

# グロースベッター

第15巻 第1号

|  |         |    |
|--|---------|----|
| アメリカにおける10日間予報の現状と<br>週間予報客観化への道   | 尾崎 康 一  | 1  |
| 500ミリバールの一単位および5日<br>平均の数値予報の検討(紹介)  | 尾崎 康 一  | 4  |
| ブディコ他:地球の温暖化(紹介)   | 古賀 晴 成  | 15 |
| Summary of "Modelling, Simulation<br>and Prediction of Climatic Change<br>and Crop Production" | 朝 倉 正   | 25 |
| Climatic Change in South, Southeast<br>and East Asia: A summary                                | 吉 野 正 敏 | 31 |
| 1975年度総会・会計報告  |         | 38 |
| 編集後記   | 編 集 部   | 39 |

1977年1月

L. F. グループ

## アメリカにおける10日間予報の現状と週間予報客観化への道

尾崎 康 一\*

1976年11月5～6日、ワシントンのNOAAのNational Meteorological Centerを訪れ、Extended Forecast Division (EFD)において、アメリカの10日間予報の現業作業を見学した。

私に説明をしてくれたのは、主としてJames F. Andrews氏(氏の論文は別に紹介した)であった。このほか新しいモデルを開発したLloyd W. Vanderman氏や週間予報に長い経験を持つF. O'Connor氏ともお会いした。

アメリカにおいては、現在10日間の地上プログノを作成している。このうち5日間までは、つぎの資料(北半球00Z)を基礎にして地上プログノを作成する。

- (1) 500 mb 高度プログノ (84時間までPEそのあとパロトロピック)
- (2) 500 mb 高度変化プログノ
- (3) 500 mb 高度偏差プログノ (平年値からの偏差)
- (4) Thickness 500mb/1000mb プログノ
- (5) 地上気圧プログノ

これらの図を参考にして(5)を修正して最終プロダクトとしてのアメリカの区域の地上プログノを作成するのであるが、この場合過去の実績として、プログノと実況とのエラー特性を主として考慮しながら、プログノを予報官が作成する。

6日から10日までの地上プログノ作成について、上記の資料のほか5日平均図のプログノを付加する。たとえばD+8、D+13などの資料を用いる。D+8とは8日目を中心として前後5日間の500mb高度平均図のプログノである。これは、5日以後の電計資料は誤差が大きくなるので、電計資料をそのまま使用する訳にはゆかないためである。500mb高度のプログノは84時間以後108時間、132時間予報はbarotropic予報を用いている。これは計算機の容量の問題と精度の点で、PEモデルを使用しない。

現在のモデルはVanderman\*\*のモデルで、10日間のプログノの基礎となっている。現業室のプログノには、その過去のプログノに重ねて実況を置いてあり、常にエラー特性を研究しながら地上プログノを作成していた。

なお5日予報のうち2日までは Forecast Division で予報をするが、その基礎になる24時間、48時間のファインメッシュプログノと、EFDの北半球プログノによる予報との結合について、

---

\* 気象庁予報部予報課

\*\* L. W. Vandermanその他(1976): Extended Forecasting with a Global Three-Layer Primitive-Equation Model, National Weather Digest, VOL. 1, No. 1, p. 13~24。

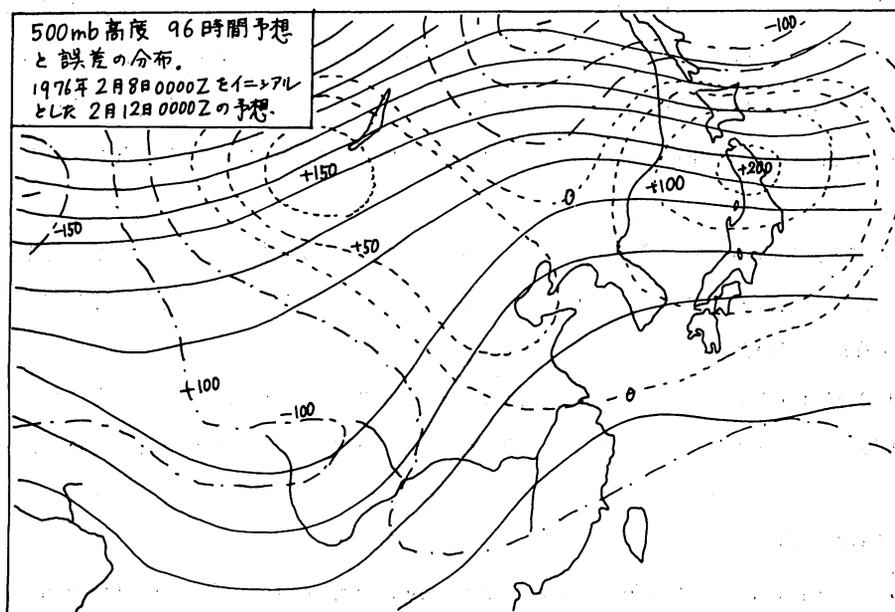
両者の予報官は常に意見を交換していた。なお気象庁予報課で現在使用している(1)波数分析 (2) Zonal Index (3)5日平均図プログノ (4)偏差プログノなどを示して、アメリカ側の意見を求めたが、5日平均図以外は興味を示さなかった。アメリカでは現在は電計プログノの修正による週間予報に徹している。なお詳細については別に述べたい。

ここで週間予報客観化への道を考えてみたい。一般に数値予報を利用するために、その誤差を除去する方法は、(1) 方程式の改善 (2)方程式から生ずる誤差の特性を把握し、客観的に修正する、という2つの道がある。アメリカにおけるNMCの週間予報の方法について、F. Andrewsの文献を紹介したが、NMCにおけるEFDのPEモデルの検証の結果、96時間予報のエラー特性はつぎのものが主なものである。

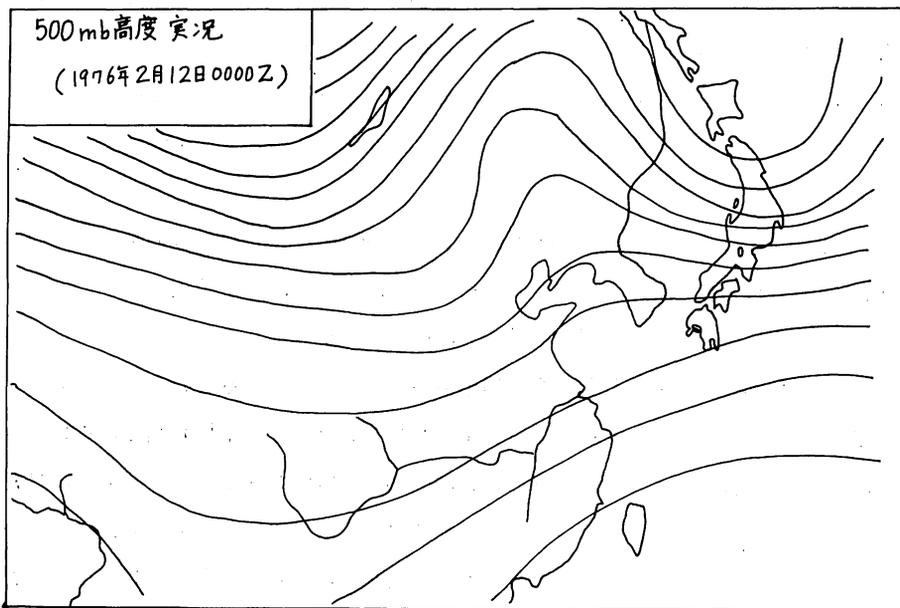
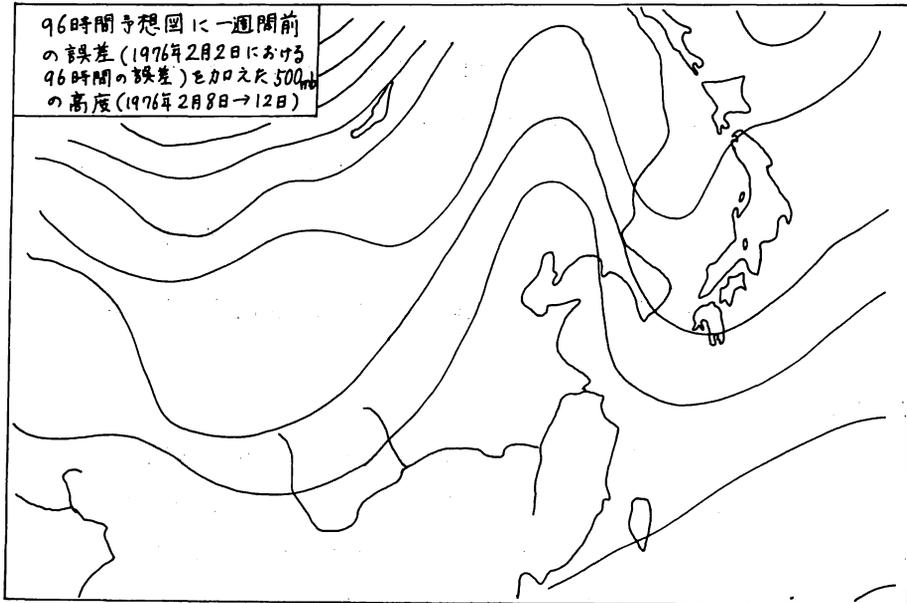
- (1) 48時間予報にあらわれたエラーの特性は、時間の延長と共に増加する。
- (2) トラフにおける正のエラー、リッジにおける負のエラーが顕著である。
- (3) ジェット・マキシマムの北側の正のエラー、ミニマムの南側の負のエラーも明らかである。
- (4) 地形と海洋の影響によって、特定の地域に、持続的なエラーが生ずる。

などである。またこの特性が持続するパターンにおいては、予報のエラーをすぐつぎの時間の予報値に加減することによって、プログノを修正する方法も試みられた。

さてこのようなアメリカの実例を、わが国における数値予報について試みることは、モデルが同一でないので問題があるが、筆者が1975年12月から1976年2月までの12例について調べた結果では、おおむねアメリカにおける特性は、わが国においてみられることを知った。たとえば第1図のように、トラフにおける正のエラー、リッジにおける負のエラーがみられる。また第2図のように、96



第1図



第2図(上), 第3図(下)

時間プログノに, 前回(7日前)のエラーを加減すると, 実況(第3図)に近いものが得られた。また Jet や  $\zeta$  によって誤差を予測して加えることによって比較的よい結果を得た。(昭和51年度気象庁予報検討会資料に掲載予定)

現在気象庁の電計室においては, モデルの改善に日夜努力されておられるが, われわれ週間予報係においては, その利用についての方法を, いかに客観的に実施できるかについて, その方法を調査中である。諸学兄の御教示をお願いしたい。(1976年11月)

Andrews, J. F.,

Evaluation of 500-mb Daily and 5-day Mean  
Numerical Predictions

Monthly Weather Review, Vol. 98, No. 5, May 1970

尾崎 康一\* (紹介)

500 ミルバールの一日単位および5日平均の数値予報の検討

1. まえがき

かなり前から、多くの500ミリバールの予報において、NMC（国内中央気象局）で用いている数値予報モデルに、組織的な誤差が生ずる傾向があることを認めてきた。多くの研究、たとえば、バロトロピック・モデルを用いてのMartin (1958) やDunn (1964) のものや、最近では、バロクリニク・プリミティブ方程式 (P E) モデルを用いたFawcett (1969) などの研究が、このことについて行われてきた。しかし、これらの研究は、36~48時間のプログノについてのものではなかった。1962年にCressman (1963) によって最初に3層のバロクリニク・モデルが導入され、その後1966年6月にShumanとHovermale (1968) によって、バロクリニクP Eモデルが導入され、これらの新しいモデルの導入によって、使用するモデルが変わるにつれて、予報時間は次第に延長された。

これらの予報は、Extended Forecast Division (E F D : 週間予報課) のルーチンの5日予報に、自動的に組み入れられてきた。この5日予報の基礎的方法は、数値予報の出現以前に行なわれていたものと本質的には変わっておらず、経験的方法にすぎなかった。この方法を手短かに述べると、将来の2~6日の期間の、時間平均対流圏中層循環パターンを予報するということである。この予報図は、(D+4) と呼ばれる。これは、4日先を中心日とした(5日平均) 図で、この図から、気温や降水の偏差を予想する。そして、また、72時間から144時間までの4日間の、1日毎の地上天気図のプログノにおける高低気圧のコースや、発達衰弱を決定するためにこの図は用いられる。

