

樽前山麓流域の洪水流出特性に関する研究

Study on Flood Runoff Characteristics in the Tarumae Volcanic Area

苫小牧工業高等専門学校 正会員 八田茂実 (Shigemi HATTA)
 専修大学北海道短期大学 正会員 山梨光訓 (Mitsunori YAMANASHI)
 苫小牧工業高等専門学校 正会員 藤井清志 (Kiyoshi FUJII)
 苫小牧工業高等専門学校専攻科 学生員 菅原元気 (Genki SUGAWARA)

1 はじめに

樽前山山麓地域の河川は、水質が優良な上、湧水比流量が大きく、かつ豪雨に対しても洪水流量の小さい、治水・利水上きわめて有用な河川である。したがって、この地域の水文流出過程を解明することは、今後の治水対策や利水対策を論じるうえできわめて有用な資料となることが期待される。本研究では、このような観点から、第四紀火山である樽前山麓流域を対象として、その流出過程を明らかにすることを目的としている。本報告では、北海道開発局をはじめ、これまでに多くの機関で観測されている資料や、本研究で新たに収集した資料および調査結果に基づき、苫小牧地域の第四紀火山流域の流出過程について現在までの成果を取りまとめて報告する。

2 試験流域における洪水流出特性

本研究で設定した小糸魚川試験流域の概要を図-1に示す。苫小牧市水道部が行った河道周辺の調査によれば、地表面下2.5mの位置に厚さ1m程度の泥炭層が不連続に見られる他は、地表面下9.5mの位置の不透水層まで軽石混じりの砂礫層や砂質土層で覆われている。本研究で行った室内実験の結果によれば、砂層の飽和透水係数は $1.0 \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ の範囲にあり、流域の地表付近は非常に透水性の大きな状態となっている。本研究では流域の下流端(M7地点)と本川最上流部の湧水地点(M0地点)において水位・水温を一時間単位で測定している。更に洪水時には、M7地点に自動サンプラーを設置し、河川水の採水も行った。

2.1 試験流域における洪水流出形態の分類

これまでも報告しているように¹⁾、小糸魚川流域の洪水流出は、

- 最上流の湧泉量がほとんど変化しないにもかかわらず、流域末端では大きな流量変化の見られるもの(I型)と、
- 湧泉量の増加傾向と流域末端の流量の増加傾向が良く一致しているもの(II型)

の2つに分類することができ、この2つの出水では下流端におけるハイドログラフの形状は大きく異なる。M7地点のハイドログラフの形状やM0地点の湧泉水量の変化に注目して、これまでに得られている洪水資料をI型の出水とII型の出水に分類して扱うこととした。

2.2 I型, II型の出水特性

図-2はI型, II型の出水時におけるM0, M7地点における流量と、M7地点で採水した試料の波長260nmにおける吸光度(E_{260})を測定した結果を示している。 E_{260} は、フミン質濃度と相関が高いことが知られている²⁾。図によると、

