

# 広葉樹林流域における溪流流出特性に関する研究

佐藤 弘和 \*

Characteristics of stream runoff in a deciduous forested catchment, in central Hokkaido, northern Japan.

Hirokazu SATO

## 抄 録

広葉樹林流域（面積 9.2ha）における溪流流出特性（降雨流出，融雪流出，基底流出）を明らかにするために，北海道中央部に位置する光珠内実験林内で野外観測を 1993～1997 年に行った。年降水量は 1,067～1,250mm の範囲をとり，1996 年の年流出量は 1,299mm であった。融雪期である 3～5 月と降雨期である 7～11 月には，明瞭なピークを伴う増水が頻繁に発生した。年間流出量の季節配分率は融雪期（1996 年 3～5 月）で高く，71% を示した。降雨流出に関して，ピーク流量はそれまでに降った雨量が多いほど高くなった。増水開始から流量ピークに達するまでの時間は，それまでの降雨継続時間が長い場合，もしくはそれまでの積算雨量が多い場合ほど長くなった。さらに流域が湿潤なほどピーク流量は多く，ピーク流量までに達する時間は短くなる傾向を示した。融雪流出に関して，流流水温によるハイドログラフの分離結果から，地中流出成分が融雪流出の大部分を占めていたことが判った。基底流出に関して，夏期湧水期の基底流出は明瞭な日変化を示しているが，冬期湧水期では日変化が見られなかった。さらに減水係数は冬期より夏期の値が高かった。降雨流出と融雪流出の特徴から，透水性の良い森林土壌が降水の大部分を浸透させ，洪水抑制効果をもつ地中流出成分に変換することが判った。基底流出特性から，冬期に比べ夏期には森林の蒸発散が基底流出に影響を与えていることが示された。

## Abstract

In order to clarify the characteristics of stream runoff (storm runoff snowmelt runoff and baseflow runoff), field observations were conducted in a deciduous forested catchment (9.2ha in area) of the Koushunai experimental forest in central Hokkaido from 1993 to 1997. Annual precipitation ranged from 1067 to 1255mm. Annual stream runoff was 1299mm in 1996. Flood events frequently occurred with sharp peak discharge during the snowmelt season (March ~ May) and the storm season (June ~ November) in each year. Monthly delivery ratio to annual runoff during the snowmelt season was amounted to 71% in 1996. Discharge at the peak flow increased with larger cumulative rainfall prior to the peak. The duration of rising limb was determined by the duration and amount of rainfall prior to the peak. Larger peak discharge and shorter duration during rising limb occurred under the wet conditions. Hydrograph separation by stream temperatures revealed that subsurface component was dominant in the snowmelt runoff. Baseflow had clear diurnal fluctuations in summer seasons, and was unclear in winter seasons. Recession coefficient in summer seasons was higher than that in winter seasons. Much of precipitation was infiltrated into forest soils and was transformed to subsurface flow, which has effect on preventing of floods. Much of evapotranspiration had influence on volume and diurnal fluctuations of baseflow. Evapotranspiration was more significant in summer season than in winter.

---

\* 北海道立林業試験場 Hokkaido Forestry Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-0198

〔北海道林業試験場研究報告 第 36 号 平成 11 年 3 月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 36 March, 1999〕

## はじめに

降水量が多く急峻な地形が発達した我が国では、豪雨や台風による洪水・土砂災害により、人命や人的財産に多大な被害が及んでいる。さらに夏期渇水による水道の断減水が生じると、日常生活に大きな影響が生じる。このような状況から、森林がもつ水源涵養機能に治水・利水上の観点から関心が寄せられるようになった。従来、水源涵養機能に関して解説しているものは多く(竹下, 1984 ; 石川, 1984 ; 志水, 1989, 太田, 1996 ; 高木, 1996 ; 森林と水研究会, 1996), その機能の一つに洪水を抑制し渇水を防止する「流出の平準化」が挙げられている。

ある森林流域の流出の平準化に関わる情報を得るためには、その流域にインプットされる降水と流域からアウトプットされる流出の対応関係を明確にする必要がある。このような流出解析は、古くから水文学的研究の中核を成すものであった。流域が降水を溪流に変換するシステムと考えれば(Chow et al., 1988), 降水と流出の対応関係のみを対象とする初期の流出解析では、降雨に対する流域の応答はブラックボックス的扱いとなる(田中, 1996)。このため、今日では、Kirkby(1978)に見られる斜面水文学的アプローチ、特に降雨流出時における斜面中の水の挙動を調べ、流出プロセスそのものを解明することが重要となっている。すなわち、森林が示す水源涵養機能を評価する上で、流域内部における水の挙動に関する情報が必要である。

流出特性は時間的な観点から、長期流出と短期流出に区分される。長期流出は観測対象期間が1年以上と長く、流出の年変動を考慮して数年間にわたり流量・降水量・水質が測定される(例えば, Likens et al., 1970)。長期流出を把握することにより、流量の季節配分や水収支が明らかになる。短期流出はあるイベントにおける溪流流出を対象とする。イベントには降雨、融雪、渇水などがある。降雨流出では、降雨イベント時の最大流量値であるピーク流量とその遅れ時間、ハイドログラフの形状による分離(Hewlett and Hibbert, 1967)や水質を用いた分離(Wels et al., 1991)から得られる直接流出率および流域内の保水状況などが重要な因子となる。融雪流出は、北海道のような降雪地帯特有の流出現象である。広域的に収集した既存の流量データと流域特性(植生など)を統計的に解析したラヒムら(1998)の結果を見ると、融雪流出の影響が全国を対象とした流出解析では誤差となる場合がある。このように降雨流出と融雪流出は、森林がもつ洪水抑制効果を検証する上で重要な要素である。一方無降雨時の流出である基底流出は、水利用の上では重要な検討対象となる(鈴木, 1984)。

以上のような水文学的アプローチから、森林流域の流出特性に関する研究が数多く報告されてきた。しかし、それぞれの研究で確認された流出特性は、研究対象とした森林流域固有の現象であるといえる。水源涵養機能の普遍的性質を明らかにするためには、先に示したアプローチに基づき、従来指摘されている現象の再現性を検証する必要がある。そのためには、研究事例を一つでも増やし、流出に関わる資料を蓄積することが重要であると考えた。

本報告では、水源涵養機能評価の基礎的資料を得ることを目的に、広葉樹林流域で行った降水量・溪流流量の連続観測結果に基づき、長期流出特性と短期流出である降雨流出・融雪流出・基底流出の諸特性についてそれぞれ解析した。また流域内部の水の挙動を調べるために、地中流である斜面湧水量の測定を行った。長期流出解析では、年間水収支と溪流流出量の季節配分に着目した。降雨流出では、斜面湧水の流出特性と溪流流出特性を対応させ、出水時における地中流出の特徴を示した。さらに流域の保水状況を見るため降雨時における保留量曲線の特徴を示すとともに、溪流のピーク流出形成に関わる量的・時間的要因について統計的考察を行った。融雪流出では溪流水温を用いたハイドログラフの分離を行い、地中流出成分の算出を行った。基底流出では、夏期渇水期と冬期渇水期の流出を比較し、森林の蒸発散が基底流出に与える影響について検証した。

## 調査流域概要

北海道中央部美幌市にある林業試験場光珠内実験林内に試験流域を設定した(図 - 1)。試験流域を流れる川は、石狩川水系美幌川の支流で通称間の沢と呼ばれる川の小支流にあたる。試験流域の流域面積は9.2ha、比高は約130mである。基岩地質は、割れ目を持つ第三系の砂岩・泥岩である。斜面では、厚さ約10~15cmの土壌が基岩を覆っている。一方尾根部では、土壌層の下に風化土層が50cm程度の厚さで堆積している。流路から約9m上方の斜面に湧水が存在する(図 - 1)。

林相は、ミズナラ(*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*)、イタヤカエデ(*Acer mono*)、オニグルミ(*Juglans ailanthifolia*)、ホオノキ(*Magnolia obovata*)などが混在する。林床はササが優占する。

