

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03729

研究課題名(和文) マルチスケール大気放射モデルを用いた全球雲解像放射エネルギー収支の定量化

研究課題名(英文) Quantification of global cloud-resolving radiative energy budget using multi-scale atmospheric radiation model

研究代表者

太田 芳文(Ota, Yoshifumi)

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・研究官

研究者番号：70442697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：モンテカルロ法と明示的解法に基づいた三次元大気放射モデルを開発した。開発したモデルを最新の雲解像気象シミュレーションデータに応用し、雲の三次元放射効果を定量的に調べた。主な成果として、開胞型・閉胞型と呼ばれる雲の場合には、同一の雲場でも太陽放射加熱率の空間分布は空間解像度によって異なり、水平格子間隔が100m～1kmの範囲では局所的に1～6 K/hr程度の違いが現れることが分かった。一方、太陽放射加熱率の領域平均値は空間解像度にほとんど依存せず、熱力学的に有意な差は無かった。このことから、雲解像スケールでの雲・放射相互作用は空間解像度に応じてその性質が大きく異なることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional atmospheric radiation models were developed on the basis of Monte Carlo method and explicit solution method. The three-dimensional radiation models were applied to the latest cloud-resolving meteorological simulation data. As a result, in the case of open cell cloud and closed cell cloud, differences in solar radiative heating rate at 1-6 K/hr were shown as a function of spatial grid sizes between 100m and 1km. On the other hand, domain-average of the solar radiative heating rate did not depend on spatial resolution, and there were no significant thermo-dynamical differences in domain-average values. Therefore, it is shown that cloud-radiation interaction at cloud-resolving scale might have different property depending on the spatial resolution.

研究分野：大気放射

キーワード：気象学 大気放射 放射エネルギー収支 モデル化

1. 研究開始当初の背景

(1) 雲は太陽光を反射することによって大気・地表面の加熱を妨げる冷却効果と、赤外放射を吸収して地表面と大気下層の冷却を妨げる温室効果をもち、地球の放射エネルギー収支を決める重要な役割を担っている。特に、雲を解像する空間スケールでは雲の不均質性と三次元放射伝達の効果が顕著であり、顕著な気象現象をもたらす雲の発達・衰退過程(雲-放射相互作用)の理解、および衛星リモートセンシングデータの解析精度を議論する上でその重要性が認識されつつある。

(2) 研究代表者および分担者らは、これまでに衛星観測用放射モデルを基盤技術として三次元放射効果を定量的に見積もるためのモデル技術を開発してきた。一方で、近年では空間解像度 10m のオーダーでの雲の発達・衰退過程の Large Eddy Simulation (LES) が可能となり、より現実に近い雲の空間分布データが得られるようになった。これらの最新のモデル技術・データを応用し、雲の三次元放射効果を定量的に理解することが重要な課題となっている。

