

ワークショップ「降雪に関するレーダーと数値モデル による研究 in 長岡 (第15回)」概要報告*

中 井 専 人**

1. はじめに

ワークショップ『降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究 in 長岡 (第15回)』(略称: 降雪 WS) が防災科学技術研究所 (以下, 防災科研) 雪氷防災研究センター (以下, 雪氷研) 大会議室 (新潟県長岡市) にて, 2016年11月21, 22日に開催された。今回のテーマは「固体降水量観測の高精度化とその活用に向けて」である。固体降水量は捕捉損失などの誤差要因が大きく, 測器の高性能化や時間分解能の向上によってそれが問題として顕在化しているのが現状である。世界気象機関 (World Meteorological Organization; WMO) が比較観測 (WMO Solid Precipitation InterComparison Experiment; SPICE; Nitu *et al.* 2012) を実施するなど, 解決に向けた試みはなされているが, 汎用的な方法は未だ確立していない。一方, 積雪や雪氷災害の解析や予測において, 降雪量, あるいは降雪種 (乾雪, 湿雪, あられ, みぞれなど) の把握は結果へのインパクトが大きく, 正確な観測値への要求は強い。本ワークショップでは, 固体降水の正確な量, 質について, 観測や降水過程の解析をする側, 及び, 雪氷現象の解析や行政機関での活動など活用する側の両面からの講演を集め, 正確な固体降水量把握に向けた研究の現状, 問題点, ニーズについて議論する場を提供することを主旨とした。

2. セッション

プログラムは, 午後, 午前の2セッションにまたがって計10件の発表で構成し, 1件あたりの時間を質疑込み40分とした。第12回からこの講演時間による構成としたことにより, ストーリーを持った講演と十分に踏み込んだ議論が可能になった (第1図)。プログラムと要旨集は防災科研の雪氷研ホームページ <http://www.bosai.go.jp/seppyo/> から「研究内容—研究集会・ワークショップの開催」(2016年11月26日閲覧) で見ることができるので, 参照していただければ幸いである。以下, 各セッションの概略を述べる。

2.1 セッション1: 気象場と雲物理

セッション1では降雪の定量的把握と予測に向けた基礎となる, 雲物理過程とそのモデリングについての発表が2件行われた。

荒木健太郎 (気象研究所) は, 南岸低気圧による降雪時の固体降水特性について, 事例解析と統計解析による調査結果を発表した。顕著な大雪事例として2014年2月14~15日の大雪を取り上げ, 地上気象・積雪深観測結果, 地上リモートセンシング観測結果, 水平解像度1.5 kmの気象庁非静力学モデル (NHM) による数値実験結果等により, 大雪をもたらした降雪雲の物理構造を解析した。地形性上昇流による下層の水雲の発生の可能性を示し (Araki and Murakami 2015), 過冷却雲粒が寄与する seeder-feeder (上層の雲から落下した降水粒子が下層の雲粒子を消費して成長する) メカニズムが地上降雪粒子特性の地域差と降雪量の増大をもたらすこと, また後者には上層での生成セルにおける昇華成長も寄与することを指摘した。1958年1月~2015年3月の41事例の JRA-55 (Kobayashi *et al.* 2015) を初期値・境界値とした水平解像度2 kmのNHMによる数値実験からも, 地形に対応して雲水量の発現頻度が高く, 大雪になりやす

* Report on the “15th Workshop on Researches of Snowfall Using Radar and Numerical Modeling, Nagaoka”

** (連絡責任著者) Sento NAKAI, 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター. saint@bosai.go.jp

© 2017 日本気象学会



第1図 雪氷防災研究センター大会議室におけるセッション。



第2図 雪氷防災研究センター構内見学：レーダーとマイクロ波放射計。



第3図 雪氷防災研究センター構内見学：降雪粒子観測施設。

い地域があることを統計的に示した。また、地形を変更する感度実験から、地形が内陸部の降雪量増大に重要であることを統計的に示した。固体降水特性の実態把握には、地形に加えてメソスケール気象場、低気圧の発達段階や中心からの位置等も重要であることを指摘した。

