

振動流作用下におけるシートフロー状態の漂砂量の特

浅野 敏之*・中野 康弘**・玉井 賢治***

1. はじめに

シートフロー漂砂研究の最大の目的は暴浪の作用による海底砂の移動量を定量的に予測することにある。

これまで漂砂量の測定は、濃度 c と底質移動速度 u_b を測定し、その積を深さ方向に積分する方法（いわゆる $c-u$ インテグラル法）によるものが多い（例えば香取ら、1980, Ahilan・Sleath, 1987）。しかしシートフロー状態では底質粒子どうしが衝突・反発して、かなりランダムな挙動をするため、精度良い漂砂量の測定値を得るためには、きわめて多数の粒子をトレースする必要がある。

一方、振動流を作用する前後の地形変化よりネットの漂砂量を求める方法もあるが（山下ら、1988, Dibajnia・渡辺, 1991, Ribberink・Al Salem, 1990）、シートフロー状態では少なからぬ底質移動があるため、局所的な地形変化が流れの場を変化させることは避けられず、その影響は実験が振動流水槽という closed conduit でなされるために、さらに助長される恐れがある。

本研究では、より精度の高い測定法として、以下のような方法を考案し、漂砂量を測定した。すなわち、観測部中央を挟んで一方に着色粒子群を、他方に着色しない粒子群を敷設し、半周期間の振動流作用下での粒子群の移動状態をビデオ撮影し、その解析から漂砂量を求めるものである。こうして得られた結果と既往の実験データとの比較検討から、シートフロー状態での漂砂量の特性を検討したので以下に報告する。

2. 実験装置・実験方法

(1) 実験装置

実験に用いた振動流水槽は前報（浅野ら、1992）に示したとおりで、鉛直部高さ 250 cm、水平部の長さは 600 cm で、15 cm×15 cm の矩形断面となっている。観測部は中央 180 cm の区間であり、底質を敷設したときの底質上端面が左右の水平部底面と同じ水準となるよう、その底面を 5 cm 落ち込ませている。底面上には測定に用

いたものと同じ粒子が一面に貼り付けられている。

実験に用いた粒子は、直径 0.417 cm、比重 1.24 の人工真珠粒子と、直径 0.301 cm、比重 1.317 のアセタール・コポリマー樹脂（商標名ジュラコン）の 2 種類を用いた。両粒子とも粒径は一樣であり、その形状は前者はほぼ完全な球形、後者はやや歪は有するものの、球形と見なし得る。沈降速度を球に対する抗力係数を通じて評価すると、前者は 16.3 cm/s、後者は 15.3 cm/s であった。実験は人工真珠粒子を用いて 18 ケース、コポリマー粒子を用いて 7 ケースの全 25 ケースを行った。その中には、粒子群と水槽底面との間で滑りが生じたり、砂漣が生じるケースがあり、これらを除外して全部で 20 ケースを解析に用いた。実験条件を表-1 に示す。表中、実験シリーズ A～C は人工真珠粒子を用いたもの、実験 D はコポリマー粒子を用いたものである。表中のシールド数 $\mathcal{P}$ は、粒径を粗度高さとし、Jonsson の摩擦係数 f を通じて評価した。

(2) 実験方法

本研究では、漂砂量を底質濃度 c と移動速度 u_b の積から求める方法（ $c-u$ インテグラル法）と、着色粒子群を一方に設置して、その移動量を直接ビデオ画像から求める方法（直接評価法）の 2 つの方法をとった。表-1 中、

表-1 実験条件

	T (s)	U (cm/s)	mobility parameter	shields parameter	δ_1 (cm)	$\frac{\bar{q}}{u_b d}$
A-1	4.64	73.9	53.68	0.422	0.94	—
A-2	4.64	96.9	95.74	0.660	1.33	—
A-3	4.98	101.3	104.63	0.694	1.84	—
A-4	5.28	83.0	70.24	0.490	1.34	—
A-5	5.44	63.1	40.60	0.307	0.78	—
A-6	4.35	76.4	59.51	0.456	0.83	—
B-1	5.28	53.1	28.75	0.234	0.91	0.31
B-2	4.50	94.9	91.82	0.645	3.58	0.66
B-4	4.82	102.8	107.75	0.720	2.02	1.07
B-5	4.60	91.3	84.99	0.601	4.19	2.46
B-7	5.63	77.9	61.87	0.431	0.95	0.22
B-8	5.35	84.4	72.63	0.501	1.17	0.99
C-1	4.64	92.6	87.43	0.613	2.75	1.52
C-2	4.64	85.0	73.67	0.532	1.54	1.30
C-4	4.28	63.7	41.37	0.341	0.80	1.24
D-1	4.64	97.3	101.25	0.627	0.86	0.83
D-3	4.33	82.5	72.79	0.487	3.98	2.02
D-4	4.94	86.7	80.39	0.506	1.65	1.46
D-5	5.28	70.8	53.61	0.353	1.28	0.63
D-7	4.34	79.3	67.25	0.455	0.98	0.68

