

直線複断面開水路流れに発生する大規模水平渦列の安定性と運動量輸送に関する実験的研究

池田駿介¹・空閑健²

¹フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

²正会員 修士(工) 北海道開発庁

水路両側に高水敷を有する直線複断面開水路流れにおいて、水深と低水路幅を系統的に変化させて広範囲な条件で実験を行った。レーザー流速計や波高計を用いて流れを測定した結果、複断面開水路流れにおいて生じる大規模水平渦は、変曲点不安定性がその発生要因であること及び低水路幅・低水路水深比 (b/H) が2列の渦列の安定性に大きな影響を与えていることが判明した。本実験の範囲内では、 b/H が約5で低水路・高水敷境界における運動量輸送が最大となることが判った。

Key Words : *compound open channel flow, organized horizontal vortex, Reynolds stress, shear instability, vortex streets*

1. 序論

河道の安定性と河川環境が共に考慮された河道設計のために、河川における流れ場をより詳細に把握する必要性が高まりつつある。このような背景から、現在複断面開水路流れに関する研究が精力的に推進されている。しかしながら、複断面開水路は高水敷と低水路からなる特有な形状を有し、両者の間で流れが相互干渉を起こして複雑な流況を呈する。このことから流れの抵抗および高水敷の土砂堆砂機構など、未解明な点がなお数多く残されている。

低水路水深に比べて比較的高水敷水深が浅い複断面開水路流れでは、高水敷・低水路境界部に周期的な大規模水平渦が発生して、横断方向の乱流混合現象に大きな影響を与えることが知られている(例えば木下¹⁾、福岡・藤田²⁾、池田ら³⁾)。最近ではこのような水平渦発生メカニズムについての研究も進んでおり、複断面開水路流れのように横断方向に主流が流速差を持つ流れ場では、変曲点不安定性により水平組織渦が発生するということが一般的に認知されるようになってきている^{3), 4), 5), 6), 7), 8)}。

また、両側に高水敷を有する複断面開水路流れでは、2列の水平渦列が形成され、ある条件下ではお

互いの渦列が干渉することにより水平渦列が安定し、低水路・高水敷間の運動量交換が増大することが知られている³⁾。このような流れ場を詳細に調べることは、実河川における河道の計画や河川構造物の設計において非常に重要である。

この点に関して池田ら³⁾は、変曲点不安定によって決定される1列の渦の波長と非対称2列渦列の安定性によって決まる波長が一致する場合に渦は安定した千鳥状配置をとり、このとき低水路・高水敷境界部における運動量輸送が非常に大きくなることを実験により示している。しかしながら池田らが行った実験では、実験装置の制約から実験ケースが少ないために、様々なパラメータに支配される複断面開水路流れの複雑な乱流現象に関する一般的な取り扱いが困難である。

一般に複断面開水路流れの横断面形の特性は低水路幅・全水路幅比 (b/B)、低水路幅・低水路水深比 (b/H)、高水敷水深・低水路水深比 (h/H) という3つのパラメータで表わされ(図-1参照)、パラメータのわずかな変化が流れ場に大きく影響する。また、それぞれのパラメータが複雑に絡み合い、流れ場の解明を困難なものとしている。

以上のことから、本研究では広範囲に低水路幅

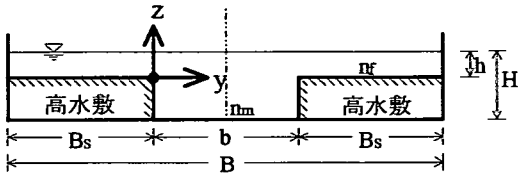


図-1 複断面開水路の横断面図及び記法の定義

(高水敷幅)を変化させ、また水深も3通りについて室内実験を実施する。複断面開水路流れに発生する水平組織渦の瞬間像や3次元構造については既に報告されている^{3), 9), 10)}ので、ここでは特に渦列の安定性と横断方向運動量輸送に主眼をおいて実験を行う。

なお、上述のパラメータの内、水路幅Bは十分大きいとして、残りの2つのパラメータ、 b/H と h/H に着目して実験データを整理する。低水路、高水敷の粗度も複断面開水路流れを規定する幾何学的パラメータであるが、水平渦の発生機構は低水路・高水敷間に生じる水平セン断であり、よって低水路・高水敷間の流速差が水平渦を生み出す。従って、粗度パラメータは抵抗という観点から水深に置きかえることが可能である。よって、本研究では水深を変化させることにより流速差を生じさせることとし、粗度は低水路、高水敷共に同一としている。

2. 実験方法及び実験条件

(1) 実験方法

図-1に複断面開水路の横断面図及び記法の定義を示す。なお、この横断面図は水路上流側から見たものである。実験には東京工業大学工学実験室の長さ12m、幅1.2mの循環式可変勾配水路を用いた。複断面水路の実験においては高水敷水深が浅いので、その水深の均一性を保つには高精度に仕上げられた水路が必要である。本実験水路は、偏流などが生じないように水平にした場合に全区間にわたる水路床の高低差が1mm以内になるように特別注文により入念に仕上げられており、この目的を十分果たすことができる。上流側水槽には、ディフューザーが取り付けられ、流れが一樣に水槽内に流入するように設計されている。又、上流側水槽には水槽中程に上方からステンレス製の仕切り板が取り付けられ、流れはその下を潜り、ベルマウス型の縮流部を経て水路に流入するようになっている。仕切り板を設置した理由は、ディフューザーからの流入によって生じる不規則な水面振動を仕切り板によって消し去るため

表-1 実験条件

実験番号	低水路水深 H(cm)	低水路幅 b(cm)	片側高水敷幅 Bs(cm)	低水路レイノルズ数 Re	低水路フルード数 Fr
A-60	5.70	60.0	30.0	24500	0.575
A-50	5.70	50.0	35.0	24700	0.579
A-40	5.70	40.0	40.0	24600	0.577
A-30	5.70	30.0	45.0	24300	0.571
A-20	5.70	20.0	50.0	23300	0.546
A-10	5.70	10.0	55.0	18000	0.423
B-60	6.00	60.0	30.0	27200	0.591
B-55	6.00	55.0	32.5	27400	0.595
B-50	6.00	50.0	35.0	27500	0.598
B-45	6.00	45.0	37.5	27600	0.600
B-40	6.00	40.0	40.0	27300	0.594
B-35	6.00	35.0	42.5	26900	0.585
B-30	6.00	30.0	45.0	26400	0.573
B-25	6.00	25.0	47.5	26200	0.570
B-20	6.00	20.0	50.0	26100	0.567
B-15	6.00	15.0	52.5	23500	0.511
B-10	6.00	10.0	55.0	21800	0.474
B-5	6.00	5.0	57.5	18000	0.391
C-60	6.30	60.0	30.0	29500	0.596
C-50	6.30	50.0	35.0	29700	0.601
C-40	6.30	40.0	40.0	29900	0.605
C-30	6.30	30.0	45.0	29300	0.592
C-20	6.30	20.0	50.0	28500	0.575
C-10	6.30	10.0	55.0	24000	0.485

