

潮間帯干潟の土砂動態と底質環境調査への 地上型 3 次元スキャナーと X 線 CT の適用

Applications of 3D Laser and X-ray CT Scanners to Geo-Environmental
Properties on Intertidal Mudflat

山田文彦¹・柴田康晴²・原田翔太³・外村隆臣⁴・玉置昭夫⁵・尾原祐三⁶

Fumihiko YAMADA, Yasuharu SHIBATA, Shota HARADA, Takaomi HOKAMURA
Akio TAMAKI, and Yuzo OBARA

Three-dimensional Laser and X-ray Computed Tomography (CT) Scanners have been applied to investigate a time-space evolutions of wave-generated ripple geometry and vertical sediment structures of intertidal mudflat with non-destructive conditions at Shirakawa River mouth. Field observations were conducted in two places where there are many *Ruditapes philippinarum* (clam-dominant area) or not (calm non-dominant area). Time-space evolutions of wave-generated ripple geometry at non-dominant area were found to be larger than those of clam-dominant area. Reconstructing three-dimensional images using CT value, retention water in the intertidal sediment at clam-dominant area existed up to 6cm below the sediment surface during dry cycle of tide motions.

1. はじめに

干潟生態系の維持・修復・創造は、河口・沿岸域の環境保全・再生を実現する上で重要不可欠な課題である(佐々・渡部, 2006)。例えば、有明海東岸の河口付近に発達する広大な砂泥質干潟では、アサリ漁獲量の長期的な低落現象が起こっている。熊本県におけるアサリの漁獲量は 1970 年代には約 6.5 万トンと日本一の漁獲量を誇っていたが、1980 年代に入ってから減少が著しく、現在は千トン程度まで減少している。一方、同じ二枚貝のシオフキガイは、個体群サイズを増大させており、この対照的な個体群消長の原因は未解明である。この要因のひとつとして、地形変動に対する二枚貝の種ごとの応答性が異なることが指摘されているが、潮間帯での地形変動の実態は現状では十分に把握されていない。

本研究の対象地である熊本県白川河口干潟での現地調査によると、アサリ稚貝はおおむね干潟全域に生息しているにも係らず、成貝はその生息域が低潮間帯に限定されている(玉置ら, 2007)。そのため、アサリ減少の要因を考える場合、稚貝の成長時期に応じた考え方が必要である。まず着底期の稚貝に対しては、櫻井・瀬戸(1999)は波浪による稚貝の移動・分散を指摘している。これは、干潟面上に砂漣等の微地形が存在する場合によ

り顕著であり、底面付近に発達した渦流や乱流境界層が、砂よりも沈降速度が小さい稚貝の定着を阻害するものである(例えば、Barros ら, 2004; 水産工学研究所, 2005)。つまり干潟表面の形状と流動との相互作用の理解が重要となるが、これまで室内実験では数多く検証されているものの、実際の干潟上では砂漣等の微地形の時空間変動を把握することが困難であり、研究例は非常に少ない。

次に着底後の稚貝に対しては、高波浪による侵食時にアサリの潜砂行動(底質内部に潜る行動で、底質の侵食速度よりも速く潜ることができれば安全である)を助長するような底質内部での空隙や間隙水の鉛直構造の把握が重要である。佐々・渡部(2006)および Sassa・Watanabe(2007)は干潟を生態系の住環境として捉え、土砂環境場の観点から特に干潟の保水機能の重要性を指摘している。しかし、実際の干潟上での土砂環境場の情報は十分には把握されていないのが現状である。

本研究は、短期的・中期的な外力変動に対する二枚貝個体群の環境基盤である干潟地形の応答について検討し、地形変動場のなかでの二枚貝資源の保全と持続的利用の方策の提言を最終的に目指すものである。そこで今回は特に、二枚貝の幼生着底から成長に伴う生息分布の変遷や生残過程に及ぼす土砂動態の影響を明らかにするために、稚貝と同様の挙動を示すと考えられる干潟上の底質を対象として、アサリの多い領域(優占域)と少ない領域(非優占域)を選定し、2つの領域における潮間帯干潟上の微地形(砂漣)の時空間変動特性を 3 次元スキャナーで計測するとともに、底質内部の保水機能や密度分布などの鉛直構造を X 線 CT 装置により計測し、比較検討を行った。

