

論文

デジタル式荷重測定器を利用した積雪の硬度測定

竹内由香里¹⁾, 納口恭明²⁾, 河島克久³⁾, 和泉 薫⁴⁾

要 旨

積雪の硬度は、表層雪崩のすべり面となる弱層を検出する上で目安になるため、雪崩災害調査などで迅速かつ細かく簡便に測定できる方法の必要性が高い。そこで新しい積雪硬度計として提案したデジタル式荷重測定器（プッシュゲージ）について、測定方法の検討を行なった。プッシュゲージは円板状のアタッチメントを積雪断面に等速で1~2 cm押し込み、抵抗力の最大値を測定する。測定値を既存の木下式硬度計やラムゾンデと比較した結果、プッシュゲージは積雪用硬度計として使用可能であるのみならず、特に薄くて硬度の小さな弱層の検出に適していることが示された。アタッチメントの径が小さい場合には測定値が大きくなるが、直径を約8 mm以上にすると、大きさによらず一定の硬度が得られるとみなせることがわかった。また雪質や粒径を限定した場合に乾き雪の硬度が密度の4乗に比例するという関係式が、地域によらず成り立つことが確かめられた。

キーワード：硬度計，プッシュゲージ，積雪硬度分布，弱層の検出，積雪密度

Key words: hardness meter, push gauge, snow hardness distribution, detection of weak layer, snow density

1. はじめに

積雪断面観測で雪温、密度、硬度、含水率など積雪層の物理量を測定する際、より簡便迅速に、細かく精度よく測れることはすべての測定項目で望まれる。中でも硬度は、雪粒子の結合の強さを表わし、表層雪崩のすべり面となる弱層を検出する上で目安になるため、雪崩災害調査などで迅速かつ細かく測定できる方法の必要性が高い。そこで著者らは野外で誰でも簡便に細かく積雪硬度を測定できる方法として、デジタル式荷重測定器を利用した硬度測定法を提案した (Takeuchi *et al.*, 1998)。従来の方法にはないこの方法の特長は、短時間に細かく測定できることである。この利点

を活かして Takeuchi *et al.* (1998) は乾き雪と濡れ雪の硬度分布の違いを面的に測定して示すことができた。本論文では、従来の硬度計との比較や、アタッチメントの大きさによる測定値への影響など測定方法に関する検討を行なった。また Takeuchi *et al.* (1998) が示した硬度が密度の4乗に比例するという関係式の検証も行なった。

2. 既存の硬度測定法

野外観測では一般に、積雪に剛体を押しこむときの抵抗力を測定して硬度を表わしている。このような硬度計としては、スイスのラムゾンデ (例えば前野, 1986)、カナディアンゲージ (Hardness gauge) (Gold, 1956)、日本では木下式硬度計 (木下, 1960) がよく使われている。

ラムゾンデは先端が頂角60°、高さ3.5 cmの円錐形になった細長いパイプにおもりを落として衝撃を与え、積雪内へ貫入した深さを測定する。雪を掘らなくてもパイプを継ぎ足して雪面から地面までの連続的な硬度分布が得られる特長があり、

- 1) 土木研究所新潟試験所
〒944-0051 新井市錦町 2-6-8
- 2) 防災科学技術研究所
〒305-0006 つくば市天王台 3-1
- 3) 助鉄道総合技術研究所
〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38
- 4) 新潟大学積雪地域災害研究センター
〒950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050

世界的に広く使われている。しかし開発者の Haefeli 自身が指摘したように、薄い弱層を検出することは難しい (Schneebeli and Johnson, 1998)。

木下式硬度計は測定しようとする積雪層上に水平面を作って金属円板をのせ、それにおもりを落としたときの円板の貫入深を測定する。測定原理はラムゾンデとほとんど同じである。ラムゾンデの先端が円錐形であるのに対し、木下式は円板を貫入させる。このとき積雪の破壊と塑性圧縮によって円板が受ける単位面積あたりの抵抗力を硬度と定義し、物理的な意味を明確にしている (木下, 1960)。木下式硬度計は測定しようとする雪の硬さに応じて、直径 20 ~ 3.5 cm までの 6 種類の円板を使い分ける。さらにおもりを落とす高さやおもりの質量の組み合わせ方によって、 $1 \sim 10^5$ 程のオーダーにわたって広範囲で変化する積雪の硬度を高い精度で測定することができる。これは木下式硬度計の長所である一方、雪の硬さに応じて円板の大きさ、おもりの質量や落下高さを選ばなければならないので、熟練を要する要因にもなっている。また 1 回の測定ごとに水平面を作り、円板の貫入深を数点で測定する必要があるため、熟練した測定者であってもかなりの時間を要する。