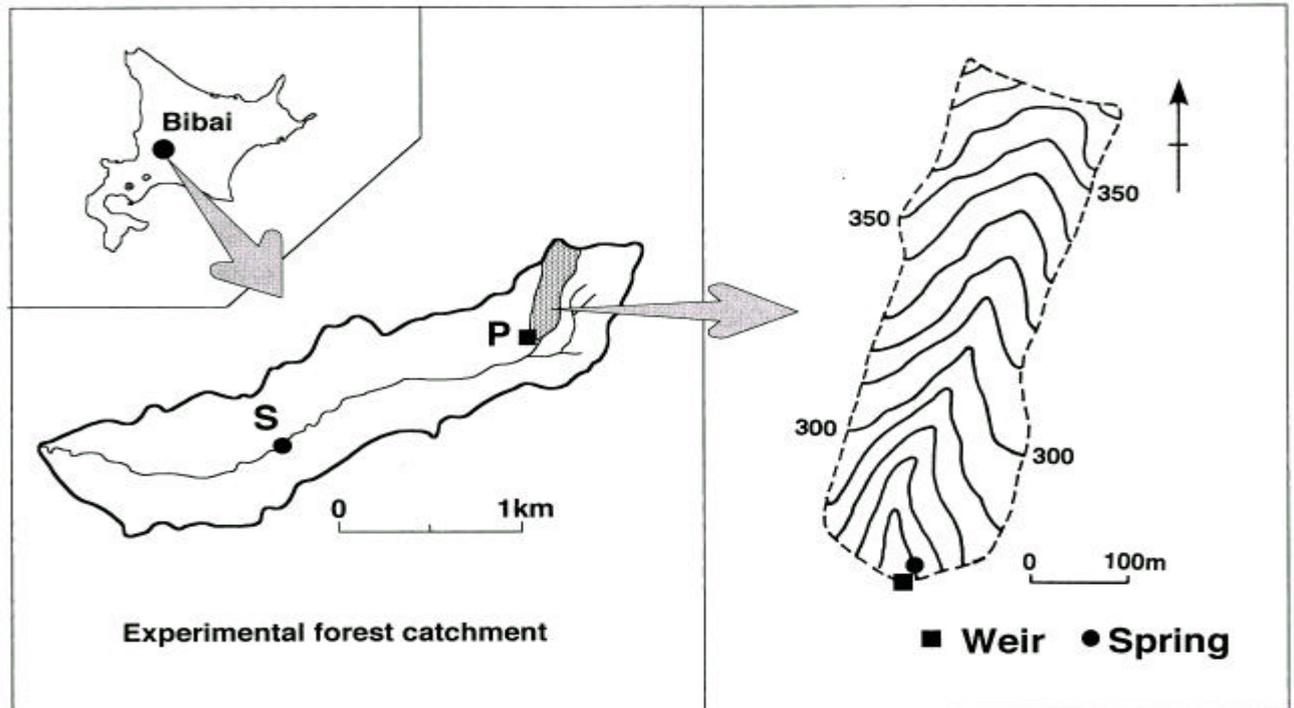


図 - 1 試験流域．图中 S 点は下流採水地点，P 点は降雨量測定地点を示す

Fig. 1 Map showing the experimental catchment . The point S indicates downstream sampling site , the P is precipitation measuring site.

## 研究方法

試験流域からの溪流流出特性を把握するために、流量と降水量の連続観測を行った。流量の計測には、流域末端に設置した直角三角流量堰を使用した。この堰に圧力式自記水位計(コーナ札幌製 DS-64K2)を設置し、1993年6月から1997年11月までの流量を求めた。流量の算出には、自記水位計で得られた電圧値を、現地で測定した越流深とその時点で記録された電圧値から求めた単回帰直線により越流深に変換し、この値を沼地らの流量公式(土木学会、1990)に代入することで流量値に換算した。

降水量の観測には、試験流域近傍の無立木地(図 - 1の P 点)に設置した転倒升式雨量計と自記記録計(コーナ札幌製 DS-64K)を使用した。観測期間は流量観測期間と同じであるが、冬期間(各年11月中旬~5月中旬)には故障のおそれがあることから、転倒升式雨量計を設置しなかった。そのため未計測期間の降水量

は、札幌管区気象台から提供されている美唄市の日降水量記録を利用した(札幌管区気象台, 1994~1997)。

地中水の挙動を調べるために、斜面湧水量を測定した。測定方法は、三角樋により湧水を集水し、ゴムホースによって自記記録計(コーナ札幌製 DS-64K)が接続してある自作の転倒升に導き湧水量を求めた。測定期間は、1993~1995年である。ただし冬期間(11月中旬~5月中旬)の計測は行われていない。

流量・降雨量・湧水量データの最小時間単位は、1993~1995年がそれぞれ30分間、1996年と1997年がそれぞれ10分間である。なお各年11月中旬~翌年5月中旬までは、流量データの最小時間単位を1時間とした。渓流水温は、水位計と同じ自記記録計にサーミスタ方式のセンサーを接続し、1993~1997年の間連続観測を行った。データの最小時間単位は、流量の時間間隔と同じである。

## 結 果

### 長期流出

1994~1997年における日流量ハイドログラフを図-2に示す。各年7~10月は雨が多く、日降水量は高い値を示した。さらに日降水量が50mmを超える日が毎年見られた。特に1997年8月1~14日の総降水量は313mmに達し、8月10日の日降水量は78mmを記録した。年降水量は、1994年が1,067mm、1995年が1,138mm、1996年が1,236mm、1997年が1,250mmであった。

各年の日流量は、1~2月に値が低く、融雪時期を含む3~5月に値が高かった。さらに融雪期を過ぎた6月以降、降雨に対応してピーク流出を伴う増水が起こった。年最大日流量は、1997年を除いて3月ないし4月の融雪流出期間内に記録された。その値は、1994年が1,750m<sup>3</sup>/day(4月13日)、1995年が2,319m<sup>3</sup>/day(3月17日)、1996年が6,017m<sup>3</sup>/day(4月26日)、1997年が4,732m<sup>3</sup>/day(10月8日)である。なお1997年の融雪流出時には、4,723m<sup>3</sup>/day(3月30日)と年最大日流量に迫る値を記録した。1997年の例を除いて、降雨時期(5月下旬~11月上旬)に見られるピーク流量の値は、融雪時期のピーク流量より低かった。1年間に良好な流量記録が得られた1996年1~12月の年流出量は、1,299mmであった。なお他の年は、気象害・獣害・機器不良により、年間流量の連続記録が得られなかった。

