

## 分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルの高速化

九州工業大学大学院 フェロー会員 秋山壽一郎 九州工業大学大学院 正会員 重枝未玲  
九州工業大学大学院 学生会員 小園裕司 九州工業大学大学院 学生会員 ○草野浩之

### 1. はじめに

近年、局地的な豪雨による水害が頻発し、甚大な被害が生じている。これからの流域治水対策、河道の整備、超過洪水対策を策定する上で、予測の範囲を超えた豪雨が、流域からの雨水の流出、本川・支川で生じる洪水流の挙動に及ぼす影響を検討することは極めて重要である。そのためには、任意の降雨外力から流出・洪水プロセスの予測可能なモデルが不可欠である。著者らは、分布型流出解析モデルと高度な平面2次元解析モデルとを用いた「分布型流出・平面2次元洪水追跡モデル」を開発し、遠賀川流域を対象に、同モデルが本川と複数の支川を対象に洪水流の挙動を十分な精度で再現できることを示した<sup>1)2)</sup>が、解析の実行には実時間以上の時間が必要であり、計算効率の向上が1つの課題となっていた。以上のような背景を踏まえ、本研究では、著者らが開発した平面2次元洪水追跡モデルの計算効率向上と同モデルの予測精度の検証を行ったものである。

### 2. モデルの概要

「分布型流出・平面2次元洪水追跡モデル」は、①流域の雨水の挙動を予測するセル分布型流出解析モデルと②洪水追跡を行う平面2次元洪水流モデルで構成される。両モデルは、流出解析より得られた流量を河道の境界条件あるいは河道低水路の内部境界条件として与えることで接続される。セル分布型モデルは、斜面流と平面2次元洪水追跡で対象とする河道を除いた河道流の洪水追跡をkinematic wave法で行い、平面2次元洪水追跡モデルは、基礎方程式に空間平均された2次元浅水流方程式を用いた河道内樹木等は流体力項で取り扱うSA-FUF-2DFモデル<sup>3)</sup>をベースとしている。本研究では、計算の高速化を目的として、平面2次元洪水流モデルを図-1に示すように河川を複数の領域に分割し、境界条件の代わりに接続条件として隣接セルの情報を受け渡すことで並列化し、さらに摩擦勾配の取り扱いを半陰解法にしたPSA-FUF-2DFモデルを新たに構築した。

PSA-FUF-2DFモデルの基礎方程式を式(1)に示す。ここに、 $U$ =保存量ベクトル、 $E$ 、 $F$ = $x$ ,  $y$ 方向の流束ベクトル、 $S_1$ =河床勾配ベクトル、 $S_2$ =摩擦勾配ベクトル、 $S_3$ =発生項・消滅項ベクトルである。摩擦勾配 $S_2$ の離散化については、式(2)に示す半陰解法を用いた。

計算領域を分割した微小領域セル $i$ の検査体積 $Q_i$ とし、式(2)を用いて式(1)を離散化すると、式(3)が得られる。なお、時間積分にはEulerの陽解法を用いた。PSA-FUF-2DFモデルでは、この摩擦勾配の取り扱いを新たに導入した。陰解法の導入により、時間の刻み幅は、クーラン型の安定条件より求めることとした。ここに、 $U_i$ =セル $i$ での $U$ の平均値、 $V_i$ =セル $i$ の面積、 $t$ =時間に対する添字、 $k$ =セル $i$ を構成するセル境界線に対する添字、 $N_c$ =セルを構成するセル境界線の総数、 $\Delta t$ =時間の刻み幅、 $L_k$ = $k$ 番目のセル境界線の長さ、 $S_{2i}$ 、 $S_{3i}$ =セル $i$ での $S_2$ 、 $S_3$ の平均値、 $\theta$ =重み係数(0.0~1.0)であり、 $\theta=0.0$ の場合は完全陰解法、 $0.0<\theta<1.0$ の場合は半陰解法、 $\theta=1.0$ の場合は陽解法となる。 $(F_n \cdot n)_k^* = k$ 番目のセル境界線を流入出する数値流束で流束差分法<sup>4)</sup>により求める。

