

都市域氾濫流モデルの開発

北海道開発局開発土木研究所 三浦敦禎

清水康行

1. はじめに

近年、治水事業の進展により洪水氾濫の頻度は少なくなっている。しかしながら、改修途中の河川やダム等の未完成段階の河川における計画規模の出水、さらには超過洪水などにより都市域を流れる河川が氾濫し、人口や資産の集中する都市域に氾濫流が侵入するような場合、その被害は計り知れないものがある。これに対して現在の都市計画における街路、建築物、公園、避難地等の配置は必ずしも氾濫流を考慮した計画とはなっていない。氾濫時には避難地として指定されている場所が逆に氾濫流の集中する場所になっていることも有り得る。したがって、被害を最小限に食い止めるには、氾濫流の挙動を明らかにした上で、氾濫流の速やかな排除や避難方法などを検討する必要がある。これまで洪水氾濫解析に関する研究¹⁾²⁾は行われてきたが、本研究においては建築物や道路が複雑に配置される都市域における氾濫流計算手法の小容量化、高速化を検討し、都市域全体をカバーできる計算手法を検討する。さらに、検討結果得られた手法を実際の都市域に適用し氾濫計算を行い都市域における氾濫流の特性を検討するものである。

2. 洪水氾濫解析

2.1 基礎方程式

洪水氾濫流を二次元平面流れとして扱いその流体運動を表現する基礎方程式は次の各式で表される。

連続の式

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

x 方向の運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial M}{\partial y} \right) \quad (2)$$

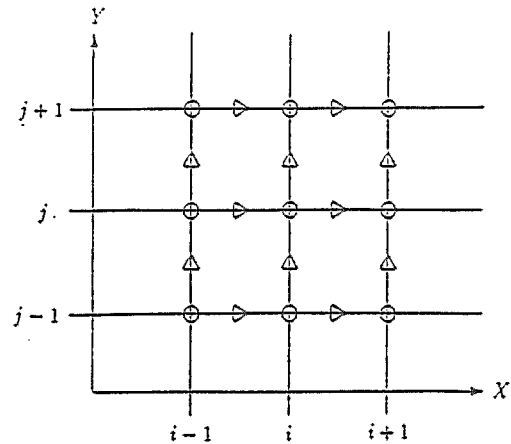
y 方向の運動方程式

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial N}{\partial y} \right) \quad (3)$$

ここに、 x, y ; 平面の直交軸, u, v ; x, y 方向の流速, h ; 水深, H ; 水位, ρ ; 流体の密度, ε ; 渦動粘性係数, g ; 重力加速度, τ_x, τ_y ; x, y 方向底面せん断力, t ; 時間, M, N ; x, y 方向の流量フラックス (単位幅流量) であり $M = uh, N = vh$ である。

2.2 数値計算方法

連続の式及び x, y 方向の運動方程式の数値解法には差分法³⁾⁴⁾を用いることとする。これらの基礎方程式すなわち微分方程式を差分法においては、一般に、計算領域は流れ場を覆う格子の格子点で、流れの変数は格子点上に定義される離散関数として表され、計算式は差分方程式として微分方程式を置き換えられる。よって流れは方程式の代数計算によって計算することができる。しかしながら、本基礎方程式においては慣性項や底面摩擦項といった差分化の際に不安定の原因となる項を含んでいる。そこで、計算の安定化を計るために計算格子上の計算点の配置を図-1の通りとすることとした。この計算点の配置において x 方向流量フラックス M 及び y 方向流量フラックス N の計算点を半格子ずらすことによって安定化を計るものである。



- ▷ : M の計算点
- △ : N の計算点
- : h, H の計算点

図-1 計算格子と計算点

また、計算時間間隔 Δt においては C.F.L. 条件を用いることとした。

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{gh} + |u|} \quad (4)$$

$$\Delta t \leq \frac{\Delta y}{\sqrt{gh} + |v|} \quad (5)$$

ここに、 $\Delta x, \Delta y$ は平面の直交軸における単位幅である。計算時間間隔において (4) 式、(5) 式を同時に満たす Δt を用いることにより伝搬速度を考慮したものとするができる。

