

順圧モデルを用いたエネルギーの逆カスケードと ブロッキングの数値実験

筑波大学地球科学系 田中 博 (Hiroshi L. Tanaka)

1. 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、今日における数値天気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カン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。

2. 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、彼独自の大気大循環モデルを、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、停電後の計算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だけかもしれないこの出来事から、ローレンツは、今世紀最後の発見とも言われるカオス理論を开花させたのである。

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。

3. 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ークスルー

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。

このブロッキングを解明する理論がこれまでに数多く提唱されてきた。既に専門的な記述になっているが、あえて専門的な言葉を用いてその一部をあげると、ブロッキングを(1)大規模山岳や海陸温度差の強制によるプラネタリーロスビー波の共鳴として解釈する理論、(2)南北温度差に起因するプラネタリー波の傾圧不安定として解釈する理論、(3)定常プラネタリー波によるジェットのスラックスが原因の順圧不安定として解釈する理論、(4)ジェットのスラックスにともなう局所的に生じる傾圧不安定として解釈する理論、(5)非線形流体特有の強制に対する多重平行解として解釈する理論、(6)高低気圧擾乱がもたらす非線形相互作用による渦度の強制の結果生じるとする理論、(7)非線形孤立波としてのソリトン、あるいはモドンとして解釈する理論、などがある⁽²⁾。しかし、これらの理論は普遍的なものではなく、必ず理論に当てはまらない例外的なケースとしてのブロッキング例が存在するため、いまだにコンセンサスが得られていない。

4. エネルギーの逆カスケードとブロッキング

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てきた⁽³⁾。著者の考えているブロッキング形成のメカニズムを説明するために、初めに大気大循環のエネルギー流について述べる。一般に大気のエネルギーは大スケールの現象から小スケールのそれへと流れる。地球に降り注ぐ太陽放射エネルギーは地球から宇宙に向かう放射冷却との放射収支の結果、赤道域で加熱、両極域で冷却となる。この加熱差による地球規模の温度勾配が大気運動のエネルギー源となる。地球規模の温度勾配は、傾圧不安定と呼ばれるメカニズムにより、波長が数1000kmの高低気圧波動を励起する。そのエネルギーはさらに波長数100kmのメソ擾乱や大気境界層の乱流エネルギーへとカスケードを起こし、やがて分子粘性摩擦により熱エネルギーに還元される。初めの大きな渦がより小さな渦に次々に分裂することにより、大スケールの現象のエネルギーが小スケールの現象のエネルギーに細分化される現象をエネルギーのカスケードとよぶ。これは、流体力学で言う3次元乱流の特徴である。

ところが、大気は地球の自転により回転し、鉛直方向に密度成層(下層ほど密度が高い状態)を形成している。この密度成層と回転の効果は、3次元的な乱流を2次元的な乱流に封じ込める働きをしている。すると2次元乱流の特性により、エネルギーは今度は小スケールの現象から大スケールの現象へと逆カスケードを生じるようになる。小さい渦同士が凝集してより大きい組織的な渦に成長して行くという、一見不思議な現象が生じるのである。このような二次元乱流によるエネルギーの逆カスケードは、実験室でも再現できる。強い密度成層をした流体にノズルで横から着色した液体を勢いよく注入すると、初めは初期の早い流速により着色流体は密度成層に逆らって3次元的に広がり乱流状態

になる。ノズルの先には風船状に細かい渦の群れが無秩序に入り乱れている。しかし、強い密度成層のため乱流状の細かい渦の集団が密度の釣り合う2次元平面に閉じ込められるとき、渦同士が衝突し、凝集してやがて大きく美しい双極渦に成長するのである⁽⁴⁾。このようにエネルギーが逆カスケードを生じるときには、乱流から巨大な渦が形成される。言わば、無秩序から秩序が生まれるのである。

