

## 長期の予報に関する基礎的問題

## (討 論 の 部)

## 内 海

安藤さんのおっしゃったことをまとめてみると長期の予報は可能性はあるが、限界があるということになるようです。そこで、これからシンポジウムを進めていきますが、最初に質問を承わり、それからゆっくり御討論をお願いすることに致します。

## 奥田穰 (気象研究所)

竹永さんにおうかがいしますが、15日平均をとると大陸方面の波が不安定に現われてくるということでしたが、その意味はどういうことでしょうか。

## 竹 永

半月の平均をとるとき陸上では変動が激しく、半月以上になるとその変動が分らなくなってきます。大洋の上では、ある程度規則性が認められるのですが、大陸の上では非常によく変る。この理由は大陸では波の振巾が小さく、また地形の影響をうけているためだろうと考えています。

## 安 藤

実際には isopleth で追っかけることが不可能な場合があります。進行性の波と振動の問題があって isopleth ですべて解決がつくわけでなく別の法則をつかまなければならぬと思います。

## 窪田正八 (気象研究所)

須田さんにお伺いします。synoptic な解析から新しい事実をつかむことを強調されましたが、新しい立場から見るとということはどういうことですか？ 図をかいて単に眺めるということになりはしませんか？

## 須 田

もちろん力学的なことも考えなくてはならないと思います。要するに絵を描くことによつて、現象を統一的に説明したい訳です。

## 窪 田

朝倉さんにお伺いします。長期の予報のことについて、もう少し具体的に御説明願います。

## 朝 倉

(図を示して) エネルギーの立場から熱を考慮に入れば、一月位は力学的予報が可能であるといいましたが、それは  $\left(\frac{\partial \eta}{\partial t}\right)$  と  $\nabla(rT)$  の関係を表わす図を示しながら) 5月、6月の熱の溜りと  $\frac{\partial \eta}{\partial t}$  との関係があることらわかります。また、地形の影響もこの図から考えられます。従って熱の影響と力学とを合わせ考えれば1月位の予報は可能であると思います。また、thickness の

保存性のよいこともその根拠になります。

## 内 海

増田さんにお聞きします。渦度方程式の移動平均による方法はその保存則と矛盾しませんか？

## 増 田

渦度方程式の各項の空間平均をとって、次のようにするわけです。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \overline{V \cdot \nabla \eta} = \overline{Q}$$

ここで

$$\overline{V \cdot \nabla \eta} = \overline{V} \cdot \overline{\nabla \eta} + \overline{V'} \cdot \overline{\nabla \eta} + \overline{V'} \cdot \overline{\nabla \eta'}$$

です。

## 朝 倉

増田さんにお尋ねします。anomaly に目をつけて予報すればよいといわれましたが、その訳をお伺いします。

## 増 田

長期の trend は予報しても大して意味はなく、安藤さんのいわれたように anomaly の予報の方が実際に重要だと思います。再び渦度方程式を書きますと、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + V \nabla \eta = Q \text{ となります。}$$

ここで Q には熱によるもの、発散の項等を含んでいます。右辺を初めから 0 にしないで normal な値  $Q_N$  を用い、これから anomaly を計算すればよいわけです。

## 朝 倉

normal の意味をはっきりとしなければ anomaly の予報はできないのではないのでしょうか？ 実際の予報では Q と  $Q_N$  の分離がむずかしく思うのですが。

増 田 その点を少し詳しく説明しましょう。

$$\zeta = \zeta_N + \zeta' \quad \text{ただし } \zeta_N = \frac{1}{n} \sum \zeta$$

(n 年間のある特定日の平均値)

とおくと 渦度方程式は

$$\frac{\partial \zeta_N}{\partial t} + \frac{\partial \zeta'}{\partial t} + V_N \nabla \eta_N + \nabla' \eta_N + V_N \nabla \eta' + V' \nabla \eta' = Q_N + Q'$$

