

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400471

研究課題名(和文) 地上降雪粒子観測を用いた雲解像モデルの降雪過程の改良に関する研究

研究課題名(英文) Study on Improvement of Snowfall Process in Cloud Resolving Model by Comparison with Ground-based Snow Particle Observation

研究代表者

本吉 弘岐 (Motoyoshi, Hiroki)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 雪氷防災研究センター・主任研究員

研究者番号：70571462

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：雪氷災害に対するソフト的な対策として、気象予報モデルによる降雪現象の予測を用いた手法に対する期待が大きい。しかし、高解像度で計算が可能な雲解像モデルの雲物理過程は様々な降水過程が複雑に組み込まれているためその改良には詳細なモデルの検証が必要となる。本研究では、地上降雪粒子観測による含水状態・卓越降水粒子の種類別の降水割合、粒径・落下速度などの降雪粒子特性などを用いたバルク法による降水カテゴリや粒径分布などの検証方法を適用するとともに、異なる水平解像度のモデル実験や感度実験からモデルによる降水量の過少評価の要因の考察とその改善を試みた。

研究成果の概要(英文)：Weather forecast model to predict snowfall phenomena is expected as useful method for the measure against snow and ice disaster. In the cloud resolving model, which can be applied to the calculations at high resolution, various microphysical processes are incorporated in complex form. Then, the validation of cloud microphysics scheme by comparison with observation are required for its improvement.

In this study, we applied the methods for validation of the precipitation category and size distribution predicted by model comparing with precipitation fraction of each precipitation type classified by predominant hydrometeor, and precipitation particle properties (size and fallspeed distribution). And we considered the factors of model underestimation of snow fall over the Japan-Sea coastal areas in middle Japan by model calculations at various resolution and sensitivity experiments and tried to modify the parameterisation for the production of graupels to improve the underestimation.

研究分野：気象学

キーワード：雲解像モデル 降雪粒子観測 バルク法 卓越降水粒子 モデル検証

1. 研究開始当初の背景

2010年度と2011年度の冬季は二年連続の豪雪となり、日本海側各地で雪崩などの災害が発生し、大きな人的被害に加え、交通機関やライフラインの途絶などにより、社会生活にも重大な影響を与えた。雪氷災害に対するソフト的な対策として、気象予報モデルによる降雪現象の予測を元に災害発生ポテンシャルを予測するといった手法に対する期待が大きい。しかしながら、気象予報モデルによる降雪予測の精度はまだ十分ではない上、雪崩や吹雪、着雪といった雪氷災害に対しては、雪、霰、みぞれやそれらの混在といった多様な降水形態の予測も重要である。よって、気象予報モデルによる複雑で多様な降水過程の再現性の向上は、雪氷災害やその防災といった観点からも急務の課題となっている。

大気現象の再現が高解像度(～数 km)で行える雲解像モデルでは、雲物理過程を陽に扱うことで昇華凝結成長、雲粒捕捉成長、併合成長、融解などのプロセスが表現でき、雪、霰、雨といった降水形態ごとに降水量を予測することができる。しかしながら、その予測検証には、地上気象観測での総降水量を用いたもの(例えば、Kato 2011)が主であり、雲物理過程、特に降雪過程の再現性の改善に必要な長期にわたる降水粒子特性の連続観測データセットがなかったことにより、雲物理過程プロセスの特性をより明確に示す降水形態ごとの降水量や粒径分布に着目した研究は今まで行われてきていない。

2. 研究の目的

2010年から雪氷防災研究センター(新潟県長岡市)では乾雪、湿雪、雨を問わず降水粒子の連続観測が可能になった。本研究では、冬期間に雪、霰、みぞれ、雨と多様な降水が高頻度で観測される北陸地方をテストフィールドとし、地上での降水粒子特性(粒径-落下速度分布、卓越降水形態、降水量)を連続観測し、雲解像モデルによる計算から得られる降水形態や降水量を複数年の冬期にわたり比較することで、北陸地方で見られる降雪過程を分類してその特徴の解明とともに、雲解像モデルの雲物理過程の改良を行い、冬期の降雪予報の改善、雪氷災害の面的予測や災害発生ポテンシャルの診断手法の高度化に資することを目的とする。

