

微細な地形標高を考慮した都市型中小河川の氾濫数値計算

NUMERICAL SIMULATION FOR INUNDATION FLOW AROUND A SMALL-TO MEDIUM SIZED RIVER WITH FINE INFORMATION OF ALTITUDE

細山田得三¹・早川典生²・加納裕美³・酒井彩美³

¹正会員 工博 長岡技術科学大学 環境・建設系 助教授 (〒940-2188 長岡市上富岡1603-1)

²正会員 Ph. D長岡技術科学大学 環境・建設系 教授

³学生会員 長岡技術科学大学大学院

In this study, a numerical simulation of inundation flow in an urban area is carried out using fine information of altitude. The numerical model is two-dimensional shallow water model. The grid size is 1m, which is fine enough to understand overland flow in an urban area. The altitude data is obtained by altitude of lid of manhole distributed randomly in the study area. The resolution of the altitude data is 1cm, which is fine enough to represent the contrast of altitude in a flat urban area. The numerical results proved that the inundation flow is sensitively affected by the geophysical features with undulation in the area.

Key Words : *inundation flow model, urban area, information of altitude, small to medium sized river*

1. はじめに

都市の中心部近くを流れる中小河川は都市における早い降雨流出を処理する目的で自治体を主体として整備されることになっている。しかしながら、そのような中小都市河川の周辺では既に土地利用や都市化が十分進んでおり、河川改修工事が困難であるため整備計画の達成率が低いものが多い。このため夏季の集中豪雨時に河川の近隣周辺が氾濫の危険にさらされている。このような状況では、河川改修によるハード面での対策の高度化だけでは不十分であり、日ごろから洪水災害に対する住民の防災意識の涵養などソフト面の対策も重要である。本学、長岡技術科学大学が位置する長岡市の中心部を流れる柿川周辺も写真-1(上段)に示すようにそのような都市河川の特徴を有している。長岡市は過去30年間で規模の大きな洪水災害は5回程度発生しており(写真1下段:長岡市土木部下水道管理課)、そのうち規模の小さいものは時間雨量16mm, 1日雨量200mmとなっており、時間雨量にして毎年、1日雨量にして10年に一度の規模である。将来においても数年に一度は洪水の危険性があり、しかも1998年に新潟市を見舞った大雨(1時間雨量96mm)が発生する危険性

を否定できない。

このような洪水による災害に対して行政としては洪水氾濫シミュレーション結果をハザードマップとして公開するなどの対策を行っている。このハザードマップは国土交通省(旧建設省)の管理する大規模な一級河川を対象としている場合が多く、自治体が管理する都市域の中小河川を対象としたものは少ない。都市域の中小河川は川幅が10m未満のものもあり、ハザードマップの数百mの解像度では評価することが困難である。

洪水氾濫の数値計算の空間的な解像度を上げる上で2つの問題点が挙げられる。それらは、計算容量の増大や時間刻みを小さくする必要があるためにCPU時間が増大するなどの計算機能力上の問題と空間解像度を上げることに見合うほどに標高データや土地利用情報の高解像度化を行なう必要があるという問題である。前者の問題は近年の計算機能力の目覚ましい向上とその発展の持続により解消されていくものと思われる。それに比して後者の問題は現在提供されているデジタル標高データモデル:DEM(Digital Elevation Model)の解像度(空間50m、標高精度1m)では都市域での微小な地形勾配を表現することは困難である。事実、そのDEMによって地形標高の等高線を描いてみると、都市域は殆ど平地としてしか表現されない。一方、建設工事等に

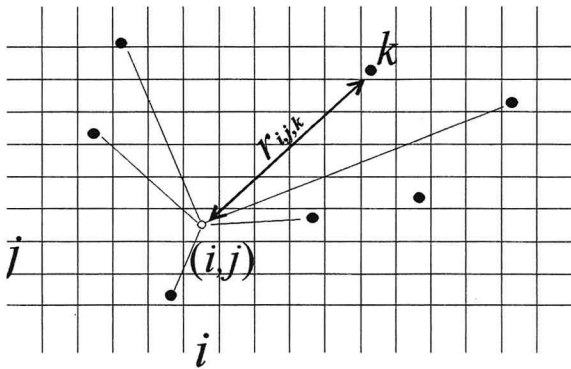


図-1 格子点(i, j)とマンホール標高の計測点(k)

