

カオスの壁を越える天気予報への挑戦

筑波大学地球科学系 田中 博 (Hiroshi L. Tanaka)

Institute of Geoscience, University of Tsukuba and
Frontier Research System for Global Change

英文要旨

A Challenge of Medium-Range Weather Forecasting beyond the Chaos

In this study, we examined a predictability of a simple nonlinear model for the barotropic atmosphere that featured parameterized baroclinic instability. The model is unique in that all possible high-frequency modes and strong dynamical instabilities have been removed from the dynamical core of the model. We demonstrated that the model can simulate a life-cycle of a realistic blocking anticyclone with the right structure and behavior.

For the study of predictability, we first integrated a control run more than 1000 days. A series of 100 days integrations (experiment run) are then undertaken by superposing small (2%) error on the initial data along the trajectory of the control run in a phase-space. The present model has a capability to predict a blocking two weeks in advance despite the superimposed initial error. According to a statistics of 50 ensemble of the experiment, the model appears to have a predictability of 35 days within the model atmosphere. The same model is applied for a real atmosphere. The residual forcing is evaluated diagnostically from observation and added for the barotropic model to construct a perfect model. We showed that the initial error does not grow for the perfect model of the real atmosphere. It is demonstrated that a large-scale barotropic flow is less chaotic and is more predictable than a 3-D flow.

はじめに

大気の運動とは空気という質量を持つ物質の運動であるから、当然運動の法則に従う。つまり、静止している空気になにも力が加わらなければ、その空気は静止し続ける一方、何かしらの力が加われば加速度を生じてその空気は動き始める。「風」は空気の運動であるから、空気に加わる外力が全て既知のときには風の変化が説明できると同時に将来予測も可能となる。この原理に基づいて、大気の将来像を予測しようという試みが数値天気予報である。現在の風の分布を世界中で同時に観測し、これを初期値として大気の運動方程式を高速コンピュータを用いて解くことで将来の風の分布が計算できる。気象学者がこの原理に気付き、大型研究プロジェクトとして大気大循環モデルと呼ばれる予報技術を開発し始めたのは、1940～50年代にかけての事であった。このプロジェクトは成功をおさめ、コンピュータの高速化と比例して天気予報の精度は飛躍的に向上し、これが、今日

における天気の数値予報への道を切り開いたのである。

かつては天気予報といえば統計的手法を駆使して、経験ある予報官が長年の勘をまじえて発表するものであった。たとえば、「夕焼けは晴れ、朝焼けは雨」などの経験則は、偏西風により天気が西から東に向かって移動することと関係し、今日では物理的根拠も明らかである。西に晴天域があれば夕焼けが鮮やかになり、その晴天域は偏西風に流されて明日にはこちらにやってくるというわけである。つい一世紀前までは、対流圏の上には成層圏があり、その境界には100m/sにも及ぶ偏西風ジェット気流が存在するという認識さえ我々にはなかったのである。近代気象学の発展は目覚ましく、今日では、世界的に見ても予測が最も困難といえる日本近辺でさえ、3日先程度までなら十分に正確な天気予報が出せるようになった。このような天気予報技術の革命を導いたのは地球流体力学に基づく大気の運動の理解と、複雑な非線形連立微分方程式を無理やり数値的に解くことのできる高速コンピュータの出現であった。

長期予報の夢とカオスの発見

流体力学の基礎方程式として知られるナビエ・ストークスの方程式は、気象学ではプリミティブ方程式と呼ばれる方程式系にまとめられ、パラダイムが築き上げられてきた。短期予報と呼ばれる数日先までの天気予報技術の目に見える進歩は、長期予報に携わる研究者達に、1週間先、1ヶ月先、さらには半年先の予報の夢を抱かせた。彼らは、大気システムの理解が一層深まり、初期値の精度が観測技術の向上にともなって向上すれば、同様の原理で必ず長期予報が可能になると信じていたのである。それは気象学における物理帝国主義の最盛期といえよう。

