

開水路流れの側壁近傍における3次元特性について

On The Three-dimensional Characteristics of

An Open Channel Flow near The Side Wall

京都大学防災研究所 正員 今 本 博 健
京都大学防災研究所 正員 石 垣 泰 輔
京 都 大 学 大 学 院 学正員 梶 間 厚 邦

1. は じ め に

乱流状態の開水路流れにおける側壁近傍の流れは3次元的存在であり、その主要因として断面形状の効果により生成される2次流とそれにより誘起される縦渦の存在が挙げられる。著者らは、従来より乱れ計測法および流れの可視化手法を用いた壁面せん断力分布の計測結果より、側壁近傍における縦渦の配列、安定性、スケール等について実験的に検討して来た。¹⁾しかしながら、用いられる計測法により推定される流れの構造スケールに差異が認められるなどの問題点を残すとともに、その3次元構造についても不明な点が残されている。本研究は、流れの3次元構造を解明するための手法として、レーザ・ライト・シートを用いた中立粒子トレーサ法と2台のレーザ・ドップラ流速計を用いた速度3成分の同時計測法(LDV速度ベクトル計測法)を用い、開水路流れの側壁近傍の3次元特性を実験的に検討したものである。

なお、流れの可視化実験には幅20cm、深さ15cm、長さ6mの壁面アクリル樹脂製直線水路を用い、LDVによる乱れ計測には、幅40cm、深さ23cm、長さ8mの壁面ガラス製直線水路内に厚さ8mmのガラス製隔壁を設置することにより所定の幅とした水路を用いた。水理条件は表-1に示す通りである。

2. 3次元流況の可視化結果による検討

2.1 実験装置および方法

実験装置および方法は、既報²⁾³⁾に示す通りであるが、概要は次のようである。平均粒径0.45mm、比重1.05のポリスチレン粒子をトレーサとして用い、5mWのHe-Neレーザにて作られるシート光で照明し、35mmスチルカメラおよび内視鏡を用いたビデオカメラにより流れの水平・縦断・横断面を可視化する方法である。

2.2 3次元流況

写真-1は、半水深の高さにおける水平断面流況の移動撮影結果である。流れは紙面に向かって左から右、下端が側壁であり、カメラを設置した台車の速度は断面平均流速と一致させた。また、照明用レーザビームを所定の時間間隔にて遮断することにより流跡線の長さに変化をつけてトレーサの移動方向が判別できる工夫をしている。ここに示した写真では流跡線の長いものから短いものに向う方向がトレーサの移動方向である。写真より、 $z/H=0.5$ 付近を境に側壁側では上流方向で側壁より離れる方向にトレーサが移動しており、水路側では下流方向で $z/H=1.5$ 付近に向かって粒子が移動しているのが見れる。また、 $z/H=0.5$ 付近では粒子の発散・集中が見られ、流体が激しく混合しているのが認められる。

すなわち、側壁より水路中央に向う低速流体が $z/H=0.5$ 付近まで移動し、さらに水路中央部に向かって移動するものと、その付近で生ずる流体の湧き上がりあるいは沈み込み現象にまき込まれるものがあることが知れる。

表-1 水理条件表

Case	B(cm)	H(cm)	Q(l/s)	I _e	Re	Fr
1	20.0	3.98	1.478	1/500	6100	0.30
2	4.0	4.01	0.329	1/1200	2900	0.57
3	12.0	4.00	1.200	1/1100	5800	0.52
4	20.0	4.01	2.055	1/1400	7700	0.48

従来の多くの研究で指摘されている隅角凹部に向う2次流の存在を考慮すれば、 $z/H=0.5$ 付近の流体は沈み込んでいると考えられる。また、粒子の集中・発散が流下方向に間隔をおいて観察されることより、その現象の間欠性が示唆される。

写真-2は、縦断面流況を、側壁近傍および側壁より $0.5H$ ごとに示した結果であり、カメラの移動速度は断面平均流速としている。なお、 $2.5H$ の位置は水路中央に相当する。

