

## 開水路流中に見出される boil の特性

## Characteristics of boils in an open channel flow

東京工業大学 正 員 福岡 捷二  
 同 上 正 員 ○福嶋 祐介  
 同 上 学生員 奥津 一夫

1. 序論 河床付近で生成された大規模渦運動が強い上向き流れを伴いながら流下上昇し、やがて水面に達し横方向に拡がる現象をboilと呼ぶ。開水路流の乱流構造は3次元的でありboilはその一面を示すものだろう。自然河川において観察されるこのようなboilは河床形態と密接に関連し、平均流に与える影響も大きく、boilの生成機構を明らかにすることの意義は大きい。Mattes<sup>1)</sup>は自然河川に見られるMacroturbulenceの1つとしてboilをあげている。木下<sup>2)</sup>は洪水時の航空写真からboilが列状をなしその間隔が水深の2倍であること、流下方向に軸をもつ並列らせん流が存在することを示した。石原・余越<sup>3)</sup>は、Theodorsen<sup>4)</sup>の $\Omega$ 型渦管モデルでboilを説明し、 $\Omega$ 型渦管の頭部が水面に達したときboilが生ずるとした。宇民・上野<sup>5)</sup>も同様の考え方でboilを説明し、第1次渦の集中という概念で $\Omega$ 型渦管の発生を説明し、複数の $\Omega$ 型渦管の相互作用によって2次流が形成されるとした。また、中川・祢津<sup>6,7)</sup>は開水路乱流のburst構造を調べ、burstingの周期が対数正規分布であることを示すとともに、低速渦の間隔が深さとともに増大することを示し、水面ではboil列の間隔に近づくことと予想した。Jackson<sup>8)</sup>もboilingをburstingと対比させ、burstの中で特に強いものがboilになると考えた。彼は自然河川での観測もしており、boilの平均周期 $\bar{T}_b$ を水深 $H$ 、表面流速 $U_s$ で無次元表示すると $\bar{T}_b U_s / H = 4.9 \sim 10.3$ となり、周期は対数正規分布に従うことを示した。

本研究では、流れの可視化によって、boilの成長過程、boilとそれに伴う一連の大規模渦運動の運動学的特性、boilの平均流に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験装置及び実験方法 boilの発生機構について

では、現在のところ明確な説明はなされていないようである。ここでは、boilの発生原因には拘泥せず、流路床付近にboilを生み出すに必要な渦度の強い集中を起す流れをつくり出すことを考えた。このため、流路床に底勾配をつけ、逆圧力勾配のために流れが剝離しそれが強い上向き流れとなってboil状を呈する状況を強制的に作り出した。実験水路は、長さ9 m、幅1 m高さ0.3 mのコンクリート製水路中央部に、長さ1.8 m、幅0.4 m、底勾配1/10の亚克力製測定部を設置したものである。測定部の上流側には、ベルマウス状の取付け部を設け、流れを滑らかに縮流させている。測定部と座標系を図-1に示す。流量 $Q$ は9.0 l/s、勾配変化点( $X=0$  cm)での水深 $H_0$ は6.0 cmである。Froude数 $Fr_0$ 、Reynolds数 $Re_0$ は $X=0$  cmの断面平均流速と水深を使ってあらわした。平均流速は直径5 mmのプロベラ式流速計を用いて、出力を直接電子計算機に入力し、サンプリング間隔1/10秒とした100秒間の平均値である。流れの可視化は次の2つの方法によって行っている。1つは、染料(ローダミンB、メチレンブルー)を外径1 mmのス

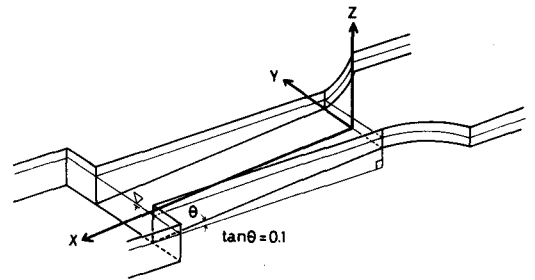


図-1 測定部及び座標系

$Q = 9.0 \text{ l/sec}$   
 $H_0 = 6.0 \text{ cm}$   
 $B = 40 \text{ cm}$   
 $Fr_0 = 0.49$   
 $Re_0 = 1.88 \times 10^4$

