

風波碎波により発生する乱れの特性

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

風波と結合した乱流バースト境界層(Downward-bursting boundary layer; DBBL)が風波の直下に存在することが指摘されている^{1),2)}。このような秩序構造は、大気-海洋間の運動量輸送やガス交換と関連して興味深い現象であるが、その詳細についてはよく分かっていない。本研究では、風洞水槽実験を行い、碎波を伴う風波下における乱れの特性について検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験には、長さ 15m、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 39 cm 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。表一に実験条件を示す。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、 H_s は風波の有義波高、 u_* は気流の摩擦速度、 u_0 はピーク周波数の波に対する水表面でのストークス・ドリフトである。

3. 実験結果および考察

図一に、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。このようなスペクトル特性から、本実験の風波乱流場においては、乱れに関係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結論できる。

本研究では、乱れの特性に着目しているために、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、乱れ成分のみにより算定された統計量を示す。

図一2に、乱れ強度、レイノルズ応力ならびに乱れエネルギーの鉛直分布を示す。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のがわかる。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⁾。

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

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、卓越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 はピーク周波数の波の周期である。Toba and Kawamura²⁾は、乱れ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、同時に乱流特性量が u_* 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。これは、碎波過程が相似則の成立と乱れの生成の両方に強く関わっていることから理解できる。 u_0 と H_s で規格化された乱流特性量の鉛直分布を図一3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。紙面の都合上割愛しているが、乱れエネルギーフラックスという、より高次の統計量についても同様の結果が得られていることを指摘しておく。これらの図より、 z/H_s が約 2 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

表一 実験条件

	U_r (m/s)	η_{rms} (cm)	f_p (Hz)	σ_p (1/s)	H_s (cm)	u^* (cm/s)	u_0 (cm/s)
Run1	5.00	0.358	3.49	21.9	1.43	25.9	2.15
Run2	7.50	0.685	2.61	16.4	2.74	32.1	3.30
Run3	10.0	1.10	2.20	13.8	4.41	60.3	5.12

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. Soc. Japan*, 52, 409-419, 1996.
 3)Toba, Y., *Fluid Dyn. Res.*, 2, 263-279, 1988.

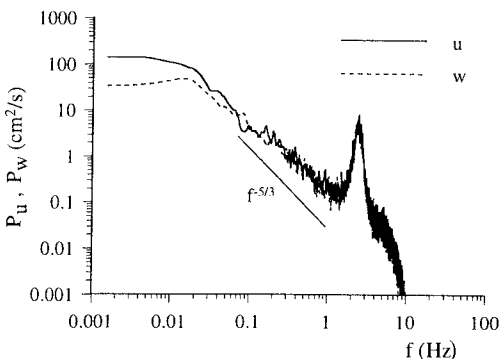


図-1 流速変動のパワースペクトル

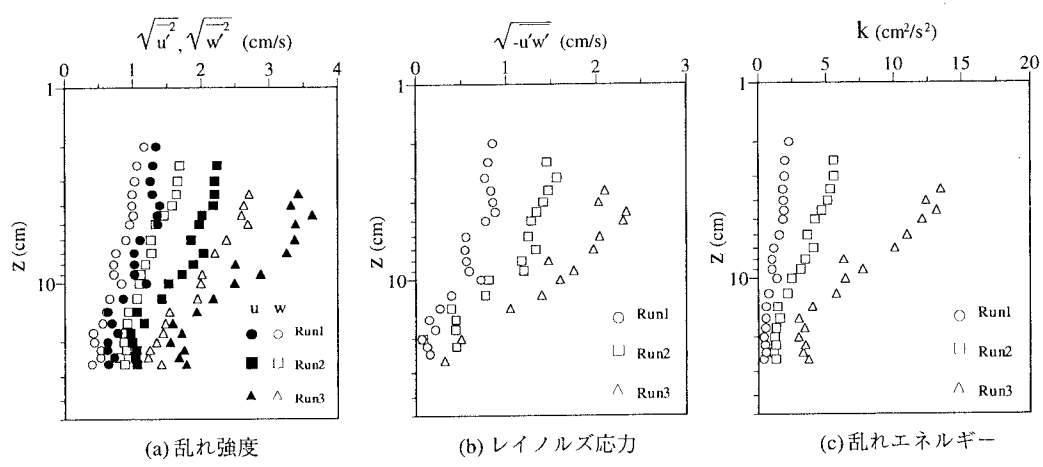


図-2 乱流特性量の鉛直分布

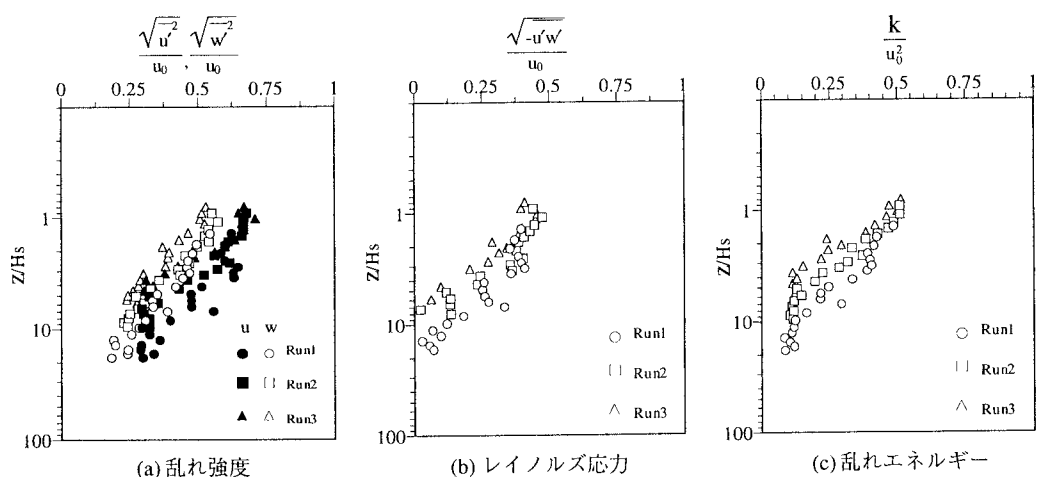


図-3 u_0 及び H_s で規格化された乱流特性量の鉛直分布