

アサリの潜砂限界強度について

On the Critical Surface Shear Strength for Japanese Littleneck Clams

佐々真志¹・渡部要一²

Shinji SASSA and Yoichi WATABE

In this paper, we investigate the role of geophysical environmental conditions in the self-burial activity of Japanese littleneck clams. By employing two kinds of bed material, namely, sandy soil taken from a natural intertidal flat and agar simulating cohesive soil, we performed a series of well-controlled laboratory experiments in which the clam activity was closely examined under variably prescribed geophysical conditions. The results demonstrate that irrespective of the type of bed material and exposure / submergence conditions, there exists a critical surface shear strength above which the self-burial activity becomes physically impossible. This finding may enable the performance-based assessment and adaptive management of tidal flat geoenvironments so as to conserve and restore the diverse clam activities.

1. はじめに

豊かな河口・沿岸環境を保全し失われた自然の再生を図る上で、多様な生物を育み高い水質浄化能力を有する干潟は鍵となる要素である。実際、干潟底生生物の多様性に関連して、生態学、海岸工学、水質化学等の分野から国内外においてこれまでに数多くの研究がなされてきている。また、近年、干潟の保全・再生に向けた取り組み、とりわけ、浚渫土砂を活用した干潟造成技術の開発・確立に向けた検討が活発になってきている（国土交通省港湾局, 2003）。この際、重要な視点は、造成する対象物は地盤であり、かつ地盤が底生生物を育む基盤を与えることである。このことは、生態系回復を真に実現するには、底生生物が住む地盤表層の土砂環境場の適切な理解が必要不可欠となることを意味している。しかるに、従来の干潟研究では、生態系や地盤上の水質・水理環境に研究主眼が置かれてきたために、干潟地盤内部の土砂環境場に関する研究が実質的に進んでおらず理解が乏しく留まっていた。

筆者らは、上述のような隘路を切り開くために、干潟土砂環境場の体系的なモニタリング手法を開発し、観測・実験・解析の協働によって、干潟土砂の保水場、土砂の安定性、多様な堆積構造の形成ならびに巣穴生物の住環境において、干潟地盤表層のサクション（土中水分張力を表し、大気圧を基準とした負の間隙水圧により定義される）を核とした土砂環境動態が重要な役割を果たしていることを世界に先駆けて解明した（佐々・渡部, 2005, 2006a, b; 渡部・佐々, 2006; Sassa and Watabe, 2007）。とりわけ、干潟土砂の様々な物理環境が生物活

動条件と密接にリンクしていること、ならびに良好な巣穴住活動を実現するために干潟土砂が有すべき性能を定量的に明らかにしてきた。そして、得られた知見に基づいた生態土砂環境場の評価・設計・管理指針を提示している（佐々・渡部, 2006b）。本研究は、上述のような“生態地盤学”の一環として、これをアサリに展開するものである。

水産有用種であるアサリは、干潟の保全・再生事業において、要の底生生物となっており、その生息生育条件の解明は重要課題である。実際、これまでに水温・塩分等の水質環境、波浪・潮位等の水理環境、強熱減量や酸化還元電位等の化学環境ならびに底質粒径等の材料物性や地形変動が、アサリの生息生育活動に及ぼす影響について知見が蓄積されてきている（柿野ら, 1991; 櫻井・瀬戸, 1996; 新保ら, 2000; 越川・田中, 2006）。しかし、アサリが生息する地盤表層内部の土砂物理環境と当該生物活動の関係に関する実証的研究はほとんどないといつてよい。例えば、底質の硬さや強度はアサリの生息限界と密接に関わっていると考えられている（阿久津ら, 1995）。しかし、従来研究では、地盤深部における相対的な固さを評価しているために、当該生物活動に適合した土砂環境条件が、未だよくわかっていない。

本研究では、上述を背景として、干潟再生指針に資するために、地盤表層内部の物理環境がアサリの活動形態ならびに活動条件に甚大な影響を及ぼすことを示す。具体的には、底質表層の物理環境を様々に制御して、かつアサリの潜砂活動との関わりを詳しく調べることによって、潜砂限界を与える底質強度を定量的に明らかにしている。

