

直交座標系での地形情報の表現とその洪水氾濫への適用について

細山田 得 三

直交座標系での地形情報の表現とその洪水氾濫への適用について

細山田 得 三*

An example of expression for geographical information with the orthogonal grid system and its application to the overland flow

Tokuzo HOSOYAMADA*

In this paper, numerical procedures for expressing the geographical information, such as land use and land height are introduced for the purpose of applying the data to the overland flow. With the fine geographical information, obtained by making use of the method a numerical simulation of overland flow in an urban area is carried out. The numerical model adopted 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 the land heights of lid of manholes distributed randomly in the study area. The resolution of the altitude data is 1cm, which is fine enough to represent minute change of altitude in a flat urban area. The numerical results proved that the overland flow is sensitively affected by the geophysical features with undulation in the area.

Key words : Overland flow model, Urban area, Information of altitude, Small to medium sized river

1. はじめに

土木・建設工学は我々の身の回りに生じている様々な現象を対象とする。このためその現象が我々の身に回りのどこで起こっているのかを記述する手法は土木・建設工学のたいへん重要なツールとなることは容易に想像できる。都市計画の分野においては言うまでもないが、都市の空間情報を表示したり、記述したりすることは土木工学における基本である。地盤工学や水工学のような地すべりや洪水氾濫などの災害に関連した研究分野においても広い空間において現場を特定したりその土地の属性を迅速に把握することは重要である。このためには地理情報をデータとして取得し管理する必要がある。

地理情報を保存するためのデータを作成することは一般には地図上に様々なイベントを記述したり情報を付与するような作業となる。そのようなツールの1つとして近年ではGIS (Geographical Information system) が急速に普及している。しかしながらGISは未だに高価なものであり、またそれを使いこなすためにはかなりの技術を身に付ける必要がある^{2),3),4)}。

空間情報をコンピュータ上に表示するための方法には様々な方法が考えられるが、平面の直交座標系を用いることが一般的である。この方法では空間を平面と

して表現し格子上に分割すれば、空間の位置情報はちょうど囲碁での碁石の配置を格子番号で表示するのと同じように表現される。これは一般的には構造格子と言われている格子配置であり、最も取り扱いが容易である⁵⁾。一方、非構造格子では有限要素法のメッシュ分割で見られるように空間の位置と節点番号とを関係付けるテーブルファイルが必要になる。いずれの方法においても土地の属性、例えば標高値は平面上の点の属性として与えることになる。

地球上の各点は球面上に位置しているため、平面によって表示することは誤差を含むことになる。しかしながら日本全国程度の緯度経度の範囲を考える場合、平面で表示しても大きな誤差とはならない。また平面の原点を種々変化させてさらに細かい平面を適用すればさらに誤差は緩和される。実用的にも日本を19の平面に分割して表示する方法が確立しており、都市計画などでは標準的に用いられている¹⁾。このような矩形格子を用いた平面座標系で土地利用状況を表現する場合の問題点としては、

任意形状を有する領域（道路・河川など）の表現が困難

土地の標高データを詳細に把握することが困難

などが挙げられる。前者では道路・河川の形状や土地の区画の形状が斜めの場合、どうしてもギザギザ（ジャギー）として表現することしかできない。また、あ

原稿受付：平成14年5月24日

*長岡技術科学大学環境・建設系

る格子点がどの土地利用属性に含まれるか知る必要がある。後者の問題は特に洪水氾濫を計算する場合に問題になるが、現在最も細密な標高データは格子サイズが50mで、標高値の分解能は1mである。従ってこのデータで表現できる最小勾配は1/50であり、十分平坦な都市域での詳細な土地利用や地形勾配を表現することはできない。このような問題を解決するためには既に整備されたデータセット以外に既存の様々な地理情報を電子化し、格子データ（Grid Point Value; GPV）として整備する手法を確立しておくことが有用である。特に都市域での水害を予測するためには平面の直交座標系において土地利用データや標高データを作成して保存する方法を整備しておく必要がある。

