

## 豪雨災害時における洪水氾濫が下流域の水位や流量に与える影響評価

### Development of High-resolution Inundation Model in Urbanized Areas

中山 恵介      阪口 詩乃      小林 健一郎  
Keisuke Nakayama      Shino Sakaguchi      Kenichiro Kobayashi

#### 1. はじめに

気候変動の影響によると考えられる豪雨災害が多発している。特徴的な現象として、新潟・福島豪雨や九州北部豪雨でみられるような、上流域において氾濫被害が発生するだけでなく、中下流域でも氾濫するという危機的な状況が発生する点をあげることができる。これまでの一般的な洪水氾濫解析では、一箇所での破堤もしくは自然氾濫を対象としており、複数箇所における洪水氾濫を対象としていない。著者らは、そのような氾濫も含めた流出解析を可能とする分布型流出モデル GeoCIRC の開発を行ってきた。GeoCIRC は 3 次元不飽和浸透流計算が可能であり、複数箇所での氾濫を含めた長期における流出解析が可能である。そこで本研究では、中下流域に広大な湿原が広がるため複数箇所において氾濫が発生する釧路湿原を対象として、GeoCIRC による洪水氾濫解析を実施し、高精度で汎用的な流出計算を実施できるようにすることを目的とする。

#### 2. 手法

釧路川は北海道の南東部に位置する屈斜路湖を水源とし、釧路地方を流下する一級河川である(図-1)。釧路川の幹川流路延長は 154 km、流域面積は 2510 km<sup>2</sup>に達する。釧路川の中下流部には、日本最大の湿原であり、ラムサール条約にも登録されている釧路湿原が広がっている。釧路湿原が位置する下流域の勾配は 1/3000 から 1/8000 程度と非常に緩やかで、多くの河川が蛇行しながら流下している。洪水発生時には、勾配が緩やかな湿原部で勾配が大きく変化するため氾濫が発生しやすい(図-2)。さらに、釧路湿原周辺での洪水の大きな特徴として、降雨のピークに対して洪水流量のピークが遅れて発生することが挙げられる。このため、雨が止んだ後も洪水流量が増加し、外水氾濫が発生することがある。このような洪水ピークの遅れは釧路川以外にも、2011 年モンスーン季にタイ・チャオプラヤ川で発生した洪水においても確認されている<sup>1)</sup>。これまでの再現計算解析では、釧路川流域の洪水流量を正確に再現することはできていない。この原因として、これまでは氾濫の影響を考慮していなかったことが挙げられる。また、これまでの再現計算に利用されてきたような集中型流出モデルでは、釧路川の大きな特徴である釧路湿原に見られるような空間的な地形の変化を考慮することができないことも原因として考えられる。

これらの問題を克服する方法として、流域を正方形メッシュで区切り、各セルで表面流や浸透流などの計算を行う水文モデル(いわゆる分布型流出モデル)が数多く提案されている。中山ら<sup>2)</sup>は水循環・物質輸送モデル GeoCIRC (Geophysical fluid CIRCulation model) を提案している。GeoCIRC は、いわゆる分布型流出モデルではあるが、オブジェ

