



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	熱量計による積雪含水率計の試作
Author(s)	秋田谷, 英次; AKITAYA, Eizi
Citation	低温科学. 物理篇, 36, 103-111
Issue Date	1979-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18359
Type	departmental bulletin paper
File Information	36_p103-111.pdf



熱量計による積雪含水率計の試作*

秋田谷英次

(低温科学研究所)

(昭和53年10月受理)

I. ま え が き

積雪の含水率測定には、吉田¹⁾の考案した結合熱量計が広く使われている。結合熱量計は湯を入れるA容器(温度計付)としめった雪を入れるB容器からなっている。測定の手順は次のとおりである。

1. A容器内の湯の質量と温度の測定
2. B容器内の雪の質量測定
3. A, B容器を結合, 攪拌, 平衡温度の測定

あとは簡単な計算で含水率は求められる。この結合熱量計はそれまでの熱量計や、他の方式^{2,3)}の含水率計に比べ操作が簡単なこと、精度が良いこと、殊に含水率の絶対測定ができることのために長く使われてきた。

しかしこの含水率計にも次のような欠点がある。温度計ははじめに検定をしてA容器に接着剤で固定するので年月を経て温度計の再検定の必要が生じたときとりはずすことが難かしい。又操作上の問題として一組の含水率計でくり返し測定するとき、容器内に水分が残らないようにするのに手間がかかり、容器が古くなるとA, B容器の連結口、温度計の接着部から水がもれるようになり、その修理が難かしい。容器の製作は簡単ではない。

筆者はこれらの欠点をのぞいて温度計の検定を容易にし、操作が簡単で、含水率の計算には小型の電卓を用い、測定後現場でただちに含水率が得られる測定法を考えた。

II. 含水率計の構造と測定法

測定は熱量計による方法なので、原理は吉田の結合熱量計と同じである。まえにのべたような結合熱量計の欠点をなくするため次の3点を改良の着眼とした。

1: A, B容器に相当するものは使い捨て可能なものとする。こうすると連続して何回も測定をくり返すとき、前回の水分が容器内に残る心配がなくなる。

2: 野外での温度の読取りを容易にするため温度が数字で表示されるデジタル温度計を用いた。又測温体の熱電対は容器に接着しないので温度計の再検定が容易である。

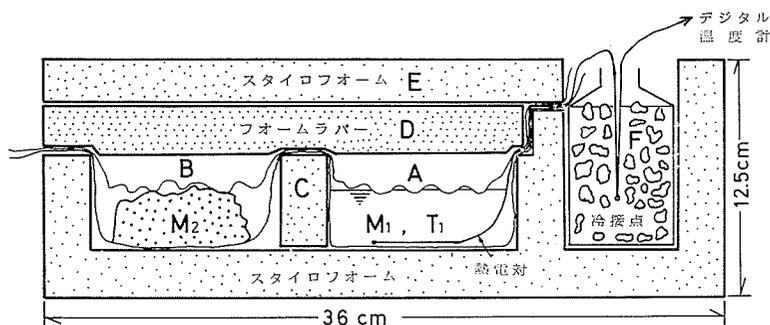
3: 単純な構造で製作や操作が容易なこと。

湯や雪を入れる容器が使い捨て可能なように薄いポリエチレンの袋(ポリチューブ)を用い

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1949号

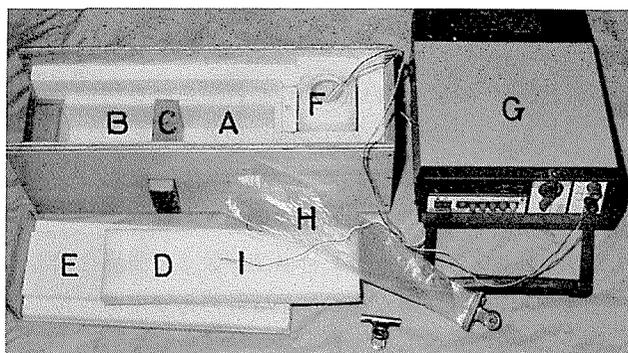
た。第1図に含水率計の構造を、第2図に写真を示した。本体は厚さ2.5 cmの断熱材(スタイロフォーム)でできた箱で、箱の外側は厚さ9 mmのベニヤ板で覆ってある。断熱材の接合にはエポキシ系接着剤を用いた。本体は湯が入る空間A、雪が入る空間B、湯と雪の間を仕切る仕切板Cからなっている。湯と雪は厚さ0.02 mm、長さ60 cm、幅7.5 cmの両端が開いているポリチューブHに両方の口から別々に入れる。湯の温度測定、湯と雪の混合、混合後の温度測定は断熱箱の中に入れてポリチューブの中でおこなう。次に測定の手順について説明しよう。

