

1 周期内で部分的に波の作用を受ける波打ち帯の漂砂の特性

Md. Azharul Hoque*・浅野 敏之**

1. はじめに

波打ち帯は漂砂の活発な領域であるが, その外力が前傾した非線形性の強い波であることや, 関与する力学的要因が多いこともあって, 現象の理解は現在に至るまで十分でない。波打ち帯の漂砂現象が特異である一つの要因は, 波の遡上・流下に伴って没水と干出を繰り返し, 底質粒子が波の作用を 1 周期を通じて連続的に受けないことにある。著者ら (浅野・末富, 1994) は数年前に, 遡上波の下での底質粒子運動と漂砂の特性の数値解析を行ったが, そのときはいったん碎波した後で遡上する短周期波を対象とした。今回は, 現地の波打ち帯では長周期波運動が卓越する場合が多いこと, また流体運動をより厳密に記述できることから, 流体運動として斜面上の重複波遡上波の解析解を与えた。

2. swash zone の水粒子運動

従来の, 遡上波運動を移動境界で取り扱った数値解法では, メッシュ間の discreet な変化や, 遡上波先端付近の不安定性にいくつかの難点があったため, ここでは Carrier-Greenspan (1958) による解析解を用いた。流体運動の記述は, 岸沖方向 1 次元のみならず平面 2 次元にも拡張し, 斜面上を斜めに遡上する場合も取り扱った。一様勾配斜面上の遡上波の運動は次式の非線形長波方程式で記述される。

$$(\eta+h)_t + [u(\eta+h)]_x = 0 \quad (1)$$

$$u_t + uu_x + g(\eta+h)_x = gh_x \quad (2)$$

ここで, 水平座標 x は静水時汀線を原点として沖向きを正と取っている。 g は重力加速度, u は水平方向の水粒子速度, h は静水時の水深, η は静水面から鉛直上方を正とした水位変動である。この解は時間・空間の独立変数の変換によって導かれるため, 後述の砂粒子運動の追跡計算では変換後の変数系から元の時間・空間の変数系での表示に戻してやる必要がある。

平面 2 次元問題への拡張は, 入射角が十分小さい場合に, 岸沖方向運動と沿岸方向運動を分離する取り扱い

(Asano, 1996) により, 沿岸方向流速 v を記述する式を導いた。この方法では, 式 (1), (2) で記述される岸沖方向問題で既に求められた u と η を用いて, 沿岸方向流速 v が計算できる。図-1 は, 本解析による結果の一例であって, 斜面勾配 $s=1/10$ 上の遡上波の水位変動を示している。

3. 単一砂粒子の運動のラグランジェ的追跡

一様勾配斜面上に置かれた単一球形砂粒子に有限振幅遡上波が作用するときの挙動を, 下記の運動方程式に基づいて解析した。運動方程式には, 遡上波先端での水面勾配に起因する慣性項, 没水と干出に伴う浮力項の作用と非作用等を考慮した。

$$\begin{aligned} & (\rho_s + \rho C_A) \frac{\pi}{6} d^3 \frac{\partial \ddot{u}_s}{\partial t} \\ &= \frac{1}{2} \rho \epsilon C_D \frac{\pi}{4} d^2 |\ddot{u} - \ddot{u}_s| (\ddot{u} - \ddot{u}_s) \\ &+ \epsilon \rho (1 + C_A) \frac{\pi}{6} d^3 \frac{\partial \ddot{u}}{\partial t} + \rho^* g \frac{\pi}{6} d^3 \ddot{s} \\ &- \left(\rho^* g \frac{\pi}{6} d^3 \vec{k} - \epsilon C_L \frac{\pi}{4} d^2 |\ddot{u} - \ddot{u}_s| (\ddot{u} - \ddot{u}_s) \right) \tan \phi \\ &\dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに, d は砂粒子の粒径, ρ, ρ_s はそれぞれ水と砂粒子の密度, $\ddot{u} = (u, v)$, $\ddot{u}_s = (u_s, v_s)$ はそれぞれ水粒子, 砂粒子の速度ベクトル, C_D, C_A, C_L はそれぞれ抗力, 付加質量力, 揚力係数, s は斜面勾配, $\vec{i} = (1, 0)$, $\vec{k} = (1, 1)$ の成分を持つベクトル, ϵ は遮蔽係数, ϕ は砂粒子間の摩擦角である。また, ρ^* は, 没水時には, $\rho^* = \rho_s - \rho$, 干出時に

