HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪内部における融雪水の流下速度の測定　II ： 斜面積雪内での融雪水の移動
Author(s)	藤野, 和夫
Citation	低温科學. 物理篇, 29, 151-158
Issue Date	1972-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18178
Type	departmental bulletin paper
File Information	29_p151-158.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Kazuo FUJINO 1971 Measurement of Flow Down Speed of Melt Water in Snow Cover. II. —Flow of Melt Water in Snow Cover on a Slope—. *Low Temperature Science, Ser. A, 29.* (With English Summary p. 158)

積雪内部での融雪水の流下速度の測定 II*

—— 斜面積雪内での融雪水の移動 ——

藤 野 和 夫
(低 温 科 学 研 究 所)

(昭和 46 年 9 月受理)

I. まえがき

積雪表面付近で融解によって生じた融雪水は積雪の内部に浸透流下する。この様な融雪水の積雪内部に於ける挙動は積雪の成層状態や傾斜の度合などの巨視的な構造及び積雪の組織の様な微視的構造によって左右される。

筆者は前報 (I) で平坦地積雪について，電解質溶液をマーカーとして，それが融雪水の中に拡散しながら共に流下する際の抵抗値を測定し，その水塊の流下速度を求めた[1]。得られた流下速度は，ざらめ化したしまり雪では，$2\sim5\times10^{-3}$ cm/sec であった。この値は吉田によって求められた皮膜流下速度の理論値にほぼ近い値であった[2]。

今回の測定は前回と同様の方法を斜面積雪について行ない，斜面を流下する水塊の移動速度を求めたものである。得られた結果を斜面に沿った流下と鉛直方向の流下とに分けて考察を行なった。それ等の結果について報告する。

II. 測定の方法及び結果

測定は昭和 46 年 4 月 10 日から 14 日迄の間に北海道雨竜郡幌加内村の北海道大学演習林母子里作業所で行なった。実験地は平坦地積雪については作業所構内，斜面積雪については作業所の南約 2 km にある丘陵の斜度 15～19° の南斜面である。実験地付近はいずれも約 85 cm の一様な厚さの積雪に覆われた畑地である。実験期間中の日中気温はプラスで，融解水は積雪の全層にわたって滲透していた。積雪の構造は，表面近くは大粒ざらめ，中層はざらめ，下層はざらめ化したしまり雪であった。又表面近くの成層境界には厚さ数 mm の氷板が含まれていた。

測定の方法はほぼ前回と同様であるが，今回は流下経路を観察するためにエオシンを溶かし込んだ飽和濃度の NaCl 溶液を噴霧器で積雪表面に撒布した。撒布した溶液の量は斜面の場合には 200×20 cm の等高線にほぼ平行な矩形の区域に平均に約 250 mℓ，又平坦地積雪の場合には 20×20 cm の区域に約 20 mℓ である。斜面積雪の場合には撒布域から斜面の最大傾斜線に沿って 100 cm 下方に予め撒布域と平行に穴を掘り，その断面の適当な深さの止水面に電極を

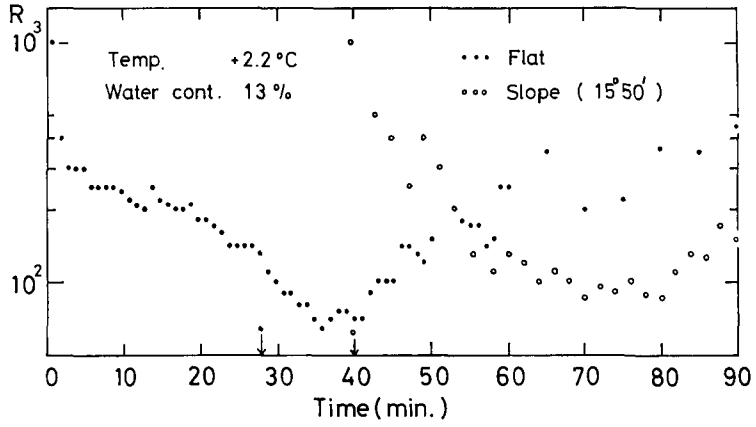
* 北海道大学低温科学研究所業績 第 1145 号

挿入して置く。又平坦地の場合には撒布域直下の，斜面積雪で選んだのと同じ止水面に電極を埋設して置く。電極はテスター用の探針子を1対，2 cm 間隔に平行に固定したものを用いた。溶液を撒布後，時間の経過と共に電極間の抵抗値をテスターで読みとった。抵抗値の読みとりは電圧印加後5秒目の値をとった。

