

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760389

研究課題名(和文)海中構造物周辺の底質浮遊・洗掘機構の解明と波浪・土砂・地形の相互作用系の統合解析

研究課題名(英文) Mechanisms of the interaction among waves, sediment transport and bed evolution around a marine structure and the integrated analysis

研究代表者

楳田 真也 (Umeda, Shinya)

金沢大学・環境デザイン学系・准教授

研究者番号：30313688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：洋上風力発電の円筒形基礎を想定した模型を砂地盤に設置し、暴浪の発生から終息までの波浪を造波水槽内に再現して実験を行った。波の不規則性や変動性が構造物周辺の洗掘地形の発達・埋戻しに及ぼす影響を究明するとともに、その変動過程を捉えられる数値解析モデルを開発した。また、波による海底砂の移動限界条件を正確に与える実験式を考案し、数値解析に利用した。波および流れによる砂漣の発生・変形過程、および海中の円筒構造物周りの洗掘現象の解析を行った。その結果、砂漣から構造物スケールの海底面の変動現象を良好に捉えられる解析手法を構築することができた。

研究成果の概要(英文)：This study investigates the scour process at a slender monopile during various phases of a storm to give a better understanding of scour and backfilling mechanisms. Laboratory experiments were carried out to simulate the scouring effect at a pile by a storm consisting of a succession of seven phases of irregular waves. A numerical model was developed in order to perform simulations of the process of the scour and backfilling around a pile in waves. The initiation of sediment motion under waves was studied to develop a simple empirical model for determining critical Shields parameter and critical velocity of fine sand. Evolutions of vortex ripples and scour around a pile were simulated to demonstrate the effectiveness of the numerical model and empirical model. It was found that the methods has proved useful in understanding of dynamics of small scale bed form (vortex ripples) and middle scale bed form (pile scour).

研究分野：水工学

キーワード：海岸工学 洗掘 砂漣 底質輸送 波 移動限界 相互作用

### 1. 研究開始当初の背景

海底資源の開発を取り巻く国際環境の変化に伴い、近年、海底資源の探査・開発を積極的に推進する必要性が増している。枯渇性燃料から再生可能なエネルギーへのシフトを進める中、洋上風力発電の実用化も進められており、これまでになく過酷な海域での開発計画が急増している。そのような開発を着実に進めるには、上部構造物の開発と共に、その基礎部分の長期的な安定性を確保するための高度な技術が不可欠である。

従来から、海中構造物の被害の多くは、基礎周辺の複雑な流体運動（渦など）に伴う砂の巻き上げによる海底面の侵食（洗掘）が原因で、構造物自体の沈下や損傷等が引き起こされてきた。洗掘の効果的な防止対策や沿岸施設の総合的な保全計画を検討するには、最大洗掘深、洗掘形状および流動場等を定量的に評価できる解析技術が求められている。

洗掘現象は波浪・構造物・底質・地盤を要素とする複雑な相互干渉の問題であるため、その定量的な評価は難しく、その学術的・社会的な重要性に反して、洗掘現象のメカニズムの解明やモデル化に関する研究は十分とは言えない。

### 2. 研究の目的

本研究は流体運動・底質輸送・地盤変動の複雑な相互作用系である海中構造物周辺の洗掘現象を対象に、基礎周辺の渦流れによる土砂の浮遊輸送と基礎周辺の地形変化（洗掘・堆積）の過程やメカニズムを究明する。その目的を達するために、以下の4つの目標を設定した。

(1) 実海域での構造物基礎部の地形変動予測の際に重要となる波浪の不規則性及び暴浪イベントに伴う波浪の変動性が底質輸送形態や洗掘・堆積過程に及ぼす影響を詳しく分析する。

(2) 波・底質・地形変化の相互作用過程を正確に評価するための数値解析モデルを構築し、波による砂漣の発生・発達過程の問題に適用し、各要素間の素過程の再現性を調べる。

(3) 波による海底砂の移動限界について、波の条件を考慮した新たな実験式を提案し、数値解析の精度向上を図る。

(4) (2) のモデルを用いて、構造物周辺で渦が激しく生じる小口径円柱周辺での洗掘現象の再現計算を行い、本モデルの適用性や課題を明らかにする。

### 3. 研究の方法

主に目標(1)や(4)のために、着床式洋上風力発電施設の円筒形基礎を想定したモデルを砂地盤に設置し、暴浪の発生から終息までの一連の波浪変動パターンを造波水槽内に再現して、構造物模型周辺の波、流況、砂の移動と底面地形の変化過程を詳しく計測・観測した(図-1)。現地波浪データを利