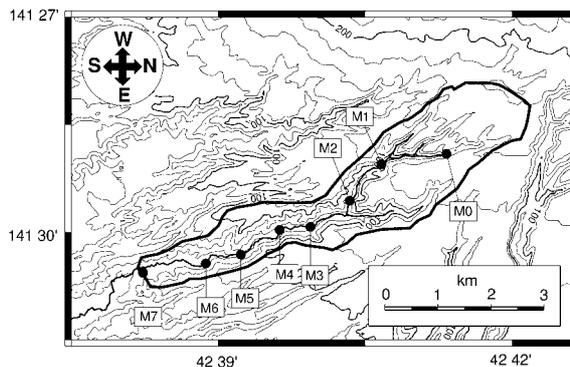


図-1 小糸魚川試験流域と流量調査点の位置

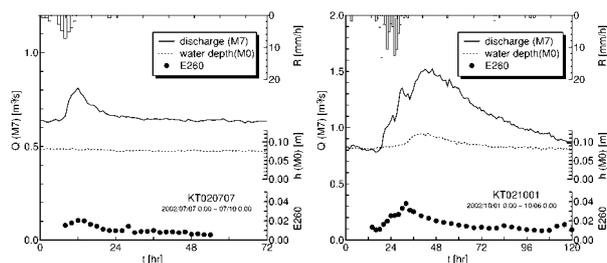


図-2 I型(左), II型(右)の出水時の E_{260} の変化

I型の出水では流出量のピークと E_{260} のピークは良く一致していることがわかる。一方、II型の出水では、ハイドログラフは2つのピークを有しており、降雨入力直後の第1ピークでは E_{260} の増加に対応し、第2ピークでは、M0の湧水量の増加に対応していることがわかる。このような傾向は、1つのピークしか持たないII型の出水にも見られ、II型の出水にはI型の出水成分が含まれているものと考えられる。また、I型出水のハイドログラフ減水部の解析から直接流出量を求めると、降雨規模は大きく異なっているにもかかわらず、直接流出率は0.025~0.030の範囲でほぼ一定となる。

このように、I型とII型の流出は量的にも質的にもその特性は大きく異なっており、まったく別の流出成分として扱うべきである。 E_{260} の測定結果を整理すると、I型の出水は比較的浅い層からの流出が主体となっており、II型の流出では、I型の流出成分に続いて地中水の流出が現れると考えることができる。I型で主たる流出成分を「直接流出成分」、II型で見られる地中水の流出成分を「基底流出成分」と呼ぶことにする。

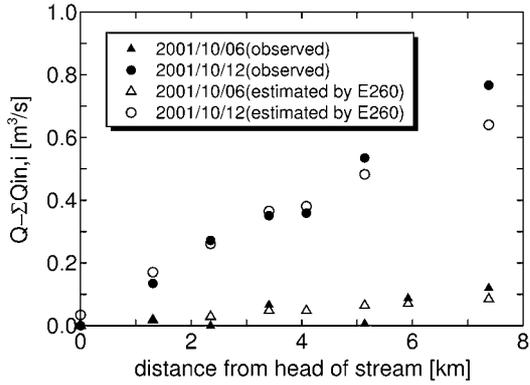


図-3 本川・支川の水源流量を差し引いた場合の流量観測点における流量の変化

2.3 斜面域からの流出

図-3は低水時・洪水時の本川上の各測点の流量 Q から本川水源部の流量 $Q_{in,0}$ と支川流入量の和 $\Sigma Q_{in,i}$ を差し引いて本川延長に対する流量変化をプロットしたものである。図中の印は低水時の流量の分布、印はII型出水のピーク流量付近で測定した結果を示しており、いずれも河道延長に対して直線的に増加する傾向が見られる。すなわち、II型の出水時には湧水量の増加以外にも、河道周辺からの流入量も増加すること、更にその流入量は流域内の各部分で同時かつ一様に現れることを示している。

洪水時の調査時では、河道近傍でも地表流が確認できなかった。このため、水源部を除く洪水時の流出成分の増加が比較的浅い層からの流出成分と考え、流量測定時に同時に採水した試料の E_{260} を測定し流出成分の分離を行った。流出成分の算定方法は、次式の質量保存則により、浅い層からの流出量 Q_s と地下水流出量 Q_g をそれぞれ求めた。

$$Q = Q_s + Q_g, \quad Q \cdot C = Q_s \cdot C_e + Q_g \cdot C_g \quad (1)$$

ここで、 Q は流量、 C は E_{260} 吸光度であり、 C_e, C_g はそれぞれの流出成分の E_{260} である。分離に当たっては、 C_e, C_g の値をいくらに設定するかが重要となるが、ここでは C_g は低水時の M0 地点における E_{260} の測定値 ($=0.0019$) を、 C_e としては M3 地点で採水した滲出水の E_{260} の測定値 ($=0.0822$) を用いた。図-3中の印はこれにより求められた流量 Q_s を示している。水源部流量を差し引いた流量と Q_s は洪水時・低水時を問わず良く一致していることがわかる。これは、水源部を除く本川の河道周辺からの流出が、測定された滲出水と同等の流出経路をたどっていることを示しており、本研究では、この成分も含めて「直接流出成分」と考える。

