

樹木群落を伴う河床上の水流と気流の 相似性と数値解法について

SIMILARITY BETWEEN WATER FLOW AND AIR FLOW ON RIVERBED COVERED BY WOODY PLANT COMMUNITY

岡部健士¹・吉村毅²・湯城豊勝³・竹林洋史⁴

Takeshi OKABE, Takeshi YOSHIMURA, Toyokatsu YUUKI 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 工修 阿南高専助教授 建設システム工学科 (〒774-0017 阿南市見能林町青木265)

⁴正会員 博(工) 徳島大学助手 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

The aim of this study is to establish a methodology that estimates flood flow resistance of riverine woody communities from measurements of wind flows. Similarity between water and airflows affected by woody plants was investigated basing on results of flume and wind tunnel experiments carried out with the same tree models. It was clarified that there are significant differences between the turbulent flow structure of water flows and airflows mainly due to existence or absence of the water surface. The drag coefficients of canopies in the airflows were found to be about 40% greater than in the water flows. In addition, numerical models to simulate the water flows and airflows passing through woody communities were developed based on a $k-\epsilon$ turbulent flow model.

Key Words: *flow resistance of woody-plant community, air flow and water flow, similarity, experiments in flume and wind-tunnel, $k-\epsilon$ turbulent flow model*

1. まえがき

河道内樹木群落が洪水流や河床変動に及ぼす影響を的確に予測するためには、その粗度評価手法を確立しておくことが、まず重要である。この問題は過去約20年間、植生水利の代表課題と位置付けられ、数多くの研究がなされてきた¹⁾。そして今日では、植生密度(流体単位体積当りで評価した植生要素の流れ遮蔽面積)と抗力抵抗係数を群落固有のパラメーターとし、いわゆる抵抗分離法に基づいて等価粗度係数を算定したり²⁾、乱流モデルを用いて、流速分布に止まらず乱れエネルギーやレイノルズ応力の鉛直分布までも求める方法論が、ほぼ確立された状況にある^{3) 4)}。しかしながら、実河川の樹木群落を対象として、植生密度や形状抵抗係数の群落代表値を、それらの高さによる変化をも含めて的確に見積もることは、実際上容易なことではない。とくに、高木群落の場合、植生密度は、個体数密度とともに樹高、樹幹径、枝下高さ、枝張り状況などを毎木的に計測した結果などから、ある程度正確に評価することも可能であるが、形状抵抗係数については、計画規模の洪水時に水没した

状況下での値の確定に資する現地での洪水観測資料などは望むべくもないし、模型実験の実施も極めて難しい。

さて、著者らは、樹木群落を通過する気流(自然風)の計測はさほど困難ではないことを鑑み、その計測資料から水流である洪水流に対する樹木群落の抵抗特性量を推定する手法を開発しようとしている。すなわち、数点で計測した風速の鉛直分布から、植生密度と形状抵抗係数の積(この両者を分離する必要はない)を逆解析し、これを水流対応の値に変換するというものである。このときに最も重要な点は、気流と水流の相似性を確認しておくことである。具体的には、樹木の幹部や枝葉の形状抵抗係数が気流と水流とで一致するか否か、また、鉛直方向に半無限の広がりをもつ気流と水面から強い拘束を受ける水流とでは樹木群によって形成される組織的な渦の構造や強度の特性が相違すると推察されるが、それがどの程度であるか、などが問題となる。

本文では、まず、同一の樹木群落模型を用いた水路実験と風洞実験の結果の比較を通して、樹木群落を通過する水流と気流の速度場ならびに乱流場の相似性を議論する。ついで、気流情報から得られた抵抗特性は $k-\epsilon$ 乱流モデルを介して水流のものに変換することを前提として、

