

海底の傾斜に伴う砂れん間の砂分散量の差を考慮した 底質移動モデル

小野 信幸*・入江 功**・中野 優***・武若 聡****

1. はじめに

自然の海浜は、その海浜固有の波の特性に応じて形成されており、一般に長期的には地形が安定していると考えられる。このような安定した海浜の底質移動特性を調べることは、海浜変形機構を理解する上で重要である。海浜の沖浜帯には通常砂れんが存在し、それが岸沖漂砂に及ぼす役割は非常に大きいと思われる。しかし現在のところ、例えば砂れん間の砂の交換等を考慮にいたした海浜変形モデルは構築されていない。

本研究は、まず室内実験レベルの漂砂現象をできるだけ忠実に再現するモデルを開発することを目指し、未だ十分に解明されていない現象（例えば、砂れん後流渦に拘束された浮遊砂の移動）についても、実験から情報を得ることで、実際の現象に即したモデルを構築するものである。その第一歩として、砂れんの存在下の底質移動モデルを構築する。その上で、掃流・浮遊を含めた底質移動状況を調べるために、蛍光砂トレーサの分散移動現象を数値的に再現することにより、平衡状態に近い海浜の沖浜帯での底質移動特性について考察する。

2. 砂れん近傍の底質移動のモデル化

2.1 現象の分離と底質移動モデル

砂れんの存在下における底質の移動機構は、図-1に示すように、波の作用により半周期毎に砂れん頂部でせん断され、そのまま下流側の海底に落ちる分（掃流移動分）と、砂れん後流渦に巻き込まれて上方水中に浮遊し反転する流れに乗って移動するもの（浮遊移動分）の2つに分類される。そこで、これら2つの移動機構で移動する底質の、波の一周期の往復運動の結果として生じる底質移動現象を次のようにモデル化する。

ここでは、底質の海底からの浮上量と海底への沈降量が等しく浮遊砂濃度が平衡状態である場合を考える。岸沖方向沖向きをx軸正にとり、砂れん波長λの区間で鉛直方向に仕切られた範囲に存在する砂が、波の一周期

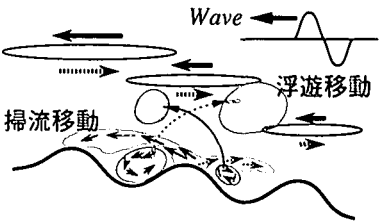


図-1 砂れん上の底質往復運動の模式図

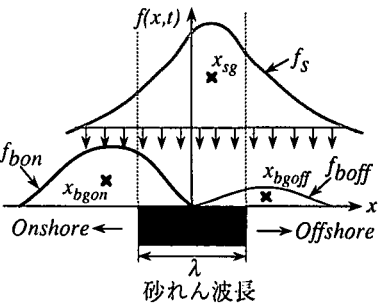


図-2 一周期後の底質移動分布のイメージ

(T)間に移動する場合を考える。即ち、時刻 t_0 で、ある1つの砂れんの範囲に存在する砂が、 t_0+t ($0 < t < T$)において波の作用により岸沖方向へ広がる時の分布形を $f(x,t)$ とし、 f の変化により生じる漂砂量フラックスを $q(x,t)$ とする。以下、掃流移動分、浮遊移動分を分けて考え、それぞれ b,s の添字を付けて表すことにする。但し、 f は、図-2に示すように分散移動する砂が沈殿した時の堆積高で表示した。

まず、浮遊砂について考えると漂砂の連続式より、

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = -\frac{\partial q_s}{\partial x} \dots\dots\dots (1)$$

が成り立つ。この時の浮遊砂分布の重心位置を x_{sg} とすれば、

$$x_{sg}(t) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f_s(x,t) x dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f_s(x,t) dx} \dots\dots\dots (2)$$

この時、重心の移動速度 V_{sg} は、(1)、(2)式を用いて次のよう表示できる。

* 学生会員 工修 九州大学大学院 工学研究科
** 正 会 員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科
*** 学生会員 九州大学
**** 正 会 員 工博 九州大学助手 工学部建設都市工学科

$$V_{sg} = \frac{\partial x_{sg}}{\partial t} = \frac{1}{Q_s} \int_{-\infty}^{\infty} q_s dx \quad (3)$$

