

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 5月 13日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340133

研究課題名（和文） 衛星搭載アクティブセンサーによる雲微物理特性導出とその生成機構の解明

研究課題名（英文） Cloud microphysics retrieval and study of its generation mechanism by space-borne active sensors

研究代表者

岡本 創 (OKAMOTO HAJIME)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：10333783

研究成果の概要（和文）：

衛星搭載雲レーダとライダを組み合わせることで、氷雲の配向と形状を考慮した微物理特性抽出アルゴリズムを開発した。水平面に偏って配向している平板状の氷粒子と3次元空間にランダムに配向する氷粒子の混合状態をモデル化し、詳細な粒子の配向状態を考慮して、レーダとライダの波長における後方散乱係数を求めた。衛星搭載雲レーダとライダから、有効半径、氷水量、そして2つの氷粒子のタイプの混合比を全球で求めることができた。

研究成果の概要（英文）：

We developed the retrieval algorithm of ice microphysics by synergy use of space-borne cloud radar and lidar. Mixture of horizontally oriented ice plates and randomly oriented ice particles was considered. And we performed backscattering calculations of ice for CloudSat radar and CALIPSO lidar. Then we obtained global distribution of effective radius, ice water content and mass mixing ratio of oriented plates to the total ice water content.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2012年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	11,800,000	3,540,000	15,340,000

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、レーダ

1. 研究開始当初の背景

(1) 雲の微物理特性は、雲-放射フィードバック効果を通して気候システムに支配的な役割を果たしているが、その理解はいまだに

不十分であると言える。その主な理由は、従来の衛星搭載の受動型センサを、用いていたため鉛直を含めた雲の全球3次元分布が得られていなかったことが挙げられる。

(2) アクティブセンサといわれる雲レーダが1988年に登場したことで、この状況は、大きく改善されると期待されるようになった。特に課題代表者らの研究から、雲レーダとライダーを組み合わせる事で、単独にレーダだけの情報を利用する場合と比較して、雲微物理特性の推定精度を大きく向上させることが可能であることがわかってきた。

(3) これまでに、我々は2001年以来観測船「みらい」に雲レーダとライダーを搭載し、西部熱帯太平洋域、西部太平洋域の日本近海において観測を実施してきた。東京大学気候システム研究センター・国立環境研究所・地球フロンティアによって開発された大気大循環モデルの検証を、これらのデータによって行うことでアクティブセンサの有用性を示してきた。検証用には、リトリーバルアルゴリズムと同様の雲微物理特性、エアロゾル特性を組み入れた雲レーダ・ライダーシュミレータを開発した。鉛直方向の雲の確率的な重なり合いの状況を考慮する機能を導入した。比較検証の結果、大気大循環モデルは、上層雲の雲量を大きく過大評価していること、下層雲の雲量は過小評価すること、そして降水の頻度は著しく過大評価しているということがわかった。この要因として、モデルにおける対流活動の頻度や生成消滅機構にも問題があることがわかった。

(4) 2006年4月には衛星搭載雲レーダとライダーが打ち上げられ、全球観測が開始された。本課題開始当時、CALIPSO衛星搭載ライダーから雲を検出する手法は、NASA-Langleyによる標準雲マスクが存在した。オリジナルの水平解像度は333mだが、これをS/N比に応じて最大80kmまで水平平均するという特徴を持つ。このことと、ダスト等の雲への誤判定の問題から、雲量を非常に過大評価する傾向があった。雲の微物理特性を求めめるためには、CloudSat衛星に搭載された雲レーダとCALIPSOライダーの複合した雲マスクのデータが必要になるが、この複合マスクのデータも、雲過大評価の問題を引き継いでいた。

(5) 雲粒子の相の識別手法としては、これまでにNASA-Langleyチームによって開発されたものがあつた。これは雲の層全体で鉛直方向に偏光解消度を積分したものをを用いるもので、雲の層全体で1つの相しか決定できないといった問題があつた。また、水平面に偏って配向した板状氷粒子が存在する場合、水雲と誤判定されるという問題もあつた。

(6) 衛星搭載雲レーダから雲微物理特性を抽出するものとしては、雲レーダのみを用いる

ものがコロラド州立大学の方で開発されてCloudSatの標準プロダクトとして採用されていた。レーダ1波長の情報を用いるこの手法は、航空機観測との比較から、推定される微物理特性の結果に大きな誤差が含まれていることがわかってきた。

