



雲の自己組織化と階層構造 ～放射対流平衡実験による気候の本質的理解～

研究・開発機関 : 理化学研究所、兵庫県立大学、京都大学、東京大学
 利用施設 : スーパーコンピュータ「京」、「富岳」
 計算規模 : 「京」では最大規模計算で23万ノード時間、
 トータル約60万ノード時間
 「富岳」では、最大規模計算で5万ノード時間、
 トータル約40万ノード時間
 利用ソフトウェア : SCALE-RM

Before

- 雲の自己組織化の発現条件は計算条件に依存し、本来の組織化スケールについては不明だった。
- 理想的な条件の下で自己組織化した雲が階層構造をもつのか、またその空間的なパターンや特徴的な長さを持つかが明確ではなかった。

After

- 十分に大きな領域サイズで解像度を上げると、雲は自己組織化し、特徴的な長さは約500 kmとなり、現実の熱帯対流とも大まかに一致する。
- 領域サイズを大きくすると、複数の組織化した雲が形成され、特徴的なスケールで3,000~4,000kmのメッシュ状の階層構造が現れる。

背景と目的

私たちの暮らしに身近な存在である雲は、地球の気候に大きな影響を与えています。雲は太陽の光を反射して地表温度を抑えたり、逆に地球から放出する熱を閉じ込めて地表を温めたりします。雲の種類や量は気温や天候に大きく影響を与えるため、気候変動の予測には最も重要な要素と言えるでしょう。しかし、地球温暖化が進む中で、雲の性質がどのように変化するかは、まだ正確には分かっていません。たとえば、低い雲が減少すれば、太陽光が地表に届き、温暖化が加速する可能性があります。また、巻雲のような高く薄い雲が増えた場合、地球の熱が閉じ込められて気温が上昇する可能性もあります。

このように、雲の変化が温暖化を加速させるのか抑えるのかに重要な影響を与えます。また、雲は雨や風の形成に関わるだけでなく、モンスーンや熱帯大規模擾乱である Madden-Julian 振動といった大規模な現象とも相互作用しますが、そのメカニズムは完全には解明されていません。

雲・対流の本質を理解するためには、複雑な現実の実験よりも理想的な条件で行う実験が有効です。その一例が「放射対流平衡」実験です。これは気候における熱収支の基本的な仕組みを理解するために用いられ、この問題は、ノーベル賞を受賞した真鍋良郎博士が次元モデルを用いて温暖化の仕組みを分かりやすく説明したことで知られています。現在では、この命題は三次元シミュレーションによってさらに進化し、気候をより正確に理解するための重要な知見を提供しています。

利用成果

今回取り上げる「放射対流平衡実験」の設定を説明しましょう。表面が一定温度の海で覆われ、地球の回転(コリオリ力)は無視されます。太陽からの放射も一定です。計算領域は周期的に設定され、端から出たものは反対側の端に戻ります。この条件下で、雲はどのように発生するのでしょうか? 直感的にはランダムに発生すると思われるかもしれませんが、図1のように実際には時間が経つと雲は特定の場所に集まり始めます(図1)。これが「雲の自己組織化」です。

我々の最近の研究では、領域サイズが500km四方の領域を超えると、雲が自発的に組織化することが分かりました。これは現実の熱帯の対流にも見られる特徴的なスケールと同程度です(Yanase et al., 2020, *Geophys. Res. Lett.*)。先行研究では、高解像度になると雲の自己組織化が現れないとされていましたが、我々の実験では、十分に大きな領域を設定することで組織化が確認されました。さらに大きな領域では雲の組織化がどのように進むのかに興味を持ち、実験を進め、最大25,000km四方の領域を使用しました。図2(d)(e)(f)に示すように、領域サイズが5,000 km四方の領域を超えると、一時的に円形の塊が集合し、最終的にはメッシュ状のパターンが現れ、その特徴的なスケールは3,000~4,000kmになることが分かりました(Yanase et al., 2022, *Geophys. Res. Lett.*)。

