

高解像度放射対流平衡実験における積雲アンサンブルの統計的性質  
 Statistical Properties of Cumulus Ensembles in  
 High-Resolution Radiative-Convective Equilibrium Simulations

○柳瀬 友朗・竹見 哲也  
 ○Tomoro YANASE, Tetsuya TAKEMI

This study investigates the statistical properties of cumulus ensembles in radiative-convective equilibrium states. Numerical experiments were conducted with the use of the non-hydrostatic Weather Research and Forecasting (WRF) model at horizontal resolutions from 1600 m to 200 m in an area of  $(200 \text{ km})^2$ , with the interactive radiative flux calculation including diurnal cycle. The experiment with the horizontal grid spacing of 200 m successfully reproduced the diurnal variability of the trimodal characteristics of cumulus convection. With the decrease in the horizontal resolution, intermittent deep convection accompanied by the strong updraft and rainfall becomes dominant. The middle-to-upper troposphere appears to become stabler and drier with the decrease in the horizontal resolution. We further analyzed the cloud structures by using a three-dimensional cloud detection method. It is suggested that vertical structures of in-cloud properties and vertical development of cumulus ensembles are strongly affected by horizontal scales of microstructure which are constrained by horizontal resolution. Furthermore, the results imply the distance between convective clouds contribute the horizontal heterogeneity of water vapor which causes convective aggregation.

## 1. はじめに

水蒸気の凝結に伴う潜熱解放を駆動源とした積雲対流の、集団的振る舞い及び大規模場との相互作用はその複雑性から包括的には理解されていない。積雲対流の基本的性質に関して数値モデルを用いて研究する枠組みの一つとして、放射対流平衡 (radiative-convective equilibrium; RCE) 実験がある。RCE は大気放射冷却と対流による熱輸送が釣り合う状態を指す概念である。RCE 実験においてある条件を満たすと、放射や水蒸気場との相互作用を通じて対流が自発的に集団化することが知られているが、そのメカニズムは詳しくは分かっていない。また RCE 実験は、水平解像度や乱流モデルといった微細規模過程の表現性に強く依存することが知られているものの、乱流スケールの現象がどのように大規模場の振る舞いに影響を与えるかはよくわかっていない。

そこで本研究では、水平格子間隔 1600 m (H1600) から 200 m (H200) の範囲で高解像度 RCE 実験を行い、微細規模過程の表現性の違いが、積雲アンサンブルの統計的性質に及ぼす影響を調べた。

## 2. 数値モデル・実験設定

数値実験には完全圧縮方程式系非静力学モデル Weather Research and Forecasting (WRF) model ver. 3.8.1 を用いた。放射過程にはインタラクティブに放射フラックスを計算する RRTMG 長波・短波スキーム、雲微物理過程には雲水・雨水・雲氷・雪・あられの混合比を予報する 1 モーメントバルク型の WSM6 スキーム、接地層過程にはモニンオブコフ相似則に基づいて地表フラックスを計算するスキームを用いた(その他詳細の設定は Yanase and Takemi (2018) と同様)。実験の概念図を図 1 に示す。

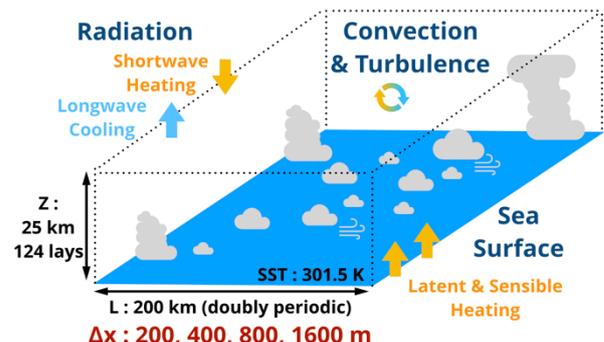


図 1. 実験の概念図.

### 3. 結果

20日間積分後の、可降水量の水平分布を図2に示す。雲が単一のクラスターとなるような極端な対流の集団化はどの実験でも見られなかったものの、解像度が低くなるほど全体としては乾燥化し、個々の対流イベントに対応するような極大値が顕著に見えるようになる。また H1600 実験においては、個々の対流スケールよりも大きな水平方向の不均一性を生じていることがわかる。

16日目から20日目の間における領域平均した地表降水量の時間変化を図3に示す。総降水量を降水頂高度に基づいて分類した Cu, Cg, Cb タイプの雲からの降水量も示している。H200, H400, H800 実験においては降水の日変化が明瞭である一方で、H1600 実験においては不明瞭である。また、H1600 実験は間欠的な Cb による強い降水が支配的であることがわかる。