2. 研究の目的

(1) 我々は、CloudSat衛星に搭載された雲レーダと、CALIPSO衛星に搭載されたライダーを主に使用して、雲マスク、雲粒子タイプ、解析アルゴリズムを独自に開発し、上述の標準アルゴリズムに内在している問題点を解決することで、全球3次元の雲の検出、雲粒子タイプ識別、そして氷雲の微物理量の新しいプロダクトを作成することを目的にした。

(2) また、雲生成メカニズム解明を目的として、上記のCloudSat-CALIPSOの雲解析に加えて、雲生成要因として、エアロゾルと過飽和度の情報を合わせてプロダクトを作成することが重要となる。

3. 研究の方法

(1) 課題代表者岡本は、CloudSat衛星とCALIPSO衛星に適用可能な雲検出アルゴリズム、雲の相や氷粒子の形状・配向を反映した雲粒子タイプ識別アルゴリズム、そして、上の2つを同時に使用する氷粒子のサイズや氷水量等の氷微物理量抽出アルゴリズムを開発した。

(2) 雲マスクに関しては、2001年以来我々が観測データを取得し、また解析アルゴリズムを開発するのに利用してきた観測船「みらい」で取得されたデータに基づいて開発されたアルゴリズムを元に、衛星搭載アクティブセンサ用に改良することとした。また、雲量を過大評価する問題を克服することを目的として、水平解像度は固定することとした。

(3) 雲粒子タイプの識別手法開発には、多重散乱を計算可能な、Backward Monte Carlo法を用いる。観測データとの比較検証を通して、CALIPSOの偏光解消度と、鉛直方向における減衰量を求めて、その2つのパラメータから、雲粒子タイプの識別を行うことにした。

(4) 氷粒子の微物理特性を抽出アルゴリズムとして、課題代表者が開発してきた、地上の雲レーダから得られるレーダ因子と、ミューライダーから得られる後方散乱係数を組み合わせて、氷粒子の有効半径と氷水量を抽出するアルゴリズムを衛星用に改良することとした。このアルゴリズムは、ある程度高精度で氷粒子の微物理特性を推定可能であること

が、航空機による氷粒子の微物理量の直接測定データとの比較でわかっている。しかし、水平面に偏って配向した板状氷粒子が存在すると、通常の氷粒子よりも3桁程度まで大きな後方散乱の信号を与える可能性がある。つまり、従来のアルゴリズムでは板状氷粒子が卓越する領域では氷水量を著しく過大評価することになる。この問題の解決のため、まず、氷粒子の配向と形状を考慮した散乱参照テーブルを、雲レーダ用と、ライダー用に用意した。レーダ用には、Discrete Dipole Approximation法を用い、ライダー用には、幾何光学領域で、Physical Optics Approximationを取り入れることで、内部散乱と回折の影響を取り入れた後方散計算を可能とする散乱理論を開発した。これらの計算結果をレーダ・ライダーアルゴリズムに組み込んだ。本研究課題では、CloudSatのレーダ反射因子、CALIPSOの可視波長における後方散乱係数に加えて、可視波長の偏光解消度の情報の3つの入力パラメータを取り入れたレーダ・ライダーアルゴリズムを作成した。

(5) CloudSatやCALIPSOによる雲検出の解析結果の妥当性を検証には、CloudSat-CALIPSOと同じA-trainと呼ばれる軌道にあるAQUA衛星に搭載されているイメージャMODISセンサとの比較を用いることにした。MODISによる雲検出には、研究分担者中島のものを利用した。

(6) 雲生成要因を調べるために、アクティブセンサから抽出される雲微物理特性と、エアロゾル量と水蒸気量を解析する必要がある。エアロゾル微物理特性に対しては、CALIPSO衛星の2波長偏光のライダーの情報から、エアロゾル種類ごとの微物理特性を抽出する手法を開発した。このアルゴリズムは、観測船「みらい」に搭載されたCALIPSO衛星と同様の2波長偏光のライダーを用いてこれまでに課題代表者のグループで開発されたものを、衛星用に改良したものを利用した。

