

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

福岡捷二*・渡辺明英**・津森貴行***

樹木群の繁茂した河道に現れる大規模な平面渦と、その流下に伴う規則的な水面変動現象に着目し、室内実験および水平混合をモデル化した浅水方程式に基づく解析から、平面せん断流の構造を明らかにしている。解析では、流れが平面渦スケールの水平混合に支配されているとの立場で、水量を平均量と変動成分に分離し、変動成分を波動展開して解いている。平面2次元解析から求めた平面的な流速場と水面変動場、及び卓越波長の解析結果は実験結果をよく説明し、十分な精度で見積もることが可能となった。

Key Words : vegetation, horizontal mixing by large-scale eddies, transverse gradient of water level, two-dimensional numerical analysis

1. 序 論

河川の高水敷や中州などには樹木が繁茂しているところが多い。樹木群の繁茂領域内では流速が非常に小さくなり、主流との間で大きな流速差が生じる。このため、樹木群の内部と主流との間に大規模な平面渦が形成され、樹木を挟んで大きな横断面勾配を伴う水平混合が起きる。このような大規模な平面渦を伴う混合現象は流れの抵抗要素となり、洪水位を増大させることから、樹木群の水理的影響の評価が重要な課題となっている^{1)~7)}。一方、近年、河川空間のもつ豊かな自然環境や生態系に配慮した河川づくりが行われるようになり、河道内の樹木群の望ましい管理のあり方が検討されている。このように治水的にも環境的にも望ましく、調和のとれた樹木群の管理のためには、樹木群の繁茂形態に応じた流れ場を予測できることがまず重要となる。

樹木群の洪水位に与える影響、すなわち流速分布、水位などについては、流れ場の時空間的な平均像を準2次元に取り扱うことによって実用上十分な精度で評価できている^{2), 4), 8)}。しかしながら、樹木群の流体抵抗に起因する平面渦によって水位、流速が周期的に変動し、これが流れ場の構造に影響を与えることから、現象の平均像だけでなく平面渦に起因する混合の機構を解明することも必要である。

水平混合現象に関する解析として灘岡、八木^{9), 10)}の数値シミュレーションがある。その解析では、浅い水域の乱流現象を平面2次元的な水平渦運動と水深スケール以下の3次元的な乱流運動にスケール分離し、平面2次元の基礎方程式系を有する乱流モデルを提案している。こ

れを植生を有する河川流に適用し、流下方向に周期境界条件を与えて数値計算を試みている。

本研究では、樹木群のある河道内の流れにおける混合の物理機構を適切かつ簡潔に考慮することによって水平混合が卓越する河川の流れ場の記述が可能であると考へ、以下の検討を行っている。

まず、樹木群の代表的な2つの繁茂形態を有する流れ場について水理模型実験を行い、平面流況に着目した流れ場の特性を明らかにする。次に、樹木によって引き起こされる水平混合を平面2次元モデルを用い簡潔にモデル化する。この解析モデルを用いて非線形安定問題として卓越波長を求めている。さらに、流れについて解き、この結果を実験結果と比較し、水平混合の機構と平面流況の検討を行っている。

2. 樹木群に起因する水平混合の実験

(1) 実験方法

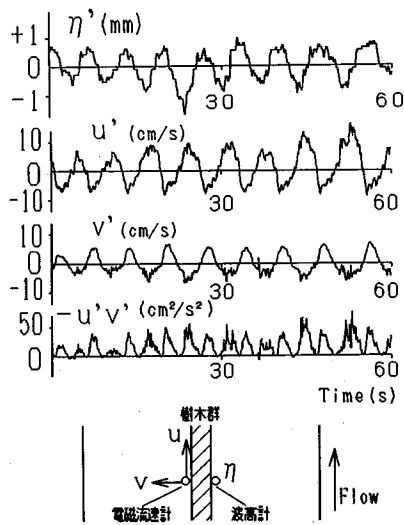
河道内の樹木群に起因する水平混合が顕著に現れる例として、樹木群が河道の中央に連続的に繁茂した場合と複断面河道の低水路河岸沿いに繁茂した場合について検討する。前者は、洪水時に浸水する河道の中州上に樹木群がある場合で、後者はよく見られる繁茂形態である。

実験に用いた水路は、長さ15 m、幅1.2 m、勾配1/1000の鋼製の一樣矩形断面を有する直線水路である。水路底面の粗度係数は $n=0.011$ である。水路の中央に樹木群を設置した場合の実験をケースAとする。一方、幅40 cm、高さ2 cmの合板を水路の全長にわたって両端に設置して高水敷をつくり、(低水路幅/高水敷高さ)=20、(低水路幅/全幅)=1/3の諸元を持つ複断面水路での実験をケースBとする。高水敷にジオテキスタイルシートを張り、低水路よりも粗度を大きくしている。樹木模型には、空隙率91%、透過係数 $K=0.38$ (m/s)のプラスチック製の多孔質体^{2), 3)}を用いた。

* 正会員 Ph.D. 工博 広島大学教授 工学部第4類(建設系)(〒724 東広島市鏡山1-4-1)

** 正会員 工博 建設省土木研究所河川研究室主任研究員

*** 正会員 工修 建設省大臣官房技術調査室

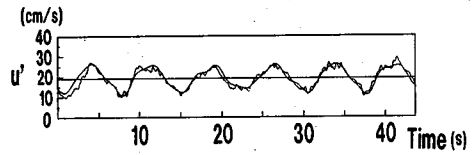


図一 樹木近傍の水位及び流速 ($z=1\text{ cm}$) の時間変動

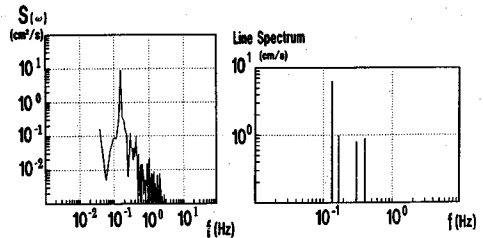
(2) 単断面水路の中央に一様で連続的に樹木が繁茂した場合 (ケース A) の実験結果

