

# 波浪による二枚貝の移動予測モデルの妥当性と 移動機構に関する研究

桑原久実\*・日向野純也\*\*・中村義治\*\*\*・三村信男\*\*\*\*

## 1. はじめに

開放性の砂浜海岸には、チョウセンハマグリ *Meretrix lamarckii*・コタマガイ *Gomphina melanaegis*・ウバガイ *Pseudocardium sachalinensis* などの二枚貝が生息し、これらは市場価格が高く、重要な漁獲対象種となっている。波浪による二枚貝の移動を調べることは、二枚貝分布の zonation の解明や漁場造成技術の開発に関連する重要な研究課題である。最近、二枚貝の種苗放流が数多く実施されているが、放流後の二枚貝の挙動が不明であるため放流効果の評価ができない現状にあり適切な種苗放流や資源管理の技術開発が必要である。

外海性砂浜域に生息する二枚貝の移動は、貝の能動的な行動（潜砂など）よりも荒天時の強制的な移動が主原因であることが、渡辺（1982）、日向野ら（1993）の研究から明らかとなってきた。波浪による二枚貝の移動を支配する要因が、波浪、海浜形状および貝の比重などの物理的なものならば、工学的な手法による予測が可能と考えられる。この様な背景から、既に桑原・日向野（1993, 1994）は波浪による二枚貝の移動に関する解析的な予測モデルを提案し、モデルの妥当性を現地調査による二枚貝の分布と比較して示している。

本研究は、波浪による二枚貝の移動現象を詳細に調べるため、波浪水槽を用いてウバガイの移動実験を行った。ウバガイは一般にホッキガイと呼ばれ、水深 10 m 以浅の砂浜底に棲息する寒海性の二枚貝である。実験では、まず、波浪の一波一波に対する二枚貝の移動状況を観察し、次に、二枚貝の移動が終了するまで波を作用させ二枚貝の集積・分散状況について調べた。さらに、実験結果と二枚貝の移動予測モデルの計算結果を比較しモデルの妥当性および改良点を検討した。なお、二枚貝は潜砂せず海底面上にあるものを想定し、波浪による受動的な移動に注目して研究を進めている。

## 2. 実験方法

実験は、長さ 18.5 m、幅 0.6 m、水深 0.425 m の 2 次元波浪水槽の一端に茨城県波崎海岸の砂（中央粒径 $\approx$ 0.2 mm）を用いて勾配 1/20 の模型海浜を作製して行った。実験波は、①  $H_0=7.0$  cm,  $T=1.0$  s (case-1)、②  $H_0=5.5$  cm,  $T=1.25$  s (case-2) 及び③  $H_0=3.0$  cm,  $T=1.7$  s (case-3) の 3 種類を用い、Sunamura and Horikawa (1974) の  $C_s$  の値は、順に 8.1, 5.5 及び 2.4 となり、侵食、中間及び堆積性の海浜を形成する。1/20 勾配の一樣海浜に波を 3 時間作用させ平衡海浜を作製した後、ホルマリン固定したウバガイ（殻長 $\approx$ 約 8 mm）を海底面上岸沖方向に 40 cm 間隔で 2 個体ずつ設置した。その後、二枚貝の移動が終了するまで（約 15 分間）再び波を作用させ移動した後の位置を計測した。ホルマリン固定した貝を用いたのは、貝の潜砂などの能動的な影響を除き、海底面上にある二枚貝の受動的な移動を見るためである。貝は番号を付けて個体識別してある。

波高は容量式波高計、流速は海底面上約 1 cm に電磁流速計を設置して 20 cm 間隔で測定し、海底断面は砂面計を用いて 10 cm 間隔で測定した。波高及び流速のサンプリング・タイムは  $T/100$  ( $T$ : 波の周期) であり、50 波測定した。波浪に対する二枚貝の移動状況の観察は、二台のビデオカメラを用いて行った。一方は水槽側面からの二枚貝の挙動を、他方は電磁流速計の流速表示メータを撮影し、これらをテレビ画面上に同期させ映像解析した。これによって、底面流速の位相と二枚貝の移動状況とを対応させて検討できるようになる。