本報告では平面の直交座標系を用いて空間情報を表示する種々のアルゴリズムを整理し、その適用結果について報告する。さらにこの方法を都市域での洪水氾濫の数値実験に適用した結果について報告するものである。

2．平面直交座標系における地理情報データの取得法

平面直交座標系とは本来、球殻上に位置しているため経緯度で表示されている地球上の各点を平面座標上に近似的に表示するものである。その方法にはUTM座標系と平面座標系（19座標系）があり、経緯度と各座標系との間には関係式が整備されている。後者の座標系は、前者に比して数多くの地形図、国土基本図を始めとする公共測量全般に広く用いられている。両方の座標系で投影変換式は同じであるが、補正係数が若干異なることと、後者は原点が日本を被覆する19点に設置されており前者に比べて4倍精度の高い地図投影変換となっている。本報告では、平面座標系（19座標系）を用いて計測された各種公共測量図を用いてこれをデジタル化する手法について説明する。

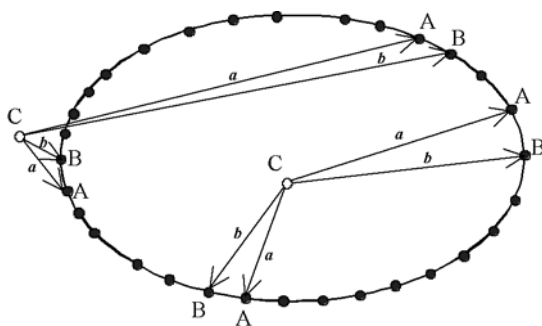


Fig. 1 Judgement whether point C is internal or external by making use of exterior product

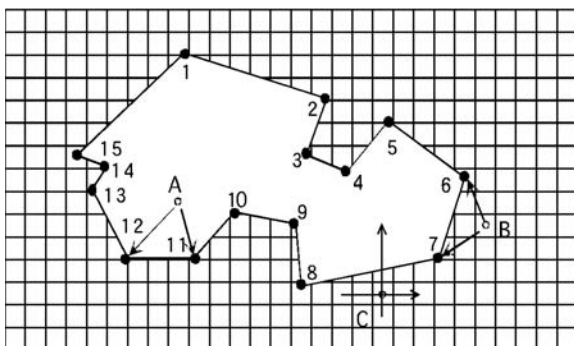


Fig. 2 Newly developed method for judgement for grid



Fig. 3 Land use data for each grid point

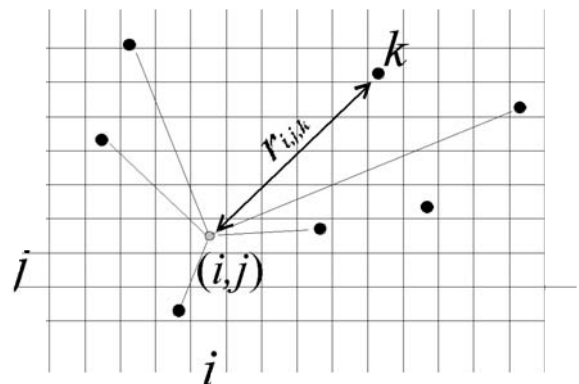


Fig. 4 grad point(i, j) and altitude data of manhole(k)
; configuration of manhole point distributed randomly

2.1 任意形状を有する領域の処理

言うまでもなく、地形の形状や土地利用形態は平面座標の格子の配置とは無関係に分布している。これらの形状はそれを構成する外周の閉曲線として表現される。この情報を平面座標系の各格子に反映させるためにはある格子が閉曲線で示された領域の内側か外側かを判定できればよい。その簡便なアルゴリズムを2種類、以下に挙げる。

