

自然災害に関わる非線形現象の予測について

下川信也*・小澤 久**・納口恭明*・鈴木真一*

On Prediction of Non-linear Phenomena Related to Natural Disaster

Shinya SHIMOKAWA*, Hisashi OZAWA**, Yasuaki NOHGUCHI*, and Shin-ichi SUZUKI*

**Disaster Prevention Research Group,*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

simokawa@bosai.go.jp, nhg@bosai.go.jp, ssuzuki@bosai.go.jp

***Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University, Japan*

hozawa@hiroshima-u.ac.jp

Abstract

On prediction of natural disaster, it is very important to predict rapid and discontinuous changes of non-linear phenomena (multiple regimes). As examples of multiple regimes related to natural disaster, there are various phenomena; appearance and disappearance of atmospheric blocking, transition among patterns of deep water circulation, transition between large meander and non-meander of Kuroshio path, and quasi-periodic collapse of snow avalanche. Recently, some new trial approaches to predict their behavior are conducted. In this paper, among their approaches, we introduce mainly a thermodynamic approach and its application to deep water circulation. It is a trial to understand the essence of phenomena by detecting macroscopic characteristics not depending on the details of system and is valid to predict various phenomena related to natural disaster involved in complex factors.

Key words : Natural disaster, Predictability, Non-linear phenomena, Multiple regimes

1. はじめに

この小論では、自然災害の予測にとってなにが本質的か、その問題を解決するためには、どのようなアプローチが有効かについて議論する。

従来、気候変動などの災害に関わる自然現象の予測は、非線形の微分方程式を数値積分することで可能であると考えられてきた。しかし、非線形系では、初期値の小さな誤差が短期間で大きく増大しうするため、しばしば予測不可能となる。このことはバタフライ効果とも呼ばれる。バタフライ効果というのは、ブラジルの蝶のはばたきがテキサスに竜巻を起こしうるという象徴的な言い方で表現される (Lorenz, 1993)。これは、蝶のはばたき程度の擾乱で大気のその後の運動が大きな影響を受けるということを意味している。実際、天気予報も一週間程度ならば予測可能であるが、高分解能の数値モデルと高速のスパコンを駆使しても、季節予報となると予測困難である。こ

のことは、従来の手法には限界があることを示している。このような状況下では、長期的な気候変動やそれに伴う災害の予測も信頼性の低いものになってしまう。このような非線形性による予測不可能性は、大気現象に限らず、自然災害に関わるさまざまな現象に広く見られるものである。従って、自然災害の予測の信頼度を高めるためには、従来の手法の精度を高める努力のほかに、非線形系の長期的なふるまいを理解するための新しい方法を探る必要があると考えられる。

2. 多重レジームの予測の重要性

その自然災害の予測が大きくはずれるのは、非線形現象の急激で不連続的な変化 (多重レジーム) に伴うことが多いことが知られている (例えば, Stommel, 1961, Charney and DeVore, 1979)。多重レジームは多重解とほぼ同義だが、理論や数値実験では多重解、現象では多重レジームと呼

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 総合防災研究部門

** 広島大学 総合科学部

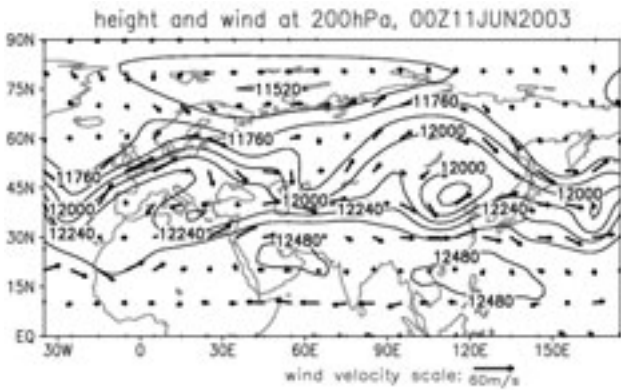


図 1 2003 年 6 月 11 日 00 UTC に観測された大気のプロッキング。NCEP/NCAR 再解析データより作成された 200hPa 面高度 (m) と水平風ベクトル。等値線間隔は 120 m。風速のスケールは図の右下に示されている。モンゴル付近と欧州でプロッキングが見られる。

Fig. 1 Atmospheric blocking observed for 00 UTC on 11 June 2003. Geopotential height (m) and horizontal wind vectors at 200hPa, obtained from the NCEP/NCAR reanalysis data. The contour interval is 120 m. The wind velocity scale is indicated by arrows at the bottom right corner. Blockings appear around Mongolia and Europe.

