

高速演算性と精緻性を有する 浸水域予測計算システムの開発

DEVELOPMENT OF PREDICTION SYSTEM OF FLOODING WITH HIGH-SPEED AND ACCRACY

安田 浩保¹・白土 正美²・後藤 智明³・山田 正⁴

Hiroyasu YASUDA, Masami SHIRATO, Chiaki GOTO and Tadashi YAMADA

¹学生会員 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117)

²建設省関東地方建設局常陸工事事務所調査第1課長 (〒313-8555 茨城県常陸太田市木崎一町 700-1)

³正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117)

⁴正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8511 東京都文京区春日 1-13-27)

Accurate data of the ground elevations is required in the analysis of inundation flows. In order to represent accurate topography, we have to use fine grid. But the fine numerical grid increases in the number of the grids. So, high-speed calculation is difficult. In this paper, we developed the new approximation method of ground elevation, which is called "Adaptive grid for the topography". The method has flexible expression to approximate to the ground elevations, and decrease the number of the grids.

Next, we developed the application system for the calculation results. The system is used by geographic information system, provides the many functions. The functions are viewer of the calculation results, summing up the square of the flooded area and flooded house, and finding the route of refuge.

Key words: numerical forecast model, flood-inundation flows, Geographic Information System, adaptive grid for the topography

1. はじめに

我が国の都市部の多くは沖積平野に存在するため、洪水氾濫による甚大な被害を受ける危険性に絶えず晒されており、特にここ数年、各地で洪水氾濫による被害が頻発している。

洪水氾濫による被害を防御あるいは最小限に抑制するために、築堤などのハード的な洪水防御対策が進められているが、いまだ十分とは言えない。それらの対策を補完するために近年では、洪水氾濫が発生した場合でも被害を最小限にとどめられるように、ソフト的な対策を同時に進めるケースが増えているようである。その一例として洪水ハザードマップの作成があり、これは平常時より流域住民の水害意識を啓発することと災害時の円滑な避難・水防活動支援を目的としている。これらの災害ポテンシャルを把握するための資料作成には、数値シミュレーションを用いた洪水氾濫現象の挙動解析に関するこれまでの研究成果などが利用される。

既往研究は精緻性に着目した例が多く、前述のように利用されることが多い。しかし、洪水時に浸水域予測を行うことを目的とした実用性や即時性を重視する計算モデルの開

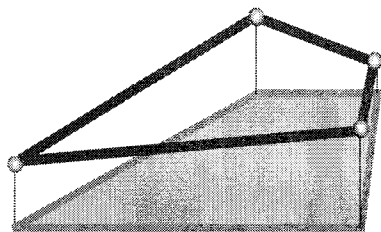
発は、著者らが知る限りほとんど行われていないようである。このようなモデルでは、洪水予警報の発令と同時に確度の高い予測情報の下で予測計算が行え、被害低減に関する種々の対策に資すると考えられる。そこで、著者らは洪水時に浸水域予測計算が可能な実用性に着目したすなわち高速演算性、精緻性をともに有する計算モデルの開発を行ってきた¹⁾。

著者らが提案するモデルでは、適切な境界条件や細分化された計算格子を設定することで、高速演算性、精緻性を両立した計算を可能とした。しかしながら、より精度の良い氾濫流の伝播予測を行うためには、

- ① 地形形状の近似方法
- ② 線状境界の考慮
- ③ 用排水路網の考慮

の3つの課題について解決策を検討する必要性があった。本研究では、これらの課題のうち地形近似の方法と線状境界の考慮の方法について次のように考えた。

地形形状の近似度は、氾濫流の伝播予測を行う場合、計算精度に大きく影響する。このため、解析対象となる地形の特徴を適切に考慮できるような十分に細分化された計算格子を用いることが望ましい。しかし、一般に高密度な標高情



■ ;格子内の地盤平均標高
○ ;線状境界標高

図-1 地形適合格子の標高データ構造

報の入手が困難なこと,あるいは緻密な標高情報を利用した計算格子の構築が可能であっても計算時間や計算機容量の都合などで,必ずしも計算対象に対して適切な計算格子が用いられるとは限らない。これら制約条件のもとで,前述モデルでは計算格子の間隔を既往研究や業務などで用いられてきた数百メートルより細分化することにより,地形形状の近似度の向上を試みた。

