

水害防備林による氾濫流の制御効果

CONTROL OF FLOOD FLOWS BY PLACING FLOOD RETARDING PLANTATIONS

重枝 未玲¹・秋山 壽一郎²・小林俊彦³

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA and Toshihiko KOBAYASHI

¹学生会員 修士(工) 九州工業大学大学院 工学研究科博士後期課程 日本学術振興会特別研究員
(〒 804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

²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)

³修士(工) 株式会社 奥村組 関西支社 土木部 (〒 545-8555 大阪府大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2)

Control of flood flows by flood retarding plantations were investigated through experiments and numerical simulations. In the experiments, front positions, depths and surface velocities of flood flows in floodplain with structures and flood retarding plantations were observed. A SA-FUF-2DF model (a numerical model based on Spatial Averaged Finite volume method on Unstructuredgrid using FDS technique for 2D Flood flows) has been developed and was verified against these experimental data. The model can reproduce the complex behavior of flood flows with reasonable accuracy. The experimental and numerical results show that flood retarding plantations are effective in reducing the flood propagation speed.

Key Words : *flood flow, numerical simulation, SA-FUF-2DF model, flood control, flood retarding plantations, experiment*

1. はじめに

近年, 世界各地で洪水氾濫が発生し, 人命や資産に甚大な被害が生じている。2000 年 9 月の東海豪雨災害では内水や破堤氾濫が発生し, 推定で 9,000 億円の被害が生じたことは記憶に新しい¹⁾。

洪水氾濫を前提とした対策には, 洪水ハザードマップや洪水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。水害防備林は, 洪水氾濫流の制御を行うための手段の一つであり, その構造物に対する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²⁾などで認められている。また, 水害防備林は, 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。

洪水氾濫時に構造物が受ける被害の度合は構造物に働く流体力と相関があることが知られている^{3),4)}。つまり, 構造物に働く流体力は, 水害防備林の被害軽減効果を示す一つの有効な指標となる。末次ら⁵⁾は, 家屋を考慮しない場合の氾濫流の流速の自乗と湛水深の積を流体力と定義し, それを水害防備林による被害軽減効

果の指標として用いることで, 水害防備林が有する被害軽減効果について調べている。ただし, この指標は, 流体力が構造物の配置状況により変化する^{6),7)}ことが考慮されていない。

洪水氾濫流中の構造物に働く流体力については, 福岡ら⁶⁾, 栗城ら⁸⁾および著者ら^{7),9)}により調べられている。特に, 著者らは, FUF-2DF モデル (a numerical model based on Finite volume method on Unstructuredgrid using FDS technique for 2D Flood flows) を構築し^{10),11)}, 本数値モデルが構造物に働く流体力を予測するための有効な手段であることを示した⁹⁾。

本研究は, このような背景を踏まえ, 水害防備林の洪水氾濫流の制御効果と構造物に対する被害軽減効果を明らかにすることを目的としている。ここでは, その第一段階として水害防備林と構造物が設置された氾濫原での洪水氾濫流のフロントの広がり位置, 水深および流速ベクトルに関する実験データを得るとともに, 計算メッシュより小さい物体を空間平均的な抵抗として取り扱う空間平均処理を導入した SA-FUF-2DF モデル (a Spatial Averaged FUF-2DF model) を構築し, 実験結果に基づき FUF-2DF モデルと SA-FUF-2DF モデルの予測精度について検証を行った。

