

# 高水敷樹木群を有する複断面河道の非定常流の水理特性

## Hydraulic Characteristics of Unsteady Flow in Compound Channels with Wooded Zones on Flood Plains

冨永晃宏\*, 柴田健一郎\*\*, 三尾憲史\*\*\*, 長尾正志\*\*\*\*

By Akihiro TOMINAGA, Ken-ichiro SHIBATA, Norifumi, MIO and Masashi NAGAO

Hydraulic characteristics of unsteady flows were investigated experimentally in compound channels with vegetated flood plains. Some noticeable differences between unsteady flow structure in compound channels with and without vegetation were revealed. The vegetation in the flood plains increases the unsteadiness of the main-channel velocity and its double peak property is changed by the effects of vegetation arrangement. During the rising stage, the velocity in the vegetation does not reach the value in the steady flow case so that the lateral velocity gradient and the turbulence intensity increase near the vegetation interface. Lastly, 1-D numerical calculation technique for unsteady flow with vegetation in flood plains was investigated.

*Keywords: unsteady flow, compound channel, vegetation*

### 1. まえがき

河道計画において、洪水時の水位や横断的流動特性への高水敷樹木群の影響を的確に評価することは、河川高水敷の有効利用や生態系の保全を考える上で最も重要な課題である。この予測があって初めて高水敷の樹木の適切な配置を計画することができる。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次元運動量交換によって特徴づけられるが<sup>1)</sup>、この場合高水敷水深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。一方、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樹木群の支配断面積が増して抵抗が増大し、高水敷流れと低水路流れの流速差と相互作用はますます激しくなる<sup>2)</sup>。河道内の樹木群の水理的影響についてかなりの研究成果が得られているが<sup>3), 4)</sup>、洪水の増水期と減水期とでは流れの特性が著しく異なることが知られており、複断面水路で水深が横断方向に変化するとともに、樹木群によって抵抗特性が大きく異なる区間を通過する非定常流の特性を明らかにするは重要な意義を持つと考えられる。こうした複雑な断面を過ぎる非定常流の研究としては、現地観測データによる検討や<sup>5), 6)</sup>、実験による検討が行われ<sup>7), 8)</sup>、複断面では単断面に比べて低水路での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<sup>7)</sup>。本研究ではさらに樹木群配列の非定常流動に及ぼす影響を明らかにするために、高水敷に樹木群が存在する場合について、すでに行われた定常流実験<sup>9)</sup>と同じ条件で非定常流を発生させ、流れ構造の変化を検討したものである。また、樹木群の影響を考慮した1次元の開水路非定常流の数値計算を試み、実験結果と比較した。

\* 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)

\*\* 学生員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (同上)

\*\*\* 正会員 工修 日本道路公団 大阪建設局 京滋工事事務所 (〒607 京都市山科区四宮泓37)

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

## 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。両岸に幅20.6cm、高さ5.9cmの木製の高水敷を設置し、対称複断面の開水路とし、勾配は0.001と固定した。高水敷上の樹木群モデルとして、直径3.5mm、長さ8cmの釘を図1のように両高水敷上に横断方向に3.6cm間隔、流下方向に7.2cm間隔で、上流端より4m地点から9m地点まで設置した。釘の配置は高水敷外側から2, 4, 6列（高水敷全幅）および内側（低水路側）2列の4通りと変化させた。流量は、インバータモーター・電磁流速計・コンピューターを組み合わせた流量制御システムを用い制御し、非定常流を起こした。基底流量を $Q_b = 0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ （このとき、流れは、低水路内に限定される）として、実験水路への流入条件としてピーク流量 $Q_p = 0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ までをピーク到達時間  $T_p$

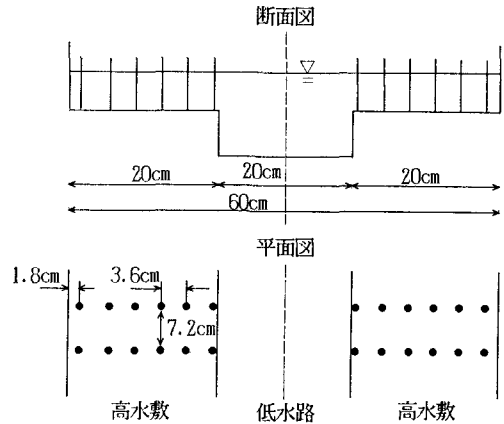


図-1 水路断面と釘配置

＝120s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るよう設定した。流速は径3mmの超小型プロペ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。プロペラ流速計の出力は水面近傍において流速との線形関係が崩れるため、水面からの距離で補正関係式を作り、流速計の直後におかれた容量式波高計から得られる水深に基づき流速に変換した。洪水の各時間における流速分布を求めるために、流速計をトラバースさせながら同一の流量波形を繰り返し与えた。データは50Hzで320秒間計測し、水深の立ち上がり点より4秒間ごとの区間平均値について解析した。