さらに Tsai and Wu(2017)に基づき、3次元雲検出手法を用いた解析を行った。雲水雲氷混合比が  $1.0 \times 10^{-5} \text{ kg kg}^{-1}$  を超える雲グリッドの3次元6連結を個々の雲として検出した。さらに、雲底高度が 1 km 以下かつ雲の深さが 1 km を超える雲を対流雲として定義した。図4に示すように、対流雲がうまく抽出されているように見える。図5に対流雲の体積の確率密度分布を示す。解像度が低くなるにつれて分布が体積が大きい側(右側)にシフトしていることがわかる。対流雲の水平スケールが解像度に強く制約されることが示唆される。また H800, H1600 実験においては、体積が大きい側に2つめのピークを持つことから深い積乱雲の存在頻度が高いことがわかる。

### 4. まとめ

RCE の場において、水平解像度の違いは大気境界層内部の微細規模構造や対流雲のエントレインメント過程を通じて積雲アンサンブルの統計的性質を変化させ、結果として熱力学的・力学的に異なる平衡状態を形成するということが本研究により初めて明らかになった。また、解像度が低いほど対流雲間の距離が大きくなることで、水蒸気場の水平不均一性を拡大し、対流の集団化を引き起こすという可能性が示唆された。

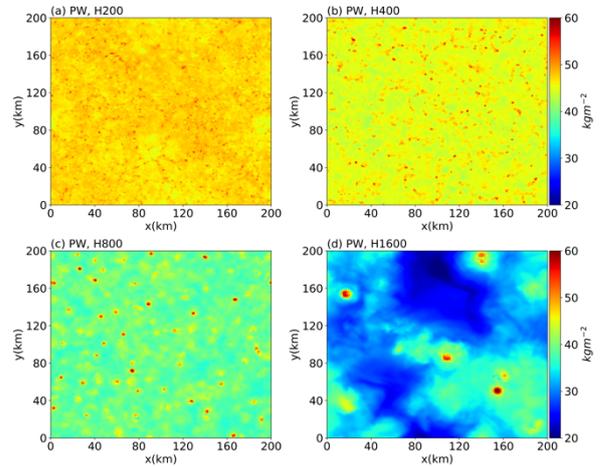


図 2. 20 日間積分後の可降水量の水平分布.

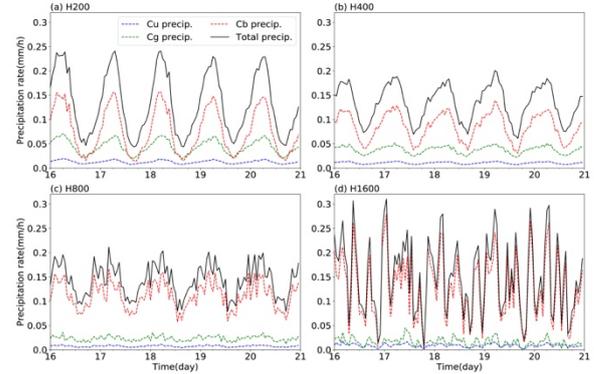


図 3. 16 日目から 20 日目の間における領域平均した地表降水の時間変化. 総降水量(黒線)を, Cu, Cg, Cb タイプの雲からの降水に分類した(青線, 緑線, 赤線).

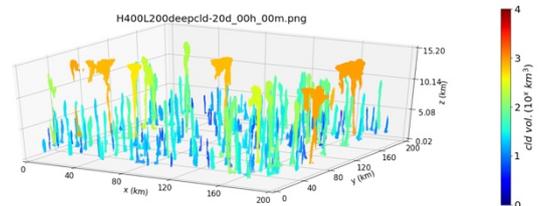


図 4. 検出された対流雲の 3 次元的なスナップショット(H400 実験の例). 色は雲の体積を表す.

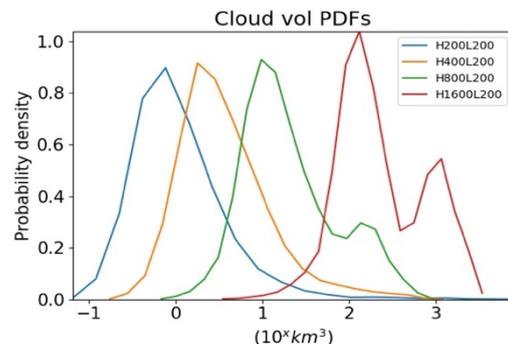


図 5. 対流雲の体積の確率密度分布. 横軸は 10 の冪指数で表している.