

積雪内における融雪水の鉛直浸透に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE VERTICAL PERCOLATION OF SNOWMELT WATER WITHIN SNOWCOVER

畑 時男*・高瀬信忠**

By Tokio HATA and Nobutada TAKASE

This paper aims to make clear the percolation process of meltwater within coarse grained snowcover. For the purpose, experiments on the unsaturated vertical percolation were made, using snow columns.

The obtained results were as follows: 1) The observed propagation speed of inflow meltwater flux was close to the wave speed calculated by the gravity flow approximation. 2) Assuming that the unsaturated permeability k_w was in proportion to the n -th power of the effective saturation S_e , the mean value of n was 3.67 and the intrinsic permeability k was within the range of 1.94×10^{-8} and $6.11 \times 10^{-8} \text{ m}^2$. 3) The propagation speed of the flux increased with each repetition of percolation of meltwater. 4) For the inflow flux less than $6.0 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$, the outflow hydrographs calculated by the gravity flow model was close to the observed hydrographs except the beginning of outflow, etc..

Keywords: meltwater, unsaturated percolation, gravity flow

1. はじめに

北海道、東北、北陸の諸河川における春季の融雪流出は不可避な現象であり、また、その時間的量的予測を可能にすることは治水、利水上非常に重要な課題である。したがって、従来より融雪流出に関する研究解析、予測法が提案されているが、融雪流出はその生起場である流域内の積雪の状態が時間とともに変化するなど複雑な現象である。このため融雪流出に関する推定・予測手法が十分に確立されているとは考えられない。この融雪流出の推定・予測手法を確立するには、流域内での融雪過程、積雪内および山腹斜面内での融雪水の移動および河道における融雪水の移動過程を明らかにする必要があると思われる。

このような流域における融雪水の流出過程のうち、積雪内における融雪水の移動については、わが国における研究としては吉田¹⁾、若浜²⁾、藤野³⁾、小林⁴⁾らの研究があるものの、定性的・基礎的段階にとどまっております。流域からの融雪流出を考えるうえで力学的な取扱いが不十

分であるといえよう。また、最近では融雪水の浸透過程における水みちの発達を実験的に考察した早川・河原らの研究⁵⁾があるが、流域における融雪流出の現象を説明するには、今後さらに研究が必要であらうと思われる。

著者らは、融雪末期の十分粗粒化した積雪における融雪水および融雪水の移動特性を明らかにするため、盛土上の自然積雪を対象に融雪水および融雪水の浸透に関する実験・観測を行い、その実験結果をもとに積雪内における融雪水の浸透特性を検討してきた^{6),7)}。その結果、融雪水の浸透に関するものとして、ざらめ化した自然積雪での鉛直浸透における表面融雪水のピーク伝播速度は、 $(3.8 \sim 18.3) \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ の範囲にあり、また、表面融雪量の増加に伴い、ピーク伝播速度も増加するという結果を得た。これに引続き、本研究では融雪末期の十分に粗粒化した均質な積雪内における融雪水の浸透過程をより水理学的に明らかにする目的で、浸透実験装置による不飽和鉛直浸透の実験を行った。そして、これより得られた積雪試料からの浸透流出の測定値をもとに、自然積雪を対象にした野外観測では得られなかった流入条件および積雪条件と、不飽和鉛直浸透の特性との関係を検討した。さらに、重力浸透流の理論に基づき、融雪末期の積雪の浸透パラメーターを推定したが、このうちの飽和透水係数（本研究でいう透水係数 k とは、速度次元を

* 正会員 石川工業高等専門学校助教授 土木工学科
(〒929-03 石川県河北郡津幡町字北中条)

** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科
(〒920 金沢市小立野2-40-20)

有する透水係数 K とは異なり、媒体の性質のみによって規定されるもので、長さの2乗の次元を有する。また K と k の値には次のような関係がある。 $K=(\rho g/\mu)k$ 、ここで、 ρ は流体の密度、 μ は流体の粘性係数、 g は重力の加速度である。)の推定値として 10^{-8} m^2 オーダーの値が得られた。この値はこれまでの二、三の研究者の推定値よりやや大きな値となっているものの、融雪末期の十分に粗粒化した積雪の値としてはほぼ妥当なものと考えられる。また、融雪水の繰り返し浸透の過程における積雪の浸透特性の変化にも検討を加えた。次に、推定された浸透パラメーターを用い、重力浸透モデルにより、実験結果の再現を行い、この結果より積雪内における不飽和鉛直浸透に対する重力浸透流の近似の妥当性を確かめた。最後に、得られた実験結果を自然積雪における野外観測の結果と比較し、自然積雪における融雪水の鉛直浸透について若干の考察を加えた。

2. 積雪内における融雪水の鉛直浸透への重力浸透流による近似

ここでは、積雪内における融雪水の不飽和鉛直浸透流に対する重力浸透流の近似について考察する。

積雪内部での融雪水の流下は、不飽和浸透流といわれ、Darcy 則の適用が考えられる⁸⁾。

一方、Colbeck は均質な積雪内における融雪水の不飽和鉛直浸透流において、Darcy 則を適用し、次式で流下フラックスの式を与えた⁹⁾。

$$u = \frac{k_w}{\mu_w} \left(\frac{\partial P_c}{\partial z} + \rho_w g \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 u は流下フラックス (flux)、 k_w は水の不飽和透水係数、 μ_w は水の粘性係数、 P_c は毛管圧 ($= P_a - P_w$ 、 P_a : 大気圧、 P_w : 水圧)、 z は鉛直下向きの座標、 ρ_w は水の密度、 g は重力の加速度である。