側壁近傍の結果を見ると、いずれのトレーサも上流側に向かって上方に移動しており、側壁に沿った低速流体の上昇が観察される。また、 $z/H=0.5$ では、路床より水面までの全域で複雑な粒子の挙動が見られ、トレーサの移動方向も上昇と下降の両者が認められる。このような粒子の激しい動きは $z/H=1.0$ の結果にも見られるが $z/H=1.5$ および 2.0 では路床近傍を除いてゆるやかにトレーサが下降するのが観察される。一方、 $z/H=2.5$ の水路中央では、路床より水面まで達する水深規模の流体の動きが見られる。以上をまとめると、側壁近傍では上昇、 $z/H=0.5 \sim 1.0$ の路床で上昇、 $z/H=1.5 \sim 2.0$ では下降、 $z/H=2.5$ では上昇という流体の挙動が観察された。

このような流況は、隅角凹部に向う2次流とそれにより誘起される縦渦により説明され、その3次元構造は、図-1に示すようなモデルで説明される。すなわち、巨視的に見れば、隅角凹部付近は低速であり連続の条件より周囲から流体が供給されることにより隅角凹部へ向う2次流が間欠的に発生し、その後側壁と底面に沿って分離する。側壁へ向う流れは壁面に沿って上昇して水面に達し、水面の存在のため水路中央部へと方向を変え、 $z/H=1.5 \sim 2.0$ 付近でゆるやかに沈み込む。一方、底面に向った流れは $z/H=0.5 \sim 1.0$ の付近で上昇し、新たに生じた2次流にまき込まれて隅角凹部へ向う。また、水路中央部に見られる2次流に誘起された縦渦とは、図に示すような関係にあると考えられるが、詳細については今後さらに検討する必要がある。

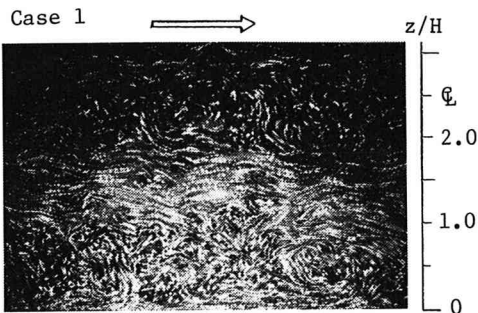


写真-1 水平断面流況 (半水深付近)

