

電導度による融雪流出の成分分離と 融雪流出過程に関する研究

志 水 俊 夫⁽¹⁾

SHIMIZU, Toshio : Studies on Hydrograph Separation by Stream
Conductivity and Run-off Process during the Snow-melt Season

要 旨：山地流域において積雪は水資源として重要な部分を担っている。それゆえ融雪期における流出過程を解明することは、河川水の有効利用をはかる上で非常に重要である。本研究では宝川森林理水試験地における融雪期の流量と水質の観測結果を利用して、まず電導度と比流量との相互関係から融雪流出ハイドログラフを直接流出成分と地下水流出成分に分離した。次に、両成分の経時変化と融雪流出水の供給源である対象流域の積雪分布の経時変化を検討することにより、融雪期における流出過程について検討した。その結果、融雪の進行に伴い流出形態は異なり、融雪期前半では直接流出成分のピークと地下水流出成分のピークは一致しているが、融雪期後半では直接流出成分のピークは地下水流出成分のピークよりも遅れることが認められた。また、地下水流出成分の全流出に占める割合は、融雪期の前半の方が後半と比較して大きいことが分かった。これらは積雪域の後退によって各流出成分の河道への到達時間が変化することによるものと考えられた。

1 は じ め に

我が国における水源地帯は山岳地域で冬期には積雪の見られるところが多く、これらの積雪地域の河川における春の融雪流出は、時として山麓部において融雪洪水をもたらし、治水上の大きな問題となるが、一方では、発電・灌がい・生活用水などの公共用水の主要な供給源にもなっている。融雪期における山地河川の流出特性及び流出機構を把握することは、治水対策並びに水の有効利用にとって重要な課題である。

しかし、山地流域における積雪期の気象要素の観測及び河川流量の正確な測定は、冬季の自然条件の厳しさもあり、無積雪地域の河川と比較して水文資料は必ずしも十分に確保されていないのが現状である。従って、積雪一融雪期を対象として水文解析を行った研究は少なく、流出解析の基礎となる融雪期の流出特性、融雪流出過程などは十分に明らかになっていない。

最近では、水質が河川水の履歴を示すという水文学的特徴を利用して、融雪期における流出の成分分離、流出過程の検討などが行われている（小林，1985；小池，1986；MARTINEC，1975；坂本，1985）。

このような背景から、本研究では山地流域における雪水資源の開発と保全に資することを目的に、まず流出解析をするための、また、流出過程を解明するための基本的データとなる流出成分の分離について、電導度を利用した分離方法と従来の方法である減水定数を利用した分離方法により解析を行い、両

者の比較検討を行った。

次に、河川水の電導度を利用して分離された融雪期における流出の直接流出成分と地下水流出成分の経時変化、及び融雪流出水の供給源である対象流域の積雪分布の経時変化を検討することにより、融雪期における流出過程について考察した。

2 対象流域と測定方法

2.1 対象流域の概況

本研究で対象とした流域は、森林総合研究所宝川森林理水試験地の初沢流域であり、利根川上流域（基地露場：東経 139°01′，北緯 36°51′，標高 816 m）に位置し、1937 年より水文観測が行われている。

初沢流域は面積 117.90 ha，標高 800～1370 m，平均傾斜 24°45′，平均方位 SSW である。地質は主として花崗岩類，御坂層といわれる第三紀層，これらをつらぬく種々の小貫入岩及び崩壊推移によってできた第四紀層からなる（東京営林局，1943）。この流域で出現する主な土壌は褐色森林土と乾性ポドゾルで露岩地も点在している。また植生は，過去においては主にブナ林でヒバ，ナラが混在していたが，1961～1963 年にかけて皆伐が行われ，跡地にはスギ，カラマツが植林され現在に至っている。

Fig. 1 に位置及び地形図を示した。

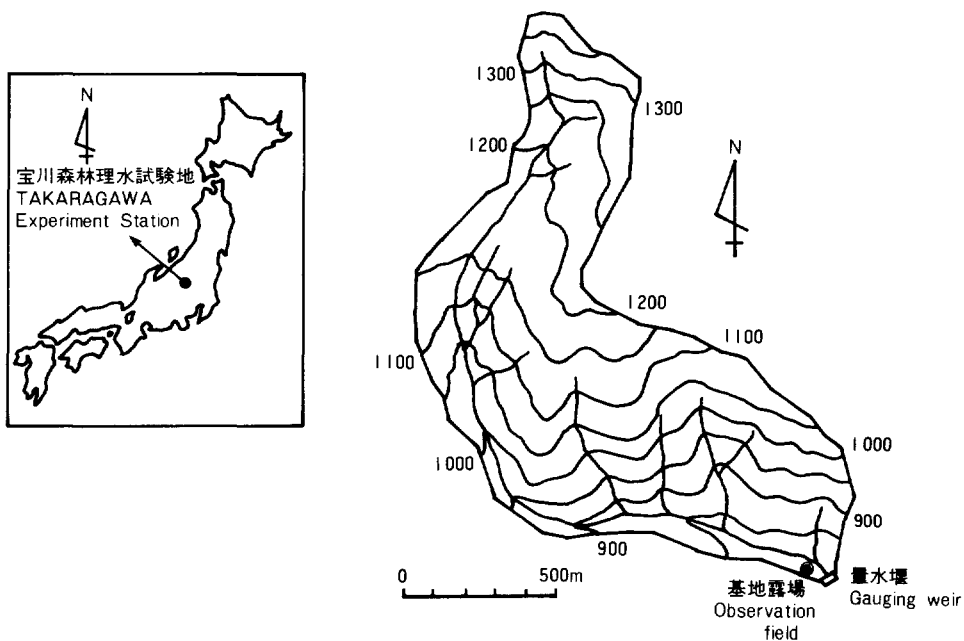


Fig. 1. 宝川森林理水試験地の位置及び初沢流域の地形図

Location of TAKARAGAWA experiment station and topographic map of SHOZAWA experimental watershed.