2. 干潟土砂と寒天を用いた高精度ベーンせん断試験

アサリは、一般に、細粒分を含む砂質の干潟土砂に生息している。砂質の干潟土砂では、日々繰り返される干

1 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部主任研究官

2 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部土質研究室長

出・冠水にともなう地下水位変化とサクシジョンの動態に応じてその間隙が時間的空間的に大きく変化して、多様な強度・硬さ状態が発現している (Sassa and Watabe, 2007). アサリを主とした生態系の再生を目指して各地で試みられつつある造成干潟では、浚渫粘土や浚渫粘土と砂の混合土砂が干潟材料として検討されているが、このような粘着性の造成干潟土砂においても、造成時の初期条件や造成後の微気象・潮汐条件によって多様な時空間構造が発現し、底生生物活動にとって好ましくない土砂物理環境が往々にして形成されることが明らかとなっている (佐々ら, 2007). これらのことは、底生生物の再生には、土砂物理環境の的確な評価とそれに基づく土砂環境の順応的管理が重要となることを示している。

(1) 試験方法と内容

本研究では、アサリの潜砂挙動に及ぼす底質硬さの影響を詳しく調べるために、千葉県小櫃川河口に広がる盤洲砂質干潟の土砂と粘着性材料を模擬した寒天の2種類の底質材料を用いてベーンせん断試験を行った。当試験を土砂表層に適用することにより、不攪乱状態でせん断強度という干潟表土の硬さに関する明確な物理量を得ることができる。これまでに、筆者らは、砂質干潟における典型的な巣穴生物であるコメツキガニを対象として、ベーンせん断強度が、巣穴の発達度を支配する住活動の性能評価指標となることを定量的に明らかにしている (佐々・渡部, 2006a, b). 本研究は、上述の研究手法を、巣穴を生成しない代表的な底生生物であるアサリに展開するものである。この際、鍵となるポイントが、アサリの住活動領域がコメツキガニに比べてさらに地表面近傍に限られることを考慮して、土砂最表層の強度を捉えるために、深さ 10 mm のベーンブレードと低容量

(2kgf・cm) のトルク計を採用した高精度のベーンせん断試験システムを新たに構築・適用したことである。

本試験のセットアップ状況を図-1 に示す。試験手順は、次のようである。水槽内に設置した多孔質な底版を有する円筒透明アクリル容器内に水中落下法と均等突き固め法により所定の相対密度 ($D_r = 45.0, 65.0, 82.5\%$) の地盤を形成する。水には海水の塩濃度を 2.7% に調整したものをを用いた。円筒容器のバルブを開けて水槽内の水位を調節することにより、地盤上の水位および地盤内の地下水位を規定した。飽和した干出状態の土砂内部には、水の単位体積重量を勾配として地下水位と 1 対 1 の線形関係を有するサクシジョンが発生する (佐々・渡部, 2005, 2006b). これを活用して、地表レベルのサクシジョンを制御した。所定のサクシジョンと相対密度を実現した地盤を図中のジャッキを用いて上昇させて固定する。その後、厚さ 0.5 mm, 直径 40 mm のベーンブレードを地表から深さ 10 mm まで差し込んだ状態で、一定の回転速度 (6°/min.) を適用して、土砂表層のベーンせん断強さを時系列で測定した。寒天の場合には、上述の調整海水に寒天を所定の濃度に溶かし込んだものに対して、同様のベーンせん断試験を行った。

