

## 滑面開水路床せん断応力の変動特性

CHARACTERISTICS OF SHEAR STRESS FLUCTUATIONS ON  
SMOOTH OPEN-CHANNEL BED

久保田 稔\*・河村 三郎\*\*・足立 昭平\*\*\*

By Minoru KUBOTA, Saburo KOMURA and Shohei ADACHI

## 1. 緒 言

水路床面の抵抗則および流砂機構を検討するという観点から、水路床せん断応力の変動特性を把握することが、近年、新たな課題となってきた。

たとえば、水路床面の抵抗則について、Prasad<sup>1)</sup>は、側壁および水路床のせん断応力変動の相互干渉が、水路床平均せん断応力に影響を及ぼすものと考え、流水の運動量の断面内輸送機構と壁面変動せん断応力分布との関係を論じ、水路断面形状による水路床平均せん断応力への影響を考察している。すなわち、水路床せん断応力変動をガンマ分布と仮定し、この変動による、運動量の断面内瞬間ランダム輸送を指数過程と想定し、水路床平均せん断応力と断面平均せん断応力との差異を考察している。また、流砂機構について、Grass<sup>2)</sup>は、砂の初期移動が流水による水路床せん断応力変動と砂の移動の間欠性との相互作用に基づく確率過程であると考えている。すなわち、水路床近傍での瞬間速度勾配の測定に基づいて、せん断応力変動と限界せん断応力変動とを求め、これらの変動が互いに独立過程であるという想定のもとに、Shields 式の修正を提案している。

Williams<sup>3)</sup>は、Grass と同様、これらの変動を互いに独立過程であると想定し、すべての砂粒子が水路床上を移動する条件として、これらの分布の最大せん断応力を同じ大きさであると考え、平坦水路床上での砂漣の発生限界を論じている。また Gessler<sup>4)</sup>は、せん断応力変動を正規分布型および限界せん断応力変動を三角形分布と仮定し、砂粒子が河床にとどまる確率を計算している。

しかし、こうした多くの研究にもかかわらず、水路床せん断応力の変動特性については、測定が比較的容易な

はずの滑面床においてさえ、なお、決定的な結論は得られていない現状である。最も問題となる点は、せん断応力の基本的特性量とみなされる変動強度  $\sigma_r/\bar{\tau}$  (変動せん断応力の標準偏差  $\sigma_r$  と平均せん断応力  $\bar{\tau}$  との比) の特性が各研究者によって異なっており、測定精度内で定数とみなせるのか、または、実験条件によって変わる変数であるのかが、必ずしも明確にはなっていない。すなわち、Mitchell<sup>5)</sup>によれば、管流実験において、せん断応力の変動強度は、0.32 の一定値とみなされ、また、彼らと同様な測定手法で実験を行った Nakoryakov<sup>6)</sup>によれば、レイノルズ数の減少に伴って、0.2 から 0.4 に増加し、さらに開水路流を対象とした Blinco<sup>7)</sup>の実験によれば、レイノルズ数の減少に伴って、0.2 から 1.2 に増加している。Blinco<sup>7)</sup>の実験結果は、管流の場合以上に、変動強度がレイノルズ数に大きく依存しており、一見、水路床せん断応力の変動特性が、開水路流と管流とは、異なっているようにみえる。

そこで、筆者らは、Blinco<sup>7)</sup>と同様な測定手法を用い、流れを常に等流状態に維持し、滑面水路床せん断応力の変動を測定した。測定結果を、従来の開水路流および管流での実験データと比較検討した結果、等流状態であれば、開水路流での変動強度、ひずみ度および尖度の値は一様管路の場合とほぼ同じであると考えられる。

## 2. 実験方法

実験水路は、幅 15 cm、長さ 8 m の合成樹脂製水路であり、図-1 に示すように、幅 40 cm、長さ 15.5 m の可変勾配水路内に設置した。給水は揚程 7.1 m、最大流量 3.35 m<sup>3</sup>/min、5.5 kW の日立製ポンプによる循環方式であり、循環系内に定圧水槽は設置されていないが、一実験ごとに、実験水路下流端で 10 回前後流量を計測し、それらの値に変動のないことを確かめた。

