

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

レーダー情報から雪の乾湿を推定して 鉄道の雪害対策に役立てる

降水が雨か雪か、また雪が乾いた軽い雪か湿った重い雪かによって、同程度の降水量でも鉄道の設備、運行に与える影響は大きく異なります。このような地上での降水の形態は、簡易的には地上の気温で判定されますが、厳密には降水粒子が地上に落ちてくる間の熱環境によって決まります。ここでは地上気温のみの判定より精度の高い降雪情報の提供を目的として、レーダーの情報によって上空の雪が解け始める高さを推定して、地上での融解度合いを求める手法に関する研究を紹介します。



高見 和弥
Kazuya Takami
防災技術研究部
気象防災研究室
研究員



佐藤 亮太
Ryota Sato
前 防災技術研究部
気象防災研究室
副主任研究員



高橋 大介
Daisuke Takahashi
防災技術研究部
気象防災研究室
研究員



鈴木 賢士
Kenji Suzuki
山口大学
創成科学研究科
農学系学域
教授

はじめに

日本の鉄道の線路は総延長で約2万kmですが、その40%にあたる約8千kmは豪雪地帯対策特別措置法で指定された「豪雪地帯」に敷設されているため、さまざまな雪害(図1)が毎年のように発生しています。これらの雪害は大雪の時にのみ発生するわけではありません。雪害の種類によっては雪の量だけでなくその性状(乾いているか、湿っているか)によって発生のしやすさが変わることが知られており、例えば架線やパンタグラフへの着雪は気温0℃付近で湿った雪が降っているときに発生しやすいといわれています。よって雪の量だけでなくその性状(乾湿)を把握することが必要です。

一方で、首都圏や近畿地方など豪雪地帯に指定されていない地域で降雪があった場合は、少ない降雪でも大きな影響が生じることがあります。これら太平洋側の雪は気温0℃付近で降ることが多いため、雨雪の判別が重要となります。例えば、1時間に5mmの雨で首都圏の鉄道が影響を受けることはありませんが、それが雪であれば、仮に新雪の密度が50kg/m³であったと

すると、圧密や融解を考慮しなければ約10cmの積雪となり大きな影響を及ぼすことが考えられます。また、雪の中でも湿り具合によってその密度は変わり、50～150kg/m³程度の幅があるため、降水量に対する積雪深の増加量は異なります。

このように、同じ降水量でも、降ってくるものが雨なのか雪なのか、また雪でも乾いた軽い雪なのか、湿った重い雪なのかによって、鉄道の運行への影響は大きく異なります。よって地上での降水の形態(雨、湿雪、乾雪)を把握することは、適切な雪害対策を行ううえで重要な情報となります。

現状の雨雪判別方法の課題

雨と雪の判別は簡易的には気温を用いて、経験的な値(例えば1℃)を境に分けることが多いですが、実際には気温だけでは明確に雨と雪を区別することはできません。例えば、2015～2019年度冬期の新潟アメダスの観測記録をみると、1時間で積雪が2cm以上増えたケースでは、その99%は気温が1℃以下でした。一方で、気温1℃以下で降水があった時刻をすべて

