

乱れの高波数領域におけるスペクトル特性について

九州大学大学院 学生員 ○松本 泰司
 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

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 $-5/3$ 乗則を提唱して以来、いくつかの室内実験で $-5/3$ 乗則が成立することが報告されている。^(1,2)

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。慣性域の $-5/3$ 乗則については $A_{90}=0.50 \pm 0.05$ が与えられており、また粘性域については著者らが開水路乱流や格子乱流の実験より $-5/3$ 乗則のスペクトル定数 A_{90} と A_{93} との間の一義的な関係を求めている。しかしながら室内実験のため乱流Reynolds数 Ret が比較的小さいデータのみによることや A_{90} の値に不確実性が残っていることなどから、正確な A_{90} の値を確定するには至っていない。

そこで、今回 Ret の大きな流れの測定を試み、速買川河口堰での実測を行なった。高波数側の粘性域のスペクトルを高い $S-N$ 比で精度良く得るため、いくつかの新しい測定方法を採用した。本論文は、これらの実測結果から得られた高い乱流Reynolds数の乱れのスペクトルの平衡領域の特性について考察を加えている。

2. 実験方法とデータ解析

速買川河口堰は河口より2.0 km地点に設置されており幅は約517mである。この河口堰の側岸に魚道が設置されており、hot film 流速計を用いる際に問題となる気泡が湛水によって除去されていること、魚道の断面がきれいな矩形をしていることなどの理由から、魚道を測定地点として選んだ。魚道の幅は3.5m、高さ1.8mであり、水深は下流の堰の上下により若干異なるが約 $h=1$ m、平均流速は $U=10 \sim 20$ cm/sであった。

平均流速や乱れの測定にはDISA社製V型2方向hot filmプローブを使用して乱れ u, w を測定し、また軸方向に 90° プローブを回転させて乱れ u, v を測定した。断面平均のReynolds数は $Re=94,000 \sim 187,000$ であった。

この実測ではデータの $S-N$ 比を高めるため、平均流速を求めるためのデータ(a)と乱れの成分を精度良く求めるため平均量を差し引いた変動部分だけを取り出してデータレコーダの許容入力範囲ぎりぎりまで増幅したデータ(b)、そして高周波(高波数)の乱れの特性を精度良く得るためエネルギーレベルの高い低周波の成分をhigh-pass filterで除去した後データレコーダの許容入力範囲まで増幅したデータ(c)とに分けて収録した(図-1)。(b)(c)のデータについてはモニターとして2chFFT Spectrum Analyzer(小野測器(株)製)に入力させ、displayされたスペクトルを見ながらhigh-pass filterのcutの境界を決定した。データレコーダに収録されたデータの時系列の1例を図-2に示す。これらの変動データはA-D変換

の後、統計処理された。

スペクトルはFFT法で計算し、サンプリング間隔は $\Delta t=1/375$ sec、データ個数は1測点につき $N=16,384$ 個とした。得られたスペクトルの1例を図-3に示す。(b)(c)のデータにより高波数のスペクトルが精度良く得られている。

(b)(c)のデータより得られたスペクトルを両者のスペクトルが良く一致する領域で連結し、低

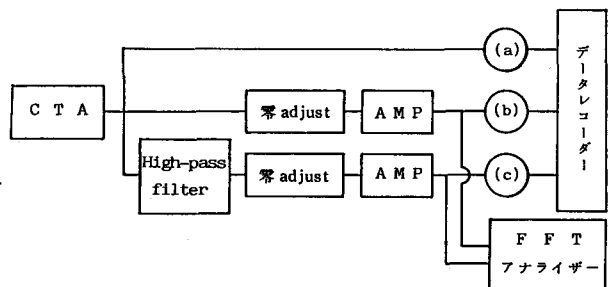


図-1 データの収録方法

波数側を(b)のスペクトル、高波数側を(c)のスペクトルで表わせば広い波数域に渡る高精度のスペクトルが得られる。uのスペクトルの代表的な1例を図-4に示す。慣性域で $-5/3$ 、粘性域で $-13/3$ の勾配とよく一致している。

今、流れ方向の慣性域のスペクトル

$$F_u(k) = A_{9/3} \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (1)$$

より $\chi \equiv (A_{9/3})^{3/2} \varepsilon = \{k^{9/3} F_u(k)\}^{3/2} \quad (2)$ が得られ、スペクトル図から慣性域に属する1点の k と $F_u(k)$ を読み取り、各測点ごとの χ を算出した。