### 3. 解析の概要

本研究の解析対象流域は遠賀川流域である。遠賀川は、幹川流路延長61km、流域面積1,026km<sup>2</sup>の一級河川であり、流域の土地利用については、森林が約52%、水田や果樹園等の農地が約19%、宅地等市街地が約18%、荒地が約6%を占める。解析条件として、降雨は2010年の降雨を用い、解析データは2010年の河道横断面図に基づき作成したデータを用いた。分布型流出解析の開始時間は2010年7月12日1時とし、流出解析のモデルパラメータについては、粗度係数は標準値の平均値を、 $d_c$ 、 $d_s$ には参考文献<sup>1)</sup>と同様に設定した。平面2次元洪水追跡の開始時間は2010年7月13日1時とし、対象河川は本川の遠賀川と支川の穂波川・中元寺川・彦山川・金辺川・八木山川・犬鳴川・笹尾川・黒川の9河川を対象とした。洪水追跡のパラメータについては、粗度係

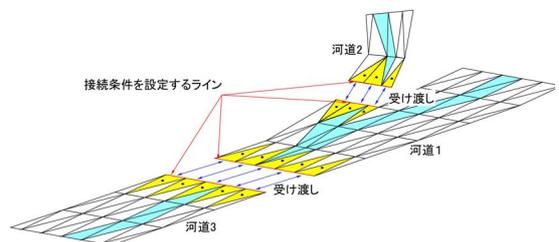


図-1 接続の概念図

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + S_1 + S_2 + S_3 = 0 \quad (1)$$

$$U = (h, uh, vh)^T; E = (uh, u^2h + 1/2gh^2, uvh)^T; F = (vh, uvh, v^2h + 1/2gh^2)^T; S_1 = (0, -ghS_{ox}, -ghS_{oy})^T; S_2 = (0, ghS_{fx}, ghS_{fy})^T; S_3 = (q_r, F_x, F_y)^T$$

$$S_2 = \theta S_{2i}^n + (1-\theta)U_i^{t+1} S_{2i} / U_i^t \quad (2)$$

$$U_i^{t+1} = \frac{\left( U_i^t - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^{N_c} (F_n^* \cdot n)_k dL_k - \frac{\Delta t}{A_i V} \int S_1 dV - \Delta t (\theta S_{2i} + S_{3i}) \right)}{1 + (1-\theta)\Delta t S_{2i} / U_i^t} \quad (3)$$

数には $0.035(m^{1/3}s)$ を、下流端には河口堰でほぼ一定に保たれている水位を与えた。

4. 解析精度の検証

図-2と図-3は、遠賀川の水位縦断形の変化および日の出橋観測所、川島観測所、秋松橋観測所、中島観測所における水位ハイドログラフの解析結果について、陰解法と陽解法との比較を行ったものである。これより、(1)いずれの観測所についても、両モデルは、若干のずれがあるものの、水位ハイドログラフの波形やピーク値など、実測値を概ね再現できること、(2)陰解法と陽解法の水位ハイドログラフの波形は、一部の観測所を除き、概ね一致し陰解法は陽解法と同等の精度で解析できること、などがわかった。日の出橋観測所や川島観測所では、陽解法と陰解法で解析結果が異なる時間帯が存在する。この時間帯では洪水が高水敷から低水路へ流入しており、水際には摩擦勾配が相対的に大きくなるため、陰解法では陽解法に比べ水深を大きく評価したと考えられる。

5. 高速化の検討

次に、並列化と半陰解法による計算速度の向上を検討した。

計算にはQuad-Core Intel Xeon 2.66GHzのDual CPUの8つのコアを用いて計算を行った。同CPUはハイパースレッド技術により、仮想的に16コアが使用できる。

図-4は、計算に使用したコア数と計算速度の向上率を示したものである。これより、(1) コアが7個までは3.8倍程度、その後、9個で4.0倍程度、12個で4.1倍程度の計算速度が向上できること、(2) 最大16個のコアを用いると逆に計算速度が低下すること、などがわかる。最大数のコアを用いた場合に計算速度が低下する理由は、システムが使用するコアを計算で使用するためと考えられる。このことを踏まえ、システムが使用するコアを残し、(コア数-1)×整数が河川の最適な分割数と考えられる。また、並列化した状態で摩擦勾配の陰解法を導入することで、計算速度は約6倍程度向上した。以上、2つの方法を導入することにより、陽解法では実時間の6倍程度必要であった解析実行時間を、実時間以内に高速化することができた。

