

二枚貝の着底・移動機構と物理環境に関する研究

水産工学研究所 日向野純也・木元克則・足立久美子

平成5年度～7年度

1. 緒言

開放性砂浜域に生息するチョウセンハマグリ *Meretrix lamarckii*, コタマガイ *Gomphina melanaegis*, ウバガイ *Pseudocardium sachalinensis* は、潜砂性の二枚貝であるが、着底初期には波浪の影響により大きく移動し、着底位置に長期間留まることはない。成長に応じて潜砂深度や潜砂能力が大きくなり、自らの棲み場所を保つことができる（耐波浪性）ようになるが、台風などの大波浪によりしばしば大きな移動を強いられることがあり、これが分布域の急激な変化として現地でも観測されている¹⁾。

本調査では①波浪により潜砂していた二枚貝が掘り出されてしまう限界の流速（または侵食速度の面からも見る必要があろう）を知ること、②掘り出された二枚貝がどこに移動させられるのか、これらを明らかにするための研究手法の確立やモデルの開発を目的とした。これによって、ある物理条件下（地形、水深、波高など）でどの程度のサイズから定着できるのか、また放流後に二枚貝が移動させられてしまうか否か、さらに移動させられた貝がどこに行き着くのか、分布域の変化を予測することが可能になる。

また、本調査を開始した平成5年に、鹿島灘南部においてウバガイの大量発生が見られたため、分布域の変遷などを追跡調査し、砂浜域における二枚貝の漁場形成要因を解明するための参考資料とした。

尚、本調査を進めるにあたり、二枚貝の移動限界を求める研究においては茨城県水産試験場の方に実験材料を提供していただくと共に共同で実験を行い、二枚貝の移動モデルの開発は北海道立中央水産試験場、桑原久実氏（当時科学技術特別研究員）の研究を主体として、現地調査の解析によってモデルの精度向上に努めた。また、二枚貝の移動に関する水槽実験では、中央水産研究所、中村義治氏（当時北海道区水産研究所）、茨城大学工学部、三村信夫教授のご指導とご協力を受けて共同研究を実施し、桑原氏と共に実験を行った。記してここに深謝致します。

2. 調査方法

(1) 波浪条件下での二枚貝の掘り出しに関する室内実験

潜砂している二枚貝が砂面上に現れる機構は、何らかの環境条件の変化により貝が自ら砂上に飛び出す行動と潜砂している場の砂が侵食されて貝が掘り出されることとに大別される。ここでは後者の機構について、造波水槽を用いて実験的解明を試みた。図1に示すように、貝の掘り出しを調べる手法としては、底面流速を測定して移動を強いる流速を求める方法と砂面の変化を測定して移動を強いる侵食速度を求める方法があげられる。波浪中での砂面変化を連続的にとらえるのは困難であるため、底面流速を指標として実験を行った。

水産工学研究所 生物環境実験棟 波浪環境水路（長さ18.5m×幅0.6m×深さ1m）に波崎海岸で採取した砂（中央粒径211 μ m）を用いて、長さ2mにわたり厚さ5cmの水平床を設置した（図1）。水位を45cm（放流点の水深は40cm）とし、プランジャー形造波機を用いて波浪を発生させた。実験条件は造波機のストロークと周期を変えることにより設定した。実験は以下の手順に従い実施した。

- ①ストローク15cm, 周期2.5秒を基本的な設定として造波し、砂面上に砂連を発生させた。
- ②二枚貝の稚貝（生貝）を座標500cm点に放流し潜砂させた。約1時間放置した後、潜砂していない個体を取り除いた（放流個体数および除去個体数を計数）。

実験に用いた稚貝は、茨城県栽培漁業センターで生産されたウバガイ（殻長3～15mm）およびチョウセンハマグリ（殻長1～20mm）である。実験水槽の水温はウバガイでは約25℃、チョウセンハマグリでは約15℃であった。

③①と同様の条件で、30分間波を与えた。このとき水槽内各点で、容量式波高計および電磁流速計を用いて水位変化と流速を測定した。流速の測定時には、底面から約1cm上にセンサーを設置した。底面流速は振動流であるため、50波測定して流速の振幅を平均し、流速振幅 V_{max} を求めた。

