

アサリ初期稚貝の生息環境に与える地形変動の影響評価

越川義功¹・田中昌宏²

干潟整備の順応的管理の観点から地形の動的平衡に着目し、干潟の代表的生物であるアサリ初期稚貝（殻長 3~5 mm）の地形変動に対する許容範囲を把握することを目的に、造波水槽を用いて実験を行った。アサリは砂面変動に対して潜砂行動で追従したが、砂面変位速度が 6 mm/min. を超えると追従できずに全て流出した。また、アサリの潜砂行動周期と 1 回あたりの潜砂深度は殻長に比例し、算出された潜砂速度（4.3 mm/min.）は流出を回避し始める砂面変動速度とほぼ一致した。さらに、緩やかな砂面変動が発生する波浪条件下では、静水条件下よりアサリ初期稚貝の生長率は大きく、底質の攪乱が必要であることが明らかになった。

1. はじめに

自然界における一定規模以上の干潟（例えば東京湾盤州干潟）は、地形変動を生じるが長期的には安定した“動的平衡”が保たれ、そこには豊かな生態系が維持されている。一方、最近の干潟造成に対する考え方には、造成後の様々な変化を前提に必要な維持管理のみを行う“順応的管理”が取り入れられようとしている。こうしたスタンスで干潟の管理を考えた場合、地形をはじめとした環境変動が急激、かつ大きい場合にはそこに棲む生物にとって生息を制限する要因となる。底生生物はこれに対応する行動能力を有しているが、特に移動力が乏しい二枚貝では活性低下につながり、ひいては個体群消滅の可能性もあり得るため、生物からみた動的・可動条件の閾値把握は重要になる。

1980 年代後半以降、干潟における代表的な生物であるアサリの急激な漁獲量減少が問題となっており、回復する兆しが見えない。その原因については、産卵（卵）・着底（着底稚貝）から資源加入（稚貝）、成長（成貝）にいたるそれぞれの過程で議論がなされているが、各地で共通して指摘される現象は稚貝発生量の絶対的な不足である。例えば、東京湾では 1990 年代半ば以降、それまでは大規模な斃死が発生しても早期に回復していた湾奥部において、稚貝（殻長 4~11 mm 以下）の発生量そのものが減少し、資源量自体も同様に長期の減少傾向を示している（Toba, 2004）。稚貝発生量そのものの減少要因は未だに明らかにされていないが、二枚貝類の再生産機構の復活には数少ない稚貝の生残率向上も重要な課題である。

このように、本来、自然干潟が有する特徴である動的平衡と、貝類の再生産機構を両立させるためには、発生する地形変動が二枚貝類、特に稚貝の生息環境に及ぼす

影響の把握が急務となる。アサリ稚貝の減耗要因の一つとして、波浪による稚貝の分散、流出があげられ（柿野ら, 1991, 1995）、水槽実験では二枚貝類としてホッキガイでの放出限界に関する検討がなされている（山下ら, 1995）。しかし、アサリはホッキガイよりも内湾性であり潜砂行動にも違いが見られることは容易に考えられるが、アサリに関する知見は限られた情報のみである（櫻井ら, 1999）。特に、資源の定着に密接な関係がある殻長 5 mm 以下の初期稚貝の潜砂行動や、これらの継続的に発生する地盤変動による影響など長期的な視点に立った知見は少ない。

そこで、本研究では、アサリの初期稚貝を対象として地形変動のスピードの生息許容範囲を定量的に把握するため、造波水槽を用いた実験を行い、海底地形の短期・長期的変動に対する流出特性や成長に与える効果を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

本研究では、生きた生物を対象とした移動床実験をコントロールし易くするため、図-1 に示す小型の造波水槽を作成した。水路長は 1,600 mm と短く、必然的に造波板によって発生した波は重複波となり、周期も水槽の長さで規定される。しかし、水深や造波板の振幅を調整することで、底面流速振幅を大きくし砂面変動を容易にコントロールすることができる。また、水槽側面はアク

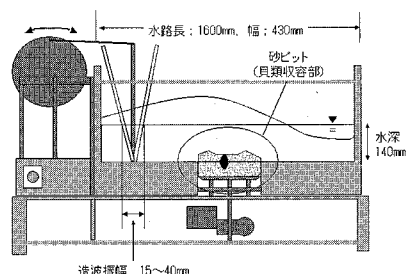


図-1 実験に使用した小型簡易造波水槽の概要

リルガラスで内部の観察を可能とするとともに、底面中央部に砂ピットを設け、アサリを初めとした生物を収容できる。これによって、流速振幅によって発生する砂面の変動、これらに対する生物の挙動を確認できる。