方法1 外積の符号の変化を調べる方法

方法2 巻きつき判定法

前者の方法の原理をFig. 1に模式図として示す。外積は、2つのベクトル a, b に対して $a \times b$ として表現されるベクトルとなるが、その向きは両方のベクトルの始点を揃えて a を b の方に回転したとき、右ねじが進む向きとなる。図に示したとおり、ある点Cが閉曲線の外側にある場合、閉曲線を構成する隣り合う外周点A, Bのベクトル $a=CA, b=CB$ に対して外積をとる。Cが閉曲線の外側にある場合、外積の符号はA, Bの掃過に従い必ず反転する。一方、Cが内部の点であり、かつ閉曲線が外側に凸である場合、外積の符号は変化しない。この方法は非常に簡便であり、プログラムも容易に作成できるが、閉曲線が外側に凸の場合にしか適用できない。

一方、後者の巻きつき判定法では、閉曲線が外側に凸であるという条件は必要とせず、ある点が任意の閉曲線の内側と外側かを判定することができる。この方法の概略をFig. 2に示す。この方法では、まず黒丸で示した連続した2つの連結された外周点（例えばここでは7、8）と格子点（例えばC）の相対的な位置関係を調べる。2つの外周点を結ぶ線分の延長線と格子点Cを原点と見たY軸（図中ではC点から上下方へ向かう線）との交点がC点より上方で、交差方向が右から左の場合、初期値ゼロの変数を1増加させる。逆に交差方向が左から右の場合、変数を1減じる。これとは正反対に交点がC点よりも下方でかつ線分が左から右に通過する場合、変数を1増加させ、線分が右から左に通過する場合、変数を1減じる。この操作を閉曲線を構成する点すべてに適用させる。なお連続する2点の取り方として、最終点（Fig. 2では15番）は第1点（Fig. 2では1番）と組み合わせる。この結果変数の値が+2あるいは-2の場合その点は閉曲線の外点であり、変数の値が0の場合内点となる。この方法を矩形計算格子の中心点全部に対して適用し、格子が閉曲線

の内側か外側かを全点で判定する。巻きつき判定法の名前の由来は考えている点から糸を吐き出し、閉曲線に沿って一巡した場合、その点が閉曲線の内側か外側かで糸が物体に巻き付くか否かが変わるためである。

これらの判定法によって領域を峻別する閉曲線とそれを構成する点の座標情報が取得され、ある点の座標が与えられれば、その点が領域の内側か外側かを判定することができる。これらの方法を実際の地形に適用する場合、閉曲線の形状が外側に凸である場合を仮定した方法1よりも巻きつき判定法（方法2）の方が適用性が高いことは言うまでもない。Fig. 3にはこのようにして作成した長岡市中央部（柿川付近）の道路と市街区の判定結果および柿川の河道を示す。いずれも複雑な形状をした領域の判定が正しく行われていることがわかる。

2.2 標高データ（DEM）の作成法と長岡市中心部付近への適用例

前節で説明した方法により平面直角座標系において生成された各直交格子に対してその位置がどのような領域に含まれるのかを判定する手法が確立した。このデータを利用して都市域での洪水氾濫の予測を行うためには微細な地形標高を考慮した数値シミュレーションを行う必要がある。洪水氾濫の数値シミュレーションは直交格子上で差分化して行うため、前節で述べたように土地利用情報、標高値ともに直交格子上に割り当てる必要がある。直交格子上の点に対して標高値を割り当てることは実測のデータを使って数値的な処理に基づいて標高データを再構成することになる。このためこのようにして取得された標高データをDigital Elevation Model（DEM）と称する。DEMを作成するためには領域内の任意の観測点が必要となる。そのような観測情報の例としては、

空間内の任意の点での標高値

地図上の等高線

が考えられる。ここでは、前者の例として長岡市土木部下水道管理課に保管されているマンホール標高データを用いて平面直角座標系での格子標高データを作成する手法について説明する。マンホールは道路に沿って設置されるが、配置や個数はランダムであるためその配置は任意と考えるべきである。DEMの作成は長岡市内の総数約30,000個所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0.6kmの範囲を対象とした。この範囲には400点を

