

# 不規則波底面境界層の実験

ムスタファ アタウス サマド\*・田中 仁\*\*・山路弘人\*\*\*

## 1. はじめに

近年、波動の不規則性を考慮した海浜変形計算が行われている (例えば, 佐藤・Kabiling, 1994)。一般に, モデルは大きく分けて, 波浪モデルと地形変化モデルからなる。このうち, 波浪変形計算法に関しては, すでにブーシネスク方程式などを対象に多くの知見が蓄積されており, 精度の高い計算が可能である。一方, 漂砂量の見積もりに必要な底面摩擦力の評価に関しては不明な点が残されたままである。波動下の底面摩擦に関する従来の研究の多くは正弦波を対象としており, 不規則波を扱ったものは極めて少ない。わずかに, 光信・佐藤 (1989), Myrhaug (1995), および著者ら (1998a, 1998b, 1998c) の研究を数える程度であるが, これらも, 解析的あるいは数値計算に基づく研究であり, これらに対する実験的な検証はなされていない。

そこで, 本研究では, 不規則振動流の下での底面境界層特性について風洞実験を行い, 底面せん断力などの境界層特性を明らかにした。

## 2. 実験方法

実験装置は, 不規則振動流発生装置と風洞部からなる。装置の概要を図-1 に示す。

駆動部にはサーボモータを使用しており, 任意の不規則信号を入力することが出来る。本研究では, まず表面波形として Bretschneider・光易型スペクトルを用い, 線形波の伝達関数を用いて底面流速の時系列を求めた後, これを振動流発生装置に入力している。なお, 乱れなどのアンサンプル平均 (位相平均) を求めるためには, 完全なランダムな運動では不都合である。そこで, 10 波程の不規則波からなる信号を繰り返し入力することにより, 流速の位相平均値が求められるように工夫した。

風洞観測部の全長は 5.0 m であり, 20 cm×10 cm の矩形断面を有する。実験では, 風洞中央部においてレーザードップラー流速計を用いて流速測定を行った。デー

タは 10 ms の時間間隔で AD 変換を行い, 50 波の平均値から乱れ強度・平均流速を求めた。

本研究では, 有義波の諸元で定義されるレイノルズ数を変化させて, 表-1 に示すような合計 3 ケースの実験を行った。表中で,  $T_{1/3}$  は有義波周期であり, また,  $U_{1/3}$ ,  $Re_{1/3}$  は有義波の諸元に基づき, 次式で計算される代表流速とレイノルズ数である。

$$Re_{1/3} = \frac{U_{1/3}^2}{\nu \omega_{1/3}} \dots\dots\dots (1)$$

$$U_{1/3} = \frac{\pi H_{1/3}}{T_{1/3}} \frac{1}{\sinh kh}, \quad \omega_{1/3} = \frac{2\pi}{T_{1/3}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで,  $H_{1/3}$ : 有義波高,  $h$ : 水深,  $\nu$ : 動粘性係数,  $k$ : 波数である。Case 1 のレイノルズ数は正弦振動流の乱流遷移限界値と比べて十分に低く, 層流を対象としたケースである。Case 2, Case 3 のレイノルズ数はほぼ遷移域に対応するものであるが, 実験の結果, Case 2 では乱れの発生は見られず, 一方, Case 3 では層流と乱流状態が混在することが分かった。そこで, 以下では Case 1 および Case 3 の実験結果を中心に示す。

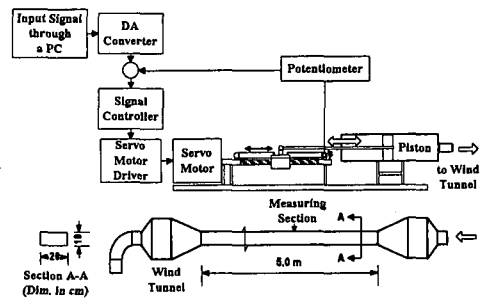


図-1 実験装置

表-1 実験条件

Experiment	$T_{1/3}$ (s)	$U_{1/3}$ (cm/s)	$Re_{1/3}$
Case 1	2.0	56.1	$7.10 \times 10^3$
Case 2	3.0	203.7	$1.40 \times 10^5$
Case 3	3.0	242.0	$1.98 \times 10^5$