図中●は任意に点在するマンホールの配置を示す。

においては地形標高を必ず計測していると推測され、地形標高データが必ず何らかの形で保存管理されていると考えられる。本研究ではそれらの一例である長岡市土木部下水道管理課において管理されている長岡市全域に設置されたマンホール蓋数万点の標高値を利用することにした。このデータの標高の分解能が1cmであり、十分な解像度である。対象河川は先に述べた長岡市の中心を流れる柿川の一部とし、対象領域を定め、マンホール蓋の標高を利用して詳細なDEMデータを作成した。そして長岡市中心部を流れる柿川の一部を対象としてマンホール標高データから柿川を含む長岡市中心部のDEMを作成し、格子間隔1mで洪水氾濫計算を行った。柿川の諸元は、表-1にまとめて示す。

2. DEMの作成

DEMの作成は長岡市内のマンホール標高データのうち、柿川の一部を含んだ長岡市中心部殿町の東西1.0km南北

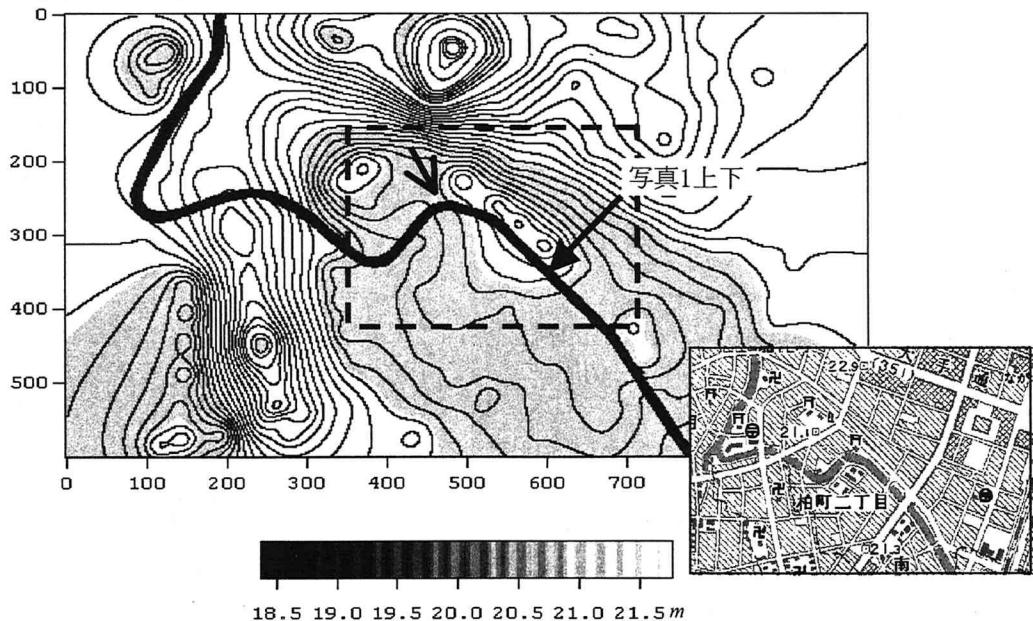


図-2. 長岡市中心部のDEMおよび長岡市中心部の地図画像
縦軸および横軸の数字は格子点数を示す。

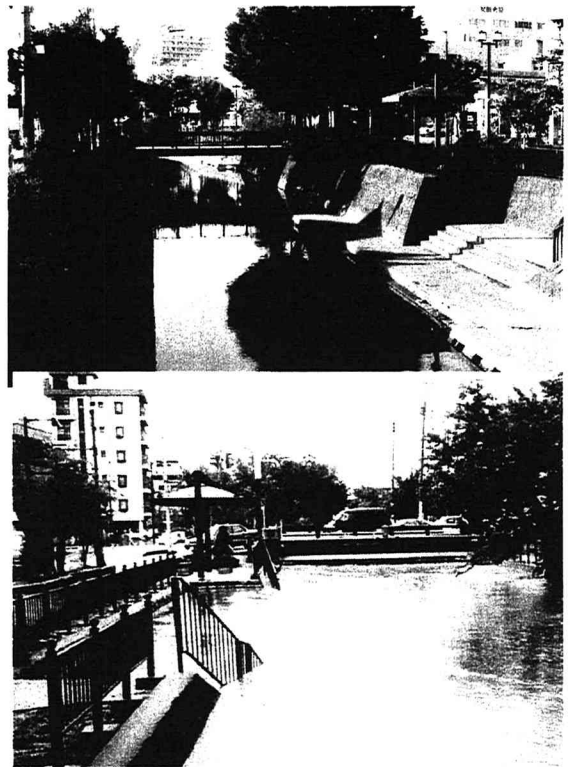


写真-1 長岡市中心部を流れる柿川
上：平水時、下：洪水時 撮影地点は図-2を参照

表-1 長岡市柿川の諸元

流域面積	12.9km ²
流路延長	7km
平均河床勾配	1/1000
暫定計画	1/2年確率
暫定降雨	28.9mm/時 71.9mm/日

0.6kmの範囲を対象とした。この範囲には400点を越すマンホール蓋があり、標高データが地図上に示されている。このように空間上に任意に分布した標高の情報が得られている場合のDEMの作成プログラムは、最近のGISソフトなどには標準的に装備されていることが多いが、そのアルゴリズムについては公開されていない¹⁾。また、今回、DEMを作成するために前もって準備したデータは平面上に任意にばらついているため、一般的に用いられている等高線のベクターデータから格子点上の標高データを作成するプログラムのアルゴリズム¹⁾は用いることができないと考えられる。このため、今回は以下のような手順によってDEMを作成した。