

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02247

研究課題名（和文）円形造波水槽による沿岸漂砂の解明と海浜地形変化の直接数値計算手法の構築

研究課題名（英文）Study on longshore sediment transport based on circular wave basin and development of its direct simulation method

研究代表者

水谷 法美（Mizutani, Norimi）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：10209760

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、側方の不透過壁による影響を受けることのない円形造波水槽による水理実験と数値解析により沿岸漂砂の発生機構の解明と地形変化の予測手法の構築を目指して検討を行った。その結果、海浜に波が入射することにとともに、まず岸沖漂砂が卓越し、その波に対する平衡地形への海浜変形が生じること、そしてその後沿岸漂砂が卓越することがあきらかとなった。その機構として、海浜断面地形上で碎波点が安定すると碎波後に生じる水位上昇の空間分布（空間勾配）が生じ、斜め入射波の下手側に流れ、すなわち沿岸流が発生し、その沿岸流を外力として沿岸漂砂が生じることが指摘された。これらを説明する数値解析手法についても構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで平面水槽を使った水理実験や現地観測でしか観測できなかった沿岸漂砂について、不透過側壁の影響を受けることなく、定常的な波を対象に検討することが本研究によって可能となった。特に、沿岸漂砂の生成・発達機構を波動場の特性と関連付けて明らかにしたことは学術的に極めて大きな意義を有する。海岸侵食の問題は地球規模で問題となっている現象であり、様々な対応策がとられてきているが、長期的には十分解決には至っていない。本研究により海岸侵食に特に大きな寄与をしている沿岸漂砂の発生機構が示されたことにより、それを抑えるための有効な工法の確立につながり、海岸侵食の軽減とともに沿岸防災にも大きく資するものである。

研究成果の概要（英文）：Hydraulic model experiments have been conducted using spiral wave maker and circular wave tank to investigate generation mechanism of longshore sediment transport. In the initial stage, on-offshore sediment transport is developed to form the equilibrium beach profile. Then, the longshore sediment transport is developed by the longshore current which is caused by spacial gradient of the mean water level after wave breaking. This phenomena is confirmed by the behavior of fluorescent sand in the experiments. Flow field is investigated not only in the experiment but also the three-dimensional simulation developed by the present research. In the numerical simulation method, full nonlinear wave field in the circular wave tank and spiral wave maker is simulated.

研究分野：海岸工学

キーワード：円形造波水槽 沿岸流 沿岸漂砂 海浜地形変化 海岸侵食 数値波動水槽 UAV

1. 研究開始当初の背景

海岸侵食は長く我が国だけでなく世界各国で深刻な問題となっており、数多くの研究が行われてきているが、必ずしも十分に解明されてはおらず、現在も漂砂や海浜変形に関する研究が行われている。海岸侵食には沿岸漂砂の寄与が大きい。例えば沿岸漂砂の岸沖分布についても卓越領域が汀線付近という研究やそれよりも沖側とする研究など、対象とする条件によっても異なっており、更なる研究が必須である。沿岸漂砂を水理模型実験によって明らかにするために平面水槽が用いられることが多いが、平面水槽では側壁の影響により連続的な計測に限界がある。そのため端部を持たない円形造波水槽がデラウェア大学やオレゴン州立大学（OSU）に設置され、沿岸漂砂の研究が行われてきた。しかし、実験の困難さからその成果はほとんど公表されておらず、すでに同水槽は撤去されている。円形造波水槽は、円周に沿って形成した海浜に、中央かららせん波を作用させることにより、端部の影響を受けずに長時間に亘って沿岸漂砂を生じさせることができるため、沿岸漂砂の実態を実験的に考究するには理想的な環境で実施できると考えられる。そこで申請者の水谷と中村は、直径 3m の小規模な円形造波水槽を製作し、沿岸漂砂の実態について、円形造波水槽による検討の有効性について検討を行ってきた。その結果、限られた範囲ではあるものの、バーム下部とバー近辺で沿岸漂砂が卓越するという興味深い結果が得られた。これは、波崎で蛍光砂の追跡と併せて実施した沿岸流速の岸沖分布の現地観測の結果と整合性の高い結果であり、これから円形造波水槽による実験は現地の現象を考究する上で有効な手法であることを確認している。

