

発達期の積乱雲における熱力学的効果を考慮した渦度場のスケール解析

京都大学大学院工学研究科 学生会員 ○大野 哲之

京都大学防災研究所 正会員 山口 弘誠

京都大学防災研究所 正会員 中北 英一

1. 研究の背景と目的

ある特定の地域に持続的に積乱雲が発生し豪雨をもたらす線状降水帯は防災上の甚大なりスクであるため、その発生位置や時間の予測に対する不確かさを軽減する手法の検討が必要である．積乱雲群の発達段階によって空間を占める水物質の種類や流れの性質が変化するため、その後の降雨予測の不確かさを与える要素が変化することが考えられる．特に発達初期の積乱雲では、水物質の相変化といった熱力学的な効果と風速場のような力学的な効果が重要な役割を果たす．実際、発達した積乱雲において、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が見出され、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が示唆されている [1]．一般的に渦度は風速のシアとして表現される．一方で、熱力学的な効果を考慮した診断的な渦度という観点から、積乱雲の発達を議論されることはほとんどなかった．そこで本研究では、大気が不安定な状態を表す新しい渦度の形式を導出し、シミュレーションを用いて発達期の積乱雲における渦の空間スケールの変化を解析することを目的とした．

2. 熱力学的効果を考慮した渦度の導出

先行研究では、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 $1/S\nabla S$ と風速 $\boldsymbol{V}$ で構成された渦度が提案された [2]．この導出の際には、個々の微小領域における水分子の相変化が瞬時に完了し、その前後では断熱過程を仮定している．本研究ではエントロピーを気象モデルの予報変数である温位に変換し、温位勾配 $\nabla\theta$ と風速 $\boldsymbol{V}$ の外積で表現される渦度を導出した (以下ではこの渦度を ω と表記する)[3]．渦度 ω は、温位勾配に由来する熱力学的な力が風速場に作用して渦が生じることを意味している．温位勾配が比較的大きい状態は大気成層の不安定性 (傾圧) に対応する．

3. 単独積乱雲シミュレーションに対する渦スケール解析

雲解像モデル CReSS を用いた単独積乱雲シミュレーションを行い、風速のシアで定義される一般的な鉛直渦度 ζ_z と渦度 ω の鉛直成分 ω_z の空間スケールの変化を解析した．水平解像度は 250 m、鉛直解像度は平均 100 m に設定し、初期値として鉛直シアと下層が湿潤なプロファイルを水平一様に与えた．

対流コア付近の2つの渦度 ζ_z, ω_z の各々の値の大きさには約 $10^1 \sim 10^2$ 程度のオーダーの差がみられた．図 1(a) では正負の渦管のペアの上端が高度約 2.0 km にあるのに対して、(b) では水平方向の温位勾配が比較的大きく、かつ渦度 ζ_z の渦管の約 1 km ほど上方の位置に、渦度 ω_z の正負の渦管のペアがみられた．

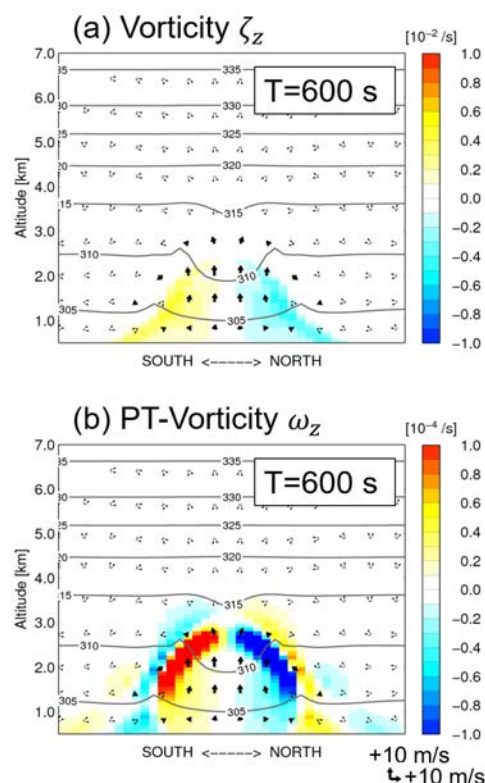


図 1: 単独積乱雲シミュレーション開始後 600 秒における対流コア付近の南北-鉛直断面. (a) 風速のシアで表現される一般的な渦度 ζ_z , (b) 本研究で提案する温位勾配を含む渦度 ω_z の分布.