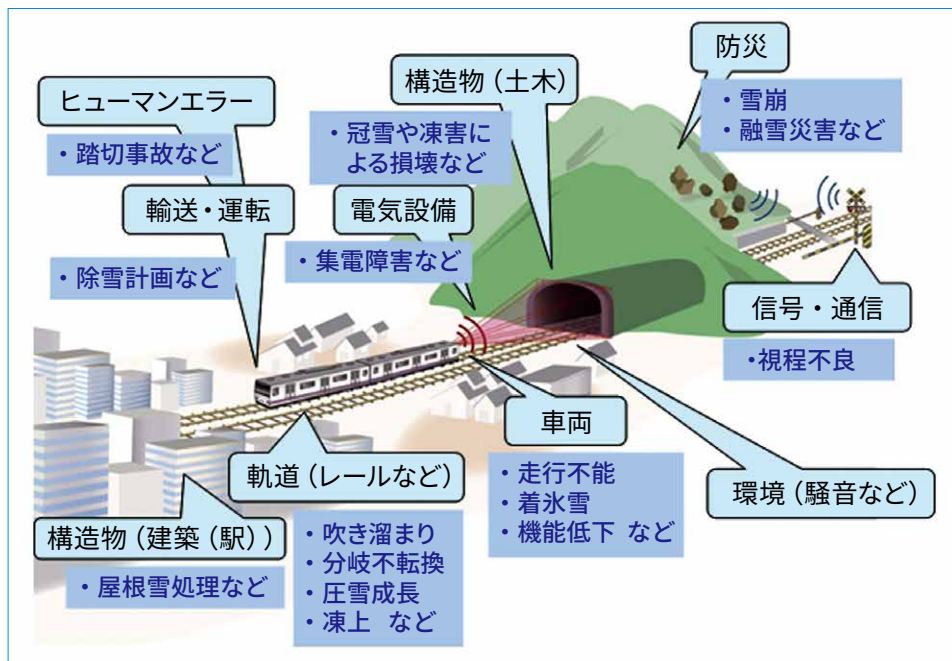


図1 鉄道の雪害の例

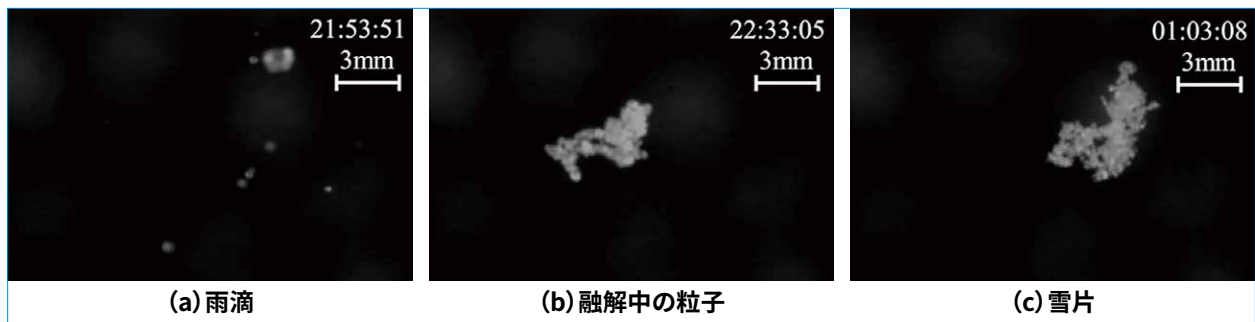


図2 観測した降水粒子の画像の種別

抜き出すと、4割以上の時刻では積雪の増加がありません。アメダスの積雪深データは、最小単位が1cmですので、積雪増加が1cm未満であった、または積雪の圧密、融解で増加分が相殺されたことも考えられますが、気温だけで雨雪を判別するのは難しいことがわかります。

実際に我々が新潟市内で実施した観測例を以下に示します。この観測では降水粒子の映像をとらえて、降水粒子の種類ごとに、個数や形状に関する情報を得ることができる機器¹⁾を使用しました。図2に降水粒子の画像の例を示します。図2(a)は雨滴、(b)、(c)は固体降水であることがわかります。また、(b)、(c)は輪郭の滑らかさから(b)が融解粒子(湿った雪)、(c)が

雪片(乾いた雪)と分類できます。図3に示したのが、粒子の画像を雪片、融解粒子、雨滴の3種類に分類して、5分間ごとの、全粒子の個数に対する種類ごとの割合を求めたものです。この事例では、すべての時刻で気温は0~1℃であったため、先述した気温1℃で単純に雨雪を分けた場合、全て雪であると判定されることとなります。しかし、図2に示した降水粒子の画像のように、実際は雨から雪に変化していったことが確認でき、またその割合も図3のように変化していることが明らかになりました。

