

2次元氾濫伝播の数値シミュレーション

Numerical Simulation of Two Dimensional Flood Wave Propagation

北海道大学工学部 ○学生員 名久井 孝史 (Takafumi Nakui)

北海道大学大学院 正 員 清水 康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

現在, 地球温暖化など様々な現象が原因と考えられる大規模な河川の氾濫が世界各地で起こっている。日本も例外ではなく, 本年9月に愛知県で起こった洪水災害は記憶に新しいところである。

都市域においてそのような洪水氾濫災害を防ぐために, 信頼性の高い洪水災害危険区域の設計法の開発, すなわち洪水氾濫解析手法の確立が急務とされ, 解析モデルの開発とその応用に関する研究が多くの研究所等において活発に行われている。

しかし, 氾濫災害において被害を受けるのは必ずしも人間社会だけではない。土砂の流出による土地の貧窮化, 反対に土砂流入による植生の変化など^{1) 2)}, 氾濫が様々な問題を起こす起因となっていることは十分に考えられる。そこで, 本研究では, 釧路湿原の乾燥化が湿原内の河川氾濫による土砂流出に起因している可能性があるため, この問題を解決する第一歩として2次元氾濫伝播の数値シミュレーションを行っている。

2. 解析手法の紹介

氾濫解析に用いられる2次元解析法には有限差分モデル, 有限要素モデルおよびボンドモデルの3つのモデルに分類できる。有限差分モデルにはデカルト座標系を用いた解析法や一般曲線座標系を用いた解析法, あるいは非構造格子³⁾を用いたものなどがある。ここでは, これらの解析法の中でも最も単純なデカルト座標系に基づいて氾濫解析を行うこととする。

3. 基礎式

デカルト座標系を用いた氾濫解析における計算式は, 中川ら⁴⁾により行われた解析法より次の連続式と運動方程式の2式を示す。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

<運動量式>

x 方向

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(UM)}{\partial x} + \frac{\partial(IM)}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} - \frac{gn^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} + \epsilon \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

y 方向

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(UN)}{\partial y} + \frac{\partial(IN)}{\partial x} \\ = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} - \frac{gn^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} + \epsilon \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに, h : 水深, g : 重力加速度, t : 時間, ϵ : 渦動粘性係数, M, N : それぞれの x, y 方向の流量フラックスで, $M = Uh, N = Vh$, U, V : それぞれ x, y 方向の断面平均流速であり, x, y, z 方向の流速成分を u, v, w , 地面高を η_b , 自由水面高を η とすると,

$$Uh = \int_{\eta_b}^{\eta} u dz, \quad Vh = \int_{\eta_b}^{\eta} v dz$$

である。ここで, n は Manning の粗度係数である。

氾濫計算では地盤高が極端に変化するため, 境界条件を与えることが難しい場合がある。そこで比較的安定な計算が可能で, しかも境界条件を与えやすい1次精度の風上差分^{5,9)}を移流項の差分に用いて(1),(2),(3)式を解くこととする。運動量保存則の差分化にあたっては時間に関しては前進差分, 移流項については第1次風上差分, 圧力項は中心差分, 粘性項には中央差分を行う。連続式の差分化は時間に関して前進差分, 空間に関して中央差分とし, leap frog 的に計算を進める。すなわち, 時刻(n+3)でも新しい値を決定するのに, 時刻(n+2)での M, N , 時刻(n+1)での h 値を用いて計算を進める。それにより(1)の差分式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{h_{i+1/2, j+1/2}^{n+3} - h_{i+1/2, j+1/2}^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{M_{i+1, j+1/2}^{n+2} - M_{i, j+1/2}^{n+2}}{\Delta x} \\ + \frac{N_{i+1/2, j+1}^{n+2} - N_{i+1/2, j}^{n+2}}{\Delta y} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここに, i, j は時刻 $t = n$ にける x, y 方向の格子点である。⁵⁾

