

2. 人工わんどにおける物質交換に関する研究

1. 複断面水路の分散係数の評価
2. 移流項に対する高精度スキームの開発
3. 熱映像解析を用いたわんどの形状の流れ場に及ぼす影響の検討
4. わんど周辺の平均流速及び乱流量の分布
5. わんど及び開口部の形状が運動量交換に与える影響
6. 人工わんど内の流れの2次元数値解析
7. わんど内外における非定常流れの特性

研究代表者

東京大学工学部土木工学科 玉井 信行

水辺の自然度を高めるための方策が求められている。本研究は、近自然工法の一環として建設される“人工わんど”に関して、土砂の堆積、流れによる物質の交換を明らかにすることを目的として行われた。

具体的な内容は複断面河道内での分散係数の理論的導出、高精度の数値解析のための新たなスキームの開発、複断面高水敷を掘り込んで作成した実験用人工わんど周辺部での定常流れ及び非定常流れの流速測定、運動量交換に与えるわんど開口部の効果の検討、流れを再現できる2次元の数値解析コードの開発から成る。

1 複断面水路の分散係数の評価

日本の主要な河川はほとんど複断面形状をしており、人工わんどをこうした複断面河道の高水敷の一部を掘り込んで造成することが計画されている。したがって洪水時のように高水敷上に流れが存在する状況下での複断面河道における物質輸送を考えることは、人工わんどの建設にあたっては基本的な事項と考えられ、初年度の解析プログラムの一部としてこれを取り上げることとした。

洪水時の流れの解析では巨視的な立場が重視され、通常1次元解析が行われる。ここでも、1次元解析の前提に立ち、縦断方向の分散係数を理論的に算定することを行った。このとき流れの特性として従来報告されている次の事項を考慮した。複断面流れでは低水路と高水敷の流れでは流速に差があり、これが原因となって境界部では複雑な流れが生ずる。水面に大規模な渦がみられたり、斜昇流が見られ、低水路と高水敷上の水塊は激しく混合される。こうした結果、境界部での渦動拡散係数は他の部分より大きくなっている。今回の解析では境界部に低水路側および高水敷側にそれぞれ独立に扱い得る渦動拡散係数を与え、これが分散係数にどのような影響を与えるかを個別に判定できる構成とした。

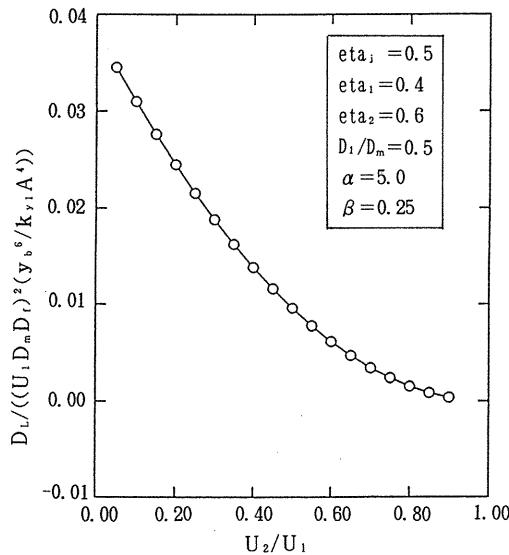


図-1 分散係数

分散係数は理論的に導かれ、断面の幾何学的条件、水理量の条件により分散係数がどのように変化するかを予測できるようになった。一例として、高水敷上の流速 U_2 と低水路での流速 U_1 の比が分散係数に与える影響を図-1に示す。高水敷での流速が遅い場合には、主流部と高水敷の流れとの流速差が大きくなるので、移流成分による物質の引き伸ばしが大きくなり、縦分散係数は大きくなる。こうした状態では、物質が高水敷上に停滞し、大きな距離にわたって濃度の分布が生ずる結果となる。高水敷部での流速が低水路流速の80%の場合と20%の場合を比べると、縦分散係数が大きく変化し、後者の場合は前者の場合の10倍以上となる。したがって、低水路と高水敷の流速比は混合現象を支配する重要な因子であることがわかった。

2 移流項に対する高精度スキームの開発

複雑の幾何学的形状を有する河道内の流れや物質輸送を精度よく数値解析するためには、移流項に対して高精度スキームを用いることが不可欠である。移流項はこれまで主として風上差分やそれを改良したスキームを用いて離散化されてきたが、それらの方法では数値拡散の影響が強く、物質が水理学的なメカニズムで輸送されたのか数値拡散により広がったのかを区別することができない。一方、使用する格子点数を増加することにより高精度化をはかるスキームが提案されているが、濃度が急変する地点で負の濃度や極めて高い濃度など水理学的に不合理な結果を算出することが知られている。

