

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540511

研究課題名(和文) 高湿潤場における降水機構にエアロゾル過程の与える影響に関する研究

研究課題名(英文) Effects of aerosol processes on the precipitation mechanism under a high humid region

研究代表者

篠田 太郎 (Shinoda, Taro)

名古屋大学・地球水循環研究センター・准教授

研究者番号：50335022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：エアロゾル輸送過程を含む雲解像モデルの開発を行った。エアロゾルの質量混合比を予報変数として、移流・拡散過程、乾性沈着過程、湿性沈着過程、重力沈降過程を実装した。このモデルを用いて2011年3月15日に福島第一原子力発電所から放出された粒子が北関東や福島県中通り地方に輸送されて、降水によって地表面に沈着する過程を表現することができた。

一方、エアロゾルを凝結核や氷晶核として雲水や雲氷の数濃度を制御する過程を実装することはできなかった。2モーメントの液相の雲物理過程で雲粒が成長して雨粒にならないという課題のためである。科研費の研究期間は終了してしまったが、今後とも実装に向けて検討を行う。

研究成果の概要(英文)：We develop a cloud-resolving model including aerosol processes. The aerosol processes of advection, diffusion, gravitational settling, dry deposition, and wet deposition have already been installed. Using the model, we reproduced well the tracing of an aerosol category released from the Fukushima Nuclear Power Plant on March 15, 2011 and the deposition of it on the northern Kanto and Nakadori (Fukushima) regions.

However, we cannot complete the nucleation processes that the aerosol particles act as CCN and/or IN. Although a cloud-resolving model has the two-moment bulk microphysical processes for liquid phase, however, cloud particles cannot develop to raindrops in simple simulations using the model. We are willing to solve the problem after the project finished.

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：水循環 大気現象 エアロゾル

1. 研究開始当初の背景

エアロゾルが雲の形成に与える影響(間接効果)の先行研究により、エアロゾルの多い大陸上と少ない海洋上では雲内の雲粒子の平均粒径や数濃度などが異なり、結果として雲の反射率や降水粒子の形成に至る雲微物理機構が異なることが指摘されている。

一方、エアロゾルが降水過程に及ぼす影響については、この10年間で様々な研究がなされるようになってきた。様々な周波数帯の衛星データを用いることで、エアロゾルが降水雲の雲頂高度や雲内の雲・降水粒子の粒径分布に与える影響についての研究も行われるようになってきている。また、エアロゾル過程を雲解像モデルに組み込むことにより、エアロゾルにより生成される凝結核(Cloud Condensation Nuclei; CCN)の数濃度が降水の開始時刻、降水分布、降水量に影響を与えることも示唆されている。

名古屋大学地球水循環研究センターがこれまでに実施してきた梅雨期の沖縄域での観測結果より、梅雨前線の南端付近では大きな粒径の雨滴による多量の降水が、梅雨前線から北側に離れた領域では非常に多くの小さな粒径の雨滴により多量の降水がもたらされることが示されている。「このような雨滴の粒径分布の相違は梅雨前線の南北におけるエアロゾルの種類や数濃度によってもたらされるのではないか」という作業仮説が本研究を実施する動機である。このために、エアロゾル過程を組み込んだ雲解像モデルを開発することで、この作業仮説の検証を行うことを目指す。この研究課題は、雲解像モデルを用いた降水量の定量的な予測(Quantitative Precipitation Forecasting; QPF)にエアロゾル過程が重要な役割を果たすかどうかを検討することにも通じるものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、梅雨前線帯などの高湿潤域において発達する降水システムの構造や機構に対して、エアロゾル過程が及ぼす影響を検討し、雲解像モデルを用いた降水量の定量的な予測に際してエアロゾル過程を導入した影響を見積ることである。

3. 研究の方法

この目的のために、九州大学応用力学研究所の竹村俊彦准教授が開発しているエアロゾル輸送モデル Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS) を名古屋大学地球水循環研究センターで開発している雲解像モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS) に組み込んだ結合モデル(以下、CReSS-SPRINTARS)の開発を行う。

SPRINTARS は東京大学大気海洋研究所が中心となって開発を行っている全球モデル Model for Interdisciplinary Research of Climate (MIROC) に結合する形で開発さ

