

II-68 平衡領域における乱れエネルギースペクトルのスペクトル定数

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 ○行徳 恒光

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。粘性域についてと著者が $-1/3$ 乗則を提唱して以来、いくつかの測定で $-1/3$ 乗則が成立することが報告されている。

一般に次元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 $A_{5/3}=0.45\sim0.55$ となることが、広く確認されているが、 $-1/3$ 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う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 $k-\epsilon$ モデルにみられるように、 ϵ の果たす役割の大きさが再認識されるにしたがい、 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、密度勾配の存在する流れでは低波数側のスペクトルは浮力の影響を受けて生成域のスペクトルはどちらか慣性域の $-5/3$ 乗則まで影響を受けて変形することが多く、密度流では前者の方法は用いられない。またDrydenの方法とスペクトルが浮力により変形を受けること、密度効果を受けると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 $-1/3$ 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 ϵ の算出に応用することができ、そのために ϵ と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 $-1/3$ 乗則のスペクトル定数を精度良く決定できたので報告する。

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、DISA社製のV型2方向hot filmプローブと日本科学工業製の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(垂直)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、また乱れの発生深の異なる流れとして格子乱流を採用した。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、図-1のように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、改めて形変圧に上乗せして解析した。このため、 $S-N$ 比と高く分解能の良い乱れのデータが得られ、十分高波数の粘性域のスペクトルも精度良く得ることができた(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に $\Delta t = 1/2.5, 1/25, 1/375 \text{ sec}$ を適宜組み合わせ用いた。例えば開水路乱流では慣性域のスペクトルを求めるために $\Delta t = 1/2.5 \text{ sec}$ 、粘性域のスペクトルを求めるために $\Delta t = 1/375 \text{ sec}$ を採用している。

ε の算出は慣性域の $-5/3$ 乗則を用い、

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

より $\chi = k^{5/3} F(k) = (A_{\eta})^{2/3} \varepsilon$ ------(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 $-1/3$ 乗則

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

を变形すると

$$k^{1/3} \nu^2 F(k) = A_{\eta} \varepsilon^{2/3} = \frac{A_{\eta}}{(A_{\eta})^2} \chi^{2/3} \text{------(4)}$$

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 $k^{1/3} \nu^2 F(k)$ 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 $2/3$ の直線を示しており、(4)式から $-1/3$ 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

$$A_{\eta} = 0.04915 (A_{\eta})^2 \text{------(5)}$$

が得られ、 A_{η} と A_{η} の間の関係式が与えられる。 $A_{\eta} \approx 0.48$ とすると、(5)式より $A_{\eta} = 0.0113$ となり、粘性域のスペクトル $-1/3$ 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 $-1/3$ 乗則が成立しており、スペクトル定数と一致している。また、V型プローブの特性については、粘性域の $-1/3$ 乗則のスペクトル定数に関する限りは、プローブを垂直にした場合と水平にした場合との間に顕著な差異は見られなかった。

3. 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 $-1/3$ 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ることができた。そして $A_{\eta} \approx 0.48$ の場合は $A_{\eta} = 0.0113$ を与えた。今後は幅(0.45~0.55)をとつ A_{η} の値についてと検討を加えて、正確に決定することを試みるとともに、 v, w のスペクトル、 Re_{η} のスペクトルについても検討していく予定である。

最後に、本研究の遂行にあたり、実験ならびにデータ整理に大いに協力願った松本泰司君に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 橋本一郎・小松利光 : 1977 土木学会論文報告集 No. 268
- 2) 小松利光・橋本一郎 : 1977 九大工学集報 第50巻, 第4号
- 3) 橋本・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) 橋本・小松・八尋 : 1982 第26回 水理講演会論文集

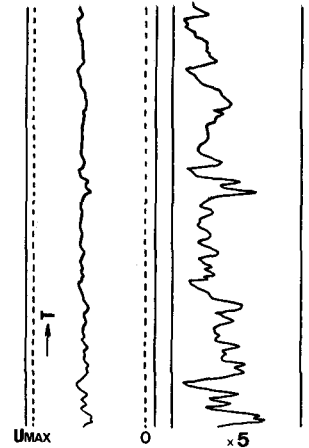


図-1 乱れ変動の計測データ

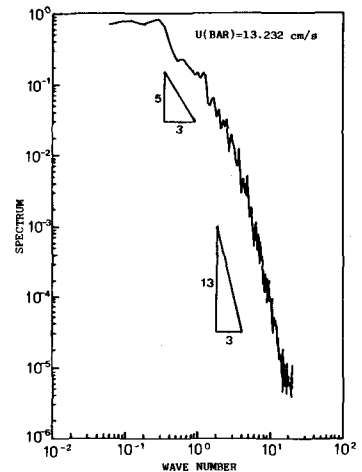


図-2 乱れのスペクトルの一例

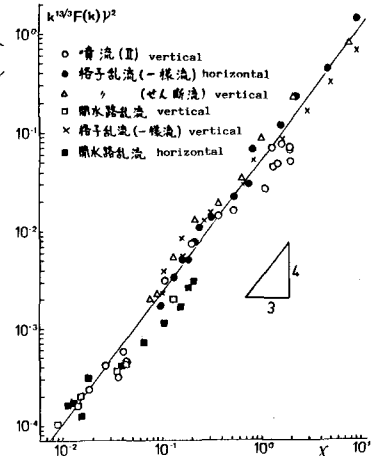


図-3 χ と $k^{1/3} \nu^2 F(k)$ の関係