

波による底質の移動に及ぼす粒径の影響

伊 福 誠*・住 井 勝 彦**

1. ま え が き

一方向流あるいは波動場における漂砂量の算定式は、球状均一砂粒子を対象としてかなり提案されている。底質が粒径の異なる砂粒子で構成される現地海滨における変形を取り扱う場合、中央粒径を底質の代表粒径として考え、既存の漂砂量式を用いて変形を予測するのが一般的であるようであるが、はたしてその代表粒径で現地海滨の底質の運動特性ひいては海滨変形の実態を十分に捉えることが可能であるか否かは定かではない。

波動場における砂粒子の運動は、ある一定の波高のもとでは比較的粒径の大きい砂粒子は底面を転動・跳躍しながら輸送され、また、粒径の小さい砂粒子は流体中に取り込まれ浮遊しながら輸送される。このように、粒径によってその輸送形態も変わり、流体中に含まれる各砂粒子の量も異なる。従って、底質が粒径の異なる砂粒子で構成される現地海滨の変形を明らかにしようとするには各粒径ごとの運動特性を把握することが重要になる。

Egiazaroff (1965) は混合砂の場合、砂粒子の粒径によって限界掃流力が異なることに着目し、粒径別限界掃流力を評価する方法を提案している。

山本 (1977) は混合砂を用いた水路実験を行っており、均一砂の場合では砂粒子が動き出すと砂漣が生じるが、混合砂の場合では砂粒子の粒径の違いによって水粒子の運動に対する応答が異なるため、砂漣の発生が抑えられることや、粗砂が細砂の中に入ると突出高さが大きいために均一砂の場合と比較して動き易くなることを報告している。また、田中ら (1988) は混合砂の場合、波により砂粒子の分級が生じ、その結果砂粒子の粒径の相違により移動特性の場所的な不均衡が生じることを指摘した上で、粒径別移動限界および粒径別漂砂量について実験的検討を行い、実用的な算定式を得ている。

上述したように、混合砂を対象とした研究がなされ、砂粒子の運動特性が解明されつつあり、漂砂量式も提案されている。しかしながら、これらのほとんどは定常的な取り扱いがなされており、時々刻々変化する浮遊砂濃

度分布やそれに基づく漂砂量の算出には至っていない。

こうしたことから、本研究では、著者の一人 (伊福, 1986) の均一砂を対象とした波動場における浮遊砂濃度や漂砂量に関する数値モデルを混合砂をも取り扱えるよう拡張し、現地海岸で得た砂粒子の粒度分布に基づいた解析を行い、底質を構成する粒径や占有率が浮遊砂濃度や漂砂量に及ぼす影響について検討する。

2. 底面近傍における浮遊砂濃度分布と漂砂量の解析

(1) 基礎方程式

水平な底面に沿って x 軸をとり、底面より鉛直上向きに z 軸をとると鉛直 1 次元の境界層方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial(u-u_b)}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 u は x 方向の流速成分、 u_b は境界層外縁における水粒子速度、 ρ は流体の密度、 τ は摩擦応力である。

式 (1) 中の摩擦応力は Prandtl の混合距離理論を用いて評価する。なお、摩擦応力を評価する際のカルマン定数の値は 0.4 とする。

沈降速度 w_{0i} をもつ物質に対する鉛直 1 次元の乱流拡散方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + w \frac{\partial C_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + w_{0i} \frac{\partial C_i}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 C_i は物質の濃度、 w は z 方向の流速成分、 K_z は乱流拡散係数である。

(2) 掃流層内の濃度

著者の一人は均一粒径の砂が底面に一様に分布する場合を対象として掃流層内の濃度を評価するモデルを構築している。ここでは混合砂床を対象とするので、均一砂床を対象としたモデルを混合砂床にも適用できるように拡張して掃流層内の濃度を算出する。

いま、図-1 に示すように着目砂粒子 d_i に底面における占有率が最大である砂粒子が隣接する場合を考えると、掃流層内の濃度は次式で表される。

$$C_{0i} = 2P_i \rho_s g d_i V_{ibi} / 3 \int_{z_0}^{\delta_b} u dz \quad \dots\dots\dots (3)$$