## 3. 実験結果とその考察

### 3.1 水深および流量配分

表-1に、水深と流量に関するパラメータを示す。水深のピーク到達時間 $T_{hp}$ は、実験精度の範囲でどのケースも同じであるが、ピーク水深 $h_p$ は、「外2列」<「4列」＝「内2列」<「6列」となっている。釘列を外側に設置した場合には釘列の列数が増えるほど、ピーク水深が増大しているが、「内2列」の場合には「4列」と同等の水深まで増大している。この傾向は定常流の場合と同様である。増水期では釘列がある場合に水位増加が速く現れるが、減水期では滑面の複断面とほぼ同様に減少した。この点については後に数値計算との比較において検討する。流量ピーク時の高水敷への流量配分を定常流の場合と比較すると、樹木群のある非定常流では一様に高水敷の流量分担が小さくなっていることがわかる。これは増水期に樹木群内への流入が遅らされた結果であると考えられ、非定常性を考慮すると低水路の負担がより大きくなることがわかる。

### 3.2 水深平均流速の時間変化特性

図-2は、樹木列がない場合と「6列」、「内2列」、「外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 $U_m$ の時間変化である。低水路の流速は、どのケースにおいても約50～60秒付近と125秒付近の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

表-1 水深および流量配分

樹木配列	ピーク水深 $h_p$ (cm)	ピーク流量 $Q_p$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	水深ピーク 到達時間 $T_{hp}$ (s)	流量ピーク 到達時間 $T_{QP}$ (s)	流量ピーク時の高水敷流量の全流量に対する割合 (非定常) $Q_{fp}/Q_p$	流量ピーク時の高水敷流量の全流量に対する割合 (定常) $[Q_{fp}/Q_p]_0$
なし	2.37	0.0193	140	136	0.50	0.49
6列	1.38	0.0159	140	136	0.26	0.37
外4列	1.38	0.0170	140	136	0.24	0.37
外2列	1.18	0.0167	140	132	0.36	0.42
内2列	1.22	0.0163	140	136	0.40	0.48

まで流速が減少し、ここから再び増大し始める。「内2列」の場合 $h=8.5\text{cm}$ までの減少が大きい。「内2列」では「6列」と同程度に大きく、定常流でも見られた「内2列」の場合の抵抗の大きさを物語っている。高水敷上の曲線のループ形状は釘列外では釘なし場合とほぼ同様な傾向を示し、釘列内も弱いループを示す。

### 3.3 水深平均流速の横断分布特性

図-4は $t=60, 120, 240\text{s}$ における水深平均流速の横断分布である。まず、低水路流速ピーク付近にあたる $t=60\text{s}$ では、釘有の3ケースとも、釘なしのケースに比べ、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2列」では、「6列」より高水敷流速が大きい、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。「外2列」も高水敷流速の増加が遅れており、高水敷・低水路境界部で大きな流速差が生じている。次に、ほぼ第2ピーク時の $t=120\text{s}$ では、非常流のいずれのケースとも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。「外2列」でも釘列内流速が定常流より遅く、この影響が高水敷流速を減速させている。また、低水路・高水敷境界部では

斜昇流による減速が認められ2次流の発達を示している。最後に、減水期 $t=240\text{s}$ と増水期 $t=60\text{s}$ とを比較すると、高水敷上の流速がほぼ同程度で、低水路流速のみが減少している。以上の結果より、増水期において流水は抵抗の大きい釘列内への運動量の流入が妨げられ、釘列内流れと外部流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。この作用が釘列内外の領域の広い範囲に及ぶ減速をもたらし、結果として非常流における流量配分を変化させたものと考えられる。

