

多段バー地形の平面分布特性と底質密度構造

Image-based analysis for spatial variations and sediment density structures of Intertidal Multiple Sand Bars

外村隆臣¹・多田裕治²・末長清也³・小林信久⁴・山田文彦⁵

Takaomi HOKAMURA, Yuji TADA, Seiya SUENAGA, Nobuhisa KOBAYASHI and Fumihiko YAMADA

Long-term morphological changes of intertidal multiple sand bars are examined using the aerial photographs during 1942 to 2008. Short-term morphological changes of intertidal multiple sand bars also investigated using video image analysis during June to December 2010. Video analysis results are compared with the 3D laser measurements using unmanned helicopter. Although horizontal bar morphology change to some extent under energetic wave motions, their morphology appears to be a permanent feature in both form and position. Sampling the sediment cores in the field, the sediment density and pore profile changes due to one-dimensional (vertical) water pressure are examined using X-ray-CT scanner. The density shows slightly changes during the experiments, however, the pore ratio is less than 0.02.

1. はじめに

多段バーは、波浪に比べ潮汐が卓越する内湾域に存在することが多く、海浜勾配が比較的緩やかな場所に発達する。対して、単にバーという場合は、列数が3列までの事を指し、外洋に面した波浪が卓越する比較的急勾配な海浜で発達する特性を持つ。このように多段バーとバーでは数や発達する場所の特徴が異なるが、どちらも同様の役割を果たしており、沖からの入射波がバー上で碎波することでエネルギーを逸散し、沿岸域の安定性に寄与していることが Lau and Travis (1973) により報告されている。

Saylor and Hands (1970) は、アメリカのミシガン湖に発達する多段バーに関して2年間の現地観測を行い、平均湖面が1.5m上昇するとバーが岸側へ30m移動するという事例を報告している。同報告では、バーが岸側へ移動することにより碎波点も岸側に移動するため、入射波エネルギーが十分に減衰されずに岸まで到達し、汀線付近の地形が侵食傾向になることが示唆されている。今後、地球温暖化に伴う海面の上昇が予想されることから多段バーの海面上昇への応答性などの地形変化メカニズムを解明し、地形変化予測を行うことが重要になる。そのためには中長期間の地形変動特性や季節性の地形変動特性、台風や高波浪などの一時的な外力による変動特性について把握する必要がある。そのための方法としてこれまでに多くの計測手法が提案されてきたが、時空間で高密度な計測が可能で、かつコスト面でも優れた手法としてビデオ画像を用いた方法が挙げられる。

Plant and Holman (1997) は、潮汐変動を考慮したビデオ画像(白黒)から潮間帯の3次元地形を計測する画像解析手法を提案し、1/10程度の急な海浜勾配で波浪が卓越する海浜に適用した。さらに、Aarninkhofら(2003)、Uunkら(2010)は、海浜勾配が1/50程度で汀線付近にバーが存在する海浜へ適用可能なカラー画像を用いた解析手法を提案した。しかし、波浪の影響が小さく、勾配が1/250~1/500程度の非常に緩やかな潮間帯に存在する多段バー地形への適用は現在まで行われていない。

本研究では、海浜勾配1/250程度の潮間帯干潟においてビデオ画像から多段バー平面形状の抽出手法について検討し、自動制御の無人ヘリコプターによる3次元レーザ測量結果との比較により、本手法の有効性について検証した。また、過去の航空写真の比較および半年間のビデオ観測結果の比較を行い、多段バー地形の平面的な時空間変動特性について考察を行った。さらに、一次元水圧変動載荷実験(土田ら, 2006)とX線CTスキャナを用い、多段バー地形の底質の密度および空隙の時空間変動特性について検討を行った。

2. 現地概要

観測は有明海に面した御輿来海岸(熊本県宇土市網田)で実施した。御輿来海岸は有明海湾口部に近い宇土半島北岸に位置し、一級河川である緑川河口より約7.5km南西に在り、有明海に分布する干潟の南端にあたる。底質は阿蘇火山起源の黒色の砂泥質堆積物からなる。内湾域であるため、波浪に比べて潮汐の影響が卓越する潮間帯干潟であり、干潮時には沖合1km程度まで十数列の多段バーが現れる(図-1)。このような特徴的な地形は有明海においてもこの宇土半島北岸に限られる。図-1にある導流堤およびコンクリート道路は、1970年頃に建設されており、御輿来海岸から西へ1.7kmの位置には1998年に建設された宇土マリーナがある。潮位データはこのマリー

