

## 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

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 (第13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, 2014年11月6, 7日に開催された。今回の副題は「水物質の鉛直プロファイル~この本質的かつ測りにくいもの」である。

偏波レーダーや降雪粒子の観測を行い, 雪氷災害との関連を調べる研究が進むにつれ, “降雪種”, すなわち乾雪, 湿雪, 雪片, 霰, みぞれといった降雪粒子の形態により吹雪, 着雪など発生する災害が根本的に異なり, 一方で, 降雪種はそのときの降水系の種類や構造に関係がありそうなのが観測経験としては得られてきている。しかしながら, 降雪種は上空からのその粒子が通ってきた経路, すなわち, 気温, 相対湿度, 雲水の鉛直プロファイルによって昇華凝結成長, 雲粒捕捉成長, 雪片形成, 昇華蒸発, 融解という多様なプロセスの結果として決まる。この鉛直プロファイルはマイクロ波放射計による多波長観測により推定することが可能であるが, その技術は開発途上である。モデルへの同化を含めて, 水物質の鉛直プロファイルの推定について, また水物質の鉛直プロファイルと降雪粒子成長や降水系, 擾乱との関係について, さらに地上降雪種と雪氷災害について, 関連する話題を集め, 降雪種と雪氷災害の関連の理解に向けた議論を試み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9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。前年度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」と辿ることで見ることができる (2014年12月6日閲覧) 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: 水物質鉛直プロファイルの観測・推定・予報

セッション1では観測に基づく水物質プロファイル推定と同化についての発表が3件, 続いて水物質と気温プロファイルのわずかな変化が地上降水の形態に大きな差異をもたらす南岸低気圧についての発表が2件行われた。

荒木健太郎 (気象研究所) は, 「放射は天から送られたメールである メール解読の技術と応用」と題し



第1図 セッションにおける討論。

\* 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](mailto:saint@bosai.go.jp)

© 2015 日本気象学会

て、マイクロ波放射計観測の原理から解析方法、最新の研究について非常にわかりやすく解説した。マイクロ波放射計観測から気温、水蒸気量の鉛直プロファイルを求めるためには輝度温度 (TB) から逆問題を解く必要がある。従来から観測点近傍の高層気象観測結果を使ったニューラルネットワークが利用されているが、この方法は逆転層の影響を受けやすく、また高高度ほど誤差が大きくなる。一方、数値予報モデルの結果を第一推定値とした 1DVAR による解析手法は、ニューラルネットワークよりも解析精度の良いことが知られている。つくば竜巻が発生した2012年5月6日について、マイクロ波放射計による天頂観測と低仰角観測に 1DVAR を適用したところ、ゾンデデータに最も近いプロファイルが得られた。応用として、竜巻発生時の不安定場の短時間変動が解析できることを示した (Araki *et al.* 2014)。曇天、降雨時の精度検証、統計検証はこれからである。

清水慎吾 (防災科研水・土砂防災研究ユニット) は、関東地方などにおけるマイクロ波放射計ネットワークの構築について述べた。防災科研では、局地的豪雨の早期発生予測にむけて、関東地方に10台のマイクロ波放射計を設置し、ネットワーク観測を2014年度内に開始する。また、降雪粒子の量と質の高精度観測にむけて、新潟県に3台のマイクロ波放射計を設置し、2013年度冬季から観測を開始した。これらのデータから、積乱雲の発生初期までの気温、水蒸気プロファイルを1DVAR によって推定し、CReSS への同化を可能にする計画である。既に 1DVAR に必要な観測演算子のフォワードモデルの構築を終え、アジョイントコード開発に移っている。さらに、レーウィンゾンデによるマイクロ波放射計の精度評価実験を新潟県域で行った。マイクロ波放射計が観測した TB とゾンデ観測値から放射伝達方程式を用いて推定した TB の酸素吸収帯における誤差は 2 K 以内に収まり、気温推定における 1DVAR による TB の直接同化は有効という結果が得られている。

幾田泰醇 (気象庁予報部数値予報課) は、MSM を対象に GPM 主衛星に搭載された DPR をデータ同化に利用した際のインパクトについて発表した。DPR は観測頻度が低いが、地上レーダー探知範囲外の降水データの同化は初期値の更なる精度改善に加え、雲物理過程の検証及び高度化への手がかりとなることも期待される。メソ解析では、Mie 散乱理論に基づき後方散乱を計算して得たレーダーの反射強度の3次元

