

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：53901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06625

研究課題名(和文) 広帯域超音波パルス波による水底堆積物の層厚・粒径観測手法の開発

研究課題名(英文) Developing the method of measuring thickness and size distribution of mud accumulated on bottom of water by broadband ultrasonic wave

研究代表者

松本 嘉孝 (Yoshitaka, Matsumoto)

豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：40413786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：止水域における底質の厚さと質を超音波エコーを用いて、間接的に測定できる新技術の開発を目指した。その結果、まず研究室の実験において、模擬底質及び実際の底泥において、粒径と超音波エコーのパワースペクトル間の関係性を明らかにした。また、単層および複層状に模擬底質を配置し、その層厚を測定する実験を行い、誤差2%以内に計測できることを確認した。

次に、屋外のため池で実験した結果、えられる反射エコーの大きさは試料の粒径に依存し、パワースペクトルのピーク値も、試料の粒径に依存していることがわかった。このことより、エコーとパワースペクトルのピーク値を調べれば、試料粒径の推定が可能であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来狭帯域の連続波ではなく、広帯域のパルス波を用いた広範囲のエコー測定で、底質厚の測定と粒径特性を明らかにすることができた。本手法によって底泥質と厚の情報と同時に推定できる可能性を示し、これは浄水場や下水処理場など、水底までの距離が明らかな場所での底泥推定に適用が可能である。

また屋外実験でも底質厚の測定が相対誤差3%以内であることが明らかとなったことから、底泥の媒質ごとの超音波速度が分かれば、水深が分からなくても底泥厚を算出することが確認できた。この基礎実験結果を発展させることにより、超音波により湖沼などの底質厚および粒径特性を安価で短時間に、そして広域で把握する手法の足掛かりができた。

研究成果の概要(英文)：The goal of our research during this research period is developing the novel methodology to measure the thickness and characteristics of accumulated bottom sediment in the inland water body. The relationship between the particulate size and the power spectrum of the ultrasonic echo was apparent in a laboratory experiment. The thickness of the sediment, accumulated single layer or double layer, was allowed to measure in a 2% error. The peak of the power spectrum relies on the sediment particle size to measure the thickness and characteristics of sediment mud in a field, which is the middle size of a water body in a park. This result represents mud particle size estimates from the ultrasonic echo and power spectrum without directly measuring methodology.

研究分野：土木環境工学

キーワード：超音波 底泥 粒径分布

# 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

内陸部に存在する河川や湖沼といった水域において、浸食や運搬作用等により砂や有機物が流入し、水底へ堆積すると泥となる。この底泥は、流域から流入および内部生産によって生じた水質汚濁に関わる化学物質が蓄積・要出する媒体の役割を担っている。そのため、底泥は一部の魚介類やユスリカ幼虫、イトミミズといった底生動物の生活の場となるとともに、有機物の沈降堆積過程の変化や、陸水の物質循環を解明していく上で重要な研究資料となる。

流域の上流部に位置する天然湖沼やダム湖へは木の葉や分解した微細有機物質などが流入し泥状となり堆積する。その堆積物は巻き上げなどにより富栄養化を引き起こし、貯水量の減少や水底の酸素不足を引き起こすことが課題となっている。

その対策の一つとして、底泥の浚渫があるが、どのような底泥が、どれくらい、どこに堆積しているかを明らかにすることは、浚渫計画および作業をする上で必要な情報とされる。しかし、既存の底質観測は特殊な採泥器を用いるため高い調査技術が要求され、その費用は高く、調査地点が限られるといった問題がある。そのため、底泥堆積量の3次元的な全体像を把握すると共に、底泥の質的情報を入手することが求められるが、それを解決する新たな手法が提案されていない現状がある。

ここで音波は、その伝搬特性により、短時間で広域にある対象物の速度や位置の測定が可能であり、音波を用いた間接的な地質探査手法は、現状の底泥の直接観測手法の課題解決に有効であると言える。しかし、水深が海よりも浅い地点に堆積し、海底下の地殻より比較的薄い層で構成されている陸水底泥を測定する場合には、解像度や精度の面で適しているといえない。水環境の分野での超音波の利用は、流速の観測<sup>1)</sup>や浮遊砂の観測(中嶋ら<sup>2)</sup>、本多電子<sup>3)</sup>)例がある。上記にも記したとおり、底質が数十センチメートルというわずかな厚みで堆積している場において、超音波での測定は難しいとされ、測定精度を向上させる調査手法のブレークスルーが求められている。

