

岸沖・沿岸両方向に発達した干潟多段バー・トラフの 堆積構造とその形成要因

Sedimentary Structures and Their Formation in an Intertidal Flat with Multi-bar-trough
Developed in Both Cross-shore and Along-shore Directions

渡部要一¹・佐々真志²・河野健二³

Yoichi WATABE, Shinji SASSA and Kenji KAWANO

In an area of Buzen Sea intertidal flat, multi-bar-trough structure is developed in both cross-shore direction with a long interval and along-shore direction with a short interval. We carried out geophysical investigation and geotechnical soil tests along the multi-bar-trough structure, and clarified that the softness and the density are closely related to the ground surface profile and water/groundwater level during a period of exposure. Relatively denser and stiffer sedimentary structures at bar regions are consistent with our explanation on the formation mechanism; i.e. denser and stiffer structures are explained as a consequence of accumulated contraction caused by effective stress associated with suction corresponding to a low groundwater level at 0.2 to 0.3 m deep from the ground surface during the period of exposure.

1. はじめに

干潟生態系の維持・再生は、河口・沿岸域の環境保全において重要な要素である。底生生物を育む母体は地盤環境であるが、従来の研究では、生物の多様性や水質・水理環境に研究主眼が置かれてきた。著者らは環境地盤学を駆使した新しい視点からのアプローチにより、干潟微地形形成における土砂環境場の役割を精密に捉えた(佐々・渡部, 2005; 渡部・佐々, 2006; Sassa・Watabe, 2007)。すなわち、干潟堆積土砂の硬軟の構造は、水理学的要因によって形成されたバー・トラフのうち、バーのみが潮汐と連動した地下水位変動すなわちサクシオン動態を受け、これに起因する有効応力変化に対応して土骨格の圧縮・硬化が蓄積して形成されることを解明した。ここで、サクシオン s は、間隙水圧を u_w 、周囲の空気圧を u_a とすると $s = u_a - u_w$ で定義される。

このサクシオン動態に支配される土砂物理環境は、底生生物の住活動とも密接に関連していることが明らかになっている(佐々・渡部, 2006a, 2006b, 2007)。豊かな生物相を育む干潟土砂環境場を保全あるいは創造していく上で、地下水位変動に連動したサクシオン動態とこれに密接に関連した土砂物理環境を鍵として、干潟土砂環境が有すべき性能を定量的に提示することが著者らの一連の研究における大きな目標である。

この論文では、干潟微地形形成要因としての土砂環境動態の役割を実際の干潟において精密に捉えることを目

的として、類似土砂物性でありながら水理条件により岸沖・沿岸両方向に異なる凹凸レベルに発達したバー・トラフを有する豊前海干潟において、a) 各方向の堆積構

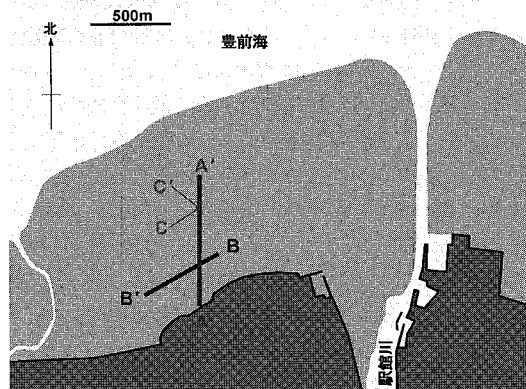


図-1 豊前海干潟と調査測線



図-2 沿岸方向の多段バー・トラフと表面波探査実施状況

1 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
2 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
3 国土交通省 九州地方整備局

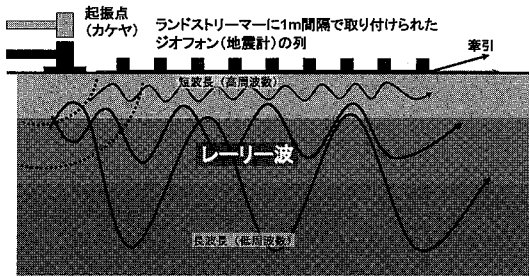


図-3 表面波探査の概念図

造を表面波探査によって捉え、b) 凹凸レベルと干潮時地下水位との関連から堆積構造の形成要因について説明することを試みた。

2. 調査対象とした砂質干潟

大分県宇佐市の海岸に広がる豊前海干潟のうち、駅館川左岸側に広がる地区を調査対象とした（図-1）。潮流や季節風の影響により、岸沖・沿岸両方向にバー・トラフが発達していることが特徴的な砂質干潟である。砂質干潟ではあるが、やや沖の方には、数センチサイズの玉石が多く見られる箇所が散見される。調査は夏の大潮時（2006年8月9～11日）に実施した。調査期間中の干潮・満潮の潮位差は約3.5mあり、干潮時の潮位はL.