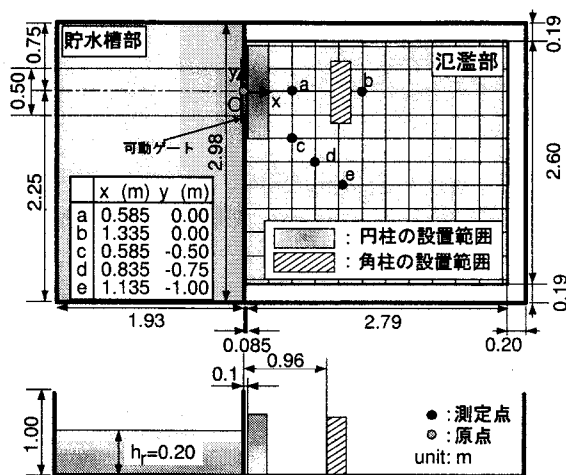


図-1 洪水氾濫シミュレーション水槽と測定点位置

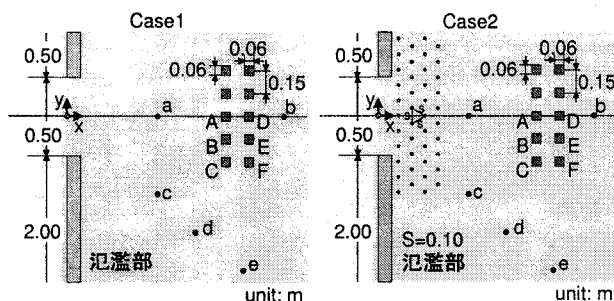


図-2 水害防備林と構造物の配列状況

2. 実験概要

氾濫原に家屋群を設置した Case1 および家屋群と水害防備林の両方を設置した Case2 の 2 通りの実験を行った。

実験装置は、図-1 に示す洪水氾濫シミュレーション水槽である。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、隔壁には可動ゲートが設けられている。なお、隔壁以外の氾濫部の境界は段落ちになっている。

洪水氾濫流には、初期条件の設定が正確かつ安易な非定常流であるダム破壊流れを採用した。氾濫部を水の無いドライベッド状態とし、ゲートをほぼ瞬間的(約 0.1sec)に開放することにより、貯水槽に貯留した水深 $h_r = 0.2\text{m}$ の水を氾濫部に流出させた。

水害防備林は直径 0.01m、高さ 0.15m のアクリル製の円柱でモデル化した。旧建設省土木研究所がまとめた水害防備林の直径と 100m^2 当りの本数との関係¹²⁾に基づけば、単位面積あたりに占める樹林帯の断面積比 $\lambda (= \pi D^2 n' / 4)$ は、 $0.0004 \leq \lambda \leq 0.01$ となる。ここに、 D は樹林帯の直径 (m)、 n' は単位面積当たりの樹木本数 (本/ m^2) である。このことを踏まえ、図-2 に示すように円柱をその中心間隔 S で千鳥状に配列した。なお、この場合の λ は 0.0091 である。

構造物は幅 0.06m、高さ 0.2m のアクリル製の角柱でモデル化し、全国中枢都市における建物占有率が 10

%から 40 %であることから⁸⁾、図-2 に示すように角柱の中心間隔 d で等間隔に 10 個設置した。なお、この場合の占有率は 16 %である。

氾濫流のフロント位置、水深 h および水深平均流速ベクトル U_a の算定は、氾濫部がドライベッド状態であることを踏まえ、前報¹¹⁾と同様に以下のような方法で行った。フロントの位置は、ウラ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により求めた。水深 h は、所定の測定点にレーザースリット光を照射することによりウランで着色した水表面を可視化し、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により求めた。水深平均流速ベクトル U_a は、1 次元ダム破壊流れの実験¹³⁾より得られた $U_a = 0.92U_s$ なる関係を用い補正した。ここで、 U_s は表面流速ベクトルであり、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撮影・収録したそれらの動きを PTV 画像解析することにより求めた。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って発泡スチロール球の識別が困難だったため、流速測定は行っていない。実験結果の信頼性を高めるために、以上の測定は同一条件下で 4 回繰り返した。

3. 数値モデルの概要

(1) 物体の取り扱い

非構造格子は、物体の形状や配置に関係なく、その境界に計算メッシュを効率良く配列することができる。しかし、計算対象領域と比較して小さな物体には、その空間スケールより小さな計算メッシュが必要となり、その総数は多大なものとなる。このため、全ての物体の境界に計算メッシュを配列することは、計算容量の関係上不可能であり、現実的には物体の空間スケールより大きな計算メッシュを用いて計算を行うことになる。

そこで、物体の大きさに応じた以下に示す 2 つの方法で、氾濫原に存在する物体が流れに及ぼす影響を考慮する。

- 境界適合処理 (物体が計算メッシュより大きい場合)
- 空間平均処理 (物体が計算メッシュより小さい場合)

ここで、境界適合処理とは物体の境界に計算格子を配列する方法で、空間平均処理とは個々の物体に働く流体力を空間的に平均することで得られる流体力項を基礎方程式に付加する方法で、物体が流れに及ぼす影響を評価することである。

