

局所的樹木群を有する複断面水路を通過する洪水波の変形過程
Transformation Process of Flood Waves Passing Compound Channels
with Locally Vegetated Flood Plains

富永晃宏*, 長尾正志**, 庄建治朗***

By Akihiro TOMINAGA, Masashi NAGAO and Kenjiro SHO

Transformation process of flood waves and hydraulic characteristics of unsteady flows were investigated experimentally in compound channels with locally vegetated flood plains. Some noticeable differences between unsteady flow structure in compound channels with and without vegetation were revealed. The shortly vegetated zone in the flood plains causes the sharp decrease of the flow depth in front of that and increases the upstream stage extremely. 2-D depth-averaged numerical calculation technique for unsteady flow with vegetation in flood plains was developed. The calculated results reproduce well the characteristic tendency of the experiments. This calculation method is useful for the flood routing passing such a complex flow field.

Keywords: unsteady flow, compound channel, vegetation, 2-d numerical calculation

1. まえがき

河川高水敷の生態系の保全や空間利用を計画する上で、高水敷に繁茂する樹木群が洪水時の上流側の水位の上昇や下流に対しての貯留効果および局所的偏流の有無などの流動特性への影響を的確に評価する必要がある。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は大きくなり、低速流体と高速流体の相互作用が激しくなる¹⁾。河道内の樹木群の水利的影響についてすでに多くの研究成果が得られており、その基本的な特性が明らかにされつつある^{2), 3)}。河道内樹木群は一般に低水路河床から盛り上がった高水敷上に存在することから、複断面と樹木群を複合した流れ場の研究が必要であるとの考えから、著者らは高水敷樹木群を有する複断面流れの定常流実験⁴⁾とともに高水敷樹木群を有する複断面開水路に非定常流を流した実験を行ってきた⁵⁾。その結果、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ことなどが示された。また、高水敷における樹木群配列の影響を調べた結果、それぞれの配列に対して水位および低水路流速のピーク到達時間に大きな差はないが、低水路流速の運動量交換による減速とその後の第2ピークの形状に違いが見られた。これらの研究は、樹木群が比較的長い区間にわたって一様に設置された場合を対象とし、樹木群区間の流れの構造に着目していたのだが、本研究では、比較的短い区間に局所的に存在する樹木群を対象とし、樹木群区間前後の洪水波および流れ構造の変化過程に着目した。さらに、1次元及び2次元の開水路非定常流の数値計算を行い、このような複雑な河道区間を通過する洪水流の追跡計算を試み、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)

** 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)

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

2. 実験装置および実験方法

実験は、幅60cm、長さ13mの勾配可変型開水路で行った。兩岸に幅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、水路勾配 $S=0.001$ 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の釘を用い、横断方向に3.6cm間隔、流下方向に7.2cm間隔で、図-1のように上流端より6.7m地点から7.3m地点までの0.6m区間に、高水敷左岸のみ（片側樹木群）と両側（両側樹木群）の2通りの設置を行った。流量は、インバータモーター・電磁流量計・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、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 $T_p=120\text{s}$ 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るような非定常流を与えた。流速計測には、センサー部の直径5mm、長さ15mmの2成分電磁流速計（東京計測製）を用い、上流端より6.7m（樹木群区間上流）、7m（樹木群区間中央）および7.3m（樹木群区間下流）の3断面で断面内の流速を計測した。同時に水深を容量式波高計を用い計測した。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。

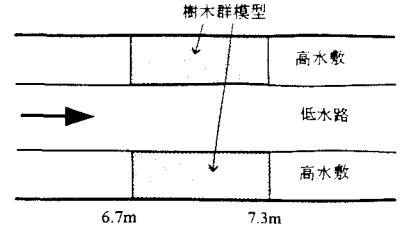


図-1 樹木群モデルの配置

流速を計測した。同時に水深を容量式波高計を用い計測した。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。

