

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：23401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24580277

研究課題名(和文) 二枚貝浮遊幼生のネットワーク強度分析に応じた検証評価型海岸保全プロセスの構築

研究課題名(英文) Development of a hypothesis verification plan for coast conservation with an ecological network of floating bivalve larvae

研究代表者

瀬戸 雅文 (SETO, Masabumi)

福井県立大学・海洋生物資源学部・教授

研究者番号：60360020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：ウバガイ浮遊幼生の遊泳運動と着底行動を再現可能な物理モデル(数値幼生)を開発し、数値幼生を用いて様々な環境下における本種の適応性や着底率を解析し着底に有利な底質条件を見出した。さらに、着底後の稚貝が波浪により砂中より放出し移動分散する過程を、底質の安定指標を用いて定式化した。人工リーフをモデルケースとして、海岸保全施設が浮遊幼生の着底や稚貝の安定に及ぼす影響を解析し、施設由来の部分重複波が生残率の向上に寄与することを見出した。

研究成果の概要(英文)：We developed a reproducible physical model that describes the swimming behavior of the floating larvae (numerical larvae) of *Spisula sachalinensis*. Using the numerical larvae, we analyzed the adaptability and the settling ratio of such larvae under various environments, allowing us to find the type of seabed sediment that is favorable for their settling to the sea bottom. Furthermore, using the stability index for seabed sediment, we formulated the process how the settled young shells are washed out of the sand, moved and spread due to the ocean waves. We used an artificial reef as a model to analyze how the coast conservation facilities affect the settling of floating larvae and the stable growth of young shells, leading us to find that the partially standing waves generated by the existing coast conservation facilities contribute to the improvement of the survival rate.

研究分野：水産土木学

キーワード：二枚貝 行動生態 数値モデル

1. 研究開始当初の背景

我が国の海岸侵食対策は、沖側に人工リーフや離岸堤、岸側に緩傾斜護岸や突堤などを複合配置し、波浪等の外力を沖合から徐々に低減させる面的防護工法による整備が進展してきた。面的防護工法では、施設の周辺海域に半孤立的な循環流が形成され、浮遊砂を循環流の内部に効率的に集積させることが実証されている。これと同様な集積機構によって、当該域に生息する砂浜性二枚貝の浮遊幼生や稚貝の多くも循環流の内部にトラップされることが推察される。砂浜性二枚貝の多くは、複数のパッチが浮遊幼生の移出入を通じて関連しながら、分散システムとして環境変動に順応し個体群の頑強性を維持している。このようなメタ個体群においては、世代時間より長い時間スケールで幼生の移出入が停滞すると、パッチサイズの縮小化、孤立化、連鎖的な局所絶滅を経て個体群の存続性が急激に低下したり、面的防護工法の影響を受け難い他の種へとメタ群集の種組成が変化することが懸念される。

我が国における砂浜性二枚貝資源の多くは、1980年代を境として全国的に激減し、以降、回復傾向が認められず、ハマグリなど一部の種では絶滅が危ぶまれる海域も発生している。二枚貝資源の減耗要因は、成長段階ごとに、浮遊幼生の移出入や着底率低下、着底後の移動分散・食害、育成過程における漁場環境の悪化や乱獲などが指摘されている。これまでに、とについてはマクロベントスの資源量調査に基づいた、人工種苗の放流、波浪制御による分散抑止、害敵駆除、漁期・漁獲サイズ制限などの資源管理方針が実施されてきた。しかしながら、においては、メタ個体群の分散システムとしての頑強性を左右する決定的な要因であるにも関わらず、実海域に浮遊する多種大量の幼生を分類・識別することの困難性、広域的に浮遊幼生の動態を追跡することの困難性に加えて、沿岸域の理化学構造や移動分散などの物理過程と、二枚貝資源の初期生態に関わる生物過程が複合化した扱い難い学際領域であることから、研究の進展が遅れており、面的防護工法にもとづく海岸侵食対策が二枚貝資源に与える影響の解明が不明なまま、海岸保全を名目に着々と施設が整備されている状況にある。

2. 研究の目的

着底後期の二枚貝浮遊幼生は、螺旋状の遊泳軌跡を伴う上昇と間欠的に発生する沈降行動を繰り返しながら、次第に砂面に到達し、砂粒間の間隙サイズが幼生の殻長より大きい場合には、砂中に埋没する。砂中に埋没した浮遊幼生は、間隙サイズが螺旋遊泳径より極端に小さい場合には、間隙内で遊泳行動を開始した直後に、砂粒側面とほぼ正面衝突し、跳ね返りと再衝突をくり返しながら砂中より離脱して海水中へ戻ることができる。