これらのことを踏まえ、ここでは構造物に境界適合処理、水害防備林に空間平均処理を適用する。なお、水害防備林の空間平均処理には、従来の研究^{14),15)}と同

様に、植生密生度という概念を用いる。

(2) FUF-2DF モデル^{10),11)}の概要

FUF-2DF モデルの基礎方程式は、2次元浅水方程式である。数値解析手法には、2次元浅水方程式が双曲型の偏微分方程式であることを踏まえ、有限体積法(FVM)と流束差分法(FDS)を用いている。計算メッシュには、任意の領域に適用できるように、非構造格子を用いている。FUF-2DF モデルは境界適合処理の場合に用いる。

(3) SA-FUF-2DF モデル

SA-FUF-2DF モデル(a Spatial Averaged FUF-2DF model)は、FUF-2DF モデルに空間平均処理を導入したものである。その基礎方程式は、 U を保存量ベクトル、 E と F をそれぞれ x と y 方向の流束ベクトル、および S を発生項・消滅項ベクトルとすると、式(1)で表される。

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

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

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

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

ここに、 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、マンニングの公式で計算される。 F_x および F_y は空間平均処理を施すことで基礎方程式に付加される流体力項であり、式(2)で表される。

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

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

ここで、 C_d は水害防備林の抵抗係数、 a は植生密生度パラメータ($=D \cdot n'$)(1/m)である。

式(1)を任意の検査体積 Ω で積分した後、ガウスの発散定理を適用すると、式(3)の積分型の浅水方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U dS + \oint_{\partial\Omega} (\mathcal{F} \cdot \mathbf{n}) dL + \int_{\Omega} S dS = 0 \quad (3)$$

ここに、 $\partial\Omega$ は検査体積の境界線、 S は Ω の面積、および L は $\partial\Omega$ の長さである。 $\mathcal{F} \cdot \mathbf{n}$ は境界線 $\partial\Omega$ の法線方

表-1 計算に用いた係数値

Case	粗度係数 n	植生密生度 a	抵抗係数 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
水の無いセル	ドライベッド条件 ¹¹⁾

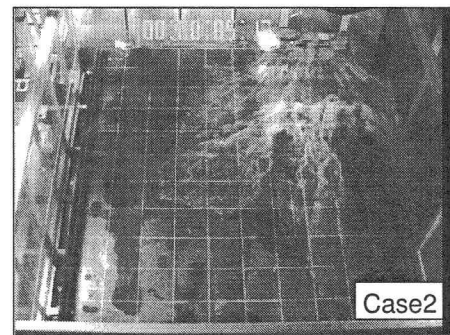
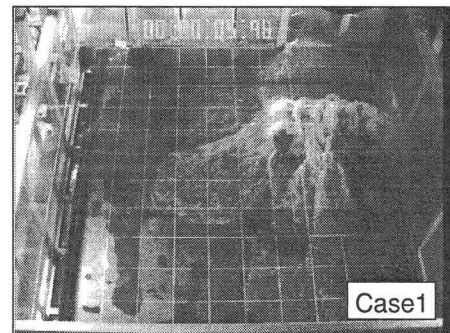


写真-1 流況の一例 ($t=1.5(\text{sec})$)

向を通過する流束ベクトルであり、 x と y 方向の流束ベクトルと境界線 $\partial\Omega$ における外向き単位法線ベクトル $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ を用いると、式(4)のようになる。

$$\mathcal{F} \cdot \mathbf{n} = E n_x + F n_y \quad (4)$$

式(3)の離散化は有限体積法に基づき行われる。時間積分にはEulerの陽解法を、空間積分には流束差分法¹⁶⁾を採用する。SA-FUF-2DF モデルは空間平均処理の場合に用いる。

4. 数値シミュレーションの概要

両Caseともに9055個のメッシュを用いて計算領域を分割した。計算に用いたManningの粗度係数 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、水害防備林をモデル化した円柱群の抵抗係数 C_d は

