

令和 3 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：2018～2020

課題番号：18K03766

研究課題名（和文）低気圧性降雪に起因する表層雪崩予測に向けた降雪のかさ密度変化過程に関する研究

研究課題名（英文）Study on the change process in snowfall bulk density for forecasting surface avalanches caused by cyclonic snowfall

研究代表者

山下 克也（Yamashita, Katsuya）

国立研究開発法人防災科学技術研究所・雪氷防災研究部門・特別研究員

研究者番号：30772925

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：気象モデルから降雪のかさ密度を予測するための基礎研究として、降雪粒子の地上観測値、地上遠隔測定、及び落下中の降雪のかさ密度変化を取扱う雲物理モデルを用いて落下中の降雪のかさ密度変化過程に関する研究を行った。2冬季の地上観測を行い、そのデータを基に降雪のかさ密度を降雪粒子数濃度、粒径、落下速度、気温を用いて算出する式の提案、及び地上付近を落下する降雪のかさ密度の減少に特に影響を及ぼす雲物理過程の推定を行った。また、上空の測定値を入力して落下中の降雪粒子の雲微物理量変化を計算するモデルを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、気象モデルから降雪のかさ密度を予測するための基礎研究を行った。研究成果として、現状の気象モデルから降雪のかさ密度を算出可能な式の提案、実大気中の雲物理量の変化過程を議論するためのデータセット整備、及び上空の測定値を入力して落下中の降雪粒子の雲物理量の変化を計算するモデルの整備が挙げられる。本研究の成果は、気象予報モデルの雲物理スキーム開発改良に有用であり、気象予報モデルから算出される降雪量や表層雪崩の面的予測の高度化に繋がる可能性がある。このことは、表層雪崩による事故軽減に役立つと期待される。

研究成果の概要（英文）：As a basic research to estimate the snowfall bulk density using numerical meteorological models, a research on the change process of the snowfall bulk density using the direct and remote observations on the ground and cloud microphysical numerical model was conducted. From the observation in two winter seasons, a formula to calculate the snowfall bulk density using temperature, number concentration, size, and falling velocity of snowfall particles was proposed, and the cloud microphysical process that had particular effect on the decrease in snowfall bulk density was estimated. A numerical model which calculates changes in cloud microphysical quantities of falling snow particles using the measured values in upper atmosphere as input values was also developed.

研究分野：気象学

キーワード：降雪

1. 研究開始当初の背景

近年、2014 年関東甲信地方大雪や 2017 年那須雪崩事故など低気圧性降雪に起因する表層雪崩による被害が報告されている。降雪情報を反映した表層雪崩予測を行うためには、気象予測モデルと積雪変質モデルの両者を用いる必要がある。しかし、両モデルをシームレスにつなぐ降雪の種類（形状、雲粒付着割合など）を表現する物理量は未だ定まっておらず、低気圧性降雪に起因する表層雪崩の予測手法は確立していない。降雪のかさ密度は両モデルをつなぐ物理量として有望視されており、気象モデルから降雪のかさ密度を予測することが求められている。

2. 研究の目的

本研究は、気象モデルで降雪のかさ密度を予測するための基礎研究として、降雪粒子の地上観測値、地上遠隔測定から得られる温湿度や降雪雲の鉛直分布、及び落下中の降雪のかさ密度変化を取扱う雲物理モデルを用いて、降雪のかさ密度変化に関わる雲物理過程（雲粒補足成長、併合成長など）の寄与率を明確にすることを目的とする。

3. 研究の方法

降雪粒子の粒径分布と落下速度の観測、及び観測露場での積雪深と降水量の観測を行い、明確になっていない降雪粒子の物理量と降雪のかさ密度の相互関係を明確化し、定式化する。地上遠隔測定観測から得られた鉛直分布情報と 2 高度での直接測定値から落下速度が変化する温湿度環境や卓越する雲物理過程を明らかにする。

落下中の降雪のかさ密度変化を取扱う雲物理モデルの開発を行い、そのモデルを用いて、気象モデルの雲物理スキーム開発の際に重要となる降雪のかさ密度に変化を及ぼす雲物理過程の寄与率を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 降雪粒子の物理量と降雪のかさ密度の相互関係の明確化