1996年1~12月の月別降水量と月別流出量、および月別流出率(=月流出量/月降水量×100)を図-3に

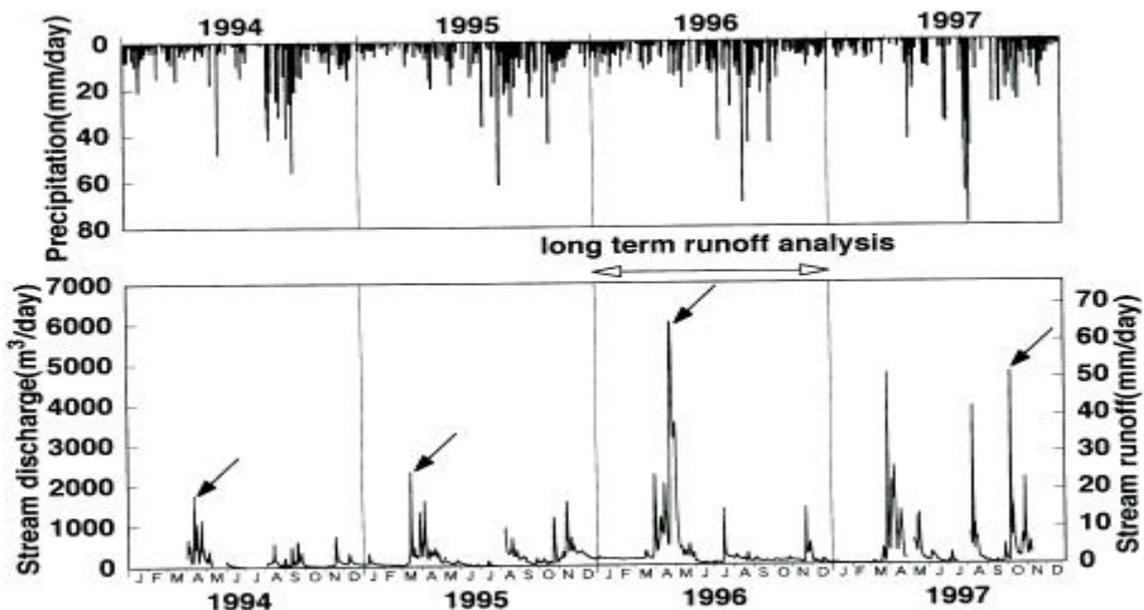


図-2 1994~1997年の溪流流出ハイドログラフ。矢印は年最大日流量を表す。

Fig.2. Stream hydrograph measured from 1994 to 1997. Arrows indicate annual daily maximum discharge.

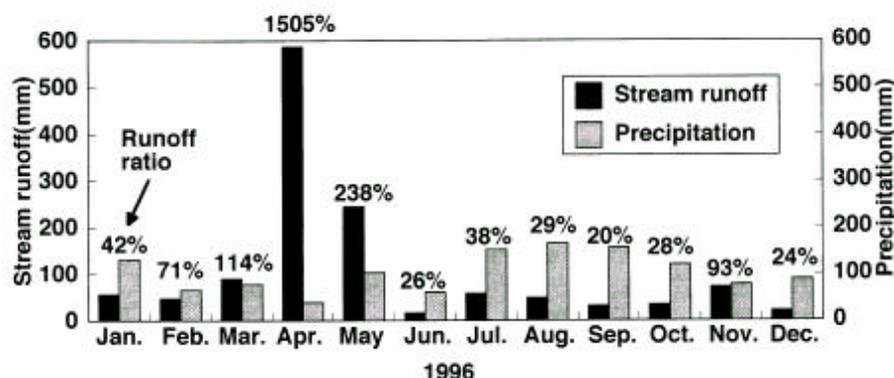


図-3 1996年の月別降水量、月別流出高および月別流出率  
 Fig.3 Monthly precipitation, stream runoff and runoff ratio in 1996.

表-1 1996年における年流出量に対する月別流出量の割合および年降水量に対する月別降水量の割合

Table 1. Ratio of monthly stream runoff to annual runoff, and ratio of monthly precipitation to annual precipitation in 1996.

Month	Ratio of monthly stream runoff to annual runoff(%)	Ratio of monthly precipitation to annual precipitation(%)
Jan.,1996	4.3	10.6
Fed.	3.6	5.3
Mar.	6.9	6.3
Apr.	45.2	3.2
May.	18.8	8.3
Jun.	1.2	4.9
Jul.	4.4	12.3
Aug.	3.6	13.4
Sep.	2.4	12.6
Oct.	2.5	9.7
Nov.	5.5	6.2
Dec.	1.6	7.2

示す。

月降水量の最大値は8月の165mm、最小値は4月の39mmであった。一方、月流出量の最大値は4月の587mmであり、最小値は6月の15.9mmであった。積雪期(1~5月と11~12月)の月流出量は降雨期(6~10月)より高い傾向を示したが、月降水量は逆の傾向であった。月別流出率は、降雨期が20~38%であり、積雪期が24~1505%と高い値であった。さらに融雪時期を含む3~5月の月別流出率は、すべて100%を超えていた。

1996年の月降水量、月流出量について、年間の量に対する各月の量の割合をそれぞれ求めた(表-1)。7~9月の降水量割合はすべて10%を超える値を示し、3ヶ月間の合計は38.3%となった。同期間の流出量割合は、合計10.4%であった。4月と5月の流出量割合はそれぞれ45.2%と18.8%であり、他の月より高い値であった。この2ヶ月間の合計割合は64.0%となり、3月の値6.9%を加えると、年流出量の70.9%が3~5月に流出したことになる。一方3~5月の降水量割合は、合計17.8%であった。

1996年の日流量記録から、流況曲線を作成した(図-4)。これより求めた年最大流出量・豊水量・平水量・低水量・湯水量・年最小流出量は、それぞれ65.4, 2.03, 1.59, 0.91, 0.32, 0.23mmであった(表-2)。

表-2 1996年における年最大流出量・豊水量・平水量・低水量・  
 渇水量・年最小流量

Table2. Annual maximum,95-day,185-day,275-day,355-day  
 and annual minimum runoff in 1996.

Daily runoff(mm/day)	
Maximum	65.4
95-day	2.03
185-day	1.59
275-day	0.91
355-day	0.32
Minimum	0.23

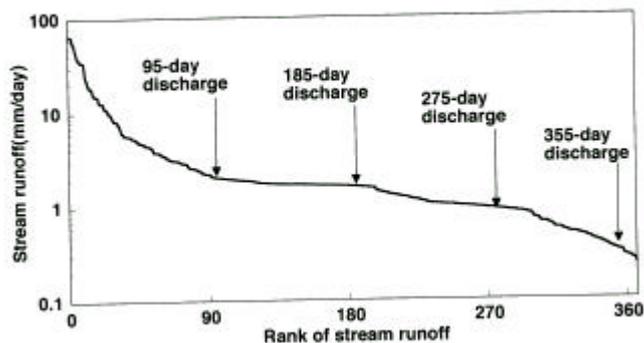


図-4 1996年の流況曲線  
 Fig.4 . Duration curve observed in 1996

### 降雨流出

1995年5月25～29日と1995年7月14～18日に記録された、降雨時の溪流流量と湧水量をそれぞれ図-5、図-6に示す。

図-5の観測例は、期間総降雨量が26mm、期間内の降雨強度の最大値（以後ピーク降雨強度と呼ぶ）が4.5mm/30min（5月26日8時）であった。5月25日の降雨により、流量は小さなピークを形成した。その後、5月26日の降雨により、流量は同日0時から急激な増加を始め、明瞭な3つのピークを形成した。ピーク流量の値は、それぞれ1.19ℓ/sec（5月26日3時）、1.47ℓ/sec（同日8時）、1.79ℓ/sec（同日14～15時）であった。これらのピーク流量に対応するピーク降雨強度は、それぞれ2mm/30min（5月26日2時）、4.5mm/30min（同日8時）、4mm/30min（同日13時30分）であった。ピーク降雨強度とピーク流量の生起時刻の差（ここではピーク遅れ時間と呼ぶ）は、3つの流量ピークで0～1時間であった。一方湧水量は、流量同様5月26日0時から増加を始めた。湧水量には、最初の流量ピークに対応した小ピークがみられたが、その後は流量で見られた明瞭なピークは認められなかった。湧水量の最大値121.5ℓ/30minが記録された時刻は5月26日20時であり、最後の流量ピークの生起時刻から5～6時間遅れていた。

図-6の観測例は、総降雨量が37.5mm、ピーク降雨強度が9mm/30min（7月14日5時30分）であった。流量は、降雨に対応して7月14日3時30分から急激に増加し、鋭いピークを形成した。ピーク流量の値は4.95ℓ/sec（7月14日5時30分）で、ピーク遅れ時間は0時間であった。このピーク以降、急激な減水が生じ、その後緩やかな増水と緩やかな減水による緩い形状の第二ピークを形成した。一方湧水量は、流量から2時