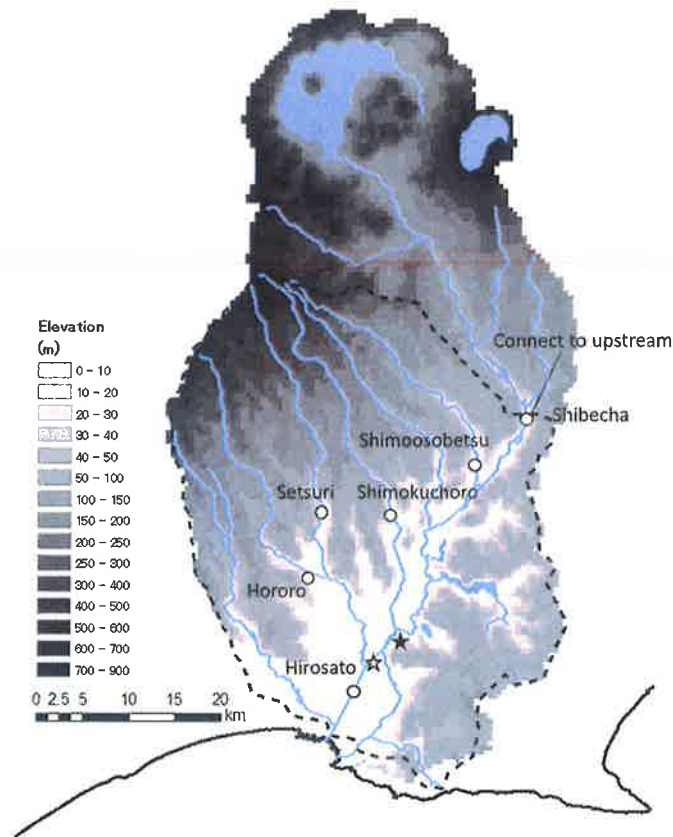


図-1 鉏路川流域

クト指向型プログラミングを利用することにより、浸透、河川流、氾濫流といった相変化だけでなく、水質や生態を対象としたモデルの組み込みが容易であるという特徴を持ち、さらに各モデルの課題に応じたスキームの変更も容易であるという利点を有する。GeoCIRC は鉛直 1 次元の物理量輸送を支配するコラムオブジェクトを導入し、コラム内には気象、表面流、不飽和浸透流、河道網といった任意のレイヤーオブジェクトを組み込むことができ、コラム毎に計算を行うことにより、様々な物理過程をまとめて再現することができる。

## 2. 1 表面流 (surface flow layer)

表面流は 1 層とし、湧き出た表面流は各計算メッシュから最も近距離に位置する本川あるいは支川に流入するものとした。この際、表層から河川へは遅れ時間を伴って水の移動を行うことにより、飽和した箇所から河川へ到達するまでの時間を考慮した。遅れ時間は、小流域ごとに適切であると考えられる値を設定した。メッシュサイズは  $x$  方向、 $y$  方向ともに 500 m、計算時間間隔は 600 s とした。

## 2. 2 不飽和浸透流 (infiltration flow)

不飽和浸透流の計算には連続の式 (式(1)) と Darcy 則の式 (式(2)および式(3)) を利用する。透水係数  $k_t$  は式(4)で求められる値を利用するものとし、本研究では  $\beta = 1.0$  の値を利用した。本研究では、現地観測の結果に基づいて不飽和浸透層の層圧は 1.0 m × 5 層とし、飽和体積含水率は 15%、残留体積含水率は 0 % とした。メッシュサイズは  $x$  方向、 $y$  方向ともに 500 m、計算時間間隔は 600 s とした。

$$\frac{\partial(\rho_w m_t)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w u_t)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w v_t)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w w_t)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$



図-2 釧路川氾濫時の空中写真

$$u_I = -k_I \frac{\partial \phi}{\partial x}, v_I = -k_I \frac{\partial \phi}{\partial y}, w_I = -k_I \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2)$$

$$\phi = \varphi + h + z \quad (3)$$

$$k_I = k_0 \left( \frac{m_I - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}} \right)^\beta \quad (4)$$

ここで、 $\rho_w$ :水の密度、 $m_I$ :飽和体積含水率、 $u_I$ :表面流の $x$ 方向の流速、 $v_I$ :表面流の $y$ 方向の流速、 $w_I$ :表面流の $z$ 方向の流速、 $\phi$ :ポテンシャル、 $\varphi$ :サクション、 $k_0$ :不飽和浸透層における飽和透水係数、 $m_{\min}$ :残留体積含水率、 $m_{\max}$ :飽和体積含水率、 $\beta$ :土壌固有の定数