しかし,上述のような矩形格子では,解析上無視することの出来ない微細な地形形状を考慮する場合,対象領域全体の格子長はその微細な地形形状が考慮可能な格子長に束縛されることとなる。その結果,計算格子数が膨大となるため,高速演算は困難となる。このように,矩形格子では複雑な地形形状の近似を効率的でかつ精度良く行うことは難しい。これらの理由から,精度の良い浸水域の予測計算を行うためには,地形形状の有効な近似方法について検討が必要である。

これら氾濫流伝播の予測計算における地形近似の問題を解決するために本研究では,“地形適合格子”を導入した。地形適合格子は,従来までの矩形の一樣格子と異なり,地形形状に合わせて自由に計算格子の構成を可能とする新しい離散手法である。地形適合格子のデータ構造は図-1に示すように,標高値を格子辺で囲まれた範囲(以下セルと呼ぶ)の代表標高と,各格子頂点では道路や盛土などの線状境界の標高値をそれぞれ保持できるように定義した。これにより洪水氾濫の伝播に影響を及ぼすと考えられる道路・アゼなどの線状境界を格子辺に考慮できる。

地形適合格子による地形形状の離散化では,対象領域内に耕作地や市街地など異なる土地利用が混在している場合でも,それぞれに適切な形状の計算格子を適用することが可能である。言い換えれば,耕作地などの無境界でかつ標高変化の小さい地形にはある程度大きな格子を適用し,市街地などのように複雑な地形区分がなされている場合では小さな格子を適用できるということである。このように同じ計算領域内において異なる格子長および形状による格子分割が可能であるということは,地形形状の近似度を格段に向上させるだけでなく,ある程度細分化された矩形格子を用いた場合よりも効率的な格子分割となり,格子数を大幅に減少させられることを意味する。そして,この格子数の減少は計算時間の短縮に大きく寄与する。

つぎに,河川水位が護岸高に及ばないにもかかわらず,用排水路網が氾濫水の伝播媒体となり浸水被害を引き起こすことがあると考え,本研究では,用排水路網を高速演算に適合した計算方法により考慮した。前述モデルでは,用排水路網が考慮されていないことから,用排水路網の影響を大きく受ける領域では,痕跡記録に比べ計算結果が過小に評価される傾向にあった。

また,本研究では,モデル妥当性の検討のために前述までの計算モデルを実流域へ適用した。そして最後に,GISを用いたシステム化を行い,計算モデルから得られる予測計算結果の高度利活用に関する検討を行った。

2. 数値モデル

(1) 河川流計算

河川水位の予測計算を精度良く行う場合,不定流モデルが用いられることが多い。著者らは不定流,不等流いずれのモデルを用いた場合でも,洪水氾濫に関わる高水位帯の計算では,その計算結果の差異は小さいことを示した¹⁾。

これに従い,本研究では式(1)に示す不等流モデルを適用し,その計算時間の間隔は1時間とした。

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + g \frac{\partial \eta}{\partial s} = - \frac{gn^2 |u|}{R^{4/3}} \quad (1)$$

ここに, η : 水位(m), s : 河川縦断方向の水平座標(m), u : 河道平均流速(m/s), g : 重力加速度(m/s²), n : Manningの粗度係数(m^{-1/3}s), R : 径深(m)である。

(2) 氾濫流計算

本研究では,式(2)～(4)で記述される線型長波理論によって氾濫流の伝播予測を行った。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = - \frac{gn^2 |M|}{h^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} = - \frac{gn^2 |N|}{h^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} \quad (4)$$

ここに, η : 水位(m), t : 時間(s), x, y : 空間座標(m), h : 水深(m), M, N : x, y 方向の流量フラックス(m²/s), g : 重力加速度(m/s²), n : Manning(m^{-1/3}s)の粗度係数である。

