

## 現地観測に基づく実河川の流れの特性について

Characteristics of River Flows by Field Measurements

瀬 良 昌 意\*

By Masanori SERA

The turbulent fluctuations of velocity have been measured actual rivers in the field where the relative water depth to roughness height is small, using ultrasonic flowmeter. The turbulent structures of river flows where roughness is relatively small, are similar to those in laboratory channels with the smooth bed. For the rivers where the roughness is relatively large, the turbulent structures in the river bed region are very complex and significantly different from those in laboratory channels with the smooth bed.

Keywords : river flow, field measurement, ultrasonic flowmeter, turbulence

### 1. まえがき

室内の模型実験水路における精緻な計測・解析を基にして河川の3次元的な流れの構造を解明しようとする試みは数多くなされているが、実河川における流速の3方向成分に関する資料や解析結果はほとんど報告されていない。その理由の一つとして、実河川での流速測定に適した計測機器が少ないことが挙げられる。そこで、筆者らは従来より用いられているプロベラ流速計、熱線流速計、レーザー・ドップラー流速計、電磁流速計などと比較して優れた特長を有するブローブ型3次元超音波流速計を用いて、実河川での3方向流速の計測に対する本流速計の有用性を検証した<sup>1)</sup>。本研究は、山地河川に多く見られる河床が礫で構成された地点を主に対象にして、河川規模、河道形状、河床状態等の異なる種々の実河川において流速3方向成分の同時測定を行い、現地観測データに基づいて実河川における流れの特性について調べることを目的とする。

### 2. 測定方法

現地観測を1989年9月から11月にかけて兵庫県下の9河川、15地点において実施した。本研究で現地測定の対象とした地点は主に山地河川に多く見られる礫で構成された河床を有し、水深が20~40cmの地点を選んだ。特に、現地測定を実施した地点は礫の直径が水深の半分ほどもある礫床の地点が多く、また、流路の平面形状を見ると、左右どちらかに緩く湾曲している地点が多い。流速測定には3方向流速の同

---

\* 正会員 工修 神戸大学助手 工学部土木工学科  
(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

時測定可能な3次元超音波流速計を用いた。本流速計は超音波発信圧電素子間の超音波の伝達時間の差から3方向成分の流速を求めている。本流速計は図-1に示すような形状で、超音波の伝播方式として、X、Y軸方向は反射式、Z方向は対向式を採用し、100Hzまでの流速変動に応答するものである。本流速計についての詳しい説明は、紙面の都合上、文献1)に譲る。座標系は測定点の座標原点を礫上面にとり、座標軸はuを流下方向、vを横断方向、wを鉛直方向にとる左手系とした。現地観測を実施した全ケースの水利条件を表-1にまとめて示す。表中の摩擦速度 $U_*$ は平均流速 $U$ の対数分布則より求め、河床の粗度係数 $n$ はManningの粗度係数の定義から求めた。

計測システムは超音波流速計本体とモニター・ユニットから構成され、流速計から得られる信号電圧をモニター・ユニット内のアンプによって増幅し、出力電圧をアナログ・データレコーダに記録する。計測時間は長時間の流速変動を観測するために水面付近、半水深および河床付近の3点で約1800秒とし、その他の水深では約300秒とした。記録されたデータは2つの系に分けてデータ処理される。す

