

2013年秋季「極域・寒冷域研究連絡会」の報告

—北極海の雲・降水の観測：新型レーダーによる展望—

1. はじめに

雲は放射を介して気象や気候に影響しているが、雲の性質によってその影響の仕方が変わる。雲の様々な特徴は水循環を表す指標として大いに価値があり、レーダーはそれらを観測するための欠かせない測器である。北極域においては極域温暖化増幅に関連して、現場観測による雲・降水システムの役割の解明が必要であり、日本独自の雲/降水レーダー観測が世界的に注目され始めている。例えば、極地研究所が拠点を構えてきたノルウェーのスピッツベルゲン島にあるニーオルスンでは、GRENE 事業の基盤整備の一環として2013年の秋から新たに雲レーダーが設置された。ニーオルスンは国際的な観測拠点にもなっているため、他国の観測機器との同期観測や長期間の雲のモニタリングが可能である。また、JAMSTEC が運用している海洋地球研究船「みらい」搭載の降水ドップラーレーダーは、2014年度に新システムへ更新された。新レーダーが持つ高次機能によって、海氷減少域での雲・降水システムの変化を世界に先駆けて捉え、当該分野を国際的にリードすることが期待される。

ここではこの2つのレーダーを主導している方々から、これまでの観測や新しいレーダーの仕様・実力について解説していただいた。出席者は約70名であった。以下に講演内容を記す。

担当世話人：平沢尚彦*

http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/coolnet/cl_index

2. ニーオルスンにおける雲レーダー新設

2.1 北極・ニーオルスンにおける雲観測

塩原匡貴 (国立極地研究所)

国立極地研究所では、これまで北極スバル諸島ニーオルスンを観測拠点として、全天カメラやマイクロパルスライダー、スカイラジオメータ等のリモートセンシング機器により雲の観測を実施してきた。ニーオルスンでのこれまでの観測から、雲量は早春(2~3月)に最小となり、晩夏(8~9月)に最大となることが示されたが(Tatsukawa *et al.* 2011, 私信)、これはニーオルスンに限らず北極域全体(ただし陸域での地上観測に基づく)の季節変化の特徴であることもわかった(Shupe *et al.* 2011)。これらの雲は雲底高度2 km以下の低層雲が多く、いわゆる北極層雲として知られる。

北極海の海水の減少に象徴される北極圏の気候変化のメカニズムの解明を目指して、2011年度よりGRENE 北極プロジェクトが始まった。このプロジェクトでは新たに95 GHz ドップラー雲レーダーが整備され、千葉大グループが中心となって2013年9月からニーオルスンにおける連続観測を開始した。これにより、雲の物理特性に関するレーダー・ライダー複合解析を可能にする体制が整った。これらのリモートセンシング観測に対する雲粒子の直接観測として、雲粒子観測装置を搭載した係留気球観測や付近の山の上での観測が計画されている。このような総合的観測は2016年に打上げが予定されるEarthCARE 衛星の地上検証観測としても実施される予定である。

雲の気候影響についてその科学的理解度は未だに低く(IPCC 2014)、ひいては気候変化の将来予測を困難にする要因となっている。北極での雲観測は気候変動メカニズムの解明に貢献することが期待される。

* Naohiko HIRASAWA, 国立極地研究所.

hira.n@nipr.ac.jp

© 2014 日本気象学会

2.2 北極域の雲・降水の観測—ドップラー雲レーダー—

鷹野敏明, 矢永賢洋, 河村洋平
(千葉大学大学院工学研究科),
塩原匡貴 (国立極地研究所)

気候に大きな影響を与える雲の役割の解明を目指して、雲物理量(雲粒の大きさ、密度、水と氷の割合など)の3次元構造や雲中の鉛直運動構造(雲内の風の流れ・雲粒の動き)を把握するために、ドップラー計測機能付95 GHz ミリ波雲レーダ(通称:FALCON-A)を開発し、ニーオルスンに設置した。FALCON-Aは、GRENEプロジェクトの観測基盤整備の一環として千葉大学が極地研と共同で開発した装置で、直径1mのパラボラアンテナ2台で構成され、一方から95 GHzの電波を放射し、雲で反射した電波をもう一方のアンテナで受信し、高い感度と空間分解能を備えているのが特徴である。現時点で行っている基本観測諸元として、空間分解能は高度方向が49 m、水平方向視野角が0.2度(高度5 kmで15 mに相当)、観測方向は天頂、観測高度範囲は0~15 kmである。時

