

## 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 24年 6月 1日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究（B）海外学術調査

研究期間：2009年度～2011年度

課題番号：21403006

研究課題名（和文）北極域の混合相雲の放射・微物理特性の解明研究

研究課題名（英文）A study on radiative and microphysical properties of mixed-phase clouds in the arctic

## 研究代表者

塩原 匡貴（SHIOBARA MASATAKA）

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号：60291887

研究成果の概要（和文）：北極域の対流圏下層に出現する混合相雲に着目し、その放射特性と微物理特性の関係を調べるため、北極スバル諸島ニーオルスンのツェッペリン観測所（高度 474m）に各種雲粒子計測機器を設置し、雲粒子の直接観測を行った。2011年6月9日の観測では典型的な混合相の雲を観測することができた。解析の結果、この混合相雲は水粒子を主体とする半径 15 $\mu\text{m}$  前後の粒子群と氷粒子を主体とする等価半径 100 $\mu\text{m}$  前後の粒子群により構成される粒径分布を示し、粒子数では水粒子が卓越し、体積密度では氷粒子が卓越した。このことから、混合相雲では、雲のアルベド効果は主に水粒子群により支配されるが、雲-大気熱収支過程では氷粒子群の寄与がより重要であることが示唆された。

研究成果の概要（英文）： In order to investigate the relationship between radiative and microphysical properties of mixed-phase clouds in the lower troposphere of the arctic, we have performed an intensive observation at the Norwegian Zeppelin Observatory (474 m above m.s.l.) in Ny-Alesund, Svalbard. Typical mixed-phase clouds appeared on 9 June 2011, and were measured by cloud microphysics probes installed at the observatory. In-situ measurements showed a bi-modal size distribution of cloud particles; water droplets with radii around 15 $\mu\text{m}$  and ice-dominant mixed-phase particles with equivalent radii around 100 $\mu\text{m}$ . Thus the result has suggested that the cloud albedo effect is dominated by water droplets and the contribution of ice particles is rather important in the cloud-atmosphere heat balance process.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2010年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	13,400,000	4,020,000	17,420,000

研究分野： 大気物理学

科研費の分科・細目： 気象・海洋物理・陸水学

キーワード： 北極、混合相雲、雲放射特性、雲微物理特性、ニーオルスン

## 1. 研究開始当初の背景

雲は地球の気候形成において重要な役割

を担う。すなわち、雲の存在は地表面-大気システムにおいて極めて大きな放射効果を

示し、一般に、地球を冷却する方向に作用する。そのため、将来の気候変化を予測する上で、雲は地球温暖化をもたらすと考えられる温室効果気体や雲の生成過程に関与し雲の放射特性を変化し得るエアロゾルと同等以上に慎重に取り扱われる必要があり、その実態解明が急がれてきた。このような背景から、1990年代以降、欧米を中心とする大型プロジェクト等を通して、これまで多くの研究がなされてきた(WCRP, ISCCP, FIRE, GEWEX, ARM)。特に、北極域においては、SHEBA や ASCYS 等の研究プロジェクトが成果をあげてきたが、近年さらに、水収支、エネルギー収支の観点から混合相雲の振る舞いが注目されている。すなわち、北極域では混合相雲が多く存在することが現場観測から認識されるようになってきたが、水雲や氷雲と異なり、その放射特性や微物理特性については不明な点が多い。また、氷粒子の種まき作用による混合相雲の氷化促進過程など未解明の現象も研究対象として注目されている。しかしながら、その重要性にもかかわらず、極域を対象とした研究は中低緯度に比べて未だに極めて少ないのが現状である。

## 2. 研究の目的

雲は気候変化の将来予測における不確定性をもたらす大きな要因の一つとして重要視されている。しかし、雲の多様性、複雑性から観測による実態把握が困難なこともあり、極域の雲についての光学特性やその変動特性については、いまだ十分に理解されていない。そこで、本研究計画では、北極域に出現する雲のうち特に混合相雲(水粒子と氷粒子の混合)に着目して、その放射特性(可視域～近赤外域での光学的厚さと非対称因子)と微物理特性(雲粒子の有効半径、雲水量)を明らかにすることを目的とし、さらに混合相雲の氷化過程におけるそれらの物理特性の変化やエアロゾルとの相互作用に関する研究を主に現場での地上観測に基づいて行うものである。