樹木群幅 $b'=10\text{ cm}$, 樹木高さ $h_w=4\text{ cm}$, 流量 $Q=11\text{ (l/s)}$ (水深 $h=4.5\text{ cm}$) の条件で流速, 及び水位変動の測定を行った。この条件では, 樹木群幅が狭く樹木群を挟んだ左右の主流間で運動量交換が活発になる。流速は2成分用の電磁流速計 (I型 $\phi=8\text{ mm}$) を用い, 水位は容量式波高計を用いて, サンプル周波数 50 Hz , サンプル数 3000 個でそれぞれ同時に測定した。電磁流速計と波高計は樹木群を挟んでそれぞれ反対側に設置している。流速は, 鉛直方向に3点 (水路床から $z=1, 2, 3\text{ cm}$), 及び横断方向に 5 cm 間隔で測定している。図一は樹木群近傍で測定した流速変動 u', v' 及び水位変動 η' を示したものである。流速, 及び水位がほぼ周期的に変動しており, 測定された波の数は60秒間で8~9波である。また, 流速変動の u' 成分と v' 成分の位相が半周期ずれており, その結果レイノルズ応力も周期的に変動し, 大きなピーク値を示している。樹木近傍では η' と v' は位相がほぼ一致しており, η' の位相が樹木群を挟んで反転していることから^{2),3)}, 樹木群を挟んで水面の高い方から低い方へ流れが生じていることがわかる。

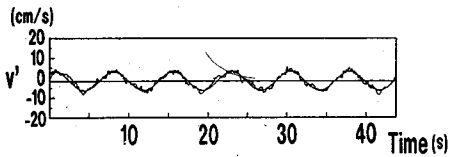
次に, 流速変動の特性についてさらに詳しく検討する。図二は, 樹木群境界から主流側へ 15 cm 離れた位置で測定された流速変動 u', v' について, 波形, 及び周波数 f に対するパワースペクトル密度 $S(\omega)$ を示したものである。線スペクトルも図二に併せて示す。図二(a), (d) の流速変動の細線が実測値, 太線が線スペクトルに分解した成分のみで表した波形である。 $S(\omega)$ は低周波数帯で大きく, 明瞭なピークをもっている。また, 線スペクトル図で示した周波数のみで実験値の波形を概ね



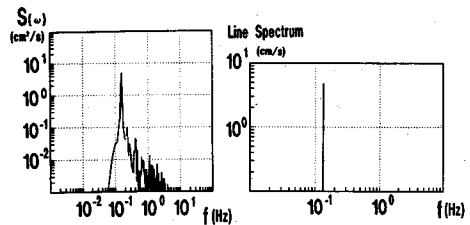
(a) u' の時間変動 ($z=3\text{ cm}$)



(b) u' のパワースペクトル密度 (c) u' の線スペクトル



(d) v' の時間変動 ($z=3\text{ cm}$)



(e) v' のパワースペクトル密度 (f) v' の線スペクトル

図二 流速変動のスペクトル

表現できている。図三は, 流速変動 u' について卓越周波数成分の周期の横断分布を示したものである。周期が横断方向にほぼ一定であることがわかる。このことは, 大規模水平混合の生じている流れ場が卓越した低周波のモードによって全体にわたって支配されていることを示している。図四は, 流速変動について卓越周波数成分の振幅, および水位変動に対する位相差の横断分布を求め, これより1次モードで表した平面流速ベクトル場を静止座標系と移動座標系で示したものである。移動座標系でみた図については波速 c として $c=L/T$ を用いている。ここで, L は波長, T はその周期である。樹木群近傍で大規模な平面渦が生じている。また, この渦のあるところでは樹木群内から流体が主流に対しほぼ直角に流出し, 主流が減速している。水路内ではこの現象が流下方向に約 1.2 m の間隔で繰り返している。

次に, 水面変動について検討する。図五は, 流下方向に 1.5 m の範囲における水面高さのコンター図である。水面の変動周期が一定であることを確認し, 2台の波高計を用いて水面変動を条件付きサンプリング (波頂をトリガーとする) して統計処理を施している。縦断的

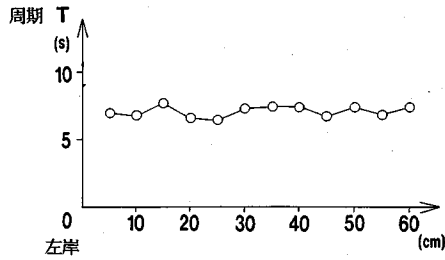


図-3 一次変動モードの周期の横断分布 ($z=3$ cm)

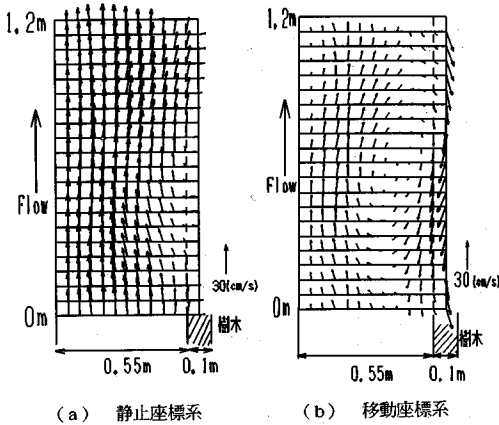


図-4 一次変動モードによる流速ベクトル (水深平均)

な測点数が粗く、また、さまざまな周波数成分を含む実測波形からそのまま求めたものであるため、図-4に示した波長と完全には一致していない。この図から、縦断方向に規則的に水面の高い部分と低い部分が現れ、水面の山と谷が樹木群を挟んで左右逆位相になっていることがわかる。図-4に示した結果とあわせて判断すると、水面の低い部分には平面渦が存在することがわかる。すなわち大規模平面渦が樹木群を挟んで左右交互に配列されており、このパターンを保って流下している。さらに、これらの山と谷のピークが樹木群境界の近くに生じていることから、縦断方向の水面勾配に比べて横断方向の水面勾配が大きくなっている。この場合、樹木群を挟んで山と谷の間で約1/200の横断水面勾配が生じている。

写真-1にこの状況を可視化したものを示す。これは樹木群模型内に投入された染料が左右の主流部に流出していく様子を示している。樹木群を挟んで横断方向の流れが交互にその向きを変えていることがわかる。また、染料が主流部に流出する際の流向は樹木群に対しほぼ直交しており、横に流出する染料の先端が左右それぞれの主流部のほぼ中央にまで達している。このことは主流部の流れが樹木により広範囲に減速させられていることを示している。

このように透過性の低い樹木群が一様に連続的に存在する河道の流れで発生する水平混合現象は低周波の安定

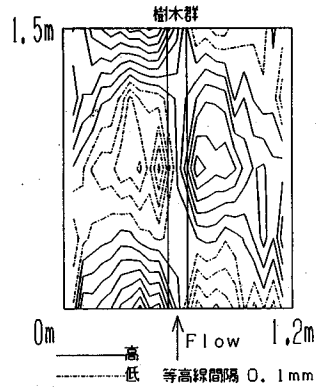


図-5 水面高さのコンター (CASE-A)

