

浸水域予測モデルに基づく 水防活動の支援システムの構築に関する研究

STUDY ON DEVELOPMENT OF SUPPORT SYSTEM OF LEVEE PROTECTION ACTIVITY

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 修士(工学) 東海大学大学院工学研究科土木工学専攻
(現 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター水害研究室(〒305-0804 つくば市旭1番地))
²正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科
³正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

A flood is not a sudden disaster, so we can predict and prepare for a flood beforehand. We paid attention to this thing and had developed a prediction numerical model of the flooding area that high-speed calculation is possible. In this paper, we developed the support system which evaluating an effect of levee protection activity quantitatively and deciding of scale of levee protection activity. This system is built in a geographical information system to manage topographic map and spatial information, and the prediction numerical model. We did simulation the effect of levee protection activity by using this system. So, we suggested technique to estimate reduction rate of the quantity of flooding water and area by levee protection activity, and evaluate a quantity of possible work till flood arrived at it.

Key Words : flood inundation flows, numerical prediction model, geographic information system, levee protection activity

1. はじめに

我が国は国土の約70%が山地であるため、我々の生活域の多くは河川沿いや臨海部の沖積平野あるいは扇状地に存在する。また、降水量の多くは梅雨期、台風期に集中するため、内陸の平野部では洪水氾濫、臨海の平野部では洪水氾濫と同時に高潮などの重畳災害を被る危険性に晒されている。そして、これらの平野部は、いずれも高度成長期以降に大きく発展を遂げ、資産の集積が進んでいるため、被害ポテンシャルは増大してきていると考えられる。

洪水氾濫のような水災害は突発的な災害ではないため、事前だけでなく発災中においてもある程度の予測や対策が可能である。つまり、洪水予警報の発令と同時に得られる確度の高い上流域の予測情報を利用した洪水氾濫の予測計算が数分程度の短時間のうちに可能ならば、その計算結果は被害低減に関する種々の対策に大きく寄与すると考えられる。これらのことを勘案し、著者らは高速演算が可能な予測計算モデルに関する研究^{1),2)}を行ってきた。

河川の増水などを起因とする洪水氾濫のような水災害は、平常時および発災時に適切な対策が講じられ

ば、被災規模を確実に低減させることができる。これまでの治水対策は主に災害の防御や減災のために堤防築堤などに代表される施設整備すなわちハードウェア的対策を実施することに重点が置かれてきた。しかし、計画規模を超過する自然災害が発生する可能性は否められず、近年ではそれと並行して洪水ハザードマップ作成などのソフトウェア的対策を事前に講じることが多くなってきている。また、発災中においては、その減災に高い効果を発揮することが期待できる水防活動が行われる。

本研究では、これまで開発してきた浸水域の予測計算モデルの高速演算性という特徴を活かし、この予測計算モデルと地理情報システムから成る、水防活動の支援システムの構築を試みた。このシステムを実流域に適用し、水防活動の効果シミュレーションを行い、被害の低減率、可能作業量などについて検討した。

2. 洪水氾濫の高速予測計算モデルの構築

(1) 予測計算モデルの構成

図-1に示すように、予測モデルは河川流の計算モデルと氾濫流の計算モデルから構成し、両モデルの接続

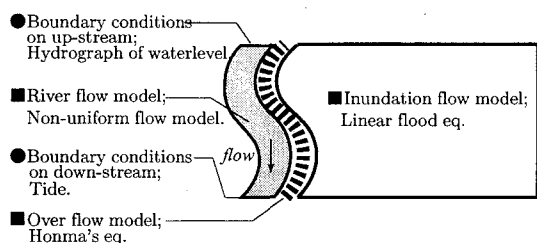


図-1 本研究で用いている計算モデルの構成図

には横越流公式を利用した。次節以降にそれぞれのモデルの計算方法を示す。

(2) 河川流の予測計算

洪水氾濫現象で重要となるピーク水位帯の計算は、不等流モデルを用いた場合でも十分な精度で行えることについて著者らが示している¹⁾。このことにならい、式(1)に示す不等流モデルの適用した。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} = - \frac{gn^2 |q| q}{R^{4/3} A} \quad (1)$$

