

3. 環境を重視した河道構造の見直しのための水工学的研究

研究目的

研究成果の要約

- (1) 高水敷に粗度や樹木群を有する複断面開水路の洪水流の水理特性
 - 1 - 1 高水敷粗度の影響
 - 1 - 2 高水敷上の樹木群の影響
- (2) 高水敷を越流する洪水流の非定常水理特性
- (3) 河道横断および縦断構造物周辺の流れ構造
 - 3 - 1 水制周辺の流れ構造とその数値計算
 - 3 - 2 強制2次流による局所的せん断応力の制御
- (4) 河床条件急変開水路流の乱流モデルによる数値計算
 - 4 - 1 河床粗度急変流の乱流モデルによる数値計算
 - 4 - 2 水深変化を考慮した河床条件変化流の数値計算
 - 4 - 3 海面上昇による河道内塩水遡上の変化予測
- (5) 実河川の流れ計測に基づく河川乱流構造の検討
 - 5 - 1 直線水路における現地計測
 - 5 - 2 湾曲水路における現地計測

名古屋工業大学 長尾正志
名古屋工業大学 喜岡涉
名古屋工業大学 富永晃宏

<研究目的>

近年、河川の環境面の機能が重要視され、治水面での安全性を確保しながら自然豊かな空間を作り出すための基準が必要とされている。河川の生態系や親水性に配慮した河道構造面からの対応としては、変化に富む多様な流れ場を創造するための低水路法線、護岸・水制、落差工等の種々の改善、高水敷や中州の植生の保全とその安定化のための低水路護岸・根固めの施工などが挙げられる。本研究は、このような河川の環境面に配慮した河道構造のあり方を考え、低水時の流れの制御および洪水時における安全性確保の検討を行い、今後の河川整備の技術的指針を得ようとするものである。

本研究では、河川環境上重要な高水敷や中州の安定維持および洪水時の抵抗評価の問題に着目し、特に植生の繁茂状況を考慮した洪水時の水位や流動および低水路護岸の安定性についての検討を第1の目的としている。また、洪水時の非定常性が高水敷を有する複断面水路の流れに及ぼす影響については未だ研究例がほとんどないことから、この点について特に重点をおいて検討することとした。さらに、これらの実験から得られたデータをもとに様々な河道構造の治水安全度を評価するシミュレーションモデルを構築することを目指している。次に、環境に配慮した河道構造の創造を目指す積極的な流れおよび河床変動の制御法として、水制および縦工の利用を考え、これらの構造物周りの流れの3次元的構造を実験および数値計算によって明らかにし、局所洗掘および堆積機構に及ぼす影響を検討することを第2の目的としている。このような複雑な河道構造は護床工などによる河床の粗度の急変をもたらすと考えられることから、河床粗度が急変する開水路流の乱流構造の応答を予測する乱流モデルについても検討を加えている。以上の実験室での実験および数値計算による研究に加えて、実河川での流速計測に基づき河川の3次元乱流構造を明らかにし、実験室規模の流れとの相似性および問題点について検討している。

以上の検討項目について、本研究では次のような具体的課題を設定して研究を行った。

- (1) 高水敷に粗度や樹木群を有する複断面開水路の洪水流の水理特性
- (2) 高水敷を越流する洪水流の非定常水理特性
- (3) 河道横断および縦断構造物周辺の流れ構造
- (4) 河床条件急変開水路流の乱流モデルによる数値計算
- (5) 実河川の流れ計測に基づく河川乱流構造の検討

<研究成果の要約>

(1) 高水敷に粗度や樹木群を有する複断面開水路の洪水流の水理特性

河川の高水敷は生態系の保全や親水空間としての価値が高まっている。自然形成された砂州や植生群落および低水路護岸等によって人工的に固定された高水敷がある河川では、洪水時に複断面流れと

なる。高水敷の有効利用や生態系の保全のためには、このような広い意味での複断面水路の形状や粗度が洪水流の流動および抵抗特性に及ぼす影響について明らかにしておくことが必要である。複断面流れの最も重要な問題はいうまでもなく洪水時の抵抗則と水位予測である。次に、河道災害防止に関する河道安定の問題がある。これらの問題を解明するための基礎的研究としてこれまでに数多くの研究があり、基本的な水理特性はある程度明らかにされてきたが、今後さらにより複雑な境界条件に対しての研究が残されている。今後の研究課題としては(a)複断面の断面形状の変化が抵抗に及ぼす効果、(b)高水敷の植生や粗度が抵抗に及ぼす効果、(c)低水路・高水敷境界の大規模組織渦の役割、(d)低水路護岸および高水敷の洗掘や浮遊砂の堆積問題、(e)低水路の湾曲および河道全体の湾曲がある場合の複断面流れの特性、(f)複断面水路における洪水時の流れの非定常性の効果等が考えられる。本研究では、特に(b)の問題について検討し、次に次節で述べる(f)の問題について検討した。

高水敷の粗度や植生の問題については、一般に河川の高水敷は植生等の存在によって粗度が大きいと考えられるが、これにも種々の状態が考えられる。第1は、単に河床粗度高さの増大と捉えられる場合と、第2に、洪水時も水没しない樹木などのように水深の増大に伴い形状抵抗が増大する場合がある。また、第3として、河床の粗滑や樹木群の非一様な配列の影響が問題となる場合がある。

1-1 高水敷粗度の影響

高水敷は一般に植生等により粗度が大きく、このような粗度の横断方向に対する配置特性が洪水流に及ぼす影響を明らかにしなければならない。滑面の複断面開水路流れの場合、低水路の高速流れと高水敷の低速流れとの相互作用による鉛直境界面に働くせん断応力は高水敷水深 h の全水深 H に対する比がかなり小さいときに特に大きくなり、この水深比 h/H がある程度大きい場合はしだいに小さくなり、むしろ2次流の影響が卓越するようになるが、全体として横断方向の運動量輸送効果は減少していく。しかし、河川の高水敷は一般に植生等により粗度がかなり大きいと考えられる。この場合、粗度による減速効果により水深比がある程度大きくなる場合でも大きな流速勾配が維持され、洪水時に h/H が0.5以上となるようなときでも大きな横断方向せん断応力が働くものと推測される。ここでは、高水敷に大きな粗度を与えて詳細な乱流計測を行い、滑面の結果と比較しながら、粗度の乱流構造や抵抗特性に及ぼす影響を検討した。

実験水路の片側に高水敷を設置し非対称複断面とし、高水敷粗度として正方形断面の角柱桟粗度を設置した。このとき高水敷粗度はマニングの粗度係数では $n \cong 0.028$ および $n \cong 0.02$ と滑面低水路の値の約3倍および約2倍となった。高水敷高さを4種類変化させ、ファイバー・レーザ・ドップラー流速計によって流速を計測した。高水敷粗面では最大流速位置は明らかに低水路中央から低水路側側面に移動し、接合部の混合の影響領域は対岸側壁の影響領域よりずっと大きくなる。滑面の場合は、2次流の斜め上昇流による極小値が現れ高水敷上で極大値をとる点が特徴であるのに対し、高水敷粗面の場合は同じ水深比にもかかわらず、低水路と高水敷の流速差が非常に大きくなり、低水路内の接合部側の流速 U の横断勾配が著しく増大した（図1-1-1）。

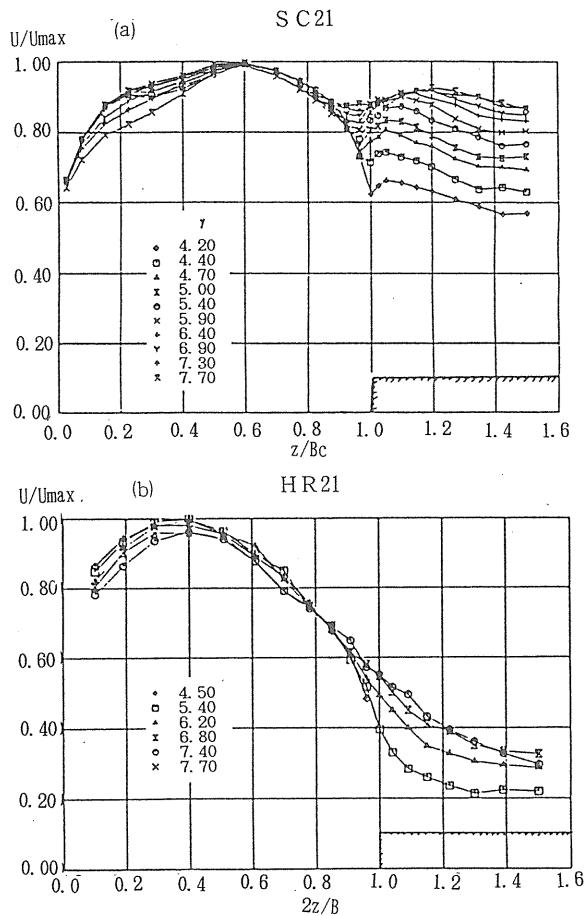


図 1-1-1 複断面開水路の平均流速横断分布 (a)高水敷滑面、(b)高水敷粗面

2次流の基本的構造は高水敷粗面の場合も滑面の場合とはほぼ同様であるが、高水敷粗度の影響により、斜め上昇流の上昇角度はより小さくなり、高水敷から低水路へ流れ出すような流れとなる。低水路渦は滑面の場合に比べて横断方向に発達し対岸側壁側へ及んでおり、最大流速位置の移動と相関がある（図 1-1-2）。このような2次流構造の変化は、高水敷粗度により乱れの非等方向の効果が変化したためと考えられる。粗面の場合は2次流があるにもかかわらず、平均主流速の横断分布における極小値はほとんど認められない。

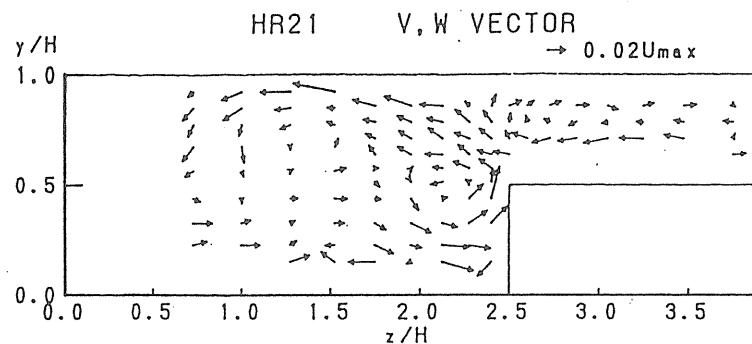


図 1-1-2 複断面開水路の2次流ベクトル図（高水敷粗面）

乱れ特性については、高水敷粗度が増大するにつれて低水路の混合領域の乱れ強度および横断方向レイノルズ応力の値が大きくなるのが明かである。粗面の低速な高水敷上の流れとの相互作用が低水路の乱れを著しく増大させることがわかる。その結果、高水敷粗度が大きい場合は、 h/H が比較的大きい場合でも強い見かけのせん断応力が働き、この抵抗が無視できないようになるといえる。

壁面せん断応力について、高水敷粗面の場合に特徴的なことは高水敷上の接合部近くで鋭いピークをとることである（図1-1-3(b)）。このピークの値は平均せん断応力の2から2.5倍程度にまで達する。この分布形状は水深比によらずほぼ同様である。 h/H が大きくなるほど低水路の平均せん断応力に対するピークの値は大きくなる。このことは高水敷の肩付近では通常予想される平均的な値より非常に大きなせん断応力が働くことを意味し、複断面水路の低水護岸等の設置に当たっては注意を要する。この特徴的な高水敷肩付近の底面せん断応力の増加は、横断方向の運動量輸送の結果と考えられる。このような流れの横断方向分布特性は水深平均された運動方程式の数値計算によって的確に予測できることを示した（図1-1-3）。この結果は、高水敷の安定化工事に際して注意すべき重要な点を指摘している。今後は、このようなせん断応力や乱れの増大範囲や大きさ等について数値シミュレーションを広範な実験結果や現地計測結果に適用し、定量的な指針を提出したいと考えている。

