

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月22日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22686047

研究課題名（和文）飛来塩分評価技術の高度化に向けた海岸構造物での
海塩粒子生成モデルの開発研究課題名（英文）Modeling of sea salt particles generated at a coastal structure
for an improvement in assessment techniques of salinity in the air

研究代表者

山城 賢（YAMASHIRO MASARU）

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：70336014

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、塩風害の原因である飛来塩分の評価技術の向上に資するべく、大量の飛来塩分の発生源となり得る直立護岸を対象に、発生量の推定式を得ることである。波と風を同時に作用させる水理模型実験を行い、波の打ち上げの特性を把握した。並行して、建設中の人工島において冬季の高波浪時に現地観測を行い、飛来塩分量と越波流量の空間分布などを得た。これらの結果から、直立護岸で生じる飛来塩分量の推定式を得た。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a simple estimation method of quantities of salinity in the air generated at vertical coastal structures. Model experiments using a two dimensional wind-wave flume were conducted in order to clarify the characteristics of violent wave run-ups (splash run-ups). Field observations on the diffusion of salinity in the air were also conducted at an artificial island. A simple estimation method was drawn from the results of experiments and observations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2012年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	16,500,000	4,950,000	21,450,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：海岸工学、飛来塩分、海岸構造物、可視化実験

1. 研究開始当初の背景

海から陸に向かって吹く風は海水の塩分を含むことから潮風と呼ばれ、穏やかな天候のもと、海岸で潮風に吹かれれば人々は心地好さを感じる。しかしながら、台風や冬季風浪による強風時には、空気中に微小な海水滴（海塩粒子）が大量に含まれ、それが風によって陸域の数10kmにも亘って拡散するため、鉄筋コンクリート構造物等の腐食・劣化、農作物の枯死・減収、広域に及ぶ停電など、多岐にわたって塩風害が生じることがある。ま

た、海の傍に暮す人々にとっては、住宅や自家用車の劣化など、生活環境や日常生活にも悪影響を及ぼす。加えて、近年では地球温暖化の影響と思われる海面上昇や台風の強大化が現実のものとなっており、将来的には更なる影響が懸念されている。海岸防災の点からは高潮や高波による災害の増加が心配されているが、飛来塩分による塩風害がそれらにまして増大することは想像に難くない。

現在の社会情勢を鑑みれば、供用年数に達

しつつある多くの鉄筋コンクリート構造物に対して、適切な維持管理による長寿命化が強く望まれており、また、食料自給率が極めて低い我が国においては、将来的に安定した農業生産を確保することが重要な課題となっている。塩風害はこれらの問題に大きく影響する災害である。したがって、飛来塩分量の推定は重要であるが、現状では、観測結果に基づいた経験式による推定法が主な手段であり、より精度良く飛来塩分量を予測・推定する技術の開発が望まれている。

沿岸部で塩風害を引き起こす飛来塩分の実体は、近隣の海岸で発生した粒径が数 100 μm 以下の海塩粒子であり、その発生過程は、①海面での気泡の破裂、②強風による波頭のちぎれ、③海岸での激しい砕波、④構造物や岩などへの波の衝突による飛沫の打上げに大別される。そのうち、④の構造物等で生じるものは、人工海岸や岩礁生海岸を多く有する我が国において、周辺への影響が大きい。しかしながら、実態を把握することが難しく、現在においても未解明な部分が多い。飛来塩分の拡散過程については、数値シミュレーションが可能であるけれども、海岸構造物等での海塩粒子（飛来塩分）の発生量が分からないため、現状では、飛来塩分量を精度よく推定することが難しい。

2. 研究の目的

本研究の目的は、飛来塩分量評価の精度向上に資するため、海塩粒子（飛来塩分）の発生量をモデル化することである。なお、様々な海岸構造物の中で、直立壁タイプの構造物は、高波浪が作用すると激しく水塊が打ち上がり、それが強風により拡散して大量の飛来塩分を生じることから、飛来塩分の発生源になりやすい構造物と考えられる。そこで、本研究では、直立壁タイプの構造物を検討対象とする。