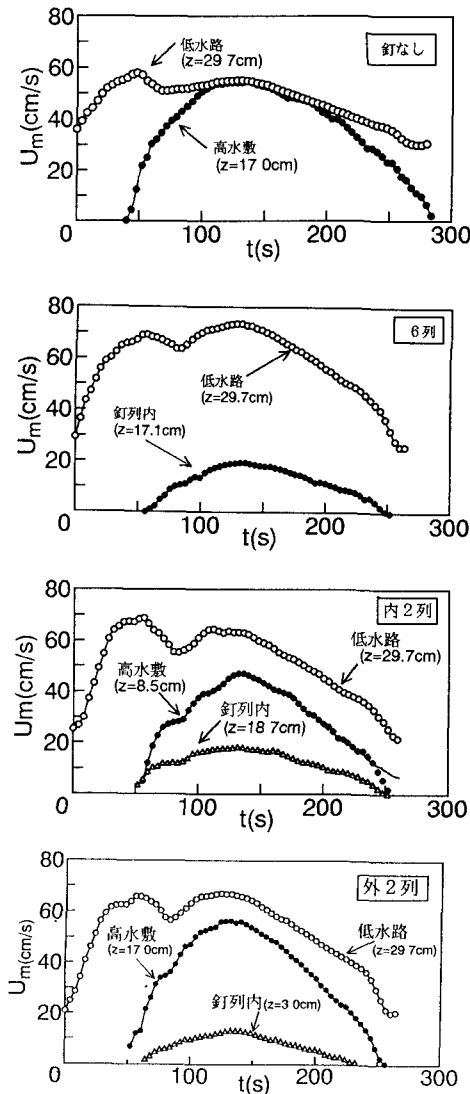


図-4 水深平均流速横断分布の時間変化

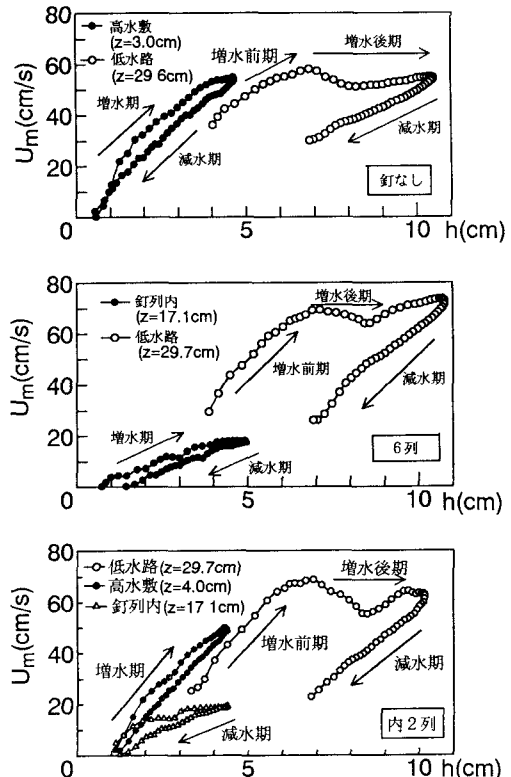


図-5 乱れ強度横断分布の時間変化

まで流速が減少し、ここから再び増大し始める。「内2列」の場合 $h=8.5\text{cm}$ までの減少が大きい。「内2列」では「6列」と同程度に大きく、定常流でも見られた「内2列」の場合の抵抗の大きさを物語っている。高水敷上の曲線のループ形状は釘列外では釘なし場合とほぼ同様な傾向を示し、釘列内でも弱いループを示す。

### 3.3 水深平均流速の横断分布特性

図-4は $t=60, 120, 240\text{s}$ における水深平均流速の横断分布である。まず、低水路流速ピーク付近にあたる $t=60\text{s}$ では、釘有の3ケースとも、釘なしのケースに比べ、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2列」では、「6列」より高水敷流速が大きい、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。「外2列」も高水敷流速の増加が遅れており、高水敷・低水路境界部で大きな流速差が生じている。次に、ほぼ第2ピーク時の $t=120\text{s}$ では、非定常のいずれのケースとも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。「外2列」でも釘列内流速が定常流より遅く、この影響が高水敷流速を減速させている。また、低水路・高水敷境界部では斜昇流による減速が認められ2次流の発達を示している。

最後に、減水期 $t=240\text{s}$ と増水期 $t=60\text{s}$ とを比較すると、高水敷上の流速がほぼ同程度で、低水路流速のみが減少している。以上の結果より、増水期において流水は抵抗の大きい釘列内への運動量の流入が妨げられ、釘列内流れと外部流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。この作用が釘列内外の領域の広い範囲に及ぶ減速をもたらす、結果として非定常流における流量配分を変化させたものと考えられる。