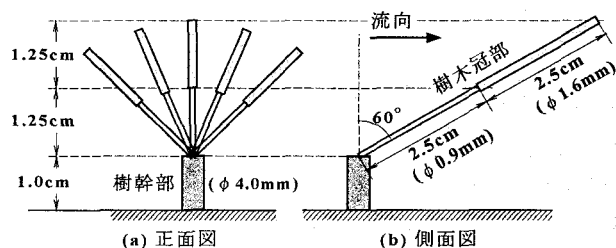


図-1 樹木模型の形状

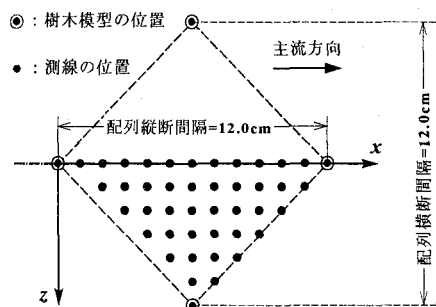


図-2 測線の配置様式

気流と水流における形状抵抗係数の直接比較、さらには、気流に適したモデルパラメーターや境界条件の同定を行う。

2. 実験概要

著者らは、すでに、図-1の樹木模型を千鳥状に配列した水路で、2成分LDVを用いて速度場と乱流場を詳細に計測している⁹⁾。今回は、水路実験と同一の模型を同一の配列様式と間隔で風洞に移設して、比較資料を得た。なお、模型樹幹部の下流側への傾斜は、実河川の典型種であるアカメヤナギの形態を模したためである。

実験には、幅0.42m、高さ0.32mの長方形断面を持つ、長さ7.0mで鋼製・一部側面透明ガラス張りの押込み送風型風洞を用いた。図-1の樹木模型は、風洞床の全区間に敷き詰めた厚さ20mmの合板の全面に、縦・横断方向の間隔が12cm×12cmの千鳥状で配列した。

実験では、表-1示す3種(CASE 1~3)の定常気流を作り、2成分熱線風速計を用いて主流および鉛直方向の乱流計測を行った。このうち、CASE 2の気流条件は、配列メッシュ中心位置での樹木模型高さにおける流速値と樹冠部材の直径に基づくレイノルズ数 Re が湯城ら⁹⁾の水流実験のCASE 1でのものとほぼ一致するように設定し、CASE 1および3では、風速レベルをCASE 2のものより約30%程度、それぞれ減少および増加させた。

図-2に、設定した鉛直測線の平面配列と平面座標 (x, z) を示す(y 軸は鉛直上向き)。各測線上には、17個の測点を設定した。また、乱流計測のサンプリング周波数および計測時間は、それぞれ500Hzおよび40秒とした。

表-1 風洞実験の気流諸元

実験 ケース	模型頂風速 (m/sec)	換算動水勾配 ($\times 10^{-4}$)	Re (—)
CASE 1	2.64	0.498	291
CASE 2	3.94	1.10	435
CASE 3	4.87	1.50	538

2. 流れ場の比較

(1) 縦断面内の流況

図-3と図-4に、それぞれ風洞実験のCASE 2と水路実験のケース1で計測された (x, y) 面内の時間平均流速ベクトル (U, V) の $z = 0.0, 1.0$ および 3.0 cmの位置における分布状況を示す。なお、流速ベクトルを描くに際しては、その始点を計測位置に一致させ、 x 軸からの偏倚角を5倍している。なお、以下では、樹木模型の頂点より高位、低位の領域を「表面層」、「植生層」と呼ぶ。

さて、流速ベクトル図の全体的な傾向は、風洞と水路の間で大きくは相違していない。各図において、表面層では流れが床面にほぼ平行で、流向の x 軸からの偏倚が顕著なのは植生層内に限られる。また、植生層に限ると、 $z = 0.0$ cmの縦断面では流速ベクトルが広い領域において上向きで、 $z = 3.0$ cmでは逆に下向きに転じる傾向のあることが、2つの実験で共通している。さらに、主流方向流速 U の鉛直分布が、軽微ながら、樹木模型高さの1/3程度の位置で極大点を持つ傾向を呈する点も、気流と水流の双方に認められる。これは、高位の高速流体塊が、上述した下向き流れのために、床面に向かう方向に輸送されていることに起因している。ただし、植生層内の流速の空間的分布を詳細に観察すると、気流と水流の間はかなり明瞭な相違点があることも見出される。まず、 x 軸からの偏倚角の大きさ(絶対値)は、水流のものが気流のものより明らかに大きい。また、流向が上あるいは下向きになる流下方向の範囲が、水流の場合には樹木模型の配列間隔の全体にわたるが、気流の場合には、樹木模型の樹幹の下流側、樹冠部長さの1.5倍程度の範囲内に限られている(気流の $z = 3.0$ cmに対応する図で、 $x \geq 8$ cmの領域に下向きの流向が現れているのは、隣の列の樹木模型の影響による)。さらに、樹木模型の樹幹部周辺の流況にも、特徴的な相違が見られる。すなわち、水流では、樹幹部の直下流に存在する強い上向き流れのために樹冠部に接近する流れに対する樹冠部の迎え角が小さくなっている。一方、気流の場合には、上述した樹幹部背後での上向き流れが弱く、樹冠部に当たる流れが逆に下向き傾向を呈し、樹冠部の迎え角が水流の場合より大きくなっている。これは、気流における樹木模型の形状抵抗係数が、見かけ上、水流のものより大きくなる可能性があることを示唆しているように思われる。

