

# 相変化が下層雲の雲セルの間隔に与える影響

宮本 佳明<sup>1</sup>, 野田 暁<sup>2</sup>, 佐藤 陽祐<sup>1</sup>, 西澤 誠也<sup>1</sup>, 八代 尚<sup>1</sup>, 梶川 義幸<sup>1</sup>, 吉田 龍二<sup>1</sup>, 山浦 剛<sup>1</sup>, 富田 浩文<sup>1,2</sup>  
1: 理化学研究所計算科学研究機構, 2: 海洋研究開発機構

## 1 背景

東部太平洋など大陸の西岸では境界層上部に下層雲（層積雲・積雲）が恒常的に存在する。下層雲は、寿命の長さや地球表面を覆う面積の広さから地球の放射収支に大きな影響を与える。下層雲が存在する流れ場は、広く弱い上昇流域で雲が存在する close セルと狭く強い上昇流域で雲が存在する open セルの二つに分けられる。そのため、下層雲域において雲が占める面積は各雲セル間の距離に大きく依存するとされており（Sato et al. 2015a、以下 S15）、被覆面積を求める上でも、雲セル間の距離を決めるメカニズムを理解することが重要である。

実際に、海面水温が高くなるにつれセルの間隔が広がるのが観測されている。海面温度の増加は海面の潜熱・顕熱フラックスを増加させ、活発な凝結を促す。すると雲粒は雨粒まで成長して落下し、それに伴う下降流が地表付近に発散場を形成する。この発散流が隣のセルのと衝突することで新たなセルを作り出すという機構が働くと考えられており、水滴が落下すること（降水の存在）が重要となる。

雨粒形成のタイミングは、海面フラックス以外にも雲の凝結核となるエアロゾルの数濃度にも大きく依存する。エアロゾルが少ない環境場では、同じ過飽和度で考えると、大きい水滴が形成される。一方でエアロゾルが多い環境場では、一粒あたりの水蒸気量が少なくなり形成する水滴は小さい。初期から粒径が大きい場合、すぐに雨粒大に成長して落下する。通常、沿岸域の方がエアロゾルが多いため、沖合に行くと共に個数が減っていき、降雨が生じてセルの間隔が広がると解釈される（Wang and Feingold 2009）。

一方で、下層雲が存在する境界層の流れ場は3次元の Rayleigh–Bénard 対流場と類似している。この点から、セルの間隔は Rayleigh 数（海面水温と自由大気との温度差や境界層深さなどの関数）に依存し、卓越する波数が Ra 数と共に増加すると推察できる。即ち、低い温度差の方が低い波数の（間隔が広い）構造が出現しやすいが、観測結果と逆の傾向である。一方で、相変化（上昇流域での加速）を加味するとセルの間隔は広がる（Tritton and Zarraga 1967）。

下層雲は水物質の相変化に感度が高いことが分かっており、雲セルによる熱輸送を考えるとセル間の間隔も相変化に影響されることが考えられる（詳細は後述）。そこで本研究では、相変化と下層雲の間隔との関係を明らかにすることを目的とする。

## 2 実験設定

本研究では S15 による SCALE-LES (Nishizawa et al. 2015, Sato et al. 2015b) を用いた広領域の下層雲の数値実験結果を解析する。計算領域は  $x, y, z$  方向にそれぞれ 784, 28.8, 1.7 km、格子幅は水平 50 m、鉛直 5 m である。 $x$  方向に  $5 \text{ m s}^{-1}$  の背景風を与えており、上流（下流）側に 247（241）km の Buffer 領域を設けてある。Sub-grid scale の乱流による拡散過

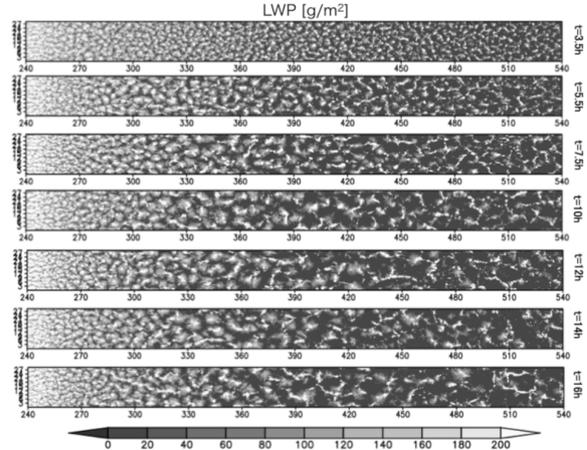


図 1: 数値実験中の各時刻における Liquid Water Path (LWP) の水平分布図。S15 の図 1 を引用。図に向かって左（右）側が上（下）流側に相当する。