れており、自然起源・人為起源の主要エアロゾル(黒色炭素・有機物・硫酸塩・土壌粒子・海塩粒子など)17種類を取り扱っている。CReSS-SPRINTARSでも、これらの17種類のエアロゾルの質量混合比を予報変数として計算する。そして、全ての種類のエアロゾル粒子に対する化学反応による生成、大気の流れによる移動(移流・拡散)、大気中での乾性沈着、雲・降水による湿性沈着、重力落下などの過程をCReSSの仕様に従って実装する。なお、気候モデルに比べて計算時間は短いため、現時点では地表面からのエアロゾル粒子の放出過程は含まない。また、エアロゾル粒子が雲に対して凝結核・氷晶核として作用する機能により、湿潤飽和調節を用いずに雲水と雲氷の数濃度を規定する部分の実装が重要である。

さらに、名古屋大学地球水循環研究センターの増永浩彦准教授により開発された衛星シミュレータ Satellite Data Simulator Unit (SDSU) を用いることで、雲氷の数濃度の推定を行うことが可能となった。SDSUは雲解像モデルの各格子点における出力値(気温、凝結物の混合比や数濃度)を用いて、衛星に搭載されているアクティブ・パッシブセンサで得られる観測値を放射伝達方程式を解くことにより推定するアルゴリズムである。本研究においても、CReSSを用いたシミュレーション結果にSDSUを適用することで、赤外輝度温度や雲レーダ帯の反射強度分布を計算し、衛星観測の結果と比較することで雲氷の数濃度の評価を行うことが可能となった。

4. 研究成果

(1) CReSSへのエアロゾル移流・拡散過程と湿性沈着過程の実装

九州大学応用力学研究所竹村俊彦准教授よりエアロゾル輸送モデルSPRINTARSのソースコードを受領し、雲解像モデルCReSSとの結合モデルCReSS-SPRINTARSの作成を行った。SPRINTARSと同様にCReSS-SPRINTARSでも、取り扱われる17種類のエアロゾルの種類毎に質量混合比を予報変数として計算する部分の作成を行った。そして、各種類のエアロゾル粒子に対して、大気の流れによる移動(移流・拡散)部分、大気中の乾性沈着、雲・降水による湿性沈着、重力落下の部分のコード化を行った。

SPRINTARSは全球モデル用に開発されていたため、降水粒子に取り込まれたエアロゾルは1タイムステップのうちに地表面まで落下してしまう仕様であった。しかしながら、雲解像モデルでは雲粒子や降水粒子に取り込まれたエアロゾル粒子は、雲・降水粒子とともに移流・拡散・沈降する必要がある。このため、凝結物とエアロゾルの種類を組み合わせた混合物毎に移流・拡散・沈降についての計算を実施する必要がある。初年度に、この部分の仕様を策定して実装を行った。

