

## 大規模渦によって誘起される上昇流およびボイルの構造\*

THE STRUCTURE OF UPWARD FLOW AND BOIL INDUCED  
BY LARGE SCALE EDDIES

福岡 捷 二\*\*・福嶋 祐 介\*\*\*・奥津 一 夫\*\*\*\*

By Shoji FUKUOKA, Yusuke FUKUSHIMA and Kazuo OKUTSU

## 1. 序 論

河床付近で生じた大規模渦が強い上昇流を伴い流下しながら上昇し、やがて水面に達し横方向に拡がる現象をボイルという。ボイルは河川の大規模乱流現象の1つの現れで、ボイルが生じているときには平均流の場に強い影響を与える。特に、河床波を伴う移動床流れでは、河床波の下流側から上昇流やボイルが発生しやすい。このため、ボイルや上昇流により多量の砂が巻き上げられ、流砂量・浮遊砂分布等に影響を与える。同時に、このような大規模渦運動は河床形状をも変化させることが予想される。

開水路乱流とボイルの関連について従来いろいろな角度から検討が加えられている。Matthes<sup>1)</sup>は、自然河川でみられる“Macroturbulence”の1つとしてボイルをあげた。彼は、上向きの傾いた渦(kolk)が水面に達して放射状に拡がったものをボイルと考え、ボイルと土砂輸送の関連を示唆した。また、Theodorsen<sup>2)</sup>は、乱流境界層の大スケール乱れの構造として馬蹄型渦(あるいはU字型渦)を提案した。馬蹄型渦は、底面付近で生じた渦管がこれを構成する渦糸の相互作用により馬蹄形状になるためこのように命名されたもので、有限翼から発生するhorse-shoe vorticesに似ている<sup>3)</sup>。石原・余越<sup>3)</sup>は、このような馬蹄型渦が引き伸ばされて水面に達したものがボイルであると考えた。宇民・上野<sup>4)~6)</sup>は、石原らの考え方が発展させ馬蹄型渦管はvortex sheetが集中し、それらが引き伸ばされることによって形成され、水面に達したものがボイルになると推論した。さらに、

馬蹄型渦管と2次流の関係についても説明を試みている。木下<sup>7),9)</sup>は、航空写真を用いて洪水時の自然河川の水面の様態を観察し、縦渦の存在を予想した。すなわち、水面で激しく湧き上がる流れと沈み込む流れが、川幅方向に水深の2倍間隔で配列していることを見出し、このことから流下方向に軸をもちほぼ水深を直径とする並列ら旋流が存在することを予想した。またこのような並列ら旋流が実験水路でも存在することを示した<sup>8),9)</sup>。中川・柁津<sup>10)~12)</sup>は、開水路乱流のburst構造を調べた結果、burst周期が対数正規分布であること、低速縞の間隔が水面に近づくとともに増大していることを示し、この低速縞の間隔が水面ではボイル列になると推論した。

自然河川においても、ボイルと河床形状、浮遊砂濃度の関連を調べた研究がある。Jackson<sup>13)</sup>は、ボイルの大きさ、周期等を測定し、ボイルは河床波の下流側でよく発生し、その周期は対数正規分布に従うことを明らかにした。また、ボイルとburstを対比してburstのうち特に強いものがボイルとなると考えた。Coleman<sup>14)</sup>は、ボイルが河床波の谷の部分から安定して発生しており、河床波に沿って浮遊砂濃度が大きくなっていると報告している。大谷・八銀<sup>15)</sup>は、石狩川で河床形状と浮遊砂分布の変化との関係を検討した。その結果、浅瀬が発達しているところでは浮遊砂分布が著しく変形すると報告している。これは、直接ボイルと浮遊砂量を結びつけたものではないが、Jackson, Colemanの報告と考え合せると、ボイルと浮遊砂量との強い関連を示唆しているといえよう。

以上のことから明らかなように、大規模渦によって誘起される上昇流やボイルに関する従来の研究は、推論または定性的な検討にとどまっておき、実証的な研究は少ない。著者らは、前報<sup>17)</sup>で上昇流・ボイルの形状や出現周期特性、平均流速分布に与える影響等を明らかにし、上昇流とボイルの関係を考察した。本論文では、河床形

\* 本研究の一部は、文献17)に発表済であるが、本論文はさらにその後の研究成果を加えまとめたものである。

\*\* 正会員 Ph.D. 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工修 東京工業大学 工学部土木工学科助手

\*\*\*\* 正会員 工修 鹿島建設(当時東京工業大学大学院学生)

状が上昇流・ボイルに及ぼす影響や上昇流・ボイルを伴う大規模渦の構造を流れの可視化実験を中心に調べ、先の研究<sup>1)</sup>を含め上昇流とボイルの発生・発達・構造の考察を行った。

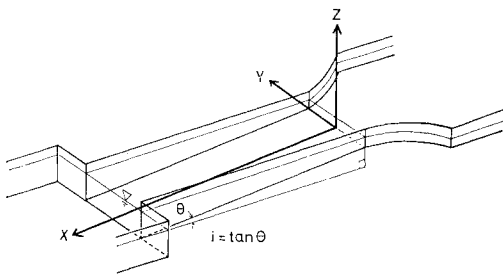
## 2. 実験装置と測定方法

### (1) 実験装置

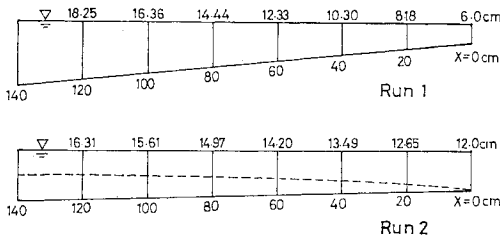
平坦床水路や波状床水路で上昇流やボイルの可視化実験を行った。移動床実験は、上昇流あるいはボイルと砂の舞い上がりとの関係を明らかにするために行った。平坦床水路は長さ 9 m, 幅 1 m のコンクリート製水路に、

表一 実験条件

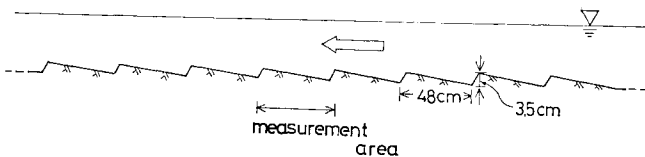
	平坦固定床		波状固定床		移動床		
	Run 1	Run 2	Run 11	Run 12	Run 21	Run 22	Run 23
$Q$ (l/s)	9.0	10.0	6.0	10.0	0.60	0.86	1.83
$H$ (cm)	入口 6.0	12.0	平均 8.2	12.5	平均 2.5	2.8	4.9
$B$ (cm)	40	40	24	24	4	4	4
$F_r$	0.49	0.19	0.34	0.30	1.21	1.47	1.35
$Re$	$1.88 \times 10^4$	$2.50 \times 10^4$	$2.50 \times 10^4$	$4.17 \times 10^4$	$1.50 \times 10^4$	$2.15 \times 10^4$	$4.57 \times 10^4$
$i$	1/10	1/30	0	0	1/50	1/50	1/50



