



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪内部の昇華
Author(s)	吉田, 順五; YOSIDA, Zyungo; 黒岩, 大助 他
Citation	低温科学, 3, 89-100
Issue Date	1950-12-15
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17425">https://hdl.handle.net/2115/17425</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	3_p89-100.pdf



# 積雪内部の昇華\*

吉田 順五, 黒岩 大助

(低温科学研究所 應用物理學部門)

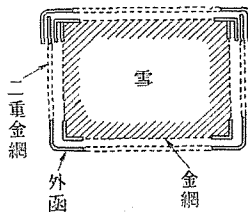
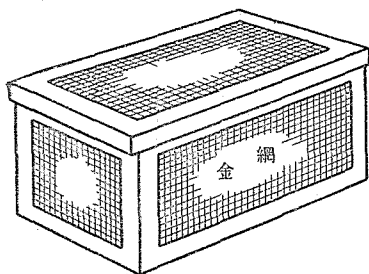
(昭和 22 年 2 月受理)

積雪の表面が盛んに昇華蒸發することはよく知られてゐる。しかし、積雪はその半分以上は空氣で、通氣性がよい。そして、地面近くでは温度が高く表面近くは温度が低いので、内部でも水蒸氣の蒸發、凝結が起つてゐる筈である。昭和 21 年の 2 月から 4 月にかけて、札幌の北大構内の積雪について、この積雪内部の昇華を調べた。又同時に實驗的にも研究を行つた。

## I. 野外の積雪についての観測

(A) 観測法：一定量の雪を金網の籠に入れて積雪のなかいろいろの深さに埋め、その目方の増減を測つた。目方が減れば、籠を埋めた附近では蒸發が起り、目方が増せばその附近で凝結が起つてゐることになる。

第 1 圖が籠の圖である。大きさは  $9 \times 9 \times 6 \text{ cm}^3$  で、トタン板で枠をつくり、それに雪がこぼれない程度の細かい金網をはつた。測定しようとする雪の層から、崩れないやうにして雪



第 1 圖

をとりだし、丁度籠の大きさに切つて籠に入れる。この籠を更に同じやうな構造の少し大きめの第 2 の籠に入れて雪のなかに埋める。外側の籠の金網は 2 重にして、外から雪が侵入してな

かの籠にさはることなどが無いやうにした。

籠は 4 箇作つたが、それを No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 とする。2 月 25 日に積雪のなかに地面に届くまでの穴を掘つた。穴の壁に奥行 60~70 cm の横孔を掘つて一番奥に籠を置き、あとはすっかり雪でつめた。横孔の大きさは丁度籠がはいるだけにしてあるので、籠のなかの雪と横孔の壁との隙間は 1 cm ほどである。この隙間が大きいと、局部的に特に通氣がよくなつて昇華が促進されるかもしれない。1 cm ほどの隙間ならこの影響も少ないであらう。横孔は地面から 160 cm, 90 cm, 10 cm の高さのところに掘つた。90 cm のところには二つの

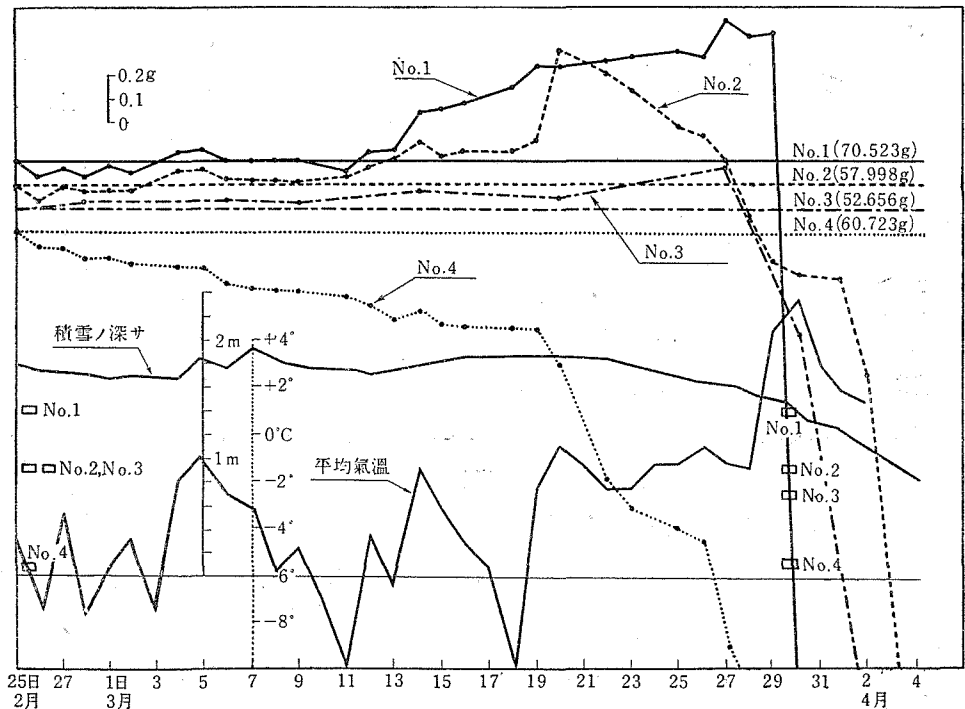
\* 北海道大學低温科学研究所業績 第 50 號。

横孔を掘り、それに No. 2 と No. 3 との籠を入れた。No. 1 は地面から 160 cm の横孔に入れ、No. 4 は地面から 10 cm の横孔に埋めた。