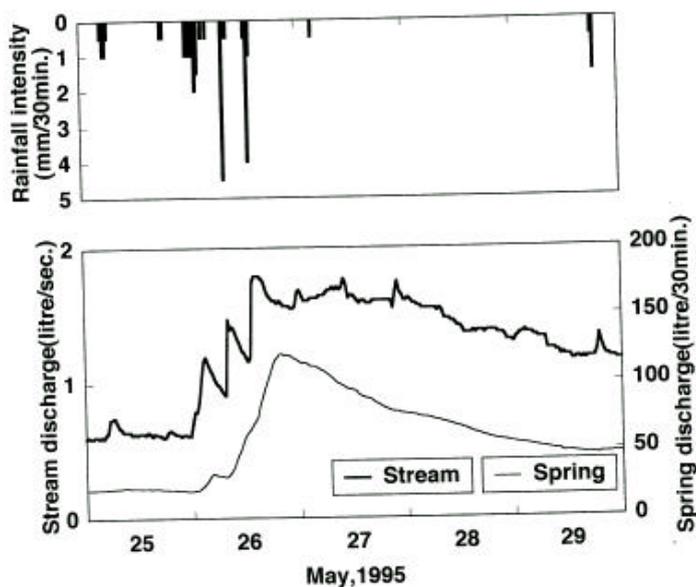


図-5 降雨時における溪流流量および湧水量のハイドログラフ  
 (1995年5月25日～29日)

Fig.5 Stream and spring hydrograph during the storm occurred from May, 25 to 29 in 1995.

間 30 分遅れで増加し始め、2 つの小ピーク（7 月 14 日 7 時 30 分の 24.13 ㎍ / 30min. と同日 14 時 30 分の 94.38 ㎍ / 30min.）を形成した。その後、ピーク流量の生起時刻から 17 時間 30 分遅れた 7 月 14 日 23 時 ~ 23 時 30 分に最大値 122.75 ㎍ / 30min. を記録した。その後、湧水量は緩やかな減水を示した。

金子 (1981) に従い、降雨流出時の保留量曲線を作成した (図 - 7)。図中上段は総降水量が 13.5mm の観測例 (1996 年 6 月 4 日, ここでは流出 - 1 と呼ぶ), 中段は総降水量 53.5mm (同年 7 月 16 ~ 18 日, 流出 - 2) の例, 下段は総降水量 115.5mm (1997 年 8 月 8 ~ 10 日, 流出 - 3) の例である。

総降雨量が少ない流出 - 1 では、累加降水量 (図中太線) の増加に対し、累加流出量 (図中細線) に顕著な増加が見られないため、保留量 (図中点線) は累加降水量よりやや低い値を示した。

総降水量が流出 - 1 より多い流出 - 2 では、累加降水量が急激に増加する 360 分までは、保留量は累加降水量よりやや低い値を示した。しかしそれ以降、保留量は徐々に低下し、2,000 分を過ぎると累加流出量の値に近づいた。

総降水量が最も多い流出 - 3 では、累加降水量が緩い増加を見せる 500 分以内では、流出 - 1, 流出 - 2 同様、保留量は累加降水量に近い値を示した。しかし累加降水量が急に増加し始める 1,350 分から保留量に小ピークが見られる 1,820 分までは、保留量と累加降水量の開きが、500 分以内で見られた開きに比べ大きくなった。1,820 分以降、保留量は累加降水量ではなく累加流出量に近い値を示した。

ピーク流量・増水時間に関して、ハイドログラフから抽出した変数 (図 - 8) を用いた統計解析を行った。解析対象

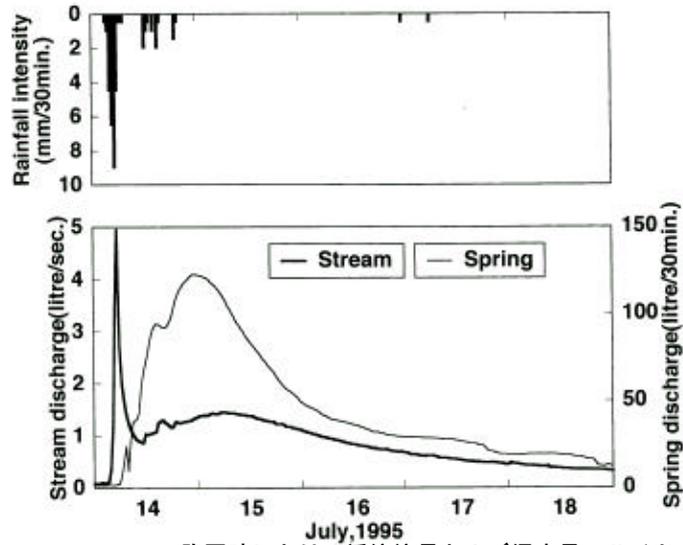


図 - 6 降雨時における溪流流量および湧水量のハイドログラフ(1995 年 7 月 14 日 ~ 18 日)

Fig.6 . Stream and spring hydrograph during the storm occurred from July,14 to 18 in 1995.

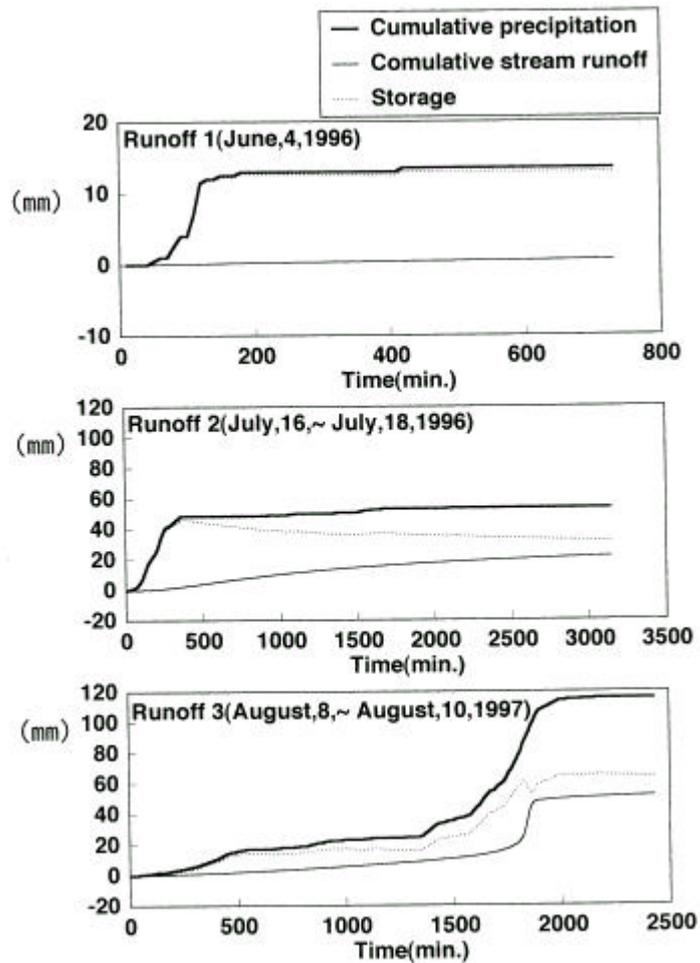


図 - 7 降雨時における累加雨量, 累加流出量および保留量

Fig.7 . Cumulative precipitation, stream runoff and storage curve during the each storms.

