

# 数値シミュレーションに基づく 堤防に沿った樹林帯の治水機能の検討

重枝 未玲<sup>1</sup>・秋山 壽一郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 日本学術振興会特別研究員 九州工業大学 工学部建設社会工学科  
(〒 804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (同上)

樹林帯等の計算メッシュより小さな物体が流れに及ぼす影響を考慮できる SA-FUF-2DF モデル (Spatial Averaged Finite volume method on Unstructured grid using FDS technique for 2D Flood flows) を開発した。樹林帯と構造物が設置された状況での氾濫流の水深、流速ベクトルおよび構造物に作用する流体力に関する実験データを収集するとともに、これらに基づき SA-FUF-2DF モデルの検証を行った。さらに、実スケールの市街地を対象とした氾濫解析を実施し、同モデルによる樹林帯の治水機能の検討を試みた。その結果、SA-FUF-2DF モデルにより、樹林帯の氾濫流量抑制効果や構造物に作用する流体力低減効果を評価できることが明らかとなった。

*Key Words* : flood flow, numerical simulation, SA-FUF-2DF model, flood control, flood re-tarding plantations, hydrodynamic forces, experiment

## 1. はじめに

ここ数年、世界各地で局地的豪雨による洪水氾濫が発生し、人命と資産に甚大な被害が生じている。2000年9月の東海豪雨災害の事例<sup>1)</sup>から明らかなように、近年の局地的豪雨は予測の範囲を越えており、堤防の強化等の従来の洪水氾濫対策では防御が難しくなってきた。このような理由で、氾濫を前提とした対策、すなわち氾濫原管理のあり方やそのための評価手法がより重要になってきた。

氾濫原管理には、洪水ハザードマップや氾濫時の効果的な避難体制などのソフト面での対策と氾濫流を制御することで家屋等の構造物への被害軽減を図るハード面での対策などがある。堤防に沿って配置される樹林帯は、氾濫流量を抑制する手段の一つであり、その被害軽減効果については、1958年の狩野川台風での被害調査結果<sup>2)</sup>などでも確認されている。また、樹林帯は、緑の空間を提供するなどの景観・環境機能も兼ね備えていることから、近年注目されている。一般に、樹林帯の整備・保全区間は、樹林帯が有する氾濫流量抑制効果や被害軽減効果等の治水機能を検討した上で選定される<sup>3)</sup>が、このような樹林帯の治水機能を検討・評価する手段は必ずしも確立されてはいない。

構造物に作用する流体力は、氾濫時に構造物が受ける被害の程度と相関がある<sup>4),5)</sup>ことが知られており、被害軽減効果を示す一つの指標となる。例えば、末次ら<sup>6)</sup>

は、構造物が存在しない状況での氾濫流の流速の自乗と湛水深の積を流体力と定義し、これを被害軽減効果の指標として用い、樹林帯の被害軽減効果を調べている。氾濫流中の構造物に作用する流体力は、福岡ら<sup>7)</sup>、栗城ら<sup>8)</sup>、高橋ら<sup>9)</sup>および著者ら<sup>10),11)</sup>によって調べられている。福岡ら<sup>7)</sup>は、氾濫流中の構造物周辺の圧力分布は静水圧分布で近似でき、角柱前後の水深差により、構造物に作用する流体力が予測可能であることを示した。また、著者ら<sup>10)</sup>は迎角のある状況でも同様に予測可能であることを明らかにした。その一方で、著者らは FUF-2DF モデル<sup>12),13)</sup> (Finite volume method on Unstructured grid using FDS technique for 2D Flood flows) を開発し、同モデルが構造物群中の個々の物体に働く流体力を十分な精度でシミュレートできることを示した<sup>11)</sup>。しかし、FUF-2DF モデルでは、物体は形状や配置とは無関係に、物体境界に計算メッシュを配列することで処理(境界適合処理)されるため、計算対象領域と比較して極めて小さな物体が存在する場合には、膨大な数の計算メッシュが必要となる。

本研究では、以上を踏まえ、樹林帯の治水機能を検討する手段の確立を目的として以下を実施した。まず、計算メッシュより小さい物体群を空間平均された抵抗として取り扱う処理(空間平均処理)を導入することで、FUF-2DF モデルを SA-FUF-2DF モデル (Spatial Averaged FUF-2DF model) に発展させた。次に、構造物、あるいは樹林帯と構造物が設置された状況での氾

溢流のフロント位置、水深、流速ベクトルおよび構造物に働く流体力に関する実験データを収集し、実験データに基づき、SA-FUF-2DFモデルの予測精度を検証した。最後に、SA-FUF-2DFモデルにより、実スケールの市街地を対象とした氾濫解析を行い、樹林帯の治水機能について検討を加えた。

## 2. SA-FUF-2DFモデルの概要

SA-FUF-2DFモデルの基礎方程式は空間平均操作<sup>14)</sup>が施された2次元浅水方程式<sup>15)</sup>である。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + S = 0 \quad (1)$$

$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}; E = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{pmatrix};$$

$$F = \begin{pmatrix} vh \\ vvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix};$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh(S_{ox} - S_{fx}) + F_x \\ -gh(S_{oy} - S_{fy}) + F_y \end{pmatrix}$$

ここに、 $U$ は保存量ベクトル、 $E$ と $F$ は、それぞれ $x$ と $y$ 方向の流束ベクトル、 $S$ は発生項・消滅項ベクトル、 $h$ は水深、 $u$ と $v$ はそれぞれ $x$ と $y$ 方向の流速、 $g$ は重力加速度、 $S_{ox}$ と $S_{oy}$ はそれぞれ $x$ と $y$ 方向の河床勾配、および $S_{fx}$ と $S_{fy}$ はそれぞれ $x$ と $y$ 方向の摩擦勾配である。摩擦勾配 $S_{fx}$ と $S_{fy}$ は、マンシングの抵抗則で計算される。 $F_x$ および $F_y$ は、計算メッシュ内に物体群が含まれる場合に、個々の物体に働く流体力を空間的に平均することで基礎方程式に付加される流体力項であり、それぞれ式(2)で表される<sup>14),15),16)</sup>。

$$F_x = \frac{C_d \cdot a}{2} uh \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$F_y = \frac{C_d \cdot a}{2} vh \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

ここで、 $C_d$ は個々の物体の抵抗係数、 $a$ は物体密集度パラメータ(= $D' \cdot n'$ )(1/m)、 $n'$ は単位面積当たりの物体数(1/m<sup>2</sup>)、 $D'$ は主流方向に垂直な個々の物体の投影幅である。

式(1)の離散化は、有限体積法(FVM)に基づき行われおり、時間積分にはEulerの陽解法が、空間積分には流束差分法(FDS)<sup>17)</sup>が用いられている。計算メッシュには非構造格子が用いられている。

