梅雨前線帯のメソ対流系に対するアンサンブル感度解析 Ensemble Sensitivity Analysis for a Mesoscale Convective System in the Baiu Frontal Zone

○中下早織・榎本 剛○Saori NAKASHITA, Takeshi ENOMOTO

Ensemble singular vectors (EnSVs) represent rapidly growing structures with respect to high-impact weather phenomena of interest with the assumption that the perturbation of each ensemble member evolves linearly over the specified time window. This study explores the effectiveness of EnSVs for a mesoscale convective system over the East China Sea, a challenge due to its strong nonlinearity. Using breeding ensembles with varying horizontal resolutions, we compare EnSVs with nonlinear perturbed forecasts. Results show that EnSVs consistently capture sensitivity to synoptic-scale features across resolutions, but their growth rates decrease with increasing resolution. While nonlinear effects become more prominent at higher resolutions, the nonlinearly developed EnSVs still exhibit significant growth in the target region. The nonlinearity is likely linked to mesoscale error growth. These finding suggest that mesoscale EnSVs can identify key growing modes but have limitations in capturing the nonlinear amplification of errors inherent in mesoscale phenomena (146 words).

1. はじめに

アンサンブル感度解析は、極端気象の予報誤差 の発達に関連する初期時刻の変数・領域を、アン サンブル予報を利用して求める.これまで提案さ れてきた解析手法のうち,特異ベクトル法に基づ く感度解析手法 (EnSVSA: Ensemble singular vector sensitivity analysis)^[1] は、アンサンブル摂動が線型 に時間発展することを仮定して、注目する現象に 伴って最も発達する初期摂動を特定することがで きる.しかし、湿潤対流に関する強い非線型性の 影響が顕著に現れるメソスケールの現象に対する EnSVSA の適用可能性は十分に調べられていない.

本研究では、異なる解像度・力学に従う大気モ デルによって計算されたアンサンブル予報を利用 して、梅雨前線帯で発達するメソ対流系(MCS) に対して EnSVSA を適用する. EnSVSA による推 定と摂動を与えた非線型実験の結果を比較し、 MCS に対する EnSVSA の有効性を評価する.

2. 解析手法

EnSVSA はアンサンブル摂動で張られる空間の 中で、検証時刻・領域において最も発達する摂動 (EnSV) を求める. EnSV(*y* = *Yp*) を与える線型結 合の係数*p*は、一般化固有値問題

$$\mathbf{Z}^{\mathrm{T}}\mathbf{G}_{\mathrm{v}}\mathbf{Z}\boldsymbol{p} = \lambda\mathbf{Y}^{\mathrm{T}}\mathbf{G}_{\mathrm{a}}\mathbf{Y}\boldsymbol{p} \tag{1}$$

によって決定される.YとZはそれぞれ初期時刻と 検証時刻のアンサンブル摂動(各メンバーのコン トロール予報からの差)を列ベクトルとする行列, G_aとG_vはそれぞれ初期時刻と検証時刻の摂動の 大きさを測るノルムを定義する行列を表す.

対象とする MCS は, 2022 年 6 月 19 日に東シナ 海上で発達した事例である. この MCS は対流圏 下層トラフの前面で発達したメソβスケールの低 気圧を伴い,前線帯に形成された対流圏中層まで 至る深い湿潤不安定層の影響を受けていた^[2].

40 メンバーのアンサンブル予報を,NCEP で開 発された領域スペクトルモデル (RSM)^[3]を用いて, 水平解像度 27,9,3 km (D1–3) の3 段階のネステ ィングによって計算する^[2].支配方程式系は D1 が 静力学,D2 と D3 が非静力学であり,鉛直解像度 (σ 面 42 層)と物理過程は全解像度で共通であ る.D1 の基本場は NCEP GFS の予報値(水平解像 度 0.25 度)から取得する。D1 におけるアンサン ブル初期摂動は成長モード育成法^[4]で生成し,内 側領域は D1 からのダウンスケーリングで初期値 を作成する.初期時刻は 2022 年 6 月 18 日 1200 UTC で,検証時刻と領域はそれぞれ MCS が最盛 期を迎えた時刻(19 日 0300 UTC)と領域(東経 127–130 度,北緯 29.5–32.5 度)とする.摂動の大 きさは湿潤全エネルギーノルム^[5]を用いて測り, 初期時刻のノルムは全解像度共通で D3 内におい て計算する.