図-1にはその手法の概略を説明するための模式図を示している。図中の縦横の線は格子線であり、点(i, j)における標高値を未知、黒丸で示した位置でのマンホール(通し番号k)の標高が既知とした場合を考えている。まず、地図をスキャナで読み込み、該当範囲内にあるマンホール(k)の水平座標と標高値(d_k)を読み取り、ファイルに保存する。この後、標高値が未知である平面2次元上の格子点(i, j)とマンホール(k)との水平距離 r_{ijk} を求め、距離の逆数に関係した重み関数を定義する。今回実際にDEMを作成するために用いた重み関数を式(1)に示す。

$$w_{i,j,k} = 1.0 - \exp(-50/r_{i,j,k}) \quad (1)$$

2点の距離である r_{ijk} が十分小さいところでは重み関数が最大値1に近い値をとり、 r_{ijk} が例えば50mの場合は、重み関数が0.632となる。距離の逆数に関係した重み関数の形に関する一般的な指標を与えることはできず、実際にDEMを作成してその結果を見て採用するか否かを決定するしか方法はない。式(1)の中に示されているパラメータの値である50mも結果を見て採用を決めたものである。この重み関数を用いて式(2)に示した重み付き平均をとり、格子点(i, j)の標高値 $d_{i,j}$ が計算される。

$$d_{i,j} = \frac{\sum_k w_{i,j,k} d_k}{\sum_k w_{i,j,k}} \quad (2)$$

図-2にはこのようにして作成されたDEMおよびその右下の領域にほぼ対応した数値地図2500 ((財) 地図センター) を示す。長岡市の中心部を流れる柿川は中央の黒く太い実線で表示されている。上流は図面の右下で、柿川は図の中心付近で蛇行しながら左上方向に流れており、この図より数キロメートル下流地点で信濃川に注いでいる。格子上に計算された標高値の空間分布をみると、矢印で示した、図の中心付近の蛇行部よりも若干上流側でかなり低い標高となっており、また矢印よりも北に向かって急激に標高値が高くなっている。これらの結果は実際に踏査して目視した標高と矛盾はないことを確認した。また、蛇行部よりもやや上流側の地点において既往洪水が頻発している事が報告

