

平坦床上および斜面上での波と流れに関する実験

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON UNIFORM AND NON-UNIFORM BOUNDARY LAYER UNDER WAVE AND WAVE-CURRENT COMBINATIONS

スバラティド・セリー・田中 仁・首藤伸夫

By Seree SUPHARATID, Hitoshi TANAKA and Nobuo SHUTO

Flume experiments were carried out in order to study the velocity field in the boundary layer under wave and wave-current combinations. These included both smooth and rough of flat and sloping beds. The particle velocity was measured by an LDV. The particle velocity on the sloping bed was found to follow the logarithmic law of wall as for the flat bed. However, significant differences in the time mean velocity and the mass transport velocity for the combined wave-current flows are found. The comparisons in terms of the friction factor and roughness parameter were made with several theoretical models.

Keywords: Uniform and Non-uniform boundary layer, friction factor

1. はじめに

波と流れによる底面摩擦を予測するモデルは現在までにいくつか発表されている。しかし、これらのモデルについて総合的な比較を行える程度の十分なデータは、今までのところ蓄積されてはいない。

従来の波のみあるいは波・流れ境界層に関する実験的検討は、振動流装置、振動平板、造波水路など水平床を有する実験装置において行われてきた。これらの実験において、境界層は主流方向に一樣である。これに対し、場所的に非一樣な波動境界層に関する実験としては、斜面上の現象を扱ったKirkgoz¹⁾がある程度である。著者らの知るところでは、波・流れ共存場に関してはこのような非一樣な境界層を扱った実験は見あたらない。そこで、本研究では、水平床上および斜面上の波および波・流れ共存場の境界層について、実験的な検討を行った。実験では乱れ成分の計測も行っているが、本論文ではおもに平均速度に関する報告を行う。

2. 実験方法およびデータ処理方法

実験は図-1に示した全長14.5m、幅30cm、高さ55cmの造波水路で行われた。水路中央部の側面はガラス製

である。一方向流の供給方向は固定し、造波機の設置位置を変えることにより、順流および逆流の実験を行った。

水平床の実験では図-1に示した斜面を取り外し、全ケースにおいて水深を30cmに保った。実験は、底面

* 学生員 M.Eng. 東北大学大学院 博士後期課程

(〒 980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 正会員 工博 東北大学工学部助教授 土木工学科

(同上)

*** 正会員 工博 東北大学工学部教授 災害制御研究センター

(同上)

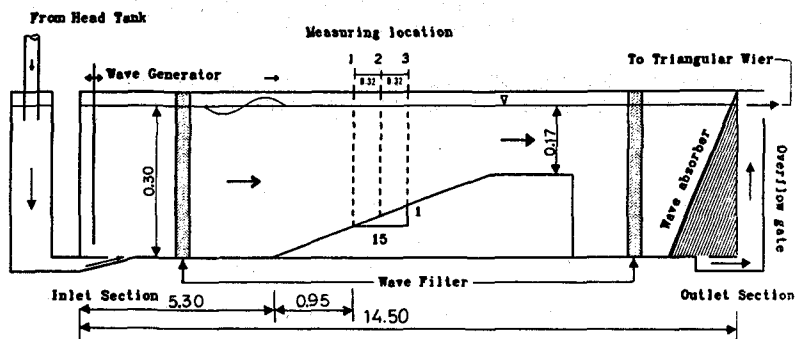


図-1 実験装置(斜面あり, 順流の場合)。

表-1 実験条件。

Flat Bed Experiments(rough)

Flow Descrip.	Run	Wave dir.	Q (cm ³ /s)	T (sec)	D (cm)	H (cm)	RE
Current	C1CRF	-	232	-	30	-	23.190
	C1ORF	-	232	-	30	-	23.190
Wave	WRFF	-	-	1.3	30	11.2	12.165
Wave and Current	WC1CRF	Co-	232	1.3	30	10.5	11.958
	WC1ORF	Op-	232	1.3	30	9.4	7.595

Sloping Bed Experiments(rough)