2.3 氾濫流先端部における境界条件

氾濫流が広がるための境界条件として、水深の計算格子点において隣合う2点より判断することとし、ここに、 x 方向の格子上隣合う2点において格子点 $(i-1, j)$ より格子点 (i, j) に向かって氾濫流が流れると仮定した際における境界条件について述べることとする。

先端部における境界条件として基準水深を用いると以下の3通りとなる。1.) 2点の水深がともに基準水深に達していない。2.) 2点の水深の一方が基準水深に達している。3.) 2点の水深が共に基準水深に達している。ここに、1.), 3.) は氾濫流の先端部でないことは明白である。またさらに、1.) における考え方はその地点での基準水深を越える水深が存在しないために、流れも生じないと考えることとする。よって氾濫流が広がる先端部は2.) の場合である。ここで、先端部においては水深のみではなく地盤高も考慮した条件、即ち水位を条件として加える必要がある。なぜならば、計算上架空

の流れを計算してしまうこととなるためである。それは、まず水深の判断において水深 $h(i, j)$ が基準水深を越えると判断し、水深 $h(i-1, j)$ においては基準水深に満たないと判断したとする。ところがその際に、地盤高を考慮した水位をもとにこれらの2点を比べると、水位 $H(i, j)$ よりも水位 $H(i-1, j)$ がより大きな値を示したと仮定するとき、差分化した運動方程式を計算すると格子点 $(i-1, j)$ から格子点 (i, j) へ向かう架空の流量フラックスを計算してしまうこととなる。即ち、水の存在しない場からの流れが生じることとなる。図として表現すれば図-2と言った状態である。そこで、先端条件として上記の場合と判断した際には、運動方程式を計算することなく $M = 0m^2/s$ とおくこととし架空の流れが計算されることのないようにした。またこれは計算時間の短縮化も計ることとなる。ここまで格子点 $(i-1, j)$ より格子点 (i, j) に向かう流れを考えたがこの逆向きの流れにおいても、また、 y 方向の隣合う2点間格子点 $(i, j-1)$ 、格子点 (i, j) においても同様とすることとする。

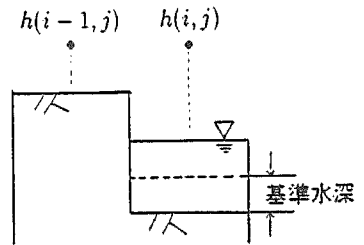


図-2 先端部境界条件

3. 都市域における洪水氾濫計算

3.1 都市域氾濫流モデル計算

本氾濫流モデルの特性を確認するために仮想都市への適用を試みた。仮想都市における町並みを図-3に示した。高速自動車道高架が縦横に伸び、また建築物の密集地が存在し、池を中心とした公園もあるものとした。仮想氾濫河川は図-3における x 軸に沿って流れるものとし、仮想氾濫箇所は建築物密集地に面した場所とすることとした。また高速自動車道高架と建築物には粗度係数 0.8 を与え、池及び道路等には粗度係数 0.02 を与えることとした。また地形条件は平坦であるものとし、高速自動車道高架及び建築物には一律 5.0m の地盤高を与えるものとする。

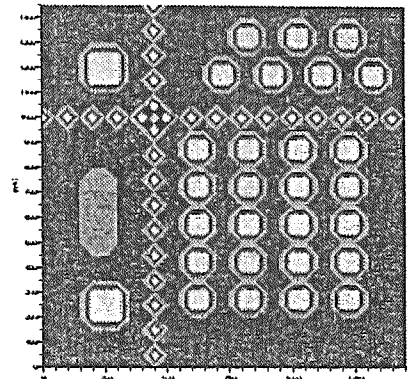


図-3 仮想都市

計算結果として図-4にベクトル図を示した。氾濫流が建築物密集地を流れ高速自動車道高架を通過する様子が計算された。そこで次に仮想都市内を横断する即ち図中 x 軸と並行な高速自動車道高架を水路に置き換えての計算も試みた。水路における条件は 1/1000 勾配を持ち終始一定流量 $10.0m^3/s$ が流れることとした。