されている。

DEMの作成と併せて、計算領域内の道路、住区、河道の抽出を行い、計算格子の指標に用いた。

3. 氾濫流の数値計算法

3.1 基礎方程式と離散化処理

数値計算には氾濫流、河道内の流れとともに平面2次元で冠水域と没水域の区別を表現できる浅水方程式を用いた。数値計算に用いた基礎方程式は、式(3)、式(4)に示されている^{2), 3), 4)}。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{M_i M_j}{h} \right) \quad (4)$$

$= -gh \frac{\partial (z^* + h)}{\partial x_i} + A \left(\frac{\partial^2 M_i}{\partial x_m \partial x_m} \right) - \frac{gn^2}{h^{3/2}} M_i \sqrt{M_m M_m}$
ここで式(3)は連続式、式(4)は平面2次元の*i*方向の非線形長波方程式である。式(2)中のサフィックス*i*=1, *i*=2 はそれぞれ、東西方向と南北方向に対応する。式中の記号、 x_i 、 M_i 、 g 、 t 、 z^* 、 h 、 A 、 n はそれぞれ*i*方向水平座標、 x_i 方向の線流量、重力加速度、時間、DEMによる地盤高、水深、水平粘性係数、マンニングの粗度係数である。計算に用いた格子は直交矩形格子であり、未知量 M_i 、 h はスタガート格子を用いて平面格子内のそれぞれ、右辺上、および中心点で定義されている。式(3)、(4)に示す基礎方程式の他に河道と周辺地盤高のように水塊そのものが分離して計算せざるを得ない条件も発生する。そのような場合には線流量 q について式(5)に示す越流公式を適用して計算を行った。

$$q = 0.35h\sqrt{2gh} \quad (5)$$

時間積分には波の遡上の判別を各時間ステップで行うため簡便な単純陽解法を用いた。このため時間間隔を十分小さくとる必要があるが総計算時間が数時間であり、大きな問題ではないと考えている。

DEMの作成と同時に地図を用いた土地利用の状況をデジタル化する作業を行ってそれを数値計算に利用した。具体的には、柿川河道内部、建物、道路の3種類に分類し、各格子点にその属性を割り当てる。例えば建物の領域と判定された格子では、流速がゼロになるように設定し、洪水の進入を止めるように設定した。これらの設定条件は現実の状況とはかなり異なるものであり、今後さらに改良を加えていく必要がある。

3.2 引き波時に関する処理

本計算における洪水氾濫の処理に関する概略の説明を図-3に示す。各格子点が冠水域かそうでないかの領域を指標として与え、冠水域と判断したら基礎方程式を適用する。冠水域格子と陸域格子との境界線上では両格子の平均水深を計算して線流量を計算した。この方法によって洪水波の先端が陸域に対して進行していくことができる。この点については従来提案されている方法と大差はないと考えられる。逆に洪水波が引いていく場合では水面が陸上標高よりも低くなる場合が発生する。この場合は、その格子での流出量と水の体積との間に過不足が発生し、計算誤差となる。このことを避けるため、その格子に隣接した格子が冠水域かどうかを判別し、冠水域と判断された場合のみその方向を向いた線流量に補正流量を付加した。補正流量は陸上標高と誤差を含んだ水位との差に格子面積を乗じて誤差体積とし、それがゼロとなるように線流量に補正を加えた。

