

2層(砂, 雪)の融雪実験での気象要素が融雪流出過程に与える役割

The role of atmospheric factors influencing snowmelt runoff
by experiments using both snow layer and sand layer

長谷部正彦* 桑川 高德**

by Masahiko HASEBE and Takanori KUMEKAWA

The authors have conducted laboratory experiments to investigate both the role of atmospheric factors in the melting process of snow and the effect of infiltration into the sand layer. Laboratory experiments are performed using two layers which are chipped ice layer or snow layer and sand one.

From the results of these experiments, in a limited range of wind speed, it becomes obvious that the volume of snowmelt water is good related with wind speed and the effect of wind speed is important for the melting process of snow.

Keywords: snowmelt water, melting process, wind speed

1. はじめに

積雪地方における春季の河川水のほとんどは融雪出水によるものであり、この融雪水は水資源上、灌漑・水道水・発電用水等きわめて大きな役割を担っている。また、一方春季の河川洪水をも引き起こすものであり、この意味での融雪量の正確な予測は治水上重要な課題である。これまで、融雪流出の予測は、積雪表面のエネルギーの出入りを考慮し、融雪水量を算定する熱収支法と外気温を気象要素の代表指数として取り上げ、融雪流出量との関係における気温融雪率を求めて解析する気温日数法(デグリーデイ)または時間の関数として表すデグリーアワー法があり、経験的手法として用いられてきた。しかし、現地での適用については熱収支法は測定項目が多く、デグリーデイ法では流域により求められる気温融雪率はまちまちである。

著者等はこれまで融雪機構の解明として、気象要素と融雪量の関係についての素過程について実験的に検討してきた。その結果、風速と気温との積、すなわち熱フラックスと融雪流出量との関係がおおむね線形となる結論が得られた。本研究では、自然の融雪流出現象へ近づけるための第一段階として、実雪及び模擬雪を用いた室内実験を、砂層を用いた実験装置を用いて行い、気象要素と融雪流出過程の関係、さらに、土壌

* 正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設工学科

(〒321 栃木県宇都宮市石井町2753)

** 正会員 工修 宇都宮大学大学院 工学部建設工学科

(同上)

への融雪水の浸透過程、すなわち土壌水の鉛直プロファイル及び遅れ時間等を調べ、融雪流出現象の素過程を実験的に検討することを目的とする。

2. 実験装置及び実験項目

今回用いた実験装置を図1に示す。この装置は厚さ2.0 cmの亚克力板を用い、長さ120 cm、幅60 cm、高さ50 cmである。流出口は底面から0 cm、8 cm、17 cm、雪層と砂層との境界の4箇所に設けた。また、この装置は、水平方向より 10° に傾けて設置した。実験で使用した雪は奥日光で採取したもので、密度は 0.3 g/cm^3 、模擬雪は水を細かく砕水したもので（かき氷と同じと考えてよい）密度が 0.4 g/cm^3 であった。実験装置での砂層の厚さは26 cmであり、雪及び模擬雪の厚さは砂層の上に厚さ20 cmとした。雪あるいは模擬雪の設定に関しては、上から押し下り、叩いたりせずに厚さが均等になるように設定した。また、図2に砂層を用いない場合と比較検討をするために装置1と同じ条件の高さが30 cmの実験装置2を示す。実験で用いた砂の粒度分布を図3に示す。使用した砂の平均粒径は 0.9 mm 位であり、透水係数は $3.9 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であった。実験装置の外側は発砲スチロールで覆った。

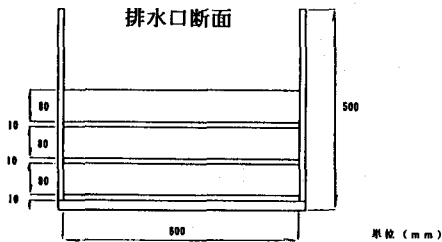
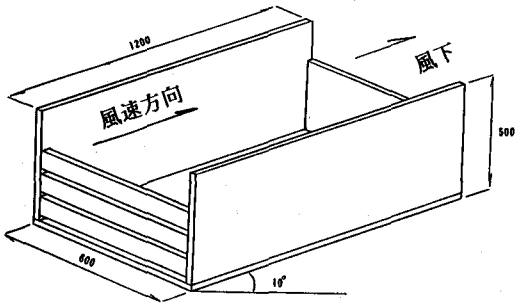


図-1 実験装置 1

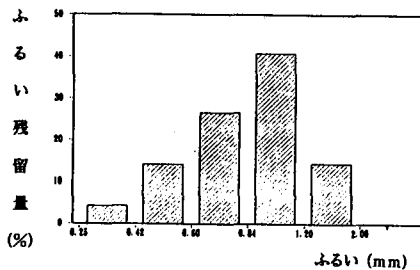


図-3 粒度分布図

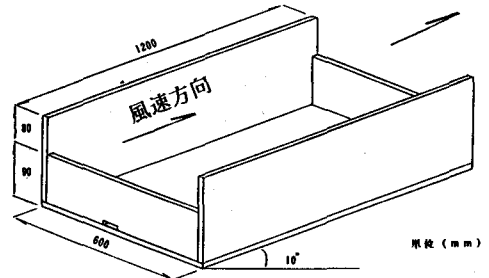


図-2 実験装置 2

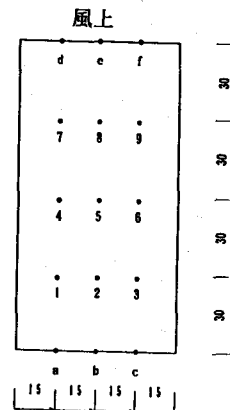


図-4 風速・湿度・測定ポイント

つぎに、温度の計測は雪面上に熱電対を設置して15分間隔で計測した。雪面層の中にも熱電対を設置し雪面上と同じ様に計測した。また、雪面上2cm、8cmのポイントで気温を測定した。風速に関しては、ハンディタイプの風速計を使用して計測した。測定ポイントを図4に示す。湿度に関しても風速と同じ測定ポイントで測定し記録した。風速は送風機を用い、実験装置の下側から勾配の上側に向かい送風した。また、風速を均一にするために、風の流入部に導流口を設置し実験を行なった。日射の入力は白熱球を用い、強さは自動的に調節できるようにした。日射の計測には日射計を用い、日射計は雪面上に設置した。砂の含水率の測定に関しては、砂層表面から5cm、15cmの深さの所で合計16ポイントの地点での砂の含水率を測定した。ここで砂を用いた理由としては、融雪水が砂層の中に浸透した場合の砂層内の土壌水の鉛直プロファイル及び遅れ時間がどのように変化するかを調べるためである(降雨の場合と同じであるかどうかを比較するためにも)。また、実験は風速・日射・気温・湿度を測定項目とし、日射・気温・風速を制御することによりおこなった。実験項目を表1に示す。

条件	風 (m/s)	u = 0.0		u = 0.5	u = 1.0		u = 2.0		u = 2.5
	日 射	有	無	無	有	無	有	無	無
氷 (模 擬 雪) 氷 (模 擬 雪) + 砂 実 雪 実 雪 + 砂	氷 (模 擬 雪)	○	○		○	○	○	○	
	氷 (模 擬 雪) + 砂		○	○	○	○		○	○
	実 雪				○				
	実 雪 + 砂				○				

表 1 実験項目一覧

3. 実験結果と考察

単位時間流出量のハイドログラフを図5に示す。実験条件は一定(日射：200W/m²、外気温：18℃、湿度 45 %)のもとで風速を0m/sから2.5m/sに変化させた場合のものである。風速が0m/sのとき、ハイドログラフはゆるい山形になっており、流出終了までの時間は風速が2.5m/sの場合より2倍くらい大きい。また、風速が大きくなるに従い、ピーク流量は大きくなって、その立ち上がりの遅れ時間は早くなり、さらに、ハイドログラフ上昇部の勾配は風速の増加とともにきつくなっていくことがわかる。ピークまでの到達時間についても風速が大きくなるにつれて短くなる傾向がある。

次に、図5と同じ条件での風速とピーク流出量との関係を図6に示す。このグラフから、風速が大きくなるに従い、ピーク流出量も大きくなっており、この関係からピーク流出量が風速に比例していることが示される。ただし、風速が無限に大きくなった場合にもピーク流出量が風速に比例するとは考えにくく、この実験範囲内の風速の場合には比例関係が成立していると考えられる。