とした降雨イベントは、1.0mm/10min。以上の降雨強度があり、明瞭な流量ピークを示した59例（対象期間1996年6月～1997年7月）である。抽出した変数は、量的意味をもつ変数がピーク流量・積算雨量（雨の降り始めから流量ピーク時までの総雨量）初期流量（増水開始前の流量）・ピーク降雨強度、時間的意味をもつ変数が増水時間（初期流量時刻とピーク流量生起時刻の差）ピーク流量までの降雨時間（ピーク流量までに記録された降雨のあった時間の積算値）である。

ピーク流量を従属変数、積算雨量を独立変数とした単回帰分析では、有意な回帰式が得られたものの（ $p=0.001$ ）、値のばらつきが大きく、決定係数は0.17と低かった（図-9）。

ピーク流量を従属変数、初期流量を独立変数とした分析では、有意な回帰式が得られ

（ $p < 0.0001$ ）、その決定係数は0.43と高い値を示した（図-9）またピーク流量を従属変数、初期流量・積算雨量・ピーク降雨強度を独立変数として、ステップワイズ法を行ったところ、初期流量と積算雨量が採用され（ $p < 0.0001$ ,  $R^2=0.66$ ）、標準偏回帰係数は前者が0.713、後者が0.499であった。

増水時間を従属変数、ピーク流量までの降雨時間、初期流量、ピーク降雨強度、積算雨量をそれぞれ独立変数とした分析結果を図-10に示す。ピーク流量までの降雨時間と積算雨量を独立変数とした場合、ともに有意な回帰式が得られ（ともに $p < 0.0001$ ）、決定係数はそれぞれ0.96、0.72であった。一方初期流量とピーク降雨強度の場合、回帰直線による近似はできなかったが（ともに $p > 0.05$ ）、初期流量およびピーク降雨強度が大きくなるほど増水時間が短くなる傾向を示した。

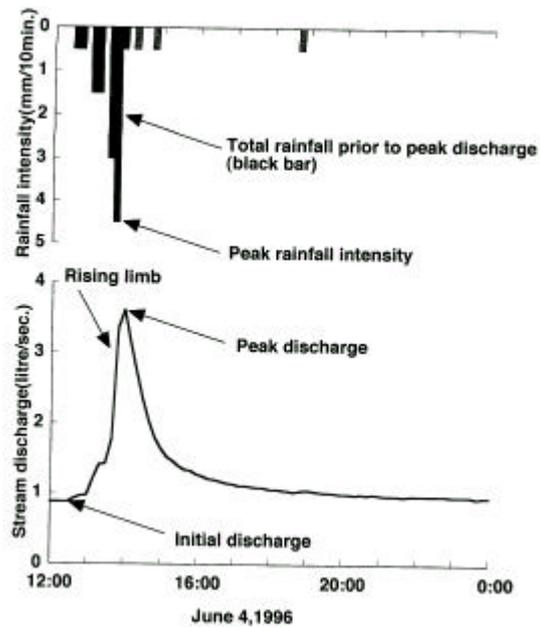


図-8 降雨流出の統計解析のために選択された変数

Fig.8 Variables selected for statistical analysis for the storm runoff.

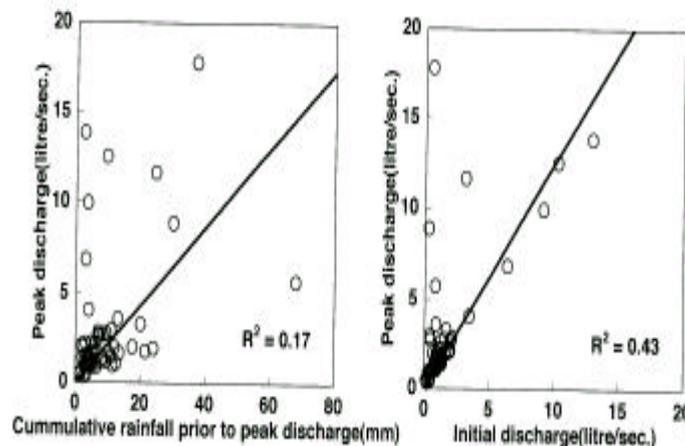


図-9 ピーク流量と各変数の関係

Fig.9 Relationship between peak discharge and each the variables

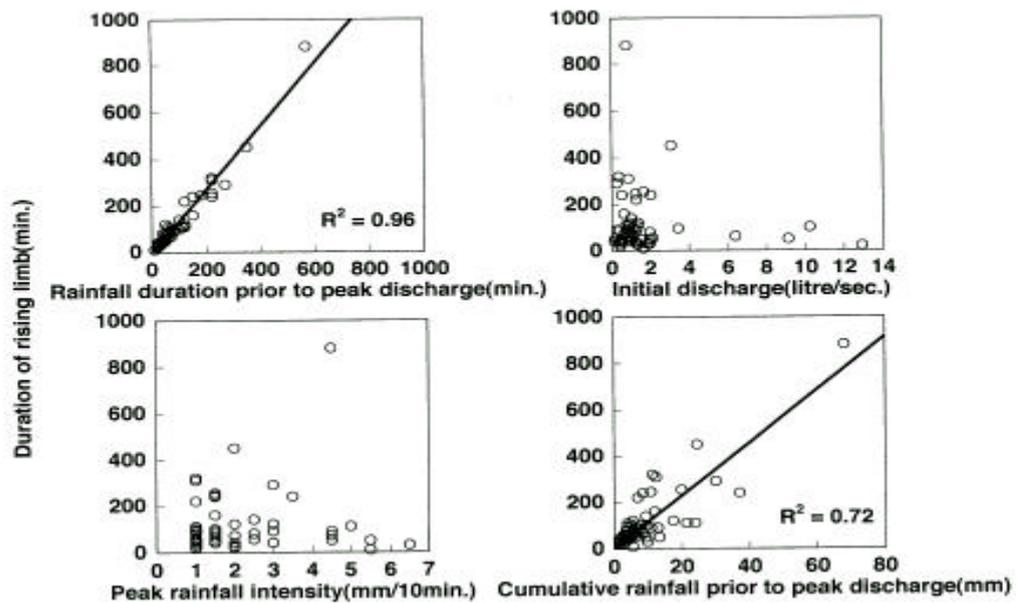


図 - 10 増水時間と各変数の関係

Fig.10. Relationship between duration of rising limb and each the variables.

### 融雪流出

1995～1997年の3～5月の溪流流量および溪流水温（1995年は除く）の時間変化を図-11にそれぞれ示す。

1995～1997年の増水開始時期は、1995年が3月中旬、1996年が3月下旬、1997年が3月下旬と、3月後半に集中していた。一方増水終了時期は、1995年が4月中旬、1996年が5月上旬、1997年が4月下旬と異なっていた。期間最大流量は、1995年が43.94 l/sec.（3月17日17時）、1996年が107.41 l/sec.（4月26日15時）、1997年が93.81 l/sec.（3月30日13時）であった。各年とも融雪増水を開始してから最初に明瞭な流量ピークが出現した。1996年と1997年では、特に融雪流出後半部で明瞭な流量の日変化が認められた。しかし1995年には、流量の日変化は不明瞭であった。

融雪増水前の溪流水温は、1996年、1997年ともに2～3と0以上の値を示した。融雪増水開始以降、溪流水温は上昇し始めた。特に3月に起こった増水時には、その変化に合わせて溪流水温が上昇した。また1996年は5月上旬から、1997年は4月上旬から溪流水温の日変動が大きくなった。日最高水温が記録された時刻は、14時前後となる日が多かった。

溪流水温を用いて、融雪流出ハイドログラフの分離を行った。分離に用いた式（Kobayasi,1985）を以下に示す。

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

$$\frac{Q_{ss}}{Q} = \frac{T}{T_{ss}} \quad \dots (2)$$

ここでQは溪流流量、Tは溪流水温である。添え字のSは地表流出、SSは地中流出、添え字のないものは溪流流出を表す。

1996年4月24～26日の記録を使った分離結果を図-12に示す。流量増加開始前は、100%が地中流出であった。4月24日と25日の11時以降、地表流出が認められたが、翌日6時前後に0 l/sec.となった。また地表流出は、地中流出より常に低い値を示した。地表流出が見られる間、溪流流出の90%以上は地中流出であり、溪流流出のピーク前後でも、地中流出の割合が80%を下回ることにはなかった。