$\frac{1}{n} \sum$  という operation をすると

$$\frac{\partial \zeta_N}{\partial t} + V_N \nabla \eta_N + \langle V' \nabla \eta' \rangle = Q_N$$

$$\text{但し } \langle V' \nabla \eta' \rangle = \frac{1}{n} \sum V' \nabla \eta'$$

T なる時間々隔で 2 回の移動平均をとると

$$\frac{1}{T^2} \iint \frac{\partial \zeta_N}{\partial t} dt d\tau + \frac{1}{T^2} \iint V_N \nabla \eta_N dt d\tau +$$

$$\frac{1}{T^2} \iint \langle V' \nabla \eta' \rangle dt d\tau = \frac{1}{T^2} \iint Q_N dt d\tau$$

あるいは

$$\begin{aligned} \Delta_T \bar{\zeta}_N + \frac{1}{T} \iint V_N \nabla \eta_N dt d\tau + \frac{1}{T} \iint \langle V' \nabla \eta' \rangle dt d\tau \\ = \frac{1}{T} \iint Q_N dt d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

但し  $\Delta_T \bar{\zeta}_N$  は normal の月平均の1カ月差 ( $T$  を1カ月としたとき) である。

一方渦度方程式は

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + V \nabla \eta = Q$$

同様に2回の移動平均をとると

$$\Delta_T \bar{\zeta} + \frac{1}{T} \iint V \nabla \eta dt d\tau = \frac{1}{T} \iint Q dt d\tau \quad (2)$$

①と②の差をとると anomaly の1カ月の tendency を与える式

$$\begin{aligned} \Delta_T \bar{\zeta}_a + \frac{1}{T} \iint (V \nabla \eta - V_N \nabla \eta_N) dt d\tau \\ - \frac{1}{T} \iint \langle V' \nabla \eta' \rangle dt d\tau = 0 \end{aligned}$$

をうる。ただし、 $\bar{\zeta}_a = \bar{\zeta} - \bar{\zeta}_N$  で特に  $Q = Q_N$  とした。

移動平均の量を適当な統計値でおきかえて予報しようと試みているのである。

高橋浩一郎 (気象研究所)

増田さんの意見に大体において賛成します。しかし、2, 3カ月程度の変動には  $Q'$  が大きく効いてくる恐れがあり、これが問題になると思います。そして  $Q'$  には海水や太陽などの影響があると思われるが、この点について、どなたかの御意見をおききたい。

正野

私は講師の意見を聞いて気付いた点を2, 3申し上げたい。高橋さんの意見には同感です。今の問題は系として open system を採用するかあるいは closed system かということだろうと思いますので、何カ月位になると系以外の影響をどの程度入れなければならないかをはっきり知り度いと思っています。次に移動平均については、その物理的意味が不明瞭である。移動平均した量を見るというのはあたかも過去の影響をみているようなものであると思います。安藤さんの北半球の空気量の問題には非常に関心を持っています。長期の予報には大気の上下層の関係、南北半球の相互作用などを調べることが大変必要で、その意味で安藤さんの取り上げられている問題は興味があります。

真鍋 (東京大学理学部)

朝倉さんにお尋ねします。heat source の図を作った process をお伺いします。

朝倉

1000mb と 700mb の thickness を水平に流して求めました。つまり垂直流のことは、この中には含まれていないので  $\frac{\partial \eta}{\partial t}$  が果して熱によるものか convergence によ

るものかは残念ながらいえません。

内海

有住さんに新しい保存量の導入についてお伺いします。

有住

保存量として発散を採用することについて現在調査中です。

内海

収斂、発散の保存性を現在仙台でも調べておりますのでそれについて何か教えていただければ幸いです。

先ず正野先生にお願いします。

正野

渦度方程式で収斂発散を含む項は大きさが1桁小さいので普通の予報では捨てていますが、長期の大規模な現象では平均値としては渦度と発散とは comparable になってくるかも知れません。

