# 準3次元CIP-Sorobanモデルによる 利根川洪水流の大規模数値計算

LARGE-SCALE NUMERICAL SIMULATION OF FLOOD FLOW IN TONE RIVER BY USING QUASI-3D MODEL WITH CIP-SOROBAN METHOD

> 吉田圭介<sup>1</sup>・石川忠晴<sup>2</sup>・箕浦靖久<sup>3</sup> Keisuke YOSHIDA, Tadaharu ISHIKAWA and Yasuhisa MINOURA

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 東京工業大学大学院 産学官連携研究員(〒226-8502 横浜市緑区長津田4259番地)
 <sup>2</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学大学院 教授(〒226-8502 横浜市緑区長津田4259番地)
 <sup>3</sup>学生会員 東京工業大学大学院 博士課程(〒226-8502 横浜市緑区長津田4259番地)

Large-scale horizontal vortices are induced at the boundary between a main channel and flood plains by shear instability in curved compound channel. It is well known that this kind of organized motion governs the macro-scale flows and bed processes in rivers. We carried out a large-scale numerical simulation of the flood flow occurred in the Tone River in September, 1998. The computation domain is 20km-long lower reach of the river, from the Fukawa observing station to the Shinkawa station. The results showed that the horizontal vortices longitudinally develop and decay according to the hydraulic conditions such as a channel curvature, a bed roughness and a relative water depth. Our numerical model was shown to be reasonable, because the simulated vortices have the almost same spatial scale as the shading patterns observed on the free-surface in the aerial photos taken during this flood.

Key Words: large-scale horizontal vortices, flood flow in Tone River, CFD, quasi-3D flow model

#### 1. はじめに

我が国では台風や梅雨による豪雨が多く,また河 川の勾配が大陸と比べて急なので,洪水が比較的短 時間で下流へ伝搬し,水害の頻度が高い.そのため, 古くから治水研究が盛んに行われてきた.例えば, 洪水波追跡や貯留効果などの縦断特性に関する項 目や,砂州・偏流などの平面的な流況特性,流砂に よる河道変形,河道樹木の影響および洪水流の局所 的な特性など多岐にわたる研究が挙げられる<sup>1)</sup>.

一方,実際の現地洪水を扱う上では,(1)流動モデ ルや流砂の非平衡特性および上・下流端の境界条件 などが不確実であり,(2)洪水観測は危険を伴うため, 解析結果の検証に用いる観測情報が不足している 点,などが現在まで指摘されている.その結果,実 務に活かされる学術成果は得られにくく,河川実務 では水害防除において経験的ないし行政的基準に よる一律的対応がなされる場合が多いと言われる.

そこで、学術研究を実務へ活かす上で重要なポイントとしては、(1)洪水流動や河床変動に関する現地 観測情報の利用や、(2)学術成果と現地情報との比較 検討、が挙げられる.現地情報の取得に関しては、 近年、高精度な流量観測法の開発<sup>2)</sup>や、画像計測法 による河川流の面的な流況把握<sup>3)、4)</sup>が行われており、 今後、良質な情報が得られることが期待される.

一方,学術的な成果と,現地流動や河床変動との

比較検討に関しては,現在まで洪水前後の局所的な 河床変動計測とその数値解析5,6や,縦断的な水際 痕跡の追跡<sup>1)</sup>などが行われてきたが、数十km以上の 広範囲に及ぶ平面流況に関する解析や検討はあま り行われていない.しかし、後で示すように、洪水 時に観測される航空写真からは大規模かつ秩序的 な乱れ構造が観察され、これが河川のマクロな流動 と河床変動を支配すると考えられる.また、このよ うな構造は、河道内の樹木、河道の蛇行度、複断面 河道での相対水深など,複数の要素により縦断方向 に発達や減衰を繰り返すため,局所性や周期性を仮 定した解析法では実際の複雑河道上の流れの遷移 過程を再現することは困難であると考えられる.一 方,近年では比較的高速な計算機も利用出来る環境 が整いつつあり, 大規模な平面流計算が可能となっ てきている. そのため、従来まで困難であった大規 模な計算の成果を実務へ活かすことが望まれる.