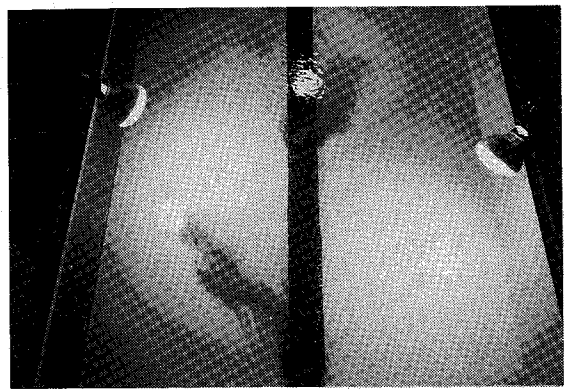


写真-1 流況可視化写真 (CASE-A)

した振動現象であり、そこで生じている大規模平面渦のスケールに相当する波長を有していることが明らかとなった。樹木群が主流に挟まれている場合には、樹木群上に大きな横断水面勾配が生じ、これに伴い樹木群の領域を横断方向に通過する流れが活発に生じている。

(3) 複断面水路の低水路河岸沿いに一様で連続的に樹木が繁茂した場合 (ケース B) の実験結果⁶⁾

ケースAの場合同様、混合現象が最も顕著にみられる条件で、水面形、流速変動などの測定及び可視化を行った。樹木は一定の幅 $b_w=3.5$ cm とし、連続配置 (高さ $h_w=6.5$ cm)、及び断続配置 (左右対称で1 m おき、高さ $h_w=6.5$ cm) について測定した。図-6は流量 $Q=9$ (ℓ/s) (水深 $h=6.8$ cm) の条件で観測された水面高さのコンターを示す。測定方法は先のケースAの場合と同じである。低水路内に水面の山と谷が流下方向に交互に現れている。さらにこの山と谷の連なりが低水路内に2列になって現れ、左右交互になっているのが特徴的である。写真-2は、樹木高さと同水深がほぼ等しい ($h/h_w=0.90$) 条件において平面流況をアルミ粉を用いて可視化したものである。低水路内ではアルミ粉が蛇行し、高水敷上にもアルミ粉が筋となっているのがみられる。図-

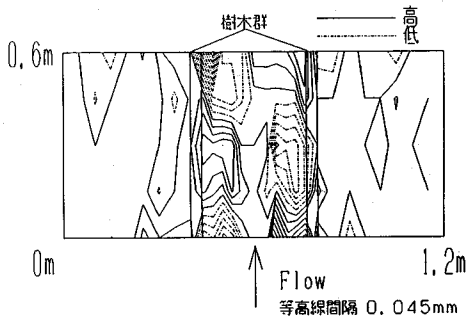


図-6 水面高さのコンター (CASE-B)

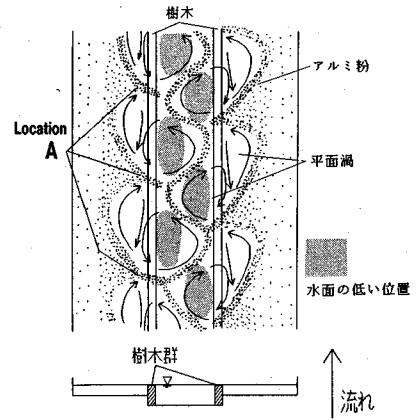


図-7 流れの模式図

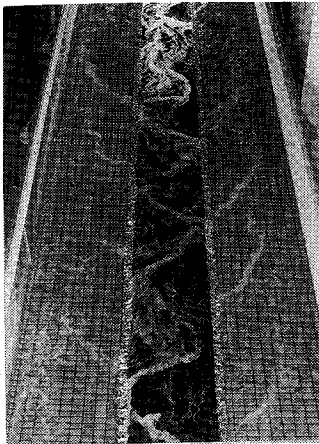


写真-2 流況可視化写真 (CASE-B 連続配置)



写真-3 流況可視化写真 (CASE-B 断続配置)

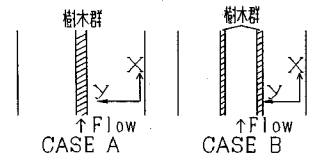


図-8 座標系

6. 写真-2をもとに、この状況を模式的に描いたものが図-7である。低水路内の水面の低い部分に平面渦があり、平面渦の外周部にアルミ粉が集まっている。この低水路内の左右交互に流下する平面渦の存在によりアルミ粉が蛇行しているものと考えられる。高水敷上にも低水路内の渦と回転方向が逆になっている平面渦が生じており、これらの互いに逆方向に回転する渦により流れが集中する高水敷上の位置-Aに特徴的な「髭」状の筋がみられる。この髭状の筋は、左右で位相が π ずれている。写真-3は樹木群を断続的に配置し、同様の可視化を行ったものである。全体的にアルミ粉の筋が連続配置の場合ほど規則正しくはない。特に低水路内をみると、樹木のある部分ではアルミ粉が明瞭な蛇行を示しているが、樹木のない部分では崩れている。これは、樹木のない部分があるために縦断的に安定な平面渦の形成が妨げられているためである。

以上から、連続的な樹木群列の存在する流れ場では大規模で安定な平面渦が形成される。この安定な平面渦の配列によって低水路内には特徴的な水流の蛇行、高水敷には流れの集中を示す筋がみられる。

3. 水平混合の数値解析

(1) 解析方法

模型実験で明らかにされた、樹木群を有する流れ場での大規模な平面渦を伴う水平混合現象を数値解析手法により表現する。

河川の流れは平面2次元流れとみなすことができ、水深方向に平均化した浅水流の運動方程式を用いることができる。本解析では、樹木群が水没しても水没水深が小さく流れの平面2次元性が維持されるような場合を扱う。このとき、基礎方程式は式(1)、(2)、(3)で表現される。用いた座標系を図-8に示す。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \\ & = gI - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{c_f u \sqrt{u^2 + v^2}}{h_0} - g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{K^2} \\ & + \nu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \dots \dots \dots (1) \\ & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \end{aligned}$$

$$= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{C_f v \sqrt{u^2 + v^2}}{h_0} - g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{K^2} + \nu_t \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (\eta u)}{\partial x} + \frac{\partial (\eta v)}{\partial y} = 0 \dots \dots \dots (3)$$

