

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月13日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21740342

研究課題名（和文） 非球形散乱過程と雲の立体形状過程の効率化と放射伝達モデルへの導入

研究課題名（英文） Efficiency of nonspherical and non-uniform cloud scattering processes and implementation to atmospheric radiative transfer models

研究代表者

関口 美保（SEKIGUCHI MIHO）

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授

研究者番号：00377079

研究成果の概要（和文）：

日本で開発されている大気放射モデルでは、氷雲などの非球形粒子の効果や雲の立体形状の効果は、計算負荷が大きいため、無視されるか大幅に簡略化した形で計算されてきた。本研究では、これらの効果を導入した衛星解析用大気放射モデル、および、気候モデル用大気放射モデルの開発・検討を行った。これにより、衛星観測を通じた雲のより深い理解、および、気候予測における雲の放射への影響のより高精度な評価が可能となると期待できる。

研究成果の概要（英文）：

In most Atmospheric radiative transfer models developed in Japan, non-spherical and non-uniform cloud scattering processes are not or very simply included because of a computational burden. In this study, those processes are discussed and implemented to narrowband and broadband radiative transfer models. These new models are contributed to deeper understandings and accurate evaluations of cloud-radiative interaction.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：気象学、大気放射、リモートセンシング

## 1. 研究開始当初の背景

計算機の性能の飛躍的な向上に伴い、世界の様々な研究機関で雲をより精密に評価する取り組みが活発になってきていた。地球観測衛星の解析モデルはもちろん、大気大循環モデル(GCM)へも非球形散乱や雲の立体的効果が近似的に導入されはじめており、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）に結果を

提出するGCMのうち半数程度が、非球形散乱を何らかの形で取り込んでいた。しかし、我が国で開発されている衛星解析モデルやGCMへの非球形効果や立体的効果の導入は、その必要性が叫ばれてはいるが、放射モデル開発に携わる研究者が絶対的に不足しており、特にGCM用放射モデルについては申請者を含め数名しか取り組んでいないことから開発が

進んでいなかった。

## 2. 研究の目的

将来的に気候における雲の役割を正確に取り扱うため、非球形粒子や立体の影響を取り込んだ世界的にも最先端となる放射モデル開発に取り組む必要があった。本研究課題では、高速かつ高精度な非球形散乱過程と雲の立体形状の計算アルゴリズムを開発し、衛星解析用モデルと大気大循環モデルへ導入することを目的とした。

## 3. 研究の方法

- (1) ベースとなるナローバンドモデル Rstar の改良を行った。現在の計算機環境に適応するよう、高速化を目指し散乱過程の効率化を行った。
- (2) 以下の非球形散乱パラメータについて比較・検討を行い、Rstar で利用できるように非球形散乱テーブルを構築した。
  - ① リール大学の Dubovik 博士が作成した回転楕円体粒子の散乱パラメータ
  - ② テキサス A&M 大学の Yang 博士が作成した、氷粒子を対象とした散乱パラメータ
- (3) 非球形粒子を取り扱うことができるよう、粒子の光学パラメータについて再構築を行った。同時に、新たな粒子種の光学パラメータについても導入を行った。これらの開発・導入を受け、Rstar のバージョンを 6b から 7 に更新した。
- (4) 以上の開発で得られた知見を元に、非球形散乱過程を高速化させ、GCM用放射モデル mstrnX へ導入した。
- (5) 三次元放射モデルに関する情報収集を行い、既存の手法より精度がよい近似手法について模索した。
- (6) 開発された放射モデルはウェブで公開し、研究グループ以外の研究者にも役立つように努めた。また、利用者からフィードバックを受けることにより、放射モデルの更なる改善を目指す。得られた成果は適宜、学術論文、学会、ウェブなどで公開している。