用して暴浪時の波高・周期と再現期間を統計解析し、現地状況の再現性を考慮して強度別に4段階の波浪条件を選定した。波の強度を段階的に増加・減少させることで暴浪イベントを模擬することで、波の不規則性や変動性が構造物周辺の洗掘地形の発達・埋め戻りの過程に及ぼす影響を調べた。

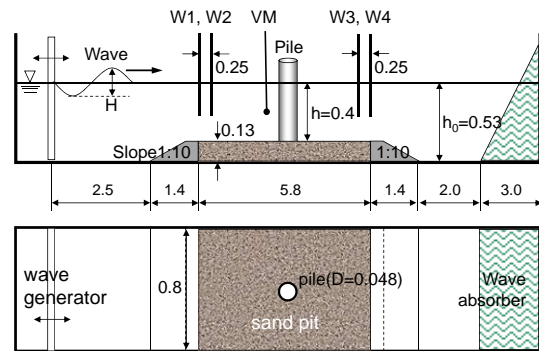


図-1 円筒構造物周辺の洗掘実験の概要

主に目標(2)のために、波による砂漣の発生・発達過程を捉えるための数値解析モデルを構築した。本研究の数値解析モデルは、流体場を計算するモデルと底質輸送モデル、底面地形モデルによって構成され、これらの連成解析により計算される。流体場の計算は Navier-Stokes 方程式に LES 型乱流モデルを追加した運動方程式を用いる。底質輸送は輸送形態を掃流砂と浮遊砂に分けてモデル化し、掃流砂は Van Rijn の式、浮遊砂は濃度の移流拡散方程式を用いて計算する。底面地形の変動は砂の体積保存の関係から求める。地形変化に合わせて計算格子を再形成して、次の時間ステップの流体・底質輸送の計算を行う。境界条件として、水平・奥行き方向で速度・圧力・底面せん断力については周期境界条件とした。そして底面境界に擾乱のために Vittori らの手法に従って微小な流速を与えた。

目標(3)のために、二次元造波水槽の底面に厚さ約 3cm で一様に敷いた砂が移動し始める時の波高および流速を計測した。中央粒径 0.16mm の富山港の浚渫砂と 0.31 mm の小舞子海岸の汀線付近の砂を用い、水深 25cm、周期 1.0~3.0s の規則波を作用させた。砂の移動限界の判断は多くの従来研究と同様に目視やビデオ映像による観測に基づいて、砂面で比較的突出した砂粒や比較的細かい砂が移動し始める初期移動と砂面表層にある砂粒がほとんど動き出す全面移動の2種類の移動限界条件を計測結果より求めた。さらに、本実験と同様に造波水槽を用いて行われた波による砂の移動限界に関する既往の実験データをできるだけ多く収集して、移動限界に及ぼす波の影響に着目して分析した。

目標(4)のために、構造物周辺での渦流れ、底質の浮遊・拡散および底面の洗掘・堆積過程を解析できるように(2)で作成した

モデルを拡張した。砂漣スケールから構造物スケールの地形変化現象を効率的かつ精度良く捉えるために、流体運動と地形変動の変動性の違いを考慮した計算スキームを取り入れ、(1)の実験結果等と比較を行い、本モデルの適用性を検討した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 波浪の不規則性・変動性が円筒構造物周辺の洗掘・堆積過程に及ぼす影響

まず、今回の不規則波による洗掘実験と過去に実施した規則波による洗掘実験結果との比較から、波の不規則性が洗掘パターンや最大洗掘深に与える影響を検討した。規則波による円筒構造物基礎周辺で形成される洗掘・堆積の地形形態は、構造物の直径と波の周期・波高・水深等によって変化する水粒子の移動距離との比(KC数)および砂や波の条件によって変化する摩擦係数に似た値(Shields数)によって分類される(Umeda, 2011)。不規則波の場合、有義波または1/10最大波を用いることで、規則波の形態分類図が概ね利用可能であることが分かった(図-2)。また、最大洗掘深の場合も同様に、有義波または1/10最大波に基づくKC数から概ね洗掘深の範囲を求めることができることが分かった(図-3)。