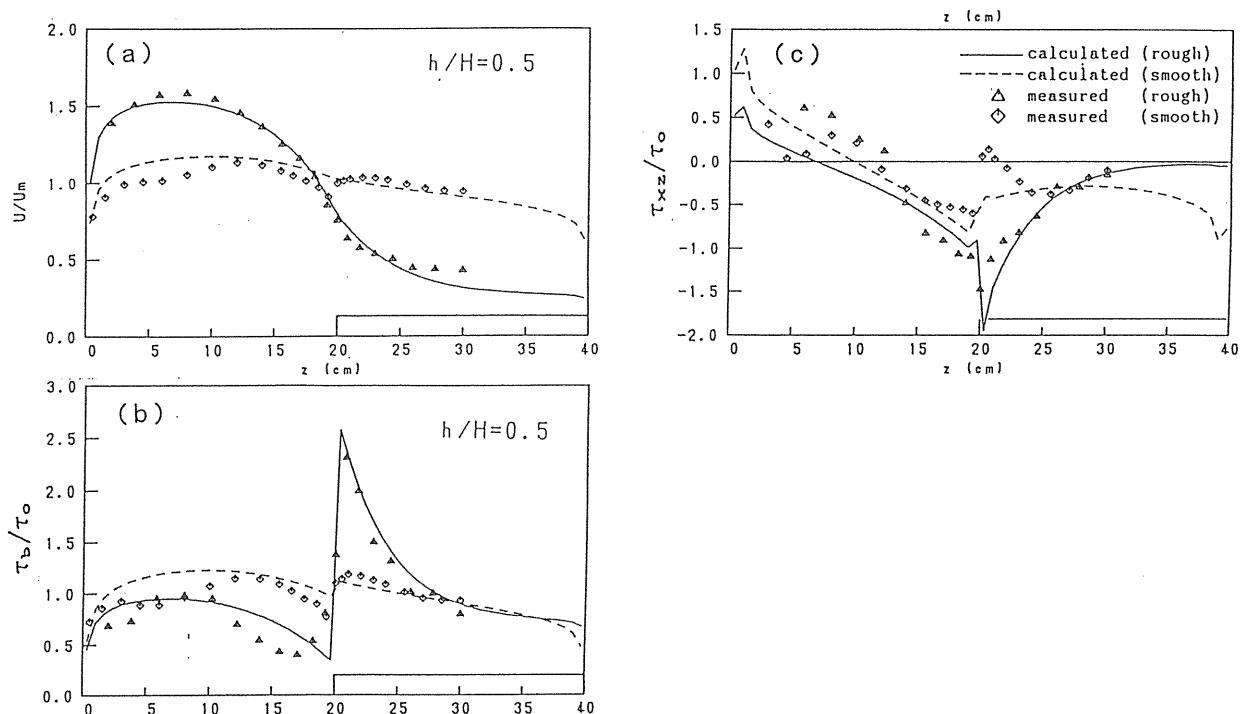


図1-1-3 横断方向運動量輸送の数値計算結果と実験値の比較

(a)水深平均流速、(b)底面せん断応力、(c)横断方向せん断応力

1-2 高水敷上の樹木群の影響

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相互作用はますます増大することが予想される。河道内の樹木群の合成粗度係数は水深の増加とともに増大し、水路中央におかれた樹木群はその幅が小さくても大きな抵抗を与えること、側壁近傍の樹木群は側壁近くの流速を増大させることなどがすでに明らかにされ、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。高水敷の樹木群を想定した研究もいくつかみられるが、本研究では、樹木群の配置が重要な設計項目となると考え、高水敷上に樹木群を設置し、その横断面内の設置幅と配列を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。また、水深平均された運動方程式の数値計算からこれら樹木群の配列の影響を評価した。

実験水路の両岸に長方形断面の高水敷を設置し対称複断面とし、樹木群模型として釘を用い横断方向2列、4列および6列（高水敷全幅に対応）の3通りの樹木群幅を設定し、横断方向の設置場所を種々変化させた（図1-2-1）。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。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。

水位・流量曲線の変化については、基本的に樹木列数の増大とともに水位が増し、抵抗が増大しているが、同じ列数でもその配列によって水位上昇量が異なる。すなわち、2列の場合は高水敷の外側が最も小さく、中央、内側の順に大きくなるが、後者の2つの配列では大きな差はない（図1-2-2）。4列の場合にもやはり内側の配列の方が外側より大きくなる。したがって、樹木群が低水路寄りにある場合はその両側に強いせん断層が形成され、運動量交換による抵抗が増大したものと考えられる。

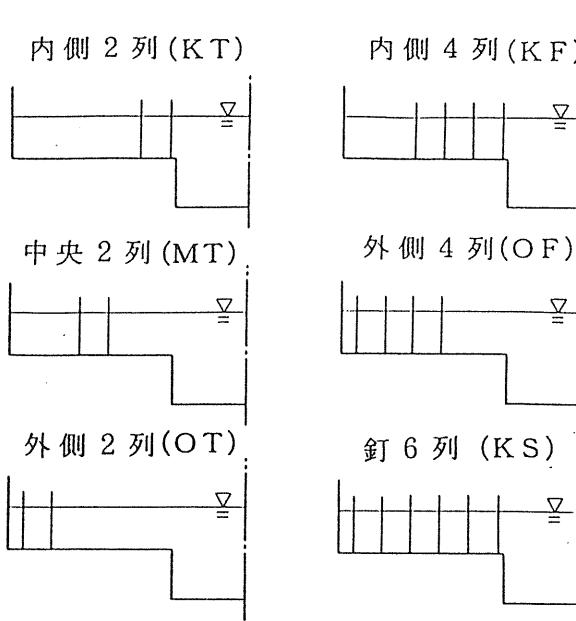


図1-2-1 高水敷樹木群模型配置図

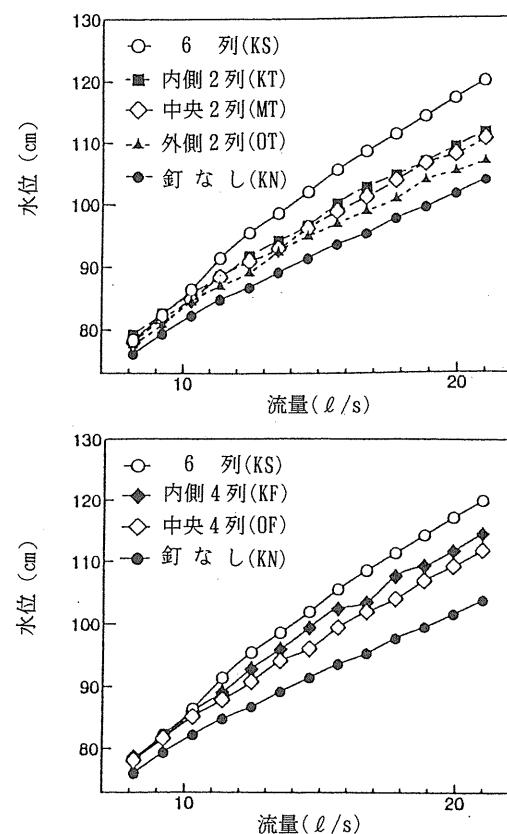


図1-2-2 水位流量曲線（樹木列の配置による影響）

複断面水路に特徴的な2次流による運動量輸送は、高水敷の内側に樹木群がある場合はほとんど認められなくなるが、外側寄りにある場合には高水敷エッジからの低水路側への輸送が水平に近づく傾向にある。樹木群内には水面側に高速流の入り込みが認められ、樹木群内では高水敷上水深の半水深から水面にかけて急加速している(図1-2-3)。このことは水面近くで樹木群内への高速流体の輸送が活発であることを意味し、強い2次流の存在が示唆されるものである。

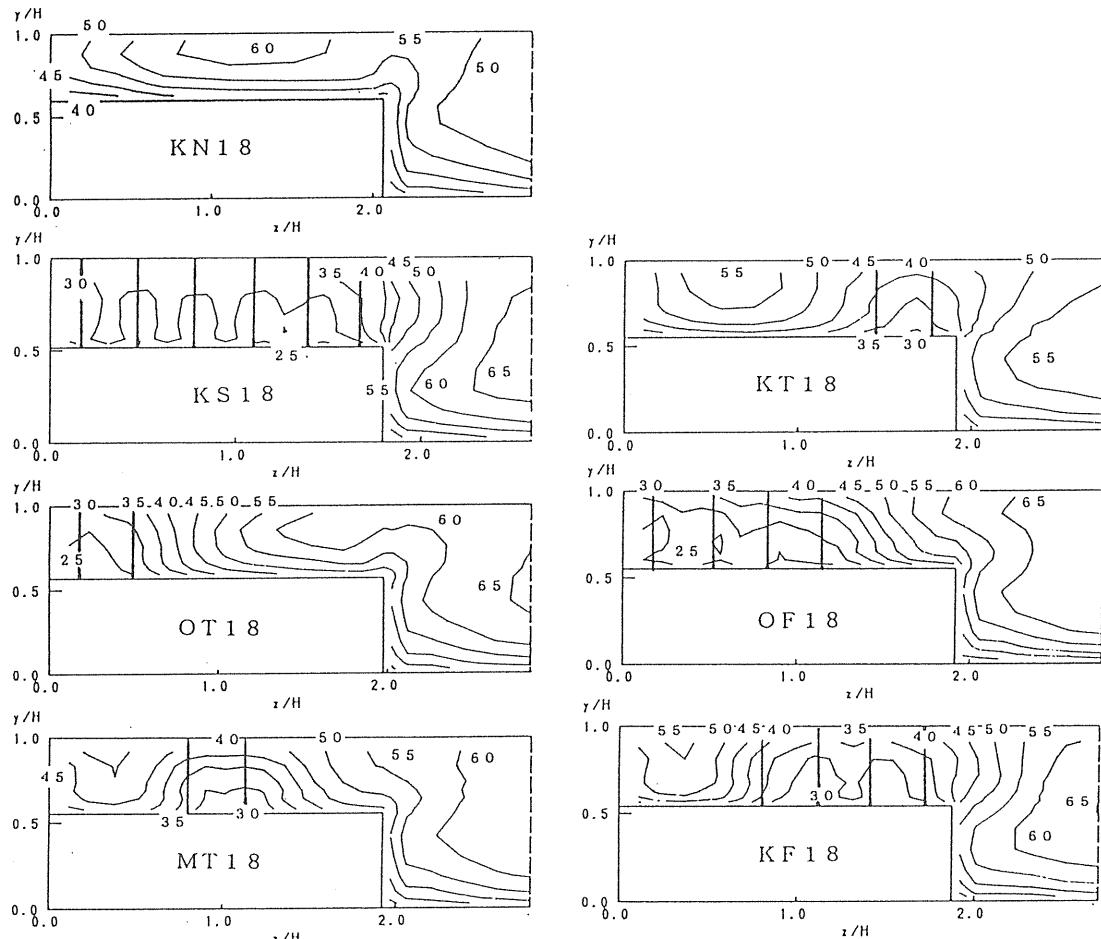


図1-2-3 主流速コンター（樹木列の配置による影響）

底面せん断応力の横断分布については、樹木群がある場合、低水路内の値は内側2列の場合を除いてかなり増大している(図1-2-4)。高水敷上では、樹木群のない領域での増大が顕著で、樹木群なしの場合のせん断応力の値を上回る箇所がある。特に内側に樹木群をおいた場合の高水敷側壁近傍の増大は大きくこのような配列においては十分な注意が必要である。

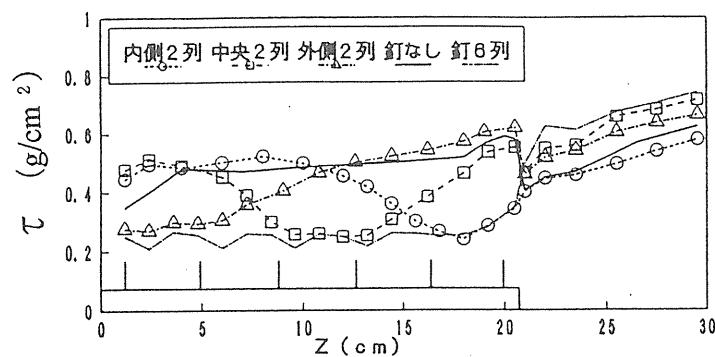


図1-2-4 底面せん断応力分布（樹木列の配置による影響）

水深平均されたレイノルズ方程式を渦動粘性モデルを用いて数値計算を行った。定常流の流れ方向のレイノルズ方程式を河床から水面まで積分し、河床高さ、粗度、樹木による形状抵抗が横断方向に変化する流れの基礎方程式を導き、これをコントロールボリューム法によって離散化した。樹木群の形状抵抗については、釘1本あたりに働く抗力を考慮してコントロールボリュームに働く力のつり合いから、単位面積あたりの抗力を与えた。水深平均流速の計算結果は樹木群内部において実験値とおおむね一致しており、形状抵抗の評価は妥当であったといえる(図1-2-5)。また、樹木群の位置の変化による全体の流速分布の変化がよく再現された。しかし、低水路及び高水敷肩付近にかけての計算値が過大となり、高水敷側壁側が過小となる傾向が認められ、この原因としては、樹木群内部や低水路における3次元的流れ構造の影響によるマニシング式の適用性の問題があるものと考えられる。底面せん断応力分布は、樹木群内部で計算値が小さくなるが、接合部や横断分布の傾向はうまく再現され、樹木群と堤防あるいは低水路に挟まれた領域のせん断応力が、樹木群なしの値より大きくなるという注目すべき特徴を予測できた(図1-2-6)。