1 正 会 員 博(工) 熊本大学准教授 大学院自然科学研究科
2 学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科
3 学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科
4 正 会 員 熊本大学 工学部 技術部
5 非 会 員 理博 長崎大学教授 水産学部
6 正 会 員 工博 熊本大学教授 大学院 自然科学研究科

2. 現地観測の概要

観測は図-1に示す有明海中央部に位置する熊本県白川河口域に広がる潮間帯干潟上で実施した。観測場所の詳細はYamada・Kobayashi (2004)に詳しいが、対象海域の大潮平均潮位差は約3.8m、平均有義波高は20cm以下である。玉置ら(2007)の干潟生物量調査結果に基づき、アサリの多い領域(優占域)と少ない領域(非優占域)を区分けした。優占域内の観測場所は堤防から1520m、非優占域内の観測場所は堤防から1040mを中心として実施した。

地上型3次元スキャナー(Cyrax 2500)を用いて、アサリ優占域(低潮帯)と非優占域(中潮帯)で干潟微地形(砂漣)の時空間変動を計測し、地形の安定性と稚貝の生残率との関係を調べた。観測時期は高波浪が発生しやすい冬期(2006年11月5, 6日、12月4, 5日、2007年2月3, 4日)に行った。観測方法は図-2に示すように、砂漣の峰線に対して垂直方向からレーザ光を当てると砂漣の峰の裏側のデータが不足するので、砂漣の峰線に対して平行な方向から計測を行った。また、流動場については、水圧式波高計・電磁流速計・濁度計を用いて観測

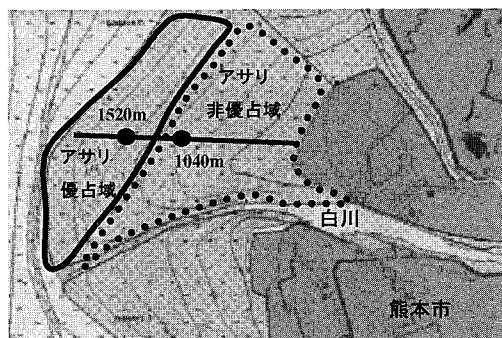


図-1 観測場所(アサリの優占・非優占域)

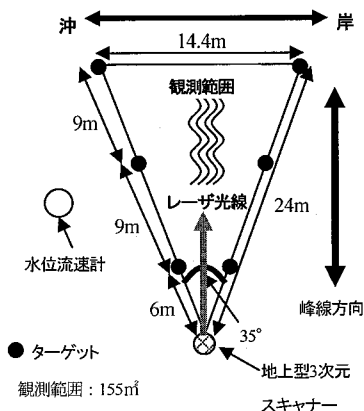
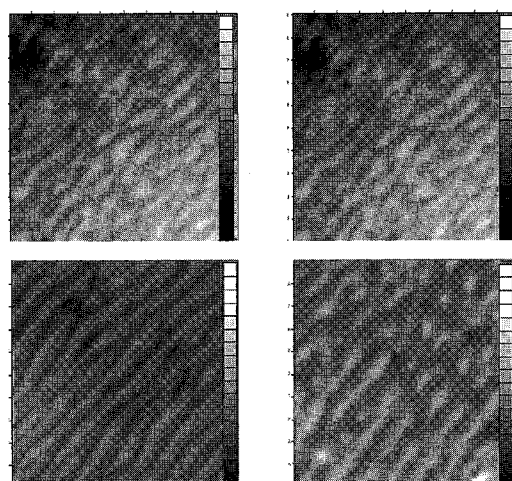


図-2 地上型3次元スキャナーの測定範囲

を行い、各機器はレーザ計測場所から5m程度離して設置した。

3. 観測結果

図-3は2006年12月4日～5日に地上型3次元スキャナーで観測した干潟微地形を濃淡画像で表現した図である。各観測日において、上段が優占域、下段が非優占域を表し、濃淡は黒色の標高が低く、白色は高いことを示す。図より、微地形の空間変化に顕著な変化が見られるのは非優占域であることが定性的に確認できる。4日から5日にかけて風が強まり波浪が発達したため、流速の波浪成分が30cm/sを越えたことが原因と考えられる。



a)2006年12月4日 b)2006年12月5日

図-3 12月の干潟微地形観測結果
(上段:優占域 下段:非優占域)