ここで、 Q_s は浮遊機構による砂の移動寄与量（一周期で移動に寄与する砂の総量）で次のように表せる。

$$Q_s = \int_{-\infty}^{\infty} f_s(x, t) dx \quad (4)$$

掃流により移動する砂についても同様の手順で、岸側分布 (f_{bon}) 沖側分布 (f_{boff}) に対し、重心移動速度及び移動寄与量が次のように定義される。

$$V_{bgon} = \frac{1}{Q_{bon}} \int_{-\infty}^{\infty} q_{bon} dx \quad (5)$$

$$Q_{bon} = \int_{-\infty}^{\infty} f_{bon}(x, t) dx \quad (6)$$

$$V_{bgoft} = \frac{1}{Q_{boft}} \int_{-\infty}^{\infty} q_{boft} dx \quad (7)$$

$$Q_{boft} = \int_{-\infty}^{\infty} f_{boft}(x, t) dx \quad (8)$$

ここで、一つの砂れんから生じる掃流・浮遊含めた全体としての漂砂量 q_t は、掃流と浮遊について独立に考えているので、

$$q_t = q_{bon} + q_{boft} + q_s \quad (9)$$

両辺を積分すれば、

$$\int_{-\infty}^{\infty} q_t dx = \int_{-\infty}^{\infty} q_{bon} dx + \int_{-\infty}^{\infty} q_{boft} dx + \int_{-\infty}^{\infty} q_s dx \quad (10)$$

(10) 式を、(3)、(5)、(7) 式及び一つの砂れんからの一周期当たりの砂の移動寄与量 $Q_t (= Q_{bon} + Q_{boft} + Q_s)$ と、その重心移動速度 V_{tg} を用いて書き直すと、

$$Q_t \cdot V_{tg} = Q_{bon} \cdot V_{bgon} + Q_{boft} \cdot V_{bgoft} + Q_s \cdot V_{sg} \quad (11)$$

$$V_{tg} = \frac{Q_{bon} \cdot V_{bgon} + Q_{boft} \cdot V_{bgoft} + Q_s \cdot V_{sg}}{Q_t} \quad (12)$$

これは、掃流・浮遊それぞれの機構で分散移動する砂の移動寄与量と重心移動速度が求められれば、全体としての重心移動速度が求められることを意味している。

2.2 移動寄与量と重心移動速度の算定

ここでは、それぞれの移動寄与量と重心移動速度の算定法について述べる。

掃流移動分については、Madsen・Grant (1976) による $\phi(t) = 40\phi^3(t)$ ($\phi(t)$: 無次元漂砂量, $\phi(t)$: Shields 数) を用いて図-2 のように底面流速波形の非対称性を考慮して、半周期で岸向き及び沖向きに移動する底質の分布形状を別々に求めた。その分布形状から (6)、(8) 式より移動寄与量 (Q_{bon} , Q_{boft}) と重心位置 (x_{bgon} , x_{bgoft}) を求め、重心の移動速度 V_{bgon} , V_{bgoft} を算定した。

浮遊移動分については、柴山ら (1993) による浮遊砂濃度分布を鉛直方向に積分して砂れん一波長内の移動寄与量 (Q_s) を求めた。重心移動速度 (V_{sg}) は、入江ら (1993)

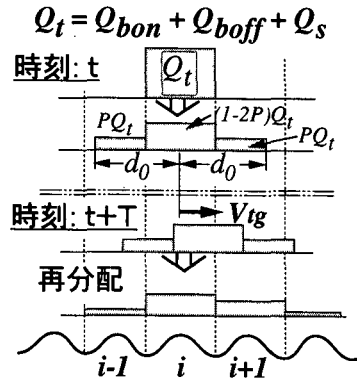


図-3 OM-プロセスによる底質移動の模式図

による固定床砂れんを用いた実験結果より流速波形の非対称性と砂れん形状の非対称性を取り入れた実験式より算定した。

2.3 OM-プロセス（砂れん間の底質交換過程の再現）

掃流分、浮遊分それぞれの一周期当たりの移動寄与量 (Q_{bon} , Q_{boft} , Q_s) とその重心移動速度 (V_{bgon} , V_{bgoft} , V_{sg}) より、全体としての移動寄与量 Q_t と重心移動速度 V_{tg} が求められる。これらの量を用いて底質移動を計算する際、砂の分散を考慮するために以下に示す方法を用いる。