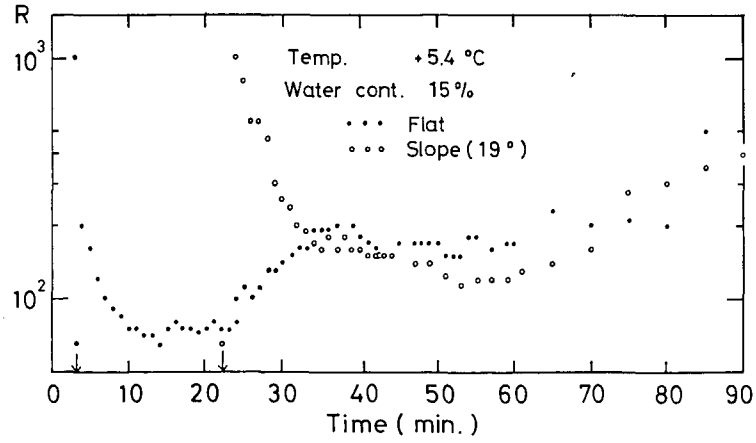
測定終了後，最大傾斜線に沿って穴を掘り，その断面でエオシンで染色された水塊の流下経路を観察した。

実験期間中に6例の測定を行なった。測定された電極間抵抗値の変化と時間との関係を第1図及び第2図に示した。両図共，時間軸は溶液の撒布終了時を原点とした。又，両図とも同じ構造，組織の積雪について斜面及び平坦地での関係を同じ図に示してある。

これ等の図から明らかな様に斜面積雪の場合も，平坦地積雪の場合にも極間抵抗値は時間と共に減少し，ある時刻で最小値を示した後ゆるやかに増大する。この様な極間抵抗値と時間との関係は前回と同様の傾向である。又両図の時間軸に検出点で，エオシンで染色された水が



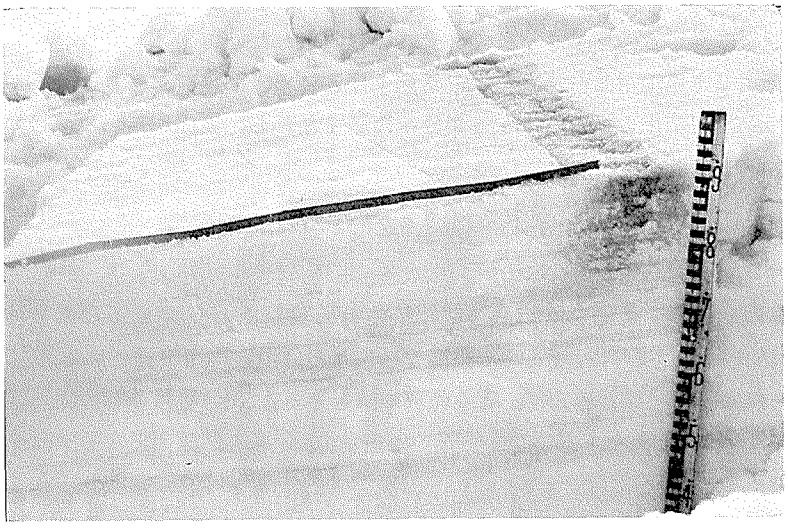
第1図 測定された斜面及び平坦地積雪に於ける極間抵抗と時間との関係（矢印は検出点にエオシンが認められた時刻を示す）



第2図 測定された斜面及び平坦地積雪に於ける極間抵抗と時間との関係（矢印は検出点にエオシンが認められた時刻を示す）

認められた時刻を矢印で示した。

測定終了後観察されたエオシンで染色された水塊の流下経路を第3図に示した。図から積雪内部で水塊が斜面の下方に向って階段状に流下している様子が明瞭に観察される。



第3図　エオシンで染色された水塊の流下経路

III. 結果に対する考察

斜面積雪内部での流下現象を前回と同様に解析する。すなわち，高塩分濃度の水塊が定常的に流下している塩分を含まない融雪水の中へ拡散しながらそれと共に流下する現象としてとりあつかう。

