

GISを用いた 氾濫解析システムに関する研究

STUDY ON ANALYSIS SYSTEM FOR OVERLAND FLOOD FLOW
BY MEANS OF GIS.

大坪郁宜¹・櫻井耕史²・武田 誠³・松尾直規⁴

Ikuyoshi OHTSUBO, Kouji SAKURAI, Makoto TAKEDA and Naoki MATSUO

¹学生員 中部大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

²正会員 三重県庁 (〒514-8570 三重県津市広明町13)

³正会員 工博 中部大学講師 工学部土木工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

⁴フェロー 工博 中部大学教授 工学部土木工学科 (同上)

The analysis of overland flood flow on urban area is generally very expensive and effortful. The aim of this study is to develop an analysis system of processing some data for analyzing overland flood flow and to show the calculated damage situation by means of GIS. In this system, the property data and elevation data for all grids of Cartesian coordinates are easily formed by digital map and GIS. The information on building and population is similarly taken into the system. Moreover, from the comparison with the results of overland flood analysis and the data on the number of houses, population and underground space obtained from digital map and GIS, not only the flood situation but also the damage estimation was easily examined.

Key Words : GIS, Analysis of overland flood flow, Digital map, Urban area, Damage estimation

1. はじめに

近年, 集中豪雨による都市型水害が増加している。2000年9月の東海豪雨の経験からも, ハード的な対策の整備に加えて, 情報伝達や避難誘導システムなどに代表されるソフト的な対策の確立が望まれている。その一環として, 予想浸水深や避難経路を示した洪水ハザードマップの作成が急がれており, それと同時に精度の高い氾濫解析法の構築が求められている。とくに, 大都市においては, 地上に建物が林立し, 道路がアスファルトで覆われるなど浸透能の低下が進んでいるため, まとまった降雨があると, 河川は急激に増水し道路は冠水する。一方, 地下には, 地下街, 鉄道, 下水道と, 水の流れを考える上で無視できない要素が数多く存在している。このように複雑な要素を有する都市域を考慮した氾濫解析法は今日に至るまでに数多く提案されており^{1)~5)}, 1999年6月の福岡での水害を受けて, とくに地下空間における浸水予測など, より高度な議論が進められている。しかし, 複雑な立体都市を考慮するほど, 解析に必要な情報量は多くなり, その収集には多大な労力を要することになる。本研究では, それらを解決する手段としてGIS

(地理情報システム)に着目した。すでに, 自治体では下水道管理などの日常業務にGISを導入する例が多く見られるが, 氾濫解析への適用はあまり例がない。東海豪雨で被災した愛知県や西枇杷島町では浸水予測の甘さから防災計画が所定通りに機能せず, 初動体制が遅れ, その結果として避難所は大混乱する事態となった。このようなことから, 防災計画の見直しが検討されており, その前提としての浸水予測および氾濫解析はより重要となってくるものと判断される。さらに, 今後, 氾濫解析は各地で実施されることが予想され, 高度化だけではなく汎用性の高い解析方法が望まれるとともに, 行政および住民の双方に分かりやすい形で情報を提供できる手段が必要である。この解決法としては, GISが大いに活用できるものと考えられるが, 具体的な手法論を十分に検討する必要がある。

本研究ではGISを用いることで, これまで時間と費用が障害となっていた氾濫解析におけるデータ収集作業の簡便化を行うとともに, 予測した被害状況を視覚的に表示し, 具体的な浸水被害軽減対策への応用も試みている。本研究で構築した氾濫解析システムに関する作業の流れを図-1に示す。とくに, 図中の二重枠はGISの適用が検

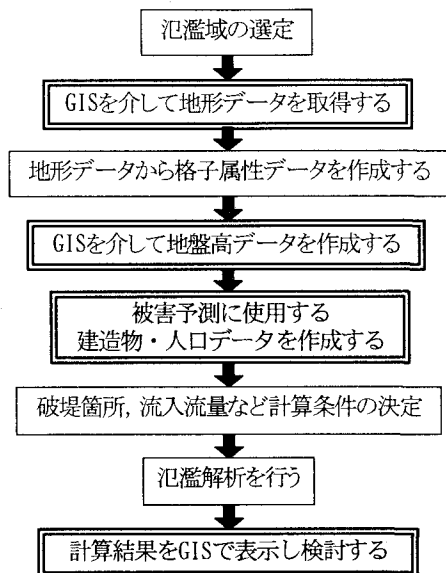


図-1 氾濫解析システムの流れ
(二重枠の作業でGISの適用が検討された)

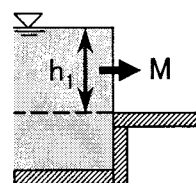


図-2 遡上の場合

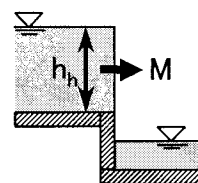


図-3 段落ちの場合

表-1 家屋面積に応じた粗度係数³⁾

家屋面積の割合(%)	粗度係数(s/m ^{1/3})
道路	0.043
0~20	0.056
20~50	0.084
50~80	0.096
80~100	1.000

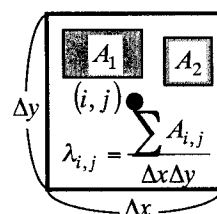


図-4 建築物占有率の概念

討された部分である。

2. 解析方法

氾濫解析には、デカルト（直交）座標による二次元不定流モデルを用い、以下の浅水方程式を基礎式とする。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial (h + z_b)}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial (h + z_b)}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (3)$$

ここで、 x, y ：平面の空間座標、 z_b ：地盤高、 h ：水深、 u, v ：それぞれ x, y 方向の流速、 M, N ：それぞれ x, y 方向の流量フラックス（ $M = uh, N = vh$ ）、 g ：重力加速度、 n ：マンニングの粗度係数、 t ：時間である。基礎式の離散化には、差分法の陽的解法であるLeap-Frog法を用いる¹⁾。氾濫水の先端の取り扱いには移動限界水深(0.001m)を採用し、地盤高と水位との関係によって遡上(図-2)や段落ち(図-3)となる場合には次の本間の越流公式を用いて流量フラックスを求める。

$$\text{遡上の場合} \quad M = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (4)$$

$$\text{段落ちの場合} \quad M = \mu' h_h \sqrt{gh_h} \quad (5)$$

ここに、 μ には0.35を、 μ' には $(2/3)^{3/2}$ を用いている。

都市域を考慮した氾濫解析として、本研究ではデータの収集が容易になったことから、建築物占有率に応じて粗度係数を与える方法と、建築物の透過率を用いる方法

の比較を行うことにした。前者の方法では、粗度係数として堤内地に福岡ら³⁾による表-1の値を、河川および海には0.020を用いた。一方、後者の方法では、中川²⁾に従い、図-4に示す各格子の建築物占有率 $\lambda_{i,j}$ より透過率 $\beta_{i,j} = \sqrt{1 - \lambda_{i,j}}$ を算出し、次式のように流量フラックスに乗じることににより反映させる。

$$\tilde{M}_{i-1/2,j}^{n+2} = \beta_{a,j} M_{i-1/2,j}^{n+2} \begin{cases} M_{i-1/2,j}^{n+2} \geq 0 : a = i \\ M_{i-1/2,j}^{n+2} < 0 : a = i - 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\tilde{N}_{i,j-1/2}^{n+2} = \beta_{i,b} N_{i,j-1/2}^{n+2} \begin{cases} N_{i,j-1/2}^{n+2} \geq 0 : b = j \\ N_{i,j-1/2}^{n+2} < 0 : b = j - 1 \end{cases} \quad (7)$$

後者の方法における水深は、建築物が完全不透過性であるとして次の連続式より求める。ただし、中川に従い、左辺第1項の係数 $(1 - \lambda_{i,j})$ を1とした。

$$\begin{aligned} & (1 - \lambda_{i,j}) \frac{h_{i,j}^{n+3} - h_{i,j}^{n+1}}{2\Delta t} + \\ & \frac{\tilde{M}_{i+1/2,j}^{n+2} - \tilde{M}_{i-1/2,j}^{n+2}}{\Delta x} + \frac{\tilde{N}_{i,j+1/2}^{n+2} - \tilde{N}_{i,j-1/2}^{n+2}}{\Delta y} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