砂漣形状を定量的に検討するために、観測データにゼロアップクロス法を適用し、アサリ優占域と非優占域での砂漣の波長・波高を算出した。図-4、図-5は2006年12月4日～5日の観測結果を頻度分布で示したものであり、砂漣の時空間分布変動を比較したものである。アサリ非優占域の砂漣は優占域に比べて時空間変動が大きく、地形が不安定であることが確認できる。また、波高や流速も最大20%程度、アサリ非優占域の方が大きくなり、局所的な波浪・流動場の違いが確認された。なお、アサリ優占域の平均波長は約8cm、平均波高は6mm、非優占域の平均波長は約9cm、平均波高は9mmである。

4. X線CTを用いた干潟底質内部構造の可視化

熊本大学GeoXセンター所有のX線CT装置(TOSCANNER-23200)を用いてアサリ優占域と非優占域での干潟底質のコアサンプル(内径10cm)を非破壊状態で

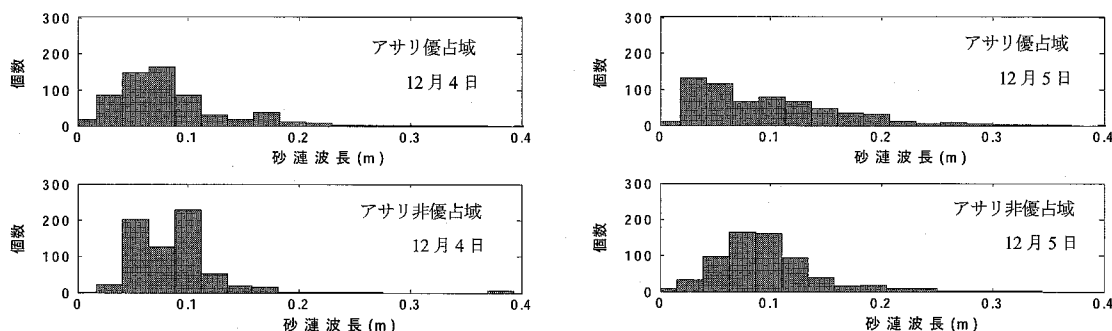


図-4 砂漣波長の頻度分布の日変化比較図(2006年12月4日～5日；上段：アサリ優占域 下段：アサリ非優占域)

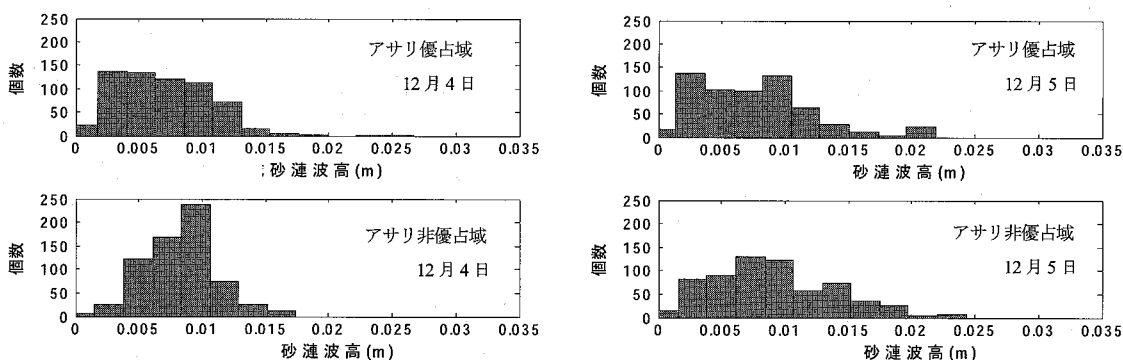


図-5 砂漣波高の頻度分布の日変化比較図(2006年12月4日～5日；上段：アサリ優占域 下段：アサリ非優占域)

底質内部の空隙や密度構造の相違などを調べた。X線CT装置の詳細はOtaniら(2000)に詳しい。現地でのコアサンプルに200 kv・3 mAの電力、照射厚1 mmのX線を照射し、解像度を2048×2048個の縦0.073 mm、横0.073 mm、高さ1 mmの直方体(ボクセル)に分割して、それぞれのボクセルに対してCT値を求めた。CT画像の撮影は、底質表層から8 cmまでを撮影幅の間隔1 mmで行った。なお、X線の吸収係数はサンプルの密度に比例するので、CT値も密度に比例することになる。つまりX線CT画像は被検体内部の密度空間分布を画像表示したものである。

