

# 多種多様な干潟底生生物の住活動性能と適合・限界場の相互関係

## Interspecific Comparison of Burrowing Capabilities of Benthic Fauna in Tidal Flats

佐々真志<sup>1</sup>・渡部要一<sup>2</sup>・梁 順普<sup>3</sup>

Shinji SASSA, Yoichi WATABE and Soonbo YANG

The paper describes an interspecific comparison of burrowing capabilities of benthic fauna in tidal flats. By utilizing our new approach in Ecological Geotechnics, we simulated and varied surface shear strengths of bed materials, to which we observed the responses of six species of invertebrates that belong to Arthropoda, Mollusca, and Annelida. The results demonstrate that for each of the burrowing activities there exist optimal, transitional and critical surface shear strengths, which are found to differ considerably between species, body sizes and weights. We have constructed a chart by which to examine such difference in the burrowing capabilities in an integrated manner in light of the associated geophysical environments in the field. This chart provides fresh important insights into natural selection of habitats of benthic fauna in tidal flats.

### 1. はじめに

大気、海、地盤が出会う場である干潟域は、豊かな底生生物を育み高い水質浄化能を有する沿岸自然環境のシンボリック的存在である。そのため、生態系や水質・水理環境を対象として、国内外において生態学、海岸工学、水質化学等の分野から活発に研究がなされてきており、主に生物の食活動や水循環過程について数多くの知見が蓄積されている。しかし、底生生物が住む地盤表層の土砂環境については、従来、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、このような隘路を切り開くために、砂質干潟、泥質干潟ならびに浚渫土砂を含む造成干潟の土砂環境場を体系的かつ精確に捉えうるモニタリング・評価手法を開発し、観測・実験・解析の協働によって、土中水分張力を表すサクションを核とした土砂環境動態が、多様な底生生物の住環境を形成する上で本質的な役割を果たしていること、ならびに、生物住活動と土砂物理環境の密接な関わりを世界に先駆けて解明し、工学・理学・生態学の学際新領域“生態地盤学”を開拓・推進している(佐々・渡部, 2005, 2006, 2007; Sassa・Watabe, 2007, 2008, 2009; 佐々ら, 2007a, 2007b, 2008, 2009;)。特に、干潟の代表的な巣穴生物であるコマツキガニを対象として、サクション、間隙、せん断強度等の土砂物理環境が巣穴発達のための臨界・最適・限界条件を支配していることを見出した(Sassa・Watabe, 2008)。さらに、

二枚貝のアサリを対象として、底質の表面せん断強度が、稚貝から成貝までの潜砂活動の最適・限界場の発現を支配していることを明らかにしている(佐々・渡部, 2007; 佐々ら, 2009)。このような生物住活動の適合・限界場の解明は、生態保全・再生に向けた生物住環境の性能評価・設計・管理の実現に大きく貢献することができる(佐々, 2007)。本研究は、上述の生態地盤学を多種多様な底生生物に展開したものである。

一般に、生物は、その種に応じて生息場所が異なるため、このような底生生物の住み分けの解明は、生態保全・再生上の重要課題である(国土交通省港湾局, 2003)。従来は主に生物の食活動の源である餌の分布や捕食生物の存在に説明を求められてきたが、実際の底生生物の分布は一般に大きくばらつくことが知られている。本研究では、従来研究が欠けていた生物住活動と土砂物理環境の関わりを、生物「住み分け」解明に繋げることをねらいとしている。これまでに、例えば、多毛類(Dorganら, 2005)、エビ(Karplusら, 1972; 梶原・高田, 2008)、二枚貝(Nelら, 2001; 越川・田中, 2006)、甲殻十脚類(Shimoda and Tamaki, 2004)などの住活動特性や巣穴形状について個別に知見が得られている。しかし、これらの底生生物の住活動性能や異なる生物種ごとに対応した住活動の適合場ならびに限界場の相互関係については、ほとんどわかっていないといつてよい。

本研究では、以上を背景として、筆者らが先駆的に開拓した生態地盤学手法の展開によって、多種多様な干潟底生生物すなわち節足動物・軟体動物・環形動物の住活動性能を系統的に調べるとともに、生物種ごとの住活動の適合場・限界場の相互関係を統一的に比較・検証する基盤を作成することを目的としている。

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・構造部土質研究チームリーダー  
3 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部土質研究チーム特別研究員

