

高水敷樹木群の洪水流に及ぼす水理的影響

Hydraulic Influence of Wooded Zone in Flood Plains on Flood Stream

富永晃宏^{*}, 長尾正志^{**}

By Akihiro TOMINAGA, Masashi NAGAO

The resistance and flow structures are studied experimentally in compound open channel flows with densely wooded zone in flood plains. In the densely wooded zone, the velocity is negligibly small but the resistance is very large in the interface between the wooded zone and the main flow. The arrangement of inside rows of trees increases the momentum exchange remarkably by means of large scale vortices. Next, the effects of unsteadiness of flood stream were studied in compound channel with vegetated flood plains. The vegetation in the flood plain increases the unsteadiness of the main-channel flow.

*Keywords: vegetation, flood plain, compound channel, unsteady flow
resistance law, flow structure*

1. まえがき

河川高水敷の有効利用や生態系の保全のためには、樹木群の洪水時の流れの疎通能や低水路の流動への影響を的確に評価し、高水敷の樹木の適切な配置を計画することが必要である。複断面河道の流れは低水路の高速流と高水敷の低速流との2次流を伴う3次元的な運動量交換によって特徴づけられる¹⁾。この場合、高水敷水深 h の全水深 H に対する比が大きくなるにつれて横断方向の運動量輸送効果は減少していくが、高水敷に樹木群がある場合には、高水敷水深の増大とともに流水断面積に占める樹木群の割合が増大することから、高水敷流れと低水路流れの流速差はいつそう大きくなり両者の相互作用はますます増大する²⁾。福岡、藤田³⁾は河道内の樹木群の水理的影響を詳細に検討しており、また河道内樹木の取扱いに関するガイドラインも提案されているが⁴⁾、高水敷の樹木群の横断方向における配置の影響を系統的に検討した例はまだ少ない^{5), 6)}。著者らは高水敷上に幹のみを対象とした疎な樹木群の横断面内の設置幅と配列を系統的に変化させた実験を行い、流れの抵抗や局所流動に及ぼす影響を検討した⁷⁾。本研究では葉の繁茂した密な樹木群の列についてこれと同様の系統的な実験を行った。また、洪水流の非定常性を考えると、複断面の場合単断面に比べて低水路で非定常性が著しく強くなり、流速のピークがかなり速い時間に現れることが明らかにされているが⁸⁾、高水敷に樹木群が存在する場合について非定常流を発生させて流れ構造の変化を検討した。

* 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科
(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

** 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科
(同上)

2. 実験方法

実験は幅60cm, 長さ13mの勾配可変型開水路で行った。水路両岸に幅20.5cm, 高さD=5.9cmの木製の高水敷を設置し, 対称複断面とした。幹のみを対象とした樹木群模型においては, 直径3.5mm, 長さ8cmの釘を用い, 横断方向に3.6cm間隔で, 2列, 4列および6列の3通りの樹木群幅を設定し, 流下方向には7.2cm間隔とした。本研究では樹木の葉を模擬するために, この釘列に直径3.6cmの円筒上のヘアカーラーをかぶせたものを用いた。このヘアカーラーは表面が網目上で網目の透過率は0.50である。横断方向にこれを2個並べたものを1セットとし高水敷の外側(側壁側)2列, 4列, 6列(高水敷全幅)と内側(低水路接合部側)2列, 高水敷中央2列の5通りの樹木群模型とした。樹木群模型は上流から4mから9mまで5m区間にわたって両高水敷に対称に設置した。また, 密度の違うケースとして上のカーラーの中に直径2cmのカーラーを入れたものを用いて, 透過度を低くした実験も行った。流量は電磁流量計とインバータモータによって制御し, まずそれぞれの樹木群の配置について, 水位・流量関係を計測した。流速計測に関しては流量Qを約10.4l/sとした。水路勾配は滑面で等流となるように $S=0.001$ と固定しているため, 樹木群のある流れでは等流とならず, 不等流において流速計測を行っていることになる。流速はピトー静圧管と差圧トランスデューサーを用いて計測した。特に運動量交換が激しいケースについては2成分電磁流速計を用いて横断方向流速と鉛直方向流速を計測した。流下方向の水面形はデジタルポイントゲージで計測した。

