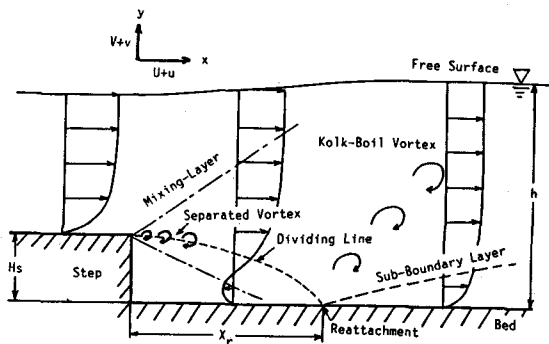


開水路段落ち流れの流速回復過程と再付着点からの組織渦の放出特性
Velocity Relaxation Process of Separated Step Flow and Coherent Vortex
Shedding from Reattachment in Open Channl Flows

京都大学 工学部 正 員 柵津家久
京都大学 工学部 正 員 中川博次
京都大学 大学院 学生員 天野邦彦
京都大学 工学部 学生員 藤本和久

1. まえがき

再付着点を伴う局所流は、一般に流れの断面形状が急変する所で発生する現象であり、剥離渦や逆流域さらには再付着点付近に低周波変動が形成される。図・1 に示すように、段落ち流れは剥離流の典型例であり、剥離渦によって強いせん断層が形成され、乱れエネルギーの発生率や逸散率は非常に大きく、流速分布やせん断応力分布は急変するからこの内部構造を解明し、流速の回復過程を明らかにすることは水工学上重要である。近年のレーザ流速計の開発で、このような逆流域を伴う高せん断層の乱流計測が本格化して来た¹⁾。筆者らは²⁾ 前回の水講で水面形状の変化が非常に小さい開水路段落ち流れを対象にし、レイノルズ数を変化させ、逆流域を含む乱流場をレーザ流速計で詳細に計測し、平均流速や乱れ特性に関する基本的知見を得た。すなわち、段落ち頂部で成立する対数則分布は混合層で成立するガウス分布へと移行するが、再付着点から内部境界層が発達するため再び対数則へと回復する特性が見られた。このような、混合層と壁面乱流との複合流れのせん断応力分布や圧力分布などの内部構造が運動方程式から良好に説明されることを示した。しかし、段落ち高さ H_s の20 倍程度下流でも流速分布は一樣には回復せず、また、フルード数を大幅に変化させた場合の局所流特性は不明のままである。以上の知見に基づき、本研究は、フルード数を常流と射流とに大幅に変化させ、段落ち流れの流速分布の回復過程を検討するものである。また、前回の研究に於て、再付着点とその平均位置を中心に50%程度も主流方向に変動していることがわかり、逆流域の伸縮によって組織渦が放出され、それが土砂の巻き上げやボイル渦に発達する可能性が示唆された。本研究は、この組織渦の実体を明らかにするため、再付着点での圧力変動と流れ場の流速変動との時空間相関を解析し、河川で見られるボイル渦と比較してみる。



図・1 段落ち剥離流の模式図

Case	H_s (cm)	h_2 (cm)	U_{max0} (cm/s)	U_m (cm/s)	Re ($\times 10^4$)	Fr	X_R/H_s
ST-1	2	5.8	24.3	14.2	0.82	0.19	6.3
ST-2	2	7.9	26.7	17.9	1.40	0.20	5.8
ST-3	2	10.6	29.2	22.1	2.34	0.22	5.2
ST-4	2	7.8	42.5	29.3	2.29	0.33	6.4
ST-5	2	8.1	15.5	10.4	0.84	0.12	5.5
ST-21	1	12.6	25.1	19.9	2.50	0.18	5.0
ST-23	1	6.8	57.2	36.7	2.50	0.45	5.9
ST-25	1	3.2	81.9	78.1	2.50	1.40	3.7