④造波終了後、放流点を中心として20cm間隔で仕切板を差し込み、サイフォンにて稚貝の回収を行い、計数と殻長の測定を行った。

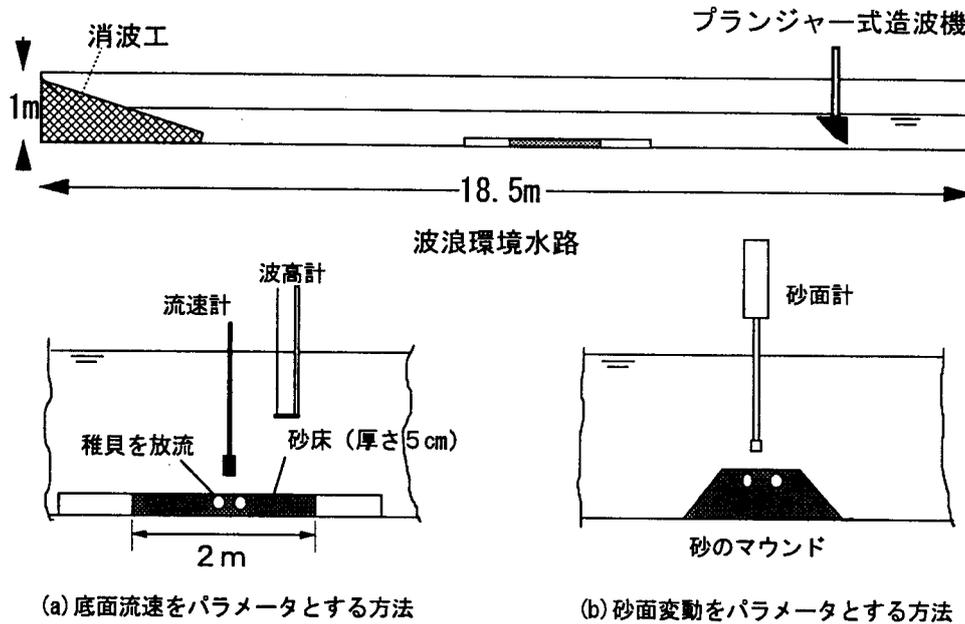


図1 水産工学研究所波浪環境水路の諸元および波浪による二枚貝の掘り出しに関する実験方法の概略図

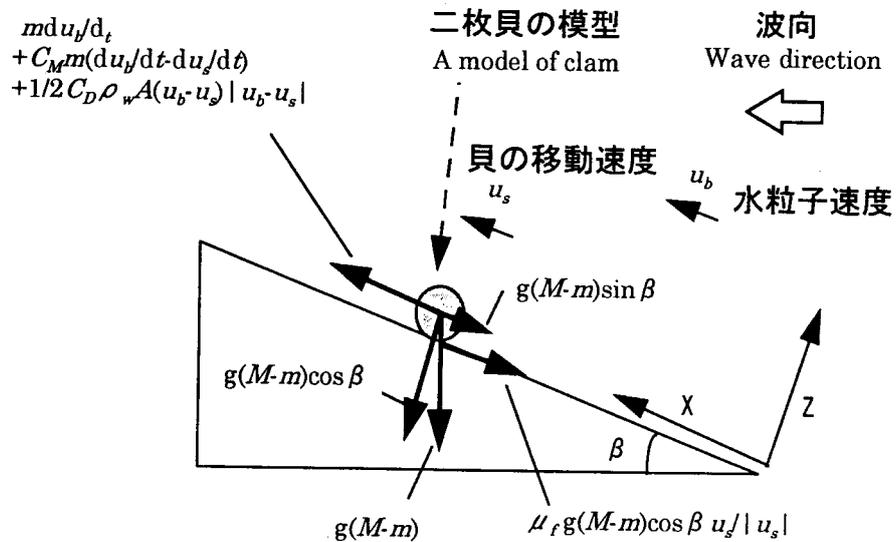


図2 波浪場における二枚貝に働く外力と移動モデルの概念図

(2) 波浪条件下での二枚貝の移動モデルと室内実験および現地調査の比較

①波浪による二枚貝の移動モデル

桑原・日向野²⁾の波浪による二枚貝の移動モデルを開発し、現地調査および水槽実験と比較してモデルの妥当性を検討した。モデルは基本的に波浪場の解析、1波あたりの二枚貝の移動距離、波浪の繰り返しによる移動を算出するという3つの計算ステップからなる。

波浪場の解析は渡辺・丸山²⁾の非定常緩勾配方程式を用いた。また砕波に伴う戻り流れを考慮して底面流速を計算した。計算式の詳細は桑原・日向野³⁾を参照されたい。波浪場で二枚貝に働く外力は図2のように示される。二枚貝を直径が D の球体と仮定すると次のような運動方程式が立てられる。

$$Mdu_s/dt = mdub/dt + C_m m d(u_b - u_s)/dt + 1/2 C_D A \rho_w |u_b - u_s| (u_b - u_s) - (M - m)g \sin \beta - \mu_r g (M - m) \cos \beta u_s / |u_s|$$

ここで、 M は二枚貝の質量 ($1/6\pi\rho_s D^3$, ρ_s : 二枚貝の単位体積重量, D : 殻長), m は二枚貝と同体積の流体(海水)の質量 ($1/6\pi\rho_w D^3$, ρ_w : 海水の比重), β は海底勾配, u_b は二枚貝の位置における流速変動, u_s は二枚貝の移動速度, C_m , C_D はそれぞれ質量力係数, 抗力係数, A は流軸方向の二枚貝の投影面積, μ_r は摩擦係数である。

上式を解くことによって、1波あたりの二枚貝の移動量を算出する。さらに波浪の繰り返し回数を与え波の繰り返しによる二枚貝の移動量を算出することにより、一定時間波浪の作用を受けた後の二枚貝の分布が得られる。

②二枚貝の移動に関する水槽実験との比較

砂および生物を用いた波浪水槽実験では相似則が成立しないため、現地の地形や波高データを基にした縮尺実験は設定しなかった。ここでは海浜地形の特性と貝の移動を比較するために次のような方法で実験条件を設定した。波浪環境水路に波崎海岸で採取した砂を用いて勾配20分の1の移動床を設置した(図3)。水位を42.5cmとし、プランジャー型造波機を用いて波浪を発生させた。

波浪の卓越する海浜の変形に関する特性は、波高や海底勾配、底質粒径などによって整理が試みられてきた。ここでは、Sunamura and Horikawa³⁾の式を用い、海浜プロファイルのタイプ分け(Csにより定められている)から侵食型、中間型、堆積型になる実験条件を設定した。

	侵食型	中間型	堆積型
沖波波高 (cm)	7	5.5	3
周期 (sec)	1.0	1.25	1.7
初期勾配 ($\tan\beta$)	0.05	0.05	0.05
Cs	7.81	5.30	2.36

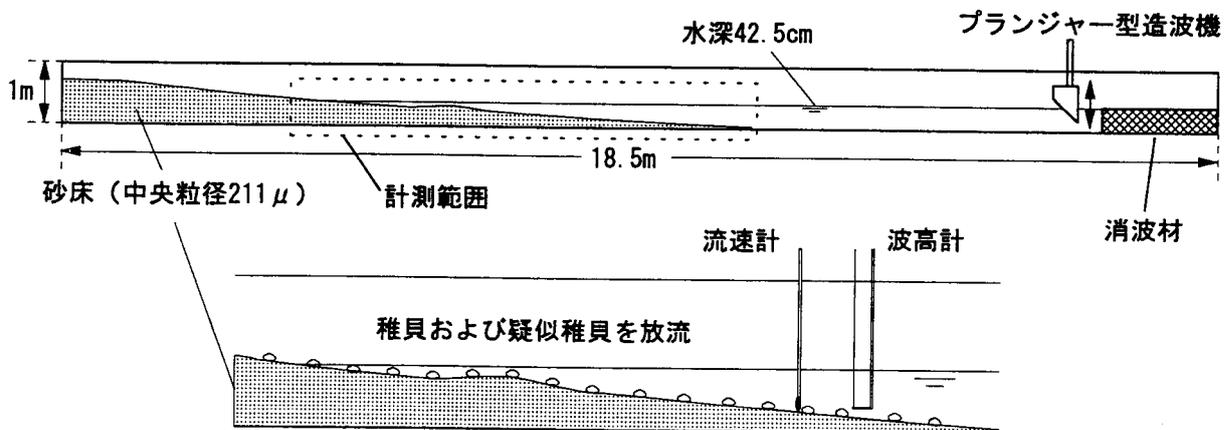


図3 水産工学研究所波浪環境水路および波浪による二枚貝の移動実験模式図

初期勾配を1/20として2時間程度波を作用させ、ある程度地形が平衡状態となった後、電磁流速計および容量式波高計を用いて流速と水位変化を40cmピッチで測定した。砂面計を用いて10cmピッチで海底地形を測定した。