安藤

数値予報をやっている方にお聞きしたいのですが、地衡風近似で pattern がよく合っているという結果を出しておられますが、energy 等を考えると地衡風だけでなく別のものも流されていることがあるのではないのでしょうか？ 現象ごとにいろいろの流れ方があるように見えるのです。例えば高低気圧では地衡風の7~8割しか流れていません。

正野

実質的な量は地衡風で流されると考えてよいが、現象は必ずしも地衡風で移動するとは限らない。この区別が必要になります。ですから当然流れるものによっては安藤さんのいわれたような区別があってよいと思います。例えば台風は昔は実質のかたまりと考えていましたが、現在では流体の状態と考えています。

内海

今迄のいろいろのお話で客観的予報も可能であるということが出来ると思います。次に前に base の問題が出て来ましたのでこれに関連して index の変動についての客観的な予報という問題を講師の方々にお伺いしたいと思います。

先ず竹永さんから……………

竹永

結論的にいいますと解らないと申し上げるより外にないのです。つまり変わり方に規則性があることが予報の可能性を示すのですが、その規則性がわからないのです。しかし変動を起す原因を調べますと、長期のものでは季節変動、数カ月くらいを対称にすると blocking とか cut off があり、旬日ぐらいになりますと out break などの中波的な南北熱交換に起因していることは解りますが、このほか phase の重なり具合で場が変わったように見える見掛上のものも2, 3検出しています。これらの原因を予想することによって、変動を予測すること

はある程度可能性がありますが、変動が起ったあと、どのような波の状態が現われるかということが解らないのです。なお高緯度では台風によって場が変わることは、まずないようです。

内海

次に須田さんをお願いします。

須田

mean の波について見ていると ridge の間に突然新しく ridge が現われて波数がふえることがあります。この発生を予報することは非常に困難です。

真鍋

その場合に、なまの天気図でも突然発生したように見えるのですか？

須田

5日平均天気図だと、その発生が突然のようにみえますが、毎日の天気図では、かなり gradually に現われて見えます。

朝倉

季節予報について、須田さんの事実の集積から技術を改善していくという態度に同感であります。岸保さんに数値予報の歴史的発展において解析ははたした役わりについて話していただきたい。

岸保 (東大理学部)

数値予報に pragmatism の考えが入っている。それがこれまでの数値予報の一つの原動力であったけれども、その行き方がまた一面行きずまりの原因にもなっています。大気を層に分けるということは、解析をやっている人には乱暴そうに見えるだろうと思うが、数値予報をやっている人はそれを敢えてやって来た。次に別の問題を申しあげたい。私はこの会に出席してどなたかが長期予報不可能論をいわれると思った。しかし今迄のところそれは一つも出ていない。そこで私が現在のやり方では不可能になるのではないかとということを申し上げたい。数値予報をやっている人には機械的に時間々隔を切って step をふんでいけば長期の予報は可能であるという一種の迷信のようなものがあると思う。それが長期予報の問題のいきずまりになっていると思います。そこで現段階では、physics を基礎として長期の問題を考え直すことが、必要であると思います。それに関連して、期間をのばす場合に scale と期間の関係について正野先生が微分方程式をもとにして、研究をされました。それによると step を何回もふんでやっていくということが、はたして大丈夫かどうか、疑問があります。例えば、疑問点を物理的なことではなく、現在の数値予報方式の技術的な問題に限定して一つの例を考えてみます。例えばテクニカルな問題として渦度の式は

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = U \frac{\partial \zeta}{\partial x} = -U \frac{\nabla \zeta}{\Delta X} - O(U \zeta_{xx} \Delta X^2)$$

ですから現在の方式で N 回の step をふむと上式で無理

した error は  $(\frac{4x}{L})^2$ , N となり ( $\zeta_{xxx} \sim \frac{1}{L^2} \zeta_x$  故),