3 流出過程のモデル化

本節では、小糸魚川流域における流域の調査結果・流出特性の検討結果を踏まえ流出過程のモデル化を行う。ただし、本研究でモデル化の対象とするのは、水源部上流を除いた 5.77km^2 の流域で、この流域では水収支的に閉じていると考えられる³⁾。水源部に関しては、洪水期間中も観測された一定流量を与えて計算するものとした。

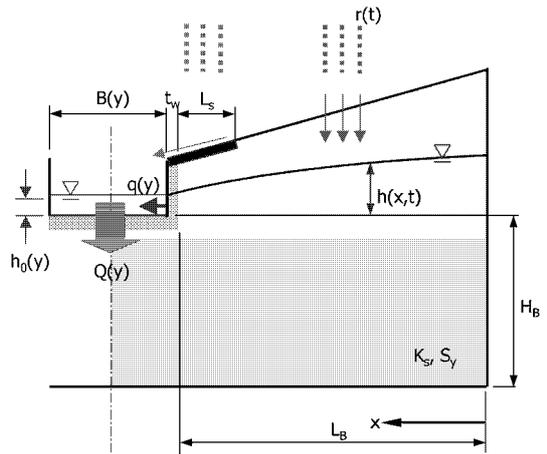


図-4 斜面域のモデルの概念

3.1 流域と河道流出のモデル化

小糸魚川流域は図-1に示したように流域のほぼ中央を流れる主河道に対し、流入する支川が少なく、かつ主河道長に対して斜面長が小さい形状となっている。このため、河道長 $Y_L = 7.4\text{km}$ の本川を中心とし、斜面長 $L_B = 390\text{m}$ 、勾配 $1/10$ の斜面が両側に付随する矩形流域に近似した。また、本川に流入する水源のうち、本川上部 ($Q_{in,0}$) と上流側の3つの支川の流量 ($Q_{in,1} \sim Q_{in,3}$) が大きいため、これらの流入量を本川合流地点で与えることとした。なお、河道は長方形断面とし、縦断形状および河道幅は実測値に基づいて本川水源からの距離 y に対する近似式を作成し、それを利用している。なお、河道内の流れは Manning 式に従うものとし、kinematic wave 法を用いて計算する。

3.2 斜面流出のモデル化

斜面流出のモデル化においては、

- i) 表面流出成分が降雨規模によらず流出率が一定である
- ii) 河道を通じた地下水流の出入りが認められる

ことに留意し、河道から L_s の距離に入力された降水は表面流出となって河道に流入するものとし、斜面全体からの流出は、Hantushら⁴⁾を参考に河床部までを含めた1次元の飽和浸透モデルに基づくモデルで説明するものとした。これらは、2.2節で示したI型出水に想定される流出経路、2.3節で示した、河道延長に沿って河道周辺からの流入量が増加する現象をモデル化したもので、これらが「直接流出成分」に相当すると考えている。図-4に斜面流出の概念図を示す。このモデルでは、河床から H_B の深さまで飽和透水係数 K_s 、有効間隙率 S_y の透水層があるものとし、地上に到達した降水は、直ちに地下水面に到達し、飽和ダルシー則に従って地中水が移動する。移動した地中水は厚さ t_w の河床材料を通じて、斜面域から河道に流出または河道から斜面域に流入することになる。このため、斜面流出の計算に当たっては、河道流の計算も同時に進めていく必要がある。

地下水流の基礎方程式は、次式で表される。

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} - K_s (H_B + h) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial h}{\partial x} = r(t) \quad (2)$$

