

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340116

研究課題名(和文) 三次元大気放射モデルを用いた全球雲解像放射収支の解明

研究課題名(英文) Evaluation of global cloud-resolving radiation budget using three dimensional atmospheric radiation model

研究代表者

太田 芳文(OTA, Yoshifumi)

独立行政法人海洋研究開発機構・シームレス環境予測研究分野・研究員

研究者番号：70442697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000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。また、広帯域計算用の雲散乱・ガス吸収モデル等を構築し、三次元放射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できる環境を整えた。応用の結果、オープンセルと呼ばれる雲の場合には、空間格子の大きさによって太陽放射フラックスの空間分布に局所的に数100W/m<sup>2</sup>の違いが出ることが分かった。一方、太陽放射加熱率の分布は空間格子の大きさにはあまり依存せず、局所的な違いは数K/day程度であった。このことから、大気中での局所的な太陽放射の三次元効果が雲の形成・消滅に及ぼす影響は大きくないことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional atmospheric radiation model has been developed on the basis of the Monte Carlo method and the explicit solution method. The broad-band optical models such as cloud scattering and gaseous absorption have been also developed in order to apply the radiation model to the latest cloud-resolving meteorological simulation data. As a result, in the case of open cell clouds, the spatially-localized differences at a few hundred W/m<sup>2</sup> in the solar radiation flux have been shown as a function of spatial grid size. On the other hand, the differences in heating rate of the solar radiation have not depended largely on the spatial grid size and have been locally several kelvins per day. The results indicate that the three-dimensional effect of solar radiation in the local air mass does not affect largely on the cloud evolution.

研究分野：大気放射

キーワード：気象学 大気放射 エネルギー収支 モデル化

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 雲は、日射を遮ることによる冷却効果とともに、赤外放射を吸収して地表面と大気下部の冷却を妨げる温室効果をもっており、地球の放射収支を決める重要な役割を担っている。様々な気候モデルによる気候感度の違いは、雲-放射過程の表現の仕方、及びそれに起因するフィードバック効果の違いが主因であることが指摘されている。そのため、気候モデルの信頼性向上には雲と放射過程の精緻なモデル化が重要な鍵となる。

(2) 一方、これまでの気象・気候学における実際の応用では、ほとんどの場合、放射伝達過程は平行平板状の雲を仮定した鉛直一次元で近似されている。雲の不均質性と三次元放射伝達の効果は空間スケールに依存するため、静力学近似が成り立つ大きな水平スケール(100km程度)では鉛直一次元の放射伝達でも計算精度が保たれるが、雲を解像し、静力学近似が成り立たない水平スケール(約10km以下)では三次元放射伝達の効果が顕著になる。より信頼性のある表現のためには、大規模な三次元放射伝達過程を高精度かつ効率的に計算する必要があり、そのモデル化とモデル格子では解像されないスケールの雲の光学特性のモデル化は重要な課題である。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究課題では、三次元放射効果を全球スケールで定量化することを目指して、高速かつ高精度の広帯域三次元大気放射伝達モデルの開発を行う。

(2) また、雲解像力学モデル等による高解像度の気象シミュレーションデータを利用し、放射フラックスの空間分布を調べ、雲量や雲種別などに対する三次元放射効果(大気上端、地上、大気内吸収)の関係を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) モンテカルロ法を用いた三次元放射伝達計算アルゴリズムを開発する。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、及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、明示的な三次元放射伝達解法の開発を行う。特に、大規模な三次元放射伝達計算を効率的に行える近似解法の開発を行い、各解法の性能特性を調査して、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) 雲解像力学モデルによるシミュレーションデータ等に三次元大気放射モデルを応用し、オフライン実験によって大気上・下端の上・下向き放射フラックス、大気中の放射加熱率分布、直達・拡散放射の不均質効果を