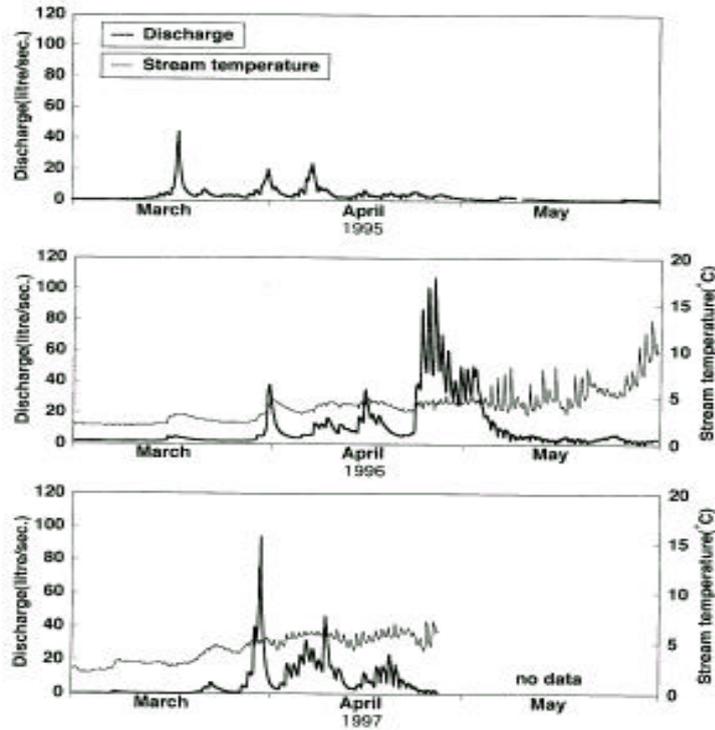


図-11 各年の融雪期における溪流流量と水温

Fig. 11 . Stream discharge and stream temperature during snowmelts in each year.

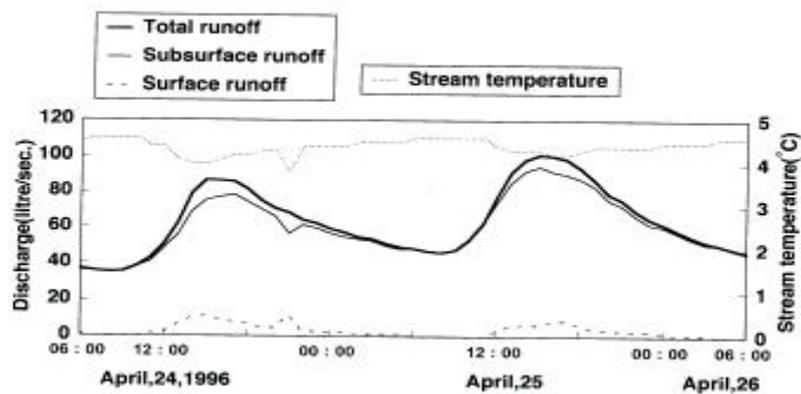


図-12 溪流水温を用いた融雪流出ハイドログラフの分離

Fig.12.Separation of the snowmelt hydrograph by stream temperature

**基底流出**

1995年と1996年の2月1～9日(ここでは、冬期渇水期とよぶ)と同年6月6～14日(ここでは、夏期渇水期とよぶ)のハイドログラフを図-13に示す。

夏期渇水期の溪流流量には、両年ともに明瞭な日変化が認められた。特に13～14時前後に流量が下がる日が多かった。一方冬期渇水期の溪流流量は、両年ともに明瞭な日変化を示さなかった。

夏期渇水期および冬期渇水期の減水曲線を両年について求めた。減水曲線式は以下である。

$$Q = Q_0 e^{-at} \dots (3)$$

ここでQは溪流流量(ここでは日流量), Q<sub>0</sub>はt=0のときの流量, tは経過時間(ここでは日単位), aは減水定数である。冬期渇水期である両年2月2～9日, 夏期渇水期である両年6月6～14日の減水曲線を図-14に示す。なおQ<sub>0</sub>の値が年(1995と1996)と時期(夏期と冬期)で異なるため,(3)式のQをQ<sub>0</sub>で除した値を縦軸に示した。

冬期渇水期の減水曲線は、両年ともに同じような傾きを示した。一方夏期渇水期の減水曲線は、両年ともに冬期渇水期より傾きが大きく、また1995年の傾きは1996年より大きかった。減水曲線の傾きである減水係数は、1995年と1996年の冬期渇水期が、それぞれ0.011,0.010/dayとほぼ同じ値を示した。1995年と1996年の夏期渇水期では、それぞれ0.098,0.067/dayであった(表-3)

**考 察**

**溪流の長期流出特性**

試験流域の流出特性として、3～5月に起こる融雪と7～10月の降雨に対応した増水発生が挙げられる(図-2)。試験

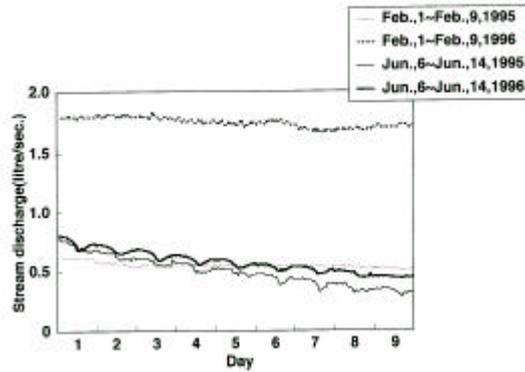


図-13 冬期と夏期における渇水流量

Fig.13 . Drought stream discharge in winter and summer season.

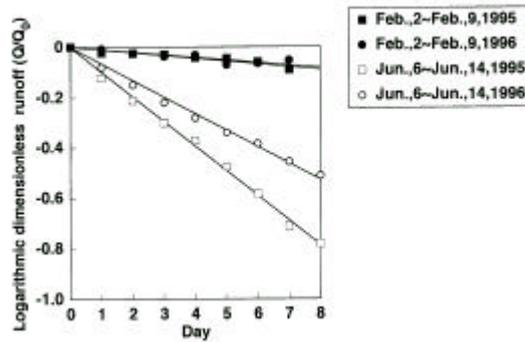


図-14 冬期と夏期における減水曲線

Fig.14 . Regression curve in winter and summer season.

表-3 冬期と夏期における減水係数と決定係数

Table3. Daily runoff recession coefficient and coefficient of determination in winter and summer season.

Period	Daily runoff recession coefficient(/day)	Coefficient of determination
Winter		
Feb.,2 ~ Feb.,9,1995	0.011	0.970***
Feb.,2 ~ Feb.,9,1996	0.010	0.936***
Summer		
Jun.,6 ~ Jun.,14,1995	0.098	0.999***
Jun.,6 ~ Jun.,14,1996	0.067	0.998***

\*\*\*p<0.001,\*\*p<0.01,\*p<0.05

流域は、岸原・石井（1982）の流出地帯区分によれば、5月に融雪流出のピークが見られ、秋雨による流出が多い特徴を待つ「第1地帯（北海道地方）」に相当する。

月別流出量では、融雪期を含む4月、5月が他の月に比べ圧倒的に値が大きかった（図-3）さらに3～5月の流出率は、100%を超えていた。積雪期では、降雪があっても降雨のように土壤中に即座に浸透することはなく、雪は積雪状態で流域表面に貯留される。1994年2月25日に試験流域で行った積雪調査結果では、積雪水量が500～600mmであった。1994～1997年の年降水量が1,000～1,300mmであったことを考えると、流域に供給される水のうち、約50%近くが雪によってもたらされることになる。3～5月の月流出量が高い理由は、融雪開始前に蓄積された年降水量の約2分の1の水が、1～2ヶ月間のうちに流域内に供給されるためである。また3～5月の月降水量には、11～2月中の降雪により流域内に残存した積雪水量が加味されていないため、3～5月の流出率が100%を超える結果となった。

試験流域では、年間の71%が融雪期を含む3ヶ月間で流出していた（表-1）。石狩川流域内6河川（流域面積 $10^2\sim 10^3\text{km}^2$ オーダー）の月別流出量を示した例では、他の月に比べ4月と5月に高い値を示している（中津川、1998）。さらに3ヶ月間（4～6月）の総流出量（10年平均値）は、年間流出量の4～6割近い流出がある（中津川、1998）。このように試験流域同様、融雪期の流出率が高い事例は、他にも報告されている。

