

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02369

研究課題名（和文）多方向不規則波群において出現する海洋巨大波の内部機構の解明とその衝撃力の推定

研究課題名（英文）Internal mechanism of giant waves in multidirectional irregular waves and estimation of their impact forces

研究代表者

陸田 秀実（Mutsuda, Hidemi）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授

研究者番号：80273126

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多方向不規則波浪群において発生する海洋巨大波の発生/発達機構、砕波・減衰機構を理学的・工学的見地から解明することによって、(1) 係留式浮体構造物に作用する海洋巨大波の衝撃波浪荷重の推定、(2) 海洋巨大波の砕波・出現予測、(3) 海洋巨大波による衝撃荷重の合理的な算定、(4) 海洋構造物の管理・運用に支障を来す海洋巨大波の遭遇予測とリスク等を工学的見地から考究した。特に、本研究では極限波浪（Draupner Waveや大津波）が係留式洋上風力発電施設に作用した場合を想定した数値シミュレーションモデルを構築し、対象浮体の6自由度運動、流体力、係留力特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国近海で発生する大津波や極限波浪（Freak wave, 三角波, Draupner waveなど）を考慮した設計ツールは必要不可欠であり、それに基づく合理的な設計値を推定することが重要である。本研究成果は、多方向不規則波群によって発生する砕波を伴うDraupner Waveに着目して、その発生・発達・砕波・減衰機構、さらには砕波形式による物理機構の比較を行っており、学術的意義は非常に高い。また、海洋巨大波に関わる海洋工学、海岸工学、船舶工学、海洋物理学分野の学理研究の飛躍的な進歩に繋がるため、海難事故の防災・減災、人命保護、各種海洋構造物の管理運用等の社会的要請に応えるものである。

研究成果の概要（英文）：A numerical design tool that takes into account large tsunamis and extreme waves (Freak waves, triangular waves, Draupner waves, etc.) that occur near Japan is necessary, and it is important to estimate exciting force and 6DoF motions of ocean structures. The purpose of this study is to elucidate the generation/development mechanism, wave breaking/attenuation mechanism of giant waves generated in multi-directional irregular waves in real sea states from a physical and engineering point of view. This study focused on, (1) Estimation of exciting wave loads of giant waves acting on a moored floating structure, (2) Breaking and emergence prediction of giant waves, (3) Rational calculation of impact loads caused by giant waves, (4) Prediction and risk assessment of encounters with giant waves that hinder the management and operation of offshore structures were investigated.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海洋巨大波 洋上風力発電施設 粒子法 Draupner Wave Freak Wave 砕波 浮体構造物

1. 研究開始当初の背景

海洋という「人間・社会・経済活動の場」において、最大の自然外力は、突発的な海洋巨大波 (Freak waves, Rogue waves, 一発大波, 三角波と呼ばれ, 最大波高 20m 超) である。しかしながら, この海洋巨大波は予測不能な物理現象であるがゆえに, これによる海難事故 (例えば, Queen Elizabeth II, USS Ramapo, Draupner Platform など) は未だ後を絶たない。これは, 海洋巨大波の実態とその成因が不明であり, その予測・回避システム, 海洋巨大波に対する海洋構造物の合理的な設計外力の指針及び基準が未だ十分確立されていないためである。

実海域の多方向不規則波群において出現する海洋巨大波は, (1) 突発的事象であること, (2) 砕波, 乱流を伴う非線形力学現象であること, (3) 確率統計諸量ではなく決定論的な波動理論が存在しないこと, (4) 予測・回避ができないこと等の理由から, 現地観測・理論・数値計算による学術的・実用的な研究が未だ進んでいない。このような海洋巨大波は, 各種海洋構造物に対する最も重大な自然外力であるため, それらの設計・運用・海難による人命の喪失・経済的損失の防災・減災の観点から, 学術的・社会的に解決すべき緊急課題である。

