペクトルについても見出されている(Kao, 1970; Steinberg et al., 1971)。Baer(1972, 1974)はルジャンドル多項式の次数の2次元のスケールインデックスを用いて、運動エネルギーと気温分散に対して同様な結果を得ている。

Saunders (1972)によると、もし気温が厳密な2次元流の場合のように力学的には追従する性質をもつものならば、崩壊率は -1 乗に比例するはずであり、もしも気温が鉛直的に干涉性がある(coherent)ならば温度風の関係を用いて崩壊率を -5 乗であると予報できる。上に引用した観測結果によると、実際の状況はこれらの2つの場合の中間であり、Charney (1971)による準地衡風乱流理論を支持する結果となっている。

Steinberg et al. (1971)は1963年2~4月の有効位置エネルギー、運動エネルギー、エンストロフィー(平均うず度の2乗の $\frac{1}{2}$)及びポテンシャルエンストロフィーを東西波数領域(波数1~15)で計算した。以前の調査(Saltzman, 1970)結果と一致して、運動エネルギーは中間の波数ではそれよりも大きい波数と小さい波数の両者にエネルギーを与える。一方、有効位置エネルギー、エンストロフィー、ポテンシャルエンストロフィーは小さい波数から大きい波数へと伝播する。波数領域の中間域では伝播してきたエンストロフィーやポテンシャルエンストロフィーの集積は相対的には殆んどない。

Kao and Wendell (1970), Kao et al. (1970 a, b), Kao and Sagendorf (1970)とKao (1970)は運動エネルギー、角運動量と顕熱の南北輸送、気温の分散のスペクトル解析を東西波数・周波数領域で行った。Deland (1973 b)は北半球のジオポテンシャルのデータを用いて、移動プラネタリー波(波数1と2)のスペクトル解析を行った。これらの調査には中緯度での各周波数に対する波の鉛直構造が述べられている。

Stratospheric general circulation

Murgatroyd (1970)は成層圏の構造とエネルギーに関する総合報告を行った。

Dopplick (1971) は北半球の 100 ~ 10 mb, 20 N ~ 90 N の領域の緯経度 5° 毎の毎日のデータを用いて 1964 年の各月についての下部成層圏のエネルギーの詳しい解析を行った。鉛直エネルギーフラックスとエネルギー変換を計算するために必要な鉛直流は熱力学の第一法則を用いて計算したが、以前の調査とは異り、熱力学の式中には放射加熱の項が含まれている。この結果によると全ての月で対流圏から下部成層圏に、また、冬（特に 1 月）には下部成層圏から上部成層圏にかなりの上向きのエネルギー流があることが解った。このエネルギー流束は 1 月を除く全ての月には下部成層圏に貯っている。うず有効位置エネルギーからうず運動エネルギーへの変換は冬期の各月は正であり、他の月は弱い負である。従って、うずは対流圏からの（また、多分熱帯成層圏からの）エネルギー束の吸収によって維持されていることとなる。ゾナル有効位置エネルギーからうず有効位置エネルギーへの変換は冬期は正である（これは Oort (1964) による以前の結果とは逆である。Dopplick は、この矛盾は水平・鉛直境界の違いによるものだと説明している）。放射加熱（冷却）は全ての月に有効位置エネルギーを壊す結果となっており、冬にはうず放射場を通して、夏にはゾナル平均放射場を通して破壊している。1 月には対流圏からの鉛直エネルギー束は下部成層圏では余り吸収されないが、Dopplick は鉛直輸送が上部成層圏での真冬の突然昇温に非常に重要だと推測している。この昇温は 10 mb を通る鉛直輸送がピークに達した約 4 日後に始っている。Dopplick は春の下部成層圏の昇温に関連しているエネルギー解析も行っている。この場合には対流圏からのエネルギー束が下部成層圏でかなり吸収されている。

Dopplick (1974) は毎シーズンの東西平均放射加熱の分布を南極と北極間の緯度及び 10 mb までの高度の関数として示した（この結果は Newell et al. の本に含まれている）。放射加熱の各成分の分布が北半球の冬について示されている。この本には又、エネルギー生成及び変換の分布が載っており下部成層圏での東西平均した運動量・気温方程式の各項のバランスについても述べられている。

Newell et al. (1974 b) は新しく東西平均した 200 ~ 2 mb 間の層についての気温の断面図、200 ~ 0.1 mb 間の層の風の断面図を各月について示した。また、加熱率の計算もいづらか新しく行った。更に下部成層圏のエネルギーサイクルを 1964 ~ 1968 年の 5 年間につき示している。そして 1964 年の春の昇温をエネルギー量とシノプティックスの両面から議論した。

ニッパス 3 の SIRS（赤外放射計）で計った 15μ (669.3 cm^{-1}) に中心を持つ CO_2 帯の放射量 (radiance) は大気の上側の厚さ約 100 mb の層の気温の過重平均の目やすと考えられる。Fritz and Soules (1970, 1972) は 1969 年 4 月 ~ 1970 年 4 月間の放射量を解析した。放射の半年・1 年変化を取り除いた後に、東西平均放射量の時間・緯度変化を議論した。その主な結果は、極の冬の成層圏の昇温は熱帯及び夏半球の低・中緯度の成層圏の冷却を伴っているという事実である。従って東西平均した成層圏気温の変化は（季節変化の他は）、冬半球の約 40 度に節を持つ定常振動をしているように思われる。気温変化の振巾は熱帯や夏半球よりも冬半球の極圏の方が大きい。こ

これらの観測事実は Matsuno (1971) による突然昇温のモデルと一致している。

Barnett (1974) はニムバス 4 号の SCR (選択波放射計) の A-D チャンネルによる 1970 年 11 月～1971 年 11 月間の放射測定値の解析を行った。この結果、Fritz and Soules の発見が確認された。更に彼は突然昇温に先立って東西波数が 1, 2 の振巾が最大となる事を示した。これは極の高温がプラネタリー波の活動の時間的な集積効果によるものであることを示している。彼は又、南極付近の気温の年変化は下部成層圏では北極付近の約 2 倍だが、上部成層圏では殆んど等しいことを見付け出した。赤道では成層圏界面付近に振巾が 2.5°K の半年周期の振動、また圏界面付近で振巾 1.7°K の 1 年周期の振動がある。修正された気温の高度・緯度断面図も各季節を代表する日々について示されている。

Deland (1973 a) は SIRS のデータを用いて移動波のスペクトル解析を行った。彼の結果によると、赤道地帯で西に移動するプラネタリー波は中緯度の西進波と干渉性があり、この結果を彼は赤道波は中緯度のプラネタリー波により励起されるという仮説を支持するものと考えた。

THEORETICAL STUDIES (理論研究)

Axially symmetric circulation

気象学者が全球の大気大循環を説明するモデルとして、Hadley 循環又は軸対称であるいかなる循環のみで説明する事をあきらめてから久しい。現在では一般に受け入れられている考えとしては定常的全球的 Hadley 循環 (赤道・極間の単一細胞) は理論的には可能だが例えば回転容器による室内実験の非対称領域で起るよううずじょう乱に関しては不安定だということである。しかし、Lorentz (1970) や Williams (1971) が強調したように、理想的な対称循環は概念上重要である。というのは、うず成長の線型不安定理論をこのような理想循環に適用することは出来ても、うずの存在する実際の東西平均循環に適用できないからである。

惑星流体力学の講義の中で Charney (1973) は薄い球殻の中で局地的な過熱や、境界面を局地的に回転させることによって生じる対称循環を議論し、赤道付近以外につき成立つ漸近解を示した。この解は本質的には単細胞の Hadley 循環であり、質量の南北輸送は境界層に集中しているものである。

Lorentz (1970) は圧縮性の球状大気に現実的な加熱分布を与えた時に理想的な全球的 Hadley 循環を見出す必要性を強調した。Hunt (1973) によるそのような試は次の数値実験の章で述べる。Lorentz は、このような循環はうずに関して不安定なばかりで無く、対称じょう乱に関しても、少なくとも赤道付近では、不安定らしいと指摘した。Hunt の結果は、少なくとも湿潤大気 (moist case) については、Lorentz の結果を支持するようだ。もしも実際の大気でもこのような事が起っているならば、熱帯の Hadley 循環は一般に考えられているよりも (統計的には定常だが) もっと時間変化が激しいのかもしれない。

Symmetric and baroclinic instabilities

Stone (1971)はEadyモデルの解を数値解析で拡張して対称及び非対称じょう乱を含めたが、基本流の水平シアーは無視したままにした。その結果、最大の成長率はリチャードソン数 $Ri > 0.95$ ならば従来の(準地衡風)傾圧不安定度に、 $\frac{1}{4} < Ri < 0.95$ ならば対称不安定度に、 $0 < Ri < \frac{1}{4}$ ならばKelvin-Helmholtz不安定度に関連があることを見出した。Stone (1972)は傾圧及び対称不安定に伴う運動量及び熱輸送を計算し、両不安定ともに熱を上方と極方向に輸送することを見出した。対称不安定の場合は運動量は下方に運ばれ Ri の大きさにより赤道又は極のどちらかの方向に運ばれる。Sela and Jacobs (1971)は傾圧不安定の端の領域での非地衡風解を詳しく調べた。

Williams (1974)は準地衡風傾圧不安定に対するEadyモデルを一般化して静的安定度とシアーの鉛直変化を考慮に加えた上に、内部うず位を0にしたまま、即ち数学的簡潔さを保ったままにしておくことが出来る事を示した。この一般化された解によると、静的安定度とシアーが高度と伴に増す(減る)時には、Eadyの基準解と較べると上(下)の境界面で気温の最大値が大きく現れることが解る。Williams and Robinson (1974)はこれらのモデルを更に一般化してEkman層の影響も含めた。Hart (1971)はEadyのモデルを一般化して時間変化する基本流の効果を含めた。

Eadyの問題に β 効果を付け加えたGreenの問題を、Garcia and Norscini (1970)は連続モデルを使って研究して不安定解を強調し、Tang (1971)は中立解を強調して移流モデルとの比較を行った。Wiin-Nielsen (1971)は気圧座標を用いた時の下端の境界面の効果を調査した。

Fisher and Wiin-Nielsen (1971)は移動超長波の安定度、構造、エネルギーを調査した。

水平シアーのある基本東西流に関して、準地衡風近似を用いた傾圧波の研究は数多くなされた。あるグループは傾圧・順圧不安定の結合されたものをより理解しようとし、又あるグループは水平シアーによる付加的な順圧不安定を取りあげずに、どのようにして傾圧波の南北構造を決めるのかを見つけようとしている。

従来の傾圧不安定の研究では水平に一樣な基本流を仮定しており、じょう乱は南北方向に一樣であるか又は多かれ少なかれ任意に選ばれた水平の境界で囲まれた水平溝の中に限られているかしている。これらの従来の理論によると可能な限り最大の南北スケールを持つじょう乱が最も早い成長率を持つように予報される。しかしながら実際の気象では傾圧波がそうである様に基本流の傾圧性は中緯度で集中的に大きくなっている。即ち、次の3つの基本的なスケールを考慮する必要がある：東西流の南北の拡がりでありそれは普通はplanetaryスケール；基本流に関連した不安定性の南北スケール；及び変形半径(radius of deformation)である。Simmons (1974 c)は、以前にStone (1969)によって研究されたこの問題を更に一般的に詳細に議論した。彼によると、変形半径よりも東西流の南北の拡がりの方が大きい時には、波の南北スケールは変形半径の幾何平均値と

傾圧性の南北スケールで決る。後者（傾圧性のスケール）が非常に大きい時には、理論的にはじょう乱の南北スケールはプラネタリースケールに近づき、変形半径には余り依存しない。

Barotropic instability and instability of baroclinic jets.

