



Title	熱量計による積雪の含水率測定
Author(s)	吉田, 順五
Citation	低温科学, 1, 11-18
Issue Date	1944-12-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17379
Type	departmental bulletin paper
File Information	1_p11-18.pdf



熱量計による積雪の含水率測定

吉 田 順 五

§ 1. 緒 言

積雪の性質は非常に變化に富んでゐる。降り積つた雪の種類、積つてから経過した時間、その間の天候等によつて文字通り千變萬化の状態にある。この複雑な性質を規定しようとする目的の爲、從來比重を初めとして、剛性率、抗張力等機械的性質の測定がなされてきたが、尙積雪の含水率なるものが重要な因子をなすに違ひないこともよく知られてゐた。含水率とは、積雪 M gr の中に m gr の水が含まれてゐた場合、 $\frac{m}{M}$ を指すのであつて、一口に云へば積雪の濕りの度合を示すものである。濕つた雪と乾いた雪とで如何に力學的性質を異にするかは誰でも知つてゐることである。それにも拘らず、この含水率を測定しようとした試みを未だ聞かない。⁽¹⁾ 以下に記すのは、中谷教授の御示唆、御指導の下に、今冬、(昭和 14 年~15 年)札幌に於て行つた雪の含水率の測定報告である。

§ 2. 測定の原理

積雪の中から水だけを分離して取り出すことが出来れば、含水率を決定出来ることは説明する迄もない。併し、積雪は細い氷粒の集合であつて、その中に含まれてゐる水は氷粒と氷粒との間の狭い間隙に入り込んでゐたり、又は氷粒の表面に薄い膜となつて存在し、これを分離することは、甚だ困難である。或は遠心分離器を使へば出来るかも知れないが、氷の融けるのを防がなければならぬと云ふ點で、これも實行不可能と思はれる。

それで水を分離することを斷念して他に方法を求めるとすると、先づ考へられるのは氷の融解の際に生ずる體積の變化を利用することと、も一つはその際に生ずる融解熱を利用することである。

先づ體積の變化を利用する方法を考へて見る。1 gr の氷が融けて、 0°C の水になると、0.0905 c.c. だけ體積が減る。それ故 M gr の積雪を採つたときその中の m gr が水であつたとすれば、これを融かして全體を 0°C の水にしたときの體積の減少は、

$$\Delta v = 0.0905 \times (M - m) \text{ c.c.} \quad (1)$$

となる。よつて Δv を測定すれば m を求めることが出来るわけである。 Δv を測定するには次のやうにすればよい。内容積の變化を示す装置を備へた容器の中に M gr の積雪を採つて入れ、

北海道帝國大學低溫科學研究所報告第 2 號。氣象集誌、第 2 輯、第 18 卷、321 頁

(1) 積雪の含水率を熱量計を用ひて測定すると云ふ考へ、即ち本論文と同じ主旨の考へを持つてゐた人及び少し手をつけた人はあらうが實際に測定したものはない。

全體を 0°C にする。この時の容器内容積を v_1 とする。次いで容器を暖めて氷を融かし、再び容器全體を 0°C にし、その時の内容積が v_2 になつたとする。 $v_1 - v_2$ が (1) 式の Δv であつて、これは容器に備へつけられた装置で知ることが出来るわけである。云ふまでもなく、 v_1, v_2 は氷と水だけの體積ではなく、容器の中に閉ぢこめられた空氣の體積も含んでゐる。そして $v_1 - v_2$ が (1) 式の Δv に等しい爲には、この空氣の體積が v_1 と v_2 とを決める時に同一であることを必要とする。 v_1, v_2 の決定の際、溫度を共に 0°C にしたのはこの爲である。又、容器の内容積を示す装置は、容器内の空氣の壓力を變化せしめないやうな類のものであるとする。併し空氣の體積は溫度、壓力の變化に伴つて非常に變り易いから、實際の場合として、溫度壓力の同一性が完全には滿されないことを考へて、それによる誤差の程度を推定しておく必要がある。次に一つの實例について、壓力は一定に保たれたと假定し、溫度だけの影響を考察して見る。

密度 0.3 含水率 10% の積雪を 50 gr 採つたとする。積雪の體積は $50 \div 0.3 = 170 \text{ c.c.}$ となり、この中氷と水の占める體積は略 50 c.c. であるから、空氣の體積として、120 c.c. を得る。容器に死容積のあるのは免れ得ないから、容器内に閉ぢ込められた空氣の體積は少くとも 150 c.c. と見なければならぬ。 0°C と云ふ溫度は作り易い溫度であるから、 v_1 と v_2 とを決定する時に起り得べき溫度の差としては 0.1°C をとれば充分であらう。この溫度差の爲に生ずる Δv の誤差は空氣の體積が 150 c.c. であるから

$$150 \times \frac{1}{273} \times 0.1 = 0.055 \text{ c.c.}$$

である。これに對して Δv は

$$\Delta v = 0.0905 \times (50 - 5) = 4.1 \text{ c.c.}$$

となるから、 Δv の蒙る誤差は 1% の程度である。 m に於ける關係誤差はこれよりも大きくなるけれども、この方法の用ひ得ることはうなづかれる所である。併し尙懸念すべきことは、氷と氷が空氣を吸収する度合を異にすることであつて、氷の方が吸収率が小さい。それ故積雪を融かした時に、容器内の空氣が氷に吸収されて、 v_2 が正しい値より小さくなることが考へられる。その程度は實際に測定を行つて見ないと判らないが、それは來るべき冬に期することとし、本報告の實驗で實際に行つたのは、氷の融解熱を利用する次の測定法である。そしてこの後の方法の方が以下に説明するやうに、現在の目的には適當してゐるのである。

積雪に氷が含まれてゐるとすればその溫度は丁度 0°C である。⁽¹⁾ $M \text{ gr}$ の積雪が $m \text{ gr}$ の水を含む場合、これを融かして全部を 0°C の水にする爲に要する熱量は

$$Q = 79.60(M - m) \text{ cal} \quad (2)$$

である。ここに 79.60 は氷の融解熱である。よつてこの Q を測定すれば m を求めることが出

(1) 積雪中の水が空氣中から鹽分を吸収して、積雪の融解點が 0°C より低くなる例が報告されてゐる。併し後に述べるやうに、筆者が調べた所では、氷を含んだ積雪の溫度は常に $0.00^{\circ}\text{C} \pm 0.01^{\circ}\text{C}$ であつた。

来る。實際に Q を見出す方法としては、普通の水熱量計による混合法を用ひればよい。熱量計に $t_i^\circ\text{C}$ の水を $\mu\text{ gr}$ 入れておき、これに積雪を入れて混合した後、温度が $t_f^\circ\text{C}$ の水になつたとする。然るときは

$$Q + M \int_0^{t_f} C_w dt = \mu \int_{t_i}^{t_f} c_w dt + W(t_i - t_f) \quad (3)$$

なる關係が成り立ち、これより Q が決定される。 W は熱量計及びその附屬の品の水當量である。 c_w は水の比熱であつて、略 1 であるが 0°C に於ては 1.007 と云ふ可成り大きい偏差を持つてゐる。それ故 $\int_{t_i}^{t_f} c_w dt$ を單に $t_i - t_f$ とすると、この測定に於て現れるやうな t_i, t_f の値に對しては、百分の幾カロリーの誤差を生ずることになる。この差を無視することは温度を $\frac{1}{100}^\circ\text{C}$ 迄測定することを無意味にするわけである。

所でここに問題になるのは熱量の測定に伴ひ易い大きな誤差である。一般にその誤差は、溫度測定上の誤差とか質量測定上の誤差などから豫想されるもの比べて遙かに大きい。

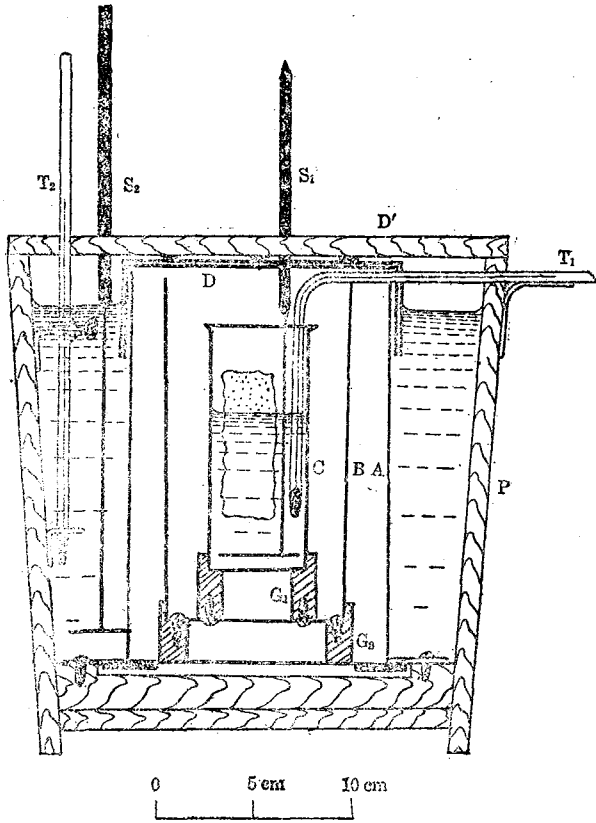
それ故、この誤差に就いては理論的な考察を進めず、實驗的にそれを推定する方法をとつた。積雪でなく $M\text{ gr}$ の氷塊を採れば、これは含水率 0 であるから、 $Q = 79.60 M\text{ cal}$ となるべきである。一方に於て測定によつて Q を求めこれを上の $79.60 M\text{ cal}$ と比較すれば測定上の誤差を知ることが出来るわけである。この誤差に就いては次節で詳しく述べる。

§ 3. 測定法

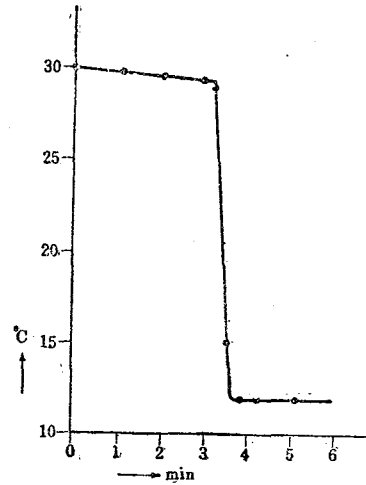
熱量計としては普通の學生實驗用のものに多少の改良を加へた程度のもを用ひた。野外に於ける測定に便利であつて、且出来るだけ正確な結果を齎らすやうに設計する必要があるからである。

第 1 圖が熱量計の略圖である。C は熱量計で、直徑 5 cm、高さ 12 cm の銅製の圓筒に蝶番によつて蓋を付けてある。眞鍮製の圓筒 B には、絶縁用のゴムの臺 G_1, G_2 が木捻子で取り付けられてゐる。A もその外を圍む眞鍮製の圓筒で、これら全體は木の桶 P の中に收められる。A と P との間には水を入れて水ウオータージャケット套とする。A には蓋 D が被さるやうになつてゐるが、この蓋は 1 mm 位の厚さの眞鍮を二枚、略 1 mm 位の隙間をおいて貼り合せたもので作られ、A に被せた時その縁が水套内の中に少し浸るやうにしてある。このやうにすると、D の内側の板の温度は殆ど水套の温度と等しくなり、熱量計 C はその八方を同一温度の壁で圍まれたことになるため、熱量計の自然冷却が非常に規則的になる。D は桶の蓋に木捻子で取り付けであり、桶の蓋をした時 D も丁度 A に被さるやうにして置く。 T_1 は $\frac{1}{10}^\circ\text{C}$ 目盛の曲管寒暖計で熱量計の温度を測定する爲のものであり、 T_2 は 1°C 目盛の寒暖計で水套の温度を示す。 S_1 は熱量計の攪拌器、 S_2 は水套の攪拌器である。尙 A と B、B と C との間空隙は 2 cm 程にとり、それ等の表面は磨いてよく光らしてある。又 A は圖に示すやうに、その底の縁に突起をつけて桶の底に引かけるやうにしておけば、浮力の爲に殆どグラつくことはない。

第 1 圖



第 2 圖



水套の温度は 10°C 前後にとる。気温 2°C の時、初め 13°C であつたものが 2 時間後に 8°C となつた。即ち 2 時間に 5°C の温度降下があつたわけであるが、一つの測定に要する時間は 10 分位で、その中カロリーメーターの温度變化を觀測する時間は 5 分位にすぎ

ないから、その間に水套の温度は、 0.2°C 位しか變化しない。随つて、温度は一定であると見ることが出来る。熱量計に $25^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 位の水を 150 gr 程入れる。その量は上皿天秤で秤つて 0.1 gr の程度迄測定する。3,4 分間自然冷却を觀測した後、積雪を 20 gr \sim 30 gr 採つて熱量計に投入しその温度變化を記録する。第 2 圖はこの間の温度變化の有様を示すものであつて、雪の投入による温度の變化は、15 \sim 20 sec 位で完了する。この際混合後の温度が 10°C 附近になるやうに、初めに採る水の温度及び量、又投入する積雪の量を加減する必要がある。若し混合後の最後の温度が $4^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ と云ふやうな低い温度になるやうにすると、雪の融けるのに時間を要し誤差を大きくする原因となる。水套の温度を 10°C 附近に選んでおいたのは、混合後の温度をそれに近からしめる爲である。投入した積雪の質量は、最後に再び熱量計全體を秤つて求めれば良いので、正確に知ることが出来る。又この方法の良い點は、採つた雪をその儘すぐ熱量計に投入すればよいので、操作中に含水率が大きくなるやうな心配は無い。

積雪を採取するには 100 c.c. のメスシリンダーを用ひると便利である。豫め積雪によつてよく冷しておき、底の廣縁の所を手袋をはめた手で持つて取り扱ふ。熱量計の蓋の裏には水滴が澤山ついてゐるのを認める。 $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ の水を用ひるので蒸發が盛んであるから、この蓋は是非共必要

である。實はこの蒸發を慮つて、熱量計を先に記したやうに、大分細長い形に設計したのであるが、もう少し太くした方が種々な點で利益があらうと思ふ。

計算をするに當つて、自然冷却の影響を考慮するのは當然であるが、先にも記した通り溫度變化は 15~20 sec 位で完了するからその補正は 1/100°C 程度のものである。この補正がこのやうに小さいことがこの測定に於て誤差を小さい値に止める上のもつとも重要な點である。 $\int_{t_1}^{t_2} c_w dt$ は $\int_0^t c_w dt - t = \Delta(t)$ を表又グラフにして表はしておき、

$$\int_{t_1}^{t_2} c_w dt = \{t_2 + \Delta(t_2)\} - \{t_1 + \Delta(t_1)\}$$

として求めるのが便利である。第 1 表は W. A. Roth⁽¹⁾ によつて最近提出された表から抜取つて示した $\Delta(t)$ の表である。使用する寒暖計は當然標準寒暖計と比較して補正 $\delta(t)$ を施さなけ

第 1 表

t(°C)	0	5	10	15	20	25	30	35
Δt(°C)	0.000	0.025	0.040	0.050	0.048	0.040	0.025	0.005

ればならないのであるから、 $\Delta(t) + \delta(t)$ を一つの補正と見做し、これを施したものを假に有效溫度と呼び t_{eff} で表はすことにすると便利である。 $\int_{t_1}^{t_2} c_w dt = t_{eff,2} - t_{eff,1}$ となり、(3) 式は

$$Q = \mu(t_{eff,2} - t_{eff,1}) + W(t_i - t_f) - M \cdot t_{eff,1} \quad (4)$$

と書かれ取扱い上簡便となる。

次に誤差に就いて考察する。前節の終りに於て述べた趣旨に従つて、含水率 0 なる氷塊を用ひてその大きさを推定して見た。氷塊は長時間水に浮べておいて、氷全體の溫度が 0°C になるのを待ち、熱量計に入れる前にハンカチでよく拭つて表面の水を取去つた。氷塊の質量を M とし、測定から求められた Q の値 Q_{ob} と、計算による Q の値 $Q_{cal} = 79.60 \times M$ との差を四回の測定の結果について表はすと、第 2 表のやうになる。

第 2 表

これで見ると Q_{cal} は常に Q_{ob} より大きく、 $Q_{cal} - Q_{ob}$ は M の相當に大きな變化があるにも拘はらず、略一定の値を示してゐる。それ故 $Q_{cal} - Q_{ob}$ の平均値 30 cal を系統的誤差と考へ、30 cal からの偏差約 ±5 cal を偶然的誤差と見做してよいであらう。30 cal の系統的誤差の原因は不明であるが、測定中これだけの熱量が餘分に熱量計に入つたことを示すもので、さういふ機會はあるものと考へられる。實際に計算する時には、前節の (4) 式の右邊にこの値 30 cal を附加すればよい。

測定番號	M (gr)	$Q_{cal} - Q_{ob}$ (cal)	$\frac{Q_{cal} - Q_{ob}}{M}$
1	6.8	25	3.7
2	11.9	30	2.5
3	14.1	37	1.6
4	19.1	37	1.9
		平均 30	

偶然的誤差は 5 cal 位であるのに對して、 Q の値は 1500 cal 程度である。よつて Q は 0.3%

(1) W. A. Roth: ZS. f. phys. chem. A. 183. 38 (1938).

の関係誤差で決められる。

$$Q = 79.60(M - m)$$

であるから、含水率 $x = \frac{m}{M}$ は

$$x = \frac{m}{M} = 1 - \frac{Q}{M \times 79.60}$$

で與へられる。随つて x の関係誤差は Q の関係誤差 0.3% よりはずつと大きくなる。例へば $x = 5\%$ の場合は誤差 6%, $x = 1\%$ のときは誤差 30% といふやうに、 x が小さい程大きい関係誤差を持つが、 x を % で表した場合小數點以下一位の數値迄は信用出来ると思ふ。實際、同一の積雪に就いて行つた二回の測定の結果は含水率が 6.7%, 6.8% と云ふやうに非常に一致した結果を與へた。

この測定を行ふには雪を採取するのに一人、熱量計に二人、都合三人の人が少くとも必要である。慣れてくると一つの測定を 10 分以内で行ふことが出来る。

野外で測定するとすれば、湯を沸したり、又同時に積雪の密度も測定したりする爲に、少くとも四人の人が必要である。

實際の野外觀測をする場合、第 1 圖に示した熱量計に直接附屬した品の他に、携帯すべきものは、次のやうな品々である。(1) 1.5 尺×2 尺位の臺。これは熱量計やその他の品を入れて持ち運ぶ箱を利用するのが最も便宜であらう。(2) 石油ストーブと藥罐。石油ストーブがなければ焚火でも間に合ふ。(3) 上皿天秤。(4) ストップウォッチ。(5) 100 c.c. のメスシリンダーとビーカー。

以上の他同時に積雪の比重を測定することが望ましいから、その爲の器具を一式要する。

§ 4. 測定結果

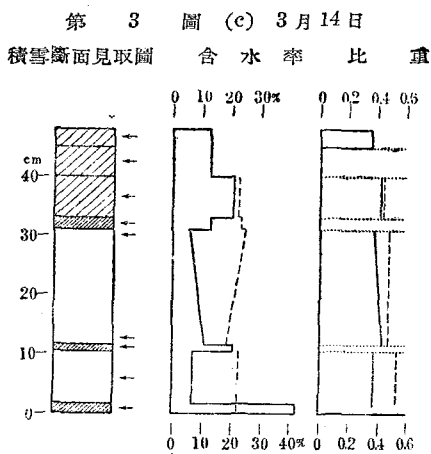
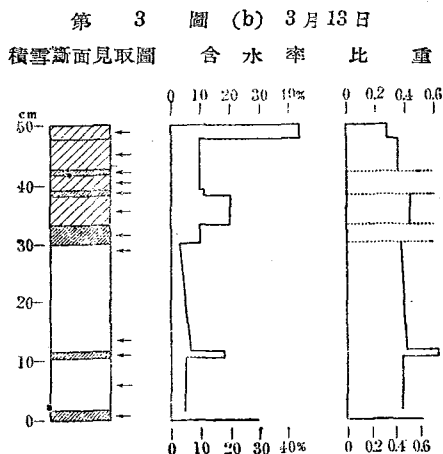
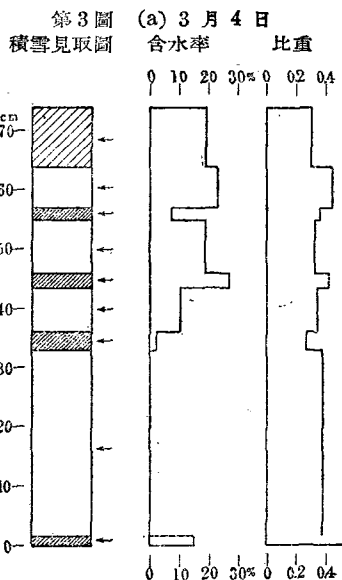
北大構内の芝地、午前 10 時頃から午後 3 時半頃まで、日射を受ける場所の積雪に就いて、その断面の各層の含水率を測定した。時期は已に 3 月に入り、融雪がはつきり認められ始めた頃からである。秋田縣の角館に於て觀測された平田博士の報告⁽¹⁾によると、冬のさなか、未だ氣温が零下數度の頃は積雪は下層から少しづつ融けてゐるが、春が近くなつて氣温が零度近邊になると上層が融けるやうになる。第 3 圖に示した測定結果は丁度上層部が融け始めた頃からのものと考へる。第 2 節の欄外で注意したやうに、融けかけてゐる積雪の溫度が 0°C でないかも知れないと云ふ疑ひがあるので、 $\frac{1}{10}^{\circ}$ C 目盛の棒状寒暖計を 0°C を充分に検査した上、積雪断面の各層に差込み調べて見たが、いつでも 0°C からの差は 0.01°C 以内であつた。もつとも他の場所の雪ではこれ程嚴密に 0°C ではないかも知れない。併し 0.0°C とは見てよいであらう。それ故含水率の計算は熱量計に投入される積雪の溫度を常に 0.00°C として行つた。

(1) 融雪に関する研究：積雪地方農村經濟調査所報告 第 10 號 (昭和 10 年 11 月)。

應用物理 7 卷, 309 頁 (昭和 13)。雪調科學報告。第 1 輯 第 3 號 (昭和 13 年 3 月)。

第3圖 (a), (b), (c) は各測定日について、三つの圖を含んでゐるが、その各々について左端は積雪断面の見取圖、中央は含水率の分布、右端は比重の分布を示すものである。何れの日も同じ場所の積雪に就いて測定した。又矢印は雪を採取した場所を示してゐる。

3月4日 [(a) 圖] は快晴で屋根の雪解け水が盛に落ちてゐた。この2日程前から融雪が目立つてゐた。3月13日 [(b) 圖]) は曇りであつたが、3月4日以来ずつと比較的暖かい日が続き積雪量はこの間に29cmも減つてゐた。3月14日 [(c) 圖] も同様曇つてゐたが、前夜降雨があつた。前日に比べて積雪面全體に亘つて含水率が、増加してゐるのが認められる。(c) 圖の含水率の圖に示した破線は含水



率の飽和値(含水飽和値)を表はすもので、これは次のやうにして求めた。例へば表面から20cm下の雪層の含水率飽和値を測るには、表面下20cm迄の雪を取り除き、その跡に0°Cの水を充分に撒布する。然る後その場所から雪を採取して含水率を測定したわけである。密度の圖に示した破線はこのやうにして水で飽和した雪の密度を示すものである。圖によつてよく表はされてゐる通り、上層部では殆ど飽和點に達してゐるが、下層部ではそれから可成り離れてゐる。

積雪断面の見取圖に表はされてゐる通り、積雪内部には半透明で目には黒ずんで見える層、即ちクラストがいくつかある。この部分はいかにも濡り氣が多く含水率が高さうに考へられるが、第3圖で見る通り必ずしもさうではない。逆に、不透明な白い雪は含水率が小さいやうに一考へられるが、3月4日の地上60cm附近の眞白な層は非常に高い含水率を示してゐる。3月14日の含水率の飽和値からも判る通り、含水飽和値と云ふものは20%前後のものとしてよいので

あるが、3月14日の最上層は40%と云ふ大きな含水率を示してゐる。これは恐らく、この層の下にある薄い半透明層が一つの氷板をなしてゐて、水の流れ下るのを妨げてゐる爲であらう。實際、半透明層の氷粒は互に結合してゐて、殆ど氷板に近くなつてゐるのが屢々認められる。そのため密度測定用の採雪器で一定容器の雪を採らうとしても成功しない場合が多い。密度分布を示す圖に於て、缺けた所のあるのは、この爲に測定が不能であつたからである。

以上の測定結果から、積雪の融け方についてある程度の推論を行ふことも出来ようが、それよりも此の方法によつて從來全く測定されてゐなかつた積雪の一性質、即ち含水率が測定可能となつたと云ふ點が本論文の要旨である。從來一見非常に誤差が大きいものと考へられてゐた熱量の測定を用ひたにも拘らず、簡単な改良によつて相當な程度に所期の目的を達し、且つ實用にも供し得る装置を作り得たことを報告する。

この測定方法は 中谷教授の御示唆によつて始め、始終懇切なる御指導の下に行はれたのである。ここに記して厚く感謝の意を表はす。又實際の測定は學生の渡邊博信、中山久子兩氏に行つて貰つた。深く謝意を表する次第である。本研究は文部省科學研究費によつて爲されたものである。