特に, 我が国近海で発生する大津波や極限波浪 (Freak wave, 三角波, Draupner wave など) を考慮した設計ツールは必要不可欠であり, それに基づく合理的な設計値を推定することが重要である。本研究は, 海洋巨大波に関わる海洋工学, 海岸工学, 船舶工学, 海洋物理学, 応用数学など様々な分野の学理研究の飛躍的な進歩に繋がるため, 海難事故の防災・減災, 人命保護, 経済的損失軽減, 各種海洋構造物の管理運用等の社会的要請に応えるものである。

2. 研究の目的

本研究では, 多方向不規則波群において出現する砕波を伴う海洋巨大波の実態とその成因の解明を行い, それに基づいた海洋巨大波の予測法と回避策の提示, さらには各種海洋構造物の設計指針の提案を図る。特に, 極限波浪 (Draupner Wave や大津波) が浮体式海洋構造物に作用した場合を想定した数値シミュレーションモデルを構築する。また, 海洋巨大波が対象浮体に作用した場合の 6 自由度運動, 流体力, 係留力特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 数値計算手法の概要

本研究では, 連続体 (流体と剛体) を粒子として離散化し, Kernel 関数によって物理量の平滑化を行う SPH 法に基づく計算法を用いた。図-1 に SPH 法の概念図を示す。係留索モデルには Lumped-mass 法を適用し, 有限個に分割・連結された質点に, 質量及び外力を集中させた運動方程式を解く数値モデル化を行った。

対象とする係留式浮体構造物は, 米国再生可能エネルギー研究所 (NREL) によって提案・開発された典型的なセミサブ型洋上浮体 (以下, OC4) をベンチマーク問題として採用した (図-2)。なお, ここで想定する実機の OC4 は, タワー高さ 87m, ブレード回転直径 120m, 定格発電量 5MW であり, 3 本の係留索を配置する。実験は数値円形水槽で得られた実験値を比較検証として用いる。

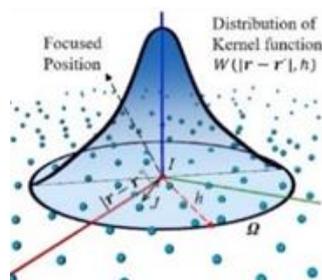


図-1 数値計算手法の概念図



図-2 対象とする係留式浮体構造物(OC4)

(2) 数値水槽モデル

図-3 は, 本研究で作成した数値円形水槽モデルの概要である。英国エジンバラ大学の FloWave 水槽に基づきモデル化されている。また, 海洋巨大波の造波条件は, 水平水粒子が卓越する砕波 (Type-A), 鉛直水粒子速度が卓越する砕波 (Type-B) とした。また, 係留式浮体構造物は, 洋

上風力発電施設を想定し、数値水槽中央に3点式カテナリー係留で配置した(図-4)。

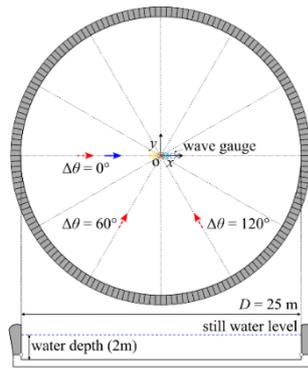


図-3 円形数値水槽のモデル化

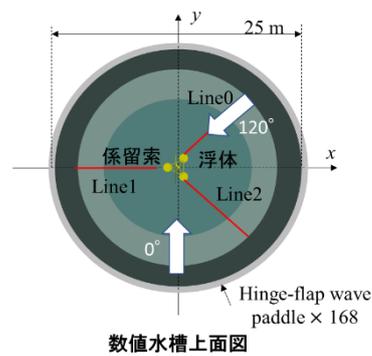


図-4 多方向不規則波および係留式浮体構造物の配置

4. 研究成果

(1) 砕波を伴う海洋巨大波の発生機構および発生条件

図-5は、3種類の条件下によって発生した海洋巨大波の砕波プロセスである。また、同条件において水面変動の時系列変化を示したものである。この他、砕波前、砕波時、砕波後における内部流速及び水粒子加速度を精査するとともに、構造物に作用する砕波衝撃力についても検証した。以上、海洋巨大波の発生条件、発生機構、砕波力等を明らかにした後、海洋構造物への安全性評価を行う。

