



Title	積雪内部での融雪水の流下速度の測定 (I)
Author(s)	藤野, 和夫; FUJINO, Kazuo
Citation	低温科学. 物理篇, 26, 87-100
Issue Date	1969-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18080
Type	departmental bulletin paper
File Information	26_p87-100.pdf



積雪内部での融雪水の流下速度の測定 (I)*

藤野和夫

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和43年9月受理)

I. ま え が き

積雪の表面付近で、日射などによって融解が起こると、生じた融雪水は積雪内部へと滲透流下して行く。この様な積雪の融解過程、及び融雪水の滲透流下の現象については、吉田¹⁾、若浜²⁾などの理論的、及び実験的考察に関する論文があるが、未だ数少なく未知の点が多い。しかし、最近、融雪に関する研究が活発になり、これ等の現象は次第に解明されつつある。

融雪水の流下現象を論ずる際に、極めて重要な融雪水の流下速度の測定について、従来色々の方法が試みられている。筆者は融雪水の積雪内部での流下速度を知るために、次の様な方法を試みた。先ず、電解質を融雪水に含ませて、電気抵抗の極めて小さな水塊を作り、予め積雪内部に埋設した電極によって、その水塊が、電極付近を流下する際の、極間抵抗の時間的变化を測定する。得られた測定点での抵抗値と時間との関係から、水塊の積雪内部での流下速度を求めた。

今回の測定は試験的な測定ではあったが、測定結果から、積雪内部での融雪水の流下は拡散を伴った流下現象であり、したがって、従来測定された流下速度は、水塊の先端速度であって、水塊の移動速度とは異なることが明らかになった。

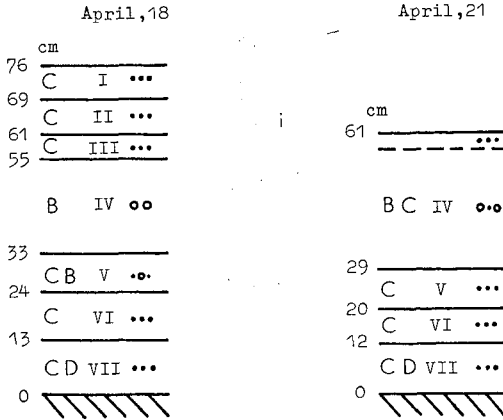
II. 実験の方法

測定は昭和43年4月18日から21日迄の間、北海道雨竜郡、幌加内村にある、北海道大学演習林、母子里看守所の構内に於いて行なった。

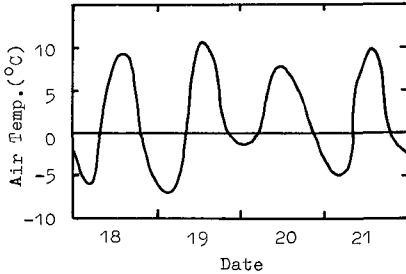
実験地付近は、厚さ約60cmの平坦な積雪に覆われた、畑地である。

測定期間中の積雪の構造、及び気温の変化を第1-A、-B図に示した。第1図から明らかな様に、当時日中気温はプラスであったので、融解は積雪の全層にわたって起こっていた。しかし、夜間は気温が低下して、マイナスの温度になるため、及び輻射冷却によって、積雪内部に滲透した融雪水が再凍結し、積雪内部の表面付近にクラスト層や氷板が形成されていた。又積雪内部の各層の密度、粒度、含水率なども、時間、日によってかなりの変化が見られた。今回は、その様な層構造をもっている積雪の中から、解析の便宜のために、クラスト層や、氷板を含まない。ほぼ様な構造をもつ層を選び、その層について測定を行なった。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第930号



第1-A図 観測期間中の積雪の深さ及び層の構造



第1-B図 観測期間中の気温の変化

測定の方法は次の通りである。まず、測定する層の上層を取り除き、新たな表面を作る。その表面に、試薬用 NaCl, 約 3g を, 10 cm² 前後の区域に一樣に, しかも一時に撒布する。同時に時計を始動して, 時間の測定を開始する。表面より下方の積雪層の内部には, 深さの方向に, 所定の間隔に, いく対かの電極が予め埋設されている。時間にしたがって, この電極間の電気抵抗の値の変化を, 刻々測定し, 各電極間の抵抗と時間との関係を求める。

表面に撒布された塩は, 表面付近の融雪水にとけこんで, 本来の融雪水よりも桁異いに低い電気抵抗をもつ水塊を作り, 積雪層の内部へと滲透, 流下して行く。この場合, 塩分を含んだ水塊と, 本来の融雪水との間の相対運動は無視出来, そして又, 塩分を含んだ融雪水が積雪本来の構造を害わないと仮定する。とすると, 所定の深さにある各検出点で電気抵抗が最小値を示す

時刻から, 滲透流下して来た塩分を含む水塊の平均移動時間を求めることが出来る。

積雪層内部に埋設した電極は, 長さ 9 cm の鉄釘を 2 cm 間隔で平行に 2 本並べ, それを木板に垂直に固定したものである。この様な一對の棒状電極を, 測定する積雪層の中に, 表面と平行に埋めこみ, 更に深さの方向に 5~7 cm の間隔で同様の電極をいく対か埋めこんである。

この様な平行棒状電極の極間電気抵抗の測定には, 今回は通常のテスターを検出器として使用した。融けつつある積雪は, 氷と水と空気からなる混合誘電体である。一般に誘電体に直流を印加した場合には, 分極の影響で抵抗値は時間と共に増加する。この様な場合には, 電圧印加後 60 秒目の測定値をもって, 抵抗値とすると云うとりきめがある。(この値を 1 分値と云う。) この 60 秒と云う時間については, 理論的な根拠は全くなく, 単なる便宜的なものであり, 電気材料の規格などに広く採用されている実用的なものである。それゆえ, 今回の測定では, この様な 1 分値を用いず, 測定の便宜上, 電圧印加後 10 秒目の値をもって電極間抵抗の測定値とした。