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科

** 正会員 工修 愛媛県土木部

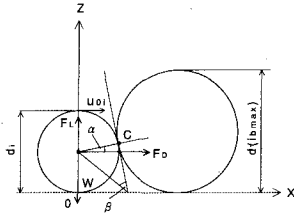


図-1 砂粒子の配列と作用流体力

ここに、 C_{0i} 、 P_i は着目砂粒子の掃流層内における濃度、pick-up rate、 ρ_s 、 d_i 、 V_i および i_{bi} は、それぞれ着目砂粒子の密度、粒径、移動速度および底面における占有率、 δ_b 、 z_0 は掃流層の厚さ、粗度長さである。

pick-up rate は次式で与えられる。

$$P_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{A V_* \Psi_i - 1/\eta_0}^{\infty} \exp(-z^2/2) dz \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $A=1/(1-\tan \alpha/k_L)$ (k_L : 揚力抗力比)、 $V_*=4/3 C_L \eta_0$ (C_L : 揚力係数、 η_0 : 正の係数)、 $\Psi_i=(\rho_s - \rho) g d_i / \rho u_{0i}^2$ (u_{0i} : 局所流速) である。

(3) 乱流拡散係数

乱流拡散係数は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評価する。

$$K_z = \gamma [l_r u^2 + l_v w^2] / q \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 γ は正の係数、 l_r および l_v は、それぞれ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す特性長であり、 $l_r = a l_r (a$: 正の係数)、 $q = (u^2 + w^2)^{1/2}$ である。

(4) 任意の高さにおける全濃度と漂砂量

各粒径の掃流層内の濃度を境界条件とし、乱流拡散方程式を解くことにより粒径ごとの任意の高さにおける濃度を算出する。算出した各粒径の濃度を線形に重ね合わせた値を任意の高さにおける全濃度と定義する。また、各粒径ごとの掃流漂砂量および全掃流漂砂量は掃流層内の各粒径の濃度および全濃度と水粒子速度の積を粗度長さから掃流層外縁まで積分することによって算出する。

(5) 初期条件および境界条件

式 (1) の初期条件および境界条件は

$$u(z, 0) = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$u(z_0, t) = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$u(\delta_b, t) = u_b(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

とする。ここに、 δ_b は乱流境界層の厚さである。

式 (2) の初期条件および境界条件は

$$C_i(z, 0) = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$C_i(\delta_b, t) = C_{0i}(t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$K_z (\partial C_i / \partial z) + w_{0i} C_i = 0, \quad z = h \quad \dots\dots\dots (9)$$

とする。ここに、 $C_{0i}(t)$ は時刻 t における着目砂粒子の掃流層内における濃度、 h は水深である。

3. 解析結果

解析対象とする波の波高は 0.25 m、0.5 m、0.75 m および 1 m、周期は 4.5 s、水深は 2 m とする。境界層外縁および境界層外の岸沖方向流速は Stokes 波の第 3 次近似解によって算出する。

混合砂床を対象とした解析で、掃流層厚を如何に定めるかが問題となる。本研究では解析対象とした粒径のうちの最大粒径の 2 倍を掃流層の厚さとする。また、粗度長さ、乱流境界層の厚さの評価法および解析法は伊福 (1986) に従う。なお、揚力係数は 0.2、局所流速 u_{0i} は任意の時刻の流速分布からスプライン補間によって求めた着目砂粒子頂部の高さにおける値を使用し、式 (3) 中の着目砂粒子の移動速度は任意の時刻における掃流層内における断面平均流速とする。さらに、揚力抗力比は Chepil (1958) が空気中において砂礫を対象とした実験から得た 0.85 を準用する。

