

熱量式による簡易積雪含水率計の試作

河島克久*・遠藤 徹**・竹内由香里***

A Portable Calorimeter for Measuring Liquid Water Content of Wet Snow

By

Katsuhisa KAWASHIMA*, Toru ENDO** and Yukari TAKEUCHI***

****Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies,

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

**Shiozawa Anti-Snow Testing Station, Railway Technical Research Institute

Abstract

In order to facilitate the measurement of liquid water content of snow in high mountains, a portable calorimeter named "Endo-type snow-water content meter" was developed. It is composed of a metal-coated container made of insulating materials and a thermister thermometer. Its strong points are its light weight, small size and easy fabrication with cheap materials. The total weight of the device is as light as 250 g, which is only 7% of the snow-water content meter widely used in Japan (Akitaya-type snow-water content meter). The results of experiments revealed that the device was capable of measuring water content in 2 minutes with an error of less than 2% in most cases.

キーワード：含水率 (Liquid water content), 積雪含水率計 (Snow-water content meter),
熱量方式 (Calorimetric method)

1. はじめに

積雪は水を含むと急激な構造変化を起こす。濡れ雪の力学的性質は乾き雪の場合と異なり、その内部に含まれる水の割合、すなわち含水率に大きく依存するので、濡れ雪の挙動を解明する上で含水率の測定は極めて重要である。

現在、実用化されている積雪の含水率計としては、熱量方式と誘電方式の二種類がある。日本において最も広く普及しているのは融解型の熱量式含水率計であり、古くは吉田 (1959) が開発した結合式含水率計が、現在では秋田谷 (1978) による秋田谷式含水率計が主に用いられている。秋田谷式含水率計は、野外における測定が簡便かつ高精度に行えるように結合式含水率計を改良したものであり、補正を施すことによって1%の精度で測定可能である。しかし、秋田谷式含水率計は精密な計測が

可能である反面、そのサイズや質量が大きいため山岳地の積雪、雪渓、氷河等の調査においては運搬が困難である。また、一測定に熟練者でも5分程度の時間を要するため、短時間に多量の測定を行うことが難しい。近年、日本でも欧米で開発された誘電方式の含水率計が導入されつつあるが、非常に高価であるとともに、計測器によっては商用電源が必要であったり、誘電率から含水率への変換に問題が残されている場合もある (井上・小南, 1995)。また、誘電方式の含水率計は、電極を積雪中に挿入した状態で誘電率を測定するため、氷河や雪渓のフィロンあるいは雪崩デブリのような高密度積雪では使用できない場合がある。

著者等は、これらの問題を解決するため、①安価に入手できる材料や部品を用いて簡単に作成することができ、②測定時間が短く、③軽量かつ小型の融解型熱量式含水率計を試作した。この含水率計は、第一号試作品の発案者の名前から「遠藤式含水率計」と名付けた。本報告では、遠藤式含水率計の構造とその測定誤差について述べるとともに、他の含水率計との比較を行う。

*長岡雪氷防災実験研究所 第三研究室 研究生

**財団法人鉄道総合技術研究所 塩沢雪害防止実験所

***長岡雪氷防災実験研究所 第二研究室 科学技術特別研究員

2. 含水率計の構造および測定方法

遠藤式含水率計は融解型の熱量方式によるものであり、その測定原理は従来の結晶式や秋田谷式と同じである。Fig. 1 に遠藤式含水率計の構造の概略を、Fig. 2 にその写真を示す。本体は、断熱材（発泡スチロールとスタイロフォーム）でできた円筒形容器およびその蓋から成っている。断熱材容器は耐久性や測定能率を考慮して金属製の容器（厚さ 0.2 mm）に入れられており、断熱材容器の側面と底面が完全に金属容器に覆われている。蓋には小型サーミスター温度計（質量 60 g）が取り付けられており、容器内の水温を測定できる。蓋と容器のつなぎめ