固有値問題の数値解が得られている - Dickinson and Clare (1973) はハイパボリックタンジェント型の流れについて、Yamasaki and Wada (1972) は東風ジェットについて計算した。傾圧西風ジェットの不安定度については、初期値問題として（いわゆる tendency 法）、Fischer and Renner (1971)、Aihara and Imai (1971)、Lejenas (1973) 等によりエネルギー変換に重点を置いた調査がなされた。

Interactions between waves and the basic zonal flow

小さな振巾の波が傾圧不安定ならば、その波はいずれ大きな有限振巾をもち、平均東西流との非線型相互作用が起る。そこで次の様な疑問が起る：この非線型効果で波の振巾限界が決められるだろうか？；もし振巾の限界があるならばどの様にしてその限界に達するのか？；波は一様に最終状態に近づくのだろうか？；本当に波の振巾に最終的定常状態又は *vacillation* で特徴づけられる有限振巾の状態があるのだろうか？等々である。この様な疑問から Pedlosky (1970, 1971, 1972) は準地衡風 2 層モデルを用い傾圧不安定波の有限振巾の振舞いについての理論を示した。彼は初期状況としては基本流は水平方向に一様であり鉛直シアは傾圧不安定の臨界値よりほんのわずか大きいと仮定した。この仮定により、この構造はほんのわずかの非線型性をもつこととなる。結果としては、じょう乱が初期に単一波ならばそのままであり、基本流の水平シアは発達しても小さいものである。彼は、もしも減衰が無いならば波の振巾は振動し、その特徴は初期条件によって完全に決定される事を示した。しかし、摩擦のパラメーターが大きい時には、最終状態として振巾が定常な波となり、その最終状態には単調に近づく。摩擦係数が小さい時には次の 2 つの中のどちらかの状態が起る。もし定常波の解が微小なじょう乱に関して不安定ならばその解は初期条件に依存しない有限サイクル (*limit cycle*) に近づく。もし定常波の解が微小じょう乱に関して安定ならば、波が初期に定常波の解に近い場合に限りその解は定常解に近づき、その他の場合には有限サイクルに近づく。この様な有限サイクルは回転容器の実験で観測される振巾振動 (*vacillation*) に似ている。

切断スペクトルシステム (*a truncated spectral system*) を使うと非線型エネルギー交換過程を都合良く議論できる (Baer, 1972)。Pedlosky の理論の弱点の一つは、順圧過程による基本流と波の間の運動エネルギーの交換を全く無視している事である。Simons (1972 a, b) は粘性の無い低次の切断スペクトルモデルを β 面と球面の両者に用いて、順圧エネルギー交換過程を含めた波と基本流の相互作用を議論した。それによると、典型的な大気状態では順圧過程は有限振巾の傾圧波に対してかなりの安定作用を及ぼすことが解った。Quinet (1973 a) は 3 成分のスペクトルモデルを用いて基本流と波の成分間の運動及び有効位置エネルギー交換を議論した。Quinet

(1973 b) は、多成分モデルを用いて静的安定度が変り得るようにして、エネルギー変換過程（これは回転容器実験での波数領域で観測される過程に類似しているように見える）を詳しく調査した。

Pedlosky の非粘性の問題での初期条件が、単一の不安定波だけでは無く線型の意味で中立な他の多くの波も存在する場合を考えてみよう。不安定波の振巾が小さいままの内は、中立波は成長しないだろう。しかし不安定波の振巾がかなり大きくなった後は、もし波の間で共鳴現象が起きるならば中立波は不安定波からエネルギーを引き取って発達するだろう。Loesch (1974 a) は、ほんの少し不安定な一つの波と 2 つの中立波を考えて、中立波の成長が起り得る事を示した。有限振巾の状態は、個々の波のエネルギーの長周期の振動と波の全エネルギーの長周期振動の状態を示した。更に、平均場の有効なエネルギー全部を中立波の 1 つ又は 2 つに、1 振動の中で、渡すことさえも可能である。Loesch (1974 b) は鉛直平均運動量の、3 つの波の共鳴によってもたらされる、南方向の再配分を議論した。

Frontogenesis

傾圧波に関連したもう一つの重要な有限振巾効果は frontogenesis である。もしも運動の場が時間的にゆっくり変化して変形を起すならば、前線性の不連続が生じる。たとえ運動が準地衡風のな時でさえも、少なくとも鉛直流が殆んど 0 となる地表付近では、気温の不連続が生成されやすい (Stone, 1966)。しかし、気温傾度が強まるにつれて、準地衡風近似は成り立たなくなってくる。R. T. Williams (1972) は準地衡風前線発生理論の弱点を要約した。Hoskins (1971) は、前線発生の簡単な解析的モデルを示した；そのモデルでは地衡風バランスは前線を横切っており、前線と平行ではないと仮定している。地表では有限時間内に速度と気温の不連続が形成される傾向がある。対流圏上部の前線とジェット流は成層圏の空気の下層への舌状の突込みと関連がある。Hoskins and Bretherton (1972) 及び Hoskins (1971) は更に解析的な手法で調査を続け、R. T. Williams (1972) は線型及び非線型プリミティブ方程式を用いて行った 2 次元の数値積分の結果を示した。運動場に変形 (stretching: 伸長, shearing; ずれ, 又は両者) がある場所ではどこでも非地衡風過程により、傾圧大気が前線を作り得るということは現在では疑い様は無い。しかし、これらの研究では対流圏中層では十分鋭い前線を作り出していない。

Mudrick (1974) は高分解能の 3 次元モデルを使った数値積分を行い印象的な結果を示した。彼の結果は対流圏中層でさえも現実的なようである。彼は水平変形活動と間接循環に関係あるフィードバック機構を仮定し、その機構により上層の前線発生がもたらされた。

Barotropic instability of the Rossby wave motion

中緯度の対流圏での運動の東西平均状態と似ている東西流は、一般には順圧的に安定である。しかし、この結論は非定常な流れや東西方向に一樣でない流れには適用できないし、中立なじょう乱が重なった流れは、その流れに更にじょう乱を重ねると不安定となるであろう。Lorentz (1972) は順圧うず度方程式の Rossby の解の安定性を議論した。彼は、もしも波が弱いか波数が小さい時

には β 効果が流れを安定にするが、波が十分大きいか又は波数が十分大きい時には波が不安定であることを見出した。うず度方程式の元の Rossby の解に似ている流れの場が大気中でなぜ一般に観測されないのかという事に対して、この不安定は一つの論拠となる。増巾するじょう乱が重った Rossby 波の運動は、Rossby 波独自の場合には出来ないジェット流状の特徴を示す。Lorentz は大気中でジェット流が卓越するのは多分このタイプの順圧不安定が現れることによるのだろうと指摘した。

Gill (1974) は有限な β 面上での Rossby 波は、 β 効果が卓越している時でさえも、共鳴現象が起るために常に不安定であると指摘した。

Hoskins and Hollingworth (1973) は Lorentz の結果を別の数学的手法を用いて導いた。Hoskins (1973) は、球面上の浅水方程式と非発散うず度方程式を積分するのにスペクトル法を用いて数値的に Rossby-Haurwitz 波の不安定性を調査し、また解析的にも調査した。彼の計算によると東西波数が 4 の Rossby-Haurwitz 波は 20 日以上に渡り殆んど変形せず、波数が 8 の波は数日の中に完全に崩壊した。その崩壊過程の間は、波のエネルギーの大部分は東西流に流れ込み、更に小さいスケールの波に流れこんだエネルギーもある。

Lilly (1973) は、2 次元乱流を作り出す波数間の相互作用は実際上はこのタイプの順圧不安定であると指摘した。

Quasi-geostrophic turbulence

スペクトル解析の項で引用した観測事実によると、波数が 8 以上の波に対する運動エネルギーは、凡そ波数の -3 乗に比例している。この事実は、3 次元等温位乱流の慣性領域に対する Kolmogoroff の $-\frac{5}{3}$ 乗則と極立った対照を示している。観測された -3 乗スペクトル則は、エンストロフィーが高波数に一樣に (エネルギーの伝播はなしに) 運ばれる 2 次元乱流の慣性領域に対する理論予測 (Kraichman, 1967; Leith, 1968 a, b) と良く一致する。Charney (1971) は、この一致がこの波数領域の大気の運動が 2 次元であることを必ずしも示すものではないと指摘した。彼は、もし地表面が等温位ならば準地衡風 3 次元流は、純粋な二次元流と同様に高波数にエネルギーを遷移することを示した。鉛直軸として Brunt-Väisälä の振動数の Coriolis パラメータに対する比によって表わされた高度を用いた、3 次元空間が等温位だと仮定して、Charney は十分大きい東西波数に対しては運動エネルギー及び有効位置エネルギーともに -3 乗則が成立つことを説明できた。3 次元空間でのこの等温位の条件は彼の最も severe な仮定であろうが、気温分散スペクトルの観測値との一致はこの仮定を支持するものである (スペクトル解析の項を参照)。

Steinberg (1973) と Barros and Wiin-Nielsen (1974) は、準地衡風乱流の数値シミュレーションを行った。両者とも 2 層モデルを用いたが、残念ながら Charney の理論を試すには鉛直分解能は粗かった。彼等は有効位置エネルギー Spektrum が波数の -5 乗に比例する結果を得たがこれは Charney の理論とも観測値とも一致しない。Merilees and Warn (1972) は、上に述べ

た事（-5乗則）しか、高次鉛直波数へのエネルギー遷移が禁じられる2層モデルからは期待できないと指摘した。

Forced planetary waves and their energy propagation

Derome and Wiin-Nielsen (1971)は、地形と定常的な非断熱加熱に対する中緯度のモデル大気の応答を調べた。一つの南北波長を与えて、線型準地衡風2層モデルの定常解を各東西波数毎に調べ、更に、1962年1月に対するforcing（外力）の推定南北分布に対する応答を調べた。モデルが極端に簡単なにもかかわらず、観測された定常波と一致するよう乱を再現できた。この結果によると、地形によって強勢される定常波は非断熱加熱で強勢される波と大体同じ位置であり、振巾は地形による波の方が熱によるものよりやや大きい。drag coefficient（引張り定数）を陸上で一定にし、海上で小さい値にした時の影響も調べた結果、両者の値の比が6の時は影響が大きく、その比が2の時は小さい（しかし未だ計算した波と観測した定常波が、一様なdrag coefficientを使った場合よりも、より一致するようには出来ない）ことが解った。

Matsuno (1970)は対流圏から成層圏への定常プラネタリー波の伝播を議論した。下端の境界条件として1967年1月の月平均500mb高度の観測値を与えて、基本状態として東西流の現実的な高度・緯度分布を用いて成層圏のプラネタリー波の構造を支配する線型方程式を数値的に解いて、波の南北構造を60kmの高度まで示した。この結果は東西波数1の波の観測値とは一致するが、波数2の波の振巾は小さく計算されている。対流圏ジェットのすぐ上にある基本状態としてのうず位の南北傾度の弱い領域は、波の伝播に対して障壁の役割を果しており従って波のエネルギーは極圏に閉じこめられている。40km以上では波は低緯度に拡がる傾向がある。熱帯で東西風が0の処を結んだ線（臨界緯度：critical line）が波のエネルギー東の主なsinkである。

臨界緯度付近での低波数のRossby波の（時間の関数としての）振舞いをDickinson (1970)は解析的に詳しく調査した。Geisler and Dickinson (1974)はそのような一つのRossby波と基本東西流との相互作用を議論した。その結果、安定作用を及ぼすfeedback効果が、順圧東西流中の臨界緯度での波の吸収に伴って現われ、また、東西流のプロファイルが時間と共に、臨界緯度で絶対うず位の傾度を0に減らすように、変化するということが解った。この様に形態が変わると波はそこで全反射され、減衰が無いならば、早、東西流とは干渉しない。強勢プラネタリー波の鉛直伝播は、Clark (1972)によって初期値問題として議論された。

