

水害防備林をともなう複断面蛇行河道の 数値計算法に関する研究

STUDY ON NUMERICAL CALCULATION OF FLOW
IN A COMPOUND MEANDERING CHANNEL
WITH THE FLOOD CONTROL VEGETATION

高畑 洋¹・福岡捷二²・渡邊明英³・平林由希子⁴

Hiroshi TAKABATAKE, Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE and Yukiko HIRABAYASHI

¹正会員 工修 広島大学助手 工学部第四類建設系 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²フェロー会員 工博 Ph.D. 広島大学教授 工学部第四類建設系 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類建設系 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

⁴正会員 京都府田辺土木事務所 (〒610-0331 京都府京田辺市田辺明田1)

It is necessary to predict the effect of vegetation in the river channel on flood flow.

In this study, a flow field in a compound meandering channel with vegetation along banks is simulated numerically by using three dimensional model with spectral method, which is effective to simulation of the flow field without vegetation. Result of simulation is compared with that of experiment. Simulation can describe distribution of water level and of velocity above the level of flood channel, but cannot velocity distribution in the lower layer and secondary flow. This model may not describe properly the mixing between fluid of low velocity near the vegetation and that in main flow. Other turbulence model may be necessary to describe the three dimensional flow field with vegetation.

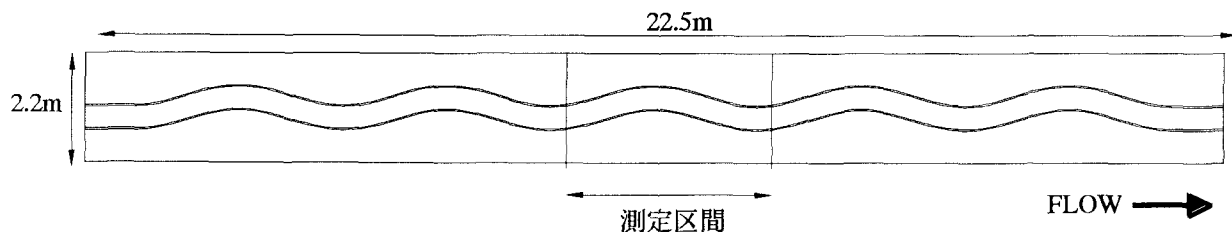
Key Words: flood control vegetation, compound meandering channel, riparian vegetation, 3D analysis of flows

1. はじめに

水害防備林(以下水防林と略す。)は、我が国の河川において堤防の作られる以前に洪水被害軽減のために河道沿いに植えられたものが多く、築堤のなされた後にも河川の低水路河岸にそのまま残されていることが多い。洪水流が樹木の繁茂領域内を流れる場合、樹木の繁茂領域内では流速が非常に遅くなり、繁茂領域外の主流との間で大きな流速差を生じる。その結果、樹木群の内部と主流との間には大規模な平面渦が形成され、それにともなう水平混合により洪水流は抵抗を受け、洪水位が増大することになる¹⁾²⁾。それゆえ、水防林

は築堤後に伐採され、その場所が護岸化されることも多い。しかし、水防林は河川における生態系を豊かなものにし、自然豊かな河川の景観を形成する。そこで洪水流に対する樹木群の水理的影響を評価し、治水上の安全を考慮した水防林の保全法を検討するため、現地調査と室内実験がなされてきたところである³⁾⁴⁾。樹木群のある流れ場を予測する数値計算モデル⁵⁾⁶⁾はいくつか開発されている。しかし、これらは直線水路を対象としたものが多い。

ここでは一般的な水防林の存在形態を考慮し、複断面蛇行水路の低水路河岸に水防林がある場合の流れ場を計算し、これを実験結果と比較する。



(a) 水路全長 (平面図)