ここに、 x は河川縦断方向の水平座標、 q は河川流量、 A は河川断面積、 η は河川水位、 n は Manning の粗度係数、 R は径深、 g は重力加速度である。

式(1)による非定常な河道水位の変化は、任意時間間隔の分割計算と線形内挿計算を組み合わせで計算した。また、流量の増加に伴う河口水位の上昇効果は、既往洪水の実測値から定式化することにより、計算に精度良く考慮した¹⁾。

(3) 氾濫流の予測計算

浸水域形状の予測を第一義の目的とした計算では地形形状の近似方法が特にその精度に影響を及ぼす。そこで本研究では、地形形状の輪郭に合わせて自由に計算格子の構成が可能な「地形適合格子」というあらたな地形形状の近似手法²⁾を適用した。

モデル式には、氾濫流の水理学的な特性から考え浅水理論式から移流項を除いた線形氾濫モデルによる解析が可能なことを著者らが示している²⁾ことにならい、線形氾濫モデルを適用した。そして、式(2)、(3)のように地形適合格子による計算が可能のように線形氾濫モデル式を拡張した。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{A} \left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) \quad (2)$$

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

ここに、 A は計算格子の面積、 Q は隣接計算格子からの流入流量、 l は計算格子の辺長、 s は空間座標 (隣接計算格子の図心間距離) である。

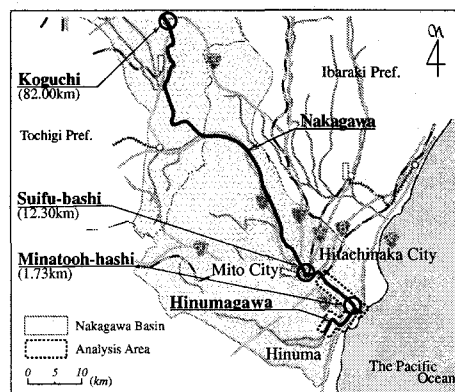


図-2 対象流域図

これらの方程式の数値解析法には、陽解法の Leap-Frog スキームを用いた。ただし、摩擦項は計算の安定性を考慮し、陰的に解いた。

また、排水路網が浸水域に及ぼす影響を著者らが提案した方法²⁾により考慮した。

(4) 河川と氾濫原の接続方法

河川と氾濫原との接続には本間の越流公式に用い、 $H_2 \leq 2/3 H_1$ を完全越流、 $H_2 > 2/3 H_1$ をもぐり越流として、式(4)、(5)により計算した。

$$Q = 0.35 H_1 \sqrt{2g H_1} \quad (4)$$

$$Q = 0.91 H_1 \sqrt{2g (H_1 - H_2)} \quad (5)$$

ここに、 H_1 は河川側の越流水深、 H_2 は氾濫原側の越流水深である。

(5) 予測モデルの実流域への適用とその計算特性に関する考察

本研究では、図-2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から10kmと那珂川の河口から0.5km付近で合流する支川涸沼川の河口から8.0kmを対象とした。

河川の横断面データには、500m間隔で取得される定期横断測量成果を内挿分割して利用した。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、試行錯誤のうえ9.5km～12.0kmの区間で計画値より若干大きな粗度係数を設定した。また、氾濫計算では、図-3に示すように地形適合格子により地形形状の近似を行い、地盤との比高差の大きな線状境界、そして横断面幅が30cm以上の1478の水路断面を考慮した地形モデルを利用した。

a) 河川流計算

図-4は、1986年洪水の河岸痕跡と、不等流と不定流モデルによる再現計算の結果の比較図である。この

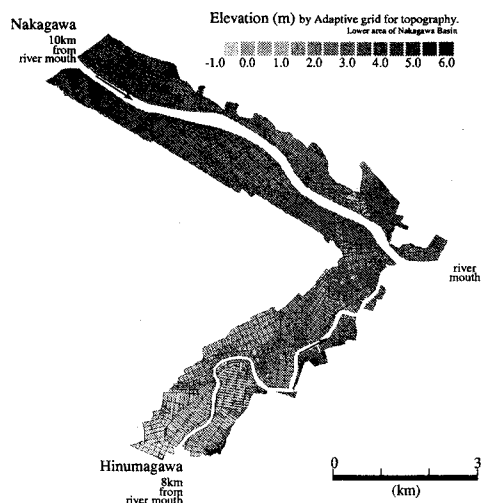


図-3 格子構成図 (地形適合格子・標高表示)