図一 座標系と測定部



図二 測定区間内の水面形



図三 固定波状床水路

長さ 1.8 m, 幅 0.4 m の可変勾配の亚克力製測定部を設置したものである。上流側にはベルマウス状の取り付け部を設けなめらかに流れを流入させている。下流端の堰で水位調整を行っているので、流れは流下方向に水深の変化する不等流となっている。図一に座標系と測定部を示す。実験条件は表一にあげた 2 通りである。Run 1 では上昇流とボイルの測定を容易にするため、流路床勾配を大きくし上昇流を発生させるような強い過度の集中を流路床付近に起こさせた。自然河川のボイルが sand waves の下流側すなわち底勾配が大きいところから発生することが知られているので、この点をも考慮してかなり急な底勾配 ( $i=1/10$ ) とした。Run 2 では底勾配  $i=1/30$  とし、Run 1 より不等流の影響を小さくした。図二に Run 1, Run 2 の水面形を示す。Run 2 には、流速分布から得られた境界層厚さを破線で示す。Run 1 の場合は流れが流路床から剥離しているので境界層厚さは求められない。

波状固定床水路は、図三に示すように勾配の小さい長さ 5 m, 幅 24 cm の水路に波長 48 cm, 波高 3.5 cm の砂漣模型を 8 連並べたものである。測定は、上流側から 5 番目の砂漣上で行った。実験条件を表一に示す。

移動床水路は、長さ 8 m, 幅 4 cm, 底面に豊浦標準砂を 10 cm の厚さに敷き均した可変勾配水路である。

実験条件を表一に示す。移動床の場合、水を長く流すと sand waves が発生する。このため、砂の舞い上がりが上昇流によるものか、sand waves によるものか識別できない。そこで砂の舞い上がり周期の測定は平坦河床状態で行った。

### (2) 測定法

染料を用いて流れを可視化することにより、上昇流・ボイルの出現周期・空間的配置などを求めた。染料注入管は、外径 1 mm のステンレス管を 4 cm 間隔に 7 本配列したもので面状に染料を注入できるものである。染料の注入速度は平均流速程度とし、注入量は少量であり、この装置が流れに与える影響は無視できる。ボイルの存在は、水面での染料の流路の変化から判定した。また、上昇流の時間的、空間的特性は注入管を水面と平行に上下 2 段に配置し、それぞれから異なる色の染料を注入することによって上昇流のために下の染料が上の染料をつき抜けていく様子を側方から 8 mm 映画撮影することにより把握した。上昇流・ボイルの判定規準その他は各項目のところで説明する。大規模渦の構造を知るためには染料法による可視化のみでは限界があるので、それを補うためにアルミ粉懸濁法を用いた。アルミ粉を懸濁した流れにスリット状光源を照射し、35 mm カ

メラで連続撮影することにより渦運動を知る方法である。アルミ粉は鱗片状で方向性をもつため渦運動で乱れた部分は明るさが増す性質がある。露出時間内のアルミ粉の軌跡や撮影されたアルミ粉の明るさなどにより大規模渦の時間的、空間的分布を測定した。

平均流速分布の測定は、プロペラ式流速計を使用し、出力を直接電子計算機に入力して0.1秒ごとに1024個のデータをサンプリングした。その平均をもって平均流速とした。

### 3. ボイルと上昇流の特性

#### (1) ボイルの特性

##### a) ボイルの成長過程

自然河川でのボイルは、水面の盛り上がりやボイル内に土砂を多く含んでいることによる色の相違などにより識別できる。しかし、実験室内では、ボイルの規模、強度が小さいためにこのような方法による解析は難しい。そこで、染料の動きを8mmカメラで撮影し可視化からボイルを判定した。可視化による判定法では強度の定量的な定義は困難である。ここでは、より広い範囲の染料を巻き込んだボイルが強度大であると考えられる。図-4はこのようにして得られたフィルムをもとにRun 1のボイル成長過程を1秒おきにスケッチしたものである。側面図のハッチは、流体が上昇している部分を示す。 $t=t_0$  (図-4 (a)) では、大規模渦運動による上昇流は水面下

にあり、その下流には前方を進むボイルが残っている。1秒後(図-4 (b))には上昇流は水面に達してボイルになるが、側方や後方から周囲の流体を補給し成長しているのがわかる。以下、図-4 (c), (d) では、ボイルは流下しながら発達して上流側に新たなボイルを誘起する。このように、ボイルは上昇流が水面に達してからもただちに衰退しないで周囲の流体を補給しながら流下し十分成長した後減衰する。

##### b) ボイルの出現周期

ボイルの存在によって、水面付近の染料の流跡線が曲げられることからボイルを識別し、その出現周期を求めた。接近水路内で発生するボイルも存在するが、下流の測定部で発生するボイルに比べて十分弱く、測定部を流下してもボイルの識別には影響を与えないこと確認して実験を進めた。写真-1はボイルの1例で2つのボイル(矢印で示す)が認められる。図-5は、各流下断面を通過するボイルの個数(約80個)から求めた平均周期( $\bar{T}_b$ )と流下距離の関係を示す。Run 1では流下するにつれて平均周期( $\bar{T}_b$ )は短くなる。Run 2は平均周期は若干短くなっているが、ほぼ一定といえる。両者の差異は次のように説明できる。Run 1の場合、底勾配が大きいので下流側で境界層が剥離を起こす。このため、強い上昇流が頻繁に起こり、その結果発生したボイルが次々に他のボイルを誘発する。このような理由で下流に進むにつれてボイルの出現個数が増加すると考えられる。一方Run 2では、不等流効果が弱く境界層内の渦度の集中が流下距離によらず比較的一様に起こっている

ためボイルの平均周期が一定になったと考えられる。図-5のRun 1とRun 2の平均出現周期を比較するとRun 2の方が短くなっており、境界層の剥離に原因を見出すと矛盾するようにみえる。ここでは、ボイルを染料の流跡の変化から判定しているので、判定規準を定量的に定めることは難しい。Run 1は、Run 2に比べ卓越したボイルの強度・規模が大きい。このため、Run 2では判定できた比較的弱いボイルがRun 1では大きなボイルのために見逃され、その結果、Run 1の出現周期は長く測定されたと考えられる。