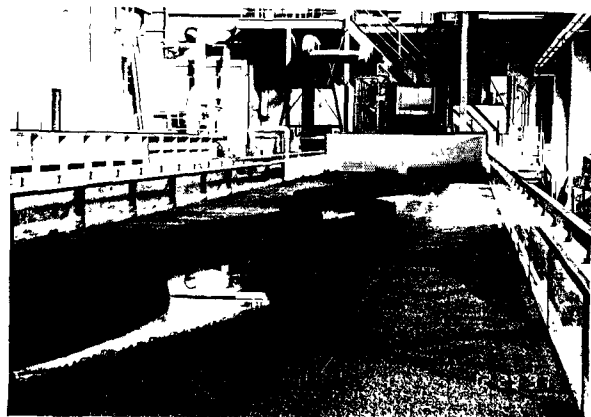
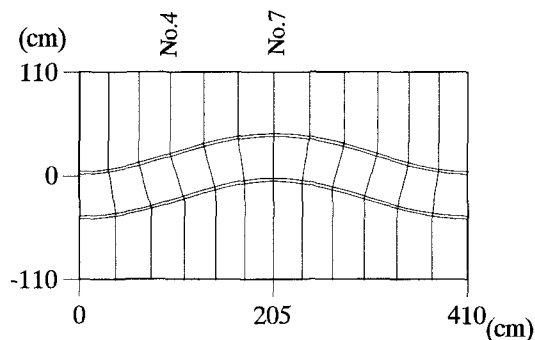


写真-1 実験水路



(b) 測定区間 (平面図)

図-1 実験水路

計算には、複断面蛇行流れの計算において有効性が確認されている、スペクトル選点法による3次元解析法⁷⁾を用いる。

2. 実験方法および条件

実験は写真-1 および図-1 に示すような自然河川に近い緩やかに蛇行する低水路をもつ、全長22.5m、全水路幅2.2m、勾配1/600の水路を用いる。低水路は幅0.5m、中心線は振幅0.2mの正弦曲線で、蛇行度1.02、最大蛇行偏角 17° となっている。高水数は低水路底面より0.045mの高さに設置され、人工芝が敷かれている。水防林模型に関しては、実河川でみられる水防林の一般的な繁茂形態を想定して、ナイロン樹脂製の超多孔質体(空隙率91%、透過係数 $K_s = 0.47\text{m/s}$)¹⁾を低水路河岸沿いに幅3cmで配置する。

水理条件は、流量 15.0l/s で、低水路内の平均水深7.5cm、相対水深0.4である。測定は図-1 に示される測定区間において、水位分布、流速分布について行われる。水位はポイントゲージで測定され、流速は2成分電磁流速計でサンプリング周波数20Hz、サンプリング数600で測定されている。

3. 計算方法

(1) 基礎方程式

水防林のない複断面蛇行河道にあっては、低水路内の流れが低水路河岸にぶつかって、高水数に乗り上げるところで圧力は静水圧からの偏差を生じる⁷⁾。しかし、水防林のある場合、以下の実験結果でも示す通り、水防林近傍における流速は比較的遅くなるため、圧力の静水圧分布から偏差は極めて小さいと考えられる。以下の計算にあっては、計算の簡略化のために圧力に関して静水圧近似を行う。基礎方程式は、 x - y 平面直交座標から ξ - η 平面一般曲線座標に変換した、 x および y 方向の運動方程式および連続式となる。 x および y 方向の流速 u 、 v は運動方程式から計算される。鉛直方向流速 w については u 、 v を連続式に代入し、鉛直方向に積分して求める。