アメリカやカナダで普及しているカナディアンゲージは受圧円板を積雪の垂直断面に押しこみ、そのときの抵抗力を測定するものである。細かい間隔で硬度分布を測定でき、形状も小型で扱いやすい。しかし雪の硬さに応じて、断面積が $0.1 \sim 10 \text{ cm}^2$ までの 7 種類の受圧円板と強度が異なる 2 種類のバネばかりを組み合わせる必要があり、やはり熟練を要する。受圧円板が雪面を突き破ったときの指示値をアナログ式のスケールで瞬時に読みとる際には読みとり誤差が生じてくる。本論文で紹介するデジタル式荷重測定器は、測定原理はカナディアンゲージと同じである。従って今回は両者の比較は行っていない。

3. デジタル式荷重測定器を用いた硬度測定法と観測概要

使用したデジタル式荷重測定器は、アイコーエンジニアリング製 MODEL9500 シリーズで最大荷重が 200 N (分解能 0.1 N) のものである。これは歪みゲージを用いた荷重変換器で、引張力、

圧縮力の荷重測定用に市販されている。もともと積雪用に開発された硬度計というわけではなく、他のメーカーからも類似のものが発売されている。これを新しい積雪用硬度計として「プッシュゲージ」と呼ぶことにする。図 1 に使用したプッシュゲージの写真を示す。本体の大きさは長さ、幅、厚さがそれぞれ約 24 cm, 6.5 cm, 4 cm で重さは約 500 g である。充電式であるから野外でも使いやすい。

硬度測定では、プッシュゲージに装着した円板状のアタッチメントを積雪の垂直断面に等速度 (数 cm s^{-1}) で 1 ~ 2 cm 押しこみ、そのときの抵抗力を測る。本論文では断わらない限り既製の直径 14 mm のアタッチメントを使用した。前述のように測定原理はカナディアンゲージと同じであるが、プッシュゲージは雪面にアタッチメントを押しこむときの抵抗力最大値、すなわち雪面を突き破る破壊強度が自動的にデジタル表示される特長をもつ。極端に軟らかい新雪や硬い氷板を除けば 1 つのアタッチメントで広範囲の測定ができる。測定方法が簡便で 1 回の測定に要する時間は数秒であるから、誰でも迅速に細かく硬度を測定することが可能である。

本研究ではプッシュゲージと既存の硬度計との比較を行ない、また測定方法を検討するためアタッチメントの大きさや測定者、機種による測定値の比較を行なった。さらに硬度と密度の関係を調べた。これらの目的のため 7 地点において積雪断面観測を行なった。観測地点の緯度、標高、積雪深などの概要を表 1 にまとめた。断面観測では平坦な場所の自然積雪を地面まで掘って断面をつくり、雪温、雪質、粒径、密度を測定した。硬度については 4 ~ 8 章で述べる各種の比較計測を行なった。

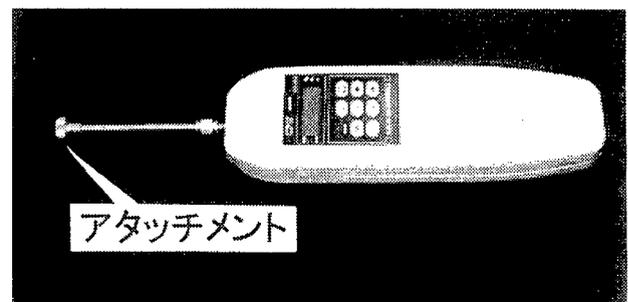


図 1 硬度測定に用いたプッシュゲージ。

表 1 観測地点の概要.

場 所	緯 度 (北緯)	標高 (m)	観測日	積雪深 (cm)	関連す る章
群馬県水上町水上高原	36° 51'	980	1997.2.26	186	7
群馬県水上町湯の小屋	36° 52'	790	1997.2.25	157	3.1, 4
新潟県妙高山麓	36° 55'	730	2001.3.14	430	7
新潟県中里村西方	36° 59'	445	1996.2.27	285	3.2
新潟県長岡市栖吉町	37° 25'	100	1997.2.20	103	5
北海道ニセコアンヌプリ中腹	42° 52'	930	2000.3.19	>200	6
北海道幌加内町母子里	44° 22'	285	1997.3.12	198	7

4. 既存の硬度計との比較

4.1 木下式硬度計との比較

プッシュゲージで測定した積雪の硬度分布を木下式硬度計による測定値と比較した (図 2). 測定は 1997 年 2 月 25 日に群馬県水上町湯の小屋で行なった. 観測地点の積雪深は 157 cm であり, 雪面付近と 3 箇所薄い (1~3 cm) ざらめ層を除くと, 全層が乾いたしまり雪またはこしまり雪で, 雪温は -0.1~-4.4°C であった (図 4 (d)). 積雪層の中程に人為的要因で層構造が乱れたところがあったので, この部分は除いて測定した.

