

波・流れ共存場における岸沖漂砂量

佐藤 功*・田中 仁**・首藤 伸夫***

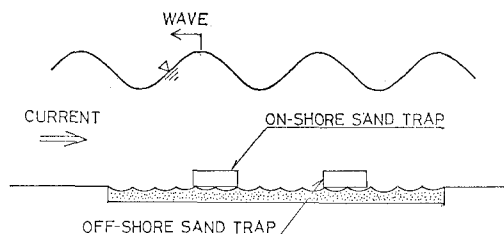
1. はじめに

波動場に伴う砂移動量に関する研究は、従来より数多く行なわれてきているが、波動運動に定常流れが重畳したケースについては実験例すら稀である。砕波帯内、あるいは河口付近の地形変化に関し、より精度良い変形予測を行なうには、波・流れ共存時の砂移動量の定式化が必要である。

著者らはこれまでに、波が流れを逆のぼる場における砂連上での砂移動機構を解明してきた。本研究では、浮遊砂を浮遊砂雲として捕えたモデルにより、共存時の砂連上での砂移動を表現し、それに基づいて、岸側および沖側漂砂量の算定を試みた。

2. 実験装置および実験条件

検証実験に用いた水路は、幅 30 cm、深さ 50 cm、長さ 10 m で、側面ガラス張りである。その中央部 2 m に渡って砂を厚さ 5 m に敷きつめた。フラップ式造波機により波を発生させ、波が流れを逆のぼる様に共存場を設定した(図一1)。砂連が定常状態に達したと判断した時点で、岸側と沖側に設置したアルミプレート製のサンドトラップにより採砂した。使用した砂は $d_{50}=0.018$ cm の細砂で、砂連上では浮遊砂が掃流砂に比べ卓越している。水理条件は、周期 $T=1.20$ s、波高 $H=5\sim 9$ cm、水深 $h=11\sim 25$ cm、定常流成分の断面平均流速 $\bar{u}_c=0\sim 20$ cm/s である。波と流れの相対強度 $\bar{u}_c/\bar{U}_w$ ($\bar{U}_w$: 微小振



図一1 波・流れ共存場

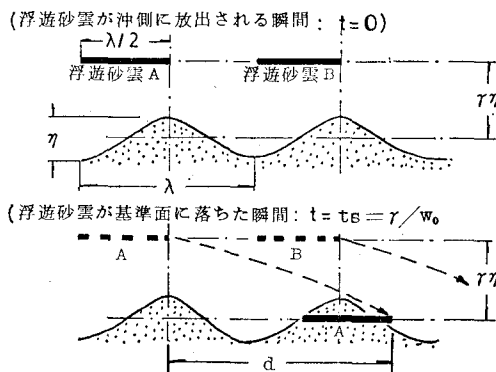
幅波理論による底面水粒子最大速度)は、サンドトラップの構造上あまり強くすることができず、 $0\sim 1.25$ にとどめた。

3. 浮遊砂雲のモデル

浮遊砂雲のモデル化に際し、以下の仮定を設ける。

- 砂連斜面上の渦中の砂は、反対側斜面に取り込まれることなく、全て砂連頂から放出され、長さ $\lambda/2$ (λ : 砂連波長) の浮遊砂雲となる。
- 浮遊砂雲が放出される高さは、砂連波高 η に比例するとし、波基準面から $\gamma\eta$ (γ : 定数) の地点とし、砂の沈降速度 w_0 に従って落下して、基準面に達した所で堆積する。
- 放出されてから落下するまでの水平砂粒子速度は、基準面から $\gamma\eta$ の水平水粒子速度に等しい。

以上の仮定を基に、砂連の岸側斜面に生じた渦中の砂が沖側に運ばれる様子を図示すると図一2のようになる。岸向の浮遊雲についても同様に考えることとする。



図一2 浮遊砂雲のモデル

4. 漂砂量算定の方法

4.1 基本式

まず、砂連斜面上の渦に含まれる砂の量を評価する。ランキン渦を砂連斜面上の渦にみため、その運動エネルギーが効率 e によって渦中の砂の位置エネルギーに転換されるとして (1) 式を得た。