ここでは、2018/2019 冬季に防災科学技術研究所雪氷防災研究センター（以下、雪氷研）の露場（北緯 37.43 度、東経 139.89 度、海拔高度 97m）の観測データを用いた解析結果を示す。2019/2020 冬季も観測を実施したが、少雪だったため十分なデータが取得できなかった。図 1 は降雪のかさ密度の時系列である。降雪時のデータのみを抽出するため氷点下時のデータを用いた。データは 10 分平均値で示している。降雪のかさ密度は、Ishizaka et al. (2013) で提案されている質量フラックスチャートと光学式降水粒子計測装置から得られた粒径、落下速度、粒子数を用いて算出した。降雪のかさ密度は 0.0~1.2g/m³ の範囲であった。降雪のかさ密度 ($\rho_{\text{snowfall_bulk}}$: g/m³) に関連する粒子数濃度 (N : 1/m³)、粒径 (d : mm)、落下速度 (v : m/s)、気温 (T : °C) を用いて重回帰式を求めると次の式が得られた。

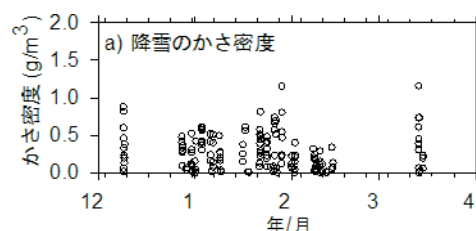


図 1 2019/2020 冬季に雪氷研の露場で測定したデータから算出した降雪のかさ密度の時系列。

$$\rho_{\text{snowfall_bulk}} = 2.5 \times 10^{-5} \times N + 0.22 \times d + 0.31 \times v + 2.6 \times 10^{-2} \times T - 0.675 \quad (R^2 = 0.82)$$

この式で用いている要素は気象モデルでも予報変数として使用されているので、気象モデルでも降雪のかさ密度を算出することができる。ただし、ここで求めた式は 1 冬季の観測値のみから算出されたものでありサンプル数が少ないので、今後は観測データを蓄積し、そのデータを用いたものに更新する必要がある。

降雪のかさ密度と新積雪のかさ密度の関係を把握することも表層雪崩予測では重要である。そこで、雪水比（降雪の深さと降水量の比）を用いた新積雪のかさ密度の算出も試みた。雪氷研で 2018/2019 冬季に重量式降水量計で測定した降水強度と積雪深測定値から算出した氷点下時の雪水比の時系列を図 2a に示す。期間全体の雪水比の平均は、1.88 (n=59) であった。降雪を霰と雪片に分けた場合の平均雪水比 (SRratio: cm/mm) は、それぞれ 1.62 (n=31)、2.04 (n=18) であった。単位時間に積もった新積雪かさ密度 ($\rho_{\text{snowcover_bulk}}$) は降水強度 (P : mm/h) を用いて次の式で算出できる。

$$\rho_{\text{snowcover_bulk}} = \rho_{\text{water}} \times P \times (\text{SRratio} \times 0.01)$$

上の式に水の密度を 1000kg/m³、全体の平均雪水比を 1.88 と仮定し、各時間帯の降水量から

推定した新積雪のかさ密度の時系列を図 2b に示している。また、降水量を重量に換算したものを降雪の深さで割って算出した新積雪のかさ密度の時系列も合わせて示している。雪水比から推定したもの(図 2b 赤点)は降雪の深さを使ったもの(図 2b 黒点)より値が全体的に小さい。観測では霰が多かったのに対し、全体平均の雪水比を用いたためであると考えられる。ここで用いた雪水比は、2018/2019 の 1 冬季の結果を用いたものでありサンプル数が少ないので、暫定値である。今後もデータを蓄積し、気温や降雪の種類を考慮した雪水比を算出することで、気象予測モデルで精度の良い新積雪のかさ密度が推定できる可能性がある。

