

# 低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造 —利根川新川通昭和 56 年 8 月洪水—

福岡捷二<sup>1</sup>・渡辺明英<sup>2</sup>・上阪恒雄<sup>3</sup>・津森貴行<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>工博 建設省土木研究所河川研究室主任研究員

<sup>3</sup>工修 建設省関東地方建設局利根川上流工事事務所所長

<sup>4</sup>工修 建設省大臣官房技術調査室

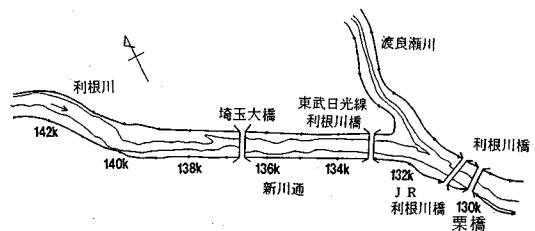
低水路河岸沿いに樹木群が繁茂した利根川新川通において観測された洪水時の航空写真には鬚状の筋など明確な流れの構造が撮影されている。この航測写真を分析して求めた洪水流の構造と樹木群の存在を考慮に入れた平面 2 次元解析で得られる流れの構造を比較検討した。その結果、現地河道の流速場の解析から樹木近傍には明確な平面渦構造が形成され、解析値は観測値とよく対応し、現地での大規模な流れの構造が平面 2 次元解析によって精度良く求められること、境界混合係数値は福岡らによる推定式で与えられること、境界混合係数を用いた準 2 次元解析は流速分布などを工学的に十分な精度で求めることができることを示した。さらに、航空写真による表面流速分布から流量算定の可能性についても議論している。

**Key Words** : *vegetation, structure of horizontal large eddies, shallow water analysis, boundary mixing coefficient*

## 1. 序 論

樹木群が繁茂した河道における洪水流の抵抗特性が明らかにされ<sup>1),2)</sup>、洪水解析や河道内の樹木管理に適用されてきた<sup>3),4)</sup>。この抵抗特性を物理的に解明するために、樹木内流れと主流との間の水平混合に起因する平面渦が検討された。実験水路で詳細な測定が行われ、卓越した平面渦は、時間及び流下方向に関する平均場と数波からなる正弦波と余弦波の和で表される変動場からなることなど平面渦の構造が実験と解析によって明らかにされた<sup>5)-7)</sup>。この解析法が樹木群の設置位置や幅が異なる場合の流れに適用され、これによって得られた境界混合係数  $f$  の値が福岡・藤田が求められた境界混合係数の実験値とほぼ一致することが示された<sup>8)</sup>。しかし、これらは理想化された樹木模型を有する流れの結果を説明し得たに過ぎず、この解析法が実河川の洪水流にまで適用できるかどうかを確認する必要がある。このためには、現地河川の洪水流の平面流況を把握し、これと比較検討することが望まれる。

本文では、実河川の低水路河岸沿いの樹木群による大規模平面渦を伴う洪水流に著者らの解析法を適用し、平面的な流れの状況や樹木群の抵抗特性について現地観測結果と比較検討を行う。これにより、樹木群のある実河道における洪水流に対する平面 2 次元解析の適用性を示



図—1 対象区間 (利根川新川通)

し、提案されていた境界混合係数が現地河道でも妥当な結果を与えることを示す。最後に、航空写真測量による流速ベクトルを用いた流量推算の可能性を検討している。

## 2. 利根川新川通の河道の特性

本文で解析対象とするのは図—1 に示す利根川 133～139 km の区間で新川通と呼ばれている。この区間は開削された河道のため、約 6 km にわたってほぼ直線となっている。現在の河道の平水時の状況を写真—1 に示す。写真—1 から明らかなように、新川通は、両側に高水敷をもつ複断面河道であり、低水路河岸沿いに樹木及び草本類が繁茂している。図—2 は昭和 55 年 5 月 23 日

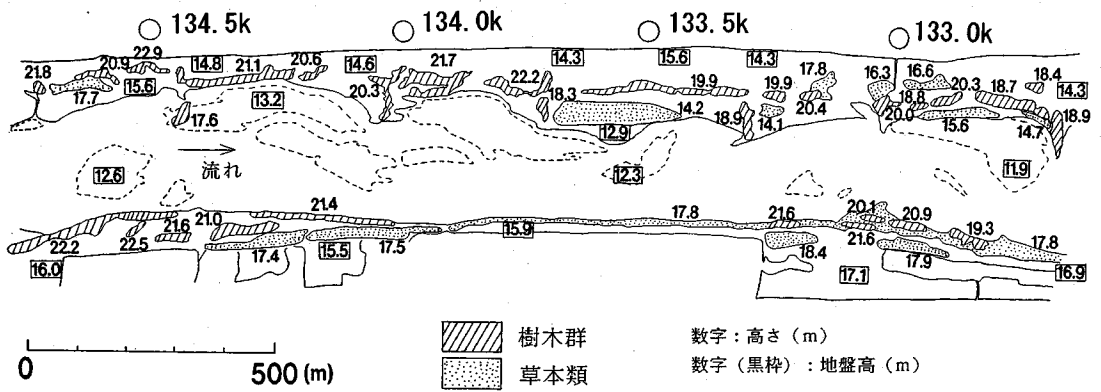


図-2 樹木位置及び高さの分布

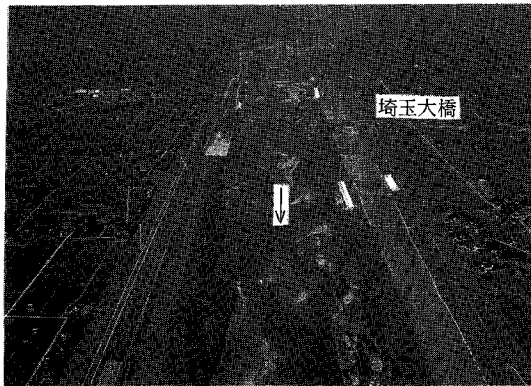


写真-1 新川通の河道状況

の平水時に撮影された航空写真を用いて、低水路河岸沿いの樹木の幅と高さの分布を読みとったものである。埼玉大橋 (137 km) 付近から上流では樹木の分布は粗であるが、下流では帯状に連続して分布している。樹木群の幅は一樣でなく、縦断的に変化しており、また左右岸で異なっている。樹木群の幅は左岸側で40~60 m程度と広く、右岸側で10~20 m程度と狭い。草本類も左岸側で50~100 mと広く、右岸側で20~50 mと狭くなっている。これらの樹木群の高さは約4~5 mであり、草本類の高さは2 m程度である。