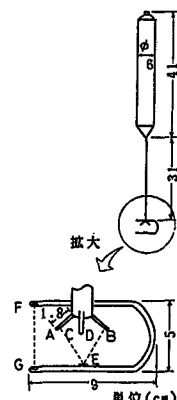


図-1 超音波流速計

表-1 水 理 条 件

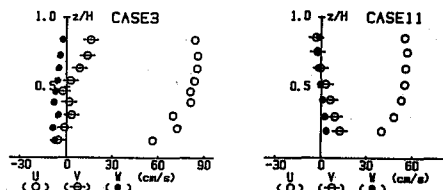
| 河川名 | CASE | 水 深<br>$H$ (cm) | 流路幅<br>$B$ (m) | $B/H$<br>( $\times 10^3$ ) | 水面<br>勾配 | 平均流速<br>$U_m$ (cm/s) | 摩擦速度<br>$U_*$ (cm/s) | $Re$<br>( $\times 10^4$ ) | $Fr$ | 粗度係数<br>( $N=7$ 分類) | 河床・河道の状態                             |
|-----|------|-----------------|----------------|----------------------------|----------|----------------------|----------------------|---------------------------|------|---------------------|--------------------------------------|
| 市 川 | 1    | 41.5            | 31.7           | 0.764                      | 1/230    | 57.2                 | 11.60                | 22.9                      | 0.28 | 0.0534 (R)          | 10~30cm $\phi$ の礫、緩く左に湾曲             |
| 千種川 | 2    | 36.0            | 32.1           | 0.892                      | 1/590    | 49.6                 | 5.04                 | 19.4                      | 0.25 | 0.0273 (R-S)        | 10~20cm $\phi$ の礫、直線状                |
| 有野川 | 3    | 33.0            | 2.5            | 0.074                      | 1/210    | 77.6                 | 6.95                 | 22.7                      | 0.43 | 0.0213 (R-S)        | 5~10cm $\phi$ の礫                     |
|     | 4    | 32.0            | 3.1            | 0.096                      | 1/130    | 49.2                 | 14.59                | 14.4                      | 0.28 | 0.0701 (R)          | 緩く左に湾曲                               |
| 猪名川 | 5    | 32.0            | 14.0           | 0.438                      | 1/540    | 54.7                 | 4.88                 | 14.9                      | 0.31 | 0.0217 (R-S)        | 岩盤上に3cm $\phi$ 程度の礫と1~3mm $\phi$ の砂  |
|     | 6    | 33.0            | 14.9           | 0.452                      |          | 49.0                 | 14.32                | 13.4                      | 0.27 | 0.0716 (R)          | 右に湾曲                                 |
| 加古川 | 7    | 37.0            | 35.7           | 0.965                      | 1/1200   | 55.5                 | 8.20                 | 18.1                      | 0.29 | 0.0392 (R)          | 5~20cm $\phi$ の礫、直線状                 |
| 篠山川 | 8    | 29.0            | 9.6            | 0.331                      | 1/540    | 70.1                 | 9.33                 | 16.5                      | 0.42 | 0.0324 (R)          | 2~10cm $\phi$ の礫                     |
|     | 9    | 32.0            | 8.0            | 0.251                      |          | 68.9                 | 9.62                 | 18.4                      | 0.39 | 0.0343 (R)          | 右に湾曲                                 |
| 加古川 | 10   | 33.0            | 67.9           | 2.06                       | 1/1100   | 43.0                 | 2.60                 | 13.3                      | 0.24 | 0.0156 (S)          | 10~20cm $\phi$ の礫と1~2mm $\phi$ の砂が混在 |
|     | 11   | 34.5            |                | 1.97                       |          | 51.7                 | 3.51                 | 16.9                      | 0.28 | 0.0175 (S)          | 緩く右に湾曲                               |
| 武庫川 | 12   | 34.0            | 16.0           | 0.470                      | 1/280    | 62.6                 | 4.97                 | 18.4                      | 0.34 | 0.0197 (S)          | 2~4cm $\phi$ の丸石と10cm $\phi$ 前後の礫が混在 |
|     | 13   | 39.0            |                | 0.409                      |          | 69.9                 | 6.10                 | 23.9                      | 0.36 | 0.0217 (R-S)        | 右に湾曲                                 |
| 下里川 | 14   | 22.1            | 12.2           | 0.552                      | -        | 19.5                 | 1.80                 | 3.81                      | 0.13 | 0.0222 (R-S)        | 1~3mm $\phi$ の砂の中に1~2cm $\phi$ の石が散在 |
|     | 15   | 27.0            |                | 0.451                      |          | 20.0                 | 1.29                 | 4.74                      | 0.12 | 0.0156 (S)          | ごく緩く左に湾曲                             |

なわち、スペクトラム・アナライザを用いてデータ処理する系と、50 Hzのローパス・フィルタを経てデータをA/D変換し、パソコンを用いてデータ処理する系である。データ処理において、平均流速、乱れ強度、レイノルズ応力については、サンプリグ周波数100 Hz、データ数20480個とし、自己相関係数についてはサンプリグ周波数51.2Hz、データ数1024個、777サンプリグ平均回数8回とし、スペクトルについてはサンプリグ周波数51.2および5.12Hz、データ数1024個、777サンプリグ平均回数8回とした。

