

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

金沢大学工学部 正 員 宇治橋 康 行
金沢大学工学部 正 員 高 瀬 信 忠
金沢大学大学院 梅 下 浩 樹

1 はじめに

春先の融雪出水は発電・農業用水等に利用される貴重な水資源である。しかしその一方で融雪出水は、継続時間がきわめて長いことや気象条件により時として大出水にもなるため、しばしば河川災害の原因となっている。したがって北海道、東北、北陸等の多雪地帯においては融雪出水の予測・制御は利水上、河川の維持管理上重要な課題となっている。しかしながら融雪出水は複雑な現象であり、その物理機構は必ずしも明らかではなく、現在実用に供されている解析・予測手法も十分なものとは言えないようである。

融雪水の流出において融雪水の積雪層内での移動機構は重要な役割を果たすと考えられ、従来から平地での観測や積雪層からサンプリングした均質な雪に対して鉛直移動機構に関していくつかの研究が行われてきた。しかし複雑な層構造をもつ山地の斜面積雪に対する観測・実験例はほとんどなく、斜面積雪中の水の移動機構は明らかにされていない。本研究は実験斜面を用いて地表面に到達する融雪量の長期間連続観測を行ない、その結果に基づいて融雪水の流出機構、特に斜面積雪内での融雪水の移動機構について検討したものである。

2 実験斜面および観測方法

実験、観測に用いた斜面は、金沢大学工学部構内テニスコート横に盛土された幅5m、長さ7m、勾配10°の南向き斜面であり、図-1に示すように斜面上部1.5mは水平部であり、実斜面長は5.5mである。斜面構成土は図-2に示す粒度分布を持つ砂質粘土であり、その飽和透水係数は 1.1×10^{-2} cm/secであった。次に観測項目と観測方法について述べる。

1) 浸透融雪量、地熱による融雪量

浸透融雪量および地熱による融雪量は50×50cm²の角型簡易ライシメーターをその先端が地表面から2～3cm突出するように埋設し、流入融雪水はパイプで斜面横の集水ますに導き1時間毎に測定した。なおライシメーターは図-1に示されているように斜面水平部に1ヶ（ライシメーターNo.1）、斜面上に3ヶ（上方よりライシメーターNo.2, No.3, No.4）設置し側方移動成分を測定できるようにした。

2) 表面融雪量

直径15cm、深さ5cmの円筒形容器の一方には底をつけ、もう一方の底は金網をはる。

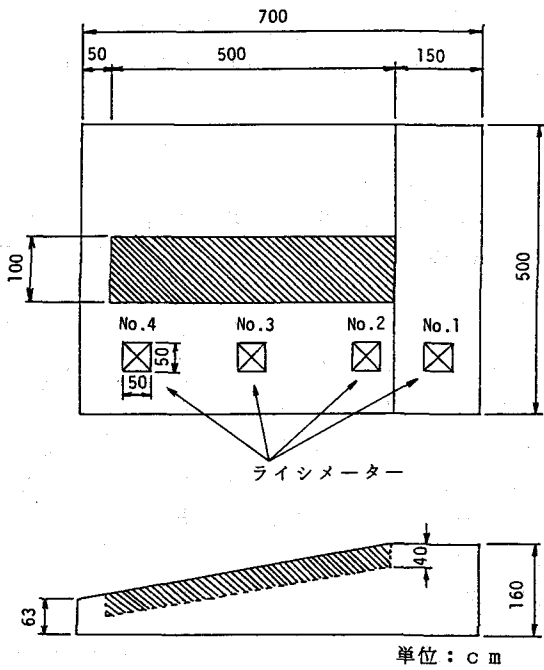


図-1 実験斜面概要

これら1対の容器に表面の積雪をできるだけ乱さないように採取して入れ、周囲の雪面と同じ高さになるように埋め、容器内の雪の質量の減少を1時間毎に測定することにより表面融雪量を測定した。これは大浦らが用いたと同じ方法である。なお測定は晴天で表面融雪が生じていると思われる日にのみ行なった。

