

波と流れの共存場における浮遊砂濃度と漂砂量

SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION AND SEDIMENT TRANSPORT
RATE IN WAVE AND CURRENT CO-EXISTING SYSTEM

伊福 誠*・後藤 博光**

By Makoto IFUKU and Hiromitsu GOTOH

Numerical analysis was carried out to obtain the near-bottom flow velocity and the suspended sediment concentration in the wave and current co-existing system. The near-bottom flow velocity was computed by the turbulent boundary layer theory. The shear stress was evaluated by using the time-independent eddy viscosity proposed by Grant-Madsen.

Suspended sediment concentration was computed by the turbulent diffusion theory. The diffusion coefficient was evaluated by using the horizontal and vertical components of flow velocity. The results for near-bottom flow velocity were compared with the laboratory data obtained by Asano *et al.* For opposing current, as the depth-averaged current velocity exceeds to 1/10~1/5 of the maximum bottom velocity in wave field, the direction of sediment transport is reversed.

Keywords: wave and current co-existing system, boundary layer, turbulent diffusion coefficient, sediment transport rate

1. 緒 論

従来、漂砂現象さらには海浜変形について調べる際には主として波動場が対象とされてきた。しかしながら、河口近傍や漂砂の移動が激しく戻り流れ、離岸流、沿岸流の存在が確認されている浅海域の波と流れの共存場における波の変形や漂砂現象を取り扱う際には波と流れの相互干渉やそれに起因する水粒子速度の変化を詳細に検討する必要がある。

波と流れの共存場の内部機構はLundgren¹⁾によってモデル化され、その後、Grant・Madsen²⁾は波と流れの水粒子速度場を記述する精緻なモデルを提案した。なお、渦動粘性係数に種々の分布形を仮定し、Grant・Madsenと同様の取り扱いをした理論的研究がSmith³⁾、田中・首藤⁴⁾等によってなされている。浅野ら⁵⁾は共存場における線形の乱流境界層方程式を解くうえで波動の境界層外縁を未知量とした未定境界値問題を解く方法を提案するとともに、非線形の乱流境界層方程式に基づいた解析を行って、水粒子速度場に及ぼす非線形性の効果を

明らかにしている。上述した理論的研究に加えて、共存場における水粒子速度についての実験的研究も、Bakker・van Doorn⁶⁾、Kemp・Simons⁷⁾、Tanaka・Shuto⁸⁾らによって行われている。

理論的および実験的研究は共存場における水粒子速度や底面摩擦に着目したものであり、こうした水理特性を十分に把握することは浅海域での漂砂現象を解明するうえでもきわめて重要である。また、共存場における漂砂現象を明らかにし、その予測法を確立することは日本海沿岸で冬期季節風時に来襲する波浪および太平洋沿岸で年間を通じて来襲する波浪によって中小河川で発生している河口閉塞を防止するといった点からもきわめて重要であると考えられる。

波と流れの共存場における砂移動現象は河口近傍に焦点を当て、樫木⁹⁾等によって実験的な取り扱いがなされ、地形変動を河川流量、河川部や波の特性と関連付け河口閉塞現象を解明しようとする試みがなされている。また、中村ら^{10),11)}は波が流れを遡る場合および流れに沿う場合の砂移動について実験的に検討し、流れの流速の増大に伴って砂の移動量も増大することを報告している。

近年、海浜流と波とが重合する場における海浜変形に関する数値モデルが清水ら¹²⁾によって提案され、実験との比較を通して波の進行方向の漂砂の移動の向きを正確

* 正会員 工修 愛媛大学講師 工学部海洋工学科
(〒790 松山市文京町3番)

** 正会員 工修 (株)復建調査設計
(〒730 広島市東区光町2-10-11)

に見積るには流速波形の非対称性、移動形態の効果を的確に評価することの重要性を示唆している。また、波が流れを廻る場における漂砂機構を佐藤ら¹³⁾が浮遊砂を浮遊砂雲としてとらえたモデルを提案して、流れが岸沖漂砂量に及ぼす効果について検討している。

底質の移動を論ずる場合、底質粒子に作用する流体力の評価が重要となることから、著者の一人は境界層を考慮した波動場における漂砂に関する数値モデルを提案し、実験や観測結果との比較を通してモデルの有用性を検証した¹⁴⁾。波と流れの共存場においても境界層の取り扱いが重要であるとの考えから波動場の解析で得られた知見をもとに共存場における漂砂に関する数値モデルを提案し、流れが漂砂に及ぼす効果について検討する。

一般に波と流れはある角度でもって交差する。波と流れが斜交する場合の乱流境界層内の水粒子速度の特性について理論的には検討されてはいる²⁾ものの、斜交する場合の乱流境界層内の水粒子速度の特性を実験的に詳細に検討したものは著者の知り得る限りないようである。そこで、ここでは本論文の解析方法が波と流れが0°あるいは180°の交差角を有する場合を対象とした既往の実験結果をどの程度再現し得るのかについて検討する。また、得た流速をもとに共存場における浮遊砂濃度の分布や漂砂量について数値解析的に調べ、流れが漂砂に及ぼす影響についても検討する。