一方、水谷・中村はこれまで七里御浜海岸の海浜変形の観測を継続して実施し、入射波と関連づけて海浜地形変化を考究してきた。そして、汀線の安定時、後退時、前進時と入射波高の関係を見いだしてきたが、波高だけで無く入射波向きによって生じる沿岸漂砂の影響も大きく、海岸全体の地形変化を解明するためには、沿岸漂砂の影響を定量的に評価することが重要であり、理想条件で行われる水理模型実験による検討が不可欠である。上記の円形造波水槽による検討はこの点からも有効であるが、これまでの小規模水槽では現地との比較に課題が残る。

これらの課題を克服するためには、さらにスケールの大きい円形造波水槽による沿岸漂砂の実態の解明とその機構の解明が必要である。そのためには数値解析手法の開発も必要となるが、本研究が対象とする円形造波水槽を対象とした数値波動水槽は未だ十分なレベルのものが開発されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究は、沿岸漂砂の実態を解明することを目的とする。具体的には、円形造波水槽による沿岸漂砂の実態の解明を行う。円形造波水槽による実験は、これまで直径 3m と非常に小さいものであることから、本研究では直径 10 程度の大型の円形水槽の製作を行う。さらにこの水槽の中央部にらせん波の造波装置を製作して設置する。このらせん波造波装置は、かつてオレゴン州立大学に設置されていた独立した 16 台のピストン型造波装置から構成され、スムーズな造波が可能な装置を参考に新たな装置を開発し、製作する。この装置を使って沿岸漂砂の実態について考究することを第一の目的とする。

一方、水理模型実験では計測可能な物理量に限界がある。そのため、沿岸漂砂の外力となる沿岸流の発生機構に関しては、高精度数値解析の開発も必要となる。そのため、本研究では、円形数値波動水槽の開発を行うことも目的の一つとする。基本的にはこれまで中村・水谷が開発してきた数値解析モデル FS3M (three-dimensional coupled Fluid-Structure-Sediment-Seabed interaction Model) をベースに円形造波水槽に適用可能なモデルに発展させる。本モデルは、波と透水性を有する海浜の相互作用のみならず、砂層の応力状態が砂移動に影響を及ぼすことも考慮した砂移動を考慮して砂を移動させる。この際、掃流漂砂だけでなく浮遊漂砂もモデル化して取り組んでおり、さらにこの地形変化も波と地形の相互作用にとり込んだ高度な数値解析モデルとなっている。

さらに、これまで水谷・中村が実施してきた三重県紀宝町の七里御浜の現地観測も継続して行う。当該海岸では、水谷・中村が Web カメラを設置し、汀線の連続観測が行ってきており、さらに UAV による地形変化の観測も行ってきた。本研究でもこれまでの現地観測を継続して実施して、来襲する波と地形変化の関連を明らかにし、本研究で構築する数値解析モデルによる再現を行うことも目的とする。

3. 研究の方法

1) 沿岸漂砂の実態の解明

まず、沿岸漂砂の実態を水理模型実験により明らかにする。水理実験は新たに製作した直径 10.2m の円形造波水槽に新たに製作した 16 枚のピストン式造波装置からなるらせん波造波装置