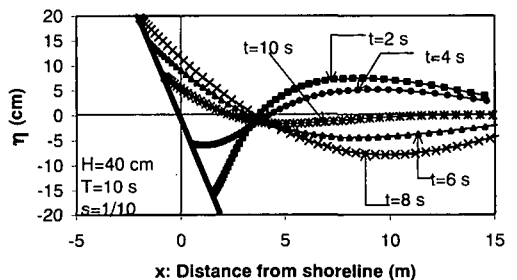


図-1 遡上波の水位変動の時間変化

* 学生会員 工修 鹿児島大学大学院理工学研究科博士後期課程
** 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科

は $\rho^* = \rho_s$ とする。式中の諸係数は、 $C_D = 2.0$; $C_A = 1.0$, $C_L = 0.1 C_D$, $\phi = 45^\circ$, $\epsilon = 0.4$ を与えた。なお、右辺最終項の摩擦項は、駆動力の大きさが摩擦力の大きさを上回る時間区間でのみ値を与えるものとする。

計算は、砂粒子の初期位置を沿岸方向位置 0 の点で岸沖方向には異なる地点に置き、遡上波の作用下での粒子を追跡した。すなわち、初期位置 $(S_{x0}, 0)$ を与えた時に、砂粒子移動速度 $\vec{u}_s$ を (3) 式に基づいて計算し、時間積分することにより時々刻々の砂粒子位置 (S_x, S_y) を求める。計算は予測子・修正子法を用い時間刻み $\Delta t = T/1000$ (T は波の周期) で計算した。遡上波の流下時に着目する砂粒子が干出するとき、作用流体力が 0 となるため、砂粒子は慣性を有するものの流速自体が小さく摩擦力を上回れないため、すぐに停止することがわかった。逆に、停止した砂粒子が遡上波の作用を受け始める瞬間は、右辺第 2 項によってきわめて大きな流体力を受けるが、この $\partial u / \partial t$ 値を遡上波が立ち上がる流速 Δu から $\Delta u / \Delta t$ の有限値で与えてやれば、計算が不安定化しないことがわかった。

4. 計算結果と考察

まず、遡上運動とともに部分的に流体運動の作用を受ける時の、単一砂粒子の岸沖方向運動についての計算結果を示す。図-2 は、砂粒子の初期位置 S_{x0} を静水時汀線 $S_{x0} = 0$ m とそれより岸側 $S_{x0} = -20$ cm に変えたときの計算結果を示したものであり、図中には岸沖方向水粒子速度 u ならびに砂粒子移動速度 u_s 、遡上波先端の位置

x_{shore} 、砂粒子の時々刻々の位置 S_x を示している。ここで x 軸を静水時汀線を原点とし沖向きを正方向としたため、図中では上方が沖側・下方が岸側への移動を意味する。Carrier-Greenspan 解では、原点である静水時汀線から遡上波運動を表現する。図中の H は汀線における波高であり、遡上幅 R は $R = H/s$ で与えられる。 H と沖波波高の関係は $H_0 = H(2\pi/s)^{-1/2}$ となる (Mei: 1983)。

計算結果では、砂粒子は遡上波の来襲とともにすぐに移動を開始し、砂移動速度 u_s は急激な立ち上がりを示すが、遡上波が最大遡上位置に達する区間で u_s は一旦 0 となる。計算開始時点と 1 周期後の砂粒子位置 S_x を比較すると、わずかに岸側に移動していることがわかる。この差が 1 周期間での正味の移動量 $\bar{S}_x$ となる。

砂粒子の初期位置 S_{x0} と上記 $\bar{S}_x$ の関係を調べたものが図-3 である。図-3 上段の図は、粒径 d をパラメータとしたもので、この場合の遡上幅 (-100 cm $< x < 100$ cm) 内の領域における $\bar{S}_x$ の分布形状は、砕波帯に相当する $x > 100$ cm の分布と明瞭に区別されることがわかる。

