

京都大学	博士（工学）	氏名	高見 和弥
論文題目	Xバンド偏波レーダーを用いた新雪密度の推定手法の開発に関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>鉄道は定められた路線を移動する交通手段であり、路線上の1地点でも堆雪等による輸送障害がおこると影響は路線全体に及び、さらに接続する路線を含めると1地点の輸送障害が広い地域に伝搬する。雪害による影響を低減するためには降積雪の質、量を面的に把握することが必要である。近年では気象レーダーの普及により、地上観測点の無い場所でも降水量を精度よく得ることができるようになった。一方で、気象レーダーの観測で得られるのは液水等価降水量であり、降雪深ではない。液水等価降水量を降雪深に変換するためには、新積雪の密度（以下、新雪密度）と液水の密度の比である雪水比（降雪量/降水量）を与える必要がある。液水の密度は既知であるから、新雪密度を推定することが降雪量の推定にとって重要である。また、例えば落雪による施設の損壊の原因となる新幹線床下への着雪量を予測するうえでは、新雪密度の情報そのものも初期値として重要なパラメータとなる。本論文は、この新雪密度をXバンド偏波レーダーの観測値から推定する手法について新たに開発したものであって、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景として鉄道における雪害を例示するとともに、列車の合間に軌道内に降る降雪深の評価、および新幹線床下着雪量の評価において新雪密度が重要なパラメータであることを述べている。新雪密度は雪板を用いた人力での観測が必要となるため、そもそも1時間程度の高頻度な観測が難しく先行研究における取り組みが少ない。また、現状の気温などの気象要素を用いた推定では、特に気温0℃未満の乾いた雪に対しては、新雪密度の違いをもたらす着氷成長の度合いを十分に表現できていない。このため、本研究では1基で広範囲をカバーできるXバンド偏波レーダーを利用して、降雪粒子の種別や着氷成長の度合いを考慮して新雪密度を評価する方法を開発すること目的としている。1時間という短い評価時間で新雪密度のデータを多数収集すること、それを偏波パラメータで評価することはこれまでどの研究でも行われておらず、本研究独自の取り組みである。</p> <p>第2章では、偏波レーダーで観測する水平偏波のレーダー反射因子 Z_H、レーダー反射因子差 Z_{DR}、位相差変化率 K_{DP} について降雪粒子の変化に対する応答を整理するとともに、着氷成長の度合いと偏波パラメータの振る舞いおよび偏波パラメータの鉛直変化について、知見を整理している。液水と固体降水を対象としたレーダー観測の違いとして、降雪粒子の密度を考慮する必要があること、粒径に対する密度、形状（縦横比）が一様でないことを述べている。偏波パラメータは着氷成長の度合いが大きくなると Z_H は増加し、Z_{DR}、K_{DP} は減少する。ただし、併合成長においても粒径が増加し、粒子が球形に近づくために、偏波パラメータは着氷成長と似た傾向を示し、落下速度や2周波による観測を実施しない場合、偏波パラメータだけで区別することは困難であると報告されている。また、降雪を対象とした偏波レーダー観測では、気温-15℃付近の高度では縦枝状（Dendrite）および板状（Plate）の結晶が形成され、Z_{DR}、K_D の極大値が観測される。また、同高度～地上に向かって、併合、着氷成長に伴って Z_H は増加し Z_{DR}、K_{DP} は減少する。このため、地上付近では Z_{DR}、K_{DP} が0に近い値をとるために、降雪の定量的な評価が困難となっていることを整理している。</p>			

第3章では、本研究の目的を達成するために独自に計画、実施した観測について述べている。Xバンド偏波レーダーを設置した新潟市では、地上観測点に観測者が常駐できる拠点がなく、人力による新雪密度の観測では十分なデータ数を得ることが難しいという課題がある。そこで、まず南魚沼市の実験所を拠点として、高頻度に新雪密度の人力観測を行い、降雪粒子の粒径・落下速度分布を自動で観測する光学式ディストロメータ Parsivel²の観測値から新雪密度を推定する手法を開発して、これを新潟市の地上観測に適用し、偏波パラメータとの関係性を調べるという方針を打ち出している。

第4章では、南魚沼市における気温 0 °C未満の 157 事例の新雪密度の観測を基に、Parsivel²で観測される粒径・落下速度分布を用いて、着氷成長の度合いの平均値 F_{rim} に着目して新雪密度を推定する手法について検討しており、 F_{rim} が大きいほど新雪密度は大きくなり、その増加率は F_{rim} が小さい範囲で大きく、 F_{rim} が大きい範囲では緩やかであることを明らかにしている。回帰分析により、 F_{rim} を利用した新雪密度の推定式を提案し、降雪粒子の画像データも示して、提案手法は降雪粒子の種別を区別することなく、種別が混在している事例も扱うことができることを示している。