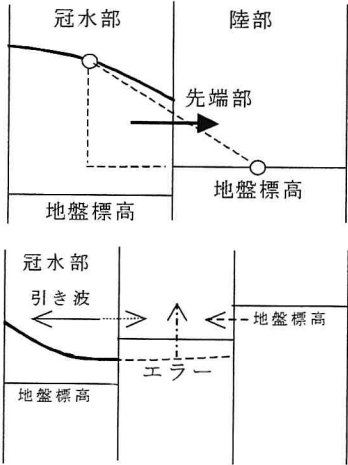


図-3 洪水氾濫の先端部および引き波の処理

3.3 計算条件

計算の対象領域は、当初、図-2に示した領域全体として1メートル四方の計算格子で計算を行っていたが膨大な計算時間を要するため、今回はさらに図-2の中心部に絞って計算を行った。図-2の中央部近くの点線は、実際に計算に用いた領域を示している。この領域は、東西360m、南北220mであり、計算格子サイズ dx, dy はいずれも1.0mである。図-4には計算領域内

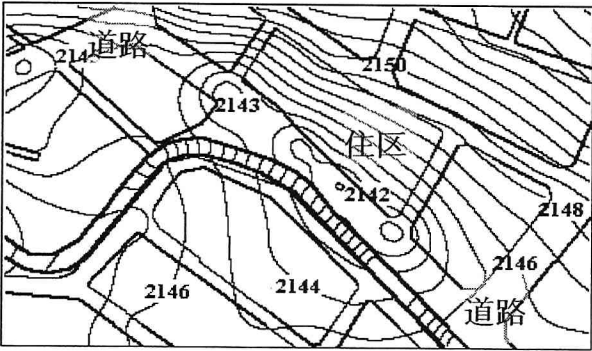


図-4 計算に用いたDEMの等高線と道路、建物、河道の区分け 単位cm

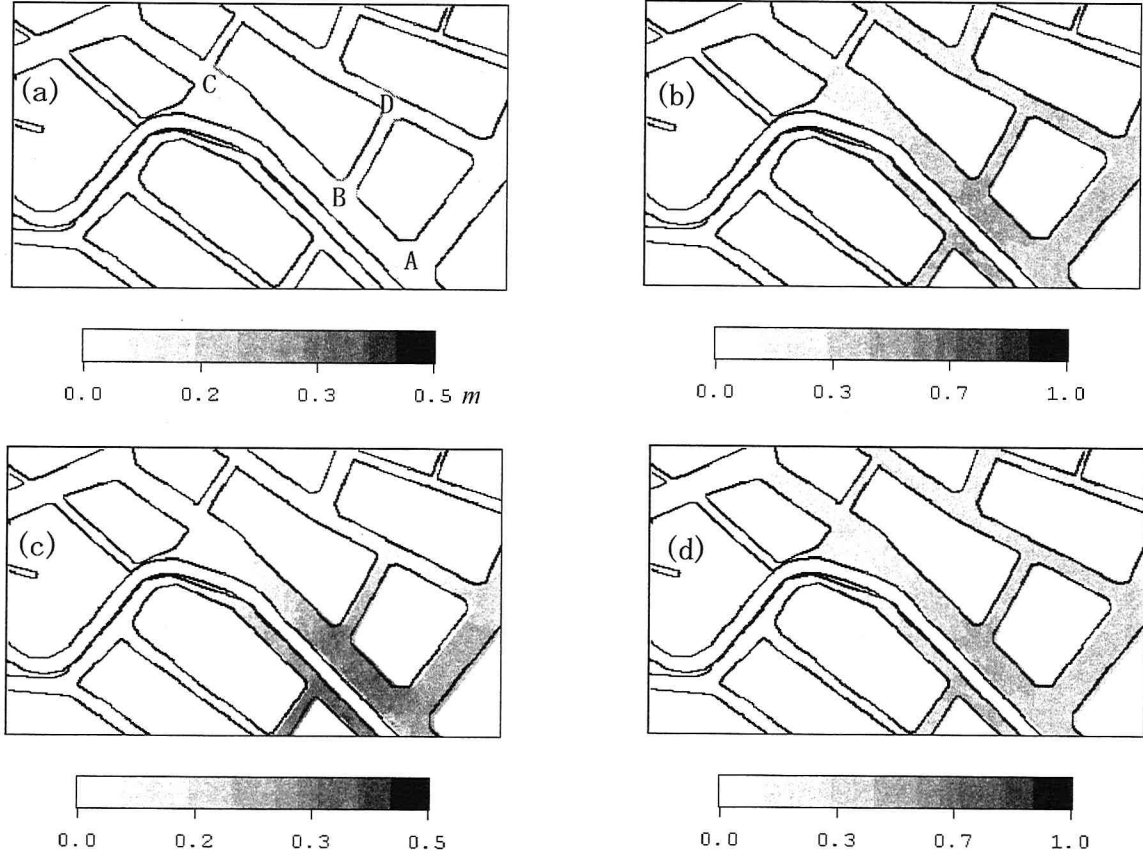


図-5 河道から市街地へ進行する氾濫流の水位分布 (単位 m)

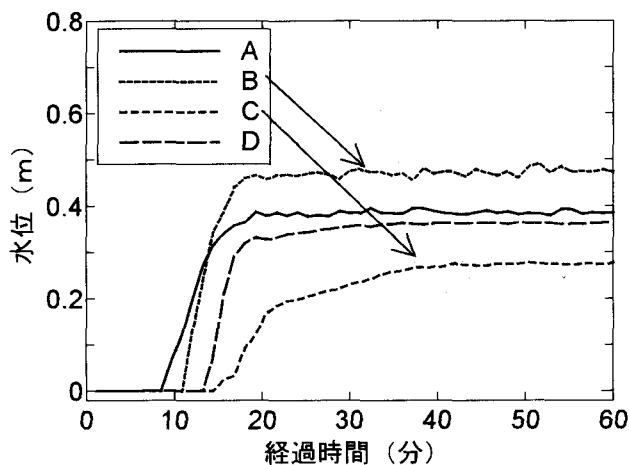


図-6 道路上の各点におけるハイドログラフ

の等高線と土地利用の区分けを併せて示している。この領域での柿川の河床標高は約19mであり、川幅は約20mである。

計算時間間隔 Δt は0.05sである。初期条件としては、河道内部で1.5mの水深とし、それ以外の領域では水深ゼロとした。計算領域の河道の上流端において洪水の入射境界条件として水位変動を与えた。波形としては振幅1.5mの正弦波であるが、4分の1周期を超えた水位が頂点に達したところで一定水位(3m)とした。図-7には氾濫前の河道内の線流量ベクトルを示しており、河道にそった安定した流れとなっている。