表-1 実験条件

テンレスパイプ製の注入器で注入し、染料の流跡線、拡散の度合いによって可視化する方法である。流れの空間的な拡がりを知るために、染料注入管を水面と平行あるいは垂直に複数本配列し

た。他の方法は、アルミ粉末をトレーサーとし、スリットを通した光を水面と平行あるいは垂直にあてることによって、光の照射面内の渦運動を知る方法である。可視化した渦運動は 8 mm シネカメラで撮影し解析した。

### 3. boilの発生位置及び周期特性

流体中に生じた上昇流が水面境界に達すると、その向きを変えboilを形成する。このときトレーサーが水面に存在すると、トレーサーも流体とともに横方向に拡がる。このようにして、水面に現われるboilを可視化し、boilの平面的拡がり、周期などを測定した。写真-1はboilの1例を示す。下流側に2つの円形のboilが、上流側に未発達小さなboilが見える。流下距離が小さいうちは、boilはそれほど強くなく、水面の染料はほとんど

拡散されず横方向にゆっくりと押しやられる。しかし、流下距離が増すと、上昇流とそれに伴うboilの強度は大きくなり、染料の拡散は著しくboilの識別は容易である。

図-2はこのようにして見出された各断面に現われるboilの平均周期 $\bar{T}_b$ を示す。測定時間は約200秒である。染料は測定断面の10~20cm上流で注入した。平均周期は一定でなく、流下距離の増大に伴って減少する。すなわち、見出されるboilの数が流下につれて増大することがわかる。 $\bar{T}_b$ を断面平均流速 $U_m(x)$ 、水深 $H(x)$ で無次元化すると、 $\bar{T}_b U_m/H = 1.5 \sim 2.5$ となり、Jackson<sup>8)</sup>が自然河川で実測した値 $\bar{T}_b U_s/H = 4.9 \sim 10.3$ と比較すると広い範囲の値をとる。これは、Jacksonの観測と著者らの観測とでは、boilの判定基準に違いがあるためであろう。すなわち、著者らの測定法では水面の流跡線の小さな変化でもboilとして確認できるが、現地観測ではそうはいかないからである。Jacksonは、boilの周期分布が対数正規分布に従うことを指摘している。図-3は、著者らの測定した周期の頻度分布を対数正規確率紙にプロットしたもので、測定の難かしい周期の非常に短いものを除いてほぼ対数正規分布に従うことがわかる。ここに、 $\log T_0$ 、 $\sigma_0$ はそれぞれ $\log \bar{T}_b$ の平均値、標準偏差を示す。