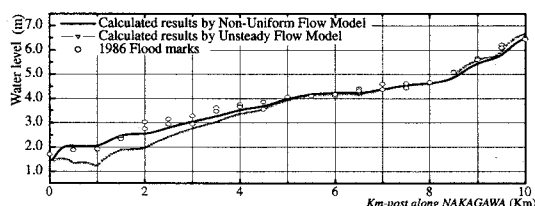


図-4 不等流・不定流モデルによる洪水ピーク水位の再現計算の結果

図から氾濫計算で重要となるピーク水位近傍における両モデルの差異が小さいことは明らかである。

b) 氾濫流計算

図-5 は、既往洪水の矩形格子と地形適合格子による再現計算の結果と洪水痕跡との比較図の一例である。いずれの規模の洪水においても、地形適合格子を用いた計算では全域においてかなり精度良く一致した。

3. 水防活動支援システムの構築

築堤などのハードウェア的対策と洪水ハザードマップや水防活動などに代表されるソフトウェア的対策が水災害の防止や減災のために講じられる。洪水氾濫による水災害はそのピークに至るまでの時間的過程がそれほど急速でないため、事前の対策だけでなく発災中における対策も可能で、特に水防活動の減災効果は高い。水災害は突発的な災害ではないとは言え、発災時の水防活動は時間的や人員的に限定された厳しい条件下での活動を余儀なくされる。

また、水防活動は、洪水時の即時対応策として有効性が高いにもかかわらず、著者らが知る限りではその研究や報告はあまり行われていないようである⁴⁾。

そこで、水防活動の効果を定量的に評価することと水防対策の規模決定の支援を目的とした支援システムを、

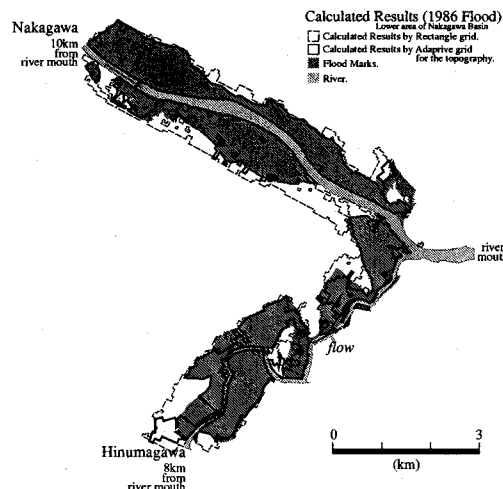


図-5 洪水痕跡値と予測計算の比較-1986 年洪水- (この図は、実線で囲まれた領域が地形適合格子を、点線で囲まれた領域が矩形格子を用いた氾濫計算を行い得られた浸水域、そして、濃灰色で塗りつぶされた領域は洪水痕跡値を表している。濃灰色の領域の多くは実線で囲まれており、地形適合格子を用いた氾濫計算では良好な精度で痕跡値を再現できることが分かる。)

前章までに述べた洪水氾濫の予測計算モデルと、地形図やそれに付随する属性などの空間情報を管理する地理情報システム (GIS) とを組み合わせ構築した。本論文では、このシステムを利用して水防活動の効果に関するシミュレーションを行い、水防活動による浸水面積や浸水量の低減率と可能作業量について見積もることを試みた。

高速演算が可能でかつ GIS により地図上に計算結果を計算後即座に重ね合わせ表示や紙面などへの出力でできることが本システムの特徴である。このため越流点や最大浸水域を予測計算後に容易に把握することが可能であるほか、水防対策が必要な危険区間に対する対策規模を決定するための有効な判断材料を提供することもできる。