測定は深さ方向に 5 cm 間隔で行ない, 貫入時の抵抗力 (N) をアタッチメントや円板の断面積で除して圧力の単位 (kPa) で表わした. この測定は 2 人 (測定者と記録者) で行ない, 要した時間は木下式硬度計で 1 時間以上であったのに対し, プッシュゲージでは約 5 分であった. 両者の値は 10 kPa 以下から 300 kPa 以上の広範囲にわたってよく一致し, プッシュゲージが木下式硬度計に替わる硬度計として使用可能であることがわかった. 雪面から約 15 cm の軟らかい雪では, プッシュゲージの方が大きめになった. これはアタッチメントと円板の大きさの違いによると考えられる. すなわち, 雪面近くの軟らかい雪については, 木下式では直径 20 cm または 14 cm の円板を用いた. 一方, プッシュゲージのアタッチメントは直径 14 mm で, 両者の差が極端に大きい. 5 章でも述べるが, 直径が小さいほど貫入の際の圧縮力に対してせん断抵抗力の割合が大きくなるため, 硬度が大きめになったと考えられる. プッシュゲージは積雪断面に向かって, アタッチメントを水平方向に貫入するのに対し, 木下式硬度計は円板を鉛直方向に貫入させる. この点については, 新雪, しまり雪, ざらめ雪を対象とした場合は力を

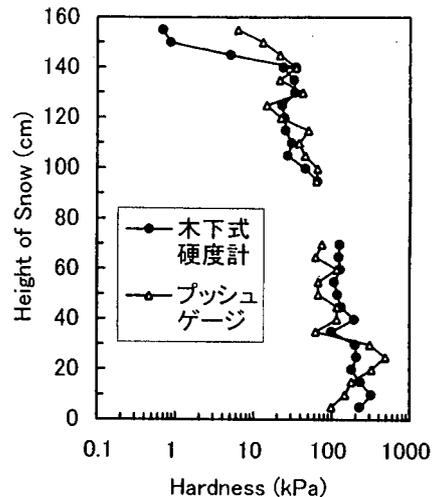


図 2 プッシュゲージと木下式硬度計の測定結果比較.

加える方向による違いは認められないことが報告されている (佐藤ら, 1997).

4.2 ラムゾンデとの比較

プッシュゲージの測定値をラムゾンデによる硬度分布と比較した一例を図 3 に示す. 測定は 1996 年 2 月 27 日に新潟県中里村西方で行なった. 観測地点の積雪深は 285 cm であり, 雪面付近と地上高 110 cm より下層は濡れざらめ雪, 110~150 cm は主として粒径 0.5 mm 以下の乾きざらめ雪, 150~240 cm は一部に氷板やざらめ雪を含むが, 主として粒径 0.5 mm 以下の乾いたしまり雪から成っていた. 雪温は 0.0~-1.9°C であった.

プッシュゲージでは水平方向に 10 cm 間隔で 5 回, 深さ方向には 5 cm 間隔で測定した. ラムゾンデの先端は円錐形でプッシュゲージと形状が異なるので, 単位をそろえた値の比較はできないが, 全体的な変化傾向はよく一致した. すなわち, 表面付近でもっとも弱く, 高さ約 110 cm より上部の乾き雪層では連続的に硬度が増加し, 120~