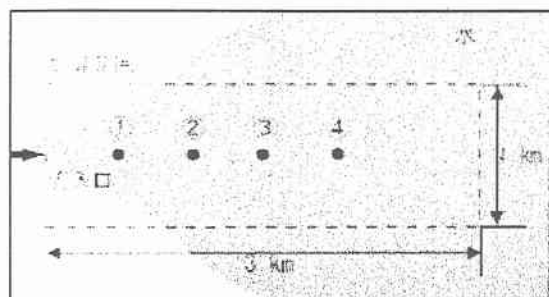


図1：氾濫場のイメージ

4. 計算条件

上記の計算法を用いて氾濫計算を行うが、今回は氾濫場におけるメッシュサイズを変化させることで、視覚的に精度の違いを検証してみることとする。

氾濫場の概略図をを図1に示す。氾濫場内の地盤は常に水平とし、流入口を100m、傾斜角を1/200となるように設定した。氾濫計算時においては流下方向と横断方向に水が自由に排出されることとする。また計算式中において河床のManningの粗度係数は蛇行、石や雑草がある際の平均値である $n=0.0425$ とした。今回はこの氾濫場において流下方向および横断方向にそれぞれ50m*50mであるメッシュと20m*20mであるメッシュの2通りの場合で計算、比較を行った。計算格子は水路全体を流下方向と横断方向にそれぞれ(61,21),(152,52)分割の直交格子となり、また計算時間刻みはどのメッシュサイズにおいても比較的安定に計算が進行する時間刻みとして1秒が得られたため、これを用いた。

5. 計算結果

図5は氾濫の様子を示したものである。両者を比較すると多少の違いはあるものの、双方の氾濫進行の様子はほぼ同じであるといえる。詳細に見るため図2,3は図1に示した①～④の4地点（それぞれ流入口から500m,1000m,1500m,2000mを表す）に観測点を設け、各地点の流量変化の様子を示したものである。1000m地点までは双方とも同じような流速で水が流れているが、1000mメッシュよりも下流では20mメッシュにおける計算において伝播速度が若干遅くなることが確認された。

図4は計算格子が50mメッシュにおける氾濫水の先端の進み具合を横軸に時刻（100秒単位）、縦軸に流入口からの距離を示したものである。図4から氾濫水がほぼ一定の流速で進んでいる事が確認される。

また、図5から計算格子の大きさによる氾濫計算精度の相違が左端の両隅に見られた。50mメッシュでは左端のほぼ隅まで水が広がっているのに対し、20mメッシュではそこまで達していない事が確認される。