解析の際に，水塊の流下経路は実際には階段状に斜面に沿って流下しているが，これを簡略化する。すなわち，最初は平坦地積雪の場合と同様に鉛直下方に流下し，止水面に達した後，その止水面に沿って斜面下方に流下すると考える。この様な経路を仮定した場合には，路程の幾何学的距離は変わらないが，実際には各屈曲点での水頭損失が起るから流下速度は異なるものとなるであろう。しかし，近似的には各屈曲点での水頭損失は無視しても良いであろう。

定常的に流下している融雪水の平均流下速度を U，塩分の融雪水への拡散係数を A，水塊の塩分濃度を C として流下軸方向にのみ拡散が起るとすれば，次の式が成り立つ。

$$\frac{\partial C}{\partial t}+U\frac{\partial C}{\partial x}=A\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

この式を無次元量で置換すると

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

となり

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

の拡散型の方程式として，適当な境界条件及び初期条件を入れて解を求めることが出来る。

ここで

$$C^* = C/S/Qt_0, \qquad \tau = t/t_0, \qquad \xi = \frac{x}{Ut_0} - \frac{t}{t_0}, \qquad \kappa = A/Ux_0$$

で，Qは融雪水の流量，Sは塩分量，t_0は検出点での水塊の到達時間である。なお式の解法等については前報に詳しく述べてあるので，それを参照されたい。

前回の測定で平坦地積雪の場合には，初期条件として表面に与えられる濃度が矩形波として解いたものが測定結果と良く合うことが分った。すなわち，表面からある深さの検出点での塩分濃度と時間との関係は

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

をほぼ満足することが分った。

κは水塊の平均流下速度Uと塩分の拡散係数Aと検出点の座標x_0との函数である。拡散係数Aについては，実際に起っている機構や数値などは現在の所不詳である。これを通常のNaClの水への拡散と同様と考えて，その係数の値をとると10^{-5}程度の値である。したがってκの値としては$\kappa \ll 1$と考えて差しつかえない。とすれば，C^*が極大となるτは

$$\tau_{(C^*\max)} = \sqrt{\kappa^4+1} - \kappa^2 \fallingdotseq 1$$

となり，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とから

$$U = x_0/t_0$$

として求められる。すなわち，検出点での塩分濃度の極大値を示す時刻は，水塊がその点に到達した時刻とほぼ一致すると見なしうるから水塊の検出点迄の平均流下速度が求められる。なお，塩分濃度と極間抵抗値との間には直線的な関係が成り立つとして，濃度を極間抵抗値で置き換え，濃度の極大値の代りに極間抵抗の極小値を用いた。

斜面積雪の場合には水塊が表面から止水面に達する迄の間，U_Vの平均流下速度で鉛直に流下し，止水面に達した後は，U_Sの平均流下速度で斜面に沿って流下するものと考える。今，$\tau_{(C^*\max)} \fallingdotseq 1$とすれば，表面から検出点迄の平均流下速度，$U_N$は$U_N = x_{N_0}/t_{N_0}$として求めることが出来る。表面から止水面迄の鉛直流下速度，U_Vは同じ構造，組織の平坦地積雪について求めた値を用いれば良い。鉛直流下速度，U_Vが分かれば，斜面に沿っての流下速度，U_Sは

$$U_S t_{S_0} = U_N t_{N_0} - U_V t_{V_0}$$

であるから

$$U_S = \frac{x_{N_0} - x_{V_0}}{t_{N_0} - t_{V_0}}$$

として求めることが出来る。すなわち，斜面積雪について得られた極間抵抗の極小値を示す時刻t_{N_0}から同じ構造組織の平坦地積雪について斜面積雪と同じ深さの検出点で得られた極小値を示す時刻t_{V_0}を差引いたものと斜面の長さx_{S_0}とから，斜面に沿った平均流下速度U_Sを求めることが出来る。

