

# 洪水氾濫解析のための 縮約モデルの開発

京都大学大学院工学研究科 准教授 市川 温

## 概要：

氾濫水の水量の時間的空間的分布をさまざまなモードを持つ基底の重ね合わせとして考えることで、より少ない情報で氾濫水の挙動を表現することのできる洪水氾濫モデルを導出することを最終的な目的とし、平成 26 年度は、1. 局所慣性方程式に基づく洪水氾濫モデルの計算機プログラム開発、2. 氾濫水の流れ構造の低次元基底を抽出する計算機プログラムの開発、3. 洪水氾濫計算の縮約可能性の検証を実施した。その結果、非常に単純な流れ場ではあるが、10 個程度の基底の重ね合わせで元の流れ構造を十分な精度で再現できることが明らかとなり、洪水氾濫計算を縮約できる可能性が示された。

キーワード： 氾濫氾濫計算、縮約、局所慣性方程式、固有直交分解

## 1. はじめに

水災害リスクを分析するためには、対象とする地域において想定される様々な降雨外力を与えて洪水氾濫シミュレーションを繰り返し行い、浸水深や氾濫水の流速などの計算結果を統計的に評価するという方法が考えられる。しかしこの方法では洪水氾濫計算を何度も繰り返す必要があるため、計算に多くの時間を要するという問題がある。

一般に、洪水氾濫シミュレーションは、対象地域に平面二次元非定常流モデルを適用し、格子で区切られた多数の小領域（セル）の水量を計算する、という構成になっていることがほとんどである。氾濫水はさまざまな速度・方向で流動する。また、その速度・方向は時間的にも変動する。セルの大きさや個数は、対象地域における氾濫水の流れの構造を適切に表現できる程度になっていなければならない。当然ながら、セルの個数が多ければ多いほど計算時間は大きくなる。

このことを、別の角度から考えると、氾濫水の流れの構造、すなわち水量の時間的空間的分布を適切かつ効率よくとらえることができるのであれば、必ずしも極めて多数のセルを使う必要はないという可能性がある。たとえば、河道流のような一次元的な流れを例にとり考える。仮に流量が下流方向に向かって一定の割合で増えているような場合には、上流端の流量と流量の増加割合という二つの情報だけで流量の空間分布を表せることに



図 1 基底の重ね合わせ

なり、河道を細かいセルに分割して各セルごとの流量を記憶しておく必要はなくなる。

本研究では、このような考え方を一般化し、氾濫水の水量の時間的空間的分布をさまざまなモードを持つ基底の重ね合わせとして考えることで（図 1）、より少ない情報で氾濫水の挙動を表現することのできる（＝縮約された）洪水氾濫モデルを導出することを最終的な目的とする。氾濫水の流れ構造の分析には固有直交分解を利用する。平成 26 年度は、

- 局所慣性方程式に基づく洪水氾濫モデルの計算機プログラム開発
- 氾濫水の流れ構造の低次元基底を抽出する計算機プログラムの開発
- 洪水氾濫計算の縮約可能性の検証

を行った。以下、2 では固有直交分解について、3 では局所慣性方程式に基づく洪水氾濫計算モデルについて、4 では本モデルを用いた洪水氾濫計算の結果について、5 では洪水氾濫計算の縮約可能性についてそれぞれ説明し、6 ではまとめを述べる。

## 2. 固有直交分解

固有直交分解は多変量解析手法の一つであり、非常に

多くの分野で活用されている。それぞれの分野によって、主成分分析、Karhunen-Loeve 展開など、異なった名称でよばれることもある。固有直交分解は、端的に言えば、多変量データの持つ情報を、少数個の情報に要約する手法である<sup>1)</sup>。固有直交分解を用いた流体運動の解析には長い歴史があり、さまざまな応用事例がある。とくに乱流解析の分野では、非常に複雑で不規則な流れから何らかの規則的な構造を見出すためによく用いられている<sup>2)</sup>。

### 3. 洪水氾濫計算モデル

洪水氾濫計算は平面二次元不定流モデル（浅水方程式モデル）を用いて行われることが多いが、このモデルから移流項を除いた方程式もしばしば用いられる。低平地の洪水氾濫計算では移流項は他の項と比べて重要ではないため、これを無視しても計算結果は大きく変わらず、しかも計算が安定化するというメリットがあることは研究者や技術者の間ではよく知られていた。近年では、この移流項を除いたモデルは局所慣性方程式<sup>3,4)</sup>と呼ばれている。本研究では局所慣性方程式を用いて洪水氾濫計算を行い、その結果を固有直交分解で分析し、洪水氾濫計算の縮約可能性を検証する。

式(1)～(3)に、局所慣性方程式を示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - gn^2 u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - gn^2 v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (3)$$