図-3 中段は斜面勾配 s をパラメータとして示した結

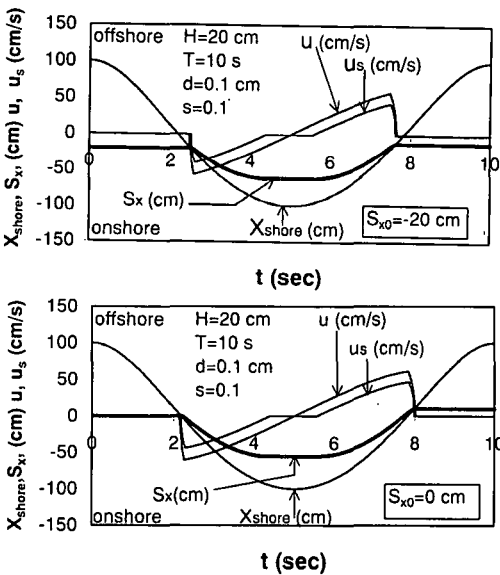


図-2 遡上端 x_{shore} 、底質位置 S_x 、水粒子速度・底質移動速度 u 、 u_s の時間変化

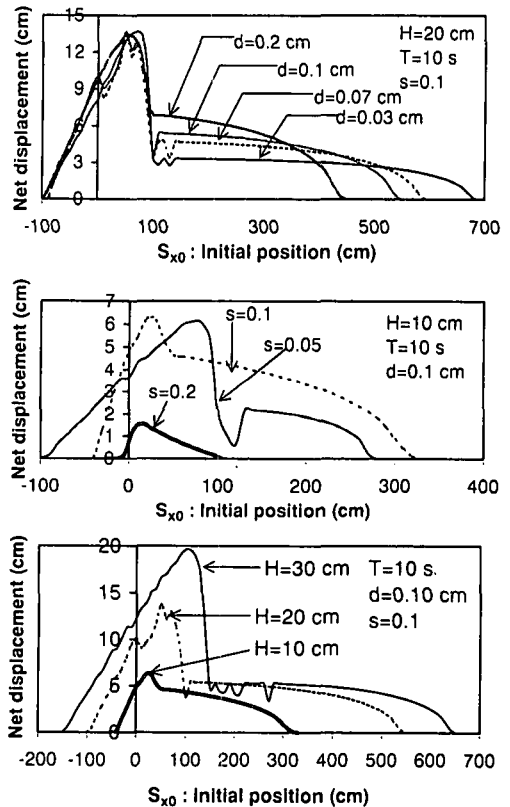


図-3 底質の初期位置 S_x と一周期後の正味の移動量との関係

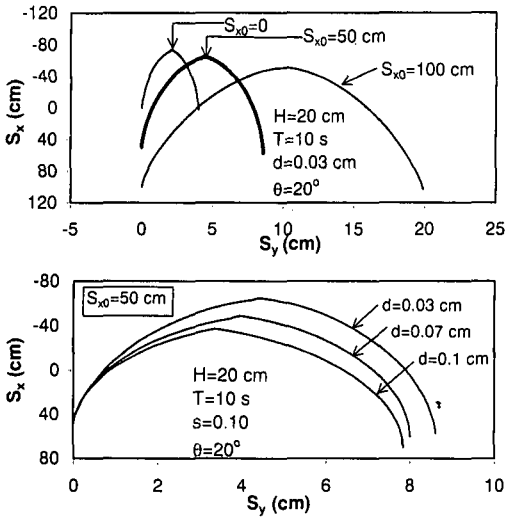
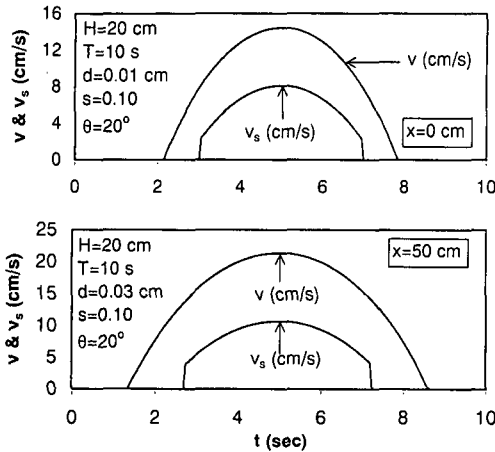


図-4 平面2次元斜面上の底質粒子のトラジェクトリー

図-5 水粒子速度・底質移動速度 v , v_s の時間変化

果で、 s が減少して緩勾配となるにつれて波打ち帯幅が広くなり、漂砂の移動幅が大きくなっている。しかし、流体運動の大きさ自体が変化するため、斜面勾配 s に対する $\bar{S}_x$ の分布形状は単調な変化を示さない。