3) 気温、湿度、風速、日射、地温

気温および湿度は斜面横に設置された百葉箱内で自記温湿度計を用いて測定した。風速は風杯型指示風速計を用いて地表面上2 mの高さの風速を測定し、打点式記録計で連続記録した。日射量はロビッチ日射計を用いて測定し、風速と同様打点式記録計に記録した。地温は斜面中央において地表面、深さ10 cm、25 cm、40 cmの4地点にサーミスタ温度計を埋めて測定し、打点式記録計に記録した。

4) 流出量

積雪層内を流下して地表面に到達し、さらに地中に浸透した後側方移動して流出する融雪水は、斜面中央幅1 m、長さ5 m、深さ40 cmの部分(図-1斜線部)をビニールシートでシールドし、末端に集水器を埋め、パイプで斜面横の集水ますに導き1時間毎に測定した。

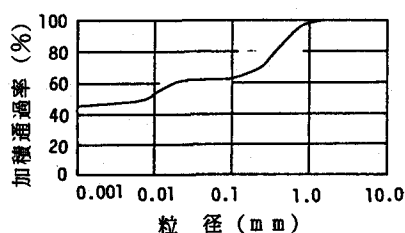


図-2 実験斜面土の粒径加算曲線

3 観測結果と考察

1982年～1983年冬期の積雪深の経日変化を図-3に示す(ただし午前9時の観測値)。図-3に見られるように途中2度の無雪期があり、積雪期は第1期(1月10日～1月17日)、第2期(1月20日～1月30日)、第3期(2月7日～3月1日)、の3期に分けられ、最大積雪深は1月20日に74.5 cmが観測されている。12月中に数回の降雪があったが積雪にはいたらなかった。以下に積雪期間が23日と最も長かった第3期の観測結果を中心にして述べる。

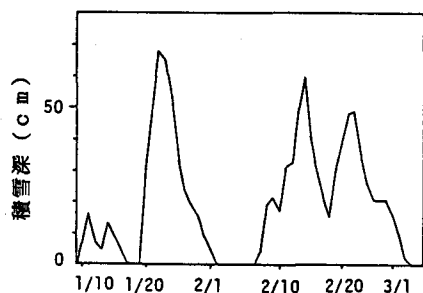


図-3 積雪深の経日変化曲線

3.1 地熱による融雪量

図-4に地熱による融雪量の観測値と計算値の比較を示す。観測値は、平均気温が 0°C 以下あるいは 0°C に近く表面融雪がほとんど生じていないと考えられる日の4つのライシメーターへの流入量の平均値をプロットしてある。表面融雪が生じ地熱による融雪量が分離できない日の観測値はプロットされていない。図より地熱による融雪量は地温の高い積雪初期に5 mm/day前後の高い値を示し、その後数日間で急速に減少し、消雪前にはほぼ一定値となり1 mm/day前後の値となることが分かる。地熱による融雪量が全融雪量に

