

# 釧路川を対象とした洪水流出再現精度向上の研究

Research on Flood Runoff Calculation Models with the Aim of Improving Reproducibility Accuracy for the Kushiro River

室蘭工業大学 ○学生員 大塚 康平 (Kohei Otsuka)  
 室蘭工業大学 正員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)  
 室蘭工業大学 学生員 谷口 陽子 (Yoko Taniguchi)

## 1. はじめに

近年地球温暖化の影響により大規模な水害が各地で多発している。水害を事前に予測し被害を軽減させるためには、水防活動、避難場所の開設、住民の避難等といった防災・減災対策に要する時間（リードタイム）の延長が望まれている。特に市街地に近い河川では洪水時における適切な判断が住民の安全に大きく影響するため、リードタイムが長くピーク水位について精度の良い河川水位予測が必要である。

河川水位の計算手法としては、上流部の河川水位との相関をとる方法（以後、水位相関法）や、洪水流出モデルで流量を計算し、水位-流量曲線（H-Q 曲線）から水位に換算する方法がある。前者は対象河川のピーク水位から ΔT 時間前の上流部の河川水位との相関をとり、後者は流量を予測することで水位を予測することができる。洪水流出モデルによって河川水位予測のリードタイムを延ばすには、上記の手法を組み合わせる方法（以後、組み合わせ法）が考えられる。これは上流部の流量・水位を洪水流出モデルで予測し、その結果を水位相関法に当てはめて当該地点の水位を予測するものである。

以上を背景に本研究では、対象河川水位予測の精度向上を目指し、以下の検討を行った。

- 1) 水位相関法で推算された対象地点の水位の再現性を検証した。
- 2) 河川の既往洪水事例をもとに貯留関数法における最適なモデルパラメータを設定した。
- 3) 2)より求めた最適化モデルパラメータを使用し、組み合わせ法による対象河川の再現性を検証した。

## 2. 研究方法

### 2.1 対象地点と対象事例

北海道東部の太平洋側に位置する釧路川流域のうち、市街地に近く、的確な防災・減災対策が必要である標茶を対象地点として水位の再現性を検証した。図-1 に示すように、釧路川は弟子屈（KP74.7km）の下流で鑑別川（とうべつがわ）と合流し、その下流に標茶（KP46.1km）が位置する。解析対象の洪水事例としては2000年から2015年に発生した洪水のうち、鑑別におけるピーク比流量が大きい上位10事例を選定した。

### 2.2 入力データ

#### 1) 雨量データ

鑑別の雨量データは釧路川流域における国土交通省所管のテレメータ観測所のものを使用し、ティーセン法により流域平均雨量を求めた。ティーセン係数は表-1に

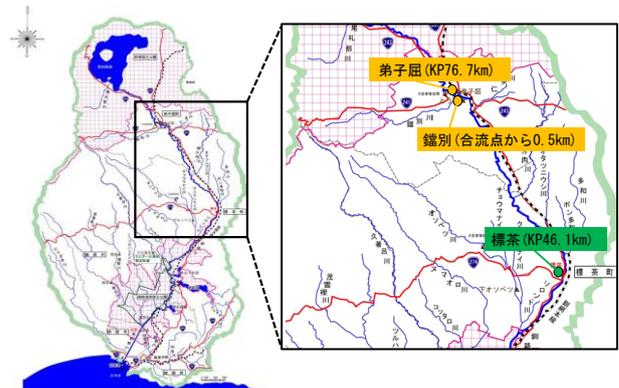


図-1 対象地域

表-1 鑑別におけるティーセン係数

雨量観測所名	屈斜路	弟子屈	奥春別	奥久著呂
ティーセン係数	0.239	0.021	0.626	0.114

表-2 鑑別の月別年平均流出率（2000年～2013年）

4月	5月	6月	7月	8月	9月
2.514	2.758	1.496	0.927	0.942	0.799

示す北海道開発局が設定しているものを用いた。

#### 2) 融雪量データ

対象事例は一般的に融雪量を考慮すべき4月から6月の事例を含んでいるが、鑑別では積雪の観測が行われていないため、融雪量の有無を流出率から検討した。表-2は2000年から2013年までの鑑別における月別年平均流出率を示している。表-2の結果は夏期（7月～9月）と比べ4月から6月の流出率は1を上回り、雨量のみならず融雪量を考慮する必要があることを示している。従って、4月から6月事例における融雪量を次式に示すデグリーアワー法より求める。