計算の境界条件としては、河川の洪水流入を上流端(図-2右下部)で水位増加として与え、河川の流出は下流端(図-2左上部)で式(5)に示す越流境界とした。河川部以外の境界は流出なしという条件とした。実際には境界外へ流出させる必要があるが、今回の計算では洪水が端部に到達する前に終了するため問題ないと考えている。

4. 計算結果

図-5, 6には冠水域の時間的な広がりや領域内に示したA, B, C, D点でのハイドログラフを示している。図-5の時間間隔は4.8分である。

図-5(a)によれば、図中A点近くの柿川の右岸側から氾濫が始まっていることがわかる。従来の洪水の氾濫開始点よりもやや上流側に位置している。今回の計算では正弦波によって洪水時の流量の増大を表現したが、正弦波の周期が3600秒であり、実際よりも短かったことが原因ではないかと思われる。図-5(b)~(d)では氾濫流は、左岸よりも右岸側に多く発生しているが、これは長岡市土木部の職員への聞き取り調査と一致している。実際は河道の両岸に設置されたパラペットによって左岸側への氾濫は計算よりも小さくなると思われる。右岸側の氾濫流は、道路に沿って進行しているが、地形勾配に応じて氾濫の進行方向が変化している。A点からB点方向に向かう河道に平行な道路の方が、A点