(1) 海底地形の短期変動に対する影響

本研究には2003年11月に横浜市金沢区の野島海岸で採取したアサリ初期稚貝(殻長3~5mm 平均殻長 4.3 ± 0.5 mm, 以後アサリ)を使用した。アサリは水温 18 ± 2 °Cで馴致し、潜砂テストにより2時間以内に潜砂した個体を、殻長および体重を測定後、実験に供した。なお、実験に使用した砂($D_{50} = 0.124$ mm)は、アサリ生息地点で採集し、水道水で洗浄・風乾後、再び海水に浸漬させて使用した。また海水は実験室前面海域(神奈川県山町)で取水したろ過海水(1 μ m フィルター通過)を設定温度に調温して使用した。

実験は造波水槽の砂ピット内部の砂を平坦になるように均した後、砂面上にアサリを投入し全ての個体が潜砂したのを確認してから開始した。潜砂行動に影響する水温条件は、東京湾においてアサリ稚貝が殻長3~5mmに成長する5月の水温(Nakamura ら, 2002)を参考に 18 ± 1 °Cに設定した。本実験での砂ピットの初期砂面レベル(以下基準底面)は水槽底面と同じになる“+0 mm”と、砂面変動の変位を大きくするためにさらに盛土した“+60 mm”の2つの条件を設定した。砂面変動を発生させる造波条件は、重複波を発生させるために使用水槽のサイズから周期を1秒とし、波高を調整するための造波板の片振幅(以下造波振幅)を20, 25, 30および40 mmの4条件とした。そして、基準底面と造波振幅を組み合わせることで、複数の砂面変動パターンを発生させた。

実験時間は造波開始から最大10分間とし、砂面変動は一定時間ごとに水槽側面からデジタルカメラで撮影、3地点の変位量を画像解析によって求め、3地点の平均値を砂面変位量とした。アサリの定位および砂面からの流出は実験水槽側面から肉眼で確認し、経過時間および流出個体数を記録した。また、対照実験としてフォルマリン固定したアサリ(死貝)を使用し、これを砂中に埋没させて同様の実験を行い、砂面変動に追従しない場合の流出特性の把握も行った。

(2) 海底地形の長期繰り返し変動に対する影響

アサリの潜砂行動に対する短期的影響とは別に、海底地形の変動が長期にわたり周期的に繰り返し発生する場合のアサリの成長や生残に与える影響を評価するための実験を行った。これは、短期変動が暴浪時の地形変動に対応するのに対し、日常的な地形変動に対応する。

実験はアサリを潜砂させた後、実験水槽内でアサリそのものが流出せず、地形変動が緩やかに発生する条件

(基準底面0 mm, 造波振幅25 mm)で造波しながら行った。本実験に供試したアサリは(1)と同じ横浜市金沢産のもので、水温18 °Cで1週間馴致した後、殻長および湿重量を測定した。また、各サイズでの地形変動による影響を見るために、これらを殻長によって3つ(2~3.5, 3.5~5, 5~8 mm)に分け実験に供した。

実験水槽の砂ピット内部は各クラスのアサリが混じらないようにプラスチック製メッシュで3つの区画に分割し、砂を投入した。そして、均一に敷き均した後、アサリを水温18 °Cに調整した実験水槽の砂表面に投入し、全ての個体の潜砂を確認後に造波、試験を開始した。実験期間は15日間で、実験条件は造波振幅25 mm, 周期1秒, 水温 18 ± 2 °Cである。実験期間中は給餌(*Tetraselmis* sp. を供給), 砂ピットからのアサリの流出個体確認, 砂ピット部分の砂面均しを毎日実施した。また、対照実験として、水槽底面に砂ピットを設けた同様の水槽を用意し、造波せずに同様の条件で飼育実験を行った。実験終了後、各水槽のアサリは砂ピットから砂ごと取出し、篩(目開1 mm)を通して水洗しメッシュに残った個体を回収、殻長および湿重量を計測した。

