

鶴川流域における降雨履歴が流出に与える影響についての研究

Study on Influence of Rainfall Hysteresis on Runoff in Mukawa River Basin

室蘭工業大学 ○学生員 中澤 辰哉 (Tatsuya Nakazawa)
室蘭工業大学 正員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

洪水発生時の流出パターンは土壌の乾湿状態に大きく依存し、土壌が飽和状態である場合に大規模な洪水が発生した場合には土砂の生産は豊富になると考えられる。今回解析の対象とした鶴川は元来土砂流出の多い河川であるが、これまで河道、特に河口域での変化が顕著であった¹⁾。河川の土砂動態の直接的な影響要因に砂利採取や人工構造物、大規模出水等の影響が考えられるが、砂利採取が禁止され構造物も完成後時間が経過している現在では出水が土砂流動に最も大きな影響を与えると考えられる。

そこで本研究では洪水時の土砂流動を左右する流出パターンの再現を行うことを目的とする。具体的には洪水発生前の流域の湿潤状態を実効雨量から把握するとともに、降雨時の流出計算を行う際、表面流出及び基底流出に寄与する流出成分を土壌の湿潤状態によって変化させることを試みた。洪水時流出量の算定にあたっては降雨量の分布特性を考慮するため流域を全てメッシュに分割し、メッシュ単位での計算を積算することによって流量を推定する分布型流出モデルを用いた。

具体的な推定手順としては以下の通りである。

- 1) 出水時期の雨量については気象庁提供のレーダーアメダス解析雨量を約1km×1kmのメッシュ(3次メッシュ)に配分し、メッシュ毎に雨量強度(mm/h)を与える。
- 2) メッシュ毎に与えられた雨量から実効雨量を求め、これを流域の湿潤度として流出率に関係づける。
- 3) この流出率によって表面流出成分と基底流出成分に配分し、斜面流出量の計算を行う。その際表面流出成分については kinematic wave モデル、基底流出成分については貯留関数モデルという二つの手法を統合したモデルを用いて流出量を算出することとした。
- 4) 3) で得られた斜面流出量を用いて河道追跡の計算を kinematic wave モデルにより行う。
- 5) 推算した流出量を流量観測所の2地点(鶴川、穂別)で実測された流量と比較し妥当性を検証した。

以上の手順により、降雨履歴(土壌の湿潤状態)が流出に与える影響を考慮した流出計算手法を検討した。

2. 対象流域の概要

本研究において対象とした流域は、図-1 に示す北海道胆振地方東部を流れる鶴川(流域面積:1,270km²,幹線流路延長:135km)である。鶴川は勇払郡占冠村の狩振岳(標高1,323m)に発し、占冠村においてパンケシュル川、双珠別川等の支川と合流、むかわ町穂別において穂別川と合流し太平洋に注ぐ一級河川である。図-2 に示すように鶴川流域は約9割が森林で占められており上流部は針広混交林、下流部は広葉樹林が分布している。また、図-3 に示すように南北に細長い形状を示す鶴川流域は標高差も大きい

ことから上流と下流で降雨量も大きく変動する²⁾。年間降水量は下流のアメダス鶴川地点で約1,038mm、上流のアメダス占冠地点で約1,303mm(1998~2008年の平均)と上下流での降雨量の差は大きい。図-4 に示したのは流域内のアメダスで観測された開始以来の年最大日雨量である。図-4を見ると既往最大の豪雨が2003年、2006年にたて続けに発生しており、近年大雨が頻発しやすい流域の一つと考えられる。

3. 対象時期の降雨の概要

本研究において分析対象とした降雨、洪水は2003年8月8~10日の3日間と2006年8月17~19日の3日間である。

3.1 雨量の空間的分布について

2003年8月8~10日の大雨については停滞した前線による降雨と台風10号による降雨が重なり長時間にわたって降雨が続いたために洪水が発生した。図-5、図-6は分析対象とした3日間のレーダー雨量で観測されたデータを整理して作成した時間最大雨量及び総雨量のメッシュである。これらの図によると時間最大雨量、総雨量ともに流域南東部で降雨量が大きくなっていることがみてとれる。なお、2003年のレーダー雨量については2.5kmメッシュでデータが提供されていたため、3次メッシュに投影する際には2.5kmメッシュとの重なりが最も大きい3次メ



