

風計測による河道内樹木群落の抵抗特性の推定

ESTIMATION OF FLUID RESISTANCE OF RIVERINE WOODY COMMUNITIES BASING ON VELOCITY MEASUREMENTS OF NATURAL WIND

岡部健士¹・山口義人²・竹林洋史³

Takeshi OKABE, Yoshito YAMAGUCHI and Hiroshi TAKEBAYASHI

¹正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

²学生会員 徳島大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

³正会員 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

The aim of this research is to develop a practical method for estimating fluid-resistance parameters, such as the resisting area per unit volume of the flow field, λ , and the representative drag coefficient, C_D , of a riverine woody-plant community by using wind velocity data. Field observation of wind velocity was carried out with respect to boundary layers affected by a woody-plant community existing on a gravel bar formed in a downstream reach of the Yoshino River, in Tokushima Pref., Japan. From wind velocity measurements, six sets of velocity profile data were collected to be used for estimation of the fluid-resistance parameters. A two-dimensional k - ε turbulent flow model was revised and successfully applied for estimating distribution of the product of the two fluid-resistance parameters, $C_D\lambda$.

Key Words : riverine woody-plant community, fluid-resistance parameters of tree-bodies, field observation on natural wind, k - ε turbulent flow model

1. まえがき

わが国の多くの河川では、砂州や高水敷で樹木群落の発達が著しい。密生した樹木群落は、洪水疎通能の低下、砂州の台地化、滞り部深掘れの促進などをもたらすので、その適正な管理が必要とされている。このとき、合理的な管理計画を策定するためには、まず、樹木群落の抵抗特性を把握するとともに、その影響を受けた洪水流況と河床変動を的確に予測しておくことが不可欠である。

水工学の分野では、これまで植生水利の研究が長足の進歩を遂げた¹⁾。実験では、多様な樹木模型を用いた開水路での流れと河床変動が詳細に調べられ、有用な知見が集積されている。一方、樹木群落を伴う流れの数値解析法も、方法論としてはほぼ確立され、河床変動数値解析モデルへの組み込みや現地河川の問題への適用事例も少なくない^{2),3)}。このような流れの数値解析では、樹木群落の流れへの影響が、流れ場を空間平均することによって現れる形状抵抗を介して評価される。したがって、解析結果の信頼性は、形状抵抗を規定する密生度（流れ場単位容積あたりの抵抗面積） λ と樹木構成要素（幹、枝、葉）の形状抗力係数 C_D の推定精度に依存する。なお、両者は基礎式中では積 $C_D\lambda$ の形で現れるから、一

括して取り扱ってもよい。しかし、実際河川での洪水流の現地観測などからそれらを正確に見積もることは容易ではないし、水理模型実験の実施も難しい。

さて、著者らは、洪水流観測や水理模型実験に代えて樹木群落を通過する気流（自然風）の計測資料から、つぎのような手順で樹木群落の抵抗特性を評価する手法を検討している⁴⁾。すなわち、現地で樹木群落の影響を受けた鉛直2次元気流境界層の流速分布を計測する。あわせて、地形測量と樹木形状の毎木調査も実施する。

適当な乱流数値解析モデルを用いて、 $C_D\lambda$ の代表値あるいは空間分布を推定する。Manning係数 n が必要なら、推定された $C_D\lambda$ から開水路等流対応の乱流数値計算モデルあるいはより簡便な抵抗分離法などを適用して推定する。このとき、水流と気流の間での C_D 値の相違が問題となる。既報⁴⁾においてこの点を検討した結果によると、規則的な千鳥状に配列した樹木群落模型の場合には、樹木層に形成される明瞭な縦渦構造のために水流の C_D 値が気流のものより小さくなる傾向が認められたが、樹木個体の配列がランダムな現地の樹木群落では、両者はほぼ一致するものと期待される。

