

天気予報とカオス

木本 昌秀（東大気候システム研究センター）

あす、あさっての天気予報といえども日本付近だけでなく全地球規模の大気の流れを把握し、予測せねばならない。気象現象は、1 個数 km, 寿命数時間の個々の雲から地球を取り巻くジェット気流の数週間以上の時間スケールの変動、さらにはエルニーニョなど海洋の変動を含む数 10 年以上のゆらぎまで時空間的にきわめて広範なスペクトルを持つ ([1])。大気運動は基本的には流体力学の方程式に支配されるが、放射による加熱、水蒸気の相変化（雲や雨）、大規模地形や海洋の影響、といった気象特有のプロセスが現象の多様性を生んでいる。個々の現象は、特徴的な時空間スケールをもち、多種の物理・力学プロセス間の特有のバランスで維持されている。そして、異なる階層の現象間に無視できぬ相互作用があることが、現象をさらに豊かなものにしている。例えば、東京に降る雨が、数千 km の間隔で並ぶジェット気流上の低気圧波に伴うものであったとしても、その数 10km, 数 100km の微細構造はそこに埋め込まれたメソスケール気象現象に支配される。また低気圧波は、より大きなスケールのジェット気流の蛇行による変調を受けている。

日々の天気予報は、大気大循環モデルと呼ばれる地球規模の大気運動を解くコンピュータモデルの計算に基づいている。ここには、Navier-Stokes 方程式に加えて、上に述べた気象特有の物理過程が組み込まれている。これらは地球を覆う数 100km 間隔の格子点上で計算される（最新のものは 60km 程度にまで細かくなっている）。しかしながら、このような格子間隔では解像出来ない sub-grid スケールの現象は、解像される現象に無視できぬ影響を及ぼす。このスケール間相互作用を表現する部分が気象モデルを一般の流体モデルと区別する最大の特徴であり、格子点平均の物理量で sub-grid スケール現象の集団効果を表現する、「パラメタリゼーション」と呼ばれている ([2])。代表的なものの一つは、主として熱帯地方に生ずる 10 数 km の高さをもつ積乱雲で、この集団は面積的にはわずか数 % を占めるにすぎないが、活発な水蒸気から水への相変化、すなわち降雨を伴い、それに伴う潜熱の解放が地球規模の大気大循環を駆動する原動力となっている。積乱雲群に伴う対流と格子点スケールの熱、水蒸気の上下輸送は、乱流に伴う Reynolds stress の closure 問題などとは画然と異なる大規模気象学特有の closure 問題を定義している。

「カオスの中の秩序」も大規模気象の重要な問題の一つである。大規模大気運動は、基本的にはロスビー波と呼ばれる自転球体特有の波を含んだ乱流であるが、その中で、地球をとりまくジェット気流が数週間から 1 か月以上の長期予報の対象となる時間スケールでゆくりと変動している。乱流たらしめる主因である高低気圧波（流体力学的不安定波）は、Lorenz ([3]) のいう天気予報の限界をもたらしめるものであるが、一般に 2 週間といわれるポイント毎の決定論的予測可能性の限界を越えたレンジでもジェット気流の coherent な変動などは予測が可能であると信じられている（海洋などの影響を受ける現象はもっと先まで予測

可能性がある) ([4]).

講演では、乱流の中に間欠的に見られる準定常な蛇行パターンとそれらの間の遷移現象 ([1, 5]) の力学を単純化したジェット気流モデルの分岐構造の解析から考察した筆者と和歌山大伊藤久徳の研究結果を紹介した ([6-8]). この種の気象モデルでは初めて多重アトラクターとそれらの不安定化, さらに explosive なグローバル bifurcation の後のアトラクター間のカオスの遍歴現象を捉えることが出来た.

大規模大気運動はさまざまな異なる階層間の相互作用の材料を提供してくれている. 気象学者は現象固有の視点に立たざるを得ないが, 普遍的な原理を抽象するより一般的な視点が新たな発見を生むこともあろう. 異分野間相互作用もまた重要であるということか.

参考文献

- [1] 木本昌秀, 1993: 天気予報とカオス. 数理科学.
- [2] 木本昌秀, 1995: 地球気候のシミュレーション. シミュレーション, **14**, 286-292.
- [3] Lorenz, E.N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130-141.
- [4] 木本昌秀, 1995: エルニーニョと異常気象の予測. 科学, **65**, 389-397.
- [5] Kimoto, M., and M. Ghil, 1993: Multiple flow regimes in the Northern Hemisphere winter. Part I: Methodology and hemispheric regimes and Part II: Sectorial regimes and preferred transitions. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2625-2643 and 2645-2673.
- [6] Itoh, H., and M. Kimoto, 1996a: Multiple attractors and chaotic itinerancy in a quasi-geostrophic model with realistic topography: Implications for weather regimes and low-frequency variability. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 2217-2231.
- [7] Itoh, H., and M. Kimoto, 1996b: Chaotic itinerancy with preferred transition routes appearing in an atmospheric model. *Physica D, sub judice*.
- [8] 木本昌秀, 伊藤久徳 1996: 気象におけるパターン生成・崩壊のダイナミクス. 数理科学, no.396, 57-62.