ばれることが多いようである。ほとんどの多重レジームと呼ばれる現象においては、ある状態 (レジーム) が突然出現し、しばらくその状態が続いた後、再び突然その状態が終了し、別の状態に遷移する。その状態間の遷移 (レジームシフト) の前後で、外系には顕著な条件の変化がないことが多く、その遷移は、現象に内在する非線形性による急激で不連続な変化が原因と考えられる。

自然災害に関わる多重レジームの例としては、大気のプロッキングの発生・解消、海洋の深層循環のパターンの遷移、黒潮の蛇行・非蛇行の遷移・雪崩の準周期的崩壊現象などさまざまなものがある。次にこれらの例について簡単に説明する。

日本付近などでは偏西風などの大規模な大気の流れに逆らって大気の流れが居座るプロッキング現象がしばしば起きる (図 1)。これは、同じ場所で同じような天候が続くので、冷夏や多雨などの異常気象の原因になる。しかし、そのプロッキングの発生・解消の予測は現在のところできていない。

現在の海洋の深層循環は大西洋で沈降し太平洋で浮上するというパターンになっている (図 2(a), Marotzke and Willebrand, 1991)。そのパターンは過去においては現在とは異なっていたと考えられている (図 2(b)-(d))。そのパターンは特に長期的な気候に大きな影響を与える。しかし、そのパターンの遷移の予測は現在のところできていない。

黒潮は 10 年程度の周期で大蛇行経路と非蛇行経路を繰り返す (図 3)。流れの速い黒潮の位置は、日本付近の気候はもとより、船舶の航路選択や沿岸漁業の漁獲量に大

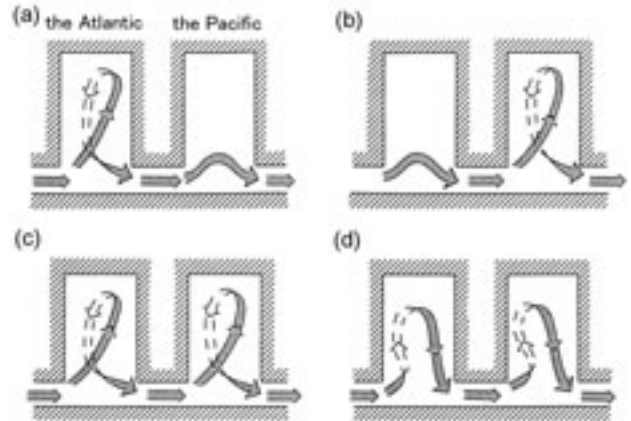


図 2 海洋の深層循環の同一境界条件下の多重解の例 (Held, 1993 による Marotzke and Willebrand, 1991 の解説から)。同一境界条件下で現在の循環のパターン (a) のほかに少なくとも 3 つの (b, c, d) パターンが存在しうる。それぞれのパターンに応じて気候の状態は大きく変わる。

Fig. 2 An example of multiple steady states of deep water circulation under the same set of boundary conditions (from a review by Held, 1993 for Marotzke and Willebrand, 1991). Three patterns of circulation (b, c, d) exist under the same set of boundary conditions besides the present pattern (a). The state of climate is largely affected by each pattern.