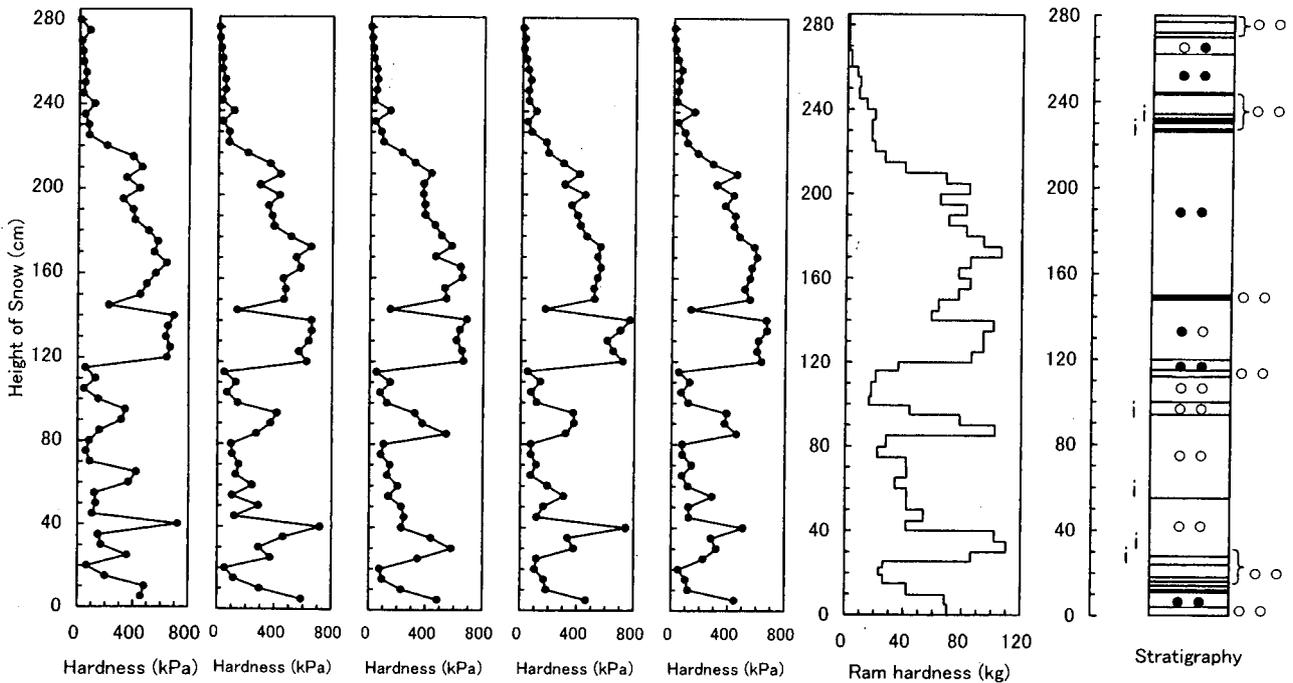


図3 プッシュゲージとラムゾンデの測定結果比較と積雪層構造。●●はしまり雪, ○○はざらめ雪, iは氷板を表わす。

140 cmで最大となった。下部の濡れざらめ雪層では、不連続な変動が多くみられた。しかし細かく見ると、プッシュゲージでは5回とも、高さ145 cmの位置に硬い層に挟まれた薄くて極端に硬度の小さな層が検出されたが、ラムゾンデの結果ではこの層を判別することができなかった。ラムゾンデで硬度を連続的に測定する場合、1回～数回のおもりの落下で貫入した厚さの平均硬度が得られる。そのため硬い層に挟まれた薄くて軟らかい層の硬度を得るのは困難になる。表層雪崩の要因となる弱層は一般に薄くて硬度が小さいので、ラムゾンデでは検出しにくく、プッシュゲージの方が適しているといえる。

5. アタッチメントの大きさによる影響

プッシュゲージは細かい間隔で積雪の硬度分布を測定できる利点がある。図4 (a) は直径5 mmのアタッチメントを使用して、1 cm間隔で測定した硬度分布である。比較のため同じデータを5 cmや10 cm間隔で抜粋して示したのが図4 (b) (c) である。測定は4.1章と同じく群馬県水上町湯の小屋で行なった。前述のとおり、高さ70～90 cmは層が乱れていたのを除いた。1 cm間隔で測定してみると積雪層の硬度は細かい間隔で激し

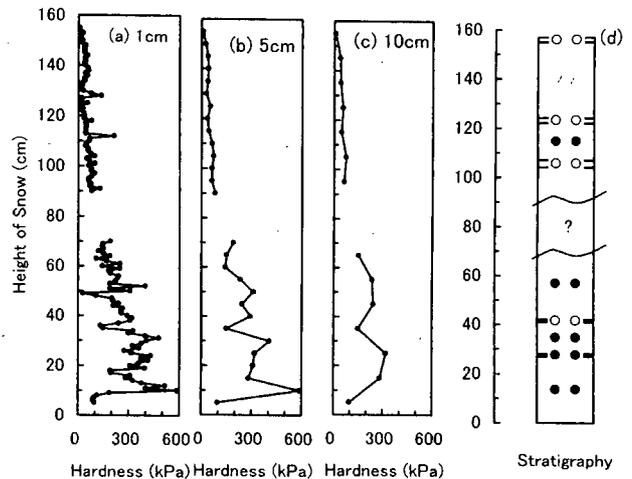


図4 測定間隔による硬度分布の比較。直径5 mmのアタッチメントを使用。(a) 1 cm間隔 (b) 5 cm間隔 (c) 10 cm間隔 (d) 積雪層構造。//はしまり雪, ●●はしまり雪, ○○はざらめ雪を表わす。

く変動していることがわかる。断面観測では5 cmや10 cm間隔の測定が一般的であるが、薄い層で急激に変化した硬度は粗い間隔の測定値には反映されにくい。

プッシュゲージの利点を活かしてより細かい間隔で測定するためには、アタッチメントの直径は小さい方が好ましい。しかし直径を数mmまで小さくし、断面積に数100倍の開きがあると、測定値に違いが生じる可能性が考えられる。そこで

アタッチメントの大きさが測定値に及ぼす影響を調べた。直径 1 mm から 30 mm までの 17 サイズのアタッチメントを作製し、同じ積雪層の硬度を測定、比較した。使用したアタッチメントの直径と断面積を表 2 に示す。