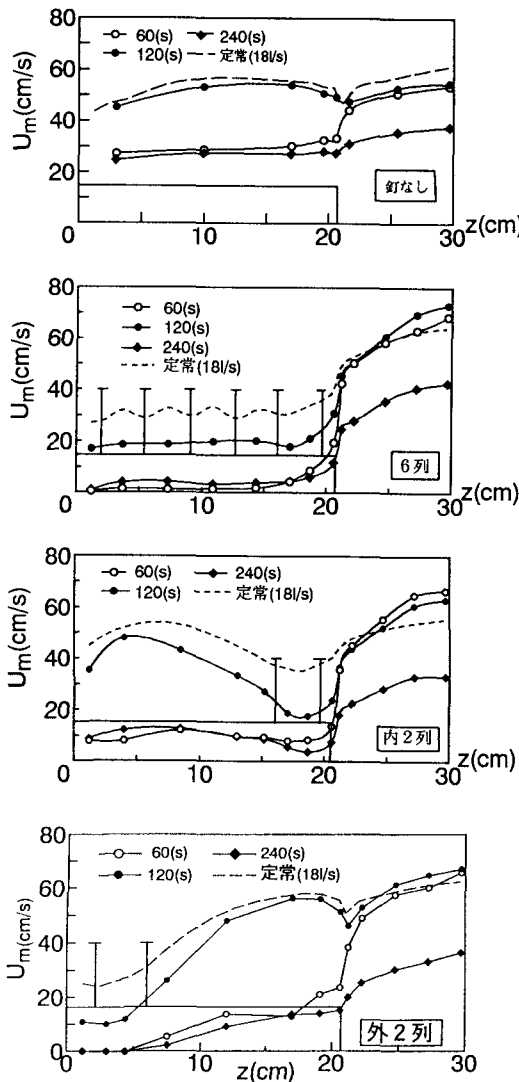


図-4 水深平均流速横断分布の時間変化

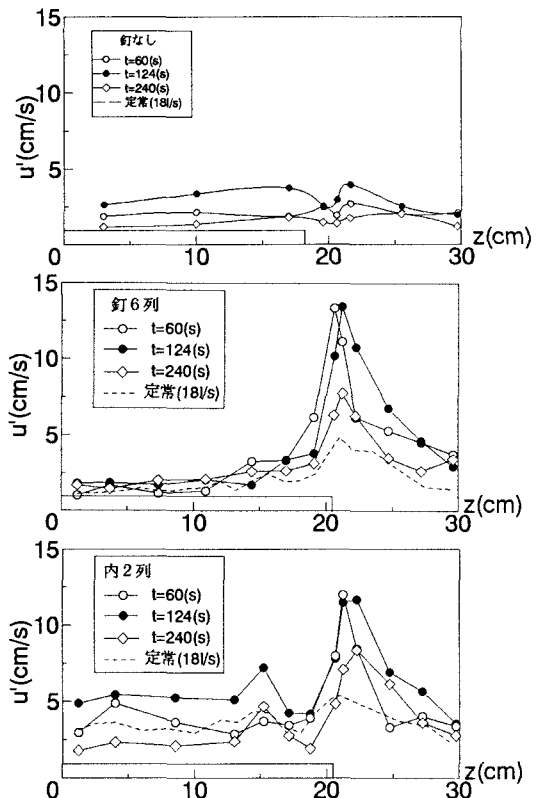


図-5 乱れ強度横断分布の時間変化

### 3-4 乱れ強度の横断分布特性

図-5は、高水数高さより0.5cm上の $y=6.4\text{cm}$ における乱れ強度 $u'$ の横断分布である。ただし、流速計の性能からみて絶対値の精度は劣るため、相対的な比較を論ずるにとどめる。釘列がある場合と釘列なしのケースとでは、乱れ強度の分布に大きな違いが見られ、「6列」の場合、「釘なし」に比べ各時間とも高水数と低水路の境界部で乱れが大きく、逆に釘列内では小さい。「内2列」では「釘なし」に比べ各時間ともどの場所においても乱れが大きく、高水数と低水路の境界部で乱れは特に大きい。定常と非定常とでの乱れ強度の分布を各ケースで比較してみると、「釘なし」では定常、非定常とも乱れの大きさがあまり変わらないのに対し、高水数上に釘列がある「6列」・「内2列」ともに高水数と低水路の境界部で、 $t=60\text{s}$ 、 $124\text{s}$ のとき非定常流での乱れが定常流での乱れより2~3倍程度大きくなる。また「内2列」の場合、 $t=124\text{s}$ で高水数上においても乱れがかなり大きくなる。