そのような長期予報の夢を打ち砕いたのは、1960年代のエドワード・ローレンツによるカオスの発見であった⁽¹⁾。他の気象学者達と同様に、彼独自の大气大循環モデルを、当時では最も早いコンピュータを用いて走らせていたローレンツは、ある日計算の途中でシステムがダウンするというハプニングにみまわれた。仕方なく途中計算出力を入力し直して再計算を試みたローレンツは、再計算の結果がそれ以前に独立に行った同一の計算結果と全く異なることに気が付いた。普通の人なら、タイプミスでもあったのだろうと何気なく見過ごしてしまったかもしれないこの出来事から、ローレンツは、20世紀最後の大発見とも言われるカオス理論を開花させたのである。

彼はこのカオスの発見を長期予報におけるバタフライ効果として分かりやすく説明している。つまり、長期予報において同一のモデルによる数値実験を2度行う。但し、一方の実験には大気の初期条件を乱す1匹のバタフライ（蝶）を入れる。風の分布が蝶の羽ばたきの分だけもう一方の実験と異なるような初期値から予報を始めるのである。すると初期の大気の微妙な乱れはより大きな乱れを呼び、やがては地球規模への乱れへと拡大して行くため、二つの長期予報は1ヶ月も経たない内に全く異なる将来の大気を予測してしまうのである。

このバタフライが、実はローレンツによる長期予報の再計算の際に含まれていた有効数字以下の入力誤差を意味することは容易に理解できよう。もともと気象観測というものは何十キロメートルも隔てて行われるものであり、観測点の間の情報は入力できない。

また観測そのものがバタフライ効果程度の避けられない誤差を含んでいる。したがって、たとえ大気大循環モデルが完璧なものであっても、避けられない初期値の誤差がより大きなスケールの誤差に拡大する、という大気の大規模な非線形性特有の性質により、長期予報は原理的に不可能となる。これがカオスの本質であり、方程式の解（つまり将来予測）が決定論的に求まるにもかかわらずその解が意味をなさないことを述べている。今日では、乱流などの流体力学をはじめ、あらゆる分野でカオスの研究が応用されている。

ブロッキング高気圧

一般に数値天気予報の予報限界はこのカオス理論により約2週間と言われる。つまり、2週間先の決定論的な天気予報は原理的に不可能であることがあたかも証明された事実のように、研究者の認識として浸透している。ところが、大気中にはグローバルな現象として、2週間から1カ月程度のライフタイムを持つブロッキング高気圧という停滞性の渦がある。たとえば、梅雨前線が活発化する6月から7月にかけてオホーツク海で発生し、日本付近に高緯度の寒気を送り込むオホーツク海高気圧などはブロッキング高気圧である。また、世界中で異常気象が同時発生する際には、たいていこのブロッキング高気圧が関係している。このブロッキング高気圧が偏西風ジェット気流をブロックしてしまうブロッキング現象が予報可能になれば、それは長期予報における画期的なブレイクスルーであると同時に、カオスの壁が破られることにつながるのかも知れない。したがって、ブロッキング現象の解明は、長期予報業務において重要であると同時に、多くの理論的研究者により注目されてきた。しかし、未だにその形成のメカニズムは解明されておらず、長期予報も成功していない。

著者はこのような背景の下でブロッキングの数値シミュレーションをいろいろな角度から試みた結果、この現象がエネルギーの逆カスケードで説明できると考えた⁽²⁾。傾圧不安定により励起される高低気圧擾乱のエネルギーの多くはより小さいスケールの渦へとカスケードしているが、一部は逆カスケードを起こし、より大きい渦へエネルギーを送り込んでいる。最も大きい渦として認識できる現象が実はジェット気流で、それは地球を取り巻く波数0の環流である。ジェット気流が高低気圧擾乱のエネルギーで維持されていることは以前からも知られていた。しかし、これを乱流が作り出す安定渦であると認識するものはこれまでなかったようである。このジェット気流は、チベット高原などの大規模山岳や海陸分布の影響でメアンダーを起こし、波長10000km、つまり東西波数1～3程度の定常プラネタリー波を形成している。高低気圧擾乱からより大きいスケールへのエネルギーの逆カスケードが、波数0のジェット気流まで行かずに波数1～3程度のプラネタリー波に閉じ込められたとき、あたかも木星の大赤班のように、巨大渦が形成され安定に持続される。著者は、それがブロッキング形成のメカニズムであると考えた^{(3),(4)}。この意味では、ブロッキングはエネルギーの逆カスケードによって無秩序な乱流から生じる安定渦であると言える。