* 正 会 員 工 博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科

** (株)三井物産 工 修

*** 学生会員 鹿児島大学大学院 工学研究科

実験シリーズ A, C は前者の方法, シリーズ B, D は後者の方法による結果である。

c - u インテグラル法は, 数色に塗った粒子を全体の粒子群のなかに散りばめ, 高速ビデオカメラで撮影された画像から粒子をトレースすることによって, c と u_s を求めるもので, その方法は前報で示したとおりである。

直接評価法は, 観測部中央を挟んで一方に着色粒子群を, 他方に着色しない粒子群を設置し, 振動流の作用による着色粒子群の移送量を画像から求めるものである。静止状態から振動流を半周期間作用させてやれば半周期漂砂量が生じ, 原理的には測定はこれで完了することになる。しかし, 本振動流装置では駆動ピストンが静止時には中央に位置する関係上, 最初の $1/4$ 周期間には不完全な振動流が発生し, その後完全な正弦振動流が生じる。よって, 本測定では駆動開始から $1/4T \sim 3/4T$ 間の底質移動量から半周期漂砂量を求めた。図-1 は水槽右側の鉛直部における水位変動であり, 本水槽は正確な正弦波形を生起できることを示している。

図-2 に模式図を示すように, 単位奥行き当たりの底質移動量 $\int q(t)dt$ は, 着色粒子群の全移動量 $V_4 + V_5$ に底質粒子の充てん率 $1-\lambda$ (λ は空隙率) を乗ずることで算定される。しかし, 実験条件に

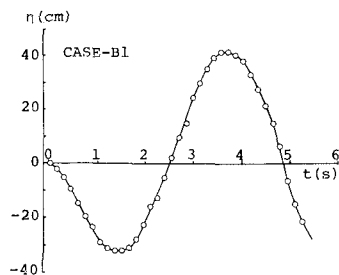


図-1 水槽鉛直部における水位変化

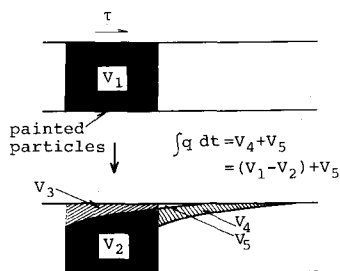


図-2 漂砂量測定の様式図

よっては着色粒子群がビデオ撮影画面を越えて流送される場合がある。また, 粒子群の体積は, 移動中にはダイレンジャーにより粒子間の距離が静止時より広がるために, 画像からの測定結果にはこの膨張による誤差が混入する。そこで, 移動量 $V_4 + V_5$ に等価なものとして残留粒子の体積 V_2 から $(V_1 - V_2) + V_5$ を求めれば, ダイレンジャーの影響の入らない漂砂量が求まる。

実験シリーズ B, D では c - u インテグラル法と直接評価法の両者の方法で漂砂量 $q(t)$ を求めた。両者はほぼ同じ値となったが, 1つのケースを除いて後者が小さい値を与えることがわかった。表-1 中の漂砂量の値は後者