本研究では高精度かつ物理性を保証するスキームとして提案された ULTIMATE QUICK および ULTIMATE QUICKEST スキームの性質を調べた。また、それらに改良を加え精度の一層の向上をはかった。一例として、1次元移流-拡散方程式に適用した場合のべき乗スキーム(PLDS)、QUICKスキーム、QUICKESTスキームによる結果と解析解との比較を図-2に、ULTIMATE QUICKと ULTIMATE QUICKESTスキームによる結果を図-3に示す。

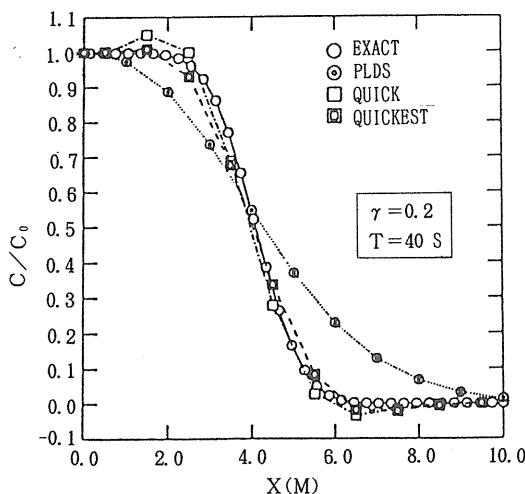


図-2 移流スキームの比較(1)

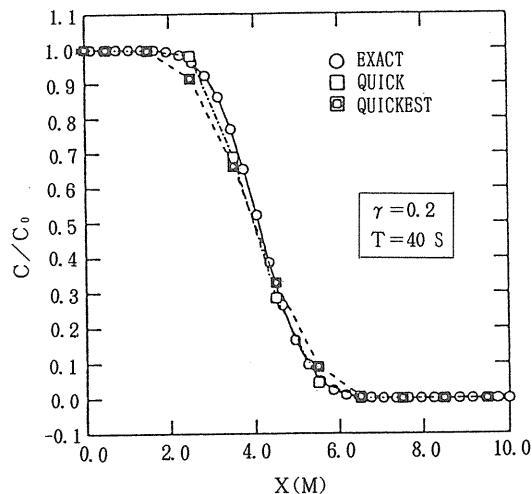


図-3 移流スキームの比較(2)

3 熱映像解析を用いたわんどの形状の流れ場に及ぼす影響の検討

人工わんど周辺部の流れ場に与えるわんど形状の影響を系統的に理解する目的で実験を行った。ほぼ均一な温度の温水を静止状態でわんど内に蓄えた後、わんどの開口部に設けた隔壁を取り去り、わんど周辺部での水面温度分布の時間的变化を熱映像解析装置を用いて測定した。実験では他の水理条件を固定し、わんどの幅・長さ比、わんどの開口部に取り付けた仕切り板の長さやその方向を一つずつ変化させた。

図-4は実験結果の一部を示したものである。図(a)は結果の読み方を説明するものであり、図中の T_1 から T_4 のフレームの順に時間が経過していることを示している。また、白色が高温域に、青色が低温域に相当する。