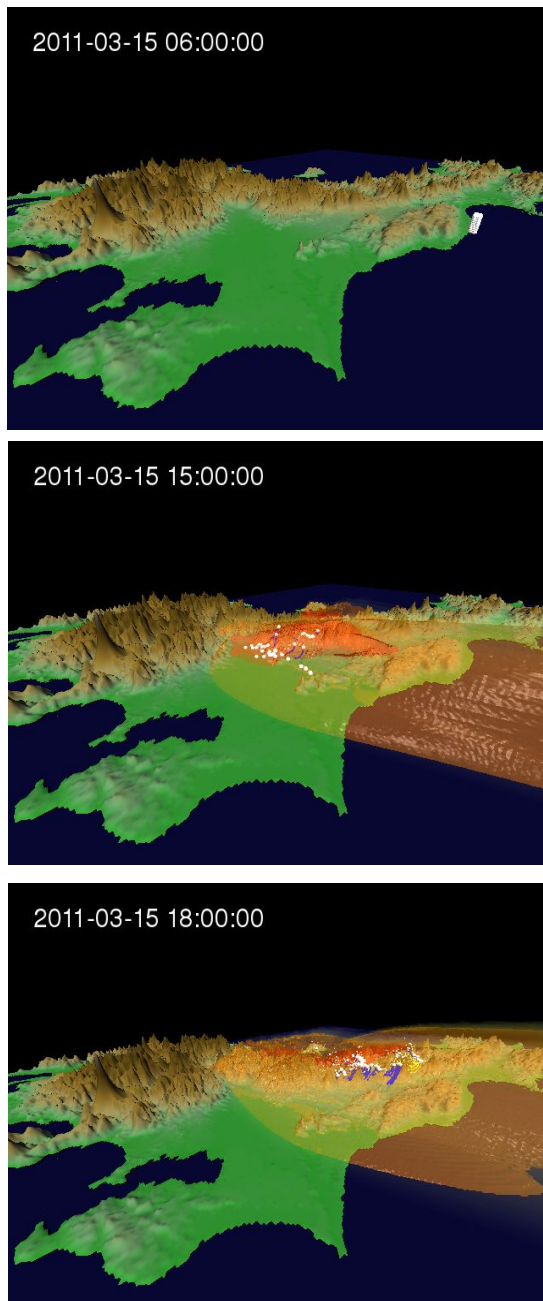


図 1. 福島第一原子力発電所から放出されたエアロゾル粒子の移動と湿性沈着過程のシミュレーション結果。(上図)2011年3月15日06時(日本標準時)を初期値として、福島第一原子力発電所周辺の格子にエアロゾル粒子を配置し(白い球)、シミュレーションを開始した。(中図)計算開始9時間後(15時)の結果。白い球は下層を移流するエアロゾル粒子が特に多い部分。オレンジ色の濃淡はエアロゾル混合比の大小を示す。湿性沈着によるエアロゾル粒子の地表面への落下を青い線で示す。(下図)計算開始12時間後(18時)の結果。白い球、オレンジ色の濃淡と青い線は中図と同じである。

CReSSにエアロゾル過程を組み込んだ計算結果の事例を図1に示す。2011年3月15日に東京電力福島第一原子力発電所2号炉で発生した水素爆発による放射性物質の拡散と沈着過程をエアロゾル輸送で代替してシミュレーションを実施したものである。水平解像度は1.5 kmとした。シミュレーションの開始時刻は、水素爆発が発生した時刻(06時10分(日本標準時):経済産業省による「原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書について」より)の近傍で大気環境場の初期・境界値を設定できる06時00分とした。

図1上図はエアロゾルが福島第一原子力発電所から放出された時刻(シミュレーション開始時)における分布を示す。福島第一原子力発電所を含む周囲の9格子の高度100 mから1000 mまでの10層(合計で90格子点)から1種類のエアロゾル粒子を放出した。この時刻には北関東から東北地方南部の太平洋側には対流圏下層に北東風が吹いており、放出源から南下したエアロゾル粒子は北関東方面に流入している。同日15時には西から近づいてきていた前線に伴う降水域と、放出されたエアロゾル粒子が遭遇し、湿性沈着過程によりエアロゾル粒子が北関東に落下している様子が見て取れる(図1中図の青い線)。その後、前線前面の南風によってエアロゾル粒子は東北地方南部を北上している。同日18時には福島県中通り地方(郡山市や福島市)周辺にも湿性沈着過程により粒子が落下している(図1下図の青い線)。シミュレーションにおいてエアロゾル粒子が湿性沈着過程により落下した領域は、観測された放射線の強度が大きかった領域とほぼ一致しており、エアロゾルの拡散過程と湿性沈着による地表面への落下がきちんと再現できていると考えられる。また、CReSSによる降水分布の再現性がエアロゾル粒子の沈着領域を評価する上で極めて重要であると考えられる。

(2) CReSSへの凝結核・氷晶核化過程の実装

CReSSにおける液相の水(雲水と雨)を対象とした雲物理過程では、これまで混合比のみを予測する1モーメントの計算式を適用していた。一方、混合比だけでなく水滴の数濃度も予測する2モーメントの計算式については、コード化はされていたものの、十分なテストは行われていなかった。エアロゾルが凝結核として作用する場合、雲粒の数濃度に直接影響を及ぼすために、凝結核化過程の実装に際しては2モーメントの暖かい雨の過程を使用する必要がある。なお、CReSSでは固相の水(雲氷・雪・霰)については既に2モーメント化が実現されて、毎日のシミュレーション実験で使用されている。

凝結核化作用についてのコードを作成し、CReSSの暖かい雨の2モーメント過程と組み合わせた形のテストを実施した。しかしながら、1モーメントではきちんとモデル中で雨が