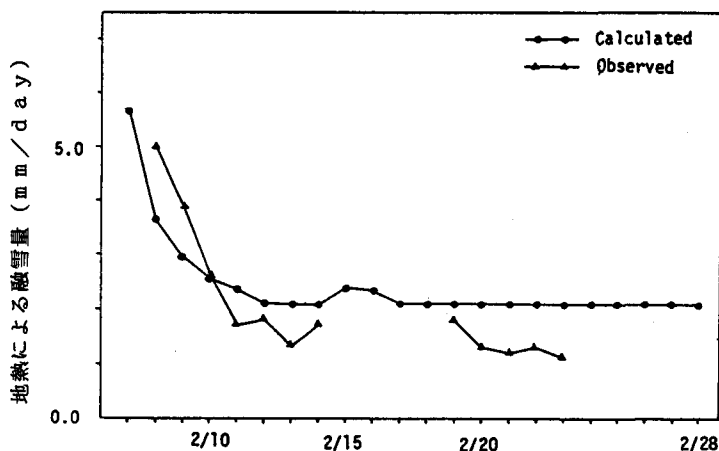


図-4 地熱による融雪量の実測値と計算値の比較

占める割合は約17%であった。ここで観測された値は小島が母子里で観測した値などに比べるとかなり大きい、これは雪質、積雪期間、気象条件などの違いによるものと思われる。図中の計算値は、積雪層内の温度分布が一樣で、地中から供給される熱量がすべて積雪下面での融雪に使われると仮定して次式により求めた。

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

ここに、 M : 融雪量 ($\text{gr/sec}\cdot\text{cm}^2$) , L : 氷の融解潜熱 (cal/gr) , λ : 土の熱伝導率 ($\text{cal}/^\circ\text{C}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec}$) , $(\partial \theta / \partial z)_{z=0}$: 地表面での温度勾配である。一般に土の熱伝導率は含水比によって大きく変化するが、実験斜面の土では図-5に示すように、含水比10%~25%付近までは急激に変化するが、含水比30%以上ではほぼ一定値となり $1.4 \text{ Kcal}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}\cdot\text{hr}$ 程度の値となる。1月29日に積雪下の土の含水比を測定したところ37%~45%、平均40%であった。地熱による融雪量は連続的に土中に供給されるので土の含水率の変化はあまり大きくなく30~45%の範囲と考えられる。よって計算に際しては $\lambda=1.4 \text{ Kcal}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}\cdot\text{hr}$ を用いた。なお熱伝導率の測定にはQTM迅速熱伝導率計を用いた。実測値と計算値は良く一致していると言えるが、融雪量の少ないところでやや差が見られる。これは積雪中への熱流を無視したことや土の熱伝導率を一定にしたことによると思われる。このように土の熱伝導率と土中の温度勾配が知られれば地熱による融雪量は推定できるが、これが冬期の湧水流量および融雪出水に果たす役割については今後の検討課題である。

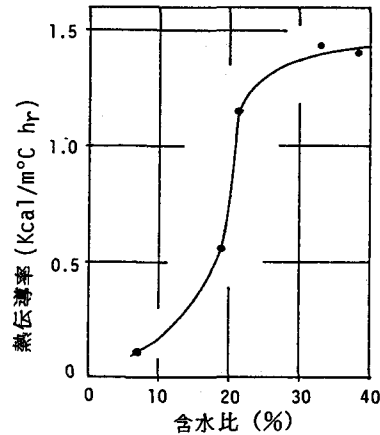


図-5 含水比-熱伝導率曲線

3. 2 浸透融雪量

斜面上に設置した4つのライシメーターへの流入ハイドログラフの観測例を図-6に示す。図は2月15日~18日までの4日間の観測結果を示したものであるが、表面融雪が連続して生じた場合の典型的な観測結果である。各ライシメーターへの流入ハイドログラフには次のような傾向が見られる。すなわち、各ライシメーターへの流入ハイドログラフの形状は相似しているが流入量には差があり、斜面上方水平部に設けられたライシメーターNo.1への流入量が最も少なく、No.2, No.3と斜面下方へ行くにつれて流入量は大きくなり最下部のNo.4が最も大きい。各ライシメーターへの流入量の差は融雪の進行に伴って減少し、No.4とNo.1の差は2月15日に