3. 研究の方法

本研究では、高波浪時に直立壁タイプの構造物で波が打ちあがり、その打ち上がった水塊に風が作用することで、大量の海塩粒子（飛来塩分）が発生するという発生過程を対象とし、水理模型実験により構造物での波の打上げ規模の特性について調べ、飛来塩分に関する現地観測を行って打ち上げ規模との関連を検討した。

(1) 水理模型実験による波の打上げ規模に関する検討

波と風を構造物に作用させる模型実験を行い、打ち上がる水塊の量を計測して、一波ごとの打上げ規模の特性について調べた。

① 実験装置・条件

実験は、波と風を同時に起こせる断面 2 次元造波風洞水路（長さ 28m、高さ 0.5m、幅 0.3m、図-1 参照）に海底斜面および直立堤の模型を設置して行った。入射波は修正 Bretschneider-光易型スペクトルを有する 2 種類の不規則波で、有義波高をそれぞれ $H_{1/3}=4.5\text{cm}$ および 5.7cm 、有義波周期はともに $T_{1/3}=1.0\text{s}$ と設定した。風の条件は、護岸壁面上の平均風速を代表風速として、 0.0m/s （無風）、 3.0m/s 、 4.5m/s 、 6.0m/s を設定した。各実験ケースとも波と風を同時に約 470 秒間作用させた。

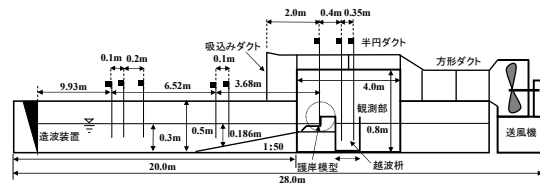


図-1 断面 2 次元造波風洞水路の概略

② 計測方法

波の打上げの規模を検討するにあたり、画像解析を用いた計測手法を新たに開発した。この計測手法の概略は以下のとおりである。構造物模型の前面での流体運動（波の打上げや越波）を可視化し、高速度カメラで撮影する。撮影した映像から PIV (Particle Image Velocimetry) により流速ベクトルを求める。図-2 に示すように、流速ベクトルから、護岸天端の高さに設けた検査ライン上の鉛直流速の時系列を抽出する。得られた流速の時系列を検査ラインについて積分すれば、検査ラインを上下に通過する水量の時系列が得られ、さらに 1 周期間で積分すれば、1 波当りの正味の越波量が求められる。このとき、ある 1 波の作用時間は、護岸の壁面に沿って計測した水位変動データから判断する。本計測手法は、単に越波量を求めるだけでなく、構造物前面での流体運動そのものを計測するため、得られた流速ベクトルから、例えば、天端から打ち上がる水量、護岸前面に戻る水量、打ち上がる水塊や越波水の速度などを得ることができる。

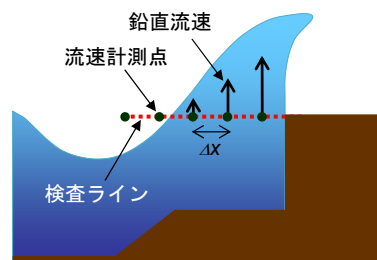


図-2 可視化実験における計測手法の概略

可視化は以下のように行った。図-3に可視化実験の概略を示す。高速度カメラによる撮影範囲を水路ガラス面から2.5cmの護岸天端周辺とし、護岸模型に背景となる黒い板を設置した。また、撮影範囲にグリーンレーザーシートを照射するため、マウンドの下にミラーを設置して、レーザーシートを水路の側面から照射した。マウンドは透明のアクリル製で、レーザーシートが透過する部分以外は黒く着色した。なお、図-3に示す水路の観察部は遮光性のテントで覆い暗室とした。実験では、護岸前面にトレーサーをチューブを通して混入し、レーザーシートで発光させて高速度カメラで撮影した。