## 3. 実験の概要

瞬間的な破堤やダム破壊では、氾濫流量が瞬間的に増加するので、その数値シミュレーションは一般に難

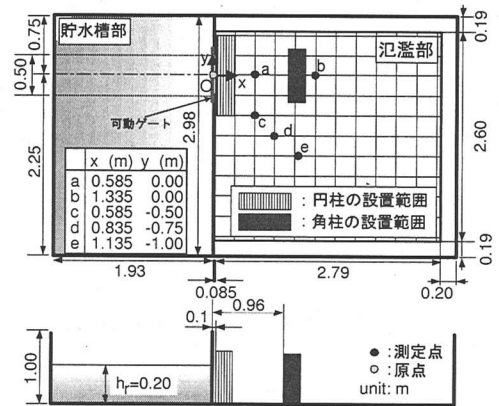


図-1 洪水氾濫水槽と測定点位置

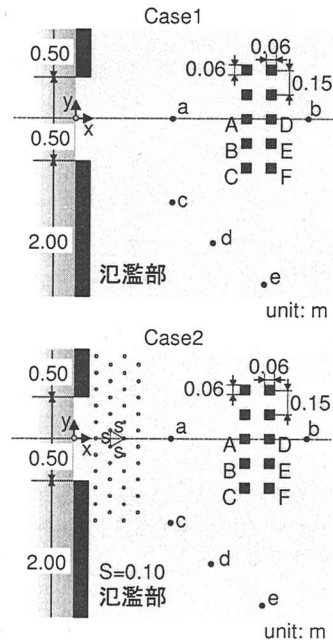


図-2 構造物 (Case1) と樹林帯と構造物 (Case2) の配列状況

しい。従って、そのような厳しい計算条件下で検証された数値モデルであれば、漸次破堤のように、厳しくない条件下での氾濫流の挙動を予測することは決して難しくはない。このような立場から、ここではダム破壊流れに対してSA-FUF-2DFモデルの予測精度の検証を行うこととした。実験は、氾濫原に構造物群を設置した場合(Case1)と、これに樹林帯を配した場合(Case2)について実施した。

実験装置は、図-1に示す洪水氾濫水槽であり、水槽全体は水平に保たれており、貯水槽部と氾濫部の底面はアクリル製である。貯水槽部と氾濫部は隔壁で仕切られており、隔壁の一部には可動ゲートが設けられて

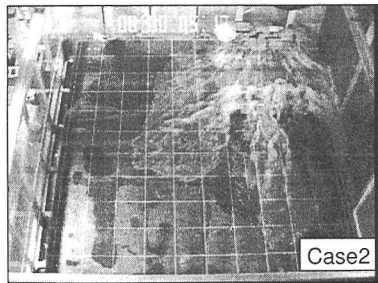
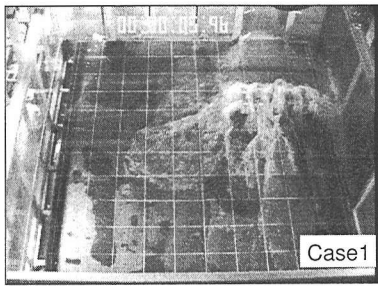


写真-1 流況の一例 ( $t=1.5(\text{sec})$ )

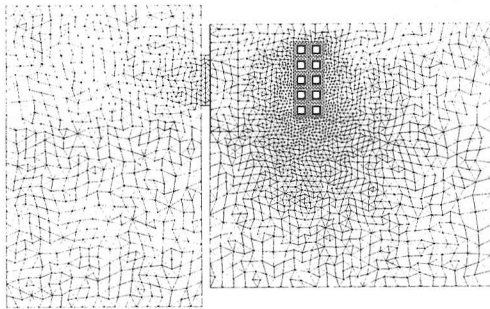


図-3 樹林帯と構造物周りの計算メッシュ

いる。隔壁以外の氾濫部の境界は段落ちとなっている。

ダム破壊流れは、貯水槽部に水深  $h_r=0.2\text{m}$  の水を貯留し氾濫部を水の無いドライベッド状態とした後に、ほぼ瞬間的 (約 0.1 秒) にゲートを開放することで発生させた。

樹林は、直径  $D=0.01\text{m}$ 、高さ  $=0.15\text{m}$  のアクリル製円柱でモデル化した。旧建設省土木研究所がまとめた樹林の直径と  $100\text{m}^2$  当りの本数との関係<sup>18)</sup>に基づくと、単位面積当たりに占める樹林帯の断面積比  $\lambda(=\pi D^2 n'_t/4)$  は、 $0.0004 \leq \lambda \leq 0.01$  となる。これを踏まえ、図-2 に示すように流出部付近に円柱を中心間隔  $S$  で千鳥状に配列した。ここに、 $n'_t$  は単位面積当たりの樹木本数 (本/ $\text{m}^2$ ) である。なお、この場合の  $\lambda$  は 0.0091 である。

構造物は、幅  $=0.06\text{m}$ 、高さ  $=0.2\text{m}$  のアクリル製角柱でモデル化し、全国中枢都市における建物占有率  $\kappa$  が 10% から 40% であることを踏まえ<sup>8)</sup>、図-2 に示すよ

表-1 計算に用いた係数値

| Case | 粗度係数<br>$n$ | 物体密集度<br>$a$ | 抵抗係数<br>$C_d$ |
|------|-------------|--------------|---------------|
| 1    | 0.01        | —            | —             |
| 2    | 0.01        | 1.15         | 1.29          |

表-2 境界およびドライベッド条件

| 適用場所       | 条件                      |
|------------|-------------------------|
| 壁面・構造物の境界  | 閉境界条件                   |
| 氾濫部の開境界    | 自由流出条件                  |
| 水の無い計算メッシュ | ドライベッド条件 <sup>13)</sup> |

うに角柱の中心間隔  $d=0.15\text{m}$  の等間隔で 10 個設置した。なお、この場合の  $\kappa$  は 16% である。

氾濫流のフロントの位置、水深  $h$  および水深平均流速  $u, v$  は、氾濫部がドライベッド状態であることを踏まえ、以下のような方法<sup>13)</sup>で算定した。フロントの広がり、ウラニンで可視化した水表面を水槽上方から CCD カメラで撮影し、デジタル VTR で収録した流況のフレーム画像をコンピュータ解析することで求めた。水深  $h$  は、所定の測定点でウラニンで着色した水表面にレーザースリット光を照射・可視化し、水路側方から CCD カメラで撮影した流況のフレーム画像をコンピュータ解析することで求めた。水深平均流速  $u, v$  は、表面流速  $u_s, v_s$  に 0.90 を乗ずることで求めた。この補正は、1 次元ダム破壊流れの流速分布がほぼ対数則に従うという実験結果<sup>19)</sup>を踏まえたものであり、摩擦速度は Manning の抵抗則より算定した。表面流速  $u_s, v_s$  は、直径約 5mm の発泡スチロール球を多数投入し、水深測定と同一測定点の流況を水槽上方から撮影・収録した画像を PTV 解析することで求めた。なお、トレーサの挙動を PTV 解析する際には、水深に応じて基準長さスケールが変化し、計測誤差が生じる場合がある。本研究では、このような水深変化による計測誤差を極力小さくするために、PTV 解析で用いた基準長さスケールと各水深に対応する長さスケールとの関係を水深の関数として求め、この関係と水深の測定結果に基づき、表面流速ベクトルを補正した。水深と流速の測定は図-1 中の ● で示す測定点 a~e で行った。なお、いずれの Case においても、角柱背後の測定点 b では気泡の混入により発泡スチロール球の識別が困難であった。このため流速測定は行っていない。

構造物に作用する流体力  $D_x, D_y$  は、図-2 に示す A~F の角柱に 2 分力計を取り付け計測した。流体力測定のスプリング間隔は 0.01 秒、スプリング時間は 30 秒である。以上の測定は同一条件下で 4 回繰り返し、実験結果の信頼性を高めた。各 Case の流況写真の一例を写真-1 に示す。