(7) 研究分担者石元によって開発された、雲生成要因の赤外サウンダAIRSセンサ用アルゴリズムを用いることで、晴天域や雲の上の過飽和度のデータ解析を実施した。このアルゴリズムの特徴として次の2つの点が挙げられる。まず従来のAIRSの標準プロダクトとして提供されているものの水平解像度が鉛直直下で45kmであったのに対して、今回初めて13.5kmと大幅に改善された水平解像度になっていることである。さらに従来の標準プロダクトでは晴天域でのみ水蒸気量が提供されていたが、今回初めて雲頂より上の水蒸気量も求めることが可能となっている。

4. 研究成果

(1) 雲検出アルゴリズムに関しては、標準プロダクトと比較して、ダスト等のエアロゾルの雲への誤判定を大幅に減少する事に成功していること、また固定された水平解像度を用いることで、CALIPSO衛星の解析の問題点であった下層雲と上層雲の過大評価の問題を回避できていることを確認した。この結果、標準プロダクトにおいては、全球平均で下層雲の雲量は最大で2倍程度の過大評価となっていることがわかった(Hagihara et al., 2010)。これらアクティブセンサによって求めた雲量と、従来のイメージャによる2次元の雲量の比較結果の検証を進めた。特にアメリカの研究機関NASA-GISSと、CALIPSOの標準プロダクト、と我々のものの3つの比較検証から、CALIPSO標準のものは著しい下層雲の過大評価を示したのに対し、我々の新しいアルゴリズムによる雲量は、ISCCPの日中晴天の雲検出結果と比較して、高い整合性を示していることが判明した(Rossow and Zhang 2010)。

(2) 雲粒子タイプ識別結果は、鉛直方向の連続した2つの減衰の影響を受けたライダー後方散乱係数の比と、偏光解消度の2つのパラメータを組み合わせることで、3次元空間にランダムに配向した氷粒子(3D-ice)、水平面に偏って配向している板状氷粒子(2D-plate)、そして温度0度以上の水粒子、温度0度以下の過冷却水の4種類を求めるアルゴリズムを完成することができた(Yoshida et al, 2010)。従来のNASA-Langleyの標準プロダクトによる粒子タイプの結果は、雲頂から雲底まで一つの粒子タイプを割り当てており、誤判定の問題が頻発していた。我々のものは、各高度ビンごとに雲粒子タイプを求めることが可能である。水粒子と氷粒子の出現頻度の全球解析を実施した結果、水粒子と氷粒子の比が同程度となるのが、温度-10度あたりになっていた。これが標準プロダクトでは、-20度くらいとなっていた。この差の原因は次のように説明することができる。-10度から-20度の温度領域では、2D-plateの出現頻度が大きいため、この識別を行っていないNASA-Langleyの標準プロダクトでは、この氷粒子タイプの水粒子への誤判定することになる。結果として、過冷却水の過大評価となっており、上記の氷と水の出現頻度が等しくなる温度の違いの原因があると考えられる。

(3) 氷粒子の高精度の微物理特性解析を目的として、まず散乱理論を開発して完全に水平に配向している2D-plateの後方散乱係数を含んだ参照テーブルを作成した。2D-plateが卓越するシーンでは、従来のアルゴリズム

では雲の中心部から雲底にかけては、解が見つからず解析不能となっていた。それに対して、2D-plate と 3D-ice の混合を考慮した新しいレーダ・ライダーアルゴリズムでは、レーダとライダーの両方のセンサで検出されている雲域全体で解を探すことが可能となっていた。この新しいアルゴリズムを全球データ解析に利用し、世界に先駆けて氷粒子の全球 3 次元分布を求めることができた(図 1)(Okamoto et al., 2010)。またレーダとライダーの感度の違いから、片方のセンサでしか観測されない雲領域に対しても、適用可能なようにレーダ・ライダーアルゴリズムを改良することができた。その結果、氷雲の全領域の微物理特性を抽出することができた(Sato and Okamoto 2011)。