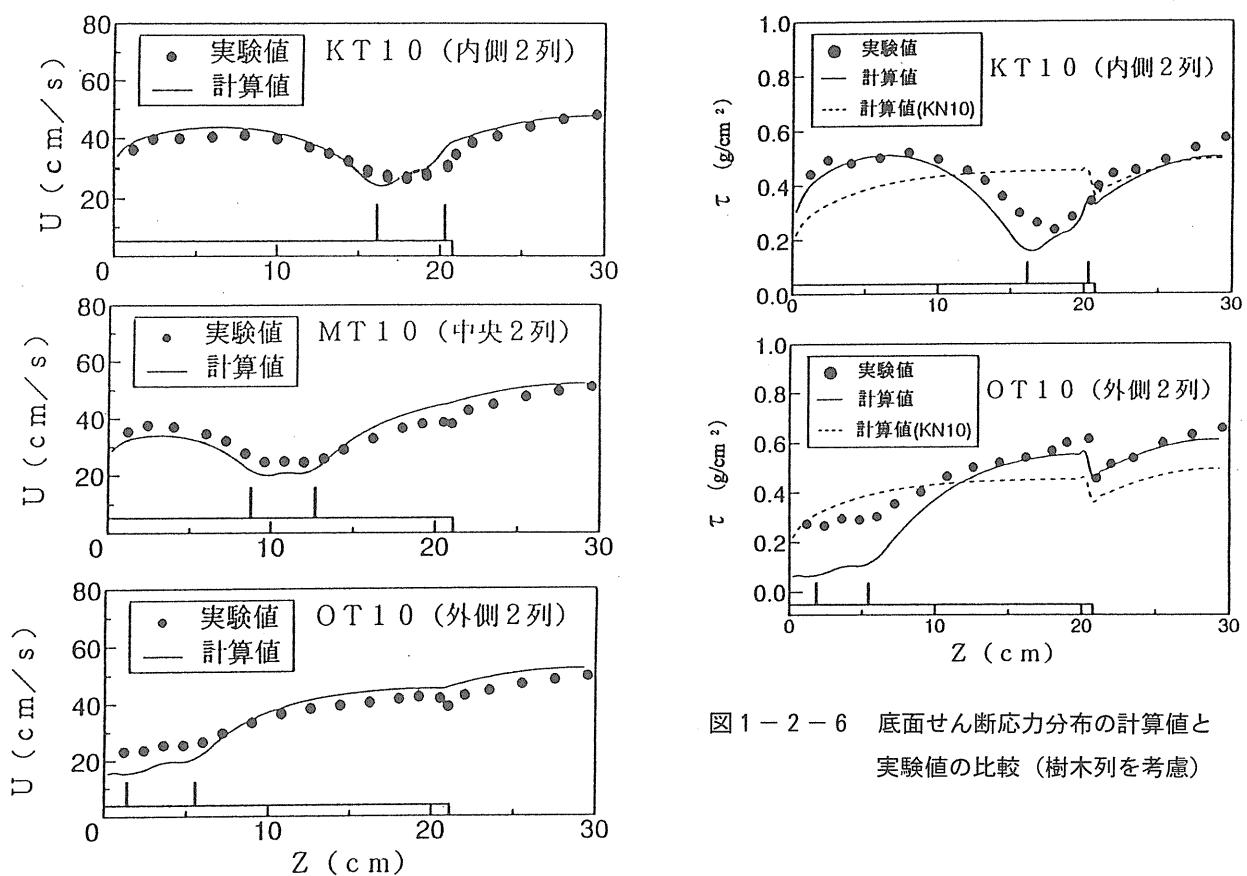


図1-2-5 水深平均流速横断分布の計算値と実験値の比較(樹木列を考慮)

図1-2-6 底面せん断応力分布の計算値と実験値の比較(樹木列を考慮)

樹木群密度が同じでもその設置場所の違いにより、抵抗および平均流速分布構造が変化した。特に、樹木群が低水路側に近い方が抵抗が大きくなり、この場合は高水敷側壁側に通常より高速な流れが発生する点が指摘された。また、樹木群内の流速分布は水面近くが加速された特異な分布をしており、2次流構造の変化が示唆されたが、この点については今後検討する必要がある。さらに、横断方向運動量輸送式の数値計算により、このような樹木群を有する複断面流れの予測がある程度可能であることが示された。渦動粘性係数については他の比較的大きな規模の実験ケースとの比較を行い検討する必要がある。

また、より透過度が小さい樹木の葉が茂った状態を想定して同様の実験を行った。樹木の葉を模擬するため、網目を持つ円筒を用いた。内側2列の場合が最も水位が大きくなる点が注目すべきである(図1-2-7)。これは高水敷全幅にわたる樹木群よりも大きくなつた。この原因是、内側2列の場合に周期的な大規模な混合によるものと考えられる。外側の2例と4例ではほとんど水位に変化がみられない。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、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。外側に樹木がある場合は、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、低水路内が加速されている。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(図1-2-8)。また、この場合、乱れ強度が樹木帯の両側で非常に大きくなる。このピーク値は6列の境界部の値の約2倍に達する。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粗度として働く。ただし、樹木帯が低水路側存在する場合は大規模渦運動により著しく乱れが強くなり抵抗が増大するといえ、注意が必要である。

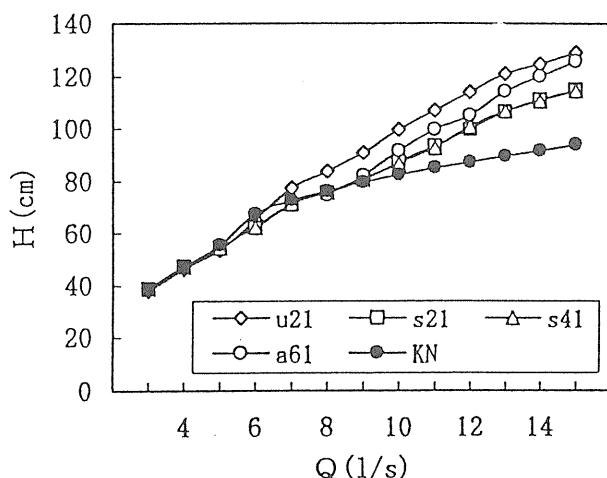


図1-2-7 水位流量曲線(樹木群透過度が小さいケース)

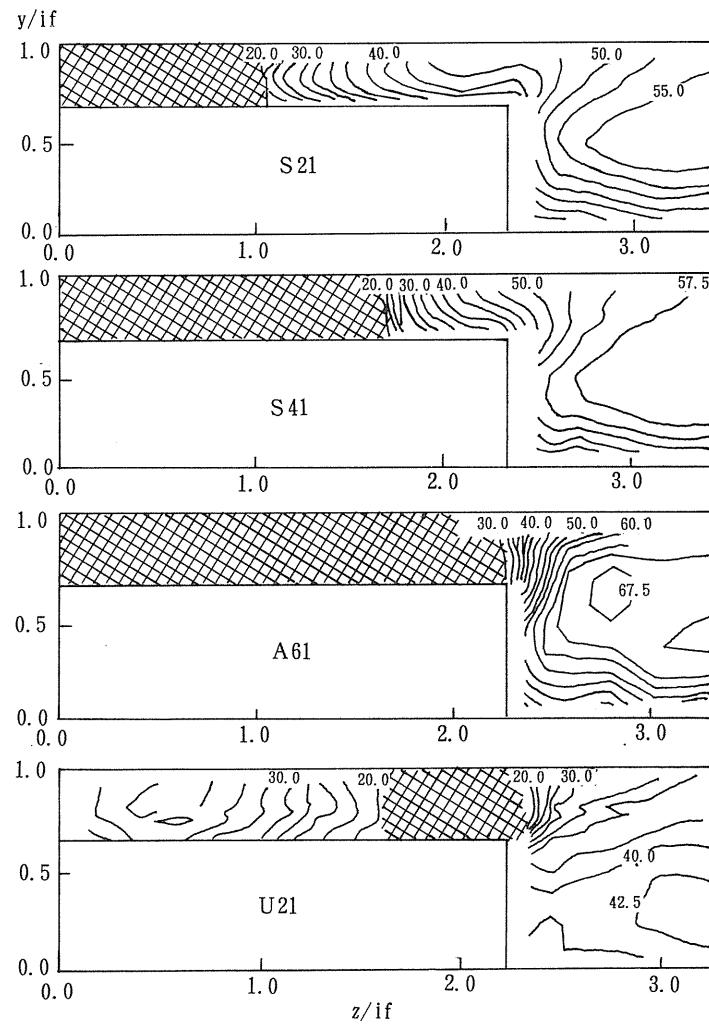


図1-2-8 主流速コンター（樹木群透過度が小さいケース）

(2) 高水敷を越流する洪水流の非定常水理特性

河川の洪水流の流れ構造の解明は、河道の安定化や治水計画の策定のために重要な課題であるが、従来は洪水ピーク流量に相当する流量の定常流における実験、解析が主であった。また、治水施設は水位調節や河岸、河床の保護機能を果たすだけでなく、環境保全や親水性の考慮が必要とされ、これらが洪水時に水位の上昇や新たな河道災害の発生などの悪影響を及ぼさないかという検討が加えられなければならない。単純な長方形断面における不定流の流れ構造の研究がいくつか行われ、増水期・減水期の異なる乱流構造が明らかにされつつある。河道災害を引き起こす土砂の洗掘や堆積は構造物周辺で活発であり、ここでの不定流の断面の局所的領域に対する応答特性が最も重要な鍵を握っていると考えられ、このような局所的な流れが卓越する場における不定流の効果は今後検討すべき重要な課題であると考えられる。そこで、本研究ではまず複断面水路を洪水波が通過するときの流れの特性について実験的に検討したものである。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といわれるが、複断面水路では水深の明らかに異なる区間を洪水波がどのように伝播するのかを、特に流速の時間変化過程及び空間分布構造とせん断応力の時間変化過程に着目して検討した。

実験は片側に台形の高水敷を設置した複断面水路および両側に長方形断面の高水敷を設置した対称複断面水路において行われた。インバーターモーターと電磁流量計を組み合わせた流量制御システムを用い、コンピュータで所定のハイドログラフを与えた。流速は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て計測した。洪水の各時間帯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。主流速は水深の立ち上がり点より前4秒間の区間平均値を定常時の値とし、その点から4秒間ごとの区間平均値の時間的変化について検討した。

複断面の場合、低水路のピーク到達時間が非常に速くなることがわかった(図2-1)。また、減水期においては、水深は流量が減少しても高い水深を維持しているため、流速はピーク後しばらくしてから定常時の流速よりも小さくなっている。高水敷上の流速のピークは水深のピークの少し前に現れれば単断面のピーク時間と一致する。複断面の水深-平均流速曲線をみると、低水路においては非常に大きなループを描き、単断面に比べて非定常性が著しく大きくなる(図2-2)。高水敷上では低水路に比べて非定常性は小さい。低水路における強い非定常性の影響が全流量の非定常性となって現れている。

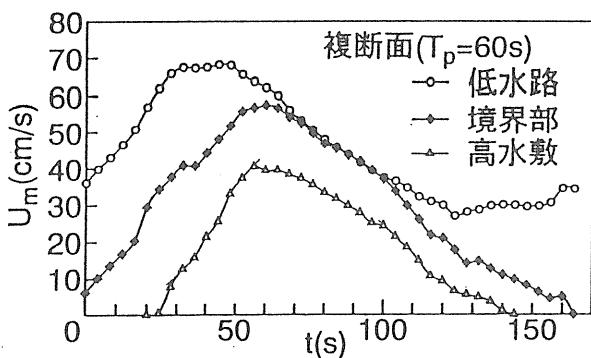


図2-1 複断面開水路非定常流の主流速の時間変化特性

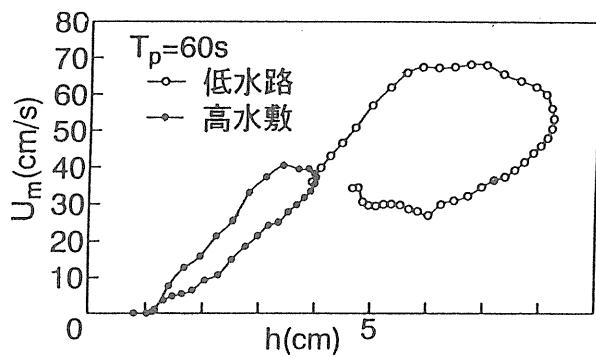


図2-2 複断面開水路非定常流の水深・主流速曲線

増水期には低水路の流速が定常時よりもかなり大きくなり、高水敷に向かって急激に減少し、境界面で非常に大きな流速勾配が生じる。ピーク時の流れ構造を定常流のものと比較すると、低水路の構造は比較的類似しているが、高水敷上の流速が定常時にかなり遅い。一方、減水期では、増水期よりも流速はかなり小さいが、分布形状は定常時の場合に近づいている。このように、複雑な断面を洪水が通過する場合は、非定常性の影響が部分的に強く現れる可能性があるといえる。