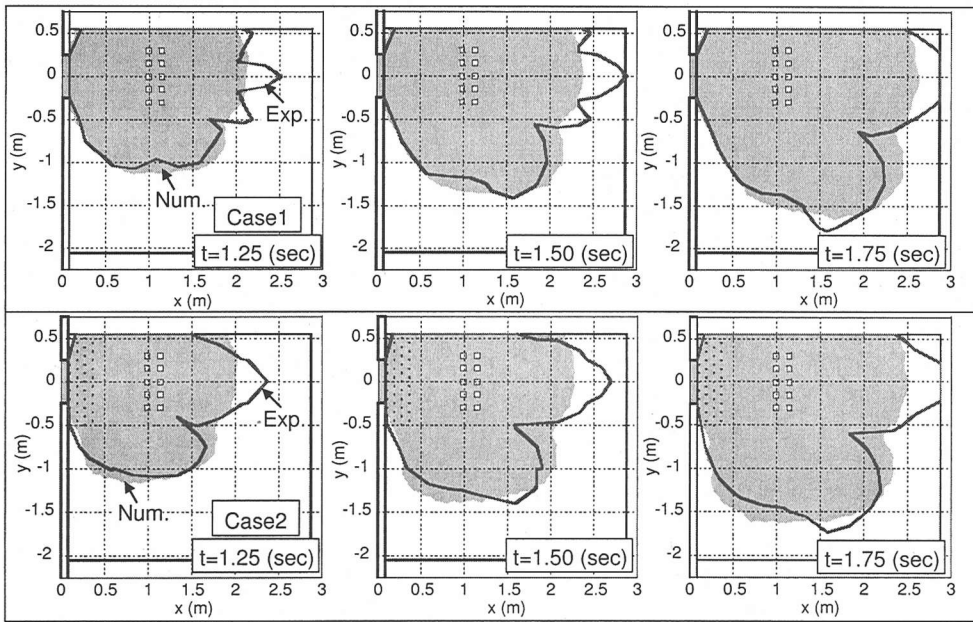


図-4 フロント位置の比較

#### 4. SA-FUF-2DF モデルの検証

##### (1) 計算条件

構造物には前述した境界適合処理を、樹林帯には空間平均処理を適用した。まず、氾濫原に構造物が配置されていない状況での計算領域境界上で、計算メッシュ間隔を最大境界長の0.025~0.1倍に変化させ、数値実験を行った。その結果、0.05倍より小さな間隔で離散化すれば、各測定点での水深および流速の計算結果の違いは5%以下であることがわかった。次に、構造物を配置し、構造物の一边とセル頂点との距離を構造物の一边の長さの0.125~0.75倍に変化させ、数値実験を行った。その結果、その距離が構造物の一边の長さの0.5倍より小さければ、各測定点での水深と流速および構造物に働く流体力の計算結果の違いは、それぞれ5%および10%以下であることがわかった。以上の検討に基づき、以下ではいずれのCaseにおいても、境界のメッシュ間隔を最大境界長の0.04倍とし、構造物と隣接セルの頂点との距離を構造物の一边の長さの0.125倍とし、図-3に示すように5502個の計算メッシュで計算領域を分割した。

計算に用いたManningの粗度係数 $n$ 、樹林帯をモデル化した円柱群の物体集中度 $a$ および抵抗係数 $C_d$ は、それぞれ表-1に示す通りである。 $n$ は貯水槽部と氾濫部の底面がアクリル板であることを踏まえたものであり、 $C_d$ は定常実験より得られた $C_d$ と $\lambda$ との関係<sup>20)</sup>から、 $a$ は円柱群の直径および配列から決定した。各境界

には表-2に示す条件を与えた。

##### (2) 流れ場と構造物に作用する流体力の実験データに対する検証

図-4、図-5と図-6および図-7に、それぞれ各Caseの流況写真、フロント位置の実験と計算結果、各測定点における水深 $h$ と水深平均流速 $u, v$ の時系列および各構造物に働く流体力 $D_x, D_y$ の時系列を示す。

計算でのフロント位置は、ドライベッド条件として与えた閾値 $h_v (=0.00001\text{m})$ よりも水深 $h$ が大きくなる場所とした。なお、 $h_v$ には本実験と同一条件下の数値実験で求めた計算可能な最小の水深を与えた<sup>13)</sup>。

流体力 $D_x, D_y$ は、水深の計算結果を用い、式(3)に基づき算定した。

$$D_x = -\rho \int_{\partial\Omega'} \frac{1}{2} gh^2 n_x dL'; \quad D_y = -\rho \int_{\partial\Omega'} \frac{1}{2} gh^2 n_y dL' \quad (3)$$

ここに、 $\Omega'$ は構造物の占める領域、 $\rho$ は水の密度、 $\partial\Omega'$ は構造物の境界線、および $L'$ は $\partial\Omega'$ の長さである。

フロント位置の計算結果と実験値との比較(図-4)より、次のようなことがわかる。(1) Case1ではゲート中心軸上付近で違いが認められるが、横断方向の広がりなどをほぼ再現している。(2) Case2ではゲート中心軸上付近やゲート付近での横断方向の広がりに若干の違いが認められるが、全体的に実験値を再現している。(3) Case1に比べ、Case2のフロントの広がりが流入部付近で横断方向へ大きくなること、ゲート中心軸上で小さ

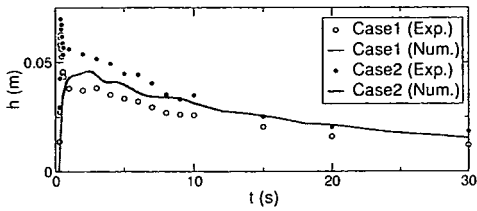


図-5(a) 水深の時系列の比較 (測定点 a)

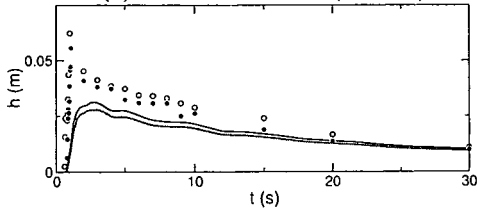


図-5(b) 水深の時系列の比較 (測定点 b)

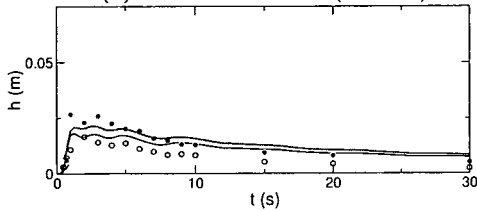


図-5(c) 水深の時系列の比較 (測定点 c)

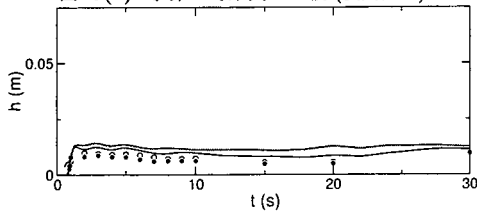


図-5(d) 水深の時系列の比較 (測定点 d)

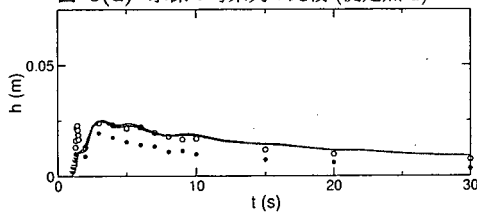


図-5(e) 水深の時系列の比較 (測定点 e)

くなることを再現している。

各測定点の水深および水深平均流速の時系列の計算結果と実験値との比較 (図-5 と 図-6) から、以下のようことがわかる。

Case1 での水深との比較から、(1) 構造物群の背後にある測定点 b では  $t \approx 20$  秒までは実験値より小さな値となるが、それ以降の実験値をほぼ再現している。(2) ゲートと構造物群の間にある測定点 a では  $t \approx 1$  秒までは実験値より小さな値となるが、それ以降の実験値をほぼ再現している。(3) ゲート中心軸から離れた測定点 c, d および e では若干の差異が認められるが、実験