Colbeck は含水率が小さい時以外は圧力項を無視できるとし、結局、流下フラックスの式として次式を与えた。

$$u = \rho_w g \mu_w^{-1} k_w \dots \dots \dots (2)$$

一方、水の不飽和透水係数 k_w は有効飽和度 S_e と次の関係がある。

$$k_w = k S_e^n \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 k は固有透水係数 (飽和透水係数) である。また、 n は定数であり、Denoth らによれば雪質によって変化し、1.4~4.6の間の値をとる¹⁰⁾。なお、有効飽和度 S_e は次式で示されるものである。

$$S_e = \frac{(\theta_w - \theta_i)}{(\phi - \theta_i)} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 θ_w は雪の体積含水率であり、 θ_i は残留飽和度に対応する体積含水率 (最小含水量)、 ϕ は雪の空隙率

である。

さて、式 (2) を次式で示される連続方程式

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \phi_e \frac{\partial S_e}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

に代入すると、次の準線形偏微分方程式が得られる。

$$n \alpha^{1/n} k^{1/n} u^{m-1/n} \frac{\partial u}{\partial z} + \phi_e \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

上式において、 t は時間、 α は $\rho_w g \mu_w^{-1}$ 、 $\phi_e (= (1 - S_i)\phi)$ は有効空隙率、 S_i は残留飽和度である。式 (6) より一定のフラックス u の伝播速度は、次式のように与えられる¹¹⁾。

$$\frac{dz}{dt} \Big|_u = n \alpha^{1/n} k^{1/n} \phi_e^{-1} u^{m-1/n} \dots \dots \dots (7)$$

3. 実験方法

積雪試料を用いた不飽和鉛直浸透の実験については、図-1 に示す浸透実験装置により行った。その実験概要は、次の通りである。まず、2本の積雪試料を直径108 mm、長さ500 mmの円筒サンプラーで採取した。そしてその後、積雪試料内部の水分状態をできるだけ平衡状態に近づけるため、恒温室内に1~2時間直立させた。なお、実験に用いた積雪試料は自然積雪および屋根雪の落下堆積したもののざらめ雪層から水平に採取したものである。採取した積雪試料の中の1本を浸透実験に用い、他の一方を密度、初期(重量)含水率、粒径測定のために使用した。この際の密度測定は積雪試料の上下部から内径55 mm、長さ50 mmの円筒サンプラーを用いてサンプルを採取し、その質量測定により求めた。そして、含水率の測定については、密度測定に用いたサンプルに対して遠心分離法または秋田谷式含水率計を用いることにより行った。また、粒径は粒度ゲージにより測定した。

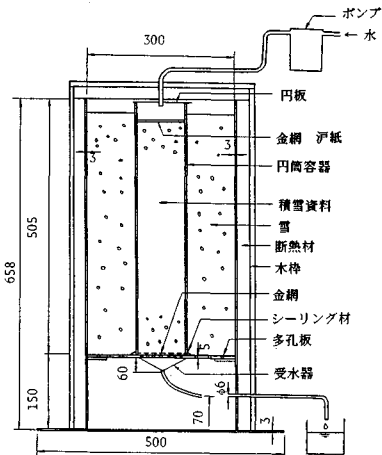


図-1 浸透実験装置断面図 (単位: mm)

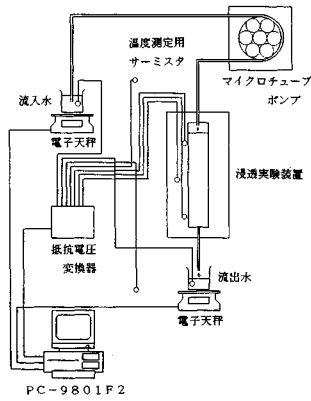


図-2 実験のフロー図

次に、流入水の供給は、図-2のフロー図で示されるように、0°Cに保持された水をマイクロチューブポンプを用いて積雪試料上面より供給した。供給された0°Cの水は積雪底部を経て実験装置底部より流出する。流出水は容器に貯留され、その重量が電子天秤により測定された。また、供給水量については、マイクロチューブポンプにより容器から吸い上げられた水量としての容器内貯留量の減少を電子天秤で測定して求めた。なお、表-1はそれぞれの実験時における積雪試料の条件および流入水の供給条件を示すものである。このうち、実験ケースCは流入および流出（流入停止）を2~3回繰り返した場合の浸透特性の変化を検討するための実験である。

4. 実験結果および考察

(1) 積雪試料を用いた不飽和鉛直浸透実験の結果

a) 浸潤前線の伝播速度と流入フラックスおよび初期含水率の関係

本研究では、浸潤前線の伝播速度を次のようにして推

定した。まず、浸潤前線の伝播時間を、積雪試料への流入水の流入開始時刻と積雪試料からの浸透水の流出開始時刻の時間差と定義して推定した。そして、この伝播時間で積雪試料の長さを除いたものを浸潤前線の伝播速度としたが、図-3は、このようにして実験結果をもとに推定された浸潤前線の伝播速度とフラックスの関係を示したものである。

浸潤前線の伝播速度と流入フラックスの関係には多少のパラッキがみられるものの、両者の間にはかなり高い相関関係が存在する。このことは、浸潤前線の伝播速度は流入フラックスの大きさに大きく依存することを示すものである。しかし、図中にみられるプロットした点のパラッキは、浸潤前線の伝播速度が単に流入フラックスに依存するだけでなく、各積雪試料の透水係数、空隙率などの浸透特性のほか、初期体積含水率の違いによっても影響を受けることを示唆している。