(3) 潜砂行動特性に関する検討

アサリの潜砂行動は、斧足での底質詮索、底質への直立・潜砂、貝全体が底質へ埋没、の一連の動きによって完了する。また、潜砂は潜砂開始から終了まで一定速度で行われず、一定の周期で休息をしながら繰り返して砂中に埋没する。しかし、地形変動も周期を持つ流速振幅により発生するため、貝類への影響を考えるうえで、潜砂行動の周期と1回あたりの潜砂深度を把握することは重要である。

実験は水温20 °Cに調温した造波水槽の砂ピットを砂面レベル0 mmで敷き均一ならした後、0.1 mm単位で計測したアサリ(殻長3~12 mm)を砂面上におき、潜砂行動を観察、記録することで行った。計測はアサリが底質に直立、潜入しはじめた時を潜砂行動の開始とし、潜砂行動した時の経過時間、潜砂を完了した時の時間を記録した。そして、平均潜砂行動周期(MBI)と潜砂行動1回あたりの平均潜砂深度(MBS)を次式により算出した。

$$MBI = T/t \dots\dots\dots (1)$$

$$MBS = L/t \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 T ; 潜砂開始から終了までの時間(秒), t ; 潜砂行動回数, L ; 殻長(mm)である。

3. 結 果

(1) 海底地形の短期変動に対する影響

造波開始後、アサリが潜砂している砂ピット表面の砂は発生した流速振幅によって左右に往復運動を繰り返し、

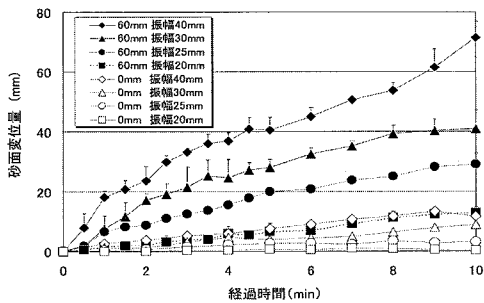


図-2 基準底面+0mm および+60mm における造波による砂ピット部の砂面変位量の短期変動

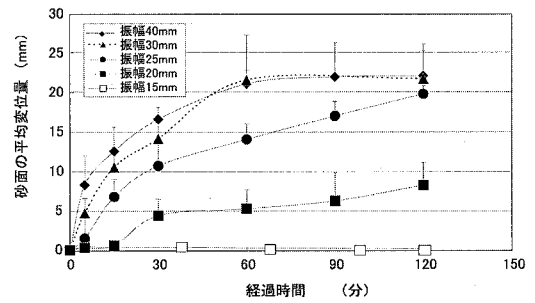


図-4 海底地形の長期繰り返し変動実験における砂面変位量の経時変化（基準面0mm，造波振幅25mm）

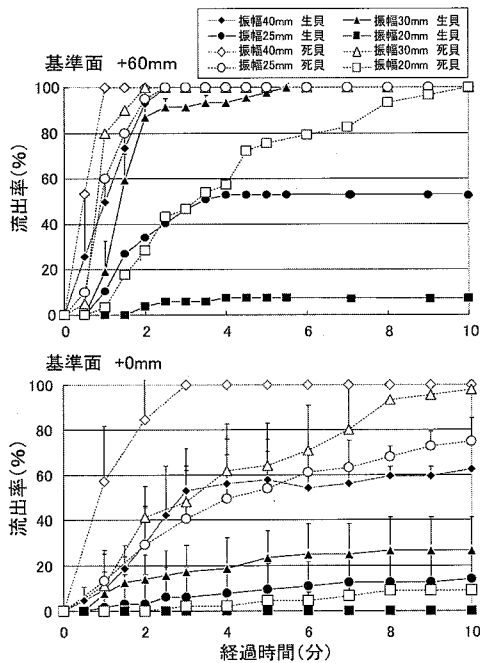


図-3 基準底面+0mm および+60mm における砂面変動によるアサリ初期稚貝（3～5mm）の流出率の経時変化

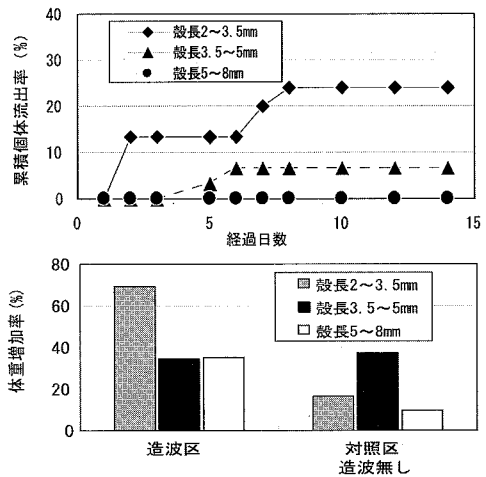


図-5 造波水槽を用いた地形の長期繰り返し変動実験におけるアサリの累積個体流出率と体重増加率

ピット内には砂漣が形成された。その後、砂漣は砂の掃流移動によって形状を変化させながら、その一部はピット外へ堆積し、砂ピット内の砂面は侵食され基準底面から変位を生じた。

図-2 に造波振幅および基準底面（0 mm，+60 mm）による砂ピット部の平均砂面変位量の経時変化を示した。造波によって生じる砂面変位量は造波振幅の増大に伴って大きくなるが、基準底面 0 mm では最大でも 13 mm にとどまった。しかし、基準底面を 0 mm から盛り土をして +60 mm に設定した場合、振幅増大による砂面変位量は大きくなり、最大 70 mm に達した。