Matsuno (1971)は成層圏突然昇温の力学モデルを提案した。このモデルは、強勢プラネタリー波の下からの鉛直伝播と、それらと基本東西流との相互作用とから成っている。ノルマルの状態（波の強さが小さいか中位でかつかなり定常の時）には、東西流との相互作用は小さい；というのは、極圏でのうず熱輸送の収束は波によって誘起される平均上昇流による断熱冷却で完全にバランスされているからである。（Holton (1974)は、この関係は一般に Ri が大きい時に成立し、準地衡風のなくても良いことを示した。）しかし、かなり強いプラネタリー波が対流圏で急速に作られる時は、

事情は異ってくる。強いプラネタリー波のフロントが上方に伝わるにつれて、フロント下方でうず熱輸送の収束は、そのほんのわずかが波により誘起された上昇流のための断熱冷却で償されるだけなので、極圏での昇温をもたらす。フロント上方の西風は減速され、もし東風になると臨界レベルが出来て、極圏での昇温は急激に起る。

Hirota (1971) は成層圏プラネタリー波の、対流圏の強勢の周期的な時間変化に対する応答を議論した。冬の成層圏の典型的な条件に対応する平均東西風の強さと波長を示すパラメーターに対して、オーダーが10~20日の周期の応答が最大となった。これは成層圏循環の特徴的な時間変動スケールの観測値と近い値となっている。

Simmons (1974 a) は下から強勢された成層圏の定常じょう乱に対する解析解を示した。その解によると、基本的な東西流のプロフィルの曲率の南北変化によりじょう乱は強い西風領域を通り抜けて上方に伝わる。これはMatsuno (1971) の発見と一致する。鉛直シアが一様な場合に対して Simmons は又、時間的に変る強勢解を示した。これらの解によると、冬の成層圏が、(じょう乱が発達するにつれてポテンシャルエネルギーが平均流から波に下層で変換されて、それから上方に運ばれるという過程が起っている) 対流圏循環の変化に定量的にどのように応答するのかを知ることが出来る。この点では、成層圏はその下端の境界面に入ってきた波のエネルギーを増巾しているように見えるが、エネルギー変換は傾圧不安定の場合と似ている。対流圏からの強勢の他に、成層圏のじょう乱は、本来存在している傾圧不安定により発達し得る (McIntyre, 1972; Dickinson, 1973; Simmons, 1974 b) が、成層圏下部中部に関する限りは少くとも、この効果は2次的であるようだ。

Closure problems

これまで見てきた理論は、全大気大循環に関係したもので無く個々の独立した力学過程に関するものである。大気大循環の力学はこれらの過程が複雑に組み合わされたものであり、関連する力学過程を全て explicit (陽) に含んだ簡単な理論モデルを作るという希みは殆んど無い。

大気大循環は熱によりもたらされる循環である。しかし、熱的強勢は外部のみからもたらされるものではない。惑星全体として見ると、全気柱の全体の加熱量は大気の上端での正味の放射量によって決まるが、出ていく量は大気中での過程(それにより気温、構成、雲分布等が決る)や、海洋中での過程(海水面温度が決められる)や、更に土の中での過程(地表温度やアルベドに影響する水過程)にさえ強く依存している。大気大循環のこの熱的強勢は更にもっと強く内部調節されている。というのは、その主な熱源は主に熱帯での積雲群の中での潜熱の放出だからである。これらの積雲群は循環そのものと、大気が下面(地球表面)と相互作用する仕方によって支配されている。潜熱放出の機構は非線型だから、時間又は空間平均された加熱は、時間又は空間平均場からのみでは決まらない。

さらに、普通の Ekman 層と異なり大気境界層 (planetary boundary layer) は常に強く乱流

の起っている層であり、層雲があっても無くともそこを突き抜けていく熱対流ブリュームをしばしば含んでいる。この乱流大気境界層は、その上端で不連続を作ろうとし、その高度は時間・空間的に変る。この様な不連続により、前線に関連したものと同様に、大気は更に複雑さを増す。

このレビューの期間に、雲と境界層過程の理解とモデル化に著しい進歩がなされ、Arakawa (1974)はそれらをまとめた。しかし、これらの過程及び、これらと放射との相互作用は大循環に強く影響するものであるが、未だ最も理解されていないままである。

上に述べた複雑さの全てを現実的な方法で考慮に入れた大循環の理論は現在ないし、近い将来にも出来そうもない。しかし、これらの各々の過程を研究することによって、それらのうちのどれを陽 (explicit) に扱うかを定める為の手伝けとできる。例えば、ある過程は他の過程に対して相対的に受動的に応答するようになる。次の例を考えてみよう：対流圏じょう乱に対する成層圏じょう乱、ポテンシャルエネルギーを放出する長波・超長波に対する短波（これらは普通は凡そ慣性領域にある）、低気圧に対する前線、大規模循環に対する積雲群、自由大気中の循環に対する大気境界層等々。各々の対のうち、後者は前者に対して、平常の状態でフィードバックがあらうとなかろうと、比較的受動的に応答する。そこで、後者の集合効果を前者によって定式化 (パラメタライズ) して、それらの式を使ってフィードバックを見積る事が出来そうだという希みはある。

最も簡単で可能な方法は、もしそれらが主なエネルギー源やシンクでないならば、受動的な過程を完全に無視することである。大気大循環の理論モデルはそのような非常な簡略化によってのみ作ることができる。そうでなければ、理論モデルは数値モデルにならざるを得ない。

そういう時でさえ大循環の理論モデルを作る時には、閉じた系とするためには極度に難しい問題 (closure problem) に直面する。その難しさは、少くともある部分は、低気圧規模のうず運動～大循環の合理的な力学理論の中に取りこまなければならないものだが～が厳密に定常波でもないし、厳密に乱流でもないという事実から生じている。この両面 (波動又は乱流) のどちらに基づくかによって、種々の研究をロレンツ (1970) がした様に、波動的な方法か又は乱流的な方法に分ける事が出来よう。

熱と運動量のうず輸送は、うずの3次元の構造によって決る。波動的な方法では、振巾を除いた波の構造を決定するために線型不安定理論を用いる。例えばCharney (1973) は線型傾圧不安定によって最も急速に成長する波と同じ形をしている単一波を考えて、振巾は同時に求まらないので、ニュートン型の加熱のもとでエネルギーサイクルが定常でなければならないという仮定から振巾を求めている。Charney のモデルは非常に簡単だが解を解析的に見出すことが出来る。しかし、子午面構造の自由度が不足しているために、うず運動量輸送はゼロである。

Salzman and Vernekar (1971, 1972) は波動的方法を用いて精密なモデルを作った。波の振巾はエネルギーサイクルが定常であるという仮定から決められている。うず運動量の定式化は荒っぽいものだけれども、彼等の結果は非常に実地的である。

乱流的な方法では閉じた系を作るために拡散の考えを用いる。しかしながら、大気中の大部分ではうずは運動量を拡散しないということはすでに十分確かめられていることである (Starr, 1968)。Green (1970) は、水平方向に拡散するのは準地衡風のうず位であるようなモデルを提案した。彼によるとうず熱輸送は非等温位的拡散の形をとり、その形は傾圧不安定理論から推論されたものだが係数は経験的に決めている。準地衡風うず位拡散の考えはWiin-Nielsen のモデルにも使われた (Sela and Wiin-Nielsen, 1971; Wiin-Nielsen, 1972)。

Stone (1972 a, 1973, 1974) が、子午面及び鉛直うず熱輸送を定式化するために用いた方法は Green の方法と似ているが更に手がこんでいる；特にそれはリチャードソン数の広い領域に対して取扱っている。うず熱輸送の大きさは経験的にというよりも幾分任意な仮定から決められる。このパラメタライゼーションを使って、地球、火星、木星大気の特徴的な Ri 、温位の鉛直・水平傾度を見積り、気候変化の機構のいくつかを議論している。

Kurihara (1970, 1973) は、東西平均した大循環の精巧な統計力学モデルを作りあげた。このモデルは他の多くの気候モデルと異り、予報モデルでありプリミティブ方程式を用いている。予報量は東西平均した運動量 (風速)、気温、地表気圧、うず運動エネルギー及びうず熱輸送であり、診断的にうず運動量輸送を求める。

Kim (1973) が作った closure モデルは、気候の研究に直接応用するためのものではなかったが、波動的方法によった完全に閉じた単純化した理論の一つの例である。このモデルは、2層の準地衡風モデルに基いており切りつめスペクトル表示を採用し、緯度に関しては低次の2つの奇数モードを残している。熱関数は、緯度に関して変えたあらかじめ決められた平衡温度に伴ったニュートンタイプのもを仮定している。運動は平均東西流、地形による定常波及び一つ (又はそれ以上の) 中立移動波から成っている。波動それ自体は平均東西流上の一次のじょう乱だが、モデルは平均東西流上の波の二次の効果～例えばうず熱輸送、うず運動量輸送、うず運動により引き起される平均子午面循環や山によるトルク等を含んでいる。閉じた系のための仮定として、移動波の成長率はゼロ (中立波) であるかその成長率は又、その波数領域で局所的に最大となる (極値条件) と仮定している。これらの仮定を用いて Kim は非線型方程式の完全系を導き、平均東西流、定常波の (複素数) 振巾、与えられた平衡温度の子午面傾度の関数として移動波の波数と振巾を決めた。方程式をくり返し法で数値的に解いた結果によると、平衡温度の南北傾度が大きくなるにつれて、一つの定常波が存在する状態から定常波と移動波の両者がある状態へと流れは変わった。この2つの波の間でのエネルギーの分れ方も議論された。

NUMERICAL MODELING AND SIMULATION EXPERIMENTS

General scope

前節で closure problem について見てきたが、このタイプのモデルについてのレビューは Wil-

lson (1973), Schneider and Dickinson (1974)により詳しくなされている。

更に現実的に大気大循環のシミュレーションを行うには少くとも低気圧スケールの運動を陽 (explicit) に扱うモデルが必要である。従ってこの型の汎用的なモデルが現在開発されており大循環の数値実験に用いられている (Smagorinsky; 1970, 1974 のレビュー参照)。

しかし、低気圧スケールの運動を陽に扱っているとは言っても、未だ、いわゆる“サブグリッドスケールのパラメタライゼーション”という closure problem を解決しなければならない。このレビューの期間 (1970~1975 年) に積雲対流のパラメタライゼーション (Arakawa and Schubert, 1974) や大気境界層での乱流過程のパラメタライゼーション (Deardorff, 1972) に進歩があった。1974 年ストックホルムで行なわれた “The Physical Basis of Climate and Climate Modeling” に関する GARP の研究会議のレポート^{*} や GARP 1974 のための米国気候変動小委員会による “Understanding Climatic Change: A Plan for Action” のレポートなどでも先に述べたパラメタライゼーションを更に改良すること、現在無視されている物理過程を (特に気候の物理的基礎の理解のための) GARP の第 2 の目的を満すように取り入れる事等を指摘している。

雲の種類の多様性及び支配的な機構の複雑性等によって (Arakawa, 1974), 時間の関数としての雲のパラメタライゼーションと雲と他の~特に放射過程~過程との相互作用が、現存する大循環モデルの最も弱い面であろう。水平方向のサブグリッドスケールの雲 (対流的に活発な雲) だけでなく、鉛直的なサブグリッドスケールの (水平方向に拡がった), 例えば層雲, 高層雲, 絹雲などの雲のパラメタライゼーションも必要である。

たとえモデルの分解能が水平方向に 50 Km, 鉛直方向に 500 m であったとしても、それでもようやくメソスケール循環~例えば前線帯, スコールラインや海陸循環などで、それらによる鉛直輸送が大気大循環に大事な役割を果す現象~を含むことしかできない。地形又は地形によらない重力波による運動量鉛直輸送のパラメタライゼーションも行なわなければならない。現存のモデルはこれらのサブグリッドスケールの運動を全く無視しているし、もう一つの問題は急傾斜の山岳による計算誤差である。