見積もり、その空間スケール依存性を調べる。

### 4. 研究成果

(1) 放射モデルの中核部分である三次元放射伝達モデルの開発と、雲散乱・気体吸収等の広帯域光学モデルの構築を行った。具体的には、モンテカルロ法に基づいた三次元放射伝達スキームを精査し、三次元放射フラックスと放射加熱率の計算に特化した放射伝達モデルを開発した。開発したモンテカルロ放射伝達モデルは、太陽光と大気の熱放射について、モデル光子の輸送経路に沿ってエネルギー吸収による放射加熱を解析的にサンプリングする解法を採用したことから、放射加熱率の計算精度が特に優れていることが分かった。

太陽放射について、他モデルによる計算結果と比較して開発した放射伝達モデルを検証したところ、完全三次元系でのモデル計算結果に顕著なバイアス誤差はないことが確認できた。また、三次元と鉛直一次元放射モデルの計算結果を比較し、雲内部では拡散放射による放射加熱の分布が両者で大きく異なることが分かった。加えて、一次元放射モデルでは雲頂での放射加熱が三次元放射モデルよりも著しく大きくなる傾向があり、雲解像スケールでは大きなバイアス誤差をもたらすことが示唆された(図1)。

最新の雲解像力学モデル(SCALE-LES)によるシミュレーションデータに対して、開発した三次元モンテカルロ放射モデルおよび

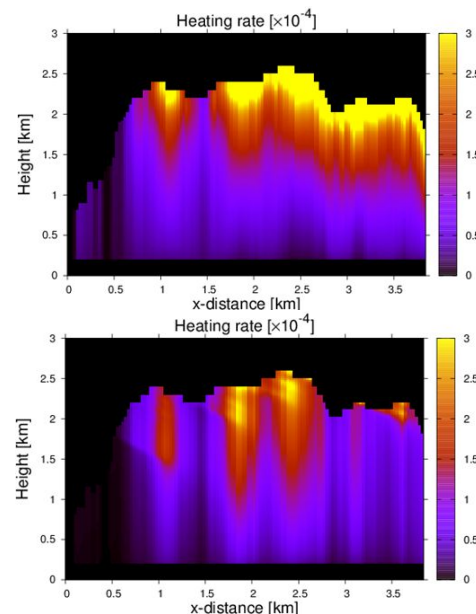


図 1: 雲による太陽放射加熱の高度断面図(I3RC PHASE II-case3 による雲の光学場を使用)。上段は独立気柱近似(鉛直一次元)、下段は完全三次元での計算結果。放射加熱率の単位は太陽照度で規格化してある。太陽天頂角は60度で、図の左側から入射している。

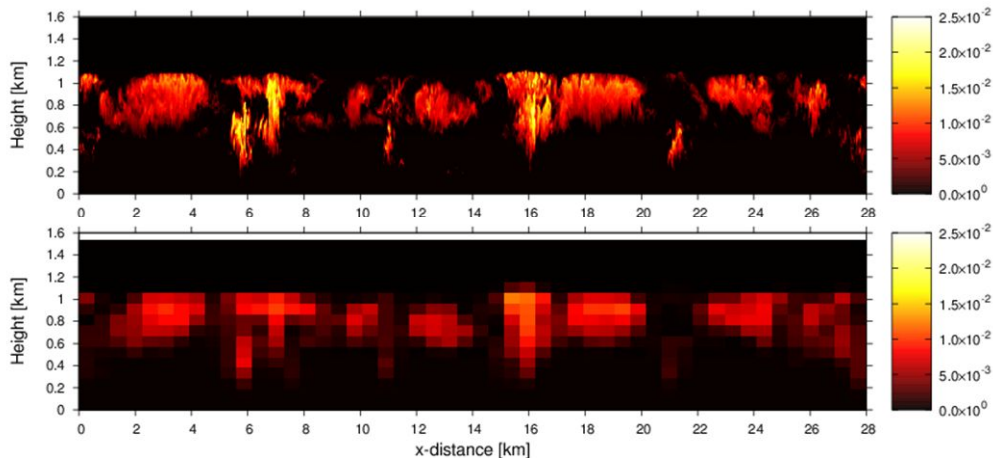


図 2: 雲を含んだ 3 次元大気の消散係数 [1/m]。雲解像力学モデル(SCALE-LES)によるシミュレーションデータを元に、広帯域太陽放射を想定して作成した。上段は $\Delta x = 35\text{m}$ ,  $\Delta z = 5\text{m}$ 、下段は $\Delta x = 560\text{m}$ ,  $\Delta z = 80\text{m}$ 。

