

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04271

研究課題名(和文) 砕波による人工リーフ連鎖的崩壊過程に関する計算力学的研究

研究課題名(英文) Numerical simulation on failure process of artificial reef due to wave breaking

研究代表者

五十里 洋行 (IKARI, Hiroyuki)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80554196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、砕波による人工リーフ被災過程を再現できる数値シミュレーションモデルの開発を行った。まず始めに、エネルギー保存性の高い粒子法の不規則波伝播計算への適用性を検討したところ、従来モデルであれば発生した波高減衰がほぼ見られない波高分布や周波数スペクトル分布が得られた。次に、鉛直二次元場で人工リーフ被災過程の数値解析を実施した。被覆ブロックの離脱の際の背後ブロック上への乗り上げについては良好に再現できた。最後に、三次元解析を実施した。被覆ブロックの乗り上げだけでなく、長時間継続したブロックの離脱やマウンドの変形など二次元計算よりもさらに再現性の高いシミュレーションが実施できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

砕波による人工リーフの被災現象は、これまで数値シミュレーションを用いて再現されたことがなかった。したがって、人工リーフの被害推定を行うためには水理実験の実施しか選択肢はなかった。しかし、本研究において、数値シミュレーションによる再現が可能となったことは、今後の人工リーフの設計において実験・解析両面からの検討が可能となったことを意味し、その点において社会的意義は非常に大きい。また、本研究において、粒子法で不規則波計算が可能となったことを示した。これは粒子法の弱点の一つが解消されたということであり、今後の粒子法研究の発展に大きく貢献したと言える。

研究成果の概要(英文)：In this study, the development of a numerical model which can simulate a failure process of an artificial reef due to wave breaking was carried out. First of all, the applicability of the energy-conserved particle method to an irregular wave analysis was examined. It was shown that the model can provide a wave height profile and a frequency spectrum profile without a wave attenuation. Using the model, a vertical 2D simulation on a failure process of an artificial reef due to irregular waves was conducted. the rotational detachment of an armor block set on the reef was reproduced. In the 3D simulation, the calculated result showed higher reproducibility than 2D calculated one such as the detachment of the block intermittently occurring during long duration and the deformation of mound.

研究分野：海岸工学

キーワード：不規則波 人工リーフ 被覆ブロック 粒子法 数値シミュレーション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

海岸保全施設の一つである人工リーフは常に水没しているため景観を損ねない利点を有しているが、大規模な砕波の作用下においては多数の被覆ブロックの飛散や捨石マウンドの変形といった被害が発生する。そのようなことから既往の実験研究において、様々な入射波条件の下で被害率の推定が試みられているが、何故この条件で被害率が高く、あるいは低くなるかについては明らかにされていない。そこで本研究では、高精度粒子法による三次元数値シミュレーションを実施し、特に被害率の高い条件に焦点を当て、ブロック・捨石に作用する周囲流体からの流体力から被害の原因について計算力学的に追究する。なお、人工リーフの被害は時系列的・連鎖的に発生するので、ブロックや捨石の運動もシミュレーションに適切に考慮する。また、これまで粒子法では波高減衰の問題から不規則波について十分な再現例がなかったが、本研究ではこの問題を解決した新たな手法により不規則波計算を試みる。

### 2. 研究の目的

本研究では、大規模な不規則波が作用した際の人工リーフの被災過程を再現可能なシミュレーションツールの構築を行う。ブロックの飛散挙動やマウンドの変形などを既往の水理実験での観察結果と比較して構築したシミュレーションモデルの再現性を検討する。また、人工リーフ上に設置した各被覆ブロックに作用した流体力の調査を行う。

### 3. 研究の方法

本現象においては、ブロックの移動やマウンドの変形だけでなく砕波も発生するので、非常に複雑な場が形成される。粒子法はこれらに対して柔軟に対応可能な数値モデルであるので、本研究では粒子法をベースにモデルを構築する。ただし、粒子法には圧力ノイズに関する弱点が存在し、それに起因してエネルギー保存が十分に得られないという弱点があった。これは波浪の伝播計算においては伝播中に波高が減衰することにつながり、特に不規則波においては小波高の波が消失して有義波高が低下するだけでなく有義波周期も増加してしまい、入力した波群を構造物に作用させるのが難しいという問題があった。しかし、研究代表者らが近年開発した高精度化スキームを導入することによって、エネルギー保存性に優れた、波高減衰がほぼ発生しない粒子法による波浪伝播計算が可能となった。本研究では、このモデルの不規則波計算への適用性の検討を含め、以下の三段階に分けて研究を行った。