一方において、間隙サイズが遊泳螺旋径とほぼ等しい場合には、間隙内部で砂粒表面と側面衝突しながら砂中で螺旋遊泳が可能となるため、間隙内に連続的に捕捉され初期稚貝に至ることが考えられる(これを螺旋捕捉理論とよぶ)。

螺旋捕捉理論によれば、光、水温、塩分、化学物質などの環境因子に関わらず、浮遊幼生の遊泳行動特性と底質の間隙サイズ(砂粒の粒度組成)をもとに、浮遊幼生の着底率を直接的に特定できる。

本研究は、ウバガイを主な対象として、行動学的手法を用いて浮遊幼生の遊泳行動や着底行動を指標化し、遊泳運動を物理モデルで定式化することによって、浮遊幼生の動態をパソコン上でシミュレーション可能なウバガイ数値幼生を開発した。この数値幼生を用いて螺旋捕捉理論の妥当性を検証するとともに、底質粒径や底面流速を変化させることにより、様々な環境条件下における浮遊幼生の着底特性を数値解析的に解明した。

続いて、漂砂環境下におけるウバガイ、および比較対象としてバカガイ、サラガイの当年貝～未成貝の安定性、すなわち、波浪等の外力により砂中より砂面上に放出した個体が物理的攪乱を受けて移動・分散を開始する条件を行動学的手法を用いて解析し、底質の波浪や流れに対する安定指標であるシルズ数を用いて評価した。

最後に、ウバガイ漁場として知られ、卓越発生群を適正に管理することによって計画的な採貝漁業が営まれている北海道胆振海岸に設置された人工リーフ、およびその周辺海域をモデルケースとして、波浪等の外力条件を変化させながら、人工リーフがウバガイ浮遊幼生の着底や、稚貝の波浪にともなう移動・分散に及ぼす影響を、他の二枚貝類と比較しながら総合的に評価する。

3. 研究の方法

(1)ウバガイ数値幼生の開発

ウバガイ浮遊幼生は螺旋状の遊泳運動で発生する向心力と個体に作用する重力を利用して、螺旋軸に対する個体の体勢を維持しながら、鉛直移動を可能にしている。本研究では、数値幼生は間欠的に発生する遊泳停止に伴う沈降過程で、底質表面と衝突した以降も螺旋軌道を描きながら再浮上行動を継続するものとして、ウバガイ浮遊幼生の浮遊行動を数値幼生でモデル化した。

静水下において螺旋軌跡を描きながら回転運動する数値浮遊幼生の運動方程式の導出では、数値幼生の推力、回転角、作用流体力、水中重量をもとに、それぞれ数値幼生の殻長、螺旋軌道径、軌道速度の関数として定式化した。数値幼生に作用する流体力は、モリソン式より与え、抗力係数は、数値幼生の運動がレイノルズ数のオーダーで1以下となることから Stokes 近似を適用した。また、数値幼生の密度は、成長段階別にホルマリン

固定した浮遊幼生の沈降実験を実施し、計測された終端速度をもとに Rubey 式より算定した。数値幼生の運動方程式を離散化し、遊泳位置を経時的に算出する過程において、底質との衝突は、球形状で近似した底質粒子内部への到達の有無で判定した。衝突後の幼生の位置の算定は、直交座標系の原点を底質表面の衝突点を原点とする新たな座標系に平行移動後、衝突直前の幼生の位置を、衝突点に接する平面上の極座標系に変換し、極座標系における数値幼生の衝突直前の移動速度をもとに、幼生と底質の摩擦係数および反発係数を用いて衝突後の移動速度を算定した。続いて、極座標系上で算出された衝突後の位置に、転置行列を適用して直交座標系に変換後、運動方程式をもとに数値幼生の運動を数値解析した。なお、主流流速に対する底面境界層の影響は、相当粗度を底質粒径の 0.75 倍として対数分布則を適用して評価した。

(2)ウバガイ浮遊幼生の行動解析

数値幼生を用いて浮遊幼生の運動を推定するためには、予め、浮遊幼生の成長段階別の螺旋軌道径、軌道速度、浮上速度を確定しておく必要がある。

ウバガイ母貝より、紫外線照射法および切開法を用いて浮遊幼生を発生させた。Pavlova lutheri により給餌飼育しながら定期的に遊泳行動を観察後、ホルマリンで固定し殻長と沈降速度を測定した。行動観察では、底面にガラスビーズを敷き詰め、海水で満たしたガラスセルに浮遊幼生を約 3 個体ずつ収容し、底質の中央粒径と水温を段階的に変化させながら、幼生の螺旋遊泳行動、沈降過程、着底行動をガラスセルの上面および側面よりデジタルビデオカメラでマクロ撮影した。撮影された浮遊幼生の三次元的な遊泳軌跡を、自動追尾動作解析ソフトを用いて同期解析し行動諸元を定量化した。