当地域は表日本側にあるが、関東地方最北西端の本州脊梁山地で、太平洋岸より約 150 km、日本海岸より約 70 km の高度 600～2 000 m にも達する区域で、冬期間は裏日本型山岳気候となる。基地露場における年平均気温は 8.3℃、年平均降水量は 2 134 mm であり、積雪は平均して 11 月下旬に始まり 4 月下旬に終わるが、5 月初旬に及ぶ年もある。根雪の期間は平均して 12 月中旬から 4 月下旬である。なお、初沢流域における融雪期 3 月～5 月の流出量が年流出量に占める割合は 65% 前後である。

2.2 測定方法

河川流量は流域下端の量水施設において自記水位計により観測を行っている。量水施設の構造は、幅 1 m のバザン式矩形ノッチ 7 個が 0.8 m 間隔で設置された量水堰である（前橋営林局，1950）。

本研究で河川水の電導度を測定するのに使用した水質自記計測システムは、小型マイコンを利用した CTI サイエンスシステム社製のものである。測定方式・精度などは既報（志水，1986）に詳しく記載したので、ここでは省略する。なお、測定期間中は点検及び携帯用電導度計による測定をほぼ 2 週間ごとに実施し、自記計測値を比較校正している。また、電導度の値は 25℃ に温度補正した値で示した。

降水量及び積雪深については、基地露場で積算雨雪量計により一定期間ごとに観測を行っているのみである。従って、この期間の日単位の降水量及び積雪深については、対象流域から約 3 km 離れたいる前橋地方気象台藤原観測所（東京電力須田貝ダム、標高 700 m）における値を使用した。気温及び地温は基地露場において観測を行っている。また、融雪量は直径 40 cm、高さ 40 cm の銅製円筒を利用し、円筒内の積雪からの融雪水を測定している。

3 融雪期における河川流量と積雪分布の概況

水資源の保全と開発にとって、山地流域における融雪流出過程の解明を行うことが重要な課題であるが、ここではまずその前段として融雪期の流出がどのような特徴を持っているか、さらに、流出の供給源である積雪分布の経時変化について概観する。

3.1 河川流量の季節変化

Fig. 2 は初沢流域における融雪期の流出量と気象要素の変化を示したものである。この例に示されるように、融雪流出は気温の上昇と密接な関係にあり、気温が低い融雪開始前の冬期間の流出は非常に少ない。融雪期に入り流出量が一度急上昇すると、その後は気温の変化と対応しながら流出量は増加する。この変化過程で最初に流出量が急激に増加する立ち上がりは融雪流出の始まりと考えられる。その時期は年によって多少異なるが 3 月中旬ごろで、これまでににおける宝川試験地での調査結果（志水，1983，1987）を総合すると、日平均気温の 10 日間移動平均が -1°C を超えるようになる時期と一致している。従って、基地露場におけるこの気温を融雪流出開始の指標とすることができるといえよう。

3.2 河川流量の日変化

積雪地帯の小河川では、融雪水の供給により、春期に顕著な流量の日変化が起こる。Fig. 3 に降雨の影響のないときの気温と融雪量及び流量の日変化を例示した。

一般に気温、融雪量、流出の各ピークは一致しないが、これは積雪層内の融雪水移動の遅れに関係していると考えられる。すなわち、積雪は外界の大部分の熱を積雪上部表面から吸収して融けていき、そ

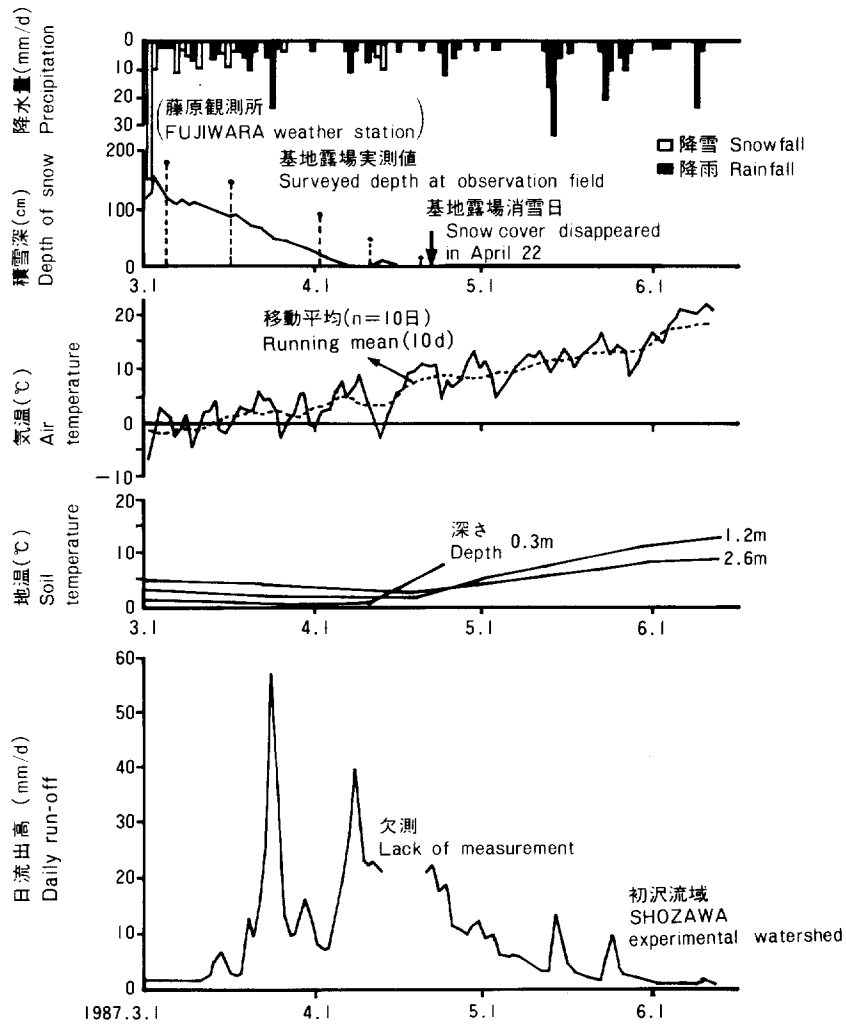


Fig. 2. 融雪期における流出量と気象要素の変化

Temporal variations of run-off and meteorological factor at the snow-melt season.