次に、図-4は、浸潤前線の伝播速度と、積雪試料の初期重量含水率から推定された初期体積含水率との関係を示すものである。ここでは、主として初期体積含水率

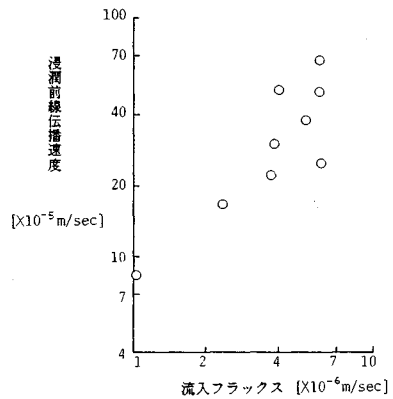


図-3 浸潤前線の伝播速度と流入フラックスの関係

表-1 実験条件

	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
雪 質	ざらめ雪	ざらめ雪	ざらめ雪	ざらめ雪	ざらめ雪	ざらめ雪	ざらめ雪	ざらめ雪	ざらめ雪	ざらめ雪	ざらめ雪
平均流入強度 (mm/hr)	3.7	8.3	13.2	13.4	13.4	21.2	18.7	13.7	21.2	14.4	21.6
流入継続時間 (min.)	105	85	40	60	100	55	100	80	80	80	80
サイクル 数	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3
試料の高さ (cm)	40	40	40	40	40	40	45	45	45	45	45
ぬれ密度 (×10 ³ kg/m ³)											
実験前・上	0.62	0.57	0.53	0.50	0.51	0.52	0.45	0.47	0.53	0.40	0.38
下	...	...	...	...	...	...	...	0.47	0.47	0.56	0.47
実験後・上	0.58	0.44	0.58	0.51	0.49	0.55	0.47	0.47	0.50	0.46	0.38
下	0.59	0.53	0.60	0.57	0.58	0.55	0.44	0.48	0.53	0.56	0.52
空隙率											
実験前・上	0.34	0.41	0.46	0.48	0.48	0.48	...	0.52	0.44	0.67	0.64
下	...	...	...	...	...	...	0.54	0.53	0.40	0.64	0.53
実験後・上	0.43	0.58	0.41	0.46	0.49	0.48	0.55	0.51	0.50	0.59	0.63
下	0.42	0.47	0.38	0.39	0.39	0.48	0.57	0.51	0.48	0.49	0.52
重量含水率 (%)											
実験前・上	2.2	4.3	5.6	4.1	5.4	7.9	...	5.9	2.5	25.0	11.8
下	8.0	7.7	3.9	12.6	9.2	10.6	9.4	8.1	1.5	29.5	13.5
実験後・上	9.1	11.4	5.7	1.8	3.8	13.2	12.2	5.6	7.6	18.0	11.5
下	9.2	8.0	5.0	1.7	3.6	13.0	9.7	5.7	10.5	16.3	15.8
粒 径 (mm)	2.5	2.0	1.8	1.8	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5

の浸潤前線の伝播速度に対する影響を検討するため、流入フラックスがほぼ等しいと思われるデータ (3.67~4.00) × 10⁻⁶ m/sec をもとにして求めた。なお、プロットした点がバラツキているため断言できないが、初期体積含水率の増加とともに浸潤前線の伝播速度も増加する傾向がみられる。

b) フラックスの伝播速度とフラックスの関係

式(7)によれば、フラックス u の伝播速度は、圧力の効果が無視できる時、フラックスの $(n-1)/n$ 乗に比例することになる。この関係を検討するため、浸透流出の減衰部の実測データから、フラックスとその伝播速度の関係を求めてみた。なお、減衰部のデータを用いた理由は、減衰部では初期体積含水率の影響が少なく、また、ショックフロント (shock front) の形成の影響もないので、フラックスとその伝播速度の関係が比較的簡単に扱えるからである。

図-5 および図-6 は実験データをもとに、フラックスとその伝播速度関係を示した例である。また、図中の実線は、実測データをもとに得られたフラックスの伝播速度のフラックスに対する回帰直線であるが、プロットされた点群は多少のバラツキがみられるものの、ほぼ回帰直線の近くに散布している。このことは、通常の大き

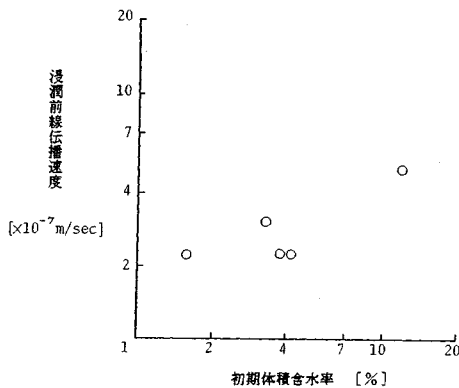


図-4 浸潤前線の伝播速度と初期体積含水率の関係

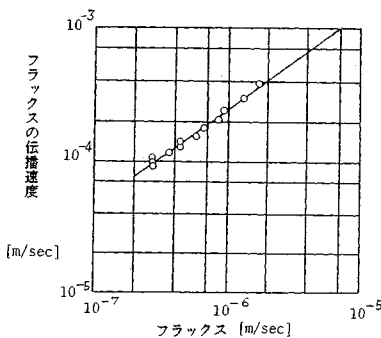


図-5 フラックスの伝播速度とフラックスの関係 (実験番号 B-3)

さの表面融雪量 (融雪最盛期でも、数 mm/hr 程度と考えられる) が積雪表面から積雪内に鉛直浸透する範囲においては、式(7)が成立することを示すものであろうと思われる。そして、式(7)における指数 n の値については、Colbeck は排水実験より 3.0~3.3 の値を得たが、実用的な観点および毛管作用の効果を考慮し、3 を採用した¹²⁾。一方、Denoth らの実験によれば、 n は雪質により 1.4~4.6 の間の値をとり、特に、十分に粗粒化した積雪では 3 以上の値をとるという結果が得られた¹³⁾。また、Wankiewicz は、有効飽和度と水圧(サクション)との間および不飽和透水係数と水圧との間に Brooks & Corey 型の関係を仮定した時に定義される pore size distribution index を実験から求め、これより n が 3.2 であることを示している¹⁴⁾。