2. 研究の目的

(1) 本研究課題では、雲による三次元放射効果を定量的に明らかにし、雲-放射相互作用の理解とリモートセンシング解析精度を向

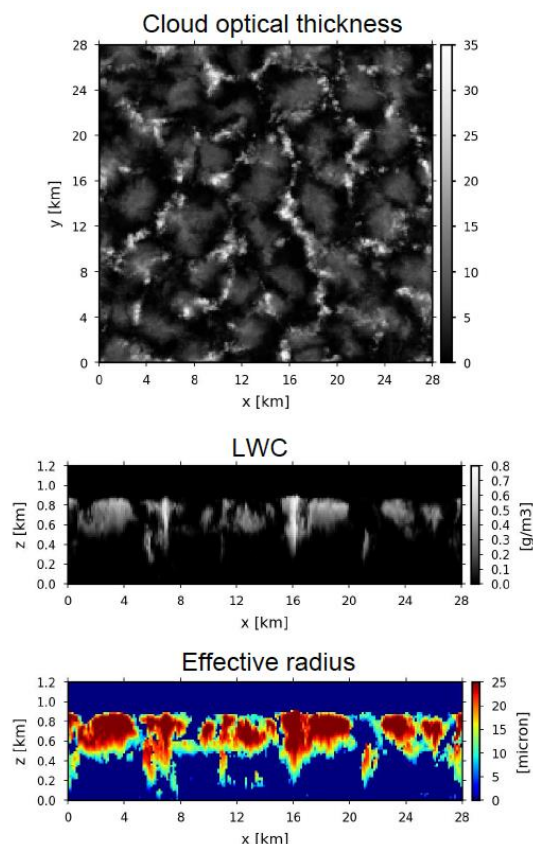


図 1: SCALE-LES によって再現された層積雲(開胞型)。[上段] 雲の光学的厚さ、[中・下段] 雲水量・有効半径の水平-鉛直断面 (y=14km)。

上させることを目指す。具体的には、高効率の広帯域三次元大気放射モデルの開発と各種光学モデルの高度化を行い、開発したモデルを最新の雲解像気象シミュレーションデータや衛星観測に適用して、雲量や雲種別などに対する三次元放射効果の関係を調べる。

3. 研究の方法

(1) モンテカルロ法に基づいた三次元放射伝達モデルの開発と高度化を行う。また、モンテカルロ法が不得意とする感度解析や誤差解析、およびモンテカルロ法では計算効率が悪い条件を補うために、明示的解法に基づいた三次元放射伝達モデルの開発と高度化を行う。大規模な三次元計算を効率的に行うために各解法の性能特性を調査し、相補的に最適な解法を選択できるようなモデルの開発を目指す。また、雲散乱・ガス吸収等の広帯域計算用光学モデルを、最新のデータベースに基づいて構築する。

(2) LES モデルによる雲のシミュレーションデータに三次元放射モデルを応用し、オフライン実験によって雲の三次元放射効果を定量的に調べる。本研究では SCALE-LES モデルによって得られた雲場のデータを主に使用する。また、衛星による全球の観測データを統計的に解析し、雲の水平不均質性の実態を調査する。

4. 研究成果

(1) モンテカルロ放射モデルと LES データを用いた雲の三次元放射収支の評価

① モンテカルロ法に基づいた放射伝達スキームを精査して、三次元放射フラックスと放射加熱率の計算に特化した三次元放射伝達モデルを開発した。開発した放射伝達モデルでは散乱過程を確率的に計算してモデル光子を輸送し、エネルギー吸収による太陽放射加熱をモデル光子の輸送経路に沿って解析的にサンプリングする解法を採用した。

② SCALE-LES モデルによる海上層積雲のシミュレーションデータを使用し、開胞型と閉胞型と呼ばれる雲場について、様々な空間解像度の雲場のデータセットを作成した。図 1 に開胞型の雲場の様子を示す。また、作成したデータセットの空間解像度を表 1 に示す。LES データから得られる水雲パラメータに対して水雲の広帯域光学モデルをオフラインで適用し、短波長域における雲の散乱・吸収係数を計算した(図 2)。ガス吸収係数の計算には mstrnX に組み込まれている相関 k 分布データを使用し、LES による水蒸気の空間分布を考慮した。

表 1: LES データの空間解像度

	x4	x8	x16	x32
$\Delta x, \Delta y$	140m	280m	560m	1120m
Δz	20m	40m	80m	160m
$N_{x,y}$	200	100	50	25
N_z	65	32	16	8