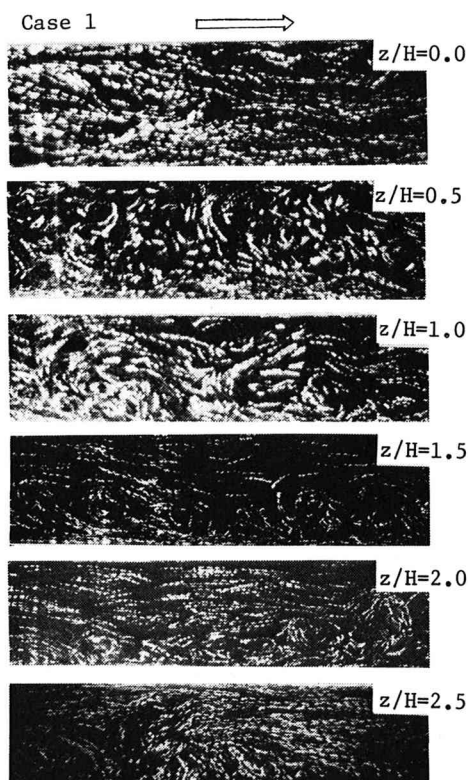


写真-2 縦断面流況

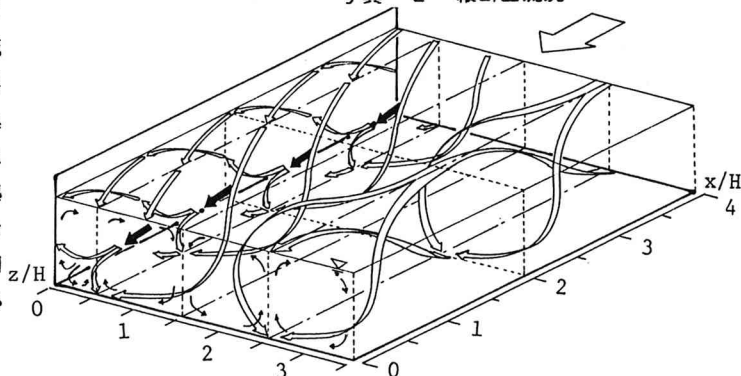


図-1 開水路流れにおける側壁近傍の3次元構造

3. LDV速度ベクトル計測法による検討

3.1 実験装置および方法

ここでは前章で示した側壁近傍での3次元構造についての検討を、2台のレーザ・ドップラ流速計を用いた速度3成分同時計測法を用いて行う。計測法の妥当性は、既報²⁾に示したようであり、流下方向速度成分 u および鉛直方向速度成分 v を15mW He-Neレーザを用いた3ビーム偏光型システムにより計測し、横断方向速度成分 w を水路下方に設置した5mW He-Neレーザを用いた同軸型システムにより同時に計測するものである。

ここでは、計測時間 256秒、51200個のデータを統計処理した結果を用いており、乱れのエネルギースペクトルはデータ数1024個、繰り返し数50としてFFT法で算定した。

3.2 結果および検討

図-2は流下方向平均速度 U の等速度線図、図-3は2次流速ベクトル図である。図-2より、 $B/H=1$ および3では水路中央部まで最大流速点の降下が見られるが、 $B/H=5$ では $z/H=2.0$ 付近までその影響が見られる。また、等速度線のゆがみより隅角凹部へ向う2次流の存在が推定されたとともに、 $B/H=3$ および5では $z/H=0.5 \sim 1.0$ 付近における等速度線の凸状分布より2次流の上昇部の存在が確認できる。これらの2次流は、図-3で明確に認められ、いずれのケースにおいても隅角凹部に向う2次流が底面に沿って回り込み0.5H程度のスケールを持つ縦渦を形成している。また、側壁に沿って上昇した2次流は水面の存在のため水路中央部へ向う流れとなり、 $B/H=1$ と3では水路中央まで、 $B/H=5$ では $z/H=1.5 \sim 2.0$ 程度の範囲まで及んでいる。一方、 $B/H=5$ の場合に水

