

沖浜領域における縦漂砂量の算定方法に関する研究

石田 昭*・林 功**・高橋宏直***

1. 緒 言

沖浜領域における縦漂砂の方向および漂砂量についてはかなり以前から研究が進められてきたが、漂砂の機構が明確には判っていないために、波の条件によって漂砂の方向が変化する理由などに関して依然として不明な点が多い。従来の研究は実験的にも解析的にも主として定形進行波としての漂砂現象を取り扱ったものである。一方細井ら¹⁾が指摘したよう

に二次波峯現象の下では波形が前傾する場所と後傾する場所とが交互に出現して、漂砂の方向もそれに応じて場所的に逆転するために、実験水槽内に波長の長い Sand Wave が発生する。このような前後非対称波形は、対称波形に比較して多くの浮遊漂砂を発生させるので、二次波峯が発生しない程度の非常に弱い非定形波の下でもこの Sand Wave が発生することがあり、漂砂の実験では観測場所によって漂砂量が大きく異なることがある。この現象は Bagnold²⁾ や本間ら³⁾の実験においても見られたようであり、近年では Hulsbergen⁴⁾、Bijker ら⁵⁾、野田ら⁶⁾および Van de Graaff ら⁷⁾が報告している。以上のことを考え合わせると、現地波を対象とするためには波形の前後非対称性を考慮に入れた研究が必要であると思われる。

本研究は二次波峯現象下の漂砂に関する実験を目視して得た知見を基に、リップルが発達している場所での漂砂機構をモデル化し、モデル式に含まれる掃流砂係数 K_b および浮遊砂係数 K_s を実験的に決定して、漂砂量および漂砂方向を算定する方法を提案するものである。最後に重複波現象および有限振幅の定形進行波に適用して算定方法の妥当性を検討した。

2. 縦漂砂量算定方法

提案する算定方法はサンドリップルが発達している場

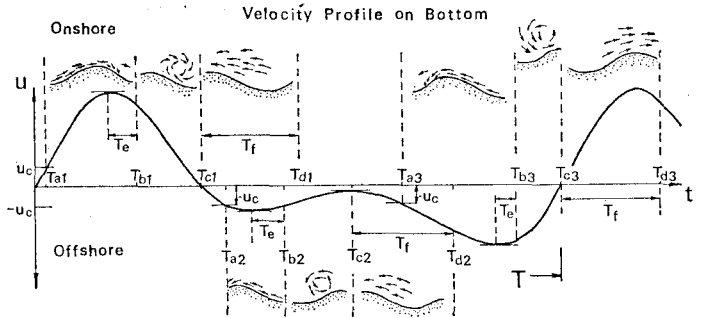


図-1 漂砂機構モデルの説明

所での掃流砂量および浮遊砂量を任意の底面流速波形の下で数値積分によって求めようとするものである。図-1 はモデル化した漂砂機構を説明するために示した流速波形である。1回の漂砂現象を掃流砂→渦→浮遊砂→沈降とすると、図のように二次波峯が1個発生している場合には1周期中に3回の漂砂が生じることになる。

掃流砂の移動開始：底面流速とその加速度 $\partial u / \partial t$ が同符号の時で、かつ $|u|$ が限界移動流速 u_c に等しくなった時 (T_{ai} で表わす。 $i=1, 2, 3, \dots$) に掃流砂の移動が始まる。 u_c は Kormar-Miller⁸⁾ による次式

$$\frac{u_c}{sgd} = 0.21 \left(\frac{u_c \cdot T}{\pi d} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

を用いる。ここで s は底質の水中比重、 d は底質の粒径、 T は周期である。

掃流砂の停止および渦の発生： $|u|$ が最大となった後は u と $\partial u / \partial t$ が異符号となるが、 T_e 時間だけは掃流砂が継続し、そこで掃流砂が停止して渦が発生する。 T_e は定形波形の場合、砂村ら⁹⁾によれば位相にして約 $\pi/6$ と報告されている値である。正弦波形に当てはめるとこの値は $1/3 \times \pi/2$ に相当するから、ここでは再び u と $\partial u / \partial t$ が同符号となる時刻 (T_{ei}) までの時間の $1/3$ とすることにして、その時刻を T_{bi} で表わす。掃流砂量 q_b の算定式は次式のように仮定する。

$$q_b = K_b \frac{\rho}{T} \sum_{i=1}^n \int_{T_{ai}}^{T_{bi}} u^3 dt = K_b \cdot B \dots \dots \dots (2)$$

n の値は1周期中に生ずる漂砂の回数で、図-1 のような場合には3である。 T_{bi} から T_{ei} までは u と $\partial u / \partial t$