データから相対湿度を推定し、その推定された相対湿度を観測データとみなして同化した。インパクト実験の結果、降水の分布について修正が見られた。1 モーメント雲物理スキームに起因する上層の雪混合比の誤差は今後の課題とされたが、これは雪の粒径分布関数として Lin *et al.* (1983) と同様の切片パラメーター固定の指数分布 (Marshall-Palmer 型) を仮定しているためであり、Gunn and Marshall (1958) 等の切片パラメーターが可変な分布を扱うことのできるスキームを用いれば改善するのではないかという議論があった。

原 旅人 (気象庁予報部数値予報課) は、南岸低気圧による関東での降雪の現業数値予報モデルによる予測可能性と降雪に至る気温低下のプロセスについて述べた。2013年1月14日に関東地方に大雪をもたらした南岸低気圧について、GSM では南岸低気圧の発達および接近は表現されていたものの、その位置や進行速度には実況と比べて大きな誤差があり、それに対応して、その低気圧の西にある500 hPa 面のトラフは浅く、進行速度が実況より遅かった。他の主要な海外数値予報センター (ECMWF, UKMO, NCEP) の全球モデルの予想でも同様の傾向が見られ、この事例における南岸低気圧の予想の難しさを示している。この事例では関東の広い範囲で急激に気温が下がり、0°C から1°Cの領域が広く分布していた。降雪前の湿球温度は広範囲で2°C程度であり、一般に南岸低気圧による降雪時に多いとされる、先行降雨の蒸発によるだけでは気温低下が説明できない。しかし、MSM の各過程からの気温の時間変化率に着目すると、気温低下の主な原因は融解に伴う冷却であり、それに伴い融解層が地表面付近へ降下していたことがわかった。なお、地域によっては、内陸での融解による冷却によって強い温度傾度が形成され、そこに北風が吹いたことによる寒気移流の寄与も大きかった。

石坂雅昭 (防災科研雪氷防災研究センター) は、2014年2月8日から9日、及び14日から15日の南岸低気圧の影響によって新潟県にもたらされた降雪には、降雪粒子を構成する雪結晶に共通した特徴が見られたことを報告した。雪氷研レーダーによると、まず一般的な冬型の降雪時より遥かに高い上空約8 km 以上の高さに降水が現れ、次第に下層に広がった。FSO で観測された5分ごとのCMF (Ishizaka *et al.* 2013) は Locatelli and Hobbs (1974) の aggregates of unrimed assemblages of plates, side planes, bullets,

and columns の関係式周辺に分布し、顕微鏡写真ではこれを裏付ける角柱、角板、砲弾、それらの結合したものからなる雪片がみられた。代表的な粒径は2.3 mm から5.6 mm、落下速度は大きいもので  $1 \text{ ms}^{-1}$  を超え、濃密雲粒付雪片の落下速度に近かったが構成結晶の結合は弱く、何かの上を受けるとバラバラになった。新潟市で Kikuchi *et al.* (2013) に従って行われた詳細な結晶分類によると、8 日には CP4 (交差角板状結晶)、P4 (複合板状結晶)、P1 (角板状結晶)、C4 (砲弾状結晶)、CP2 (砲弾・板状結晶)、C3 (角柱状結晶) など、14 日には CP4、C4、C3、CP2、C1 (針状結晶) などの結晶が記録され、本降雪が  $-20^{\circ}\text{C}$  より低温で成長するタイプの結晶を多く含むという特徴を持つことがわかった。これは前述のレーダー降水頂高度や MSM の相対湿度分布とも整合的である。

## 2.2 セッション2：降雪の分布と融解

まず、三隅良平 (防災科研水・土砂防災研究ユニット) が雪片の含水率に関して実験的に得られた3つの経験式について説明した。この内容は最近発表された Misumi *et al.* (2014) の解説でもある。雪片含水率の観測を中村 (1960)、Sasyo *et al.* (1991) に基づいて行い、測定法の校正方法も考案した。線形多重回帰式によりバルク含水率 (降水強度に対する液体水のフラックスの比)  $F_L$ 、降水強度に対する雨滴フラックスの比  $F_R$ 、をそれぞれ