既往研究では,線形長波理論に移流項を加えた非線形長波理論(浅水理論)を適用した例が多い。しかし,対象地形の勾配が緩やか場合や,氾濫流の到達時間を厳密に議論しない場合,そして,緩慢な挙動を示し波高水深比が小さいと推測される氾濫流の解析においては,移流項が計算結果におよぼす影響は大きくないと考えられることから,本研究では線型長波理論を適用した。

また,移流項を無視することで計算時間を短縮することが可能となり,本研究の目的の一つである高速演算性を満た

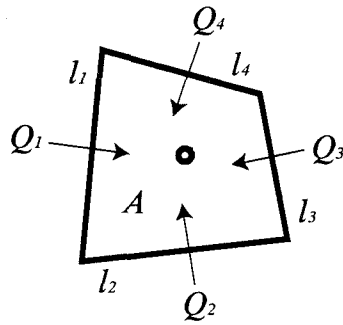


図-2 連続式の変数定義

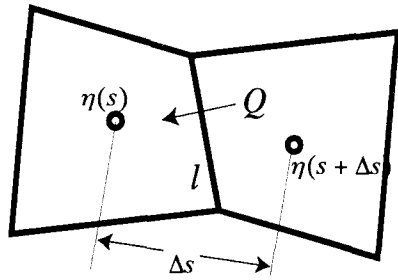


図-3 運動式の変数定義

す。ここで、線型長波理論を本研究で提案する”地形適合格子”に適用が可能なように式(2)～(4)を拡張する。

まず、連続の式は、隣接セルおよびセル内の排水路との流入流出の総和は水位の時間的変化が等しいと考え、式(5)のように記述する。ただし、ここでは流入を正值と定義する。そして、運動の式は、式(6)と記述できる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{1}{A} \left[\sum_{i=1}^n \Lambda_i \cdot l_i \right] = -\frac{1}{A} \left[\sum_{i=1}^n Q_i \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + ghl \frac{\partial \eta}{\partial s} = -\frac{gn^2 |Q| Q}{h^{7/3} l} \quad (6)$$

ここに、 η : 水位(m)、 t : 時間(s)、 A : セル面積(m^2)、 Λ : 隣接セルからの流出流量フラックス(m^2/s)、 l : セル辺長(m)、 Q : 隣接セルからの流出流量(m^3/s)、 s : 空間座標(隣接セルの重心間距離)(m)、 h : 水深(m)、 g : 重力加速度(m/s^2)、 n : Manningの粗度係数($m^{-1/3}s$)である。

本研究では、式(5)、(6)の差分式を下記の式(7)～(9)の通りとした。差分スキームには Leap-Frog 法を用いたが、運動式に含まれる摩擦項(式(9))については、計算の安定性を考慮し陰的に解いた。

$$\eta_i^{K+1/2} = \eta_i^{K-1/2} - \frac{\Delta t}{A_i} \left[\sum_{j=1}^n \Lambda_{i,j+1/2}^K \cdot l_{i,j+1/2}^K \right] \quad (7)$$

$$Q_{i+1/2}^{K+1} = \left\{ Q_{i+1/2}^K (1 - fr) - gh^K l_{i+1/2} \frac{\Delta t}{\Delta s} \left[\eta_{i+1}^{K+1/2} - \eta_i^{K+1/2} \right] \right\} / (1 + fr) \quad (8)$$

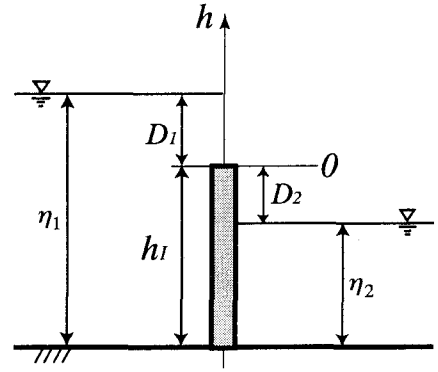


図-4 線状境界の取り扱い方法

表-1 線状境界の越流条件

	$D_2 > 0$	$D_2 < 0$
$D_1 > 0$	$h = \frac{(D_1 + D_2)}{2}$	$h = \eta_1$
$D_1 < 0$	$h = \eta_2$	$Q = 0$