雲解像モデルを用いた数値実験からは、分解能や境界層過程の実験設定を変えることにより降水量や粒子形態の比率に影響が出ることがわかってきている。これは、実験設定によって鉛直流や雲水量に差が現れ、それがモデルの雲物理過程を通して各種降水粒子の形成に影響した結果と考えられる。しかし、降水粒子の特性を統計的に検証できるデータがなかったため、雲物理過程が現実の降水粒子の成長を再現しているかどうか、十分な評価には至らなかった。予備的な研究として行った降雪粒子観測による降水形態の判

別結果と雲解像モデルでの予測結果との比較から、観測で霰が卓越している時間帯において、予想される霰の割合が少ないなどの問題点が示されている。雲解像モデルの降雪過程の観測による検証方法は、他にも気象レーダーや雲粒子ゾンデ観測などが考えられるが、気象レーダーによる固体降水の定量的降水観測はまだ発展段階で、雲粒子ゾンデ観測によるものは単発的に行わざるを得ない。

本研究の手法は、様々な雲物理過程を経た結果として地上に到達するものを観測している点で直接的な検証ではないが、降水過程の特徴を端的に表す卓越降雪形態に着目し、かつ、粒径分布といった詳細な比較対象を考慮している点で雲物理過程の検証方法の一つとして有効である。また、長期にわたる降雪粒子観測の蓄積により雲解像モデルの予測結果の統計的な検証が可能である点がこれまででない特徴といえる。

雲物理過程は雲解像モデルの核となる部分であり、本研究の成果として雲物理過程の問題点が解決され、数値予報モデルの改良がなされれば、冬期の降雪予報の大きな改善につながり、防災に役立てることができる。また、モデルの降水出力の組み合わせと観測による詳細な卓越降水形態との対応が得られると、降雪を伴う吹雪時の視程障害や吹きだまり、表層雪崩における降雪粒子に起因する弱層の形成、湿雪に伴う着冠雪などの、雪氷災害の面的予測や災害発生ポテンシャルの診断手法の高度化に対しても、非常に有用な情報が得られる。

3. 研究の方法

本研究では、テストフィールドである長岡市を含む領域での雲解像モデルの計算結果および地上降雪粒子観測データを蓄積したデータセットを作成し、それらを比較することにより、雲解像モデルの雲物理過程を扱うバルク法の特徴を調べるという方法をとった。また、雲解像モデルによる中部日本海側での平野部での降雪量の過小評価を調べるために、異なる解像度での雲解像モデルを用いた感度実験を行うとともに霰の生成条件の改良を試みた。また、雲物理過程で用いられる降水粒子の密度や落下速度のパラメタリゼーションについて、地上観測から得られ

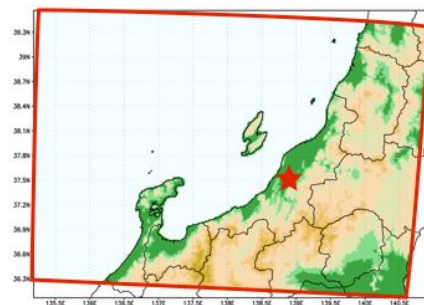


図1: 雲解像モデルでの計算領域

た密度や落下速度のパラメタリゼーションとの関係性を調べた。

(1) 雲解像モデルデータの蓄積

雪氷防災研究センターでは雪氷災害発生予測システムのために、冬期に雲解像モデルである気象庁非静力学モデル JMANHM (Saito et al. 2007、以下 NHM と呼ぶ) を用いて、12 時間毎の予測実験を行っている。このデータを蓄積することで、2014 年冬期から 2016 年冬期まで 3 年分の 1 時間毎の上層データと 10 分毎の地表面データをデータセットとして作成した。計算領域は、テストフィールドである長岡を図 1 のように含む。計算の水平解像度は 1.5km で、鉛直層数は 38 層 (2014 年冬期)、50 層 (2015 年冬期以降) である。