$$m = k_{dhf} T_{dh} \quad (1)$$

ここで、 $m$  は融雪量 (mm/hr)、 $T_{dh}(t)$  は時刻  $t$  での  $0^\circ\text{C}$  以上の度数であるデグリーアワー (degree)、 $k_{dhf}$  はデグリーアワーファクター (mm/deg/hr) である。本研究では、中津川<sup>1)</sup>が提案した  $0.15$  (mm/deg/hr) をデグリーアワーファクターとして算出した。なお、気温は鑑別と最も近い弟子屈の観測値を気温減率  $0.65^\circ\text{C}/100\text{m}$  を用いて海面高さに補正し、それを標高補正して鑑別川流域の1km四方のメッシュ気温値を求める。それらを流域全体で平均化したものからデグリーアワーを設定する。

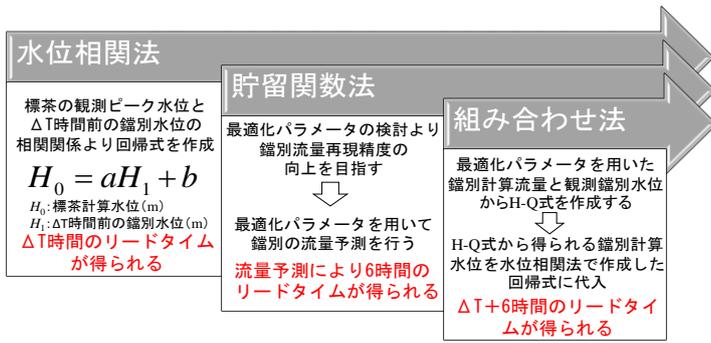


図-2 水位予測手法の計算フロー

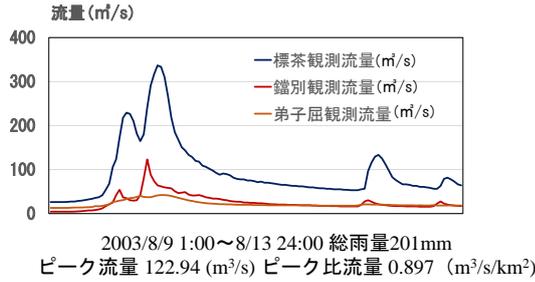


図-4 標茶, 弟子屈, 鑑別における流出量の関係

2. 3 水位予測手法 標茶地点の水位を予測するため、以下の3つの手法で水位の再現性の検証を行った。本研究の計算フローを図-2に示す。

1) 水位相関法

標茶のピーク水位の再現性を高めるため、弟子屈と鑑別の観測水位と標茶の観測ピーク水位の相関から回帰式を作成した。図-3に水位相関法のイメージ図を示す。具体的には、標茶の観測ピーク水位とその ΔT 時間前 (ΔT=1~8 時間) の各観測所水位の相関を調べ、最も相関がある回帰式を選定する。なお、ΔT は標茶地点の水位予測のリードタイムを意味することにもなる。ここで、図-4に示す二つのピークをもつ降雨に由来する標茶、弟子屈、鑑別における観測流量を比較したところ、弟子屈の一山流出に対し、鑑別は二山で流出していることがわかる。すなわち、標茶と鑑別のハイドログラフは相似形となっており、相関性のあることが類推できる。このほか、標茶と鑑別・弟子屈の重相関についても再現性を検証したが、標茶と鑑別の単相関と再現精度にほとんど差がみられなかったため、本研究では後者の単相関を採用する。

2) 貯留関数法

水位相関法より得られたリードタイム ΔT を延長させるためには、鑑別地点における流量予測が必要である。精度の良い流量予測には適切なモデルパラメータが不可欠であり、本研究では既往事例の再現によって鑑別川流域におけるモデルパラメータの最適化を試みた。