この様な考えにもとづいて解析した結果，平坦地積雪に於ける鉛直流下速度，U_Vは0.8～3×10^{-2} cm/sec，又斜面積雪では傾斜15～19°の範囲で斜面に沿った流下速度U_Sは4×10^{-2}

cm/sec であった。平坦地積雪での鉛直流下速度は積雪の構造組織によって大幅に変化するが，斜面流下速度の場合にはそれ程の変化は見られなかった。

撒布した溶液にとかし込んだエオシンが検出点で認められた時刻は水塊の尖端が検出点に到達した時刻と考えられる。その時刻から求められる水塊の尖端速度は極間抵抗の極小値から求められる水塊の平均移動速度よりも平坦地でも斜面でも2～4倍程度大きな値となった。

吉田は積雪内部に於ける融雪水の流下機構について理論的考察を行ない，それを2つに分けそれぞれを皮膜流下及び水路流下と名付けた。皮膜流下は積雪が湿ってさえいれば常時起っている。しかし，水路流下は皮膜流下の様な定常的なしかも連続的なものではない。ある時刻に，ある圧力帯で融雪水が停滞し平衡を保っているとする。その圧力帯に水が供給されたり，空隙の形状が変化したりして平衡が破れると停滞していた水は次の圧力帯に移動する。この時の融雪水の移動を水路流下と呼んだ。そして皮膜流下速度として

$$\bar{u} = \rho g \cdot \delta^2 / 3\eta$$

又水路流下速度 $\bar{v}$ として

$$\bar{v} = \rho g B$$

の理論式を与えた。これ等の式で δ は氷粒を覆っている水膜の厚さ，B は通水度である。積雪内部で圧力帯として作用するのは止水面の様な巨視的構造ばかりではなく，もっと微細な積雪の組織の様なものもその作用をする。若浜は積雪の含水率の測定結果から，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が積雪内部の融雪水の流下現象を支配していると述べた[3)~5)]。

これ等のことから次の様に考えることが出来よう。含水量が多い場合には全層にわたって各圧力帯は平衡状態に近くなっているから何らかの原因で平衡状態を上廻る水が圧力帯に加わると平衡が破れて流下が起る。それによって連鎖反応的にそれより下方の圧力帯でも次ぎ次ぎに，ほとんど連続的に流下して行く。この様な場合に測定される見掛けの流下速度は水路流下の理論値に近い値となるであろう。一方，含水量が少ない場合には各圧力帯は平衡には程遠い状態にあるから，一部の圧力帯に水が供給されてその平衡が破れて流下が始まっても，それより下方の圧力帯がそれによって平衡に達するとは限らない。その場合には皮膜流下によって，又は次の水路流下によって供給される水により平衡に達する迄の待ち時間が必要となる。この様な場合には流下現象は定常的に起っている皮膜流下と間歇的に起る水路流下とで交互に支配される。したがって測定される見掛けの流下速度は皮膜流下の理論値よりは大きいが，水路流下のそれよりは，はるかに小さな値となる。この様に考えると吉田の理論式は積雪内部での融雪水の鉛直流下速度の最大値と最小値を与えていると考えることが出来る。

前回の測定で得られた平坦地積雪での鉛直流下速度 U_V は $2\sim5\times10^{-3}$ cm/sec で，今回の測定で得られた値よりも一桁小さい値であった。前回の測定では，表面に NaCl の結晶 3 g を 10 cm^2 の区域に撒布した。表面付近の含水率は約 15% であったから，この区域には約 0.07 mℓ/cm^2 の水が存在していた。撒布された NaCl が周囲の氷をとかして流下したとしてもその量は高々 0.1～0.3 mℓ/cm^2 程度であったと考えられる。この場合にも，表面付近では部分的に

水路流下が起ったのであろうが，それが検出点に迄達せず水塊の移動は皮膜流下が支配的であったのだろう。そのために得られた流下速度は理論値をやや上廻る程度であった。今回の測定では表面に撒布された水の量は 0.05 mℓ/cm² と前回よりも少なく，又，含水率も 13～15% と前回とあまり変わらない。しかし，得られた流下速度は前回の値よりも約一桁大きな値であった。これは雪質の違いによると考えるのが妥当である。前回の雪質は今回の雪質よりはざらめ化の程度が著しくなかったことによるのであろう。若浜によれば積雪内部の空隙に関係する量として，水のしみ上がり高さを測定したところ，ざらめでは 15～25 mm であるのに対し，しまり雪では 50～80 mm であった[4]。このことはざらめ雪の組織内部では圧力帯で停滞する水量が少なく，仮りに停滞しても不安定で容易に水路流下を起すことを意味している。これはざらめ化の程度が進むと更に促進されるであろう。したがって，今回の測定の場合も溶液を撒布したために内部では水路流下が起ったのであろうが，供給された水量が少なかったために，それが全層にわたって起らず部分的にとどまり，大部分は皮膜流下によったのであろう。しかし水路流下の起こった部分の全層で占める割合が前回の場合よりも大きく，そのために測定された値が前回よりも一桁近く大きくなったと考えられる。

