



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	融雪の實驗的研究
Author(s)	吉田, 順五; YOSIDA, Zyungo; 小島, 賢治 他
Citation	低温科學, 3, 101-108
Issue Date	1950-12-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17426
Type	departmental bulletin paper
File Information	3_p101-108.pdf



融雪の實驗的研究*

吉田順五, 小島賢治, 青木眞一

(低溫科學研究所 應用物理學部門)

[昭和 22 年 3 月受理]

I. 輻射融雪と氣溫融雪

雪の面には直射日光と空からの大氣輻射とがあたる。これを E_i とすると、その一部 γE_i ($\gamma < 1$: 反射係數) は反射され、残りの $(1-\gamma)E_i$ が雪に吸収される。空氣から傳達される熱量を E_a とすると、雪が受ける熱量は全部で $E = E_a + (1-\gamma)E_i$ である。この E は (a) 融雪 (b) 雪面からの熱輻射 (c) 雪の昇華蒸發 (d) 積雪内部との熱交換 などのために費される。そして E が (a) (b) (c) (d) の各、にどのやうな割合で分割されるかといふことに對しては意味がある。しかし、 E を E_a と $(1-\gamma)E_i$ とにわけて、その各、がどのやうな割合で (a) (b) (c) (d) に分割されるかと考へることは意味がない。それゆゑ、輻射による融雪と熱傳達による融雪といふやうに融雪量をわけることはできないのである。しかしわけると考へやすいこともあるので、便宜上次のやうにわけて見る。

雪の面が 0°C のときは輻射の形で雪が得る差引の熱量は全部融雪に使はれるとして、いひかへれば (a) の一部と (b) の全部とに費されるとしてこの融雪量を輻射融雪といふことにする。すなはち、雪面がだす熱輻射を E_s とすれば、輻射融雪は $A = (1-\gamma)E_i - E_s$ によつて融ける雪の量である。雪の面から上の方、空に向ふ輻射は $\gamma E_i + E_s$ で、上の方から來る輻射は E_i である。そして、この二つの輻射の差 $E_i - (\gamma E_i + E_s) = (1-\gamma)E_i - E_s$ は A に等しい。 A を測定することはさほど困難でなく、これを測定するための器械もできてゐる。 E_s は 0°C の黒體面からでる輻射量と同じで $0.46 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ であるが、太陽常數 $1.93 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ の $1/4$ に近い値をもつてゐる。

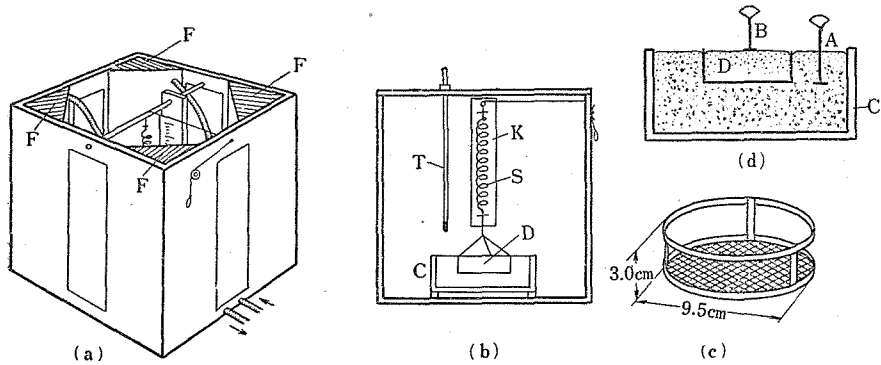
空氣から傳達される熱は (a) 融雪 (c) 昇華蒸發 (d) 熱交換 に分割されると考へる。そして、これによる融雪を氣溫融雪と呼ぶことにする。

輻射融雪でも、氣溫融雪でも、積雪の表面溫度が 0°C のときにだけ起る。また、積雪内の溫度も融雪が起るときには 0°C になつてゐる場合が多いので積雪内部の溫度勾配はない。したがつて、上の (d) 積雪内部との熱交換は零と考へてよい。