ただし、 $h$ : 水深、 $M$ :  $x$ 方向の単位幅流量、 $N$ :  $y$ 方向の単位幅流量、 $r$ : 降水強度、 $H$ : 水位、 $u$ :  $x$ 方向の流速、 $v$ :  $y$ 方向の流速、 $g$ : 重力加速度、 $n$ : Manning の粗度係数である。

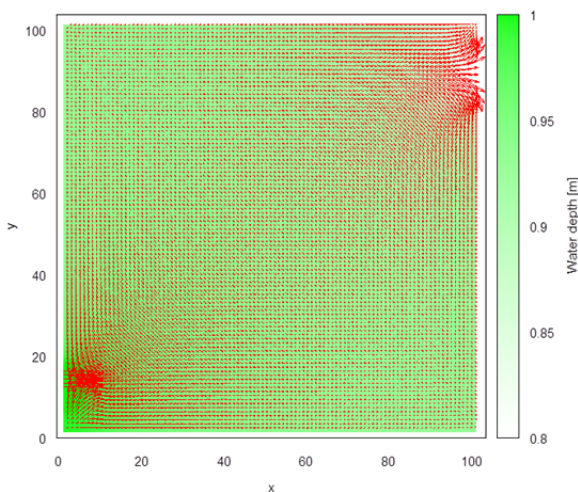


図 2 仮想的な領域における洪水氾濫計算結果

### 4. 洪水氾濫計算

局所慣性方程式を用いて、1km×1km の仮想的な領域で洪水氾濫計算を行った。左側の辺に幅 50m の開口部を設け、ここから洪水流が流入すると仮定した。洪水流は領域内を流れ、右側の辺に設けられた開口部から流出する。流出部では段落ち流れになるとした。二つの開口部以外の辺では、水の流入流出はないものとした。また降雨はないものとした。洪水氾濫計算のためのセルは 10m×10m とした。すなわち、対象領域は 10000 個のセルから構成されていることになる。流入強度は 10m<sup>3</sup>/s とした。

図 2 に流入開始から 1 日経過した後の水深と単位幅流量の計算結果を示す。このような結果に対して固有直交分解を適用し、水理量の時間的空間的分布をより少ないデータ量で効率的に表すことが可能か検証する。

### 5. 洪水氾濫計算の縮約可能性の検証

基底を重ね合わせることで、元の計算結果がどの程度近似されるか検証した。5.2 の分析に基づき、近似には第 1 基底から第 10 基底まで用いた。

図 3 は、計算開始時刻から 1 日経過した時点の水理量を基底の重ね合わせで近似した結果を比較したものである。図 2 と比較すると、極めて高い精度で近似されていることがわかる。

### 6. おわりに

氾濫水の水理量の時間的空間的分布をさまざまなモードを持つ基底の重ね合わせとして考えることで、より少ない情報で氾濫水の挙動を表現することのできる洪水氾濫モデルを導出することを最終的な目的とし、平成 26 年度は、

- 局所慣性方程式に基づく洪水氾濫モデルの計算機プログラム開発
- 氾濫水の流れ構造の低次元基底を抽出する計算機

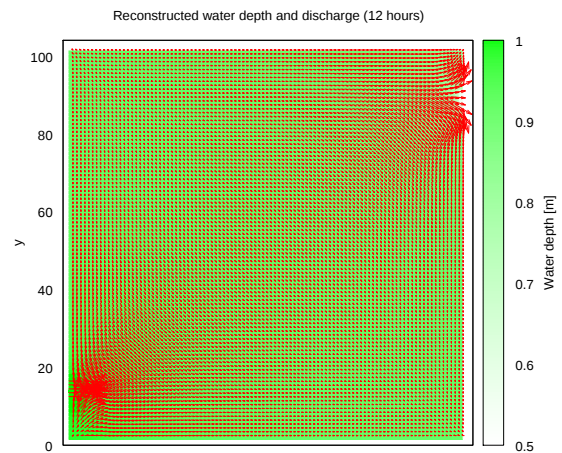


図 3 基底の重ね合わせで近似された流れ場

#### プログラムの開発

##### ● 洪水氾濫計算の縮約可能性の検証

を実施した。その結果、非常に単純な流れ場ではあるが、10 個程度の基底の重ね合わせで元の流れ構造を十分な精度で再現できることが明らかとなり、洪水氾濫計算を縮約できる可能性が示された。

#### 参考文献

- 1) 青木繁伸 : R による統計解析, オーム社, 2013.
- 2) 平邦彦:固有直交分解による流体解析: 1. 基礎, ながれ, 30, pp.

115-123, 2011.

- 3) Bates et al.: A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling, *Journal of Hydrology*, 387, pp. 33-45, 2010.
- 4) 田中ほか: 分布型流出モデルをネスティングする流出・氾濫一体型モデルの構築, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, I\_1495-I\_1500, 2014.