

融雪流出に関する実験的研究 (その2) Experimental Study on the Snowmelt Runoff(2)

金沢大学工学部 正 員 高 瀬 信 忠
同 上 正 員 宇治橋 康 行

1 はじめに

豪雪地帯の河川においては春先の融雪出水は、年間総流出量の30～50%を占め、発電、かんがい等の水資源として利用される一方、継続時間の長い出水は、河川工作物に少なからぬ悪影響を与えている。また、北陸等における春先の融雪地すべりの多発もよく知られているところである。したがって融雪出水の予測、制御は重要な問題であり、この目的のために融雪出水の機構の解明が望まれる。

降雨流出に関する現地観測や実験的研究は、これまでに数多く行なわれてきている。また水平積雪での融雪現象の長期観測は、井上²⁾、小島ら³⁾によって行なわれているが、融雪出水に関する実験的研究は、ほとんど行なわれておらず、その機構は明らかではない。

本研究は、実験斜面での長期間連続観測および実験により融雪出水の機構を明らかにする目的で昨年より行なっているものである。

2 観測および実験方法

観測は、昨年同様写真-1に示す幅5m、長さ7m、勾配10°の実験斜面での観測を中心に行なったが、今年度はその他に実験斜面近傍の傾斜積雪および土木工学科中庭の幅2m、長さ3m、勾配10°の小斜面を用いて、着色水散布と断面観測による融雪水の移動状況についても調べた。以下に観測項目と観測方法および実験方法について述べる。なお、実験斜面の詳細については前報⁴⁾に譲り、ここでは省略する。

2.1 観測項目と観測方法

観測項目は、1) 気温、2) 風速、3) 日射、4) 地温、5) 積雪深、6) 積雪密度、7) 浸透融雪量、8) 表面融雪量、9) 流出量の9項目である。風速、日射、積雪深、浸透融雪量の5項目は、昨年と全く同じ方法で観測を行なったのでここでは観測方法は省略する。気温は、昨年の自記温湿度計に代わり、百葉箱の中で地上1.5mの高さでサーミスタ温度計で測定し、打点式記録計に記録した。地温は、地表面、深さ10cm、深さ20cmの3点でサーミスタ温度計を用いて測定した。積雪密度は、実験斜面上の積雪密度を測定することが望ましいが、斜面の規模が小さく毎日の測定は行なえないので、実験斜面近傍の工学部グラウンドの水平積雪において、毎日午前9時に積雪層から5cm毎にサンプリングして密度分布を求めた。流出量は、水路末端に集水器を持つ幅1m、長さ5m、深さ40cmの亚克力樹脂製水路を斜面中央部に埋設し(写真-1)、パイプで斜面横の集水ますに導びき1時間毎に測定した。

2.2 着色水散布実験

積雪期間中の斜面積雪層内の融雪水の移動状況を調べるために、実験斜面近傍の勾配約10°の傾斜積雪および土木工学科中庭の小斜面を用いて着色水の散布

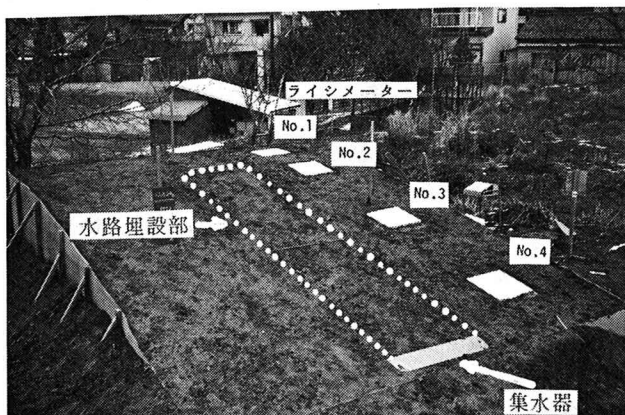


写真-1 実験斜面

実験を行なった。実験は、赤インクを薄めた着色水を 0℃に十分冷した後、斜面上方の積雪表面に霧吹きで散布し、一定時間後に積雪断面を作り着色水の移動状況を調べた。

3 観測および実験結果と考察

観測は、1983年12月25日～1984年3月23日までの91日間行なった。観測期間中の積雪深の経日変化を図1に、日最高気温、日最低気温の変化を図2にそれぞれ82年～83年冬の観測値とともに示す。59豪雪とも言われた83年～84年冬の累加降雪量は、240cmであった前年の約1.8倍の445cmに達し、最大積雪深も107cmを記録し前年の74.5cmを大きく上回っている。また図1からも分かるように積雪期間も前年の約2倍となっている。これは降雪量が多かったことと図2から分かるように気温が前年に比べて著しく低かったためである。12月の積雪は1月1日に消えているので以下では根雪となった1月4日～3月23日までの81日間の観測結果について述べる。