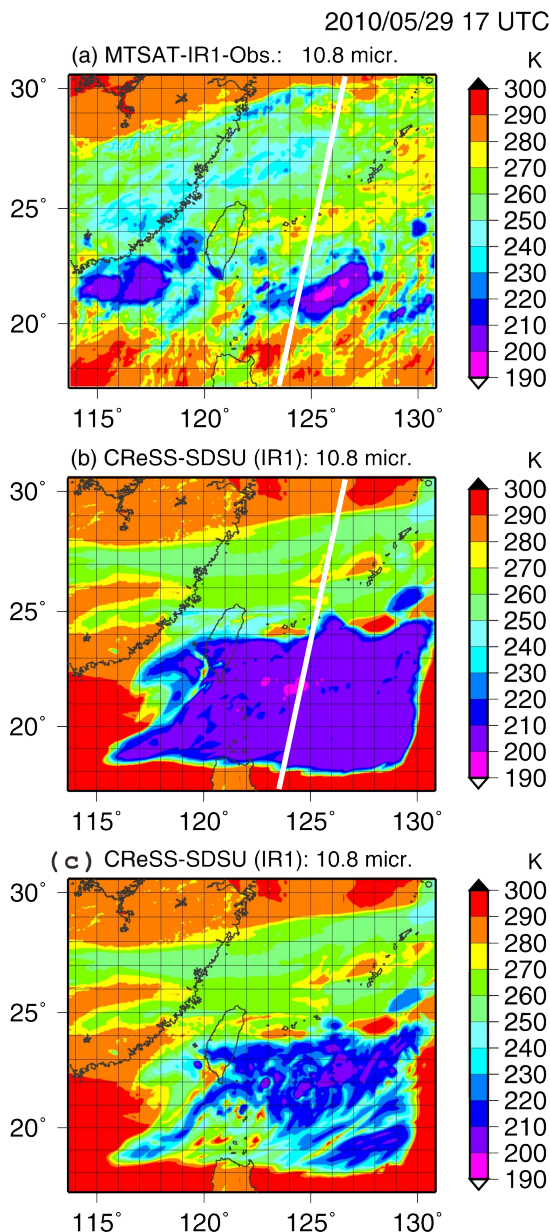


図 2. (a) 2010 年 5 月 29 日 17 時 (世界時) に運輸多目的衛星 MTSAT により観測された赤外輝度温度 (Ch-1, 10.8 μm) の水平分布。中国大陸から台湾を通過して沖縄の南側に延びる梅雨前線に沿って積乱雲群に伴う低輝度温度域が見られる。(b) 同じ時刻に CReSS のシミュレーション結果に SDSU を用いて算出した赤外輝度温度の水平分布。計算領域の南東側の積乱雲群に伴って低い輝度温度の領域が観測結果に比べて広く分布している。(c) 雲氷の数濃度を 0.0001 倍して SDSU の計算を行った場合の赤外輝度温度の水平分布。低い輝度温度の領域の広がり改善されている。白い実線は図 3 で示される鉛直断面図を示す。

降るにもかかわらず、2モーメントではほとんど雨が降らなかった。

この部分について、CReSSとSPRINTARSのコードを細かく解析しているものの、現時点でも問題の解決に至っていない。この点については、今後ともアルゴリズムの検討を行っていく予定である。

(3) 衛星シミュレータを用いた雲解像モデルの出力結果における雲氷の数濃度の評価
雲解像モデル CReSS の雲物理過程の検討を行うために、名古屋大学地球水循環研究センターの増永浩彦准教授の開発した衛星シミュレータ Satellite Data Simulator Unit (SDSU) を適用した。SDSU は雲解像モデルの各格子点における出力結果 (気温・水蒸気混合比・各凝結物の混合比と数濃度) に放射伝達方程式を適用し、衛星に搭載されたセンサーで観測される輝度温度やレーダ反射強度に相当する値を計算するアルゴリズムである。本研究では、MTSAT で観測される赤外輝度温度 (Ch-1; 10.8 μm 周波数帯) と CloudSat に搭載されている 94 GHz 帯の雲レーダで観測される反射強度との比較を行うことで、対流圏上層に位置する雲氷の数濃度について考察を行った。