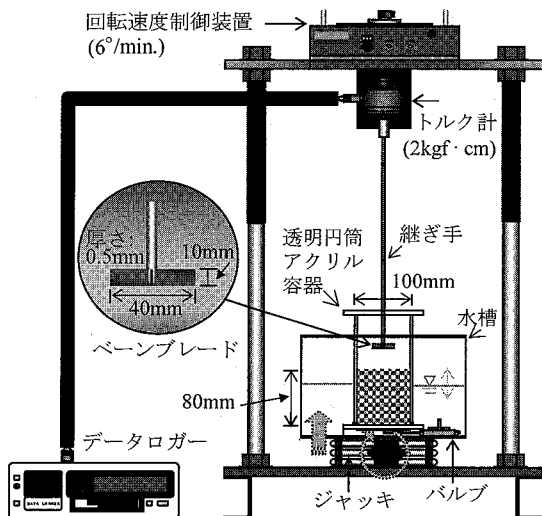


図-1 高精度ベーンせん断試験のセットアップ状況図

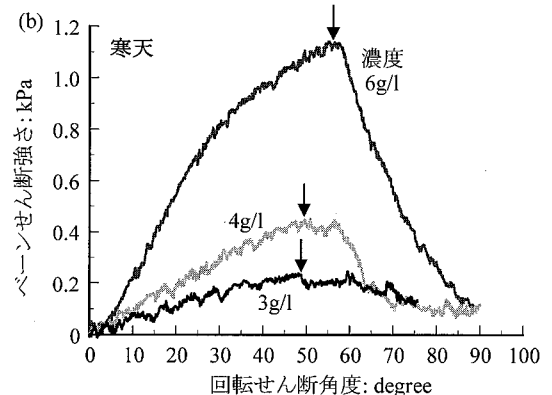
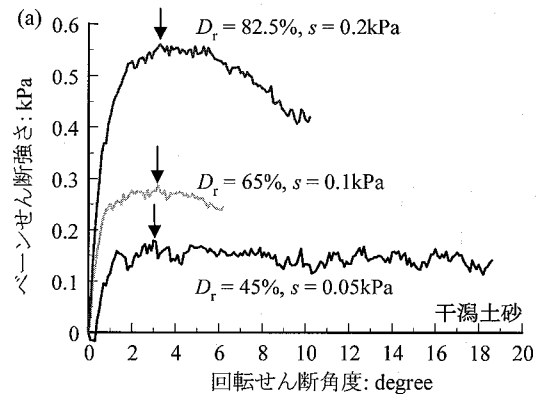


図-2 干潟土砂と寒天に対するベーンせん断試験結果

(2) 試験結果

干潟土砂と寒天を用いたベーンせん断試験結果の例を図-2に示す。干潟土砂の結果(図-2(a))において、異なる3つの相対密度 D_r とサクシオン s の組み合わせに対して、ベーンせん断強さは回転せん断角度とともに上昇しピークに達した後は減少するまたは一定値に落ち着くことがわかる。このようなピーク強さが干潟土砂のベーンせん断強度を表す。寒天の結果(図-2(b))においても、異なる寒天濃度に対して、せん断強さのピークすなわちベーンせん断強度を明確に規定することができる。この際、次章で述べる考察のために、干潟土砂のベーンせん断強度が寒天の強度に比べて著しく小さなせん断角度で発現していることを指摘しておく。

干潟土砂と寒天に対するベーンせん断試験結果のまとめを図-3に示す。干潟土砂に対する結果(図-3(a))から、所定の相対密度の下で、干潟土砂強度は、地下水位低下とともにサクシオンの上昇とともに、敏感にかつ著しく増加することがわかる。例えば、相対密度82.5%では、サクシオンゼロの際のせん断強度0.18 kPaから、地下水位-20 mm 深さに対応するサクシオン0.2 kPaにおいて、せん断強度0.56 kPaと3倍以上の強度増加を発揮する。このことは、アサリが好むような短い干出時間中の浅い地下水位変化によってもそれに伴うサクシオン変動によって、干潟表層の土砂強度が動的

に大きく変化することを意味している。又、このようなサクシオンによる表層土砂強度の増加割合は、緩詰めから密詰め状態になるにつれて大きくなることがわかる。以上の実験事実は、干出時の干潟土砂強度が、サクシオンと相対密度の双方に大きく依存することを如実に示すものである。一方、サクシオンが消失する冠水時の干潟土砂強度は、水位の変化に対して変化せず、それゆえ相対密度のみに依存することがわかる。現地干潟においては、干潟表層土砂の間隙状態の形成には、サクシオンの動態が本質的な役割を担っている。結局、上述の実験結果によると、干潟土砂の強度状態を様々に制御し評価することが可能である。寒天に対する結果(図-3(b))においては、寒天濃度の増加に対応してベーンせん断強度が忠実に上昇しており、粘性材料としての底質強度の自在な制御を実現している。

次章では、このような多様な底質強度ならびにその発現形態の違いがアサリの活動応答に及ぼす影響について記述し考察する。

3. アサリの潜砂実験

(1) 実験方法と内容

上述のベーンせん断試験により底質の硬さを精確に制御し評価した上で、干潟土砂においては、冠水・干出状態の双方を対象として、寒天においては、その強度が干出・冠水条件によらないため、冠水状態のみを対象として、実験各に殻長20 mmの天然のアサリを5匹用いて一連のアサリの潜砂実験を行った。具体的には、所定の条件の円筒地盤または寒天表面に図-4に示すようにアサリを配置してその潜砂挙動を詳しく観察した。