NHM は雲物理過程としてバルク法が組み込まれており、オプション設定によりいくつかのバルク法の種類を選択できる。バルク法とは、大気中の水や氷による粒子状物質を、いくつかのカテゴリ (雲水、雲氷、雨、雪、霰など) に分けて、それぞれの混合比 (と数濃度) を予報変数として水物質間の相互作用を計算する雲物理過程の計算手法のひとつである。本研究では、全てのカテゴリで混合比に加えて数濃度を予報変数とする 2-モーメントバルク法を用いた。これにより、粒径分布の形状がより柔軟に表現される特徴がある。

(2) 地上降雪粒子観測データの蓄積

防災科学技術研究所雪氷防災研究センター (新潟県長岡市) では、冬期間に連続的な降雪粒子観測データを蓄積した。主なデータとしては、降雪粒子観測施設 (Falling Snow Observatory; FSO) における CCD カメラの画像処理による固体降水の高精度観測装置を用いた降雪粒子観測データと、レーザーシート方式の光学式ディスクロメータ (PARSIVEL, OTT 社製) によるデータである。気象要素については観測露場の気象・降雪観測データを用いた。

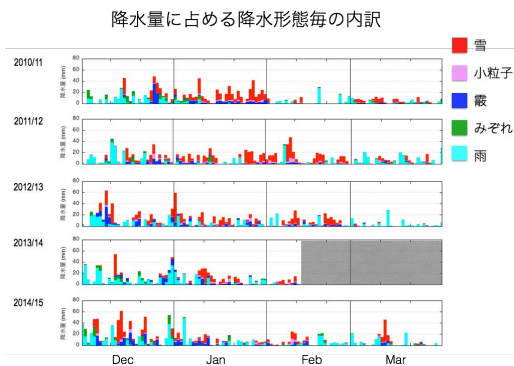


図 2: 地上降雪粒子観測から得られた 2010/11 冬期～2014/15 冬期の日別降水量に占める降水形態毎の割合

降水粒子はその種類 (雨、雪片、あられなど) によって粒径および (終端) 落下速度の

関係が異なる。この性質により、降水粒子の粒径と落下速度を同時に測定することで、降雪粒子の種類を同定することができる。本研究では、ある時間帯の卓越降水粒子を同定するため、降水粒子の粒径・落下速度分布から求まる質量フラックス分布の中心 (CMF; Center of Mass Flux distribution) を用いた降水粒子判別手法 (Ishizaka et al. 2013) を採用した。気温帯によっては、この手法だけでは、みぞれと霰との区別が難しい場合があるため、本研究期間中に開発した光学式ディスクロメータを用いた降水の含水状態の定量的推定手法により、降水の融解状態 (みぞれにおける雨滴の割合および含水率) を含めた分類手法 (雨、みぞれ、固体降水) を確立した。複雑な雲物理過程の結果生成され地上に落下してくる降水粒子について、形状や落下速度、卓越降水粒子の判別、融解状態、粒径分布、降水強度などの詳細なデータが連続的に得られるため、雲解像モデルの予測結果を降水形態ごとに統計的に検証し、雲物理過程改良を行うために最適なものといえる。

上記の手法から得られたデータの例として、日別降水量に占める降水形態毎の内訳を図 2 に示す。

4. 研究成果

(1) 雲解像モデルによる地上気象要素の予測値と地上降雪観測との比較

図 3 は、1.5km 水平分解能の NHM を用いて計算された気象要素と地上観測との比較である。地上気圧の相関は非常に良く、総観規模の現象がよく再現されていた。気温については、降雪現象で重要な 4 以下の気温では若干の過大評価だが比較的合っており、それ以上の温度では大きく過大評価となった。地上における乾雪が湿雪 (みぞれ含む) かの判別において湿球温度は重要な判別指標であるが、湿球温度については気温よりも ME、RMSE と小さかった。降水量については 1 時間毎の比較では期間全体では相関がみられず、気象モデルによるメソ降水系自体の予測と、メソ降水系予測における位置ずれや時間ずれ