Suffix 2 = values at downstream uniform section

表・1 水理条件表

2. 実験装置及び計測方法

長さ10 m、幅40cmの可変勾配型水路を用い、上流端から7 m下流に落差高 $H_s = 1$ cmの段落ちを設けた。前回の実験は幅30cmの水路で、落差高 $H_s = 2$ cmであったが(表・1のケースST1からST5)、今回の実験では、計測区間を最低60 H_s までとり、流速の回復過程を検討することに主眼を置いた。表・1のST-21、-23、-25の3種類のケースを行い、レイノルズ数を一定に保ち、フルード数を常流と射流とに大幅に変化させた。水路中央軸に沿って、下流方向(x 軸)に20断面、鉛直方向(y 軸)にケースによって9から27測点トラバースして、2成分レーザ流速計で流速を高精

度に計測した。なお、計測方法は前回と同様である。²⁾

3. 流れの回復過程に関する実験結果及び考察

3.1 平均流速及び乱れ特性

図・2 (a)及び(b)は、それぞれST-23及びST-25の平均流速 U 、レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ 、乱れ強度 u' 、 v' を示すものである。ST-21は、ST-3 とほぼ同一の水理条件であり、水面変化もほとんどなかった。ST-23は $F_r = 0.45$ の常流であるが、水面形はかなり波立っている。しかし、この水面形は定常であり、場所的・時間的に固定していた。フルード数 F_r がさらに大きくなると、波状跳水が起き、流れはさらに複雑となる。一方、ST-25は $F_r = 1.4$ の射流の代表例であり、水面形は下流側に急激に減少し、その後若干波立ちながら等流となるが、この場合も水面形は定常であった。なお、等流となった最終水深は、1次元水理解析の共役水深関係からほぼ与えられる。²⁾ 常流と射流の乱流構造の流下方向への変化過程は非常に異なることが図・2よりわかる。射流は、常流に比べて再付着点距離が短かく、乱流構造はより速く一定の分布形に収束するようである。平均流速分布は後で詳細に検討することにし、まずレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ を検討する。津津らによって指摘されたように、²⁾常流のとき $-\overline{uv}$ はほぼ剥離流線に沿って発達し、再付着点後は運動量の変化 $\int_y^h \partial U^2 / \partial x \, dy$ のピーク位置とほぼ一致し、 $y/H_s > 1$ に最大値が現われ、 $x/H_s = 60$ の下流でも y に対して直線分布をしない。一方、射流では $-\overline{uv}$ の最大位置は再付着点後、河床近くに現われ、 $x/H_s \geq 26$ では y に対してほぼ直線分布をなし、等流の分布則に従う。図・3は、 $-\overline{uv}$ の最大値を初期断面 $x = 0$ での最大流速 U_{max0} で無次元表示したものである。 $-\overline{uv}$ の最大値は、再付着点付近でピークに達して低減するが、射流の方が低減率大きい。この変化特性は水理条件に依存するが、境界層での特性とほぼ類似し、³⁾せん断層の形成機構は両者で同じであると考えられる。次に、乱れ強度 u' 、 v' に関しては、常流のとき $y/H_s = 1$ に沿って増大するが、²⁾射流では $-\overline{uv}$ と同様な発達過程を示す。乱れ強度の回復過程も常流より射流の方が速かった。

以上のように、乱流構造の回復過程が常流より射流の方が速い理由は、段落ち後、下流水深が急減し、強い加速流が生じるためと考えられ、この影響は平均流速分布にも顕著に現われる。

