

碎波帯における粗底面上の流速場の特性

岡 安 章 夫*

1. はじめに

碎波帯内における底面付近の流速分布の評価は、底質移動等を予測する上で重要である。特に底面波動境界層内の流速分布や乱れの特性は、境界層内で底質移動が活発であるだけでなく、それより上層の流速分布や底面剪断応力の評価をする上で必要な情報である。碎波帯内の底面乱流波動境界層が通常の波動下の乱流境界層と最も異なる点は、波動の強非線形性の問題と共に水表面近くで形成され下層へと連行される強い乱れの影響である。

Fredsøe・Deigaard (1992) は碎波帯内の底面境界層においても境界層で生成される乱れが支配的であり、また、上層の乱れと境界層内の乱れは統計的には独立と扱えそれぞれ別のモデルで評価できるであろうとしている。しかし、一般に碎波による乱れは底面境界層で生成されるものよりはるかに大きいと考えられており、またそれが底面近傍においてどのような分布になっているのか不明な点が多い。特に戻り流れの分布などを考える場合には、碎波帯内では上層から伝播してくる碎波による強い乱れにより全水深に渡る連続的な乱れの構造が存在すると考えるべきであろう。従って、境界層内の定常流速分布を決定する際にも、非碎波時のように底面境界層を独立な層として扱うことには疑問がある。また、Fredse・Deigaard も少なくとも境界層の直上については底面境界層の影響を強く受けるとしており、上層の流速場の特性に強く影響される戻り流れと境界層内部の流速とがどのように影響し合うのか検討する必要がある。

碎波帯内の底面波動境界層については、碎波帯内で底面の極近傍について精度と密度の高い流速測定が要求されるので、従来これについての研究はほとんど行われていない。そこで、本研究では、粗度をつけた斜面上の碎波について、水位変動と共に2成分ファイバー・レーザ流速計 (FLV) により底面極近傍を含めた詳細な流速測定を行い、碎波帯内の底面乱流境界層の流速特性について上層の流速場との関係を含めて検討を行った。

2. 実験方法および実験条件

実験には、油圧制御のピストン型造波装置を持つ長さ33 m、幅0.6 m、深さ1.5 mの二次元波動水槽を用いた。この水路には樹脂製の人工大理石板を使用し精度良く仕上げられた1/35の一樣勾配斜面が設置されている。この斜面上にエポキシ樹脂で砂を貼り付けた厚さ約1 mmのプレキシグラスを耐水性の両面接着テープで固定した。粗度に用いた砂は海岸から採取しふるった粒径0.71~1.41 mmの自然砂を中央粒径1.0 mmとなるように調整して用いた。写真-1にプレキシグラス上に貼り付けた粗度のサンプルの拡大図を示す。

この斜面上の碎波帯内外に6つの測線を設け、それぞれ沖から測線1 (L1)、測線2 (L2) とした。各測線において幾何学的な平均底面上0.3 mmから平均水位付近まで鉛直方向に20点程度の測定点を配置し、さらに各測線での底面近傍における測定の精度を向上させるために、設定した測線から岸沖両方向に2 cm ずつ離れた補助測線を設定し (L6は除き、L4は沖側のみ) た。補助測線上の測点は底面上0.3 mmから1.0 mm (L4は2 mm) で、測定点の合計は167である。本実験における測定点の水利学的な位置についてはCoxら (1996) に詳しい。

図-1に実験装置の概略と基準座標を示す。 x , z はそれぞれL1を基準とした水平岸向き、静水位を基準とした鉛直上向きの座標であり、 h は静水深である。この座標を用いると静水時の汀線は $x=980$ cmである。また、