2. 現地海岸における流れの鉛直分布

1983年1月8日の冬期季節風時、著者の一人は愛媛県梅津寺海岸の海底から7 cm, 65 cm および98 cmの高さで岸沖方向流速を測定している。観測地点の平均水深は2 m程度であり、碎波の発生頻度(一資料中に含まれる観測地点で砕けた波の数と総波数の比)は13~19%であった。Fig.1(a) および (b) は、得た資料のうち碎波の発生頻度が13%と19%であるRun No. B 83108-4, 8の上述した3点における岸沖方向流速をFFT法により周波数分解し、周波数0の流速を示したものである。(a)においては、海底から7 cm, 65 cm および98 cmの高さで、それぞれ、冲向きに11 cm/s, 4.9 cm/s および岸向きに9.9 cm/sの流れがある。(b)においては、海底から7 cm, 65 cm および98 cmの高さで、それぞれ、冲向きに12 cm/s, 5.5 cm/s および岸向きに18 cm/sの流れがある。海浜勾配や碎波の状況によっても周波数0の流速の絶対値や向きも変化すると思われるが、有義波高0.5 m, 有義波周期4.5 s程度の波では、周波数0の流れは底面近傍においては冲向き、水深の中程においては岸向きである。3点の流速から断面平均流速を求めると、Run No. B83108-4 および8ではそれぞれ、冲向きに3.8 cm/s および3.2 cm/sとなる。

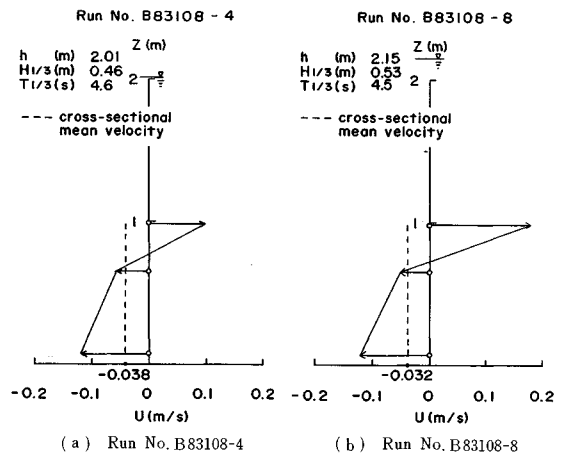


Fig.1 Observed current profiles.

海底から7 cmの高さで得た流速記録によると、岸向き流速の最大値は両ケースとも0.3 m/s程度であった。周波数0の断面平均流速は岸向き最大流速の10%程度である。

3. 基礎方程式および解析方法

(1) 乱流境界層内の水粒子速度

流体が非圧縮性でその運動が非定常な場合、波と流れが共存するときの二次元運動方程式はxを水平な底面、zを底面より鉛直上向きにとり、水面の勾配を無視すると次式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u+U)\frac{\partial(u+U)}{\partial x} + (w+W)\frac{\partial(u+U)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial}{\partial x} (p_f + P_f) + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \tau_{cw}}{\partial z} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、tは時間、uは波の岸沖方向水粒子速度、Uは流れの岸沖方向水粒子速度、wは波の鉛直方向水粒子速度、Wは流れの鉛直方向水粒子速度、ρ_fは流体の密度、p_fは波の圧力、P_fは流れの圧力、τ_{cw}は共存場の摩擦応力である。

波と流れの共存場における流体の運動に関して以下の仮定(i)~iii)をし、さらにuについての非線形項を無視し、境界層外では非粘性の波動理論で記述できるものとする、次式で表わされる波動成分に関する線形の境界層方程式が得られる。

- i) 流れの流速のx方向の勾配 ∂U/∂x は小さい。
- ii) 波および流れの鉛直方向の流速はx方向のそれらに比較して小さい。
- iii) 摩擦項は渦動粘性係数 N_z を用いて評価し得る。

$$\frac{\partial(u-u_0)}{\partial t} - U_b \frac{\partial u_b}{\partial x} + U \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots \dots (2)$$

となる。ここに、u₀は境界層外縁における波の岸沖方

向水粒子速度, U_0 は境界層外縁における流れの岸沖方向水粒子速度である。

渦動粘性係数 N_z は Grant・Madsen の波と流れの共存場におけるモデルに従い, 境界層内外で摩擦速度を区別して次式で与える。

$$N_z = \kappa |u_{cw}^*| z \quad z < \delta_b \dots \dots \dots (3 \cdot a)$$

$$N_z = \kappa |u_c^*| z \quad z > \delta_b \dots \dots \dots (3 \cdot b)$$

ここに, u_{cw}^* および u_c^* は, それぞれ, 共存場および流れの摩擦速度, κ はカルマン定数 ($\kappa = 0.4$), δ_b は境界層厚である。また, 境界層内における流れの流速分布は次式で与えられるものとする。

$$U = \frac{u_c^{*2}}{\kappa u_{cw}^*} \ln \frac{z}{z_0} \quad z < \delta_b \dots \dots \dots (4 \cdot a)$$

