

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289157

研究課題名(和文) 沿岸土砂堆積環境の連続一体調査手法の開発による堆積形成史復元

研究課題名(英文) Restoration of sequential sedimentation history in coastal area by means of an integrated soil survey technology

研究代表者

渡部 要一 (Watabe, Yoichi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00371758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、干潟・浅場の地盤環境を対象として、干出時にはジオフォン(地震計)、冠水時にはハイドロフォン(水圧計)を使い分けることにより多チャンネル型表面波探査(MASW)の適用範囲を拡大した。また、簡易なサンプリング・サウンディングによる地盤調査手法を併用することにより、探査と地盤調査とを組み合わせたパッケージとして調査手法を提示した。これらを適用することにより、地層が複雑な河口付近の地盤の堆積形成史を復元し、地球科学・海岸工学・生態学と地盤工学との学際分野に資する成果を得た。

研究成果の概要(英文)：In this study, by selectively using geophones for exposed ground and hydrophones for submerged ground, the scope of application of MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) technology was extended when the subsoils of tidal flat/shallow sea is surveyed. By combining these technologies and simplified sampling and sounding technologies, an integrated and packaged ground survey method is proposed. Using this method, we successfully restored the sedimentation history of the complex subsoil layers in an estuary or an artificial tidal flat. These results can contribute to the interdisciplinary fields of geophysics, coastal engineering, coastal ecology, and geotechnical engineering.

研究分野：地盤工学

キーワード：堆積形成史 表面波探査 サンプリング 潮間帯 潮下帯 干潟 浅場

### 1. 研究開始当初の背景

豊かな生態系を育む干潟や浅海域は、海水浄化能力が高く、沿岸環境のシンボルともなっている。近年、新たな学際分野として生態地盤学が展開され、地盤工学の視点からの貢献に期待が集まっているが、従来は、生態学・海岸工学・環境化学からの調査・研究が中心であった。

本研究の担当者らは、地層分布の連続的な空間情報を得るために、干潟地盤の干出時のみ適用できる調査手法として、多チャンネル型表面波探査 (MASW: Multi-channel Analysis of Surface Waves) の有用性を示してきた。MASW はポータブルな計測機器であり、測線上にジオフォン (地震計で鉛直速度を計測) を等間隔に設置し、測線端部の地盤表面をカケヤで起振して表面波の伝播波形を計測する。計測された伝播波形を逆解析することによって、せん断波速度の速い・遅い、すなわち地層の硬い・軟らかいの分布を推定する。様々な土質からなる干潟において MASW を適用してきており、評価された地層断面の特徴は、潮汐変動に伴うサクシオン動態に起因した弾塑性圧縮変形の蓄積として、土質力学による理論的説明ができることを示した。しかしながら、これらの研究では以下の 2 つの事項が研究を進める上での隘路となっていた。

- 1) MASW による逆解析で評価された地層構造は、深度に対して 20 ~ 30% もの大きな誤差があると言われている。本来であればコアサンプルとの深度比較により探査結果を検証し、必要に応じて深度を修正した再計算を実施する必要があるが、簡易なコアサンプルの採取手法がない。
- 2) ジオフォンを使う MASW は水中では使用できないことから、水深が約 5cm 以上あると計測できなくなってしまう。

### 2. 研究の目的

上述を背景として、本研究では、(1) 干潟・浅海域における簡易サンプリング方法の実用化、(2) 潮間帯～潮下帯における MASW の適用性やデータ連続性の検討、(3) コアサンプルとの比較による MASW の精度向上、(4) 干潟・浅海域における地盤調査パッケージの提示、(5) これらの手法による土砂堆積形成史の復元を研究目的とした。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 自然干潟とその浅海域

調査対象とした干潟は、熊本県宇土市の御輿来海岸の干潟で、美しい多段バー・トラフ構造が見られる砂質干潟である。潮上帯から潮間帯を経て潮下帯に至るまで、ジオフォンとハイドロフォン (水圧計) を使い分けて連続的に調査を実施し、干潟の地盤断面構造を