本研究で使用した洪水流出モデルは、貯留関数法のうち、国土交通省北海道開発局の現業部門でも広く採用されている星ら<sup>2)</sup>の2段タンク型貯留関数モデル(以後、2段モデル)とした。2段モデルの基礎式を図-5に示す。実際の計算はフリーでダウンロードできる水理・水文ソ

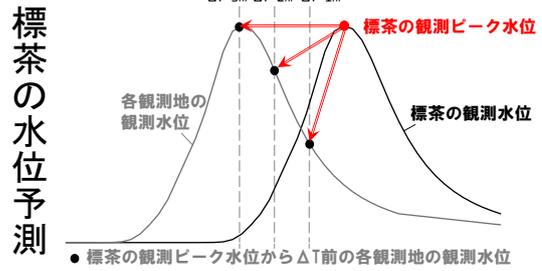
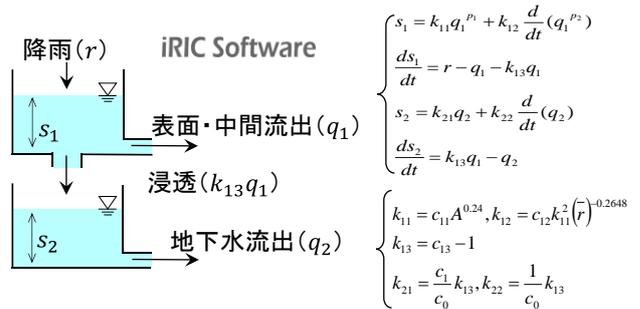


図-3 水位相関法のイメージ図



ここで、S: 貯留高(mm), S<sub>1</sub>: 1段タンク貯留量(mm/h), S<sub>2</sub>: 2段タンク貯留量(mm/h), q: 表面流出高(mm/h), q<sub>0</sub>: 基底流出高(mm/h), q<sub>B</sub>: 初期流出高(mm/h), q<sub>1</sub>: 表面流出高(mm/h), q<sub>2</sub>: 中間・地下水流出高(mm/h), r: 観測雨量(mm/h), r: 平均有効雨量強度(mm/h), A: 流域面積(km<sup>2</sup>), k<sub>11</sub>, k<sub>12</sub>, k<sub>13</sub>, k<sub>21</sub>, k<sub>22</sub>, p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>: モデルパラメータ, c<sub>11</sub>, c<sub>12</sub>, c<sub>13</sub>: モデル定数, c<sub>0</sub>, c<sub>1</sub>: 定数

図-5 iRIC SRM で利用可能な2段モデルの基礎式

フトウェア iRIC<sup>3)</sup> のソルバーである SRM (Storage Routing Model) を用い、洪水流出再現と最適なパラメータの探索(最適化)を行った。

3) 水位相関法と貯留関数法を組み合わせる手法

(組み合わせ法)

貯留関数法より鑑別地点の流量を算出し、当該地点の観測水位との関係から H-Q 式を作成した。さらに H-Q 式より鑑別地点の水位を推定し、これを先に示した水位相関法で標茶地点の水位を再現する。

2. 4 モデルパラメータの設定方法

1) 星らによる北海道の地域特性による設定

星ら<sup>2)</sup>の既報では北海道を対象とした2段モデルの代表的なモデルパラメータを求めた成果が示されている。これは、多数の既往洪水事例の最適化を行ない、地域の特性を踏まえて北海道を4つの地域に分け、各地域のモデルパラメータと北海道全域のモデルパラメータを整理、集約したものである。本報では、この中で釧路川が該当するⅢ地区のモデルパラメータ(以下、Ⅲ地区)を採用した。

2) 最適化による設定

ピーク流量をより安全側に評価するため、全10事例においてSRMの最適化の機能を用いてモデルパラメータの最適化を行い、その結果から以下の3つの考え方でモデルパラメータを設定した。①各事例の最適化パラメータを平均したもの(以下、最適平均)、②既往最大事例の最適化パラメータ(以下、既往最大)、③最適化し