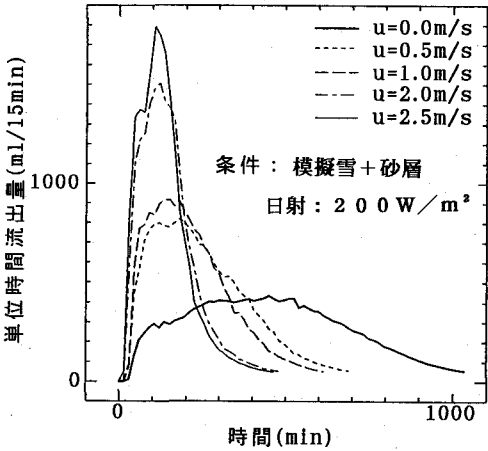
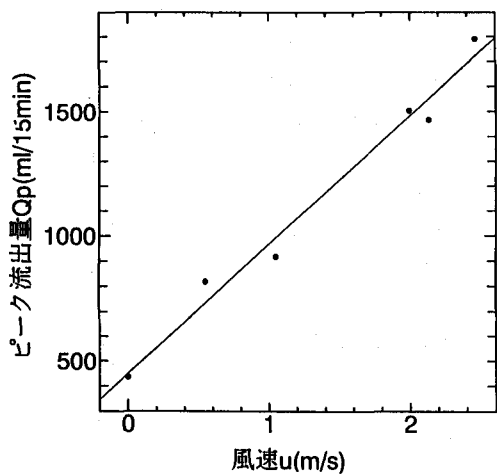
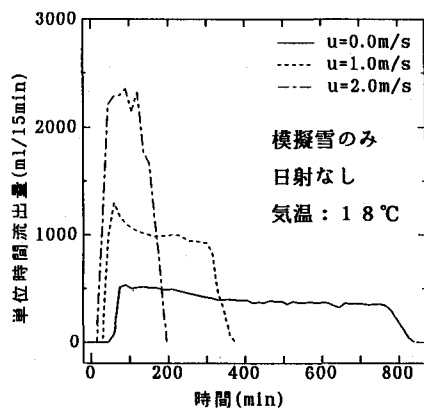


図-5 単位時間流出量図(15分間隔)

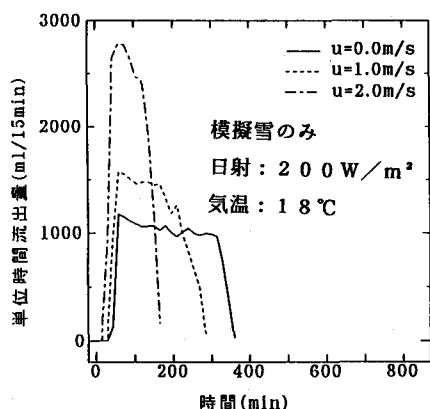


図－6 風速とピーク単位時間流出量図

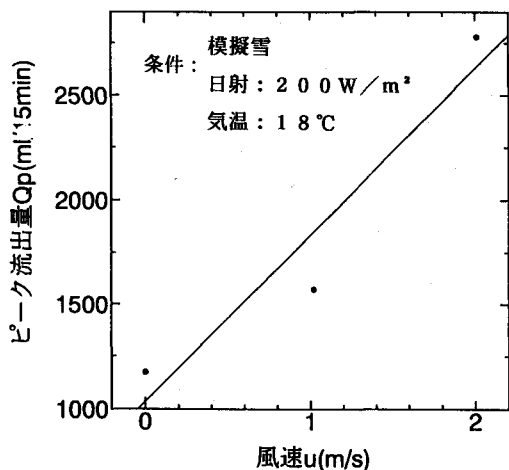
また、砂層がない条件で、日射がない場合の模擬雪のみ（砂層がない）の流出量のハイドログラフと日射が一定の場合についてのハイドログラフを図7、8に示す。実験では風速が0 m/s、1 m/s、2 m/sについて行なった。図7、8より、風速が0 m/sの場合には流出開始までの時間50分ほどかかり、流出し始めてからは日射がない場合もまたある場合にもほぼ一定量づつ流出していることがわかる。また、流出開始時のハイドログラフの立ち上がりの勾配は日射がある場合とない場合の両者ともほぼ同じ傾きであるが、単位時間流出量は日射のある場合の方が約2倍ほど日射がない場合よりも多い。これは明らかに日射の効果によるものであると考えられる。しかしながら、風速が1 m/sの場合について両者を比較してみると、ハイドログラフの山部の高さにおいては日射のある場合の方が1.4倍くらいとなり、さらに、風速が2 m/sの場合にはピーク流量については両者とも近くなり、風速の増加とともに日射の効果より風速の効果が卓越してくると判断できる。また、流出終了までの時間は、日射がある場合の方が日射がない場合より少しだけ短い、それ程おきな差とはなっていない。砂層を用いない場合について、風速とピーク流量との関係を図9に示す。図から模擬雪のみの場合には実験値は少ないけれどもおおむね風速に比例していることがわかる。



