

不規則波と流れの干渉による波動場の変化

手賀夕紀子*・小林 信久**・多田 彰秀***

1. 緒 言

Tidal inlet や河口付近では流れの影響を受け、波の高さ、スペクトルや波向などが著しく変化する。波と流れの干渉に関する研究の多くは、規則波を対象としたものであり、不規則波と流れの干渉に関するものは比較的少ないのが現状である。不規則波と流れの干渉による碎波は、河口や inlet 付近に出現する砂洲等の発生機構並びに近傍の海浜安定化に係る重要な要因であり、その説明が急がれている。Hedges et al. (1985) は不規則波と流れの干渉によるスペクトル平衡領域を提案し、Suh et al. (1994) は平衡領域における TMA スペクトルの表現式を導いた。Lai et al. (1989) は、波と逆流の強い干渉の結果、碎波の発生によって共存場のスペクトルが著しく変化することを水槽実験で実証した。さらに、彼らは wave-blockage の限界値について、理論値を裏付ける結果を示した。また、上述の著者による実験結果では逆流によってスペクトルがピーク付近で増加し、高周波数の平衡領域で減少している。一方、Briggs et al. (1996) らによる inlet 付近を想定した不規則波と逆流の干渉に関する実験では、ピーク付近のみならず、平衡領域でもエネルギーの増加が観察されている。

本研究では流れ（順流および逆流）と不規則波との干渉に関する水理実験を行い、共存場における不規則波のスペクトル特性および wave-blockage について検討した。さらに、Mathisen and Madsen (1996) が提案した規則波を用いた共存場の境界層理論を適用して、本実験における共存場の底面摩擦係数を算定し、その有効性について考察を加えた。

2. 実験装置および実験手順

実験装置を図-1に示す。図中の座標は、造波板の位置を原点として造波方向に x 軸、水槽底面から上向きに z 軸、水槽横断方向に y 軸と定義した。水面変動 $\eta(t)$ は、図中点線にしめす G1, G2 および P1~P6 の 8 測線に

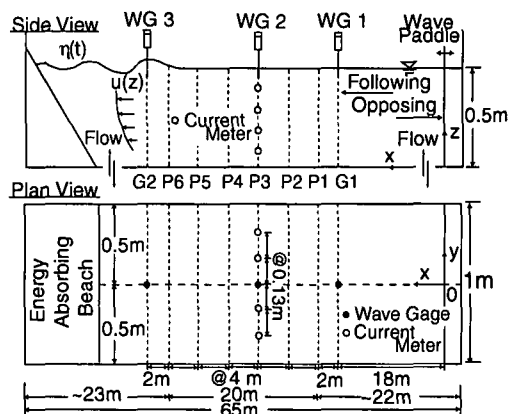


図-1 実験装置

において計測された。流速 $u(x, y, t)$ の測定箇所は、同図中の測線 P1~P6 の 6 測線で、1 測線につき鉛直方向に 4 点 ($z=0.1, 0.185, 0.3$ および 0.4 m)、水槽横断方向に 4 点 ($y=-0.26, -0.13, 0.13$ および 0.26 m) の計 16 点である。なお、水深は 0.5 m で一定とした。実験はまず流れを起こし、流れが十分に安定した後造波し、各測線における水面変動および流速を測定した。サンプリング周波数は 50 Hz で、計測時間は約 328 秒である。実験に用いた波は JONSWAP スペクトル型の不規則波であり、有義波高 H_s が約 0.09 m、スペクトルピーク周期 T_p が 0.97 sec, 1.40 sec および 2.22 sec の 3 ケースである。流れは、流速を変化させて順流と逆流で 5 ケースとした。水槽内に発生する流れと波のそれぞれの特性を調べるため、始めに流れ場と波動場の実験を行い、次いで波・流れ共存場の実験を行った。流れは鉛直方向および水槽横断方向についてほぼ一様で、加えて wave induced current の値は流れと比較して無視できるほどに小さかった。表-1 は、実験に用いた不規則波と流れの諸元をまとめたものである。表中の U および T_p は、それぞれ流れ場の実験で測定された平均流速（負号は逆流）および波動場の実験で測定されたピーク周期の値を示している。表-1 に示すように共存場に関する実験は計 8 テストを実施した。