1日毎の数値予報を組みこんだ3枚の基礎の5日平均図が、1958年から1965年まで5日予報の作成に用いられた。このことは、Namias (1958) によって十分述べられている。D<sub>0</sub> として知られている第1番目の図は、予報日を中心であって、5日平均循環の初期状態をあらわす。それは、00 GMT の最も新しい3つの高層天気図と、24時間、48時間の数値予報を合成して作る。(D+2) は "Summation" と呼ばれるもので、2日先を中心日としている。そして、これは、96時間までの毎日の4日間の数値予報と、00 GMT の高層天気図からできている。あと1枚の図は「流れ」もし

\*気象庁予報部予報課

くは基本的な循環流であって、数値予報の延長に基本的に必要で、E F Dで開発したモデルから作られている。このモデルは、経験的・物理的推論を基礎としているが、入力として(D+2)を用いて、4日先を中心日とした5日平均の高層天気図を作る。

1965年5月からは、3層モデルをバロトロピック的に144時間まで延長して毎日の500mb 数値予報が行なわれた。(1966年に6層P Eモデルが出発している。)5日予報日である、日曜、火曜、木曜日の00GMTのデータを用いて走らせた数値予報結果によって(D+4)図を作ることが可能になった訳である。即ち、2日から6日先までの5日間の予報を単に平均すればよいからである。

数値予報の発展の結果、予報者は、平均循環を求めることに時間をかけずに、天気予報に時間を余計かけられることになった。熟練した予報者は、毎日の数値予報を検討し、また平均図を考慮し、多くの統計的技術を用いて、5日予報を客観的な予報として作成できる。

毎日の500mb 予報を検討する一つの方法は、1か月間の予報の各日についての予報高度誤差の北半球月平均図を作ることである。おのおのの図は、12~14回分の予報結果の誤差を算術平均したものである。これらの誤差パターンは、その月全体を代表するものとみなされる。というのは、これらの12~14日は、1か月中にはほぼ均等に散っているからである。

この研究の目的は、規則的に作成している6層のP Eモデルによる144時間までの毎日のパターンおよび、5日平均(D+4)図の誤差を議論することである。また、誤差と循環とを結びつけ、モデルの改善によって組織的な誤差が、どのように変り得るかを示すことである。季節毎の誤差換算(RE)のスキルコアーを用いて、D<sub>0</sub>、(D+2)、(D+4)と循環図を相対的に2か年間比較してみた。

## 2. 数値予報の平均誤差

(48, 96, 144 時間予報の月間の誤差分布)

第1図から第6図までは、1965年7月から1969年1月までの7月と1月について、48, 96, 144時間予報の500mb 高度の誤差(10フィート単位)を示す。また、96時間予報の誤差パターンに重ねて、この予報時間に対応する実測値のコンターを描いてある。48時間や144時間に対する実測のコンターも、勿論96時間予報のものと似ているはずである。全ての誤差分布は、P Eモデルになってからの1967年7月のはじめの48時間の誤差を除いては、バロトロピック的なものを示している。1965年8月からの他の月の誤差は、NMCのE F Dで作成されている。これらのパターンを調べてみると、全シーズンに共通なある特徴がうかび上ってくる。エラーの大きさは、普通は48時間で出来たパターンが、96時間までは急に増加する。その後は、ゆっくり増加するか又はそのままである。

多くのトラフとリッジの振巾は、第2図と第5図の96時間のパターンが示すように、トラフの中では正のエラー、リッジの中では負のエラーと、予報は悪くなっている。また、誤差の中心が、ある季節に特定の地域に集中する明らかな傾向がある。この傾向特性は、一般に、Stark(1965)が

示した同じ地域において観測された月平均のトラフやリッジについてもいえることである。正のエラーの主な中心は、トラフ軸の近くやJet Maximumの丁度北の部分においても見出される。また、負のエラーの主な中心は、リッジ軸の近くと、Jet Minimumの南でも見出される。

また、中緯度において冬の間は波数3や4の波が卓越し、夏の間は波数4や5が卓越することがわかる。PEとパロトロピック結合モデルのこれらの一般的特性は、また、3層とPEモデルの両方によって作られた36時間予報にも存在することがわかる(Fawcett 1969)。7月と1月の図が示すように、夏と冬の大スケールのエラーと循環パターンに関することは、次のように議論される。

夏一夏におけるもっとも組織的なエラーの一つは、北アメリカ(第1,2図と3図)にみられる負のエラーの広い地域である。7月に最も大きいこのエラーは、48時間予報であらわれる。そして、夏に常にロッキー山脈とGreat Plains上空にみられるリッジに関係している。また、2つの誤差

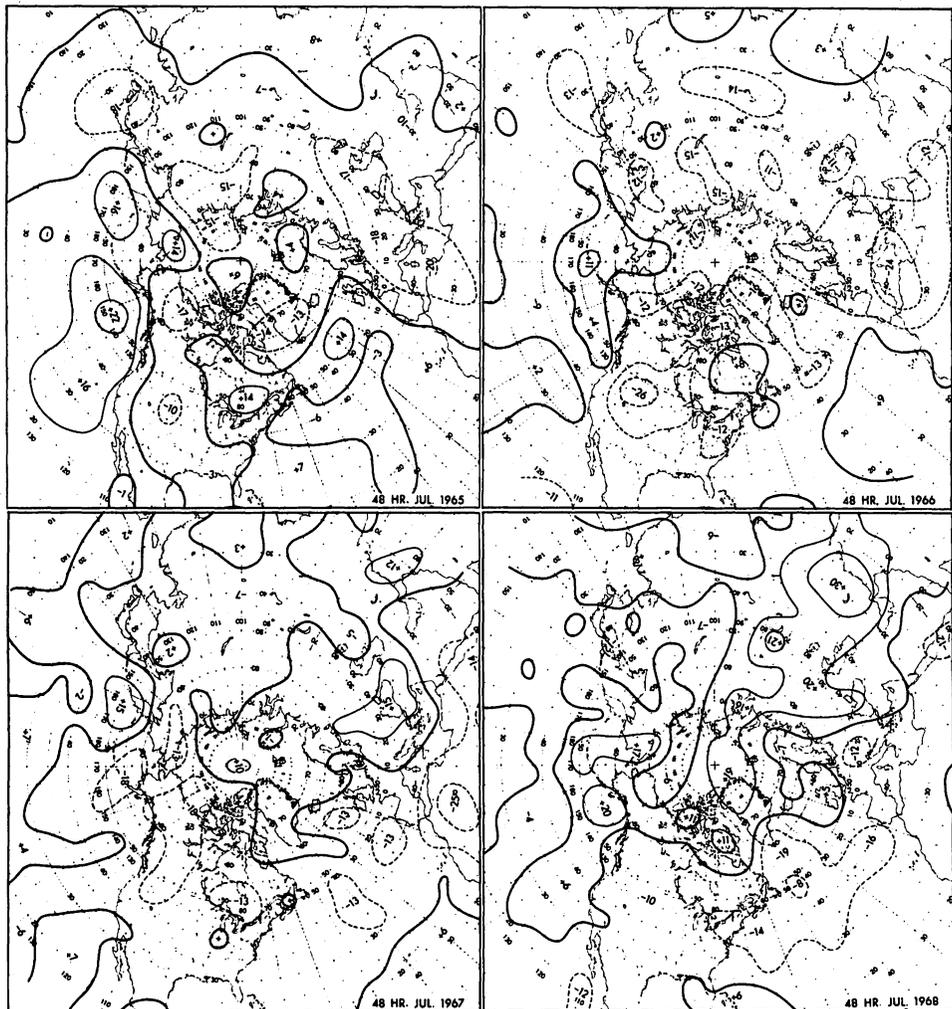


FIGURE 1.—Mean 500-mb 48-hr barotropic error for July 1965 and 1966 and 48-hr PE error for July 1967 and 1968. All error patterns in this and subsequent figures are in tens of feet and are valid at 0000 omt.

の中心が明らかに次の傾向を持っていることに注目しよう。1つはNorthern Plainsであり、もう1つはアラスカからカナダ北部にあるものである。このエラーの多くは、東太平洋におけるトラフからのうずの東方への移流が、あまり早く進むことと関係がありそうである。加えて、1966年の7月だけは、米国の大部分で異常高温が観測されたので、おそらくこの7月のNorthern Plainsの大きなエラーも、モデルにおける熱の入れ方の不足が関係があるようである。

1969年7月の毎日の平均エラーパターンは、以前の各年の7月の図と大きな差はなかった。負のエラーの2つの中心が、96時間の北アメリカに見られ、一つは北西カナダの-340フィートと、他の一つはNorthern Plainsの-270フィートである。

大西洋と東アジアの多くも、また負の予報誤差となる傾向がある。1967年7月と、1968年7月の東大西洋トラフの負のエラーの中心は、容易には説明できない。夏の持続的な負のエラーの第二の地

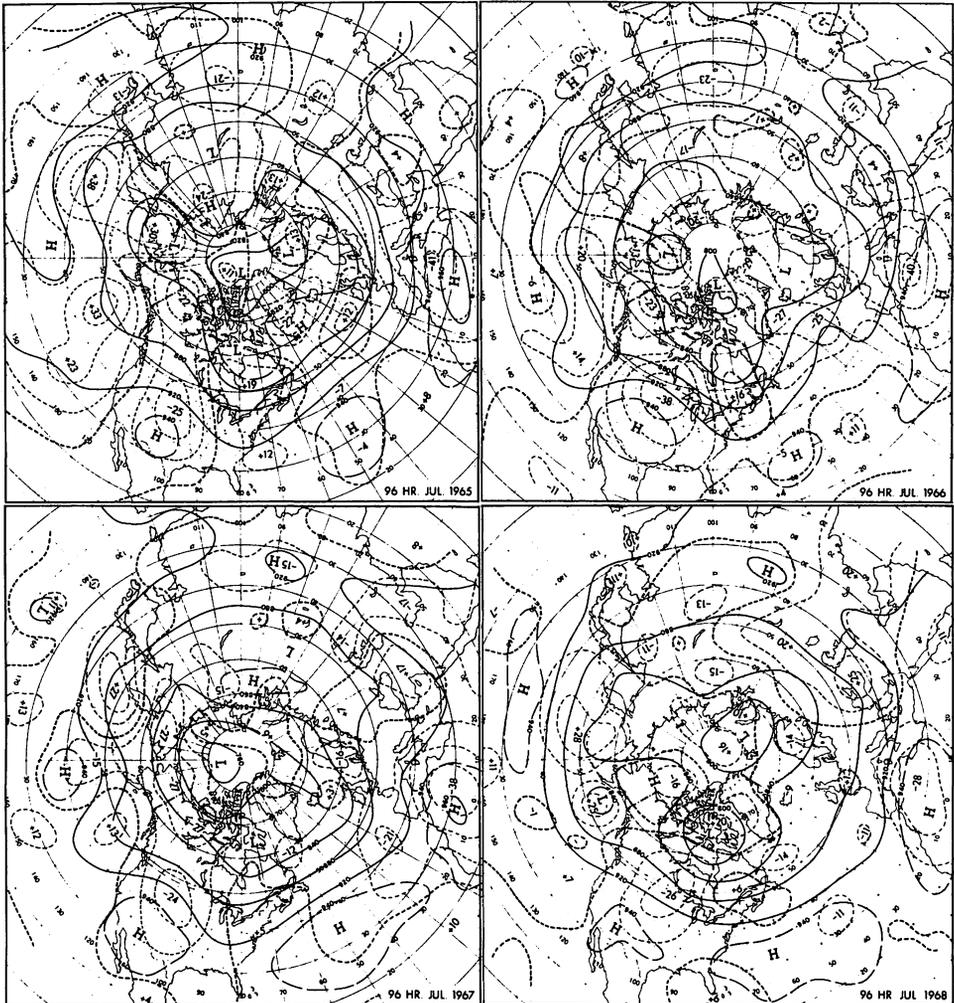


FIGURE 2.—Mean observed 500-mb and 96-hr barotropic error for July 1965, 1966, 1967, and 1968.