を使用して行った (図-1 参照)。この水槽の円周壁に沿って海浜を円周状に設置し、中央部かららせん波 (斜め入射波) を生起し、海岸に斜め入射波を作用させ、沿岸流とそれによる沿岸漂砂を発生させることで海浜地形変化と砂移動の観測を行った。実験では、断面地形変化をレーザー変位計にて計測した。また、漂砂移動については、蛍光砂を各所に設置し、暗室状態で実験を行い、ブラックライトの照射による蛍光砂の移動状況の可視化を行って計測した。基本的には、一様勾配斜面の海浜を初期地形とした実験を行うが、バー・トラフやバームの形成のような海浜断面地形が沿岸漂砂に影響を及ぼしていることが予想されるため、本研究ではこの点に着目しながら実験を行う。すなわち、バー・トラフが形成された平衡断面地形を初期条件とする実験も行なって漂砂移動の差異を確認し、漂砂移動の特性に及ぼす初期地形の影響についても考究した。なお、実験では、海岸侵食対策工として広く採用されている人工リーフの地形制御効果についても、人工リーフの諸元を変化させた実験結果を比較することで考究した。



図-1 円形造波水槽の状況

2) 数値解析

実験で明らかにされた漂砂移動と地形変化の機構を明らかにするため、FS3M をベースに円形数値波動水槽を開発し、数値解析を実施した。FS3M は、これまでデカルト座標系に対してモデル化されているが、円形造波水槽に適用可能なように円筒座標系での基礎方程式に基づくモデル化を行って再度プログラムを書き直している。オリジナルのFS3M は漂砂移動の計算も行えるが、円形数値造波水槽では、外周に近づくほど円周方向の格子幅が大きくなるため、ネスティングを行って円周方向の分解能も担保するようにしている。そのため、計算付加が格段に増していることから、本計算では、砂浜地形は透水層として扱うものの、漂砂にともなう地形変化の再現は行わず、主に漂砂の外力となる流れ場の再現に注力することとした。

3) 現地調査

三重県南部に位置する七里御浜井田地区海岸における海浜地形変化の現地調査を継続して実施した。この海岸に常設している Web カメラによる海岸の連続撮影に加え、UAV によって海浜地形を断続的に撮影し、GNSS 測量とこれらの画像解析から汀線変化と海浜地形変化を解析し、波浪データと関連づけて地形変化を生じさせた波浪特性の関係を解明した。ただし、COVID-19 の影響による出張の制約から、当初予定していた観測頻度は大幅に減少せざるを得なかったが、可能な範囲で計測は実施した。

4. 研究成果

(1) 地形変化の概要

一様勾配斜面を初期地形とする実験より平衡断面地形は、汀線より沖側では、堆積が発生し、岸側では侵食が発生したことで、ステップ型の地形となった。加えてステップ部の沖端では、バーが形成される。実験時の目視観測からバー上での碎波にともなう底質の巻き上げと堆積によるものと考えられる。ついで地形変化量に注目すると、堆積と侵食面積がほぼ等しい点から、この地形変化は、岸沖方向の砂移動によるもので、特に汀線より岸側の砂が沖向き流れによって移動したことで、発生したと考えられる。これはこれまで水谷・中村が直径 3m の小型の円形造波水槽による底質移動の観測結果と一致するものである。



(a) 開始前

(b) 5 分後

(2) 平衡地形が形成されるまでの漂砂特性

一様勾配地形を初期地形とした実験における蛍光砂の移動状況をそれぞれ図-2 に例示する。同図に例示したように、一様勾配斜面を初期条件としたケースのいずれの場合でも実験開始時には岸沖方向の砂の動きが顕著となり、この動きが落ち着いた後に、沿岸方向へ砂が移動する様子が確認された。実験開始時の砂の動きに関し



(c) 30 分後

(d) 50 分後

図-2 蛍光砂の移動状況 ($T=2.22s$)

ては、岸沖方向の動きが支配的である点から、既述した地形変化に寄与したと考えられる。

(3) 平衡地形形成後の漂砂特性

各ケースの平衡地形を初期地形とした場合の漂砂移動の状況を図-3 に例示する。平衡地形を初期地形とした場合、平衡地形が形成されるまでの漂砂特性とは異なり、造波開始直後から沿岸漂砂が卓越する様子が観測され、特にその動きは砕波点であるバー付近で顕著となった。以上から、波が入射し、砕波を含めた波動場に対する平衡地形が形成されるまでは岸沖漂砂が卓越し、その後平衡地形が形成され、砕波を含む波動場も安定してくると、沿岸漂砂が卓越することが指摘できる。