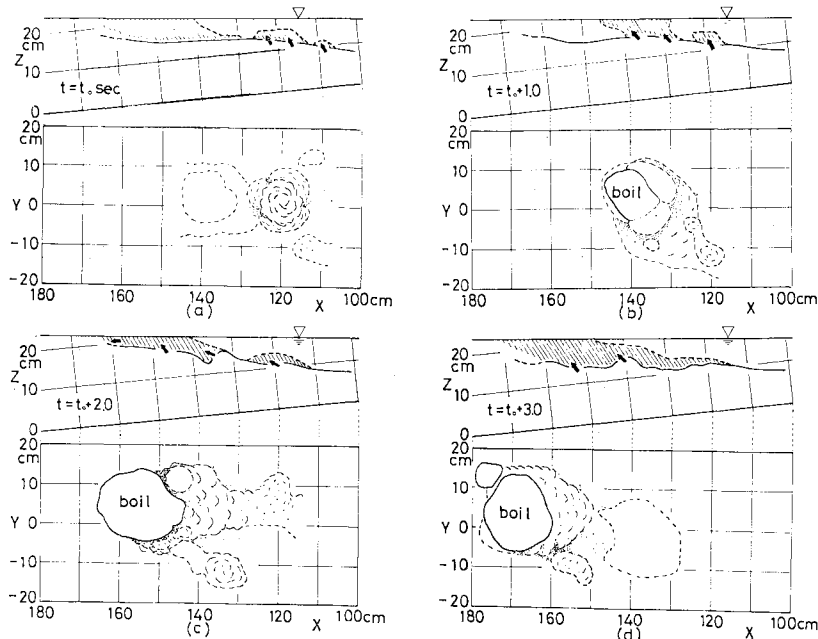


図-4 ボイルの成長過程

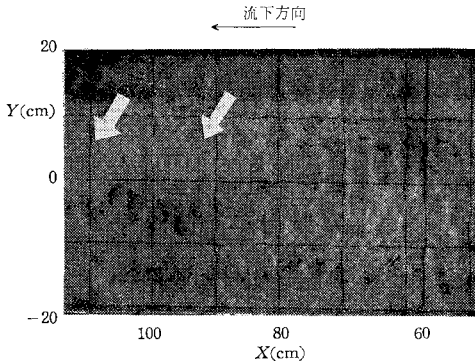


写真-1 流下するボイルの1例

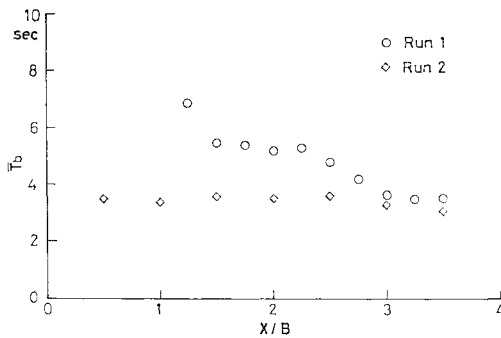


図-5 ボイルの出現周期

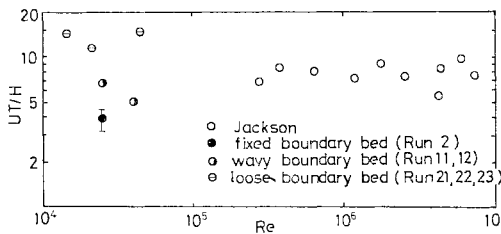


図-6 無次元化した周期

次に、平坦床水路と波状床水路のボイルの周期を比較してみる。図-6には本実験の測定結果と自然河川での実測である Jackson<sup>13)</sup> の結果を示す。Run 2 の周期は断面平均流速と水深で、Run 11, Run 12 では河床波上の平均水深と平均流速で無次元化している。Run 1 は流下距離により無次元化周期が大きく変化するため除外している。一方、Jackson の資料は表面流速と水深を用いて無次元化している。縦軸は一種のストロハル数の逆数、横軸はレイノルズ数である。fixed boundary bed の点は、流下距離による  $UT/H$  の平均値とその偏差を表す。これより、平坦床と波状床とではボイルの無次元化周期にはほとんど差がないことがわかる。また、実験水路と自然河川のレイノルズ数が非常に異なるにもかかわらず無次元化周期に大きな違いは存在しない。したがって、ボイル発生の無次元化周期は河床形状、河床形態

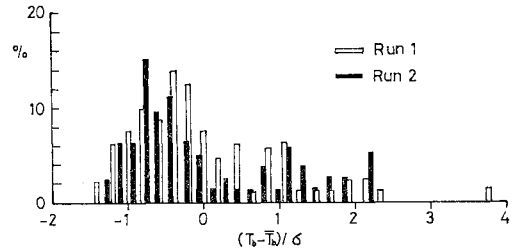


図-7 ボイルの出現周期分布

の違いによらずほぼ一定であるようにみえる。

図-7 は平坦床で得られたボイルの出現周期の頻度分布である。縦軸は全測定個数に対する割合、横軸は平均周期と分散で標準化した周期である。Run 1 は  $X=100$  cm, Run 2 は  $X=110$  cm における周期データを使用した。いずれの場合も、周期の短いものの頻度が高く、短い周期と長い周期の2か所にピークが現われている。このことは、ボイルの発生周期が対数正規分布に従うとした Jackson の報告<sup>13)</sup> と異なるようである。実験水路での観察によると、1つの強いボイルが流下すると新たなボイルが次々と誘発される。けれども、弱いボイルの流下ではこのようなことはほとんど起こり得ず、再び渦度の集中によって流れが不安定になるまでボイルは形成されにくい。このことは、ボイルの形成が2つの異なった要因によることを示唆する。短周期側に現われたピークは強いボイルにより誘発されるボイルの出現周期に対応し、長周期側のピークは弱いボイルが流下後、再びボイルが発生するまでの間隔に対応すると考えられる。Run 1 では Run 2 より長周期側のピークが顕著でない。Run 1 では流路床付近の強い逆圧力勾配のために流れが不安定となり、大規模渦が発生しやすい状態にあるためと考えられる。このように流路床近傍の流れが不安定である場合には、長周期側のピークは不明確になり対数正規分布に近づく傾向がある。

Jackson の測定は不規則な河床形態をもつ自然河川で行われた。したがって、河床付近の渦運動は強くボイルが発生しやすい条件にある。さらに現地観測では、水面の盛り上がりや浮遊土砂含有によってボイルが識別されることになる。したがって、ある基準以上の強さをもつもののみが、ボイルとして判定されることになる。一方、実験水路での測定は流跡線の変化による判定のため比較的弱いボイルも含まれていることになる。Jackson の実測と本実験とは以上のような流れの条件、判定基準の相違のために周期分布特性に差が現れたものと考えられる。

#### e) ボイルの平面的配列

図-8 はボイルの横方向分布を表わす。縦軸は断面  $X$  におけるボイルの全出現数に対するその位置  $Y$  での出

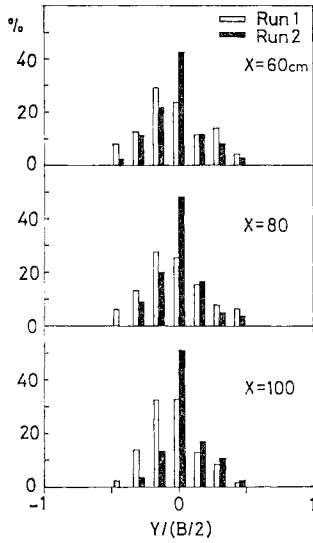


図-8 ボイルの横方向分布

現割合である。X=60 cm (Run 1 に比べ Run 2 の水深は大きい) での分布を比較すると、Run 1 は Run 2 より横方向に広く分布している。しかし、流下距離が大きくなると Run 1, Run 2 ともボイルは水路中央に集中するようになる。ボイルは水深規模の現象であるので、幅に比べて水深の比較的小さい Run 1 の X=60 cm では、側壁の影響をあまり受けずに広い範囲に分布できる。しかし、流下するにつれて水深が増加するため側壁の影響は強くなり横方向の自由度が減少する。このため、ボイルは水路中央付近に集中して発生すると考えられる。