幾田泰醇（気象庁予報部数値予報課）は、降雪観測とアジョイント法を用いた雲物理過程のパラメーターの最適化について発表した。固体降水に関して氷と雪の衝突、氷と霰の衝突、氷から雪への変換に関するパラメーターの最適解の導出を可能にしようという、将来に向けた基礎技術の開発である。雲物理過程として新たに開発したデータ同化用6-class 1-momentのバルク法は、接線形モデルの積分安定性を重視し、素過程の単純化、微分不可能点のない式の選択などのほか、氷粒子の形状にbulletを仮定したこと、雪粒子の質量が粒径の2乗に比例し（Field *et al.* 2005；Thompson *et al.* 2008）、密度が粒径に逆比例すること（Heymsfield *et al.* 2004）が特徴である。この手法をシングルカラムモデルに組み込むことにより、固体粒子間の衝突・変換の予測や観測の誤差に対する応答を調べ、雲物理過程パラメーターの最適解を求められることを確認した。

2.2 セッション2：地上降雪特性とその雪氷現象へのインパクト

山下克也（防災科学技術研究所）は降水量計の捕捉

特性について発表した。降水量計の雪に対する損失は、風速が大きくなるにつれて大きくなる。例えば、気象庁で使用されている助炭無し気象庁仕様温式水式（RT-3）、助炭あり気象庁仕様溢式水式（RT-4）の捕捉損失は、風速 2 ms^{-1} でそれぞれ約4割、2割であることが報告されている（横山ほか 2003、以後 Y03）。新潟県上越市にあるサイトを WMO SPICE 比較実験観測サイトのひとつとして、二重防風柵 DFIR（Goodison 1978）中央に設置した重量式降水量計 Geonor T-200B（Bakkehoi *et al.* 1985；Duchon 2008）を参照器に用い、複数測器の比較観測を行った。3冬季の観測データを用いた解析から、RT-3、RT-4の捕捉率は、過去の報告と同じように風速が大きくなるほど低くなった。粒径-落下速度を用いた降雪種別分類を行い、捕捉率と風速の関係を示す回帰曲線を雨と雪の場合について導出したところ、RT-4に関しては Y03 とほぼ同じであったが、RT-3は Y03 よりも捕捉率が高い結果であった。違いの原因は定義した降水イベントの長さの差なども考えられる。解析と検証観測を今後も続けていく予定である。

平沢尚彦（国立極地研究所）は、SPICE 陸別サイトにおける降雪量観測から分かった測器の特性と課題について発表した。Raingauge 方式の測器に認められる未解決の課題には(1)Wind-induced error（風による捕捉損失、 5 m/s で50%）、(2)Evaporation loss（貯水容器や転倒ますからの蒸発損失）、(3)Trace

precipitation (微弱な降水), (4) Wetting loss (計測容器表面を濡らすだけで蒸発する損失) があり, この問題の改善に向けて WMO SPICE は実施されてきた。陸別では OD (optical disdrometer; 光学式ディストロメーター), RT-3, RT-4 の評価, 及び極域の降雪量の測定を見据えて各測器の性質や性能を知ることが目的としている。2 基の DFIR の中央にそれぞれ重量式 (Geonor T-200B) と OD の 1 機種 Thies Laser Precipitation monitor (LPM) を設置し, 比較を行った。LPM は重量式より降水に対する感度が高いが, 無降水時に小粒子カウントにノイズが乗るほか, 風の影響を受ける。重量式は風による震動のほかに約 $0.5 \text{ mm}/20^\circ\text{C}$ の気温依存性がある。RT-3, RT-4 は, 降水の分解能に加えて蒸発による損失があり, 降水強度の小さい寒冷地では影響が大きい。現状では, 本研究の目的に対して比較したなかでは LPM が最も適していると考えている。