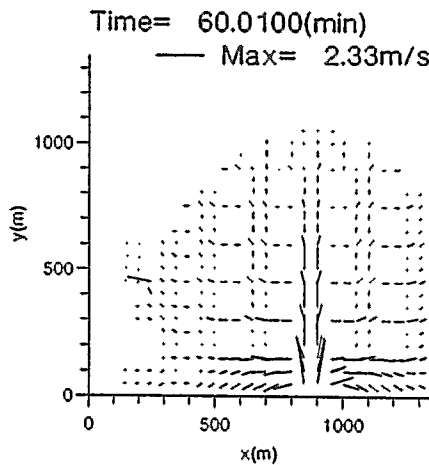


図-4 計算結果

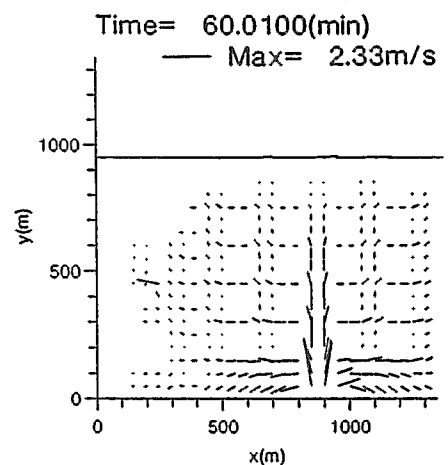


図-5 計算結果

またこの計算において水路以外の条件は全て前計算条件と同様とする。計算結果として図-5にベクトル図を示した。図-4と図-5を比較すると図-5において氾濫流の広がりが水路によって遮られていることがわかる。さらにこのことは図-6により確認することができる。図-6は水路内下流部の1地点における水深の変化を示したものである。この図より水路内に氾濫流が流れ込むことにより水深の増加が顕著に認められる。なおグラフ初期における若干の揺らぎは初期水深の影響であると考えられる。

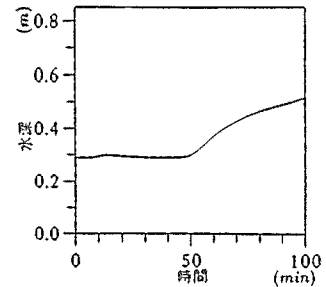


図-6 水路内水深

3.2 都市域氾濫流モデルの札幌市への適用

想定氾濫地域および対象河川として札幌市および豊平川を例とした洪水氾濫流数値シミュレーションを行った。仮想破堤地点として豊平橋付近左岸を仮定した。なぜならば、この地点は河道が狭くなり高水敷も少なく、さらにこの地点が破堤したならば都市域への影響も多大なものと想定されるためである。また、図-7に仮想破堤地点を示し破堤距離を150mとした。この様に仮定した想定氾濫地域における建築物等の分布は福岡ら⁵⁾と同様に建築物等の密集度を粗度係数として表現することとした。

表-1 密集度と粗度係数

密集度	粗度係数
空き地	0.02
道路	0.01
建物密集度20%	0.03
建物密集度50%	0.05
建物密集度80%	0.10
建物密集度80%以上	0.80
川・池	0.01

また、粗度係数は2万5千分の1地形図を基に作成した。ここに図-7は粗度係数の分布を示すものであり、表-1に個々の密集度による粗度係数を示した。なお、図-7において色の濃い部分が道路網を示し、色が白色に近くなるほど建築物密集度が高い箇所を示している。さらに豊平川の左岸堤防および円山より西の丘陵地帯には境界条件としてこより流れが進入しない条件を与えた。地形条件として国土数値情報(ks-124-1)を50mメッシュに補間して用いることとした。想定氾濫地域への流入条件として計画高水流量を