の融けた水は重力水となって、積雪の粒子間の間隙を流下し、積雪の下面から地表面に流出するという形態をとることによる。

宝川地域の場合、基地露場での日最高気温は融雪全期間を通じて12~15時に、日最低気温は3~6時に現れ、季節的な変動は見られない。一方、初沢流域の日最大流量の出現時刻は16~20時で融雪が進むにつれて早くなり、融雪最盛期には18時ごろにピークが現れる。日最小流量は12時前後に現れ、融雪全期間を通じてほぼ一定である。気温及び水位記録の検討から、気温ピークと流出ピークの lag-time (出水の遅れ時間) は融雪の進行、すなわち、積雪深の減少とともに小さくなる傾向が認められた。

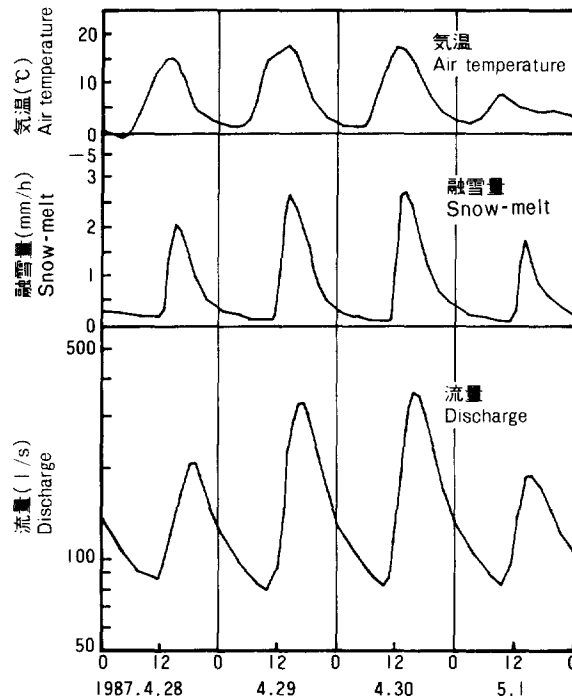


Fig. 3. 初沢流域における融雪期流量の日変化

Daily variation of discharge at the snow-melt season on SHOZAWA experimental watershed.

3.3 積雪分布の変化

流域内の積雪域の面的変化は、融雪期の流出特性に影響を与える因子として重要な部分で、融雪期の流出予測及び流出過程の解明を行う場合に把握しておくべき基本的項目である。すなわち、流域全面が積雪で覆われている時期と融雪により積雪域が減少している時期とでは、当然、融雪流出機構に差異があると考えられる。このため、ここでは対象としている初沢流域について積雪分布状況の経時変化の把握を試みた。

Fig. 4 は初沢流域における積雪分布の変化、すなわち、流域下端にある基地露場の消雪日以降の流域内観測点における消雪日及び積雪域の目測と標高—累加面積率の関係から算定された残雪面積割合の変化を示したものである。同図から標高により消雪時期が異なり、標高の高い所ほど消雪日の遅いことが認められる。また、残雪面積割合は日数の経過とともに指数関数的に減少し、1987年は23日間で全流域が消雪している。このように融雪期後半になると積雪域はしだいに縮小して、積雪域境界は河道から後退し、標高の高い所へ移動することが理解される。

本研究では融雪流出開始から流域下端の基地露場が消雪する日までの流域全面が積雪で覆われている期間を融雪前期、それ以降の積雪域が次第に河道から後退し、流域内に露出部分が現れて融雪流出が終了するまでの期間を融雪後期として検討を進めた。

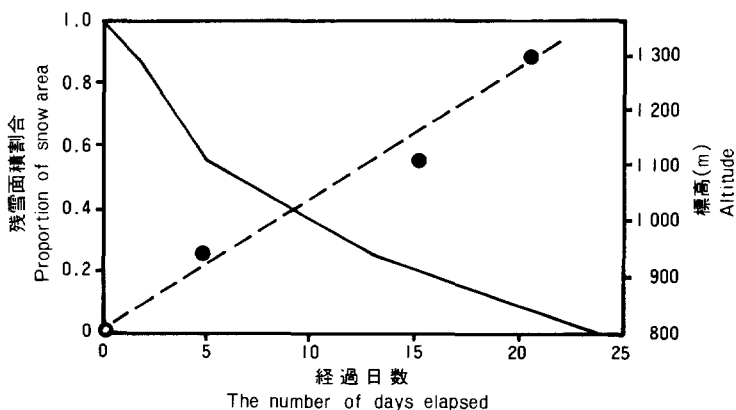


Fig. 4. 初沢流域における流域内観測点の消雪日と残雪面積割合の変化 (1987 年融雪期)
The day that snow cover disappeared on the surveyed spot and changes of proportion of snow area in SHOZAWA experimental watershed (The snow-melt season in 1987).

- : 基地露場消雪日
Snow cover at observation field disappeared in April 22, 1987.
- : 流域内観測点の消雪日
The day that snow cover disappeared on the surveyed spot.

4 融雪期における流出成分の分離

現在までのところ融雪流出の流出成分を分離し、流出解析を行った研究は極めて少ない。それは融雪流出のハイドログラフが複合ハイドログラフの連続からなり、流出成分の分離が困難なことから、流出モデルが融雪流出機構の実態よりも出水現象への適合性を重視してきたことによるものと思われる。

降雨流出と同様に融雪流出においても、その流出過程を明らかにし、さらに、流出機構に立脚した流出予測方法を提示するには、流出成分を分離し、ハイドログラフをより詳細に解析する必要がある。

ここでは、従来の減水定数を利用した流出成分の分離方法と、電導度を利用した分離方法を用いて融雪期のハイドログラフ解析を行い、それぞれの特徴について比較検討した。

4.1 減水定数を利用した方法

一般に使用される流出成分の分離方法は、流量の減水特性を利用したものが多く、流量の減水特性は流域特性を代表する重要な指標として考えられており、それは流出成分の分離に関して基本的な役割を果たしているといえる。

無降雨期間のハイドログラフは、比較的規則性を持った減水の仕方をするが、その流量減水部の曲線型として最も一般的なものは減水指数関数型である (BARNES, 1936; HORTON, 1933)。そこで本研究では、次式を使用して減水特性を検討することとした。

$$q = q_0 K^t \dots\dots\dots(1)$$

ここで q_0 : 初期流量, q : t 時間経過後の流量, K : 減水定数である。

ハイドログラフの減水部を減水指数関数型で表した場合, 減水部にはいくつかの変曲点が認められる。それぞれの点の間は (1) 式で近似できるが, K の値は流出機構の差異のためにかなり異なった値となる。