#### (1) エネルギー保存性の高い粒子法による不規則波伝播計算への適用性の検討

まず、上述したエネルギー保存性の高い粒子法の不規則波計算への適用性を簡単な境界条件の下で検討する。水深一定 ( $h=0.6$  m) の数値波動水槽を設定し、水槽最左端に造波板を設置して、右方向に向かって不規則波を伝播させる。水槽右端にはエネルギー吸収帯を設置し、反射波が発生しないようにする。水槽の途中の3か所において水位変動を記録し、各計測点における記録から波高分布および周波数スペクトル分布を出力して、波高減衰の発生の有無を調査する。なお、有義波高および有義波周期の異なる3ケースの不規則波群 (case1:  $(H_{1/3}, T_{1/3}) = (0.05\text{m}, 1.5\text{s})$ , case2:  $(H_{1/3}, T_{1/3}) = (0.075\text{m}, 1.5\text{s})$ , case3:  $(H_{1/3}, T_{1/3}) = (0.1\text{m}, 2.0\text{s})$ ) を造波した。

#### (2) 不規則波による人工リーフ被災過程の鉛直二次元数値シミュレーション

次に、鉛直二次元場において不規則波による人工リーフ被災過程のシミュレーションを実施する。用いた人工リーフモデルにおいては、個別要素法と同様のパネ-ダッシュポット系で反発力を計算する円形粒子をマウンド材としてランダムパッキングによりマウンドを形成した。被覆ブロックは既往の水理実験を参考に長方形形状とし、マウンド上に配置した。マウンド材とブロックの衝突力も個別要素法で計算する。流体粒子は、マウンドおよびブロックともに透過して移動し、相互作用は抗力モデル(ポアラスモデル)を通じて計算する。人工リーフモデルの諸元は既往の水理実験と同様で、天端幅は約1.2mである。1/30 勾配斜面上に静水状態での天端水深(0.022m)が既往の水理実験と同様になるようにこの人工リーフモデルを設置した。造波は、1/30 勾配斜面の沖側に接続した水平床上で行い、既往の水理実験で最も被害の大きかった水理条件と同様の条件を与えた ( $(H_{1/3}, T_{1/3}) = (0.136\text{m}, 2.8\text{s})$ )。

#### (3) 不規則波による人工リーフ被災過程の三次元数値シミュレーション

最後に、三次元シミュレーションを実施した。マウンドは球形粒子で作成し、ブロックは直方体とした。水路幅(奥行幅)は流体粒子10個分であり、ブロックは奥行方向に3個配置した。流体粒子およびマウンド材粒子は、水路幅方向に周期境界で計算を行うが、簡単のため、ブロックについては側壁があるものとして計算を行った。ただし、ブロックと側壁の間に摩擦は考慮しない。造波は、水路幅方向に同様であり、人工リーフに対して直角に入射する状況を想定している。人工リーフの諸元や設置水深、水理条件などその他の条件については、鉛直二次元計算のケースと同様である。

#### 4. 研究成果

##### (1) エネルギー保存性の高い粒子法による不規則波伝播計算への適用性の検討

図1に、各ケースの波高出現頻度分布および周波数スペクトル分布を示す。波高の出現頻度については、一般的にRayleigh分布に従うことが知られているので併せて示している。また、周波数スペクトルは入力値を合わせて示している。すべてのケースのすべての計測点において、計算結果から得られた波高出現頻度分布はRayleigh分布に良好に対応し、また、周波数スペクトルも入力値と同様であることから、波高減衰がほぼ発生していないことがわかる。すなわち、エネルギー保存性の高い粒子法が不規則波伝播計算に適用可能であることが示された。