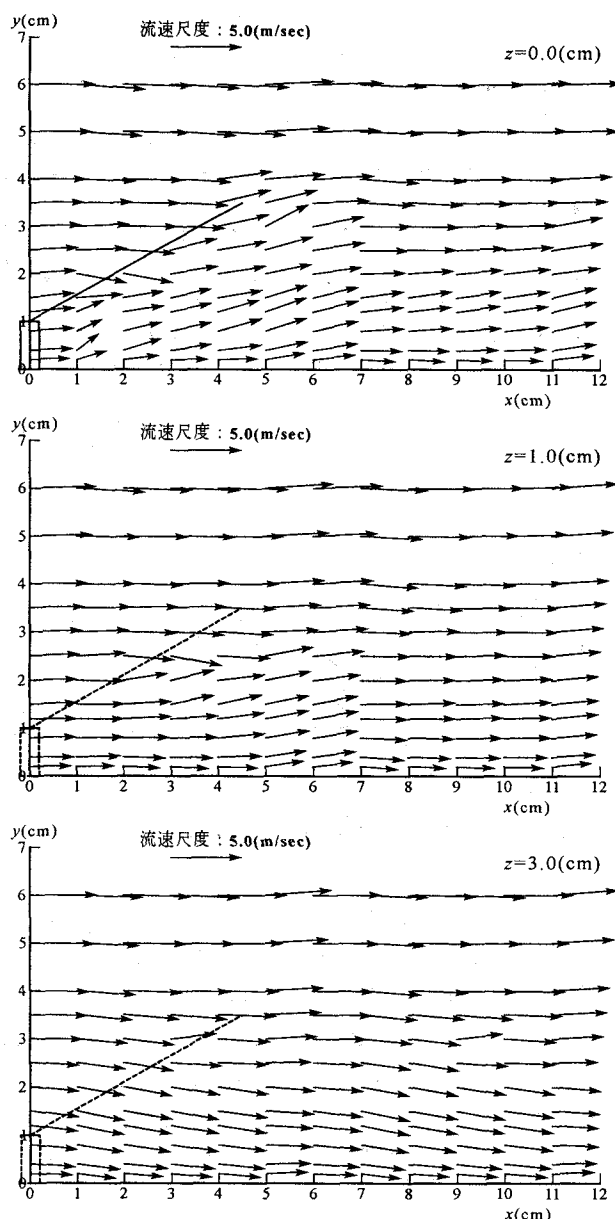


図-3 気流の時間平均流速ベクトルの縦断面内分布

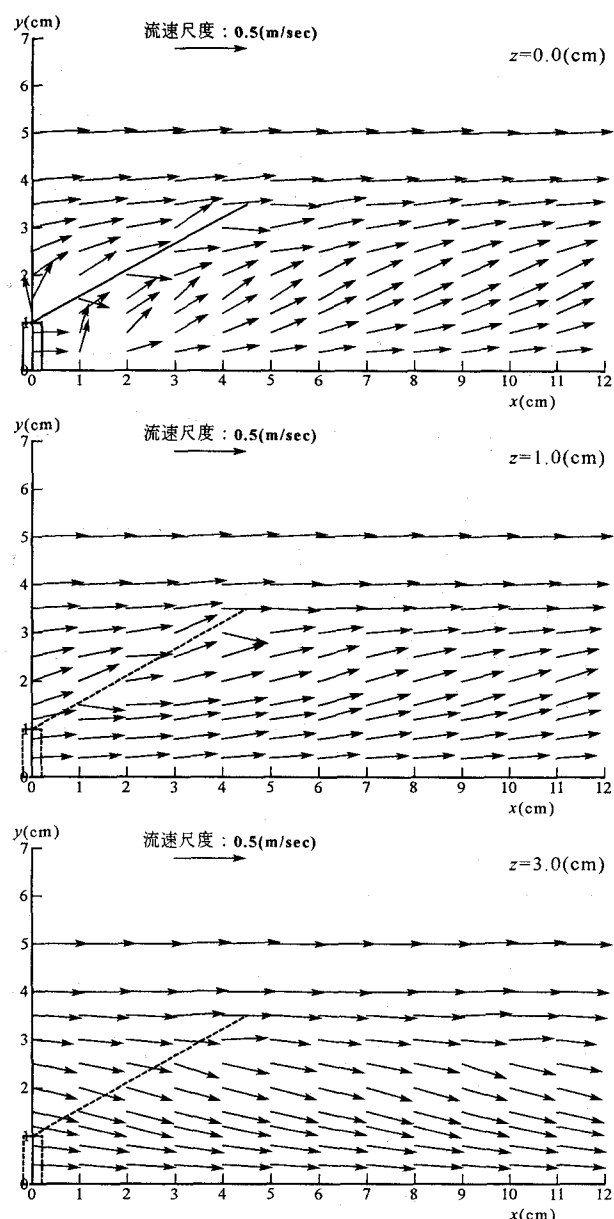


図-4 水流の時間平均流速ベクトルの縦断面内分布

(2) 横断面内の流況

図-5と図-6では、それぞれ風洞実験CASE 2と水路実験ケース1の流れの $x = 4\text{cm}$ および 9cm 断面について、 (y, z) 面内の時間平均流速ベクトル (V, W) の横断面内分布を比較している。なお、 z 方向流速成分 W は、 (U, V) の実測値を用い、3次元流れの連続式を数値積分することにより算定された。

気流と水流では横断面内の流況が明らかに相違していることがわかる。まず、水流では、2断面の流速ベクトルの分布状況がほぼ同一で、隣り合う樹木模型配列線（横断方向間隔=6cm）の間に、規模がほぼ等しく、回転方向のみ反転した一対の縦渦が安定して形成されている状況が窺える。これに対して気流では、2断面間で流速ベクトルの分布形態が全く異なっている。そして、水流の場合に存在する同規模の縦渦対の存在も明瞭ではなく、樹木模型により近接する側の縦渦が他方をほぼ完全

に吸収してしまっているように見える。このような、気流と水流の間での縦渦構造の相違は、水面の有無によってもたらされたものと推察される。すなわち、縦渦は、主として樹木模型の樹冠部による水ハネと樹木模型背後の上向き流れの効果が相俟って維持されているが、気流の場合には、後者に対する拘束がなく、図-3でも認められるように、それが樹木模型高さの2倍以上まで拡散できるのに対して、水流の場合には、水面による拘束を受けて横断方向に転向するために、樹木模型に近接しない側の縦渦の回転エネルギーが維持されるのであろう。

以上のような縦渦の存在は、この種の流れを平面的に空間平均して取り扱う際に現れるdispersive fluxと密接に関係している^{5), 6)}。上述した縦渦構造の相違は、気流と水流ではdispersive fluxの特性に本質的な相違があることを示唆しているが、この点については次項で検討することにする。

