

那珂川下流部を対象とした 高速洪水氾濫予測モデルの開発

DEVELOPMENT OF HIGH SPEED CALCULATION FORECAST MODEL OF
FLOOD-INUNDATION FLOWS FOR LOWER AREA OF NAKAGAWA BASIN

安田 浩保¹・後藤 智明²・山田 正³

Hiroyasu YASUDA, 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 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)

³ 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)

Numerical forecast model of flood-inundation flows usually composes the analysis model of flood flows and the analysis model of inundation flows. That analysis models is often used by high approximate equations, and the calculation time is comparatively long. As calculation mesh of the inundation flows model is not enough to approximate ground elevations, Computation accuracy is fell.

In this paper, we developed the practicable forecast model of flood inundation flows, the model is keeping the computation accuracy and possible to high speed calculation. In the first, model equations of flood flows and inundation flows was selected by theoretical consideration. In the second, calculation mesh of the inundation flows model divided five compared with conventional mesh interval. In the third, flood flows analysis model is included effects density at river mouth.

Key words: Numerical forecast model, Flood-inundation flows

1. はじめに

これまで洪水氾濫流に関する多くの研究が行われ、解析あるいは予測モデルがいくつか提案されている。それらのモデルのほとんどは、河川流解析モデルと氾濫流解析モデルから構成されている。岩佐ら²⁾は、河川流解析モデルに1次元の不定流モデル、氾濫流解析モデルに直交座標系の2次元非線形長波を適用し、氾濫原を250m程度の計算格子により近似し、さらに氾濫水の挙動に影響を与えると考えられる排水路や道路の線状構造物を考慮した計算を行った。福岡ら³⁾は、家屋群から流れが受ける流体力を考慮した上で市街地の複雑な道路網と地物配置を精度良く近似する一般曲線座標系の非線形長波理論を適用した密集市街地の洪水氾濫解析モデルを提案した。栗城ら⁴⁾は、予測結果の活用目的に相応しいモデル式や計算格子長の選定方法を整理し、建物密度の粗度係数への反映方法について述べた。

また、洪水氾濫解析では氾濫原の計算格子は250m程度に近似²⁾³⁾されることが多い。この程度の格子間隔による予測計算では地形近似の精度が十分でないことが要因となり、解析精度が低下する。

前述までの研究例による解析モデルは、高近似方程式を

適用した精度の良い予測モデルの構築を目的としている。これらモデル式の解は、有限差分法や有限要素法などの数値解法により求めることとなるが、演算時間は電子計算機の容量や処理能力が発達した今日においても洪水時に浸水域の予測計算を数分で行えるとは考え難い。このため計算結果の用途は、数ケースの想定洪水に対し予測計算を行いその洪水による対象流域の氾濫状況の傾向を把握するだけに留まざるを得ないと考えられる。言い換えれば、既往の研究は、モデルの精緻性やパラメータ設定法の一般性を求めたものが多く、高速演算という実用性に着目した予測モデルの研究は少ないと言える。精緻性モデルによる解析・予測結果が洪水ハザードマップや防災計画などに反映されることは治水対策のソフト面において大変有意義であるが、一方、即時性モデルによる解析・予測結果もまた実洪水時においては水防活動や避難活動上極めて有効な情報源となり得る。

そこで著者らは、パーソナルコンピュータを利用した場合でも予測精度を犠牲にすることなく数十秒～数分の高速演算が可能で、最大浸水域の即時予測に着目した予測モデルの構築を行った。高速演算が可能のように河川流解析モデル、氾濫流解析モデルに対してそれぞれ理論的な検討

を行いモデル式を選定した。また、精度の良い予測が可能
なように適切な境界条件の設定と、氾濫原の格子長を従来の
の研究で設定されているよりも細分化した。

2. 解析対象範囲と代表洪水

本研究では、河口より 10km ポスト付近までの那珂川下流
域を解析対象範囲とした。那珂川は、源流を栃木県的那須
岳山中に発し、茨城県大洗町より太平洋に注ぐ、全長
150km、流域面積 3,270km²、主な支川に涸沼川、桜川、藤
井川、箒川、荒川、余笹川などを有する一級河川である。解
析対象範囲のうち河口から 9km 付近までの区間は現在築
堤計画が進められているものの無堤区間である。なお、本
研究では涸沼川や桜川などの支川は考慮していない。