毎日午前 10 時から 11 時までの間に籠を掘りだして天秤室に運び、なかの籠をとりだして秤量する。再び外籠に入れてもとの積雪のなかに埋め戻した。天秤室へ運ぶときには、大きな函に雪をつめ、そのなかに籠を埋めて運んだ。運ぶ途中、外気に觸れて昇華するのを妨げるためである。天秤室にはストーブを焚かず、室内の温度は外の気温とほとんど同じであつた。秤量には数分しかかからないので、測定中の重量変化は無視できる程度である。雪のはじめの目方は 60~70 gr で、測定は mg まで行つた。

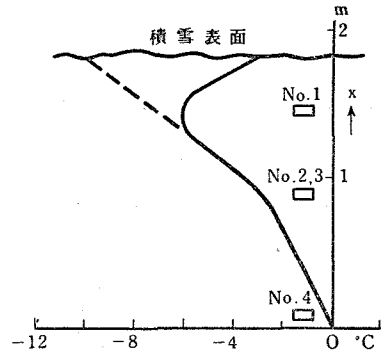
No. 1, No. 2, No. 4 の三つの雪は毎日秤量したが、No. 3 だけは 5~6 日ごとに秤量した。掘りだして秤量するために誤差が現はれるといけないので、同じ条件にある No. 2 の雪と比較してコントロールするためである。

(B) 観測結果：第 2 圖に各測定籠の重量変化と積雪量と平均気温とを示す。平均気温は札幌管區氣象臺の観測値から計算して求めたもので、前日の午前 10 時からその日の午前 10 時までの平均値である。観測は 2 月 25 日に始めた。この日、積雪量は 180 cm で、積雪内の温度は、No. 1 の籠のところで  $-5.5^{\circ}\text{C}$ 、No. 2 のところで  $-2.5^{\circ}\text{C}$ 、No. 4 のところで  $-0.5^{\circ}\text{C}$  であつた (第 3 圖参照)。



第 2 圖

翌日の 26 日に秤量してみたところ、一晝夜の間 No. 1, No. 2, No. 4 とも約 100 mg 目方がへつてゐた。25 日～26 日の平均気温は、第 2 圖に示した通り  $-7.5^{\circ}\text{C}$  で、この頃の平均気温としては低い方である。27 日には No. 1 は 50 mg, No. 2 は 90 mg 目方がふえてゐる。そして 26 日～27 日の平均気温は  $-3.4^{\circ}\text{C}$  で、前日の平均気温より  $4^{\circ}\text{C}$  も高く、又このところの平均気温としては高い方である。No. 4 はごく僅か目方が減つてゐる。このやうに積雪の表面に近い



第 3 圖

い No. 1 と No. 2 とには、気温が低めるときには蒸發が起り、高めるときには凝結が起る。しかし、一般的の傾向としては、第 2 圖からわかる通り、No. 1 と No. 2 とには凝結が起り、No. 4 には蒸發が起つてゐる。

以上は 3 月中旬までのことで、3 月半ばをすぎると日中晴天のときは気温が  $0^{\circ}\text{C}$  以上のぼる。No. 1 は急に目方がふえだして、3 月 26 日には、はじめの目方より 600 mg も重くなり、最大に達した。このころは気温も充分に高く融雪期に入つたので、積雪の高さもへりだし、3 月 29 日から 30 日にかけて No. 1 は積雪の表面に露出した。そして外氣に曝されたため、目方は急激に減つてゐる。

No. 2 は 3 月 20 日に目方が最大となり、はじめより 460 mg ふえた。その後、No. 1 が露出した 3 月 30 日には、はじめの目方より 340 mg 少くなり、4 月にはいつてからは急に減つてゐる。No. 2 と同じ高さのところに埋め、5～6 日目ごとに掘りだして秤量してきた No. 3 は、ほぼ No. 2 と同じ経過をとつてゐる。したがつて掘りだして秤量するために生ずる誤差は、あるとしても小さい。ただ、No. 3 は、No. 2 とはじめ同じ高さのところに埋めたが、3 月の終りには No. 2 より 15 cm ほど位置が低くなつた。No. 4 だけは、初めから目方がふえることはなく、大體一樣な割合で目方がへりつづけ、融雪期にはいつてから急に減つてしまつた。

(C) 観測結果の考察：積雪のなかの一點で、氷の粒の隙間にある空氣中の水蒸氣壓を  $p$  とする。又その點の溫度を  $\theta$  として、 $\theta$  に對應する氷の飽和水蒸氣壓を  $p_s$  とする。さうすると、 $p < p_s$  がなりたつやうな點では氷の粒は蒸發し、 $p > p_s$  がなりたつやうな點では氷の粒の表面に水蒸氣が凝結する。又水蒸氣は  $p$  の大きい點から  $p$  の小さい點に向つて擴散によつて移動する。地面から鉛直上方に坐標  $x$  をとれば、 $p$ ,  $\theta$ ,  $p_s$  などは  $x$  の函數である。 $p$ ,  $\theta$ ,  $p_s$  が時間とともに變化しない定常状態を考へれば

$$\tau D \frac{d^2 p}{dx^2} = \alpha(p - p_s) \quad (1)$$

がなりたつ。 $D$  は積雪中の水蒸気の拡散係数で、 $x$  には無関係に一定であると仮定した。 $\tau$  は、水蒸気の圧力と密度との比で、 $0^\circ\text{C}$  附近では  $1.06 \times 10^{-6}$  gr/cm<sup>3</sup> mmHg の値をもつ。 $\alpha$  は凝結係数で、積雪の性質や温度によつて變るが、これもまた  $x$  には無関係に一定であると假定する。