第一項と comparable order になる可能性があります。すなわち微分方程式の初期値問題として考えた場合、長期予報は誤差のためある程度以上の期間に対しては、nonsense となるのではないかと思います。別のやり方として通信工学の雑音理論を参考にする方法があります。それは方程式に操作をほどこして雑音を除き長期の変化を見るやり方ですが、統計量が入って来て明瞭な意味がつかみにくい。

正野

まず model の問題であります。理論的に扱う場合には昔は扱い易い場合を考えました。しかしそれは理想化したもので実際とはちがうと、シノプティションが言ったものでした。今では始めから model とははっきりいってしまいますが、そういったものから essential なものを引き出すという立場であって、実際と予報とが合えばよいという考え方です。数値予報ではシノプティションが考えると、乱暴だと思ふこともやります。例えば front は数値予報では特別に扱っていませんが、これでもある程度の予報が可能なのです。もちろん今後はこれらを考えねばならないと思います。話は変わりますが、一昨年夏以来 Phillips は1月位の長期予報をやる時は水平方向に heat source を置き initial には大気が止まっているとして時間がたつとどんな運動が起るか 3-layer model を用いて1時間の時間々隔で1カ月以上の期間の変動を計算しました。その結果、実際現象に似たいろいろな現象が出て来た。例えば、front が出て、それに伴って強い jet や、cut off 等実際に近いものを再現することが出来た。これを numerical experiment といひ Charney はこれによって長期予報も可能ではないかといっています。

中島暢太郎 (京大)

長期予報は単に短期予報を延長することによって可能かどうか、私の考えでは疑問です。旬日平均 pattern と短期 pattern とを支配するものは全然違うと思います。旬日の場合は細かいものは noise と考えるべきでありましょう。増田さんのやり方は極言すれば noise の集積にならないだろうか。旬日予報をやる時には短期をやる時よりもずっと大きな pattern を考えねばならないからやはり空間的にも平均しなければならぬと思います。評価の仕方も1日予報で1時間違うのと10日で1日違うのとは同程度のものと考えてのはどうかと思います。10日先ともなると long wave の pattern を追跡すべきでその時の小擾乱はそれに流されると考え、先ず広範囲な予報を行ってさらに local なものを重ね合わせればよいのではないのでしょうか。

高橋浩一郎 (気象研究所)

旬日程度の予報ならば短期予報を extend するのでも

よいと思います。しかし、1カ月になると open system であるか closed system であるかの問題があり、計算技術の問題もあります。最近では数値予報の発展で力学が重要視され、それがあれば全てが解決されるという錯覚に陥入っているようにも見えますが、1月になるとどうでしょうか。むしろ radiation の影響などが本質的な問題になるのではないでしょうか。正野先生のいわれた model research には同感です。現象の order を estimate し、本質を見出すことが、現在の長期予報で行われなければならない問題だと思います。

#### 正野

数値予報をやっている者は dynamics だけで事が片付くとは思っていない。一般に数値予報という言葉が非常に狭い意味になってしまっている。だから numerical prediction とはいわずに physical forecasting といった方がよいかも知れない。Fjørtoft もこのような言葉を使っている。私も同感である。短期だけが dynamics である程度予報が可能であり、長期では radiation 等熱の影響を加味することが必要になって来ると思います。

#### 藤田敏夫 (気象研究所)

昨年の長期予報検討会で long wave を取り出して予報したらどうかという suggestion があったが、実際に当たって見るとそれも短期間の内に大きく変動し、波数3のいわゆる base に対応するものも大分変わる。竹永氏の話のように変わり方が不連続で spectrum の時間的変化が問題になると思います。実際 long wave と中波の interaction を調べて見た上でないとうまく行かないのではないのでしょうか。

#### 長尾 (研修所)

数カ月の予報では noise が重要で、ある時には邪魔になっていると思います。この意味で1月平均とか数カ月平均の天気図と結びつける理論が欲しい。

#### 正野

その通りです。

#### 内海

1カ月平均天気図に現われる pattern, trough はどんな意味を持っているのでしょうか。

#### 正野

Chicago 大学の Barrett という人が平均天気図を Fourier analysis し各 component で変動を調べたことをやりましたが、物理的意味が不明瞭だというのが、