3.1 地熱による融雪

地熱による融雪量の実測値と計算値との比較を図3に示す。図中の実測値は、低温で表面融雪がほとんど生じていないと思われる日の4つのライシメーターへの平均流入量をプロットしてある。計算値は、積雪中の温度分布が一様で、地中から供給される熱量はすべて積雪下面での融雪に使われると仮定して次式より求めた。

$$M = -\left(\frac{\lambda}{L}\right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)_{z=0}$$

ここに、Mは融雪量 (gr/sec・cm²)

Lは氷の融解潜熱 (79.6 cal/gr

)、λは土の熱伝導率 (cal/℃・cm・sec)、 $(\partial \theta / \partial z)_{z=0}$ は地表面での温度勾配である。土の熱伝導率は、含水比によって変化するが、昨年同様 $\lambda = 1.4 \text{ Kcal} / \text{℃} \cdot \text{m} \cdot \text{hr}$ を一定値として用いた。地熱による融雪量は、地温の高い降積雪初期には5～6mm/dayの値であるが、数日で急速に減少し、その後ゆるやかに減少し1.2mm/day前後の値となる。82～83年冬、83～84年冬ともに計算値が実測値よりやや大きくなっている。これは積雪中への熱移動を無視したことと、地熱による融雪量のみで融雪量の少ない時期には土の含水比が低下し、土の熱伝導率を過大に評価したためである。地熱による融雪の全融雪に占める割合は、82～83年冬が約17%、83～84年冬が約19%であった

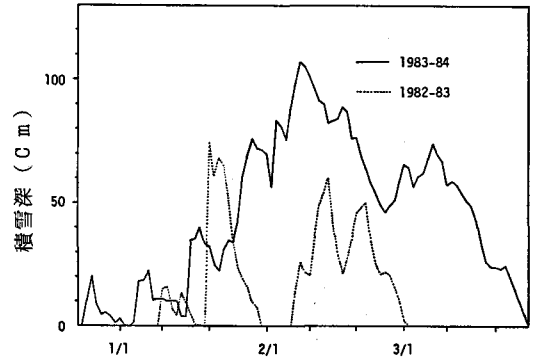


図-1 積雪深の経日変化

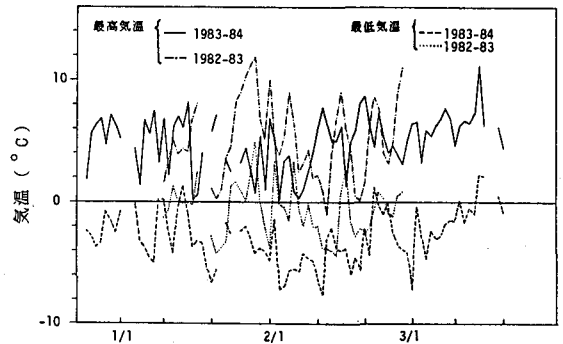


図-2 日最高気温、日最低気温の変化

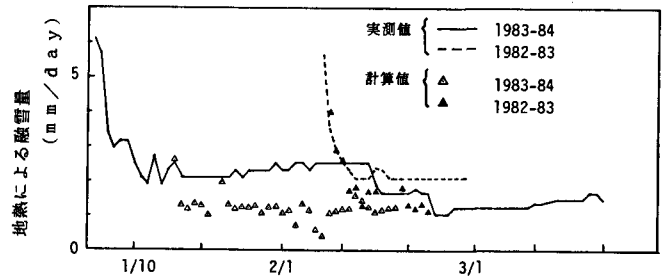


図-3 地熱による融雪量の実測値と計算値の比較

3.2 浸透融雪量と融雪水の移動機構

1月4日～3月23日までの81日間の観測期間は、降積雪状況、融雪および融雪水の移動機構から、第1期（降積雪初期）（1月4日～1月15日、12日間）、第2期（降積雪期）（1月16日～2月19日、35日間）、第3期（過渡融雪期）（2月20日～3月7日、17日間）、第4期（融雪期）（3月8日～3月23日、17日間）にそれぞれ分けられる。