### 2. 3 河道流 (river flow)

1次元の長波方程式(式(5),(6))を利用した。計算は差分法によって行い、計算格子にはスタッガード格子を利用する。長波方程式を差分法によって解く方法には、中山ら<sup>3),4),5)</sup>が提案している予測子・修正子法を用いる。以下に予測子・修正子法のスキームの概略を示す(式(7)~式(11))。メッシュ間隔は500m、計算時間間隔は10sとした。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial}{\partial x}(z_0 + h) - gn^2 \frac{u|u|}{h^{4/3}} \quad (6)$$

$$\frac{\hat{u}_i - u_i^n}{\Delta t} + [(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}]_i^n = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\tilde{u}_i - \hat{u}_i}{\Delta t} = -g \nabla (h^n + z_b) - \frac{gn_m^2 \mathbf{u} |\mathbf{u}|}{(h^n)^{4/3}} \quad (8)$$

$$\frac{u_i^{n+1} - \tilde{u}_i}{\Delta t} = -\nabla \phi \quad (9)$$

$$\phi_i = h_i^{n+1} - h_i^n \quad (10)$$

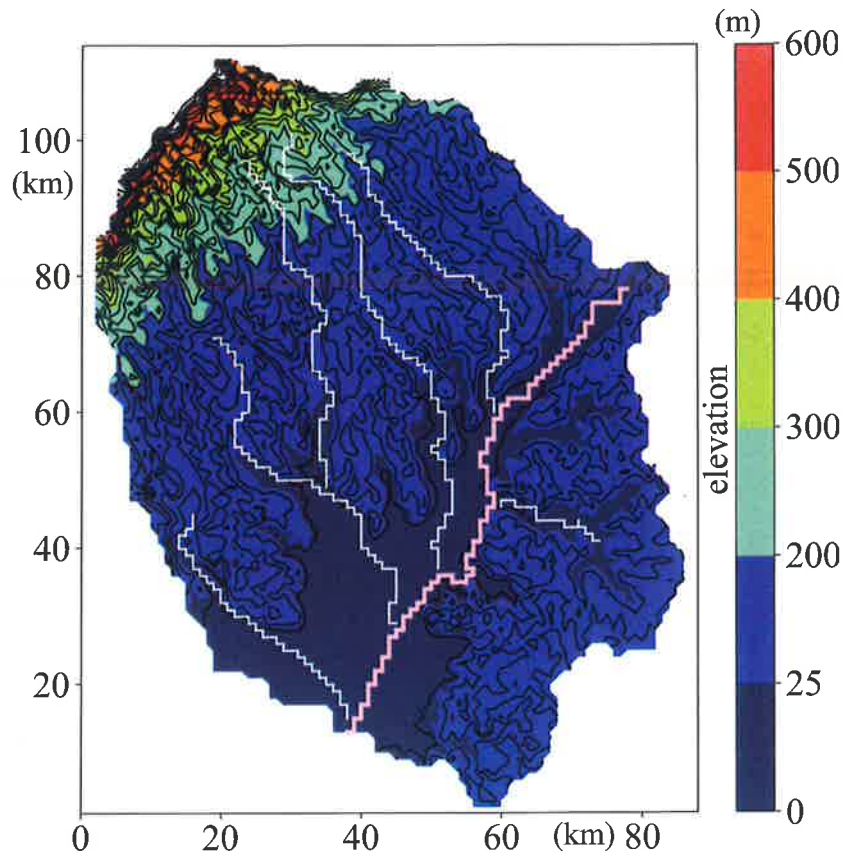


図-3 計算対象領域

$$\frac{h_i^{n+1} - h_i^n}{\Delta t} = -\nabla(h^n + \phi)(\bar{\mathbf{u}}_i + \Delta t \nabla \phi) \quad (11)$$

ここで、 $h$ ：水深、 $t$ ：時間、 $u$ ：流速、 $g$ ：重力加速度、 $n_m$ ：マンニングの粗度係数、 $\mathbf{u}_i$ ：格子点、 $i$ における流速ベクトル、 $n$ ：タイムステップ、 $\Delta t$ ：計算時間間隔、 $z_0$ ：基準面から底面境界までの距離である。