## 3. 研究の方法

本研究の調査研究地域として、北極・スバル諸島ニューオルスンを選定した。現地ではすでに国立極地研究所により、スカイラジオメータ、マイクロパルスライダ、全天カメラを用いた地上リモートセンシングによる光学観測が継続的に実施されている。これらの観測と同期させて、混合相雲の微物理特性およびエアロゾルとの相互作用に関する短期集中観測を実施した。

### (1) 山岳観測所での混合相雲の観測

北極域で出現する雲のうち、特に混合相雲に着目し、その放射特性と微物理特性の関係について調べるため、航空機観測で使用する

雲粒子プローブ等の測器をニューオルスンにあるノルウェー極地研究所が管理するツェッペリン観測所(高度474m)に設置し、雲の微物理量の測定を2011年5～6月にかけて行った。なお、当初計画では北極・ニューオルスンでの観測を2010年5～6月に実施予定だったが、同年4月のアイスランド火山噴火の影響により観測機材の輸送が困難と判断されたために、本観測を翌年に延期し、2011年5～6月に実施することになった。

### (2) 使用測器

雲の微物理量を測定するため航空機用雲粒子プローブ(CAPS: Cloud, Aerosol and Precipitation Spectrometer, DMT社)、航空機用ガーバー式雲水量計(PVM-100: Gerber Particulate Volume Monitor)、および雲粒子顕微鏡カメラ(CPM: Cloud Particle Microscope)を用いた。CAPSは、FSSP-100と300相当のCAS(Cloud and Aerosol Spectrometer)と2D-OAP相当のCIP(Cloud Imaging Probe)から成っている(Baumgardner et al, 2001)。CASは、前方及び後方への光散乱を測定して粒径を推定する測器で測定粒径域は $0.3\sim 50\mu\text{m}$ である。CIPは、1次元のアレーセンサー(64要素、分解能 $25\mu\text{m}$ )を用いて通過粒子の影を記録する測器で測定粒径域は $25\mu\text{m}\sim 1.55\text{mm}$ である。PVM-100は、水雲用の測器で有効半径と雲水量を測定する測器である。CPMは、本研究計画において新たに開発された測器で、高倍率顕微鏡を用いた雲粒子撮像装置である。測定粒径域は $2\sim 50\mu\text{m}$ であるが、測定個数が少なく、今回の解析では形状の判別のみを使用した。

### (3) CAPS-CASのデータ処理

今回測定された粒子は、大部分がコラム状の粒子であった。残りは、水滴、Aggregateした粒子、不規則形状粒子であった。2Dプローブのデータ処理では、Circular Reconstruction(Heymsfield & Parrish, 1978)がよく使われるが、ここでは大部分がコラム状であることが既知であるので、楕円を仮定してRe-Constructionを行った。CAPS-CIPのデータ解析(粒子解析)のために新たにプログラムを開発した。粒子の形状として楕円を仮定して、コラム状粒子の長軸、短軸比を出せるようにした。粒子の判別は、(1)楕円の長軸と短軸の比、(2)測定周囲長/等価面積円半径、(3)長軸と短軸の比から推定したコラム粒子の周囲長と測定周囲長の比を参考にコラム状粒子、aggregateした粒子、水滴、その他に分類した。

氷水量の計算は、コラム粒子に対しては、体積をMitchell & Arnott(1994)、密度をHeymsfield(1972)の最大長との関係式を使用し、それ以外は、Cunningham(1978)およびBoudala et al(2002)の式を使った。

#### 4. 研究成果

北極・ニーオルスンにて実施した混合相雲の集中観測では観測例は少ないものの良好なデータが得られた。特に、ツェッペリン観測所（標高 474m）での雲粒子直接測定 of データ解析から、次のような研究成果が得られた。