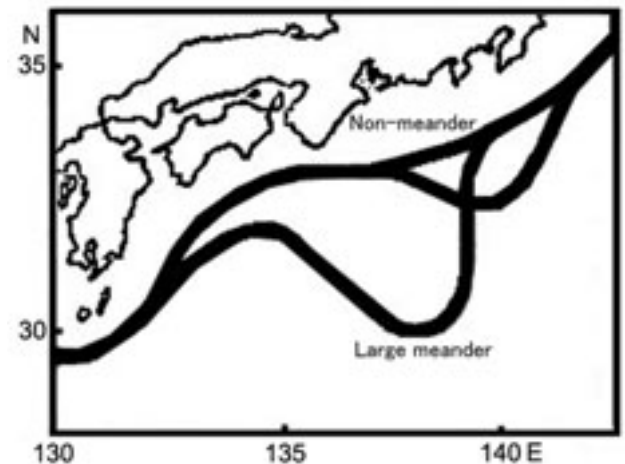


図 3 黒潮の代表的経路。黒潮は 10 年程度の周期で大蛇行経路と非蛇行経路を繰り返す。その中間的な経路がみられることもある。

Fig. 3 Representative path of Kuroshio. Kuroshio path shows bimodal features; the transition between large meander path and non-meander path takes place with intervals of around 10 years. The intermediate path can be also observed.

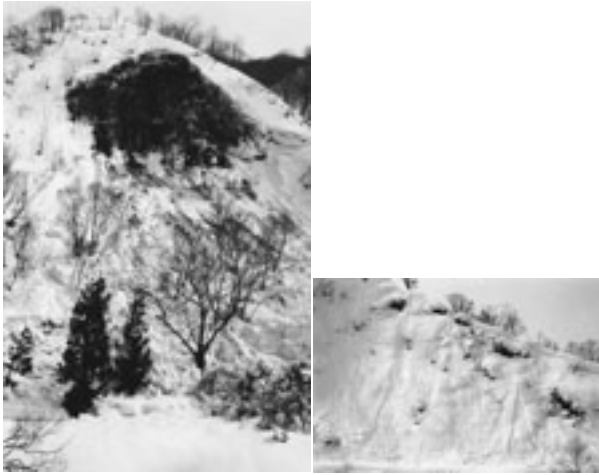


図4 1996年2月29日に山形県飯豊町で起きた死者2名を出した雪崩(左写真)。その周辺では多数の小さな雪崩が起こっていた(右写真)。(写真は共に和泉薫博士撮影)

Fig. 4 Avalanche occurred at Iide Yamagata on 29 Feb. 1996. It killed two peoples. Many small avalanches had occurred (right) around there. (Both pictures were taken by Dr. Kaoru Izumi).

きな影響を与える。しかし、その大蛇行・非蛇行の遷移の予測は現在のところできていない。

雪や砂などの粉粒体の山はある一定の高さと傾きをもつ状態を保とうとする傾向がある。その状態を超えたときには、多数の小さな雪崩と少数の大きな雪崩を起こすことにより元の状態に戻ろうとする(図4)。しかし、その大きさや周期の予測は現在のところできていない。

以上の例からわかるように、自然災害の予測の信頼度を高めるためには、これらの多重レジームの予測が重要となる。しかし、それらがつくりだされる仕組みやその変動と安定性を支配する要因はまだよくわかっていない。

3. 予測への新しいアプローチ

以上で述べたような自然災害に関わる非線形現象、特に多重レジームの予測について、いくつかの新しい試みがなされつつある(例えば、Hergarten, 2002, Kleidon and Lorenz, 2004)。ここではまず著者らが海洋の深層循環のパターンの遷移についてその適用性を確かめた非平衡・非線形系におけるエントロピー生成率最大の仮説(MEP: Maximum Entropy Production)について簡単に説明する。

MEPは、非線形度及び非平衡度の高い系においては、系はエントロピー生成率の高い状態で安定化するという仮説である(Sawada, 1981, Paltridge, 1975)。例えば、上下にある温度差がある流体を考える(図5)。温度差(環境の非平衡)が小さいときは、熱は熱伝導によって運ばれる。しかし、温度差が大きくなると、熱をより効率よく運ぶために熱対流(秩序構造)が発達する。熱対流がもともと熱をより効率よく運ぶために発達したのであるならば、その熱対流の構造は熱をさらに効率よく運ぶ方向に発達してゆくであろうと考えるのは合理的であると思われる。そして、熱をより効率よく運ぶ状態というのは環境の非