図-1 自然干潟の潮間帯でのジオフォンを使った MASW の実施状況

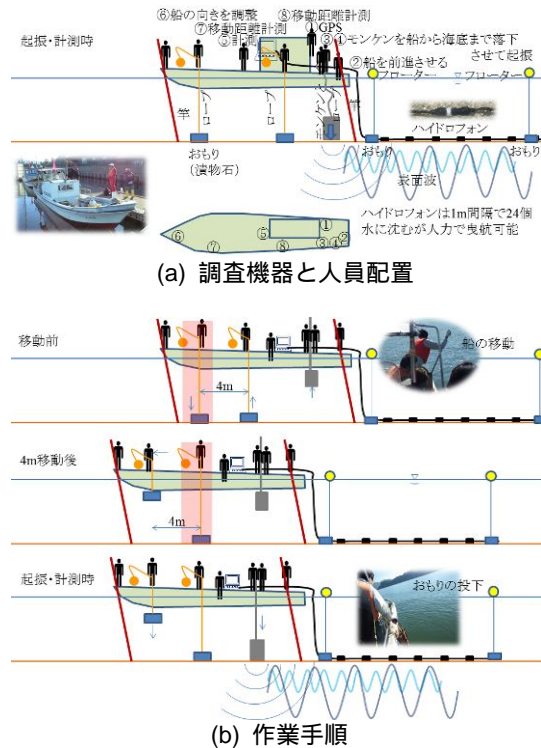


図-2 自然干潟とその浅海域でハイドロフォンを使った MASW の説明図

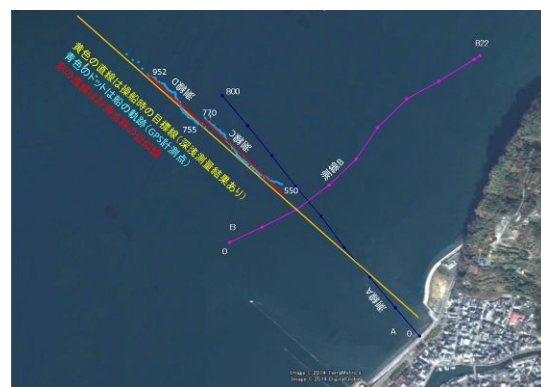


図-3 自然干潟と浅海域での調査測線の詳細図 (Googleマップ上に表示)

捉えることを試み、両計測手法の適用性や留意点について検討した。

本研究で実施した MASW では、24 個の受信器を 1m 間隔で地盤表面に並べて設置した後、受信器の列よりもさらに前方の地盤表面をカケヤやおもりで鉛直に叩くことにより起振し、これをトリガーとして多様な周波数