$$F_L = a_1 T + a_2 RH + a_3 R + a_4 \quad (1)$$

$$F_R = F_L \exp(b_1 F_L^3 + b_2 F_L^2 + b_3 F_L + b_4) \quad (2)$$

で求めた。 $T$ 、 $RH$ 、 $R$  はそれぞれ気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )、相対湿度 (%), 降水強度 ( $\text{mm h}^{-1}$ ) である (係数の値は要旨集または Misumi *et al.* (2014) を参照していただきたい)。 $F_R$  は含水率80%でも8%しかないが含水率100%に近づくと急激に増えるのが特徴である。 $F_L$ 、 $F_R$  を用いて個々の雪片の含水率  $f$  を

$$f = F_L (D/D_0)^{-0.86(1-F_L)} \quad (3)$$

のように得た。ここで  $D$  は雪片の融解直径、 $D_0$  は雪片粒径分布における質量中央直径である。これらをもとに、予報変数を増やさずに導入できるバルク雲物理モデルの改良を行ったところ、プライトバンドを明瞭に再現することができた。

このような湿降雪に起因する着冠雪現象について、佐藤研吾 (防災科研雪氷防災研究センター) が従来の

着雪研究、着雪発生条件、新庄雪氷環境実験所における観測、実験の取り組みを紹介した。湿雪による着雪は、高層建築物や交通構造物、電力設備に被害をもたらすだけでなく、着雪後の気温上昇による落雪により、人的被害・物的被害を引き起こす懸念もある。特に電線着雪についての研究が多く、強風下の観測 (Kamiyama *et al.* 1990; Eliasson *et al.* 2000)、主に弱風下で着雪を再現した実験・観測がある (荘田 1953; 高木 1966; 若浜ほか 1980)。しかし、南岸低気圧により関東において着雪被害が発生した10事例の条件を調べると、気温範囲は従来考えられていたより狭く、特に  $0^{\circ}\text{C} \sim 1^{\circ}\text{C}$  に集中することが示された。新庄雪氷環境実験所で密度が大きく異なる2事例の着雪が観測され、PARSIVEL (PARTicle SIZE and VELOCITY disdrometer: Löffler-Mang and Joss 2000; Battaglia *et al.* 2010) による粒径と落下速度との比較から、密度が高い (低い) 事例は霰や雲粒子付結晶 (樹枝状結晶) が降ったと推定された。これを確かめるため同所内 CES による2種類の人工降雪粒子による着雪再現実験を行ったところ、観測と整合する結果が得られ、さらに、風速が大きくなるほど着雪体の密度差が小さくなる傾向が見られた。

次の2件は降雪分布についてであった。木村祐輔 (新潟大学大学院自然科学研究科) は、2005/06年~2013/14年の12月から2月まで9冬について、JRA-55再解析データによる佐渡島上空850 hPa 面における風向・風速で降水イベントを分類したコンポジット解析を行った。その結果、北西風  $10 \text{ ms}^{-1}$  以上の条件において新潟市域で顕著に降水量が少なくなることが、気象庁全国合成レーダーと AMeDAS の両方で示された。これにあてはまる事例として、2014年1月10日について JMA-NHM を用いた再現実験を行ったところ、佐渡島の風下、新潟市の風上にあたる場所に下降流の卓越する領域が現れた。降水粒子の移流を考慮すると、この下降流域が新潟市周辺の降雪の少なさに関係していると考えられるが、そのメカニズムについての解析は次の課題とのことであった。

加藤輝之 (気象研究所) は、水平分解能 5 km, 2 km, 1 km, 500 m, 250 m の JMA-NHM (以下、5 km-NHM のように表記) に、乱流過程として MYNN level-3 (Nakanishi and Niino 2009) 及び Deardorff (1980) のスキームを用いた24時間予報を行い、中部日本海側での降雪量の過少評価について、その要因と改善への取り組みを述べた。24時間積算降

水量について解析雨量と比較すると、MSMと5 km-NHM、2 km-NHMでは平野部での降雪が過少であった。その理由は、落下速度が $2\sim 3\text{ ms}^{-1}$ の霰の代わりに、落下速度が $1\text{ ms}^{-1}$ 程度の雪が過剰に生成され、移流により山岳まで輸送されたためであった。1 km-NHMや250 m-NHMではこれが改善されたが、地上における霰/全降水量の比率は観測よりもかなり小さく十分な改善には至らなかった。雪の落下速度を陸上のみ霰の落下速度に置き換えた5 km-NHM実験を行ったところ、平野部の過少な降水は解消され解析雨量の分布に近づけることができたが、これは本質的な解決にはならない。霰の生成量を増やすため雲物理過程の設定を変更した実験をいくつか試みたが、霰生成量の増加にはつながらなかった。