なお、この場合の粗度係数としては、Xanthopoulosらの土地利用に応じた値⁶⁾を用い、市街地の場合である0.067（一定値）をすべての格子に与える。

以上のような方法を用いて氾濫解析を行う際は、浅水方程式を解くための、堤内地、河川、海を判別する格子属性データおよび地盤高データが必要となる。さらに、都市域を考慮した解析を行うための建築物占有率データも必要である。以下では、これらのデータの作成作業に

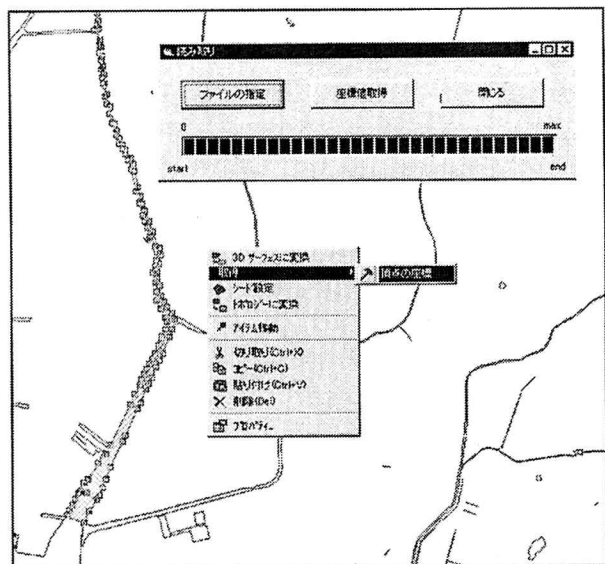


図-5 GISでの地形データの取得状況

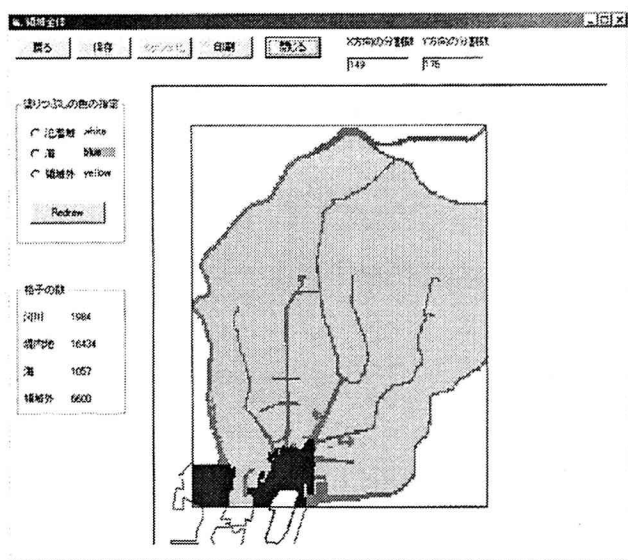


図-6 地形ごとに色を塗り分けた状態

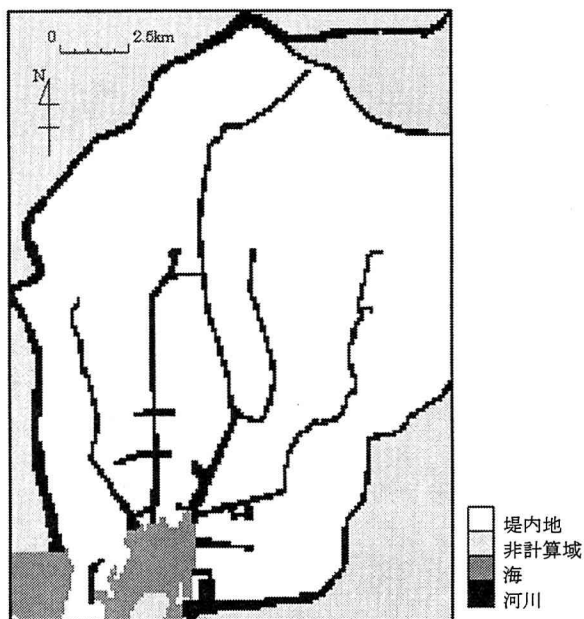


図-7 格子属性データ

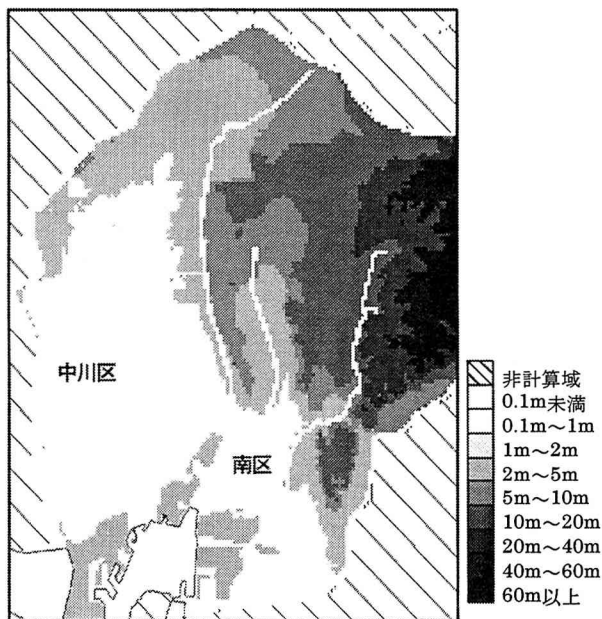


図-8 地盤高データ

おける簡便化について検討する。

3. 氾濫域データの作成

名古屋市を対象にデカルト座標系格子（100m四方）を用いた氾濫解析システムの構築を行う。格子の属性（堤内地、河川、海）と地盤高が設定できれば、最も単純な氾濫解析は実施できる。

格子属性データを作成する方法としては、まずGISを介して数値地図2500⁷⁾より水部のアイテムのみを選択する。その結果、図-5に示すように河川と海岸線の形状を各頂点の座標値として取得することができる。この座標値を用いて、VisualBasicのフォーム内のピクチャエリアに対象領域の河川と海岸線を描画する。次に、堤内地、河川、海および非計算域を4色に塗り分ける。この塗り

分けは、ピクチャエリアの閉じた領域内を1回クリックすることによって塗り潰すことが可能のようにプログラミングしている。図-6は、このときの作業画面である。次に、対象領域を格子に分割する。各格子で最も割合の多い色（地形）に基づき、各格子に堤内地、河川、海および非計算域のいずれかの属性を与える。ただし、数値地図の河川は低水路を表示しているため河川形状が堤防形状と一致しない場合や、格子に占める河川の面積が小さいためメッシュ化した河川が不連続となる場合など、計算上不都合な格子属性はGIS上で修正する。このようにメッシュ化したデータを用いて表示された対象領域は、図-7のようになる。