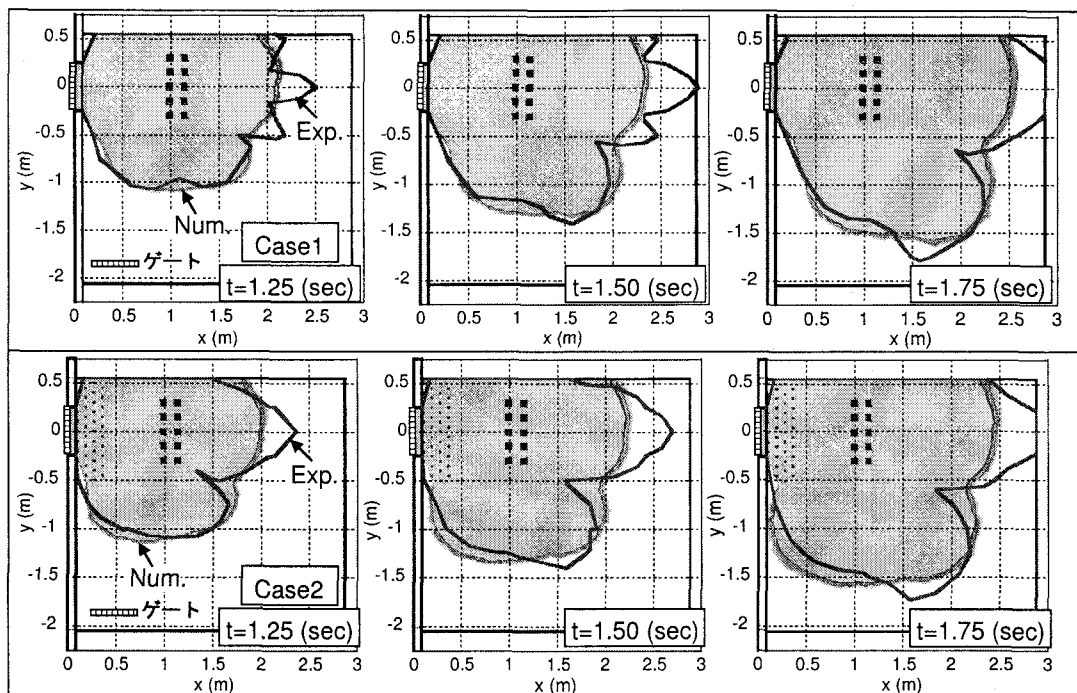


図-3 フロント位置の比較

λとの関係¹⁷⁾から、植生密度 α は円柱群の配列から、表-1のように設定した。各境界には表-2に示す条件を与えた。

5. 結果および考察

(1) 流れ場

写真-1は、両Caseの流況を示したものである。これより、洪水氾濫流は、構造物群の間を通過する流れと構造物群を回り込む流れとに大きく分かれることがわかる。また、水害防備林の存在により、洪水氾濫流の横断方向に広がりがゲート付近で大きくなることも認められる。以下ではCase1にFUF-2DFモデル、Case2にSA-FUF-2DFモデルを適用する。

図-3は、両Caseのフロント位置の計算結果と実験値との比較を各時間ごとに示したものである。なお、ドライベッド条件により与えた閾値 $h_0=(0.00001\text{m})$ より大きくなった水深 h をもって、計算でのフロント位置としている。ここで、 h_0 には本実験と同一条件下の数値実験により求めた計算可能な最小の水深を与えた¹¹⁾。これらの図から、Case1では計算結果はゲート中心軸上付近で違いが認められるものの、横断方向の広がりなど、全体的に実験値を再現していること、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ものの、全体的に実験値を再現していることがわかる。計算結果と実験値との間に差異が生じた理由としては、計算ではどのように h_0 を小さくしても、決してドライベッド状態とはならないこと、実験でのゲート開放時間が厳密には瞬間

的でないことなどが考えられる。

水害防備林を設置しない場合(Case1)と設置した場合(Case2)の計算および実験結果を比較すると、いずれも水害防備林の存在により、ゲート付近で横断方向の広がりが早くなり、ゲート中心軸上でフロントの広がりが遅くなることがわかる。この傾向は、 λ が大きくなるほど強い。これは、水害防備林の設置が洪水氾濫流を拡散するとともに、その到達時間を遅延できることを示唆している。

図-4および図-5は、両Caseの各測定点における水深および水深平均流速の時系列について、計算結果と実験値との比較を行ったものである。これらの図から以下のようなことがわかる。

Case1の水深の比較から、計算結果は、(1) 構造物群の背後にある測定点bではゲート開放から $t \approx 20$ 秒までは実験値より小さな値となり、それ以降では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ではゲート開放から $t \approx 1$ 秒間までは実験値より小さな値となり、それ以降では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ものの、実験値をほぼ再現している。Case2の比較から、計算結果は、(1) 構造物群の背後にある測定点bではゲート開放から $t \approx 10$ 秒までは実験値より小さな値となり、それ以降では実験値をほぼ再現している。(2) 水害防備林と構造物群の間にある測定点aではゲート開放から $t \approx 15$ 秒までは実験値より小さな値となり、それ以降では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も