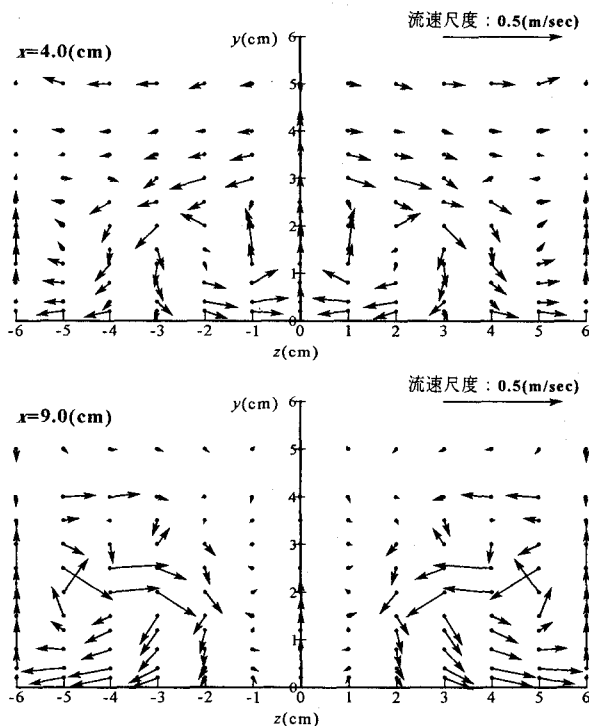


図-5 気流の時間平均流速ベクトルの横断面内分布

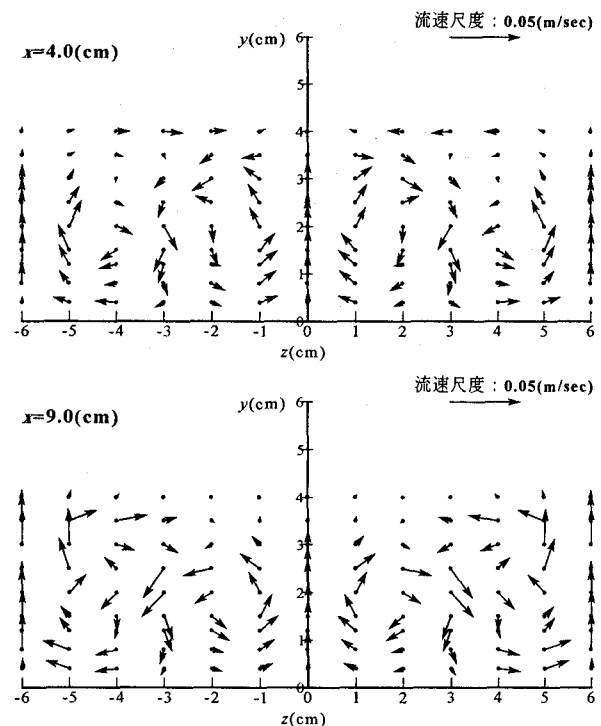


図-6 水流の時間平均流速ベクトルの横断面内分布

(3) 空間平均された流れ

樹木群落の抵抗則の議論では、樹体個々の影響を適当に平均化することによって得られる鉛直一次元の速度場を扱うのが普通である。

樹木群落を通る定常等流の3次元レイノルズ方程式を主流に平行な平面内で空間平均すると次式が得られる⁹⁾。

$$0 = g \sin \theta - \frac{1}{\rho} \frac{dP_0}{dx} - \frac{1}{2} C_D \lambda \langle U \rangle^2 + \frac{d}{dy} \left(\langle -U'V' \rangle + \langle -u'v' \rangle \right) \quad (1)$$

ここに、 g = 重力加速度； θ = 床面勾配； ρ = 流体密度； dP_0/dx = 平均流の圧力勾配； C_D = 樹木の形状抵抗係数； λ = 植生密度； $\langle U \rangle = U$ の空間平均値； $\langle -U'V' \rangle$ = dispersive fluxで、 U' 、 V' は、それぞれ U 、 V の空間平均値からの偏差； $\langle -u'v' \rangle$ = Reynolds応力の空間平均値。さらに、(1)式を水平な風洞内の等流ならびに床勾配が θ の開水路の等流を対象に変形すると、

$$g \delta I_A \left(1 - \frac{y}{\delta} \right) = \int_y^\delta \frac{1}{2} C_D \lambda U^2 dy + \langle -U'V' \rangle + \langle -u'v' \rangle \quad (2)$$

$$gh \sin \theta \left(1 - \frac{y}{h} \right) = \int_y^h \frac{1}{2} C_D \lambda U^2 dy + \langle -U'V' \rangle + \langle -u'v' \rangle \quad (3)$$

ここに、 δ = 最大流速発生点の高さ； I_A = 気体柱に換算された圧力水頭の勾配； h = 開水路等流の水深。

(2)および(3)式は、左辺の外力応力に対して右辺にあ

る3種の抵抗応力の和が釣り合っていることを意味する。そして、図-7および図-8は、風洞実験CASE 2と水路実験ケース1の資料から(2)および(3)の各項をそれぞれ $g \delta I_A$ および $gh \sin \theta$ で除した値を求め、各抵抗応力の分担状況を調べたものである。なお、形状抵抗による応力は実測されていないが、 $\odot$ で示された(Reynolds応力+dispersive flux)と破線で示された外力応力との差に等しいと考えることにする。