##### (1) 観測状況

5月13日までに一部の測器の調整を除き観測体制に入ったが、観測機会に恵まれず6月になりようやく観測ができた。6月1,2日（擾乱に伴う雲）、4日（水雲）、7日（山岳波に伴う雲）、9,10日（寒気流入に伴う下層雲）に観測することができた。雲が観測されたときの気温は $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ 、湿度は90~100%であった。6月9日に観測された雲が、典型的なものであるため、この日のデータについて詳しく調べた。

##### (2) 観測結果

図1に雲水（LWC）、雲氷（IWC）、両者の和（TWC）の時間変化を示した。図2に、全雲水・氷量への粒形毎の寄与を示した。今回の観測は、雲の下層しか観測していないためか、全雲水・氷量は、 $0.1(\text{g}/\text{m}^3)$ 以下で少ない。水滴と氷粒子の割合は、どちらが一時的に多いと言うことはなく両者が共存していた。氷粒子の形としてはコラム状の粒子が非常に多く、雲水量（IWC）への寄与も多かった。CIPで測定された $75\mu\text{m}$ 以上（3画素以上）の粒形の割合を調べると $75\mu\text{m}$ を超える水滴（丸い粒子）が個数で5~10%存在していた（図3）。コラム状、Aggregateした粒子以外の割合は非常に少なかった。粒子数では水粒子が卓越し、体積密度では氷粒子が卓越していることから、混合相雲では、雲のアルベド効果は主に水粒子群により支配されるが、雲-大気熱収支過程では氷粒子群の寄与がより重要であることが示唆される。

図4に2011年6月9日の粒径分布を時間変化が分かるように重ねて示した。図から分かるようにエアロゾル、水滴、氷粒子に対応したピークが見られる。図1から分かるように6時頃から徐々に全雲水量が増え変動しながら9時前後に最も多くなり、その後、減少しているが、これに対応して、粒径分布の変化が観測されている。6時前後は $1\sim 10\mu\text{m}$ 域の個数濃度が高く、水雲の粒形は小さく、氷粒子はほとんどない。これは、エアロゾルが水雲に成長している発達段階に対応している。その後、氷粒子の比率が徐々に増加し、水雲の粒径が大きくなる。また、 $1\sim 10\mu\text{m}$ 域の個数濃度が減少し、エアロゾル域の粒径は大きくなっている。それに続いて、氷粒子の比率が最大となり、また、水雲の粒径も最大となる。その時、 $1\sim 10\mu\text{m}$ 域の個数濃度は最少となる。これが成熟期に対応していると思われる。その後、氷粒子の比率が減少し、水雲の粒径も減少し、 $1\sim 10\mu\text{m}$ 域の個数濃度は