分解能の外に別種の “closure problem” がある。現存モデルでは水の相変化 (水と氷) を陽に予報しないで水過程を取り扱っている。このことは不活発だが寿命の長い例えば絹雲~この雲は放射計算に重要である~にとっては不満足である。オゾンの予報では~これも又放射計算に重要だが~その複雑な光化学的再生機構をパラメタライズする必要がある。

Model description and basic simulation

米国で使われている主な大循環モデルは 5 個ある。それらは NOAA の GFDL (Geophysical

* (訳者註: 気研ノートに訳文掲載予定)

Fluid Dynamics Laboratory), NASAのGISS (Goddard Institute for Space Studies), NCAR (National Centre for Atmospheric Research), RAND (the Rand Corporation), UCLA (University of California, Los Angeles) の各モデルである。GISS, RANDモデルはUCLAモデルの初期のものから開発したものであり三者は多くの共通点を持っている。

GFDLモデルの基本構造はHolloway and Manabe (1971) を見よ。このモデルを用いて多くの数値実験を行っているが、これらの他に2週間予報を行っている (Miyakoda et al., 1971 a; Delson et al., 1971; Miyakoda et al., 1972; Miyakoda, 1973; Miyakoda et al., 1974) 事が注目される。

GISSモデルについてはSomerville et al (1974) 参照。このモデルを用いて観測システムのシミュレーションやデータアシミュレーション, 延長予報の調査等を行っている。

NCARモデルについては Kasahara and Washington (1971), Kasahara et al (1973) を見よ。

RANDモデル及びUCLA 2層モデルについてはGates et al (1971), UCLA 3層モデルはArakawa (1972)を参照。UCLAモデルで近年最も大きく変わった事は成層圏まで含んだ12層モデルを開発したことで以前のモデルの全ての面が新しくなっている (Arakawa and Mintz, 1974)。

Sensitivity experiments

GFDLモデルを基としたモデルを用いて, Rowntree (1972) は, 熱帯東太平洋の海水温の変動が地上のアリュージェン低気圧の位置及び強さの変化の原因であるという, Bjerknesの仮説 (1969) をテストする実験を行った。その結果によると熱帯東太平洋の表面水温が高ければその海水温が最大の場合付近に低気圧が出来, それに伴った下層での収束及び上昇流で中部及び東部太平洋で降水量が増え, 一方, 西太平洋や南アメリカの一部で降水量が減る。それに伴う上層の流れの変化により, 中緯度の東太平洋上に定常的なトラフが出来て, それに伴い亜熱帯ジェットの極大ができる。これに伴ってアリュージェン低気圧は東に偏り深まり, これはBjerknesの仮説と一致している。

Spar (1973 a, b) は2層Mintz-Arakawa モデルを用いて熱帯外の太平洋上で持続的に海水温が暖かかった場合の大気の応答を調べた。Spar (1973 b)によると, 600 mb高度場で見ると海水温偏差を与えた同じ半球では, その影響は極方向に拡がり, 2~3週間後には反対側の半球の高緯度に影響が現れた。一カ月後には, 反対側の半球での影響の大きさは, (海水温偏差を与えた) 同じ半球での大きさと同じ大きさとなった。Spar (1973 c) は同じモデルを用いて, 北半球大陸上の雪線の位置に対する大循環の反応を調べた。Spar (1973 c)のこの一連の調査によると, 適当な大きさの海面温度の変化を持続的又は一時的に与えた場合のどちらの場合でも, 大気の上層, 下層の流れの場に著しい違いが生じ得ることが解った。しかし, 彼は predictability (予報限界)

が1カ月以上あるという点には疑問を提起しており、たとえ、一カ月平均の予報でも難しいだろうと考えている。

Houghton et al (1974) は、NCAR 6層モデルを使い北大西洋に海水温偏差を与えて同様な実験を行って、コントロールケースと較べたが、低気圧の統計量に極立った違いが見られた。

2層Mintz-Arakawaモデルを用いて、Fletcher et al (1973) は11月末～2月末の期間に対して北極海の氷がある場合と無い場合について90日間のシミュレーションを行った。北極海の氷を取り除いた時に起った変化は北アメリカでは非常に小さいが、北アジアの800mb気温は10～15℃変化した。氷がある場合にはアジアの海岸線沖で低気圧が急速にあるいはゆっくり発達して、その強さは北太平洋で最大に達した。氷が無い場合は低気圧の発達はもっと一様でゆっくりだった。北極海の氷が無い場合の平均場では、海水がある場合よりも太平洋の低気圧は伸長せずにより発達していた。Warshaw and Rapp (1973) も又このモデルを使い、北極海の氷がある場合と無い場合について実験を行った。先ず正しい温度場を与えて実験を行い次に基本場の上に、任意の独立に与えた温度誤差を重ね合わせた二つの実験を行った。氷がある場合と無い場合の3つのケースについて、最終日30日目の東西平均値を分散解析した結果、海水を取り除いたために顕著な変化が起った事が確かめられた。

Charney (1974) は亜熱帯砂漠(生成)の力学理論を提案した。何等かの理由で砂漠が出来ると、地表のアルベドは増え全気柱の受けとる熱は減る。この減少によって下降流が起り砂漠を更に乾燥させ、これが砂漠を形成するための不安定化機構である。GISSモデルを用いて、Charneyは地表アルベドが局地的に増えた時にサハラ砂漠が南に拡大するという結果を得た。

Idealized experiments

大循環のある局面を研究するために理想化した条件のもとで、大循環モデルを用いて数値実験することが出来る。例えば、山岳が大循環に及ぼす影響を調べるために地球の山がある時と無い時について実験が行なわれている。12層NCARモデルを用いて、Kasahara et al. (1973) は、山がある場合には波のエネルギーの成層圏への特に波数1による鉛直輸送が非常に増えるという事を見出した。冬期アリューレン上の成層圏に観測される準定常的な低気圧は山のある場合にのみ出来た。しかし、対流圏では、海陸分布による熱効界が卓越しているという。Manabe and Terpsstra (1974) は、同様な実験を、11層、水平格子間隔250kmのGFDLモデルを用いて行った。彼等によると、成層圏ばかりで無く対流圏上部で観測される定常的な長波が出来るためには山が不可欠であるという結論である。彼等の実験によると、山岳により北半球の定常じょう乱の運動エネルギーへのポテンシャルエネルギーの変換が強まり、一方、移動性じょう乱への変換が減って、結果としては全変換量は殆んど変化しない。山がある場合には低気圧の発生頻度は主な山岳域風下側で増加する。山岳の影響により水蒸気移流も変化して水過程が変り、降水量の全球分布が非常に変化する。

Hunt (1973) は極度に理想化した実験を行った。彼は GFDL モデルを 18 層軸対称に変えたモデルを用いて、2 つの実験を行った：1 つは乾燥した場合でありもう一つは水過程を含んだ場合である。どちらの場合も、結果として東西風の分布は成層圏で 110 m/sec を越す赤道東風ジェットが現れ、更に著しいのは、低緯度で東風と西風が現れたことである。乾燥した場合の子午面循環では、中緯度と高緯度とに一つずつ計 2 個の対流圏直接循環が出来た。水過程を入れた場合には、熱帯に閏接循環、亜熱帯に直接循環、中緯度に別の閏接循環、極に直接循環が生じた。これらの結果は予期しないものだったが、それらは平衡を満すという面では矛盾が無い。水過程を含んだ実験では全球平均の運動エネルギーは強い時間変動を示し、これは多分対称不安定を示すものであろう。

訳者あとがき

このレビューの中には、LABORATORY EXPERIMENTS の章が含まれているが省略した。訳にあたっては、不勉強のため理解できない箇所もあったがその様な処は出来るだけ原文に忠実に訳しておいた。その他は抄訳であるが、訳者の力不足のため不明確な点や疑問点が多いと思われるが御許し願いたい。文献リストは全て載せてあるので疑問の点は是非、該当論文を参照願いたい。理論研究の章は、我々の様な長期予報の現場には直接必要はないが、これからはポテンシャルとしてある程度の知識が必要との考えから訳しておいた。

また、訳に際しては、電計室の新田尚氏に大変御世話になりました。厚く御礼申し上げます。

General Circulation of the Atmosphere

Akio Arakawa

- Aihara, M., and H. Imai, Instability of planetary waves in a zonal current, J. Meteorol. Soc. Japan, 49, Special Issue, 553-563, 1971.
- Anderson, D.L.T., and P.F. Noar, The synoptic verisimilitude of a mid-latitude cyclone generated in a Southern Hemisphere general circulation model, Mon. Weather Rev., 102, 613-129, 1974.
- Arakawa, A., Design of the UCLA general circulation model, Tech. Report No. 7, Numerical Simulation of Weather and Climate, Dept. of Meteorology, UCLA, Los Angeles, Calif., 1972.
- Arakawa, A., Modeling clouds and cloud processes for use in climate models, in The physical basis of climate and climate modeling, Report of the GARP Conference held at Stockholm, 29 July - 10 August 1974.
- Arakawa, A., and Y. Mintz, The UCLA atmospheric general circulation model. Workshop Notes, 25 March - 4 April, 1974. Dept. of Meteorology, UCLA, Los Angeles, Calif., 1974.
- Arakawa, A., and W.H. Schubert, Interaction of a cumulus ensemble with the large scale environment, part I, J. Atmos. Sci., 31, 674-701, 1974.
- Baer, F., An alternate scale representation of atmospheric energy spectra, J. Atmos. Sci., 29, 649-664, 1972.
- Baer, F., Energetics of low-order spectral systems, Tellus, 23, 218-231, 1971.
- Baer, F., Hemispheric spectral statistics of available potential energy, J. Atmos. Sci., 31, 3-42, 1974.
- Barnett, J.J., The mean meridional temperature behaviour of the stratosphere from November 1970 to November 1971 derived from measurements by the selective chopper radiometer on Nimbus IV, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 100, 505-530, 1974.
- Barros, V.R., and Wiin-Nielsen, On quasi-geostrophic turbulence: a numerical experiment, J. Atmos. Sci., 31, 609-621, 1974.
- Bjerknes, J., Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific, Mon. Weather Rev., 97, 163-172, 1969.
- Budyko, M.I., The heat balance of the earth's surface (trans. by N.A. Stepanova), Washington, D.C., U.S. Weather Bureau, 250 pp., 1958.
- Charney, J.G., Dynamics of deserts and drought in the Sahel, in The physical basis of climate and climate modeling, Report of the GARP Study Conference held at Stockholm, 29 July - 10 August 1974.
- Charney, J.G., Geostrophic turbulence, J. Atmos. Sci., 28, 1087-1095, 1971.
- Charney, J.G., Planetary fluid dynamics, Dynamic Meteorology, (Edited by P. Morel), D. Reidel Publishing Co., Boston, Massachusetts, 1973.