本研究で用いた高速度カメラは、最大解像度がVGA(640×480ピクセル)で、撮影した画像をLAN(ギガビットイーサネット)で繋いだPCの内蔵メモリに記録するタイプのものであり、録画可能時間はフレームレートとPCの内蔵メモリの量に依存する。フレームレートについては、予備的な検討の結果、400fps(シャッター速度1/500秒)とした。撮影時間については、不規則波を対象としているため、数百波が作用する数分間の撮影ができるよう、96GBのメモリを搭載したPCを使用した。また、トレーサーについては、複数のトレーサーを比較検討し、人工海水で発生させたマイクロバブルを利用した。したがって、水路内の淡水中に海水のマイクロバブルを混入することになるため、護岸前面での打上げや越波に及ぼす海水マイクロバブルの影響について事前に調べ、本研究で対象とする越波や打上げなどの激しい現象に対して、ほぼ影響がないことを確認した。

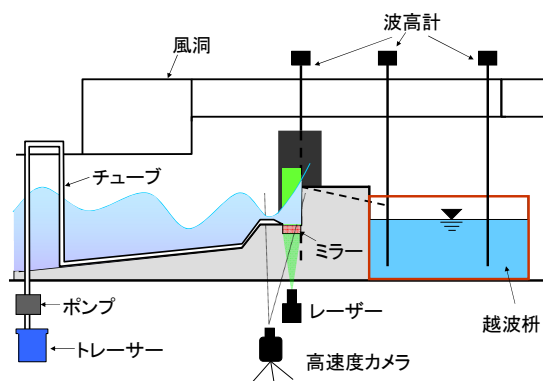


図-3 可視化実験の概略

各実験ケースで、波と風を作用させた約470秒間について高速度カメラによる撮影を行った。加えて、図-1および図-3に示すように、越波した水量を計測するための越波枡を設置し、枡内の2か所と護岸壁面の1か所を含む水路内の計8か所において、サンプリング周波数10Hzで水面変動を記録した。データ数は4696個である。

(2) 飛来塩分量に関する現地観測

現実に海岸構造物で生じる飛来塩分量の観測を行った。同時に、越波量や飛沫量、打上げ高、飛沫粒径などの計測も実施した。

① 観測内容

観測は現在建設中の下関港「長州出島」で行った。図-4に2012年2月現在の当該人工島の概略を示す。外周護岸はスリットケーソンを用いた直立護岸で、天端高はDL+4.5~6.0m、天端幅は約10mである。島内は埋め立てが進行中であり、建物等の遮蔽物がなく飛来塩分の観測に適した状況にある。

観測は平成24年の2月から3月、および12月から平成25年2月までの期間に、合計6回実施した。観測項目は、波の打上げ高、打上げ頻度、飛来塩分量、飛沫粒径、越波量、風向風速、波浪である。

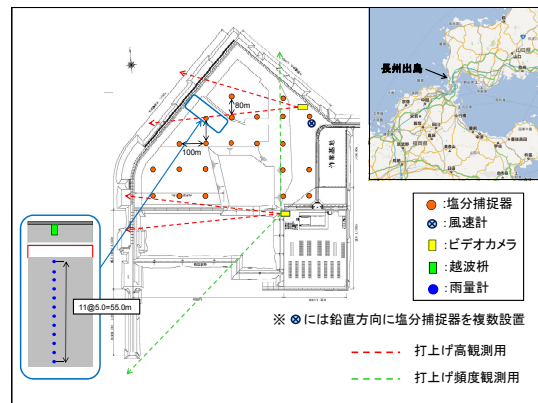


図-4 現地観測の概略

② 計測方法

打上げ高と打上げ頻度については、ビデオカメラにより打上げの様子を撮影し、その映像から計測した。飛来塩分については、金網籠にガーゼを入れたものを人工島内に満遍なく設置し捕捉した。観測終了後に、採取したガーゼを、RO膜水50ml内で攪拌し、十分に塩分を溶出させて電導度計によりNaCl換算で塩分濃度を測定した。越波量については、模型実験と同様に越波枡を作成し、護岸背後に設置して、越波水の流入による枡内の水位変化を水位計により計測した。飛沫量については、越波枡の背後に転倒枡式雨量計を5m間隔で配置し計測した。飛沫の粒径は、感水紙(海水の塩分に反応して変色する紙で主に検潮所で利用されるもの)により飛来してくる飛沫の痕跡を捉え、これを画像データに変換してPC上で個々の飛沫痕の面積と円形度を計測し、それらの情報から個々の飛沫の粒径を算定した。風向風速はプロペラ式風向風速計を用いて観測した。波浪については、人工島の北約500mの海底に波高計を設置して観測した。