## 2. 研究の目的

そこで、著者らは、超音波で細胞の非破壊診断を行う手法を応用し、止水域における底質の厚さと質を超音波エコーを用いて、間接的に測定できる新技术を開発することを目指す(図1)。これは、従来観測で用いられている狭帯域の連続波ではなく、広帯域のパルス波を使用し、広範囲のエコー測定から底質厚の測定と粒径特性を明らかにする手法である。ただし、広帯域パルス波を用いた底質観測の研究例はないため、以下の方法で検討を行う。

### 1) 模擬底質での粒径および層厚の超音波エコー特性の把握および層厚推定式の構築

粒径が均一の模擬底質を用いて、鉛直方向に超音波を照射し、粒径毎の1層模擬底質厚の測定精度、多層状態における底質厚の測定精度および推定式の確立を行う。

### 2) 模擬底質と実際の底質との超音波エコー特性の比較および補正式の確立

粒径が不均一の実際の底泥の測定精度の検証および、模擬底質結果をもとに補正式を作成し、実際の底質での測定精度向上を目指す。

### 3) 実水域における超音波エコーによる間接的な層厚測定および底質性質の測定技術の開発

実験室内で確立した超音波測定方法の実証を行うため、粒径や層厚、観測条件が多様な実水域において観測を行い、従来手法と比較しその精度検証を行う。

## 3. 研究の方法

### 3. 1 研究の進め方

本研究は3つのPhaseに分けて行う(図2)。

「平成29年度」

#### Phase 1: 模擬底質での粒径および層厚の超音波エコー特性の把握および層厚推定式の構築

Phase 1では、室内での模擬底質(ガラスビーズ)を用いた実験を行う。超音波エコーは反射対象物の粒径に依存するため、粒径と周波数との関係を明らかにしなければ底質厚の正確な測定はできない。そこで、水平方向の実験で粒径とエコー周波数との関係を明らかにし底泥質の観測手法

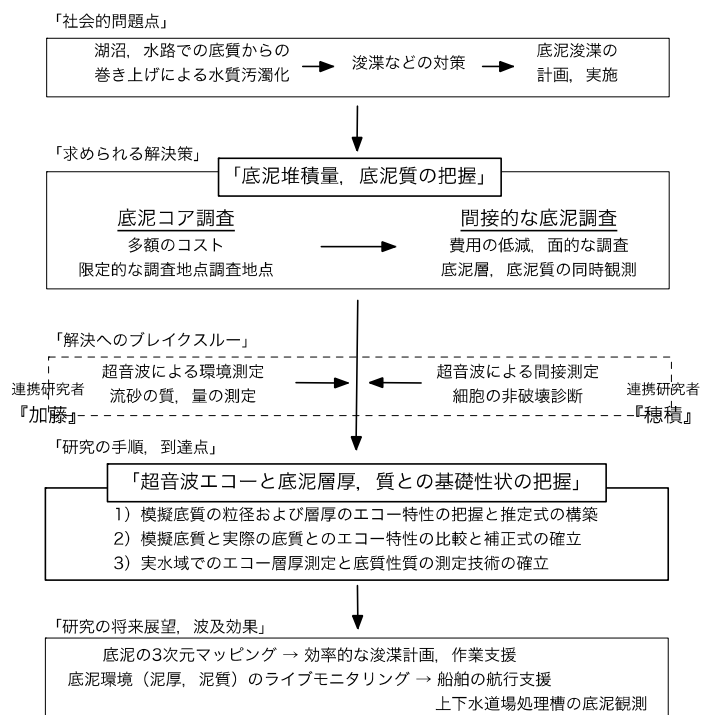


図1 研究の流れ(背景, 目的, 強み, 手順, 将来展望)

を構築し、鉛直方向の実験で粒径毎に周波数および送受信時間差から底質厚を観測手法を確立する。

「Step 1」これまで予備実験として、超音波パルスの送信振動子、受信振動子の作成、広帯域超音波パルス制御装置を開発している。ここで、連携研究者の穂積と協働し、これまでの実験で用いた機械式のパルス制御装置を、より安定性および精度の高いデジタル式制御装置とする。そして、エコーをスペクトル変換するための波長変換プログラムの構築費用を計上し開発にあてる。それらの装置等