ここに, z_0 は粗度長である。なお, 境界層外縁における流れの流速は

$$U_b = \frac{u_c^{*2}}{\kappa u_{cw}^*} \ln \frac{\delta_b}{z_0} \dots \dots \dots (4 \cdot b)$$

で与えられる。

一方, 境界層外における流れの流速分布は次式で与えられるものとする。

$$U = \frac{u_c^*}{\kappa} \ln \frac{z}{\delta_b} + U_b \quad z > \delta_b \dots \dots \dots (4 \cdot c)$$

(2) 濃 度

沈降速度 w_0 をもつ物質の鉛直一次元の乱流拡散方程式は流れの鉛直方向の水粒子速度は波のそれに比較して小さいとすれば次式のように与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + w_0 \frac{\partial C}{\partial z} \dots \dots \dots (5)$$

ここに, C は物質の濃度, K_z は乱流拡散係数である。

(3) 解析方法

流れの流速分布を規定する際に重要となる粗度長の評価であるが, 波と流れの共存場における粗度長について検討されたものは著者の知り得る限りではないので, 波動場の解析¹⁴⁾と同様の取り扱いをする。さらに, 共存場における境界層厚についても波動場の解析で用いた野田の結果¹⁵⁾を援用する。

掃流層内の濃度および乱流拡散係数は波動場の解析で用いたものに流れの効果を考慮して評価する。

掃流層内の濃度は著者が波動場における解析で用いた Kalkanis¹⁶⁾の理論を共存場に拡張し次式で評価する。

$$C_0 = 2 P \rho_s d V / 3 \int_{z_0}^{\delta_b} (u + U) dz \dots \dots \dots (6)$$

ここに, ρ_s は物質の密度, d は物質の粒径, V は物質の移動速度, δ_b は掃流層厚, P は pick-up rate であり次式で表わせる。

$$P = p_r (Z' > V_* \Psi_* - 1 / \eta_0) \dots \dots \dots (7)$$

ここに, $V_* = 4/3 C_L \eta_0$, $\Psi_* = (\rho_s - \rho_f) g d / \rho_f u_0^2$ (u_0 : 波と流れの共存場における任意の高さの流速), $Z' = L' / \bar{L} \eta_0$ (L' : 揚力の変動量, \bar{L} : 平均揚力) であり, 揚力は次式で評価する。

$$L = \bar{L} + L' = \rho_f C_L \frac{\pi}{8} d^2 u_0^2 \dots \dots \dots (8)$$

Z' は平均値 0, 標準偏差 1 の正規分布であるとすれば式 (7) は

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{V_* \Psi_* - 1 / \eta_0}^{\infty} \exp(-z^2/2) dz \dots \dots \dots (9)$$

と表わせる。

物質の移動速度をいかに評価するかが問題となるが, 波動場における解析と同様に掃流層内の断面平均流速とする。

乱流拡散係数: 水平方向および鉛直方向の水粒子速度に依存する次式で仮定する。

$$K_z = \gamma \{ l_r (u + U)^2 + l_b (w + W)^2 \} / q \dots \dots \dots (10)$$

ここに, γ は正の係数, l_r , l_b は水平および鉛直方向流速成分による拡散係数への寄与を表わす特性長であり, $l_r = a l_b$ (a : 正の係数), $q = \{(u + U)^2 + (w + W)^2\}^{1/2}$ である。

沈降速度は次式で算出する。

$$w_0 = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d}{C_b} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g} \dots \dots \dots (11)$$

ここに, C_b は抗力係数である。

差分法を用いて境界層内の流速に関する式 (2) と物質の濃度に関する式 (5) の解を得る。計算にはクラック・ニコルスン法を用い鉛直座標および時間を以下のよう分割する。

鉛直座標: 底面から水面までを 100 分割し, 底面から物質の粒径の 3 倍の高さまでを粒径の 1/2 の等間隔, それより水面までを等比級数的に分割する。

時間: 波の一周期を 96 等分する。

境界層内の流速は境界層内の各高さ, 濃度は各高さにおいて, 任意の時刻 mT (m : 整数) と一周期前 $(m-1)T$ の流速あるいは濃度との差の絶対値が 10^{-5} 以下になるまで計算を行い, それ以後は求めた値が一周期ごとに繰り返すものとする。

掃流層厚は粒径の 2 倍, 揚力係数 C_L および経験定数 $1/\eta_0$ は波動場の解析で使用した値, 0.2 および 1.5 を準用する。なお, 共存場における乱流境界層方程式および乱流拡散方程式に基づいて流体中の物質の濃度を解析するにあたり, 流れが底面から水面まで直線的に変化する場合を対象として, 流れの場における Stokes 波を浜田・加藤¹⁷⁾に従って第 3 次近似解まで誘導した。