これらの実験設定は現実的ではないと思われるかもしれませんが、物事の本質を理解するためには、時には極端な実験設定が有効なのです。特に計算機を使った実験では、こうした設定を簡単に組むことができ、計算科学の利点の一つと言えるでしょう。私たちは、この実験結果が雲の階層構造を伴う自己組織化の素描、つまり原点であり、今後、解析を通じて気候の本質に迫れると考えています。また、雲の自己組織化の研究は、気候変動の理解だけでなく、自然が秩序を作り出す過程を学ぶことの助になります。他分野でも、ランダムな状態から秩序を生み出す現象が多く見られ、雲の自己組織化もその一例にすぎません。このメカニズムの解明は、気象気候予測や防災に限らず、生命の仕組みや集団行動の理解など広範な分野に貢献することが期待できます。

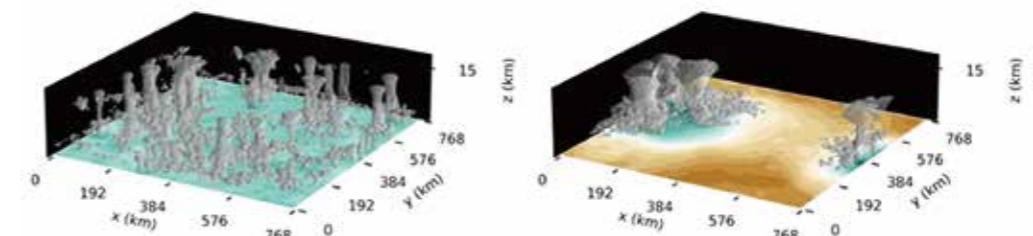


図1 初期は積雲がランダムに発現する(左)のに対して、時間が経過すると一か所に集中します。

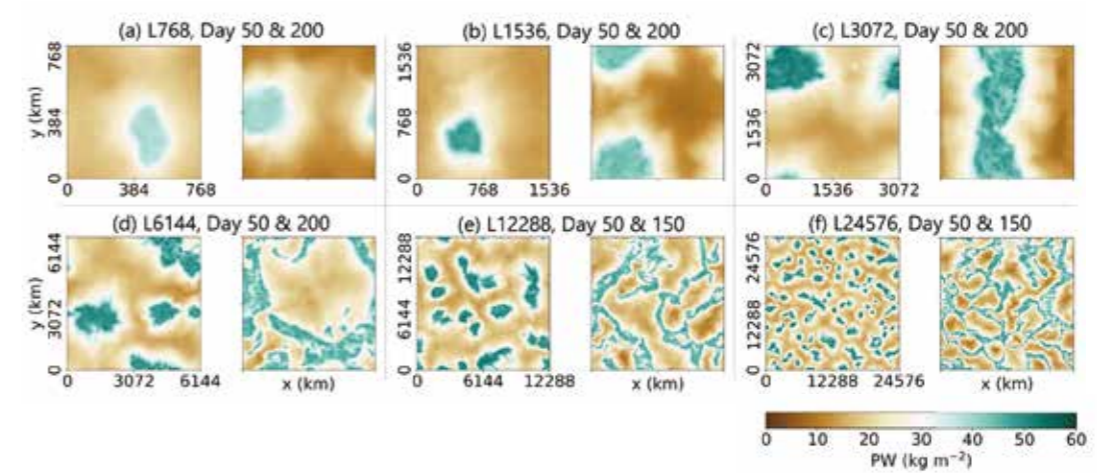


図2 (a)から(f)は水平領域をどんどん大きくしていった時の様子。カラーバーは可降水量。青系の箇所が雲が存在している。各パネルの左は過渡期、右は準平衡状態(Yanase et al. 2022, *Geophys. Res. Lett.* Fig.1より抜粋)

文責 理化学研究所計算科学研究センター 富田 浩文