式(3)は連続式である。渦動粘性係数 ν_t には次式を用いた。

$$\nu_t = \frac{1}{6} \kappa u_* h_0 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 u : 流下方向の水深平均流速、 v : 横断方向の水深平均流速、 η : 水深、 g : 重力加速度、 C_f : 摩擦抵抗係数、 κ : カルマン定数 (=0.4)、 u_* : 摩擦速度、 h_0 : 平均水深、 I : 水路床勾配である。

また、 K は透過係数と呼ばれ、樹木群の透過度を表し、速度の次元をもつ。樹木群内部の見かけの平均流速 U_w は透過係数 K とエネルギー勾配 I_e とにより式(5)のように表される^{2),3)}。

$$U_w = KI_e^{1/2} \dots \dots \dots (5)$$

基礎式において、樹木の存在は、式(1)では右辺第四項、式(2)では右辺第三項で表されている。樹木群が水路内にある場合には、樹木群内では加速・減速流れが生じるが、ここでは式(5)の定常・等流における抵抗則を準用している。樹木のない領域では透過係数は無限大であり、これらの項はゼロになる。

次に、水平混合のモデル化について述べる。流速 u 、 v 、水深 η を流下方向についての平均値とそれからの変動量に分離する。これらの変動は以下の特性を持つ。

- ① 流速、水位がほぼ周期的に変動する。
- ② 樹木群を有する流れ場では、樹木群近くで安定な平面渦が形成される。変動成分は、この平面渦スケールに応じた波長をもつ。

このため、変動量を波長 L の1次モードと波長 $L/2$ の2次モードの重ね合わせで表現する。

$$u(x, y, t) = u_0(y, t) + \sum_{m=1}^2 u_m(y, t) \cos \frac{2m\pi}{L} (x - ct + \alpha_m(y)) \dots \dots \dots (6)$$

$$v(x, y, t) = v_0(y, t) + \sum_{m=1}^2 v_m(y, t) \cos \frac{2m\pi}{L} (x - ct + \beta_m(y)) \dots \dots \dots (7)$$

$$\eta(x, y, t) = h_0(y, t) + \sum_{m=1}^2 \eta_m(y, t) \cos \frac{2m\pi}{L} (x - ct + \gamma_m(y)) \dots \dots \dots (8)$$

変動を2次モードまで考慮した理由は、次の通りである。対象とする混合現象には、さまざまな波数の変動成分が存在する。しかし、実験から明らかなように現象を支配しているのは大規模平面渦スケールの水平混合であり、このスケールでの変動成分で流れ場の記述がほぼ可

能であることによる。また、変動成分の1次モードの解が定まるためには2次モードと1次モードの干渉を表す非線形項が不可欠であり、式(1)、(2)、(3)の各項の大きさのオーダー比較の結果、これらの非線形項が無視できない大きさを持っている。このため、解析には最低でも2次モードまで取り入れる必要がある。

式(6)、(7)、(8)で表した u 、 v 、 η を基礎式(1)、(2)、(3)に代入することにより、未知変数である平均値 u_0 、 v_0 、 h_0 、変動振幅 u_1 、 u_2 、 v_1 、 v_2 、 η_1 、 η_2 、位相差 $\gamma_1 - \alpha_1$ 、 $\gamma_1 - \alpha_2$ 、 $\gamma_1 - \beta_1$ 、 $\gamma_1 - \beta_2$ 、 $\gamma_1 - \gamma_2$ 、波速 c に関する15個の連立偏微分方程式が得られる(Appendix)。計算にあたっては γ_1 に任意の値を与えている。初期水位に実測値の1/100程度の微小な擾乱を与え、これらの非定常項を陽的に時間積分することにより解が得られる。左右の水路壁にはスリップ条件を与える。波速 c は各位相を停留させるものとして定まる。本モデルでは、 u 、 v 、 η について卓越する変動成分を抽出し、流下方向に対し波動展開した形を与えて横断方向のみの1次元問題としている。これにより現象を単純化して捉えることになり、計算時間も大幅に短縮される。以下の節では実験ケースA、Bに対して表-1の条件で計算を行う。

(2) 非線形安定問題としての卓越波数の計算

実験結果の解析を行うに先立ち、まず周期渦の卓越波数を数値解析的に求める。植生境界において発生する周期渦について、池田ら¹⁴⁾は線形不安定解析を行い、与えられた流速分布形に対する微小擾乱の卓越波数を求めている。このように定まる卓越波数は流速分布とその欠損幅に依存している。すなわち、線形解析では流速の欠損幅と流速分布形が決まれば、その場に応じた発達し易い波数が定まることを意味している。しかし、波数と流速分布は互いに関連し合うものであり、非線形関係として同時に求められるべきものである。

本研究では、3.(1)の解析法を用いて、波数を種々変えて流速分布形を計算する非線形安定解析を行い、卓越波数を求める。ここでは、樹木境界付近での大規模渦によるせん断応力 $-\overline{u'v'}$ (以下これをレイノルズ応力と呼ぶ) が、波数に対して最大となるときこれを卓越波数と判断する。これは以下の理由による。樹木のある流れ場の初期の流速分布は欠損幅が小さい。この場合、波長が短く発達速度が大きいものがまず成長する。これに起因するレイノルズ応力によって欠損幅が大きくなり、次にこれに応じた長い波長のものが成長する。このプロセスを経て、渦の波長は短いものから長いものへと移行していく。レイノルズ応力が波長の増大に伴ってどこまでも大きくなるのならば、欠損幅が時間、流下距離と共に大きくなっていき、卓越波数というものは存在しないことになる。すなわち、波長が長くなってもレイノルズ応力が小さくなる領域がなければ卓越波数はない。したがっ

表—1 計算条件

	流量 (l/s)	水路床 勾配	等流水深 (cm)	樹木幅 (cm)	底面粗度係数	透過係数 (m/s)
CASE A	11	1/1000	4.5	10	0.011	0.38
CASE B	9	1/1000	6.8(低水路) 4.8(高水路)	3.5×2列	0.011(低水路) 0.019(高水路)	0.38

て、波長が大きくなってもレイノルズ応力が大きくなる
なくなる領域が最終的な平衡状態であり、この様な波数
のうち実際の有限な長さの水路で現れるのは発達
の早い波数であり、これを卓越波数と考える。