表-3 水位相関法による水位計算の精度指標 (10 事例の平均値)

$\Delta T$	1	2	3	4	5	6	7	8
Jpe	0.010	0.005	0.002	0.006	0.002	0.002	0.007	0.009
NS	0.805	0.896	0.949	0.942	-0.683	-2.079	-2.956	-3.677

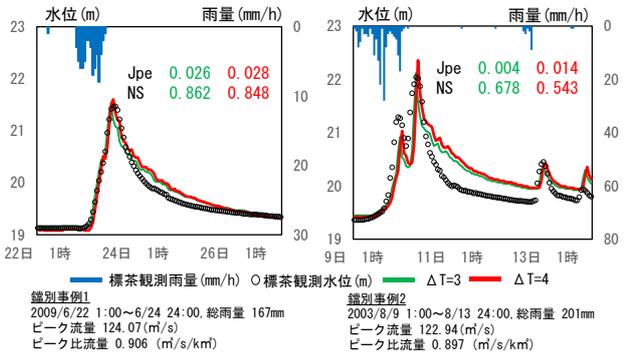


図-6 水位相関法による標茶地点の水位の再現結果  
表-4 鑑別川流域で設定されたモデルパラメータ

パラメータの種類	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$T_c$
Ⅲ地区	14.005	0.180	4.283	67.60
最適平均	22.748	0.047	3.361	67.60
既往最大	26.525	0.056	4.495	67.60
Jpe最小	19.564	0.049	2.677	67.60

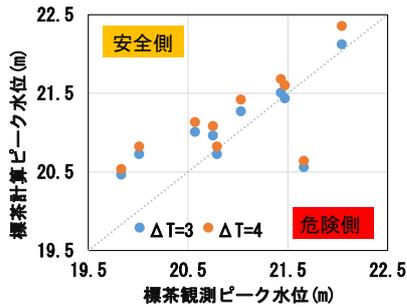


図-7 水位相関法による計算ピーク水位と観測ピーク水位の比較

た 10 事例のなかで Jpe が最小だった事例のパラメータ (以下, Jpe 最小) である。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 水位相関法の検証

水位相関法より推定した水位の再現精度の評価は、以下に示す Nash-Sutcliffe 係数 (以下, NS 係数), ピーク水位相対誤差 (以下, Jpe) の 2 つを用いて行った。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (H_{oi} - H_{ci})^2}{\sum_{i=1}^N (H_{oi} - H_{oave})^2} \quad (2), \quad Jpe = \frac{|H_{op} - H_{cp}|}{H_{op}} \quad (3)$$

ここで,  $H_{oi}$  は降雨開始  $i$  時間後の観測水位 (m),  $H_{ci}$  は降雨開始  $i$  時間後の計算水位 (m),  $H_{oave}$  は観測水位平均値 (m),  $H_{op}$  は観測ピーク水位 (m),  $H_{cp}$  は計算ピーク水位 (m),  $N$  は総降雨時間数である。標茶の観測ピーク水位とその  $\Delta T=1 \sim 8$  時間前の鑑別の観測水位との間で作成した水位相関法の精度評価を表-3 に示す。これは標茶の水位の再現性を表す指標を既往 10 事例について平均した結果である。表-3 より  $\Delta T=1 \sim 4$  時間において

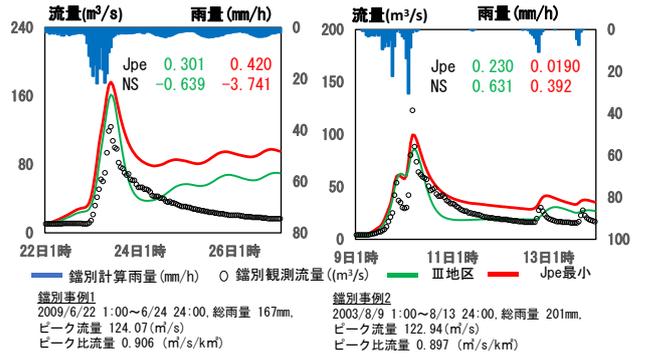


図-8 貯留関数法による鑑別地点の流量の再現結果

表-5 各モデルパラメータを用いた流量計算の精度指標

10事例平均	最適平均	既往最大	Jpe最小	Ⅲ地区
Jpe	0.245	0.351	0.235	0.248
NS	0.548	0.681	0.118	0.602