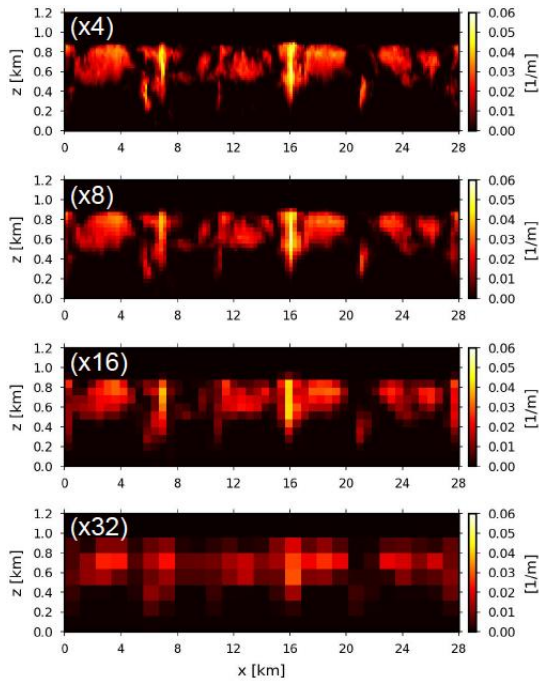


図 2 : LES による水雲パラメータから計算した雲の消散係数。y=14km での鉛直断面。(x4)-(x32)は空間解像度の違いを表す。

③ この雲場に対して三次元モンテカルロ放射モデルを適用し、太陽放射の三次元効果を様々な空間解像度で調べた。図 3 に開胞型の雲場についての計算結果を示す。その結果、100m~1km の空間解像度では空間解像度が高いほど局所加熱の効果が顕著になる傾向が見られた。局所加熱の大きさは、空間解像度が約 1km の場合では大きくても 2 K/hr 弱であったが、空間解像度が 100m 程度の場合には局所的に 6 K/hr に達し、空間解像度に依存する傾向が見られた。しかし、LES の計算領域全体の平均放射加熱率は空間解像度によらず、熱力学的にみて有意な差は無かった。これらの傾向は開胞型の雲場でも同じであった。結果として、雲による三次元放射効果の定量的な評価を行うためには空間スケールを考慮する必要があることが分かり、三次元放射効果のパラメタリゼーションの実現に向けた知見が得られた。

(2) モンテカルロ法の高度化と衛星観測への応用

① 最大消散係数法を拡張し、吸収係数の異なる多波長の計算を同時に行う手法を提案した (Iwabuchi and Okamura, 2017)。これにより、散乱特性が変化しない狭波長帯域において、一度の計算で効率的に多数の波長の放射量を効率良く計算することが可能となった。SCALE-LES の雲データを用いて 3次元放射伝達計算を行い、一度に 1000 波長を計算すると、1 波長ずつ計算する場合と比較して、約 70 倍の高効率で計算をすることが可能となることを示した。