## 2. 多種多様な干潟底生生物の住活動性能実験

本研究では、生物多様性を構成する重要種であり、好む土質や住活動の形態が顕著に異なる二枚貝（アサリ、シオフキ）、多毛類（ゴカイ、チロリ）、カニ（コメツキガニ）、エビ（テッポウエビ）および甲殻十脚類（スナモグリ）を対象として、一連の生態地盤実験を実施することによって、生物住活動性能の統一比較を実現している。この際、コメツキガニについては、筆者らが既に明らかにした巣穴活動性能（Sassa・Watabe, 2008）を本研究における同じ土俵にのせて考察している。底質材料としては、干潟土砂とともに、主に、別報（佐々・渡部, 2007; 佐々ら, 2009）にて有効性を実証した海水寒天を用いた。これは、同研究において、様々な成長段階の二枚貝の潜砂性能が、粒状体（干潟土砂）や粘性（海水寒天）などの材料の種類によらず同じ底質の表面せん断強度によって規定されることを明らかにしたことに基づいている。この際の寒天及び干潟土砂地盤の形成と強度の制御方法については、佐々ら（2009）に詳しく記載している。

一連の生態地盤実験では、気温（ $20.8 \pm 1.2^\circ\text{C}$ ）、水温（ $19.5 \pm 1.8^\circ\text{C}$ ）、塩分（2.7%）等の大気・水環境を統一し、底質表層（10mm）のせん断強度を精緻に制御・変化させた上で、各種生物の住活動の可否を一定時間（1時間）、生物個体ごとに系統的に調べた。この際、ゴカイ、チロリおよびスナモグリについては、上記時間内で住活動の可否が判明した。すなわち、住活動可の場合には、全身が地表面下に入り（潜穴・巣穴形成の実現）、住活動不可の場合には全身が地表面上に留まった。一方、二枚貝およびテッポウエビについては、同時間内に部分潜砂（佐々ら, 2009）又は部分巣穴形成モード（図-1）が現れたため、住活動の可否を明確化するために6時間にわたって調べた。

各種生物は4つの自然干潟（盤州干潟、江奈干潟、野島干潟、風蓮湖干潟）から採取し、気温・水温を上記一

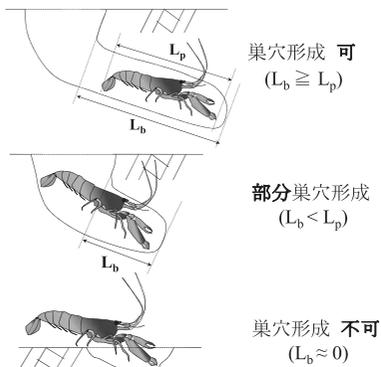


図-1 テッポウエビの巣穴形成基準を示す模式図

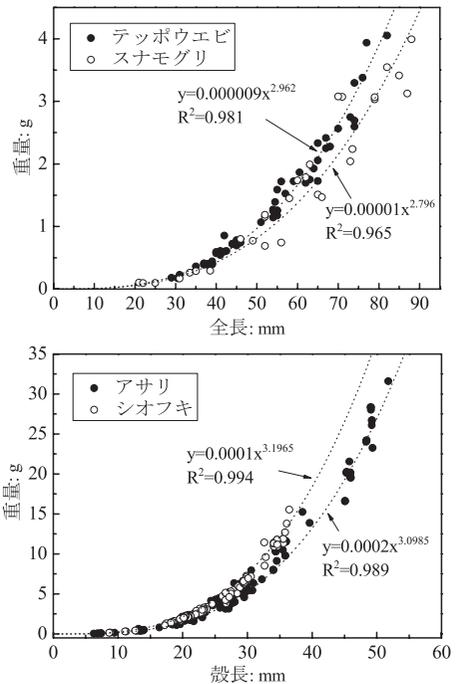


図-2 用いた節足・軟体動物の全長・殻長と重量の関係

定に保持した室内海水槽で約1ヶ月間馴致した後、実験を行った。同実験には、大きさ2mm～88mm、重量0.004g～31.6gまでの、計835生物個体を用いた。図-2には、用いた生物種の基礎データとして、以下の考察に資するために、計測した全長・殻長と重量の関係を記している。この際、多毛類については、重量のみの計測のため記していない。同図より、節足動物のテッポウエビとスナモグリ、軟体動物のアサリとシオフキとも、それぞれ同一動物門同士で全長・殻長～重量関係がほぼ似通っていることがわかる。