図-3に示すように、まず、時刻 t において、砂れん i の一周期当たりの移動総量 Q_t が左右均等に分配率 P で水粒子軌道全振幅 d_0 の範囲に分散すると考える。これが形を変化させずに移動速度 V_{tg} で移動するものとし、一周期後 ($t+T$) に各砂れんに再分配する。このプロセスが生起する箇所（砂れん）を乱数を用いて選択し、海底に存在する全ての砂れんに対し、重複することなく施して波の一周期分が完了する。この一連のプロセスをOM-プロセス (Oscillatory Movement Process) と呼ぶことにする。OM-プロセスによって、底質の平均的な移動と隣合う砂れん間の底質交換の過程を再現することができる。後に述べる数値計算では、分配率 P を、橋本ら (1993) の研究を参考にして全て $P=0.1$ として行った。

2.4 砂れん間の砂分散量の差

a) 海底勾配の効果

これまで述べてきた底質移動のプロセスを傾斜海浜に適用する場合について考える。水粒子の軌道径は水深が浅くなるに従って大きくなり、それに伴い砂移動も激しくなる。従って、一周期当たりの移動に寄与する砂の総量 Q_t は図-6(下)に示すように水深が浅くなるに従って大きくなる。このことを隣合う砂れん間で模式的に示したのが図-4である。このように Q_t の量に差が存在するので一周期で隣の砂れんへ分散移動する砂の量 $Q_{d(1)} > Q_{d(2)}$ (1: 岸側, 2: 沖側) となり、この差による浅海域

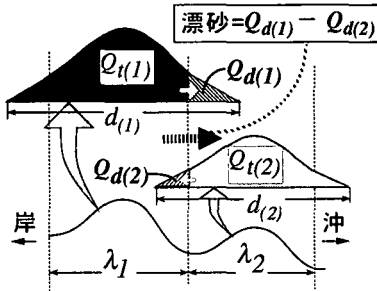


図-4 砂れん間の砂分散量の差による漂砂

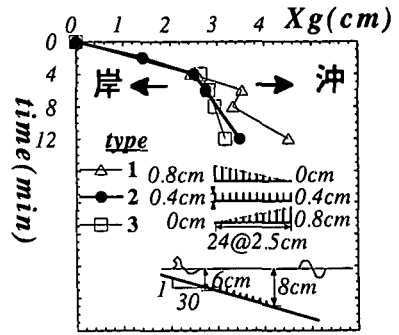


図-5 粗度高さの違いによる底質移動の変化

から深海域へと向かう漂砂が生じる。OM-プロセスを行うと、海底が勾配を持つ限り、このような沖向きの漂砂が発生することになる。また、2.2で算定される重心移動速度 V_{cg} には掃流移動分に対する海底勾配の効果が組み込まれていない。本モデルでは、このような海底勾配の効果をとり入れ、 V_{cg} を次のように補正した。

$$V_{cg} = V'_{cg} + J \cdot \tan \theta \quad \cdots \cdots \cdots (13)$$

V'_{cg} は水平床の場合の重心移動速度、 θ は海底の傾斜角、 J は海底勾配効果の補正項で速度の次元をもつ。

OM-プロセスを施す数値シミュレーションにおいて、もし水平な海底で、漂砂量がゼロである場合を想定すると、砂れん間の砂分散量は差はなく、 V_{cg} はゼロとなる。しかし、海底が傾斜している一般の海浜の場合は、たとえば V_{cg} がゼロであったとしても、砂れん間の砂分散量の差 $\{Q_{d(1)} - Q_{d(2)}\}$ による沖向きの漂砂が発生する。

b) 砂れん間の砂分散量の差の効果の確認実験

図-5 は、岸沖方向に高さの変化率の異なる type 1～3 の棧粗度の中央に粒径 0.08 mm の砂を置き、波高 2.5 cm、周期 0.8 s の波を作用させた後、岸沖方向に分布した砂の重心位置 (X_g) の時間変化を調べた結果である。棧粗度の岸側端で底質の移動条件を各ケースで比較した場合、底面付近に生じる後流渦の規模が異なり (type 1: 大 → type 3: 小)、また、海底に落ちた砂の巻き上がり易さは、type 1 から type 3 に向かって低下する。このような条件下で、海底に置かれた底質の重心の移動は、type 1 の場合が最も沖向きへの砂移動が大きい。このことから、傾斜海浜の沖浜帯においても、砂れんからの砂移動量が大きい岸側から、より移動量の小さい沖側へ向かう漂砂が発生するという図-4 の効果が確認される。