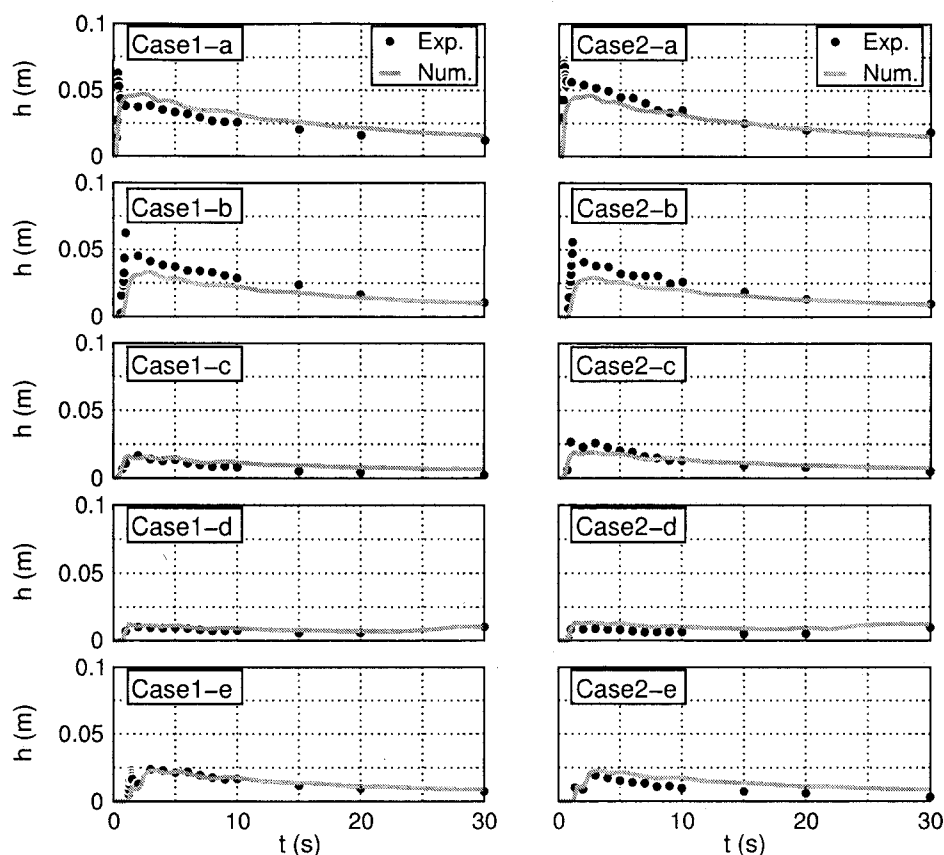


図-4 水深の時系列の比較

の、実験値をほぼ再現している。

両 Case の水深平均流速ベクトルの比較から、計算結果は、(1) 水害防備林と構造物群の間にある Case2 の測定点 a ではゲート開放から $t \approx 15$ 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り、それ以降では実験値をほぼ再現している。(2) 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。

Case1 の測定点 a の約 1 秒間、Case2 の測定点 a の約 20 秒間および両 Case の測定点 b の $t < 20$ 秒では再現性に若干の問題が認められる。特に、Case2 の測定点 a や測定点 b で長時間にわたって計算結果と実験値との間に差異が生じている。これは、鉛直方向の加速度の大きな浅水流方程式では記述できない流れが生じているためだと考えられる。しかしながら、全体的に FUF-2DF モデルと SA-FUF-2DF モデルは洪水氾濫流の挙動を十分な精度で再現している。

水害防備林を設置しない場合 (Case1) と設置した場合 (Case2) の実験および計算結果を比較すると、水深については、ゲート付近での測定点 a を除き、いずれの測定点においても大きな違いが認められない。水深平均流速ベクトルについては、ゲート付近の測定点 a では図-5 の丸で示すように最大流速値が計算結果および実験値のいずれも小さくなるなど、全体的に流速が小さくなっている。これは、水害防備林が抵抗となる

ことで、洪水氾濫流の勢いを減じたためだと考えられる。ただし、図-3 のフロント位置の実験値が示すように、水害防備林の設置により氾濫域が広がるため、水害防備林が無い場合に影響を受けなかった場所で被害が生じる可能性がある。このように、水害防備林は人為的な被害を発生させる可能性があり、その配置には十分な検討が必要である。