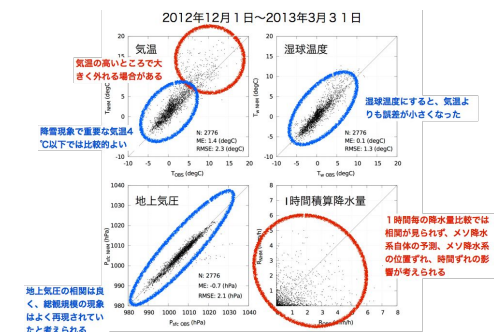


図 3: 2012/13 冬期における気象要素 (気温、湿球温度、地上気圧、1 時間降水量) のモデルと地上観測との比較

の影響があると考えられる。そこで、1 時間降水量が 0.05mm を越える連続期間を降水イベントとして抽出し、相互の積算降水量を比較したところ、全体的に過少評価であるが、両者には相関がみられた(図 4)。降水イベント毎にみることで、時間ずれのある事象を比較することが可能となるが、逆に位置ずれによる空振りや見逃しを拾ってしまう可能性もある。期間全体の降水量は、地上観測で 1327.9mm、NHM では 874.9mm であり、予測値は観測値の約 65%と過少評価であった。

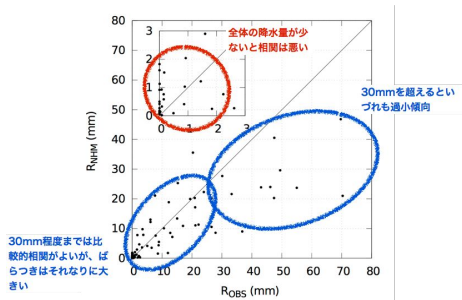


図 4: 2012/13 冬期における降水イベント毎の積算降水量のモデルと地上観測との比較

図 5 に、2012 年 12 月 31 日から 2013 年 1 月 12 日にかけての観測とモデルの降水種の降水量割合の比較例を示す。気象モデルには霰というカテゴリがないため、観測された霰に関しては、落下速度が速く雨に近い霰(図 5 の緑)以外は、雪片、小粒子、霰のいずれかに分類した。期間を通して霰の割合が観測に比べて少ない傾向があり、これについては、雲物理過程自体の問題と、モデル側の降水カテゴリと観測側の降水種の整合性を検討する必要があると考えられる。

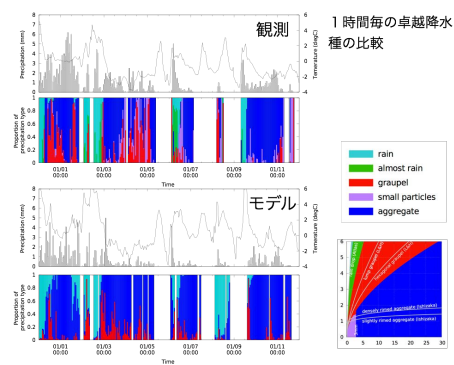


図 5: 2012 年 12 月 31 日から 2013 年 1 月 12 日にかけての 1 時間毎の降水種毎の降水量割合

雨や霰は、気温が高い時に予測されるので、気温の予測が重要となる。1 月 8 日の降水イベントでは観測は降雪に分類されているが、予測では雨に近く、このときの気温が 0 以上と予測されていた。

(2) 中部日本海側でのモデルの予想降雪量の過小評価の要因と改善への試み

NHM を用いた気象庁の現業メソ気象モデル(MSM、水平分解能: 5km)は、降雪量を平野部で過小に、山岳部で過大に予想し、その解決が課題となっている。そこで、異なる水平分解能(5km, 2km, 1km, 500m, 250m)の NHM を用いて、モデルが予想した降水カテゴリと、地上観測により判別した降水種を比較することにより、平野部で降雪量が過小となる要因を考察した。