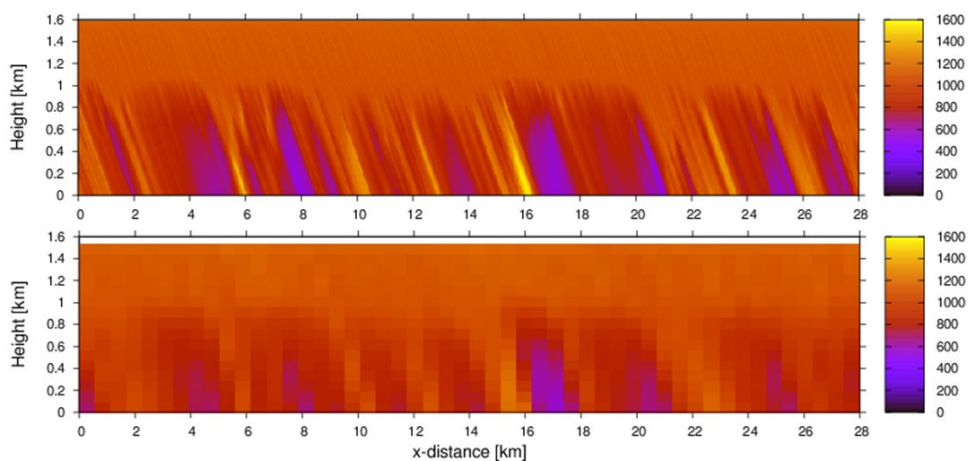


図 3: 下向きの広帯域太陽放射フラックスの計算結果 [W/m<sup>2</sup>]。図 2 の大気場に周期境界条件を適用して計算した。太陽天頂角は 60 度で、図の左側から入射している。上段は $\Delta x = 35\text{m}$ ,  $\Delta z = 5\text{m}$ 、下段は $\Delta x = 560\text{m}$ ,  $\Delta z = 80\text{m}$ 。

広帯域光学モデルをオフラインで適用し (図 2) 太陽放射の三次元効果を様々な空間スケールの雲場について調べた。数 10~数 100 メートルの空間格子を使った場合には、格子サイズの違いが放射エネルギー分布に及ぼす影響は、雲影や、雲の間隙からの陽射しの近傍で顕著に現れる。オープンセルと呼ばれる雲場でその大きさを見積もったところ、10m オーダーと 100m オーダーの空間格子では、太陽フラックスの計算結果に局所的に数 100W/m<sup>2</sup> の違いが生じ、特に大気下端の地表付近で違いが顕著に現れることが分かった (図 3)。このことから、地表面加熱の空間分布に対して三次元放射効果の影響が特に大きく現れることが示唆された。一方、雲による大気の放射加熱率の大きさは 20 ~ 30 K/day 程度となることが分かった (図 4)。その分布は空間格子の大きさに依存するものの、局所的な違いは数 K/day 程度であった。これは雲の形成・消滅の時間スケールでは大きな加熱とは言えないことから、太陽放射については大気中での局所的な三次元効果が雲の形成・消滅に与える影響は大きくないこ

とが示唆された。また、放射加熱の分布は空間格子の大きさには大きく依存しないことから、そのパラメタリゼーションの可能性が示唆された。

以上の成果から、三次元放射過程を通じた放射-雲相互作用をより定量的に理解するためには、地表面における放射エネルギー収支と、雲を含む三次元大気中での熱放射エネルギー収支の評価が今後の重要な課題といえる。

(2) モンテカルロ放射伝達モデルと比較するために、計算原理が全く異なる計算スキームとして、明示的放射伝達モデルの開発を進めた。特に可視・赤外両波長において地表面反射もしくは地表面熱放射を組み込むための改良を実施した。その結果、地表面熱放射についてはモデルにて考慮できるようになった。さらにマルチグリッド法を導入し、放射伝達計算の効率化・高速化のために有効な手法であることを確認した。