以上のことから、SA-FUF-2DF モデルが、洪水氾濫流の全体的な挙動だけでなく、水害防備林の設置による洪水氾濫流のフロント到達時間遅延効果や減勢効果を良好に再現できていることがわかる。

6. おわりに

本研究では水害防備林と構造物が設置された氾濫原での洪水氾濫流のフロントの広がり位置、水深および流速ベクトルに関する実験データを得るとともに、それに基づき FUF-2DF モデルと SA-FUF-2DF モデルの予測精度について検証を行った。その結果、FUF-2DF モデルが構造物がある氾濫原での洪水氾濫流の挙動を再現できることがわかった。さらに、SA-FUF-2DF モデルが水害防備林や構造物がある氾濫原での洪水氾濫流の挙動や水害防備林の設置によるフロント到達時間の遅延や洪水氾濫流の減勢効果をほぼ再現できることがわかった。このことから、水害防備林の設置方法等に

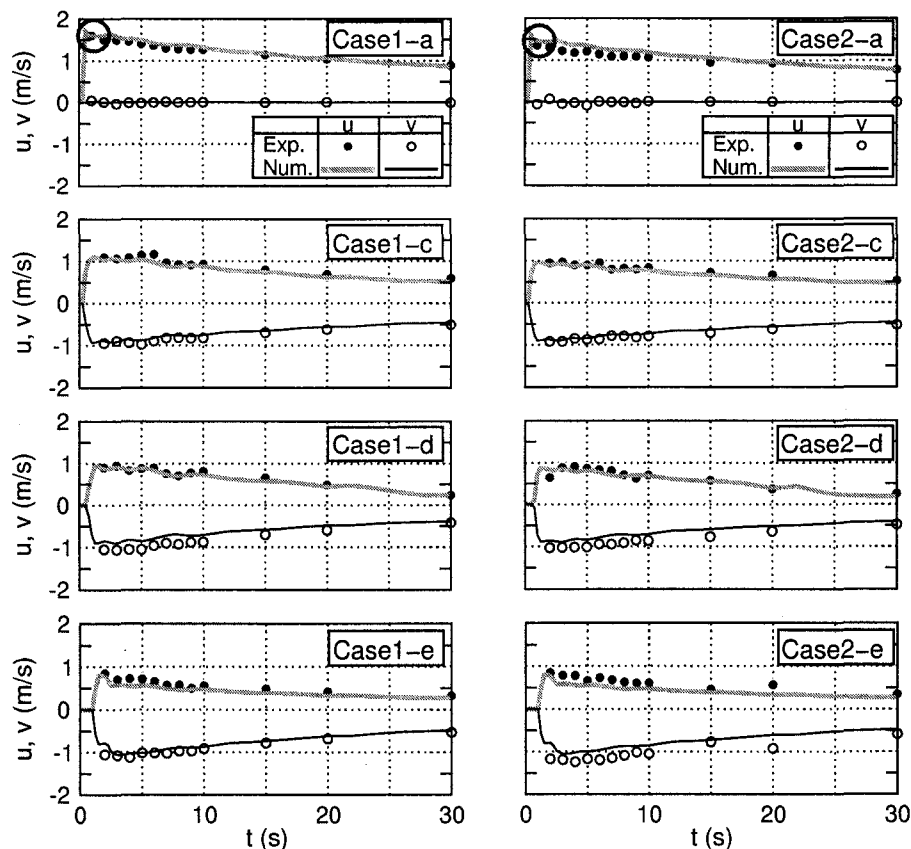


図-5 水深平均流速ベクトルの時系列の比較

について検討を行う上で、SA-FUF-2DF モデルによる数値シミュレーションは有効な手段であると考えられる。

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) 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 大田和正君の協力を得た。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) 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，Vol. 27 B-2，pp. 1-18，1984。
- 4) 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-，第 33 回水理講演会論文集，pp. 331-336，1989。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 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) 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，Vol. 46，pp. 833-838，2002。
- 10) 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。
- 11) 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 (第 II 巻 5 月号に掲載予定)。
- 12) 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。
- 13) 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。
- 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：杭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，Vol. 43，pp. 527-532，1999。
- 16) Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357-372, 1981。
- 17) 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，Vol. 45，pp. 475-480，2001。

(2002. 4. 15 受付)