* 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 奈良県土木部

*** 正会員 工修 運輸省第二港湾建設局

が異符号であり、この間は渦が発生してそれまでに運搬された掃流砂の何割かがこの渦の中に取り込まれる。渦の中の最大濃度は T_{ci} の時に生じ、 u と $\partial u/\partial t$ の積の絶対値を T_{bi} から T_{ci} まで積分した値

$$\int_{T_{bi}}^{T_{ci}} u \frac{\partial u}{\partial t} dt = \frac{u^2(T_{bi}) - u^2(T_{ci})}{2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

に比例しているものと仮定する。

浮遊砂の移動開始: T_{ci} 後は渦が壊れてその後の流速に乗って浮遊状態で運搬が開始される。浮遊砂濃度は沈降時間 T_f までの間に直線的に減少するものと考えて、浮遊砂量の算定式は次式のように仮定する。

$$q_s = K_s \frac{\rho}{T} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{u^2(T_{bi}) - u^2(T_{ci})}{2} \right\} \times \int_{T_{ci}}^{T_{ci}+T_f} \left(\frac{T_{ci}+T_f-t}{T_f} \right) u \cdot dt$$

$$= K_s \cdot S \quad \dots\dots\dots (4)$$

沈降時間 T_f は渦の高さが砂れんの高さ η 程度であると考えて、 η を底質の沈降速度 w_0 で割った値とした。

$$T_f = \eta/w_0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

w_0 は速水による値を使用し¹⁰⁾、 η は厳密には場所的に変化する値であるが、近似的に一定値と考えて本間ら³⁾による次式を用いた。

$$\eta/\lambda = 0.175(\lambda/d_0)^{0.190} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\lambda = \alpha \cdot T^{\beta} \cdot d_0^{\gamma}, \quad d_0 = H \operatorname{cosech} kh \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで H は二次波峯が発生する前の波高(二次波峯追いつき点の波高とも云える)を代入した。 k は波数、 h は水深、 λ は砂れんの波長であり、 α, β, γ は底質の直径が 0.02 cm から 0.03 cm の間ではそれぞれ 1.93, 0.289, 0.422 である。 q_b と q_s は重量表示である。

3. 二次波峯現象の漂砂量

3.1 実験方法と実験結果

実験水槽は全長 26.4 m、幅 60 cm、高さ 1.2 m の片面ガラス張りのもので、一端には造波装置を、他端には消波のために約 1/10 勾配で碎石を置いた。水槽底面にはほぼ均一な粒径を持つ市販の珪砂($d_{50}=0.021$ cm、比重 2.42)を長さ 17.1 m、厚さ 20 cm で敷いた。実験条件は表-1 に示すようなもので X は二次波峯の発生

表-1 実験条件

Data No.	h (cm)	H (cm)	T (sec)	X (m)
1	20	6	1.64	6
2	20	6	1.94	8
3	20	6	2.10	10
4	20	6	2.20	12
5	20	6	2.28	14
6	30	10	2.08	8
7	30	10	2.24	10
8	30	10	2.37	12
9	30	10	2.50	14

間隔である。造波を開始してから砂床全面に砂れんが発生した状態で二次波峯発生間隔を 8 等分した各点 ($mX/8$, $m=1, 2, \dots, 8$) において捕砂器により沖向き漂砂量及び岸向き漂砂量を計測した。