W.L.+ 約0.1mであった。

3. 表面波探査による堆積構造の評価

図-1に示したA, B, C測線において、物理探査手法の一つである表面波探査を実施した。岸沖方向に発達した多段バー・トラフを含む方向がA測線、沿岸方向の多段バー・トラフを含む方向がB測線、A測線に含まれる一組のバーとトラフに着目して詳細な調査を実施したのがC測線である。B測線での表面波探査実施状況を図-2に示す。

図-3の概念図に示すように、24個のジオフォン（高精度地震計）を1m間隔に取り付けたランドストリーマーを測線に沿って牽引し、所定距離（A測線で4m, B測線で2m, C測線で1m）移動する毎に後方の地盤表面をカケヤ（巨大な木槌）で鉛直に叩いて多様な周波数の表面波（レーリー波）を発生させ、ジオフォンで伝播波形を記録し、逆解析によってせん断波速度構造を推定した（Hayashi・Suzuki, 2004）。

表面波探査が多様な干潟地盤の堆積構造の把握に有用であることは、渡部・佐々（2006）に示した通りである。すなわち、表面波の伝播速度は、地盤が緩く軟らかいほど遅く、地盤の硬軟や層構成に対応した特徴的な伝播波形が得られ、これを分析することにより精度の高いせん