実験に用いたウバガイ稚貝は、殻長6~8mm、1993年8月20日に波崎海岸で採集され、単位体積重量は1.2~1.3であった。ウバガイ稚貝はホルマリンで固定して実験に用いた。また、それぞれの稚貝は個体識別した。これらを40cmピッチで砂面上に置き、波を15分間作用させた後、汀線部より10cm間隔で仕切板を差し込み、サイフォンにて稚貝の回収を行い、計数と個体識別を行った。これにより波浪によるウバガイ稚貝の移動状況をまとめた。

また、上述の実験条件を二枚貝の移動モデルに適用し、実験と計算の比較を行った。

③現地調査との比較

図4に示す茨城県鹿島灘の砂浜海岸にある運輸省港湾技術研究所波崎海洋研究施設(Hasaki Oceanographical Research Station, 以後HORS)において、1986年から日向野ら¹⁾はSM式採泥器を用いて栈橋上10m間隔で二枚貝を採集し、海底地形と貝の分布の関係をまとめている。ここでは特に1987年6月23日における採集結果と、同時に港湾技術研究所で測得された波浪、地形データを用いて前述のモデルで、二枚貝の分布様式の解析を試みた。

(3) 鹿島灘南部におけるウバガイの分布調査

平成5年から大発生しているウバガイの分布状況を図5に示す海域で調べた。

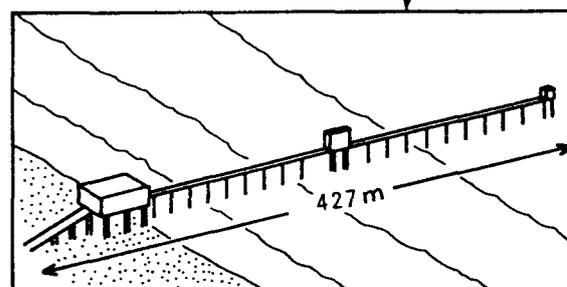
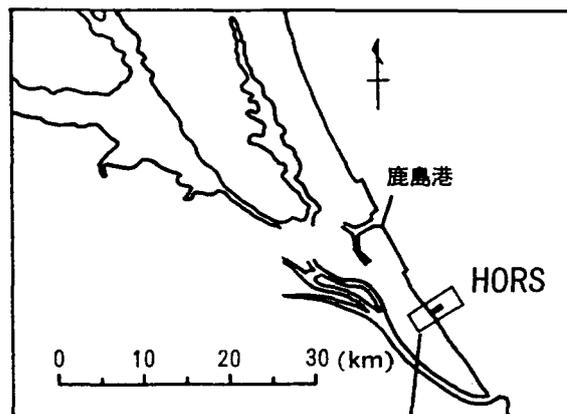


図4 波崎海洋研究施設の位置と採集定点

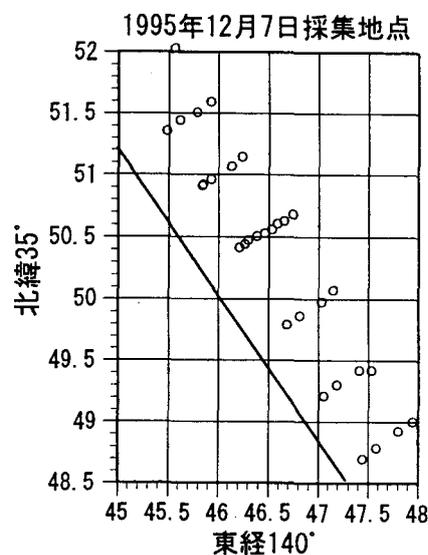
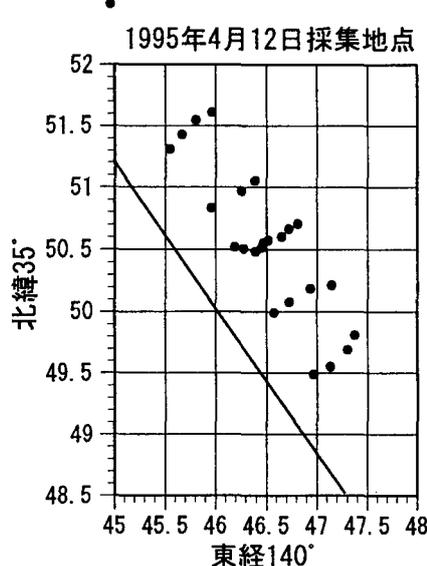
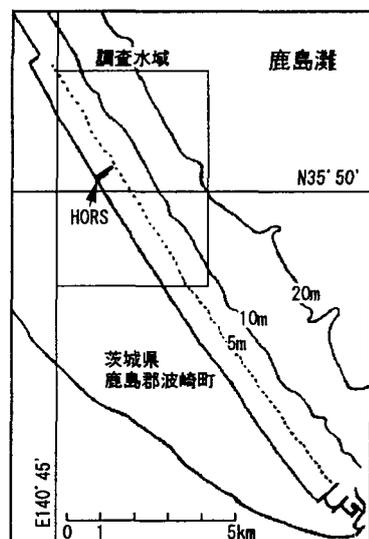


図5 ウバガイ分布調査海域および採集点

調査は1994年4月17日，5月28日および12月4日，1995年4月12日，5月8日および12月7日に実施した。採集には稚貝用貝桁網（1995年5月までは網口60cm，爪の間隔2cm，爪の深さ10cm，袋の目合1cm，95年12月では網口175cm，以下3.3cm，11cm，3cm）を用い，1～5分間曳網した。上滑りなどを除いた実質的な曳網距離を算出するため，貝桁網の側面に距離計を装着した。

3. 調査結果

(1) 波浪条件下での二枚貝の掘り出しに関する室内実験

放流点を中心とした区画（20cm幅）における再捕個体数が放流個体数に占める比率を残留率として，殻長と流速振幅のグラフ上に数値をプロットして図6に示す。ウバガイでは，殻長3～4mmの稚貝で30cm/sの条件に対して90%が残留し，殻長15mmで74cm/sでも90%以上の残留率が得られた。殻長10mm，流速振幅40cm/sの残留率58%を異常値として無視すると，殻長が大きくなると流速振幅に対する残留率が高まる傾向が明確に見られ，図2中に示すような等残留率線を引くことができる。チョウセンハマグリでは，54cm/sの条件では殻長3～15mmまで全て残留率が90%を大幅に越えている。回収の際もチョウセンハマグリは砂床の底の方から回収され（深く潜砂していた），波浪に対して活発な潜砂行動をとることが推察された。但し，本実験ケースでは造波の途中から放流点に堆積傾向がみられ，このことが残留率を高めた可能性も留意が必要である。砂を敷いたバットを動揺する方法で得られたチョウセンハマグリは残留率は本実験結果より低く，砂面上の流速以外の条件（砂の侵食）を勘案する必要がある。