次に、boilの発生位置をboilの中心位置で代表し、その横方向分布を図-4に示す。縦軸は断面Xでのboilの出現数に対するその断

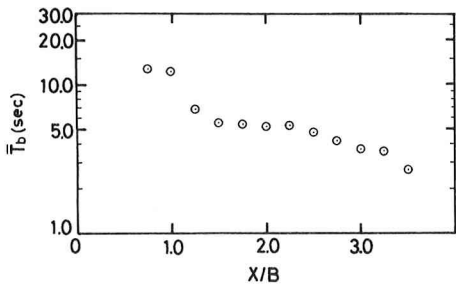


図-2 boilの平均周期  $\bar{T}_b$

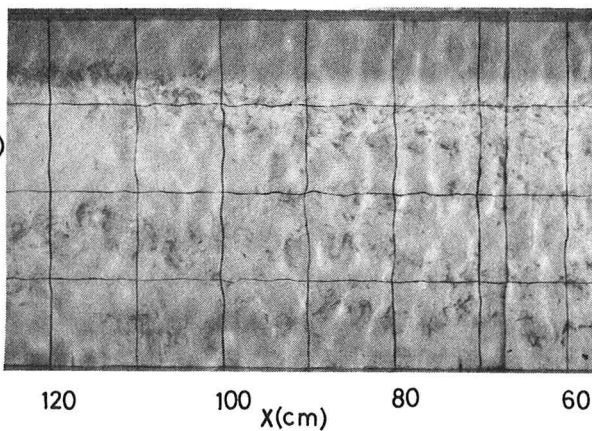


写真-1 boilの1例

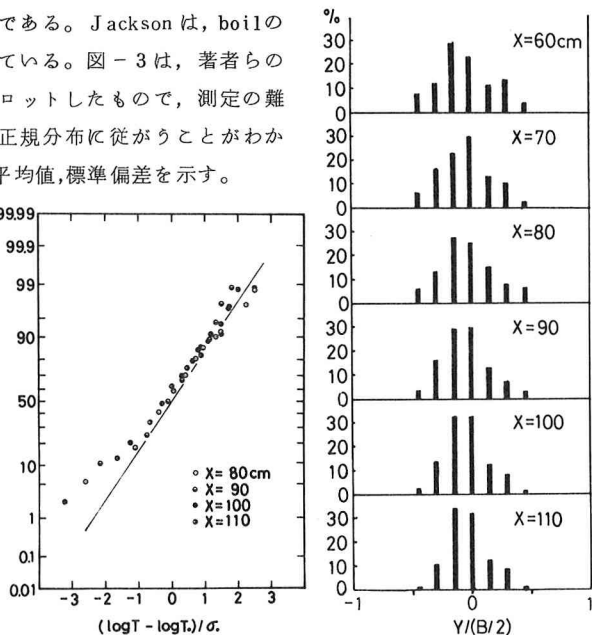


図-3 boilの周期分布

図-4 boilの横方向分布

面内の位置での出現割合である。流下距離が小さいうちは、横断方向に広い範囲で出現するが、流下距離が増大するに従ってboilは水路の中央付近に集中して出現する。この時に、boilの径Dが流下距離とともにどのように変化するかも測定した。これに関し、Jacksonは自然河川での観測からboil径Dは水深にほぼ比例し、 $D/H=0.3\sim0.6$ となることを示した。本実験結果もほぼ同様な傾向を示し、その値は $D/H=1.0\sim1.2$ であった。

#### 4. 大規模渦運動の特性

boilは水面で観察される現象であるが、これは、水面下の流体の強い上昇運動の結果として生ずるものと考えられる。本節では、水面下の上昇流と大規模渦運動について考察する。

写真-2は、 $X=100\text{cm}$ 付近で染料を4層にわけて注入し、水底付近の大規模渦運動を可視化して水路側面から撮影したものである。水面近くでは染料は乱されていないが、底面付近では強い渦運動によって染料が著しく拡がっている。染料の動きからみた大規模渦がつくる流れを図-5に模式的に示す。強い上昇流は水面に到達してboilを形成し、上昇流の側面には、回転流が生じている。これは、 $\Pi$ 型渦管モデル<sup>3,4)</sup> Laufer<sup>9)</sup>のモデルから想像される流れに近いものである。また、染料の動きから、大規模渦の前面は穏やかに下降する流れが認められる。