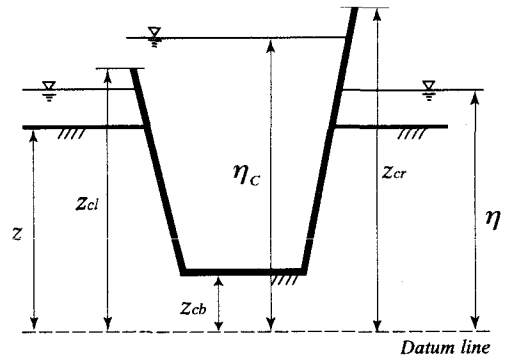


図-5 水路断面の高さ関連図

$$fr = \frac{1}{2} \frac{gn^2 |Q_{i+1/2}^{K+1}|}{(h^{7/3})_{i+1/2}^K \cdot l_{i+1/2}^K} \Delta t \quad (9)$$

ここに、 Δt : 時間差分間隔、 Δs : 空間差分間隔である。

なお、道路などの線状境界は、それを挟むセル重心で規定される水位と線状境界の高さ関係を図-4、表-1のように考え、式(8)中でその効果を考慮した。

(3) 排水路網計算

高橋らによる等流の式と越流式を組み合わせた排水路考慮の洪水氾濫解析を行った例²⁾もあるが、本研究では以下に示す計算法により排水路網の影響を考慮した。

洪水現象は数十時間に及ぶ長周期現象であり、1時間単位程度の短時間では中小河川を除けば、その水位の時間的変化量は小さいと考えられる。そして、排水路網は河川接続点より河川水位の影響を受け、洪水時に水門・樋門などによる河川水の遮断対策を行わない限り、排水路網は氾

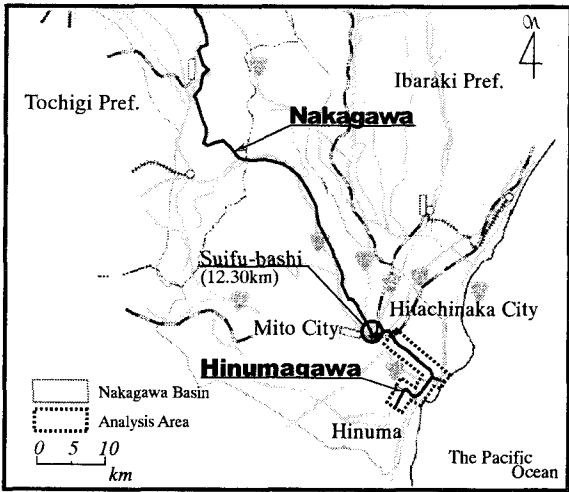


図-6 流域図

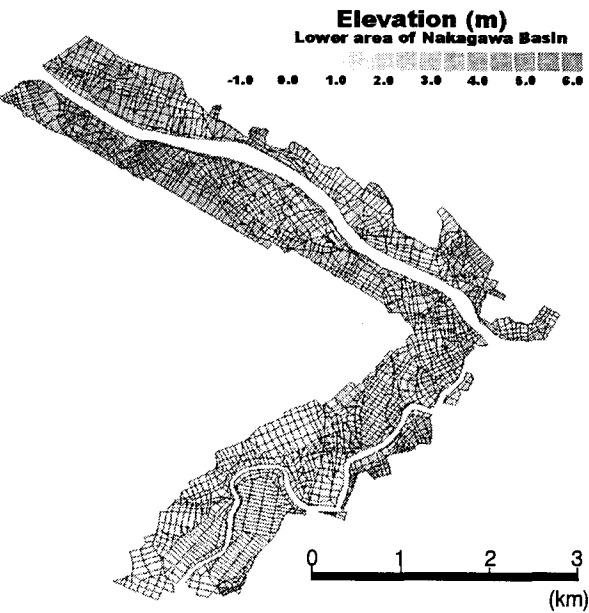


図-7 格子構成図(標高表示)