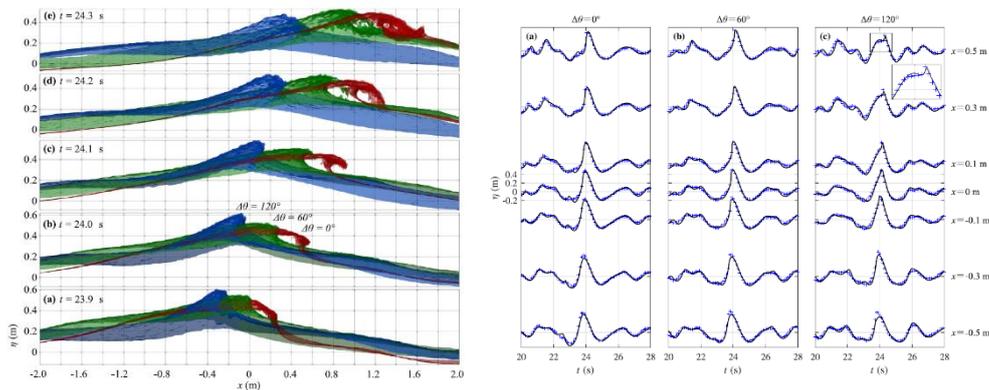


図-5 海洋巨大波の砕波プロセス(左図)および波形の時系列変化の比較(右図)

(2) 一方向・多方向不規則波とOC4モデルの相互作用シミュレーション(試算)

係留索を有するOC4モデルと波浪の相互作用問題への適用例として、多方向不規則波中の浮体運動シミュレーションを実施した。数値円形水槽は直径25m、水深2mとした。図-6は方向集中度パラメータ(Spreading parameter) $s = \infty$ (一方向不規則波列)、 $s = 5$ (多方向不規則波列)におけるOC4モデルの運動シミュレーションを示したものである。ここでは、OC4モデルの6-DoF運動と最大圧力、係留力の時系列変化を検証した。

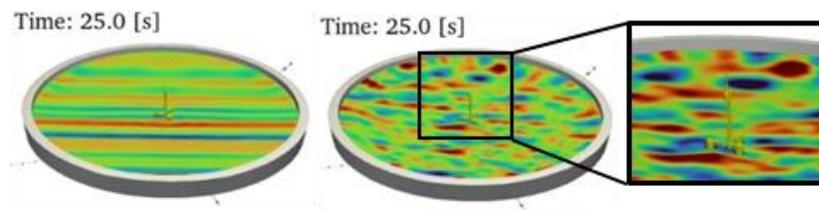


図-6 一方向不規則波(左図)および多方向不規則波(右図)とOC4モデルの相互作用

(3) Draupner WaveとOC4モデルの相互作用

次に、極限波浪現象の一例として海洋巨大波(Freak Waveの一種: Draupner Wave, 1995)をOC4モデルに作用させた。一般的に2方向交差角(交差角 $\theta = 0^\circ, 120^\circ$)を有する波群の非線形重ね

合わせによって、砕波を伴う海洋巨大波が出現する。図-7に、海洋巨大波が OC4 に来襲している様子を示す。 $\theta = 0^\circ$ の場合、OC4 モデルに水平方向の砕波が作用し、 $\theta = 120^\circ$ の場合、鉛直方向の砕波が作用している様子を捉えている。図-8は、砕波を伴う Draupner Wave 作用下における OC4 の浮体運動の係留力の時系列変化を示したものであり、6DoF 運動および流体力、係留力を定量的に評価できるモデルを構築した。



図-7 Draupner Wave と係留式浮体構造物の相互作用（左図： $\theta = 0^\circ$ 、右図： $\theta = 120^\circ$ ）