#### 2. 4 鉛直方向の水の交換について

タイムステップ毎に、まず各層毎の水平方向の水分量交換を行う。これは隣接するメッシュの水深と地形勾配を基に計算される。次に、表層から不飽和浸透層へ重力による浸透計算を実施する。この際、水分量の移動先が飽和しているかどうかの判断は行わない。次に、不飽和浸透層の最下層から表層へ方向に、飽和して余った水分量を受け渡す。この際、保存関係を満たすように計算を実施する。

### 3. 結果

計算対象領域（図-3）には、6ヶ所の流量観測所が存在し、各観測所における1時間毎の観測流量を国土交通省の水文水質データベースから入手した（図-1の丸印）。本研究では、2013年4月の融雪及び7日から8日の大雨による洪水を対象とする。図-4は対象期間における降雨と広里における流量の時系列を示している。2013年4月7日から8日にかけて北上してきた低気圧と、同時期に発生した融雪による洪水である。流域平均雨量は115.4mmであったが、これに加えて温度上昇による融雪による影響で流量がさらに増加した。

#### 3. 1 氾濫を考慮しない解析

釧路川の洪水における氾濫の影響を検討するためのモデルとして、河道を無限に深くすることによって、外水氾濫が

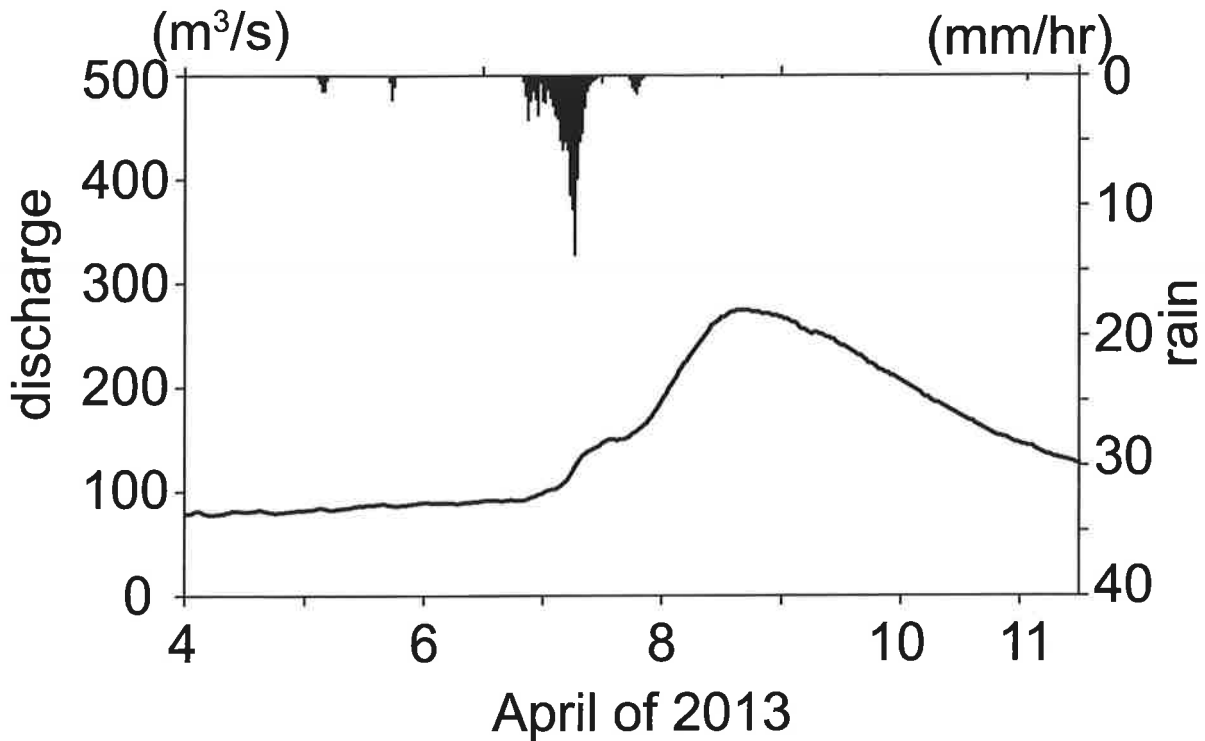


図-4 2013年融雪洪水における広里での流量の時系列

起こらない状況を想定したモデルを作成した。河道におけるマンニングの粗度係数は、全領域で一様に0.03とした。数値計算から求められる流量が、実測値を大きく上回っていることが分かる(図-5)。ピーク流量を比較すると、約500 m³/sだけ計算値の方が大きい結果となった。さらに、ピーク流量到達時間を比較すると、計算値が実測値と比較して約3日早い。以上の結果から、本川において氾濫を考慮したモデルを利用して数値計算を行う必要があることが確認できた。

### 3. 2 氾濫を考慮した解析

釧路川流域は不飽和浸透層の水分量が多いため、氾濫が発生しやすく、氾濫によって河道外に出た水の一部は浸透することなく河道に戻ると予想される。そこで、河道内水深が閾値を超えた場合、閾値を超えた分の水を氾濫水としてメッシュ上に貯留し、貯留された氾濫水の一部を、貯留関数(式(12)、式(13))を利用して徐々に河道に戻すこととする。貯留関数の式(式(12)、式(13))において、 $Q$ が $S$ の線形関数であるとし、新たなパラメータ  $T_{return}$ を導入してパラメータ  $K$ を再定義すると貯留量 $S$ に関して微分方程式(式(14))を得る。貯留量 $S$ の解は式(15)となり、貯留された氾濫水が指数関数的に減少する、つまり時間をかけて河道に戻る効果を表している。

$$-Q = \frac{dS}{dt} \quad (12)$$

$$Q = KS^P \quad (13)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{T_{return}} \quad (14)$$