## 3. 実験結果と考察

本実験結果の全体像を示す結果として、環形・節足・軟体動物6種の生物住活動の物理的可否を表す住活動指標値と底質表面硬さを表すせん断強度の関係を図-3に示す。同図には、生物種別に用いた個体数n、重量w、及び大きさLを合せて記している。本図より、潜穴、巣穴形成、潜砂のような住活動の形態や生物個体の大きさ・重さによらず、全個体が住活動可能な適合領域（OP以下の強度域）と、住活動の可否の選別が始まる遷移領域（OPとCRの間の強度域）、ならびに、全個体が住活動不可となる限界領域（CR以上の強度域）が、全ての生物種を通じて存在することがわかる。そして、これらの生物住活動の適合場、限界場とその間の遷移領域の範囲・形状ならびに値が、異なる動物門はもとより同一動物門でも生物種ごとに大きく異なることがわかる。

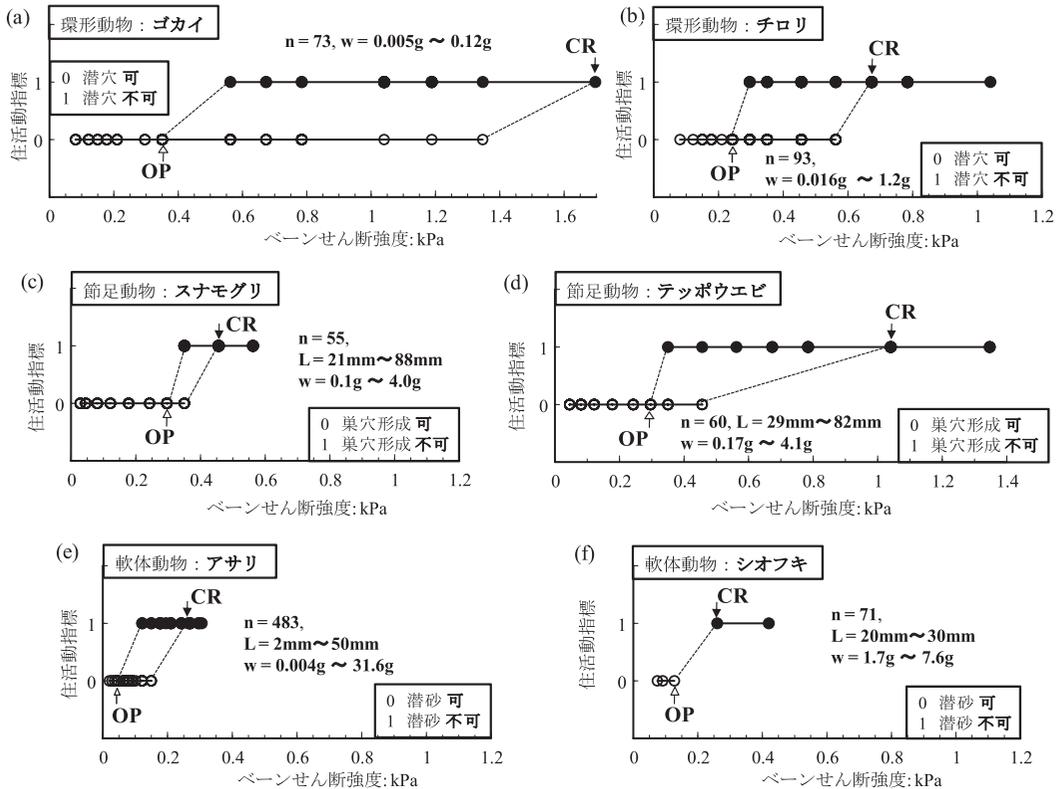


図-3 干潟の環形・節足・軟体動物の住活動性能の統一比較と適合・限界場の存在

上述の生物種ごとの実験結果を、重量別に整理したものを図-4に示す。ここに、用いた生物重量のスケールの違いが種により千倍を超えるため、全ての結果をlogスケールでプロットした。また、図-4 (e) (f) 中の全個体とは、各プロットに対応する3~7個体/実験ケースを表す。同図には、得られた実験結果に基づく重量別の適合・遷移・限界領域の境界線も合わせて引いている。同図より、これらの住活動領域が種別の生物個体重量によっても大きく異なる様子がわかる。また、ゴカイの適合・遷移領域が他種に比べて格段に高い強度範囲をカバーしており、干潟造成後の初期移入種としての特性を示している点で興味深い。また、テッポウエビとスナモグリは、図-2に示すように同様の身体特性を有するが、その巣穴形成能は、テッポウエビがより軽くて幼体に近いほど高くなるのに対して、スナモグリは成体近くの領域でピークが発現しており、興味深い。