一方, 非定常流の実験は幹のみを対象とした樹木の疎なケースについてのみに行った。非定常流発生装置及び実験方法は文献(8)と同様である。釘列は高水敷の外側(側壁側)2列, 4列, 6列(高水敷全幅)と内側(低水路接合部側)2列の4通りとした。流量は基底流量を $Q_b=3\text{ l/s}$, ピーク流量 $Q_p=18\text{ l/s}$ までをピーク到達時間 $T_p=120\text{ s}$ で増加させ20秒間ピーク流量を保持した後, 120sで基底流量まで減少させた。流速は超小型プロベラ流速計を用いて計測し, 同時に水深を容量式波高計を用い計測した。

3. 高水敷上に密な樹木群を有する複断面河道の定常流実験の結果

3. 1 抵抗特性

図-1に流速計測位置における水位・流量曲線を示す。図には樹木がない場合の曲線も示している。内側2列の場合がもっとも水位が大きくなる点が注目すべきである。これは高水敷全幅にわたる樹木群の場合よりも大きくなっており, 基本的に樹木列数の増大とともに水位が増した釘だけのケースとは大きく異なっている。この原因は内側2列の場合に顕著に認められた周期的な大規模な混合によるものと考えられる。中央2列は6列と同じ水位を示している。この場合も内側2列と同様な原因によって大きな抵抗を示すことがわかるが, 低水路側で大きな流速勾配を持つ内側2列の方がより抵抗が大きくなったものと考えられる。外側の2列と4列ではほとんど水位に変化がみられない。また, カーラーを2重にした場合と1つの場合とでは水位に与える影響はほとんどなかった。

3. 2 平均流速分布特性

図-2に主流速コンターを釘列だけの結果とともに示す。今回の葉の繁茂を考慮した樹木群模型内では内側2列の場合を除いて流速は著しく遅く, ピトー静圧管では計測可能限度を越えており正確な値は得られなかったが, ほぼ0に近い値である。ただし, 樹木帯と主流部の境界部では樹木帯内部の遅い流体の周期的な連行現象が染料による可視化からも観測され, 個体壁とは異なる粗面としての役割を果たしている。以下, 葉の繁茂の有無で比較する。外側2列では樹木帯内がほとんど流れがないことから, 流速勾配の大きな領域が高水敷中央付近に形成される。この減速分だけ低水路内が加速されているが,

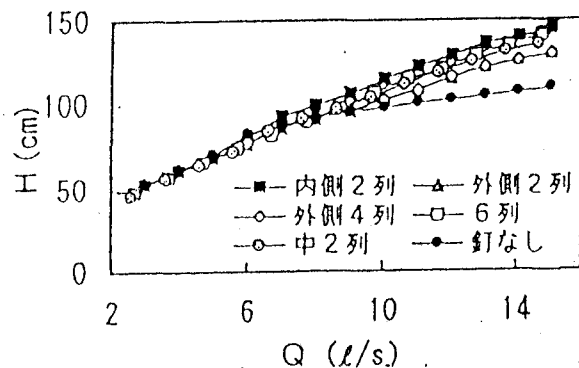


図-1 水位・流量曲線

等値線形状はほぼ同様である。斜昇流によると思われる高水敷角からの等値線の張り出しがみられる。外側4列では減速範囲が拡大したことにより、高水敷の低水路側に外側2列の場合よりも大きな流速勾配の領域が生じる。この場合も低水路内が加速されている。6列になると、高水敷上がほとんど流量を受け持たないためほぼ全流量が低水路内を流れ、低水路内流速が非常に高速となる。したがって、樹木帯と低水路の高速な主流との間にさらに大きな流速勾配が発生する。また、低水路コーナー付近の流速が相対的に遅くなり、かなり壁面から離れたところまで大きな流速勾配を持ち、最大流速域が高水敷の水面側へ張り出した形状となる点が特徴的である。次に、内側2列の場合はその両側にせん断層が形成されるのが特徴であるが、葉の繁茂を考慮した今回のケースでは樹木帯の減速が大きくその影響がさらに広範囲に及ぶ。このため低水路上部が著しく減速され、最大流速はむしろ底面近傍に現れる。高水敷外側では釘だけの場合と同様に高速域が現れる。