雨雪判別方法の精度向上

地上の気温だけで降水の形態が決まらないのは、厳密には上空から降って

くる雪の粒径や、落ちてくる間の融解や水蒸気の凝結による雪片表面での熱収支によって地上での融解度合いが決まるためです。そこで、上空から落下してくる雪片を追跡して、表面からの融解を物理的に計算する手法²⁾(以下、雪片の融解モデル)を利用し、地上気温だけでの判定よりも精度よく雨雪および雪の乾湿を判定する手法の作成を目指しました。雪片の融解モデルの計算を行うためには、入力データとして、以下の2つが必要となります。

- ① どのような大きさの雪片が落ちてくるか(計算の初期値)
- ② どの高さから落ちてくるか(計算の開始高度)

これらの入力値を用意するにあたり、アメダスなどの地上観測点を利用した

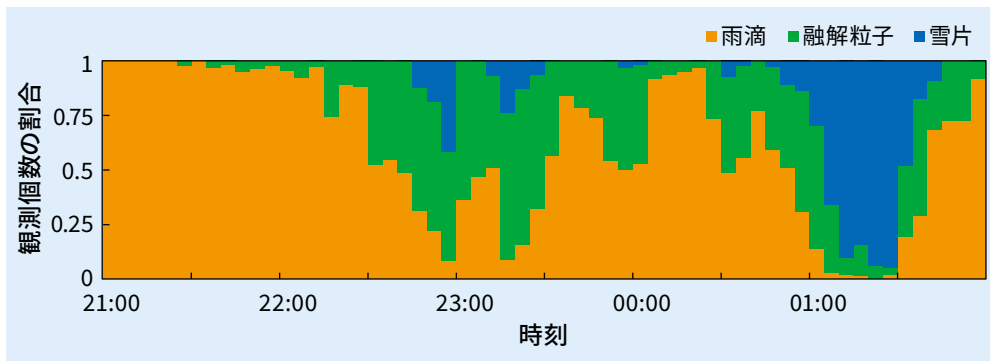


図3 2019/1/1 21:00 - 1/2 2:00 降水粒子の種類ごとの観測個数の割合 (5分間隔)

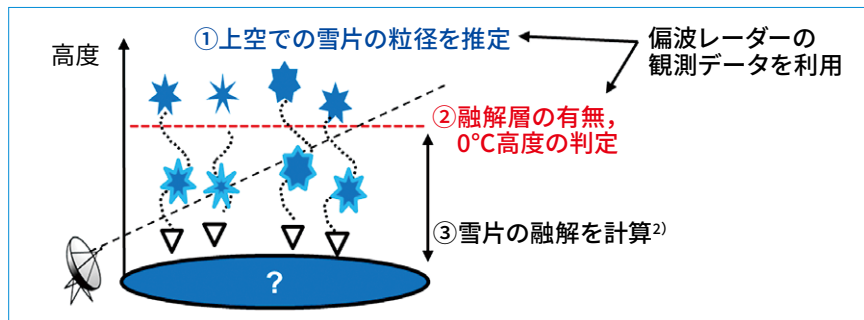


図4 偏波レーダーを利用した雨雪および雪の乾湿を判定する手法のイメージ

場合はその設置間隔は十数kmに1箇所となります。しかし、鉄道の運行管理への利用を考えると、数kmごとに降水の形態を把握することで駅間ごとの運行管理が可能となります。そこで、リアルタイムに面的な観測データが利用できる、気象レーダーの観測値から推定することを検討しました(図4)³⁾。

気象レーダーの利用

気象レーダーは上空に浮かぶ降水粒子(雨粒や雪片など)を探知する観測機器です。アンテナから発射した電波が、降水粒子に反射されて返ってきた強さ(Z : 反射因子)から降水強度を推定できます。降水強度がわかると、経験式から降水粒子の粒径分布を推測することが可能となり、前章で述べた①の値が求められます。一方で、②の計