なお、このシステムは水防活動支援の目的以外にも、氾濫水深と土地利用種別から想定被害額を算出する治水経済調査⁸⁾の支援や、地方自治体において作成が義務化された浸水想定区域マップ⁹⁾や洪水ハザードマップ¹⁰⁾の作成においても利用が可能であると考えられる。その理由は、まず、これらの調査や作成のほとんどが 250m 程度の比較的大きな矩形の計算格子により氾濫計算を行うのに対し、地形適合格子を用いた精度の良い計算ができるからである。そのうえ、計算後に手作業により計算結果を地形図上へ展開し、それぞれの地点における浸水深や想定被害額の算定を行う過程は、煩雑なうえ人為的なミスが考えられる。一方、本システムでは、計算終了と同時に地図上に計算結果を重ね合わせ表示できるため、ミスや煩雑さはほとんどないと考えられる。

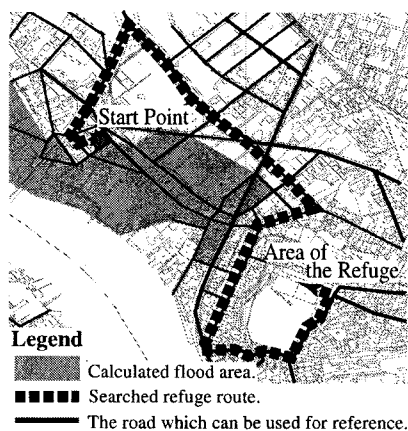


図-6 避難経路の検索例

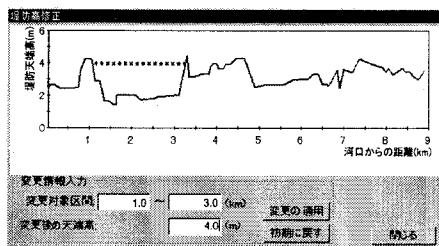


図-7 堤防高調整用に開発した操作画面（図中の実線が変更前の堤防天端高の縦断変化を表し、点線が変更後の堤防高を表し、本図では1km～3kmの区間の堤防高を4.0mに変更したことを示している。）

(1) システムの装備機能

a) 予測結果の表示機能

予測計算の終了と同時に地図上に予測結果を重ね合わせ表示する機能を備えた。この機能では、最大浸水域の表示と、1時間刻み（氾濫流の伝播速度が比較的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。すなわち、越流地点とその開始予想時間を把握するなどの利用方法が考えられる。

また、予測結果の配布などを勘案して、予測結果は画面以外に紙面と画像情報としての出力機能を備えた。

b) 浸水域面積と被害家屋の集計機能

表示中の浸水域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。浸水建物の戸数集計機能には、地形図に地物単位で格納されているデータを利用した。これら建物情報に一户ごとの床高さ情報を付加すれば、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。同様に、地形分類として耕作地地目などの属性情報が付記されている地形図を利用した場合は、想定被害資産額の集計を容易に行うことが可能である。

c) 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-6はその経路検索例であり、図中の太点線が検索結果、中太

表-1 水防活動の効果検討－氾濫面積 (km²)

	1986 洪水	1998 洪水	1999 洪水
対策なし	10.77	2.62	1.07
Case1	10.60	2.57	0.98
Case2	6.35	1.30	0.42
Case3	3.89	0.29	0.15

表-2 水防活動の効果検討－氾濫水量 (×10⁶m³)

	1986 洪水	1998 洪水	1999 洪水
対策なし	10.32	1.90	0.55
Case1	9.99	1.87	0.43
Case2	5.48	1.03	0.34
Case3	2.80	0.37	0.18