さて、両図に示された抵抗応力の分担状況は、定性的にはよく類似している。すなわち、気流、水流ともに、表面層では外力応力とReynolds応力がほぼ完全に釣り合い、植生層では、樹木模型の頂点から下位に至るにつれてReynolds応力の分担率が急激にゼロ近くまで低減するとともに、樹木模型高さの60%程度より下方でdispersive fluxが存在している。しかし、定量的にみると、気流におけるdispersive fluxの分担率が水流の高々20%以下と非常に小さく、その減少分が主として形状抵抗の分担率の増大によって補われていることがわかる。Reynolds応力の分担率には気流と水流の間で実質的な差がない。結局、気流と水流における抵抗分担の相違は、dispersive fluxによる応力発現の大小に依存しているものといえよう。そして、この原因は、前項で述べた縦渦の形成のされ方の相違に求めることができる。なお、気流の場合にdispersive fluxが極めて小さくなることは、樹木群落の抵抗パラメータとしての λC_D を現地での気流計測資料から逆解析する際に、その評価の厳密さにとくにこだわる必要がないので、むしろ好都合である。

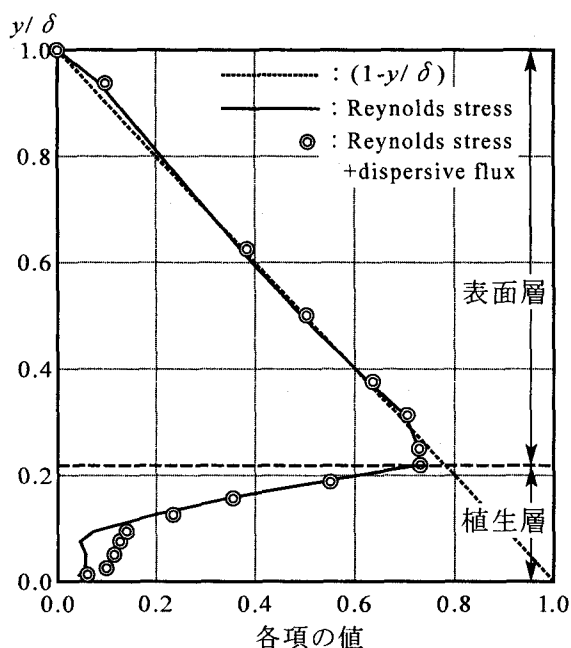


図-7 気流における抵抗応力の分担

図-9に、風洞実験の3ケースと水路実験ケース1の資料から(1)式に基づいて抗力係数を求めた結果を示す。気流の値でバラツキが大きいのは、(1)式の微分項を実験値に平滑化操作を加えることなく算定したことによる。

抗力係数の性質は、樹幹部と樹冠部で異なっている。樹幹部では、気流と水流の値がほぼ同一の傾向を示すが、樹冠部では、ともにほぼ一定の値をとる点は共通しているが、気流の値が水流のものより40%程度大きい。この理由は、前節の(1)で指摘したように、気流と水流では、樹冠部とこれに当たる流れの交叉角が異なることにある。

4. 乱流モデルによる数値解析

著者らは、既報⁵⁾において、水流実験での流れの空間平均された乱流場を再現するために、清水ら⁴⁾が提案した標準k-ε乱流モデルの拡張型に基づく数値計算法の適用を試みた。その結果、形状抵抗係数やdispersive fluxについては実測結果を利用したものの、流速やReynolds応力などの鉛直分布をかなり良好に再現できる境界条件とモデル定数の設定法を見出している。本法については、その後も若干の改良を加え、現在のところ、概ね以下のような境界条件とモデル定数の組み合わせが最適という結果を得ている。①底面付近の流速については、これと底面摩擦速度 u_* の関係を平衡壁面乱流と同一の対数型流速分布式で近似する；②乱れエネルギー k に関しては、底面で $k = C_k u_*^2 = 4.0 u_*^2$ とおき、水面では、瀬津・中

