

た二つの積雲対流セルが直接相互作用を及ぼさない程度（たとえば 10^3km ）離れていてかつまわりの状態は両者ともほぼ同一であるような場合を想定すると、両者は時間の経過と共に似たような形態を保ちつつ成長発達し、やがて一連のライフサイクルが終る。その持続時間（たとえば1時間）の範囲内では両者のちがいは程度の差こそあれ保存され個々のセルの識別が可能である。その意味において一個の対流の変遷過程は deterministic である。

それでは、その一対の対流セルが消滅した結果としてはどのようなちがいが後に残るであろうか。ひとつには時間経過の途中においてより空間スケールの小さいゆらぎが生み出されているはずであるが、先に述べたように空間スケールの小さいゆらぎ現象はその時間スケールも小さいために、より早く deterministic な性格は失なわれているにちがいない。一方、より大きなスケールへの影響としては、積雲対流の発達がそれを包含するような更に大きな場（たとえば中規模擾乱）の特性によって決定されていたことから考えて、その大きな場に与えた熱や水蒸気や運動量の輸送量のちがいが互に 10^3km 離れた二つの中規模擾乱の間に結果的に残されたことになる。従って最初は同一であると仮定した一対の中規模擾乱はそのちがいを保ちつつ成長発達してゆきそのスケールに固有のライフサイクルを1~2日かかって終える。以下同様に延々とこの議論を繰り返せば良い。すなわち、常になにかがしかのゆらぎを内在している大気現象は、およそその空間スケールに固有な持続時間（あるいは寿命）の範囲内においてのみ deterministic であり、その時間以後に残るものは、それぞれのスケールの現象

が他に及ぼす作用の統計的性質だけである。

そこでもう一度第1図を見直していただきたい。図中のカーブの右下に D と書いてあるのは deterministic range を意味し、左上の S が statistical range を表す。つまり寿命或いは持続時間という見地から現象論的に求めたカーブが、このように考えてくると、実は大気現象の predictability を規定する本質的なものであることが理解されると思う。

くどいようだが、この議論において我々は何故大気現象の predictability の限界が約3週間であるのかについて細かい理由を論じているのではない。あくまでも、巨視的に見て大気のふるまいがそうになっているのだという現象論的事実を述べているだけである。

5. むすび

本論では最初から意識的に実際の予測手段（たとえば現有の数値予報モデル）については一切触れないで話を進めてきた。しかし従来の predictability に関する大かたの議論、即ち数値予報モデルを用いた初期値問題の解のふるまいという見方は観測の精度や計算技術が向上するにつれて、結果的には本論で大づかみに述べた大気現象の特性でさまる予測限界と同じことを意味してくるはずである。その際、予測の精度に関する評価を如何に行うか、たとえば数値モデルの各格子点上の予測値と実測値との差の root mean square などで評価するだけで果して良いのか、更には天気予報が本来背負っている人間社会とのかかわり合いから決められる情報価値とどう結びついてくるのか……等々の practical な問題が必然的に生じてこよう。しかしそれは本論とは全く次元の異なる世界の話である。

予測可能性と延長予報の問題

吉 田 泰 治*

1. はしがき

自然現象の時間経過を予測する場合に、予測する方法なり技術なりが有効である期間がどれだけかという問題がある。これはひとつにはその自然現象の物理的特性による面と、ひとつには予測方法の技術の水準という面とがある。

気象現象の予測のなかには、主として週期的な外因に支配される現象の経験的な予測とか、現象の発現を確率的に予測する方法などがあるが、ここではこれらの方法は除く。ここでとり上げるのは、現在および過去の状態（以下単に初期値という）が将来の状態を一意的に決める決定論的な予測、代表的な例として数値予報、の問題に限定する。

ところで、その初期値は一般に観測によってあたえら

* T. Yoshida 気象庁予報部電子計算室

れるのであるが、観測値やそれを適当に解析した結果は必ずしも大気運動の初期状態を正確に表現しているという保証はない。むしろ初期値は必ず誤差を含むものという前提に立って物事を考えなければならないであろう。

