

砂浜海岸における水産有用魚類の餌資源生物分布に果たす サクシンの役割

Role of Waterfront Suction in the Distribution of Food Organisms for Coastal Fish

佐々真志¹・梁 順普¹・渡部要一¹・梶原直人²・高田宜武³

Shinji SASSA, Soonbo YANG, Yoichi WATABE, Naoto KAJIHARA and Yoshitake TAKADA

Benthos such as Amphipoda living in coastal sandy sediments are important food organisms for fish, but, factors controlling their distributions remain poorly understood. Here, we aim to solve this question by introducing our new approach encompassing ecology, geophysics and hydraulics / geotechnics. We performed sets of integrated observations / surveys and analyses concerning the *in situ* intertidal geoenvironments and the benthos distributions at three natural coasts. The results demonstrate that the waterfront suction governs the variety of the habitat environments, involving a range of the degree of saturation, stiffness and void state, and the manifestation of the peak and critical area of densities for the three dominant species are uniquely determined by the magnitudes of such suction which are found to be particular to species throughout the coasts. These findings will effectively contribute to the conservation and management of fishery resources at sandy coasts.

1. はじめに

大気、海、地盤が出会う場である潮間帯は、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重要構成要素である（国土交通省港湾局，2003）。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、底生生物の住環境を担う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背景があった。

筆者らは、このような隘路を切り開くために、干潟地盤表層の土砂環境場を体系的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オンを核とした土砂環境動態が、多様な底生生物の住環境の時空間変化をもたらす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間に密接な関わりがあること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，2007，2008，2009a，2009b）。特に、砂質干潟の代表的な底生生物であるコメツキガニを対象として、サクシオン、

間隙、せん断強度等の土砂物理環境が巣穴発達の臨界・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、このような生物住活動の最適・限界場が巣穴形成・潜砂・潜穴等の住活動の形態によらず存在し生物種によって顕著に異なることを明らかにしている（佐々ら，2009a，2009b）。本研究は、上述のような干潟の生態地盤学を砂浜潮間帯に展開したものである。

砂浜潮間帯に生息する潜砂性的小型甲殻類は、ホシガレイやメナダなどの水産有用種をはじめ多種多様な魚類の重要な餌資源となっている（Takahashiら，1999；首藤，2002；梶原・高田，2008）。また、同時にシギ・チドリなどの渡り鳥の餌にもなっており（Brown・McLachlan，1990）、海岸の掃除屋としても、美しい砂浜の保全に多大な貢献を成していることが知られている。しかし、これらの餌資源生物の密度と水温・塩分・粒度・勾配等の既往の各環境要因の間には有意な相関が認められず（James・Fairweather，1996）、その生息分布を規定する要因については、様々な時空間スケールのものが介在するとして未だよくわかっていないのが現状である（Defeo・McLachlan，2005）。

一方、梶原・高田（2008）は、砂浜の小型甲殻類を対象とした室内実験により、地盤内部の物理環境がその潜砂行動の可否に多大な影響を及ぼすことを明らかにしている。

本研究は、以上を背景として、筆者らの構築した生態地盤学手法を新潟県の3つの海浜に展開し、上述の問いに答えることを目的としている。そして、干潟と砂浜の保水動態機構に関する近年の知見（佐々ら，2007）も踏まえて、砂浜潮間帯の底生生物の住環境について一般化するとともに、従来研究が欠けていた生物住活動の最適・限界場の観点から現地調査及び室内試験結果の分析と考察を行った。

1 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所
2 (独法) 水産総合研究センター日本海区
水産研究所
3 博(理) (独法) 水産総合研究センター日本海区
水産研究所

