

## II-11 宮の森小試験地における融雪・降雨流出の比較

|          |     |     |    |
|----------|-----|-----|----|
| 北海道大学大学院 | 学生員 | 洪   | 廷芳 |
| 北海道大学工学部 | 正員  | 藤田  | 睦博 |
| 同上       |     | 山田  | 正  |
| 同上       |     | 長谷川 | 和義 |

### 1. はじめに

積雪地域において融雪流出は年間流出量に占める割合が大きい。しかし単位時間ピーク融雪量は融雪最盛期にさえ10mm/hr以下がほとんどであり夏季の降雨強度と比較すると1オーダー小さいものである。それゆえに流域に対して融雪水は安定な水源となっている。言い換えれば弱い降雨強度の連続降雨と見なし得る。この自然条件を利用すれば融雪流出は流域の流出応答の基本的な性質を知ること役立つことが期待される。このような観点から著者らは源流部に位置するところに小試験流域を設け、0次谷に相当する谷頭部及び全流域からの流出を夏季と融雪期において測定しその流出特性の違いを比較した。この研究においては融雪流出にもっとも影響する表層融雪、雪層浸透、気温、水温等を実測すると共に染料・塩水をトレーサとして融雪水の流量、流速を測定している。

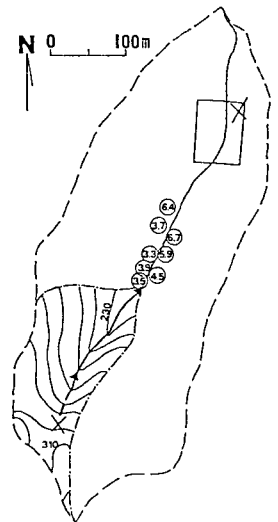
### 2. 対象流域

試験地は札幌市北西部に位置し、標高220mから340mの間であって北東に走る長方形に近い形を示す。標高280m付近が谷頭部の先端に当たり、その上流は15度から20度の緩勾配斜面であり平面的には凹状の収束集水型をなしている。図-1に地形と実験位置を示す。流域面積は0.026km<sup>2</sup>、河道延長120m、河道勾配0.25程度である。河道近傍の左右岸は長さ6m程度で45度の急勾配斜面、約全流域面積の5.5%を占め、それ以外は15度から25度の緩勾配斜面である。植生はミズナラ、シラカバ、カツライタヤなど落葉広葉樹の混合林で夏季に5cmぐらいの枯れ葉に覆われ、そして10cmの腐植物を含むA層である。

### 3. 流出測定

(1)夏季と融雪期の流出形態の違いを調査するため0次谷(A=0.01Km<sup>2</sup>)及び流域下流にそれぞれ三角堰を設置しこれに差圧式水圧計を取り付けることにより上下流2地点における流量測定を行った。

(2)降雨量は流域下流端から約200m離れたところで転倒樹型雨量計を用いて測定した。(3)融雪期の河川水温と気温は自記式温度計で X 浸透実験 □ 融雪実験測った。(4)深さごとの積雪密度は寸法(内法)5cm\*5cm\*2cm、前後 図-1流域地形と実験位置



が抜けた四角なステンレスの箱に柄と刃先を付けた角型サンプラーを用いて積雪層の鉛直方向密度分布を測定した。(5)表層融雪量は内径15cm、高さ5cmのエンビパイプで作った容器で、底が閉じたものと網が張って開いたものを1組み用意し、積雪表層を乱さないように隙間なく容器に入れる。このようにし融雪状態により適当な時間間隔で重量を測定することにより融雪量を測定した。(6)融雪水の積雪層中の流れ、また土層に入った水の浸透速度は染料及び塩水をトレーサとして測定した。(7)地面まで到達する融雪水は受水部が1.5m四方のライシメータを降雪前に斜面に設置し融雪時の流出を測っている。なお融雪水の水平移動を防ぐために融雪前に周りの雪を掘り出しビニールシートで囲んで再び埋戻している。

