ふく射要素法を用いた雲領域における三次元ふく射伝熱の影響

The Effect of Three-Dimensional Radiative Heat Transfer in
Clouds Field Using the Radiation Element Method

○学 桜井 篤 (東北大流体研)

正 円山重直 (東北大流体研)

正 酒井清吾 (東北大流体研)

Atsushi SAKURAI, Shigenao MARUYAMA, and Seigo SAKAI
Tohoku University, Institute of Fluid Science

Key Words : Cloud, Radiative Heat Transfer, Radiative Interaction

1. 緒言

地球大気放射収支には、雲領域でのふく射伝熱が重要であることが、多くの観測実験や数値計算によって確かめられている^[1]。しかしながら、現在の数値計算では問題を簡略化するため、雲を一次元的に扱うことが多い。そのため、雲の三次元性による影響については未知な部分が多く、気象シミュレーションにおける大きな不確定要素となっている。そこで本研究では、二つの三次元雲が近接している場合の、雲間におけるふく射の相互作用に着目し、雲の三次元性が雲領域のふく射伝熱にどのように影響しているかを調べるため、ふく射要素法 REM²を用いてふく射伝熱解析を行った。

2. 解析手法

本研究では、雲を非灰色、非等方散乱性のふく射性媒体として扱う。雲内のあるふく射要素 i から放射される単色ふく射エネルギー $Q_{i,\lambda}$ は次式で与えられる。

$$Q_{i,\lambda} = \left[(1 - \Omega_{i,\lambda}^D - \Omega_{i,\lambda}^S) I_{i,b,\lambda} + \Omega_{i,\lambda}^D I_{i,\lambda}^D \right] \times \int_{4\pi} A_{i,\lambda}(s) \left[1 - \exp(-\beta_{i,\lambda}^o \bar{S}_i) \right] d\omega, \quad (1)$$

ここで各変数は、 $I_{i,b,\lambda}$; 単色黒体ふく射強度、 $I_{i,\lambda}^D$; 平均散乱強度、 $\Omega_{i,\lambda}^D$; 単色散乱アルベド、 $\Omega_{i,\lambda}^S$; 鏡面反射率、 $A_{i,\lambda}(s)$; s 方向から見たふく射要素の投影面積、 $\beta_{i,\lambda}^o$; 見かけの減衰係数、 $\bar{S}_i$; 平均厚さである。ここで、ふく射有効面積 $A_{i,\lambda}^R$ を導入し、(1) 式を簡単化する^[2]。

$$Q_{i,\lambda} = (\varepsilon_{i,\lambda} E_{b,i,\lambda} + \Omega_{i,\lambda}^D G_{i,\lambda}) A_{i,\lambda}^R \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_{i,\lambda} = 1 - \Omega_{i,\lambda}^D - \Omega_{i,\lambda}^S$ 、 $E_{b,i,\lambda} = \pi I_{i,b,\lambda}$ 、 $G_{i,\lambda} = \pi I_{i,\lambda}^D$ である。考慮する系が N 個の要素からなる場合、ふく射輸送方程式は、次式で与えられる。

$$Q_{j,\lambda} = Q_{T,j,\lambda} + \sum_{i=1}^N F_{j,i,\lambda}^D Q_{i,\lambda}, \quad (3)$$

$$Q_{X,j,\lambda} = Q_{T,j,\lambda} - \sum_{i=1}^N F_{j,i,\lambda}^A Q_{i,\lambda}, \quad (4)$$

ここで、 $Q_{T,j,\lambda} = A_{j,\lambda}^R \varepsilon_{j,\lambda} E_{b,j,\lambda}$ であり、 $Q_{X,j,\lambda}$ は正味ふく射伝熱量を表す。 $F_{j,i,\lambda}^A$ は吸収形態係数、 $F_{j,i,\lambda}^D$ は散乱形態係数であり、これらの形態係数は、光線追跡法を用いて算出する。最終的に、(3)、(4)式を連立することで正味ふく射伝熱量 $Q_{X,j,\lambda}$ を求めることができる。

Fig. 1. Analytical model of the clouds.

3. 解析モデル

解析モデルを Fig. 1 に示す。二つの積雲を雲底 1000m、雲頂 1225m に固定し、境界条件として大気放射、天頂角 30° の直達太陽放射および拡散太陽放射を与える。簡単化のため、雲の形は半径 225m の半球とした。太陽放射は Bird モデルを用い、大気放射は LBL 法を用いて計算した^[3]。その際、大気鉛直温度分布などのパラメータは、McClatchey らの熱帯大気モデルを用いた^[4]。雲内の温度分布や粒径分布は一定とし、雲内の温度は高度 1000m における持ち上げ凝結温度 292K、粒径は体面積平均径 12 μm、数密度は 2.93 × 10⁸ m⁻³ を使用した^[5]。また一つの雲のふく射要素数は 876 である。