算の開始高度、つまり上空で 0°C となる高度は気温の情報であるため、直接レーダーで観測することができません。そこで偏波レーダーとよばれる種類のレーダーで得られる観測パラメータを用います。レーダーが出す電波は、地表面と水平(水平偏波)あるいは垂直(垂直偏波)に振動しています。通常のレーダーは水平偏波のみを送受信し、降水粒子に当たって返ってくる強さ(受信電力)から反射因子(降水強度に相当する値)を推定します。偏波レーダーでは、水平・垂直偏波を送受信し返ってくる電波の強さや伝播速度の違いを比較することで、降水粒子の扁平度や均一度合いなどに関連したパラメータ(☞参照)も得ることができます。これを利用して、降水粒子が雪から雨に変わっている途中の層(融

解層)を検出し、その上端高度(0°C 高度)の推定が可能となります。

レーダーの観測では一般的にある仰角をもって水平方向にアンテナを回転させて観測が行われます。このとき、レーダーから離れるほど高い高度を観測するため、降水が雪から雨に変わる層(融解層)を電波が通過するところで、偏波情報の分布に「ブライトバンド」とよばれる特徴的なドーナツ状の領域が見られます(図5(a), (b)の暖色系, (c)の寒色系の領域)。通常、雨滴はある程度の大きさになると分裂しますが、融解層内では雪片の表面で融解が発生し表面を覆うため、あたかも扁平率の大きい楕円状の大きな雨滴のように認識されます。このため、粒径に依存する Z_H 、粒子の縦横比に依存する Z_{DR} は大きな値をとります(図5(a), (b))。一方、雪片は粒径が小さいものから早く、上空で融解を終えるため、融解層内では融解度合いの異なる粒子が混在します。このため粒子の不ぞろい具合に依存する ρ_{HV} は

☞ 偏波レーダーの観測パラメータ

- Z_H : 降水強度と対応する情報(水平偏波の反射因子)
- Z_{DR} : 粒子の扁平率に対応する情報(水平, 垂直偏波の反射因子差)
- ρ_{HV} : 粒子の不ぞろい度に対応する情報(偏波間相関係数)