本文では、徳島県・吉野川の交互砂州の一つに成立したアカメヤナギ群落を対象として、上記の調査・計測を試行した結果を紹介する。

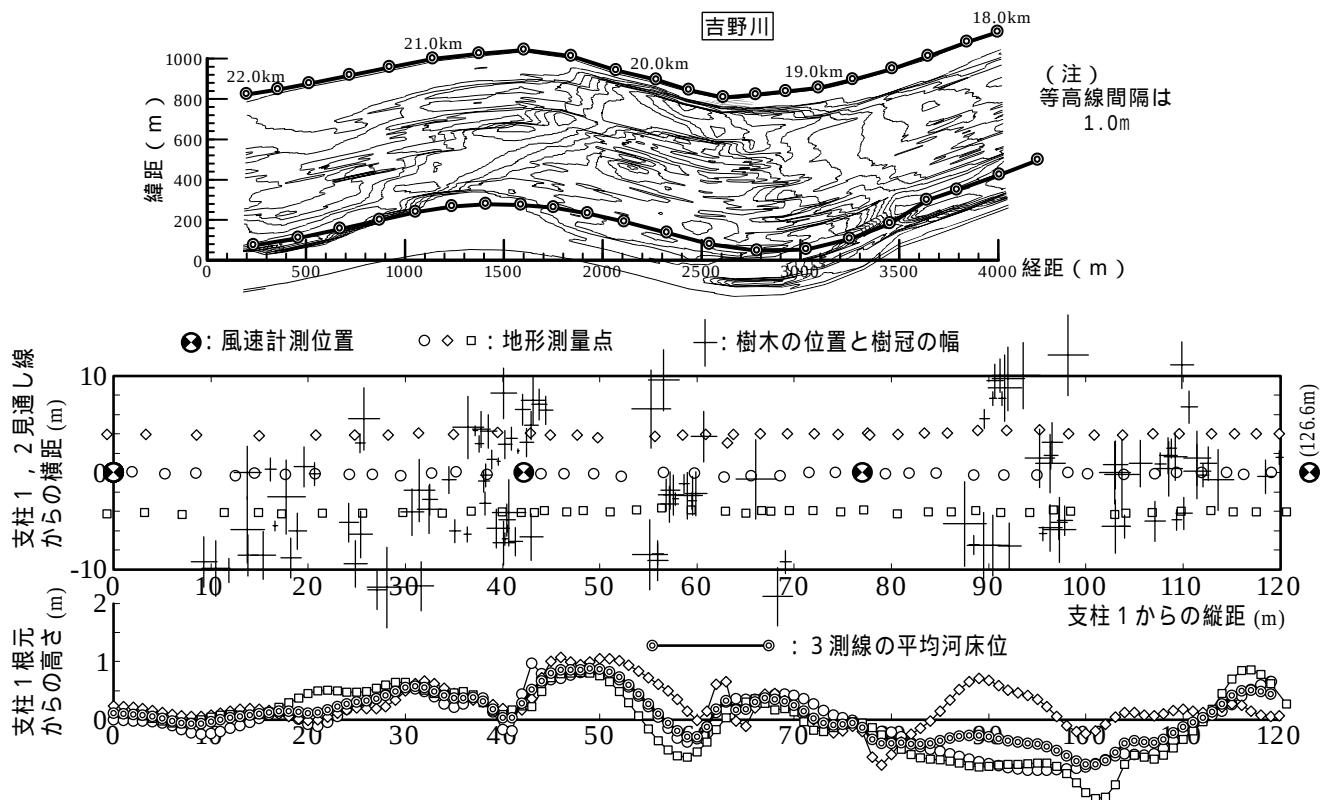


図-1 気流計測地点，樹木個体の分布位置と樹幅および河床の縦断形状

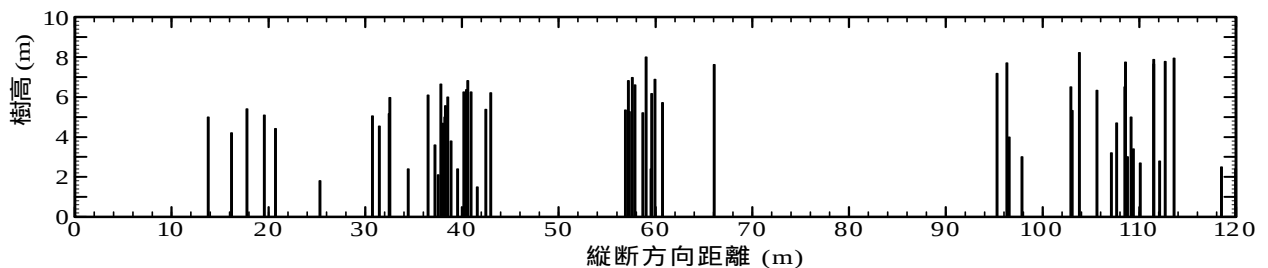


図-2 気流計測線に沿う樹高の分布

2. 現地における調査・計測の概要

(1) 対象とした樹木群落

調査・計測の対象とした樹木群落は，徳島県・吉野川19.0km～21.0km区間の右岸に位置する交互砂州の中央部に成立したアカメヤナギ群落である．この群落は1970年代後半から存続してきたもので，樹種としてはタチヤナギ，ネコヤナギ，カワラハンノキなども含まれている．それらの大半は中・高木で，樹高は3～10m，胸高直径は5～20cm，樹冠幅は3～9mである．