(3)螺旋捕捉理論の検証

数値仮想空間の内部に流れを与え、空間の底面に球形状で近似した底質（砂粒）を正方格子状、および千鳥状に多層に亘って配置した。底質の上部に 11 行×11 列のグリッドを設定し、予め数値幼生が終端速度に達するまでの降下高さを見積った上で、グリッド交点の 0.5cm 上方より総計 121 個体の数値幼生を 1 個体ずつ落下させ、着底後の底質内外における行動を 0.001 秒毎に数値解析した。主流流速 0~50cm/s の範囲内で、底質の中央粒径を 0.1~2.0mm まで 0.1mm 刻みで変化させながら試行を繰り返し、幼生が底質内に捕捉される割合（捕捉率）を算定した。捕捉率の値が行動実験より得られる浮遊幼生の着底率と符合し、遊泳期から着底期に及ぶ数値幼生の行動が浮遊幼生の行動に順応できるように、底質に対する幼生の摩擦係数と反発係数を試行的に決定した。

(4)二枚貝の耐波浪安定性解析

小型振動流水槽の観測部に砂層厚 80mm まで珪砂を敷き、波浪流を作用させて砂漣を形成した上で、ホルマリン固定したウバガイ、およびバカガイ、サラガイ稚貝を主流に対する殻長軸方向の迎え角を 0°~180°まで 45°刻みで変化させながら配置した。水槽内に波周期 6~12sec の波浪流を発生し、流速振幅を段階的に増加させながら、各個体に揺動移動、滑動移動、転倒移動が発生する限界流速値を判定した上でシールズ数に換算した。

(5)実海域への適用

北海道胆振海岸白老地先に設置されたタンDEM型人工リーフを取り囲む、沿岸方向 650m、岸沖方向 2550m を解析対象領域とし、ブシネスクモデルを用いて、1 年確率平均有義波に対する平面波浪場および海浜流場を数値解析した。計算では波向を主波向（NNW）から偏差 30°まで段階的に変化させながら、螺旋捕捉理論を用いて数値幼生の人工リーフ周辺における着底特性を解析した。さらに、当該域におけるシールズ数の平面分布を算定し、稚貝の移動限界シールズ数と比較することにより、当年貝および齢期ごとの波浪流に対する安定性を解析した。

4. 研究成果

(1)螺旋捕捉理論の妥当性と稚貝の安定性

ウバガイ浮遊幼生の螺旋遊泳径と軌道速度は、全ステージを通してほぼ一定値を維持するのに対して、浮上速度は成長初期より急激に低下し着底中期より頻繁な着底行動が認められた。これらの行動諸元を数値幼生に反映させ、着底行動を解析した結果、遊泳を停止し底質上へ到達した数値幼生は、底質空隙内に捕捉されずに再浮上する個体群、及び間隙内に瞬間的に捕捉された後に再浮上する個体群が経時的に底質内より離脱してゆくため、捕捉率には、離脱行動に符号した複数のピークが形成された。このため、本研究では、捕捉無しの個体群、および瞬間捕捉後に底質を離脱した個体群が形成するピークを除いた三番目のピーク以降の個体群を着底個体群と定義し、第二のピークがほぼ終了する、幼生の螺旋遊泳周期で 5 周期時間を基準として着底率を算定した。

ウバガイ浮遊幼生の着底率には底質粒径による差違が認められ、着底率が最大値をとる底質粒径は螺旋軌道径と概ね一致していた。また、着底率は主流流速の増加とともに急激に減少した。さらに、底質間隙内へ連続的に捕捉される個体は、底質粒径の整数倍（多くは等倍）の螺旋遊泳径で、間隙内をループ状に回転移動しながら底質側面と頻繁に衝突や接触を繰り返す状況が認められ、これらの刺激が遊泳活性の低下や着底初期稚貝への変態の誘発要因として作用することが示唆された。螺旋捕捉理論に基づく数値幼

生の着底特性は、浮遊幼生の行動観察結果を反映しており、ウバガイ浮遊幼生における螺旋捕捉理論の妥当性が検証された。

波浪流に対するウバガイ、およびバカガイ、サラガイ稚貝の安定性については、何れも殻長軸と主流向の成す迎え角が 90° 付近で波浪耐性のピークが形成され、流速振幅の増加とともにウバガイとバカガイは揺動移動と滑動移動がほぼ同時に発生後、転倒移動へと推移した。転倒移動の限界条件は殻長をパラメータとしたシールズ数で定式化され、稚貝期における転倒移動（例えば殻長 10mm のウバガイ稚貝に対応する限界シールズ数 0.02）は、砂漣の発達に先行して発生する傾向が認められた。