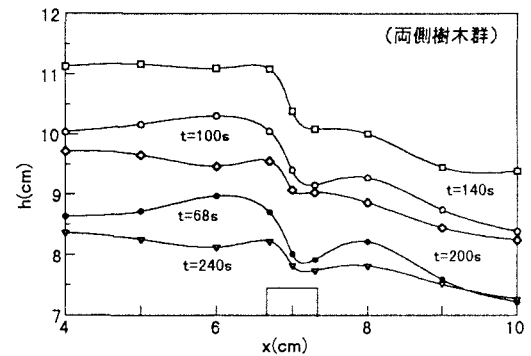
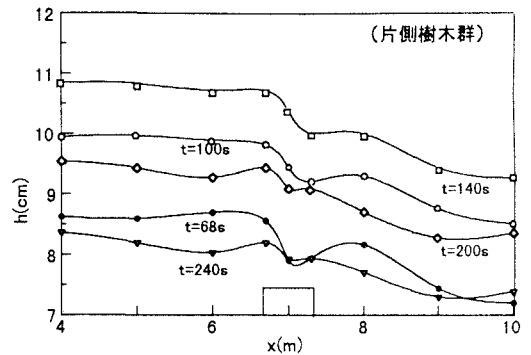


図-2 水面形の時間変化

3. 実験結果とその考察

3.1 水面形の時間変化特性

図-2に、片側及び両側樹木群の代表的時刻における $x=4\text{m}$ から 10m 区間の水面形の変化過程を示す。これは、下流の 10m 地点に一つの波高計を固定し、もう一つを上流 4m 地点から順次移動させて同時に計測した結果より得られたものである。ここで $t=140\text{s}$ 付近が水位のピークにあたる。上昇期の $t=68\text{s}$ 、 100s では、樹木群より上流が堰上げられて水位が急上昇し、樹木群上流端から内部にかけて急激に減少している。水位は樹木群内で極小となり、樹木群下流でいったん上昇している。樹木群上流側の水位の上昇は、抵抗の大きい両側樹木群のケースの方が大きくなり、上昇期には若干逆勾配となる傾向を見せる。水位ピーク時にはほぼ定常流と同様な水面形となる。下降期の $t=200\text{s}$ 、 240s は下流水位がそれぞれ上昇期の $t=100\text{s}$ 、 68s にほぼ相当する時刻であるが、樹木群上流の堰上げは上昇期に比べて大幅に小さくなっている。したがって、樹木群内部での水位降下もかなり小さく、樹木群直下流の水位も上昇期のように増加しない。以上のように、樹木群の上流側では洪水の上昇期には樹木群の抵抗による貯留効果が顕著に現れ、水位が急上昇し水面勾配は小さくなることがわかった。

3.2 低水路・高水敷流量配分の時間変化

図-3は両側樹木群の場合の樹木群上流側と下流側の低水路・高水敷流量配分及び全流量の時間変化を示す。各流量は計測点における流速の時間ごとの積分によって求められたものである。樹木群の上流側と下流側の比較から樹木群を通過することにより、高水敷流量が大きく減少し、低水路流量がわずかに増加していることがわかる。全流量についてみると、樹木群を通過したことによりわずかながらピーク流量の低減が認められる。