平衡をより効率よく解消する状態であり、それはエントロピー生成率がより大きい状態となる。これがMEPの基本的なアイデアである。つまり、MEPは非平衡度および非線形系度の高い系の発達の方向についての規則を与える可能性がある。これは、特に多重レジームのような同一境界条件下で可能ないくつかの解があり、それらの中で現実にはどのような解が選ばれるかが問題となる場合に有効となるであろう。その場合には、MEPによれば、勿論、エントロピー生成率の高い解が選ばれることになる。

このことを確かめるために、我々は、海洋の深層循環のパターンの遷移の数値実験においてエントロピー生成率の変化を調べた(Shimokawa and Ozawa, 2001, 2002, 2004, 下川と小澤, 2004)。実験の手順は以下の通りである。まず海洋大循環モデルを使って同一境界条件下の多重解を求める。次に、塩分の擾乱を北半球高緯度に与えることにより、その多重解間の遷移を引き起こす。そして、その遷移の前後のエントロピー生成率を計算する。図6はその数値実験の結果をまとめたものである。例えば、ある解S3からスタートすると、擾乱の符号に関わらず、よりエントロピー生成率の大きな別の解S4に遷移する(実験r14, r15)。一方、S4からスタートすると、擾乱の符号に関わらず、よりエントロピー生成率の小さなS3には戻らず、S4に留まる(r18, r19)。同様のことがS1とS2の間でも起こっている(r04, r05, r08, r09)。すなわち、これらの遷移は、エントロピー生成率の増加する方向について非可逆であり、MEPを支持していることがわかる(詳細については、原論文参照)。

しかし、この海洋の深層循環のパターンの遷移という現象においてさえも、遷移を起こしうる擾乱の大きさなどの定量的な問題やMEPの詳細な適用条件についてはよくわかっていないところも多い。その意味でこの分野の研究はまだはじまったばかりである。

しかし、また、そのような基礎的な部分を探る試みと並行して、その具体的な応用を考えていくことは、この分野の発展にとっても重要な意味を持つであろう。そこで次にこれらの研究の成果を基礎として、これまでの手法では難しい自然災害の予測の信頼度を向上させるための手法について考察したい。特に我々にとって身近な天気予報の手法について考えてみよう。現在、気象庁の現業で行なわれている数値予報では、アンサンブル実験という手法が使われている。先に述べたように、大気のような非線形系では、初期値の誤差が短期間に大きく増大しうるので、事実上予測不可能となる。そのため、この手法では、初期値を少しずつ変えて、複数の数値実験を行い、その平均を予測解としている。しかし、自然が平均をとるわけではないので、これは単に予測が極端に大きくは外れることの少ない解を人工的に(あるいは形式的に)作っているにすぎないという可能性がある。むしろ、自然はそれらの解のうちいずれかひとつを選択する(あるいは、自然においてはそれらの解には実現確率に差がある)はずである。先に述べたように、MEPにはその選択則(あるいは、実現確率の決定則)を与える可能性が

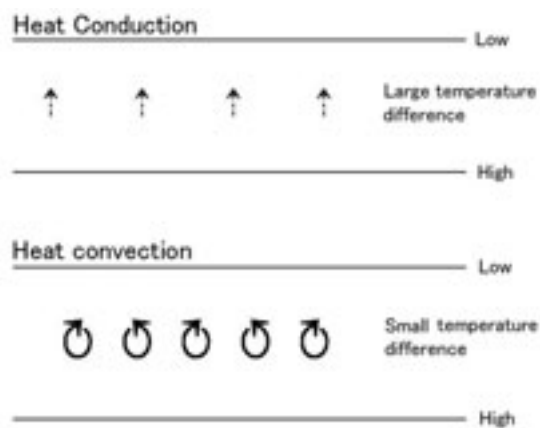


図 5 非平衡系の発達の具体例 (熱伝導と熱対流).
 Fig. 5 An example of development of non-equilibrium system (heat conduction and heat convection).