さらに、堤内地の地盤高データは、数値地図50mメッシュ（標高）⁸⁾の値に基づいて100mメッシュ中心の値を内挿補間により算出した。得られた地盤高の分布図を

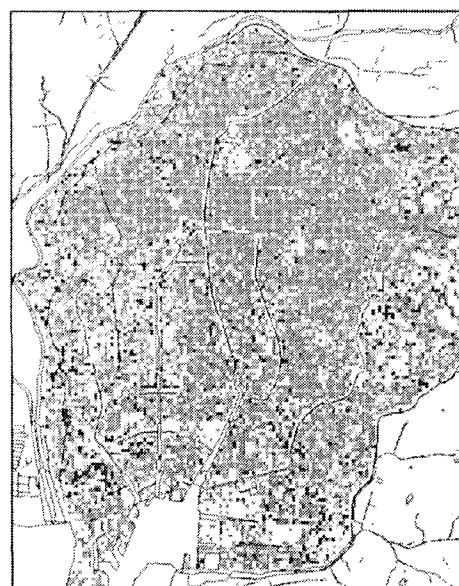


図-9 総戸数の分布図

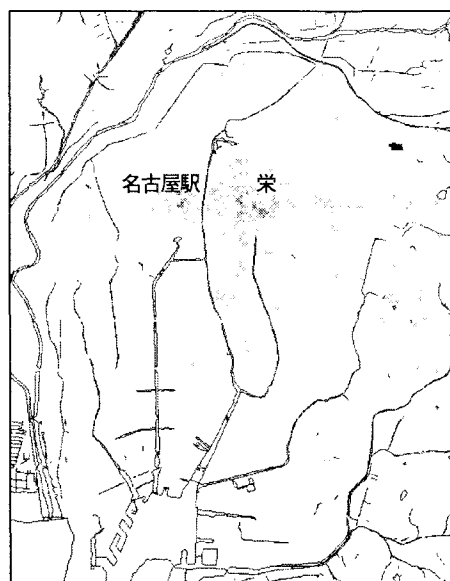
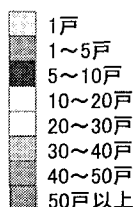


図-10 地下戸数の分布図

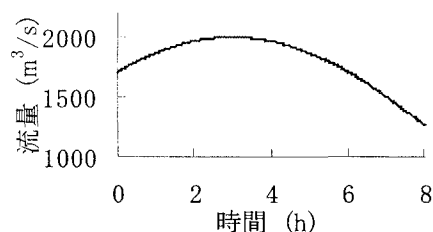
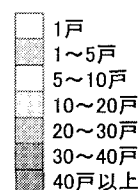


図-11 破堤箇所からの流入流量

表-2 計算条件

計算ケース	粗度係数	透過率
CASE1	建造物占有率により変化(表-2)	考慮する
CASE2	一定 (0.067)	考慮する
CASE3	建造物占有率により変化(表-2)	考慮しない
CASE4	一定(0.067)	考慮しない

図-8に示す。この図からも、東海豪雨で堤防越水により長時間浸水被害が生じた名古屋市中川区や南区など、海拔ゼロメートル地帯が広く分布しており、水害の危険性の周知や排水対策が重要であることが分かる。

都市域を考慮した氾濫解析のための建造物占有率、さらに被害予測を行うための戸数および地下室数などのデータについても、住宅地図データベース⁹⁾からGISを介して取得した。まず、対象領域内すべての建物アイテムの座標値、面積、戸数(全階、地上1階、地下ごと)を取得し、各格子における総和を算出した。地上1階の戸数を取得したのは、洪水時に直接被害を受けることを考慮したものである。図-9は全ての戸数についての分布図、図-10は建物の地下にある戸数についての分布図である。図-10から、地下空間は名古屋駅から栄にかけて多く分布していることが分かる。

被害予測に用いる人口データは、国勢調査小地域集計¹⁰⁾の単位区毎の総数および3区分(15歳未満、15~64歳、65歳以上)に関する年代別の夜間人口を各格子で算出した。これにより、危険地域の総人口はもちろん、高齢者や子供といった災害弱者のみの集計も可能である。

以上のように、所要データの作成にGISを導入したシステムの構築によって、多くの費用と時間を費やすことなく、容易にデータの収集および作成を行うことが可能となった。また、都市域を考慮した氾濫のモデル化やその解析結果として得られる詳細な被害予測の評価も可能

となった。ただし、地盤高に使用した数値地図50mメッシュ(標高)の値が1m単位であるなど、各数値情報の精度上の問題点を今後解決する必要があるといえる。

4. 都市域のモデル化の検討

作成したデータを用いて、庄内川左岸河口から10km地点が破堤したと想定して氾濫解析を行った。破堤箇所(幅100m)からの流入流量は図-11のように想定した。計算時間は8時間とした。なお、本研究では氾濫解析のシステム化が主な目的であるため、河川は解析の対象から除外し、堤防も無限に高い壁として取り扱った。

また、都市域のモデル化が解析結果に及ぼす影響を明らかにするため、表-2のように4通りの条件で計算を行った。計算結果として、各CASEの最大浸水深の分布を図-12に示す。これらの図は、各格子における浸水深と座標値が分かれば、GIS上でセル分割することにより、容易に表示することができる。また、一定時間毎の浸水深分布図を順に重ね合わせることでアニメーションにすることも可能である。