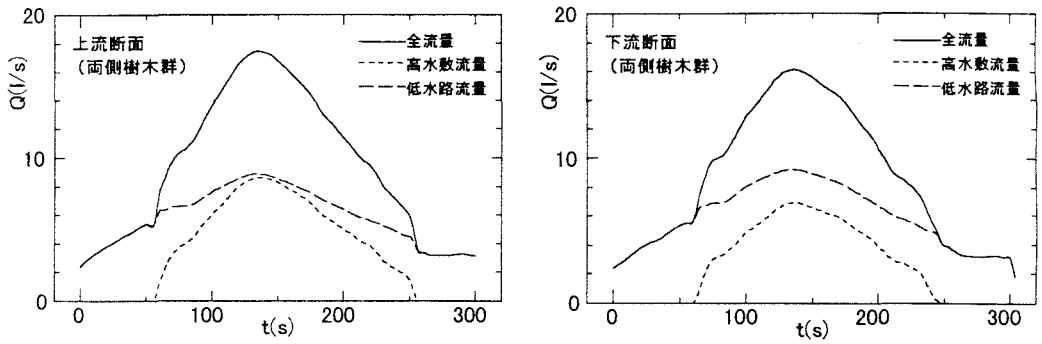


図-3 分割流量のハイドログラフ

3. 3 水深平均流速横断分布の時間変化特性

図-4は $t=68s, 100s$ (上昇期), $140s$ (ピーク時), $200s$ (下降期)における各ケースの樹木群上流及び下流断面の水深平均流速の横断分布を示している。樹木群上流では上昇期の $t=68s$ で低水路内流速がほぼピークに達する。このとき高水敷上はまだ低速で境界部に大きなせん断が生じている。これ以後ピークまでは低水路流速はほとんど変化せず、高水敷流速が増大していく。ピーク時の横断分布は、定常流の場合とほとんど同様であった⁴⁾。下降期の $t=200s$ あたりまでは、ピーク時の横断分布形と相似形で大きさのみが減少してくる。 $t=240s$ 付近になると水深の低下に伴い高水敷流速が急減し、再び境界部のせん断が大きくなる。以上の特徴は、片側及び両側の樹木群の両方に言えることである。片側樹木群では樹木群のない高水敷上の流速が大きくなるのがわかる。また、樹木群下流側についても、上述の特徴がほとんど当てはまる。ただし、低水路流速のピークが $t=140s$ の流量ピーク時になる。また、 $t=68s, 240s$ に樹木群下流の高水敷水深が小さくなるため高水敷上でかなりの低流速が現れる。樹木群のある高水敷と低水路の境界部では、流速のくぼみが顕著となり、複断面開水路の特徴である斜昇流の発達を示唆している¹⁾。

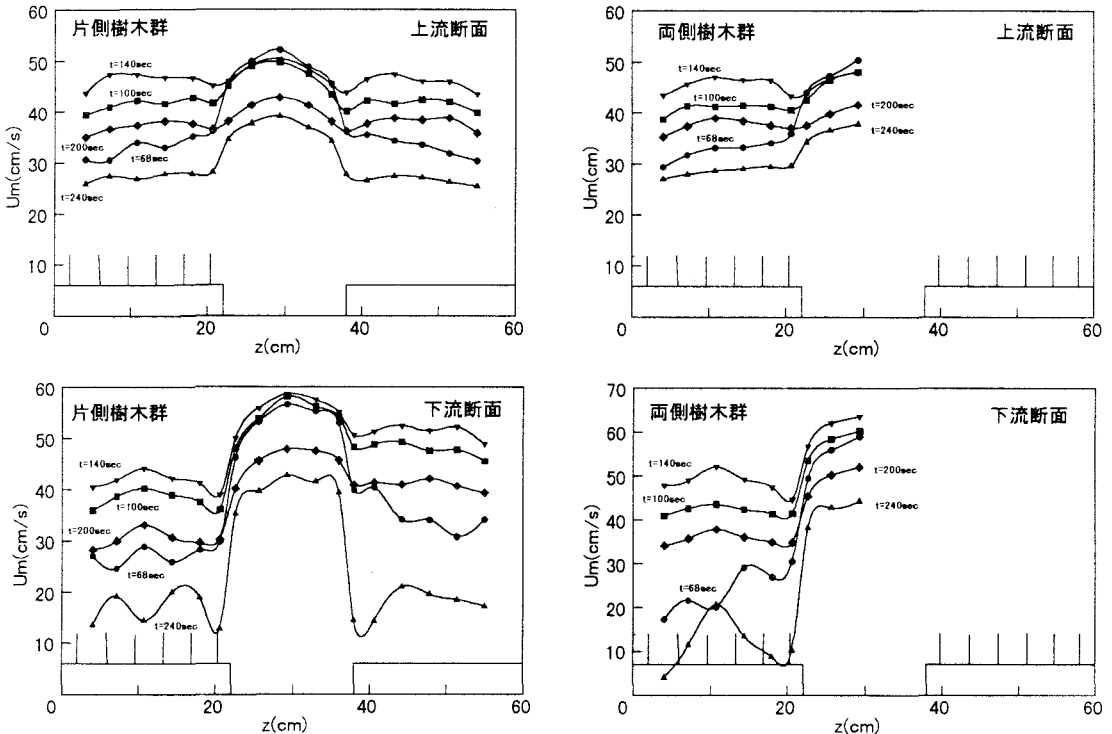


図-4 水深平均流速横断分布の時間変化

4. 高水敷樹木群を有する複断面開水路非定常流の2次元数値計算

高水敷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考慮に入れる必要があり、流速の横断方向分布の情報が不可欠となる。著者らは、洪水追跡計算を行うための第1次近似として、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、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、良好な結果を得た⁶⁾。この結果は、樹木の形状抵抗が支配的で、上昇期の前半や下降期の後半にみられる境界せん断の増大の効果はさほど効いてこないことを示したものと考えられる。しかしながら、1次元の計算では、合成粗度係数を水深の関数としてあらかじめ求めておかねばならない点が大きな欠点である。また、今回の実験のように、局所的に樹木群が偏在する場合は、流速の横断分布の局所的变化を予測することも重要となるため、開水路非定常流の2次元数値計算が必要となる。