ある。これらの装置により、流れはスムーズに水路へ流入する。従って、特に開水路において乱れを発生させるもととなるハニカム等は設置していない。流入後、水路には1.5mの助走区間が設けられている。高水敷は、水路の両側に長さ10mにわたって幅30cm、高さ4.85cmのコの字型に加工したアルミ板を固定し、その上に厚さ0.15cmのアルミ板を幅30cm、高さ5cmのL字型に加工したものを重ねて作成した。これらのアルミ板加工も注文製作である。従って、高水敷高さは5.0cmであり、上に重ねたL字型のアルミ板をスライドさせることにより、高水敷幅(従って低水路幅)を任意に変えることができる。このとき、流れに出来る限り擾乱を与えないよう、流水は高水敷下をそのまま通過する構造とした。粗度係数は、高水敷及び低水路上で横断方向に流速

が一様となっている場所を選び、それぞれの場所の水深を用いて算出した。マンギの粗度係数は低水路床 n_m 、高水敷 n_f ともに約0.011であった。

実験は、高水敷設置開始点から約4.0m～8.0mの区間において等流状態が成立していることを確認した後に行った。等流は水深と勾配が与えられているので、基本的には流量を調節することにより作成し、微妙な調整は下流端セキの高さを変化させて行った。複断面開水路流れは、わずかな水深の違いが流れ場に影響してくるため、4.0m～8.0m区間の高水敷上で下流方向に1m毎にポイントゲージで水面を測定し、水位が等流条件から0.1mm以内となるように高精度で等流条件を実現させた。

流速の測定は、低水路側では主流速成分 u の時間平均流速の測定は使用上の簡便さから小型電磁流速計 (KENEK社製) を用いた。この時、鉛直方向に5点計測し、加重平均により水深平均流速を求めた。また、高水敷上の流速測定、及び高水敷と低水路の境界部においてはReynolds応力を高精度に測定するため、主流速成分 u 及び横断方向流速成分 v について、水中用プローブを取り付けた2成分アルゴン・レーザー流速計 (TSI社製) を用いて測定を行った。水中用プローブは流れを乱さないように先端が表面張力で水面に接する程度に極くわずか (1mm以内) 水中に入るように水面上方から設置した。高水敷上では鉛直方向に2点で流速測定を行い、2点法を用いて水深平均流速を求めた。測定高さは、水面及び底面からそれぞれ3mmの位置である。更に、電磁流速計とレーザー流速計による測定値に差異がないかどうかを確かめるために、低水路側の測定点で両者による測定結果の比較を行い、一致することを確かめた。このとき、サンプリング周波数100Hzで8192個のデータを採取した。なお、測定点は水平渦が十分に発達し、しかも下流端の影響を受けないように高水敷の設置開始点から約7.5mの地点とした (図-2参照)。

渦の周期の測定は、容量式波高計 (KENEK社製) を境界部から若干低水路側に設置し、通過する渦による水面変化を100秒にわたって計測することにより求めた。波高計支柱の直径は6mmであり、後述のように横断方向スケールが約20cm程度である水平渦の基本的な構造には影響を与えていないと考えられる。なお、この容量式波高計で後述のように1mm程度の水面変動を測定できるかどうかについては、既に文献3)において0.4mm程度の水面変動でも精度よく測定しうることが判明しているので問題はないと判断した。

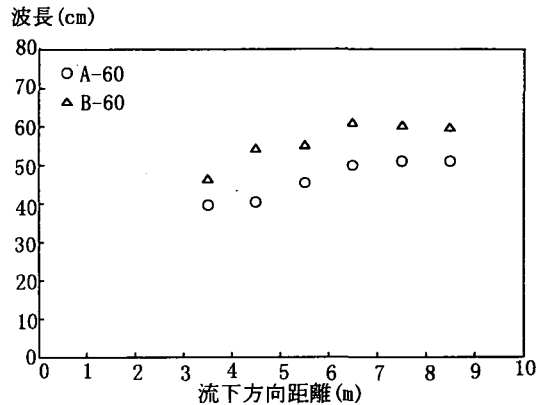


図-2 水平渦波長の発達状況 (A及びBシリーズ)

(2) 実験条件

表-1に実験条件を示す。実験は、まず水深一定の条件で低水路幅のみを変えて行った。これは、文献3)と同じように水深を固定することによって低水路幅のみを変え、2列の渦列の干渉の度合を調べることを目的としている。また、以上のような水深一定で低水路幅を種々変えていく実験を、3通りの低水路水深 ($H=5.7\text{cm}$, 6.0cm , 6.3cm) について行い、水深が変わることによる大規模水平渦列発生状況の違い及び2列の渦列の相互干渉状況の違いを調べた。

表-1中の実験番号はハイフンを挟んで最初の記号が低水路水深の変化を示し (Aは5.7cm, Bは6.0cm, Cは6.3cm)、後の記号が低水路幅の違い (数字の値がそのまま低水路幅の値 (単位cm)) を示している。なお、低水路幅の変化に関しては、実験例が最も多い水深6.0cmの場合についてはB-60 からB-5 まで12ケース行った。よって全水路幅120cmに対し、低水路幅を60cmから5cmまで変えたことになる。また、水深5.7cm, 6.3cmのケースの場合は、それぞれの場合について低水路幅を60cmから10cmまで10cm間隔で変えた。水路床勾配Sはすべての場合について1/1000に設定し、等流条件で実験を行った。従って高水敷の存在の影響を受けない場合の低水路摩擦速度 u_{*0} ($=\sqrt{gHS}$) は、5.7cmの場合は2.36cm/s、水深6.0cmの場合は2.42cm/s、6.3cmの場合は2.48cm/sである。

3. 実験結果

(1) 水平渦の流下方向発達状況

まず、ここでは水平渦の流下方向発達状況に関し

て述べる。一般に、水平渦は、セン断不安定（変曲点不安定）により発達する初期擾乱が、渦のマーキングに代表される複雑な非線形過程を経て平衡な状態に至ると言われている。ここでは、水平渦の波長に注目して、水平渦が流下方向にどのように発達するのかを調べてみることにする。

水平渦の発達に関する実験は、低水路幅が広く、渦列間の干渉が比較的小さいと考えられる実験番号の A-60 と B-60 の 2 ケースについて行った。高水敷設置開始点から 3.5m, 4.5m, 5.5m, 6.5m, 7.5m, 8.5m の地点において、それぞれその地点を中心に、高水敷・低水路境界部から若干低水路側に流下方向に 2 台の容量式波高計を 50cm 離して同時に設置し、水面変動を計測した。その後、得られた水面変動記録データから得られる渦の移流速度と周期から、それぞれの地点における渦の平均波長を求めた。