を用いて、再度、水平方向での粒径毎のエコー特性を把握する。

「Step 2」現場での測定を想定した鉛直方向の実験には、送受信一体型の超音波振動子が必要であり、その振動子の構造や送信周波数は開発メーカーと設計する。また、鉛直方向実験を行うための鉛直アクリル柱を作成する。実験では、各粒径毎に厚みを変え、送受信時間の差から底質厚を求める関係式を作成する。その際、粒径毎でその関係式の周波数パラメータが異なることが考えられるため、水平方向の実験から求めた周波数度と粒径の関係式から補正を行う。

「平成30年度」

「Step 3」実際の底質は、粒径に依存する密度により沈降時間が異なるため、粒径の異なる層状構造だと考えられる。そのため、多層状に粒径の異なるビーズを配置し、多層状でも層厚が測定できる手法を確立する。

#### Phase 2: 模擬底質と実際の底質との超音波エコー特性の比較

Phase 2では、Phase 1のガラスビーズで確立した、底泥厚および粒径解析結果を実際の底質へ適用する研究を行う。実験機器および方法、解析手法はPhase 1と同様である。

「Step 4」湖沼より底泥を採取し、ふるいにより数 $\mu\text{m}$ から数 $100\mu\text{m}$ で分離した試料毎に水平方向の超音波照射実験を行う。現場の底泥は形状が不均一であるため、その結果は模擬底質結果に比べ、分解能が低くなっていると考えられる。そのため、どの程度の誤差が生じているかを明らかにする。このステップでは、ふるいの購入および底泥採取のための調査費用を計上する。

「令和元年度」

「Step 5, 6」Step 5では、湖沼から採取し粒径毎に分離した底泥を、Phase 1のStep 2と同様に鉛直方向での超音波照射実験を行う。Step 4と同様に、底泥厚が測定できる分解能を把握する。またStep 6として、採取した底質を多層状に配置し、超音波照射による底泥厚の測定方法を確立する。

#### Phase 3: 実水域での超音波エコーによる間接的な層厚・底質測定技術の開発

Phase 3では、屋内実験で得られた手法が、屋外でも適用できるかの実証実験を行う。

「Step 7」ボートで湖上から鉛直方向に超音波照射を行い、エコーを観測し、Step 6でえられたエコーと底質厚の関係式から底質厚を求める。その際、コアサンプリングを行い、実際の底質厚を把握する。このステップでは、ボートの購入費用、機器の防水対策費用、コアサンプリング費用などの調査費用を計上する。

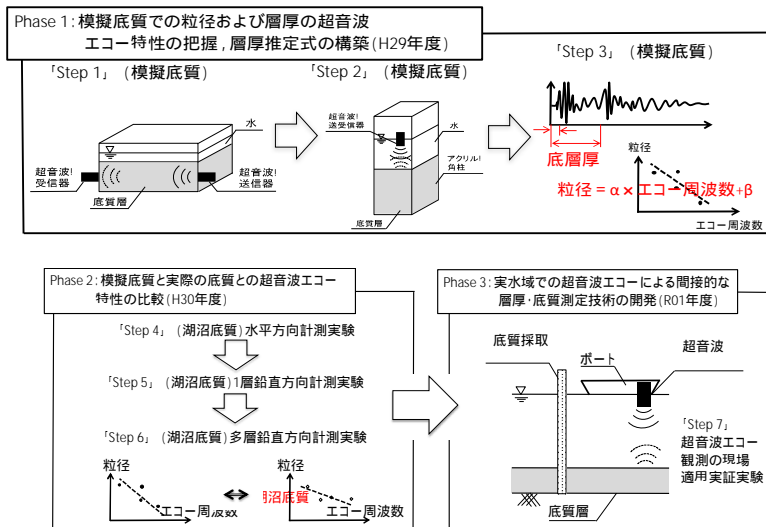


図2 実験計画

### 3.2 実験材料

本研究では超音波を照射する実験試料として、底泥とガラスビーズを用いる。底泥を構成している砂や泥粒子はその粒子の形が様々で無いため、各粒子によって反射の仕方が違う可能性が高い。特に各粒径のエコー特性把握における基礎実験を行う室内実験では、試料による誤差を取り除かなければならない。そこで、砂粒子と同じ粒径であり、粒子の形の均一性が高いガラスビーズを用いた実験を行う。