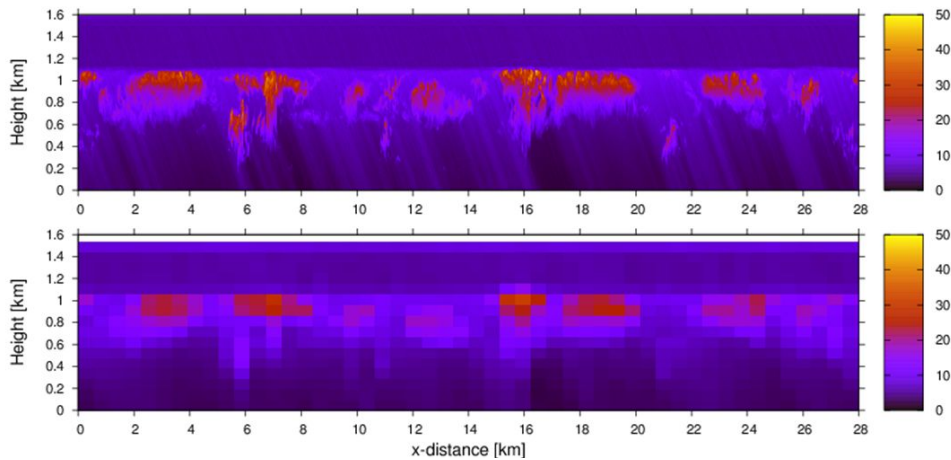


図 4: 広帯域太陽放射加熱率の計算結果 [K/day]。計算条件は図 3 と同じ。

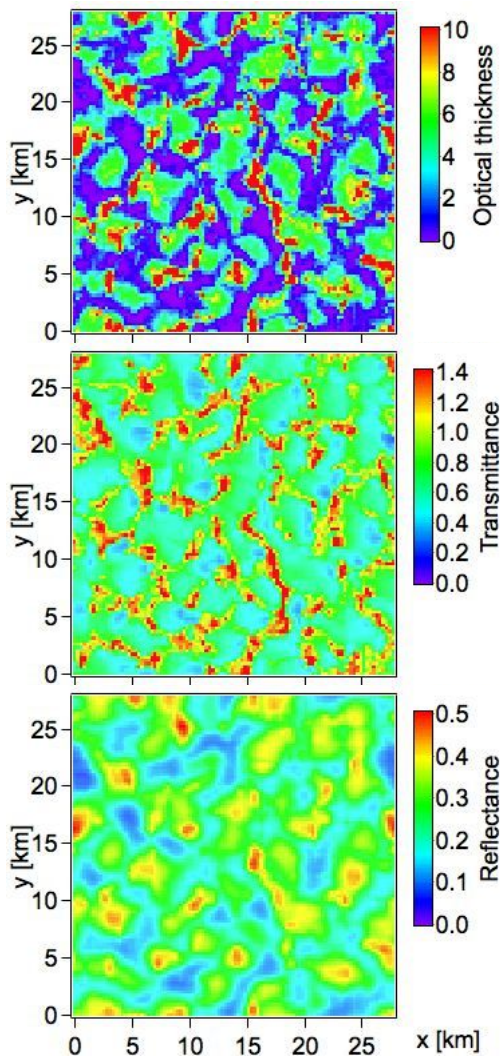


図 5: SCALE-LES による、ある時刻での雲水量計算結果に対応する波長  $0.5\mu\text{m}$  での [上段] 光学的厚さと、明示的放射伝達モデルにより計算した [中段] 下向きフラックスの透過率 (直達成分を含む)、及び [下段] 上向きフラックスの反射率。太陽天頂角は  $53.1$  度、絶対方位角  $0$  度で、図の左側から入射している。格子サイズ設定は  $\Delta x = \Delta y = 280\text{m}$ ,  $\Delta z = 40\text{m}$ 。

