

富山における積雪深増加時の降水粒子特性に関する研究

キーワード：富山, 積雪深, 降雪粒子, ディスドロメーター, 二重偏波レーダー

更科 孟 *1 安永 数明 *2 濱田 篤 *2

1. はじめに

1. 1 富山における降雪の特徴

富山県の位置する北陸地方は、大陸からの北西季節風の影響により多量の雪が降り、全域が豪雪地帯に指定されている。雪雲は富山・石川県境の山脈を越えて西から流入することが多く、山間部を中心とした降雪が見られるほか、富山県の平野部でも日本海寒帯気団集束帯（JPCZ）や中規模渦状雲に伴って断続的に降雪を観測することも少なくない。ただし、平野部ではシーズンを通して雪が積もっていることは少なく、雪が積もっては消えを繰り返すことが多い。北海道や東北地方と比べ氷点下になることが少なく、冬季でもしばしば雨が観測されるのが特徴である。

1. 2 数値予報の現状と限界

近年の観測技術と計算機技術の発達に伴って数値予報の精度は格段に向上し、大雪の恐れがある場合には報道が行われるようになってきた。しかし、大雪は局地的である場合が多く、アメダスの観測から漏れることも多い。どの地域でどれだけの降雪イベントが起こるのかを予測するのは現在でも難しく、そのうえ、富山県のような平均気温の高い地域は雨雪の判定が難しいこともあって、降雪予報をさらに困難にしている。

1. 3 地上観測による研究

地上における降水タイプは、地上気温だけでなく地上の相対湿度にも依存していることが知られている（例えば Matsuo et al. 1981）。現在、地上での降水タイプや降雪頻度は、地上気温や湿度の影響が大きいというのが定説となっているが、それらの要素を降雪量自体と関連付けた研究はあまり行われていない。

ディスドロメーターを用いて降雪強度を推定するという研究が近年行われるようになってきた。小西ら (2011) をはじめ、ディスドロメーターの降水強度値から降雪量を見込もうとする研究が北海道や長岡で行われている。

1. 4 レーダー観測による研究

石坂ら (2003) は、降雪をもたらす雪雲のパターンである降雪モード (Nakai et al. 2005) と降雪粒子の関係について議論しており、降雪モードと降雪粒子タイプとの間に密接な関係があることを指摘している。また、近年では偏波

レーダーパラメータを用いた粒子判別も盛んに研究されるようになってきた。国土交通省の北陸地方整備局ではこれらを用いて XRAIN ネットワークにおいて降雪観測の精度向上を図っている（例えば板戸ら 2017）。

1. 5 本研究の目的

本研究では観測に基づいて降雪量の予測を行うことを念頭に置いている。現況を地上観測やレーダー観測により把握し、数分から1時間程度先の降雪量を予想、短時間予報として用いてもらうことが目標である。そのために、積雪深増加時において、地上観測機器によって観測された気温や湿度などの地上気象要素や、ディスドロメーターや偏波レーダーの観測データに見られる特徴を明らかにすることを目的とする。

2. 使用データ・観測測器

本研究では、富山大学理学部の建屋屋上において観測された降水粒子と基本的な気象要素（気温・湿度・風向・風速・気圧）のデータ、富山地方気象台における積雪深のデータ、富山市水橋入江に設置された X バンド MP レーダーの観測データを使用している。図1に示すように、富山地方気象台は富山大学から北東に約 1,800 m のところに、水橋入江のレーダーサイトは富山大学から東に約 8,200 m のところに位置している。解析期間は、2016 年 12 月から 2018 年 2 月までの 2 シーズン（1 シーズンは 12～2 月）である。

