

第8表 うず度の精度 ($T=24$)

	相関係数	類似示数	平均平方差
500 ζ	0.66	0.52	1.93
850 ζ	0.41	0.31	1.46

での期間について、fine mesh 内におけるうず度の精度は、第8表のとおり 850mb であまり良くない。また上昇流についても700mb に比べて900mb の精度は目立って良くない。

この原因についてはボーガス作業がないことだけでなく、地形・非断熱効果、とくにエクマン層内における摩擦力の取り扱いに難点があるためであろう。境界層内においては多量の熱と水蒸気が補給される層だけに、そこでの収束量の多寡は直接上層の凝結量に影響することは、何も台風だけの問題ではないように思える。とくに対流現象の予報については、下層のうず度や水蒸気量の予報精度が決め手になるほか、次節で述べる天気分布予想図の精度にも、重要な影響をもたらすことになる。

5. 天気分布予想図の問題

ここ2カ年に亘って全国予報技術検討会において、天気構造の問題が取り上げられてきた。その目的とするところは、結局は天気分布予想図を作成する技術を開発することである。前にも触れたが、レーダーや気象衛星で観測される降水現象や雲の分布は、今の物理量では必ずしも適切に表現されていない。天気構造とより密着し

た要素が見つかって、悪天域の3次元解析ができなければ、天気予報精度は向上しないだろう。われわれが知り得る気象要素やそれから誘導される物理量を、効果的に組み合わせることによって、よりよく天気の表現ができないだろうか。例えば上昇速度と水蒸気量を組み合わせた量が、降水との関係はより密接だし、それに移流量や安定度などをうまくアレンジすることによって、大雨のポテンシャル予報に利用するといった方法がそれである。本庁ではすでに二次製品といわれる物理量が、ルーチンに利用されているが、今後この分野を大いに開拓し、天気分布予想図の FAX 化を実現させるべきである。幸い ITOS の導入に伴い、雲の高さや雲形がある程度推定できるようになったのを機会に、意欲的なアプローチを期待したい。

1972年、73年に東京地方の予報が大きくはずれた82回のうち、主観的な分類ではあるが、明らかにパターンのはずれによると思われるものが4割、パターンのはずれより、むしろ天気へのほん訳の誤りの方が主因になっているものが6割に達している。ほん訳の分野については、個人的な経験と勘に頼る比率が多過ぎるのが現状であり、できるかぎりの客観化と、予報中核においてシノプティック・スケールにおける天気予想図を作成して地方に提供することが、今後の課題であろう。

この報告の資料作成には、予報課の鈴木義男、市沢成介、青木孝および業務課の菊地恒之の各氏にお願いした。記して厚くお礼を申し上げる。

大気現象の時間空間スケールと Predictability

廣 田 勇*

1. まえがき

“天気予報はどこまで発展可能か?” という素朴にして重大な質問の意味はふた通りあって、“何日先まで”と“どの位キメ細かく”に大別されようが、しかしこのふたつがまたお互いに無関係ではないために多少話は複雑化してくる。過去20年間、数値予報とその拡張としての大気大循環数値実験の歴史はその大部分がまさにこの質問に対する解答を探し続けてきた道のりであったとも言

えよう。その過程においては、基礎的理論的研究からモデル実験、更には現実の観測値に基づく具体的予報例に至るまでさまざまな手法・アプローチが楽観論と悲観論にいろいろれた一連の葛藤を演じ続けてきたのは良く知られているとおりである。その間、predictability に関して書かれた数々の論文や解説は国内外を問わず枚挙にいとまがない。この問題に多少なりとも関心を寄せている人ならば既にいくつかの解説を読まれていることと思う。

このような事情のもとでは今更とめを行ってまでも所詮屋上屋を重ねる愚を繰り返すのみであろう。従って

* I. Hirota 気象研究所予報研究部 (現在京都大学理学部)

ここでは、これまでの predictability の議論の大部分を占めていて初期値の問題及び数値モデルの問題から一応はなれて、純粋に大気現象それ自体の性質を現象論的立場からながめなおすことによって従来の predictability に関する大よその結論と同じことがやや定性的ながら説明出来ることを示そうと思う。