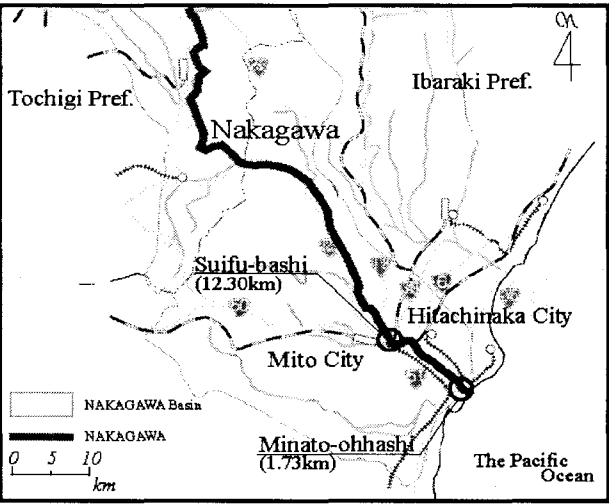


Fig.1 Lower area of NAKAGAWA basin

近年の大規模洪水としては、1986 年 8 月 4 日から 6 日に
かけて発生した事例があり、那珂川流域に未曾有の被害を
もたす洪水となった。この洪水では河口より 12.3km 付近に
位置する水府橋が 9.13m の観測史上最高水位を記録し、
浸水面積は 41.17km² におよび茨城県内を中心に那珂川全
流域で甚大な被害を受けた。その他の代表洪水とその被害
については、Table.1 の通りである。

Table.1 Recorded flood of NAKAGAWA

	Jul.,1961	Sep.,1982	Aug.,1986	Aug.,1998	Aug.,1999
Flooded Area (km ²)	—	—	41.17	17.26	9.87
Precipitation (mm/2days)	(309)	160	247	432	—
Death toll	(12)	—	—	—	—
Missing	—	—	—	—	—
Flooded Houses	(1754)	210	3,580	1,072	130

3. 河川流解析モデル

(1) 支配方程式

本研究では即時性の高い洪水氾濫の予測モデルの開発
を目的としているから、河川流解析モデルとして高速演算
が可能なモデル式を適用する必要があり、その候補として

不定流モデルと不等流モデルのいずれかが考えられる。そ
れぞれのモデルの計算上の特性について概観する。

一般に洪水流下の解析^{2),3),4),7)}に対して 1 次元あるいは
2 次元の不定流モデルが採用されることが多い。しかし、不
定流モデルは時間発展型の方程式で、安定した計算を行う
ためには計算時間間隔 Δt に関する制約条件に拘束され、
高速演算を行うことは難しい。また、下流端において洪水波
の自由透過の条件などを考慮しなければならないため、後
述(3. (6) 節)の流量の増加、と海水との密度差に伴う河口
水位の上昇効果を計算に組み入れるのが難しい。

一方、不等流モデルは不定流モデルから非定常効果を
無視したモデルと考えられるから、任意時間ピッチの分割
計算と線形内挿計算を組み合わせた高速演算が可能であ
る。また、流量の増加に伴う河口水位の上昇効果を定式化
により計算に精度良く考慮することができるため、十分な精
度を有する解析が可能である。

ここで、不定流モデルを不等流モデルと波動成分から成
ると便宜的に仮定し、波動成分の大きさから不等流計算の
近似的な誤差を検討した。

まず、後出の Fig.3 に示すように洪水波形の時間的な変
化はつり鐘型を成し、下記のガウス分布関数で近似できる。

$$H(t) = H_p \exp \left\{ -\frac{(t - t_p)^2}{2\sigma^2} \right\} \tag{1}$$

ここに $H_p(m)$:洪水ピーク水位、 t :時間座標、 $t_p(m)$:洪水
ピークの出現時刻、 $H(t)$:河川水位(m)、である。従って、波
動成分による水位差 ΔH がすなわち不等流モデルによって
考慮できない水位は、

$$\Delta H = \frac{dH}{dx} l = \frac{1}{\sqrt{gh}} \frac{dH}{dt} l = -\frac{(t - t_p)}{\sigma^2 \sqrt{gh}} H_p \exp \left\{ -\frac{(t - t_p)^2}{2\sigma^2} \right\} l \tag{2}$$