次に、水深平均流速 U_m の横断分布を図-3に示す。樹木群内の流速はかなり遅く、釘だけの場合に比べて横断方向の流速勾配が著しく大きくなっている。外側2列、4列および6列を比較した場合では、この順に協会部の横断方向流速勾配が大きくなっている。同じ2列同士で比較すると、内側2列の両側で勾配が急であり、また、高水敷流速が低水路流速と同程度まで大きくなっている。

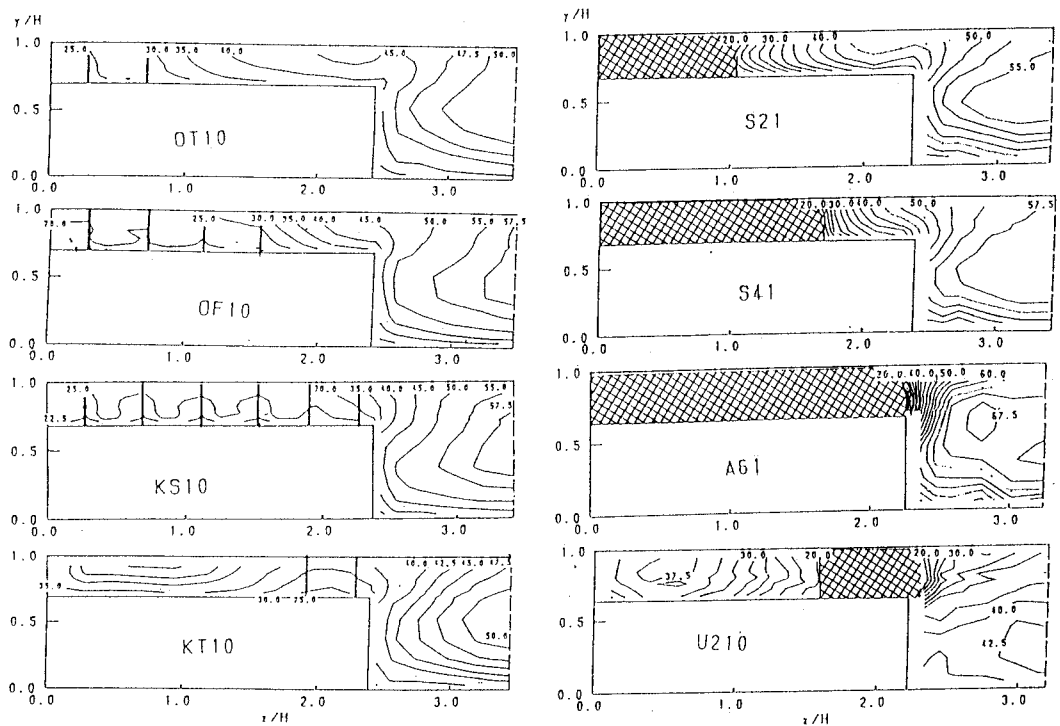


図-2 主流速コンター図

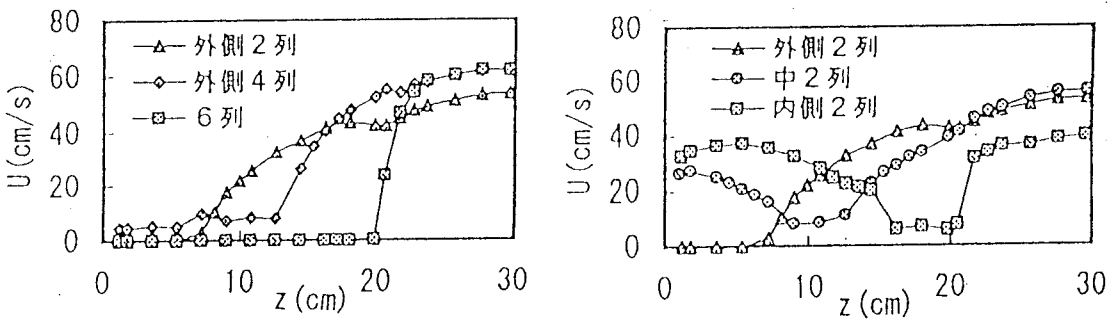


図-3 水深平均流速の横断分布

3. 3 境界せん断応力の評価

水路断面を高水敷・低水路境界面、樹木群境界面によって分割し、各境界面を通しての運動量交換によるせん断応力を評価してみた。それぞれの分割された断面において、次の釣り合い式が成り立つ。

$$\frac{n_i^2 u_i^2}{R_i^{1/3}} S_i + \sum \frac{\tau S_v}{\rho g} = A_i I_e \quad (1)$$