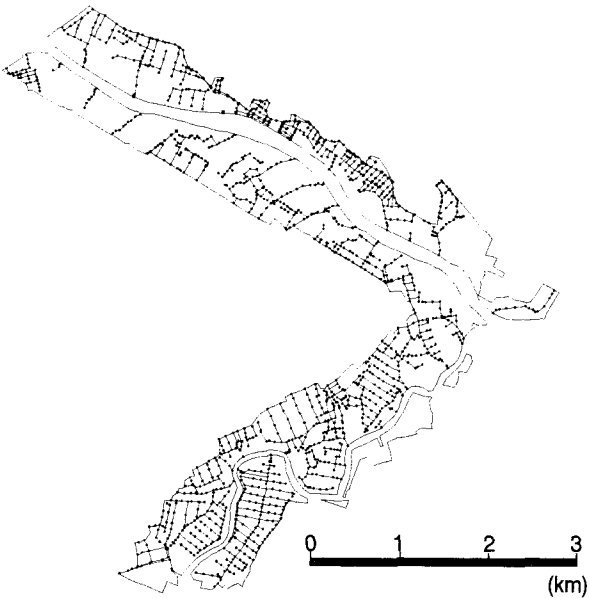


図-8 排水路網図

表-2 格子辺の属性分類

種別名称	説明
データ境界	計算領域の境界.
河川境界	氾濫原と河川の接する線分.
非線状境界	格子分割上の都合上発生した実地形とは関係のない線分.
線状境界	アゼや盛土など氾濫水を遮蔽する可能性がある線状境界.
道路	県道クラス以下の道路.
幹線道路	県道クラス以上の道路.

氾濫水の伝播媒体となり、堤内地は浸水被害を被る。本研究ではこれらの挙動を、河川水位と排水路水位は連動していると仮定した。すなわち排水路水位(η_c)が水路護岸高(Z_d , Z_σ)のいずれかより大きく、かつ排水路水位(η_c)がセル水位(η)より大きい場合、セル水位(η)と排水路水位(η_c)が一致し排水路網の影響がセルに及ぶと考え、この条件が成立する場合に式(11)により用排水路網の影響を考慮した。

$$\eta_i^{K+1/2} = \eta_{c,i}^{K-1/2} + \frac{\Delta t}{A_i} \left[\sum_{k=1}^K \Lambda_{i,i+1/2}^k \cdot l_{i,i+1/2}^k \right] \quad (11)$$

ここに、 η_c :水路水位(m)を表す。また、水路断面とその断面を包含するセルとの高さ関係を図-5のように定義した。ただし、セル水位(η)が水路護岸高(Z_d , Z_σ)の何れかより大きい場合のセルから排水路への流入は、最大浸水域予測への影響は小さいと考え無視した。

3. 実流域への適用

(1) 適用流域の概要

前章で提案した計算モデルを、図-6に示す栃木県北西部に源流を発し茨城県大洗町より太平洋に注ぐ那珂川河口部から10kmとその支川である潤沼川(那珂川の河口部から0.5km付近で合流)の河口部から8.0kmに適用した。この流域は近年では、1986年、1998年、1999年と洪水に見舞われており、その際の洪水痕跡記録などを再現計算の検証資料とした。図-7は対象領域に地形適合格子を利用し離散化したものである。この格子には、予測計算やその他の目的で利用が可能(例えば4(3)参照)のように表-2に示すとおり格子辺に種別分類のための属性が与えられている。格子数は、著者らが既往報告¹⁾において50m直交格子で那珂川本川流域の計算格子を作成した場合と比べ、約80%もの減少となった。