樹木群の形状抵抗および2次流の横断方向運動量輸送効果を考慮した2次元非定常流の基礎式は次のようである。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UU) + \frac{\partial}{\partial y}(VU) = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial y} - F_x - \frac{\partial}{\partial y} \overline{uv} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UV) + \frac{\partial}{\partial y}(VV) = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} - F_y - \frac{\partial}{\partial x} \overline{uv} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 U は流下方向水深平均流速、 V は横断方向水深平均流速、 z は河床高、 h は水深、 ρ は流体の密度である。 τ_{bx} 、 τ_{by} は x 、 y 方向の底面せん断応力であり、次のように与えられる。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{bn^2}{\sqrt[3]{h}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{bn^2}{\sqrt[3]{h}} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (n: \text{マニングの粗度係数}) \quad (4)$$

τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yy} は水深平均されたレイノルズ応力であり、水深平均の渦動粘性係数 ν_t を用いて与えた。

$$\tau_{xx} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad \tau_{xy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \tau_{yy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (5)$$

F_x 、 F_y は水深平均された樹木群の抗力をとすると次式で表される。

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \beta_x \sqrt{U^2 + V^2} \cdot U, \quad F_y = \frac{1}{2} C_D \beta_y \sqrt{U^2 + V^2} \cdot V \quad (6)$$

ここに、 C_D は抗力係数、 β_x 、 β_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の樹木群の密度パラメータである。複断面開水路の流れでは、高水敷水深が大きくなる場合、2次流による運動量輸送効果が無視できない。この2次流の働きにより、高水敷に低水路の高速流が輸送され、高水敷流速がかなり大きくなる。本研究では、この輸送効果を複断面開水路の実験結果¹⁾より以下のように見積もった。

式(1)、(2)中の \overline{uv} は、それぞれ水深平均値 U 、 V からのずれを表し、これを水深平均したものが \overline{uv} である。

これは、2次流による平均的な横断方向への運動量輸送フラックスを与える。 \overline{uv} は実験値に基づき図-5のような分布を示すことから、次のようにモデル化して与えた。

$$(I) \quad 0 \leq y \leq yf_1 \text{ のとき} : \quad \overline{uv} = -\frac{1}{2} \hat{v}_{a1} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{\pi y}{yf_1} \right) \right\}$$

$$(II) \quad yf_1 \leq y \leq yf_2 \text{ のとき} : \quad \overline{uv} = -\hat{v}_{a1} + (\hat{v}_{a2} + \hat{v}_{a1}) \frac{y - yf_1}{yf_2 - yf_1}$$

$$(III) \quad yf_2 \leq y \leq B \text{ のとき} : \quad \overline{uv} = \frac{1}{2} \hat{v}_{a2} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{\pi(y - yf_2)}{B - yf_2} \right) \right\}$$

ここに、 \hat{v}_{a1} 、 \hat{v}_{a2} はその位置における2次流の最大値と摩擦速度の積に比例すると考えられ、 $\hat{v}_{a1} = \hat{v}_{a2} = \alpha U^2$ として与えられる。

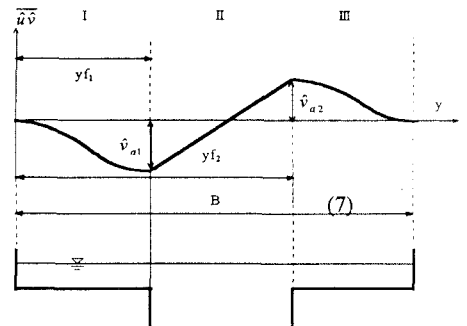


図-5 2次流による運動量輸送項

ここでは実験値に一致するように $\alpha U_*^2 = 0.0015$ とした。式(1), (2)は、スタッガード格子で有限体積法によって離散化され、移流項はハイブリッドスキーム、時間項は完全陰解法を用いた。水深はSIMPLE法に基づき水位補正式から計算される。複断面開水路の場合、高水敷に流れが乗り上げる過程で計算領域の変化を取り扱わねばならない。そこで、コントロールボリュームに状態を識別する整数配列を与え、考えているコントロールボリュームの水位が、隣接するコントロールボリュームの河床高を越えたときに、これを新しく流れの計算領域に加え、再び計算を繰り返すという方法をとった。このような越流水の先端部については、傾斜面を水深が増加していく場合は通常の壁関数を用いる固体境界として扱い、高水敷面上で流れ場が空気に隣接する場合は、これを区別し特別な措置を行わない。ただし、高水敷水深が最低基準値 h_0 以下では、流出入フラックスはないものとした。