ここに、左辺第1項は壁面摩擦項、第2項が運動量交換項であり、 n はマンニングの粗度係数（ここでは滑面に対して0.009を使用）、 u_i は断面平均流速、 R_i は径深、 S_i は壁面摩擦の働く潤辺、 τ は運動量交換によるせん断応力、 S_v は運動量交換が行われる潤辺、 A_i は分割断面積、 I_e はエネルギー勾配である。運動量交換によるせん断応力 τ は福岡らにならい、

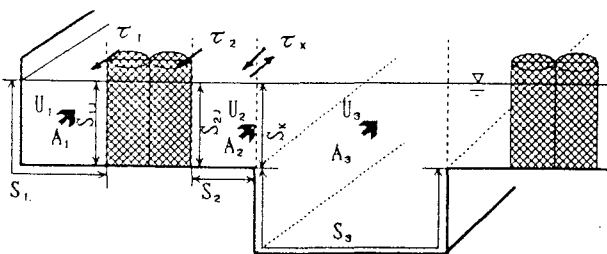
$$\tau = \rho f (\Delta u)^2 \quad (2)$$

と表すこととする。ここに、 Δu は境界に接する断面間の断面平均流速の差、 f は境界混合係数である。図-4に分割断面および記号の説明を示し、計算された境界せん断応力および混合係数の値を表-1に示す。せん断応力は、内側2列と6列がほぼ同じで最も大きく、外側4列と中央2列がほぼ同程度でこれに続き、外側2列が最も小さい。境界混合係数 f の値は、福岡らの得た値⁹⁾よりも大きく、特に中央2列

および内側2列の場合が他のケースよりもかなり大きな値となった。これは流速差に比べて大きなせん断応力が発生することを意味し、樹木群内と周囲の流れとの間に大規模な周期的混合が起こるためと考えられる。

3. 4 乱れ強度分布

図-5は6列と内側2列の流下方向の乱れ強度 u' の横断方向分布である。これから内側2列の場合、乱れ強度が樹木帯の両側で非常に大きくなることがわかる。このピーク値は6列の境界部の値の約2倍に達する。また、高水敷外側から低水路上部に至るまで全体的に乱れが大きくなっている。これはカーラーによ



断面1：樹木群と水路壁面との間
断面2：樹木群と低水路・高水敷境界面の間
断面3：低水路

図-4 断面分割説明図

表-1 境界せん断応力と混合係数

CASE名	τ_1	τ_2	τ_3	f_1	f_2	f_3
外2列一重	—	0.0470	0.0621	—	0.061	0.137
外2列二重	—	0.0624	0.0817	—	0.089	0.190
外4列一重	—	0.1021	0.0115	—	0.083	0.305
外4列二重	—	0.1314	0.1485	—	0.104	0.457
6列一重	—	0.2475	—	—	0.078	—
6列二重	—	0.2809	—	—	0.089	—
内2列一重	0.0784	0.2381	—	0.165	0.294	—
内2列二重	0.0829	0.2574	—	0.134	0.261	—
中2列一重	0.0168	0.1423	0.1594	0.15	0.407	0.407
中2列二重	0.0235	0.1544	0.1750	0.147	0.360	0.316

