

底面波動境界層における乱れに関する研究

田 中 茂 信*・野 田 英 明**

1. はじめに

従来波動境界層に関する研究は平均流のみを扱ったものが大部分であった。ところが、ごく最近になって乱れを扱った研究が発表されるようになり、波による海底面近くの流れの構造がかなり明らかにされるようになった。

この研究は、海底近くの波による水粒子運動の実態把握を主目的として、底面近くの流速を測定して、その結果を検討したものである。

流速は日野・大西¹⁾が示した集合平均の概念を適用して平均流速と変動速度に分離して、変動速度から乱れの強さ、VITA (Variable Interval Time Averaging) 条件抽出法²⁾を適用した変動速度の急変現象、粗度周辺における乱れエネルギーの分布等について検討する。

2. 実験装置、実験方法および資料整理方法

実験は鳥取大学にある長さ 25 m、幅 60 cm、高さ 1 m の波動水槽を用いて行なった。水槽の一端にはフラッター式造波機が、他端には 1/10 勾配斜面上にステラシートを敷いて消波工とした。流速および波高は水槽のほぼ中央部で測定した。波高は容量式波高計で、また流速は熱膜流速計（流向判定不可）および超音波流速計（流向判定可）を用いて測定した。なお、造波機の性能上、十分な乱れを発生できないため、測定部分 3.8 m の範囲

に、図一1 に示す三角形粗度（高さ Z_R 、中心間隔 l ）を設置して乱れを発生させた。同図には流速測定点をも示してある。

表一1 は、実験条件を示すものであって、すべての実験は水深 $h=40$ cm と一定に行なった。ここに、 H は波高、 T は周期、 L は波長、 u_b は微小振幅波理論にもとづく底面最大水平水粒子速度、 $\delta=\sqrt{\nu T/\pi}$ (ν : 水の動粘性係数)、 $R_\delta=u_b\delta/\nu$ である。

表一1 実験条件

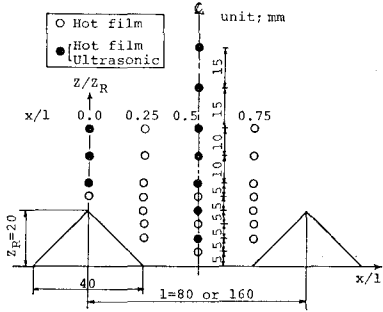
Run	H (cm)	T (sec)	L (cm)	l (cm)	u_b (cm/s)	δ (cm)	R_δ	l/L
1	6.8	1.47	255	8	12.6	0.068	86	0.031
2	6.4	1.47	255	16	11.8	0.068	81	0.063
3	9.5	1.48	257	16	17.7	0.069	121	0.063
4	8.4	1.09	168	16	11.4	0.059	67	0.095
5	5.2	1.09	168	16	7.1	0.059	42	0.095
6	4.7	1.92	352	16	9.9	0.078	78	0.045
7	7.4	1.92	352	16	15.6	0.078	122	0.045

波高計および流速計の出力はデータ・レコーダに記録した後、10 msec 間隔で約 90 sec 間（43~75 波分に相当）の記録を AD 変換した。水面変動の記録から波の峯の位相を初期点として、流速の位相集合平均を算出し、これと流速測定値との差を変動速度とした。集合平均流速および変動流速はさらに一度、カセットテープにデジタル値として記録し、後の種々の解析に用いた。なお、これらの処理はすべてマイクロコンピュータ（TEAC 社製 PS-80）によった。

3. 実験結果および考察

3.1 流速の位相集合平均と変動速度

波動による水粒子運動は基本的には非回転の周期運動であるが、レイノルズ数が非常に大きい場合や底面に粗度が存在する場合には底面付近の境界層における水粒子運動は乱される。したがって粗度近くの流速は周期的変化と不規則変動の混在したものとなる。そこで不規則変動を含む水粒子運動を周期的な主流と不規則変動に分けて取り扱うほうが、平均流および変動速度の特性や両者の関係を調べるためには都合が良い。そこで、本研究では、前述したように位相集合平均を用いて平均流速と変



図一1 流速測定点

* 正会員 工修 建設省土木研究所 海岸研究室
** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部海洋土木工学科