(2) 上昇流の特性

a) 上昇流の可視化

ボイルが現われている水面の下では強い上昇流が存在している。この上昇流の可視化法を 図-9 に模式的に示す。水路幅全体にわたって深さ方向に 5 cm の間隔で異なった色の染料を面状に流す。上昇流が存在すると下段の染料(ローダミンB)で着色された流体は上段の染料(メチレンブルー)を突き破り上昇する。ここでは、上昇流を以下のように定義し測定した。下層の流跡線の平均的位置Bから 5 cm 離れた上層のA点以上に下層の流体の先端部が達し、さらに上昇を続けているとき、A点に上昇流が到達したものとす。このとき、上昇速度が大きいものを強い上昇流と定義する。一方、上昇流の規模は、発生した上昇流が上昇し終るまでの空間的拡がりによって定義する。これらは普遍的規準ではないが上昇流の特性を適切に表わしていると考えられる。

図-10 は Run 1 における上昇流の成長過程を 0.5

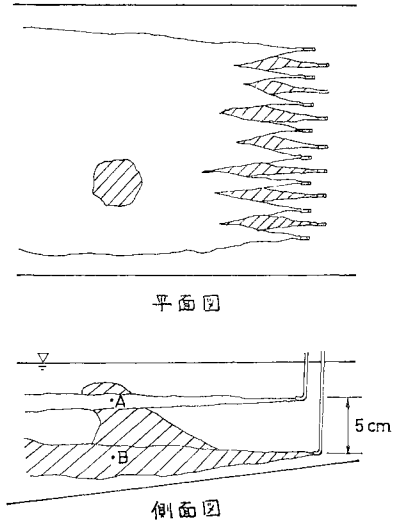


図-9 上昇流の可視化法

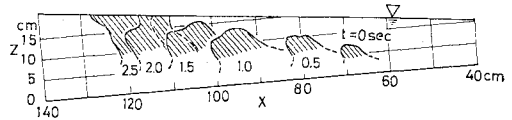


図-10 上昇流フロントの時間変化

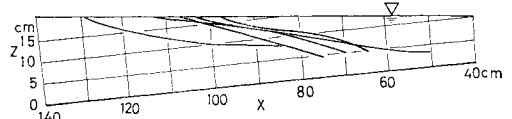


図-12 下降流フロントの軌跡

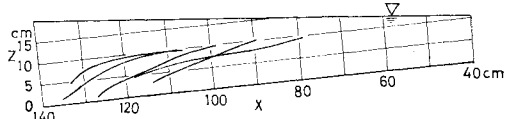


図-11 上昇流フロントの軌跡

秒おきにスケッチしたものである。底付近にみえはじめた流体塊は上昇するにつれて周囲から流体を補給して大きくなる。水面に達した後も補給を受けながら流下する。周囲からの流体の補給量を概算してみると、t=0 秒のとき上昇流の体積は 50 cm<sup>3</sup> ぐらいであるが、最終的には 1000 cm<sup>3</sup> ほどに成長している。

図-11 は上昇流のフロントの軌跡の数例を示す。上昇する角度や速度は渦の強さと関係しさまざまである。また、上昇流が存在するときその前方に緩やかに下降する流れが見られる。上昇流は比較的狭い範囲に集中した強い流れであるが、下降流は上昇流を補償するために生ずる比較的広い範囲にわたる緩やかな流れである。図-12 に下降流のフロントの軌跡の数例示す。

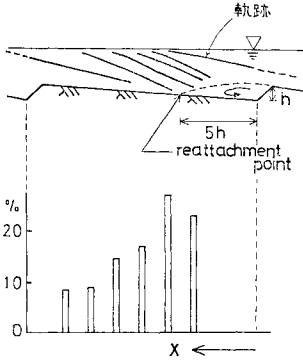


図-13 波状床流れにおける上昇流の軌跡とその発生頻度分布

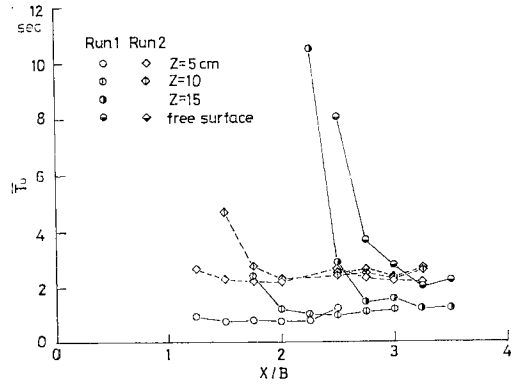


図-14 上昇流の平均出現周期

図-13 は波状床上の流れ (Run 11) で見られる上昇流のフロントの軌跡と発生頻度を示す。運動軌跡には流路床付近からただちに水面に達するもの、ゆっくり上昇して下流側の砂漣上で水面に達するものなどいろいろある。これは上昇流の強さがさまざまであるためであり、平坦床の場合と同様である。図-13 中のグラフは上昇流の発生位置と頻度を表わしたものである。横軸は流下方向位置、縦軸は頻度である。これによると、reattachment point 付近で最も多く発生していることがわかる。Run 1, Run 2 の場合は上昇流の発生位置は固定されずどこからでも発生していたのに対して、Run 11 においては流路床の幾何形状が重要となり reattachment point 付近に集中する。これは上流側の河床波の頂上で流れが剥がれ、そこで渦度の集中が起こる。これらの渦が、reattachment point 付近で河床に衝突し上昇流になると考えられる。

b) 上昇流の出現周期

図-14 は Run 1, Run 2 の上昇流の平均出現周期を示す。染料を出す位置を変えることにより異なった (X, Z) で測定を行った。縦軸は平均周期 ( $\bar{T}_u$ )、横軸は流下距離 (X) を幅 (B) で無次元化したものである。Run 1 では底面からの距離 (Z) が大きくなるにつれて周期は長くなるが、流下するに伴って 1.0~1.5 秒程度の時間に近づく。このことは上流側では種々の強度をもつ大規模渦運動があるが、 $X/B=2.5$  付近より下流側ではそれらの渦運動が全水深スケールの渦運動に集約されたと考えられる。Run 2 では平均周期は X, Z によらずほとんど一定で 2.5 秒程度である。Run 2 は Run 1 に比べ境界層の剥離が起こっていないため、河床付近の渦度は流下距離によらずほぼ一定となる。このためどこでも同じような規模の渦運動が生じることになる。

図-15 は上昇流の出現周期を正規確率紙にプロットしたものである。縦軸は期待累加相対密度、横軸は  $[\log(T/T_0)]/\sigma$  ( $T_0$ : 中央値,  $\sigma$ :  $\log T$  の分散) で正規化し

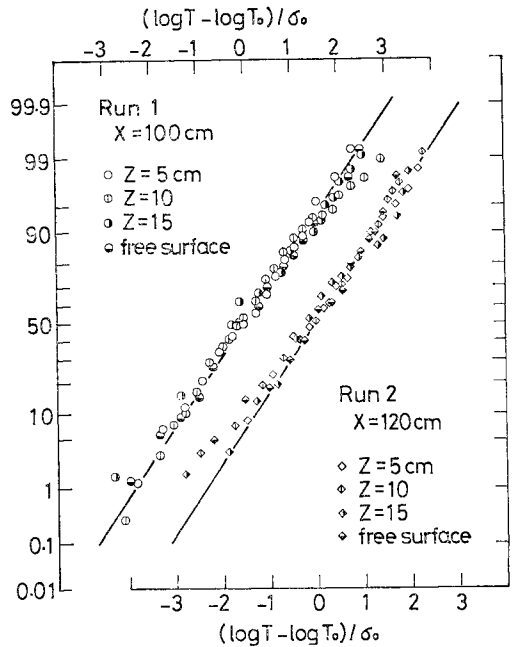


図-15 上昇流の周期分布特性

ている。Run 1 はほぼ対数正規分布をしている。しかし、Run 2 は  $Z=5$  cm を除いて短周期側で規準直線からはずれる。一方、ボイルの周期は 2 つのピークをもち、対数正規分布と異なることを図-7 で示した。特に Run 2 ではその傾向が顕著であった。したがって、上昇流は水面に近づくにつれて、しだいにボイルの周期特性をもつようになると考えられる。

(3) ボイルと上昇流の関係

上昇流とボイルの出現周期を比較し、上昇流からボイルへの移行過程を考察する。図-5 と 図-14 を比較すると、底面に近い位置での上昇流の周期 ( $\bar{T}_u$ ) はボイルの周期 ( $\bar{T}_b$ ) に比べて短いことがわかる。つまり、底面

付近の上昇流の出現頻度に比べてボイルの出現頻度は小さい。このことは、さまざまな強さをもつ底面付近の上昇流は全部水面に達するわけではなく、強いものだけがボイルを形成することを示している。水面まで達する上昇流の周期とボイルの周期とは必ずしも一致していないが、これは両者の判定法の違いによるものと考えられる。

Jackson<sup>13)</sup> は burst のうち強いものが水面に達しボイルを形成すると考えた。ここで考えている上昇流は必ずしも burst と 1 対 1 の関係にあるとはいえないが、流路床付近の上昇流を伴う大規模渦のうち特に強いものだけが水面に達してボイルを形成するという実験事実は、Jackson のボイル発生説の仮説を裏づけるものである。

#### (4) 河床砂の舞い上がり周期

Coleman<sup>14)</sup> は、ボイルが河床波の谷部から発生しやすく、河床波に沿って浮遊砂濃度が大きくなることを実測により示した。このことよりボイルを形成する上昇流と浮遊砂の関連が示唆される。波状床水路で reattachment point 付近に砂を敷いて観察すると、砂が間欠的に舞い上がる現象が見られる。reattachment point 付近では上昇流の発生が多いことが 3. (2) a) で明らかにされているので、この砂の舞い上がりは上昇流やボイルと直接関係があると考えられる。そこで、河床波などに流況を規定されない平坦な移動床流れで砂塊の舞い上がり周期を測定した。砂塊を舞い上げることができる上昇流は水面に達しボイルを形成すると考えられる。したがって、砂塊を舞い上げる上昇流の周期は、ほぼボイル周期になる。そこで、砂塊の舞い上がり周期を平均流速と無次元化し、固定床流れや自然河川にみられるボイルの周期と比較したものが図-6 である。これから、砂塊の舞い上がり周期は他の実験のボイルの周期よりやや大きいことがわかる。砂塊の舞い上がり周期は砂塊を持ち上げることのできるある強さ以上の上昇流やボイルに対応する。この強さ以下の上昇流やボイルは前述の判定規準からはずれするため、やや長い周期になったと考える。この結果、異なる河床形状、流れ形態に対し、砂塊の舞い上がり周期はボイルの周期にほぼ一致する。しかし、これはあくまでも本実験で見出された事実であり、今後さらに検討を要する問題である。

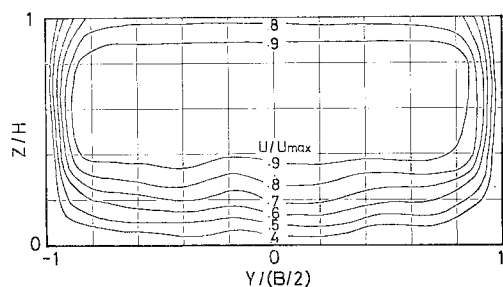
### 4. 平均流速分布

#### (1) 平均流速分布

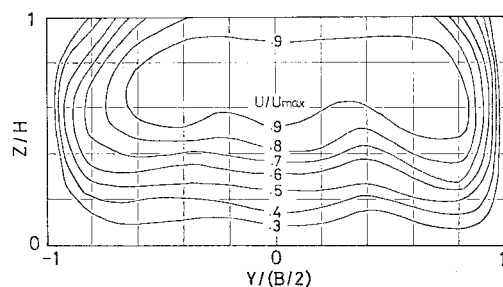
図-16, 17 は Run 1, Run 2 の  $X=40, 80, 120$  cm の 3 断面における平均流速分布図である。図-18 は

Run 11 の河床波の頂上と reattachment point 付近の断面の平均流速分布図である。縦軸は水深 ( $H$ )、横軸は水路の半幅 ( $B/2$ ) で無次元化し、断面最大流速  $U_{max}$  で無次元化した等流速線を記入した。

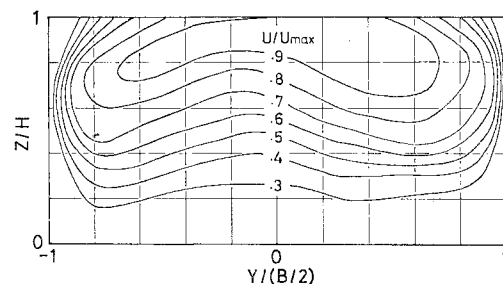
Run 1 では底面付近の流れは剥離しており、流下距離 ( $X$ ) が大きくなるにつれてその剥離領域が大きくなり平均流速分布は著しくひずめられている。  $X=40$  cm の分布をみると流路床付近の等流速線はわずかに波打ち、流速の速い部分と遅い部分が現われている。  $X=80$  cm では、この傾向はさらに顕著となり流路床付近では水路中央で流速が大きくその左右で小さい。  $X=120$  cm では、逆に水路中央で流速が小さくなっており、水面近くまでひずめられた分布になっている。 Run 2 では流れは剥離していないため、Run 1 に比べると流路床付近の速度勾配は大きい。  $U/U_{max}=0.95$  の等流速線は下流ほど水面に近づき、しだいに境界層の厚さが増す。



(a)  $X=40$  cm ( $H=10.3$  cm,  $U_{max}=24.1$  cm/s)

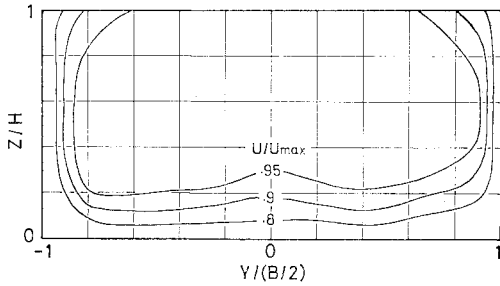


(b)  $X=80$  cm ( $H=14.4$  cm,  $U_{max}=19.8$  cm/s)