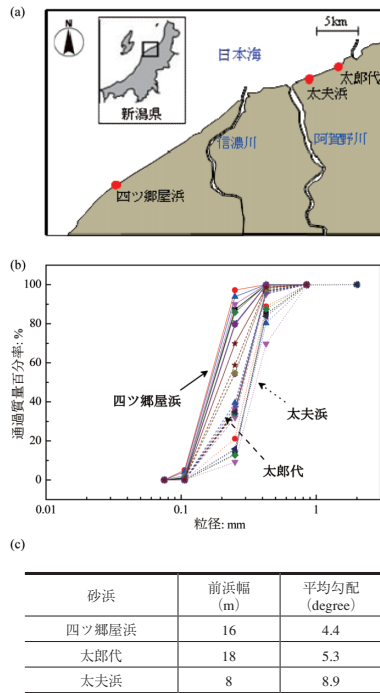


図-1 現地調査を行った3海浜の場所と粒度・勾配・前浜特性

2. 砂浜海岸における土砂物理環境／底生生物分布の一体調査と室内試験

現地調査を行った海浜は、日本海沿岸（新潟市）に位置し、前浜幅、粒度、勾配、塩分等の特性が互いに異なる四ツ郷屋浜、太郎代および太夫浜である（図-1）。同図より、前浜幅が相対的に広く緩勾配で粒径が細かい四ツ郷屋浜と前浜幅が相対的に狭く急勾配で粒径の粗い太夫浜とでは各因子が倍のオーダーで異なることがわかる。また、太夫浜は阿賀野川河口に位置しており、塩分も他の2海浜の約半分であることが知られている。本研究ではこれらの3海浜の前浜において、平成21年10月20日～22日の大潮最干時（潮位差約0.3m）に土砂物理環境と底生生物分布の一体調査を実施した。具体的には、サクシオン s 、地下水位、底質硬さを表すベーンせん断強度 τ の岸沖分布を計測し、各地点において表層土砂（深さ50mm）のサンプリングを行った。この際、サクシオン s は次式で定義される。

$$s = u_a - u_w \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 u_a は大気圧、 u_w は間隙水圧である。本定義により、サクシオンは地下水位でゼロとなる。

一般に、干潟に発達するサクシオンは、以下に述べる空気侵入サクシオン値より低いいため、土中水分が常に保持される一方、砂浜ではサクシオンが空気侵入サクシオン値より高い不飽和帯が形成されることが特徴である

（佐々ら，2007）。空気侵入サクシオン s_{aev} の推定式は、次式で表すことができる（佐々ら，2007）。

$$s_{aev} = \frac{\psi}{e \cdot D_{10}} \gamma_w \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 D_{10} は土砂の有効粒径、 e は間隙比、 γ_w は海水の単位体積重量、 $\psi = 20\text{mm}^2$ は係数である。上式（2）は、これまでに自然砂質干潟、人工干潟および人工海浜において適用性を確認しており、本研究では上述の3つの自然海浜において詳しく検証した。

そして、同一地点で採取した土砂の湿潤重量が $\pm 5\%$ 以内に収まることを確認した“不攪乱”状態のサンプルに対して各種の室内試験を実施し、現地土砂の粒度分布、含水比 w 、土粒子比重 G_s 、間隙比 e 、相対密度 D_r と飽和度 $S_r = G_s \cdot w / e$ を得た。この際、土砂の相対密度 D_r は次式で定義される。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $e_{\max}$ は土砂の最緩状態を表す最大間隙比、 $e_{\min}$ は土砂の最密状態を表す最小間隙比である。それゆえ、 D_r は、砂質土の緩密状態を統一的に評価しうる指標となっている。

上述の各地点において、底生生物分析用の4つのコアサンプル（直径100mm、深さ100mm）を採取し、3海浜を通じた優占3種の小型甲殻類であるナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシ、およびヒゲナガハマトビムシの生息密度分布（平均値 $\pm$ 標準誤差SE）と対応する土砂物理環境の突合せを行った。この際、採取した生物の体長範囲は、上述の生物種の順に、5～8mm、6～12mm、8～18mmであった。

3. 調査・分析結果と考察

上述の3海浜における実測サクシオンと式（2）に基づく空気侵入サクシオン値の関係を図-2に示す。同図から、四ツ郷屋浜、太郎代、太夫浜の順に細砂から中砂へと粒径が粗くなるにつれて s_{aev} 値が低くなり、全ての砂浜を通じて、実測サクシオン s が s_{aev} 値以下である飽和域と s_{aev} 値を上回る不飽和域の両者が形成されていることがわかる。