(2) 波浪条件下での二枚貝の移動モデルと現地調査および室内実験の比較

①水槽実験との比較

侵食型における地形と波浪・流速および稚貝の移動状況を図7(a)～(d)に示す。海底地形は比較的滑らかで，汀線側が侵食され沖に堆積する侵食型の典型的な地形を示した。汀線より300cm付近にバー（瀬）らしき起伏が見られる。波高は砕波により急激に減衰し，汀線近くでは水位上昇と戻り流れがみられる。ウバガイ稚貝は汀線近くに多く集積したほか，550cmに集積した。

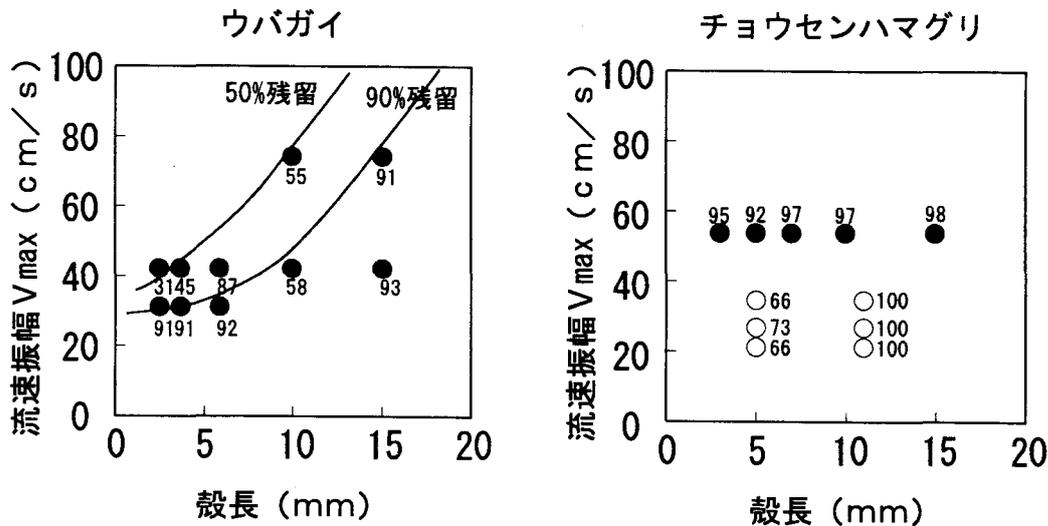


図6 ウバガイおよびチョウセンハマグリの殻長と流速振幅Vmaxおよび放流点における残留率との関係
 図中の数字は残留率(%), チョウセンハマグリにおける○は、別の方法での実験結果である。

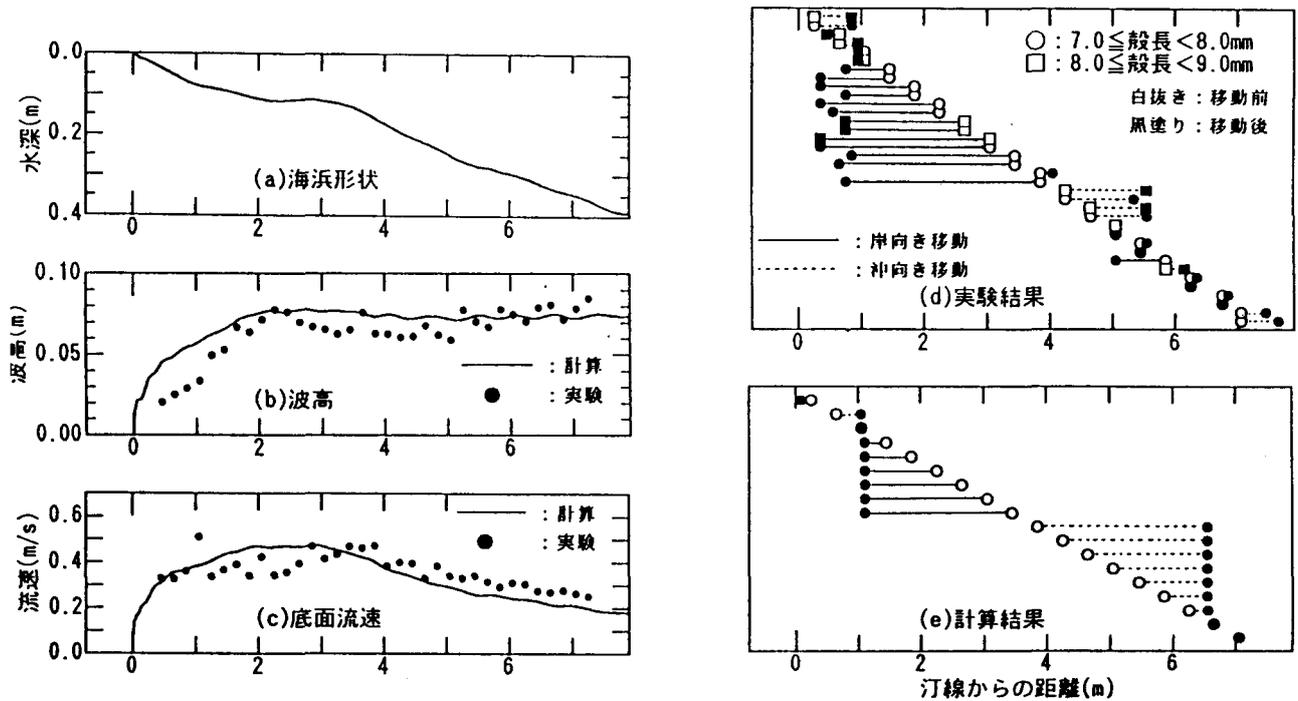


図7 侵食型の波浪によるウバガイ稚貝の移動実験結果と数値計算との比較
 (計算時の各係数は、殻長 $D=8\text{mm}$, 比重 $\rho_s=1.2$, 静止摩擦係数 $\mu_{rs}=0.5$, 動摩擦係数 $\mu_{rs}=0.05$, 質量力係数 $C_m=0.5$, 抗力係数 $C_D=24/\text{Re}(1+0.152\text{Re}^{1/2}+0.0151\text{Re})$;
 Re はレイノルズ数 $|u_s-u_b|D/\nu$, ν は動粘性係数)