##### (2) 不規則波による人工リーフ被災過程の鉛直二次元数値シミュレーション

本現象においては、人工リーフ天端の沖側法肩近傍のブロックが飛散しやすく、特に、離脱の際に回転しながら岸側のブロック上に乗ることが既往の水理実験によって示されている。図2は、本計算結果のスナップショットの一例である。図中の濃灰色と淡灰色の二色で示されている長方形がブロックを示す。流体粒子は、流速の強度によって赤～青にコンター表示されているが、波浪の通過とともにB10やB13のブロックが回転して背後のブロック上に乗る様子が良好に再現されている。しかし、鉛直二次元計算では、ブロックの運動の自由度が制限され、また、沖側に隣接するブロックによる流れの遮蔽効果を過度に受けるため、水理実験と同様に密にブロックを配置した場合にはこのような離脱は発生しなかった。つまり、人為的に天端上最沖側のブロックを除去しなければ、図に示すような被害の再現はできなかった。また、計算を進めてもこれ以上のブロックの移動は見られなくなり、水理実験結果のように継続して離脱が発生することはなかった。また、マウンドの変形も見られなかった。

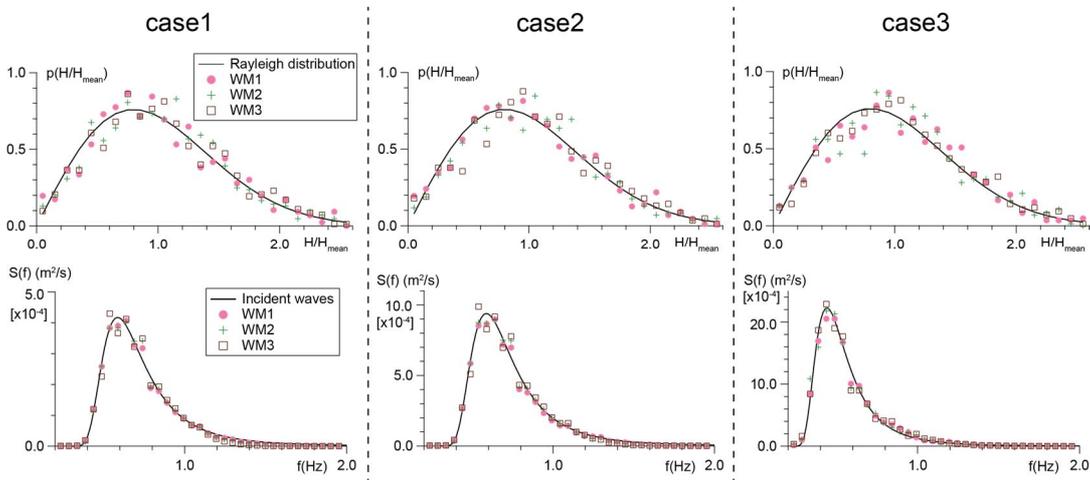


図1 波高出現頻度分布（上）および周波数スペクトル分布（下）

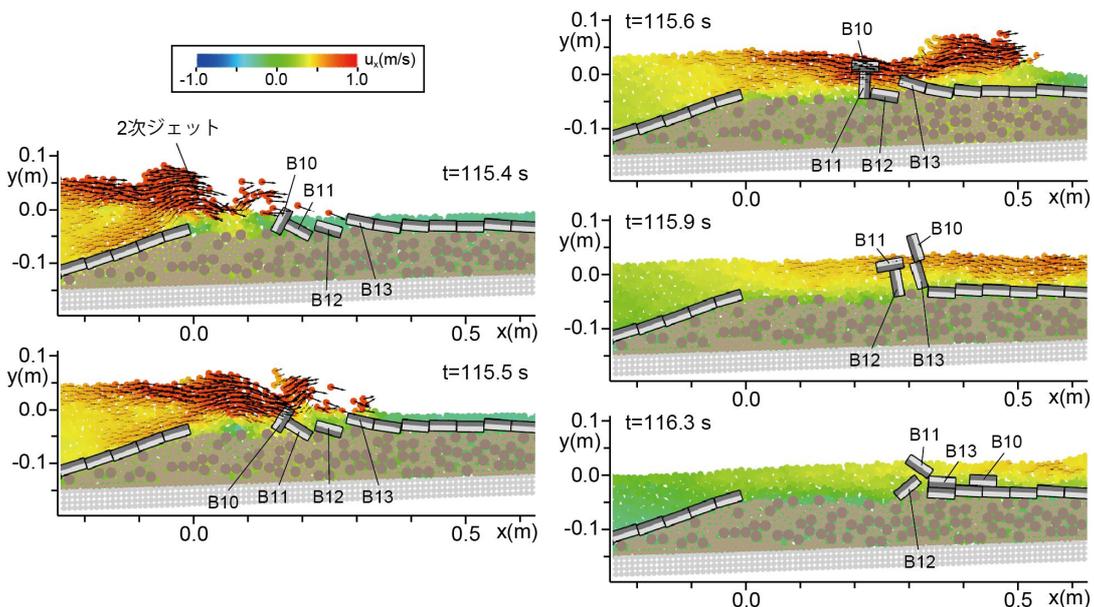


図2 砕波の作用により回転離脱するブロック挙動