ここで、誤差を含む初期値から出発した予報と、全く誤差のない初期値から出発すると仮定した（というのは現実にはあり得ないから）予報とを比べたときに、

(i) 予報の誤差は平均的に初期の誤差をこえることはない。

(ii) 予報の誤差は予報期間とともに増加するが、初期の誤差を小さくすれば予報の誤差も小さくなる。

(iii) 予報の誤差は一定期間の後には初期の誤差にかかわらず必ず有限の大きさに拡大される。

のいずれの経過をたどるかという予測限界の問題が発生する。

次節で述べるように、この問題にはさまざまな角度から研究がなされているが、実際の予報という立場からみると、大気モデルの不完全なこととか観測点が決定的に不足していること、客観解析の不十分さ、数値積分の精度や計算機能力などの現実的・経済的制約から、一般に研究の面から指摘されている予測可能の限界に到達するには、はるかにきびしい条件のもとにあるといわなければならない。

ここでは予報技術の現状に則した実用的な意味での予測限界を中心にして、二三の問題点を述べてみたい。

2. 予測限界の検証

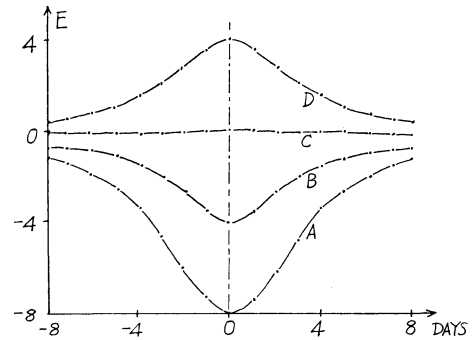
大気の基本的な性質からみた予測限界についてつ広田によって詳しく述べられているが、ここではいままで研究されたものの中から二三の例を引用して簡単に補足しておきたい。

(a) 経験的な方法による検証

一般に類似法と呼ばれる方法を応用する。しかしこの場合違った年の同じ季節の中から850mb, 500mb, 200mb全部を通じて類似している1組の状態を選び出すという方法をとる。選択の尺度としては2つの大気の状態の差を表示しような一定の計算方式を用いる。

こうして選ばれたよく似た1組の状態は、いわば僅かの差のある2つの初期値に相当することになる。そしてそれぞれの状態がどのような経過をたどって類似性を喪失するかを調べ、何らかの法則性が見出されれば現実の大気に内在する予測可能性を推論しようというのがその骨子である。

この目的で約45万組の状態を調べて、それを統計した



第1図 類似した大気の状態の変化. Lorenz(1969)による

結果を第1図に示す。たて軸には類似の程度を示す値Eを目減っている。負の値が大きいほど類似性が高く、E=0はランダムにえらんだ2つの状態の場合に相当している。よこ軸は類似を設定した時点を中心にとり、それから1日後を+1（1日前を-1）というように目減っている。

この図によると、初期においてE=-8というかなり似ていた状態が時間の経過とともに（時間軸の正負の側に）類似性が失われ、ランダムにえらんだ2つの状態に漸近する様子がA曲線によって示されている。ほかの場合については、はじめからランダムな程度に離れていたものは終始ランダムで（C）あるし、極端に似ていない状態はやがてランダムな程度にまで回復する様子（D）が示されている。

以上のことから、観測された自然の中におこる大気運動は、統計的にみて初期の微小な差をやがては拡大する性質をもつものと考えてよいであろう。

(b) 実験的な方法による検証

目的は気象現象の予測であるから、なるべく大気運動を正しく再現しうる大循環モデルを利用する。この力学モデルに適当な初期値を与えて大体1カ月程度の予報を走らせそれを基準にとる。つぎにこの初期値を僅かに乱してもう一度予報をやり直し（誤差予報）、すでに得られている基準の予報結果と比較するというよく知られている方法である。

このとき、制御しうるパラメーターが多く、大型計算機が自由に使えるような場合には、初期値に対して人工的に加える誤差の振幅や分布をさまざまに変えてみたり、モデルに含まれる物理プロセスを操作してその効果を調べたり、領域を限定した予報と全球予報とを比較したり、そのほかさまざまな興味ある実験を行うことがで

き、その結果が数多く報告されている。

代表的な例として、GFDL で行われた9層北半球モデルによる実験結果を第2図に引用しておいた。初期の温度場に0.2度程度のランダムな乱れを重ねた場から出発した誤差予報と基準予報の差を r.m.s. で表した結果がA曲線である。この誤差がどの程度かをみるために、初期値をそのまま予想図であると仮定（現況予報）したときの r.m.s. 誤差曲線Bを併記している。