図-1 解析対象流域(鶴川流域)



図-2 土地被覆メッシュ

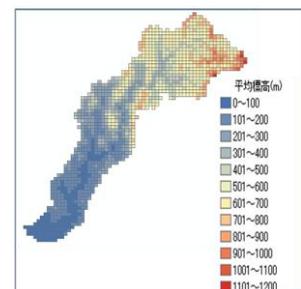


図-3 標高分布メッシュ

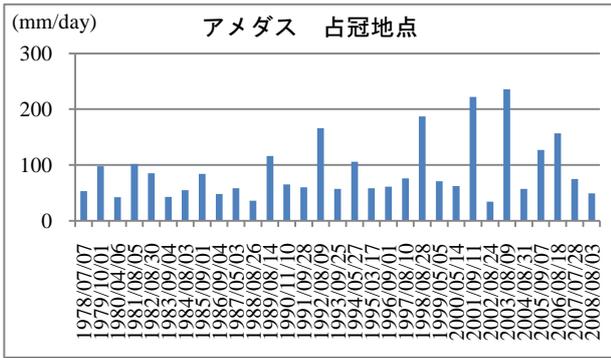
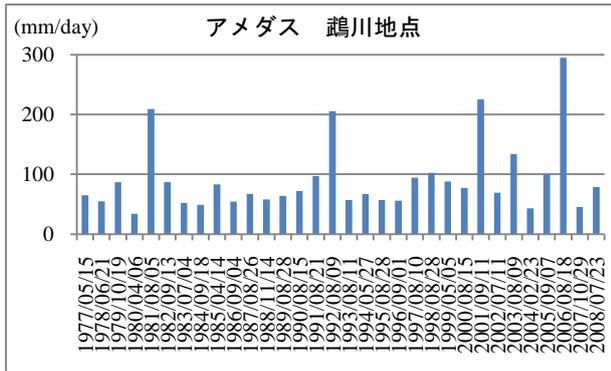


図-4 年最大日雨量



メッシュにその雨量値を与えた。また、レーダー雨量については芳賀ら³⁾により地上雨量計との相関が十分にとれていることが確認されたため、そのまま用いることとした。

2006年8月17日～19日の大雨については停滞前線の動きが活発となった際に局地的な豪雨が発生し洪水が発生した。図-7、図-8は分析対象とした3日間の時間最大雨量及び総雨量のメッシュである。これらの図によると流域南西部の下流域に集中的に降雨が発生していることがみとれる。なお、2006年のレーダー雨量は1kmメッシュで提供されている。

3.2 雨量の時間的分布について

鶴川観測所上流域の流域平均時間雨量について2003年8月8～10日のハイトグラフを図-9に、2006年8月17～19日のハイトグラフを図-10に示す。

最終的な積算雨量についてはどちらも大きな違いは無く、2003年の豪雨については最大の降雨が発生するまで弱い雨が連続的に降っているが、2006年の豪雨については瞬間的に降雨量が増加する傾向がみられた。

4. 実効雨量

本研究において降雨履歴の影響について考慮する指標として、土砂災害発生予測に用いられる下式の実効雨量により流域の湿潤度を評価する。

$$R_t = r_t + \sum_{n=1}^m \alpha_n r_{t-n} \quad (1)$$

ここで、 R_t : t 時の実効雨量(mm)、 r_t : t 時の時間雨量(mm/h)、 m :実効雨量推算にあたり遡って考慮する時間数で本研究では30日(720hr)とした。また、 α_n は n 時間前の減少係数で半減期を T 時間として、

$$\alpha_n = 0.5^{n/T} \quad (2)$$

と表わされる。一般に地下水の変動は長期の実効雨量(半

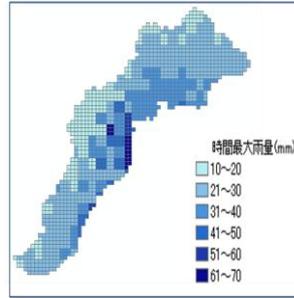


図-5 時間最大雨量メッシュ値 (期間 2003/8/8～8/10)

