

融雪および融雪流出に関する研究

A Study on The Snow Ablation and Its Runoff

金沢大学工学部 高瀬 信忠 N. Takase

同 上 宇治橋康行 Y. Ujihashi

1. はじめに

北陸地方はわが国でも有数の多雪地帯であり、春先の融雪出水は年間総流出量の30~50%を占め発電、農業用水、工業用水等の重要な水資源となっている一方で河川災害の要因ともなっている。また融雪水の土中への浸透による、いわゆる融雪地すべりが多発することも良く知られている。したがって、融雪量の算定、融雪水の浸透、流出の過程を明らかにすることは利水上、防災上重要である。

筆者らは金沢において実験斜面を主体として冬期の長期連続観測により融雪、融雪出水機構解明のための基礎的研究を行っている。ここではこれまでの観測結果をもとに、気温因子のみによる表面融雪および浸透融雪量の算定、地熱による融雪、積雪期の土壌水分の変化と斜面からの流出の関連について述べる。

2. 気温因子による融雪量の算定

融雪量は積雪表層の熱収支によって決まり、これに最も大きく関与するのは雪面での放射吸収であり、次いで顕熱伝達、潜熱伝達の順であると一般に言われている。融雪量を算定するには厳密な熱収支に基づけば良いのであるが、一般には入手不可能な気象要素が多く、実用的融雪予測には気温因子のみを指標とする算定式が古くから用いられてきた^{1), 2)}。これらの式は各地域での気象条件と雪質の差により種々の形のものが用いられている。ここでは金沢のような、いわゆる暖地積雪の融雪量と各種の気温因子との相関関係について筆者らの実測値について検討した。

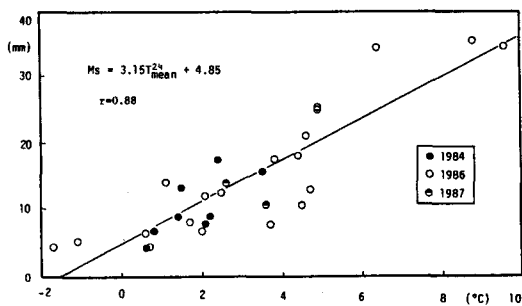
2. 1 気温因子と表面融雪量

融雪量、気温因子の測定は金沢の金沢大学工学部構内の実験斜面とその周辺平地である。実験斜面の概要、融雪量、気温因子の測定法については文献に譲り³⁾、ここでは省略する。

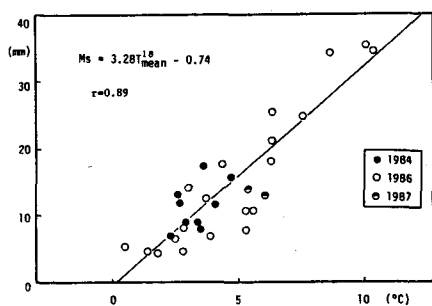
表面融雪との相関を調べた要素は、(1) 日平均気温 (T_{ave})、(2) 06~18時の平均気温 ($T_{\text{06-18}}$)、(3) 日最高気温 (T_{max})、(4) 06~18時の正の積算気温 (Σts) の4要素である。1984年(サンプル数10)、1986年(サンプル数19)、1987年(サンプル数2)の3ヶ年31データに対し、縦軸に表面融雪量 (M_s)、横軸に気温要素をとってプロットした結果を図-1(a)~(d)に示す。図中には最小2乗法で求めた回帰式、回帰直線および相関係数も合わせて記入した。結果を見ると、日最高気温の相関係数が0.79と低い、他の3要素は0.88~0.89の相関係数でありいずれも融雪指標として十分使用しうるものと言えよう。融雪の生じる日平均気温は -1.5°C であり、小島ら⁴⁾が札幌で得た -1.4°C とほぼ等しい。昼間の平均気温では 0.3°C を越えないと融雪が生じない。