気流計測では，砂州の砂礫床部分を通過してきた気流が樹木群落に当たって形成される境界層の流速を，河道中心線とほぼ平行な全長126.6mの測線上に，ほぼ等間隔で立てた4本の鉄製支柱に取り付けたプロペラ式風速計で計測した（詳細は後述）．以下，それらを上流のものから順に支柱1，2，3，4と呼ぶ．

図-1は，気流測線の両側約10mの範囲における樹木個体の分布位置と各個体の横断方向樹冠幅，および測線

とその両側約4mの位置での河床縦断形状の計測結果を，支柱1～4の設置位置とともに示したものである．図中では樹木の個体を，十字線で表現しており，縦・横線の交点が各個体の根元位置を，縦線の長さが横断方向の樹冠幅を示している．さらに，図-2では，気流計測測線の左右5m以内に立地する樹木個体について，樹高と支柱1からの縦断方向距離の関係を描いている．

樹木の個体数密度は場所よるバラツキが著しい．とくに，縦断方向距離が概ね45～55mおよび65～90mの範囲には樹木がまったく存在していない．樹冠幅については，特に指摘すべき点は見当たらないが，樹高（群落高さという意味での）は，洪水流による物理的攪乱の強さの相違によるものなのか，群落の上流端の水当たりが強い領域で約4mと最も低く，その後，下流に向かって次第に増加して，気流計測区間の下流端付近では約8mと，上流端のものに比較すれば，ほぼ倍増している．河床縦断形状は，平坦ではなく振幅が1m程度の凹凸を伴っている．

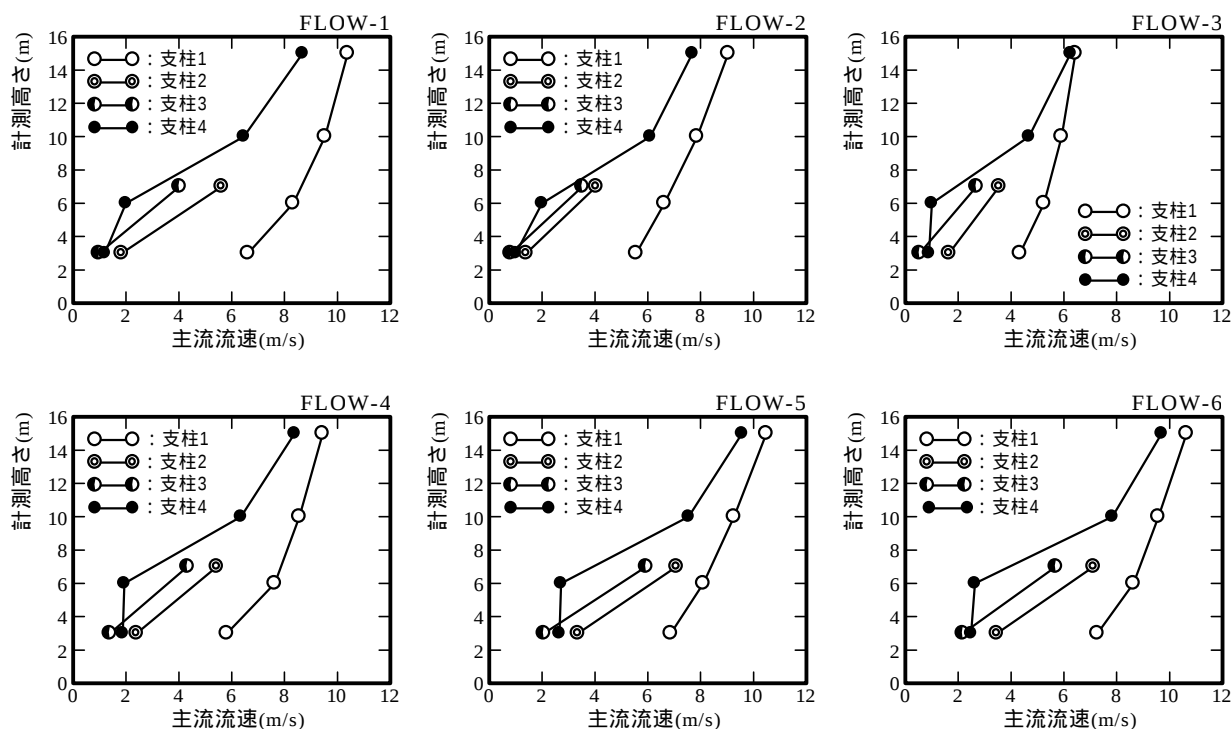


図-3 各計測位置における時間平均流速成分の鉛直分布

(2) 気流計測の方法

風計測用の支柱の高さは、支柱1、4は15m、支柱2、3は7mで、支柱2、3、4は、樹木群落の上流端から約10m上流に置いた支柱1より44.2m、77.0m、126.6m下流に設置した（図-1参照）。各支柱における計測高さ（支柱下端の地盤高さを基準）は、支柱1と4では3、6、10および15m、支柱2と3では3および7mとした。そして、支柱1と4では、各高さに、水平・流下方向（ x 軸）、鉛直・上向き方向（ y 軸）および流下方向に向かって右向きを正とする水平・横断方向（ z 軸）の流速成分を計測するためのプロベラ式風速計（Gill, 27106型・正逆両用）を取り付けた。一方、支柱2と3では同型の風速計により x 成分のみを計測した。各流速計からの出力電圧は、連合コネクタ（インターフェース、TRM-2201）とAD変換ボード（インターフェース、PCI-3177C）を介してパソコンに入力され、流速値への変換ののち、ハードディスクに収録した。なお、以下においては、上流から第 i 番目の支柱の上から第 j 番目の計測高さでの x 、 y 、 z 方向・時間平均流速をそれぞれ U_{ij} 、 V_{ij} 、 W_{ij} と表記する。

計測作業は、2002年12月から2004年3月の間、安定した強い季節風が測線に平行に吹く日に現場に赴き、中でも風向きが測線にできるだけ平行となる時間帯を選んで実施した。一回当たりの収録時間は約10分、サンプリング周波数は20Hzとした。

(3) 計測結果と有効データの抽出

現場では合計8日間、計測作業を行い、50セットの

データを獲得した。ただし、その大半において W_{ij} が、気流を x 、 y 面内の定常な鉛直・2次元境界層流れとして取り扱うことが無理なほどに大きかった。そこで、原データセットから支柱1、4の W_{ij} が概ね0.5m/s以下で、トレンド傾向も小さい2分間データを切り出し、ついで、支柱1と4の上端で計測された x 、 y 方向流速の時系列が大きい長周期変動を含まないことや、同一の測点で計測された2方向の変動流速の相互相関が支柱1と4で類似した周期性を有することなどを基準にして、最終的に6組の2分間データセットFLOW-1～FLOW-6を抽出した。これらの収録日は、FLOW-1、2が2003年4月26日、FLOW-3、4が2003年12月18日、FLOW-5、6が2004年1月13日であった。

以上のようにして抽出された6組のデータセットから求められた x 軸方向の時間平均流速（ U_{ij} ）の鉛直分布を図-3に示している。

3. 抵抗特性の推定

前節で最終的に抽出された6組の気流速データセットをもとに、樹木群落の抵抗特性量である C_D と λ を、両者の積 $C_D \lambda$ として逆推定することを試みた。すなわち、鉛直2次元乱流に対するほぼ標準型の $k-\varepsilon$ モデルによる流れ場の計算結果が、現地風の主流方向流速の計測結果（図-3）に適合するような $C_D \lambda$ 値を試行錯誤的に探索した。