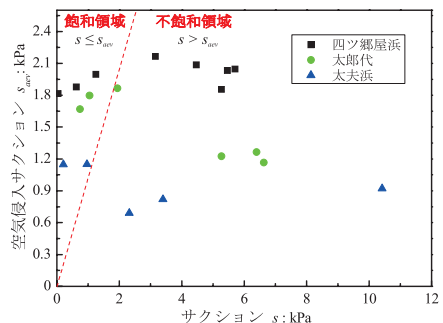


図-2 3海浜のサクシオンと空気侵入サクシオンの関係

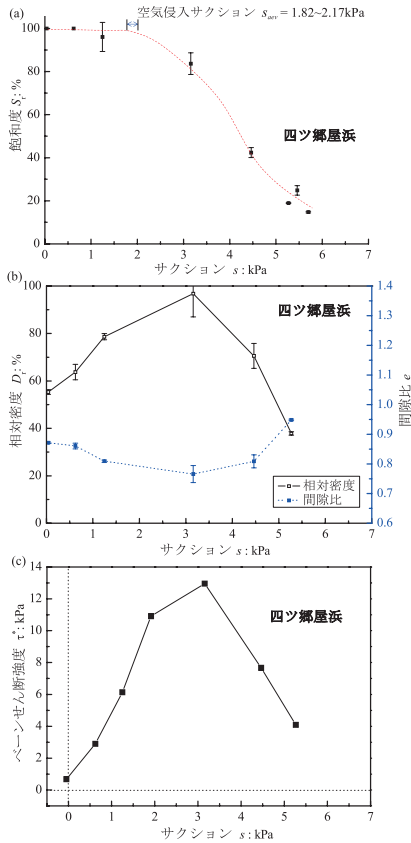


図-3 四ツ郷屋浜の生物住環境特性：(a) 飽和度 (b) 相対密度 (c) ペーンせん断強度とサクシヨンの関係 (工: $\pm$ SE)

以下では、このような砂浜潮間帯における生物住環境の多様性とその発現メカニズムについて述べた後に、小型甲殻類の生息分布を支配する要因について記述・考察する。

(1) 砂浜生物住環境の多様性とその発現メカニズム

a) 四ツ郷屋浜

前浜勾配が緩やかで粒径が細かく3海浜の中でDissipative型に分類される四ツ郷屋浜のサクシヨンと飽和度・相対密度・ペーンせん断強度の関係を図-3に示す。まず、同図 (a) から、式 (2) に基づく空気進入サクシヨン値 s_{ae} 以下の実質飽和域において実測飽和度 $S_r \approx 100\%$ となっており互いに整合していることがわかる。そして、同 s_{ae} 値を超えるサクシヨンの上昇とともに飽和度は次第に低下し、サクシヨン 6 kPa において $S_r \approx 10\%$ の実質乾燥状態に至っている。同図 (b), (c) は、このような土中水分の保持状態と土砂の間隙・硬軟状態が相互に密接に関わっていることを示している。すなわち、実質飽和状態では、サクシヨンの上昇とともに間隙比は減少し、対応する相対密度も $D_r > 90\%$ と極めて密に締った状態が現れるとともに、ペーンせん断強度 τ_v もサクシヨンゼロの際の実に15倍に達していた。一方、不飽和域ではサクシヨン