実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には、幹線道路と道路の属性分類を行っている。このため、その属性分類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。すなわち、地域防災計画やハザードマップで指定される避難地域を利用した各地域ごとの数例の避難経路候補を検索することもできる。

d) 堤防高調整の機能

堤防の高さ情報が更新された場合に簡便にその情報更新を可能とする図-7のようなインターフェイスを備えた。図中の実線は現状の堤防高であり、点線は下段枠内の変更情報入力に示された内容を図化したものである。変更の適用が実行されると、点線部分の更新情報が堤防高情報に反映され、その新しい堤防情報のもとで予測計算ができるようになる。

この機能により、水防活動による土嚢の積み上げ作業の効果検討や築堤や堤防補強工事の効果を反映した予測計算を容易に行うことが可能である。

(2) 水防活動の効果シミュレーション

a) 対象流域と計算条件

構築した支援システムを那珂川下流域に適用し、水防活動の効果を洪水痕跡値を基準値として定量的に評価することを試みた。ここで設定した洪水の規模は既往の1986、1998、1999年洪水で、それぞれ与条件として水府橋の観測水位を与えた。

検討ケースとして次の3通りを設定した。まず、Case1は、河川からの越流が予想される水防対策が必要な区

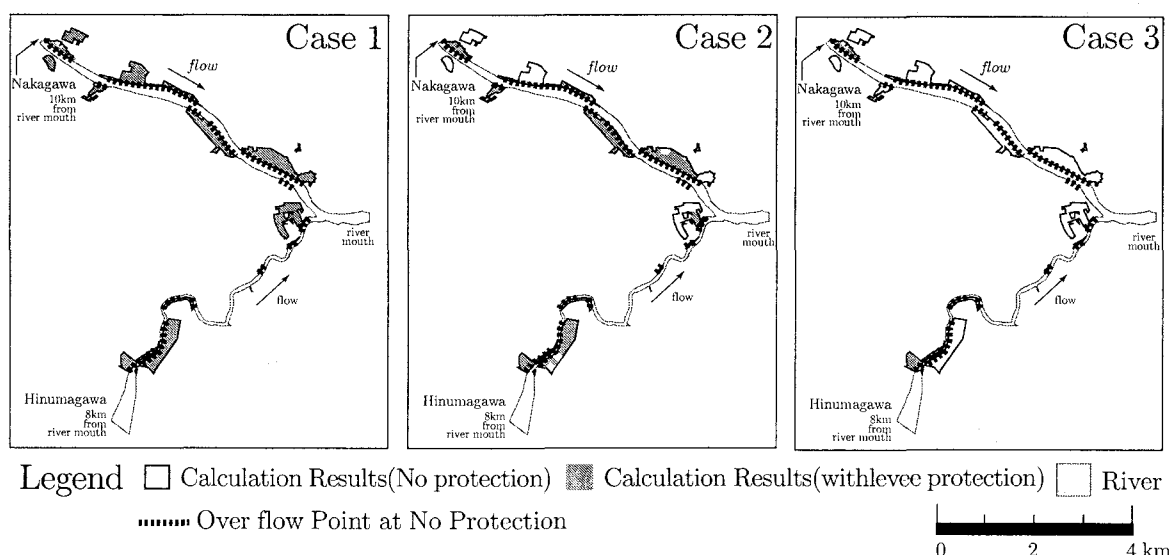


図-8 水防活動の効果（この図は、何らかの水防活動を実施した場合と全く対策を行わなかった場合の浸水面積の比較を示した図である。図中の Case1 は越流箇所の全てに 0.90m の土のう積をした場合、Case2 は河川と接続する水門・樋門を閉鎖した場合、Case3 は Case1 と Case2 の両方を組み合わせた水防活動が行われた場合を示す。提案システムを用いれば、水防活動が必要となる区間の推定や水防活動により施される対策の効果を容易に把握することが可能である。）