底面せん断応力分布について注目すべき点は、非定常性が強い場合には増水期にピーク流量を定常流として流したときの底面せん断応力よりも大きな値が発生することであり、低水路の護岸の設計に際しては注意が必要である(図2-3)。長方形断面においても増水期に底面せん断応力が増大することが知られているが、複断面では低水路でこの傾向がさらに強くなり、河床変動や浮遊砂輸送が増水期に活発化することの一因になっているものと考えられる。また、低水路・高水敷接合部の角部では、高水敷に流れが乗り上げた直後から大きな乱れを示している(図2-4)。これは、等流速線の時間変化のところで述べたように、このときに横断方向のせん断が定常時にも増して最も大きくなり、乱れ発生が大

きくなったためと考えられる。ただし、非定常性が比較的弱い場合の対称複断面水路では、増水期からピーク時にかけて低水路の高速流と高水敷の低速流の運動量交換が定常流の場合よりも発達し、また2次流の効果も大きくなり、ピーク時に低水路流速がかなり遅くなる点が指摘された（図2-5）。

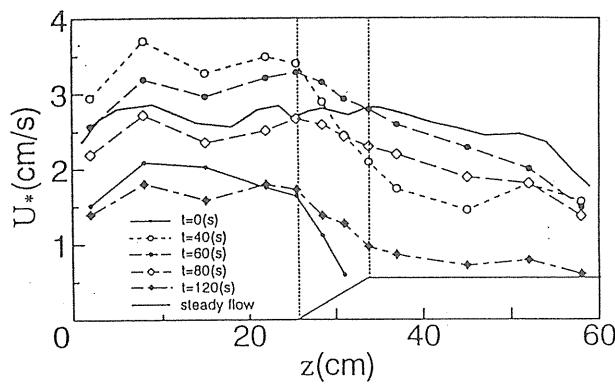


図2-3 摩擦速度横断分布の時間変化

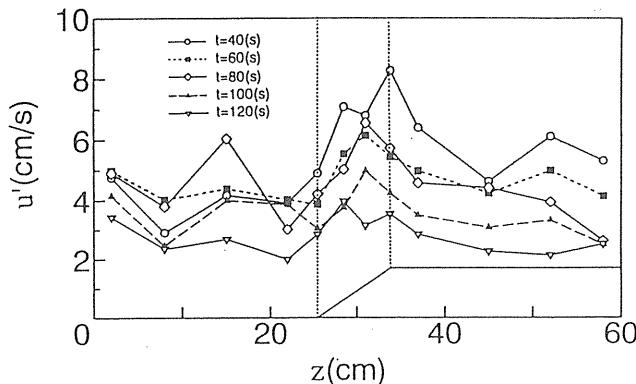


図2-4 乱れ強度横断分布の時間変化

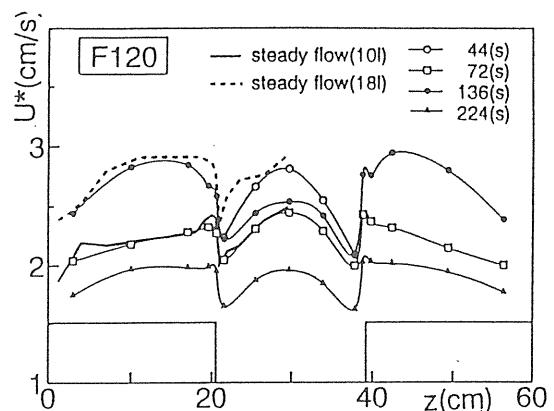
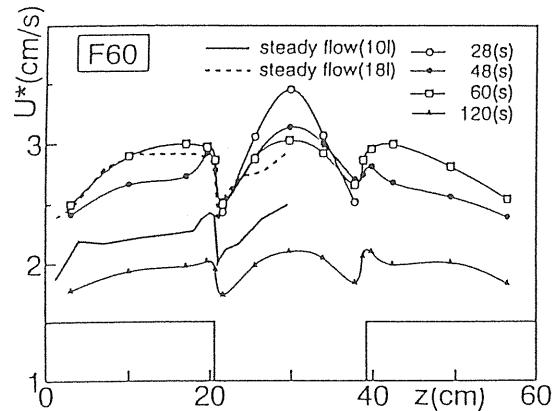


図2-5 摩擦速度横断分布の時間変化

(F60: ピーク時間60s、F120: ピーク時間120s)

複断面水路を洪水波が通過するとき、単断面とは異なるいくつかの特性が明かとなった。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ようになる。流入流量のピーク時間をかなり長くしても低水路でこの非定常性が残り、全流量のハイドログラフもループを描く。高水敷では低水路に比べて非定常性は弱く、ピーク時間が長くなると疑似的な定常状態に近づく。複断面の3次元流れ構造から増水期には低水路高水敷の境界部で流速差が著しくなり、強いせん断が発生し乱れが大きくなることがわかった。ただし、非定常性が比較的弱い場合の対称複断面水路では、増水期からピーク時にかけて低水路の高速流と高水敷の低速流の運動量交換が定常流の場合よりも発達し、また2次流の効果も大きくなり、ピーク時に低水路流速がかなり遅くなる点が指摘された。

また、実際には高水敷の粗度は低水路に比べて大きく、低水路・高水敷の速度差が大きい場合の検討が必要である。そこで本研究では植生が繁茂した複断面河川の洪水流を想定して、樹木群が高水敷に存在する場合についての定常流実験と同じ条件で非定常流を発生させ、流れ構造を検討した。実験は1-2に示したのと同じ境界条件で行われ、上述の流量制御システムを用い、非定常流を発生させた。水深のピーク到達時間は、いずれのケースもほとんど同じであった。ピーク水深は定常流の場合と同様に樹木列の増加とともに増大する。増水過程では樹木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。水深平均流速の時間変化については、低水路の流速はいずれのケースも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始める時間に対応し、低水路内の急激な加速が高水敷への流量の分配によっていったん減少することを意味している(図2-6)。この場合高水敷低速流と低水路高速流との流速差による運動量交換がいっそう低水路流速を減少させるものと考えられる。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。樹木列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る。内側2列では樹木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(図2-7)。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。

複断面水路の高水敷に樹木群がある場合、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。

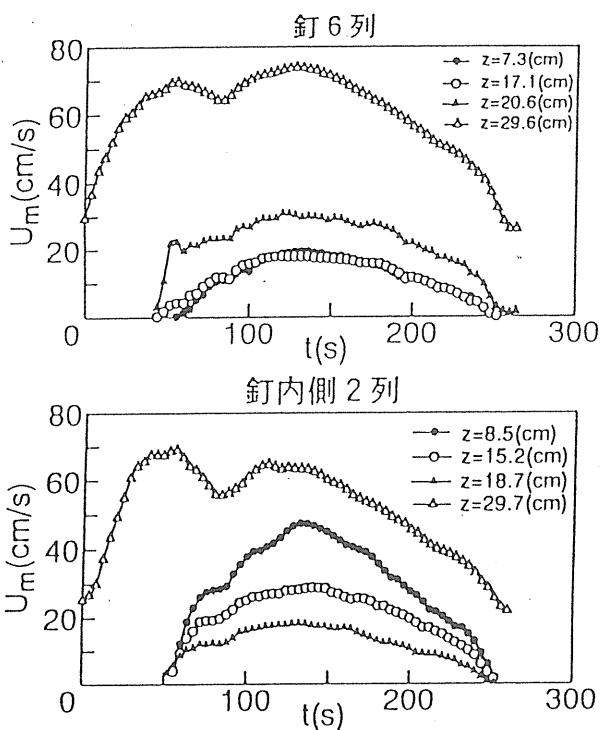


図2-6 水深平均流速の時間変化特性
(樹木群配置の影響)

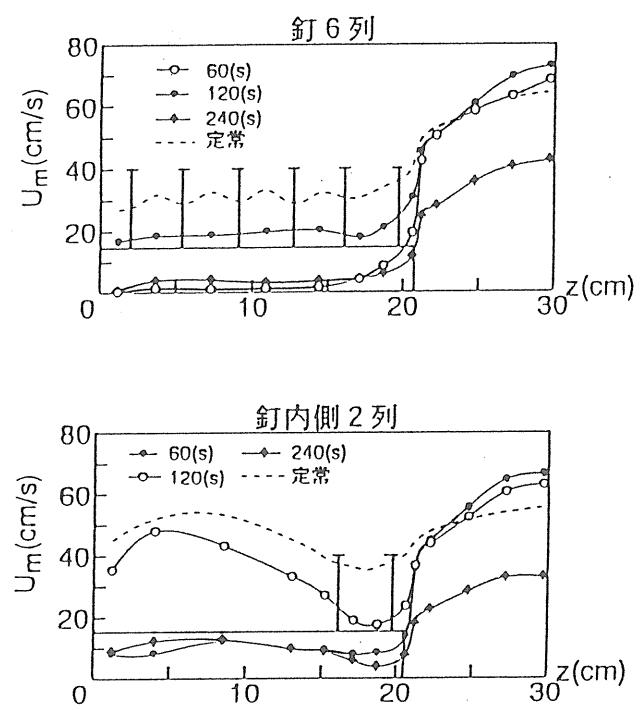


図2-7 水深平均流速横断分布の時間変化
(樹木群配置の影響)

(3) 河道横断および縦断構造物周辺の流れ構造

3-1 水制周辺の流れ構造とその数値計算

近年、護岸の普及に伴い水制の施工例が減少していたが、水制は治水上の目的だけでなく、護岸による単調な河川景観を改善でき、環境面でも平水時に多様な流れ場を作る方法として見直されつつあり、環境に配慮した水制というものが考えられるようになってきた。しかし、水制まわりの流れ構造は非常に複雑で不明な点が多く、一般的な経験式も得られていない。水制の利用を積極的に図っていくためには、水制背後の流れの特性と局所洗掘特性を明らかにし、このような流れの計算法を開発することが必要である。本研究では、水制に関する数多くの設計項目の中で、特に主流に対する水制の設置角度に着目して実験を行い、その流れに及ぼす影響を検討した。

実験は主流方向に対して $\theta = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の3ケースについて水制の流水断面への投影幅 L と水路幅の比 L/B が $1/2$ となるように水制模型を設置した。流速は2成分電磁流速計を用いて流下方向成分 u と横断方向成分 v を計測した。

水制の前後での水深の流下方向変化は水制が下流側へ向いた 45° のケースが最も小さく、 $90^\circ, 135^\circ$ と上流側へ向くにつれて変化が大きくなるが、水制下流の増加過程はよく類似している(図3-1-1)。各ケースの流速ベクトルを見ると、底面近くと水面近くで水制背後の剥離域の流れ構造に大きな違いがみられた。すなわち、底面近くでは水制背後への回り込む流れが現れているのに対し、水面近くでは水制背後で水制の根から水制先端の方へ向かう横断方向の流れが現れしており、主流はほぼ直進している。これは水制先端でせん断不安定によって発生する剥離水平渦に加えて水深規模の大規模な縦渦構造(2次流)があることを意味している。水制の内側の側壁に沿って上昇した流れが水面で水制先端へ向かうことによるものと考えられる。この構造は染料による可視化実験でも明瞭に認められた。この2次流の水制先端付近での下降流が水制先端の局所洗掘に関係し、底面で水制内側に向かう流れが水制背後の土砂堆積に関係するものと思われる。

次に角度の違いによる影響については、底面近傍の再付着点距離を水制の根元からの距離で比べると、明確ではないが角度が上流に向くにつれて長くなる傾向にある。横断方向のレイノルズ応力は、水制背後で剥離域外縁に沿って大きな値を示し、水面近くの方が広い範囲で大きな値をとる。

次に、平均的な流れ構造を予測することを目的として、水深平均の2次元レイノルズ方程式を数値計算して実験値と比較検討した。傾斜した水制をカーティシャン座標において取り込み計算する方法を開発し、乱流モデルとして、K-εモデルとゼロ方程式モデルを用いて計算を行った。基礎式はスタッガード格子を用いてコントロールボリューム法で離散化され、ADI法によって解かれた。圧力補正式としてSIMPLEアルゴリズムを採用した。水制内部の領域は拡散係数 Γ に大きな数(1.0E-25)を与え、傾斜水制上下流の格子は直角三角形となり、スカラー変数はその重心位置に流速は直角の辺上に配置した。計算結果はあくまで水深平均値であり、主流の平均的構造について比較する。水制下流の水深変化および流速分布は基本的によく再現されている(図3-1-2)。しかし、実験からわかるように水制まわり