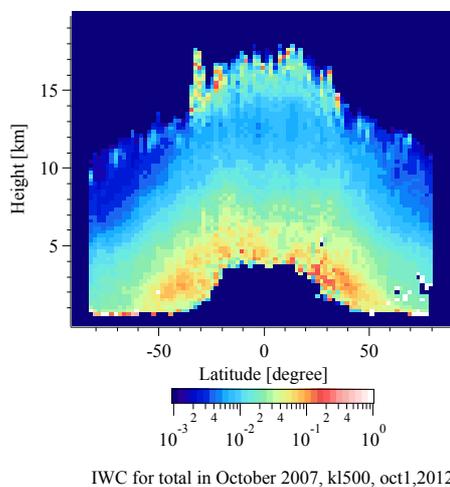


図 1 氷水量の全球分布の緯度高度断面図。

(4) さらに、板状氷粒子が水平面に対して板状氷粒子の上面の、水平面に対する傾きが分散しているモデルを考えて、その散乱特性を求めることに成功した。すべてのサイズの粒子が水平面に対して一定の角度分散を仮定するガウス分布モデルや、エネルギー散逸率と半径に依存して、水平面に対する傾きの分散を表す関数形の詳細が決まる Klett モデルを導入した。後方散乱特性の理論計算の結果、レーダ反射因子には配向の影響はあまり大きくないこと、それに対してライダーに関しては非常に大きい変化をもたらすことが判明した。

(5) CALIPSO ライダーは、観測開始から 2007 年 11 月までは、ほぼ鉛直真下 (0.3 度) に向けてレーザ光を照射していたが、それ以降は、鉛直直下から 3 度の傾きで照射した。これは板状氷粒子による強い後方散乱強度が頻繁に観測され、その散乱メカニズムが良く理解されていないため、この鏡面散乱が起きるのを避けようとしたためであった。このライダー

照射角を変更したことの後方散乱係数や偏光解消度の観測値に対する影響を 2006 年から 2009 年の 4 年間の CloudSat と CALIPSO のデータに対して調べることにした。その結果、可視波長におけるライダー後方散乱係数は、レーザ光を傾ける前と比べ、傾けた後では、特定の緯度高度帯で帯状平均値としては減少し、一方で偏光解消度は、増加していることが判明した。雲レーダの 4 年間のデータは、あまり大きな変化をしていないことがわかった。このようなライダーの変更に対応して 2D-plate の後方散乱が変化したことによると考えることができる。このような劇的な観測量の変化を含む期間にわたって、統一的な氷粒子の微物理特性解析を可能にするためには、CALIPSO 用参照散乱テーブルを、レーザ光の照射角度の偏光前後で、それぞれ 0.3 度用、3 度用の状況に対応したものを使用することが必要となる。これらの新しい参照テーブルを用いて全球解析を実施した結果、レーザ照射角度の変更前後で、氷水量は帯状平均値として 30% 程度以内で求めることがわかった(Okamoto et al., 2012)。

(6) CALIPSO 衛星の波長 532nm と 1064nm の 2 波長の後方散乱係数と、波長 532nm の偏光解消度の 3 つの情報をすべて用いて、エアロゾルタイプ毎の消散係数を求めるアルゴリズムを開発した。

(7) ライダーのデータからエアロゾル、雲とノイズを区別するために、ウェーブレットを導入し、エアロゾルの検出精度を向上させることができた。得られたエアロゾルの水平分布は、MODIS センサによるものと比較して、その妥当性が検証された。

(8) エアロゾルの光学的厚さを抽出した結果、陸上付近の海上でも連続的な光学的厚さが導出されており、これはアクティブセンサのみでしか達成できない成果であると言える。光学的厚さの比較結果は、海上では MODIS より大きく、陸上では小さい傾向があった。

(9) AIRS センサの温度・水蒸気解析を実施し、高精度の過飽和度の 3 次元分布を導出した。氷粒子に対する過飽和度と、CloudSat-CALIPSO によって検出された氷雲の領域が良い対応を示していることが判明した。

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 26 件)

