

波が重畳した時の流れの摩擦応力の变化

京都大学工学部 正員 岩垣 雄一
京都大学工学部 正員 浅野 敏之
大阪市 正員 中川 政博

1. まえがき 波と流れの共存場におけるエネルギー保存関係についてはPhillipsの研究がよく知られているが、彼の理論展開の中には底面摩擦等によるエネルギー逸散が含まれていない。一方、従来の波と流れの共存場に関する研究は、もっぱら流れによる波の特性の変化に対してのみ関心が払われており、波による流れの特性の変化についてはほとんど研究がなされていない。本研究は、底面摩擦によるエネルギー逸散が波の特性のみならず、流れの特性にどのような影響を与えるかを考察したもので、前者を波高減衰率、後者を平均水面の変化で評価し、理論と実験の両面からこれを解明しようとしたものである。

2. 基礎式 図-1のように、波がない時の平均水面に x_α ($\alpha=1,2$)座標を、鉛^z直上方に z 軸をとり、共存場での流速 u_α を次のように表わす。

$$u_\alpha = \bar{u}_\alpha + u'_\alpha \quad \dots (1)$$

ただし、 $\bar{u}_\alpha$ は平均流の流速成分、 u'_α は波による変動流速成分。共存場での質量保存式は、 $z=-d$ より $z=z$ まで積分し、波の周期にわたって時間平均操作をした次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t} P(R+\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (\bar{M}_\alpha + M'_\alpha) = 0, \quad \bar{M}_\alpha = \int_d^z \rho \bar{u}_\alpha dz, \quad M'_\alpha = \int_d^z \rho u'_\alpha dz \quad \dots (2)$$

共存場での運動量保存式は、 f_α を単位体積当りの作用力とすれば、次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{M}_\alpha + \frac{\partial}{\partial x_\beta} (\bar{U}_\alpha \bar{M}_\beta + S_{\alpha\beta}) = T_\alpha + R_\alpha, \quad \bar{M}_\alpha = \int_d^z \rho \bar{u}_\alpha dz, \quad \bar{U}_\alpha = \bar{M}_\alpha / P(d+R), \quad R_\alpha = \int_d^z f_\alpha dz$$

$$S_{\alpha\beta} = \int_d^z \rho u'_\alpha u'_\beta + p'_{\alpha\beta} dz + \frac{1}{2} \rho g (d+R)^2 \delta_{\alpha\beta} - M'_\alpha M'_\beta / P(d+R), \quad T_\alpha = -\rho g (d+R) \partial R / \partial x_\alpha \quad \dots (3)$$

共存場での全エネルギー保存式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{1}{2} \bar{U}_\alpha \bar{M}_\alpha + \frac{1}{2} \rho g (R^2 - \alpha^2) - \bar{M}_\alpha^2 / 2P(d+R) + E \right\} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left\{ \bar{M}_\alpha \left(\frac{1}{2} \bar{U}_\alpha^2 + gR \right) - \bar{U}_\alpha \bar{M}_\alpha^2 / 2P(d+R) + \bar{U}_\alpha E + \bar{F}_\alpha + \bar{U}_\alpha S_{\alpha\beta} \right\} = \int_d^z f_\alpha u'_\alpha dz, \quad E = \frac{1}{2} P \int_d^z (u'^2 + w'^2) dz + \frac{1}{2} \rho g R^2, \quad \bar{F}_\alpha = P \int_d^z u'_\alpha \left(\frac{1}{2} u'^2 + g(z-R) + \frac{1}{2} w'^2 \right) dz \quad (4)$$

3. 波高減衰率および平均水面の変化 基礎式(2)~(4)で、次のような仮定を設ける。

- ①流れは定常2次元、波動は2次元
- ②風の応力、内部粘性は無視
- ③流れの流速分布は深さ方向に一定
- ④エネルギー、運動量などは微小振幅波で記述
- ⑤波高水深比は小さい
- ⑥流れは漸変流
- ⑦底面でのせん断応力と流速は、次式で与える。

$$\tau = \frac{1}{2} \rho f_w u |u|, \quad u = U + u_m \cos \omega t \quad \dots (5)$$

ただし、 f_w は共存場での摩擦係数、 u_m は波の底面水粒子速度の振幅。

また、底面摩擦によるエネルギー逸散は、従来の沿岸流発生理論と同様、エネルギー逸散の定常成分が流れの成分に、非定常成分が波の成分に配分されると仮定する。

以上の仮定に基づき、基礎式(2)~(4)を用いて波高水深比 α/d の2次まで考えると、波に対するエネルギー保存式および流れに対するエネルギー保存式が次式のように得られる。

Iwagaki Yuichi, Asano Toshiyuki, Nakagawa Masahiro

$$\frac{\partial}{\partial x} \{ E(\bar{\eta} + C_g) \} = -\frac{1}{2} \rho f_w \sqrt{|\bar{\eta} + u_m \cos \sigma t|^3} - \bar{\eta} (\bar{\eta} + u_m \cos \sigma t) |\bar{\eta} + u_m \cos \sigma t| \} \quad \dots (6)$$

$$\left(\frac{1}{2} \rho \bar{\eta}^3 + \rho g \bar{\eta} d \right) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{3}{2} \rho d \bar{\eta}^2 \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{1}{2} \rho \bar{\eta}^3 \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{3}{2} \bar{\eta}^2 \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \bar{\eta} \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = -\frac{1}{2} \rho f_w \bar{\eta} (\bar{\eta} + u_m \cos \sigma t) |\bar{\eta} + u_m \cos \sigma t| \dots (7)$$

こゝに、(6)に平均水面勾配による波高変化の項²⁾(α/α について4次)を導入すると、

$$\frac{\partial}{\partial x} \{ E(\bar{\eta} + C_g) \} = -\frac{1}{2} \rho f_w \sqrt{|\bar{\eta} + u_m \cos \sigma t|^3} - \bar{\eta} (\bar{\eta} + u_m \cos \sigma t) |\bar{\eta} + u_m \cos \sigma t| - g M \frac{\partial}{\partial x} \left(R + \frac{\bar{\eta}^2}{2g} \right) \dots (8)$$

$|\bar{\eta}| \geq u_m$ の場合、(8),(7)を解くと波高減衰率($\alpha + d$)と波による平均水面の変化 $\partial \bar{\eta} / \partial x$ が得られる。

$$\alpha = \frac{2\pi f_w}{\sinh 2R(d+R)} \frac{1}{(\bar{\eta} + C_g)} \quad \dots (9)$$

$$\alpha = \frac{Lg}{2c(\bar{\eta} + C_g)} \frac{\partial}{\partial x} \left(R + \frac{\bar{\eta}^2}{2g} \right) \dots (10)$$

ただし、 $H = H_0 \exp \{ -(\alpha + d)x \}$, H_0 は $x=0$ での波高 H 。

$$\partial \bar{\eta} / \partial x = \frac{1}{g d - \bar{\eta}^2} \left[\frac{1}{2} f_w (\bar{\eta}^2 + \frac{1}{2} u_m^2) + \bar{\eta}^2 \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - \frac{3}{2} \bar{\eta} \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} \right] \dots (11)$$

$|\bar{\eta}| \leq u_m$ の場合、 H の変化は指数関数とはならない。

4. 実験方法 実験は長さ27m, 幅50cm, 高さ70cmの水槽で行い、波高計は2.5m間隔で6本または3.0m間隔で5本設置した。流速の測定はフロー式流速計で行った。実験条件は表-1に示す通りである。

5. 実験結果 波高減衰率として α のみを与え理論値と実験値を比較すると、実験値は理論値よりかなり大きい結果になることがわかった。そこで、さらに $(\alpha + d)$ として理論値と実験値の比較を行ったが(図-2)、実験値は依然として理論値の2倍程度も大きいことがわかった。図-3は共存場での平均水面勾配 $\partial \bar{\eta} / \partial x$ の理論値と実験値を比較したもので、理論値は実験値の $1/2 \sim 1/3$ となっている。

($\alpha + d$)と $\partial \bar{\eta} / \partial x$ の理論と実験の不一致の主な原因として、内部粘性や波の有限振幅性の効果などが考えられるが、底面摩擦によるエネルギー逸散の定常成分が波動の波高減衰にも寄与するためではないかと考えられる。

6. 結論 波高減衰率と共存場での平均水面勾配の理論値と実験値の不一致は、測定上の誤差では説明がつかず、むしろエネルギー逸散項の定常成分が流れの成分に、非定常成分が波の成分に貢献するというエネルギー配分の理論的仮定に問題があるのではないかと考えられる。しかし、従来の沿岸流砂生理論などでは、こうした仮定の下で理論展開されており、その意味で本研究は重要な問題提示をしたといえる。

参考文献: 1) Phillips, O.M.: The Dynamics of the Upper Ocean, 2nd Edition. Cambridge University Press, p.336, 1977.

2) 佐藤道郎: 砕波後の波の波高変化に及ぼす平均水位の影響, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 35-38, 1984.

	U (cm/sec)	T (sec)	H _i (cm)
wave only	0.00	1.02 ~ 2.61	4.6 ~ 8.1
following current	5.65	1.02 ~ 2.53	4.7 ~ 8.6
	20.49	1.03 ~ 2.64	5.5 ~ 10.5
	31.88	1.03 ~ 2.33	2.3 ~ 8.0
opposite current	-7.78	1.03 ~ 2.60	3.7 ~ 9.4
	-21.33	0.93 ~ 3.00	4.6 ~ 11.0
	-31.88	1.20 ~ 2.52	5.3 ~ 7.9

(i: incident)

表-1

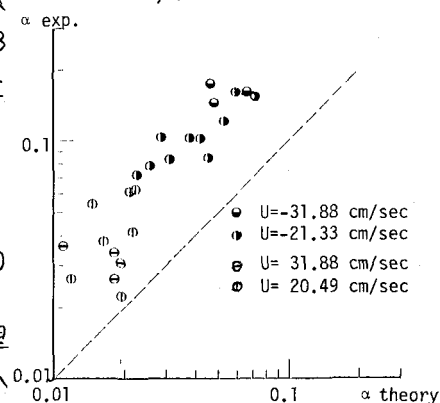


図-2

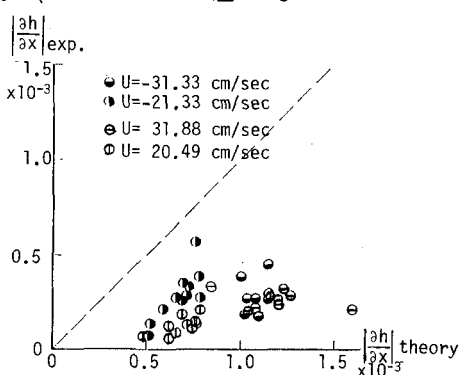


図-3