本報では著者ら<sup>7</sup>が提案した簡易準3次元モデル を利根川下流約20km区間(76kp~58kp)での洪水流 へ適用する.そして,現地の流動情報として洪水航 空写真を利用し,その情報との比較に基づいて,河 道縦断方向約20km区間における大規模渦構造の再 現性について検討を試みる.ここで,本研究では準 3次元モデルを用いているため,浅水流モデルのよ うに対数則などの仮定を用いることなく,計算結果 から水表面流速が直接算定できる.そのため,計算 結果と航空写真解析の結果との比較は合理的に可 能である.一方,この解析に先立ち,本モデルによ る平面せん断渦構造の再現性について,既往の植生 域境界渦に関する研究<sup>8),9)</sup>を例として検討を行う. その際には,周期境界と上下流端境界条件の,計算 結果に及ぼす相違について言及する.

## 2. 基礎方程式と数値解法

#### (1) 基礎方程式

著者ら<sup>7</sup>は蛇行河川流の解析を目的にして,静水 圧近似と,平面流速場の鉛直方向分布に線形モード を仮定し,準3次元モデルの枠組みに基づいて,直 交曲線座標(*s*,*n*,*z*)上で次式の流動基礎方程式を導 出した.ただし,(*s*,*n*,*z*)は各々,流下方向,横断方 向および鉛直方向である.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{n^*} \frac{\partial M_0}{\partial s} + \frac{1}{n^*} \frac{\partial}{\partial n} (n^* N_0) = 0$$
(1)

$$\frac{\partial M_0}{\partial t} + \frac{1}{n^*} \frac{\partial M_0 u_0}{\partial s} + \frac{\partial M_0 v_0}{\partial n} + \frac{2\sigma}{n^*} (M_0 v_0)$$

$$= -\frac{gh}{n^*} \frac{\partial H}{\partial s} - \frac{\tau_s}{\rho} + Reys + \Gamma_s$$
(2)

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} + \frac{1}{n^*} \frac{\partial N_0 u_0}{\partial s} + \frac{\partial N_0 v_0}{\partial n} - \frac{\sigma}{n^*} (M_0 u_0 - N_0 v_0)$$

$$= -gh \frac{\partial H}{\partial n} - \frac{\tau_n}{\rho} + Reyn + \Gamma_n$$
(3)

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{1}{n^*} \frac{\partial M_1 u_0}{\partial s} + \frac{\partial M_1 v_0}{\partial n} = \tau_s^* + \Gamma_s^* + D_s + Reys^*$$
(4)

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{1}{n^*} \frac{\partial N_1 u_0}{\partial s} + \frac{\partial N_1 v_0}{\partial n} = \tau_n^* + \Gamma_n^* + D_n + Reyn^*$$
(5)

ここで, t は時刻, h は水深, g は重力加速度, (u,v) および (M,N) は各々 (s,n) 方向のReynolds平均流速 と対応する線流量(下添え字の0は全層流, 1は偏差 流),  $\sigma$  は s 軸の曲率, H は水位, ( $\tau_s$ , $\tau_n$ ) は(s,n) 方 向の河床せん断応力,  $\rho$  は水の密度であり,  $n^*$ (=1+ $\sigma$ n) は曲率半径  $r_o$ で規準化された座標である. Reys と Reyn は (s,n) 方向のReynolds応力であり, 式 中のその他の項 $\Gamma_s$ , $\Gamma_n$ , $\Gamma_s^*$ , $\Gamma_n^*$ , $\tau_s^*$ , $\tau_n^*$ , $D_s$ , $D_n$ , Reys<sup>\*</sup> およ び Reyn<sup>\*</sup> の詳細に関しては前報<sup>7)</sup>を参照願いたい.