4. 研究成果

(1) 水理模型実験による波の打上げ規模に関する検討

まず、開発した計測手法の妥当性について検討し、打上げ規模の特性について調べた。

① 画像解析を用いた計測手法の妥当性

可視化実験で得た撮影記録をPIVで解析した結果の例を図-5に示す。両者は造波開始後の同じ時刻で、同一の波が作用した瞬間について、無風の場合と風を作用させた場合である。このように、PIV解析によって打ち上がる水塊の流速ベクトルが良好に計測できることが確認された。

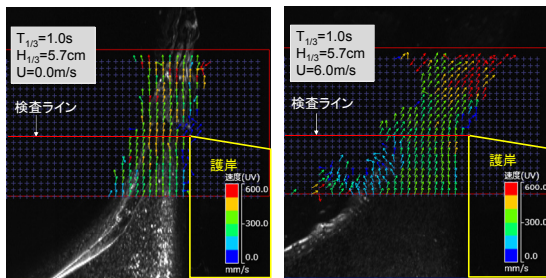


図-5 PIVによる解析結果の例

しかし、越波のような複雑な現象の場合、PIV結果に計測誤差や欠測が生じやすく、流速データに対し何らかの補正が必要となる。そこで、本計測手法においても異常値を除去するなどの補正を施した。図-6はPIVより求めた累積越波量（図中では「画像解析」と表記）と越波桁により計測した累積越波量を比較した例である。越波桁で求めた累積越波量は、桁内に越波水が着水した際に生じる水面の振動により激しく振動している。このため個別波の越波量を求めることは難しい。しかし、越波水の増加過程は妥当に得られる。PIVによる累積越波量は補正の有無により3つの結果を示している。それらを比較すると、補

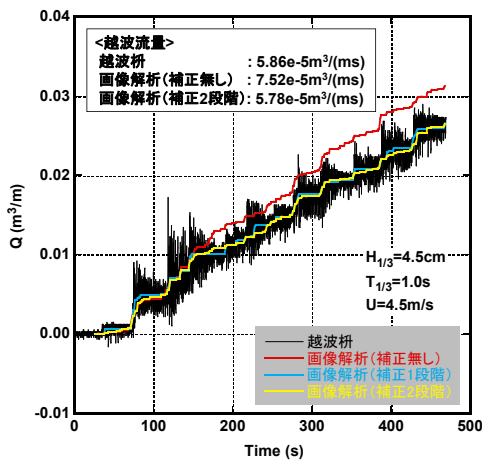


図-6 累積越波量の比較（流速補正の効果）

正をしていない結果は過大であるが、補正（2段階の補正を施している）を行うことで妥当な結果が得られる。

② 打上げ規模の特性

開発した計測手法により得られた結果から、作用波の一波ごとの越波量や打ち上がる水量、および打ち上がって海面に落ちる水量（越波量は打ち上がった水量から落下した水量を差し引いたもので、陸側に流入する正味の水量である）について特性を調べた。図-7は越波量の頻度分布を示している。発生頻度は越波量が大きくなるほど減少する分布形状を示す。風速が大きくなるにつれて頻度分布の裾が広がり、大きな越波量の発生頻度が増加して、越波回数や平均越波量も増加している。このような結果から確率密度分布を求めると、指数分布に適合することが分かった。図-8に一波ごとの越波量の確率密度分布を示しており、横軸は基準化した越波量である。