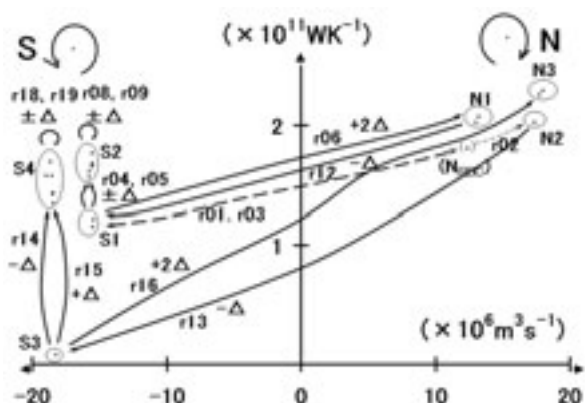


図 6 海洋の深層循環のパターンの遷移についての数値実験結果の概要。縦軸 (\dot{S}) はエントロピー生成率 ($W K^{-1}$)、横軸 (Ψ) は流線関数の最大値 (つまり、循環の強さ、 $SV=10^6 m^3 s^{-1}$) を表す。左側にある点は南沈込の循環をもつ解 (S の頭文字で示す)、右側にある点は北沈込の循環をもつ解 (N の頭文字で示す)、矢印は遷移の方向、矢印の横にある記号は実験番号と遷移のためのトリガーとして与えた擾乱の大きさと符号を表す (例: r04 と Δ)。

Fig. 6 Summary of the results of the numerical experiments for transitions among patterns of deep water circulation. The vertical axis (\dot{S}) indicates the rate of entropy production ($W K^{-1}$), and the horizontal axis (Ψ) shows the maximum value of the zonally integrated meridional stream function for the main circulation (i.e., the strength of the circulation, $SV(=10^6 m^3 s^{-1})$). The dots on left side correspond to the steady states with southern sinking circulation (indicated by the capital letter "S"). The dots on right side correspond to the steady states with northern sinking circulation (indicated by the capital letter "N"). The arrows show the direction of the transitions. The symbols besides the arrows show the experiment number and the perturbation used as a trigger for the transition (e.g., r04 and Δ).

ある。アンサンブル実験は、単なる細部のテクニカルな方法ではなく、予測するシステム全体、あるいは、予測というものに対する思想を表すものである。したがって、その改善は科学的にも大きな意味をもつと考えられる。

自然災害に関わる非線形現象を理解するための概念には、MEPのような熱力学的手法以外にもさまざまなものがありうるであろう。特に、複雑系を理解するためのさまざまな手法、例えば、フラクタルや自己組織的臨界状態などはその有力な候補であろう。実際、それらの概念には地球物理学的な素材に多くの実例が見出されている (例えば、Hergarten, 2002)。これらは、まったく別々の概念なのか、それともより一般的な概念の異なる側面を見ているだけなのか、その答えは現時点では、誰も知らない。

これらに共通する考えは、系の細部に依存しないマクロな性質を取り出すというところにある。ある意味では現象論的理解である。現象論はミクロな理論の近似理論と捉えられがちであるが、優れた現象論は、決してミクロな理論の近似理論ではなく、それ自体が厳密な理論となりうるものである (田崎, 2000)。例えば、統計力学は熱力学を基礎づけるものと一般には考えられているが、実際には統計力学は熱力学の一部を説明するに過ぎず、さらにはいくつかの検証不可能な仮説 (エルゴード仮説など) に基づいている。我々が目にするマクロな現象の予測という意味では、統計力学よりも熱力学の方がはるかに正確で、汎用性が高いのである。実際、熱力学はミクロな理論なしに完結しうる独立した理論体系をもっており、その理論体系は、量子力学などの現代物理学の展開に際して、なにひとつ変更を迫られなかった唯一の分野でもある (Lieb and Yngvason, 1999)。以上の意味で、我々の身近に起こるような、そして、自然災害に関わるような複雑な現象を理解するためには、還元論的な方法論だけでなく、対象とする系の全体の傾向を記述するようなマクロな方法論が必要と思われる。

4. まとめと展望

以上において、自然災害の予測の信頼度を高めるためには、非線形現象の多重レジームの予測が重要であること、そして、その予測のための新しいアプローチが必要であることを述べた。このような研究は分野横断的な研究であり、多様な対象 (海洋、大気から雪氷、水文、土砂、固体地球まで) と多様な手法 (理論、観測、室内実験や数値実験) から総合的にアプローチすることが重要である。また、この分野は萌芽的な研究分野でもあるので、分野の振興・普及が重要になる。その意味で、個々の研究者がそれぞれに研究するだけでなく、組織として、あるいは、同じ問題意識をもった研究者同士が連携して研究を進めてゆくことが重要である。