ここで、 t は時間、 x は斜面頂部からの距離、 h は河床から測定した地下水水深、 $r(t)$ は時刻 t における雨量である。

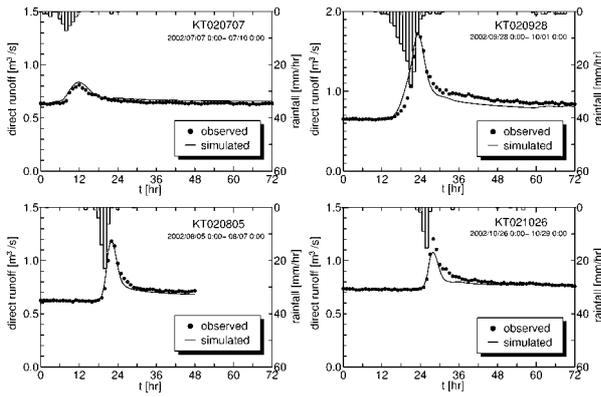


図- 5 I型の洪水の再現結果

表- 1 計算に用いた数値

K_S	S_y	K_w	t_w	L_s	H_B	n
cm/s		cm/s	m	m	m	$m^{-1/3}s$
0.015	0.3	1.0	0.2	8.0	10.0	0.05

また、境界条件としては、 $x = 0$ で流域界、 $x = L_B$ で流出量 $q(y)$ の連続条件から次の2式を採用した。

$$\frac{\partial h(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$-K_S(h(L_B, t) + H_B) \frac{\partial h(L_B, t)}{\partial x} = K_w L_w \frac{h(L_B, t) - h_0(y)}{t_w} \quad (4)$$

ここで、 K_w, L_w はそれぞれ河床材料の透水係数、潤辺/2、 $q(y), Q(y), h_0(y)$ はそれぞれ、上流から距離 y の位置の単位幅流量、河道流量、河道の水深である。

最終的に河道に流出（あるいは河道から斜面域に流入）する単位長さあたりの流量は、以下の式で計算される。

$$q(y) = K_w L_w \frac{h(L_B, t) - h_0(y)}{t_w} \quad (5)$$

計算に当たっては初期条件が必要となるが、低水時の河道縦断方向の流量を再現できるように各断面ごとに斜面域からの流出量を与え、この流量を再現できる地下水分布を初期条件として与えた。具体的には、実測した河道縦断方向の流量分布 $Q(y)$ を近似式で与え、この河道流下方向の流入量増分が低水時の斜面域からの流出 $q(y)$ によって供給されているものとし、

$$2q(y) = \frac{dQ(y)}{dy} = AB y^{B-1} \quad (6)$$

によって $q(y)$ を定めた上で、これを満たす地下水分布 $h(x, 0)$ を式 (2), (5) により与えた。

3.3 計算結果

図-5はI型出水に関して、以上のモデルを適用して得られた計算流量と実測流量を比較したものである。計算に用いた各係数は表-1に示すとおりで、いずれの解析でも同じ値を用いている。なお、 K_S, S_y, L_s, H_B, n の数値は、室内実験・現地調査およびI型の流出特性から選定した値となっ

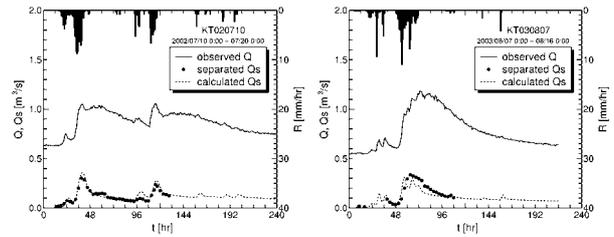


図- 6 E_{260} により分離された斜面域流出成分（印）とモデルによる斜面域流出成分の計算値（破線）の比較

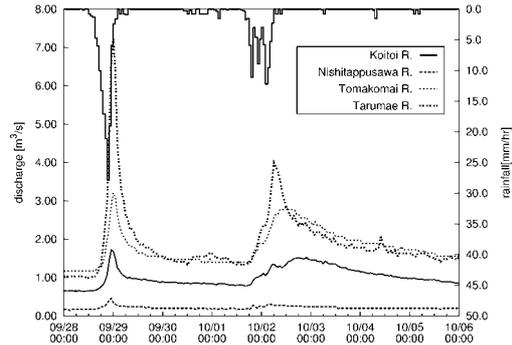


図- 7 小糸魚川・錦多峰沢川・苫小牧川・樽前川流域における洪水ハイドログラフの比較 (2002/9/28 ~ 10/6)