* 正会員 工修 福島県技師 福島県庁土木部白河建設事務所

** 正会員 工博 宇都宮大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

$$A \cdot C = \frac{e}{8\pi(\rho_s/\rho_w - 1)} \rho_w \frac{1}{\eta} \Gamma^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 A : 渦面積、 C : 渦中砂の重量濃度、 ρ_w および ρ_s : 水および砂の単位体積質量、 Γ : 渦の循環である。式中の $A \cdot C$ が渦中における単位幅当りの砂の重量で、仮定により、これが浮遊砂雲に含まれる砂に相当する。

次に、浮遊砂雲が落下するまでに越える砂連頂の数 N は、 $d/(\lambda/2)$ により決定される (d : 浮遊砂雲の移動距離)。例えば、冲向浮遊砂雲に関する N は (2) 式の様に求められる。

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq d < \frac{\lambda}{2} \text{ の時 } N &= \frac{d}{\lambda/2} \\ \frac{\lambda}{2} \leq d < \lambda \text{ の時 } N &= 1 \\ \vdots & \quad \quad \quad \vdots \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

以上より、漂砂量 Q は、 a を比例定数として、(3) 式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} Q_{on} &= a(1/\eta) \Gamma_{on}^2 \cdot N_{on} \\ Q_{off} &= a(1/\eta) \Gamma_{off}^2 \cdot N_{off} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

添字 on, off は岸側、沖側に関する諸元を表わし、 Q の単位は、単位幅波一周期当りの漂砂重量である。

4.2 砂連スケール

砂連のスケール η , λ を求めるに当たっては、田中・首藤³⁾により提案された次式

$$\eta = 0.15\lambda \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\lambda}{d_{50}} = 0.65 \frac{T \hat{U}_w}{\pi d_{50}} \left\{ 1 + 0.37 \left(\frac{\hat{u}_o}{\hat{U}_w} \right)^{1.44} \right\} \quad \dots\dots (5)$$

を用いた。さらに共存場における砂連の非対称性を調べるために、 α/λ (α : 図-3 参照) と $\hat{u}_o/\hat{U}_w$ の関係を示

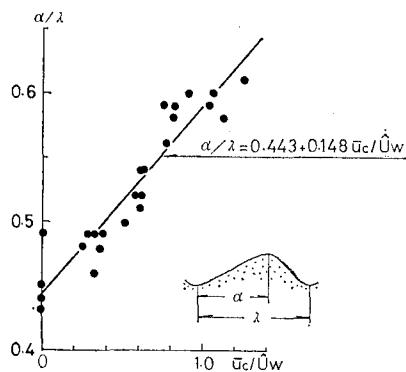


図-3 砂連の非対称性

したのが図-3である。本実験の範囲内では、直線的な関係があるとして図中の直線

$$\frac{\alpha}{\lambda} = 0.443 + 0.148 \frac{\hat{u}_o}{\hat{U}_w} \quad \dots\dots\dots (6)$$

を採用した。

以上により、水理条件から砂連の概形が決定される。

4.3 水面波形

Γ および d は、砂連付近の水粒子水平速度から計算される。この場合、便宜的に次の様な水面波形を考えることにより、底面付近の水平流速を求めた。

- ① 水面波形の山および谷の周期 T_1, T_2 、波高 H_1, H_2 はストークス波第2近似解により求める。
- ② 山と谷に対して、それぞれの周期、波高をもつ正弦波をあてはめる。
- ③ 底面付近の流速は、それぞれの正弦波に対して、田中・首藤³⁾の波・流れ共存時境界層理論を適用する。