域は、地中海と北アフリカである。このエラーは7月に最大となり、地表から大気に運ばれる最大顕熱の中心と完全に一致する (Budyko, 1963)。1969年7月に北アフリカにおいて観測された負のエラーの中心は、144時間で430フィートの最大の値を示した。1967年7月以降の48時間のエラーの減少は、多分P Eモデル(1967年7月)に、太陽放射を入れたからであろう。夏に組織的な正のエラーが現れる唯一の地域は、太平洋の高緯度を横切る地域である。ここに、2つの中心が現れるという傾向もまた、太平洋に2つのトラフがあるというノルマルの循環場の影響である。

冬一冬におけるP E・バロトロピックモデルの最も大きな組織的なエラーは、西太平洋をおおう正のエラーである(第4,5,6図)。それはモデルで正確に計算できない、主熱源を伴った強い傾圧帯によることが原因である。このエラーは、寒い季節が近づくとつれ、その大きさは増加する。そして、このエラーと、通常アジア上空に現れる負のエラーとが結びつくと、アジア大陸の東岸でニ

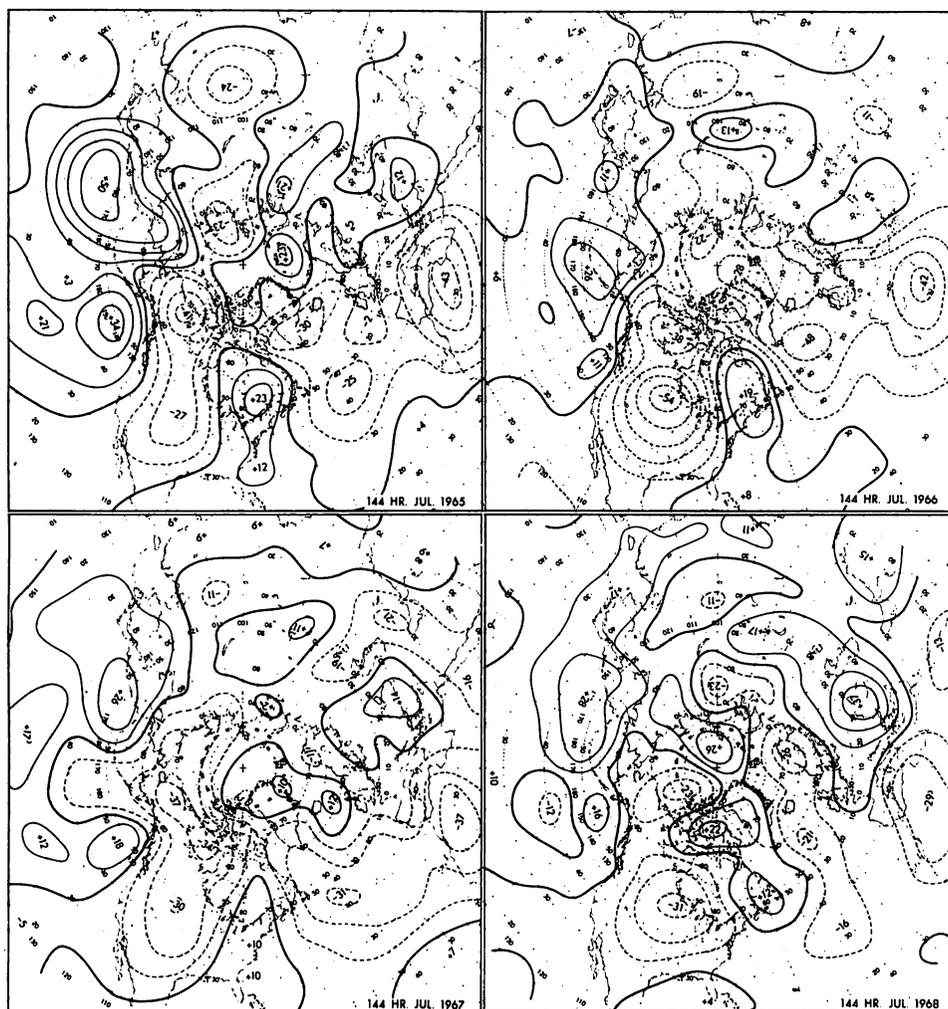


FIGURE 3.—Mean 500-mb 144-hr barotropic error for July 1965, 1966, 1967, and 1968.

セの南風が徐々に大きくなってくる。

中緯度の西風が最大となり、そして、大陸と大洋の熱的コントラストや、海から大気への熱輸送が最大となる1月に、この正のエラーは極大となる。なお、エラーの大きさは、48時間でかなり大きい(第4図)、144時間には、その大きさは2倍となる。このエラーの大きさは、以前の数値予報モデルのそれよりも次第に小さくなってきたが、なお、バロトロピック延長予報において非常に大きい。1969年1月のエラーと、それ以前の年の1月のエラーとを比較すると(第4,5,6図)、エラーの大きさは明らかに小さくなっている。この減少のあるものは、PEモデルへ降水からの潜熱を導入した(1967年2月)ためかもしれない。しかし、一部分はまた、通常的位置から北偏したポーラージェットの軸の位置に関係しているのかもしれない。

北米の東海岸で低気圧が頻ぱんに発生するのは、アジアの沿岸と条件が似ているためである。し

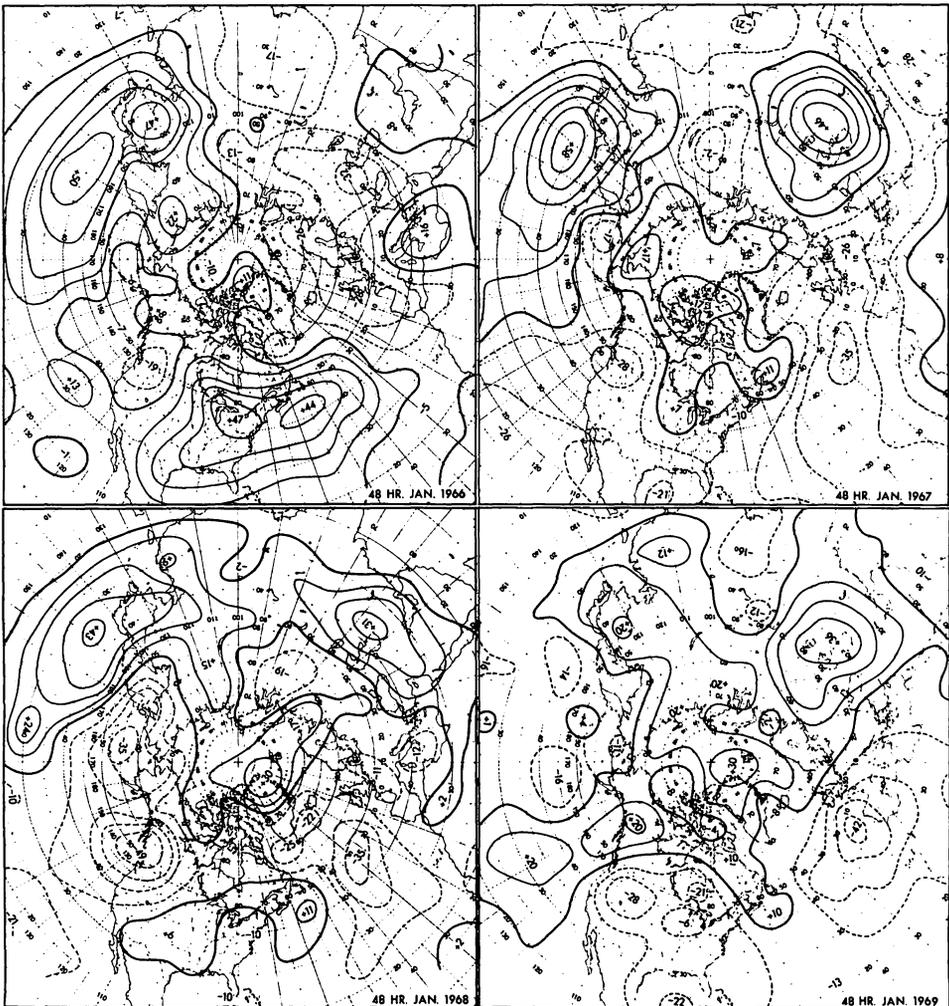


FIGURE 4.—Mean 500-mb 48-hr barotropic error for January 1966 and 1967, and 48-hr PE error for January 1968 and 1969.

かし、冬の平均的な正のエラーは、西太平洋におけるものよりも、北米東岸のものは小さく、48時間以前は常にあまり明瞭ではない。これは地域がせまく、熱的コントラストも小さいので、エラーが小さいのかもしれない。なお、西大西洋の大きな正のエラーを起す2つの循環型があるように思われる。1968年2月に起ったような北米西部を俺うリッジと、東岸近くの通常のトラフよりもさらに深いトラフによって、大きな振巾の流れが見られるが、この流れは、谷の中での大きな正のエラーと関係がある。

第二の型は1966年1月(第5図)にみられる。この型は大西洋と東カナダの強いブロッキングから形成される。その時は、沿岸のトラフは1968年2月にみられるように深くはない。それにもかかわらず、二つの循環は中部大西洋沿岸とポーラージェット軸のすぐ北側に中心をもつ同じ位の大きさの正のエラーを示している。また、冬に常にプラネタリートラフがみられる南東ヨーロッパと南西

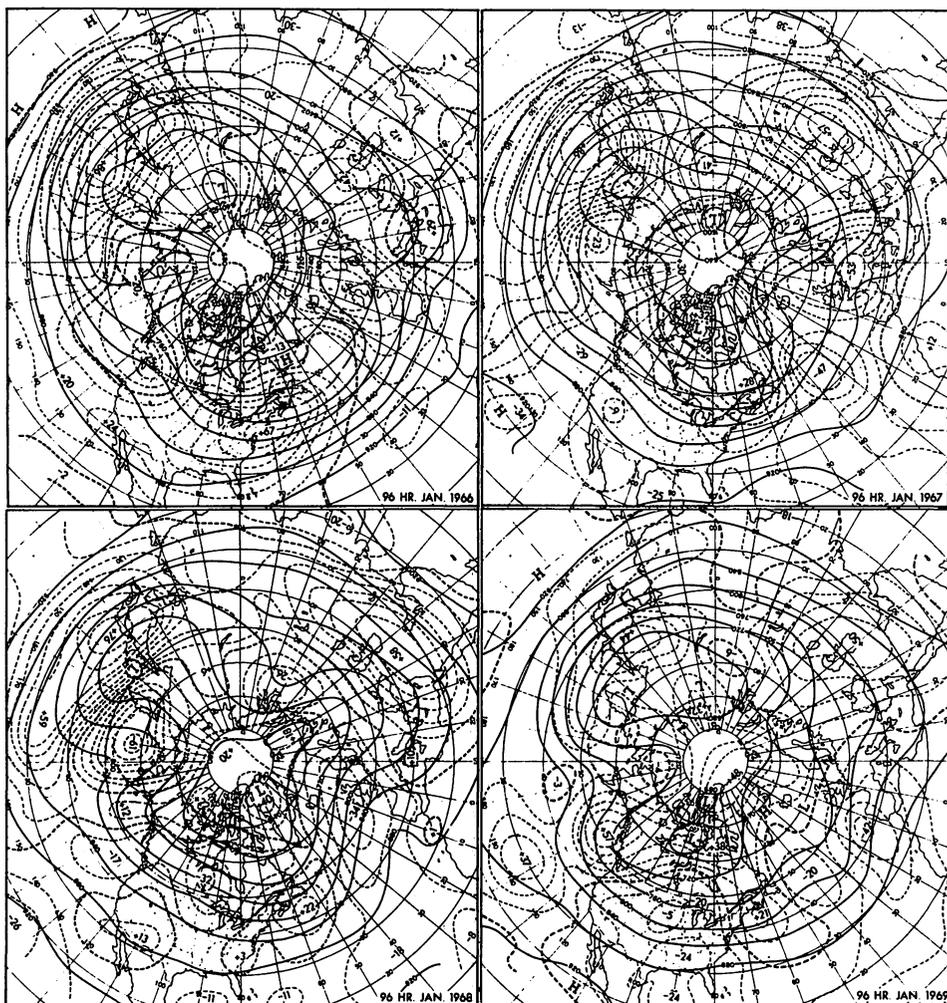


FIGURE 5.—Mean observed 500-mb and 96-hr barotropic error for January 1966, 1967, 1968, and 1969.