積雪の電気抵抗は, 積雪の構造や, 含水率などによって著しく異なる。今回の測定で使用した様な電極系では, 電極間に現われる抵抗値は, 積雪粒子間に存在する電解質溶液の濃度によって変化することは間違いない。したがって, 測定された抵抗値は, 積雪の実抵抗としての

意味ではなく、電極間に存在する電解質溶液の相対的な濃度を表わすと見て良いであろう。

III. 実験の結果及びそれに対する考察

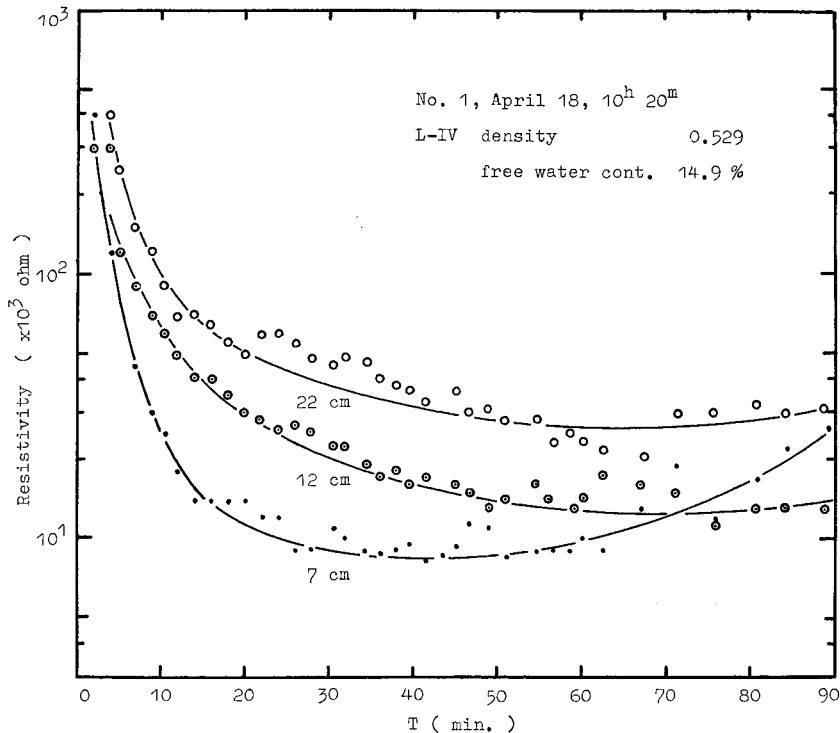
II. に述べた方法によって観測期間中に 12 例の測定を行なった。測定された極間抵抗と時間との関係を表わす代表的な例を第 2, 3, 4 図に示した。

これ等の図から明らかな様に、いずれの測定例においても、各検出点で測定された抵抗値は時間と共に急速に減少し、ある時間で最小値を示し、その後次第に、ゆるやかに増加する。又検出点が表面から下方へ離れるにしたがって、抵抗の最小値は増加し、同時に最小値を示す時間が明確さを欠いて行く傾向が認められる。

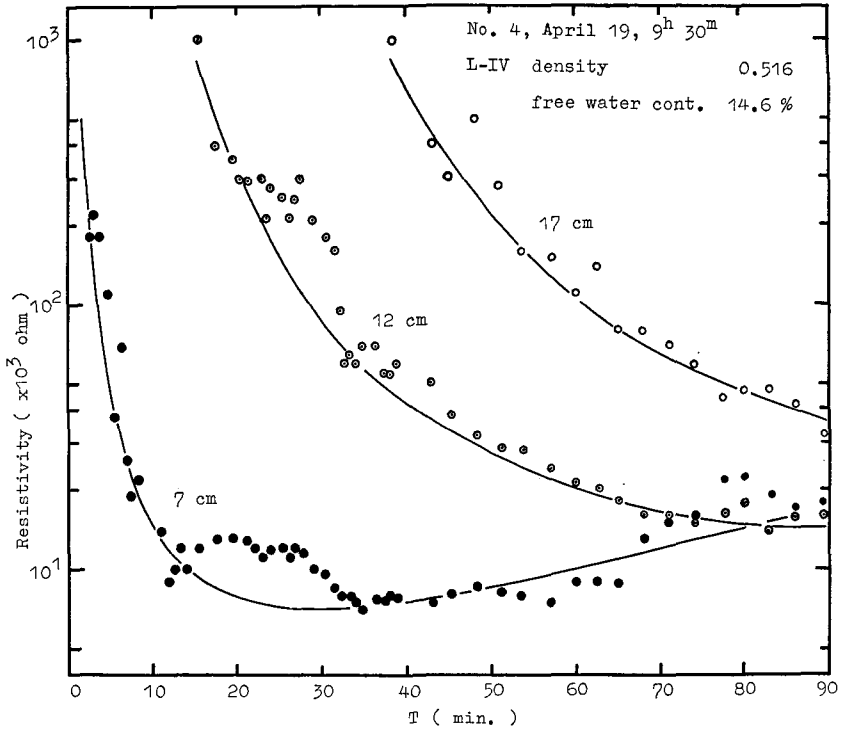
このことは塩分を含んだ、低抵抗の水塊が積雪内部を流下しながら、本来積雪内部を流下している塩分を含まない高抵抗の融雪水の中へ拡散して行くことを示している。