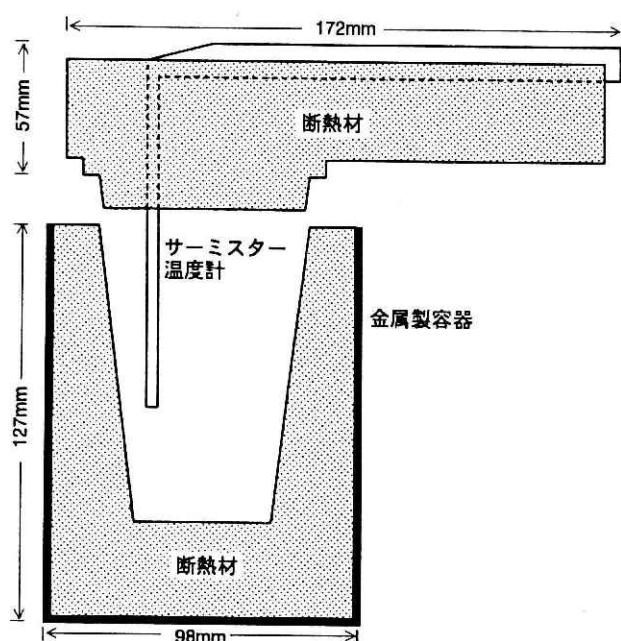


Fig. 1 遠藤式含水率計の構造の概略。

Schematic diagram of Endo-type snow-water content meter.

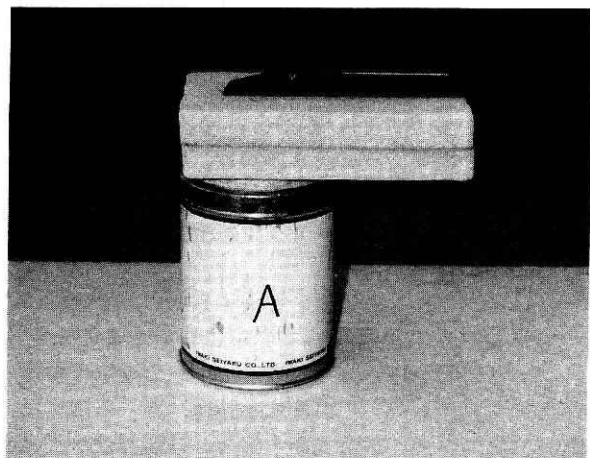


Fig. 2 遠藤式含水率計の外観。

Side-view of Endo-type snow-water content meter.

はテーパーになっているので、気密性があり、しかも容易に脱着できる。本体全体の質量、体積はそれぞれ 250 g, $1.6 \times 10^3 \text{ cm}^3$ であり、秋田谷式含水率計と比べると質量は約 1/14, 体積は約 1/10 である。さらに、遠藤式含水率計は、安価（1 万円程度）に入手可能な材料や部品を用いて簡単に作成できる点が大きな特徴である。

測定手順は次の通りである。まず最初に、ポリエチレン容器に $30 \sim 40^\circ\text{C}$ の湯を $60 \sim 100 \text{ cm}^3$ 入れ、その質量 $M_1(\text{g})$ を測定する。湯を含水率計本体に移し蓋をかぶせた後、湯を空けたポリエチレン容器の質量 $M_2(\text{g})$ と湯を入れた含水率計の質量 $M_3(\text{g})$ を測定する。 $M_1 - M_2$ より用いた湯の質量が得られる。次に湯を入れた含水率計を揺すり、湯をよく攪拌させてから湯の温度 $T_1(^\circ\text{C})$ を測定した後、蓋を開け、 $15 \sim 30 \text{ g}$ 程度の雪の試料を素早く入れて蓋を閉じる。雪が速く完全に融けるように含水率計を揺すり、含水率計内の水温が平衡状態に達したらその時の温度 $T_2(^\circ\text{C})$ を読みとる。最後に、湯と雪が入った含水率計の質量 $M_4(\text{g})$ を測定する。 $M_4 - M_3$ より雪の試料の質量が得られる。なお、質量、温度の測定はそれぞれ 0.1 g , 0.1°C の単位まで行う。

含水率計の水当量や雪試料を入れる際の熱の出入りを無視すると、含水率 $W(\%)$ は次式より算出できる。

$$W = 100 \left[1 - \frac{1}{79.6} \left\{ \frac{(T_1 - T_2)(M_1 - M_2)}{M_4 - M_3} - T_2 \right\} \right] \quad (1)$$

3. 測定誤差

遠藤式含水率計の測定誤差を調べるために含水率既知の雪試料を作り、遠藤式による測定結果と既知含水率とを比較した。含水率既知の雪試料は、密度 340 kg/m^3 のしまり雪を用いて秋田谷（1978）と同様な方法で作成した。含水率の測定は $-1 \sim 0^\circ\text{C}$ の低温室内で行った。