3. 平衡状態に近い海浜での底質移動特性

3.1 蛍光砂の分散移動追跡実験

a) 海浜断面形状と漂砂量の変化

これまでに述べてきた底質移動モデルを検証するために、地形の変化量が小さい海浜断面の沖浜帯において蛍光砂の移動を追跡する移動床実験を行った。実験時の断

面形状と漂砂量の特徴を以下に述べる。中央粒径 0.16 mm の砂を用い、勾配 1/30 で一様に均した模型浜に、沖波波高 $H=6$ cm、周期 $T=1.3$ s の規則波を 40 時間作用させ、平衡状態に近い断面形状を得た。しかし、断面には部分重複波による Sand wave が発達しており、これが底質移動を拘束していた恐れがある (中野ら, 1996)。そこで、Sand wave を均し、波の反射率を低減させるために、図-6 (上) に示すように前浜勾配を緩やかにした上で消波材 (ステラシート製) を設置し、再び同じ波を作用させたところ、Sand wave は形成されなくなった。

図-7 は、Sand wave を均した直後の断面を基準として、図-6 (上) の蛍光砂投入点 ($X=535$ cm) の位置より沖側に堆積した土量 $\Sigma \Delta v$ (cm^3/cm) の時間変化である。これより、4～7 時間は断面がほぼ平衡状態であったものの、7～8 時間 (次に述べる蛍光砂の分散移動追跡実験はこの時間帯に行っている) では一定の沖向き漂砂が発生している。このようにそれまで平衡状態であった海浜が 7 時間後に急に沖向きの漂砂が発生した理由は、図-6 (上) において前浜消波材法先の洗堀を防ぐため間欠的に砂を補給したためと思われるが、この変化が発生する前後において断面変化はほとんど見られなかった。

b) 蛍光砂の分散移動状況の特徴

蛍光砂の分散移動を追跡する実験は以下のようにして行った。図-6 中の投入点の位置に存在した砂れんの一つを水槽の幅一杯に形状がほぼ等しくなるよう、上と同じ砂で作成した蛍光砂で完全に置き換えた。その後、波を作用させ、岸沖方向の分散状況を各砂れんの表面に存在する蛍光砂数を数え、水槽側面から見て、砂れんの頂部から蛍光砂が元の砂と混合している高さを測定した。図-8 は、各時刻における砂れん毎の表面の蛍光砂数と鉛直混合高さを掛け合わせ、それを岸沖方向の総蛍光砂数で無次元表示したものである。波作用後 15 分までは、蛍光砂分布のピークは投入点に残り、その裾が、徐々に沖へ広がる形をとっているが、60 分後になるとピークは 550～600 cm の位置に移動し、裾は 650～700 cm まで広

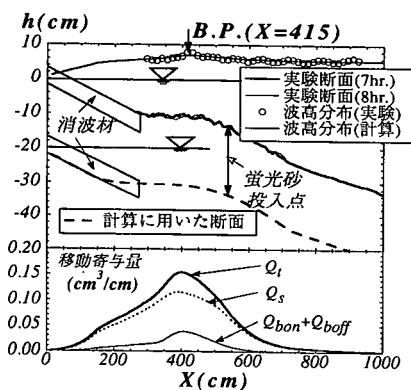


図-6 断面形状と波高分布(上), 移動寄与量の岸沖分布(計算値)(下)

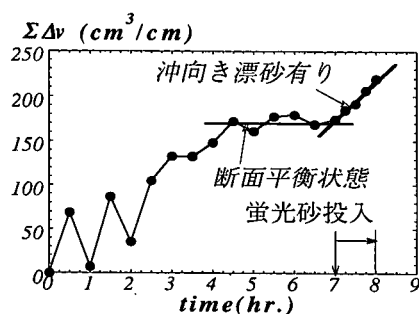


図-7 蛍光砂投入点より沖側の土砂堆積量の時間変化

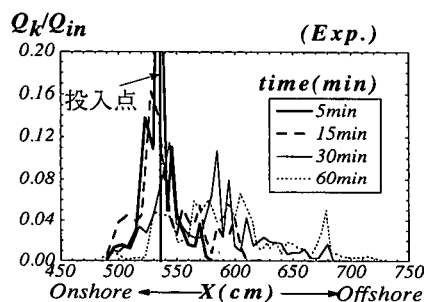


図-8 蛍光砂分布の時間変化(実験値)

がっている。

3.2 実験における蛍光砂移動の数値シミュレーション

図-6に示した移動床実験における海浜断面(7時間)を, 近似した断面を計算のモデル断面に設定して, 今回のモデルで蛍光砂移動の数値シミュレーションを行った。まず, 図-7の波作用後7時間以降に発生した冲向き漂砂量の岸沖分布(図-9最下段のExp.)を滑らかな曲線で近似したものを q_{exp} とし, $q_{set}=0 \times q_{exp}$ (断面平衡状態) から, $q_{set}=1.0 \times q_{exp}$ までをいくつかの段階に分割する事で, 種々の冲向き漂砂条件を設定した。図-6のモデ

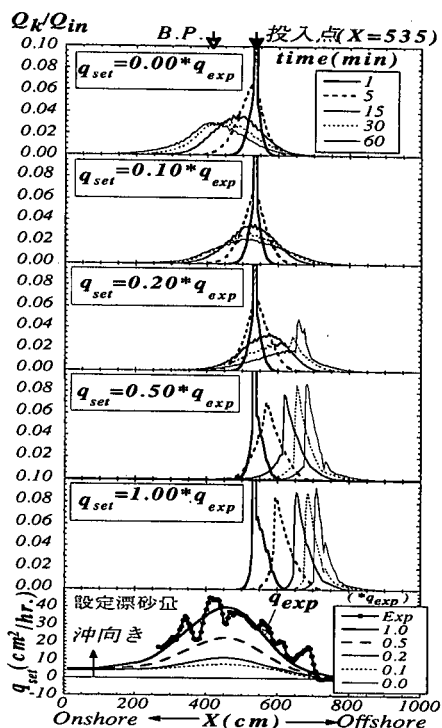


図-9 初期漂砂量分布の変化に伴う蛍光砂の移動

ル断面の投入点の位置の砂れんに $1 \text{ (cm}^3/\text{cm)}$ の蛍光砂を数値的に投入して, 波を一時間作用させた場合の蛍光砂分布の変化を種々の冲向き漂砂量に対して計算した。

図-9に計算結果を示すが, $q_{set}=0 \times q_{exp}$ の場合は平衡状態であるにも拘らず, 蛍光砂は岸向きへ(碎波点へ向かって)移動するという興味深い結果となっている。 q_{set} が増大するにつれ, 蛍光砂の移動は冲向きへ転じ, $q_{set}=0 \times q_{exp}$ では, 1時間後には $X=700 \sim 800 \text{ cm}$ まで移動している。

$q_{set}=0$ の場合, 沖浜に投入された蛍光砂は岸向きへの移動を示したが, 断面平衡状態の蛍光砂の移動特性をより詳しくみるために, 碎波点 ($X=415 \text{ cm}$) に先と同量の蛍光砂を数値的に投入した場合の蛍光砂の分布状況を併せて表示したのが図-10である。碎波点に投入された蛍光砂の分布の重心は動かず岸沖方向に広がるだけであるが, 沖浜帯に投入された蛍光砂よりも投入点の蛍光砂が早く無くなる傾向が見られる。これは図-6(下)に示すように, 砂れんからの移動寄与量 Q_t が沖浜帯の投入点よりも碎波点の方が大きいため, 断面平衡状態で砂れん間の砂交換量が等しくなるには, 沖浜帯にある蛍光砂は岸側に多くの砂を供給する必要があることが分かる。

海浜の断面平衡状態において, 沖浜帯に投入した蛍光砂が岸向きに移動するということは, 沖浜帯における岸沖漂砂を操作することで海浜断面を制御できる可能性を

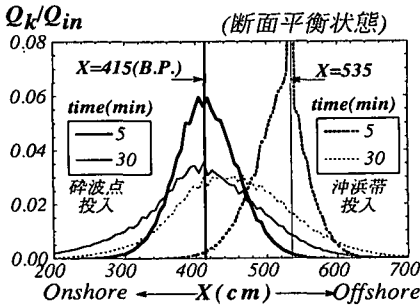


図-10 断面平衡状態の蛍光砂の分散移動

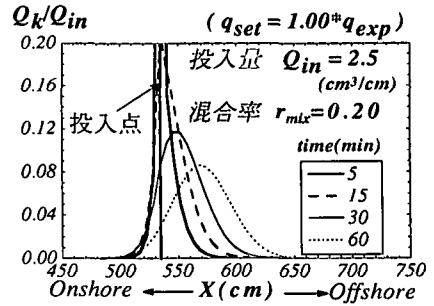


図-12 鉛直混合モデルを取り入れた計算結果

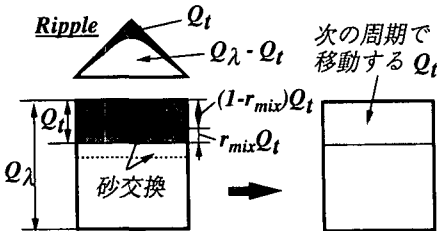


図-11 砂れん内部の鉛直混合モデル

示し、興味深い。

3.3 砂れん内部での底質の鉛直混合

図-9における蛍光砂の分散移動計算では、OM-プロセスによる分散のみを考え、蛍光砂が移動する過程で、砂れんに混合して残留するとは考えていない。実験で水槽横側から蛍光砂が海底の砂と混合する過程を観察したところ、分散移動する蛍光砂は、砂れんの岸側斜面から徐々に砂れん内部に混入していき、最終的に、ほぼ砂れんの波高 (η) の高さで一様に混合した。そこで、蛍光砂が砂れんに混合していく過程をモデルに組み込むことを考えた。図-11に示すように、砂れんの山を構成する砂の量を $Q_\lambda (=0.5\lambda)$ とした場合、一周期で移動に寄与する Q_t の内、 $r_{mix}Q_t$ が混合により砂れん本体の砂と置き代わり、置き代わった砂と $(1-r_{mix})Q_t$ との合計が、次の周期での移動に寄与すると考えた。

図-8における蛍光砂分布の移動状況を、この仮定により計算したのが図-12である。計算では、鉛直混合率 r_{mix} を 0.2、蛍光砂の投入量 Q_{in} を $2.5 \text{ (cm}^3/\text{cm)}$ と仮定している。図よりこの仮定に基づく蛍光砂分布の変化は、図-8の実験値とかなり近いことが分かる。

4. おわりに

一つの砂れんに着目し、波通過時に底面付近の水粒子の往復運動により生じる底質移動をモデル化した。これを傾斜海浜に適用する場合、水粒子軌道径の岸沖方向の違いにより、砂れん間の砂分散量に差が生じることが分かった。

このような砂れん間の砂分散量の差は、海浜断面が平衡状態にある場合においても存在するため、沖浜帯に投入された蛍光砂の移動の様子を追跡すると、蛍光砂は岸沖方向の広域にわたって分散するものの、分布の重心は砕波点へ向かって岸向きに移動する。

蛍光砂の分散移動状況を数値シミュレーションする場合、砂れん内部での蛍光砂の鉛直混合過程を考慮する必要がある、これをモデルに組み込むことにより実験との比較がより詳しくできるようである。

参考文献

- 入江 功・小野信幸・村上啓介・橋本誠也・中村 聡 (1993): 歪み砂れんマットによる沖浜帯の岸沖漂砂の制御, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 561-565.
- 柴山知也・W. Rattanapitikon., (1993): 砕波帯を含む浮遊砂濃度の鉛直分布の評価, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 306-310.
- 中野 優・小野信幸・入江 功・武若 聡 (1996): 規則波による海浜変形の形成過程と底質移動特性について, 第51回年次学術講演会講演概要集
- 橋本誠也・入江 功・村上啓介・小野信幸・小島治幸 (1993): モンテカルロ法を用いた海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 366-370.
- Madsen, O. S., and W. D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport by wave, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1093-1112.
- Price, W. A., (1968): Variable Dispersion and its Effects on the Movements of Tracers on Beachs, Proc. 11th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 329-334.