- Chiu, W.C., On the atmospheric kinetic energy spectrum and its estimation at some selected stations, J. Atmos. Sci., 30, 377-391, 1973.
- Clark, J.H.E., The vertical propagation of forced atmospheric planetary waves, J. Atmos. Sci., 29, 1430-1451, 1972.
- Corby, G.A., A. Gilchrist, and R.L. Newson, A general circulation model of the atmosphere suitable for long period integrations, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 98, 809-832, 1972.
- Cunnold, D., F. Alyea, N. Phillips, and R. Prinn, A three-dimensional dynamical-chemical model of atmospheric ozone, J. Atmos. Sci., 32, 1975.
- Deardorff, J.W., Parameterization of the planetary boundary layer for use in general circulation models, Mon. Weather Rev., 100, 93-106, 1972.
- Deland, R.J., Analysis of nimbus 3 SIRS radiance data: traveling planetary-scale waves in the stratospheric temperature field, Mon. Weather Rev., 101, 132-140, 1973a.
- Deland, R.J., Spectral analysis of traveling planetary scale waves: vertical structure in middle latitudes of northern hemisphere, Tellus, 25, 355-373, 1973b.
- Delsol, F., K. Miyakoda, and R.H. Clarke, Parameterized processes in the surface boundary layer of an atmospheric circulation model, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 97, 181-208, 1971.
- Derome, J., and A. Wiin-Nielsen, The response of a middle-latitude model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources, Mon. Weather Rev., 99, 564-576, 1971.
- Dickinson, R.E., Baroclinic instability of an unbounded zonal shear flow in a compressible atmosphere, J. Atmos. Sci., 30, 1520-1527, 1973.
- Dickinson, R.E., Development of a Rossby wave critical level, J. Atmos. Sci., 27, 627-633, 1970.
- Dickinson, R.E., and F. J. Clare, Numerical study of the unstable modes of a hyperbolic-tangent barotropic shear flow, J. Atmos. Sci., 30, 1035-1044, 1973.
- Dopplick, T.G., Radiative heating of the global atmosphere, J. Atmos. Sci., 29, 1278-1294, 1972.
- Dopplick, T.G., Radiative heating in the atmosphere, in The general circulation of the tropical atmosphere and interactions with extratropical latitudes, Vol. II, by Newell et al., the MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1974.
- Dopplick, T.G., The energetics of the lower stratosphere including radiative effects, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 97, 209-237, 1971.
- Dyer, A.J., Do ghost balloons measure eulerian mean velocities?, J. Atmos. Sci., 30, 510-513, 1973.
- Fischer, G., and V. Renner, Numerical and analytical studies on the energy conversions in a baroclinic model, J. Atmos. Sci., 28, 512-522, 1971.
- Fisher, P.W., and A. Wiin-Nielsen, On baroclinic instability of ultra-long waves, Tellus, 23, 270-284, 1971.
- Fletcher, J.O., Y. Mintz, A. Arakawa, and T. Fox, Numerical simu-

- lation of the influence of Arctic sea ice on climate, Energy fluxes over polar surfaces, W.M.O. Tech. Note, No. 129, 1973.
- Fritz, S., and S.D. Soules, Large-scale temperature changes in the stratosphere observed from Nimbus III, J. Atmos. Sci., 27, 1091-1097, 1970.
- Fritz, S., and S.D. Soules, Planetary variations of stratospheric temperatures, Mon. Weather Rev., 100, 582-589, 1972.
- García, R.V., and R. Norscini, A contribution to the baroclinic instability problem, Tellus, 22, 239-250, 1970.
- Gates, W., The January global climate simulated by the two-level Mintz-Arakawa model: a comparison with observation, R-1005-ARPA, The Rand Corporation, Santa Monica, California, 408 pp., 1972a.
- Gates, W.L., Analysis of the mean forcing fields simulated by the two-level Mintz-Arakawa atmospheric model, R-958-ARPA, The Rand Corporation, Santa Monica, California, 43 pp., 1972b.
- Gates, W.L., E.S. Batten, A.B. Kahle, and A.B. Nelson, A documentation of the Mintz-Arakawa two-level atmospheric general circulation model, Rand Report R-877-ARPA, 1971.
- Geisler, J.E., and R.E. Dickinson, Numerical study of an interacting Rossby wave and barotropic zonal flow near a critical level, J. Atmos. Sci., 31, 946-955, 1974.
- Gilchrist, A., G.A. Corby, and R.L. Newson, A numerical experiment using a general circulation model of the atmosphere, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 99, 2-34, 1973.
- Gill, A.E., The stability of planetary waves on an infinite beta-plane, Geophys. Fluid Dyn., 6, 29-47, 1974.
- Green, J.A.A., Transfer properties of the large-scale eddies and the general circulation of the atmosphere, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 96, 157-185, 1970.
- Hadlock, R.K., J.Y. Na, and P.H. Stone, Direct thermal verification of symmetric baroclinic instability, J. Atmos. Sci., 29, 1391-1393, 1972.
- Hart, J.E., A note on the baroclinic instability of general time-dependent basic fields of the Eady type, J. Atmos. Sci., 28, 808-809, 1971.
- Hart, J.E., On the behavior of large-amplitude baroclinic waves, J. Atmos. Sci., 30, 1017-1034, 1973.
- Hartmann, D.L., Time spectral analysis of mid-latitude disturbances, Mon. Weather Rev., 102, 348-362, 1974.
- Haurwitz, F., and W.R. Kuhn, The distribution of tropospheric planetary radiation in the southern hemisphere, J. Appl. Meteorol., 13, 417-429, 1974.
- Hayashi, Y., Spectral analysis of tropical disturbances appearing in a GFDL general circulation model, J. Atmos. Sci., 31, 180-218, 1974.
- Hide, R., Some laboratory experiments on free thermal convection in a rotating fluid subject to a horizontal temperature gradient and their relation to the theory of the global atmospheric circulation, in The global circulation of the atmosphere, (G.A. Corby, Ed.), London, Roy. Meteorol. Soc., 196-221, 1970.
- Hirota, I., Excitation of planetary Rossby waves in the winter

- stratosphere by periodic forcing, J. Meteorol. Soc. Japan, 49, Special Issue, 439-449, 1971.
- Holloway, J.L., Jr., and Manabe, S., Simulation of climate by a global general circulation model. I. Hydrologic cycle and heat balance, Mon. Weather Rev., 99, 335-370, 1971.
- Holloway, J.L., Jr., M.J. Spelman, and S. Manabe, Latitude-longitude grid suitable for numerical time integration of a global atmospheric model, Mon. Weather Rev., 101, 69-78, 1973.
- Holopainen, E.O., An observational study of the energy balance of the stationary disturbances in the atmosphere, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 96, 626-644, 1970.
- Holton, J.R., Forcing of mean flows by stationary waves, J. Atmos. Sci., 31, 942-945, 1974.
- Hoskins, B.J., Atmospheric frontogenesis models: some solutions, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 97, 139-153, 1971.
- Hoskins, B.J., Stability of the Rossby-Haurwitz wave, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 99, 723-745, 1973.
- Hoskins, B.J., and F.P. Bretherton, Atmospheric frontogenesis models: mathematical formulation and solution, J. Atmos. Sci., 29, 11-37, 1972.
- Hoskins, B.J., and A. Hollingsworth, On the simplest example of the barotropic instability of Rossby wave motion, J. Atmos. Sci., 30, 150-153, 1973.
- Houghton, D.D., J.E. Kutzbach, M. McClintock, and D. Suchman, Response of a general circulation model to a sea temperature perturbation, J. Atmos. Sci., 31, 857-868, 1974.
- Hunt, B.G., Zonally symmetric global general circulation models with and without the hydrologic cycle, Tellus, 25, 337-354, 1973.
- Jastrow, R., and M. Halem, Simulation studies related to GARP, Bull. Amer. Meteor. Soc., 51, 490-513, 1973.
- Julian, P.R., and A.K. Cline, The direct estimation of spatial wavenumber spectra of atmospheric variables, J. Atmos. Sci., 31, 1526-1539, 1974.
- Julian, P.R., W.M. Washington, L. Hembree and C. Ridley, On the spectral distribution of large-scale kinetic energy, J. Atmos. Sci., 376-387, 1970.
- Kahte, A.B., and F. Haurwitz, The radiation and heat budget of the Mintz-Arakawa model: January, R-1318-ARPA, The Rand Corporation, Santa Monica, California, 59 pp., 1973.
- Kaiser, J.A.C., Heat transfer by symmetrical rotating annulus convection, J. Atmos. Sci., 28, 929-932, 1971.
- Kaiser, J.A.C., Rotating deep annulus convection. part 2. wave instabilities, vertical stratification, and associated theories, Tellus, 22, 275-287, 1970.
- Kao, S.-K., Wavenumber-frequency spectra of temperature in the free atmosphere, J. Atmos. Sci., 27, 1000-1007, 1970.
- Kao, S.-K., R.L. Jenne, and J.F. Sagendorf, The kinetic energy of large-scale atmospheric motion in wavenumber-frequency space: II. mid-troposphere of the southern hemisphere,

- J. Atmos. Sci., 27, 1008-1020, 1970b.
- Kao, S.-K., and J.F. Sagendorf, The large-scale meridional transport of sensible heat in wavenumber frequency space, Tellus, 22, 172-185, 1970.
- Kao, S.-K., and L.L. Wendell, The kinetic energy of the large-scale atmospheric motion in wavenumber-frequency space: I. northern hemisphere, J. Atmos. Sci., 27, 359-375, 1970.
- Kao, S.-K., C.Y. Tsay, and L.L. Wendell, The meridional transport of angular momentum in wavenumber-frequency space, J. Atmos. Sci., 27, 614-626, 1970a.
- Kasahara, A., and T. Sasamori, Simulation experiments with a 12-layer stratospheric global circulation model. II. Momentum balance and energetics in the stratosphere, J. Atmos. Sci., 31, 408-421, 1974.
- Kasahara, A., T. Sasamori, and W.M. Washington, Simulation experiments with a 12-layer stratospheric global circulation model. I. dynamical effect of the earth's orography and thermal influence of continentality, J. Atmos. Sci., 30, 1229-1251, 1973.
- Kasahara, A. and W.M. Washington, General circulation experiments with a six-layer NCAR model, including orography, cloudiness and surface temperature calculations, J. Atmos. Sci., 28, 657-701, 1971.
- Ketchum, C.B., An experimental study of baroclinic annulus waves at large Taylor number, J. Atmos. Sci., 29, 665-679, 1972.
- Kidson, J.W., D.G. Vincent, and R.E. Newell, Observational studies of the general circulation of the tropics: long term mean values, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 95, 258-287, 1969.
- Kim, J.-W., The influence of large-scale topography and thermally forced planetary circulations, Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles, 1973.
- Kraichnan, R.H., Inertial ranges in two-dimensional turbulence. Phys. Fluids, 10, 1417-1423, 1967.
- Kung, E.C., A diagnosis of adiabatic production and destruction of kinetic energy by the meridional and zonal motions of the atmosphere, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 97, 61-74, 1971.
- Kung, E.C., On the meridional distribution of source and sink terms of the kinetic energy balance, Mon. Weather Rev., 98, 911-916, 1970.
- Kung, E.C., and L.P. Merritt, Kinetic energy sources in large-scale tropical disturbances over the Marshall Islands area, Mon. Weather Rev., 102, 489-502, 1974.
- Kurihara, Y., A statistical-dynamical model of the general circulation of the atmosphere, J. Atmos. Sci., 27, 847-870, 1970.
- Kurihara, Y., Experiments on the seasonal variation of the general circulation in a statistical-dynamical model, J. Atmos. Sci., 30, 25-49, 1973.
- Leith, C.E., Diffusion approximation for two-dimensional turbulence, Phys. Fluids, 11, 671-673, 1968a.
- Leith, C.E., Two-dimensional eddy viscosity coefficients, Proc. Symp. Numerical Weather Prediction, Tokyo, Meteor. Soc. Japan, 41-44, 1968b.