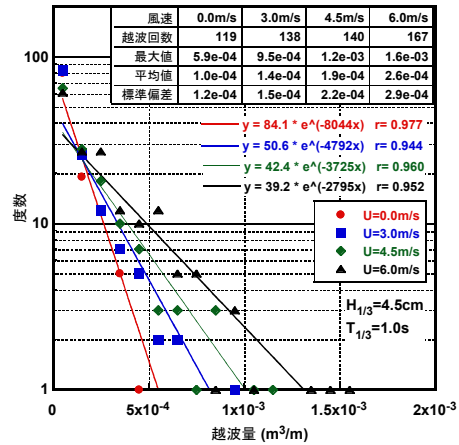


図-7 越波量の出現頻度分布

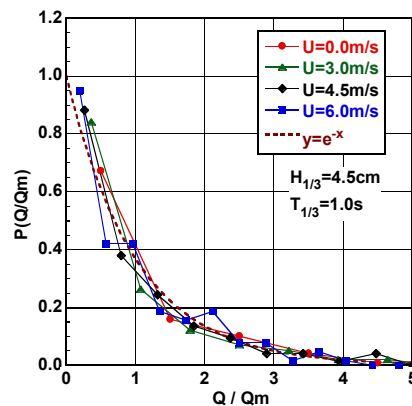


図-8 越波量の確率密度分布

同様に、打ち上がる水量と落下する水量についての頻度分布を図-9に示す。越波量の出現頻度と同様に、風によって打ち上がる水量

(図中では上昇量と表記)の分布の裾が広がり、大きな上昇量の発生頻度が増えることがわかる。また、落下する水量(同じく下降量と表記)も大きな量の発生頻度が増えるが、上昇量ほどではないため、両者の差である越波量は風により増加することになる。

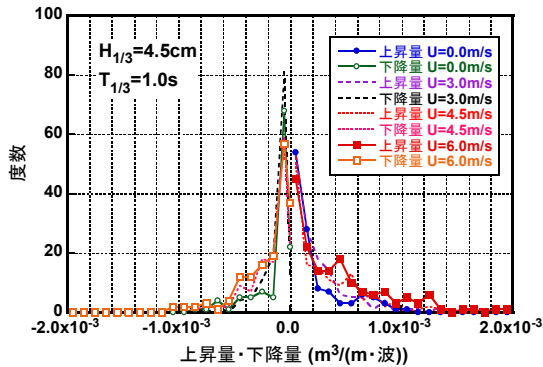


図-8 上昇量と下降量の頻度分布

(2) 飛来塩分量に関する現地観測

現地における打上げ頻度、越波量、飛沫量、飛来塩分量などについて観測結果を得た。

① 波の打上げ頻度

撮影したビデオ映像から、波の打上げ高さを読み取り頻度分布を作成すると、図-9に示すようにレーリー分布に近い分布形状となることが分かった。

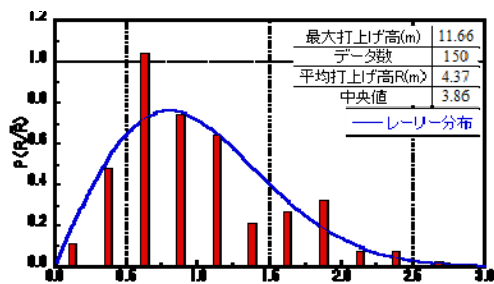


図-9 波の打上げ高の確率分布

② 頻度越波量と飛沫量

越波量と飛沫量の時系列が得られたことから、単位面積単位時間当たりの越波流量を算定し、その護岸からの距離に対する空間分布を作成した。図-10はその一例である。図

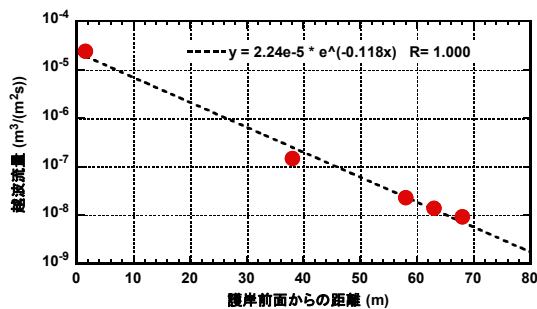


図-10 単位面積当たりの越波流量の分布

より、護岸背後に落下する水量は護岸からの距離に対して指数関数的に減少する。

③ 飛来塩分量

飛来塩分量の計測結果の一例を図-11に示す。図に示すのは、単位時間単位面積当たりの塩分フラックスである。頻繁に波が打ち上がっていた箇所の直背後で塩分濃度が高く、風下に離れるにつれ濃度が減少しており、拡散している様子が伺える。この観測結果から、飛来塩分量は越波流量と同様に風下方向に指数関数的に減少することがわかった。