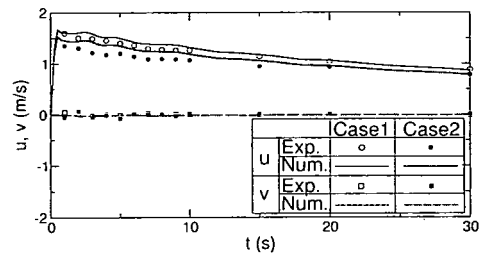


図-6(a) 水深平均流速ベクトルの時系列の比較 (測定点 a)

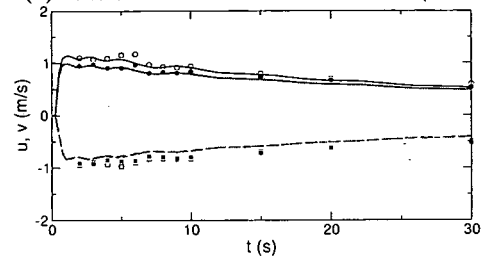


図-6(b) 水深平均流速ベクトルの時系列の比較 (測定点 c)

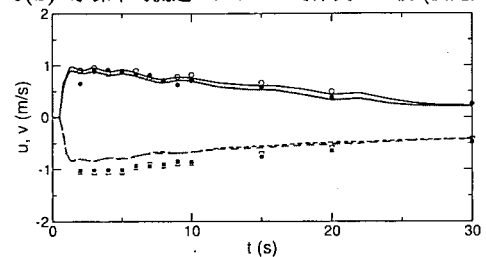


図-6(c) 水深平均流速ベクトルの時系列の比較 (測定点 d)

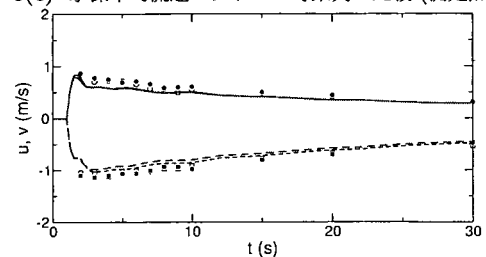


図-6(d) 水深平均流速ベクトルの時系列の比較 (測定点 e)

値をほぼ再現している。Case2 での水深との比較から、(1) 構造物群の背後にある測定点 b では  $t \approx 10$  秒までは実験値より小さな値となるが、それ以降の実験値をほぼ再現している。(2) 樹林帯と構造物群の間にある測定点 a では  $t \approx 15$  秒までは実験値より小さな値となるが、それ以降の実験値をほぼ再現している。(3) ゲート中心軸から離れた測定点 c, d では若干の差異が認められるが、実験値をほぼ再現している。(4) 測定点 e では実験値よりも過大に予測している。

各 Case の水深平均流速ベクトルとの比較から、(1) 樹林帯と構造物群の間にある Case2 の測定点 a では  $t \approx 15$  秒までは、水深の結果と対応して実験値より大きな値となるが、それ以降の実験値をほぼ再現している。(2)

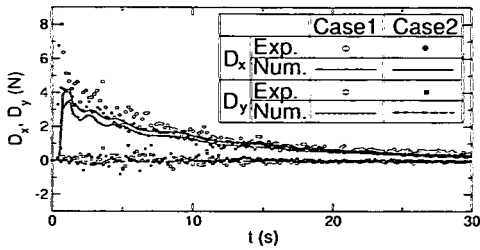


図-7(a) 構造物に働く流体力の時系列の比較 (構造物 A)

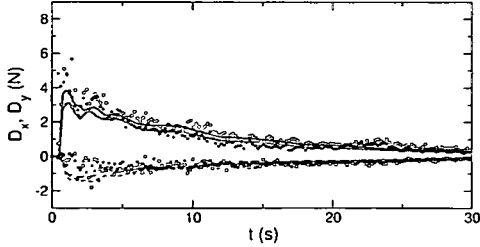


図-7(b) 構造物に働く流体力の時系列の比較 (構造物 B)

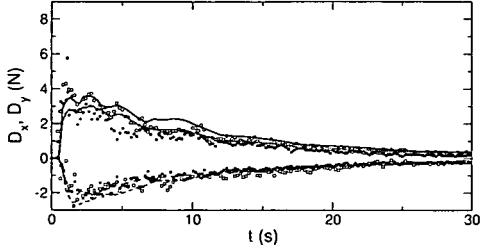


図-7(c) 構造物に働く流体力の時系列の比較 (構造物 C)

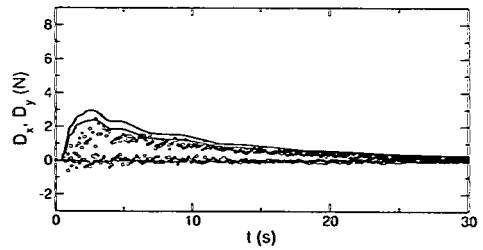


図-7(d) 構造物に働く流体力の時系列の比較 (構造物 D)

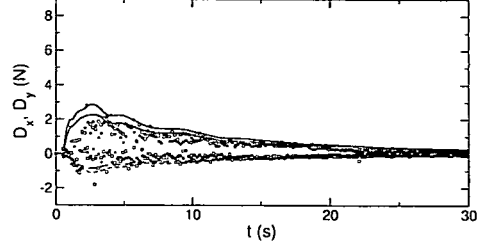


図-7(e) 構造物に働く流体力の時系列の比較 (構造物 E)

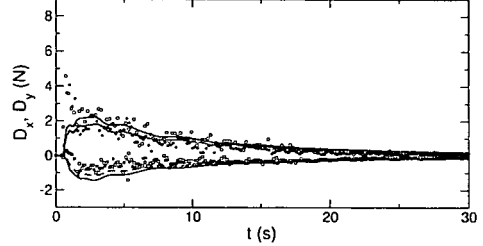


図-7(f) 構造物に働く流体力の時系列の比較 (構造物 F)

Case2 の測定点 a 以外は、いずれの測定点においても、実験値をほぼ再現している。(3) Case1 に比べ、Case2 の流速が遅くなることを再現している。

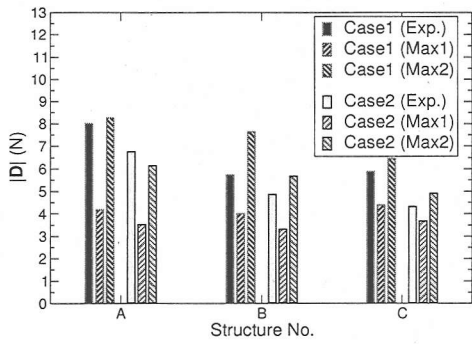
各構造物に働く流体力の時系列の計算結果と実験値の比較(図-7)から、次のようなことがわかる。(1) 1 列目の構造物に働く流体力との比較から、いずれの Case についても、計算結果は氾濫流の到達直後の衝撃的な最大流体力や  $t \approx 10$  秒までの実験値を再現できていない。しかし、それ以降の実験値をほぼ再現している。(2) 2 列目の構造物に働く流体力との比較から、いずれの Case についても、計算結果は  $t \approx 7$  秒までは若干の差異が認められるが、それ以降の実験値をほぼ再現している。(3) Case1 に比べ、Case2 の流体力は全体的に小さくなることを再現している。

以上を要約すると、実験で観測された流れの様子を勘案すれば、氾濫流のフロント部、測定点 a の  $t \approx 15$  秒まで、測定点 b の  $t \approx 15$  秒までは圧力が静水圧分布に従っていないために、浅水流方程式で記述できない流れが生じていると考えられる<sup>21)</sup>。しかし、このような場合を除けば、SA-FUF-2DF モデルが、いずれの Case についても、(1) 氾濫流の全体的な挙動を再現できること、(2) 氾濫流のフロント到達時に生じる衝撃的な最大