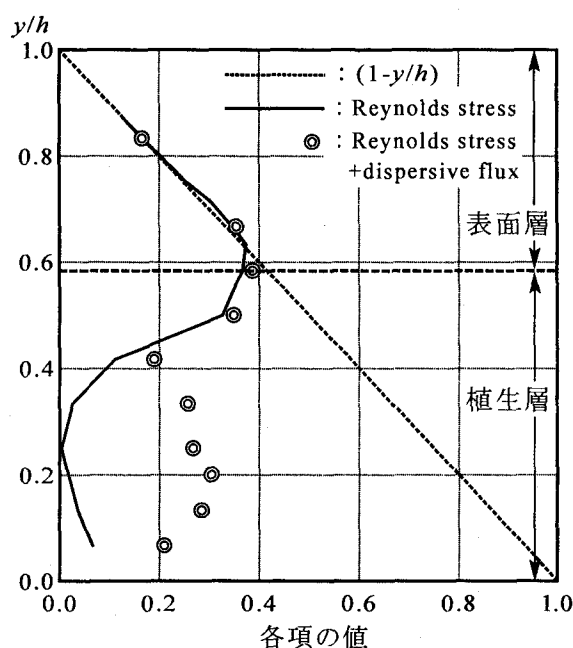


図-8 水流における抵抗応力の分担

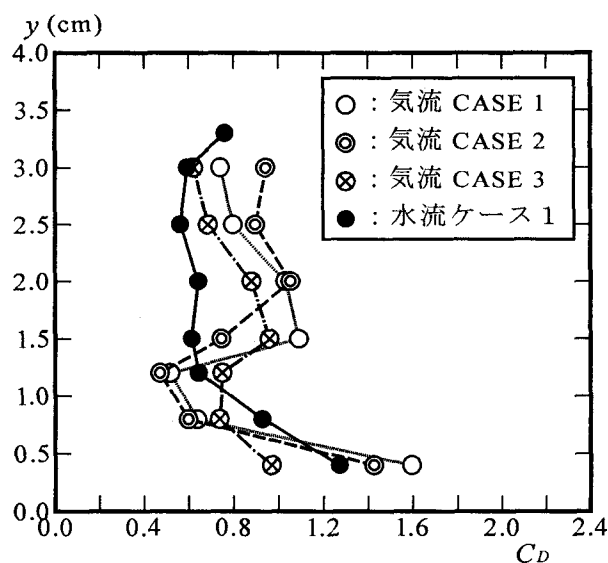


図-9 形状抵抗係数の比較

川⁷⁾を参考に、水面上での値をその直下のものの2/3に減少するものとみなす；③乱れエネルギーの逸散率 ϵ については、底面では瀬津・中川⁷⁾が低レイノルズ流れに対して示した数値計算による特性図を適用するものとし、水面では k と同様な取り扱いをする；④標準型k-εモデルの定数 C_μ , C_1 , C_2 , σ_k および σ_ϵ は不変とする；⑤清水ら⁴⁾が導入した植生の形状抵抗による k と ϵ の生成に関する係数 C_{fk} と $C_{f\epsilon}$ は樹木の形状により変化するものとみなして経験的に定める；⑥傾斜した樹冠部は鉛直方向の乱流拡散を抑制するものとみなし、渦動粘性係数を標準k-εモデルによるものより小さめに見積もる

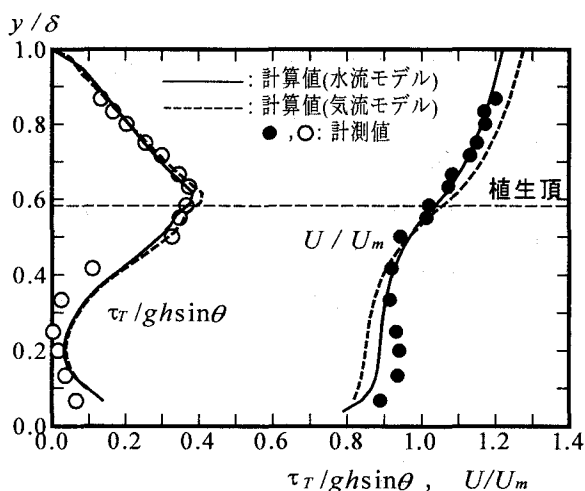


図-10 水流の実験結果と計算結果の比較

(この点の詳細については既報⁹⁾を参照)．なお、とくに、多岐の流れでの検討から推奨された標準k-εモデルの係数値を変更せざるを得なかったのは、それらを空間平均された流れに拡張して適用したためであろう．以上の要領で計算された水流実験ケース1の流速とReynolds応力 τ_r は、図-10に示すように、実測値とある程度良好に一致する(図中、 U_m = 断面平均流速)．なお、この計算では、形状抵抗が乱流エネルギー収支に及ぼす影響に関する係数を、 $C_{fk} = 0.12$ および $C_{fe} = 0.16$ とした．