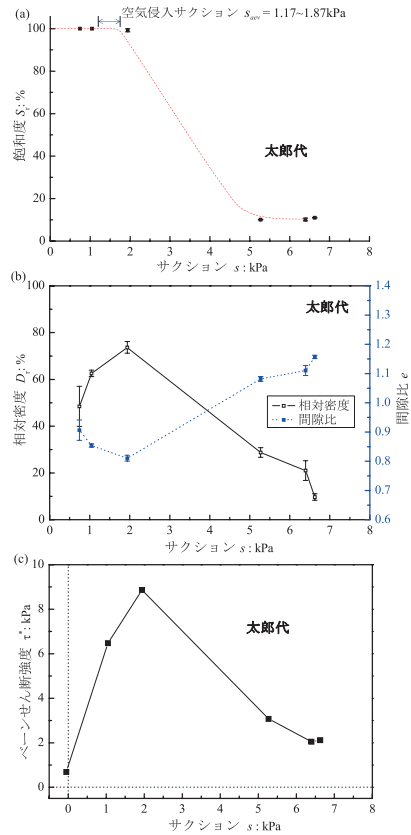


図-4 太郎代の生物住環境特性：(a) 飽和度 (b) 相対密度 (c) ペーンせん断強度とサクシヨンの関係 (工: $\pm$ SE)

の更なる上昇とともに相対密度 D_r ならびにペーンせん断強度 τ_v が顕著に低下していることがわかる。

b) 太郎代

前浜勾配や粒径が3海浜の中間に位置する太郎代の調査・分析結果を図-4に示す。まず、空気進入サクシヨン値の予測範囲と実測飽和域が良好に一致していることがわかる。また、上述の四ツ郷屋浜と比べて、 s_{ae} 値が低下したことにより実質飽和域が狭まったものの、 s_{ae} 値を基準とした飽和度・間隙・硬軟の顕著な変化特性が共通して発現していることがみてとれる。

c) 太夫浜

前浜勾配が急で粒径が粗く3海浜の中でReflective型に分類される太夫浜の調査・分析結果を図-5に示す。 s_{ae} 値は著しく低下した一方、同予測値の妥当性が裏付けられる。これにより大きく狭まった実質飽和域 ($s \leq s_{ae}$) においても、サクシヨン s の発達とともに、相対密度 D_r およびペーンせん断強度 τ_v は顕著に増加し、不飽和域 ($s > s_{ae}$) では D_r と τ_v の両者とも実質乾燥状態に至るまで低下し、結果としてサクシヨンによる緩密と硬軟の変化が15～20倍のスケールに及んでいることがわかる。

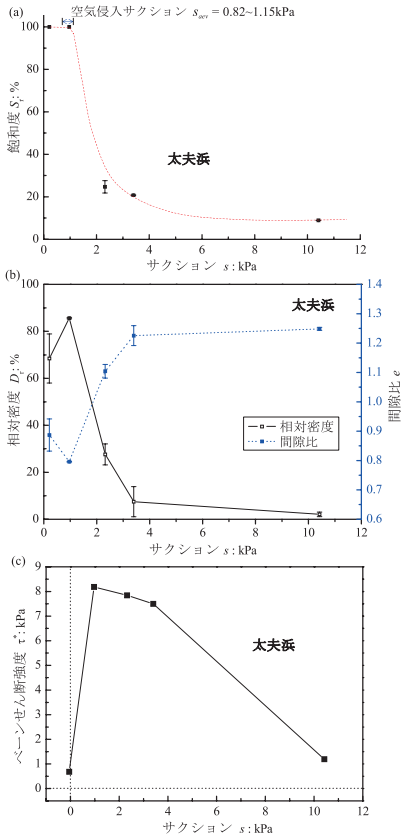


図-5 太夫浜の生物住環境特性：(a) 飽和度 (b) 相対密度 (c) ペーンセン断強度とサクシジョンの関係 (工: $\pm$ SE)

d) 砂浜生物住環境の一般化

本節では、多様な砂浜生物住環境の特性について一般化する。このために、上述の3海浜において共通して発現した住環境の変化特性を図-6に示している。

Sassa and Watabe (2007) は、実質飽和状態 ($s \leq s_{aev}$) で干出・冠水を繰り返す干潟土砂においては、サクシジョン動態の厳しさに応じて顕著な繰り返し弾塑性収縮が生じて間隙・硬軟構造に忠実に反映されることを明らかにしている。当該効果は不飽和 ($s > s_{aev}$) になるにつれて次第に弱まり乾燥状態では締め固まり効果はゼロになることから、上述のような砂浜潮間帯の多様な土砂物理環

