

論文の内容の要旨

A study on radiative transfer effects in 3D cloudy atmospheres using

Monte Carlo numerical simulation

(モンテカルロ数値シミュレーションを用いた 3 次元雲場の

放射伝達効果に関する研究)

氏名：大方 めぐみ

雲の放射強制力は地球のエネルギー収支に大きく影響するが、その定量的評価には不確実性が大きい。これは、空間的に不均質な雲の放射場への影響評価が難しいことが一因である。数値気候モデルで通常採用されている平行平板近似(PPA)による誤差は、雲のタイプによっては太陽放射で 200%以上、地球放射では 20%におよぶ場合もあることが報告されている。そのため、雲の 3 次元(3D)性の放射伝達への影響を近似的に表す方法が提案されてきたが、多くの先行研究では理想化されたモデル雲や数学的なランダム雲にもとづいており、実観測データに基づいて太陽、赤外の広帯域放射フラックスを定量的に評価した研究は非常に少ない。しかしながら、2006 年に打ち上げられた雲レーダー (CPR) 搭載の CloudSat 衛星により雲の鉛直断面情報が得られるようになり、3D 雲場の実観測データを利用できる時代になった。そこで本研究では、実観測された 3D 雲場の情報を利用して、その放射影響を定量化することを目的とする。

上の目的のために、広波長域の太陽放射と赤外放射フラックス計算を取り扱える 3D モンテカルロ放射伝達コード (*MCstar*) を自身で開発した。*MCstar* は Backward 型と Forward 型の光線追跡機能を有し、衛星輝度を高速計算する TMS 法や非線形相関 k 分布法によるガス吸収パラメータも実装されている。また、赤外放射伝達を高速かつ精度よく計算できる新たな摂動アルゴリズムを開発した。開発したコードは、モンテカルロ型 3D 放射伝達コード相互比較 (I3RC) と比較検証し、世界のコードと整合のとれたコード開発に成功した。

MCstar を適用するための 3D 実観測雲場を得るために、NASA/A-Train 衛星群に含まれる CloudSat 衛星搭載の CPR と Aqua 衛星搭載の MODIS イメージャの雲プロダクトを組み合わせる新しいアルゴリズム (MIDPM) を考案した。これは CloudSat 衛星軌道直下で得られる 1 次元の鉛直プロファイル、水平 2 次元的に得られる MODIS 雲プロダクトを用いて軌道の外側に外挿する手法である。具体的には、CloudSat 軌道に沿って同期して存在する雲レーダエコーの鉛直分布と MODIS 雲物理量 (光学的厚さ、有効粒子半径、雲頂温度) からライブラリを作成し、それを参照することで CloudSat 軌道外の MODIS 観測領域に雲場の消散係数の 3D 分布を構築する。本研究では、水雲である下層雲を対象とした。

このようにして構築された 3D 雲場について、開発した *MCstar* により大気上下端での太陽放射と赤外放射の広波長域積分計算を行った。この計算値を Aqua 搭載の広波長域放射計 CERES の観測フラックス値と比較したところ、誤差幅は大気上端での上向き太陽放射フラックス $7\sim 50\text{Wm}^{-2}$ 以下であった。CERES 自体の大気上端放射フラックスの瞬時誤差は 9Wm^{-2} 程度と報告されており、本研究手法が妥当な放射フラックスを算定していると考えられる。他の誤差要因としては、1) 雲レーダーやイメージャのリトリバル誤差、2) 気圧・温度プロファイルの誤差、3) MIDPM の誤差などが考えられるので、それらの定量化のために今後解析事例数を増やし検証を続ける予定である。

これまでに提案されてきた PPA 近似法である全領域を一つの平行平板雲で近似する PPA 近似、各ピクセルに平行平板雲を当てはめる IPA 近似、IPA と同様であるが太陽入射方向に沿った光学的厚さを利用する TIPA 近似がもつ誤差を軽減するために、SIPA と呼ばれる新たな平行平板近似法を開発した。SIPA は TIPA と同様の手法であるが、太陽天頂角を仮想的に固定する(Virtual Solar Zenith Angle (VSZA) : θ_i)方法である。これによって、太陽入射方向の消散係数に過度な重みをつける TIPA の過大補正を軽減することができた。本研究では、 $\theta_i = \theta_0 - 10^\circ (\theta_0 > 10^\circ)$, $\theta_i = \theta_0 = 0^\circ$ と定義したシミュレーションの結果、SIPA は高い精度を持つことがわかった。

これまで提案されてきた種々の平行平板近似法である PPA 近似、IPA 近似、TIPA 近似で得られる放射フラックスを、3D 放射計算から得られるものと比較し、各近似の誤差を算出した。本研究ではさらに、これらの誤差を雲の 3D 効果を理解するための指標として利用する方法を考えた。実観測の解析例を図 1 に示す。