この発表に関連してJMA-NHMなど数値予報モデルの境界層過程、雲物理過程についての議論があった。これらの過程では多雪地を考慮していないものが多く採用されており、水平分解能2 kmのLFMでも平野部の降水は過少である。水平分解能を細かくしても降水量に差は出ず、降雪種にはかなり差が出るものの、霰生成量の過小は改善されない。高解像度でも霰が少ないので雲微物理の改良が必要である。特に沿岸部の霰の生成が重要であり、低解像度ではパラメタリゼーションが必要となる。境界層過程については、Deardorffのスキームがサブグリッドをパラメタリゼーションするのに対して、MYNNは全乱流をパラメタリゼーションする。JMA-NHMへのMYNNの実装では境界層を混ぜすぎる傾向があったが、気象庁の新しいモデルでは改良し、日本海側の降水が少ない問題は多少解決されてきているとのことであった。

### 2.3 総合討論

総合討論では、加茂祐一（気象庁仙台管区气象台）から現業における降雪状況の面的実況監視への取り組みについてコメントがあった。現在、気象官署ではAMeDASの気温観測値、またMSM、解析雨量などの格子データを基に降雪量の面的推定を試みているところもある。しかし、降雪が少なく積雪観測のない地域でも南岸低気圧などで大雪となり得るため、全国をカバーできるものも必要ではないかとのことである。

続いて、この発表及びこれまでのセッションの発表を踏まえて、ワークショップテーマ全体にまたがる議論が行われた。その概略は次の通りである。

地上の雪の量、状態を知るためには、予測、監視いづれにおいても上空の気温と水物質の鉛直プロファイ

ルを把握することが重要であるといえる。例えば、マイクロ波放射計のデータ同化を行うと、数値予報モデルが雪を作りすぎて水蒸気が減る分を補正することが期待できる。また、気温と水物質の鉛直プロファイルは雲微物理に影響し、逆に、雲微物理は境界層過程とともに大気の気温と水物質の鉛直プロファイルに影響する。双方向のプロセスの理解が必要である。そのような研究を進めるためには、数値予報モデルの観測値による検証をどう進めていくかも課題である。これは降雪に関しては現状、容易ではなく、地上観測値の補正をしっかりと行うことが必要である。降雪粒子別の降水量については、PARSIVELなどのディストロメーター観測、レーダー観測のいずれもまだ誤差があるものとして数値予報モデルとの比較を行う必要がある。このような作業には広い分野の多くの人が必要であり、今後ともこのワークショップ参加者を始めたとした気象、雪水分野の人の協力が大きな力になる。

### 3. おわりに

セッション終了後、前年度整備された新しいXバンド偏波レーダー、マイクロ波放射計、DFIR、2 DVD (2-Dimensional Video Disdrometer: Kruger and Krajewski 2002) など構内の地上測器、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（第2図）。

長岡で開催するこのワークショップは今回が通算13回目である。過去の報告等については第9回、第10回概要報告（中井 2011, 2012）を参照していただきたい。前述の雪水研ホームページにも第2回以降のプロ



第2図 雪水研露場DFIRに向かう見学者。

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す。次回第14回も今回同様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いただいた講演者、参加者の皆様、座長を快くお引き受けいただいた三隅良平さん、本吉弘岐さん、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に厚く御礼申し上げます。また、見学ツアー実施にあたってお世話になりました新潟工科大学の皆様にも御礼を申し上げます。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『高度降積雪情報に基づく雪氷災害軽減研究（研究代表者：中井 専入）』の一環として行われました。