- Lejenas, H., Energetics of a developing wave in the westerlies, Tellus, 25, 20-35, 1973.
- Lilly, D.K., A note on barotropic instability and predictability, J. Atmos. Sci., 30, 145-147, 1973.
- Loesch, A.Z., Resonant interactions between unstable and neutral baroclinic waves: Part I, J. Atmos. Sci., 31, 1177-1201, 1974a.
- Loesch, A.Z., Resonant interactions between unstable and neutral baroclinic waves: Part II, J. Atmos. Sci., 31, 1202-1217, 1974b.
- London, J., and T. Sasamori, Radiative energy budget of the atmosphere, Space Research XI, Berlin, Akademie-Verlag, 639-649, 1971.
- Lorenz, E.N. Barotropic instability of Rossby wave motion, J. Atmos. Sci., 29, 258-264, 1972.
- Lorenz, E.N., The nature of the global circulation of the atmosphere: a present view, in The global circulation of the atmosphere (B.A. Corby, Ed.), London, Roy. Meteorol. Soc., 3-23, 1970.
- Mahlman, J.D., and S. Manabe, Numerical simulation of the stratosphere: Implications for related climate change problems, Proceeding of the Survey Conference Feb. 15-16, 1972 (A.E. Barrington, Ed.), Climate Impact Assessment Program, Department of Transportation, 1972.
- Manabe, S., The use of comprehensive general circulation modeling for studies of the climate and climate variation, in The physical basis of climate and climate modeling, Report of the GARP Study Conference held at Stockholm, 29 July - 10 August 1974.
- Manabe, M., D.G. Hahn, and J.L. Holloway, Jr., The seasonal variation of the tropical circulation as simulated by a global model of the atmosphere, J. Atmos. Sci., 31, 43-83, 1974.
- Manabe, S., J.L. Holloway, Jr., and H.M. Stone, Tropical circulation in a time-integration of a global model of the atmosphere, J. Atmos. Sci., 27, 580-613, 1970.
- Manabe, S., J. Smagorinsky, J. L. Holloway, Jr., and H. M. Stone, Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle, III. Effects of increased horizontal computational resolution, Mon. Weather Rev., 98, 175-212, 1970.
- Manabe, S., and T. B. Terpstra, The effects of mountains on the general circulation of the atmosphere as identified by numerical experiments, J. Atmos. Sci., 31, 3-42, 1974.
- Matsuno, T., A dynamical model of the stratospheric sudden warming, J. Atmos. Sci., 28, 1479-1494, 1971.
- Matsuno, T., Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter northern hemisphere, J. Atmos. Sci., 27, 871-883, 1970.
- McIntyre, M. E., Baroclinic instability of an idealized model of the polar night jet, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 98, 165-174, 1972.
- Merilees, P. E., and T. Warn, The Resolution Implications of geostrophic turbulence, J. Atmos. Sci., 29, 990-991, 1972.

- Miyakoda, K., Cumulative results of testing a meteorological-mathematical model: The description of the model, Proc. Roy. Irish Acad., 73, 99-130, 1973.
- Miyakoda, K., G. D. Hembree, R. F. Strickler, and I. Shulman, Cumulative results of extended forecast experiments, I. Model performance for winter cases, Mon. Weather Rev., 100, 836-855, 1972.
- Miyakoda, K., J. C. Sadler, and G. D. Hembree, An experimental prediction of the tropical atmosphere for the case of march, 1965, J. Atmos. Sci., 102, 571-591, 1974.
- Miyakoda, K., R. W. Moyer, H. Stambler, R. H. Clarke, and R. F. Strickler, A prediction experiment with a global model of the kurihara-grid, J. Meteorol. Soc. Japan, 49, Special Issue, 521-530, 1971a.
- Miyakoda, K., R. F. Strickler, C. J. Nappo, P. L. Baker, and G. D. Hembree, The effect of horizontal grid resolution in an atmospheric circulation model, J. Atmos. Sci., 28, 481-499, 1971b.
- Mintz, Y., A. Katayama, and A. Arakawa, Numerical simulation of the seasonally and inter-annually varying tropospheric circulation, Proc. Survey Conf., CIAP, Department of Transportation, Cambridge, Massachusetts, 194-216, 1972.
- Morel, P., and W. Bandeen, The EOLE experiment: Early results and current objectives, Bull. Amer. Meteorol. Soc., 54, 248-306, 1973.
- Morel, P., and M. Desbois, Mean 200-mb circulation in the southern hemisphere deduced from EOLE balloon flights, J. Atmos. Sci., 31, 394-407, 1974.
- Morel, P., and M. Larcheveque, Relative dispersion of constant-level balloons in the 200-mb general circulation, J. Atmos. Sci., 2189-2196, 1974.
- Mudrick, S. E., A numerical study of frontogenesis, J. Atmos. Sci., 31, 869-892, 1974.
- Murgatroyd, R. G., Structure and dynamics of the stratosphere, in The global circulation of the atmosphere, (G. A. Corby, Ed.), London, Roy. Meteorol. Soc., 159-195, 1970.
- Newell, R. E., G. F. Herman, J. W. Fullmer, W. R. Tahnk, and M. Tanaka, Diagnostic studies of the general circulation of the stratosphere, Proceedings of the international conference on structure, composition and general circulation of the upper and lower atmospheres and possible anthropogenic perturbations, January 14-25, Melbourne, 1974b.
- Newell, R. E., J. W. Kidson, D. G. Vincent, and G. J. Baer, The general circulation of the tropical atmosphere and interactions with extratropical latitudes, Vol. I., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1972.
- Newell, R. E., J. W. Kidson, D. G. Vincent, and G. J. Boer, The general circulation of the tropical atmosphere and interactions with extratropical latitudes, Vol. II., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1974a.
- Newell, R. E., D. G. Vincent, T. G. Dopplick, D. Ferruzza, and J. W. Kidson, The energy balance of the global atmosphere, The Global Circulation of the Atmosphere, edited by G. A. Corby, 42-90, Royal Meteorological Society, London, 1970.

- Newton, C.W., Global angular momentum balance; earth torques and atmospheric fluxes, J. Atmos. Sci., 28, 1329-1341, 1971b.
- Newton, C.W., Mountain torques in the global angular momentum balance; J. Atmos. Sci., 28, 623-628, 1971a.
- Newton, C.W., Southern hemisphere general circulation in relation to global energy and momentum balance requirements, in Meteorology of the Southern Hemisphere, Meteorol. Monogr., 13, No. 35, 215-246, 1972.
- Oort, A.H. and R.M. Rasmusson, On the annual variation of the monthly mean meridional circulation, Mon. Weather Rev., 98, 423-442, 1970.
- Oort, A.H., On the energetics of the mean and eddy circulations in the lower stratosphere, Tellus, 16, 309-327, 1964.
- Oort, A.H., The observed annual cycle in the meridional transport of atmospheric energy, J. Atmos. Sci., 28, 325-339, 1971.
- Oort, A.H., and E.M. Rasmusson, Atmospheric circulation statistics, NOAA Prof. Pap. 5, 323 pp., Nat. Oceanic and Atmos. Admin., Rockville, Md., 1971.
- Oort, A.H., and H.D. Bowman, II, A study of the mountain torque and its interannual variations in the northern hemisphere, J. Atmos. Sci., 31, 1974-1982, 1974.
- Pedlosky, J., Finite-amplitude baroclinic waves, J. Atmos. Sci., 27, 15-30, 1970.
- Pedlosky, J., Finite-amplitude baroclinic waves with small dissipation, J. Atmos. Sci., 28, 587-597, 1971.
- Pedlosky, J., Limit cycles and unstable baroclinic waves, J. Atmos. Sci., 29, 53-63, 1972.
- Pfeffer, G. Buzyna, and W.W. Fowles; Synoptic features and energies of a wave-amplitude vacillation in a rotating, differentially-heated fluid, J. Atmos. Sci., 31, 622-645, 1974.
- Pfeffer, R.L., W.W. Fowles, J. Fein, and J. Buckley, Experimental determinations of the transition between the symmetrical and wave regimes in a rotating differentially-heated annulus of fluid, Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH), 81, 263-271, 1970.
- Quinet, A., Non-linear mechanisms in a non-conservative quasi-geostrophic flow which possesses 30 degrees of freedom, Tellus, 25, 545-559, 1973b.
- Quinet, A., The structure of non-linear processes, Tellus, 25, 536-544, 1973a.
- Raschke, E., Vonder Harr, T.H., W.R. Bandeen, and M. Pasternak, The annual radiation balance of the earth-atmosphere system during 1969-70 from Nimbus 3 measurements, J. Atmos. Sci., 30, 461-464, 1973.
- Rasmusson, E.M., Seasonal variation of tropical humidity parameters, in The general circulation of tropical atmosphere and interactions with extratropical latitudes, Vol. I, by Newell, et al., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1972.
- Romtree, P. R., The influence of tropical east pacific ocean temperatures on the atmosphere, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 98, 290-321, 1972.
- Saltzman, B., Large-scale atmospheric energetics in the wave-

- number domain, Reviews of Geophysics and Space Physics, 8, 289-302, 1970.
- Saltzman, B., and A. D. Vernekar, An equilibrium solution for the axially symmetric components of the earth's macroclimate, J. Geophys. Res., 76, 1498-1524, 1971.
- Saltzman, B., and A. D. Vernekar, Global equilibrium solutions for the zonally averaged macroclimate, J. Geophys. Res., 77, 3936-3945, 1972.
- Sasamori, T., J. London, and D. V. Hoyt, Radiation budget of the southern hemisphere, in Meteorology of the Southern Hemisphere, Meteorol. Monogr., 13, No. 35, 9-23, 1972.
- Saunders, P. M., Comments on "wavenumber-frequency spectra of temperature in the free atmosphere," J. Atmos. Sci., 29, 187-199, 1972.
- Sawyer, J. S., Observational characteristics of atmospheric fluctuations with a time scale of a month, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 96, 610-625, 1970.
- Schneider, S. K., and R. E. Dickinson, Climate Modeling, Reviews Geophys. & Space Phys., 12, 447-493, 1974.
- Seia, J., and S. J. Jacobs, Ageostrophic effects on baroclinic instability, J. Atmos. Sci., 28, 944-953, 1971.
- Seia, J., and A. Wiin-Nielsen, Simulation of the atmospheric annual energy cycle, Mon. Weather Rev., 99, 460-468, 1971.
- Simmons, A. J., Planetary-scale disturbances in the polar winter stratosphere, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 100, 76-108, 1974a.
- Simmons, A. J., Baroclinic instability at the winter stratopause, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 100, 531-540, 1974b.
- Simmons, A. J., The meridional scale of baroclinic waves, J. Atmos. Sci., 31, 1515-1525, 1974c.
- Simons, T. J., The non-linear dynamics of cyclone waves, J. Atmos. Sci., 29, 38-52, 1972a.
- Simons, T. J., On the theory of atmospheric development, Mon. Weather Rev., 100, 145-152, 1972b.
- Smagorinsky, J., Global atmospheric modeling and the numerical simulation of climate, Weather Modification, W. N. Hess (Ed.), Wiley and Sons, New York, 1974.
- Smagorinsky, J., The nature of the global circulation of the atmosphere: a present view, in The global circulation of the atmosphere, (G. A. Corby, Ed.), London, Roy. Meteorol. Soc., 24-41, 1970.
- Somerville, R. C. J., P. H. Stone, M. Halem, J. E. Hansen, J. S. Hogan, L. M. Druryan, G. Russell, A. A. Lacis, W. J. Quirk, and J. Tenenbaum, The GISS model of the global atmosphere, J. Atmos. Sci., 31, 1974.
- Spar, J., Some effects of surface anomalies in a global general circulation model, Mon. Weather Rev., 101, 91-100, 1973a.
- Spar, J., Supplementary notes on sea-surface temperature anomalies and model-generated meteorological histories, Mon. Weather Rev., 101, 767-773, 1973c.
- Spar, J., Transequatorial effects of sea-surface temperature anomalies in a global general circulation model, Mon. Weather