大宮 哲 (寒地土木研究所) は, 開始したばかりの防災科学技術研究所との降雪量と視程低下に関する共同研究について述べた。冬季における道路交通障害を軽減するうえで, 吹雪に伴う視程障害発生を予測することは重要である。視程は飛雪流量 q ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) との相関が高く, 寒地土木研究所で開設している「吹雪の視界情報」提供サイトでもその関係を利用している。しかし, 降雪種や粒径などを考慮していないので, 本研究では各種降雪特性と視程低下の関係にも注目する。「視程」は視角 0.5° 以上 5° 以下の黒い目標物が見通せる距離と定義されている (気象庁 2002) ことから, 雪氷研露場においては黒色の視認対象物を距離別に設置し, カメラ及び目視観測を実施する。視程計測定と目視観測は道路管理で事故が起きやすい 200 m 以下になると合わなくなる傾向があり, 今後は視程計設置も加える予定である。寒地土木研究所石狩吹雪実験場は北海道内においても有数の吹雪頻発地帯であり, これまでデータがあまり得られていない強風時のデータを得ることができる。どちらのサイトにも DFIR 内 Geonor T-200B と一般的な気象官署及び北海道開発局道路テレメータで用いられている雨量計を設置する。

石坂雅昭 (防災科学技術研究所・客員) は降雪粒子と STL (snow-to-liquid ratio; 雪水比) について, まさにこのワークショップ当日に publish となった Ishizaka *et al.* (2016) の内容を中心に発表した。海外で用いられている STL は降水量から降雪深への変

換係数であり, 新雪密度と等価である。これまで, 経験的な雪水比, STL が多く使われてきたが, 近年, 正確な降雪深予測が求められるようになってきている (Milbrandt *et al.* 2012 など)。そこで, 密度測定が可能な程度の降雪深が確保され, 圧密が無視できる短い時間で, かつほぼ同種の降雪が観測された降雪イベントを選び, 降雪粒子と密度の関係を求めた。対応する降雪粒子特性は降雪粒子観測から CMF (Center of Mass Flux distribution (降水強度重み付き平均); Ishizaka *et al.* 2013) を用いて霰や雪片などに分類した。CMF から得られる仮想的な密度と実測の密度との関係式を分類された降雪毎に求めたので, OD 観測と降水量とから任意の期間の新雪密度を求めることも可能である。降水イベント期間の推定新雪密度と実測の密度とは概ね良い一致を示し, 降雪情報を的確に掴むことによって精度の高い STL を得られ, かつ降雪粒子の種類情報もあるため, 積雪, 雪氷災害モデル初期値の高度化に役立つことが分かった。

2.3 セッション 3: これからの降雪観測に向けた課題

中井専 (防災科学技術研究所) は, レーダーとディストロメーターによる固体降水量算出の試みと問題点について述べた。固体降水のレーダー降水強度の推定は, 降雪種やその特性の違いを反映するため, 偏波パラメーターを用いた降雪種分類 (hydrometeor classification; HC; X バンドであれば Kouketsu *et al.* 2015 など) と降雪種毎の水平偏波反射強度因子 Z_h (dBZ) と降水量 R (mm hour^{-1}) の関係式を適用し R を求める方法が開発されてきている (例えば, Lim *et al.* 2005; 板戸ほか 2015)。一方, 粒子分類をせずに地上降水量を参照する方法も以前から行われてきた (解析雨量 (牧原 2007), MRMS (Multi-Radar Multi-Sensor) システム (Zhang *et al.* 2016) など) が, 固体降水量観測の課題についてはセッション 2 で討論されたとおりである。防災科学技術研究所では地上降雪種を参照した HC と降雪種毎の Z_h - R 関係式を用いる手法を開発してきた。手法としてはリアルタイム稼働できることを示したが, 降水量の値は HC の評価方法に任意性が残り, 観測による検証もしくは理論的な検証によるライミング率の評価が必要である。また, そのためのレーダー, 降水量計, OD の観測誤差評価を確実に行う必要があることも指摘した。