図-3 下段は波高 H をパラメータとしたもので、当然のことながら H の増大とともに $\bar{S}_x$ は増加し、漂砂の移動幅も大きくなっている。

図-4 は平面2次元に拡張した場合の、底質粒子のトラジェクトリーを示したものである。沿岸方向への移動は岸沖方向に比べて小さいため、ここでは結果を強調するために、入射波の波向き θ が 20° と大きくした場合を例として示した。

図-5 は、図-2 に対応して沿岸方向の水粒子速度 v と底質移動速度 v_s の時間波形を示したものである。

5. 漂砂量に関する考察

Kalinske (1947) の掃流漂砂モデルによれば、瞬時漂砂量 $\bar{q}_b$ は単位面積当たりに移動可能な粒子個数 n_b とその移動速度 $\bar{u}_s$ の積で表される。すなわち

$$\bar{q}_b = \frac{\pi}{6} d^3 n_b \bar{u}_s \quad (4)$$

である。 n_b については流体運動による瞬時底面せん断力 τ_b が移動限界底面せん断力 $\tau_{b,c}$ を上回る分が、移動粒子数 n_b 個の砂粒子作用する抗力 F_b と釣り合うとして次式で表すことができる (Kobayashi, 1982)。

$$\frac{\pi}{6} d^2 n_b = \frac{1 + (C_L/C_D) \tan \phi}{\tan \phi} (\Psi - \Psi_c + W \frac{S}{\tan \phi}) \quad (5)$$

ここに、 Ψ は時間変動する水粒子速度から計算される無次元掃流力、 Ψ_c は無次元移動限界掃流力である。岸沖2次元の場合の砂粒子の移動速度 u_s は

$$\frac{u_s}{e\sqrt{g(\sigma_s-1)d}} = [\sqrt{\Psi} - b_2\sqrt{\Psi_c}] \times \text{sign}(\tau_b) + \frac{1}{2} b_2 \sqrt{\Psi_c} \frac{s}{\tan \phi} \quad (6)$$

となる。ただし、 $\sigma_s = \rho_s/\rho$ 、 $b_2 = 0.7$ 、 $e = u_w/u_*$ (u_* は瞬時摩擦速度) である。また $\text{sign}(\tau_b)$ は τ_b が正の時1、負の時-1を与えるものとする。式 (5)、(6) を式 (4)

