

有限体積法と球面調和関数展開を用いた不均質大気における放射伝達計算手法の開発

*石田春磨(東海大学情報技術センター)

浅野正二(東北大学理学部大気海洋変動観測研究センター)

1. はじめに

雲の不均質性が放射伝達に与える影響を解明するための手段として、我々はこれまで三次元大気における放射伝達方程式の明示的解法を開発してきた。明示的解法は雲の空間構造と放射場の関係の評価に有用である。本発表ではその一環として、球面調和関数展開と有限体積法を適用した解法について説明する。また、これを用いた計算例を示し、他の計算手法との比較によって本手法の妥当性を検証する。

2. 計算アルゴリズムの概略と特長

放射伝達方程式の明示的解法においては、離散化によって変数分離を行い、連立一次方程式に帰着させて解を求めるのが一般的である。これまで我々が開発した手法では、放射強度の角度依存成分に対しては有限個のストリームによって離散化していたが、本研究では球面調和関数展開によって離散化を行う。これによって散乱ソース項を非常に簡略に表現でき、また、任意の方向に進行する電磁波の放射強度の計算が容易になる。また、空間座標に依存する成分は、大気をグリッド状に分割し、有限体積法によって離散化した。これによって、各グリッド及び放射計算の対象とする領域全体において、エネルギーの保存が保証されている。

有限体積法を適用するに際し、空間偏微分の項の取り扱いには注意を要する。放射伝達方程式は一次微分項しか含まないため、単純な中心差分を用いた場合は、解に非現実的な振動が発生してしまう。この現象は、消散係数が小さい部分を含む大気において特に顕著になる。一方、風上差分をそのまま適用することも、放射強度それ自体が方向の関数であるため困難である。従って、偏微分項は以下の手順によって離散化した。まず、(球面調和関数によって展開された)放射強度を正負方向に分割する。例えばx軸方向においては、放射強度をl位m次の球面調和関数 $Y_{l,m}^{c/s}$ で変換したときの展開係数 $N_{l,m}^{c/s}$ は

$$N_{l,m}^{c/s} = \sum_{l',m'} R_{c/s,l,m;l',m'}^{rgt} N_{l',m'}^{c/s} + \sum_{l',m'} R_{c/s,l,m;l',m'}^{lft} N_{l',m'}^{c/s} \quad (1)$$

と分割される。ここで、

$$R_{c/s,l,m;l',m'}^{rgt} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-1}^1 Y_{l',m'}^{c/s} Y_{l,m}^{c/s} d\mu d\phi \quad (2)$$

$$R_{c/s,l,m;l',m'}^{lft} = \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \int_{-1}^1 Y_{l',m'}^{c/s} Y_{l,m}^{c/s} d\mu d\phi \quad (3)$$

である。即ち、式(1)の右辺第一項はx軸の正方向に、第二項は負方向に進行する成分を表している。そして、この各方向にそれぞれ風上差分を適用する。即ち、右辺第一項の差分の場合はxが小さい側を、第二項の場合はxが大きい側を風上とする。y、z軸方向に関しても同様である。

これらの離散化によって、放射伝達式は最終的に行

列形式で

$$\mathbf{AN} = \mathbf{e} \quad (4)$$

と表せられる。ここで、 \mathbf{N} は離散化された放射強度、 \mathbf{e} は離散化されたソース項を要素とするベクトルである。球面調和関数展開及び有限体積法の特徴から、行列は対角優位の疎行列になっている。連立方程式(4)を解くに当たっては様々な手法が存在するが、ここでは successive overrelaxation法を用いた。

3. 計算例

この計算手法を仮想的な二次元(x-z)雲モデルに適用し、ある領域内(3.2km×0.8km)での放射強度の分布を求めた。波長0.5μmの単色光を対象とし、雲は水滴のみからなり、雲粒の1次散乱アルベドは1、雲粒の散乱位相関数は粒径分布を有効半径4μmのlog-normal分布であると仮定してMie理論により計算した。分子吸収と地表面反射は無視した。雲の消散係数の分布を図1に示す。なお、領域外では雲は存在しない。太陽入射光の天頂角余弦が0.6(約53度)でx軸に水平な方向から入射しているときの、上向き(天頂角余弦0.55)と下向き(天頂角余弦-0.95)の放射強度の分布をそれぞれ図2(a)と(b)に示す。なお、値は入射フラックス量で規格化してある。また、方位角はいずれも0度である。この結果から、本計算手法は、雲が散点的に存在するような場合でも、雲が存在しない地点を含めて安定した解が得られることが確認される。また、放射伝達に対する不均質な雲の影響が良く再現されている。

本発表では、これ以外の雲モデルにおける計算結果や、モンテカルロ法との比較、また、離散化と計算精度の関係について報告する予定である。

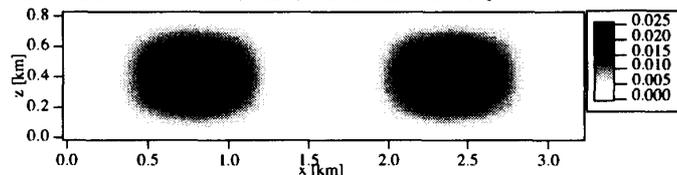


図1. 雲の消散係数の分布。

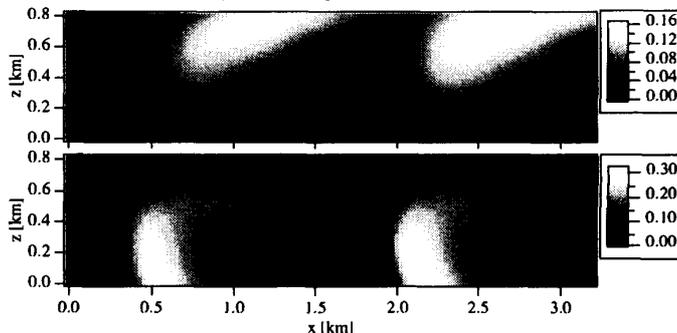


図2.(a)上向き放射強度(天頂角余弦0.55)。(b)下向き放射強度(天頂角余弦-0.95)。