ここでは初沢流域について次のような方法で減水定数を計算した。いま流量が減水している部分の流量時系列データの先行流量と後行流量を両対数紙上にプロットすると Fig. 5 のようになる。同図によれば, 流量が 10 l/s 及び 60 l/s 程度のとときに変曲点が認められる。その変曲点の間は直線で示されるが, その傾きが先の減水定数に相当するもので, 計算を行ったところ, 減水定数の値はそれぞれ次のようになった。

$$K_s = 0.9369 \quad (q > 60 \text{ l/s})$$

$$K_i = 0.9667 \quad (10 \text{ l/s} < q \leq 60 \text{ l/s})$$

$$K_b = 0.9932 \quad (q \leq 10 \text{ l/s})$$

ここで K_s は表面流出, K_i は中間流出, K_b は地下水流出に対応していると考えられる。

これらの減水特性を応用して流出成分の分離を行うのであるが, 融雪流出は降雨流出と異なり複合ハイドログラフの連続であるので, 流出成分の分離は非常に複雑となる。すなわち, 本来各日の融雪による流出は単独のハイドログラフであるが, 融雪は気象条件にもよるがほぼ毎日起こっているために, 1 日ごとの流出ハイドログラフは時間的にずれながら重なりあって日変化を示す複合ハイドログラフとなる。

Fig. 6 は初沢流域を対象にして上述の減水定数を利用して 1 日ごとの融雪流出を分離したものであ

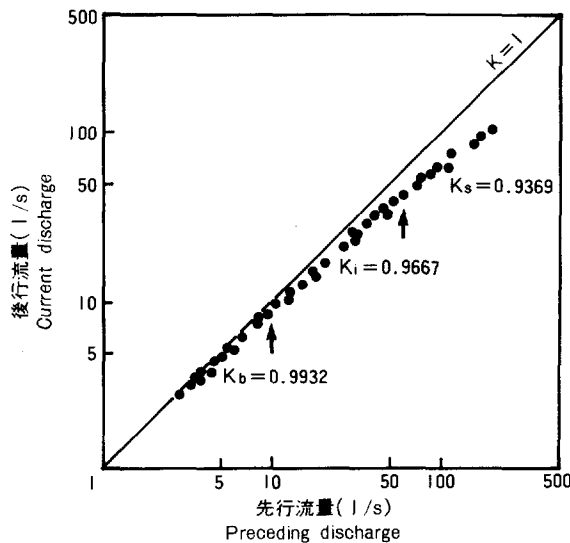


Fig. 5. 初沢流域における減水定数 ($K: h^{-1}$)
Recession constants for SHOZAWA experimental watershed.

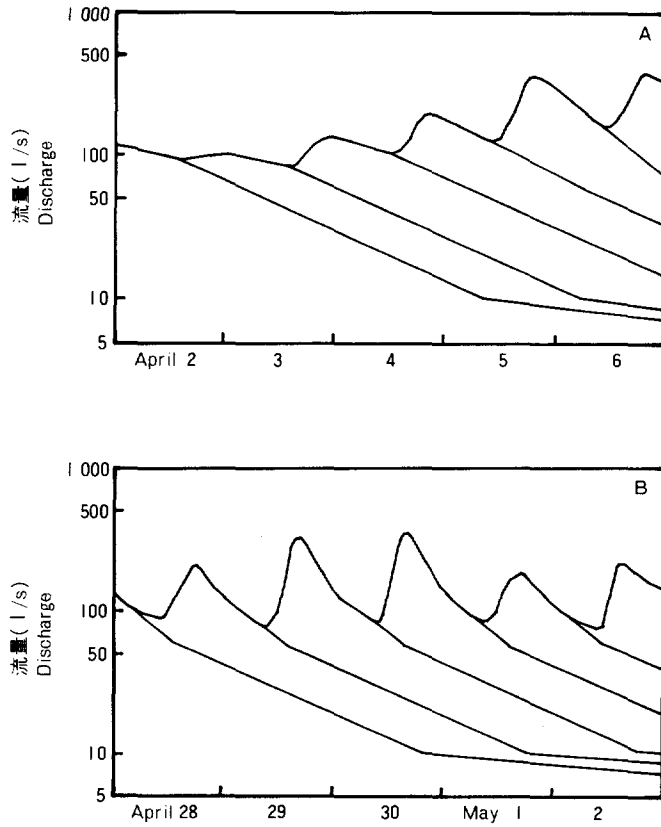


Fig. 6. 初沢流域における減水定数による融雪流出の分離結果 (1987年融雪期)
 Separation of snow-melt run-off hydrograph using the recession constant for SHOZAWA experimental watershed (The snow-melt season in 1987).

- A : 融雪期前半 (流域全面が積雪で覆われている時期)
 The former period of snow-melt run-off
 (The whole area of watershed is covered with snowpack)
- B : 融雪期後半 (流域内に露出部分が現れている時期)
 The latter period of snow-melt run-off
 (A part of the surface of watershed is recovered in snowpack)

る。これは各日の融雪による流出という概念を示したものであるといえる (小林, 1968)。しかし、実際の融雪期の流出では、融雪水の一部は直接流出成分、一部は地中へ浸透して地下水流出成分となるので、この図のように単純に流出成分を分離することはできない。そのため、減水特性を利用した直接流出及び地下水流出の流出成分の分離方法が検討されている。なお、同図のAは融雪期前期の流域が全面積雪で覆われている時期、Bは融雪期後期の積雪域が減少し、流域内に露出部分が現れている時期である。

石原 (1955) は、各日の融雪に対応する出水の base length を次式により求め、Fig. 7 の分離例1のように、ハイドログラフの変曲点から減水曲線を延長して、直接流出成分と地下水流出成分を分離す