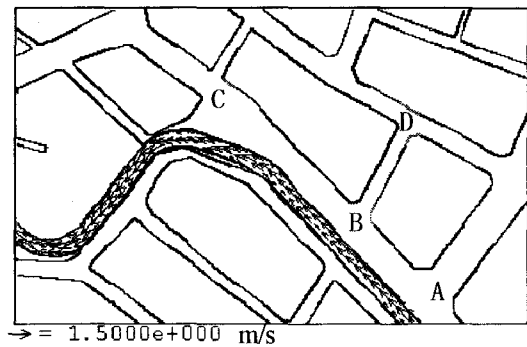


図-7 氾濫前の河道内の流れ(線流量)

から河道に直行している道路よりも氾濫流の進行が早い。B点付近は図-4によると最も標高の低い領域であり、氾濫流の挙動が標高に強い影響を受けていることが分かる。点Bでの水位は計算の全体を通して常に高い値を保持している。図-6のハイドログラフによると氾濫源に最も近いA点で水位は上昇し始めるが、B点での水位もすぐに立ち上がり始め、数分で最も高い値となってその後もその値を保持している。D点においては氾濫源(A点付近)から遮蔽されているにもかかわらず立ち上がりが比較的早く、水位も氾濫源とほぼ同じ程度となっている。このことはD点への氾濫流の進入経路が2つであったことと関係している。C点では氾濫源から直接的であり、遮蔽物は何もないにもかかわらず、氾濫水の浸入が遅く、立ち上がりも緩やかになっている。これはC点の標高が若干高くなっていることと、B点での氾濫水の滞留が氾濫流の進入を弱めているためである。

図-8には氾濫流の線流量ベクトルを示している。なお、柿川の河道内部の線流量ベクトルは氾濫流に比べてかなり大きいので示していない。氾濫源のA点では、はじめ早い線流量となっているが、A点からB点へ向かう間で道路に平行な方向にかなり強力な線流量が生じている。この領域以外では、D点付近でもある程度の強い線流量となっている。C点付近では、あまり強い線流量ベクトルではなく、C点到達する前に河道へ戻る流れも一部見られるようである。

5. まとめ

本研究では、マンホール標高データと住区データから柿川を含む長岡市中心部のDEMを作成し、都市型中小河川の氾濫計算を行った。その結果、格子サイズが1m程度の微細な地理情報を考慮した洪水氾濫シミュレーションが可能であることが分かった。また、氾濫流の空間的な分布特性が地形標高に鋭敏に影響されることが分かった。今回、計算の妥当性を比較する現場での定量的なデータが得られていない。このことは今後の