Fig. 3 に既知含水率 W_0 が $0 \sim 25\%$ の試料 49 個について、遠藤式含水率計による測定値 W との比較を行った結果を示す。図中の実線と破線は、それぞれ $W = W_0$, $W = W_0 \pm 2$ を表すものである。 W の W_0 への回帰直線は、

$$W = 1.006 W_0 + 0.164 \quad (2)$$

となり、図中には示していないが $W = W_0$ の実線の極近傍にくる。49 個の測定値のうち、その約 86% に当たる 42 個については測定誤差が $\pm 2\%$ 以内に入っている。各誤差の絶対値の平均値である平均誤差は 1.07% であった。また、 W の確率誤差は 0.903% であり、 $1/2$ の確率で測定誤差の絶対値は 0.903% より小さくなることがわかった。秋田谷式含水率計について行われた精度の検定結果では、測定誤差が $\pm 2\%$ 以内に入った測定値の割合は約 84%, W の確率誤差は 0.970% となっている（秋田谷, 1978）。これらの値は、遠藤式含水率計の場合とほぼ同じである。

次に、測定に用いた湯と雪の質量の比率と測定誤差との関係を Fig. 4 に示す。測定データ数が十分ではない

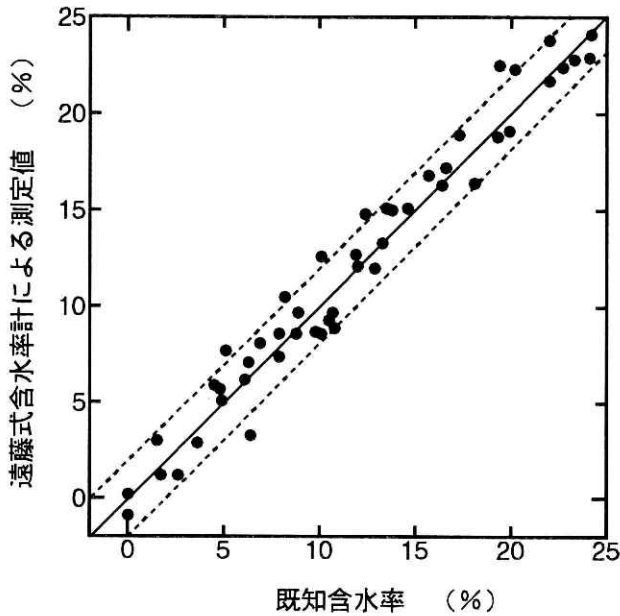


Fig. 3 既知含水率と遠藤式含水率計による測定値との関係.

Relation between values of liquid water content and those measured by Endo-type snow-water content meter.

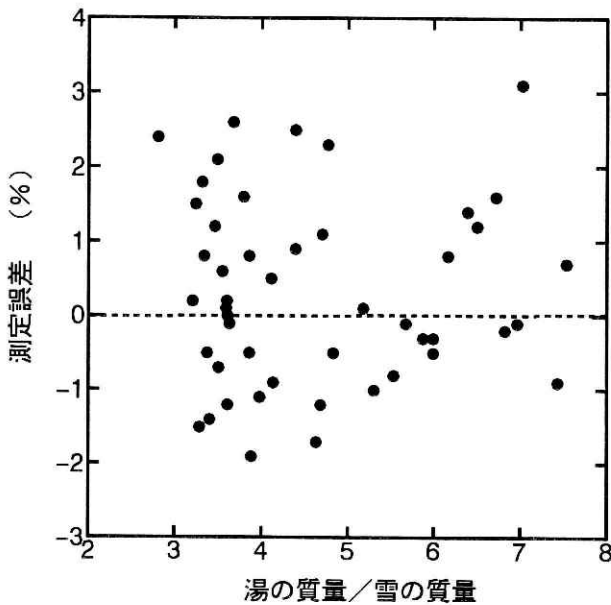


Fig. 4 測定に用いた湯と雪の質量の比率と測定誤差との関係.

Relation between the gravimetric ratios of hot water to snow samples and measurement errors.

