II-175　開水路における乱れ特性量について

佐賀大学理工学部　正員　渡辺訓甫
九州大学工学部　学正員　小松利光
建設技研K.K.　正員　○古屋慶一

1. まえがき

開水路の乱れ特性量について今本は乱れエネルギーの拡散を無視して次元解析的な表示を試みている。しかし管路や開水路流れにおいて拡散が重要な役割を果たすことはすでに粟原によって指摘されているので、ここでは開水路等流の式，乱れエネルギーの式およびReynolds応力輸送式に基づいて、滑面乱流における乱れ強度，Taylorのmicro scale，エネルギー逸散率などの分布を導き、従来の実験結果および球状粗度，砂漣状三角形粗度上で行なわれた我々の実験結果と比較検討してみた。

2. 基礎式および計算方法

流れが等流として、x方向の運動方程式，乱れエネルギーの式，Reynolds応力輸送式はそれぞれ

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\tau}{dy}+gi=0 \quad \cdots(1),\qquad 2\frac{\tau}{\rho}\frac{d\bar{U}}{dy}-D_i-\frac{d}{dy}(\overline{v'c^2})=0 \quad \cdots(2),\qquad -\overline{v'^2}\frac{d\bar{U}}{dy}-\mathbb{D}_i-\frac{d}{dy}(\overline{v'u'v'})=0 \quad \cdots(3)$$

である。ここで、D_i；乱れエネルギーの dissipation，$\mathbb{D}_i$；Reynolds 応力の dissipation，$c^2=\overline{u'^2}+\overline{v'^2}+\overline{w'^2}$

$\eta=y/h$として式(1)を積分し、$\tau=\rho K_\varepsilon\frac{d\bar{U}}{dy}$，渦動粘性係数$K_\varepsilon=\frac{1}{3}c\ell$（$c$；乱れの強度，$\ell$；混合距離）とすると

$$c\ell\frac{d\bar{U}}{dy}=3U_*^2(1-\eta) \quad \cdots\cdots(4)$$

乱れに等方性近似を行ない$D_i=\frac{10\nu}{\lambda^2}\cdot c^2$（$\lambda$；Taylor の micro scale），乱れの拡散係数を$K_c=\beta_*K_\varepsilon$として式(2)は

$$c\ell\left(\frac{d\bar{U}}{dy}\right)^2-\frac{15}{\lambda^2}\nu c^2+\frac{1}{2}\beta_*\frac{d}{dy}\left(c\ell\frac{dc^2}{dy}\right)=0 \quad \cdots\cdots(5)$$

式(3)で$\overline{v'^2}=\frac{1}{3}c^2$，乱れによる$\overline{u'v'}$の拡散係数$K_\tau=\delta_*K_\varepsilon$，粟原に従って$\mathbb{D}_i=-\frac{\gamma_*}{3}\frac{\nu}{\lambda^2}c\ell\frac{d\bar{U}}{dy}$（$\gamma_*=40$）とすれば

$$c^2\frac{d\bar{U}}{dy}-\gamma_*\frac{\nu}{\lambda^2}c\ell\frac{d\bar{U}}{dy}-\frac{\delta_*}{h}U_*^2\frac{d}{dy}(c\ell)=0 \quad \cdots\cdots(6)$$

(i) まず、開水路流れの下半分では対数則が成り立つので、この分布を用いると式(4), (5), (6)より

$$\beta_*\kappa\frac{1}{U_*^2}\cdot\frac{d}{d\eta}\left\{\eta(1-\eta)\frac{dc^2}{d\eta}\right\}+\frac{2}{\kappa}\cdot\frac{1-\eta}{\eta}-\frac{10}{3\gamma_*\kappa U_*^4}\cdot\frac{1}{\eta(1-\eta)}c^4+\frac{10\delta_*\kappa}{\gamma_*U_*^2}\cdot\frac{1-2\eta}{1-\eta}c^2=0 \quad \cdots\cdots(7)$$