水路床面のせん断応力の測定には、実験水路上流端か

\* 正会員 工修 大同工業大学講師 建設工学科

\*\* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 豊橋技術科学大学教授 建設工学課程

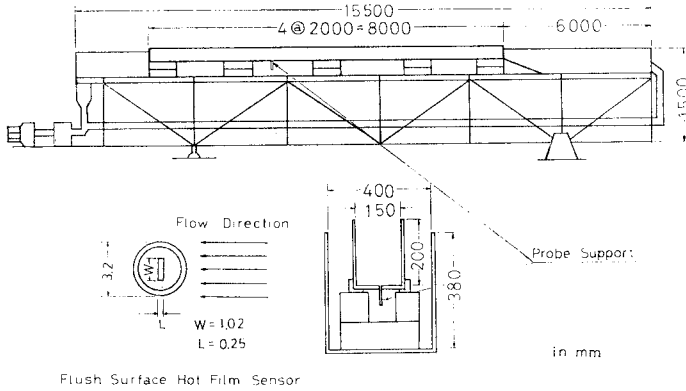


図-1 実験水路およびプローブ配置図

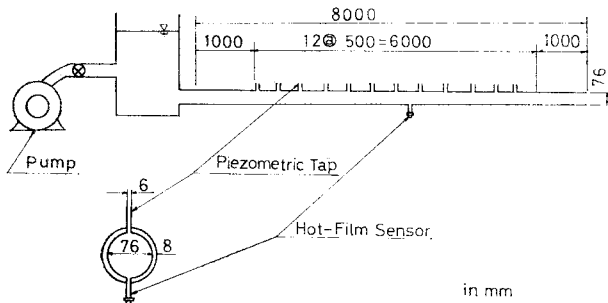


図-2 検定管路

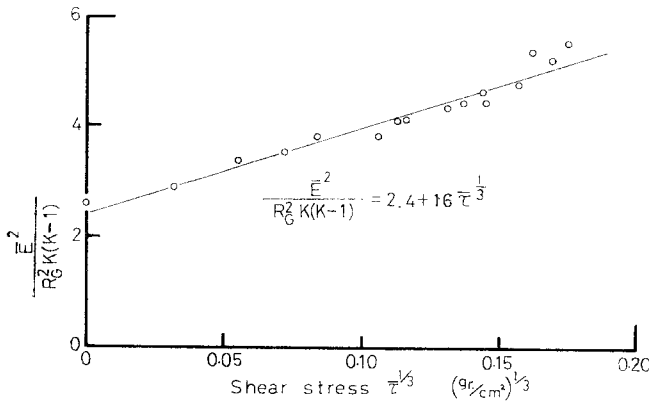


図-3 平均せん断応力と出力電圧とのキャリブレーション

ら 6 m の位置に埋め込んだフラッシュセンサーを用いた。フラッシュセンサーは、熱応答受感部であるホットフィルムを水路床に平行に埋め込むものであり、熱板の方向応答特性については、Ludwig<sup>8)</sup>の詳細な実験報告があり、本実験においては Bellhouse と Schultz<sup>9)</sup>に従って、熱線流速計からの平均出力電圧  $\bar{E}$  と水路床平均せん断応力  $\bar{\tau}$  との関係を

$$\bar{E}^2 / R_G^2 K(K-1) = A + B\bar{\tau}^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

とした。ここに、 $R_G$  は流体温度でのセンサーの抵抗、 $K$  は過熱比であり、すべての実験を通じて  $K=1.05$  と

した。なお、 $A$  および  $B$  は使用するセンサーの特性定数である。

本実験に用いたセンサーは日本科学工業製 (1237 W) であり、その検定には図-2 に示すような、長さ 8.0 m、管内径 7.6 cm の塩化ビニール管を用いた。センサーを塩化ビニール管のほぼ中間に埋め込み、下流放流端で数回にわたり流量測定を行い、それぞれの実験で、流量変動のないことを確かめ、直径 6 mm の 12 個の圧力口から動水勾配を測定した。図-3 は検定管路において得られた動水勾配からの平均せん断応力と、そのときの

センサーからの平均出力電圧との関係であり、これらの値より、特性定数  $A$  および  $B$  の値を、最小自乗法によって、 $A=2.4$ 、 $B=16$  と決定した。

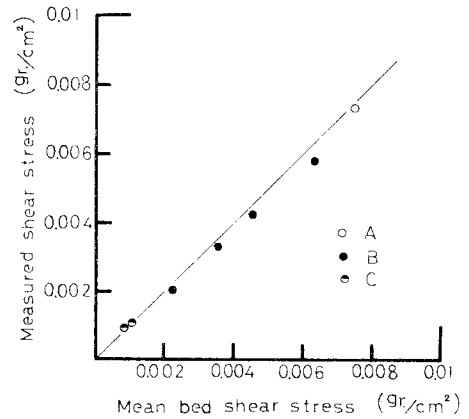


図-4 本実験での平均せん断応力と moody 図からの平均せん断応力

図-4 は、センサーによる開水路での平均せん断応力の測定値と moody 図より計算した平均せん断応力との対比を示している。同図より、検定管路を用いて決定した特性定数  $A$  および  $B$  の値を、開水路での測定に使用しても支障

ないと考えられる。

また、データ処理については、データレコーダーに記録した熱線流速計からの出力電圧を、A-D 変換器によってデータサンプリング間隔  $\Delta t=0.01$  秒で、データ個数 11000 個を紙テープに出力し、統計処理を行った。