3.2 再付着点特性

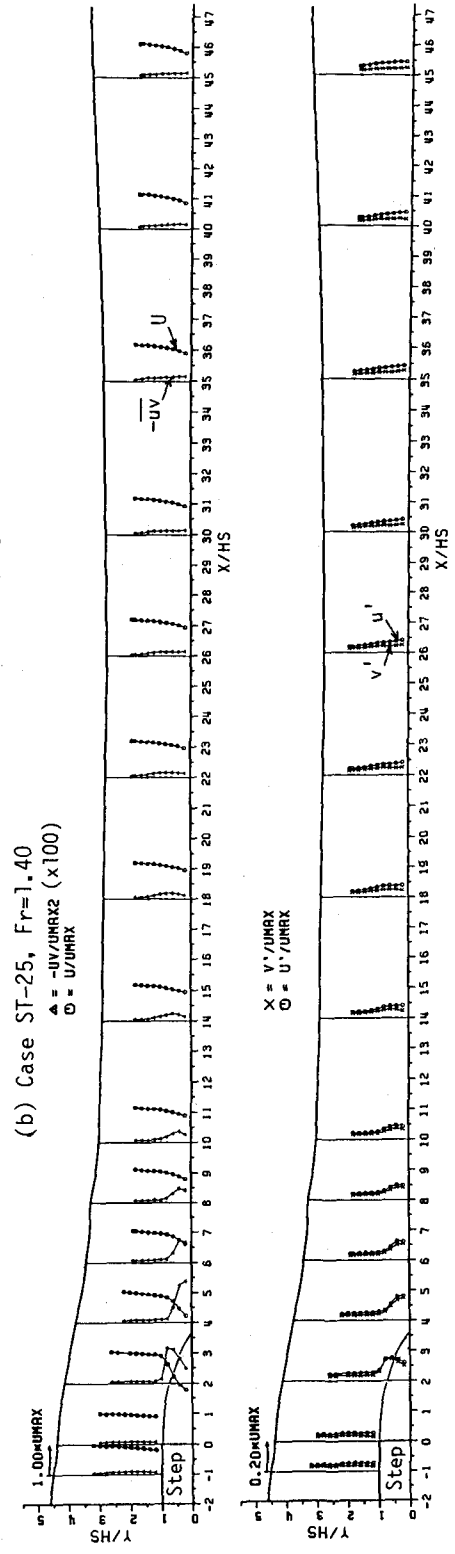
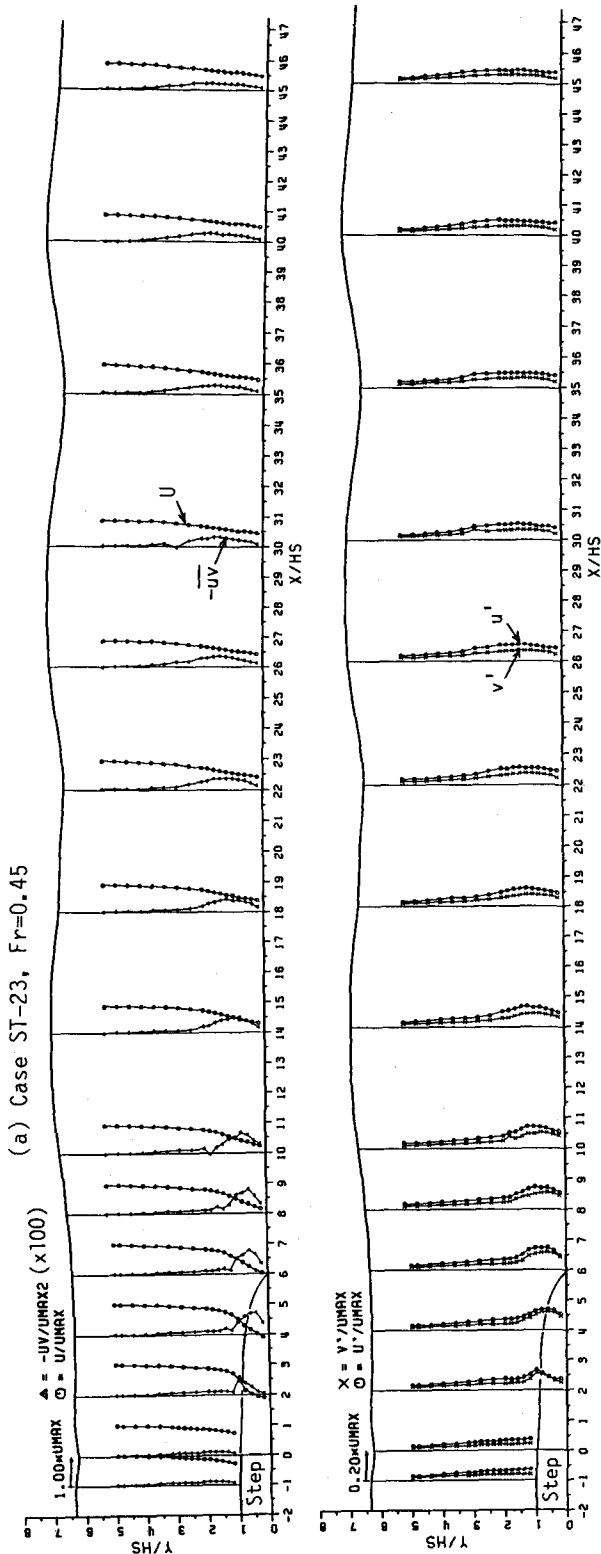
図・4は、河床近傍 $y = 2 \text{ mm}$ での逆流率 I_r を計測した結果である。 $I_r = 0.5$ が平均再付着点 x_R であり、ここを中心に再付着点が x 方向にかなり伸縮することがわかる。特に、ST-23は変動幅が大きく、フルード数 F_r が大きな常流域でボイル渦の発生は活発になることが予測される。図・5は、 x_R/H_s をフルード数 F_r に対して図示した。データ数が少ないが、レイノルズ数が一定のとき、 $F_r \approx 0.35$ でピークをとり、射流で減少するようである。今後、データ数をより多く、収集し、また、再付着点の変動特性をより詳細に検討する予定である。