図-3 に基準底面 +0 mm および +60 mm における砂

面変動によるアサリの流出率の経時変化を示した。実験中のアサリは砂面の変化（特に侵食）に対して敏感に反応し、貝殻の一部が水中に露出すると、流出を回避する潜砂行動を起こした。しかし、変位速度に追従できない場合、アサリは砂面上に流出した。基準底面 0 mm の場合、殻長 3～5 mm では造波振幅によって流出率に差異はあるものの、死貝は造波振幅の増大に伴って流出率が高くなった。生貝の流出率は死貝よりも低く、死貝すべてが流出した造波振幅 30 mm では 30 %，40 mm では 60 %であった。これに対して、砂面変位量が大きくなる基準底面 60 mm の場合、殻長 3～5 mm では造波振幅 25 mm で 45 %の個体が潜砂行動によって流出を回避したが、造波振幅 30 mm，40 mm では死貝と同様に生貝のアサリもすべての個体が流出した。

（2）海底地形の長期繰り返し変動に対する影響

図-4 に初期砂面レベル 0 mm における造波振幅による砂面変動の経時変動を示した。今回の設定条件である造波振幅 25 mm での砂面変動を毎日繰り返し与えたが、この条件では砂ピット内部に短期変動実験で与えた大き

な砂面変動は見られない。しかし、実験開始後2時間まではおよそ10 mm/時間の変位がもたらされ、砂ピット内部の地形が安定するおよそ20 mmまで砂面は変位をする。つまり、アサリに対して潜砂行動によって十分対応できる程度の比較的緩やかな砂面変位が与えられたことになる。

図-5に地形の長期繰り返し変動実験におけるアサリの累積個体流出率の経過時間変化と実験終了後の体重増加率を示した。アサリの砂ピット外への流出は実験期間前半に確認され、最終的な流出率は殻長2~3.5 mmで24%, 殻長3.5~5 mmで7%, 殻長5~8 mmでは流出そのものが確認されず0%であった。体重増加率は殻長2~3.5 mmでは造波区、対照区それぞれ70%, 17%, 殻長3.5~5 mmでは造波区、対照区それぞれ34%, 37%, 殻長5~8 mmでは造波区、対照区それぞれ35%, 10%となり、造波区のアサリで体重増加率が高い傾向にあった。

(3) 潜砂行動特性に関する検討

図-6にアサリの殻長と平均潜砂深度(MBS), および平均潜砂行動周期(MBI)との関係を示した。アサリの潜砂行動はある程度の周期で潜砂行動を繰り返しており、そのMBIは6~32秒の間で殻長に比例していた。またMBSは1回あたり0.5~1.73 mmで潜砂し、MBI同様に殻長が大きいくほど大きかった。この結果、(1)海底地形の短期変動に対する影響、で使用した個体の殻長(平均殻長4.3 mm)に相当するアサリの潜砂速度は4.3 mm/minと算出することができる。

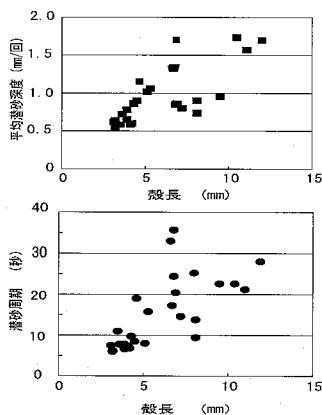


図-6 アサリの殻長による潜砂行動あたりの平均潜砂深度(MBS)と平均潜砂行動周期(MBI)との関係

4. 考 察

地形変動の生息環境へ与える影響を評価するために、アサリの砂ピットから流出率に砂面変位速度を対応させ

て検討した。アサリが砂面変位に追従できずに全個体が流出したのは砂面変位速度が6 mm/min. (図-2; ◆, ▲) 以上であり、地形変動に追従する個体が出始めたのは1.5~4.0 mm/min. (図-2; ●, ◇) であった。また、砂面変位速度が0.5 mm/min. 以下 (図-2の■, △, ○, □) の場合、アサリは地形変動に追従し、ほとんどの個体は流出しない (図-3; 下図)。

これを本実験で得たアサリ初期稚貝の潜砂速度 (4.3 mm/min.) と比較すると、侵食に追従する個体が出始めた砂面変化速度4.0 mm/min. に近い値である。しかし、アサリに限らず二枚貝の潜砂能力には、個体によるバラツキが発生することが容易に予想される。これまでに報告されているアサリ稚貝 (平均殻長9.1 mm) での限界砂面変位速度は0.06 mm/s (=3.6 mm/min.) (櫻井ら, 1999) であるが、本研究における砂面変位速度4.0 mm/min. (図-2; ●, 図-3 上図; ●) でのアサリ流出率は53%であった。これはアサリの潜砂能力における個体差を反映し、限界砂面変位速度がある程度の幅を持っていることを示している。

二枚貝の限界砂面変位速度は貝類の潜砂速度と地形侵食速度の比で決定され (山下ら, 1995), アサリの場合は潜砂速度の1.7~2.5倍とされてきた (櫻井ら, 1999)。限界砂面変位速度を“全ての個体が流出する砂面変位速度”とするのであれば、すべての個体が流出した砂面変位速度6.0 mm/min は、アサリ初期稚貝の潜砂速度4.3 mm/min. の1.4倍に相当し、既往の報告範囲よりも小さい。これは今回の試験で使用したアサリが櫻井ら (1999) が用いた供試サイズよりも小さい初期稚貝 (平均殻長4.3 mm) であるためと考えられる。また、アサリは水温低下によって潜砂能力が低下し (櫻井ら, 1996), 振動流場においては砂面上に放出された二枚貝は浮遊転動によって再び潜砂することなく最終的に斃死に至るとされる (山下ら, 1994)。特に、東京湾では冬季におけるアサリ大量減耗の一因が波浪であると指摘されていることから (柿野ら, 1995), 個体群の維持が目的である場合には地形変動による生息閾値はより小さく、高い割合での定着が確保できる砂面変動内で制御する必要がある。

東京湾盤洲干潟において冬季に実施された地盤高変動の現地観測では、24時間で最大50 mmであり、20~30 mmの変位も頻繁に観測されている (柿野ら, 1995)。これらの変位は継続的にゆっくりと進行するとは限らず、概ね堆積傾向にある現地でも潮汐流や風向が一致した短時間で急速に侵食が進行するとも報告されている (内山, 2001)。また、初期段階の稚貝では、波浪による大きな流速振幅が発生している場合、貝殻が露出した状態になると潜砂能力を十分に発揮できなくなるとも考えられ、

これらのことから波浪によって引き起こされる“小さく短時間に発生する”地形変動でも、発生段階が早い初期稚貝は生息環境に対する影響を受けやすいと考えられる。このような観点からアサリ初期稚貝の砂面変動に対する生息閾値は、個体数の50%以上の定着を目安に砂面変位速度1.5 mm/min. 以下と見積もることが妥当と考えられる。

