# レーザー距離計による路面残雪深計測における表面下散乱現象

山賀康平<sup>1</sup>, 〇平田拓巳<sup>1</sup>, 上村靖司<sup>2</sup>, 杉原幸信<sup>2</sup> <sup>1</sup>長岡技術科学大学大学院 工学研究科<sup>2</sup>長岡技術科学大学 機械創造工学専攻

## 1. はじめに

年間を通じて温度が一定な地下水を散水する融雪装置 (消雪パイプ)は、比較的低コストで効果も高いことから 雪国に欠かせない技術として広く普及している.しかし、 地下水を過剰にくみ上げて地下水位を過度に低下させない ために、無駄な散水を減らせる高精度の制御が必要である.

現在は降雪の有無を検知して制御する方法が主流である が、上村らの研究では、これを積雪深による制御に変更す るだけで消費熱は半分以下に削減され、運転時間の短縮に つながることが示されている.

本研究では、路面における積雪有無の検知のみならず、 その積雪深を計測し、積雪深によって精密に稼働判定する 融雪システムの実用化を目指す.そのために、散水融雪装 置が設置されている路面に残っている雪の深さ、すなわち 「残雪深」を安価な汎用レーザー距離計を用いて精度良く 計測する方法について検討する.

山賀ら(2020)は、汎用レーザー距離計で残雪深の計測実 験を行い、10 cm 以下の残雪深測定において測定値が実際 よりも低くなるバイアスが生じることを報告した.本報告 では、残雪深計測において確認されたバイアスが「表面下 散乱現象」によって引き起こされていると考え、この表面 下散乱現象をモンテカルロ法によるシミュレーションに よって分析し、レーザー距離計を用いた残雪深計測に対す る表面下散乱の影響について調べた結果を報告する.

#### 2. 路面積雪深計測実験

#### 2.1 実験方法

散水融雪装置を残雪深で制御するには、5 cm 以下の積 雪深をを高精度(±1 cm)に測定することが求められる. そこでまずは,路面上の積雪深を正しく測定できるか、実 際の計測環境を想定して測定実験を行った.本実験では路 面上の模擬雪にレーザー距離計(SICK 社製 DT-35-BT15551)のレーザー光を照射し、測定された距離 から積雪深を算出した.レーザー距離計は図1に示すよう に高さ5 m、角度30 °の位置に設置した.レーザー距離計 の設置高さと角度は実際の路面積雪深の計測環境と合わせ た.含水率を変えて2種類を用意し、0~10 cm の1 cm 刻 みに積んだ.模擬路面は黒路面と白路面の2種類を用意し た.





#### 2.2 実験結果

計測実験の結果を図2に示す.実験の結果,積雪・シャー ベット双方で積雪深測定値が直線で示した実際の積雪深よ りも小さい値となった.このバイアスの大きさは積雪深と 路面色によって変化し,白路面では積雪深4,5 cm以下の積 雪深測定値がマイナスの値になることも確認された.黒路 面では2~4 cm以下の積雪深でレーザー光の反射強度が足 りず,積雪深を測定できなかった.以上の結果により,レー ザー距離計を用いて10 cm以下の積雪深を直接,精度良く 測定するのは困難であることが分かった.



図2 異なる路面色における積雪深の測定結果と推定結果

## 3. 表面下散乱

#### 3.1 積雪面の表面下散乱現象

レーザー光が照射された模擬雪を横から見ると,図3の ように積雪粒子内部にレーザー光が入り込んでいることが 確認された.これは「表面下散乱」と呼ばれる,入射した 光が表面だけでなく積雪粒子内で反射・散乱した後に表面 から出ていく現象である.本来,レーザー距離計から対象 物表面までの距離を計測するはずだが,表面下散乱を起こ すと,レーザー光の経路が表面での反射時よりも長くなり, 計算によって導かれる積雪深の測定値が小さくなる(図4).



図3 表面下散乱を起こしたレーザー光の様子



図4 表面下散乱現象と残雪深測定誤差の模式図

図2に示したとおり、5 cm 以下の浅い残雪深での計測 値は黒路面と白路面で明らかに異なる.このことから、残 雪深が浅くなると、残雪深測定値に路面による影響が表れ ると考えられる.図5に表面下散乱による路面の影響を示 す.レーザー光の光子が路面に達すると、黒路面では光子 の吸収、白路面では光子の反射が起こる.黒路面では光子 の一部が吸収されることで、反射強度が弱くなり、浅い残 雪深が測定できなくなる.白路面ではレーザー光が表面下 散乱を起こし、さらに白い路面で反射することで、計算に よって導かれた残雪深測定値がマイナスになると考えられ る.



図5 表面下散乱と路面の影響

### 3.2 モンテカルロ法による表面化散乱シミュレーション

雪などの散乱媒質に入射した光の伝播解析方法として, モンテカルロ法によるシミュレーションがある.これはヒ トの皮膚などの散乱媒質中の光のふるまいを調べる手法と して実績があり,積雪による光散乱の解析への適用例もあ る.本研究ではこのモンテカルロ法を用いたシミュレー ションを用いて,残雪に入射したレーザー光のふるまいを 調べる.モンテカルロ法(Monte Carlo method, MC)とは, 様々な事象を乱数に対応させ,その事象が何回発生するか, どのくらいの確率で起こるのかなどを,シミュレートする 方法である.モンテカルロ法による光子伝播シミュレー ションでは,光子の進行方向,進行する距離,散乱後のエ ネルギーなどを,散乱媒質の光学特性に基づいて発生させ た乱数を用いて計算する.図6にシミュレーションの模式 図を示す.