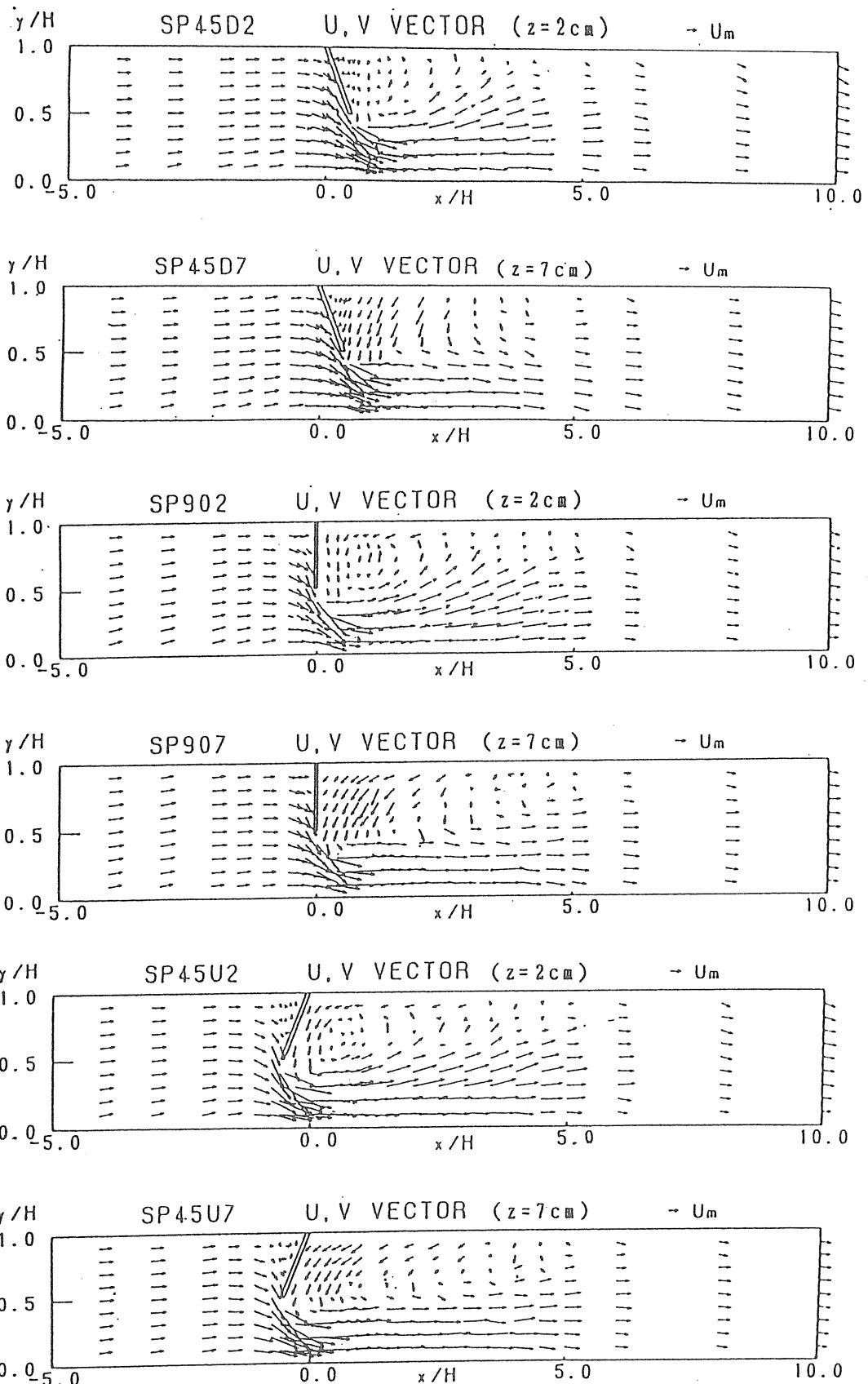


図 3-1-1 各種水制周辺の流速ベクトル図

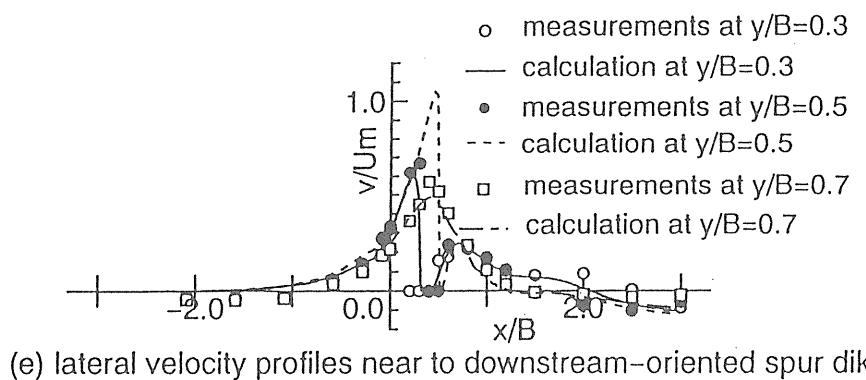
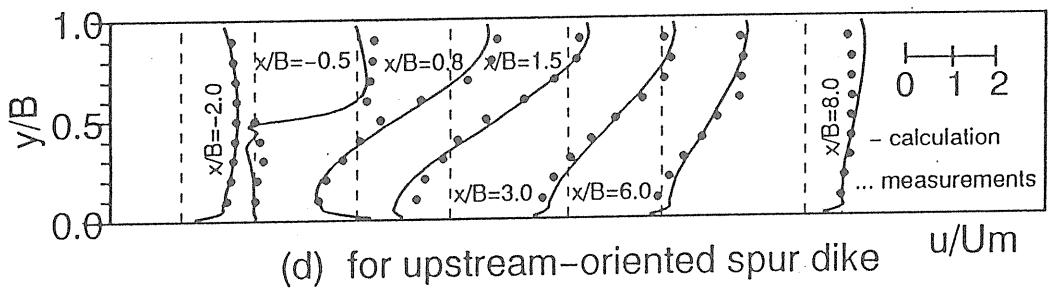
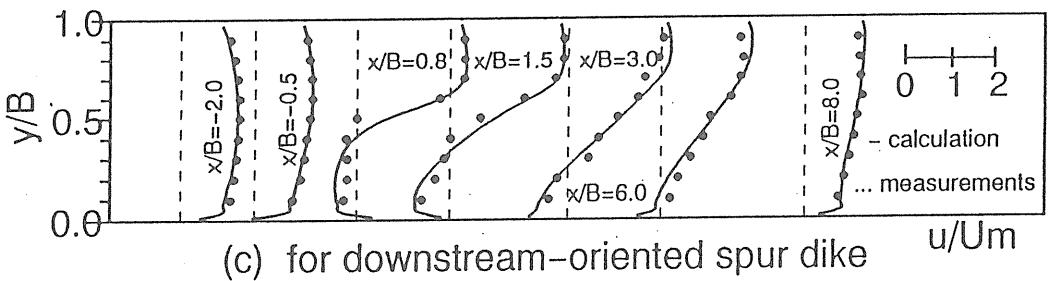
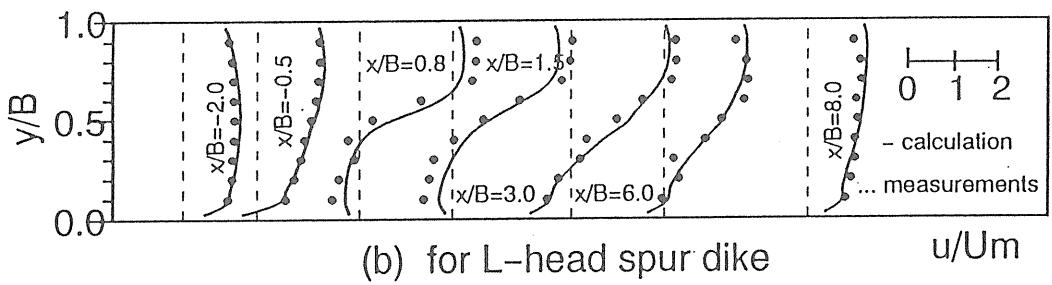
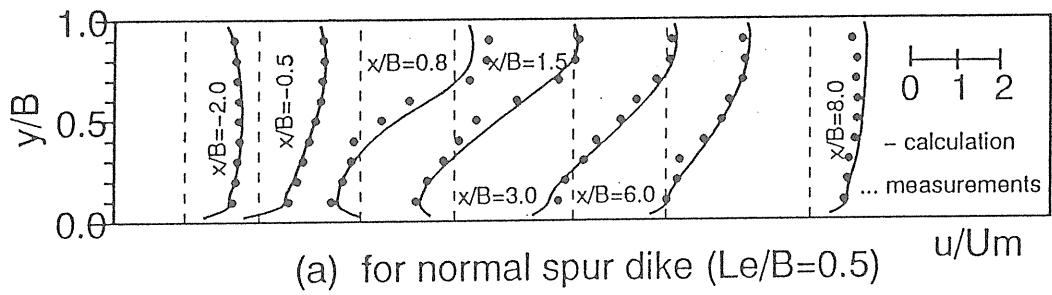


図 3－1－2 水制周辺流れの計算値と実測値の比較

の流れは非定常な3次元的現象であり、局所的な洗掘や堆積を考える上では本研究で行った数値計算では不十分であり、今後は何らかの3次元計算が必要となろう。

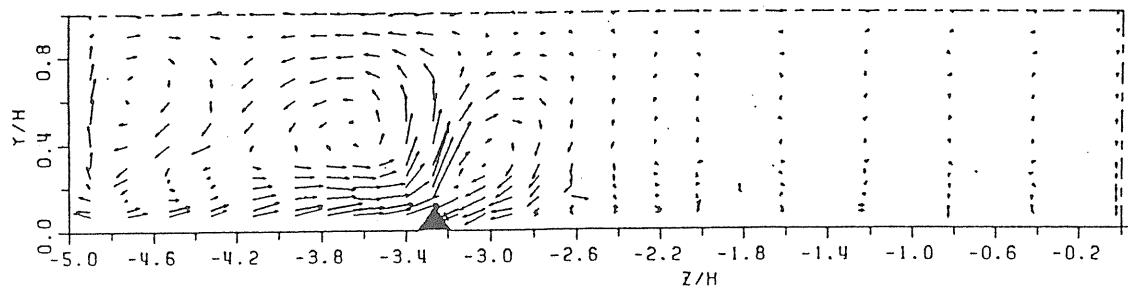
河川の水制は平水時に多様な流れ場を作る方法として環境面における利用が図られつつある。この場合、ケレップ水制のような高さの低い、洪水時には越流するような水制が望ましいと思われる。水制まわりの流れ構造は複雑で非越流時でも3次元的になることが示されているが、洪水時に越流するとさらに複雑な流れとなることが予想され、非越流時と越流時における流れ構造の違いを明らかにする必要がある。本研究では、流れが水制を越流する場合の流れ構造を実験的に検討した。

水制を越流する流れは、横断方向の構造としての水制の作用とともに、水制側の領域に対して鉛直方向の構造としての桟粗度のような働きをし、乱れの増大をもたらす。また、水制背後の剥離域は非越流型に比べて小さくなり、水制近傍では全幅にわたってむしろ鉛直方向流速が大きな値をとり、2次流の存在を示唆している。ここで示したケースは水深の変化がほとんどない場合であるが、水深が変化する場合はさらに複雑な流れとなることが予想される。

3-2 強制2次流による局所的せん断応力の制御

流れに平行な河床の突起や凹凸及び粗度の不均一が2次流を誘起し、平均流速及び底面せん断応力を局所的に変化させることが知られている。この特性を利用し、低水路護岸付近の局所洗掘防止工法への応用が考えられる。本研究では、長方形空気管路流のコーナー付近に三角形断面の桟を流れに平行に設置し、乱れに起因する2次流を強制的に発生させ、流れの制御を試みた。また、開水路流において同様の実験を行い、この突起の形状や大きさおよび水深と生成される2次流の強度や、横断方向の主流及びせん断応力の変動強さ等を検討した。その結果、相対的に小さな横断面積しか持たない突起でも、強い2次流が生成されこれが流れの3次元構造を大きく変化させることが明かとなった(図3-2-1、3-2-2)。これにともない、底面せん断応力の横断分布は周期的な変動を示し、横断方向レイノルズ応力は突起の周辺で急激な変化を示す。2次流の発生原因として考えられるレイノルズ垂直応力差からは、突起による2次流の生成がうまく説明できず、乱れエネルギーの発生率と逸散率の差が突起付近で特徴的な変化を示していることが示された。また、突起の大きさは2次流の強さの支配的パラメータではなく、水深が小さい場合には2次流のスケールが抑制されることが示された。