粘性域の $-13/3$ 乗則

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

を変形し ε の代わりに χ を用いて表わすと次式のようなになる。

$$k^{13/3} \nu^2 F(k) = A_{13/3} \varepsilon^{4/3} = \{A_{13/3}/(A_{9/3})^2\} \chi^{4/3} \quad (4)$$

u-変動のスペクトルについては、定数 α を次のように定義する。

$$\alpha \equiv (A_{9/3})_u / (A_{9/3})_u^2 = k^{9/3} \nu^2 F_u(k) / \chi^{4/3} \quad (5)$$

u-変動の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 $F_u(k)$ を読み取り(5)式に代入して α の値を求めると、 $\alpha = 0.047 \pm 0.010$ となることから、 $(A_{9/3})_u$ と $(A_{13/3})_u$ の間の関係は、

$$(A_{9/3})_u = (0.047 \pm 0.010) (A_{13/3})_u^2 \quad (6)$$

となり、著者が⁶⁾開水路乱流や格子乱流、また振動格子乱流の数多くの実験から得た結果と良く一致している。 α がほぼ一定値となることから Ret 数の大きい乱れでも粘性域で $-13/3$ 乗則が良く成立していることがわかる。

また、v,w-変動のスペクトルについて検討したところ、乱れの局所等方向が慣性域から粘性域に渡る広い波数域で成立していることがわかった。

3. 結論

本研究で得られた主要な結論は以下のようである。

- (1) 平衡領域の波数領域だけでも6 decadeに渡って乱れエネルギーが分布しているにもかかわらず、高波数まで精度良く測定することができた。
- (2) 乱流 $Reynolds$ 数の大きい乱れでもスペクトルの慣性域では $-5/3$ 乗則、粘性域では $-13/3$ 乗則が良く成立する。特に慣性域の $-5/3$ 乗則は広い波数帯に渡って成り立っている。
- (3) スペクトル定数 $(A_{9/3})_u$ と $(A_{13/3})_u$ の間の関係を(6)式により一義的に関係づけることができた。これは格子乱流や開水路乱流・振動格子乱流などの室内実験から得られた結果と良く一致する。

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・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) 鶴谷・中野・一戸 : 1984 第31回海洋講演会論文集
- 6) 橋・小松・柴田・松本 : 1984 土木学会第39回年講

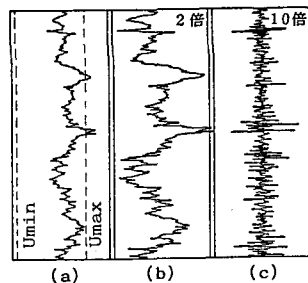


図-2 乱れ変動の計測データ

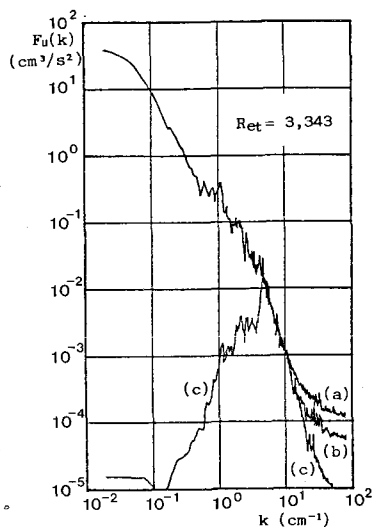


図-3 乱れのスペクトルの1例

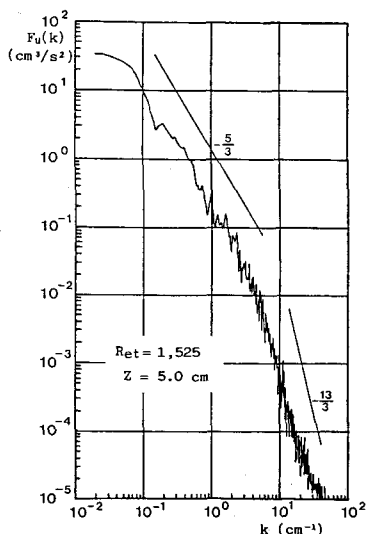


図-4 u-変動のスペクトル