### 3.3 実験方法

試料を粒度分画した後、各粒径の底泥厚と底泥質の観測のための室内実験を行う。底質の反射実験では、角柱アクリル容器の底部に粒径ごとに分画した底泥またはガラスビーズを詰め、溶媒を注ぎ実験試料とした。複層反射実験では、堆積させた試料に対し水面から超音波を照射し、1層目および2層目の表面で発生したエコーを観測した。

底質の透過実験では、容器底部の中心から1cm上の位置よりパルサーに接続した振動子から実験試料に向かって超音波を照射した。超音波照射後は、試料内を透過した超音波をパルス照射位置と反対側に設置した振動子で受信し、オシロスコープを用いて波形測定および保存した。

底層厚の観測実験では、水面から超音波を堆積している試料にあて、その試料から得たエコーを検出した時間を記録した。その後、実験で得た観測時間と超音波の移動速度、すでに高さ分かっている実験容器の底部までの移動時間から、試料厚さを算出し、実際に堆積している試料厚さと比較した。複層の底厚の観測実験では、試料に対し超音波を照射し表層と2層目の表面にて発現したそれぞれのエコー観測時間を測定した。そして、観測した2つのエコー発現時間差と超音波の速度から、表層の厚さを算出し、実際の層厚と比較した。

屋外実験は、到達距離能計測実験および、水深不明時底厚計測実験を行った後、鉛直実験による底泥厚の算出と、測量用ポールによる実測値との比較を行い、現場での調査技術の適用性を検討する。

### 3.4 解析方法

底質の粒径特性を把握する実験の解析方法は、対象の物質に振動子を当てて超音波を発生させ、反射した超音波（エコー）を受信して画像データとして処理を行う。そして、記録された波形を周波数成分で分解しパワースペクトルとし、その大きさを周波数の領域で比較する。

底厚を把握する実験では、表層の表面と2層目の表面にて発現したそれぞれのエコー観測時間差と、その時の超音波速度より推定する。その後、実際に堆積している厚さと算出した厚さの誤差をもとめ、試料厚を変えた実験の誤差の平均を算出し、この観測方法の有効性を検証する。

## 4. 研究成果

### 4.1 模擬底質での粒径および層厚の超音波エコー特性の把握および層厚推定式の構築

堆積させたガラスビーズ試料に超音波を照射した結果、えられる反射エコーの大きさは試料の粒径に依存していることがわかった。次にエコーの周波数解析した結果、ガラスビーズ試料において、エコーのパワースペクトルのピーク値も、試料の粒径に依存していることがわかった（図3, 4）。これより、エコーとパワースペクトルのピーク値を調べれば、試料粒径の推定が可能であることがわかった。

次に、超音波が試料表面を反射する場合は、粒径によりエコーの周波数成分に変化はないが、超音波が試料内部を透過する場合は、粒径によりエコーの周波数成分が変化することがわかった。このことより、反射エコーの周波数スペクトルと透過エコーの周波数スペクトルは異なることがわかった。

2層目底質実験では、試料に向けて超音波を照射した結果、表層時のように2層目の表面でも

エコーの波形が確認できたが、振幅が表面波よりも小さいことがわかった。次にエコーのスペクトル解析とピーク値分析をした結果、表層条件、2層目条件ともに高周波帯では粒径が大きくなるほどパワースペクトルのピーク値が小さくなり、低周波帯では粒径が100 $\mu\text{m}$ 以上の時で粒径が大きくなるほどパワースペクトルのピーク値が小さくなる

ことがわかった（図5）。これより、超音波エコーにより水底に堆積した底泥質を2層目まで推定が可能であることが示された。

ガラスビーズ試料において、底層厚の違いにより、反射エコーの観測時間がそれぞれ違うことがわかった。また、各粒径で計算した厚さと実際に堆積している厚さの誤差を全体で平均すると、誤差5%以内になることがわかった。このことより、表面を反射するエコーによって底泥厚の推定が可能であると示された。