が、湯と雪の質量比率が5～6の場合に誤差の絶対値は小さくなっている。秋田谷式含水率計においても比率が5～6のときに精度が良くなる傾向がみられている。

遠藤式含水率計では、雪試料を入れる際に蓋を開けるため、その間に熱の出入りが生じる。蓋を開けている時間は2～5秒程度であり、測定環境や雪試料のサイズ等によって変わる。そこで、蓋を開ける時間によって測定値がどのように変化するかを調べた。含水率10%の雪試料を作成し、蓋を開けている時間を2～100秒の間で変化させて含水率を測った結果をFig. 5に示す。測定は、用いる湯の温度が40℃と34℃の場合について行った。湯の温度が40℃のときには、蓋を開けた時間が10秒までは測定値は誤差±2%以内に入っているが、10秒以上になると時間の増加とともに急激な測定値の減少がみられる。一方、湯の温度が34℃の場合には、40秒以上で測定値が減少している。これらの結果より、40℃以下の温度の湯を用いる場合、蓋を開けている時間が2～5秒程度であれば、この時間の違いは測定結果にほとんど影響を及ぼさないといえる。また、湯の温度が高くなるに従って、より短い時間で測定結果に影響が現れる傾向があるので、測定誤差を小さくするためには40℃以下の湯を用いる必要がある。

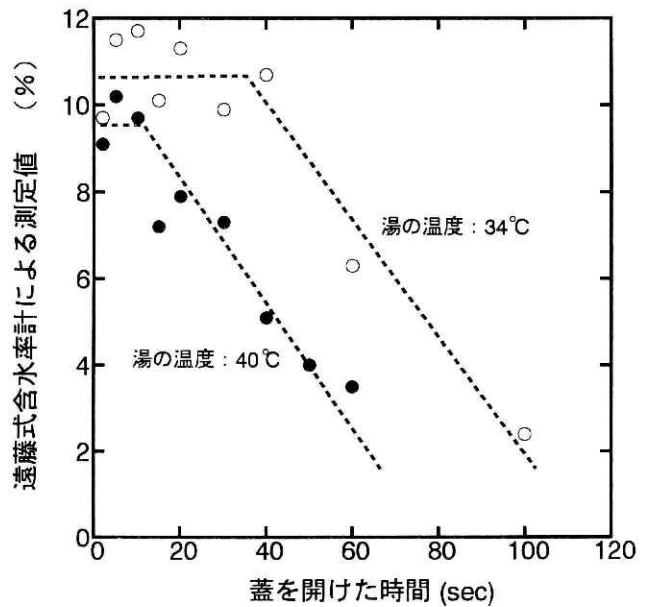


Fig. 5 遠藤式含水率計による測定値の蓋を開けた時間による変化。湯の温度が34℃の場合(○)と40℃の場合(●)について、既知含水率10%の試料を用いて測定した。

Changes in liquid water content measured by the Endo-type snow-water content meter due to the time the lid of the device is kept open. Snow samples with a liquid water content of 10% were measured. Open circles and solid circles represent the measured values when the temperature of hot water is 34℃ and 40℃, respectively.

4. 他の含水率計との比較

1996 年 3 月 7 日に長岡雪氷防災実験研究所の露場上の積雪(積雪深 91 cm)において、含水率の鉛直分布を遠藤式、秋田谷式、誘電方式の各含水率計を用いて測定した。誘電方式の含水率計としては、近年日本でも所々で用いられているインスブルック大学実験物理学研究所製の積雪表面・内部用誘電率式含水率計(The Snow Surface/Volume Wetness Dielectric Device)を使用した。この含水率計は、12.5×14 cm の板状の電極(厚さ 1.5 mm)を積雪に挿入して体積含水率を測定するものであり、通常、日本において採用されている重量含水率に変換するためには、同時に測定した密度で除する必要がある。3 種類の含水率計による測定は、比較的厚い均一な積雪層の中央付近の雪を、水平方向に約 5 cm ずつ離れた場所から採取し試料として用いた。Fig. 6 に含水率と密度の鉛直分布および積雪の層位構造を示す。積雪は全層がざらめ雪に変態しており、濡れ密度は 330~500 kg/m³ であった。3 つの含水率の垂直分布の測定結果を比較すると、表層部の含水率が大きく、地上 70 cm 以下の含水率がほぼ均一であるという全体的傾向は一致しているものの、場所によっては測定値に最大 6.8% の差異がある。尾関・秋田谷(1993)の積雪表層における含水率の水平分布の観測でも、水平方向に 10 cm 離れると含水率が 5~10% 変化する場合があり得ることが示されているの