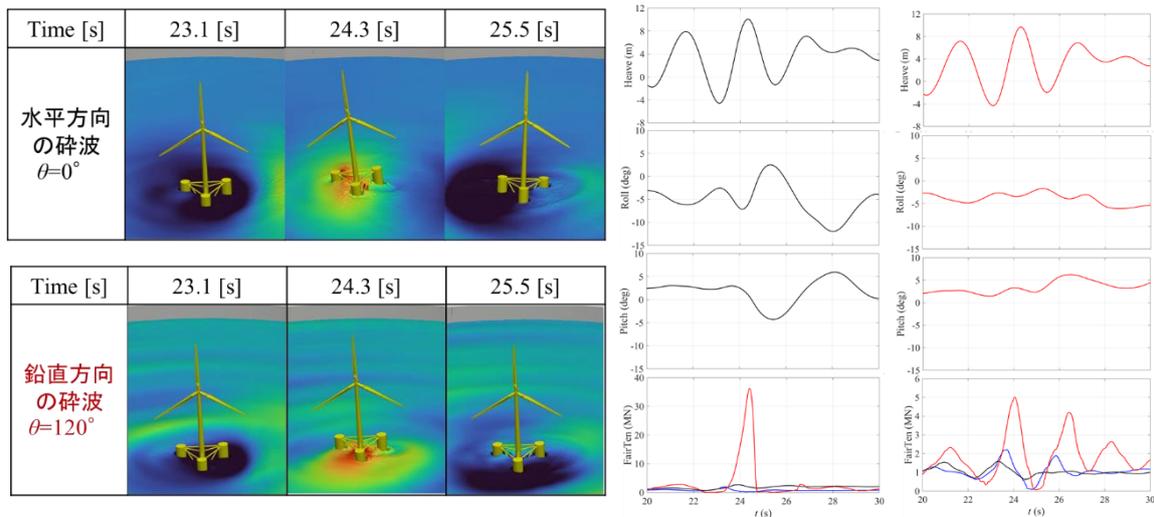


図-8 砕波を伴う Draupner Wave 作用下における OC4 の浮体運動と係留力の時系列変化

(4) 巨大津波と OC4 モデルの相互作用

巨大津波（波高 20 m 超）と OC4 モデルの相互作用計算を実施した。波上側にはピストン型造波板、波下側には波高減衰領域を有する数値波浪水槽とした。また、波高伝播精度を検証したところ誤差 0.9% であったことから、津波の造波性能と定常伝播精度が極めて高いことを確認した。

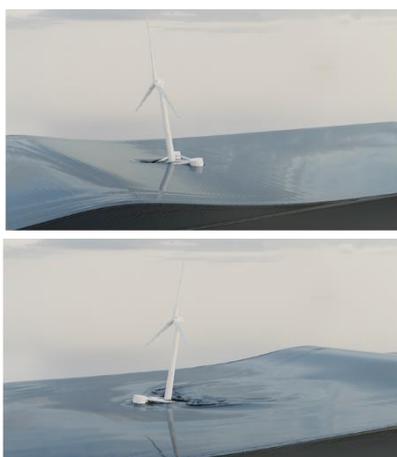


図-9 巨大津波と OC4 の相互作用

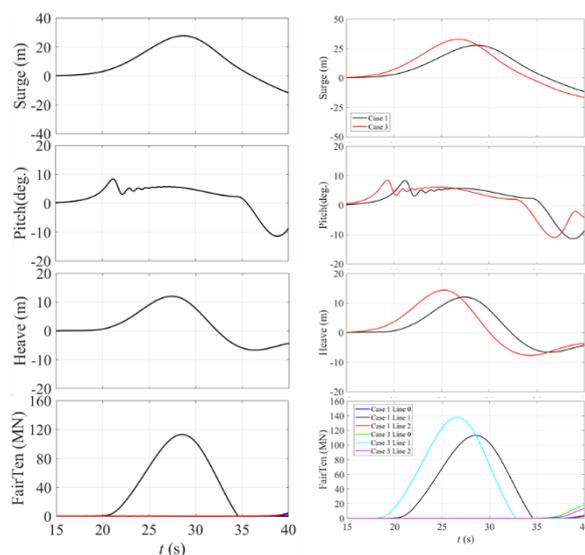


図-10 大津波作用下における OC4 の浮体運動の係留力の時系列変化

次いで、OC4 モデルを 3 点係留（水槽中央地点）し、波高と係留方法が浮体運動・最大圧力・係留力に及ぼす影響を検証した。図-9 は最大波高 $H = 25 \text{ m}$ の津波が OC4 モデルに來襲している

