

三次元離散雲の放射収支算定に関わる放射伝達解法の研究

Development of a radiative flux evaluation program with a 3D Monte Carlo radiative transfer code

大方めぐみ^{1*}, 中島映至¹, ハワード パーカー², デイビッド ドノヴァン³
Megumi Okata^{1*}, Teruyuki Nakajima¹, HOWARD, W. Barker², DAVID P. Donovan³

¹ 東京大学大気海洋研究所, ² カナダ気象局, ³ コーニンクレッカ気象研究所

¹University of Tokyo Atmosphere and Ocean Research Institute, ²Meteorological Service of Canada, ³Koninklijk Netherlands Meteorological Institute

地球気候モデリングにおいて、これまで雲は平行平板状の形状を持つとして放射収支が計算され、それに基づいて大気加熱率などが計算されてきた。しかし、計算機技術の進歩に伴ってモデルの空間分解能が数 km 以下になり始めるとこのような近似が力学計算に問題を起こすことが議論され始めてきた。また、鉛直方向の雲の構造を測定できる能動型センサーを搭載した CLOUDSAT 衛星や CALIPSO 衛星からの観測によって、3 次元的に有限の広がりを持つ離散雲の構造が得られるようになった。本研究では、広帯域の太陽放射フラックス計算が取り扱える 3 次元モンテカルロ放射伝達コードの開発を行い、Sekiguchi and Nakajima (2008) の k 分布パラメータの実装も行った。不均質な雲を含んだ大気での放射フラックスや加熱率の鉛直プロファイルを見積もるために、このコードを使用した。3 次元の雲の消散係数の場を構築するために、以下の 3 つの方法を試みた。1 つ目は乱数によって作成されたランダムに分布した雲とタイル状の雲を分布させたもの、2 つ目はピン法を用いた雲微物理モデルと結合した非静力モデルによる数値シミュレーションの結果、3 つ目は最適雲情報プロファイリング法 (MIDPM) を用いたものである。3 次元雲システムの 2 つ目の構築は、気象庁 NHM 非静力学モデルにピン法雲モデルを組み込んだモデル (Iguchi et al., 2008; Sato et al., 2009, 2012) を用いたカリフォルニア沖での夏の層雲の数値シミュレーションによって行われた。数値シミュレーションは、30 km × 30 km × 1.5 km の周期境界条件の領域で水平、鉛直グリッドが 100m、20m のものと 300m、20m の解像度で行われた。それぞれの分解能で 2 つの異なるセルシステムは、異なる凝結核 (CCN) 濃度でシミュレーションされた。分解能 100m の場合、領域平均した雲の光学的厚さ <COT> と標準偏差 COT は、雲核数の少ない Pristine case では 3.0 と 4.3 であり、雲核数の多い Polluted case では 8.5 と 7.4 である。MIDPM 法では、CLOUDSAT 衛星の軌道に沿った雲レーダー CPR のフットプリントでの CLOUDSAT/CPR と AQUA/MODIS イメージャのプロダクトによる観測パラメータのペアのライブラリをまず作成した。この観測パラメータのライブラリは、CPR のレーダー反射因子 dBZe(z) の鉛直分布と MODIS の多波長イメージャ MSI のスペクトル放射輝度、雲の光学的厚さ (COT)、粒子の有効半径 (RE)、雲頂温度 (Tc) である。CPR の軌道にない MODIS のピクセルでの MODIS 雲パラメータ (COT, RE, Tc) をライブラリのものと比較し、偏差が最小となる組を選択し、最も一致するレーダー反射因子の鉛直プロファイルを選び出した。ここでは、2007 年 7 月 2 日のカリフォルニア沖での夏の層雲のデータを用いた。これらの 3 次元雲システムに関して、本研究で作成したモンテカルロ放射伝達コードを用いて 0.5、1.6、2.1 μm の波長での放射場の計算を行った。本研究では 0.5 μm の反射率の 3 次元放射場の結果と平行平板大気 (PP) との差、IPA との差を比較した。IPA (Independent Pixel Approximation) は各ピクセルの平行平板大気の放射場を計算して全領域で平均する近似法である。結果として、全ての雲場で平行平板大気より IPA 近似の方が精度が良い事がわかった。特に、現実雲場を再現している、NHM+ACB モデルや MODIS+CPR の結果の中でも、平行平板大気との差は最大で 0.040 であり、IPA との差は 0.010 であった。これは、波長 0.5 μm で概算すると、太陽放射フラックスに換算して、それぞれ、30Wm⁻² と 10Wm⁻² である。また、NHM+ACB モデルの分解能の違いから、高分解能ほど IPA 近似の精度が悪くなる事がわかった。タイル状雲で、これらの雲に近い雲を構築し、定量的に調べるため、検証したところ IPA 近似では、入射角が 0° のとき雲の層厚に依存し、入射角が大きいつま雲の雲量に依存することがわかった。雲粒の有効半径を考慮した計算から得られたデータ、NHM+ACB モデルによる雲場での 3 次元放射特性の検証、また MODIS+CPR での 3 次元雲場での放射特性の検証の試みは初めてであり、このような現実雲を考慮した 3 次元放射場の計算を行いより現実的な雲の放射特性を知る必要がある。また、このような 3 次元雲をタイル状雲などで再現し、雲の放射特性を定量的に調べる必要がある。さらに、全ての波長で計算を行い波長積分する必要も行っていくことも今後の課題である。

キーワード: モンテカルロ, 放射伝達, 放射フラックス, 三次元雲, 衛星観測, モデル

Keywords: Monte Carlo, radiative transfer, radiative flux, 3D cloud, satellite observation, model