II. 風のないときの融雪 (實驗)

* 北海道大學低溫科學研究所業績 第 53 號。

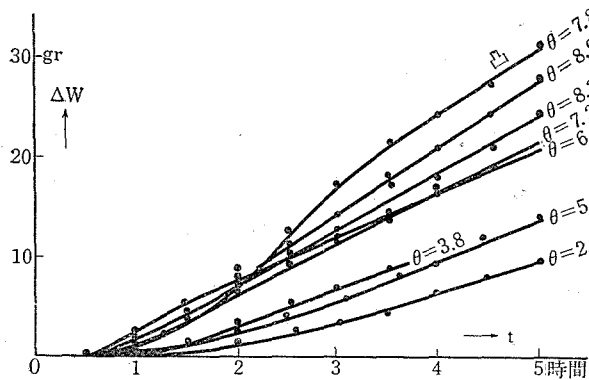
測定装置の外観を第1圖(a)に示した。内容積 $40 \times 40 \times 39 \text{ cm}^3$ の木の函の四隅に三角形のブリキ罐 F を立て、これに水を循環させて函の中を一定の温度に保つ。側面の四つの窓は二重のガラスである。この恒温槽のなかに第1圖(b)のやうに、内容積 $18 \times 18 \times 6.6 \text{ cm}^3$ の木函 C を置いて雪を入れ、更にもその中に雪を入れた籠 D を埋める。D はトタンの細い骨組の圓い枠で、側面には紙を張つて蠟を塗り、底には金網が張つてある(第1圖(c))。S はバネで下端に籠を吊し上端にはひもがつけてあつて、槽外からひきあげることができる。



第 1 圖

はじめ函 C のなかの雪の面と籠 D のなかの雪の面を同じ高さにしておく。恒温槽のなかの温度が 0°C より高いと雪はとけて底の金網をぬけて下へ流れ去るので D のなかの雪の重さが減る。それで、30 分おきに、外からひもをひいてバネ S を引きあげ籠 D を宙に吊して S の長さを測り、雪の重さを求める。(b) 圖の K は鏡の面に目盛を刻んだ物指で、これで S の長さを測つた。

測定は、恒温槽に蓋をしたまゝで行へるので、恒温槽のなかには対流による弱い気流があるだけである。恒温槽の蓋をあけると、外から風がはいつて、融雪速度がかなり増すので測定中



第 2 圖

は蓋はかぶせたまゝにしておいた。槽内の気温をはかる寒暖計 T の球部と雪の面との距離は 5 cm である。なほ函 C の底には吸取紙を 10 枚ぐらゐ敷いて融雪水を吸収させた。

第2圖の横軸は時間 t 、縦軸は D のなかの雪の重さの減少量 ΔW 、 θ は函のなかの空気の温度である。測定に使つた雪は比重 0.33

の雪で、 $-5\sim-10^{\circ}\text{C}$ の低温室内に貯藏しておいたものである。それ故これを恒温槽内に入れてもすぐには 0°C にならず、しばらくの間は全くとけない。第 2 圖の横軸の時間の原点 0 は、雪を恒温槽内に入れてから 1 時間か 2 時間あとの時刻である。したがつて 2 時間前後の間、 $\Delta W=0$ でグラフは水平直線になつてゐる。それから次第にあがりだし、遂には一定の傾きをもつた直線となる。融雪がはじまつても、始めのうちはとけた水が一部雪のなかに貯るので $d\Delta W/dt$ は融雪量より少ない。しかし、時間が充分たつと雪は水で飽和するので、それ以後はとけただけの水は流れ下つてしまふ。したがつて雪の重さの減少と融雪量とは一致して、 ΔW と時間との關係は直線となり、 $d\Delta W/dt$ は一定値をとる。このときの $d\Delta W/dt$ が單位時間についての融雪量である。

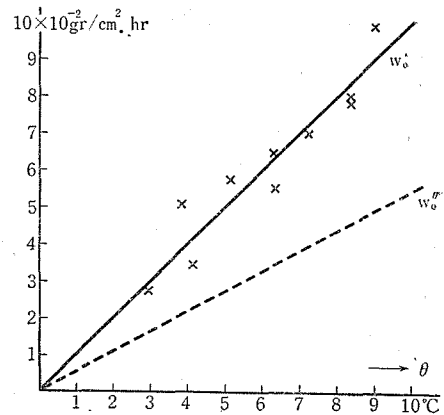
空氣から雪に傳へられる熱量は雪の表面積に比例する筈である。したがつて、雪の面に凹凸があれば表面積が増し融雪は速くなる。籠 D の雪の面を平らにしないで横斷面を凸形にしたら、第 2 圖の凸と印した曲線が得られた。時刻 2 時~3 時あたりでは曲線の傾斜が大きく融雪の盛んなことを示してゐる。しかし時間がたつと、表面が次第に平らになるので融雪は減り、曲線の傾きも減つてくる。