著者らが実験を行った積雪試料は、その粒径が何れも 1.5 mm 以上の粗粒化したざらめ雪である。したがって、得られる指数 n は前述のことから、3 より大となると考えられる。表-2 は実験ケース B および C について前述の方法により指数 n の値を推定したものである。これらの値は 3.2~4.2 の範囲にあり、表-2 における 8 つの実験例をもとに n の平均値を求めると 3.67 という結果が得られた。この結果、融雪末期の十分に粗粒化した均質な積雪では、 n は 3 より大となることが考えられる。

c) ざらめ雪の飽和透水係数 k の推定について

前述したように、フラックスの伝播速度とフラックスの関係から、式(7)の成立が認められると考えられるが、このことは均質なざらめ雪における不飽和鉛直浸透流に対して、重力浸透流の仮定の妥当性を示唆するものと思われる。

指数 n の値が与えられれば、図-5 および図-6 で示されるフラックスの伝播速度のフラックスに対する回帰

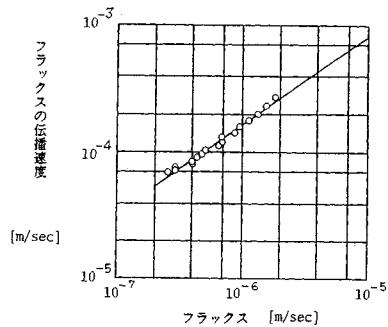


図-6 フラックスの伝播速度とフラックスの関係 (実験番号 C-2)

表-2 指数 n の値

実験番号	B-3	B-4	B-5	C-1
指数	3.56	3.89	3.17	4.22
実験番号	C-2	C-3	C-4	C-5
指数	3.25	4.16	3.76	3.36

直線と式(7)の対応関係から飽和透水係数を推定できる。この関係を利用し、実験ケースCについて指数 n の値を本実験で得られた平均値 3.67 として、飽和透水係数を推定したものが表-3 である。ただし、実験例 C-3, 4, 5 については、後述するように初期体積含水率の測定値を修正し、さらに、空隙率についても修正を加え、この値をもとに飽和透水係数を推定した。

このようにして推定された飽和透水係数 k の値は、 $1.94 \times 10^{-8} \sim 6.11 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ の範囲にある。また、これらの値を清水の式¹⁵⁾、

$$k = 0.077 d_0^2 \exp(-7.8 \rho_s / \rho_w) \dots \dots \dots (8)$$

から推定されるかわき密度に対する飽和透水係数と比較したものが図-7 である。なお、式(8)において、 d_0 : 積雪の粒径、 ρ_s : 雪のかわき密度、 ρ_w : 水の密度である。ここで推定された k の値は清水の式から推定される値と比較すると、やや大きな値となっているものの、オーダー的には同程度の値となっている。本実験で対象とした雪質とはほぼ同様と考えられる雪質に対する透水係数 [Bader ら : coarse grain old dry snow において、 $10 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, 黒岩 : large grain snow において、 $(3 \sim 16) \times 10^{-9} \text{ m}^2$]¹⁶⁾ と比較すると、本実験で得られた値は、やや大きい結果となっているものの、やはりオーダー的にはほぼ同程度とみられる。このことから、本実験結果および Wankiewicz が示していることなどを考慮すれば、融雪末期の十分に粗粒化した均質な積雪の飽和透水係数は 10^{-8} m^2 オーダー程度の値をとるものと考えられる。

表-3 飽和透水係数の値

実験番号	飽和透水係数 (m ²)	実験番号	飽和透水係数 (m ²)
C-1	2.94×10^{-9}	C-4	6.11×10^{-8}
C-2	1.94×10^{-9}	C-5	3.77×10^{-8}
C-3	5.45×10^{-9}		

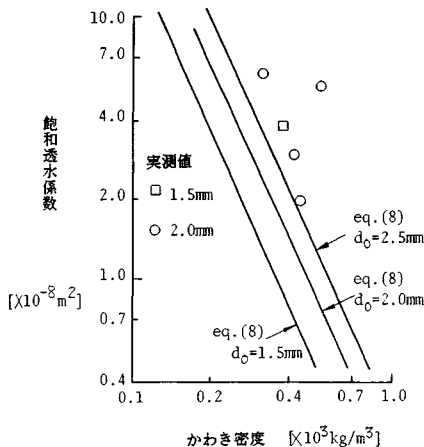


図-7 実測値から推定された飽和透水係数と清水の式より推定された飽和透水係数の比較

d) 繰り返し融雪水の浸透を受けた場合の積雪の浸透特性の変化

積雪は時間の経過とともに変態を生じ、その性質を変化させてゆき、特に、水の浸透を受けたときには急激な変態を生じるといわれている。この結果、積雪粒子は粗粒化し、積雪組織にも大きな変化が生じるものと考えられ、さらに、積雪組織の変化に対応して浸透特性も変化してゆくものと考えられる。このことは、積雪の変態が十分に進行していない積雪においては、融雪水の浸透を繰り返し受けることによって、浸透特性が大きく変化することを示している。