図-8は、計算に考慮した水路幅30cm以上の排水路網図である。本計算で考慮した断面総数は1478断面である。

(2) 河川流計算

河道データには、500m間隔で取得される定期横断データを内挿分割して利用した。また、粗度係数は、計画粗度係数を利用し、既往洪水の河岸痕跡が再現可能なように試行

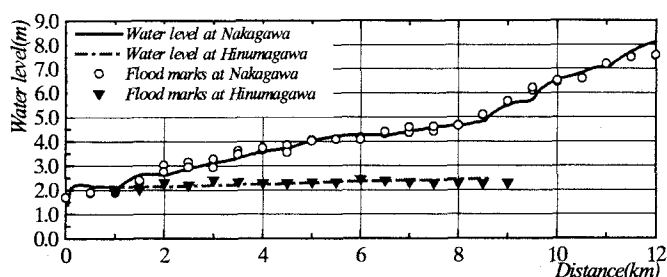


図-9 再現計算結果(1986 洪水)

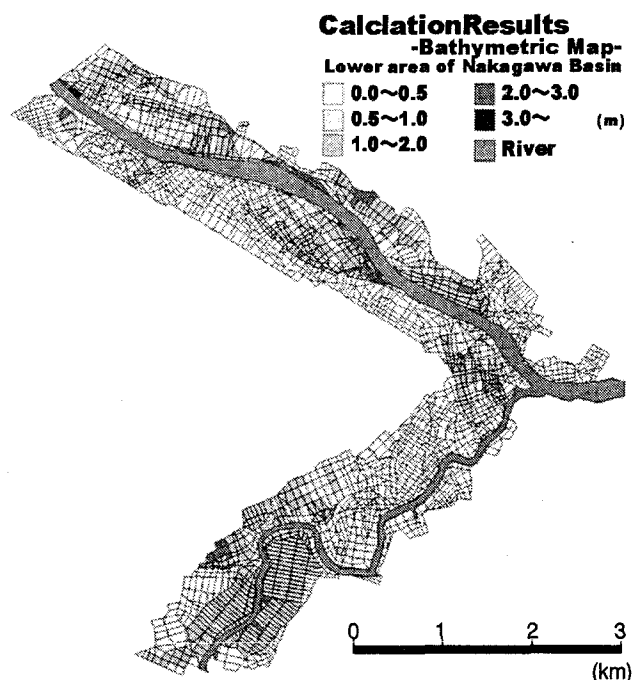


図-10 計算結果(浸水深分布図-1986 洪水-)

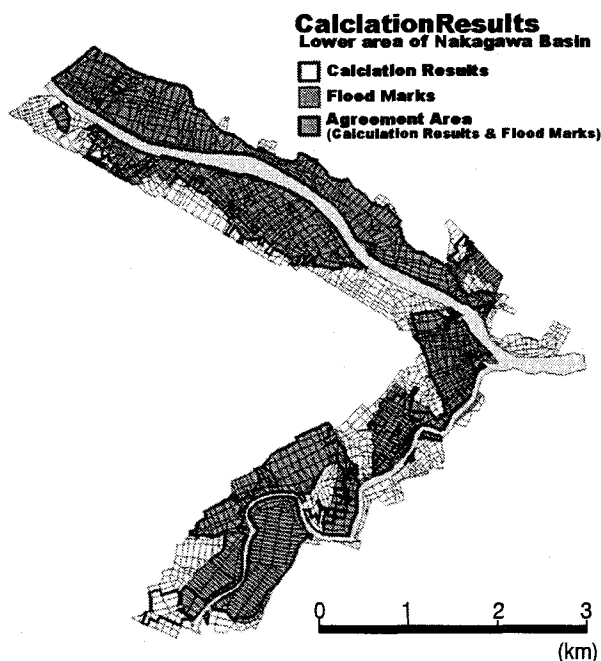


図-11 計算結果(洪水痕跡・計算値の比較-1986 洪水-)