(1) 流れの基礎式

数値計算では、樹木を伴う非定常流れの基礎式を適当な初期条件と定常な境界条件のもとに、定常解に達するまで数値積分した。

まず、流れの連続式は、

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

流れの運動方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{2} C_D \lambda U \sqrt{U^2 + V^2} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\nu + \nu_t) \left(2 \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} k \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{1}{2} C_D \lambda V \sqrt{U^2 + V^2} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\nu + \nu_t) \left(2 \frac{\partial V}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} k \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 x = 主流方向の座標、 y = 鉛直方向の座標、 U, V = x, y 方向の流速、 P = 圧力強さ、 ρ = 空気密度、 ν = 空気動粘性係数、 ν_t = 流れの渦動粘性係数、 k = 乱れエネルギーである。 ν_t は、樹冠部による乱流混合の抑制効果を考慮して、次式のように定式化した⁵⁾。

$$0 \leq \eta \leq h_T ; \quad \nu_t = C_\mu \left(k^2 / \varepsilon \right) \left\{ 1 - K_{vt} (\eta / h_T)^3 \right\} \quad (4a)$$

$$h_T \leq \eta \leq 2h_T ; \quad \nu_t = C_\mu \left(k^2 / \varepsilon \right) \left\{ 1 - K_{vt} (2 - \eta / h_T)^3 \right\} \quad (4b)$$

ここに、 C_μ = 標準型 k - ε モデルのパラメーター (=0.09)、 ε = 乱れエネルギーの逸散率、 η = 樹木位置の地表面を基準にした盤高さ、 h_T = 局所的な樹高、 K_{vt} = 樹冠部の枝密度に応じて経験的に定めるべき係数である。なお、本計算では、 K_{vt} を、現地樹木の形状や水路実験結果⁵⁾を参考に、 $K_{vt} = 0.35$ とした。

k および ε に対する基礎式はつぎのようである。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial k}{\partial x} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial k}{\partial y} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \right\} \\ & + P_k - \varepsilon + C_{fk} (F_x U + F_y V) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \right\} \\ & + P_\varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{f\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (F_x U + F_y V) \end{aligned} \quad (6)$$

$$P_k = \nu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$P_\varepsilon = C_1 P_k \varepsilon / k \quad (8)$$

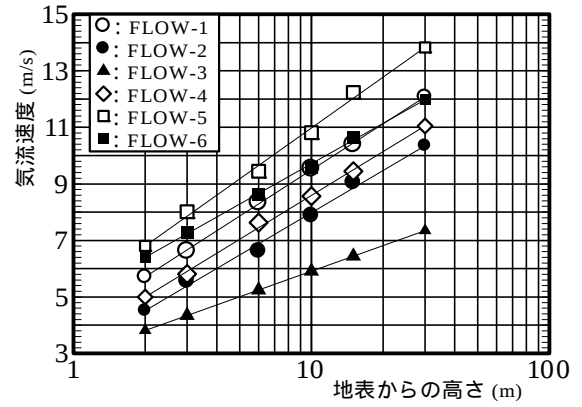


図-4 支柱1における主流方向流速の分布

ここで、 F_x, F_y = 流れ場の単位容積あたりに作用する樹木の形状効力の x, y = 成分であり、(2)および(3)式ではつぎのように表示されている。

$$F_x = 1/2 \cdot C_D \lambda U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (9a)$$

$$F_y = 1/2 \cdot C_D \lambda V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (9b)$$

式(5)~(8)において、 $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_1, C_2$ = 標準型 k - ε モデルのパラメーター（それぞれ、1.0, 1.3, 1.44, 1.92）、 $C_{fk}, C_{f\varepsilon}$ = 樹木の抵抗による k, ε の生成を表す項の係数である。 C_{fk} と $C_{f\varepsilon}$ について、筆者らは以前、水路や小規模風洞における樹木群落模型実験の再現計算において、清水らの成果⁶⁾を参考に $C_{fk} \approx 0.08$ 、 $C_{f\varepsilon} \approx 0.15$ と設定した⁴⁾。しかし、 $C_D \lambda$ 値の試行錯誤的な探索計算を繰り返す過程において、現地スケールの流れに対しては、それらが必ずしも適正ではないと判断された（流速分布の再現性が悪かった）。そこで、本研究の計算では、風工学の分野において、実際の樹林帯に対するキャノピーモデルでの適合性が検証されている $C_{fk} = 1.0$ 、 $C_{f\varepsilon} = 1.8$ を適用することにした⁷⁾。