図-3に代表的な位置での横断面形状を示す。断面形状は左右で異なり、縦断方向に変化しているが、その違いは大きくない。堤間幅は約600 mであり、低水路幅は約300~400 m程度である。低水路の深さは4~5 mである。河床材料は、レキ混じりの砂であり、60%粒径は0.3~0.6 mm程度である。

### 3. 洪水観測結果と平面二次元計算結果の比較

河道内に樹木群が繁茂している場所では洪水時に主流と樹木群の間で水平混合が生じることが報告されてい

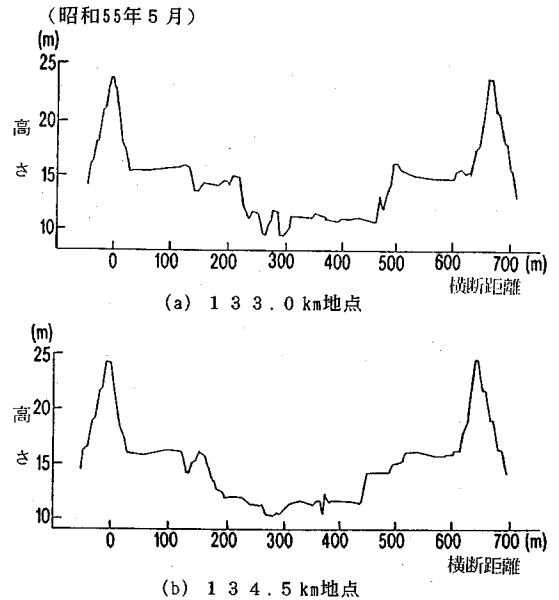


図-3 横断形状 (昭和56年)

る<sup>1)</sup>。利根川新川通における昭和58年8月洪水において、その状況が航空写真に明確に記録されている。観測された水理データと航空写真データを解析し、平面流況を明らかにする。この洪水について、平面2次元流解析法を適用し、洪水流の構造について比較・検討を行う。

ここで用いる平面2次元流解析法<sup>5)~8)</sup>は、樹木及び河道断面形等の条件が縦断方向に一樣に続いているとして、このときの流れ場を求めるものである。実際にはこのような状態は存在し得ず、新川通においても、樹木の分布の粗密、低水路幅の縦断変化などが存在する。しかし、私達が知りたいのは現地河川での洪水流の大局的な構造であり、これが先の平面2次元解析法の枠組みで表現できるかどうかである。このため、河道の断面形状、樹木の高さ・密度分布、粗度などの条件が縦断的に大き

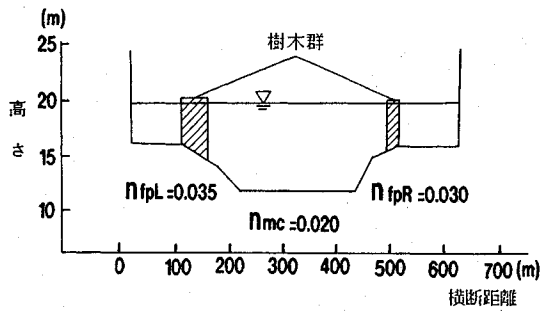


図-4 解析に用いた断面形状と樹木分布

表-1 解析に用いた水理条件

流量 Q (m <sup>3</sup> /s)	水面勾配 I	透過係数 K (m/s)
7,800	1/3700	18

く変化していないと見なし、本解析法を適用をする。

以下、本文ではまず、洪水の概要について述べ、航空測量から得られた結果と解析結果を比較しながら低水路河岸沿いに樹木群のある河道における洪水流の構造について検討を行う。

#### (1) 昭和56年8月洪水の概要と解析条件

航空測量写真及びそれから得られたベクトル図などと解析結果を比較するため、この写真が撮影された時刻における洪水の水理量や河道断面諸量を用いる。計算に用いた断面形状及び水理条件を図-4及び表-1に示す。

当該地点における昭和56年8月23日の洪水の概要を述べる。図-5のヒドログラフに示すようにピーク流量は、上流の川俣で7,800 m<sup>3</sup>/s (150 km, 14時頃)、下流の栗橋で8,100 m<sup>3</sup>/s (130 km, 17時頃)が観測されている。図-1に示したように利根川は栗橋の手前で渡良瀬川と合流することから、ここでは川俣のピーク流量が当該地点を流下したものとす。航空写真を撮影した時刻はピーク流量通過後であるが、ピーク流量との違いは小さい。ここでは流量としてピーク流量を用いる。ピーク時の水面勾配は川俣、飯野 (143.2 km)、栗橋観測所のそれぞれの観測水位を用いて求めると約1/3700であった。水深は、低水路の中央で7~8 m、高水敷上で3~4 mであり、このとき水位はほぼ樹木の樹冠上にかぶさる状態であった。

河道の粗度係数は以下のように求めた。新川通における低水路の河床構成材料が砂であることから低水路の粗度係数はおよそ  $n=0.020\sim0.0225$  程度と考えられる。高水敷は草地及び背の高い草本類で覆われている。草本類の高さや地盤高が左右岸で異なっていることから、高水敷の粗度は左岸で  $n=0.035$ 、右岸で  $n=0.030$  を与え