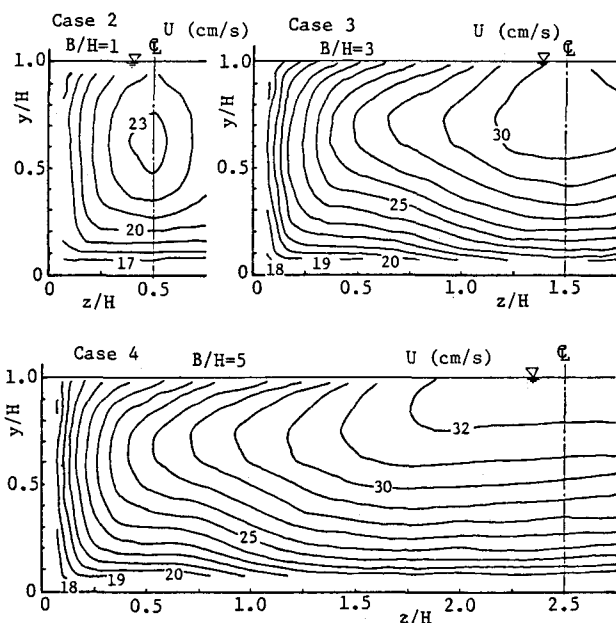


図-2 流下方向平均速度 U のコンター

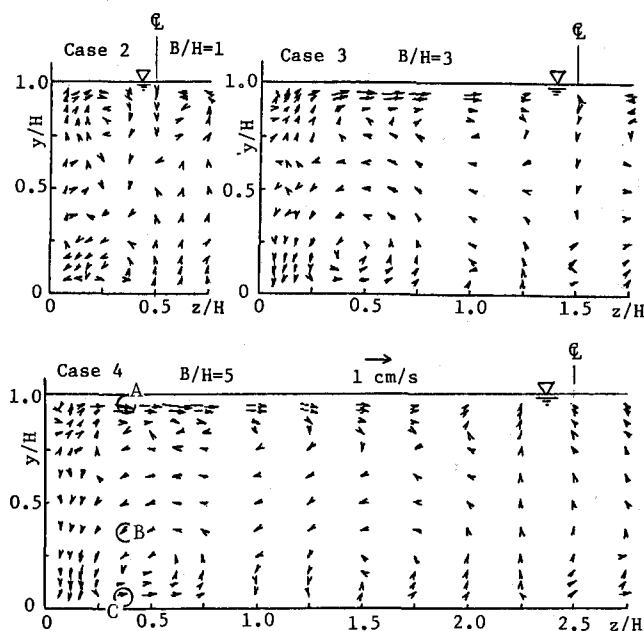


図-3 2次流速ベクトル

路中央で流向が上向きになっているものの、可視化結果で見られるような水深規模の縦渦の存在は認められず、平均場の特性として捉えにくいと考えられる。つぎに、2次流ベクトルの経時変化について検討する。

図-4は、2次流ベクトルの変動と流下方向速度 u の変動を、図-3に示した $B/H=5$ のケースにおける水面付近のA点、隅角凹部に向う2次流が顕著に認められるB点、およびその2次流が底面に沿って流れる路床付近のC点について示したものである。図-3より、A点では側壁より水路中央部へ向う流れ、B点では隅角凹部へ向う流れ、C点では側壁より水路中央へ向う流れが卓越している。A点の結果を見ると、卓越方向は水路中央に向う方向であり、強い2次流の発生と流下方向速度 u の低速部の対応が明確に認められる。これは、側壁に沿って上昇した2次流が水面の存在のため方向を変え、水路中央へ向う流れとなることを説明するものである。B点では、隅角凹部に向う2次流が間欠的に発生していることと、この2次流により高速流体が隅角凹部に輸送されることが u の変動特性との対比から確認される。同様のことがC点についても言え、隅角凹部へ向った2次流が底面に沿って流れることが知れる。

これらの結果より、2次流の間欠性が指摘されるが、つぎにその卓越方向の速度ベクトルの発生周期を図より算定し、 $H/U_{\text{平均}}$ で無次元化して示すと、A点では1.55、BおよびC点ではそれぞれ1.13、1.00となり、流下方向のスケールは水深程度であることが推定される。また、2次流の強さは図-3に示したように、平均値で見ると、最大でも断面平均流速の2~3%程度であるが、図-4の