(1) 代表粒径の設定

著者の一人は、1983～1984 年にかけて松山市の梅津寺海岸において波浪・流速および浮遊砂濃度の観測を実施した。測定機器の設置点付近の底質の中央粒径および平均粒径は、それぞれ 0.18 mm および 0.20 mm であった (図-2)。混合砂床を対象として解析するにあたって次のような取り扱いをして代表粒径を設定した。6 種類のふるいによって粒度分布を調べたが、ふるいのサイズの 0.105 mm 以下、0.105～0.25 mm、0.25～0.42 mm および 0.42 mm 以上の粒径の 4 つの階級を考えた。4 つの階級の代表粒径は、それぞれふるいのサイズの 0.074 mm と 0.105 mm、0.105 mm と 0.25 mm、0.25 mm と 0.42 mm、0.42 mm と 0.84 mm の平均値とした。表-1 に以下の解析に用いる代表粒径とその占有率を示す。

(2) 限界掃流力

図-3 に粒径別の限界掃流力を Egiazaroff 式とともに示す。なお、図中には表-1 に示す粒径に加えて砂の最小粒径である 0.074 mm の場合も示してある。図中の実

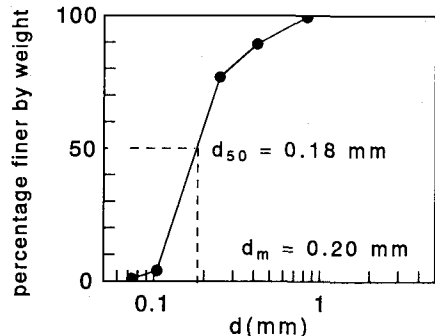
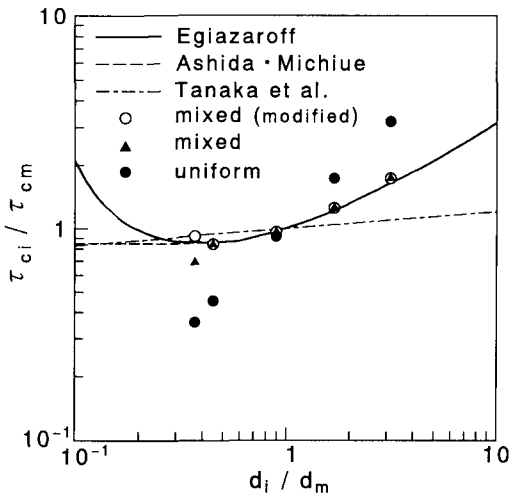


図-2 粒径加積曲線

表一 代表粒径と占有率

bed	d_i (mm)	d_i/d_m	i_b (%)
mixed	0.09	0.45	4.2
	0.18	0.90	72.8
	0.34	1.69	12.6
	0.63	3.13	10.4
uniform	0.18	1	100

線、破線および一点鎖線は、それぞれ Egiazaroff, 芦田・道上 (1971) の修正式および田中らの経験式である。 τ_{ci} および τ_{cm} は、それぞれ着目砂粒子および平均粒径の砂粒子の限界掃流力である。図中の●は着目砂粒子には同一粒径の砂粒子が隣接するとした場合の砂粒子の限界掃流力である。粒径が増大するにつれて限界掃流力も増大し、平均粒径を境にして平均粒径より小さい砂粒子の限界掃流力は Egiazaroff のそれより小さく、平均粒径より大きい砂粒子のそれは Egiazaroff のそれより大きい。すなわち、粒径の小さい砂粒子に対しては限界掃流力を過小評価し、粒径の大きい砂粒子に対しては限界掃流力を過大評価することになる。そこで、図一1示すように着目砂粒子には底面における占有率が最大の砂粒子が隣接するとして砂粒子の限界掃流力を算出した結果が図中の▲である。平均粒径より大きい粒径および底面における占有率が最大である砂粒子の限界掃流力は Egiazaroff のそれらとほぼ一致し満足いく結果が得られる。しかしながら、解析対象とした粒径のうち最小粒径の砂粒子の限界掃流力は Egiazaroff のそれより 20 %程度小さく、限界掃流力を過小評価する。そこで、芦田・道上に倣い着目砂粒子の粒径が隣接するその 2/5 より小さい場合に