同様の現象は木星の大赤班についても言える。大赤班を説明する理論として、テラーコラム、ハリケーン、ソリトン等が提唱されてきた。しかし最近のボイジャーによる接近写真を見る限り、大赤班の周辺には活発な乱流活動が存在し、決してソリトンのような滑らかな構造にはなっていない。激しく入り乱れた状態の中で大赤班は壊れる事なく安定に存在している。むしろ、乱流がもたらす逆カスケードにより大赤班は維持されていると考えられる。このように、エネルギーの逆カスケードは乱流を組織化して巨大渦にする特性がある。これは、エネルギーのカスケードが組織化された渦を分割して乱流に導くのと対照的である。

著者は、地球大気のプロッキングが、このようなエネルギーの逆カスケードで説明できると考えている。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、それがプロッキング形成のメカニズムであると考えた。この意味では、プロッキングもエネルギーの逆カスケードによって乱流から生じる予測不可能な安定渦であると言える。

5. プロッキングのシミュレーションと予報実験

著者は、プロッキングの謎解きのために、以上のシナリオに沿う最も簡単な数値モデルを開発し、現実のプロッキングをシミュレートしてみた⁽⁵⁾。この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。

上図はNCEP再解析から求めた1989年2月4日の北半球高度場の順圧成分である。アラスカ付近に巨大な高気圧があるが、これがプロッキング高気圧である。ひとたびこのプロッキング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。

下図は、1989年1月1日の初期値から計算した2月4日のブロッキングであり、ひと月以上先の予報であるが、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。ただし、この初期値問題において、物理過程に代表される外部強制項は観測から逆算して求めた値を供給しているため、完全な予報にはなっていない。疑似完全モデルとも呼べる数値シミュレーションである。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、非線形項は外力項より数倍大きいのであるが、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、モデル大気の予報限界は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。ちなみに、このモデルによる実験結果ではモデル大気の予報限界は約35日となり、今日気象庁などで現業として行なわれる数値予報の予報限界⁽⁶⁾と比べると非常に大きいものである。したがって、この実験結果は興味深いものであるが、あくまで外力が既知の場合の疑似完全モデルの予報限界であり、現実大気の完全予報と混同してはならない。

6. まとめ

ここで紹介したシミュレーションによる大気の予報例では、研究用の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。このモデルはブロッキングの再現性に優れ、これまでにブロッキングに関する様々な研究に応用されてきたものである。

長期予報に関する数値実験として、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⁽⁷⁾。

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。現実大気に応用するには数多くの難題をクリアする必要があるが、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。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、今後の長期予報の一方法として役立つ可能性がある。現実大気に対しても予報限界が35日にまで延びれば、それは夢のように素晴らしいことである。しかし、ここで紹介した結果はあくまでモデル大気についての予報であり、現実大気については今後の研究課題である。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、実際の予報技術の向上に少しでも役立てば幸いである。

文献

- (1) Lorenz, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130–141.
- (2) Benzi, R., B. Saltzman, and A. C. Wiin-Nielsen, 1986: *Anomalous Atmospheric Flows and Blocking*. Advances in Geophysics, 29, Academic Press, 459 pp.
- (3) 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.
- (4) Van Heijst, G. J. F. and J. B. Flór, 1989: Dipole formation and collisions in a stratified fluid, *Nature*, **340**, 212-214.
- (5) 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. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 983–1008.
- (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) 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.

図の説明

(上図) NCEP 再解析データを用いて計算した 1989 年 2 月 4 日の北半球高度場の順圧成分。コンター間隔は 50 m。アラスカ付近にある高気圧がブロッキング高気圧。

(下図) 1989 年 1 月 1 日を初期値として計算した 1989 年 2 月 4 日の同様の図。ここで用いたモデルは現実大気に対する疑似完全モデルで、力学的非線形項は計算しているが、外力項は観測値から逆算した値を供給している。

Geopotential Height

00Z 4 Feb 1989