1	正会員	熊本大学工学部	技術部
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	Ph. D	テラウェア大学	教授 応用海岸研究センター
5	正会員	博(工)	熊本大学 教授 大学院

ナでの実測潮位（10分間隔）を用いている。

図-2 に御輿来海岸の岸沖断面の地盤高測量結果を示す。多段バーが存在する箇所の地形勾配は約 1/250 となっていることがわかる。なお、詳細な現地特性に関しては山田ら(2005)、Yamada and Kobayashi (2007)を参照されたい。

3. 長期的（約 40 年間）な地形変化

御輿来海岸は Makino(1994)、山田ら（2005）等の調査があるが、多段バー平面形状の変動特性については詳細に調べられていない。そこで、航空写真から多段バー平面形状について経年変化を調べた。1942～2008 年までの期間で 11 枚の航空写真が存在するが、不鮮明なものや満潮時の写真を除くと、多段バー地形が確認できる写真は 1962, 1973, 1979, 1988, 1994, 1999 年の 6 枚である。これらの写真を基に約 40 年間の地形変化について考察を行った。

本論文では紙面の都合上 図-3 に 3 枚の写真を示す。(a)1962 年から(b)1973 年にかけては 網田川河口部で多段バーの空間分布に顕著な相違が確認できる。これは、1970 年頃に導流堤が造られたことが要因と考えられる。また、(a)1962 年の時点では多段バーの平面形状は岸側に凸な三日月形であり、沿岸方向の連続性は離岸流により分断

されている。しかし、(b)1973 年には多段バーの形状は直線性が増加するとともに、連続性も増している。(b)1973 年から(c)1999 年にかけては、全体的に多段バーの直線性や連続性が失われているのが分かり、S 字状のバーが多くなっている。さらに、ビデオ撮影範囲（導流堤とコンクリート道路で挟まれた範囲）の岸側のバーは消失しており、多段バーの列数の変化も見取れる。

このように航空写真を比較することで、バーの消失や分断、形状変化などが明らかとなり、多段バーの平面分布は約 40 年の間に顕著な時空間変動を有していることが確認された。そこで次に、御輿来海岸の多段バー地形の季節性の変動特性や短期的な変動特性について検討した。

4. 短期的（数ヶ月）な地形変化

(1) ビデオ画像観測の概要

前章の航空写真を用いた手法は数十年間の多段バー地形の経年変化を調べる場合には有効な手法である。しかし、通常利用できる航空写真は数年～数十年間隔で撮影されたものとなる場合が多く、数ヶ月～季節性の変動や台風に伴う高波浪や高潮などの一時的な外力変動が及ぼす影響を検討する場合には時間分解能が不足する。

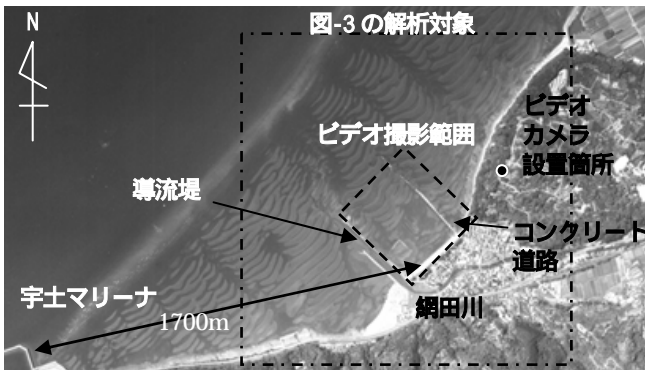


図-1 御輿来海岸の航空写真(1999年撮影)

