

京都大学大学院 学生員 石垣 泰輔
 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

一般に乱流場は種々のスケールの乱れ成分より構成され、1次元エネルギー・スペクトル $S(k)$ は生成、慣性および粘性の3波数領域でそれぞれ異なった特性を示すことはすでによく知られている。すなわち、生成領域での $S(k)$ は乱れの強さ u' と平均スケール L の2量、慣性領域はエネルギー逸散率 ε と波数 k の2量、粘性領域は ε 、 k および動粘性係数 ν の3量によって規定されるとともに、慣性領域については $S(k)$ が $k^{-5/3}$ に比例するという $-5/3$ 乗則の成立性が広く確かめられ、また粘性領域については -3 乗則あるいは -7 乗則の成立性が類推されている。本報告は別報¹⁾に示された乱れの移流過程についてとまったく同様の手法を用いてレイノルズ応力のスペクトル特性について次元解析的考察を加えるとともに、2成分ホットフィルム流速計による乱れ計測結果によりその妥当性について実験的に検討したものである。

1. レイノルズ応力のスペクトル相似則

いまレイノルズ応力 $-u'w'$ に関するコ・スペクトル $P(k)$ は、 $S(k)$ についてと同様に、3波数領域で異なった特性を示し、それぞれの領域の $P(k)$ は、 $S(k)$ を規定する量のほか、Lumley²⁾の提案した平均速度勾配 $\partial u/\partial z$ によって規定されるとすると、つぎのような $P(k)$ に関する相似則が導かれる。すなわち、生成領域については u' および L を、慣性および粘性領域については ε および k を基本量として選び、Buckinghamの π 定理を用いた次元解析を行なうとともに、無次元因数間の関係を近似的に1次式と仮定するとつぎの関係式が得られる。ただし、第2粘性領域では無次元エネルギー・スペクトル $S(k)/\varepsilon^{2/3}k^{-5/3}$ が無次元動粘性係数 $\nu/\varepsilon^{1/3}k^{-4/3}$ の -4 乗に比例することより、無次元コ・スペクトル $P(k)/\varepsilon^{2/3}k^{-5/3}$ もまた同量の -4 乗に比例すると仮定されている。

$$\text{生成領域} \quad : \quad P(k) \sim \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) u' L^2 \quad (1)$$

$$\text{慣性領域} \quad : \quad P(k) \sim \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) \varepsilon^{1/3} k^{-7/3} \quad (2)$$

$$\text{粘性領域 (第1)} \quad : \quad P(k) \sim \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) \varepsilon^{2/3} \nu^{-1} k^{-11/3} \quad (3a)$$

$$\text{粘性領域 (第2)} \quad : \quad P(k) \sim \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) \varepsilon^{5/3} \nu^{-4} k^{-23/3} \quad (3b)$$

すなわち、生成領域では波数に関係なくある一定値をとるが、慣性領域では波数の $-7/3$ 乗、粘性領域では $-11/3$ 乗あるいは $-23/3$ 乗に比例して減少することが知れる。なお、慣性領域に対する (2) 式は Lumley²⁾、Wyngaard ら³⁾によるものと一致している。

まったく同様にして u および w それぞれの k という波数成分間の相関度を表わすコヒーレンシ $\text{Coh}(k)$ についての相似則が導かれ、つぎのようになる。

$$\text{生成領域} \quad : \quad \text{Coh}(k) \sim \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) u'^{-1} L \quad (4)$$

$$\text{慣性領域} \quad : \quad \text{Coh}(k) \sim \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) \varepsilon^{1/3} k^{-2/3} \quad (5)$$

$$\text{粘性領域 (第1)} \quad : \quad \text{Coh}(k) \sim \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) \nu^{-1} k^{-2} \quad (6a)$$

$$\text{粘性領域 (第2)} \quad : \quad \text{Coh}(k) \sim \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) \varepsilon \nu^{-4} k^{-6} \quad (6b)$$

これらの式より、 $\text{Coh}(k)$ は生成領域での一定値から慣性および粘性領域へと波数が大きくなるにしたがい急激に減少し0に近づくことが知れる。

以上は3波数領域における $P(k)$ および $\text{Coh}(k)$ がそれぞれの領域に対応する $S(k)$ の規定量と平均速度勾配とによって定まるとして導かれたものであるが、これらがここに述べた量のみによって規定されるということは現段階では厳密に立証されておらず、普遍則として確立するためにはさらに詳細な検討が必要である。