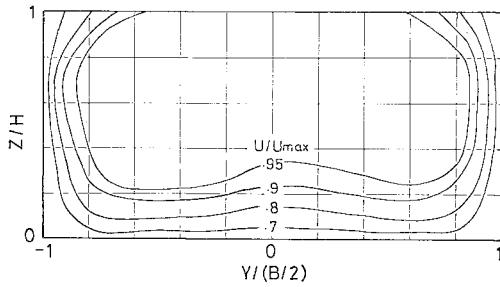


(c)  $X=120$  cm ( $H=18.3$  cm,  $U_{max}=17.7$  cm/s)

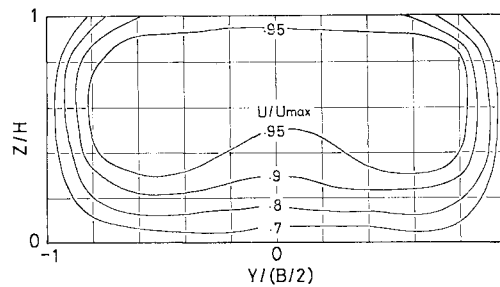
図-16 平均流速分布図 (Run 1)



(a)  $X=40\text{ cm}$  ( $H=13.5\text{ cm}$ ,  $U_{\text{max}}=17.8\text{ cm/s}$ )



(b)  $X=80\text{ cm}$  ( $H=15.0\text{ cm}$ ,  $U_{\text{max}}=16.0\text{ cm/s}$ )



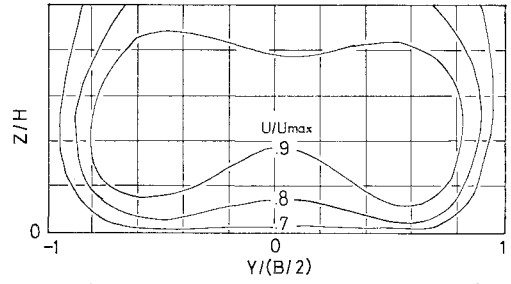
(c)  $X=120\text{ cm}$  ( $H=16.3\text{ cm}$ ,  $U_{\text{max}}=14.8\text{ cm/s}$ )

図-17 平均流速分布図 (Run 2)

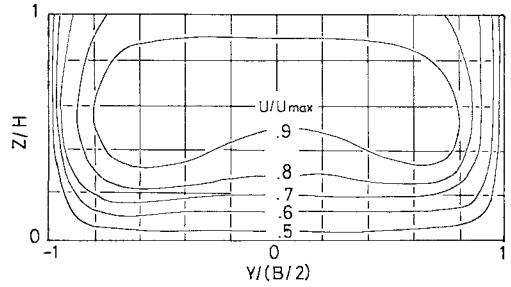
$X=40, 80\text{ cm}$  では  $U/U_{\text{max}}=0.95$  の等流速線は水路中央でひずんでいる。低流速の領域は下流ほど広がり、横方向の速度差が大きくなって Run 1 の  $X=120\text{ cm}$  の流速分布に近い分布形となる。波状床上の流れの平均流速分布 (Run 11) は上流側から5番目の砂漣上で測定されている。上流側の波状床から発生する大規模渦が水路中央付近を次々と流下していくため、中央で遅くその両側で速い分布形になっている。

(2) 平均流速分布とボイルの関係

木下<sup>7)</sup>は、自然河川の洪水観測からボイルと2次流および平均流の関係が、図-19のようになっていると推論した。すなわち、水深の約2倍の間隔でボイル列が現れ、ボイル列に対応して流下方向に軸をもち互いに逆向きの回転をする2次流が存在する。A-A'断面の流速分布が示すように、ボイル列の部分では流路床付近の遅



(a) crest 部 ( $H=6.6\text{ cm}$ ,  $U_{\text{max}}=41.4\text{ cm/s}$ )



(b) reattachment point 付近 ( $H=9.1\text{ cm}$ ,  $U_{\text{max}}=34.8\text{ cm/s}$ )

図-18 平均流速分布図 (Run 11)

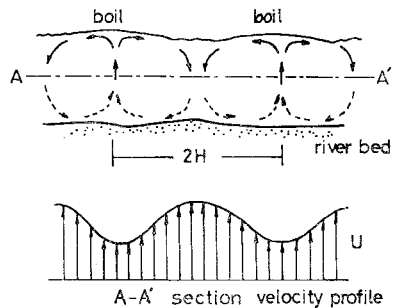


図-19 ボイルと2次流 (木下による<sup>7)</sup>)

い流体が上昇してくるために平均流速は他の部分より遅くなる。

本実験においても、Run 1, Run 2 の  $X=120\text{ cm}$  では、平均流速分布は水路中央付近に遅い部分が現れている。図-8で示したように、 $X=120\text{ cm}$  ではボイルは水路中央に集中して発生している。Run 11 の場合もボイルの発生が多く認められた水路中央付近の流速は遅い。つまり、図示した平均流速分布はボイルを形成する大規模渦によって強くゆがめられていると考えられる。

$B/h$  が大きな流れでは、ボイルは多列になると考えられる。特に、河床波を伴う移動床流れでは、河床波によりボイルの発生位置が規定され安定したボイル列ができる。このため、断面内の平均流速分布には遅い部分と速い部分が交互に現れる。一方、平坦床流れでも不安定ながらボイル列は存在する。すなわち、図-16 (b) 中の



$Y/(B/2) \doteq -0.2, 0.3$  の位置には流速の遅い部分が認められる。

## 5. 大規模渦の構造

### (1) 大規模渦の可視化

ボイルや上昇流を伴う大規模渦運動の構造を調べるため、Run 1 の流れをアルミ粉懸濁法を用いて可視化した。大規模渦の全体像を一度に可視化することはできないので、3つの切断面について別々に可視化し組み合わせることによって渦の構造を調べた。図-20 にそれぞれの切断面を示す。可視化した切断面は、

- (i) 流路床に平行な断面 (切断面 I)
- (ii) 流路床に垂直な縦断面 (切断面 II)
- (iii) 主流方向と直角な横断面 (切断面 III)