#### 4. 流出ハイドログラフ

4.1融雪期の場合：図-2は融雪期の3月下旬から4月下旬までのハイドログラフ、気温、水温、表層融雪量を示す。1)表層融雪量：斜面2カ所にそれぞれライシメータを設置しこれにより融雪量は測定されているが、その内の一方は上流側の緩勾配斜面にあり日当たりが比較的良好であることから下流側のライシメータの2倍～1.5倍の融雪量が得られた。しかしピーク発生時間及びその波形ともに相似であった。2)融雪ピーク時刻：融雪ピーク時刻は午前11時から午後16時の間に起き、一定な傾向が見られないが気温に強く影響され、4月上旬までは気温ピークに対し平均4時間の遅れがあるのに対し、4月後半には積雪のざらめ化が進みにつれて積雪中を鉛直流下しやすくなりピークの遅れも30分まで縮小した。3)河川流量：河川流量のピーク発生時間は4月上旬まではほぼ一定に午

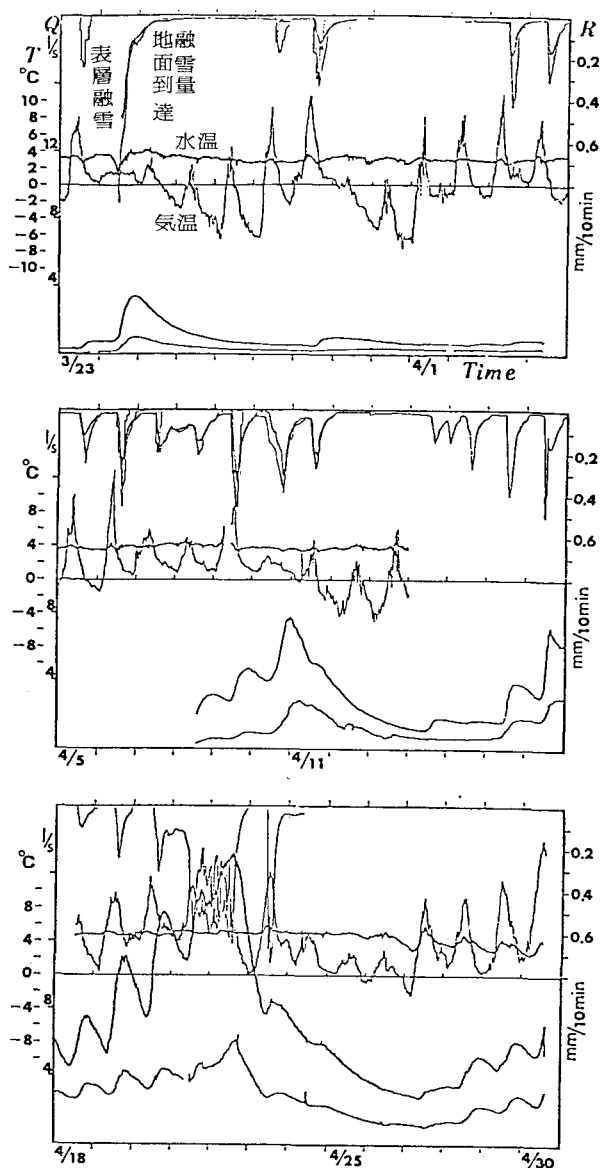


図-2 融雪期の表層融雪量、気温、水温、流量

後22時前後で起きているが4月中旬と下旬の後半は17時30分まで早くなり、その後再びそれより1時間程度遅くなった。のピーク時間の変動は積雪深及び積雪の状態と深い相関を持っていることが考えられるがそれ以外に土壤の湿潤状態にも影響される。すなわち融雪の日が続く場合、土壤の湿潤度が高くなり河川流量のピーク時刻もしだいに早く生起する。逆にしばらく融雪が起これないと河川流量のピーク発生時刻は再び遅くなる。4)日最低流量:日最低河川流量はほぼピーク流量より12時間遅れて生起し、またピーク流量時間と同じ傾向を示す。5)河川水温:河川水温の変動幅は4月下旬の後半を除いて1℃以内で4℃前後を維持している。融雪水が0℃であることからほとんどの融雪水は土層に浸透し地熱をもらった後に流出すると考えられる。6)谷頭部と下流部:谷頭部の流量ピークは下流流量ピークとほぼ同時に生起するが谷頭部流出波形のピーク付近は鈍い形を示している。これは谷頭部の収束集水型地形の影響であると考えられる。

4.2夏期降雨の場合: 降雨量が40mm以下の降雨の場合、降雨に対する流出応答が非常に速く、流量ピークは雨量ピークが発生後、データ観測時間間隔幅の10分以内に到達する。ハイドログラフ増水部の立ち上がりは急であるが比較的長い減水部を持つ。いままで得られたデータでは降雨量が40mm以下の小降雨の流出率は0.1以下である。急斜面が全流域に占める割合は5.5%であることから小降雨における大部分の流出が急斜面の表層付近の土壤からであり、また降雨の大部分は山腹の河道から離れた緩勾配斜面に貯留されると考えられる。大降雨の場合、雨量ピークに対する流出ピークの遅れ時間が30分から長くなるという興味ある結果が得られた。このことは流出寄与域の変動を示していると考えられる(夏期のデータに関しては参考文献(2)を参照されたい)。