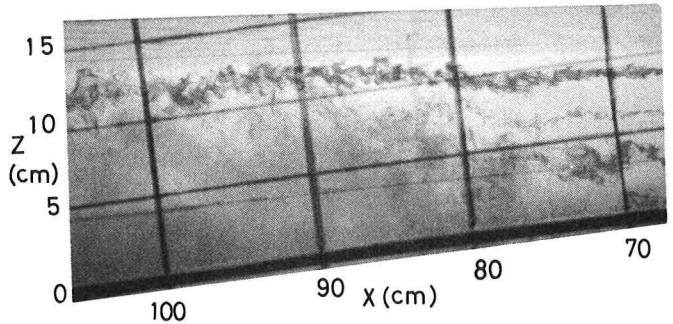


写真-2 大規模渦（水路側面から撮影）

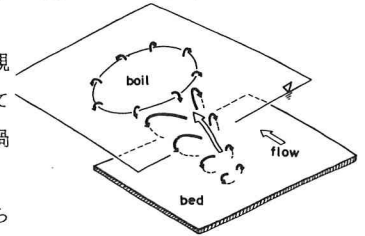


図-5 大規模渦運動がつくる流れ

上昇流は下降流に比べれば強く急激であり、流体塊はほぼ、その位置での局所的流速で運ばれながら上昇する。上昇流のフロントの動きを可視化し、映画解析から見出したものの1例を図-6に示す。上昇する流体は、周囲からの流体の補給を受けながら、流下するに従って大きさを増大し上昇を続ける。図-7、図-8に観測された上昇流と下降流の中心の軌跡を数例ずつ示す。何れも程度の差はあるが流下方向に引き延ばされた軌跡となる。

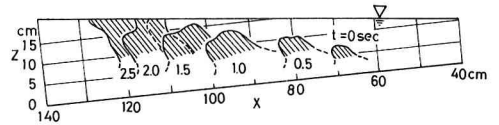


図-6 上昇流のフロントの動き

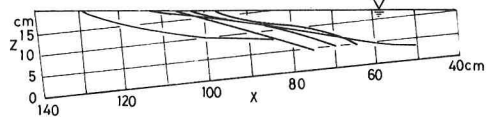


図-7 上昇流の軌跡

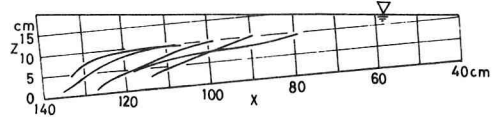


図-8 下降流の軌跡

大規模渦運動の様子を以下の方法で可視化し、調べた。水路幅全体にわたって染料を注入できるような装置を水深方向に5cm離して2台設置し、下段からローダミンB上段からメチレンブルー溶液を流す。ローダミンBで着色された下層流体は、下段付近で生じた上昇流のため上層のメチレンブルー溶液をつき破って上昇する。このような上昇流の発生回数を知ると、その場所の流体を5cm以上上昇させる強さを持つ上昇流の周期を求めることができる。上昇流の周期と空間特性を知ることによって、大規模渦の特性を知ることができる。

図-9は、このようにして測定された上昇流の平均周期 $\bar{T}_u$ が流下距離とともにどのように変化するかを示

す。測定時間は約200秒である。流下距離が小さいうちは、周期は底面からの深さ $Z$ とともに変化し、底面付近では短く水面に近づくほど長い。流下距離がある程度大きくなると、各 $Z$ での $\bar{T}_u$ はほぼ断面内で一定となる。周期の変動の大きさを表わす変動係数 $\sigma_u/\bar{T}_u$ についても同様のことがいえる。流下距離が小であれば、底面付近では $\sigma_u/\bar{T}_u \approx 0.3$ であるが水面に近づくとも周期の変動は大きくなり、 $\sigma_u/\bar{T}_u \approx 1$ 程度になる。流下距離が大きくなると変動係数は $Z$ によってほとんど変化せず0.3である。これは、中川 祢津<sup>7)</sup>によるburstの変動係数1~2に比べて小さい。

boilと同様、各 $Z$ の上昇流の周期も対数正規分布に従う。一例として、 $X=100\text{cm}$ の位置で測定された周期を対数正規確率紙上にプロットしたものを図-10に示す。他の位置でもほぼ同様の結果を得た。

上昇流は、底面付近に生じた大規模渦が水面方向に伝わって来ることによって生ずると考えられる。ここで明らかにされた上昇流の周期特性から次のことがいえよう。流下距離が小さいうちは( $X/B < 2$ )、流れの剝離によって生じた大規模渦運動が、高流速層をつき破るほど強い渦となる頻度はきわめて少なく、その影響範囲は主に底面付近に限定される。しかし、流下距離が大きくなるに従って、大規模渦によって誘起される上昇流は水面近くまで及ぶようになり、その出現もかなり規則性を増す。図-9から、 $X/B \approx 3$ 程度になると上昇流出現周期が全水深にわたって一定となる。これから、大規模渦が水深全体に及び、水深規模の運動になっていることがわかる。