図－7 単位時間流出量図（15分間隔）



図－8 単位時間流出量図（15分間隔）



図－9 風速とピーク単位時間流出量図

次に、雪を用いた場合のグラフを図10(a)に示す。風速が1 m/sの場合で、砂層を用いた場合と用いない場合について、砂層を用いた場合には雪だけの場合に比べてピーク流出量は約2倍ほど大きくなり、流出開始時間も約2倍となっている。しかし、流出開始からピークまでの到達時間はそれ程変わらないことがわかる。この結果から、砂層はゆっくりとした流出を促す役割、すなわち貯留効果の役割を果たしていることが推察される。また、参考までに、模擬雪の場合の砂層の有無での流出ハイドログラフを図10(b)に示す。図11に風速が同じ条件で雪と模擬雪の場合(両者とも砂層がある場合)についての比較を示す。ピーク流量は両者ともそれ程大きな違いとはなっておらず、流出開始時間が模擬雪の場合の方が約2倍ほど早くなっている。

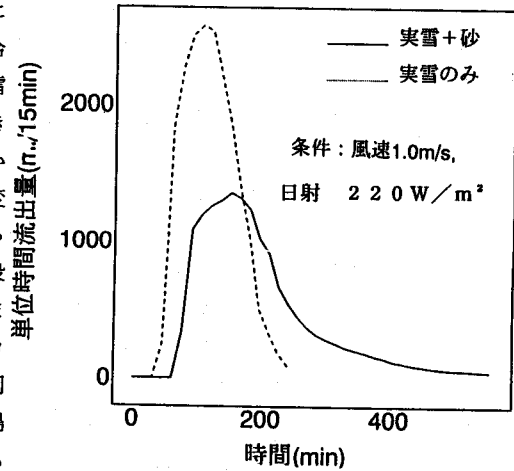


図-10(a) 単位時間流出量図(15分間隔)

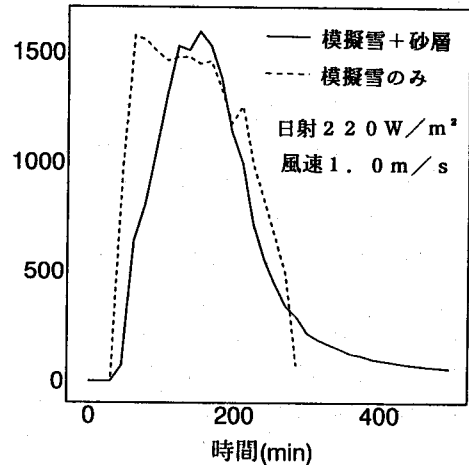
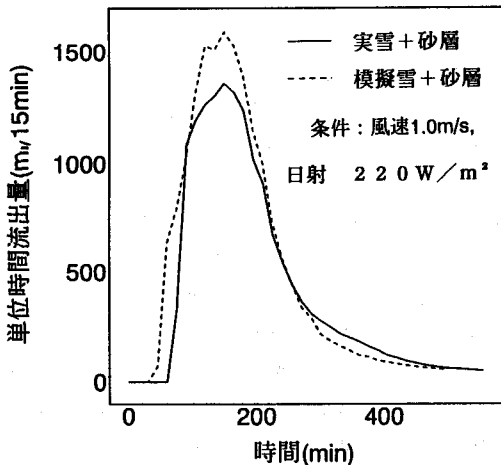


図-10(b) 単位時間流出量図(15分間隔)

図-11 単位時間流出量図(15分間隔)

次に融雪量の計算値と実験値との関係を図12に示す。実験値に関しては砂層を用いた場合であり、砂層の上に模擬雪を用いた場合である。計算値に関しては、融雪量を見積もるのに熱収支法を用いた。この場合、日射・顕熱・潜熱のみを考慮すれば次式となる。

$$QM = Qr + Qs + Ql$$

QM: 全融雪量、Qr: 日射による融雪量、Qs: 顕熱による融雪量、Ql: 潜熱による融雪量。模擬雪のアルベドは実験により0.4とし、顕熱量算定には渦相関法(詳細の計算方法は文献3)を用いた。また、潜熱量の算定には湿度の測定結果を用いてバルク法による