開発した明示的放射伝達計算手法の検証を行うため、仮想的な大気中における放射輝度及び放射フラックスの計算結果をモンテカルロ法と比較した。その結果、当手法によって放射フラックスについては妥当な結果が得られることが確認できた。一方、放射輝度については条件によって値に差異が見られ、原因として特に数値拡散の影響が大きいことが推察された。

高解像度で時間発展するモデル大気における放射計算の実行可能性を調査するため、明示的大気放射モデルを SCALE-LES データにオフラインで適用した (図 5)。その結果、上向き及び下向きの放射フラックスの値においては、計算時間は長大化するものの、モンテカルロ法と同等の妥当な結果を得られることが証明された。また、連続的な時刻毎データにおいて前時刻の結果を初期値とすることにより、放射計算時間の短縮が可能であることが分かった。

(3) 氷粒子に代表される非球形粒子による散乱過程を構築した。これに伴い、観測や実験室での測定などによるデータを収集し、様々な粒子タイプについて計算できるよう光学データベースの整備を行った。特に、粒子表面粗度を考慮した非球形の氷粒子による散乱特性の最新データベースに基づいて、広帯域放射計算用の光学特性データを参照表として作成した。水雲モデル・ガス吸収モデルについても広帯域計算に適したものを開発・整備し、放射エネルギー収支解析を行うためのモデル要素を整えた。

(4) 大気放射モデルの応用を目指して、薄明の空の観測と三次元放射伝達モデルによるシミュレーションを行い、対流圏エアロゾルの量が薄明の空の色に強く影響していることを示した。

(5) 観測に基づいた現実的な雲の全球三次元分布を得るため、衛星観測データ (MODIS,

CloudSat)とモデル再解析データ(MERRA)の収集・整備を行った。高解像度の雲の分布と変動特性を地球規模で得るため、衛星搭載のイメージャを用いた雲の解析を行った。特に対流圏上部にできる氷晶雲の光学的厚さの変動が大きいことが分かり、雲の変動の放射に対する影響を定量化する必要性が改めて示唆された。

#### 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6件)

Saito, M., and H. Iwabuchi, A new method of measuring aerosol optical properties from digital twilight photographs, Atmos. Meas. Tech. Discuss., 8, 191-234, 2015. (査読有)  
DOI: 10.5194/amtd-8-191-2015

Hioki, S., and H. Iwabuchi, Photographic observation and optical simulation of a pollen corona display in Japan, Applied Optics, 54, B12-B21, 2015. (査読有)  
DOI: 10.1364/AO.54.000B12

Ishida, H., K. Miura, T. Matsuda, K. Ogawara, A. Goto, K. Matsuura, Y. Sato, and T. Y. Nakajima, Investigation of Low-Cloud Characteristics Using Mesoscale Numerical Model Data for Improvement of Fog-Detection Performance by Satellite Remote Sensing, J. Appl. Meteor. Clim., 53, 2246-2263, 2014. (査読有)  
DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0363.1

Matsui, T., J. Santanello, J. J. Shi, W.-K. Tao, D. Wu, C. Peters-Lidard, E. Kemp, M. Chin, D. Starr, M. Sekiguchi, and F. Aires, Introducing Multi-Sensor Satellite Radiance-based Evaluation for Regional Earth System Modeling, Journal of Geophysical Research (Atmosphere), 119, 8450-8475, 2014. (査読有)  
DOI: 10.1002/2013JD021424

Ishida, H., Application of the multigrid method in a deterministic solution scheme for the three-dimensional radiative transfer equation, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 133, 396-411, 2014. (査読有)  
DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.09.003

Saito, M., H. Iwabuchi, and T. Hayasaka,

Physical explanation of tropospheric aerosol effects on twilight sky color based on photographic observations and radiative transfer simulations, Scientific Online Letters on the Atmosphere, 9, 15-18, 2013. (査読有)  
DOI: 10.2151/sola.2013-004