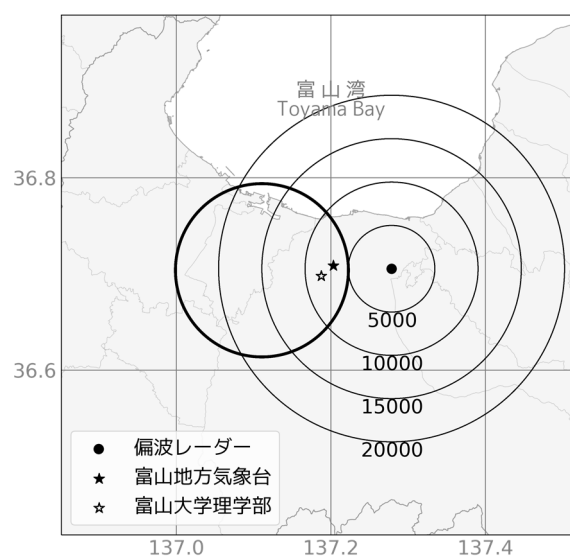


図1 各観測点の位置関係

2. 1 降水粒子と気象要素に関する観測

降水粒子と気象要素については、富山市五福にある富山大学理学部の建屋屋上に設置したヴァイサラ社製複合気象計 WXT-520 と、光学式ディストロメーターである Thies Clima 社製 CTC-LPM (Laser Precipitation Monitor) の観測値を使用している。

複合気象計 WXT-520 は、基本的な気象要素である風向、風速、温度、湿度、気圧、降水量を一体型センサにより観測可能で、富山大学ではそれぞれの観測値が1分間の平均値として保存されている。本測器によって観測された降水の値は、本研究では用いていない。

CTC-LPM (以下 LPM とする) は、降水粒子によって遮蔽されるレーザー光の減衰量から降水粒子の粒径や落下速度を測定する光学式ディストロメーターの1つで、粒径は 0.125 mm 以上の 22 クラス、落下速度は 0.0~20.0 m/s の 20 クラスの計 440 クラスについてそれぞれの粒子数を観測することができ、複合気象計と同様に1分間の積算値が保存されている。また、LPM は降水粒子の粒径や落下速度をもとにした降水強度値も出力しており、時間解像度が高く降水に対する応答も良いという利点から、本研究では降水強度値としてこの出力値をそのまま使用している。また、強風時の観測への影響を考慮し、WMO が推奨する防風柵 (直径 12 m と 4 m の円に内接する八角形のもの) のうち内側のものを設置して、降水粒子の捕捉率低下に対処している。

2. 2 富山地方気象台での積雪深の観測

積雪深については、富山市石坂に位置する富山地方気象台の観測露場に設置された、レーザー式の積雪深計の観測値を使用している。本研究ではある時間の積雪深と1時間前の積雪深の差分をその時間の「積雪深変化量」として解析を行っている。

2. 3 XバンドMPレーダーによる観測について

積雪深と降水粒子特性の関係をより広範囲に調べるために、富山市水橋入江に位置する国土交通省北陸地方整備局富山防災センターの屋上に設置された、XバンドMPレーダー水橋局の観測データを使用している。

このレーダーは従来のレーダーと比較してより細かく短い観測間隔で降水を観測でき、従来の反射強度 ZH に加えて、反射因子差 ZDR や偏波間位相差変化率 KDP、偏波間相関係数 ρ_{HV} といった偏波パラメーターを取得することが可能で、上空での降水粒子の様子を推測できるのが特徴である。

オリジナルデータの空間分解能は、動径方向に 150 m、方位角方向に 1.2° である。水橋局での仰角設定は更科ら (2019) を参照されたい。1分間に3回の PPI (Plan Position Indicator) 観測が行われている。

3. 解析手法

本研究では富山地方気象台における1時間毎の積雪深データをもとに解析を行うため、理学部屋上で観測した地上気象要素や LPM の粒径・落下速度のデータを平均または積算して1時間毎のデータとしている。LPM が出力する降水強度のデータについても、平均処理を行うことにより1時間降水量 (以下 LPM 降水量) として解析に使用している。

まず、気象台における積雪深変化量が、理学部屋上で観測した各地上気象要素 (気温や相対湿度、風速など、LPM 降水量も含む) とどの程度関連しているかを調べるために、各地上気象要素を説明変数、積雪深変化量を被説明変数として単回帰分析を行った。次に、積雪深変化量と降水量以外の気象要素との関係を調べるために、LPM 降水量を説明変数、積雪深変化量を被説明変数としたときの単回帰直線から予測される積雪深変化量よりも、実際には大きく変化したケースを「予測式よりも積もった」 (以下単に「積もった」とする) 場合、逆のケースを「予測式よりも積もらなかった」 (以下単に「積もらなかった」とする) 場合として、LPM で観測された降水粒子特性に関するコンボジット解析を行った。さらに、積雪深変化量と降水粒子特性の関係をより広範囲に調べるために、それぞれの場合における X バンド MP レーダーのパラメータに関するコンボジット解析を行った。