藤吉康志 (北海道大学) はブライツバンドの下端高度について発表した。北大・低温研の X バンド船舶

レーダーは距離分解能が極めて高く(約12 m)、データ取得間隔が短い(約2秒)。札幌の定時高層気象観測と比較すると、多くの層状性エコー観測事例で、0°C高度はレーダーエコー強度が急速に増加する高度(変曲点高度)とほぼ完全に一致した。一方ブライトバンド高度の下端を決定することは、粒子の融解や分裂過程が複雑であるため、ゾンデやレーダーエコーのみでは困難である。そこで、融解層が地上に到達した事例(2013年3月10日)について、2DVD(2-Dimensional Video Disdrometer; Kruger and Krajewski 2002)を用いた観測データから粒子形状を詳細に調べた。その結果、ブライトバンドピーク高度からその下50 mの範囲で粒子の融解が一気に進むため、形は複雑であるがバルク粒子密度が急激に1に近づく。ピーク高度の下50~250 mの範囲で融解粒子の分裂が主に起こっており、縦長および扁平な粒子が混在する。250~300 mの高度範囲では薄い扁平な粒子のみが存在し、300 m以下では全ての粒子は水滴であった。ちなみに、微小水滴は0°C高度直下から存在し、また、ブライトバンドピーク高度が地上から50 mに達した頃から、地上に雪が積もり始めた。上記のような微物理過程を基にした散乱モデルを用いて、「偏波パラメーターを用いた融解層判定法」の妥当性を検討する必要がある。

佐野哲也(情報通信研究機構)は、冬季の南岸低気圧に伴い発生する甲府盆地の大雪の解析、及び、最近のフェーズドアレイレーダーの開発について発表した。甲府では、南岸低気圧に伴う降雪事例は少なくとも1年に1回以上あり、継続する降雪により深い積雪が生じる。2014年2月14~15日に南岸低気圧の通過に伴い生じた甲府盆地の大雪を山梨大学および国土交通省が運用するXバンドマルチパラメータ(X-MP)レーダーなどの観測データを用いて解析した。その結果、甲府盆地は層状性降水域に長時間覆われ、固体降水粒子が盆地内に落下したこと、高度1.5 km付近で寒冷な東寄りの風が維持したことが解析され、雪片を含む固体降水粒子の融解を伴わない落下が長時間維持したことで大雪になったことが示された。情報通信研究機構ではこのような解析を高時間分解能で可能にするフェーズドアレイレーダーを開発している(例えば、磯田ほか 2014)。ノイズ処理やクラッター除去などの課題があるものの、夏の対流雲だけではなく、背の低い冬の雪雲に対しても詳細な変動が捉えられることを示した。

岩本勉之(紋別市観光交流推進室)は、紋別レーダーを用いた自治体のレーダー活用例について発表した。紋別レーダーは、紋別市大山山頂に設置されたXバンドドップラーレーダーであり、降水、海水、海面状況などを観測することができる。海水は厚くなると凹凸が出るためエコーとして検知され、また海面はシークラッターとして表れるが、これらと降水とは移動方向や速度が異なるため、連続画像を人の目で見ると判別できることが多くある。また、ドップラー速度やスペクトル幅のデータも使えばあらゆる気象条件の下で海水の検出は可能であるものの(Fujiyoshi *et al.* 2013)、どのように自動判別するかがこれからの課題である。これまで流水状況把握を主な目的として運用してきたが、今後は降雪観測にも力を入れていきたいと考えている。紋別付近にはオホーツク海沿岸帯状雲(藤吉ほか 2009)が発達することがあり、「弱い寒気吹き出し時に発生するタイプI」と「強い寒気吹き出し時に発生するタイプII」という2種類があることがわかっている(藤吉 2010)。しかし、その鉛直構造や時間変化、雲内の渦の発達過程、海水との関係など、様々な現象や地域気象への影響が指摘されているものの、定量的な解明と災害情報としての活用方策策定はこれからであり、紋別レーダーによる観測事例の蓄積と解析はその有力な手段であると言える。

2.4 総合討論

今回のワークショップでは、固体降水量をより正確に測ること、及びそれを社会で活用することを意識した。レーダーは面的に降水量が測れることと、近年小型のレーダーが普及したこともあり台数が増えている。一方で、観測の原理や降水観測における誤差などデータ特性の理解にはある程度の学習が必要で、解析を行うためにはその理解に基づいた処理系の構築が必要である。データ特性に関わる雲物理は、融解に伴う粒子の大きさ、密度の変化など、定量化がこれからという課題も多くある。今回自治体からの発表もあり、研究を本務としない人が地域特性に合わせた処理や解析を行うことも考えていく必要がある。そのような場合でも支障なく正確な処理、解析を行えるためには、解析ツールのパッケージ化が一つの方法と考えられる。

地上の固体降水量観測については、比較観測をもとに様々な誤差要因についての議論がなされた。風による捕捉損失は比較的知られてきたが、これ以外にも計測原理によって様々な誤差要因があることの指摘は以

