

短時間の降雪重量を詳細に計測する装置の開発

国立研究開発法人 土木研究所 雪崩・地すべり研究センター 上之和人・秋山一弥

1. はじめに

近年、北陸の各所で短時間の多量降雪による交通障害や雪崩が発生している。道路除雪の作業の効率化や雪崩発生危険度評価には、リアルタイムに時間降雪深を知る必要がある。ただし、道路に積もった新雪の密度の違いにより、除雪作業や交通への影響が異なる。また、気象庁の発表するなだれ注意報では、地域ごとに気温、降雪深や積雪深に基づいて雪崩注意報発表基準が設定されている。しかし、基準を満たしても実際に雪崩が発生することは少ないため、実際にこの基準のみで雪崩の発生を予測することは難しい。

短時間の多量降雪による雪崩発生前後の積雪断面観測から、新雪層の密度の小さい箇所は相対的に強度の弱い層（弱層）になり、その上下に密度の大きい降雪があると表層雪崩発生の可能性が高くなることが示唆され、雪崩の発生には降雪深ばかりでなく新雪層内の密度の分布を知る必要がある¹⁾。そのためには、新雪の重量（降雪重量）も計測する必要がある。しかし、一般に積雪重量計は装置が大きく設置が大がかりなうえ高価なため、本事業では、短時間の降雪重量を詳細に計測する簡易で安価な装置を開発し新雪の密度を評価し、実測と比較することを目的とする。

2. 降雪重量計

図1は、初期の新雪の重量を計測する装置（降雪重量計）の外観を示す。容器（幅46.5cm×奥行37cm×高さ24cm）に入った降雪の重量を計測する装置（デジタルフォースゲージ（AIKOH RZ-50））を用いて、重量の時系列を取得しノートPCへ保存する方法である²⁾。この装置の利点は軽量のため持ち運びやすく、現地設置も容易であることである。しかし、デジタルフォースゲージとその付



図1 初期の降雪重量計

属ソフトウェア（パソコンへのデータ取り込み）の機能の制約のため、重量の時系列データが約8時間しか取得できない、降雪のタイミングを見計らって装置の設置場所へ行きソフトウェアを起動しなければならない、重量の時系列データは、装置の設置場所へ行き回収した後でしか入手することができないなどの問題があった。

このため、本事業では図1の降雪重量計を改良して、新たに図2に示す降雪重量計を開発した。改良点は以下の通りである。

1) 容器を大容量（幅54cm×奥行38cm×高さ60cm）にした。ノートPC、バッテリーを収納したボックス上の四隅にA&D製ボタン型USB対応デジタルロードセル（型式:LCCU21N100）を取り付け、容器下に付けたアクリル板がロードセル中央の突起部に接触すると容器とアクリル板の重量がかかり、容器の中に降水または降雪があると重量が増加する。

2) ロードセルとその付属ソフトウェアWinCT-DLCを用いると、バッテリーが稼働している限り、設定したサンプリング間隔で降雪重量を連続して取得できる。WinCT-DLCはロードセルからノートPCへ計測データを転送するWindowsデータ通



図2 新たに開発した降雪重量計

信ソフトウェアである。図2は、4隅のロードセルに番号を付したとき、ノートPC上にWinCT-DLCが番号順に起動した状態である。1個のロードセル当たり100Nの重量が計測可能である。

3) モバイルWiFiルーターをノートPCに接続しインターネット環境を構築する。GoogleChromeのリモートデスクトップ機能を用いることによって、別の端末から遠隔操作でボックスに収納したノートPCの中のWinCT-DLCを起動し図2に示す重量をモニタリングできる。重量の時系列データはクラウドストレージ(Windows10のOneDrive)にCSVとして保存でき、別の端末からアクセスし編集できる。

図3は本事業の概要を示す。雪崩・地すべり研究センター露場には気象測器が設置され、風向・風速、気温、相対湿度、降水量、積雪深を計測している。これらの時系列データはセンター内のパソコンへCSVとして保存される。図2の装置から取得した降雪重量、図3の降水量計およびレーザー式積雪深計から取得した降水量と積雪深を用いてそれぞれ次の①と②から新雪の密度を算定し、実測③と比較する。