(2) 数値計算法の要点

a) 基礎式の離散化

計算は不等間隔の直交メッシュについて実施することとし、 P や k などスカラー量の定義点を格子中心に、ベクトル量である速度成分の定義点を、格子中心からそれぞれが対応する座標軸について半格子分だけ負の側にずらして設定した。まず、時間進行には2次精度の Adams-Bashforth法を適用した。運動方程式の空間微分項の離散化においては、移流項に対して3次精度風上差分のUTOPIAスキーム、その他の空間微分項には2次精度の中心差分を用いた。そして、圧力解法としては、アルゴリズムが比較的単純なHSMAC法を採用した。

b) 計算領域および樹木分布のモデル化

計算領域は、流下方向には、支柱1の断面を上流端として、その下流側150mまでの範囲、鉛直方向には、支柱1の根元を規準とした高さが-2m ~ 60mの範囲に設定した。メッシュ間隔は、流下方向には一定値2mとし

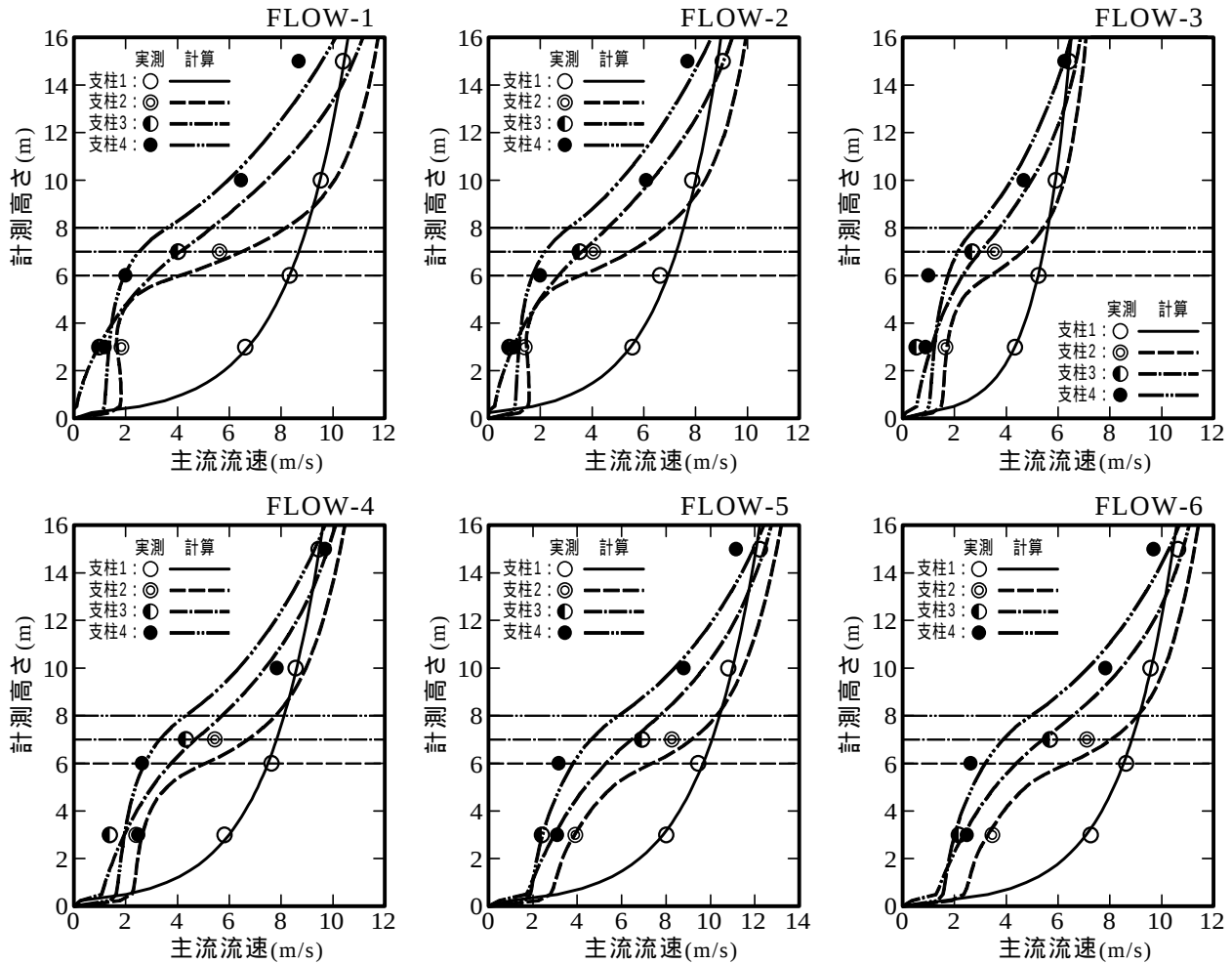


図-5 流速の計算値と実測値の比較

たが、鉛直方向では、樹木頂の高さ以下の範囲で一定値0.25m、その上方では最大2mまで一様に増大させた。

数値計算では、各メッシュの $C_D\lambda$ を入力する必要がある。現地の樹木分布は、図-1および図-2に示すように計算領域内で複雑に変化しているが、本研究では、まず、樹木要素を含むメッシュの分布範囲と $C_D\lambda$ を一つの値で代表させる領域を樹木調査の結果を参照しながら、後出の図-6のように単純化した。すなわち、同図中でハッチングが施された長方形領域のメッシュを樹木要素を含むと見なし、各長方形領域に対する $C_D\lambda$ の代表値を変化させながら流れの計算を行い、 U_{ij} の実測結果（図-3参照）を良好に再現する $C_D\lambda$ の組み合わせを試行錯誤的に探索した。なお、樹木領域を鉛直方向に二分しているのは、樹幹部と樹冠で $C_D\lambda$ が相違するとしておくのが妥当であろうと判断したためである。