ブロッキングのシミュレーションと予報実験

本研究で用いた予報モデルの特徴は、モデルの力学系に含まれる重力波などの高周

波モードや強い力学的不安定を排除し、比較的安定な低周波モードだけで力学系が構成されている点である。そして、高低気圧波動の励起とそこからのエネルギーの逆カスケードには細心の工夫が凝らされている。

図1は北半球の上層天気図に相当し、高緯度ほど気圧が低く、気圧の等値線に沿って地衡風が西から東に向いて吹いている様子を高度場で表している。アラスカ付近に高気圧、その南に低気圧の渦が双極子のペアになっているが、この高気圧がブロッキング高気圧である。ひとたびこの双極子パターンが形成されると、その循環は停滞したまま長期間持続し、アラスカや北米に異常気象をもたらすのである。数値シミュレーションとしては、ブロッキングの構造や停滞性、持続性といった特徴をほぼ完璧に再現している。

図2は、2週間前の初期値に観測誤差程度の誤差を上乗せして同様の数値シミュレーションを繰り返した結果である。アラスカ付近にほとんど同じブロッキングが再現されている。つまり、ローレンツが言うようなカオスによる初期誤差の拡大はこのモデルでは起こらず、モデル大気の前報限界は2週間と言われるカオスの壁を十分に越えている、という興味深い結果を示している。

図3は前報誤差の成長をエネルギーの次元で表現したもので、^{(5),(8)} 初期に与えた2%の誤差が、時間とともに増大し、約100日後に飽和している様子を表している(実線)。点線は基準となる持続前報誤差のレベルで、実線がこれより低ければ前報としての価値がある。波線は50例の前報実験(図-3b)の標準偏差の範囲を表す。前報誤差が飽和値のいたい40%位にまで増大したところを通常は前報限界としているので、このモデルによる実験結果ではモデル大気の前報限界は約35日となる。ちなみに、今日気象庁などで現業として行なわれる数値前報の前報限界は高々8日である⁽⁶⁾。したがって、この実験結果は興味深いものであるが、あくまでモデル大気についての前報限界であり、現実大気に対するものと混同してはならない。

そこで、本研究では現実大気にこのモデルを適用することを試みた。はじめに実際に観測される大気の動きにモデル大気が一致するように、このモデルに必要な外力を観測大気から残差項として逆算する。次に、この残差外力を与えてある日の初期値からモデルの時間積分を行なうと、このモデルは一月先までも観測大気と全く同じ振る舞いをすることを確認した。つまり、現実大気に対するパーフェクトモデルが完成する。このような前報が現実になれば夢のような話であるが、残差外力を観測から診断的に求めているので前報にはなっていない。しかし、この実験結果が当たり前かというとは決してそうではない。このモデルにもバタフライ効果程度の初期誤差やモデル誤差は含まれているのであるが、この順圧大気モデルではその誤差がカオス理論が唱えるようには増幅しないのである。さらにこのパーフェクトモデルに小さな初期誤差を入れてみた。すると、全順圧大気エネルギーとの比で2%の誤差に対しては10日先まで前報が可能であり、0.2%の誤差に対しては20日先まで前報が可能であるという結果を得た(図4)。つまり、前報限界は誤差の対数に比例し、誤差エネルギーが1/10になるごとに前報限界は10日伸びることを明らかにした⁽⁷⁾。ここで、予測変数は大気の鉛直平均量であるから、観測値に避けられないランダム誤差があっても、観測数の平方根に比例して平均誤差は縮小するので観測数を増加させることで、初期誤差を限りなくゼロに近付けることが原理的に可能である。この実験事実、このモデルにカオスの壁など存在しないことを意味する。

図5はパラメータをチューニングした順圧-モデル（実線）と対応する持続予報（点線）のアノマリ相関の例である⁽⁸⁾。予報実験の初期値は1989年1月27日00Zから1月31日00Zまでの20例（下図）で、その平均が上図の実線である。この結果では予報をはじめて9日後にアノマリ相関0.6を下回り、予報限界は9日に延びている。持続予報は2日で限界に達しており、このモデルの予報スキルが認められる。