3.3 平均流速分布の対数則への回復過程

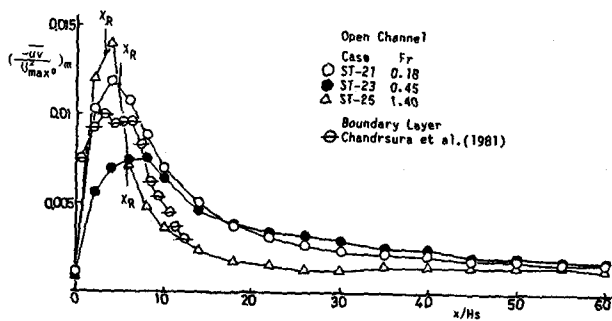
図・6 (a)、(b)は、平均流速分布の対数表示を行い、開水路で成立する次の対数則⁴⁾と比較したものである。

$$U/U_* = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + A, \quad \text{ここで、} y^+ \equiv yU_*/\nu, \quad \kappa = 0.41, \quad A = 5.3 \quad (1)$$

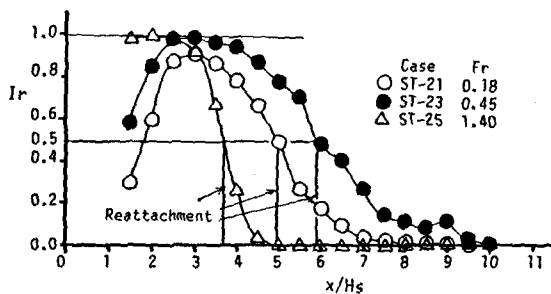
摩擦速度 U_* は内層($y/h < 0.2$)で実験値が式(1)と一致するように最小2乗法で決定された。図・6 (a)の常流では流速分布の回復過程が明瞭にわかる。段落ちの直前では式(1)とよく一致するが、段落ち直後から再付着点までは混合層型となり、式(1)は適用できない。再付着点直後の壁面せん断応力 $\tau_0 = \rho U_*^2$ は非常に小さく、平均流速は式(1)から大きくずれる。しかし、内部境界層が発達すると、壁面乱流の特性が現われ、 $x/H_s \geq 14$ 程度から式(1)の対数則に次第に乗るようになる。実験値が式(1)からずれる点を内部境界層厚 δ と定義すると、 $x/H_s = 60$ でも $y/\delta = 0.3$ であり、外層でのwake関数を考慮しても外層の流速分布は式(1)の対数則からかなり高速側にずれている。このように、常流の流速分布が対数則に回復するには $x/H_s > 60$ のかかなりの距離を要することがわかり、この結果は境界層流のBradshawらの指摘と一致する。⁵⁾ 一方、図・6 (b)に示す射流の場合は、段落ち頂部の河床近くの流速は式(1)より高速側にずれる。再付着点近くは $\tau_0 \approx 0$ のため式(1)の適用はできないが、再付着点後は河床近くで式(1)から若干高速側にずれ、 $x/H_s \geq 26$ で全水深にわたり式(1)と一致する点が注目される。このように、段落ち射流で河床近くの流速が対数則より高速になるのは、図・2で示したように水面形が急減少し、遠心力効果が現われ、河床側がより加速されるためであり、ダム越流頂部の流れと同じ効果が現われていると考えられる。