で表される。ここに ΔH は波動成分による水位(m)、 dH/dx
は水位勾配、 l は対象区間(m)である。

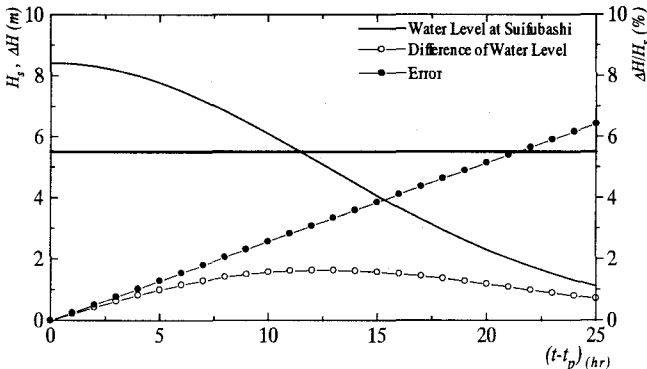


Fig.2 Accuracy of Non-uniform flow model

Fig.2 に式(2)で表される、水府橋における種々の水位出
現時における水位差および誤差すなわち不等流モデルの
精度を示した。この図から、水府橋水位(図中 H_s)が高いと
きは水位差(誤差)が小さく、水府橋水位が小さいときに水
位差(誤差)が大きくなることが読みとれる。那珂川下流域に
氾濫現象が起こるのは、水府橋水位が約 5.5m を越える範

用である。従って、氾濫に影響を及ぼすという観点から判断すると、不等流モデルと不定流モデルの平均的な差違は、最大に見積もった場合でも水位差 $0.023m$ 、誤差 0.4% 程度であると推定できる。つまり、Fig.2 から、洪水の氾濫域や氾濫浸水深を規定するピーク水位付近は、水位差・誤差共に無視できる程度に小さいと言える。

そこで本研究では河川流解析モデルに、高速演算に適している上、比較的短い解析区間においては十分な解析精度を得られることが確認された不等流モデルを採用する。基礎式は、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} = - \frac{gn^2 Q |Q|}{R^{3/4} A} \quad (3)$$

である。ここに、 x : 河川縦断方向の水平座標(m)、 Q : 河川流量(m^3/s)、 η : 河川不等流水位(m)、 n : Manning の粗度係数($m^{1/3}s$)、 R : 径深(m)、 g : 重力加速度(m/s^2)である。

(2) 境界条件

実用性の高いモデルとするためには、初期条件が簡便でかつ適切に与えられる必要がある。不等流モデルの境界条件として、上流端境界条件には、洪水時に水位予測が行われていることから水府橋水位を与えることにした。初期条件として水位ハイドログラフを与える作業は煩雑にであるから、予測計算を行う想定洪水の任意ピーク水位とその時刻から水位経時変化が推定される形式が相応しい。そこで、ピーク水位と洪水波形の経時変化の関係を明かし、水府橋におけるハイドログラフの相似則を3. (3)節において規定する。

また、下流端境界条件には、解析対象日時を与えることで推算が可能な潮位を与え、後述の3. (6)節に示す流量の増加に伴う水位上昇効果を経験的に付け加えた。

(3) 水位ハイドログラフの相似則

水府橋の水位観測記録の中から顕著な洪水 5 例を用いて水位経時変化の特性を調べた。Fig.3 にピーク水位前後に欠測がない 6 洪水の水位経時変化を示す。

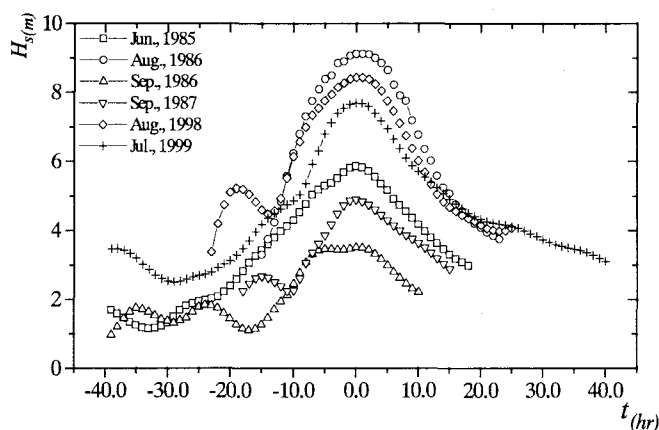


Fig.3 Water level in the past floods at Suifu-bashi

1998 年 8 月洪水は双峰性のピーク特性があり特殊であ

るが、この洪水波形の第 1 峰を含め 5 種類の洪水波形は、ガウス分布に近い形状をなしていることが分かる。そこで、洪水と関連のが考えられるピーク水位の $3/4$ 水位の出現時間間隔を調べ、その結果を図化したものが Fig.4 である。

