

暴浪時の二枚貝の洗い出し過程の漂砂力学的側面

後藤 仁志*・酒井 哲郎**・豊田 泰晴***・酒井 淳史***

1. はじめに

時化の後に大量の二枚貝が死滅して浜に打ち上げられたという報告はこれまでも数多くなされており、二枚貝は水産資源として重要であることから多くの現地調査、室内実験、解析がなされてきた(例えば、渡辺, 1982; 日向野ら, 1988; 山下ら, 1994; 桑原ら, 1993)。二枚貝の重要性は単に水産資源としての位置付けに止まるものではない。すなわち、二枚貝に代表される底生生物は環境の質を知るための指標の一つであり、良好な海岸環境の保全を考える上でも重要な要素であると言える。

波・流れの作用による二枚貝の移動過程は、二枚貝を粗砂、周囲の砂粒子を細砂と見立てると、混合粒径からなる漂砂の移動過程と類似の現象であるが、粗砂が外力よってのみ移動させられるのに対して、二枚貝には能動的な運動能力が備わっている点が際立った相違点である。二枚貝は本来、海底床の底質中に潜砂して生息しており、この潜砂行動の存在は、波・流れの作用による二枚貝の移動限界を論じる上で重要な因子である。二枚貝は潜砂行動により周辺の環境の変化にある程度は能動的に対応することが可能であり、この意味で潜砂行動は二枚貝の生存に大きく貢献しているが、生物一般と同様に運動能力すなわち潜砂能力には個体差が存在する。さらに、波・流れの作用による二枚貝の移動は主として荒天時に生じることが知られているが、この場合、二枚貝周辺の砂地盤の運動も活発であり、周辺地盤にも種々の変動要因が存在する。このような状況を適切に記述するため、確率過程モデルを導入し、二枚貝の運動と周辺地盤の挙動の不規則性を考慮に入れた解析を試みる。

さらに、荒天時には高いレベルの底面せん断力が作用するので、土砂の移動モードはしばしばシートフローとなる。土石流の流下過程では、巨礫がフロントの表層部に集積する逆グレイディング現象の存在が知られているが、二枚貝の運動能力を遙かに凌ぐ外力の作用下では

先にも述べたように二枚貝の流動過程は混合砂礫の流動過程と類似性を有することを考慮すると、二枚貝の浮上に土石流における砂粒径の分級機構として知られている逆グレイディング現象が関与している可能性が示唆される。ここでは、著者らの粒状体モデルによる数値解析(後藤ら, 1994)を通じて、そのメカニズムを砂粒子の運動レベルから検討する。

2. 二枚貝の洗い出し過程の確率論的検討

2.1 二枚貝の洗い出し過程の実験

山下ら (1994) は、U 字管振動流装置を用いて、貝長 5 mm~20 mm のホッキ貝とエゾバカ貝の潜砂過程についての実験を行った。彼らは、貝の潜砂能力の統計特性を調べるとともに、砂面の侵食速度 v_e と二枚貝の潜砂速度 v_s を測定して、侵食速度・潜砂速度比 $\alpha = v_e/v_s$ と貝の洗い出し事象の生起の関係を検討した。その結果、砂面侵食速度が貝の潜砂速度の 10 % を越えると砂中から洗い出される貝が出現し、砂面侵食速度が貝の潜砂速度の 30 % を越える領域 ($\alpha \geq 0.3$) では、貝は全て砂層中より放出されることが示された。このように、貝の運動能力を大幅に下まわる速度での砂面侵食が生じる際にも貝の洗い出しが生じし、さらに侵食速度・潜砂速度比 ($\alpha = v_e/v_s$) が同一でも洗い出しの発生・非発生が共存する領域が存在する。

これらのことは、二枚貝の洗い出し事象が確率論的な側面を有していることを裏付けるものである。以下では、二枚貝の潜砂能力に関する既往の測定結果に基づいて、潜砂過程の確率過程論的検討を試みる。