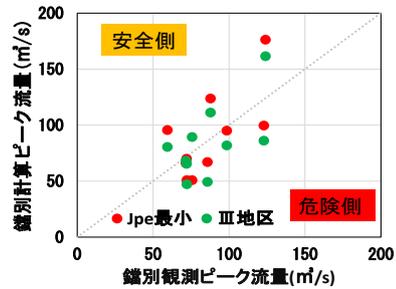


図-9 貯留関数法による計算ピーク流量と観測ピーク流量の比較

Jpe は 0.01 以下, NS 係数も 0.7 以上であり, 水位の再現性に良い結果を得た。その中でも  $\Delta T=3$  時間,  $\Delta T=4$  時間で特に NS 係数, Jpe ともに精度の良い結果であった。2009 年 6 月の既往最大事例 (事例 1) と 2003 年 8 月の二山降雨事例 (事例 2) のハイドログラフによる再現結果を図-6 に示す。両事例ともピーク流量は  $\Delta T=3$  時間よりも  $\Delta T=4$  時間でより安全側に再現しており, 図-7 より 10 事例全体においてピーク流量を安全側に評価していることが分かる。よって, リードタイムのより長い時間がとれる  $\Delta T=4$  時間の以下の回帰式を採用した。

$$H_{SBC(t)} = 2.5986H_{TBT(t-4)} - 226.3 \quad (4)$$

ここで,  $H_{SBC(t)}$  は  $t$  時における標茶水位 (m),  $H_{TBT(t-4)}$  は  $t$  時の 4 時間前の鑑別地点の水位 (m) である。

#### 3.2 貯留関数法の検証

SRM に搭載されている機能を用いるなどして表-4 に示す鑑別川流域のモデルパラメータを設定し, それらを用いた鑑別地点の流量計算結果の精度指標を表-5 に示す。これより新たに設定した①~③のパラメータのうち, ③の Jpe 最小のパラメータを用いることで最もピーク流量を精度よく再現できたことが分かる。本研究では防災・減災対策の観点からピーク流量やピーク水位において安全側に評価することに重きを置いており, この結果

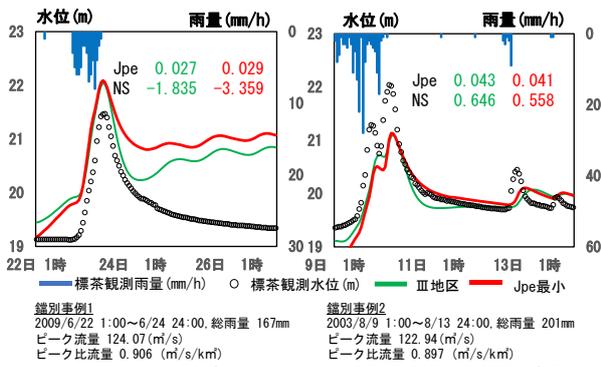


図-10 組み合わせ法による標茶水位の再現結果

から Jpe 最小のパラメータが最も適切であると考えた。

図-8 は既に提案されているⅢ地区のパラメータと Jpe 最小パラメータを用いた鑑別地点の流量計算結果を示している。ピーク流量に着目すると、どちらのパラメータを使用しても鑑別事例 1 (既往最大) において安全側に評価する結果となった。ただし、全事例で計算ピーク流量と観測ピーク流量を比較した図-9 をみると、危険側と安全側に評価した事例はおおよそ同じ事例数であり、汎用性の高くピーク流量の再現性を向上させるパラメータの設定手法についてはまだ改善の余地があると考えられる。なお、表-5 及び図-9 よりⅢ地区のパラメータは、鑑別川流域のみの事例で設定した他のパラメータと同等の再現結果を算出できており未観測流域 (PUB) への適用性が改めて確認された。