Chicago 大学での意見です。時間平均は簡単だが、例えば強い台風が観測所を通ると低い気圧を観測し、それが5日平均に現われると5日間に風が吹走する長い範囲に亘って low pressure の帯が現われることになり、ずっと長くなって定常的なものを考える時には time mean でもよいが、extended forecasting ではかえって危険ではないかと思えます。

#### 高橋 (浩)

長期予報を研究する時の態度ですが、直ぐ明日から役立てたいという場合と10年先を考えるという時とは、研究態度に自ずと差があると思います。すぐ明日からという場合には統計的な方法が役立つのですが、長い先を目標とした場合、根本的に力学から考えていかねばならない。それを区別しないで現場の人と研究者が互に悪口をいっては仕様がなと思います。

#### 荒川秀俊 (気象研究所)

現在長期予報には学問的基礎は差し当りないが、現実の要求に迫られて予報は毎日出している。しかし顕著な変化でなければ確信を持って出すことはできないと思う。practical には、そのような場合にだけ予報を出すことにしたらどうか。

#### 岸保

さっきは pragmatism に対する批判的な話をしましたが、今度は逆の話を一つ。須田さんのいうように trough の間隔が延びてその間に急に trough があらわれることは、実際に力学でもそうなるかどうかを pragmatism で押して見ることも必要ではないかと考える。このような現象は dishpan でも現われていますが、Phillips の numerical experiment にもでて来ています。ともかくやって見るのが早道ではないでしょうか。そのためには自動的な計算機が是非とも欲しい訳です。

#### 竹永 (福岡管区)

現業では波として予報して合わないことがよくある。それで中間波が Rossby の理論に合わないのではないかと、中間波と short wave の相互作用はどうなっているか、お尋ねしたい。1カ月、2カ月予報では5日平均天気図を作るが10日周期が卓越するときは、5日平均をとると位相をずらすことにより違ったものが出て来るから、5日平均をとり扱う時に、そのような見かけ上のは、どのように克服すべきか。

#### 有任

そういうことがわからないので波に分けて追っかける方法は中央では使っていません。

#### 西本

short wave の周期は2乃至3日から9日位で、5日平均では short wave の影響が出るため short wave を消した base をあらわしていません。だから5日平均を二つずつ合わせて、10日平均にするとやや我々の考えているものに合ってきました。或る点 (40°N, 135°E) での 500 mb level の高さの毎日の変化のグラフをお見せします。4日平均ではあまり base はあらわれませんが、10日平均では、base に近いものがあらわれてきます。ところで base と擾乱を分離することは力学的に根拠はありませんが、私は一応 base として個々の short wave pattern を平滑化したものを考えます。そうすると、この basic な pattern は zonal index に

対応して変化するようであります。

またある点での 500mb の Z の変化と zonal index の変化を対比して見ますと、Z の short wave の変化周期は秋には短く 3~6 日であり冬は 6~10 日位ですが、この周期が変る時期は 11 月に起り中旬前後が多い。そしてこの転換は 11 月の low-index を期として起っています。

#### 安藤

これは 80°N の 500mb 面高度の isopleth です。これを見ますと、trough や ridge が交互にあらわれそれらが時間的に一つの線で結べるのですが、低温があらわれたときには、その線が結ばなくなってしまいます。

次に May storm のときの半旬天気図を書いて見ますと cyclone が 2 つに分れ、間に高気圧が出る等、割に規

則性があります。しかも May storm の時は内部的なものを考える事が重要と思われる。

#### 内海

以上総合しまして客観的予報が可能かどうかをまとめて見ると、現在のところ、絶対的に可能とはいえない。現象の説明は出来るが、個々の場合を予報する段になると成功するかどうかは疑問となる。結局客観予報の可能性はあるにはあるが今後の研究問題として残されている。岸保さんのいわれる様に絶対に出来ないものかどうか、これをどう解決するかも今後の問題である。思考実験のようなこともやらねばならぬ。電子計算機は大変重要であり、思考実験を完全にやって見なければならぬ。それでは色々有益な意見を有難うございました。

### 大気大循環の数値実験

(Phillips 1956; Quart. J. Roy. Met.)

