

波浪による二枚貝の岸沖移動に関する解析手法の開発

桑 原 久 実*・日 向 野 純 也**

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* などの二枚貝が生息しているが、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。

外海に面した沿岸域に生息する二枚貝の移動について、日向野・安永 (1988) は運輸省港湾技術研究所の波崎海洋研究施設 (Hasaki Oceanographical Research Facility, 以後、HORF と称す。) で現地観測を行い、チョウセンハマグリはバーに、コタマガイはトラフ付近に多く見られることを明らかにしている。また、渡辺 (1982) は、時化後の海岸にホッキガイが大量に打ち上げられることに着目し、波浪による二枚貝の移動について実験的な研究を行っている。これらの研究から、二枚貝の移動は、貝の能動的な行動をしのぐ荒天時の強制的な移動が原因しており、二枚貝の殻長、比重などにより特有の場所に移動するものと考えられる。また、このような波浪による二枚貝の移動機構は、二枚貝分布の zonation に深く関与しているものと考えられる。

波浪による二枚貝の移動を調べることは、稚貝集積場の形成機構の解明や漁場造成技術の開発に関する重要な研究課題である。このため種々の研究が行われて来たが、いずれも定性的な考察に留まっているようである。

このような背景から、桑原 (1993) は、波浪による二枚貝の移動に関する理論的な解明を試み、その予測手法の開発に取り組んでいる。解析手法は、波浪場を非定常緩勾配方程式を用いて計算し底面流速変動を求め、この流体力を比重、殻長、質量力および抗力係数などで表現される二枚貝モデルに作用させ、波浪による二枚貝の移動を求めるものである。本研究は、水産庁水産工学研究所と運輸省港湾技術研究所の共同研究で実施した HORF での二枚貝の現地分布調査をもとに、本解析手法の妥当性および改良点を検討する。

2. 解析手法の概要

本解析手法は、(1) 波浪場、(2) 一波当たりの二枚貝の移動距離、(3) 波浪の繰り返しによる二枚貝の移動、の3つの計算ステップを経て、任意時間後の二枚貝の移動位置を求めることができる。以下、各計算ステップについて説明すると次のようである。

(1) 波浪場の計算

碎波帯を含む岸沖1次元の波浪場に関する非定常緩勾配方程式は、水位変位 ξ と線流量 Q_x を用いると次式で与えられる (渡辺・丸山, 1984)。

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \xi}{\partial x} + f_D Q_x = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial (n Q_x)}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 t : 時間、 x : 水平座標、 c : 波速であり、

$$Q_x = \int u_x dz \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

u_x : 波動流速の水平成分、 h : 水深、 k : 波数である。また、 f_D は碎波減衰定数であり、次式で示される。

$$f_D = a_D \tan \beta \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{\bar{Q}_x - Q_r}{Q_s - Q_r} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$\tan \beta$: 碎波点付近の海底勾配、 $\bar{Q}_x$: 線流量 Q_x の振幅、 a_D : 碎波帯内で 2.5 となる定数、 g : 重力加速度、 Q_s 、 Q_r は次式により与えられる。

$$Q_s = 0.4(0.57 + 5.3 \tan \beta) \sqrt{gh^3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_r = 0.135 \sqrt{gh^3} \quad \dots\dots\dots (7)$$

碎波指数は、渡辺ら (1983) により整理された流速波速比を用いている。また、数値計算は差分法を用い、空間差分はスタッガードメッシュ・スキーム、時間差分はリーブ・フログ法である。

底面流速変動は、次式により求められる。

$$u_x = k Q_x \sin(\sigma t + \epsilon_x) / \sinh(kh) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 ϵ_x : 位相差、 σ : 角周波数である。

(2) 一波当たりの二枚貝の移動距離

波浪による二枚貝の運動方程式は、貝の移動による波

* 正員 農博 水産工学研究所 科学技術庁科学技術特別研究員

** 正員 同上 研究員

浪場の変化を考慮すると次式のように与えられる (Hinze, 1975). ここではバセット項を無視し, x 軸は海底面の岸向きを正にとる.

$$\frac{dX}{dt} = U_x(t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_x}{dt} = & A_1 |u_x(X, t) - U_x(t)| \{u_x(X, t) - U_x(t)\} \\ & + A_2 \frac{du_x(X, t)}{dt} + A_3 - A_4 \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここに, u_x : 二枚貝の位置における流速変動であり (8) 式で求められる, U_x : 二枚貝の移動速度, X : 二枚貝の移動距離である.