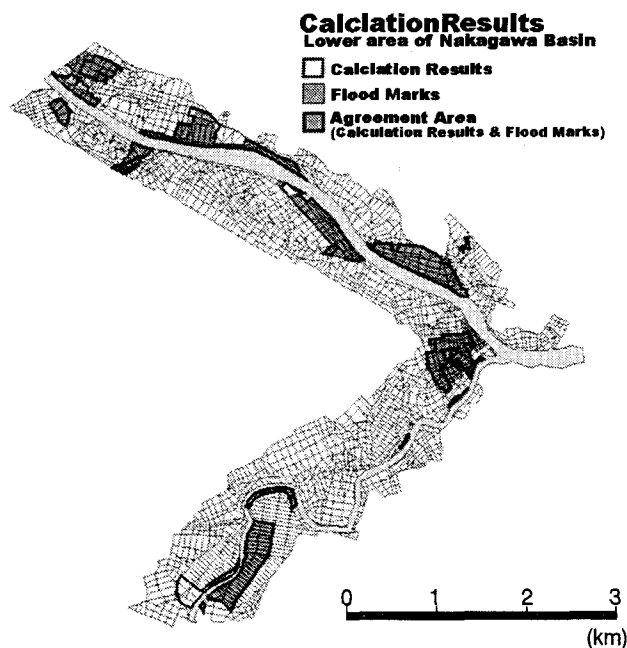


図-12 計算結果(洪水痕跡・計算値の比較-1998 洪水-)

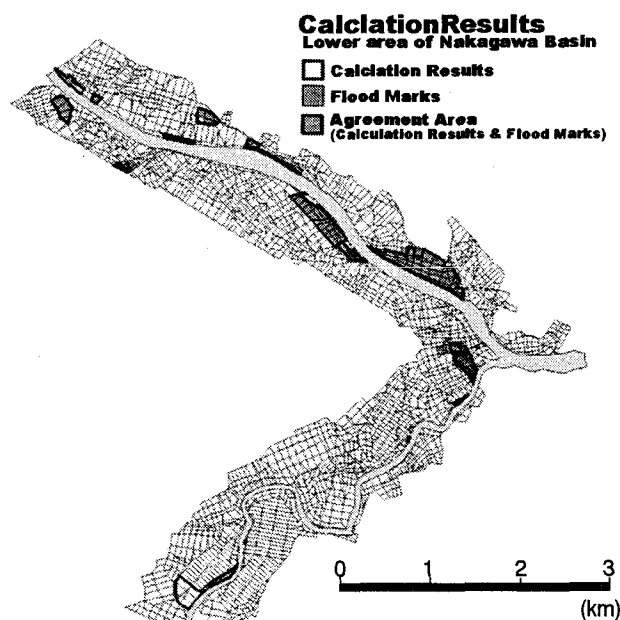


図-13 計算結果(洪水痕跡・計算値の比較 1999 洪水-)

錯誤のうえ、9.5～12.0km 断面で計画値より若干大きな粗度係数を設定した。また、著者ら¹⁾の示した下流端境界条件の設定法により、洪水時河口部における密度差による水位上昇現象を考慮した。図-9 は、1986 年洪水の河岸痕跡と計算結果の比較図である。

(3) 氾濫流計算

前述した既往 3 洪水(1986 年、1998 年、1999 年)に対して再現計算を行った。図-11～13 は 1986 年、1998 年、1999 年洪水の再現計算と洪水痕跡との比較図である。いずれの規模の洪水に対しても全域においてかなり精度良く

表-3 計算時間

	洪水継続時間 (Hour)	CPU 時間 (Sec)
1986 年洪水	39	36
1998 年洪水	107	65
1999 年洪水	37	20

■利用計算機 CPU; PentiumIII850MHz, RAM; 512MB, OS; WindowsNT4.0 SP5

一致していると言える。すなわち十分な精度で予測計算も可能であると思われる。一部、痕跡値では浸水域となっているものの予測計算では非浸水域となることがあった。これは特に 1986 年洪水の再現計算でみられたもので、地形変化が大きな原因と考えられる。

なお、再現計算を行った既往 3 洪水が要した CPU 時間は、表-3 に示す通りである。

4. GIS を利用した表示・集計システム

(1) 予測結果の表示機能

予測計算の終了と同時に予測結果の閲覧を可能とする表示機能を備えた。この機能では、最大浸水域の表示と、1時間刻み(氾濫流の伝播速度は緩やかであることから表示間隔を決定)で予測結果を表示することが可能である。