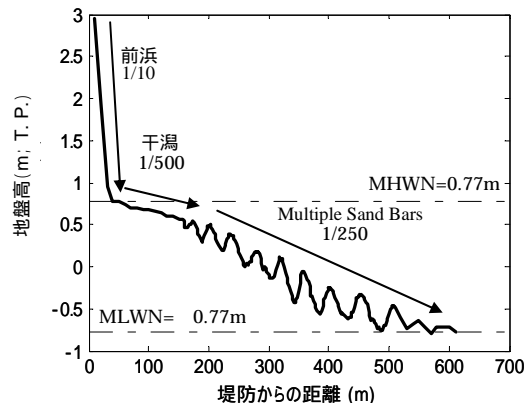


図-2 地盤高測量結果(2003.7.9)

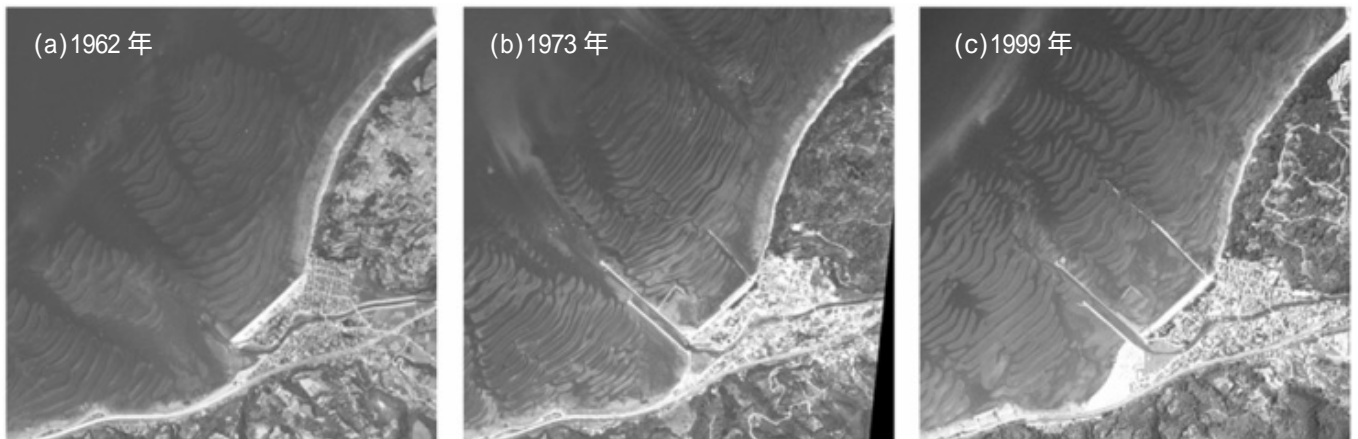


図-3 航空写真による約 40 年間の御輿来海岸の変遷

そこで、デジタルビデオカメラ（SONY HDR-XR350V）を用いた観測を実施した。ビデオカメラは図-1 に示した設置個所（標高 59 m）に、高さ 8 m の鋼支柱を設置し、その先端に固定してリモート撮影を行った。

これまでに 5 回のビデオカメラ観測を実施しており、その詳細を表-1 に示す。撮影範囲は、画像変換を行う際に必要な基準点が数箇所入るようにしている。基準点の座標は GPS を用いて計測し、平面直角座標系に射影変換を行った（図-4）。

(2) 精度検証

2010 年 6 月 11 日に御輿来海岸での自動制御の無人ヘリコプター（(株) ECR）による 3 次元レーザ測量を実施した。図-5 に結果を示す。この測量結果を基に図-6 に示すビデオ撮影範囲内の等高点群図（コンター図）を作成した。図中は、基準面（T.P. 0 m）から - 20 cm 毎にプ

表-1 観測日

観測日	時刻	撮影時間(分)	潮位(m)
2010/6/1	13:00-15:40	56	2.82-0.92
2010/6/11	11:00-14:00	145	1.69-0.39
2010/7/11	12:25-16:35	50	0.97-0.39
2010/9/10	15:35-16:10	36	0.47-0.39
2010/12/7	10:00-15:50	70	4.24-1.24

ロットしており、それぞれの地盤高の±5 cm の範囲をプロットしている。これより、各バーの平面形状と位置が概ね把握できる。このコンター図を同日のビデオ観測結果と比較する事で、射影変換の精度検証を行った。