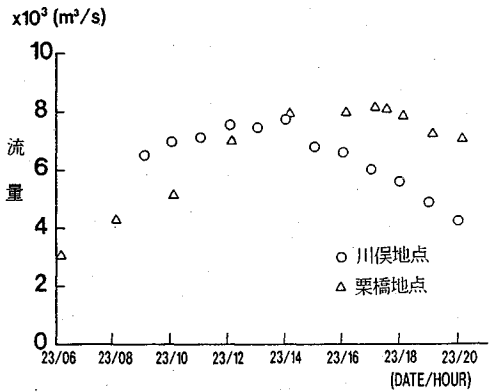


図-5 流量ヒドログラフ

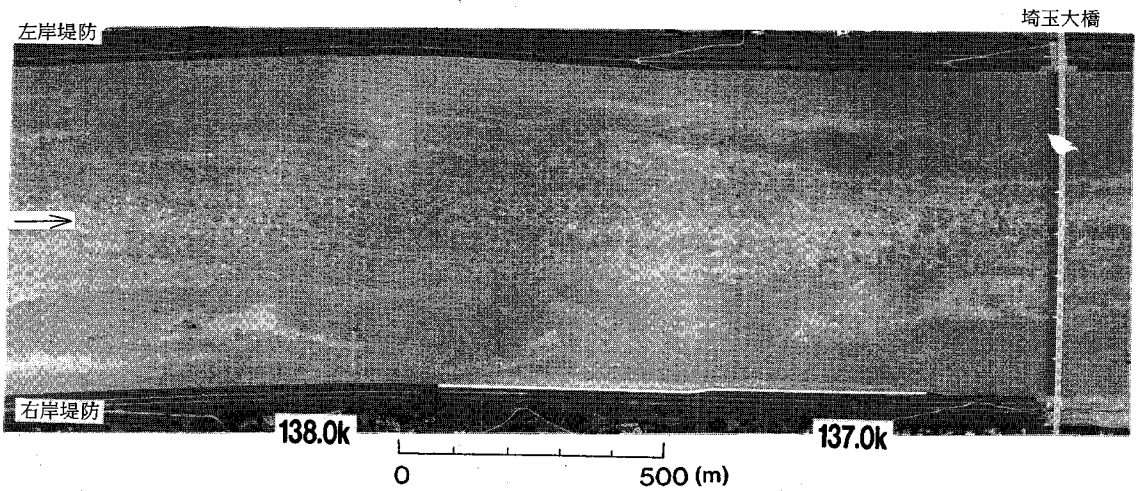
た。樹木群の透過係数  $K$  は、航空測量写真で得られた表面流速分布から樹木の存在する部分での横断平均流速値  $U_w$  を読みとり、 $K=U_w/I^{1/2}$  から逆算して求めた。厳密に言えば樹木内部でも周りの流れの影響を受けるため、この値には誤差が含まれ、多少大きめな値になっていると考えられる。しかし、これを正確に求めることは困難なため、このようにして求めた値を推定値として用いる。これより、 $K=12\sim24$  m/s と考えられ、解析では  $K=18$  m/s とした。解析法は著者らによる平面2次元解析法<sup>5)</sup>を適用する。解析では初期水位に微小な擾乱を与え、流量の保存を課して水位を計算し、流れの平均場と渦運動による変動場の時間発達を求める。

#### (2) 平面的な流れの状況

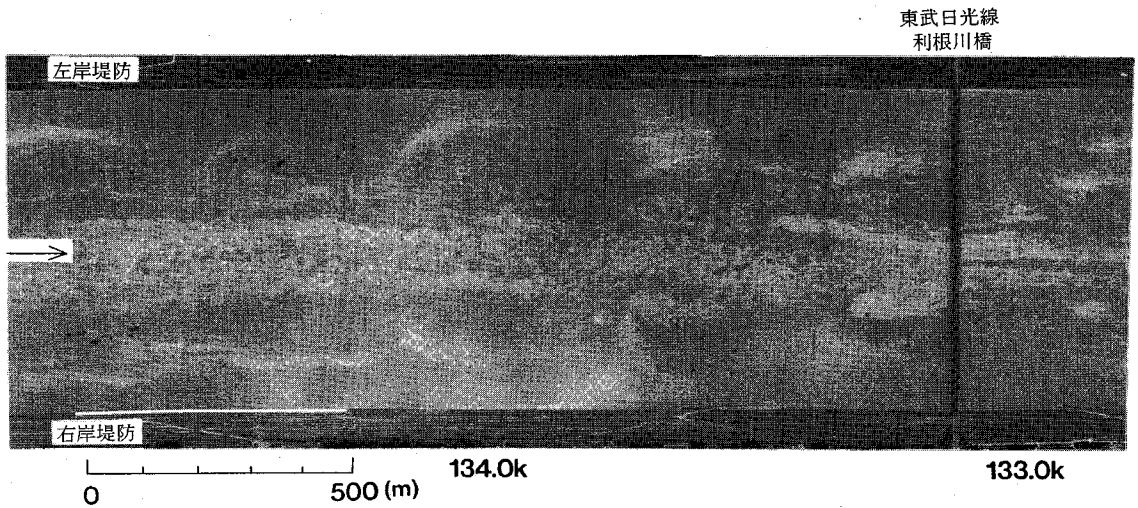
写真-2, 3は、当該区間で撮影された洪水時 (昭和56年8月23日14:30)の航空測量写真である。写真-2は、埼玉大橋よりも上流で樹木が粗に生育していた (136.5~138.5 km) 区間、写真-3は、その埼玉大橋よりも下流で樹木が繁茂していた (133.0~135.0 km) 区間の水面での流れの状況を示している。樹木の少ない埼玉大橋より上流では流れの特徴的な構造が見られない。一方、埼玉大橋より下流では、樹木群に起因する水平混合による平面的な流れの構造が浮遊している土砂濃度の濃淡として捉えられている。

写真-3では、鬚状の筋が樹木群から高水敷上にかけて伸びているのが見える。この筋は低水路の左右両岸で生じており、その位相の差はほとんどないようにも見えるがわずかについていているようにも見える。このような鬚状の筋は樹木模型を有する複断面実験水路で見いだされた流れの構造と対応している<sup>5)~7)</sup>。以下では、流れに特徴的な構造が見られる写真-3 (133~135 km) の区間について検討を行う。

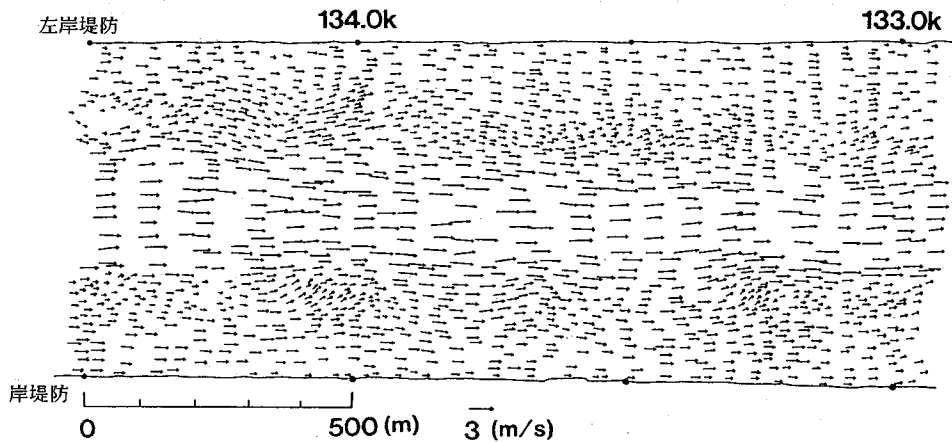
この航空測量写真を解析し、読みとられた表面流速ベクトルを図-6に示す。表面流速ベクトルは、連続して



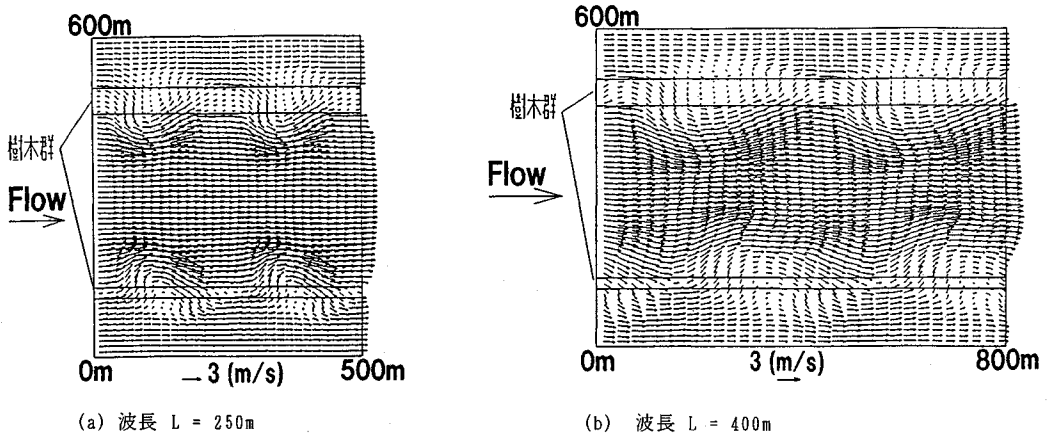
写真一2 樹木が粗な区間の洪水時の表面流況（埼玉大橋上流：136.5～138.5 km 区間）



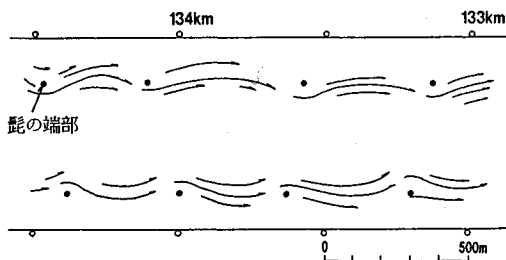
写真一3 樹木が密に繁茂している区間の洪水時の表面流況（利根川橋上流：133.0～135.0 km）



図一6 航測写真から求めた表面流速ベクトル



図—8 流速ベクトル (計算結果)



図—7 ベクトル図から見られる流れと蛇端部の位置の配置

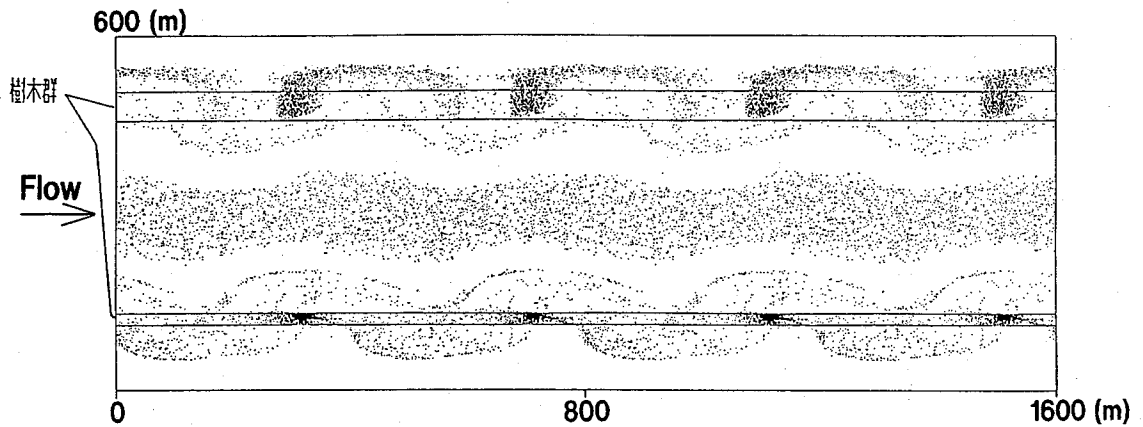
撮影された2枚の写真に移ったゴミ、模様等が移動した距離を撮影時間間隔で除して求めたものである。これより、鬚状の筋の形状とその位置に対応して、流速ベクトルが蛇行していることが分かる。この流れの蛇行は、流れと共に流下する平面渦運動が生じている場合に、渦運動を瞬間場で捉えたと見られるものであることが著者らの実験及び解析から分かっている<sup>5)~8)</sup>。したがって、実験水路で見いだされたような樹木群近傍の大規模な平面渦構造が存在していることが推定される。