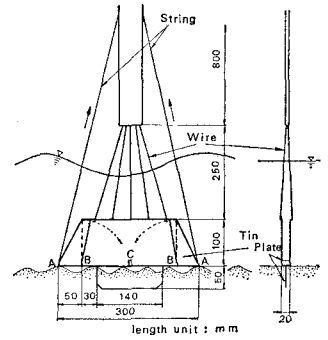


図-2 捕砂器

捕砂器は図-2 に示

すようなブリキ製のもので、捕砂器の先端 A を砂れんの頂部に合わせて、横振れ防止のために底部に取り付けたブリキの板を砂中に埋め込んで設置した。計測中に砂れんが若干移動する場合にはそれに応じて捕砂器も移動させたが、横振れさせずに移動させるためにも埋め込んだ板は効果があった。捕砂器中央 C には反対側からくる漂砂と混じわらないように仕切板(高さ 1 cm 程度)が設けてあるが、実際には C 点まで来る砂はなかった。また沖向き漂砂と岸向き漂砂を同時に捕砂することは困難であり、別々に計測を行なった。設置して 5 分経過したところで素早く両側の糸を引っ張って B 点を中心に $\overline{AB}$ を回転させて蓋をし、砂が流出しないようにしてから捕砂器を引き出して捕砂量を計量した。図-3 は岸向き漂砂量 $Q_{(+)}$ と沖向き漂砂量 $Q_{(-)}$ の差を取って示した正味の实测漂砂量 Q である。このような捕砂方法によると捕砂器先端より流出する砂(特に掃流砂が多い)もあるので $Q_{(+)}$ および $Q_{(-)}$ の値そのものは正確ではない。しかし両者の差を取った正味の漂砂量 Q ならば、あいまいさが相殺されてかなり正確な値になるものと期待される。 X 点(0 点も同じ)は正弦波形に近く、 $1/2 \cdot X$ 点は主峯と主峯の中央に二次波峯が出現しているが、

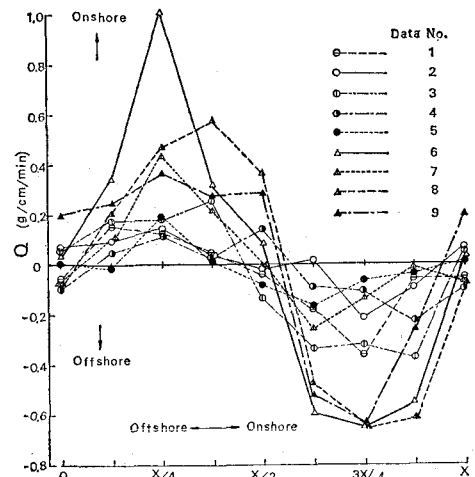


図-3 漂砂量(実験結果)

そうでない変形の弱い場合には有限振幅理論的な波形をしている場所であり、いずれも前後対称波形(正の加速度と負の加速度が同じになる)となる場所である。図からわかるようにこのような場所での漂砂量は波形が前傾している $1/4 \cdot X$ 点付近および後傾している $3/4 \cdot X$ 点付近の漂砂量に比較するとかなり少ないことがわかる。

3.2 実験値と計算値の比較

二次波峯現象下の底面流速を小型プロペラ式流速計(直径 5 mm)で計測しようとしたが、振動流としての精密な検定を行なうと 2 秒程度の波であっても応答性が悪く、流速波形を得ることは不可能であることがわかった。そこで水位波形から底面での流速波形を求めることにし

$$u = \frac{\sigma_1 A_{01}}{\sinh k_1 h} \cos(k_1 x - \sigma_1 t) + \frac{2\sigma_1 A_{12}}{\sinh k_2 h} \cos(k_2 x - 2\sigma_1 t) + B_{21} \frac{2k_1}{\sinh 2k_1 h} \cos 2(k_1 x - \sigma_1 t) \\ + B_{23} \frac{(k_1 + k_2)}{\sinh(k_1 + k_2)h} \cos\{(k_1 + k_2)x - 3\sigma_1 t + \pi\} + B_{24} \frac{(k_1 - k_2)}{\sinh(k_1 - k_2)h} \cos\{(k_1 - k_2)x + \sigma_1 t - \pi\} + U_{\text{mass}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$B_{21} = A_{02} \cdot g - \frac{1}{4} A_{01}^2 \sigma_1^2 (3 - \coth^3 k_1 h) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$B_{23} = A_{13} \cdot g - \frac{1}{2} A_{01} \cdot A_{12} \cdot \sigma_1^2 (7 - 2 \coth k_1 h \coth k_2 h) / 3\sigma_1 \coth(k_1 + k_2)h \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$B_{24} = -A_{11} \cdot g + \frac{1}{2} A_{01} \cdot A_{12} \cdot \sigma_1^2 (3 - 2 \coth k_1 h \coth k_2 h) / \sigma_1 \coth(k_1 - k_2)h \quad \dots\dots\dots (11)$$

質量輸送速度 U_{mass} は Longuet-Higgins による次式

$$U_{\text{mass}} = \frac{5}{16} k_1 \sigma_1 H^2 \frac{1}{\sinh^2 k_1 h} \quad \dots\dots\dots (12)$$