本実験のポイントは、アサリの潜砂の意志を確認した上でその物理的挙動を評価・検証したことである。具体的には、図-5に示したような実験のスタート条件を採用した。すなわち、底質に置かれたアサリが、自らのあしを出してそれを地表面に接地した状態Aを実験開始条件として、その後の1時間を実験期間とした。本実験でみられたアサリの潜砂可・不可挙動の典型例を図-6

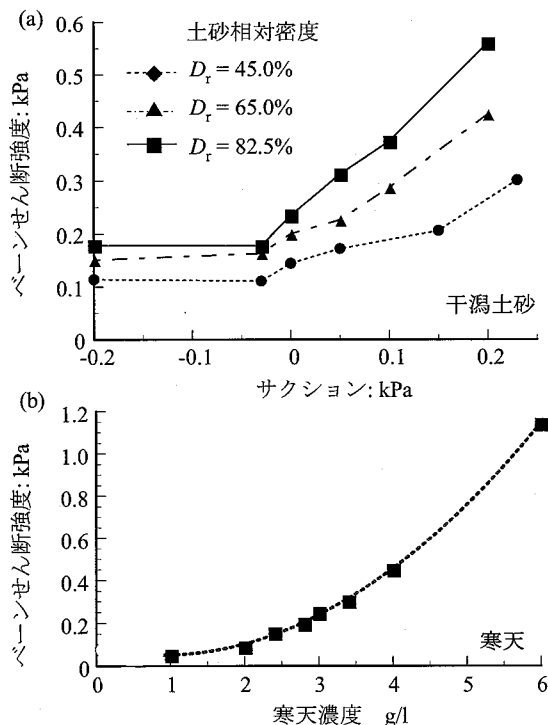


図-3 干潟土砂と寒天に対するベーンせん断試験結果のまとめ

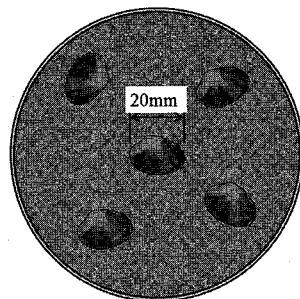


図-4 アサリ潜砂実験のセットアップ平面図



図-5 アサリ潜砂実験のスタート条件の模式図

に示す。潜砂可の場合には、アサリはあしを底質内に挿入して自らの体を倒立させた後、底質内に潜っていった(図-6(a))。

一方、潜砂不可の場合には、アサリはあしを引っ込めるか、又は、図-6(b)に示すようにあしが底質上で折れ曲がり底質に跳ね返されては落ちるといった一連の挙動を断続的に示した。

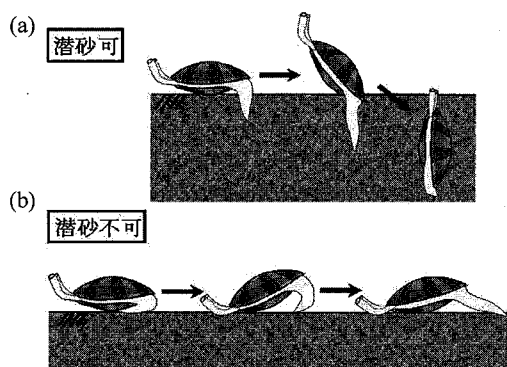


図-6 アサリの潜砂可・不可挙動の典型例を示す観測結果の模式図

(2) 実験結果と考察

干潟土砂に対するアサリ潜砂実験結果のまとめを図-7に示す。本結果から、干出時に比べて相対的に低い土砂強度が発揮される冠水状態では土砂の密詰め・緩詰め状態に依らず潜砂可能となっていることがわかる。一方、地下水位低下にともなうサクシジョンの上昇によって土砂強度が大きく増加する干出状態では、各相対密度に対応