擴散係数  $D$  を  $x$  に無関係の常數としても (1) 式の形は温度が一様なばあひにだけなりたつものである。いまの場合は温度勾配がある。この意味で (1) 式は訂正しなければならないが、このばあひの程度の温度勾配ならば (1) 式をそのままつかつても、たいしたまちがひはおこらない。

第 3 圖に示した通り、積雪のなかの温度  $\theta$  は地面から 1 m 以上のところまで、だいたい直線的に下つてゐる。地面のところは  $0^\circ\text{C}$ 、すなはち  $x=0$  では  $\theta=0$  であるから、 $\theta = -bx$  ( $b$ : 常數) である。ところで、

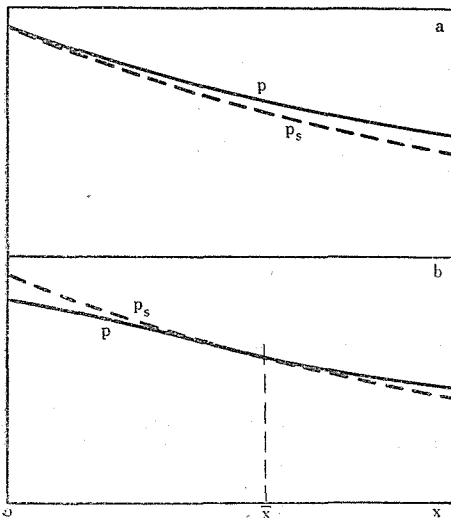
$$p_s (\text{mmHg}) = 4.58 e^{0.0857\theta}, \quad \theta < 0^\circ\text{C}$$

といふ関係があるので、 $p_s$  は  $x$  の函數として

$$p_s = p_0 e^{-\lambda x} \quad (2)$$

$$p_0 = 4.58 \text{ mmHg}, \quad \lambda = 0.0857 b$$

で表はされる。第 4 圖の  $p_s$  は (2) 式のグラフである。積雪の厚さは有限で、表面近くの温度は絶えず變るけれども、この變化の影響は深いところまでは達しないと考へることができる。それで、積雪が  $x = \infty$  まで續いてをり、(2) 式がやはり  $x = \infty$  までなりたつてゐると



第 4 圖

して、(1) 式の解を求める。このやうな解は積雪の表面近くにはあてはまらないが、深い部分ではほぼ正しいであらう。

簡單のために  $\frac{\alpha}{\tau D}$  を  $\mu^2$  で表はす。 $x=0$  の境界條件として二つの場合を考へる。

(a)  $p = p_s, x=0$ : 地面が凍つてゐないで、水を充分に含んでおれば、地面からの水蒸気の供給が充分なのでこのやうな條件がなりたつであらう。このときの (1) 式の解は

$$p - p_s = p_0 \frac{\lambda^2}{\mu^2 - \lambda^2} (e^{-\lambda x} - e^{-\mu x}) \quad (3)$$

となる。 $p - p_s$  は常に正で、 $p$  のグラフは第

4 圖 a に表はしたやうになる。  $p > p_s$  であるから、どこでも水蒸気の凝結が起る。この水蒸気は地面から供給される。

(b)  $\frac{dp}{dx} = 0, x = 0$  : 地面から水蒸気が供給されない場合にあたる。地面が凍つてゐれば、だいたいこの條件が満足される。このときは

$$p - p_s = p_0 \frac{\lambda}{\mu^2 - \lambda^2} (\lambda e^{-\lambda x} - \mu e^{-\mu x}) \quad (4)$$

となり、第4圖 b に示したとほり、  $x$  がある値  $\bar{x}$  より小さいところでは  $p - p_s < 0, x > \bar{x}$  のところでは  $p - p_s > 0$  となる。即ち、  $0 \sim \bar{x}$  の間では蒸發し、  $\bar{x} \sim \infty$  の間では凝結する。  $\mu, \lambda$  のどちらが大きくても、この関係にかはりはない。しかし  $x = 0$  とをくと  $p - p_s = -\frac{\lambda}{\mu + \lambda}$  となる。  $|p - p_s|$  が大きな値をとるとは考へられないから、実際には  $\mu \gg \lambda$  であらう。

観測の結果(第3圖)によると、地面から10cmのNo.4の雪は、3月19日まで、だいたい一様な割合で目方がへつてゐる。この目までは気温はひくく、雪がとけた心配はないから、この目方は蒸發のために減つたのである。地面から90cmのNo.2とNo.3との雪は一般的傾向としては少し目方が増して、凝結が起つたことを示してゐる。積雪の表面に近いNo.1の雪も目方がましてゐる。すなはち、  $x$  の小さいところでは蒸發が起り、  $x$  の大きいところでは凝結が起つてゐるのであるから、上に考へた a, b 二つの場合のうちの b にあつてゐる。実際に雪を掘つて地面を調べたら、地面の表面は凍つてゐた。北海道ほど寒さのきびしくないところでは、地面も凍らず、a の場合も起るであらう。