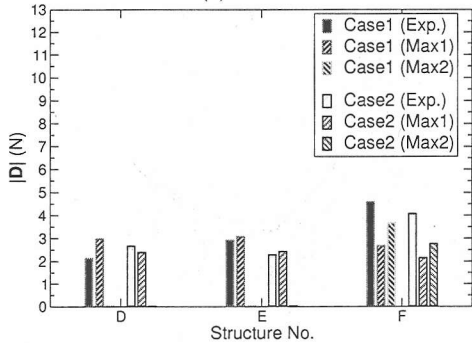
流体力を除いては、構造物に作用する流体力を再現できることが確認できる。

### (3) 構造物に作用する最大流体力に関する検討

SA-FUF-2DF モデルは、上述したように、衝撃的な最大流体力を予測することはできない。サージフロントの衝突により、流れの回り込みのない 2 次元鉛直壁に生じる衝撃力については、Fukui *et al.*<sup>22)</sup>、Cross<sup>23)</sup>、Cumberbatch<sup>24)</sup> および松富<sup>25)</sup> 等により、その予測手法が調べられている。しかし、流水中に置かれた円柱あるいは角柱に作用する衝撃力については、Alavi により得られた結果が Cross の論文<sup>23)</sup> の付録に示されている程度であり、そこで指摘されているように、この結果から有益な情報を得ることは難しい。このように、現時点では構造物に作用する衝撃的な最大流体力の算定方法は確立されていない。そこで、次のような方法で、衝撃的な最大流体力の推定を試みた。まず、流体力を推定したい構造物を取り除いた状態で、そこでのフロント到達時の水深と流速を SA-FUF-2DF モデルで求め、次にこれらより算定した全水頭が圧力水頭に変換されると仮定し、式(3)に基づき最大流体力を求めた。ただし、エネルギー損失や構造物が流れに及ぼす影響を的

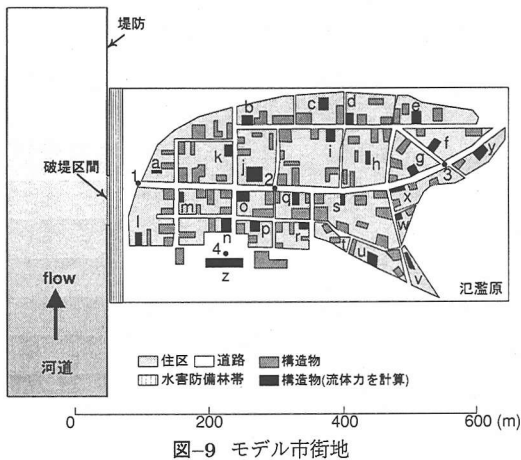


(a) 1 列目



(b) 2 列目

図-8 構造物に働く最大流体力の比較



確に把握することは難しいので、これについては考慮していない。

図-8は、最大流体力の計算結果と実験値との比較を示したものである。図中には、SA-FUF-2DFモデルにより直接求めた最大流体力(Max1)と上記の方法で求めた最大流体力(Max2)を示している。なお、2列目の角柱D、Eについては、衝撃的な流体力が作用しているわけではないので、Max2は求めていない。同図より、

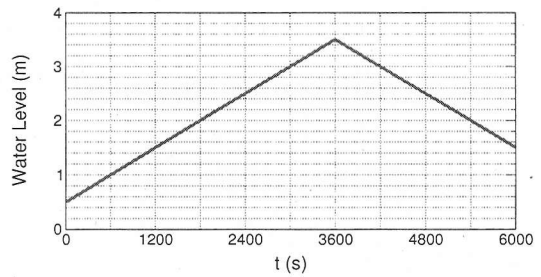


図-10 河道上流端での仮想水位の時間変化

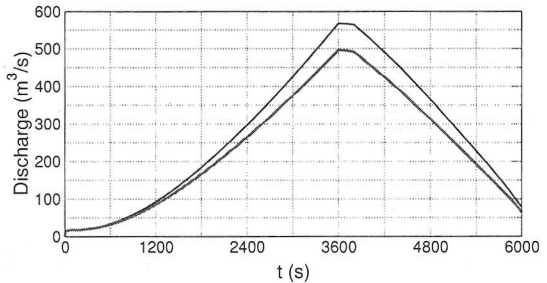


図-11 氾濫原への流入流量の時系列

表-3 計算に用いた係数値

| 粗度係数<br>$n$ | 物体密集度<br>$a$ | 抵抗係数<br>$C_d$ |
|-------------|--------------|---------------|
| 0.043(道路)   | 0.08         | 1.2           |
| 0.067(住区)   |              |               |

表-4 境界およびドライベッド条件

| 適用場所       | 条件                      |
|------------|-------------------------|
| 堤防・構造物の境界  | 閉境界条件                   |
| 氾濫部の開境界    | 自由流出条件                  |
| 水の無い計算メッシュ | ドライベッド条件 <sup>13)</sup> |

次のことが確認できる。(1) 構造物 A, B, C, F では、Max1 は実験値を大きく下回っているが、Max2 は実験値の 0.7~1.3 倍程度、平均で 1.0 倍程度であり、実験結果をほぼ再現している。(2) 構造物 D, E では、Max1 は実験値の 0.9~1.4 倍程度、平均で 1.1 倍程度であり、実験結果をほぼ再現している。氾濫流中の構造物に働く流体力は、氾濫流の流入状態が漸次的な場合と瞬間的な場合とで、また、構造物が構造物群の最前列にある場合と群中にある場合とで変化すると考えられる。上記の結果から、漸次的な流入条件の場合の流体力については、構造物の位置に無関係に、Max1 で推定可能であることが確認できる。また、瞬間的な流入条件で構造物が群中に位置する場合の流体力も同様である。一方、瞬間的な流入条件で構造物が群最前列に位置する

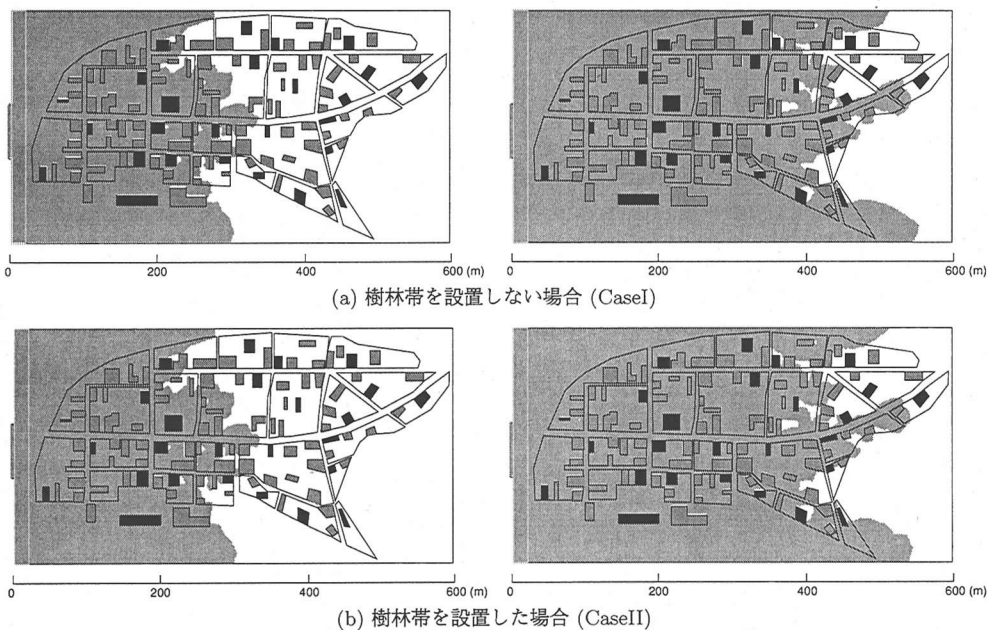


図-12 氾濫流の広がり比較 (左:  $t=500$  秒, 右  $t=1000$  秒)