6. おわりに

以上、本研究から、並列化と半陰解法を導入した「分布型流出・平面2次元洪水追跡モデル」は、著者らが構築した従来の「分布型流出・平面2次元洪水追跡モデル」に比べて、水際での若干の誤差は生じるが、同等の精度で実河川における洪水流の予測が可能であり、並列化と半陰解法を導入することで従来のモデルに比べ、計算速度が約6倍向上することがわかった。今後は、計算効率が最も高い河道分割数が(CPU数-1)×整数であることを確認するとともに、本モデルを用いて流出解析の最適なパラメータの設定方法について検討したいと考えている。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究B(課題番号：21360237, 研究代表者：秋山壽一郎)、若手研究B(課題番号：19760344, 研究代表者：重枝未玲)の助成を受けた。ここに感謝の意を表します。

参考文献：1) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小園裕司: 水工学論文集, 第54巻, pp.919-924, 2010. 2) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小園裕司: 河川技術論文集, 第16巻, pp.443-448, 2010. 3) 重枝未玲, 朝位孝二, 坂本 洋, 長太茂樹, 秋山壽一郎, 樋口直樹, 重岡広美, 徳永智宏: 大野川とその派川の乙津川を包括した平面2次元洪水流解析と河道内樹木が乙津川への分流量に及ぼす影響, 河川技術論文集, 第12巻, pp.85-90, 2006. 4) Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol.43, pp.357-372, 1981.

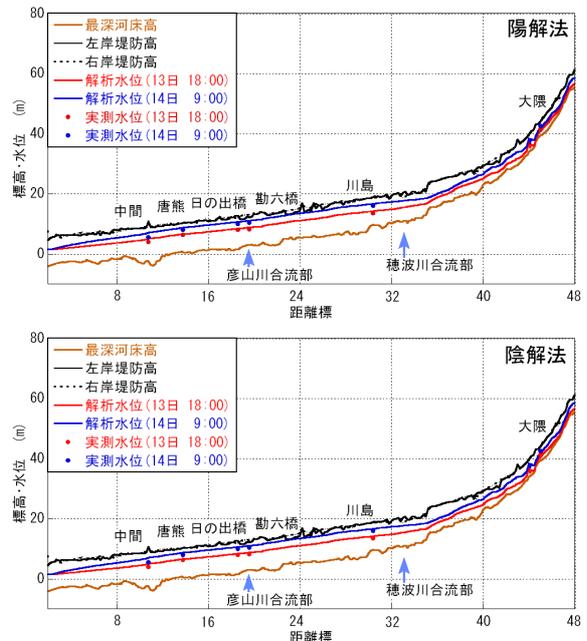


図-2 水面形の経時変化

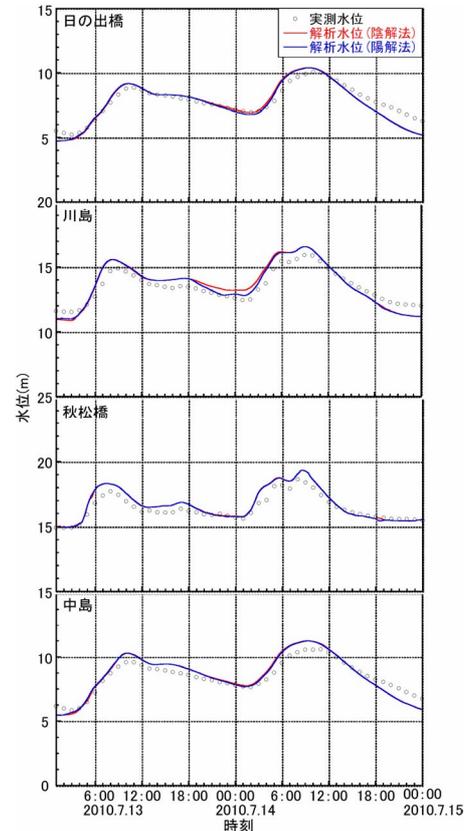


図-3 観測所における水位ハイドログラフ

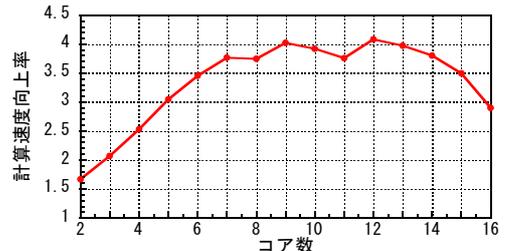


図-4 計算速度の比較