$p = p_s$  となる  $\bar{x}$  は No. 2, No. 3 の場所より少し下のところ、地面から60cmのあたりであらう。 $\bar{x}$  より下で蒸發した水蒸気は  $\bar{x}$  より上の方へ擴散して行つて凝結する。この水蒸気の量が  $M$  gr であるとすれば、  $\bar{x}$  の高さの水平面を通過して  $LM$  cal の熱が運ばれたのと同じ結果となる、  $L$  は氷の蒸發潜熱(約700 cal/gr)である。この水平面の  $1\text{cm}^2$  を1secに通過する水蒸気量  $M$  は  $M = \alpha \int_0^{\bar{x}} (p_s - p) \alpha x$  で、第4圖 b の  $0 \sim \bar{x}$  の間で、  $p$  曲線と  $p_s$  曲線とはさまれた面積に  $\alpha$  をかけたものに等しい。今この面積の形を、大ざつぱに三角形とすると、

$$M = \alpha(p_s - p)_0 \cdot \frac{\bar{x}}{2}$$

となる。 $\alpha(p_s - p)_0$  は地面附近で、  $1\text{cm}^2$  の積雪から1sec間に蒸發する水蒸気量で、No.4の雪の蒸發量から求められる。即ち、No.4の雪は體積が  $9 \times 9 \times 4\text{cm}^3$  で、2月25日から3月19日までの22日間に0.4 gr 蒸發した。したがつて、  $1\text{cm}^2, 1\text{sec}$  については  $6.7 \times 10^{-10} \text{gr/sec} \cdot \text{cm}^2$  の蒸發となる。この値を上式の  $\alpha(p_s - p)_0$  に代入し、又  $x = 60\text{cm}$  とすると

$$M=2.0 \times 10^{-8} \text{ gr/sec} \cdot \text{cm}^2$$

となる。  $L=700 \text{ cal/gr}$  をかけると、 $\bar{x}$ -面の  $1 \text{ cm}^2$  を  $1 \text{ sec}$  に通過する熱量として

$$1.5 \times 10^{-5} \text{ cal/sec} \cdot \text{cm}^2$$

が得られる。

第4圖によると、積雪内部の温度勾配は  $1 \text{ m}$  についてほぼ  $4^\circ\text{C}$  である。積雪の熱伝導率を  $4 \times 10^{-4} \text{ cal/sec} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$  にとると、傳導によつて運ばれる熱量は

$$1.6 \times 10^{-5} \text{ cal/sec} \cdot \text{cm}^2$$

となつて、水蒸氣によつて運ばれる熱量と同じ程度のものである。

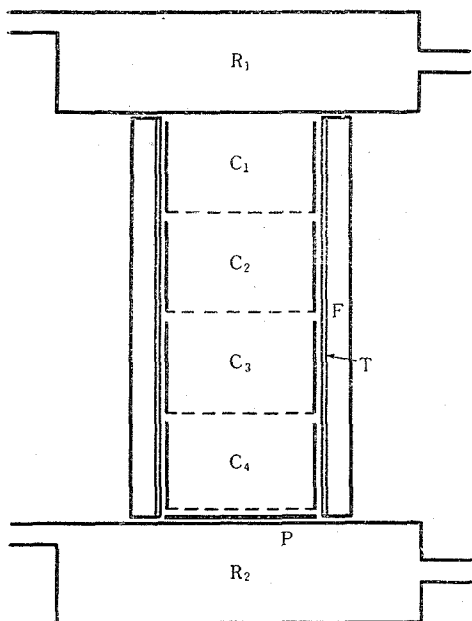
積雪の表面近くの温度分布は、深いところとちがつて、気温によつて激しくかはる。寒さの酷しい時期に、一時的に気温が高くなると、表面近くの温度分布は第3圖の實線で示したやうに右の方へ著しく彎曲する。即ち  $x$  軸に向つて著しく凹となる。しかるに  $p_s$  は温度  $\theta$  にほぼ比例し、又  $p$  と  $p_s$  との差は小さいものと考へられるから、 $p$  の曲線も  $x$  軸に向つて凹となるに違ひない。即ち  $\frac{d^2p}{dx^2} > 0$  である。したがつて、(1)式により  $p > p_s$  となり凝結がおこる。前節(B)で、気温の高いときには No. 1, No. 2 の雪は目方の増し方がひどくなると述べたが、それはこのやうな理由によるのである。気温が普通の程度に低ければ温度曲線は表面近くでも直線となる。この場合にも、 $\bar{x}$  より上では凝結が起り、No. 1, No. 2 などは少しづつ目方が増す。しかし気温の高い程著しくはない。気温が著しく低くて、表面近くの温度曲線が  $x$  軸に向つて凸になれば  $\frac{d^2p}{dx^2} < 0$  となつて、蒸發が起る。前節に述べたやうに、気温の低いときには No. 1, No. 2 の雪の目方は減つた。