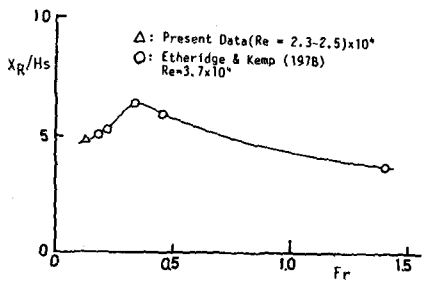
図・2 段落ち流れの平均流速 U 、レイノルズ応力 $-uv$ 及び乱れ強度 u' 、 v' の分布



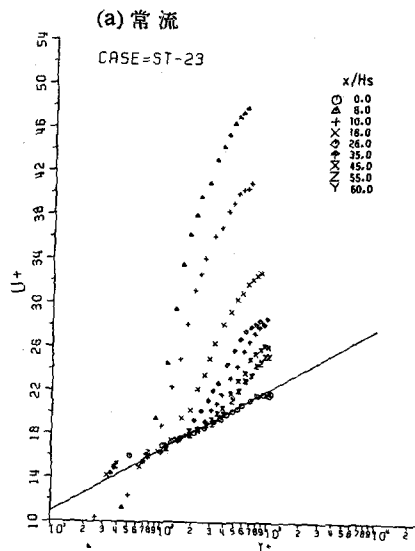
図・3 最大レイノルズ応力 $(\overline{u'v'})_m / U_{max}^2$ の分布特性



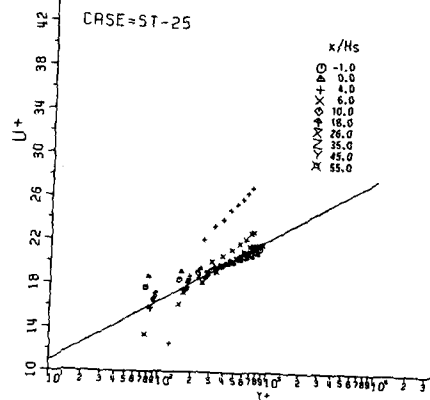
図・4 逆流率 I_r の分布特性



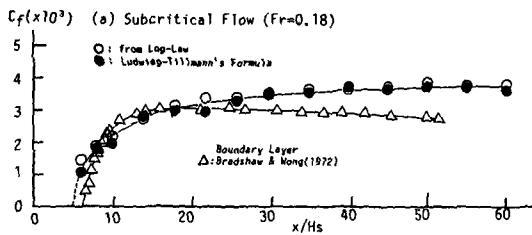
図・5 再付着点距離の変化



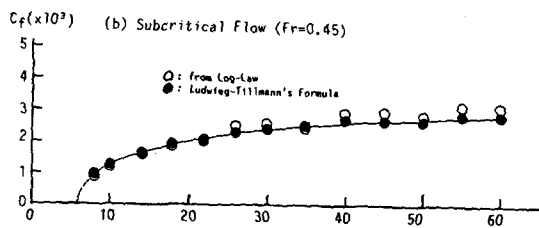
(b) 射流



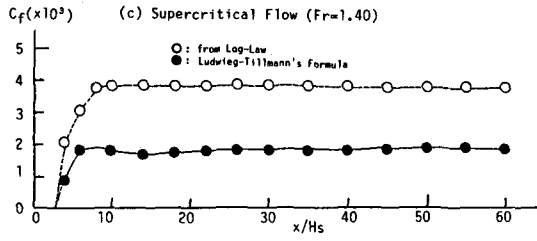
図・6 平均流速分布の回復過程



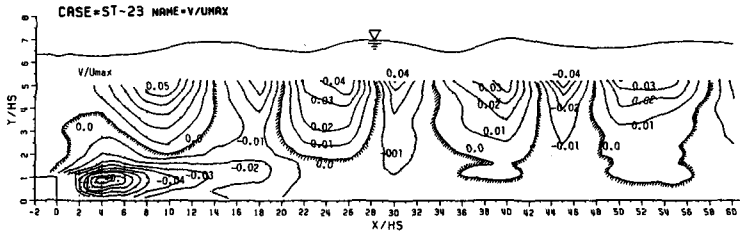
図・7 (a) 壁面摩擦係数 C_f の変化 ($Fr = 0.18$)