斜面に沿っての水塊の平均流下速度として傾斜 15～19° の場合に 4×10^{-2} cm/sec の値を得た。この値は鉛直流下速度と同程度の値ではあるが流下の機構としては鉛直のそれとは異なるものであると考えられる。斜面に沿って止水面上を流れることから同一圧力帯内での横方向の流動と考えると横方向の圧力差が流動を支配していると考えられる。圧力帯として止水面の様な巨視的構造を考えると流動の状態はほぼ自由水面地下水のそれに近いと考えられる。自由水面地下水の流動は Darcy の法則にしたがい，その流動速度 v は

$$v = k\frac{dh}{ds}$$

で表わされる。ここで k は透水係数，$\frac{dh}{ds}$ は動水勾配である。動水勾配は傾斜角を θ とすれば $\tan\theta$ で表わされるから，今回の場合には，$\theta=15\sim19°$ として $\tan\theta=0.27\sim0.34\fallingdotseq3\times10^{-1}$ 程度の値である。一方，透水係数については黒岩がケロシンを使って求めた，ざらめ雪で 1～4 [cm/sec] がある[6]。この値を 0°C の水の透水係数に換算すれば 1.3～5.3 程度の値である。これ等の値を入れて流動速度を求めると 10^{-1} cm/sec 程度の値となり，測定された流下速度 U_s よりも一桁大きな値である。このことは融雪水の流動が Darcy の法則の諸条件を満していないことを示している。

自由水面地下水の場合には滞水層の厚さに比べて毛管作用による水面の上昇は無視して良い。しかし止水面上の融雪水の場合には毛管作用による水面の上昇は無視出来ず，毛管作用による圧力降下は動水勾配を減少させることになる。又，止水面での漏水も無視出来ず，それによる圧力降下も勾配の減少に効くと考えられる。これ等の要素は動水勾配を減少させ，したがって流動速度を減少させる効果を持つ。一方，地下水の場合には，土壌は水で完全に飽和されているが，融雪水の場合には止水面付近でも高々 20～30% 程度で未飽和の状態で多くの空気が含まれている。この様な未飽和状態では界面での抵抗が飽和の場合の抵抗よりも減少するから流動速度が増加することになる。

この様な諸条件を考えると斜面に沿っての流下の場合も，鉛直流下の場合と同様に含水量の大小が流下の機構を支配していると考えるのが妥当であろう。すなわち，含水量が多い場合には止水面はほぼ飽和に近い状態になり，毛管作用による圧力損失や漏水による圧力損失も無視出来る程度になるから，流下速度は Darcy の法則が適用出来る。しかし，含水量が少ない場合には，それ等の補正が必要となる。例えば動水勾配も斜面の傾斜の様な巨視的構造によるものではなく，もっと微細な積雪組織程度の規模のものを考えなくてはならないであろう。今回の測定で傾斜によって流下速度にほとんど差が表われなかったのもこの様な原因によるものと考えられる。

若浜が色水法で求めた斜面での流下速度 $\bar{v}=1.5\sim3$ cm/sec[3] を水塊の尖端速度として流下速度に換算すると，ほぼ Darcy の法則で求めた値に近くなる。これは供給した色水の量が多かったために Darcy の法則の諸条件が満足される状態で流動が起っていたことを示している。

IV. ま と め

筆者は先に積雪内部での融雪水の流下速度を測定するために，電解質溶液をマーカーとしてそれが定常的に流下している融雪水に拡散しながら共に流下する際の抵抗値の変化を測定し，その流下速度を求めた。