- Rev., 101, 554-563, 1973b.
- Starr, V. P., Physics of negative viscosity phenomena, McGraw-Hill, New York, 254 pp., 1968.
- Starr, V.P., J.P. Peixoto, and N.E. Gaut, Momentum and Zonal kinetic energy balance of the atmosphere from five years of hemispheric data, Tellus, 22, 251-274, 1970.
- Starr, V.P., Remarks on the progress of general circulation studies, Tellus, 25, 1-11, 1973.
- Steinberg, H.L., Numerical simulation of quasi-geostrophic turbulence, Tellus, 25, 233-246, 1973.
- Steinberg, H.L., A. Win-Nielsen, and C.H. Yang, On nonlinear cascades in large-scale atmospheric flow, J. Geophys. Res., 76, 8629-8640, 1971.
- Stone, P.H., Frontogenesis by horizontal wind deformation fields, J. Atmos. Sci., 23, 455-465, 1966.
- Stone, P.H., A simplified radiative-dynamical model for the static stability of rotating atmospheres, J. Atmos. Sci., 29, 405-418, 1972a.
- Stone, P. H., On non-geostrophic baroclinic stability: Part II, J. Atmos. Sci., 27, 721-726, 1970.
- Stone, P. H., On non-geostrophic baroclinic stability: Part III. the momentum and heat transports, J. Atmos. Sci., 29, 419-426, 1972.
- Stone, P. H., The effect of large-scale eddies on climatic change, J. Atmos. Sci., 30, 521-529, 1973.
- Stone, P. H., The meridional structure of baroclinic waves, J. Atmos. Sci., 26, 376-389, 1969.
- Stone, P. H., The meridional variation of the eddy heat fluxes by baroclinic waves and their parameterization, J. Atmos. Sci., 31, 444-456, 1974.
- Stone, P. H., W. J. Quirk, and R. C. J. Somerville, The effect of small-scale vertical mixing of horizontal momentum in a general circulation model, Mon. Weather Rev., 102, 765-771, 1974.
- Stone, P. H., S. Hess, R. Hadlock and P. Ray, Preliminary results of experiments with symmetric baroclinic instabilities, J. Atmos. Sci., 26, 991-996, 1969.
- Tang, C. -M., The stability of continuous baroclinic models with planetary vorticity gradient, Tellus, 23, 285-294, 1971.
- Tsay, C. Y., Analysis of large-scale wave disturbances in the tropics simulated by an NCAR global circulation model, J. Atmos. Sci., 31, 330-339, 1974.
- Van Loon, H., J. J. Taljaard, T. Sasamori, J. London, D. V. Hoyt, K. Labitzke, and C. M. Newton, Meteorology of the southern hemisphere, Meteorol. Monogr., 13, No. 35, 263 pp., 1972.
- Vinnichenko, N. K., The kinetic energy spectrum in the free atmosphere--1 second to 5 years, Tellus, 22, 158-166, 1970.
- Vonder Haar, T. H., and A. H. Oort, New estimate of annual poleward energy transport by northern hemisphere oceans, J. Phys. Oceanogr., 3, 169-172, 1973.
- Vonder Haar, T. H., and V. E. Suomi, Measurements of the earth's

- radiation budget from satellites during a five-year period. Part I: extended time and space means, J. Atmos. Sci., 28, 305-314, 1971.
- Marshaw, M., and R. R. Rapp, An experiment on the sensitivity of a global circulation model, J. Appl. Meteorol., 12, 43-49, 1973.
- Washington, W. M., and A. Kasahara, A January simulation experiment with the two-layer version of the NCAR global circulation model, Mon. Weather Rev., 98, 559-580, 1970.
- Webster, P. J., and D. G. Curtin, Interpretations of the EOLE experiment I. temporal variation of Eulerian quantities, J. Atmos. Sci., 31, 1860-1875, 1974.
- Webster, P. J., and J. L. Keller, Strong long-period tropospheric and stratospheric rhythm in the southern hemisphere, Nature, 248, 212-213, 1974.
- Welck, R. E., A. Kasahara, W. M. Washington, and G. De Santo, Effect of horizontal resolution in a finite-difference model of the general circulation, Mon. Weather Rev., 99, 673-683, 1971.
- Wetherald, R. T., and S. Manabe, Response of the joint ocean-atmosphere model to the seasonal variation of the solar radiation, Mon. Weather Rev., 100, 42-59, 1972.
- Win-Nielsen, A., A study of the baroclinic instability problem and the lower boundary condition, J. Geophys. Res., 76, 6497-6505, 1971.
- Win-Nielsen, A., Simulations of the annual variation of the zonally averaged state of the atmosphere, Geofys. Publik., 28, 1-45, 1972.
- Win-Nielsen, A. and J. Sela, On the transport of quasi-geostrophic potential vorticity, Mon. Weather Rev., 99, 447-459, 1972.
- Williams, G. P., Baroclinic annulus waves, J. Fluid Mech., 49, 417-449, 1971.
- Williams, G. P., Generalized eddy waves, J. Fluid Mech., 62, 643-655, 1972.
- Williams, G. P., The field distributions and balances in a baroclinic annulus wave, Mon. Weather Rev., 100, 29-41, 1972.
- Williams, G. P., and J. B. Robinson, Generalized eddy waves with Ekman pumping, J. Atmos. Sci., 31, 1768-1796, 1974.
- Williams, R. T., Quasi-geostrophic versus non-geostrophic frontogenesis, J. Atmos. Sci., 29, 3-10, 1972.
- Wilson, M. A. G., Statistical-dynamical modeling of the atmosphere, Internal Scientific Report, No. 17, Commonwealth Meteorology Research Centre, 53 pp., 1973.
- Yamasaki, H., and H. Wada, Barotropic instability of an easterly zonal current, J. Meteorol. Soc. Japan, 50, 110-121, 1972.

Additional Bibliography

- Adem, J., A critical appraisal of simple climatic models, in The physical basis of climate and climate modeling, Report of the GARP Study Conference held at Stockholm, 29 July - 10 August, 1974.

- based on the semi-spectral method, Mon. Weather Rev., 102, 3-16, 1974.
- Hunt, G.E., Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 99, 346-369, 1973.
- Kao, S.K., and R.J. Kuczek, The kinetic energy of large-scale atmospheric motion in wavenumber-frequency space: III. the tropics, J. Atmos. Sci., 30, 308-312, 1973.
- Kasahara, A., and D. Williamson, Evaluation of tropical wind and reference pressure measurements: numerical experiments for observing systems, Tellus, 24, 100-115, 1972.
- Keutner, J., Cloud bands in the earth's atmosphere, Tellus, 23, 404-425, 1971.
- Kikuchi, Y., Influence of mountains and land-sea distribution on blocking action, J. Meteorol. Soc. Japan, 49, Special Issue, 564-572, 1971.
- Kraus, E.B., Atmosphere-Ocean Interaction, Clarendon Press, Oxford, 1-268, 1972.
- Kung, E.C., and P.J. Smith, Problems of large-scale kinetic energy balance--a diagnostic analysis in GARP, Bull. Amer. Meteorol. Soc., 55, 768-777, 1974.
- Kurbatkín, G.P., Ultralong atmospheric waves and a long-range forecasting, Tellus, 24, 499-513, 1972.
- Kurihara, Y., Seasonal variation of temperature in an atmosphere at rest, J. Meteorol. Soc. Japan, 49, Special Issue, 537-544, 1971.
- Kutzbach, J.E., Diagnostic studies of past climates, in The physical basis of climate and climate modeling, Report of the GARP Study Conference held at Stockholm, 29 July - 10 August 1974.
- Labitzke, K., Temperature changes in the mesosphere and stratosphere connected with circulation changes in winter, J. Atmos. Sci., 29, 756-766, 1972.
- Labitzke, K., and H. Van Loon, The stratosphere in the southern hemisphere, in Meteorology of the Southern Hemisphere, Meteorol. Monogr., 13, No. 35, 113-138, 1972.
- Leith, C.E., Atmospheric predictability and two-dimensional turbulence, J. Atmos. Sci., 28, 145-161, 1971.
- Leith, C.E., The design of a statistical-dynamical climate model and statistical constraints on the predictability of climate, in The Physical basis of climate and climate modeling, Report of the GARP Study Conference held at Stockholm, 29 July-10 August, 1974.
- Leith, C.E., The standard error of time-average estimates of climatic means, J. Appl. Meteorol., 12, 1066-1069, 1973.
- Leovy, C.B. and T. Ackerman, Evidence for high-frequency synoptic disturbances near the stratopause, J. Atmos. Sci., 30, 940-942, 1973.
- Lilly, D.K., Numerical simulation studies of two-dimensional turbulence: II. stability and predictability studies, Geophys. Fluid Dynamics, 4, 1-28, 1972.
- Lilly, D.K., Wave momentum flux--A GARP problem, Bull. Amer.

- Meteorol. Soc., 53, 17-23, 1972.
- Lin, J.T., Relative dispersion in the enstrophy-cascading inertial range of homogeneous two-dimensional turbulence, J. Atmos. Sci., 29, 394-396, 1972.
- Lorenz, E.N., Climatic change as a mathematical problem, J. Appl. Meteorol., 9, 325-329, 1970.
- Lorenz, E.N., On the existence of extended range predictability, J. Appl. Meteorol., 12, 543-546, 1973.
- Lorenz, E.N., Climatic predictability, in The physical basis of climate and climate modeling, Report of the GARP Study Conference held at Stockholm, 29 July - 10 August, 1974.
- MacCracken, M.C., Zonal atmospheric model ZAM2, Proceedings of the Second Conference on the Climatic Assessment Program, November 14-17, 1972, Boston, Massachusetts, 298-320, 1973.
- Mahlman, J.D., Eddy transfer processes in the stratosphere during major and 'minor' breakdowns of the polar night vortex, J. Geophys. Res., 75, 1701-1705, 1970.
- Mahlman, J.D., On the maintenance of the polar front jet stream, J. Atmos. Sci., 30, 544-557, 1973.
- Manson, A.H., J.B. Gregory, and D.G. Stephenson, Winds and wave motions to 110 km at mid-latitudes. I. partial reflection radiowave soundings, J. Atmos. Sci., 31, 2207-2215, 1974.
- McInnis, D.H., and E.C. Kung, A study of subsynoptic scale energy transformations, Mon. Weather Rev., 100, 126-132, 1972.
- McIntyre, M.E., On the non-separable baroclinic parallel flow instability problem, J. Fluid Mech., 40, 273-306, 1970.
- Meyer, W.D., A diagnostic numerical study of the semiannual variation of the zonal wind in the tropical stratosphere and mesosphere, J. Atmos. Sci., 27, 820-830, 1970.
- Miyakoda, K., R.F. Strickler, and G.D. Hembree, Numerical simulation of the breakdown of a polar-night vortex in the stratosphere, J. Atmos. Sci., 27, 139-154, 1970.
- Miyakoda, K., and L. Umschied, Jr., Effects of an equatorial "wall" on an atmospheric model, Mon. Weather Rev., 101, 603-616, 1973.
- Miller, D.B., and R.G. Feddes, Global atlas of relative cloud cover 1967-1970 based on data from meteorological satellites, National Environmental Satellite Service, NOAA, Washington, D.C., 1973.
- Miller, A.J., J.A. Brown, and K.A. Campana, A study of the energetics of an upper stratospheric warming (1969-1970), Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 98, 730-744, 1972.
- Namias, J., Experiments in objectively predicting some atmospheric and oceanic variables for the winter of 1971-72, J. Appl. Meteorol., 11, 1164-1174, 1972.
- Namias, J., Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil, Tellus, 24, 336-343, 1972.
- Namias, J., Seasonal interactions between the north pacific ocean and the atmosphere during the 1960's, Mon. Weather Rev., 173-192, 1969.
- Namias, J., The 1968-69 winter as an outgrowth of sea and air