ており、 K_w, t_w については2002年9月28日の洪水を再現できるように定めた。

図に示すように、I型の出水では計算流量も観測流量を良く再現できている。前節のモデルは、式(1)で E_{260} に基づいて分離した斜面域流出成分 (Q_s) を対象としているため、計算された流量のうち水源部流量を差し引いた流量 (Q'_s) は一致していなくてはならない。このため、 E_{260} の測定されている洪水について、モデルによる計算を行い、 Q_s と Q'_s を比較した結果を図-6に示す。図のように、I型、II型出水を問わず、両者はほぼ一致しており、本研究で推測した試験流域の流出過程が妥当なものであったことを示している。

4 樽前山麓流域の洪水流出特性

4.1 洪水ハイドログラフの比較

図-7は、流域平均雨量に比較的差が見られない降雨イベントについて、小糸魚川、錦多峰沢川、苫小牧川、樽前川の洪水ハイドログラフを示したものである。図に見られるように、対象地域の洪水ハイドログラフ形状は、河川ごとに大きく異なっている。流出率の小さい錦多峰沢川流域では降雨直後に流量は増加するが、それ以降の流量の変動が明瞭でなく、流出率が1に近い他の流域でははっきりとした流量変動が見られる。特に小糸魚川試験流域と隣接する苫小牧川流域では、ハイドログラフの形状が極めてよく似ており、苫小牧川流域でも、小糸魚川流域同様にI型、II型の出水に分類することが可能である。一方、流域面積や流出率がほぼ等しい樽前川と苫小牧川流域を比較すると、対象地域の西側に位置する樽前川では降雨に対する応答が鋭く、苫小牧川流域でII型出水が主体となっている出水時に

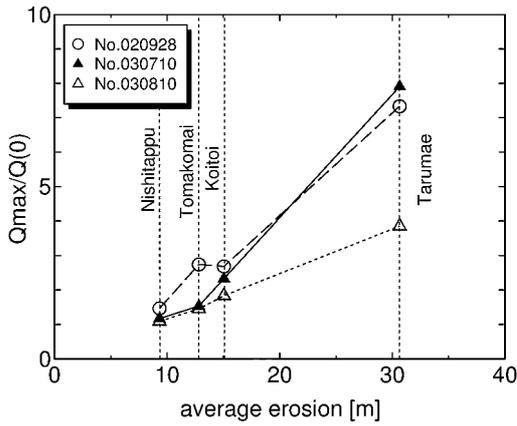


図-8 流域平均侵食高と河川係数の関係 (小糸魚川・錦多峰川・苫小牧川・樽前川流域)

も、I型出水に見られるような明瞭な洪水ピークを有している。また、樽前川・苫小牧川流域とも減水部はほぼ同じであるが、苫小牧川流域では降雨に対する応答が緩やかな分、洪水前後の低水流量が大きくなっているのが特徴的である。

4.2 流域地形との関連性

先に小糸魚川試験流域で検討したように、I型出水は河道近傍の浅い流出成分で説明することができる。安形⁵⁾は、国内の5つの成層火山を対象に、火山体の全体の湧泉湧出量の総和を入力である降水で除した湧泉湧出率を定義し、この湧泉湧出率と地形の侵食の度合いを示す開析度¹⁾の間には、明瞭な負の相関関係のあることを示している。これは、侵食の進んだ火山体ほど入力された降水が湧泉以外の流出経路で流出すると言い換えることもできる。安形が指摘した湧泉湧出率と開析度の関係は、1つの火山体全体を対象としたものであって、山麓に存在する個別の湧泉や流域を対象としたものではない。しかし、堆積した火山噴出物が流域の保水性を大きくするものであるならば、侵食が進んでいる場合、流域の保水性が低下し降雨に対する河川流量の応答は鋭敏になると予想される。