この様な拡散を伴う水塊の移動について考えて見る。測定によって得られた極間抵抗と時間との関係を表わす曲線は、極間抵抗が塩分濃度と linear な関係にあることから、塩分濃度と時間との関係を表わす曲線に書き直すことが出来る。

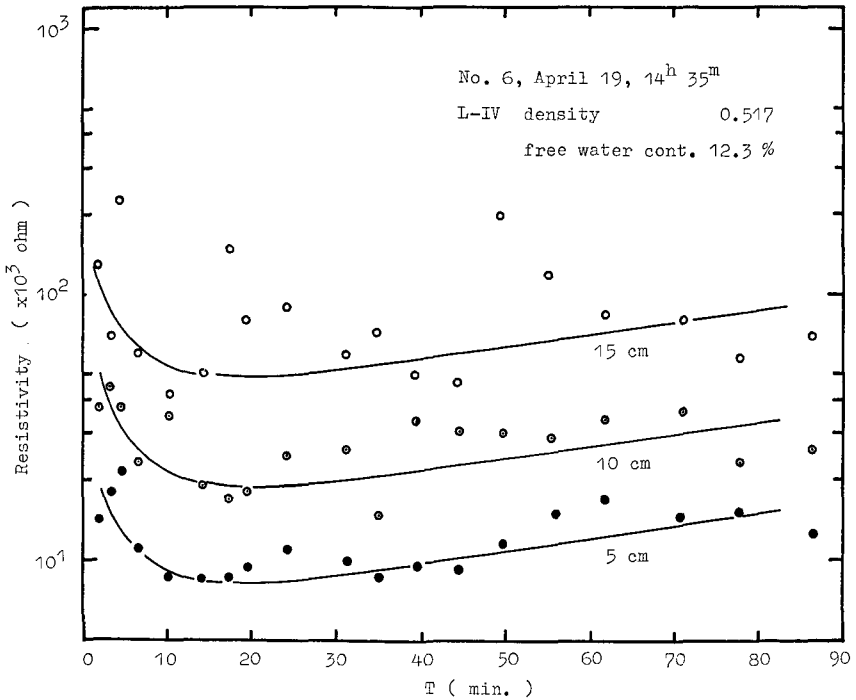
今、撒布された塩の量を S 、融雪水の流量を Q 、表面から電極迄の塩分を含んだ水塊の到達時間を t_0 、塩分濃度を C とすれば、これ等の間には次の様な関係がある。



第 2 図 測定によって得られた種々の深さに於ける極間抵抗と時間との関係



第3図 測定によって得られた種々の深さに於ける極間抵抗と時間との関係



第4図 測定によって得られた種々の深さに於ける極間抵抗と時間との関係

$$S = \int_0^{\infty} C \cdot Q \cdot dt \quad (1)$$

(1) 式の各量を無次元化すると

$$\int_0^{\infty} C / \frac{S}{Qt_0} d\left(\frac{t}{t_0}\right) = 1 \quad (2)$$

となる。(2) 式の様各量を無次元化して、縦軸に濃度の無次元量 $C / \frac{S}{Qt_0}$ ，横軸に時間の無次元量 t/t_0 をとれば，異なる塩分や，異なる深さの検出点での測定曲線の比較は容易となる。しかしながら塩分を含む水塊の検出点迄の平均到達時間 t_0 をどの様にして決めるかが問題となる。次にこれについての考察を進める。

理想的な状態として融雪水が定常流で積雪内部を一様に流下しているとする。その平均流下速度を U ，流下方向の塩分の拡散係数を A と云う一定値とする。表面から深さの方向に x 軸をとり，横方向には拡散はしないとすれば，塩分濃度の流下拡散について次の式が得られる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = A \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

$C / \frac{S}{Qt_0}$ と t/t_0 との関係を求めるために，(3) 式を次の様に無次元化する。

$$\frac{\partial \left(C / \frac{S}{Qt_0} \right)}{\partial (t/t_0)} + \frac{\partial \left(C / \frac{S}{Qt_0} \right)}{\partial (x/Ut_0)} = \frac{A}{Ux_0} \frac{\partial^2 \left(C / \frac{S}{Qt_0} \right)}{\partial (x/Ut_0)^2} \quad (4)$$

但し $x_0 = Ut_0$ である。

(4) 式で $C / \frac{S}{Qt_0} = C^*$ ， $t/t_0 = \tau$ ， $x/Ut_0 - t/t_0 = \xi$ ， $A/Ux_0 = \kappa$ と置き換えると

$$C^*(x, t) = C^*(\xi, \tau)$$

となるから，(4) 式は

$$\frac{\partial C^*}{\partial \tau} = \kappa \frac{\partial^2 C^*}{\partial \xi^2} \quad (5)$$

となる。

この(5)式は熱伝導や拡散の方程式として良く知られた式であるから適当な境界及び初期条件を入れて解を求めることが出来る。

次に(5)式を解くための境界条件及び初期条件について考える。積雪表面に撒布された塩は，その付近の融雪水にとけこんで，濃い塩分を含んだ低抵抗の水塊を作り，その水塊が積雪内部へ浸透流下して行く。この場合，次の2通りの融解過程が考えられ，それぞれ(5)式を解くための初期及び境界条件が異なる。したがって求められる濃度と時間との関係が異なってくる。

i) 撒布された塩が全てその場所で，ほとんど瞬間的に融雪水にとけこんで，ある塩分濃度の水塊を作って流下して行く場合。すなわち表面に与えられる濃度が矩形波の場合には初期及び境界条件は

$$\tau=0 \quad \left. \begin{array}{l} |\xi| > l/x_0 \quad (l > 0) \quad \text{で} \quad C^*(\xi, \tau) = 0 \\ |\xi| \leq l/x_0 \quad \text{で} \quad C^*(\xi, \tau) = C_0^* \end{array} \right\} \quad (6)$$

