

下層循環と自由対流圏変動の結合を通じた湿潤対流の自己集合化メカニズム  
 Low-level circulation and its coupling with free-tropospheric variability as a mechanism of  
 spontaneous aggregation of moist convection

○柳瀬友朗・西澤誠也・三浦裕亮・竹見哲也・富田浩文

○Tomoro YANASE, Seiya NISHIZAWA, Hiroaki MIURA, Tetsuya TAKEMI, Hirofumi TOMITA

Deep convective storms often organize into large-scale systems such as mesoscale convective systems and tropical cyclones. Since these systems are accompanied by heavy rainfalls and strong winds, it is necessary to understand the convective organization mechanism as a physical basis for disaster prevention. Convective self-aggregation (CSA) is a spontaneous organization mode of deep convective storms found in numerical experiments of radiative-convective equilibrium and is considered as important for the organization of cloud at meso- $\alpha$  scale. In this study, we investigated the onset mechanism of CSA by focusing on the low-level circulation responsible for horizontal moisture transport. By proposing a new analysis method quantifying the circulation across dry and moist regions, we found that the radiatively driven cold pool in the dry region drove the organized low-level circulation. Furthermore, we showed that the free-tropospheric subsidence coupled with horizontal variabilities of diabatic heating and moisture played an important role in triggering the CSA onset.

### 1. はじめに

入道雲としても知られる深い対流雲は、しばしばメソ対流系や台風といった大規模な構造に組織化する。対流の組織化を深く理解することは、極端大気現象の物理的基礎を与えることで防災にも資する。しかし、どのような水平スケールにおいてどのような物理機構が対流の組織化に重要であるのかについての理解は不十分である。

数値大気モデルを用いた気候研究の枠組みの一つである放射対流平衡(RCE)実験において、水平一様な境界条件にも関わらず、多数の対流雲が一箇所に集まり雲クラスターが形成されることがある。この雲の自発的な組織化は対流の自己集合化(CSA)と呼ばれている。Yanase et al. (2020, Y20) は非静力学大気モデルを用いた RCE 実験を行い、CSA は水平領域幅が約 500km の臨界的な長さよりも大きい時に発生することを発見した。この結果は、CSA はメソ  $\alpha$  スケール以上の水平スケールにおいて重要な過程であることを意味すると同時に、現実大気における雲の組織化のより深い理解に役立つ可能性を示唆する。

本研究の目的は、領域幅増加に伴う CSA の発生を詳細に調べることで、CSA の発生機構を明らかにすることである。特に、水蒸気の水平輸送に重要な役割を果たす下層循環の発達機構、及びその自由対流圏における水蒸気・放射・対流の水平変

動との関係に注目する。

### 2. 数値モデル・実験設定

本研究は、3次元完全圧縮非静力学方程式系領域大気モデル SCALE-RM (Nishizawa et al. 2015; Sato et al. 2015) を用いて行われた Y20 の一連の数値実験データセットを用いる。計算領域は、水平方向に正方形型で側面には二重周期境界条件を課す。鉛直方向には上端は高度 24km で、下層ほど密に 64 層で離散化する。また、雲微物理過程、放射過程、地表フラックス過程、サブグリッドスケール乱流過程に関する物理パラメタリゼーションを用いる。その他の実験設定の詳細は Y20 を参照されたい。本研究では主に水平格子幅 1000m・水平領域幅 {96,192,384,560,960}km の 5 つの実験に注目する。

### 3. 新たな解析手法：準 3 次元流線関数

本研究では、乾燥域から湿潤域に亘る循環の特徴を定量化するために、等可降水量線による水平領域分割に基づく手法を導入し、循環強度の新たな指標である準 3 次元流線関数を提案する。この手法は、Bretherton et al. (2005) によって導入された有効流線関数の算出手法とは異なり、大気柱を並び替えないため、水平方向のトポロジーの情報が損なわれないという利点がある。準 3 次元流線関

数は、次に示す積分形の質量保存則によって基礎付けられる:

$$\oint_C \int_0^z \rho \tilde{v} dz' d\tilde{x} + \iint_D (\rho w)|_{z'=z} dS = 0, \quad (1)$$

ここで、 $C$ と $D$ は周回積分のための閉曲線と面積分のための面、 $d\tilde{x}$ と $dS$ は曲線 $C$ に沿った線素と面 $D$ に対する面積素である。また $\rho$ は大気密度、 $\tilde{v}$ は曲線 $C$ を横切る水平風速、 $w$ は鉛直速度、 $z$ は鉛直方向の積分範囲の上端高度である。準3次元流線関数は、次に示す式(1)の左辺第2項(離散形)で定義される:

$$\Psi_{i,z} = \sum_{j=1}^i (\rho w)_{j-1/2,z} dS_{j-1/2}, \quad (2)$$

ここで、 $i$ は $C$ と $D$ のインデックスであり、 $j-1/2$ は $C_j$ と $C_{j-1}$ の間の水平領域のインデックスである。本研究では、可降水量(PW)の各パーセンタイル値の等値線を $C$ として用いる。PWが等値線の値よりも小さい水平領域が $D$ である。