渦動粘性係数 ν_T は、カルマン定数 κ 、底面摩擦速度 u_* 、水深 h および河床からの高さ z' を用いて、

$$\nu_T = \kappa u_* z' \left(1 - \frac{z'}{h}\right) \quad (1)$$

と、0方程式モデルで表わす。

水防林による抵抗は、速度の次元をもつ透過係数 K_s を用い、水防林内の平均流速 U_w はエネルギー勾配 I_e の1/2乗に比例する抵抗則にしたがうとする¹⁾。

$$U_w = K_s I_e^{1/2} \quad (2)$$

以下の計算では、平均水深を実験と同じ値に設定し、流速と水位偏差を基礎方程式から解く。

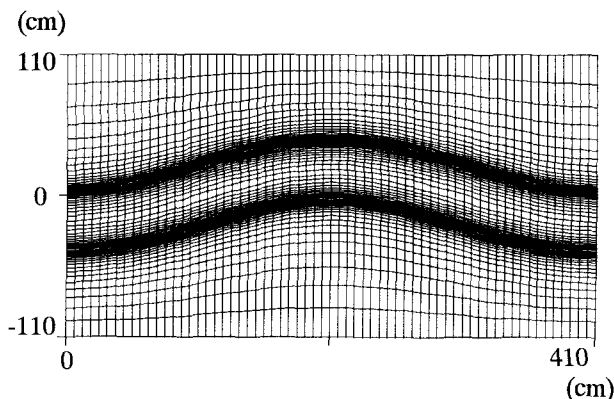


図-2 計算メッシュイメージ

(2) 計算方法および境界条件

複断面蛇行水路の流れにおいては、低水路と高水敷の間における運動量の交換が大きく、このような流れ場を精度よく計算するには、移流項を正確に表現することが必要であることがわかっている。ここでは水路の形状を考慮し、周期境界条件を適用して、スペクトル選点法を用いて計算する⁷⁾。

横断面内 (η, z) の微分は横断方向の移流項に3次精度の風上差分(河村・桑原スキーム)が、鉛直方向の移流項には1次精度の風上差分が用いられている。また、移流項以外の圧力項や拡散項などの横断、鉛直方向の微分値は2次精度の中心差分近似で求める。

流速に対する境界条件として、壁面において壁面近傍流速の2乗に比例する抵抗が与えられ、不透過スリップ条件が与えられている。水位は水深積分した連続式から計算され、水表面の w は運動学的境界条件から求める。

(3) 計算条件

実験水路の測定区間に相当する領域を計算領域にとり、図-2に示すようなメッシュイメージで離散化する。計算領域のメッシュの分割数は流下方向に64個で、スペクトル選点法を行う本モデルでは0~15次モードまで解析されている。横断方向のメッシュの分割数は82個であり、特に平面渦の発生する水防林近傍にあっては、密な間隔でメッシュを配置している。水防林は実験と同じように配置する。鉛直方向のメッシュ分割は高水敷高さより下で6分割、高水敷高さより上で4分割している。底面の抵抗を与える低水路と高水敷の底面の流速係数 ϕ は、それぞれ $\phi_m=18.0$ 、 $\phi_f=4.5$ とする。また、水防林の透過係数 K_s の値は実験で用いた水防林模型の多孔質体と同じ $K_s=0.47\text{m/s}$ とする。