2. 大気のゆらぎ

上述の如く、以下当分は我々が如何なる観測システム・数値予報モデル・計算機を現実を持っているかについては一切忘れて上で話を進める。

まず大気の実体を考えよう。ある長さの時間についての平均状態（いわゆる normal あるいは climatology）はいま一応既知のものと仮定する。そのとき平均状態からの時間的・空間的偏差を“大気のゆらぎ”と仮に呼ぶことにする。この“ゆらぎ”とはふつう良く用いる“擾乱”という言葉よりやや広義の内容を持つ。

さて、現実の地球大気中にはさまざまなタイプのゆらぎが存在している。それらは皆それぞれの成因・維持機構に応じた固有のスケールを持っていると同時に相互に深い関連を有している。いまある特定の空間スケールを持つゆらぎのひとつをを考えてみるとそのゆらぎ（あるいは擾乱）にはその存在を何らかの意味で規定するより大きなスケールの場が随伴している。抽象化された例としては帯状流の力学的不安定性に起因する波動擾乱の発達、あるいは不安定成層中の対流の成長などが挙げられよう。しかしここで考える場とは上の例のような空間的に一様でかつ無限のエネルギー源を持つものではなく、むしろ場それ自身がひとつのゆらぎとして空間的にも時間的にも限定されたものと考えてべきである。すなわちそのより大きなスケールの場は、更に大きな場の中に培養されているわけである。一方、ひとつのゆらぎの発生・発達は、その自ずからの成長の結果として場に何らかの影響を及ぼすと同時に非線型効果によるエネルギーのカスケード、或いは自らの状態に必然的に随伴するさまざまな不安定性などにより、より小さなスケールのゆらぎを作り出してゆく。この間の事情は次の有名な四行詩に集約されている；

Great whirls have little whirls,
That feed on their velocity;
And little whirls have smaller whirls
And so on to viscosity.

—L.F. Richardson—

地球大気システムの根源的な動力源としての太陽エネルギー入射による温度場の形成、運動の発達、乱流粘性消散、そして再形成された温度場からの長波放射という一連のエネルギーサイクルは、斯様にしてバランスの状態を作り、時間的にはほぼ一定の地球大気に固有なエネルギースペクトル分布を生み出しているわけである。

このように考えてみると、大気のエネルギースペクトル分布とはおよそ二つの相異なる側面を有していることがわかるであろう。即ち、ひとつには種々の気象力学的不安定性によるいくつかの特定空間スケールのゆらぎが卓越していること、他方にはそれら個々の異なるタイプのゆらぎといえども全く他とは独立に存在することは許されず、本質的には流体運動の非線型性に起因するカスケード効果によって異なる空間スケールのゆらぎ同志の間に強い相互作用を持っていることである。

このことは言い換えると、今仮想的に考えるあるひとつのゆらぎは発生・発達そして非線型効果による減衰・消滅という一連の物理的プロセスの中で、必然的にそれ自身に固有の存在許容時間、もっとひらたく言えば“寿命”を持っていることになる。その寿命とは当然考える擾乱の空間スケールに依存しているにちがいない。そしてその寿命の長さは、巨視的な現象論の立場から大よそ見積ることが出来るはずである。

3. ゆらぎの時間スケール

一口に時間スケールと言ってもその意味するところはそれぞれの現象の持つ性質によって多少のちがいは存在するし、また定義の仕方によってある幅を持った長さを考えねばならぬ時もある。

一番わかり易い時間スケールの定義としてはいわゆる“現象の周期”がある。これはあるサイクルが形状を変えないで繰り返して生起する現象に随伴するもので、日変化や年変化の如き外力励起によるものや、空間の一点で見た single wave の通過によるものなどが例として挙げられよう。

一方、必ずしも繰り返して生起することを要しない現象（たとえば台風とか集中豪雨など）に関してはその発生発達減衰消滅という一連のプロセスに要する寿命あるいは持続時間という見方が時間スケールの定義としてふさわしい。

しかしながら、現実の大気中に存在するさまざまなゆらぎ現象は、単純な周期性や逆に明白な単一のライフサイクルを示すことは稀れであり、多くの場合はその両者の性格を程度の差こそあれ共有していると考えられる。

従ってある特定のゆらぎ（あるいは擾乱）のふるまいを現象論的にながめると周期性の見方からきめられる時間スケールと持続性を見地から定義される時間スケールとがそれぞれ別個に存在し、全体としてある幅を持った時間スケールというものを考えざるを得ないことになる。

以下、いくつかの具体例について上に述べたような意味での現象の時間スケールを見積ってみよう（シンポジウムの際にはさまざまな空間スケールの観測解析例を図示したがここでは紙数の都合上二三の例を言葉で説明するにとどめる）。