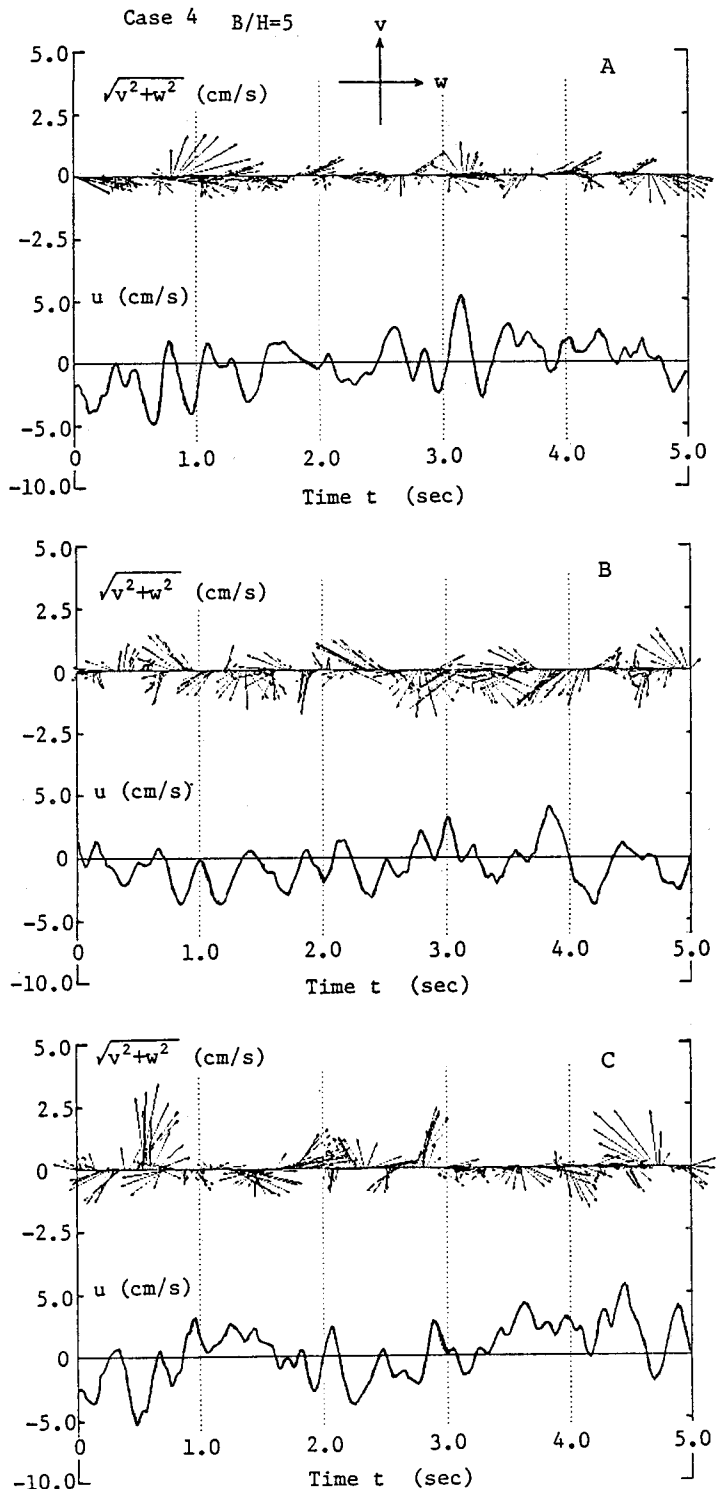


図-4 2次流速度ベクトルの経時変化

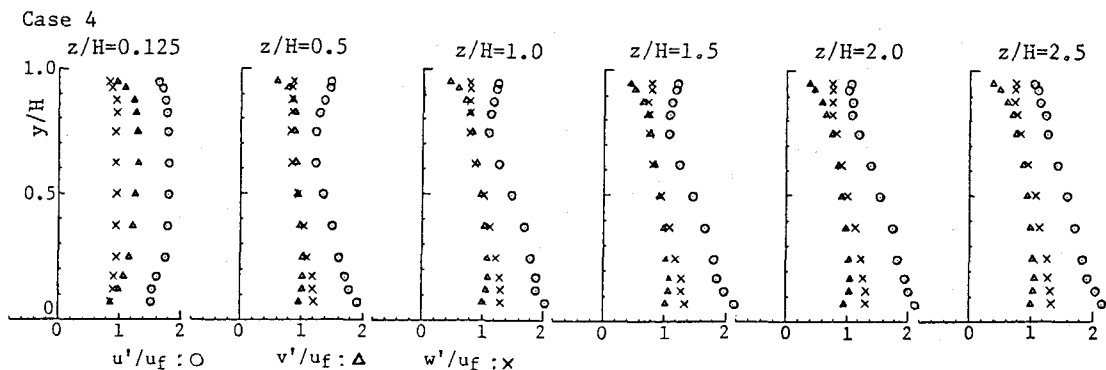


図-5 乱れの強さの鉛直分布

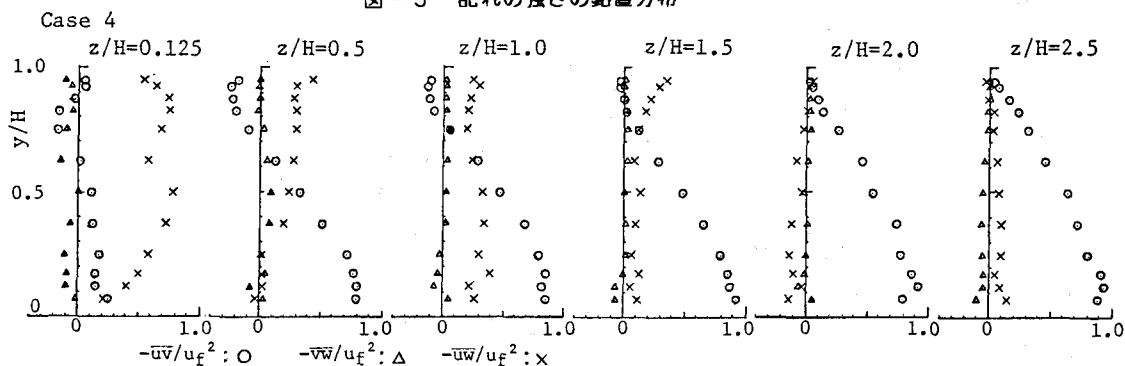


図-6 レイノルズ応力の鉛直分布

瞬間値では断面平均流速の10%に達している。詳細には今後の検討が必要である。

つぎに、これらの2次流と乱流構造の3次元特性について検討する。図-5は、乱れの強さの鉛直分布を摩擦速度 U_f で無次元化し、側壁からの各位置の測線について示したものである。 $z/H=2.5$ での乱れの強さは $u' > w' > v'$ の大小関係を示し、路床で大きく水面に近づくにつれて減少する2次元流れと同様の分布特性を示しているが、側壁に近づくにつれて乱れの強さが鉛直方向に一樣化する傾向を示し、側壁近傍の $z/H=0.125$ では $u' > v' > w'$ となり、側壁の影響を強く受けている。 u' の分布について見ると、 $z/H=2.0$ より水面付近から乱れの強さが増大し、側壁近傍では鉛直方向にほぼ一樣な分布となっている。水面付近の u' の増大は水路中央に向う2次流の影響であり、路床付近では隅角凹部に向う2次流によるものと考えられる。

図-6は、レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ 、 $-\overline{u'w'}$ 、 $-\overline{v'w'}$ を U_f^2 で無次元化し、その鉛直分布を示したものである。図より、乱れの強さの分布と同様に $z/H=2.5$ では2次元流れと同様の分布を示すが、側壁に近づくにつれて $-\overline{u'v'}$ が減少するとともに $-\overline{u'w'}$ が増加している。