このようなことを踏まえ、対象地域の侵食の度合いと降雨に対する河川流量の応答を検討する。安形は侵食の度合いを表す指標として開析度を採用しているが、流域間の比較では、平均標高の低い流域で開析度が他の流域より極端に大きくなる傾向がある。このため、本研究では接峰面高度と現地形の標高差の流域平均値(流域平均侵食高)を侵食の度合いを表す指標として採用した。なお、接峰面は国土地理院による50mグリッドDEMを用い、中山⁶⁾が提案している方法により算定した。図-8は濁水比流量が $4 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{km}^2$ 以上の流域について、流域平均侵食高と洪水ピーク時の比流量(Q_p/Q_0)を示したものである。

図中には、降雨特性による相違を排除するため、対象地域でほぼ一定の降雨のものを選んでプロットしており、流域自体の特性として考えることができる。図を見ると、流域平均侵食高の増加に従って Q_p/Q_0 も大きくなり、その変

¹⁾現在までに侵食されたと推定される谷の体積を V_v 、現地形の体積を V_p とすると、開析度 D_d は $D_d = V_v/V_p \times 100(\%)$ で表される。なお、 V_v は接峰面高度と現地形の標高差を流域全体に積分することによって推定される。

動も降雨イベント毎に大きくなること分かる。このことは、侵食の進んでいない流域では洪水を平滑化する機能が高いことを示している。

ここでは侵食の進んでいない流域として、小糸魚川・錦多峰川・苫小牧川の3流域を挙げたが、これらの流域は現在でも侵食が進み、小糸魚川流域でも観測を開始した2001年から谷頭部は2~3mほど上流側へ移動している。今後、侵食が進行すれば、降雨に対してピーク流量が大きくなるとともに低水流量が低下することも予想される。

5 まとめと今後の課題

本研究では、小糸魚川試験流域を対象に、多地域からの流入があると考えられる水源部以外の残流域に対して、「直接流出成分」のモデル化を行った。これは、河道から一定幅の流出寄与域からの流出と、斜面域が河道流を涵養するような流出をモデル化したものである。提案したモデルに同一のモデルパラメータを与えて、全洪水資料の再現計算をした結果、I型およびII型に含まれる直接流出成分を精度良く再現することができた。これは実測資料に基づいて推定した対象流域の流出過程が妥当なものであったことを示している。また、流域平均雨量に比較的差が見られない降雨イベントについて、樽前山麓のいくつかの流域の洪水ハイドログラフを比較した。この結果、侵食の進んだ流域ほど直接流出成分が大きく現れ、洪水のピーク流量も大きくなる傾向のあることを示した。

現在までに得られている結果から、小糸魚川試験流域以外にも発生するI型の出水に関しては河道降雨と流出寄与域的な流出と見て差し支えないものと考えているが、II型の出水に関しては、なぜ出水時に水温が低下するのかと言った点も含めて不明な点が多い。今後は水源部の湧水や地中流の流出機構を検討するとともに、対象流域周辺の河川の出水特性についても検討する必要がある。

謝辞：本研究は財団法人北海道河川防災研究センター平成16年度研究助成「苫小牧地域の河川流域の流出特性に関する研究」(研究代表者：八田茂実)の援助を受けました。また、北海道開発局室蘭開発建設部、苫小牧市水道部からは貴重な水文資料を提供していただきました。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 八田茂実, 秋野隆英, 藤井清志, 菅原元気, 小糸魚川試験流域の流出過程に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 60, pp.300-303, 2004.
- 2) 丹保憲仁, 亀井翼: 自然系, 都市系の流出指標としての紫外外部吸光度とTOC, 水文・水資源学会1988年研究発表要旨集, pp.180-181, 1988.
- 3) 八田茂実, 秋野隆英, 藤井清志, 樽前火山流域の流出特性について, 水工学論文集, 48, pp.349-354, 2004.
- 4) Hantush, M.M., Harada, M. and Marino, M.A., Hydraulics of stream flow routing with bank storage, Jour. of Hydrologic Engineering, ASCE, 7(1), 76-89, 2002.
- 5) 安形康, 成層火山体の地形発達と湧水湧出プロセスの変化過程, 東京大学学位論文, pp.67-74, 1999.
- 6) 中山大地・隈元崇, 細密DEMに関する研究展望, デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析-東京大学空間情報科学研究センター公開シンポジウム-, 地域環境GIS研究会, pp.31-34, 2000.