このような実験結果からも、初期値として避けがたいと考えざるを得ない程度の微小な誤差によって一定の予測限界が生じてしまうことが示されている。この限界は用いたモデルによって多小の差はありうる。しかし多くの類似の研究結果を総合すれば、数値実験的な方法（あるいは現在の予報モデルの技術）によって検証される予測限界はほぼ20日程度であろうというのが共通した結論になっている。

(C) 理論的な方法による検証

これまで述べてきた方法はいずれも誤差が格子間隔のスケールで識別される程度のものであった。しかしもし誤差のひろがりをもっと広いスペクトル領域で考えようとすると、大気運動のゆらぎを一般的に扱う問題に帰着し、力学的な立場からの統計現象を明かにすることが必要になってくる。

このことについてはすでに前の報告者から詳しい物理的な説明がなされているが、二三の容認しうる作業仮説のもとで導かれた結論は、スケールの点からも大きさの点からも微小な初期の誤差に対して、大気という力学系には有限の予測限界が存在するというものであった。予報モデルには関係なく、初期に微小な観測の誤差があれば十分時間が経過した後はその誤差が拡大してしまう

ということは、大気の力学的な不安定性や運動の非周期性、エネルギーの非線型的な伝わり方に関連した問題になる。現在では理論的な方面からの予測可能の検証は仮説として提案されている段階であるが、これからはこの方向での発展に注目してゆく必要があるであろう。

3. 実用的な意味での予測可能性

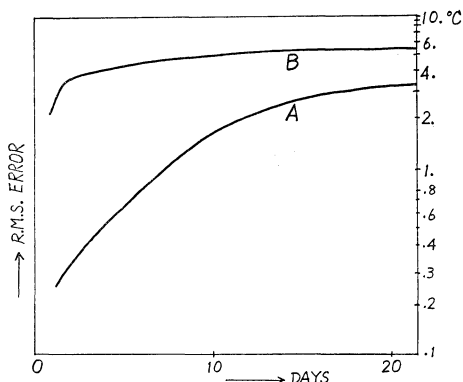
まず第1に実際の観測データを何らかの方法で客観的に解析した結果を大気の初期状態とみなしたとき、この初期値には前節(b)の実験で人工的に与えるような「微小」な誤差である保証はなく、場所によってはかなり大きな誤差であるかも知れない。第2には、予報モデルは大気中に起こりうる運動をすべて正確に表現しうるとは限られず、むしろ極めて不完全なものであると考えるべきであろう。そして第3に仮りにこのモデルが十分に精密なものであっても、これを数値的に解く際には切断誤差などの計算誤差は避けがたい。

これらの理由によって、前節(b)によって求められた予測の限界はそのモデルを実際の大気に適用した場合の最長の予測限界を示すものであるとみる事ができる。実際に数値予報モデルによる予報と実況とを比べてみると、一般には(b)の実験から期待される予測限界よりはもっと早く現況予報の水準に達してしまうのが実情である。

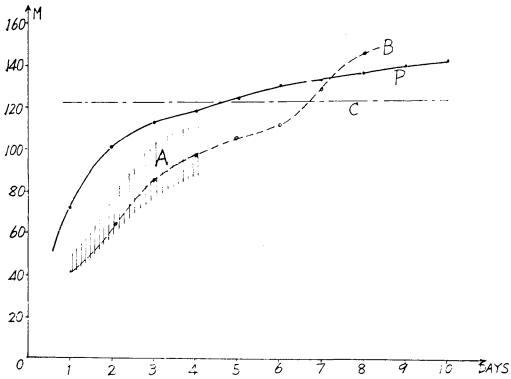
このような実用的な予測限界の意義は、統計的にみて予報期間をどこまでのばすことが意味があるのかを明らかにし、予報をなるべく延長できるように初期値や予報モデルの内容や計算方法を改良してゆくという普通の意味での予報モデルの開発に一定の指針をあたえる点にある。