程は標準 Smagorinsky モデルを非等方格子用に改善したモデル (Scotti et al. 1993)、雲物理過程は 5 種の混合比と数濃度を解く Seiki and Nakajima (2014) のダブルモーメントスキーム、長波放射による冷却過程は DYCOMS-II RF01 (Stevens et al. 2005) の放射スキームにより解いた。全ての予報変数式に初期値に戻すニュートン冷却項を加えており、時定数は水平方向に 300 s、鉛直方向に 10 s とした。摩擦速度を  $0.25 \text{ m s}^{-1}$  で、潜熱（顕熱）フラックスを上流端で  $93 (16) \text{ W m}^{-2}$ 、下流端で  $200 (40) \text{ W m}^{-2}$  という値で、領域内では両端の値を線形内挿した固定値を与えた。過飽和度 1% で活性化する CCN の数を  $N_{CCN}$  として、 $N_{CCN} = 250 \exp(-7.0433 \times 10^{-3} x) \text{ cm}^{-3}$  という関数で与えた。全ての予報変数に対して、大規模沈降流を  $1.33 \times 10^{-6} z \text{ m s}^{-1}$  という固定値で鉛直移流項に加えた。コリオリ力は考慮しなかった。初期条件として、温位及び水蒸気・液水混合比は DYCOMS-IIRF02 (Ackerman et al. 2009) の値を水平一様に与えた。また境界層内 ( $z \leq 795 \text{ m}$ ) で温位・水蒸気混合比にそれぞれ  $0.1 \text{ K} \cdot 2.5 \times 10^{-6} \text{ kg kg}^{-1}$  のランダム摂動を与えた。以上の条件で 16 時間の時間積分を行った。さらに詳しい設定は S15 を参照されたい。

## 3 雲セルの抽出条件

S15 の結果では雲セルが存在し、これらは open セルの構造をしているため、雲の部分で強く狭い上昇流が存在することが示唆される。そこで Miyamoto et al. (2013, 2015) の深い対流の抽出方法を基に、鉛直流速と雲水・雨水混合比を用いた雲セル抽出方法を構築した。まず高度 500 m の鉛直速度に対して水平方向に 1–2–1 平均を 100 回行う。次に周囲の格子点との水平勾配を計算して極大点を選出し、その格子点での凝結物（雲水と雨水の和）質量の鉛直積算値が 2 g よりも大きければ、雲セルとして特定する。

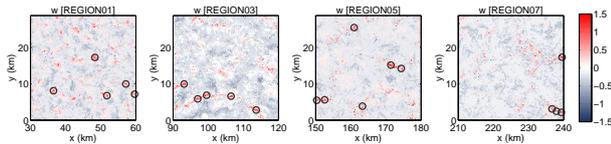


図2: REGION1, 3, 5, 7における鉛直速度の水平分布図。黒丸印は本解析手法で抽出した雲セル中心の位置である。解析時刻は積分開始14時間後である。

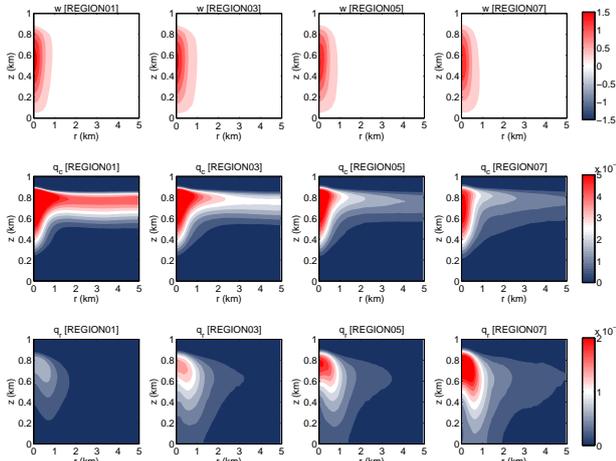


図3: 図2と同じREGIONにおける抽出した全ての雲セルの鉛直速度(上段)・雲水混合比(中段)・雨水混合比(下段)の合成図。横軸は雲セル中心からの距離(半径)、縦軸は高度を示す。

#### 4 結果と考察

図1はS15で得られたLiquid Water Path (LWP)の水平分布図である。積分5.5時間後では、計算領域ほとんどの領域で空間スケールが小さく間隔が狭い雲が存在している。時間が経つにつれて下流側で雲が大きくなり、間隔も広がる。一方で上流側は常に小さい雲が多数存在している。このLWPの分布は、しばしば観測される下層雲の分布と整合的である。