で与えられる。

ii) 撒布された塩の一部が融雪水にとけこんで流下し、残りの塩分は表面に止って、周囲の融雪水と相的平衡を保ちながらとけこんで行く。その平衡時間は測定時間と比較して充分に長く、したがって測定時間中、常に連続的に一定濃度の水塊を流下させる場合。すなわち初めに表面に与えられる濃度が Step 状の波である場合には、初期及び境界条件は

$$\tau=0 \quad \left. \begin{array}{l} \xi > 0 \quad \text{で} \quad C^*(\xi, \tau) = 0 \\ \xi \leq 0 \quad \text{で} \quad C^*(\xi, \tau) = C_0^* \end{array} \right\} \quad (7)$$

で与えられる。

それぞれの初期及び境界条件を入れて(5)式を解く。

i) の条件の場合には

$$\frac{\partial C^*}{\partial \tau} = \kappa \frac{\partial^2 C^*}{\partial \xi^2}$$

の解は

$$C^* = \int_0^\infty du \int_{-\infty}^\infty F(\lambda) e^{-u^2 \kappa^2 \tau} \cos[u(\xi - \lambda)] d\lambda \quad (8)$$

で与えられ、 $C^*_{(\tau=0)} = f(\xi)$ として Fourier 積分を用いると

$$\begin{aligned} C^* &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty du \int_{-\infty}^\infty f(\lambda) e^{-u^2 \kappa^2 \tau} \cos[u(\xi - \lambda)] d\lambda \\ &= \frac{1}{2\kappa\sqrt{\pi\tau}} \int_{-\infty}^\infty f(\lambda) e^{-\frac{(\xi-\lambda)^2}{4\kappa^2\tau}} d\lambda \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

ここで

$$\left. \begin{array}{l} f(\xi) = C_0^* \quad |\xi| \leq l/x_0 \\ f(\xi) = 0 \quad |\xi| > l/x_0 \end{array} \right\}$$

であるから

$$C^* = \frac{2 \cdot l/x_0 \cdot C_0^*}{2\kappa\sqrt{\pi\tau}} e^{-\frac{\xi^2}{4\kappa^2\tau}} \quad (10)$$

となる。

$Q = U \cdot P$, $x_0 = Ut_0$ (但し P は水塊の断面積) であるから、 $C_0^* = \frac{S}{2} \cdot l \cdot P / \frac{S}{Qt_0}$ とすれば

$$C^* = \frac{1}{2\kappa\sqrt{\pi\tau}} e^{-\frac{\xi^2}{4\kappa^2\tau}} \quad (10')$$

となる。

ある深さの検出点について C^* を考えると, $x=x_0$ であるから, $\xi=x_0/Ut_0-t/t_0=1-\tau$ となり, したがって

$$C^* = \frac{1}{2\kappa\sqrt{\pi\tau}} e^{-\frac{(1-\tau)^2}{4\kappa^2\tau}} \quad (11)$$

となる。

この(11)式が測定される濃度と時間の関係を表わす式である。

ii) の場合には, i) の場合と同様に, 解は

$$C^* = \frac{1}{2\kappa\sqrt{\pi\tau}} \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) e^{-\frac{(\xi-\lambda)^2}{4\kappa^2\tau}} d\lambda \quad (9)$$

で与えられる。

これに初期及び境界条件を入れる。

$$\left. \begin{array}{l} \tau=0, \quad \xi > 0 \text{ で } C^* = 0 \\ \xi \leq 0 \text{ で } C^* = C_0^* \end{array} \right\}$$

であるから, (9) 式は

$$C^* = \frac{C_0^*}{2\kappa\sqrt{\pi\tau}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{(\xi-\lambda)^2}{4\kappa^2\tau}} d\lambda \quad (12)$$

となる。

ここで $\eta = -\frac{\xi-\lambda}{2\kappa\sqrt{\tau}}$ とおきかえると $\lambda = -\infty$ で $\eta = \infty$, $\lambda = 0$ で $\eta = \frac{-\xi}{2\kappa\sqrt{\tau}}$ であり, η の代りに $-\eta$ とすれば, (12) 式は

$$C^* = \frac{C_0^*}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{\xi}{2\kappa\sqrt{\tau}}}^0 e^{-\eta^2} d\eta = \frac{C_0^*}{\sqrt{\pi}} \left(\int_0^{\infty} e^{-\eta^2} d\eta - \int_0^{\frac{\xi}{2\kappa\sqrt{\tau}}} e^{-\eta^2} d\eta \right) \quad (13)$$

となる。

ここで $\int_0^{\infty} e^{-\eta^2} d\eta = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$, $\int_0^x e^{-\eta^2} d\eta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erf}(x)$ であるから, (13) 式は

$$C^* = \frac{C_0^*}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\xi}{2\kappa\sqrt{\tau}} \right) \right\} \quad (13')$$