アジアでは正のエラーは特に目立って現われる。このエラーは一般に西大西洋のエラーより大きく、西太平洋のものより小さい。

冬における最も持続的な負のエラーは、リッジが循環を支配している東大西洋と、西ヨーロッパを掩っている。負のエラーは、また、ベーリング海にひんぱんに現われ、そこでは1968年1月（第5図）のように、異常に強いリッジに伴って大きな正のエラーが起りやすい。

#### 96時間エラーの月平均値

Weather Bureauでは、1969年の春にMidwestの上流で起った大洪水時の状況調査に対する援助をした。この時、NMCは3月と4月の気温、降水量について、特別に3~4日予報をした。これらの予報のために、入力として00GMTのデータを用い、PEモデルを108時間まで毎日について走らせた。このことは、PEの月平均のエラーパターンと48時間以上のパロトロピックモデルと

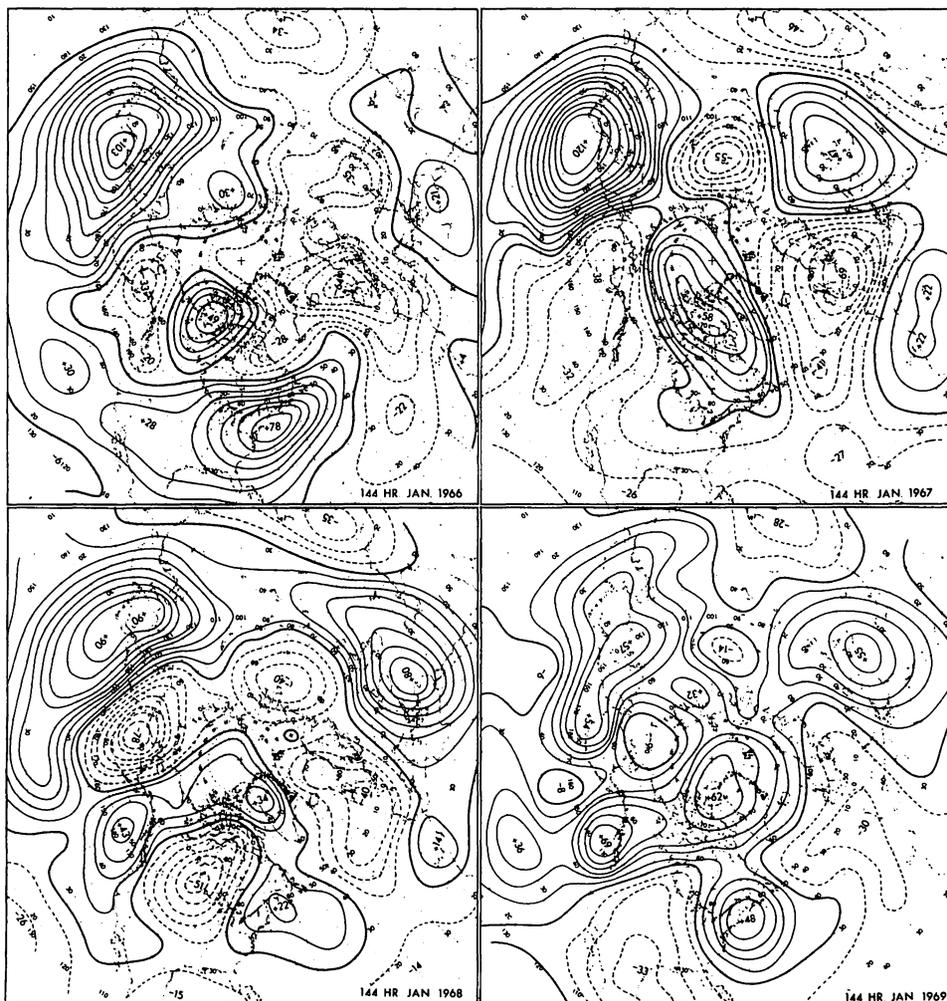


FIGURE 6. Mean 500-mb 144-hr barotropic error for January 1966, 1967, 1968, and 1969.

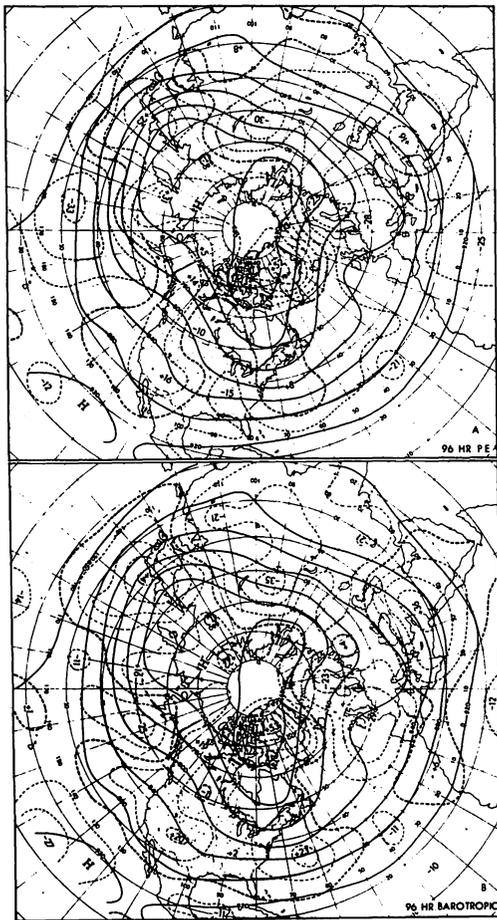


FIGURE 7.—Mean observed 500-mb and 96-hr error for (A) PE and (B) barotropic models for March 1969.

の比較をする最初の機会を与えてくれた。第7図に、1969年3月の22のケースのA (PE) とB (バロトロピックモデル) に対する500mb実況値と96時間予報のエラーを示す。PEモデルは、トラフの深まりをよりよく予報している。しかし、リッジ予報は余り差はない。アメリカでは、PEモデルのエラー傾度はバロトロピックのものより、一般に大きくなった。1969年4月の13ケースについて、A (PE) とB (バロトロピック) の平均500mb観測値と96時間エラーを第8図に示す。北米ではPEモデルの方が、バロトロピックモデルよりも一般には良好

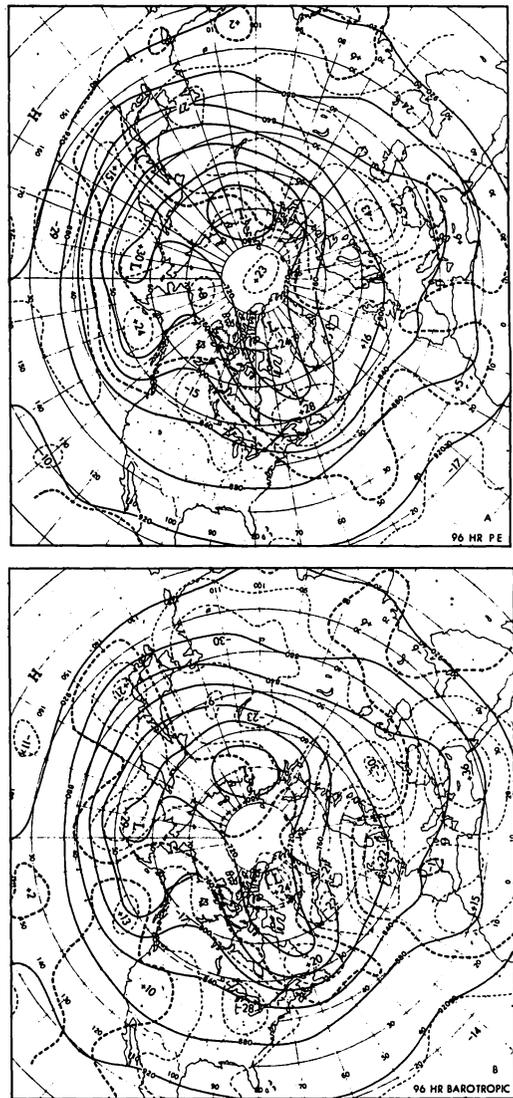


FIGURE 8.—Mean observed 500-mb and 96-hr error for (A) PE and (B) barotropic models for April 1969.

である。というのは、負のエラーは両者に共通しているが、PEモデルの方がエラーが小さいからである。(しかし、3月の96時間については、バロトロピックの方がエラー傾度は小さい)。4月もPEモデルは、アジアと地中海に沿ったトラフについては、バロトロピックよりエラーは小さかった。しかし、4月の東太平洋と西太

西洋のトラフの強さのバロトロピック予報は、PEよりも良かった。いままでに示した限られたデータから、96時間500mb予報の大規模なエラーパターンは、PEとバロトロピックと殆んど差がないことが明らかである。

### 3. 大規模スケールのエラー傾向の除去

大規模スケールのエラーは、地理学的位置に大変影響されている。そしてまた、ある地域では季節的な変化に非常に影響されている。従って、予報された平均循環から、少なくともこの傾向部分を除去することは可能といえよう。次の月の全ての(D+4)予報に対して、前の月の平均の500mbの(D+4)エラーを適用することによって、この除去法が1966~67年の冬の期間について行なわれた。25のケースでは、その予報に対する結果は、半球的なRE Skillが51から57まで増加となったことである。この改善の大部分は中緯度によるものであり、また、西太平洋での正のエラーが除去されたことによるものである。この簡単な方法は、予報日の前日を最終日とするような3~4週間(すなわち、予報期間により近い期間)の平均エラーを使うと、更に改良することができる。予報者は、そこで、過去と現在の平均場を考慮して、この修正された予報を採用するか、又は捨てるかするであろう。修正した予報のパターンは、大部分の地域については、未修正のものと異ならないであろうが、絶対値は大いに異なるであろう。

平均エラーを(D+4)図に適用するこの方法で、予報は改良されるかもしれないが、一方、これらのエラーパターンをあるKey areaで分類すると、更に良い結果が得られるかもしれない。このようなやり方は、Key areaとして東太平洋を選び、イニシャルの平均循環(D<sub>0</sub>)の型によって1965年の夏の北米を掩っていた数値予報高度エラーを分類するやり方で、以前に調査されたことがあり、未発表ながらAndrews(1966)の論文で述べてある。

50°N, 150°Wの近くで、負の偏差を伴っている深いトラフがある場合と、また、同じ場所で正の偏差を伴う強いリッジがある場合の各々について、合成した5日平均のD<sub>0</sub>図が作られた。北米の西岸に沿った一つのトラフと、北西アメリカを掩っている強い負の偏差の中心があるため、リッジ場のケースでは、初期循環は、かなり大きな振巾をもっていた。合成の(D+4)図を、これらトラフ、リッジの場合について作り、実測値と比較した。

東太平洋に深いトラフがある場合の(D+4)予報は、北米の予報をする時には、リッジがある場合よりも良いことがわかった。これは、パターンと高度の絶対値両者とも良く予報され、主なリッジトラフシステムは実際の位置の近くに予報されている。このエラーパターンは、1965年(第2図)7月の96時間エラーによって示されているように、平均パターンの改善を示した。そして、リッジの場合と同様に、中部アメリカを横切って、わずか120フィートのエラー傾度があるだけだった。リッジがある時の(D+4)図の予報は、北米の長波の移動を速く予報して、結果的には、平均580フィートのエラー傾度を示した。

1969年夏のトラフ・リッジのケースについて同様の試験を行なった結果、PE・バロトロピック結合モデルによる結果は、今迄に述べてきた状況と殆んど差はなかった。現在は更に多くのデータを使えるので、他のKey areaや季節を用いて、更に層別化することができるだろう。

Kleinは数値予報高度を入力として用いて、気温と降水の客観予報のための回帰式を作るためにスクリーニング法を用いて成功したが、修正高度場を予報するための同様な回帰式を作るために、スクリーニング法を使えるであろう。この方法や、平均誤差の適用法が、気温や降水量の客観予報のスキルスコアを良くするかどうかは知られていないが、何がしかの改良は行なわれそうである。というのは、回帰式は予報高度のわずかな変化にも大きく影響されるからである。

## 6. 要約

NMCで作成している数値予報の毎日と5日平均上の上層のエラーの月平均は、大部分のトラフ、リッジの振巾の予想を悪くしている。そして、このエラーは平均循環と密接に関係していることを示してきた。毎日のエラーパターンは、一般に48時間までにできて、144時間までは次第に増加する。主なエラーの中心は、高度偏差の観測値と高い相関があり、また、ノルマルの季節循環と共に変化する。

運用中のPEバロトロピックモデルとPEモデルを使って、4日先の(D+4)の毎日と5日平均予報を比較してみると、両モデルとも、全般には、半球的には大体同じ位良く予報している。しかし、PEモデルは、特に夏には、低緯度で96時間先までは、大きな負の高度エラーを示す。これは、明らかに境界の問題によるためであり、PEの海面(1000mb)の予報では、気圧の予報が低くなりすぎることとなって現れる。

1966~67年の冬以来、北半球75~25°Nの間でNMCで用いているモデルは、除々にではあるが確実に改良されてきた。これは季節平均のRE(誤差換算)スキルコアが、2日先(D+2)や4日先(D+4)を中心とした5日平均の予報に対して、増加したことでわかる。大規模な組織的なエラーの除去は、RE Skillによって計算されるように、平均循環の予報の改善をもたらす。循環によってエラーパターンを分類することは、更に良いであろう。そして、それで気温、降水の客観予報を改善することができるであろう。

Будько М. И. , Винников К. Я. ,

Глобальное потепление « Метеорология И Гидрология »,

1976, № 7, 16~26.