2. 2 気温因子と浸透融雪量

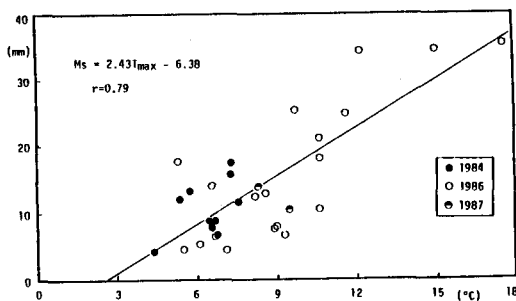
融雪が主に積雪の表層付近で生じることが前述のとおりであるが、融雪量をタンクモデル等の流出モデルへの入力として考えるなら表層付近での融雪に限らず、広く積雪層からの離脱として考え積雪下面に到達する浸透融雪を考える必要がある。浸透融雪量は積雪下面に埋設されたライシメータにより地熱による融雪とともに測定される。しかし、すでに報告したように^{3), 5)}、積雪の層構造や氷板層の存在による融雪水の止水や側方移動のために個々のライシメータへの流入量が融雪量を正確に表さない場合があり、ライシメータへの流入量については水収支等の面からの検討が必要である。図-2は1986年1月9日~3月12日までの実験斜面での積雪相当水量の変化を示したものである。ここで観測値1は断面観測より得た積雪密度から計算したものであり、観測値2は累加降水量からライシメータへの累加流入量を引いて求めたものである。両者は



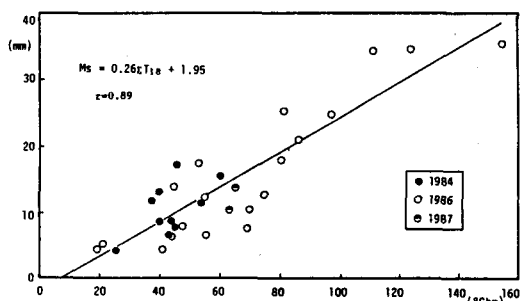
(a)



(b)



(c)



(d)

図-1 表面融雪量と気温要素の関係

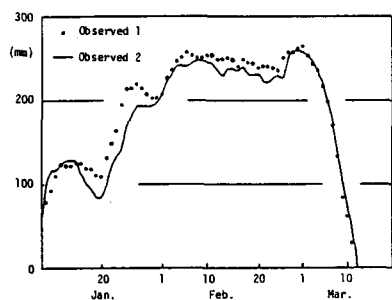
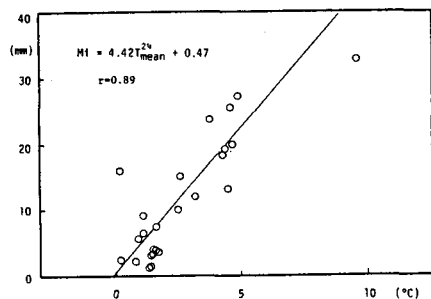


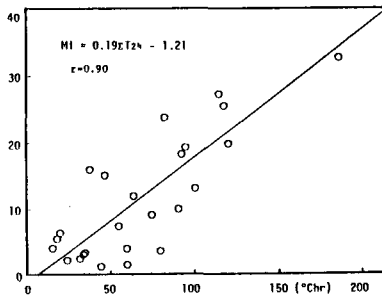
図-2 積雪相当水量の観測値

表-1 表面融雪量, 浸透融雪量と気温要素との関係

年	期間	回帰式	相関係数	サンプル数
1984, 1986-87	1~3月	$M_s = 3.15T_{\text{mean}} + 4.85$	0.88	31
		$M_s = 3.28T_{\text{mean}} - 0.74$	0.89	
		$M_s = 2.43T_{\text{max}} - 6.38$	0.79	
		$M_s = 0.26\Sigma T_{1e} + 1.95$	0.89	
1986	2~3月	$M_i = 4.42T_{\text{mean}} + 0.47$	0.89	26
		$M_i = 2.58T_{\text{max}} - 7.56$	0.72	
		$M_i = 0.19\Sigma T_{2e} - 1.21$	0.90	



(a)



(b)

図-3 浸透融雪量と気温要素との関係

積雪の全期間にわたって良く一致しており、1986年のライシメータへの流入量は浸透融雪量を表していると考えて良い。但し、気温要素との相関を求める場合には、09～09時のライシメータへの流入量から後述の地熱による融雪量を差し引いたものを用い、さらに、1mm/day以上のものを対象とした。