となる。

したがって, i) の場合と同様に, ある深さの検出点について考えると

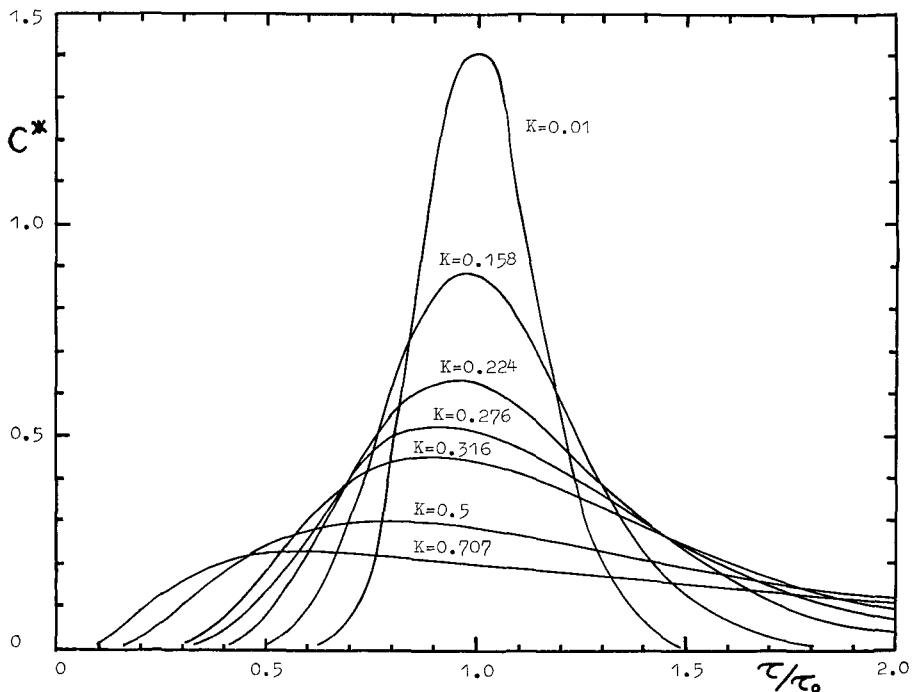
$$C^* = \frac{C_0^*}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{1-\tau}{2\kappa\sqrt{\tau}} \right) \right\} \quad (14)$$

となり, これが濃度と時間の関係を表わす式となる。

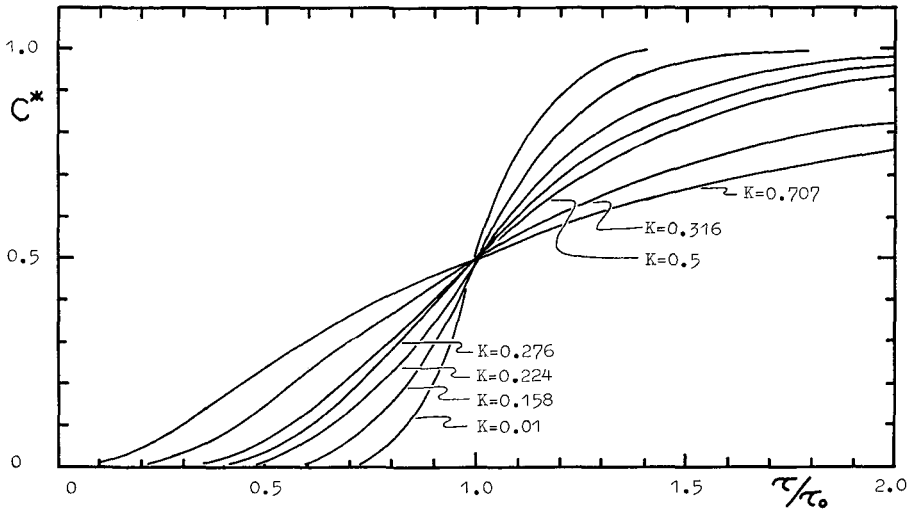
求められた(11)及び(14)式は τ と κ の関数である。ここで κ について考えてみよう。 κ は水塊の流下速度 U と, 塩分を含んだ水塊が雪粒表面を覆って流下している薄膜状の塩分を含まない水と拡散していく時の拡散係数 A と, 検出点の座標 x_0 の関数である。この拡散係数については, その機構及び数値などは現在のところ不明であり, 今後更にこの問題について研

究を進めなければならない。今回の測定では仮りに A は一定の常数としておこう。そうすると κ は流下速度 U と検出点の座標 x_0 の関数である。したがって種々の κ の値について、(11)式及び(14)式から濃度の無次元量 C^* と時間の無次元量 τ との関係を示す曲線群を画くことが出来る。これ等の曲線群は、ある深さの1つの検出点で観測される種々の流下速度に対する濃度と時間の関係を表わす曲線群と見ることが出来る。同時に又、一定の流下速度で流下する水塊の、表面から種々の深さの検出点における濃度と時間との関係を表わす曲線群と見することも出来る。したがって計算によって求めた曲線群と、実測によって得られた濃度と時間の関係を表わす曲線群とを比較して、水塊の平均到達時間 t_0 が分かれば、検出点の深さ x_0 から水塊の積雪内流下速度 U を求めることが出来る。又流下速度 U が分かれば、塩分の拡散係数 A の値も知ることが出来る訳である。第5図に i) の条件で求めた(11)式の、又第6図に ii) の条件で求めた(14)式の種々の κ の値に対する C^* と τ の関係を表わす曲線群を示した。

測定を行なった積雪層の含水率は測定開始時には約 15% であった。したがって表面層 1 cm^3 あたり約 0.08 ml の融雪水が含まれていたことになる。塩を約 10 cm^2 の区域に撒布したが、この区域内には融雪水は高々 1 ml しかない。 0°C に於ける NaCl の飽和濃度は 35.7% であるから、約 3 g の NaCl を完全に融かすためには約 10 ml の融雪水が必要である。したがって撒布された塩は、その一部が融雪水にとけこんで高濃度の水塊を作り滲透流下する。残りの大部分の塩は表面に止まって周囲の融雪水と相的平衡を保ち連続的に高塩分の水塊を作り、そ