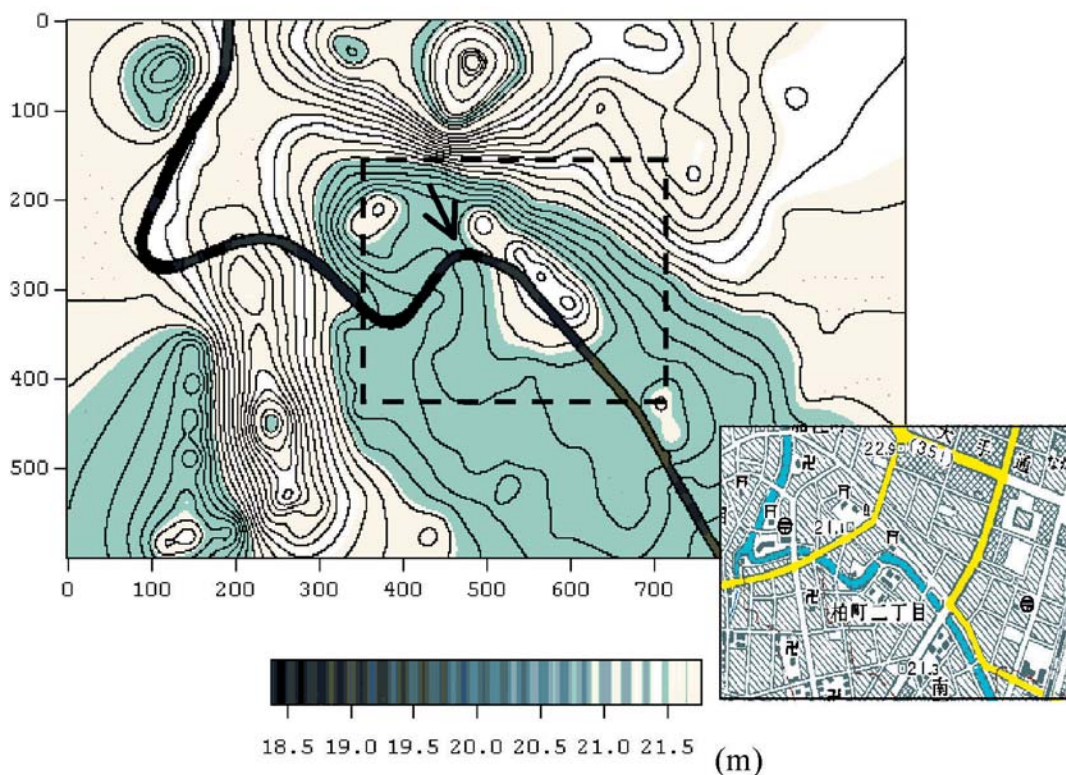


Fig. 5 DEM and Land Use data at the central area of Nagaoka city

越すマンホール蓋があり、標高データがcm単位で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。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ないため、後述するような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。Fig. 4 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 $r_{i,j,k}$ 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 $r_{i,j,k}$ 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、 $r_{i,j,k}$ 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。

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

式（2）を用いれば限られた閉曲線内の領域におけるDEMも作成することができる。すなわち、前節で述べた方法で閉曲線内部の格子に対する属性の割り当てが終了していれば領域内部と判定された格子のみに式（2）を適用してDEMを作成することができる。例え

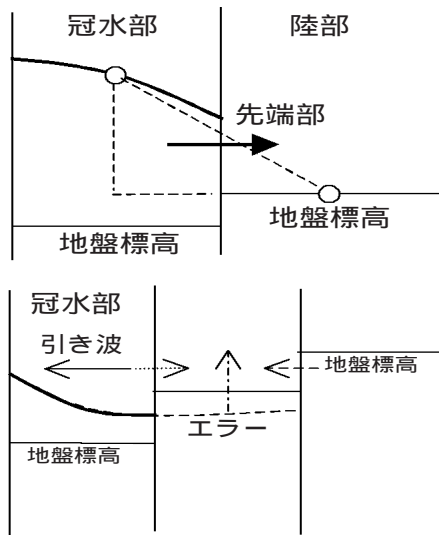


Fig. 6 Numerical Treatment of Wave Runup and backwash

ば、領域内部の河床標高はマンホールの標高値から外挿することによって算出できない。この場合、中小河川の河道内と判定された格子点に対するDEM、すなわち河床標高のGPVは限られた河床標高の実測値と式(2)によって作成された。