c) 境界条件

上流端断面では、流れを等流状態と見なし、支柱1で実測された U_{1j} の分布図である図-4を参考に、その流速分布をつぎのような対数式で近似した。

$$U/u_* = 5.75 \log_{10}(y/k_S) + 8.5 \quad (10)$$

ここに、 u_* = 摩擦速度、 k_S = 相当粗度であり、これら

を実測値から最小自乗法で決定した（図-4の直線は式(10)を表す）。一方、下流端断面では、全未知変数の x 軸方向の勾配をゼロとした。

つぎに、河床面上では、流れが局所的に平衡壁面乱流となっているものとみなした。このときに摩擦速度などの計算に必要な相当粗度は、支柱1から最初の樹木存在区間に至るまでは上で決定されたものに等しく、その下流では下草や樹体間の河床面の凹凸状況などを勘案して1.0mとした。最後に、解析領域の上部境界（ $y = 60\text{m}$ ）では、主流方向流速を上流端におけるものに固定するとともに、 $\partial V / \partial y = 0$ とした。

(3) 抵抗特性量 $C_D\lambda$ の推定結果

図-5に、 $C_D\lambda$ の推定値を決定した計算の流速分布と実測値との比較を示す。図中で、計算結果の曲線と同種の水平線は、各支柱の直上流での平均樹高を表す。

接近流の流速が比較的大きい場合には、全ての支柱位置での流速分布を概ね良好に再現できているが、小さい場合（FLOW-3, FLOW-4）には、とくに樹木層の範囲内での適合性をこれ以上に高めることができなかった。この理由については、現在も検討中である。