4. 結果

4. 1 LPM 観測データの解析結果

まず、積雪深変化量と各地上気象要素に関して単回帰分析を行った。事例数を確保しつつ可能な限り雨滴の事例を排除し、後のレーダー解析に際して融解層の影響を受けないようにするために、気温 0.5°C 以下で、かつ LPM により何らかの降水粒子が観測された 577 時間分を対象とした。その結果、気温や相対湿度と積雪深変化量との間には有意な関係性が見られなかった一方で、LPM 降水量と積雪深変化量との間には $R^2 = 0.7$ という強い比例関係を確認できた (更科ら 2019)。

次に、降水量以外にどの気象要素が積雪深変化量に寄与するかを詳細に調べるため、粒径・落下速度分布にどのような特徴があるかを積雪深変化量の LPM 降水量への回帰直線を基準として調べた。LPM 降水量から予測される積雪深変化量と比べて相対的に「積もった」場合と「積もらなかった」場合とでグループ分けし、粒径・落下速度分布に関するコンボジット解析を行って比較した (図2)。ここでは、2つのグループの粒子数自体が大きく異なるため、全体の観測粒子数で正規化した値を用いて「積もった」「積もらなかった」両グループを比較している。また、有意差検定として危険率5%の両側検定 (Student's t 検定) を実施した。

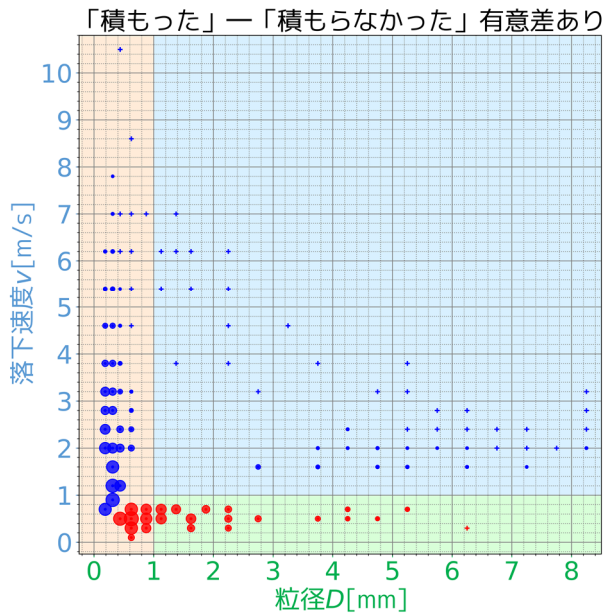


図2 「積もった」「積もらなかった」各場合における各クラスの粒子数割合の平均値の差
ここでは有意差があったクラスのみ示している
(更科ら 2019 より再掲)

図2では、赤色のマーカーが落下速度 $v < 1.0$ m/sのクラスで見られている。赤色のマーカーはそのクラスにおいて「積もった」場合が占める割合がより大きいことを示している。逆に「積もらなかった」場合が占める割合が大きいことを示す青色のマーカーは、粒径 $D < 1.0$ mmのクラスで多く見られる。

4. 2 レーダー観測データの解析結果

積雪深変化量と降水粒子特性の関係をより広範囲に調べるために、水橋入江にあるXバンドMPレーダーの偏波パラメーターに着目した。ここでは、雪が降っていると推定された577時間分のうち、積雪深が1時間で2 cm以上増加し、かつ60分間連続して何らかの降水粒子を観測している時間において、顕著に「積もった」15事例と顕著に「積もらなかった」15事例の計30時間分について、偏波レーダーの各パラメーターに関するコンボジット解析を行った。

解析に際して、配信用・CAPPI観測用の5分間計15回分のPPI観測データから、空間解像度を水平方向に $150\text{ m} \times 150\text{ m}$ 、鉛直解像度を150 mとしてクレスマン内挿(Cressman 1959)により5分毎の「解析用CAPPI」データを作成した。この5分の間にも降水システムは移動するため、その移動を考慮して移動補正を行う必要があるが、簡単化のために無風状態と仮定して補正は行っていない。レーダーの解析領域は降水システムの多くが西から東に進むことを踏まえ、地上観測地点の富山大学理学部や富山地方気象台から西に約7,500 m離れた地点を中心に、半径10,000 mの領域を