EnSVSA における摂動の線型時間発展の仮定の 妥当性を検証するために, EnSV をコントロール 予報の初期値に加えた非線型実験を行う.ノルム が二乗量であるため, EnSV の符号は一意に定ま らない.そのため,式(1)を解いて得られる EnSV をそのまま加える実験(NL+)と符号を反転させ て加える実験(NL-)を行い,摂動の符号に関する 非線型実験の対称性を利用して,非線型性の影響 を定量的に評価する^[6].また,摂動の非線型時間発 展の空間スケール依存性を,運動エネルギースペ クトルを用いて評価する.

3. 結果とまとめ

EnSV の成長率の比較から、解像度が上がるに つれて全体の成長率に対する上位モードの寄与が 下がり、高解像度ほど検証領域での摂動の発達を 説明するのにより多くのモードが必要となること がわかった. 主要モードの EnSV の初期の構造は 解像度間で類似していたが、EnSV の非線型時間 発展に対する解像度と力学の違いの影響は大きか った. 摂動の時間発展における非線型性は解像度 が上がるとともに強くなり、特に対流の発達域に おいて顕著に非線型性の影響が現れた (Fig. 1). 初 期の摂動の符号に対する対称性を用いて定義した 線型性指標の時間発展から、3km 解像度では6時 間以内に非線型性の影響が明瞭に現れることが定 量的に示された. 運動エネルギースペクトルの解 析から、非線型に時間発展した摂動は EnSV と比 較して 200 km 以下のスケールでの成長が大きく, 特に D2 と D3 で非線型性の影響が明瞭に現れる 時刻には,100km以下のメソβスケールでの成長 が顕著に大きいことがわかった. D1 では約200 km, D2 では約60 km 以下の波長帯での摂動の成長に 数値粘性が大きく影響するため, D3 と比較して摂 動の発達における非線型性の現れ方が弱いと考え られる.しかし,検証領域内でのNL+, NL-の摂動 エネルギーの時間発展はどの解像度でもEnSV に よる推定とよく対応しており,最も非線型性の影 響が顕著に現れる3 km 解像度においても,非線型 に時間発展したEnSV は検証時刻に検証領域内で 顕著な成長を示していた.本研究の結果は,メソ スケールの擾乱に対するEnSV は目的とする発達 構造を捉えることができるが,MCS に伴う非線型 誤差発達の大きさを表現するには限界があること を示唆している.

謝辞

NCEP RSM は Hann-Ming Henry Juang 博士より ご提供いただいた. JSPS 科研費 JP22KJ1966, JP21K03662, JP24H02226の助成を受けた。

参考文献

- [1] Enomoto, T. et al., 2015: J. Meteor. Soc. Japan, 93, 199–213, doi:10.2151/jmsj.2015-011.
- [2] Nakashita, S. et al., 2024: J. Meteor. Soc. Japan., 102, 599–631, doi:10.2151/jmsj.2024-032.
- [3] Juang, H.-M., H. 2000: Mon. Wea. Rev., **128**, 2329-2362.
- [4] Toth, Z. and E. Kalnay, 1997: J. Atmos. Sci., 52, 1434-1456.
- [5] Ehrendorfer, M. et al., 1999: J. Atmos. Sci., 56, 1627–1648.
- [6] Gilmour, I. et al., 2001: J. Atmos. Sci., 58, 3525– 3539.



Fig. 1 Distribution of perturbation moist total energy (J kg⁻¹) at 9 forecast hours for the third mode in D3 of (a) EnSV,
(b) NL+, (c) NL-, and (d) average of NL+ and NL- (larger values mean stronger nonlinearity). Shading areas indicate the verification region.