場合の流体力は、Max2 で推定可能であることが確認できる。

### 5. SA-FUF-2DF モデルに基づく樹林帯の氾濫流量抑制効果と構造物に作用する流体力低減効果の検討

SA-FUF-2DF モデルを実スケール市街地に適用し、樹林帯の治水機能について検討を行う。なお、ここでは構造物に作用する流体力低減効果を樹林帯の被害軽減効果の指標とする。

樹林帯を設置しない場合 (CaseI) あるいは設置した場合 (CaseII) について氾濫解析を実施した。解析対象領域は図-9 に示すモデル市街地である。モデル市街地は、1983年7月の山陰豪雨で大きな被害を受けたM地区<sup>4)</sup>の道路網や構造物の設置状況を参考に作成した。破堤区間は図-9 のように設定した。

樹林帯には、一般に氾濫流の堰上げ作用と流水抵抗による流速低減作用がある。この作用により、氾濫流量は抑制され、堤内地の被害が低減される。従って、検討に際しては、このような効果を考慮できる流入条件を与える必要がある。そこで、図-9 に示すような仮想的な河道を設定し、河道内の初期条件としては、一定水位 (0.5m) と流速 (1.6m/s)、市街地には先述したドライベッド条件を与えた。河道上流の境界条件としては、図-10 に示すような仮想的な水位の時系列を与え、河道下流の境界条件としては、自由流出条件を与えた。な

お、当然のことながら、実河道での具体的な条件がわかっている場合ではその条件を与えることになる。一般に、氾濫流量は河幅や破堤幅、破堤断面形状等に、氾濫流の挙動は氾濫原の地盤高に依存するが、ここでは樹林帯による氾濫流量抑制効果と構造物に作用する流体力低減効果の検討を目的としているので、破堤幅、河幅、破堤断面形状、地盤高については一定として取り扱っている。

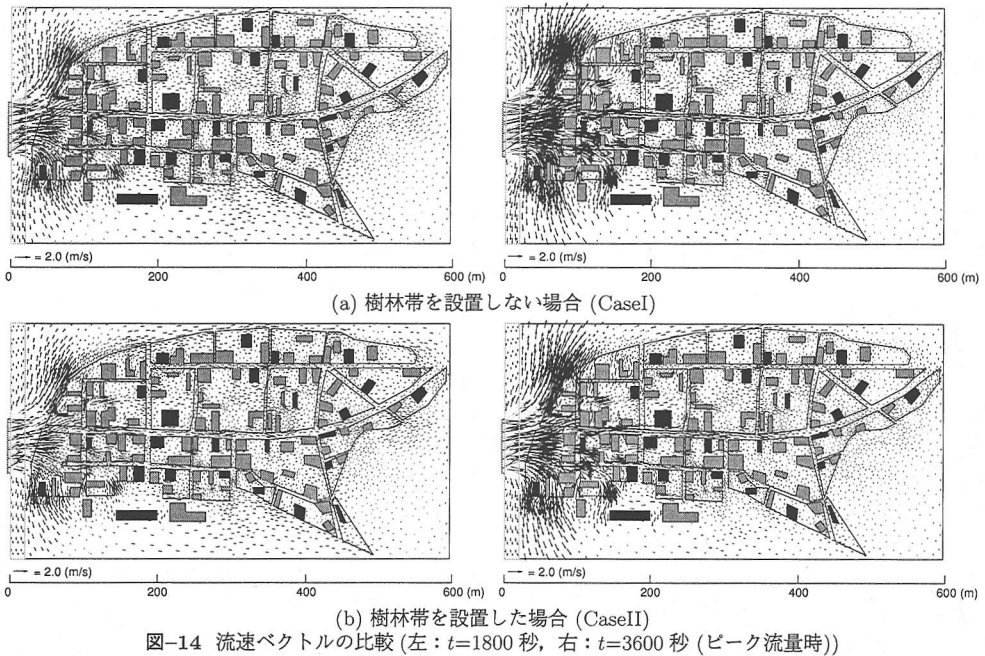
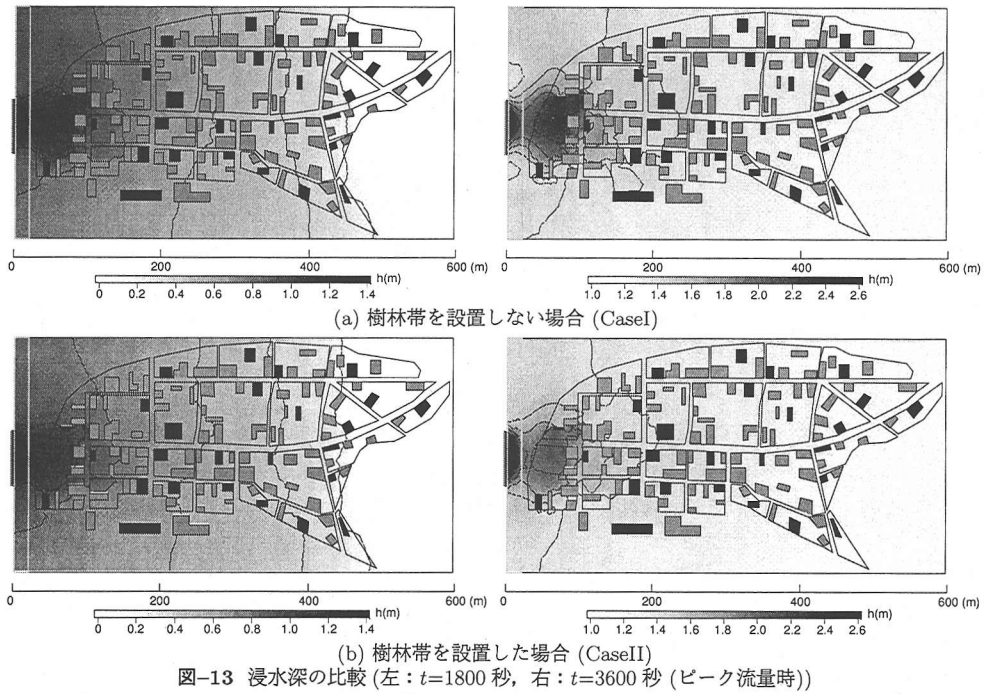
樹林帯は 20m 幅で堤防に沿って設置した。樹林の直径  $D$  および単位面積当たりの樹木本数  $n'_t$  は、樹林の直径と  $100\text{m}^2$  当りの本数との関係<sup>18)</sup>を踏まえ、それぞれ  $0.08(\text{m})$  および  $1.0(\text{本}/\text{m}^2)$  とした。

氾濫原の各境界には、表-4 に示す条件を与えた。計算に用いた Manning の粗度係数  $n$ 、樹林帯の植生密度および抵抗係数は表-3 に示す通りである。計算領域と構造物については、第4節の(1)で述べたメッシュサイズと計算精度の関係を踏まえ、街路についてはその幅をメッシュ幅とすることで、計算対象領域を 5844 個のメッシュで分割した。

図-11 は、市街地への流入流量について、CaseI と CaseII との比較を行ったものである。これより、計算開始から 900 秒程度までは、両 Case には顕著な違いは認められないが、時間の経過と伴に両 Case の違いが大きくなり、ピーク流量時 ( $t=3600$  秒) には、CaseII の流入流量の方が約 10% 程度小さくなるのがわかる。