の3切断面である。スリット光源を用い 35 mm カメラで連続撮影し解析した。

#### (i) 流路床に平行な面内の渦運動

写真-2 は、流路床から高さ  $Z=10$  cm の断面をライティングし、カメラを流れの速度で移動し連続撮影した

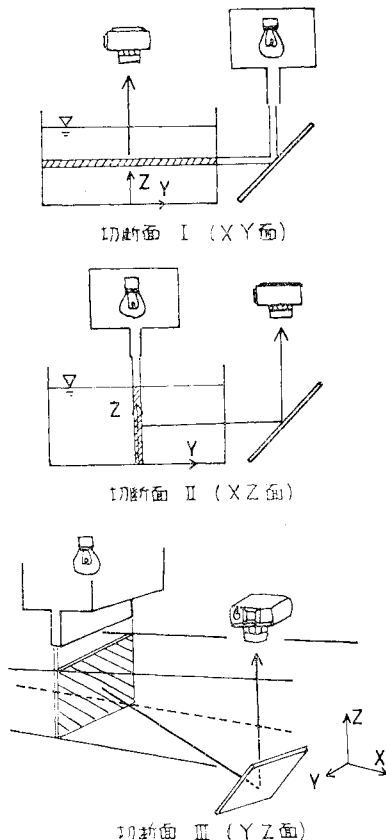


図-20 大規模渦の可視化法

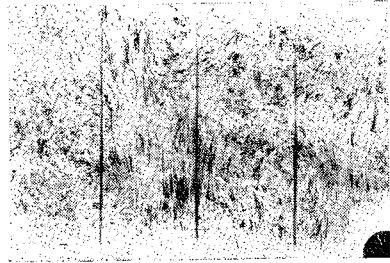


写真-2 切断面 I 内の大規模渦 ( $Z=10$  cm, 露出時間 1/4 秒)

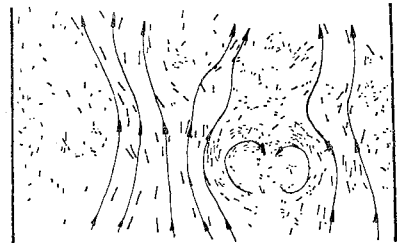


図-21 切断面 I の流況

ものである。カメラの移動速度 (11 cm/s) と平均流速、アルミ粉の軌跡長、連続写真で写されたアルミ粉の時間変化状況、実際の観察などから総合的に流況を判断すると、図-21 に示した流れが存在することがわかる。流速の速い部分は軌跡が長く、大きな渦運動は軌跡が短く撮影される。もし、図-21 と異なり渦運動が単一の渦によって誘起されているとすれば、流下方向に向かって渦運動の左右の部分は渦の回転速度とカメラの移動速度の関係から長さの違う軌跡になるはずである。ところが、渦運動の両側はともに流速が速く、渦運動は流下方向の軸に対して対称形をしている。このため、この渦運動は単一の渦であるとは考えにくく、模式図に示したように渦運動の強い部分は互いに逆向きの2個の渦が卓越していると考えられる。この高さ ( $Z=10$  cm) での渦の大きさは 10~15 cm 程度である。写真-3 は  $Z=2.5$  cm のものである。この高さでは流速が小さいためカメラは固定して撮影した。  $Z=10$  cm の写真と同様に軌跡の長さは一様でなく、強く乱れた部分が存在していることがわかる。渦の大きさは底面で制限されるため 5~10 cm

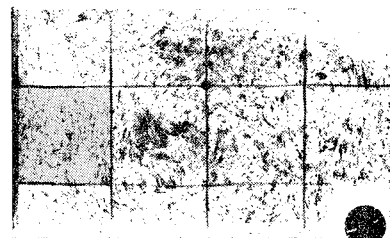


写真-3 切断面 I 内の大規模渦 ( $Z=2.5$  cm, 露出時間 1/4 秒)

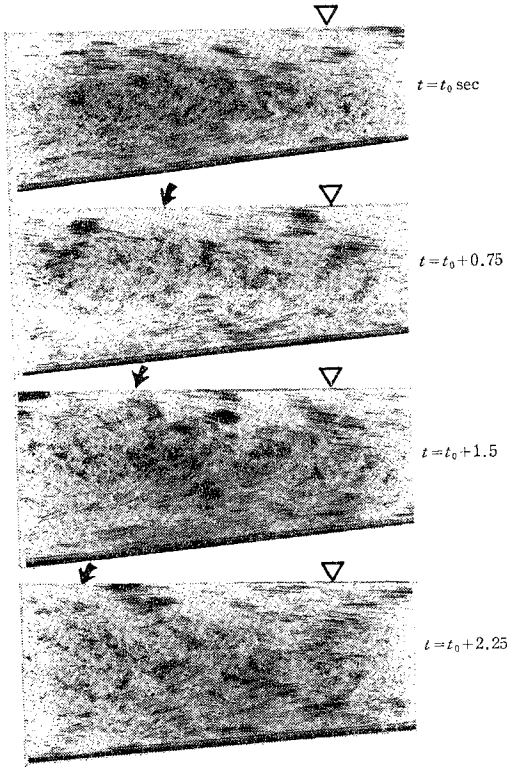


写真-4 切断面 II 内の大規模渦 (Y=0 cm, 露出時間 1/4 秒)

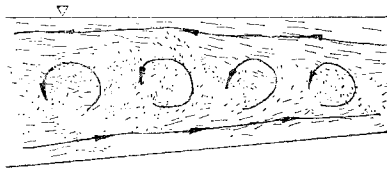


図-22 切断面 II の流況

で  $Z=10$  cm の渦と比べると小さい。このように、流路床近傍で発生した渦は、流下上昇するにつれて大規模な渦に成長すると考えられる。

(ii) 流路床に垂直な縦断面内の渦運動

写真-4 は  $XZ$  面 ( $Y=0$  cm) を連続して移動撮影した写真である。図-22 は断面内の流況を写真より模式的に描いたものである。カメラの移動速度は境界層外縁付近の渦の流下速度とほぼ等しくなるように定めた。このため、渦の流下速度でみると流路床付近では流れの方向が逆になっている。流れの中心部では、模式図に示すような反時計回りの大規模渦が流下方向に連なっている。大規模渦は成長しながら上昇し水面に近づく。このとき、反時計回りに回転する渦の後部から誘起される上向き流れが、水面に達しボイルとなる。写真中の矢印は、大規模渦に伴う上向き流れが水面に達した部分を示す。

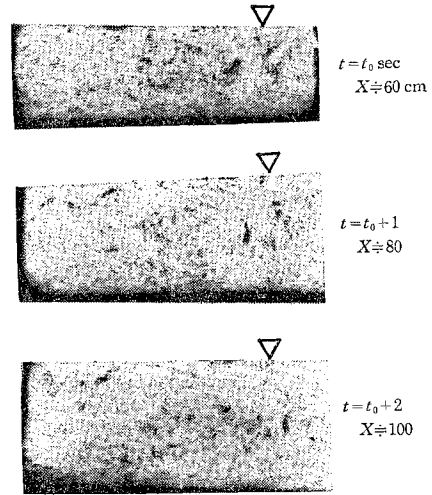


写真-5 切断面 III 内の大規模渦 (露出時間 1/2 秒)