図-6 には測量結果の背景に射影変換画像を重ねている。射影変換画像は、バーの輪郭をはっきりさせるため、二値化処理を施している。図を見て分かるように、コンター図が表す多段バーの輪郭と射影変換画像が 5 m 程度の精度で一致していることが確認できる。よって、今回のビデオ画像の射影変換手法は誤差が小さく、画像解析により多段バーの平面形状の変化を十分比較検討できることが確認できた。

(3) ビデオ画像から見る多段バーの地形変化

全観測の中から同潮位の撮影画像が得られた 6/1, 6/11, 7/11, 12/7 を対象に射影変換を行った。ビデオ観測期間の初期状態（6/1）から最終日（12/7）までの約 6 ヶ月間の多段バー地形の二値化画像の比較結果を図-7 に示す。この図で、6/1 のバー形状を濃灰色、12/7 のバー形状を薄灰色、両方の画像で重なる部分を黒色で表示している。今回の全観測期間を通した結果を比較しても、左側のバー列において、個々のバーの面積の増減が若干見られるが、干出状況の差程度であり、バーの位置や平面形状に

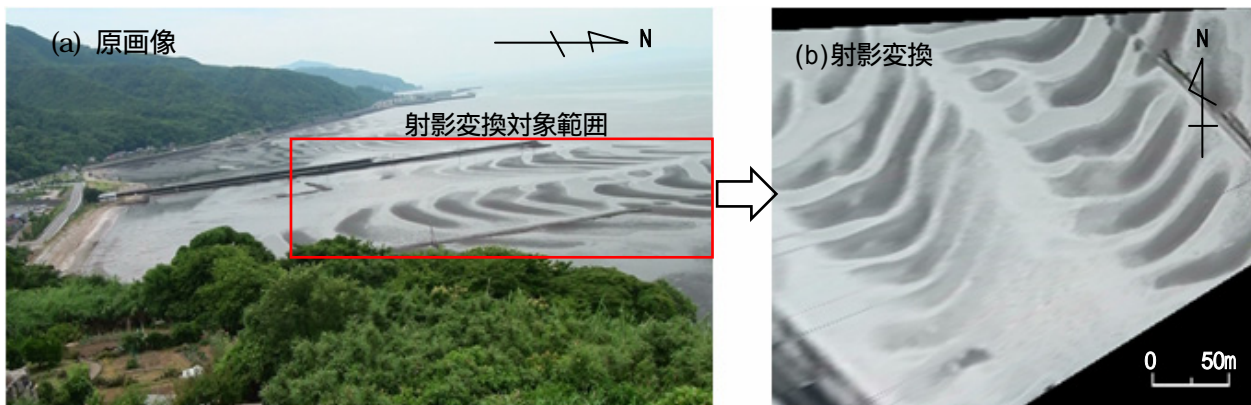


図-4 射影変換（2010年6月11日 11:50の瞬間画像）

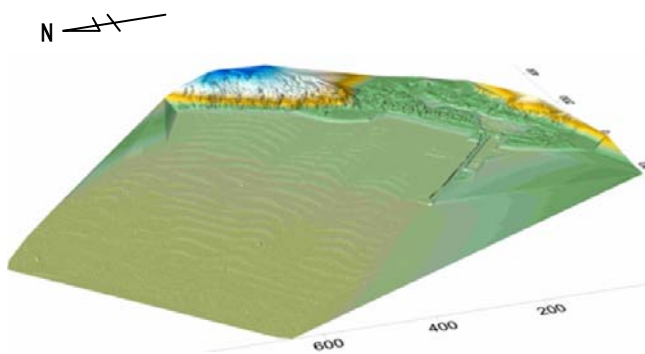


図-5 無人ヘリによる3次元レーザ測量結果

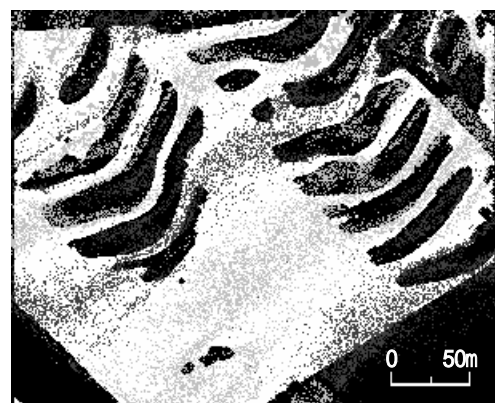


図-6 測量結果と射影変換画像の比較

は大きな変化を確認することができなかった。そこで、それぞれの観測日ごとに多段バー地形の比較を行ったが、同じようにバーの位置や形状に大きな変化は見られなかった。観測期間中の実測波高を図-8に示す。観測期間中に有義波高 40 cm 以上を 2 回記録しているものの、台風に伴う高潮や高波浪といった一時的な大きな外力の影響を受けていないことがわかる。これより、平常時における多段バーは大きく移動したり、形状を変えることなく安定して存在し続けているものと推測される。