通常の浅水流モデルでは、式(1)~式(3)の3式のみを用い、3つの未知数 $h,M_0,N_0$ を求める.ただし、この際、 $\Gamma_s = \Gamma_n = 0$ とする.一方、本報で用いる準3次元モデルでは、式(1)~式(5)の5式を利用し、5つの未知数 $h,M_0,N_0,M_1,N_1$ を算定する.浅水流モデルとの相違は、式(2)と式(3)に現れる2つの項 $\Gamma_s,\Gamma_n$ によって、第1種2次流による平面内の運動量輸送を簡易に考慮できる点にある.また、本モデルでは既往の準3次元モデル<sup>6),9</sup>と比べてモード数が少ない.これは、本報では広域の実現象の解析と実務への応用を念頭に置き、出来る限りシンプルに、かつ少ない計算コストで準3次元化を試みたためである.

# (2) 数值解法

CIP法の時間分割法(mode-splitting)の考え方に従い、基礎式(1)~(5)を移流相と非移流相に分離して、順次計算を行う.移流相の計算ではCIP-Soroban法を適用して、数値拡散を抑えた移流計算を行う.一方、非移流相の計算では境界適合座標法を利用する.また、水深の計算では非圧縮性流体の解法の1つである、SMAC法とほぼ同様の考えに基づき、半陰解法により流速と水深のカップリング計算を行う.これは一連の計算を安定にし、かつ保存性を満足させるためである<sup>10)</sup>.なお、計算の過程では、直交曲線座標と境界適合座標の間で、物理量は適切に交換される.以上の計算法の詳細は前報<sup>7)</sup>を参照頂きたい.

#### (3) 境界条件と乱流モデル

流入境界条件としては,流量を上流端断面で与える.この際,断面内ではManning式から水深のべき 乗に比例する流量を想定し,各計算セルに振り分けた.一方,流出境界条件としては,横断方向で同一 の水位を与えた.河岸では水深平均流速の2乗に比 例する摩擦力を与えた.また,乱流モデルには渦粘 性近似による,経験的0次モデル式を用いた.

# 3. 計算法の適用例1 ~植生域境界の平面せん断渦の再現性~

本節では計算モデルの適用性を検討する目的で, 平面せん断不安定渦の再現計算を行う.このような 場を対象とした開水路流の研究には,低水路河岸に 樹木を配置した場合の複断面河道の平面構造を扱 った例<sup>11)</sup>や,長方形死水域における平面渦構造を扱 った例<sup>12)</sup>など多数が挙げられる.本報では植生境界 を有する開水路場を計算対象に選んだ.既往の研究 <sup>8),9),13)</sup>では,理論,実験および数値解析を駆使した 検討がなされており,植生境界で発生する周期渦の 発生と発達過程に関する重要な知見が得られてい る.本節では上述の計算モデルを用いて,それらの 結果と比較を行い,本モデルの検証を行う.

#### (1) 流動場の概要

図-1には計算対象の流れ場,その寸法および計算 で用いる座標系を示した.縦断方向60m,横断方向 0.96mの矩形開水路において,左岸部には0.27mの横 断幅を有する植生域を設ける.以下,池田ら<sup>8)</sup>の実 験,灘岡・八木の計算<sup>9)</sup>と同様に,河床縦断勾配は 1.61×10<sup>3</sup>とし,上流端では一定流量(=15.71/s)を与 え,下流端では一定水位(=0.06m)とした.ここで"植 生域"と定義された領域では,既往の研究<sup>9,13)</sup>と同 様に,実際の植生1本1本を扱うのではなく,植生密 度という形で流動に対する効果を考慮する.

