

## 熱的勾配が駆動する渦度場の解明とデータ同化実験

## Understanding and Data Assimilation Experiment on Vorticity Field Driven by Thermal Gradient

山口 弘誠・○大野 哲之・中北 英一

Kosei YAMAGUCHI, ○ Akiyuki ONO, Eiichi NAKAKITA

In this research, potential temperature gradient based vorticity which is the expression of baroclinic is obtained to analyze the energy structure of the vorticity field in developing cumulonimbus. First, applying the variational method enables us to obtain a diagnostic equation in which the equation of motion, conservation law of mass, and entropy are considered as constraints. Second, Fourier analysis was performed on the vorticity field in the cross-section of the convective core in the isolated cumulonimbus simulation. The temporal change of the spectrum of vorticity field indicates that the rotational intensity of potential temperature gradient based vorticity increases as the degree of baroclinicity increases. Third, we conducted the data assimilation experiment assuming the use of vertical vorticity estimated by doppler radar observation. As a result, the change in the potential temperature and vertical wind through the error covariance matrix generates coherent convection in the computations (145 words).

## 1 はじめに

メソ対流系による広域の豪雨災害は防災上の甚大なりスクであるため、メソ対流系の発生メカニズムの理解、ならびにレーダー等の観測情報と数値気象モデルを高度に組み合わせた予測の実現は工学的に重要な課題である。一方でメソ対流系は、ミリメートル以下のスケールを持つ雲微物理過程から総観規模の大気の流れに至るまで、大小様々なスケールの現象が相互作用を成す複雑な系、という理学的に興味深い性質を持ち合わせている。そこには、水物質の相変化に伴う潜熱の移動に由来するスケールの小さい渦と、個々の積乱雲、ないしはメソ対流系全体に及ぶスケールの大きな渦との間の密接な関係があると考えられている。実際、中北ら(2013)は発達した積乱雲に対してそのファーストエコーである「タマゴ」の観測から比較的大きな鉛直渦度が特徴的であることを見出し、鉛直渦度が「タマゴ」のその後の発達の有無を判断する指標として有効であることを示唆している[1]。しかし、積乱雲における熱的に駆動される渦の存在は指摘されてきたものの、メソ対流系における渦のスケール間の相互作用およびその探求の方法論、さらには予測への応用に関する議論はほとんどなされてこなかった。

そこで本研究では、傾圧性の度合いを示す渦度を導出し、発達期の積乱雲内における渦のスケール間の相互作用を議論するための方法論、ならびに鉛直渦度のデータ同化手法という新しい概念を提案することを目的とした。

## 2 温位勾配により駆動される渦度の定式化

Sasaki (2014) は、運動方程式・質量保存則・エントロピー保存則の下で変分法を適用し、エントロピー勾配と風速で表される渦度を提案した[2]。本研究では、エントロピーをモデル変数である温位に変換することで、温位勾配と風速で表現される渦度を導出した。この渦度を  $\omega$  と表記するとき、東西方向の成分  $\omega_x$ 、並びに鉛直方向の成分  $\omega_z$  は式(1)のように表せる。

$$\begin{aligned}\omega_x &= -\frac{1}{\theta} \left( w \frac{\partial \theta}{\partial y} - v \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \\ \omega_z &= -\frac{1}{\theta} \left( v \frac{\partial \theta}{\partial x} - u \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

式(1)は、温位勾配に由来する熱力学的な力が風速場に作用することで生じることを意味している。温位勾配が比較的大きい場合は大気が傾圧である事に対応する。

## 3 発達期の積乱雲内の渦スケール解析

次に、雲解像モデル CReSS [3] を用いた単独積乱雲シミュレーションにおける渦度場に対して高速フーリエ変換 (FFT) を適用することで、回転強度と渦のスケールの時間変化を解析した。図1は、発達期の積乱雲の対流コア付近の鉛直断面における、水平渦度のエネルギースペクトルを示している。

赤色で示された温位で表される水平渦度  $\omega_x$  と青色で示された風速で表される水平渦度  $\zeta_x$  のスペクトルには、約  $10^4$  のオーダーの差が存在していることが分かった。