一方、本研究で対象とした積雪試料の粒径は 1.5 mm ~ 2.0 mm のざらめ雪であり、かなり変態の進行したものと考えられる。このような変態が十分に進んだざらめ雪においても、融雪水の繰り返し浸透を受けた場合にどのような浸透特性の変化があるかを実験的に検討した。そして、実験番号 C の実験においては、積雪試料へ 0°C の水を 80 分間流入 (これを流入時間という) させた後、120 分間流入を停止 (これを流出時間という) させるということを何回か繰り返した。すなわち、80 分の流入時間および 120 分の流出時間を 1 サイクルとする浸透実験を 2 ないし 3 回繰り返して浸透実験を行ったが、その結果より浸透特性の変化を実験的に検討してみた。なお、ここでは浸透特性としてフラックスの伝播速度を採り上げ、その変化についても検討した。図-8 は実験ケース C-5 の場合について、各サイクルごとの排水過程におけるフラックスの伝播速度とフラックス u の関係を示したものである。また、図中の直線は式(7)の指数 n を 3.67 と仮定したときの回帰直線である。

一方、表-4 は同様な方法によって、浸透特性の指標として $k^{1/3.67} \phi_e^1$ を採りあげ、融雪水の浸透を繰り返し受けた場合の各サイクル毎における変化を示したものである。

図-8 に示す C-5 のケースの場合には、繰り返し回

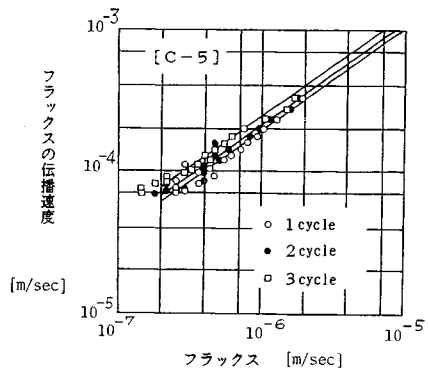


図-8 融雪水の浸透を繰り返し受けた場合のフラックスの伝播速度とフラックスの関係

表—4 $k^{1/3.67} \phi_e^{-1} m^{2/3.67}$ の各サイクルごとの変化

実験番号	1サイクル	2サイクル	3サイクル
C-1	1.71×10^{-2}	1.75×10^{-2}	
C-2	1.54×10^{-2}	1.58×10^{-2}	
C-3	2.50×10^{-2}	3.73×10^{-2}	
C-4	1.96×10^{-2}	2.52×10^{-2}	
C-5	1.78×10^{-2}	1.95×10^{-2}	2.25×10^{-2}

数が増加するにつれ、同一フラックスに対する伝播速度が増加する傾向がみられる。また、表—3に示すように、 $k^{1/3.67} \phi_e^{-1}$ の変化についてみると、C-1、C-2のケースでは顕著な増加がみられないが、他のケースの場合には融雪水の浸透を繰り返し受けると、 $k^{1/3.67} \times \phi_e^{-1}$ が増加していく傾向がみられる。特に、C-5の場合には、積雪粒子の粒径が1.5mmであり、また、流入量が 6.00×10^{-6} と大きいこともあり、サイクル毎に $k^{1/3.67} \times \phi_e^{-1}$ が顕著に増加している。このことは、融雪水の浸透を繰り返し受ける過程において、浸透特性に変化が生じ、フラックスの伝播速度が増加することを示している。しかし、ここで得られた浸透特性の変化は、水の浸透に伴う積雪粒子の粗粒化、あるいは流入水が厳密に0°Cでないために、積雪粒子の融解に起因した積雪組織の変化によるものなのかについては本研究の範囲内では明らかではない。

(2) コルベックの重力浸透モデルによる流出ハイドログラフの再現性の検討

a) 計算の概要および使用したパラメーターの値

(1) では、積雪の鉛直浸透の特性を実験的に検討するとともに、重力浸透流理論に基づいて積雪の浸透パラメーターを推定した。

ここでは、前述した方法によって推定された浸透パラメーターを用い、重力浸透モデルにより浸透流出の計算を行った。そして、この計算により推定された浸透流出のハイドログラフと実験によって得られた実測の浸透流出のハイドログラフを比較検討し、この結果より重力浸透モデルによる浸透流出の再現性を検討し、併せて推定した浸透パラメーターの妥当性についても検討した。

積雪試料への流入フラックスが与えられた場合の流出フラックスを計算するには、2. で述べた式のみでは不十分である。特に、浸潤前線の伝播速度は式(7)では求められないので、ここでは、浸潤前線の伝播速度を、浸潤前線付近の浸透水量の連続条件から得られる次式

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{u_+ - u_-}{\theta_+ - \theta_-} \dots\dots\dots (9)$$

で求めることとした¹⁷⁾。ここで、 $d\xi/dt$ は浸潤前線の伝播速度、 u_+ は後続のより大きなフラックス、 u_- は先行するより小さいフラックス、 θ_+ は u_+ に対応する体積含水率、 θ_- は u_- に対応する体積含水率である。そして、積雪試料内における積雪特性は一樣であるとし、また、

初期体積含水率の分布においても位置的な変化はなく、一樣に分布しているものと仮定した。さらに、各実験例とも指数 n は3.67とし、残留飽和度 S_r は0.04で一定であるとした¹⁸⁾。

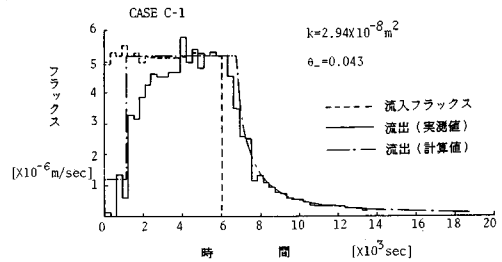
b) 計算結果

a) で述べた仮定および一樣流入強度の条件のもとで、実験ケースCの各実験例について計算した。その結果と実測の結果を比較した一部の例が図—9および図—10である。なお、各計算結果における特徴を挙げると、次のようなことが共通的にいえる。