図 2c は、10 分データから算出した落下速度の平均値と最大値を用いて、その落下速度を持つ降雪粒子が 10 分毎に落下する距離を 3 時間積算した場合の空気のかさ(嵩)の時系列を示している。新積雪の密度を空気のかさで除することでおよそその降雪のかさ密度が推定できる。落下速度の平均値と最大値から算出した空気のかさ平均値は、それぞれ約 7500、14500 m であった。3 時間積算で考える場合、新積雪の密度の 4 桁程度小さい値がおおよそその降雪のかさ密度と推測できる。

図 2d は図 1 に使用した降雪のかさ密度を 3 時間積算した時系列を示している。新積雪かさ密度の値より約 4 桁低い値であった。新積雪かさ密度と空気のかさから推定される降雪のかさ密度の値と同程度である。このことは、時間分解能の細かい降雪のかさ密度を積算することで、任意の積算時間の降雪のかさ密度を算出できることを示唆している。

新積雪のかさ密度と降雪のかさ密度の相関係数は 0.28 であり、相関は無いという結果であった。このことは、2018/2019 冬季の新積雪のかさ密度は、降雪のかさ密度算出に使用した降雪粒子の粒径や落下速度の情報よりも風速などの他の要素の依存性が強いことを示唆している。一方、Ishizaka et al. (2016)では、降雪粒子の粒径や落下速度情報から霰や雪片の新積雪のかさ密度を算出する方法を提案しており、本研究の結果と矛盾する。降雪の種類を分類した上での解析など、詳細な解析が今後必要であると考えられる。

(2) 落下速度が変化する温湿度環境や卓越する雲物理過程の明確化

落下中の降雪のかさ密度変化をもたらす雲物理過程の寄与率を明確化することを目的として、雪氷研の露場から水平方向に約 4km、高度方向に約 450m 離れた八方台(北緯 37.42 度、東経 139.93 度、海拔高度 566m)に降水粒子計測装置を設置し、2 冬季の観測を行った。八方台でも 2019/2020 冬季は少雪だったため十分なデータが取得できなかった。そのため、ここでも 2018/2019 冬季のデータを解析した結果を示す。図 3 は雪氷研と八方台の測定値から算出した降雪のかさ密度の散布図である。1 対 1 直線を中心に分布していることが分かる。両者の相関係数は 0.68 であり、相関がある。このことは、両者の観測データが同じ降雪雲からもたらされた事例が多くあることを示唆している。散布図に使用した八方台と雪氷研の降雪のかさ密度の差をとり、その差を 0.1 と -0.1 を敷き値として 3 つのグループ(図 3 参照)にデータを分けて解析を行った。高度の高い八方台のかさ密度が高い領域(図 3 緑色)に分布するデータを落下中のかさ密度が小さくなる領域とし、逆に高度の高い方のかさ密度が低い領域(図 3 黒色)に分布するデータをかさ密度が大きくなる領域とみなした。それぞれの領域のデータを更に Ishizaka et al. (2016)や Yamashita et al. (2019)の粒径-落下速度測定値が粒径-落下速度座標図上(図 4 参照)のどこに位置するかで降雪粒子の種類を分類する手法を用いて卓越する降雪粒子の種類

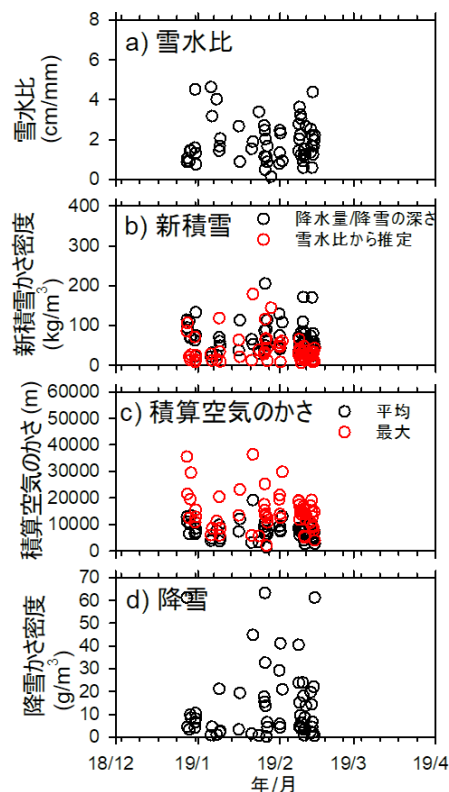


図 2 雪水比(a)、新積雪かさ密度(b)、積算空気のかさ(c)、積算降雪かさ密度(c)の時系列。積雪深計で積雪を検知できるまで時間がかかるので雪水比と新積雪のかさ密度 3 時間平均値を用いている。空気のかさと降雪のかさ密度は 3 時間積算値を用いている。