3月の半ばをすぎると、気温は全般的に昇り、變動も少なくなつて温度分布は地面から表面まで、ほとんど常に直線的になる。それ故、表面近くでは凝結だけが起る。

融雪期になつて、測定用の雪の目方が急に減つたのは、融けて流れ去つたためである。實際に、雪の籠を掘りだしてみると、底の金網からつららがさがつてゐる。

## II. 實 験

第5圖の装置で實驗した。  $R_1, R_2$  はトタン板の四角な函で、なかに  $0^\circ\text{C}$  以下に冷したエチレングリコールの水溶液を循環させる。  $C_1, C_2, C_3, C_4$  は、直径  $5.5 \text{ cm}$ 、高さ  $3.5 \text{ cm}$  の圓いトタン板の筒の底に金網をはつた籠で、これに雪を入れる。  $C_4$  と  $R_2$  との間には圓板  $P$  がある。  $T$  はガラスの筒で  $F$  は斷熱用のフェルトである。  $R_1, R_2$  の温度を夫々  $-1^\circ\text{C}$ 、 $-6^\circ\text{C}$  ぐらいにしてをくと、  $C$  のなかの雪から水蒸氣が昇華蒸發して下の方に擴散して行き  $P$  の表面に霜となつて凝結する。4時間半から5時間半ののち、各  $C$  から蒸發した雪の量、又  $P$  の上に凝結した霜の量をきめる。實驗の前後に、精密天秤で  $C$  や  $P$  の目方ははかれれば、その



第 5 圖

差が蒸發量，凝結量になる。天秤で秤量してゐる間にも雪は蒸發するので，CもPも一つ一つ蓋のある罐に入れて秤つた。それにしても，多少の蒸發は免れないので，測定された値は，Cの蒸發量としては大きすぎ，Pの凝結量としては小さすぎる。測定された蒸發量，凝結量は 20~150 mg の範圍であつた。

各 C の蒸發量を C の底面積で割り，且實驗時間で割つたものを  $q_1, q_2, q_3, q_4$  とし，又 P の凝結量についても同様な量を作つて  $q$  とすると，第 1 表のやうになる。密度とあるのは測定に用ひた雪の密度で，時間とあるのは實驗時間である。  $q_1+q_2+q_3+q_4$  と  $q$  とは一致するはずだが，實際には  $q$  の方が小さい。天秤で秤量する間に起る蒸發が

その主な原因であらう。それで，  $q_1+q_2+q_3+q_4$  と  $q$  との平均値を  $q$  の正しい値としてとることにした。さうすると，  $q$  の値は實測値の 30% 増しに，  $q_1, q_2, q_3, q_4$  は實測値の 30% 減にとればよいことになる。

第 1 表

番 號	密 度 g/cm <sup>3</sup>	R <sub>1</sub> の溫度 °C	R <sub>2</sub> の溫度 °C	$\Delta p$ mmHg	時 間 × 10 <sup>3</sup> sec	$\times 10^{-7} \text{g/sec} \cdot \text{cm}^2$				$\times 10^{-7} \text{g/sec} \cdot \text{cm}^2$		D cm <sup>2</sup> /sec
						$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q$	$q'$	
1	0.08	-1.2	-6.7	1.58	16.5	0.88	0.35	0.40	0.28	1.17	3.3	0.7
2	0.14	-0.4	-7.0	1.90	16.9	0.93	1.05	1.00	2.20	2.83	5.9	1.0
3	0.25	-0.3	-4.9	1.43	20.1	0.48	0.77	0.96	0.88	2.08	3.8	0.9
4	0.34	-9.1	-1.4	1.96	18.0	1.65	0.58	0.44	1.09		4.6*	0.8
5	0.51	-1.9	-8.8	1.75	16.2	0.85	0.80	0.69	2.10	3.56	4.9	0.9
6	0.12	-0.8	-5.5	1.41	18.0	0.44 0.21	0.30 0.28	0.54 0.42	0.47 0.65	* この $q'$ は $\frac{1}{2}(q_1+3q_2+5q_3+7q_4)$ である		

なほ，この  $q_1+q_2+q_3+q_4$  と  $q$  との不一致の原因として，C から蒸發した水蒸氣の一部が P の方に擴散して行かないで，圓筒 T の内面に凝結したり，又は外へ逃げてしまふことなどが考へられる。それで，C<sub>4</sub> の下に P をおくだけでなく，C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> の下にも P と同じやうな圓板をおいた。すると，これらの圓板にも霜が凝結して，たしかに C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> から蒸發し

た水蒸気が P の方へ向つて擴散することがわかつた。第 1 表の第 6 番目の測定では、 $q_1 \sim q_4$  の欄の數字が二段になつてゐる。上の段は  $q_1 \sim q_4$  の値で、下の段が、 $C_1 \sim C_4$  の下において圓板に凝結した霜の量である。ただ、 $q_1$  に比べて、 $C_1$  の下の圓板の霜はだいぶ少なく、 $q_4$  の下の圓板の霜は  $q_4$  よりも多い。これは、一部の水蒸気が雪のなかを通らず、C と T との隙間を通つて擴散するためであらう。しかし、全體に比べればその量は少く、大部分は雪のなかを通つて擴散する。