図-2 に渦波長の流下方向変化を示す。両ケースとも、3.5m から 6.5m の地点の間は流下方向に渦波長は長くなっており、渦の発達域であることが分かる。しかしながら、6.5m 以降では渦の波長はほとんど変化せず一定になっている。これは、水平渦はマーキングしながら発達し、ある地点から下流では平衡状態に達するというを示している。また、水深の違いによって、水平渦の波長が異なるものの、その発達過程には相違は見られない。本研究では、Reynolds 応力などの測定は高水敷設置開始点から 7.5m の地点で行われており、この地点では水平渦は十分に発達して平衡状態になっている。よって以下に述べる本実験結果の考察は、十分に発達した流れおよび水平渦に関するものである。

(2) 水深を一定にして低水路幅のみを変化させて行った実験の結果 (B シリーズ, H=6.0cm の場合)

ここでは、代表的な実験ケースである水深 6.0cm の場合 (B シリーズ) について、低水路幅を全水路幅 120cm に対し 60cm から 5cm まで 5cm 間隔で変化させることによって行った実験の結果を述べ、水深を一定にして低水路幅を変化させた場合に流れ場がどのように変わるか (大規模水平渦列の相互干渉が水平渦の安定性や境界部の水平混合の度合に及ぼす影響) について詳しく検討する。なお、水深の変化による効果については次節以降で取り扱う。

a) 水深平均流速分布

図-3 は水深平均の流速分布を示している。例として、低水路幅が比較的大きいケース B-60 ($b=60\text{cm}$) と、後に述べるように渦列間の干渉が最も強いと考えら

れる B-30 ($b=30\text{cm}$)、かなり狭いケース B-10 ($b=10\text{cm}$) について示したものである。図中、丸印は測定値を、実線は次式で表される理論横断流速分布である (文献4) 参照)。

・低水路内

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\max}} = 1 - \frac{1}{3}(1-J)\exp(\sqrt{2p})\left(4 - \exp\sqrt{2p}\right) \quad (1)$$

・高水敷内

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\max}} = J \left[J + \frac{1}{3}(1-J)\exp\left(-\frac{\sqrt{2p}}{J}\right) \left\{ 4 - \exp\left(-\frac{\sqrt{2p}}{J}\right) \right\} \right] \quad (2)$$

ここに、 \bar{u}_{\max} は低水路内で発生する最大水深平均流速、 \bar{u} は水深平均流速、 $p = y/B\sqrt{v}$ 、 $v = \epsilon_y H^{4/3} / gn_m^2 \bar{u}_{\max} B^2$ 、 g は重力加速度、 $J = (h/H)^{1/3} \times (n_m/n_f)^{1/2}$ 、 ϵ_y は横断平均方向渦動粘係数であり、以下のように表される。

$$\frac{\epsilon_y}{u_{*o} H} = \frac{\gamma^2}{2C_f^{1.5}} (1-J)^2 (1+J)^4 \quad (3)$$

$$\gamma = 0.035 \exp\left[-2.95 \exp(-3.8J^2)\right] \quad (4)$$

ここに $u_{*o} (= \sqrt{gHS})$ は、低水路内の高水敷の影響を受けていない領域の摩擦速度、 $C_f = (u_{*o} / \bar{u}_{\max})^2$ 、 γ は水平セン断層が完全に発達した領域において、様々な種類の水平セン断流に対して測定された流速分布から得られた経験式(4)で与えられる値である (文献4) の図-5 参照)、式(3)、(4)から無次元化された水平渦動粘係数は C_f と J の関数となることが知られている。 J は、セン断層外の (即ち、水深平均流速が横断方向に一定となっている領域) 高水敷水深平均流速 \bar{u}_Φ と低水路水深平均流速 \bar{u}_{\max} と次のような関係がある。

$$J = \left(\frac{\bar{u}_{\Phi}}{\bar{u}_{\max}} \right)^{1/2} = \left(\frac{h}{H} \right)^{1/3} \left(\frac{n_m}{n_f} \right)^{1/2} \quad (5)$$

但し、ケース B-10 のみについては、低水路幅が狭く $\bar{u}_{\max} = H^{2/3} S^{1/2} / n_m$ とならないので式(5)の第2項と第3項は一致しない。従って、B-10 については式(1)、(2)の \bar{u}_{\max} は実測値を用いて図-3(c)を描いている。図-3(a)、(b)、(c)において水深平均流速分布は式

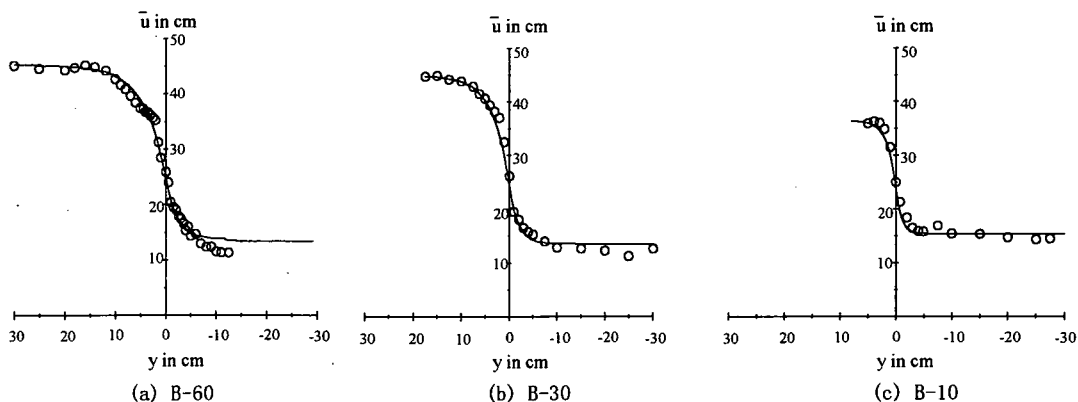


図-3 水深平均流速分布 (Bシリーズ)

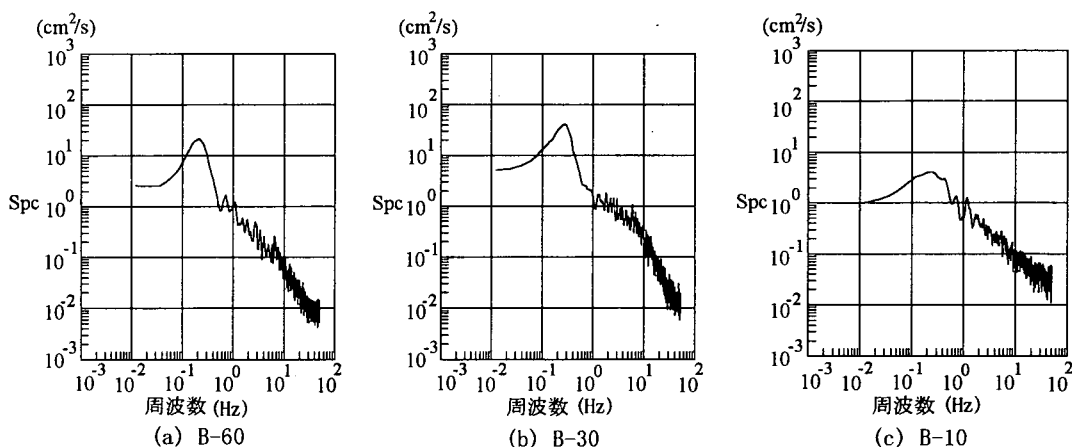


図-4 主流速スペクトル密度関数 (Bシリーズ)