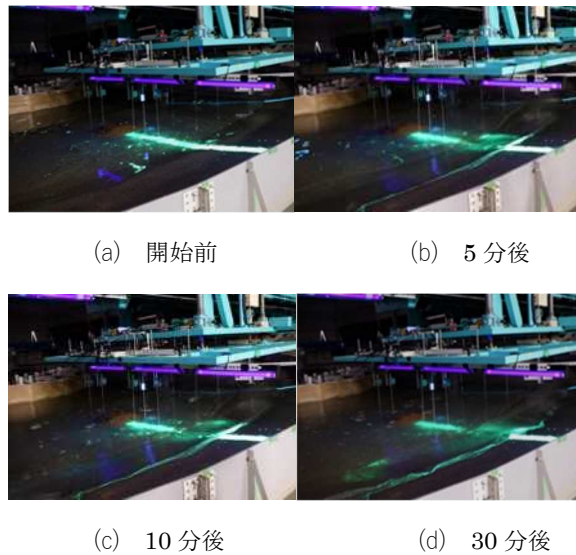


図-3 蛍光砂の移動状況 (T=2.22s)

(4) 沿岸漂砂の発生機構

海浜に波が入射すると、水深の減少とともに波の非線形変形が生じて砕波に至るが、砕波が生じると岸向きの流れが生成されるため平均水位が上昇することが一般的な波動場の特徴である。この砕波点岸側からの戻り流れが底面付近から沖向きに戻る戻り流れで底質が沖側に運ばれるが、次の波の砕波に伴う流れでまた岸向きに運ばれることで岸沖漂砂が発達するのが初期の漂砂移動になると考えられる。この岸沖漂砂に伴い、バー・トラフ地形が発達し、砕波点がバー上で安定してくると地形も安定して平衡状態になるが、平衡地形が形成されると斜め入射にともなう沿岸方向での砕波の時間差から平均水位に勾配が生じて波の入射方向の下手側に沿岸流が生成される。これが外力となって沿岸漂砂が生じるものと考えられる。平衡地形を初期断面とする実験では造波直後から沿岸漂砂が発生するが、これも上記の機構にともなうものと考えられる。

(5) 人工リーフによる地形変化への影響

人工リーフを設置した場合と未設置時の蛍光砂設置断面（人工リーフを設置したケースの場合、人工リーフ中心断面）における最終地形を図-4 と図-5 に示す。なお、未設置時のケースに関しては、人工リーフの効果を考究するため、設置時と入射波周期が同じケースを記載している。

また、人工リーフを設置したケースでも、前節に既述した砕波の時間差と考えられる影響により、人工リーフの背後においても、下手側へ流出する沿岸漂砂が活発に生じたと考えられる。その条件下においては沖側に設置した Type-1 では、未設置時の最終地形とほとんど変わらないことがわかる。その一方で、岸側に設置した Type-2 では、未設置時と比較すると、バー付近で多く砂が堆積しており、汀線に関しても前進していることがわかる。これらの結果より、人工リーフは Type-2 のように砕波点に近い岸側に設置をした方が海岸侵食対策に有効であると指摘できる。

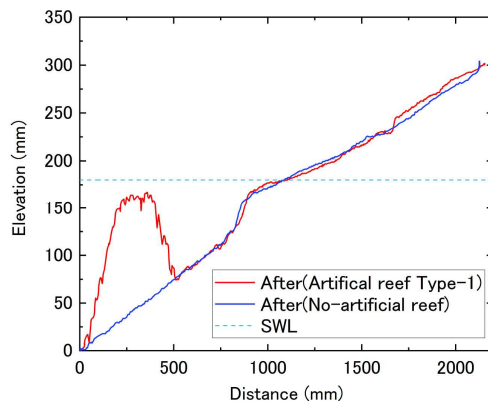


図-4 人工リーフによる地形変化への影響 (Type-1)