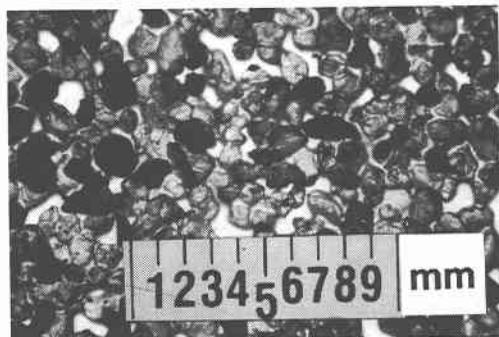


写真-1 底面粗度の拡大写真

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 大学院工学研究科人工環境システム学専攻

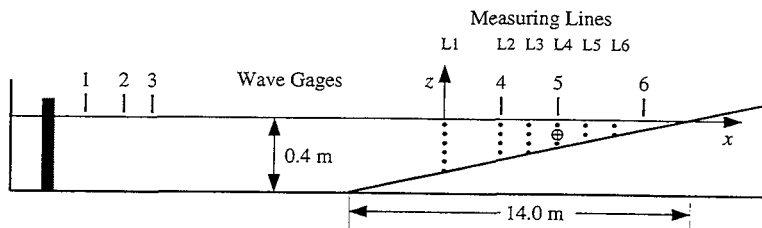


図-1 実験装置の概略

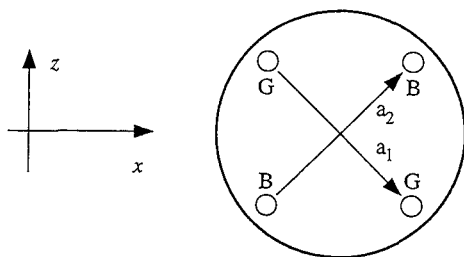
図-1 に示してある数字は容量式波高計の位置であり、波高計 1, 2, 3 は入射波の諸元と入反射波の分離を行うために設置した。また、波高計 4 は砕波点に固定し、波高計 5 は流速計と共に各測線を移動させて用いた。波高計 6 は水槽内に発生する長周期の水位変動をとらえる目的で汀線付近 $x=840$ cm に設置した。

実験は周期 $T=2.2$ s, 沖側一様水深部での波高 $H_i=11.5$ cm の規則波 1 ケースのみについて行った。砕波点は測線 2 上で、砕波波高 H_b は 17.1 cm, 砕波形式は崩れ波型であった。本実験のスケールを考えた場合、1 mm の粗度は実際の海岸においては小石程度の粒径に相当する。しかし、実際の砕波帯内の底面上で起こっていると考えられる粗面乱流境界層を再現するためには、実験室規模ではかなり大きな粗度を使用せざるを得ない。本実験における波動境界層は各測線で概ね Jonsson (1966) の流れの領域区分図で滑面-粗面乱流の遷移領域と粗面乱流域との境界に位置している。

この条件において、水位変動を 6 台の容量式波高計で同時に計測すると共に、岸沖・鉛直の流速変動を 2 成分ファイバー・レーザ流速計 (FLV) で測定した。本実験で使用した FLV は DANTEC 社製で 4 W のアルゴン・レーザと個々のチャンネル用に 2 台のハードウェア FFT を利用した信号処理装置 (Burst Spectrum Analyzer, BSA) を使用したシステムである。

レーザ光は水路側壁の強化ガラスを通して水路内に入れ、底面付近の流速を測定する際にはレーザ光と底面が干渉しないように若干の俯角をつけた。俯角の大きさは 3 度程度であり、これによる流速の測定誤差は無視できる。また、流速計の 2 つのチャンネルは、水平・鉛直の座標軸と 45 度のオフセットを持つように光学系を設置した。 x - z 平面内でのレーザ光の位置関係を図-2 に示す。

計測は造波開始後 30 分で波浪場がほぼ定常に達したとみなし、その後から水面変動および流速変動の記録を行った。流速は毎秒約 1,500 個を 50 波分記録し、水位変動はサンプリング周波数 100 Hz でデジタルデータレコーダに記録した。流速計からのデータは時間的に等間