また、 $-\overline{u'v'}$ が0となる位置は最大流速点の降下位置と対応しており、 $z/H=2.0$ より側壁側では2次流の影響により $-\overline{u'v'}$ の分布に負の領域が認められる。一方、 $-\overline{u'w'}$ の分布を見ると側壁に近づくにつれて水面近傍より増加し、側壁近傍で最も大きな値を示す。なお、 $-\overline{v'w'}$ はいずれの測線においても小さくほぼ0に近い値となっている。

図-7は、乱れエネルギーの生成項を $-\overline{u'v'}\partial U/\partial y$ 、 $-\overline{u'w'}\partial U/\partial z$ とその和について横断面内の分布を等値線図で示したものである。図より、乱れの生成については底面が支配的な領域と側壁が支配的な領域が明確に判別され、隅角を二等分する線で分られる。また、隅角凹部へ向う2次流の最も顕著に現われる領域では、 $-\overline{u'v'}$ と $-\overline{u'w'}$ による乱れの生成が相互に干渉し合う位置であることが知れる。

図-8および図-9は、乱れエネルギー k ($= \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$) と、乱れのエネルギースペクトルの慣性領域にKolmogorovの $^{-5/3}$ 乗則を適用して算定したエネルギー逸散率 ϵ を U_f^3/H で無次元化した値の等値線を図示したものである。なお、スペクトル定数は $C=0.5$ としている。乱れエネルギー k の分布を見ると、低

乱れ領域が隅角凹部へ広がっており2次流の影響が顕著に見られる。一方、エネルギー逸散率の分布を図-7の乱れエネルギーの生成項の分布と比較して見ると、分布特性そのものは比較的類似しており、水路中央部付近では生成項と逸散項が釣合う平衡領域の存在が見られるが、隅角部付近では生成項の方が逸散項より大きく、乱れエネルギーの輸送項および拡散項が乱れエネルギー収支に寄与していることが知れる。