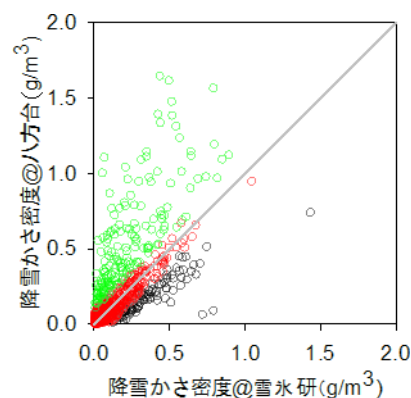


図 3 雪氷研と八方台の降雪かさ密度散布図。

分類を行った。種類分類した両サイト降雪粒子の種類情報と雲物理過程を把握するのに必要な雲物理量の増減情報を表1に示す。落下中のかさ密度の減少や落下速度の減少に効いているプロセスとして、衝突併合プロセスが推定された。一方、増加させるプロセスは全体データを用いた解析では分からなかった。今後、個々の事例解析を行うことによりどのようなプロセスが効いているかを調査する必要がある。

表1で分類したデータが取得された時の上空の気象環境を、多波長マイクロ波放射計データから得られる気温の鉛直分布で見ると、落下中にかさ密度が減少する領域に分類されるデータが測定された時の上空の気温は、かさ密度の増加する領域に分類されるものより相対的に気温が0℃に近い値になっていた。衝突併合プロセスは、気温が0℃に近いほど活発なので、上空の気温からも衝突併合プロセスが比較的活発であったことが示唆され、表1の結果と整合がある。

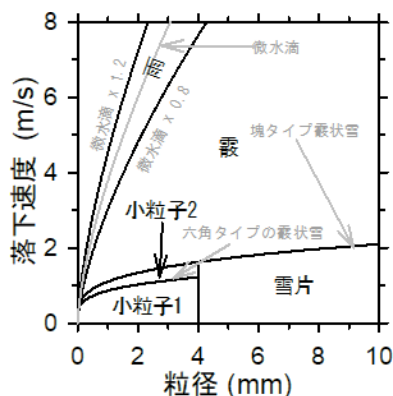


図4 降水粒子の種類を分類するための粒径-落下速度図。微水滴の曲線は、Atlas and Ulbrich (1977) のものを、塊タイプ霰状雪と六角タイプ霰状雪の曲線は、Locatelli and Hobbs (1974) のものを用いている。

表1 落下中の降雪粒子の雲物理量の増減、卓越する降雪粒子の種類、及び雲物理量を変化させていると考えられる雲物理プロセス

かさ密度変化	高高度で卓越する降雪の種類			低高度卓越する降雪の種類			データ割合 (%)	粒径変化	落下速度変化	数濃度変化	推定される卓越雲物理プロセス
	種類	種類	種類								
減少	霰	霰	霰	47	増加・減少	減少	減少	減少	衝突併合、蒸発		
	霰	雪片	雪片	38	増加	減少	減少	減少	衝突併合		
	霰	小粒子2	小粒子2	7	増加・減少	減少	減少	減少	衝突併合、蒸発		
	雪片	雪片	雪片	5	増加・減少	減少	減少	減少	衝突併合、蒸発		
増加	霰	霰	霰	61	増加	変化なし	変化なし	変化なし	ライミング		
	霰	雪片	雪片	22	増加	減少	変化なし	変化なし	不明		
	霰	小粒子2	小粒子2	6	増加	変化なし	変化なし	変化なし	不明		
	雪片	雪片	雪片	3	増加	変化なし	変化なし	変化なし	不明		

(3) 降雪のかさ密度に変化を及ぼす雲物理過程の寄与率の明確化

落下中の雲物理量の変化過程を理解するための一次元の詳細雲物理モデルの開発では、地上遠隔測定により得られる温湿度や高度の高いサイトで測定した雲物理量を入力値とし、落下中の雲物理量の変化を計算するモデルを作成した。図5は、モデル計算で得られた結果の一例を示している。計算値と実測値が一致していないことからわかるが、まだ、実測値を再現できるレベルまで達していない。しかしながら、上空の測定値を入力して落下中の降雪粒子の雲物理量の変化を計算できるようになった。今後は、モデルで実測結果を再現できるように改良し、あらゆるケースに対してかさ密度の変化を計算し、変化プロセスを明確化する予定である。このモデルは参照用のモデルとしての利用を想定しており、気象予報モデルの雲物理スキーム開発、及び開発した雲物理スキームの検証モデルとしての利用を想定している。また、本研究で得られた知見も雲物理スキームの改良に有用であり、降雪のかさ密度の精度良い予報に繋がる可能性がある。このことは、降雪量や表層雪崩の面的予測の高度化に繋がること期待される。

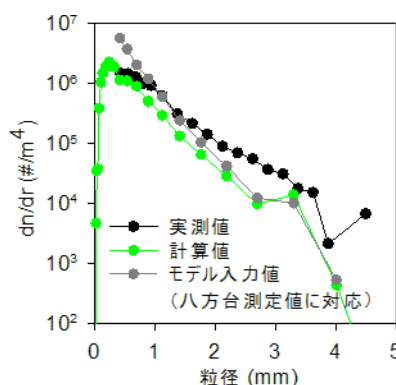


図5 詳細雲物理モデルで計算した降雪粒子の粒径分布(緑)と雪氷研で実測した降雪粒子の粒径分布(黒)。灰色で示した粒径分布はモデルに入力した八方台での実測値である。

参考文献

Atlas, D. and Ulbrich, C. W. (1977): Path- and area-integrated rainfall measurement by

- microwave attenuation in the 1-3 cm band. *J. Appl. Meteor.*, 16, 1322-1331.
- Ishizaka, M., Motoyoshi, H., Nakai, S., Shiina, T., Kumakura, T. and Muramoto, K. (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., Motoyoshi, H., Nakai, S., Shiina, T., Kumakura, T. and Muramoto, K. (2016): Relationships between snowfall density and solid hydrometeors, based on measured size and fall speed, for snowpack modeling applications. *Cryosphere*, 10, 2831-2845.
- Locatelli, J. D., and Fobbs, P. V. (1974): Fall speeds and mass of solid precipitation particles. *J. Geophys. Res.*, 79, 2185-2197.
- Yamashita, K., Nakai, S., Motoyoshi, H., and Ishizaka, M., (2019): An improved snowfall monitoring system developed in central Niigata Prefecture, Japan. *Bull. Glaciol. Res.*, 37S, 21-30.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山下克也、本吉弘岐、中井専人
2. 発表標題 ディストロメーターを用いた2高度での降雪粒子観測
3. 学会等名 2019年度日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下克也
2. 発表標題 落下中の降雪粒子の雲微物理特性に関する調査研究
3. 学会等名 2019年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下克也、中井専人、本吉弘岐
2. 発表標題 新潟県上越市で測定した降水粒子の落下速度変化
3. 学会等名 雪氷研究大会(2018・札幌)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下克也、中井専人、本吉弘岐
2. 発表標題 落下中の降雪粒子の併合成長事例解析
3. 学会等名 2020年度日本気象学会秋季大会(2020・オンライン)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中井 専人 (NAKAI SENTO) (20360365)	防災科学技術研究所・雪氷防災研究部門・総括主任研究員 (82102)	
研究協力者	橋本 明弘 (HASHIMOTO AKIHIRO) (20462525)	気象庁気象研究所・気象予報研究部・主任研究官 (82109)	
研究協力者	本吉 弘岐 (MOTOYOSHI HIROKI) (70571462)	防災科学技術研究所・雪氷防災研究部門・主任研究員 (82102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------