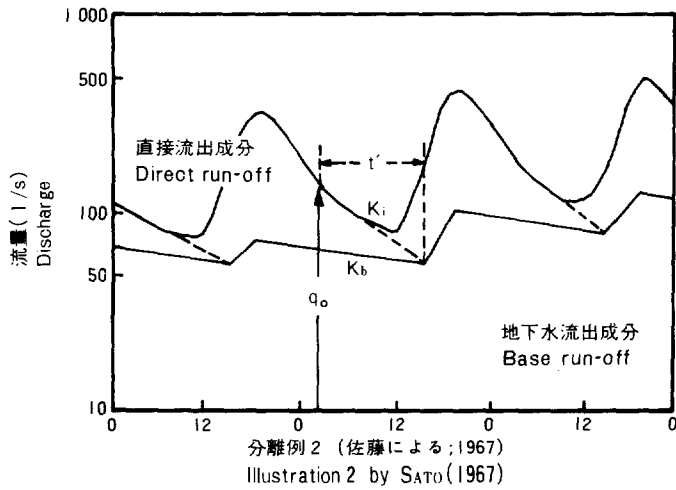
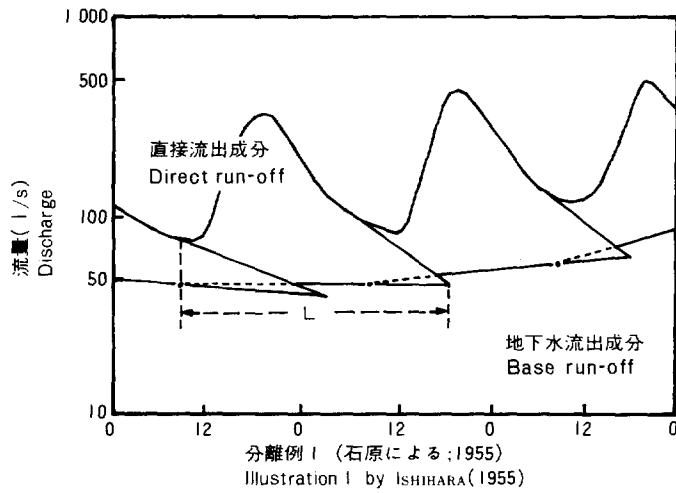


Fig. 7. 減水定数を利用した流出成分の分離方法
Separation methods of hydrograph using the recession constant.

る方法を示している。

$$L = 5 (t_{PR} + t_R / 2) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 L : base length, t_{PR} : 融雪量の最大の時刻からハイドログラフのピークまでの遅れ時間, t_R : 融雪時間である。

佐藤 (1967) は、中間流出領域の起点流量 q_0 とそのときの地下水流量 q_{b0} との比 (q_{b0}/q_0) と q_0 の間に直線的関係を見出し、さらに、地下水流出の減水定数 K_b はほぼ一定と見なしうることに着目して次式を導いた。

$$t' = \frac{\log(a - bq_0)}{\log K_i - \log K_b} \dots\dots\dots(3)$$

ここに t' は q_0 の時刻から地下水流出起点時刻までの時間であり、 K_i は中間流出領域の減水定数、 a 、 b は定数である。そして Fig. 7 の分離例 2 のように t' を知るにより、地下水流出起点時刻からピーク時刻まで、地下水流出の減水定数を利用して、分離線を BARNES (1936) の方法に準じて延長して、地下水流出成分の分離を行っている。

これらはいずれも基本的には減水勾配変曲点、減水定数などの減水特性を利用して流出成分の分離線を増水部へ内挿する方法である。

4.2 電導度を利用した方法

一般に、溶存化学成分や同位体などをトレーサーに用いた流出成分の分離に関する研究 (BOTTOMLEY, 1986; DINCER, 1970; MARTINEC, 1975) においては、融雪期の流出は流量の増大を生起させた融雪水そのものの化学成分を有する流出成分と、融雪水による影響を直接化学的に受けていない流出成分とに分離されている。ここでは前者を直接流出成分、後者を地下水流出成分と定義して検討をすすめる。

水質による流出成分の分離方法としては、一般に水質流出現象において質量保存の関係が成り立つ場合 (瀬口, 1985)、次式を使用することができる。

$$Q = Q_d + Q_b \dots\dots\dots(4)$$

$$C(Q_d + Q_b) = C_d Q_d + C_b Q_b \dots\dots\dots(5)$$

ここで Q 、 C : ある時刻における流出量と水質濃度、 Q_d 、 C_d : 直接流出量とその水質濃度、 Q_b 、 C_b : 地下水流出量とその水質濃度である。(4) 及び (5) 式より次式が得られる。

$$Q_b = \frac{(C - C_d)}{(C_b - C_d)} Q \dots\dots\dots(6)$$

(6) 式において、ある時刻における流出量 Q と水質濃度 C は測定可能であるので、その時の C_d 、 C_b の値が得られれば、地下水流出量 Q_b が算出できる。そして、その値を流出量 Q から差し引くことにより直接流出量 Q_d が求められ、この結果、直接流出成分と地下水流出成分の分離が可能となる。

しかし、この場合 C_d 、 C_b にかかわる河川水の水質濃度を現地で、しかも連続的に測定することは、現実問題として非常に困難を伴う。そのため水質濃度に代わる測定が容易なトレーサーが検討されているが、その一つに河川水の電導度を利用する方法がある。

電導度が流出成分分離に利用できることは、すでに河川水中の溶存イオン濃度と電導度及び流量との相互関係から明確にされている (志水ら, 1990)。さらに、電導度は現地での測定が容易で、連続観測が可能であることから、非常に有力なトレーサーとなることが示されている (小林, 1985; 瀬口, 1985; 志水, 1986)。従って、ここでは電導度を利用した分離方法について考察する。

小林ら (1985)、坂本ら (1985) は、表層流出あるいは早い流出成分の電導度を積雪の値とし、地中流出あるいは遅い流出成分の電導度をハイドログラフの谷部の値あるいは観測期間の最大値として、それぞれの値が期間内で一定であるとして流出成分を分離している。融雪期間は流量が一日のうちに時間

変動し、流出の遅れがあるため、観測期間内で電導度が最大になる点、あるいは流量が最低になる点が必ずしも全量が基底流出であるとは限らないので、この方法では(6)式による計算値がマイナスになる場合があるという欠点がある。

NAKAMURA (1971) は、直接流出成分の電導度が斜面長の関数で表せると仮定し、基底流出成分の電導度を流量の分数関数で表すことにより、流量下降期の流出成分の分離を行っている。さらに、小池ら (1986) は直接流出成分の電導度を積雪の観測値で一定とし、基底流出成分の電導度と流量との関係については、電導度が時間の関数であると仮定して流量の分数関数型の減水曲線を応用することにより、流出成分の分離を行っている。これらは物理的説明に優れているが、電導度と流量の関係式を求めるのに複雑さが残る。