次に、暴浪イベントに伴う波浪の変動性と波の不規則性が洗掘地形の発達・埋め戻りの

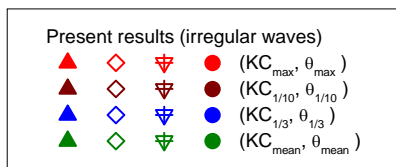
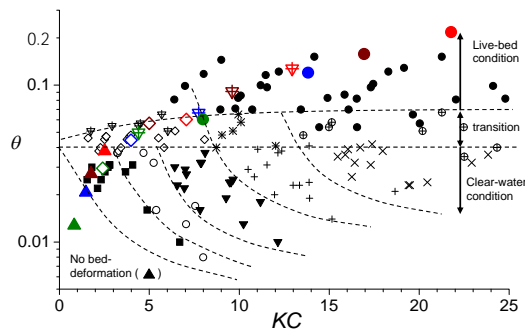


図-2 円筒構造物周辺の洗掘・堆積の形態分類(規則波および不規則波)

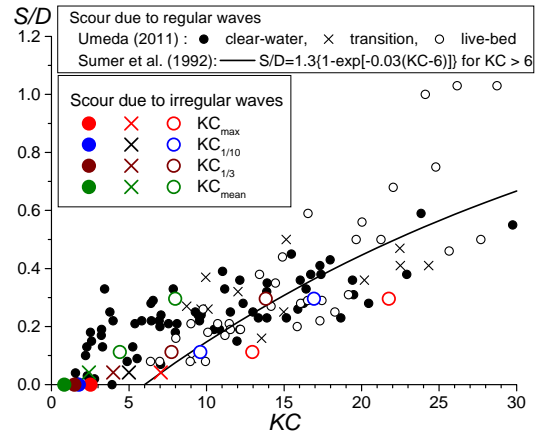
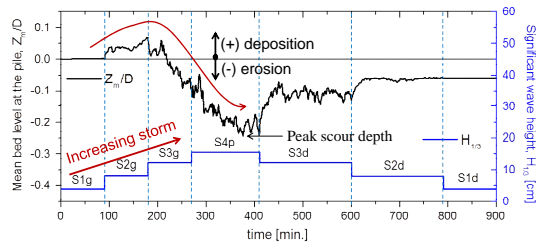
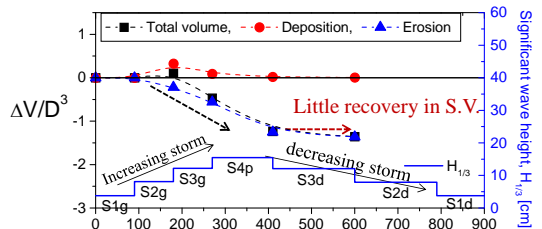


図-3 最大洗掘深とKC数の関係



(a) 構造物周辺の洗掘深



(b) 構造物周辺の砂の体積

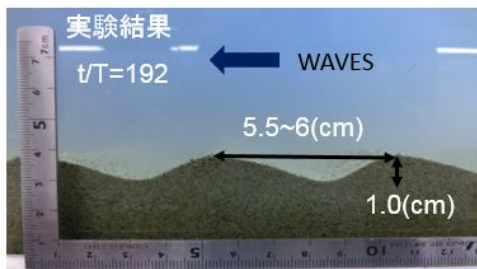
図-4 波浪変動期間中の洗掘深や底質体積(発達段階: S1g - S4p, 減衰段階: S4p - S1d)

過程を解析し、波の不規則性や洗掘地形の変動履歴が最大洗掘深や底質体積の変化に与える影響を調べた。浸食・堆積の地形パターンや砂の移動形態はイベント中に遷移すること、各段階の洗掘地形は同じ強度の波浪が長時間続いて平衡状態に達したものと一致することが分かった。また、基礎根元の底面高は暴浪がある程度発達した段階で一時的に上昇し、さらに発達すると低下して暴浪ピーク段階で根元の洗掘深が最大に達する。暴浪減衰段階になると埋戻しにより根元付近の底面高さは急速に上昇するものの、最終底面高は初期に比べ低く、完全には回復しない(図-4(a))。波浪減衰の後の最終的な洗掘深は最大洗掘深に比べると約1/3と小さいこと、埋戻しは根元付近の限られた範囲のもので、ピーク段階で生じた洗掘孔全体を埋めるには十分でなく、暴浪減衰期も基礎周辺の底質量の回復はほとんど見込めない場合がある(図-4(b)) ことなど基礎周辺の洗掘・堆積の過程の特徴に関する知見を得ることができた。