間に土嚢積みによる越流防止工を施したと設定したものである。この際の防止工の規模は、末次らによる水防活動に関するアンケートや水防活動に関する調査¹¹⁾を参考に決定した。すなわち、土嚢積みによる越流防止工は3段2列なる形状で施されることが多いようであるから、土嚢の1段あたりの高さを30cm程度と考え、作業終了時の越流防止工の積み上げた高さは90cm程度になると設定した。つぎに Case2 は、河川と接続する用排水路網の接続点すなわち水門・樋門を閉鎖したと設定したものである。そして、Case3 は、Case1 と Case2 を組み合わせたものである。

b) 水防活動による被害の減災効果と低減率

表-1、2 に既往3洪水に対して3ケースの対策を施した場合の浸水面積と浸水量、図-8 に1998年洪水に対して3ケースの越流防止の対策を施した場合と無対策の場合の浸水域分布の比較、そして、図-9 に浸水面積と浸水量の低減率を示した。

減災効果はこれらの図から分かるとおり、いずれの洪水においても Case3 のような全ての越流区間への土嚢積みと水門や樋門の閉鎖を組み合わせた水防対策の効果が最も高いことが分かる。また、洪水の規模にかかわらず、対策作業量に比例する傾向で浸水面積と浸水量は低減されることが分かる。

c) 水防活動の可能最大作業量の検討

産業構造の変化により職住近接の世帯が大幅に減少しているなど理由から、発災時に水防活動のために迅速に参集することが困難となってきた。前節において土嚢積み上げと水門や樋門の閉鎖を組み合わせた越流防止工を講じることで大きな減災効果が得られる

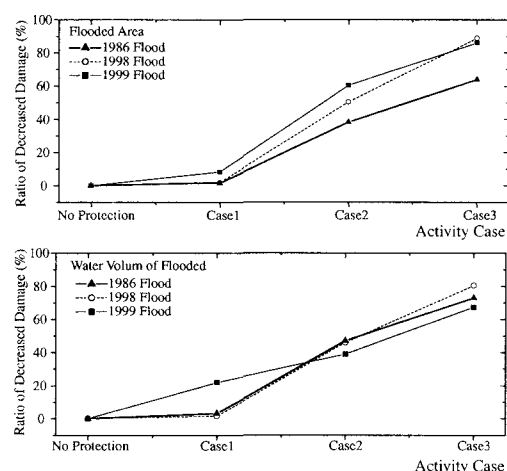


図-9 水防活動の効果（この図は、何らかの水防活動を実施した場合と全く対策を行わなかった場合の浸水面積の軽減率を示したものである。図中の Case1 は越流箇所の全てに 0.90m の土のう積をした場合、Case2 は河川と接続する水門・樋門を閉鎖した場合、Case3 は Case1 と Case2 の両方を組み合わせた水防活動が行われた場合を示す。）

ことを示したが、効率良く効果の高い水防活動を行うためには、水防対策が必要な区間とこれらの作業に必要な人員数を的確に把握する必要がある。前述したように、提案する支援システムによれば水防活動が必要な区間を容易に推定が可能である。ここでは、洪水のピーク到達時間までに人力による可能な最大作業量について検討した。

まず、作業量を見積もるために洪水のピーク到達までの時間を明らかにした。図-10 は那珂川における洪水流下時間を示したものである。今回対象領域とした

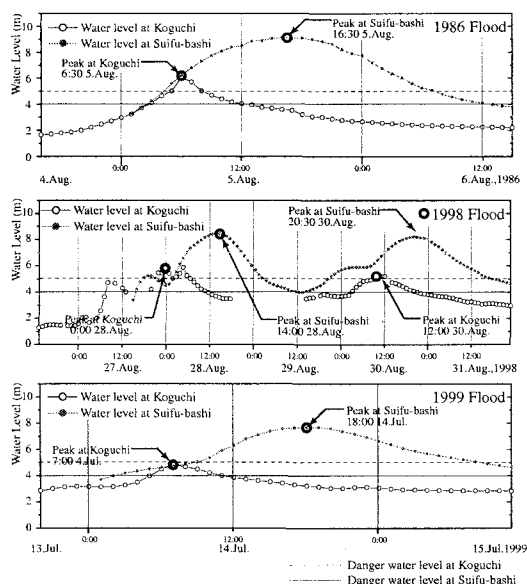


図-10 那珂川における洪水伝播時間

那珂川下流域では、図-2に示した小口観測所と水府橋観測所のピーク水位の時間差を洪水到達時間の指標の1つとしている。この図から分かるとおり、小口観測所と水府橋観測所のピーク水位の到達時間差は平均して9時間程度であると判断できる。