5. 2次元数値計算の結果と考察

非定常流の計算に先立ち、定常流計算を行い実験結果と比較した。この結果、釘列に対しては $C_D \beta_s = 1.20$ という値がとられた⁷⁾。水深平均の渦動粘性係数については、減少の複雑さを考慮し、ゼロ方程式モデルを採用し、 $\nu_t = \nu_* u_* h$ として与え、 $\nu_0 = 0.14$ とした。非定常計算では、基底流量 $3000 \text{ cm}^3/\text{s}$ からピーク流量 $18000 \text{ cm}^3/\text{s}$ までを実験と同様な時間変化で与えた。計算の時間ステップは2秒とし、260秒まで計算した。これは高水敷から水が引く過程で計算が発散する場合が発生したためである。この点については今後さらに検討を要する。

図-6は、両側樹木群の場合の樹木群下流の流量ハイドログラフの計算値と実験値の比較である。実験値は与えた波形からの部分的なずれが認められるが、計算値はこのような比較的疎な短い区間の樹木群を通過してもあまり変化していない。しかし、基本的な波形においては両者はほぼ一致している。図-7は、両側樹木群の場合の樹木群上流と下流の水深の時間変化の計算値と実験値の比較を示したものである。高水敷越流前については若干傾向が異なっているが、高水敷越流後は計算値は実験値とよく一致している。ピーク水深については若干計算値の方が大きくなるものの、樹木群通過前後の水深の変化およびその時間変化特性がともに良好に再現されているといえる。次に、片側樹木群および両側樹木群の水面形の時間変化の計算値を $x=4\text{m}$ から $x=10\text{m}$ まで取り出して

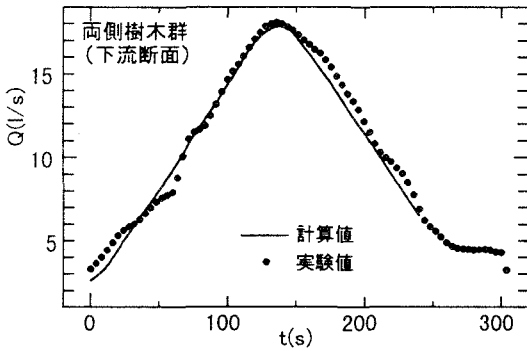


図-6 流量ハイドログラフの比較

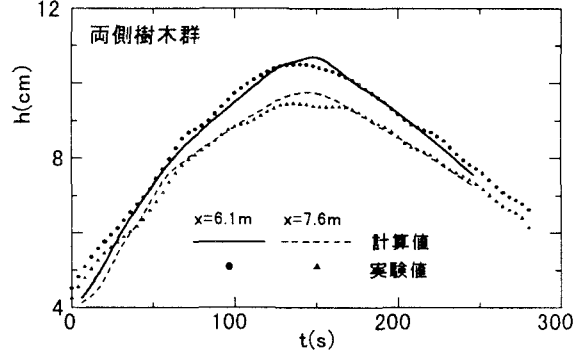


図-7 水深の時間変化 (計算値と実験値の比較)

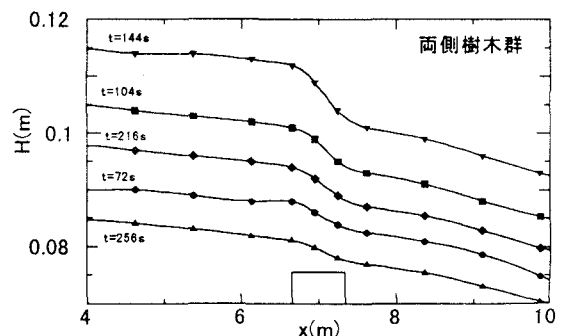
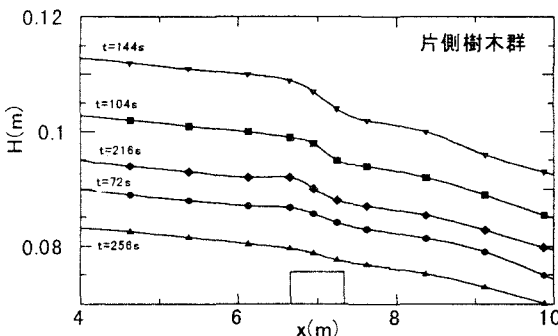