第 5 圖の  $R_1$  の下面を原點として坐標  $x$  を鉛直下むきにとる。そして、 $C_1, C_2, C_3, C_4$  の下面の位置を 1, 2, 3, 4 で表はす。 $-\tau D \frac{dp}{dx} = \beta$  ( $\tau, D, P$  の意味は第 II 章 (C) に於けるものと同じ) とすると、

$$q_i = \beta_i - \beta_{i-1}$$

といふ關係がある。又  $\beta_0 = -\tau D \left( \frac{dp}{dx} \right) = 0$  である。それ故  $\beta_i = \sum_{k=1}^i q_k$  である。また 0~4 の距離すなはち筒 T の長さを  $l (=14 \text{ cm})$  とすると、近似的に

$$\tau D (p_0 - p_4) = \frac{l}{4} \left\{ \frac{0 + \beta_1}{2} + \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} + \frac{\beta_2 + \beta_3}{2} + \frac{\beta_3 + \beta_4}{2} \right\} = \frac{l}{4} \left\{ \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \frac{\beta_4}{2} \right\}$$

とおくことができる。しかるに、 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \frac{\beta_4}{2} = \frac{1}{2} \{4q_1 + 5q_2 + 3q_3 + q_4\}$  で、これを  $q'$  とおく。 $p_0, p_4$  はそれぞれ點 0, 4 での水蒸氣壓  $p$  の値であるが、これはほゞその點の飽和水蒸氣壓  $p_{s0}, p_{s4}$  に等しい。 $p_{s0}, p_{s4}$  は、點 0, 4 の溫度、即ち  $R_1, R_2$  の溫度から求められる。それで、 $p_0 - p_4 = p_{s0} - p_{s4} = \Delta p$  とすると

$$D = \frac{lq'}{4\tau\Delta p}$$

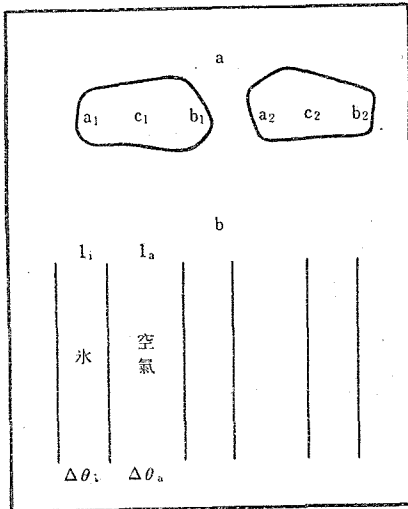
となり、これによつて  $D$  が求められる。 $\Delta p, q'$  (測定値の 30% 減の値) は第 1 表に示したやうな値となる。 $\tau = 1.06 \times 10^{-6} \text{ gr/cm}^3 \cdot \text{mmHg}$ 、 $l = 14 \text{ cm}$  として計算した  $D$  の値を最後の行に掲げた。

$0^\circ\text{C}$ 、 $1 \text{ atm}$  の空氣中の水蒸氣の擴散係數  $D_a$  は  $0.22 \text{ cm}^2/\text{sec}$  (Critical Table による) である。積雪のなかでは、氷の粒と粒との間を擴散して行くのであるから、ただの空氣中よりは擴散係數が小さくなるやうに考へられるのに、こゝに求めた積雪の  $D$  は  $D_a$  の 3~4 倍である。水蒸氣の一部が、測定装置の C と T との隙間を通つて擴散するけれども、それによつてこれを説明することはできない。又熱對流のためでもない。第 1 表の測定 4 は、 $R_1$  の方を  $R_2$  よりも冷たくして行つたものである。しかし、 $R_1$  の方を暖かくして行つたほかの測定との間に著しい差異は認められない。もし熱對流の影響が大きいとすれば、大きな差異が認められる筈である。

積雪の  $D$  が  $D_a$  より大きいことは次のやうにして説明される。積雪のなかの水蒸氣の擴散

は、温度の高いところでは氷の飽和水蒸気圧が高く、温度の低いところではそれが低いために起る。氷の熱伝導率  $\mu_i$  は  $0.0053 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$  で、空気熱伝導率  $\mu_a = 0.000055 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$  の 100 倍である。それ故、積雪のなかに温度勾配があるととしても、実際の温度勾配は氷の粒と粒との間の空気のなかにある。一つ、一つの氷の粒の温度はほとんど一様で、そのなかに温度勾配はない。第 6 圖 a は二つの氷の粒を表はすものとして、左の方から右の方へ温度が下つてゐるものとする。さうすると、左の氷の粒の右端  $b_1$  の温度は右の氷の粒の左端  $a_2$  の温度より高い。したがつて  $b_1$  の部分で水蒸気が蒸發し  $a_2$  に凝結する。すなはち  $b_1$  と  $a_2$  との間に水蒸気が擴散したわけである。そして、この擴散についての擴散係数は空気の擴散係数  $D_a$  である。しかし、巨視的に見れば、この擴散は、氷の粒の中心間の距離  $c_1 c_2$  に起つた擴散である。そしてこの巨視的に見た擴散が積雪内の擴散にほかならない。それ故、積雪の擴散係数  $D$  は  $D_a \times \frac{c_1 c_2}{b_1 a_2}$  となり、 $D_a$  に比べれば大きくなる。いはば、氷の粒は擴散係数の非常に大きい媒質と見なされる。それ故、氷の粒が空気中に分散してゐると全體としての擴散係数は大きくなる。