Flow Descrip.	Run	Sta	Wave dir.	Q (cm ³ /s)	H ₀ (cm)	T (sec)	D (cm)	H (cm)	RE
Cur. Alone	C1CRS	1	-	232	-	-	23.5	-	23.190
		2	-	-	-	-	21.5	-	-
		3	-	-	-	-	19.5	-	-
	C1ORS	1	-	232	-	-	26.3	-	23.190
		2	-	-	-	-	24.3	-	-
		3	-	-	-	-	22.3	-	-
Wave Alone	WRSF	1	-	-	8.74	1.3	23.5	8.48	10.214
		2	-	-	-	-	21.5	8.56	11.834
		3	-	-	-	-	19.5	8.66	13.882
	WC1CRS	1	Co-	232	7.83	1.3	23.5	7.49	9.051
		2	-	-	-	-	21.5	7.25	9.728
		3	-	-	-	-	19.5	6.94	10.332
Wave and Cur.	WC1ORS	1	Op-	232	7.94	1.3	26.3	8.02	6.708
		2	-	-	-	-	24.3	8.89	9.201
		3	-	-	-	-	22.3	9.43	11.552

where q = Discharge per unit width
 T = Wave period
 D = Water depth, H = Wave height
 H_0 = Deep water wave height
 RE = $U_0 D / \nu$ for current alone
 U_0 = $U_0 a_0 / \nu$ for wave alone and wave-current combinations
 U_0 = Depth-averaged current velocity
 a_0 = Maximum wave velocity at the bottom (Linear wave)
 ν = Kinematic viscosity

3. 実験結果

3.1 平坦床水路での水粒子速度

図-2, 3, 4はそれぞれ, 波のみのケース(WRFF), 順流のケース(WC1CRF)および逆流のケース(WC1ORF)の測定結果である。表面波形はストークスの5次近似理論により比較的よく表現されるが, 図-3(a), 4(a)に見られるように, 共存場の流速について実験値からのずれが顕著である。これは, 非回転波動理論では流れを一様分布とすることによる。一方, 著者らの一人によって提案された流れ関数(Tanaka²⁾)による計算値は比較的良い一致を示しているものの, 細部では差異がみられる。底面近くでの実測流速は対数則に従っている。これは, 波・流れ共存場の境界層内流速分布として, 対数則を仮定するモデル(例えば,

が滑面の場合および粗面の場合について行われた。

滑面実験時には底面を滑らかなアクリル板とし, 粗面実験においては三角形粗度を張り付けた。粗度の高さは4mm, 間隔は測定部付近2m区間では4cm, これに接続する上下流2m区間では15cmとした。流速測定は水路中央付近の一測線で行われ, 粗面の場合には粗度のトラフ位置で行った。

斜面上の実験では, 図-1に示す様に1/15勾配の斜面を設置し, 図示した3測線で流速測定を行った。水平床の場合と同様に, 滑面および粗面に関して実験を行った。

流速は2成分レーザー・ドップラー流速計によって測定した。また, 同時に測定位置での水位変動を容量式波高計によって測定した。これらのデータを100Hzでサンプリングし, 処理を行った。

測定された流速の瞬時値 u は次式のように三つの成分からなる。

$$u(x, z, t) = \bar{u}(x, z) + \tilde{u}(x, z, t) + u'(x, z, t) \quad \dots (1)$$

ここに, $\bar{u}$: 平均流成分, $\tilde{u}$: 周期的な波動成分, u' : 乱れ成分, x : 波の進行方向を正とする水平座標, z : 水路底面を原点とし鉛直上向きを正とする鉛直座標である。各位相毎の平均流速の算定には, アンサンブル平均法を用いる。すなわち,

$$\bar{u}(x, z) + \tilde{u}(x, z, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u(x, z, t+iT) \quad \dots (2)$$

ここに, n : サイクル数, T : 波の周期である。予備実験の結果から, $n=50$ とすれば十分であった。また, 粗面においては水路床から2mmの位置を z 軸の仮想原点とした。