境界層内の流速場および漂砂現象を議論する場合, 水平方向の移流がそれらに及ぼす効果は重要であると思われるが, ここでの解析は鉛直一次元にとどめる。

(4) 初期条件および境界条件

波および流れの岸沖方向流速に関する初期条件および境界条件は

$$u(z, 0) = 0 \dots\dots\dots(12)$$

$$\left. \begin{aligned} u(z_0, t) &= 0 \\ U(z_0, t) &= 0 \\ u(\delta_b, t) &= u_0(t) \\ U(\delta_b, t) &= U_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

とする。

物質の濃度に関する初期条件および境界条件は

$$C(z, 0) = 0 \dots\dots\dots(14)$$

$$\left. \begin{aligned} C(\delta_b, t) &= C_0(t) \\ K_z \frac{\partial C}{\partial z} + w_0 C &= 0, \quad z = h \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

とする。ここに、 $C_0(t)$ は時刻 t における掃流層内の濃度、 h は水深である。

4. 解析結果と考察

浅野らの波と流れの共存場における実験結果に基づいた解析を行い境界層内の流速について実験結果と比較・検討し、次に、現地海岸で得た波浪や底質の条件に準じた波や底質を用いた境界層内の流速、流体中の物質の濃度分布および漂砂量やその移動方向について解析する。

Table 1は浅野らの実験条件である。ここでは表中の共存場の場合を解析対象とする。浅野らは数値モデルによる解析において粗度高さを0.12 cmとしているので、ここでもその値を用いる。また、対象とする流体は淡水とし、水温は20°Cとして密度、動粘性係数を算出する。

現地海岸で得た波を対象とした解析においては対象とする流体は海水、水温は10°Cとして密度、動粘性係数を算出する。対象とする物質は砂とし、粒径は0.2 mm、乾燥砂の密度は2.65 g/cm³とする。解析対象とする波の波高は0.5 m、周期は4.5 sおよび水深は2 mとする。この波はStokes波の第3次近似解が適用される領域にある¹⁸⁾。

(1) 境界層内の流速

浅野らの実験条件をもとに線形の乱流境界層方程式に

Table 1 Experimental conditions by Asano et al.⁵⁾

| Case | System | \bar{U} (cm/s) | H(cm) | T(s) | h(cm) |
|------|--------------|------------------|-------|------|-------|
| I | wave only | 0 | 8.52 | 1.67 | 30 |
| | current only | -18.2 | 7.74 | | |
| II | wave only | 0 | 7.99 | 1.67 | 30 |
| | co-existing | -31.6 | 7.49 | | |
| III | wave only | 0 | 8.22 | 1.67 | 30 |
| | co-existing | -42.3 | 6.30 | | |
| IV | current only | -34.9 | — | 1.67 | 25 |
| | co-existing | -36.0 | 7.13 | | |

基づいて解析した共存場における水粒子速度の分布を浅野らの論文から読み取った実験結果 (Case III) とともに示したのが Fig. 2 である。0 および $3\pi/4$ の位相においては計算結果と実験結果との差が大きいが、 $\pi/4$ および $\pi/2$ の位相においては計算結果は実験結果をほぼ説明し得ているようである。

計算して得た乱流境界層内の波動成分の流速分布を浅野らの論文から読み取った実験結果 (Case III) とともに示したのが Fig. 3 である。計算結果は0の位相において $z \approx 10^{-2}$ cm に生じている over-shooting や $3\pi/4$ の

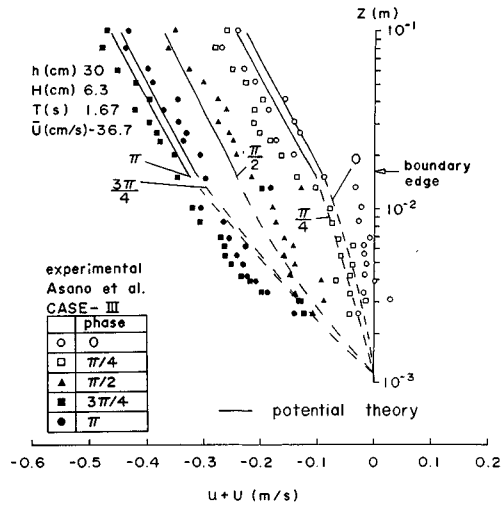


Fig. 2 Flow velocity distributions; (○, □, ▲, ■, ●) : after Asano et al.⁵⁾.

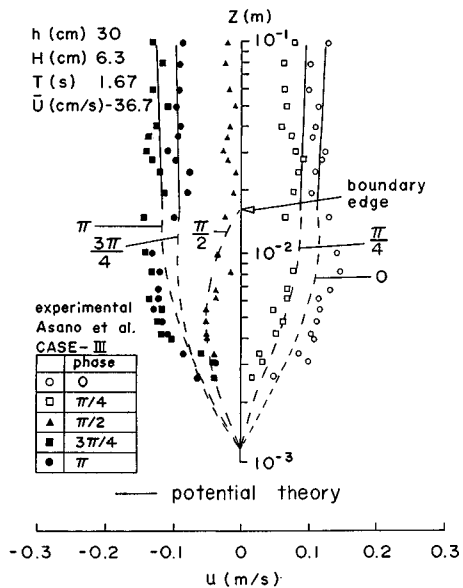


Fig. 3 Velocity distributions for wave component; (○, □, ▲, ■, ●) : after Asano et al.⁵⁾.

位相において境界層内の各高さで得られた実験結果を必ずしも精度良く説明し得ているとはいえず、 $0, 3\pi/4$ および π の位相における流速の絶対値は実験結果よりわずかに小さめであるといった傾向はあるもののほぼ実験結果を再現しているのではないかと考える。実験結果と計算結果の差違が境界層外縁の位置の取り扱いの差によるものなのかあるいは境界層方程式として線形化したものを使用したためであるのか現在のところ定かではない。

(2) 濃 度

a) 砂粒頂部の流速波形と掃流層内の濃度波形

砂粒頂部の流速波形と掃流層内の濃度波形を示したのが Fig. 4 である。(a) および (b) はそれぞれ、流れの断面平均流速が正および負の場合であり、波動のみの場の結果とともに示している。流れの断面平均流速が正の場合、 \bar{U}/u_{bm} が增大するにつれて流速が岸向きの位相においては掃流層内の濃度は高くなり、冲向きの位相に

においては濃度は低くなる。流速が冲向きの位相における濃度の低下の割合は岸向きの位相における増大の割合よりも大きく、 \bar{U}/u_{bm} が 0.3 の場合、 $t/T \approx 6.4$ の位相における濃度は波動のみの場と比較すると 10% 程度低い。一方、流れの断面平均流速が負の場合、正の場合とは逆に $|\bar{U}|/u_{bm}$ が增大するにつれて流速が岸向きの位相においては掃流層内の濃度は低くなり、冲向きの位相においては濃度は高くなる。流速が冲向きの位相における濃度の低下の割合と岸向きの位相における増大の割合はほぼ同一である。 $|\bar{U}|/u_{bm}$ が 0.3 の場合、 $t/T \approx 6.4$ の位相における濃度は波動のみの場と比較すると流速が岸向きの位相においては 3% 程度低く冲向きの位相においては 3% 程度高い。また、 $|\bar{U}|/u_{bm}$ が 0 あるいは 0.1 の場合に $t/T \approx 6.95$ の位相に生じている第一ピークは $|\bar{U}|/u_{bm}$ が 0.2 より大きくなると、冲向きの流速が最大となる位相で生じる。

b) 境界層内の濃度波形

流れの断面平均流速が負の場合、 z/h が 2.35×10^{-3} 、 1.28×10^{-2} (境界層外縁) における濃度波形を Fig. 5 に示す。(a) および (b) はそれぞれ、 z/h が 2.35×10^{-3} および 1.28×10^{-2} のものである。図中には、比較のため流れがない場合も示している。濃度波形は前傾し非対称であり、底面からの距離が増大するとともにピークが生じる位相は遅れ、ピーク値も徐々に小さくなる。 z/h が 2.35×10^{-3} の高さでは \bar{U}/u_{bm} が減少するにつれて、 $t/T \approx 6.1$ の位相に生じている第一ピークの濃度は低くなるが、 $t/T \approx 6.5$ の位相に生じている第二ピークの濃度は高くなり、 \bar{U}/u_{bm} が -0.3 になると、 $t/T \approx 6.5$ の位相の濃度が $t/T \approx 6.1$ の位相の濃度より高くなる。 z/h が 1.28×10^{-2} の高さでは \bar{U}/u_{bm} が減少するにつれて、 $t/T \approx 6.2$ にあるピークが生じる位相は早くなり、その絶対値は徐々に小さくなる。 \bar{U}/u_{bm} が -0.2 程度から第一ピークと第二ピークの生じる位相が逆転し、 \bar{U}/u_{bm} が -0.3 では $t/T \approx 6.7$ の位相に生じる第一ピークの濃度は波動のみの場において $t/T \approx 6.2$ の位相に生じている第一ピークとほぼ同一になる。また、 1000 mg/l 以上の濃度を持続する時間は波動のみの場と比較すると長く、波形はわずかに太っているようである。以上のように、境界層内において流れの断面平均流速の向きによって浮遊砂濃度のピークが生ずる位相が変化するという結果は漂砂量やその移動方向に影響を及ぼすことが予測される。

c) 平均濃度の鉛直分布

流れの断面平均流速が負の場合の波の一周期で平均した濃度の鉛直分布を流れがない場合とともに示したのが Fig. 6 である。乱流拡散係数を評価する際の係数 γ および a は波動場の解析で用いたものを準用した。すなわ

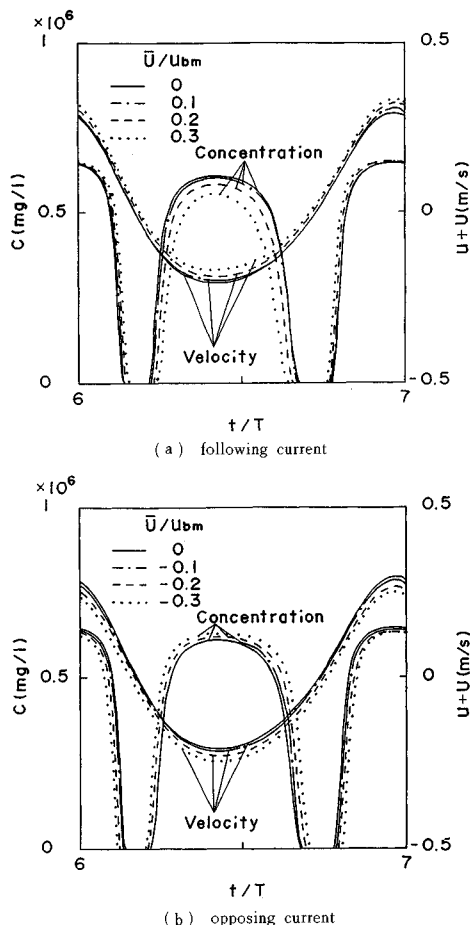


Fig. 4 Temporal variations of water particle velocity at the top of sand particle and sediment concentration in bed layer.

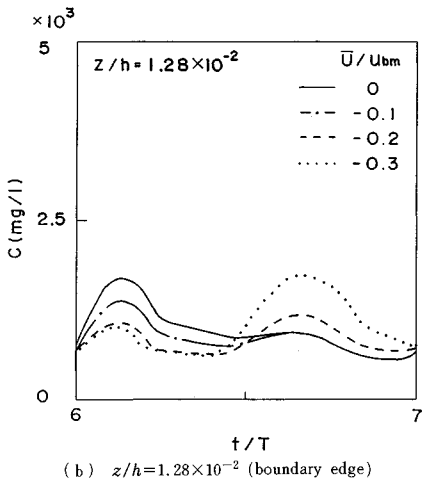
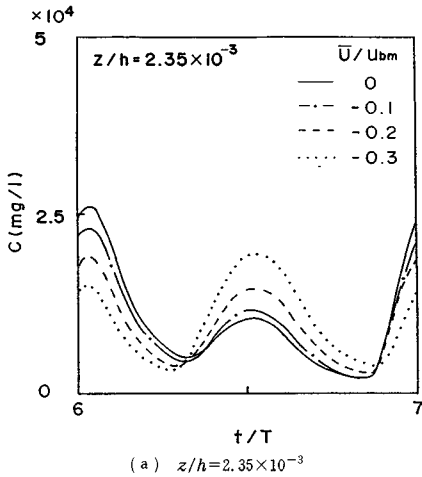


Fig. 5 Temporal variations of sediment concentration in boundary layer.

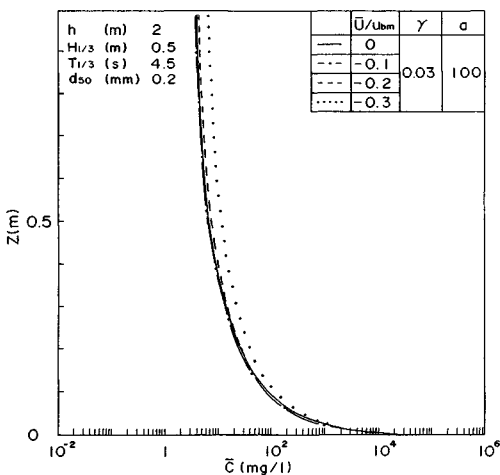


Fig. 6 Distributions of time-averaged sediment concentration.

ち、 γ は0.03、 α は100である。各高さにおける平均濃度は \bar{U}/u_{bm} が-0.1の場合の底面近傍において波動のみの場の平均濃度よりわずかに低いことを除けば、各高さにおける平均濃度は \bar{U}/u_{bm} が減少するにつれて高くなる。なお、流れの断面平均流速が正の場合、各高さにおける平均濃度は \bar{U}/u_{bm} が増大するにつれて高くなることを考えれば、 \bar{U}/u_{bm} が-0.1の場合の底面近傍における平均濃度は波動のみの場のそれより低いという結果はきわめて関心あることのように思える。 \bar{U}/u_{bm} が-0.3の場合の底面から1, 4, 10および50 cmの高さにおける平均濃度は流れがない場合の1.1, 1.3, 1.5および1.8倍程度であり、わずかではあるが底面からの距離が増大するにつれてその割合は大きくなる。

(4) 漂砂量

波の一周期で平均した、粗度長の高さから掃流層外縁までの掃流漂砂量 \bar{q}_B 、掃流層外縁から境界層外縁までの浮遊漂砂量 \bar{q}_s および粗度長の高さから水面 h までの全漂砂量 \bar{q} を次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}_B &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{z_0}^{\sigma_s} C(u+U) dz dt \\ \bar{q}_s &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{\sigma_s}^{\sigma_b} C(u+U) dz dt \\ \bar{q} &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{z_0}^h C(u+U) dz dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(16)$$

a) 全漂砂量と境界層内の浮遊漂砂量との関係

全漂砂量と境界層内の浮遊漂砂量との関係を示したのがFig. 7である。流れの断面平均流速が正の場合、 $|\bar{U}|/u_{bm}$ が増大するにつれて全漂砂量および境界層内の浮遊漂砂量も増大し、両者は線形関係にある。波動のみの場の結果と同じく、全漂砂量は境界層内の浮遊漂砂量とほぼ同一である。一方、流れの断面平均流速が負の場合、 $|\bar{U}|/u_{bm}$ が0.15になると全漂砂量は岸向きの量と冲向きの量がほぼ等しくなり、一周期平均の量はかなり小さくなるためばらつきがみられる。しかしながら、流れの断面平均流速の絶対値が大きくなり $|\bar{U}|/u_{bm}$ が0.3では、全漂砂量は境界層内の浮遊漂砂量とほぼ同一になり、流れの断面平均流速が正の場合と似た傾向を示す。波と流れの共存場においても、流れの断面平均流速が負の場合、砂の移動方向が岸向きから冲向きに変わることを除けば、全漂砂量は境界層内の浮遊漂砂量とほぼ同一であり、波動のみの場の結果¹⁹⁾と似た傾向を示す。したがって、波動場と同様、底面に発達する境界層の取り扱いが重要となる。

b) 漂砂に及ぼす流れの効果

波の一周期で平均した掃流漂砂量、浮遊漂砂量および全漂砂量と流れの断面平均流速との関係を示したのがFig. 8である。流れの断面平均流速が正の場合、 \bar{U}/u_{bm}

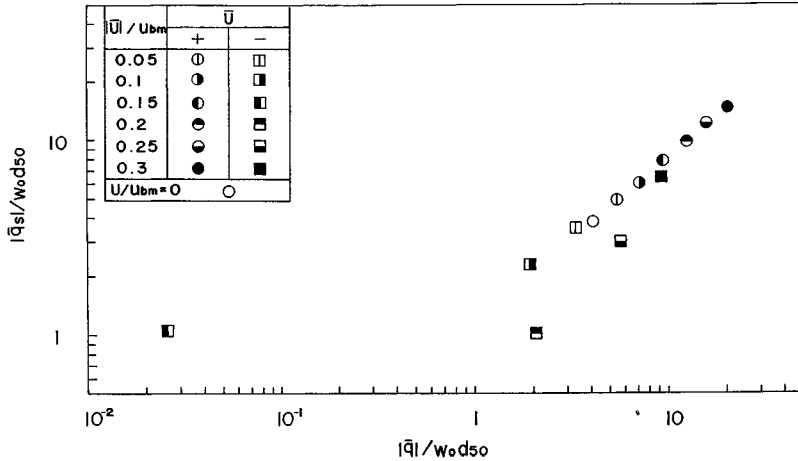


Fig. 7 Time-averaged non-dimensional suspended and total sediment transport rates.

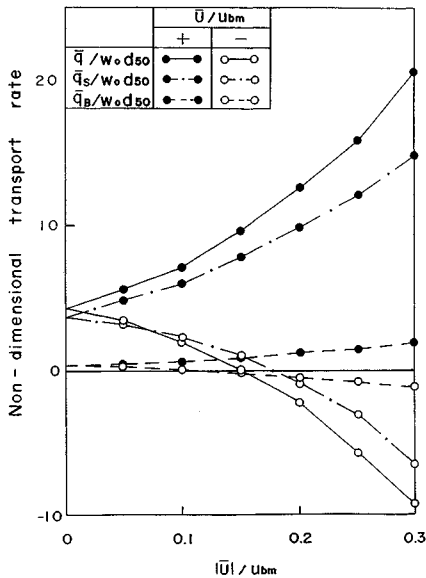


Fig. 8 Effect of current on the time-averaged bed, suspended and total sediment transport rates.

が増大するにつれて波の一周期で平均した掃流漂砂量、浮遊漂砂量および全漂砂量は増大しその割合も大きくなる。 \bar{U}/u_{bm} が 0.3 の場合の全漂砂量は波動のみの場の 4 倍程度である。一方、流れの断面平均流速が負の場合、 $|\bar{U}|/u_{bm}$ が増大するにつれて波の一周期で平均した掃流漂砂量、浮遊漂砂量および全漂砂量は減少する。掃流漂砂量は $|\bar{U}|/u_{bm}$ が 0.1 程度で移動方向が岸向きから沖向きに変わるのに対して、全漂砂量および浮遊漂砂量は流れの流速がわずかに大きい $|\bar{U}|/u_{bm}$ が 0.15~0.2 の間で全漂砂量および浮遊漂砂量の移動方向が岸向きから沖向きに変わる。 $|\bar{U}|/u_{bm}$ が 0.3 の場合の全漂砂量

の絶対値は波動のみの場の 2.3 倍程度である。流れの断面平均流速が負の場合、断面平均流速の絶対値が波のみの場の底面における最大水粒子速度の 20 % 程度までは漂砂量は徐々に減少するといったことを除けば、流れの断面平均流速が正および負の場合とも流速の増大に伴って漂砂量は増大するといった傾向は中村らの実験結果と一致する。

服部・上原²⁰⁾は戻り流れの鉛直分布を砕波帯内では底面で最大であり水面まで直線的に減少、砕波点では一様、砕波帯外では底面から水面まで直線的に増大、特に砕波点より汀線までの距離と等距離の沖浜では底面での流速は 0 であり、砕波帯内外での流れの断面平均流速の鉛直分布が砕波点よりの距離に比例して変化すると仮定している。服部・上原の実験結果によれば、戻り流れの大きさが波による水粒子速度の 10 % 程度となる地点は砕波点より汀線までの距離と等距離の地点とほぼ一致する。そこでの流れの鉛直分布は本研究で仮定した分布と同一である。服部・上原の実験の詳細が彼らの論文からは読み取れないが彼らの実験が傾斜海浜であり、本研究が水平床を対象としているといった違いはあるものの漂砂量と流れとの関係が良く似た傾向をしていることはきわめて関心あることのように思える。

5. 結 論

波と流れの共存場における境界層内の水粒子速度、浮遊砂濃度や漂砂量について数値解析的に検討し、流れの方向およびその大きさにより漂砂の移動量が変化し、特に流れの断面平均流速が負の場合、流れの断面平均流速が減少するにつれて漂砂の移動方向が岸向きから沖向きに変わり、流れが漂砂に及ぼす効果が大きいことが明らかとなった。しかしながら、本研究で解析対象とした流

れは底面から水面まで直線的に変化する場合であり、現地海岸で観測した周波数が0の流速分布、水面近傍では岸向きで底面付近では沖向き、とは異なる。現地海岸の流れの状況に即した解析が今後に残された課題である。また、浮遊砂濃度や漂砂量に関しては解析結果と実験結果等との比較・検討も行っていないことから、実験を実施するとともに実験結果との比較を通して共存場における漂砂現象を明らかにする必要があると考える。

参 考 文 献

- 1) Lundgren, H. : Turbulent currents in the presence of waves, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., pp.623~634, 1972.
- 2) Grant, W.D. and Madsen, O.S. : Combined wave and current interaction with a rough bottom, Jour. Geophy. Res., Vol.84, No.C4, 1797~1808, 1979.
- 3) Smith, J.D. : Modeling of sediment transport on continental shelves, The Sea, Vol.6, Wiley-Interscience, pp.539~577, 1977.
- 4) 田中 仁・首藤伸夫：一方向流を伴う振動流に関する研究, 第29回海岸工学講演会論文集, pp.259~263, 1982.
- 5) 浅野敏之・岡本 浩・岩垣雄一：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, 1983.
- 6) Bakker, W.T. and van Doorn Th. : Near bottom velocities in waves with a current, Delft Hydraulic Lab., Publication No.208, 25 p., 1980.
- 7) Kemp, P.H. and Simons, R.R. : The interaction between waves and a turbulent current; waves propagating with the current, Jour. Fluid Mech., Vol.116, pp.227~250, 1982.
- 8) Tanaka, H. and Shuto, N. : Friction coefficient for a wave current co-existing system, Coastal Eng. Japan, Vol.24, pp.105~128, 1981.
- 9) 樺木 亨：河口閉そく機構に関する基礎的研究(第1報), 第12回海岸工学講演会講演集, pp.162~167, 1965.
- 10) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄・伊藤三甲雄：波と流れによる砂移動について, 第15回海岸工学講演会講演集, pp.115~120, 1968.
- 11) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄：波と流れによる砂の移動について(II), 第17回海岸工学講演会論文集, pp.269~274, 1970.
- 12) 清水琢三・三村信男・渡辺 晃：波浪海浜流共存場における海浜変形と漂砂量モデル, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.229~233, 1983.
- 13) 佐藤 功・田中 仁・首藤伸夫：波・流れ共存場における岸沖漂砂量, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.311~315, 1984.
- 14) 伊福 誠：砕波帯における浮遊砂の濃度分布, ながれ, 第5巻, 第4号, pp.326~339, 1986.
- 15) 野田英明：波動による乱流境界層の発達, 第16回海岸工学講演会講演集, pp.23~27, 1969.
- 16) Kalkanis, G. : Transportation of bed material due to wave action, U.S. Army Coastal Eng. Res. Center, Tech. Memo. 2, 114 p., 1965.
- 17) 浜田徳一・加藤 始：流水の中の有限振幅波の計算, 第10回海岸工学講演会講演集, pp.1~6, 1963.
- 18) U.S. Army Coastal Eng. Res. Center : Shore Protection Manual, Vol.2, p.2-35, 1977.
- 19) 伊福 誠・柿沼忠男・後藤博光：非対称波浪下における浮遊砂濃度と漂砂量, 土木学会論文集, 第405号/II-11, pp.99~108, 1989.
- 20) 服部昌太郎・上原義和：戻り流れを考慮した岸沖漂砂量モデル, 第29回海岸工学講演会論文集, pp.223~227, 1982.

(1989.10.2・受付)