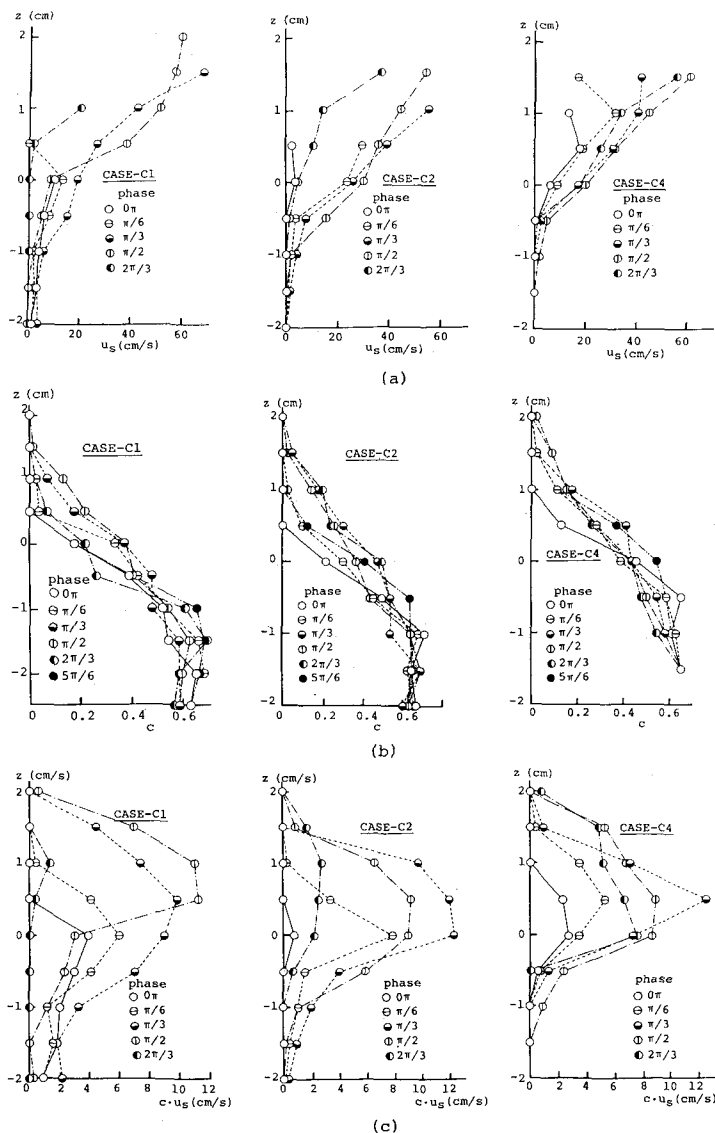


図-3 c - u インテグラル法から求めた底質移動速度 u_s (上段), 濃度 c (中段), 漂砂量 $c \cdot u_s$ (下段) の鉛直分布

の方法による値を示した。なお、駆動開始後 1/4 周期間に一部の粒子が既に移動しているので、両者の方法ともこれに対する補正を行った。

3. 実験結果ならびに考察

(1) c - u インテグラル法による漂砂量の結果

図-3 の上段は、着目した粒子の追跡から求めた底質移動速度 u_s の鉛直分布を示したものである。本研究では、振動流を作用させる前の底質粒子群の上面を基準面 $z=0$ に取っている。 $z<0$ で流速が急激に減少し、流速分布は全体として上に凸の分布を示す。

図-3 の中段は、底質濃度 c の鉛直分布を示したものである。底質濃度は、流体を着色して側壁に接する層内にある粒子の数を映し出されるようにし、鉛直方向に 0.5 cm づつに区分したメッシュ内にある粒子数をカウントすることにより求めた。粒子数から濃度値への換算は、シートフロー層の最底部における最大粒子数が最密充填濃度 $c_{\max}=0.65$ となるようにした。この方法は、粒子が密に詰まっている下方においては側壁の存在が粒子格子の 3 次元構造を乱すこと以外は正確にカウントできるが、流体中を少数の粒子が運動する上方の流体層においては、側壁に接した薄い層内の粒子だけをカウントすることが必ずしも容易ではなく、 $z>0$ における c の値はいくらか大きめに算定する恐れがある。図から $z=0$ では 0.4 程度の大きな濃度値を有し、下方に行くにつれて濃度が漸増する上に凸の分布形を示すことが読み取れる。

図-3 下段は、 c と u_s の積 $q(z)=cu_s$ から計算された局所漂砂量の鉛直分布を示したものである。すべてのケースで基準面よりやや上方で $q(z)$ が極大となり、基準面よりやや下方に極大値をとる香取らの結果とは異なる結果が得られた。また、 $q(z)$ が最大となるのは、主流流速が最大となる位相 $\pi/2$ より先行した位相 $\pi/3$ 付近にあることがわかる。