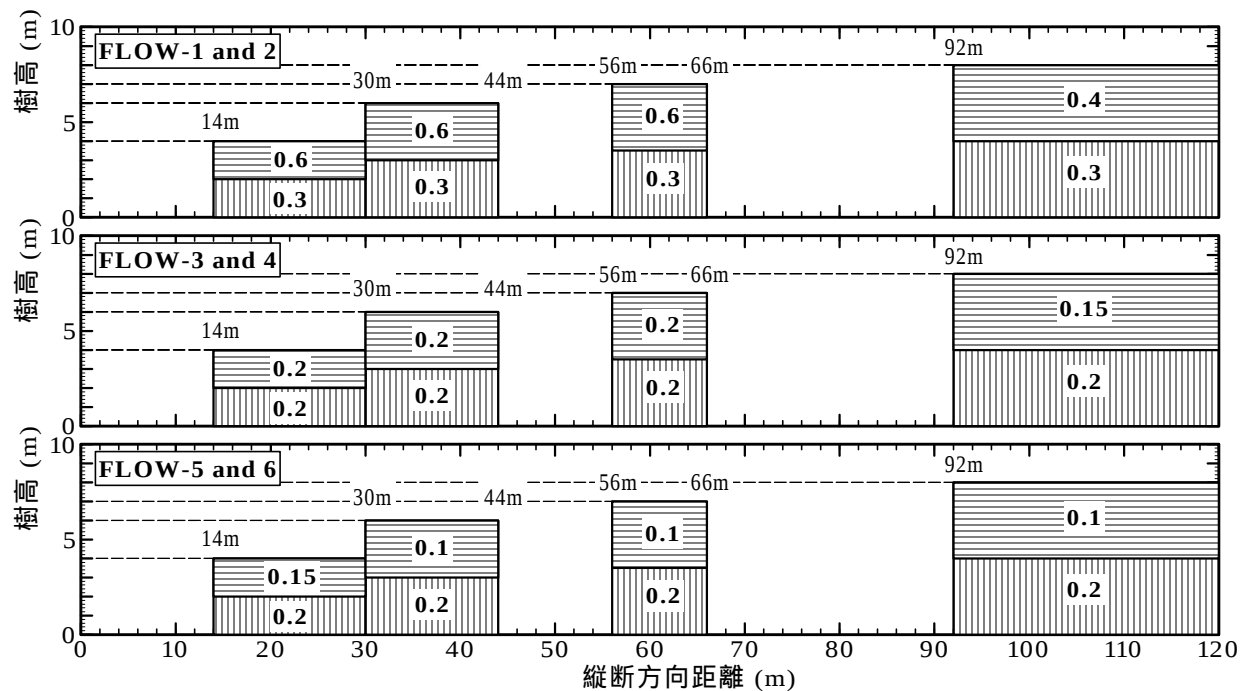


図-6 樹木群落の抵抗特性量 $C_D\lambda$ の推定結果

図-6に $C_D\lambda$ の推定結果を取りまとめている。季節が晩春期 (FLOW-1,2)、初冬期 (FLOW-3,4)、厳冬期 (FLOW-5,6) と変化するのに伴って、とくに樹冠部の $C_D\lambda$ 値が明瞭に低下しているが、これは、樹冠部の葉密度の減少に起因するものと思われる。一方、樹幹部でも、冬期の $C_D\lambda$ 値が晩春期のものより減少している。これは、計算上では樹幹部と見なした領域にも枝張りや下草があり、これらの葉密度が減少したことによるものと推察される。また、 $x \geq 90$ m の区間の樹冠相当の領域での推定値が、上流側のものより小さい傾向がある。その理由は、図-2からも明らかなように、前者において仮定した群落高さに達している樹木個体の割合が、後者におけるものより小さいためと思われる。

推定された $C_D\lambda$ 値は0.1のオーダーである。これは、樹幹や枝などの樹体各要素の C_D 値を1~2程度と見積もれば、 λ が0.01~0.1のオーダーであることを意味している。現地では樹木形状の毎木調査を行った結果によれば、樹木1本の支配面積は5~10m²で、直径5~20cmの幹あるいは主枝を数本有していることから、推定された $C_D\lambda$ 値は概ね妥当なものと判断している。

4. あとがき

以上、本文では、河道内樹木群落の流体抵抗特性量を、その影響下にある自然風の流速資料から推定する方法を提案するとともに、徳島県・吉野川の砂州上に発達したアカメヤナギ群落での試行例を紹介した。結果として、利用する流速データを入念に選別したのち既存の乱流数値計算モデルを用いれば、十分に信頼で

きる推定結果に到達できることが検証された。ただし、今回行った計測作業は、必ずしも簡便なものではないし、広域を網羅できるものでもない。今後は、より簡便で機動的な計測方法を検討してゆく予定である。

謝辞：本研究は国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所の支援を受けて行われた。関係各位に深く感謝します。

参考文献

- 1) (財) 河川環境管理財団河川環境総合研究所、資料第1号「河川の植生と河道特性」、第1、3章、1995。
- 2) 辻本哲郎：河道植生と流路変動、2001年度水工学に関する夏期講習会講義集、pp.A-6-1~A-6-20、2001。
- 3) 前野詩朗・宮内洋介・森卓也：植生が旭川の洪水流に及ぼす影響の検討、水工学論文集、第48巻(1)、pp.757-762、2004。
- 4) 岡部健士・吉村毅・湯城豊勝・竹林洋史：樹木群落を伴う河床上的水流と気流の相似性と数値解法について、水工学論文集、第47巻、pp.499-504、2003。
- 5) 井上貴之・岡部健士・濱井宣明・湯城豊勝：樹木状の植生を伴う河床上的流れと掃流砂量に関する研究、水工学論文集、第43巻、pp.677-682、1999。
- 6) 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 / 19、pp.35-44、1992。
- 7) 岩田達明・木村敦子・持田灯・吉村博：歩行者レベルの風環境予測のための植生キャノピーモデルの最適化、第18回風工学シンポジウム論文集、pp.69-74、2004。

(2005.9.30受付)