二枚貝を球状固体とし, 移動形態は掃流状態で滑動するものと仮定すると, (10) 式の定数 $A_1 \sim A_4$ は次式となる.

$$\begin{aligned} A_1 = & \frac{3C_D}{4D(\rho_b/\rho_w + C_M)}, \quad A_2 = \frac{C_M + 1}{C_M + \rho_b/\rho_w} \\ A_3 = & \pm \frac{\mu_f g(\rho_b/\rho_w - 1)}{\rho_b/\rho_w + C_M}, \quad A_4 = \frac{g(\rho_b/\rho_w - 1) \sin \theta}{\rho_b/\rho_w + C_M} \\ & \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここに, D : 二枚貝の直径, ρ_w, ρ_b : 水, 二枚貝の密度, C_D : 抗力係数, C_M : 質量力係数, μ_f : 二枚貝と海底面の摩擦係数 (μ_{fs} : 静止摩擦係数, μ_{fd} : 動摩擦係数), θ : 海底勾配である.

移動開始は, (10) 式の右辺第 1, 2 項の抗力, 質量力の和が第 3, 4 項の底面摩擦力, 重力の和より大きくなる場合とし, 移動停止は, 二枚貝の移動速度 U_x が 0 になる場合とする. また, 停止状態では, μ_f は μ_{fs} とし, 一旦, 移動を開始すると μ_{fd} とする (但し $\mu_{fs} > \mu_{fd}$). また, (11) 式の A_3 を示す複号は, 抗力, 質量力の和が正ならば負に, 負ならば正で与える.

(9), (10) 式は, (11) 式の定数を用い Runge-Kutter-Gill 法で計算することによって, 任意の波浪, 地形上にある二枚貝の移動状況を求めることができる. この計算ステップでは, 一波当たりの二枚貝の移動距離を海浜全域について計算し, その分布を求める.

(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いくことによって任意の波作用を受けた二枚貝の移動位置を求めることができる.

(4) 解析条件

現地調査結果は, 1986 年 12 月～1987 年 12 月に実施された中から 1987 年 6 月 23 日, 10 月 22 日の 2 ケースに着目する. この調査手法および結果は, 日向野ら (1993 a) に詳しく示されている.

海底地形は, HORF 橋脚による局所洗掘の影響を除去

し実測値を平滑化している. 潮位は調査日の午後 3 時の観測値を用いている. 波浪, 二枚貝の特性は, 次のような値を基準にし, 二枚貝の移動に与える影響を考察するために種々の特性値を変化させた.

$$H_0 = 1.5 \text{ m}, T = 7.0 \text{ s}, \rho_b = 1.8, D = 20 \text{ mm},$$

$$C_D = 0.5, C_M = 0.5, \mu_{fs} = 1.0, \mu_{fd} = 0.5 \quad \dots\dots (12)$$

なお, 日向野ら (1993b) の測定値から二枚貝の比重 ρ_b は, コタマガイが 1.8, チョウセンハマグリが 1.6 およびヒメバカガイが 1.3 である. また, 二枚貝の潜砂行動を表現するため静止摩擦係数の μ_{fs} は, 粗面上の球体に比べ大きな値を与えている.

3. 結果および考察

(1) 1987 年 6 月 23 日の調査に基づく解析結果

図-1 は, SM 式採泥器 (22×22 cm) を用いた採泥 1 回当たりの二枚貝の個体数と海底断面を示している (1987 年 6 月 23 日の調査結果). 海底断面の形状は, 数日前の高波により大きくトラフが洗掘され, トラフの岸側では急に水深が浅くなっていることが特徴としてあげられる. ヒメバカガイはパーの沖側に多く, チョウセンハマグリも個体数は少ないが同様な傾向にある. コタマガイはトラフに多く見られることがわかる.