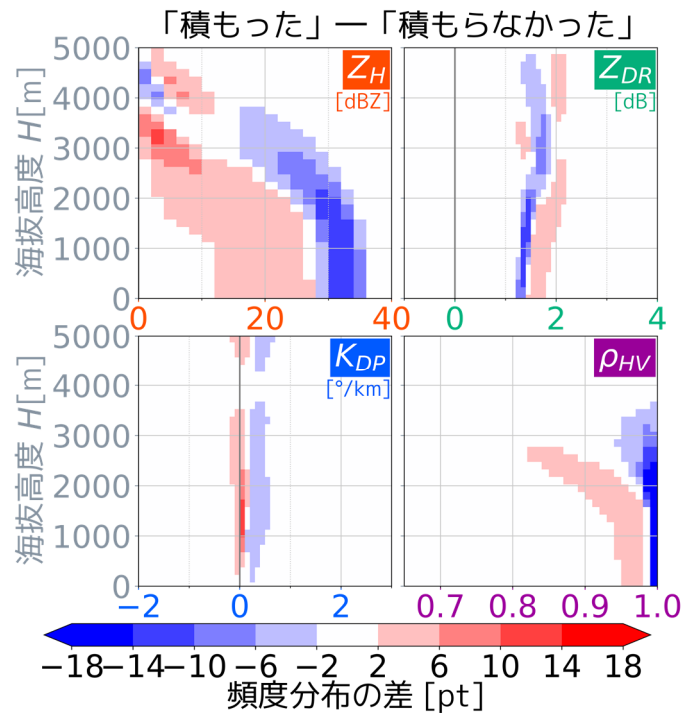


図3 「積もった」「積もらなかった」各場合についてCFADを描き、その差分をとったもの
(各場合のCFADは更科ら 2019 を参照されたい)

解析対象とした(図1の太線円内)。15事例ずつある「積もった」「積もらなかった」場合それぞれの平均的な頻度分布を求め、両者の差分をとることによって比較した。

図3は、レーダー反射強度ZH、レーダー反射因子差ZDR、偏波間位相差変化率KDP、偏波間相関係数 ρ_{HV} について「積もった」「積もらなかった」場合それぞれにおいてCFAD(Contoured Frequency by Altitude Diagram)を描き、その差分をとったものである。

レーダー反射強度ZHは、降水粒子が高密度または大粒径の場合に大きな値を持つとされるが、「積もった」場合の方が反射強度は弱く、その値に幅があることが分かった。これは強雨時に反射強度が強くなる傾向とは逆の様相を呈している。また、どちらの場合も高度1,000 m以上において、高度が高くなるにつれ反射強度値が低下しているのを見ることができたが、「積もった」場合の方がより低高度から反射強度値の低下が見られた(図略)。レーダー反射因子差ZDRは降水粒子の縦横比に依存しており、値が大きいことは粒子が横長であることを示す。ZDRは「積もった」場合において大きな値をとる頻度がより高く、またその値に幅を持ち、その特徴は高度2,000 mから3,000 m付近において顕著であった(図略)。偏波間位相差変化率KDPは数密度が低く粒子が球形に近いときに0.0付近を示し、数密度が高く横長のとき正の大きな値をとるとされるが、「積もった」場合の方が0.0に近い値を示すことが分かった。偏波間相関係数 ρ_{HV} は粒子の形状や相が揃っているときに1.0に近い値を示す指標で、一般的な雨滴では1.0付近を示す。融解層な

どのような粒子が混在する場合に値が小さくなるが、X バンド MP レーダーでは降雨下でも 0.7 程度の値を観測したことがあるとされている。いずれの場合も低高度において、高頻度域が 1.0 付近に集中していたが、「積もらなかった」場合においてより集中していた。「積もった」場合には特に高度 2,000 m 付近で値の分散が大きくなっており、その高度は「積もらなかった」場合よりも低かった（図略）。

5. 考察

LPM による解析結果を示した図 2 において、「積もった」場合に大きな割合を占める落下速度 $v < 1.0$ m/s のクラスの粒子は、空気抵抗が大きくひらひらと落ちてくる樹枝状結晶や雲粒付雪片といった粒子の存在が推察される。一方で「積もらなかった」場合に大きな割合を占めた落下速度が大きいクラスの粒子は、霰などの粒子が考えられる。