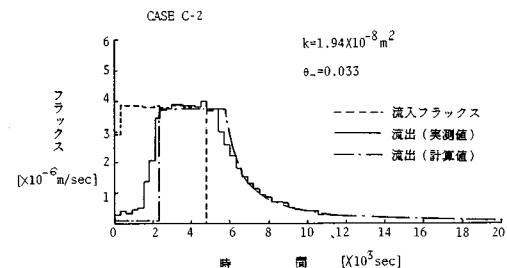
まず、第一点としては、計算で求められた流出フラックスのハイドログラフの立ち上がりが実測のハイドログラフと比較すると、かなり異なっていることである。第二点としては、融雪水の流入停止後の流出フラックスの大きい部分での計算結果と実測の結果との間に若干の差がみられることであるが、これらの理由としては、次のようなことが挙げられる。

計算に用いた各パラメーターは、実験結果をもとに推定されたほぼ妥当な値と考えられるものの、なお、検討を要する値と考えられること。また、第二の点に関連する理由として、指数 n と飽和透水係数は、主としてフラックスが比較的小さい範囲を重視し、この範囲におけるフラックスの伝播速度とフラックスの関係より値を推定したものであり、そして、流出ハイドログラフの計算には、この値を用いていることによるものと考えられる。

また、上記以外の原因としては、計算に用いた初期体積含水率の問題点を挙げることができる。初期体積含水率は、式(7)を用いた飽和透水係数の推定のみならず、



図—9 実測値と計算値との比較 (その1)



図—10 実測値と計算値との比較 (その2)

流出ハイドログラフの立ち上がりに直接的に影響する。すなわち、初期体積含水率が0.5%変化するだけで流出の立ち上がりが大きく変化することから、計算ハイドログラフが実測ハイドログラフと大きく異なった原因として、初期体積含水率の実測値が実際の値と異なっていたと考えられる。特に、C-4およびC-5はざらめ雪の体積含水率としては、かなり大きな値となっており、計算結果が実測のハイドログラフと大きく異なる結果になったものと思われる。なお、これら計算結果と実測結果の違いに対して、次のような方法で初期体積含水率を修正し、計算結果の改善を試みた。すなわち、実測の流出曲線の立ち上がり以前の初期流出量と計算による初期流出量がほぼ等しくなるように、初期体積含水率を仮定し、これをもとに流出曲線の推定を行った。図-11および図-12はこのような方法でC-1、C-2の実験例について、初期体積含水率を0.4~0.5%修正し計算した結果である。ただし、この際、初期体積含水率の変化に伴う他の積雪特性の変化は無視した。一方、C-3、C-4、C-5の実験例については、修正すべき初期体積含水率が大きくなるので、この修正された初期体積含水率に対応して間隙率および飽和透水係数の推定値にも修正を加え、計算した。

以上のような方法で行われた計算結果はかなり実験結果を再現しているようである。この結果、重力浸透モデルは実測結果を良好に再現し、また、推定された浸透パラメーターもほぼ妥当なものと考えられるが、この種の実験および計算においては、正確な体積含水率の測定が

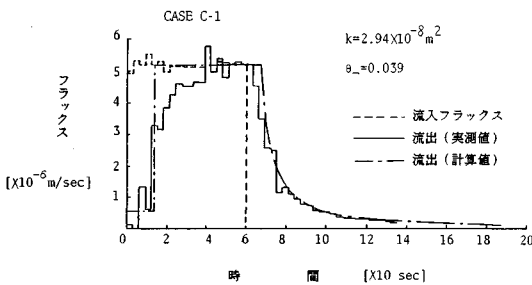


図-11 修正された計算値と実測値との比較 (その1)

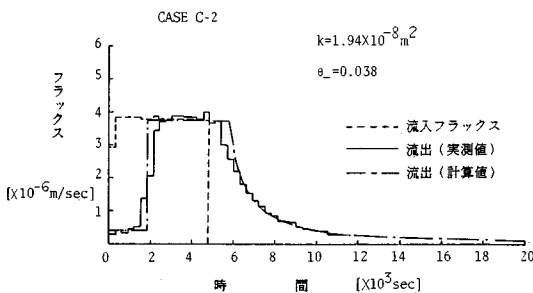


図-12 修正された計算値と実測値との比較 (その2)

不可欠と思われる。

(3) 自然積雪における融雪水の浸透に関する観測結果について

(1)、(2)では、重力浸透流の理論に基づいて均質と考えられる積雪内における融雪水の不飽和鉛直浸透について、その性質を検討するとともに、重力浸透流のモデルを用いて浸透流出の再現を試みた。その結果、著者らの実験範囲内では、積雪内での不飽和鉛直浸透流は重力浸透流としての近似が可能であり、実験的に求めた浸透パラメーターもほぼ妥当なものであることが確かめられたが、次に、一般に不均質と考えられる自然積雪での観測結果をもとに、これまでの均質な積雪の実験結果および重力浸透流として考察した結果を参考に、自然積雪における不飽和鉛直浸透流の性質について考察する。

a) 表面融雪量と浸透融雪量の関係について

図-13は融雪末期の自然積雪についての表面融雪量と浸透融雪量の関係を示したものである。ここで、表面融雪量は積雪表層付近において、大浦らの方法¹⁹⁾により測定されたものである。また、浸透融雪量は、表面融雪量の測定場所に近接した3.6m×3.6mの正方形の盛土上に堆積した積雪を対象に、盛土表面中設置された50cm×50cmの矩形ライシメータにより集水して測定されたものである。両者の測定場所の位置的ずれ、浸透融雪量の測定に用いたライシメータが小さかったこと、積雪内における融雪水の水平移動を遮断しなかったことなどのため、両者の間には連続性が成立していない。しかし、両者の波形はほぼ同様な傾向を示し、ピーク生起時間差のみを議論する場合には、実用上十分対応しているものと考えられる。