## 5. 融雪期の河川水温と流量

融雪期の河川水は高い水温を示していたがほぼピーク流出時刻には一時的に低下していた。これは0℃の融雪水のうちの一部は表層流出成分として流出し地中流出水に河道の近傍で混合入したものであると思われる。これにかんしては熱収支及び水量の保存則を用いて次のように成分分離することができる。ここ

で  $Q$ : 総流出量、 $Q_s$ : 表層流出量、 $Q_{ss}$ : 地中流出量、 $T$ : 河川水の水温、 $T_s$ : 表層流出水の水温、 $T_{ss}$ : 地中流出の水温とする。

$$Q = Q_s + Q_{ss} \quad (1)$$

$$Q \cdot T = Q_s \cdot T_s + Q_{ss} \cdot T_{ss} \quad (2)$$

実験流域の下流400mにおいて測定した河川水温及び河道付近斜面の湧水水温は図-1中に示されている。こ

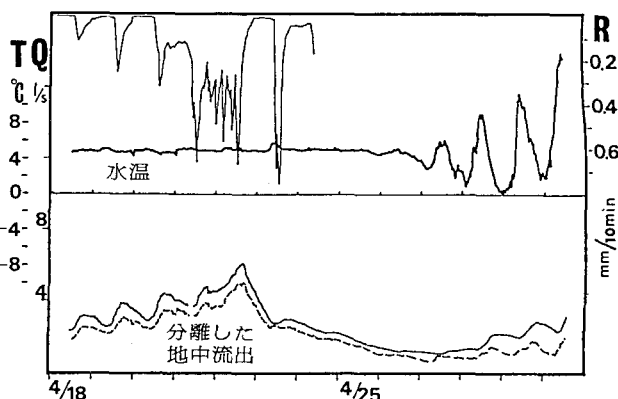


図-3 水温による融雪流出の成分分離

の図より湧水の水温は場所的にばらついていることがわかる。このことは地中流出成分は地温の異なる多くの層の土壤から流出していることを示唆している。流域で測った湧水の水温を参考にして仮に地中流出の水温を平均6℃とした成分分離の結果が図-3に示されている。この結果より地中流出成分は全流出のほぼ90%を占め、この逆説的な現象に関してはまだその物理機構は明らかではないがピーク流出直前での表層流出は最大であることがわかる。一方4月26日から水温と流出との対応が乱され、むしろ水温と気温との対応が一致する。これは河道上の積雪が融け河道が開いたことによる日射の影響で河川水温が上昇したと考えられる。4月21日から4月22日までの降雨データを見ると流出応答が速く、ほぼ気温あるいは融雪量と対応しているがこのときには水温の変化が見えない。これらのことから融雪流出の大部分は地中流出であることがわかったが一方流出の応答時間は10分以内であり、非常に速い応答を示している。

#### 6. 融雪水の融雪中における浸透(塩水・染料をトレースとする実験)

(1)融雪前期の4月7日に試験流域の約250m下流の山腹斜面で染料をトレースとする融雪水の流れの観測を行った。当日の積雪深は1.1m程度、雪層中のトレースの斜面方向流速は平均20cm/hrであった。調査した結果のうち大部分は表層融雪水が各々の積雪の層中を斜面の最急勾配に沿って下流へ流下するが層の隙間で下層に鉛直浸透する場所もいくつか見出された。また鉛直浸透の場合、フィンガリング現象も見られる。(2)融雪後期の4月18日から4月30日までは試験流域の谷頭部に連続3回塩水と染料とをトレースとする実験を行った。1回目は雪深が70cmで谷頭の堰までの距離は42mであった。堰の出口における伝導率の測定により塩水の散布から約8時間後に堰の河川水の塩水濃度はピークになりこれから単純に計算すると平均流速は約5m/hrであった。一方同時に行った染料実験の結果、融雪水はほとんど1m足らず斜面方向に積雪中を流下した後地表面と積雪境界面に到達する。しかしさらに下流を調べると融雪水は地中に入らず地表面との境界面に沿って流れていた。このとき地表面が薄い水層におおわれていたが、これが融雪水の地中への浸透を阻害していた。よって透水性の大きい(小さい)水層の有無は融雪水の地中への浸透を左右する重要な因子であることが考えられる。(3)2回目と3回目の実験では積雪深はそれぞれ50cm、30cm、堰からの斜面長は14.20と20mの場所であった。このときも前話と同様に堰のところにおいて伝導率計を使って塩水の伝搬を測ったがトータルとしての融雪水の積雪中での流下速度は200mm/hrと300mm/hrと大幅に小さくなっていた。同時に行った染料実験の結果から判断すると融雪水は散布場所から下流80cm以内において地中に入っていた。得られた200mm/hr～300mm/hrという流速は土壤の飽和透水係数と見なせば合理的であると考えられる。