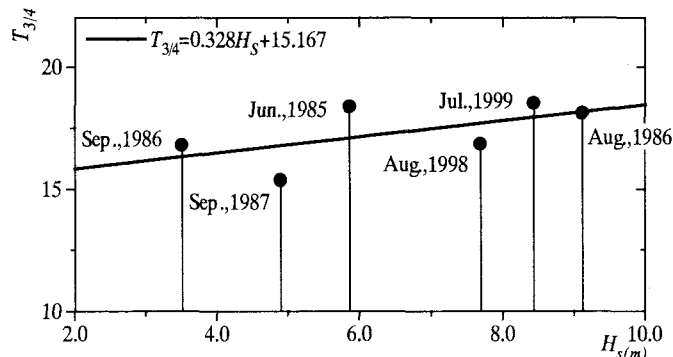


Fig.4 The relationship between water level and duration for water level of $3/4$ Peak

すなわち $3/4$ 水位時間間隔は、ピーク水位と良好な相関があり、

$$T_{3/4} = 0.328H_s + 15.12 \quad (4)$$

なる関係で表される。ここに、 $T_{3/4}$: $3/4$ ピーク水位時間間隔(hr)、 H_s : 水府橋ピーク水位(m)である。従って、水府橋の水位ハイドログラフ(水位経時変化)は式(1)のガウス分布関数で表されると仮定すると、 $3/4$ ピーク水位時間間隔と時間的な変化量を表すパラメータ $T_{3/4}$ の間に、

$$\sigma = 0.659T_{3/4} \quad (5)$$

の関係があることがわかる。前述のガウス分布関数により規定された相似則を用いて表された水位ハイドログラフと水府橋の観測水位値を比較したものが Fig.5 である。水位が低い部分で差違は大きくなるが、洪水氾濫で重要なピーク前後では良好な精度で推定値と観測値が一致することがわかる。

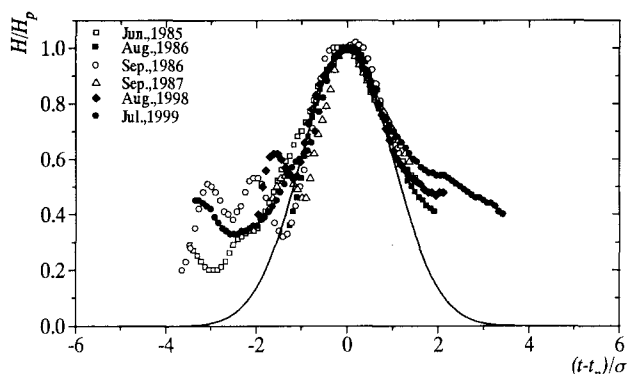


Fig.5 The similarity law of water level at Suifu-bashi

(4) 河道内粗度分布

1986 年 8 月洪水、1998 年 8 月洪水の 2 例を利用して、これらの洪水が適切に再現できるように試行錯誤を繰り返して河道内の粗度分布を Fig.6 に示すとおり定めた。ただし、建設省の計画粗度¹⁾に比べ河口から $9km$ 付近より上流部分

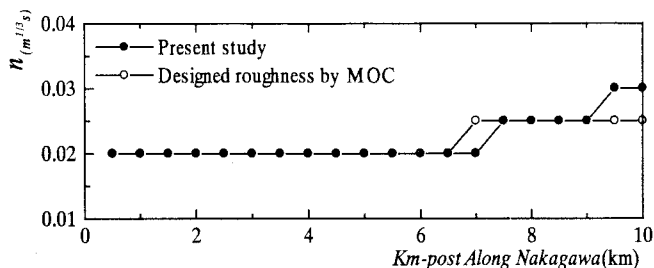


Fig.6 The distribution of Manning roughness coefficient

では多少大きな値となっている。

また、ここで規定した河道内粗度分布を利用し、1986 年 8 月洪水、1998 年 8 月洪水、1999 年 7 月洪水の水府橋ピーク水位時における不等流計算を行ったものが Fig.7 である。洪水時の河口部付近は、流量の増加と密度差による水位上昇が考えられるため、河口部付近の適切な痕跡値などを利用して解析している。また、詳細は割愛するがピーク水位付近では 3. (1) 節の誤差解析で述べたように不等流モデルと不定流モデルの計算値の差異は小さい。