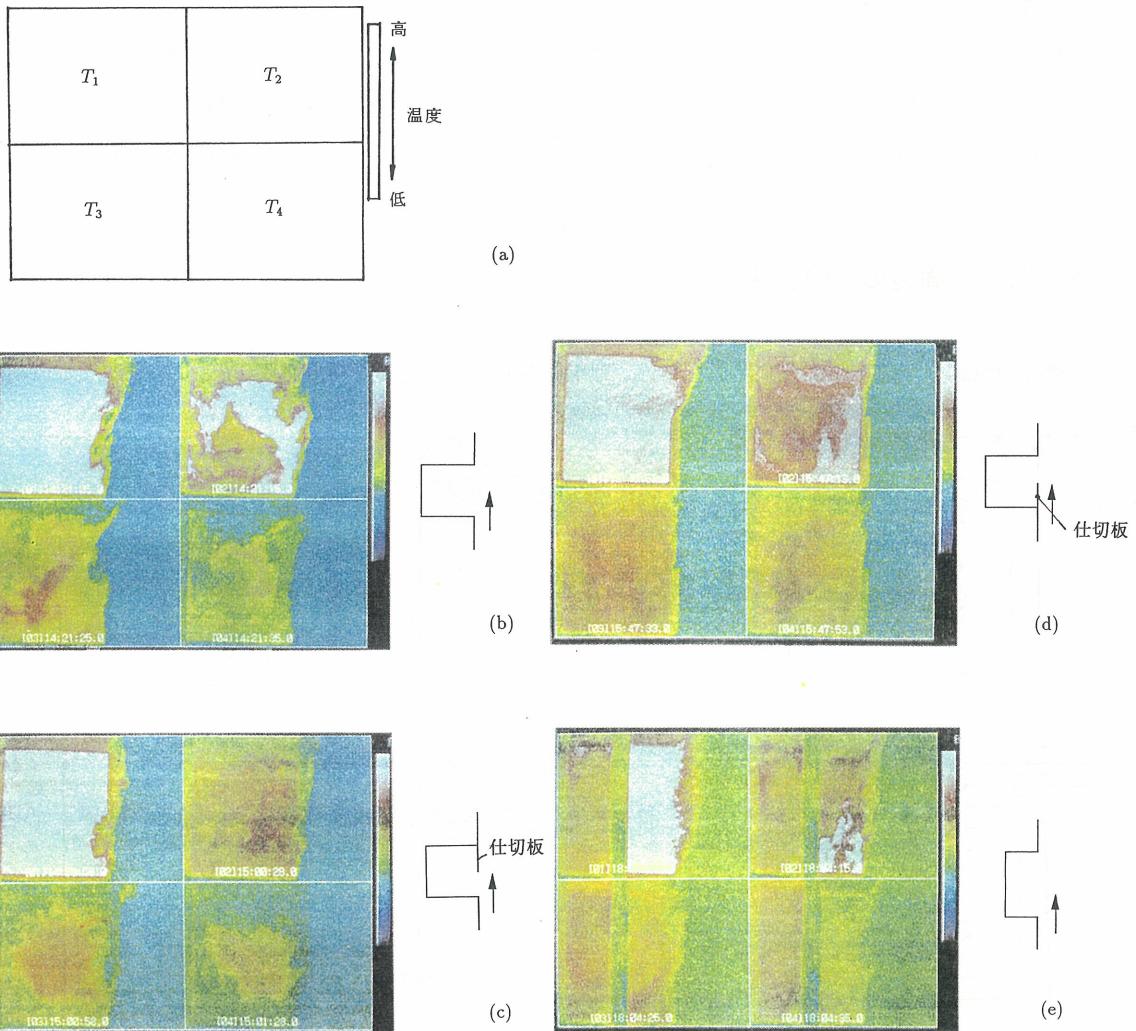


図-4 水面温度の変化

図(b)は正方形のわんど内での10秒間隔での温度分布を示している。わんど開口部に形成される渦は流下しながら発達し、わんどの角部に衝突する。それに伴って一部がわんど内部に流入するが、それが主流部の低温水をわんど内にもたらす。次々に運ばれる低温水は拡散しながらも反時計方向に回転する大きな循環を形成する。混合はかなり盛んに行われる。

図(c)ではわんど下流部から主流に平行に仕切り板を設置した場合の流況を表している。仕切り板の長さは開口部の半分である。わんど上流端から発達する渦は十分に発達する前に薄い板により切断される。このために取り込む低温水は少なくわんど内の温度低下は緩やかになっている。また、わんど内の循環流の強度も弱く、混合は抑えられている。

図(d)では図(c)とは反対に、わんど上流部から主流に平行に仕切り板を設置している。仕切り板の下流端部には渦の形成が認められるが、図(a)と比較すると明らかに発達が抑制されており、混合の不活発化をもたらしている。図(c)の場合よりわんど内部の循環流はさらに弱く、流れのパターンも異なっているようである。

わんどの幅を半分にした場合の流況を表したもののが図(e)である。主流部とわんど内の水の交換は活発であり、短時間に温度が低下している。わんど内の循環流のパターンは図(a)とは異なり、わんど内の下流部に形成される大きな循環の他に上流側にも複数の循環セルが生じ、上流部での温度低下を抑えている。