#### (2) 計算条件

灘岡・八木の計算<sup>9</sup>を参考にして,時間刻み $\Delta t$ は 0.002sec,空間解像度は縦断方向に $\Delta x = 1.5$ cmとした. 一方,横断方向では,植生域と非植生域の境界部で



図-1 計算対象の流れ場,その寸法および計算で用いる座標系



図-2 瞬間渦度 Ω の分布(x=10~15m, 浅水流モデル)

Δy =0.9cmとし, それ以外では Δy =1.8cmとした. その結果, 縦断・横断方向に1920点と128点配置した.

粗度や抵抗が横断方向に異なる河床で生ずる,平 面せん断渦に関する既往の研究では,計算コストを 抑えて現象の基本的特性を把握するために, 浅水流 モデル<sup>9)</sup>, 準3次元モデル<sup>14)</sup>ともに, 周期境界条件を 適用している場合がある.一方,本報では後の節で 示すように,縦断方向に地形や地被条件が変化する 実現象での平面渦の発達・減衰過程を扱いたいため, 上・下流端で境界条件を設定している.この際,同 ーの解像度で境界条件の影響を排除した結果を得 るために、本報では縦断方向に60mの距離を設け、 多数の計算点を用いている.また,上流端には平均 流の1%程度の人工的な擾乱を与えた<sup>9</sup>. なお,本計 算で示す結果は、10時間程度の助走計算を行った後 の5分間のデータを元に作成した. さらに、本節で は乱れの計算法として、上述の0方程式モデルに加 えて, 灘岡・八木のSDS&2DHモデル<sup>9)</sup>も利用した.

#### (4) 計算結果の考察

図-2には瞬間渦度 $\Omega$ [1/s]のコンターを示した.こ れらは本報(浅水流モデル適用時)の計算結果であ り, x=10~15mにおける結果を示した.既往研究<sup>9</sup> と同様に,せん断不安定から平面乱流渦の形成とい う非線形発達過程が観察される.この渦塊の平均移 流速度 $u_c$ と,渦塊が周期境界条件の下で"平衡状態" へ遷移する時間 $\Delta T_c$ (~60 sec)<sup>9</sup>との積から移流距離  $\Delta x_c$ を見積もると, $\Delta x_c$ は12~15m程度である.図-2 からは渦中心同士の間隔は1.2m程度と推定される. この結果は灘岡・八木の結果<sup>9</sup>と一致し,本計算モ デルの有効性が確認できる.なお,ここで乱流モデ ルに0方程式モデルを用いた場合には定量的な相違 は若干あったが,定性的には同様の結果を得た.

図-3には浅水流モデルから計算された,各縦断距離xにおける,植生境界y=0.69m上の水深平均主流



図-3 水深平均主流速の変動のパワースペクトルP (植生境界,浅水流モデル,助走後の5分間のデータ)

速の変動パワースペクトルを示した. 横軸は周期T [sec]である. 図中には池田ら<sup>8)</sup>の実験で得られた, 水平渦の周期データ(=約6.3sec,上流端より7mで計 測)も併示した. 図-3より,縦断方向に x=8mを過ぎ ると、スペクトルはほぼ平衡状態に達する. x=10m を過ぎるとそれ以後は渦の合体などにより、周期 6sec以上の渦スケールの成分が増大することがわか る. また,  $x = 8 \sim 14 \text{m}$ の結果からは、池田ら<sup>8)</sup>の実験 結果ともほぼ良好に一致する.一方,灘岡・八木<sup>9</sup> の結果では"平衡状態"(~60sec)以降の時間帯では 渦は安定した状態を維持していたが、本報では x=15mより下流で渦の空間スケールはさらに大き くなることが分かった.この理由として、灘岡・八 木の計算<sup>9</sup>では周期境界を仮定しているため、計算 領域が渦構造を規定しているとも考えられる.計算 領域と渦スケールに関連して、福岡ら11)は縦断方向 に発達する渦の卓越スケールについて論じており, 水路長が不十分である場合には,当該縦断距離にお ける一時的な卓越渦が得られると指摘している.