さらに、計算ケース毎に浸水面積の時間変化を図-13に示す。また、想定破堤箇所から1.7km離れた地下鉄中村公園駅(図-12, A地点)および4.4km地点にある名古屋駅(同B地点)の浸水深の時間変化を図-14, 15にそれぞれ示す。図-13~15から、透過率を考慮したCASE1、

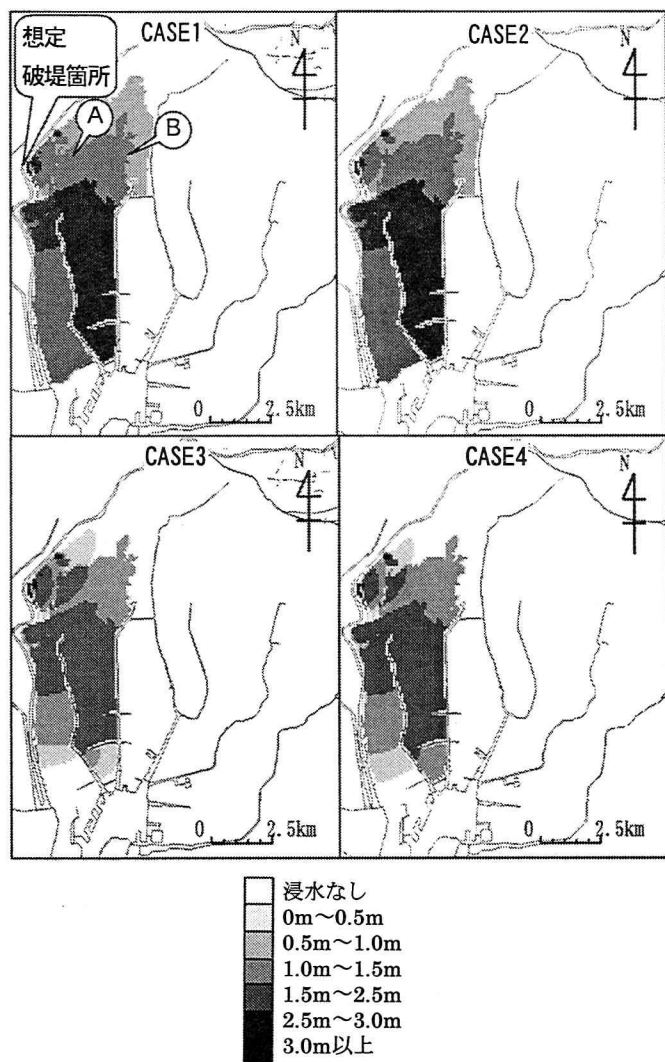


図-12 各CASEの最大浸水深分布図

CASE2の方が透過率を考慮しないCASE3, CASE4より浸水深は大きく、氾濫流の伝播速度も速くなることが分かる。これは、建造物により氾濫流の通過する面積が減少するために浸水深が大きくなり、流速が速くなったものと考えられる。しかし、実際には建造物が密集していると、氾濫水は阻害され伝播が遅くなるとも考えられる。また、床下浸水の程度ならば建造物を不透過として取り扱うことの妥当性はない訳ではないが、床上浸水となった場合には建造物の中にも大量の水が流れ込み、完全に不透過とすることは現象の再現上からも問題がある。今後、建造物の取り扱いについてはさらに検討が必要であるものと思われる。

次に、粗度係数の取り扱いによる解析結果の差異について考察を加える。図-13～15より、粗度係数を建造物占有率に応じて与えたCASE1, CASE3の場合、氾濫水の到達する時間は、粗度係数を一定値としたCASE2, CASE4より遅いことが分かる。これは、粗度係数を建造物占有率に応じて与えた場合の対象領域内の粗度係数平均値は0.083であり、一定とした場合の0.067より大きな数値であったことによるものと考えられる。しかし、浸水深は

