

大規模並列に対応した 3 次元放射伝達モデルの 気象モデルへの実装

佐藤陽祐 (北大院理)・平田 憲 (コロラド大学)・関口美保 (海洋大)・稲津 将 (北大院理)

1. はじめに

現在の広く用いられている気象・気候モデルは、水平解像度が数 km~数百 km であり、そのような水平解像度のモデルにおいて放射モデルでは、独立カラム近似を仮定した、1 次元放射伝達モデル(例えば MSTRN-X: Sekiguchi and Nakajima 2008)が用いられることが一般的である。

しかしながら、近年の計算能力の飛躍的な向上によって水平解像度が数 m~数百 m の超高解像度の数値実験が当たり前に行われるようになってきており、このような超高解像度の実験では上記の近似が成り立つ保証がなく、3 次元的な放射伝達を考慮した放射モデルが求められる(例えば Iwabuchi 2006)。しかしながら、このような 3 次元放射伝達モデルは計算コストが非常に高い。また、上記のような高解像度な気象モデルの実験においては、大型計算機を用いた大規模並列条件下で実行されることがほとんどであるため、気象モデルがもつ並列計算の設計と親和性の高い 3 次元放射伝達モデルが求められるが多くの 3 次元放射伝達モデルはそのような設計にはなっていない。そのため、気象・気候モデルと 3 次元放射伝達モデルを結合させて実験を行なった例は世界で数例しかない。

そこで本研究では、気象モデルとの結合を見据えて開発された 3 次元放射伝達モデル (Hirata et al. 2022) を、大型計算機で性能が出るように設計された次世代気象・気候ライブラリ SCALE(Nishizawa et al. 2015; Sato et al.

2015)に実装し、結合実験を行えるように開発を行なった。また浅い積雲に対して、解像度を変えた実験を行い、3 次元放射伝達モデルが必要となる解像度を明らかにすることを目指した。

2. モデルの概要と実装

本研究では理化学研究所で開発が進んでいる気象モデル SCALE を用いて実験を行なった。この SCALE に Hirata et al. (2022)で開発された 10 流近似による 3 次元放射伝達モデルを実装した。SCALE には、ブロードバンド 1 次元放射伝達モデル MSTRN-X が実装されており、MSTRN-X が紫外~赤外までを 29 バンドに分けて計算を行うため、3 次元放射伝達モデルも同様のバンド数で計算をするように実装した。しかしながら、3 次元放射伝達モデルは「4. 結果とまとめ」で示すように非常に計算コストが高いため、全ての波長を 3 次元放射伝達モデルで計算するのは計算コストの観点から現実的でない。そこで、短波領域(紫外~可視光領域)は 3 次元放射伝達モデルを用いて計算を行い、長波領域(近赤外~赤外領域)は MSTRN-X で計算を行なうようにした。

また Hirata et al. (2022)には、逆行列の求解が含まれているが、この逆行列の求解が、大規模並列では計算のボトルネック(計算時間を要する箇所)になる。そこで、本研究では、山下(2021)で SCALE に実装された、ガウス・ザイデル前処理を用いることで、計算の高速化を行なった。

3. 実験設定

実験設定は積雲を対象とした国際モデル間比較 (ICMW: <https://drive.google.com/file/d/1y8-spOqxpbj6ureMHbLpSMAr7lvFf9bv/edit>) で用いられた設定とした。初期プロファイルとして Lasher-Trapp et al. (2005)を領域全体に一律に与え、地表面の熱・運動量フラックスを計算開始後 10 分から与えることで、計算領域内に一つの積雲が発生するような設定とした。計算領域は、 $5 \times 5 \times 8 \text{ km}^3$ 、計算時間は 1 時間とした。また解像度の依存性を調べるため、解像度を(水平・鉛直同一で) 500 m から 25 m まで変化させて実験を行なった。また比較のため短波領域も MSTRN-X で計算する実験も行なった。

実験には HEVE スキームを用い、雲微物理モデルは 2-moment バルク法(Seiki and Nakajima, 2014)を用いた。またサブグリッドスケールの乱流の効果は Smagorinsky 型のモデル(Brown et al. 1993)を用いて計算した。

太陽天頂角 θ と方位角 ϕ を $(\theta, \phi) = (30.28^\circ, 98.5^\circ)$ と $(\theta, \phi) = (8.6^\circ, 120^\circ)$ の 2 通りで計算を行なった。またモデル上端での下向き太陽放射は入射する光の強度がおおよそ同程度になるように、 (θ, ϕ) 、 (θ, ϕ) でそれぞれ 1172.25 Wm^{-2} 、 1360.25

Wm^{-2} とした。

さらに雲による放射伝達のみを焦点を当てるため、気体吸収や大気分子の散乱 (レーリー散乱含む) は無視した。

4. 結果とまとめ

図 1 は計算開始から 50 分後における、雲水混合比、放射による加熱率、下向き短波放射の分布である。3 次元放射伝達モデルを用いることで斜めに光が差し込む様子を再現できている。また、従来広く用いられてきた 1 次元放射伝達モデルに比べ、3 次元放射伝達モデルでは雲の側面や内部での加熱が見られることがわかる。またそのような加熱率の違いによって、雲の分布も異なっていることが見て取れる。このような計算は気象モデルと 3 次元放射伝達モデルを結合させることで初めて可能になった計算である。

しかしながら、3 次元放射伝達モデルを用いた場合の計算時間は例えば 100 m 解像度では 1 次元放射伝達モデルを用いた場合に比べ、133 倍程度と計算コストが高い。そこで今後は 3 次元放射伝達モデルの高速化に着手する。

謝辞：本研究は北海道大学寄附分野北海道気象予測技術分野(北海道気象技術センター)の支援を受けて行われています。

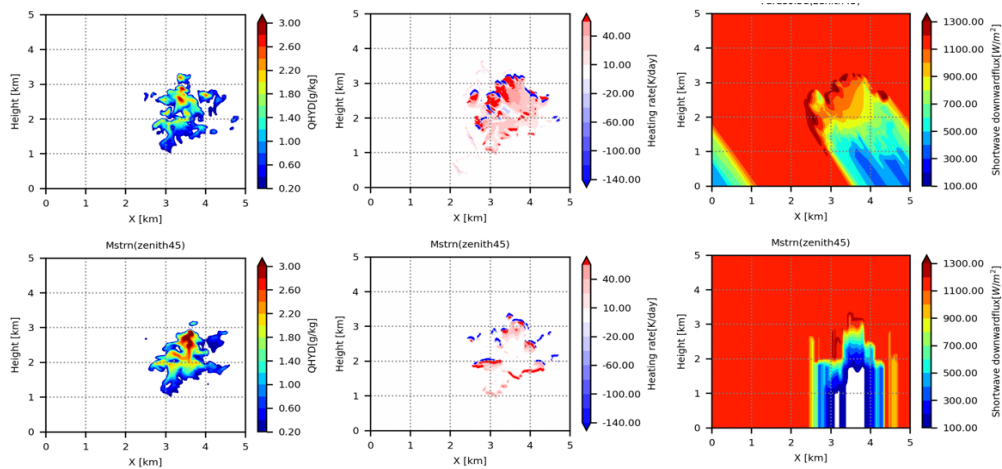


図 1 : $t = 50 \text{ min}$, $y = 3750 \text{ m}$ における (左列) 雲水混合比と (中列) 加熱率、および (右列) 下向き短波放射の分布. 上段が 3 次元放射モデル, 下段が 1 次元放射モデルを用いた結果である (水平・鉛直解像度 25m の結果)。