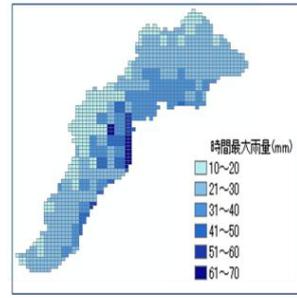


図-6 総雨量メッシュ値 (期間 2003/8/8～8/10)

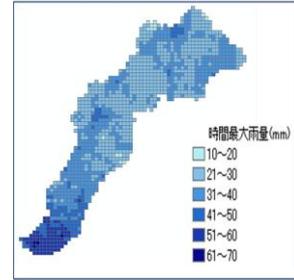


図-7 時間最大雨量メッシュ値 (期間 2006/8/17～8/19)

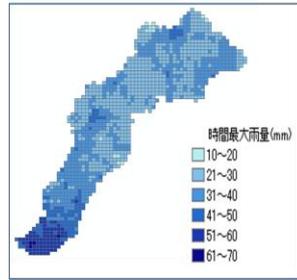


図-8 総雨量メッシュ値 (期間 2006/8/17～8/19)

減期72時間)の変動とよく似ていることが知られ、嵯峨ら⁴⁾も長期実効雨量と土壌の飽和度の関連性は大きいと指摘している。鶴川観測所上流域の流域平均時間雨量について2003年8月8～10日の実効雨量を図-11に、2006年8月17～19日の実効雨量を図-12に示す。図-11と図-12を比較すると2003年の豪雨時の実効雨量は緩やかに増加していくのに対し、2006年の豪雨時の実効雨量は初期実効雨量が2003年のそれよりも小さい状態から降雨開始時に合わせ急な増加を示していること等から、それぞれの実効雨量の時間的推移は異なっていることがみとれる。

5. 流出計算

流出計算には斜面流出と河道追跡とを組み合わせた分布型モデルを用いた。また、斜面流出については表面流出はkinematic waveモデル、基底流出は貯留関数法を用いて計算を行った。

5.1 解析データ

斜面流出計算にあたり、鶴川流域のメッシュ分割を行った。メッシュ分割は国土数値情報を元に対象流域の水系コードからメッシュコードを抽出し決定した。河道追跡計算については斜面からの流出量を疑似河道網に与えて行う必要がある。本研究では石狩川流域ランドスケープ情報⁵⁾を参考に東西南北に位置する周囲4メッシュから流入及び流出メッシュを決定し、疑似的な河道網を作成した。

5.2 斜面流出計算

(1) 表面流出

kinematic waveモデルを用いた表面流出計算基礎式は以下の通りである。

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = fr \quad (3)$$

$$q_s = ah_s^p, \quad \alpha = \sqrt{i_s/n_s}, \quad p = 5/3 \quad (4)$$

ここで、 h_s :斜面の水位 (m)、 q_s :単位幅流量(m³/s)、 f :流出

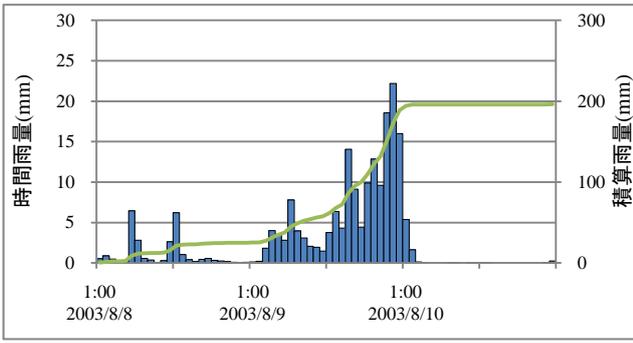


図-9 鷓川観測所上流域平均時間雨量
(期間 2003/8/8~8/10)

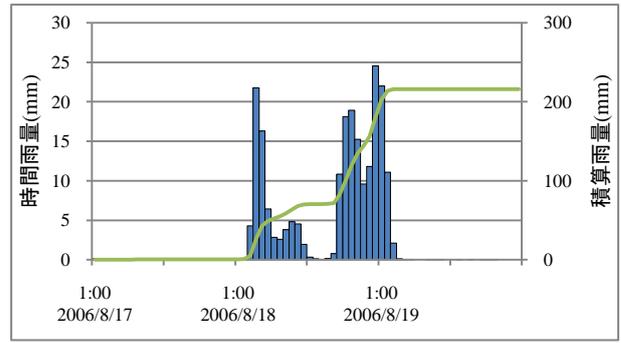


図-10 鷓川観測所上流域平均時間雨量
(期間 2006/8/17~19)