(1), (2)で表される予測値とよく一致している。セン断層の影響を受けていない低水路、高水敷の水深平均流速は一定しており、偏流などの影響を受けていないことが分かる。又、流速分布は低水路から高水敷にわたって滑らかに推移しており、電磁流速計とレーザー流速計による測定結果に差異がないことが知られる。更に、セン断層の幅は、低水路幅が比較的広いB-60、B-30の場合には、低水路側、高水敷側にそれぞれ10cm程度である。このことは、水平渦の横断方向スケールが20cm程度であることを表している。片側高水敷幅は最低でも30cmであるので、本実験では水平渦に対する側壁の影響を考慮する必要がないことを意味している。又、本実験の方法では複断面の高水敷をモデル化した幅30cmのアルミニウム板を移動させると高水敷に1.5mmの段差がつくが、この影響も無視しうる事が分かる。

b) 水平渦の発生状況

図-4は $y=0.0\text{cm}$, $z=0.5\text{cm}$ (図-1参照)における主流速の時系列データのスペクトル密度関数である。B-60, B-30では、大規模渦の発生状況に対応する明瞭なピークがみられる。また、B-30の方がB-60よりも鋭いピークを持ち、しかも絶対値が大きいエネルギースペクトル密度を示している。しかしながら、B-10では、それほどの明瞭なピークは見られず、なだらかなスペクトル形となっている。B-10では水深6cmに対し低水路幅が10cmと水深と低水路幅スケールがかなり近い。従って、低水路幅が低水路水深に比べて充分大きいケースに比べて、流れは底面及び高水敷双方の影響を受けて3次元性が強くなり、水平渦の組織構造が不明瞭になったためであると考えられる。ケースB-10では高周波域でスペクトル形状が $-5/3$ 乗則に従っていない。この原因については現

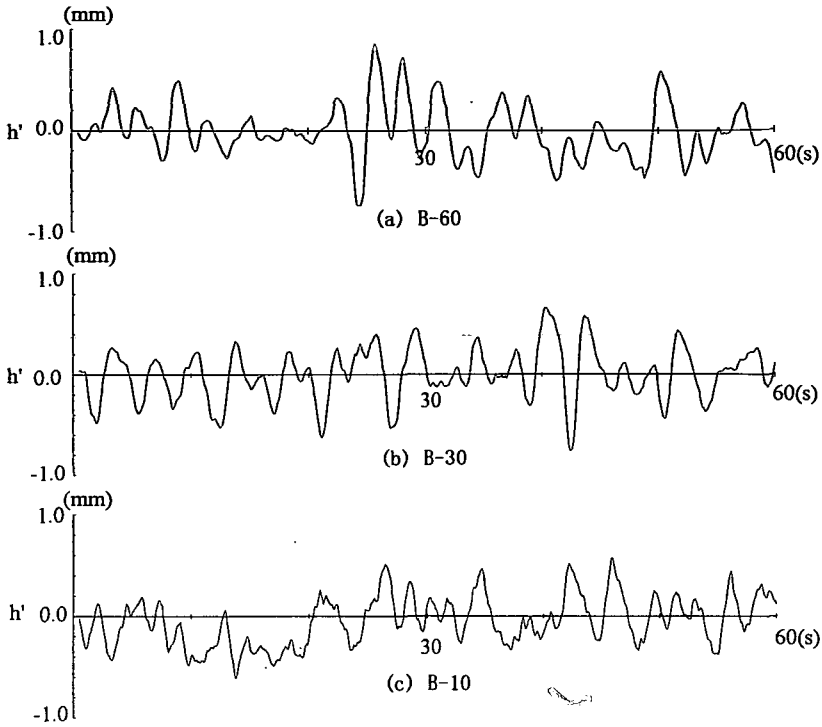


図-5 水面変動記録 (Bシリーズ)

在の所不明であるが、測定精度上の問題ではなく、高水敷間の間隔が狭いことにより上述のような複雑な流れ場が形成されているためではないかと考えられる。

c) 水平渦の安定性理論

次に、一列の渦列に関する線形不安定解析から求まる理論波長、2列の渦列に関するKarmanの非対称渦列の安定性理論から求まる理論波長及び実験で得られる実測波長の比較を行い、水平渦が2つの安定性をどのように受けているかについて検討する。ここでは、まずそれぞれの理論の波長の求め方を簡単に述べる（詳しくは、文献3), 4)を参照して頂きたい）。

一列の渦列に関する線形不安定解析法は、文献3)と全く同一である。ここでは、渦の理論波長 λ の結果のみを示す。

$$\lambda = \frac{2\pi B\sqrt{\nu}}{k} \quad (6)$$

ここに、 ν は既出であり、 $k(=\omega_{\max}/c_T, \omega_{\max}$: 不安定解析により得られる擾乱の最大発達率が現れる無次元角振動数、 c_T : 無次元位相速度)は無次元波数で、 ϵ_y と同様に低水路及び高水敷の水深及びマニングの粗度係数により規定されるパラメータJによって一義的に決定される（文献4)参照）。今回の

水深6.0cmの一連のケース (Bシリーズ)の実験において、Jはすべてについて0.55である。

なお、式(6)で表される線形解析の結果を用いて、マーキングなどの非線形発達が顕著な水平渦の波長を予測できる理由は以下の通りである。式(6)は式(1), (2)で表される完全に発達した領域における横断方向速度分布に対して導かれている。このとき、式(6)中の $\epsilon_y, \omega_{\max}, c_T$ はJの関数となる（文献3)参照）。以上のように、 ϵ_y が水平断層外の高水敷水深平均流速・低水路水深平均流速比の平方根Jの経験関数として与えられることが完全発達域における水平渦波長を線形解析で予測できる大きな理由である。マーキング等の非線形干渉を表現するには、LESなどによる数値解析が必要となるが、式(6)は外部パラメータを与えれば完全発達域における波長を簡単に予測できる点に最大の利点がある。