地上観測データから特に霰の割合の高かった 2013 年 1 月 4 日 3 時から 5 日 3 時までを対象期間として選び、新潟地方を含む領域に対して 24 時間予測を行った。解析雨量を 24 時間積算した降水量(図 6a)と比較すると、5km-NHM(図 6b)は MSM 同様に、平野部(図の楕円の領域)の降水を過小に予想しているが、1km-NHM(図 6e)では改善されていた。5km-NHM ではほとんどあられが予想されていなかったが、1km-NHM での平野部での降水量の増加量は 予想された降あられ量と同程度で、降水量が改善された主な理由は、海岸線付近のあられの生成によっていた。しかし、地上降水観測による霰の降水量割合を比較すると、1km-NHM が予想した地上でのあられの降水割合(図なし)は、かなり過小予想されていた。この観測に対する過小予想は 250m-NHM を用いても改善することはできていなかった。

5km-NHM の降雪量について、平野部で過小、山岳部で過大という傾向は、落下速度が 2~3m/s のあられの代わりに、落下速度が 1m/s 程度の雪が過剰に生成され、山岳による強制

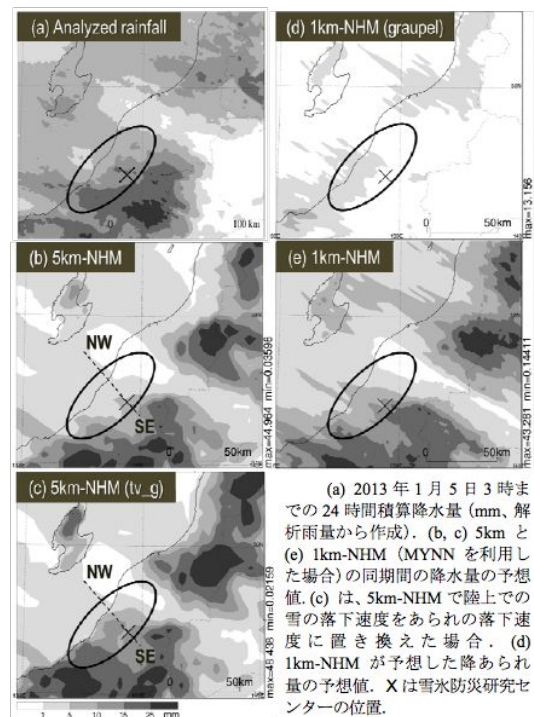


図 6: 異なる解像度でのモデル計算結果と陸上の雪の落下速度を霰の落下速度に置き換えた計算結果

上昇で落下せずに山岳域まで移動していることが考えられた。そのため、陸上での雪の落下速度をあらゆる落下速度に置き換えた感度実験を 5km-NHM を用いて行った。降水分布(図 6c)をみると、平野部では課題である過小予想が解消され、解析雨量の分布(図 6a)に近づいていた。

特にあらゆる生成量が少なかった水平分解能 2km 以上の NHM での平野部の降雪量を増やすためには、あらゆる生成させる新たなパラメタリゼーションが必要だと考えられる。その試みとして、まず-4 より暖かい雲では雲氷が存在しないので、雲氷核活性の温度上限値を設定してみた。2km-NHM を用いて上限値を-4、-5、-10 としてみたが、残念ながらあらゆる生成量の増加が見られなかった。また 1km-NHM でも同様の結果であった。あらゆる落下時の蒸発のみを抑制することも試みたが、あらゆる生成域での下層相対湿度が 80%程度と高く、降あらゆる量増加に対する効果はほとんどみられなかった。雪の蒸発も抑制すると降水量は海上で増え、平野部で減少した。この結果は Kato (2011) と同じであった。

(3) 降雪粒子の密度・落下速度のパラメタリゼーション

雲解像モデルの雲物理過程においては、降水粒子の様々な特性がパラメタリゼーションにより組み込まれている。NHM では、降水粒子の落下速度はカテゴリ毎に図 7 のように粒径の関数として与えられている。日本海沿岸地域では頻繁に見られる大きめの霰(3mm~)や雪片(5mm~)に関しては、図 7 で与えられた落下速度は過大評価になっている。また、密度は、カテゴリ毎で粒径によらない固定値であり、デフォルト値では雪では 84kg/m^3 、霰では 300kg/m^3 となっている。