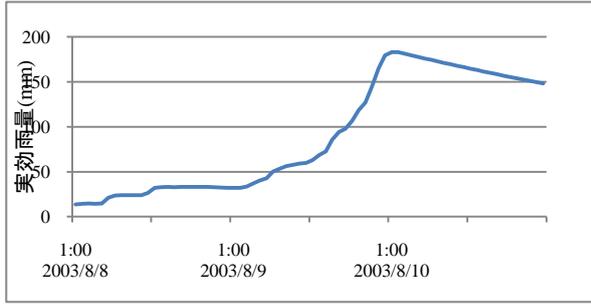


図-11 鷓川観測所上流域長期実効雨量
(期間 2003/8/8~8/10)

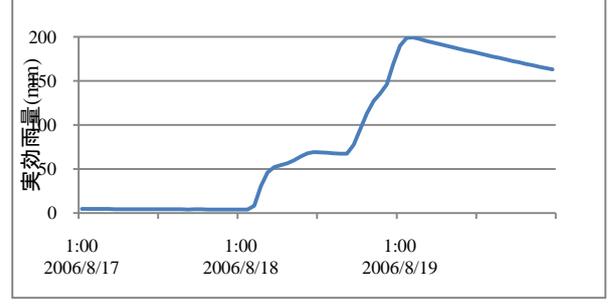


図-12 鷓川観測所上流域長期実効雨量
(期間 2006/8/17~8/19)

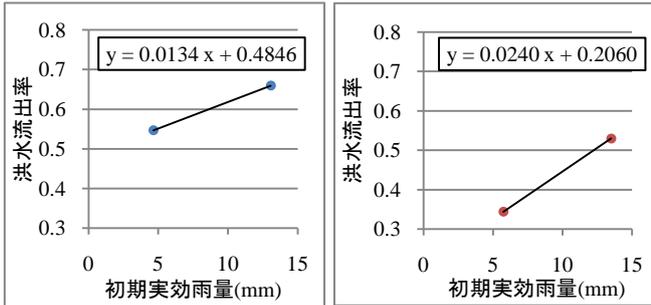


図-13 実効雨量と流出率関係式
(左: 鷓川観測所 右: 穂別観測所)

率, r :雨量強度(m/s), i_s :斜面勾配, n_s :等価粗度($m^{-1/3}s$)となっている. 等価粗度 n_s は流域の土地利用形態を考慮し国土数値情報土地利用 1/10 細分区画メッシュから卓越する土地利用を判別し表-1のように与えた^{6),7)}. 流出率 f については前章で述べた実効雨量を用いて時間毎に変化させて与える. 図-13に流域毎の実効雨量と流出率の関係を示す. また, 流出率 f の具体的な算定方法を図-14に示す.

(2) 基底流出

基底流出の計算には下式で表わされる 2 段タンク型貯留関数モデル⁸⁾の基底流出を計算する部分を適用した.

$$s = k_1 q_b + k_2 \frac{dq_b}{dt}, \quad \frac{ds}{dt} = r_b - q_b \quad (5)$$

$$k_1 = c_1 k_2, \quad k_2 = (c_3 - 1)/c_0 \quad (6)$$

$$c_0 = (\delta/T_c)^2, \quad c_1 = \delta^2/T_c, \quad \delta = 2.1 \quad (7)$$

$$r_b = (1 - f)r \quad (8)$$

ここで, s :貯留高(mm), q_b :地下水流出成分流出高(mm/h), T_c :分離時定数(h), δ :減衰係数, k_1 および k_2 :モデル定数, c_0 および c_1 : T_c および δ によって決定する関数, r_b :地下に供給される水量(mm/h)となっている. 各定数のパラメータに

表-1 等価粗度 n_s ($m^{-1/3}s$)