図-2 は, 図-1 の海底地形に $H_0 = 1.5 \text{ m}$, $T = 7.0 \text{ s}$ の波浪が来襲したことを想定し, 波高分布を計算した結果である. トラフを通過した波は急激に碎波減衰することがわかる. 碎波点は, 汀線から沖 157 m である.

図-3 に, 二枚貝の移動状況を示す. (a) 図は一波当たりの二枚貝の移動距離である. 縦軸は正值が岸向き, 負値は沖向きの移動距離を示している. 二枚貝の物性値は, 上で示した基準値を用いている. パーの沖側では, あまり移動は見られないが, パーと碎波点付近では岸向き, トラフ底部では沖向きに移動することがわかる. また, 大きく波高減衰した 120 m 付近より岸側では, 汀線近傍を除くと移動が認められない. (b) 図は, (a) 図をもとに波浪の繰り返しによる二枚貝の移動を示している. 初期状態で二枚貝を 10 m 間隔に設置し, 二枚貝の軌跡を示している. 波浪の繰り返し作用によって, 波高減衰が大きく生じた汀線から沖 100 m 付近, トラフ底部の 180 m 付近で二枚貝の集積が認められる.

図-4 に, 波浪, 二枚貝の特性を種々変化させ 10000 秒後の二枚貝の位置を 10 m 間隔で数計し, 各区間での個体数を示す. (a)～(d) 図は順に, 波浪, 殻長 D , 比重 ρ_b および静止摩擦係数 μ_{fs} による集積・分散状況を示している.

(a) 図の波浪特性について見ると, $H_0 = 0.5 \text{ m}$, $T = 7.0 \text{ s}$ ではほとんど移動しないが, 波高, 周期が大きくなるとトラフに多く集積することがわかる. (b) 図から殻

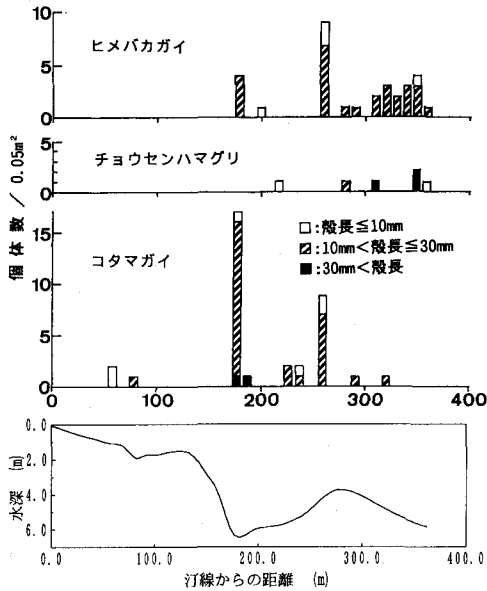


図-1 1987年6月23日の波崎海洋研究施設における二枚貝の分布調査結果と海底断面

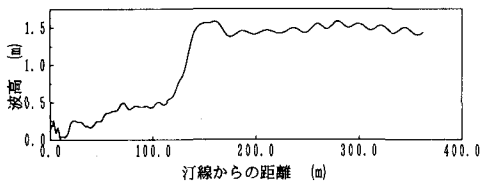
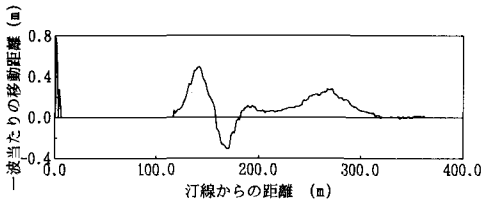
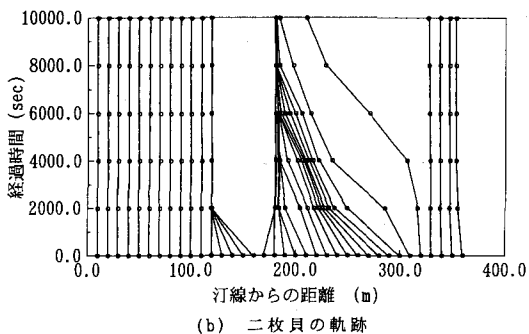


図-2 波高分布 ($H_0=1.5$ m, $T=7.0$ s)

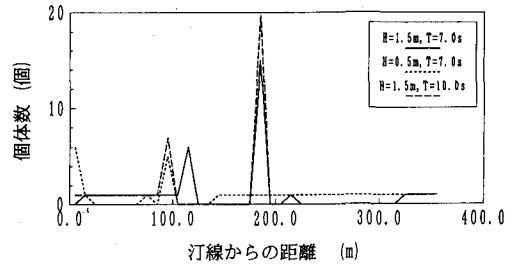


(a) 一波当たりの二枚貝の移動距離

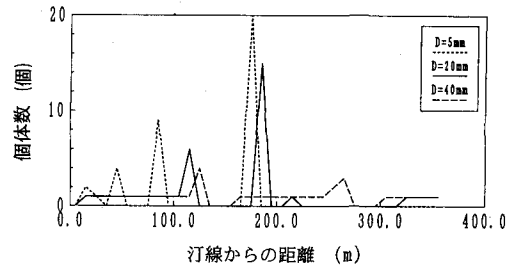


(b) 二枚貝の軌跡

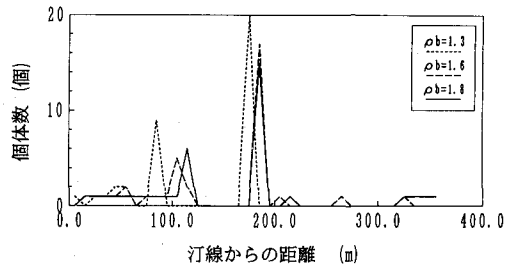
図-3 波浪による二枚貝の移動状況



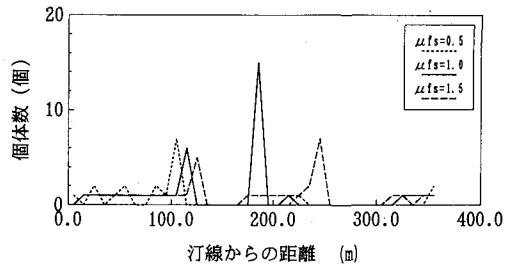
(a) 波浪特性



(b) 殻長



(c) 比重



(d) 静止摩擦係数

図-4 波浪による二枚貝の集積・分散状況 (10000秒後)

長について見ると、殻長 20 mm では汀線から 120 m, 180 m に集積するが、5 mm では集積位置がこれより岸側になる傾向にある。殻長 40 mm の場合は、ほとんど移動が見られずトラフに集積しなかった。(c) 図から比重について見ると、二枚貝の比重が 1.6, 1.8 ではほとんど差はなく、汀線から沖 110~120 m 付近, 180 m のトラフ底部に集積しているが、比重 1.3 では集積位置はやや岸側になっている。(d) 図から静止摩擦係数について見ると、 μ_{fs} が 0.5 及び 1.0 の場合は同様な傾向にあるが、 μ_{fs} が

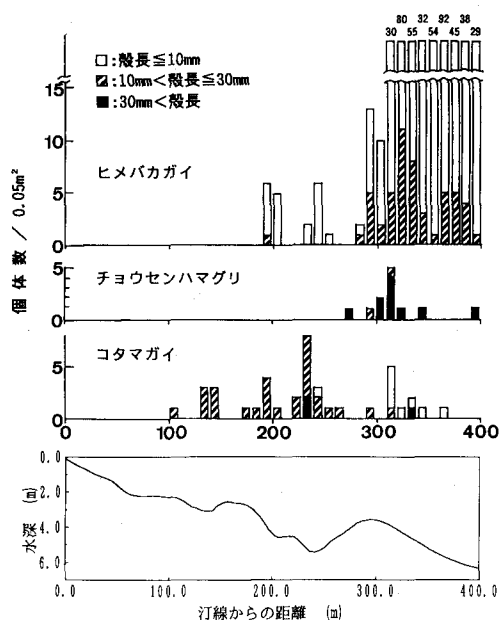


図-5 1987年10月22日の波崎海洋研究施設における二枚貝の分布調査結果と海底断面

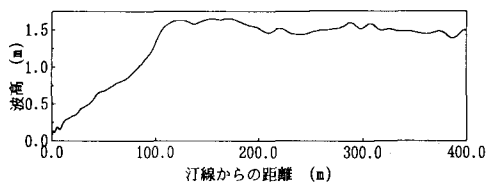
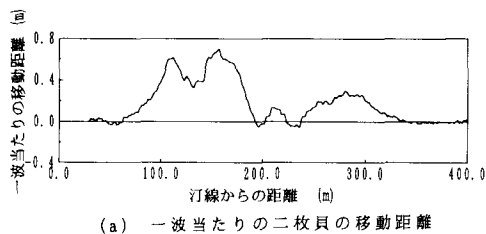
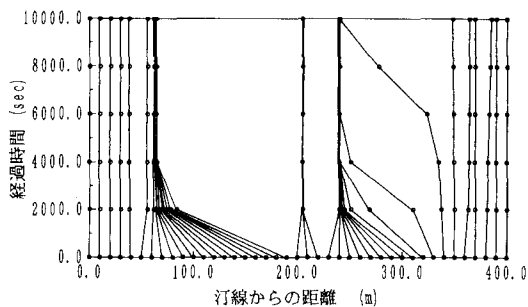


図-6 波高分布 ($H_0=1.5$ m, $T=7.0$ s)

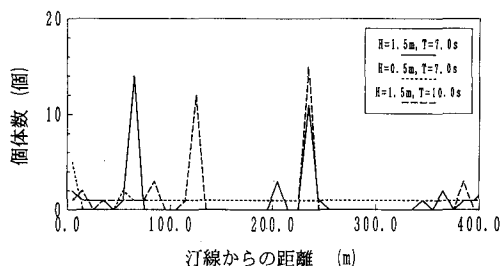


(a) 一波当たりの二枚貝の移動距離

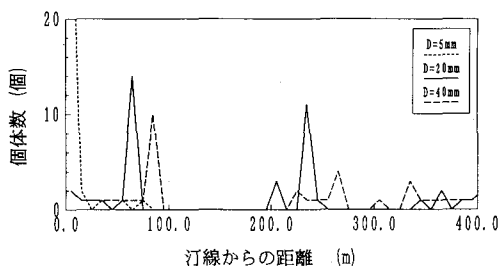


(b) 二枚貝の軌跡

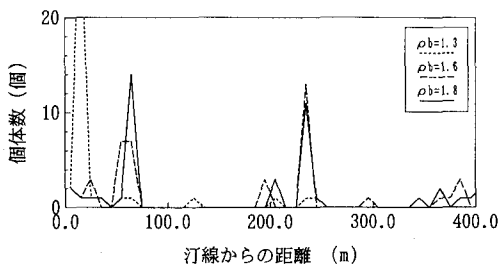
図-7 波浪による二枚貝の移動状況



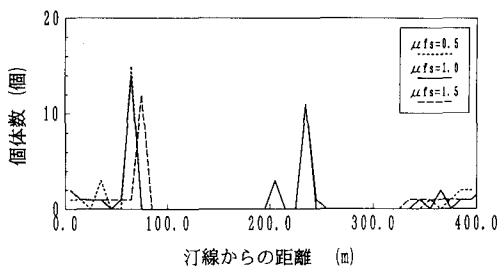
(a) 波浪特性



(b) 殻長



(c) 比重



(d) 静止摩擦係数

図-8 波浪による二枚貝の集積・分散状況 (10000秒後)

1.5の場合, トラフでの集積が認められない。

これらの結果を図-1と比較すると, 殻長10~30mmのコタマガイがトラフの底部に当たる180m付近に非常に多く集積した現象と良い一致が見られた。しかし, 他の二枚貝については, パーの沖側にも分布しており計算結果と異なっている。

(2) 1987年10月22日の調査に基づく解析結果

図-5に, 図-1と同様の二枚貝の分布と海底断面を示す(1987年10月22日の調査結果)。海底断面の形状は,

6月23日のものほど著しいトラフの洗掘が見られず、やや穏やかな起伏となっている。二枚貝の分布状況は6月23日と同様な傾向にありヒメバカガイ、チョウセンハマグリはバーの沖側に多く、コタマガイはトラフに多く見られる。バーの沖側でヒメバカガイの稚貝が非常に多く見られるが、これは同年夏に産卵されたものである。

図-6は、 $H_0=1.5\text{ m}$ 、 $T=7.0\text{ s}$ の波浪を想定した波高分布の計算結果である。砕波は汀線から沖124 mで生じ、汀線に向かい波高減衰が生じるが、6月23日のような急激な減衰は生じていない。

図-7は、二枚貝の移動状況を示している。(a)図は一波当たりの二枚貝の移動距離である。全体に岸向き移動が多いが、トラフ付近で僅かながら沖向きの移動が見られる。また、汀線から80 m付近より岸側では移動が認められない。(b)図は、波浪の繰り返しによる二枚貝の移動を示している。波浪の繰り返し作用によって、汀線から沖80 m付近、トラフの底部に当たる沖200 mおよび230 mで二枚貝の集積が認められる。

図-8に、波浪、二枚貝の特性を種々変化させ10000秒後の二枚貝の位置を10 m間隔で計数し、各区分での個体数を示す。(a)図の波浪特性について見ると、 $H_0=0.5\text{ m}$ 、 $T=7.0\text{ s}$ ではほとんど移動しないが、波高、周期が大きくなるとトラフに多く集積することがわかる。(b)図から殻長について見ると、殻長が5 mmでは汀線付近に顕著に集積している。また、殻長20 mmではトラフに集積するが、殻長40 mmではあまり移動が見られないことがわかる。(c)図から比重について見ると、二枚貝の比重が1.3では汀線付近に顕著に集積し、比重が1.6、1.8では、汀線から沖80 m付近およびトラフの底部に当たる230 m付近で集積する傾向にある。(d)図から静止摩擦係数について見ると、いずれの場合も同様な傾向にあり μ_{fs} による二枚貝の集積の相違に認められない。

これらの結果を図-5と比較すると、コタマガイが汀線から240 m沖のトラフに集積していることは、良い一致が見られている。比重1.3、殻長5 mmの場合、汀線へ顕著に集積する結果が出たが、ヒメバカガイおよびコタマガイの殻長10 mm以下の分布はバーの沖側にあり、相違点として注目される。

4. おわりに

本研究では、波浪場を非定常緩勾配方程式で求め、こ

の流体力を二枚貝モデルに作用させ、二枚貝の移動を予測する手法を提案し、HORFでの二枚貝の現地分布調査をもとにケーススタディーを行い、本解析手法の妥当性を検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

1) 本解析手法は、波浪により二枚貝がトラフに集積する傾向を良く示し、現地調査結果とも良い一致が見られた。また、二枚貝の殻長、比重などの特性値により集積する場所の相違が表現され二枚貝分布のzonationの機構を説明することが可能であると考えられる。

2) 海底地形の形状が、二枚貝の移動に与える影響は大きい。例えば、1987年10月22日に比べ6月23日のようにトラフが著しく洗掘され、その岸側の水深が急激に浅くなっているような海底地形では、この部分で大きな波高減衰が生じ、二枚貝に作用する流体力が低下し、汀線への二枚貝の集積は見られない。

3) 低比重、殻長の小さい貝の汀線への集積は、現地調査結果と大きな差異が認められた。これは、本解析手法における二枚貝の移動モデルが掃流で滑動するものを想定しており、浮遊状態での移動を考慮していないこと、波浪場の計算に戻り流れが考慮されていないことによると考えられる。

以上の問題点をさらに検討し、より精度の高い数値計算手法を確立したいと考えている。

本研究を進めるにあたり、有益な助言を頂いた北海道大学山下俊彦助教授に御礼申し上げる。また、本研究は、科学技術庁科学技術特別研究員制度によるもの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 (1993): 波浪による二枚貝の岸沖移動に関する解析、平成5年度日本水産学会学術講演会講演論文集, pp.37-40.
日向野純也・安永義暢 (1988): 解放性砂浜域における海底地形変化と二枚貝の分布性状について、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 (1993a): 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.
日向野純也・木元克則・安永義暢 (1993b): 潜砂行動と物理環境の関係からみたチョウセンハマグリとコタマガイの分布特性、水産工学研究所研究報告, pp. 65-87.
渡辺 晃・原 哲・堀川清司 (1983): 重合した波浪場における砕波について、第30回海岸工学講演会論文集, pp. 5-9.
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.