\* 正会員 M.Eng 東北大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻  
 \*\* 正会員 工 博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻  
 \*\*\* 正会員 東北大学大学院教授職員 工学研究科土木工学専攻

3. 結果と考察

3.1 層流実験 (Case 1) の結果

層流時には、正弦振動流に対する解の重ね合わせにより厳密解が得られる。以下に図中に示される層流解はこのようにして得たものである。

図-2に実験結果を示す。(A)は境界層外縁流速 $U$ 、(B)、(C)は境界層内流速 $u$ であり、また、(D)の底面せん断力 $\tau_0$ は、底面近傍の速度勾配から算出した。また、図-3には平均流速の鉛直分布を示した。境界層外縁流速に比べ、壁面近傍流速や底面せん断力の波形は大きく異なるものである。特に、矢印で示した波ではこれが顕著である。正弦波の場合には、境界層内でもやはり正弦的な流速・せん断力となり、位相がずれるに過ぎない。これに対して、不規則波では図-2(B)、(C)、(D)の様に境界層内で波形自体が変化している。このように、正弦

波の知見を不規則波に準用することには限界がある。

図-3の実験値と解析解は極めて良好な一致を示している。

図-4は、図-3(D)に示したせん断力から得られる応答関数 $H_r(f)$ である。実験値は理論式

$$H_r(f) = \frac{\sqrt{2} \beta \mu \omega}{\sinh kh} \dots\dots\dots (3)$$

と良い一致を示している。ここで、 $\mu$ :粘性係数、 $\omega$ :角周波数、 $\beta = (\omega/2\nu)^{1/2}$ である。

図-2(E)の○印は、個々の波の峰位相・谷位相ごとに境界層厚さの実験値 $\delta_{exp}$ を求めたものである。ここで、境界層厚さの定義は、Jensen et al. (1989)による。個々の波毎に大きな変動があることが判る。太い横線 $\delta_{1/3}$ は有義波の諸元を用いて正弦波の算定式で計算した値であり、実験値の平均値に近い結果を与える。一方、●印は、各峰位相・谷位相を正弦波の半分と見なし、同じ周期・流速振幅を持つ正弦波動と仮定して境界層厚 $\delta_{sin}$ を計算したものである。実験値(○印)に比べて変化が緩慢で

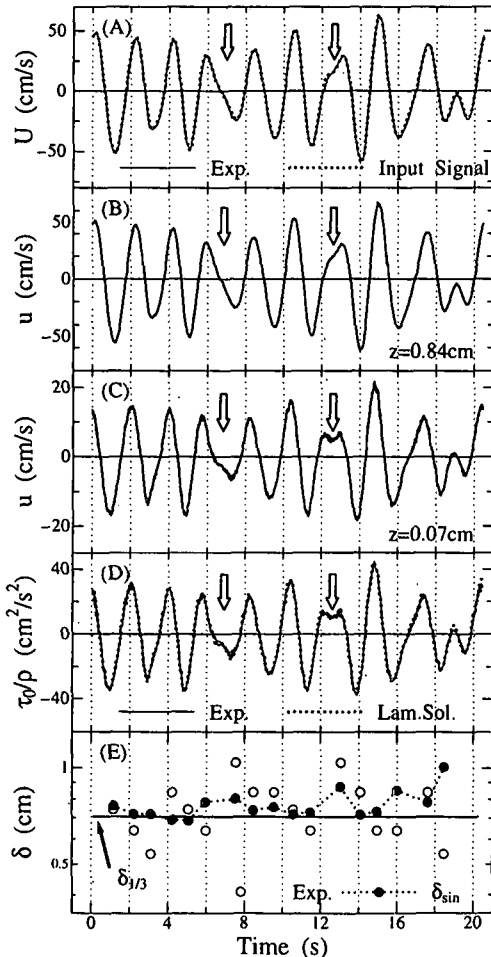


図-2 境界層外縁流速・底面近傍流速・底面せん断力・境界層厚さ (Case 1)

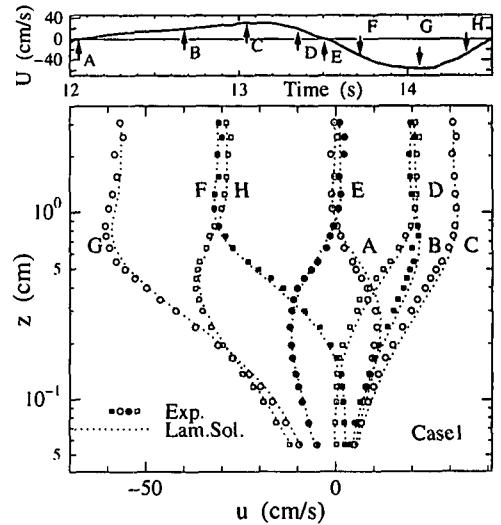


図-3 流速分布 (Case 1)

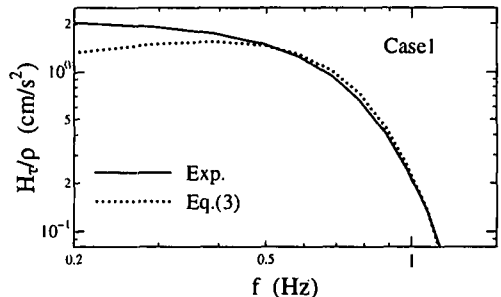


図-4 せん断力の応答関数 (Case 1)

あり、先の結果と同様に、やはり正弦波への置き換えの限界を示している。

$\delta_{exp}/\delta_{sin}$  の比は、波形の非対称性を表すパラメータ  $t_1/t_2$  と明らかな関係が見られる (図-5)。ここで、 $t_1$ 、 $t_2$  の定

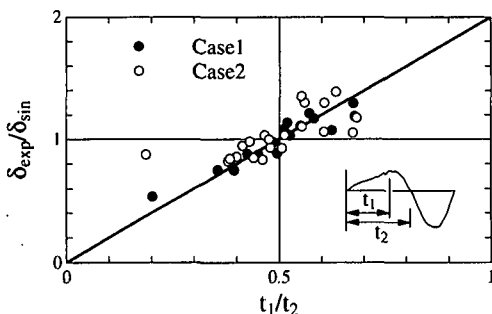


図-5 境界層厚さ比  $\delta_{exp}/\delta_{sin}$  と  $t_1/t_2$  の関係 (Case 1, Case 2)

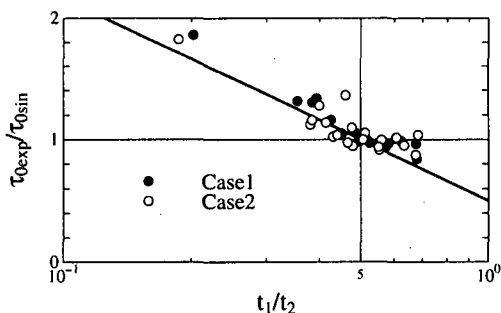


図-6 せん断力比  $\tau_{0exp}/\tau_{0sin}$  と  $t_1/t_2$  との関係 (Case 1, Case 2)

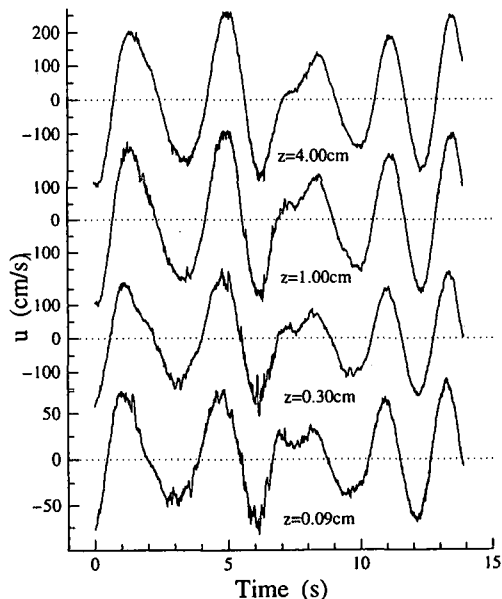


図-7 流速波形 (Case 3)

義は図-5 に示した。正弦波では  $t_1/t_2=0.5$  であり、この値が 0.5 より小さい時、正弦波より過大な加速度が作用していることを意味している。

同様に、せん断力最大値の実測値と正弦波と仮定した計算値の比  $\tau_{0exp}/\tau_{0sin}$  についてもやはり  $t_1/t_2$  との関係が認められる (図-6)。図-5、図-6 より、加速度の効果が大きい時 ( $t_1/t_2 < 0.5$  の時) に、正弦波よりも薄い境界層厚となり、逆に底面せん断力については正弦波よりも大きな値を持つことが判る。図-5、図-6 において、比較的ばらつきの少ない関係を示すことから、単純な正弦波への置き換えに加え、さらに、加速度の大小を表す無次元数  $t_1/t_2$  を加味することにより、境界層内の特性値について比較的良好な算定を得ることが分かる。

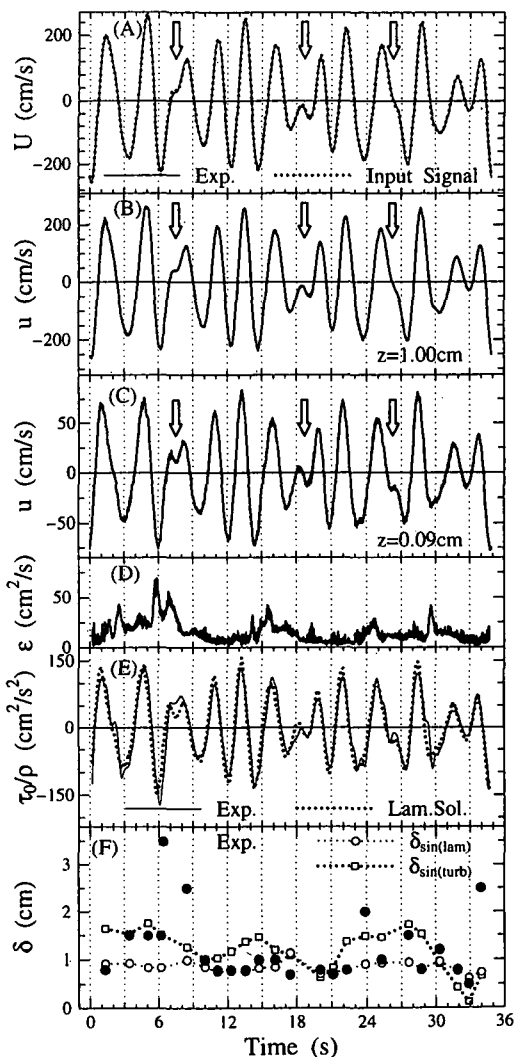


図-8 境界層外縁流速・底面近傍流速・底面せん断力・ $\epsilon$ ・境界層厚さ (Case 3)

3.2 乱流実験 (Case 3) の結果

図-7には流速波形の生データを示した。壁面から離れた  $z=4.00$  cm では乱れが極めて微弱である。一方、壁面近傍では始めの第二波あたりまで強い乱れが見られるものの、10.5 s以降では乱れが減衰し、ほぼ層流状態となる。このように、本ケースの様に移移限界近くの条件下では波の大小に応じて乱れに間欠性が見られる。この点が規則波動と大きく異なる点である。

図-8には、平均流速波形、底面せん断力ならびに次式で定義される  $\epsilon$  を示した。 $\epsilon$  は層流解からのずれを定量的に評価するために、層流解との差の絶対値の積分値を求めたものである。

$$\epsilon = \int |u_{meas} - u_{lam}| dz \dots\dots\dots (4)$$

ここで、添え字 meas, lam はそれぞれ実験値と層流解を示す。また、図中のせん断力は、実測された速度分布を運動量方程式に代入して求めたものである。

まず、図-2(A)と同様に入力信号は実測波形と良く一致しており、所期の不規則振動が得られている。境界層内流速  $u$  は、先の Case 1 と同様に境界層外縁流速  $U$  と大きく異なる場合があり、図中の矢印を付した波でこれが著しい。

図-8(D)の  $\epsilon$  と図-9の乱れ強さ ( $x$  方向成分) のコンター図を比べると、両者はほぼ同調して変動していることが分かる。これは、強い乱れの発生により層流の速度分布が破壊されることを表す。図-9の 7 s 以降に乱れが弱まると  $\epsilon$  も減少し、層流の速度分布に戻っている。このような速度分布の変化過程をより詳細に示したのが図-10(a)、図-10(b)である。DからEの減速位相に強い乱れが発生し、速度分布が層流解から外れてくる。その後、IからKの位相にかけても依然層流解からズレが見られるが、L以降は層流の速度分布を示している。

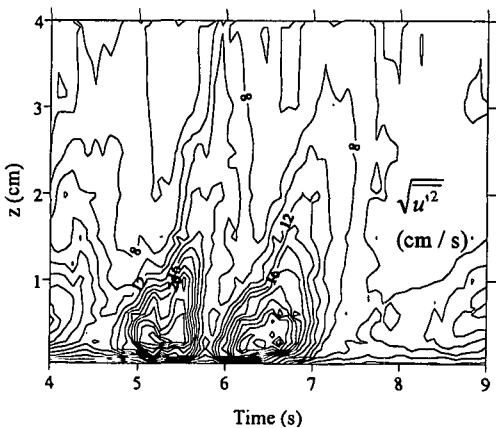


図-9 乱れ強さのコンター図 (Case 3)

このような乱れの間欠的な発生は、せん断力波形(図-8(E))にも影響を及ぼしている。すなわち、乱れが強い位相では、層流解からのずれが大きく、主流との間の位相差が減少している。図-11に示した底面せん断力の応答関数にも層流からのずれが認められる。

図-8(F)は境界層厚さの変動を示す。黒丸は実験値であり、また、白抜きマークは図-2(E)と同様に正弦波との等価性を仮定し、層流 (○) および乱流 (□) の算定式で計算を行ったものである。ここで、乱流時の算定は Sana and Tanaka (1995) による。乱れ強度の消長に応じて、実験値は二つの式による算定値の間を移動している。

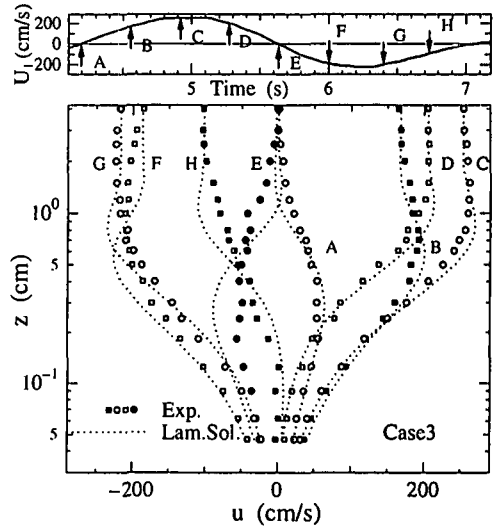


図-10(a) 流速分布 (Case 3,  $t=4.1$  s~7.2 s)

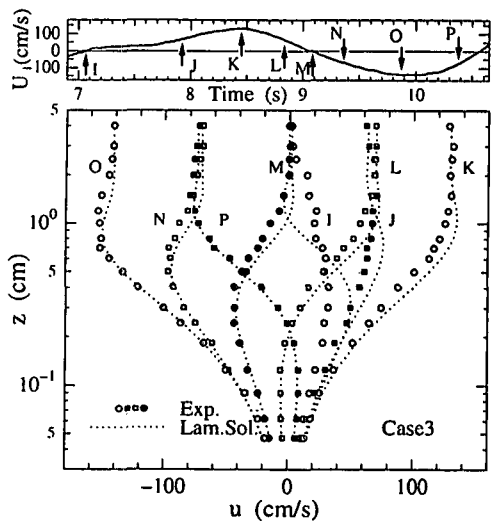


図-10(b) 流速分布 (Case 3,  $t=6.9$  s~10.7 s)

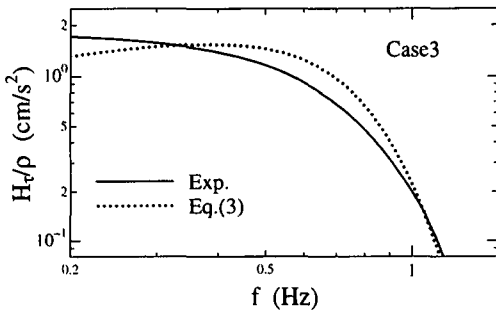


図-11 せん断力の応答関数 (Case 3)

#### 4. おわりに

本研究では、不規則波動下における底面境界層に関する実験を行った。レイノルズ数の低い層流実験においては、厳密解との一致が確認され、実験の精度が確認された。また、正弦波動境界層とは異なる興味深い現象が観察された。一方、よりレイノルズ数の高い遷移域に近い条件下での実験では、間欠的な乱れの発生により、流速分布・底面せん断力などの境界層特性が変化することが認められた。

著者らの知る限り、不規則波底面境界層を対象とする詳細な実験的検討は、本実験を除いてこれまでになされていらない。より精緻な砂移動モデルの構築のためには、このような不規則波動下での境界層特性を理解しなければならぬ。今後、現地スケールに対応する高レイノルズ数の下での実験を行う予定である。

**謝辞：**本研究で使用した不規則振動流発生装置の制作にあたり、鹿児島大学海洋土木工学科・中村和夫技官より多くの技術的な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。また、本研究に対して文部省科学研究費の補助を受けたことを付記する。

#### 参考文献

- 佐藤慎司, Michael B. Kabiling (1994): 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 401-405.
- 光信紀彦・佐藤慎司 (1989): 不規則波浪場での底面流速および底面摩擦の代表値の取り扱いについて, 土木学会第 44 回年次学術講演会講演集, II, pp.770-771.
- ムスタファアタウスサマド・田中 仁 (1998a): 不規則波動境界層の特性に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第 14 巻, pp. 113-118.
- ムスタファアタウスサマド・田中 仁 (1998b): Oscillatory bottom boundary layer under irregular waves, 応用力学論文集, 第 1 巻, pp. 747-755.
- ムスタファアタウスサマド・田中 仁 (1998c): 不規則波動下の底面せん断力特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 91-95.
- Jensen, B. L., Sumer, B. M. and Fredsøe, J. (1989): Turbulent oscillatory boundary layer at high Reynolds numbers, J. Fluid Mech., Vol. 206, pp. 265-297.
- Myrhaug, D. (1995): Bottom friction beneath random waves, Coastal Engineering, Vol. 24, pp. 259-273.
- Sana, A. and Tanaka, H. (1995): A full range equation for wave boundary layer thickness, Advance in Hydro-Science and -Engineering, Vol. II, pp. 1487-1494.