4 わんど周辺の平均流速及び乱流量の分布

流速の点計測で得られた流れの平均特性、乱れ特性について結果の一部を示す。

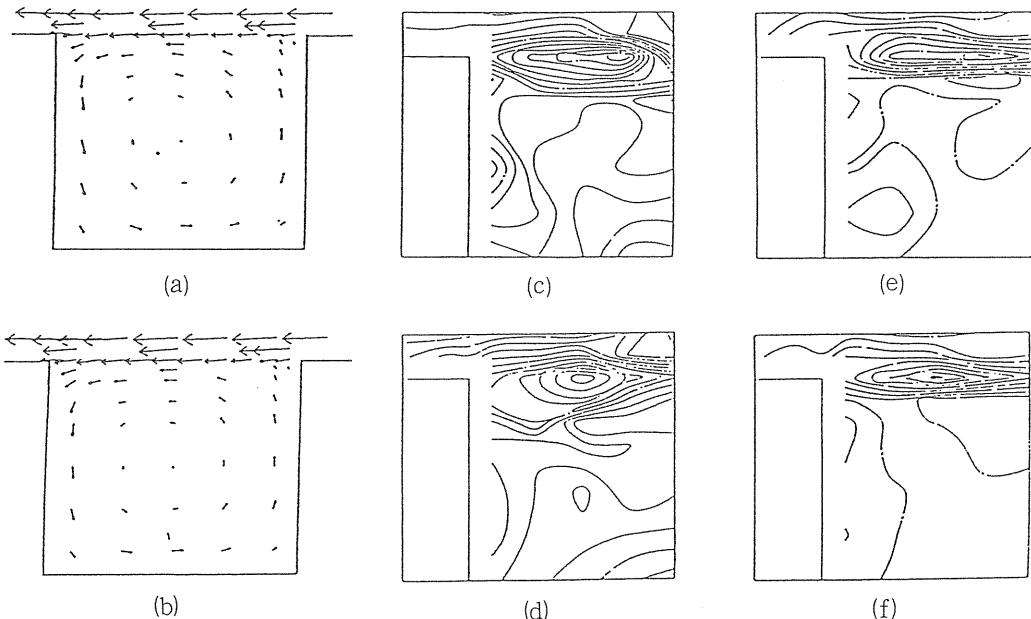


図-5 平均流速分布

図-6 亂れ強度 $\sqrt{v'^2} / U_*$

図-7 レイノルズ応力 $\overline{u'v'} / U_*^2$

図-5(a)、(b)は底面から水深の30%、80%の面における平均流速分布図である。わんど内には一つの大きな循環流が生じている。さらに異なる高さにおける平均流速分布が相似の形状を示している。この結果より、低水時のわんど内の流れはほぼ二次元的であると言うことができる。可視化において確認された副循環流が捉えられていないが、これは電磁流速計のプローブが大きかったことによると考えられる。

図-6はそれぞれの水深における横断方向流速の乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/U_*$ 、図-7はレイノルズ応力 $u'v'/U_*^2$ 等の等值線図である。図(c)、図(d)を見ると両断面においてわんど開口部付近で縦断方向流速の乱れが大きくなっている。またレイノルズ応力も両断面ともにわんど開口部付近で高い値を示し、運動量の輸送がわんど開口部で激しいことがわかる。これらの特性より、低水時におけるわんど周辺の物質輸送にはわんど開口部付近の乱れが寄与していると考えられる。

5 わんど及び開口部の形状が運動量交換に与える影響

熱画像解析の結果で説明したように、わんどにおける運動量交換や物質輸送にわんどの形状が大きな影響を及ぼす。そこでわんどの形状を変化させ、流速の測定を行った。

図-8(a)は正方形の場合であるが、内部に大きな循環流が一つ存在している。図(b)はわんど上流端から開口部の半分の長さの仕切り板を設置した場合である。わんどの上流側に非常に流速の小さい部