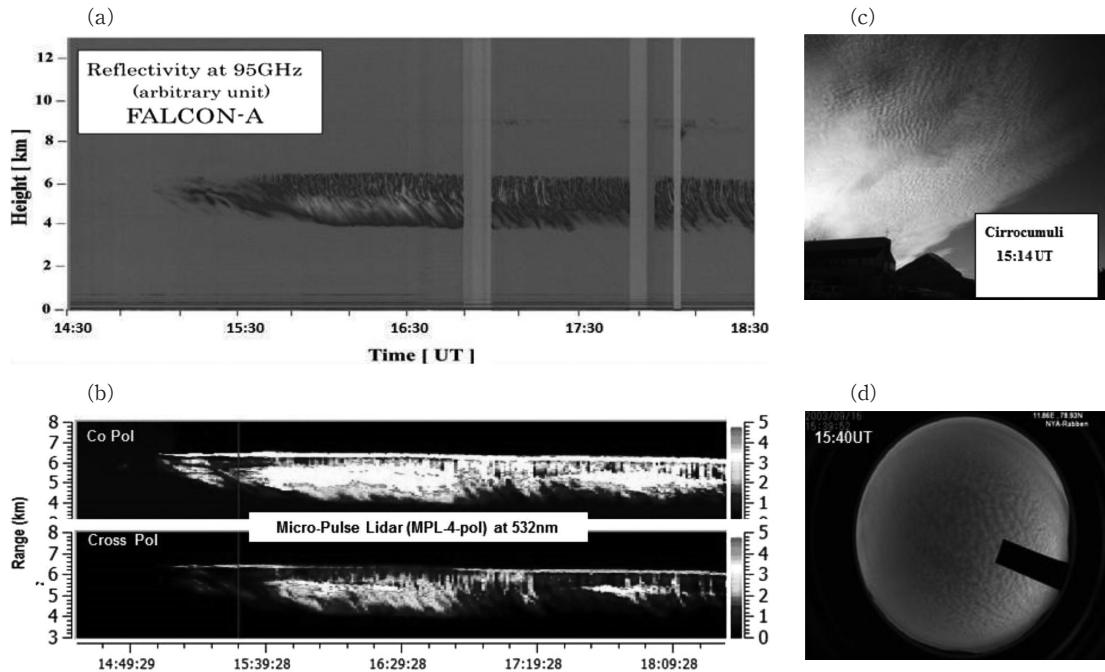
間隔10 secで常時観測を実施する。

FALCON-Aは、2013年4-6月に千葉大に於いて試験観測・校正作業を実施した後、船でノルウェーのニーオルスンに運ばれ、9月に現地で設置・調整を行い、9月中旬から定常観測を開始した。第1図は、2013年9月16日の巻積雲(ウロコ雲)の観測例である。ライダー観測で見えている雲の時空間的な詳細構造が、FALCON-Aの観測で見えている。このとき現れていた巻積雲の様子を、通常のカメラで撮影した写真と、自動連続観測を実施している全天カメラの写真で示す。

2.3 雲粒子ゾンデによる検証

小林 拓 (山梨大学)

北極圏において、混合層雲の放射過程への影響が不明であり、その定量的な把握が求められている。混合層雲内の雲粒子の相状態を判定するために雲粒子を浮遊状態のまま撮像できる雲粒子顕微鏡を開発した。8個の発光ダイオードを同心円状に配置し、暗視野になるよう対物レンズの視野に入らないように顕微鏡下部



第1図 2013年9月16日の巻積雲の観測例。(a) FALCON-Aの95 GHzの反射率、14:30-18:30 (UTC)を示す。(b) マイクロパルスライダー(MPL)の後方散乱強度。上段はCoPol, 下段はCrossPol, 14:30-18:30 (UTC)を示す。(c) 通常のカメラによる15:14 (UTC)時点の写真。(d) 全天カメラによる15:40 (UTC)時点の写真。

から斜め上方向に照射するようにした。発光ダイオードは、動いている雲粒子の静止像を得るために、パルス点灯（点灯時間 $1\mu\text{s}$ 、発光周期 500 Hz ）させた。対物レンズは10倍を使用し、雲粒子像は CCD カメラにより撮像した。連続して撮影された2枚の画像の差分をとることでバックグラウンドの影響を取り除いた後、画像処理を行い、円相当径や長径、短径などの一般的なパラメータを取得した。

2011年5月に北極圏スバル諸島スピッツベルゲン島に位置するニーオルスンにおいて観測を実施した。雲粒子顕微鏡は、ノルウェー極地研究所のツェペリン大気観測所（標高 474 m ）のテラスに設置した。本観測中に測定された粒径 $30\mu\text{m}$ 以下の雲粒子は、全て液滴状であった。