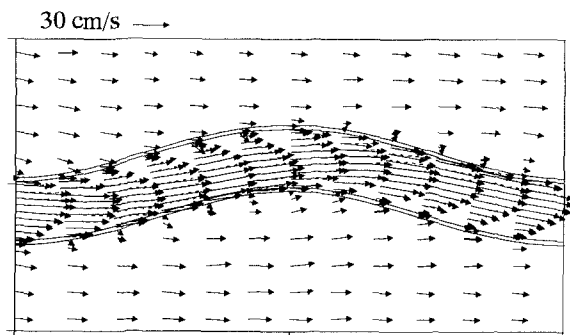


図-3 平面流速ベクトル(実験)
実線: 水面下2cm 点線: 水面下5cm

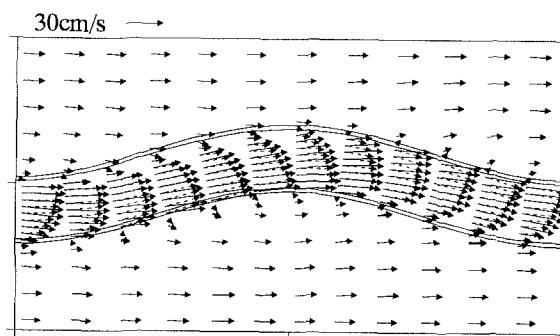


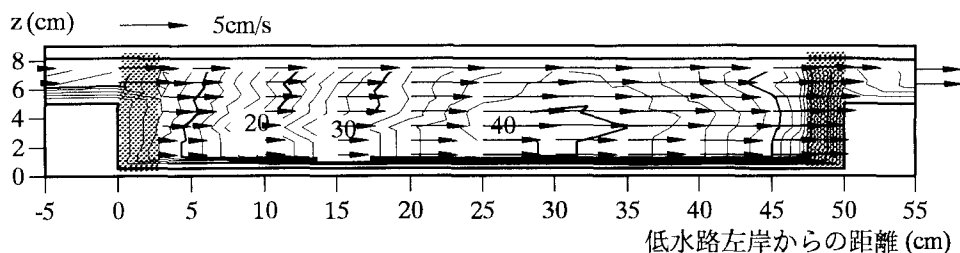
図-4 平面流速ベクトル(計算)
実線: 水面下2cm 点線: 水面下5cm

4. 実験結果および計算結果

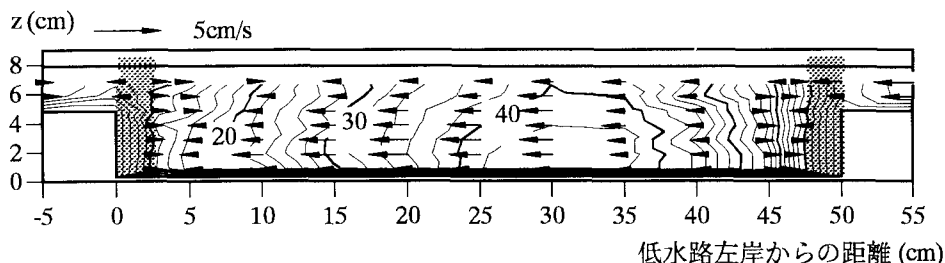
(1) 平面流速分布

図-3に、実験におけるサンプリング時間中の平均流速のベクトルを示す。高水敷上の低水路蛇行帯内にあるのは、水防林により、低水路から流出する流れが著しく減速され、非常に流速の遅い領域が形成される。その外側では流れは堤防に沿い、高水敷の幅の広がる領域の流速が、狭まる領域に比べ大きくなっている。

低水路内でも、水防林近傍では水防林内の極めて遅い流体が主流と混合するため流速が減少している。最大流速は、水防林のない複断面蛇行流れと同様に蛇行低水路の内岸から内岸へと向かう位置に発生しているが、異なるのは低水路内の高水敷高さより上層における流れの向きである。水防林のないときには、高水敷上と低水路の流れの混合が活発なため、低水路内上層では流速はその大きさが減少するとともに、方向が高水敷上の流れと同じく堤防と平行になる。高水敷よりも下層では、流れは低水路法線に沿った方向となり、高水敷より上層とは異なる流況がみられる。水防林のある場合、そのような混合がほとんどみられず、低水路内の流速は高水敷高さを挟んで上層、下層とも低水路法線に沿う向きとなる。流速の大きさ



(a) 測定断面No.4 (蛇行変曲断面)



(b) 測定断面No.7 (蛇行最大曲率断面)

図6 横断面内主流速コンターおよび2次流ベクトル (実験)
(コンター線は2cm/s間隔)