Fig. 5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。格子点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。

本報告ではデータが空間内にランダムに分布しても使える式(2)で示した方法によってDEMを作成したが、これ以外にも地図上の等高線を構成する点の水平位置と等高線の値をリスト化したデータから標高値のGPVを作成する手法が公開されており、ソースプログラムも入手できる⁷⁾。なお、上記のいずれのデータを利用するとしても紙として保存されている平面2次元空間での座標値と量とをデータとして作成し保存しておく必要がある。本研究ではniftyserveのサイエンスフォーラムのライブラリとして保存されているグラフ読

み取りツールGreaderを用いてスキャナで読み込んだビットマップをもとにそれらのデータを作成した。

3. 平面直交格子上での地理情報を利用した洪水氾濫計算

3.1 基礎方程式と離散化処理

前節までの手法を長岡市中心部柿川周辺に適用することによって洪水氾濫の数値計算のための地理情報に関するデータが作成された。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^{6,8,10,15,16)}。

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{M_i M_j}{h} \right) \\ & = -gh \frac{\partial (z^* + h)}{\partial x_i} + A \left(\frac{\partial^2 M_i}{\partial x_m \partial x_m} \right) - \frac{gn^2}{h^{7/3}} M_i \sqrt{M_m M_m} \end{aligned} \quad (4)$$

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、水平渦粘性係数、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)式(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。

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

ここに、*h*は構造物上の越流水深である。

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このような対象領域の場合、総計算時間が数時間と短く、大きな問題ではな