一方月降水量が多いにも関わらず、降雨期（6～10月）の月流出量が積雪期より低い値を示す理由として、森林の蒸発散により降雨期の流出量が減少することが挙げられる。蒸発散が流出に及ぼす影響については後の節で述べる。

1996年の年降水量は1,236mm、年流出量は1,299mmで年流出率は100%を超えていた。流域内の年間水収支から、年降水量と年流出量の差は年蒸発散量となる（市川、1995）。したがって、試験流域の年降水量と年流出量の値では、蒸発散が起こっていないことになる。年流出率が100%を超える結果について、井倉（1994）が指摘した隣接流域からの地下水流入の可能性も考えられるが、ここでは特定できない。

### 降雨流出の特徴

降雨時の溪流流出と湧水流出を比較した場合、以下の特徴が見られる（図-5,図-6）。湧水流出は、溪流流出のような明瞭なピークが表れず、期間最大値の生起時刻が溪流流出ピークの生起時刻より数時間遅れていた。本研究で述べている湧水が、土壌流出成分ないし基岩流出成分（井倉、1994）のどちらであるかという議論はここではできないが、土壌を通過し土中を流れる地中流出成分であることは確かである。

つまり森林土壌には、降雨が通過し流れることにより、溪流ピーク流出を現状より抑え、かつピーク生起時刻を遅らせる効果、いわゆる洪水抑制効果があることを示している。また湧水流出は、図-6で見られた緩い第2ピークの形成に寄与することが示唆される。一方鋭いピーク流量を形成する流出成分（早い流出）は、ピークの遅れ時間が1時間以内であることを考慮すると、流路近傍の流出寄与域からの成分である可能性が高い。

期間総降水量が少ない場合、保留量は期間を通じて累加降水量よりやや小さい値を示していた（図-7中の流出-1）。これは、降雨のほとんどが流域内に貯留されていたことを示す。一方期間総降水量が多くなる場合、最初の降雨による累加降水量曲線の増加時には、降雨の大部分が保留されているが、時間の経過とともに、保留量曲線と累加降水量曲線の開きが大きくなり、保留効果が小さくなっていることが読みとれる（図-7中の流出-2,流出-3）。このことは、総降水量が多くなるほど保留効果が減少することを示している。特に流出-3では、最初の累加降水量曲線の急増時に比べ、2回目の急増時には保留効果がそれほど期待できないことを示している。つまり2回目の累加降水量曲線の急増時には、流域全体が最初に比べ湿润状態であったことが予想される。三つの例で見られた保留量曲線の特徴は、保留量が総降水量と流域の湿润状態の違いに影響を受けることを示している。

ピーク流量と積算降雨，初期流量の関係では，初期流量を独立変数とした場合，決定係数の高い直線回帰式が得られた（図 - 9）。さらに重回帰分析では，初期流量の決定係数が積算雨量より高い結果であった。初期流量は土壤の湿潤度を全体的に表す簡便な指標であり，同じく土壤の湿潤度の指標である先行降雨指標と良い相関があることが知られている（日野・長谷部，1985）。美唄の日降水量から計算した先行降雨指標と初期流量では，有意な正の相関が見られた（ $r=0.70$ ， $p<0,0001$ ）。これより，ピーク流量は土壤の乾湿状態の影響を受けており，土壤が湿潤になるほどピーク流量値が高くなる傾向があることが判る。Hewlett et al.（1977）による降水量・初期流量・季節・降雨期間を変数としたピーク流量に関するモデルにおいて，これらの4変数でピーク流量（対数值）の72%を説明することができると報告した。この結果は，試験流域同様，降雨状況だけではなく，流域地下水の賦存状態（初期流量で表現）がピーク流量に影響することを示している。

増水時間は，ピーク流量までの降雨時間と強い正の相関を示し，積算雨量もやや強い正の相関を示した（図 - 10）。いわば降雨時間や積算雨量が増水時間を決定する要因となりうる。しかし初期流量・ピーク降雨強度を独立変数とした場合，増水時間との間に線形関係がないものの，初期流量が多いほどまたはピーク降雨強度が大きくなるほど，増水時間が短縮する傾向が見られた。雨水到達時間と降水ピークまでの雨量・先行降雨の有無との関係を，森林施業前後で比較した例では，先行降雨がある場合は，ない場合より雨水到達時間が早くなる結果が示されている（吉野，1980）。また一雨に対して二つの流量ピークから成る洪水流出現象について検討した日原・鈴木（1988）によると，二つのピークの時間差が洪水をもたらした降雨の大きさと初期流量に強く規定されていることを見出ししている。以上の結果を考慮すると，雨の強さ・時間的要素だけでなく，流域の乾湿状態，つまり洪水開始時における流域の地下水賦存状態も増水時間に対して影響を与えていることが推察される。

#### 融雪流出の特徴

年により融雪流出特性に違いが見られた（図 - 11）。各年における融雪開始時期・終了時期・融雪流出量の違いは，その年の積雪状況や日照条件などの年変動が影響している。

融雪流出の状況把握に対し，水温は重要な情報を含んでいる。融雪増水開始以前の渓流水温は，0 を下回ることはなく，結氷していなかったことを示している。これは，渓流水温の熱源が，地中に蓄えられた熱であることや，河道が雪で完全に覆われることで，河面と気温0 以下の大気との熱交換が行われないことによると考えられる（Kobayashi, 1985）。一方融雪流出の後期では，渓流水温に14時頃をピークとする明瞭な日変化が生じる。融雪前の試験流域では，河道を覆う積雪であるスノウ・ブリッジが形成されていた。融雪期に見られた流量の日変化は，スノウ・ブリッジが融雪により消失し，日射や大気との熱交換による影響が強くなることに起因すると判断した。水温の日変化により，流路内の結氷状態や流域内の消雪状況が判ることを示唆している。

渓流水温による融雪流出ハイドログラフの分離によると，地中流出成分が80%以上を占めていた（図 - 12）。他の研究例では，融雪流出時に地中流出起源の水（地中流出成分またはふるい水）の割合が高い結果を示しているものや（Kobayashi, 1985, 1986；鈴木・小林，1987；Wels et al., 1991），融雪前期には地中流出成分の割合が高いが，融雪後期には直接流出成分の割合と同程度になるとの報告（志水，1990b），さらに土壤凍結による浸透能の低下のため，地表流出成分が卓越していた例（Dunne・Black, 1971）がある。このように，融雪時の積雪分布の変化や土壤状態，特に流域内の凍結面積の違いが地中流出起源の水の割合を変える要因となりうる。試験流域の場合，凍結している面積がほとんどなく，融雪水のほとんどが土壤中に浸透し，河道へ向かって流れる地中流出成分が卓越していた。

#### 基底流出の特徴

夏期と冬期で基底流出の流況が異なっていた（図 - 13）。1995年および1996年の夏期渇水期の流量には14

時前後に値が低下する日変化が明瞭であり、冬期渇水期では夏期渇水期にみられた流量の日変化は兩年ともに認められなかった。

森林流域における夏期流出には明瞭な日変動が認められることはよく知られている（遠藤，1972）。冬期渇水期では見られず夏期渇水期で認められる日変動の原因は、樹木による蒸発散の影響であると考えるのが妥当である。Richards の不飽和浸透理論をモデル斜面の流出に適用して、斜面上の森林が流出に及ぼす影響を説明した太田・城戸（1986）の報告によると、蒸発散のある斜面では流出ハイドログラフに明瞭な日変化が認められ、実際の山地小流域で観測される無降雨日ハイドログラフの日変化が蒸発散に起因するものであることを物理的に示す結果となった。また森林流域とササ流域の夏期流出の日変動を比較した例では、森林流域では明瞭な日変動が見られるのに対し、ササ流域でははっきりした日変動は見られない（佐藤ら，1998）。これらの報告から、試験流域で認められた夏期渇水期の日変化は、蒸発散によるものであり、冬期渇水期の流出に与える蒸発散の影響は非常に小さいといえる。