##### [学会発表](計16件)

Iwabuchi, H. and S. Katagiri, Cirrus cloud properties inferred from multispectral imager and lidar measurements, AGU Fall Meeting 2014, 2014/12/17, San Francisco (USA)

Yoshifumi Ota, Spatial-scale Characteristics of Three-dimensional Cloud-resolving Radiation Budget by Monte Carlo Radiative Transfer Simulations, AGU Fall Meeting 2014, 2014/12/16, San Francisco (USA)

Miho Sekiguchi, Implementation of Unified atmospheric Scattering Processes in radiative transfer models, EarthCARE Workshop, 2014/09/18, National Museum of Emerging Science and Innovation, Miraikan (Koto-ku, Tokyo, Japan)

Miho Sekiguchi, Seasonal variability of aerosol-cloud interaction estimated from long-term satellite analysis, AOGS 11th annual meeting, 2014/07/31, Royton Sapporo Hotel (Sapporo, Hokkaido, Japan)

Miho Sekiguchi, Seasonal variability of aerosol-cloud interaction estimated from long-term satellite analysis, 14th conference on atmospheric radiation, American Meteorological Society, 2014/07/09, Boston (USA)

関口 美保, 衛星から見た雲エアロゾル相互作用の地域特性と季節変動, 日本気象学会 2014 年度春季大会, 2014/05/22, 横浜市開港記念会館(神奈川県・横浜市)

Yoshifumi Ota, Development of three-dimensional Monte Carlo radiative transfer model for analysis of cloud-resolving radiation budget, AGU Fall Meeting 2013, 2013/12/12, San Francisco (USA)

石田 春磨, 明示的 3次元放射伝達計算手法におけるマルチグリッド法の導入, 日本気象学会, 2013/5/17, 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)

太田 芳文, 放射収支解析のための3次元放射伝達のモデリング, 超高解像モデリングにおける放射伝達に関するワークショップ(招待講演), 2013/2/22, 理化学研究所計算科学研究機構(兵庫県・神戸市)

石田 春磨, 3次元雲を対象にした放射伝達計算の明示的解法, 超高解像モデリングにおける放射伝達に関するワークショップ(招待講演), 2013/2/22, 理化学研究所計算科学研究機構(兵庫県・神戸市)

岩淵 弘信, 3次元放射伝達モデルの計算効率についての考察, 超高解像モデリングにおける放射伝達に関するワークショップ(招待講演), 2013/2/22, 理化学研究所計算科学研究機構(兵庫県・神戸市)

関口 美保, ブロードバンド放射伝達モデル MSTRNX の現状と課題, 超高解像モデリングにおける放射伝達に関するワークショップ(招待講演), 2013/2/22, 理化学研究所計算科学研究機構(兵庫県・神戸市)

Yoshifumi Ota, Modeling three-dimensional Monte Carlo radiative transfer for analysis of cloud-resolving radiation budget, AGU Fall Meeting 2012, 2012/12/7, San Francisco (USA)

Yoshifumi Ota, Modeling of three-dimensional Monte Carlo radiative transfer for analysis of global cloud-resolving radiation budget, International Radiation Symposium 2012, 2012/8/7, Berlin (Germany)

Haruma Ishida, Development of a Solution Scheme Applying the Multigrid Method for Three-Dimensional Radiative Transfer Equation, International Radiation Symposium 2012, 2012/8/7, Berlin (Germany)

Saito, M., Iwabuchi, H, and Hayasaka, T, How does tropospheric aerosol affect twilight colors?, International Radiation Symposium 2012, 2012/8/7, Berlin (Germany)

[図書](計1件)

岩淵 弘信, 北海道大学低温科学研究所, 不均質雲による放射効果 in 低温科学 72

巻, 2014, 320(151-158)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 芳文 (OTA, Yoshifumi)  
独立行政法人海洋研究開発機構・シームレス環境予測研究分野・研究員  
研究者番号: 70442697

(2) 研究分担者

石田 春磨 (ISHIDA, Haruma)  
山口大学・理工学研究科・助教  
研究者番号: 90374909

岩淵 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・海洋科学技術研究科・准教授  
研究者番号: 00377079