それぞれの実験での平均せん断応力  $\bar{\tau}$  と標準偏差  $\sigma_\tau$  とを求めた後に、すべてのデータを正規化し、ひずみ度  $\beta_1$  と尖度  $\beta_2$  とを

$$\beta_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{*i}^3 \dots\dots\dots (2)$$

表-1 実験条件および測定結果

Experiment number	Dischage, $Q$ , in centimeters cubed per second	Depth, $h$ , in centimeters	Mean veloc- ity, $\bar{U}$ , in centimeters per second	Reynolds number, $Re = \frac{U\bar{h}}{\nu}$	Froude number, $F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}}$	Skewness $\beta_1$	Kurtosis $\beta_2$	Standard deviation $\frac{\sigma_\tau}{\bar{\tau}}$
A	783	1.13	46.2	4000	1.39	0.47	3.05	0.21
B-1	3789	5.11	49.4	20700	0.70	0.50	3.11	0.21
B-2	2289	3.81	40.0	12400	0.65	0.44	3.00	0.24
B-3	1543	3.05	33.7	8100	0.62	0.67	3.45	0.25
B-4	748	2.02	24.7	3900	0.56	0.63	3.47	0.27
C-1	2966	10.67	18.5	16100	0.18	0.82	3.75	0.31
C-2	2225	8.87	16.7	12300	0.18	0.76	3.49	0.35

$$\beta_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{*i}^4 \dots\dots\dots (3)$$

より求めた。ここに、 $\tau_{*i}$  は、それぞれのサンプルリング時間での正規化したせん断応力である。

なお、周期の短い小規模な流量変動の有無に関しては、計測した変動せん断応力のスペクトル解析から、スペクトル形状に特異なピークがないことを確かめた。

### 3. 実験結果および考察

実験条件と測定結果は、表-1 に示してある。表-1 の実験番号 A, B および C は、フルード数の値に対する分類記号である。

#### (1) 変動強度 $\sigma_\tau/\bar{\tau}$ の値

図-5 は、水路床せん断応力の変動強度  $\sigma_\tau/\bar{\tau}$  と、断面平均流速  $\bar{U}$  と水深  $h$  で定義したレイノルズ数、 $Re = \bar{U}h/\nu$  との関係を示しており、なお同図中には、他の研究者によって得られた値もあわせて示してある。

他の研究者の実験方法および  $Re$  数の定義は、年代順に列記すると、以下のようである。

① Laufer<sup>10)</sup> は、内径  $D=24.7$  cm, 長さ約 5 m の管路で、内径  $D$  と最大流速  $U_{max}$  で定義した  $Re = U_{max} \cdot D/\nu$  が  $5 \times 10^5$  の場合での空気流の乱流強度  $\sqrt{u'^2}/u$  を、熱線流速計で測定し、管路壁面での極限值として、 $\lim_{y \rightarrow 0} \sqrt{u'^2}/u = 0.3$  の値を与えている。ここに添字  $y$  は壁面からの距離である。

水路床面平均せん断応力  $\bar{\tau}$  は、

$$\bar{\tau} = \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0} \dots\dots\dots (4)$$

で与えられ、水路床面での変動せん断応力  $\tau'_0$  は、

$$\tau'_0 = \mu \left. \frac{du'}{dy} \right|_{y=0} \dots\dots\dots (5)$$

と表される。ここに、 $\mu$  は粘性係数である。

変動強度  $\sigma_\tau/\bar{\tau}$  は、式 (4) および式 (5) より、

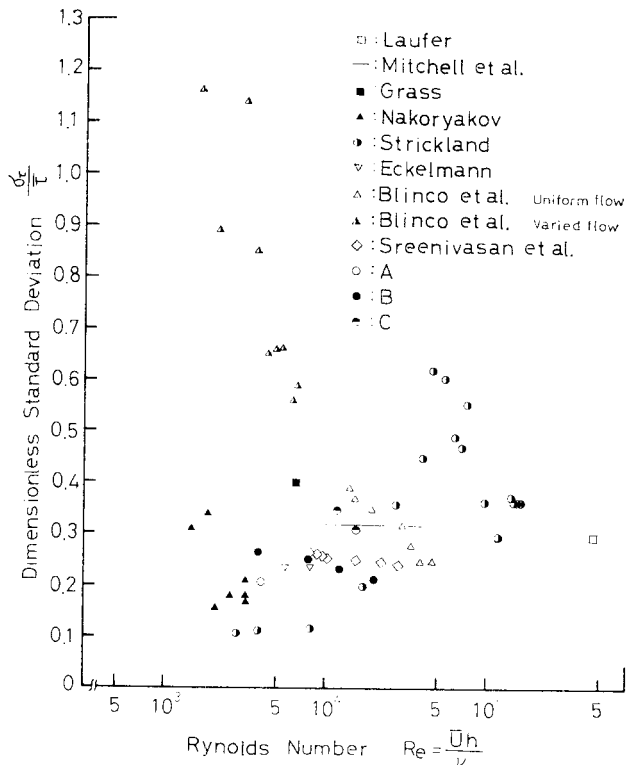


図-5 せん断応力の変動強度

$$\frac{\sigma_\tau}{\bar{\tau}} = \sqrt{\left( \left. \frac{du'}{dy} \right|_{y=0} \right)^2 / \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0}} \dots\dots\dots (6)$$