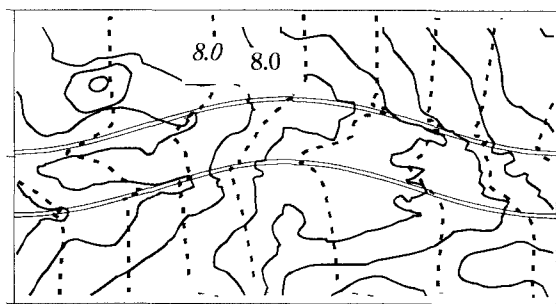


図5 水位コンター

コンター間隔: 1mm, 実線: 実験 点線: 計算
数字は下流端の低水路底面からの高さ

も上層, 下層の間で差はなく, 水防林により, 低水路内での混合が活発になり, 鉛直方向には流速分布が一様化するのが特徴である。

図4 に計算において流れ場が定期的な周期変動に達したあとの結果を示す。これは実験における電磁流速計サンプリング時間と同じ長さの時間平均流速ベクトルである。計算流量は15.7l/sであった。高水敷上の流速分布は計算によって実験結果が的確に表現されている。一方, 低水路内の流速については上層の分布形は実験結果に似ているが, 下層とともに流速の大きさが小さく, 最大流速の発生位置が実験結果に比べ, 蛇行低水路の最大曲率断面の内岸側に寄っている。また, 高水敷高さより上層と下層の間で流速ベクトルの向きが異なっている点において実験結果とは異なる。とくに蛇行低水路の変曲点付近では上層と下層の流速ベクトルの向きのなす角度が大きい。これら低水路内

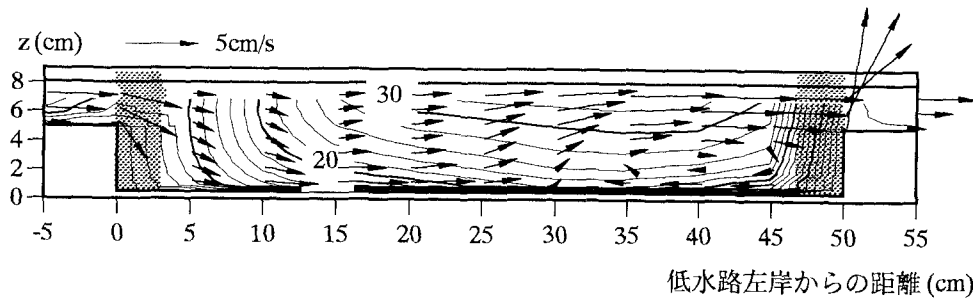
の流況の実験結果との違いは, 3次元計算において, 鉛直方向の混合が十分でないためと考えられる。その原因は鉛直方向の移流項が1次精度の風上差分を用いているために, 十分な精度で計算されていない, 乱流拡散のメカニズムを計算が十分に表わしていない, 等であると思われる。水防林等樹木群をともしう流れ場にあつては, とくに乱流拡散項をどのようにモデル化するかが重要になるものと思われる。

(2) 水位分布

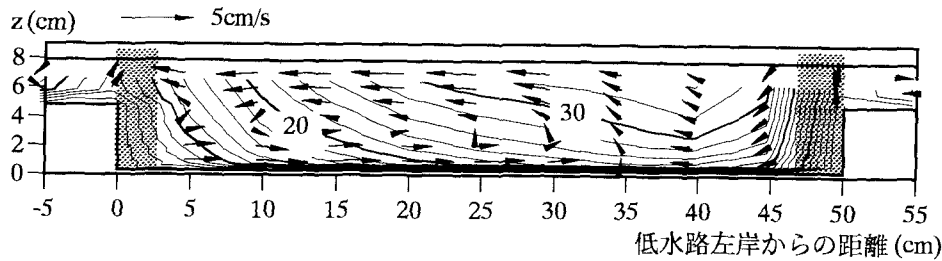
図5に, 実験および計算の水位コンターを示す。計算結果は30秒間の平均値である。実線で示される実験の水位コンターは, 水防林の近傍で低水路内, 高水敷上ともに水位の上昇がみられ, 水防林を挟んで低水路と高水敷の間で水位コンターが不連続となる。蛇行低水路内では遠心力的作用により, 内岸側よりも外岸側の水位が高くなる。また, 下流へ向かって流速の増大する高水敷が拡大する領域では水位コンターの間隔が密であり, 流速の減少する高水敷が縮小する領域での水位コンター間隔は大きい。一方, 点線で示される計算の水位コンターは, 水防林近傍および低水路内において実験でみられる水位コンターの不連続性, 蛇行低水路内の内岸側の水位上昇が再現されている。