### 4. 高水数樹木群を有する複断面開水路の1次元非定常流の数値計算

高水数樹木群がある場合の抵抗則は、樹木の形状抵抗と樹木群内流れと周辺流との境界部における運動量交換による抵抗を見積もらなければならず、流速の横断方向分布の情報が不可欠となり、2次元計算が要求される。しかし、洪水の水位計算のために長区間の2次元流計算を行うことは合理的とは言えない。福岡らの方法<sup>10)</sup>によっても、少なくとも樹木群内部代表流速と外部代表流速に分ける必要があり、樹木群の位置によってはさらに細かい分割が必要となる。富永らは横断方向の運動量式に基づく1次元数値解析によって、樹木群を含む複断面開水路の横断方向分布を予測する方法を提案している<sup>9)</sup>。水面形計算においてはこのような計算で断面の合成粗度を計算した後、不等流計算を組み合わせる方法が考えられるが、非定常流計算では時間ステップごとに合成粗度の計算を行わねばならず、時間がかかり効率的でない。複断面で樹木群があるような場合は、水深に対する合成粗度係数の変化が顕著であり、ここでは、簡単に洪水追跡計算を行うための第1次近似として合成粗度係数を水深の関数として与えて1次元非定常流計算を行う方法を試み、実験と比較した。

まず、富永らによる同一境界条件における定常流実験の結果<sup>9)</sup>を用いて、樹木列設置区間の水面形からエネルギー勾配を算出し、福岡・藤田と同様の方法<sup>3)</sup>で計算された合成粗度係数 $N$ の相対水深 $H/D$  ( $D$ は高水数高さ)に対する変化を図-6に示す。樹木群がない場合は高水数水深を増加とともに $N$ は減少するが、樹木群がある場合は、若干のばらつきがあるものの水深の増加とともにほぼ直線的に増大し、その傾きはほぼ樹木の列数に比例しているが、樹木列が側壁から離れている場合の方が若干大きい。

予測計算のためには、この合成粗度係数を上述の横断方向運動量輸送解析から計算することが必要であるが、ここでは第1段階としての検証のために実験結果

の $N$ を $H/D$ に対して直線近似した式を用いることとした。1次元非定常流の基礎式は次のようである。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial uA}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial uA}{\partial t} + \frac{\partial u \cdot uA}{\partial x} = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - gA \frac{N^2 u}{R^{4/3}} u \quad (2)$$

ここに、 $A$ は断面積、 $R$ は井田法による代表径深、 $u$ は断面平均流速、 $H$ は水位である。式(2)を有限体積法を適用し、流下方向に対して風上差分、時間に対して完全陰解法で離散化した。

$$a_p u_p = a_w u_w + b + g(H_w - H_e) \quad (3)$$

$$a_p = u_w + \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{gN^2 u_p^0}{R^{4/3}} \Delta x, \quad a_w = u_w, \quad b = \frac{\Delta x}{\Delta t} u_p^0$$

ここに、添字P, W, Eは流速 $u$ の提議格子点及び隣

接格子点を表し、w, eはコントロールボリューム境界面を表す。上添字の0は前時間 $t$ における値を意味する。水深の変化は式(1)より圧力補正式を導くSIMPLE法を適用した。ここでは水位補正式となり次式のような。

$$d_p g H_p' = d_E H_E' + d_W H_W' + b \quad (4)$$

$$d_E = A_e / a_e, \quad d_W = A_w / a_w, \quad d_p = d_E + d_W, \quad b = \frac{\Delta x}{\Delta t} (A_p^0 - A_p) + u_w^* A_w - u_e^* A_e$$

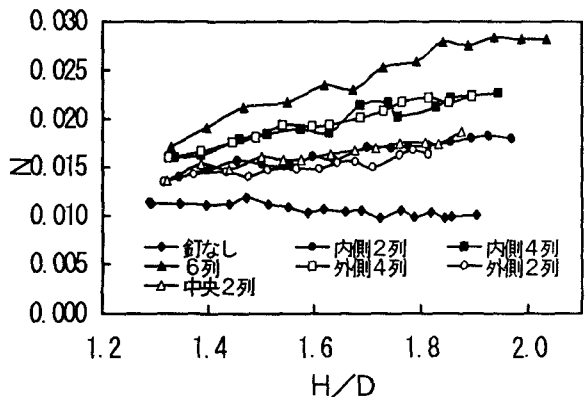


図-6 合成粗度係数(定常流)