2列の渦列に関する理論波長は、Karmanの理論によって示されるように2列の渦列が最も安定となる以下の条件から算出した。

$$\lambda = \frac{b}{0.2806} \quad (7)$$

ここで、2列の渦列の横断方向間隔は、複断面開水路流れに発生する大規模水平渦の中心部は文献3)で示されているように、ほぼ高水敷と低水路の境界に

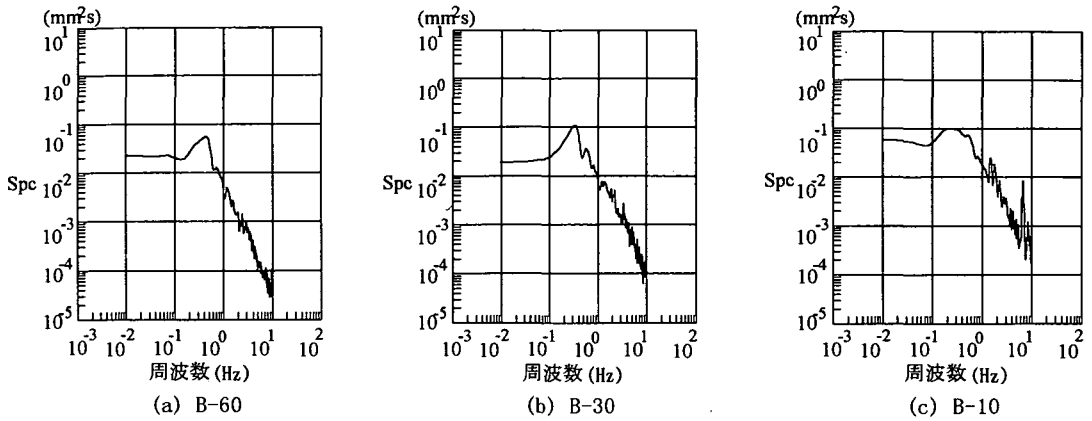


図-6 水面変動スペクトル密度関数 (Bシリーズ)

位置することから低水路幅 b とした。

渦の実測波長の求め方は、3.(1)で述べた方法と同じように、波高計により得られた渦の実測周期に、渦の移流速度を乗じることにより求めた。また渦の実測周期を求める際に、水面変動の時系列データをスペクトル解析し、そのピークを示す周期から求める方法(このようにして求まる波長を以下 λ_{es} とする)と、水面変動の時系列データの波形から渦の通過によるものと思われる水面低下を目視により判定して求める方法(このようにして求まる波長を以下 λ_{eh} とする)の2通りを行い、それぞれの方法で波長を算出した。

水面変動記録例を図-5に示す。例として、B-60, B-30, B-10の3ケースを示す。B-60, B-30について見てみると、水面低下は比較的一定の周期で生じており、特にB-30は比較的きれいな波形が見られる。これは、比較的渦のスケールが一定で、安定なパターン化した渦列が発生している事を示しており、このような場合、スペクトル解析により得られる渦の周期と波形の目視により得られる渦の周期はほぼ一致する。しかしながら、B-10について見ると、B-60, B-30で見られた様なきれいな波形は見られず、大きな周期の変動のなかに小さな変動が入り交じっているような複雑な波形が表れている。このことから、B-10では、大小さまざまなスケールの渦が混在している複雑な流れ場であると言える。このような複雑な波形をスペクトル解析すると、パワースペクトル密度が最大ピークを持つときの周期は、前者の大きな周期を持つ変動によってほぼ決まってしまう、スペクトルはなだらかな分布といくつかのピークを持つにもかかわらず、小さなピークの部分は周波数の決定にあまり効いてこないものと思われる。従っ

て、スペクトル解析によって得られる周期と目視により得られる周期は一致しなくなる。図-6に、B-60, B-30, B-10の水面変動記録のスペクトル密度関数を示す。スペクトル解析にあたっては、サンプリング周波数を20Hzとし、2048個のデータを用いた。B-60, B-30の場合には鋭いピークが見られる。特にB-30ではスペクトルのピーク値が大きい。これに対して、B-10の場合には最大のピークはなだらかであり、しかも高周波側にもいくつかの顕著なピークが見られる。

図-7に一系列の渦列に関する線形不安定解析から求まる理論波長、2列の渦列に関するKarmanの非対称渦列の安定性理論から求まる理論波長、及び実験から得られた実測波長 λ_{es} 、 λ_{eh} をBシリーズのそれぞれのケースについて示す。なお図の横軸は、低水路幅 b を低水路水深 H で無次元化した値を取っている。まず、 λ_{es} と λ_{eh} の比較を行う。低水路幅が30cmであるケースB-30 ($b/H=5$)より低水路幅が大きい場合には、 λ_{es} と λ_{eh} はほぼ一致しているが、 b/H が5よりも小さくなると、 λ_{es} と λ_{eh} は一致しなくなる。すなわち、前にも述べたように低水路幅が比較的大きな場合は、渦のスケールがかなり一定で安定な渦列が発生しているが、低水路幅がある値以下になると渦のスケールが安定せず、さまざまなスケールの渦が混在した流れ場になっている。この原因は、鉛直方向及び水平方向の乱れのスケールが近づき、流れ場の3次元性が強まるためである。

次に、一系列の渦列に関する変曲点不安定性理論と2列の渦列に関するKarmanの非対称渦列の安定性理論の両理論による検討を行う。図-7中実線は、式(6)によって得られる変曲点不安定性理論による線形不安定解析から求まる理論波長であり、破線は式

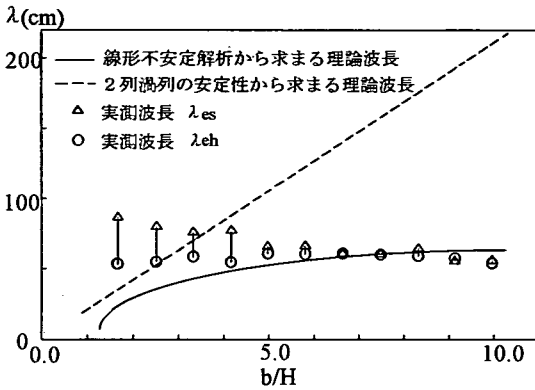


図-7 理論波長と実測波長の比較 (Bシリーズ)

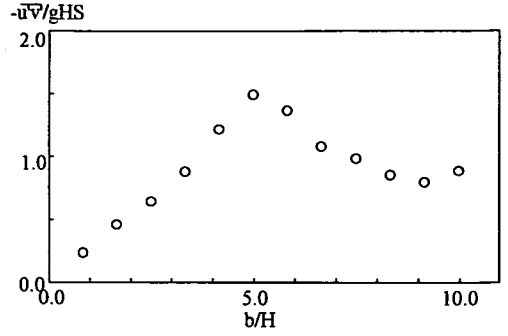
(7)から求まる2列の渦列についての理論波長である。低水路幅が比較的に広い場合には、実測波長は1列の渦列に関する線形不安定解析から求まる理論値に良好に一致している。しかしながら、低水路幅がある値 (b/H が4程度)以下になると、理論値と実測値は次第に合わなくなる。これは、低水路幅と水深のスケールが近づいたために、平面2次元理論では扱えなくなるためであると考えられる。

低水路幅が小さくなるに従い、実測波長は2列の渦列の安定性から求まる理論波長に次第に近づくが、本実験からは2列の渦列の安定性理論に対する明確な依存性は見られない。以上のことから大規模水平渦発生 の 主 要 因 は、主流速の横断分布の変曲点不安定であることが確認される。