なお、今後も定期的に継続してビデオ観測を実施するとともに高波浪や台風の前後の比較を行い、季節性や周期的な多段バーの時空間変動特性および一時的な外力要因の時空間変動特性を解明する事が重要である。

5. 底質内部の密度・空隙構造

(1) 一次元水圧変動载荷実験

航空写真やビデオ画像の結果より、御輿来海岸の多段バーは構造物等の人的要因や一時的な外力等の影響により、バーの平面形状は変化するものの、大きく移動したり、消失することなく、比較的安定して存在し続けていることがわかる。佐々・渡部 (2008) によると、多段バ

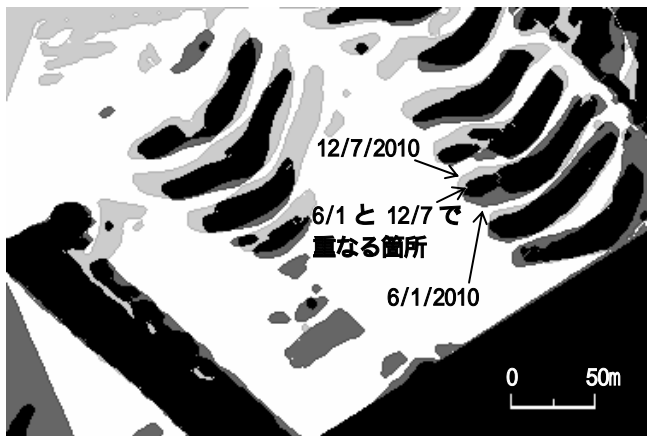


図-7 多段バーの平面分布の比較

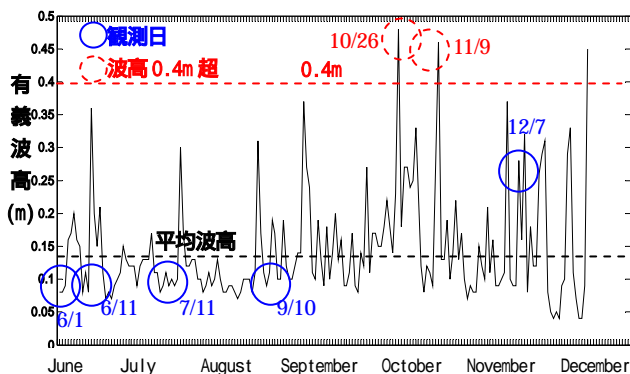


図-8 観測期間中の実測波高データ

ー地形の動的安定性は底質に作用するサクシヨンの動態効果によるとされているが、現地での検証例が少ない。そこで、現地でコアサンプリングを実施し、図-9に示す一次元水圧変動载荷装置 (土田ら, 2006) を用いて、海底面に作用する水圧を再現し、一定時間繰り返し作用させる。本装置は、コンプレッサーにより水圧を発生させ、試料面上に水圧を载荷する装置である。試料採取には直径 6cm, 内径 4cm, 高さ 30cm のアクリル製のコアを用いた。実験に用いる試料は、御輿来海岸の沖側(454m)と岸側(271m)の 2 か所から採取した不攪乱試料を使用する。今回の実験では、2 時間ごとに最大水圧を変動させ、水圧の作用が終了する毎にコア内部の密度・空隙構造を、熊本大学所有の産業用 X 線 CT スキャナ(TOSCANER-23100 mini)により非破壊状態で計測した。