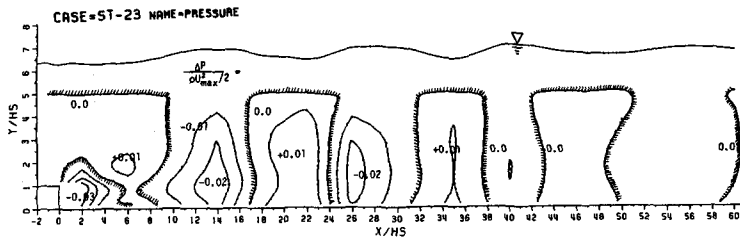
図・7 (b) 壁面摩擦係数 C_f の変化 ($Fr = 0.45$)



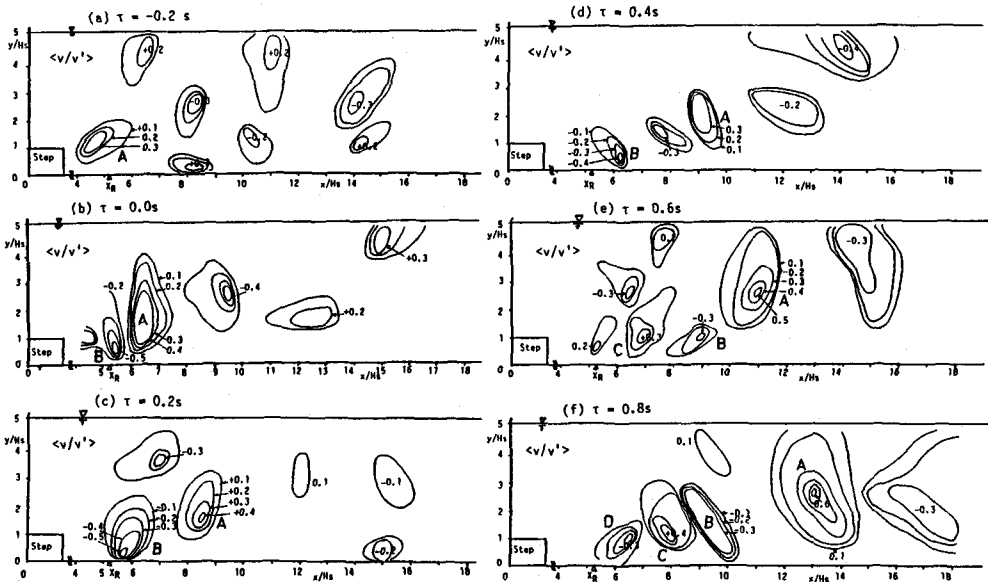
図・7 (c) 壁面摩擦係数 C_f の変化 ($Fr = 1.40$)



図・8 鉛直方向の平均流速成分のコンタ



図・9 動圧力分布



図・10 再付着点での圧力変動 q と鉛直速度変動 v' の条件付平均コンタ図

3. 4 壁面摩擦係数 C_f

壁面せん断応力 τ_0 の流下方向変化は局所流では特に重要な水理量である。式(1)から求められた U_* を壁面摩擦係数 $C_f \equiv 2(U_*/U_{max})^2$ の形で図・7(a),(b),(c)に示した。ここで、 U_{max} は各測点での最大流速である。図には、次式のLudwig-Tillmannの実験公式を使って、流速分布形から計算された値を併示した。

$$C_f \equiv 2(U_*/U_{max})^2 = 0.256 \times 10^{-0.678H} \times R\theta^{-0.268} \quad (2)$$

ここで、 $H \equiv \theta_1/\theta_2$, $R\theta = U_{max} \theta_2/\nu$, θ_1 = 排除厚, θ_2 = 運動量厚である。

