

天気科学（9） 天気予報の限界

山崎 孝治

(北海道大学 名誉教授 Koji Yamazaki)

1. 数値予報

地球大気中のすべての点で、風、気温、気圧、水蒸気量等の大気の状態を知ることができれば、大気の物理法則に基づいて初期値問題としての未来の状態の予測は原理的に可能である。このような予測計算をコンピュータで行う方法を数値予報といい、用いられるプログラムを数値予報モデルという。数値予報モデルには、大気の温度や流れをはじめ、水蒸気が凝結して雲となり雨が降ること、太陽放射で表面が暖められることなど気象に関する様々な過程を物理的な方程式の形で考慮している。数値予報モデルは大気の初期状態がモデルの各グリッドで与えられると、1ステップ先の（例えば5分後の）大気状態を数値積分して求める。これを繰り返し将来の大気状態を予測する。

現在、気象庁の明日～週間予報用の全球モデルの格子間隔は約 20 km である。20 km の格子間隔だと一つ一つの雲は到底表現できない。雲のようにモデルの分解能で表現できないが重要なものは格子点のスケールの量から推定する。コンピュータの計算能力の向上とともに、数値予報モデルの分解能も高くなってきた。現在のコンピュータの能力では、全球で 20 km 程度が限度であるが、日本の天気予報のためにはもっと細かい分解能が欲しい。そのために、日本域に限って領域モデル（分解能 5km のメソモデル、2 km の局地モデル）を運用し集中豪雨や局地的な現象の予測に用いている（図1）。もちろん、領域モデル周囲の境界場は全球モデルの予測値を用いている。

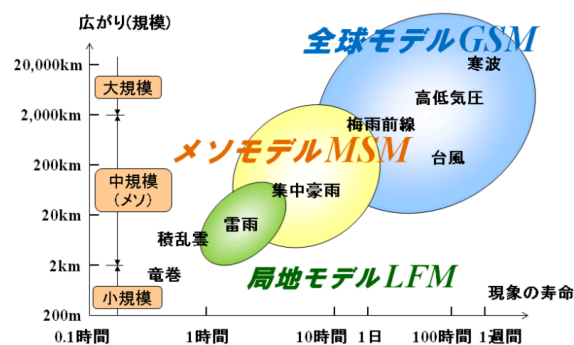


図1 気象庁で使われている数値予報モデル

気象庁ホームページより

予測のためには初期値が必要である。世界各国で気象観測を行い、その観測結果を即時に交換して初期値をつくる。実際には、数値予報モデルで予報した値を第1推定値とし観測値

で修正する形で初期値を作っている。12時間予報のような短時間予報は信頼性が高く、予報値は全球均一にあるからである。数値予報モデルの初期値用に観測を反映した均一な解析値を作ることを「データ同化」といい、データ同化の技術の進歩もモデル自体の改善とともに予報精度向上の鍵である。

昔は世界各国の気象機関が定時にいっせに行うゾンデ観測（測器をつけた風船を飛ばして気温、湿度、風などの鉛直分布を測るもの）が主要なデータソースであったが、近年は衛星、レーダなどリモートセンシングの観測が重要なデータソースとなっている。本年7月に現業運用を開始したひまわり8号の映像を見ると技術の進歩を実感する。

2. カオスとアンサンブル予報

世界の気象機関が数値予報モデルの開発にしのごを削っていた1960年代に衝撃的な研究があらわれた。マサチューセッツ工科大学の気象学者のエドワード・N・ローレンツ（Edward N. Lorenz）の一連の研究である。後にローレンツモデル（ローレンツ・アトラクター）としてカオス分野の先駆けとなった論文¹⁾や大気の予測可能性が2週間とした論文²⁾などである。後者の論文は若いとき筆者も読んで式はわからなかったものの結論に衝撃を受けた。

カオス理論によれば、ある種の力学系ではほんの僅かの初期値の誤差が有限時間のうちに予測不可能なまでに拡大する。この種のカオス的振る舞いをする力学系は不安定に拡大する項と安定化する項を持っている。ローレンツアトラクターの論文では、シンプルな3元連立非線形微分方程式で非周期的な（カオス的な）解が現れることを示した。カオス理論は、非線形力学系の数学として発展していくことになる。

大気予測可能性の論文²⁾は、現象の時間スケール（寿命）により決定論的予測可能性時間は異なり、積雲対流では1時間、全球スケールでは2週間ほどであると主張する（図1も参照）。大気もカオス的な力学系であるので予測可能性に限界がある。この限界は数値予報モデルを用いても確かめられている。初期値には僅かながら誤差がある。モデルを時間積分してゆくと、初期の小さな誤差が有限時間のうちに予測としての価値がないほどに拡大する。どんなに観測やコンピュータが進歩しても、明日・明後日の予報と同じような精度で1ヶ月後の予報を行うことは原理的に不可能なのである。