## ブディコ他：地球の温暖化

古賀晴成<sup>\*</sup>(紹介)

今世紀60年代中ばから始まった北半球の昇温の原因を解析し、人間活動による大気中のCO<sub>2</sub>濃度の増加を考慮して、将来の気温を予想する。

### 序 論

最近の研究で、現代の気候変動の多くの法則が明らかになった〔6, 13, 15, 24他〕。気象観測の資料から次のようなことがわかった。即ち、今世紀に入って、大気の熱的状況が明らかに変化し、平均地上気温は30年代末まで昇温が続いていたが、その後、寒冷化が始まったこと。その温度変化は、とくに北半球の高緯度で著しく、その振巾は寒候期に大きく、暖候期に小さいことなどである。

また、気温の変動は降水量の変化とも密接な関係があることもわかった。温暖化した時代は、中緯度の大陸内部の平均降水量が減少し、農産物に著しい影響を与えた。このような降水量の変化は、温暖化に伴い平均南北温度勾配が小さくなり、大気循環が弱まるために起こる。大気循環が弱まると、海洋から大陸へ移流する水蒸気が少なくなり、大陸内部の降水量は減少する。

現代の気候変動の根本原因は、おそらく地球表面に到達する短波の放射量が変動するためであろう。火山活動度等の変化により、大気透明度が安定せず、地表面に達する短波の放射量が変化し、気温の変動をもたらす。簡単なモデルを利用して、到達太陽放射量の変化を算出し、現代の気温変化の主な法則を量的に説明することに成功した〔4〕。このことは他の研究でも証明されている〔33, 34他〕。

現代の気候変動は、人間活動に影響を与え、この影響が今後ますます増大していくだろうという予想を幾度となく述べてきた。

また、今まで発表した研究で次のようなことも述べてきた。

人間活動の影響で地球の気候が変化することを、半実験的理論で確認した。現代の気候は、気候形成要素のわずかな変動に敏感に左右されるという結論に達した〔3〕。たとえば大気に入るエネルギーのわずかな減少が、全地球上を氷で覆ってしまう可能性を、またわずかな増加が極地方の氷塊を全て解かしてしまう可能性を秘めている。その後、半実験的モデルやその他の類似したモデルを利用した多くの研究が発表され〔17~21, 31, 32, 36~40 その他〕、ほとんど同じ結論を得ている。

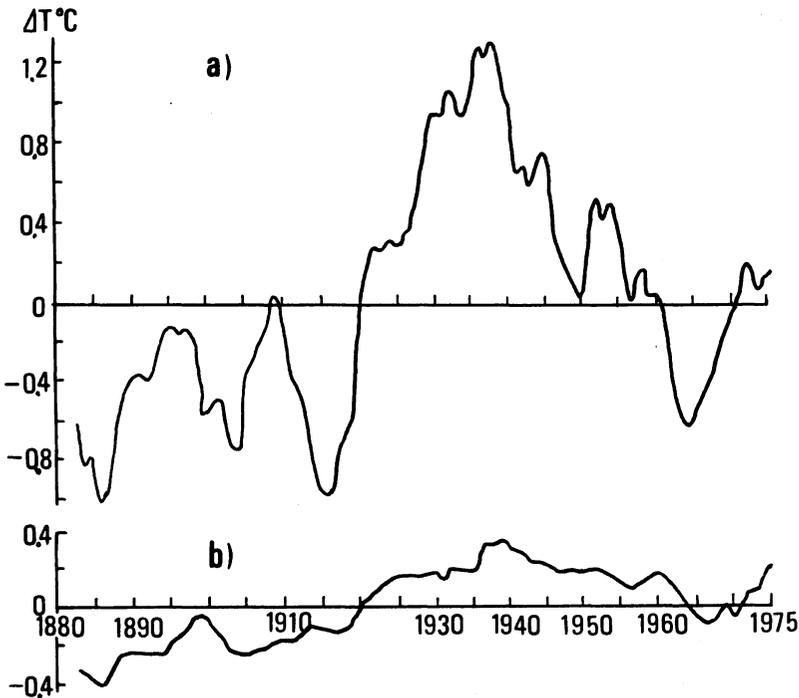
そのうち、ウエザロールドとマナベの研究〔41〕は注目に値する。上述の問題に対して、彼らは

\* 気象庁予報部電計室

一般的な大気循環の理論を利用して同様の結論に達したものである。気候形成要素のわずかな変動が気候に大きな変化をもたらす可能性を指適し、人間活動が気候変動に与える影響を研究する必要性の高いことを示している。

生産エネルギーの増大が、気候に影響を与えるようになるのは21世紀に入ってからで、今世紀末気候に顕著な影響を与えるのは、大気中のCO<sub>2</sub>やエアロゾルの量の増加によるものだろうという評価もある〔5, 29他〕。これらの研究のうち、最初のもは、人間活動によるエアロゾルの気候に与える影響についての吟味が不足しているけれども、エアロゾル量の増加で大気下層の温度が下がる理由を定量的に与えた。すでに19世紀に確かめられていたように、CO<sub>2</sub>量の増加は大気の温室効果を強め、大気下層の温度を高める作用をする。エアロゾル粒子による大気汚染の防止策を採っているため、今後人間活動によるエアロゾルの気候変動に与える影響は、人間活動によるCO<sub>2</sub>の影響に比べ、少なくなってくると考えられる。このことは、次第に温暖化が強まることを示している。上述の研究では、1970年から2000年までの間に人間活動の諸要因の影響で平均地上気温は、約0.5℃高くなるという予想を述べている。

70年代の始めには、最近10年間の気候は寒冷化に向っているとされていた。第1.b図からわかるように、19世紀末から20世紀中頃までの間に符号は1回しか変わっていないことを理由に、



a) 72.5~87.5°N    b) 17.5~87.5°N  
 第1図 北半球の気温偏差 (5年平滑平均)

気候変動に関するほとんどすべての研究で、当時始まった温度降下は当分続くことが確実だと述べられていた。ラムは、70年代の始めに気候変動に関する20以上の予想すべてが、この10年間は寒冷化が続くとしていると述べている〔23〕。彼は、またこの予想は十分な科学的根拠にもとずいたものでないことも示した。このラムの研究後、わずか2年で気候変動が温暖化に向う徴候を示す資料が得られた〔25〕。

この資料は、北大西洋上の熱的状况の特徴を表わし、グリーンランドからノルウェーにかけての海域では、それまでの強い寒冷化の傾向が1970年～1971年の冬から温暖化傾向に変わった。最近の気候変化について、さらに詳細な研究が待たれる。

## 気温変化

現代の気温変化を研究するため、器械観測が始まって以来、1975年までの北半球と特定緯度帯の気温データを解析した〔1〕。

第1. b 図は、北半球の大部分（175°N以北）の気温偏差の永年変化を示している。この値は5年の平滑平均をしたものである（最近の2年間を除いて）。このデータは、観測時代に北半球の気温が本質的に変化し、気温の年平均値の分散が $0.053\text{ (}^\circ\text{C)}^2$ になることを示している。

この分散は、2つの成分、即ち、北半球の気温の本質的な変動による分散と偶然の変動による分散とから成る。

オリバーは、火山活動による大気透明度の変化を考慮したモデルを使って、1968年までの北半球気温の本質的な変動による分散を求める計算を実施した〔33〕。

彼は、このようにして分散の約70%を解明し、残りの約 $0.016\text{ (}^\circ\text{C)}^2$ の分散は、気象学的雑音を表わすと考えた。

最近20～30年間の気候変化に、人間活動の要素（CO<sub>2</sub>, エーロゾルの量等）を考慮すると気象学的雑音は少なくなる。この雑音レベルは我々の知識レベルを表わすと考えられる。

北半球の年平均気温変化は、60年代の前半で下降傾向は終り、最近は上昇傾向を示している。

最近12年間の北半球平均気温の上昇速度 $\beta$ は、 $0.3\text{ }^\circ\text{C}/10$ 年であり、また、“本質的”昇温速度は、95%の確率で $0.1\sim 0.5\text{ }^\circ\text{C}/10$ 年であった。

前にも述べたように、気温変化は高緯度と寒候期にとくに大きな振巾を持っている。

第1. a 図に75°N以北の年平均気温の永年変化を示す。最近12年間のデータによると、この緯度帯の昇温速度は年平均気温で $0.9\text{ }^\circ\text{C}/10$ 年、寒候期の気温で $1.3\text{ }^\circ\text{C}/10$ 年になる。

低緯度と高緯度とでは、温度変化の振巾に差が存在するということは、北半球気温の永年変化が平均南北温度勾配の本質的な変化に伴うものであることを示している〔10〕。

北半球の平均気温が $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 上昇することは、22.5～77.5°Nの緯度帯で平均南北温度勾配が寒候期に対して1%、年平均に対しては0.5%相対的に減少する。また、平均南北温度勾配と中緯度の

大陸内部の降水量との間に関係があるため、北半球の気温変化が大陸内部における農業生産高に影響を及ぼすと述べている研究もある。

## CO<sub>2</sub> の気温に与える影響

化石燃料の消費時に出る CO<sub>2</sub> の濃度が増加し、気候変動をもたらすのではないだろうかという考えは、今世紀30年代にすでに存在していた〔16〕。国際地球観測年で組織的な観測が行なわれ、大気中に含まれる CO<sub>2</sub> の量が増加していることは確かめられている。マウナロア（ハワイ群島）観測所のデータによると、50年代の終り頃から現在まで、CO<sub>2</sub> の量は数%増えている。このことは、遠くはなれた地域でも観測されている。

スカンジナビアの多くの観測所、バロイ（アラスカ）観測所、南極、飛行機観測による観測結果は、大気中の CO<sub>2</sub> の平均含有量の増加速度に対して、実用上同一の評価を与える。

気温や降水量のような気象要素の変動と CO<sub>2</sub> の濃度変化との本質的な差には、注目する必要がある。大気の物理状態の変動の特徴は、広範囲に及んでいるということである。したがって気候変動を研究するためには、広範囲に平均した永年の観測資料を利用せねばならない。〔14, 26〕の研究で示されているように大気の化学成分の変化は、一地点の観測資料で決定でき、それが全地球を代表しているものと見なすことができる。

産業活動のために大気中に放出される CO<sub>2</sub> の量と、大気中の CO<sub>2</sub> の含有量の増加量とを比較した結果、大気中に放出された量の約半分が大気中にとどまることがわかった。

将来の気候状態を予測するためには、マクタ〔22〕の提唱した CO<sub>2</sub> の量の予報モデルがよく利用される。このモデルの適用した結果は、観測データとよく一致している。これによると1970年から2000年までに CO<sub>2</sub> の濃度は、0.0320 から 0.0375%まで増加する。