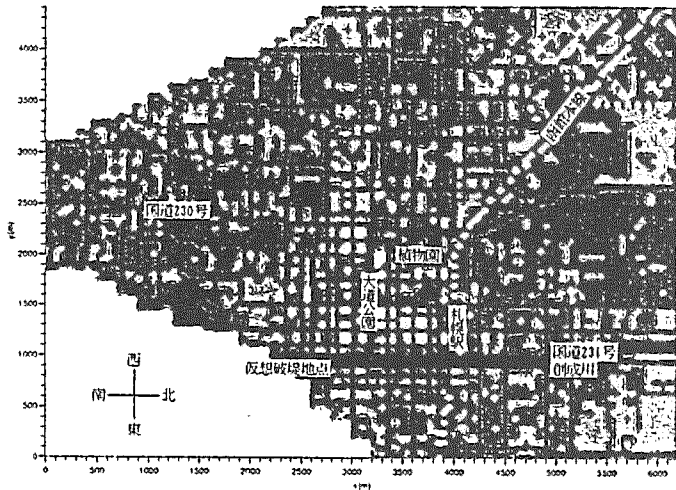


図-7 粗度係数の分布

越えた流量が氾濫流となることとした。豊平川雁来地点の計画高水流量は $2000\text{m}^3/\text{s}$ である。現在、豊平川上流においてダム整備が整いつつあるが依然 $2300\text{m}^3/\text{s}$ 程度の洪水は想定される。よって計画高水流量との差 $300\text{m}^3/\text{s}$ が都市域に氾濫すると仮定した。また、図-8にハイドログラフを示しこのように仮定した氾濫流量を仮想破堤地点において流量フラックス M, N を用いて流入の条件とした。数値シミュレーションの結果を図-9に示す。この図は計算開始後200分であり氾濫流入終了時

である。この図より氾濫流が道路網に沿って流れる様子がシミュレーションされたことが確認される。また、図-9の主な地点における水深と流速をまとめる。大通西8丁目において水深0.11m 流速西へ0.27m/s、札幌駅前において水深0.13m 流速西へ0.04m/s、時計台前において水深0.17m 流速西へ0.02m/s、国道213号北7条において水深0.07m 流速北へ0.25m/s、以上の計算結果が得られた。

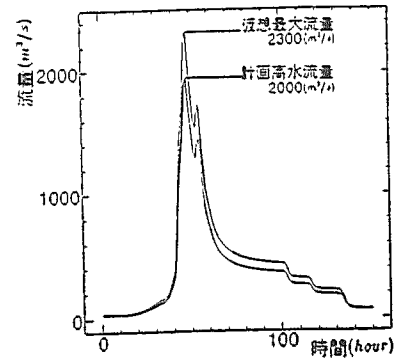


図-8 ハイドログラフ

4. 洪水氾濫計算データ作成上の課題点

本計算に用いた主なデータとして、1) 建築物等密集度データ及びそれに伴う粗度係数、2) 地形データ、3) 氾濫流のハイドログラフ、を上げることができる。このうち、3) 氾濫流のハイドログラフについては単に流量の時間変化だけでなく、破堤場所、破堤規模等の様々な要因が関係するためここではふれないこととする。そこで、建築物等密集度データの作成手法は2万5千分の1地形図上において実際にメッシュを組むことによりデータを作成した。2万5千分の1地形図を用いた理由は地形データとの対応のためである。しかしながら、本計算メッシュの単位幅は50mであり当然のことながら地形図上では2mmメッシュになってしまう。

計算上の単位幅を小さくするには今回用いた地形図では限界である。そこで今後は地形データとの対応を考慮しながら、密集度データ作成に用いる地形図の縮尺を検討するとともに航空写真や人口衛星からのデータ作成といった抜本的なデータ作成手法を検討しなければならない。またさらには密集度と粗度係数の対応についても未知な点が多々あり今後の課題点である。次に2) 地形データとして国土数値情報(ks-124-1)を用いた。この数値情報⁶⁾は最小メッシュ250mで記録されたものであるためこのデータを50mメッシュに補間して地形データとしたものである。ここで、都市域氾濫流計算に用いる地形データとしての課題点も少なくないことからその点について述べる。この地形データは先にもふれた通り250mメッシュが最小単位であることよりあまり細かな点についての地形情報が不明である。また、この地形データにおいて2次メッシュと呼ばれる範囲においては、2万5千分の1地形図における範囲とほぼ等しいとされているために、メッシュデータ上の想定氾濫地域の特定にこの関係を利用した。ところが緯度が高くなるにしたがい地形図上の地形は