図-4には準3次元モデルを用いて計算した場合の 瞬間渦度のコンター(x=10~15m)を示した.この渦 度は準3次元モデルから計算された水深平均流速か ら算定した.図-2と比較すると、同様の周期的な大 規模渦構造は存在するものの、乱れの発達が空間的 に下流側へ遅れ、それほど明瞭でなく、渦構造が局 所的に崩壊している様子が観察される.これは準3 次元化により水深方向に流速分布をもつことで、植 生境界において水深一様の運動量交換ではなく、鉛 直位置 z によって方向性が異なる交換が行われる ため、秩序的な平面渦構造を破壊するためだと考え



図-4 瞬間渦度 Ω の分布(x=10~15m, 準3次元モデル)

られる.また、実際の流れを再現するためには、上流端の乱れに配慮する必要があると指摘できる<sup>14)</sup>.

図-5には準3次元モデルから計算された,各縦断距離xにおける,植生境界y=0.69m上の水深平均流速の変動パワースペクトルを示した.横軸は周期T[sec]である.スペクトルはx=10m程度まで発達し,その後ほぼ平衡状態に至ることがわかる.浅水流の結果と比較して,x=14mより下流では時間的に小さい変動成分も観察されるが,T=6.3s付近でスペクトルは最大値をとることがわかる.

以上より,若干の定量的な相違はあるものの,浅 水流モデル・準3次元モデルともに本計算法を用い ることで,平面渦の発生周期に関してはほぼ既往の 結果を再現できることがわかった.

# 4.計算法の適用例2~平成10年9月 利根川洪水流動の再現性~

本節では平成10年9月に発生した利根川洪水を対象に,流れ場の大規模な乱れ構造に関して航空写真 との比較を行い,本計算法の適用性を検討する.な お,以下の解析では,対象とする洪水時に上空から 撮影された航空写真から,適宜,流れ場の定性的・ 定量的情報を得て,それらと計算結果と比較する.

#### (1) 平成10年9月洪水の概要と計算対象領域

平成10年の台風5号により9月17日に生じた洪水 は、利根川で戦後第3位にあたる規模の出水であっ た.図-6にはこの時に布川流量観測所(76kp)と新川 水位観測所(58kp)で観測された、流量と水位の時間 的推移を示す.ピーク流量は7559m<sup>3</sup>/sであり、計画 高水流量である10500m<sup>3</sup>/s(生起確率1/200)に比べて やや小さい.台風5号により生じた降水のピークは 前日の9月16日であったが、出水が利根川下流部に 到達するのには1日程度かかった.

図-7には計算対象区間の浅深図コンターを示す. この浅深データは縦断方向に500m毎の測量結果を 適宜線形補間して得ている.計算領域では洪水時に は概ね複断面河道となる(図中,大まかには,青色・ 水色部が低水路).65kp地点では左岸側に広い高水 敷が存在し,低水路は蛇行している様子が伺える.

#### (2) 計算条件

本報では洪水流を準定常流とみなし、布川観測所



図-5 水深平均主流速の変動のパワースペクトルP (植生境界,準3次元モデル,助走後の5分間のデータ)



図-6 平成10年9月利根川出水における流量と水位の時間的推移(流量:布川観測所,水位:新川観測所)

でピーク流量を観測した,9月17日午前7時(図−6中 の○印)における河川流量(布川流量観測所,76kp) と水位(新川観測所,58kp)を境界条件として計算 を行い,その結果を現地情報と比較する.

時間刻み Δt は0.5sec,空間解像度は縦断方向に 1521点,横断方向に47点である.このような高密度 の格子を配置した理由は,主流速の横断分布のみな らず,洪水時に現地で観察される平面渦構造の再現 性について検討するためである.