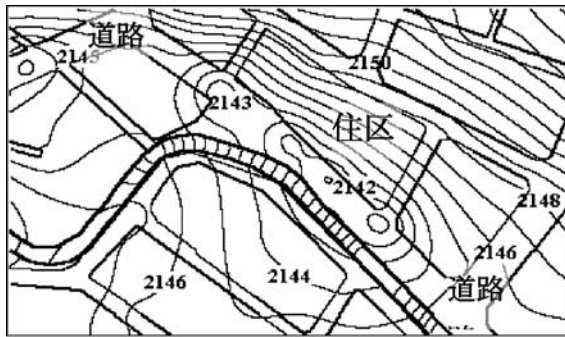


Fig. 7 Generated DEM and Land use for downtown of Nagaoka city unit : cm

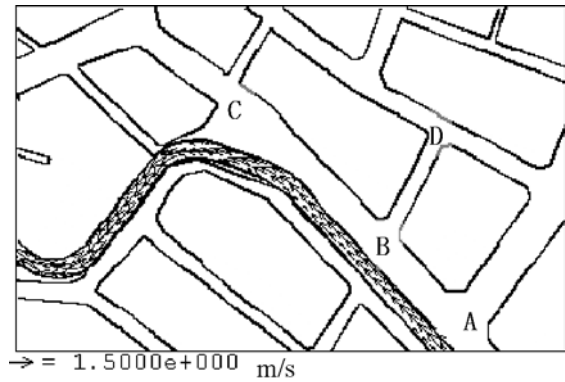


Fig. 8 Initial condition of the calculation

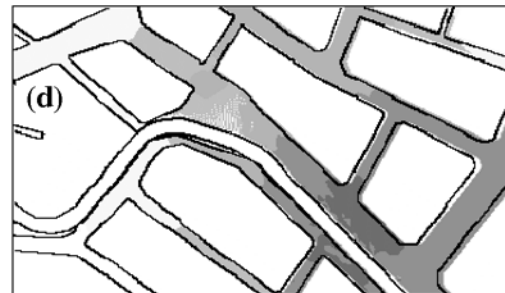
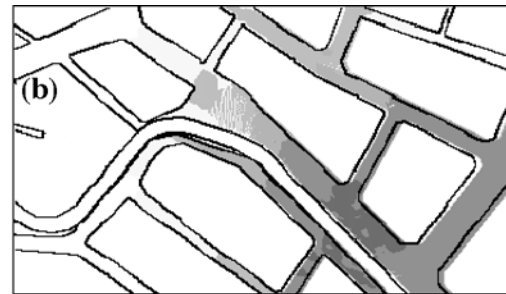
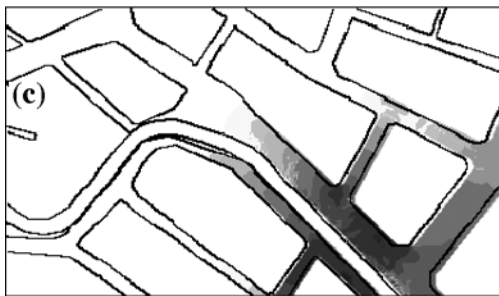
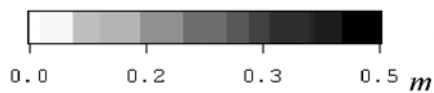


Fig. 9 Water level distribution of overland flow (unit : m)

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不十分と考えられる。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数値的な処理に関する概略の説明をFig. 6に示す。各格子点が冠水域かそうでな

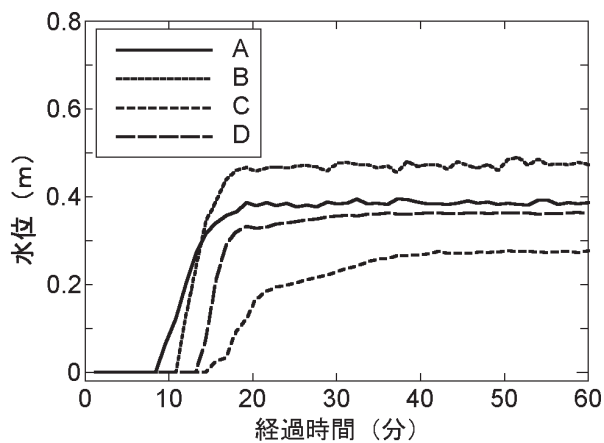


Fig.10 Hydrograph of each point in the calculation domain

いかなる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。

3.3 計算条件

計算の対象領域は、当初、Fig. 5 に示した領域全体として1m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Fig. 5 の中心部に絞って計算を行った。Fig. 5 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。このような格子サイズでの中小河川の氾濫数値計算は過去他に例を見ないほどの高分解能である。格子サイズ1mでは1つの格子にマンホー