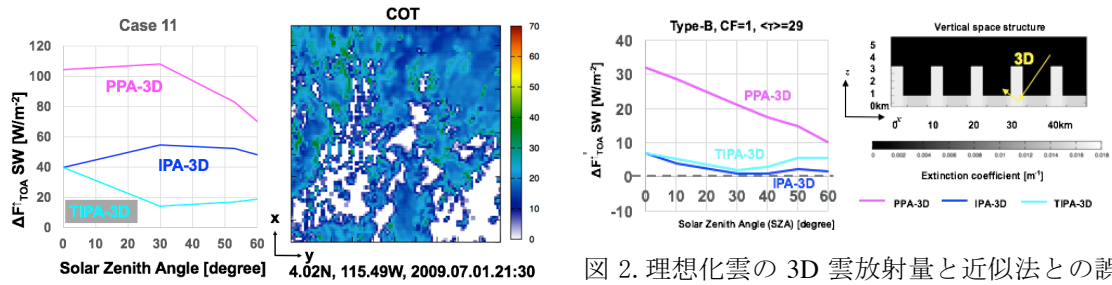


図 1. 実観測雲の 3D 雲放射量と近似法との誤差評価例 (Case 11)

図 2. 理想化雲の 3D 雲放射量と近似法との誤差評価。孤立雲 (B) に関する近似誤差の太陽天頂角依存性を示す。

その結果、解析した 15 例の実観測雲場に関して、平行平板近似誤差の太陽天頂角依存性に着目すると、これらの雲場は 3 つのタイプの 3D 効果に分類できることが明らかになった。すなわち、1) 雲量が少なく、孤立した雲が支配的な場(タイプ A)、2) 雲量が比較的多く、雲頂の不均質性が支配的な場(タイプ B)、3) 雲量が非常に多く、雲頂が比較的平坦な場(タイプ C)に分類できた。例として、図 2 にタイプ B の結果を示す。

このような分類を定量化するために次の 2 つのインデックス G と H を定義したところ、15 例の実観測雲場を図 3 のように分類できた。

$$G = \Delta F_{IPA}(\theta_{04}) - \Delta F_{IPA}(\theta_{01})$$

$$H = [\Delta F_{TIPA}(\theta_{04}) - \Delta F_{TIPA}(\theta_{03})] - [\Delta F_{TIPA}(\theta_{02}) - \Delta F_{TIPA}(\theta_{01})]$$

$$\theta_{01} = 0^\circ, \theta_{02} = 30^\circ, \theta_{03} = 30^\circ, \theta_{04} = 60^\circ$$

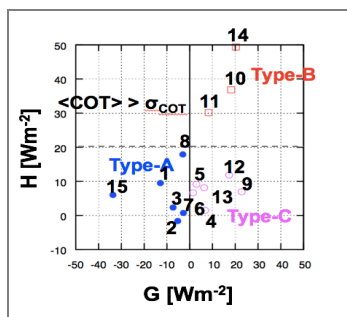


図 3. 実観測雲の理想化雲タイプ別分類。番号は観測事例番号(1 から 15)を示す。

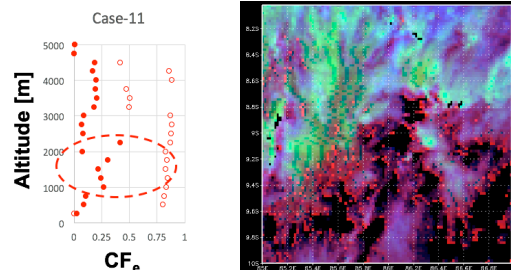


図 4. 左図: タイプ B に分類された雲の CF_e の鉛直分布。右図: MODIS から得られた RGB 合成図 (R: 低く薄い, G: 高く厚い, B 高く薄い雲を示す)。

この分類をさらに雲の形状と結びつけるために、鉛直各層の光学的厚さのばらつきを考慮した放射に対して有効な雲量 CF_e を求めた。 $CF_e = 1 / (1 + \sigma_t / \langle \tau \rangle)$ 。この有効雲量 CF_e をタイプ A, B, C の雲場について調べたところ、 CF_e の鉛直プロファイルがそれぞれの雲の構造の特徴を反映していることがわかった。この雲構造の特徴はまた、図 4 に示す MODIS の 3 チャンネル (0.6, 2.1, 11 μm) の RGB 合成図にも反映されていることが確認できた。

本研究では、実観測雲データを用いて 3D 雲場を構築し、太陽と赤外広帯域放射フラックスの算定量における平行平板近似の定量的な誤差評価を行った。これらの評価のうち、特に 3D 雲場の赤外放射広帯域放射フラックス算定に関する研究は初めてである。今後、氷雲も含めて事例解析数を増やし Aqua 搭載の広波長域放射計 CERES の観測フラックス値との比較を行い、全球の 3D 雲場に対する太陽放射と赤外放射が及ぼす影響に関して研究を進めて行きたい。また、本研究で考案した新たな平行平板近似 SIPA は、他の既存の近似のもつ過大・過少評価や過大補正を軽減し、その結果精度が向上した。今後、赤外放射フラックスへの応用や高速計算用のモデルへの実用化も課題である。さらに、太陽放射フラックスの定量的な誤差評価の結果を、理想化された 3 つの雲タイプによって初めて特徴づけた。この特徴づけはさらに、放射に有効な雲量の鉛直分布の違いとも対応することが確認された。これらの結果は実観測された雲場の 3D 効果のイメージ的な理解を可能とし、先行研究におけるタイル雲、フラクタル雲やモデル雲にもとづく理解と比較してより実用的である。将来的に、本研究で考案した近似法(SIPA)や全球での実観測雲の 3D 放射効果の評価や分類は、先に述べた数値気候モデルで採用されている一次元放射伝達コードで算定した放射量に対して、より現実的なパラメタリゼーションとして貢献できると考えられる。