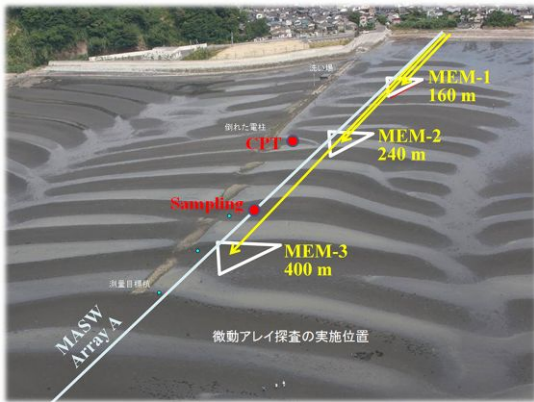


図-4 自然干潟のA測線と微動アレイ探査，サンプリング，CPTの調査位置

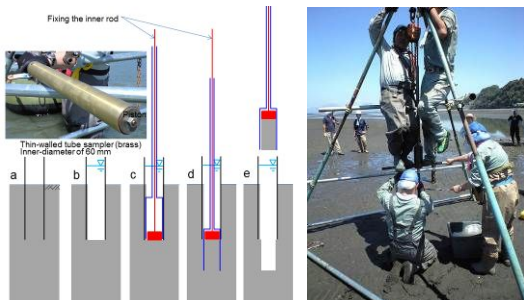


図-5 自然干潟での人力によるサンプリング

帯を含むレーリー波の伝播波形を計測する。本研究では、岸から沖に向かって移動することに起振した。

潮間帯でのジオフォンを使った MASW の実施状況を図-1 に示す。作業効率向上のため 2 本のロープに 1m 間隔でジオフォンを取り付けたランドストリーマーを用い、これを牽引して 2m ずつ移動した。一方、冠水した状態の潮間帯から潮下帯にかけてのハイドロフォンを使った調査では、24 個のハイドロフォンが一体となって連なった受信器を小型船舶で曳航し、図-2 に示すような手順で 4m 移動することに起振した。記録された波形に基づいて、逆解析によりせん断波速度分布を推定した。

船の位置は GPS を使って正確に把握できるが、潮流がある中では船が流されてしまうため、実際の誘導は困難をとまなう。また、4m ずつ移動するのに毎回エンジンを始動することは非現実的であることから、船の前方と後方で竿を使って海底を突いて船を移動させることにした。今回の調査では、目標とする測線上に船が位置するように GPS で確認・誘導しながら、竿を使って船を前進させ、ロープに吊したおもり（漬物石）2 組を使って尺取り虫のように 4m の移動距離を計測して位置を決めた。次にロープに吊した約 40kg のおもり（モンケン）を船上から海中に投入し、おもりが海底に到達したときの衝撃で海底地盤表面を起振した。

当初、底部に板を取り付けてあるパイプを海底に立て、水面から出ている頭部をハンマーで叩いて起振することを試みたが、水中の音速に相当する実体波が得られたものの、表

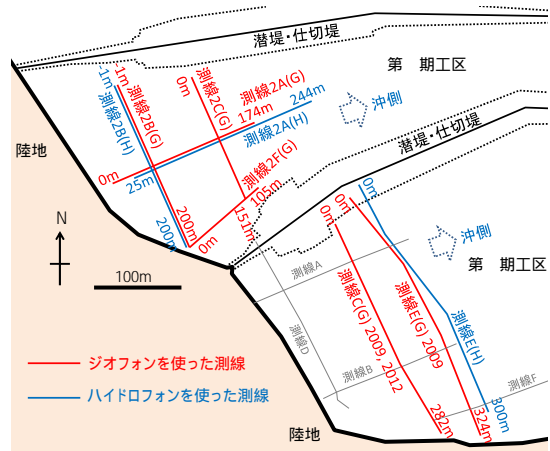


図-6 人工干潟の詳細図と調査測線

面波の起振としては十分なエネルギーを与えられず、識別できないほどに弱い波形しか得られなかった。そこで、上述したように、おもりを海底面に投下して起振する方法に切り替えたところ、表面波として明瞭な波形記録が得られたことから、この手法を採用することにした。

調査位置の詳細を図-3 に示した。測線 A を沖側に延長すると深浅測量による地形データが得られていなかったため、今回の船を使った調査では、事前に深浅測量による地形データを得ていた、図中の「操船時の目標線」に沿って MASW を実施することにした。測線 A は目標線の近傍にあり、今回の調査結果と既往の測線 A の調査結果は十分な比較対象になる。図中には、起振位置ごとの GPS データをプロットするとともに、その起振点群の近似直線も示した。

これらに加えて、図-4 に示すように、A 測線上の 3 地点において微動アレイ探査 (MEM, より深くまでせん断波速度構造が得られる)、1 地点において人力によるサンプリング (Sampling, 図-5)、別の 1 地点においてコーン貫入試験 (CPT) を行い、MASW による調査結果を検証した。