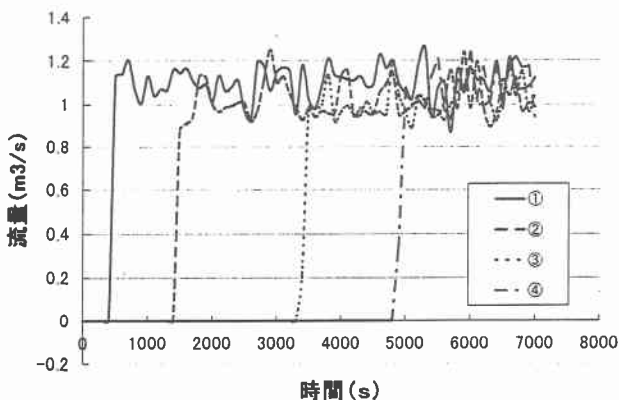


図2：20mメッシュにおける4地点の流量変化

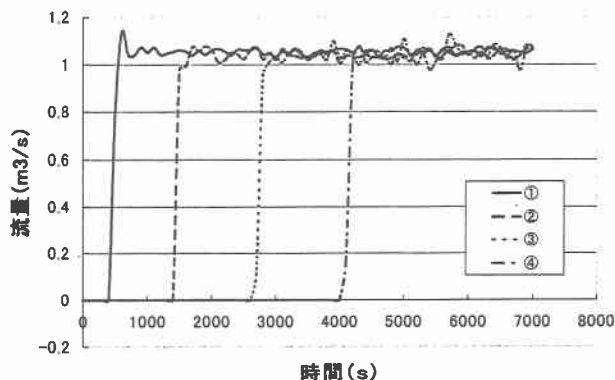


図3：50mメッシュにおける4地点の流量変化

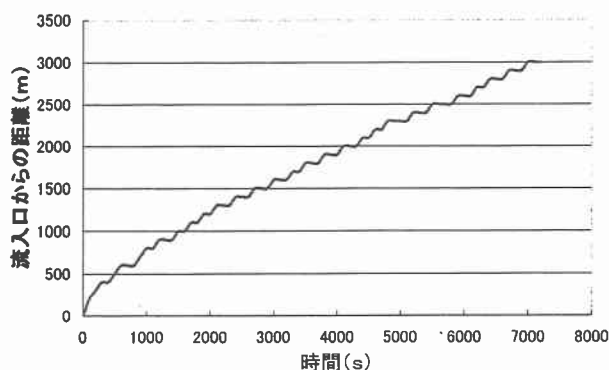
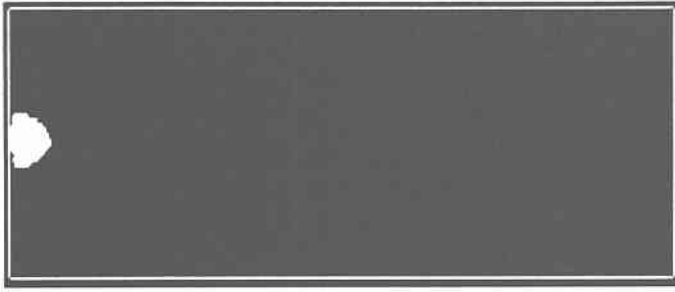


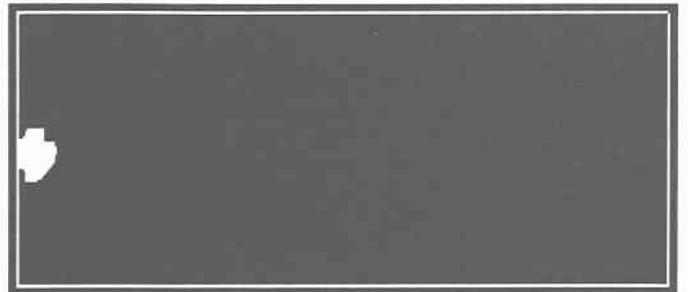
図4：氾濫先端の流入口からの時間に対する距離
(50mメッシュ)

6. 考察

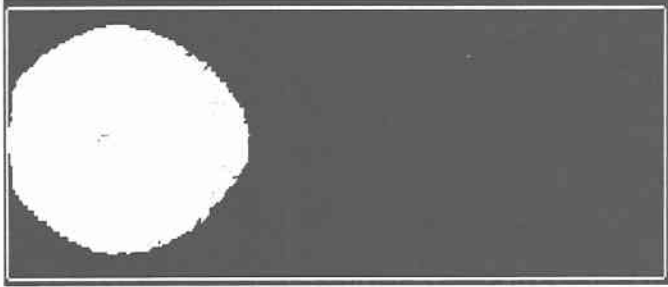
本研究では、釧路湿原の乾燥化が氾濫時の土砂流出に起因しているかを氾濫計算から検討する事を目的としており、今回はその最も初期の段階であるデカルト座標系による計算格子サイズを変えた氾濫計算の比較検討を行った。本論文では計算格子サイズを20mと50mの2種類に限定したが、それ以外にも40m,30mのサイズの格子を用いて計算を行った結果、氾濫の様子は格子サイズが20mである場合の様子に近くなる事が確認された。今後はさらに格子サイズを2mとし、実際の釧路湿原内の地形情報ならびに河川位置、河川流量を用いることにより、実河川に適合可能なモデルの確立を図る予定である。