S15は雲セルが存在する流れ場を解析してopenセル的であることを示した。観測から、沿岸域(上流域に相当)でcloseセル構造を伴い、より沖側(下流側)でopenセル構造が存在し、流れ方向にセルの間隔が広がることが分かっている。S15の結果は後者の流れ構造と整合的である。本研究ではS15と同様にBuffer領域を除く296 kmを等間隔に8つのREGIONに分け、各REGIONごとの結果を比較した。S15は雲の被覆面積の時間変化から、積分開始10時間後には準定常的になっていたことを示しており、本研究では解析時刻として計算期間最後の2時間を対象とした。

まず今回構築した手法の妥当性を確認するため、図2に4つのREGIONでの鉛直流速と特定された雲セルの位置を示す。上流側ほど鉛直流速の細かなピークが多く見られ、下流側ではその間隔が広がっており、LWP(図1)と整合的である。抽出した雲セルの位置は上昇流の極大と良く一致しており、今回の手法により鉛直流速極大を抽出できることが分かった。

次に図3に4つのREGIONにおいて抽出された全ての雲セルで平均した鉛直速度・雲水混合比・雨水混合比の半径-高度断面図を示す。各変数の分布から、

定性的に雲セルの構造を良く表現できていることが分かる。具体的には、鉛直流速・混合比全てでセル中心で極大を持ち、半径と共に減衰する。雲水は境界層上端付近( $z \approx 800$  m)に広がっており、雲セルは典型的に半径数百mの水平スケールを持つことが示唆される。雨水は中心から数km外側に極大を持つ。

鉛直速度はREGIONごとの違いが小さい一方、雲水は外側で顕著に異なり、下流側ほど混合比が小さい。逆に雨水混合比は下流側ほど外側が大きく、特にREGION03以降は半径数kmで地上まで到達している。上流側では流れ構造はopenセル的であるが、広い領域を雲が覆っており、LWPではcloseセル的に見ると考えられる。下流側では上昇流域と雨を伴う下降流域が近接しており、積雲的な構造になっている。

それでは、なぜ下流側ほど雲セルの間隔が広がるのだろうか?ここでは、既存のものに加えて新たに以下のメカニズムを提案する。Rayleigh-Bénard対流との類似を基に、各雲セルは下層と上層の温度差を解消するために働くと考え、一つの雲セルが運ぶ熱量に注目する。例えば同じ不安定度するとき(同じ熱量を運ぶ必要があるとき)、一つのセルが運べる熱量が多いほど少ないセルで賄え、セル間隔は広いと考えられる。相変化を伴う際には、凝結が上層の雲層で起きるため、正味の上向き熱輸送が存在し熱輸送の効率が高い。さらに降雨に伴い下層に運ばれた水が蒸発すると、下層を冷却するためより効率的に熱を運ぶように働く。もし降水が無く、凝結時と同様に全て上層で蒸発したとすると、相変化による熱輸送は0となる。つまり降水による蒸発域の変化は、熱輸送を活発化して雲セル間隔を広げるように働くと考えられる。

#### 5 まとめと今度

本研究では、境界層内に現れる雲セルの間隔を決める上で相変化が重要と考え、それを検証することを目的とする。下層雲に関する大規模理想実験結果から雲セルを抽出することに成功したため、今後は雲セル単体が運ぶ熱量に注目して解析を行う。

#### 参考文献

- Ackerman, A. S., et al., 2009: Mon. Wea. Rev., 137, 1083–1110.
- Miyamoto, Y., et al., 2013: Geophys. Res. Lett., 40, 4922–4926.
- Miyamoto, Y., et al., 2015: Atmos. Sci. Lett., 16, 305–309.
- Nishizawa, S., et al., 2015: Geosci. Model Dev., 8, 3393–3419.
- Sato, Y., et al., 2015a: SOLA, 11, 75–79.
- Sato, Y., et al., 2015b: PEPS, 2, 23.
- Scotti, A., C. Meneveau, and D. K. Lilly, 1993: Phys. Fluids, 5, 2306–2308.
- Seiki, T., and T. Nakajima, 2014: J. Atmos. Sci., 71, 833–853.
- Stevens, B., et al., 2005: Mon. Wea. Rev., 133, 1443–1462.
- Tritton D. J., and M. N. Zarraga, 1967: J. Fluid Mech., 30, 21–31.
- Wang, H. and G. Feingold, 2009: J. Atmos. Sci. 66, 3237–3256.