$$S = S_0 e^{-\frac{t}{T_{return}}} \quad (15)$$

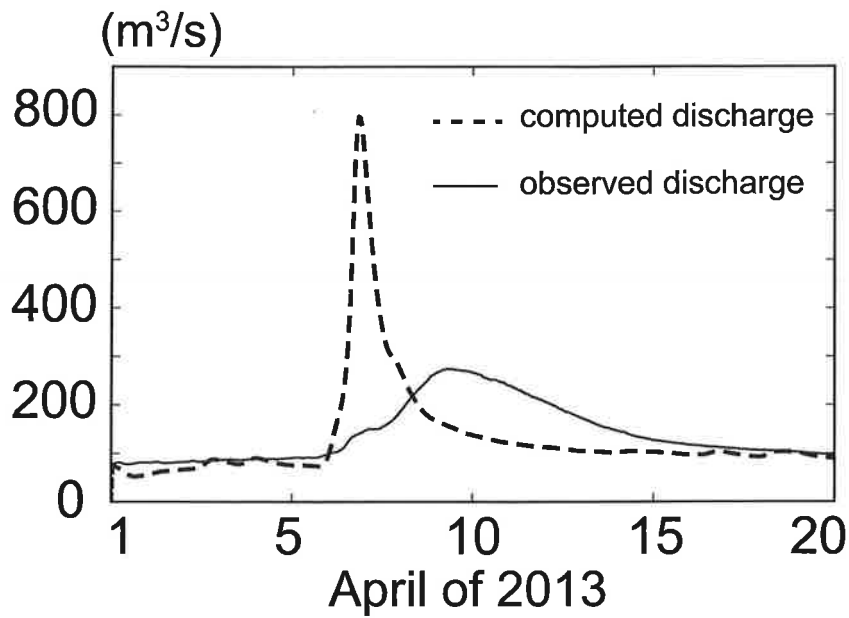


図-5 氾濫を考慮しない場合の再現計算結果（広里）

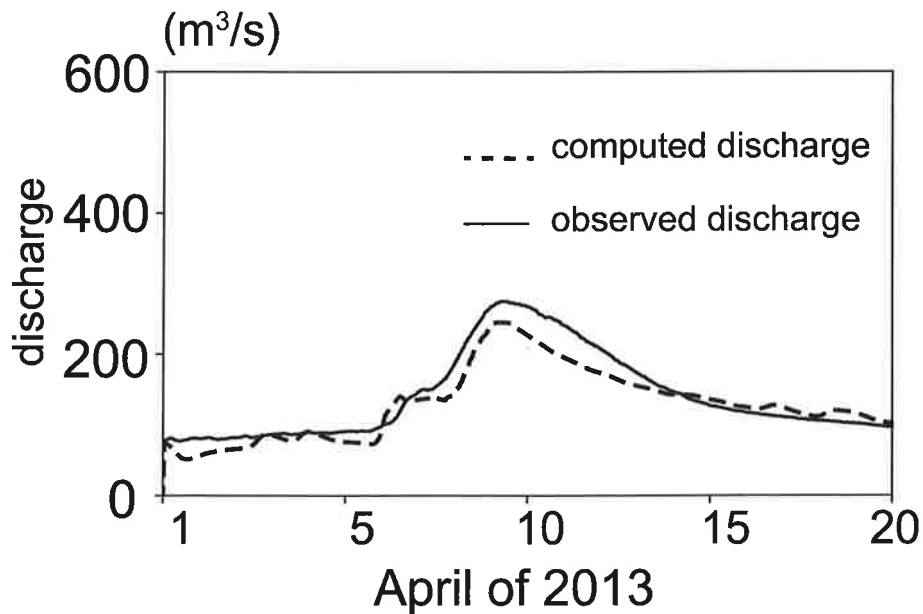


図-6 氾濫を考慮した場合の再現計算結果（広里）

ここで、 $S$ : メッシュ上に貯留される氾濫水の体積、 $Q$ : 河道に戻る氾濫水の体積、 $K, P$ : 貯留関数のパラメータ、 $T_{return}$ : リターンピリオド（パラメータ）、 $S_0$ : 積分定数である。

実際の氾濫では、氾濫が発生してから河道に戻り始めるまでの間には一定の時間差があると予想される。そこで、氾濫発生から一定時間が経過するまでは、氾濫水はメッシュ上に貯留し続け、一定時間経過後から式(13)により氾濫水を河道に戻すこととし、この時間差をタイムラグと呼ぶこととした。リターンピリオドを 5 days とし、タイムラグを 1.5 days として計算した結果、実測値を良く再現できていた（図-6）。しかし、全体的に計算値がやや過少となっている。これは本モデルに融雪の影響を加えていないことが原因であると考えられる。

#### 4. おわりに

融雪洪水を対象とし再現計算を行った結果、Nash 係数で 0.9 程度の再現性を得ることができており、本研究で提案する手法の適用性の高さが示された。リターンピリオドを大きくすることで、ピーク流量を低下させる効果があることが分かった。一方で、ピーク到達時間を遅らせる効果は小さいため、タイムラグで調整する必要があることも示された。

#### 参 考 文 献

- 1) Sayama, T., Tatebe, Y., Tanaka, S. : An emergency response-type rainfall-runoff-inundation simulation for 2011 Thailand floods, *Flood Risk Management*, 10, pp.65-78, 2017
- 2) 中山恵介, 新谷哲也: オブジェクト指向型水循環・物質輸送モデル GeoCIRC の開発と浸透過程の検証, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.71, No.4, pp. I\_283- I\_288, 2015
- 3) 中山恵介, 佐藤圭洋, 堀川康志, CIP 法を用いた浅水流方程式の数値計算手法の開発, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.1159-1164, 1998
- 4) 中山恵介, 堀川康志, 三上卓哉: 射流場におかれた円柱周辺の流れの解析, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.365-370, 1999
- 5) 中山恵介, 堀川康志, 江島敬三: 樹林群を考慮した浅水流モデル, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.801-806, 2000

#### 著 者

中山 恵介	所員, 博士 (工学), 水工学
阪口 詩乃	京都市役所, 修士 (工学), 水工学
小林健一郎	所員, 博士 (工学), 水工学