で、今回観測された差異を一概に含水率計の違いに起因するものとはいえない。しかし、地上 70 cm 以下でみられるように、10% 以下の含水率領域では誘電方式の方が熱量方式よりも幾分大きな値を示しており、しかも含水率の変動は誘電方式の方が他に比べて小さい。この傾向が含水率計の特性によるものか否かを調べるため、同一積雪層で遠藤式と誘電方式による含水率の測定を多数行い比較した。測定に用いた雪は、濡れ密度 310~520 kg/m³ のしまり雪とざらめ雪である。Fig. 7 にその結果を示す。図中の直線は両者が等しいことを示し、2 本の破線ではさまれた領域は両者の差が 2% 以下であることを示す。36 個の全測定値のうち、その差が 2% 以内であったのはわずか 14 個である。遠藤式含水率計による測定値を基準として考えると、含水率が約 8% 以下では誘電方式の方が大きな値を示し、逆に 8% 以上では遠藤式の方が大きな値を示す傾向がみられる。さらに、Fig. 7 より遠藤式の測定値が 4~12% の間で変動したとき、誘電方式では 6~10% の変動しか示しておらず、5~10% 程度の含水率領域では誘電方式の測定値の方が遠藤式に比べて変動が小さいといえる。

次に、遠藤式、秋田谷式、誘電方式の各含水率計を用いて野外で含水率を測定したときの測定時間を比較する。Fig. 6 に示した長岡で行った含水率鉛直分布の測定時に各測定毎に所要時間を計った。その結果、晴天、無

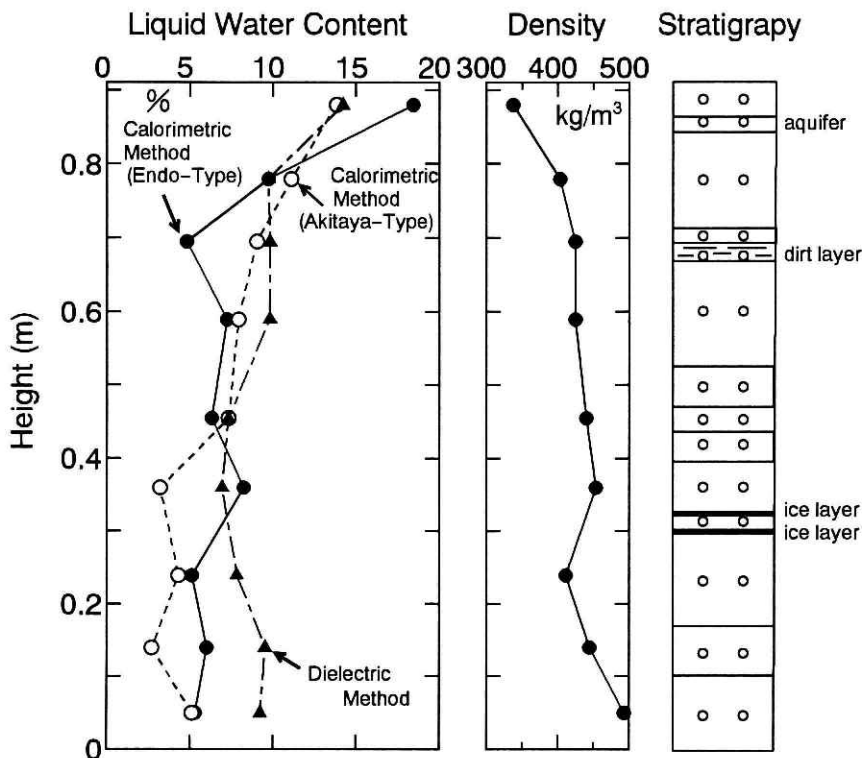


Fig. 6 長岡における積雪の含水率と密度の鉛直分布および層位構造(1996年3月7日)。雪質記号は ICSI of IASH and IGS (1990)による国際分類に従った。

Liquid water content and density profiles and stratigraphy of snow cover at Nagaoka on 7 March 1996. Grain shape classification is referred to ICSI of IASH and IGS (1990).

