P325

明示的3次元放射伝達計算手法におけるマルチグリッド法の導入

*石田春磨(山口大学理工学研究科)

1. 明示的3次元放射伝達計算手法について

現在，人工衛星リモートセンシングによる各種物理量の推定や，センサー測定値のシミュレーションには，計算簡略化のため1次元の平行平板近似による放射伝達計算が適用されることが多い．しかし，センサーの空間分解能が高い場合は，雲などによる大気の3次元的構造が無視できない．これまで目的に応じた様々な3次元放射伝達計算手法が開発されているが，そのうち，放射伝達方程式を差分化し，繰り返し計算などで方程式解を求めるタイプのものは，明示的計算手法と称される．この手法は，確率的誤差が発生しない，1度基本計算をすればその後は任意の角度の放射輝度を導出できる，といった利点があるが，一般に多大な計算時間とリソースを必要とする．そこで本研究では，流体計算などで計算時間低減に利用されているマルチグリッド法を3次元放射計算に応用することを試みた．

2. マルチグリッド法について

マルチグリッド法は，差分方程式などの繰り返し計算において，解の収束を加速するために適用される．一般に，高周波の誤差は少ない繰り返し回数で消滅するが，低周波の誤差は低減が遅い．そこで，方程式を一旦粗いグリッドに投影(restrictionと称す)すると，もとのグリッドにおける低周波誤差成分は高周波となる．粗いグリッドで繰り返し計算を実行の後，もう一度もとのグリッドに投影(prolongationと称す)すれば，効率的に誤差を収束させせることが可能となる．本研究では，Red-Black法にマルチグリッド法を組み合わせている．

3. マルチグリッド法を応用する際の注意点

放射伝達計算と流体計算の大きな差異は，放射輝度は一般に位置(3次元)だけでなく方向(2次元)にも依存することである．本研究の手法では，方向依存成分は球面調和関数を利用して離散化する．また，放射伝達式においては移流項が大きいため，空間偏微分項の離散化には，非等方性を表現できる差分法(風上差分など)が適切である．しかし，放射輝度の場合"風上側"は各位置において一意には決まらないため，そのことを考慮した差分法を適用する必要がある(詳細はIshida and Asano, 2007)．同様の考慮がマルチグリッド法の利用についても必要となる．一般的なrestrictionは

$$\mathbf{I}(x_n)^{2h} = \sum_k \left(a_{n-k} \mathbf{I}(x_k)^h \right) \tag{1}$$

のように，もとのグリッドのデータを重み付き平均に類似した手順により粗グリッドに投影する．この際，非対称的な差分法を適用している場合は，restrictionもそれに対応した非対称的，即ち

$$a_k \neq a_{-k} \tag{2}$$

であるような重みとなる．3次元放射伝達の場合は，各座標軸の正負方向を考慮することにより，2^3=8通りのrestrictionを実行し，それらの平均が最終的なrestrictionとなる．

4. 計算例

開発した手法を仮想的な雲層に適用し，3次元効果を考慮した放射場の空間分布を計算した．図1は雲層の波長0.66μmにおける光学特性の空間分布である．格子間隔は水平50m，鉛直31.25mとしている．地表面反射，及び大気分子吸収は無いとする．また，水平方向の境界条件はオープンである．この雲層に太陽光が層上部から天頂角60°，方位角45°で入射する際の上向きフラックスの分布を図2に示す．計算結果では，雲層内部では雲の厚い部分でフラックスが大きいが，雲層上端では放射の水平移流によって雲の境界が不鮮明になっている．

発表では、他の条件での計算結果や，モンテカルロ法との比較による評価，マルチグリッド法の優位性について報告し，それらを通じて本手法の妥当性について議論する．

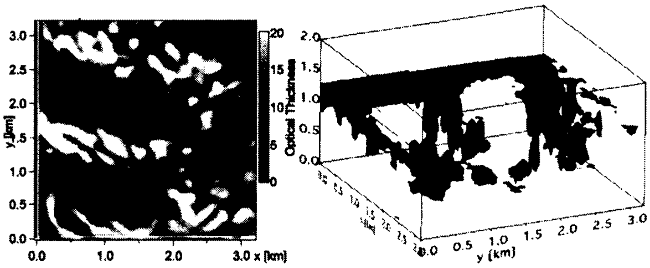

図 1. 計算対称とした雲の波長 0.66μm における光学的厚さの分布(左)と，消散係数 0.02[1/m] 以上の領域(右).

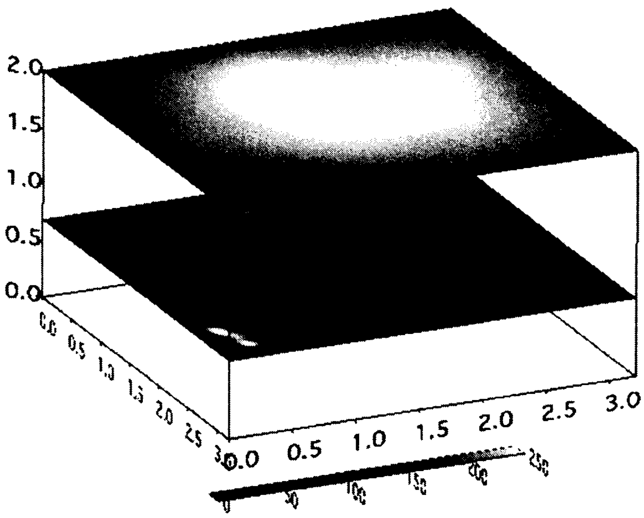

図 2. 上向きフラックス．グレイスケールの単位は W m^{-2} μm^{-1}.

References:

Ishida, H. and Asano, S, 2007: *J. Atmos. Sci.*, 64, 4098 -4112.