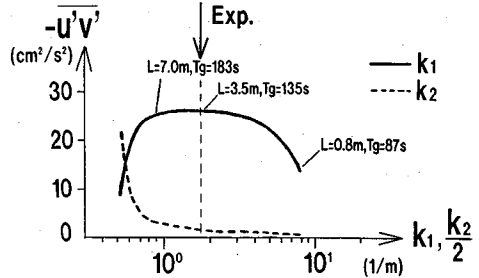
これを調べるため、福岡・藤田の実験値^{2),3)}および著
者らのケース A, B の実験値を用いて、各波数に対す
る境界付近のレイノルズ応力を計算する。福岡らの計算
条件を表—2 に、計算結果を図—9 に示す。1 次モード
の流速場についてのレイノルズ応力が波数 k_1 の大き
さに対してピークをとる。これは、水平混合が最も活
発になる波数領域が存在することを示している。た
だし、このピークをとる波数には、ある幅があるよ
うに見える。このレイノルズ応力が発達を始めてか
ら安定した値をとるまでに要する計算の時間ステップ
を Tg として図中に示す。高周波のものほど安定
に至るまでの時間が短くなっている。すなわち、レ
イノルズ応力がピークをとる波数群の中でも、よ
り高周波のものほど発達が速い。この渦が発達し
た段階で安定な場が形成され、これ以降波数の小
さいものは発達できなくなると考えられる。実際、
48 m という長い水路を用いた福岡・藤田の実験で
確認された波長は約 3.5 m³⁾ であり、これはこの緩
やかなピーク上の波数の大きい領域に位置している。

なお、実際の擾乱はランダムであるが、初期値として
左右逆対称な微小擾乱を水位の 1 次モードのみに与
えている。このとき、2 次モードの初期擾乱はゼロで
左右対称な解になる。このため 1 次モードの波数を
十分小さくとった場合でも、2 次モードの波数の変
動成分が発達しにくくなるという問題が生じている。
この問題は、卓越波数を間に含む数多くの波数を
とり、種々の擾乱パターンを含む計算を行えば解消
し、卓越波数が直接的に定まる。しかし、このよう
にして卓越波数を求めるには著しく計算時間がかか
るため、ここでは卓越波数は 2 次までの波数の流速
場に対するレイノルズ応力最大で算定している。

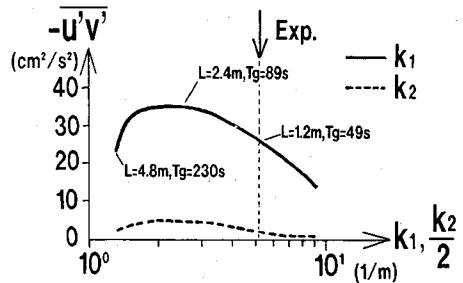
次に、本実験のケース A, B についての計算結果を
それぞれ図—10, 図—11 に示す。ケース A では波
数に対してレイノルズ応力にピークが現れるが、実
験で得られた波数 ($k_1=5.2(1/m)$) はこのピーク
付近の値よりも大きい。これは、この場合の波速と
 Tg から判断すると、十分発達した卓越波数を持
つ平面渦が水路内に形成されるためには水路が十分
長いことが必要であり、本実験に用いた水路が短
すぎることを意味している。十分長い水

表—2 計算に用いた福岡・藤田の実験条件^{2),3)}

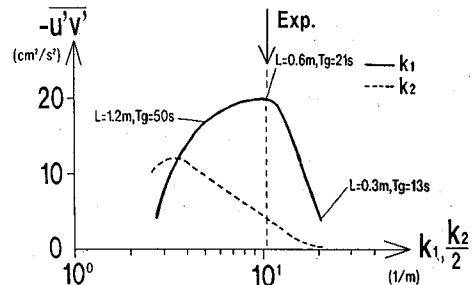
流量 (l/s)	水路床 勾配	等流水深 (cm)	水路幅 (cm)	樹木幅 (cm)	底面粗度 係数	透過係数 (m/s)
37	1/1000	4.5	300	30	0.011	0.38



図—9 レイノルズ応力と波数の関係 (福岡・藤田の実験について計算したもの)



図—10 レイノルズ応力と波数の関係 (CASE-A について計算したもの)



図—11 レイノルズ応力と波数の関係 (CASE-B について計算したもの)

路で実験を行うと $k_1=3(1/m)$ 程度のものが卓越すると
予想される。ケース B では、解析で得られた卓越波数は
実験で観測された波数と一致している。この場合は、樹
木の列数が多く、相対的な水路幅が狭くなるため、本
実験に用いた水路の範囲で平衡状態に達していると考え
られる。なお、ケース A の実験で出現した波数 ($k_1=5.2$
(1/m)) の場合の実測流速分布形を与えて線形不安定解
析を行うと、これと同程度の波数のものが卓越する結果
が得られる。したがって、線形不安定解析を用いる場
合には、十分発達した平衡状態の流速分布を用いないと卓

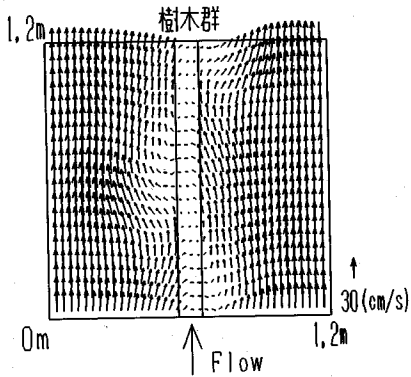


図-12 計算流速ベクトル (CASE-A, 静止座標系 u, v)

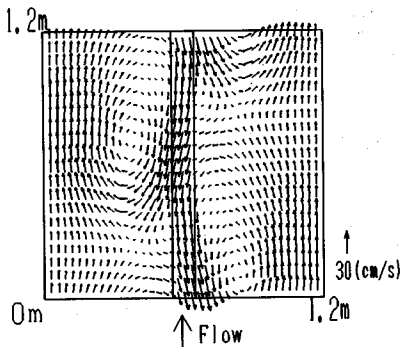


図-13 計算流速ベクトル (CASE-A, 移動座標系 $u-c, v$)

越波長が正しく求まらないことになる。このことは、先に述べたように、卓越波長は流速分布と一緒に非線形の基礎方程式を解いて決まるものと解釈すべきであろう。

以下ではケース A, B の計算値と実験値との比較をする際には、実験で見出されたそれぞれの波長とそのモードが発達し安定した時点の平面流況の解を用いることにする。

(3) 単断面水路の中央に一様で連続的に樹木が繁茂した場合の計算結果

流れが十分に発達した段階の結果を示す。図-12は静止座標からみた流速ベクトル、図-13は波速 c で移動する座標系からみた流速ベクトル図である。図-14には水面形のコンターを示す。変動の振幅、位相差の横断分布を計算し、式 (6), (7), (8) を用いて求めたものである。先に実験結果で示したように、樹木群近傍に左右交互に大規模な平面渦が生じており、その外周は樹木群内部に入り樹木群内外の間で流体が入り出している。また、水面の山と谷が左右互い違いに交互に現れ、図-5に示した実験値をよく表現している。実験値の振幅が小さいのは、流速が大きい場では波高計のプロープが小さな波を作り出すことなどにより、水面の変動に対する波高計の応答性が鈍くなっているためと考えられる。大規模平面渦のある場所ではすり鉢状に水面が低く

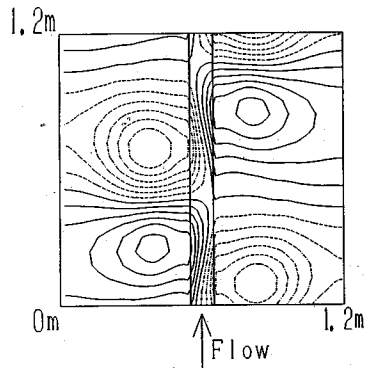


図-14 計算水位コンター (CASE-A)

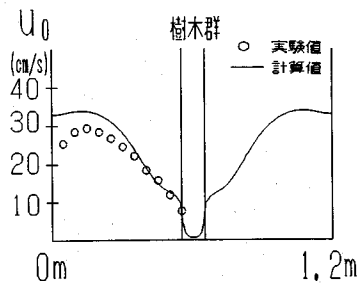


図-15 平均流速分布 (CASE-A)

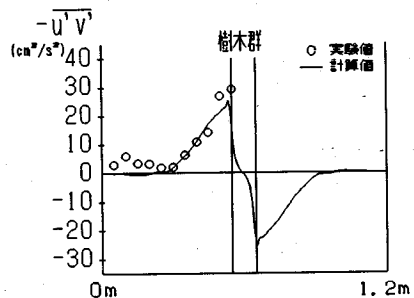
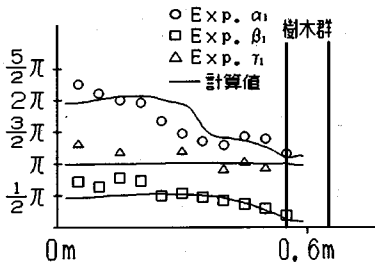
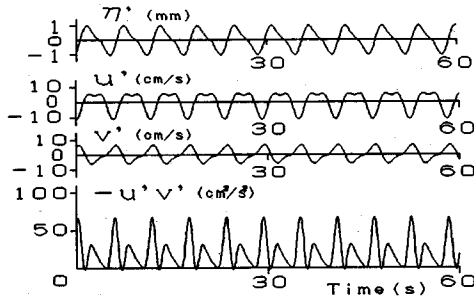


図-16 レイノルズ応力分布 (CASE-A)

なっており、逆に渦の外側で流れがぶつかり合うところで水面が高くなっている。これらの平面渦は、流下方向に対し内側向きに長軸をもつ楕円形となっている。ただし、渦の回転中心の位置が長軸上の上流側に片寄っている。そのため水面形の左右の山と谷に関して、山のピークが谷のピークよりもやや下流にずれている。この結果、樹木群上の横断水面勾配は主流に対し完全に直角な方向ではなく、常にやや上流側に傾いて生じている。図-15は水深平均の流速分布を示したものである。計算値は樹木群近傍の水深平均流速の欠損をよく表している。図-16には水深平均レイノルズ応力の分布を示す。樹木境界面での実測せん断力値をよく説明している。また、レイノルズ応力が主流の中央付近から樹木境界にかけて急



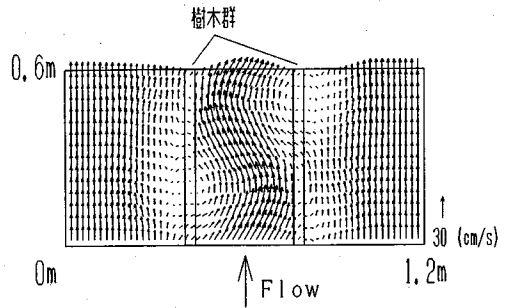
図一七 位相差の横断分布 (CASE-A)



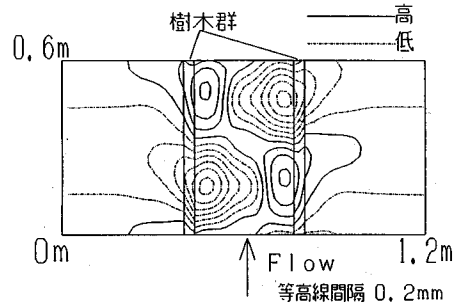
図一八 計算による水位及び流速の時間変動 (CASE-A)

増しており、この領域で激しい水平混合が生じていることを示している。図一七には一次モードの u' 、 v' 、 η' について、右岸側樹木境界での水位変動の位相に対するそれぞれの位相差の横断分布を示す。位相差は各変動量の相対的な位相関係を表すものである。計算値は実測値をよく表している。側壁付近で計算値と実測値が一致しないのは、実測値が壁面からの乱れの影響を受けているためである。 u' の位相である α_1 についてみると主流の中央付近で π 変化しており、ここに平面渦の中心があることを示している。また、 u' と v' の位相差については樹木近辺ではほぼ π であるのに対し、主流中央付近から外側では約 $3/2\pi$ となっている。 v' と η' の位相差は樹木境界ではほぼ π ずれているが、樹木から離れるに従い相対的に v' の位相がすすみ $1/2\pi$ に漸近していく。このことから図一六で示したように主流の中央付近から外側ではレイノルズ応力がほとんど生じないことが理解できる。

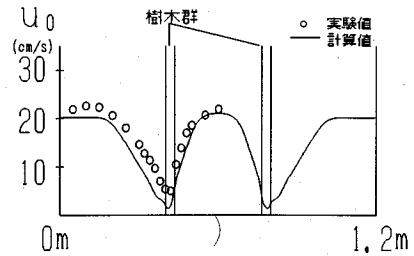
次に、樹木群近傍における u' 、 v' 、 η' 、及びレイノルズ応力について、時間変化として示したのが図一八である。図一八の実験結果と同様に、流体が樹木群内から流出する時間は樹木群に流入する時間よりも短いことが計算結果でもよくわかる。レイノルズ応力のピークをみると主流速が減速しているときには、加速しているときの倍近い値となっている。このことは、主流が樹木群から流出する流れにより急激に減速させられることを示している。