前からなされている (Goodison 1978など)。しかし、そのような誤差の評価はなされておらず、その存在は必ずしも意識されずに解析や利用がなされている。これについては比較観測を精力的に行っている3機関からの発表があったが、SPICEの比較基準とされているGeonor T-200Bにも注意すべき特性があり、他の測器も含めて誤差特性を改めて整理する必要がある。強調しておきたいのは、そのような誤差は現状の観測値の価値を損なうものではなく、固体降水の特性を調査して補正式を作成すれば、より正確な値とエラーバーのセットとなるデータを作成できるはずだということである。筆者の知る限り、固体降水量の測定誤差を補正した値を降水量として現業で公開している国はない。これを実現するには多くの仕事が解析、測器開発、利用と普及にわたって必要であり、このワークショップ参加者を始めとした多くの分野の人の協力が大きな力になると考えられる。

3. おわりに

セッション終了後、新しいXバンド偏波レーダー、マイクロ波放射計、DFIR、2DVDなど構内地上測器の見学(第2, 3図)、さらに午後には、柏崎の新潟工科大学構内に設置した防災科研降雪粒子観測サイトを見学するツアーを開催した。

長岡で開催するこのワークショップは、今回が通算15回目である。過去の報告等については第9回、第10回、第13回概要報告(中井 2011, 2012, 2015)を参照していただきたい。前述の雪氷研ホームページにも、第2回以降のプログラムと講演要旨(一部)があるので、興味のある方はアクセスしていただくと幸いである。次回第16回も今回と同様に秋季の開催を検討しており、多数のご参加をいただくとありがたいと考えている。

最後になりましたが、お忙しいなか、丁寧な講演と有意義な討論を頂いた講演者、参加者の皆様、座長を快くお引き受けいただいた荒木健太郎さん、石坂雅昭さん、またワークショップの実施を様々な面で支えていただいた上石 勲センター長はじめ雪氷防災研究センターの皆様へ厚く御礼申し上げます。本稿執筆にあたってはワークショップ講演要旨を参照し、また講演者の皆様にチェックをいただきました。このワークショップは防災科学技術研究所プロジェクト研究『多様化する雪氷災害軽減のための危険度把握と面的予測の融合に関する研究(研究代表者:小杉健二)』の一

環として行われました。

参考文献

- Araki, K., and M. Murakami, 2015: Numerical simulation of heavy snowfall and the potential role of ice nuclei in cloud formation and precipitation development. CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, (45), 4.03-4.04.
- Bakkehoi, S., K. Øien and E. J. Førland, 1985: An automatic precipitation gauge based on vibrating-wire strain gauges. Nord. Hydrol., 16, 193-202.
- Duchon, C. E., 2008: Using vibrating-wire technology for precipitation measurements. Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction (S. Michaelides, ed.), Springer, 33-58.
- Field, P. R., R. J. Hogan, P. R. A. Brown, A. J. Illingworth, T. W. Choulaton and R. J. Cotton, 2005: Parametrization of ice-particle size distributions for mid-latitude stratiform cloud. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131, 1997-2017.
- 藤吉康志, 2010: オホーツク海沿岸帯状雲の成因と構造。第33回メソ気象研究会の報告 一冬季のメソ擾乱とそれにもなうストームー (コンビーナー:大東忠保), 天気, 57, 708.
- 藤吉康志, 川島正行, 大井正行, 藤原忠誠, 上庄拓哉, 向笠康二郎, 2009: 「オホーツク海沿岸帯状雲」のレーダーエコー特性(1)。日本気象学会2009年度春季大会講演予講集, P411.
- Fujiyoshi, Y., K. Osumi, M. Ohi and Y. Yamada, 2013: Sea ice identification and derivation of its velocity field by X-band Doppler radar. J. Atmos. Oceanic Tech., 30, 1240-1249.
- Goodison, B. E., 1978: Accuracy of Canadian snow gage measurements. J. Appl. Meteor., 17, 1542-1548.
- Heymsfield, A. J., A. Bansemer, C. Schmitt, C. Twohy and M. Poellot, 2004: Effective ice particle densities derived from aircraft data. J. Atmos. Sci., 61, 982-1003.
- Ishizaka, M., H. Motoyoshi, S. Nakai, T. Shiina, T. Kumakura and K. Muramoto, 2013: A new method for identifying the main type of solid hydrometeors contributing to snowfall from measured size-fall speed relationship. J. Meteor. Soc. Japan, 91, 747-762.
- Ishizaka, M., H. Motoyoshi, S. Yamaguchi, S. Nakai, T. Shiina and K. Muramoto, 2016: Relationships between snowfall density and solid hydrometeors, based on measured size and fall speed, for snowpack modeling applications. Cryosphere, 10, 2831-2845.