### 3. 測定結果とその考察

#### (1) 平均流速分布

各測定点における瞬間流速 $u$ 、 $v$ 、 $w$ を時間平均した局所的な平均流速 $U$ 、 $V$ 、 $W$ の鉛直線上の分布の一例を図-2に示す。この図で $V$ (横断方向成分、右岸向きを正)の分布に注目すると、河道の湾曲の方向によって分



(a) 左に湾曲 (b) 右に湾曲

図-2 平均流速分布

布形に相違があることが分かった。すなわち、右に湾曲する場合 (Case 11), 河床から水面に向かうにつれてその値が正から負へと変化している。一方、左へ湾曲する場合 (Case 3), それと逆の傾向が見られる。前者の場合, このような分布形を示す理由として, 玉井らの湾曲水路での実験結果<sup>3)</sup>でも示されているようにUの軸に直角な断面内で流下方向に向かって反時計方向に回転するような2次流を伴う流れの構造となっていると考えられる。

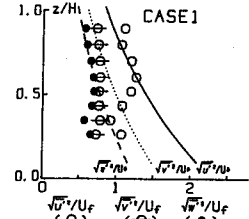


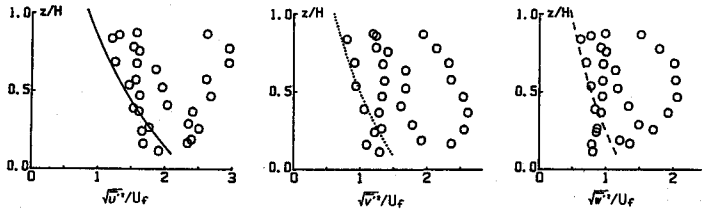
図-3 3方向の乱れ強度分布

## (2) 乱れ強度分布

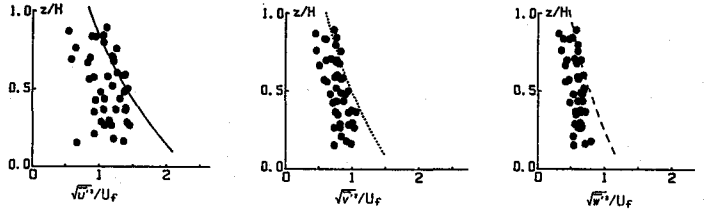
乱れ強度の鉛直線上の分布の一例を図-3に示す。横軸は乱れ強度を摩擦速度  $U_f$  で無次元化している。図中の曲線は実験室水路の滑面あるいは相対粗度の小さい粗面流で得られた欄津の乱れ強度分布式<sup>3)</sup>を示す。各方向成分の大小関係については筆者らの測定結果<sup>1)</sup>や従来の多くの結果と同様に次式の関係がある。

$$\sqrt{u'^2} > \sqrt{v'^2} > \sqrt{w'^2} \quad (1)$$

次に Manningの粗度係数の定義から求めた河床の粗度係数  $n$  の大きさによって以下の2つのグループ (Sグループ ( $n < 0.021$ ), Rグループ ( $n > 0.039$ )) に便宜的に分けて考察する。S, Rグループそれぞれについて乱れ強度の鉛直線上の分布を図-4に示す。Sグループの図を見ると, 乱れ強度分布形状は欄津の分布曲線と同様の形状を示している。この理由として, Sグループの河床の粗度係数が比較的小さいため, 欄津の実験室水路の実験結果と同様な特性を示したと考えられる。ところが, Rグループの図を見ると, 流下方向 ( $u$  方向) の場合, その分布形状は水面付近から半水深付近までは増加傾向にあるが, 半水深より下方に向かって乱れ強度は大きくはならず逆に減少の傾向を示している。一方, 他の方向成分の乱れ強度分布は  $\sqrt{u'^2}/U_f$  の分布特性のような顕著な変化は見受けられない。文献3),