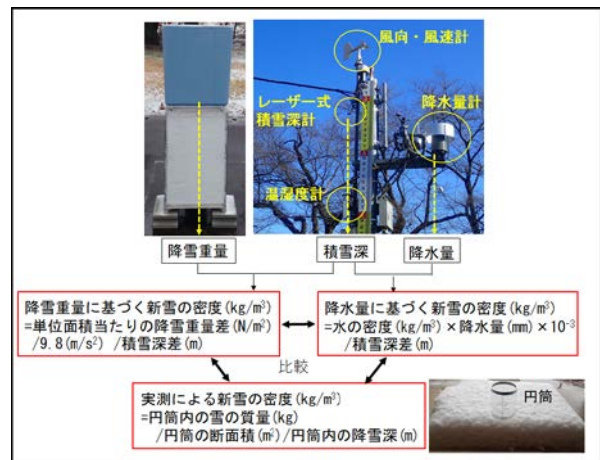


図3 本事業の概要

- ① 降水量に基づく新雪密度 (kg/m^3) = 水の密度 (kg/m^3) \times 降水量 (mm) $\times 10^{-3}$ / 積雪深差 (m) ,
 - ② 降雪重量に基づく新雪密度 (kg/m^3) = 単位面積当たりの降雪重量差 (N/m^2) / $9.8 (\text{m/s}^2)$ / 積雪深差 (m) ,
 - ③ 実測による新雪密度 (kg/m^3) = 円筒内の雪の質量 (kg) / 円筒の断面積 (m^2) / 円筒内の降雪深 (m) .
- ③の円筒内の雪の質量と降雪深には、図3に示すスノーサンプラー (断面積 50cm^2) と呼ばれる円筒を平板上に堆積した雪の5か所に挿入し、それぞれの円筒内の雪の質量と高さを計測しその平均値を採用した。

3. 結果

図4は2018年度冬季(2018年12月1日～2019年3月31日)と2019年度冬季(2019年12月1日～2020年2月28日)の雪崩・地すべり研究センター露場で計測した気温と積雪深を示す。2018年度冬季は、12月下旬から2月中旬まで気温が0°C近い状態が継続し、その間に積雪深も増加しているが、2019年度冬季は、気温の低下した2020年2月5日-6日と2020年2月8日-9日に短時間に多量の降雪が観測されたのみで、その日以外は気温が高く降水があっても雨やみぞれが多かった。今冬季は全国的に記録的な暖冬であり、気象庁は、上空の偏西風が北に蛇行して寒気が流れ込みにくかったためとしている。

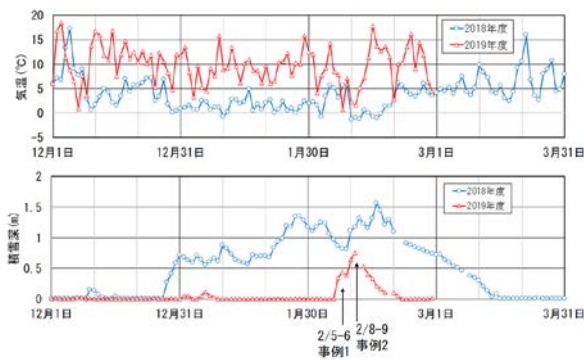


図4 2018年度冬季と2019年度冬季の気温と積雪深の比較

以下ではふたつの降雪イベント、事例1(2020年2月5日-6日)と事例2(2020年2月8日-9日)に対して気象要素(気温, 相対湿度, 降水量), 降雪重量, 積雪深の計測結果を示す。図6(a)と図8(a)は気温と相対湿度に基づく雨雪判別図を示し、融解開始線は乾雪と湿雪の境界を表す。図6(b)と図8(b)の、降水量計による降雪質量(kg/m^2)は、上記①の水の密度(kg/m^3) \times 降水量(mm) $\times 10^{-3}$ の値、重量計による降雪質量(kg/m^2)は、上記②の降雪重量差を重力加速度 $9.8(\text{m}/\text{s}^2)$ と容器下のアクリル板の面積 ($0.47\text{m}\times 0.32\text{m}$) で除した値、実測の降雪質量(kg/m^2)は、上記③の円筒内の雪の平均質量を円筒の断面積 50cm^2 で除した値である。これらは積雪水量または積雪水当量とも呼ばれているものである³⁾。図6(c)と図8(c)の積