第5章では、偏波パラメータと新雪密度の関係性を調べる対象事例として、2021年1月に新潟市で観測した気温 0 °C未満での降雪 5 事例 (計 56 時間) について総観場や事例ごとの新雪密度、気象条件を整理している。このうち、新雪密度が小さかった事例、大きかった事例、大きく変化した事例を例として、先行研究で報告されているような着氷成長の度合いに対する偏波パラメータの変化は、どの事例に対しても適用できるわけではないこと、特に、 Z_{DR} 、 K_{DP} の振る舞いは Z_H の値の大きさに依存していることを示している。一方で、位相差変化率と反射因子の比 (K_{DP}/Z_H) をとって数密度を打ち消すことで、高度変化は大きいものの新雪密度との関係性は良好であることを示している。

第6章では、第4章で検討した Parsivel²の観測値から推定した新雪密度を真値として、地上に近い高度 1 km および気温 -15 °C 高度 (本観測では約 2 km 高度) における偏波パラメータの 1 時間平均と新雪密度の関係を調べ、以下の知見を明らかにしている。

- ・ 高度 1km では Z_{DR} が最も新雪密度とよい相関を示す。ただし、新雪密度が 50 kg m^{-3} より小さい、あるいは 70 kg m^{-3} より大きい範囲では Z_{DR} の新雪密度に対する変化率は小さい。また、全体として、 Z_{DR} の新雪密度の変化に対する値の幅は小さい (約 0.2 dB) ため、得られた関係性を用いて実運用を行うにはバイアス補正が懸念点となる。
- ・ 気温 -15 °C 高度における K_{DP}/Z_H は最も新雪密度とよい相関を示し、高度 1 km における Z_{DR} よりも相関係数が高い。新雪密度の値の範囲によらず、変化率はほぼ一定であり、シームレスに新雪密度の変化を表現することができる。同高度における K_{DP}/Z_H は、扁平な単結晶の存在に対応しており、そのような粒子が併合成長した雪片が積もったとき、積雪内の空隙が多くなり新雪密度が小さくなると推察される。

上記より、気温 -15 °C 高度における K_{DP}/Z_H と新雪密度について回帰分析を行い、新推定式を提案している。また、提案した推定式を 2022 年 1 月 17 日の降雪事例に適用し、従来の気温による推定では表現できなかった新雪密度の時間変化を表現できることを示している。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後の研究の展望について論じている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、降雪深の把握や雪害リスクの評価にとって重要な新雪密度について、Xバンド偏波レーダーを利用することでリアルタイムに把握することを目標に研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な研究成果は次のとおりである。

1. 新雪密度の観測は雪板を用いた人力によるものであり、1時間という短い評価時間で新雪密度のデータを多数収集し、地上での気象要素や降雪粒子の諸特性との関係を調べた研究は他にはない。まず従来の新雪密度の推定手法で利用されている地上気温について、気温が大きいほど新雪密度の大きな事例が出現し易くなることを示している。しかしながら、気温の値に対する新雪密度の下限値はおよそ一定で、気温だけでは着氷成長の度合いの変化を表現しきれないことを明らかにしている。次に、光学式ディストロメータで観測される粒径・落下速度分布を用いて、着氷成長の度合いの平均値との関係性を調べている。平均的な着氷成長の度合いが大きいほど新雪密度は大きくなり、その増加率は着氷成長の度合いが小さい範囲で大きく、大きい範囲では緩やかであることを示し、新雪密度にとって着氷成長の度合いが支配的なパラメータであるという重要な知見を示している。また、回帰分析を行い、降雪粒子の種別を区別する必要がないという点で実用的な、新たな新雪密度の推定式を提案している。
2. 1. で提案した光学式ディストロメータの観測値を用いて推定した新雪密度を真値と仮定して、Xバンド偏波レーダーで観測される偏波パラメータとの関係性を調べており、気温-15℃高度の偏波間位相差 K_{DP} と反射因子 Z_h の比 (K_{DP}/Z_h) が最も良い相関を示すことを明らかにしている。 K_{DP}/Z_h は同高度における樹枝状結晶などの扁平な単結晶の形成を示しており、このような粒子が併合成長して積もったときに積雪内の空隙が大きくなることで新雪密度が小さくなることを考察している。気温-15℃高度の K_{DP}/Z_h と新雪密度について回帰分析を行い、Xバンド偏波レーダーの観測値を用いた新雪密度の推定手法を新たに提案している。また、提案手法を解析対象外の降雪事例に適用し、従来の気温による推定では表現できなかった新雪密度の時間変化を表現できることを示している。
3. 2. で示した気温-15℃高度の K_{DP}/Z_h は、雪粒子が併合成長や着氷成長によって地上付近では球形に近くなること、粒径が増加することから、地上に近い高度 1 km よりも気温-15℃高度の方が新雪密度との相関が良いことを明らかにしており、レーダーによる立体観測の重要性を示している。

以上のように、本論文は新雪密度の推定という実用的な目的に留まらず、雲物理現象そのものに関する新たな知見をもたらしている。得られた成果は工学的な観点だけでなく、気象学、雪氷学的にも、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年8月1日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。