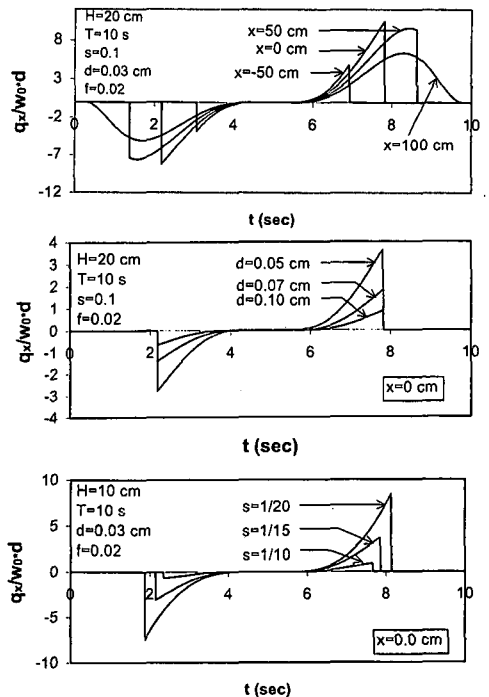


図-6 波打ち帯の瞬時岸沖漂砂量の時間変化

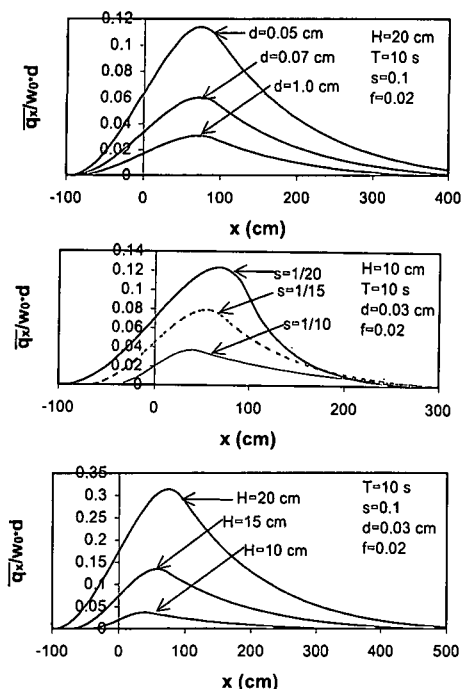


図-7 1周期平均岸沖漂砂量の空間分布

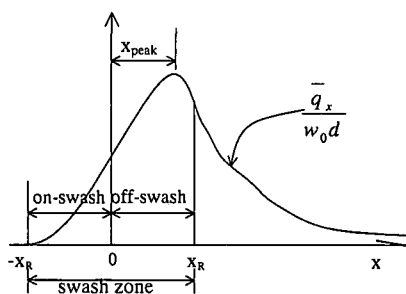


図-8 岸沖漂砂量の分布形状に関する指標

に代入すると、瞬時漂砂量 (q_x, q_y) が得られる。また、これを一周期にわたって平均すると一周期平均漂砂量 ($\bar{q}_x, \bar{q}_y$) が得られる。

図-6 は岸沖方向の瞬時漂砂量の時間波形を示したものである。図-6 上段は岸沖方向位置 x をパラメータとして示したもので、岸方向に向かうほど (x が小さいほど) 遡上波の作用する時間が短くなり、瞬時漂砂量の変動波形は尖鋭となる。 $x=50$ cm より沖側の地点となると、変動波形が丸みを帯びてくる。図-6 中段・下段は、それぞれ粒径 d , 斜面勾配 s をパラメータとして示したものである。いずれの結果も、岸方向と沖方向漂砂量は異なり、1周期間を積分すると正味の漂砂量が生じる。

次に、1周期平均した岸沖漂砂量について、岸沖位置を横軸に取って示したものが、図-7 である。静水時汀線

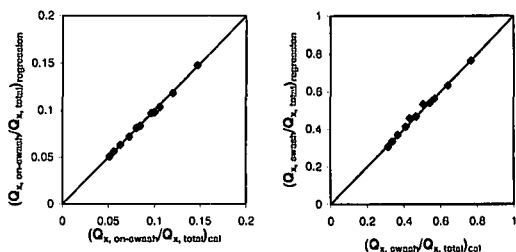
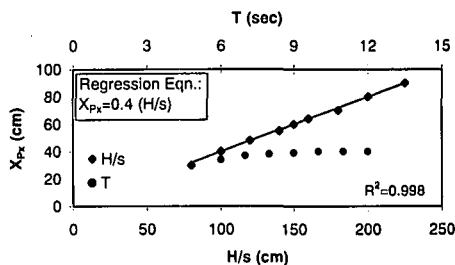


図-9 岸沖漂砂における swash zone の寄与率に関する回帰分析結果

図-10 岸沖漂砂量の極大点 x_{peak} と波の周期 T ならびに H/s 値との相関分析

$x=0$ より岸側においても、有意な漂砂量が計算されていることがわかる。

ここで、波打ち帯内の漂砂量が全領域の漂砂量にどの程度寄与しているかを調べるため、図-8 に示すように波打ち帯を静水時汀線 (SWSL) から遡上波が打ちあがる限界 ($x = -x_R$) までの領域 (on-swash zone) と、SWSL から遡上波が流下する限界 ($x = x_R$) までの領域 (off-swash zone) に2分割し、それぞれの寄与率を次のような指標を導入して検討した。

$$\left. \begin{aligned} R_{x, \text{on-swash}} &= Q_{x, \text{on-swash}} / Q_{x, \text{total}} \\ R_{x, \text{swash}} &= Q_{x, \text{swash}} / Q_{x, \text{total}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$\begin{aligned} Q_{x, \text{on-swash}} &= \int_{-x_R}^0 \bar{q}_x dx, & Q_{x, \text{swash}} &= \int_{-x_R}^{x_R} \bar{q}_x dx, \\ Q_{x, \text{total}} &= \int_{-x_R}^{\infty} \bar{q}_x dx \end{aligned} \dots\dots\dots (8)$$