* 正会員 MCE 西松建設(株)技術研究所
** 正会員 Ph.D. University of Delaware
*** 正会員 工修 西松建設(株)技術研究所

表-1 実験条件

Test		T_p (s)	H_{m0} (m)
wave only	W 1	0.97	0.080
	W 2	1.40	0.096
	W 3	2.22	0.095
Test		Velocity: U (m/s)	T_p (s)
wave and current	CW 1	-0.32	0.97
	CW 2	-0.32	1.40
	CW 3	-0.264	1.40
	CW 4	-0.18	0.97
	CW 5	-0.18	1.40
	CW 6	-0.18	2.22
	CW 7	0.18	0.97
	CW 8	0.18	1.40

3. 波と流れの干渉について理論的考察

3.1 Doppler-shift による共存場のスペクトル変化

波が流れの無い領域から流れのある領域へ進入したとき、2つの領域での wave action が保存されれば、不規則波と流れの共存場における波高スペクトル $S_{\eta\eta}(\omega_a, d, U)$ は、波動場での波高スペクトル $S_{\eta\eta}(\omega_a, d)$ を用い、次式で表わすことができる (Hedges et al., 1985).

$$\frac{S_{\eta\eta}(\omega_a, d, U)}{S_{\eta\eta}(\omega_a, d)} = \frac{\omega_r \left(1 + \frac{2ka_d}{\sinh 2ka_d}\right)}{2ka \left[U + \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}\right) \frac{\omega_r}{2k}\right]} \dots (1)$$

ここで、 U : 鉛直一様流速 (波の進行方向が正)、 ka : 波動場での波数、 k : 共存場での波数、 d : 水深、 ω_a : 静止座標系における角振動数、 ω_r : U とともに移動する相対座標系における角振動数であり、これら2つの角振動数の関係は

$$\omega_r = \omega_a - kU \dots (2)$$

である。なお、 k および ka は以下の分散関係式を満足している。

$$\omega_a^2 = gka \tanh ka_d \dots (3)$$

$$\omega_r^2 = gk \tanh kd \dots (4)$$

ここで g は重力加速度である。深海波に関する共存場の波高スペクトル $S_{\eta\eta}(\omega_a, U)$ は、式 (1) を変形することによって、次式ようになる。

$$S_{\eta\eta}(\omega_a, U) = \frac{4S_{\eta\eta}(\omega_a)}{\left[1 + \left(1 + \frac{4U\omega_a}{g}\right)^{1/2}\right]^2 \left(1 + \frac{4U\omega_a}{g}\right)^{1/2}} \dots (5)$$

波が逆流の領域に進行するとき、逆流によって波高およびスペクトルエネルギーは増加することが知られてい

る。また、波の周波数成分の一部については、逆流の領域にエネルギーを伝播することができず、流れと波の境界で砕波が発生し、スペクトルの平衡領域が存在する。さらに、深海波に関する共存場の平衡領域のスペクトル $S_{\eta\eta Eq}(\omega_a, U)$ は以下の経験式で与えられる (Hedges et al., 1985).

$$S_{\eta\eta Eq}(\omega_a, U) = \frac{A^* g^2}{(\omega_a - kU)^5} \frac{1}{\left[1 + \frac{2U(\omega_a - kU)}{g}\right]} \dots (6)$$

ここで A^* は定数で、約 0.05 である。式 (6) から得られる $S_{\eta\eta Eq}(\omega_a, U)$ の値は、式 (1) で計算された $S_{\eta\eta}(\omega_a, d, U)$ の上限値とした。

また、共存場の流速スペクトル $S_{uu}(\omega_a, d, U)$ は式 (1) と linear wave theory を適用して、

$$S_{uu}(\omega_a, d, U) = \left[(\omega_a - kU) \frac{\cosh kz}{\sinh kd}\right]^2 S_{\eta\eta}(\omega_a, d, U) \dots (7)$$