図-11は、気流実験のCASE 1に着目し、dispersive fluxには実測値を入力することを前提に、境界条件とモデル定数の同定を行った結果である．流速、Reynolds応力、乱れエネルギーとともに、分布形状が良好に再現されている($y/\delta \geq 0.7$ の領域で実測流速が計算値より大きいのは、この領域の流れの3次元性による)．ただし、この場合には、 C_{fk} の最適値が0.08であった．さらに、境界条件の一部を、つぎに記述するように、水流のものから大幅に変更する必要もあった．すなわち、 k の底面条件の係数(前出の②)を $C_k = 8.0$ と水流の場合の2倍にするとともに、 U の底面条件についても、水流向けの要領(前出の①)による値を倍増させねばならなかった．これは、気流の場合には粘性が小さいので、底面近くの乱流が平衡状態に到達していないためと解釈されるが、再検討の余地もある．参考のために、気流について同定された境界条件を使って水流の計算を行った結果を図-10に併記した．当然のことながら、流速の再現精度が著しく低下している．

5. あとがき

本研究では、樹木群落の流水抵抗特性を気流計測の情報から推定する方法の開発に向けて、気流と水流の相似性を調べるとともに、両者の数値計算法を検討した．

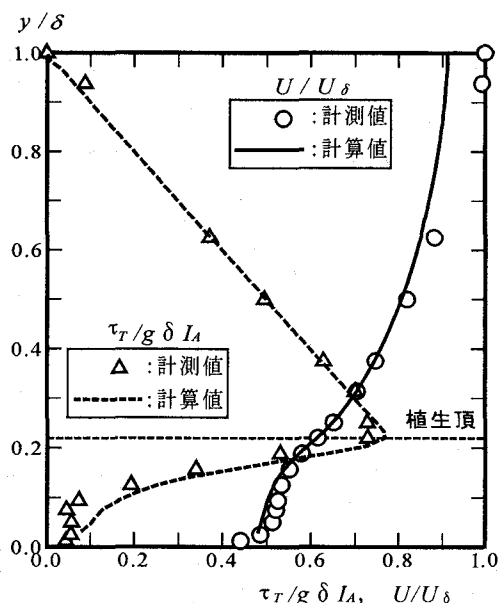


図-11 気流の実験結果と計算結果の比較

両者では、縦渦の構造に相違があり、この影響により、植生層内の抵抗応力の分担構造が相違するとともに、樹冠部の形状抵抗係数にも差が生じることが確認された．また、数値計算法としてはk-ε乱流モデルをとりあげ、境界条件とモデル定数の同定を行った．気流と水流に対しては若干異なった境界条件を設定する必要があるものの、ほぼ満足できる適合性の数値計算モデルを構築することができ、現地での気流観測資料から気流対応のモデルで λC_D を逆解析し、つぎに水流対応のモデルで洪水流の抵抗を評価するという道がある程度開かれた．

参考文献

- 1) (財)河川環境管理財団編：河川の植生と河道特性，第3章，pp.61-90，1995．
- 2) 建設省河川局治水課：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン，山海堂，pp.70-72，1994．
- 3) 渡邊康玄・北條紘次・清水康行：樹木の存在する河道の流況特性，水工学論文集，第34巻，pp.471-476，1991．
- 4) 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，II-19，pp.35-44，1992．
- 5) 湯城豊勝・岡部健士・濱井宣明：樹木状植生を持つ河床上の流れの乱流構造とその数値解析，水工学論文集，第45巻，pp.847-852，2001．
- 6) Raupach, M.R. and Thom, A.S.: Turbulence in and above plant canopies, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.13, pp.97-129, 1981.
- 7) 瀬津家久・中川博次：修正k-ε乱流モデルによる開水路乱流の数値計算，土木学会論文集，No.387，II-8，pp.125-134，1987．

(2002. 9. 30受付)