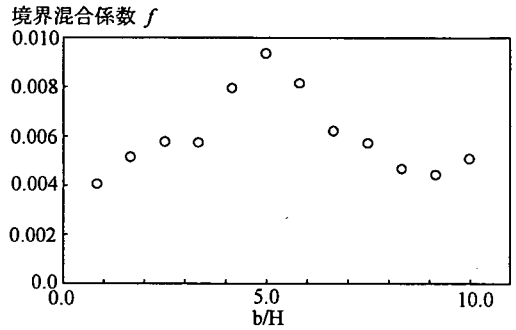
d) 低水路・高水敷間の運動量交換

図-8(a)に、低水路底面せん断応力で無次元化した境界部 ($y=0.0\text{cm}$)における水深平均された Reynolds応力 ($-\overline{u'v'}/gHS$)を低水路幅・低水路水深比の関数として示す。水深平均は流速の場合と同様に2点法によって求めている。これを見ると、低水路幅が30cm ($b/H=5$)のケースB-30において、Reynolds応力が極大値を取るような分布形になっている。水深を一定にして低水路幅を変えていくと、2列の渦列の干渉の度合いが変化し、ある低水路幅のときに最も良く干渉して千鳥状に交互に配列された安定な渦列が形成され、横断方向の運動量交換が最も大きくなることは既に文献3)でも知られている。今回はより広い水路を用い、低水路幅の刻みを細かくし、より広範囲な条件の下で実験を行ったところ、改めてその傾向が明確になった。

ここで、先に述べた渦列の2つの安定性との関連を考慮に入れて、低水路幅・低水路水深比が大きな



(a) Reynolds応力を gHS で無次元化したもの



(b) Reynolds応力を境界混合係数で評価したもの

図-8 境界部の運動量輸送 (Bシリーズ)

場合から小さな場合に移るにつれて、水平混合の度合いがどのように変化するかを調べる。低水路幅が広い場合 ($B-60 \sim B-50$)には両境界部において、それぞれ変曲点不安定性によって発生する2列の渦列は、お互いに干渉せず、その配列の位相関係は時間的に変動して、境界部の Reynolds応力も b/H の値によらず一定のままである。しかし、低水路幅がある値より小さくなると ($B-45$ 以下)、それぞれの渦列が干渉を始め、それが境界部における運動量輸送の活発化につながって Reynolds応力は増大する。更に低水路幅が小さくなるにつれ、2列の渦列はより強く干渉するようになり、ますます Reynolds応力が増加しピークに達する ($B-30$)。しかしながら、低水路幅がある値以下になると ($B-25$ 以下)、3次元性のために渦は次第に組織構造を失い、いわゆる不規則な乱れとなり、Reynolds応力もそれに応じて次第に小さくなる。

低水路幅が狭くなると、低水路内の水深平均最大流速が小さくなり、その分高水敷と低水路内の流速差がなくなり、水平渦の強度が小さくなるため Reynolds応力も小さくなる。従って、渦列の干渉が

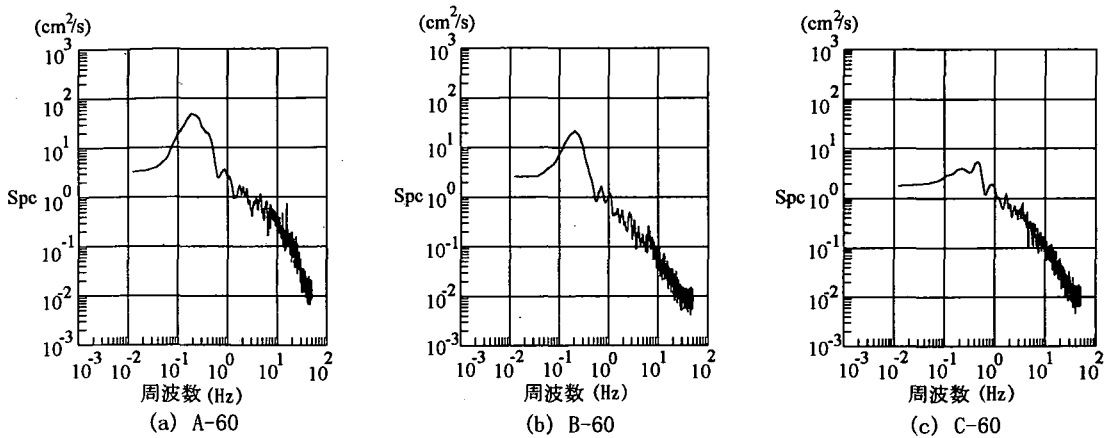


図-9 水深の違いによる主流速スペクトル密度関数の変化 ($y=0.0\text{cm}$, z は各シリーズの高水敷水深の中央の値)

運動量輸送に及ぼす効果を系統的に捉えるためには、無次元の境界混合係数で評価する必要がある。

図-8(b)は、低水路幅の変化と境界混合係数 f の関係を示したものである。この境界混合係数は福岡・藤田²⁾によって導入され、高水敷・低水路境界せん断力 $\tau_{as} (= -\rho \bar{u}'v')$ と流速差の自乗値の比例関係を表す係数である。

$$\tau_{as} = \rho f (\bar{u}_{\max} - \bar{u}_{fp})^2 \quad (8)$$

ここに、 ρ は水の密度、 \bar{u}_{\max} は低水路内水深平均最大流速、 \bar{u}_{fp} は高水敷内の一様となった領域の水深平均流速を表している。境界混合係数 f は、図-8(a)で示されたReynolds応力の絶対値が最も大きくなる場合と同様に、低水路幅・低水路水深比が5 (B-30) で極大値を持つ分布形となっている。

以上のことから、水深を一定にして低水路幅を変えていくと、2列の渦列の干渉の度合や乱れの構造が変化し、その中で最も効果的に干渉し合う低水路幅・低水路水深比において横断方向運動量輸送が最も大きくなると言える。

(3) 水深の変化による渦発生状況の違い

ここでは、A, B, Cの各シリーズの実験データを用いて、水深が異なる場合に渦の発生状況がどのように変化し、それとともにReynolds応力がどのように影響を受けるかを検討する。図-9は、それぞれのシリーズにおいて低水路幅が最も広い $b=60\text{cm}$ の場合についての主流速スペクトル密度関数である。なお、 $y=0.0\text{cm}$ において流速を測定した結果、底面極く近くまたは水面極く近くを除いて水深方向に乱れの統計量はほとんど変化しないことが測定によって判明

したので、それぞれのシリーズについて境界部で水深方向に1点の測定点において計測することにより流れ場の比較ができ、図-9はその結果を示したものである。

これを見ると、ケース A-60, B-60 では、大規模渦の発生周期に対応するエネルギースペクトル密度の明瞭なピークが見られる。しかしながら、C-60 では、それほど明瞭なピークは見られず、全体的になだらかなスペクトル形となっている。よって、A-60, B-60 では、水平渦が明瞭に発生しているが、高水敷水深が大きいC-60では水平渦の構造が不明瞭になりつつあることが分かる。また、A-60の方が、B-60よりも大きなエネルギースペクトル密度を示しており、より強い水平渦が発生していることが分かる。次に水面変動という観点から、水深の違いによる渦の発生状況の変化を調べてみる。図-10は、A-60, B-60, C-60 の水面変動記録例、図-11は同じくA-60, B-60, C-60 の水面変動スペクトル密度関数である。これらを見ても、水深が5.7cmと小さいA-60では強い水平渦が発生していることが伺われるが、水深が6.3cmと大きいC-60では、水平渦発生はかなり不明瞭である。

