

開水路流れにおける Euler の乱れ特性量について

京都大学防災研究所 正員 今本 博 健
 京都大学大学院 学生員 浅野 富 夫
 京都大学大学院 学生員 ○石 垣 泰 輔

本報告は、開水路流れにおける乱れの普遍的特性をホットフィルム流速計を用いた Euler 的乱れ計測により検討しようとしたものであって、実験水路としては、長さ 13 m、幅 40 cm、深さ 20 cm の直線水路が用いられ 2 次元定常等流状態の流れの水理条件を規定する Reynolds 数、Froude 数および相対粗度高の 3 量のうち 2 量を一定に保ち残りの 1 量を独立にかつ広範囲に変化させた実験が行なわれている。

1. スペクトル特性

乱れに関するスペクトルは、相関係数が計測スケールに大きく支配されるのに対して、平均値評価時間と瞬間値評価時間との比が大きい場合、これらの計測スケールに影響されない周波数領域が存在し、このためとくに多重構造性の乱れを対象とする場合には支配スケールごとの特性を抽出することが可能となる。

周波数スペクトル $S(f)$ の計測例を図-1に示す。図にみられるように、いずれのケースについても、慣性領域のスペクトルとして Kolmogorov により提案された $-5/3$ 乗則の成立する 2 種の領域と -3 乗則あるいは -7 乗則が成立するとみられる粘性領域の存在が明確に示されている。また、Froude 数の増加に伴いスペクトル密度は大きくなるとともに、スペクトルピークの発生周波数および慣性領域あるいは粘性領域とみなされる領域は高周波数側に移行していくが、スペクトルの形状そのものには相似性が認められる。このように、開水路流れの乱流構造は水路幅、水深など種々のスケールに支配される多重構造性としての特性を有するが、高周波数（小スケール）の領域の乱れについては慣性領域ならびに粘性領域の相似則に従うことが知れ、局所的等方性の概念が適用されることが確かめられる。ただし、粘性領域のスペクトル特性についてはさらに検討の余地が残されており、本実験ではつぎのような興味ある結果が得られた。

すなわち、慣性領域の乱流構造はエネルギー逸散率のみによって規定され、1次元波数スペクトル $S(k)$ は次元解析によりつぎのように表わされることが知られている。

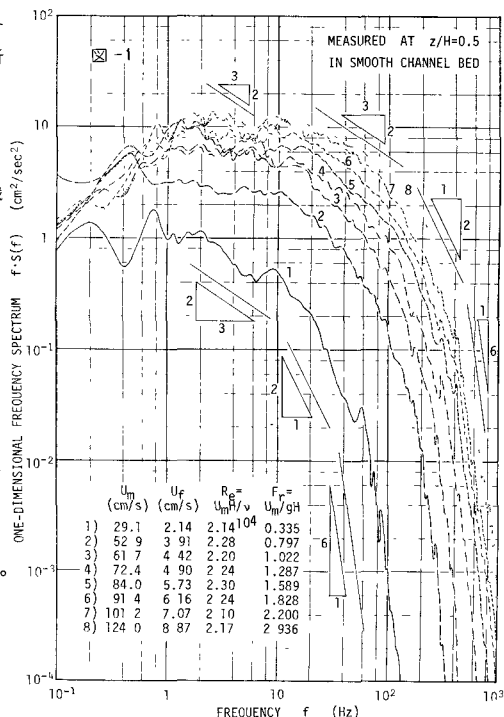
$$S(k) = S_e \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (1)$$

ここに、 $S_e \approx 0.47$ は普遍定数である。これに対し粘性領域の乱流構造は ε と流体の動粘性係数 ν によって規定されるが、次元解析により $S(k)$ を一義的に決定することはできずつぎのような任意定数 a を含んだものとなる。

$$S(k) = S_v \varepsilon^{(1-a)/4} \nu^{(5+3a)/4} k^a \quad (2)$$

ここに、 S_v はやはり普遍定数と考えられるが、その値についてはこれまでほとんど検討されていない。

いま、(1)式の $S(k)$ を凍結乱流の仮定を用いて周波数スペクトル $S(f)$ に書き直し、図-1に示されたスペクトルの $-5/3$ 乗則の成立する領域に適用して得られる ε を用いて(2)式の S_v を決定すると、図-2および図-3のようになる。図-2は(2)式において $a=-3$ とした場合の S_v を示したものであるが、 Fr が 1 より小さな常流状態ではほぼ一定とみなされるのに対し、 Fr が 1 より大きな射流状態では Fr の増加に伴い S_v は減少する傾向がみられる。図-3は同