### 3.3 組み合わせ法の検証

貯留関数法で安全側に評価した Jpe 最小パラメータとⅢ地区パラメータより、鑑別地点の計算流量と観測水位から H-Q 式を作成したのち、水位相関法で提案した(4)式を用いて、標茶地点の水位再現を検証した。図-10 に標茶水位の再現結果を示す。図-10 より Jpe 最小パラメータ、Ⅲ地区パラメータともに鑑別事例 1 (既往最大) では全体的に安全側に評価することが出来たが、鑑別事例 2 に関してはピーク水位を 1m 以上過小評価した。

また、図-11 に標茶地点の計算と観測のピーク水位の比較を示すが、10 事例中 6 事例を安全側に、4 事例を危険側に評価する結果となった。これは図-9 と同じ傾向であり、安全側に過大評価するパラメータを使用することが標茶の水位計算をより安全側に評価することに繋がると考えられる。また、ピーク水位に着目すると表-6 より Jpe 最小パラメータとⅢ地区パラメータで Jpe が同程度であり、組合せ法でリードタイムの延長をしても比較的精度の良い結果を得た。したがって、貯留関数法から設定した Jpe 最小のパラメータと水位相関法による(4)式を組み合わせることでピーク水位に重点を当てた標茶地点の水位再現ができたといえる。

また、Jpe 最小パラメータから求めた計算流量を用いて算出した H-Q 式と北海道開発局釧路開発建設部が観測流量より算出している H-Q 式 (H26 年度) を比較すると次式のとおりである。

$$H = 0.11182\sqrt{Q} + 94.10 \quad (\text{Jpe最小}) \quad (5)$$

$$H = 0.11104\sqrt{Q} + 94.08 \quad (\text{北海道開発局}) \quad (6)$$

これより Jpe 最小のモデルパラメータより求めた鑑別地

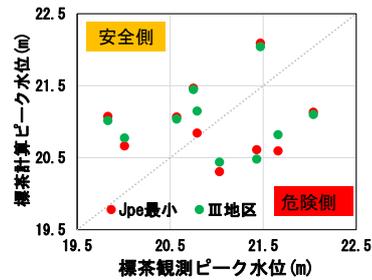


図-11 組み合わせ法による計算ピーク水位と観測ピーク水位の比較

表-6 組み合わせ法による水位計算の精度指標

10事例平均	Jpe最小	Ⅲ地区
Jpe	0.035	0.035
NS	-2.515	-1.700

点の計算流量を用いることで観測流量を用いて作成されたものと同等の H-Q 式が得られることが分かった。なお、鑑別地点の流量観測は現在行われていない。

### 3.4 モデルパラメータの考察

表-4 で示したⅢ地区のパラメータと本研究で提案する Jpe 最小のパラメータを比較すると、後者では前者より  $C_3$  の値が小さくなっている。 $C_3$  は地下水流出に関係するパラメータであり、これを小さく設定することで地下水流出への寄与を減らしてピーク水位をより安全側に再現できたものとする。

## 4. 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 鑑別地点と標茶地点の水位相関法より求めた回帰式より予測リードタイムを 4 時間に延ばすことができ、標茶地点のピーク水位を適切に予測できた。
- 2) SRM を用いて鑑別地点におけるピーク流量を安全側に評価する貯留関数法のモデルパラメータを設定することができた。
- 3) 貯留関数法による流量計算と水位相関法との組み合わせ法により予測リードタイムの延長が可能であることが示唆できた。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、国土交通省北海道開発局釧路開発建設部の関係各位には資料の提供をしていただいた。また、平成 26 年度一般財団法人河川情報センター研究助成金 (助成研究名「流量データのない河川でも利用可能な流出計算ソルバーの開発」) の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 中津川誠, 臼谷友秀: 水文情報の総合化による融雪期ダム流入量の推算, (財)北海道河川防災研究センター研究所紀要, XVII, pp.299-323, 2006.
- 2) (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, 第3回, 第10回, 第12回, 2006.
- 3) iRIC Project ; 河川シミュレーションソフト iRIC : <http://i-ric.org/ja>. (2015.10.5 閲覧)