

物理アンサンブルを用いた 1 か月予報の予測可能性 - Lorenz モデルを用いた予備的研究 -

小山博司 (北大・環境科学院)・渡部雅浩 (北大・地球環境科学研究所)

1 背景と目的

近年、大気数値予報モデルによる予報の成績を向上させるためにアンサンブル予報が用いられている。アンサンブル予報には、初期値敏感性への対策を目的とする初期値アンサンブルと、数値予報モデルの不完全性への対策を目的とするモデルアンサンブル¹がある。各国の現業予報機関の数日から 1 か月先の予報において初期値アンサンブルは良く用いられているが、モデルアンサンブルはあまり用いられてはいない。しかし、1 か月予報のような予報期間が長い予報の場合には、モデルの不完全性による影響が短期あるいは週間予報など予報期間が短い予報に比べて大きく、モデルアンサンブルが有効である可能性が考えられる。

モデルアンサンブルにもさまざまな種類がある。Stochastic physics 法 (Buizza et al. 1999 や Palmer 2001 など) は、パラメータリゼーションで表現される全物理過程の時間変化項に無作為な係数を掛ける手法で、欧州中期予報センター (ECMWF) で現業の中期予報に用いられている。物理アンサンブル (perturbed physics) 法 (Yang and Arritt 2002 など) は、パラメータ係数の値の組合せを変えた複数の予測結果を用いる方法で、気候モデルで用いられている。その他にもマルチパラメータリゼーション法やマルチモデル法などがある。

本研究の目的は、モデルアンサンブルの中の一つである物理アンサンブル法を、最も単純な非線型方程式系である Lorenz モデルに適用し、1 か月予報を想定した期間の後半におけるその効果を調べることである。

¹それ以外にも、境界値アンサンブルや外力アンサンブルがある。これらは、領域モデルあるいは季節予報以上の長い時間スケールに対して有効な手法とされているものであるため、今回の研究ではこれらは考えない。

2 モデルと実験の設定

以下の様な Lorenz モデルを使用する。

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= \sigma X + \sigma Y \\ \frac{dY}{dt} &= -XZ + rX - Y \\ \frac{dZ}{dt} &= XY - bZ\end{aligned}$$

Lorenz パラメータ σ 、 b 、 r をこのモデルにおけるパラメータ係数とする。パラメータを変化させる範囲は $\sigma = 10$ 、 $27 < r < 29$ 、 $2.5 < b < 2.9$ であり、この範囲内では、Lorenz モデルはカオス的な振舞いをする。差分時間は $\Delta t = 0.001$ で、計算スキームとして 4 次の Runge-Kutta 法を用いている。積分期間は、現実大気での 30 日を想定して、Lorenz モデルの時間で $t = 3$ までを考える。これは、Lorenz アトラクターのどちらか一方の wing 内での回転が総観規模擾乱などの短周期の変動に相当し、片方の wing からもう片側の wing への遷移が大気上層の流れの東西型から南北型への移行などの長周期の変動に相当するという考えに基づいている。

・初期値

初期値として、時間発展の特徴が大きく異なる以下の 2 点を選ぶ。

初期値 S: $t=3$ までの間に wing 間の遷移が 1 回も起こらない初期値

初期値 U: $t=3$ までの間に少なくとも 1 回 wing 間の遷移が起こる初期値

摂動を加えていない初期値 S と初期値 U をそれぞれ初期値の真値とする。初期値アンサンブルでの初期摂動は、真値を中心とした半径 1 の球の球殻上に空間的に一様に与える。

・完全モデルと不完全モデル

この実験では、標準パラメータ ($\sigma = 10$, $r = 28$, $b = 8/3$) の組み合わせのモデルを完全モデルとし、標準パラメータからずれたパラメータの組合せのモデルを不完全モデルとする。

・物理アンサンブルの作成法

Lorenz パラメータ σ を変化させたときの Lorenz モデルの振る舞いの変化は、 r , b を変化させたときのそれに比べて小さいため、 σ の値は $\sigma = 10$ に固定し、 r , b を変化させることを考える。

パラメータ値が (r, b) の不完全モデルの初期値アンサンブル平均を $\bar{x}(r, b)$ とする。 r - b 平面内において、 (r, b) を中心とする楕円の円周上にある N 個のパラメータ値を $(r_p, b_p) (p = 1, 2, \dots, N)$ とする。パラメータ値が (r_p, b_p) である N 個の不完全モデルのアンサンブル平均

$$\hat{x}(r, p) = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \bar{x}(r_p, b_p)$$

を不完全モデル (r, b) の物理アンサンブル予報値とする。アンサンブルメンバー数は、初期値アンサンブルのメンバー数の M 個に、物理アンサンブルのメンバー数の N 個を掛けた $M \times N$ 個になる。

・観測値と気候値

真値を初期値とする完全モデルの計算結果を観測値とし、この観測値との差を予報誤差とする。また、Lorenz モデルを十分に長い期間 ($t = 5000$) 積分して得られる X, Y, Z のそれぞれの時間平均値および全分散 $X^2 + Y^2 + Z^2$ の時間平均値をそれぞれ X, Y, Z の気候値、全分散の気候値とする。

3 結果

物理アンサンブルの効果を調べるために、以下の2通りの実験を行い比較をする。

- (1) 物理アンサンブルを用いない場合 (初期値アンサンブルのみ): 複数の初期摂動を初期値とする単一の不完全モデルによる予報
- (2) 物理アンサンブルを用いる場合 (初期値アンサンブルに加えて物理アンサンブル): 複数の初期摂動を初期値とする複数の不完全モデルによる予報

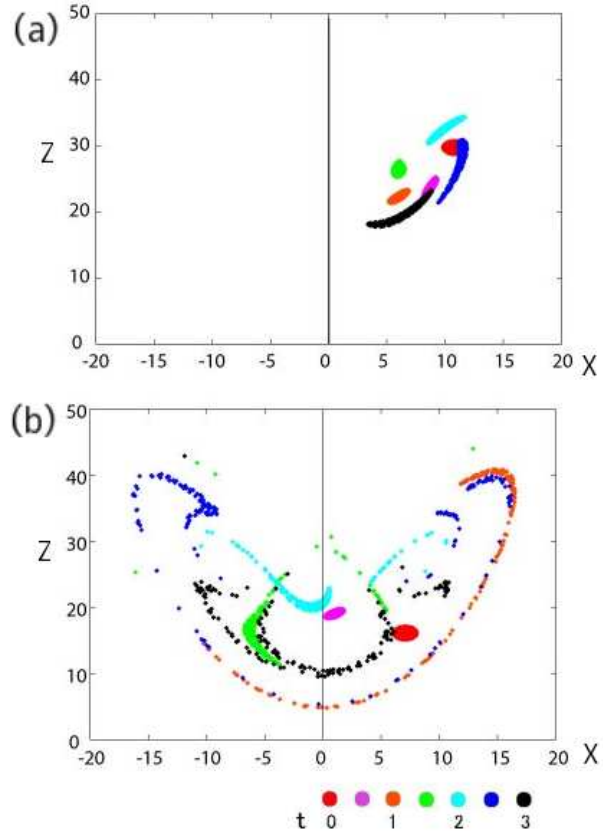


図1: 単一の不完全モデル ($\sigma = 10, r = 28.1, b = 2.7$) による初期値アンサンブルの全メンバーの予測結果を $t=0.5$ 毎に $X-Z$ 平面上に描いたもの。(a) が初期値 S、(b) が初期位置 U の場合。

(1) 物理アンサンブルを用いない場合

図1は、単一の不完全モデル ($\sigma = 10, r = 28.1, b = 2.7$) による初期値アンサンブルの全メンバーの予測結果を $t = 0.5$ 毎に $X-Z$ 平面上に描いたものである。(a) が初期値 S から始めた結果で (b) が初期値 U から始めた結果である。(a) の初期値 S の場合では、各メンバーの予測結果は、初期時刻 (赤点) からそれほど大きくばらつかない。一方、(b) の初期値 U の場合では、各メンバーの予測結果は、 $t = 1.0$ 以降、2つの wing に別れ大きくばらつく。このことから、Palmer (1993) でも述べられているように、Lorenz モデルでは、初期値の依存性が強いこと分かる。予報期間後半 (以降、 $t = 1.5$ から $t = 3.0$ までの意味で用いる) の X のアンサンブル平均の2乗平均平方根予報誤差 (以降、単に予報誤差と呼ぶ) は、初期値 S の場合は 0.4、初期値 U の場合は 5.0 と、当然ながら wing 間の遷移が起こる初期値 U の方がずっと大きい。

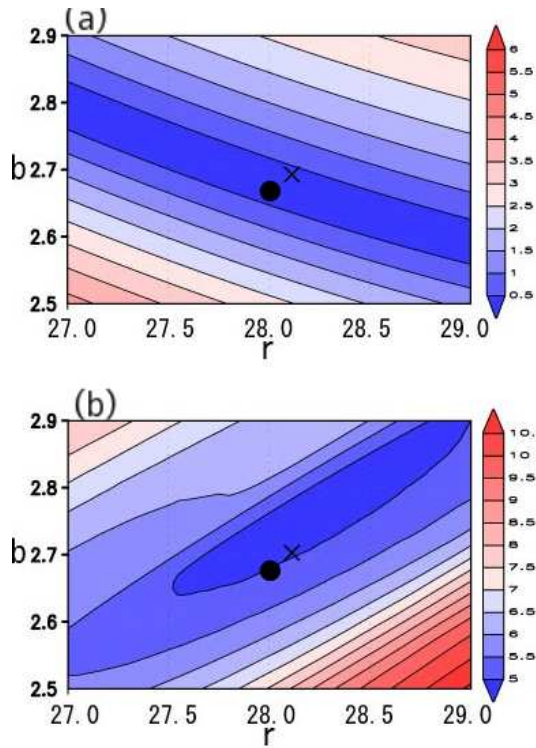


図 2: パラメータ値が (r, b) のモデルにおける X のアンサンブル平均の予報期間後半の予報誤差。(a) が初期値 S から始めた結果、(b) が初期値 U から始めた結果で、物理アンサンブルは適用していない。シェードが予報誤差、●印が完全モデルのパラメータの組合せ、×印が図 1 の不完全モデルのパラメータの組合せ。メンバー数は 2562。

図 1 では、ある単一の不完全モデルによる予測結果を示した。次に、さまざまな不完全モデルに対するより一般的な結果を示す。図 2 は、さまざまな不完全モデルつまりパラメータの値が r (横軸) と b (縦軸) の組合せであるようなモデルにおける X のアンサンブル平均の予報期間後半の予報誤差を示したものである。シェードが予報誤差を示し、●印が完全モデルのパラメータの組合せ、×印が図 1 の不完全モデルのパラメータの組合せを示している。(a) が初期値 S の場合、(b) が初期値 U の場合の結果であり、メンバー数は 2562 である。また、図 3 は、破線が気候値²の等値線で、点線が全分散の気候値の等値線である。これら 2 つの線は、初期値には依存しない。

初期値 S と初期値 U では、パラメータ $r-b$ 平面上での予報誤差の分布つまりパラメータの値を変化させたときの予報誤差の値の変化の仕方

² X, Y の気候値は 0 であるから、この気候値は Z の気候値である。

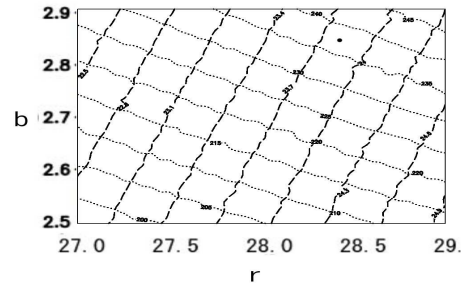


図 3: Lorenz モデルにおける気候値および全分散の気候値。破線が気候値の等値線で、点線が全分散の気候値の等値線である。

が大きく違うことが分かる。ただし、予報誤差の大きさは初期値 U の方が全体的にかなり大きい。(a) の初期値 S の場合は、予報誤差の等値線は、全分散の気候値の等値線とほぼ平行で、気候値の等値線とほぼ垂直である。そのため、単一の不完全モデルをパラメータの値の組合せを変えることにより最適化する際には、パラメータの値を全分散の気候値が変化しないような条件下でずらせば、予報誤差が極端に大きくなってしまいう危険性が少ない。一方、物理アンサンブルを考えると、予報誤差の変化が大きな方向つまり気候値が変化しないような条件下でパラメータを振らせれば、その効果が期待できる。それに対して、(b) の初期値 U の場合では、予報誤差の等値線は、気候値の等値線と全分散の気候値の等値線のほぼ中間の向きをもつ。そのため、不完全モデルを最適化する際に、気候値と全分散の気候値一定のどちらの条件下でパラメータを変化させても、予報誤差が極端に大きくなる危険性がある。また、物理アンサンブルの効果が期待されるパラメータの振らせ方は予想できない。

(2) 物理アンサンブルを用いた場合

物理アンサンブルで用いる楕円摂動の大きさは、パラメータ r 方向が長軸で長さは 0.4、パラメータ b 方向が短軸で長さは 0.08 である。図 4 は、初期値アンサンブルに加えて物理アンサンブル適用した場合の X のアンサンブル平均の予報期間後半の予報誤差の分布である (図 2 と同様の図)。初期値 U の場合のみを示す。全メンバー数は、初期値アンサンブル 42 個に物理アンサンブル 64 個を掛けた 2562 メンバーで、アンサン

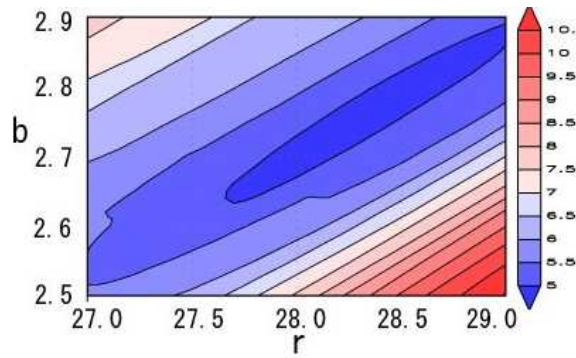


図 4: 物理アンサンブルを適用したことを除いては図 2b の場合と同様。全メンバー数は、初期値アンサンブルメンバー数 42 個に物理アンサンブルメンバー数 64 個を掛けた 2562 メンバー。

ブル数の差異による影響をなくすために、図 2 と同じにしている。

物理アンサンブルを適用した場合 (図 4) は、適用しない場合 (図 2b) に比べて、パラメータ r - b 平面上での予報誤差の分布が滑らかになっていることが分かる。物理アンサンブルを適用しない場合に対する物理アンサンブルを適用した場合の X のアンサンブル平均の予報期間後半の予報誤差の改善率を計算したものが図 5 である。物理アンサンブルを適用した方が良い場合が青で、悪い場合が赤であり、単位は % である。この図から、物理アンサンブルを適用した場合には、適用しない場合と比べて全体的に予報誤差が小さくなるわけではなく、適用しない場合と比較して最大で $\pm 6\%$ 程度の予報誤差の違いが生じることが分かる。物理アンサンブルを考慮したことによる違いが特に大きいのは、図 2 で r - b 平面上の予報誤差の勾配が急激に変化しているところである。このことは、物理アンサンブルを適用しない場合におけるパラメータ平面上の予報誤差の分布が得られれば、物理アンサンブルが有効かどうかを事前にある程度予想できる可能性があること示唆している。

次に、物理アンサンブルの改善率が最も低く物理アンサンブルの有効性が最も低い図 5 の P 点のパラメータの組合せのモデルに対して、パラメータ摂動の与え方を楕円の円周上ではなく、気候値一定の線上 (r, b 平面での長さ 0.14) に等間隔に与えて、これまでと同様な計算を行った。その結果得られた、 X のアンサンブル平均の予

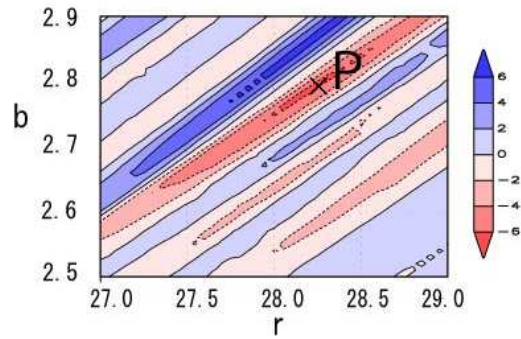


図 5: 物理アンサンブルを適用しない場合に対する物理アンサンブルを適用した場合の X のアンサンブル平均の予報期間後半の予報誤差の改善率 (%)。

報期間後半の予報誤差をこれまで得られた結果と比較すると次のようになる。

物理アンサンブルなし	4.76
物理アンサンブルあり (摂動の形:楕円の円周上)	5.07
物理アンサンブルあり (摂動の形:気候値一定の線上)	<u>4.71</u>
(参考) 気候値の予報	7.57

物理アンサンブルの有効性が最も低いパラメータの組合せにおいても、パラメータ摂動の与え方を変えることにより物理アンサンブルなし (初期値アンサンブルのみ) の場合に比べて僅かではあるが予報誤差が小さくなった。よって、物理アンサンブルではパラメータ摂動の与え方に対する依存性が大きく、効果的なパラメータの与え方を見出すことが重要であることが分かる。

4 まとめ

1 か月予報の期間を想定し物理アンサンブルを Lorenz モデルに適用した結果、wing 間の遷移が起こる初期値に対して、以下のような結果が得られた。(1) 初期値アンサンブルのみの場合と比較して、予報期間後半の予報誤差に $\pm 6\%$ 程度の差が生じた。(2) 物理アンサンブルが有効かどうかは、パラメータ空間上の予報誤差の分布図が分かれば、事前にある程度予想できる可能性がある。(3) パラメータ摂動の与え方に対する依存性が大きく、効果的なパラメータの与え方を見出すことが重要である。

今後の課題は、まず、より一般的な初期値依存性に対する結果を得ることと効果的なパラメータ摂動の与え方を導入することである。さらに、stochastic physics 法などの他のモデルアンサンブルの手法との有効性の比較なども行うことも重要であると思う。最終的な目標は、こうして得られた結果やアイデアを大気大循環モデルへ少しでも反映することである。

5 謝辞

今回の研究集会の参加にあたり、京都大学防災研究所より旅費の援助を受けました。感謝致します。

参考文献

- Buizza, R., M. Miller, and T.N. Palmer, 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 2887–2908.
- Mukougawa, H., M. Kimoto, and S. Yoden, 1991 : A relationship between local error growth and quasi-stationary states: Case study in the Lorenz system. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1231–1237.
- Palmer, T.N., 1993 : Extended-range atmospheric prediction and the Lorenz model. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 49–65.
- Palmer, T.N., 2001 : A nonlinear dynamical perspective on model error: A proposal for non-local stochastic-dynamic parametrization in weather and climate prediction models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 279–304.
- Yang, Z., and R.W. Arritt, 2002: Tests of a perturbed physics ensemble approach for regional climate modeling. *J. Climate*, **15**, 2881–2896
- 山根省三, 2002 : 摂動の線型発展の理論. アンサンブル予報, 気象研究ノート, 第201号, 21–71.