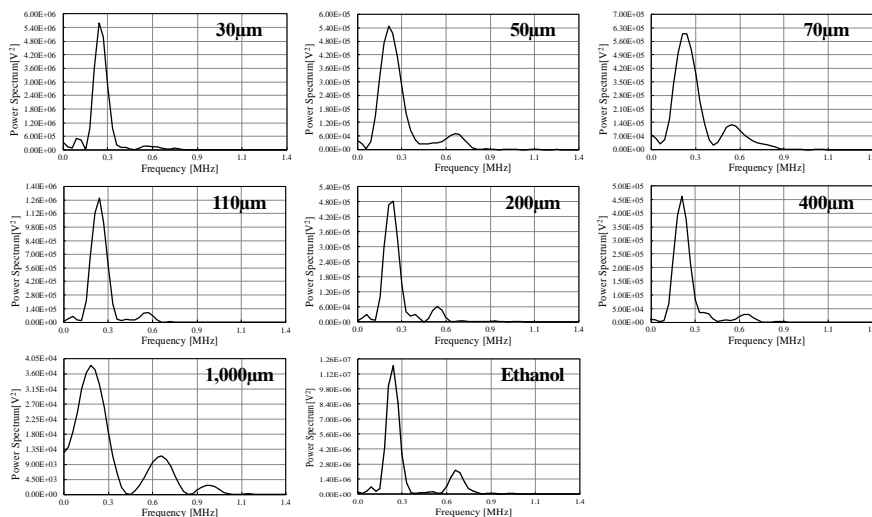


図3 ガラスビーズ試料の反射実験でえられた周波数スペクトル

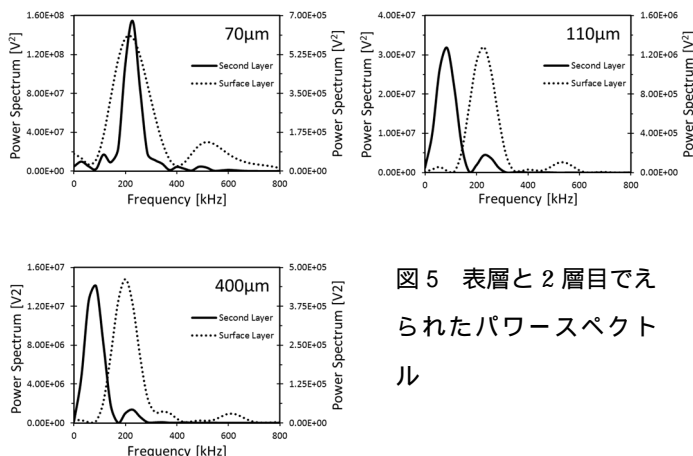


図5 表層と2層目でえられたパワースペクトル

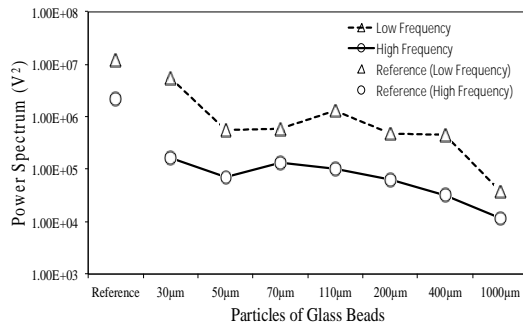


図4 ガラスビーズ試料の反射実験でえられた  
パワースペクトルのピーク値

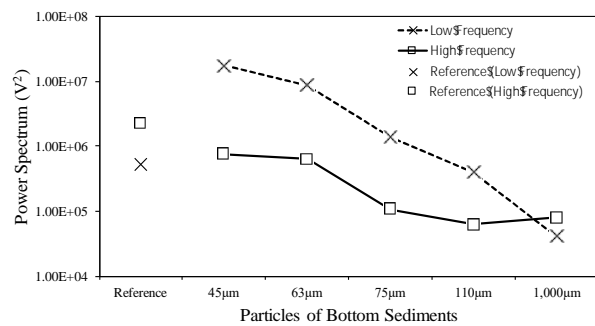


図6 底泥試料の反射実験でえられたパワースペ  
クトルのピーク値

底層を複層にした実験では、各粒径で計算した厚さと実際に堆積している厚さの平均誤差を全体で平均すると、誤差が2%以内になることがわかった。これより、2層目を観測したエコーにより、表層厚推定が可能であることが示された。

#### 4.2 模擬底質と実際の底質との超音波エコー特性の比較および補正式の確立

ため池で採取した底泥試料に超音波を照射した結果、えられる反射エコーの大きさは試料の粒径に依存していることがわかった。次にエコーの周波数解析した結果、エコーのパワースペクトルのピーク値も、試料の粒径に依存していることがわかった(図6)。このことより、エコーとパワースペクトルのピーク値を調べれば、試料粒径の推定が可能であることがわかった。