境の発現は、サクシジョン動態の帰結として統一的に説明することが出来る。

換言すれば、砂浜潮間帯はその一部に干潟環境を内包する極めて変化に富む生物住環境特性を有しているといえる。

(2) 小型甲殻類の生息分布を支配する要因

各砂浜の優占3種の小型甲殻類の生息密度 (平均値 $\pm$ 標準誤差) とサクシジョンの関係を図-7に示す。まず、ナミノリソコエビについては、サクシジョン s が 2kPa を上回る領域では、いずれの海浜においても生息密度がゼロとなっている。一方、当該サクシジョン以下の領域をみると、全ての海浜を通じて、サクシジョン $s = 1 \sim 2$ kPa の範囲で生息密度が立ち上がり始め、サクシジョンが 1kPa を下回ると急激に生息密度が上昇している。そして、全海浜を通じて、生息密度のピークが、サクシジョン $s = 0.3 \sim 0.5$ kPa のきわめて狭い範囲に集中していることがわかる。また、ヒメスナホリムシについては、全海浜を通じて、 $s > 5$ kPa において生息密度がゼロであり、サクシジョン $s = 4 \sim 5$ kPa の範囲で生息密度が立ち上がり始めるとともに、生息密度のピークが $s \approx 2$ kPa に集中していることがわかる。この際、個体密度が低い太夫浜では有意なピークが現れていないことも確認することができる。また、ヒゲナガハマトビムシについては、 $s > 10$ kPa において生息密度がゼロとなっており、 $s \approx 5$ kPa においてピーク密度が現れていることがわかる。

以上の結果は、3海浜を通じた優占3種の小型甲殻類について、生息密度がゼロの生息限界域 (CR)，ならびに、生息密度の有意なピークが現れる最適域 (OP) が、生物ごとに特有のサクシジョン場において現れ、かつ、その値が砂浜に依らず一致することを明確に示している。

本結果は、生物住活動の最適・限界条件をサクシジョンが支配していること (佐々・渡部, 2006; Sassa・Watabe, 2008)，ならびに、上述の小型甲殻類を用いた生態地盤実験の結果ともよく整合するものである。すなわち、梶原・高田 (2008) は、ナミノリソコエビと四ツ郷屋浜の土砂を用いた一連の生物応答実験を実施し、地下水位が -100mm よりも深くなると潜砂活動が不可能となることを報告している。当該地下水位で土砂は実質飽和状態に