対象としたのは 2010 年梅雨期に台湾から沖縄を含む領域で CReSS を用いて毎日実施したシミュレーション実験の結果である。この間、水平解像度 2.5 km で図 2 に示される領域を対象として毎日 36 時間にわたるシミュレーション実験を実施した。CReSS、SDSU の計算とも、雲氷の粒径分布を単分散の 2 モーメントでの粒径分布を、雪と霰については指数分布の 2 モーメントでの粒径分布を仮定して計算を実施した。

比較結果を図 2 に示す。観測結果 (図 2a) に比べてシミュレーション結果 (図 2b) では、降水システム近傍の上層雲の輝度温度が 20 K ほど低くなる傾向が見られた。雲頂輝度温度の頻度分布も、固相の凝結物を 1 モーメントで計算した結果に比べて観測結果との乖離が大きくなっている (図略) ことから、上層雲の雲頂付近での固体凝結物、すなわち雲氷の数濃度に問題があることが示唆される。格子点における雲氷の混合比が同じ値であっても、数濃度が大きな値であれば、平均粒径は小さく、光学的厚さは大きな値となってしまう。2 モーメントを用いた SDSU の計算では、降水システムの辺縁部において雲氷の数濃度が大きな値をとる領域が広がっているために、観測結果や 1 モーメントで計算した結果に比べて広い範囲に輝度温度の低い領域が広がったと考えられる。図 2c には SDSU の計算に際して、雲氷の混合比の分布はそのままとして、雲氷の数濃度を 0.0001 倍して計算を行った場合の輝度温度の水平分布を示している。輝度温度の低い部分が大幅に小さくなっており、雲頂輝度温度の頻度分布も大幅に改善されていることから、シミュ

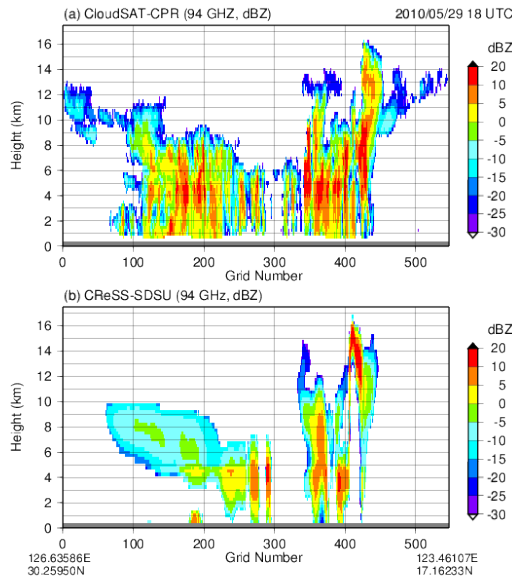


図 3. (a) 図 2 とほぼ同時刻 (2010 年 5 月 29 日 18 時) に CloudSat に搭載された 94 GHz 雲レーダ (CPR) により観測された図 2 中の白い実線の断面に沿った反射強度の鉛直断面図。(b) 同じ断面で CReSS のシミュレーション結果に SDSU を用いて算出した同じ周波数帯の反射強度の鉛直断面図。色が反射強度を示す。

レーション実験では観測結果と比べて雲氷の数濃度の分布に大きな乖離があることが考えられる。

一方、レーダ反射強度の鉛直断面では、計算における降水システムの周辺に広がる上層雲(アンビル)の領域が CloudSat-CPR の観測結果に比べて狭くなっていた(図 3)。雲氷の数濃度が大きな値であるために、平均粒径・レーダ反射強度の値とも小さくなり、観測結果や 1 モーメントで計算した結果に比べてアンビル域が狭くなったと考えられる。雲氷の数濃度を 0.01 倍、もしくは 0.001 倍と小さくした実験結果で同様の分布を描くと、高度 10 km 以上において上層雲に伴う反射強度が広がるようになり、反射強度の頻度分布が観測結果に近いプロファイルを示すようになった。

これらの結果から、CReSS の出力結果では雲氷の数濃度が大き過ぎるという問題があることが示唆される。今後、エアロゾル過程の導入、特に不均質核生成の部分のアルゴリズムを改良していくことで、雲氷の数濃度の改善を行っていく予定である。