つぎに、水防活動の動員数を概算するために、既往洪水の高水速報¹²⁾を調べたところ、1998年洪水では約1000人、1999年洪水では約500人が動員された。また、土嚢の積み上げ幅10mに約50人が動員され、その所用時間は約90分要したと記されている。このことから考えて、ピーク水位の時間差約9時間を利用して行える越流対策は、1,000人体勢では1,200m、500人体勢では600m程度であると推測できる。

なお、1998年洪水を越流防止工だけ完全な防御しようとした場合、越流区間長は那珂川・涸沼川の両岸の合計が約11kmであるから、作業体勢を前述と同様に考えた場合では約10,000人程度の動員が必要になり、現実的に極めて困難な対策手段と考えられる。

d) 支援システムを用いた水防活動の有用性

前節の通り、理想的な水防活動を行うためには多数の人員が必要なことを示した。つまり、発災時の時間的や人員的に限定された厳しい条件下で効果の高い水防活動を実施するためには、まず、確度の高い予測情報をもとに本論文で提案したような高速演算が可能な支援システムを用いて予測計算を行い、越流点とその地点における越流の予想開始時間を推定する。そして、背後地の重要度などから水防活動が優先的に必要な越流の可能性がある危険箇所を判断し、その区間に対して効果的な越流防止工などの対策を施すことが重要である。水防活動は多くの場合、経験的な勘を主たる判断材料として行われてきたと推測できるが、提案した

支援システムを用いれば根拠のある情報を判断材料として効率よく効果的な水防活動ができると考えられる。

4. おわりに

本研究では、高速演算性を特徴とする洪水氾濫の予測計算モデルとGISから成る水防活動の支援システムを構築し、水防活動の効果と可能最大作業量について検討した。これらのことから、効果の高い水防活動を行うためには本支援システムなどから得られる定量的な判断材料を利用することが重要であることを確認した。なお、本論では、支援システムの利用目的の焦点を水防活動の支援に当てて論じたが、浸水想定区域図や洪水ハザードマップの作成支援の他、土地利用分類などの充実した空間情報が存在する場合では治水経済調査などの資産集計の支援に利用することも可能であると考えている。

謝辞： 本研究の端緒は、建設省常陸工事事務所(現国土交通省常陸工事事務所)調査第1課の白土正美課長をはじめとする職員の方々の有益な助言にある。また、水防活動に関する貴重な情報は、国土交通省国土技術政策総合研究所 末次忠司氏よりご提供して頂いた。そして、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ご協力を頂いた。ここに記して各位に感謝の意を表す。

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) 安田 浩保, 白土 正美, 後藤 智明, 山田 正; 高速演算性と精緻性を有する洪水氾濫計算システムの開発, 水工学論文集, 第45巻, pp889-894, 2001.
- 3) 建設省関東地方建設局常陸工事事務所; 平成10年度那珂川定期縦横断測量報告書, 1998.
- 4) 末次 忠司; 水防災のための危機管理方策～防災・情報・危機管理セッション～, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp19-24, 2000.
- 5) 建設省河川局; 河川における今後の情報化に向けた施策はいかにあるべきか, 1999.
- 6) 建設省河川局; 水災防止小委員会答申(今後の水災防止のあり方について), 2000.
- 7) 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.
- 8) 建設省河川局; 治水経済調査マニュアル(案), 1998.
- 9) 国土交通省河川局; 浸水想定区域図作成マニュアル, 2000.
- 10) 財団法人河川情報センター; 洪水ハザードマップ作成要領 解説と運用, 1996.
- 11) 末次 忠司; 水防活動に関するアンケート調査結果, 私信.
- 12) 建設省関東地方建設局常陸工事事務所; 水文資料整理 高水速報資料 昭和60年～昭和62年, 1991.

(2002. 4. 15 受付)