ポリチューブをほぼ中央で2つに折り、折ったところを書類をはさむ金属製のクリップでとめる。底がクリップでとめられた長さ30 cmの2つのポリ袋ができたことになる。袋の一方に40~50°Cの湯を120~150 g入れる。入口は別のクリップでとめ、湯がもらないようにしてその質量を0.1gの単位まではかる。風袋を差引くと湯の質量 M_1 が得られる。ポリチューブの湯が入っている方を断熱箱のAの側に入れ、2個のクリップをとり去り湯の中に熱電対Iを挿入する。湯の温度が下らないようにAの部分にだけフォームラバーDを2つ折りにしてふたをする。ポリチューブの湯の入っていない方はBの部分に入れ、このポリチューブに含水率を測る雪(20~50 g)を入れる(第3図 a)。2枚のふたD, Eをし箱全体を持ち上げ左右に振り



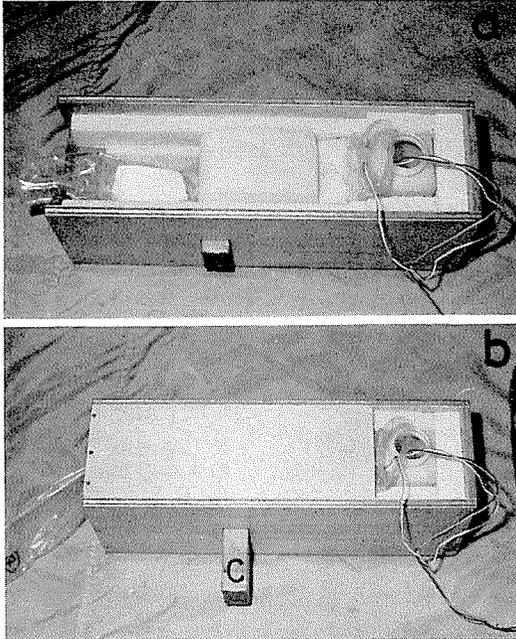
第1図 含水率計の構造

Aの側には湯を、Bの側には雪を入れる。湯と雪の混合は仕切板Cを引出して行なう



第2図 含水率計一式

A~Fは第1図参照, G: デジタル温度計, H: ポリエチレンチューブ, I: 銅-コンスタンタン熱電対

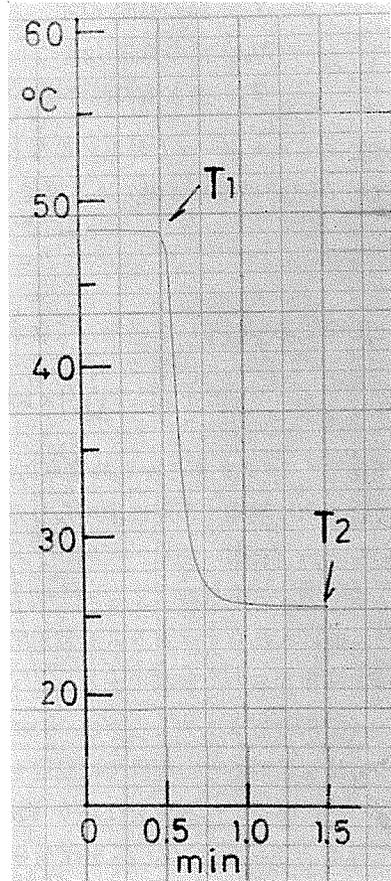


第3図 含水率操作手順

a: 湯と雪を入れたところ, b: 仕切板 C を引き出しポリチューブの左端を引いたところ

ながらデジタル温度計を読む。10秒あまりで湯は一定温度 T_1 になる。内側のフォームラバーのふた D で湯の入っているポリチューブの両端が押えつけられているので、箱を振っても湯が外にもれたり、雪の入っている側へもれることはない。熱電対の冷接点 F は氷と水を入れた 250 cc のポリエチレン容器である。温度を読むときには断熱箱を左右に振るので冷接点の氷と水は攪拌され正確に 0°C となる。温度計の分解能は 0.1°C のものが必要である。筆者の使ったものはタケダ理研, TR-2112 型で付属のバッテリーユニットと組合せると野外でも使える。熱電対 (銅-コンスタンタン) は 0.3 mm の直径であらかじめ温度目盛の検定をしておいた。誤差は $0\sim 50^\circ\text{C}$ の間で最大 0.4°C であった。温度は 0.1°C の精度が必要なので、使用する温度計は必ず検定しなければならない。 T_1 の読取りがすんでから仕切板 C を引きぬく。仕切板はスタイロフォームで、すべりを良くするため表面にテフロンテープをはってある。仕切板を引きぬくと箱の中のポリチューブにはたるみが生ずるので、箱の左端からはみでている部分を少し引きだしてたるみをなくする (第3図 b)。たるみがなくなると湯と雪がまざり温度は下りはじめる。容器を左右に振りながら平衡温度 T_2 を読む。ポリチューブをとり出して全体の質量をはかり、これから湯の質量 M_1 を差引くとしめり雪の質量 M_2 が求まる。湯と雪を混合したときの温度変化の一例を第4図に示した。0.5分の所で湯の温度 T_1 を読み、その後混合、攪拌の操作を経て1.5分の所で T_2 を読んでいる。

いま M_1 ; 湯の質量 (g)



第4図 含水率測定時の温度変化例

T_1 : 湯の温度, T_2 : 湯と雪を混合したあとの平衡温度

T_1 ; 湯の温度 (°C)

M_2 ; 雪の質量 (g)

T_2 ; 湯と雪の混合後の平衡温度 (°C)

とし、ポリチューブと熱電対の水当量、断熱材からの熱の出入りを無視すると、しめった雪の試料 M_2 (g) のうち氷のしめる質量 I (g) は

$$I = \frac{1}{79.6} \left\{ (T_1 - T_2) M_1 - T_2 M_2 \right\} \quad (1)$$

として求められる。したがって含水率 W は

$$W = \left(1 - \frac{I}{M_2} \right) \times 100 = \left[M_2 - \frac{1}{79.6} \left\{ (T_1 - T_2) M_1 - T_2 M_2 \right\} \right] \frac{100}{M_2} \quad (2)$$

である。(2)式をあらかじめ電卓に記憶させておき、 M_1 , T_1 , M_2 , T_2 の4つの測定値を入れると含水率は現場で即座に求められる。筆者の用いた電子式卓上計算器(電卓)はヒューレット・パッカード社製、マイクロカリキュレーター、モデル29Cでこの器械に手動で計算のプログラムを入力すると電源スイッチを切ってもプログラムは消えず、次の計算の時スイッチを入れれば、前に入れたプログラムが利用できるので、乾電池の消耗を防ぎながら野外で長時間、くり返し使用するのに便利である。

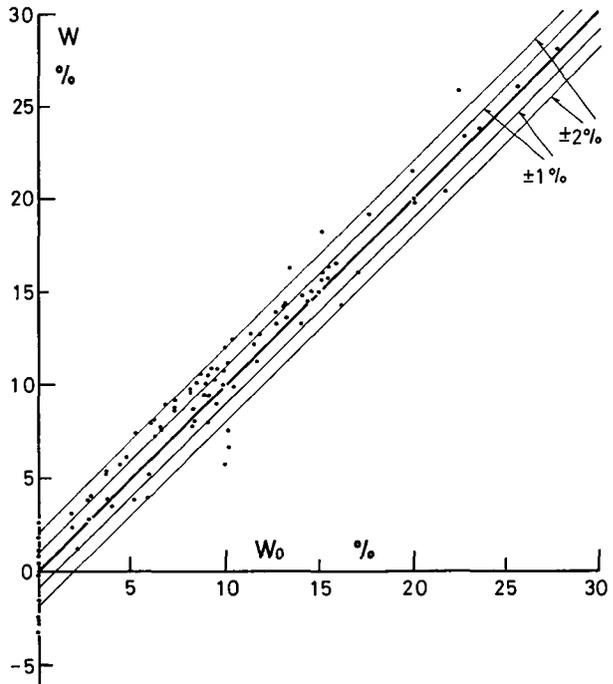
使用するポリチューブはつねに乾燥したものをを用いる。野外での測定を簡便にするには次の方法を用いると、現場では温度を測るだけでよい。すなわち必要な数だけあらかじめポリチューブに湯を入れ質量をはかり、両端を輪ゴムでとめ、大きめの魔法瓶の中に入れて現場へ持って行く。現場では T_1 , T_2 をはかったあと、ポリチューブは再び輪ゴムで水がもれない様にしておき、現場から持ち帰ってそれぞれの試料について質量 M_2 をはかればよい。こうすると現場での測定時間はかなり短縮される。ただしこれは便宜的な方法で、現場で含水率の計算を行い、疑わしい値がでた時には再度の測定を行う方が良いことは言うまでもない。一般に含水率をはじめ積雪の性質が現場で得られれば、さらに何を測定すべきであるかがその場で決定でき、実行できるのであるから現場で測定結果を得られるようにすることが大切である。

III. 測定結果

試作した含水率計の精度を調べるため含水率既知の雪 ($W_0\%$) をつくり、それと測定結果を使って(2)式で計算した含水率 ($W\%$) の値とを比較した。測定はほぼ -1°C の低温室内でおこなわれた。大きな魔法瓶の中に水とくだった氷を入れ、この上に 0°C 以下の乾いた雪の試料が入った3重のポリエチレンの袋のをせる。更にこの試料の上に水と氷の入ったポリエチレンの袋のをせてふたをする。魔法瓶は 0°C に近い低温室や冷蔵庫内に数時間入れておく。そうすると試料の雪は 0°C の乾いた雪となる。この試料から $20\sim 50$ g の雪をとり出し質量 I_0 をはかる。一方別の魔法瓶の中にくだった氷と水を入れておき、そこからスポイトで適当量の水をとり、先程の雪にそそいで質量 M_2 をはかる。これで含水率既知の雪ができたわけで、 $W_0 = \left(1 - \frac{I_0}{M_2} \right) \times 100\%$ であり、この W_0 を既知含水率と呼び、これに対し(2)式で求めた含水率 W を含水率

の測定値とよぶことにする。

含水率が0~30%の範囲に入るような多くの試料を作り含水率を測定した。第5図に95個の試料についての W と W_0 の関係を示した。 W についての回帰直線 $W=A+BW_0$ を求めると係数 A, B とその確率誤差はそれぞれ $A=0.249\pm 0.178, B=1.024\pm 0.016$ となり又 W の確率誤差 r_w は ± 0.970 となった。確率誤差の定義から本装置での測定値の半数は $\pm 0.97\%$ 以内の精度におさまり、その4倍、 $\pm 3.9\%$ をこえる偶然誤差はおこらないことになる。第5図には $W=W_0$ としたときの線が太い実線で、その上下に $\pm 1\%, \pm 2\%$ の細かい実線が引かれている。上にえられた回帰直線は事実上ほとんど第5図の太い実線に重なってしまう。検定用につくられたしめり雪が湯と



第5図 既知含水率 W_0 と含水率測定値 W
 W_0 は 0°C の乾いた雪とそれに加えた 0°C の水の量から求めた値、 W は M_1, M_2, T_1, T_2 の測定から (2) 式で求めた値

混ぜ合わされるまで、つくられた時の含水率のままであり、熱の交換がしめり雪と湯との間のみで行われる場合のみ $W=W_0$ の関係を示すわけであるが、回帰直線はほとんどこのことが成立していることを示している。すなわちポリチューブやまわりの断熱材への熱の出入りを考慮しなくても殆んど差支えないことを示すわけで、ポリチューブを主体とした含水率計の簡略化が成功したわけである。第5図の95個の測定のうち、15個の測定値は $\pm 2\%$ の外にはみ出している。上にのべたように $\pm 3.9\%$ 程度までは偶然誤差としておこりうる値ではあるけれども、今の場合次にのべるように誤差の大きいものは試料の雪の質量と密接な関係がある。

まえにのべたように測定にはしめり雪の質量 M_2 が $20\sim 50\text{g}$ の範囲でおこなったが、数個だけ M_2 が 20g 以下のものもあった。 M_2 が 20g 以下の場合には測定誤差はすべて -2% より大きかった。そこで湯の質量 M_1 と雪の質量 M_2 の割合と測定誤差の間関係をしらべた。その結果 M_1/M_2 が4以下の場合(雪の質量が多い場合)には誤差はすべてプラス側に、 M_1/M_2 が7以上の場合(雪の質量が少ない場合)には誤差はすべてマイナス側にあらわれていることがわかった。したがって、この含水率計の使用上の注意として、 M_1/M_2 の値が5ないし6程度で使うようにすることが、測定精度をよくするために必要なことである。

IV. 誤差の補正

前章で含水率の測定誤差の起り方に一定の傾向があることをのべた。次に誤差の発生原因

とそれを補正する方法を考えてみよう。この含水率計では、次にあげる2つの仮定のもとで計算がおこなわれた。すなわち、

1) 測定中に断熱材の壁を通して熱の出入りが全くなく、したがって湯の失った熱量は雪をとかず潜熱 (79.6 cal/g) およびとけた水を平衡温度 T_2 まで上昇させることにだけ消費された。

2) 湯と雪を入れるポリチューブおよび周囲の断熱材の熱容量を無視した (ポリチューブの質量は 2.5 g で湯と雪が入っている部分は約 1 g)。この2つを考慮すると、湯が失った熱量と雪が得た熱量の間には次の関係が成立つ。

$$(T_1 - T_2)(M_1 + m_1) = T_2(M_2 + m_2) + 79.6 I_0 + Q$$

ここに I_0 は試料中に含まれる氷の質量, Q はポリチューブを通して出入りする熱量である。又 m_1, m_2 はポリチューブおよび断熱材の水当量であるが、湯に関する値 m_1 と雪に関する値 m_2 はポリチューブおよび断熱材の形状が同じなのでほぼ等しいと考えられる。そこで $m_1 = m_2 = m$ とおき上式から I_0 を求めると

$$I_0 = \frac{1}{79.6} \left\{ (T_1 - T_2) M_1 - T_2 M_2 \right\} - \frac{1}{79.6} \left\{ m(2T_2 - T_1) + Q \right\} \quad (3)$$

となる。右辺の第1項は(1)式と同じであるから(3)式は次のようになる。

$$I_0 = I - \Delta I$$

ただし

$$\Delta I = \frac{1}{79.6} \left\{ m(2T_2 - T_1) + Q \right\}$$

結局(1)式では ΔI だけ氷の量を多く見積っていたことになる。

既知含水率 W_0 は

$$\begin{aligned} W_0 &= \left(1 - \frac{I_0}{M_2} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{I}{M_2} \right) \times 100 - \frac{\Delta I}{M_2} \times 100 \\ &= W - \Delta W \end{aligned}$$

ただし

$$\Delta W = \left[-\frac{1}{79.6} \left\{ m(2T_2 - T_1) + Q \right\} \right] \frac{100}{M_2} \quad (4)$$

となる。今のところ m, Q の値が求まっていないので計算のみで W_0 を求めることはできない。そこで第5図に示した実測結果から ΔW に関する実験式を導き誤差を求めてみよう。(4)式をかきかえると

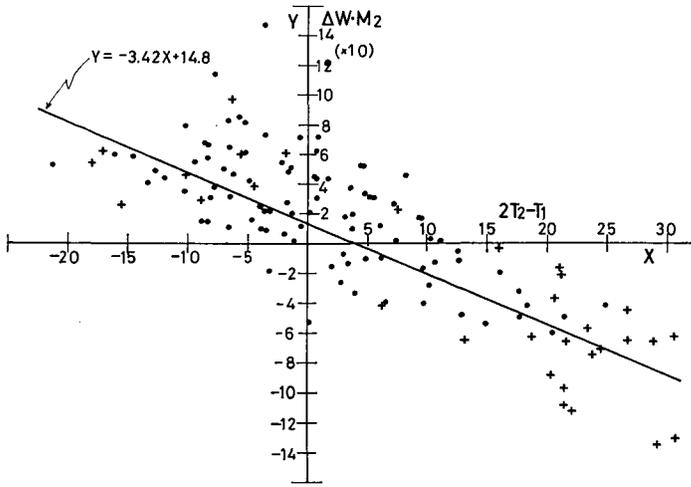
$$\Delta W M_2 = a(2T_2 - T_1) + b \quad (5)$$

ただし

$$a = \frac{100m}{79.6}, \quad b = \frac{100Q}{79.6}$$

となる。

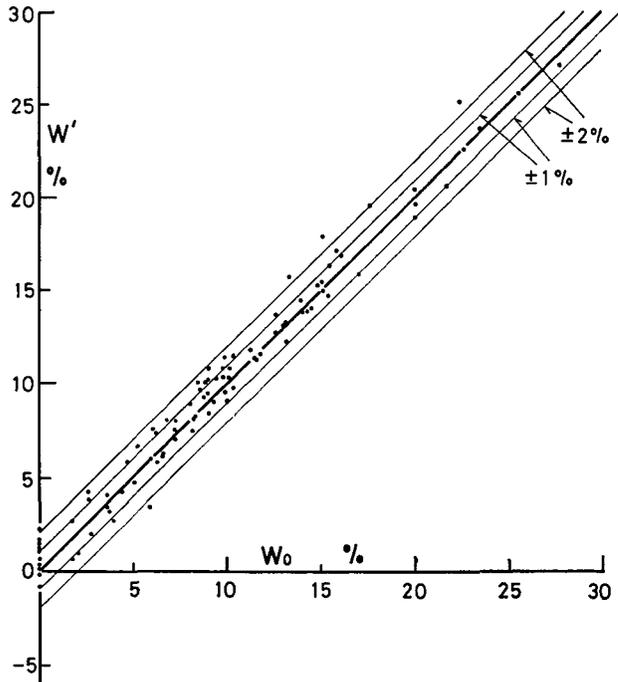
(5)式の係数 a, b が求まれば誤差 ΔW は計算される。そこで95個の実測値を用い、たて軸に $\Delta W M_2$, よこ軸に $2T_2 - T_1$ をとると第6図の黒丸印が得られた。 $\Delta W \cdot M_2$ と $2T_2 - T_1$ の



第6図 測定誤差と温度との関係

黒丸印は雪について、+印は0°Cの水について測定した値、
直線の式は0°Cの水から得たもの

間にはほぼ直線の関係がみられるので、その回帰直線から(5)式の係数 a, b が得られることになる。 a, b の値を求めるのに含水率既知の雪を作って検定するのは非常に手間がかかる。そこでしめった雪のかわりに0°Cの水だけを用いて測定してみた。0°Cの水だけを用いるので既知含水率 W_0 は100%であり、(2)式で計算された W から100を差引いた値が ΔW となる。湯に対して水が少ないときには W は100%以下 (ΔW はマイナス) となり、反対に水を多くすると W は100%以上となった。湯と水の量を変えて30回測定し、それらの値を第6図に+印でしめた。+印と黒丸印の分布の傾向はほぼ同じなので測定器の検定には0°Cの水を用いれば良いことがわかる。+印について直線の式を求めると



第7図 補正後の含水率

W' は第6図の直線式をもとにして補正
ほどこした含水率、 W_0 は既知含水率

$$\Delta WM_2 = -3.42(2T_2 - T_1) + 14.8$$

となった。

この式を用いて補正をほどこした含水率 W' は次のようになる。

$$W' = \left[M_2 - \left\{ \frac{1}{79.6} (T_1 - T_2) M_1 - T_2 M_2 \right\} \right] \frac{100}{M_2} - \left\{ -3.42(2T_2 - T_1) + 14.8 \right\} \frac{1}{M_2} \quad (6)$$

第7図に(6)式で求めた補正後の含水率 W' と既知含水率 W_0 の関係を示した。 W' についての回帰直線 $W' = A' + B' W_0$ を求めると

$$A' = 0.420 \pm 0.120, \quad B' = 0.994 \pm 0.011$$

となり、 W' の確率誤差 $r_{w'}$ は 0.660 となった。補正前の含水率の確率誤差 $r_w = 0.970$ に比べると精度が良くなったことがわかる。回帰直線は太い実線で描かれた $W' = W_0$ の線にほとんど重なる線である。測点は 45° の太い直線の近くに集まり、 $\pm 2\%$ 以上の誤差をもったものは補正前の 15 個から 4 個にへっている。電卓には(6)式のプログラムを記憶させておく。尚プログラムの検定として M_1, T_1, M_2, T_2 の値に 1, 2, 3, 4 の数値を入れると 107.8 を示す。

V. ま と め

熱量計法による操作が簡単な含水率計を試作した。この含水率計の特徴は

- 1) 本体は木と断熱材でできており自作が容易である。
- 2) 0°C の水を用いて検定をすれば補正計算をすることができる。
- 3) 温度計にはデジタル温度計を用いたので読取りが容易であり、感温部が含水率計に固定されていないので温度計の検定を随時行なうことができる。
- 4) 結合熱量計に比べて湯や雪の量が少なくても良い。標準としては湯の量 M_1 が 120~150 g, 雪の量 M_2 は 20~50 g 程度である。
- 5) 測定精度は $\pm 1\%$ 程度である。本装置の検定や操作の練習に 0°C の水を用いれば含水率は $100 \pm 1\%$ 程度の範囲で得られる。

終りに本報告を書くにあたりデータ処理に関して御指導をうけた藤岡敏夫教授に深謝致します。なおこの研究費用の一部は文部省雪崩特別事業費から支出された。

文 献

- 1) 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.
- 2) 対馬勝年 1971 体積差法による積雪含水量計の試作. 低温科学, 物理篇, **29**, 57-67.
- 3) 木村忠志 1977 積雪計測法の最近の発展. 雪氷, **39**(4), 179-182.

Summary

The author designed a new type of calorimeter capable of determining the free water content of wet snow. Figures 1 and 2 show its schema and photograph. Made of a thermal insulating material 2.5 cm thick, it consists of three portions A, B and C. Hot water and a sample of wet snow in a thin polyethylen tube H (60 cm long, 7.5 cm wide and 0.02 mm thick) are stored in A and B, respectively, while C is a movable parting strip made of thermal

insulating materials to separate the snow sample from the hot water.

Let us explain how to use this apparatus.

(1) Hot water (120~150 g, 40~50°C) is put into the one half of the tube and the mass of hot water M_1 in it is measured.

(2) The part of the tube containing the hot water is stored in A with a thermocouple inserted in it. A sample of wet snow (20~50 g) is put into the other half of the tube and stored in B, as shown in Fig. 3 a. The tube is covered with two thermal insulating pieces D and E and the temperature of hot water T_1 is read on the digital thermometer G while shaking the apparatus.

(3) The parting strip C is drawn ahead after reading T_1 (Fig. 3 b). The snow sample and hot water are mixed with each other in the tube, resulting in a rapid drop in temperature of the hot water. The temperature T_2 of the mixture is read while shaking the apparatus.

(4) The tube containing the mixture is weighed and the mass M_2 of wet snow determined. The free water content W of the sample can be calculated by equation (2).

In a cold room 95 artificially prepared samples of wet snow each having the known value of free water content W_0 are examined by this apparatus. Relations between W and W_0 are shown in Fig. 5, standard deviation of error $\Delta W (=W-W_0)$ being found to be 1.51%. Considering the water equivalent m of the tube and the heat loss Q through the thermal insulator, equation (3), (4) and (5) are obtained. The free water content calculated by equation (2) can be corrected by equation (5). Instead of the wet snow having a known value of water content, water of 0°C ($W_0=100\%$) is examined so that the coefficients a and b in equation (5) can be obtained. Relations between $\Delta W M_2$ and $2T_2-T_1$ using water at 0°C are shown by the marks + on Fig. 6 and the two coefficients a and b of the regression line were obtained. The same relations are shown for the 95 samples of wet snow by dotted marks on the figure. The corrected free water content W' using equation (6) are shown in Fig. 7, the standard deviation of error $\Delta W' (=W'-W_0)$ being found to be 1.03%.