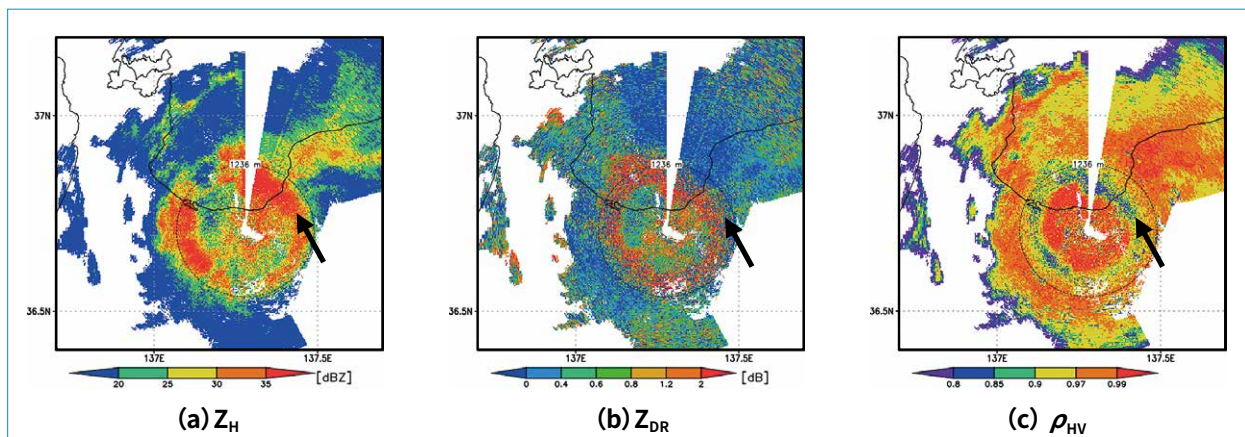


図5 偏波レーダーによる偏波レーダーの観測パラメーターの観測例
各図に矢印で示したのが融解層（ブライトバンド）

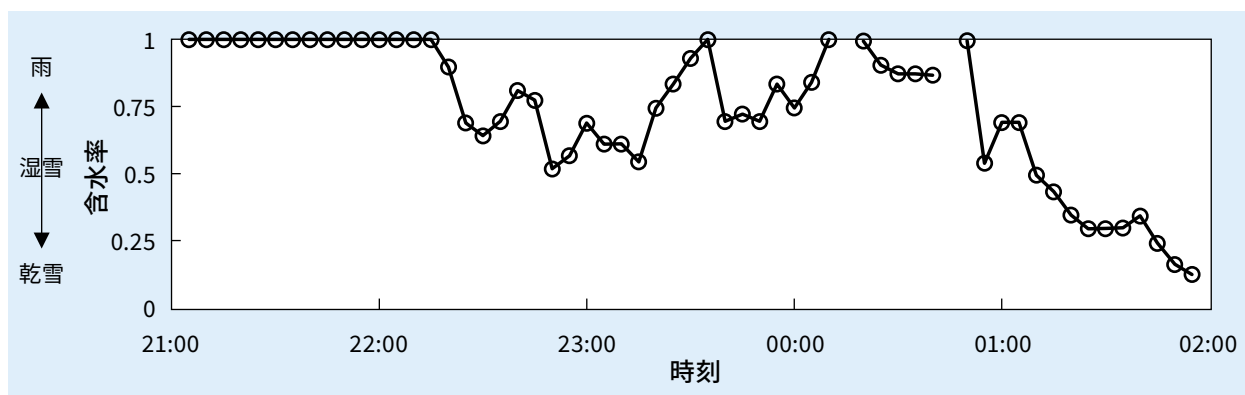


図6 降水の含水率の計算結果

小さな値をとります（図5 (c)）。これが図5に示したドーナツ状の領域，ブライトバンドが現れる理由です。これを利用することで降水粒子が融解している領域（融解層），ひいてはその上端である0℃高度を推定することが可能となります。

このように偏波レーダーを用いて推定した情報を入力値として，雪片の融解モデルの計算を行いました。融解モデルでは地上での重量含水率（粒子の重さにおける水の割合）が計算結果として出力され，含水率が1であれば全て雨滴，0であれば全て乾雪，その間は融解中の粒子が混ざっていることを示します。図6に計算結果を示しますが，21:00～22:00は雨であったものが22:00以降湿雪となっていることが確認できます。図3の個数の割合と直接比較できるものではありませんが，

定性的には降水形態の変化を示せていることが確認できました。

おわりに

本研究では地上での降水の形態を，偏波レーダーの観測データを利用して推定することを検討しました。レーダー利用の実用化は雨災害の監視の分野で先行していますが，近年では風・雪災害対策への利用も進んでいます。今後も鉄道の雪害対策の高度化を目指

して，レーダーの利活用の研究を進めていきたいと考えています。

なお，利用したXRAINレーダーデータは国土交通省より提供されたものです。この利用したデータセットは，国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」：データ統合・解析システム(DIAS)の枠組みの下で収集・提供されたものです。RRR

文献

- 1) K.Suzuki, K.Nakagawa, R.Oki, and K.Nakamura: Microphysical features of solid/melting particles by ground-based direct observations for the GPM/DPR algorithm development, 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp.3941-3944, 2016
- 2) T.Matsuo and Y.Sasyo : Melting of snowflakes below freezing level in the atmosphere, J.Meteor.Soc.Japan 59, pp.10-25, 1981
- 3) 高見和弥, 鈴木賢士, 山口弘誠, 中北英一: 冬期の降水形態の判別を目的とした偏波レーダーを用いた0℃高度推定手法, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.76, No.2, pp.205-210, 2020