## 4. 研究成果

- (1) Rstar の散乱過程は、計算の高速化のためあらかじめ散乱特性を計算し、テーブル化されている。ミー散乱はサイズパラメータ（物質を球形とした場合の円周と入射波の波長の比）73 種類（0.1 - 1000）、複素屈折率の実部  $n$  と虚部  $k$  合わせて 198 種類（ $1.0 \leq n \leq 2.7$ ,  $10^{-9} \leq k \leq 10^0$ ）、散乱角 74 点である。これと同様の散乱テーブルを、氷粒子と回転楕円体粒子について作成した。

氷粒子の散乱パラメータはテキサス A&M 大学の Ping Yang 教授から提供を受けた [Yang et al., 2000; Yang et al., 2005]。太陽放射域と赤外放射域の二つのデータから成り、太陽放射域では 9 種類、赤外放射域では 6 種類の粒子形状について散乱パラメータが計算されている。計算手法は FDTD 法と拡張幾何光学近似に適したサイズパラメータごとに採用している。太陽放射域のデータの格子点は波長 56 種類（ $0.225 \leq \lambda \leq 4.9 \mu\text{m}$ ）、粒子サイズ 24 点（ $3 \leq x \leq 3500 \mu\text{m}$ ）、赤外放射域では波長 49 点（ $3.08 \leq \lambda \leq 999.9 \mu\text{m}$ ）、粒子サイズ 45 点（ $2 \leq x \leq 9500 \mu\text{m}$ ）となっている。入射角はランダムであり、散乱角は 498 点について、散乱強度が大きくなる 0 度付近を細かく区切った格子点で計算されている。アスペクト比は 1 種類のみである。

本研究では、提供されたデータの粒子形状の中から氷粒子の代表的な形状だと思われる六角柱を選択した。氷粒子は複素屈折率が波長ごとに決まっているため、六角柱のテーブルは波長と等価体積半径、散乱角のテーブルに設定した。散乱角の格子点については、球形と同一の現行の格子間隔だと、氷粒子の散乱として有名であるハロ（日暈）が出現する角度において解像度が粗く再現性が悪いため、その角度周辺での格子点を増やし、全体で 112 点に増加させた。これにより、ハロの再現性が良くなった。また、散乱テーブルに統一性をもたせるため、球形の散乱テーブルもこの格子間隔を採用することとした。

- (2) 回転楕円体の散乱パラメータはリール大学の Dubovik 博士から提供を受けた [Dubovik et al., 2002]。このデータは AERONET を対象に作成されたもので、計算手法は T-Matrix 法と改良型幾何光学近似が用いられている。アスペクト比 25 種類（0.3349 - 2.986）、サイズパラメータ 41 種類（0.012 - 626）について、複素屈折率の実部  $n$  と虚部  $k$  それぞれ 15 種類ずつ（ $1.33 \leq n \leq 1.6$ ;  $0.0005 \leq k \leq 0.5$ ）、角度の格子点は 180 点（1 度刻み）で計算されている。Rstar 向けの散乱テーブルを作成する際、角度の格子点については他の粒子と共通に設定し、サイズパラメータと複素屈折率については内挿に寄る誤差が想定されたためオリジナルデータと同じ範囲、格子点を用いた。アスペクト比は 7 種類（0.33, 0.48, 0.69, 1.00, 1.44, 2.07, 2.99）を採用し、個々のテーブルを作成した。回転楕円体の粒子は砂