(2) 直接評価法から求めた漂砂量の特性

この方法は、実験のたびに着色粒子と着色しない粒子を仕分けをして水槽内に設置する必要があるので労力を要するが、着色粒子群の移動から漂砂量は視覚的に直示されるので解析が簡単であり、誤差の混入も少ないと考えられる。写真-1 に粒子群の移動状況を示す。

図-4 は中央の試験断面を通過する底質移動量 $\int q(t)dt$ の時間変化を示したものである。図-5 は、その微分値から時間変動漂砂量 $q(t)$ を求めたもので、図中の曲線は

$$q(t)/q_{\max} = \sin^n(\sigma t + \theta_0) \dots\dots\dots (1)$$

を表している。ここに $q_{\max}$ は半周期間の $q(t)$ の最大値、 θ_0 は主流流速変動からの位相の前進を示す。

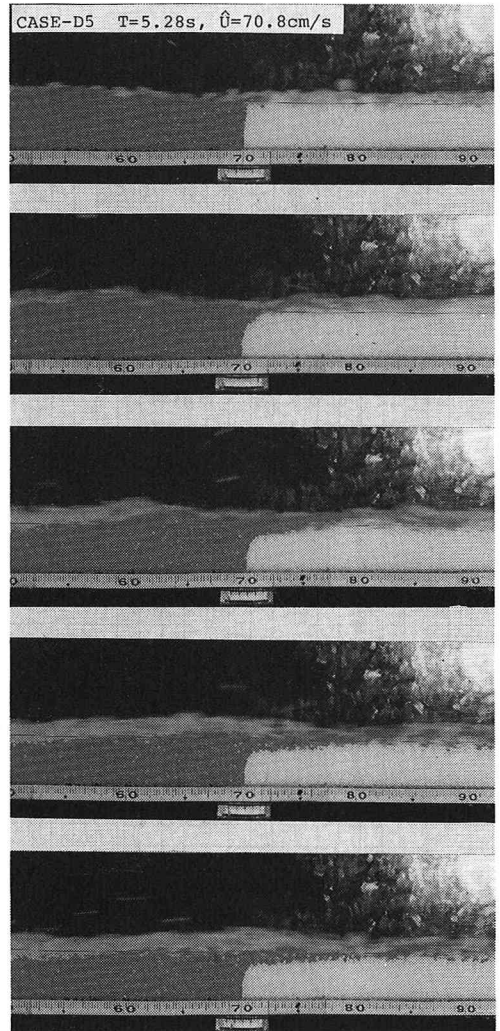


写真-1 着色粒子群の移動状況

図から実測値は加速期において $\sin^4 \sigma t$ の周りに分布するようである。減速期にはばらつきが大きい、加速期に比べ少し大きな $q(t)$ の値が得られていることがわかる。これは粒子群がいったんシートフロー状態で移動を始めると、移動層下端での滑り抵抗が減少し、同じ流体でも加速期より減速期の方が動きやすくなるためと考えられる。また位相の前進 θ_0 については、この測定を行った 8 ケースの平均値が 0.21π で $0.08\pi \sim 0.33\pi$ に分布し、振動流の周期が短いほど θ_0 は大きくなることがわかった。

Sleath (1978) は掃流状態での漂砂量の時間波形を測定し、 $q(t)$ が $\sin^4 \sigma t$ で表されることを示した。本実験は Sleath の実験と漂砂モードが異なり漂砂量も大きい、両者の結果の一致は興味深いことである。