CASE-F



CASE-G

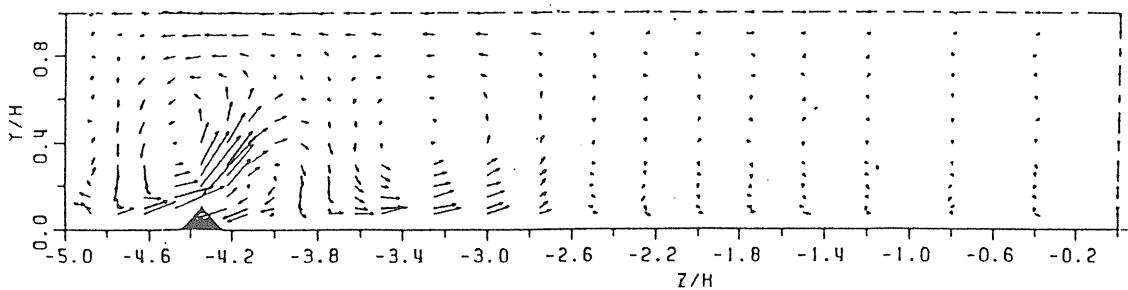


図3-2-1 構造突起による2次流のベクトル図

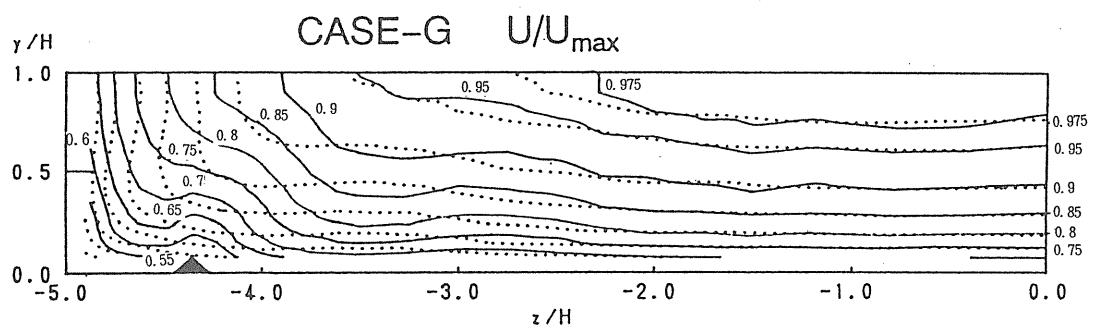
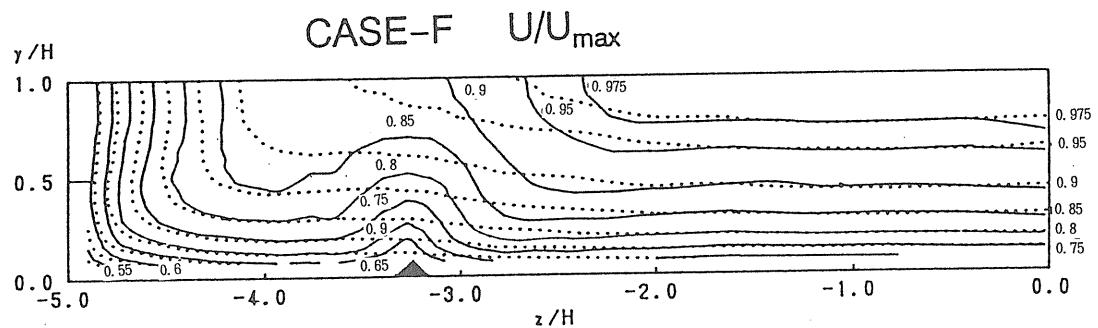


図3-2-2 主流速コンター（構造突起による2次流の影響）

(4) 河床条件急変開水路流の乱流モデルによる数値計算

4-1 河床粗度急変流の乱流モデルによる数値計算

河床の粗度が急変する開水路流れは、河川の護岸や護床工の設置区間や植生領域の前後でしばしばみられる。このような条件における流れ構造を明らかにすることは、河床や堤防の局所洗掘の機構や生態系に及ぼす流れの影響等を検討する際に重要となる。この問題は、境界層問題ではかなり以前から検討されており、多くの実験的、理論的研究がある。開水路流は、底面から水面までが発達した境界層となっており、またフルード数が大きい場合、水面形の変化が顕著となり、断面平均流速そのものが変化する複雑な流れとなる。滑面から粗面および粗面から滑面へと河床粗度が急変する開水路流れの乱流構造の応答特性における水工学上最も注目すべき結果として、滑面から粗面に急変するときの底面せん断応力のオーバーシュート現象がある。本研究は、こうした境界粗度急変部における乱流構造の変化過程を予測できる数値モデルの開発を目的として、まず標準型の $k-\varepsilon$ モデルを用いて数値計算を実行し、実験値との比較を行った。

粗面乱流の乱流モデルによる数値計算法としては、壁面境界条件として壁関数の対数則に粗度の影響を含めるだけで、あとは滑面と同様に扱うこととした。滑面乱流に関しては、壁面極近傍を考慮した低レイノルズ数モデルが開発されているが、粗面乱流に関しては、粗度の形状を忠実に境界として表現するか、そうでなければ壁関数に頼らざるを得ない。そこで本研究では、まず、最も一般的な標準型 $k-\varepsilon$ モデルを用いて粗度急変流の計算を行って実験値と比較し、問題点を検討することとした。このモデルに関しては、既に確立されており、モデル定数も標準値を用いた。開水路で問題となるのは水深の変化であるが、ここではまず、水深変化が微少なフルード数が 1 よりずっと小さい流れを対象とし、水深は変化せずに計算される圧力勾配の影響のみを考慮した。また、水面での境界条件は対象条件のみとし、特に乱れの減衰効果などは考慮していない。変数はスタッガード配置として有限体積法を用いて離散化し、SIMPLE アルゴリズムを採用し、移流項の離散化にはハイブリッド法を用いた。壁面の境界条件としては壁関数法を用い、粗度急変点で粗度長さスケールを変化させ、粗面条件として相当砂粒粗度を与えた。

滑面から粗面への遷移では、粗度急変点から底面近傍の流速が減少し始めるが、片対数グラフ上ではほぼ直線分布をし、流速分布は屈曲点を持つようになる。この屈曲点は内部境界層の外縁に当たり、これが流下方向に発達していく。一方、屈曲点より上では、ほぼ上流側滑面の勾配を維持しながら徐々に加速されている。計算値は、おおむね実験値と良好な一致を示すが、粗度急変直後の底面近傍の減速が実験値の方が大きい（図 4-1-1）。底面せん断応力については、計算値はいずれも粗度急変点直下流で鋭いピークを示し、下流側平衡値の 2 倍程度にまで達する。実験値もほぼ同程度のオーバーシュートを示すが、計算値は粗度急変に対する応答が実際より速いようであり、この点は壁面境界条件に問題があるものと思われる（図 4-1-2）。乱れ強度およびレイノルズ応力の計算値は、粗度急変直下流で底面近傍の値が直ちに応答して増大し、この乱れの増大領域は下流に行くに従って水面側へ発達してい

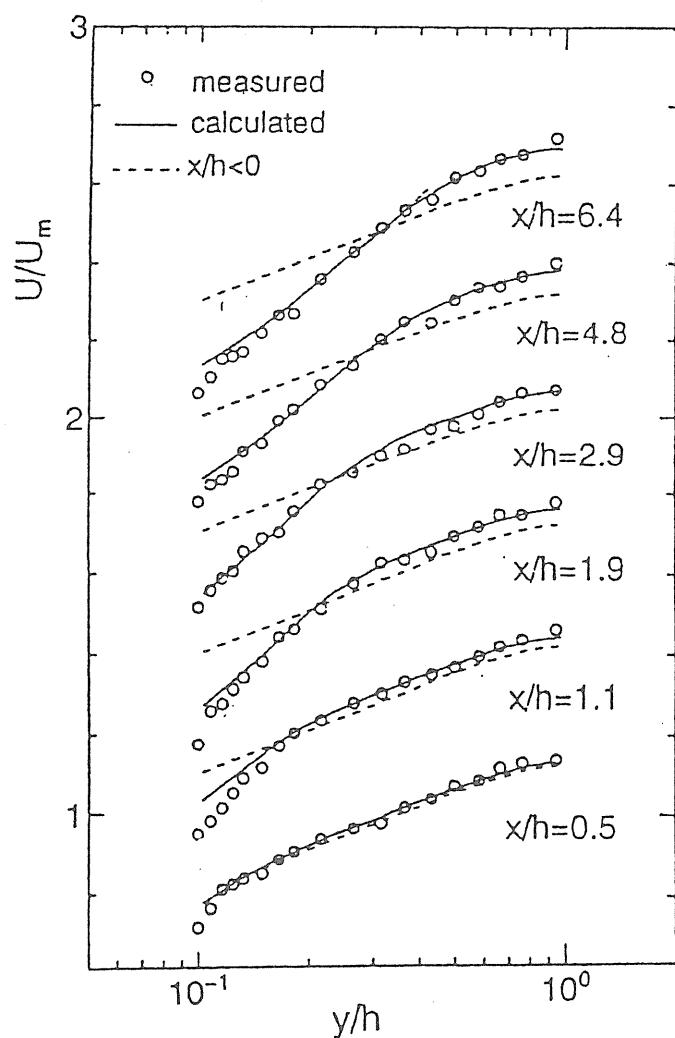


図 4-1-1 平均主流速分布の変化過程（滑面→粗面）

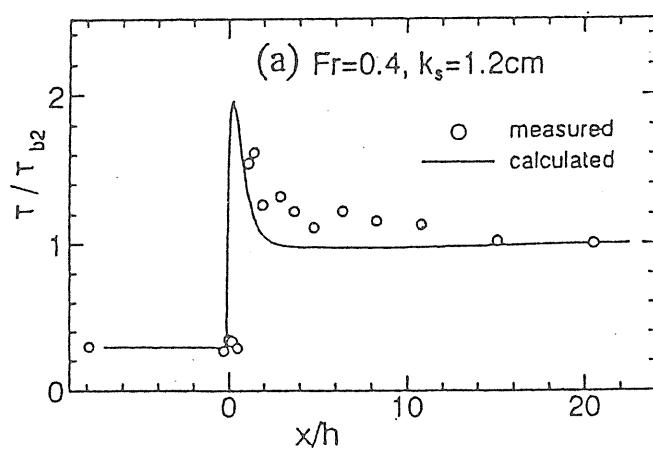


図 4-1-2 底面せん断応力の流下方向変化（滑面→粗面）

く。実験値では粗面ごく近傍の値が計測されていないこともあって、粗度急変直後のオーバーシュート現象がはっきり観察されないが、計算値には明確に現れる。計算によるその後の乱れの下流への発達過程はほぼ実験値を再現しているようである。

粗面から滑面への遷移では、粗度急変点から底面近傍の流速が増大し始め、滑→粗の時と同様に屈曲点が現れる。計算値は、おおむね実験値と一致しているが、実験値は下流へ流下しても分布にはらつきが見られ、上流側の大きな乱れの影響が履歴として残っているものと推測される（図4-1-3）。底面せん断応力の変化過程は、粗度急変直後、計算値は下流側平衡値より若干小さい緩やかな最小値を取った後、平衡値に達しているが、実験では最小値のあといったんピークを取っている点が異なる（図4-1-4）。粗面から滑面への遷移の場合は底面せん断応力に重大な変化は見られず、標準型の $k-\varepsilon$ モデルでも十分な予測が可能であると思われる。

滑面から粗面および粗面から滑面へと底面粗度が急変する開水路流を水深変化が小さい場合について $k-\varepsilon$ モデルによって計算し、実験値と比較した。計算結果は粗度急変による内部境界層の発達過程をおおむね再現できたが、滑面から粗面への遷移における粗度急変点近傍の構造及び底面せん断応力の応答において、実験との違いが認められた。この点については、粗面における壁関数法の適用に検討を要することが指摘された。粗面流れの計算法自体も検討すべき問題であろう。