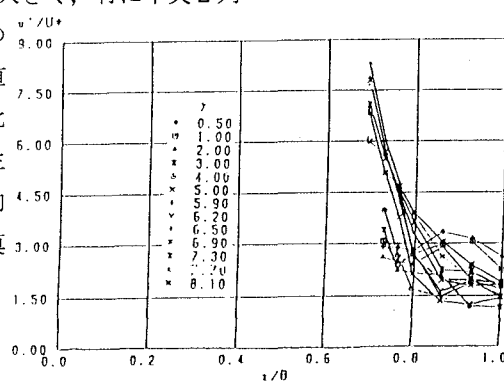


図-5 乱れ強度の横断分布

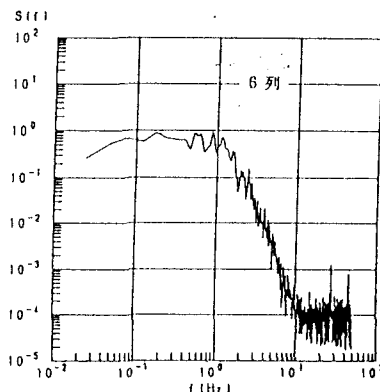
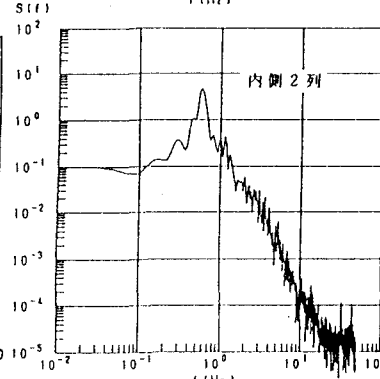
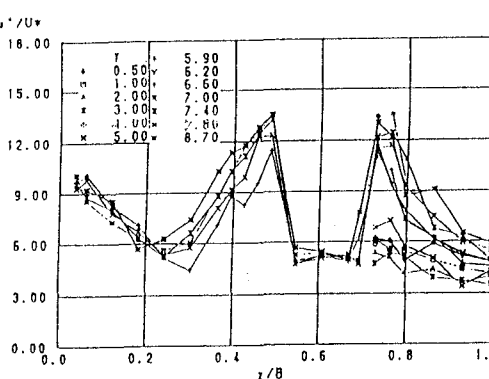


図-6 変動流速のスペクトル分布



て透過度を小さくした場合、樹木帯の低速流とその両側の高速流との相互作用が活発化し、大規模渦による周期的混合が支配的になるためと考えられる。次に、これら両ケースの高水敷・低水路境界面の中央付近における変動流速 u のスペクトル分布を図-6に示す。内側2列の場合、周波数0.5付近に明確なピークが認められ、周期約2秒の渦の存在が明らかである。その結果内側2列の場合に水位が最も大きくなったものと考えられる。

4. 高水敷樹木群を有する複断面河道の非定常流実験結果

図-7は釘なし、6列、内側2列の場合の横断方向の代表位置における水深平均流速 U_m の時間変化を示す。低水路の流速はいずれのケースも約50~60秒付近と120秒付近で2つのピークをとるのが特徴である。1つめのピークは流れが高水敷上へ乗り上げ、高水敷の水深が1cm程度となる時間に対応し、低水路内の急激な加速が高水敷への流量の分配による減少と、高水敷と低水路での流速差による運動量交換によって、低水路流速の増大が減少に転じ生じたものと考えられる。第2のピークは高水敷上の流速のピークにほぼ対応し、高水敷全幅まで水面幅が拡大した複断面水路の流れ場としての流速のピークを意味している。釘6列では高水敷の流量分担が小さいため第2のピークの方が大きくなっている。内側2列では釘の全抵抗は小さいにも関わらず第1のピークは釘6列の場合に匹敵する値まで増加している。これは、釘が低水路側にあることにより高水敷上への流量分配が遅れるためと思われる。高水敷水深の増加に伴い定常流においてもみられたような内側の釘列の大きな抵抗の影響で低水路流速は急速に減速し、比較的鋭いピークとなったものと考えられる。ある程度水深になると、釘列外側の高水敷上の流速が増大してくるため、第2のピークは第1のピークより小さくなっている。図-8は水深-平均流速曲線であり、低水路と高水敷の代表位置における変化を示している。低水路の曲線はいずれも低水路内に限定される増水前期と全水路幅にわたる増水後期および減水期に分けられる。高水敷に樹木列がある場合ループの面積が大きくなる。 $h=7\text{cm}$ でみると、増水期と減水期の流速差は内側2列の場合が最も大きい。増水後期をみると $h=8.5\text{cm}$ 程度まで流速が減少し、ここから再び増大し始める。内側2列の場合 $h=8.5\text{cm}$ までの減少が大きい。