融雪指標として用いた要素は、(1) 日平均気温、(2) 日最高気温、(3) 0～24時の正の積算気温 ($\sum T_{\geq 0}$) の3要素である。結果を表面融雪の場合と合わせて表一1に、 T_{mean} 、 $\sum T_{\geq 0}$ に対するプロットを図一3(a)、(b)に示す。この場合にも日最高気温は表面融雪の場合と同様に相関が低く融雪指標としては使えないが、他の2要素についてはいずれも表面融雪の場合より若干相関が良くなっており浸透融雪量算定の指標として十分に使える。浸透融雪の場合、積算気温が7℃・hr以上、日平均気温は0℃以上にならないと融雪が生じない結果となっている。これは表面融雪が少ない場合、積雪中に保持され含水比の増加等になるだけで下方に浸透してこないためであると考えられる。

3 地熱による融雪

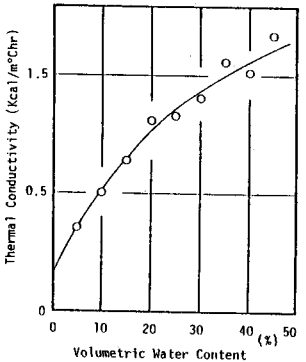
北陸地方のように積雪量が多く、しかも冬期の気温があまり低くない所では土壌の凍結は起こらず積雪は地中からの熱伝導により下面で融解し続ける。表面融雪が盛んに起こっている日に地熱による融雪量を分離測定することは難しいが、気温が低く日射も少なく表面融雪がほとんど生じない日に積雪下面に埋設されたライシメータで測定される融雪量は地熱による融雪量と考えて良い。一方、積雪中への熱伝導を無視し、地中からの熱が全て積雪下面での融雪に使われると仮定すれば、地熱による融雪Mgは、

$$M_g = \frac{1}{L} \lambda \left| \frac{\partial T_g}{\partial Z} \right| \tag{1}$$

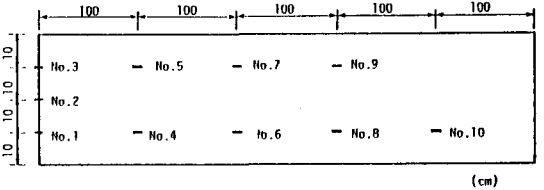
と表される。ここに、L (=79.6 cal/gr) は氷の融解潜熱、λ (cal/cm℃・sec) は土の熱伝導率、Tg (℃) は地温、Z (cm) は、深さである。土の熱伝導率λは一般に一定ではなく土の含水比によって変化する。筆者らが実験斜面に用いた砂の含水比-熱伝導率曲線は図一4のようである。土中の温度勾配は2、3点の地温の測定値から容易に求められるので、図一4の曲線をあらかじめ求めておけば土壌含水比を知ることにより式(1)から地熱による融雪量は求められる。

土壌含水比の連続測定の方法はいくつかあるが、ここでは容量式水分計を用いて測定した⁶⁾。水分計は図一5に示す10点に埋設し、式(1)の入には地表面から深さ10cmでの値を用いた。また温度は10cm、20cmの深さで測定した。

前述のように1986年のライシメータのデータは浸透融雪を表していると考えられるのでこの期間について式(1)による計算値とライシメータへの流入量を比較した結果を図一6に示す。図より表面融雪がほとんど生じていないと思われる日の計算値とライシメータへの流入量は良く一致していることが分かる。1月10日～3月12日までの62日間の地熱による総融雪量は52mm、最大値1.2mm/day、最小値0.564mm/day、平均0.84mm/day、分散0.168mm/dayであり期間中の変動変動は小さくほぼ一定と見なして良い。地熱による融雪は日量としてはわずかであり、表面融雪の多い日には相対的には重要でなくなるが、総融雪量(471mm)に占める割合は11%であり長期的な水収支等を考える上では無視できない量である。