① Sato, K., and H. Okamoto. (2013), A

- detection and analyses of hydrometer properties from EarthCARE data, Proc., international radiation symposium, Current problems in Atmospheric radiation (IRS 2012), Proc. international radiation symposium, AIP conference proceedings 査読あり (in press).
- ② Hagihara, Y., and H. Okamoto, (2013), Global Cloud Distribution Revealed by Combined Use of CloudSat/CALIPSO: Comparison of Using CALIPSO Version 2 and 3 Data, Current problems in Atmospheric radiation (IRS 2012), Proc. international radiation symposium, AIP conference proceedings 査読あり (in press).
- ③ Okamoto, H., K. Sato, Y. Hagihara and T. Nishizawa, (2013), Development of level 2 algorithms for EarthCARE CPR/ATLID, Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS2012), Proc. International Radiation Symposium, AIP conference proceedings, 査読あり (in press).
- ④ Okamoto, H., (2013), Active remote sensing of cloud microphysics, Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS2012), Proc. International Symposium, AIP conference proceedings, 査読あり (in press).
- ⑤ Borovoi, A., A. Konoshonkin, N. Kusutova and H. Okamoto, (2012), Backscattering Mueller matrix for quasi-horizontally oriented ice plates of cirrus clouds: application to CALIPSO signals, Opt. Express, 査読あり, 20, 28222-28233.
- ⑥ Iwasaki, S., T. Shibata, H. Okamoto, H. Ishimoto, and H. Kubota, (2012), Mixtures of stratospheric and overshooting air measured using A-Train sensors, J. Geophys. Res., 査読あり 117, D12207, doi:10.1029/2011JD017402.
- ⑦ Borovoi, A., A. Konoshonkin, N. Kustova, H. Okamoto, (2012), Lidar backscattering by quasi-horizontally oriented hexagonal ice plates, Reviewed and Revised Papers, 26th International Laser Radar Conference., 査読あり, 379-382.
- ⑧ Jin, Y., K. Kai, H. Okamoto, Y. Hagihara, H. Zhou, (2012), Dust and ice occurrence ratios over dust sources observed by space/ground based active remote sensor, Reviewed and Revised Papers, 26th International Laser Radar Conference., 査読あり, 493-496.
- ⑨ Sato, K. and H. Okamoto, (2012), Numerical and theoretical analysis of hydrometeor properties observed by spaceborne lidar and radar., Reviewed and Revised Papers, 26th International Laser Radar Conference, 査読あり, 737-740.
- ⑩ Okamoto, H., K. Sato, Y. Hagihara, T. Matsumoto, A. Borovoi, (2012), Retrieved ice microphysics from CALIPSO and CloudSat and horizontally oriented ice plates, Reviewed and Revised Papers, 26th International Laser Radar Conference, 査読あり, 687-690.
- ⑪ Iguchi, T., T. Nakajima, A. Khain, K. Saito, T. Takemura, H. Okamoto, T. Nishizawa and W. -K., Tao, (2012), Evaluation of cloud microphysics in JMA-NHM simulations using bin or bulk microphysical schemes through comparison with cloud radar observations, J. Atmos. Sci., 査読あり, 69, 2566-2586, doi: 10.1175/JAS-D-11-0213.1.
- ⑫ 中島孝, (2012), 地球観測衛星データを用いた雲物理量・雲特性の導出の手法とアルゴリズムの開発 — 2011年度堀内賞受賞記念講演 —. 天気, 査読あり, 59.11, 3-16.
- ⑬ Sato, Y., T. Y. Nakajima, and T. Nakajima, (2012), Investigation of the vertical structure of warm cloud microphysical properties using the cloud evolution diagram, CFODD, simulated by three-dimensional spectral bin microphysical model. Journal of the Atmospheric Sciences, 査読あり, 69, 2012-2030.
- ⑭ Ishimoto, H., K. Masuda, Y. Mano, N. Orikasa, A. Uchiyama, (2012), Irregularly shaped ice aggregates in optical modeling of convectively generated ice clouds, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 査読あり, 113, 632-643.
- ⑮ Sato, K., and H. Okamoto, (2011), Refinement of global ice microphysics using spaceborne active sensors, J. Geophys. Res.- Atmosphere, 査読あり, 116, D20202, doi: 10.1029/2011JD01588.
- ⑯ Watanabe, M., H. Shiogama, M. Yoshimori, T. Ogura, T. Yokohata, H. Okamoto, S. Emori, and M. Kimoto, (2011), Fast and slow timescales in the tropical low-cloud response to increasing CO2 in two climate models, Climate Dynamics, 査読あり, volume 39, issue 7-8, 1627-1641, DOI: 10.1007/s00382-011-1178-y.
- ⑰ Nakajima, T. Y., T. Tsuchiya, H. Ishida, and H. Shimoda, (2011), Cloud detection performance of spaceborne