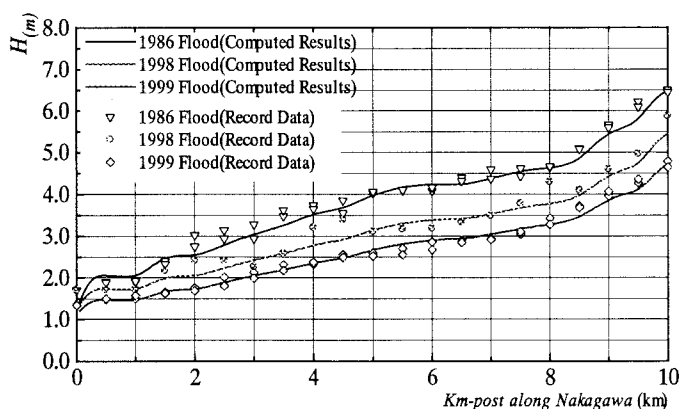


Fig.7 Comparison between flood marks and computed water level

(5) 水位と流量の関係

不等流モデルを利用して、水府橋における水位と流量の関係を調べた。計算は、下流端水位-0.3m~1.8m を 0.3m 間隔で 8 ケース、流量は 50m³/s~5,000m³/s を 50m³/s 間隔で 100 ケースの都合 800 ケースの不等流計算を実施した。Fig. 8 に河口水位と水府橋の水位・流量の関係を示す。

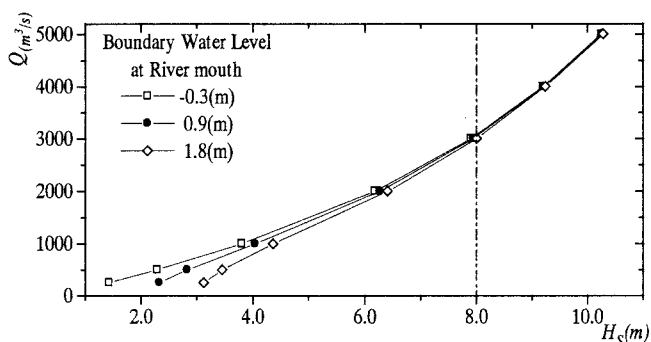


Fig.8 water level and discharge at Suifu-bashi

その結果、河口水位による影響は水府橋水位 8.0m 程度まで及ぶことが明らかとなり、このことは河口水位の特性の検討の必要性を示唆する。

(6) 河口部水位

1998 年 8 月洪水の水位観測記録¹⁾を利用して、河口水位の補正方法について検討した。いま、不等流計算の適切な境界値 H_B をとし、河口水位 H_B が

$$H_B = H_T + \Delta H_B \quad (6)$$

で表されるものと仮定する。ここに、 H_T : 推算潮位、 ΔH_B : 補正量である。4 時刻分の満潮時データと 7 時刻分の干潮時データを利用して水府橋水位と湊大橋水位(1.73km)が再現できるように試行錯誤の計算を利用して干潮時(式(7))と満潮時(式(8))を区別して、それぞれ、

$$\Delta H_B = 0.196H_S - 0.232 \quad (7)$$

$$\Delta H_B = 0.147H_S - 0.411 \quad (8)$$

と定めた。ここに H_S : 水府橋水位である。この補正方法により適切な境界水位が推定でき、Fig.9 に示すとおり水府橋と湊大橋の水位も良く再現できている。

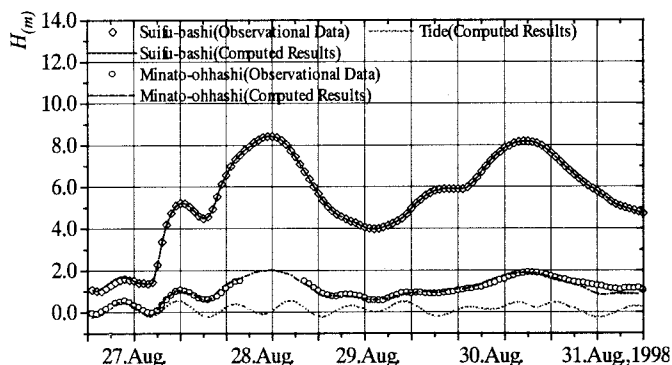


Fig.9 Computed and observed water level at river mouth, Minato-ohashi and Suifu-bashi