図-2 x - z 平面内でのレーザ光の位置関係表-1 測線 1 から 6 の x 座標および水位変動幅

Line No.	x (cm)	d (cm)	H (cm)	$\bar{\eta}$ (cm)	η_c (cm)	η_t (cm)
L1	0	28.00	13.22	-0.30	9.34	-3.88
L2	240	21.14	17.10	-0.44	9.34	-3.60
L3	360	17.71	12.71	-0.05	13.50	-2.82
L4	480	14.29	8.24	0.20	5.91	-2.33
L5	600	10.86	7.08	0.75	5.48	-1.60
L6	720	7.43	5.05	1.13	4.23	-0.82

隔でないので、解析にあたっては一度リサンプリングにより等間隔データに変換した後行った。

3. 実験結果

(1) 定常流速の分布

表-1 に各測線の x 座標と共に、位相平均の水面波形から求めた、波高 H , 平均水位 $\bar{\eta}$, 波峰レベル η_c , 波谷レベル η_t を示す。測線 1 は砕波帯外に位置し、測線 2 は砕波点、測線 3 は transition zone, 測線 4, 5, 6 は砕波帯内の inner region に位置している。

図-3 は各測線における定常流速の分布である。図中実線は定常流の岸沖方向成分、一点鎖線は鉛直方向成分を示す。砕波帯外の測線 1, 2 では底面付近に波動境界層外縁付近で顕著な沖向きの定常流が見られる。これにより岸沖定常流の鉛直分布自体もかなり歪んだ形状となっているが、これはこれまで計測された砕波点付近の定常流の分布と大きく異なる。

これまでの滑面上の砕波点近傍の底面極近傍の流速は

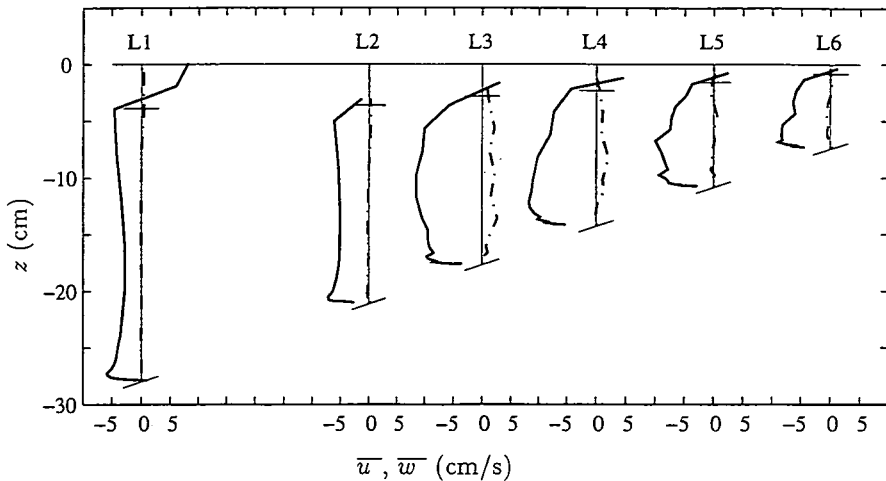


図-3 各測線における定常流速の分布

いずれも岸向きを示しており (例えば, Okayasu ら, 1988), 本実験結果と異なる。しかし, 波動境界層のみを考え, 例えば Trowbridge・Madsen (1984a, 1984b) により境界層外縁の定常流速成分を概算すると, 本実験の条件では沖向きとなる。また, これまでの実験条件では計算値が概ね岸向きの結果となるため, 測線 1, 2 での定常流の分布形状は境界層による steady streaming の影響を強く受けたためであると考えられる。

一方, 碎波帯内においては典型的な戻り流れの流速分布形状を示しており, 境界層内部の定常流速分布も上層の影響を強く受けていることがうかがえる。

(2) 位相平均流速の分布

図-4 は各測線での位相平均の水面波形である。図の実線が位相平均値で, 波線は各波毎の水位変動の標準偏差を示している。碎波帯の中程では 1 波毎のばらつきが大きい。

図-5 は碎波帯外の測線 1 における底面付近での位相平均流速の 1/10 位相毎の岸沖流の鉛直分布を示している。流速分布に付してある番号は位相の順序で, 水面波形のゼロアップクロス点を 0 としている。また, 図-6 は碎波帯内 inner region の測線 5 における同様の図である。

双方を比較すると碎波帯内の測線 5 の方が境界層厚が若干大きくっているように見られる。位相平均流速の最大値を見ると測線 5 における流速振幅の方が小さくなっており, 単純な正弦振動を仮定した境界層厚の概算では碎波帯内の方が小さくなるはずである。碎波帯内で境界層厚が増大する理由としては, 1) 碎波による上層の強い乱れにより, 乱れ構造の境界がはっきりしなくなったため, 2) 戻り流れによる見かけ上の流れ場のため, 3)

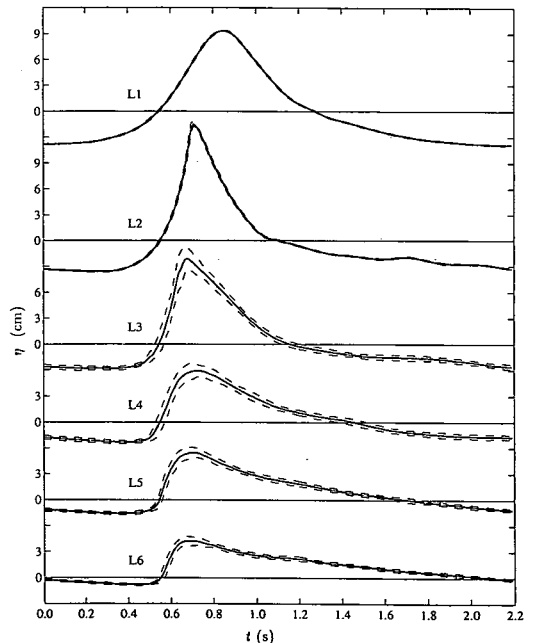


図-4 各測線での位相平均の水面波形

碎波帯内の流速波形の強い非線形と非対称性のため, 等が考えられる。ただし 2) について Nielsen (1992) は流れによる波動境界層厚の変化は実験結果から見る限りそれほど大きくないと指摘している。また, 流速の位相前進や境界層内部での over shooting が碎波帯外に比べ碎波帯内では幾分小さくなっている。これも上述の理由によるものであろう。ただし, 規則入射波によっても碎波帯内では流速の統計的, 長周期的変動があることが指摘されており (岡安・浅利, 1996), 特に位相平均化した流

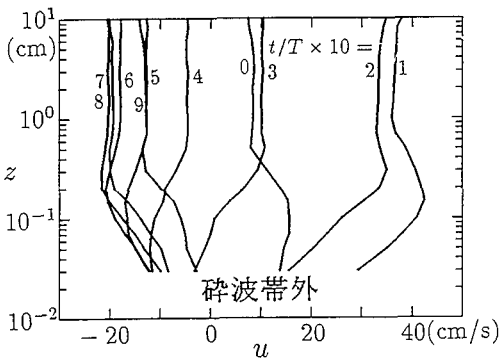


図-5 砕波帯内測線 1 における底面近傍の位相平均流速

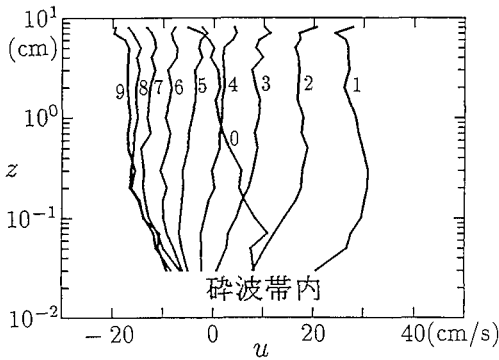


図-6 砕波帯内測線 5 における底面近傍の位相平均流速

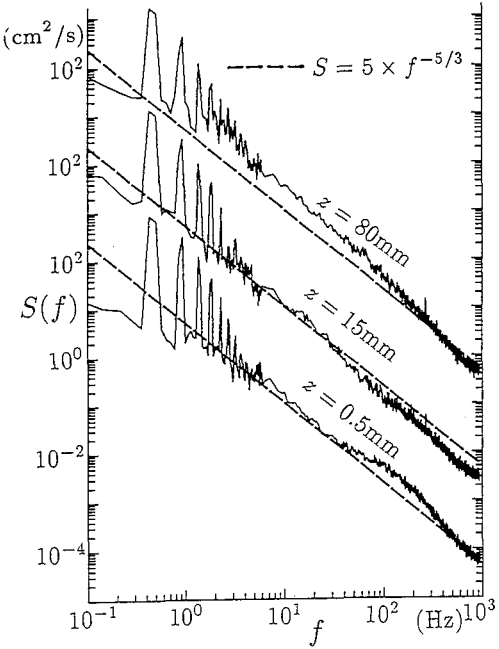


図-7 砕波帯内流速のパワースペクトルの鉛直方向変化

速においてはこの影響を無視できない。図-6 における流速分布もこの影響を受けていると考えられる。

(3) 砕波帯内における流速のパワースペクトルの鉛直方向変化

図-7 は砕波帯内の測線 5 における流速のパワースペクトル $S(f)$ (f は周波数) を底面上 0.5 mm, 同 15 mm, トロフレベル付近の 3 点について示したものである。図中、各スペクトルは上下方向にシフトして示しており、破線は比較の基準として示した、

$$S = 5 \times f^{-5/3} \text{ (cm}^2/\text{s)} \dots\dots\dots (1)$$

である。また、予備測定実験から、静水中での流速計システムのバックグラウンド・ノイズは図で示されたパワースペクトルよりもはるかに小さいことを確認している。

図からトロフレベル付近のパワースペクトルは 1 ～数十 Hz の低周波数で相対的に大きく、中層ではこれが中周波数域に移行してきていることが分かる。これは砕波による低周波の強い乱れが減衰しつつ高周波側へ移行していくことに対応しているものと考えられる。一方、底面の極近傍では 100 Hz 以上で乱れエネルギーが大きく、底面粗度により生成される高周波数域の乱れの存在

を示唆している。本実験では、毎秒 1,500 個程度の流速データを取得しているため、リサンプリング後についても 400 Hz 程度までは信頼できるスペクトルが得られていると推測される。

(4) 砕波帯内外における乱れ強度分布の変化

図-8 に砕波帯外測線 1 (点線) と砕波帯内測線 5 (実線) での水平・鉛直面内での乱れ強度の鉛直分布を示した。境界層の厚さは双方ともに 1 cm 弱であるが、砕波帯外では境界層内での乱れ強度が大きく、砕波帯内では逆に上層の乱れが支配的であることがわかる。乱れ強度の絶対値では砕波によると思われる上層部分でのものが大きい。底面近傍の値は砕波帯内外でほとんど変わらず、境界層内部では砕波帯内においても砕波による乱れが必ずしも支配的ではないことが分かる。また、砕波帯内では下層に乱れ強度が極小値をとる地点が存在するが、これは砕波による乱れが支配的な領域と底面境界層で生成された乱れが支配的な領域との境界を示していると考えられ、軌道流速分布から判断される境界層の外縁とほぼ一致している。このことは図-7 のスペクトルの変化とも符合しているが、この地点での乱れ強度自体の大きさは一般の境界層外縁よりかなり大きい。

図中破線で示したものは砕波帯内での一周期平均のレイノルズ応力の鉛直分布である。レイノルズ応力も境界層外縁付近で符号が変わり、境界層外縁での境界条件として

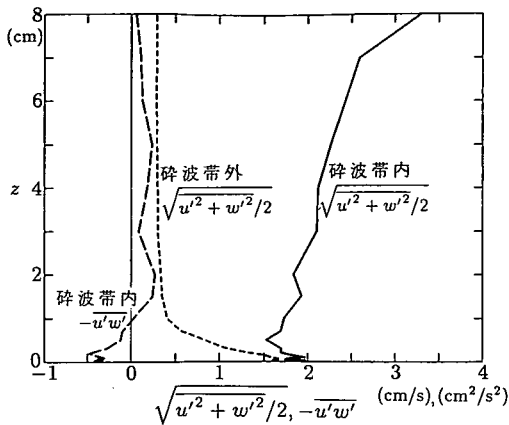


図-8 碎波帯内外の乱れ強度分布の比較とレイノルズ応力の分布

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

を援用できる可能性を示している。また、図には示していないが、レイノルズ応力の時間変化も境界層外縁付近では境界層内部と異なりほぼ0である。従って、境界層厚さを適切にとれば、これまでの乱流波動境界層モデルの適用が可能であると考えられる。例えば、柴山ら(1996)は波の場の数値計算によって得られた境界層外縁流速を用い、Grant・Madsen (1979)の波動境界層内渦動粘性係数分布のもと、境界層方程式を数値的に解くことにより碎波帯内での底面波動境界層内部の流速を計算した。数値計算の条件としては本実験のものをを用い、得られた境界層内流速分布は本実験の結果と良い一致を示している。

4. おわりに

本研究では、従来ほとんど計測されていない、碎波帯内の底面波動境界層を含む底面近傍の流速場について、2成分ファイバー・レーザ流速計を用いた精度の高い測定を行った。碎波帯内の底面近傍の流速場は底面近傍での定常流速や剪断応力を評価する際に重要であると考えられるが、この測定をもとに碎波帯内の底面乱流境界層の流速特性について上層の流速場との関係を含めて検討を行い、以下の結論を得た。

1) 碎波帯内では、碎波帯外の底面波動境界層と比較し底面境界層厚が増大するが、これは碎波による上層の強い乱れによる乱れ構造の連続性、戻り流れによる見かけ上の流れ場の存在、碎波帯内の流速波形の強い非線形性と非対称性、などによると考えられる。2) 碎波帯内では碎波による上層からの乱れが支配的であり、乱れ構造は底面境界層による乱れとともに全水深に渡り連続性を持ったものとなっているが、碎波による乱れは境界層内部においては支配的ではない。3) 乱れ強度の鉛直分布には極小値が存在し、流速分布から判断される底面境界層の外縁と符合している。また、レイノルズ応力についても境界層外縁付近ではほぼ0となっている。

最後に、本研究では Center for Applied Coastal Research, University of Delaware の施設を使用させていただいた。また、実験に際しては Daniel T. Cox 博士(現 Texas A & M University)の協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 岡安章夫・浅利洋信 (1996): 碎波帯内の流速の変動特性と漂砂量推算に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 501-505.
- 柴山知也・Nguyen The Duy・岡安章夫・Ioan Nistor (1996): 碎波帯内底面乱流境界層の数値モデルとその検証, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 446-450.
- Cox, D. T., N. Kobayashi and A. Okayasu (1996): Bottom shear stress in the surf zone, J. Geophys. Res. Vol. 101, No. C6, pp. 14337-14348.
- Fredsoe, J. and R. Deigaard (1992): Mechanics of coastal sediment transport, Advanced Series of Ocean Engineering, Vol. 3, World Scientific Publishing, pp. 122-125.
- Grant, W. D. and O. S. Madsen (1979): Combined wave current interaction with a rough bottom, J. Geophys. Res., Vol. 84, pp. 1797-1808.
- Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layers and friction factors, 10th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 127-148.
- Nielsen, P. (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, Advanced Series of Ocean Engineering, Vol. 4, World Scientific Publishing, pp. 73-75.
- Okayasu, A., T. Shibayama and K. Horikawa (1988): Vertical variation of undertow in the surf zone, Proc. 21st Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 478-491.
- Trowbridge, J. and O. S. Madsen (1984a): Turbulent wave boundary layers, 1. Model formulation and first-order solution, J. Geophys. Res., Vol. 89, pp. 7989-7997.
- Trowbridge, J. and O. S. Madsen (1984b): Turbulent wave boundary layers, 2. second-order theory and mass transport, J. Geophys. Res., Vol. 89, pp. 7999-8007.