そこで本研究では、初沢流域を対象に地下水流出成分と直接流出成分のそれぞれについて、実測データに基づいて電導度と流量の関係を見い出して、 C_d 及び C_b の推定式を求め、融雪期の流出成分の分離を行う。

いま、ある時刻の流量とそのときの電導度と流量の積との関係を示したものが Fig. 8 である。流量が 10 l/s 程度以下のデータは、夏季の無降雨期間で流量のすべてが地下水流出と考えられる時期のもので、この 10 l/s の値は Fig. 5 における減水時の変曲点と対応しているものである。流量 10 l/s 以下において両者の関係を求めると次式が得られる。

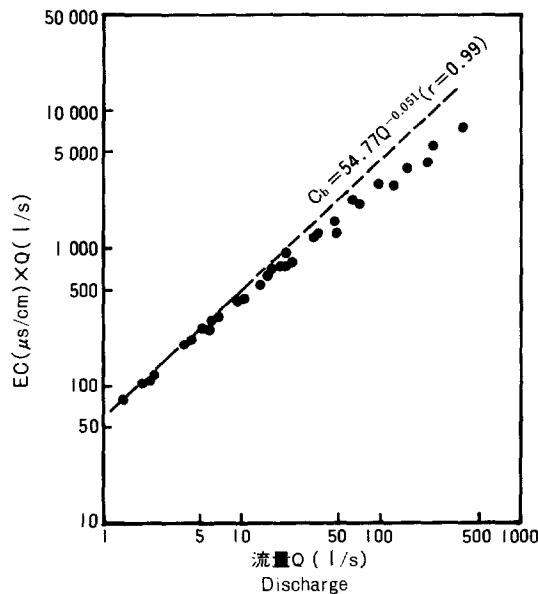


Fig. 8. 初沢流域における流量と電導度×流量との関係

Relation between discharge and electrical conductance × discharge in the recession part of the hydrograph on SHOZAWA experimental watershed.

C_b : 地下水流出成分の電導度

Electrical conductance of base run-off

$$C_b = 54.77 Q^{-0.051} \quad (r=0.99) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで C_b ：地下水流出成分の電導度 ($\mu\text{s}/\text{cm}$)、 Q ：河川流量 (1/s) である。すなわち、(7) 式を利用することにより、各時点の河川流量からそのときの地下水流出成分の電導度の値が推定できることになる。

また、Fig. 8 において (7) 式が回帰範囲外にも適用されるとすると、延長された回帰線は、そのときの流量がすべて地下水流出成分であるとした場合の電導度の値であるといえる。従って、流量が多いときにプロットの点が延長した回帰線より下方へずれるのは、電導度の値が低い融雪流出水により河川水質濃度が希釈されていることを示すものであると考えられる。

一方、直接流出成分については、その電導度と流量との関係を得ることは、融雪期には特に困難であると考えられるので、直接流出成分の電導度 (C_d) は積雪の値の平均値とした。その値は、

$$C_d = 11.6 \text{ } (\mu\text{s}/\text{cm}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

で一定と考えることとした。従って、本研究では対象とした初沢流域における融雪期の河川流出水を (7) 式及び (8) 式で示される成分に分離することになる。

Fig. 9 は、初沢流域において測定された電導度を利用して、(6) 式により流出量を直接流出成分と基底流出成分の 2 成分に分離した結果を示したものである。

4.3 二つの方法による分離結果の比較

減水定数を利用した流出成分の分離方法と、電導度を利用した分離方法について見てきたが、ここでは両者の方法を比較検討する。

実際の地下水流出の挙動において、特にハイドログラフの上昇部における地下水流出の挙動は判然としていないので、減水定数を利用した分離方法ではどの位置まで分離線を内挿するか不明瞭であり、任意性をもつことを免れない。

また、融雪期の流出は先に述べたように、顕著な日変化を示しており、しかも流量が日最低のとき、すべてが地下水流出とは限らない。従って、減水定数を利用した分離方法の場合、減水曲線の内挿の起点が不安定となる。

さらに、最大流量のときに、地下水流出成分が最大となるという考え方 (BARNES, 1936) についても、融雪流出における直接流出、地下水流出の各成分は、融雪水の供給源である積雪域の分布特性により同じ融雪期間であっても流出過程が変化する。従って、両成分のピークは融雪期間を通じて必ずしも一致しているわけではない。特に、積雪域が河道から後退した融雪後期において流出成分の分離が不明確になりやすい。

これに対して、電導度を利用した流出成分の分離は、電導度の測定を連続的に行うことができ、しかも、電導度は河川水の履歴を表しているので、直接流出及び地下水流出の各成分の挙動がより現実的であるといえる。また同時に、両成分の融雪期間における変化過程は、直接流出の供給域である積雪分布の変化をも示していると推察される。

すなわち、電導度を利用した流出成分の分離方法は、これまでハイドログラフの増水部分において流出成分の挙動がブラックボックスであったところが明確にできるという意味で、流出過程を解明するた