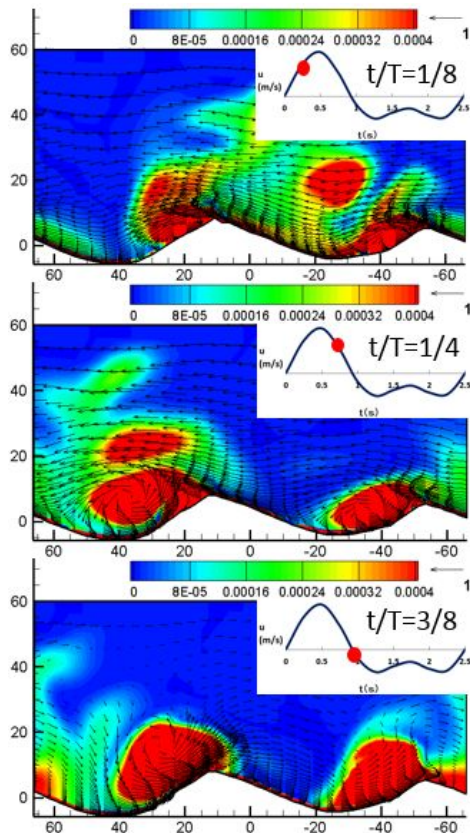
(2) 流体・底質・地形の連成モデルによる波による砂漣の発生・発達過程の数値解析

底面に砂漣形成のきっかけとなる小さな凸部(高さ数 mm)を与えた砂面上が波によって砂漣が発生し、ほぼ平衡状態になるまでの過程を実験および数値解析した。実験では砂漣頂部の岸側に急斜面をもつ非対称な形状になった(図-5(a))。同じ波の条件で十分発達し、ほぼ平衡状態に達した砂漣の平均的な高さや波長は波の条件によって変化した。波形勾配は実験条件の範囲では概ね0.16-0.2程度になった。数値解析でもほぼ同様な形状の砂漣が再現できた(図-5(b))。

計算領域の大きさを変更しても、形成される砂漣の波長はほぼ一定で、実験同様に一定条件の砂に対して波の条件により砂漣の大



(a) 平衡状態の砂漣 (実験結果)



(b) 平衡状態の砂漣，流況と浮遊砂濃度分布の時間変化 (数値解析結果)

図-5 波による砂漣の形成に関する実験と数値解析の結果の比較

きさが変化することが確認された。また、砂漣の頂点付近で発生した渦に砂が巻き込まれて、浮遊砂となって移動する様子を数値解析によって捉えることができた。さらに、広範囲の条件下での砂漣の発生・発達の再現計算を行い、従来の実験結果と概ね一致する傾向を示すことが確認された。

(3) 波による海底砂の移動限界条件に関する実験およびデータ解析

砂の移動限界条件は漂砂量式などを利用する海浜変形、海岸構造物周辺洗掘や砂漣などの数値解析の結果をかなり左右する可能性があるため、波浪条件も考慮して移動限界を精度良く推定する必要がある。本研究では、海底砂の移動限界を波と砂の条件を用いてできるだけ簡単な式で正確に表すために、造波水槽を用いた細砂の移動限界実験を行うとともに、既存の造波実験のデータを収集・分析した。その結果、以下の知見を得て、実験式を提案することができた。

細砂の移動限界時の Shields 数と波高水深比は概ね比例関係にある。その近似式の傾きは移動限界状態の違いに関わらず水と砂の物性によって決まる式の無次元粒径に依存する。全面移動限界の波高水深比は砂の粒径、波長や水深で定義される無次元数を用いた式によって実験結果の変化傾向をある程度捉えることができる。

上記の式を組み合わせる移動限界 Shields 数を波と砂の諸元から陽的に直接算定するための簡便な実験式を考案した。本式の大規模実験への適用性は良好であり、従来の幅広い粒径範囲をカバーしたものに比べて、適用範囲は限られるものの、波の条件を考慮して精度良く限界 Shields 数を求める場合に役立つ(図-6)。