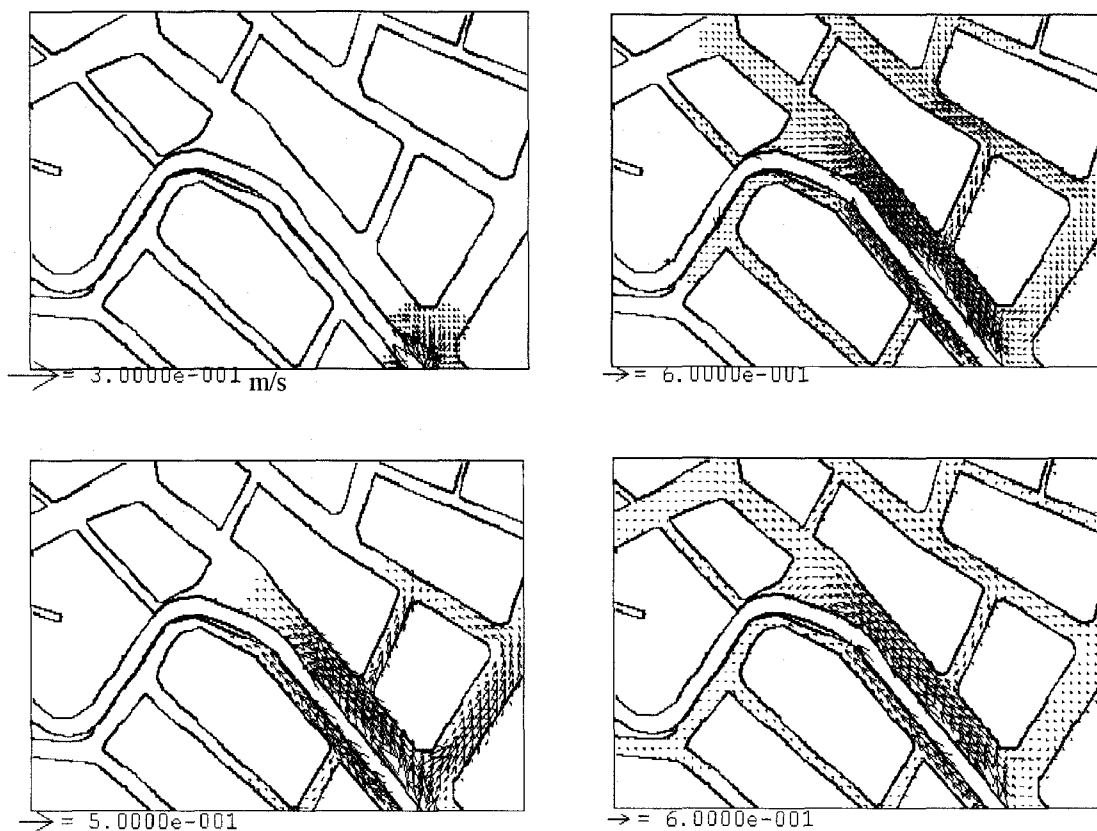


図-8 河道から市街地へ進行する氾濫流の流量ベクトル

課題としたい。

洪水氾濫の数値計算のアルゴリズムに関しては従来、多くの研究者が指摘しているように、氾濫流先端の移動限界水深、運動方程式の移流項の処理、底面の摩擦や水平方向の乱流粘性の影響など考慮すべき要因が数多く含まれている。また、ダムブレイクウェーブのような非線形性がかなり強い現象を再現できるスキームも各種提案されたり、非構造格子を用いたモデルの開発など活発に研究が進められている^{5),6)}。一方、実際の現象を表現するために家屋や下水道網などの地形情報を詳細にモデルに反映させるための研究も進んでいる^{7),8)}。本研究は目下、後者の立場をとるものであるが、アルゴリズムの妥当性についても適宜検討していきたい。また、土地の利用情報を含めて、より広い地域を対象とした長時間にわたる氾濫計算を行っていく予定である。

謝辞

最後に本研究を実施するにあたり、長岡市土木部(木本二郎部長)下水道管理課(和田行夫課長、鈴木忠夫技師)より、柿川に関する種々の資料、およびマンホール標高データの資料をお送り頂いた。また、長岡技術科学大学の山本技官にはデータ入力作業のお手伝いを頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本地形学連合・技術講習会実行委員会(代表:野上道男):DEMデータ処理技術講習会テキスト,2000.
- 2) 酒井彩美・細山田得三・早川典生・福岡祐介、氾濫流の伝播特性に関する研究、第18回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp.57-58, 2000.
- 3) 栗城稔、末次忠司、海野仁、田中義人、小林裕明、氾濫シミュレーション・マニュアル(案) -シミュレーションの手引き及び新モデルの検証-、土木技術研究所資料、第3400号、1996.
- 4) 土木学会編:水理公式集、昭和46年改訂版、1971.
- 5) 秋山壽一郎、浦勝、重枝末玲、アキレス K.ジャ、1次元浅水流方程式のFDSに基づく数値解析法、水工学論文集、第44巻, pp.473-478.
- 6) 川池健司、井上和也・戸田圭一:非構造格子の都市氾濫解析への適用、水工学論文集、第44巻, pp.461-466, 2000..
- 7) 武田誠、松尾直規:氾濫水に与える下水道システムの影響に関する数値解析的検討、水工学論文集、第44巻, pp.467-472., 2000.
- 8) 戸田圭一、井上和也、村瀬賢、市川温、横尾英男:豪雨による京都市域の氾濫解析、水工学論文集、第44巻, pp.479-484

(2001.10.1受付)