以上のように、主流速あるいは水面変動のスペクトルから見ても、高水敷高さに対し水深が浅いほど強い水平渦が発生し、高水敷水深が大きくなるにつれ、水平渦の発生は次第に不明瞭になることが分かる。これは境界部におけるせん断の強さに関係している。水深が浅いほど、高水敷・低水路間の流速差が大きく、境界部において強いせん断が生じ、それが水平渦の発生に寄与している。逆に水深が大きくなるにつれ、高水敷・低水路間の流速差が小さくな

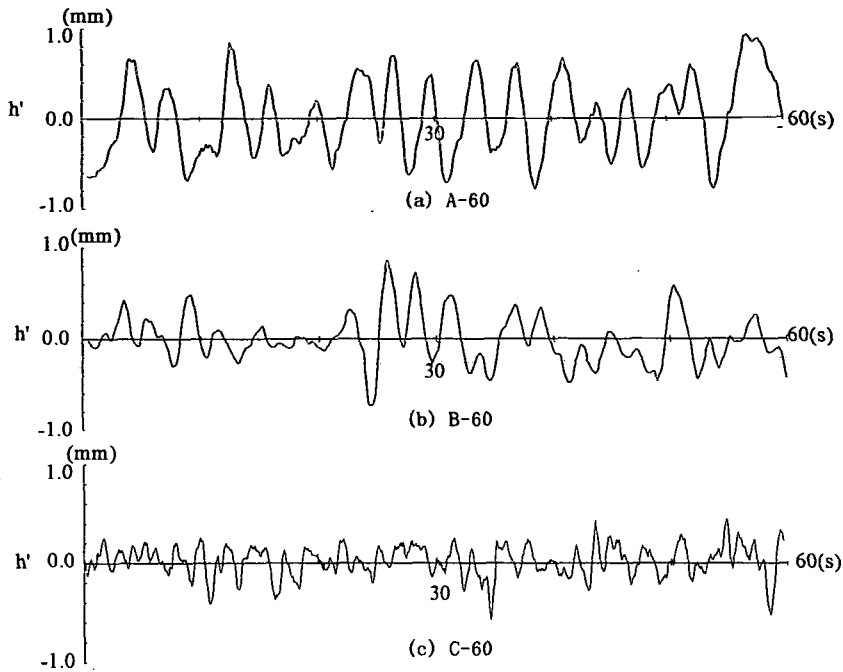


図-10 水面変動記録例 (水深の違いによる比較)

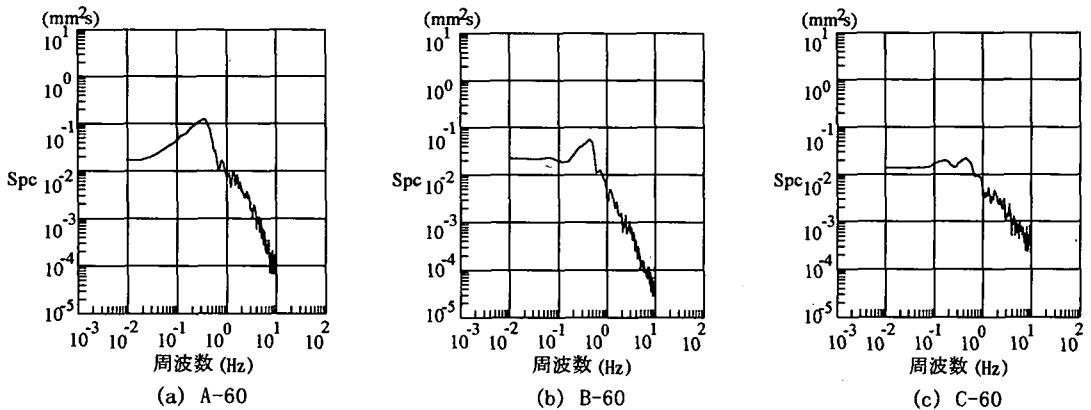


図-11 水面変動スペクトル密度関数(水深の違いによる比較)

り、渦度が小さくなるので水平渦の発生も抑えられる。以上のように複断面開水路流れでは水深の違いが流れ場に及ぼす効果は大きい。今回の実験は、高水敷、低水路とも同じ粗度係数で行われたが、わずか水深の数mmの違い(高水敷高さの数%の水深の違い)により流れ場が大きく変化することが判明した。

(4) 複断面開水路流れの系統的把握

ここでは(2)、(3)でそれぞれ述べた低水路幅と水深の両方の効果が流れ場に及ぼす影響を評価するために、渦列の安定性と運動量交換に着目して複断面開水路流れの系統的把握を試みる。

a) 水平渦の安定性

図-12に水深3ケースの場合すべてについて水平渦の実測波長と線形不安定解析から得られる理論波長の比較を示す。なお、ここでの実測波長は渦の正確な波長であると思われる λ_{ch} のみを示した。同図を見ると、水深が小さくなるにつれ、理論値、実験値ともに全体的に波長は短くなっている。これは、高水敷水深が浅い程、境界におけるせん断力が大きく、不安定性が強くなって小さなスケールの(しかし強い)水平渦が形成されるためである。

低水路幅の変化に対する渦の波長の変化の状況は、3つの水深のケースでほぼ同じ傾向を示している。

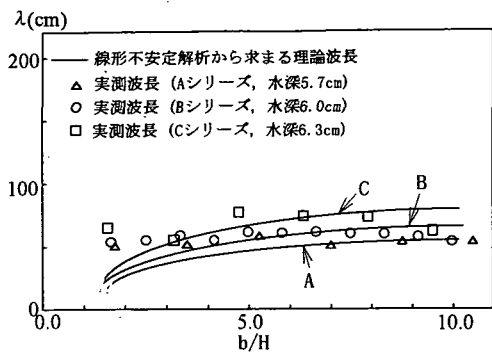


図-12 理論波長と実測波長の比較 (A, B, Cシリーズ)