と表される。

水路床面  $y=0$  で、変動速度成分  $u'$  および平均流速  $u$  は常に零であるから、

$$\left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0} = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{u}{y} \dots\dots\dots (7)$$

および、

$$\left. \frac{du'}{dy} \right|_{y=0} = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{u'}{y} \dots\dots\dots (8)$$

が成立する。式 (7) および式 (8) を式 (6) に代入し、変動強度  $\sigma_\tau/\bar{\tau}$  は、

$$\frac{\sigma_\tau}{\bar{\tau}} = \lim_{y \rightarrow 0} \sqrt{\left( \frac{u'}{y} \right)^2 / \frac{u}{y}} = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{\sqrt{u'^2}}{u} = \left( \frac{\sqrt{u'^2}}{u} \right)_{y=0}$$

.....(9)

と表される. 同図中には, 彼の定義した  $R_e$  数で  $(\sqrt{u'^2}/u)_{y=0}$  の値が示してある.

㉔ Mitchell ら<sup>9)</sup>は, 内径1インチの管に, 電解溶液としてカリウムフェリシアン化物  $[K_3Fe(CN)_6]$ , カリウムフェロシアン化物  $[K_4Fe(CN)_6]$  および水酸化ナトリウム  $[NaOH]$  の混合液を流し, 管壁に埋め込んだニッケル板の電極表面イオン濃度変化より, 壁面せん断応力変動を測定している. この測定原理は, 熱損失量を測定とした定温度型熱線流速計と類似している. 彼らは, 断面平均流速  $\bar{U}$  および管径  $d$  で定義した  $R_e = \bar{U} \cdot d/\nu$  が  $1 \times 10^4$  から  $3 \times 10^4$  の領域で,  $(\sqrt{u'^2}/u)_{y=0}$  が 0.32 のほぼ一定な値を与えている. 同図中には, 彼らの測定した  $R_e$  数の領域での,  $(\sqrt{u'^2}/u)_{y=0}$  の値が直線で示してある.

㉕ Grass<sup>11)</sup>は, 幅 25 cm, 長さ 10 m の開水路で, 水深  $h$  と断面平均流速  $\bar{U}$  で定義した  $R_e = \bar{U}h/\nu$  が  $6.7 \times 10^3$  の条件のもとに, 水素気泡法と高速度カメラとを併用して, 水路床近傍での瞬間速度より,  $(\sqrt{u'^2}/u)_{y=0} = 0.4$  の値を与えている. 同図中には, 彼の  $(\sqrt{u'^2}/u)_{y=0}$  の値が示してある.

㉖ Nakoryakov<sup>6)</sup>は, 高さ 1 cm の長方形管路で, Mitchell らと同様な電気化学的手法により,  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の値を測定し, 管路の高さ  $H$  と平均流速  $\bar{U}$  で定義した  $R_e = 2\bar{U}H/\nu$  が減少するに従って,  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の値が 0.2 から 0.4 に増加すると報告している. 同図中には開水路流と比較するために, 管路の半幅  $H/2$  を特性深さと考え, 彼の  $R_e$  数を  $\bar{U}H/2\nu$  に書き換え,  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の値が示してある.

㉗ Strickland<sup>12)</sup>は, 幅 36 インチ, 高さ 15 インチ, 長さ 16 フィートの風洞で, 流下方向のそれぞれの場所でのせん断応力変動を, 圧力勾配をも考慮して, フラッシュセンサーで測定している. 彼の測定値は, 0.1 から 0.6 の間で変化している. 同図中には, 流速  $U_\infty$  および排除厚さ  $\delta_*$  で定義した  $R_e = U_\infty \cdot \delta_*/\nu$  で  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の値が示してある.