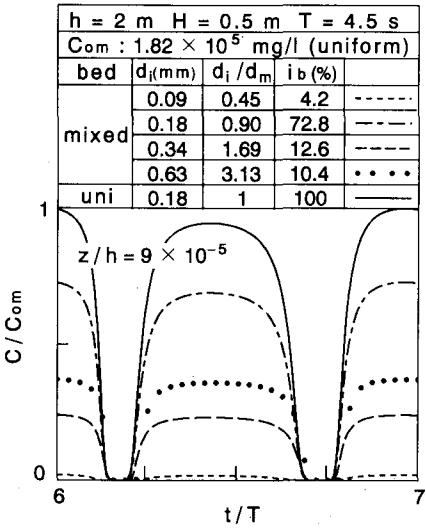


図一3 粒径別限界掃流力

ついて補正を施した結果が図中の○である。すなわち、図一1に示す $\tan \beta$ の値が 1 より小さくなると着目砂粒子に作用する流体力は、隣接する砂粒子の遮蔽の影響を受け、 $\tan \beta$ の値が 1 より大きい場合と比較して小さくなると考え、式 (4) 中の η_0 を $\tan \beta$ 倍して着目砂粒子に作用する流体力を小さく評価する。上述した算出法によって d_i/d_m の値が 0.4 より小さい砂粒子の限界掃流力も芦田・道上の結果とほぼ一致し、満足いく結果が得られることが判る。

(3) 掃流層内の濃度の経時変化

掃流層内 ($z/h=9 \times 10^{-5}$) における無次元化した濃度の経時変化を示したのが図一4である。図中の太い破線、一点鎖線、細い破線および点線は、それぞれ粒径が 0.09 mm, 0.18 mm, 0.34 mm および 0.63 mm の混合砂の場合で実線は粒径が 0.18 mm の均一砂の場合である。混合砂の場合、占有率が最大である粒径の濃度は他の粒径より高い。最小粒径の濃度は、粒径が 0.34 mm および 0.63 mm の濃度より低く、また、無次元濃度の値が 0 である時間は他の粒径よりも長い。こうした結果は、着目砂粒子には占有率が最大である砂粒子が隣接するとしたこと、さらには、pick-up rate を評価する際の局所流速として各粒径頂部の高さにおける流速を用いたため 0.09 mm の砂粒子は底面から離脱し難くなり、0.34 mm および 0.63 mm の砂粒子は、逆に離脱し易くなったことに起因するものと思われる。なお、混合砂のうち占有率が最大である粒径の濃度の最大値は、均一砂のその 70 %程度である。また、混合砂の全濃度の最大値は均一砂のその 1.4 倍程度である。



図一4 掃流層内の濃度の経時変化

(4) 平均濃度の鉛直分布

著者の一人が1983年に得た観測資料に基づいてパラメータ解析を行い、算出した平均濃度の鉛直分布を観測結果とともに示したのが図-5である。観測結果に基づき、水深、周期および波高は、それぞれ2.15 m, 4.5 sおよび0.53 mとした。図中の実線および点線は、それぞれ混合砂および均一砂を対象とした場合であり、●は観測値である。なお、式(5)中の乱流拡散係数に寄与する比例係数 γ と α は0.027と50に固定した。混合砂と均一砂の場合とも底面から4 cm程度の高さにおいては観測値と良く一致する。しかしながら、底面から30 cm程度の高さにおいては均一砂の場合が混合砂の場合よりも僅かに濃度が高い。これは、混合砂の場合、比較的粒径の大きい粒径の沈降フラックスが大きいことに起因する。