### 3.2 人工干潟とその浅海域

調査対象とした干潟は、徳山下松港人工干潟（大島干潟）であり、調査対象エリアの詳細図を図-6 に示す。潜堤や仕切り堤の築造、浚渫土砂の投入を終えた後、第一期工区の覆砂工事は 2008 年に、第二期工区の覆砂工事は 2012 年にそれぞれ完了した。当該干潟において、浚渫土砂による埋立層の経年変化や覆砂厚の分布について調査するために、MASW による継続的モニタリングを実施し、造成直後から数年間にわたる物性の変化をせん断波速度によって把握してきた。干出時にジオフォンと呼ばれる地震計（4.5Hz の低周波数対応の速度計）を使って実施してきたこれまでの調査では、圧密沈下によって干潮時にも水没するようになったエリアはモニタリングを継続できない状態になってしまっていた。



そこで本研究では、水没してしまった、あるいは将来水没すると予想されるエリアにおいても、人工干潟の維持管理を念頭に置いた MASW の実施を可能にすることを目的として、ハイドロフォンを使った MASW の適用を新たに試みた。ジオフォンとハイドロフォンはともに表面波による地盤表面の鉛直動を計測するが、ジオフォンは地表面の変動を速度変化として直接的に計測するのに対して、ハイドロフォンは水没した地表面の変動を水圧変動として間接的に計測しており、両者の計測原理は異なっている。

次章に示す研究成果では、ジオフォンとハイドロフォンの併用や両センサーの使い分けによる調査結果を報告し、両手法による調査結果の相違点について取りまとめた。使用したハイドロフォンは、7Hz～36kHz に対応したものである。

加えて、MASW の結果として得られる表層の覆砂厚については、造成直後の干潟土砂が安定化する前の段階では、安全管理上も重要な項目となる。MASW から得られた覆砂厚が実際の覆砂厚を反映したものであるかどうかを確認するために、ポータブルコーン貫入試験を測線に沿って実施し、サウンディングによる正確な覆砂厚確認も実施した。

## 4. 研究成果

### 4.1 自然干潟とその浅海域

MASW により得られたせん断波速度構造を図-7 に示す。測線 A の結果は既往の調査結果としてジオフォンにより得られたものであり、トータルステーションを用いて測線に沿って測量した地形データを反映して描いてある。表層付近にあるやや硬い地層(砂層)は沖に向かって次第に薄くなっていくことが読み取れる。測線 C と測線 D の結果は今回の調査でハイドロフォンにより得られたものである。図中に点線で囲んだ区間は測線 A と測線 C の調査範囲がオーバーラップしている。

両調査結果は表層付近で 100m/s 以上のせん断波速度が見られるなどやや硬く、それより下には粘性土と推測される柔らかい地層が存在していることが読み取れる。一方、測線 A では、ごく表層でせん断波速度が 60m/s 程度の小さな値が得られているが、測線 C では、ごく表層においてこのような小さなせん断波速度はほとんど得られていない。距離 700m 付近より沖側では、測線 A でも測線 C でも、ともに表層付近のやや硬い地層(砂層)は消滅し、さらに沖側の潮下帯となる測線 D の範囲では、表層付近まで柔らかい粘性土が現れていることがわかる。潮下帯において粘性土が海底表面に現れているとの評価は、船を移動するために使った竿で海底を突いたときの感触とも整合するものであった。