CT値から白川河口干潟の現地底質に応じた湿潤密度を求めるために、現地土を用いたキャリブレーション試験を行った。詳細は後で述べる。

X線CT撮影により、被検体内部の密度が式(1)で示すCT値として表現される。

$$\text{CT値} = K \times \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 μ_t は求める点の吸収係数、 μ_w は水の吸収係数、 K は比例定数($K=1000$)である。(1)式は水のCT値が0に設定されており、空気は吸収係数が0であるので、空気のCT値は-1000となる。X線CT画像はCT値を256階調の濃淡画像で表示したものであり、

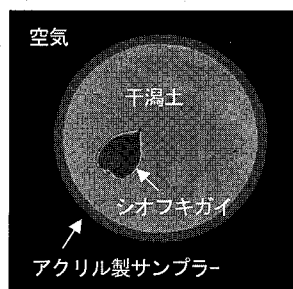


図-6 X線CT画像(アサリ非優占域)

CT値が高い領域(高密度領域)は白く、低い領域(低密度領域)は黒く表示される。今回撮影した非優占域のCT画像の一例を図-6に示す。アクリル製サンプラーの内径は10 cm、厚さ5 mmである。サンプラーの外側は空気であり、黒く(低密度)表示される。コアサンプル内には干潟土以外に、シオフキガイの成貝が確認できる。そこで、別途成貝のみを取り出してX線CT撮影を行った結果、成貝の貝殻はCT値で1200以上の値を示すことがわかった。

図-7は、アサリ優占域と非優占域のコアサンプルに対するX線CT撮影で得られたコア内の全CT値(底質表層から8 cmまでを1 mm間隔で撮影)の頻度分布をそれぞれ示したものである。両者の相違はCT値で0