初期値の誤差は避けられない。そこで最も確からしい解析値に少しだけ誤差を加え多数の初期値を作り、その予測結果がどのように振る舞うかによって予測の信頼度がわかるであろう。そのような予報をアンサンブル（ensemble）予報という（図2）。週間予報のためには1日2回、解像度を40kmに落としたモデルでアンサンブル予報を行っている。1ヶ月以上の長期予報のためには、さらに解像度を落としたモデルでアンサンブル予報を行っている。図2のようなアンサンブル予報の結果であれば、「3-4日後は暖かいが、その後は寒くなる確率が高く、2週間以降はわからない」といった信頼度情報が得られる。気象庁のホームページ

ページの週間予報のページを覗くと、「予報の信頼度」(A, B, C) が掲載されている。

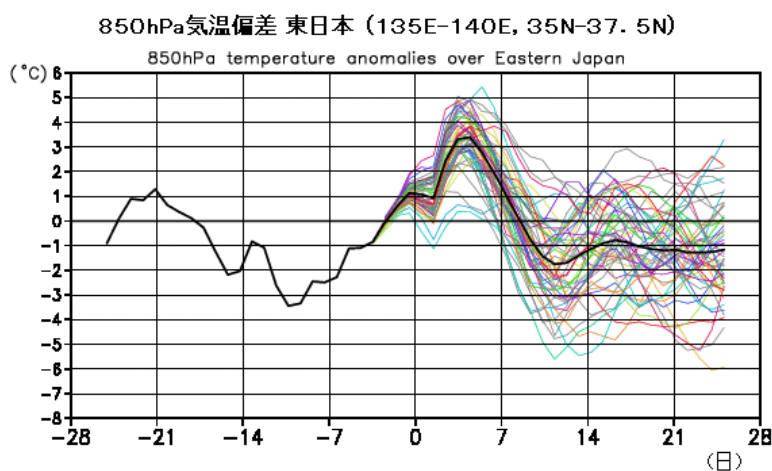


図2 アンサンブル予報の例 気象庁ホームページより

気象庁は1週間先までしか予報を発表していないが、2週目の予報のアンサンブルのばらつきが小さく信頼度が高いときがたまにある。信頼度が高く、高温・低温などの異常な天候が予測される場合には5日～14日後を対象に「異常天候早期警戒情報」を発表している。

3. 予報精度の推移

現在、世界で最も予報精度が高いとされているヨーロッパ中期予報センターの半球規模の予測精度(500hPa 高度偏差)の検証結果を見てみよう(図3)。年々、予報精度は向上し、最近では5日予報でも相関係数0.9を超えていて驚異的な高精度である。20世紀までは北半球(20N以北)のほうが高精度だったが、近年は南北の差がない。これは衛星観測自体の精度向上と同化技術の向上によるところが大きい(ゾンデ観測や地上観測は北半球に偏っている)。また、2010年以降の精度は横ばいであり、すでに中緯度大規模場では予測可能性の限界に達しつつあるのかもしれない。

4. おわりに

2週間が天気予報の限界ならば、気象庁の3ヶ月予報や季節予報は無意味なのだろうか。1ヶ月先の天気もわからないのに、100年先の温暖化予測なんて信用できるのだろうか。この疑問については次回に答えたい。

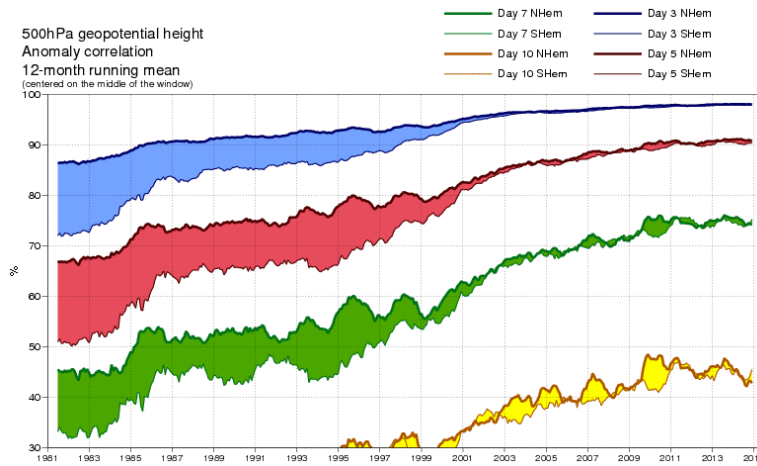


図3 南北半球の500hPa高度の予報精度（偏差相関）

ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）による500hPa高度予報の偏差相関の時系列。1981～2015年を示す。上から3日、5日、7日、10日予報。太線（各線の上部）は北半球、細線（各線の下部）は南半球の予報。ECMWFのホームページより。

引用文献

- 1) Lorenz, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130-141.
- 2) Lorenz, E. N., 1969: Predictability of a flow which possesses many scales of motion, *Tellus*, 21, 1-19.