図一九 計算流速ベクトル (CASE-B, 静止座標系 u, v)



図二〇 計算水位コンター (CASE-B)



図二一 平均流速分布 (CASE-B)

(4) 複断面水路の低水路河岸沿いに一樣で連続的に樹木が繁茂した場合の計算結果

ケースAの計算同様に、流れが十分に発達した段階の結果を示す。図一九に静止座標系での流速ベクトル、図二〇に水面形のコンターを示す。低水路内に左右交互に大規模な平面渦が生じ、その部分の水面が低くなっている。これら低水路内の平面渦の外周部に沿うように流れが蛇行しており、図一六や写真二の実験結果をよく裏付けている。この平面渦の外周は樹木を突き抜けて高水敷上にまで及んでいる。図二一は平均流速分布、図二二はレイノルズ応力分布を示したものである。平均流速分布については、計算値が実験値に比べて若干低めになっているものの概ね一致している。低水路は高水敷に比べて粗度係数が小さく水深が深いにもかかわらず、低水路内の流速が高水敷の流速と同程度であることから、低水路では全体にわたって樹木の存在に起因する水平混合により流速が抑制されている。次に、レイノル

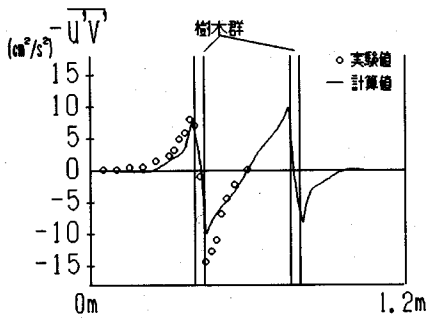


図-22 レイノルズ応力分布 (CASE-B)

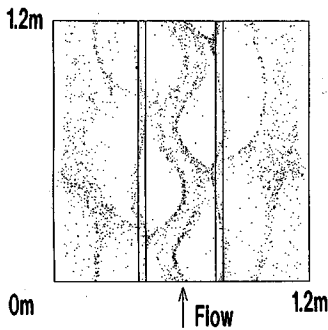


図-23 計算解によるマーカー分布

ズ応力の分布を見るとケースAでの分布がそのまま二列になったような形になり、そのピーク値が低水路側で大きくなっている。このように複断面の場合は、低水路内での水平混合が卓越して生じることがわかる。ただし、低水路内の樹木境界での実験値が計算値に比べてやや大きな値となっている。これは、用いた電磁流速計のプロープが大きく、レイノルズ応力の小さい高水敷高さ以下の領域での測定数が少なくなり、ほぼ高水敷高さ以上の領域で平均化を行ったためである。次に写真-2に示したアルミ粉の分布との比較を行うために計算結果に対する流れの可視化を試みた。ここでは、得られた流速場にマーカーをのせて流下させ、その挙動を調べた。結果を図-23に示す。写真-2同様に、低水路内でマーカーが蛇行するとともに高水敷肩付近に特徴的な鬚状の筋がみられる。この筋は実験同様、低水路内の平面渦の配列が左右互い違いになっているために、左岸側と右岸側で位相がπずれている。

以上のことから、樹木群を有する河道では大規模平面渦によるせん断流れが形成され、明確な平面構造をもつ流れ場になることが明らかとなった。このためには、流下方向への連続的な樹木群の存在と横断方向の透過性が必要不可欠であることがわかる。

樹木群を有する河道の流れを求める場合には、灘岡らの主張する水深スケール以下の3次元乱れの影響を取り込む必要性は小さい。大規模水平混合に着目してその低

周波変動を単純に表す本解析法を用いることにより十分な精度で現象の記述が可能であることが示された。

4. 結 論

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

①縦断的に連続する樹木の近くに大規模な平面渦が現れ、これらの流下に伴い水面に周期的な変動が生じる。これらの渦が樹木を挟んで互い違いに流下するため樹木群領域で横断方向に大きな水面勾配を形成する。そして、これらの平面渦及び横断水面勾配により横断方向の流体混合が駆動されていることを、実験による水量の測定、及び流れの可視化から明らかにした。

②樹木の存在に起因する水平混合をモデル化して基礎式に組み込み、流れ場の非線形安定解析を行った。その結果、平面渦の卓越波長を見積もることが可能となった。本解析により、流速分布形と波数の間の非線形現象として定まる流れ場は平衡状態の流れ場であり、線形解析より定まる卓越波長の問題点が明らかとなった。

③代表的な樹木群繁茂形態について流況解析を行い、その平面流況および樹木群境界のせん断力が、実験で求めた値と良く一致した。これにより、このような水平混合場が大規模平面渦に代表されるような卓越した波長を有する流れに支配されていること、及び2次元平面流況解析で十分な解を与えることを示した。

Appendix

15個の連立偏微分方程式

(i : モードの次数 (1~ n 次まで), $j=1, 2$)

$$\frac{\partial u_{ij}}{\partial t} = L(u_{ij}) + v_{ij} \frac{\partial u_0}{\partial y} + \nu_i \left(-2k_i^2 u_{ij} + \frac{\partial (v_{ij})'}{\partial y} + \frac{\partial^2 u_{ij}}{\partial y^2} \right) - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{ij} - \left(v \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{ij} \dots \dots \dots (A.1)$$

$$\frac{\partial v_{ij}}{\partial t} = L(v_{ij}) + v_{ij} \frac{\partial v_0}{\partial y} + \nu_i \left(-k_i^2 v_{ij} + \frac{\partial (u_{ij})'}{\partial y} + 2 \frac{\partial^2 v_{ij}}{\partial y^2} \right) - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{ij} - \left(v \frac{\partial v}{\partial y} \right)_{ij} \dots \dots \dots (A.2)$$

$$\frac{\partial \eta_{ij}}{\partial t} = -(u_0 - c)(\eta_{ij})' - \frac{\partial (v_0 \eta_{ij})}{\partial y} - \frac{\partial (h_0 v_{ij})}{\partial y} - h_0 (u_{ij})' - \left(u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_{ij} - \left(v \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)_{ij} - \left(\eta \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{ij} - \left(\eta \frac{\partial v}{\partial y} \right)_{ij} \dots \dots \dots (A.3)$$

$$\frac{\partial u_0}{\partial t} = gI - RSu_0 + \nu_i \frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right)_0 + \left(v \frac{\partial u}{\partial y} \right)_0 \dots \dots \dots (A.4)$$

$$\frac{\partial v_0}{\partial t} = -g \frac{\partial h_0}{\partial y} - RSv_0 + 2\nu_i \frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} \right)_0 + \left(v \frac{\partial v}{\partial y} \right)_0 \dots \dots \dots (A.5)$$

$$\frac{\partial \eta_0}{\partial t} = -\frac{\partial (h_0 v_0)}{\partial y} - \left(u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_0 - \left(\eta \frac{\partial u}{\partial x} \right)_0 - \left(\frac{\partial \eta v}{\partial y} \right)_0$$