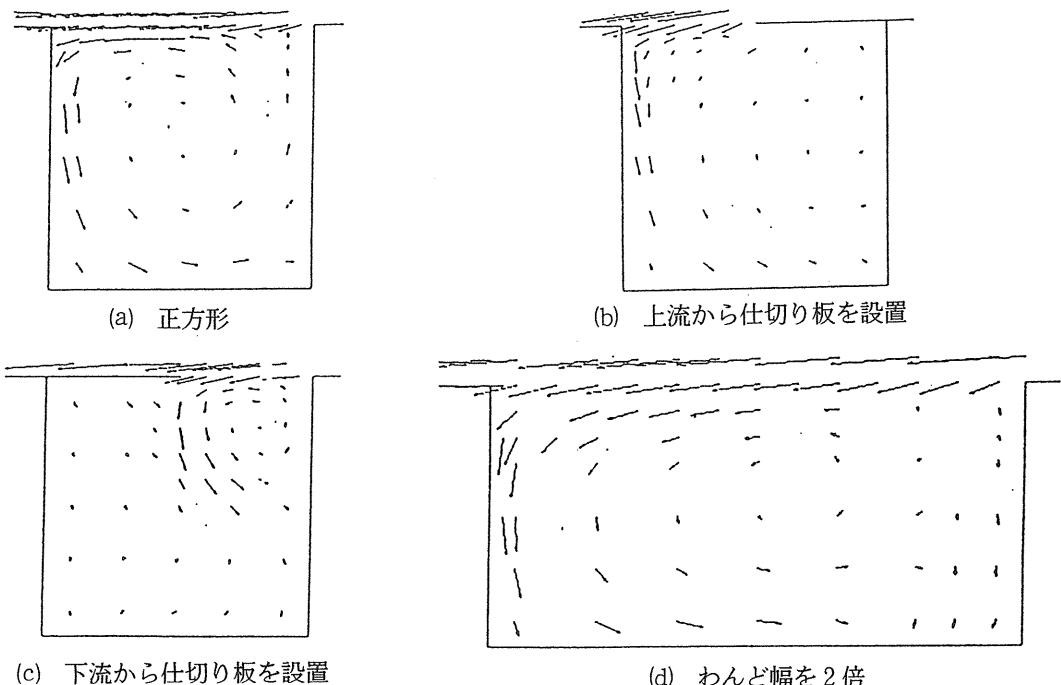


図-8 平均流速分布

分がみられ、汚濁物質の堆積を予想される。図(c)はわんど下流端から同じ長さの仕切り板を設置した場合である。わんど上流側の主流部寄りに循環流が生じているが、下流側やわんど奥部での流速は小さく、汚濁物質の堆積が考えられる。図(b)、図(c)において流速の小さい部分は熱画像解析において物質交換があまり行われていなかった部分と一致する。図(d)はわんど幅を2倍にした場合である。わんどの上流側に副循環流が存在している。この副循環流は熱画像解析においても確認されている。

これらの結果より、時間平均流においてもわんどの形状が運動量交換に与える影響が大きいことが分かる。

6 人工わんど内の流れの2次元数値解析

図-9から図-11ではそれぞれ実験-2から実験-4までについて平均流速ベクトルを比較している。図-9では流れのパターンを良く再現しているが、わんど上流側の流速が異なっている。実験データでは流量の保存が満足されておらず、その差異は実験結果のデータに不備にあるものと考えられる。