4. 氾濫流解析モデル

氾濫流の解析法として、Muskingum 法、貯留関数法や長波近似方程式による手法など、様々な解析法が研究されている^{1), 5), 7)}。本研究では、氾濫流の挙動を物理的に明確に表しうる長波系近似方程式を用いた解析法を採用する。氾濫流解析モデルとして適切な長波系近似方程式は、線形長波理論、非線形長波理論のいずれかであると考えられる。非線形効果の性質(5. (2) 節で詳述)と演算時間から判断して、本研究では線形長波理論を採用する。方程式群は、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2 M}{h^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2 N}{h^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} \quad (11)$$

である。ここに、 x, y : 氾濫原の水平座標、 M, N : 流量フラックス(m²/s)、 η : 氾濫水位(m)、 n : Manning の粗度係数

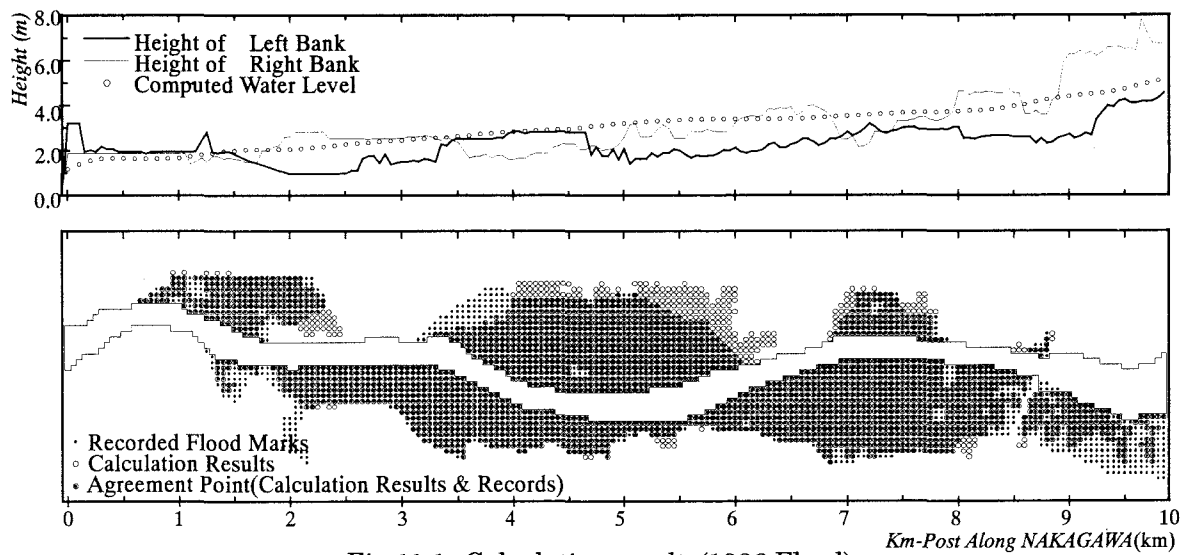


Fig.11.1 Calculation results(1986 Flood)