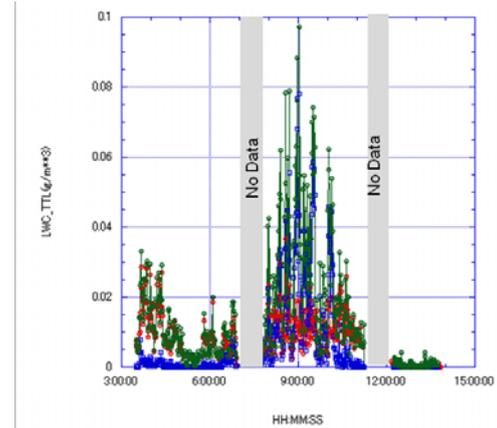


図1 雲水・氷量の時間変化。赤は雲水量、青は雲氷量、緑は両者の和

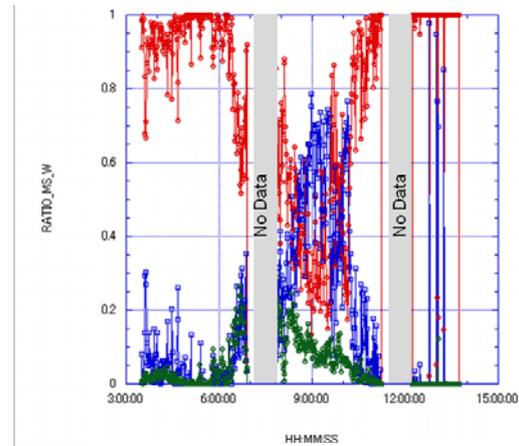


図2 雲水・氷量への粒形毎の寄与率

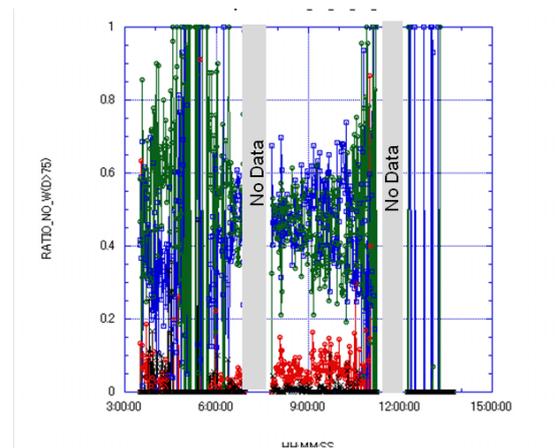


図3 粒形毎粒子数の割合（CIPの3画素以上）

やや増加している。徐々に衰弱しているものと思われる。更にその後、氷粒子は、ほとんどなく、水雲のピークもなくなり、 $1\sim 10\mu\text{m}$ 域の個数濃度が増加している。この時期は、消滅期に対応しているものと思われる。

### (3) 光学特性

測定された粒形毎の個数濃度を元に、Yang et al (2000, 2005) を使って光学特性 (散乱係数、一次散乱アルベド、Asymmetry factor) を計算し、水滴、氷粒子の割合に応じてどう変わるか調べた。

消散係数、吸収係数とも、粒子の増減に応じて変化する。消散係数は、波長依存性が小さく、吸収係数は、複素屈折率の波長依存性に応じて増減の幅が変化していた。吸収係数の変化は、 $1\mu\text{m}$  以上の波長で見られ、これは、水と氷の屈折率の波長依存性の差を反映したものである。 $1.6\mu\text{m}$  や  $2.2\mu\text{m}$  付近の波長で氷の量の変化に対して大きく変化する。

図5に波長  $1675\text{nm}$ 、 $2250\text{nm}$  での一次散乱アルベド (SSA) の時間変化を示した。 $1575\text{nm}$  では、水滴と氷粒子の SSA には  $0.2$  程度差があり、氷粒子の割合の増加に応じて SSA が最大  $0.05$  程度水滴からずれる。 $2250\text{nm}$  では、水滴と氷粒子の SSA の差は、 $0.1$  程度であり、氷粒子の割合に応じて変化するが、変動幅は、 $1575\text{nm}$  に比べ小さい。

### (4) まとめ

2011年5、6月にニーオルスンにある Zeppelin 観測所 (高度  $474\text{m}$ ) で、混合相雲の観測を行った。観測機器としては、CAPS-CAS/CIP、PMV-100、CPM を使用した。混合相雲を観測したときの気温は  $-5\sim 0^\circ\text{C}$ 、湿度は  $90\sim 100\%$  であった。CAPS-CAS で測定される粒径分布と CAPS-CIP で測定される粒径分布は、つながっており、半径  $0.3\sim 300\mu\text{m}$  の範囲の粒径分布を得ることができた。

測定された粒径分布は、半径  $25\mu\text{m}$  を境に粒径分布は大きく変わっており、小さい方は水滴に、大きな方は主に氷粒子に対応していると思われる。特に、2011年6月9日の例では、この時の混合相雲は水粒子を主体とする半径  $15\mu\text{m}$  前後の粒子群と氷粒子を主体とする半径  $100\mu\text{m}$  前後の粒子群により構成される粒径分布を示し、粒子数では水粒子が卓越し、体積密度では氷粒子が卓越した。測定された粒径分布は、雲の発達・衰弱過程を反映したものであると思われる。また、このことから、混合相雲では、雲のアルベド効果は主に水粒子群により支配されるが、雲-大気熱収支過程では氷粒子群の寄与がより重要であることが示唆された。

測定した粒径分布を元に、消散係数、吸収係数、一次散乱アルベド (SSA)、Asymmetry factor を計算し、雲水・氷量に対する変化を調べた。その結果、リモートセンシングの観点から、雲水・氷量を推定するのに使えそうなのは、水蒸気や  $\text{CO}_2$  などの吸収帯位置を考慮すると、従来から使われている  $1.6\mu\text{m}$  や  $2.2\mu\text{m}$  であることが再確認できた。

雲粒子顕微鏡カメラによる粒子形状計測では、雲粒子を浮遊した状態でそのまま撮影

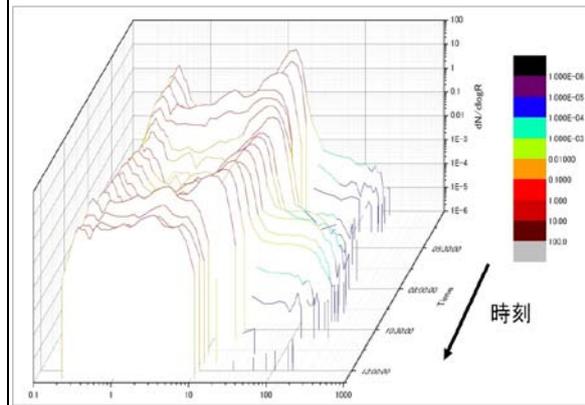
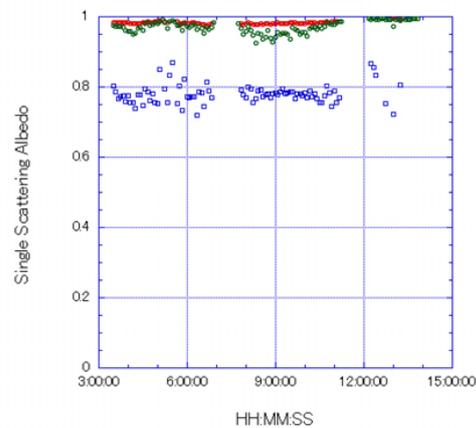


図4 2011年6月9日の粒径分布の時間変化

### (a) $1575\text{nm}$



### (b) $2250\text{nm}$

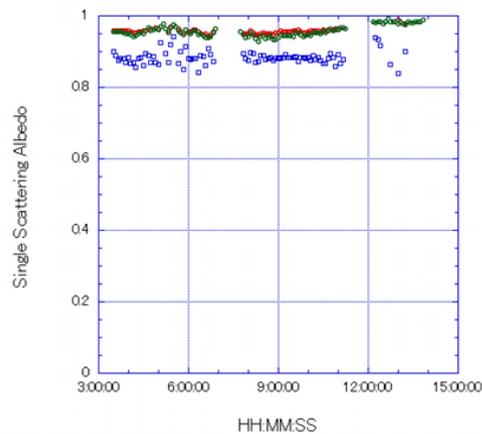


図5 一次散乱アルベド(SSA)の時間変化。赤が水滴粒子、青が氷粒子、緑が両者が混合している場合

できるような顕微鏡カメラシステムを開発し、2011年5-6月の混合相雲観測に用いた。その結果、CAPSと同様、直径  $10\sim 20\mu\text{m}$  にモードを持つ粒径分布が得られ、その映像の特

徴からこの微粒子領域の雲はほとんど水雲で構成される様子が見出された (図6)。

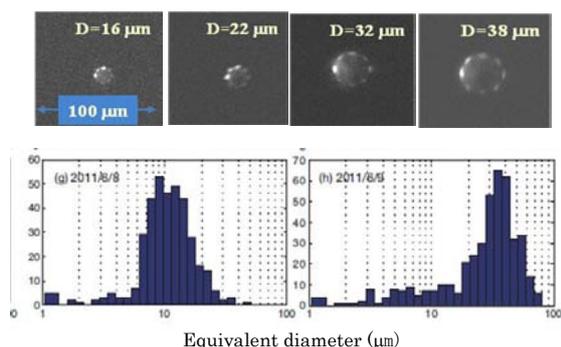


図6 雲粒子顕微鏡カメラ (CPM) で観測された個々の粒子像 (上図) と粒径分布 (下図)。半径約 50 $\mu\text{m}$  以下の雲粒子はほぼ水滴であると判定された。

## 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10件)

- ① Hoffmann, A., C. Ritter, M. Stock, M. Shiobara, A. Lampert, M. Maturilli, T. Orgis, R. Neuber, and A. Herber, 2009: Ground-based lidar measurements from Ny-Alesund during ASTAR 2007. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 9059-9081.
- ② Ishimoto, H., K. Masuda, Y. Mano, N. Orikasa, A. Uchiyama, 2012: Irregularly shaped ice aggregates in optical modeling of convectively generated ice clouds, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **113**, 632-643.
- ③ Lampert, A., M. Shiobara, (9<sup>th</sup>) et al., 2010: Lidar characterization of the Arctic atmosphere during ASTAR 2007: four cases studies of boundary layer, mixed-phase and multi-layer clouds. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 2847-2866.
- ④ Lampert, A., M. Shiobara, (7<sup>th</sup>) et al., 2011: Inclined lidar observations of boundary layer aerosol particles above the Kongsfjord, Svalbard. *Acta Geophysica*, doi:10.2478/s11600-011-0067-4.
- ⑤ Mazzola, M., M. Shiobara, (11<sup>th</sup>) et al., 2012: Evaluation of sun photometer capabilities for retrievals of aerosol optical depth at high latitudes: The POLAR-AOD intercomparison campaigns. *Atmos. Environ.*, **52**, 4-17.
- ⑥ Saha, A., M. Shiobara, (10<sup>th</sup>) et al., 2010: Pan-Arctic sunphotometry during the ARCTAS-A campaign of April 2008.

*Geophys. Res. Lett.*, **37**, L05803, doi:10.1029/2009GL041375.

- ⑦ Shupe, M.D., M. Shiobara, (7<sup>th</sup>) et al., 2011: Clouds at arctic atmospheric observatories. Part I: Occurrence and macrophysical properties. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 626-644.
- ⑧ 青木一真, 矢吹正教, 塩原匡貴, 2010: スカイラジオメーターを使ったニーオルスンにおけるエアロゾルの光学的特性の長期観測. *南極資料*, **54**, 882-889.
- ⑨ 塩原匡貴, 矢吹正教, 山野牧, 青木一真, 小林拓, 2010: ニーオルスンでのスカイラジオメータ観測に基づく 2006 年および 2007 年の春季エアロゾルの光学特性. *南極資料*, **54**, 890-898.
- ⑩ 矢吹正教, 2010: 極域対流圏の雲とエアロゾル. *エアロゾル研究*, **25**, 234-239.

[学会発表] (計15件)

- ① Sakami T., A. Uchiyama, A. Yamazaki, and R. Kudo, 2010: Retrieval methods of microphysical and optical properties of cloud vertical profiles from radiances measured by ground-based observations at a specific point, Proceedings of the 16th CERE International Symposium on Climate Change Studies through activities of SKYNET and Virtual Laboratory for Climate Diagnostics, 21-23 October 2010, Okinawa, Japan.
- ② Shiobara, M., M. Yabuki, M. Yamano, K. Aoki, and H. Kobayashi, 2009: Long-term monitoring of aerosol optical properties by ground-based remote-sensing at bi-polar sites. MOCA-09 IAMAS/IAPSO/IACS Joint Assembly, 19-29 July 2009, Montreal, Canada.
- ③ Shiobara, M., 2010: An observational study on cloud-aerosol interaction in Ny-Alesund. Japan-Norway Joint Workshop, 11-12 March 2010, Tromso, Norway.
- ④ Shiobara, M., A. Uchiyama, A. Yamazaki, H. Kobayashi, and M. Yabuki, 2010: Field experiment of cloud-aerosol interaction study planned for May 2011 in Ny-Alesund, Svalbard. 2nd International Symposium on Arctic Research, 7-9 December 2010, Tokyo, Japan.
- ⑤ Shiobara, M., A. Uchiyama, A. Yamazaki, H. Kobayashi, and M. Yabuki, 2011: Field experiment for cloud-aerosol interaction study in the Arctic Svalbard. 2nd Atmospheric System Research Science Team Meeting, 28-31 March 2011, San Antonio, TX, USA.