図—7は、写真及び流速ベクトル図から流れの状況を読み取ってこれを流線として表し、流速ベクトルと写真の位置を同定して求めた鬚の端の位置を描き加えたものである。これは渦の状況を直接表したものではないが、蛇行流と渦の位置関係<sup>5), 6)</sup>から、樹木群から流れが出て樹木群に流れが入る図—7の黒丸と黒丸の間の低水路側に大きな渦があると考えられる。図—7に示した蛇行流の構造や波長から推定される渦と渦の間隔は必ずしも一定ではなく、少しずつ異なっていることが分かる。これらの一つの渦構造の大きさは、およそ350~450m程度であると思われる。また、渦の大きさが異なることもあって、これらの鬚状の筋、渦の位置は左右岸でずれており、そのずれ方に特徴はない様に見える。

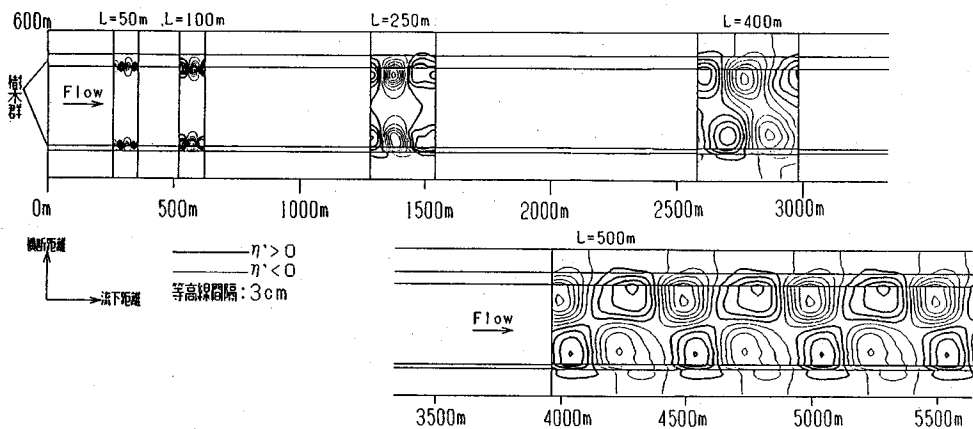
波長を  $L=250\text{ m}$ 、 $400\text{ m}$  として計算した場合に得ら

れた流速ベクトルを図—8 (a) (b) に示す。波長250mの場合の蛇行数の平面構造は未だ小さく、波長400mの場合が図—6に示されている実測にほぼ対応している。これまでの研究から波長が短く渦の大きさが小さい場合には左右岸の渦は干渉せず、波長が十分大きくなってから相互干渉を起こすことが示されている<sup>7)</sup>。波長を種々変えて流れ場の計算を行った結果、この洪水の場合には図—8に示す様に、実測の波長(350~450m)にほぼ相当する波長400mほどになった時点で低水路内の流れが蛇行を開始し、左右の渦が相互に干渉し始めることが分かった。

航空写真の表面流況との比較を行うため、航空写真から見積もられた波長とほぼ等しい  $L=400\text{ m}$  の場合について、計算で得られた流速ベクトルにマーカーを乗せて十分流下させ、得られる模様で流れを可視化した結果を図—9に示す。実河川で見られる写真—3のような周期的な筋は、浮遊砂の巻上げ・移送・沈降という物理過程が、水表面付近の土砂の濃淡として現れたものと考えられる。筋が、樹木領域から高水敷上に伸びながら途中で消失しているのは、拡散や沈降により表面濃度が薄くなっていくからと考えられる。また、取り扱っているスケールの大きさから判断して、拡散や沈降では沈降の影響の方が大きいと考えられる。このような沈降現象の影響を取り込むため、計算では1回の移動ごとに高水敷上の全マーカー数の5%ずつをランダムに消滅させている。これは、高水敷上では堆積土砂の再浮上はないものとして、土砂が移流によって  $(u\Delta t, v\Delta t)$  進む間に、表面の色の濃淡に関係すると考えられる深さ  $h_w$  の中に存在する浮遊砂の内の5%ずつが  $h_w$  より下に沈降していくことを意味している。この割合は、浮遊砂の濃度分布や土砂の沈降速度  $w_0$  と鉛直方向の拡散の強さなどによって決まる量である。ここでは、その量は場所によら



図—9 計算流速ベクトルにマーカーを流したときに計算された洪水流の表面流況



図—10 平面渦の発達過程

ず一定とみなし、航空写真に写っている髭の距離と計算結果から得られる髭の距離がほぼ一致するように試行錯誤で求めた。マーカーは、初めに低水路・樹木群内部に乱数を用いて蒔いており、高水敷上へ流れが入り込む位置では特に濃度を濃くした。また、消えたマーカーは樹木群から高水敷へ入り込む位置に移動させ、マーカーの総数は一定となるようにした。マーカーの模様は、周期境界条件の静止座標系で計算すると、流下するに従ってマーカー位置が主流線上に集まるようになって、徐々に形成される。一方、渦の波速に対する相対座標系で同様な計算を行うとマーカーは渦の周辺に集まってくる<sup>6),7)</sup>。

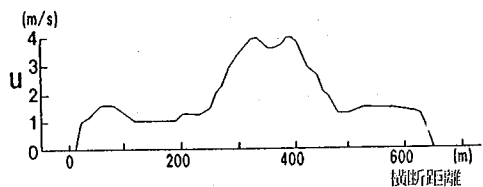
計算結果は航空写真と同様に、樹木のある領域から髭状の筋が高水敷上に伸びていることを示している。写真—3と図—9は同一の大きさで描かれており、2つを重ねて見ると髭の形状は両者ほぼ同じであることが分かる。左右の位相差は航空写真の場合ではわずかにある程度であるが、計算解では  $(1/2)\pi$  程度である。両者の差は、樹木の幅や密生度、断面分布や粗度係数などの非均質性の影響も考えられるが、これは樹木群の生育密度

および範囲が上流側では小さく渦がまだ成長段階にあり、左右岸に及ぶほどの組織的な構造を取り得るまで発達していないためであると考えられる。

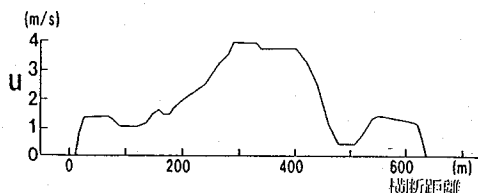
初期水位に右岸側と左岸側で微小な擾乱をそれぞれ与える。この左右の擾乱の位相差を  $0.06\pi$  ( $\tan\theta=0.2$ ) として、各波長ごとに渦の発達状況を求め、各時点で発達して卓越している波長を選び、波速を用いて時刻を流下距離に変換する<sup>9)</sup>。このようにして求めた平面渦の流下発達の様子を図—10に示す。