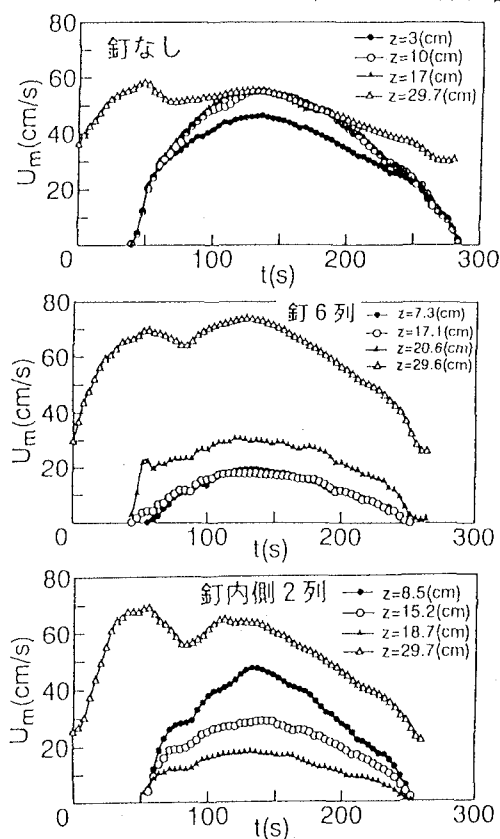


図-7 水深平均流速の時間変化

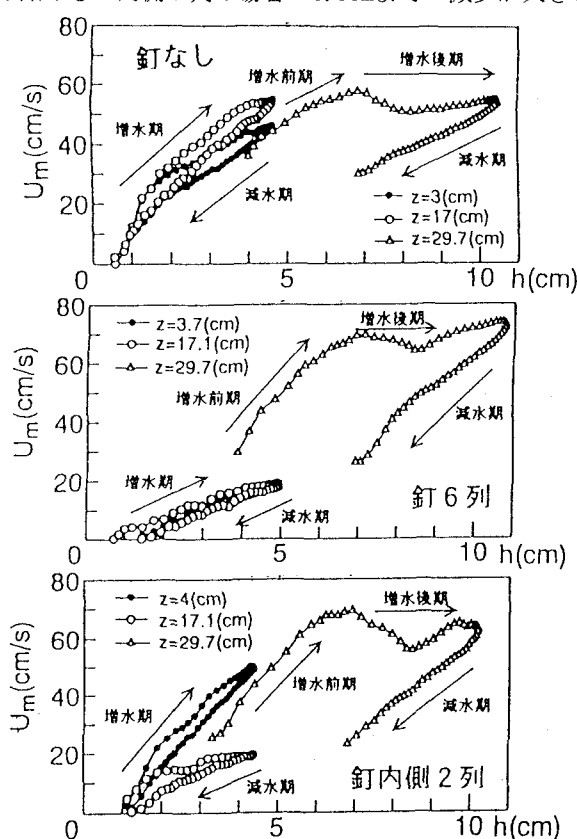


図-8 水深・平均流速曲線

高水敷上の曲線のループ形状は釘列外ではほぼ同様である。釘列内も弱いループを示している。図-9は $t=60, 120, 240$ sにおける水深平均流速の横断分布である。低水路ピーク付近にあたる $t=60$ sでは、両ケースとも高水敷流速はかなり小さく低水路境界部における流速勾配が非常に大きい。内側2列では、6列より高水敷流速が大きい、いずれも定常流でみられた高水敷外側での高速流はまだ発生していない。ほぼ第2ピーク時の $t=120$ sでは、定常流の分布と同様の傾向を示すが、釘列内の流速が定常流の値よりかなり小さい。その結果、低水路側では定常流より大きな流速勾配を示し、内側2列においては高水敷上での釘列による減速の影響範囲が定常流の場合より大きい。減水期 $t=240$ sでは増水期と比べて低水路流速のみが減少している。したがって、増水期において流水は抵抗の大きい釘列内にあまり流れ込まず外へ流れるため、樹木列内流れと外部の流れとの間に定常流よりも大きな流速差が生じ、大きなせん断応力と激しい運動量交換をもたらす。この作用が樹木列内外の領域の広い範囲を減速させていると考えられる。図-10は、 $y=6.4$ cmにおける乱れ強度 u' の横断分布である。樹木群がある場合、高水敷、低水路、境界部では、 $t=60$ s, 124 sで非定常流の乱れが、定常流の乱れよりかなり大きい。内側2列の場合では、 $t=60$ sで低水路境界側が定常流よりも大きくなり、 $t=124$ sでは全体に大きくなる。

