

II-145

複雑な地形における氾濫流れの平面二次元不定流数値モデル

日本工営(株) 中央研究所 開発研究部 正 員 ○金 海生¹ 山田 裕康¹

1. はじめに 氾濫シミュレーションは治水事業の効果算定、浸水区域の設定の他、避難計画、流域施設による影響の把握など様々な用途に活用されている。これに対して、氾濫流の挙動を高い精度の数値モデルで予測することが強く求められていて、基本的には平面二次元モデルを採用することが望ましい^{1,2,3)}。二次元モデルにおいて、有限要素法は任意不規則な境界をもつ現象に対しては有利であるが、表示式が極めて複雑で、流れの運動方程式に特有な非線型対流項に対しても計算を行うことは容易ではない。これに対して、実用性と高速性という点から、構造格子による特定座標系上の有限差分法あるいは有限体積法を採用することが一般的である。平面二次元モデルとしては越流(または氾濫、開水路)ポンド(タンク)モデルと不定流モデルがある。氾濫原勾配が緩やかな場合、または氾濫水の伝播状況を表示する場合には、ポンドモデルは伝播が遅く、適合性が落ちる。また、xとy方向の水理現象を独立に計算しているため、浸水深の横断変化、流速、氾濫流れのフロント等を的確に表現できない場合がある¹⁾。一般的に氾濫原の平面形状はかなり複雑で、その中にいろいろな構造物、道路、水路などが含まれているため、デカルト座標系では地形、障害物などの形状を扱うのに充分でなく、応用範囲が限られてしまう。ここに、氾濫流れに影響を与える道路、水路、構造物等の地域情報を想定して、これらの任意境界に対して柔軟性がある一般曲線座標系における平面二次元不定流運動方程式を数値解析することにより、氾濫シミュレーションを実施する。

2. 境界適合一般曲線座標系における平面二次元氾濫モデル 一般曲線座標系における流れの平面二次元運動方程式が以下に示す形(建物、樹木などによる形状抵抗を考慮することができる)で表される。

$$\text{連続式: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{J(1-\theta)} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(h \frac{J}{g_{11}} U \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(h \frac{J}{g_{22}} V \right) \right] = \text{Source/sink} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{運動量式: } & \frac{\partial(hU)}{\partial t} + \frac{1}{J(1-\theta)} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(h \frac{J}{g_{11}} U \cdot U \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(h \frac{J}{g_{22}} V \cdot U \right) \right] - \frac{h}{(1-\theta)} \left[\frac{U}{g_{11}} \left(u \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{g_{11} y_\eta}{J} \right) - v \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{g_{11} x_\eta}{J} \right) \right) + \frac{V}{g_{22}} \left(u \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{g_{11} y_\eta}{J} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. - v \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{g_{11} x_\eta}{J} \right) \right) \right] = - \frac{gh}{J(1-\theta)} \frac{g_{11} g_{22}}{J} \left(g_{22} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} - \frac{x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta}{g_{22}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) + \text{Turbulent Stress 'a'} - \frac{\tau_{\xi\xi}}{\rho} - \frac{C_{Dm}}{2} a_v h U \sqrt{u^2 + v^2} + f_h v \end{aligned} \quad (2)$$

上記にはξ方向の運動量式だけを示しているが、η方向の運動量式は似る形を有する。ここで、x、yはデカルト座標、ξ、ηは一般曲線座標、g₁₁、g₂₂、Jなどは座標変換に関するパラメータ、θは建物占有率(メッシュに占める建物面積の割合)、U、Vは水深平均流速のξ、η方向の反変成分、u、vはその共変成分、u、vはデカルト座標系における流速のx、y成分である。h(=ζ-z_b)は湛水深、ζ、z_bは氾濫水位、地盤高である。ρ、g、fは水の密度、重力加速度、Coriolis係数、C_{Dm}は樹木、障害物の抗力係数、a_vは単位体積あたりのその遮蔽面積である。質量保存式にSource/Sink項は降雨、またはPump、Culvertなどによる流出/入を表す。必要に応じて浸透、蒸発も考慮する。乱流応力項(Turbulent Stress)の完全形は極めて複雑なため、本モデルには簡略化した形で考慮する。τ_{ξξ}は地面における抵抗: τ_{ξξ} = ρC_fU√u²+v²、C_f = n²g/h³は抵抗係数、nはManning粗度係数である。中川は、家屋密集度に応じた粗度係数を計算格子毎に与えることで家屋群の影響を考慮する⁴⁾。本モデルは、土研方法¹⁾に基づいて、メッシュ毎に粗度係数を設定する。すなわち、θに応じて、建物区域の粗度係数を設定し、他の土地利用の粗度係数と合成する。建物などによる流れへの影響が形状抵抗として考慮することがあるが²⁾、実際のシミュレーションには十分な障害物の地域情報を得ることが難しいので、必ずしも精度が高いわけではないと思われる。