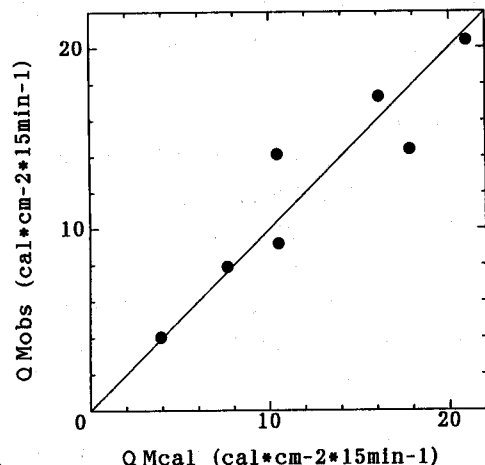


図-12 計算値と実験値との比較

り計算した（文献3、6参照）。なお、バルク係数は近藤（文献4）を参考して求めた。また、実験例は少ないがボーエン比はおおむね30位であった。流出量の測定値は、砂層中の水分残存量（実験開始前と実験後の水分量との差）を考慮した。このグラフより計算値と測定値はばらつきはあるもののおおむねよい一致をしていると思われる。最後に、流出量と風速の関係を図13に示す。この図は、15分間隔での流出量を気温で除したもの（ Q/T ）と風速（ U ）との関係であるが、線形関係になっていることが示される。今回の実験で砂層を用いた場合においても風速により融雪流出量が説明できることが示された。

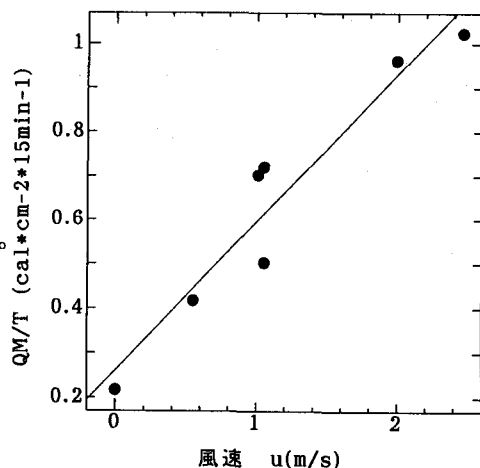


図-13 風速と単位時間流出量図

4. 結論

今回の砂層と雪層あるいは模擬雪を用いた実験より得られた結果を示す。

- (1) 気温一定、日射一定とした場合について、流出量は風速の増加につれて多くなり、実験範囲内では風速に比例していることが示された。
- (2) 風速と日射の関係は風速が大きくなるに従い、今回の実験のように限定された範囲内では、日射による効果は雪のみの実験の場合と同様に減じられ、風速の効果が卓越していることが示された。
- (3) 砂層を用いた今回の実験についても流出量に関しては、雪のみの実験の場合と同様に、風速と気温との積による熱フラックスと融雪流出量が比例していることが示された。
- (4) 砂層の融雪流出に於ける役割は、流出してくる融雪水を一時的に貯留し、流出を滑らかにするフィルターの働きとともに流出を遅らせる役割をしていることが示された。

以上のような結論が得られたが、砂層がある場合はない場合よりもより流出に於けるメカニズムが複雑となっていると考えられる。それは気象要素などにより溶けた融雪水が時間の遅れなく流出してくるわけではなく、雪層での融雪、貯留また砂層での貯留、流出をくり返し、その間にも新たな変化が加わるためと考えられるからである。砂層での実験を用いて、気象要素と流出との関係を調べたが、日射量に限定はあるものの、風速により説明できることが示された。また、今回の実験では定性的ではあるが砂層の役割についても検討できた。これらの結果は、実験室内での気象要素が制御されている場合で、実際の自然融雪現象と対応できるか否かは今後検討する必要があると思われる。

5. 参考文献

- (1) 長谷部正彦、桑川 高德、日野幹雄；融雪流出に影響を与える気象要素についての予備実験、東工大土木工学科研究報告、No. 41、1989
- (2) Wilson, W, T; An outline of the method the thermodynamics of snowmelt, Trans, Am, Geop. Union, 1941
- (3) 小島賢治；融雪機構と熱収支、気象研究ノート、第136号、1979
- (4) 近藤純正；身近な気象の科学、東大出版会、1987
- (5) 桑川 高德、長谷部正彦、田村文直、日野幹雄；気象要素が融雪及び融水流出過程に及ぼす役割の実験的研究、水工論文集、第35巻、1991
- (6) 宇治橋康行；水文量の変動パターン解析とその水資源計画・管理への応用に関する研究、1990