CO<sub>2</sub> の気温に与える影響については、多くの研究があり、現在多くの問題が解決されつつある。昨年、地上気温と CO<sub>2</sub> の濃度との関係を明確にした研究が発表された〔28, 35〕。

この研究の一つは、一般的な大気循環を考えた気候理論のモデルに基づいて、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度が増加したときの気温変化を求めた。この理論は、今まで利用されていたどの理論よりも多くの点で詳しいものになっている。すなわち、大気中の水蒸気の移動と高緯度での太陽放射の反射状態を左右する雪や氷におおわれた面積と大気の熱的状況との関係とを考慮した点である。

マナベとウェザロールドの実施した計算によると、CO<sub>2</sub> の濃度が 0.03 から 0.06%まで増加すると平均地上気温は、2.93℃上昇する。この値は、最近の多くの研究で得られたどの値よりも大きい。

上述したシュナイダーの研究では、CO<sub>2</sub> の濃度の気温に与える影響を調べる際の誤差の原因を考えている。マナベとウェザロールドとが共同で実施した数値実験の結果を利用して、シュナイダーは今までの研究で得られた CO<sub>2</sub> 量の変動による気温変化が小さかったのは、適用した気候理論のモデルが不正確なためであると結論した。上述のことと同時に、彼は次のような仮定も述べている。

即ち、マナベとウェザワールドの研究では、大気中の長波放射量のパラメータ化が比較的大雑把であることが原因で、CO<sub>2</sub>濃度が増えたときの気温上昇の値を約0.5℃高いものにしてある。

水におおわれている境界での年平均気温は、観測では10℃であるにもかかわらず、マナベとウェザワールドの研究結果では、その他の誤差が原因で25℃になっている。この誤差がCO<sub>2</sub>の変動による大気の熱的状況への影響を少なくし、気温と水におおわれた面積との関係も弱くしている。

また、マナベとウェザワールドのモデルでは、気象要素の年変化と海流による熱の移流を考慮していないことも、誤差の原因となっているだろう。

我々の解析結果では、CO<sub>2</sub>濃度の増加による地上気温変化量は2.5℃になる。これは、シュナイダーの指摘した長波の扱いを考慮して、マナベとウェザワールドの研究から得られる値に相当する。

気候理論で決定された熱的状況に及ぼすCO<sub>2</sub>の影響の評価を実際の大気に適用できないのは、CO<sub>2</sub>の量と気温と雲量とが変動した場合、それらの間にある関係の研究がなされていないためである。メーラーは、気温とCO<sub>2</sub>濃度との間にある関係が本質的に変化することを示した〔30〕。この考えは、上述のシュナイダー、マナベとウェザワールドの研究、〔22〕の「不注意による気候変化」等を含めて、多くの研究で採用された。

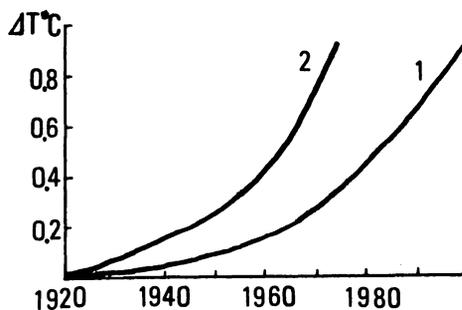
最近、一年間の気象データで気温と雲量とは逆の関係にあることを見つけた。この関係は存在するが、比較的弱いものであり、熱の移動のために半球の平均気温には大きな影響を与えないことが、スプートニクの観測データから確かめられた〔9〕。

このことは、雲量を変化しないとしてCO<sub>2</sub>の量の変化が温度に与える影響を求めることができることを示している。

カレンダーは、CO<sub>2</sub>濃度が気温に与える影響は非線型で、CO<sub>2</sub>濃度が増加すると急速に低下することを確かめた。

マナベとウェザワールドの研究〔22, 27他〕から  $(\frac{\Delta T}{\Delta C}) / (\frac{\Delta T}{\Delta C})$  を計算することができる（ $\Delta T - CO_2$ の濃度が $\Delta C$ 変化したときの平均気温に生ずる差。 $\Delta T / \Delta C$ は現在のCO<sub>2</sub>の量を基準にしたもの。（ $\Delta T / \Delta C$ 'は現在よりCO<sub>2</sub>の量が20%増えた場合のものである）。この値は、約1.5倍になった。

この値とマクタの導いた1920年から2000年までのCO<sub>2</sub>の濃度変化を利用し、この期間のCO<sub>2</sub>量の増加による平均気温の変化を導いた（第2図曲線1）。気候理論のモデルを用いた多くの計算結果は、CO<sub>2</sub>の量が増えると高緯度の温度変化が低緯度の温度変化より著しく大きくなる



第2図 人間活動がもたらす大気中のCO<sub>2</sub>濃度の増加による地上気温変化  
1. 北半球 2. 60~90°N

ことを示している。とくに、マナベとウェザールドと同様の理論を適用した〔6〕の研究で、 $60 \sim 90^{\circ}\text{N}$  帯の気温変化が全地球平均の変化より約2.5倍大きくなっていることは、注目すべきことである。以上のことを考慮して、上述の緯度帯の $\text{CO}_2$ の増加が原因で生ずる永年の気温偏差を求めることができる(第2図曲線2)。

1965年から1975年の間に、 $\text{CO}_2$ 濃度の増加は、北半球平均気温を約 $0.15^{\circ}\text{C}$ 上昇させた。第1図と第2図とを比較してわかるように、北半球でも北極地方でも、最近の温暖化の原因が $\text{CO}_2$ 濃度の増加によるものであることを示している。したがって、最近の気候変化の主な原因は、人間の経済活動にあり、今後ますます人間活動による温暖化傾向は増大すると考えねばならない。

### 将来の気候

将来の気候変化を確実に評価するためには、次の3つの要因を考慮しなければならないだろう。

- (1)  $\text{CO}_2$ 濃度の増加
- (2) 火山活動やその他自然現象を原因とする大気透明度の変動
- (3) 人間活動によるエアロゾル量の増加を原因とする大気透明度の減少

これらの要素のうち、将来の気候状態に対してもっとも重要なのは(1)で、第2図の曲線1, 2で与えられる。

この図と第1図とを比較して明らかなように、今世紀末には $\text{CO}_2$ 濃度の増加を原因とする温度変化は、この一世紀間に観測された最大の気温偏差を越えるようになる。これは、今世紀30年代の昇温と比較しても、はるかに強い昇温となることは確実である。

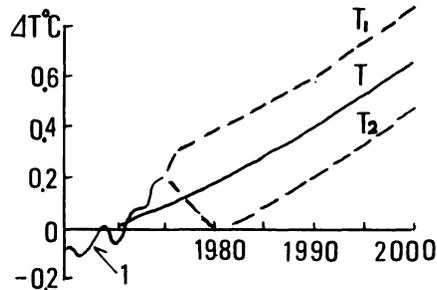
今後の火山活動度は不明であるから、大気の熱的状況に及ぼす自然要素の影響を評価するためには、人間活動の影響が比較的小さかった1950年頃までのデータを利用せねばならない。この期間の北半球気温偏差の絶対値の平均をとると $0.2^{\circ}\text{C}$ となる。この値は、今世紀末に達する $\text{CO}_2$ 濃度の増加を原因とする温度変化よりはるかに小さい。

人間活動によるエアロゾルが大気の熱的状況に与える影響を評価することは大変困難なことである。この困難は、対流圏におけるエアロゾル量の変動と気温との関係についての研究不足、人工エアロゾルの量とその空間分布についての知識不足そして将来のエアロゾル量を予想するためのデータ不足にある。

人工エアロゾル量の増加が、40～60年の平均気温の降下に影響を与えたとする研究もある〔10〕。60年代の気温降下は、人工エアロゾルの影響だけでなく火山噴火(1963年のアグン噴火等)を含む自然現象も関係していると考えられる。

最近、人工エアロゾル量の増加にはどめがかかっているというデータもある。これはおそらく大気汚染防止運動の高揚によるものであろう。今後の平均気温の変化は、 $\text{CO}_2$ 量の増加と自然現象を原因とする大気透明度の変動の影響が加わって決まるものと考えられる。

そのような熱的状況の変化を近似的に表わしたものが第3図である。この図の作成にあたって、1965年～1975年の成層圏の透明度はだんだん平均値に近づき、その後の対流圏の人工エアロゾル量は安定するという仮定を採用した。この条件下で、最も確かだと思われる温度変化は曲線Tで表わす。この曲線は、CO<sub>2</sub>濃度の増加が全面的に温度に影響を与えており、第2図の曲線1と類似している。曲線T<sub>1</sub>とT<sub>2</sub>は、火山活動やその他の自然活動の影響で起こりうる温度変化の両限を示している。



第3図 2000年までの北半球の気温変化  
(平均値は1881～1975年の95年平均)

第3図は、将来の気候状態を近似的に表わしたものである。この温暖化は、毎年大気中のCO<sub>2</sub>量が急速に増加していくために確実に強まっていく(火山噴火があれば、断続的になるが)。

最近始まった温暖化は、現代の気候史上の大きな事件である。これは、また降水量に大きな影響を与える。第1図からわかるように北極の温暖化は、低緯度の温暖化より著しく強いものである。その上、温暖化の位相は、北極の方が北半球平均気温よりも若干早くなっている。そのような時期は、平均子午面温度勾配を著しく小さいものにする。これは水蒸気を海洋から大陸へ移動させる気流を弱くする。

第1図のデータからわかるように、現在の気候変化とよく似た状態は約50年前に起こっている。当時の温度変化は現在とよく似ており、1920、1921、1924年に我国では大規模な干ばつが起きた。似たような温度場が、1972、1975年の干ばつ発生の原因になっていると考えられる。

将来の降水量の変化を予想することは大へん困難なことである。というのは、人間活動が原因で、平均気温の変化は今まで存在した正の偏差を比較的最早い時機に越えてしまうからである。

強い温暖化は、地球上の多くの地域の降水量に著しい変化をもたらすことが予想される。このことは、経済活動の計画にとって重要である。

この問題を解決するためには、経験的に得られた関係と同時に、気候理論の数値モデルの利用も不可欠である。

中緯度の多くの地域で乾燥化を引き起こし、農業に対しマイナスの経済効果を与えた。気候温暖化が経済活動の多くの部門にプラスだけでなくマイナスの影響も与えることは疑いない。とくに農業に対して重要なのは、発育に適する時間を延長し、この期間の積算温度を大きくする。温暖化は、また高緯度の航海条件を改善し、極地方の利用度を大きくする。

種々の気候温暖化のもたらす好結果を考慮しても、全世界の国々の経済活動に適し、これが歓迎

されるかどうかは疑わしい。このようなことを考慮して、最近、気候の温暖化を避ける方法を提唱した〔6～8, 11, 12〕。

現在始まったばかりの温暖化は、今後著しく進行し、現在の地球を守る問題は非常に重要なことが確実である。

## 参 考 文 献

1. ボルセンコフ他：1881～1975年の北半球気温変化
2. ブディコ：気候に及ぼす影響のある過程
3. ブディコ：氷河時代の起源について
4. ブディコ：気候変化
5. ブディコ：人間が気候に与える影響
6. ブディコ：気候変化
7. ブディコ：将来の気候
8. ブディコ：気候に及ぼす影響の仕方
9. ブディコ：平均気温と太陽放射の変化との関係
10. ブディコ他：現在の気候変化
11. ブディコ他：気候に及ぼす影響の見通し
12. ブディコ他：気候と成層圏のエーロゾル層に及ぼす影響
13. ドロースド他：ソ連邦における降水量の永年変化
14. コバク：荒涼たるモンゴルの大気接地層におけるCO<sub>2</sub>の活動
15. ルービンシュタイン他：現在の気候変化

