

令和元年6月21日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17759

研究課題名(和文)高解像度気候計算のための広帯域放射伝達モデルの革新的研究

研究課題名(英文) Innovative research of broadband radiative transfer model for high resolution models

研究代表者

関口 美保 (Sekiguchi, Miho)

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：00377079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：気体吸収過程においては、従来は二酸化炭素倍増状態までを想定したものであったため、4倍増状態など極端な状態については再現性が悪かった。これを4倍増状態に対応できるように修正し、同時にデータベースの更新も行った。これにより、極端な温暖化状態にも対応できるようになった。粒子散乱過程については、氷粒の形状を球ではなく六角柱と樹枝状結晶を扱えるように変更を加え、さらに従来の手法では計算することができなかった霧粒や雨粒、雪粒などの放射影響を算定できるように変更を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題研究で改良された放射伝達モデルにより、温暖化時の気温上昇について精度の良い推定が可能となった。また、氷粒子の非球形形状や大粒子の散乱計算を新たに導入することで、これまで考慮されていなかった雨粒や雪粒の放射への寄与や、氷雲の影響のより性格な算定が可能となった。近い将来での気候変動の推定にはGCMによるシミュレーションが不可欠であり、より精度の良い放射伝達モデルを提供することは気候予測のみならず、都市インフラの異常気象への対策にも役立つと考えられる。また、本課題研究で改良された放射伝達モデルは様々なモデルに既に導入されているため波及効果が予想される。

研究成果の概要(英文)：For gas absorption process, MstrnX was not simulated well in case of the quadruple CO2 condensation because it is assumed the doubling CO2 condensation in the previous version. In this study, we revise this model to correspond the quadruple CO2 condensation with the update of database. For particle scattering process, ice crystal habits was assumed sphere, so we modify it can be adopted the hexagonal column and aggregate particle. Moreover, large particle scattering are introduced, that is able to calculate the radiation effects of fog, rain, and snow particles that could not be calculated using the conventional method.

研究分野：大気放射学

キーワード：気象学 大気放射 温室効果気体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンピュータ性能の飛躍的な向上に伴い、気象予報や気候予測に用いられている数値モデルもより詳細な表現が可能になってきた。気候モデル(GCM)の水平解像度はこの20年で約500 kmから約30kmに細くなり、静力学近似を用いない力学方程式系を全球で採用した全球非静力学大気モデルも登場した。全球で1つ1つの雲を直接表現できる全球雲解像モデルが実用化されつつある。現在は数ヶ月程度の気象予報に留まっているが、数十年に渡る気候予測の実現も近い将来可能となると推測される。

放射伝達過程の計算結果である放射束密度は、エネルギーの水平・鉛直方向の不均衡を直接表現し、大気大循環の駆動源となるので、放射伝達過程は地球大気を再現するためには不可欠な物理過程である。放射伝達過程の数値モデルも、雲の立体的な構造を光学的に計算できる三次元放射伝達モデルが実用化されるなど、進化を続けている。一方、GCMで採用されている放射伝達モデルには計算効率を高める必要から、各過程において様々な近似手法が採用されている。例えば、地球大気に影響を及ぼす電磁放射の波長範囲は0.2~200 μm と四桁の幅に及び、この範囲内の気体の吸収線は現時点でデータ化されているだけで270万本以上存在する。このため、波長範囲を数十から数百の範囲に分割し、それぞれの範囲内で平均した吸収・散乱係数を用いて放射伝達を近似的に計算している。また、氷雲粒子や砂粒などに代表される非球形粒子を球形とみなしたり、雲の水平・鉛直分布を計算領域を分割した格子内で一様であると仮定するなど、計算の高速化のための簡略化を導入している。このように、放射伝達モデルには様々な過程において精度の高い計算手法と高速に計算するための近似解法がそれぞれ開発・運用され、計算機資源や許容される精度に応じて選択されている。