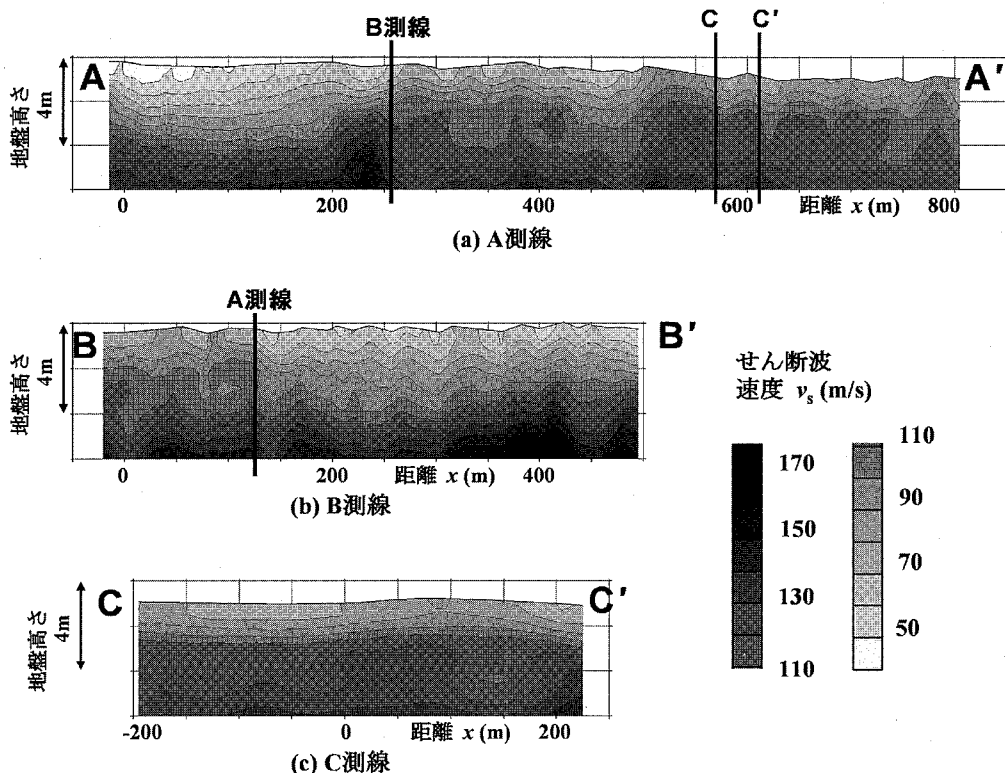


図-4 せん断波速度分布として把握した干潟土砂の堆積構造

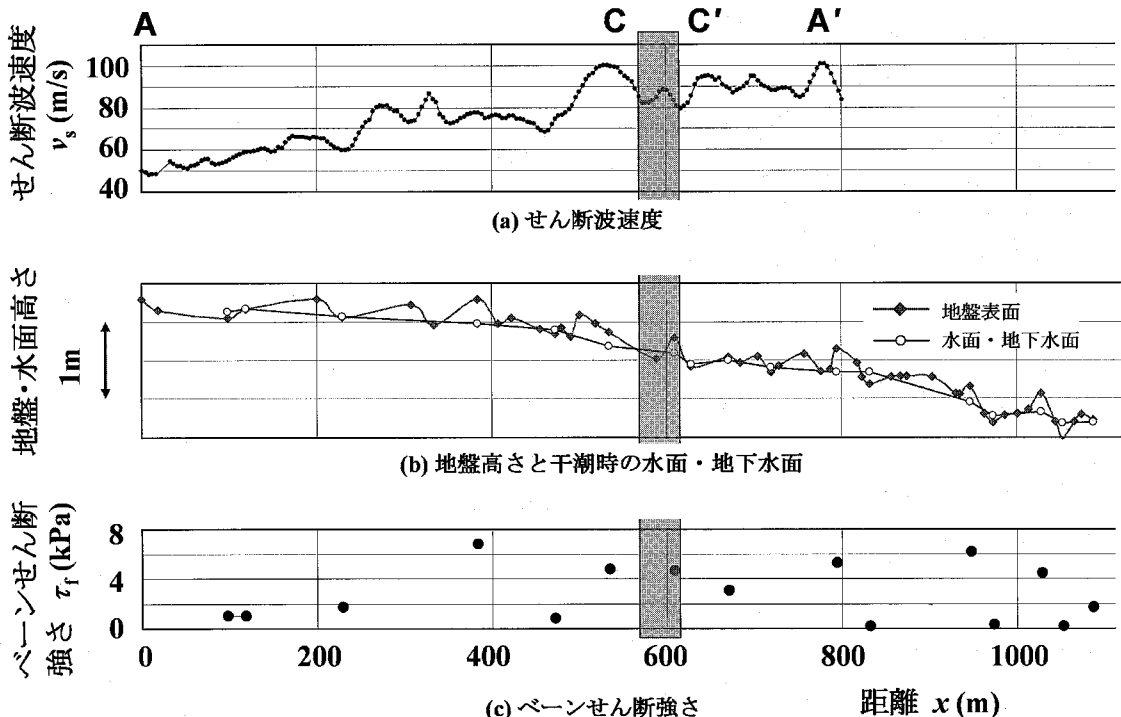


図-5 A 測線の (a) 表層のせん断波速度, (b) 地表面形状と干潮時の水面・地下水面, (c) 最表層のペーセンせん断強さ

断波速度構造を得ることができる。

各測線に沿って実施した表面波探査により得られたせん断波速度構造を図-4に示す。図中の地盤高さは、各測線に沿って実施したレベル測量の結果に基づいて、地盤表面の形状を反映したかたちで示してある。せん断剛性 G_0 はせん断波速度 v_s の二乗に比例する、すなわち、単位体積重量 ρ_t を用いて $G_0 = \rho_t \times v_s^2$ と表されるので、せん断波速度構造は本質的に地盤の硬軟を表す。A 測線において地盤表面が岸沖方向に低くなっていく様子、各測線においてバー・トラフに対応した硬軟の構造が発達している様子を読み取ることができ、C 測線ではその一部分を詳細に捉えている。A 測線の岸沖方向に比べ B 測線の沿岸方向のバー・トラフ構造の方が細かいピッチで現れている。また、A 測線では、他地区の砂質干潟における測定例 (渡部・佐々, 2006) と同様に、岸側の地盤が非常に軟らかく沖側に向かって硬くなる傾向にある。