図-8 水面形の時間変化の計算値

示したのが図-9である。水面形の実験値は図-2にみられたように局所的な変化が大きく、上昇期と下降期で水面勾配の大きな変化が見られたが、計算値にはこのような局所変動が見られず、ほぼ平行に上下している。樹木群区間における水位の急減少は片側および両側ともによく再現され、樹木群による上流側の堰上げも良好に評価されている。しかし、樹木群下流での水位が上昇するような傾向および上昇期の初期に樹木群上流側に逆勾配が現れるような波動的な傾向は、本計算では再現されない。本研究の計算法では、ハイブリッド法と時間に完全陰解法を用いているため、安定ではあるが数値粘性も大きく入り、急激な水面の変動を取り扱うことはできないが、むしろ洪水追跡のように水位や流量の全体的な伝播過程を一定時間間隔で捉えたい場合には有効な方法である。

図-10は水深平均主流速の横断分布の時間変化の計算結果を示したものである。樹木群上流断面の分布は、片側樹木群もほとんど同じだったので、両側樹木群のケースのみ示す。上昇期の初期においては低水路と高水敷の流速差が最も大きくなる。その後ピークに至るまで上流側では、低水路流速の増加が小さく高水敷流速が大きく増大する。実験では低水路流速がほとんど増加していなかったが、この点は2次流の効果の変化が原因していると考えられる。下流断面では樹木群の影響による高水敷流速の減速が良好に再現されている。また下降期には低水路の流速分布がフラットになる傾向にある。片側樹木群では、樹木群のない側の高水敷の加速が認められる。

6. あとがき

局所的に高水敷樹木群が存在する複断面開水路に洪水波を模擬した非定常流量を通過させ、水位および平均流速の構造の時間変化を調べた。たと

え短い区間でも樹木群は水位に大きな影響を与える。また、複断面形状と高水敷樹木群を扱うことのできる2次元の水深平均非定常流計算を開発し、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。最後に、本研究は文部省科学研究費基盤研究(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) 福岡捷二・藤田光一, 土木研究所報告, 第180号, pp.129-192, 1990
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 富永晃宏・柴田健一郎・三尾憲史・長尾正志, 水工学論文集, 第40巻, pp.693-698, 1996
- 7) 大沼保仁・富永晃宏・長尾正志, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 2, pp.358-359, 1996

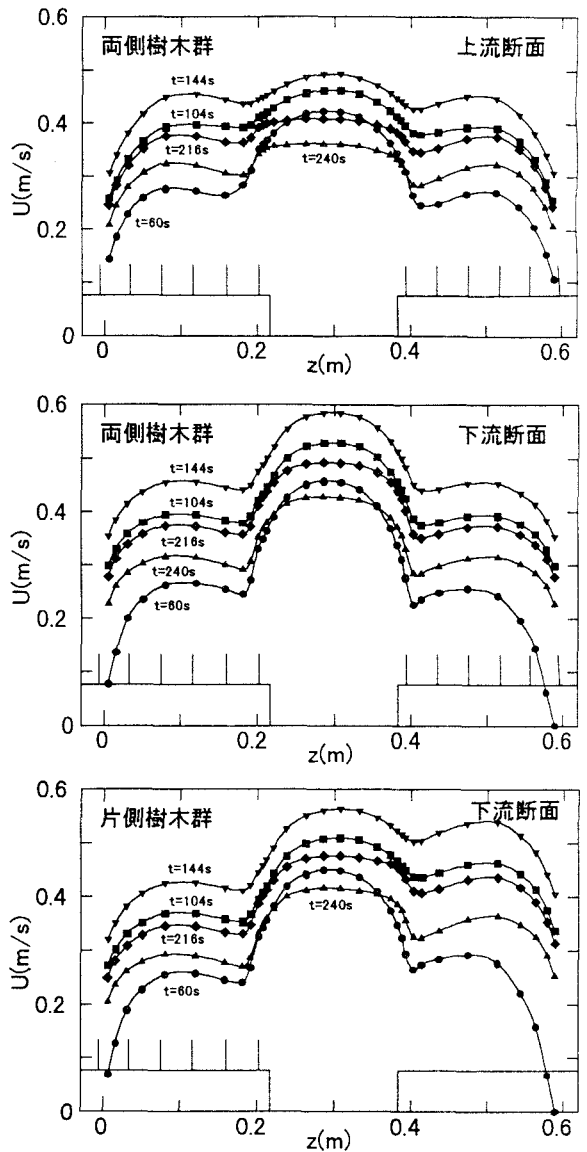


図-10 計算による水深平均主流速横断分布の時間変化特性