図-12~図-14 は、氾濫流の広がり、浸水深および流速ベクトルの比較を行ったものである。なお、氾濫流の





広がりについては、氾濫流が計算領域全体に広がらない時間での結果を示している。図-12 から、(1) 氾濫流は道路に集中して広がること、(2) 計算開始から 900 秒程度までは流入流量に大きな変化がないことから、CaseI と CaseII との間に大きな違いが認められないこと、な

どがわかる。図-13 から、(1) 破堤区間付近で浸水深が大きくなること、(2) 計算開始  $t=1800$  秒後では両 Case の間にさほどの違いが認められないが、ピーク流量時 ( $t=3600$  秒) では CaseII の浸水深の方が CaseI に比べ小さくなること、などが確認できる。図-14 から、(1)

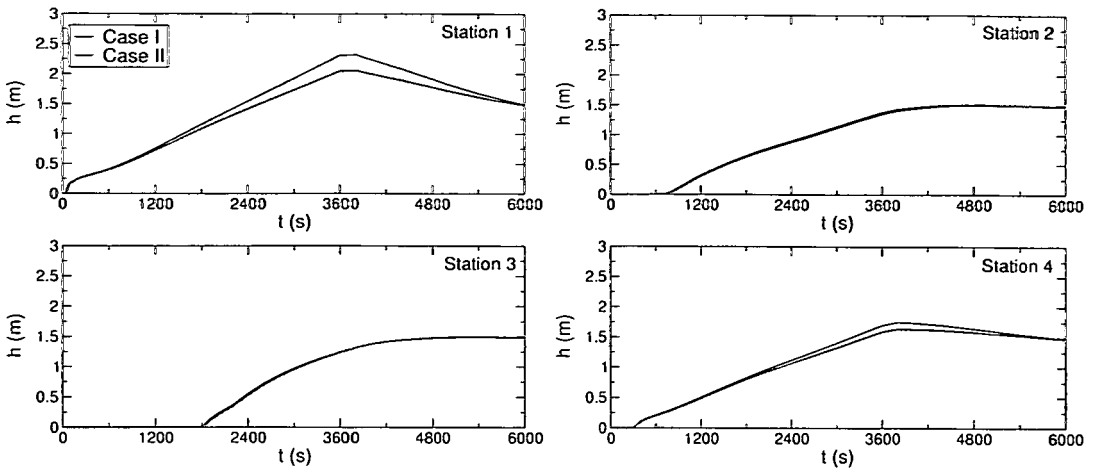


図-15 各測定点における水深の時系列

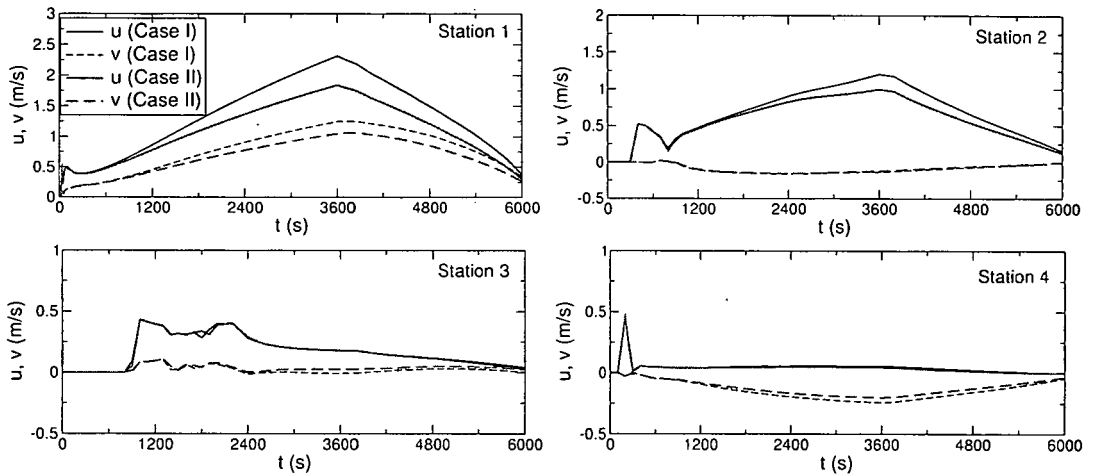


図-16 各測定点における流速の時系列

いずれの Case でも、破堤区間付近で流速が最大となり、構造物によって氾濫流の流向が大きく変化することや氾濫水が道路に集中すること、(2) 樹林帯の設置により、破堤区間付近での流速が大きく減速されること、などがわかる。

図-15 と図-16 に、それぞれ図-9 中の位置 1, 2, 3, 4 の水深と流速の時系列を示す。これらより、上述したように、樹林帯の設置により、破堤区間付近での浸水深が減少することや流れが減速される様子などがわかる。この計算例では、浸水深については最大で 10% 程度、流速については最大で 20% 程度の減少が認められた。

図-17 に、図-9 中の a~z の構造物の中で任意に選択した構造物 a, j, s, z に働く流体力の時系列を示す。これより、流体力は時間の経過に伴って大きくなり、ピーク流量時で最大値に達した後、時間の経過とともに小

さくなることがわかる。また、樹林帯の設置により、流体力が全体的に小さくなることも確認できる。

図-18 に、構造物 a~z に働く最大流体力の比較を示す。なお、図中には参考として、一般木造家屋の水平耐力<sup>9)</sup>を示している。図-17 から明らかなように、この計算例では流体力は漸増し、ピーク流量付近で最大となる。従って、第 4 節で検討したように、最大流体力は Max1 で予測できる。Case I と Case II を比較すると、最大流体力は、流入部から離れた構造物では同程度か若干減少する程度であるが、相対的に大きな流体力が作用している構造物 a, l, m および z では Case I の方がかなり減少することがわかる。この計算例では、流入部付近の構造物 a で最も最大流体力が低減され、約 40% の低減効果が認められた。浸水深や流速が減少する割合に比べ、最大流体力が減少する割合が大きい