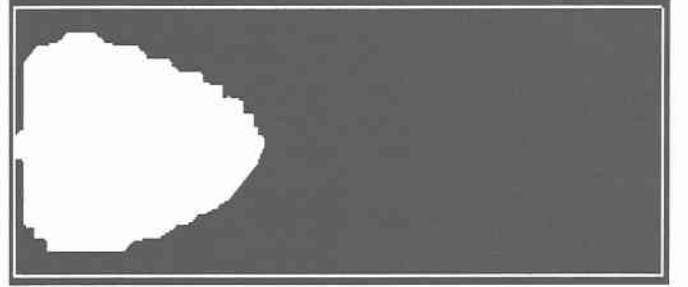
Time=100sec



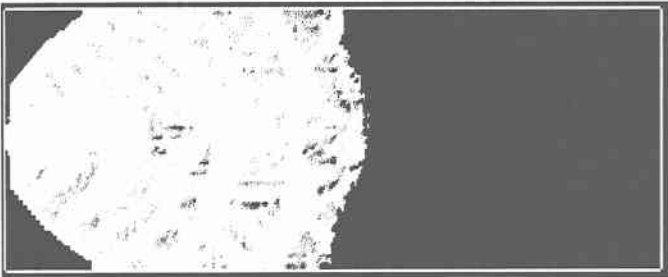
Time=100sec



Time=2000sec



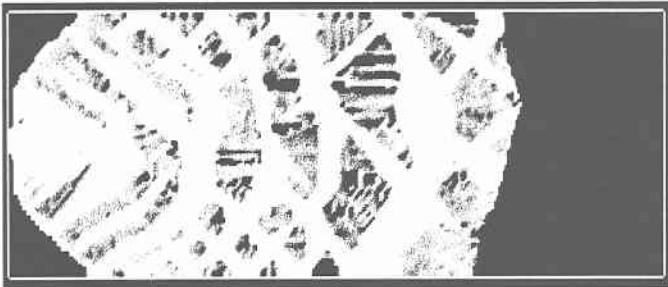
Time=2000sec



Time=4000sec



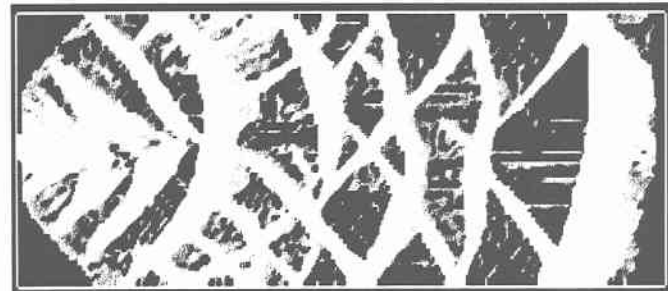
Time=4000sec



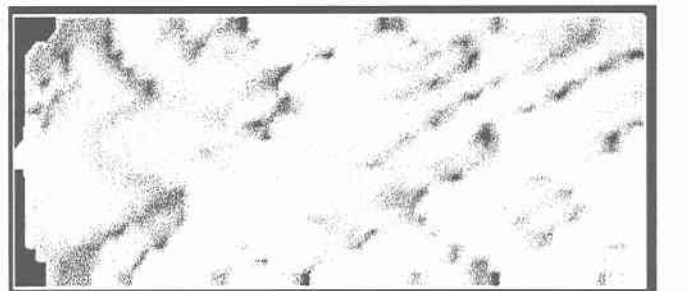
Time=6000sec



Time=6000sec



Time=8000sec



Time=8000sec

20*20 mesh

50*50 mesh

図5-20mメッシュ(左)と50mメッシュ(右)における氾濫の様子

7. おわりに

本研究で現在用いている、氾濫場を縦横の垂直格子でのみ区切り計算するデカルト座標系の手法は先にも述べたように氾濫解析においては最も単純な手法と言える。今回のような完全に平坦な地面を想定して氾濫解析を行う場合であれば際だった支障は見られないものの、例えば都市部のようにように構造物が多く存在する地域を計算する際には垂直格子のみの計算法では大きな支障となる事は言うまでもない。著者がこれから目標としている釧路湿原の氾濫計算においても、都市部のように顕著な構造物はみられないものの、無視する事の出来ない地形状況や極端な地盤高の変化があることは想像に難くない。

対策として、一般座標系や非構造格子系を用いた解法が挙げられるが将来的にはそれぞれの解析手法を見比べ、湿原のみならず様々な地形に対応できるシミュレーションが出来るよう工夫して行きたい。

7. 参考文献

- 1) 許士裕恭, 齊藤仁史: “釧路川湿原ミティゲーションについて”, 第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.181-186
- 2) 釧路湿原の河川環境保全に関する検討委員会事務局: “釧路湿原の河川環境保全に関する検討委員会 資料“2000
- 3) 井上和也, 川池健司, 戸田圭一: “非構造格子による氾濫解析モデル”, 京都大学防災研究所年報 第42号, pp.339-353, 1999
- 4) 中川一, “氾濫流の解析”, 水工学における計算機利用の講習会講義集, pp.43-50, 1999
- 5) 越塚誠一, “数値流体力学” 培風館