減水係数は、冬期渇水期では兩年ともにほぼ同じ値であり、夏期渇水期では冬期渇水期より値が大きく、年による違いも認められた（Table3）。冬期渇水期では蒸発散の影響がほとんどないため、減水係数は、地形・地質・土層構造およびこれらと関わる地下水の賦存状態など、森林以外の流域要因が主に影響するため、年による減水係数の違いが大きくなると推察される。一方夏期渇水期では、気象条件および樹木の生理活性の年による違いが、兩年の減水係数の違いに反映していたと考えられる。

#### 水源涵養機能からみた森林流域の流出特性

試験流域での長期流出特性の一つとして年間流出量に対する融雪流出量の割合が高いことが挙げられる。他の報告例と併せて考えると、この結果は流域面積の違いに関わらず、北海道特有の現象であるといえる。北海道では、農業用水をはじめとする水資源は融雪に大きく依存しており、深刻な渇水問題を免れているのも融雪の恩恵によるとの意見がある（中津川，1998）。試験流域において、1996年3～5月の期間のうち71日が、豊水量（95日間はこれを下回らない流量）2.03mmを上回る日流出量を示した。水利用の立場から、融雪流出が重要であることは確かである。

降雨流出において、地中流出成分である湧水はピークが抑制されかつ溪流流出ピークに対し遅れを伴っていた。また融雪流出では、地中流出成分が大部分を占めていた。これらの現象は、透水性の良い森林土壌が降水の大部分を地中流出成分に変え、洪水抑制効果をもたらすことを反映している。ただし流域の湿潤状態により、流域の保留効果やピーク流量の大きさや遅れ時間が変わる場合がある。そのためピーク流量や保流量曲線を用いて水源涵養機能を評価する場合、降雨状況と同時に流域の水分状態を考慮する必要がある。

融雪流出の量や時期に関わる情報は、水利用や融雪洪水対策において重要であり、その情報を用いた融雪流出予測を行うことは有意義である。さらに森林伐採が融雪流出に及ぼす影響について論じた志水（1990a）は、森林の配置、施業方法等によっては、流域からの融雪流出の流量の一様化と流出期間の延長が可能であるとも指摘している。林相や森林蓄積などが異なる複数の流域で流量観測を行い、この結果に基づいた、森林による融雪流出調整の方法が確立されれば、融雪洪水抑制ならびに水資源の有効利用の発展が期待できる。

基底流出では、森林の蒸発散の影響が夏期渇水期の日変化として表れた。こうした日変化は、他の流域にも見られる現象である。森林の蒸発散によって流域外に出る水は、我々が利用することができないものであり、水源涵養機能にとってマイナスの側面があることが指摘されている（井倉，1994）。さらに降水の河川水への変換過程に影響を及ぼす諸要因の中で、量そのものを変化させる要因は蒸発散のみである（塚本，1995）。そこで森林施業（枝打ちや間伐など）によって、水収支項目である蒸発散量などを適正に調整することにより、流減水収支をコントロールし、水源涵養機能を高められる可能性がある。

## 謝 辞

本研究を進めるに当たり、流量堰の設置には北海道立林業試験場の管理科職員の方々、野外観測には同流域保全科の柳井清治科長、長坂有研究職員をはじめ多くの方々の協力をいただいた。ここに記し、感謝の意を表したいと思います。

## 引用文献

- Chow V.T., Maidment D.R. and Mays L.W. 1988 Applied Hydrology. 572p McGraw-Hill USA  
土木学会 1990 水理公式集.625p 土木学会 東京
- Dunne T, and Black R.D.1971 Runoff processes during snowmelt. Water Resources Research 7:1160-1172
- 遠藤泰造 1972 溪流流量の日周期変化.北方林業 24 : 224-229
- Hewlett J. D., Fortson J. C. and Cunningham,G.B.1977 The effect of rainfall intensity on storm flow and peak discharge from forest land. Water Resources Research 13:259-266
- Hewlett J. D. and Hibbert A.R.1967 Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In Sopper W.E. and Lull H.W. "International Symposium on Forest Hydrology"275-290p Pergamon Press Oxford
- 日原高志・鈴木啓助 1988 丘陵地源流域における降雨による流量のふたつのピークについて.地理学評論 61A : 804-815
- 日野幹雄・長谷部正彦 1985 水文流出解析.254p 森北出版 東京
- 市川正巳 1985 水文学の基礎.310p 古今書院 東京
- 井倉洋二 1994 貯留関数モデルによる土壌および基岩からの流出成分の分離.九州大学農学部演習林報告 70 : 13-42
- イリシャット ラヒム・柿本大典・今井剛・浮田正夫 1998 森林流出水の水質特性と森林植生の水源涵養機能に関する研究.土木学会論文集 7 : 73-83
- 石川政幸 1984 森林の水土保持機能—研究の現状と成果—.林野時報 30 : 24-28
- 金子良 1981 農業水文学.286p 共立出版 東京
- Kirkby M.J.(ed). 1978 Hillslope Hydrology 389p John Wiley & Sons England
- 岸原信義・石井正典 1982 日本列島の山地流出に関する研究(Ⅰ)流出地帯区分について.日本林学会誌 64 : 373-381
- Kobayasi D.1985 Separation of the snowmelt hydrograph by stream temperatures. Journal of Hydrology 76:155-165
- Kobayasi D. 1986 Separation of the snowmelt hydrograph by stream conductance. Journal of Hydrology 76: 155-165
- Likens G.E., Bormann F.H, Johnson N.M., Fisher D.W. and Pierce R.S.1970Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem. Ecological Monographs 40:23-47
- 中津川誠 1998 積雪寒冷地流域における融雪流出.木文水資源学会編集出版委員会編「積雪寒冷地の水文・水資源」 p79-94 信山社サイテック 東京
- 太田猛彦・城戸毅 1986 森林の蒸発散が斜面流出に及ぼす影響 - 不飽和浸透理論を用いた数値実験 - .日本林学会誌 68 : 490-498
- 太田猛彦 1996 森林と水循環.森林科学 18 : 26-31
- 札幌管区气象台 1994~1996 石狩・空知・後志支庁農業気象速報.16~19.

- 佐藤冬樹・笹賀一郎・藤原滉一郎 1998 寒冷積雪地帯の小流域における冬期流出の特性．水文水資源学会編集出版委員会編「積雪寒冷地の水文・水資源」p95 - 108 信山社サイテック 東京
- 志水俊夫 1989 森林の水保全機能とは．林野時報 420 : 17 - 21
- 志水俊夫 1990a 森林伐採が融雪流出に及ぼす影響．雪氷 52 : 29 - 34
- 志水俊夫 1990b 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．森林総合研究所研究報告 359 : 123-140
- 森林と水研究会編集 1996 森林と水 - 主要な研究結果から - . 115 p 日本治山治水協会 東京
- 鈴木啓明・小林大二 1987 森林小流域における融雪流出の形成機構．地理学評論 60 : 707 - 724
- 鈴木雅一 1984 山地小流域の基底流出逡減特性(Ⅰ)飽和 - 不飽和浸透流モデルを用いた数学的検討．日本林学会誌 66 : 174 - 182
- 高木潤治 1996 森林が水を蓄える働き．森林科学 18 : 32 - 36
- 竹下敬司 1984 森林の持つ水土保持機能と今後の課題．林野時報 30 : 18 - 24
- 田中正 1996 降雨流出過程．恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編「水文地形学 - 山地の水循環と地形変化の相互作用 - 」56-66p 古今書院 東京
- 塚本良則 1995 森林の変化が長期流出に与える影響．塚本良則編「森林水文学」250 - 263p 文永堂出版 東京
- Wels C . , Cornctt R . J . and Lazerte B . D . 1991 Hydrograph separation: a comparison of geochemical and isotopic tracers . Journal of Hydrology 122:253 - 274
- 吉野昭一 1980 山地小溪流の雨水到達時間について．日本林学会誌 62 : 59 - 61