土地利用	等価粗度
森林	0.7
その他の用地	
田	0.3
其他農用地	
ゴルフ場	
河川地及び湖沼	0.05
海水域	
荒地	0.03
建物用地	

表-2 各パラメータ

観測所	T_c	c_3
鷓川	79.204	1.832
穂別	52.917	2.220

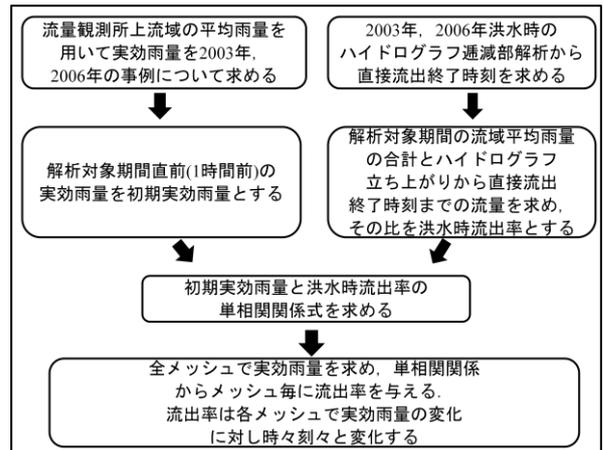


図-14 流出率 f の算定方法

については文献値⁹⁾を参考に表-2のように与えた.

5.3 河道追跡計算

kinematic wave モデルを用いた河道追跡計算基礎式(横流入量を零)⁷⁾は以下の通りである.

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} + \frac{5}{3} i_c^{0.3} Q_c^{0.4} \frac{\partial Q_c}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

ここで, Q_c :河道の流量(m^3/s), n_c :粗度係数($m^{-1/3}s$), i_c :

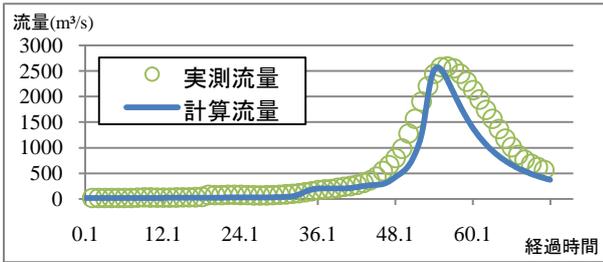


図-14 鶴川観測所流出量計算結果
(期間 2003/8/8~8/10)

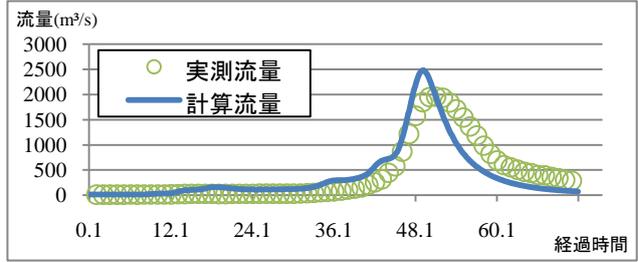


図-15 穂別観測所流出量計算結果
(期間 2003/8/8~8/10)

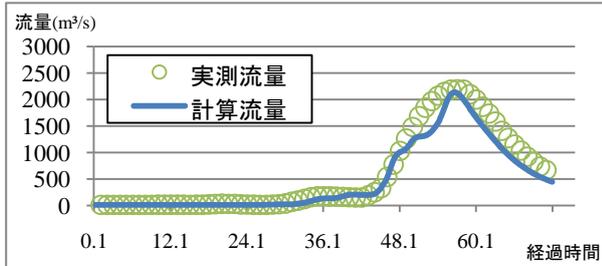


図-16 鶴川観測所流出量計算結果
(期間 2006/8/17~8/19)

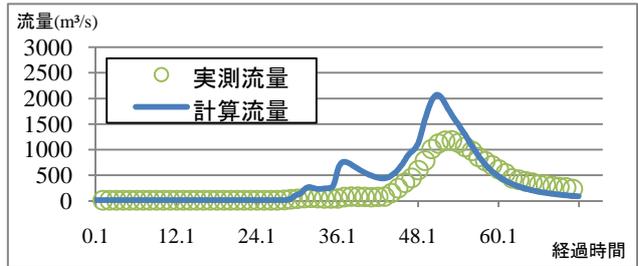


図-17 穂別観測所流出量計算結果
(期間 2006/8/17~8/19)