氾濫域に存在する各種施設は氾濫水の伝播、氾濫域に大きな影響を及ぼすことがある。したがって、盛土(堤防、鉄道、道路等)はそれが横切るメッシュの境界に配置する。水路岸線も盛土のように横切るメッシュの境界に配置する。盛土上の越流量は本間式、樋門やCulvertからの排水量はオリフィス式を用いて計算する。

数値計算法においては、流速ベクトルと水位を曲線座標系におけるスタッガード格子上に配列し、有限体積積分陰解スキームに基づいて時間ステップごとに前記支配方程式を離散化し、離散化した代数方程式を連立で解くことによる時間的および空間的に変化する湛水深、流速ベクトルの計算結果を得る。

3. 計算例 本モデルを用いて、洪水のため河川増水による、ある流域における氾濫原流れの挙動をシミュレーションした。氾濫計算域、土地利用状況、地盤高Contourと計算メッシュは図1に示している。本モデルは現場の細かい地形を取扱うことができる。河川水位、流量の変化は、降雨による流域からの流出に基づいて、一次元不定流モデルで氾濫流れの計算と同時にシミュレーションする。河川から氾濫域へ、または氾濫

Keywords: Flood inundation, unsteady flow, complicated topography, 2-D numerical simulation, boundary-fitted coordinates

¹ 〒300-1245 茨城県稲敷郡那珂町稲荷原2304

Tel.: 0298-71-2039

Fax: 0298-71-2022

域から河川への越流は越流公式で計算し、そして河川の水量バランスに考慮する。氾濫域流れの計算は、氾濫原の初期水深と流速をゼロとし、堤防から河川水が越流して流れ込んでいくものを氾濫源（ソース）とした。この時点の降雨強度は約 98mm/hr であった。降雨、氾濫水による 1mm 以下の湛水はそのまま蓄積し、湛水深が 1mm になった時点で流動が始まる。前出の図 1 には、堤防から越流が発生し始めてから 72 秒後の氾濫域における湛水深と流速ベクトルも示している。ただし、湛水深はメッシュ毎に表している。図 2 に示しているのは氾濫原の代表的な水面形である。

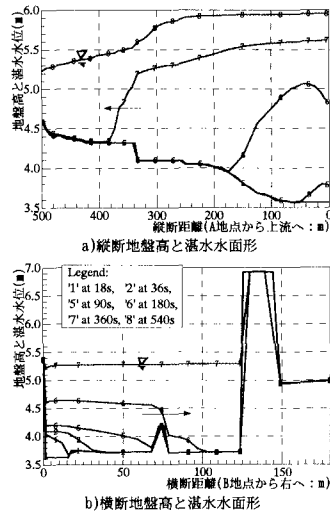


図 2 氾濫原の代表的な水面形

これによって、本モデルで氾濫原における湛水深と流速ベクトルの計算結果が合理的なものであることが分かる。道路など地形変化による氾濫流れの伝播に対する遮断、遅滞など、水路への氾濫フロントの流れ込みを再現することができる。

4. おわりに 境界適合一般曲線 図 1 計算区域、地理情報、メッシュおよび湛水深、流速ベクトルの計算結果 座標系における平面二次元氾濫解析モデルを開発した。このモデルを複雑な地形をもつ氾濫原に適用し、河川増水時における氾濫流れをシミュレーションした。道路など複雑な地形変化が氾濫流れの伝播に及ぼす影響、低地・水路などにおける局所的な流れの特徴が見事に表されることがとなった。

本研究を行うにあたり種々御協力いただいた同僚の諸君に感謝いたします。

参考文献 1) 建設省土木研究所（資料）：氾濫シミュレーション・マニュアル（案），1996. 2) 福岡捷二ら：密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究，土木学会論文集，No.600/II-44，1998. 3) 井上和也ら：都市域における氾濫解析モデルに関する研究，水工学論文集，Vol.43，1999. 4) 中川一：京都大学博士論文，1989.