ここであげたような今まで異なる現象と捉えられてきたいくつかの現象が、共通の概念で理解されれば、それを、そのほかの自然災害に関わる非線形現象に適用できる可能性も出てくるであろう。具体的には、水害に関わる河川ネットワークの形成や地震災害に関わる断層の破壊現

象の問題などさまざまな分野への応用が期待できると考えられる。

備考

本稿は、防災科学技術研究所における部門長裁量費研究（平成13年度から現在）を基礎としている。次期中期計画（平成18年度－平成22年度）において、本稿で示した枠組みをもとにした新規の研究計画を立案中である。

参考文献

- 1) Charney, J. G. and J. G. DeVore (1979): Multiple flow equilibria in the atmospheric and blocking, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1205-1216.
- 2) Hergarten, S. (2002): *Self-organized Criticality in Earth Systems*. Springer-Verlag, Berlin.
- 3) Held, I. M. (1993): Large-Scale dynamics and global warming. *Bull. Ame. Meteorol. Soc.*, **74**, 228-241.
- 4) Kleidon, A. and R. D. Lorenz (2004): *Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth and Beyond*, Springer-Verlag, Berlin (in press).
- 5) Lieb, E. H. and J. Yngvason (1999): *The Physics and Mathematics of the Second Law of Thermodynamics*. Physics Reports, **310**, 1-96.
- 6) Lorenz, E. N. (1993): *The Essence of Chaos*. University of Washington Press, Seattle.
- 7) Marotzke, J., and J. Willebrand (1991): Multiple equilibria of the global thermohaline circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, **21**, 1372-1385.
- 8) Paltridge, G. W. (1975): Global dynamics and climate - a system of minimum entropy exchange. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **101**, 475-484.
- 9) Sawada, Y. (1981): A thermodynamic variational principle in nonlinear non-equilibrium phenomena. *Prog. Theor. Phys.*, **66**, 68-76.
- 10) Shimokawa, S. and H. Ozawa (2001): On the thermodynamics of the oceanic general circulation: entropy increase rate of an open dissipative system and its surroundings. *Tellus*, **A53**, 266-277.
- 11) Shimokawa, S. and H. Ozawa (2002): On thermodynamics of the oceanic general circulation: Irreversible transition to a state with higher rate of entropy production. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **128**, 2115-2128.
- 12) Shimokawa, S. and H. Ozawa (2005): Thermodynamics of the Oceanic General Circulation: A Global Perspective of the Ocean system and Living systems: in "Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth and Beyond" (edited by A. Kleidon and R. D. Lorenz), Springer-Verlag, Berlin, 121-134.
- 13) Stommel, H. (1961): Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus*, **13**, 224-230.
- 14) 下川信也・小澤久 (2004): 海洋大循環の熱力学. 防災科学技術研究所研究報告, No.65, 153-162.
- 15) 田崎清明 (2000): 熱力学=現代的な視点から. 培風館, 東京.

(原稿受理：2004年9月30日)

要 旨

自然災害の予測にとっては、非線形現象の急激で不連続的な変化（多重レジーム）の予測が本質的に重要である。自然災害に関わる多重レジームの例としては、例えば、大気のプロッキングの発生・解消、海洋の深層循環のパターンの遷移、黒潮経路の大蛇行・非蛇行の遷移、雪崩の準周期的崩壊現象などさまざまなものがある。その予測について、いくつかの新しい試みがなされつつある。ここでは、それらのうち、ある熱力学的な方法と海洋の深層循環のパターンの遷移についてのその応用例を中心に紹介する。それは系の詳細に依存しないマクロな性質を取り出すことにより現象の本質を理解しようとする試みであり、複雑な要素が絡み合う自然災害に関わるさまざまな現象を理解し予測するために有効である。

キーワード：自然災害、予測可能性、非線形現象、多重レジーム