塵や氷粒子を想定しているが、複素屈折率やサイズパラメータが範囲外となるときは球形で近似するようにコードを変更した。

- (3) これらの散乱テーブルを導入するため、球形粒子の散乱と非球形粒子の散乱を同時に計算できるよう、粒子の光学パラメータの再構築を行った。導入した六角柱の氷粒子の散乱計算で用いている複素屈折率[Warren 2008]を *Rstar* にも採用した。散乱計算の高速化のため、複素屈折率の格子点を 324 点に増加させ、範囲も  $0.9 \leq n \leq 3.0$ ;  $10^{-11} \leq k \leq 10^0$  に拡張した。また、雲やエアロゾルの種類も様々であるため、入手しうる限りの光学特性をまとめ、*Rstar* で取り扱えるように構成した [e.g., d' Almeida et al., 1991; Hess et al., 1998]。
- (4) *Rstar* の更新を受けて、これら 2 種類の非球形粒子の散乱について *mstrnX* への導入を試みた。*mstrnX* の散乱テーブルは、球形で仮定している粒径分布で粒径積分を行っているが、六角柱粒子、回転楕円体粒子では等価体積半径を用いて計算し、テーブル化した。大気状態は CMIP3 (T42L20) SRESB1 2001 年の月平均データを用いた。*mstrnX* では  $0.2 - 1000 \mu\text{m}$  で計算を行っているが、六角柱粒子は  $0.225 \cdot \mu\text{m}$  までしかデータが存在しない。また、回転楕円体は複素屈折率の領域外のデータが必要となるが、このような非球形粒子の範囲外のデータについては球形粒子のデータを用いた。六角柱を氷晶粒子、回転楕円体をダスト粒子として計算を行った。氷晶粒子について球形粒子と比較すると、全球・年平均で、短波領域で  $-0.77 \text{ W/m}^2$  の差が生じた。平均化したため小さな値となったが、氷雲の放射強制力を考慮すると最大 10% 程度の違いがみられた。今後も評価を続けていく必要があることがわかった。

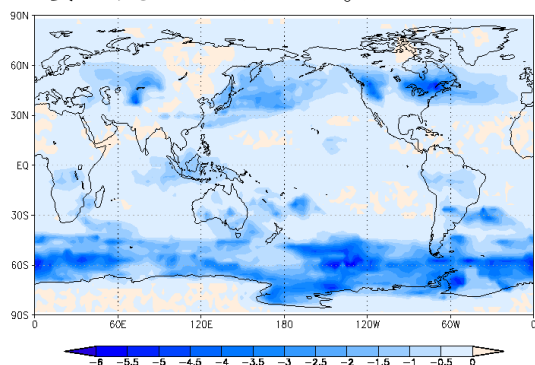


図1 氷粒子を六角柱粒子と仮定した場合と球形と仮定した場合の、地表面下向き太陽放射フラックスの差

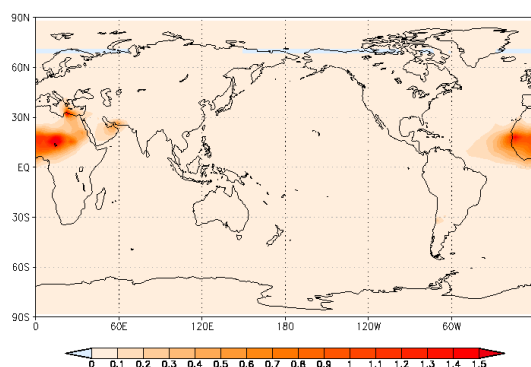


図2 土壌性粒子を回転楕円体粒子と仮定した場合と球形と仮定した場合の、地表面下向き太陽放射フラックスの差

- (5) また、六角柱は氷粒子の代表例であるが、実際の観測ではいくつかの氷粒子が凝集した粒子 (Aggregate) がよく観測されるため、六角柱粒子との比較を行ったうえで Aggregate 粒子についても導入を検討した。六角柱粒子と Aggregate 粒子では、散乱位相関数の分布に違いが見られるため、非等方性因子に顕著な違いがみられた。このことから、異なる粒子形状の導入も積極的に検討していくべきであることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Masunaga, H., T. Matsui, W.-K. Tao, A. Y. Hou, C. D. Kummerow, T. Nakajima, P. Bauer, W. S. Olson, M. Sekiguchi, and T. Y. Nakajima, Satellite Data Simulator Unit (SDSU): A multi-sensor, multi-spectral satellite simulator package, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 査読あり, 91, 1625-1632, 2010.
- ② M. Watanabe, T. Suzuki, R. O'ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe, and M. Kimoto, Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity, *J. Climate*, 査読あり, 23, 6312-6335, 2010.