A 測線と C 測線で見られる違いは、ジオフォンとハイドロフォンの計測手法の違いが

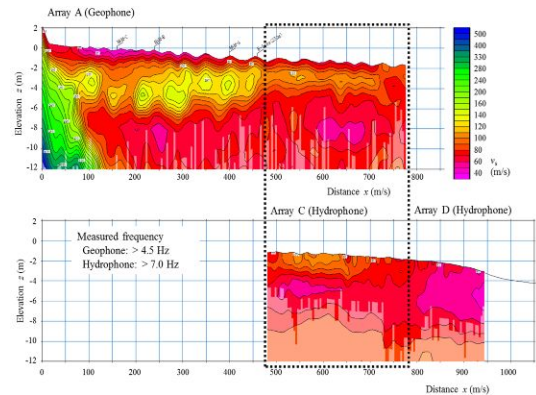


図-7 自然干潟と浅海域で MASW により得られたせん断波速度構造

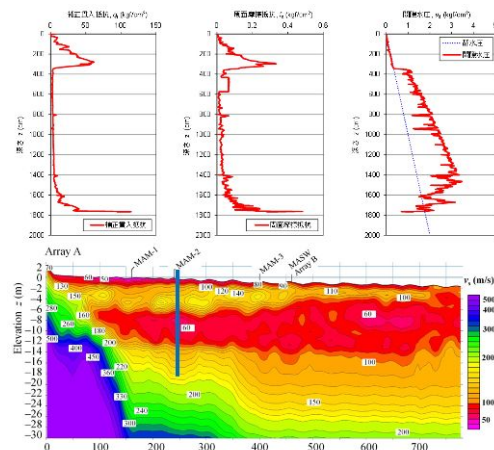


図-8 自然干潟で MASW により得られたせん断波速度構造と CPT の結果との比較

現れた可能性がある。受信器の列の先端から起振点までの距離をオフセット距離と称し、ジオフォンを用いた MASW ではこれを 1m 程度としているが、ハイドロフォンを使った MASW では、ケーブルが長く、水深もあるので、船の直下に先端のハイドロフォンを引き寄せることはできず、オフセット距離が 10m 以上になる。ここでは詳細は省くが、オフセット距離が長くなると、波形が時間的に広がるようになるばかりでなく、分散曲線において高次モードが弱くなり、相対的に基本モードの方が卓越するようになる。これは、高周波数の表面波は減衰が著しいために、オフセット距離が長くなると高次モードが見えにくくなってしまいうためであると考えられる。地盤の大局的な構造を把握するにはオフセット距離がある程度大きくなって問題はないが、高次モードを利用して浅部の地盤断面構造を把握しようとする場合には、オフセット距離を短くする必要がある。

MASW により得られたせん断波速度分布は、サンプリングや CPT から得られた地層深度と比較して、十分な精度があることを確認した(図-8)。

### 4.2 人工干潟とその浅海域

2009 年に調査を始めた当初は、いずれの測線においてもジオフォンを使った MASW に

よりせん断波速度構造が得られた。しかし、その後の沈下によって、沖側に位置する部分は、大潮の干潮時でもかなりの水深がある状態となり、ジオフォンを使っての MASW の調査実施を断念せざるを得ない状況となった。そこで、2014 年に新たに試みたのが、ジオフォンに代えてハイドロフォンを使った MASW である。その実施状況を図-9 に示す。

今回の調査では、人が立って安全に作業できる水深を限度とし、最大でも水深約 1m の範囲での作業にとどめた。ハイドロフォンには 24 個の受信器が 1m 間隔で設置されており、2m 移動するごとに地盤表面に立てたパイプの頭部をカケヤで叩いて起振した。ジオフォンとハイドロフォンでは、それぞれの受信器の特性など、調査方法に依存した諸特性が結果に表れる可能性が懸念された。そこで、同一時点、同一測線において、すなわち干出する部分を有する測線を対象として、ジオフォンによる MASW とハイドロフォンによる MASW の両者を実施し、得られたせん断波速度構造を比較することにより、調査法の特性が調査結果に表れるかどうかを確認した。

ジオフォンとハイドロフォンを併用した調査は第 期工区において実施した。ここでは、測線 2B の結果を示す。ジオフォンとハイドロフォンによる測線にオーバーラップした区間があり、測線 2B(G)では干出時にジオフォンを使って、また、測線 2B(H)では冠水時にハイドロフォンを使って調査を実施した。測線 2B について、異なる手法によって得られたせん断波速度構造を比較するために描いたのが図-10 である。