5. あとがき

高水敷に存在する葉が繁茂した樹木群は、その内部の流れはほとんどなく流量の疎通能力は期待できないが、主流との境界領域では横断方向に大きな抵抗として働く。特に、樹木帯の両側に流れがある場合は大規模渦運動により著しく運動量交換が活発になり抵抗が増大し、水位の予想外の上昇を招くため注意が必要である。流した場合、水位および低水路流速のピーク到達時間はほとんど等しいが、2重ピークの形状が異なってくる。増水期と減水期の低水路平均流速の非定常性は樹木列がある方が大きくなり、特に低水路側近くに樹木がある場合この傾向が強い。非定常流では、樹木群境界において定常流より大きな流速勾配と大きな乱れが生じる。

<参考文献>

- 1) 富永晃宏・江崎一博・小葉竹重機, 土木学会論文集, 第417号/II-13, pp.129-138, 1990
- 2) 富永晃宏, 水工学論文集, 第37巻, pp.587-592, 1993
- 3) 福岡捷二・藤田光一, 土木研究所報告, 第180号, pp.129-192, 1990
- 4) 河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案), リバーフロントセンター編集, 山海道, 1994
- 5) 佐野良久・野崎一郎・濱谷拓・中井正則・管和利: 水工学論文集, 第35巻, pp.483-488, 1991
- 6) Pasche, E. and Rouve, G.: J. of Hydraulic Engineering, ASCE, vol.111, No.9, pp.1262-1278, 1985
- 7) 富永晃宏・長尾正志・劉建・鈴木徹也, 水工学論文集, 第39巻, pp.477-482, 1995
- 8) 富永晃宏・長尾正志・三尾憲史・劉建, 水工学論文集, 第38巻, pp.443-448, 1994
- 9) 福岡捷二・藤田光一・新井田浩, 土木学会論文集, No.447/II-19, pp.17-24, 1992

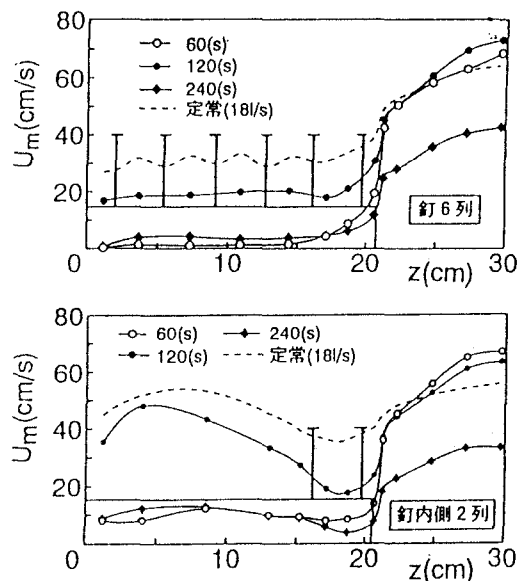


図-9 水深平均流速の横断分布

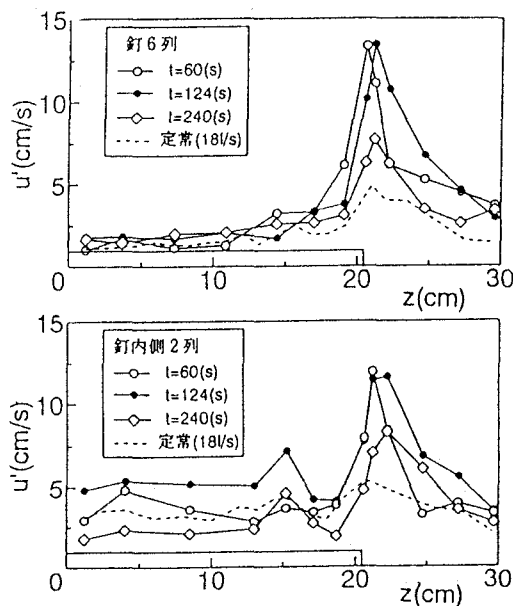


図-10 乱れ強度の横断分布