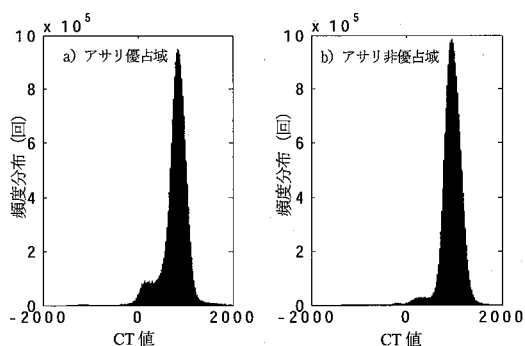


図-7 コア内の全CT値の頻度分布

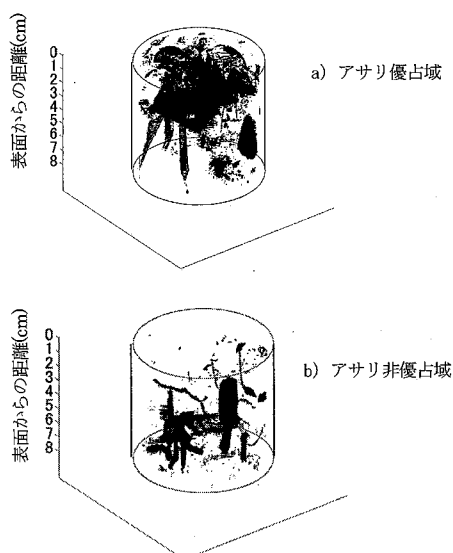


図-8 コア内の保水領域の空間分布

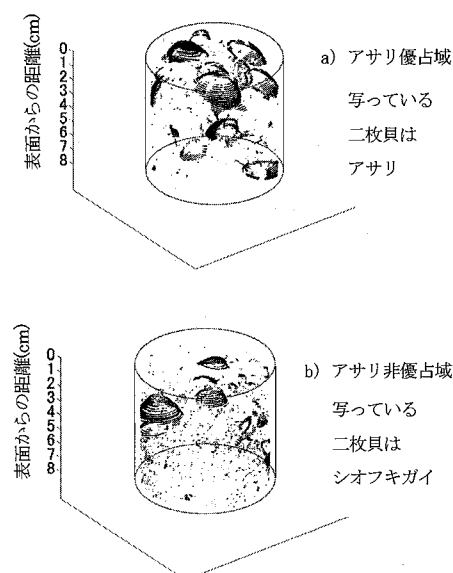


図-9 コア内の二枚貝（成貝）の存在範囲

～200の間で特に顕著であり、アサリ優占域は非優占域に比較して水分が多く保持されていることを示している。そこで、この保水領域が空間的にどのように分布しているかを調べるために、その範囲のCT値をしきい値として3次元画像を再構築し、両者を比較した(図-8)。その結果、アサリ優占域では干出時においても表層から6 cm 程度の間に保水領域が存在することが分かり、佐々・渡部(2006)の提示した干潟の保水機能が現地においても確認された。また、非優占域では表層付近での保水機能がほとんど見られないことや、図-9に示すように、アサリ優占域では干潟表層から6 cm 程度の深さまでにアサリが多く生息していることから、干潟の保水機能はアサリなどの底生生物の生息範囲と密接に関係している事が示唆された。

次に、CT値と湿潤密度との関係式について検討する。両者の関係式を算定するのに際して、海洋底質の場合は、算出した湿潤密度が負値になることを防ぐために、以下のような変数変換を行うのが通例である(Orsiら, 1994, Amosら, 1996)。

$$\text{CT数} = (1000 + \text{CT値}) / 1000 = 1 + \text{CT値} / 1000 \quad \dots\dots\dots (2)$$

本対象干潟の底質に関するCT数と湿潤密度の関係式を求めるために、次のようなキャリブレーション試験を行った。体積が一定(内径10 cm, 厚さ5 mm, 高さ3 cm)の亚克力製シャーレを20個作成し、アサリ優占域と非優占域において、干潟表層、表層から4 cm 下、表層から8 cm 下の3箇所まで容積一杯になるようにサンプリングを行い、各シャーレの湿潤重量を計測し、湿潤密度を求めた。また、各シャーレに対して鉛直方向に3断面でX線CT撮影を行い、合計54個のデータを取得し、最小自乗法を用いて両者の関係式(3)式を決定した(相関係数 $R=0.90$)。なお、CT数としては、撮影同一平面におけるサンプラー内の試料に対する全平均値を用いた。

$$\text{湿潤密度 (t/m}^3\text{)} = 1.21 \times \text{CT数} - 0.59 \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、X線CT撮影終了後のコア試料を用いて、ふるい分け試験を行い、アサリ優占域の保水領域では、貝殻の小片が多く存在し、これが底質と適度に混じることによって間隙を形成することが示唆された。この場所は元来、貝殻の死骸が多く、さらに低潮帯下部の覆砂域からも貝殻小片が流入しやすい場所である。そこで、(3)式を用いてアサリ優占域と非優占域の湿潤密度の鉛直分布を比較する際に、貝殻のCT値が1200以上(CT数で2.2以上)のデータを考慮するか否かで、貝殻の影響についても調べた(図-10)。a)図より、アサリ優占域は、全体的に湿潤密度が低く、特に、表面～6 cm までの間で顕著である。また、貝殻の影響もほぼ同じ範囲でアサリ優占域のみに表れている。そこで、貝殻の考慮の有無に

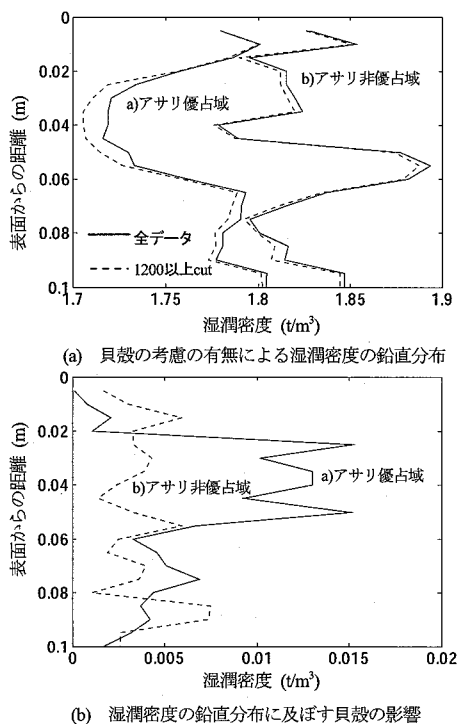


図-10 湿潤密度の鉛直分布の比較

より湿潤密度の差を取って鉛直方向に比較したものがb)図である。アサリ優占域では、表面2cm～6cmの範囲で最大0.015 t/m³程度の湿潤密度が低下しており、貝殻の小片が保水領域（間隙）の形成に寄与していることが確認できた。