図一4 熱伝導率-含水曲線



図一5 土壌水分測定位置

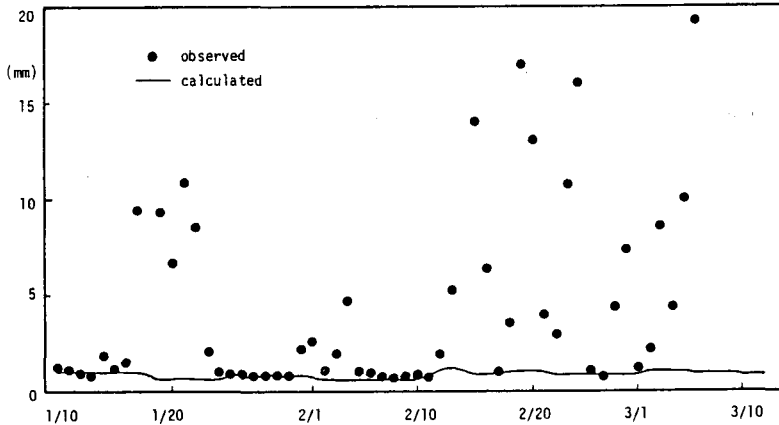


図-6 地熱による融雪量の計算値とライシメータへの流入量の比較

4 土壌水分の変化と流出量

1986年1月9日～3月14日までの斜面内各点の日最大、日最小含水比の経日変化を図-7に示す。また厳寒期の2月1日、融雪進行中の3月1日および消雪直前の3月10日の斜面内の含水比の分布を図-8に示す。これらの図から斜面内の含水比は融雪開始前には、斜面下方にごくわずかな高含水域が存在するだけで他の領域は10%前後の値を保っていることが分かる。2月中旬以後になって融雪が生じるようになって土中の含水比はそれほど大きく変化していないが、3月1日以後本格的な融雪が始まり、日融雪量が20～30mmに達するようになると土壌の含水比は急速に上昇し、消雪3日前の3月10日になると30%を超える高含水領域は斜面上方に拡大し、25%以上の含水比の領域が斜面全体の60%を超えるようになる。図-9には2月12日、2月23日、3月11日の表面融雪量、ライシメータへの流入量および斜面下流端流出量をそれぞれ示す。図から融雪の初期では表面融雪は積雪層内でその一部が保持され、さらに3時間近い時間遅れで融雪波形もかなり偏平になって積雪下面に到達し、これに対する流出もかなりゆっくりした応答を示している。2月23日になると表面融雪は若干の時間の遅れと変形を伴うものも積雪層内での損失はほとんどなく積雪下面に到達する。

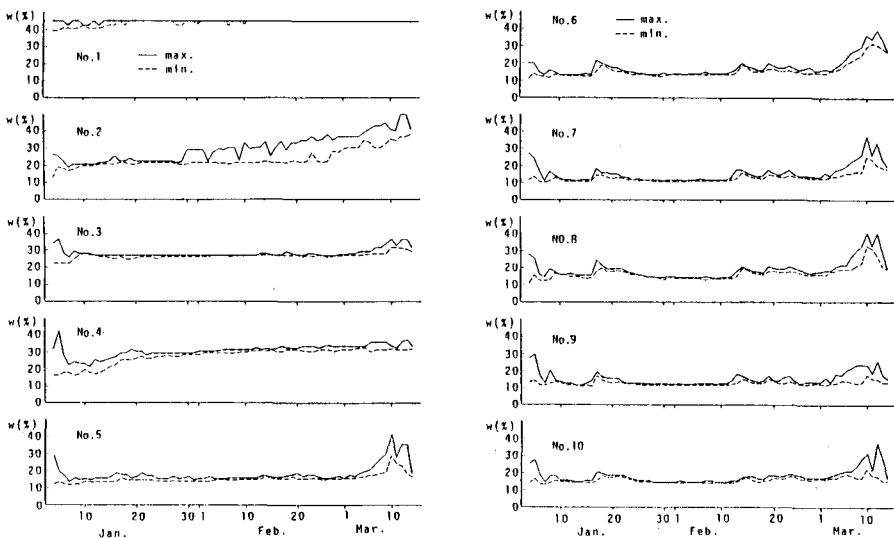


図-7 土壌含水率の経日変化

しかし、斜面からの流出は、図-9に示したように土壌水分の分布に大きな変化がないためその応答は2月12日良く似たゆるやかな応答を示している。しかし3月11日になると表面融雪とライシメータへの流入量にはほとんど差がなくなり、流出量も1～2時間の遅れで早い応答を示すようになっていくことが分かる。