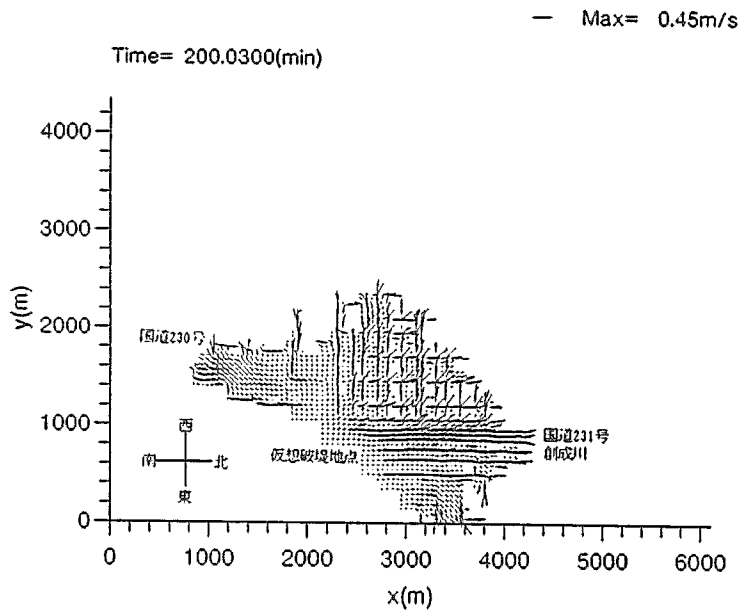


図-9 計算結果

歪んでしまう。このために2次メッシュと2万5千分の1地形図とが必ずしも一致せず地形メッシュデータの正確な場所の特定が困難である。しかしながら、このメッシュデータを用いることにより迅速に地形データを計算に取り込むことができる。現時点において氾濫流計算に用いるデータ作成上の課題点を上記のようにまとめることができる。

5. おわりに

初期水深が存在しない洪水氾濫流の挙動は不安定であり的確なシミュレーションが困難である。例えば、地面に水を撒くとする。水は高い所から低い所へと流れる。ところが、この高い所から低い所へと流れる水がどのような広がりをもちながら流れて行くのかを、あらかじめ的確に把握することは困難である。

本研究では、都市域における洪水氾濫流数値シミュレーションを行った。ここでの的確な洪水氾濫流予測モデルを確立するために、現段階の主要な結果と課題点についてまとめる。都市域における洪水氾濫を道路網に沿った氾濫流として数値シミュレーションすることができた。また、氾濫流計算を行うにあたり地形データ、建築物密集度データが不足している。今後リモートセンシング等によるきめ細かなデータの検討を必要とする。さらに、精度の高いデータに対応するよりの的確な数値シミュレーションとするために模型実験を行うとともに、氾濫流先端部を中心とした境界条件等を考慮、検討しよりの的確な洪水氾濫流モデルへと発展させなければならない。

最後に、本研究を進めるにあたり京都大学防災研究所 中川 一先生 に氾濫流先端部の取り扱いについて御指導と貴重な助言を頂戴した。ここに深く感謝の意を表します。

6. 参考文献

- 1) 高橋 保・中川 一・西崎丈能：堤防決壊による洪水危険度の評価に関する研究、京都大学防災研究所年報、第29号B-2、1986年4月、pp.431-450
- 2) 中川 一：洪水・土石流氾濫解析の現状と展望、河川災害に関するシンポジウム、1993年3月、pp.1-18
- 3) 清水康行：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究、北海道大学審査学位論文、1991年2月、pp.48-73
- 4) 社団法人 日本機械学会：流れの数値シミュレーション、1989年、1月、pp.56-165
- 5) 福岡捷二・松永宣夫：密集市街地における洪水氾濫流解析と氾濫流制御の試み、土木学会水理委員会、水工学論文集第36巻、1992年2月、pp.311-316
- 6) 建設省国土地理院、国土庁計画・調整局：国土数値情報、1987年、pp.1-130