偏波レーダーデータによる解析結果については、特に降雪粒子タイプごとにとり得る各レーダーパラメータの値を求めることは最新の研究であり、実際にどのタイプの降雪粒子が降っていたかを確認するだけのデータもないため、考察は難しいのが現状である。しかし「積もった」場合における地上観測データの結果を踏まえると、反射強度 ZH や反射因子差 ZDR、偏波間相関係数 ρ_{HV} の値が相対的に大きな分散を持っていたことは、様々な形の粒子がゆっくりと降ってきたことで説明できるのではないかと考えている。「積もった」場合において、様々な粒径の粒子が存在することで反射強度 ZH の値に幅を持ち、様々な縦横比の粒子がレーダーに対する断面を変えながら落ちてくることで、反射因子差 ZDR の値が幅を持っているのではないかと考えている。これらは図 2 で落下速度の遅いクラスにおいて、粒径に拘わらず赤色マーカーがついていることと整合的である。偏波間相関係数 ρ_{HV} の値が幅を持っているのは、様々な粒径・縦横比をもつ粒子が混在していることで説明可能である。

今後は、降水粒子を直接撮影するなどしてこれらの推察を確認するとともに、各パラメータの値が何を反映しているのか検証していく予定である。また、上述したような降雪粒子が、積雪深を効果的に増加させるメカニズムについても様々な仮説が考えられるが、これを確かめるだけの観測データも得られていない。これについても精度の高い降雪量計や電子天秤等による観測を行う計画である。

6. まとめ

観測に基づく降雪量の予測につなげるために、積雪深変化量に最も寄与しそうな要素は何かを富山において調べたところ、気温や相対湿度とはあまり相関がなく、降水量と良い相関を確認できた。しかしながら、降水量は降水粒子そのものを観測して得た値のため、この結果は当然のもの

といえる。そこで、降水量以外の要素について積雪深変化量に寄与する気象要素を詳細に調べるために、降水量を基準とした解析を行った。降水量に対して相対的に「積もった」場合と「積もらなかった」場合とに分けて比較した解析では、「積もった」場合において落下速度の遅い粒子群がより大きな割合を占める傾向があることが分かった。さらに、この「積もった」「積もらなかった」場合について X バンド MP レーダーのデータを使用して比較したところ、「積もった」場合においてレーダー反射強度 ZH は値に幅を持ち、その値のピークも弱く、レーダー反射因子差 ZDR や偏波間相関係数 ρ_{HV} もその値に幅を持っていることが分かった。いずれの結果も様々な形の粒子がゆっくりと降ってきたことを反映しているものと考えられる。

今後は、他の地点についても同様のことがいえるか解析するとともに、地上や上空での降雪粒子の確認手法、他の気象要素についての見落としがないか検討していきたい。

7. 謝辞

本研究で使用した XRAIN データセットは、文部科学省の委託事業により開発・運用されているデータ統合・解析システム (DIAS) の下で、国土交通省により収集・提供されたものです。

8. 参考文献

- Cressman, G.P. : An operational objective analysis system. Mon. Wea. Rev, 87, 367-374, 1959.
- Matsuo, T., Y. Sasyo, and Y. Sato : Relationship between types of precipitation on the ground and surface meteorological elements. J. Meteor. Soc. Japan, 59, 462-476, 1981.
- Nakai, S., K. Iwanami, R. Misumi, S. Park, T. Kobayashi : A Classification of Snow Clouds by Doppler Radar Observations at Nagaoka, Japan, SOLA, Vol.1, 161-164, 2005.
- 石坂雅昭・中井専人・清水増治郎・岩本勉之・椎名徹・村本健一郎 : 降雪粒子種の連続観測：降雪モードとの関係, 日本気象学会 2003 年秋季大会講演予稿集, 339, 2003.
- 板戸昌子・増田有俊・谷口和哉・境和宏・上田博・瀬戸丈晴・中井専人・石坂雅昭・本吉弘岐・山下克也, XRAIN を用いた冬期降水量推定精度向上に向けた取り組み, 日本気象学会 2017 年春季大会講演予稿集, 367, 2017.
- 小西啓之・平沢尚彦・石坂雅昭・亀田貴雄 : 粒径と落下速度の観測値を用いた降雪強度の推定法, 2011.
- 更科孟・安永数明 : 富山における積雪深増加時の降水粒子特性に関する研究(in press), 自然災害科学, Vol.38, 特別号, 201-212, 2019.