



|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | 融雪熱量計   |
| Author(s)        | 油川, 英明; ABURAKAWA, Hideaki  |
| Citation         | 低温科学. 物理篇, 35, 157-166  |
| Issue Date       | 1978-03-25  |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/18334">https://hdl.handle.net/2115/18334</a> |
| Type             | departmental bulletin paper   |
| File Information | 35_p157-166.pdf   |



## 融雪熱量計\*

油川英明

(低温科学研究所)

(昭和52年10月受理)

### I. ま え が き

融雪期における積雪面での融雪量を測定する場合、最も直接的な方法としては雪尺による雪面低下量の観測や、融雪滲透水を積雪下部で観測することにより求める方法があるが、これらは積雪の密度や含水率、組織など積雪自体の変化に大きな影響をうけるので正確に融雪量を測定することは困難である。他方、積雪表面における熱収支の観測から間接的に融雪量を求める方法がある。これは雪面における放射収支熱量、顕熱伝達量及び潜熱伝達量を測定してそれらの結果から融雪熱量を求めるわけであるが、各熱量を個別に測定するために観測要素が多くなり比較的複雑な観測が要求される。さらに、顕熱伝達量に関しては熱量の直接測定が困難なので、接地気層の状態を仮定した理論式や、気温と風速の観測から経験式により間接的に求められている。経験式については観測する地域や季節などにより違いがみられ<sup>1)</sup>、また相関法による顕熱伝達量の測定では、地表面における熱収支の観測と必ずしも良い一致を示していない<sup>2)</sup>。これらのことから、融雪量をより確実に測定するためには積雪表面における融雪熱量を直接測定する方法が必要となる。また、この方法が可能であるならば、雪面における顕熱伝達量が直接測定できることにもなるので、接地気層からの熱伝達の機構を実験的に解明する上でも有益な手段になるものと考えられる。以上のことから著者は半導体熱電素子を感部に利用した熱量計を試作したので、その原理及び融雪観測の結果について報告する。

### II. 測定 の 原理

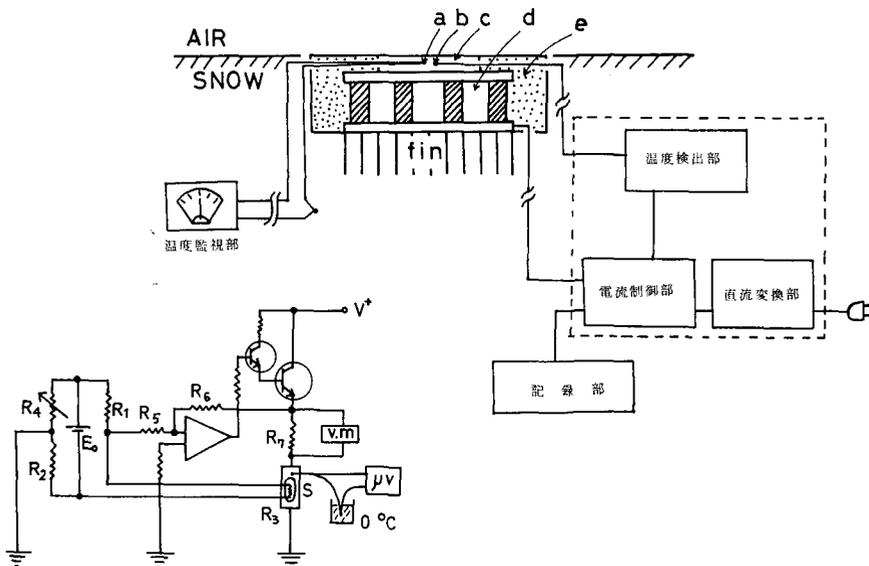
雪面における熱収支は

$$Q_R + Q_A = Q_M + Q_E + Q_C$$

で表わされる。ここで  $Q_M$ ；融雪熱量、 $Q_R$ ；放射収支熱量、 $Q_A$ ；顕熱伝達量、 $Q_E$ ；蒸発（凝結）熱量、 $Q_C$ ；積雪内への伝達熱量である。融雪が盛んにおこっているときは  $Q_C = 0$  となり、結局  $Q_M = Q_R + Q_A - Q_E$  となる。試作した熱量計は  $Q_M$  を求めるために  $Q_R + Q_A - Q_E$  を直接測定することを目的とした装置であるが、 $Q_E$  が蒸発熱の場合には  $Q_R + Q_A$  を、すなわち  $Q_M + Q_E$  を測定することになり、 $Q_E$  が凝結熱の場合には熱量計は  $Q_R + Q_A - Q_E$  を、すなわち  $Q_M$  を測定することができる。結局この熱量計は積雪表面が得る全体の熱量を測定する装置である。そして、この熱量を測定するための感部に半導体熱電素子を利用したわけである。

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 1868 号

熱電素子に電流を流すとペルチエ効果により熱の吸収、発生が生じ、電流  $I$  によるペルチエ吸熱または発熱を  $Q$  とすれば、 $Q = \alpha I$  となる。 $\alpha$  はペルチエ係数でこの値が大きい素子ほど性能がよいわけである。この素子に半導体を利用することにより、 $\alpha$  の大きな熱電素子が得られる。一般にこの素子に電流を流し吸熱を行なわせた場合、素子内部におけるトムソン効果、ジュール熱の発生、及び伝導による熱の流れがあり、これらの効果によって吸熱量が減少する。このことから、最も効率の良い使用条件は素子内部に温度勾配が生じないようにすることである。この点は熱電素子を融雪熱量計の感部に使用する上で最も都合の良い条件である。すなわち、素子の発熱側は湿雪内に置かれて  $0^{\circ}\text{C}$  に保たれ、吸熱側は大気中に露出された状態で常に同じ  $0^{\circ}\text{C}$  に保たれるように素子へ流す電流を制御するのが試作した装置の基本原理だからである。第1図に装置全体の原理図及び基本回路図<sup>3)</sup>を示す。この装置は大まかに4つの部分から構成されている。すなわち熱吸収感部、電流制御部、記録部及び感部温度の監視部である。感部は熱電素子の吸熱側に直径 27 mm、厚さ 5 mm で、白色塗装されたアルミニウムの円板を密着させ、その円板の中心部にサーミスタ素子と熱電対の一端を封入してある。サーミスタは電流制御部へ、熱電対は温度監視部へ連絡されている。素子の発熱部は放熱フィンが取り付けられ湿雪の中に埋め込まれる。もし放熱側の状態が変化すればその影響は吸熱量の変化として現われるのでこれは測定の誤差となる。このことから、温度が一定である湿雪は熱電素子の発熱部にとっては非常に都合の良い物体である。熱電対の他端は同じ湿雪中にさし込まれ、基準温度点 ( $0^{\circ}\text{C}$ ) とした。この熱電対に起電力が生じないよう監視部のマイクロボルトメータを見ながら、電流制御部の調整を行なう。この調整後は、円板への流入熱量に応じた電



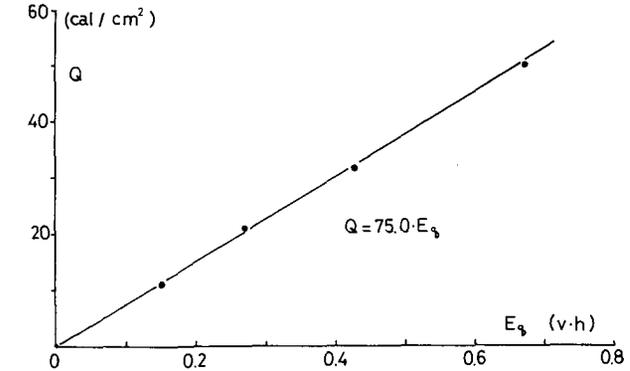
第1図 融雪熱量計の原理図

図の a は熱電対、b はサーミスタ素子、c はアルミニウムの円板、d は熱電素子本体、e は絶縁体である。

また回路図の S は熱電素子、V・m は電圧記録計、 $\mu\text{V}$  はマイクロボルトメータである。

流が自動制御されるので、この電流の値を記録することによりこの円板表面へ供給される熱量が測定できることになる。

電流の制御はフィードバックの方式により行なっている。第1図の基本回路図において先ず、S(感部)にさし込まれた熱電対の $\mu\text{V}$ メーターが零になるまでブリッジ回路の $R_4$ を調節する。この場合外部からSへの流入熱量に応じた電流 $I$ が $R_7$ を流れて流れている。逆に $R_7$ の電圧を測れば $I$ を求めることができるので、この電圧( $I \cdot R_7$ )を電圧記録計 $V_m$ により記録すれば外部からSへの流入熱量がわかることになる。 $h \cdot IR_7 (=v)$ とSの吸収熱量( $Q$ )との関係を第2図に示す。 $Q$ と $v$ は



第2図 感部の吸収熱量と出力電圧との関係

$$Q = 75.0v \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

の直線関係で表わされる。この $Q$ と $v$ との関係は市販の熱流板を用いて求められたものである。使用した熱流板はEKO-WS-22HTであり、それ故精度もこの熱流板に依存している。

第1図の回路図においてSへの流入熱量に変化がなければ、 $v$ の記録は時間的に一定であるが、このSへの流入熱量が変化した場合(実際には気温、風速、日射などの変化)それに伴って感部の温度が変化し( $\Delta T$ )サーミスタ素子の抵抗( $R_3$ )が変る。それによりブリッジ回路における出力電圧が変化する( $\Delta E$ )。サーミスタを一端としたブリッジ回路において、温度と変化に対する出力電圧の変化(感度)は

$$\frac{dE}{dT} = \frac{B \cdot n \cdot E_0}{T^2(1+n^2)}$$

により表わされる。ここで $B$ はサーミスタ定数、 $n=R_2/R_4$ 、 $T$ は今の場合273.15 K、 $E_0$ はブリッジの電源電圧である。

よって $\Delta E$ と $\Delta T$ とは

$$\Delta E = \frac{B \cdot n \cdot E_0}{T^2(1+n^2)} \Delta T$$

で表わされる。

一方 $\Delta E$ はオペアンプにより $\{R_6/(R_5+R_m)\} \Delta E$ に増幅される。 $R_m$ はオペアンプ側からみたブリッジの抵抗である。この変動電圧が $R_7$ とSとにかかり、これによる電流の変化( $\Delta I$ )は

$$\Delta I = \frac{R_6/(R_5+R_m)}{R_7+R_s} \Delta E$$

となる。ここで $R_s$ は感部Sの抵抗値である。これから熱電素子の吸収熱量の変化( $\Delta Q$ )は

$$\Delta Q = \alpha \Delta I = \alpha \frac{R_6 / (R_5 + R_m)}{R_7 + R_s} \Delta E$$

となり、また  $V_m$  に記録される電圧の変化  $\Delta V$  の値は

$$\begin{aligned} \Delta V = \Delta I R_7 &= \frac{\{R_6 / (R_5 + R_m)\} \Delta E R_7}{R_7 + R_s} \\ &= \frac{\{R_6 / (R_5 + R_m)\} \frac{B \cdot n \cdot E_0}{T^2 (1 + n^2)} R_7}{R_7 + R_s} \Delta T \end{aligned}$$

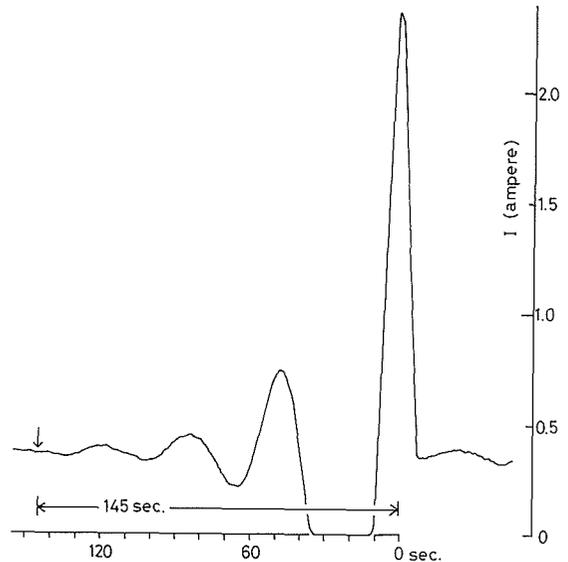
となる。この式に  $\frac{R_6}{R_5 + R_m} = 10^3$ ,  $\frac{B \cdot n \cdot E_0}{T^2 (1 + n^2)} = 0.057$ ,  $R_7 = 0.7$ ,  $R_s = 0.21$  を代入すれば

$$\Delta V = 41.31 \Delta T$$

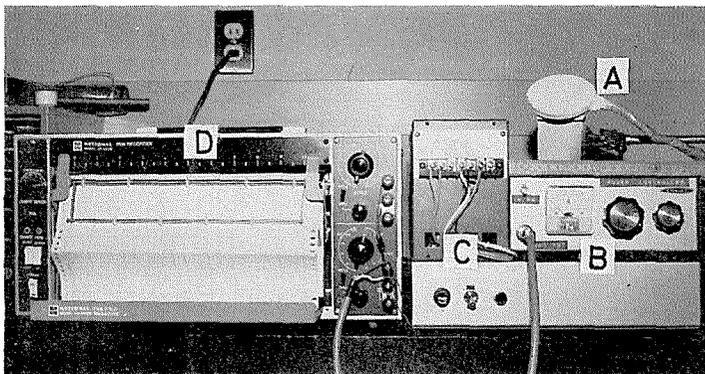
となる。

電流が2アンペア変化したものとすれば(この装置の最大許容電流)  $\Delta V = 1.4$  ボルトとなり、この時  $\Delta T = 0.034^\circ\text{C}$  となる。すなわち、感部の温度が突然  $0.034^\circ\text{C}$  上昇した場合2アンペアの電流が感部の熱電素子に流れることになる。この状態が1分間続いた場合、感部の吸収熱量は  $1.75 \text{ cal/cm}^2$  となる。

一方、感部がアルミニウムの円板であるため熱容量をもち、この大きさとオペアンプの利得との関係から、実際のSへの熱流量の変化に対する感部の追従が問題となる。第3図はこれを実験的に示したもので、オペアンプの利得が60 db



第3図 感部への流入熱量の変化に対する電流のフィードバック制御



第4図 融雪熱量計の概観

Aは感部、Bは電流制御部、Cは直流変換部、Dは記録部である

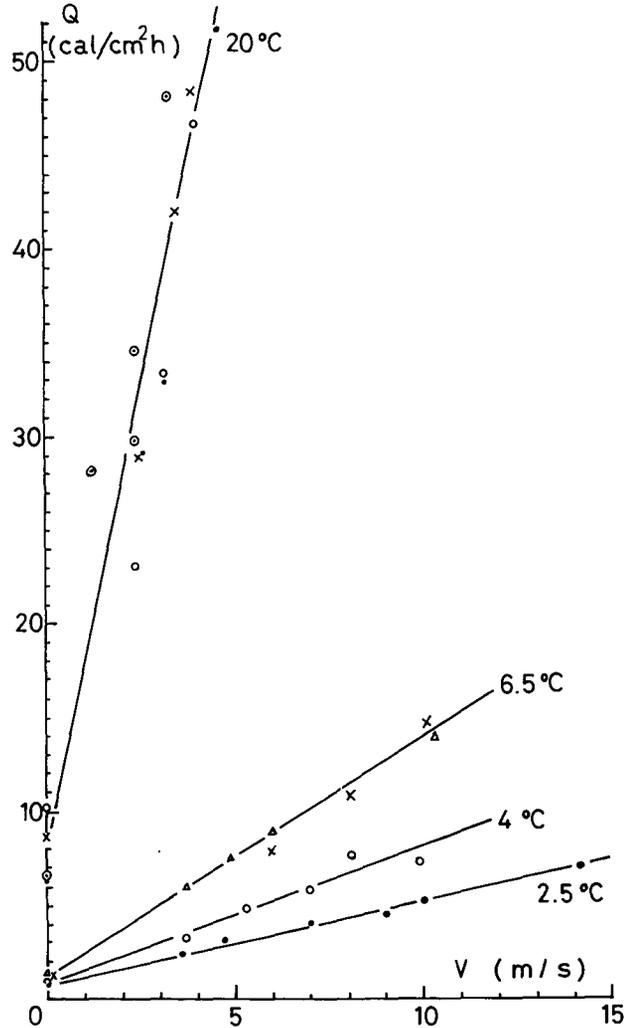
の場合、感部の表面を瞬間的に加熱した時  $S$  へ流れる電流 ( $I$ ) の時間変化を示している。この加熱の度合いはこの装置の熱量吸収の最大能力まで行ない、その後加熱を突然中止したものである。 $I$  はフィードバック制御にみられる典型的な減衰振動の形を示し、2.4 分後には加熱前の状態に復帰している。すなわちこの場合現象への感部の過従は最大 2.4 分間の時間を必要とすることになる。

第4図に装置全体の写真を示す。写真の A は感部、B は電流制御部、C は直流変換部である。D は 2 ペンの記録計であるので、吸収熱量の記録と感部の温度の監視とを合わせて行なうことができる。また感部は装置本体から約 4 メートルのコードで接続されているが、感部に関する吸収熱量の校正を行なえば、コードの長さは自由に変えることができる。

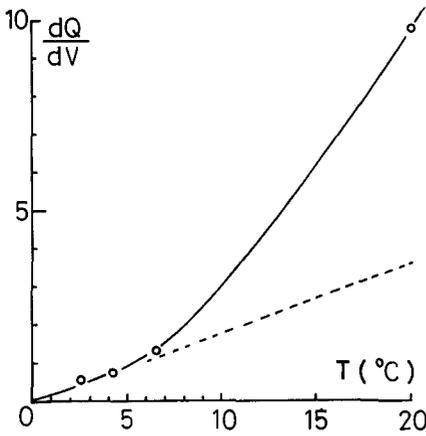
### III. 風洞実験の結果

風洞実験室において、試作した熱量計により積雪面における顕熱伝達量の測定を行なった。風洞内に長さ 60 cm、幅 50 cm、厚さ 30 cm の湿雪を設置し、その風下端に熱量計の感部をとりつけた。これらの表面は風洞の床の高さに一致させてあるので湿雪面における風速境界層の変化はないものと考えられる。一方温度境界層は雪面上で発達するが、この風下端ではほぼ発達し切ったもの<sup>4)</sup>として、以下同じ状態で室温を変えて実験を行なった。第5図はこれらの結果をまとめたものである。

尚、図に示した気温、風速とも風洞の中心部(雪面より 20 cm の高さの点)の値である。顕熱伝達量  $Q$  ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ ) は融雪熱量計によって測定された値から、感部における長波長放射収支熱量  $Q_r = \sigma(T_a^4 - \varepsilon T_0^4)$  を差し引いた値である。 $T_a$  は室温、 $T_0$  は感部の温度 (273.15 K)、 $\varepsilon$  は感部が白色ラッカーで塗装されているので、0.96 の値を用いた<sup>5)</sup>。この値は積雪の値とほぼ同じ位であるので、この熱量は雪面における値とみなして良いものと考えられる。また  $\sigma$  はステ



第5図 顕熱伝達量に関する風洞実験  
風速  $V$  (m/s) に対する顕熱伝達量  $Q$  ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ ) の関係。



第6図 室温と  $dQ/dV$  との関係

破線は室温が比較的低いとき直線で近似できると仮定した場合である

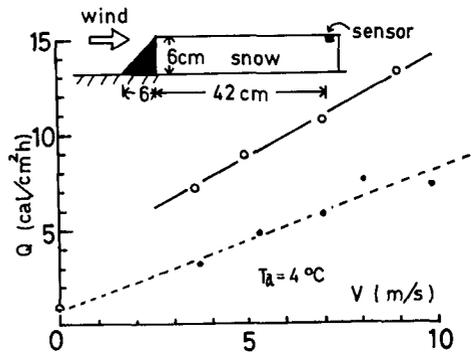
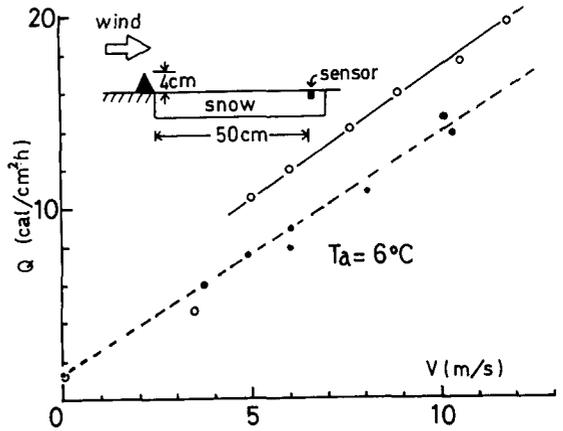
ファン・ボルツマン定数である。

このグラフにおいて、 $Q$  は風速  $V$  とともに直線的に増加している。また温度が高い程この勾配は大きくなっている。これらの勾配と温度との関係を示したのが第6図である。温度  $T_a$  が比較的低い場合はこの関係は直線で近似されるが、 $20^\circ\text{C}$  の場合はこの直線を延長した破線から明らかに大きくはずれている。

すなわちこれらの結果から顕熱伝達量は風速に関しては一次の比例関係がみられるが、温度に対してはその関係が成り立たないことがわかる。

また、雪面上の風の状態を変化させた場合には第7図のようになる。(a)は実験領域(湿雪上)の風上に4cmの高さの三角柱を置いて風速を変化させた場合の $Q$ の値を○印でグラフに示してある。この時、風速が4m/s以下では第5図の結果(破線)とほぼ同じか、あるいは若干小さくなる傾向にあるが、風速が5m/s以上では明らかに $Q$ は破線の値よりも大きくなっている。但しこの直線の勾配は破線とほぼ同じである。すなわち、この場合 $Q$ の値に対する風の乱れの効果は風速が5m/s以上から現われるものと考えられる。尚、破線と実線の $Q$ の値の差は約 $3\text{ cal/cm}^2\cdot\text{h}$ である。

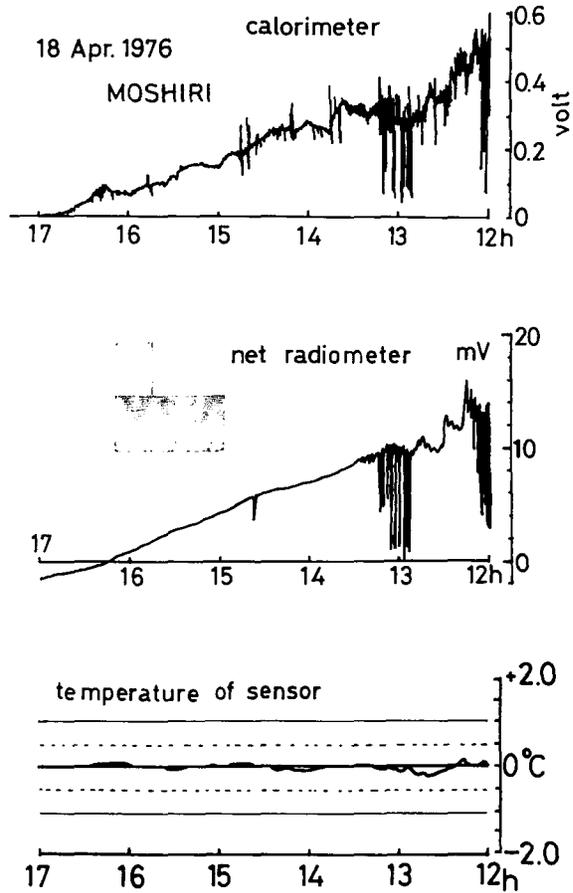
(b)の実験は、実験領域を風洞床面から6cm上昇させ、風上の先端に $45^\circ$ の勾配をつけた場合の結果である。風速が0m/s以外では明らかに破線の値よりも $Q$ の値が大きくなっており、しかも風速に対する $Q$ の増分も破線より大きく、その比は1.33となっている。この場合には温度境界層に加え、風速境界層の発達 $Q$ に対して影響を与えているものと考えられる。このように(a)と(b)の傾向は全く異なっており、これは主に風の状態のちがいによるものと思われる。



第7図 積雪表面の風の状態を変えた実験、上方の図を(a)、下方を(b)とする

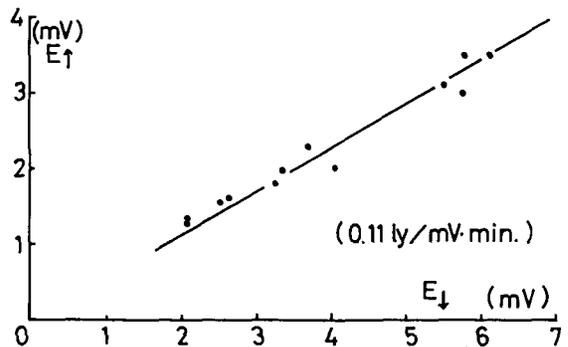
## IV. 野外における観測結果

1976年4月の融雪期に、試作した融雪熱量計を用いて野外において融雪熱量の観測を行なった。第8図はその結果の1例である。(a)は熱量計の出力、(b)は示差放射計の出力を示している。また(c)は熱量計の感部の温度を示したもので、 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以内において変動している。(a)は(b)に比べて変動が激しい。つまり(a)の変動には顕熱伝達量によるものが含まれているからである。また(b)の示差放射計は16時15分に零を示しているが、(a)の熱量計は17時で零となっている。つまり、16時15分~17時の間は雪面における放射収支熱量は負となっているが、それを補う以上の熱量が顕熱伝達として雪面に与えられ、17時にはそれらの絶対値が等しく結局積雪面が得る熱量は零となったわけである。尚、熱量計の感部は長波長放射に関する射出率は前述のように積雪とほぼ同じである。また、感部は白いラッカーで塗装されているので、このアルベドを調べるために日射計を用いて、野外において日射と、塗装体からの反射の観測を行なった。その結果を第9図に示す。この図は日射計の出力をmVで表わしたもので、日射 $E_{\downarrow}$ に対してラッカーの塗装体からの反射 $E_{\uparrow}$ をグラフに示したものである。このグラフの勾配より、塗料のアルベドつまり熱量計の感部のアルベドは0.58となる。一方、この時の積雪のアルベドは第1表に示したように0.57~0.62となっており、感部の値とほぼ同じである。以上のことからこの観測において放射に関する特性は積雪も熱量計の感部も同じであ



第8図 野外における融雪の観測

図は上から(a), (b), (c)とする。  
 (a)は融雪熱量計の出力  
 (b)は示差放射計の出力  
 (c)は熱量計感部の温度変動



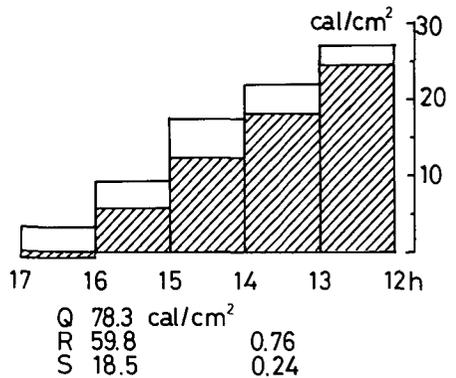
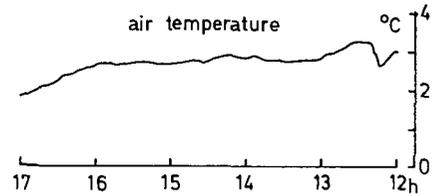
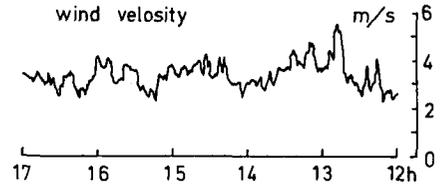
第9図 熱量計の感部に塗装した白ラッカーの反射。ゴルチンスキー日射計による出力をグラフに示してある。 $E_{\downarrow}$ は日射、 $E_{\uparrow}$ は塗装体からの反射による値ある

第1表 1976年4月18日の母子里における積雪のアルベド

| 時 刻         | 日 射 量<br>(cal/cm <sup>2</sup> ) | 反 射 量<br>(cal/cm <sup>2</sup> ) | アルベド |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|------|
| 13:30-14:00 | 31.0                            | 17.8                            | 0.57 |
| 14:00-13:30 | 28.7                            | 16.5                            | 0.57 |
| 14:30-15:00 | 25.0                            | 14.5                            | 0.58 |
| 15:00-15:30 | 21.3                            | 12.5                            | 0.59 |
| 15:30-16:00 | 17.3                            | 10.2                            | 0.59 |
| 16:00-16:30 | 13.0                            | 7.9                             | 0.61 |
| 16:30-17:00 | 9.0                             | 5.6                             | 0.62 |

とみなせるので、雪面における示差放射計の値は熱量計の感部にも適用できるものと考えられる。第10図(c)は第8図の熱量計と示差放射計の出力を1時間当りの熱量にして示したグラフである。図の斜線部分は放射収支熱量である。この時は雪面における潜熱伝達は蒸発によることから、グラフの白い部分の値は顕熱伝達量を示しているものと考えることができる。(a)は雪面上1mにおける風速の10分間平均値を示し、(b)は同じく雪面上における気温を示してある。(c)のグラフより顕熱伝達量が最も多く観測されたのは14~15hの間である。この間は気温の変動は少ないが、風速は14時すぎから大きくなり15時すぎにやや減少している。この効果により顕熱伝達量が比較的大きく観測されたものと考えられる。12~17時までの合計熱量は78.3 cal/cm<sup>2</sup>となり、このうち放射収支熱量は59.8 cal/cm<sup>2</sup>で全体の76%、顕熱伝達熱量は18.5 cal/cm<sup>2</sup>で24%を占めている。尚、積雪面に与えられたこの熱量は積雪の融解と蒸発によって消費されたことになる。

第11図は第10図と同様に4月19日の熱量観測の結果である。第10図と同じように(a)は平均風速、(b)は気温を示している。(c)のグラフによれば顕熱伝達量は10~11時と、16~17時での値が大きく観測された。16~17時では風速が大きくなっていることから顕熱伝達量が大いことは予想がつくが、10~11時では風速、気温とも他と比較して大きな値ではない。但しこの時間は気温の上昇が最も激しく、風速の変動も大きいことが特徴としてあげられる。熱量の合計は148.2 cal/cm<sup>2</sup>で、このうち放射収支熱量は84%で124.7 cal/cm<sup>2</sup>、顕熱伝達量は16%で23.5%となっている。4月18日の値と比較すれば、顕熱伝達量の割合は19日の方が少な



第10図 融雪熱量計による放射収支熱量(Q<sub>R</sub>)と顕熱伝達量(Q<sub>S</sub>)との測定(4月18日)

図は上より(a), (b), (c)とする。(a)は雪面上1mにおける10分間平均風速、(b)は雪面上1mの気温、(c)は熱量計による測定熱量と示差放射計による放射収支熱量(斜線の部分)。この差が顕熱伝達量となる(白い部分)。

い。これは19日の気温は18日と比べて平均 $2^{\circ}\text{C}$ 程高いが、風速は18日のほぼ1/2程度の大きさになっているためであると考えられる。

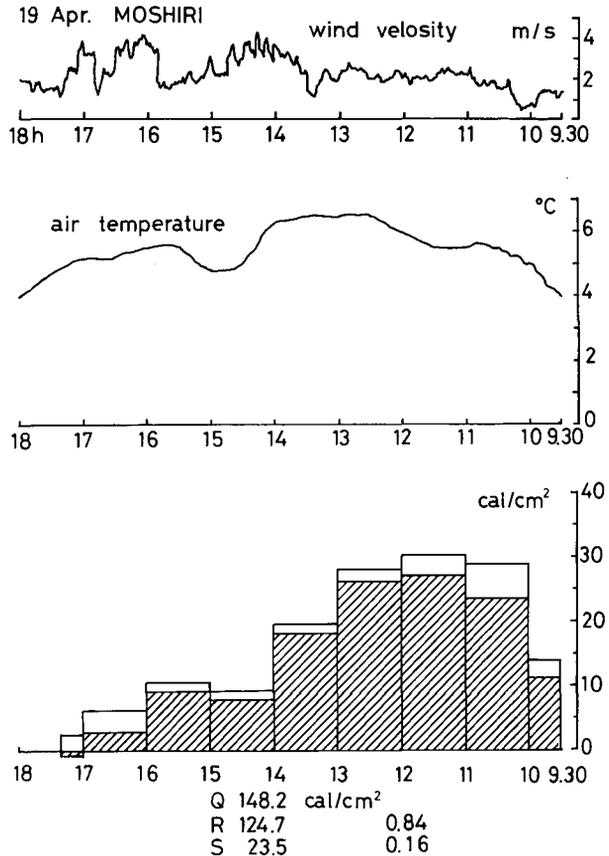
## V. あとがき

試作した融雪熱量計は実験室においても、野外においても充分使用できることが確かめられた。この装置の問題点としては、熱流量の変化に対する感部の追従の問題があげられる。これは感部の熱容量と電流のフィードバック制御の問題であり、回路の改良と感部の熱容量を減少させることによってより速い熱流の変動をとらえることが可能となる。また野外においてこの装置を使用する場合には感部表面のアルベドに充分注意しなければならない。今回の観測では積雪と良く一致したが、融雪期全体にわたっては積雪のアルベドは変化するのでその時の補正ないしは感部の改良が要求される。また、潜熱伝達量を分離して測定するためにはこの熱量計を2組同時に作動させ、1つはそのまま、他方は感部の表面に常に $0^{\circ}\text{C}$ の水を補給しながら熱量を測定すれば、2つの熱量計の測定値の差より潜熱伝達量を求めることができる。

おわりに風洞実験に際しては低温科学研究所大学院生高橋修平氏に終始援助をしていただいた。また、論文の推稿にあたり同研究所助手石川信敬氏より有益な助言をうけた。装置の改良及び野外観測に関して同研究所融雪科学部門の諸兄から多くの助言を与えられた。ここに記して感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 成瀬廉二・大浦浩文・小島賢治 1970 気温融雪の野外研究. 低温科学, 物理篇, **28**, 191-202.
- 2) C. B. Tanner and G. W. Thurtell 1970 Sensible heat flux measurements with a yaw shere and thermometer. *Boundary-layer Meteorology*, **1**, 195-200.



第11図 融雪熱量計による放射収支熱量計 ( $Q_R$ ) 顕熱伝達量 ( $Q_S$ )との測定 (4月19日)

図は上より (a), (b), (c) とする。

(a) は雪面上1 mにおける10分間平均風速, (b) は雪面上1 mの気温, (c) は熱量計による測定熱量と示差放射計による放射収支熱量 (斜線の部分), この差が顕熱伝達量となる (白い部分)。

- 3) トランジスタ技術編集部 1975 電子回路ハンドブック No. 2. p. 411.
- 4) 石本敬志・小島賢治 1973 気温融雪に関する風洞実験. 低温科学, 物理篇, **31**, 143-157.
- 5) 甲藤好郎 1964 伝熱概論. p. 337

### Summary

When snow is melting, a heat balance at a snow surface may be expressed by the equation :

$$Q_M = Q_R + Q_S + Q_E,$$

Where  $Q_M$  is the latent heat flux of snowmelt,  $Q_R$  is the radiation absorbed by snow,  $Q_S$  is the sensible heat transferred by turbulence from air to snow and  $Q_E$  is the latent heat flux of evaporation or condensation. The amount  $Q_M$  can be estimated by measuring  $(Q_R + Q_S + Q_E)$  on the snow surface.

The author has developed a calorimeter with which the total heat  $(Q_R + Q_S + Q_E)$  can be measured directly on the snow surface. When evaporation occurs on its surface, the sensor of the calorimeter must be covered with a thin cloth slightly moistened. It is because water vapour of air condenses on the surface of the sensor in the same amount as on the snow surface, but it does not evaporate from the surface of the sensor which is made of metal. The four main parts of the calorimeter are (Fig. 1):

- (1) A sensor with a heat-absorbing thermoelement using an electric current.
- (2) A controller of an electric current provided to the sensor.
- (3) A temperature monitor to check the sensor whether it is kept at  $0^\circ\text{C}$ .
- (4) A recorder of an electric current to the sensor.

The sensor is made of an aluminium disk (diameter : 27 mm ; thickness : 5 mm) which is painted white and attached onto the heat-absorbing side of the thermoelement. When used to measure the heat of snowmelt, it is set on the snow surface.

As an example, for the measurement of the sum  $(Q_R + Q_S)$  in case the sensor has the same albedo as the snow surface, it is not covered with a thin wet cloth because in such a case  $Q_E$  of evaporation can be disregarded despite that evaporation takes place on the snow surface. Meanwhile, the controller is based on the feedback control by a circuit using a thermistor in the aluminium disk. Through the controller and electric current is supplied to the thermoelement in proportion to the sum  $(Q_R + Q_S)$ , while the sensor is cooled and kept at  $0^\circ\text{C}$  constantly equal to the melting snow surface. For this reason the sum  $(Q_R + Q_S)$  can be estimated by the amount an electric current to the sensor.