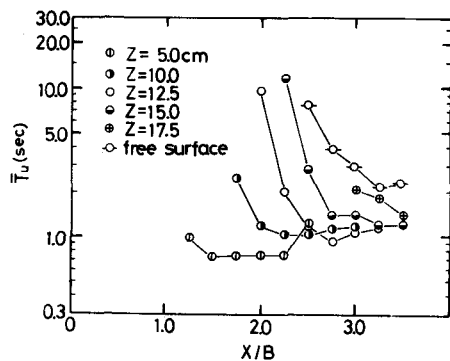


図-9 上昇流の平均周期  $\bar{T}_u$

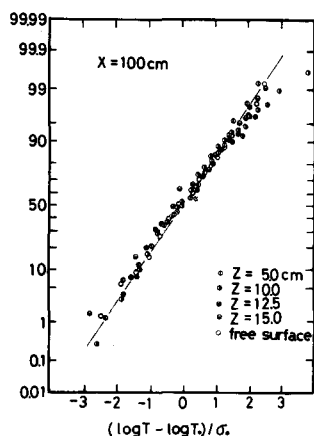


図-10 上昇流の周期分布

5. boilの発達過程と大規模渦運動 前節では、boilが活発に出現している位置には、急激な上昇流を伴う大規模な渦運動が存在することを示した。以下では、boilの成長過程と大規模渦運動との関連について考察する。boilを観察すると、1つのboilが流下した後に新たなboilが誘起されることが多い。写真-1の2つのboilはその例である。同様に、強い上昇流を伴う大規模渦は、流下した後に次々と新たな上昇流を誘起する。また、boilと上昇流の周期特性が良く似ていること等、boilと上昇流を伴う大規模渦の間に強い関連性がうかがわれる。一方、図-2と図-9を比較すると、boilの平均周期と水面に達した上昇流の平均周期とは必ずしも一致しない。すなわち、本実験の範囲では、boilは $X/B < 1$ でも観測されるのに対し、水面下5 cmから水面迄達する上昇流は $X/B > 2$ でなければ観測されない。ここで採用されたboilの判定は、水面における染料の流跡線の拡がり変化によってなされるため、弱いboilまでとらえることができる。一方、上昇流の水面への到達周期は、水面下5 cmの流体塊が水面に達するという基準をもって測定している。この判定基準の差が平均周期の差となってあらわれている。これに対し、大規模渦の周期としてある深さ以下の上昇流の周期をとり、これをboilの周期と比較すると、大規模渦はboilに比較して頻繁に現われていることがわかる。これから、boilは大規模渦による上昇流の結果として現われるが、広いスペクトル範囲をもつ大規模渦のうち上昇流の強度の大きいものだけがboilを形成することを示唆する。Jackson<sup>7)</sup>は、boilをburstと結びつけて考え、burstのうち強度の大きいものだけがboilになると予想した。ここでいう大規模渦は彼のいうburstと必ずしも同一ではないが、水面下で起こる大規模渦運動のうち特に強いものがboilになると考える点で一致する。

boilは上昇流が水面に達した結果生ずるが、boilとなった後直ちに減衰するわけではない。boilは流下しながら周囲水を補給し、十分発達した後減衰してゆく。boilの発達過程を側面と水面からみたものを図-11に示す。図は撮影した8mmフィルムをもとに、代表的なboilを1秒おきにスケッチしたものである。側面図のハッチは上昇する流体であることを示す。 $t=t_0$ では、大規模渦に伴う上昇流は水面下にあり下流には前方を進むboilの影響(破線)が残っている(図-12(a))。1秒後には、上昇流は水面に到達しboilとなる。boil面の後方、側方から引続き上昇流が周囲水を補給し、その後boilは流下しながら発達してゆく。図-11(b)～