数値予報的に扱われた延長予報の研究には現在大別して 2 つの流れがある。その 1 つは、非断熱の効果などを適当に仮定して、大気しょう乱の変動を計算し、長期予報に適した大気モデルの設定に対する基礎資料を求めていこうとするものである。もう 1 つは、Thompson などのように、既存の物理像をもってしても、数学的障害があるため、十分その機能を発揮するに至っていないから、もっと現象の数学的処理<sup>\*</sup>を考えるべきだという人々がそれである。前者のとる方法は、日本ではモデル・リサーチと呼ばれるが、数値実験と名づけたほうがより適切であると思う。Phillips などはこれに属する。

彼は、2 尺モデルを採用し、与えられる熱量の分布は東西には一様、南北には線形と、全体としてみると大気に与えられる熱量はないのと同等になっている。渦動粘性係数は、運動量や sensible heat の輸送の観測の統計的結果を用いて決めてある。そのほか、温度拡散の効果も考慮した。また、摩擦は地表面におけるものだけを考え、地表面に比例するとしてある。

計算は、大気静止の状態から始められた。仮定した熱源分布に従って時間とともに気温の南北傾度は増大するのであるが、この実験では 130 日ぐらいたつと、中層における南北両境界の温度差は理論的に不安定波の期待される値 52°C ぐらになる。そういう状態になると、乱れはランダムに発生すると考えられるので、いわゆるモンテ・カルロ・メソッドを用い、ランダムにしょう乱を与えたあとの変動を計算した。これまでの計算の時間々隔は 1 日であったが、これからは 2 時間以内の時間々隔である。計算の結果は 30 日目頃から (切断誤差のためと思われる) エネルギー的にみて不合理な状態にたちいたったので、一応計算を打ち切った。つぎに、以上の計算過程からえられた結果を列挙する。

(i) 長期予報、少くとも 1 カ月程度の大体の様子は、

熱量と摩擦効果を考慮すれば、数値予報的に扱うる可能性がある。

(ii) 数値実験の方法を駆使し、各予報期間に応じて熱や摩擦、地形のえいきょうなどがきめられるなら、季節予想に対する有力な手掛が与えられる。

(iii) 長期予報には切断誤差の問題が大切である。

(iv) ここで採用された 2 層モデルに固有な結果としては、

(a) 平均の場としょう乱の場の運動エネルギーおよび位置のエネルギーの間のやりとりの問題、あるいは摩擦や拡散によるエネルギー拡散の大きさがえられた。

(b) 3 細胞状の顕著な子午線循環がえられ、中緯度における急激な温度勾配や偏西風、地表偏東風の分布が計算できた。

最後に Phillips は、大気の大規模運動を理解する上に、その物理的過程を一層研究しなければならないが、それ以前の問題として、横たわっていた計算上の障害が計算機の発達と共にある程度は除かれたと述べている。

[付]

上述の数値実験と並んで、Corn および Fultz の dish-pan による実験のボウ大な報告\*\*\*がある。彼らは、実際の天気図と対比して、運動量の分布やトラフ、カットオフローなどの運動、生成についてのよい対比を見出している。dish-pan の実験にはコリオリの力が一定、相似性の不完全(粘性などのため)など実験そのものからさけられない欠点があるが、数値実験にはそれがない。しかし、dish-pan の実験は大気モデルが複雑化するに従って、数値実験ではえられない貴重な資料を提供するようになるかもしれない。(窪田正八)

\* 切断誤差、平均値の意味、渦度の表現など。

\*\* ジェットやフロントの形成発達、高低気圧の移動

\*\*\* Geophysical Research Papers, (G. R. D.), 1954, No. 34.