- coupling during antecedent seasons, J. Phys. Oceanogr., 1, 65-81, 1971.
- Namias, J., Thermal communication between the sea surface and the lower troposphere, J. Phys. Oceanogr., 3, 373-378, 1973.
- Newell, A.C., The post bifurcation stage of baroclinic instability, J. Atmos. Sci., 29, 64-76, 1972.
- Nicholas, G.W., D.N. Hovland, and A.D. Belmont, Determination of stratospheric temperature and height gradients from Nimbus 3 radiation data, Mon. Weather Rev., 101, 141-149, 1973.
- Oort, A.H., On the variability of the general circulation of the atmosphere as deduced from aerological data, in The physical basis of climate modeling, Report of the GARP Study Conference held at Stockholm, 29 July - 10 August 1974.
- Ooyama, K., A theory on parameterization of cumulus convection, J. Meteor. Soc. Japan, 49, Special Issue, 774-756, 1971.
- Paegle, J.N., and A.E. MacDonald, Short numerical integrations of a three-level spectral quasi-geostrophic model, Mon. Weather Rev., 31, 772-783, 1974.
- Pearce, R.P., Present and future trends in dynamical meteorology, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 99, 407-423, 1973.
- Pedlosky, J., Finite-amplitude baroclinic wave packets, J. Atmos. Sci., 29, 680-686, 1972.
- Peixoto, J.P., Pole to pole divergence of water vapor, Tellus, 22, 17-25, 1970.
- Peskin, R.L., Comments on "relevant dispersion in the enstrophy-cascading inertial range of homogeneous two-dimensional turbulence", J. Atmos. Sci., 30, 733-734, 1973.
- Phillips, N.A., Models for weather prediction, Annual Review of Fluid Mechanics, 2, 251-292, 1970.
- Pittock, A.B., Global meridional interactions in stratosphere and troposphere, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 99, 424-437, 1973.
- Priestley, C.H.B., and R.J. Taylor, On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, Mon. Weather Rev., 100, 81-92, 1972.
- Raschke, E., and W.R. Bandeen, The radiation balance of the planet earth from radiation measurements of the satellite nimbus II, J. Appl. Meteorol., 9, 215-238, 1970.
- Robinson, G.D., Review of climate models, Man's Impact on the Climate, edited by W.H. Matthews, W.W. Kellogg, and G.D. Robinson, 205-215, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1971.
- Rodgers, C.D., Modeling of atmospheric radiation for climatic studies, in The physical basis of climate and climate modeling, Report of the GARP Study Conference held at Stockholm, 29 July - 10 August 1974.
- Saha, K.R., Global distribution of double cloud bands over tropical oceans, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 99, 551-555, 1973.
- Saltzman, B., and C.M. Tang, Analytical study of the evolution of an amplifying baroclinic wave, J. Atmos. Sci., 29, 437-444, 1972.
- Saltzman, B., and C.M. Tang, Mid-tropospheric frontogenesis in an amplifying baroclinic wave, J. Atmos. Sci., 31, 835-839,

- 1974.
- Saltzman, B., and F.E. Irsch, III, Note on the theory of topographically forced planetary waves in the atmosphere, Mon. Weather Rev., 441-444, 1972.
- Sasamori, T., The radiative cooling calculation for application to general circulation experiments, J. Appl. Meteorol., 7, 721-729, 1968.
- Schneider, S.H., Cloudiness as a global climatic feedback mechanism: the effects on the radiation balance and surface temperature of variations in cloudiness, J. Atmos. Sci., 29, 1413-1422, 1972.
- Schneider, S.H., and R.E. Dickinson, Climate modeling methodology, in The physical basis of climate and climate modeling, Report of the GARP Study Conference held at Stockholm, 29 July - 10 August 1974.
- Schneider, S.H., and T. Gal-Chen, Numerical experiments in climate stability, J. Geophys. Res., 78, 6182-6194, 1973.
- Schwerdtfeger, W., Comments on "the mean upper-air flow in southern hemisphere temperate latitudes determined from several years of Ghost balloon flights at 200 and 100 mb", J. Atmos. Sci., 30, 1448, 1973.
- Sellers, W.D., A new global climatic model, J. Appl. Meteorol., 12, 241-254, 1972.
- Shabbar, M., Side-band resonance mechanism in the atmosphere supporting Rossby waves, J. Atmos. Sci., 28, 345-349, 1971.
- Simons, T.J., A note on the non-geostrophic baroclinic stability problem, Tellus, 23, 99-103, 1971.
- Simons, T.J., and D.B. Rao, Nonlinear interaction of waves and zonal current in a two-layer baroclinic model, Tellus, 24, 1-5, 1972.
- Sims, J.E., Meridional transport of mean zonal kinetic energy from five years of hemispheric data, Tellus, 22, 655-662, 1970.
- SMIC, Study of Man's Impact on Climate, Inadvertent climate modification, Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, Massachusetts, 1971.
- Smith, P.J., Midlatitude synoptic scale systems: their kinetic energy budgets and role in the general circulation, Mon. Weather Rev., 101, 757-762, 1973.
- Solot, S.B., and J.K. Angell, The mean upper-air flow in southern hemisphere temperate latitudes determined from several years of Ghost balloon flights at 200 and 100 mb, J. Atmos. Sci., 30, 3-12, 1973.
- Song, R.T., A numerical study of the three-dimensional structure and energetics of unstable disturbances in zonal currents: part I, J. Atmos. Sci., 28, 549-564, 1971.
- Starr, V.P., The parameterization of dynamic processes, Tellus, 25, 219-223, 1973.
- Starr, V.P., and A.H. Oort, Five-year climatic trend for the northern hemisphere, Nature, 242, 310-313, 1973.
- Starr, V.P., and J.E. Sims, Transport of mean zonal kinetic

- energy in the atmosphere, Tellus, 22, 167-171, 1970.
- Steinberg, H.L., On the power law for the kinetic energy spectrum of large scale atmospheric flow, Tellus, 24, 288-292, 1972.
- Stone, P.H., Comments on "ageostrophic effects on baroclinic instability", J. Atmos. Sci., 29, 986-988, 1972.
- Suomi, V.E., A proposed radiation parameterization programme, in The physical basis of climate and climate modeling, Report of the GARP Study Conference held at Stockholm, 29 July - 10 August 1974.
- Taljaard, J.J., Physical features of the southern hemisphere, in Meteorolog of the Southern Hemisphere, Meteorol. Monogr., 13, No. 35, 1-8, 1972.
- Tang, C.-M., Seasonal variation and latitudinal distribution of the instability of two-level quasi-geostrophic waves in horizontal shear, Tellus, 25, 247-255, 1973.
- Tsay, C.-Y., and S.K. Kao, An analysis of wave structure near center of maximum turbulent kinetic energy, Tellus, 26, 299-312, 1974.
- Tsay, C.-Y., and S.K. Kao, An investigation of the spectral structure of atmospheric waves near a jet stream, Tellus, 25, 111-131, 1973.
- Tokioka, T., Non-geostrophic and non-hydrostatic stability of a baroclinic fluid, J. Meteorol. Soc. Japan, 48, 503-520, 1970.
- Van Loon, H., Cloudiness and precipitation in the southern hemisphere, in Meteorolog of the Southern Hemisphere, Meteorol. Monogr., 13, No. 35, 101-111, 1972a.
- Van Loon, H., Pressure in the southern hemisphere, in Meteorology of the Southern Hemisphere, Meteorol. Monogr., 13, No. 35, 59-86, 1972b.
- Van Loon, H., Temperature in the southern hemisphere, in Meteorology of the Southern Hemisphere, Meteorol. Monogr., 13, No. 35, 25-58, 1972c.
- Van Loon, H., Wind in the southern hemisphere, in Meteorology of the Southern Hemisphere, Meteorol. Monogr., 13, No. 35, 87-100, 1972d.
- Vukovich, F.M., The steady-state structure of the ultralong waves produced by heating with a pressure-dependent frictional effect, Mon. Weather Rev., 101, 566-572, 1973.
- Wahl, E.W., Climatological studies of the large-scale circulation in the northern hemisphere. I. zonal and meridional indices at the 700-millibar level, Mon. Weather Rev., 100, 553-564, 1972.
- Washington, W.M., Numerical climatic-change experiments: the effects of man's production of thermal energy, J. Appl. Meteorol., 11, 768-772, 1972.
- Washington, W.M., and A. Kasahara, A january simulation experiment with the two-layer version of the NCAR global circulation model, Mon. Weather Rev., 98, 559-580, 1970.
- Weare, B.C., and F.M. Snell, A diffuse thin cloud atmospheric structure as a feedback mechanism in global climatic modeling,

- J. Atmos. Sci., 31, 1725-1734, 1974.
- Wiin-Nielsen, A., A theoretical study of the annual variation of atmospheric energy, Tellus, 22, 1-16, 1970.
- Wiin-Nielsen, A., On the motion of various vertical modes of transient, very long waves, Tellus, 23, 87-98, 1971a.
- Wiin-Nielsen, A., On the motion of various vertical modes of transient, very long waves. II. the spherical case, Tellus, 23, 207-217, 1971b.
- Williams, J., R.G. Barry, and W.M. Washington, Simulation of the atmospheric circulation using the NCAR global circulation model with ice age boundary conditions, J. Appl. Meteorol., 13, 305-317, 1974.
- Williamson, D.L., and G.L. Browning, Comparison of grids and difference approximations for numerical weather prediction over a sphere, J. Appl. Meteorol., 12, 264-274, 1973.
- Williamson, D.L., and G.L. Browning, Formulation of the lateral boundary conditions for the NCAR limited-area model, J. Appl. Meteorol., 13, 8-16, 1974.
- Williamson, D.L., and W.M. Washington, On the importance of precision for short-range forecasting and climate simulation, J. Appl. Meteorol., 12, 1254-1258, 1973.
- Winston, J.S., Comments on "measurements of the earth's radiation budget from satellites during a five-year period: part I. extended time and space means", with reply by V.E. Suomi and T.H. Vonder Haar, J. Atmos. Sci., 29, 598-607, 1972.
- Wooldridge, G., and E.R. Reiter, Large-scale atmospheric circulation characteristics as evident from ghost balloon data, J. Atmos. Sci., 27, 183-194, 1970.

編集後記

- グロスベッター第15巻2・3号をおくります。発行がおくれたことをお詫びします。
- 長期予報を発展させるためには予報技術の検証もさることながら、大循環論をはじめ、関連する分野の研究成果に関心を払わねばなりません。その意味で廣田さんには成層圏・中間圏の気象衛星による観測資料の最新の解析例を紹介していただいた。古賀さんには前号にひき続き、ブレイコーの論文の重要な引用文献であったボルゼンコフの原論文を紹介していただいた。また田中さんには最新の荒川昭夫さんの大循環の総合報告を紹介していただいた。文献もすべて掲載してこの方面の向学の士の便に供した。
- 現在、長期予報課で作業がすすめられている“南北両半球天気図”の解析資料について、能登さんに紹介していただいた。付図は、全球天気図の一部であるが、近い将来ルーチンとして見ることが出来るようになるだろう。これを機会に、長期予報の分野ではまた一つ、南半球や亜熱帯高気圧の話題が活発になることを期待している。もう一つ、長期予報課で開発をすすめてきた統計力学モデルによる数値実験の一応の集約を朝倉さん、田中さんに紹介していただいた。

以上の方々の御協力で豊富な内容となり、編集子としても発行のおくれの責が少しは軽くなったかと思っています。執筆者の皆さんに厚く御礼申し上げます。

● 会費納入のお願い

今回は第16巻（昭和52年会計年度）にバトンタッチとなりますが、昭和51年度会費（600円）を未納の方はなるべく官署ごとにまとめて至急納入して下さい。

なお、郵便振替口座番号は下記のとおりです。

(1) 郵便振替

口座番号：東京5-165913

加入者名：L・F・グループ

(2) 銀行口座

富士銀行本店営業部（店番号：110）

口座番号：203156、名称：L・F・グループ

代表者：田中康夫