降積雪初期は、図-2、表-1に示されるように気温も高く、153mmの降水量があったものの、累加降雪量は40cmであり、降雪だけでなく降雨も多く図-4に示すように地温も高いため積雪は融け易く大きな積雪とはならず、積雪の層構造も発達せず、各ライシメーターへの流入量にもほとんど差は見られない。流出量も多く、図-5に示されるように貯留量もあまり増加しない。

降積雪期に入ると気温は低下し、表-1に示すように初期の2倍近い278.6mmの降水量があり、しかもその大部分が降雪であり、この間の累加降雪量は326cmに達する。この期間の平均気温は-1.24℃と低く、表面融雪はほとんど起らず前述の地熱による融雪のみが生じ積雪の形での斜面貯留量が急激に増加する。ライシメーターへの流入量は、集水器への導水パイプの凍結の影響のあったライシメーターNo.1を除いた他の3つのライシメーターへの流入量にも大きな差は見られない。

過渡融雪期に入ると気温も上昇し、晴天の日中には、観測されただけでも80mm近い表面融雪が生じ、融雪水は積雪下面に到達するようになる。しかし、この時期では写真-2に示すように顕著な層構造が積雪中に見られ、後述する着色水散布実験により明らかにされた積雪層内の融雪水の移動により、表-1に示されるように斜面下方のライシメーターほど流入量が大きくなる。しかし、この差は融雪の進行に伴って積雪が均一化するにつれて図-6に示すように、減少し融雪期になると各ライシメーターへの流入量の差は再びなくなる。このような過渡融雪期は、積雪の少なかった82～83年冬では一週間程度であったが、積雪の多かった83～84年冬では17日間にわたり、この間のライシメーターへの流入量は、総流入量の30%以上を占める重要なものである。

3.3 積算気温と浸透融雪量、流出量の関係

地熱による融雪が主で表面融雪のほとんど生じない第2期を除いた、実験斜面における積算気温と浸透融雪量と流出量の回帰分析結果を表-2に示す。降積雪初期および過渡融雪期においては、積算気温と浸透融雪量、流出量の間には強い相関は見られないが、融雪期には、それぞれ0.899、0.906の相関係数が得られた。このことから、融雪期においてのみデグリー・デイ法のような気温データのみを用いる解析法が適用し得ると言えるが、その期間は長くない。

3.3 積算気温と浸透融雪量、流出量の関係

3.4 着色水散布実験

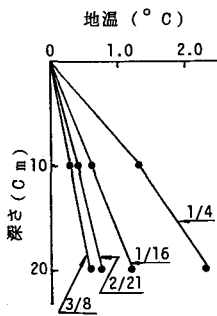


図-4 地温分布

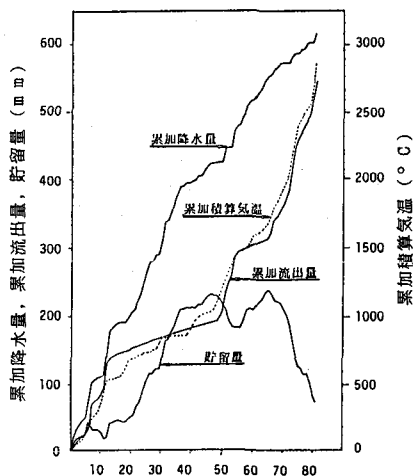


図-5 貯留量の変化

表-1 ライシメーターへの流入量

	1/4-3/24 81日	1/4-1/15 12日	1/16-2/19 35日	2/20-3/7 17日	3/8-3/24 17日
ΣR	625.6 (mm)	153.0 (mm)	278.6 (mm)	123.0 (mm)	71.0 (mm)
Σ No.1	567.16	209.2	20.8	113.74	226.0
Σ No.2	714.01	206.6	43.55	108.61	355.25
Σ No.3	912.83	220.6	41.14	323.19	327.9
Σ No.4	1192.9	262.2	52.92	535.67	342.11
Mean 1	846.73	224.7	39.60	270.3	312.82
Mean 2	939.91	229.8	45.87	322.49	341.75
ΣQ	544.76	131.5	59.54	120.32	233.40
T_m	0.86°C	1.42°C	-1.24°C	0.74°C	2.44°C