最後にタンクモデルを用いた実験斜面の流出解析により融雪流出と降雨流出の相違について検討する。モデルは1986年1、2月のデータを用いて式(2)、(3)で表される誤差 E_1 、 E_2 が小さくなるようにパラメータを定めた。

同定されたモデルとパラメータを図-10に示す。斜面は単一砂層であるが3段タンクが必要であった。同定期間での計算結果を図-11に、1987年3

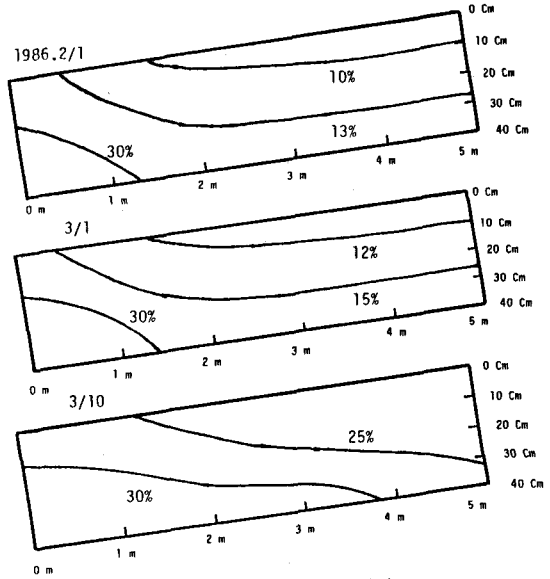


図-8 斜面内の含水率分布

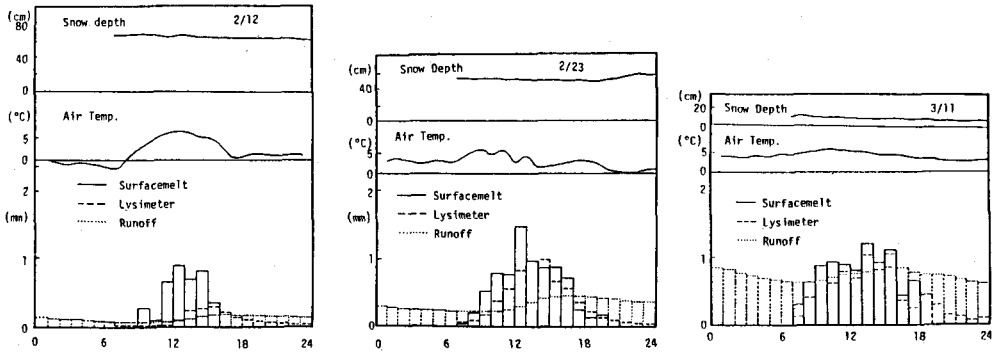


図-9 表面融雪量、ライシメータ流入量、斜面流出量の比較

$$E_1 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |Q_o(t) - Q_c(t)| \quad (2)$$

$$E_2 = \left| \frac{\sum_{t=1}^N Q_o(t) - \sum_{t=1}^N Q_c(t)}{\sum_{t=1}^N Q_o(t)} \right| \quad (3)$$

ここに、 $Q_o(t)$ は観測流量、 $Q_c(t)$ は計算流量、 t は時間、 N はデータ数

月の降雨に対する計算結果を図-12に示す。降雨期の計算において雨のない日の蒸発はハモン式を用いて推定した。図-11、12の両図を比較すると融雪期のデータを用いて同定したモデルによる降雨流出の解析結果は適合度、特にピーク付近、が悪くなっている。蒸発量の推定に検討の余地が残されているが、融雪流出と降雨流出に対して同じモデルを用いることには一考の余地があり今後さらに検討していく必要があると図-10