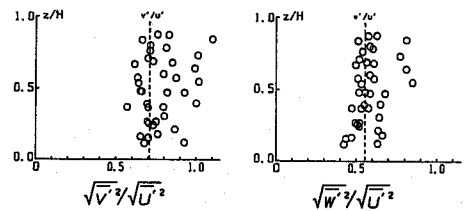
(a) Sグループ



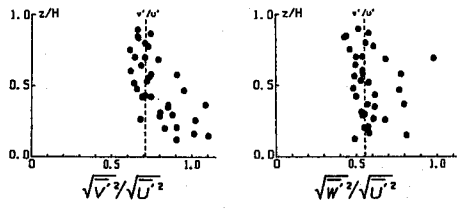
(b) Rグループ

図-4

## 粗度係数で分類した乱れ強度分布



(a) Sグループ



(b) Rグループ

4)にも指摘されているように河床の粗度係数が大きく 図-5 粗度係数で分類した乱れ強度の比なるほど河床近傍で乱れ強度が一様化されている ( $\sqrt{u'^2}/U_f$  の大きさは顕著に減少し,  $\sqrt{v'^2}/U_f$  の分布形状に近づいていく) と考えられる。次に, S, Rグループそれぞれについて各方向の乱れ強度の比  $\sqrt{v'^2}/\sqrt{u'^2}$ ,  $\sqrt{w'^2}/\sqrt{u'^2}$  を図-5に示す。図中の破線は欄津が示した値,  $v'/u' = 0.709$ ,  $w'/u' = 0.552$ を表す。流下方向 ( $u$  方向) と鉛直方向 ( $w$  方向) の比  $\sqrt{w'^2}/\sqrt{u'^2}$  の図を見るとどちらのグループの値も全水深にわたってほぼ普遍であると考えられる。一方, 流下方向 ( $u$  方向) と横断方向 ( $v$  方向) の乱れ強度の比  $\sqrt{v'^2}/\sqrt{u'^2}$  の方の図を見ると粗度係数の小さいSグループの場合は欄津の値よりは若干大

きめではあるが一定値を示している。ところが、Rグループの場合は水面から半水深付近まではほぼ一定値を示しているが、半水深より下方では欄津の示した値より右側へずれている。なお、表-1を見ると、Sグループの場合、 $Re = 3.8 \sim 18.4 \times 10^4$ 、 $Fr = 0.12 \sim 0.34$ 、また、Rグループの場合、 $Re = 13.4 \sim 22.9 \times 10^4$ 、 $Fr = 0.27 \sim 0.42$ となっており、どちらのグループのレイノルズ数とフルード数についても値の変化幅は狭い範囲となっており、今回の測定データに関する限り、乱れ強度分布に対するレイノルズ数やフルード数の影響は明確には確認できない。

### (3) レイノルズ応力分布

S, Rグループのレイノルズ応力  $-\overline{u'w'}/U_f^2$  の鉛直線上の分布を図-6に示す。図中の破線は次式で示される直線を示す。

$$\frac{-\overline{u'w'}}{U_f^2} = 1 - \frac{z}{H} \dots\dots\dots (2)$$

Sグループのデータは理論曲線の周りに広く分布しているが、Rグループのデータは半水深より下方でその値は明らかに減少していることがわ

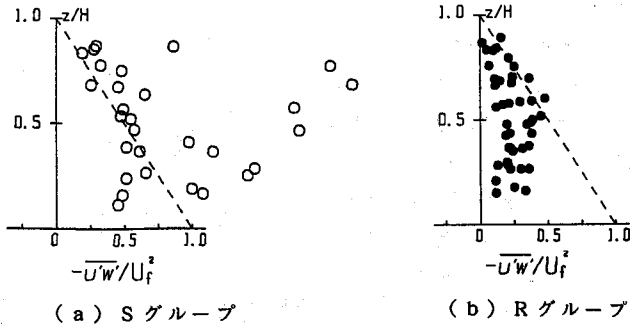


図-6 粗度係数で分類したレイノルズ応力分布

かる。この特性は筆者らが過去に実施した測定データからも同様の結果<sup>9)</sup>が得られている。このような分布形状の特異さは文献5)で述べているような本流速計のプロブ形状の構造(流速の各方向成分の測定領域は空間的に若干のずれがある)にも一因があると思われるが、文献4)で指摘されているように流れの構造が河床の粗度自身に強く影響される領域の存在が乱れ強度分布と同様にレイノルズ応力の分布特性に大きく影響を与えていると考えられる。そこで、Rグループのような河床粗度の大きな流れに対して平均流の影響を検討するため、図-6の右図(Rグループ)の修正を試みる。レイノルズ方程式を水深間で積分した式を修正した次式を導入する。

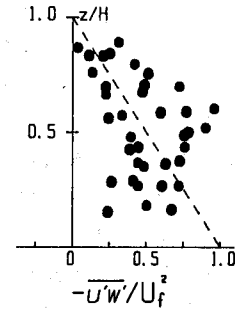


図-7 修正されたレイノルズ応力分布(Rグループ)

$$\frac{-\overline{u'w'} - \overline{uw}}{U_f^2} = 1 - \frac{z}{H} \dots\dots\dots (3)$$