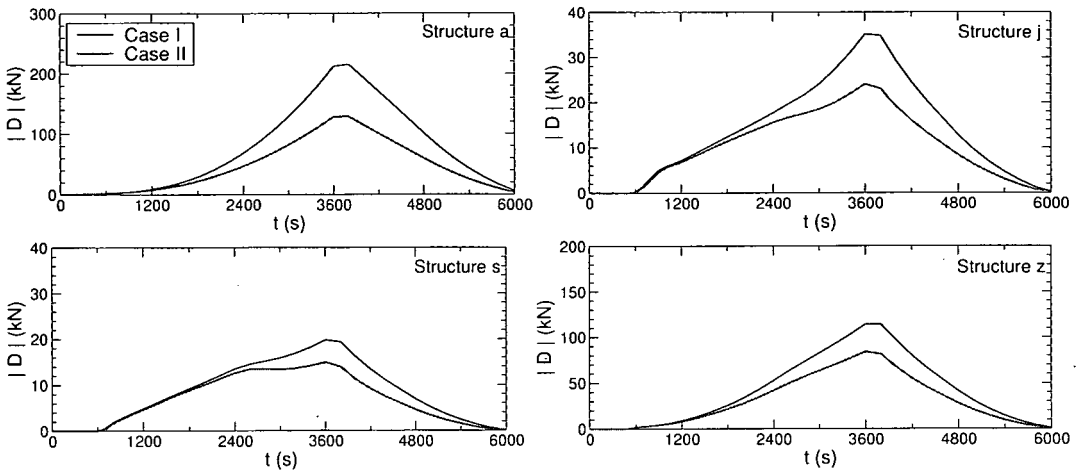


図-17 各構造物に働く流体力の時系列

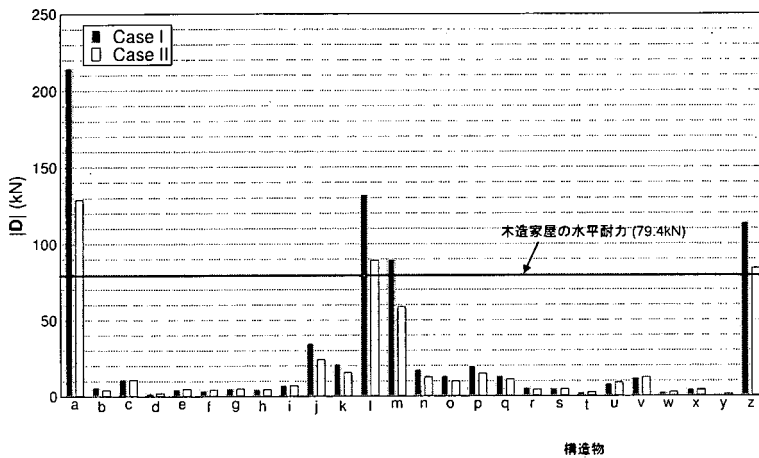


図-18 構造物に働く最大流体力の比較

は、流体力が水深の1乗と流速の2乗に依存するためである。

以上より、SA-FUF-2DFモデルは、樹林帯の氾濫流量抑制効果や構造物に作用する流体力低減効果を検討するための有効な手法であると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、まず、樹林帯がある場での氾濫流の予測手段として、計算メッシュより小さな物体が流れに及ぼす影響を考慮したSA-FUF-2DFモデルを開発した。次に、樹林帯と構造物が存在する氾濫原における氾濫流のフロント位置、水深、流速および構造物に働く流体力に関する実験データを収集し、これらの実験結果に基づきSA-FUF-2DFモデルの予測精度の検証を行っ

た。その結果、SA-FUF-2DFモデルは、樹林帯や構造物がある氾濫原での氾濫流の挙動や氾濫流中の構造物に働く流体力を再現できることなどが明らかとなった。また、氾濫流中に置かれた物体に作用する衝撃力的な流体力の算定方法についても検討・提案した。最後に、SA-FUF-2DFモデルにより、実スケール市街地を対象とした氾濫解析を行い、樹林帯の治水機能の検討を試みた。その結果、SA-FUF-2DFモデルが、樹林帯の氾濫流量抑制効果や構造物に作用する流体力低減効果を検討する上での有効な手法であることが明らかとなった。

今後は、地形起伏を考慮した氾濫流実験に基づき、SA-FUF-2DFモデルのさらなる検証を行う予定である。

謝辞： 本研究は、文部科学省科学技術研究費補助金、基盤研究(B)(2)(代表:秋山壽一郎, 課題番号11450190)

および日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費）の援助を受けた。また、本研究を遂行するにあたり、本学大学院生 小林俊彦君（現（株）奥村組）および大田和正君（現（株）大本組）の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 辻本哲郎（編）：2000年9月東海豪雨災害に関する調査研究，平成12年度科学研究費補助金（特別研究促進費（1））研究報告書，2001。
- 2) 栗林沢一：狩野川流域における集落の立地と災害形態，地理学論評，pp. 166-173，1960。
- 3) 国土交通省河川局治水課監修：堤防に沿った樹林帯の手引，山海堂，2001。
- 4) 河田恵昭，中川一：三隅川の洪水被害—洪水氾濫と家屋の被害—，京都大学防災研究所年報，第27号B-2，pp. 1-18，1984。
- 5) 佐藤智，今村文彦，首藤伸夫：洪水氾濫の数値計算および家屋被害について—8610号台風における吉田川の場合一，第33回水理講演会論文集，pp. 331-336，1989。
- 6) 末次忠司，館健一郎，小林裕明：防災樹林帯の氾濫流制御効果，土木研究所資料第3538号，1998。
- 7) 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の研究，土木学会論文集，No. 600/II-44，pp. 23-36，1998。
- 8) 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）—シミュレーションの手引き及び新モデルの検証—，土木研究所資料第3400号，1996。
- 9) 高橋保，中川一，加納茂紀：洪水氾濫による家屋流失の危険度評価，京都大学防災研究所年報，第28号B-2，pp. 1-16，1985。
- 10) 秋山壽一郎，重枝未玲，小林俊彦，大田和正：定常自由表面流中の正角柱に働く流体力，水工学論文集，第46巻，pp. 1205-1210，2002。
- 11) 重枝未玲，秋山壽一郎，浦勝，小林俊彦：洪水氾濫流と構造物に働く流体力の数値シミュレーション，水工学論文集，第46巻，pp. 833-838，2002。
- 12) 重枝未玲，秋山壽一郎，浦勝，有田由高：非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面2次元洪水流数値モデル，水工学論文集，第45巻，pp. 895-900，2001。

- 13) 秋山壽一郎，重枝未玲，浦勝：非構造格子を用いた有限体積法に基づく1次および2次精度平面2次元洪水流数値モデル，土木学会論文集，No. 705/II-59，pp. 31-43，2002。
- 14) Raupach, M. R. and Shaw, R. H.: Averaging procedures for flow within vegetation canopies, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 22, pp. 79-90, 1982.
- 15) 秋山壽一郎，浦勝，重枝未玲，有田由高：抗群のある場における非定常自由表面流の数値シミュレーション，水工学論文集，第43巻，pp. 527-532，1999。
- 16) 池田駿介，太田賢一，長谷川洋：側壁部植生境界の周期渦の発生機構，土木学会論文集，No. 443，pp. 47-54，1992。
- 17) Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357-372, 1981.
- 18) 浜口達男，本間久枝，井出康郎，高橋克彦，松浦茂樹，島谷幸宏，小栗幸雄，藤田光一：水害防備林調査，土木研究所資料第2479号，1987。
- 19) 秋山壽一郎，重枝未玲，小林俊彦，大田和正：非定常自由表面流中の正角柱に働く流体力，水工学論文集，第46巻，pp. 827-832，2002。
- 20) 林建二郎，藤井優宏，重村利幸：開水路中における円柱群に作用する流体力に関する研究，水工学論文集，第45巻，pp. 475-480，2001。
- 21) 秋山壽一郎，重枝未玲，大田和正：迎角をもってダム破壊流れ中に置かれた正角柱に作用する流体力，水工学論文集，第47巻，pp. 799-804，2003。
- 22) Fukui, Y., Nakamura, M., Shiraishi, H. and Sasaki, Y.: Hydraulic study on tsunami, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 6, pp. 67-82, 1963.
- 23) Cross, R. H.: Tsunami surge forces, *Journal of the Waterways and Harbors Division*, ASCE, Vol. 93, No. 4, pp. 201-231, 1967.
- 24) Cumberbatch, E.: The impact of a water wedge on a wall, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 7, pp. 353-374, 1960.
- 25) 松富英夫：砕波段波衝突による衝撃力について，土木学会論文集，No. 399/II-10，pp. 147-155，1988。

(2002. 5. 7受付)

## NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOOD CONTROL FUNCTIONS OF FLOOD RETARDING PLANTATIONS

Mirei SHIGE-EDA and Juichiro AKIYAMA

A numerical model based on Spatial Averaged Finite volume method on Unstructured grid using FDS technique for 2D Flood flows (SA-FUF-2DF model) was constructed to estimate flood control functions of flood retarding plantations. In experiments, front positions, depths and surface velocities of flood flows in flood plain with structures and flood retarding plantations as well as hydrodynamic forces acting on structures were observed. A SA-FUF-2DF model was verified against these experimental data, and flood simulations in a proto-scale urban area was also carried out. The model can reproduce the complex behavior of flood flows as well as hydrodynamic forces with reasonable accuracy. The flood simulations show that flood retarding plantations are effective in reducing flow discharge into urban area and hydrodynamic forces.