実験条件を表-1に示す。いずれのケースにおいても水路内で碎波が生じないように条件を設定した。

Predsoe³⁾の妥当性を示している。

図-2 (b), 3 (b), 4 (b) は波の谷位相および山位相での波動成分の流速分布を示したものである。底面近くで“overshooting”と呼ばれる凸形の流速分布がみられる。

図-2 (c), 3 (c), 4 (c) を比較すると、 $z=3.0\text{mm}$ での流速波形には明瞭な差が見られないのに対し、共存場では底面から離れるに従い定常流の影響が顕著になる。共存場の境界層を波動によるものと定常流によるものとに分離して考えれば、後者に比べて前者の厚さは極めて薄く、底面近傍では波動による運動が卓越している。共存場において底質に作用する流体力を考える際には、このような境界層構造の差異に留意することが重要である。

3.2 斜面上での水粒子速度

図-5 は、波のみ (WRSF), 順流 (WC1CRS) および逆流 (WC1ORS) のケースについて、波の峰位相及び谷位相での水粒子速度の鉛直分布を示したものである。水平床上と同様に、底面近傍で対数則に従う領域が認められる。

それぞれについて波動成分 u を求め、測点 1, 3 での底面近傍のデータを拡大して示した結果が図-6 である。あわせて水位の波形も示した。

(a) の波のみの場合には、 $z=8\text{mm}$ 近くに“overshoot”現象がみられる。先に示した水平床のものに比べ、きわめて顕著である。境界層外縁流速 U_{am} に対する“overshoot”部の比率 $100 \times (\langle u \rangle - U_{am}) / U_{am}$ は、測点 1 では峰で 20%, 谷で 15% であったのに対し、測点 3 では峰で 30% に増加し、谷では逆に 10% に低減する。水位波形の変化、すなわち、峰での波形の立ち上がり、谷での平滑化がこのような変化を生み出したものと考えられる。横線で示した境界層の厚さは位相・測点によらず、ほぼ一定である。一方、(b), (c) では (a) に比べ“overshoot”の程度が小さい。これは山位相・谷位相の継続時間に代表される波形の相違を反映したのと考えられる。

3.3 平均流の変化

順流時の平均流 u の分布を図-7 に黒丸で示した。(a) は水平床、(b) は斜面での実測結果である。図中の白丸は、流量・水深を共存時のそれに一致させて行った流れのみの場合の流速 u_c である。図-7 (a) より、流れのみの場合に比べ、共存時には $z < 7\text{mm}$ では流速が低下しているが、 $7\text{mm} < z < 100\text{mm}$ では共存場の定常流成分が増大する。 $z > 100\text{mm}$ においては u は低下し、負の速度勾配の領域が見られる。一方、図-7 (b) の