を代入して計算した。

さて式(2)と式(4)に式(8)の底面流速を代入して数値積分を行なって B_j と S_j (j は観測点番号 1, 2, ..., 8) を求め、実験値を Q_j 、誤差を ϵ_j とすると、

$$\epsilon_j = Q_j - K_b B_j - K_s S_j \quad \dots\dots\dots (13)$$

となり、最小自乗法で K_b と K_s を決定すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} K_b &= (\sum Q_j B_j \cdot \sum S_j^2 - \sum Q_j S_j \cdot \sum B_j S_j) / P \\ K_s &= (\sum Q_j S_j \cdot \sum B_j^2 - \sum Q_j B_j \cdot \sum B_j S_j) / P \\ P &= \sum B_j^2 \cdot \sum S_j^2 - (\sum B_j S_j)^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

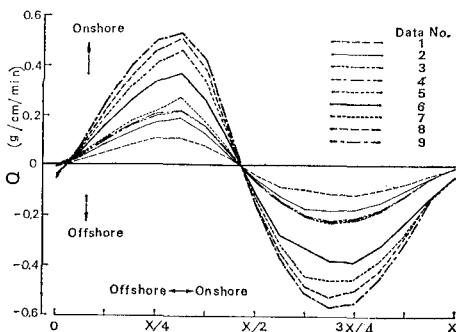


図-4 漂砂量(計算結果)

た。二次波峯現象は基本成分波(水位振幅 A_{01})と 2 次の自由波(A_{12})の干渉によってできる A_{11} , A_{13} および A_{01} 自身の干渉波 A_{02} などの成分波が合成したものであるとして近似的に表現できる¹¹⁾。 A_{01} と A_{12} を与えると、 A_{02} , A_{11} , A_{13} などの水位振幅および速度ポテンシャルは浜田¹²⁾の二次干渉理論によって求めることができるが、 A_{02} , A_{11} , A_{13} を実験値と比較すると過大な値となる。そこで、実際に近い流速を得るために水位振幅 A_{02} , A_{11} , A_{13} および波長などをすべて実験値を代入して速度ポテンシャルを逆算し、流速波形を得ることにした。浜田の二次干渉理論により底面流速は次式のように与えられる。

最終的に 9 ケースの実験の中から傾向が外れている No. 5 と No. 6 を除いた 7 ケースの平均値として $K_b = 2.49 \times 10^{-4}$, $K_s = 1.06 \times 10^{-2}$ の値を得た。物理量の基本単位は g, cm, sec を使用している。ただし図中の漂砂量は 60 倍して g/cm/min で表示してある。この値を使って計算による漂砂量を示したのが 図-4 である。図-3 の実験値と比較するとかなり良好な一致がみられる。図-4 は正味の漂砂量であるが、掃流砂と浮遊砂の岸向き量(+)と冲向き量(-)を別々に計算して示した一例が 図-5 である。点線は浮遊砂を、実線は掃流砂を示

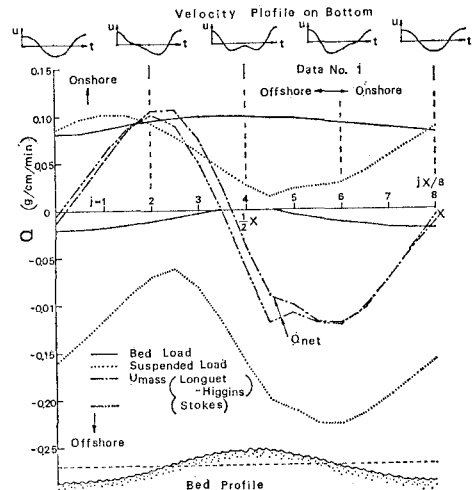


図-5 漂砂量の内訳(計算結果)