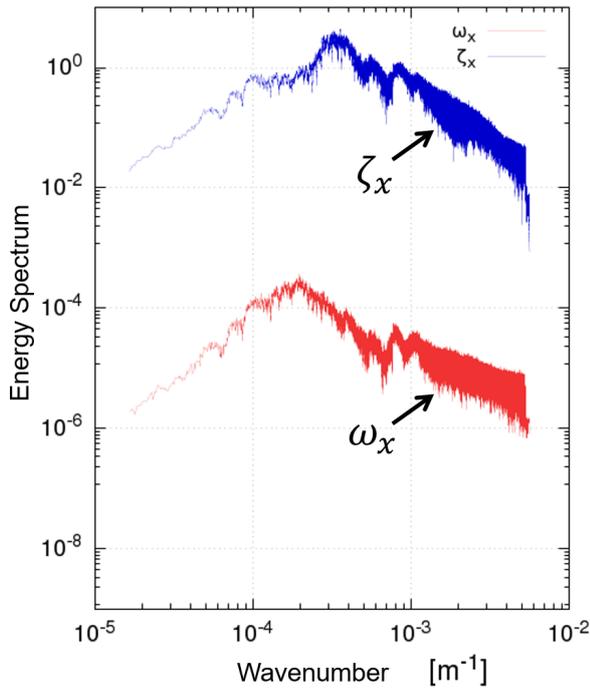


図 1: 発達期の積乱雲の対流コア付近の鉛直断面における水平渦度のエネルギースペクトル

またスペクトルの形状は上昇流が発達する前では互いに相似であった。上昇流が強化されるに従って水平渦度  $\omega_x$  では波数  $2.0 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  付近のピークを中心にスペクトルが増大した。一方で、風速で表される水平渦度  $\zeta_x$  のピークは高波数側から低波数側へ移動していく様子が見られた。以上のスペクトルの振る舞いより、2つの渦度間、及びスケール間の相互作用の存在が示唆された。

#### 4 鉛直渦度のデータ同化実験

さらに、温位で表される鉛直渦度  $\omega_z$  を観測演算子に設定し、レーダー観測から鉛直渦度が推定された状況を想定したデータ同化実験を行った。データ同化システムには雲解像モデル CReSS に Yamaguchi *et al.*(2008) が局所カルマンフィルタを組み込んで開発した CReSS-LETKF を使用した [4]。水平解像度 1 km、鉛直解像度を平均 250 m に設定し、2017 年 7 月 5 日に発生した九州北部豪雨の環境場を用いて BGM 法により計 30 のアンサンブルメンバーを作成した。また同化する疑似観測値として、絶対値が等しい正負の鉛直渦度のペアが南北・鉛直方向に分布した渦管構造を採用した。

図 2 に同化前後における大気場のアンサンブル平均を示す。同化前はほぼすべての高度で西風が卓越していたため、図 2(a) で示す断面における風速はほぼゼロに近い値を取っている。一方で、図 2(b) では、i) 疑似観測値を同化した格子点付近で正負の鉛直渦度が実現し、ii) 負の

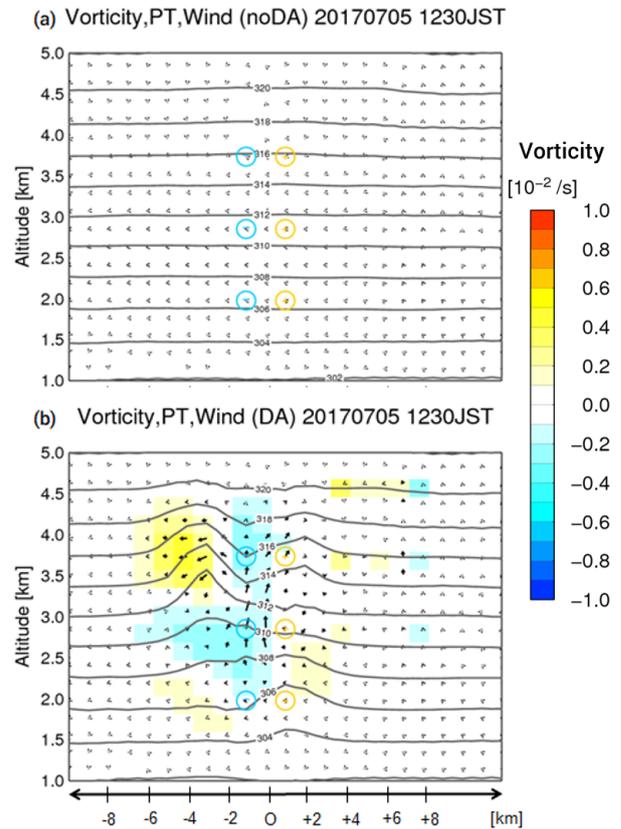


図 2: 正負の渦管を同化した南北-鉛直断面における風速・温位・鉛直渦度の分布。(a) は同化前、(b) は同化直後の分布を、図中の丸印は鉛直渦度を同化した格子点の位置を示している。

鉛直渦度が実現した領域付近で温位が周囲に比べ高くなり、iii) 高度 2.5~4.5 km に最大で  $3.5 \text{ ms}^{-1}$  の上昇流が出現したことが明らかになった。

#### 参考文献

- [1] 中北英一ら, ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), 69.4, pp.325-330, 2013.
- [2] Y, Sasaki, Entropic Balance Theory and Variational Field Lagrangian Formalism: Tornadogenesis, J. Atmos. Sci., 71, pp.2104-2113, 2014.
- [3] Tsuboki, K. *et al.*, Large-scale parallel computing of cloud resolving storm simulator, High Performance Computing, Springer, pp.243-259, 2002.
- [4] Yamaguchi, K. *et al.*, Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data using the cloud-resolving non-hydrostatic model with an aim to introduce polarimetric radar data assimilation, Proc. of 7th Intl. Symp. on WRaH, 3 pp, 2008.