㉘ Eckelmann<sup>13)</sup>は, 幅 50 cm, 長さ 8.5 m の水路を, 水路中央部で幅  $B = 22$  cm の 2 本の水路に仕切り, 水より約 6 倍の動粘性係数の値を有する油を左右の水路内で循環させている. 彼は, 自由表面から 10 cm 下の側壁に, フラッシュセンサー (DISA, 55 A 91) を埋め込み, また, 水路幅  $B$  方向の乱流強度をホットフィルムで測定し, 水路中央最大流速  $U_{max}$  および水路幅  $B$  で定義した  $R_e = U_{max} \cdot B/\nu$  が  $5.6 \times 10^3$  および  $8.2 \times 10^3$  の場合に,  $(\sqrt{u'^2}/u)_{y=0}$  および  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の

値が 0.24 の一定値であると報告している. 同図中には, 彼の定義した  $R_e$  数で  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の値が示してある.

㉙ Blinco ら<sup>7)</sup>は, 幅約 20 cm, 長さ 10 m の循環式開水路で, フラッシュセンサーを用いて, 滑面開水路床せん断応力変動を測定し, 径深  $R$  と断面平均流速  $\bar{U}$  で定義した  $R_e = 4\bar{U}R/\nu$  が減少するに従って,  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の値が 0.2 から 1.2 に増加すると報告している. 同図中には, 彼らの  $R_e$  数を  $\bar{U}h/\nu$  に書き換え, 流水条件の相違で記号を区別して,  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の値が示してある.

㉚ Sreenivasan ら<sup>14)</sup>は,  $1.27 \text{ cm} \times 40.6 \text{ cm} \times 183 \text{ cm}$  の管路にフラッシュセンサー (DISA, 55 A 93) を埋め込み,  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の値を測定し, 管路の半幅  $D$  と管軸での平均流速  $U_c$  で定義した  $R_e = U_c D/\nu$  が  $7.8 \times 10^3$  から  $11.7 \times 10^3$  の間で,  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の値が, ほぼ 0.25 の一定値であると報告している. 同図中には, 彼の定義した  $R_e$  で  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の値が示してある.

これらの結果を検討すれば, Strickland および Blinco らの測定値は, 他の測定データと大きく傾向を異にしている.

Blinco らは,  $R_e = \bar{U}h/\nu$  が約  $6.7 \times 10^3$  以下の実験領域では, 流れが不等流状態であったと述べている.

主流  $U$  に, 流れ方向の勾配があると, 単位質量単位時間当りでの乱れエネルギー  $(-u'^2 \partial U/\partial x)$  が生ずる. したがって,  $\partial U/\partial x > 0$  の場合, すなわち静水圧勾配  $dp/dx$  が負の場合には, 乱れエネルギーの発生が抑制され, 逆に,  $\partial U/\partial x < 0$  のときには乱れエネルギーの発生が促進される. このような乱れエネルギー発生の多寡は, 水路床せん断応力変動に影響を及ぼすものと推測される.

Strickland<sup>12)</sup>は, フラッシュセンサーでの底面せん断応力変動測定と平行して, 風洞内での底面静圧分布をも測定している. 底面静圧勾配  $dp/dx$  および  $\sigma_x/\bar{\tau}$  の測定結果は, 流れ方向の距離とともに図-6 に示してある.

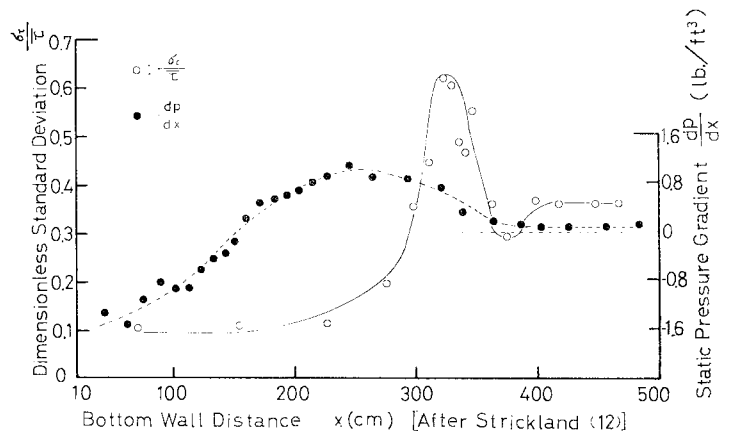


図-6 せん断応力の変動強度および底面圧力勾配

図-6より、 $dp/dx < 0$ の領域では $\sigma_{\tau}/\bar{\tau}$ の値は小さく $dp/dx$ が増加するにつれ $\sigma_{\tau}/\bar{\tau}$ の値も増加し、 $dp/dx > 0$ の領域では、 $\sigma_{\tau}/\bar{\tau}$ の最大値は約0.6になり、 $dp/dx$ が約0.1の一定な領域では、 $\sigma_{\tau}/\bar{\tau}$ はほぼ0.36の一定値を与えている。同図は、圧力勾配による変動強度への影響を示唆していると考えられる。