雪深差(レーザー式)は図3のレーザー式積雪深計を用いて計測したもの、降雪深は上記③の円筒内の雪の平均高さである。図6(d)と図8(d)の降水量計による密度は、上記①を用い算定したものであり、積雪深差はそれぞれ図6(c)と図8(c)を用いた。重量計による密度は、上記②を用い算定したものであり、積雪深差はそれぞれ図6(c)と図8(c)を用いた。実測による密度は上記③による。

3.1 事例1(2020年2月5日-6日)

2月5日16:00に図5に示す積雪板を降雪重量計の近くに置き観測を開始した。また降雪重量計の容器に付着した雪の様子を1時間毎に撮影した。実際に撮影した時刻は図5に示す時刻より数分経



図5 観測写真

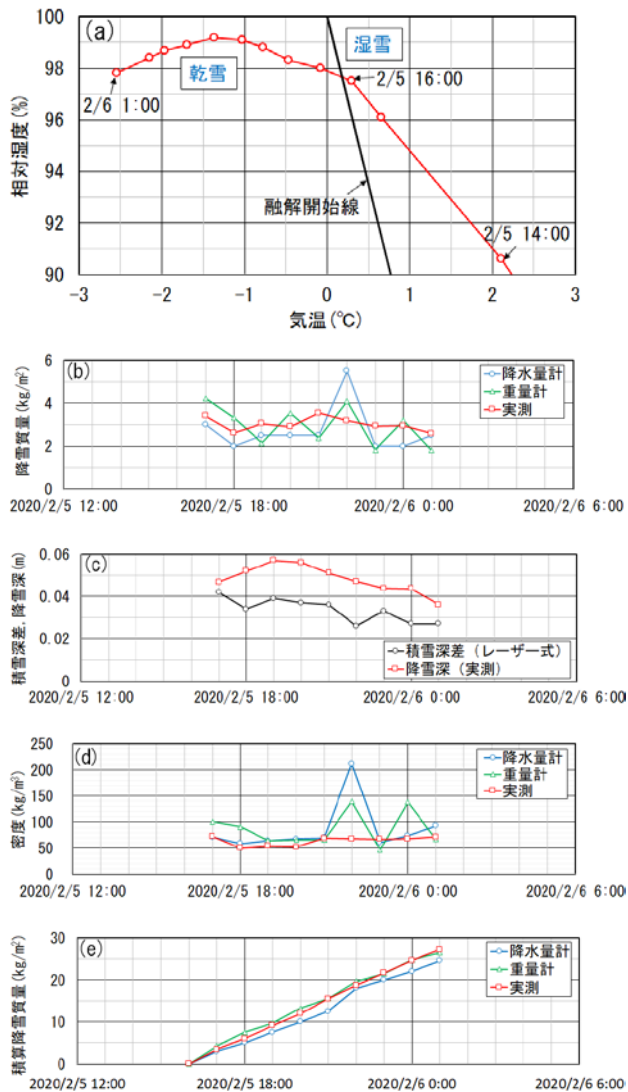


図 6 (a) 雨雪判別図, (b) 降雪質量, (c) 積雪深差, 降雪深, (d) 密度, (e) 積算降雪質量

過している。観測開始直後から湿雪から乾雪に変わり、その後は乾雪が継続した(図 6(a))。観測開始直後より容器の中に雪が堆積しただけでなく、容器の上の淵と風上側の面(北東方向)に雪が付着し、時間の経過とともに容器の口を塞ぐほど堆積した。積雪板を回収し筒の中の雪の質量と高さの計測に 5 分程度要したため、実際に雪を堆積させた時間は、16:00 から 17:00 の 1 時間を除いて、最初の 10 分間を除いている(例えば 17:10-18:00, 18:10-19:00 など)。実測と比較するために、図 6(b)の降水量計と重量計による降雪質量、図 6(c)の積雪深差も最初の 10 分間を除いた 50 分値である。