アサリも同様に成長段階によって最高性能を発揮するが、同ピークに対応する重量約1gは、殻長にして約10~15mmの稚貝に対応している。また、シオフキは、通常の冠水状態では、アサリよりも潜砂性能は高く、より高密の硬い地盤でも潜砂可である一方で、水際の部分冠水又は干出状態では潜砂性能が低下する。これは、シオフキが図-5に示すように“嵩張った”形状をしていて重いため、同条件下(浮力が有

効に働かない)では、立ち上がることができず潜砂が困難になることに由来する。

本研究では、以上のような生物住活動の適合場OPと限界場CRの相互関係を現地土砂環境に照らして詳しく検証しうる住活動性能チャート(図-6)を構築している。図-6の横軸は、干潟の底生生物の全重量範囲をカバーする0.001g~100gまでの生物個体重量w、縦軸は、ベーンセン断強度 $\tau^*$ と、当該強度を現地干潟土砂のキャリブレーション結果に基づき干潟土砂の典型的な相対密度範囲( $D_r=40\% \sim 80\%$ )に対して換算したサクシヨンsである。同図には、コメツキガニに関する筆者らの既往の結果(Sassa・Watabe, 2008)も合わせて示している。

本住活動性能チャートに基づく、1) 生物種・重量の違いによる住活動性能の差異の特徴や2) 生物住み分けに関する新たな重要な洞察を得ることができる。すなわち、1) については、環形・節足動物の住活動性能が軟体動物の同性能を上回ること、節足・環形・軟体動物とも種による成長段階の違いによって最適性能が現れることを明らかにした。さらに、2) については、a) コメツキガニの巣穴を形成できない臨界条件 $s=0$  (Sassa and Watabe, 2008) がアサリの適合場に重なることが水際での両者の非共存を、b) シオフキとアサリの適合場は部分的に重複する一方前者の限界場が後者のそれを上回る