[学会発表] (計 10 件)

- ① Saito, S., M. Sekiguchi, T.M. Nagao and T.Y. Nakajima, Global and regional effects of aerosol optical properties on warm water clouds: Long-term analysis of MODIS data, American

- Geophysical Union Fall Meeting 2012, 2012年12月、サンフランシスコ.
- ② 齊藤 秀太郎, 関口 美保, 中島 孝, 「雲・エアロゾル相互作用における水蒸気量の影響-MODIS 観測データの解析-」, 日本気象学会 2012 年春季大会, 2012 年 5 月、つくば.
  - ③ 関口 美保, 中島 映至, 「ブロードバンドモデル MstrnX への非球形散乱過程の導入」, 日本気象学会 2011 年秋季大会講, 2011 年 11 月、名古屋.
  - ④ 齊藤 秀太郎, 関口 美保, 中島 孝, 「MODIS データを用いた雲・エアロゾル相互作用の評価」, 日本気象学会 2011 年秋季大会, 2011 年 11 月、名古屋.
  - ⑤ 関口 美保, 福田 悟, 高坂 裕貴, 胡斯勒図, 竹中 栄晶, 中島 孝, 中島 映至, 「ナローバンドモデル Rstar への非球形散乱過程の導入」, 日本気象学会 2011 年春季大会, 2011 年 5 月、東京.
  - ⑥ 竹中 栄晶, 福田 悟, 中島 孝, 日暮 明子, 関口 美保, 高村 民雄, 中島 映至, 奥山 新, 高坂 裕貴, 中山 隆一郎, 大和田 浩美, 大野 智生, 「第 3 世代「ひまわり」による放射収支の推定」, 日本気象学会 2011 年春季大会, 2011 年 5 月、東京.
  - ⑦ Letu Husi, 中島 孝, 松井 隆, 関口 美保, 「GCOM-C/SGLI の氷雲粒子散乱データベースの作成について」, 日本気象学会 2011 年春季大会, 2011 年 5 月、東京.
  - ⑧ 横島 徳太, 渡部 雅浩, 鈴木 立郎, 大石 龍太, 小室 芳樹, 渡辺 真吾, 江守 正多, 竹村 俊彦, 千喜良 稔, 小倉 知夫, 関口 美保, 高田 久美子, 山崎 大, 野沢 徹, 羽角 博康, 建部 洋晶, 塩竈 秀夫, 木本 昌秀, 「全球気候モデル MIROC5 による現在気候の再現と将来予測」, 日本気象学会 2011 年春季大会, 2011 年 5 月、東京.
  - ⑨ 関口 美保, 中島 映至, 「ブロードバンド放射モデルにおける散乱過程の比較・検証」, 日本気象学会 2010 年春季大会, 2010 年 5 月、東京.
  - ⑩ Takenaka, H., S. Fukuda, A. Okuyama, T. Hashimoto, R. Nakayama, K. Kato, Y. Tahara, T. Kurino, T. Y. Nakajima, A. Higurashi, M. Sekiguchi, T. Takamura, and T. Nakajima, 2009: Geostationary Satellite Re-Analysis: Estimation of radiation budget, The EarthCARE Workshop, 2009 年 6 月、京都.

[図書] (計 2 件)

- ① 関口美保、他、日本気象学会、気象・気候学のための最新放射計算技術とその応用、気象研究ノート第 223 号、2011、1-24.

- ② 関口美保、他、朝倉書店、からだと光の事典、2010、1-6.

[その他]

ホームページ等

<http://fuji.u.e.kaiyodai.ac.jp/~miho/nosp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

関口 美保 (SEKIGUCHI MIHO)  
東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授  
研究者番号：00377079

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし