

九州大学工学部 正員 椿 東一郎
九州大学工学部 正員 ○小松 利光
九州大学工学部 正員 柴田 敏彦
九州大学大学院 学生員 松本 泰司

1. まえがき

乱れの波数空間において、その中・高波数帯に局所等方性とみなされる平衡領域が存在し、慣性領域ではスペクトルの $-5/3$ 乗則が成立することが良く知られている。粘性域についても著者らが $-13/3$ 乗則を提唱して以来いくつかの測定で $-13/3$ 乗則が成立することが報告されている。

一般に次元的物理的に推測されたスペクトル関数型の妥当性を確かめるためにはスペクトル定数が広範な条件のもとに一義的に決められていることが必要である。 $-5/3$ 乗則については $A_{5/3} = 0.45 \sim 0.55$ とされているが、 $-13/3$ 乗則のスペクトル定数についてはそれ程明らかではない。これは、高波数側のエネルギーレベルの低い粘性域のスペクトルを精度良く求めるためには測定機器の高い周波数応答性と高い $S-N$ 比が要求されるといふ実験的な難しさによるものである。

ところで最近の乱流の研究において、粘性散逸率 ε をどう算出するかが大きな課題となっている。従来より ε の算出に際しては慣性域のスペクトルの $-5/3$ 乗則やDrydenの方法が用いられてきたが、比較的小さいスケールの組織渦が存在する場合、その波数帯にエネルギーが集中して $-5/3$ 乗則は成立しない。また、密度勾配の存在する流れにおいても低波数側のスペクトルは浮力の影響を受けて変形することが多く、前者の方法は使えない。Drydenの方法も密度効果を受けると乱れの非等方性がさらに強くなること、また高波数側のnoiseの影響を直接受けて過大評価し易いなどの理由から厳密には使えない。一方、粘性域の $-13/3$ 乗則は生成域や慣性域のスペクトルと異なり浮力の影響を受けずに成立することから成層流においても ε の算出に應用することができ、そのためにもスペクトル定数の正確な決定が望まれている。

今回、自由乱流・開水路乱流・格子乱流について $S-N$ 比の大きい乱れの計測を行ない、粘性域の $-13/3$ 乗則のスペクトル定数の決定を試みた。

2. 実験方法とデータ解析

流速の測定は測定プローブの個性による影響を避けるため、1方向hot film プローブ(wire type, wedge type, conical type)とV型2方向hot film プローブと2方向X型hot wire プローブを用いた。なお、V型プローブは2個のセンサー部分が2mm程離れているため、せん断の強い流れではこの間隔の影響が出てくる可能性がある。したがってその影響の有無を調べるため、V型プローブについては縦にした場合(鉛直)と横にした場合(水平)の両方について実験を行なった。流れは自由乱流として2次元噴流、壁面乱流として開水路流れ、また乱れの発生源の異なる流れとして格子乱流を採用した(表-1)。この実験ではデータの $S-N$ 比を高めるために、平均流速を求めるためのデータと乱れの変動を求めるためのデータを切り離し、零点を移動させることにより変動部分だけを取り出して、データレコーダーの許容入力範囲ぎりぎりまで増幅して収録した(図-1)。これらの変動データは、A-D変換の後、改めて平均電圧に上乘せして解析した。このため、十分高波数の粘性域のスペクトルも精度良く得るこ

表-1 実験条件

開水路乱流	幅 15 cm, 水深 4.0 cm, 水路勾配 0, 流量 796 cc/sec $Re = \frac{U_m d}{\nu} \approx 3700$
格子乱流	水理条件は開水路乱流と同じ。 使用した格子はメッシュ間隔 $M = 2.5$ cm, 格子の大きさ $d = 0.5$ cm の正方形
自由乱流	2次元表面噴流, 幅 15 cm, 噴出口厚 $\begin{cases} h_0 = 3.1 \text{ cm (1方向70-7)} \\ h_0 = 4.0 \text{ cm (2方向70-7)} \end{cases}$ 初期 Re 数 $= \frac{U_0 h_0}{\nu} \approx 4400$, 流量 805 cc/sec

とができた(図-2)。スペクトルはFFT法で計算し、サンプリング間隔は広い波数領域にわたってスペクトルを精度良く求めるため、 $\Delta t = 1/625, 1/125, 1/375 \text{ sec}$ を適宜組み合わせ用いた。

3. 実験結果とその考察

ε の評価は慣性域の $-5/3$ 乗則を用い、

$$F(k) = A_{5/3} \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \text{ ----- (1)}$$

より $\chi \equiv k^{5/2} F(k)^{3/2} = (A_{5/3})^{3/2} \varepsilon$ ----- (2) が得られ、スペクトル図から慣性域に属する一点の k と $F(k)$ を読みとり、各測点ごとの χ を算出した。