がc^2の分布を規定する微分方程式である。ここに，$\kappa=0.4$である。

(ii) 流れの上半分においては渦動粘性係数K_εを一定と考え、速度分布を$\eta=\eta_0(=0.5)$で接続させると

$$\frac{3}{2h}\eta_0(1-\eta_0)\beta_*\kappa U_*\frac{d}{d\eta}\left(\frac{dc^2}{d\eta}\right)-\frac{15c^4}{3\eta_0(1-\eta_0)\gamma_*\kappa hU_*}+\frac{3U_*^3(1-\eta)^2}{\eta_0(1-\eta_0)\kappa h}=0 \quad \cdots\cdots(8)$$

となる。$0<\eta<0.5$では式(7)からc^2の近似解を求め、また$0.5<\eta<1.0$では式(7)から求めた$\eta=0.5$での値を境界条件として式(8)の数値計算を行なう。以上の操作により各領域の乱れ強度c，Taylor の micro scale λおよびエネルギー逸散率εの鉛直分布を計算した。

3. 実験概要

球状粗度としては径1.3cmのガラス球を用い、幅40cmの水路に、また砂漣状の粗度としては波長20cm，波高1cmの木製三角形粗度を用いて幅60cmの水路に、それぞれ10m区間密に敷きつめた。球状粗度の場合は4ケースで、水路中心線上のある一断面において、三角形粗度については一波長間の数断面において測定を行なった。なお乱れ速度の計測には2成分ホットフィルム流速計を用いた。

	球状粗度				三角形
実験ケース	Ex.1	Ex.2	Ex.3	Ex.4	Ex.5
I_e ×10³	2.48	2.31	2.36	2.24	1.87
h (cm)	5.27	7.55	9.16	2.87	5.62
U_* (cm/s)	3.58	4.13	4.60	2.51	3.21
Re ×10⁴	1.97	3.24	4.99	0.8	1.71

表－1　水理条件

4. 実験結果および考察

①乱れの強度；球状粗度においては粗度によって惹起された乱れの支配的な roughness layer が存在し、その厚さは粗度径の0.6倍程度である。また三角形粗度においては流れのはく離を伴なって流況は極めて複雑であり、

いずれも底面近傍に強い乱れの層を想定したのであるが、結果は図－1，2に示すようである。即ち、底面近傍での乱れの強度は粗面の場合かえって小さく、一様になる傾向がみられる。図中には上述の理論曲線の他に、Laufer（空気流滑面），Kennedy（空気流 sin wave），McQuiveyら（開水路滑面および粗面）の結果も示した。粗面乱流の測定点は u' についてみると Laufer の値より若干大きく Kennedy, McQuivey らのものと一致し、v' については Laufer, McQuivey の結果と一致している。また、理論値はこれらの実験値より若干小さいが u', v' いずれの場合も傾向的にはよく合っている。なお、McQuivey らによる粗面での乱れ強度は滑面での値や我々の実験値に比して小さいなど、現在これらの資料で得られる知識からは滑、粗間の差異を明確に論ずることができない。図－3は今本による普遍関数表示で $u'/u_*(U/u_*)^{1/3} \sim (y/h)^{-1}$ の関係はほぼ満足している。

② Taylor の micro scale とエネルギー逸散率；図－4は Taylor の micro scale $\sqrt{\frac{u_*}{h\nu}}\lambda$ の分布である。底面近傍では一様になる傾向があるが、平均的には理論と実験値とはよく一致しており、水表面に向けて単調に増加する分布形をなす。図－5はエネルギー逸散率 $\varepsilon = 15\nu\frac{\overline{u'^2}}{\lambda^2}$ の無次元表示である。平均的にみると流れの上半部では理論曲線とよい一致を示すが、河床に近づくにつれて一様化されている。今本の実験式 $\varepsilon/u_*^3h^{-1} = 0.35(y/h)^{-1}$ は過小な値を与えるが、これはエネルギー逸散率の評価法による違いと思われる。

③ macro scale；macro scale の実験式としては今本の $L/h\left(\frac{U}{u_*}\right) \approx 0.15$, Velikanov の $L/h \approx 1.4$ などがあるが、測定結果は図－6に示すようである。実験値は実線で示された今本の実験値の範囲とほぼ一致するが、底面近傍ではかなり小さい scale になっている。なお、今本による普遍関数表示についてはよい相関は得られなかった。

なお、本研究は椿教授の指導のもとに行なわれたものである。

〈参考文献〉

小松・古屋・古賀；開水路乱れの分布について，土木学会西部支部研究発表会論文集，昭和48年2月．