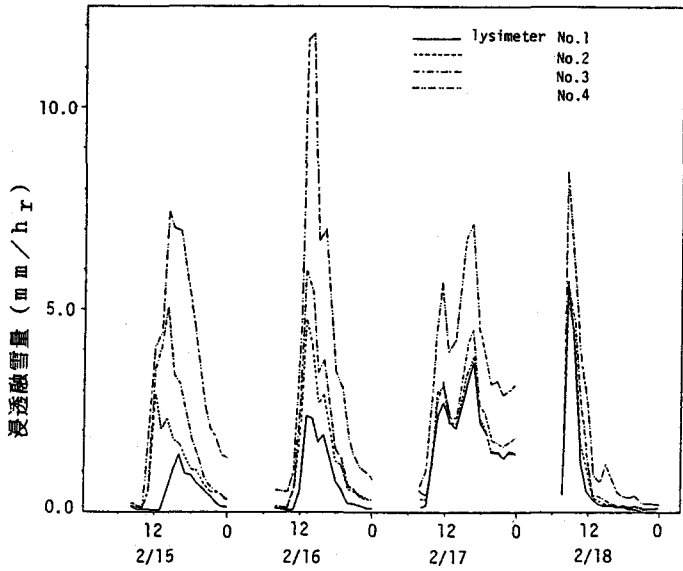


図-6 各ライシメーターへの流入ハイドログラフ

最大流入量で7.2倍総流入量で7.4倍であったものが3日後の2月18日には、最大流入量で1.5倍、総流入量で1.9倍に減少しており、No.1, No.2, No.3のハイドログラフはほとんど一致している。このように各ライシメーターへの流入量に差が生じる原因として、1) ライシメーターの設置条件の相違, 2) 積雪の空間的不均一性, 3) 積雪層内の融雪水の移動機構の3つが考えられる。各ライシメーターの設置条件については斜面上に設置されたNo.2, No.3, No.4の3つのライシメーターには差がなく、水平部に設置されたNo.1とは差がある。しかし融雪水が単純な鉛直浸透をするならば観測されたような差を生じるような条件の違いではない。ライシメーターNo.2への流入量を1とした場合の他のライシメーターへの流入量の比をプロットしたものが図-7である。図を見るとほとんどの観測日において $No.1 < No.2 < No.3 < No.4$ の関係があることが分かる。

このことから各ライシメーターへの流入量の差が偶然性に支配される積雪の空間的不均一性によるものとは考えにくい。したがって積雪層内の融雪水の移動機構に起因してライシメーターへの流入量の差が生じると考えるのが妥当である。すなわち、複雑な層構造をもつ積雪層内の融雪水は単純に鉛直移動するのではなく層構造の境界面では斜面方向に沿って側方移動が生じ、融雪水の一部は階段状に流下し、表面融雪が生じた位置より下方の地表面に到達する。このために斜面下方にあるライシメーターでは上方からの

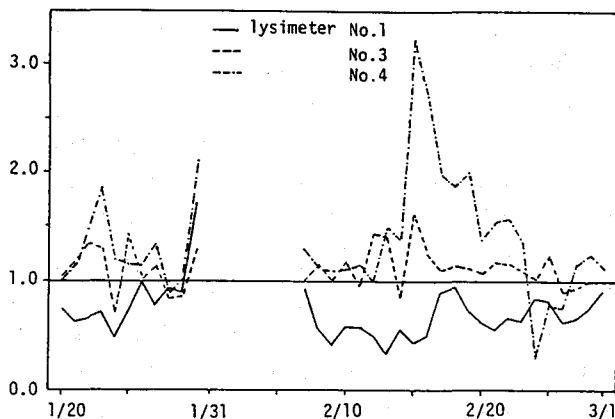


図-7 各ライシメーターへの流入量の比の経日変化

融雪水が流入し、流入量が斜面上方のライシメーターより大きくなったものと思われる。水平な積雪においても境界層で水平方向に広がりながら鉛直方向に移動する。ライシメーターNo.1は斜面部に近い位置に設置されたため水平に広がった融雪水の一部が斜面積雪層内に流出したため流入量が最も小さくなったと思われる。

図-6, 8に見られるように各ライシメーターへの流入ハイドログラフの傾向は良く似ており、特に最大融雪量の流入時刻はほとんどの観測日で一致している。このことから融雪水の斜面積雪層内での側方移動と鉛直移動の速度は同程度かやゝ前者が大きいと考えられる。これは藤野らの観測結果とは異なるものであり今後さらに詳細な観測、実験を重ね、層構造をもつ斜面積雪層内での融雪水の移動機構を明らかにしていく必要がある。

図-6, 7, 8には融雪の進行に伴ない各ライシメーターへの流入量の差が減少していくことが示されている。これは前述の層構造の境界に沿った側方移動成分が、融雪水の積雪層内への侵入に伴なって積雪が均一化するため、層構造の消滅につれて減少していくからである。今回の観測では、図-8の2月22日～24日の観測結果に見られるように、3日間で46.4mmの表面融雪が発生したが、22日と23日の2日では地熱による融雪量と考えられる2.4mmの流入量があったにすぎず、24日に9.1mmの流入量があったものの大部分の融雪水は積雪中に保持され地表面に到達しなかった。しかし融雪開始7日後の2月28日には表面融雪はほとんど地表面に到達するようになった。実際の河川流域においても融雪が進行し、全層がほぼ均一化し積雪表面で生じた融雪水がそのまま地表面に到達するようになると規則正しい日変化をする本格的融雪出水が始まると考えられる。したがって降積雪特性、気象特性と層構造の関係について観測、調査を積み重ねれば融雪開始日の予測がより正確に行なえるようになると思われる。