#### 4. 結果

まず、CSAが発生した(集合)事例と発生しなかった(散在)事例の間にはどのような循環パターンの違いがあるかを確かめるために、図1に水蒸気-高度空間における循環を示す。図1bに示すように、散在事例においては、高度1km以上の自由対流圏においては反時計回りの循環が卓越しているのに対し、地表付近においては時計回りの循環が卓越している。一方、図1aに示すように、集合事例においては、自由対流圏のみならず乾燥域の地表付近においても反時計回りの循環が卓越している。この反時計回りの循環が、CSAの特徴である水蒸気の水平不均一性の増幅に本質的役割を担うと考えられる。

次に、散在・集合事例の循環パターンの違いを生む力学的要因を理解するために、図2に浮力・放射冷却・蒸発冷却のパターンを示す。図2bに示すように、散在事例においては、湿潤域下層の蒸発冷却に伴う浮力水平勾配が時計回りの循環を駆動するトルク(緑色円矢印)として働く。一方、図2aに示すように、集合事例においては、乾燥域下層の放射冷却に伴う浮力水平勾配が反時計回りの循環を駆動するトルク(紫色円矢印)として働く。この結果から、乾燥域において放射冷却が強まることで、CSA発生に伴う下層循環の発達に鍵である

ることがわかる。

#### 5. 議論と展望

本研究ではさらに、(1)乾燥域の自由対流圏下降流が境界層に鉛直貫入する過程、(2)自由対流圏下降流と非断熱加熱の関係、(3)非断熱加熱と水蒸気量の水平変動性の関係、について詳しく調べた。発表においては、これらの結果に基づき、下層循環と自由対流圏変動の結合を通じたCSA発生機構の全体像を提示する。

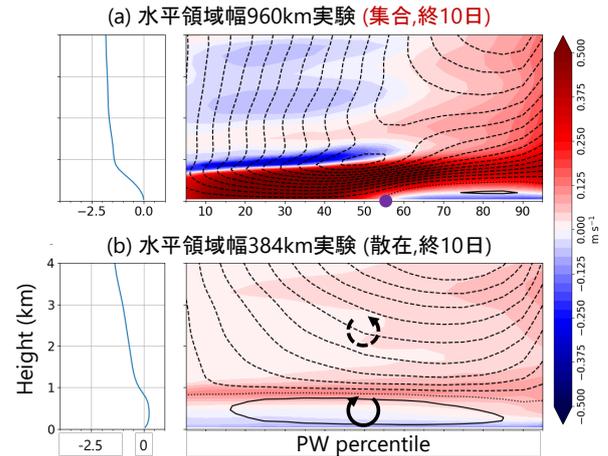


図1. 水蒸気-高度空間における循環. シェードは等PW線を乾燥側から湿潤側に向けて横切る水平風速. コンターは式(2)の準3次元流線関数を計算領域面積で規格化した値で、実線(破線)は正值(負値)で時計回り(反時計回り)の循環を意味する. 横軸方向に平均した準3次元流線関数の鉛直分布を左に示す. (a)CSA発生時の水平領域幅960km実験. (b)CSA非発生時の水平領域幅384km実験.

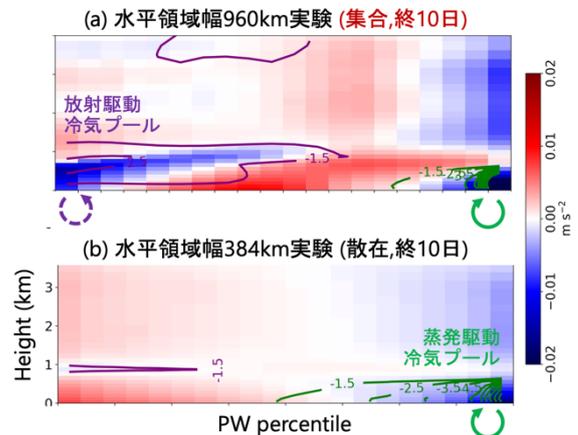


図2. 水蒸気-高度空間における浮力・放射冷却・蒸発冷却. シェードは浮力. 紫色(緑色)コンターは放射加熱率(雲微物理加熱率)で、 $-1.5 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 以下のみを表示している。