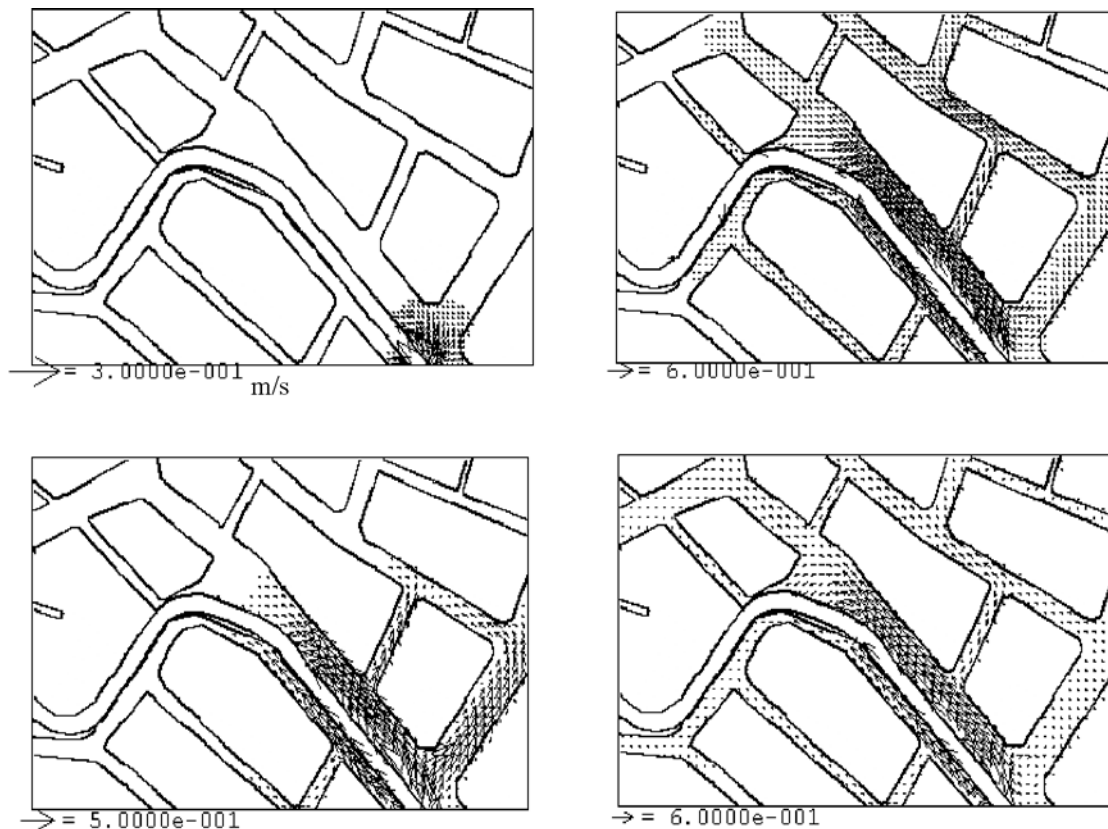


Fig.11 Temporal development of the overland flow vectors

ルが1つだけが対応することになるため下水管からの氾濫の取り扱いが容易になる。下水管からの氾濫と中小河川からの氾濫を組み合わせる研究は今後の検討課題としたい。

Fig. 7には計算領域内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。Fig. 8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(Fig. 7右下部)で水位増加として与え、河川の流出は下流端(Fig. 7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

Fig. 9、10には冠水域の時間的な広がりや領域内に示したFig. 9(a)のA、B、C、D点でのハイドログラフを示している。Fig. 9の時間間隔は4.8分である。Fig. 9(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、現実よりも短かったことが原因ではないかと思われる。Fig. 9(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Fig. 7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。Fig. 10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。

Fig. 11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ことを示していない。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点に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、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¹¹⁾¹²⁾。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¹³⁾¹⁴⁾。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浩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。また、本研究を行うにあたり、研究の動機づけを頂いた本学教授、早川典生先生、福嶋祐介先生、および計算とデータ作成にご協力頂いた本学大学院修了生酒井彩美さん、本学大学院生加納裕美さんに謝意を表する。

参考文献

- 1) (財)日本地図センター：数値地図ユーザーズガイド, pp.471, 1992.
- 2) 町田聡, 地理情報システム入門&マスター, 山海堂, pp.178, 1994.
- 3) GeoInformation International: Getting to know ArcView GIS, Environmental System Institute, 1996.
- 4) GeoInformation International: Understanding GIS The ARC/INFO Method, Environmental System Institute, 1990.
- 5) 小野謙二：設計における直交格子法の利用, 日本流体力学会誌 “ながれ”, 21, pp.16-25, 2002.
- 6) 中川一：河川氾濫, 日本流体力学会誌 “ながれ”, 19, pp.88-95, 2000.
- 7) 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.
- 8) 酒井彩美・細山田得三・早川典生・福嶋祐介、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.
- 9) 粟城稔、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.
- 10) 土木学会編：水理公式集、昭和46年改訂版、1971.
- 11) 秋山壽一郎、浦勝、重枝未玲、アキレス K.ジャ、1次元浅水方程式のFDSに基づく数値解析法、水工学論文集、第44巻、pp.473-478.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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、2000.
- 15) 酒井彩美、微細な地形情報を考慮した氾濫流の数値計算、長岡技術科学大学修士論文 2002.
- 16) 細山田得三、早川典生、加納裕美、酒井彩美、微細な地形標高を考慮した都市中小河川の氾濫数値計算、水工学論文集、第46巻、2002.