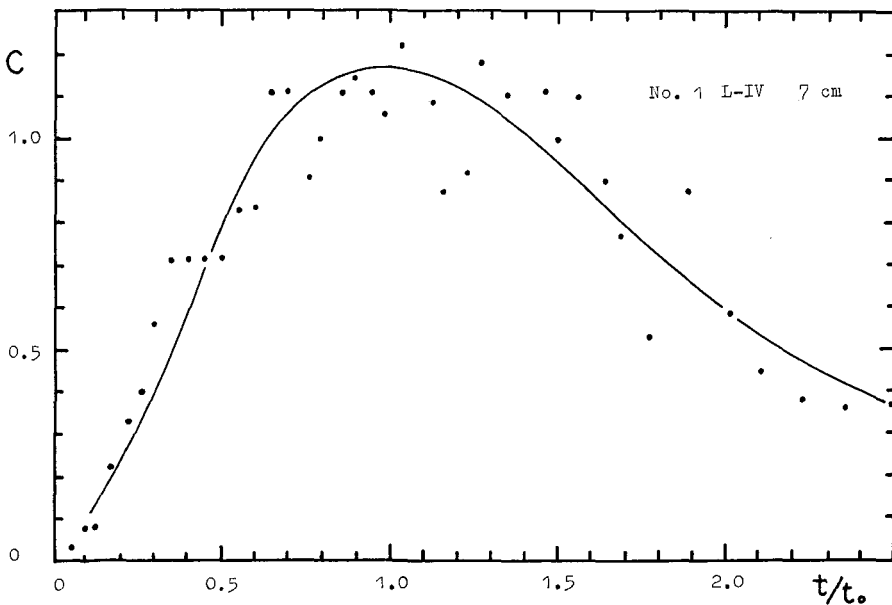


第5図 種々の κ の値に対して得られた C^* と τ/τ_0 との関係
(最初に与えられる波形が矩形波である場合)

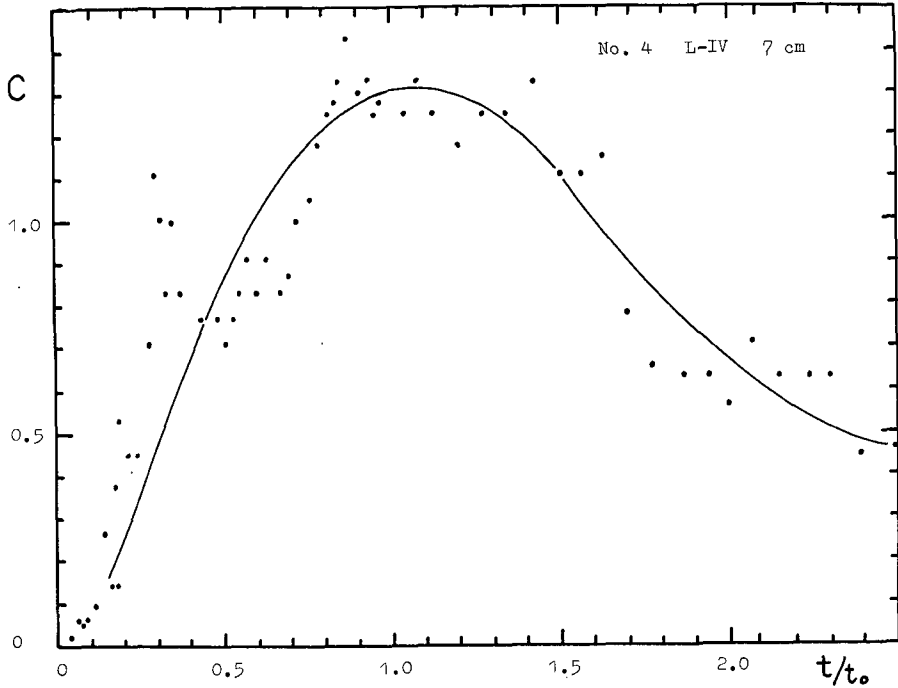


第6図 種々の K の値に対して得られた C^* と τ/τ_0 の関係
(最初に与えられる波形が階段状の波形の場合)

れが滲下すると考えられる。すなわち, ii) で与えた条件に近いと考えられた。しかしながら実測で得られた各測点での抵抗と時間の関係曲線を濃度と時間の関係に変換した曲線は第7, 8図のようになる。これ等の図から明らかな様に表面に近い測点で得られた濃度と時間との関係曲線は、いずれも凸型の曲線となり、明瞭な濃度の極大値が見られる。表面から下方へ離れるにつれて、得られる測定曲線は凸部が幅広くなると共に極大値は減少して、極大値を示す時刻は次第に明確さを欠いている。この様な曲線の型から判断して、実際の表面に於ける塩の融解流下



第7図 実測曲線から換算した C と t/t_0 の関係



第8図 実測曲線から換算した C と τ/τ_0 との関係

の過程は最初考えた様な条件 ii) の場合ではなく、i) の条件に近いことが分かった。すなわち、撒布された塩は表面で全て瞬間的に融けて高濃度の水塊を作って、それが積雪内部を滲透流下して行く場合に近いことが分かった。

第5図の、条件 i) で得た計算曲線から明らかな様に、 κ の値の増加と共に濃度の極大値は次第に t_0 よりも小さい t に対して存在する様になる。すなわち塩分濃度の極大値を与える時刻より水塊の平均到達時刻が遅れて来る様になる。(11) 式から求めた C^* が極大となる τ は

$$\tau(C_{\max}^*) = \sqrt{\kappa^4 + 1} - \kappa^2 \tag{15}$$

となり、 C^* の極大値 C_{\max}^* は

$$C_{\max}^* = \frac{2}{2\kappa\sqrt{\pi}(\sqrt{\kappa^4 + 1} - \kappa^2)} e^{-\frac{\sqrt{\kappa^4 + 1} - 1}{2\kappa^2}} \tag{16}$$