- ⑥ Shiobara, M., A. Uchiyama, A. Yamazaki, and H. Kobayashi, 2011: In-situ cloud measurements performed at Zeppelin Station in May-June 2011. 10th Ny-Alesund Seminar, 25-26 October 2011, Kjeller, Norway.
- ⑦ Shiobara, M., A. Uchiyama, A. Yamazaki, H. Kobayashi, 2011: Mixed-phase cloud observation in Ny-Alesund, Svalbard: Preliminary results from the May-June 2011 field experiment. AGU Fall Meeting, 5-9 December 2011, San Francisco, CA, USA.
- ⑧ Shiobara, M., H. Kobayashi, A. Yamazaki, A. Uchiyama, 2012: In-cloud and below-cloud aerosol characteristics and mixed-phase cloud microphysics during the May-June 2011 field experiment in Ny-Alesund, Svalbard. 92nd AMS Annual Meeting, 22-26 January 2012, New Orleans, LA, USA.
- ⑨ Uchiyama A., A. Yamazaki, M. Shiobara, and H. Kobayashi, 2012: Microphysical Properties of Boundary Layer Mixed-Phase Cloud Observed in Ny-Alesund, Svalbard, 92nd American Meteorological Society Annual Meeting, 22-26 January 2012, New Orleans, LA, USA.
- ⑩ Uchiyama A., A. Yamazaki, M. Shiobara, and H. Kobayashi, 2012: Microphysical properties of boundary layer mixed-phase Cloud Observed in Ny-Alesund, Svalbard (observed cloud micro-physics and calculated optical properties), Atmospheric System Research Science Team Meeting, 12-16 March 2012, Arlington, VA, USA.
- ⑪ 内山明博、山崎明宏、塩原匡貴、小林拓、2011：北極・ニーオルスン観測基地での混合相雲の微物理特性の測定と放射特性（1）、日本気象学会 2011 年秋季大会、2011.11.16-18、名古屋。
- ⑫ 小林拓、塩原匡貴、内山明博、山崎明宏、2011：雲粒子顕微鏡による混合相雲観測、第34回極域気水圏シンポジウム、2011.11.14、立川。
- ⑬ 坂見智法、内山明博、山崎明宏、工藤玲、2011：定点放射輝度観測による鉛直雲特性量の推定、極域の雲の衛星観測に関する研究集会、国立極地研究所、2011年1月、東京
- ⑭ 塩原匡貴、内山明博、山崎明宏、小林拓、2011：北極ニーオルスンにおける混合相雲観測－2011年5-6月の観測結果、第34回極域気水圏シンポジウム、2011.11.14、立川。
- ⑮ 山崎明宏、内山明博、坂見智法、工藤玲、

塩原匡貴、小林拓、2011：スカイラジオメーターが観測した北極域混合相雲集中観測期間中のエアロゾル光学特性、日本気象学会 2011 年秋季大会、2011.11.16-18、名古屋。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

塩原 匡貴 (SHIOBARA MASATAKA)  
国立極地研究所・研究教育系・准教授  
研究者番号：60291887

### (2) 研究分担者

内山 明博 (UCHIYAMA AKIHIRO)  
気象庁気象研究所・気候研究部・室長  
研究者番号：50354460  
小林 拓 (KOBAYASHI HIROSHI)  
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授  
研究者番号：20313786

### (3) 連携研究者

山崎 明宏 (YAMAZAKI AKIHIRO)  
気象庁気象研究所・気候研究部・主任研究官  
研究者番号：40278106  
坂見 智法 (SAKAMI TOMONORI)  
気象庁気象研究所・気候研究部・研究官  
研究者番号：00391227  
矢吹 正教 (YABUKI MASANORI)  
京都大学生存圏研究所・助教  
研究者番号：80390590