#### 略語一覧

1DVAR : one-dimensional variational (英語では analysis, retrieval, data assimilation などにかかる) 次元変分法の解析, 推定, 同化などを指す。  
 AMeDAS : Automated Meteorological Data Acquisition System 地域気象観測システム  
 CES : Cryospheric Environment Simulator 雪氷環境実験棟 防災科研新庄雪氷環境実験所にある, 結晶成長させた人工雪を降らせられる実験室  
 CMF : Center of Mass Flux distribution 降雪粒子ひとつひとつの降水量で重み付けて時間平均した粒径・落下速度  
 CReSS : Cloud Resolving Storm Simulator 名古屋大学で開発された, 雲スケールからメソスケールのシミュレーションを目的とした数値気象モデル  
 DFIR : Double Fence Intercomparison Reference 降水量計測における風による捕捉損失を低減するための世界気象機関 (WMO) 標準仕様の防風柵  
 DPR : Dual-frequency Precipitation Radar 二周波降水レーダー。KuPR (13.6 GHz) と KaPR (35.5 GHz) という 2 台のレーダーで構成される。  
 ECMWF : 欧州中期予報センター  
 FSO : Falling Snow Observatory 雪氷研にある 2 重防風ネットを備えた降雪粒子観測施設  
 GPM : Global Precipitation Measurement 全球降水観測計画。主衛星は2014年2月に打ち上げられた。  
 GSM : Global Spectral Model (気象庁全球モデル) 気象庁が地球全体の大気を対象として現業運用している水

平格子間隔約20 km のモデル

JMA-NHM : Japan Meteorological Agency NonHydrostatic Model 気象庁非静力学モデル

JRA-55 : Japanese 55-year Reanalysis 1958年からの55年間を対象として気象庁が行った長期再解析

LFM : Local Forecast Model 局地数値予報モデル

MSM : Meso Scale Model (メソ数値予報モデル) 気象庁が日本及びその近海の大気を対象として現業運用している水平格子間隔約5 km のモデル

MYNN : Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Nakanishi and Niino (2009) によるレイノルズ平均乱流モデル

NCEP : 米国環境予測センター

TB : Brightness Temperature 輝度温度

UKMO : 英国気象局

#### 参考文献

- Araki, K., H. Ishimoto, M. Murakami and T. Tajiri, 2014: Temporal variation of close-proximity soundings within a tornadic supercell environment. SOLA, 10, 57-61.
- Battaglia, A., E. Rustemeier, A. Tokay, U. Blahak and C. Simmer, 2010: PARSIVEL snow observations: A critical assessment. J. Atmos. Oceanic Technol., 27, 333-344.
- Deardorff, J. W., 1980: Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. Bound.-Layer Meteor., 18, 495-527.
- Eliasson, A. J., E. Thorsteins and H. Olafsson, 2000: Study of wet snow events on the south coast of Iceland. Proceedings of 9th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), Chester.
- Gunn, K. L. S. and J. S. Marshall, 1958: The distribution with size of aggregate snowflakes. J. Meteor., 15, 452-461.
- 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.
- Kamiyama, T., K. Maruyama, J. Katoh, H. Ando, K. Fujii and O. Nakamura, 1990: The mechanism of snow accretion growth on conductors in relation to weather conditions in Kantoh plain. Proceedings of 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), Tokyo.
- Kikuchi, K., T. Kameda, K. Higuchi and A. Yamashita, 2013: A global classification of snow crystals, ice

- crystals, and solid precipitation based on observations from middle latitudes to polar regions. *Atmos. Res.*, **132-133**, 460-472.
- Kruger, A. and W. F. Krajewski, 2002: Two-dimensional video disdrometer: A description. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 602-617.
- Lin, Y.-L., R. D. Farley and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 1065-1092.
- Locatelli, J. D. and P. V. Hobbs, 1974: Fall speeds and masses of solid precipitation particles. *J. Geophys. Res.*, **79**, 2185-2197.
- Löffler-Mang, M. and J. Joss, 2000: An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 130-139.
- Misumi, R., H. Motoyoshi, S. Yamaguchi, S. Nakai, M. Ishizaka and Y. Fujiyoshi, 2014: Empirical relationships for estimating liquid water fraction of melting snowflakes. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 2232-2245.
- 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.
- 中村 勉, 1960: 雪片の含水率の測定法について. *雪氷*, **22**, 145-146.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895-912.
- Sasyo, Y., T. Mori, O. Onozaki and T. Saito, 1991: Observation of the liquid water content of melting snowflakes with a new instrument. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 83-90.
- 荘田幹夫, 1953: 着雪研究. *雪氷の研究*, (1), 50-72.
- 高木子平, 1966: 石打における電線着雪の観測. *雪氷*, **28**, 1-7.
- 若浜五郎, 小林俊一, 対馬勝年, 1980: 電線着雪実験用風洞. *低温科学 物理編*, **38**, 183-187.