(3) 横断面内流速分布

図6 は測定断面No.4 とNo.7 の低水路における主流速コンターおよび2次流ベクトルを示す。実験においては, 鉛直方向流速を測定していないので,



(a) 測定断面No.4 (蛇行変曲断面)



(b) 測定断面No.7 (蛇行最大曲率断面)

図-7 横断面内主流速コンターおよび2次流ベクトル (計算)
(コンター線は2cm/s間隔)

2次流ベクトルの向きは常に水平方向を向くように描かれている。

水防林のない場合、測定断面No.4 では遅い高水敷流れが左岸側から低水路に流入する。それゆえ、左岸側は河床から水面に向かって流速が減少するようなコンター図となるが、水防林のある場合では、コンター線が河床から水面に向けて鉛直に立っている。また、水防林近傍においては大きな流速勾配がついて、コンター線の間隔が密になる。また、最大流速は河床付近に発生している。これは、水防林からの遅い流体と主流との混合において、高水敷よりも上層では主流が減速されやすいためであると考えられる。

2次流ベクトルは、低水路内で上層と下層で流速の方向が同じであるため、断面内で同じ方向であり、水防林のない複断面蛇行流れにみられるような2次流セルは形成されない。

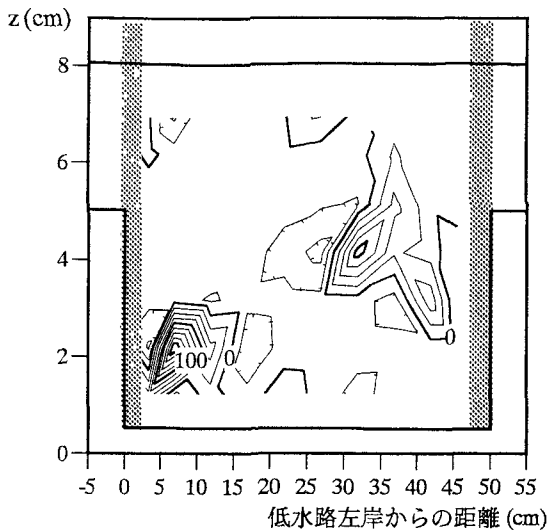
図-7 に計算における測定断面No.4 とNo.7の低水路における主流速コンター図および2次流ベクトル図を示す。

主流速分布は、水面から底面に向けて流速が小さくなっており、実験結果とは全く逆になっている。特に測定断面No.7ではその傾向が顕著であり、これは2次流が水防林近傍の遅い流体を最大流速の発生位置の下側に送り込んでいるのに対応している。また、単断面の蛇行水路の流れにみられるような、蛇行水路の水面付近で内岸から外岸へ、底面付近で外岸から内岸へ向かうような2次流の

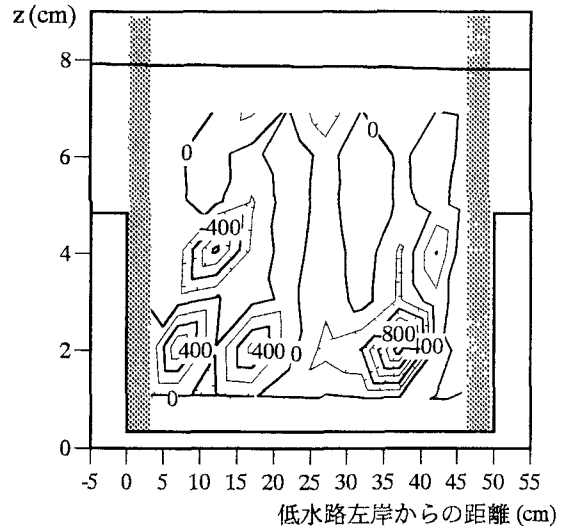
セルが発達している。このように、水位分布および高水敷よりも上層の流速分布が計算結果と実験結果で似ているにもかかわらず、図6と図7を比較すると、水防林の存在によって生じる横断方向、鉛直方向の流体混合のメカニズムが正確に表現できていないことがわかる。