粒径分布は、雪、霰については指数関数が仮定されており、その傾き、切片パラメタは、バルク法の予報変数である混合比、粒子数濃度および、上記粒子密度と乾燥空気密度から計算される。粒子として球形粒子を仮定すれば、予報変数の混合比、粒子数濃度などから降水量が診断できる。

図 8 は、降雪粒子観測施設に設置されてい

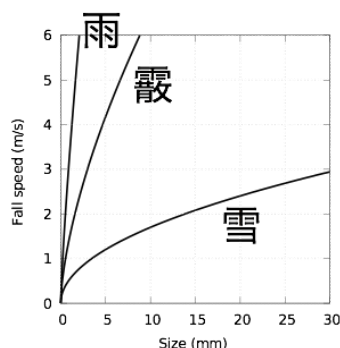


図 7: NHM の雲物理過程におけるカテゴリ毎の落下速度の粒径依存性

る天井窓から自然降雪を取りこむことが可能な低温室で実施した、ビデオカメラと高精度電子天秤を用いた個別粒子の粒径・落下速度・質量の同時測定から推定された降水粒子の密度(左図)の測定値と粒径・落下速度を用いたパラメタリゼーション(右図)である。図 7 の落下速度に対する密度を、図 8 のパラメタリゼーションから評価すると、雪、霰ともデフォルト値の密度になる粒子の大きさは 1mm~2mm 程度であり、それ以下では密度はより大きく、それ以上ではより小さい。粒子密度の値は、粒径分布に影響を与えるため、その結果、降水量の診断に影響を与える。落下速度も、同様であるが、いずれも雲物理過程の計算に深く関わる量であるために、地上観測との整合性と雲物理過程の中での整合性をいかに両立するかは課題である。

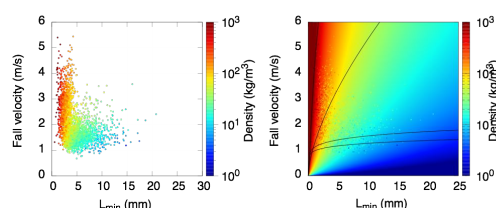


図 8: 降雪粒子の粒径・落下速度・質量の同時測定から得られた密度の推定値(左)と粒径と落下速度による密度のパラメタリゼーション(右)

今後は、本研究で得られたデータセットを活用し、地上降雪観測との整合性がとれるモデルからの降水量や降雪粒子特性の診断方法を改良していく必要がある。

参考文献

- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Nareta, and Y. Honda, 2007: *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271-304.
 Ishizaka, M., H. Motoyoshi, S. Nakai, T. Shiina, T. Kumakura, and K. Muramoto, 2013: *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 747-762.
 Kato, T., 2011: CAS/JSC Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling, **41**, 3.03-3.04.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1件)

- T. Kato, H. Motoyoshi, Y. Yamada, A. Hashimoto, S. Nakai, M. Ishizaka, 2015: Factors of model underestimation of snow fall over the Japan-Sea coastal areas in middle Japan: Comparison with observed precipitation particles, CAS/JSC Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling, **43**, 4.08-4.09. (査読無)

[学会発表](計15件)

本吉弘岐: ビデオカメラを用いた降雪粒子の粒径・落下速度測定および個別粒子測定の試み, 研究集会「降雪粒子の撮影や観測の自動化に関する研究」, 2014年2月21日, 東京.

本吉弘岐, 三隅良平, 石坂雅昭, 中井専
人, 藤吉康志: 地上降雪観測による融解層に伴う雲の含水状態の観測, 日本気象学会2013年度秋季大会, 2013年11月19日-2013年11月21日, 仙台.

石坂雅昭, 中井専
人, 本吉弘岐, 椎名徹, 村本健一郎: 降雪モードと主要降雪粒子種の関係 - L, S mode の時の降雪粒子 -, 2013年11月19日-2013年11月21日, 仙台.