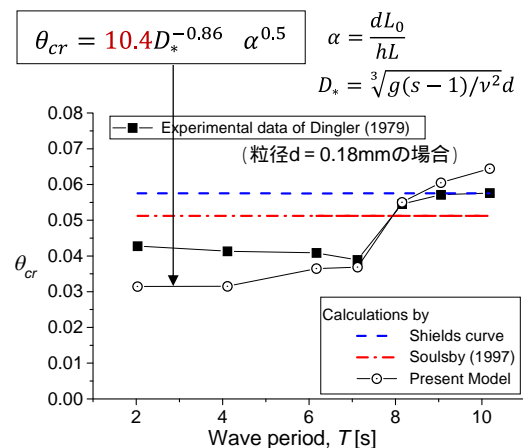


図-6 大型実験結果から得られた移動限界 Shields 数に関する本実験式および従来実験式による推定結果の比較

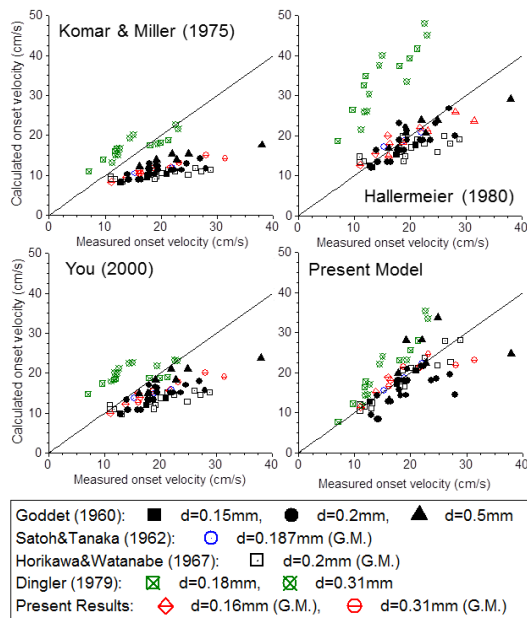


図-7 波による海底砂の移動限界流速に関する本実験式および従来実験式による推定結果の比較

全面移動限界の底面流速についても同様に陽的な算定式を提案した。波の周期とともに限界流速が増加する傾向は従来の代表的な算定式と同様であるが、本式は水深変化の影響を利用している点が特徴である。本式によって造波実験による細砂の移動限界流速をより良好に推定できることが分かった(図-7)。ただし、本式による現地海底砂の移動限界の推定にはある程度限界があると考えられる。今後、現地観測データの蓄積とともにより幅広い粒径の砂の移動限界に関するデータ解析が必要である。

#### (4) 流体・構造物・底質・地形の連成モデルによる海中構造物周辺の洗掘問題の数値解析

様々な条件の波浪による洗掘現象を取り扱いために、波によって生じる任意の流速変動を与えられるように境界条件を設定して、直立円柱周辺の渦流れ、掃流砂・浮遊砂の移動および底面地形の変化を解析した。(1)の実験結果等から得られた知見に基づいて、KC数およびShields数の変化によって生じる様々な洗掘・堆積形態の再現を試みた。

その結果、主に発生後間もない後流渦の下で底面せん断力が局所的に急激に大きくなり、渦中心部での砂の巻上げに寄与する様子を数値解析的に捉えることができた。砂の移動限界以下の波の条件では、Clear-waterの状態(構造物から離れた地点では海底砂は移動しない場合)になり、構造物によって生じた後流渦の周辺部で主に掃流砂による地形変動が徐々に進行し、円柱片部を中心に洗掘孔が発達し、砂の水中安息角を維持しながら洗掘深が増すにつれて洗掘孔が周辺に徐々に拡大する。これらの特徴は従来の実験結果

や本実験(1)の結果と概ね整合していることが確認できた(図-8)。

波が大きくなり Live-bed scour の状態(構造物から離れた地点でも海底砂は移動する場合)になると、砂の移動が活発で、地形変動も激しくなる。実験では砂面全体に砂漣が形成されるとともに、基礎部周辺で洗掘孔が生じた。計算結果でも同様に砂漣地形が形成され始め、基礎部周辺で形成される洗掘地形を概ね再現している。ただし、実験の洗掘・砂漣の地形は複雑であるが、数値解析では詳細地形までは捉えられていない。また洗掘の進行速度に比べて砂漣の発達が遅い。この原因のひとつとして、初期地形や波の場に様々な擾乱の度合いが実験と数値解析で異なることが考えられる。数値解析では、境界条件に Vittori らの手法を用いて流体場に微小な乱れを誘発するための工夫をしたが、その度合いの調整は十分でない。微地形を再現するには、格子解像度を含めて再検討が必要である。ただし、構造物周辺の洗掘による最大洗掘深の推定に関しては、本数値解析モデルで概ね再現することができており、KC数とともに増加する傾向を良好に捉えられることが確認された。