(d)では、このboilが次の大規模渦を誘起している様子も示している。この大規模渦は流下上昇し、さらに新たなboilを形成する。

6. boilと平均流速分布の関連 boilが現われると、平均流速分布が歪められ、流れが3次的になることが知られている。各断面での平均流速 $U$ を断面最大流速 $U_{max}$ で無次元化した等流速線を図-12に示す。流速計の精度を考慮して、 $U/U_{max}=0.3$ までの等流速線を記入した。図-12以外に、さらに上流でも同様の測定を行なったが、 $X=40$  cmまでは、側壁の影響を除いて流れはほぼ2次的であり、boilの影響は顕著には認められなかった。 $X=80$  cmの測定結果をみると、水路中央付近でも各等流速線は水路床と平行ではなく、3次的な流れとなっていることがわかる。 $X=100, 120$  cmでは、流れの3次性はさらに著しくなり、流速分布形に明らかにboilの影響が認められる。等流速線の形は流下するに従って変化する。すなわち、 $X=80$  cmでは $U/U_{max}=0.9$ の等流速線は、 $Y/(B/2) \approx -0.2, 0.3$ に明確なピークを持つ。ところが、 $X=120$  cmでは、ピークは $Y/(B/2) \approx -0.2$ に1つ見られるだけである。この流速分布の変化は、boilが流下するに従ってその特性が変化することに密接に関連すると思われる。図-4から、boilは流下距離が小さければ横断方向に広く分布し、流下距離が増加するに従って水路中央に集中することがわかった。木下<sup>2)</sup>は、洪水時の河川には水深の2倍の間隔

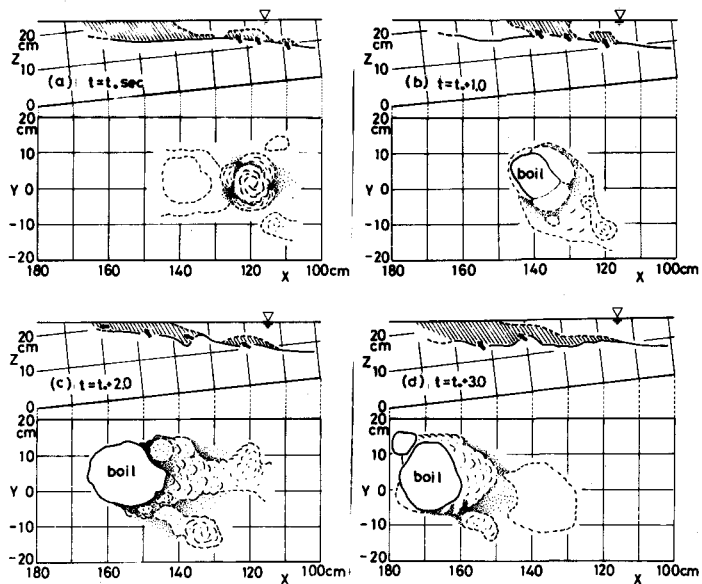


図-11 boilの発達過程

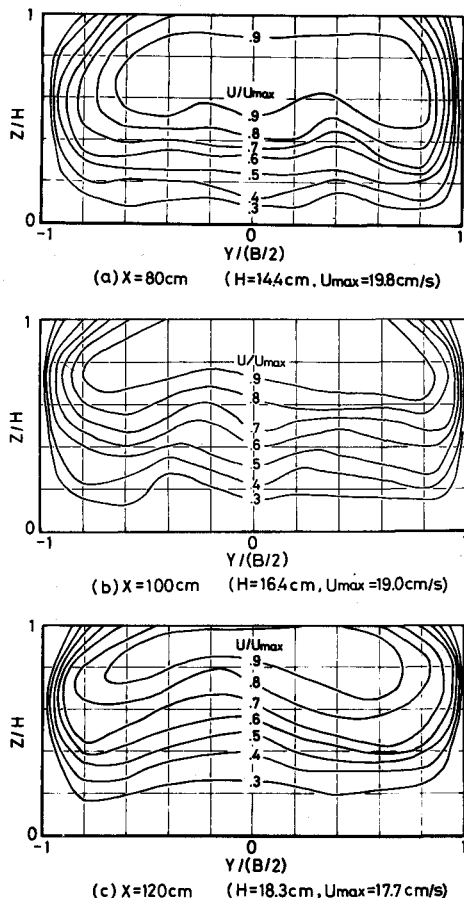


図-12 平均流速分布

を持つboil列が存在することを指摘し、boilのつくるたてすじは流速が小さく、浮遊物のなすたてすじは流速が大きいことを示した。 $X=120\text{ cm}$ では、boilが水路中央に集中しており、それに対応して、水路中央付近で流速が小さく、その両側で流速が大となっている。これは、木下の示した傾向と一致しており、boilによって流速分布が歪められたものと理解できる。 $X=80\text{ cm}$ では、boilはほぼ中心に分布しているが、流速分布には2つのピークがあらわれており、boilと流速分布との対応は明らかではない。