図6 モンテカルロ法による 残雪内光子伝播シミュレーションの模式図

本シミュレーションにおいて、散乱媒質は残雪である. 残雪と光子のふるまいは残雪の光学特性(散乱係数 $\mu$ s,吸 収係数 $\mu$ a,屈折率 nsnow,非等方性パラメータg)によっ て関係づけられる.ここでは、残雪は光学特性が一様で、z 方向は残雪深 Hを、x、y方向は無限の広がりを仮定する. 図7に残雪内光子伝播シミュレーションのフローチャート を示す.原点から残雪に入射した単位エネルギー(W=1)の 光子は、内部で移動、減衰、散乱を繰り返し、最終的には 消滅、あるいは残雪から放出される.シミュレーションで は、光子の残雪内部での移動、減衰、散乱を繰り返し計算 する.減衰により光子のエネルギーがあるしきい値を下 回った場合は、光子が消滅したとみなして計算を終了し、 新たな光子を入射する.光子が残雪深*H*を超えて路面に接 触する場合は、黒路面または白路面の反射率に基づいて吸 収と反射の処理を行う.光子が残雪中で消滅せずに残雪表 面から放出した場合は、光子の放出と伝播した距離を記録 する.残雪入射時に表面で反射、または残雪内部を伝播し て放出した光子の伝播距離を平均することで、レーザー距 離計が受光する残雪深測定値への表面下散乱の影響を見積 もることができる.



### 3.3 シミュレーション結果

シミュレーションによって求めた放出光子の伝播距離の 平均値について,残雪深と路面ごとに比較してグラフにプ ロットした結果を,図8に示す.



残雪深測定値は6cm となる. 図9にシミュレーションの 結果と残雪深測定実験での模擬雪の残雪深の実測値を示す. 四角形で示すプロットがシミュレーション結果,丸で示す プロットが実測値である.

変換式は(1)式の通りとなる.



伝播距離は光子が積雪表面から入射して放出するまでの

移動距離である.しかしレーザー距離計が出力するのは

レーザー光が往復した距離ではなく,片道分の距離である.

したがって, 伝播距離を半分にした値が, 残雪深測定値の

バイアスとなる. すなわち伝播距離から残雪深測定値への

つまり、伝播距離が 4.00 cm の場合, 2.00 cm が残雪深測

定値へのバイアスとなり、測定時の残雪深が8cmの場合、

(1)

残雪深測定值 = 残雪深 - (伝播距離/2)

図9 シミュレーション結果と実測値の比較

各プロットをみるとシミュレーション結果よりも実測値 の方が,残雪深が低くなるバイアスが大きいことがわかる. バイアスの大きさはシミュレーション結果では約2cm,実 測値では約3cmであった.

黒路面のプロットから,実測値で3cm以下の積雪深を測 れたと仮定した場合,シミュレーション結果のように,残 雪深が浅くなるにつれて測定値が残雪深0cmに漸近する と考えられる.白路面のプロットを比較すると,実測値の 方が,およそ5cm以下となる浅い積雪深において,路面色 の違いによる測定値の差が大きい.シミュレーション結果 と実測値の間に見られる差は,残雪の実際の光学特性とシ ミュレーションで求めた値との違いによるものと考えられ る.なおシャーベットについては、シャーベットの散乱係 数と吸収係数が不明なため、今回はシミュレーションでき なかった.残雪についても、散乱係数と吸収係数の実測値 を用いてシミュレーションすれば、実測値と同じようなプ ロットが得られると考えられる.

#### 5. まとめ

残雪深推定実験で確認されたバイアスについて、モンテ カルロ法を用いた残雪内光子伝播シミュレーションにより, レーザー光の表面下散乱が残雪深測定値に与える影響につ いて調査した.構築したプログラムによるシミュレーショ ンの結果、表面下散乱によって残雪内を伝播し、残雪表面 から放出した光子が 0.13~5.23 cm の伝播距離を持ってい ることが確認できた. 伝播距離から残雪深測定値を計算し, グラフにプロットしたところ、測定実験の実測値と同じよ うに、残雪深が実際の値よりも小さくなるバイアスが確認 できた.さらにおよそ 5cm 以下となる浅い残雪深において, 黒路面と白路面で測定値に差が出ることが確認できた. 表面下散乱によって光子が残雪内部を伝播すると、レー ザー距離計による残雪深測定値が低くなることが確認され た. シミュレーションによる調査の結果,残雪深測定値の バイアス,そして路面による浅い測定値の違いが,表面下 散乱現象によって起こりうることが明らかになった.

# 参考文献

 [1] 上村靖司,善哉広大(2019)「路面融雪装置の設計熱 負荷 第3報:サービス水準と消費熱の総合評価指標の提 案」,雪氷81(6), pp.269-281.

[2] 山賀康平,上村靖司,藤野丈志,杉原幸信(2020) 「汎用レーザー距離計による路面残雪深計測」,雪氷研究 大会(2020・オンライン)講演要旨集, p.69.

[3] Lihong Wang, Steven L.Jacques, Liqiong Zheng (1995)

「MCML – Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues ] Computer Methods and Programs in Biomedicine, 47, pp.131-146.

[4] 原田康浩,鳥羽啓太,舘山一孝,神田淳,大前宏和, 三宅 俊子 (2015) 「積雪による光散乱のモンテカルロシ ミュレーション解析」,雪氷研究大会 (2015・松本) 講演 要旨集, p.52.