実際の計算では式(3)の瞬間流速 $w$ を現場計測時の流速計の設置誤差を考慮して $w_r \approx w'$ と仮定した。式(3)を用いて求めたレイノルズ応力分布を図-7に示す。この図と図-6(b)とを比較して見ると、河床付近においてその値は理論曲線に近づく傾向を示している。すなわち、Rグループのような河床の粗度係数が大きな粗面流を対象とする場合は平均流の影響を考慮したパラメータを含んだ式を用いて考察する必要がある。

### (4) 4象限法による瞬間レイノルズ応力特性

乱流中の乱れの運動に空間的、時間的に相当規則だった運動パターンを持つ組織的構造が存在することがよく知られている。乱流中のバースティング現象がレイノルズ応力の発生に寄与していることより、流速の測定結果を条件付抽出法によって処理し、その流れの構造を解明しようとする手法のひとつである $u-w$ 平面4象限区分しきい値法(以下では4象限法と略す)を用いて乱流中の組織的構造を探ることを試みる。

用いた方法を簡単に示す。乱れ速度 $u'$ (流下方向)および $w'$ (鉛直方向)で表される平面を5つの領域

に区分し、

$|uw| = H'u'w'$  ..... (4)

で表されるしきい値  $H'$  を導入し、 $H'$  の変化に伴うレイノルズ応力  $-u'w'$  への各領域からの寄与率  $C_i$  を次式から算定する。

$$C_{i,H'} = \frac{1}{-u'w'} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T uw I_{i,H'}(u,w) dt \quad (i=1,2,3,4,5) \quad \text{..... (5)}$$

ここに、
$$I_{1,H'}(u,w) = \begin{cases} 1, & |uw| > H'u'w' \text{ で } (u,w) \text{ が } i \text{ 領域にあるとき } (i=1,2,3,4) \\ 0, & \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$I_{5,H'}(u,w) = \begin{cases} 1, & |uw| \leq H'u'w' \text{ のとき} \\ 0, & \text{その他の場合} \end{cases}$$

また、時間占有率  $T_i$  は、次式で表される。

$$T_{i,H'} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{i,H'}(u,w) dt \quad (i=1,2,3,4,5) \quad \text{..... (6)}$$

まず、しきい値  $H'$  を変化させた場合を考えると、4象限法により求められる各事象の  $-u'w'$  に対する寄与率  $C_i (i=1,2,3,4,5)$  および hole 事象の時間占有率  $T_i$  の一例 (Case 1) を図-8 に示す。比較のために、欄津による粗面流の壁面領域での結果を図-9 に示す。図-8 の (a)、(b) を比較して見ると、ejection 事象の  $C_2$  (●印)、sweep 事象  $C_4$  (○印) に注目すると、自由水面付近と河床付近では  $C_2$  と  $C_4$  の大小関係が逆転している。つまり、河床付近では ejection 事象の寄与に比べ sweep 事象の寄与の方が大きくなることを示している。この結果は図-9 で見られるような壁面領域で ejection 事象と sweep 事象の大小関係が逆転するという欄津<sup>6)</sup>の指摘と一致する。次に、 $H'=0$  の場合の各事象の寄与率  $C_i$  と時間占有率  $T_i$  の鉛直分布を図-10 に示す。比較のために、欄津による粗面流での  $H'=0$  の場合の各事象の寄与率を図-11 に示す。全水深にわたって  $C_2 > C_4$  なる関係を持つ滑面乱流の場合と異なり、河床に近づくにつれて sweep 事象の寄与が増大し、ejection 事象の寄与より大きくなることがわかった。この結果は図-11 で見られるように欄津の結果と一致する。

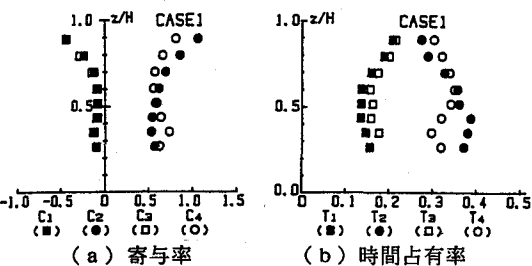
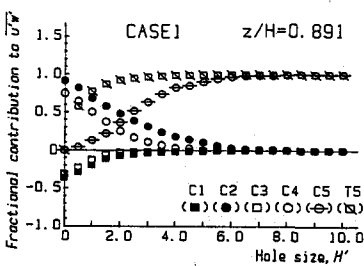
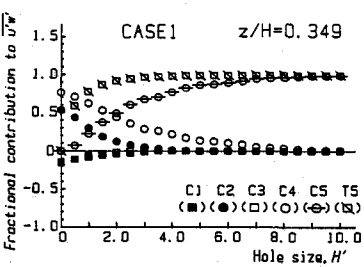