となる。(15) 式から明らかな様に

$$\sqrt{\kappa^4 + 1} - \kappa^2 \leq 1$$

であるから C^* の極大値は t_0 よりも小さい t に対して存在する。したがって κ の値が十分に小さく、 $\tau(C_{\max}^*) \cong 1$ の場合には水塊の平均流下速度は C^* の極大値を与える時刻 t_0 と検出点の座標 x_0 から $U = x_0/t_0$ として求めることが出来る。しかしながら κ の値の増加と共に C^* の極大値を与える時刻 t は t_0 よりも小さくなって行くから、濃度の極大値を与える時刻 t から直

接、水塊の平均流下速度を求めることは出来なくなる。したがって水塊の平均到達時間 t_0 を求めるためには、実測された濃度と時間との関係曲線を、計算された曲線と比較して κ の値を推算し濃度の極大値を与える時刻 t に補正を加えて t_0 を求めなければならない。

第7, 8図に実測値から変換した濃度と時間との関係曲線を示した。(これ等の図で横軸は比較の便宜のため無次元化してある。縦軸は融解した塩分量 S の値が正確につかめなかったので無次元化してはいない。) これ等の曲線を第5図の計算曲線と比較して見ると、実測曲線の後半部分はいずれも $\kappa=0.2\sim 0.3$ の計算曲線とかなり良く一致しているが、実測曲線の立ち上り部分はいずれも計算曲線より20%近く前えづれている。このずれは実際の融雪水の流下が計算の際に仮定した様な簡単な条件とは異なるものであるために起こったのか、又は全く別の機構による流下があるために起こったのかは明らかではない。今、仮りにこれ等の実測曲線が計算曲線に一致するとして考える。計算曲線群の中で $\kappa=0.276$ の曲線が実測曲線と比較的一致しているが、この曲線では濃度の極大値を示す時刻 t は水塊の平均到達時間を示す t_0 よりも約10%前に現われている。すなわち濃度の極大を示す時刻より10%位後に遅れて水塊の平均到達時間が来る。したがって水塊の平均流下速度を求める際には極大値を示す時刻に10%の補正をしなければならない。第7図の測定 No.1 の場合には、表面下7cmの測点で濃度の極大値は塩の撒布後、約40分付近に現われている。しかし水塊の平均到達時間はそれよりやや遅れていると考えなければならない。

測点の深さが増加すると濃度の極大値を示す時刻と水塊の平均到達時間との間の遅れは更に増加し、第5図から明らかな様に50%近くのずれが生じ、したがって補正も無視出来なくなってくる。

以上の様な考察にもとづいて、各測定例の内から濃度の極大値が顕著に認められるものについて、実測曲線と計算曲線とを比較して κ の値を推算して、水塊の平均到達時間を求めた。その値から水塊の積雪内流下速度を求めると平均して $2\sim 5\times 10^{-3}$ cm/sec の値となる。

吉田・若浜は融雪水の積雪内部での流下機構を2つに分け、含水量の多い場合には水路流下が、又含水量の少ない場合には皮膜流下機構が流下現象を支配していると述べている。今回の測定の場合には含水率は高々15%程度であるので、その流下機構は皮膜流下機構であろうと考えられる。

吉田は融雪水が皮膜流下をしている際の流下速度 \bar{u} を次の式で表わした。

$$\bar{u} = \rho_w \cdot g \cdot \delta^2 / 3\eta \quad (17)$$

ここで δ は皮膜水の厚さ、 η は皮膜水の粘性係数である。皮膜水の厚さ δ と含水量 w との間には、 $\delta = W/S$ の関係がある (S は表面積)。今含水率 $w=15\%$ 、密度 $\rho_w=0.5$ とすれば $W=\rho_w \cdot w=0.075$ 、 S は $30\sim 110$ cm²/cm³ として、皮膜水の厚さ δ は高々 10μ 程度となる。したがって皮膜流下速度 \bar{u} は (17) 式から

$$\bar{u} = 1 \times 980 \times (10 \times 10^{-4})^2 / 3 \times 0.018 \approx 2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$$

となる。この値は氷の円柱の表面を流下する際の速度であるが、吉田も述べている様に実際の

積雪では円柱と異なり、屈曲度が大きいからこの値よりは小さな値となると推測されている。したがって今回の測定で得られた、 $2\sim 5\times 10^{-3}$ cm/sec の値は含水率が15%程度の積雪層での融雪水の皮膜流下速度を表わしていると考えて良いだろう。

従来、若浜などによって行なわれた着色水をマーカーとして融雪水の流下状態を知る方法は、同一の積雪について、同一の場所での時間的な変化を調べるのが困難であった。更に又着色された融雪水が流下しながら本来の融雪水に拡散して行く様子を量的に知ることが出来なかった。そのために着色された水塊の先端速度のみしか知ることが出来なかった。しかし我々が用いた方法はそれ等の点については一応の解決を与えた訳である。

今回の測定では融解した塩量 S の値を明確に知ることが出来なかったので、実測曲線の濃度を規格化することが出来なかった。そのために計算曲線と実測曲線との形の比較から求めた κ の値の精度に疑点があった。第7, 8図から明らかな様に実測曲線は複雑な変化を示し、測定値はかなりばらついている。したがって、この様な実測曲線の形から κ を推算するのは、かなりの手数を要し又、精度も良くないであろう。今後の測定では実測曲線の形ではなく、極大値から(16)式を用いて κ を算出した方が簡便且つ正確であろう。そのためには、電極係数の確定の問題や塩の撒布の方法など改良しなければならない点が多く見受けられる。

