

3次元放射伝達モデルの開発に向けて

平田 憲 (北大理)・稲津 将 (北大院理)・関口 美保 (東京海洋大)

1. はじめに

計算機性能の向上により、空間解像度の高い雲解像モデルや LES(Large Eddy Simulation)などの数値気象モデルの開発が進んでいる。これまでの数値気象モデルの放射過程の計算には、鉛直方向の放射伝達のみを考慮する 1次元放射伝達モデル(例, MSTRN-X; Sekiguchi and Nakajima, 2008)が用いられてきた。しかし、1次元放射伝達モデルは水平方向の格子間の放射エネルギー輸送を無視しているため、格子のアスペクト比が 1 程度の高解像度モデルでは、各格子での放射に伴う加熱率の計算誤差が大きくなりうる(O'Hirok and Gautier, 2005)。一方、SHDOM(Evans, 1998)やモンテカルロ法(例, Evans and Marshak, 2005)をはじめとする多くの 3次元放射伝達モデルはその計算コストの大きさから、数値気象モデルへの適用に課題が残されてきた。そこで本研究では、高解像度の数値気象モデルに適用可能な 3次元放射伝達モデルの開発を目指す。

2. モデルの設計

モンテカルロ法は多数のモデル光子について光源から吸収されるまでの経路を乱数によって確率的に計算する方法である。そのため、計算領域内の任意地点での放射フラックスの計算値を収束させるには大量のモデル光子を追跡する必要があり、計算コストが大きい。また、それぞれのモデル光子は任意の方向に自由に移動できるため、空間領域を分割して並列計算を行う数値気象モデルとの設計上の親和性が良くない。

この問題を解決するため、Jakub and Mayer (2015)は 2 段階の手順を踏んだ 3次元放射伝達モデルを開発したが、本研究ではそれを改良したモデルを開発した。以下にその設計を示す。はじめに、単一の均質な格子内において、決められた範囲内のパラメータでモンテカルロ法に基づくモデル光子の追跡を行い、ある面から入射した放射が特定の面から射出する割合である輸送係数を求めてルックアップテーブル(LUT)に保存する。このときの計算パラメータには格子サイズ、吸収係数、散乱係数、1次非対称因子のほか、2次の非対称因子を用いることで 3次元放射伝達に重要な散乱位相関数の再現性を改良した。このモンテカルロ計算の並列化効率は理論上 100%であり、格子内は均質であるため収束性もよい。次に、数値気象モデル内のそれぞれの格子で計算されるパラメータに対して LUT を補間して輸送係数を求め、一つ一つの格子での隣接格子との放射フラックスの入射と射出の関係式をすべての格子について連立した線形方程式を立てる。この求解には並列化された BiCGSTAB 法を用いる。このように計算コストの大きなモンテカルロ計算による輸送係数をあらかじめ求めておくことで、数値気象モデルの各タイムステップにおける 3次元放射計算のコストを下げることができる。

3. 計算テスト

図 1 に示す極めて単純化された 3次元の計算領域で放射フラックスの計算テストを行った。格子数は $100 \times 100 \times 100$ で、周期境界条件を課した。雲を模した領域(図 1 の濃い領域; 以下、雲領域とする)

は吸収係数と散乱係数を $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 、非対称因子を $g_1 = 0.8, g_2 = 0.2$ 、それ以外の領域は吸収係数と散乱係数を $1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ 、非対称因子を $g_1 = 0.0, g_2 = 0.1$ とし、それぞれ均質と仮定している。また、大気上端から入射する放射フラックスは 1000 W m^{-2} で天頂角を 30° とした。さらに、地表面アルベドは 0.3 とし、短波放射を仮定して大気層や地表面からの射出はないものとした。計算された下向き直達光フラックス (図 2 左) には雲領域の影が明瞭に見られた。また、上向き散乱光フラックス (図 2 右) は、雲領域の周辺と直達光が届く地表面付近で大きな値をとっていた一方、雲領域の影にあっていた地表面付近では小さくなっていた。これらの結果は現実の大気の放射場の特徴とも一致し、放射フラックスの計算が正しく行われていることを示唆する。

4. まとめと今後の展望

ルックアップテーブルを用いた 3 次元放射伝達モデルを開発した。今後は既存の放射伝達モデルとの比較検証を行うとともに、数値気象モデルへの実装を行う。

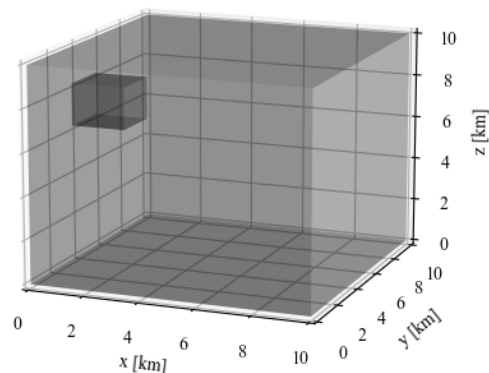


図 1 : 計算テストの計算領域。雲を模した領域を濃く示す。

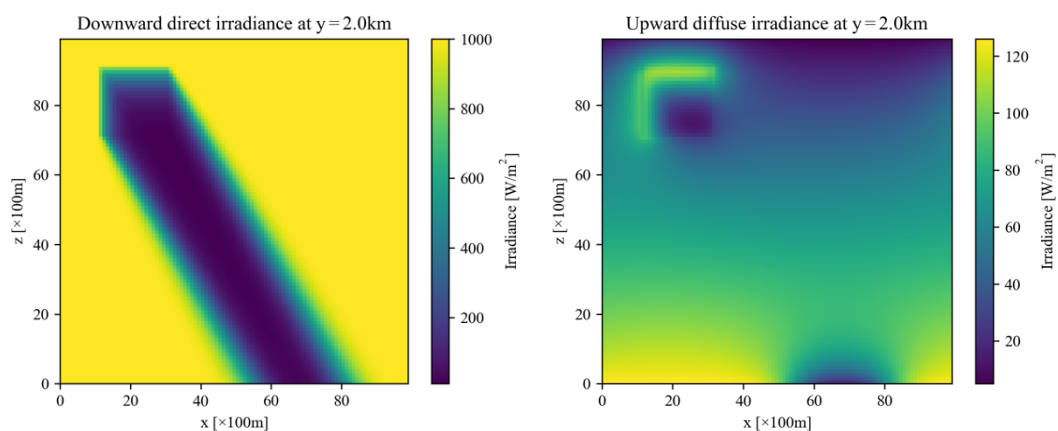


図 2 : $y = 2.0 \text{ km}$ の鉛直断面における下向き直達光フラックス (左) と上向き散乱光フラックス (右)。