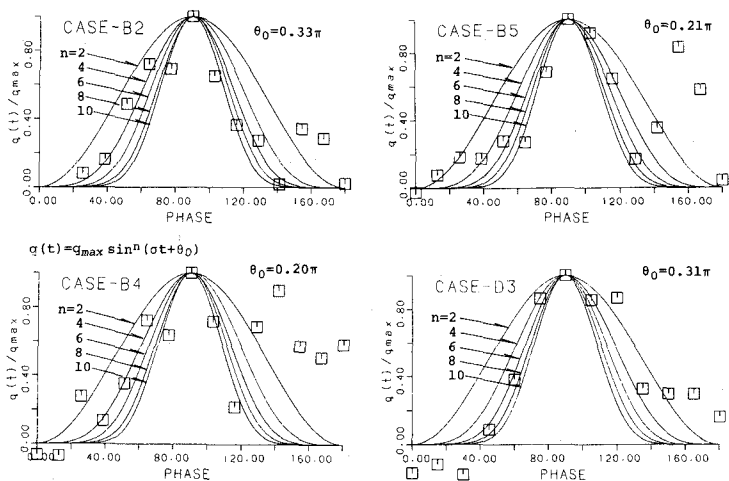


図-5 漂砂量の時間変動波形

(3) シートフロー層厚

図-6 は移動層厚 δ_1 を粒径 d で無次元化した δ_1/d と、シールズ数 Ψ の関係を示したものである。図から δ_1/d は前報で示した提案式

$$\delta_1/d = A(\Psi - \Psi_{cr}), \quad A = 8.5 \dots\dots\dots (2)$$

の周辺にプロットされるが、今回のシールズ数 Ψ の計算では摩擦係数 f を Jonsson の公式から算定し、その値は前報の f を 0.01 と一定とした場合より一般に大きくなるために、いくつかの大きな δ_1/d を与えるケースを除けば、実験結果は (2) 式の直線よりやや下方に分布するようである。

一方、大きな δ_1/d の値が得られたケースでは、ビデオ画像の検討から底質粒子群が全体として流送されている傾向が観察された。こうした場合には、ピストン駆動装置の機械的要因による余剰圧力勾配力が発生した可能性もある。またいったん粒子群のある面で滑りが発生すると、そこでのせん断抵抗が急に低下することもばらつきの原因と考えられる (浅野, 1993)。

(4) 半周期平均漂砂量

図-7 は半周期平均漂砂量 $\bar{q}/w_{od}$ をシールズ数 Ψ で整理したものである。比較のため、Sawamoto・Yamashita (1986), 香取ら (1980), Ahilan・Sleath (1987) のデータも示した。また図中には、Madsen・Grant (1976) による公式も記入した。

本研究で得られた漂砂量の結果は、Sawamoto・Yamashita の報告結果とほぼ同じ範囲に分布した。Ahilan・Sleath の結果は他の結果に比して過大であり、また香取らの実験はシールズ数がやや大きい条件下のものであるが、他の結果より大きめの漂砂量を与えることがわかった。Madsen-Grant 式は本実験結果と同じオーダーの値を与えるが、本実験のデータ群の傾きはシール

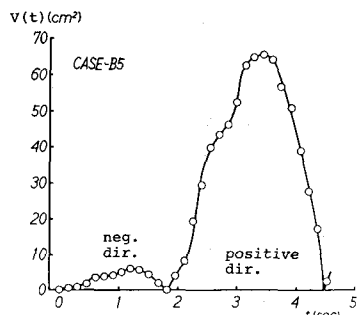


図-4 底質移動量の時間変動波形

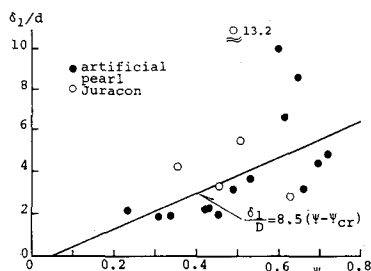


図-6 シートフロー移動層厚とシールズ数の関係

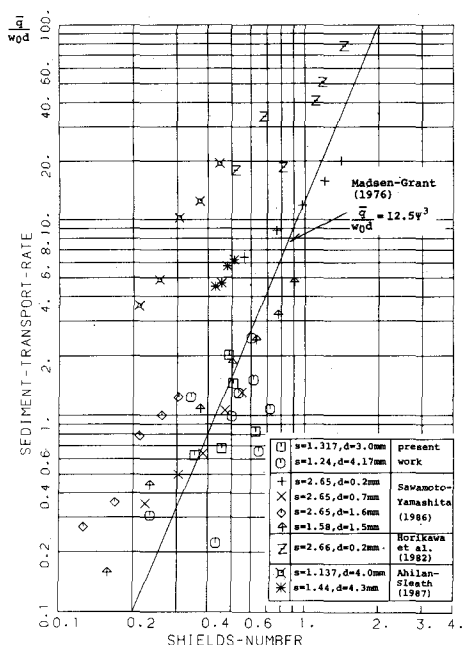


図-7 半周期平均漂砂量とシールズ数の関係

ズ数の 3 乗の傾きより緩いようである。

図-8 は図-7 と同じデータを mobility number $\Theta = U^2/(s-1)gd$ で整理したものである。本実験結果は底質粒子の種類、漂砂量の評価法の違いに関わらず、 Θ によ