測定は図 4 と同じ地点において深さ方向に 5 cm 間隔で行なった。17 のサイズによる測定値のうち最大のアタッチメント (直径 30 mm) で得た値 (H_{30}) をその積雪層の代表値と見なした。そして各アタッチメントの測定値 (H_x) と代表値との偏差を代表値で除して規格化し (ND_x)、各サイズの ND_x 平均値とアタッチメントの直径との関係を表わしたのが図 5 である。すなわち、

$$ND_x = (H_x - H_{30}) / H_{30} \quad (1)$$

図中の縦棒は ND_x の標準偏差の範囲を示す。アタッチメントの直径が 7 mm (断面積: $38 \times 10^{-6} \text{ m}^2$) 以下になると測定値が大きくなり、直径 1 ~ 2 mm ではばらつきも大きくなった。一般に雪の中へ押しこまれたアタッチメントには圧縮力と同時に周囲の雪とのせん断抵抗力がかかっている。圧縮力はアタッチメントの断面積に、せん断抵抗力は円周の長さに比例するので、アタッチメントの径が小さくなるほど圧縮力に対するせん断抵抗力の割合が大きくなる。測定値が大きくなったのはこのせん断抵抗力の影響と考えられる。

表 2 アタッチメントの直径と断面積。

直径 (mm)	断面積 ($\times 10^{-6} \text{ m}^2$)
1	1
2	3
3	7
4	13
5	20
6	28
7	38
8	50
9	64
10	79
12	113
14	154
16	201
18	254
20	314
25	491
30	707

直径が 8 mm 以上 (断面積: $50 \times 10^{-6} \text{ m}^2$) になると測定値は径によらずほぼ一定になった。この傾向は硬度の大小によらずに見られた。

積雪の硬度は細かい間隔で不連続な変動をすることがある。プッシュゲージはアタッチメントの径を小さくすることによって、細かい間隔で硬度を測定することが可能である。アタッチメントの径が小さくなると硬度は大きくなる傾向があるので、測定の際には径の記載が必要といえる。以上の結果と測定値の単位を換算する便宜上、アタッチメントの断面積を $1000 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ または $100 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ にすると便利である。こうすると測定値 (N) そのまま、または 10 倍した値が硬度 (kPa) となるからである。

6. 測定者の違いによる影響

前述のように、プッシュゲージはアタッチメントを雪の中へ押しこむときに受ける抵抗力の最大値を測定する。そのためアタッチメントを貫入する速度と深さを一定にする必要があるが、これは測定者の感覚に頼っている。そこで測定者の違いによる測定値への影響を調べた。

観測は 1997 年 2 月 20 日に長岡市栖吉町で行なった。5 名の測定者は事前に数回練習を行なってアタッチメントを等速で 1 ~ 2 cm 貫入させるよう心掛けた。図 6 は同じ地点の積雪硬度分布を 5 名の測定者が測定した結果である。5 名のうち 2 名は、当日初めてプッシュゲージを使用した。硬度は深さ方向に 2.5 cm 間隔 (合計 36 点) で測定

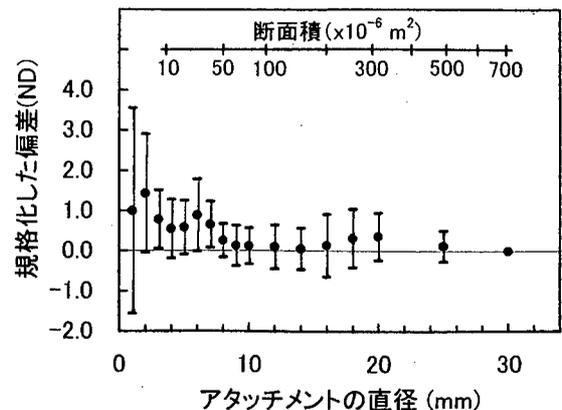


図 5 アタッチメントの大きさと硬度測定値の偏差との関係。偏差は直径 30 mm の測定値で規格化した。黒丸は平均値、縦棒は標準偏差の範囲を示す。

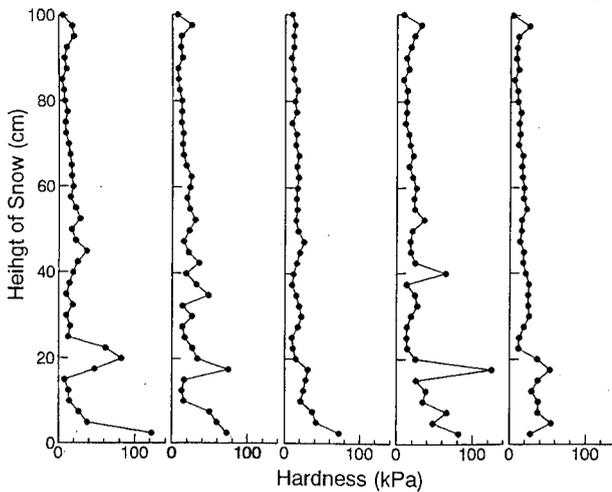


図6 5名の測定者による硬度測定結果.