粘性域の $-13/3$ 乗則

$$F(k) = A_{13/3} \nu^{-2} \varepsilon^{4/3} k^{-13/3} \text{ ----- (3)}$$

を変形すると

$$k^{13/3} \nu^2 F(k) = A_{13/3} \varepsilon^{4/3} = \frac{A_{13/3}}{(A_{5/3})^2} \chi^{4/3} \text{ ----- (4)}$$

となる。したがってスペクトル図の粘性域に属するデータから1つのスペクトルにつき1点の k と $F(k)$ を読みとり $k^{13/3} \nu^2 F(k)$ を計算し、慣性域のデータを用いて(2)式から求めた χ に対してプロットしたのが図-3である。若干のばらつきはあるが両対数グラフにおいて勾配4/3の直線を示しており、(4)式から $-13/3$ 乗則が粘性域で成立していることが分かる。

$\chi = 1$ のときの値から

$$A_{13/3} = 0.048 (A_{5/3})^2 \text{ ----- (5)}$$

が得られ、 $A_{13/3}$ と $A_{5/3}$ の間の関係式が与えられる。 $A_{5/3} \div 0.48$ とすると、(5)式より $A_{13/3} = 0.011$ となり、粘性域のスペクトル $-13/3$ 乗則のスペクトル定数が決定される。なお、自由乱流、壁面乱流、格子乱流の粘性域のスペクトルのいずれにも $-13/3$ 乗則が成立しており、スペクトル定数もほぼ一致している。また、hot film プローブの特性については、粘性域の $-13/3$ 乗則のスペクトル定数に関する限りは、V型プローブを鉛直にした場合と水平にした場合との間にも、また各プローブの測定結果にも、顕著な差異は見られなかった。

4. 結論

種々の乱流についてのS-N比の高い実験から粘性域の $-13/3$ 乗則のスペクトル定数と慣性域の $-5/3$ 乗則のスペクトル定数を一義的に関係づけ、(5)式を与えた。そして $A_{5/3} \div 0.48$ の場合は $A_{13/3} = 0.011$ となることがわかった。今後は、 $A_{5/3} = 0.45 \sim 0.55$ とされている $A_{5/3}$ の値についても再検討を加えて、正確に決定することを試みるとともに、 ν, ω のスペクトル、Reynolds 応力のスペクトルについても検討していく予定である。

参考文献

- 1) 椿東一郎・小松利光 : 1977 土木学会論文報告集 No. 268
- 2) 小松利光・椿東一郎 : 1977 九大工学集報 第50巻, 第4号
- 3) 椿・小松・下田 : 1981 第25回 水理講演会論文集
- 4) 加藤・中野・池田 : 1982 第29回 海岸講演会論文集
- 5) 椿・小松・八尋 : 1982 第26回 水理講演会論文集

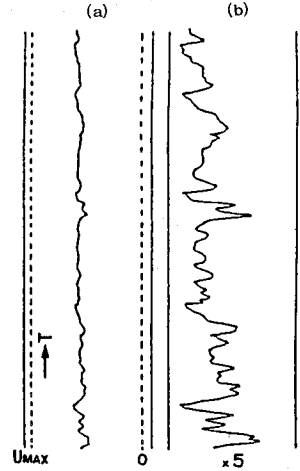


図-1 乱れ変動の計測データ

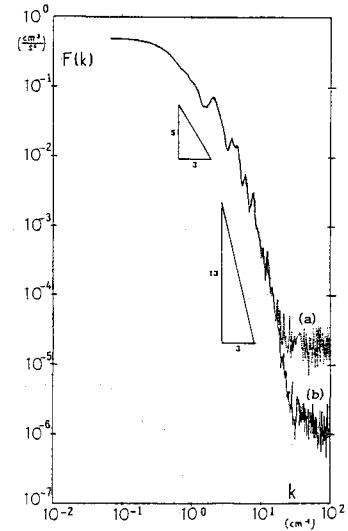


図-2 乱れのスペクトルの一例

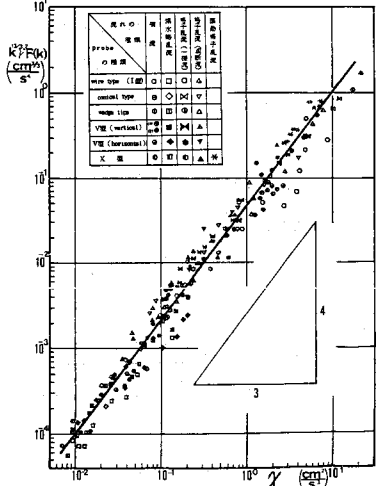


図-3 χ と $k^{13/3} \nu^2 F(k)$ の関係