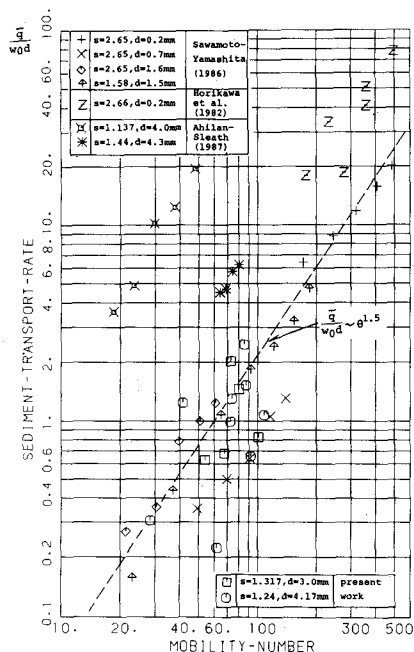


図-8 半周期平均漂砂量と mobility number との関係

って良く整理されることがわかる。図中の破線は $\bar{q}/w_{od} \sim \Theta^{1.5}$ の関係を示すもので、この関係は漂砂量が主流流速の振幅の3乗に比例することを意味する。Ribberink・Al-Salem (1990) は、定量的には本結果よりやや小さいものの、同じ $\bar{q} \sim U^3$ の関係で示される実験結果を示している。

図-7のシールズ数 Ψ より図-8の mobility number Θ の方が本結果ならびに既往の結果を良く整理できるのは、 Ψ 中の摩擦係数が固定床の知見に立脚したものであり、シートフロー状態の摩擦力の表現として正確でないためと考えられる。

4. ま と め

本研究では、観測部中央を挟んで一方に着色粒子を、他方に着色しない粒子を敷設し、半周期間の振動流作用下における2つの粒子群の境界の移動から漂砂量を測定した。この新しい方法によって漂砂量は視覚的に直示さ

れ、底質敷設面の一様性も確保されるため測定精度の向上が得られた。主要な結論は以下のとおりである。

(1) $c-u$ インテグラル法から求めた局所漂砂量 $q(z)$ は、静水時の底質層表面よりやや上方で最大値を取り、 $q(z)$ が最大となる位相は主流流速より $\pi/6$ 程度先行することがわかった。

(2) 直接評価法から求めた漂砂量の時間変動波形は、ばらつきがあるが $\sin^4 \theta t$ に近い波形を示し、主流流速変動より平均で 0.2π 程度位相が先行することが明らかになった。

(3) シートフロー層厚は、一部の過大なデータを除き前報の提案式と近い値が得られた。

(4) 半周期平均漂砂量は、底質粒子の種類・漂砂量の測定法の違いに関わらず、シールズ数より mobility number Θ によって良く整理され、その結果は Θ の1.5乗に比例することがわかった。

参 考 文 献

- 浅野敏之 (1993): シートフロー層内の力学機構に関する2・3の考察, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, pp. 948-969.
- 浅野敏之・中村和夫・中野康弘・高沢俊満 (1992): シートフロー状態の底質移動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 296-300.
- 香取完和・渡辺 晃・堀川清司 (1980): シートフロー状態の底質移動に関する研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 202-206.
- 山下俊彦・日比康生・寺島貴志 (1988): シートフロー状漂砂の移動機構と net の漂砂量, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 297-301.
- Ahilan, R. V. and J. F. A. Sleath (1987): Sediment transport in oscillatory flow over flat beds, Proc. ASCE, Vol. 113, HY3, pp. 308-322.
- Dibajnia, M.・渡辺 晃 (1991): 非対称振動流によるシートフローの発生と漂砂量, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 236-240.
- Ribberink, J. S. and A. Al-Salem (1990): Bedforms, sediment concentrations and sediment transport in simulated wave conditions, Proc. of 22nd ICCE, pp. 2318-2331.
- Sawamoto M. and T. Yamashita (1986): Sediment transport rate due to wave action, J. of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 1-15.
- Sleath J. F. A. (1978): Measurements of bed load in oscillatory flow, Proc. ASCE, J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng. Div., Vol. 104, WW3, pp. 291-307.