助走計算としては10時間分を設けた.以下で示す 結果では、その後の1時間の間に得られた計算デー タから諸量を算定している.上流端では当初、主流 に対して3~5%程度の擾乱を与えて計算を行って いたが、上流端の近傍を除いて計算結果に擾乱の影 響は観察されなかった.そこで、擾乱を与えない条 件で計算を行った.また、この洪水が発生した時の 現地の地被条件(植生や砂礫、等)が不明確であっ たため、粗度係数に関しては幾通りかの試行計算の 後、低水路部で0.025、高水敷で0.08と一様に決定し た.これについては、今後、検討の余地がある.

#### (3) 主流速の比較

図-8および図-9には70kpと60kpの両地点におけ る,主流速の横断分布に関して,計算結果と航空写 真解析の結果を併示した.横軸は右岸からの横断距 離y[m],左側縦軸は主流速u[m/s],右側縦軸は河床 高z[m]を示す.ここで行った"航空写真解析"とは,





数秒の時間を離して撮影される,一続き2枚の航空 写真上に現れる河川表面の濃淡模様の相対的な移 動量から,画像相関法により流速ベクトルを算出す る一般的な方法を指す.両地点では濃淡模様は明瞭 だったため,既報<sup>4)</sup>のように実体視による高精度な 解析を行っていない.図中の計算結果は,水表面で の主流速の2通りの結果を示している.青線は時間 平均流速uに対して,流速変動の標準偏差u'を差し引 いたものであり,赤線はそれを加えた結果である.

航空写真解析の結果は撮影時刻(70kp:7時53分, 60kp:8時12分)における瞬間の流れ場の結果であり, 時間平均操作を施した計算結果とそのまま比較す ることはできないが,両図から計算結果は航空写真 解析の結果と定性的には一致することがわかる.一 方,詳細に見ると,大きな流速勾配の現れる横断位 置が計算と写真解析でずれていることがわかる(例 えば,図-8の右岸側).この原因としては,(1)計算 で用いた地形情報が500m毎の測量結果を内挿した ものであり,低水路河岸の位置が確かではない,(2) 植生の効果が適切に考慮されていない,といった点 が考えられ,今後検討する必要がある.

#### (4) 渦度分布

図-10には瞬間渦度Ω[1/s]の計算結果を示す.本 計算で利用した準3次元モデルでは、水表面流速、 水深平均流および河床近傍流速の3種類を計算でき るため、この渦度は水表面の流速値から計算した. 図-10(a)には解析領域全体に対して、図-10(b)には 60kp付近の拡大図を示した. 図-10(a)から, 解析区 間全体を通じて,低水路と高水敷間の流速差により 生ずる平面渦が,低水路河岸に沿って並列して存在 する様子が観察される.また,並列構造が比較的安 定して存在する河道区間と、 渦が間欠的に発生・移 流・合体する区間とが存在する様子も伺える. こう した間欠的な渦の存在は,程度の差はあるが,布川 での擾乱量に関係なく,平面せん断不安定の作用に より形成される.このように、洪水時の流れでは、 上流からの乱れ構造の移流,河道横断形の縦断変化 および低水路河岸の蛇行などの要因により,流れ構 造が縦断方向に大きく変化することが分かり,大規 模計算の意義が確認できる.

写真-1には9月17日,午前8時12分に60kp付近で撮影された洪水航空写真を示した.写真は上に示した 図-10(b)の箇所に対応する.洪水表面には泡や濁質などにより,明瞭な濃淡模様が観察できる.この模



図-8 水表面での主流速の横断分布と地形の横断形状 (計算結果と航空写真解析の比較,70kp)





様からは水表面の流れの様子が直感的に理解できる.例えば、写真-1の区間の右岸で観察される,縦 断方向に並ぶ大規模渦の中心間隔は約300mである. 一方、図-11には同領域の水表面流速ベクトル(計 算結果)を示した.先に示した渦度の構造に対応し て、流速ベクトルは低水路河岸付近を縦断方向に蛇 行して配列している様子が観察される.このことか ら、高濃度土砂を含む流体塊がこうした流速場に従 って縦断方向に輸送されている可能性が示唆され る.また、計算結果からは同様の渦構造がこの領域 で間欠的に存在することが確認された.