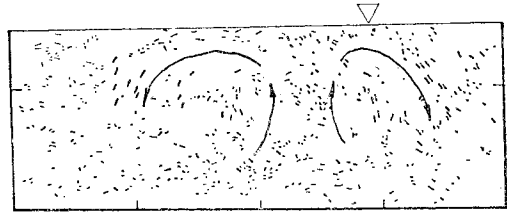


図-23 切断面 III の流況

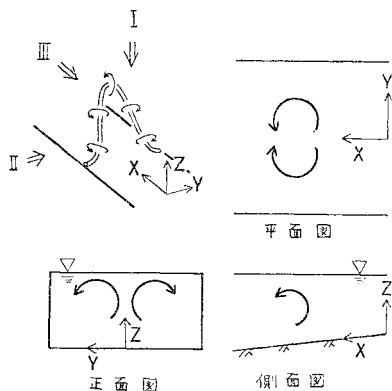
(iii) 主流と直角な横断面内の流れ

写真-5 は  $YZ$  面を連続的に移動撮影したものである。流路内に鏡などの撮影用器材を入れることはできないので、この切断面に直角方向から直接撮影することはできない。そこで、図-20 に示すように水路斜め横下流側から撮影した。このため、撮影した写真を解釈するとき、流下方向に対して左右方向の運動は上下方向の運動に比べゆがんでいることに注意しなければならない。いずれの写真も流路床付近は激しく乱れている。また水路中央部にも軌跡が短く、渦運動による乱れた部分がある。その範囲は流下距離とともに拡大し水面にまで達している。この渦運動領域の両側には、斜めに傾いたやや長いアルミ粉の軌跡が撮影され断面内に流れが存在することがわかる。写真からだけではこの流れの方向を決めることはできないが、目視による観察によると緩やかに下降する流れになっている。このように、断面内には図-23 に示すように中央で上昇し、その両側で下降する流れが存在することがわかる。

(2) 大規模渦と 2 次流

a) 大規模渦の構造

可視化で得られた各切断面内の渦運動を組み合わせ大規模渦の構造について考察する。



図—24 2 次的流れの組み合わせから得られた大規模渦の構造

従来、乱流境界層内の大スケール乱れのモデルの一つとして馬蹄型渦管モデルが提案されている。可視化により得られた各切断面内の 2 次的な流れと馬蹄型渦管がつくりだす流れを比較してみる。図—24 は、各切断面内の渦運動による流れを模式的に示したものである。平面図に見られる流れは馬蹄型渦管が作りだす流れを I の方向から見たときの流れに近く、側面図に見られる流れは II の方向から見たときの流れに近い。また、正面図の流れは III の方向から見た流れに近い流れになる。このように、可視化によって得られた各切断面内の 2 次的な流れは、馬蹄型渦管が作りだす流れに近いものである。したがって、ここで考える大規模渦は、馬蹄型渦管と類似の構造をもつと考えることができる。

b) 大規模渦と 2 次流

大規模渦と 2 次流の関係について考察する。平坦床流れの可視化から、ボイルや大規模渦に対応して主流と直角方向の断面には 図—23 のような流れが存在することが示された。しかし、YZ 面の写真を検討してみると、このような流れは常に存在しているのではなく大規模渦の流下とともに顕著に現れるようである。つまり、この 2 次的な流れは、流下方向に軸を持つ定常的な流れではなく、大規模渦の流下により誘起された流れであると思われる。

6. 結 論

自由表面をもつ流れの中に見出される上昇流とボイルの特性、大規模渦の構造を可視化法により調べた。さらに、大規模渦と 2 次流の関係について考察した。

本研究で明らかになった主要な点を以下に示す。

(1) ボイルは流路床付近で生じた上昇流が水面まで達した結果として現われる。しかし、上昇流の強さはさまざまであり、強度の大きいものだけがボイルを形成す

る。

(2) 実験水路で得られたボイルの発生周期は、水深と平均流速で無次元化すると路床形状によらずほぼ一定となり、自然河川での実測値と対応する。

(3) 大規模渦は周囲の流体を巻きこみながら成長し流下する。その大きさは十分発達すれば水深規模となる。

(4) 上昇流に代表される大規模渦の周期特性は、対数正規分布に従う。

(5) 移動床上流れでは、水は河床砂を一様には巻き上げない。砂の舞い上がり周期はボイルの周期とほぼ一致する。

(6) 上昇流は平坦床流れではどこでも発生しうるが、波状床流れでは reattachment point 付近で数多く発生する。

(7) ボイルや上昇流により流れの平均流速分布はひずめられる。

(8) 上昇流やボイルを伴う大規模渦の構造は、乱流境界層の大スケール乱れのモデルとして従来から提案されている馬蹄型渦と類似の構造である。

(9) 平坦固定床水路では、流下方向に軸をもつ安定した 2 次流は現われず、大規模渦の流下に伴って強い 2 次的な流れが誘起される。

参 考 文 献

- 1) Matthes, G.H. : Macro-turbulence in Natural Stream Flow, Am. Geophys. Uni. 28, pp. 225~262, 1947.
- 2) Theodorsen, Th. : The Structure of Turbulence, 50 Jahre Grenzschichtforschung, (ed. H. Görtler and W. Tollmein), Friedr. Vieweg & Sohn, pp. 55, 1955.
- 3) 石原安雄・余越正一郎：河川の乱流構造に関する一考察，京都大学防災研年報，第 13 号 B, pp. 323~331, 1970.
- 4) 上野鉄男・宇民 正：可視化法による大スケール乱れに関する研究，京都大学防災研年報，第 19 号 B-2, pp. 267~288, 1976.
- 5) 宇民 正・上野鉄男：可視化法による大スケール乱れに関する研究 (2)，京都大学防災研年報，第 20 号 B-2, pp. 331~354, 1977.
- 6) 宇民 正・上野鉄男：河床波の発生・発達過程に関する実験的研究，京都大学防災研年報，第 21 号 B-2, pp. 367~383, 1978.
- 7) 木下良作：航空写真による洪水流の解析，写真測量，Vol. 6, No. 1, pp. 1~17, 1967.
- 8) 木下良作・遠藤義幸・石坂 晋：洪水流の写真判読—らせん流の実験的研究一，日本写真測量学会 研究発表会講演概要集，1976.
- 9) 木下良作：並列らせん流に関する実験的研究，北海道開発局石狩川開発建設部委託調査，河道形状と洪水流に関する検討業務報告書，1976.
- 10) 中川博次・祢津家久：せん断乱流の bursting 現象とその物理モデル，第 22 回水理講演会論文集，pp. 29~36, 1978.
- 11) 中川博次・祢津家久：開水路乱流の bursting 現象とその特性，第 32 回土木学会 年次学術講演会 講演概要集 II, pp. 281~282, 1977.

- 12) 林津家久：開水路流の乱流構造に関する基礎的研究，京都大学博士論文，1977.
  - 13) Jackson, R.G. : Sedimentological and Fluid-Dynamic Implications of the Turbulent Bursting Phenomenon in Geophysical Flows, *J. Fluid Mech.*, Vol. 77, Part 3, pp. 531~560, 1976.
  - 14) Coleman, J.M. : Brahmaputra River Channel Processes and Sedimentation, *Sediment Geol.* 3, pp. 129~239, 1969.
  - 15) 大谷守正・八嶽 功：河底地形が浮泥分布におよぼす影響，第 32 回年土木学会年次学術講演会講演概要集 II, pp. 509~510, 1977.
  - 16) Laufer, J. : New Trends in Experimental Turbulence Research, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 7, pp. 307~326, 1975.
  - 17) 福岡捷二・福岡祐介・奥津一夫：開水路中に見出される boil の特性，第 22 回水理講演会論文集，pp. 37~42, 1978.
  - 18) たとえば，溝江 昇：流体力学と航空力学，裳華房，1947. (1979.4.16・受付)
-