どちらの測線においても、表層に覆砂があることは捉えられているが、ハイドロフォンでの調査結果はジオフォンでの調査結果よりも覆砂厚をやや薄く評価する傾向にあることがわかる。岸側に位置する沿岸方向の測線 2B では、せん断波速度が 35m/s 程度の表層覆砂が均質に広がっている様子が捉えられている。

その一方で、深い部分に着目すると、軟弱な浚渫土層が厚いとせん断波が深部まで伝わりにくく、軟弱層の下端が捉えられていない。特にハイドロフォンでは、ジオフォンによる調査で 2m 程度の薄い軟弱層があると評価された区間でも軟弱層の下端は捉えられなかった。

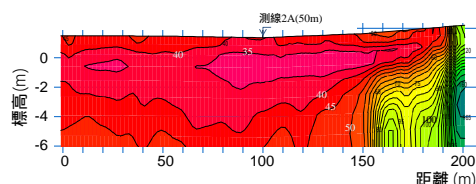
測線 2B の距離 100m の地点に着目すると、ジオフォンでは深い部分のせん断波速度の増加が捉えられているのに対し、ハイドロフォンでは深い部分のせん断波速度の増加が得られていない。

#### 4.3 主要な結論

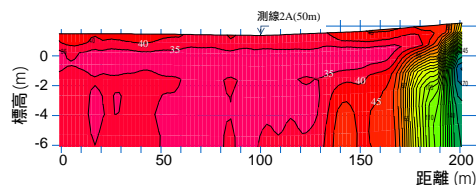
- 1) 干出した領域ではジオフォン、冠水している領域ではハイドロフォンを使い分けることで、多チャンネル型表面波探査 MASW により、潮上帯から潮間帯を経て潮下帯に至るまで、広範囲の地盤断面構造



図-9 ハイドロフォンを使った MASW 実施状況



(a) 2014 年 (測線 2B(G), ジオフォン)



(b) 2014 年 (測線 2B(H), ハイドロフォン)

図-10 人工干潟の測線 2B のせん断波速度構造

をせん断波速度分布として把握することができる。

- 2) 人工干潟に埋め立てられた浚渫土砂構造の経年変化をモニタリングするにあたり、MASW は有用であり、測線が水没してしまってもハイドロフォンを使うことによって継続的な調査が可能である。
- 3) ハイドロフォンを利用した調査では、オフセット距離が長くなってしまったため、高周波数領域の波が減衰して高次モードが現れにくくなる傾向があることに留意する必要がある。
- 4) ハイドロフォンを使った MASW の結果は、ジオフォンを使った MASW の結果とほぼ同様であるが、軟弱層での減衰の影響を受けやすく、覆砂厚をやや薄く評価する傾向があること、軟弱層の厚さを捉えられない傾向が強いことに留意が必要である。
- 5) 人工干潟の干潟土砂構造の継続的なモニタリングを行うにあたって、ジオフォンとハイドロフォンを状況に応じて使い分けることができるが、測定方法や受信器の周波数特性の違いにより、測定方法の違いが結果に影響を与える可能性がある。このため、同一測線に対して、ジオフォンとハイドロフォンの調査を同一時点で併用し、両者の結果を比較しておくことが推奨される。
- 6) MASW の結果の信頼性を高めるためには、サンプリングやサンプリングとの一体的な調査を実施することが望ましい。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

Watabe, Y. and Sassa, S. (2016): Sedimentation history of sandbars in flood-tidal delta evaluated by seismic method in Lake Tofutsu, Japan, Journal of Coastal Research, Volume 32, Issue 6, pp.1389-1401.  
<http://dx.doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00113.1>

Watabe, Y., Sassa, S., Kaneko, T. and Nakata, Y. (2015): Mechanical characteristics of reconstituted coral gravel soils with different fractions of finger-coral fragments and silt matrix, Soils and Foundations, Vol.55, No.5, pp.1233-1242, 2015.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.022>