まとめ

本研究では、簡単なモデルを用いて長期予報に関する一連の数値実験を行なった。はじめにモデルを長期間時間積分し、それを基準ラン (control run) とする。次に実験ランとしてその解軌道上に観測誤差程度の誤差を与えた初期値から100日間時間積分を行ない、誤差の成長を調べた。事例解析としてブロッキングが発生している場合とそうでない場合について北半球高度場の予報結果と誤差の成長を解析した。解析の結果、初期の誤差はモデル大気においてほとんど成長しないことが判明し、ブロッキングのあるなしに拘わらず約2週間と言われる予報限界の壁を越えてモデル大気の長期予報が可能であることを示した。

統計的信頼性を得るために同様の実験ランを解軌道上の様々な点で繰り返し、50例の実験結果の平均を求めたところ、この予報モデルの予報限界は約35日と判明した。この予報モデルはカオスによる鋭敏な初期値依存という長期予報における本質的な難題を回避しているという点で興味深い。この統計結果はあくまでモデル大気についての予報なので、現実大気についても同様の実験を行なった。観測される大気の動きにモデル大気が一致するように、モデルに必要な外力を観測大気から残差項として逆算し、その残差外力をモデルに組み入れることで、現実大気に対するパーフェクトモデルを構築した。そして、このパーフェクトモデルに初期誤差を与えることで、誤差の拡大を調べた。その結果は、モデル大気の場合と同様に、約2週間と言われる予報限界の壁を越えて長期予報が可能であることを示唆した。

したがって、もしカオスを回避しつつ、モデルの精度向上を図ることができれば、本研究で示した方法は今後の長期予報の一方法として役立つ可能性がある。現実大気に応用するには数多くの難題をクリアーする必要があるが、このような実験による大気現象の理解と知識の積み重ねが、今後の予報技術の向上につながるものと考えられる。

文献

- (1) Lorenz, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130–141.
- (2) 田中博, 1993: エネルギーの逆カスケードによるプラネタリー波の増幅とブロッキング形成の数値実験. *天気*, **40**, 733–750.
- (3) Tanaka, H. L., 1991: A numerical simulation of amplification of low-frequency planetary waves and blocking formations by the upscale energy cascade. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2919–2935.

- (4) Tanaka, H. L., 1998: Numerical simulation of a life-cycle of atmospheric blocking and the analysis of potential vorticity using a simple barotropic model. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **76**, 983–1008.
- (5) Tanaka, H.L. and D. Nohara, 1997: A new method of extending predictability of the medium-range weather prediction beyond the two-week Barrier of chaos. Proc. 11th Conf. on Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics, June 1997, Tacoma, Washington.
- (6) Kalnay, E. M. Kanamitsu, and W.E. Baker, 1990: Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **71**, 1410–1428.
- (7) Nohara, D. and H.L. Tanaka, 2001: Logarithmic relation between the initial error and predictability for the barotropic component of the atmosphere. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **79**, 161–171.
- (8) Tanaka, H.L. and D. Nohara, 2001: A study of deterministic predictability for the barotropic component of the atmosphere. *Science Report, Inst. Geosci., Univ. of Tsukuba*, 22A, 1–21.

Geopotential Height
Run 01 Day 955

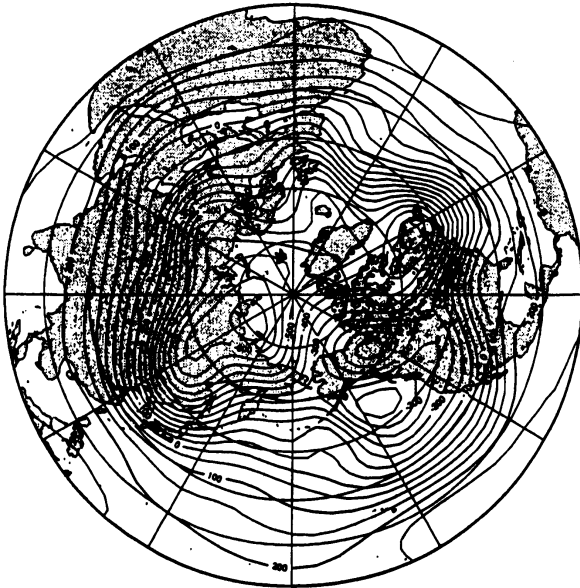


図1 モデル大気の北半球上層天気図

Geopotential Height
Run 04 Day 955

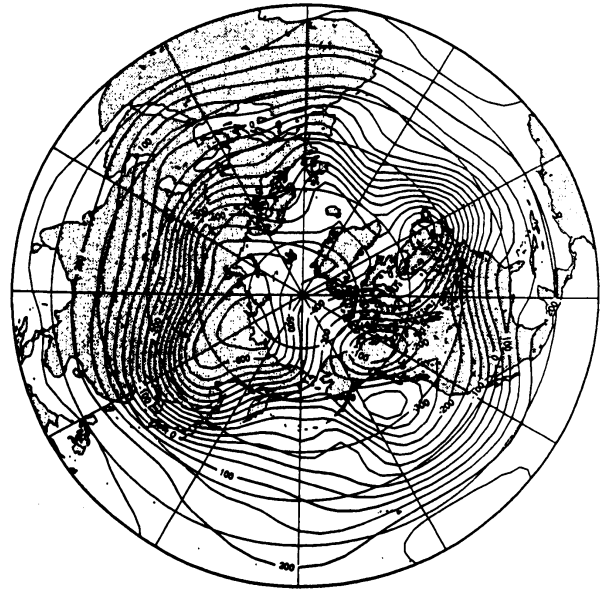


図2 図1を2週間前から予測した実験結果

Time Series

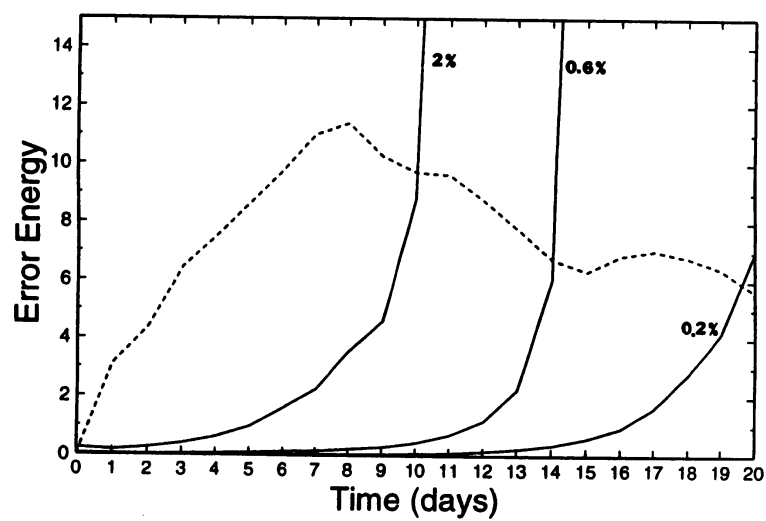