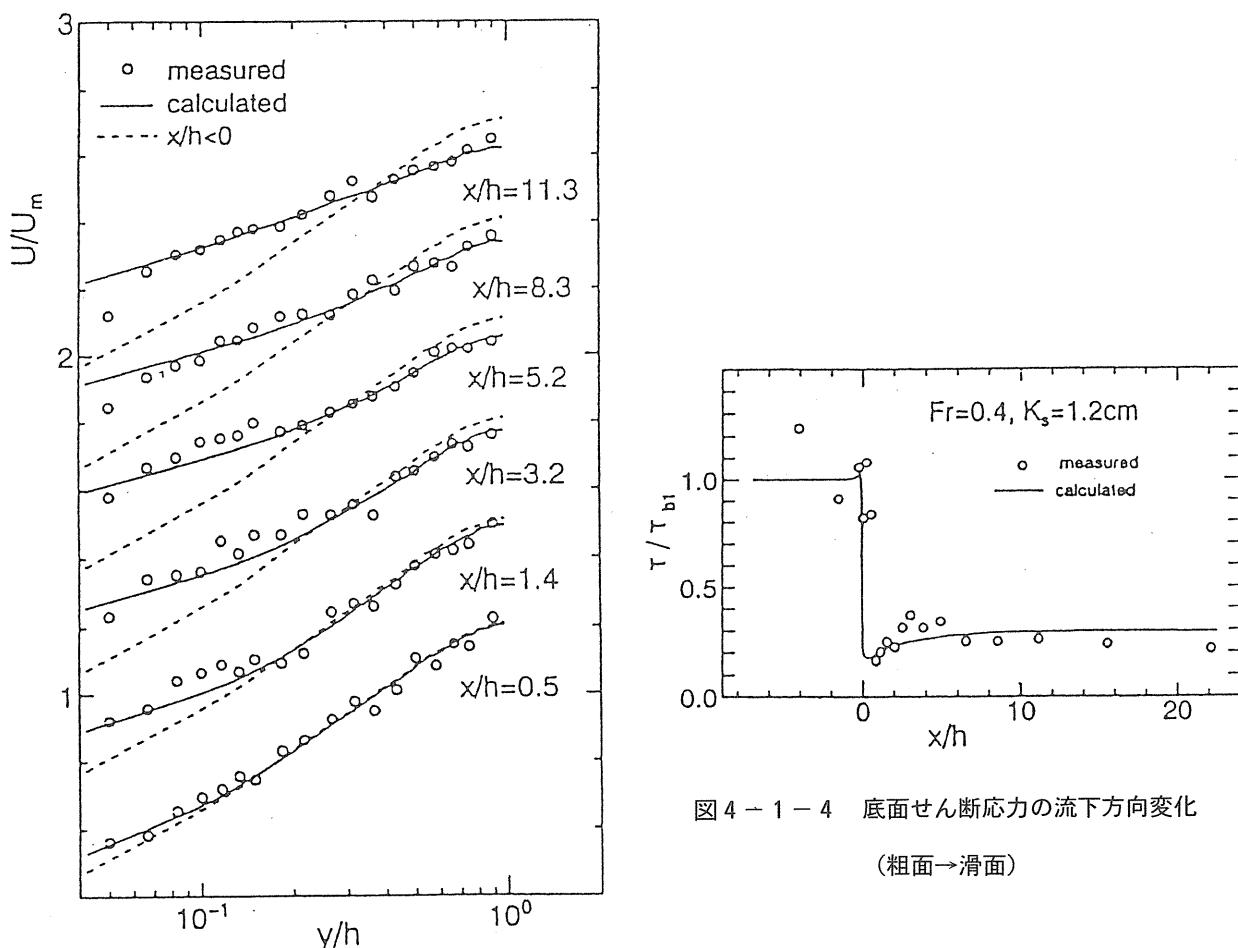


図4-1-3 平均主流速分布の変化過程（粗面→滑面）

図4-1-4 底面せん断応力の流下方向変化
(粗面→滑面)

4－2 水深変化を考慮した河床条件変化流の数値計算

河道計画において河床や堤防の局所洗掘や土砂堆積および生態系に及ぼす流れの影響等を検討するため、河床条件の急変を伴う流れの構造を明らかにすることがますます必要となってきている。いずれの河床状態急変部においても水面形の変化は避けられないことから、水面変化が流れの内部構造や底面せん断応力等に及ぼす影響を明らかにしなければならない。したがって、数値予測においてもこのような自由水面の変化を取り入れた開水路乱流の計算方法の確立が望まれる。本研究では、水面近傍の乱流構造自体に着目するのではなく、水面の圧力境界条件と水深の流下方向変化を取り入れることを第1条件とし、河床条件変化に応答して水面変化を伴う開水路定常流の内部構造を解析する方法を検討した。

本研究では乱流モデルとして標準型の $k - \epsilon$ モデルを用い、2次元の定常な開水路乱流場を解くこととした。水面の変化を考慮した計算方法として SIMPLE 法を拡張して水深を変化させる方法の適用性を検討した。まず、初期水深を与えて計算を行い、自由水面に接するコントロールボリューム圧力から水深補正值を計算し、この値によってその断面の水深を更新し、次にこの更新された水深に基づきセルの分類を行い新たな水面セルが定義され、計算された水面での圧力が 0 となるまで水深の補正を繰り返すというものである。

開水路の段落ち流れへの適用では、最も下流水深が大きいケースでは水面変化が小さく、初期水面形として一定水深を与えて水面形の予測が可能であった。水面形の計算値は若干の振動を示すが、ほぼ実験値の傾向を再現できた（図 4－2－1）。計算された段落ち近傍の流速ベクトル図からは、段落ち背後の後流域の再付着点距離がほぼ実験結果と一致した（図 4－2－2）。しかし、水深変化の大きいケースにおいては本モデルで水深自体の予測はできなかった。そこで、これら 2 ケースについては実測の水面形を初期条件として与えて計算を行った。水面形は実測で容易に計測できるので、このような計算が可能となればその水工学的意義は大きいものと考える。跳水を伴わない場合は段落ちの通過につれて水面が急降下し下流で射流となる流況が良く再現され、段落ち下流の剥離域の長さも実験結果とほぼ一致した（図 4－2－3）。跳水を伴う場合は主流が与えた水面形に沿って流れてしまい水面側が高速となり、内部の流速とは全く異なっている（図 4－2－4）。これによって底面近傍の流速分布も実験と一致しない。このような跳水が発生する場合については、このままのモデルでは計算できず何らかの対策が必要であろう。

本モデルを用いて、河川で考えられる堰、床止め、護床工およびトレンチなどの河床横断構造物を想定した流れの計算を試みたが、妥当な水面形が再現されていると考えられる。水面変化が穏やかな場合には本研究で用いた比較的簡単な方法で水面変化を考慮した開水路乱流の数値計算がある程度可能となることが示された。この計算方法は任意の河床形状への応用が容易であり、自由水面を有する開水路流れの数値予測に利用されることが期待されるが、さらに実験値との比較検証が必要とされる。本計算方法の問題点として厳密な水面の支配方程式を用いていない点と水面セルの連続の関係のあいまいさがある。この点も含めて常流・射流の遷移を含む急変流の計算を可能とするにはさらに多くの改良が必要であろう。

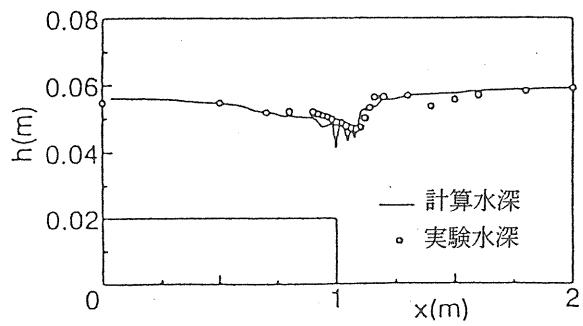


図 4-2-1 水面形の計算値と実験値の比較

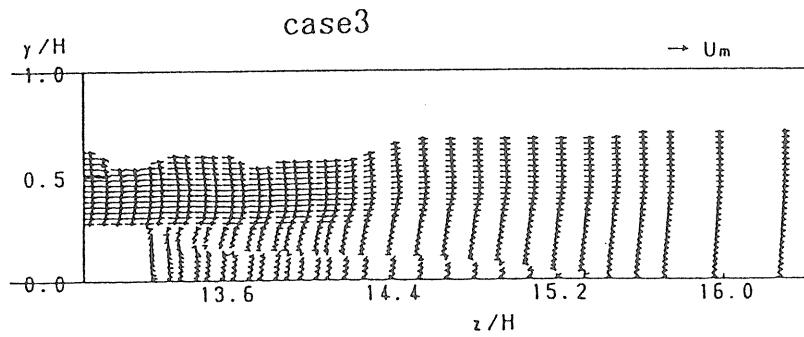


図 4-2-2 計算された流速ベクトル図（下流水深大）

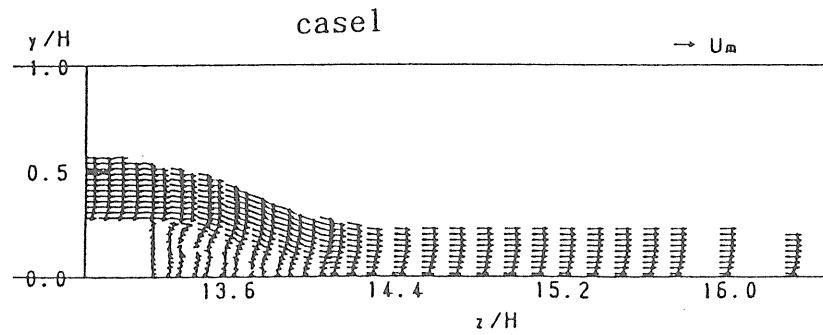


図 4-2-3 計算された流速ベクトル図（下流水深中）

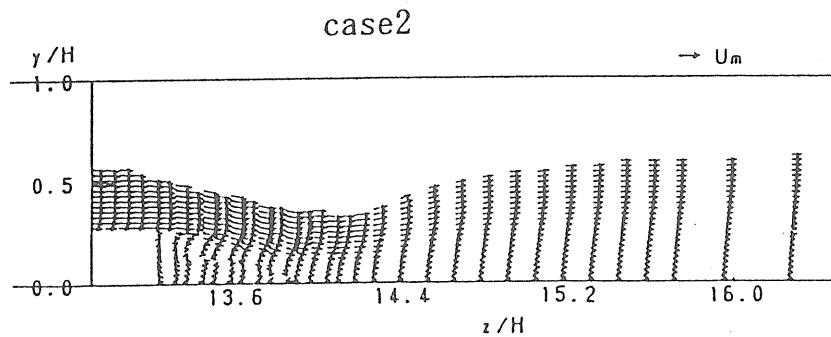


図 4-2-4 計算された流速ベクトル図（下流水深中）

4-3 海面上昇による河道内塩水侵上の変化予測

河口部の淡水と塩水についての水質問題は、生態系や河口流域における上水、農水、工水等の水利用に大きな影響を与えるものであり、温暖化による海面上昇に伴う河口流域の塩水侵上距離や流況変化を予測しておくことは非常に重要である。本研究では、弱混合型と強混合型の両方のモデルについて、温暖化による海面上昇に伴う塩水侵上距離と流速の変化をシミュレーションし、温暖化によって河口部の流況がどのように変化するかを予測することを試みた。

その結果、弱混合型の方が強混合型より温暖化に伴う海面上昇の影響を受けやすく、塩水の侵上距離が大きくなることがわかった。今後は河床勾配や河幅の変化等の河川の形状を組み込んだ高精度の予測モデルの開発と、河口部流況、河口形状、塩水侵上距離等の実測データを収集することが重要である。

(5) 実河川の流れ計測に基づく河川乱流構造の検討

5-1 直線水路における現地計測

直線状の河川の流速分布に関する野外計測は、100年以上も前から河川技術者によってすでに着手されている。川幅が狭い河川では最大流速が水面ではなく水面より下方の流れの内部に現れること（これを最大流速点の降下現象という）は現地計測によって明らかにされた。その後、この現象が2次流セル（最近では、縦渦ともいう）によって引き起こされる可能性が指摘された。また、開水路流れの浮遊砂濃度が水路横断方向に規則的に濃淡分布を示すことも発見された。そして、浮遊砂濃度が縦筋状の濃淡分布になるのは2次流セルによる、あるいは逆に2次流セルが濃淡分布によって惹起されることが推測された。また、航空写真から洪水河川の水面流速は川幅方向に決して一様ではなく、高速部と低速部が交互に水深規模の間隔で整然と並ぶことを発見された。そして、この原因として2次流セル（並列らせん流）の存在が予測された。しかし、乱れの非等方性のため発生するこの2次流は主流の数%の微流速であり、これを野外で実測することは当時不可能であった。一方、実験室ではレーザ流速計の高精度計測等により、開水路の2次流が実測されるようになった。また、ダクト流や開水路流における2次流の構造やその発生機構がかなり研究され、両者の2次流は根本的に相違することが明らかになってきた。以上の研究は、実験室規模のレイノルズ数（ 10^4 程度）を対象とし、開水路流れの3次元乱流構造がかなり解明されたが、これらの実験データや理論が高レイノルズ数の実河川の流れに適用でき、上述の複雑な河川乱流を説明できるか不明である。そこで本研究は、河川乱流を実測・解明する一步として、よく整備された人工河川を研究対象にし、琵琶湖疏水と愛知用水を対象とし、電磁流速計2本同時使用して流速3成分全てを計測解析した。そして、これらの河川乱流の計測結果が高精度の実験室データや数値計算値と比較検討され、両者の乱流構造がよく一致することが確認された。