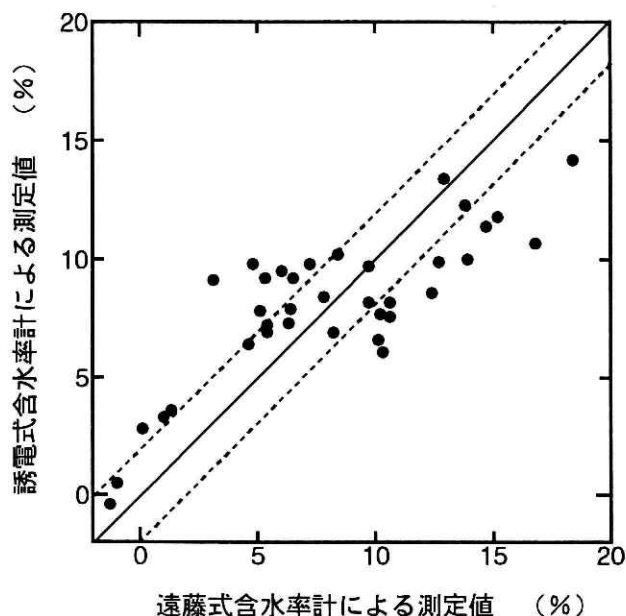


Fig. 7 遠藤式含水率計による測定値と誘電式含水率計による測定値との比較。

Liquid water content measured by dielectric method in comparison with those by Endo-type snow water content meter.

風時に2名で測定した場合(1名は計測, 他の1名は記録および計測補助), 各9回の測定から求めた平均測定時間は遠藤式で105秒, 秋田谷式で236秒, 誘電方式で94秒であった。なお, この時間の中には, 秋田谷式では室内で行う質量の測定が, 誘電方式では密度の測定が含まれている。遠藤式含水率計の測定時間は, 誘電方式と10秒程度しか差はなく, 同じ熱量式である秋田谷式含水率計と比べると2倍以上の速度で測定可能である。

5. おわりに

熱量式による簡易積雪含水率計(遠藤式含水率計)を試作した。その主な特徴は, 軽量かつ小型であること(質量250g)および操作が簡単で測定時間が短いことである(一測定の所要時間2分以下)。遠藤式含水率計を用い

て含水率を測定したときの誤差はほとんどの場合 $\pm 2\%$ 以内であり(平均誤差1.07%), 測定誤差を小さくするためには, 湯と雪の質量比率を5~6にし, しかも 40°C 以下の湯を用いることが重要である。

遠藤式含水率計は, 現在日本で最も広く普及している秋田谷式含水率計と比べて, サイズ, 質量, 測定所要時間ともに小さい。また, 誘電方式の含水率計と比較すると, 測定所要時間はわずかに劣るものの, 高密度積雪でも使用できるという利点がある。このため, 遠藤式含水率計は, 測定機材の運搬が困難である山岳地において, 氷河や雪渓のフィルンあるいは雪崩デブリのような積雪の含水率を多数測定する場合に最も適している。また, 遠藤式含水率計は安価に入手可能な材料や部品を用いて簡単に作成することができるので, 雪を題材とした学校教育の教材にも成り得るであろう。

謝 辞

測定誤差の検証を行うに当たって, 長岡雪氷防災実験研究所の小林俊市氏, 納口恭明氏, 清水増治郎氏, 山田穰氏, 五十嵐高志氏および新潟大学の和泉薫氏に適切な助言と測定機材の提供をしていただいた。野外における測定に当たっては, 北海道大学低温科学研究所の西村浩一氏および伊藤陽一氏に手伝っていただいた。以上の各氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 秋田谷英次(1978): 熱量計による積雪含水率計の試作。低温科学物理篇, 36, 103~111.
- 2) 井上 聡・小南靖弘(1995): TDR法による雪の含水率測定。雪氷北信越, No. 14, 58.
- 3) 尾関俊浩・秋田谷英次(1993): 積雪表層における含水率の水平分布。平成5年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 119.
- 4) The International Commission on Snow and Ice of the International Association of Scientific Hydrology and International Glaciological Society (1990): The International Classification for Seasonal Snow on the Ground, 23pp.
- 5) 吉田順五(1959): 積雪含水率測定用熱量計。低温科学物理篇, 18, 17~28.

(原稿受理: 1996年7月24日)