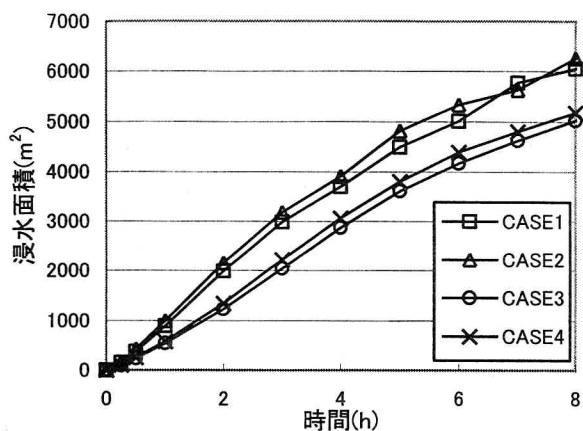


図-13 CASE別の浸水面積の時間変化

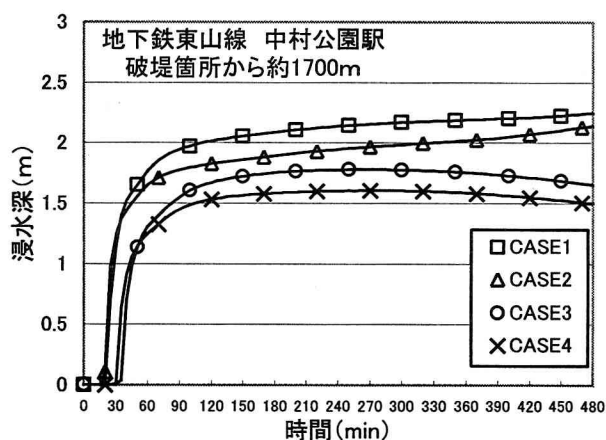


図-14 中村公園駅における浸水深の時間変化

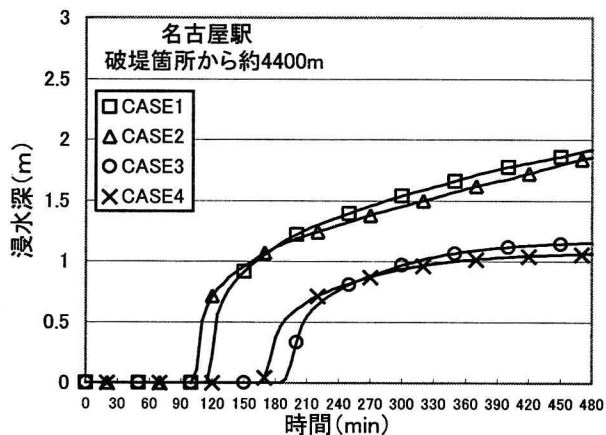


図-15 名古屋駅における浸水深の時間変化

伝播速度が遅いCASE1, CASE3の方が深くなる傾向が図-13～15より分かる。これは、粗度係数の増加に伴い、底面摩擦が増加するために伝播速度が遅くなり水深が上昇したものと考えられる。

本研究では、氾濫解析におけるGISの適用法について検討し、その一つの応用として名古屋市を対象に都市域のモデル化を試みた。構造物のモデル化は氾濫解析にお

ける一つの大きなテーマであり、ここでの比較計算だけで解決するわけではないが、粗度係数の違いにより伝播時間と浸水深に差が生じたことから、適切な粗度係数の設定が不可欠である。また、実際の構造物には水を通さない箇所が存在するため、透過率を用いたモデル化についてもより詳細に検討すべきである。これら両者のモデル化には、建物の占有率が重要となるため、その算出においてGISを用いた氾濫解析システムは有効であるといえる。

5. 解析結果の応用

図-16に浸水深50cm以上を床上浸水としたときの累計戸数、図-17に地上の浸水深が10cm以上で地下浸水が生じると仮定したときの地下浸水戸数、図-18に浸水域における被災人口の時間変化を示す。ここでは、CASE3の結果のみを示した。これらの図から床上浸水戸数や被災人口は時間に比例して増加する傾向にあるが、地下浸水戸数はある時間に急激に増加することが分かる。これは対象氾濫域において建物および人口が面的にほぼ一様に分布するものの、地下空間のある建物は名古屋駅周辺に集中し、氾濫水の到達によりその地区の地下浸水が急増するためと考えられる。図-17からは、破堤後2時間までに避難を確実に行うことが、地下浸水による人的被害を防ぐために必要であることが分かる。このようにGISを用いることで、被害ポテンシャルの高い大都市においても、容易に地下空間などの危険因子を抽出し解析結果を表示することが可能となり、実際的かつ有効で具体的な浸水対策や災害危険度の周知に役立つものと考えられる。