図-13に大規模渦が存在するときの瞬間流速分布を示す。測定はアルミ粉をトレーサーとし、35 mm カメラによって1/30 秒の露光時間で撮影することによって行なった。アルミ粉のつくる流跡線と露光時間から、流速と流向がわかる。水面付近では、流速が大きく乱れが小さいが、底面付近では、流速が小さく乱れが大きくなっており、この付近に大規模な渦運動が存在していることがわかる。低速で乱れた領域は、空間的・時間的に変化する。ある地点の流速を考えれば、測定時間内で大規模渦に影響される時間が長いほど乱れ強度が増加することが予想される。

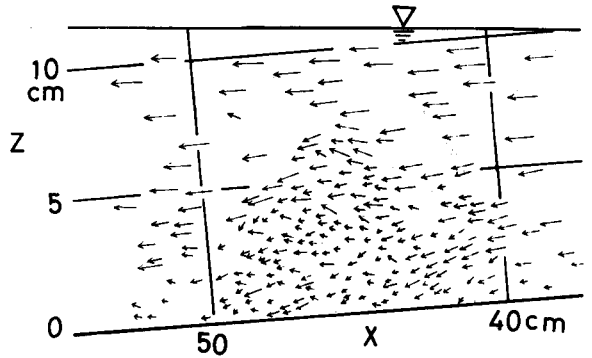


図-13 大規模渦内の瞬間流速分布

## 7. 結 論 今回の実験で得られた結果を以下にまとめる。

1) boilは、底面付近で生じた大規模渦運動による上昇流の結果として現われる。しかし、大規模渦の強度はさまざまであり、上昇流の強度の大きいものだけがboilを形成する。

2) 大規模渦、及びboilの周期の確率分布は対数正規分布をする。

3) boilの現われる流れでは、平均流速分布は歪められ3次元的となる。本実験の範囲では、流下するに従って、boilの特性が変化するため、平均流速分布も流下距離によって変化している。

4) 大規模渦の影響範囲は、流下するに従って増大し、十分発達すれば鉛直方向には水深規模となる。

今回の実験は限られた水理条件のもとで行なわれたものであるので、さらに広い範囲の条件で検討を行なう必要がある。また、上昇流として、5cm以上上昇したものをとっているが、異なる判定基準は異なる結果を与えることに注意を要する。著者らの1人<sup>10)</sup>は、自由乱流中に見られる大規模渦の特性を可視化とホットフィルム流速計による点計測とを併用して明らかにしてきた。本研究のように境界のある場合の大規模渦についても点計測との併用によって、今後、その特性と水理学的役割を明らかにしていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Mattes, G. H., Tran, Am. Geophys. Un., vol. 28, 1947, pp 255-262
- 2) 木下良作, 写真測量, vol. 6, No. 1, 1967, pp 1-17
- 3) Theodorsen, Th., 50 Jahre Grenzschichtforschung, Friedr. Vieweg & Sohn, 1955, p.55
- 4) 石原安雄, 余越正一郎, 京大防災研年報 13B, 1970, pp 323-331
- 5) 宇民正, 上野鉄男, 京大防災研年報 19B, 1976, pp 267-288
- 6) 祢津家久, 中川博次, 第32回年講, 1977, pp 281-282
- 7) 祢津家久, 京都大学博士論文, 1977
- 8) Jackson, R. G, J. Fluid Mech., vol.77, part 3, 1976, pp 531-560
- 9) Laufer, J., Ann. Review of Fluid Mech., vol. 7, 1975, pp 307-326
- 10) 福岡捷二, 佐藤郁太郎, 第9回乱流シンポジウム, 1977, pp 7-12