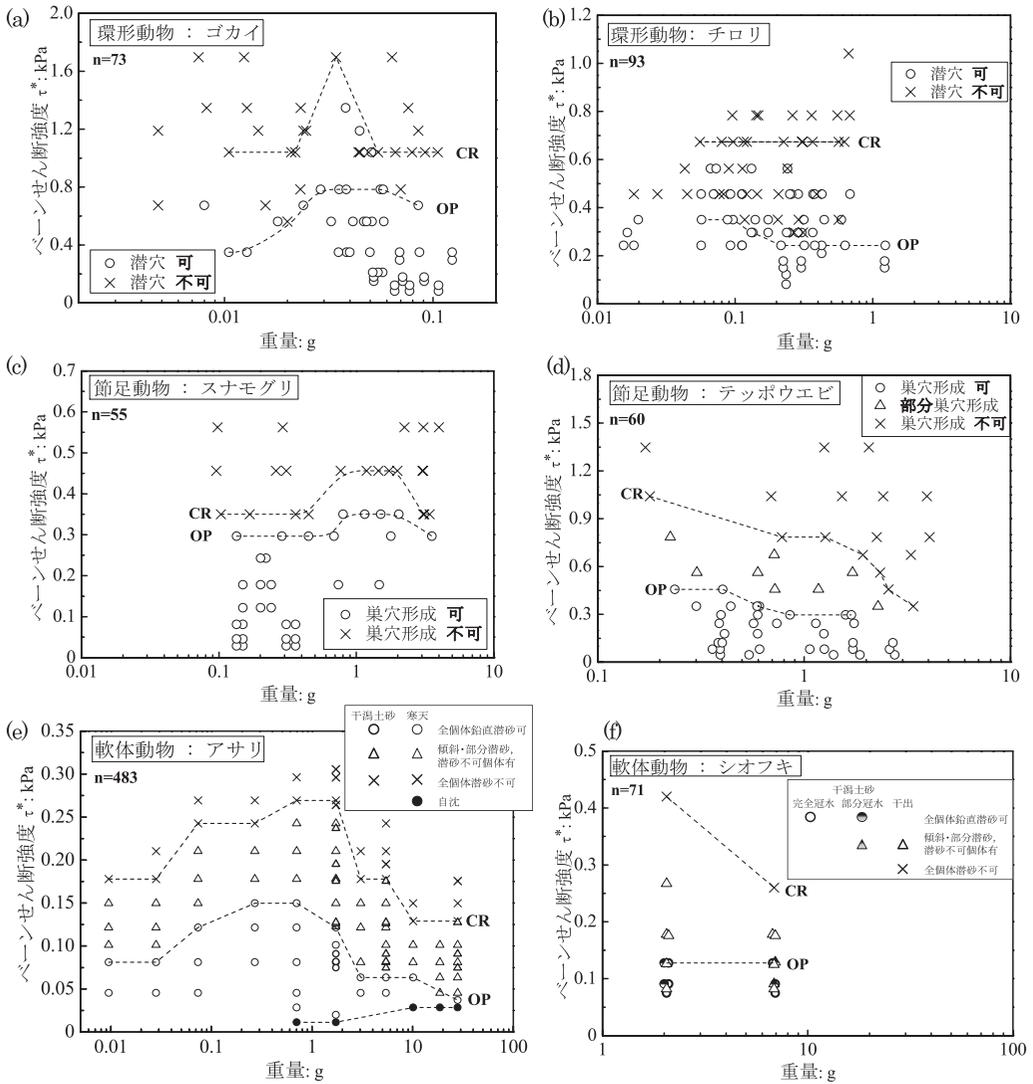


図-4 多種多様な干潟底生生物の重量別の住活動性能実験結果

ことが、両者が共存する一方、シオフキはよく締まった  
 層でも息することを、c) スナモグリの適合場がア

サリの限界場に一致又はその直上に位置することが両者  
 の非共存を、d) コメツキガニの適合・限界場双方がス  
 ナモグリのそれらを大きく上回ることが前者の生息帯が  
 後者のそれより地下水位が深くサクシオンが発達した場  
 所にあることを、それぞれよく説明している。

4. おわりに

多種多様な干潟底生生物への生態地盤学手法の展開に  
 よって、潜穴、巣穴形成、潜砂等の住活動の形態や生物  
 個体の大きさ・重さの違いに依らず、生物住活動の適合  
 場と限界場の両者が生物種ごとに存在することを初めて  
 明らかにした。そして、節足・環形・軟体動物の各動物  
 門において、生物種に応じた成長段階の違いによって生  
 物住活動の最適性能が現れることを見出した。