6. おわりに

本研究では市販の統計データとGISを用いることによって、氾濫解析のデータ作成にかかる時間と費用を大幅に削減する氾濫解析システムを開発した。また、この氾濫解析に限らず、デカルト座標系による様々な平面2次元解析に必要なデータを容易に作成できる汎用性の高いシステムが構築できるものと考えられる。さらに、建物や人口に関する情報も同様に作成することにより、都市域を考慮した氾濫のモデル化や詳細な被害状況の表示並びに評価が可能となった。

都市域の氾濫水の挙動を詳細に再現するなど今後の課題は数多く残されているものの、構築したシステムは簡便かつ実用的な氾濫解析および被害予測の方法として有用であると判断される。

参考文献

- 1) 岩佐義明・井上和也・水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，pp. 305～317，1980。
- 2) 中川 一：洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研

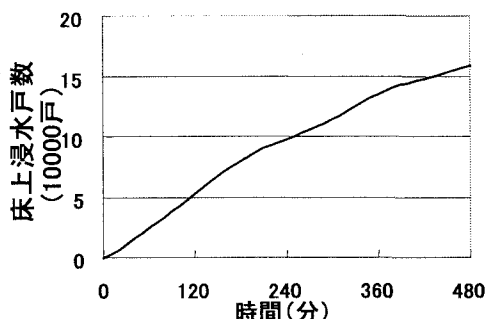


図-16 床上浸水戸数の時間変化 (CASE3)

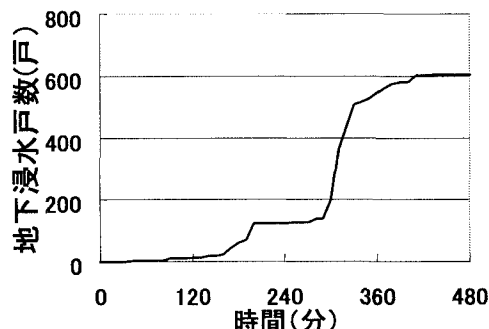


図-17 地下浸水戸数の時間変化 (CASE3)

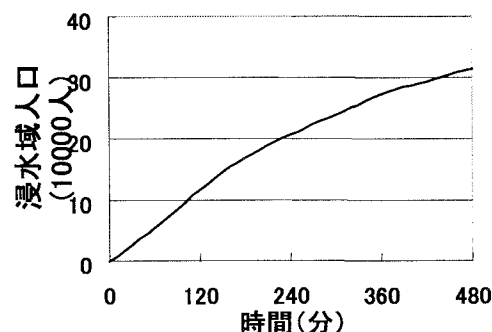


図-18 浸水域人口の時間変化 (CASE3)

究，京都大学博士論文，1989。

- 3) 福岡捷二・川島幹雄・松永宜夫・前内永敏：密集市街地の氾濫流に関する研究，土木学会論文集，No. 491/II-27，pp. 51-60，1994。
- 4) 川池健司：都市域の氾濫解析法の高度化とその応用に関する研究，京都大学修士論文，1999。
- 5) 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検討，水工学論文集，第44巻，pp. 467-472，2000。
- 6) 土木学会：水理公式集，丸善，p. 131，1999。
- 7) 国土地理院：数値地図2500愛知-1～7，1997。
- 8) 国土地理院：数値地図50mメッシュ(標高)日本-Ⅲ，1997。
- 9) (株)ゼンリン：住宅地図データベース(Zmap-TOWN II) '99名古屋，1999。
- 10) (財)統計情報研究開発センター：平成7年国勢調査 小地域統計 基本単位区別集計A 愛知県，1995。

(2000. 10. 2受付)