今回はそれと同様の方法を斜面積雪に適用し融雪水がどの様な経路で，どの様な流下速度で斜面の下方へ移動して行くかを調べた。得られた結果を鉛直方向の流下と斜面に沿った流下とに分け，鉛直流下速度は同じ構造組織の平坦地積雪について求め，更にそれを用いて斜面に沿っての流下速度を求めた。測定の結果は鉛直流下速度，U_V は $0.8\sim3\times10^{-2}$ cm/sec，傾斜 15～19° の斜面に沿っての流下速度，U_S は 4×10^{-2} cm/sec であった。

今回得られた鉛直流下速度は前回得られた値よりも一桁程大きな値である。この相違は測定を行なった積雪の組織の違いによるものと考えられる。すなわち，測定した層内での流下過程の中で，水路流下の占めた割合が前回よりも多かったためと考えられる。

斜面に沿っての流下は自由水面地下水の流動と同様と考えられ，その流下速度は Darcy の法則にしたがうと予測された。しかし，得られた結果は予測された値よりも約一桁程小さな値であった。この原因は止水面に沿って流れている融雪水の量が少ないために Darcy の法則が成立する条件が満足されなかったためと考えられる。

今回の測定並びに論文の作製に当たり，小島教授を始め融雪科学部門の諸兄から有益な助言と援助をいただいた。又，現場での測定の際に当研究所応用物理学部門の若浜助教授及び対馬勝年氏，大学院生の井上，川田両君の御協力を得た。併せて深く感謝の意を表す。

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) 藤野和夫 1968 積雪内部での融雪水の流下速度の測定 I. 低温科学，物理篇，**26**，87–100.
2) 吉田順五 1968 融雪水の積雪内滲透. 低温科学，物理篇，**23**，1–16.
3) 若浜五郎 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.

4) 若浜五郎 1968 積雪内に於ける融雪水の移動 II. 低温科学, 物理篇, **26**, 53-76.
5) 若浜五郎 1968 積雪内に於ける融雪水の移動 III. 低温科学, 物理篇, **26**, 76-86.
6) 黒岩大助 1968 積雪の Liquid Permeability. 低温科学, 物理篇, **26**, 29-52.

Summary

Measurements of the flow speed and path of meltwater in a sloping snow cover were carried out using an NaCl solution as a tracer. The tracer, which was sprayed on the surface of the snow cover, diffused into and flowed down with meltwater in the snow cover where a constant flow of meltwater existed initially. Using electrodes which were pre-set in the snow cover, we could detect the change of resistivity when the tracer flowed through the snow cover. From the curves of time-resistivity obtained, we could calculate the flow speed as follows:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+U\frac{\partial C}{\partial x}=A\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

where C=concentration of tracer, U=flow speed, A=diffusion coefficient. From former measurements on a flat snow cover which were already reported by the author[1], we determined that the solution between the normalized concentration of tracer and the normalized time of the above equation was statisfied as follows:

$$C^*=\frac{1}{2\kappa\sqrt{\pi\tau}}\exp\left\{\frac{-(1-\tau)^2}{4\kappa^2\tau}\right\}$$

The time-resistivity curves obtained on the slope are shown in Figs. 1 and 2, and a typical path of meltwater on the slope which was dyed by a tracer containing eosine is shown in Fig. 3.

We divided the curves into two parts, vertical flow and flow along the slope. For the vertical flow speed, we adopted the values which were obtained from the similar measurements of the same layer in a flat snow cover. Using this vertical flow speed, we could calculate the flow speed along the slope. The results obtained were as follows: In the case of the flat snow cover, the vertical flow speed was $0.8\sim3\times10^{-3}$ cm/sec. In the case of the sloping snow cover, having an inclination of 15~19°, the flow speed along the slope was 4×10^{-2} cm/sec.

The values of vertical flow speed were slightly larger than those obtained from former measurements. The difference between them might be caused by the difference of smow texture. For that reason, the ratio of film-like flow to channel-like flow was less when compared to that in the former case. The flow along the slope was expected to obey Darcy's law which is usually adopted in cases of free surface ground water. However, results obtained were about one order smaller than those expected. This difference might be caused by the amount of meltwater which was small compared with that of ground water so that the various conditions which satisfy Darcy's law were not met in the case of meltwater in a snow cover.