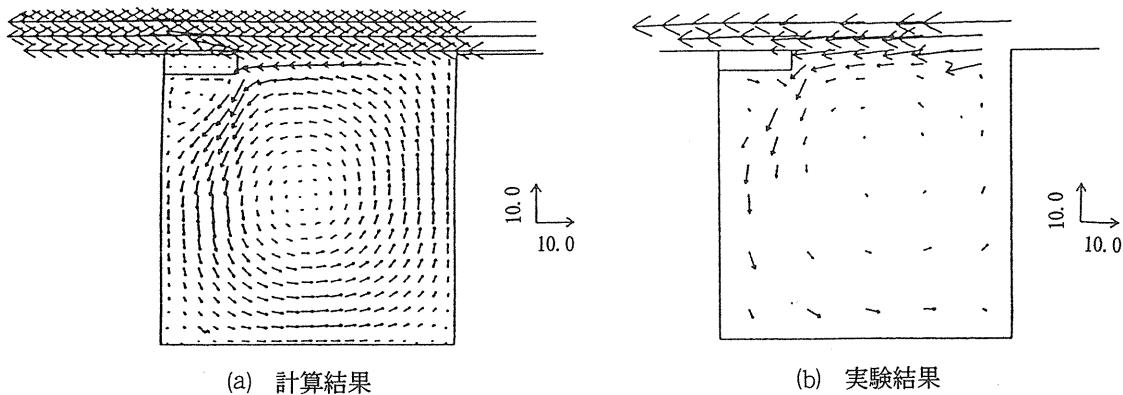


図-9 実験-2に対する平均流速分布の比較

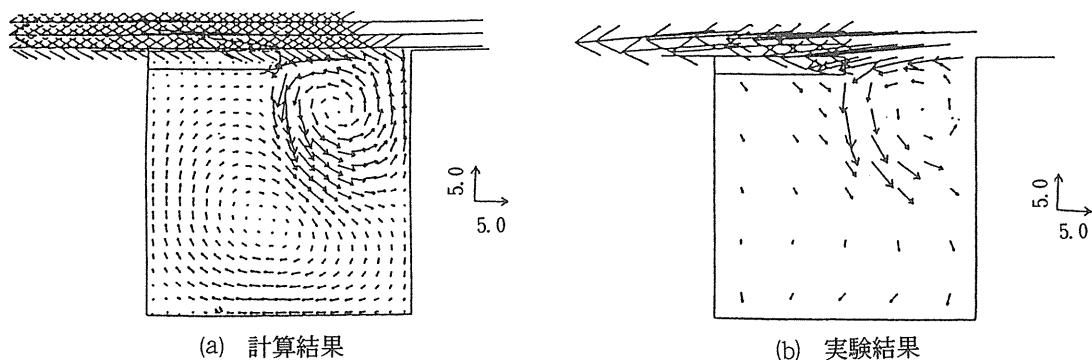


図-10 実験-3に対する平均流速分布の比較

図-10に示すように、わんど開口部をより狭くした実験-3においては循環流は実験-2と比較して大きく変化している。計算結果でもその特徴は正確に捉えられている。実験結果はやはり質量の保存を満たしていないが、本解析手法は信頼できるものと判断できる。わんど開口部の面積を変えず上流側を半分閉め切った場合が実験-4であり、その結果を図-11に示す。実験結果では誤差が大きいが、大規模な循環流が形成されていることが推測される。閉め切り部背後に2次的な循環流が存在する可能性があるが、数値解析は満足できる結果を与えている。

本研究では、種々の開口部を有する正方形わんど内の水深平均の流速分布を、 $\kappa - \varepsilon$ モデルを用いた浅水流方程式に基づく平面2次元解析でほぼ再現できることを確認した。

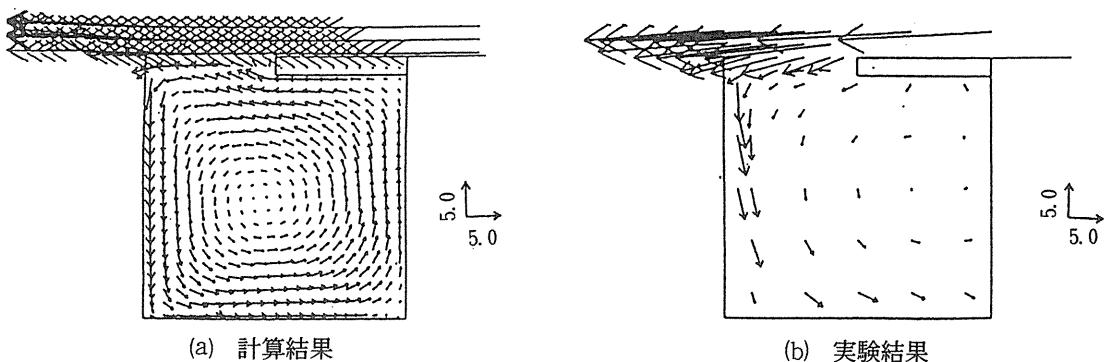


図-11 実験-4に対する平均流速分布の比較

7 わんど内外における非定常流れの特性

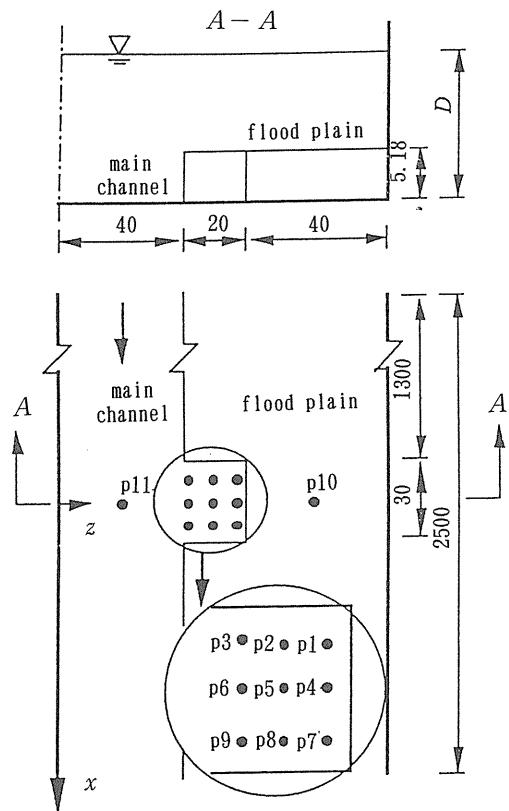
長さ25m、横1mの可変勾配水路に、複断面形状の水路を作り、高水敷に正方形の人工わんどを設けた。配置の概要を図-12に示し、また発生させた洪水流のハイドログラフを図-13に示す。