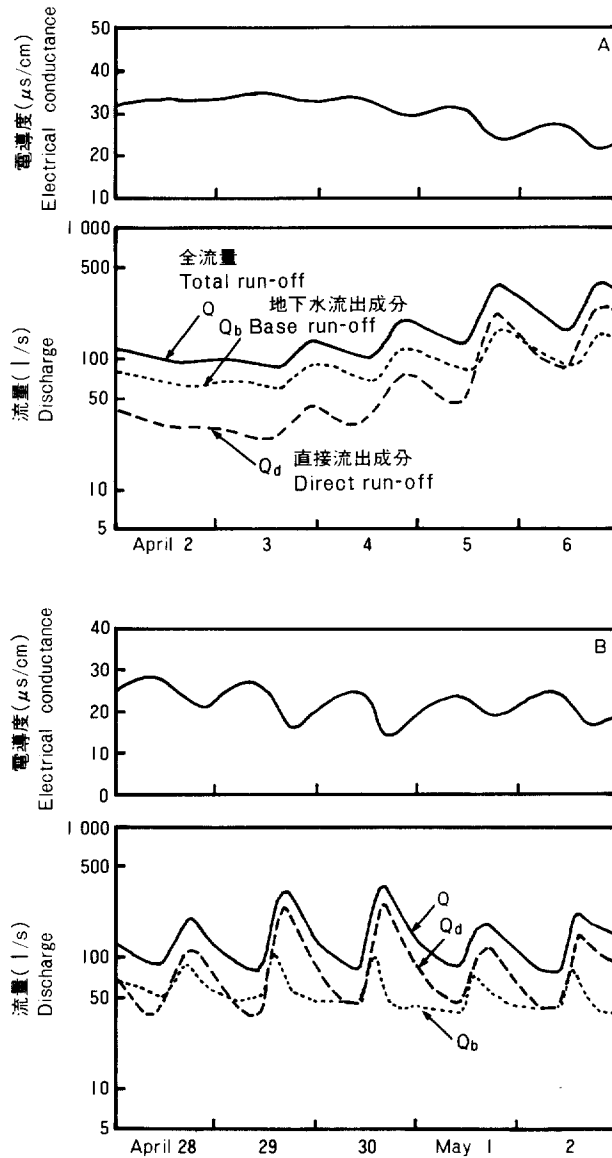


Fig. 9. 初沢流域における電導度による流出成分の分離結果 (1987年融雪期)
 Separation of snow-melt run-off hydrograph using the electrical conductance for SHOZAWA experimental watershed (The snow-melt season in 1987).

- A : 融雪期前半 (流域全面が積雪で覆われている時期)
 The former period of snow-melt run-off
 (The whole area of watershed is covered with snowpack)
- B : 融雪期後半 (流域内に露出部分が現れている時期)
 The latter period of snow-melt run-off
 (A part of the surface of watershed is recovered in snowpack)

めの、また、流出解析をするための基本的データを得る方法として、非常に有効であるといえよう。

5 融雪期における流出過程の検討

水資源の有効利用のために融雪期の流出予測は重要な研究課題となっているが、なかでも融雪流出過程の解明は大きな問題として残されている。

ここでは、電導度を利用した方法により分離された直接流出成分と地下水流出成分の経時的变化により、融雪期の流出過程の時間的变化を考察した。

先に示したように Fig. 9 は1987年融雪期の流出成分の分離結果で、A は融雪期の前半で流域が全面積雪で覆われている時期、B は融雪期の後半で流域内では積雪が消雪して露出部分が現れている時期のものである。

同図を見ると、流量の日最低時は、A では地下水流出成分が直接流出成分の約2倍で、地下水流出成分が卓越している。しかし、B では2成分とも同程度である。また、流量の増加時には両成分とも増加するが、特に直接流出成分の方が地下水流出成分に比べて増加の度合いが大きく、融雪期の後半でその傾向が強い。さらに、A では地下水流出成分と直接流出成分のピークがほぼ一致しているが、B では直接流出成分のピークの遅れが示される。

融雪の開始直後に、直接流出成分と比較して地下水流出成分が多く流出する機構としては、融雪初期は積雪のざらめ化があまり進んでおらず(石原, 1951)、融雪水の量は比較的少なく、その多くは浸透水となりやすいためであると考えられる。その結果として地下水流出成分の全流出に占める割合が大きい。

融雪期前半で直接流出及び地下水流出の2成分が多く流出し、両成分のピークがほぼ一致する機構としては、融雪水の地下水帯への多量な浸透によって地下水流出が増加し、さらには当日以前の浸透水が遅い中間流として流出すること、河川近傍の積雪からの融雪水が、積雪下地面での地表流あるいは早い中間流として直接的に河川に多量に流出することが、相重なるためであると考えられる。

一方、融雪期後半で地下水流出成分の量が相対的に少なくなり、直接流出成分の量が多く、ピークが遅れる機構としては、積雪域が縮小することにより、流域への入力としての融雪のあり方が変化したこと、換言すれば融雪水の供給域が次第に河道から遠くなる結果として現れると考えられる。

すなわち、先の積雪分布の変化で示したように、融雪期後半になると積雪域は次第に縮小して、積雪域境界は河道から後退し、標高の高い所へ移動する。このように積雪域が河道から遠くなると、斜面上部で積雪層より供給された融雪水は地表を傾斜方向へ流下するが、まず地中に浸透することにより地下水流出成分が相対的に先に出る。さらに、融雪水が供給され続けることにより地表流下水が卓越するが、河道から遠いために到達するまでに時間がかかり、結果として直接流出成分が遅れるものと推察される。

また、電導度を利用して分離された融雪期における直接流出成分と地下水流出成分について、それぞれの日流出高に占める比率の経時的变化を示したものが Fig. 10 である。同図によれば、地下水流出成分の比率は、融雪期前半の A では50~60%程度、融雪期後半の B では30~40%程度と、融雪の進行・積雪域の減少とともに変動することが分かる。すなわち、融雪期前半においては相対的に地下水

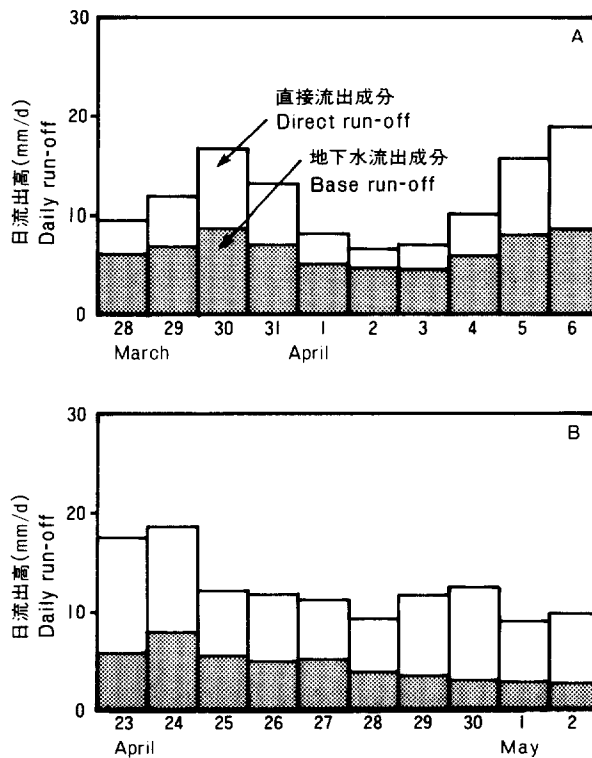


Fig. 10. 初沢流域における各流出成分の日流出高の変化（1987年融雪期）

Daily variations of each run-off component on SHOZAWA experimental watershed (The snow-melt season in 1987).