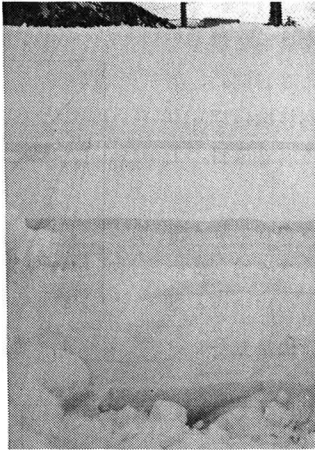


写真-2 積雪の層構造

着色水散布と断面観測による斜面積雪層内の融雪水の移動機構を調べる実験は、2月22日に実験斜面近傍の勾配約 10° の斜面を用いて行ない（実験1）、2月24日に土木工学科中庭の幅2m、長さ3m、勾配 10° の斜面上で行なった（実験2）。

実験1では斜面上方に帯状に赤インクを薄めた着色水を散布し、散布後1時間おきに積雪断面を作り融雪水の移動状況を観察した。散布後2時間の積雪断面、写真-3を見ると、散布点から鉛直下方に浸透した着色水は、しまり雪とざらめ雪の境界である止水面上に停滞し、一部は止水面に沿って側方移動し、一部はさらに下方に鉛直移動していることが分かる。鉛直浸透深さは約27cm、側方移動距離は約25cmである。散布3時間後の断面、写真-4では、鉛直下方に浸透した着色水は、深さ35cmの第2の止水層に到達し、側方移動距離も約55cmとなっている。散布4時間後の断面、写真-5では、鉛直浸透は、第2の止水層で止められ下層への浸透は起きていない。一方、第2の止水層に沿う側方移動は、上方の第1止水層の水みちからの鉛直浸透水を受けながら約50cm斜面下方に移動している。5時間後の断面、写真-6においても、第2止水層より下方への鉛直浸透は起きておらず、側方移動距離は、2つの止水層とも約130cmとなっている。

実験2では斜面幅が狭いので着色水散布5時間後に積雪断面を作った。断面の写真-7を見ると、鉛直浸透した着色水は、深さ30cmの第3止水面まで、停滞しており、第2、第3止水面に沿う約130cmの側方移動が生じている。第1止水層に沿う側方移動が観察されないのは、側方移動が生じる前に停滞した着色水が下層へ鉛直浸透したためと思われる。ここで観測された層構造を持つ積雪内の水の移動機構が、前述の過渡融雪期における各ライシメーターへの流入量の差の原因である。断面観測では移動の定性的な機構は知ることができるが定量的、例えば鉛直浸透速度や側方移動速度等は分らない。今後さらに検討していく必要がある。

写真-8は、積雪中の氷板層であり、3月16日に観測されたもので融雪期においても鉛直浸透は単純な一様浸透ではないようである。

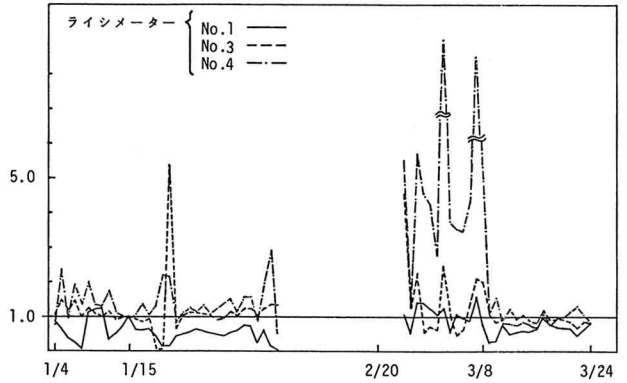


図-6 ライシメーターの流入量の比の変化

表-2 実験斜面における積算気温と浸透融雪量と流出量の回帰分析結果

	積算気温と融雪量の関係		積算気温と流出量の関係	
	回帰式	相関係数	回帰式	相関係数
第1期	$M=0.258T+0.291$	$r=0.564$	$Q=0.307T-2.868$	$r=0.738$
第3期	$M=0.629T-6.980$	$r=0.704$	$Q=0.266T-2.656$	$r=0.647$
第4期	$M=0.391T-5.574$	$r=0.899$	$Q=0.275T-3.694$	$r=0.906$