本課題研究は、研究代表者が開発を主導している広帯域放射伝達モデル *MstrnX* をベースにして行った。*MstrnX* は東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同で開発している大気大循環モデル(AORI/NIES/FRCGC AGCM)や東京大学大気海洋研究所と海洋研究開発機構による全球非静力学20面体大気モデル(NICAM)、名古屋大学と高度情報科学技術研究機構による領域雲解像モデル(CReSS)など様々な気象・気候モデルに導入されている。放射伝達モデルは各国の様々な研究機関で開発されているが、日本で開発が続けられている広帯域放射伝達モデルは *MstrnX* のみであるため、諸外国のモデルに引けを取らない放射伝達モデルを提供し続ける必要がある。しかし、計算結果比較プロジェクト[Pincus et al., 2015]において二酸化炭素4倍増の再現性が悪いことが示された。*MstrnX* は計算の高速化のため最適化手法を採用しており、シミュレーションに使用される大気状態が二酸化炭素倍増状態程度で4倍増状態のような極端な状況は想定されていなかったためである。

2. 研究の目的

GCMの精度が向上する一方、GCMに用いられている放射伝達モデルの近似解法は特に検討されることなくそのまま用いられているのが現状である。気象予報では日周期や季節変化をもつ平均的な放射場を与えることで、ある程度の精度での計算が可能であるが、気候予測においては温暖化などによる放射収支の長期傾向を計算する必要があるため、近似の少ない放射伝達モデルが理想的である。しかしながら、すべての過程に高精度だが計算時間がかかる手法を導入すれば良いわけではなく、結果の信頼性への寄与が大きい要素を優先的に高精度化するのが望ましい。本研究課題では、進化し続けるGCMの将来を見通した放射伝達モデルの革新を行い、来たるべき全球雲解像モデルによる気候計算に耐えうるモデルを社会に提供することを目的とする。

3. 研究の方法

放射伝達モデル内に含まれる物理過程は大きく分類して3つあり、温室効果気体などの影響を算定する気体吸収過程、雲や大気浮遊微粒子などの影響を算定する粒子散乱過程、放射エネルギーの流れを計算する放射伝達過程という。本研究課題では *MstrnX* におけるそれぞれの過程に含まれる近似解法の計算精度を再検討した。気体吸収過程については、二酸化炭素4倍増状態を再現できるよう、吸収線データベースの更新を含めた改良を行った。粒子散乱過程においては氷雲粒子の非球形の形状と、雨や雪粒などの大粒子の影響を算定できるようにした。放射伝達過程においては、従来は上下1方向のエネルギー伝達のみを考慮していたが、3次元的なエネルギー伝達の導入について検討を行った。

4. 研究成果

気体吸収過程において、各バンド（一度に計算する波長領域）で相関 k -分布法を採用し、これの積分点と重みについて最適化を行っているが、最適化の基準値として使用する大気状態は標準状態と温暖化状態としていた。ここでいう温暖化状態においては二酸化炭素の濃度は倍増状態であったため、4倍増状態には対応できていないのではないかと推察された。これを踏まえ、気体吸収テーブルの更新を試みた。本更新ではこれまでの標準状態、温暖化状態に加え、二酸化炭素4倍増の大気状態に合わせて行ったが、フラックスの誤差が大きいバンドもあったため、二酸化炭素の吸収帯を含むバンドだけではなく、近赤外と赤外領域のバンドについて更新を行った。この更新において、気体吸収線データベースを HITRAN2004 から HITRAN2012 に更新した。最適化の手法においては、設定する初期値を二通り (completely および uncompletely correlated)、最適化中に積分点を減少させる方法と増加させる方法の二通り、計四通り行い、最も基準値からの差が小さいケースを選択した上で、放射強制力の誤差が 0.1W/m^2 以下の結果を採用した。これにより、気体吸収テーブルは 29 バンド 111 点から、29 バンド 147 点に更新された。

気体吸収の算定には、上記のデータベースのほか、連続吸収帯の吸収プログラムが必要であるが、初年度に更新された後、二年目の7、12月に追加の更新がなされたため、上記の更新間に合わなかった。また、上記の更新で太陽放射と地球放射を同時に扱う波長領域を新たに導入したが、この領域での最適化がスムーズに収束しなかった。この理由として太陽から伝達される放射と地表面および地球大気から射出される放射は、光路長が大きく異なると考えられるため、太陽放射と地球放射は別々に取り扱うのが望ましいと考えられる。これの実現のためには大規模な更新が必要となるため、本課題研究では再更新に向けた研究を進めた。まず、吸収線のデータを扱うのに必要な、波長、気圧(高度)、温度における気体吸収の変化に対する内挿法および解像度について検討を行った。これらを確認の上、気圧27点(1100-0.01hPa、対数線型)、気温10点(150-330K、20Kごと)、吸収データベース HITRAN と連続吸収プログラム MT_CKD から導出した吸収係数のデータベースを作成した。この波長解像度は波長領域ごとに異なり、短波領域でも細かい解像度を保ったままにしているところが従来と異なるところであり、精度の向上が見込まれる。次に、気体吸収テーブルの作成法についてパッケージの整備を行った。パッケージは大きく分けて3つに分かれている。上記で作成したデータベースを *MstrnX* の伝達過程に当てはめて LBL 計算を行う *MstrnX*_LBL パッケージ、同じく吸収係数をバンド領域で並べ替えて k -分布を作成する k -分布作成パッケージ、LBL 計算の結果との差を最小にするように k -分布の積分点と重みを決定する最適化パッケージである。同時にマニュアルも作成中である。これを研究グループ内で共有することで、放射伝達モデルへの理解が進むことを期待して