短いほうの例としては集中豪雨の雨量強度の時間変化を考えると、特定の一地点の雨量は約10分間程度の時間間隔に強い降雨が集中しそれが二三回繰り返されるのが見られるが、もう少し巨視的に（あるいは総観的に）ながめると集中豪雨をもたらす強い降雨域が空間的にある組織化された形態を保ちつつ約1時間ないし2時間程度追跡されることがわかる。同様な例ではレーダエコーなどからとらえられる中規模擾乱（空間スケール $\leq 10^3$ km）の通過周期は約1日であるが全体的に見れば同様な現象は3日以上持続性がある。

一方大規模現象の例としては、中高緯度 500mb 面高度場の半月平均からの差として調和解析などから検出される超長波は〔波長/位相速度〕として定義される通過周期よりやや長時間（2～3週間）にわたり確実に個々の波の identification が出来る。調和解析による波動という見方ではなく特定領域における即物的な意味でのブロッキング現象に関する統計事実も、同様に最大20日な

いし25日程度の持続性があることを示している。大気のゆらぎとして最大の空間スケールを持つもの、たとえば緯度平均帯状風速（あるいは平均南北温度傾度）の時間的変動の様子を見るとやはり3週間程度の特徴的な時間スケールを持っていることがわかる（俗に zonal index cycle ≈ 20 日と言われる現象を想起されたい）。

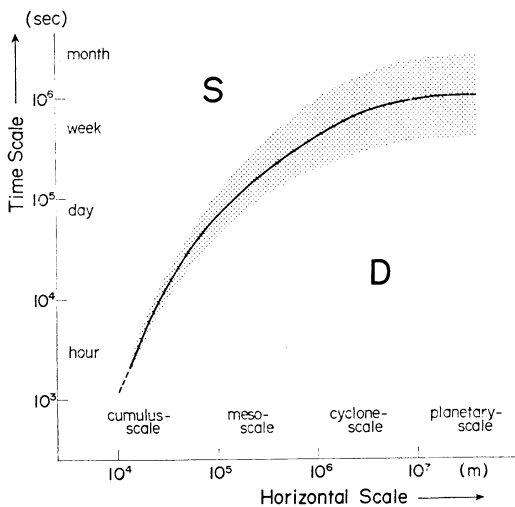
以上の事実をきわめて模式的に図示したものが第1図で、この図には縦軸に時間スケール、横軸に空間スケールを取って“ゆらぎ現象の持続時間”の見地からきめた大よその時間スケールを適当な幅（ハッチ）をつけてフリーハンドで描いてある。この図で言わんとする重要なことは数値自体の絶対値の大きさではなく、ひとつには空間スケールが大きくなると時間スケールも大きくなること、もうひとつには地球のサイズできまる最大の空間スケールに対応して時間スケールのほうにもある上限が存在することである。

実はこの章で考察したゆらぎの時間スケールというのが、本論の主題である予測限界の問題と密接なかかわり合いを持っていることを以下に述べよう。

4. 大気現象の determinism

大気中に存在するさまざまな物理現象のひとつひとつは、量子論における不確定性原理まで遡らぬかぎり、本来流体力学方程式や熱力学の法則に支配される deterministic なもの（初期条件や境界条件が与えられればその後の状態が一意的に定まるという意味）と考えて良いであろう。しかしこのことを単に観念的にのみ理解するかぎりにおいては、“世の中すべてなるようになっていくだけ”という低次元の運命論と何ら変りはなくなってしまう。問題は初期条件や境界条件を“完全に知る”ということが本来原理的に意味を持たないことにある。このことは最初に述べたように我々が現実如何なる観測技術を持っているかに無関係に要請される自然認識の根本原理である。換言すれば、単に誤差という観測技術の未熟さに帰せられるように聞こえるがそうではなく、我々は常に現実の大気の状態のある一部分しか知り得ないという前提から出発すべきものなのである。従って問題は、その部分的情報をもとにしてある種の未来予測を試みる場合に、未来の状態に関して得られる情報の質と量とが、単に用いる予測技術のみならず現象それ自体の持つ固有の性質に依存することがあるかどうか、という点に移ってくる。

いささか話が抽象的に流れすぎたので具体例について考えてみよう。いま互にわずかだけ異なる状態を持つ



第1図

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 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