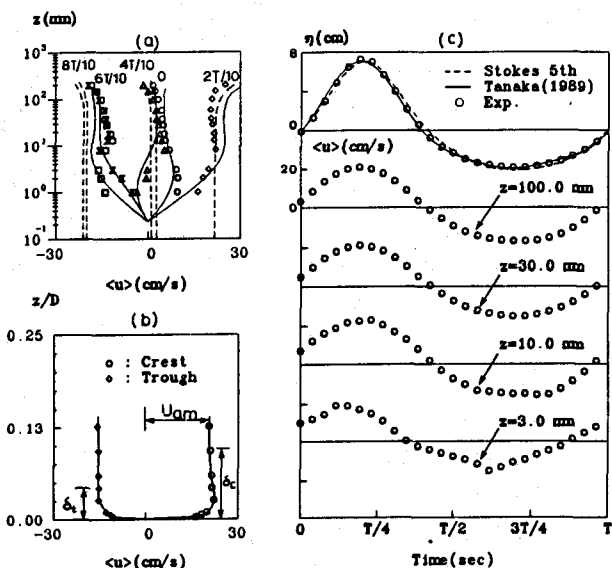


図-2 波のみのケース (WRSF) での水粒子速度。

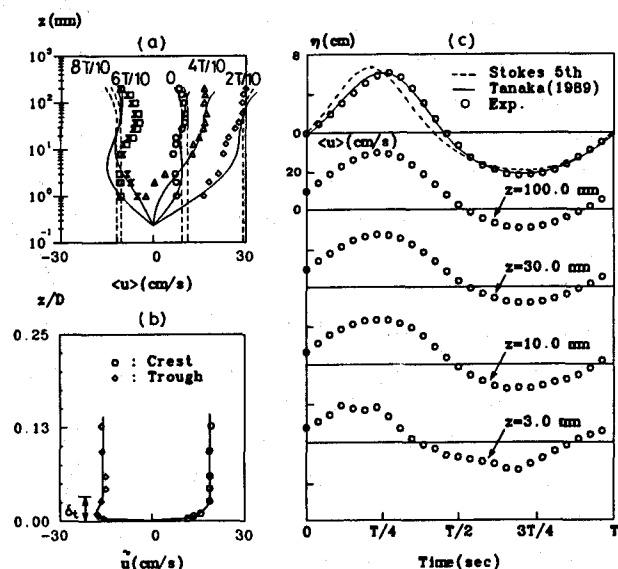


図-3 順流のケース (WC1CRF) での水粒子速度。

斜面上の実験結果では、 $z = 200\text{mm}$ まで流速の低下がみられる。同図より、従来から言われるように共存時の平均流に対し、壁面から幾分はなれた位置で対数則を当てはめると、摩擦速度およびみかけの粗度長さが流れのみの場合に比べて大きな値を持つことがわかる。

一方、図-8は逆流の場合について同様な図を示したものである。(a)、(b)ともに共存場では底面近くで増加がみられ、水表面近くでは逆の傾向がみられる。斜面では流速が増加する領域が、水平床の場合に比べ上方にまで広がっている。

波の重量による平均流の変化量 $\bar{u} - u_0$ の鉛直分布を示したものが、図-9(水平床)、図-10(斜面)である。両図の(a)は滑面で(b)は粗面で得られた同様な結果を示す。また、比較のために、水平床・滑面・正弦波・層流の仮定のもとに、Longuet-Higgins⁴⁾により得られた質量輸送速度の解を各図に実線で示した。なお、図中で、 ω は角周波数、 k は波数である。滑面・水平床の図-9(a)では、実験値は実線に近い値を示している。一方、図-9(b)の粗面の実験結果では、 $z/D > 0.2$ において実験値と計算値に近い値を示すものの、 $z/D < 1.0$ の底面近傍で大きな差異がみられる。このような傾向は、粗面上での波による質量輸送速度を扱ったBrebnerら⁵⁾およびBijkerら⁶⁾の実験結果と符合するものである。Longuet-Higginsの解からの離脱は、図-10に示した斜面のデータにおいてさらに顕著である。特に、粗面上の(b)で最も大きく差異がみられる。ただし、壁面からはなれた位置では実線に漸近する傾向がみられる。以上の実験結果より、波により生じる平均流の変化はおもに質量輸送の効果により生じるものと考えられる。

3. 4 摩擦係数

底面近くの流速分布に対数則をあてはめることにより、底面剪断応力と粗度長さを求めることができる。ただし、カルマン常数 κ は0.41とする。比較のための予測モデルとしては、Madsen and Grant⁷⁾(以下、GMと略

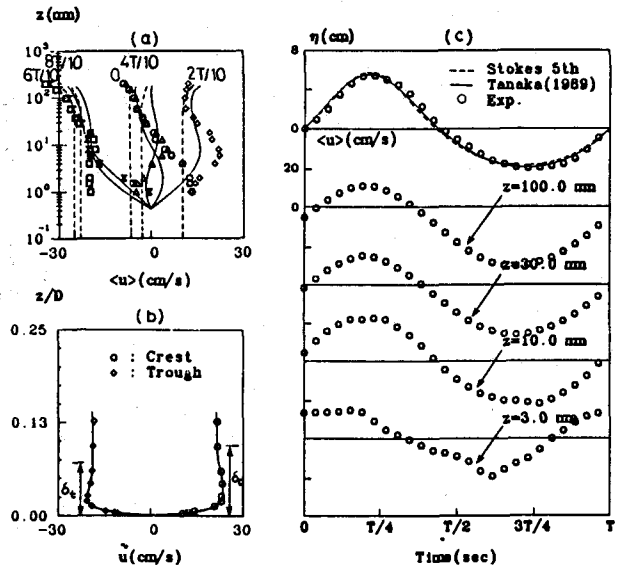


図-4 逆流のケース(WC10RF)での水粒子速度。

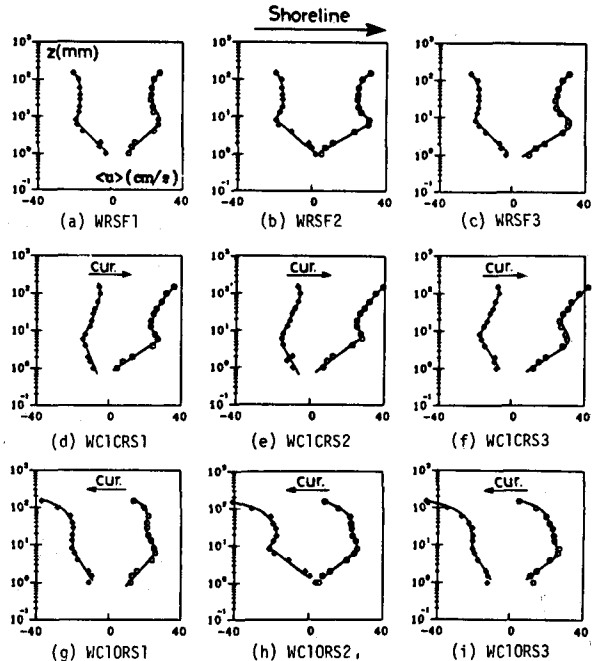


図-5 斜面でのケース(波のみ:WRSF, 順流:WC1CRS, 逆流:WC1ORS)での水粒子速度。○: Crest, ●: Trough

す。), Tanaka and Shuto⁸⁾(同, TS) Christoffersen and Jonsson⁹⁾(同, CJ1, CJ2), O'Connor and Yoo¹⁰⁾(同, OY), Myrhaug and Slaattelid¹¹⁾(同, MS)を採用する。ただし, CJ1とCJ2は波動境界層内での渦動粘性係数の分布の仮定に相違があり, 前者では一定値, 後者では直線分布である。

摩擦係数は次式で定義される。

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{f_b}{2} U_c^2, \quad \frac{\tau_{wc}}{\rho} = \frac{f_{wc}}{2} U_c^2 \quad \dots (3)$$

ここに, τ_b , f_b : 共存下での流れ成分による底面せん断力および摩擦係数, τ_{wc} , f_{wc} : 波・流れによる底面せん断力の最大値および摩擦係数, ρ : 流体の密度である。図-11に結果を示す。(a), (b)は波のみの場合である。ただし, 摩擦係数の定義式は, 式(3)で τ_{wc} , f_{wc} を波のみの場合の τ_w , f_w に置き換えたものである。実測値が幾分小さいひとつのケースを除けば, 比較的良好な対応を示している。

波・流れ共存場において, 底面剪断応力の最大値は順流の場合は峰位相で, 逆流の場合は谷位相で生じる。そこで, 順流, 逆流の場合について別々に f_{wc} を求めた結果が, 図-11の(c)および(d)である。(d)においては実験値が幾分小さい値を示す。これは, モデルに含まれていない波の非線形性の影響であると考えられる。

(e)は摩擦係数 f_b に関する結果であり, OYモデルおよびTSモデルとよい一致を示す。

図-11(f)は見かけの粗度長さ z_b の計算値と実験値を比較したものである。ただし, TSモデルおよびOYモデルでは z_b の予測は行うことが出来ない。先に示した摩擦係数に比べ, ばらつきが大きい, 諸モデルの中ではGMの誤差が最小である。以上の諸特性値に関する予測値の相対誤差の平均を求めた結果を表-2に示す。

4. まとめ

波および波・流れ共存場における流速分布の詳細をLDVにより測定した。本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- ① 底面近くの流速分布は対数則に従っている。著者らの一人により提案された流れ関数は, 流速分布を比較的良好に予測する。
- ② 底面近傍では, "overshooting"現象が見られる。特に, 斜面上ではこれが顕著にみられる。これは, 波

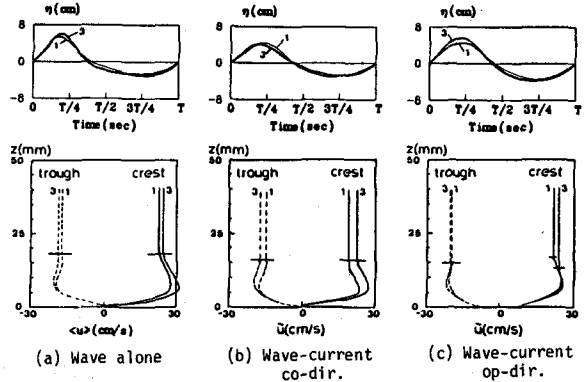


図-6 斜面での波動成分。

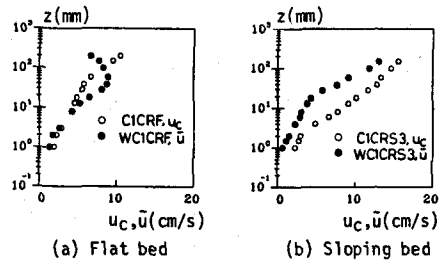


図-7 平均流の変化(順流)。

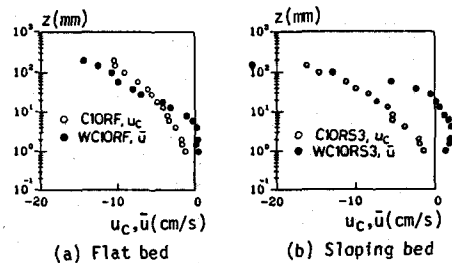


図-8 平均流の変化(逆流)。

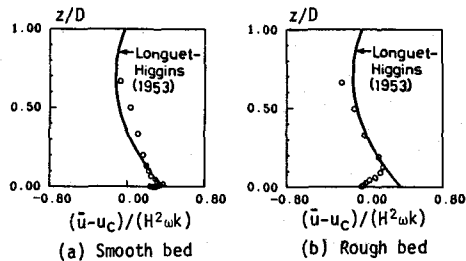


図-9 共存時の平均流 $\bar{u}$ と流れのみの速度 u_c との差(水平床)。

形の先鋭化によるものと考えられる。

Table 11

Percentage of the average of the absolute deviation

Item	GM		TS		CJ1		CJ2		OY		MS	
	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T
f_w	42	124	39	95	97	220	39	95	41	53	43	54
f_{wc}	47	122	45	115	48	218	48	89	47	202	48	68
f_s	48		20		62		72		10		50	
z_o	48		*		60		80		*		72	

(C : Under wave crest, T : Under wave trough, * : Not available)

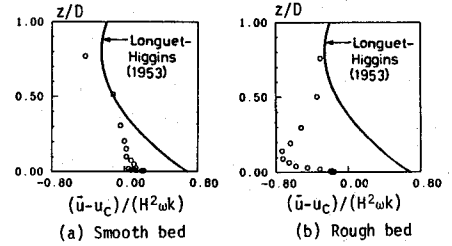


図-10 共存時の平均流 $\bar{u}$ と流れのみの速度 u_c との差 (斜面上)

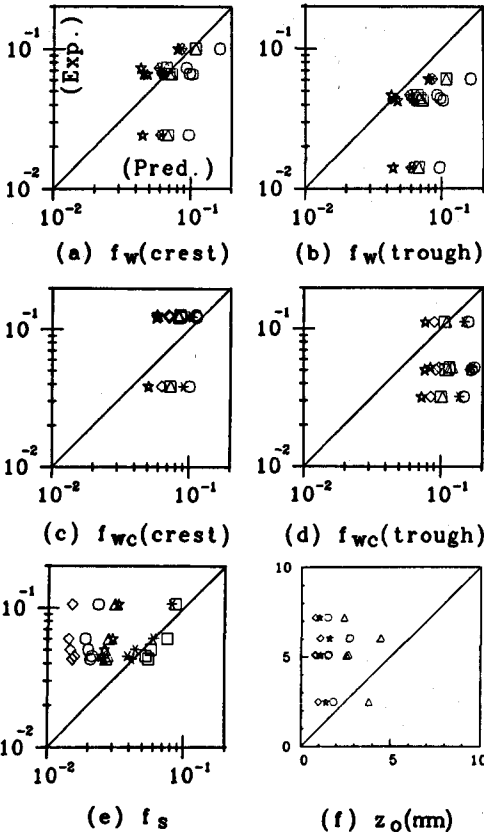
③ 波動によって平均流に対してもたらされた変化量は、水平床・滑面上の場合にはLonguet-Higginsによる質量輸送速度と近いものであった。粗度、斜面の効果は理論解からのずれを大きくする。粗面上の底面近くでの質量輸送速度の低減は、波のみのケースについては既に報告されている。このことから、平均流の変化はおもに波動に伴う質量輸送によるものと考えられる。

④ 摩擦係数等に関して、既に提案されているモデルによる予測値と実験結果との比較を行った。その結果、相対誤差の平均値として表-2に示す結果を得た。

謝 辞：実験を行うに際し、東北大学工学部卒研 津 旨大輔君の助力を得たことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) Kirkgoz, M.S.: An experimental investigation of plunging breaker boundary layer in the transformation zone, Coast. Eng., Vol. 13, pp. 341-356, 1989.
- 2) Tanaka, H.: Bottom boundary layer under nonlinear wave motion, J. Waterway, Port, Coast and Ocean Eng., Vol. 115, No. 1, pp. 40-57, 1989.
- 3) Fredsoe, J.: The turbulent boundary layer in wave-current motion, J. Hydr. Eng., Vol. 110, No. 8, pp. 1103-1120, 1984.
- 4) Longuet-Higgins, M.S.: Mass transport in water waves, Phil. Trans. Royal Soc. London, Series A, No. 903, Vol. 245, pp. 535-581.
- 5) Brebner, A., Askew, J.A., and Law, S.W.: The effect of roughness on the mass transport of progressive gravity waves, Proc. 10th Conf. Coast. Eng., pp. 175-184, 1966.
- 6) Bijker, E.W., Kalkwijk, J.P.T. and Peters, T.: Mass transport in gravity waves on a sloping bottom, Proc. 14th Conf. Coast. Eng., pp. 447-465, 1966.
- 7) Grant, W.D. and Madsen, O.S.: Combined waves and current interaction with a rough bottom, J. Geophys. Res., Vol. 84(C4), pp. 1797-1808, 1979.
- 8) Tanaka, H. and Shuto, N.: Friction coefficient for a wave-current coexistent motion, Coast. Eng. in Japan, Vol. 24, pp. 105-128, 1981.
- 9) Christoffersen, J.B. and Jonsson, I.G.: Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion, Ocean Eng., Vol. 12, NO. 5, pp. 387-423, 1985.
- 10) O'Connor, B.A. and Yoo, D.: Mean bed friction of wave-current flow, Coast. Eng., Vol. 12(1), pp. 1-21, 1988.
- 11) Myrhaug, D. and Slaattelid, O.H.: A rational approach to wave-current coefficients for rough, smooth and transitional turbulent flow, Coast. Eng., Vol. 14, pp. 265-293, 1990.



(○ : CJ1, ○ : CJ2, △ : GM, □ : TS, * : OY, * : MS)

図-11 摩擦係数と見かけの粗度長さ。