各地点の地盤表面から深度 2 m までのせん断波速度の平均を求め、各測線に沿った地表面付近のせん断波速度 v_s の分布として図-5 (a), 6 (a), 7 (a) に示す。A 測線の岸側の距離 $x=0 \sim 220$ m では $v_s=50 \sim 65$ m/s と軟らかいが、 $x=250 \sim 450$ m では $v_s=70 \sim 80$ m/s、さらに沖側では $v_s=80 \sim 100$ m/s と次第に硬くなっている。バーはトラフよりせん断波速度が 10 ～ 15 m/s 速い。B 測線は $x=-20 \sim 100$ m では $v_s=80 \sim 90$ m/s

とやや硬いが、 $x=150 \sim 500$ m では $v_s=60 \sim 70$ m/s 程度とやや軟らかい。これは、土質の変化に対応した分布であると考えられる。バーはトラフよりせん断波速度が 5 ～ 10 m/s 速い。

C 測線は A 測線の $x=600$ m 前後の一对のバーとトラフについて着目した詳細な分布を示しており、着目するバーにおいて最大のせん断波速度が 102 m/s であるのに対して、着目するトラフにおいて最小のせん断波速度が 94 m/s であり、8 m/s ほどの差がある。バーにおけるせん断波速度の分布は $x=12$ m 付近をピークとする山形を呈するのに対し、トラフにおけるせん断波速度の分布は $x=-17 \sim -6$ m においてほぼ一定値を呈していることが特徴である。トラフの水没している部分では、土中にサクションが発達しないため有効応力の変化がなく土骨格の圧縮・硬化の蓄積がないこと、ならびに、バーの干出する部分では、サクションによる有効応力を生み出す地下水位 (地盤表面と地下水面との差) が一定ではなく分布があることを示唆するデータである。このことについては、次章において詳しく考察する。

4. 地形・地下水位と堆積構造

図-5 (b), 6 (b), 7 (b) には、レベル測量により得た地表面形状、および干潮時に測定した水面 (トラフ部) と地下水面 (バー部) (B 測線を除く) も合わせて