波長が400mほどに達する  $X=2500$ m 付近で左右の位相差が増大し、平衡状態である  $L=500$ m ( $X=4000$ m) では位相差がほぼ  $\pi$  の互い違いの配列をとる。このように、左右の平面渦が相互に干渉し互い違いの配列をとるまでには、低水路幅の10倍近い数kmオーダーの長い流下距離が必要となる。

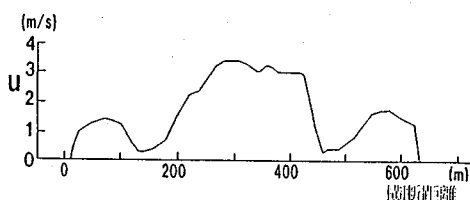
図—10に示される波長400~500mの間の流下距離の領域が航空写真の平面渦の状況に一致していると思われる。このとき発達に要した流下距離は3~4kmである。新川通の樹木密生区間の長さは4km程度である。発達



(a) 1 3 3 3 . 0 km地点



(b) 1 3 4 4 . 0 km地点



(c) 1 3 4 4 . 5 km地点

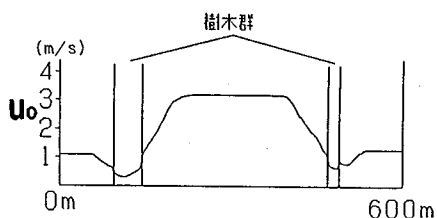
図—11 航空測量写真による表面流速横断分布

速度は計算よりも現地河川の方が若干速い様であるが、計算結果は現地河道での平面渦の発達の状況をほぼ説明し得ている。

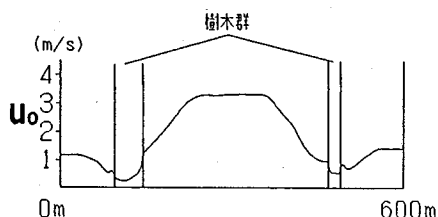
### (3) 流速横断分布

図—11は、航空写真を解析して求めた当該区間の断面での表面流速横断分布を示したものである。低水路際にほぼ連続的に樹木が存在しているため、この領域で流速の欠損が顕著となっている。このような速度欠損域は河道幅スケールに比較しても大きく、大きな水平渦による混合が生じていることがこれからも読み取れる。その速度欠損の領域は流下と共に大きくなっており、水平混合がまだ発達段階にあることが読み取れる。これより流速は、低水路中央部で3~3.5 m/s、高水敷上で1~1.5 m/s、樹木上で0.2~0.4 m/s程度となっていることが分かる。

波長を  $L=250\text{ m}$ 、 $400\text{ m}$  とした場合の水深平均流速の横断分布を図—12 (a) (b) に示す。図—12 (a) (b) に示される様に、波長の増大とともに樹木付近の速度分布の欠損幅が大きくなる。波長  $250\text{ m}$  と波長  $400\text{ m}$  では、波長  $250\text{ m}$  の場合の欠損幅の方が小さく、これは発達初期の流れに相当している。波長  $400\text{ m}$  でも欠損領域は十分発達しきっていない。波長がさらに増大すると、欠損域が河道の中央付近にまで達し、流れは大きな



(a) 波長  $L=250\text{ m}$



(b) 波長  $L=400\text{ m}$

図—12 流速横断分布 (計算結果)

蛇行を生じるようになる<sup>5)~7)</sup>。流速分布の計算結果 (図—12 (b)) と発達段階の観測結果 (図—11) を比較すると、波長  $400\text{ m}$  の計算結果は観測結果を良く表していることが分かる。低水路内に現れる左右の平面渦の波長は、樹木幅など種々の条件が左右で異なるため、実際には同じものでない可能性があり、事実多少異なっている。しかしながら、断面形や樹木特性について平均的な諸量を与えて計算した本解析法でも流速分布など十分説明できることから、実用上波長は左右対称と解釈しても良いと思われる。

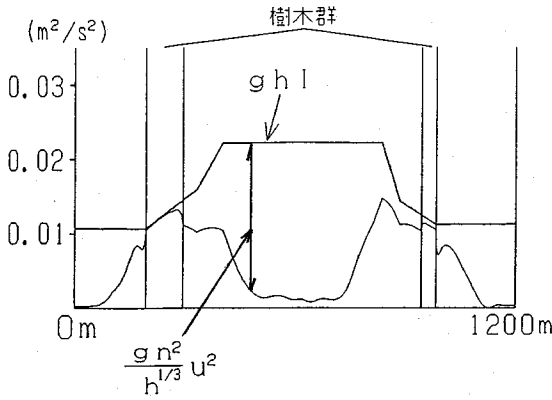
### (4) まとめ

航空写真で確認された特徴的な髭状の筋は実験水路においても明瞭に出現しており、これが樹木群の存在による大規模な平面渦を伴う流れの水平混合から生じていることが示された。これより、樹木群を有する現地河川の洪水流において、大きな水平混合が生じていることが確認された。

著者らの平面2次元流解析法を利根川河道に適用することにより、洪水時の水平混合場と高水敷上に現れている髭状の筋、すなわち平面的な流れの状況をよく再現できた。これにより、樹木の縦断的な存在距離に応じた水平混合の発達過程を概算することが可能となった。

## 4. 利根川河道における境界混合係数 $f$ の評価

序論でも述べたように洪水流の準2次元解析法<sup>1)~3)</sup>は、実河川の洪水流の計算や樹木管理に用いられている。この解析法に含まれている境界混合係数  $f$  の値には大型模型実験で定められたものを用いている。しかし、実際