2 月 6 日の 0:50 から 1:00 の間に容器の風上側

面の一部が落雪したために 2 月 6 日 1:00 と 0:00 の間の降雪質量差が負になった。このため、図 6(b)の重量計による降雪質量(kg/m^2)の 1:00 の値は落雪前の 0:50 の値で代用した。2 月 5 日 22:00 の降水量計による降雪質量と実測との差はかなり大きい。降水量の 10 分値を確認すると、21:50 から 22:00 の 10 分間だけ降水量が 3.5mm の異常な値を示したことに起因するが、降水量計の淵に解けずに堆積した雪が中に落雪した可能性がある。観測期間中、実測した円筒内の降雪深は 4~6cm が継続し短時間に多量の降雪があったことを示し、レーザー式積雪深計による積雪深差は実測による降雪深に比べ常に小さい(図 6(c))。図 6(d)に示すように、全体的に降水量や降雪重量に基づく新雪の密度は実測に比べ大きい。特に 2 月 5 日 22:00 に大きいのは、この時間に降水量や降雪質量が実測に比べ大きく、降雪深が実測に比べ小さいからである。図 6(e)は図 6 (b)の降雪質量を積算したものである。重量計による降雪質量が実測に比べ若干大きいのは容器まわりに付着した雪によるものと考えられる。降水量計による降雪質量は重量計による降雪質量や実測に比べ小さい。

3.2 事例 2 (2020 年 2 月 8 日-9 日)

2 月 8 日 18:00 に観測を開始した。事例 1 の積雪板による降雪質量と降雪深の実測は 10 分間が欠如した 50 分値であったため、図 7 に示す積雪板と平板を 1 時間おきに交互に降雪重量計の近くに置くことによって 1 時間値を取得した。図 7 はまた容器に付着した雪の様子の写真を 1 時間毎に示す。実際に撮影した時刻は図 7 に示す時刻より数分経過している。2 月 8 日 20:00 を過ぎると湿雪から乾雪に変わり、その後は乾雪が継続した(図 8(a))。容器に雪が付着するのを防ぐために、容器の上の淵と側面に市販の雪付着防止剤を塗布した結果、事例 1 のときに比べて容器への雪の付着は低減した。また、降雪重量計のまわりを防風ネットで囲んだが(2 月 8 日 19:00 写真)、雪の重みでネットが傾き出し重量計に接触する可能