4. おわりに

以上、主な結論をまとめると、以下のようなものである。

1) 隅角凹部の3次元構造は、図-1に示したモデルで説明される。すなわち、巨視的に見れば、隅角凹部付近は低速であり連続の条件より周囲から流体が供給されることにより隅角凹部へ向う2次流が間欠的に発生し、その後側壁と底面に沿って分離する。側壁へ向う流れは壁面に沿って上昇して水面に達し、水面の存在のため水路中央部へと方向を変え、 $z/H=1.5 \sim 2.0$ 付近でゆるやかに沈み込む。一方、底面に向った流れは $z/H=0.5 \sim 1.0$ 付近で上昇する。

2) 隅角凹部の2次流は間欠的に発生することが、速度ベクトル計測結果より確かめられ、その発生周期 T_s は H/U_m 程度と推定されるとともに、瞬間的には断面平均流速の10%程度にもなる。

参考文献

- 1) 今本、石垣：第28回水理講演会論文集、1984。
- 2) 今本、石垣：京都大学防災研究所年報28B-2、1985。
- 3) 今本、石垣：第30回水理講演会論文集、1988。

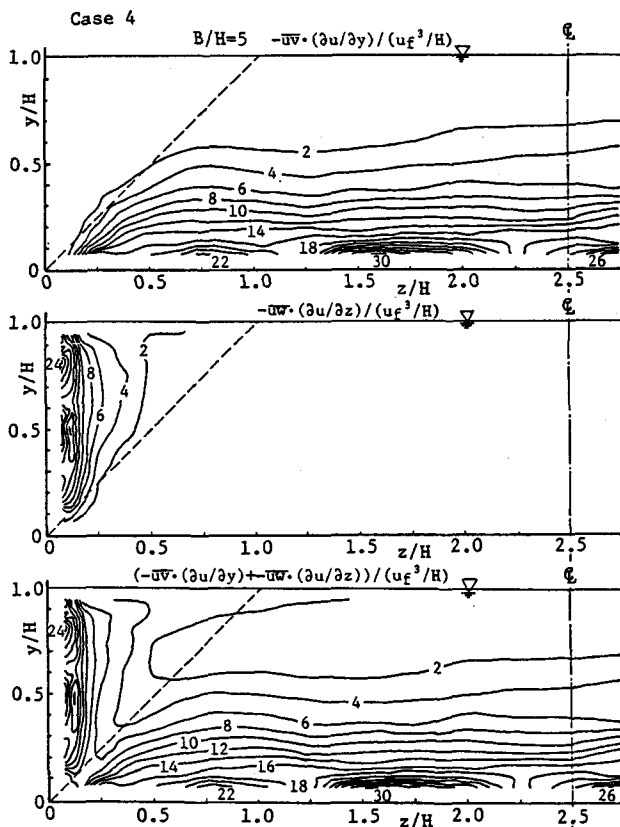


図-7 乱れエネルギーの生成項の分布

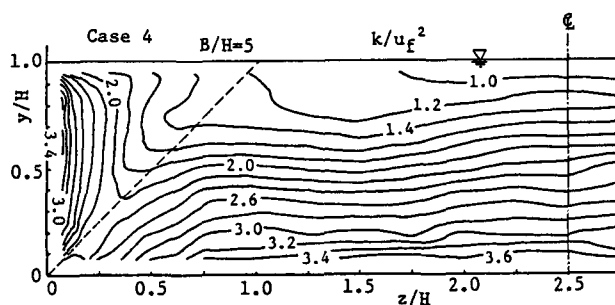


図-8 乱れエネルギーの分布

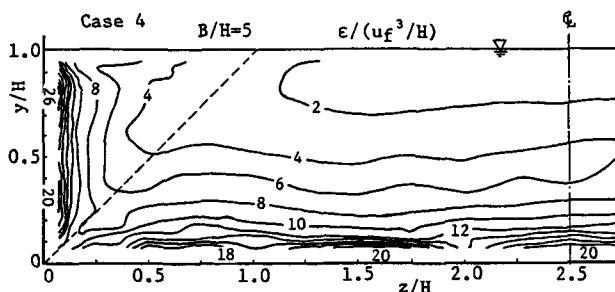


図-9 エネルギー逸散率の分布