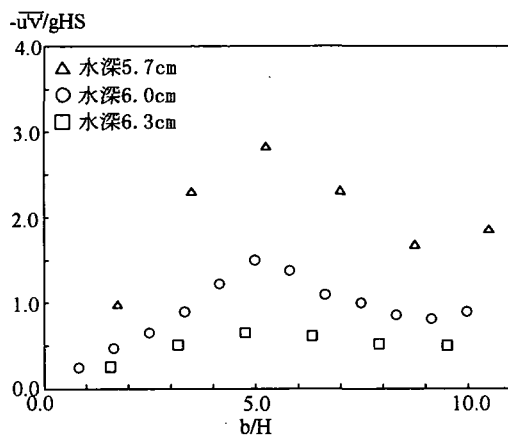
低水路幅が極端に狭くなり平面2次元の理論では取り扱えない場合を除いて、2次元変曲点不安定性への依存度が高いことが分かる。

b) 境界部における運動量輸送

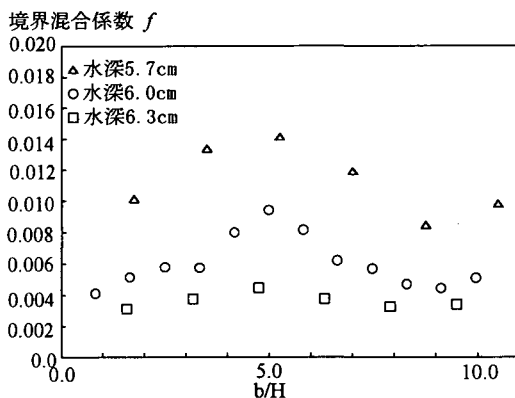
図-13に水深3ケースの場合すべてについて低水路・高水敷境界部における(a)Reynolds応力及び(b)境界混合係数 f の値を示す。

図-13(a)は水深平均したReynolds応力を gHS で無次元化したものである。水深が5.7cmの場合が無次元Reynolds応力は最も大きく、水深6.0cm、水深6.3cmと水深が大きくなるにつれ、無次元Reynolds応力の値は小さくなっている。これは、図-9, 10, 11で見たように高水敷水深が浅くなるに従い、境界部で強い水平渦が発生するためである。また、全ての水深のケースにおいて、 $b/H \approx 5$ の時にReynolds応力が極大値を取るような分布形になっている。これより本実験の範囲では、複断面開水路流れでは水深の大小によって水平渦の強さが変化し、2列の渦列の干渉に起因する水平混合の極大値の発生は $b/H \approx 5$ において生じる。しかし、本実験では、低水路幅を5cm間隔で変えており、実際はその間でピークの位置が変わることもありうる。また、水深6.3cmの場合には弱い極大値が見られるものの、他のシリーズと比べて b/H の大小によって水平混合の度合いがあまり変化しないという結果が得られた。これは図-9, 10, 11で見たように、このCシリーズでは高水敷水深が大きく、水平渦の発生がかなり不明瞭になっているために、2列水平渦列のお互いの干渉による運動量輸送の増加が少なかったためである。

図-13(b)は境界混合係数 f の変化を示している。同図を見て気付くことは、無次元境界混合係数 f は高水敷水深 h （厳密には h/H ）によっても変化し、 b/H に対して一義的に定まらないことである。このことは既に述べたように、流れ及び水平渦の構造が



(a) Reynolds応力を低水路底面せん断応力で無次元化したもの



(b) Reynolds応力を境界混合係数で評価したもの

図-13 境界部の運動量輸送

高水敷水深によって変化することによっている。

4. 結論

本研究は、複断面開水路流れの水深と低水路幅を系統的に変化させて実験を行い、水平組織渦の安定性や境界部の運動量交換などについて検討したものである。以下に主要な結論を述べる。

1) 複断面開水路流れにおいては、低水路幅・低水路水深比 (b/H) が約5で両境界部に発生する2列の渦列同士が最も良く干渉し合い、低水路・高水敷境界部における運動量輸送は極大値を取る。しかし、この結論は本実験の範囲内である高水敷水深・低水

路水深比 (h/H) が小さい場合について成立する。Cシリーズにおいて見られたように h/H が0.22程度よりも大きくなると、顕著なピークは存在しなくなると考えられる。その理由は、 h/H の値が大きくなると低水路・高水敷間の流速差が減少し、明瞭な組織渦構造が失われるからである。

2) 水深と低水路幅のスケールが近づくと、流れの3次元性が強くなり、安定な渦列が形成されなくなっていわゆる乱流的な不規則な流れ場となる。

3) 低水路幅・低水路水深比が小さく、平面2次元理論では取り扱えない場合を除いて、2列の水平渦列のそれぞれの水平渦の波長は式(6)で表されるせん断不安定によってほぼ決定され、水平渦の発生要因が主流速の横断分布の変曲点不安定であることが確認された。

4) 複断面開水路流れでは、高水敷水深のわずかな変化が流れ場に大きく影響する。すなわち、高水敷水深が浅いと、水平渦の波長は短くなるが、強度の大きな水平渦が発生し、境界部において単位深さ当たりの運動量輸送は大きくなる。

謝辞：本研究は文部省科学研究費一般研究B(課題番号：07455195)の補助を受けて行われたものである。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集，345号，pp.1-19, 1984.
- 2) 福岡捷二，藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計

画への応用，土木学会論文集，411号，pp.63-72, 1991.

- 3) 池田駿介，村山宣義，空閑健：複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造，土木学会論文集，509号，pp.131-142, 1995.
- 4) 池田駿介，太田賢一，長谷川洋：側岸部植生境界の周期渦の発生機構，土木学会論文集，443号，pp.47-54, 1992.
- 5) 難岡和夫，八木宏：SDS&2DHモデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション，土木学会論文集，473号，pp.35-44, 1993.
- 6) Tamai,N., Asaeda,T. and Ikeda,H. : Study on generation of periodical large surface eddies in a composite flow, *Water Resour.Res.*, Vol. 22, No.7, pp.1129-1138, 1986.
- 7) Chu,V,H., Wu,J.H. and Khayat,R.E. : Stability of transverse shear flows in shallow open channels, *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 117, pp.1370-1388, 1991.
- 8) 木村一郎，細田尚，村本嘉雄，安永良：平面二層モデルによる複断面開水路流れの水平渦運動解析，土木学会水工学論文集，40巻，pp.699-704, 1996.
- 9) 池田駿介，戸田祐嗣，空閑健：PIVによる複断面開水路に発生する周期渦の瞬間構造の測定，河道の水理と河川環境シンポジウム講演論文集，pp.33-38, 1995.
- 10) 禰津家久，志村拓也，中山忠暢：PTV手法による高水敷・低水路間で発生する組織渦の解析，土木学会水工学論文集，40巻，pp.1059-1064, 1996.

(1996. 3. 29. 受付)

LABORATORY STUDY ON LARGE HORIZONTAL VORTICES IN COMPOUND OPEN CHANNEL FLOW

Syunsuke IKEDA and Takeshi KUGA

It has been known that shear instability generates large horizontal vortices at the junctions of a main channel and flood plains in two-stage channel. A series of laboratory tests were performed by varying the main channel width, and the tests were conducted for 3 cases of water depth. Fluid velocity and water surface elevation were measured by using laser-Doppler velocimetry and capacity-type wave gage, respectively. It was found that two arrays of vortex streets become very stable at $b/H=5$, in which b is main channel width and H is main channel depth. The Reynolds stress at the junction shows a peak value at $b/H=5$ for all cases of water depth. The wavelength of vortices was predicted successfully in terms of linear shear instability analysis.