- A : 融雪期前半（流域全面が積雪で覆われている時期）
The former period of snow-melt run-off
(The whole area of watershed is covered with snowpack)
- B : 融雪期後半（流域内に露出部分が現れている時期）
The latter period of snow-melt run-off
(A part of the surface of watershed is recovered in snowpack)

流出成分の占める割合が大きいことが定量的に理解される。

融雪期の流出過程について、各流出成分の経時的変化とハイドログラフの挙動を見ることにより検討を行ってきたが、これまでの結果から、透水性の良い森林流域における融雪期の流出の特徴としては、まず基本的に融雪水の浸透による地下水流出の増加があり、その上に積雪分布に応じた融雪水の直接流出が時間的、量的に変化しつつ付加されているといえよう。

6 おわりに

河川水の水質特性はいくつかの流出過程の各段階での水質特性の総合的效果により決まると考えられるが、本研究における検討から、河川水の水質を利用した流出成分の分離は、水文流出解析を進める上

で非常に有効であるとともに、流出機構を明らかにするための一つの方法として位置づけられることが明らかとなった。

しかし、流出経路からみた場合、現段階では流水中における地下水流出成分が地中流経路であるパイプ流と毛管水縁効果による押し出し流 (KIRKBY, 1978) のいずれの経過を通ったかを直ちに判断することは難しい。また、直接流出成分が飽和地表面である流出寄与域からのものだけでなく、大孔隙を通ったものである可能性もある。

従って、山地流域における融雪・降雨流出現象の実態、特に流出経路を明らかにするには、さらに降雪・降雨の水質変動とともに水みち流出水、斜面浸出水などの水質流出特性と土層中のイオン分布を把握する必要があるだろう。

本研究を進めるに当たり、現地調査には元宝川試験地主任吉野昭一氏、さらに、森林総合研究所森林環境部の藤枝基久、坪山良夫、菊谷昭雄の各氏に多大なご援助をいただいた。また、森林環境部長の秋谷孝一氏、水土保持科長 (現新潟大学教授) の近嵐弘榮氏からは種々のご助言をいただいた。ここに謝意を表する次第である。

引用文献

- BARNES, B.S.: Structure of discharge recession curve, *Trans. Amer. Geophys. Union*, **20**, 721-725 (1936)
- BOTTOMLEY, D.J. et al.: Oxygen-18 studies of snowmelt runoff in a small Precambrian sensitive shield watershed, Implications for streamwater acidification in acid-sensitive terrain, *J. Hydrol.*, **88**, 213-234 (1986)
- DINCER, T. et al.: Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18, *Water Resour. Res.*, **6**, 110-124 (1970)
- HORTON, R.E.: The role of infiltration in the hydrologic cycle, *Trans. Amer. Geophys. Union.*, **14**, 446-460 (1933)
- 石原健二ほか: 融雪洪水予報の研究, *雪氷*, **12** (4), 15~25 (1951)
- 石原健二: 融雪の予報, *雪氷の研究* No. 2, 115~128 (1955)
- KIRKBY, M.J. (editor): *Hillslope Hydrology*, John Wiley & Sons. (1978) (日野幹雄ほか訳: 新しい水文学, 朝倉書店, 330pp. (1983))
- 小林大二ほか: 母子里における融雪量と流出量, *低温科学 物理編*, **26**, 105~110 (1968)
- 小林大二ほか: 融雪流出過程 I, *低温科学 物理編*, **44**, 77~90 (1985)
- 小池俊雄ほか: 電気電導度を用いた融雪流出過程の検討, 第30回水理講演会論文集, 25~30 (1986)
- 前橋営林局: 宝川森林治水試験第2回報告, 11~24 (1950)
- MARTINEC, J.: Subsurface flow from snowmelt traced by tritium, *Water Resour. Res.*, **11**, 496-498 (1975)
- NAKAMURA, R.: Runoff analysis by electrical conductance of water, *J. Hydrol.*, **14**, 197-212 (1971)
- 坂本 康ほか: 融雪流出水水質の特徴と流出解析への利用についての基礎的検討, 第29回水理講演会論文集, 143~148 (1985)
- 佐藤晃三: 融雪流出の研究IV. 融雪流出の特性, *岩大農報*, **8**, 357~372 (1967)

- 瀬口昌洋ほか：水質による山地小河川の基底流出成分の分離，農土論集，**16**，49～57（1985）
- 志水俊夫ほか：山地小流域における融雪期の流出特性，35回日林関東支論，233～234（1983）
- 志水俊夫ほか：山地小河川における水質の自記計測と降雨時の変動特性，97回日林論，537～540（1986）
- 志水俊夫ほか：融雪期における河川水質の変動特性，98回日林論，561～564（1987）
- 志水俊夫ほか：宝川流域における融雪流出水の水質特性，日林誌，**72**（2），171～174（1990）
- 東京営林局：宝川森林治水試験報告，33～39（1943）

Studies on Hydrograph Separation by Stream Conductivity and Run-off Process during the Snow-melt Season

SHIMIZU, Toshio⁽¹⁾

Summary

Snow cover constitutes an important part of water resources. Therefore, understanding the process of snow-melt run-off is indispensable for making efficient use of run-off water in snowy regions. In this study, the process of snow-melt run-off was discussed through the measurement of the water quality and discharge of the Takaragawa experimental watershed. The snow-melt run-off hydrograph was separated into two components, direct run-off and base run-off, by using the method of mass balance relations, which examines the reciprocal relation between specific discharge and electrical conductance. As the result of the investigation of the behavior of run-off components in the early period of snow-melt run-off, it was found that, the peak point of direct run-off agrees with the peak point of base run-off, but in the latter period of snow-melt run-off, the peak point of direct run-off is slower than the peak point of base run-off. The proportion of the base run-off to the total run-off is larger in the early period than in the latter period of snow-melt run-off. The physical meaning was considered to be that, the time of concentration of the direct run-off and base run-off to the stream channel changes according to the snow coverage decrease.

Received December 11, 1989

(1) Forest Environment Division