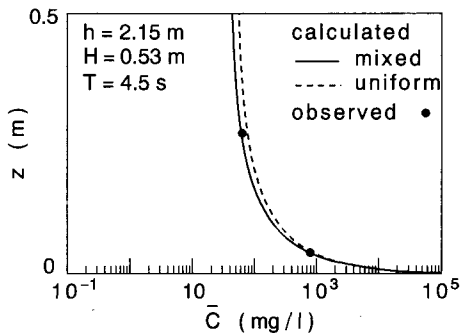


図-5 平均濃度の鉛直分布

(5) 漂砂量

混合砂のnetの無次元掃流漂砂量 $q^*_{Bi} = q_{Bi}/i_{bi}$ (q_{Bi} : netの掃流漂砂量)とmobility parameter θ_i ($\theta_i = \rho u_{bm}^2 / (\rho_s - \rho) g d_i$, u_{bm} : 境界層外縁における最大流速)との関係を示したのが図-6である。粒径が0.09 mmのnetの掃流漂砂量は極大値をとった後、mobility parameterの増大とともに徐々に減少し、mobility parameterが600程度で漂砂の方向が岸向きから沖向きに変わる。一方、他の粒径のnetの掃流漂砂量はmobility parameterが増大するにつれて徐々に減少し、漂砂の方向は岸向きから沖向きに変わる。

粒径別の無次元掃流漂砂量 q^*_{Bi} とシールズ数との関係を図-7に示す。図中の白抜きおよび黒塗りの記号は、それぞれ岸向きおよび沖向き掃流漂砂量を表す。海底摩擦係数は平均粒径を相当砂粒粗度として、Jonsson (1966)の式によって算出した。また、シールズ数を算出する際の流速としては境界層外縁における岸向きおよび沖向き流速の最大値を用いた。なお、図中の実線は最小二乗法によって求めた近似曲線である。ばらつきはある

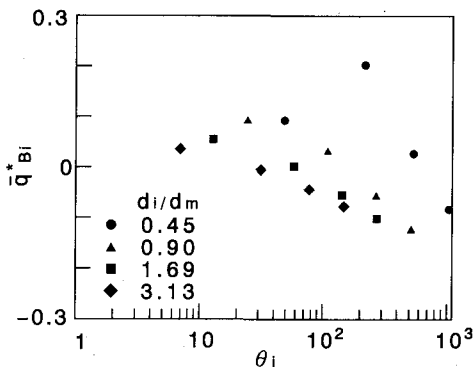


図-6 mobility parameter と net の無次元掃流漂砂量

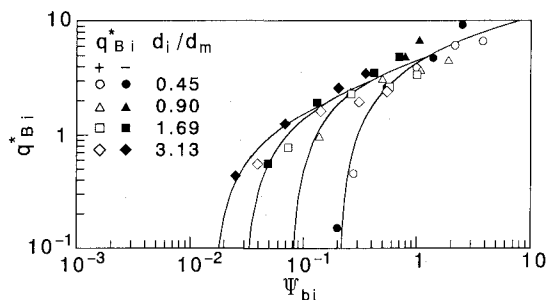


図-7 無次元掃流漂砂量とシールズ数

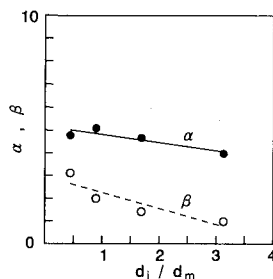
が、計算結果は粒径ごとに比較的まとまった傾向を示しており、シールズ数が小さい方から粒径が大きい順に並んでいる。こうした傾向は、平野 (1971)、芦田・道上および田中らの結果と同一である。図中の曲線の関係は次式で表される。

$$q^*_{Bi} = \alpha + \beta \ln \Psi_{bi} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 α , β は係数、 Ψ_{bi} は粒径別のシールズ数である。

上式中の係数 α および β と d_i/d_m の関係を図-8に示す。係数 α および β は d_i/d_m が増大するにつれてほぼ線形に減少している。図中の実線および破線は線形回帰による近似式である。