この関係より昭和59、60年のデータについて、表面融雪量のピーク生起時刻と浸透融雪量のピーク生起時刻の時間差を表面融雪水のピーク伝播時間と定義し、これで積雪深を除いてピーク伝播速度を推定した。このようにして推定された表面融雪水のピーク伝播速度を示した

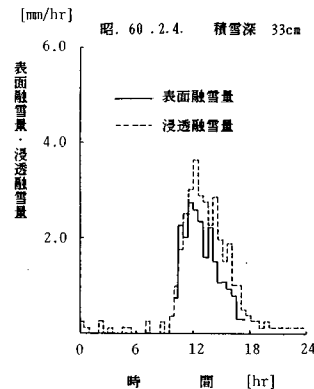


図-13 表面融雪量と浸透融雪量の関係

表一五 自然積雪における融雪水の鉛直浸透ピーク伝播速度

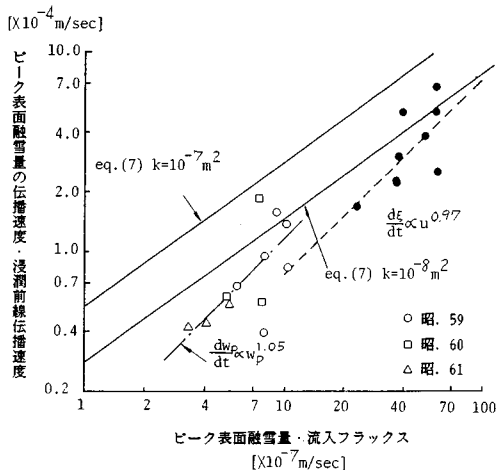
年月日	積雪深 (cm)	遅れ時間 (hr)	ピーク伝播速度 (m/sec)
昭. 59. 3. 9	48	3.5	3.8×10^{-6}
3. 13	36	1.5	6.7×10^{-6}
3. 14	34	1.0	9.4×10^{-6}
3. 15	28	0.5	15.6×10^{-6}
3. 16	25	0.5	13.9×10^{-6}
昭. 60. 2. 2	40	2.0	5.6×10^{-6}
2. 4	33	0.5	18.3×10^{-6}
2. 5	32	1.5	5.9×10^{-6}

ものが表一五である。これらの値は $(3.8 \sim 18.3) \times 10^{-6}$ m/sec の範囲にあり、自然積雪における成瀬らの $(5 \sim 13) \times 10^{-5}$ m/sec²⁰⁾ および藤野の $(8 \sim 30) \times 10^{-5}$ m/sec²¹⁾ とほぼ同じオーダーである。

b) ピーク伝播速度とピーク表面融雪量の関係

前述したように、観測結果における表面融雪量と浸透融雪量の間には連続性が成立せず、また、観測単位時間が30分間と大きいので、式(7)で示すような各融雪フラックスに対する伝播速度を求めることは困難である。そこで、a)において求められたピーク伝播速度とピーク表面融雪量およびフラックスの関係について検討する。

図一四は表面融雪量のピーク伝播速度とピーク表面融雪量の関係を昭和59, 60年および61年のデータについて示したものである。同時に、積雪試料を対象とした浸透実験における浸潤前線の伝播速度と流入フラックスの関係も同図中に黒丸印で示してある。一方、図中の2本の実線は $k=10^{-8}$ m² および 10^{-7} m² とした時 (ただし、 $\phi=0.5, S_r=0.04$) の式(7)の関係、すなわち、本実験における浸潤前線の伝播速度と流入フラックスの標準的な関係を示すものである。さらに、一点鎖線および破線はそれぞれ表面融雪水のピーク伝播速度、浸潤前線の伝播速度のピーク表面融雪量および流入フラックスに対する回帰直線を示す。



図一四 自然積雪におけるピーク伝播速度とピーク表面融雪量との関係

融雪末期においては、自然積雪中の積雪粒子は十分粗粒化し、積雪自身も全層ざらめ化し、ほぼ一様な状態に近づいていると考えられる。しかし、自然積雪(盛土上の自然積雪)の場合、十分に変態が進み、全層ざらめ化した場合でも、なお、一部に存在していると思われる層構造および水みちなどの局所的不均一性の存在が融雪水の鉛直浸透に影響するものと考えられる。また、積雪における初期体積含水率の差異などのため、表面融雪のピーク伝播速度とピーク表面融雪量との間の関係には、大きなバラツキが存在するものと考えられる。そして、フラックスの伝播速度において成立する式(7)に示すような、重力浸透流の仮定に基づく明確な関係はみられない。しかし、一部の観測例を除けば、表面融雪量の増加とともに表面融雪水のピーク伝播速度も増大する傾向が存在する。そして、表面融雪量が 1×10^{-7} m/sec $\sim 1 \times 10^{-6}$ m/sec 程度の範囲では、自然積雪における表面融雪量のピーク伝播速度は、積雪試料の浸透実験における標準的な関係より求められるフラックスの伝播速度と比較すると、やや小さいという結果がみられる。むしろ、表面融雪水のピーク伝播速度とフラックスの関係は、フラックスの伝播速度とフラックスの関係より、浸潤前線の伝播速度とフラックスの関係と同様な関係があるように思われる。例えば、フラックスの伝播速度 $(dz/dt|_u)$ は、フラックス u の0.73乗に比例するのに対し、表面融雪水のピーク伝播速度 (dw_p/dt) は、ピーク表面融雪量 w_p の1.05乗に、浸潤前線の伝播速度 $(d\xi/dt)$ は、フラックス u の0.97乗に比例する。このような伝播速度の類似性から、表面融雪のピーク伝播にはショックフロントの形成が影響しているものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、融雪流出の特性を明らかにする上で不可欠な融雪水の積雪内における基本的な移動特性を明らかにするため、融雪末期の十分に粗粒化した均質な積雪試料を対象に不飽和鉛直浸透の実験を行った。その結果、不飽和鉛直浸透の特性に基づく二、三の知見が得られた。すなわち、