上記 ①, ②, ③ を図-4 に示す。

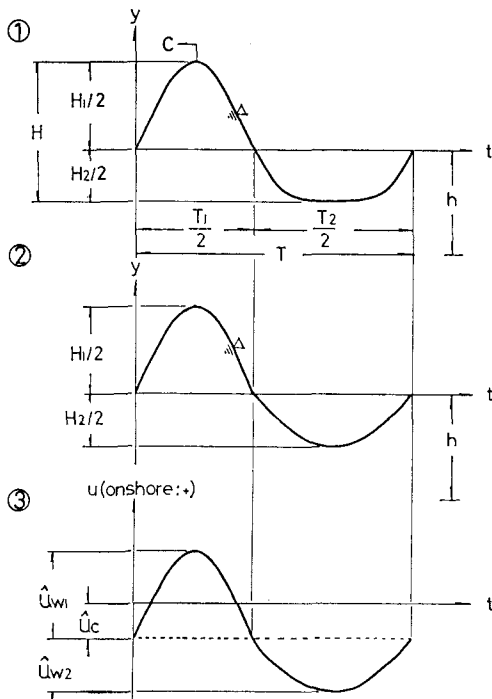


図-4 正弦波の合成による水平流速の経時変化

ここで、 $\hat{u}_o$, $\hat{u}_{w1}$, $\hat{u}_{w2}$ は境界層理論によって導かれる底面付近の流速で、 $\hat{u}_o$ は定常流成分、 $\hat{u}_{w1}$, $\hat{u}_{w2}$ は波の山と谷に対する波動成分の最大値である。基準面でノン・スリップになると考え、 Γ と d の計算には、それぞれ基準面から η , $\gamma\eta$ の高さの流速を使用した。

4.3 d について

図-2 に示す様に、浮遊砂雲の浮遊時間 t_s は $t_s = \gamma\eta/w_o$ で与えられる。よって浮遊砂雲の岸向および冲向移動距離 d_{on} , d_{off} は図-5 に示す斜線部の面積として求まる。ここで岸向流速を正としている。(3) は $\hat{u}_o$ の影響が大きい場合の d_{on} であり、岸向浮遊砂雲の沖側移動が表現されることになる。

4.4 Γ について

(1) 循環の評価

Γ の試価式として、柴山⁴⁾が示した渦粘性による Γ の

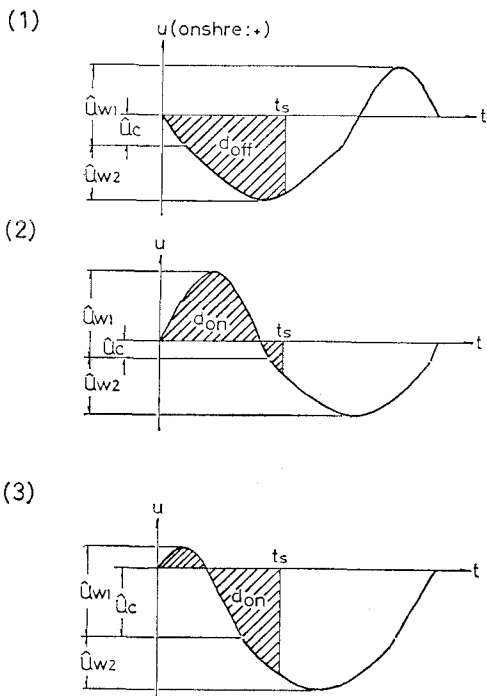


図-5 浮遊砂雲の移動距離

減衰を考慮した式を、共存場にあてはめた次式

$$\frac{d\Gamma}{dt} = k_1(-\hat{u}_c + \hat{u}_w \sin \sigma t)^2 - k_2 \Gamma \quad \dots\dots\dots (7)$$

を $t=t_1=\sin^{-1}(\hat{u}_c/\hat{u}_w)/\sigma$ で $\Gamma=0$ のもとに解いた式を用いた。即ち

$$\Gamma(t) = [A(t) - A(t_1)]e^{-k_2 t} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$A(t) = \frac{k_1}{k_2} e^{k_2 t} \left[\hat{u}_c^2 - 2\hat{u}_c \hat{u}_w \left(\sin \sigma t - \frac{\sigma}{k_2} \cos \sigma t \right) \right. \\ \left. \left(1 + \frac{\sigma^2}{k_2^2} \right) + \frac{\hat{u}_w^2}{2} \left\{ 1 - \left(\cos 2\sigma t + \frac{2\sigma}{k_2} \sin 2\sigma t \right) \right\} \left(1 + \frac{4\sigma^2}{k_2^2} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

を用いた。ここに $\sigma=2\pi/T$ である。但し (8), (9) 式は Γ_{on} の計算に用いる式で、 $\hat{u}_w$, σ に添字 1 を付けて計算を行なう。この場合 $\sigma_1=2\pi/T_1$ であり、評価時間は岸向流速の継続時間ととして $t=T_1/2-t_1$ とした。 Γ_{off} の計算では、正弦波の合成のために式が複雑になるが、結果を示せば (10) 式のとおりである。この場合の評価時間は沖向流速の継続時間とした。

$$\Gamma_{off} = [A_1(T_1/2) - A_1(T_1/2+t_0) + \Gamma_2 \cdot e^{k_2(T_1/2+t_0)}] e^{-k_2 \cdot T_1/2}$$

$$\Gamma_2 = [A_2(T_2/2) - A_1(t_0) - A_2(0) + A_1(0)] e^{-k_2 \cdot T_2/2}$$

$A_1(t)$: (9) 式の $\hat{u}_c$ の符号を逆にして、 $\hat{u}_w$, σ に添字 1 を付けた式

$A_2(t)$: (9) 式の $\hat{u}_c$ の符号を逆にして、 $\hat{u}_w$, σ に添字 2 を付けた式

$$t_0 = \sin^{-1}(-\hat{u}_c/\hat{u}_{w1})/\sigma_1 \quad \dots\dots\dots (10)$$

(2) 減衰係数 k_2

k_2 は渦粘性による循環の減衰を表わす係数であるので、まず波動場での流れの状態を規定するレイノルズ数 $\hat{U}_w d_0/\nu$ (d_0 : 微小振幅波理論による底面水粒子の 2 倍振幅, ν : 水の動粘性係数) により k_2 を表現することを試みる。

(8), (9) 式で、 $\hat{u}_c=0$ とし、 $\hat{u}_w$ を $\hat{U}_w$ に置換した次式

$$\Gamma(t) = \frac{k_1}{2} \hat{U}_w^2 \left\{ \frac{1}{k_2} (1 - e^{-k_2 t}) + \frac{1}{k_2^2 + 4\sigma^2} \cdot (k_2 e^{-k_2 t} - k_2 \cos 2\sigma t - 2\sigma \sin 2\sigma t) \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

を以下の式群

$$\Gamma^* = \frac{\Gamma\sigma}{\hat{U}_w^2}, \quad t^* = \sigma t, \quad C_1^* = \frac{k_2}{\sigma} \quad \dots\dots\dots (12)$$

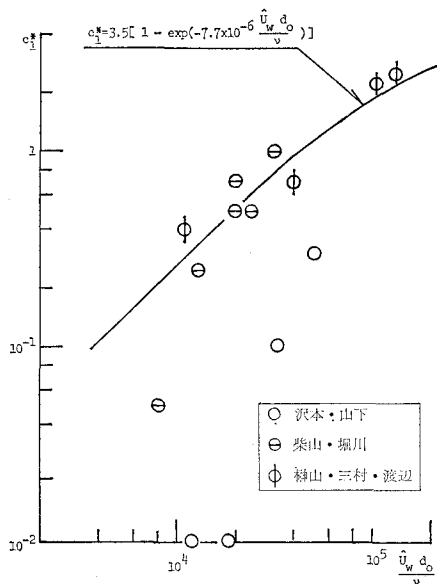
によって無次元化すると (13) 式になる。式中の k_1 は

$$\Gamma^* = \frac{k_1}{2} \left\{ \frac{1 - \exp(-C_1^* t^*)}{C_1^*} - \frac{1}{C_1^{*2} + 4} \cdot (C_1^* \exp(-C_1^* t^*) - C_1^* \cos 2t^* - 2 \sin 2t^*) \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$k_1 = \varepsilon k'^2/2$ であって、 $\varepsilon=0.5$ とし、 k' は沢本⁵⁾にならい $k'=1.4$ とした。この式を用いて、沢本^{5),6)}、柴山⁴⁾、渡辺⁷⁾らによる循環の実験値に最も合致する C_1^* と $\hat{U}_w d_0/\nu$ の関係を 図-6 に示した。その回帰式として (14) 式を得た。

$$C_1^* = 3.5 \left\{ 1 - \exp \left(-7.7 \times 10^{-6} \frac{\hat{U}_w d_0}{\nu} \right) \right\} \quad \dots\dots (14)$$

但し、(14) 式は波動場における式である。共存場にお

図-6 $C_1^* \sim \hat{U}_w d_0/\nu$

いては, Γ_{on} に対して

$$C_1^* \rightarrow k_2/\sigma_1, \quad \hat{U}_w \rightarrow -\hat{u}_c + \hat{u}_{w1}, \quad d_0 \rightarrow d_1$$

Γ_{off} に対して

$$C_1^* \rightarrow k_2/\sigma_2, \quad \hat{U}_w \rightarrow \hat{u}_c + \hat{u}_{w2}, \quad d_0 \rightarrow d_2$$

と置き換えることによって k_2 を表現できると仮定した。ここに d_1, d_2 は波一周期間の水粒子の岸向および沖向移動距離であり, 基準面から η の高さの水平流速により計算した。

(3) vorticity fraction; ε

ε は砂連頂を通過する渦度の取り込みの程度を表わすもので, 渡辺ら⁷⁾は U 字管振動流装置を用いて, ε を砂連斜面勾配 S と主流流速の最大値 U_{max} の関係として表わした。この際, ε の評価式は (15) 式を用いており,

$$\Gamma(t) = \frac{\varepsilon}{2} \int_0^t u^2 dt \quad \dots\dots\dots (15)$$

Γ と u の実験値から ε を評価している。しかし, (15) 式には (7) 式に見られる Γ の減衰項が入っていない。

そこで, ε の評価式として (11) 式を用いることにする。但し, 式中の k_2 は (14) 式を用い, $\hat{U}_w$ として U_{max} を使用した。循環の実験値と計算値が最も合致する様に定めた ε と S および U_{max} の関係を 図-7 に示

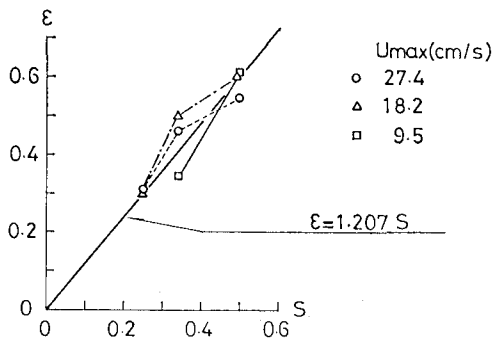


図-7 $\varepsilon \sim S$

す。 U_{max} による ε の変化はほとんど認められない。よって Γ の計算に減衰項を入れることにより, ε を S のみの関数として評価できる。本研究では図中の回帰式

$$\varepsilon = 1.207 S \quad \dots\dots\dots (16)$$

を用いた。 S は 4.2 節から容易に求まる。例えば, 岸側斜面勾配 $S_{on} = \eta/\alpha$ である。

5. 計算値と実験値の比較検討

以上により求められる η, Γ, N を (3) 式に代入し, その計算値が, 定常流を次第に強くしていった時の実験値の変化に対応する様に γ を定めた結果, $\gamma = 1.8$ となった。さらに, この γ を用いて計算値と実験値が良く合う様に a を定めると

$$a = 1.03 \times 10^{-5} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。これから効率 e を逆算すると $e = 0.42$ となり,

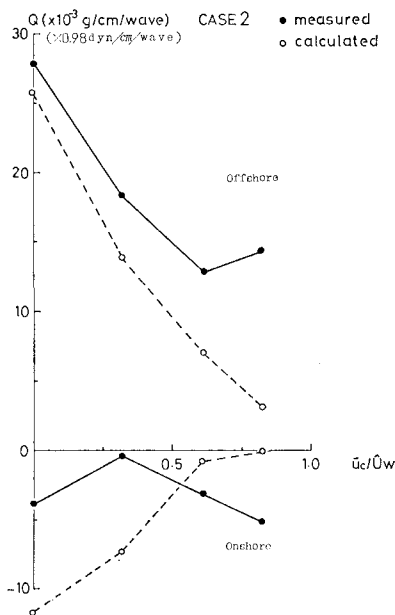
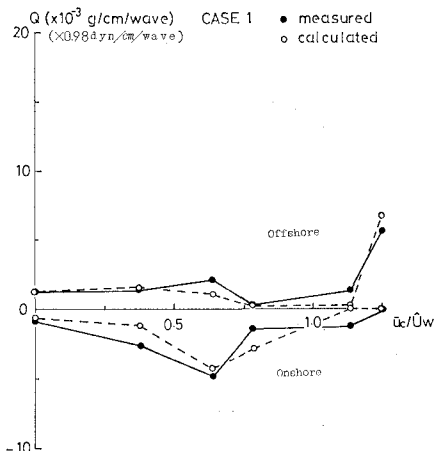


図-8 計算値と実験値の比較 (検討前)

オーダー的に見れば許容される値であろう。計算結果を 図-8 に示す。縦軸が漂砂量 Q であり, 沖側漂砂量を正とした。横軸には $\hat{u}_c/\hat{U}_w$ をとって定常流が漂砂量に与える影響を示した。実験値を実線で結び, 計算値を破線で結んだ。CASE 1, CASE 2 は, 波高水深比 H/h がほぼ 0.26 および 0.45 の場合である。

図-8 に示される様に, 岸沖漂砂量は $\hat{u}_c/\hat{U}_w$ および H/h かなり影響され, 実験値と計算値のズレのパターンも変化する。そこで, a を一定値ではなく, $\hat{u}_c/\hat{U}_w$ と H/h により変化するものとして検討した結果 (18) 式を得た。

$$\begin{aligned} \hat{u}_c/\hat{U}_w = 0, \text{ 岸側漂砂量に対し} \\ a = 1.03 \times 10^{-5} \exp \{2.9(H/h - 0.80)\} \end{aligned}$$

上記以外の岸側, 沖側漂砂量に対し

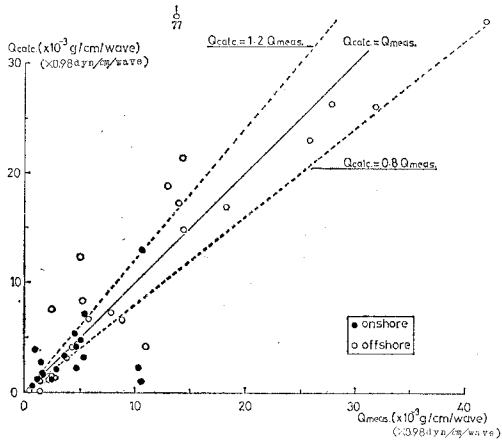


図-9 計算値と実験値の比較 (検討後)

$$a = 1.03 \times 10^{-5} \exp \{ (6.2 \bar{u}_c / \bar{U}_w + 6.5) \cdot (H/h + 0.2 \bar{u}_c / \bar{U}_w - 0.47) \} \quad \dots\dots\dots (18)$$

この a を用いた計算値 Q_{calc} と実験値 Q_{meas} の比較をに 図-9 示す。黒丸が岸側漂砂量、白丸が沖側漂砂量である。なお、漂砂量測定時に砂面とトラップ端の接合点によって攪乱が生じたデータは除外した。±20% 程度の誤差でまとまっている。

6. おわりに

本算定式 (3) は、波と流れの条件を入力することによ

り、岸側漂砂量と沖側漂砂量がそれぞれ計算され、両者の差をとれば、net の漂砂量が求められ、図-1 に示す共存場における net の岸側漂砂量も、実験値と良い一致を示した。しかし、適用される周期が限られていること、計算の上で $\bar{u}_c / \bar{U}_w$ に上限が存在するなどの問題があり、今後の課題となるものである。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費（代表者 東工大日野教授）により行なわれたものであり、ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 佐藤 功・田中 仁・首藤伸夫：波・流れ共存場における砂移動，第 38 回年講概要集，pp. 183～184，1983。
- 2) 田中 仁・首藤伸夫：河口部の砂移動現象に関する実験および現地観測，第 28 回水講演文集，pp. 137～142，1984。
- 3) 田中 仁・首藤伸夫：波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験，第 27 回海講演文集，pp. 163～167，1980。
- 4) 柴山知也・堀川清司：Laboratory Study on Sediment Transport Mechanism due to Wave Action, Proc. of JSCE, No. 296, April 1980。
- 5) 沢本正樹・山下俊彦：砂連上の振動流境界層流れ，第 26 回海講演文集，pp. 51～55，1979。
- 6) 沢本正樹・山下俊彦・栗田敏寿：砂連上の振動流境界層流れ，第 27 回海講演文集，pp. 226～229，1980。
- 7) 柳山 勉・三村信男・渡辺 晃：砂連上の振動流境界層に関する実験的研究，第 28 回海講演文集，pp. 237～241，1981。