図—13 平衡状態での流下方向の力の釣合分布

に現地河川の洪水流で観測された  $f$  値ではないため、100% の信頼性をもって利用されているわけではない。利根川の洪水で平面流況が調べられ、平面渦の存在も平面 2 次元解析で確認された。そこで実用的な準 2 次元解析と平面 2 次元解析を関係づけ、求められた  $f$  値の理論式が利根川の最大規模洪水についても成立するかを検討する。

平衡状態での流れ方向の力の釣合は次式で表される。

$$ghI + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy} h}{\partial y} - \frac{\tau_{xz0}}{\rho} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $g$ ：重力加速度、 $h$ ：局所水深、 $I$ ：水面勾配、 $\rho$ ：水の密度、 $\tau_{yy}$ ：横断方向のせん断力、 $\tau_{xz0}$ ：底面せん断力、 $y$ ：横断方向の座標である。 $\tau_{xz0}$  は水深平均流速  $u_0$  を用いて、

$$\frac{\tau_{xz0}}{\rho} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} u_0^2 \quad (2)$$

で表す。これより、平面 2 次元計算によって得られた流速分布を用いて底面せん断力分布を求める。これと重力による流下方向の力の差が水平混合による影響の大きさを示す。

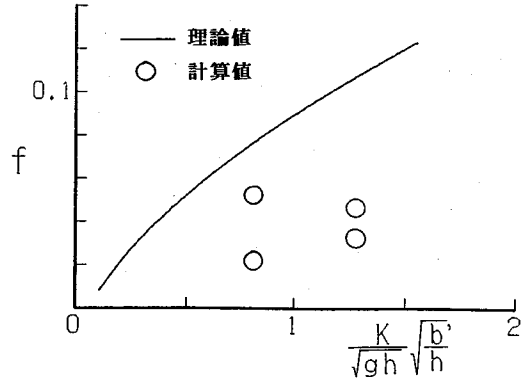
これらの大きさの関係を図—13 に示す。低水路中央部はまだ水平混合の影響を受けていない状態であることが分かる。一方、樹木群近傍では水平せん断力の影響の方が大きい。この水平混合による影響分を樹木群まで横断積分すれば樹木に作用するせん断力が求められる。

このようにして平面 2 次元性を考慮した解から求めた樹木境界でのせん断力  $\tau_y$  を主流と樹木内流速の差  $\Delta u$  の 2 乗で除して準 2 次元解析の境界混合係数  $f$  の形

$$f = \frac{\tau_y}{\rho(\Delta u)^2} \quad (3)$$

で表す。 $f$  の値は、左右岸でそれぞれ

$$f_1 = 0.052 \text{ (左岸高水敷側)} \\ f_2 = 0.022 \text{ (左岸低水路側)}$$



図—14 境界混合係数の理論値と計算値の比較

$$f_3 = 0.032 \text{ (右岸低水路側)}$$

$$f_4 = 0.046 \text{ (右岸高水敷側)}$$

となる。これらの値と樹木群の境界混合係数の理論式<sup>8)</sup>

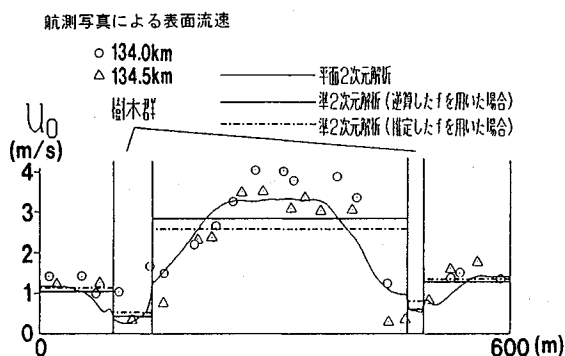
$$f = \frac{\frac{\beta}{\sqrt{\alpha}} \frac{K}{\sqrt{gh}} \sqrt{\frac{Zh}{b'}}}{\left\{ \frac{1}{2} + \alpha^2 \left( \frac{gb'I}{2(\Delta u)^2} + f \right)^2 \right\}^{1/4}} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{(\Delta u)^2}{g\eta'} \cong 13.3, \quad \beta = (0.25 \sim 0.30)$$

と比較する。ここで、 $b'$  は樹木群の幅であり、水深  $h$  には樹木群位置の水深を用いる。また、 $\Delta u$ ：樹木群内外の流速差、 $\eta'$ ：水位変動量である。式 (4) は、縦断的に連なる 1 つの樹木群を挟む平行な 2 つの流れによって引き起こされる水平混合現象について、平面 2 次元計算法を適用した結果に基づき、樹木群を通過する流れとこれによる流速変動の大きさを推定し導かれたものである。この理論式は、大型実験による境界混合係数の値を実験のパラツキの範囲内で説明できている。ただし、透過係数  $K$  が大きい場合には樹木群内の流れの非線形作用によって実際の境界せん断力が小さくなる。理論式はこれらの作用を省略しているため、大きめな値を見積もることになる。すなわち、式 (4) は  $f$  の理論上の最大値を与えるものである。現地河道の条件は大型実験の条件と必ずしも一致していないが、ここでは、現地河道の計算値を理論式と比較することによって理論式の現地河道への適用性を検討する。

図—14 に、理論式及び現地河道の平面 2 次元計算から求めた  $f$  値を示す。これより、樹木群の幅が広い場合には樹木の左右で  $f$  の値のパラツキがあり、その平均値は理論式の値の 1/2 程度になっている。これは、理論式は、樹木群内を水が通り難いことを前提として物理的に取り得る最大値を選んで表したものであるためである。計算では  $K$  の値を大きく選び、水が樹木群内を通り易くしたため、樹木群内の流れが影響する状況となってい





図一五 平面2次元解析と準2次元解析による水深平均流速分布の比較

たことが考えられる。また、計算での流れが十分発達しきった状態でないための影響もあることも考えられる。これより、透過係数  $K$  が分かれば理論推定式を用いて現地スケールの境界混合係数の値を概ね予測可能であることが分かる。