計算結果の一例を示す。その時の OC4 の運動と係留力の時系列変化を図-10 に示す。

(5)まとめと今後の課題

本研究では、実海域を想定した多方向不規則波浪群において発生する海洋巨大波の発生/発達機構、砕波・減衰機構を理学的・工学的見地から解明した。次いで、(1) 係留式浮体構造物に作用する海洋巨大波の衝撃波浪荷重の推定、(2) 海洋巨大波の砕波・出現予測、(3) 海洋巨大波による衝撃荷重の合理的な算定、(4) 海洋構造物の管理・運用に支障を来す海洋巨大波の遭遇予測とリスク等を工学的見地から考究した。

今後は、砕波を伴う巨大波が来襲した際の係留式洋上風力発電施設のリスク評価や設計ツール、設計指針の提案等を行うために、さらなる精度検証が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Taiga Kanehira, Mark L. McAllister, Samuel Draycott, Takuji Nakashima, David M. Ingram, Ton S. van den Bremer, Hidemi Mutsuda	4. 巻 1
2. 論文標題 The effects of smoothing length on the onset of wave breaking in smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulations of highly directionally spread waves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computational Particle Mechanics	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40571-022-00463-z	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 該当する
1. 著者名 T. Kanehira, M. L. McAllister, S. Draycott, T. Nakashima, N. Taniguchi, D. M. Ingram, T. S. van den Bremer and H. Mutsuda	4. 巻 164
2. 論文標題 Highly directionally spread, overturning breaking waves modelled with Smoothed Particle Hydrodynamics: a case study involving the Draupner wave	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ocean Modelling	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ocemod.2021.101822	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 該当する
1. 著者名 Taiga Kanehira, Hidemi Mutsuda, Yasuaki Doi, Takuji Nakashima, Naokazu Taniguchi, Mark McAllister, Ton van den Bremer	4. 巻 1
2. 論文標題 Numerical Recreation of the Draupner Wave in Crossing Wave Systems Using Smoothed Particle Hydrodynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/OMAE2020-18359	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 該当する
1. 著者名 Kanehira T., H. Mutsuda, S. Draycott, N. Taniguchi, T. Nakashima, Y. Doi, D. Ingram	4. 巻 209
2. 論文標題 Numerical re-creation of multi-directional waves in a circular basin using a particlebased method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.oceaneng.2020.107446	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 該当する

1. 著者名 Taiga Kanehira, Roman Gabl, Laura-Beth Jordan, Thomas Davey, Takuji Nakashima, Naokazu Taniguchi, David Ingram, Hidemi Mutsuda	4. 巻 1
2. 論文標題 Constructive and Destructive Interference Locations of Waves in a Circular Wave Basin - Study of Velocity Component Perpendicular to Wave Direction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 31th International Society of Offshore and Polar Engineers	6. 最初と最後の頁 1-8
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 該当する

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Taiga Kanehira, Roman Gabl, Laura-Beth Jordan, Thomas Davey, Takuji Nakashima, Naokazu Taniguchi, David Ingram, Hidemi Mutsuda
2. 発表標題 Constructive and Destructive Interference Locations of Waves in a Circular Wave Basin - Study of Velocity Component Perpendicular to Wave Direction
3. 学会等名 Proceedings of the 31th International Society of Offshore and Polar Engineers (国際学会)
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	田中 義和 (Tanaka Yoshikazu) (00335704)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授 (15401)	
研究分担者	谷口 直和 (Taniguchi Naokazu) (30711733)	広島大学・工学研究院・研究員 (15401)	削除：2021年1月26日

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