実測曲線の立ち上り部分に見られる、計算曲線とのずれについては、現在の所では明確ではない。塩を表面に撒布したために、融雪が促進されて、一時的に融雪水量が増加し、部分的に水路流下に類似した現象が起こったために流下速度が増加したとも考えられる。したがって実測曲線はそれ等別々の機構の重畳したものであると見ることが出来る。又、今回の計算の最初の仮定で融雪水と塩分を含んだ水塊の間には相対的な運動は無視出来るとしたが、一時的な流量の増加がある時には、洪水波の場合の様な本来の定常流と水塊との相対運動も考慮しなければならないであろう³⁾。実測曲線はその様な複雑な幾つかの現象の合成されたものではあるが、第1近似としては今回の仮定で充分であろう。

実測曲線にみられる測定値のばらつきについては電極の問題、検出器の精度の問題などが含まれているためと考えられる。しかしその様な技術的な問題ばかりではなく、積雪の構造が関係していると考えられる。既に述べた様に測定された抵抗値は積雪の実抵抗としての意味ではなく、電極間に存在する電解質溶液の相対的な濃度変化を表わしている。融雪水が積雪内部を滲透流下する場合に、融雪水は積雪粒の表面を覆って連続的に流下する。しかし雪粒表面は複雑に屈曲しているから、表面張力による保持力が各個所で異なる。したがって流下して来た融雪水が雪粒同志の接合部分の様な保持力の高い部分に一時停滞したり、又その部分の力学的平衡が破れて急速に流下したりする現象が起こる。すなわち皮膜流下と水路流下が混在することになる。この様な現象が電極付近で起こると当然電場の変化を生じ、したがって極間抵抗にも変化が現われて来ると予想される。実測された測定値のばらつきは、その様な変化の集積の結果と考えて良いであろう。その様に考えると測定値のばらつきには何らかの規則性があり、その規則性が積雪の構造を表わす一つの目安を与えていると云うことになる。この点についても今後残された問題として研究を進めなければならない。

IV. ま と め

今回の測定は電解質溶液をマーカーとして、それを含む水塊の移動速度を知る方法が積雪内部の融雪水の様な系に対して適用出来るか否かを知るための試験的なものであった。そのために装置や方法などに不備な点や改良しなければならない点が少なくなかった。しかしながら、この様な方法で従来測定困難であった融雪水の積雪内部での流下状態を知ることが可能であることが分った。

今回の測定結果をまとめると次の様になる。

- 1) 電解質をマーカーとして水塊に含ませ、その水塊の積雪内部での流下速度を電気抵抗の変化によって測定することが出来る。
- 2) 水塊の流下は拡散を伴う流下現象であるので流下速度が小さい場合には、水塊の平均到達時より以前に塩分濃度の極大値が現われる。
- 3) この様な系での塩分の拡散について、その機構や拡散係数について更に研究を進めなければならない。
- 4) 今回の計算にあたって、マーカーを含む水塊と本来の融雪水との相対的な運動は無視したが、この点について更に研究を進めなければならない。
- 5) マーカーを含ませる水塊の流量を変化させて、異なる流下機構での、流下速度や拡散について更に研究を進めなければならない。
- 6) 積雪の構造と測定値のばらつきとの間の関係についても同様に研究を進めなければならない。

今回の測定は吉田順五教授が数年前から実施している“融雪機構に関する研究”の一環として行なわれたものである。測定ならびに論文の作製にあたって、吉田順五、田畑忠司両教授、石田完、若浜五郎両助教授に御指導、御便宜をいただいた。又現場での測定にあたって当研究所物理部門、応用物理部門の大学院学生諸兄の御協力を得た。併せて深く感謝の意を表わす。

なお、この研究に使用した費用の一部は文部省特定科学研究費から支出された。

文 献

- 1) 吉田順五 1956 融雪水の積雪内滲透. 低温科学, 物理篇, **23**, 1-16.
- 2) 若松五郎 1963 積雪内に於ける融雪水の移動 I. 低温科学, 物理篇, **21**, 45-74.
- 3) Lighthill, M. J. and Whitham, G. B. 1955 On kinematic wave. *Proc. Roy. Soc.*, **A 229**, 281-316.

Summary

Experimental studies on the flow down speed of melt water in a snow cover were carried out using an electrolyte (NaCl) solution as a tracer.

Measurements were made in the following manner: First, the electrolyte is spread on the melting surface of the snow cover. The melt water on the surface dissolves the electrolyte and produces a water mass which has a fairly low resistivity comparing with ordinary melt water, and then the water mass flows down into the snow cover. Several pairs of electrodes were arranged in the snow cover at each 5 cm of depth. By observing the variation of electrical resistance of each electrode which is caused by the change of the electrolyte concentration in the snow texture around the electrodes, the mean flow down speed of melt water in the snow cover can be obtained.

The obtained results of electrical resistance against time are shown in Figs. 2, 3 and 4. The obtained resistance can be converted into concentrations of the electrolyte. Therefore, using a diffusion equation on the stationary flow, the theoretical relation in the electrolyte concentration against time was analyzed. The calculated curves for various values of the parameter, κ , under condition (6) in equation (11) are shown in Fig. 5. It may be readily deduced from Fig. 5 that, when the values of κ are sufficiently small, the peak of concentration occurs at the same time of the arrival of the water mass, but, when the values of κ are fairly large, then the peak of the concentration appears before the arrival of the water mass.

The obtained curves of electrolyte concentration against time agree fairly well with the calculated values and the values of κ are nearly 0.2~0.3. Therefore, some corrections are necessary for the mean arrival time of water mass to agree with that of the peak of concentration.

Under such considerations, we obtained the values of $2 \approx 5 \times 10^{-3}$ cm/sec. as the mean flow down speed of melt water in a snow cover when free water content is about 10~15%.

The flow down speed of melt water in a snow cover depends on the free water content held therein. When the free water content is relatively small, the melt water flows down around the snow texture forming a thin water film of 30~40 microns thick. Such considerations render the obtained values of flow speed to be reasonable in this case.