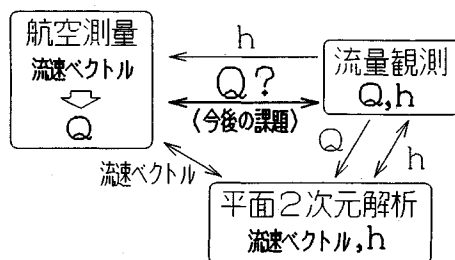
図一五に実測及び平面2次元計算から得られた水深平均流速分布と境界混合係数  $f$  を用いて準2次元解析から求めた流速分布を同時に示す。ただし、透過係数の値が大きいことから、準2次元解析では樹木群の内部の流速も求めた。これより、航測による流速分布と底面粗度を用いて逆算した境界混合係数の値及び推定式による境界混合係数の値を用いて求めた流速は、実測及び平面2次元計算による分布を概ね説明でき、 $f$  の違いが流速分布、抵抗等に与える影響の程度は小さい。

以上より、樹木群の繁茂した現地河道の抵抗特性及び流速分布を  $f$  の理論式で表現することが可能であり、 $f$  を用いた準2次元解析を河道計画や樹木管理計画へ適用する物理的背景が明らかとなった。

## 6. 航空写真測量と平面2次元解析の併用による洪水流量の推算

現在、観測流量は、河道内に浮子を流して流速を測り、断面形状と水位から求められている。これに代わる流量観測手法が未だに確立されていないのは、種々の方法によって求めた流速分布の精度が明らかでなく、また精度を向上させる手段を得ていなかったことによる。

洪水流量が大きいときには、航空写真がしばしば撮影されているが、これにかけられる費用と労力の割には、これらが十分利用されているとは言い難い。これは、航空測量から読みとった流速の精度に問題があるとされていたためである。しかしながら、本文で示したように平面2次元流解析を行い、流速分布を求め、これと観測による流速分布を比較することにより、流量算定の精度を



図一六 流量観測と2次元解析及び航空写真測量の関係の概念

向上させることができると考えられる。流量観測手法の多様化を目的として、リモートセンシング手段を用いた流量観測の航空測量の有効性について述べる。航空測量には飛行機を飛ばす上で、天候などの気象、洪水ピークの時間帯、航空法などによる制約がある。しかしながら、上空から撮影することは、飛行機の利用を限定しているわけではないので、これらの問題は解決可能であろう。図一六に流観・航空測量・2次元解析の関係の概念と今後明らかにすべき課題を示す。航空写真から得られた表面流速より求まる流量と観測流量の関係を求め、また、これらの関係に2次元解析を介らせて航空写真を用いた流量算定の可能性について検討を行う。すなわち、航空測量写真や2次元解析から、水位・流量の関係を求め、これらの河川計画への活用の可能性を探る。

ここでは、航空測量のベクトル図から表面流速分布を求め、これと観測水位から流量を算定している。航空測量された時点の流量は、写真撮影がピーク流量通過直後であるために若干小さくなっている。また、その値は断面によって異なっており、 $\pm 5\%$  程度のバラツキがある。したがって、航空測量による流量を求めるには、流量および水位観測の基準点を含み、ここでの流量・水位が測定されている所で、かつ断面形状が縦断的にも密に測られている区間について行う必要がある。これによって航空写真流量と平面2次元解析を併用して実測流量に含まれる誤差を評価していくことが可能になると考えられる。

ここでは、低水路河岸に樹木がある新川通を事例として示した。しかし、航空測量と平面2次元解析を併用して流量算定を行う上では、樹木の有無は本質的な問題ではない。この理由は、河川の水深平均流れは、河道の大きな湾曲部や低水路近傍を除けば全体として平面2次元流で近似できるからである。航空写真が撮られている多くの河川について、これらの方法による計算流量と観測流量を比較し、対応関係と精度について検討を重ね、航空測量による流量算定法の可能性を探っていくことが今後の課題である。

## 7. 結 論

本論文で得られた主要な結論を以下に記す。

- 1) 昭和56年8月利根川新川通で撮影された航空測量写真に見られる髭状の筋は航測写真と平面2次元解析による流速ベクトルから大規模平面渦によるものであることが確認された。この大規模渦の波長は350~450mであり、この渦により、樹木群近傍では蛇行流れが生じている。
- 2) 著者らの平面2次元流解析法を利根川新川通の洪水流に適用し、流速ベクトル、可視化図などから現地河道の流れの状況をほぼ表し得ることが分かった。計算との比較から、新川通の流れ場を再現する波長は約400mであり、この時の平面渦は発達段階であるため、低水路内全体での蛇行とはならない。
- 3) 利根川河道で得られた流速分布から樹木に作用するせん断力に関する境界混合係数を求め、理論式と比較した。その結果、理論式を用いて利根川新川通の樹木群の抵抗や流速分布を表し得ることが明らかとなった。これより、実用的な洪水流計算法である準2次元解析法の理論的背景が示された。
- 4) 航空写真測量と平面2次元解析を併用することにより、流量を推算することの可能性を検討し、実用化への方向性を示した。

## 参考文献

- 1) 福岡捷二, 藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の物理的影響, 土木研究所報告第180号, pp.129-192, 1990.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 建設省河川局治水課監修: 河道内樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案), 山海堂, pp.1-144, 1994.
- 5) 福岡捷二, 渡辺明英, 津森貴行: 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.
- 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.357-364, 1994.
- 7) 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.
- 8) 福岡捷二, 渡辺明英: 樹木群を有する河道流れの境界混合係数 $f$ の評価, 土木学会論文集, No.503/II-29, pp.59-68, 1994.
- 9) 辻本哲郎, 北村忠紀: 側岸に沿って植生群落の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.
- 10) 灘岡和夫, 八木宏: SDH & 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.

(1994.3.18 受付)

## STRUCTURE OF FLOOD FLOW IN THE TONE RIVER WITH VEGETATION CLUSTERS ALONG LOW-WATER CHANNEL BANK

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Tsuneo UESAKA  
and Takayuki TSUMORI

Large horizontal eddies were observed in aerophotograph taken in the flood of the Tone river with vegetation near bank. Observed flow pattern was examined by applying 2-D shallow water model to flood flow. It was shown that large horizontal structures of flow which meanders along vegetated area near river bank, exist and agree with the structure of the flow calculated by 2-D model. The boundary mixing coefficient predicted by authors was shown to be applicable to the flood flow in actual rivers.