第 3 圖に、單位面積についての融雪量 w_0' $\text{gr/cm}^2\cdot\text{hr}$ 即ち $d\Delta W/dt$ を籠 D の面積で割つたものと氣温 $\theta^{\circ}\text{C}$ との關係を示した。×印が測定値で、ほぼ原点を通る直線 w_0' で表はすことができる。即ち、

$$w_0' = 0.010 \theta \text{ gr/cm}^2\cdot\text{hr}$$

となる。

この雪をとかず熱は空氣から傳達された熱と、恒温槽の壁から來る輻射熱とである。また、雪の面も輻射を放出してゐるが温度が低いので輻射線の波長は 5μ 以上である。このやうに長い波長の



第 3 圖

輻射線に對しては雪の面も恒温槽の壁の面も黒體表面と同じである。それで黒體輻射に関する法則によつて、恒温槽の壁の温度(恒温槽内の空氣の温度と同じ)が $\theta^{\circ}\text{C}$ のとき、雪の面(温度 0°C)が得る正味の輻射量(投射輻射量から、雪が放射する輻射量を差し引いたもの)を求めると $0.0073 \theta \text{ cal/cm}^2\cdot\text{hr}$ となる。これだけの熱でとされる雪の量 w_0'' を第 3 圖に點線で表はしたが、

$$w_0'' = 0.0055 \theta \text{ gr/cm}^2\cdot\text{hr}$$

となる。それ故輻射による熱の交換がないと假定すれば、融雪速度は

$$w_0 = w_0' - w_0'' = 0.0045 \theta \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{hr}$$

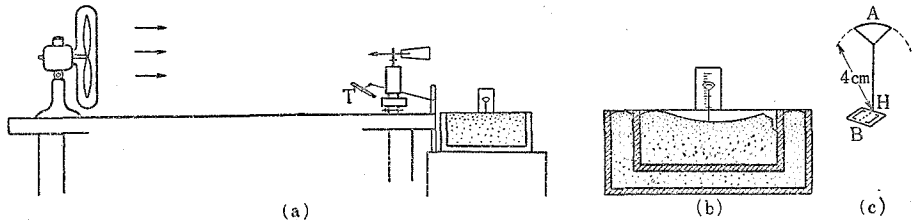
となる。

もしも、表面でとけた雪がとりさられるためだけで雪の表面が沈下するのならば、表面の沈下速度 u に雪の密度 ρ をかけたものが、 w_0' に等しくなる。 u を第 1 圖 (d) のやうにしてはかつた。細い針金でつくつた指標 A, B (この指標については次節で詳しく説明する) を、A は足が雪の内部にあるやうにして立て、B は雪の表面に載せて立てた。雪は函の底でもとけて全體が沈下するので、標準の位置を示すものとして指標 A が必要である。A の上端に対する B の上端の沈下速度を測れば、それが u である。 $\theta = 6.3^\circ\text{C}$ での u の測定値は 0.20 cm/hr で、これに密度 0.33 をかけると $\rho u = 0.066 \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{hr}$ となる。第 3 圖によると 6.3°C の w_0' は $0.063 \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{hr}$ で ρu と殆ど一致する。

III. 風のあるときの融雪 (実験)

沈下速度に密度をかければほぼ融雪量になることがわかつたので、風のある場合は沈下速度の測定だけを行つた。

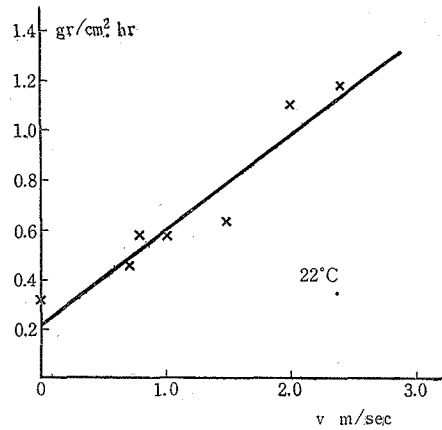
第 4 圖 (a) のやうに実験臺のうゑに電氣扇とピラム風速計をおき、机の端に雪を入れた函をおいた。雪の函は第 4 圖 (b) のやうに二重にして丁度この函の上縁と実験臺の面と一致するやうにした。寒暖計 T は函の前に吊した。このやうにして、雪の面に平行に風を送り、雪面



第 4 圖

の沈下の測定を行つた。雪面の位置を示すために細い鐵線で第 4 圖 (c) のやうな指標を作つた。足 B は蠟を塗つた紙である。上端 A の圓弧の中心はたての棒の根元 H になつてゐる。それで此の圓の平面内で指標が傾いても指標の最高點の高さはかわらない。スケールは内側の函に固定してあつて、これで指標の最高點の位置を讀んで沈下量を定める。内側の函は側面と底とを雪でかこまれてゐるので、この函のなかの雪は表面以外ではとけない。したがつて函の底からとけて雪全體が沈下することはないからスケールは函に固定しておけばよい。沈下量は (b) 圖のやうに風上では少いが、あとの部分ではほぼ一樣である。それで、沈下量としては函の中央のものをつつた。室温 22°C で測定した。スライダックで扇風器の電壓を上下して風速を加減した。最大風速は 2.5 m/sec である。

沈下速度 u は風速が一定ならば一定で 1 時間に 1~3 cm の程度である。風速が大きい程大きい。沈下速度に雪の密度 0.33 をかければ 1 時間の融雪量 w' となる。第 5 圖に $\theta = 22^\circ\text{C}$ での v と w' との關係を示した。× 印が測定値で、扇風器をとめて $v=0$ としたときの w' の値は 0.33 である。しかるに前節の恒温槽内の無風状態での融雪速度の式から 22°C の値を求めると 0.22 となる。しかし、 w' の 0.33 と云ふ値は、實驗室内で求めたもので、扇風器をとめたとしても多少風のあることは免れない。それ故、 $v=0$ のときの値としては 0.33 でなく 0.22 をとる方がよいであらう。



第 5 圖

風速 v と w' との關係はほぼ直線で表はされ、それを數式にすると

$$w' = (0.22 + 0.38v) \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{hr}$$

(v : m/sec, $\theta = 22^\circ\text{C}$)

となる。これから 22°C での輻射による融雪量 w_0'' をひいて、熱輻射がないとした場合の融雪速度として

$$w = w' - w_0'' = 0.10 + 0.38v$$

を得る。しかるに w は風がある時でも、気温 $\theta^\circ\text{C}$ に比例するものと考へられる。それで、

$$w = (0.0045 + 0.017v)\theta \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{hr} \quad (2)$$

の式が得られる。風速 v の影響は非常に大きい。たゞこの實驗では雪の面にあたる風は机の上を吹いて來た風で實際に 22°C の温度の風である。野外の状態では、ある部分の雪の面にあたる風はすでに長い間雪の面を吹いて來た風で冷えてゐて、その温度は雪の面から離れたたかいところではかつた気温よりも低い。それ故上の式で求められる融雪速度は、實際の場合のものよりも多少大きいであらう。

筆者のうちの一⁽¹⁾人は積雪面での熱傳達係數 α を實驗的に測定して

$$\alpha = 0.284 \frac{\lambda}{L} (Pé)^{0.8}$$

を得た。 λ は空氣の熱傳導率、 L は風の方向に於ける雪面の長さ、 $Pé$ は Péclet の數で、 a を空氣の温度擴散率とすると vL/a と同じである。 α は L によつて變るがその變化はあまり著しくはない。そして、上の式は $L=40 \text{ cm}$ の場合について實驗して得たもので、この α の値が廣い雪面についてもあてはまるものと假定する。

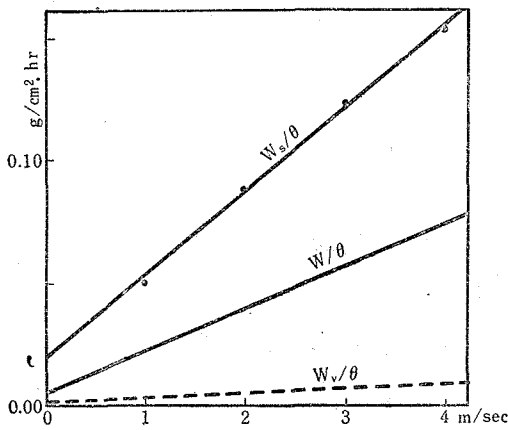
空気の温度が $\theta^\circ\text{C}$ ならば $a\theta$ だけの熱が雪に與へられ、若しこの熱が全部雪をとかすために費されるとすれば、 $a\theta$ を氷の融解熱 $Q=80\text{cal/gr}$ で割つただけの雪がとける。この融雪速度を w_s とし、 $w_s/\theta=a/Q$ を上の式によつて計算して第 6 圖に黒圓印で表はした。風速 v を $1\sim 4\text{m/sec}$ の範圍に限つたが、この範圍内では計算で求めた點は一つの直線にのり、

$$w_s/\theta=(0.02+0.034v)\text{gr/cm}^2\cdot\text{hr}$$

で表はされる。第 6 圖の w/θ の直線はさきに實驗で求めた融雪速度の式

$$w/\theta=(0.045+0.017v)\text{gr/cm}^2\cdot\text{hr}$$

である。 $w/\theta > w_s/\theta$ であるから、空氣から傳へられた熱は雪をとかして尙餘つてゐる。雪の内部の温度も 0°C になつてゐるので、この餘つた熱は雪の内部には傳はらない。したがつて、この餘つた熱は雪を蒸發させるために使はれると考へてよい。この熱量を氷の蒸發熱 700cal/gr で割れば蒸發によつて消える雪の量、即ち蒸發速度となる。第 6 圖の一番下の直線が w_v/θ である。これで見ると、融雪速度は蒸發速度の約 8 倍である。測定された融雪量のなかには蒸發によつて消えた雪の量も入つてゐるので w_v/θ は實は w/θ に含まれてゐる。けれども、 $w_v/\theta \ll w/\theta$ であるから



第 6 圖

w/θ は全部融けた雪と考へても差しつかへない。

實驗に際して湿度を定めなかつたが、蒸發速度は空氣の湿度によつても變る。したがつて w_v/θ と w/θ との比は場合によつて變化する筈であるが、だいたいには於てはこゝに得た値に近いものと考へてもよいであらう。

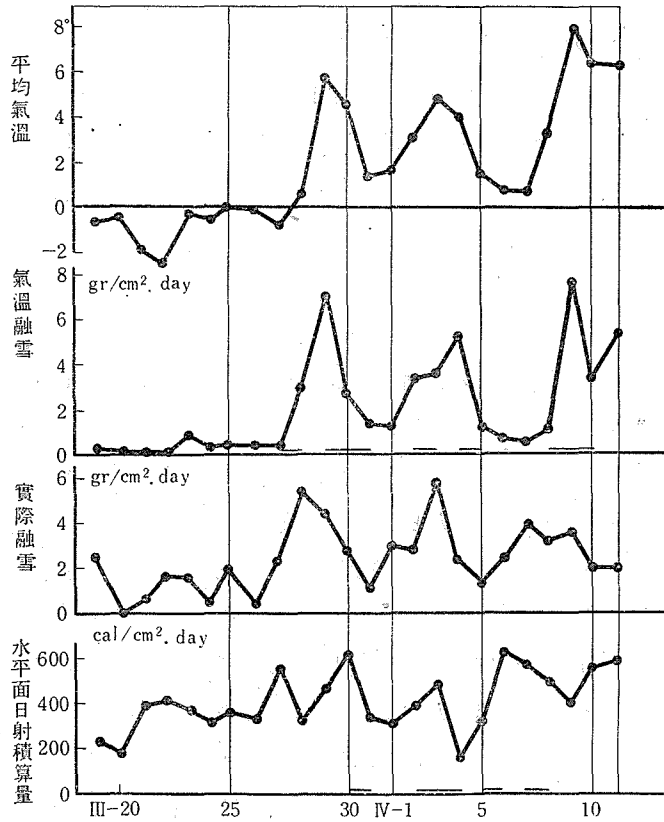
IV. 實際の融雪との比較

昭和 21 年 3 月 19 日から 4 月 11 日までの札幌市(札幌管區氣象臺)の實際の融雪と、實驗できめた式で計算した融雪との比較を第 7 圖に示す。1 日ごとの融雪を示してある。實際の積雪の表面が 1 日にさがつた長さに雪の密度をかけたものが第 3 段の實際融雪である。第 2 段の氣溫融雪が、III 節の (2) 式から計算した値である。1 日のうち、氣溫が 0°C 以上の時間だけについて積算温度 $\theta = \int \theta dt$ (θ : 氣溫 > 0 , t : 時) を求め、一方そのあひだの平均風速 \bar{v} をもとめて (2) 式により

$$(0.0045+0.017\bar{v})\theta \quad (3)$$

をその日の気温融雪とした。
 實驗では、風速を雪面から15 cm のところではかつたが、氣象臺の風力計は雪面から15 m ぐらゐの高さにおいてある。うへの平均風速はこの風力計による値からもとめたものであるが、W. Paeschke の式によると、雪原のうへでは、15 m の高さの風速は 15 cm の高さの風速の約 2 倍である。それで、(3) 式につかつた v は風力計の値からもとめた平均風速の半分にとつた。

第 4 段の水平面日射積算量は、これも札幌氣象臺のロビッチ日射計の値で、1 日について積算したものである。第 1 段には平均気温を示した。



第 7 圖

積雪の昇華蒸發量は、量としてはあまり大きくないが、それに使はれる熱量は非常に大きい。しかし、この昇華を勘定に入れてない。また、ロビッチの日射計ではかれるのは、空から地面に向つてくる輻射だけで、そのうちの何%が積雪に吸収されたかも不明である。それで、気温融雪、輻射融雪と實際融雪との關係を第7圖から求めることは無理である。しかしたとへば、ある日の輻射量に比べてその翌日の輻射量の方が大きい場合、もし實際融雪も大きくなつてゐたら、だいたい於て輻射が融雪に及ぼす影響が大きいといつてよいであらう。気温融雪についてもおなじで、計算した気温融雪量が翌日大きくなつていて、しかも實際融雪もさうならば、気温が融雪に及ぼす作用が大きいわけである。それで第7圖に、3月27日から4月10日まで、融雪が盛んにおこつた時期について、實際融雪の線の傾きと気温融雪の線の傾き、輻射量の線の傾きとが同じ方向である部分に太い横棒をいれてしるした。たとへば、3月27日から28日の間では、28日の實際融雪の方が大きいので、實際融雪の線は上向きである。これに對して、気温融雪の線も上向きだが、輻射量の線は下向きである。それで、27日と28日との間について、気温融雪の横坐標の線に沿つて太い線をかきいれ、輻射量の横坐標の線に沿つ

ては何もかきいれてない。

横線のある部分は気温融雪の方が少しばかり輻射量ではあひよりも多い。それで、融雪に對しては気温の作用の方が輻射の作用よりも大きいと考へられる。たゞ3月28日～29日、3月31日～4月2日、4月6日～7日については、気温融雪、輻射量の變化の方向がともに實際融雪の方向とあはない。それ故、融雪に對しては、気温、輻射のほかにもなほ大きな因子を考へなければならぬわけである。

摘 要

實驗的に、積雪の表面に接してゐる空氣から積雪に與へられる熱によつて起される融雪量 w を求め

$$w = (0.0045 + 0.017v) \theta \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{hr}$$

を得た。 θ は積雪面から 5 cm の高さではかつた気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 v は風速で單位は m/sec である。札幌での實際の積雪の融雪量と、気温、風速をもとにして上の式から計算した融雪量 (気温融雪) とを比較すると、大きさの程度はよく一致し、また個々の日の融雪量についてもわりあひによくあつてゐる。日射計ではかつた日射量と實際の融雪との關係よりも、気温融雪と實際の融雪との關係の方が少しばかり密接なやうである。

札幌管區氣象臺からいろいろの資料をいただいたことに對して厚く感謝する次第である。

文 獻

- (1) 吉田順五, 内海威彦 1948. 簡単な氣體寒暖計による輻射の測定, 低溫科學 4, 1.
- (2) 小平吉男 1940. 大氣力學, 岩波講座, 物理學, 12, A, 56.

Zyungo YOSIDA, Kenzi KOZIMA and Sin'iti AOKI:
Experiments on Melting of Snow Layer.

Résumé

Quantity w of snow melted by heat given from the air over it was determined experimentally. w was expressed by the formula

$$w = (0.0045 + 0.017v) \theta \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{hr.}$$

v : wind velocity, m/sec; θ : temperature of the air, $^{\circ}\text{C}$.

By means of this formula the authors calculated the melting of snow using the data of air temperature and wind velocity measured by the Meteorological Observatory at Sapporo. The calculated values were in agreement with the actual melting of the snow layer at Sapporo.