式(2)は、もともと境界層から得られたものであるが、常流の場合、実験値と式(2)との一致はきわめて良好である。図・7(a)には境界層でのBradshawらの実測値も併示した。⁵⁾境界層では $x/H_s = 20$ 程度にゆるいピーク値をとるが、開水路では単調に増加し、一定値に達するようである。一方、図・7(c)の射流の場合は、実験値と式(2)とはかなり相違する。図・2に示したように、射流の実験では水面近くの計測は困難となり、 θ_1 , θ_2 の計算にかなり誤差を伴うことが考えられるが、図・6(b)で示したように、射流では常流に比べて加速の効果が強く出たことが原因かも知れず、今後さらに検討したい。実験値の特性を検討すると、再付着点直後、 C_f は急増し、再付着点距離が長いほど C_f が一定値に収束するまでの距離はかなり長くなることがわかる。

3. 5 鉛直方向の平均流速 V 及び圧力分布 P

図・8は実測した鉛直流速 V のコンタを示す1例である。段落ち直後の剥離流線に沿って非常に大きな負のピークを示し、 $V/U_{max} = -0.1$ にも達する。この水面側は正の値となり、水面形も正勾配となっている。下流に行っても、 V と水面形状との対応は非常に良好である。すなわち、 $dh/dx > 0$ で $V > 0$, $dh/dx < 0$ で $V < 0$ となり、この結果は実測の U を連続式を使って求めても得られ、水面形が波状を呈していても乱流構造は安定したものといえる。図・9は、運動方程式を使って求めた圧力分布であり、静水圧分布からのずれ、すなわち流速変化に伴う動圧力の分布である。²⁾水面形が凸の所で負圧、凹部の所で正圧となっている。このように、フルード数が大きい常流では水面形が波状となり、乱流構造はかなり複雑なものとなる。また、動圧力分布によって何らかの組織渦の発生・発達が存在するものと示唆される。

4. 再付着点からの組織渦の放出特性

ケースST-3を対象に、再付着点に圧力変換器をセットし、流速と圧力との時空間相関を解析した所、ボイル渦と考えられる組織渦が検出された。図・10は、圧力変動 p がこのrms値 p' より大きくなった条件でボイル渦の発生、または通過があったと仮定して条件付サンプリングをした v 変動の一連の結果である。遅延時間 τ は -0.2 から 0.8 秒まで変化させた。組織渦は3次元性が強いので、データにはかなりばらつきがあるが、条件付平均の $\langle v/v' \rangle$ のコンタはボイル渦の発生・発達を示していると考えられる。 $\tau = 0$ では、再付着点付近に強い渦があり、 $v < 0$ と $v > 0$ となるある界面が存在するようである。これは、前者の渦Bが図・1で示した剥離渦の発達したものが再付着点にきたことを、また、後者のAはここから放出される渦を示すものと思われる。 $v > 0$ の浮上する渦Aを時間 τ を追って見ると、0.6秒後にC渦が発生している。A, C渦は $v > 0$ であり、これらの移流速度は局所平均流速の約0.7倍である。AとC渦の間隔は移流に伴って長くなり、 $\tau = 0.8$ の図から評価するとAとCの通過周期 T は1秒間以上となり、 $TU_{max}/h \geq 3$ となる。水面に達する前に弱いボイル渦は崩壊するものと考えられ、水面でのボイルの無次元周期は河川で観測される7程度の値をとるものと予測される。

5. 結 論

段落ちの乱流構造はフルード数が大きくなると複雑になるが、射流になると流速の回復過程は常流に比べてかなり速くなる。再付着点付近からはボイル渦が放出されることが条件付解析から示された。

【参考文献】

- 1) Etheridgeら(1978), JFM, vol. 86, p.545.
- 2) 祐津ら(1986), 水講論文集, p.601.
- 3) Chandrsudaら(1981), JFM, vol. 110, p.171.
- 4) Nezuら(1986), ASCE, Hydr. Eng, vol. 112, p.335.
- 5) Bradshawら(1972), JFM, vol. 52, p.113.