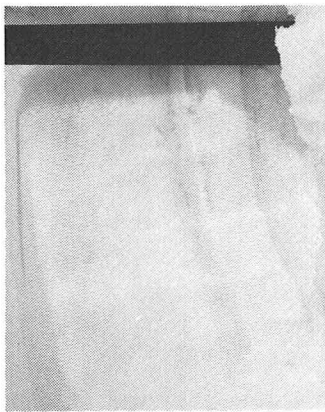


写真-3 実験1における積雪断面
(2時間後)



写真-4 実験1における積雪断面
(3時間後)

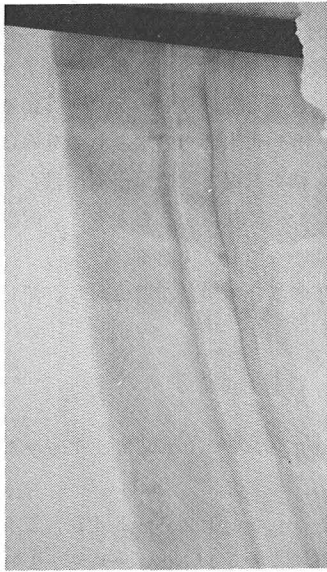


写真-5 実験1における積雪断面
(4時間後)

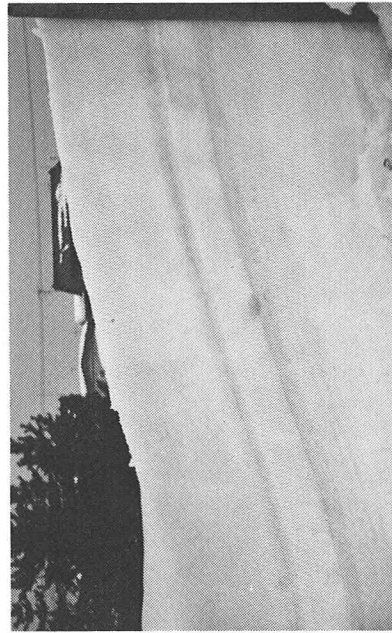


写真-6 実験1における積雪断面
(5時間後)

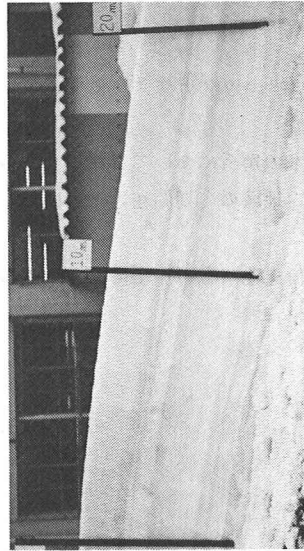


写真-7 実験2における積雪断面
(5時間後)



写真-8 積雪中の氷板層

今年度の観測、実験により得られた結果は次のようである。1) 全積雪期は降積雪初期、降積雪期、過渡融雪期の4期に分けられる。2) 地熱による融雪は、降積雪初期で $5\sim 6\text{ mm/day}$ の値を取り、数日で急速に減少し、 1.2 mm/day 前後の値となる。3) 地熱による融雪の全融雪に占める割合は $17\sim 19\%$ である。4) 過渡融雪期には積雪の層構造が存在し、融雪水は、鉛直浸透と側方移動の2つの移動機構を持ち、側方移動によりライシメーターへの流入量に大きな差を生じる。5) 止水面上の水みちの分布は、 $10\sim 15\text{ cm}$ 間隔であった。6) 実験斜面においては、融雪期にのみ、積算気温と融雪量に流出量との間により相関が得られた。今後は、さらに積雪期間中の融雪水の移動機構について検討するとともに、融雪期間中の土中の水分変化とそれに伴う流出成分の変化についても検討していくつもりである。

最後に、厳しい条件のもとでの長期間の観測に協力してくれた河海工学講座の学生諸君に対し、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、M J Kirkby: Hillslope Hydrology, John Wiley & Sons, 1980.
- 2) 井上章平: 融雪出水の解析について, 第12回直轄技術研究会報告, pp. 129~140, 1958
- 3) 小島賢治: 低温多雪地域の冬期間積雪下面における融雪量, 低温科学, A 41, pp. 99~107, 1982.
- 4) 宇治橋康行, 高瀬信忠他: 融雪流出に関する実験的研究, 第28回水理講演会論文集, pp. 429~434, 1984.