である。

図-7 をはじめ、 $10 \text{ cm} < H < 20 \text{ cm}$, $0.02 \text{ cm} < d < 0.1 \text{ cm}$, $6 \text{ s} < T < 12 \text{ s}$, $0.05 < s < 0.1$ の範囲でおこなった計算結果をもとに、(7) 式の指標を回帰分析したところ、次式を得た。

$$R_{x, \text{on-swash}} = \frac{Q_{x, \text{on-swash}}}{Q_{x, \text{total}}} = 1.04 \left(\frac{H}{g T^2 s^2} \right)^{0.61} \dots\dots (9)$$

$$R_{x, \text{swash}} = \frac{Q_{x, \text{swash}}}{Q_{x, \text{total}}} = 4.03 \left(\frac{H}{g T^2 s^2} \right)^{0.52} \dots\dots\dots (10)$$

図-9 に上記の回帰式の再現状況をしめす。式 (9),

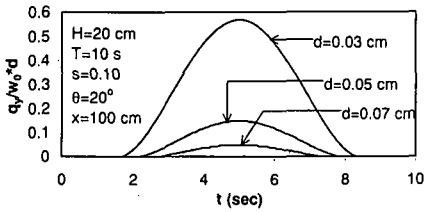


図-11 瞬時沿岸漂砂量の時間波形

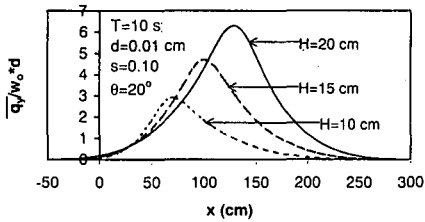


図-12 1 周期平均沿岸漂砂量の空間分布

(10) のかつこ内は内容的には surf similarity parameter に相当する。なお、粒径についてはこれら指標の値にほとんど影響を与えない。

次に図-8 に示した岸沖漂砂量がピークとなる位置 x_{peak} について、同様に計算結果を整理する。回帰分析の結果を図-10 に示す。周期 T によって x_{peak} も変化するが、 H/s と比べるとその寄与は無視できる。 x_{peak} と H/s はほぼ比例し、

$$x_{\text{peak}} = 0.4 H/s \dots \dots \dots (11)$$

の回帰式が得られる。 H/s は遡上幅に等しいから、(11) 式は、岸沖漂砂量のピークの位置は遡上波の最大流下限界 ($x = x_R$) の 8 割の点で起こることを意味しており、興味深い結果である。

図-11 は沿岸方向の瞬時漂砂量の時間波形を示したものである。ここでは粒径 d をパラメータとした結果を

示した。

図-12 は、一周期平均した沿岸漂砂量に関して示した図-7 に対応する図表である。静水時汀線より岸側、すなわち x が負の領域では沿岸漂砂量はきわめて小さく、実質的な値を有さないことがわかる。

6. 結 論

非透水性斜面上の重複波遡上波を外力とするときの砂粒子運動と掃流漂砂量について、系統的な計算を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) 単一砂粒子のラグランジェ的解析から、流下時に砂粒子が干出して流体運動を受けなくなると、慣性力より摩擦力が卓越し直ちに停止する結果となった。

(2) 岸沖方向掃流漂砂量に占める波打ち帯内の寄与率について計算結果を再解析し、これを記述する式として (9) (10) 式を提案することができた。

(3) 岸沖方向漂砂量が極大値をとるのは、静水時汀線より沖側方向に遡上波の最大流下限界の 8 割下った点であることが明らかになった。

参 考 文 献

- 浅野敏之・末富博文 (1994): 斜め遡上波の下での波打ち帯の漂砂の解析, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 396-400.
- Asano, T. (1996): Sediment transport in swash zone under obliquely incident waves, Proc. of 26th I. C. C. E, ASCE, pp. 3770-3784.
- Carrier, G. F. and Greenspan, H. P. (1958): Water waves of finite amplitude on a sloping beach, J. Fluid Mech, 4, 97-109.
- Kalinske, A. A. (1947): Movement of sediment as bed load in rivers, Trans. A. G. U., Vol. 28, No. 4, pp. 615-620.
- Kobayashi, N. (1982): Sediment Transport on a gentle slope due to waves, J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Div., Vol. 108, No. WW3, pp. 254-271.
- Mei, C. C. (1983): The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, World Scientific, 740 p.