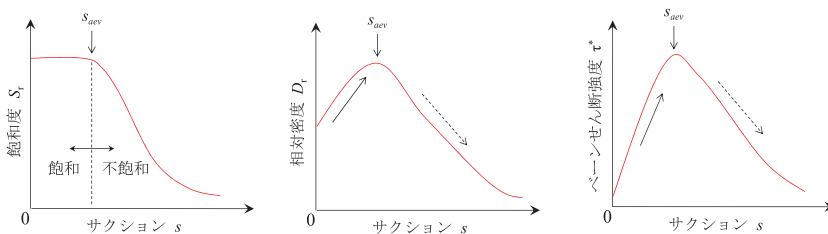


図-6 空気侵入サクシジョンを基準としたサクシジョンによる砂浜生物住環境の変化特性

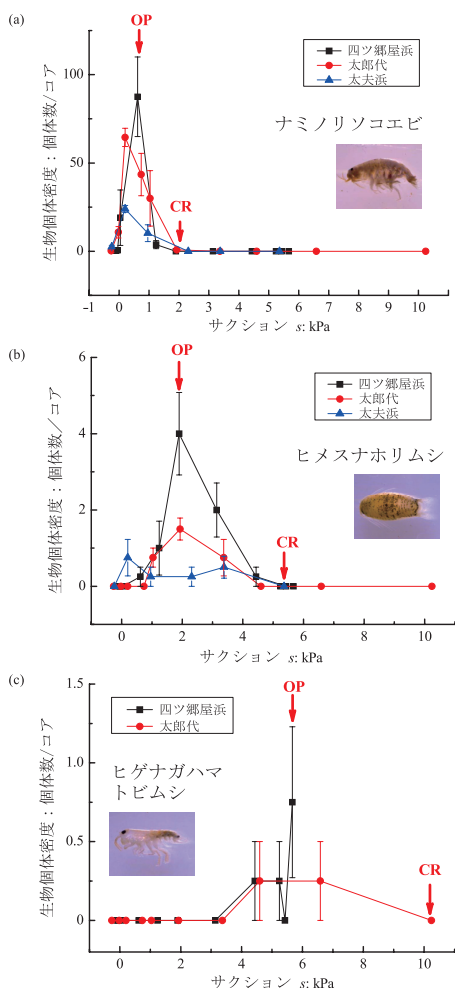


図-7 3 海浜の優先3種の小型甲殻類の生息密度分布とサクションの関係 (工: ± SE)

あり、地下水位とサクションの1対1の線形関係が成り立つ (佐々ら, 2007) ことから、当該実験結果は、サクションが1kPaを上回ると生息密度が急低下する上述の現地観測事実とよく整合している。

4. まとめ

本研究では、生態/土砂物理の関わりに着目して筆者らが開拓・推進している生態地盤学を新潟県の3つの海浜に展開し、現地土砂環境/底生生物分布の一体調査と一連の室内試験および分析を行った。その結果、砂浜の種類やタイプに依らず、空気進入サクション値を基準としたサクションが砂浜潮間帯の飽和・不飽和、緩密、硬さ軟らかさ等の多様な生物住環境の発現を支配していること、そして、全海浜を通じた優占3種の小型甲殻類の生息限界域と高密度域の分布が、多様な生物住環境と

もに生物住活動の最適・限界条件を支配するサクションによって統一的に規定できることを初めて明らかにした。

本研究で得られた知見は、従来の隘路を突破しており、砂浜海岸における水産資源の保全・管理に今後有効に資することが期待できる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（基盤研究B，代表佐々，課題番号20360216）の助成を受けた。

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・高田宜武 (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.
- 佐々真志・渡部要一 (2005)：砂質干潟の土砂環境におけるサクショ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 (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 (2007)：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・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・梁 順普 (2009a)：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，土木学会論文集，B2-65，No.1，pp. 1116-1120.
- 佐々真志・梁 順普 (2009b)：多種多様な干潟底生生物の住活動性能と適合・境界場の相互関係，土木学会論文集，B2-65，No.1，pp. 1226-1230.
- 首藤宏幸 (2002)：宮古湾岸の木浜に放流したホシガレイ種苗の摂餌生態，日本栽培漁業協会，p. 49.
- Brown, A. C. and A. McLachlan (1990): Ecology of Sandy Shores. Amsterdam: Elsevier, 328 p.
- Defeo, O. and A. McLachlan (2005): Patterns, processes and regulatory mechanisms in sandy beach macrofauna: a multi-scale analysis. Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol. 295, pp. 1-20.
- James, R. J. and P. G. Fairweather (1996): Spatial variation of intertidal macrofauna on a sandy ocean beach in Australia. Estuar. Coast. Shelf Sci., Vol. 43, pp. 81-107.
- Sassa, S. and Y. Watabe (2007): Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model. J. Geophys. Res., Vol. 112, F01003.
- Sassa, S. and Y. Watabe (2008): Threshold, optimum and critical geoenvironmental conditions for burrowing activity of sand bubbler crab, *Scopimera globosa*. Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol. 354, pp. 191-199.
- Sassa, S. and Y. Watabe (2009): Persistent sand bars explained by geodynamic effects. Geophys. Res. Lett., Vol. 36, L01404.
- Takahashi, K., Hirose, T. and K. Kawaguchi (1999): The importance of intertidal sand-burrowing peracarid crustaceans as prey for fish in the surf-zone of a sandy beach in Otsuchi Bay, northeastern Japan. Fisheries Science, Vol. 65, pp. 856-864.