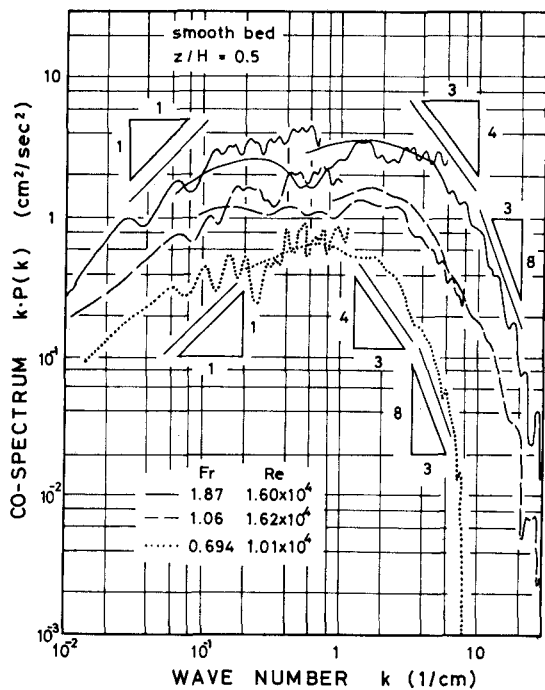


図-1 コ・スペクトル

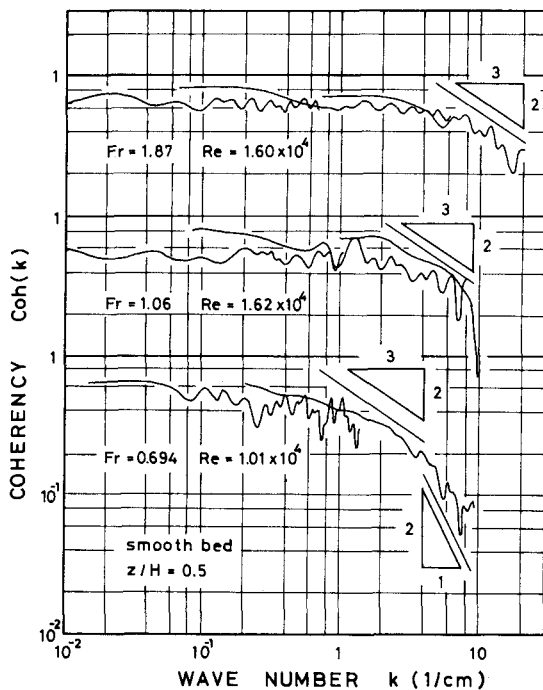


図-2 コヒーレンシ

2. 実験的検討

図-1 および図-2 はそれぞれ $P(k)$ および $Coh(k)$ の計測例を示したものであって、計測精度を高めるためとくに繰り返し数が多くとられている。すなわち、本実験においては最高160ブロックの速度変動記録より算定されたものの平均値をもって計測値とされており、定量的にもかなりの信頼性があるものと考えられる。なお、1ブロックのデータ数は $N = 500$ 個であって、サンプリング周波数は $fs = 20 \sim 1600$ Hzのものが適宜採用されている。また、波数スペクトルへの変換には局所的平均速度が用いられている。

3種の水理条件のもとで計測された $k \cdot P(k)$ を示した図-1において、 $k \cdot P(k)$ は低波数領域で波数 k に比例して増加しているが、高波数領域では逆に k の増加とともに減少し、その減少の度合いは k が大きいほど著しく、 $P(k)$ についても生成、慣性および粘性領域の3波数領域に区分して取り扱えることが確かめられる。したがって、各領域における $P(k)$ の相似則について検討するとつぎのようである。すなわち、生成領域とみなされる低波数領域における $P(k)$ は k に関係なくほぼ一定となるようであり、(1)式で表わされるような相似則にしたがうことが知れる。また、これより高波数側の慣性領域では $P(k)$ が $k^{-7/3}$ に比例して減少するとみなされ、(2)式による $-7/3$ 乗則の妥当性が認められる。さらに高波数側の粘性領域では慣性領域の $-7/3$ 乗則よりも急激な減少傾向を示しており、第1粘性領域では $P(k)$ が $k^{-11/3}$ に比例するという(3a)式の相似則にしたがうようである。

一方、 $Coh(k)$ についても(4)式で表わされるような k に関係しない生成領域と、 k の増加とともに減少する慣性および粘性領域の3波数領域が存在しており、慣性および第1粘性領域における $Coh(k)$ はそれぞれ(5)式および(6a)式の相似則にしたがっていると考えられる。

以上のように $P(k)$ および $Coh(k)$ の相似則としては、述べたものがかなり有力であることが実験的にも確認されたが、第2粘性領域といった超高波数領域の計測は困難であるためこの領域の相似則については不明の点も多い。なお、今後はこのような相似則にしたがうとしたときのスペクトル定数について検討を行なう予定である。

- 参考文献 1) 今本：土木学会第31回年次学術講演会講演概要集。 2) Lumley: Proc. Int. Coll. Atmos. Turbulence and Radio Wave Propagation, 1967. 3) Wyngaard and Coté: Quart. J. R. Met. Soc., 98, 1972.