### (3) 不規則波による人工リーフ被災過程の三次元数値シミュレーション

図3に、人工リーフ周辺のスナップショットを示す。波浪の作用によって人工リーフ沖側法肩近傍のブロックが天端上へ乗り上げ、岸側に輸送される状況が良好に再現されている。また、上述したように、二次元計算ではブロックの移動が途中から全く見られなくなり、人工リーフの被害が進行しなくなる状況が発生したが、三次元計算では既往の水理実験と同様、断続的なブロックの離脱が長時間にわたって発生した。また、三次元計算では二次元計算時のように特殊な条件を与えることなく、ブロックの離脱が発生した。図4では、約530秒間の計算時間における各ブロックの最大変位、作用抗力の最大値、並進移動速度の最大値、作用トルクの最大値、角速度の最大値をそれぞれコンターで示している。図より、沖側法面上に設置したブロックの変位が大きいことがわかる。なお、天端上のブロックにおいても全体的に岸側への変位が見られており、これも含めて水理実験と同様の傾向が再現されている。作用抗力の分布図を見ると、やはり、沖側法肩近傍で大きな抗力が作用しており、変位または並進移動速度が大きい箇所との対応が見られる。一方で、トルクに関しては、沖側天端上でも大きな値が示されており、作用波浪の砕波による複雑な流れ場が形成されたことが推察される。ただし、角速度に関しては天端上ではあまり大きくなっておらず、近傍のブロックとの衝突によって回転が抑制されたものと思われる。図5は、初期のマウンド形状と比較した536秒後のマウンドの形状(上図)と変位の大きさによって色付けしたマウンド粒子の初期位置を示す。沖側法肩近傍でマウンドの高さが低下しており、その前後で逆に増加している。下図から初期にマウンド法肩に位置した粒子が大きく移動していることがわかり、この形状の変化を裏付けている。このような形状の変化は、既往の水理実験と同様の傾向であった。