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борзенкова И. И., Винников К. Я., Спирина Л. П., Стехновский Д. И. Изменение температуры воздуха Северного полушария за период 1881—1975 гг. — «Метеорология и гидрология», 1976, № 7, с. 27—35.
2. Бudyко М. И. Некоторые пути воздействия на климат. — «Метеорология и гидрология», 1962, № 2, с. 3—8.
3. Бudyко М. И. О происхождении ледниковых эпох. — «Метеорология и гидрология», 1968, № 11, с. 3—12.
4. Бudyко М. И. Изменение климата Л., Гидрометеонздат, 1969, 37 с.
5. Бudyко М. И. Влияние человека на климат. Л., Гидрометеонздат, 1972, 47 с.
6. Бudyко М. И. Изменение климата. Л., Гидрометеонздат, 1974, 280 с.
7. Бudyко М. И. Климат будущего. — «Метеорология и гидрология», 1974, № 2, с. 3—15.
8. Бudyко М. И. Метод воздействия на климат. — «Метеорология и гидрология», 1974, № 2, с. 91—97.
9. Бudyко М. И. Зависимость средней температуры воздуха от изменений солнечной радиации. — «Метеорология и гидрология», 1975, № 10, с. 3—10.
10. Бudyко М. И., Винников К. Я. Современные изменения климата. — «Метеорология и гидрология», 1973, № 9, с. 3—13.
11. Бudyко М. И., Гандии Л. С., Дроздов О. А., Кароль И. Л., Пивоварова З. И. Перспективы воздействия на климат. — «Известия АН СССР. Сер. географ.», 1974, № 2, с. 11—23.
12. Бudyко М. И., Винников К. Я., Гандии Л. С., Дроздов О. А., Кароль И. Л., Пивоварова З. И. Климат и воздействия на аэрозольный слой стратосферы. Л., Гидрометеонздат, 1974, 41 с.
13. Дроздов О. А., Григорьева А. С. Многолетние циклические колебания атмосферных осадков на территории СССР. Л., Гидрометеонздат, 1971, 157 с.
14. Кобак К. И. Активность CO<sub>2</sub> приземного слоя атмосферы зоны пустынных степей Монголии. Структура и динамика степных и пустынных экосистем МНР. АН СССР, Л., 1974, с. 41—46.
15. Рубинштейн Е. С., Полозова Л. Г. Современные изменения климата. Л., Гидрометеонздат, 1966, с. 268.
16. Callender G. S. The Artificial Production of Carbon Dioxide and its Influence on Temperature. — «Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.», 1938, Vol. 64, No. 275, p. 223—240.
17. Dwyer H. A., Petersen T. Time-Dependent Global Energy Modeling. — «J. Appl. Meteorol.», 1973, Vol. 12, p. 36—42.
18. Faegre A. An Intransitive Model of the Earth-Atmosphere-Ocean System. — «J. Appl. Meteorol.», 1972, Vol. 11, No. 1, p. 4—6.
19. Gordon H. B., Davies D. R. The Effect of Changes in Solar Radiation on Climate. — «Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.», 1974, Vol. 100, No. 423, p. 123—126.
20. Hantel M. Polar Boundary Conditions in Zonally Averaged Global Climate Models. — «J. Appl. Meteorol.», 1974, Vol. 13, p. 752—759.
21. Held I. M., Suarez M. J. Simple Albedo Feedback Models of the Icecaps. — «Tellus», 1974, Vol. 26, No. 6, p. 613—630.
22. Inadvertent Climate Modification (SMIC). The MIT Press., 1971, 308 p. Русск. перев.: Непреднамеренные воздействия на климат. Гидрометеонздат. Л., 1974, 260 с.
23. Lamb H. H. Climatic Change and Foresight in Agriculture: the Possibilities of Long-Term Weather Advice. Outlook on Agriculture, 1973, Vol. 7, No. 5, p. 203—210.
24. Lamb H. H. The Current Trend of World Climate — a Report of the Early 1970's and a Perspective. Climate Research Unit School of Environmental Sciences. University of East Anglia, Norwich, 1974, 27 p.
25. Lamb H. H., Malmberg S. A., Colebrook J. M. Climatic Reversal in Northern North Atlantic. — «Nature», 1975, Vol. 256, No. 5517, 479 p.
26. Machta L. Man's Influence of the Climate. A Status Report. WMO, Commission for Atmospheric Science, 6th Session, Versailles, 1973 31 p.
27. Manabe S., Wetherald R. T. Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. — «J. Atmos. Sci.», 1967, Vol. 24, p. 241—259.
28. Manabe S., Wetherald R. T. The Effects of Doubling the CO<sub>2</sub> concentration on the Climate of a General Circulation Model. — «J. Atmos. Sci.», 1975, Vol. 32, No. 1, p. 3—15.
29. Mitchell J. M., Jr. The Natural Breakdown of the Present Interglacial and its Possible Intervention by Human Activities. — «Quart. Res.», 1973, Vol. 2,

- p. 436—445.
30. Möller F. On Influence of Changes in the CO<sub>2</sub> Concentration in Air on the Radiation Balance at the Earth's Surface and on Climate, — «J. Geophys. Res.», 1963, Vol. 68, No. 13, p. 3877—3887.
  31. North G. R. Analytical Solution to a Simple Climate Model with Diffusive Heat Transport. — «J. Atmos. Sci.», 1975, (to be published).
  32. North G. R. Theory of Energy Balance Climate Models. — «J. Atmos. Sci.», 1975 (in press).
  33. Oliver R. C. On the Response of Mean Temperature to Stratospheric Dust. An Empirical Approach. Review Draft from Paper Presented at Fourth Conference on the Climatic Impact Assessment Program, 4—7 February 1975, Cambridge, Mass. p. 12.
  34. Pollack J. B., Toon O. B., Sagan C. The Effect of Volcanic Activity on Climate. Proc. of the WMO/IAMAP Symp. on Long-Term Climate Fluctuations. Norwich, 18—23 Aug. 1975, p. 279—283.
  35. Schneider S. H. On the Carbon Dioxide Climate Confusion. — «J. Atmos. Sci.», 1975, Vol. 32, No. 11, p. 2060—2066.
  36. Schneider S. H., Gal-Chen T. Numerical Experiments in Climate Stability. — «J. Geophys. Res.», 1973, Vol. 73, No. 2, p. 6182—6194.
  37. Sellers W. D. A Global Climatic Model Based on the Energy Balance of the Earth-Atmosphere System. — «J. Appl. Meteorol.», 1969, Vol. 8, No. 3, p. 392—400.
  38. Sellers W. D. A New Global Climatic Model. — «J. Appl. Meteorol.», 1973, Vol. 12, No. 2, p. 241—254.
  39. Sellers W. D. A Two-Dimensional Global Climatic Model. Institute of Atmospheric Physics, University of Arizona, Tucson, Arizona, 1975, 56 p.
  40. Suarez M. J., Held I. M. The Effect on Seasonally Varying Insolation on a Simple-Albedo-Feedback Model. Proc. of the WMO/IAMAP Symp. on Long-Term Climatic Fluctuations. Norwich, 1975, p. 407—411.
  41. Wetherald R. T., Manabe S. The Effect of Changing the Solar Constant on the Climate of a General Circulation Model. — «J. Atmos. Sci.», 1975, Vol. 32, No. 11, p. 2044—2059.

Государственный гидрологический институт

Поступила  
16 III 1976

## GLOBAL WARMING

*M. I. Budyko, K. Ya. Vinnikov*

Causes of air temperature rise, which began in the mid-1960s of the current century, are analysed. Estimates of probable change in air temperature for the future are given taking into account the anthropogenic increase of carbon dioxide concentration in the atmosphere.

Summary of "Modelling, Simulation and Prediction  
of Climatic Change and Crop Production"

T. Asakura\*

Crop production in relation to climatic change has been discussed in this symposium and are summarized in this meeting. This may well be said as a diagnostic study. There is a another side of this problem. That is, prognostic study of crop production relating to climatic changes. This study is rather difficult but very important for a mankind to alive. It must be emphasized here that this symposium has attached this difficult problem. On the 3rd day of this symposium are the Modelling, Simulation and Prediction of the Climatic Change and Crop Production.

Five papers are presented. T. Takakura and H. Van Keulen discussed a simulation of influences of climatic factors on food problem. T. Asakura and Y. Tanaka presented an effect of Solar activity on the climatic change using a statistical-dynamical model. Other two papers are the climatic forecast by R.A. Bryson for monsoon and by H. Wada for summer weather in North Japan.

Summary of these papers is follows.

T. Takakura discussed a food problem by Forrester's model and through energy analysis.

An analysis is made to identify the effect of these growing stresses on the agricultural production system by means of Forrester's model and through energy analysis of Japanese agriculture.

In the modified model, the original agricultural subsystem is divided into arable land agriculture and industrialized agriculture

---

\* 気象庁予報部長期予報課

such as greenhouse production. The effect of mean air temperature on crop yields in arable land agriculture is taken into account.

One of his simulation results shows that rather drastic changes of rates such as birth rate are required in order to get an equilibrium state of the world behavior, and also shows that the increase of industrialized agriculture such as greenhouse cultivation is recommended under inevitable stresses.

However, it has been revealed recently that industrialized agriculture is more energy intensive. Therefore he calculated the energy balances of several crops cultivated in greenhouses as well as open field crops.

It is surprising that none of the energy ratios for these crops exceeds 100 %, that is, input energy is more than output. The largest is 80 % for wheat, the second being tomatoes grown in the open field crops exceed 20 % but crops grown in heated greenhouses are less than 5 %. In order to obtain one mg of vitamin C by cucumbers grown in the field, overall energy of 4 Kcal is used. On the other hand, input energy of 110 Kcal is required in the case of greenhouse production because of almost a 50 % decrease in vitamin C in greenhouse cucumbers and mainly the cost of heating.

H. van Keulen presented a paper on modelling and simulation of the influence of climatic factors on rice production.

When we want to get any insight in the consequences of climatic changes on food production, it is obvious that we must be aware of the relations between weather and food production.

The yield however eventually obtained by the farmer is the result of the interactive effects of the properties of soil, plant and the environment modified by management practices, such as

irrigation and fertilization. It is, generally, difficult to analyse such complex systems by means of statistical analysis, as the large number of feedbacks contained in them, tends to obscure causal relations.

Dynamic simulation models are a powerful tool. In the paper presented here a model is described, simulating the dry matter production of a rice crop and the partitioning of that dry matter between the various plant organs.

Some results of so-called "calibration" runs are shown in indicating that the model yields results, which are, at least semi-quantitatively in good agreement with experimental evidence.

However, a rigid evaluation in which the results of carefully planned experiments with the model, are compared with real world behavior, is necessary before the model may be used for predictive purposes. In that case it is possible to use the model to forecast rice production.

Next three papers are simulation and prediction of climatic change. T. Asakura and Y. Tanaka discussed the effect of solar constant to the atmospheric general circulation using a Kurihara's statistical dynamical model.

Changes of solar constant ranging from +3 % to -3 % vary the atmospheric heating through the variation of atmospheric motion and temperature field. The changes of solar constant by 3 % makes the variation of diabatic heating rate by 7 % to the normal case.

The magnitude of changes in the diabatic heating rate, due to changes of solar constant, differs in each latitude. With the decrease (increase) of solar constant, the heating rate decreases (increases) in lower latitudes, while increases (decreases) in higher

latitudes. Thus, the intensity of heat source and sink weakens (strengthens) with the decrease (increase) of solar constant (which appears most pronounced in June).

Changes of solar constant by  $\pm 3\%$  cause hemispheric mean temperature to change by  $\pm 0.4^\circ\text{C}$ . But extents of the temperature change undergo a seasonal march and has maximum in August and minimum in December. The temperature drop by the decreasing solar constant isn't uniform but varies by latitudes through atmospheric motion. The larger values are found over both the polar and subtropical latitudes.

Energy of the general circulation also varies in accordance with variations of heating rate and temperature.  $A_z$ ,  $A_e$ ,  $K_e$  and  $K_z$  decrease with the decrease of solar constant, and vice versa, and their values are large in winter and small in summer. In short, general circulation becomes inactive when solar constant decreases, and vice versa.

However, the Jet stream doesn't change its position by the changes of solar constant. Wind speed of subtropical Jet stream decreases a little by the decreases of solar constant.

Results thus gained show good agreements qualitatively with previous study but quantitatively, many differences are found. This seems to be brought about by an ignorance of feed-back mechanism and other restrictions in this model.

A. Bryson has discussed the possibility for year-in-advance predictions of monthly total precipitation.

Several authors, as Spitaler and Matsukura, have suggested that small motions of the axis of rotation of the earth may have large meteorological effects. More recent work on the pole motions has shown that the motion may be resolved into five component oscillations

known collectively as Chandler motion.