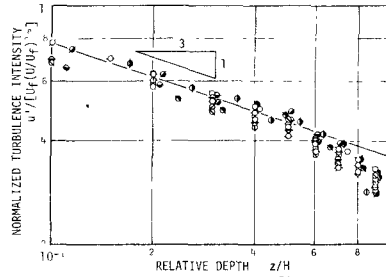
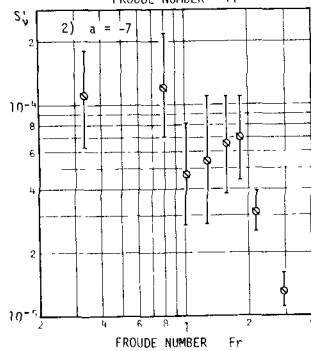
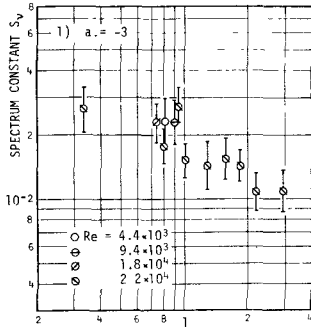


図-4 乱れの強さ

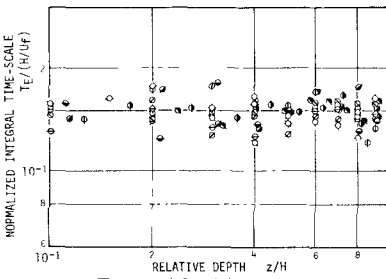


図-5 時間平均スケール

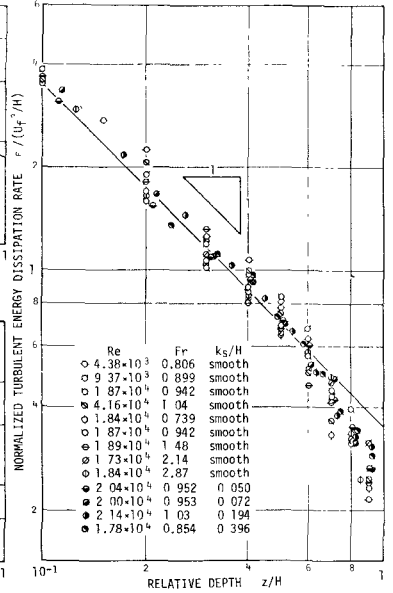


図-6 乱れエネルギー逸散率

図-2(左側上段) および 図-3(同下段) 粘性領域スペクトル定数の算定結果

じく(2)式において $a=-7$ とした場合のスペクトル定数 S_v について示したものであるが、 S_v と同様に Fr の増加に伴い減少する傾向が認められる。

このように、本実験で決定された粘性領域のスペクトル定数が射流状態では Fr によって変化し、一定値を示さない理由としてはつぎのものが挙げられよう。すなわち、

- 1) 乱流運動は流体自身のもつ物理特性によってあるスケール以上の波数成分を持ち得ないといういわゆる“violent catastrophe”の効果により粘性領域のスペクトル構造は複雑化され、(2)式の任意定数にみられるようなあいまいさがスペクトル構造に反映し、 S_v を普遍定数とする取扱いが許されなくなる、
 - 2) センサーの大きさの効果のため本実験における計測が高周波数領域では有効性を失い、誤まった情報を伝えたことにより粘性領域のスペクトル定数が見かけ上 Fr によって変化したものとなる、
- などであるが、本実験のみによって結論づけることは許されず今後さらに詳細な検討が必要と考えられる。

2. 乱れ特性量の分布

図-4, 5および6は、乱れの強さ u' 、時間平均スケール T_E および乱れエネルギー逸散率 ϵ の計測結果を示したものであって、すでに著者らによって提案された普遍表示式に基づいた無次元化がなされている。なお、乱れ特性量の解析にはつぎの手法が用いられている。すなわち、平均値評価時間を予備実験で得られた相関係数における second mild maximum T_d の102倍程度に選び、 u' については速度変動の r.m.s. を、 T_E については T_d を、また ϵ についてはすでに述べた $-5/3$ 乗則の適用により得られる値を採用し、いずれも数回から10数回の繰返し計測の平均化により計測精度の向上が図られている。

これらの図より明らかなように、乱れ特性量の分布則としてはつぎの関数形が内そう式として得られる。

1) for $0.1 \leq z/H < 0.6$

$$\frac{u'}{U_F(U_F/U_F)^{1/3}} = (0.36 \pm 0.03) \left(\frac{z}{H}\right)^{-1/3} \quad (3)$$

$$\frac{L}{H(U_F/U_F)} = \frac{T_E}{H/U_F} = 0.15 \pm 0.03 \quad (4)$$

$$\frac{\epsilon}{U_F^3/H} = (0.35 \pm 0.05) \left(\frac{z}{H}\right)^{-1} \quad (5)$$

2) for $0.6 \leq z/H < 0.9$

$$\frac{u'}{U_F(U_F/U_F)^{1/3}} = (0.30 \pm 0.03) \left(\frac{z}{H}\right)^{-2/3} \quad (6)$$

$$\frac{L}{H(U_F/U_F)} = \frac{T_E}{H/U_F} = 0.15 \pm 0.03 \quad (7)$$

$$\frac{\epsilon}{U_F^3/H} = (0.20 \pm 0.05) \left(\frac{z}{H}\right)^{-2} \quad (8)$$

路床および自由表面近傍の領域における乱れ特性量の分布則について今後さらに検討を加える予定である。