5. 乱流混合のメカニズムについての考察

水防林のない複断面蛇行水路の流れ場において、運動量の輸送は渦粘性よりも移流によるところが大きい⁹⁾。そのような流れ場の数値計算にあっては、渦粘性を精度良く表現する必要がない。しかし、水防林のある流れ場においては、この渦粘性によるせん断応力が現象に対して支配的である。実験結果から、レイノルズ方程式における移流項と渦粘性項のオーダーはともに1.0から $1.0 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$ となっており、渦粘性は移流に対して無視できない。図-8 は、実験結果から水平面内において主流方向のレイノルズ応力に対する渦動粘性係数 ϵ_{zz} の横断面内の分布を計算したものである。この図に示すように、断面内の渦動粘性係数の分布は非常に複雑であり、それによって水面付近よりも底面付近の方が主流速が大きくなるような流速分布が生じると考えられる。それゆえ、このような流れ場を精度良く計算するには、渦粘性を精度良く表現することが重要であり、式(1)に示すような0方程式モデルでは図-8に



(a) 測定断面No.4 (蛇行変曲断面)
(コンター線は $25\text{cm}^2/\text{s}$ 間隔)



(b) 測定断面No.7 (蛇行最大曲率断面)
(コンター線は $200\text{cm}^2/\text{s}$ 間隔)

図8 横断面内の渦動粘性係数 ε_{zf} の分布 (実験)

示されたような渦動粘性係数の分布を表現しきれないと考えられる。

6. 結論

水防林の最も一般的な存在形態である、複断面蛇行河道の低水路河岸に水防林を配置した場合の流れ場に関する実験および3次元の数値計算を行った。実験結果から、水防林の存在により、高水敷と低水路の流体の混合が遮られることと、水防林の近傍の低速の流体と主流部の流体との混合が、流れ場の特性を支配する要因であることが理解できた。

水防林のない複断面蛇行水路の流れ場を再現できる、乱流モデルに0方程式モデルを用いた本数値計算の結果は、高水敷高さよりも上層の流速分布および水位分布に関して実験結果と似ている。しかし、低水路下層の流速分布や横断面内流速分布が実験結果を十分に説明できていない。これは3次元の解析を行う本計算において、水防林の存在によって生ずる、特に横断方向と鉛直方向の乱流混合のメカニズムが正確に表現されていないためと考えられる。以上のことから、水防林のある流れ場を解析する数値計算モデルでは流体混合を的確に表現することが特に重要であると考えられ、今後、横断面内の移流項の計算精度の向上や、乱流モデルの改善が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 藤田光一, 福岡捷二: 洪水流における水平乱流混合, 土木学会論文集, No.429/II-15, pp.27~36, 1991.
- 2) 福岡捷二, 五十嵐崇博, 高橋宏尚: 江の川水防林の特性と治水効果, 水工学論文集, 第39巻, pp.501~506, 1995.
- 3) 福岡捷二, 藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 土木研究所報告, 第180号-3, 1990.
- 4) 福岡捷二, 川岡秀和, 平林由希子: 水害防備林と低水路線形が洪水流に与える影響, 水工学論文集 第42巻, pp.967~972, 1998.
- 5) 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.
- 6) 福岡捷二, 渡辺明英, 津森貴之: 樹木群を有する開水路における平面せん断流の構造とその解析, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.41~50, 1994.
- 7) 福岡捷二, 渡辺明英: 複断面蛇行水路における流れ場の3次元解析, 土木学会論文集, No.586/II-42, pp.39~50, 1998.

(1998.9.30受付)