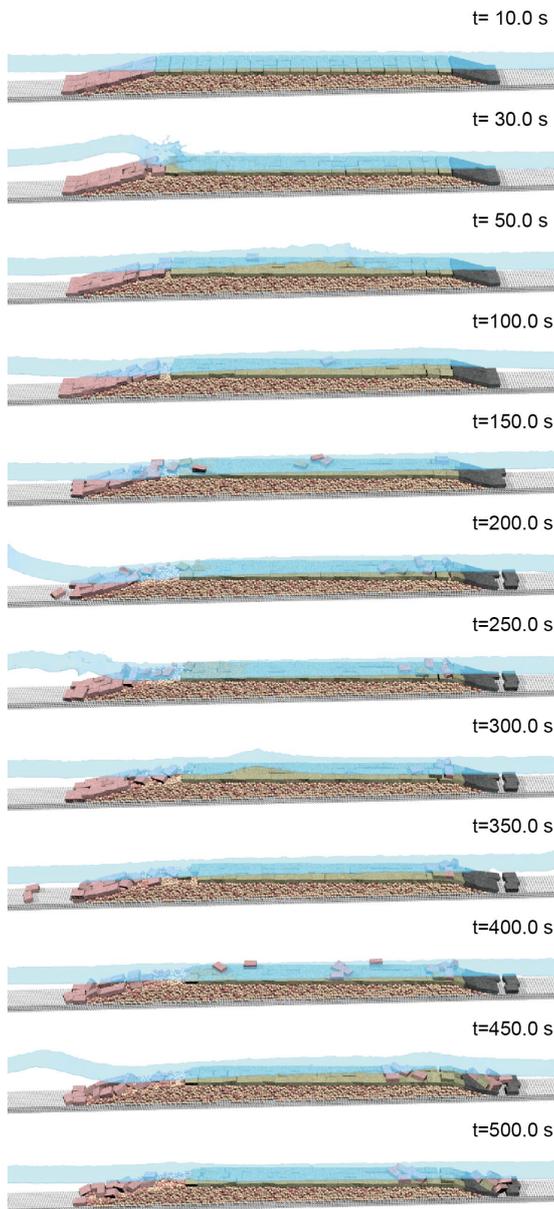


図3 人工リーフの被災過程のスナップショット

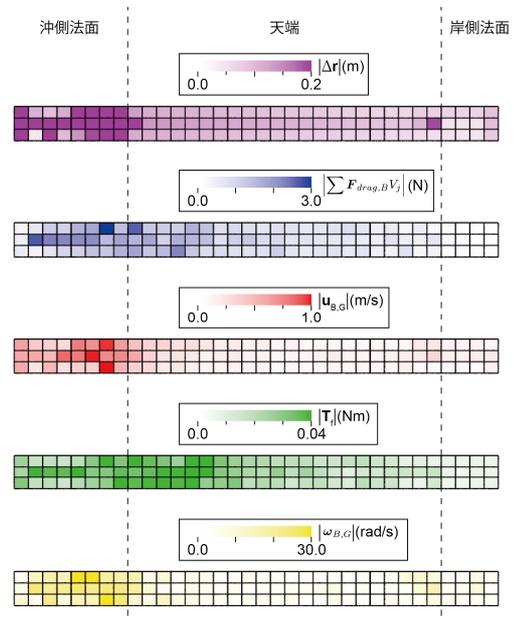


図4 各ブロックの変位(一段目)、作用抗力(二段目)、並進移動速度(三段目)、作用トルク(四段目)、角速度(五段目)

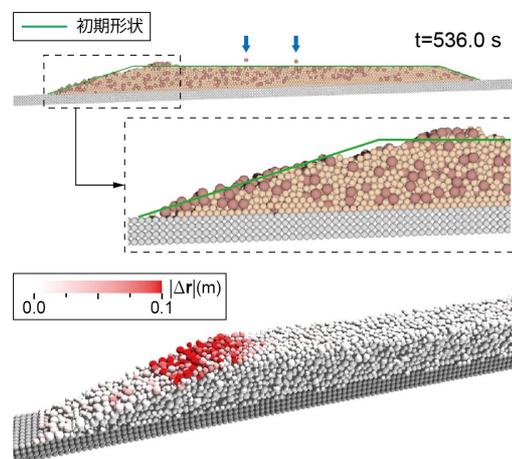


図5 マウンドの変形

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 五十里洋行, 後藤仁志, 富田哲朗	4. 巻 79(17)
2. 論文標題 不規則波による人工リーフ天端上被覆ブロック飛散過程の数値解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-17125	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 五十里 洋行, 後藤仁志, 脇嶋可成	4. 巻 78
2. 論文標題 MPS法におけるエネルギー保存性の改善と不規則 波伝播計算への適用性	5. 発行年 2022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 43-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.78.2_1_43	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 Hiroyuki Ikari and Hitoshi Gotoh	4. 巻 10
2. 論文標題 Fully implicit discrete element method for granular column collapse	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computational Particle Mechanics	6. 最初と最後の頁 261-271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40571-022-00485-7	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 E.Harada, H. Ikari, T. Tazaki and H. Gotoh	4. 巻 117
2. 論文標題 Numerical simulation for coastal morphodynamics using DEM-MPS method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Ocean Research	6. 最初と最後の頁 102905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apor.2021.102905	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 五十里 洋行
2. 発表標題 不規則波による人工リーフ天端上被覆ブロック飛散過程の数値解析
3. 学会等名 第70回海岸工学講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 五十里 洋行
2. 発表標題 MPS法におけるエネルギー保存性の改善と不規則波伝播計算への適用性
3. 学会等名 第69回海岸工学講演会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------