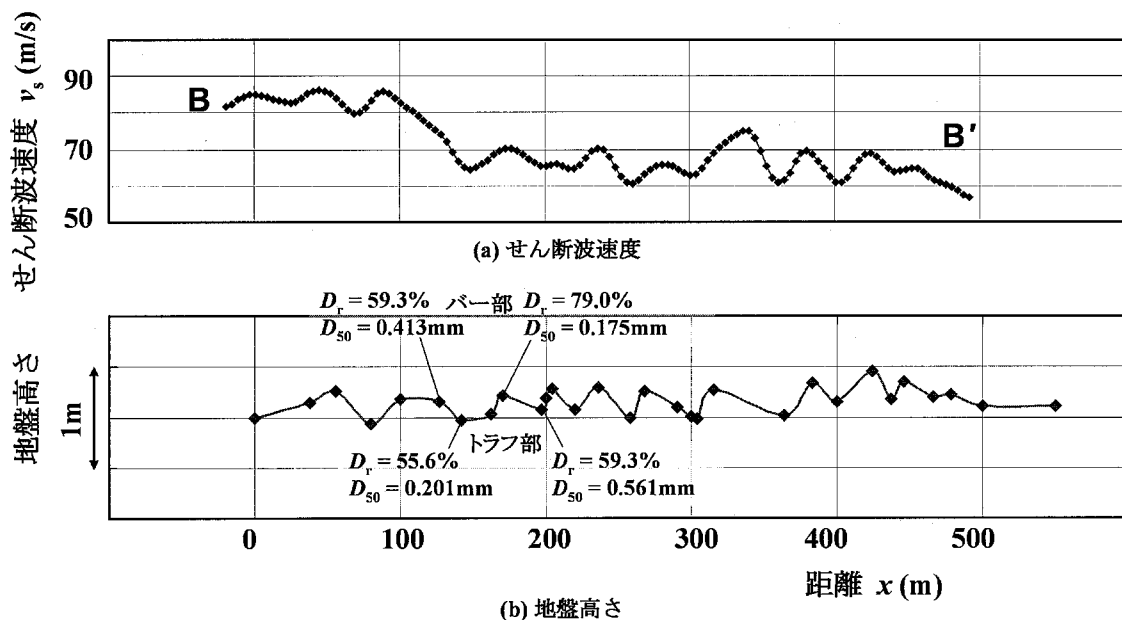


図-6 B 測線の (a) 表層のせん断波速度, (b) 地表面形状

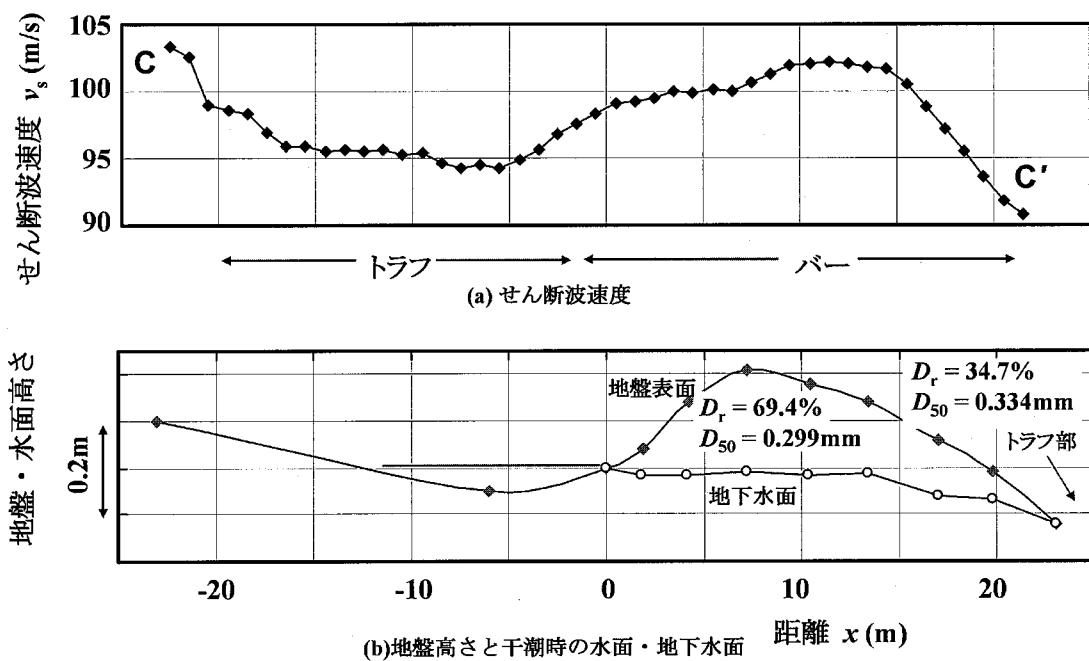


図-7 C 測線の (a) 表層のせん断波速度, (b) 地表面形状と干潮時の水面・地下水面

示した。また、B測線およびC測線において特に着目したバーとトラフでは、内径 100 mm、肉厚 1.5 mm、長さ 500 mm のステンレス製円筒サンプラーにより深さ 0 ~ 200 mm の試料を採取し、平均化した試料に対して物理試験を実施し、平均粒径 D_{50} や相対密度 D_r を得た。 D_r は最大間隙比 $e_{\max}$ と最小間隙比 $e_{\min}$ に対する間隙比

e の相対的な位置により表した土砂の緩密状態に関する指標であり、 $D_r = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$ で定義される。結果は図-6 (b)、7 (b) に記載した。

A 測線の岸沖方向多段バー・トラフは、B 測線の沿岸方向多段バー・トラフに比べて顕著な凹凸が長周期で発達している。当該地区では波向き、周期、波高、地形の

影響が絡み合って複雑な地形が形成されたものと推察される。地下水面は地表面形状のトレンドに沿って変化し、バーで地表面から0.2～0.3 mほど下に位置し、これに起因する2～3 kPaのサクシオンが圧縮・硬化の蓄積に寄与するとして説明できる(佐々・渡部, 2005; 渡部・佐々, 2006)。