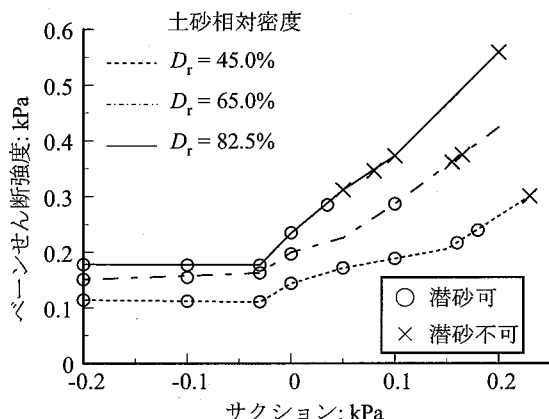


図-7 干潟土砂に対するアサリ潜砂実験結果

したある一定のサクシジョン以上で潜砂不可となっていることがわかる。例えば、相対密度 $D_r = 82.5\%$ ではサクシジョンが 0.05 kPa において、相対密度 $D_r = 45\%$ ではサクシジョンが 0.2 kPa 以上で潜砂不可挙動が現れている。これらの結果は、サクシジョンや相対密度に依存する表層土砂強度が潜砂の可否を左右することを強く示唆するものである。実際、図-7から当実験において潜砂限界を与えるベーンセン断強度を約 0.3 kPa と同定することができる。

寒天に対するアサリ潜砂実験結果のまとめを図-8に示す。本図から、寒天濃度とともに増加する底質強度に対応して、アサリ挙動は、自沈状態から潜砂可、潜砂不可状態と次第に変化していったことがわかる。そして、当実験の潜砂限界強度は約 0.25 kPa であったことがわかる。

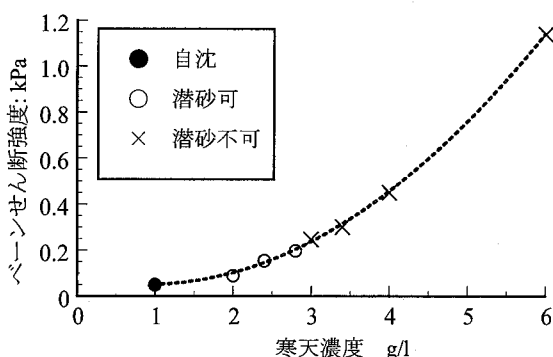


図-8 寒天に対するアサリ潜砂実験結果

上述のアサリ実験結果をベーンセン断強度に対する潜砂指標値のかたちで図-9にまとめている。本図より、干潟土砂および寒天の双方に対して、自沈または潜砂可能な強度領域 (0.25 kPa 以下)と潜砂が不可能となる強度領域 (0.3 kPa 以上)の存在を明瞭に確認することができる。

ここで、異なる底質材料の間で現れた潜砂限界強度の差異について考察する。すなわち、干潟土砂の場合の潜砂限界強度は 0.3 kPa と寒天の 0.25 kPa に比べて 0.05 kPa だけ高い。これはアサリの活動形態、具体的には潜砂の前段階において地表面に水を吐き出す挙動と密接に関わっているといえる。つまり、地表のサクシジョンは降雨等の浸透によって低下する。そして、サクシジョンの低下は土砂の表面強度の低下に直結する(図-3(a)参照)。それゆえ、アサリの水の吐き出しによる表面土砂強度の低下分が上述の潜砂限界強度の差異をもたらしたと考えられる。