#### 5. おわりに

本報では準3次元モデルを利根川の下流約20km区 間における洪水解析へ適用し,洪水時に撮影された 航空写真との比較から,大規模な乱れ構造,等に関 して検討を行った.その結果,実河道で生ずる大規 模な乱流現象の縦断方向の遷移過程が計算でも確







写真-1 洪水航空写真(9月17日午前8時12分撮影, 60kp付近. 縮尺・位置ともに図-10(b)に対応する.)

認された.本報では一部分の結果を提示したが,今 後は他区間に関しても検討を行っていきたい.

#### 謝辞

(b)

本研究を行うにあたり,国土交通省利根川下流河 川事務所から貴重な洪水航空写真を提供して頂い た.また、パシフィックコンサルタンツ株式会社、 三井共同建設コンサルタント株式会社および株式 会社 東京建設コンサルタントには、本研究に多大 なる協力を頂いた.記して謝意を表する.

### 参考文献

- 1) たとえば、現地研究の詳細なreviewとして、福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法,森北出版,436p,2005.
- 2) 二瓶泰雄, 木水啓: H-ADCP観測と河川流を融合した 新しい河川流量モニタリングシステムの構築、土木学 会論文集, B編, Vol.63, No.4, pp.295-310, 2007.
- 3) 藤田一郎, 武藤裕則, 島津良郎, 椿涼太, 綾史郎: LSPIV 法による水制周辺部の平水時および洪水時流れに関す る検討,水工学論文集,第47巻,pp.943-948,2003.



(計算領域全体)

図-11 水表面での瞬間流速場の計算結果(60kp付近)

- 4) 箕浦靖久,石川忠晴,吉田圭介:実体視と相関解析の 併用による洪水航空写真解析の効率化、水工学論文集, 第51巻, pp.1093-1098, 2007.
- 5) 清水康行, 板倉忠興:河川における2次元流れと河床 変動の計算,北海道土木試験所報告,No.85,1986.
- 6) 福岡捷二, 五十嵐崇博, 西村達也, 宮崎節夫: 河川合 流部の洪水流と河床変動の非定常三次元解析、水工学 論文集, 第39巻, pp.435-440, 2003.
- 7) 吉田圭介,石川忠晴:円筒座標CIP-Soroban法と境界適 合座標法を組み合わせた蛇行河川の準3次元計算法,水 工学論文集, 第52巻, pp.997-1002, 2008.
- 8) 池田駿介,太田賢一・長谷川洋:側岸部植生境界の周 期渦の発生機構,土木学会論文集,No.443/II-18, pp.47 -54, 1992.
- 9) 灘岡和夫, 八木宏: SDS&2DHモデルを用いた開水路 水平せん断乱流の数値シミュレーション、土木学会論 文集, No.473/II-24, pp.35-44, 1993.
- 10) 牛島省,山下英夫,藤岡奨,禰津家久:コロケート 格子上の非圧縮性流体計算法に基づく浅水流方程式の 数值解法,水工学論文集, Vol.50, pp.775-780, 2006.
- 11) 福岡捷二,渡辺明英,津森貴行:低水路際に樹木を 有する複断面河道における流れの平面構造、東京工業 大学, 土木工学科研究報告, No.48, 1993.
- 12) 例えば、木村一郎、細田尚、友近文志:開水路流れ 混合層におけるせん断不安定波動の空間的増幅特性, 土木学会論文集, No509/II-30, pp.99-109, 1995.
- 13) 例えば,清水義彦,辻本哲郎,中川博次:直立性植 生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究、土木学会 論文集, No.447, pp.35-44, 1992.
- 14) 木村一郎, W.S.J. Ujittewaal, 細田尚: 二次元及び三 次元RANSモデルによる浅水格子乱流の数値解析,水工 学論文集, 第51巻, pp.799-804, 2007.

(2008.9.30受付)