② 不均質雲を人工衛星から観測した場合、

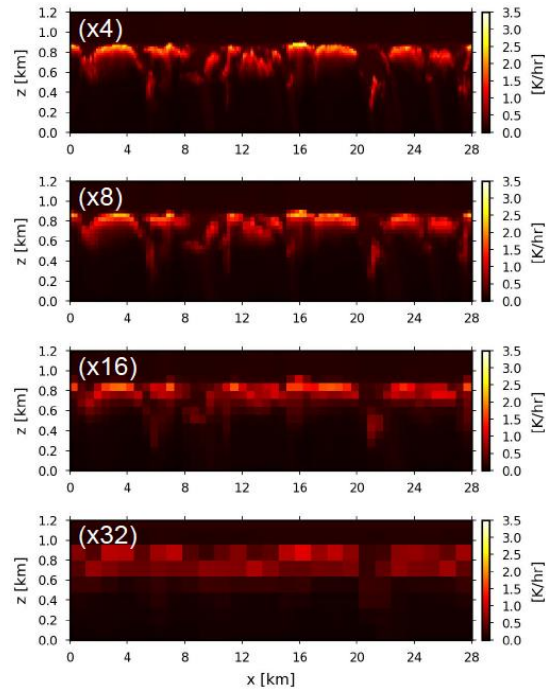


図 3 : 太陽放射加熱率の分布。y=14km での鉛直断面。(x4)-(x32)は空間解像度の違いを表す。太陽天頂角は 50 度で左側から入射している。

観測される放射輝度には三次元放射伝達の効果が現れる。従来の雲のリモートセンシングではこの効果は無視されることがほとんどで、雲物理量の推定には大きな誤差が生じている。この誤差を低減するため、深層学習 (deep learning) を用いて多波長・多画素観測データから雲物理量を推定する手法を開発した (Okamura et al., 2017)。SCALE-LES の雲データを用いて、近赤外と短波長赤外域の複数波長の反射光画像データを作成し、これらを学習データとして用いることで、多画

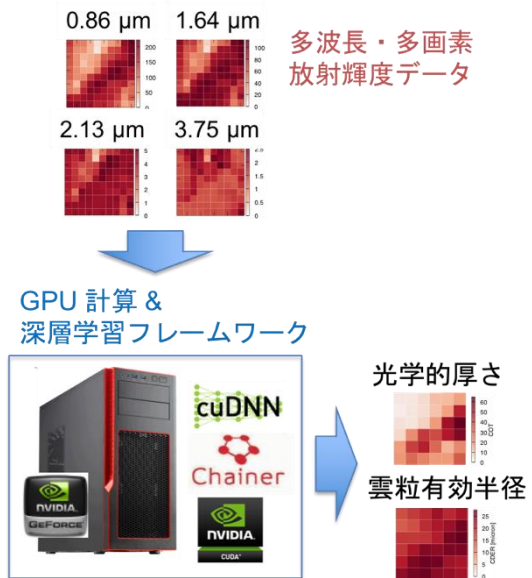


図 4 : 深層学習を用いた不均質雲のリモートセンシング手法の概要

素の雲物理特性（雲の光学的厚さおよび雲粒有効半径）を推定する深層学習モデルを構築した（図4）。提案した手法では、雲の光学的厚さ、雲粒有効半径ともに既存の推定手法よりも誤差が小さく、特に雲粒有効半径の推定において顕著な改善がみられた。深層学習を用いると大量のデータから特徴量の自動抽出ができる利点があり、従来は実現困難であった複雑な雲のリモートセンシングの問題解決に深層学習が有効であることを示した。

(3) 明示的放射モデルの高度化と LES データへの応用による赤外放射収支の評価

- ① これまでに開発した明示的解法に基づく三次元大気放射モデルを改良・高度化し、それを LES データに応用して微細な空間構造をもつ雲の放射エネルギー収支を評価した。
- ② はじめに、計算リソースの低減および計算高速化のための改良を実施した。本研究の明示的手法ではマルチグリッド法を組み込んだ緩和法によって放射伝達方程式の解を求めているが、その際に解の収束が最速となるようなマルチグリッド法の実行条件を評価した。また、緩和係数を条件に応じて変更できるようにし、大気消散係数の大小に関わらず迅速に収束解が得られるように改良した。さらに、広帯域波長積分を効率的に実行するため、各波長での放射計算は互いに独立であることを考慮し、波長に対して並列計算が可能となるようソースコードを改訂した。
- ③ 赤外放射の伝達計算に対応するため、赤外域での様々な分子吸収・射出を考慮できるように放射モデルを改良した。その際、大気中での赤外放射は一般に等方的であることに留意し、放射伝達方程式での最適な角度分