と表すことができる。

3.2 共存場における底面摩擦係数

Mathisen and Madsen (1996) は、規則波と流れの共存場の乱流境界層を提案した。本研究では、規則波の振幅を $H_{rms}/2$ で、周期を T_p で代表させることによって、彼らの理論を不規則波に適用し、共存場におけるエネルギー逸散係数 f_e および摩擦係数 f_w を算定するとともに、実測値との比較をおこなった。ここで H_{rms} は root-mean-square wave height である。エネルギー逸散係数 f_e は、 x 方向の波のエネルギー変化と底面摩擦によるエネルギー逸散が等しいと仮定して算定されたものである。本実験では、摩擦係数 f_w は wave Reynolds number Re の関数として与えられる。

4. 実験結果および考察

4.1 実験結果

各測線で計測された水面変動および流速の時系列データは、スペクトル解析され、計測区間内の波の変化の解析に使用された。図-2 は、水槽縦断方向のスペクトル有義波高 H_{m0} (上段) およびスペクトルピーク周期 T_p (下段) の分布が示してある。 T_p については計測区間に渡ってほぼ一定であるが、 H_{m0} は波の進行方向に減少していることが分かる。さらに、水槽内の波のエネルギー変化を調べるため、各測線における wave action ($U + C_{gr}$) $S_{\eta\eta}/\omega_r$ の変化を追跡した (C_{gr} は相対座標系における group velocity)。図-3 は、テスト CW 3 の wave action の変化をプロットしたものであり、wave action が波の進行方向に対して減少しているのが分かる。このことは、水槽の底面摩擦によるエネルギー逸散が無視で

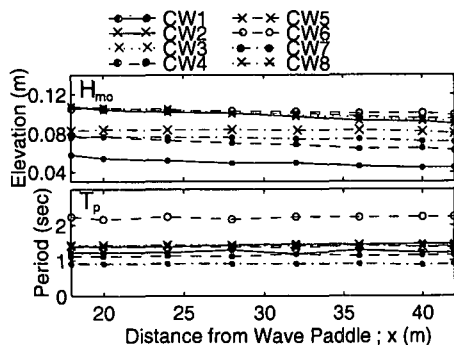
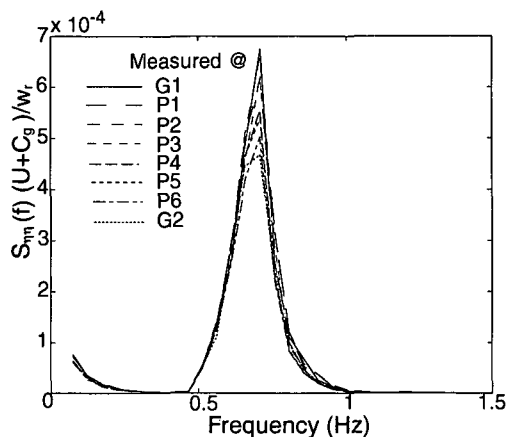
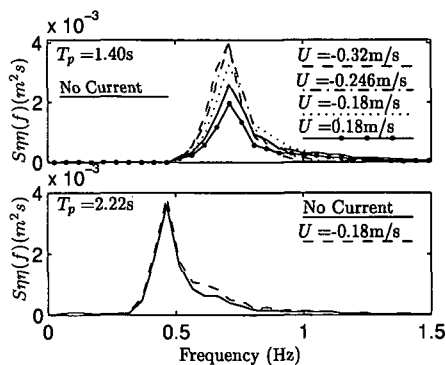
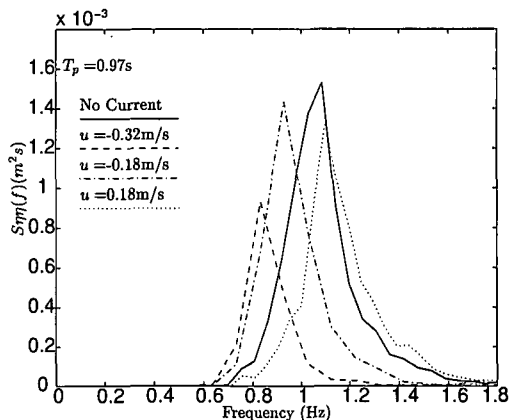
図-2 水槽内の H_{m0} の分布 (上段) と T_p の分布 (下段)

図-3 wave action の変化

きないことを示唆している。したがって、以下の解析には、底面摩擦の影響によるスペクトルの減少を避けるため、測線 P1 における波高および流速データを用いることにする。

図-4 は $T_p=1.40$ s (上段) および $T_p=2.22$ s (下段) の場合について、それぞれの流速に対する共存場の波高スペクトルと波動場の波高スペクトル (実線) を併せてプロットしたものである。この図から分かるように、逆流が強くなるにしたがって、スペクトルピーク付近および低周波数側でエネルギーの増加が見られ、逆に高周波数側のスペクトル平衡領域では、エネルギーの減少が顕著になっている。このことは、波が逆流を進行するときに発生する小規模な砕波によって、高周波数の波のエネルギーが減少するためである。なお、実験結果に基づけば、逆流によるスペクトルピーク付近のエネルギーの増加には限界があるものと思われる。一方、順流の場合、共存場の波のエネルギーは、周波数の領域に関係なく一律に減少する。

図-5 は、 $T_p=0.97$ s の場合における各流速の波高スペクトルと波動場の波高スペクトル (実線) を併せて示

図-4 $T_p=1.40$ s (上段) および $T_p=2.22$ s (下段) での流れによる波高スペクトルの変化図-5 $T_p=0.97$ s の波高スペクトルの変化

したものである。逆流が強くなるほどスペクトルのピークは低周波数側に移動し、スペクトルエネルギーは減少している。特に、 $U=-0.32$ m/s の場合、流速と深海波の波速 (c_0) との比は $U/c_0=-0.21$ となり、wave blockage の限界である $U/c_0=-0.25$ (Lai et al., 1989) に近い値となる。このとき、流れのある領域と流れの無い領域との境界で wave blockage による砕波が発生し、エネルギーの減衰が顕著になったものと考えられる。なお、 $U=-0.18$ m/s のときは $U/c_0=-0.12$ であり、全エネルギーの変化は小さい。

4.2 スペクトルの実験値と計算値との比較

実験結果との比較より、前節で述べた理論の有効性について考察を加える。図-6 は、CW5 と CW8 の実験値および、式 (1) と式 (6) から算定された波高スペクトルを、周波数 f の関数としてプロットしたものである。

逆流の場合、式 (1) で算定されたスペクトル $S_{\eta\eta}$ は、平衡領域において実測値のスペクトルの値より大きくなるため、式 (6) による平衡領域のスペクトル $S_{\eta\eta EQ}$ を考慮しなければならない。一方、順流の場合は、平衡領域のスペクトルを考慮しなくとも、式 (1) による計算値

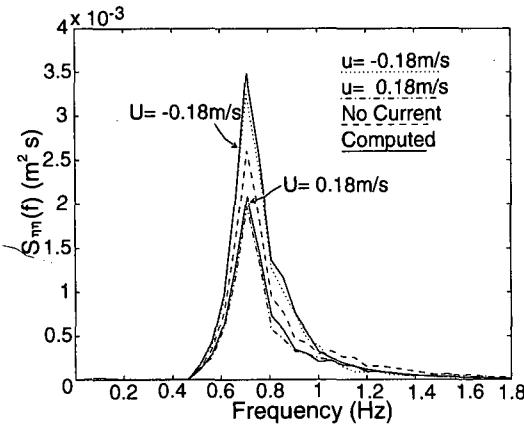


図-6 波高スペクトルの実験値と計算値との比較

と実験値との一致は、すべてのケースについて良好であった。加えて、逆流が大きくなるほど、スペクトルの計算値は実測値よりも大きめの値を示すことが確認された。

続いて、流速スペクトルの実験値 (CW 5) および計算値を比較したものを、図-7 に示す。\$S_{uu}\$ は式 (7) を用いて算定されたものである。波高スペクトルの場合と同様、流速スペクトルもまた linear wave theory と Doppler-shift によって概ね予測可能である。

ここには示していないが、\$T_p = 0.97\$ s で逆流の場合における \$S_{\eta\eta}\$ の計算結果について簡単に述べる。\$U = -0.32\$ m/s の場合、式 (1) による計算値は、スペクトルのピーク付近において分散関係式の実数解が存在可能な上限値 (\$\omega_a = -g/4U\$) を超えてしまい、発散する。一方、\$U = -0.18\$ m/s の場合では、\$S_{\eta\eta}\$ のピーク付近における発散は生じてはいないものの、スペクトルの増加は著しく、現実的ではない。このことは、実験値が示すようにスペクトルの増加には上限があり、かつ \$U/c_0\$ が比較的小さい値であるにもかかわらず、碎波の発生に伴うエネルギーの減衰が生じることと一致する。

また、流れの無い領域と流れのある領域との境界で発生する碎波は、水槽湧き出し口の流れの影響を受けていることが確認された。したがって、このエネルギー減衰とピーク周期移動のメカニズムの解明については、水槽湧き出し口の影響を直接受けていないデータが必要である。

4.3 摩擦係数の算定

前述した Mathisen and Madsen (1996) にならって、次式を用いて共存場における \$f_e\$ を算定した。

$$\frac{1}{2} H_{rms} \rho g m_b (c_0 + U) = -\frac{1}{4} \rho f_e u_{bm}^3 \quad \dots\dots\dots (8)$$

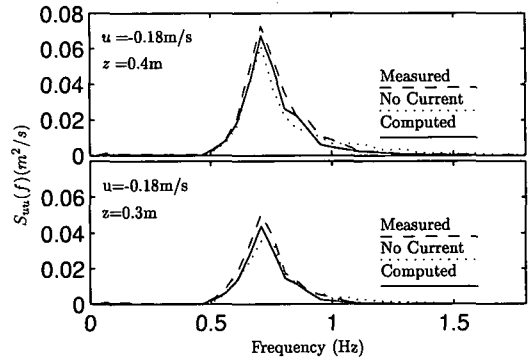


図-7 流速スペクトルの実験値と計算値との比較

$$m_b = \frac{d}{dx} \left(\frac{H_{rms}}{2} \right) - \left(-\sqrt{\frac{\nu}{2\omega}} \frac{H_{rms}\omega}{2bc_0} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$u_{bm} = \frac{H_{rms} \omega_r}{2 \sinh kh} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、\$u_{bm}\$: 最大水平水粒子速度、\$m_b\$: 底面摩擦である。式 (9) の右辺第一項は壁面および底面摩擦による \$H_{rms}\$ の勾配であり、右辺第二項は壁面による摩擦を表わしている。なお、式中の \$b\$ は水路幅である。波動場の \$f_e\$ は、式 (8) において \$U=0\$ とすることで算定できる。また、wave Reynolds number \$Re\$ は、\$u_{bm}\$、動粘性係数 \$\nu\$ および excursion amplitude \$A_b\$ によって次式で定義される。

$$Re = \frac{A_b u_{bm}}{\nu}, \quad A_b = \frac{H_{rms}}{2 \sinh kh} \quad \dots\dots\dots (11)$$

本実験における \$Re\$ は、表-2 に示すように、すべてのテストにおいて \$Re < 1.0 \times 10^4\$ であった。したがって流れは層流であり、摩擦係数 \$f_w\$ は、

$$f_w = \frac{2}{\sqrt{Re}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

と表わすことができる (Jonsson, 1966)。

Jonsson (1966) によれば、\$f_e\$ と \$f_w\$ は wave shear stress と水平底面水粒子速度との位相差 \$\theta\$ によって、次式で関連付けられている。

$$f_e = f_w \cos \theta \quad \dots\dots\dots (13)$$

なお、本実験で対象としたケースは層流かつ滑面であるので、\$\theta = 45^\circ\$ とした。

以上のような方法で本実験における摩擦係数 \$f_w\$ およびエネルギー逸散係数 \$f_e\$ を計算し、考察を加えた。計算結果を表-2 に示す。\$u_{bm}\$ および \$A_b\$ は順流の場合 (CW 7, CW 8) に比べて、逆流の場合 (CW 4, CW 5) のほうが小さくなり、浅野ら (1983) が示した結果と一致する。しかしながら、\$f_e\$ および \$f_w\$ については順流の場合のほうが逆流の場合よりも小さくなり、式 (12) と (13)

表-2 各テストでの f_e と f_w

Test	$H_{rms}/2$ (cm)	T_p (s)	u_{bm} (cm/s)	A_b (cm/s)	f_e (Meas.)	Re (1.0×10^3)	f_w	$f_w \cos \theta$ (Comp.)
W 1	2.84	0.97	4.40	0.692	0.605	0.305	0.115	0.081
W 2	3.41	1.40	9.88	2.20	0.084	2.17	0.043	0.030
W 3	3.37	2.22	12.87	4.55	0.053	5.86	0.026	0.019
CW 1	1.73	1.24	2.55	0.394	1.15	0.101	0.199	0.141
CW 2	3.46	1.44	7.77	1.44	0.223	1.12	0.060	0.042
CW 3	3.52	1.42	8.36	1.60	0.246	1.34	0.055	0.039
CW 4	2.45	1.14	3.97	0.126	1.38	0.252	0.126	0.089
CW 5	3.56	1.39	8.92	1.77	0.232	1.58	0.050	0.036
CW 6	3.61	2.20	13.30	4.25	0.036	5.65	0.027	0.091
CW 7	2.64	0.90	4.43	0.720	0.585	0.306	0.114	0.081
CW 8	2.94	1.43	9.38	2.33	0.011	2.18	0.043	0.030

に符合する。また、本実験による f_e の測定値は、 f_e の理論値である $f_w \cos \theta$ をはるかに上回る値となった。これは、式 (8) が流れによる小規模な碎波を考慮していないためと考えられる。加えて、水槽湧き出し口の流れの影響で、水槽内の乱れが増加したのも一因であると考えられる。

5. 結 論

不規則波と流れの干渉に関する水理実験によって、linear wave theory と Doppler-shift を用いた共存場スペクトルの表現を JONSWAP スペクトルの場合についても確認することができた。逆流によってスペクトルエネルギーは、スペクトルピーク付近と低周波数域で増加し、平衡領域で減少する。加えて、逆流の強さに伴うスペクトルピークの増加には限界があると考えられる。本実験におけるピーク周期が 0.97 s の逆流のテストでは、流れのある領域と流れの無い領域との境界で碎波が発生して、その結果エネルギーが減少し、ピーク周期は低周期側に移動した。なお、この境界における碎波とスペクトルの移動には、水槽湧き出し口の流れも影響しているため、現象の解明には湧き出し口の影響を直接受けていないデータが必要である。また、式 (1) で算定される共存場スペクトルは、順流の場合には非常に有効であり、逆流の場合にはスペクトルの平衡領域を考慮すればある

程度まで妥当性を有しているものと判断される。不規則波と流れの共存場における摩擦係数およびエネルギー逸散係数の算定には、流れによる碎波を考慮したモデルの開発が必要である。今後、高周波数の波の碎波に起因する、平衡領域のスペクトルについて、さらに物理的なメカニズムの解明を試みる予定である。

参 考 文 献

- 浅野敏之・岡本 浩・岩垣雄一 (1983): 波と流れの共存場における底面乱流境界層に関する研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 84-88.
- Briggs, M. J., Z. Demirbilek and D. R. Green (1996): Wave-current interaction in inlets, *Proc. 25th ICCE*, pp. 1219-1232.
- Hedges, T. S., K. Anastasiou and D. Gabriel (1985): Interaction of random waves and currents, *J. Waterway, Port, Coast. Oc. Engrg.*, ASCE, Vol. 111, No. 2, pp. 275-288.
- Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layers and friction factors, *Proc. 10th ICCE*, pp. 127-148.
- Lai, R. J., S. R. Long and N. E. Huang (1989): Laboratory studies of wave-current interaction: kinematics of the strong interaction, *J. Geophys. Res.*, Vol. 94, No. C11, pp. 16201-16214.
- Mathisen, P. P. and O. S. Madsen (1996): Waves and currents over a fixed rippled bed 1. Bottom roughness experienced by waves in the presence and absence of currents, *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, No. C7, pp. 16533-16542.
- Suh, K. D., Y. Kim and D. Y. Lee (1994): Equilibrium-range spectrum of waves propagation on currents, *J. Waterway, Port, Coast. Oc. Engrg.*, ASCE, Vol. 120, No. 5, pp. 434-450.