流速の3成分測定は2種類の2成分電磁流速計を用いて行った。流速計の測定部の直径は5mmである。水路床勾配は1/1000であり、測定点はわんど内に9点、その他に低水路と高水敷上にそれぞれ1点を配しており、合計11箇所である。また、鉛直方向には5mmおきに測定した。

図-14には、わんど内、低水路、高水敷で計測した水深の時間的変化を示す。水深の差は約5cmであり、高水敷の高さに相当している。図-15を見るとわんど内の水深は低水路水深より大きく、特に減水期に顕著となる。ハイドログラフが減水期に入ると、低水路の流れは速くなり、わんど内の流れには遅れがあるので、こうした水位差が形成されると考えられる。

図-16は水路縦断方向の流速成分の時間的变化を示したものである。鉛直方向の位置としては水面付近、水深中央部、水底付近の3つが取り上げられている。洪水波の到達前で流量が一定の時にはすべての水深位置においてP3、P6、P9の位置（わんどの入口部）では速度はすべて下流向きである。P2、P5、P8というわんど中央部ではゼロでありP1、P4、P7というわんどの奥の部分

では、流れは上流を向いている。これはわんど内に循環流があることを示している。洪水が到達すると、水底付近ではわんどの全域を通じて速度が小さくなる。わんどの奥まった部分では減水期には少し回復する。これにより、水底付近では洪水の通過の間は循環流が弱くなることが分かる。高水敷の高さ以上の位置においては洪水が到達すると、わんど内の循環流はほとんど消失することが分かった。こうした洪水期における循環流の特性により、物質移動の特性がどのように変化するかについて今後さらに解明を進めたい。



Coordinates of the measuring positions (x, z; in cm)											
	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11
X	-6.5	-6.5	-6.5	0	0	0	6.5	6.5	6.5	0	0
Z	58	50	42	58	50	42	58	50	42	80	25

図-12 実験装置と計測位置の概要

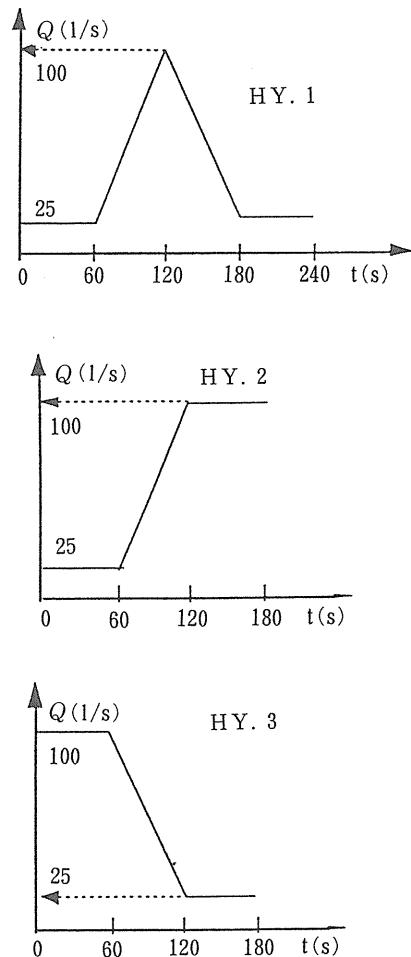


図-13 実験に用いた洪水ハイドログラフ
(上流端)