- visible-to-infrared multispectral imagers. *Applied Optics*, 査読あり, 50, 2601-2616.
- ⑱ Okamoto, H., K. Sato, Y. Hagihara, (2010), Global analysis of ice microphysics from CloudSat and CALIPSO: incorporation of specular reflection in lidar signals, *J. Geophys. Res.*, 査読あり, 115, D22209, doi:10.1029/2009JD013383.
- ⑲ Hagihara, Y., H. Okamoto, R. Yoshida, (2010), Development of a combined CloudSat/CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution, *J. Geophys. Res.*, 査読あり, doi:10.1029/2009JD012344, 115, D00H33.
- ⑳ Yoshida, R., H. Okamoto, Y. Hagihara, and H. Ishimoto, (2010), Global analysis of cloud phase and ice crystal orientation from CALIPSO data using attenuated backscattering and depolarization ratio. *J. Geophys. Res.*, 査読あり, doi:10.1029/2010JD014032, 115, D00H32.
- ㉑ Sato, K., H. Okamoto, T. Takemura, H. Kumagai and N. Sugimoto, (2010), Characterization of ice cloud properties obtained by shipborne radar/lidar over the tropical western Pacific Ocean for evaluation of an atmospheric general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 査読あり, doi:10.1029/2009JD012944, 115, D15203.
- ㉒ Deng, M., G. G. Mace, Z. Wang and H. Okamoto, (2010), Tropical Composition, Cloud and Climate Coupling Experiment validation for Ice cloud profiling retrieval using CloudSat radar and CALIPSO lidar, *J. Geophys. Res.* 査読あり, doi:10.1029/2009JD013104, 15, D00J15.
- ㉓ Nishizawa, T., N. Sugimoto, T. Matsui, A. Shimizu and H. Okamoto, (2010), Algorithms to Retrieve Optical Properties of Three-Component Aerosols from Two-Wavelength Backscatter and One-Wavelength Polarization Lidar Measurements: Considering Nonsphericity of Dust, *J Quant Spectrosc radiative Transfer*, (査読あり) doi:10.1016/j.jqsrt.2010.06.002.
- ㉔ Nakajima, T. Y., K. Suzuki, and G. L. Stephens, (2010), Droplet growth in warm water clouds observed by the A-Train. Part II: A Multi-sensor view. *J. Atmos. Sci.*, 査読あり, 67, 1897-1907.
- ㉕ Nakajima, T. Y., K. Suzuki, and G. L. Stephens, (2010), Droplet growth in warm water clouds observed by the A-Train. Part I: Sensitivity analysis of the

MODIS-derived cloud droplet size. *J. Atmos. Sci.*, 査読あり, 67, 1884-1896.

- ㉖ Ishimoto, H., Y. Zaizen, A. Uchiyama, K. Masuda, Y. Mano, (2010), Shape modeling of mineral dust particles for light-scattering calculations using the spatial Poisson-Voronoi tessellation, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 査読あり, 111, 2434-2443.

[学会発表] (計 36 件)

- ① Okamoto, H., K. Sato and Y. Hagihara (2012), Multi-year analysis of ice microphysics derived from CloudSat and CALIPSO, American Geophysical Union fall meeting, 2012 年 12 月 7 日, アメリカ, サンフランシスコ.
- ② Okamoto, H. (2012), Active remote sensing of cloud microphysics, International Radiation Symposium, 2012 年 8 月 6 日, ドイツ, ベルリン.
- ③ Okamoto, H., K. Sato, Y. Hagihara and M. Hirakata, (2010), Ice cloud microphysics from CloudSat and CALIOP: Analysis of oriented crystals (2010), 2010 年 7 月 5 日, ロシア, サクトペテルブルグ.

[その他]

ホームページ等

<http://atmosph.riam.kyushu-u.ac.jp/cloudsatcalipso/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 創 (OKAMOTO HAJIME)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：10333783

(2) 研究分担者

中島 孝 (NAKAJIMA TAKASHI)

東海大学・情報デザイン工学部・教授

研究者番号：70408029

石元 裕史 (ISHIMOTO HIROSHI)

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・主任研究官

研究者番号：70281136

(3) 連携研究者

佐藤 可織 (KAORI SATO)

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：00584236