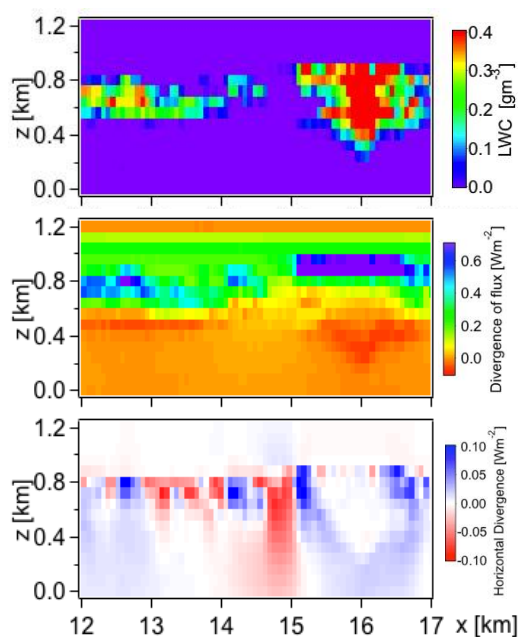


図5：鉛直-水平断面内における(上)雲水濃度、(中)赤外放射フラックスの発散量、(下)そのうち水平移流成分のみの空間分布(一部領域)

解能を評価して計算精度と速度の双方の向上を図った。

④ 改良した明示的放射伝達計算手法を、SCALE-LES モデルによる海上の下層積雲発達・減衰シミュレーションの計算データにオフラインで適用し、放射フラックスと大気加熱率を見積もった。まず、SCALE-LES で計算される大気パラメータから放射伝達計算に必要な(特に水雲の)光学特性パラメータを計算する各種光学モデルを導入した。広帯域放射フラックスを計算した結果、雲層内部における放射エネルギーの発散・収束量や水平移流成分を定量的に評価することができた(図5)。これは、従来良く利用されている鉛直一次元近似の放射計算では評価できないものである。特に、雲層の間隙(即ち晴天域)でも、雲側面からの熱放射による放射エネルギーによって雲の生成・消滅において無視できない加熱が存在することが示された。一方、薄い雲では放射水平移流成分による放射冷却の促進が示唆された。太陽放射フラックスについても、雲層の空間構造に応じた加熱・冷却の複雑な空間分布を評価することができた。

⑤ これらの開発と実験により、実際の観測が困難な細かい時空間分解能での雲層内部の放射エネルギー収支を、LES データと三次元放射モデルの利用により評価することが可能になった。モンテカルロ法による三次元放射モデルと組み合わせることで、三次元的な放射加熱・冷却を考慮した雲の発達・衰退シミュレーションや、リモートセンシングにおける雲の不均質性の影響のパラメタリゼーションの検討に応用可能である。

(4) 衛星観測データ解析による雲の水平不均質性の実態把握

① CloudSat-CALIPSO 衛星から得られた2007年の水平-鉛直二次元の雲データを解析し、空間スケールに依存した雲の不均質性の実態を把握した。雲底高度により、雲を上層、中層、下層雲に分類し、幾何学特性や氷雲について光学的・微物理的特性の統計値を求めた。下層雲では、雲頂が雲底よりも不均質であり、幾何学的厚さの標準偏差は約0.2 kmであった。64 kmのスケールで測った雲量は熱帯で特に小さく約60%、中緯度では80%であった。上層の氷雲では、雲底が雲頂よりも不均質であり、幾何学的厚さの標準偏差は約0.3 kmであった。64 km以下のスケールで測った雲量は約90%以上であったが、雲内部は水平鉛直方向に不均質であり、光学的厚さの不均質性パラメータ(変動係数)は0から1の値をとり、平均0.6と大きかった。熱帯では特に、巻層雲や深い対流雲のように幾何学的に厚く、高度の高い雲はより不均質性が大きく、この種の雲による3次元放射効果が重要である可能性が示唆された。この研究により、CloudSat/CALIPSO、MODIS、Himawari-8、GSMaP、MERRA-2等の衛星データやモデル解析