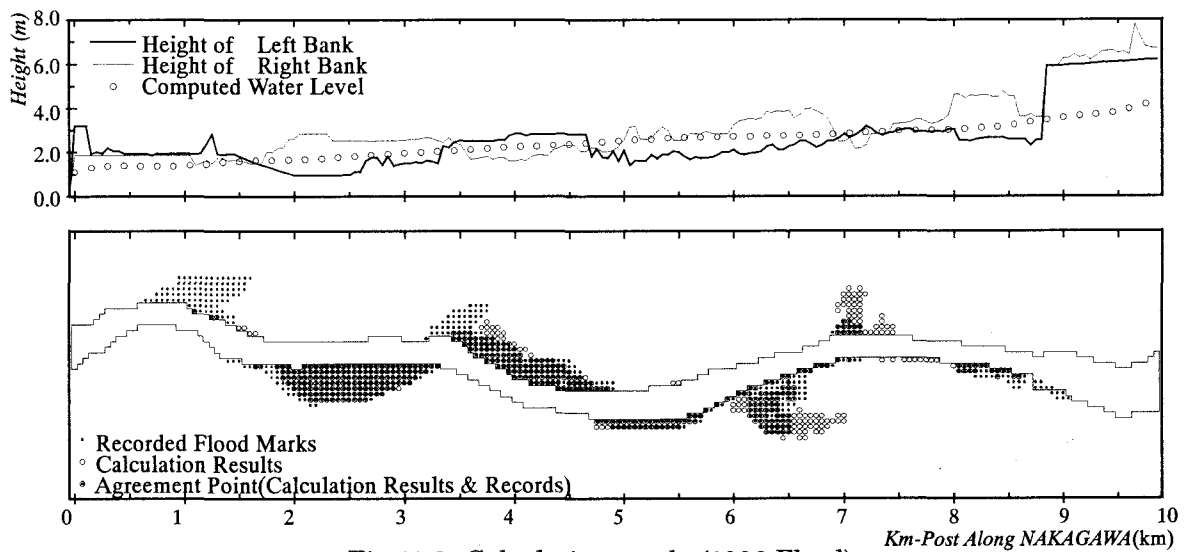


Fig.11.2 Calculation results(1998 Flood)

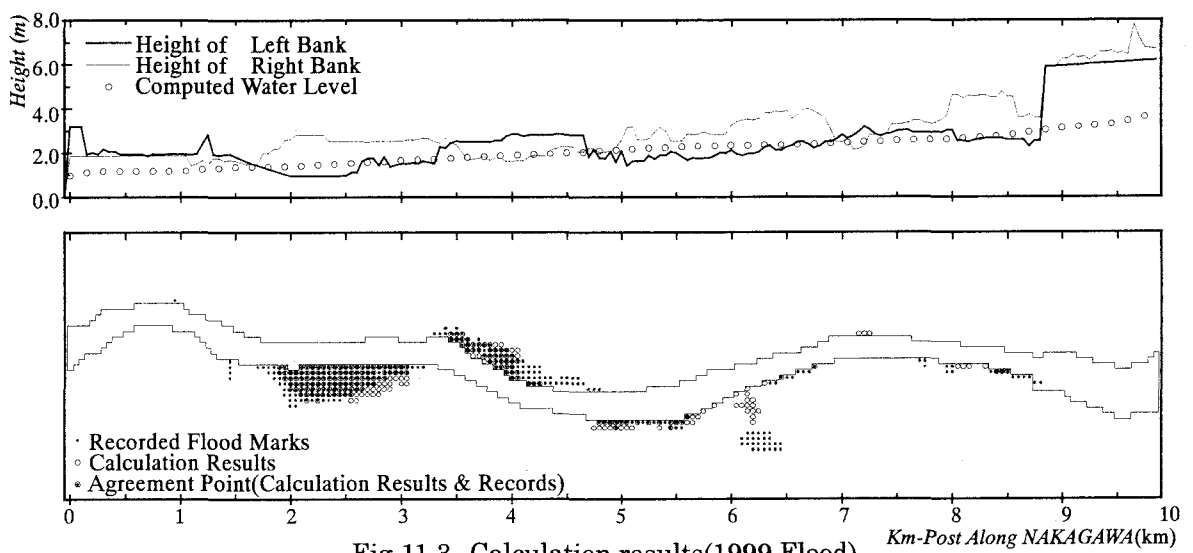


Fig.11.3 Calculation results(1999 Flood)

($m^{1/3}s$), h : 氾濫浸水深(m), g : 重力加速度(m/s^2)である。

また、適用座標系であるが、複雑な地形形状を精度良く近似する一般曲線座標系を用いた解析法^{3), 9)}についても研究されているが、本研究では最大浸水域の即時予測を目的としており、解析精度に精緻性を求めないこと、格子間の粗密により保存則が十分に満足されないことが懸念されることや演算時間を考慮し、直交座標系を用いることとした。

また、氾濫流解析では、地形近似の精度が十分でないことが解析精度の低下に繋がるから、氾濫原の計算格子の分割間隔は適用される座標系に依らずある程度細分化する必要がある。そこで、従来の研究で用いられることの多かった 250m 程度に比べ、より細分化された 50m 間隔の計算格子に設定し、粗度係数は $n=0.025 m^{1/3}$ と設定した。そして、数値解析法には Leap-Frog 法を用いた。