4. 結果および考察

Single cloud model

二つの雲が存在するモデルと比較するため、ふく射の相互作用を受けない雲の単体モデルの解析を行った。境界条件として次の 3 つの場合について計算を行った。

- Case (a) ; 太陽放射のみを考慮
- Case (b) ; 大気放射のみを考慮
- Case (c) ; 太陽放射および大気放射を考慮

Figure 2 に、それぞれのケースについて単位体積当たりの正味ふく射伝熱量分布を示す。Case (a) の場合、太陽放射によって雲の片側が加熱されているのがわかる。Case (b) の場合、雲頂において放射冷却、雲底において放射加熱が起きているのがわかる。Case (c) の場合、正味ふく射伝熱量分布は太陽放射のため、太陽方向へ分布がわずかに傾いているが、Case (b) の場合と類似の分布を示している。このことから、雲内部の発熱に関しては、大気放射による影響が、太陽放射よりも大きいことがわかる。また、断面における正味ふく射伝熱量分布を見ると、放射冷却や加熱は、どのケースにおい

でも、主に雲表面下 20-50m で起きており、雲内部ではほぼ断熱状態であることがわかる。

Double clouds model

前節と同じ3つのケースに従って、二つの雲が隣接しているモデルの解析を行った。解析結果を Fig. 3 に示す。Case (a) の場合、Cloud (A) の右側面で影の影響が現れているのがわかる。Case (b) および (c) の場合、二つの雲が面している部分をみると、正味ふく射伝熱量が他の部分と比べて大きくなっているのがわかる。これは、雲間のふく射の相互作用によるものと考えられる。

ここで、Single cloud model と Double clouds model における雲の正味ふく射伝熱量の差を明らかにするため、その相対的な差（以下 RD と記す）を次式で定義する。

$$RD = (\bar{Q}_d - \bar{Q}_s) / \bar{Q}_d \quad (5)$$

ここで $\bar{Q}$ は平均正味ふく射伝熱量であり、雲の総括正味ふく射伝熱量をその体積で割ったものである。 $\bar{Q}_d$ は Double clouds model の平均正味ふく射伝熱量、 $\bar{Q}_s$ は Single cloud model の平均正味ふく射伝熱量である。

Fig. 2. The distributions of the heat generation rate in the single cloud model. The left side figures show the results at surface of the cloud. The right side figures show the results at the cross section of center.

Fig. 3. The distributions of the heat generation rate in the double clouds model. ($D/2H=1$)

Fig. 4. The distributions of RD at the thin layer beneath the cloud surface.

計算の結果、Case (a) の場合は、RD は 1.4% 以内、Case (b) の場合は 4.5% 以内、そして Case (c) の場合は 5.0% 以内であった。したがって、ふく射の相互作用は全体としてみると、雲の平均正味ふく射伝熱量に対する影響は小さいことがわかる。この理由として以下の三つが考えられる。(1) 雲の光学厚さが厚いため、(2) 雲同士が向かい合う面において、影の影響とふく射の相互作用が互いに補完する働きを持つため、(3) 雲内部のエネルギーがほぼバランスしており、雲外部とのふく射交換は雲表面近傍でのみ起こるため、である。

次に、雲表面近傍における正味ふく射伝熱量の RD が雲間の距離に対してどのように推移するかを Fig. 4 に示す。計算には、最もふく射の相互作用を受けやすいと思われる雲表面近傍の 40 要素 (Fig. 4 中の灰色部) を選択した。Case (b) および (c) の場合、雲同士が接している条件 ($D/2H=1$) では、最大で 20% 程度ずれが生じているのがわかる。また、Case (a) では、影の影響によって 9% 程度ずれが生じている。3つのケースとも、雲間の距離が大きくなるに従い RD は小さくなり、 $D/2H > 1.6$ であれば、単体の雲とみなすことができると考えられる。

5. 結言

本研究を行うことにより、以下の知見を得た。

- (1) 雲の正味ふく射伝熱量に関して、太陽放射よりも大気放射の影響が大きいことがわかった。
- (2) 雲間のふく射の相互作用が雲の正味ふく射伝熱量に与える影響は、雲全体としては小さいが、雲表面近傍においては重要となる。
- (3) 雲の三次元性による影響は、雲同士が隣接する場合に最も大きく、雲間の距離が $D/2H > 1.6$ であれば、単体の雲とみなすことができる。

6. 参考文献

- [1] Cess, R., and Coauthors, *Science*, Vol. 267, pp. 496-499, 1995.
- [2] Maruyama, S. and Aihara, , *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 119, pp. 129-136, 1997.
- [3] Bird, R. E., and C. Riordan, *J. Climate Appl. Meteor.*, Vol. 25, pp. 87-97, 1986.
- [4] McClatchey, R. A., and Coauthors, *Optical properties of the atmosphere*, 3rd ed. AFCRL-72-0497, 108 pp. 1972.
- [5] Liou, K. N., *Radiation and cloud processes in the atmosphere*. Oxford university press, New York, pp. 487, 1992.