本吉弘岐, 加藤輝之, 山田芳則, 中井専
人, 石坂雅昭: 地上降雪粒子観測によるNHMの降水過程の検証方法について, 第15回非静力学モデルに関するワークショップ, 2013年9月26日-2013年9月27日, 札幌.

加藤輝之: 大気仮想水蒸気蓄積における大気・海洋相互作用, 大槌シンポジウム「大気・海陸面相互作用と降水課程」, 2013年8月26日, 盛岡.

H. Motoyoshi, M. Ishizaka, T. Shiina
and S. Nakai: Simultaneous Measurement of Mass, Size and Fallspeed of Individual Solid Hydrometeors using Electronic Balance and Video Camera, 14th Conference on Cloud Physics, 2014年7月7日-2014年7月11日, Boston, USA.

T. Kato, H. Motoyoshi, Y. Yamada, S. Nakai, M. Ishizaka: Factors of model underestimation of snow fall over the Japan-Sea coastal areas in middle Japan: Comparison with observed precipitation particles, International Conference on Mesoscale Meteorology and Tropical Cyclones (ICMCS-X), 2014年9月16日, Boulder, USA.

T. Kato, H. Motoyoshi, Y. Yamada, S. Nakai, M. Ishizaka: Factors of model underestimation of snow fall over the Japan-Sea coastal areas in middle Japan: Comparison with observed precipitation particles, Joint Workshop of 6th International Workshop on Global Cloud Resolving Modeling and 3rd International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models, 2014年9月16日, 兵庫.

加藤輝之, 本吉弘岐, 山田芳則, 橋本明弘, 中井専
人, 石坂雅昭: 中部日本海側でのモデルが予想する降雪量の過少評価の要因と改善への取り組み: 観測された降水粒子との比較, 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)」, 2014年11月7日 長岡.

H. Motoyoshi: Empirical parameteriza-

tion of kinematical properties of solid precipitation particles from ground-based measurements at Nagaoka, International Snow and Ice Science Workshop, 2014年11月18日, 長岡.

橋本明弘, 林修吾, 加藤輝之: 雹害報告数と数値モデルによる固体降水予想値の比較, 日本気象学会2015年度春季大会, 2015年5月4日, つくば市.

加藤輝之: 2014年2月8日と14~15日の大雪の発生要因と過去事例との比較, 南岸低気圧とそれに伴う気象・雪氷災害に関する研究会, 2015年8月10日, つくば市.

本吉弘岐, 三隅良平, 石坂雅昭, 中井専
人, 山下克也: 光学式ディストロメータを用いた雲の含水状態の推定手法について, 雪氷研究大会(2015・松本), 2015年9月13日-2015年9月16日, 松本.

本吉弘岐, 三隅良平, 石坂雅昭, 中井専
人, 山下克也: 光学式ディストロメータを用いた雲の含水状態の解析について, 日本気象学会2015年度秋季大会, 2015年10月28日-2015年10月30日, 京都.

本吉弘岐, 三隅良平, 石坂雅昭, 中井専
人, 山下克也: 経験的パラメタリゼーションにもとづく降雪の諸特性の定量的推定手法について, 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14回)」, 2015年11月12日-2015年11月13日, 長岡.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本吉 弘岐 (MOTOYOSHI HIROKI)

国立研究開発法人 防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 雪氷防災研究センター・主任研究員

研究者番号: 70571462

(2) 研究分担者

加藤 輝之 (Kato Teruyuki)

気象庁気象研究所・予報研究部・室長

研究者番号: 70354438

(3) 連携研究者

山田 芳則 (Yamada Yoshinori)

気象庁気象研究所・予報研究部・室長

研究者番号: 80553164

(4) 連携研究者

中井 専 (Nakai Sento)

国立研究開発法人 防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 雪氷防災研究センター・総括主任研究員

研究者番号: 20360365

(5) 連携研究者

石坂 雅昭 (Ishizaka Masaaki)

国立研究開発法人 防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 雪氷防災研究センター・研究参事

研究者番号: 50414412