#### 7. 流出特性の比較

1)流量ピーク及び流出率:夏季流出において表面流出が発生していない中小降雨においては雨量ピーク強度が大きくなるほど上下流の流出量のピーク比は大きくなる傾向がある。

しかし大降雨においては谷頭部において表面流が発達するために逆になる。融雪期の融雪量は夏季の降雨強度よりかなり弱く日単位周期の相似な波形を示す。図-3からわかるように全流域と谷頭部とのピーク流出高比は全融雪期を通してしだいに大きくなる。その原因は夏季の大降雨時と同じく、土壌の湿潤度が高くなるにつれて河道近傍の飽和域が発生しやすく、しかも収束円錐型の谷頭部においてそれが発達し易いと考えられる。夏季の一雨流出率は谷頭部より流域横斜面のほうが大きい。すなわち谷頭部の貯流高はより高くなっている。融雪流出は積雪の状態と気温・日射などに強く影響され、

しかも長時間、ほぼ毎日連続発生するため、夏季のようにひと雨ごとに流出率を論議することは難しい。この試験流域では全融雪水のほぼ100%が流出していた。

2)増水部の特性:一雨ごとの累加雨量と累加流量の関係において縦軸を累加流出の対数、横軸を累加雨量に取ると流出前半部が拡大されて表

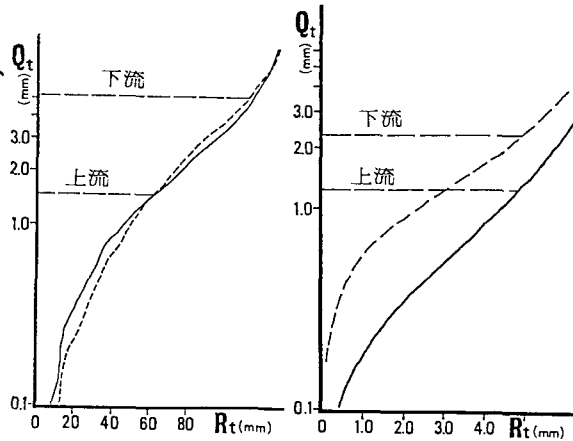


図-4 (a)降雨流出、(b)融雪流出の増水部

示される。図-4(a)に夏季流出、図-4(b)に融雪流出の例を示す。夏季降雨の場合降雨初期に降雨量に対する流出量の増加率は曲線の接線からわかるように谷頭部のほうが小さく、ある反曲点のようなポイントを境にして逆になる。その反曲点は夏季降雨と融雪との場合において共に累積流出量が1.5mm付近にある。これらの結果より流域の流出応答は累積雨量よりも累積流出とより大きい相関を持つようである。

3)逓減部の特性:降雨流出の減水部を両対数で表示したものが図-5(a)である。この図より折れ線が表示されており一般に言われる不圧逓減式(3)式でほぼ説明出来る。図-5(a)の例は一つを除き、一本の直線で現せる。すなわち二次減水あるいは遅い中間