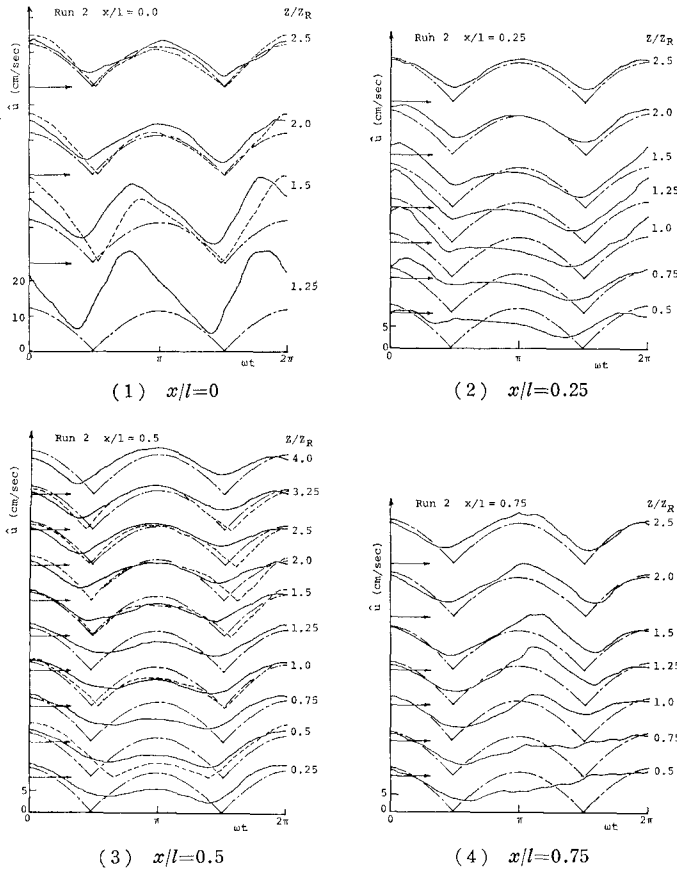


図-2 集合平均流速の時間的变化

動速度を分離した。

ここでは示していないが、実験波の波形はストークスの第3近以解とほぼ一致していた。図-2(1)~(4)は x/l および Z/Z_R の種々の値における集合平均流速の時間的变化を波の周期にわたって示したものであり、熱膜流速計による結果(実線)はそのまま、ストークス波理論(一点鎖線)と超音波流速計(破線)の流速は絶対値で示してある。図-2より、底面からの高さ Z と粗度高さ Z_R との比 Z/Z_R が 2.0~2.5 では各流速計に

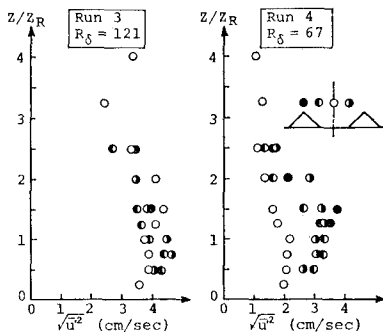


図-3 $\sqrt{u'^2}$ の鉛直分布

よる流速測定値と理論値はかなりよく一致しているが、 $Z/Z_R < 2$ では $x/l=0$ の場合、極大値は理論値の 2~2.5 倍となり位相は約 $\pi/4$ 進んでいることがわかる。 $x/l=0.25$ の場合位相 $0 \sim \pi/2$ において、また $x/l=0.75$ では位相 $\pi \sim 3\pi/2$ において流速は理論値より大きくなる。さらに $x/l=0.5$ では沖向き流速が小さく、岸向き流速が大きくなる。

図-3 は変動流速の全測定時間における自乗平均値の鉛直分布を示すものであって、図中の ●, ○, ○ および ○ 印はそれぞれ $x/l=0.0, 0.25, 0.5$ および 0.75 における実験値を表わしている。レイノルズ数 R_s が小さい場合、乱れは弱いことおよび粗度からの距離によって乱れの強さが異なる傾向がみられる。逆に R_s の値が大きい場合、粗度からの距離にかかわらず乱れは強くなることわかる。

3.2 VITA による条件抽出

VITA (Variable Interval Time Averaging) による条件抽出法は、定常流における突発的現象の研究に適用されているもので、Blackwelder・Kaplan⁹⁾によって用いられた方法で、変動量の時間変化がその時間平均値に比べて大きな値をとるとき、そこに異なった構造が現れるとして条件抽出するものである。変動流速 $u'(t)$ の VITA を

$$[u'(t, T_1)] = \frac{1}{T_1} \int_{t-T_1/2}^{t+T_1/2} u'(s) ds \quad \dots\dots\dots (1)$$

で定義する。ここに T_1 は平均時間であり、したがって時間平均 $\bar{u}'$ は $T_1 \rightarrow \infty$ として得られ、次式で与えられる。

$$\bar{u}' = \lim_{T_1 \rightarrow \infty} [u'(t, T_1)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

次に変動流速の局所分散 [var] を

$$[\text{var}(t, T_1)] = [u'^2(t, T_1)] - [u'(t, T_1)]^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

で定義し、さらに条件抽出のための識別関数 $D(t)$ を次のように定義する。すなわち、

$$D(t) = \begin{cases} 1: & [\text{var}(t, T_1)] > k u'^2_{rms} \\ 0: & \text{それ以外のとき} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに k は閾値と呼ばれる量であり、 u'_{rms} は変動速度の自乗平均値である。この識別関数を実際に求めるには T_1 と k を決めなければならないが、 T_1 と k を決定する明確な方法はなく、試行錯誤により現象を捕えるのに最適と思われる値を見い出さなければならない。本研究では $k=1$ とし、 T_1 のみ変化させた。図-4(a)は Run 1 の $x/l=0.5, Z/Z_R=1$ における変動流速 $u'(t)$

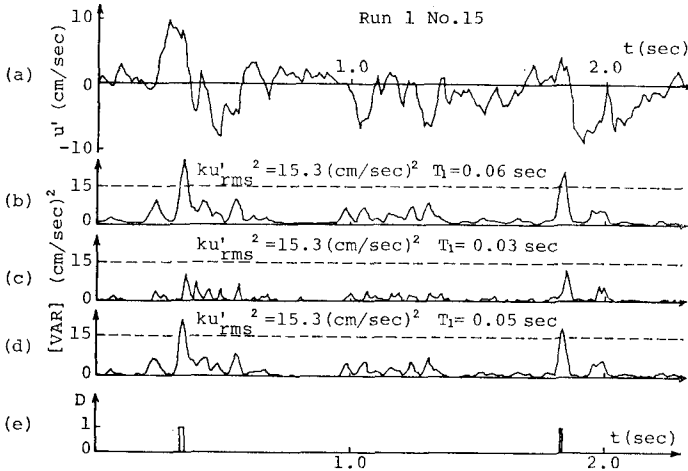


図-4 VITAによる条件抽出説明図

の時間変化を、また同図 (b)~(d) はそれぞれ $T_1 = 0.06, 0.03$ および 0.05 sec とした場合の変動流速の局所分散を示すものである。なお図中の破線は ku'_{rms}^2 の

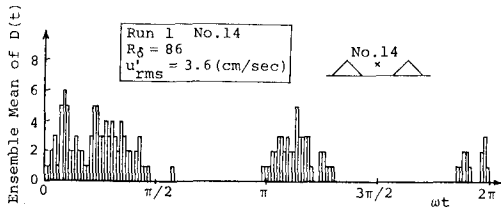


図-5 識別関数の集合平均

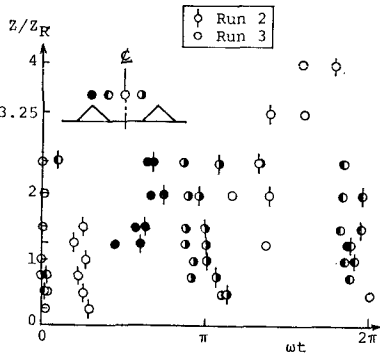


図-6 識別関数の集合平均が最大となる位相

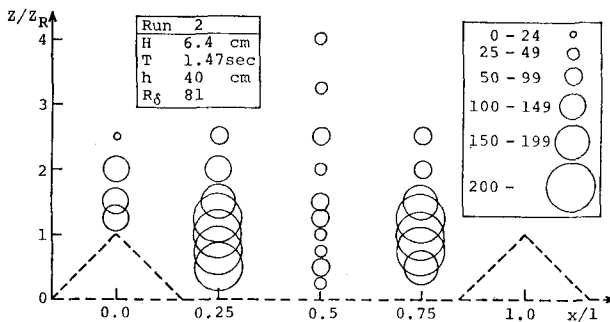


図-7 識別関数の総和の空間的分布

値を表わしている。同図 (a) より、 $t = 0.35$ および 1.85 sec 付近に急激な速度変動が現れているのがわかる。一般に識別関数は T_1 が短いと、分解能は良いが感度が悪くなり、逆に T_1 が長い場合、感度は良いが分解能が悪くなる。以上の結果から本研究では $T_1 = 0.05$ sec を採用し、同図 (e) にその識別関数を示した。図-5 はこのようにして求めた識別関数の集合平均の一例を示すもので、位相 $0 \sim 3\pi/8$ および $\pi \sim 5\pi/4$ で突発的な速度変動が頻発していることがわかる。図-6 は識別関数の集合平均が最大となる位相を示したものであって、 x/l の値がいずれの場合も突発的現象が頻発する

位相は、 R_δ の値が大きいくほど早くなることがわかる。さらに $x/l = 0.25$ では位相 0 付近、 $x/l = 0.75$ では π 付近に突発的速度変動が頻発している。これは粗度の背後に渦が生じていることに関係付けられるであろう。図-7 は測定時間内における識別関数の総和を円の大ききで示したものであって、このケースでは粗度によって起こされた渦は $x/l = 0.5$ まで到達するころにはかなり減衰しているため、 $x/l = 0.5$ におけるその値は小さくなっている。しかし R_δ の大きい他のケースでは $x/l = 0.5$ においてもかなりの頻度で突発的速度変動が現われることがわかっている。

3.3 変動流速のパワースペクトル

図-8 は Run 4 の $x/l = 0.25$ における変動流速のパワースペクトルを示したものであって、 Z の値が大きいく

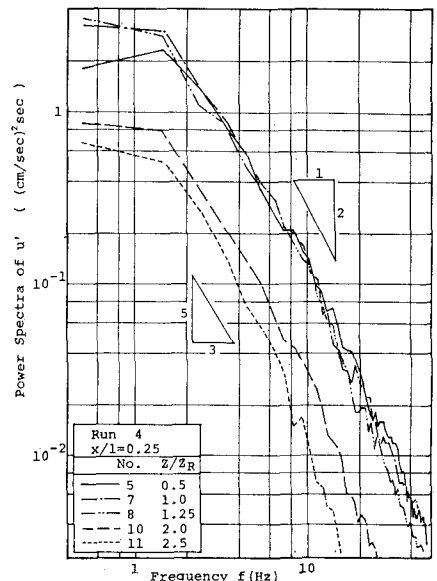


図-8 変動流速のパワースペクトルの鉛直方向変化

なるにつれて変動流速のスペクトルが減少する傾向がわかる。また周波数 $f > 2$ の範囲で変動流速のパワースペクトルは空間的位置にかかわらず、 f のほぼ

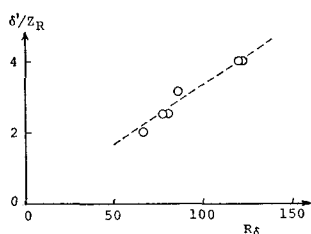


図-9 R_δ と δ'/Z_R の関係

—5/3—2 乗に比例する。図-9は、 δ'/Z_R と R_δ との関係を示すものであって、 δ' は $Z/Z_R=1$ における変動流速のスペクトルに対して、その大きさが 1/10 に減少する高さを示している。 δ'/Z_R の値は R_δ の値に比例して大きくなることがわかる。

4. ま と め

本研究は波動水槽の底面に三角形粗度を置き、熱膜流速計と超音波流速計により粗度周辺を測定し、位相集合平均を用いて平均流と変動速度を分離して検討を加えてきたが、それらの結果を要約するとつぎのようになる。

- 1) Stokes の第3近以解による理論値と測定流速が一致する下限は $Z/Z_R=2.0 \sim 1.5$ であった。著者らの実験では $\delta=0.059 \sim 0.078$ cm であり、層流境界層厚 δ_t を $\delta_t=10\delta$ とすると $\delta_t=0.59 \sim 0.78$ cm 程度となるが、人工粗度を用いた場合乱流境界層厚 δ_t は $\delta_t=3 \sim 4$ cm となり、境界層の厚さが急激に増大する。本実験における変動流速の自乗平均値は最大値 ($Z/Z_R=1.0$) で 5 cm/sec 程度であった。非回転理論による底面水平方向流速の最大値が 7~18 cm/sec

であるので $[\sqrt{u'^2}/U]_{\max}=5/18=0.28$ となる。

- 2) Jonsson⁴⁾によると、底面のごく近くでは流速は対数分布に従うといわれているが、その傾向は明確ではなく、この付近の流速分布についてはさらに詳細に観察する必要がある。

- 3) レイノルズ数 R_δ が小さい場合：粗度中央部の集合平均流速の振幅の鉛直分布は高さの増大とともに減少する。変動流速の自乗平均値は粗度中央部において他の場所より小さく、鉛直方向の変化が顕著でない。また突発的な速度変動は粗度周辺に限られ、粗度中央部では非常に少なくなる。

レイノルズ数 R_δ が大きい場合：粗度中央部の集合平均流速の振幅はほぼ粗度と同じ高さにおいて最大値をとる。変動流速の自乗平均値は鉛直方向に大きく変化する。また突発的な速度変動は、空間的位置にかかわらず頻発する。したがって変動流速のパワースペクトルの水平方向変化も少ない。

参 考 文 献

- 1) 日野幹雄・大西亮一：浅水表面波の粗底上の乱流構造，第18回海岸工学講演会講演集，pp. 83~91, 1971.
- 2) 小橋安次郎・一条真古人・桜井昭次・石黒 修：逆圧力勾配のある乱流境界層の壁近傍での組織運動，日本航空宇宙学会誌，第28巻，第318号，pp. 32~40, 1980.
- 3) Blackwelder, R. F. and R. E. Kaplan: On the wall structure of the turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., Vol. 76, part 1, pp. 89~112, 1976.
- 4) Jonsson, I. G.: Measurements in the turbulent wave boundary layer, 10th Congress of IAHR, pp. 85~92, 1963.