(4) 研究成果のまとめ

雲解像モデル CReSS にエアロゾル輸送モデル SPRINTARS を結合させた CReSS-SPRINTARS の開発を行った。現時点ではエアロゾルの移流・拡散過程、乾性沈着過

程、湿性沈着過程、重力沈着過程の導入を行うことができ、このモデルを用いて福島第一原子力発電所から放出された粒子が北関東や福島県中通り地方に輸送されて沈着された過程を示すことが出来た。

しかしながら、当初予定していたエアロゾルを凝結核や氷晶核として雲水や雲氷の数濃度を制御する過程については実装することが出来なかった。特に液相において、2 モーメントの雲物理過程を用いるときちゃんと雨が生成されず、小さな雲粒が多く存在してしまうという結果となってしまった。この点については、現時点でも原因を検討しているが、未だ解決策は見いだせていない。科研費の研究期間は終了してしまっていたが、今後とも検討を続けていきたいと考えている。

一方、氷晶過程については、現在の CReSS では雲氷の数濃度に大きな問題があることが衛星観測との比較より得られた。地上降水量だけでなく、固相の雲粒が空中にある段階での検証を行う手段を得ることが出来るのは大きな進展である。凝結核化過程や氷晶核化過程が動作するようになった場合に、雨として地上に降ってくる前に、空中に雲氷として存在している段階で、雲解像モデルの中における雲物理過程の精度の評価が行えるためである。

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 1 件)

Nomura, M., K. Tsuboki and T. Shinoda: Impact of Sedimentation of Cloud Ice on Cloud-Top Height and Precipitation Intensity of Precipitation Systems Simulated by a Cloud-Resolving Model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 791-806, 2012, 査読有。

[学会発表](計 6 件)

Shinoda, T., H. Masunaga, M. Yamamoto, M. Kato, A. Higuchi, K. Tsuboki and H. Uyeda : Development of a Validation Method for a Cloud-Resolving Model Using Satellite Data of Infrared and Microwave Bands Asia Oceania Geosciences Society 2011 Annual Meeting, Taipei International Convention Center, Taiwan, AOGS 8th Annual Meeting 2011 AS04-D5-AM2-202B-004, p95, 12 Aug. 2011. (oral)

篠田太郎・増永浩彦・山本宗尚・加藤雅也・樋口篤志・坪木和久・上田 博: 衛星より観測される赤外・マイクロ波輝度温度を用いた雲解像モデルの結果の検討(その 2). 日本気象学会 2011 年度 春季大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 東京, 2011 年度春季大会講演予稿集 P217 (p.334), 2011 年 5 月 18 日 - 21 日, (ポスター)。

加藤雅也・篠田太郎・坪木和久・相木秀則： CReSS を用いた移流拡散シミュレーション. 日本気象学会 2011 年度 秋季大会, 名古屋大学東山キャンパス, 名古屋, 2011 年度秋季大会講演予稿集 A210 (p.78), 2011 年 11 月 16 日 - 18 日, (口頭).

Shinoda, T., H. Masunaga, M. K. Yamamoto, M. Kato, A. Higuchi, K. Tsuboki and H. Uyeda : Evaluation of simulation results of a cloud-resolving model using satellite data and a satellite simulator. 16th International Conference on Clouds and Precipitation (ICCP 2012), Leipzig, Germany, 13.2.5, 3 Aug. 2012. (oral)

Shinoda, T.: Evaluation of Simulation Results of a Cloud-Resolving Model Using Satellite Data and a Satellite Simulator. International Symposium on Heavy Rainfall over East Asia: Observation and Modeling at Cloud-resolving Scales, Seogwipo KAL Hotel, Jeju Island, Korea, September 6-7, 2012. (oral) 招待講演

篠田太郎・増永浩彦：衛星データと衛星シミュレータ SDSU により示された雲解像モデル CReSS における雲氷の粒径に関する問題点. 日本気象学会 2013 年度 春季大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 東京, 2013 年度春季大会講演予稿集 P419 (p.396), 2013 年 05 月 15 日 - 18 日, (ポスター).

〔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：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠田太郎 (SHINODA TARO)

名古屋大学・地球水循環研究センター・

准教授

研究者番号：50335022

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

竹村俊彦 (TAKEMURA TOSHIHIKO)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：90343326