キーワード 温位, 渦度, 単独積乱雲, 線状降水帯, スペクトル解析

連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 E-mail: ono.akiyuki.76n@st.kyoto-u.ac.jp

渦度 ω_z の渦管の振る舞いの原因は、水平方向に軸を持つ互いに逆向きの渦管2つが上昇流によって持ち上げられ、鉛直方向に軸を持つ渦管へと変化したことと推測される．図 2(a) に示すように、渦度 ω_z の鉛直渦管と渦度 ζ_z の鉛直渦管の位置関係は、積乱雲の発達期において概ね共通してみられる傾向であった．

計算開始後 900 秒時の、対流コアを中心に水平方向 10 km、鉛直方向は地表付近～高度 13 km までの領域を対象とした渦度 ζ_z, ω_z のスペクトル解析の結果を図 2(b) に示す．上昇流の発達と同時にスペクトルも増加傾向を示し、霰等の固相降水粒子の生成が始まる前後でスペクトルの変化傾向が異なることが明らかになった．

このことは水物質の相変化に伴う渦度の変化、ないしは2つの渦度 ζ_z, ω_z の相互作用の存在を示唆している．渦度の定量的な時間変化やスペクトルのべき乗則等の観点から、2つの渦度 ζ_z, ω_z のエネルギーカスケード構造に関する解析を進め発表時に紹介する予定である．

4. 線状降水帯事例への応用

2020 年 7 月 3 日～4 日にかけて球磨川流域に豪雨をもたらした線状降水帯発生時の実環境場を用いた再現実験を行い、海上でみられた発達期の積乱雲の対流コア断面に対して同様の解析を行った．図 2(c) に、再現実験内の降水システム付近の鉛直断面を示す．図中の右下の黒丸で示した領域で上昇流が発達しつつあり、その周囲に比較的大きな値の渦度 ω_z が分布している様子がみられた．

また、図 2(c) と同じ断面の渦度 ω_z の分布についてスペクトル解析を行ったところ、単独積乱雲シミュレーションと同様に上昇流とエネルギースペクトルの増加傾向が対応していることが明らかになった．

今後は解析対象を積乱雲付近の3次元領域に拡張し、単独積乱雲シミュレーションに対する解析で得られた特徴との比較からその類似性や相違点を考察する．さらに渦度 ω_z の観点から、積乱雲の発達が周囲の環境場を変化させ、バックビルディング型の線状降水帯を発生・維持させるメカニズムを分析する予定である．

5. まとめ

大気が不安定な状態を示す新しい渦度 ω_z を導出し、単独積乱雲シミュレーション・線状降水帯事例の再現実験に対して渦度の空間スケールについて解析した．発達期の積乱雲における渦度 ω_z の振る舞いには、一般的に用いられている渦度 ζ_z に対する先行性、ないしは相互作用の存在が示唆された．こうした性質を応用し、レーダー観測と気象モデルを融合した線状降水帯の動向を予測する手法の検討が今後の課題である．

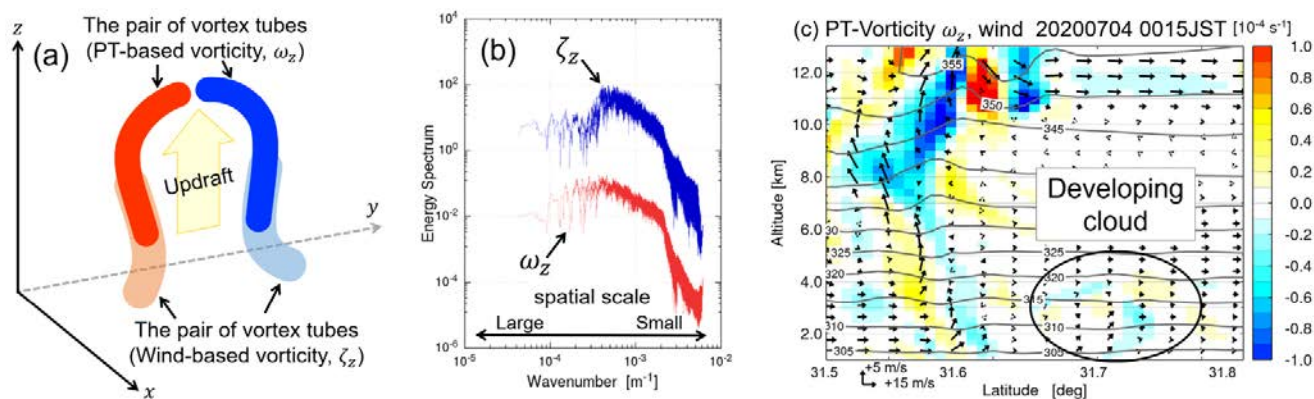


図 2: (a) 鉛直方向に軸を持つ正負ペアの渦管の位置関係を示した模式図、(b) 対流コア近傍の鉛直渦度分布のスペクトル解析の結果と (c) 再現実験の結果から抽出した、発達期の積乱雲付近の南北-鉛直断面における渦度 ω_z の分布．

参考文献

- [1] E. Nakakita, H. Sato, R. Nishiwaki, H. Yamabe, K. Yamaguchi, Early Detection of Baby-Rain-Cell Aloft in a Severe Storm and Risk Projection for Urban Flash Flood, *Advances in Meteorology*, vol. 2017, Article ID 5962356, 15 pages, 2017.
- [2] Y. Sasaki, Entropic Balance Theory and Variational Field Lagrangian Formalism: Tornadogenesis, *J. Atmos. Sci.*, 71, pp.2104-2113, 2014.
- [3] 山口弘誠, 大野哲之, 中北英一, 温位勾配に着目した鉛直渦度データ同化手法の提案と理想実験, *土木学会論文 文集 B1(水工学)*, 76.2, pp.259-264, 2020.