ここではひとつの素材として現在われわれがもっているモデルにより実用上の予報がどの程度成功しているかを調べてみたい。用いた力学系は100mbを上限とする4層プリミティブモデル、北極を中心にして平均380kmの間隔をもつ51×51個の格子点でおおわれた北半球領域を予報の対称としている。海面からのけん熱やせん熱の補給が簡単な形で計算され、地表面附近での摩擦と水平混合、大規模運動にともなう凝結、対流の調節型パラメタリゼーションが含まれている。モデルには大規模な山岳など地表面の起伏が導入されているが、陸地と大気との間の熱エネルギー交換や放射過程は考慮されていない。

このモデルは延長予報のためのテストモデルとしていままで30例ほどの96時間予報が試みられているが、ここ



第2図 温度の r.m.s. 誤差。A: 実験結果, B: 現況予報の場合 Smagorinsky (1969) による



第3図 4層北半球プリミティブモデルによる実際の予報結果(500mb). P: 現況予報, C: 月平均天気図による予報, A: 12例の96時間予報, B: 192時間予報

では昨年末から今年はじめにかけての12例についての子報結果を第3図に示しておいた。たて軸は500mb高度予報の実況に対する r.m.s. 誤差、よこ軸は予報時間を日の単位で示している。12例の4日予報の誤差はすべてかけをほどこした区域に入り、こころみに予報を8日まで行った1例を点線で示している。現況予報と、月平均天気図をそのまま予想図であると仮定したときの誤差をそれぞれ太い実線と鎖線とで示しておいた。

予報結果をどのような数値で表現するのが適切かという議論はさまざまであるが、従来数値予報の成績を表現するのに各国で伝統的に用いられてきた r.m.s. 誤差や相関係数などを一応の目安として採用している。

この結果からみれば、用いたモデルによる実用上の予報(という行為)の限界はほぼ6~7日程度、同じような図を地上気圧の予報に対して描いてみると5~6日で見況予報の誤差に達してしまうことが示されている。

予測限界はある種の平均量たとえば帯状平均値などに対してはもっとのびる可能性のあることが議論されたこともあったが、このモデルの実験によれば必ずしもそのことは確かではないこと、側面の境界条件によって特定の波長の波が強制され、これが予報の誤差を拡大するひとつの大きな原因になっていることなども明らかになった。

数値実験の手法による予測限界の研究では、北半球モデルによる予測限界は10日程度といわれている。現在のわれわれのもっている技術の水準は必ずしも満足すべき

ものではないが、これから延長予報を力学的方法で実施しようとするとき、どのような点を主として改良すべきかにさまざまな情報が得られつつある。

4. むすびにかえて

大気の子報可能性について、主として技術的側面からその現状を簡単に紹介してきたのであるが、このシンポジウムの共通の主題になっている今後の予報のあり方について、特に力学的な方法による延長予報に関連して、個人的な見解を述べむすびにかえたい。

(i) ここ一两年内に各国の気象センターは4~5日先を予報するモデルを完了するものとみられる。予報領域は(北)半球で十分であろう。予報結果に解析的なあるいは実用的な観点からのさまざまな検討が加えられ、モデルの改良が順次すすめられることになる。

(ii) これと殆んど並行して初期値をなるべく正確に記述すること、特にデータ空白地帯を埋めるための観測や解析の技術が開発することが強く要望されてくるであろう。解析と予報とを有機的に組み合わせたシステムも検討されることになる。

(iii) 10日またはそれ以上の予報の実用化は、(i)によって十分な経験が生まれ(ii)によって精度のよい初期値が得られるという前提が必要であろう。今までの数値実験の結果を参考にすると、予報領域は全球をとる必要があり、気候的な値で代用できた環境条件(海水温、冠雪、地面の湿りなど)自身を予報の対称とすることも検討される。モデルに導入される物理過程が高度に精密化される必要があろう。

(iv) 20日程度の予報を行うことは、殆んど現在提唱されている予測可能な限界に挑戦することになる。このような挑戦をルーチン的に行うことの現実的な可能性や経済性が検討されるものと推定される。しかし開発された全球モデルは、例えば熱汚染や大気汚染の気候や生態に及ぼす影響を「予測」といった面に有効な方法となるであろう。

(v) より長期の予報には、大気の大規模運動の統計現象を記述する力学の確立、あるいは今の段階では未知の広義の数値予報の新しい方法による可能性が強いように思われる。

なお短期予報の精密化や中小規模現象、台風など特殊な現象の予報の可能性については全く別の問題であるから一切割愛したことをお断りしておきたい。