(2)実海域への適用

人工リーフ周辺海域におけるウバガイ数値幼生の着底効率（当該域の着底率を人工リーフが無い場合の着底率で基準化した値）の平面分布には、人工リーフ特有の高密度領域の形成が認められた。すなわち、リーフ沖側には部分重複波に由来する着底密度の粗密領域が交互に形成され、特に、沖波波長で 2 波長分に相当するリーフ近傍領域では着底効率で最大 5.6 倍におよぶ高密度着底域が安定的に出現した。一方、リーフ岸側では半孤立水塊の中心部をピークとした高密度着底域がリーフ堤長の 0.8 倍程度のスケールでパッチ状に形成されたが、着底効率は沖波の入射角や方向集中度に依存ながら 2.0~6.2 倍の範囲で大きく変動した。さらに、入射角の変位幅の増加とともに、ピークの形成位置もシフトし、水深 2m 未満の打上げ領域へ移送される数値幼生が急増した。

人工リーフの周辺海域においてウバガイの転倒移動限界シールズ数を下回る、安定領域の平面分布を計算し、全海域面積に占める割合として、耐波浪生残率で評価すると、耐波浪生残率は、1 齢期で 0.03%、2 齢期で 0.19%、3 齢期で 11%と成長とともに増加した。さらに、3 齢期以下における安定領域は、全て人工リーフの沖側に出現し、人工リーフに平行した帯状の安定領域が、一定間隔を保ちながら沖合のウバガイ成貝生息域まで続いていた。4 齢期における耐波浪生残率は解析対象領域の半分程度を占め、リーフ沖側に加えて岸側にも拡大した。

一方、サラガイにおいては、10 齢期に達しても、解析対象領域における耐波浪生残率 0.7%と低く、本種の漁場が更に深所に形成される要因が波浪耐性面より示唆された。これら二枚貝の生残過程は、当該域における本種の減耗過程をほぼ反映していた。供試稚貝の潜砂深度は波浪流により形成される砂漣の波高より概して小さいため、波浪に伴う底質の物理的攪乱によって、稚貝は恒常的に砂中より放出されることから、転倒移動限界シールズ数が、二枚貝の波浪に伴う移動分散や生残過程を評価するための主要な指標と考え

られた。

(3)研究成果の波及効果

一連の研究を通して、これまで未解明であったウバガイ浮遊幼生の着底から稚貝の生残に関わる初期生態プロセスを数値解析するための手法が開発され、発生から漁獲に至る一連の資源動態時系列を定量評価するための端緒が開かれた。さらに、人工リーフや離岸堤の水産協調効果として以前より指摘されていた、施設岸側の半孤立水塊の効果に加えて、施設沖側にも部分重複波に由来する安定領域の形成とその有効性が示された。本研究の成果は、海岸保全施設の設置が二枚貝資源の加入に及ぼす影響の評価や、着底稚貝の移出入に配慮した施設の最適配置計画など、二枚貝類の生活様式や生活史と調和した総合的な海岸管理の実現に向けた様々な方策策定のための基盤技術として寄与することが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

瀬戸雅文、加藤千明、巻口範人、二枚貝の波浪耐性と人工リーフの分散抑止効果に関する研究、平成 28 年度日本水産工学会学術講演会学術講演論文集、査読無し、2016、pp.45-46

瀬戸雅文、片山南、加藤千明、巻口範人、サラガイ稚貝の潜砂能力と流れによる移動限界条件、平成 26 年度日本水産工学会学術講演会学術講演論文集、査読無し、2014、pp.49-50

〔学会発表〕(計 4 件)

加藤千明、瀬戸雅文、二枚貝稚貝の漂砂による移動限界条件-ウバガイ、バカガイおよびサラガイについて-、日本水産学会中部支部、2014 年 11 月 8 日、石川県政記念しいのき迎賓館（石川県金沢市）

瀬戸雅文、加藤千明、片山南、巻口範人、二枚貝稚貝の漂砂による移動分散機構、日本水産学会、2014 年 3 月 28 日、北海道大学函館キャンパス（北海道函館市）

瀬戸雅文、加藤千明、巻口範人、人工リーフ周辺における二枚貝浮遊幼生の分布特性解析、日本水産学会、2013 年 9 月 20 日、三重大学（三重県津市）

瀬戸雅文、加藤千明、北川裕人、螺旋捕捉理論による二枚貝浮遊幼生の着底行動モデルの開発、日本水産学会、2012 年 9 月 15 日、(国研)水産大学校(山口県下関市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

瀬戸 雅文 (SETO, Masabumi)

福井県立大学・海洋生物資源学部・教授

研究者番号： 60360020

(2)研究協力者

巻口 範人 (MAKIGUCHI Norito)