し、各自の測定所要時間は230～300秒であった。積雪深は103 cmであり、地上高53 cmより上部は $-0.2 \sim -0.6^{\circ}\text{C}$ のこしまり雪、下部は氷板や帯水層を含んだ濡れざらめ雪であった。上部のこしまり雪層では5名の測定結果とも連続的な硬度分布を示し、深さ方向に硬度が増加する傾向が類似している。一方、下部のざらめ雪層では不連続的な変動が多く見られ、測定者によって測定値に開きのある箇所が見られた。しかしこれは、測定者の違いによる影響というよりも、ざらめ雪層が水平方向に非一様な硬度分布をもつこと (Takeuchi *et al.*, 1998) に起因すると考えられる。一般に雪の抵抗は圧縮速度によって変化する。木下 (1960) によると、定速度 (0.2 cm s^{-1}) で圧縮する場合の抵抗力最大値 (破壊強度) と衝撃に対する平均抵抗力 (木下が定義する硬度) では、後者の方が5倍も大きい。一方、定速度圧縮の場合には、圧縮速度が 0.1 cm s^{-1} 以上になると速度の増加によらず抵抗力はほぼ一定になるという結果が得られている (木下, 1958)。プッシュゲージの場合、数 cm s^{-1} の定速度圧縮による抵抗力最大値を測定している。すなわち、測定者による圧縮速度の違いは測定値に影響しないという結果は、木下 (1958) と一致し、妥当であるといえる。以上の結果から、プッシュゲージを用いた測定ではアタッチメントの貫入速度や深さを測定者の感覚に頼ってはいないものの、等速 (数 cm s^{-1}) で1～2 cm 貫入させることを念頭において測定すれば、測定者の違いによる影響は小さく、特に高度な技術や経験がなくても十分な測定が可能であるとい

える。

7. 機種の違いによる影響

プッシュゲージは市販のデジタル式荷重測定器であるから、類似のものが数社から発売されている。最大荷重容量も数 kg～数 100 kg と広範囲であり、分解能が異なる。これらを用いて積雪硬度を測定した場合、分解能やメーカーの違いによって測定値に大きな差が生じるとすれば、積雪用硬度計としては統一した基準が必要になってくる。そこで機種異なる3台のプッシュゲージで同じ地点の硬度分布を測定し、比較を行なった。使用したのはアイコーエンジニアリング製 MODEL9500 シリーズのうち、最大荷重容量が20 N (分解能が0.01 N) と200 N (分解能0.1 N) のもの、およびイマダ製の500 N (分解能0.1 N) のものである。いずれも歪みゲージを用いた荷重変換器であり、原理的な違いはない。アタッチメントの直径は各々14.0 mm, 15.3 mm, 16.2 mm であり、5章の結果から、アタッチメントの大きさの違いによる影響は無視できると考えられる。

測定は2000年3月19日に北海道のニセコアンヌプリ中腹 (標高約930 m) で、雪面から約200 cm までの積雪を対象に行なった。雪温は $-5.1 \sim -2.1^{\circ}\text{C}$ で雪面下66～71 cm に氷板を含むざらめ雪層が見られた他は、深さ150 cm までは新雪、こしまり雪、しまり雪、150 cm 以下200 cm まではこしもざらめ雪から成っていた。3機種別のプッシュゲージによる硬度分布の測定結果を図7に示した。各々3回測定した平均値である。硬度が約100 kPa を越えると最大荷重20 N のものでは測定できないため、2機分の結果を示している。3機の測定結果は10 kPa 以下の軟らかい新雪でも100 kPa 以上のしまり雪やこしもざらめ雪についても、測定値、変化傾向ともによく一致した。ここで比較したのは3機種ではあるが、分解能が0.01～0.1 N であれば、他機種についても最大荷重容量やメーカーによらず、積雪用硬度計として使用可能であることが推察される。

8. 積雪の硬度と密度の関係

密度が同じ積雪であっても、一般に雪質や粒径、雪温、含水率によって硬度にはばらつきが生じる。

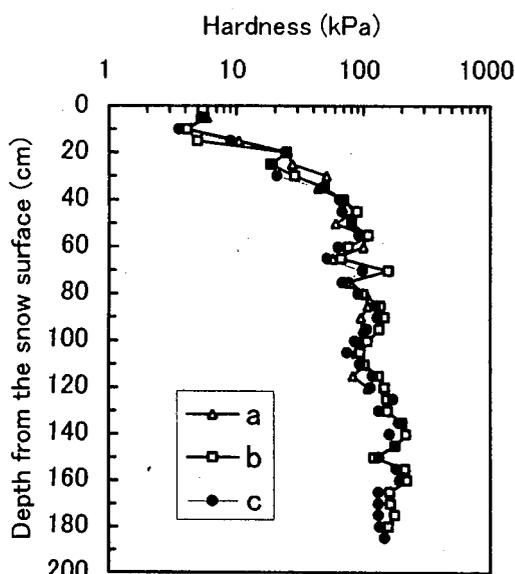


図7 3機種 of プッシュゲージによる硬度測定結果. a: アイコーエンジニアリング製 (最大荷重容量: 20 N), b: 同 (200 N), c: イマダ製 (500 N).