(2) 集計機能

現在表示中の浸水域の総面積と、この浸水域に含まれる浸水建物の戸数集計機能を備えた。このうち、浸水建物の戸数集計機能は、本システムで利用の背景図(河川基盤地図 1/2,500 準拠デジタルマップデータ)が地物単位にデータを格納していることを利用したものである。これら建物情報に一戸ごとの床高さ情報を付加する加工を行えば、それぞれの建物の浸水状況(床上/床下/浸水なし)を加味した集計を行うことも可能である。

(3) 避難経路の検索

予測計算で得られる浸水域を回避した避難経路検索とその経路距離の算出を行う機能を備えた。図-14 はその経路検索例であり、図中の太線が検索結果、中太線が避難経路に利用可能な道路である。

この機能に利用した道路ネットワークデータは、表-2 に示した属性のうち幹線道路と道路に属する線分より構築した。このデータは道路の規模による分類がなされているため、それを考慮したより高度な経路検索を行うことも可能である。

5. おわりに

本研究で提案する数値モデルを那珂川下流域に適用し、既往 3 洪水に対して再現計算を行った。その結果、いずれ

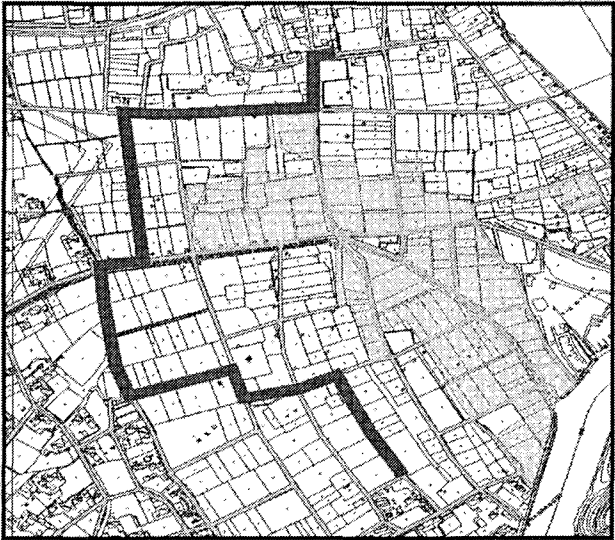


図-14 避難経路の検索例

の規模の洪水の最大浸水域到達線に関しても精度良く再現され、本研究の目的である高速性と精緻性は満足することができたと考えている。現在のところ浸水域に関する記録は、建設省が行う洪水痕跡調査により取得される最大浸水域区域図のみのため、防災計画の策定上で重要となる洪水の到達時間や浸水深についての現地スケールでの検証資料は存在せず、その真値は不明である。今後、氾濫原浸水深データ、洪水到達時間データが取得されることがあれば、これらを検証資料として現モデルにおける問題点の抽出を行い、それらを改善したより高精度な予測モデルの開発を行いたいと考えている。

また、道路などの線状境界を本研究では、格子边上に考慮した。しかし、ひとたび氾濫水が堤内地に侵入してくれば、道路は流路と化し、氾濫水の伝播媒体としての役割を担うことになる。本研究のような最大浸水域の予測を目的とする場合では大きな問題とならないが、氾濫水の到達時間などの詳細な議論を行う場合では、ある程度の幅員の道路は、計算格子として考慮する必要があると考えている。このほか、密集市街地に本モデルを適用する場合では、下水道網の考慮も不可欠であると考えている。

謝辞:対象流域の空間データ作成にあたっては、国際航業(株)空間情報事業部に多大な協力を頂いた。また、東海大学大学院 深澤雅人君、井上直行君には尽力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

1) 安田 浩保, 後藤 智明, 山田 正;那珂川下流域を対象とした高速洪水氾濫予測モデルの開発, 河川技術に関する論文集,第 6 巻,pp309-314, 2000
2) 高橋 保, 中川 一, 笥 崇弘;排水路網を考慮した洪水氾濫解析, 京都大学防災研究所年報, 第 31 号, B-2, 1988
3) 建設省関東地方建設局常陸工事事務所;平成 10 年度 8 月洪水出水検討業務報告書, 1998

(2000.10.2 受付)