5. 結 論

本研究では、アサリの多い領域（優占域）と少ない領域（非優占域）における潮間帯干潟上の微地形（砂漣）の安定性や底質の内部構造について比較検討を行った。結論を要約すると以下のとおりである。

- (1) アサリ優占域と非優占域において、地上型3次元スキャナーにより砂漣の時空間分布の計測を行った結果、アサリ非優占域の砂漣は優占域に比べて時空間変動が大きく、地形が不安定であることが示された。
- (2) アサリ優占域と非優占域のコアサンプルに対し、非破壊状態でX線CT撮影を行い、CT値を用いて3次元画像を再構成した。その結果、アサリ優占域では干出時においても表層から6cm間に保水領域が存在すること、また、非優占域には見られないことがわかった。
- (3) 底質のふるい分け試験より、アサリ優占域の間隙水が保持されている低密度域には貝殻の小片が多く混ざっており、これが底質と適度に混じることで保水領域（間隙）を形成していることが分かった。

上記の結果より、自然営力のもとでの干潟底質の物性評価に対する、地上型3次元スキャナーとX線CTの有効性が示された。今後さらに干潟内部の保水領域の季節変動特性などを検討し、自然干潟の物理環境特性を評価する予定である。また、本手法により、対策工として現在広く行われている“覆砂”（潮下帯から取った貝殻混じりの砂を低潮帯下部付近に散布する方法）の有効性を物理的・生物学的視点から定量的に評価できる可能性も示唆されたので、今後は覆砂の機能評価および設計・管理指針等にも本研究の成果を反映させてゆく予定である。

謝辞：X線CT撮影では、熊本大学の大谷教授をはじめ、GeoXセンター各位にご協力いただきました。また、地上型3次元スキャナー計測では、パスコ九州支店にご協力いただきました。記して感謝いたします。また、本研究は文部科学省科学研究費・水産基盤整備調査委託事業・鹿島学術振興財団研究助成による研究の一部であることを付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 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, pp. 41-46.
- 佐々真志, 渡部要一(2006): 砂質干潟の生態土砂環境に果たすサクシンの役割ー巣穴住活動・保水場の性能評価・設計指針ー, 港湾空港技術研究所報告, 第45巻, 4号, pp. 61-107.
- 水産工学研究所(2005): 二枚貝稚貝期における流動による輸送と生残, 平成17年度水産工学関係試験研究推進特別部会水産基盤整備分科会報告書, 34p.
- 玉置昭夫, 中岡 歩, 前川英樹, 山田文彦(2007): 有明海の砂質干潟における植物プランクトン食ギルドのなかの二枚貝資源ー環境収容力制限仮説の提示, 日本ベントス学会誌, 第62巻, pp. 73-81.
- Amos, C.L., T. F. Sutherland, B. Radzjijeski and M. Doucette (1996): A rapid technique to determine bulk density of fine-grained sediments by X-ray computed tomography, J. of Sedimentary Research, 66, pp. 1023-10225.
- Barros, F., A. J. Underwood and P. Archambault (2004): The influence of troughs and crests ripple marks on the structure of subtidal benthic assemblages around rocky reefs, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 60, pp. 781-790.
- Orsi, T., H. Carl, M. E., and Aubery, L. L. (1994): X-ray computed tomography: A nondestructive method for quantitative analysis of sediment cores, J. of Sedimentary Research, 64, pp. 690-693.
- Otani, J., T. Mukunoki and Y. Obara (2000): Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, Soils and Foundations, 40(2), pp. 111-118.
- Sassa, S. and Y. Watanabe (2007): Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: field evidence, experiments, and theoretical model, J. of Geophysical Research, 112, F01003, doi:10.1029/2006JF000575
- Yamada, F. and N. Kobayashi (2004): Annual tide level and mudflat profile, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 130, pp. 119-126.