データの収集方法を習得し、データの読み出しや可視化、整理のためのコードを開発したことで、これらのデータを統合的に扱うための技術基盤ができた。

(5) 放射モデル基盤技術の整備

① 三次元放射モデルの衛星観測への応用を高度化することを目指して、様々な地表面反射モデルを整備した。放射モデル 6S に組み込まれた双方向反射率分布関数を参考にして、植生反射モデル (Verstraete et al. JGR, 1990)、半経験則反射モデル (Rahman et al., JGR, 1993; Roujean et al., JGR, 1992)、キャノピー反射モデル (Kuusk, Rem. Sens. Environ., 1994) 等の地表面反射モデルを整備した。これら地表面反射モデルを放射モデル Rstar に組み込み、6S や MODTRAN4 の計算と比較したところ、概ね同等の計算結果が得られた。これによって衛星リモートセンシング解析の精度向上が期待できるとともに、地表面の水平不均質性を考慮した三次元放射収支の評価を行うために必要なモデル基盤技術が整った。

② また、気象衛星ひまわり 8 号の高解像度・高頻度観測を活用した雲の発達・衰退過程の解析への道を開くため、ひまわりに搭載されている AHI センサの観測バンド (特に可視・近赤外バンド) に対応したガス吸収モデルを開発した。これによって AHI バンドに対応した放射計算が高速かつ効率的に行えるようになった。

(6) 三次元放射モデルの工学面での応用

① 太陽光発電は気象条件にその発電量が大きく依存するという性質がある。それにより太陽光発電の大量連携時に逆潮流による電圧上昇が原因で出力変動などの悪影響を及ぼす。そのため、発電量の正確な予測が求められている。気象モデルを用いた数値解析による予測では、不均質な層積雲場について独立に鉛直一次元の放射伝達を計算する Independent Column Approximation (ICA) が用いられることが多い。そのため、これまで発電量評価における雲の三次元効果の十分な調査が行われてこなかった。そこで、研究分担者・石田によって開発された明示的三次元放射モデルを応用し、発電量評価において雲の三次元効果が及ぼす影響を明らかにすることを目的として、不均質雲が存在する大気において太陽光の三次元放射伝達計算を行った。その結果、特に太陽光の直達成分が雲の分布によって大きく変動し、雲の不均質性がソーラーパネルにおける日射量に大きな影響を与えることがわかった (堀江ら, 2017)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Sekiguchi, M., H. Iwabuchi, T. M. Nagao, and T. Nakajima, Development of gas

absorption tables and an atmospheric radiative transfer package for applications using the Advanced Himawari Imager. *J. Meteor. Soc. Japan*, 96B, 2018.

DOI:10.2151/jmsj.2018-007.

- ② Iwabuchi, H., and R. Okamura, Multispectral Monte Carlo radiative transfer simulation by using the maximum cross-section method, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 193, 40-46, 2017. DOI:10.1016/j.jqsrt.2017.01.025

- ③ Okamura, R., Iwabuchi, H. and Schmidt, K. S., Feasibility study of multi-pixel retrieval of optical thickness and droplet effective radius of inhomogeneous clouds using deep learning, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 4747-4759, 2017. DOI:10.5194/amt-10-4747-2017

- ④ Zhang, F., Y. Shi, J. Li, K. Wu, and H. Iwabuchi, Variational Iteration Method for Infrared Radiative Transfer in a Scattering Medium. *J. Atmos. Sci.*, 74, 419-430, 2017. DOI: 10.1175/JAS-D-16-0172.1

- ⑤ Okamura, R., and H. Iwabuchi: Physical interpretation of gray cloud observed from airplanes. *Applied Optics* 55, 5761-5765, 2016. DOI:10.1364/AO.55.005761

- ⑥ Saito, M., H. Iwabuchi, Cloud discrimination from sky images using a clear sky index, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 33, 1583-1595, 2016. DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0204.1

[学会発表] (計 15 件)

- ① 堀江亮太, 石田春磨, 櫻井 篤, 三次元大気放射モデルを用いた太陽光発電量評価のための基礎研究, 2017 年度日本伝熱学会北陸信越支部秋季セミナー, 2017/11/11, 休暇村能登千里浜 (石川県・羽咋市)