いる。

粒子散乱過程については、非球形形状の導入と大粒子散乱の導入を行なった。大粒子散乱については降雨粒子としてサイズパラメーターが 25000 までの球形散乱、雲氷粒子として六角柱、降雪粒子として aggregate の形状を仮定し、Yang et al. [2013]の散乱データベースを *MstrnX* へ適用できるよう変更を加えた。この更新により、等価体積半径が 500 μm までの粒子の散乱が可能となり、従来の手法では計算することができなかった霧粒や雨粒、雪粒などの放射影響を算定できるようになった。

放射伝達過程については、3次元放射の影響を簡易的に取り入れるための比較研究を始めた。これまで、1次元放射伝達コードを利用した近似法の Independent Pixel Approximation (IPA/ICA, Stephens et al., 1991; Cahalan et al., 1994)や Tilted Independent Pixel Approximation (TIPA, Varnai and Davies, 1999) が開発されている。これらの近似法で算定する放射量に対して、3次元放射伝達コードによって見積られた放射量の違いを定量的に評価した。IPA では精度が不十分であるが、TIPA は3次元効果を良く再現していることがわかった。

放射伝達モデル本体の見直しにも着手した。まずは放射スキームの高速化について検討を行った。吸収係数の内挿に使用するサブルーチン PTFIT2 について、一層ずつ探す方法からコーディングの工夫により整数に変換する方法を試みたところ、PTFIT2 が 35%高速化した。この高速化の検討に伴い、コードの全般的な見直しも行った。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- Hashino, T., M. Satoh, Y. Hagihara, S. Kato, T. Kubota, T. Matsui, T. Nasuno, H. Okamoto, and M. Sekiguchi, Evaluating Arctic cloud radiative effects simulated by NICAM with A-train: Evaluating cloud radiative effects, *J. Geophys. Res.*, 121(12), 7041-7063, 2016.
- Sugiyama et al, Transdisciplinary Co-Design of Scientific Research Agendas: 40 Research Questions for Socially Relevant Climate Engineering Research, *Sustainability Science*, Doi:10.1007/s11625-016-0376-2. 2016.
- Sekiguchi, M., H. Iwabuchi, T. Y. Nagao, and T. Nakajima, Development of Gas Absorption Tables and an Atmospheric Radiative Transfer Package for Applications Using the Advanced Himawari Imager, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 96B, 77-89, 2018.
- Iwabuchi, H., N. S. Putri, M. Saito, Y. Tokoro, M. Sekiguchi, P. Yang, and B. A. Baum, Cloud Property Retrieval from Multiband Infrared Measurements by Himawari-8, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 96B, 27-42, 2018.
- Michibata, T., K. Suzuki, M. Sekiguchi, and T. Takemura, Prognostic Precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Description and Evaluation Against Satellite Observations, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 1-22, 2019.

〔学会発表〕(計 4 件)

- 関口美保、中島映至、広帯域放射伝達モデルMstrnXの気体吸収テーブルの更新, 日本気象学会 2016年度秋季大会.
- 石田春磨、太田芳文、関口美保、佐藤陽祐、高解像度大気モデルにおける広帯域赤外フラックスの3次元放射伝達計算, 日本気象学会2016年度秋季大会.
- H. Ishida, Y. Ota, M. Sekiguchi, and Y. Sato, Microphysical properties and ice particle morphology of cirrus clouds inferred from combined CALIOP-IIR measurements, 2016 AGU Fall Meeting.
- 関口美保、佐藤拓也、狭帯域放射伝達モデルRstar7の気体吸収過程の更新, 日本気象学会2017年度秋季大会.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。