前述の実験条件と全く同じ条件を与え、計算を行った結果を図7(e)に示す。実験によるウバガイの集積・分散状況とよく一致していることがわかる。本モデルは、平均的な海底勾配や底面流速によって二枚貝が滑動することを想定しているため、砂連における跳躍などの複雑な挙動を表現することはできない。しかし、波浪が長く作用することによって、二枚貝の移動に対し、海底勾配や底面流速等が支配的に効いていることを示していると考えられる。

②現地調査との比較

1987年6月23日の採集結果を図8に示す。直前に大波浪を受けたため、バーとトラフ(深み)が大きく発達し、トラフ内にコタマガイが集積しているのが顕著に認められる。この時の地形および波浪条件から図9に示す波高の変化と底面流速が計算され、戻り流れを加味することによって岸沖断面上の各点における二枚貝の移動方向と経時的な集積状況が図10のように示される。この時の貝の特性値(殻長20mm, 単位体積重量1.8など)は同日に採集されたコタマガイとほぼ同様であり、コタマガイがトラフの底に集積することが再現されている。また、採集の3日前には波高2.5mに達していたことが観測されているが、この条件を与えることにより、図11(a)に示すように、280m点に集積が見られる計算結果となった。これは図8で汀線から260m付近に見られたコタマガイの第2の集積点で、最も波浪が大きかった時点で形成され、波浪が減衰した時にそのまま残留した群と考えられる。

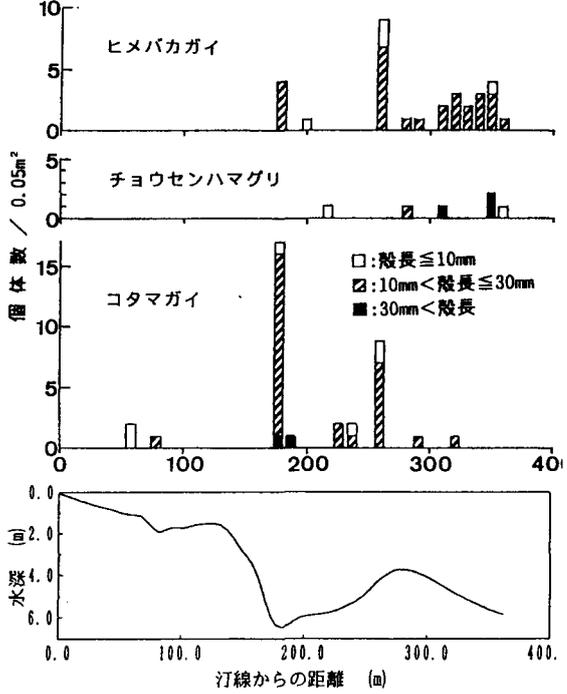
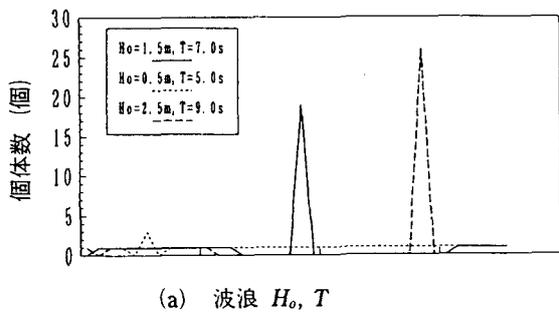
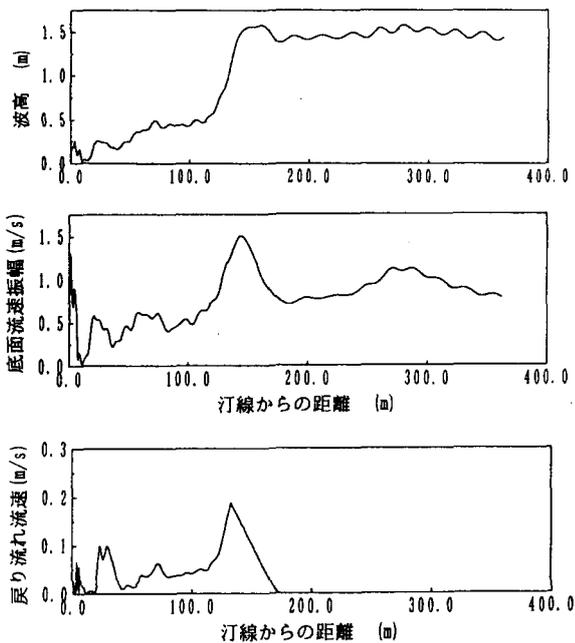
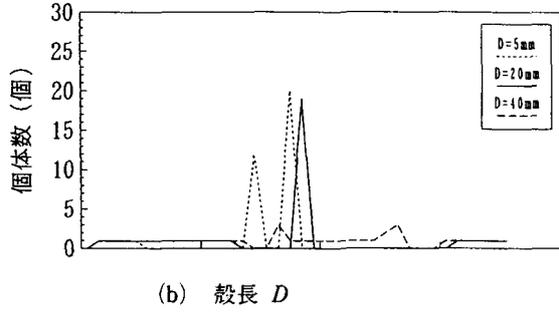


図8 HORSにおける海底断面形状と二枚貝の分布(1987年6月23日)

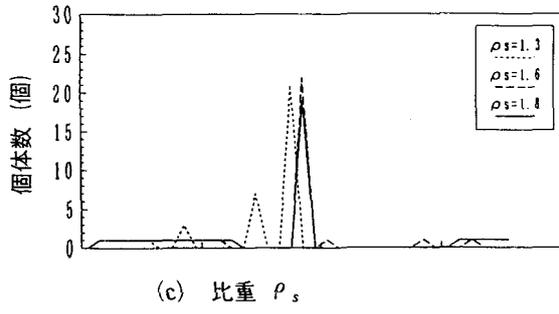
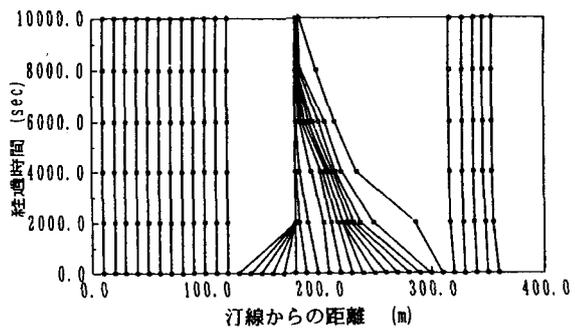
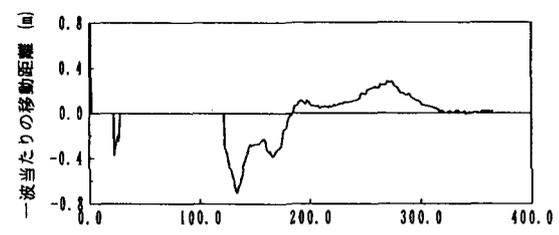


(a) 波浪 H_o, T

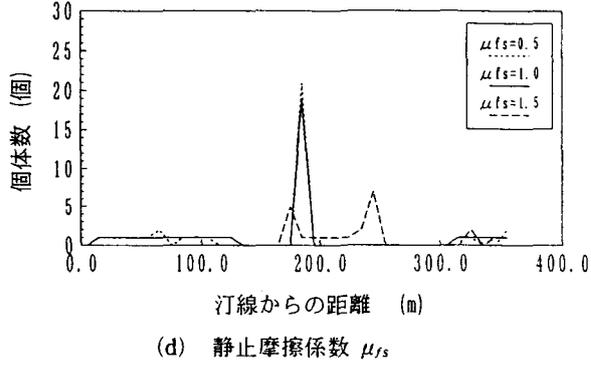


(b) 殻長 D

9 波高, 底面流速および戻り流れの分布 (沖波波高 $H_o=1.5m$, 周期 $T=7.0s$)



(c) 比重 ρ_s



(d) 静止摩擦係数 μ_{fs}

10 1波あたりおよび経時的な二枚貝の移動 図11 波浪による二枚貝の集積・分散状況

($H_o=1.5m, T=7.0s, D=20mm, \rho_s=1.8, \mu_{fs}=1.0, \mu_{fsd}=0.5, C_w=0.5, C_o=0.5$)

($H_o=1.5m, T=7.0s, D=20mm, \rho_s=1.8, \mu_{fs}=1.0, \mu_{fsd}=0.5, C_w=0.5, C_o=0.5$ を基準とし, 各係数を枠内の数値に置き換えて計算した)

(3) 鹿島灘南部におけるウバガイの分布調査

1995年4,5月および12月における, HORSの沖, 水深5~13mおよび海岸線に平行に南北それぞれ2~3kmの範囲内での等深線図, ウバガイの分布個体数密度, 分布重量密度, 平均殻長を図12および図13に示す。海底はかなり平坦(但し, 海底勾配は150分の1程度)で一様勾配に近く余り変化はないようであるが, HORS北側の水深10m前後には砂利場が存在している。HORSの沖とその北側の2カ所に個体密度の高い場が見られるが, 重量密度ではHORS沖が最も高くなっている。これは平均殻長がHORSより北側では著しく小さいためである。

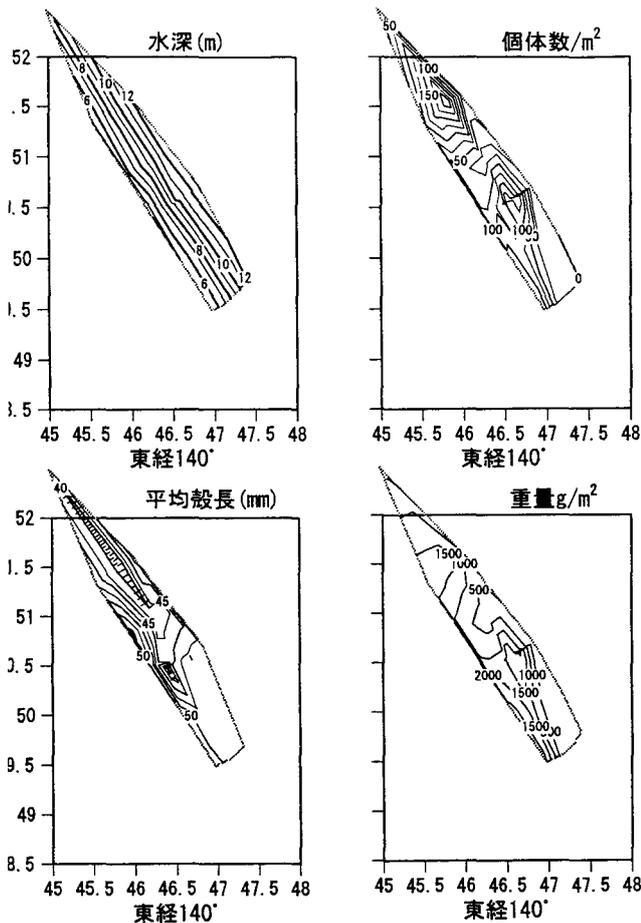


図12 1995年4月12日および5月8日における海底地形およびウバガイの分布密度と平均殻長

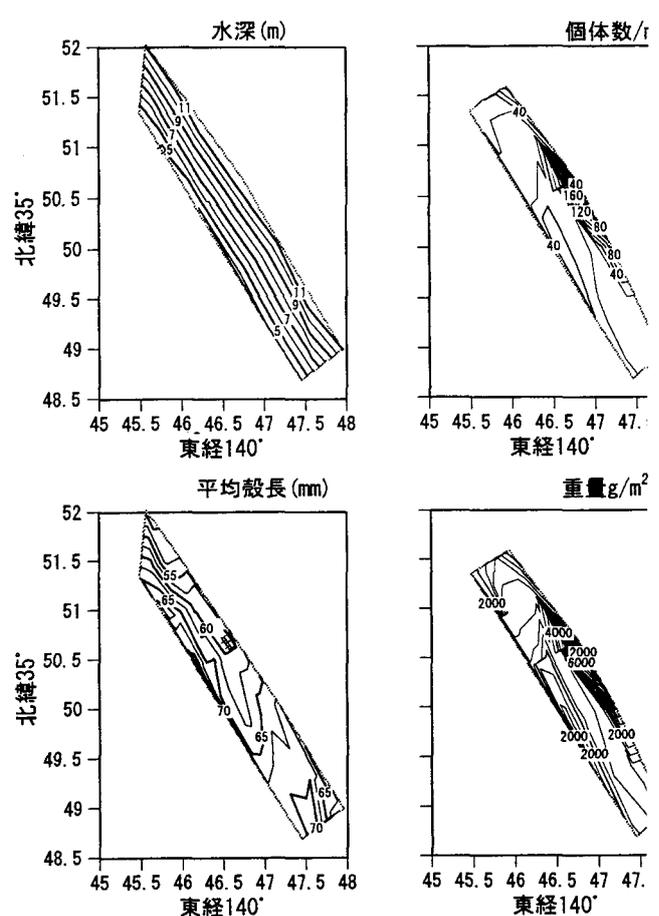


図13 1995年12月7日における海底地形およびウバガイの分布密度と平均殻長

HORS沖の測線で見ると、図14に示すように個体密度におけるウバガイの分布は沖側ほど高い傾向にあり、水深11mにピークが見られる。またこれより岸側での個体密度はかなり急減していることが明らかになった。重量密度は個体密度ほど岸沖の差は顕著でなく、水深5~10mで1~3kg/m²であった。但し、HORS沖水深11mでは約7kg/m²と大きな値になっている(図15)。また、平均殻長は岸側で大きい傾向にあり、成長も一層加速傾向が見られるが(図16)、これは個体密度の減少に伴うものと考えられる。

4. 考察

二枚貝は定着性が高く漁場造成の効果も把握し易い生物であるが、実際にはアサリなどの内湾性の二枚貝でさえかなり激しい移動が見られ、波浪による移動を把握することは漁場造成や資源管理を行う上で不可欠である。本調査は、砂浜性二枚貝を対象として、波浪による移動機構を解明し、二枚貝の漁場造成の際の設計条件や効果調査の手法開発や算定に寄与しようというものである。

まず潜砂している二枚貝の掘り出しに関する実験からは、十分とは言えないもののチョウセンハマグリとウバガイで移動限界流速に匹敵するような流速振幅の値が得られた。種間の比較では、チョウセンハマグリの方がウバガイよりも同じ流速振幅に対する残留率は高い傾向がみられるが、これはチョウセンハマグリの方が、水深が浅く、より波浪の影響を受ける砕波帯近くに生息しているため、高い潜砂能力を有していると考えられる。またウバガイについて、殻長5mmでは流速振幅30cm/s、10mmでは40cm/s、15mmでは75cm/sで90%が動かされないことを示している。この値を現地海域に適用すると、微小振幅波理論により計算した海底の流速振幅は水深10m、波高1m、周期7秒では36cm/sとなり、波高2mでは71cm/sなので、殻長

5mm程度まではかなり波浪による移動が激しいが、殻長10mm以上に達すれば通常の波浪ではあまり移動することはないと推察される。

本調査の最も重要な位置を占める二枚貝の移動モデルは、岸沖方向の1断面についてではあるが、水槽実験と現地調査の両方で二枚貝の分布・移動の現象をかなり良く再現することができた。モデルを改良する過程で、現場との整合に寄与したのは碎波に伴う戻り流れを考慮したことである³⁾。これによって二枚貝の集積点が実験および現地調査と計算とで非常に良い一致がみられた。特に外海に面した砂浜海岸では碎波帯を含む極浅海域にチョウセンハマグリやコタマガイの漁場が形成されているため、実海域においても碎波に伴う戻り流れは岸沖方向の分布域の形成に大きな影響を与えていることが推定される。本モデルを利用することにより、地形や波浪を正確に与えることができれば、かなり精度の良い移動・分布のシミュ

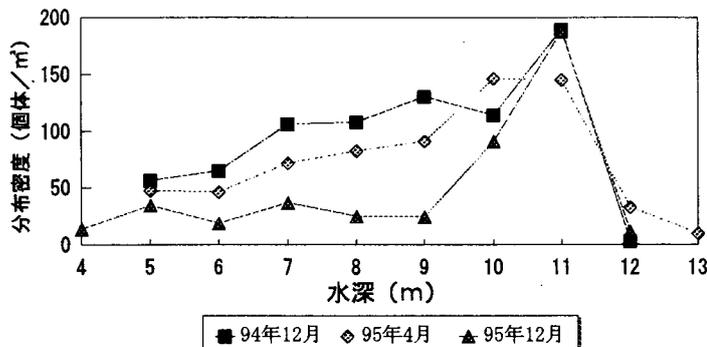


図14 HORS沖におけるウバガイ個体密度の変化

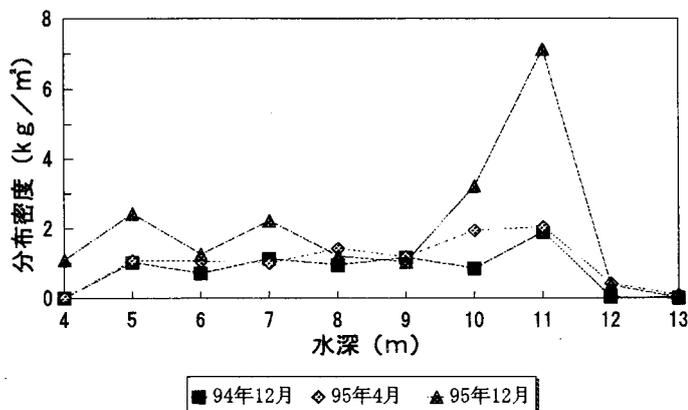


図15 HORS沖におけるウバガイ重量密度の変化

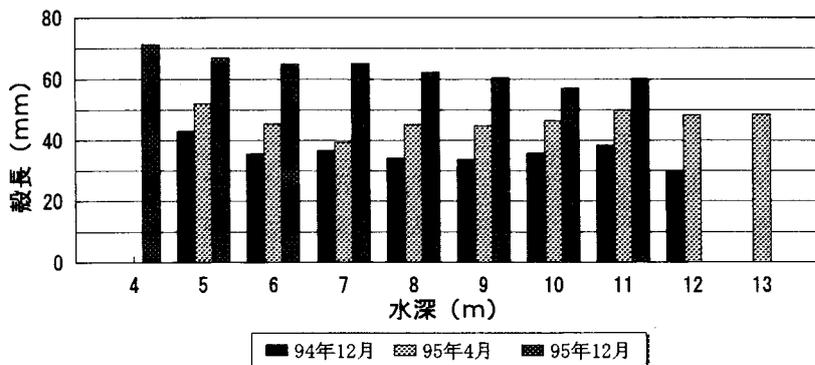


図16 HORS沖の各水深におけるウバガイ平均殻長の推移

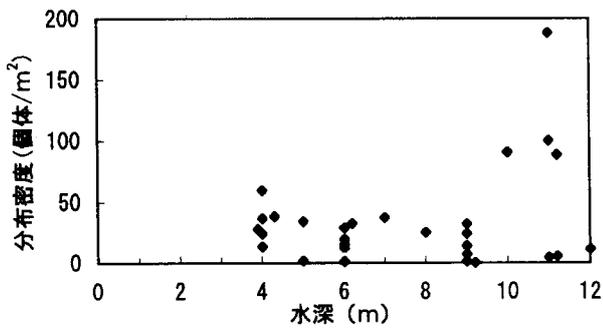


図17 水深と個体密度の関係
1995年12月7日

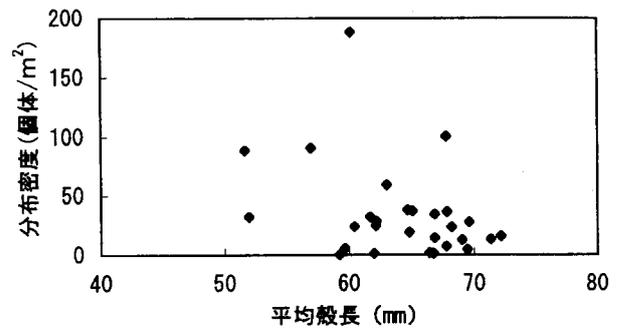


図19 平均殻長と個体密度の関係
1995年12月7日

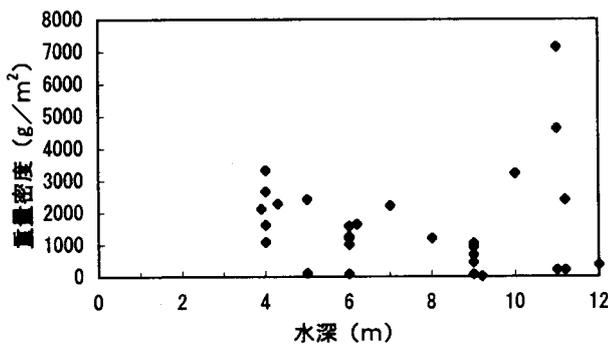


図18 水深と重量密度の関係
1995年12月7日

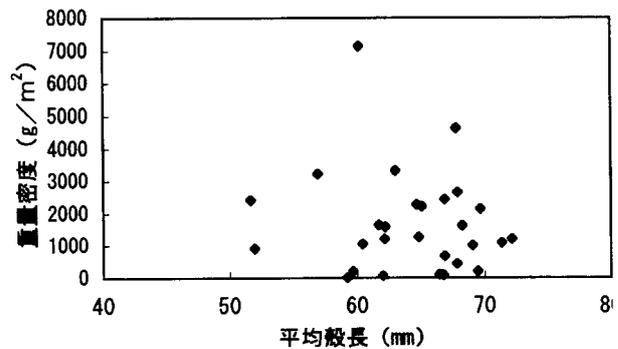


図20 平均殻長と重量密度の関係
1995年12月7日

レーションを行うことが可能になったと考える。今後の課題としては、モデルの波浪場の計算に波の非線形性を考慮すること、モデルを平面波浪場に適用すること、そして二枚貝の種類に適した種々の係数を定めることがあげられる。前2者については、海岸工学分野で解析手法が開発されており、計算プログラムの改良は可能であろう。後者については山下ら⁹⁾が振動流水槽を用いて実験的にウバガイやバカガイの質量力係数や抗力係数を求めている。

ウバガイの平成5年級群の追跡調査では、図14のように殻長30mm以上に成長したウバガイの岸沖分布様式に基本的な変化は見られないことから、先に述べた理由から移動を強いられる状況は起こりにくいと考えられる。またウバガイの分布水深に着目すると、図18に示す水深と重量密度の関係から水深6~9mが顕著に低くなっている傾向が認められる。平均殻長と個体密度にはやや負の相関は見られる(図19)ものの、餌料密度が一定である中で個体密度の高い場で殻長が小さいという関係を一概に適用することはできない。図14, 15のように水深8, 9mに見られる個体密度の急減と生物量の頭打ちはいかなる理由によるのか、消化管内容物や筋肉や中腸腺の生化学的性状の分析等を行うことにより、水深帯毎に餌料供給その他の点からの環境要因を評価することが必要である。

一方で、このようなウバガイの大量発生を生じた機構は浮遊幼生期における流れとの関係が非常に深いと考えられている⁷⁾。数年から数十年に1度という大量発生メカニズムは、二枚貝の生活史のごく初期の生残・滞留といったことに大きく関連している。特に稚貝の発生を促す場として二枚貝の増殖場を造成する場合、浮遊幼生が安定的に供給され、着底することが不可欠である。今後の課題として、二枚貝浮遊幼生の挙動を調査し、流れの場における浮遊幼生の移動モデルの開発を行うことがあげられる。

5. 摘要

二枚貝の移動機構に関する研究では、以下のような成果と問題点が得られた。

(1) 潜砂している貝が掘り出される機構

- ・水槽実験により、底面流速との関係からウバガイ稚貝やチョウセンハマグリ稚貝の波浪条件と定着サイズとの関係を推定する手法を開発し、移動限界流速に相当する値を求めた。
- ・問題点として、実際には砂面の侵食によって掘り出されるため、砂面浸食速度との関係からも調べる必要がある。今後補追実験を計画している。

(2) 砂面上の貝が移動させられる機構

- ・波浪による二枚貝の移動モデルを開発し、水槽実験および現地調査と比較することにより、砕波帯を含む浅海砂浜域の二枚貝の岸沖移動や帯状分布を説明、予測するのにかなり有効であることがわかった。
- ・今後の課題として、岸沖断面から平面場へ拡張する必要性があげられる。

(3) ウバガイの分布特性

- ・1993年産ウバガイ個体群が鹿島灘南部に大量に生息しているのを追跡調査し、現地海域でも殻長30 mm以上ではほとんど移動しないことが推定された。また、分布密度や平均殻長の差異から成長・生残に適したまたは不適の水深帯および環境条件が想定された。
- ・今後の課題として、成長に適した環境条件の解明と浮遊幼生の移送・分散によるウバガイ等二枚貝の大量発生機構の推定があげられる。

引用文献

- 1) 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), 15, 1-16
- 2) 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回海岸工学論文集, 103-107
- 3) 桑原久実・日向野純也, 1994: 波浪による二枚貝の岸沖移動に関する解析手法の開発. 水産工学研究所研究報告, 15, 25-40
- 4) Sunamura, T. and K. Horikawa, 1974: Two-dimensional beach transformation due to waves. Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, 920-938
- 5) 桑原久実・日向野純也・中村義治・三村信男, 1994: 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. 海岸工学論文集, 41(1), 376-380
- 6) 山下俊彦・和田 彰・松岡 学・谷野賢二・明田定満, 1995: 振動流場での二枚貝の挙動に関する実験的研究. 海岸工学論文集, 42, 506-510
- 7) 日向野純也・足立久美子・木元克則, 1994: 砂浜性二枚貝の発生と浮遊期における流れの関係について. 平成6年度日本水産工学会学術講演会論文集, 45-46