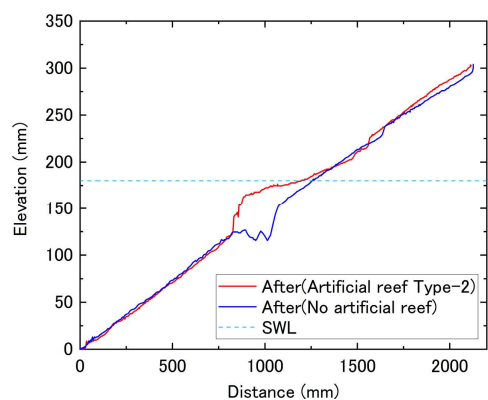


図-5 人工リーフによる地形変化への影響 (Type-2)

海浜地形変化の現地観測を行っている七里御浜井田地区海岸では、海岸侵食対策として人工リーフが設置されているが、その効果は限定的である。本研究成果によればより砕波点に近い位置に設置することで海岸侵食対策としての効果はあがることが期待できる。一方、砕波点では人工リーフの被覆材に作用する波力も大きくなるため、安定性の確保のための被覆材の大きさも増大することが予想される。これらを両立させるためにはさらなる検討が望まれる。

(6) 数値解析による波動場の再現

本研究により開発した円形造波水槽による波動場を図-6 に例示する。同図より、らせん波が造波されていることが確認できる。

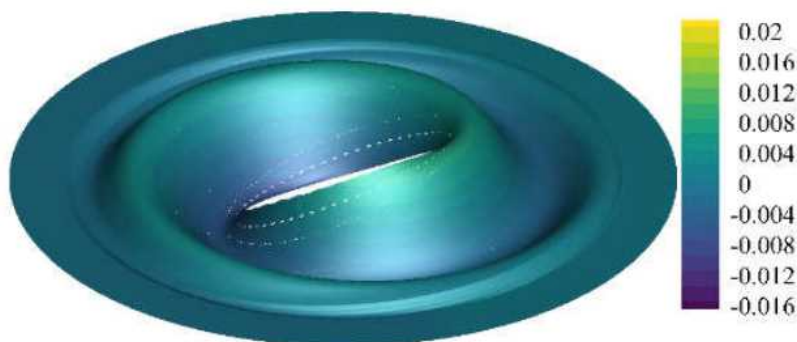


図-6 円形造波水槽によるらせん波の再現状況 (T=2.99s)

また、円形数値波動水槽による流速場の計算結果を図-7 に例示する。砕波点付近で流速が大きくなり、砕波後には表層より下方で戻り流れが生じていることが確認できる。これは上述した造波開始後から平衡断面地形が形成されるまでに岸沖漂砂が卓越する際の外力になっていると考えられる。