もつとも、このやうに氷の粒の間に水蒸気の蒸發、凝結が起ると、潜熱のために  $b_1$  と  $a_2$  との温度差が小さくなる。そして氷の粒のなかの温度勾配が大きくなる。しかし、この影響はあまり大きくはないであらう。簡單のために、厚さ  $l_i$  の氷の板が厚さ  $l_a$  の空気層をへだてて何枚も並べられてゐるとする(第 6 圖 b)。



第 6 圖

氷の板の両面の温度差を  $\Delta\theta_i$ 、空気層の両面の温度差を  $\Delta\theta_a$ 、蒸發潜熱を  $L$ 、 $\Delta\theta_a$  の温度差に對應する飽和水蒸気圧の差  $\Delta p_s$  を  $a\Delta\theta_a$  とすると

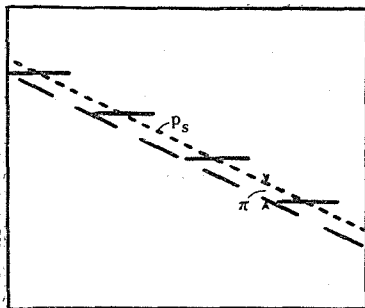
$$\mu_i \frac{\Delta\theta_i}{l_i} = \mu_a \frac{\Delta\theta_a}{l_a} + L\tau D_a \frac{\Delta p_s}{l_a} = (\mu_a + aL\tau D_a) \frac{\Delta\theta_a}{l_a}$$

なる關係がなりたつ。 $L=700 \text{ cal/gr}$ 、 $\tau D_a = 0.23 \times 10^{-6} \text{ gr/sec} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mmHg}$ 、 $a=0.3 \text{ mmHg}/^\circ\text{C}$  ( $-2 \sim -4^\circ\text{C}$ ) を代入すると

$$\frac{\Delta\theta_a}{l_a} : \frac{\Delta\theta_i}{l_i} = 50$$

となり、氷のなかの温度勾配は空気のなかの温度勾配の 50 分の 1 にすぎない。氷の板でなく、氷の粒の場合は、この比は 50 より小さくなるが、それでもなほかなりな値を持つてゐるであらう。

これまでの議論は、簡單のために、第 6 圖 a の  $b_1$  で蒸發する水蒸気は全部  $a_2$  に凝結するものとした。すなはち、巨視的に見れば蒸發も凝結も起らない  $p_s = p$  の場合である。第 7 圖の階段状の實線は微視的に見た  $p_s$  のグラフで、



第 7 圖

この水平直線の部分が氷の粒のあるところである。そして、点線は、互視的に見た  $p_s$  のグラフである。上の議論では、互視的に見た  $p$  のグラフがこの点線と一致すると考へたのであつた。しかし、互視的に見た  $p$  のグラフが破線で示すやうな位置をとれば、氷の粒の右端で蒸發した水蒸氣は、次の氷の粒の左端に凝結しない。そして全部氷の粒の間の空間に擴散し、互視的に見た蒸發がおこる。 $p$  のグラフが破線的位置ほどに下らなくても、点線より下に來れば、

蒸發した水蒸氣の一部はやはり氷の粒の間の空間に擴散して互視的蒸發がおこる。いまのばあひは、互視的蒸發が起つてゐるから、このばあひにあたる。しかし、次のやうにして、實際には、互視的に見た  $p$  と  $p_s$  とが非常に近いことが證明される。

点線と破線との距離  $\pi$  は、破線の勾配  $\frac{dp_s}{dx}$  に氷の粒の長さの半分をかけたものである。第 1 表によつて  $\frac{dp_s}{dx}$  を求め、氷の粒の長さを 1mm として  $\pi$  を求めると、だいたい 0.005mm Hg となる。また 1cm<sup>3</sup> の雪から 1sec に蒸發する水蒸氣量はほぼ  $0.2 \times 10^{-7}$  gr/sec·cm<sup>3</sup> ( $q_1, q_2, \dots$  を籠  $C_1, C_2, \dots$  の高さ 3.5cm で割つたもの) である。この  $\pi$  の値 0.005 mmHg が  $p_s - p$  に等しいと考へると、

$$\alpha \times 0.005 = 0.2 \times 10^{-7}$$

によつて凝結係數  $\alpha$  (第 II 章 (C) 参照) が求められる。この値を  $\alpha'$  とすると  $\alpha' = 2 \times 10^{-6}$  gr/sec·cm<sup>3</sup>·mmHg となる。ところが、半径 0.5mm の球の形をした氷の粒が集つてできた密度 0.3 の積雪を想像して、 $\alpha$  を計算すると  $\alpha'' = 110 \times 10^{-6}$  gr/sec·cm<sup>3</sup>·mmHg となる。實際の積雪では氷の粒は球ではなく、表面積が球の場合より遙かに大きいから、凝結係數はこの  $\alpha''$  よりもなほ大きくなるであらう。したがつて、 $\pi = p_s - p$  と假定して求めた  $\alpha$  の値  $\alpha'$  は實際の積雪の値より著しく小さいことになる。したがつて  $p_s - p \ll \pi$  でなければならない。氷の粒の長さは普通 1mm より小さいが、粒が小さくなればなるほど  $\alpha'$  と  $\alpha''$  との差は大きくなり、ますます  $p_s - p$  は  $\pi$  に比べて小さくならなければならない。

かくして、實際には第 7 圖の点線と破線とは非常に接近してゐて、この二つが一致してゐると考へてもよいくらゐである。したがつて互視的蒸發がある場合に對しても、積雪の擴散係數  $D$  が空氣の擴散係數  $D_a$  よりも大きいことに對するさきの説明はそのまゝなりたつ。

なほ、第 1 表の  $q$  に、氷の蒸發潜熱 700 cal/gr をかけると、水蒸氣が雪から板 P (第 5 圖) に運んだ熱量になる。一方、上下の函  $R_1, R_2$  の溫度差を筒 T の長さ 14cm で割つて雪のなかの溫度勾配を求め、それに雪の熱傳導率  $4 \times 10^{-4}$  cal/sec·cm·°C をかけると、傳導によ

つて運ばれる熱量が得られる。そして、この二つの熱量の値は同じ程度の大きさである。すなわち、第 I 章で述べたことが、この場合についてもいられる。

### 摘 要

冬、積雪の温度は地面に近い下の方で高く、表面に近づくにつれて次第に低くなる。したがって、積雪内の水蒸気圧は下の方で高く、上の方で低い。よつて、水蒸気が下から上に向つて擴散し、その結果下の方では雪が昇華蒸發し、上の方では水蒸気が雪に凝結する。眞鍮の細かい網で籠を作り、それに雪をつめて積雪のなか、地面から 10 cm, 90 cm, 120 cm のところに埋め、毎日掘り出して天秤で目方を秤つた。もし、目方が減つてゐれば、籠を埋めておいた附近の雪は蒸發したわけで、又目方が増してゐればその附近の雪に水蒸気が凝結したわけである。觀測の結果、地面から 10 cm のところの雪は、2 月下旬から 3 月中旬にかけて  $6.7 \times 10^{-10}$  gr/sec $\cdot$ cm $^3$  の割合でほゞ一様に蒸發したことがわかつた。地面から 90 cm, 120 cm のところの雪には、この値のほゞ  $1/3$  の水蒸気が凝結した。水蒸気は蒸發するときには潜熱を奪ひ、凝結するときにはそれだけの熱を與へるから、上のやうな水蒸気の移動によつて、下から上に向つて熱が運ばれることになる。この熱量を計算すると  $2 \times 10^{-5}$  cal/sec $\cdot$ cm $^2$  となり、雪の熱傳導率から計算される傳導によつて運ばれる熱量とほゞひとしい。

雪のなかの水蒸気の擴散係数を測るために實驗を行つた。ブリキ板で直徑 5.5 cm, 高さ 3.5 cm の圓い筒を作り、底に金網をはつて雪を入れる。このやうな筒を四ヶ積重ね、上面を  $-1^\circ$  C, 下面を  $-6^\circ$  C ぐらゐに長時間保つておいた。筒のなかの雪は蒸發し、水蒸気は下の方へ擴散して  $-6^\circ$  C の面に霜となつて凝結した。各の筒の重量の減り高から蒸發量がわかり、それをもとにして雪のなかの水蒸気の擴散係数を求めた。空氣のなかでは擴散係数は 0.22 cm $^2$ /sec であるが、雪のなかではその 3~4 倍になる。その理由を、積雪のなかの隣りあつた粒子の間で、互に向かひ合つた一方の面で蒸發がおこり、その水蒸気が他方の面にすぐ凝結するためと解釋した。

觀測、測定に際しては岩井裕君、高田明君に手傳つてもらつた。厚く感謝する。なほ、この仕事は文部省科學研究費及び學術振興會の援助金によつて行つたものである。

Zyungo YOSIDA and Daisuke KUROIWA : Sublimation in the Interior of snow Layer.

Résumé

Four cages, which were made of wire gauze and contained a mass of snow in each of them, were buried in the interior of snow layer (thickness: 1.8 m.) at various heights from the ground surface. The weights of cages were measured every day. Increase or decrease of weight means respectively condensation of water vapour onto or evaporation of it from the snow by sublimation. Water vapour evaporated in the neighbourhood of the ground surface and condensed on the snow in the upper part of the snow layer. By such a sublimation heat was conveyed from the lower part of the snow layer to the upper part. The quantity of heat thus conveyed was calculated and it was found to be as large as the quantity of heat conveyed by thermal conduction.

The diffusion of water vapour through a mass of snow was determined by experimental measurements. The bottom of a small can (diameter: 5.5 cm., height: 3.5 cm.) was taken off and a wire gauze was stretched in its place. Four of such cans were piled up and the upper and lower ends of the pile were maintained at the temperatures  $-1^{\circ}\text{C}$  and  $-6^{\circ}\text{C}$  respectively for several hours. Water vapour evaporated from the snow put in the cans and diffused downwards. Diffusion coefficient of the water vapour was calculated from the amount of decrease in the weight of snow in each can and was found to be 3-4 times greater than that through free air. It was supposed that evaporation and condensation of water vapour occurring at the opposite surfaces of pairs of neighbouring ice grains in the snow caused this increase of diffusion coefficient.