## 3. 二枚貝の移動予測モデル

二枚貝の移動予測モデルは、既に桑原・日向野（1993, 1994）が提案したものをを用いている。簡単に示すと次の様に（1）～（3）の計算ステップからなっている。

### （1）波浪場の計算

砕波帯を含む岸沖 1 次元の波浪場は、非定常緩勾配方程式（渡辺・丸山, 1984）を用いて計算し、戻り流れ（佐藤ら, 1987）も考慮している。

\* 正会員 農博 北海道立網走水産試験場 漁業資源部 予測科  
 \*\* 正会員 水産庁 水産工学研究所 水産土木工学部  
 \*\*\* 水博 水産庁 北海道水産研究所 資源増殖部  
 \*\*\*\* 正会員 工博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科

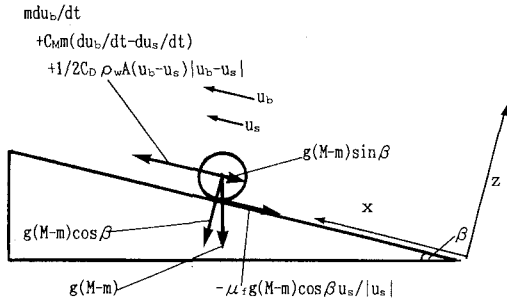


図-1 波浪による二枚貝の移動モデル

(2) 一波当たりの二枚貝の移動距離

波浪による二枚貝の移動モデルは図-1 のようであり、二枚貝は圧力勾配による力、質量力、抗力、重力および底面摩擦力の釣り合いによって掃流移動するものとする。運動方程式は式 (1), (2) より表され、貝の移動した場所の底面流速を逐次与えると Lagrange 的に貝の挙動を計算することができる。X軸は海底面の岸向きを正としている。

$$\frac{dX(t)}{dt} = u_s(t) \dots\dots\dots (1)$$

$$M \frac{du_s(t)}{dt} = m \frac{du_b(X, t)}{dt} + C_M m \frac{d(u_s(t) - u_b(X, t))}{dt} + \frac{1}{2} C_D A \rho_w |u_b(X, t) - u_s(t)| (u_b(X, t) - u_s(t)) - (M - m) g \sin \beta - \mu_f g (M - m) \cos \beta \frac{u_s(t)}{|u_s(t)|} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $u_b$ : 底面流速、 $u_s$ : 貝の移動速度、 $X$ : 二枚貝の移動距離、 $A$ : 貝の投影面積、 $M$ : 貝の質量 (=  $\rho_s \pi D^3 / 6$ ,  $\rho_s$ : 貝の比重、 $D$ : 殻長)、 $m$ : 貝と同体積の流体の質量 (=  $\rho_w \pi D^3 / 6$ ,  $\rho_w$ : 流体の比重)、 $\mu_f$ : 二枚貝と海底面の摩擦係数、 $\beta$ : 海底勾配、 $C_M$ : 質量力係数、 $C_D$ : 抗力係数である。

(3) 波浪の繰り返しによる二枚貝の移動

波浪の繰り返し回数、二枚貝の生息分布 (二枚貝の位置、個体数) を与え、一波当たりの二枚貝の移動距離を波の作用ごとに重ね合わせて、波浪が繰り返し作用した後の二枚貝の移動位置が求まる。

ウバガイの特性値は、比重  $\rho_s$  が実測値から 1.2、静止摩擦係数  $\mu_{fs}$  が 0.55、動摩擦係数  $\mu_{fd}$  が 0.05 と仮定し、質量力係数  $C_M$  が 0.5、抗力係数  $C_D$  は次式から求める (Molerus and Werther, 1968)。

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.152 \sqrt{Re} + 0.0151 Re)$$

ここに、 $Re$ : レイノルズ数 (=  $|u_s - u_b| D / \nu$ ,  $\nu$ : 動粘性係数) である。なお、 $C_M$ ,  $C_D$  は二枚貝を球体と仮定して

定数を決めている。

4. 二枚貝の移動状況の観察

図-2 は、侵食性の波浪により形成された海浜形状と二枚貝の挙動をビデオ撮影した位置を示す。また、図-3~図-5 は、それぞれ図-2 の①~③地点での二枚貝の移動状況であり、(a), (b) は水槽側面から見た貝の中心位置の変化、(c) は二枚貝の移動距離及び (d) は底面流速である。正は岸向き、負は沖向きを示す。

図-3 は、汀線近傍の二枚貝の移動状況を示す。二枚貝の岸沖移動について見ると、約 2.5 s まで底面流速が岸向きに増加するときは岸へ、沖向きに増加するときは沖へ、砂連で凹地形となった岸側の斜面を移動し net の移動はほとんど認められない。2.5~3.0 s の底面流速が沖

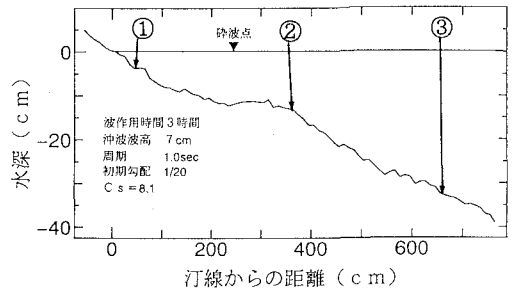


図-2 海浜形状と二枚貝の移動を観測した位置 (case-1; 侵食性)

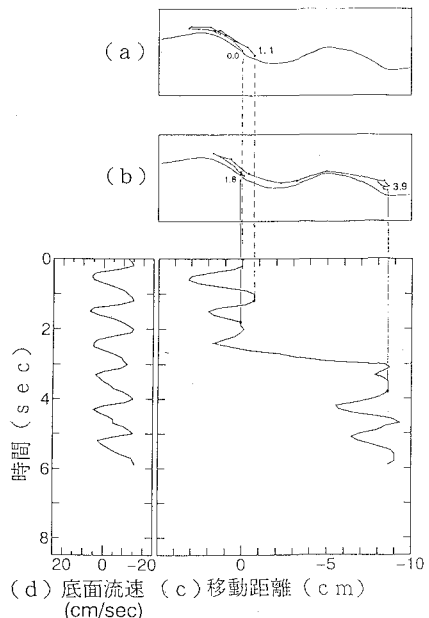


図-3 ①地点 (汀線から 25 cm) における二枚貝の挙動 (case-1)

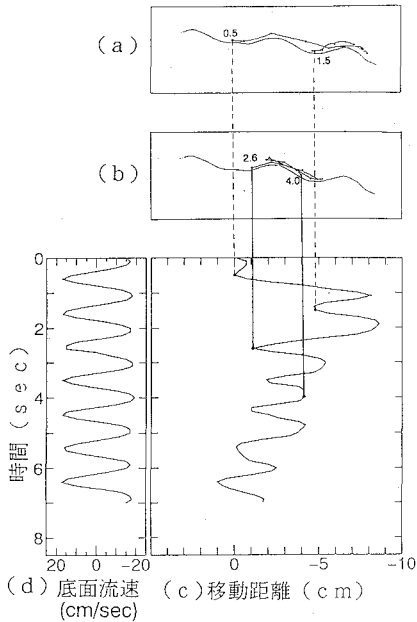


図-4 ②地点 (汀線から 385 cm) における二枚貝の挙動 (case-1)

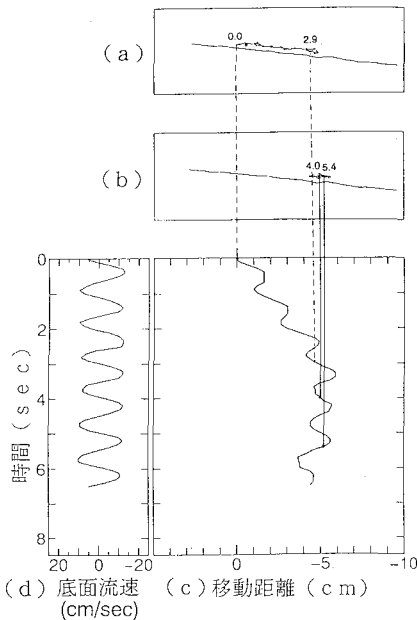


図-5 ③地点 (汀線から 665 cm) における二枚貝の挙動 (case-1)

向きに増加する時、砂漣一波長を急速に沖へ移動し、その後、再び、底面流速の位相と同様な形態で移動している。鉛直方向の移動は、時々、砂漣周辺の渦や海底面との衝突によって浮遊状態で海底面上を移動するが、海底面から大きく舞き上がるような現象は見られず、二枚貝

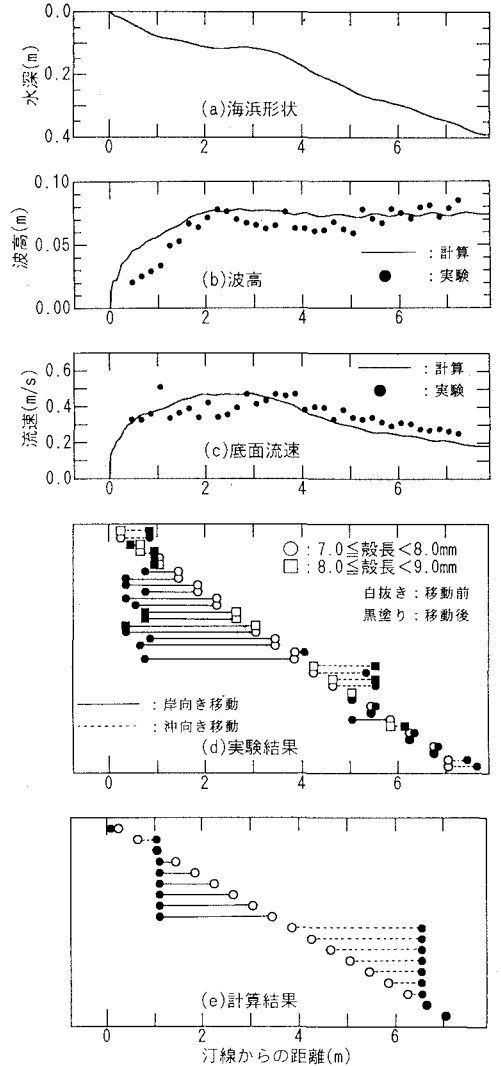


図-6 侵食性の波浪による実験と計算結果の比較 (case-1)

の移動は掃流的なものと考えられる。

図-4 は、バー頂部あたりの二枚貝の移動を示す。二枚貝は、0.5~1.0 sec に砂漣二波長ほど沖向きに移動し、2.0~2.5 sec には逆に砂漣二波長を岸向きに移動し、その後、底面流速と同様な位相で移動し、僅かずつであるが岸向きの net の移動が認められる。

図-5 は、底面流速が小さいため砂移動は無く砂漣の形成も見られないような沖側での二枚貝の移動を示す。波の力で貝が移動状態となり、重力の効果によって徐々に沖へ移動しているものと考えられる。また、転動による移動であることが映像からわかった。

この様な二枚貝の移動状況は、中間及び堆積性の波浪を作用させた場合にも同様に観察された。波浪の一波一波に対する二枚貝の移動は、底面流速と同じ位相で移動

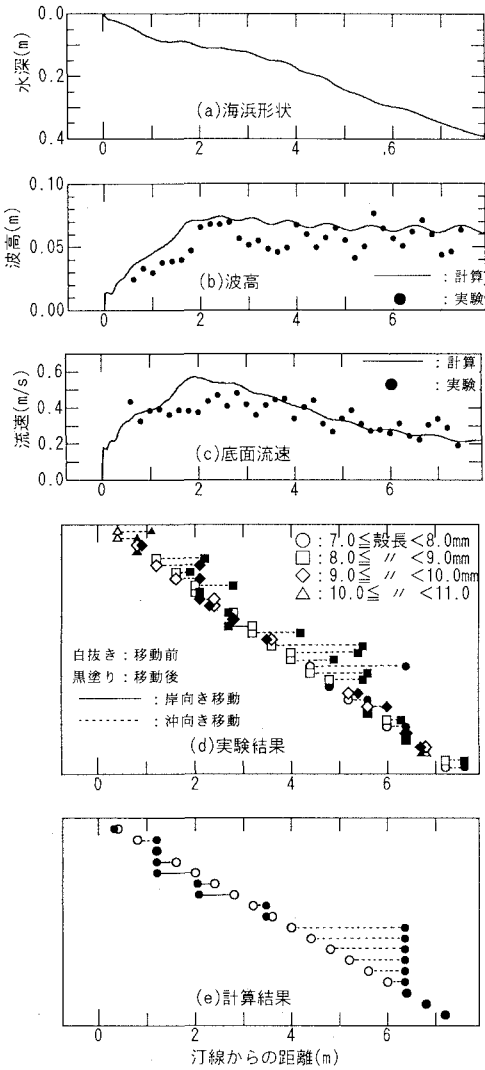


図-7 中間性の波浪による実験と計算結果の比較 (case-2)

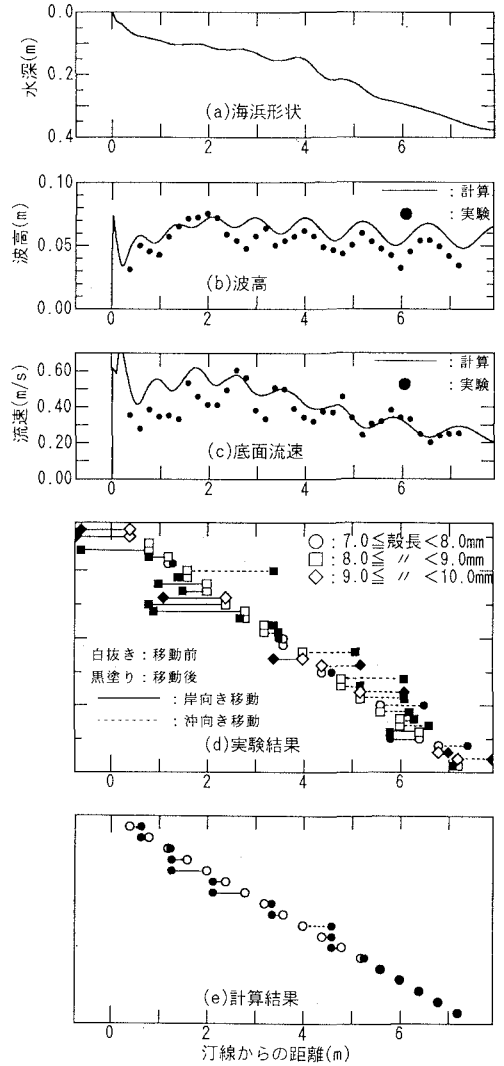


図-8 堆積性の波浪による実験と計算結果の比較 (case-3)

することから driving force として底面流速の加速度が効いており、貝の姿勢、砂漣とその周辺の渦および底面流速の局所的な物理量が影響し岸沖へと複雑な挙動を示すものと考えられる。このため、短時間の二枚貝の移動を追跡しただけで移動方向を判定することは、困難であることがわかった。

### 5. 二枚貝移動予測モデルの妥当性

二枚貝の移動予測モデルの妥当性を検討するために、実験と同じ条件で計算を行うことにする。

図-6～図-8 は、それぞれ侵食、中間及び堆積性の波浪を作用させた場合の実験と計算結果の比較を示している。(a)～(c)は順に海浜形状、波高及び底面流速の分布、(d)、(e)は二枚貝の集積・分散に関する実験と計算結果

である。なお、(a)の海浜形状は、砂漣による局所的な地形の起伏を除去するために50 cm間隔で移動平均を行っている。

図-6より侵食性の場合について見る。(a)の海浜形状は汀線から3.0 m付近にバーが形成されており侵食性の形状となっている。(b)の波高は汀線から2.4 m付近で碎波し波高減衰が生じ、(c)の底面流速は沖から約3.5 mまで増加し更に岸側では減少する傾向にあり、計算結果と良く一致していることがわかる。(d)から実験による二枚貝の集積・分散状況を見ると、汀線から3.5 mを境に、これより岸側では岸向きに、沖側では沖向きに移動しており、汀線から0.9 m、5.4 mあたりで集積が認められる。この様な二枚貝の移動状況は、(e)の計算結果にも同様に見られるが、沖側の集積場所は計算の方が

沖側になっている。

図-7より中間性の場合について見る。(b), (c)から実験による波高及び底面流速の分布は反射波が影響し凸凹し計算結果と異なるが、全体的な傾向は一致している。(d)から実験による二枚貝の集積・分散状況を見ると、汀線から3.5mより沖側のものは沖に移動し5.5mあたりで集積し、岸側は砕波点(汀線から2.2m)やや沖側の2.0~3.0m付近に集積している。(e)の計算結果では、3.5mより沖側の貝が沖へ移動することは実験と良く一致するが、集積場所は計算の方が沖側となっている。また、岸側の集積場所は1.0~2.0m付近に表れ実験と相違が見られる。

図-8より堆積性の場合について見る。(a)の海浜形状は汀線近傍で急勾配となり堆積性の形状となっている。(b), (c)から波高及び底面流速は反射波が影響し凸凹な分布となっている。計算結果は実験と同じ位相で変動しており良い一致が見られる。(d)から実験による二枚貝の集積・分散状況を見ると、汀線から0.5~1.5m, 3.2m及び6.0m付近に集積が認められる。汀線より岸側に貝が移動しているが、これは造波直後の過渡的な波によるものである。(e)の計算結果では、実験で見られた0.5~1.5m, 3.2mの集積場所は一致するが、それ以外に2.1m, 4.6mにも集積が認められる。また、計算では沖側の集積が見られない。

二枚貝の移動予測モデルは、平均的な海浜勾配、底面流速によって二枚貝が滑動することを想定しており、4.で述べたような局所的な外力に伴う二枚貝の複雑な挙動を表現することができない。しかし、実験と計算結果の二枚貝の集積・分散状況は比較的良い一致が見られている。これは、波浪の一波一波に対して二枚貝は複雑な挙動を示すが、波浪が長く作用する場合、二枚貝には平均的な海浜形状、底面流速などの物理量が支配的に効いてきて二枚貝移動予測モデルの結果と良く一致したものと考えられる。即ち、波浪による二枚貝の移動は、長期的に見ると局所的な物理量よりも平均的なものが支配的に効いており、二枚貝の移動予測モデルと良く一致するものと考えられる。

## 6. おわりに

本研究は、波浪水槽を用いてウバガイの移動実験を行い、波浪による二枚貝の移動現象、二枚貝の移動予測モデルの妥当性について検討した。その結果、次のことが明かとなった。

1) 波浪の一波一波に対する二枚貝の移動は、貝の姿

勢、砂運とその周辺の渦および底面流速などの局所的な物理量が影響し岸沖へ複雑な挙動を示すが、波浪が長く作用する場合、二枚貝には平均的な海浜形状、底面流速などの物理量が支配的に効いてきて集積・分散場所が現れる。

2) 二枚貝の移動予測モデルは、平均的な海浜勾配、底面流速によって二枚貝が滑動することを想定しており、長期的な二枚貝の移動について妥当な解が得られるものと考えられる。

3) 中間および堆積性の波浪を作用させた場合、砕波帯内の二枚貝の集積・分散状況は実験と計算結果に相違が認められる。これは、波浪の有限振幅性及び前傾化を考慮していないこと、wave set-up, set-downを考慮していないこと、および、抗力、質量力係数は球体を仮定しており二枚貝の形状の影響が入っていないことが原因していると考えられる。

以上の問題点をさらに検討し、より精度の高い二枚貝の移動予測モデルを確立したいと考えている。

本研究を進めるにあたり協力して頂いた茨城大学、佐藤孝次君(当時4回生)に御礼申し上げる。また、本研究は、科学技術庁科学技術特別研究員制度および沿岸漁場整備開発事業直轄調査「二枚貝の着底・移動機構と物理環境に関する研究」の一部であり関係各位に感謝する次第である。

## 参考文献

- 桑原久実・日向野純也(1993): 波浪による二枚貝の岸沖移動に関する解析手法の開発, 海岸論文集, 第40巻, pp. 311-315.
- 佐藤慎司・福濱方哉・堀川清司(1987): 斜面上における不規則波の砕波変形と底面流速に関する実験的研究, 第34回海講論文集, pp. 36-40.
- 日向野純也・木元克則・安永義暢(1993): 鹿島灘で観測された海底断面変化と砂浜性二枚貝の分布 I. 1987年調査結果, 水産工学研究所技報 水産土木, pp. 1-16.
- 渡辺 晃・丸山康樹(1984): 屈折・回折・砕波減衰を含む波浪場の数値解析, 第31回海講論文集, pp. 103-107.
- 渡辺栄一(1982): 波浪によるホッキガイの減耗に関する実験的研究, 土木試験所月報, No. 351, pp. 3-15.
- Hinze, J. O. (1975): Turbulence, McGraw-Hill, New York, 790 pp.
- Kuwahara, H., and J. Higano (1994): On-offshore movement model of bivalves by waves, Proc. 24th ICCE (in press).
- Molerus, O. and J. Werther (1968): Berechnung der Sinkbewegung kugelförmiger Teilchen in einem vertikal pulsierenden Stromungsfeld, Chemie-Ingenieur-Technik, Vol. 40, pp. 522-524.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 920-938.