(2) X線CTスキャナによる底質内部の密度構造

まず産業用 X 線 CT スキャナを用いて 2 時間ごとの底質内部の密度構造を確認した。撮影箇所は、表層から 90 mm の範囲を 3 mm ピッチで撮影した。CT 画像は CT 値によるデジタル画像である。そのため、試料ごとにキャリブレーションを実施し、CT 値から湿潤密度の換算式を算出し、CT 値を換算式より湿潤密度に換算し、コア採取時の擾乱の影響を最小限に抑えるために ROI (Region Of Interest) 領域を抜き出して解析を行った(山田ら,2010)。

図-10 は沖側と岸側のコアの湿潤密度の鉛直分布の時間変化を重ねて示したものである。図より、時間変化に伴う密度の変化は非常に小さい。さらに目視によって変化を確認したが分級は見られず、本対象地の場合、一次元方向のみの水圧変動では密度変化はほとんど生じない。次により空間解像度を上げて密度・空隙構造を検討するために、熊本大学所有のマイクロ CT スキャナ(TOSCANER-32300 FPD)を用い空間解像度を 10 μm で撮影を行った。産業用 X 線 CT の結果と比較したところほぼ傾向は一致することが確認できた。そこで、分解能の高いマイクロ CT の結果からコア内の空隙率を算出した。

図-11 にマイクロ CT スキャナの撮影結果から算出したコアの空隙率分布を示す。沖側・岸側のどちらも空隙率が 0.02 以下と非常に低い。これは、粗い粒径同士の間には微細な粒子が入り込んでいるか、あるいは、10 μm 以下の微細な粒子が多く判別不可能である状態を表す。いずれにしても表層付近の底質は非常に密な状態を呈している。この結果は、一次元水圧変動実験において現地相当の水圧を繰り返し作用させても密度変化がほとんど生じない結果と符合する結果である。つまり、御輿来海岸の多段バー地形は、潮位の変動により干出・冠水を繰り返し、佐々・渡部 (2008) の提案する

サクシヨンの動態効果により圧密が促進されることで、底質が密な状態が維持されており、地形変動を生じにくい状態を保持していると解釈できる。

6. おわりに

御輿来海岸における過去 40 年間の航空写真を比較し、その長期的な地形変動特性について考察した結果、多段バー地形の経年変化が認められた。また、ビデオ観測を実施し、ビデオ画像から多段バーの形状を抽出する方法について検討し、短期的な地形変動特性について検証を行い、バーの位置や形状について大きな変化がなく、多段バーは安定して存在し続けることがわかった。さらに、一次元水圧変動载荷実験を行い、X線 CT を用いて内部の密度構造を確認した結果、水圧を繰り返し作用させても密度変化がほとんど生じないことや底質内部には空隙が少なく、密な状態であることがわかった。この結果より、サクシヨンの動態効果による影響が底質に作用していることが示唆された。