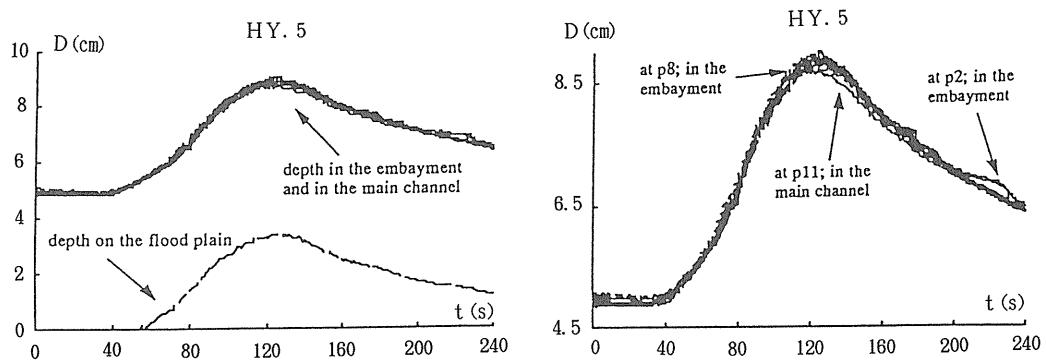


図-14 わんど内および低水路の水深変化と高水敷上の水深変化

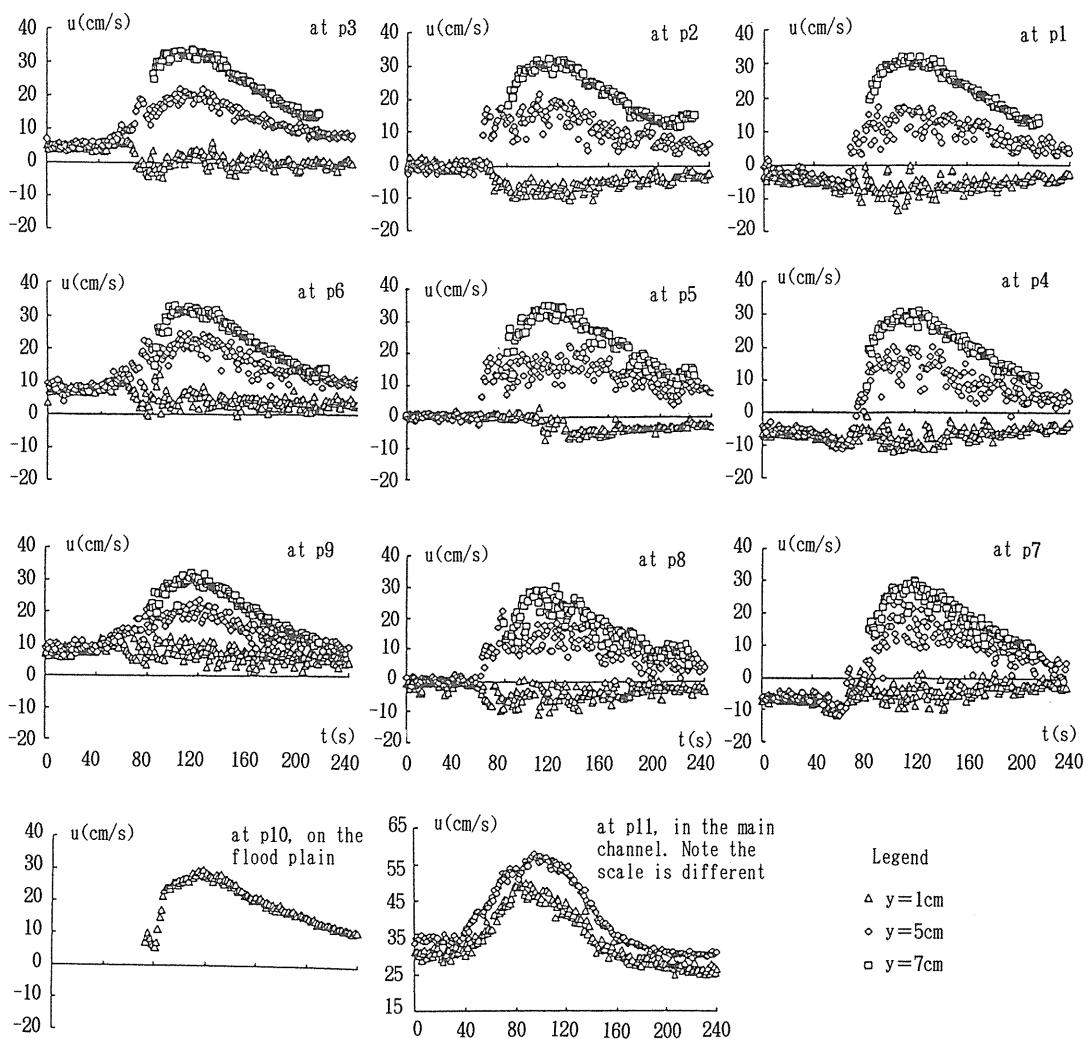


図-15 水深変化：わんど内の水深変化は低水路水深より大きい
特に、水位の下降期に目立つ