次に、ガラスビーズ試料と同様に、超音波が試料内部を透過する場合は、粒径によりエコーの周波数成分が変化することがわかった。このことより底泥試料についても、反射エコーの周波数スペクトルと透過エコーの周波数スペクトルは異なることがわかった。

以上の結果より、超音波エコーにより水底に堆積した底泥質の推定が可能であることが示された。ただし粒径の大きさがエコーの進行方向に影響を与えるため、超音波が試料表層を反射する場合と試料内部を透過する場合とでは、粒径と検出されるエコーの大きさの関係性は異なることが考えられる。また反射エコーと透過エコーとで周波数スペクトルが異なるため観測には注意が必要である。

底泥試料において、試料厚の違いにより、反射エコーの観測時間がそれぞれ違うことがわかった。また、各粒径で計算した厚さと実際に堆積している厚さの誤差を全体で平均すると、誤差5%以内になることがわかった。このことより、表面を反射するエコーによって底泥厚の推定が可能であると示された。

以上の結果から、本研究の手法によって底泥質と底泥厚の情報が同時に推定できる可能性を示した。これは浄水場や下水処理場など、水底までの距離が明らかな場所での底泥推定に適用が可能であると言える。しかし、表層より下の底泥の質や厚さを観測する場合は、表層を透過するエコー特性を考慮した実験を行う必要や、多層状態での底泥厚の観測実験を行う必要がある。

#### 4.3 実水域における超音波エコーによる間接的な層厚測定および底質性質の測定技術の開発

到達距離能計測実験により、1.5m以下の水深であれば、水深が分かっている場合、周波数800kHzの超音波で底泥厚を測定できることが確認できた。また、水深不明時底泥厚計測実験により、水平方向実験で算出した超音波速度を用いて底泥厚を計測した結果、相対誤差は3%以内となり、底泥の媒質ごとの超音波速度が分かれば、水深が分からなくても底泥厚を算出することが確認できた。

屋外実験では、底泥表層面での反射波を確認することができたため、水深が分かっている場合での底泥厚の算出が可能であるといえる。しかし、底泥が厚いため、超音波が減衰し、湖沼底面での反射波を確認することができなかった。そのため、振動子の出力をあげる、減衰しにくい低周波数の超音波を用いる必要があると考えられる。また、表層面観測用の周波数と湖沼の底面観測用の周波数の二つを組み合わせることも問題解決の一つの手段であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Gibbard, D.: Design and installation of ultrasonic and electromagnetic flow gauging stations, Flow Measurement and Instrumentation, 4, pp.25-33, 1993.
- 2) 中嶋亮太, 加藤茂, 穂積直裕, 岡辺拓巳: 超音波パルスを用いた浮遊砂の粒径推定に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 70, 1476-1480, 2014.
- 3) 本田電子株式会社: 超音波技術紹介, 超音波ハンドブック, 第3章, [https://www.honda-el.co.jp/hb/3\\_11.html](https://www.honda-el.co.jp/hb/3_11.html) (閲覧日: 2020年6月9日)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ishikawa Tomonari, Matsumoto Yoshitaka, Hozumi Naohiro	4. 巻 1865
2. 論文標題 Developing the new method measuring thickness and quality of bottom sediments in using ultrasonic wave	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 proceeding of the 3rd international conference of global network for innovative technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4993407	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松本嘉孝, 石川智也, 穂積直裕, 加藤茂
2. 発表標題 超音波を用いた陸水底泥の層厚および粒径観測手法の確立
3. 学会等名 土木学会中部支部年次講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomonari Ishikawa, Yoshitaka Matsumoto, Naohiro Hozumi
2. 発表標題 Developing the new method measuring thickness and quality of bottom sediments
3. 学会等名 IGNITE2016（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshitaka Matsumoto, Tomonari Ishikawa, Koki Nishimura, Shigeru Kato, Naohiro Hozumi
2. 発表標題 The relationship between particle sizes of sediment and echo spectrums irradiated by ultrasonic measurement techniques
3. 学会等名 INTERCOH2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

受賞歴 Yoshitaka Matsumoto : Ray Krone award second prize, INTERCOH2019 (2019.10)
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	穂積 直裕 (Hozumi Naohiro) (30314090)	豊橋技術科学大学・電気・電子情報工学・教授  (13904)	
連携研究者	加藤 茂 (Kato Shigeru) (40303911)	豊橋技術科学大学・建築・都市システム学系・教授  (13904)	