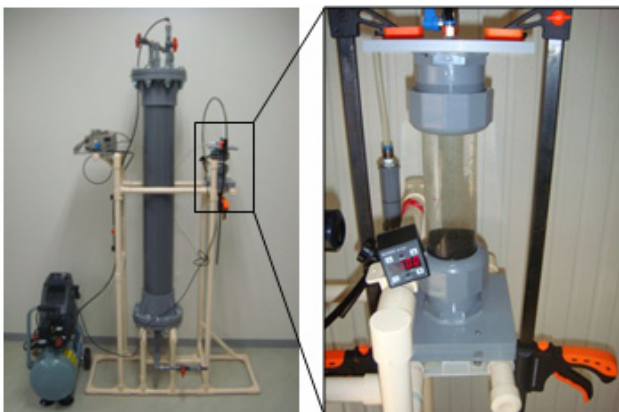


図-9 一次元水圧変動载荷実験装置

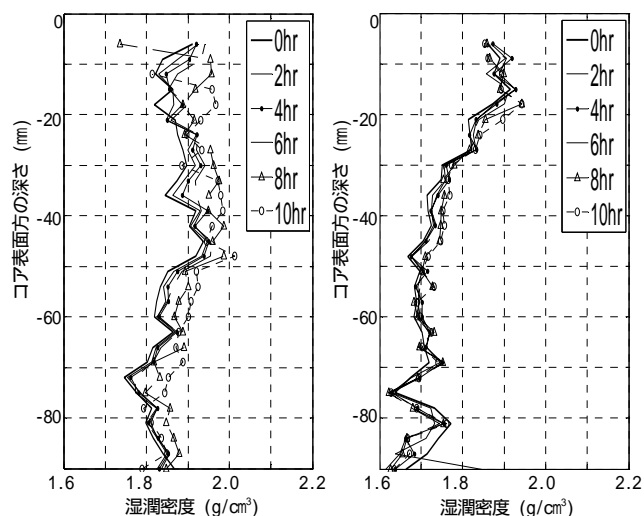


図-10 鉛直密度分布 (左: 沖側 右: 岸側)

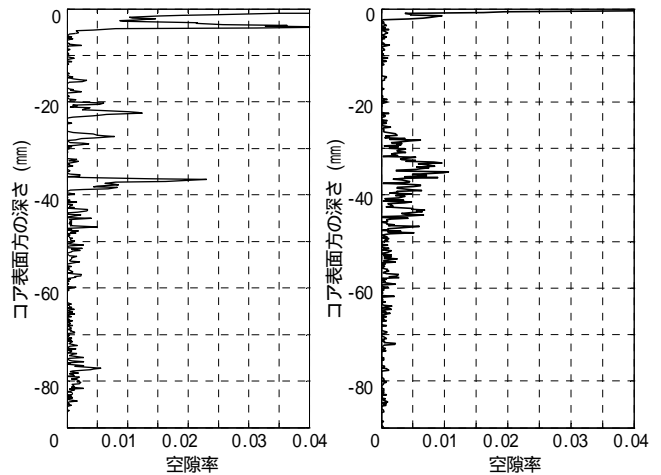


図-11 空隙率 (左: 沖側 右: 岸側)

参考文献

- 佐々真志・渡部要一 (2008): 干潟バーの動的安定機構の解明, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.1176-1180.
- 土田 孝・吉牟田卓・浅海綾一(2006): 一次元水圧変動による海底地盤表層からの細粒分移動に関する研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 491-495.
- 山田文彦・上原和朗・中道誠・外村隆臣・由比政年・小林信久 (2005): 潮間帯に発達する Multiple Sand Bars の発生確率と季節変動特性, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 496-500.
- 山田文彦・辻本剛三・田端優憲・立山龍太・外村隆臣・小林信久(2010): X線 CT を用いた地形変形を伴うバー・トラフ付近の底質内部の密度構造の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), pp.436-440.
- Aarinkhof, S. G. J., Turner, I. L., Dronkers, T. D. T., Caljouw, M., Nipius, L. (2003): A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry, J. of Coastal Eng. 49, pp. 275-289.
- Lau, J., and Travis, B. (1973): Slowly varying stokes waves and submarine longshore bars, J. Geophys. Res., 78(21), pp. 4489-4497.
- Makino, Y. (1994): Wave ripple dynamics and the combined-flow modification of wave ripples in the intertidal zone of Ariake Bay (Kyushu, Japan), Marine Geology, 120, pp. 63-74.
- Plant, N. G and Holman, R. A. (1997): Intertidal beach profile estimation using video images, J. Marine Geology 140, pp. 1-24.
- Saylor, J. H. and E. B. Hands (1970): Properties of longshore bars in the Great Lakes, Proc. of 12th International Conf. Coastal Eng., ASCE, New York, pp. 839-853.
- Uunk, L., Wijnberg, K. M., Morelissen, R. (2010): Automated mapping of the intertidal beach bathymetry from video images, J. of Coastal Eng., 57, pp. 461-469.
- Yamada, F, and Kobayashi, N. (2007): Intertidal multiple sand bars in low energy environment. J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 133, pp. 343-351.