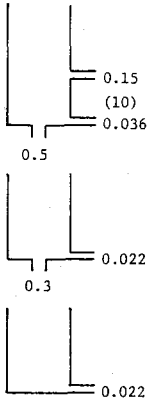


図-10 タンクモデルとその定数

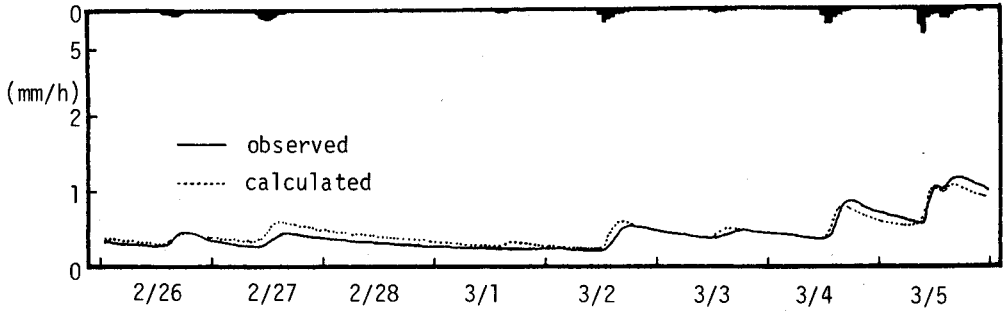


図-11 タンクモデルによる計算結果（融雪期）

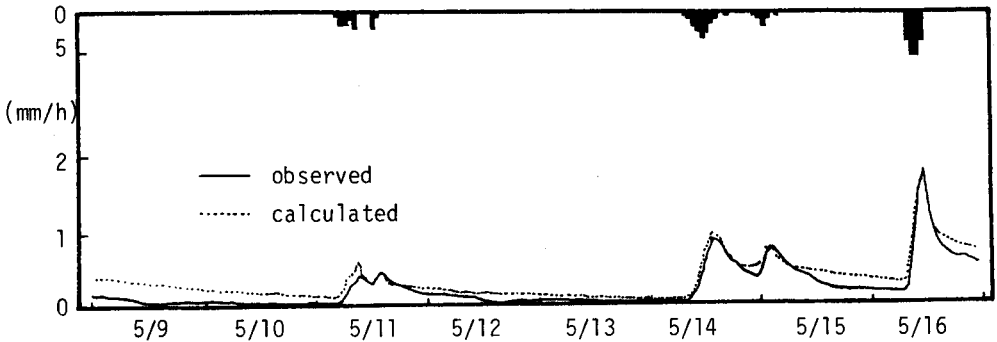


図-12 タンクモデルによる計算結果（降雨期）

5 おわりに

ここで得られた結果を要約すると次のようである。

- 1) 表面融雪の指標としては、日平均気温、昼間の平均気温、昼間の正の積算気温のいずれもが有効であり、融雪は日平均気温 -1.5°C 以上で起こる。
- 2) 浸透融雪量の指標としては日平均気温、1日の正の積算気温が有効である。但し、この場合地熱による融雪量を算定する必要がある。また、表面融雪が生じても下面に到達しない場合についての検討が今後必要である。
- 3) 地熱による融雪量は平均 0.84mm で期間中の変動は小さく、総融雪量に占める割合は11%と大きい。
- 4) 土中の含水比は斜面下流端の一部を除き10%前後の値であるが、融雪の最盛期には高含水域が拡大し、それに伴って流出の応答も早くなる。
- 5) 融雪流出と降雨流出に同じ流出モデルを使うことについては、さらに検討の余地がある。

最後に本研究を行うに当たって観測、実験に協力して頂いた河海工学講座の学生諸氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 大浦他：幾寅（金山ダム流域）における融雪の研究Ⅱ，低温科学，物理篇，27，pp.143～162，1969.
- 2) 山口甲：融雪出水予報の実例，雪水，33，No.4，pp.276～281，1971.
- 3) 宇治橋・高瀬他：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
- 4) 小島他：気温等単純な気象要素による融雪予測について，低温科学，物理篇，42，pp.101～110，1983.
- 5) 高瀬，宇治橋：融雪流出に関する実験的研究（その2），第29回水理講演会論文集，pp.137～142，1985.
- 6) 宇治橋，高瀬：融雪の進行に伴う土中水分の変化について，第41回年次学術講演会概要集，第2部，pp.29～30，1986.