- 磯田総子, 佐藤晋介, 花土 弘, 高橋暢宏, 水谷文彦, 牛尾知雄, 2014: フェーズドアレイ気象レーダによる豪雨の3次元観測. 可視化情報, **34**, 148-153.
- 板戸昌子, 内藤和久, 白鳥篤央, 上田 博, 瀬瀬丈晴, 中井専人, 石坂雅昭, 本吉弘岐, 山下克也, 2015: XバンドMPレーダを用いた降水粒子判別および地上観測による精度検証. ワークショップ『降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究 in 長岡 (第14回)』講演要旨集, 9-10, http://yukibousai.bosai.go.jp/others-files/KouWS_FY2015Nagaoka/images/14thFY2015_Abstract.pdf (2016年11月26日閲覧).
- 気象庁, 2002: 地上気象観測指針. (財)気象業務支援センター, 128pp.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48, doi: 10.2151/jmsj.2015-001.
- Kouketsu, T., H. Uyeda, T. Ohigashi, M. Oue, H. Takeuchi, T. Shinoda, K. Tsuboki, M. Kubo and K. Muramoto, 2015: A hydrometeor classification method for X-band polarimetric radar: Construction and validation focusing on solid hydrometeors under moist environments. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **32**, 2052-2074, doi:10.1175/JTECH-D-14-00124.1
- Kruger, A. and W. F. Krajewski, 2002: Two-dimensional video disdrometer: A description. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **19**, 602-617.
- Lim, S., V. Chandrasekar and V. N. Bringi, 2005: Hydrometeor classification system using dual-polarization radar measurements: Model improvements and in situ verification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **43**, 792-801.
- 牧原康隆, 2007: 気象レーダーを利用した短時間の降水・土砂災害予報と気象業務改善の歩み —2006年度藤原賞受賞記念講演—. *天気*, **54**, 21-33.
- Milbrandt, J. A., A. Glazer and D. Jacob, 2012: Predicting the snow-to-liquid ratio of surface precipitation using a bulk microphysics scheme. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2461-2476.
- 中井専人, 2011: ワークショップ「降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究 (第9回)」概要報告. *天気*, **58**, 413-415.
- 中井専人, 2012: ワークショップ「降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究 (第10回)」概要報告. *天気*, **59**, 579-582.
- 中井専人, 2015: ワークショップ「降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究 (第13回)」概要報告. *天気*, **62**, 209-214.
- Nitu, R., R. Rasmussen, B. Baker, E. Lanzinger, P. Joe, D. Yang, C. Smith, Y. A. Roulet, B. Goodison, H. Liang, F. Sabatini, J. Kochendorfer, M. Wolff, J. Hendrikx, E. Vuerich, L. Lanza, O. Aulamo, V. Vuglinsky, 2012: WMO Intercomparison of instruments and methods for the measurement of solid precipitation and snow on the ground: Organization of the formal experiment. WMO, IOM(109), TECO-2012. http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-109_TECO-2012/Session1/O1_01_Nitu_SPICE.pdf. (2016年11月26日閲覧)
- Thompson, G., P. Field, R. Rasmussen and W. Hall, 2008: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 5095-5115.
- 横山宏太郎, 大野宏之, 小南靖弘, 井上 聡, 川方俊和, 2003: 冬季における降水量計の捕捉特性. *雪氷*, **65**, 303-316.
- Zhang, J., K. Howard, C. Langston, B. Kaney, Y. Qi, L. Tang, H. Grams, Y. Wang, S. Cocks, S. Martinaitis, A. Arthur, K. Cooper, J. Brogden and D. Kitzmiller, 2016: Multi-radar multi-sensor (MRMS) quantitative precipitation estimation: Initial operating capabilities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 621-638.