図4 現実大気における予報誤差の成長

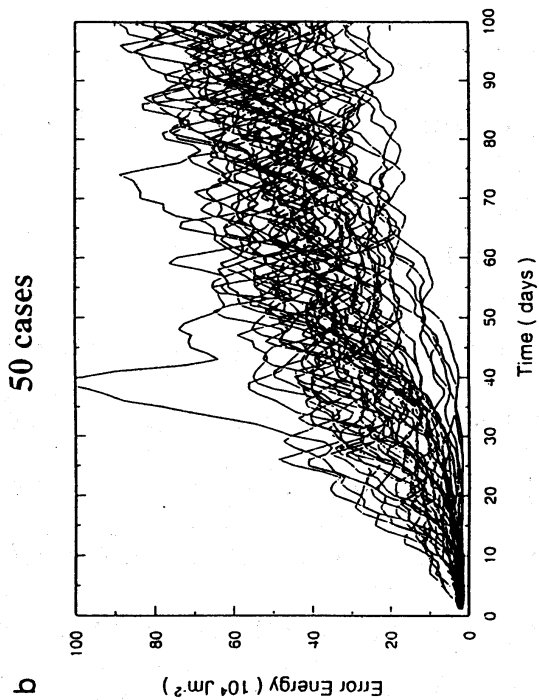
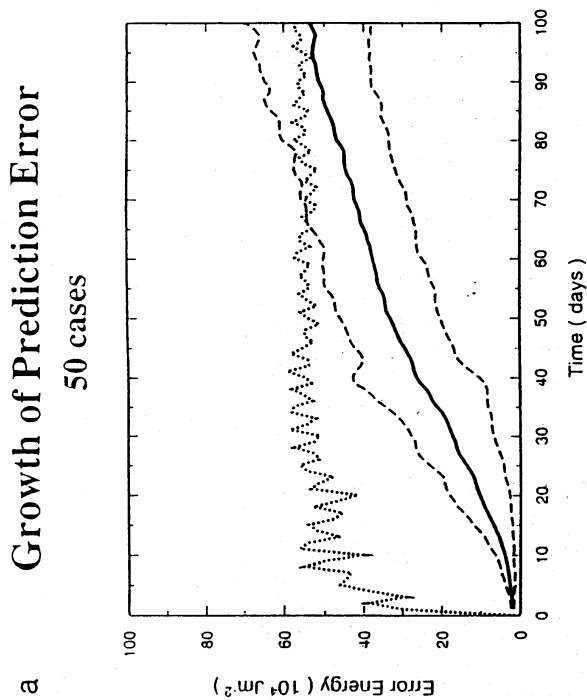


図3 モデル大気における予報誤差の成長

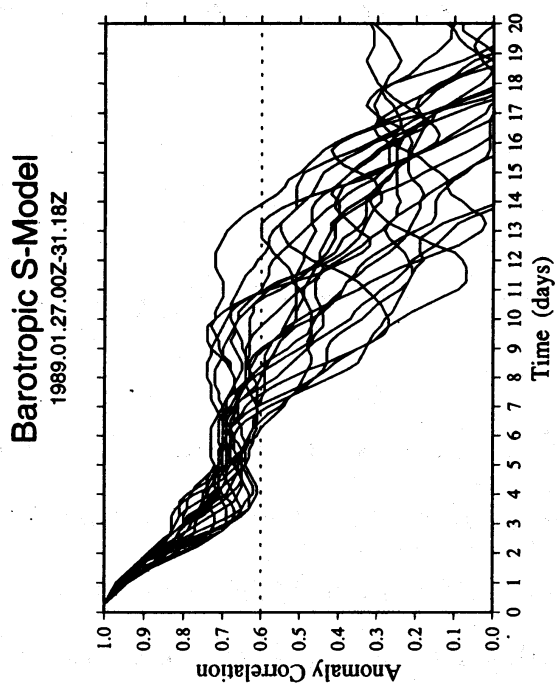
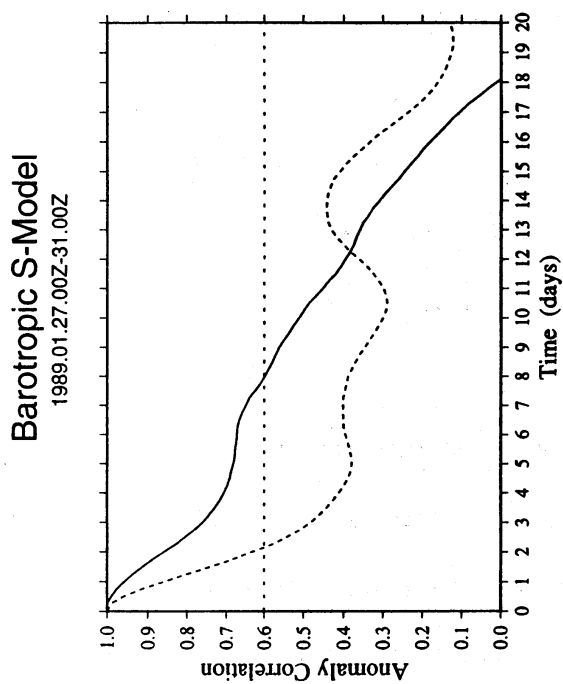


図5 現実大気におけるアノマリ相関の例