

II-2

風波下における乱流境界層の特性

九州大学 総理工 学○高崎敦彦 正 杉原裕司

九州大学 総理工 正 松永信博

1. はじめに

近年、風波と結合した特別な乱流境界層が風波の直下に存在することが指摘されている¹⁾²⁾。この境界層は風波スペクトルのピーク周波数よりも低周波側の乱流バースト運動によって特徴づけられており、Downward-bursting boundary layer (DBBL)と呼ばれる。大気-海洋間の運動量輸送やガス交換はこの境界層を介して行われることから、その特性を明らかにすることは工学的にも重要である。しかしながら、その特性の詳細や海面境界過程において果たす役割については十分に明らかにされていない。本研究では、風洞水槽実験を行い、局所平衡領域の風波下における低周波帯域の乱流特性量について検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験には、長さ17m、高さ0.8m、幅0.6mの矩形断面を有する風洞水槽を用いた。全てのケースにおいて、水深は39cmに固定され、吹送距離10.75mの位置で計測が行われた。水中における流速測定は、超音波ドップラー流速計を用いて $z = -2 \sim -26\text{cm}$ の範囲で行われ、サンプリング周波数25Hzで16384個のデータが取得された。ここで、 z は静水面から上向きに取られた鉛直座標を示す。風速の鉛直分布および波高については、それぞれピトー管と容量式波高計を用いて測定された。表-1に実験条件を示す。ここで、 U_r は基準風速、 η_{rms} は水面変動のrms値、 f_p および σ_p はそれぞれ風波のスペクトルピーク周波数ならびにその角周波数を示す。また、 u_* は気流の摩擦速度である。

3. 実験結果および考察

図-1に、Run2のケースで得られた $z = -7\text{cm}$ における流速変動のパワースペクトルを示す。ここで、実線および点線は水平変動流速 u および鉛直変動流速 w のスペクトルである。 $f = 3\text{Hz}$ 付近において風波のスペクトルピークが見られ、その低周波側に f の $-5/3$ 乗でスペクトルが減衰する等方的な乱流帯域が形成されていること

がわかる。また、 $f = 0.1\text{Hz}$ 以下の低周波領域では非等方的な乱流帯域が存在することがわかる。

図-2に、Run2のケースで得られた $z = -7\text{cm}$ における流速変動のコスベクトルを示す。ただし、図中の実線はコスベクトルに周波数 f を掛けたものである。風波のスペクトルピークよりも低周波側の帯域がレイノルズ応力のかなりの部分を占めていることがわかる。

パワースペクトルならびにコスベクトルの特性から、本実験の風波乱流場においては、乱れに関する主要な変動成分は風波のピーク周波数よりも低周波側に存在するものと考え、流速データから波動成分を除去するような数値処理を行った。以下において議論される乱流特性量は、低周波成分のみにより算定された特性量を示す。

図-3に、乱れ強度、レイノルズ応力、乱れエネルギーおよび乱れエネルギーフラックスの鉛直分布を示す。いずれの基準風速においても、水平流速の乱れ強度が鉛直流速のそれよりも大きくなることがわかる。また、乱れ強度の値は風速の増加とともに大きくなり、水深が深くなるにしたがって減衰する。レイノルズ応力、乱れエネルギーおよび乱れエネルギーフラックスについても、その鉛直分布の挙動は乱れ強度の場合と定性的にはほぼ一致している。

局所平衡にある風波の有義波高 H_s と有義波周期 T_s の間には以下のような相似則が成立する³⁾。

$$H_s = BT_*^{3/2} \quad (H_s = gH_s/u_*^2, T_* = gT_s/u_*) \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度を示す。この相似則を用いることにより、ピーク波に対する水表面でのストークスドリフト u_0 は摩擦速度 u_* に比例することが導かれる³⁾。

$$u_0 = 2\pi^3 H^2 / g T^3 \propto u_* \quad (2)$$

ここで、 H は風波の平均波高、 T はピーク波の周期である。Toba and Kawamura²⁾は、低周波成分による乱流特性量の値が波のパラメータである u_0 によって規定されることを明らかにした。このことは、同時に乱流特性量

表-1 実験条件

	U_r (m/s)	η_{rms} (cm)	f_p (Hz)	σ_p (1/s)	u^* (cm/s)
Run1	5.00	0.358	3.49	21.9	25.9
Run2	7.50	0.685	2.61	16.4	32.1
Run3	10.0	1.10	2.20	13.8	60.3

Key words 風波, 乱流, 海面境界過程

福岡県春日市春日公園 6-1

TEL 092(583)7549

FAX 092(592)8447

が u_0 に規定され、風波下における乱れが式(1)の相似則の枠組みで捉えられることを示唆している。

u_0 と H_s で規格化された乱流特性量の鉛直分布を図-4に示す。いずれの特性量の分布についても、このように規格化された場合、風速に依存せずに普遍的に表わせることがわかる。これらの図より、 z/H_s が約2程度までの範囲において、乱流特性量が鉛直方向に変化しない領域が成立しており、この領域がDBBLに相当するものと考えられる。従来の研究では、DBBLの深さは $z/H_s = 3 \sim 7$ であると報告されており²⁾、本研究の結果とオーダー的に一致している。

最後に、本実験に際して多大なご助力をお願いした九州大学応用力学研究所の丸林賢次ならびに石橋道芳の両氏に謝意を表します。

参考文献

- 1)Yoshikawa, I., Kawamura, H., Okuda, K. and Toba, Y., *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 44, 143-156, 1988.
- 2)Toba, Y. and Kawamura, H., *J. Oceanogr.*, 52, 409-419, 1996.
- 3)Toba, Y., *Fluid Dyn. Res.*, 2, 263-279, 1988.

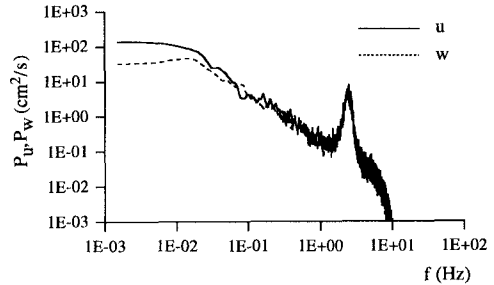


図-1 流速変動のパワースペクトル

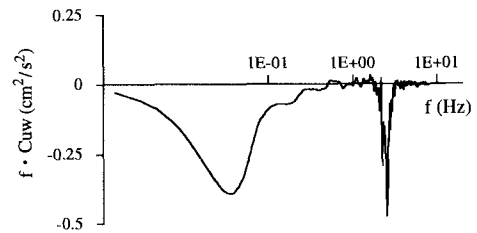


図-2 流速変動のコスペクトル

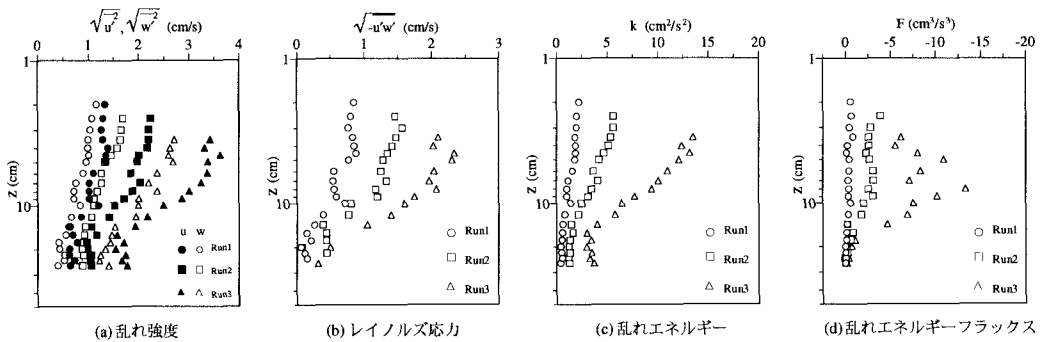


図-3 乱流特性量の鉛直分布

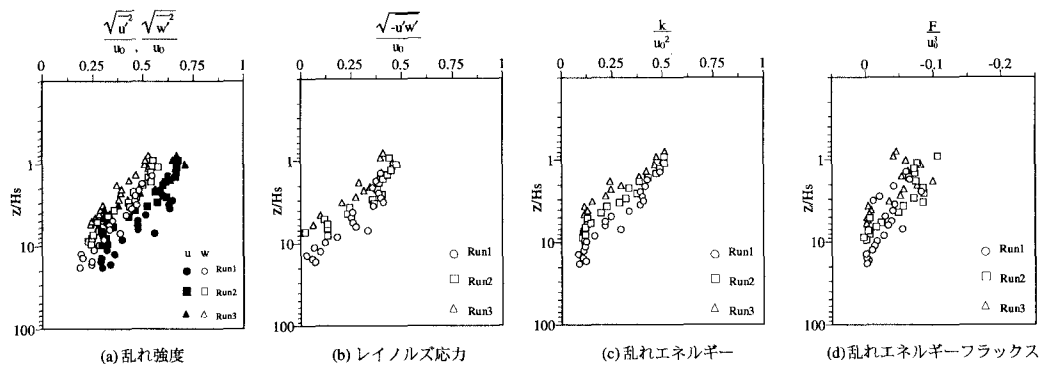


図-4 u_0 と H_s で規格化した乱流特性量の鉛直分布