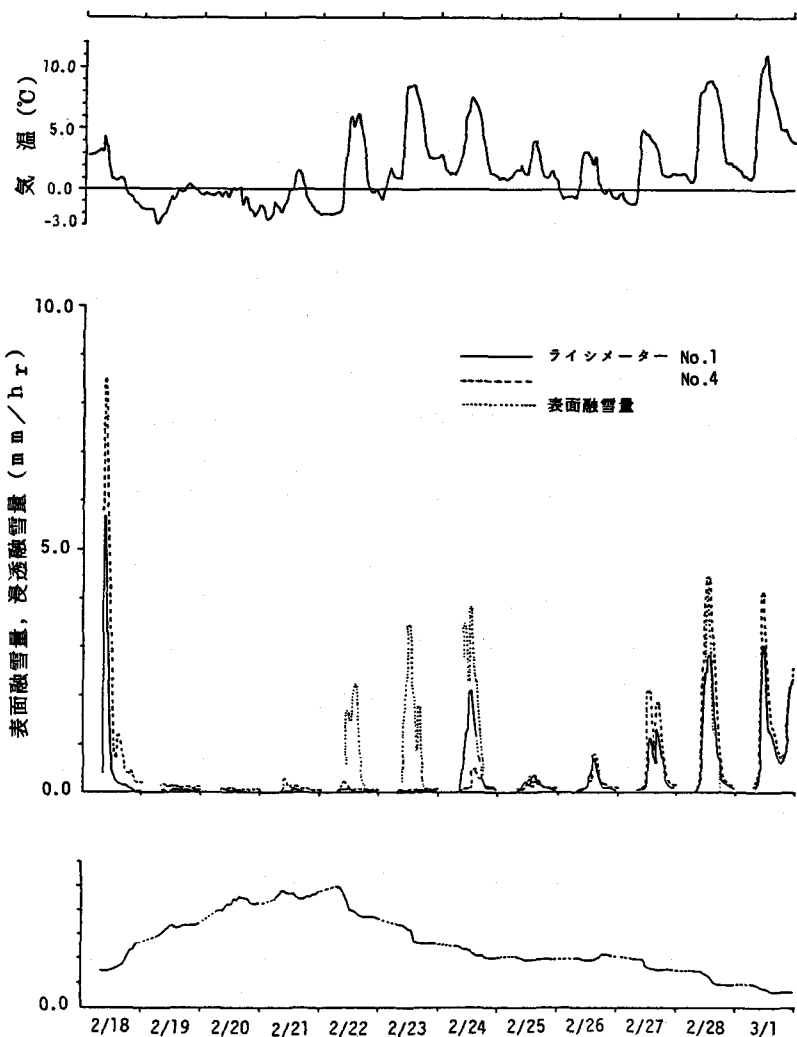


図-8 気温、表面融雪量、ライシメーターNo.1, No.4の流入ハイドログラフ、積雪深

3. 3 実験斜面の水収支

2月7日～3月1日までの23日間の総降水量、各ライシメーターへの総流入量、平均流入量および総流出量を表-1に示す。ただし総降水量は金沢地方気象台での観測値を実験斜面との積雪深に応じて補正したものである。表-1によれば、蒸発量を無視すれば、水収支から融雪水量の約18%は前述の側方移動によって積雪層内から直接斜面外に流出し、残りの82%が地中を通して流出したことが分かる。実際の河川流域において積雪層を通して

表-1 実験斜面の水収支

総降水量 (mm)	ライシメーターへの総流入量 (mm)					総流出量 (mm)
	No.1	No.2	No.3	No.4	mean	
306.5	167.1	221.6	249.9	371.6	252.8	182.1

直接流出する成分がどの程度であり、融雪出水に果たす役割はどの程度であるかは実流域での調査、データ解析により明らかにしていく必要がある。なお表中の総流出量は総降水量の60%となっているが、これは流出量を午前7時～午前0時まで1時間おきに測定したので、融雪の激しい日や降雨のあった日には夜間に集水しますがしばしばオーバーフローしたことと3月2日以後に流出した量が含まれていないからである。

4 結 語

融雪出水の物理機構、特に複雑な層構造を持つ斜面積雪層内での融雪水の移動機構を明らかにするために実験斜面を用いて長期間連続観測を行なった。観測によって得られた結果は次のようである。1) 地熱による融雪量は積雪初期に最も大きく 5 mm/day 前後の値を示し、その後数日で急速に減少し 1 mm/day 前後の一定値に近づく。地熱による融雪の全融雪量に占める割合は約 17% であった。2) 融雪初期には表面融雪は積雪層内に保持され、3 日間で 45 mm を越える表面融雪が生じて始めてその一部が地表面に到達した。3) 複雑な層構造を持つ斜面積雪内の融雪水は、鉛直移動と側方移動の 2 つの移動機構を有し、融雪水の一部は階段状に移動し、残りは鉛直移動する。鉛直移動、側方移動それぞれの移動速度はほとんど同じか側方移動の速度がやや速い。4) 側方移動により全表面融雪量の約 18% が地表面に到達せずに直接流出し、残りの 82% が地中を通して流出した。

ここで得られた結果は、小規模な実験斜面での一冬の観測結果であるので個々の数値については今後さらに観測を重ねて検討していく必要がある。また積雪層内の融雪水の移動機構についても今後さらに詳細な観測、実験を重ね、その機構を明らかにしていくとともに数理モデルについても検討していく予定である。

最後に厳しい条件のもとで観測に協力してくれた河海工学講座の学生諸君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉田順五；融雪水の積雪内浸透，低温科学，A23，1965，pp. 1~16.
- 2) 若浜五郎；積雪内における融雪水の移動 1，低温科学，A21，1963，pp. 45~74.
- 3) 若浜五郎 他；積雪内における融雪水の移動 2，低温科学，A26，1968，pp. 53~76.
- 4) 若浜五郎；積雪内における融雪水の移動 3，低温科学，A26，1968，pp. 77~86.
- 5) 大浦浩文 他；幾 における融雪の研究 2，低温科学，A27，1969，pp. 143~162.
- 6) 藤野和夫；積雪内部での融雪水の流下速度の測定，低温科学，A29，1971，pp. 151~158.
- 7) 小島賢治；冬期間の積雪下面における融雪量の連続観測（序報），低温科学，A39，1980，pp. 101~108.
- 8) 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，A41，1982，pp. 99~107.