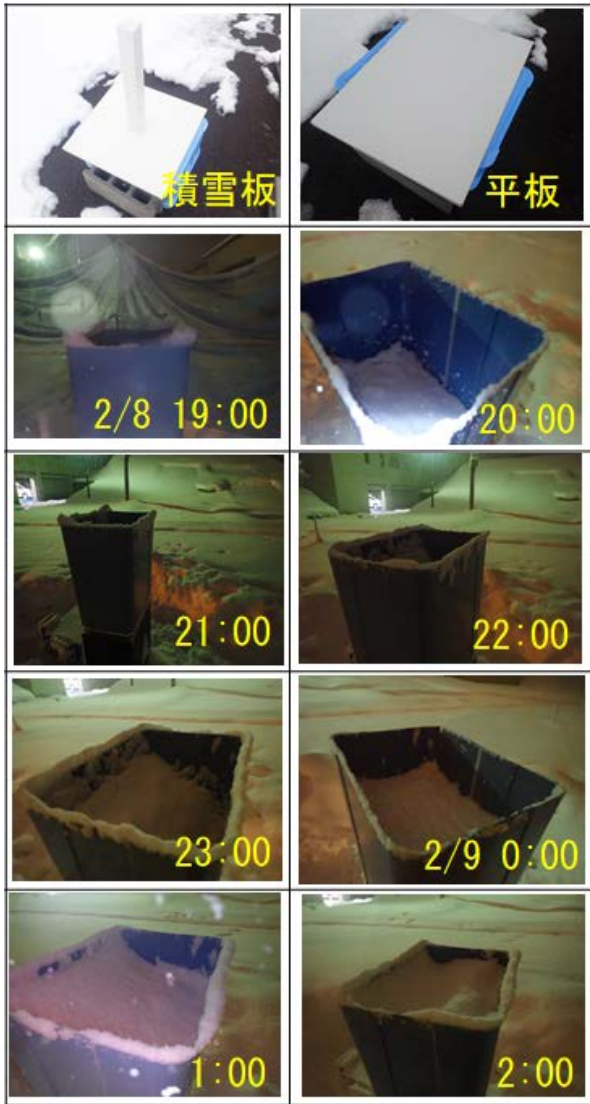


図7 観測写真

性があったため 20:00 に撤去した。

図 8(b) に示すように、2 月 8 日 21:00 と 2 月 9 日 1:00 と 2:00 の降水量計と重量計による降雪質量は実測に比べて小さい。2 月 8 日 20:00 と 2 月 9 日 0:00 の写真が示すように、20:00 と 0:00 の直後撮影前に重量計容器の上の淵と側面の雪を払い落したことにより次の 1 時間の降雪質量が小さくなった可能性がある。降水量計の入口の淵にも雪が付着している可能性があり、短時間の多量降雪のときヒーターによる融解が間に合わず雪が解けず降水量としてカウントされず降水量計による降雪質量が小さくなった可能性がある。

事例 1 と同様、レーザー式積雪深計による積雪深差は実測による降雪深に比べ常に小さい（図

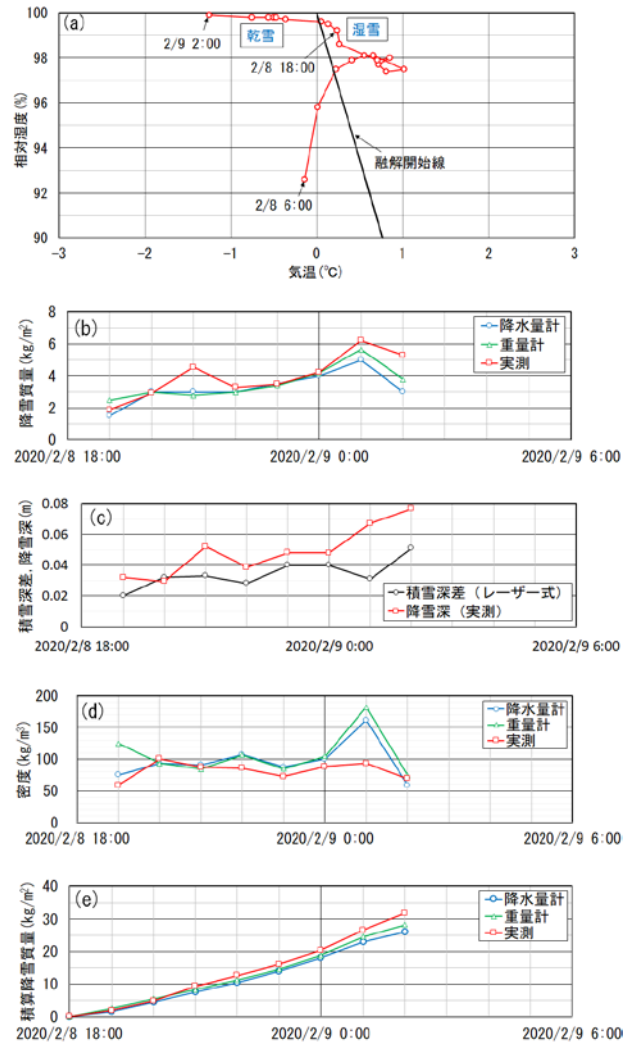


図 8 (a) 雨雪判別図, (b) 降雪質量, (c) 積雪深差, 降雪深, (d) 密度, (e) 積算降雪質量

8(c)). 図 8(d) に示すように、全体的に降水量や降雪重量に基づく新雪の密度は実測に比べ大きい。特に 2 月 9 日 1:00 に大きいのは、この時間に降水量や降雪質量が実測に比べ大きく降雪深が実測に比べ小さいからである。図 8(e) は図 8(b) の降雪質量を積算したものである。2 月 8 日 20:00 と 2 月 9 日 0:00 の直後に重量計容器の上の淵と側面の雪を払い落したために、それ以降実測との差が現れている。降水量計の入口の淵に付着した雪が融解せずに、降水量計による降雪質量は重量計による降雪質量や実測に比べ小さくなったと考えられる。

4. 考察

新たに開発した降雪重量計を用いて計測した積算降雪質量と降水量計と実測による積算降雪質量を比較した結果、降雪重量計の方は降水量計に比べて実測に近い値が得られたため、降雪重量計は正常に動作していると考えられる。事例1と事例2とも降水量計による積算降雪質量は降雪重量計や実測のものに比べて常に小さいのは、降水量計の雪の取り込み口が降雪重量計の取り込み口より狭く捕捉率が低下していると考えられる。