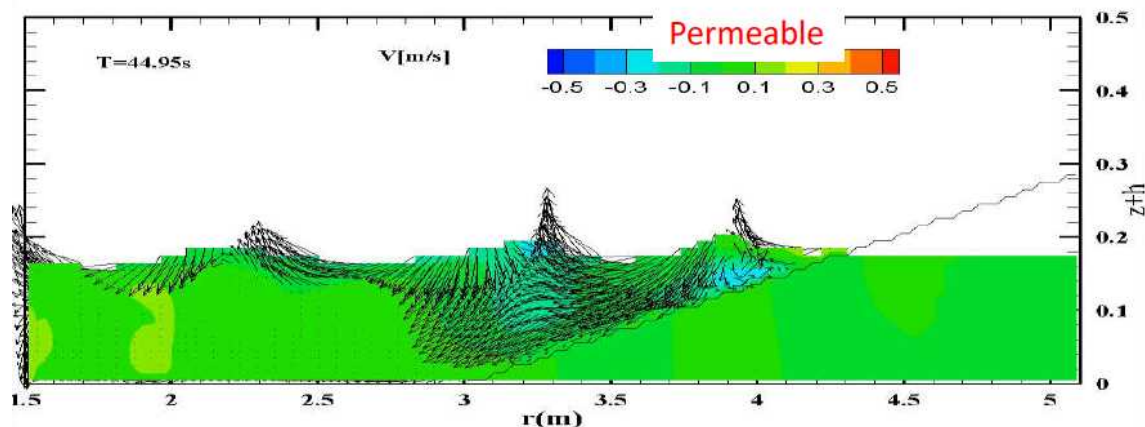


図-7 円形造波水槽による流動場の計算結果の例 (T=2.99s)

なお、沿岸流の再現に関しては現在も計算を継続しており、その解析結果が得られ次第公表する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kim Shinwoong, Nakamura Tomoaki, Cho Yonghwan, Mizutani Norimi	4. 巻 30
2. 論文標題 Experimental Study on Spatiotemporal Profile Change in Gravel Beach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Offshore and Polar Engineering	6. 最初と最後の頁 349 ~ 356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17736/ijope.2020.hc19	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kim, S., Nehashi, S., Nakamura, T., Cho, Y., Mizutani, N., and Takeuchi, M.	4. 巻 75
2. 論文標題 Real-scale numerical assessment of artificial reef in Ida beach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B3 (Ocean Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_971-I_976
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.75.I_971	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 宮下侑莉華, 菊 雅美, 中村友昭, 水谷法美	4. 巻 75
2. 論文標題 ディープラーニングを用いた海岸画像と波浪条件の関連性の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 I_677-I_682
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.75.I_677	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 菊雅美, 森勇人, 中村友昭, 水谷法美	4. 巻 75
2. 論文標題 UAV-SfM/MVS測量による磯浜海岸の地形変化計測に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 I_127-I_132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.75.I_127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 秋田直輝, 加藤里紗, Hoang Hai DONG, 中村友昭, 水谷法美	4. 巻 75
2. 論文標題 円形水槽による沿岸漂砂機構に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_625-I_630
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.75.I_625	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 宮下侑莉華, 菊雅美, 中村友昭, 水谷法美	4. 巻 77
2. 論文標題 深層学習による水際線変動と波浪条件の関連性の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_667-I_672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.77.2_I_673	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 井上雄太, 菊雅美, 中村友昭, 水谷法美	4. 巻 78
2. 論文標題 礫浜構成物を自動分類するための機械学習モデルの高精度化と現地海岸への適用に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 土木学会論文集B3 (海洋開発)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 秋田直輝, Hoang Hai DONG, 趙容桓, 中村友昭, 水谷法美
2. 発表標題 円形造波水槽の製作および沿岸漂砂機構解明に関する実験的研究
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山遼哉, 趙容桓, 菊雅美, 中村友昭, 水谷法美
2. 発表標題 ネットワークカメラから抽出した汀線位置とDEMとの関係に関する一考察
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上雄太, 菊雅美, 中村友昭, 水谷法美
2. 発表標題 オルソモザイク画像からBASEGRAINによって算出される礫粒径の妥当性
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮下侑莉華, 菊雅美, 中村友昭, 水谷法美
2. 発表標題 ディープラーニングにおける波浪状況判別に及ぼす画像撮影方向の影響
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮下侑莉華, 菊雅美, 中村友昭, 水谷 法美
2. 発表標題 海岸画像を用いた深層学習の判別精度向上に関する一検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮下侑莉華, 菊 雅美, 中村友昭, 水谷法美
2. 発表標題 セマンティックセグメン ションを用いた水際線抽出手法に関する一検討
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担 者	中村 友昭 (Nakamura Tomoaki) (90569328)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------