図-10 各事象の寄与率と時間占有率 ( $H'=0$ )



(a) 水面付近 ( $z/H=0.891$ )



(b) 河床付近 ( $z/H=0.349$ )

図-8 各事象の寄与率

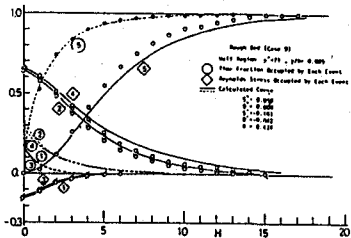


図-9 欄津<sup>6)</sup>による各事象の寄与率 (粗面流の場合)

#### 4. 結 語

本研究では山地河川に多く見られる河床が礫で構成され地点を主に対象にして、河川規模、河道形状、河床状態等の異なる種々の実河川において流速3方向成分の同時測定を行い、現地観測データに基づいて実河川における流れの特性について検討を行った。得られた結果をまとめると以下の通りである。

(1) 平均流速分布から、実河川にて流路の湾曲する地点において、流下方向の流速 $U$ に直角な断面内で時計方向あるいは半時計方向に回転するような2次流を伴う流れの構造が確認された。

(2) 乱れ強度分布から、Manningの粗度係数の定義から求めた河床の粗度係数が比較的小さい場合、滑面あるいは相対粗度の小さい粗面流で得られた実験結果とほぼ同様な分布特性を示すが、河床の粗度係数が比較的大きい場合、半水深より河床に向かって流下方向の乱れ強度の大きさが顕著に減少する。

(3) レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}/U_{\tau}^*$ の分布は河床の粗度係数が比較的大きい場合、乱れ強度の分布と同様に半水深より河床に向かって減少傾向を示す。一方、平均流の影響を考慮した場合、河床付近においてその分布形状は理論曲線に近づく傾向を示す。

(4)  $u-w$ 平面4象限区分しきい値法を用いて瞬間レイノルズ応力の寄与率および時間占有率の分布を検討した結果、河床の粗度係数が大きい場合、水面付近と逆に河床付近では ejection 事象の寄与に比べ sweep 事象の寄与の方が大きくなることがわかった。この結果から粗面流れにおいて瀬津<sup>8)</sup>が指摘した ejection 事象と sweep 事象の大小関係の逆転が確認された。

末筆ながら、本研究を行うにあたり適切な御助言を賜った神戸大学工学部、篁 源亮 教授・神田 徹教授に感謝の意を表します。また、現地観測とデータ解析に協力して頂いた当時神戸大学学生、山下 敏君(現、㈱CSKに勤務)に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 瀬良昌憲・神田 徹：超音波流速計による河川流の測定，第32回水理講演会論文集，pp.353-358，1988。
- 2) 玉井信行・池内幸司・山崎 晶：連続わん曲水路における流れの実験的研究，土木学会論文報告集，No. 331，pp.83-94，1983。
- 3) 瀬津家久：開水路乱流の乱れ強度に関する研究，土木学会論文報告集，No. 261，pp.67-76，1977。
- 4) 中川・辻本・清水：粗度近傍の組織的流速変動場が相対水深の小さな流れの乱流構造に及ぼす影響，第33回水理講演会論文集，pp.487-492，1989。
- 5) 瀬良昌憲：河川乱流の現地観測，建設工学研究所研究報告，第31号，pp.191-209，1989。
- 6) 瀬津家久：開水路流の乱流構造に関する基礎的研究，京都大学学位論文，p.33，1977。

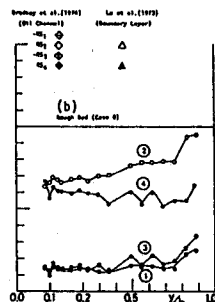


図-11 瀬津<sup>8)</sup>による各事象の寄与率 ( $H' = 0$ ) (粗面流の場合)