2.2 潜砂過程のモデル化

ここでは、山下ら (1994) および日向野ら (1993) の測定に基づき、潜砂過程を以下のようにモデル化する。

(1) 二枚貝は長軸 $l_0 = 8 \text{ mm}$ を対象とする。(2) 二枚貝は長軸を鉛直にして潜砂するものとする。(3) 二枚貝が砂床表面と上端を接した状態(図-1 参照)を初期状態とする。(4) 水流により砂床表面の砂が流されて殻が露出すると貝は潜入運動を行ない、再び砂が流されて殻が露出するとこの運動を繰り返す。潜入運動を誘発した時に露出していた殻部分の殻長に対する比率は、日向

* 正 会 員 工博 京都大学助手 工学部土木工学教室

** 正 会 員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

*** 学生会員 京都大学大学院工学研究科

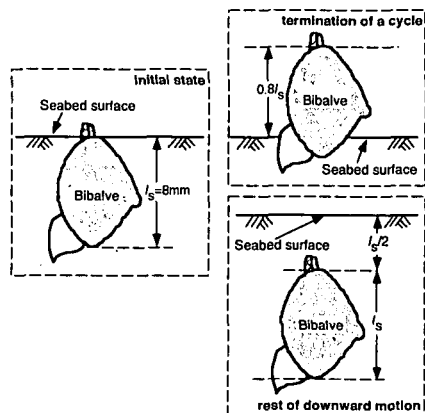


図-1 二枚貝の諸元

野の実験から得られた分布に従うものとし、潜砂開始の確率的特性を考慮する。(5) 二枚貝は砂床表面と貝の上端の距離が殻長の50%になるまで潜砂すれば停止するものとする(図-1参照)。(6) 二枚貝は殻長の80%が砂床表面に露出した時点で洗い出し事象の発生とし(図-1参照)、追跡を終了する。(7) 二枚貝が潜砂し始め(5)の条件が成立して停止するまでを1サイクルとし潜砂行動を追跡する。また、追跡開始より2200秒間洗い出されることがなければ1サイクルの終了とし、そのサイクルにおける洗い出しは非発生と判断する。(8) 山下らの実験によると二枚貝は平均反復周期2.2秒で潜砂運動を繰り返す。この特性を模擬するため、2.2秒ごとに潜砂速度を変化させて貝の運動を追跡する。(9) 山下らの実験では、砂面の侵食速度の変動特性については報告されていないが、ここでは砂面侵食速度の変動が洗い出し事象に与える影響について検討するため、砂面の侵食速度を標準偏差 $\sigma = v_e/3$ の正規分布に従うように確率変動させる。(10) 二枚貝が洗い出されるか、(7)の条件の下に1サイクルが完了すれば、(3)の初期状態に戻り、潜砂過程を再度追跡する。

以上のプロセスを繰り返して、洗い出し発生・非発生をカウントし洗い出し事象の生起確率 P_m を求めた。

2.3 解析結果と考察

図-2は、 $\alpha=1.0$ で貝が洗い出されない場合の、1サイクルの間の二枚貝の潜砂と砂の侵食の深さ z と、追跡時間 t の関係を示したものである。図中には、砂床厚(貝の土被りの厚さ) δ の時間変化も併示している。この例では、 $t \cdot v_s/l_s \approx 1.0$ 付近で砂床厚が急減して貝が洗い出しが完了しそうになるが、 $t \cdot v_s/l_s \approx 2.0$ 付近で砂床厚が急増して洗い出しを免れている。仮に移動開始直後の砂層厚の急減が持続した場合には、洗い出しが生じたものと推察される。このように、貝の洗い出しの発生・非発生は侵食速度の偶発的な変化に大きく左右される。

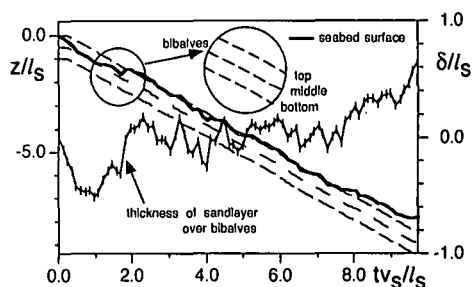


図-2 潜砂過程

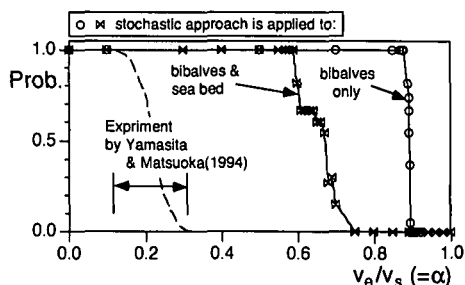


図-3 二枚貝の洗い出しの発生領域

図-3は、砂の侵食速度の確率分布を考慮したときの100サイクル後に貝が洗い出されず砂層中に存在する確率 P_{100} と侵食平均速度・潜砂平均速度比 α の関係を示したものである。また、図中には砂の侵食速度の確率分布を考慮しない場合の P_{100} と侵食平均速度・潜砂平均速度比 α の関係も併示したが、山下らの実験では洗い出される貝と砂中に留まる貝が共存している範囲は $0.1 \leq \alpha \leq 0.3$ の0.2の幅であるが、侵食速度の変動を考慮しない場合には実験よりはるかに小さな範囲で P_{100} が1.0から0.0に急減している。

これに対して砂面の侵食速度の確率分布を考慮した場合、 $0.6 \leq \alpha \leq 0.75$ の範囲で P_{100} の値は緩やかに変化しており、山下らの実験結果に近づく方向に解析結果がシフトするものの、砂の侵食速度の確率分布を考慮しないときと同様、洗い出しの発生・非発生の境界は過大評価される。

諸量の変動を考慮した確率過程モデル(特に砂面侵食速度を考慮したモデル)により、貝の洗い出しの発生・非発生の共存状態の存在は再現されたが、貝の潜砂速度の0.1倍から0.3倍程度の侵食速度での洗い出しの発生という実験結果を定量的に説明するには至らなかった。

3. シートフロー中の二枚貝の流動

3.1 逆グレーディング現象と二枚貝の浮上

前節からも明らかなように、二枚貝の潜砂行動の支配

要因の確率変動を考慮するだけでは、波による洗い出し事象の発生を過小に評価することとなり、他の要因の洗い出し過程への介在が示唆される。時化の際に卓越する底質の移動形態はシートフロー状態であることはよく知られているが、このシートフローの流動特性が二枚貝の浮上に関係している可能性がある。シートフローにおいては多数の砂粒子が近接して頻繁に干渉しつつ流下するので、山地河川における土石流と同様に粒子間干渉が流動機構の支配要因となっている。土石流では、巨礫がフロント部表面に集中する逆グレーディング現象が見られるが、ここでは、二枚貝の浮上にもこれと類似の現象が介在するものとの仮説を立て、粒状体の数値モデルによりその検証を試みる。

3.2 個別要素法の概要

ここでは、シートフローの流動過程の基本的特徴である粒子間干渉を陽に取り込んだモデルとして、個別要素法を用いる。著者ら（後藤ら、1994）は均一粒径より成る砂層が表層に水平せん断を受ける際の流動過程を個別要素法により模擬して、砂粒子の運動特性と移動速度分布の関係について考察するとともに、準定常の仮定の下にシミュレーション結果をまとめて漂砂量を推定した（後藤ら、1995）。

ここでは、著者らのシミュレーションを2粒径混合状態に拡張し、粗砂を二枚貝と見立ててその挙動を追跡する。以下では、計算方法の概略を説明する。

鉛直2次元場を対象として、砂粒子群を均一粒径 d 、二枚貝を粒径 D の剛体円盤によりモデル化する。砂粒子間の相互作用および砂粒子と二枚貝の間の相互作用は弾性スプリングと粘性ダッシュポットにより表現され、砂粒子と二枚貝の運動方程式が陽解法で解かれて両者の運動が追跡される。

a) 要素の運動方程式

要素 i の並進および回転の運動方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\pi\sigma_i d_i^2}{4} [\ddot{x}_i]_t = \sum_j \{ -[f_n]_t \cos \alpha_{ij} + [f_s]_t \sin \alpha_{ij} \} + F_{0i} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\pi\sigma_i d_i^2}{4} [\ddot{y}_i]_t = \sum_j \{ -[f_n]_t \sin \alpha_{ij} + [f_s]_t \cos \alpha_{ij} \} - \frac{\pi(\sigma_i - \rho) d_i^2 g}{4} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\pi\sigma_i d_i^3}{16} [\ddot{\phi}_i]_t = \sum_j \{ [f_s]_t \} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 f_s, f_n ：要素の接平面を主軸とする局所座標系 $n-s$ における要素 i, j 間の法線および接線方向の作用力、 α_{ij} ：要素 i, j の接線角、 F_{0i} ：せん断に起因して要素 i に作用する外力、 d_i ：要素 i の直径、 σ_i ：要素 i の密度、 g ：

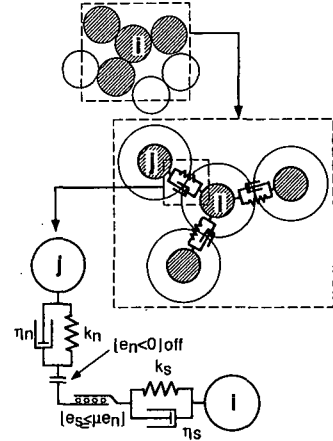


図-4 要素間接触のモデル化

重力加速度であり、 $[]_t$ は時刻 t における値を、ドット $(\dot{})$ は時間微分を表す。

b) 要素間接触判定

要素間の接触判定条件は、

$$R_{ij} \leq d_i + d_j; R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \dots \dots (4)$$

となる。ここに、 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ ：要素 i, j の中心の座標、 R_{ij} ：要素 i, j 間の距離である。

c) 砂粒子間の作用力の算定

要素間の接触状態を模式的に示したのが、図-4である。各要素の接点には、法線方向および接線方向に弾性スプリング（ばね定数 k_n, k_s ）および粘性ダッシュポット（減衰定数 η_n, η_s ）を配置して相互作用を表現する。要素 i, j 間の法線および接線方向の作用力 f_n, f_s は、

$$\begin{aligned} [f_n]_t &= [e_n]_t + [d_n]_t \\ [f_s]_t &= [e_s]_t + [d_s]_t \end{aligned} \dots \dots \dots (5)$$

$$\begin{aligned} [e_n]_t &= \min \{ [e_n]_{t-\Delta t} + k_n \cdot \Delta \xi_n, e_{n\max} \} \\ [d_n]_t &= \eta_n \cdot \Delta \dot{\xi}_n \\ [e_s]_t &= \min \{ [e_s]_{t-\Delta t} + k_s \cdot \Delta \xi_s, e_{s\max} \} \\ [d_s]_t &= \eta_s \cdot \Delta \dot{\xi}_s \end{aligned} \dots \dots \dots (6)$$

と書ける。ここに、 e_n, e_s ：法線および接線方向のばねによる抗力、 d_n, d_s ：法線および接線方向のダッシュポットによる抗力、 $\Delta \xi_n, \Delta \xi_s$ ：時間 Δt 間の法線および接線方向変位である。また、砂粒子群の塑性的挙動を表現するため、ばねによる抗力に上限値 $e_{n\max}, e_{s\max}$ を設けた。

さらに、非粘着性の砂粒子を対象としているので、法線方向には引っ張り抵抗しないジョイントを、接線方向には一定の限界を越える力が作用すると滑動するジョイントを配置した。これらのジョイントの効果は、次式で与えられる。

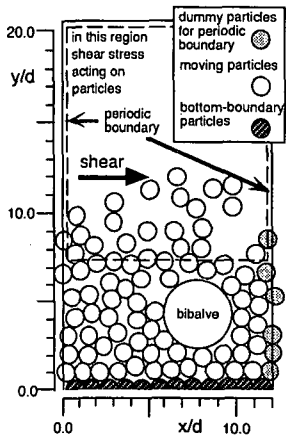


図-5 計算領域

表-1 二枚貝の諸元

k_n	$9.45 \times 10^6 \text{ N/m}$
k_s	$2.36 \times 10^6 \text{ N/m}$
η_n	40.0 Ns/m
η_s	20.0 Ns/m
μ	0.577
$e_{n \max}$	2.5 N
$e_{s \max}$	0.025 N
Δt	$2.0 \times 10^{-5} \text{ s}$

$[f_n]_i = [f_s]_i = 0 \text{ when } [e_n]_i < 0 \dots\dots\dots (7)$

$[f_s]_i = \mu \cdot \text{SIGN}([e_n]_i, [e_s]_i)$
when $|[e_s]_i| > \mu \cdot [e_n]_i \dots\dots\dots (8)$

ここに、 μ ：摩擦係数、 $\text{SIGN}(a, b)$ は $|a|$ に b の符号を付けることを意味する。また、計算の安定化のため、後藤ら (1994) と同様の孤立要素の速度補正を実施した。

d) 初期条件・境界条件

計算領域の模式図を図-5 に示す。計算の効率化のため側方境界は周期境界とし、底面境界は計算対象と同一粒径の砂粒子から成る粗面固定床とした。計算を始める前に、砂粒子群の初期配置を決定するための予備計算(パッキング)を行った。具体的には、各要素間に 0.004 cm の間隙を残した非接触の状態から計算を開始して、ほぼ静止状態となった時点を経験の初期状態とした。

計算では、砂層表面にせん断力を作用させて粒子群の運動を追跡するが、実際には、所定のせん断力を表層付近の要素に割り振る必要がある。これについては後藤ら (1994) と同様に、表層付近に設けた閾値 y_m よりも上方に存在する全ての要素について超過部分の面積に応じてせん断力を比例配分した。要素 i に作用するせん断力は

$F_{0i} = Lw_i\tau_0; w_i = S_i / \sum_{j=1}^N S_j \dots\dots\dots (9)$

と書ける。ここに、 L ：計算領域の水平方向の長さ、 τ_0 ：底面せん断力、 S_i ：要素 i の閾値超過部分の面積である。

計算に用いた要素は、粒径 $d=0.5 \text{ cm}$ 、比重 $\sigma/\rho=2.65$ の円盤(砂粒子) 91 個および粒径 $D=2.0 \text{ cm}$ 、比重 $\sigma/\rho=1.30$ の円盤(二枚貝) 1 個である。二枚貝の比重に関しては、日向野ら (1993) の測定結果を参考にした。また、二枚貝の形状の複雑性により貝周囲の砂粒子は 3 次元的に挙動し、貝自体の回転運動も厳密には円盤のそれとは異なることは言うまでもないが、ここでは二枚貝と砂粒子の本質的相違である粒径および比重の差のみ注目し

た解析を行う。さらに、実現象では砂粒子の粒径は今回用いた $d=0.5 \text{ cm}$ より小さく、砂粒子と二枚貝の粒径比は大きくなるが、徒に計算量を増大させることなしに現象の本質を模擬するため $d=0.5 \text{ cm}$ の粒子を用いることとした。また、モデル定数については既往の研究を参考に、表-1 のように与えることとした。なお、計算は底面境界に接するように初期配置した貝が砂層外部に放出されるまで行った。時間ステップは $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ で、計算終了までの繰返し回数 80,000 回であり、0.8 秒間の現象を追跡したことに相当する。

3.3 二枚貝の浮上過程のシミュレーション結果

図-6 は、シミュレーション結果の直感的把握のために、底面せん断力 $\tau_* (=u_*^2/\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd})=1.5$ の場合の二枚貝の洗い出し過程を 0.2 秒間隔のコマ送りで表示したものである。時間の経過とともに二枚貝は上昇し、0.8 秒後には完全に砂層外部に放出される。砂粒子に関しては、二枚貝が移動してできたスペースに上方から砂粒子が流れ込むことにより鉛直方向の混合が促進されるものの、一般的には、下層では砂粒子間距離が小さい(密な状態の)層状の流動が生じており、上層へと近づくにつれて砂粒子間距離が増大し、上層では砂粒子が分散した状態で流動している。図-6 に見られた二枚貝の急上昇の物理的背景を明らかにするため、二枚貝の存在高さ(反時計回りを正とする)について示したのが、図-7 である。二枚貝は時計回りに回転しながら緩やかに上昇を開始し、0.6 秒付近から顕著な時計回りの回転を呈しつつ急上昇に転じる。このように回転運動の存在が二枚貝の急激な上昇と深く関わっているが、この上昇機構を模式的に示したのが、図-8 である。砂粒子の水平方向移動速度は上方ほど大きいから二枚貝の直径スケール程度の範囲でも砂粒子の衝突速度には鉛直分布が存在する。二枚貝の上部に衝突する砂粒子の速度は下部に衝突する砂粒子の速度より大きく、速度せん断層の中に置かれた二枚貝は時計回りに回転する。下流側にある砂粒子との接平面を想定すると、瞬間的には時計回りに回転する剛体円盤が傾斜面に置かれた状態として単純化して

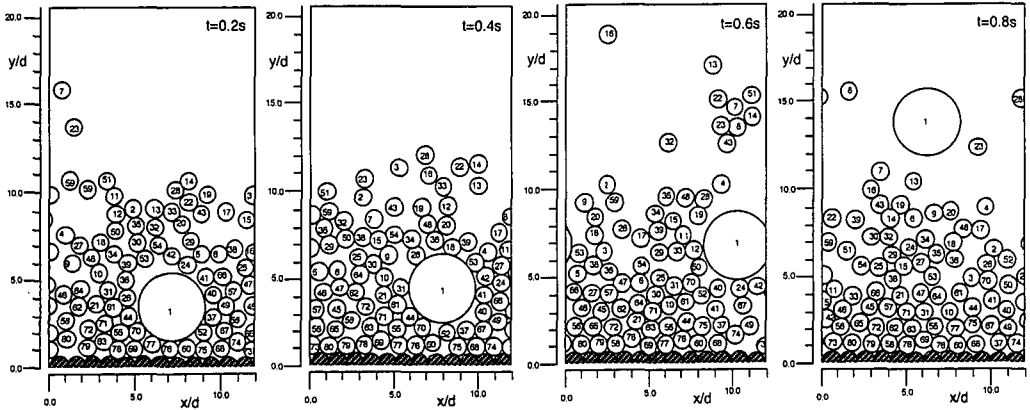


図-6 二枚貝の上昇過程

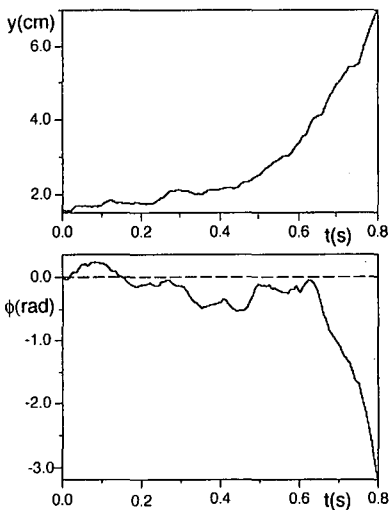


図-7 二枚貝の位置と回転角

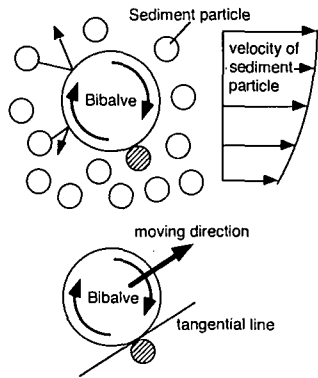


図-8 二枚貝の上昇機構

したい。

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, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 311-315.
- 後藤仁志・酒井哲郎・富永圭司 (1994): 粒状体モデルによるシートフローの流動過程の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 371-375.
- 後藤仁志・酒井哲郎 (1995): 表層せん断を受ける砂層の動的挙動の数値解析, 土木学会論文集 (投稿中).
- 日向野純也・安永義暢 (1988): 解放性海浜域における海底地形と二枚貝の分布特性について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 767-771.
- 日向野純也・木元克則・安永義暢 (1993): 潜砂行動と物理環境の関係から見たチョウセンハマグリとコタマガイの分布特性, 水工研報, Vol. 14, pp. 65-87.
- 山下俊彦・松岡 学 (1994): 波浪による二枚貝の挙動と減耗に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp. 119-122.
- 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.

理解できるが、この場合、円盤が斜面を登ることは自明である。

4. おわりに

本研究では、環境指標として重要な二枚貝の波の作用による洗い出し過程について漂砂力学的観点からの2つの支配要因の検討を行った。二枚貝の生息環境における諸要因の変動特性を考慮することにより、山下ら (1994) の実験で示された洗い出しの発生・非発生の混在領域の存在が再現された。また、粒状体モデルを用いたシミュレーションにより、シートフロー漂砂中での逆グレイディング現象が砂層中での二枚貝の浮上を促進することが明らかとなった。なお、本研究の遂行に当たり、(財)稲盛財団からの研究助成を受けたことを記して、謝意を表