Blincoらの実験を、等流、不等流の2種類の条件下での実験に分類すると、 $R_e$ 数が $10^4$ 以上の等流領域では、彼らの測定値の平均値は0.32となり、他の研究者の測定値と同じ程度の値となる。流量と水路勾配を調整して流れを等流状態に維持した筆者らの測定値の平均値は0.26であり、粘性底層の厚い流れでのEckelmannの測定値0.24とほぼ同じ値であった。以上の結果より、開水路流および管路での $\sigma_{\tau}/\bar{\tau}$ の値は、 $R_e$ 数の影響は顕著ではなく、0.2から0.4の間にあるものと考えられる。

(2) ひずみ度  $\beta_1$  の値

ひずみ度  $\beta_1$  は分布の非対称度を示すものであり、正規分布のときには零である。 $\beta_1$  が正で大きいほど、分布は右側に遠く裾をひき、負の場合は、その反対に左側に裾をひく。

ひずみ度  $\beta_1$  の値は  $R_e$  数とともに 図-7 に示してある。同図中には、等流状態での Blinco らのデータおよび

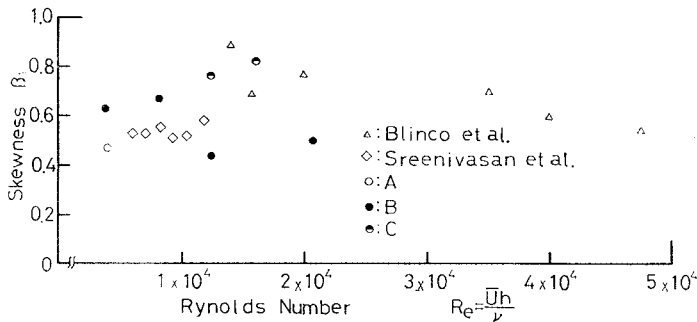


図-7 変動せん断応力のひずみ度

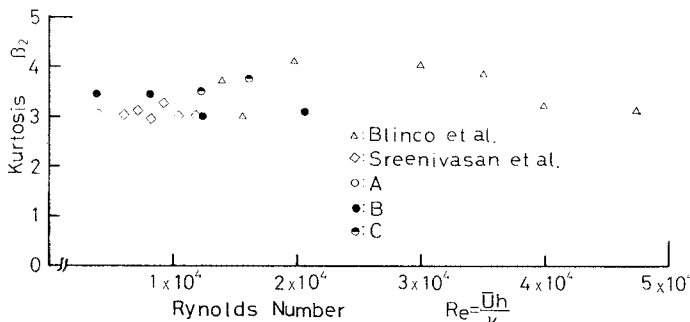


図-8 変動せん断応力の尖度

び Sreenivasan らのデータも彼らの定義した  $R_e$  で示してある。同図より、 $\beta_1$  を表している  $R_e$  数の領域はあまり広くないので、Blinco らが指摘しているように  $R_e$  数の増加とともにひずみ度が減少すると考えるよりも、ひずみ度はほぼ 0.4 から 0.9 の間で散らばっていると考えた方が妥当であると思われる。

(3) 尖度  $\beta_2$  の値

尖度  $\beta_2$  は分布の尖鋭度を示すものであり、正規分布のときには3.0である。 $\beta_2$  が大きいほど、分布は概して中心が高く裾が遠くひろがる。

尖度  $\beta_2$  の値は  $R_e$  数とともに 図-8 に示してある。同図中には、Blinco らおよび Sreenivasan らのデータも図示してある。同図より、 $R_e$  数が  $\beta_2$  の値に影響しているようにはみられず、尖度の値は、3.0 から 4.0 の間で散らばっていると考えられる。

4. 結 語

以上、滑面開水路床のせん断応力変動に関する測定結果および考察を述べたが、その結果から導かれる結論は、以下のようである。

(1) せん断応力の変動強度  $\sigma_{\tau}/\bar{\tau}$  は、筆者らの測定では平均値が 0.26 であり、他の条件での測定から得られた値をも考慮すると、開水路等流や一様管路の流れでは、 $\sigma_{\tau}/\bar{\tau}$  の値は、水深および平均流速で定義されるレイノルズ数に無関係に、0.2 から 0.4 の間にあるものと考えられる。

(2) ひずみ度の値は、 $R_e$  数の増加とともに減少すると考えるよりも、ほぼ 0.4 から 0.9 の間で散らばっていると考えた方が妥当であると思われる。