琵琶湖疏水は幅水深比が約8で広水路カテゴリーに属する。河床せん断応力は横断方向に波状分布することが大きな特徴である。水路には2次流セルが発生しており、上昇流部で河床せん断応力はほぼ最低になり、逆に下降流部で最高になる。河床せん断応力の変動値は側壁から離れるほど小さくなる傾向に

あるが、平均値の2割から3割にまで達している。このため、河川での土砂や浮遊物質など各種の乱流輸送を合理的に予測するにはこのような河床せん断応力の変化特性を考慮することが重要である。

主流速分布に最大流速点の降下は見られないが、水面近くに高速域と低速域が交互に帶状に現れているのが特徴的である。水面近傍に低速域は2次流の上昇流にはほぼ対応し、河床側の低運動量が2次流によって水面側に輸送されるから低速域が形成されたと解釈できる。一方、下降流のある地点では、水面側の高運動量が河床側に輸送されるから高速域が形成される。しかし、最大流速点が水面下に降下するほど2次流れは強くなり、広水路の特性をよく表している。

2次流セル群の存在は明らかに認められ、側岸寄りの河床にはかなりの土砂の堆積があり、これが河床せん断応力を変化させ、2次流の形成に何らかの影響を与えている、あるいは逆に2次流が土砂の堆積に何らかの影響を与えていているものと推測される。

愛知用水は幅水深比が2.5で狭水路カテゴリーに属する。注目すべき点は最大流速が明らかに自由水面より下方に現れていることである(図5-1-1)。野外水路での最大流速点の位置は実験室の計測結果および数値計算結果とよく一致する。2次流の流線は野外水路においても水面渦と河床渦が明確に認められ、前者の渦は後者より規模が大きく、野外水路で観測されたこのような2次流構造は実験水路で計測された結果と良好に一致している(図5-1-2)。この事実は、乱れに起因する二次流のメカニズムが野外水路と実験水路で同じであることを意味している。乱れ強度の構造は3成分ともに野外データと実験室データでほぼ同じ特性を示した。鉛直成分は水面が近づくにつれて単調に減少し、この特徴的な低減特性は自由水面の存在によって引き起こされる。したがって、開水路では、乱れ強度は水面近傍で対応する閉管路の場合よりも非等方性がはるかに強くなると結論づけられる。

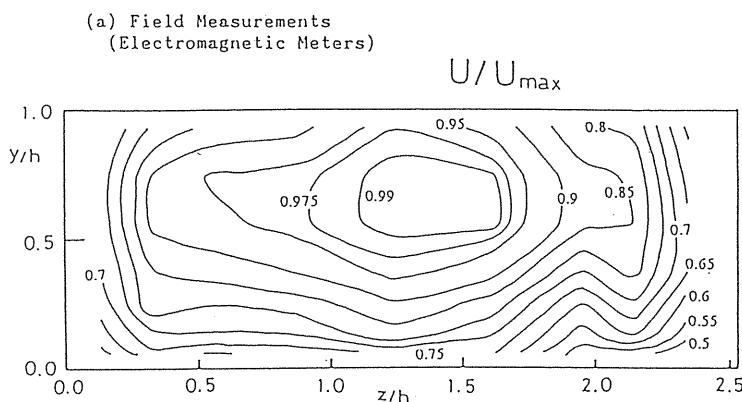


図5-1-1 主流速コンター（愛知用水：狭水路）

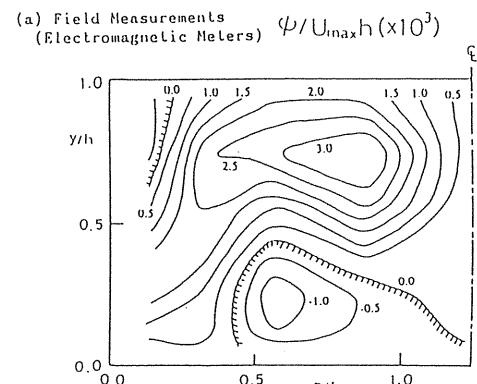


図5-1-2 2次流ベクトル図
(愛知用水：狭水路)

このような2次流は乱れの非等方性の項によって発生することが理論的・実験的に確認された(図5-1-3)。2次流は、河川横断面全体にわたって、主流速、河床せん断応力および諸々の乱れ特性値の分布パターンに著しい影響を及ぼす。野外計測データと実験室データとの比較から、2次流を含む三次元乱流構造はレイノルズ数に無関係にほぼ普遍的であると結論づけられる。それゆえ、レーザー流速計

によって得られた高精度の開水路流のデータは、スケールアップした高レイノルズ数の河川乱流にまで適用できると考えられる。

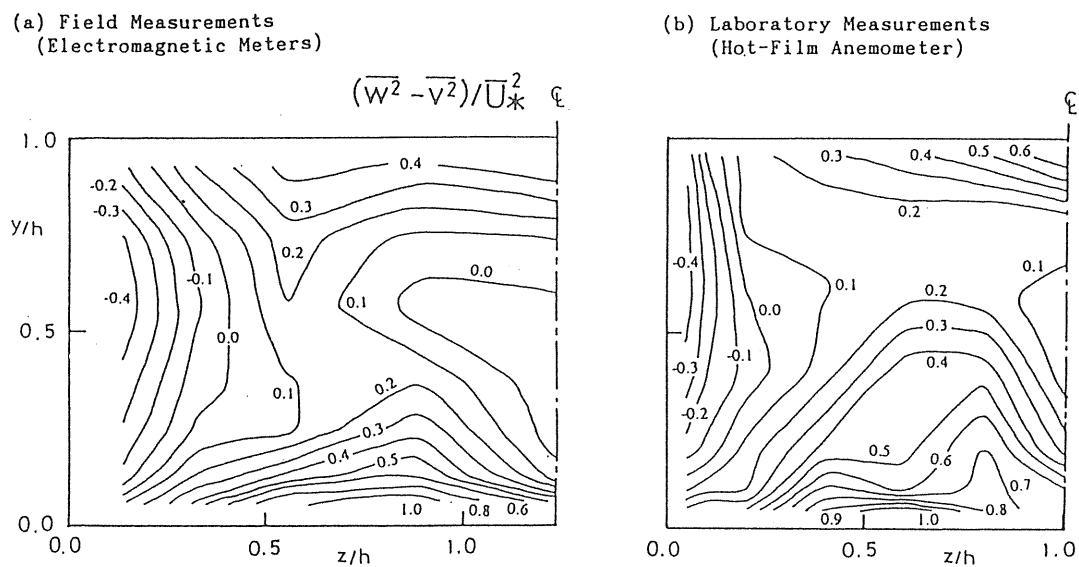


図 5-1-3 2 次流発生項のセンター（愛知用水と実験水路の比較）

5-2 湾曲水路における現地計測

開水路湾曲部の流れについては、実験室レベルでは曲率半径が小さくしかとれず実スケールの流れとはかなり異なったものとなる可能性があり、現地でのデータが望まれる。河川湾曲部の現地計測はこれまでにいくつか行われているが、計測時の水理条件によって流れ構造は変化するため、普遍的な特性を把握するには今後さらに多くの実測データを蓄積していくことが必要である。本研究では礫床河川の湾曲部の固定砂州形成部とほぼ直線の砂床河川の交互砂州形成部において横断面内の乱流計測と2次流の計測も行った。このような流れ場では流れ構造は複雑になり、流速分布及び乱れ統計量はかなりの変動を示すようになる。このとき、乱れ構造の普遍性や、2次流の影響等について検討するとともに、底面せん断応力の評価方法について様々な角度から検討を加えた。

比較的粗い礫河床の浅い河川流湾曲部及び交互砂州形成部の横断面内乱流構造を計測し、湾曲部の2次流の存在が確認された（図5-2-1、5-2-2）。主流速の鉛直勾配がかなり大きい領域があり、勾配のみから摩擦速度を評価するとかなりの過大評価となつた。レイノルズ応力も特に外岸側で直線分布からかなりのズレを示した。主流速、レイノルズ応力及び乱れ強度の普遍分布から平均的な底面せん断応力を評価したところ、これらはオーダー的に一致し、このような流れ場でも乱れの自己保存性がほぼ保たれていることがわかった。また、外岸の形状の異なる2断面での計測から流れ構造が外岸の段差によってかなり変化することが示された。

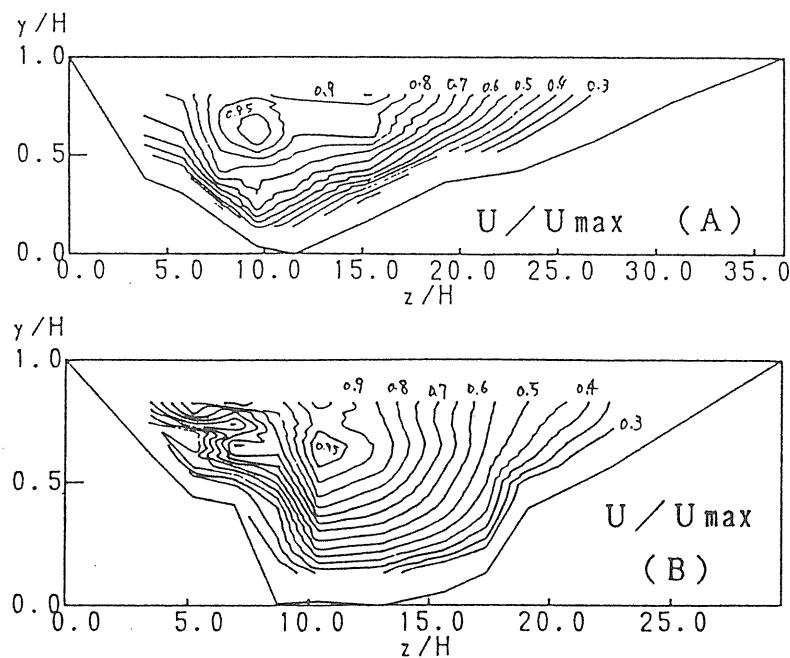


図 5-2-1 主流速コンター（河道湾曲部）

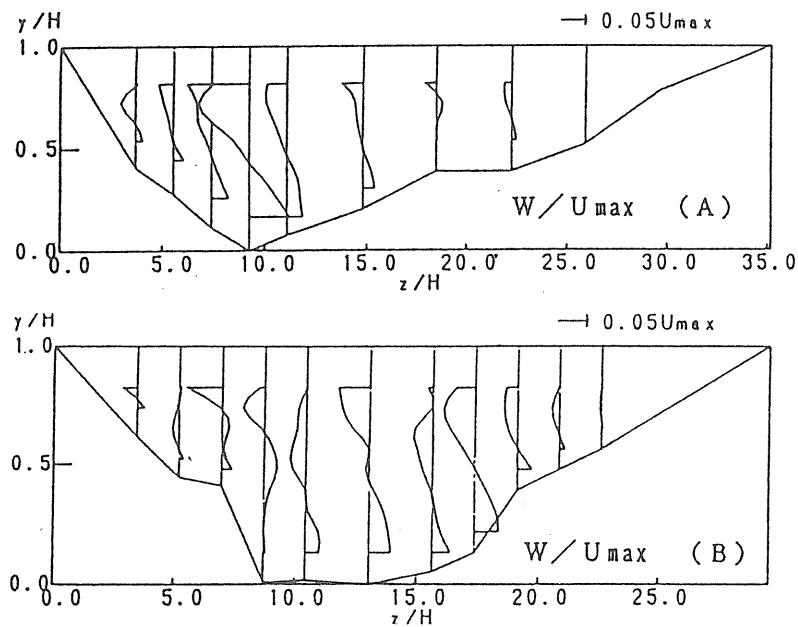


図 5-2-2 横断方向流速成分の鉛直分布特性（河道湾曲部）

本研究により、以上のような成果が得られた。研究内容は非常に多岐にわたるが、主要な点は高水敷を有する河道の水理と、河川構造物の流れへの影響に関する研究に重点がおかれた。補足的に実河川における現地計測を行い実験水路での研究の実河川への応用に関しての情報を得ることに努めた。ここでは基礎的な研究が中心となり、実際への応用に向けては今後さらなる研究が必要とされるが、環境を重視した河道構造の見直しに関する水工学的な見地からの有用な情報を提供したものと確信する。