- ② 岩瀬弘信, 岡村凜太郎, K. Sebastian Schmidt, 機械学習を用いた不均質雲の光学的厚さと雲粒有効半径の推定, 日本気象学会 2017 年度秋季大会, 2017/11/2, 北海道大学 (北海道・札幌市)

- ③ 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, 2017/11/1,

北海道大学（北海道・札幌市）

- ④ 太田芳文, 雲の三次元放射エネルギー収支の空間解像度依存性, 日本気象学会 2017 年度秋季大会, 2017/10/31, 北海道大学（北海道・札幌市）
- ⑤ 岩瀬弘信, 岡村凜太郎, モンテカルロ 3 次元放射伝達モデルによる多波長同時計算手法, 日本気象学会 2017 年春季大会, 2017/5/27, 国立オリンピック記念青少年総合センター（東京都・渋谷区）
- ⑥ Ota, Y., Spatial-scale Characteristics of Three-dimensional Cloud-resolving Radiation Budget by Monte Carlo Radiative Transfer Simulations, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017/5/21, Makuhari Messe (Makuhari, Chiba)
- ⑦ Ishida, H., Y. Ota, M. Sekiguchi, and Y. Sato, Application of the deterministic scheme for estimating cloud inhomogeneity effects in a high-resolution numerical model, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017/5/21, Makuhari Messe (Makuhari, Chiba)
- ⑧ Iwabuchi, H., R. Okamura, K. S. Schmidt, Retrieval of optical thickness and effective droplet radius of inhomogeneous clouds using a deep neural network, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017/5/21, Makuhari Messe (Makuhari, Chiba)
- ⑨ Ishida, H., Y. Ota, M. Sekiguchi, and Y. Sato, Incorporation of Three-dimensional Radiative Transfer into a Very High Resolution Simulation of Horizontally Inhomogeneous Clouds. AGU Fall Meeting 2016, 2016/12/16, San Francisco (USA)
- ⑩ 太田芳文, 三次元放射収支モデリングと衛星観測用アジイント放射モデルの現状, 大気放射と衛星リモートセンシングに関するワークショップ, 2016/11/2, 兵庫県立大学（兵庫県・神戸市）
- ⑪ 岩瀬弘信, モンテカルロ大気放射伝達モデルを用いた積雲下の 3 次元放射効果の解析. 大気放射と衛星リモートセンシングに関するワークショップ, 2016/11/2, 兵庫県立大学（兵庫県・神戸市）
- ⑫ 岡村 凜太郎, 岩瀬 弘信, モンテカルロ 3 次元放射伝達モデルのための最大消散係数法を用いた複数波長の同時計算手法の開発, 大気放射と衛星リモートセンシ

グに関するワークショップ, 2016/11/2, 兵庫県立大学（兵庫県・神戸市）

- ⑬ 岡村 凜太郎, 岩瀬 弘信, SCALE-LES データを用いた MODIS センサに対する雲の不均質性の影響の解明, 大気放射と衛星リモートセンシングに関するワークショップ, 2016/11/2, 兵庫県立大学（兵庫県・神戸市）
- ⑭ 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, 2016/10/28, 名古屋大学（愛知県・名古屋市）
- ⑮ 岡村 凜太郎, 岩瀬 弘信, SCALE-LES データを用いた MODIS の雲物理量の推定における雲の不均質性の影響の解明, 日本気象学会 2016 年秋季大会, 2016/10/26, 名古屋大学（愛知県・名古屋市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 芳文 (OTA, Yoshifumi)
気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・研究官
研究者番号: 70442697

(2) 研究分担者

石田 春磨 (ISHIDA, Haruma)
気象庁気象研究所・気候研究部・研究官
研究者番号: 90374909

岩瀬 弘信 (IWABUCHI, Hironobu)
東北大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 80358754

櫻井 篤 (SAKURAI, Atsushi)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 20529614

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