底面が平均粒径のみで構成されている場合を対象として計算した掃流漂砂量とシールズ数との関係を図-9に

図-8 α , β と d_i/d_m

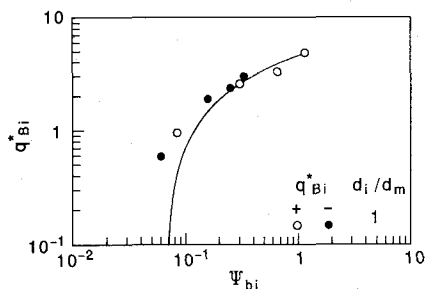


図-9 均一砂の無次元掃流漂砂量と式 (10) との関係

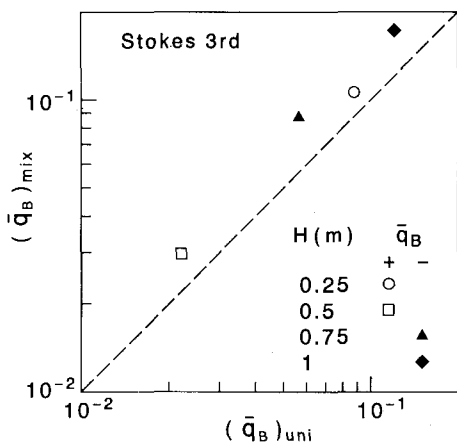


図-10 均一砂と混合砂の無次元掃流漂砂量

示す。シールズ数は、境界層外縁における岸向きおよび沖向きの最大流速を用いて算出した。図中の実線は、図-8中で $d_i/d_m=1$ として求めた α および β の値を用い、式 (10) で算出した無次元掃流漂砂量である。経験式との一致の度合いは概ね良好であるが、境界層外縁における流速が小さい場合、経験式は掃流漂砂量を過小評価するようである。

混合砂と均一砂の net の掃流漂砂量の関係を、波高をパラメータとして示したのが図-10である。図中の白抜きおよび黒塗りの記号は、それぞれ混合砂と均一砂の漂砂の方向が岸向きおよび沖向きであることを示す。なお、 $(q_B)_{mix}$ および $(q_B)_{uni}$ は、それぞれ混合砂および均一砂の net の漂砂量を $\sqrt{(\rho_s/\rho-1)gd^3}$ (d : 砂粒子の粒径であり、ここでは 0.18 mm とした) で除したものである。波高が 0.5 m 以下では混合砂および均一砂の漂砂の方向は岸向きであるが、波高が高くなると両者の漂砂の方向

は沖向きになる。また、いずれの波高においても混合砂の漂砂量が均一砂のそれよりも多く、混合砂の漂砂量は均一砂のその $1.2\sim 1.5$ 倍程度である。

5. おわりに

本研究では、混合砂床を対象とし底質を構成する粒径や占有率が浮遊砂濃度や漂砂量に及ぼす影響について検討し、以下のことを得た。

- 1) 着目砂粒子には底面における占有率が最大の砂粒子が隣接するとした場合、限界掃流力は Egiazaroff および 芦田・道上、田中らの結果と良く一致する。
- 2) mobility parameter が増大すれば岸向き・沖向き掃流漂砂量は増大するが、net の掃流漂砂量の漂砂の方向は岸向きから沖向きへ変わる。
- 3) 無次元掃流漂砂量とシールズ数との関係では、シールズ数の小さい方から粒径が大きい順に並び、シールズ数が増大するにつれて無次元掃流漂砂量も増大する。この傾向は、平野、芦田・道上、田中らの結果と同一である。
- 4) 混合砂の net の掃流漂砂量は、いずれの波高の場合とも均一砂のそれよりも多く、均一砂の $1.2\sim 1.5$ 倍程度である。

本研究では、底面における砂粒子の存在状況をかなり大胆に表現した。今後は、砂粒子の配列をも考慮したモデルの構築が必要になると考える。

参 考 文 献

- 芦田和男・道上正規 (1971): 混合砂礫の漂砂量と河床変動に関する研究, 京大防災研究所年報, 第 14 号 B, pp. 259-273.
- 伊福 誠 (1986): 碎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.
- 田中 仁・片山裕貴・加賀正之・須賀堯三 (1988): 混合砂海浜における漂砂量則, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 307-311.
- 平野宗夫 (1971): Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第 195 号, pp. 55-65.
- 山本晃一 (1977): 波による底質のふるい分け作用, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 142-146.
- Chepil, W. S. (1958): The use of evenly spaced hemispheres to evaluate aerodynamic forces on a soil surface, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 39, No. 3, pp. 397-404.
- Egiazaroff, I. V. (1965): Calculation of nonuniform sediment concentration, Proc. ASCE, Vol. 91, No. HY4, pp. 73-80.
- Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layer and friction factor, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., pp. 127-148.