なお、氾濫流モデルと河川流モデルの引き継ぎ、すなわち河川からの越流量の推定には、本間公式を適用した。

5. 予測モデルの適用と適用性の検討

(1) 予測モデルの既往洪水への適用

本研究で提案する予測モデルを那珂川下流域へ適用した。大規模洪水である 1986 年 8 月洪水、中規模洪水である 1998 年 8 月洪水、そして小規模洪水である 1999 年 7 月洪水に対して再現計算を行い、それぞれの洪水痕跡値を用いて精度検証を行った。Fig.11.1～Fig.11.3 に水府橋が最高水位時の河道水位(上段)と最大浸水域図(下段)を示す。何れの規模の洪水に対しても、良好な精度を得ることができた。また、演算時間は、対象領域約 30km² の 48 時間予測計算にパーソナルコンピュータ(CPU; PentiumIII 500MHz, RAM; 128MB)を利用した場合、2分程度であった。従って十分に実用的な活用が可能な予測モデルであると言える。

(2) 予測モデルの適用性の注意

本研究では高速演算が可能な洪水氾濫予測モデルを河川流解析モデルとして不等流モデル、氾濫流解析モデルとして線型長波理論を適用し構築した。

まず、河川流解析モデルについてであるが、不定流を適用した場合との誤差は、3. (1)で述べたとおり見込まれる。従って許容の誤差を 5%程度とするならば、約 100km までの範囲に適用が可能であると考えられる。

つぎに、氾濫流解析モデルであるが、線形長波理論と非線形長波理論の差異は移流項の有無である。移流項の非線形効果により波高水深比が大きいところほど流れは速く伝播する。すなわち氾濫の発生原因が越流による場合で、かつ氾濫原の勾配が緩く、氾濫流に慣性が大きく作用しない場合においては、移流項の効果が顕著でないと考えられる。急勾配な丘陵地形が見られない那珂川下流域のような地域においては、氾濫流の非線形効果は限定された現象と考えることができる。

また、非線形効果により氾濫流の伝播速度が線形長波理論に比べ増すことが考えられるため、洪水流の到達時間に多少の差異が見られる可能性があるものの、本研究で目的としている最大浸水域の即時予測への影響は大きくないものと考えられる。

6. おわりに

洪水氾濫予測モデルの構築に必要なモデル式に対し理論的な検討を行い、高速演算が可能な洪水氾濫予測モデルを構築した。大・中・小規模の洪水に対し再現計算を行い、何れの規模の洪水においても精度の良い解析が可能なことを確認した。このことは高速演算が可能なモデル式すなわち近似度の高くないモデル式による解析においても、適切な境界条件を設定することで精度の良い解析ができることを示していると言える。

本研究で構築した予測モデルでは、氾濫原の地形形状を正方格子による標高値のみで近似したが、より精度の良い解析や予測を行うためには、氾濫原の地形形状の近似手法と、排水路や道路などの氾濫水の挙動に対して影響を与えたと考えられる線状構造物の効果をモデルに導入する必要があると考えられる。また、本研究では、洪水により河川の水位上昇が発生し洪水流が堤防を越流する場合に起こる越流型の洪水氾濫のみを対象としたが、今後は破堤を起因とする破堤型の洪水氾濫についても対応を検討する必要があると考えられる。

謝辞: 本研究を行うにあたり、建設省関東地方建設局常陸工事事務所調査第 1 課より有用なデータを多数提供して頂いた。また、計算対象流域の空間データ作成にあたっては、国際航業株式会社空間情報事業部に多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Xanthopoulos, T., Koutitas, C.; Numerical Simulation of a two dimensional flood wave propagation due to dam failure, Jour. of Hydraulic Research, Vol.14, No.2, pp.321-331, 1976
- 2) 岩佐 義朗, 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
- 3) 福岡 捷二, 川島 幹雄, 松永 宣夫, 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) 福岡 捷二, 川島 幹雄, 横山 洋, 水口 雅教; 密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策に関する研究, 土木学会論文集, No.600/II-44, pp.23-36, 1998
- 5) 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)ーシミュレーションの手引き及び新モデルの検証ー土木研究所資料, 第 3400 号, 1996
- 6) 建設省河川局; 治水経済調査マニュアル(案), 1998
- 7) 土木学会; 水理公式集[平成 11 年版], 土木学会, 1999
- 8) 椿 東一郎; 水理学 I, II, 森北出版, 1974
- 9) 岩佐 義朗; 数値水理学, 丸善, 1995
- 10) 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

(2000.4.17 受付)