Watabe, Y. and Saitoh, K. (2015): Importance of sedimentation process for formation of microfabric in clay deposit, Soils and Foundations, Vol.55, No.2, pp.276-283.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.004>

Watabe, Y., Kaneko, T. and Sassa, S. (2015): Mechanical properties of coral-silt composite soils evaluated on the basis of skeletal structure of coral gravels, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.2, No.14, pp.547-551.  
<http://dx.doi.org/10.3208/jgssp.JPN-089>

Watabe, Y., Sassa, S., Kaneko, T., Ueno, K. and Yamada, K. (2015): Safety assessment of an artificial intertidal flat using MASW technology, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.1, No.4, pp.30-34.  
<http://dx.doi.org/10.3208/jgssp.JPN-34>

渡部要一, 金子 崇, 佐々真志, 橋本裕司, 中條壯大 (2016): MASW を活用した潮上帯・潮間帯から潮下帯に至る干潟堆積土砂構造評価, 土木学会論文集 B2, Vol.72, No.2, pp.I\_1699-I\_1704.  
[http://dx.doi.org/10.2208/kaigan.72.I\\_1699](http://dx.doi.org/10.2208/kaigan.72.I_1699)

渡部要一, 佐々真志, 金子 崇, 橋本裕司 (2016): 人工干潟における MASW による浚渫土砂構造モニタリング: 水没エリアでのハイドロフォンの適用, 土木学会論文集 B3, Vol.72, No.2, pp.I\_449-I\_454.  
[http://dx.doi.org/10.2208/jscejoe.72.I\\_449](http://dx.doi.org/10.2208/jscejoe.72.I_449)

渡部要一, 佐々真志, 金子 崇, 上野一彦, 山田耕一, 橋本裕司 (2015): 人工干潟に埋め立てられた浚渫土砂構造の時間変化: MASW による継続調査とその検証, 土木学会論文集 B3, Vol.71, No.2, pp.826-831.  
[http://dx.doi.org/10.2208/jscejoe.71.I\\_826](http://dx.doi.org/10.2208/jscejoe.71.I_826)

〔学会発表〕(計4件)

渡部要一, 金子 崇, 佐々真志, 橋本裕司, 中條壯大: MASW を活用した潮上帯・潮間帯

から潮下帯に至る干潟堆積土砂構造評価, 第63回海岸工学講演会, 2016年11月16日~11月18日, 大阪市.

渡部要一, 佐々真志, 金子 崇, 橋本裕司: MASW による潮上帯~潮間帯~潮下帯の連続探査, 第71回地盤工学研究発表会, 2016年9月13日~9月15日, 岡山市.

渡部要一, 佐々真志, 金子 崇, 橋本裕司: 人工干潟における MASW による浚渫土砂構造モニタリング: 水没エリアでのハイドロフォンの適用, 第41回海洋開発シンポジウム, 2016年6月23日~6月24日, 浜松市.

渡部要一, 金子 崇, 林 宏一, 橋本裕司, 上野一彦: MASW による潮上帯~潮間帯~潮下帯の連続探査, 人工干潟を形成する超軟弱な浚渫土層において MASW で得られたせん断波速度の検証, 第50回地盤工学研究発表会, 2015年9月1日~9月3日, 札幌市.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

渡部要一 (WATABE, Yoichi)  
北海道大学・工学研究院・教授  
研究者番号: 00371758

### (2)研究分担者

佐々真志 (SASSA, Shinji)  
海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長  
研究者番号: 10392979

椋木俊文 (MUKUNOKI, Toshifumi)  
熊本大学・自然科学研究科・准教授  
研究者番号: 30423651

金子 崇 (KANEKO, Takashi)  
海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・研究官  
研究者番号: 90649807

山田文彦 (YAMADA, Fumihiko)  
熊本大学・自然科学研究科・教授  
研究者番号: 60264280

中條壯大 (NAKAJO, Sota)  
熊本大学・自然科学研究科・助教  
研究者番号: 20590871