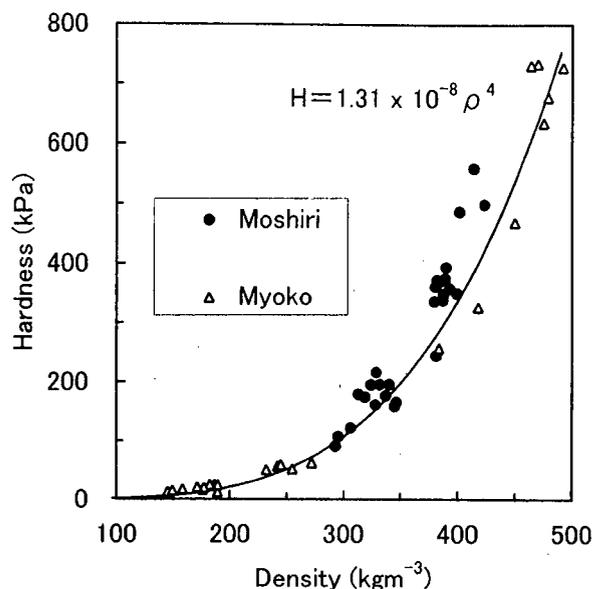


図8 積雪の密度と硬度の関係. 実線は群馬県水上町で得られた硬度と密度の関係式 (Takeuchi *et al.*, 1998) を表わす. H は硬度 (kPa), ρ は密度 (kgm^{-3}).

しかし、乾いたしまり雪だけに限ると硬度は密度の4乗に比例するという関係式が木下式硬度計によって得られている (木下, 1960). またカナディアンゲージによって、密度 $200 \sim 400 \text{ kgm}^{-3}$ の雪の硬度が密度の3.92乗に比例することが示されている (Gold, 1956). プッシュゲージで測定した硬度についても、粒径 0.5 mm 以下の乾いたしまり雪、こしまり雪では、硬度 H (kPa) と密度 ρ (kgm^{-3}) の関係を次式で近似でき、類似の結果が得られた (Takeuchi *et al.*, 1998).

$$H = 1.31 \times 10^{-8} \rho^4 \quad (2)$$

この関係式は1997年2月26日に群馬県水上町水上高原において行なった測定結果から得たものである. 観測地点の積雪深は186 cmであり、対象とした雪の密度は $166 \sim 419 \text{ kgm}^{-3}$ 、雪温は $-3.1 \sim 0.0^\circ\text{C}$ であった.

図8には新潟県妙高山麓、北海道幌加内町母子里において測定した積雪の硬度と密度の関係を示した. 観測日は各々2001年3月14日、1997年3月13日で、積雪深は430 cm、198 cmである. 測定方法は(2)式を得たときと同様に、密度は 100 cm^3 の密度サンプラーで、一様な積雪層から採取した試料の質量を測定して求めた. 硬度は、

密度測定箇所を挟んだ近傍2点で測定し、平均値を採用した. 対象とした雪はいずれの観測地点においても、粒径 0.5 mm 以下の乾いたしまり雪、こしまり雪である. 雪の密度と温度はそれぞれ、妙高山麓で $145 \sim 492 \text{ kgm}^{-3}$ と $-2.1 \sim -0.1^\circ\text{C}$ 、母子里で $293 \sim 424 \text{ kgm}^{-3}$ と $-2.7 \sim -1.4^\circ\text{C}$ であった. 図中の実線は(2)式を表わしている. 両地点の結果はほぼ実線上に分布し、(2)式をおおむね満たしている. 水上高原では得られなかった 420 kgm^{-3} を越える高密度で硬い雪についても、適用できることがわかった. このことから(2)の関係式は北海道の寒冷地や新潟県の豪雪地でも地域によらず、雪質や粒径を限定した乾き雪であれば成り立つことが確かめられた. すなわち、この関係式を用いると、粒径 0.5 mm 以下の乾いたしまり雪、こしまり雪であれば、硬度からおおよその密度を推定することが可能である. プッシュゲージは、硬度のみならず積雪の密度を簡便に迅速かつ細かく知るためにも有用な手段であるといえる.