(3) 尖度の値は、 $R_e$  数が影響しているようにはみられず、3.0 から 4.0 の間で散らばっていると考えられる。

なお、この報告は、第1筆者が岐阜大学工学部土木工学科に在職中、河村教授のもとで実験を行い、その後、足立教授の指導のもとで整理したものである。

【補 注】

水路床せん断応力変動を測定する方法には、Grass が行ったように、水素気泡法と高速度カメラとを併用して、水路床近傍での瞬間速度勾配からせん断応力変

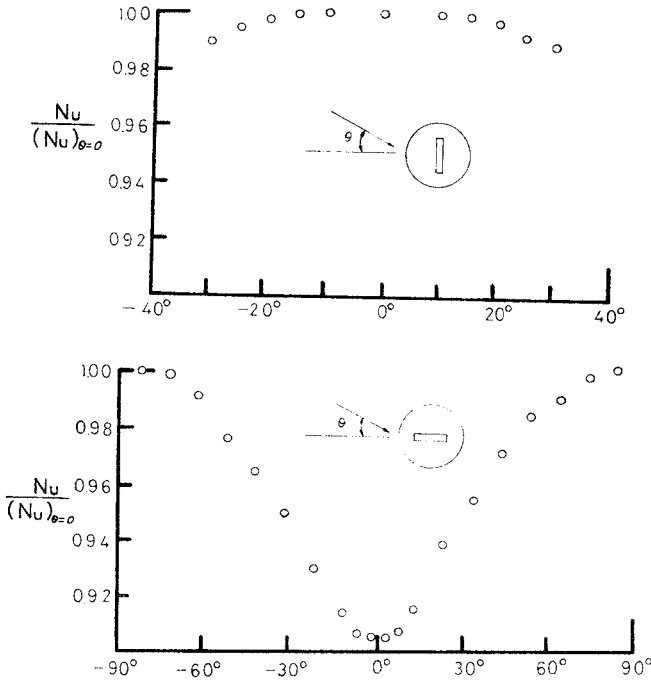


図-9 Ludwig による熱板の方向応答特性

動を求める方法もあるが、この方法では、流れが速い場合には測定に限界が生じ、また、水路床ごく近傍での瞬間速度勾配の計算には誤差が含まれやすいと考えられる。

一方、ホットフィルムなどのプローブを水路床近傍に近づけての測定では、壁面とプローブとの距離が小さくなるほど、プローブ自体によって、流れ場の構造が乱され、また壁面への熱損失も大きくなるために、誤差が多く含まれる恐れがある。

したがって、筆者らは、流れ場を乱さないという考慮より、熱線流速計の乱れ検出プローブ（フラッシュセンサー）を水路床に埋め込んで測定する方法が一番望ましいと考えた。

Ludwig (1950 年) は、平板の表面に置いた微小な熱板からの熱輸送量を測定し、間接的にせん断応力を測定する方法を提案した。彼のこの研究成果、およびそれ以後の熱線流速計の大なる進歩により、滑面水路における水路床せん断応力の変動測定が可能となった。

図-9 は、Ludwig による熱板の方向応答特性の実験結果

であり、この結果を参考にして、図-1 に示しているように、フラッシュセンサーの受感部の方向を決定した。

変動流速の測定に用いられている熱線流速計は、以下のような手順により、壁面でのせん断応力をも測定することが可能となっている。

Bellhouse と Schultz は、定常層流に対する熱エネルギー積分方程式を、Cule の方法で解き、

$$\tau^{1/3} = \left( -\frac{\mu^2}{\rho \sigma a L^2} \right) \left( -\frac{Q_w L}{k \Delta T_0} \right) \dots (A.1)$$

を得ている。ここに、 $a$  は定数、 $\mu$  は粘性係数、 $\rho$  は密度、 $Q_w$  は熱フラックス、 $\sigma$  はプラントル数、 $L$  はフィルムの長さ、 $\Delta T_0$  は流体とフィルムとの温度差、 $i$  は熱線流速計の電流、および  $k$  は熱伝導率である。

フィルムと電流との関係は、

$$-\frac{Q_w L}{k \Delta T_0} = A_1 \left( \frac{i^2 R}{\Delta T_0} \right) + B_1 \dots (A.2)$$

であるから、式 (A.1) と式 (A.2) より、

$$\tau^{1/3} = A_2 \left( \frac{i^2 R}{\Delta T_0} \right) + B_2 \dots (A.3)$$

となる。ここに、 $A_1, B_1, A_2$  および  $B_2$  はそれぞれ定数である。

式 (A.3) より、有効せん断応力  $\tau_e$  と熱線流速計からの出力電圧  $E$  との関係は、

$$\bar{E}^2 / R(R - R_G) = A_3 + B_3 \tau_e^{1/3} \dots (A.4)$$

となる。ここに、 $R$  は測定時でのセンサーの抵抗、 $R_G$  は流体温度でのセンサーの抵抗および  $A_3$  と  $B_3$  はそれぞれ定数である。

有効せん断応力  $\tau_e$  は 図-10 に示されているように、

$$\tau_e^2 = (\bar{\tau}_{xy} + \tau_{xy}')^2 + \tau_{zy}'^2 \dots (A.5)$$

と表される。ここに、 $\bar{\tau}_{xy}$  は流れ方向の平均せん断応力

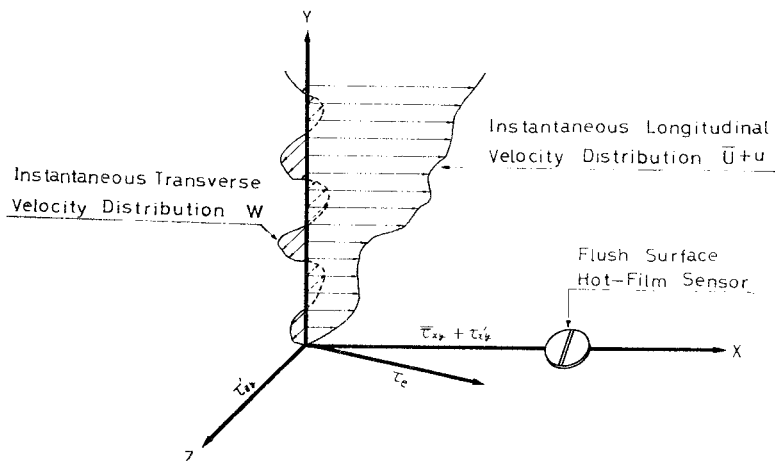


図-10 水路床変動せん断応力

であり、 $\tau_{xy}'$  はその変動成分および  $\tau_{zy}'$  は流れ方向と直角な方向に作用している変動成分である。

一般に、

$$|\tau_{xy}| > |\tau_{xy}'| > |\tau_{zy}'|$$

が成立していると考えられるから、式 (A・5) は、

$$\tau_e = \bar{\tau}_{xy} + \tau_{xy}' \dots\dots\dots (A \cdot 6)$$

となり、式 (A・4) を用いて、せん断応力の変動成分  $\tau_{xy}'$  を求めることができる。

参 考 文 献

- 1) Prasad, S.N. : Probability Distribution of Cross Transfer of Momentum through Turbulent eddies and Secondary currents in Channel flow, Hydraulic Problems solved by Stochastic Methods, edited by Peder Hjorth, Lennart Jönsson and Peter Larsen, Water Resources Publications, Fort Collins, 1977.
- 2) Grass, A.J. : Initial Instability of Fine Bed Sand, J. Hydr. Div. ASCE, Vol. 96, pp. 619~632, 1970.
- 3) Williams, P.B. and H.P. Kemp : Initiation of Ripples of Flat Sediment Beds, J. Hydr. Div., ASCE, Vol. 97, pp. 505~522, 1971.
- 4) Gessler, J. : Stochastic Aspects of Incipient Grain Motion on Riverbeds, Stochastic Approaches to Water Resources, Vol. 2, edited and published by H.W. Shen, Fort Collins, 1976.
- 5) Mitchell, J.E. and T.J. Hanratty : A Study of Turbulence at a Wall using an Electrochemical Wall Shear-Stress Meter, J. Fluid Mech., Vol. 26, pp. 199~221, 1966.
- 6) Fluid Mech., Soviet Research : Chapter 1, Flow Struc-

- ture in the Immediate Vicinity of the Wall, Scripta Pub. Com., Vol. 6, pp. 6~53, 1978.
- 7) Blinco, P.H. and D.B. Simons : Characteristics of Turbulent Boundary Shear Stress, J. Engi. Mech. Div., ASCE, Vol. 100, pp. 203~220, 1974.
- 8) Ludwig, H. : Instrument for Measuring the Wall Shearing Stress of Turbulent Boundary Layers, N.A. C.A., Tech. Memo., L 284, pp. 1~22, 1950.
- 9) Bellhouse, B.J. and D.L. Schultz : Determination of Mean and Dynamic Skin Friction, Separation and Transition in Low-Speed Flow with a Thin-Film Heated Element, J. Fluid mech., Vol. 24, pp. 379~400, 1966.
- 10) Laufer, J. : Turbulence, pp. 656~657, Second Edition, by J.O. Hinze, McGraw-Hill, Inc., 1975.
- 11) Grass, A.J. : Structural Features of Turbulent Flow over Smooth and Rough Boundaries, J. Fluid mech., Vol. 50, pp. 233~255, 1971.
- 12) Strickland, H.J. : The Separating Turbulent Boundary Layer, An Experimental Study of An Airfoil Type Flow, Dissertation, Southern Methodist University, 1973.
- 13) Eckelmann, H. : The Structure of the Viscous Sublayer and the Adjacent Wall Region in a Turbulent Channel Flow, J. Fluid Mech., Vol. 65, pp. 439~459, 1974.
- 14) Sreenivasan, R.K. and R.A. Antonia : Properties of Wall Shear Stress Fluctuations in a Turbulent Duct Flow, Trans. of the ASME, Series E, Vol. 44, pp. 389~395, 1977.

(1979.4.23・受付)