GRENE プロジェクトの一環でニーオルスンに雲レーダーが設置された。また、偏光ライダーも稼働中である。これらの測器のデータ解析アルゴリズムの開発や検証のため、係留気球により雲内部に雲粒子顕微鏡を保持し、観測をする計画を進めている。そのために雲粒子顕微鏡の軽量化を進めているところである。

3. 海洋地球研究船「みらい」のドップラーレーダーの更新

3.1 北極海での降水システムの観測の重要性

猪上 淳（国立極地研究所/JAMSTEC）
温暖化が顕著な北極圏では、降水量や海水面積の変化など水循環に大きな変化が起き始めている（例えば Zhang *et al.* 2013）。特に北極海上では、降雪量と薄氷の成長速度は密接な関係があるため、降水・降雪システムの変化の把握は今後一層重要になってくる。しかし、北極海では現場観測の機会は極めて限られるため、再解析データやモデルのパフォーマンスを検証するだけのデータは不足している。本講演では、海氷が減少し続けている太平洋側北極海で10年以上に渡って観測を行っている海洋地球研究船「みらい」のドップラーレーダーについて、最近の研究成果を元に紹介した。

「みらい」にはCバンドドップラーレーダーが標準で搭載されており、これまで1999年から2013年まで8回の航海で降水システムの観測を行っている。北極海上で3次元スキャンが可能なレーダーによる観測は日本しか行っていないため、これまでの継続的な観測とその成果は世界的にも脚光を浴びようになってきた。その初期の成果は藤吉ほか（2011）にまとめられ

ており、雲頂高度の出現頻度は高度約 1 km でそれらは北極層雲によるものである一方、北極海上の降水量は主に高度約 10 km にまで発達する低気圧によってもたらされること、などが記されている。

2000年代は夏季海水面積の最小値が2002年、2005年、2007年、2012年と次々更新され、北極海上の降水システムの変化が「みらい」の北極航海でも頻繁に捕えられるようになってきた。例えば、2009年10月にチャクチ海上で観測されたポーラーロウ（Inoue *et al.* 2010）、2010年に北緯 79 度付近の氷縁域で観測された北極低気圧（Inoue and Hori 2011）など、これまでのイメージとは異なる激しい気象擾乱が夏季北極海で卓越していることが、わずか2回の観測航海で示された。シーロメーターによる2010年までの8航海分の雲底高度の頻度分布解析からは、1990年代の氷上での雲底高度分布（Intrieri *et al.* 2002）に比べて、雲底高度が 500 m 以上高くなっていることも示されており（Sato *et al.* 2012）、海洋からの熱供給によって雲の鉛直構造も変化していることが分かってきている。

「みらい」はラジオゾンデ観測を高頻度で実施できる自動放球装置を搭載しており、ドップラーレーダー観測と組み合わせることで、変化の著しい北極海の気象を効率的に観測できる世界でも珍しい船である。このドップラーレーダーは2013年10月をもって運用を終了し、2014年夏には新型のドップラーレーダーを搭載後、再び北極研究の最前線に挑む。

3.2 新システムの仕様

勝俣昌己（JAMSTEC）

海洋研究開発機構が保有・運航する海洋地球研究船「みらい」は、1998年の運用開始以来、走査型降雨ドップラーレーダーを固定装備する世界唯一の研究船として、極域から熱帯に至る様々な環境下で観測を行ってきた。観測データの乏しい純粋海洋上の降水雲の詳細な時空間構造を捉えられる特性を活かし、これまで、北極海における北極層雲（藤吉ほか 2004）やポーラーロウの構造（Inoue *et al.* 2010）、熱帯域でのマッデンジュリアン振動（MJO）に伴う降水雲の発生過程（Yoneyama *et al.* 2008, 2013）などの貴重な事例を捉えてきた。一方で、運用開始から15年を経た機材の老朽化が問題となっていたところ、今回、機能向上を含む機材の更新が認められた。本稿ではその概要を紹介する。（以後、更新前のレーダーを「現行レーダー」、更新後のレーダーを「新レーダー」と称

する。)

まず現行レーダーと新レーダーの共通要素を紹介する。周波数帯はCバンド(5GHz)を維持する。多点展開が困難な洋上観測において、降雨減衰をもたらす熱帯の豪雨、微弱な反射信号を探知することが必要な極域の雪雲等の多彩な雲を十分な品質で観測するための引き続きの選択となった。空中線は、過去の技術的蓄積が大きいパラボラアンテナによる走査型を引き続き採用している。船体動揺の影響を排除するため、高精度ジャイロが検知した船体姿勢をキャンセルするようにパラボラアンテナの指向方向を制御する機能も現行型の方式を引き継ぐ。