- (1) 浸潤前線の伝播速度は流入フラックスおよび初期体積含水率に依存し、これらの増大とともに増加する。
- (2) フラックスの伝播速度に関しては、融雪水の流入フラックスが $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$ m/sec 程度の範囲では、式(7)がほぼ成立する。
- (3) 式(3)の指数 n は融雪末期のざらめ雪に対しては、3以上の値をとるものと考えられるが、著者らの実験結果では3.2~4.2の範囲で、その平均が3.67の値が得られた。
- (4) 本研究において、指数を3.67と仮定したとき

に得られた融雪末期の十分に粗粒化した均質な積雪における飽和透水係数は $1.94 \times 10^{-8} \sim 6.11 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ の範囲であった。これらの値は従来求められた対応する雪質の飽和透水係数と比較すると、やや大きいものの、オーダー的には等しい。

(5) フラックスの伝播速度は、融雪水の浸透を繰り返すごとに次第に増加する傾向がある。

(6) 本実験において、重力浸透流の理論に基づく浸透流出のモデルにより、通常の範囲の表面融雪量に相当した流入水に対する浸透流出をよく表現できたと考えられる。このことより、均質な積雪における融雪水の不飽和鉛直浸透は重力浸透流であり、推定された浸透パラメーターは、ほぼ妥当なものであることが認められた。

(7) 自然積雪においては、表面融雪のピーク伝播速度は式(7)によるフラックスの伝播速度よりは小さい傾向がみられた。そして、表面融雪のピーク伝播速度のフラックスに対する関係は、浸潤前線の伝播速度のフラックスに対する関係と同様な関係がみられた。

などである。

しかし、本研究で得られた結果は、主として均質な積雪を対象にした不飽和鉛直浸透の基本的な特性である。一方、自然積雪においては層構造の存在、あるいは、水みちの存在などの異方性、局所的不均一性のため実際の融雪水の移動機構はより複雑であり、この関係を流域の融雪流出モデルに組み込むことは困難といわざるを得ないが、これについては、今後の研究集積が必要であろうし、重要な課題になると思われる。

最後に、実験にあたり御協力頂いた当時石川高専学生の大橋裕一(現・福田道路株式会社)、奥村 学(現・長岡技術科学大学)両君に深く感謝するとともに、有益な御助言を頂いた金沢大学工学部土木建設工学科 宇治橋康行氏に厚く御礼申し上げる次第です。

参 考 文 献

- 1) 吉田順五：融雪水の積雪内浸透，低温科学，物理篇，A31，pp. 1~16，1973.
- 2) 若浜五郎：積雪内における融雪水の移動Ⅰ，低温科学物理篇，第21輯，pp. 45~74，1963.
- 3) 藤野和夫：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，第26輯，pp. 87~100，1968.

- 4) 小林大二：積雪中の融雪水の皮膜流下速度(Ⅰ)，低温科学物理篇，第31輯，pp. 135~142，1973.
- 5) 早川典生・河原能久・山田 衛・後藤 巖：融雪水の積雪内部への浸透過程に関する研究，第32回水理講演会論文集，pp. 161~166，1988.
- 6) 畑 時男・高瀬信忠・宇治橋康行：融雪および融雪水の浸透に関する実験的研究，土木学会中部支部 昭和59年度研究発表会，pp. 102~103，1986.
- 7) 高瀬信忠・畑 時男：融雪および融雪水の浸透に関する実験的研究(その2)，土木学会中部支部 昭和60年度研究発表会，pp. 78~79，1986.
- 8) 藤野和夫：融雪水の積雪内部への浸透，気象研究ノート，第136号，pp. 49~62，1979.
- 9) Colbeck, S. C. : A theory of water percolation in snow, Journal of Glaciology, 11, pp. 369~385, 1972.
- 10) Denoth, A., Seidenbusch, A., Blumthaler, M. and Kirchlechner, P. : Some experimental data on water percolation through homogeneous snow, Proceedings Modeling of Snow Cover Runoff, pp. 253~257, 1972.
- 11) Colbeck, S. C. and Davidson, G. : Water percolation through homogeneous snow, International Symposia on the Role of Snow and Ice in Hydrology, Unesco and World Meteorol. Organ., pp. 242~257, 1972.
- 12) 前出11)
- 13) 前出10)
- 14) Wankiewicz, A. : A Review Water Movement, Proceedings Modeling of Snow Cover Runoff, pp. 222~250, 1978.
- 15) Shimizu, H. : Air permeability of deposited snow, Low Temperature Science A, Vol. 22, pp. 1~32, 1970.
- 16) 前出14)
- 17) Colbeck, S. C. : Analysis of Hydrologic Response to Rain-on-snow, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report 340, 1975.
- 18) Denoth, A. : The Pendular-funicular Liquid Transition and Snow Metamorphism, Journal of Glaciology, Vol. 28, No. 99, pp. 357~364, 1982.
- 19) 大浦浩文・小島賢治・小林大二・小林俊一：金山ダムおよび朱鞠内湖付近における融雪の研究，低温科学物理篇，第25輯，pp. 99~117，1967.
- 20) 成瀬廉二・大浦浩文・小島賢治：気温融雪の野外研究，低温科学物理篇，第28輯，pp. 191~202，1970.
- 21) 藤野和夫：積雪内部での融雪水の流下速度の測定Ⅱ，低温科学物理篇，第29輯，pp. 151~158，1971.

(1989. 9. 25・受付)