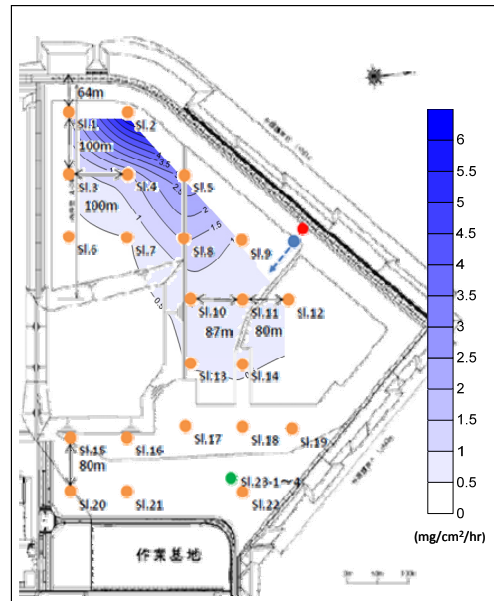


図-11 塩分フラックスの空間分布

④ 飛沫粒径

ある程度の大きさの飛沫が飛来して雨量計で飛沫量を計測できた範囲は、護岸から70m程度であった(図-10)。護岸からさらに離れた位置での微小な飛沫について、感水紙で計測した粒径の頻度分布を図-12に示す。大きな粒子であるほど少なく、粒径の累乗で近似される分布形が得られた。

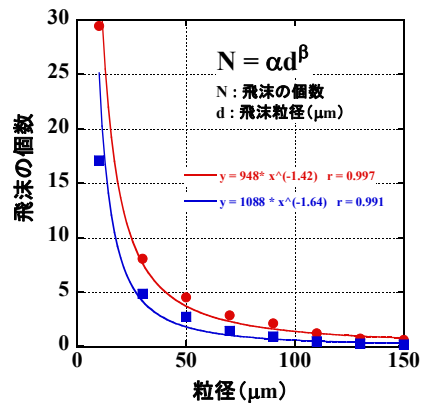


図-12 飛沫粒径の頻度分布

(3) 飛来塩分量の推定

水理模型実験結果と現地観測結果に基づいて、打ち上げ高と風速の条件から直立壁で生じる飛来塩分量の推定式を得た。図-13はその推定式を用いて、過去に行った現地観測を対象に塩分フラックスを推定し、観測値により検証したものである。塩分フラックスが大きくなると推定値にばらつきがみられるが、概ね妥当に推定できていると思われる。打ち上げ規模については、来襲波浪や護岸の条件により変化するため、水理模型実験によりその関係を把握する必要がある。

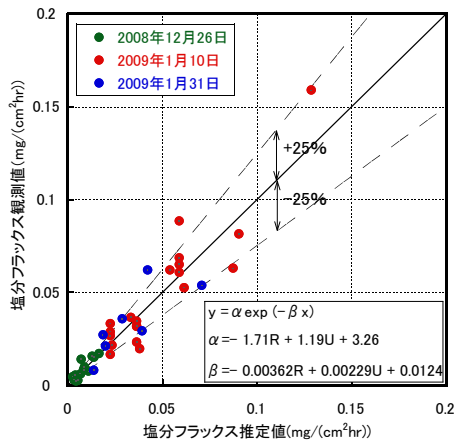


図-13 塩分フラックスの推定

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 山城 賢、改田将平、村上邦宏、吉田明德、水理模型実験における画像解析を用いた越波量計測手法の有用性について、土木工学論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_736-I_740, 2012、査読有、DOI:http://dx.doi.org/10.2208/kaigan.68.I_736
- ② 山城 賢、村上邦宏、吉田明德、画像解析を用いた水理模型実験における越波量計測、土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp. I_300-I_305, 2012、査読有、DOI:http://dx.doi.org/10.2208/jscejo.e.68.I_300

[学会発表] (計6件)

- ① 山城 賢、水理模型実験における画像解析を用いた越波量計測手法の有用性について、海岸工学講演会、2012年11月14日、広島市
- ② 山城 賢、画像解析を用いた水理模型実

験における越波量計測、海洋開発シンポジウム、2012年6月27日、函館市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山城 賢 (YAMASHIRO MASARU)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：70336014

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし