

# A study on the improvement of one-month forecasts using ensemble Kalman filter

(アンサンブル・カルマンフィルタを用いた  
1か月予報の改善に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

大気数値予報モデルの週間から1か月予報の予測精度は、初期値の不正確さだけでなくモデルの不完全さにも依存する。このうち初期値の不正確さによる予報の悪化を防ぐためには初期値アンサンブル予報が広く用いられている。これはデータ同化により求められる解析値のまわりに複数の初期摂動を加え初期値を生成し、その複数の初期値からそれぞれ独立に予報を行うことで確率論的な予報を行う手法である。アンサンブル・カルマンフィルタ(EnKF)は、従来は別々に行われてきたデータ同化と初期値アンサンブル予報を融合した手法であり、高度なデータ同化および解析誤差を適切に反映した初期摂動の生成を行うことが出来る。近年ではその実用化へ向けて大気大循環モデルや観測データへの適用などの研究が行われているが、その1か月予報に対する有効性について調べた研究はない。一方で、モデルの不完全さに伴う予報の悪化を防ぐためにモデルアンサンブル法と呼ばれる手法がしばしば用いられる。これは一般に、異なるモデルの不完全さを持つ複数のモデル、複数のパラメタリゼーション、複数のモデルパラメータなどを用いてアンサンブル予報を行うことで予報を改善させるものである。しかし、このモデルアンサンブル法においては初期値アンサンブル法のように理論的にその有効性が裏付けられるような方法は確立していない。モデルアンサンブル法の一種であるマルチパラメータ法はパラメタリゼーションに関するパラメータを用いたアンサンブル法である。それは同一のモデルと同一のパラメタリゼーションを用いて予報を行うことが出来るため、他のモデルアンサンブル法に比べてアンサンブル間の不確定さは小さいという利点を持つ。しかし、そのパラメータの与え方には任意性があるため適切なパラメータを見出す必要がある。また、この手法は気候モデルでは広く用いられているが1か月予報へ適用しその有効性が調べられた研究はほとんどない。

本研究の目的は、モデル誤差をもつ予報モデルにおける週間から1か月予報の予測精度の特徴を調べ、その改善に有効な手法を考案することである。そのために、本研究では従来のEnKFをモデルパラメータを含むように拡張した手法を考案した。本手法は従来のEnKFで求められる状態変数の解析値とその摂動だけでなく、時間変動する最適なモデルパラメータ値と

その摂動を求めることができる。そのため、従来のEnKFでも行われる初期値アンサンブル予報に、モデルアンサンブル（マルチパラメータ）法を組み合わせた予報を行うことが出来る。本手法の一部は、state augmentation 法と呼ばれるパラメータ推定法に基づいているが、それに対して主に状態変数用のEnKFとパラメータ用のEnKFを分離した点で異なっている。

まず、本手法を低自由度の非線形方程式系であるLorenz '96モデルに導入した。このモデルは大気大循環モデルの構造を非常に単純化したものと見なすことが出来るため、データ同化と予報スキームの検証に広く用いられる。元々のモデルを完全モデルと定義し、そのモデルにおける短い時間スケールを持つ変数を直接計算することなくパラメータを用いて表現（パラメタリゼーション）したモデルを不完全モデルと定義した。不完全モデルに本手法を導入した結果、パラメータの推定が可能であることが確認された。また、本手法はアンサンブル平均予報の誤差の減少に加えてアンサンブル間のばらつきを最適化するのに有効であることが分かった。本手法による予報の改善の効果はパラメータ推定によるものとモデルアンサンブルによるものに大きく分けられる。そこで、このそれぞれの効果を検証したところ、パラメータ推定は1週間以内の予報期間に対して、モデルアンサンブルは1週間以降の予報期間に対して予報の改善に効果的であった。また、パラメータ推定は、モデルの不完全さが予報期間より長い時間スケールを持つときに有効であり、一方でモデルアンサンブルはモデルの不完全さの時間スケールに依らず有効であった。さらに、従来のstate augmentation法と本手法との比較を行ったところ、十分に大きなアンサンブルメンバー数がとれる場合において、1週間以内の予報期間に対しては従来の方法が、それ以降の予報期間に対しては本手法が予報の改善に有効であることが分かった。

次に、Lorenz '96モデルを用いた実験で得られた結果が高自由度で複雑なパラメタリゼーションを持つモデルに対しても同様に成り立つかどうかを検証するために、本手法を大気大循環モデル(CCSR/NIES/FRCGC AGCM 5.7b)へ適用した。その水平解像度はT21（全波数21の三角形切断）で鉛直層数は11である。Lorenz '96モデル実験と同様に完全モデルと不完全モデルを定義した。積雲対流および大規模凝結に関するパラメタリゼーションで使われる6個のパラメータを赤色ノイズで変動させたものを真パラメータとし、この真パラメータを持つモデルを完全モデルと定義した。一方、不完全モデルはこの6個のパラメータの変動を知らないこと以外は完全モデルと同一のモデルとして定義される。不完全なモデルへ本手法を導入した結果、6個中少なくとも2個のパラメータの推定に成功した。また、東西風、温度、比湿の予報誤差が少なくとも2週間先まで減少した。これは雲のパラメタリゼーションに関するパラメータ値に対してより最適な値が解析された効果であると考えられる。

本研究の結果は、モデル誤差がさけられない大気の数値予報モデルによる週間から1か月予報の改善に対して、モデルパラメータの推定とモデルアンサンブル（マルチパラメータ）法の両方が有効であることを示している。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 山崎 孝治

副査 教授 池田 元美

副査 教授 長谷部 文雄

副査 准教授 渡部 雅浩 (東京大学気候システム  
研究センター)

副査 助教 三好 建正 (米国メリーランド大学  
大気海洋科学部)

## 学位論文題名

### A study on the improvement of one-month forecasts using ensemble Kalman filter

(アンサンブル・カルマンフィルタを用いた

1か月予報の改善に関する研究)

大気数値予報モデルの週間から1か月予報の予測精度は、初期値の不正確さだけでなくモデルの不完全さにも依存する。初期値の不正確さによる予報の悪化を防ぐために初期値アンサンブル法が広く用いられている。これはデータ同化により求められる解析値のまわりに複数の初期摂動を加え初期値を生成し、その複数の初期値からそれぞれ予報を行う手法である。アンサンブル・カルマンフィルタ (EnKF) はデータ同化と初期値アンサンブル予報を融合した手法であり、解析値と予報の初期摂動の生成が同時に行われる。近年ではその実用化へ向けた研究が行われている。一方、モデルの不完全さによる予報の悪化を防ぐためにモデルアンサンブル法と呼ばれる手法がしばしば用いられるが、初期値アンサンブル法に比べて有効性に理論的な根拠をもつような方法は確立していない。

本研究の目的は、モデル誤差をもつ予報モデルにおける週間から1か月予報の予測精度の特徴を調べ、その改善に有効な手法を考案することである。そのために、本研究では従来のEnKFを基にそれをモデルパラメータも含むように拡張した手法を考案した。この手法では従来のEnKFでも求められる予報変数の解析値とその摂動だけでなく、時間変動する最適なモデルパラメータ値とその摂動もまた求めることができる。そのため、従来のEnKFでも行われる初期値アンサンブル予報に加えてモデルア

ンサンプル（マルチパラメータ）予報も組み合わせた予報を行うことが可能である。本手法の一部分は、従来のstate augmentation 法と呼ばれるパラメータ推定法に似た構造を持つが、それに対して予報変数用とパラメータ用の2つのEnKFに分離されている点で異なっている。最初に、非常に単純な非線形モデルであるLorenz '96モデルに本手法が導入された。その結果、本手法はアンサンプル平均予報の誤差の減少とアンサンプル間のばらつきの大きさを最適化するのに有効であることが分かった。特に、パラメータ推定は1週間以内の予報期間に対して、モデルアンサンプル法は1週間以降の予報期間に対して効果的であった。また、パラメータ推定は、モデルの不完全さが予報期間より長い時間スケールを持つときに有効であり、一方でモデルアンサンプル法はモデルの不完全さの時間スケールに依らず有効であった。次に、より複雑なモデルである大気大循環モデルに本手法が適用された。その結果、雲のパラメタリゼーションに関する6個のパラメータの中の少なくとも2個の推定に成功した。また、東西風、温度、比湿などの予報誤差が初期から2週間先の予報まで少なくとも5%以上減少することが分かった。さらに、現実的な観測値を用いた実験の結果では、本手法の導入によってモデルの系統誤差を減らす方向にパラメータが修正されることが分かった。

本研究の結果は、モデル誤差が避けられない予報モデルでの週間から1か月予報に対して、モデルパラメータの推定に加えてモデルアンサンプル法の導入が有効であることを示すものである。また、本研究の手法はパラメータ推定のみならず大気海洋結合系など時間スケールの大きく異なる変数を併せて同化する方法の一つとして今後さらなる発展と応用が期待される。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。