両材料に対する潜砂不可挙動の形態の違いも興味深い。すなわち、潜砂不可の場合、干潟土砂においてアサリは自らのあしを地表に接地するとまもなくあしを引っ込め

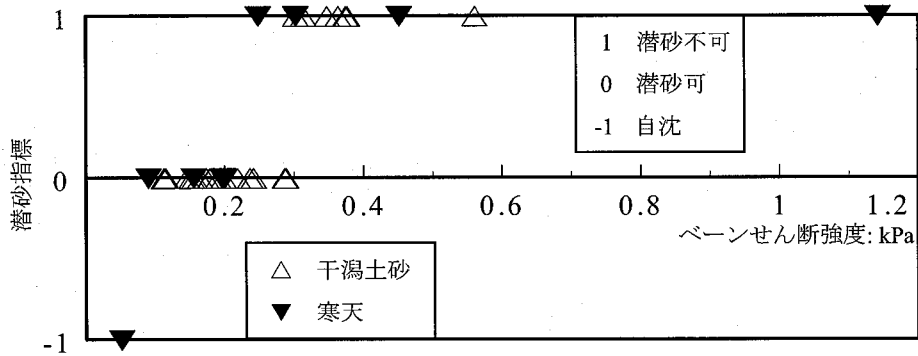


図-9 アサリ潜砂実験結果のまとめ

る挙動を示したのに対して、寒天においてはあしを地表に接地した後、何度も底質をさぐり潜砂を試みる挙動を典型的に示した(図-6(b)参照)。このようなアサリ活動応答の違いは、底質強度の発現形態の差異によって説明することができる。すなわち、干潟土砂は寒天に比べて格段に小さなせん断角度においてピーク強度が現れる(図-2参照)。このことは、干潟土砂では、アサリがそのあしを底質に接地すると直ちに硬さが判明するのに対して、寒天ではあしを接地した潜砂の初期段階では当該材料が有する本来の硬さよりも著しく低いみかけの硬さが現われるために、アサリは、潜砂可能であると判断して何度もトライしたと考えられる。結局、以上の観測事実は、潜砂活動性能が底質の表面硬さを規定するベーンせん断強度に大きく依存することを裏付けるものである。

本研究では、上述の強度値と現場で使用するハンドベーンによる強度値の間の概ね良好な対応関係も合わせて確認している。したがって、現地干潟において当該ベーン試験を行うことによって潜砂活動性能を診断することが可能である。この際、現地ベーンせん断強度を正確に評価するためには、回転せん断速度を一定に保持することが肝要である。この点についての詳細は、佐々・渡部(2006b)を参照されたい。

4. ま と め

生態/土砂物理の関わりに着目して筆者らが先駆的に開発している生態地盤学手法を活用して、底質表層の物理環境がアサリの潜砂活動に及ぼす影響を詳しく調べた。その結果、底質の表面硬さがアサリの潜砂活動の性能を支配していることを明らかにした。そして、底質材料や干出・冠水条件に依らず、潜砂挙動が物理的に不可能となる潜砂限界強度の存在を定量的に初めて明らかにした。これ以上の強度状態の下では、生物生息が困難となり、かつ生物活動によるバイオタベーションも期待することができない。それゆえ、本研究で得られた知見は、今後、他種の二枚貝への適用・展開を通じて、潜砂活動をとも

なう底生生物の保全・再生に向けた自然および造成干潟土砂の性能評価・管理指針として有効に活用していくことができる。

参 考 文 献

- 阿久津孝夫・山田俊郎・佐藤仁・明田定満・谷野賢二 (1995) : アサリの生息と底質の硬度、粒度との関係について、開発土木研究所月報, 503号, pp. 22-30.
- 柿野純・中田喜三郎・西沢正・田口浩一 (1991) : 東京湾盤州干潟におけるアサリの生息と波浪の関係, 水産工学, 28巻, pp. 51-55.
- 国土交通省港湾局 (2003) : 海の自然再生ハンドブック, 第2巻, 干潟編, 138p.
- 越川義功・田中昌宏 (2006) : 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, 海岸工学論文集, 53巻, 土木学会, pp. 1211-1215.
- 櫻井泉・瀬戸雅文 (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, 62巻, pp. 878-885.
- 佐々真志・渡部要一 (2005) : 砂質干潟の土砂環境場におけるサクシオン動態とその果たす役割, 海岸工学論文集, 52巻, 土木学会, pp. 981-985.
- 佐々真志・渡部要一 (2006a) : 干潟底生生物の住活動における臨界現象と適合土砂環境場の解明, 海岸工学論文集, 53巻, 土木学会, pp. 1061-1065.
- 佐々真志・渡部要一 (2006b) : 砂質干潟の生態土砂環境場に果たすサクシオンの役割-巣穴住活動/保水場の性能評価・設計指針, 港湾空港技術研究所報告, 45巻, 4号, pp. 61-107.
- 佐々真志・渡部要一・川野泰広・中島謙二郎・吉田秀樹 (2007) : 泥質干潟再生に向けた土砂環境動態評価手法の開発: 自然泥干潟および干潟実験施設への適用, 海洋開発論文集, 23巻, pp. 507-512.
- 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, 47巻, pp. 1111-1115.
- 渡部要一・佐々真志 (2006) : 干潟堆積構造の地球物理学的評価と形成要因: 砂質・泥質・砂泥二層干潟, 海岸工学論文集, 53巻, 土木学会, pp. 1236-1240.
- Sassa, S. and Y. Watabe (2007) : Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model, Journal of Geophysical Research, 112, F01003, doi:10.1029/2006 JF 000575.