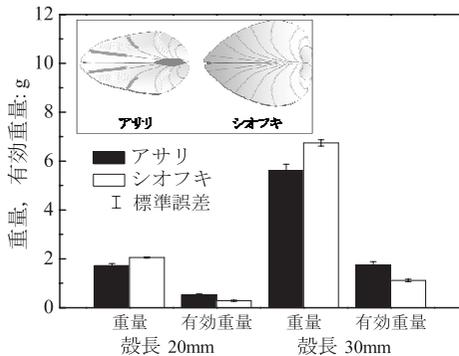


図-5 アサリとシオフキの形状・重量・有効重量の比較

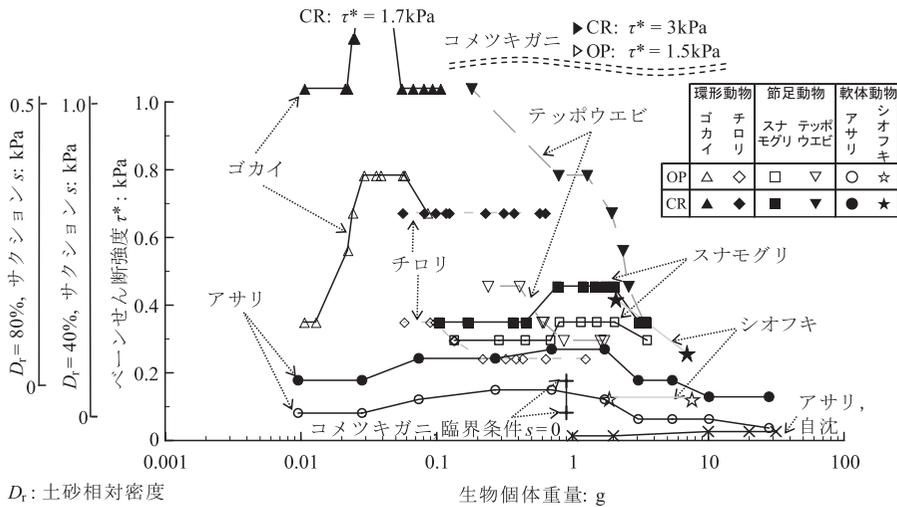


図6 多種多様な干潟底生生物の住活動性能チャートと適合・限界場の相互関係

さらに、上述の生物適合場と限界場の相互関係を現地土砂環境に照らして詳しく検証しうる生物住活動性能チャートを構築し、現在未解明に留まっている底生生物分布のなりたちに対して新たな説明・洞察を与えることを示した。

それゆえ、本チャートは、今後の更なる生態地盤実験の継続と現地調査による検証を通じて、学術基盤としてはもとより、豊かな生態系の保全・再生に向けた生物住環境の性能評価・設計・管理指針として活用・発展性が大きく期待できる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（基盤研究B，研究代表者 佐々，課題番号20360216）の助成を受けた。又、本論文のシオフキに関する実験については、東京工業大学元大学院生の酒井陽平氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

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.  
 梶原直人・高田宣武 (2008) : ナミノリソコエビ *Haustorioides japonicus* の潜砂行動におよぼす飽和水位の影響に関する実験的研究, 水産工学, 45巻, pp. 151-156.  
 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.  
 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, pp. 981-985.  
 佐々真志・渡部要一 (2006) : 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, pp. 1061-1065.  
 佐々真志・渡部要一・川野泰広・中島謙二郎・吉田秀樹 (2007a) : 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.  
 佐々真志・渡部要一 (2007) : アサリの潜砂限界強度について, 海岸工学論文集, 54巻, pp. 1196-1200.  
 佐々真志・渡部要一・石井嘉一 (2007b) : 干潟と砂浜の保水動態機構と許容地下水位の解明, 海岸工学論文集, 54巻, pp. 1151-1155.  
 佐々真志 (2007) : 生態地盤学の創成と土砂性能照査型干潟再生指針の開発, 平成19年度港湾空港技術講演会講演集, pp. 29-50.  
 佐々真志・渡部要一・桑江朝比呂 (2008) : 鳥と地盤と底生生物の関係に果たす水際土砂環境の役割, 海岸工学論文集, 55巻, pp. 1171-1175.  
 佐々真志・渡部要一・梁 順普 (2009) : 生態地盤学の展開によるアサリの潜砂性能の系統的解明, 海岸工学論文集, 56巻, 印刷中.  
 Dorgan, K., P. A. Jumars, B. Johnson, B.P. Boudreau and E. Landis (2005): Burrow extension by crack propagation. *Nature*, Vol. 433, pp. 475.  
 Karplus, I., R. Szlep and M. Tsumamal (1972): Associate behavior of the fish *Cryptocentrus cryptocentrus* (Gobiidae) and the pistol shrimp *Alpheus djiboutensis* (Alpheidae) in artificial burrows. *Maine Biology*, Vol. 15, pp. 95-104.  
 Nel, R., A. McLachlan and D.P.E. Winter (2001): The effect of grain size on the burrowing of two *Donax* species. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 265, pp. 219-238.  
 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*, Vol. 112, F01003, doi:10.1029/2006JF000575.  
 Sassa, S. and Y. Watabe (2008): Threshold, optimum and critical geoenvironmental conditions for burrowing activity of sand bubbler crab, *Scopimera globosa*. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 354, pp. 191-199, doi:10.3354/meps07236.  
 Sassa, S. and Y. Watabe (2009): Persistent sand bars explained by geodynamic effects. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L01404, doi:10.1029/2008GL036230.  
 Shimoda, K. and A. Tamaki (2004): Burrow morphology of the ghost shrimp *Nihonotrypaea petalura* (Decapoda: Thalassinidea: Callianassidae) from western Kyushu, Japan. *Marine Biology*, Vol. 144, pp. 723-734.