..... (A.6)

以下に、変数、線形演算子 L 、非線形項について示す。

$$u = u_0 + \sum u_{i1} \cos \{k_i (x - ct)\} + \sum u_{i2} \sin \{k_i (x - ct)\}$$

$$u_{i1} = u_i \cos (k_i \alpha_i) \quad u_{i2} = -u_i \sin (k_i \alpha_i)$$

$$v = v_0 + \sum v_{i1} \cos \{k_i (x - ct)\} + \sum v_{i2} \sin \{k_i (x - ct)\}$$

$$v_{i1} = v_i \cos (k_i \beta_i) \quad v_{i2} = -v_i \sin (k_i \beta_i)$$

$$\eta = h_0 + \sum \eta_{i1} \cos \{k_i (x - ct)\} + \sum \eta_{i2} \sin \{k_i (x - ct)\}$$

$$\eta_{i1} = \eta_i \cos (k_i \gamma_i) \quad \eta_{i2} = -\eta_i \sin (k_i \gamma_i)$$

$$RS = (u + v)^{1/2} (g/K^2 + c_f/h_0)$$

$$L(f_{ij}) = -(u_0 - c)(f_{ij})' - v_0 \frac{\partial f_{ij}}{\partial y} - RS f_{ij}$$

ここで $(f_{ij})'$ は x 方向の微分を表し、 $(u_0)' = 0$ 、 $(u_{i1})' = -k_i u_{i2}$ 、 $(u_{i2})' = k_i u_{i1}$ であり v 、 η について同様である。

$$\left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)_{i1} = \sum_l \sum_m [(\delta_{i, (l+m)}) \{f_{l1} (-g_{m1})' + f_{l2} (g_{m2})'\} + \{(\delta_{i, (l-m)} + \delta_{-i, (l-m)}) \{f_{l1} (-g_{m1})' - f_{l2} (g_{m2})'\} \} / 2]$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)_{i2} = \sum_l \sum_m [(\delta_{i, (l+m)}) \{f_{l2} (-g_{m1})' - f_{l1} (g_{m2})'\} + \{(\delta_{i, (l-m)} - \delta_{-i, (l-m)}) \{f_{l2} (-g_{m1})' + f_{l1} (g_{m2})'\} \} / 2]$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial y} \right)_{i1} = \sum_l \sum_m \left[\left\{ \delta_{i, (l+m)} \left(f_{l1} \frac{\partial g_{m1}}{\partial y} - f_{l2} \frac{\partial g_{m2}}{\partial y} \right) \right\} + \left\{ (\delta_{i, (l-m)} + \delta_{-i, (l-m)}) \left(f_{l1} \frac{\partial g_{m1}}{\partial y} + f_{l2} \frac{\partial g_{m2}}{\partial y} \right) \right\} \right] / 2$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial y} \right)_{i2} = \sum_l \sum_m \left[\left\{ \delta_{i, (l+m)} \left(f_{l2} \frac{\partial g_{m1}}{\partial y} + f_{l1} \frac{\partial g_{m2}}{\partial y} \right) \right\} + \left\{ (\delta_{i, (l-m)} - \delta_{-i, (l-m)}) \left(f_{l2} \frac{\partial g_{m1}}{\partial y} - f_{l1} \frac{\partial g_{m2}}{\partial y} \right) \right\} \right] / 2$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)_0 = \sum_l \{f_{l1} (-g_{l1})' - f_{l2} (g_{l2})'\} / 2$$

$$\left(\frac{\partial fg}{\partial y} \right)_0 = \sum_l \left[\frac{\partial (f_{l1} g_{l1})}{\partial y} + \frac{\partial (f_{l2} g_{l2})}{\partial y} \right] / 2$$

δ : クロネッカー記号

l, m : モードの次数 (1-n 次まで)

参 考 文 献

- 1) 石川忠晴・田中昌宏：開水路中のかん木の抵抗特性に関する研究，第 31 回水理講演会論文集，pp. 329~333, 1987.
- 2) 福岡捷二・藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水利的影響，土木研究所報告第 180 号，1990.
- 3) 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.
- 4) 福岡捷二・藤田光一・新井田 浩：樹木群を有する河道の洪水位予測，土木学会論文集，No. 447/II-19, pp. 17~24, 1992.
- 5) 福岡捷二・渡辺明英・津森貴行：低水路際に樹木群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, pp. 33~51, 1993.
- 6) 渡辺明英・福岡捷二・津森貴行：樹木群のある河道の流れの水平混合とその卓越波数，水工学論文集，第 38 巻，pp. 357~362, 1994.
- 7) 辻本哲郎・北村忠紀：側岸に沿って植生群落がある流路での水面変動を伴う横断混合，水工学論文集，第 36 巻，pp. 273~280, 1992.
- 8) 建設省河川局監修：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン (案)，山海堂，1994.
- 9) 灘岡和夫・八木 宏：SDS & 2 DH 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) 灘岡和夫・八木 宏：植生によって引き起こされる浅水流の水平混合現象に関する数値シミュレーション，東京工業大学土木工学科研究報告，No. 47, pp. 8~20, 1993.
- 11) 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.

(1993. 11. 1 受付)

STRUCTURE OF PLANE SHEAR FLOW IN RIVER WITH VEGETATIONS

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE and Takayuki TSUMORI

Horizontal large eddies and water level fluctuation appear periodically near vegetations in river flow. To estimate the flow pattern and water level fluctuation 2-D-numerical model was developed. Experiment and 2-D-numerical analysis of the river flow were performed focussing on the lateral mixing due to horizontal large eddies. The computational results of flow pattern and water level fluctuation agreed with experimental results. As the result, it became clear that flow pattern and distribution of shear stress in the river flow with vegetations can be estimated accurately, by the method presented in this paper.