し、一点鎖線は 図—4 と同じ正味の漂砂量である。 図—5 をみると掃流砂は全領域で岸向きの方が卓越している。正弦波形に近い 0 点および X 点では岸向きの掃流砂 $q_{b(+)}$ と浮遊砂 $q_{s(+)}$ がほぼ同じ量で両者の和が沖向き浮遊砂 $q_{s(-)}$ と釣り合って正味の漂砂量は少ない。 $U_{mass}=0$ を代入して計算すると当然 $q_{s(+)} \div q_{s(-)}$, $q_{b(+)} \div q_{b(-)}$ が得られる。一方 $1/2 \cdot X$ 点 (二次波峯発生点) では岸向き流速が大きいので $q_{b(+)}$ は最大となるが、 $q_{b(-)}$ は 0 である。浮遊砂は沖向きに卓越して $q_{b(+)}$ と同じ規模なので正味の漂砂量は少なくなる。浮遊砂は前傾波形 (正の加速度が卓越する) となる $1/4 \cdot X$ 点付近では岸方向に卓越し、後傾波形 (負の加速度が卓越する) となる $3/4 \cdot X$ 点付近では沖方向に卓越し、前後対称波形 (正と負の加速度が同じ) の場所よりもかなり多くの浮遊漂砂が発生する。このことは渦の中に取り込まれる漂砂量が加速度にも関係すること、および加速度が大きければ渦が壊れてから運ばれる速度も急激に大きくなるので浮遊砂が沈降する前に運ばれることと関連していると思われる。 図—5 の中で二点鎖線は式 (12) より小さな値のストークス波理論の値を代入して計算したものであるが、掃流砂と浮遊砂の値が少し変化するが、正味の漂砂量にはそれほど変化のないことがわかる。

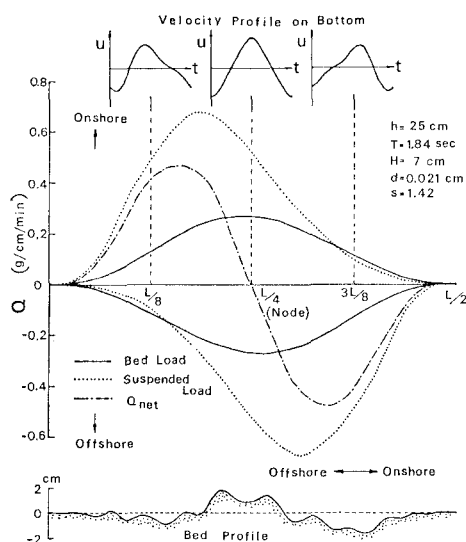
4. 重複波および定形進行波への適用

本研究で提案した算定方法の妥当性を検討するためにまず Tadjbakhsh-Keller による重複波理論を用いて計算した。質量輸送速度の値として野田ら¹³⁾による次式

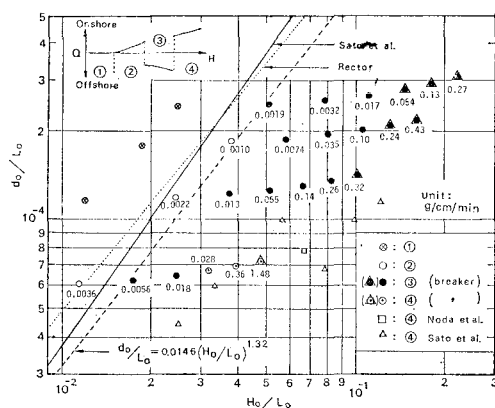
$$U_{mass} = \frac{\pi^2 K(\eta)}{8} \frac{(2a)^2}{L \cdot T \sinh^2 kh} \sin 2kx \quad \dots (15)$$

において掃流砂の計算には境界層内の最大値として $K(\eta)=0.4$ を代入し、浮遊砂の計算には境界層外の値として $K(\eta)=-3.0$ を代入して求めたのが 図—6 である。しかしながら $U_{mass}=0$ として計算した値と比較しても、ほとんど差は見られず、やはり流速波形の方が重要な要素であるように思われる。 図—6 は実験の波長, 周期, 水深, 底質粒径などを代入して計算したもので、 図—5 と同じ表示方法である。重複波の腹 ($x=0, 1/2 \cdot L$) では掃流砂も浮遊砂も発生していない。掃流砂は節を中心にしてその前後でかなり発生するが、沖向きと岸向きがほぼ同量である。岸向き浮遊砂 $q_{s(+)}$ が最大になるのは節の少し沖側であり、流速波形からみて加速度も正の値が卓越する。沖向き浮遊砂 $q_{s(-)}$ が最大になるのは節の少し岸側であり、加速度は負の値が卓越する。正味の漂砂量は結局浮遊砂の傾向で決定され、この場合は節に砂が堆積し、腹の前後は侵食されることが理解できる。下段に示したのは実験後の底面変化を水槽側面からスケッチしたもので、計算結果と一致する傾向で変化している。

つぎに進行定形波に適用するために Skejelbreia の第



図—6 重複波による漂砂量 (計算結果)



図—7 進行波による漂砂の卓越方向

3 近似解を代入して計算した。 U_{mass} の値は式 (12) を代入した場合と、ストークス理論の値を代入した場合で、漂砂量の絶対値に多小の変化がみられるが漂砂方向が変わるケースは境界付近の 2 ケースだけであった。ここでは佐藤ら¹⁴⁾の実験的研究と比較するために U_{mass} は式 (12) を、底質の比重は 2.65 を代入し、底質粒径は (K_s, K_b を決定したのが 0.021 cm であるので) 0.021 cm を代入した。 図—7 は漂砂方向を示したもので、⊗印は漂砂のない場合、白丸は岸向き、黒丸は沖向き、丸印に三角を付けたものは碎波指標でみると碎波する場合である。数値は漂砂量 (g/cm/min) を示す。興味深いのは周期を一定にして波高を大きくしていくと岸向き、沖向き、岸向きと方向が再度逆転するケースが見られる点である。△印は佐藤らの実験で再度逆転する場合だけをプロットしたもので、□印は野田ら¹⁵⁾の実験によるものである。前後対称波形となる定形進行波でも卓越方向ができるのは、上下非対称であれば渦が壊れてから直後の流速波形

が冲向きと岸向きで違うことが原因であり、漂砂現象には流速波形そのものが重要な役割を持っていることが考えられる。

以上に述べて来たように重複波と進行波にこの算定方法を適用するとほぼ妥当な結果が得られることがわかる。

5. 結 論

1) 任意の底面流速波形の下で、沖浜領域の掃流漂砂および浮遊漂砂量を算定する方法を提案した。

2) このモデルによれば二次波峯現象下でみられる波長の長い Sand Wave の発生を説明することができた。

3) 重複波現象に適用すると、節の近辺で堆積されて、腹の前後で侵食される場合の説明ができた。

4) 定形進行波に適用すると、漂砂方向は佐藤らの実験と同じ傾向となる。

5) 砂れんが発生している場所での漂砂現象にとっては質量輸送速度よりも流速波形(水位波形でも同じ)そのものが重要な要素であると考えられる。

最後に本研究にあたり実験および資料整理にご協力を頂いた大学院生浅田耕司君ならびに当時学部生であった近藤朗君、藤原昌宏君、近藤真章君に謝意を表します。また本研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを明記する。

参 考 文 献

- 1) 細井正延・石田 昭・平山秀夫: 進行波による dune の発生に関する研究, 土木学会第 25 回年次学術講演会講演

概要集, 1970.

- 2) Bagnold, R. A.: Motion of waves in shallow water—Interaction between waves and sand bottoms, Proc. Royal Soc., Vol. 187, 1946.
- 3) 本間 仁・堀川清司・鹿島遼一: 波による浮遊砂に関する研究, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp. 159~168, 1964.
- 4) Hulsbergen, C. H.: Origin, effect and uppression of secondary waves, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 392~411, 1974.
- 5) Bijker, E. W., E. V. Hijum and P. Vellinga: Sand transport by waves, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 1149~1167, 1976.
- 6) 野田英明・松原雄平: 岸・沖向き漂砂に関する実験的研究, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 162~166, 1979.
- 7) Van de Graaff, J., and W. Tilmans: Sand transport by waves, Abstracts of 17th International Conf. on Coastal Eng., 1980.
- 8) Komar, P. D. and Miller, M. C.: Sediment threshold under oscillatory waves, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 756~775, 1974.
- 9) 砂村継夫・阪東浩造・堀川清司: 非対称砂れん上での砂移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 250~254, 1978.
- 10) 土木工学ハンドブック, 上巻, 第 8 章, 470 p., 技報堂.
- 11) 石田 昭: 浅水領域での分裂波 Soliton の特性について, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 41~46, 1975.
- 12) Hamada, T.: The secondary interactions of surface waves, Report of Port and Harbour Technical Research Institute, No. 10, 28 p., 1965.
- 13) 野田英明・川嶋康宏: 浅海重複波による質量輸送, 第 15 回海岸工学講演会講演集, pp. 24~29, 1968.
- 14) 佐藤昭二・田中則男: 水平床における波による砂移動について, 第 9 回海岸工学講演会講演集, pp. 95~100, 1962.
- 15) 野田英明・松原雄平: 汀線に直角方向の漂砂, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 246~249, 1978.