河道勾配, B :河道幅(m)となっている. 粗度係数 n_c は試行錯誤の結果 $0.1(m^{-1/3}s)$ とした. 河道勾配 i_c は流入メッシュの最低標高と当該メッシュの最低標高の差の最小値を選び出し, 河道長 1km で除して算出した. 河道幅 B は上流域での実測河道幅データがないため, 山口らの報告¹⁰⁾を参考に, 流域面積 $A(km^2)$ から以下のように与えた. $781.22km^2$ が実測河道幅のある上下流域の境界の A である.

$$B = 3.476A^{0.435} \quad (A < 781.22) \quad (10)$$

$$B = 2.8418^{-4} \times A^{1.848} \quad (A \geq 781.22) \quad (11)$$

以上より, 図-14, 図-15 に 2003 年 8 月の豪雨時の鶴川, 穂別観測所での実測ハイドログラフと計算結果を, 図-16, 図-17 には 2006 年豪雨時の鶴川, 穂別観測所での実測ハイドログラフと計算結果を示す. これらの図について実測流量に着目すると, 2003 年は前期降雨の影響のためか実測流量のピークは大きく, ハイドログラフの立ち上がりも急である一方 2006 年は土壤が乾燥していたためかピークは小さい. 次に, 計算結果をみると 2003 年, 2006 年の鶴川観測所でのハイドログラフは立ち上がり, ピーク流量ともに実測と比較しても概ね妥当な傾向が再現されている. しかし, 穂別観測所での結果については 2003 年, 2006 年ともに立ち上がりが早い傾向にありピーク流量を含め全体的に過大な流量を示している. この原因としては主に流出率の与え方が考えられ, 今後実効雨量ではなく土壤雨量指数など流域の特徴に応じて湿潤状態を表す指標から流出率を与えるなどの改善が必要と考えられる.

6. まとめ

本研究において得られた結果を以下にまとめる.

- 1) 2003 年, 2006 年にたて続けに発生した既往最大の豪雨は積算雨量のみを見ると大きな違いは見られることはなかったが, それぞれ異なる降雨形態を示しており, 2003 年は前期降雨があって湿潤状態にあったのに対し, 2006 年は乾燥状態の土壤に突発的に 2 度の豪雨が降ったものであった. 前期降雨による流出

の違いはピーク流量からも読み取ることができた.

- 2) kinematic wave モデルと貯留関数モデルを統合したモデルを用い, 降雨履歴を考慮した流出の再現については, 概ね妥当な結果が得られた.

今後流域の湿潤状態を表す方法を改善し, 普遍性のある流出計算手法の確立を目指していきたい.

謝辞

本論文をまとめるにあたり, 気象協会, 気象庁からデータ提供等でご協力いただいた. ここに記して謝意を表す.

参考文献

- 1) 国土交通省河川局:鶴川水系河川整備基本方針, 2007.
- 2) 北海道開発局室蘭開発建設部:鶴川・沙流川治水史, 1995.
- 3) 芳賀一斗, 中津川誠, 山下障司:降雨特性による土砂災害発生要因の解析 -沙流川流域の事例-, 土木学会北海道支部 論文報告集 第 66 号(B), 2009.
- 4) 嵯峨浩, 余湖典昭:森林斜面域の観測に基づく流出特性と土壤水分状態に関する研究, 北海道河川防災研究センター研究紀要(XVII), 2007.
- 5) (財)北海道河川防災研究センター:石狩川流域ランドスケープ情報, 1998.
- 6) 社団法人 土木学会:水理公式集[平成 11 年度版], pp40, 2000.
- 7) 白谷友秀, 工藤啓介, 中津川誠:石狩川を対象にした水循環の定量化, 北海道開発土木研究所月報, No628, pp.18-34, 2003.
- 8) (財)北海道河川防災研究センター・研究所:実践流出解析ゼミ 講義テキスト編, pp12-2, 2006.
- 9) 北海道開発局:北海道開発局洪水予測システム, pp143-144, 2007.
- 10) 山口甲, 新庄興, 三田村一弘, 上野順也:豊平川の生産土砂について:土木学会北海道支部 論文報告集 第 55 号(B), pp.268-271, 1998.