By using spectral analysis, he examines the question of whether or not there are atmospheric effects of the same frequencies as the polar motions.

Examination of the monthly rainfall spectrum for Poona, in July, for example, shows that essentially all peaks of variance are either at Chandler motion frequencies, harmonics of those frequencies or beats of the Chandler frequencies with each other.

The nature of the non-linear response of the various atmospheric parameters to the Chandler motion, and the associated theory, are not yet known fully. However, a few empirical determinations of the relationship have yielded significant skill scores for year-in-advance predictions of monthly total precipitation at a variety of stations.

In the last, ultralong-range weather forecasting and food problem is presented by H. Wada.

It is evident that ultralong-range weather forecasting is a quite difficult problem at present time.

The ultralong-range weather forecast is tried here, applying long-range weather forecasting techniques used in Japan. That is,

1. Climatic change

Climatic trend of recent years

Time lagged relationship between Central England temperature and cool summers in North Japan

2. Long-term variations of the circulation pattern over the Northern Hemisphere

Some features of circulation pattern in recent years

Long-term trends of the centers of action

Prognostic charts of summers in North Japan

### 3. Relationships between solar activity and summer weather in North Japan

The result shows that unusually cool summers in North Japan will be anticipated during the 1983-1988 years. This sort of prediction seems to have a serious threat not only to Japan food supplies but also to world food supplies, with the potential for disrupting world food trade patterns.

Climatic Change in South, Southeast  
and East Asia: A summary

M.M. Yoshino \*

1. Introduction

On the first day, October 4, 1976, of the International Symposium on Recent Climatic Change and the Food Problems, fourteen papers were presented under the theme of climatic change in East Asia as well as in Monsoon Asia and the world. The present paper is a summary of their results and points out the problems drawn. On the other hand, I hope that today's discussion will start from this summary.

2. Main Evidences Reported

(1) Precipitation

As the facts that the half of the fourteen papers presented on October 4, concerned with precipitation changes show, the most important climatic element is precipitation in this regions.

T. Yamamoto reported the changes in the winter and summer precipitations in Japan. He showed that the winter precipitation change in Kyushu, Southern Japan, has a close relation to the preceding summer and autumn pressures in tropical Asia and Australia. It was revealed also that the July precipitation in the Izu Island, south of Japan, has a good correlation with that in Sudan, Africa. It is interesting to note that the lowest trough of the curve obtained from the maximum Nile gauge readings at Aswan seems to be occurred around the period from 1785 to 1835, coincident with the "Little Ice Age" in Japan, in which the climate was exceedingly disastrous due to the series of cool, rainy or stormy summers and

---

\* 筑波大学

the Lake Suwa in Central Japan froze earlier than before and after that period.

H.K. Cho presented a paper on the secular variation of precipitation in Korea. He compared the recent precipitation (1908-1975) with the historical one (1770-1907) in Seoul and showed that the recent annual precipitation has decreased 19.1 per cent against the historical one the spring and winter precipitations 38.0 per cent, which is the greatest decrease, and the summer 9.5 per cent. The mean annual variation for the 10 stations has major peaks around 1934 (except Incheon and Seoul) and 1956-1957, and a major trough around 1939-1944.

In Seoul, the historical annual records show no appreciable trend during 1770-1878, but minor fluctuations with peaks around 1789, 1805, 1817-1821, 1828-1832, 1846-1847 and 1877-1878, followed by a decreasing trend with a large major trough around 1886-1910. This trough is clarified by the earlier analysis of Arakawa as a dry period of Seoul. In addition to the historical records, the observations in recent years indicate a slight increasing trend with two peaks around 1924 and 1969, and two minor troughs around 1936-1943 and 1949-1950. The Seoul data also indicates that the summer trend together with its fluctuations are conceivably similar to the annual patterns. The results indicate that the dominant periods of the fluctuations appear to be at interval of approximately 10-15 years. Seoul shows significantly a low frequency cycle, a cycle of 88 years or more for annual and all seasons.

S.E. Moon studied the occurrence frequency of anomalous weather during the historical age and found out very interesting evidences as follows: The various phenomena such as heavy rain, heavy snow,

great drought large hail, extraordinary warm winter, and unusually cold summer are found to fall into four distinct periods ranging from the 8th to 17th century. There were far more data for this era than for either the period before or after.

These four periods are:

- (I) First period, A.D. 740 to 850, centering around A.D. 800.
- (II) Second period, A.D. 1080 to 1190, centering around A.D. 1130.
- (III) Third period, A.D. 1310 to 1420, centering around A.D. 1380.
- (IV) Fourth period, A.D. 1580 to 1690, centering around A.D. 1630.

These facts lead us to the conclusion there might be a climate that can be called the "Disturbance Age" which is described as cold, pluvial in summer and warm in winter. The period of "Disturbance Age" is about 110 years and their intervals are about 250 years, except for the first interval. Moon considered that the strength of the North Pacific High in summer and the Siberian High in winter were weak during the "Disturbance Ages". If there are approximately 250 year cycle in the "Disturbance Ages", there would be another "Disturbance Age" from 1830 to 1940 centering around 1880. The variation of July precipitation in Seoul was very large in the period 1830 to 1940, eventhough there were minor fluctuations during this period as pointed out by Cho. By the way, referring to the results of Manley, the rising trend of January temperature and decreasing trend of June and July temperatures are found in the period from 1830 to 1940.

H. Ch. Hu and J.T. Lim reported a periodicity in the rainfall data in Malaysia and Singapore and found a quasi-biennial oscillation. M.A. Rouf pointed out the humidity change at Rajshahi and Ishurdi in Bangladesh, which might be caused by the hydrological conditions of

the river Ganges. Ch. Nakajima analysed the time change of five-year moving average of the annual and the monthly rainfall of 25 stations in the Phillipine, Laos, Thailand, Malaysia, Singapore, Pakistan, Buruma, Nepal and India. He discussed the rainfall variations and heavy rainfall during the short time in each region in relation to their synoptic conditions.

I. Tsuchiya studied the year-to-year variations of rainfall over the so-called equatorial Pacific dry zone, which extends from the Peru coast to 180° or further west along the equator. He investigated the long-period Indian flood and drought data and rainfall data of Ocean Island and Fanning Island in the dry zone and showed that the reverse phase of the rainfall variations between India and the equatorial Pacific. He further studied the effects of the westerlies trade winds and cross-equatorial air flows on the variations. It was indicated that the abnormally weak southeast trade winds over the Indian Ocean is followed by the abnormal minus anomaly of the monsoon rainfall over the Indian sub-continent, and the good monsoon rainfall or the less drought condition are the case of the strong or normal southeast winds.

M.M. Yoshino reported the regionality of secular change in precipitation in Monsoon Asia in recent time and the historical time. As a conclusion, he pointed out that it has a close relation to the positions and activities of the polar frontal zones, the ITCZ, the N-Pacific high, the Okhotsk high and the Siberian high.

## (2) Air Temperature

H. Arakawa reported the secular change of the mean temperature in the lowest 4,000 m layer over Japan during the period 1953-1974, showing the temperature decreasing at the rate of 0.021°C/year.

S. Kanno and F. Masuda discussed the temperature change in the geological period in East Asia in detail. For the period during 5,000 to 7,500 years B.P., called Hypsithermal (Climatic Optimum), it can be said that Hokkaido was about 5°C warmer than the present Kanto district about 2°C and Okinawa and Taiwan 0-1°C.

H. Flohn discussed, how far the usual assertion of more stable and more unstable times in recent climatic history is warranted, according to the variability of long records of temperature and rainfall from western and Central Europe, as well as from India and other tropical areas.

R. Yamamoto, T. Iwashima and M. Hoshiai studied the monthly mean surface air temperature at 343 stations north of 20°S of the world from 1951 to 1972. Negative anomaly or temperature lowering with magnitude of 0.1-0.4°C continued over 6 months are found in 1954, 1955/56, 1964, 1965/66, 1968/69 and 1970/72. The variability of zonal mean temperature is generally large at high latitudes. The maximum lowering of temperature exceeds 1.5°C in 1958/59 and 1965/66. These two coldnesses are preceded by the eruption of Bazymianny and Agung, with time lay of about 2 years, respectively.

### (3) Wind and Others

K. Sekihara, T. Takeuchi and T. Tamura reported the climatic trend of wind speed at Tateno and its relation to solar activity. Since 1920, measurement of wind aloft was continued by the method of optical tracking of a pilot balloon. Since about 1940 the technique of radiowind sonde observation was introduced and at the same time the network of aerological observation was established.

So far as the data after 1950 are concerned, the winter wind speed increased or decreased apparently in accordance with the increase

or decrease of sunspot number.

Y. Sugimoto and E. Uchida studied the relationships between solar activity and the variation of terrestrial polar-cyclone. After considering the physical processes, they applied power spectrum analysis of sun spot number and geomagnetism in time series variation in 1968 (year of maximum solar activity) and 1973 (year of near minimum solar activity). It was shown that the terrestrial magnetic variation, which is mainly originated from solar activity and has the good correlation with the change of sun spot number, seems to be more direct agent to meteorological change. For instance, it is indicated that after two or three days from magnetic variation isobaric height change occurs.

### 3. Problems

Summarizing the results mentioned above, the following problems can be drawn.

(a) "Little Ice Age". This was occurred in Japan during the years from 2nd half of 18c to 1st half of 19c. It is estimated that the mean January temperature was 1-2°C lower than the present. Was there also the "Little Ice Age" in southeast Asia? Where is the southern boundary of the region with "Little Ice Age"?

(b) Decreasing of precipitation in recent years. This is most evident in Seoul in spring and winter. Are there same tendencies in other regions in Monsoon Asia? What are the reasons for this tendencies?

(c) Precipitation peaks are found around 1934 and 1956-1957 and major trough around 1939-1944 in South Korea. The peak 1956-1957 and the troughs coincide with the abundant rainfall and scanty rainfall in Japan. Are there similar fluctuation in Southeast

Asia? Is this connected with the activities of the Pacific polar front?

(d) Correlation of climatic change between East Asia and Europe.

The variation of July precipitation in Seoul was very large during the period 1830-1940. This period showed rising trend in January temperature and decreasing trend of June and July temperature in England. Both phenomena might be related to the increasing activity along the polar frontal zones in the Northern Hemisphere. Can this correlation be generalized?

(e) Secular changes of the positions or activities of ITCZ.

This has not been studied in detail. Is it needed to study them in South and Southeast Asia in future?

(f) Secular change of southern oscillation or Walker circulation.

We know some evidences in South and Southeast Asia, which were occurred in relation to the southern oscillation or Walker circulation over the Pacific. Are there more possibilities to find out further evidences of secular change in this regions?

(g) Study of regionality of the secular change. This is very important to make clear the problem from the standpoints of meteorology, climatology and agricultural planning in Monsoon Asia. It is difficult, however, to study statistically this problem, because the observed data at the stations with long-year series are not easily available for many stations. Is it needed to collect at certain data center?

(h) Short-time cycle or trend. The general tendencies of the cycle or trend in the recent, relatively short-time period (2 years-88 years) must be studied extensively; especially for Southeast Asia. Its time and regional relations to South Asia and East Asia must be important to understand the climatic change in the whole Monsoon Asia.



## 編 集 後 記

○第1号がすっかり遅れてしまい、おわびいたします。尾崎さんの10日予報の客観化とそれに関連した論文の紹介は、1か月予報にたずさわっているわれわれにも大変参考になりますが、紙面の関係で一部分しかのせることができませんでした。最近、気候変動や昨年の北日本の冷害と関連して、地球の寒冷化・温暖化の議論が盛んになってきましたので、古賀さんにはブディコの論文を紹介していただきました。また、朝倉さんと吉野さんのSummaryは昨年の10月4日～8日に筑波大学と東京で開催された“気候変動とそれが食料に及ぼす影響に関するシンポジウム”で話されたものです。

上記の方々の御協力で本号の内容が大変豊富になりました。あつくお礼申し上げます。

### ○会費納入のお願い

昭和51年度会費(600円)を未納の方は、なるべく官署毎にまとめて送金下さるよう御願ひ致します。なお、郵便振替口座番号が下記のようにになりました。

#### (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

編 集 部