前出のとおり、アサリの減耗要因のひとつには波浪が関係するとされてきた。しかし、本研究では地形に大きな変動を与えない程度の波浪条件下では、流出せずに定位した個体は静水中で飼育した個体よりも体重増加率が大きかった(図-5)。この結果は波浪が必ずしもアサリの生息に負の影響を与えるものではないことを示している。アサリが生息する干潟域では、潮流や波浪による底層の物理的混合に起因して底生の付着珪藻やデトリタスの再懸濁が行われ、これをアサリなど懸濁物濾過摂食者が有効に利用しているとされ(沼口, 1990)、現地調査ではアサリの生息環境に対する波浪の影響を示す底面摩擦速度が3~4 cm/sの領域にアサリが多く生息することが示されており、摩擦速度がこれより小さくても、おおきくてもアサリの生息量が減少することを示している(柿野ら, 1991)。さらに、新保ら(2000)は生息適性評価モデル(HSIモデル)の構築にあたって、環境因子(SIモデル)に波の作用(底面摩擦速度)を加えることで、HSIと生息量との関係の線形性がより高くなることを確認した。このSIモデルの底面摩擦速度の下限值が、デトリタス等の再懸濁の発生状況に対応し、上限値はアサリが定位できるかどうかの限界に対応していると考えられている。したがって、水槽内での造波は、干潟で発生している機構と同様の現象を再現し、アサリが投入した餌を有効に活用していると考えられる。

また、造波が好影響を与えたもう一つの原因として底質環境の好気化があげられる。実験区では静水である対照区にくらべて底質における嫌気化(底質の黒色化)が抑制されており、アサリの生息にとって良好な底質環境が維持されていた。これは波浪によって間隙水の水圧が常時変化することによって、底質への酸素供給がなされていたためと考えられる。

これらの事実は、生物の生息、特に二枚貝類にとっては底質に波浪などによる一定の擾乱が必要であることを示しており、静的安定よりも動的安定が干潟整備には不可欠であることは明確である。今後は、地形変動の生息閾値を超過しない擾乱の与え方や制御方法の開発が重要な課題になると考えられる。

5. 結 論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- ① アサリ初期稚貝は砂面変位速度が0.5 mm/min. 以下では流出しないが、1.5~4.0 mm/min. では追従できない個体が出現し、6.0 mm/min. 以上では全てが侵食に追従できず流出した。
- ② 初期稚貝の潜砂周期と潜砂行動1回あたりの深さは殻長に比例し、算出したアサリの潜砂速度は流出する個体が出始める砂面変位速度とほぼ一致した。
- ③ 長期的変動実験におけるアサリの体重増加率は、地形変動を発生させた実験区のほうが地形変動させない対照実験よりも大きく、底質表面への一定の攪乱は生長を促進する可能性がある。

謝辞：本研究の着手に際して、鹿島建設(株)技術研究所土木構造・材料グループ主任研究員稲垣聡氏に協力いただいた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 内山雄介(2001)：冬期の東京湾盤洲干潟における浮遊砂生成機構および短期地形変動について、土木学会論文集 No.677, II-55, pp. 129-140.
- 柿野純・中田喜三郎・西沢正・田口浩一(1991)：東京湾盤洲干潟におけるアサリの生息と波浪の関係、水産工学, Vol. 28, pp. 51-55.
- 柿野純・古畑和哉・長谷川健一(1995)：東京湾盤洲干潟における冬季のアサリのへい死要因について、水産工学, Vol. 32, pp. 23-32.
- 櫻井泉・瀬戸雅文・中尾繁(1996)：ウバガイ、バカガイおよびアサリの潜砂行動に及ぼす水温、塩分および底質粒径の影響、日本水産学会誌, 第62巻, pp. 878-885.
- 櫻井泉・瀬戸雅文(1999)：海底地形の変化に対するアサリ稚貝の行動特性、北水試研報, 54号, pp. 41-46.
- 新保裕美・田中昌宏・池谷毅・越川義功(2000)：アサリを対象とした生物生息地適性評価モデル、海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1111-1115.
- 沼口勝之(1990)：アサリ漁場における底層水、セジメントおよび底泥のクロロフィルaとフェオ色素量、養殖研報, 18号, pp. 39-50.
- 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.
- 山下俊彦・和田 彰・松岡学・谷野賢治・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, 第42巻, pp. 506-510.
- Nakamura, Y., M. Higano, T. Hiwatari, A. Iijima, K. Kohata, and T. Furota(2002)：Growth of the Manila Clam *Ruditapes philippinarum* in Sanbanse, the shallow coastal area in Tokyo bay, Fish. Sci., Vol. 68, pp. 1309-1316.
- Toba, M.(2004)：The decline of Manila clam stock in Tokyo bay, Bull. Fish. Res. Agent., Supplement No.1, pp. 13-18.