これにより流速仮定値  $u^*$  のもとでの水位補正值  $H_p'$  が求められ、これから流速補正值  $u_p'$  が次式で計算される。

$$u_p' = \frac{g}{a_p} (H_p' - H_L) \quad (5)$$

時刻  $t$  のもとで連続式を満足するように収束させた後、次の時間ステップ  $t+\Delta t$  の計算に進む。

「6列」における流量および水深の時間変化の計算値と実験値の比較を図-7に示す。図には高水敷高さ以上に対して用いた合成粗度係数の1次式を示している。流量は全体的によく予測され、水深は増水期からピークにかけてはよく一致し、定常流で得られた合成粗度係数が非定常流においてもある程度適用できることを示している。図-8は、「6列」の場合の各時刻における水面形の変化過程を示したものである。実測値はばらつきが大きく微妙な水面勾配の差を検知するまでの精度は得られなかったが、同時刻の計算値とほぼ一致している。実験の計測位置ではほぼ同水深となる増水期と減水期の計算値を比較すると、増水期の水面勾配がかなり大きいことがわかる。非定常流では樹木列内と外部との流速差が定常流より大きくなり境界面における運動量交換は増大したと考えられるが、この影響は水面勾配の増大となって現れるため区間が短い場合には計測位置でその差が顕著に現れず、樹木の形状抵抗が支配的となったものと思われる。この効果はさらに樹木群上下流の広い範囲に及ぶ検討が必要とされよう。また、減水期には水深の計算値は実験値を下回っているが、これは樹木列による貯留効果がよく再現されなかったためと考えられる。

### 5. あとがき

高水敷樹木群を有する複断面開水路に洪水流を模擬した非定常流を流した場合、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、低水路流速の運動量交換による減速とその後の第2ピークの形状が異なってくる。増水期と減水期の低水路流速の差は高水敷樹木群がある方が大きくなる。非定常流の増水期に樹木群内流速が定常流における値まで達せず、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。また、高水敷樹木群がある場合に水深の増加に伴って合成粗度係数が増大する特性を考慮した1次元の非定常流計算によって、このような複雑な流れ場の洪水追跡がある程度可能となった。今後はさらに2次元モデルによる計算が必要とされよう。最後に、本研究は文部省科学研究費一般研究(c)の補助を受けたことを記して謝意を表します。

### <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) 清水康行・板倉忠興・岸力・黒木幹雄, 第30回水理講演会論文集, pp.487-492, 1986
- 6) 福岡捷二他, 土木研究所報告, 第180号の2, 1990
- 7) 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
- 8) Tu, H. and Tamai, N. and Kan, K., Proc. of Hydraulic Engineering, JSCE, vol 38, pp 703-708, 1994
- 9) 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
- 10) 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

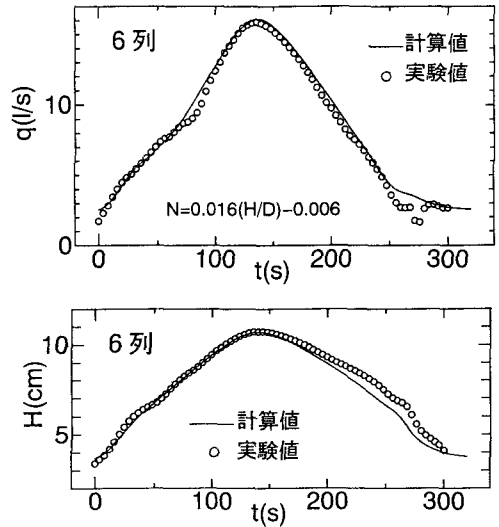


図-7 流量及び水深の時間変化(計算値と実験値)

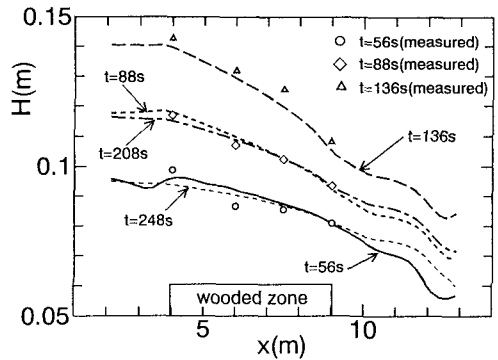


図-8 水面形の時間変化(計算値と実験値)