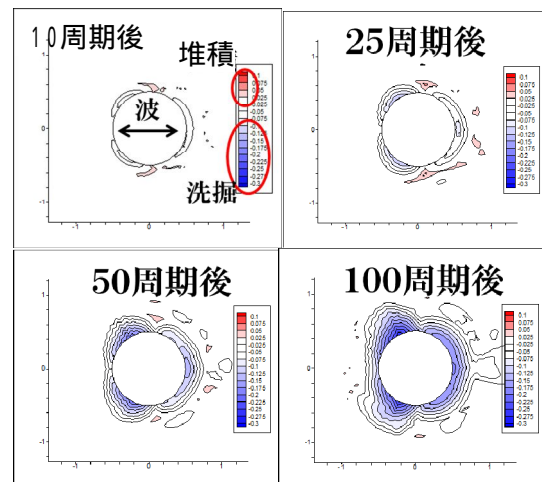
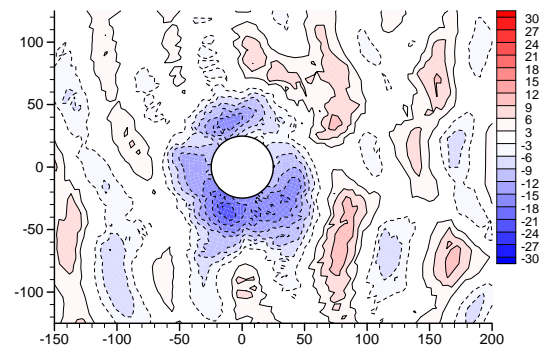
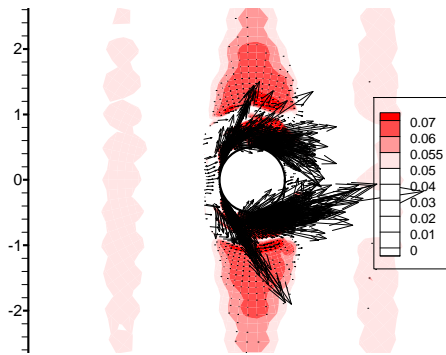


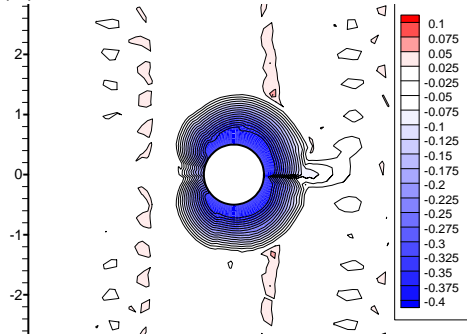
図-8 円柱基礎周辺の洗掘・堆積地形の変化過程(Clear-water scour)



(a)実験結果



(b) 計算結果 (無次元底面せん断応力)



(c) 計算結果 (底面地形)

図-9 洗掘地形に関する実験結果および計算結果の比較 (Live-bed scour)

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 2 件)

榎田真也, 横山珠実, 波による海底砂の移動限界に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 70 巻, 2 号, pp.1\_586-1\_590, 2014, 査読有  
[http://doi.org/10.2208/kaigan.70.1\\_586](http://doi.org/10.2208/kaigan.70.1_586)

S.Umeda, Scour process around monopiles during various phases of sea storms, Journal of Coastal Research, SI65, pp.1599-1604, 2013, 査読有  
[http://www.ics2013.org/papers/Paper4438\\_rev.pdf](http://www.ics2013.org/papers/Paper4438_rev.pdf)

### 〔学会発表〕(計 3 件)

市岡大昌, 榎田真也, 由比政年, 波による砂澱の発生・発達過程に関する数値解析, 平成 26 年度土木学会中部支部研究発表会, 2015.3.6, 豊橋  
<http://www.jsce-chubu.jp/gyoji/H26/hppyou26.html>

榎田真也, 横山珠実, 波による海底砂の移動限界に関する研究, 土木学会海岸工学講演会, 2014.11.12~14, 名古屋  
<http://www.coastal.jp/ja/index.php?%E7%AC%AC61%E5%9B%9E%E6%B5%B7%E5%B2%B8%E5%B7%A5%E5%AD%A6%E8%AC%9B%E6%BC%94%E4%BC%9A>

S.Umeda, Scour process around monopiles during various phases of sea storms, 12th International Coastal

Symposium, 2013.4.8~12, プリマス (英国)

<http://www.ics2013.org/?page=programme>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

榎田 真也 (UMEDA SHINYA)

金沢大学・環境デザイン学系・准教授

研究者番号: 30313688