$$Q = Q_0 / (1 + b \sqrt{Q_0 t})^2 \quad (3)$$

$$Q = Q_0 \exp(-a t) \quad (4)$$

中間流出の減水を示す。例外のデータは10分間に11mmの雨が降った場合(降雨強度66mm/hr)であり二

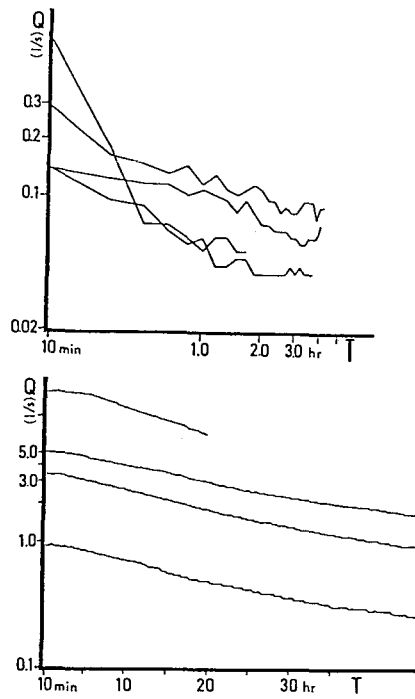


図-5 (a)降雨、(b)融雪流出の減水部

本の直線近似になり、一次減水または早い中間流出の減水をも含めていると考えられる。融雪流出の減水部を流量だけ対数に取れば図-5(b)のようになる。被圧減水の代表的な数式である(4)式で完全に説明できる。すなわち融雪流出の大部分は深層から流出したものであると考えられる。また融雪期を通して河川水温が4℃という融雪水よりかなり高い温度を保つこともそれを裏付けている。

#### 4) 貯留特性

4)貯留特性:r図-6(a)は小降雨であるが無降雨の10時間を挟んで前後にそれぞれ継続1時間総雨量12mm

$$S = iQ^j \quad (5)$$

と継続40分総雨量8mmの降雨があった場合を示す。(5)

式の指数関数が成立するとすれば1価関数になるが図-6(a)と図-6(b)の融雪例ではヒステリシスを示すようなループの形状が見られ、かつそのループの方向は違っている。それは比較的短時間に強い降雨強度があった場合、長い継続時間・弱い降雨強度の場合の流出の違いに対応していた。融雪流出の例では夏季流出と同じように谷頭部の貯留高はやや高い値を示している。しかし夏季の連続降雨の場合では同じ流量でも貯留高がしだいにたかくなるのに対して融雪流出の場合はほぼ一本の曲線を中心とするループの繰り返しである。これは融雪時には表層土壌はほぼ飽和に近い状態、言い換えれば流域はほぼ最大可能な貯留高に近い状態であることを示している。

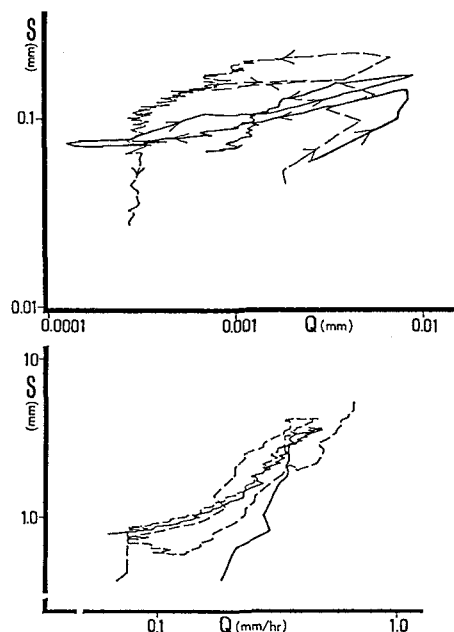


図-6 (a)降雨、(b)融雪の流量-貯留

#### 8. 結論

本論文は1次谷の源流域において夏期と融雪期を通して流出応答の相違を検討したものである。以下に得られた結論を記すと、(1)流域の小降雨に対する流出応答は非常に速いが流出に寄与するのは殆ど河道近傍の急斜面のみで流出率は0.1以下である。融雪流出は弱い日単位周期を持った相似な波形を示している。全融雪期を通して流出率はほぼ1である。(2)ハイドログラフの増水部・減水部及び貯留特性をそれぞれ検討した。(3)融雪時の観測河川水温と湧水水温を利用して流出の成分分離を試みた。(4)融雪水の浸透特性をトレ-サを用いて観測した。本研究の遂行に当たりは文部省科学研究費(代表藤田睦博・山田正)の補助を受けている。流出観測及び実験において著者らは北大工学部本講座の小林稔、望月明彦両君をはじめ多くの学生諸君の助力を頂いている。ここに記して謝意を表す。

参考文献:(1)小林大二・植松孝彦: 融雪期における河川源流域の水温III, 低温科学, 物理篇, 35, 1977。(2)洪廷芳・藤田睦博・山田正: 宮の森小試験地における流出特性と横流入ハイドログラフに関する研究, 水理講演会論文集, 1987。