場所により平均粒径 D_{50} に著しいばらつきが見られるが、B測線の $x=140$ mと170 mのトラフとバー、C測線の $x=10$ mと25 mのバーとトラフに着目すれば、隣り合うバーとトラフで平均粒径に有意な差は見られない。千葉県木更津市の盤洲干潟での既往の調査結果(渡部・佐々, 2006)とも整合して、分級はほとんど起きていないと推察される。一方、間隙構造の指標となる相対密度 D_r は、バーにおいてトラフよりも高い値になっており、干出するバーにおける圧縮・硬化の蓄積傾向と整合した調査結果が得られた。

詳細な調査を実施したC測線では、せん断波速度が最大となる地点は、バーの頂部に一致せず、ややずれていた。これは当該バーでは粒径がやや大きく、2 kPa程度のサクシオンでも空気侵入値を超えて不飽和になり、地下水位に対して線形関係に連動した値よりもサクシオンが小さくなってしまったため、必ずしも頂部で有効応力が最大になっていなかったことを示唆する結果である。

佐々・渡部(2006b)は、海岸の砂質土砂の空気侵入サクシオン s_{aev} が、土砂の有効径 D_{10} 、間隙比 e 、水の単位体積重量 γ_w を用いて $s_{aev} = \Psi \gamma_w / (e D_{10})$ により表されることを示した。ここで、 Ψ は定数($=20 \text{ mm}^2$)である。C測線のバー($D_r=69.4\%$)においては、間隙比 e が0.900、有効径 D_{10} が0.17 mmであったので、空気侵入サクシオンに相当する水頭($h_{aev} = -s_{aev} / \gamma_w$)は-131 mmとなる。図-7において、バーの頂部付近において地下水位は地盤表面から約-220 mmにあり、空気侵入により水分が下方に移動してサクシオンすなわち有効応力がやや低下したことが推察される。実際、せん断波速度が最大となるのはバーの頂部よりもやや下がった地点であり、地下水位が-150 mm程度で、飽和状態が保たれた上でサクシオン動態による高密度化が起きていると推察される箇所と相当する。

同様の視点から、バーがトラフよりも200～250 mmほど高いB測線に着目すると、興味深い傾向が見て取れる。すなわち、 $x=110$ m付近のバー($D_r=59.3\%$)において $e=0.913$ 、 $D_{10}=0.13$ mmであったので h_{aev} は-169 mm、 $x=170$ m付近のバー($D_r=79.0\%$)において $e=0.877$ 、 $D_{10}=0.10$ mmであったので h_{aev} は-228 mmであり、地下水位が h_{aev} より深い前者では地形の頂部とせん断波速度のピークを示す地点がずれているものの、地下水位が h_{aev} より浅い後者では一致して

おり、上述の議論と良く整合する。

A測線については、幅20 mm、高さ40 mmのバーによって土砂の最表層で計測したせん断強さ τ_f の分布も合わせて示してある(図-5(c))。せん断強さはトラフにおいて2 kPa以下、バーにおいて5～7 kPaであり、表面波探査では捉えることができないごく表層のせん断強さには、サクシオンに伴う有効応力の発達による強度増加がより顕著に表れている。

5. ま と め

調査対象とした豊前海干潟では、岸沖方向に大規模・長周期で、沿岸方向に小規模・短周期で、岸沖・沿岸両方向に干潟多段バー・トラフが発達している。地表面の凹凸、水位・地下水位、地盤の硬軟は密接な関係にあり、バーでは地盤表面から0.2～0.3 mほど低い地下水位に対応したサクシオンに起因する有効応力により圧縮・硬化したと説明できる。水理条件等により岸沖・沿岸両方向に発達した多段バー・トラフ構造について環境地盤学からの調査をした結果は、著者らが一連の研究成果として主張する堆積構造形成要因と整合するかたちで説明できた。特に一組のバーとトラフに着目した詳細な調査結果は、これと見事に整合するものとなった。

なお、本研究は科学研究費補助金(基盤研究(B)課題番号18360232; 若手研究(B)課題番号17760397)を受けて実施したことを付記する。

参 考 文 献

- 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, 第52巻, 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, 第53巻, 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, 第45巻, 第4号, pp. 61-107.
- 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, 第54巻. (投稿中)
- 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, 第53巻, pp. 1236-1240.
- Hayashi, K. and H. Suzuki (2004): CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, Exploration Geophysics, Vol. 35, pp. 7-13.
- 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:10.1029/2006JF000575.