一方、新レーダーでは多くの機能向上も実現予定である。まずレーダーの基本性能向上として、アンテナ径の大型化と据付位置の嵩上げがなされる。アンテナ径は現行レーダーの3mに対し新レーダーでは4mとなる。これによりビーム幅は現行レーダーの概ね3/4となり、データの空間分解能が向上する。据付位置が現状から3m嵩上げされ、船体構造物による観測不能域が現状から半減する。また、昨今のレーダー技術の発展を反映し、発振子の固体素子化とパルス圧縮技術を採用する。これにより、より長時間、より高品質なデータを安定して取得することが期待される。

ユーザとして最も期待される機能向上は、二重偏波化であろう。これは陸上設置型レーダーでは近年急速に普及した技術であり、降水量推定の高精度化、降水粒子判別(雪・霰・氷・液滴、等への分類)、等の成果が結実しつつある。降水システムの特徴は海洋性と陸上性と異なると言われており、観測データの少ない純粋海洋上で新レーダーがもたらすデータは、降水システム研究に飛躍的な発展をもたらすことが期待される。一方で過去に例のない船舶搭載型二重偏波気象レーダーからのデータはその処理と解釈に十分な検討を重ねる必要がある。

偶然か必然か、「みらい」新レーダーとほぼ同時期に、豪州の新型船「Investigator」でも二重偏波気象レーダーの運用が開始される。加えて、その他の国の観測船においても同様のレーダーが搭載される構想を聞き、この分野の研究において国際競争が激しくなることが予想される。是非、皆様に「みらい」新レーダーを用いた観測研究に積極的に参加していただき、世界をリードしていただきたい。

謝 辞

講演を快く引き受けてくださった諸氏に感謝申し上げます。また、会場の準備をしていただいた大会実行委員会の皆様に感謝いたします。

略語一覧

EarthCARE : Earth Cloud Aerosol Radiation Explorer
GRENE : 2010年6月に閣議決定された新成長戦略「グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略」を受けて、文部科学省が2011年度から開始したGRENE (Green Network of Excellence) 事業。この中に北極気候変動分野が設定された。(http://www.nipr.ac.jp/grene/about.html, 2014年8月確認)

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

参 考 文 献

- 藤吉康志, 吉田一穂, 粕谷英行, 堀江宏昭, 2004: 北極域の雲科学(4). 第7回「みらい」シンポジウム予稿集, 45-46.
- 藤吉康志, 尾関竜彦, 粕谷英行, 吉田一穂, 大野裕一, 堀江宏昭, 2011: 北極の雲・降水システム. 気象研究ノート, (222), 37-51.
- Inoue, J. and M. E. Hori, 2011: Arctic cyclogenesis at the marginal ice zone: A contributory mechanism for the temperature amplification? *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L12502, doi:10.1029/2011GL047696.
- Inoue, J., M. E. Hori, Y. Tachibana and T. Kikuchi, 2010: A polar low embedded in a blocking high over the Pacific Arctic. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L14808, doi:10.1029/2010GL043946.
- Intrieri, J. M., M. D. Shupe, T. Uttal and B. J. McCarty, 2002: An annual cycle of Arctic cloud characteristics observed by radar and lidar at SHEBA. *J. Geophys. Res.*, **107**, 8030, doi:10.1029/2000JC000423.
- IPCC, 2014: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 1535 pp.
- Sato, K., J. Inoue, Y.-M. Kodama and J. E. Overland, 2012: Impact of Arctic sea-ice retreat on the recent change in cloud-base height during autumn. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L10503, doi:10.1029/2012GL051850.
- Shupe, M. D., V. P. Walden, E. Eloranta, T. Uttal, J. R. Campbell, S. M. Starkweather and M. Shiobara, 2011: Clouds at arctic atmospheric observatories. Part I: Occurrence and macrophysical properties. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 626-644.

- Yoneyama, K. *et al.*, 2008: MISMO field experiment in the Equatorial Indian Ocean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 1889–1903.
- Yoneyama, K., C. Zhang and C. N. Long, 2013: Tracking pulses of the Madden–Julian Oscillation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1871–1891.
- Zhang, X., J. He, J. Zhang, I. Polyakov, R. Gerdes, J. Inoue and P. Wu, 2013: Enhanced poleward moisture transport and amplified northern high-latitude wetting trend. *Nature Clim. Change*, **3**, 47–51.
-