9. まとめ

積雪硬度を野外において簡便、迅速かつ細かく測定する新たな方法として、デジタル式荷重測定器 (プッシュゲージ) を利用した硬度測定法を提

案した。プッシュゲージの測定値は木下式硬度計による測定値とよく一致し、積雪用硬度計として使用可能であることがわかった。さらにプッシュゲージは細かい間隔での測定が可能であることから、ラムゾンデでは困難な薄い弱層の検出に適している、特に緊急を要する雪崩災害調査等で有用である。簡便、迅速に測定できるため、多点のデータを容易に得ることもできる。

プッシュゲージを用いた測定の問題点は、アタッチメントの貫入速度と深さを測定者の感覚に頼っていることである。しかし、一定の速度で1~2 cm 貫入させるように心がければ、測定者の違いによる影響は小さいことが確かめられた。また、アタッチメントの直径を小さくすると、せん断抵抗力の影響が大きくなり、硬度が大きくなる傾向があることから、直径が約7 mm 以下の場合、径の大きさを記載することが必要である。以上の点に注意すれば、プッシュゲージは積雪用硬度計として大変有用であるといえる。

謝 辞

本研究で行なった積雪断面観測では多くの方々に支援していただいた。各観測でご協力いただいた方(所属は観測当時のもの)を記し、感謝の意を表します。群馬県水上町：山田穰氏、小林俊市氏、神田尚子氏(防災科学技術研究所長岡雪氷防災実験研究所)、山田高嗣氏(新潟大学理学部)。

新潟県中里村西方：深見浩司氏(北海道立地質研究所)、宮崎伸夫氏(クライメットエンジニアリング)。長岡市栖吉町：牛尾収輝氏(国立極地研究所)、永崎智晴氏(国際基督教大学理学部)。北海道ニセコアンヌプリ：川田邦夫氏(富山大学理学部)、阿部修氏、小杉健二氏(防災科学技術研究所新庄雪氷防災研究支所)、山田高嗣氏、西川大輔氏、小椋崇広氏、James McElwaine 氏(北海道大学低温科学研究所)、池田慎二氏(信州大学農学部)。北海道幌加内町母子里：橋本重将氏(名古屋大学大気水圏科学研究所)。

文 献

- Gold, L. W., 1956: The strength of snow in compression. *Journal of Glaciology*, **2**, 719-725.
- 木下誠一, 1958: 積雪における変形速度と変形形式との関係Ⅱ. 低温科学, 物理篇, **17**, 11-30.
- 木下誠一, 1960: 積雪の硬度Ⅰ. 低温科学, 物理篇, **19**, 119-133.
- 佐藤 威・小杉健二・阿部修, 1997: プッシュプルゲージと木下式硬度計による積雪硬度の比較. 1997年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 75.
- 前野紀一, 1986: 雪の力学的性質. 雪氷の構造と物性, 東京, 古今書院, 164-167.
- Schneebeli, M. and Johnson, J. B., 1998: A constant-speed penetrometer for high-resolution snow stratigraphy. *Annals of Glaciology*, **26**, 107-111.
- Takeuchi, Y., Nohguchi, Y., Kawashima, K. and Izumi, K., 1998: Measurement of snow hardness distribution. *Annals of Glaciology*, **26**, 27-30.

Snow hardness measurement using a digital load-gauge

Yukari TAKEUCHI¹⁾, Yasuaki NOHGUCHI²⁾, Katsuhisa KAWASHIMA³⁾ and Kaoru IZUMI⁴⁾

1) *Niigata Experimental Laboratory, Public Works Research Institute,
Nisiki-cho, Arai 944-0051*

2) *National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,
Tennodai, Tsukuba 305-0006*

3) *Railway Technical Research Institute, Hikari-cho, Kokubunji, Tokyo 185-8540.*

4) *Research Institute for Hazards in Snowy Areas, Niigata University, Niigata 950-2181.*

Abstract: A new method of snow-hardness measurement using a handy-type digital load-gauge (push-gauge) is demonstrated. The push-gauge can measure the maximum strength of a snow layer when it is destroyed by the circular plate attachment pushed horizontally into the side of the pit. Snow-hardness measured with the push-gauge was compared with measurements with a rammsonde and Kinosita-type hardness meter. The measured values agreed with each other, confirming that the push-gauge can be used as a snow-hardness meter. It is especially useful to detect thin weak layers because it can measure snow-hardness at very small space intervals. The measured hardness can be regarded as constant if the diameter of circular plate is about 8 mm or more. It was confirmed by data in various regions that the hardness of a fine-grained compacted snow layer with grain-sizes less than 0.5 mm is highly correlated with the fourth power of the snow density.

(2001年6月4日受付, 2001年8月10日改稿受付, 2001年8月16日受理, 討論期限2002年3月15日)