事例1の2月5日17:00から6日の1:00までの1時間毎（最初の10分間を除く）、また事例2の2月8日18:00から9日の2:00までの1時間毎の新雪の密度の平均値をそれぞれの期間の実測による密度の平均値と比較した結果を図9に示す。事例1では実測、降水量、降雪重量に基づく新雪の密度は、それぞれ 64kg/m^3 、 86kg/m^3 、 87kg/m^3 、事例2では、それぞれ 82kg/m^3 、 97kg/m^3 、 107kg/m^3 であった。事例1に比べ事例2の密度が大きいの、事例2は気温が 0°C に近く相対湿度が100%に近い状態だったためと考えられる。降水量と降雪重量に基づく密度は実測に比べ、15%から25%過大となる。

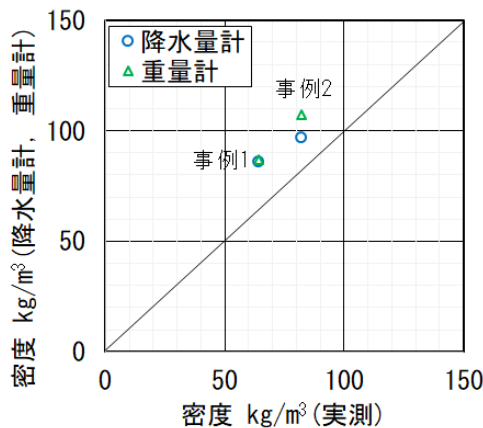


図9 実測による新雪の密度と降水量計または重量計による新雪の密度の比較

図6(c)の1時間毎（最初の10分間を除く）または図8(c)の1時間毎に実測した降雪深に比べ、レーザー式積雪深計から得られた積雪深差に基づく降雪深が常に小さいのは、後者は、両事例ともほぼ氷点下のため積雪の融解を無視すると、積雪の圧縮により厚さが減少しているからであ

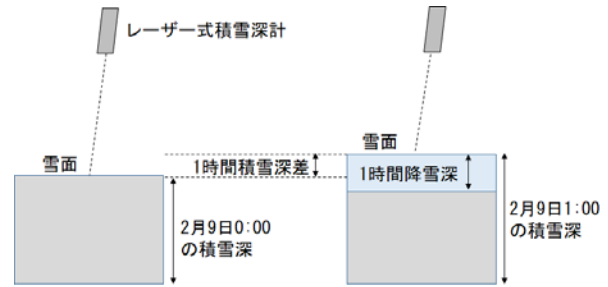


図10 積雪深差と降雪深の模式図

る（図10は2月9日0:00-1:00の模式図）。1時間内における積雪の圧縮・融解は相対的にわずかであると仮定し、積雪深の1時間差を時間降雪深の近似値に用いるときがあるが⁴⁾、実際は両事例とも1時間でもその近似は成り立たないといえる。

5. まとめと今後の展望

降水量計と重量計による降雪質量と積雪深差を用いて新雪の密度を評価し実測と評価した結果、前者の密度は実測に比べ常に大きくなる傾向があることが明らかになった。この主要因は降雪深を積雪深差で代用したことによる。降雪深は実測しない限り計測できるものではないため、降雪深を積雪深差で代用するときは常に積雪の圧縮・融解による厚さの減少を意識する必要がある。

今後は事例を増やし、新雪の密度が事例毎に異なる理由を気象要素と関連付けて詳細に検討し、密度に基づいて除雪作業を効率的に実施するための判断資料や地域別の雪崩発生の危険性を面的に把握するシステムを構築する予定である。

参考文献

- 1) 原田裕介, 上之和人, 石川茂: 短時間多量降雪に起因する雪崩発生の特徴-長野県乗鞍高原での調査事例, 寒地技術論文・報告集, Vol. 34, pp. 158-163, 2018.
- 2) 上之和人, 秋山一弥, 原田裕介: 簡易な降雪重量計による新雪の密度の評価, 雪氷研究大会(2019・山形)講演要旨集, p. 182, 2019.
- 3) 社団法人 日本雪氷学会 編集: 積雪観測ガイドブック, 朝倉書店, p. 16, 2010.
- 4) 二宮洗三: 日本海の気象と降雪, 成山堂, p. 63, 2008.