

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21981

研究課題名（和文）沿岸巨大波の生成と予測への挑戦

研究課題名（英文）Formation and prediction of coastal rogue waves

研究代表者

渡部 靖憲（Yasunori, Watanabe）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：20292055

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：既開発済みである一次元浅水包絡波集中理論に対して、その包絡波形の発達並びに最大波高の予測を行う数値モデルを開発し、実験結果の再現に成功した。理論をさらに応用し、流れ場における包絡波集中条件を新たに導出し、実証実験により集中波高は顕著に増大し、初期波浪振幅の6倍を超える巨大波の生成を再現した。さらに巨大波増幅率の入射波浪のスペクトル性を明らかにすると同時に、面的波群集中の数値および物理実験から、交差波の非線形エネルギー輸送及び波面衝突によるflip-throughの影響がさらなる波浪増幅に寄与している可能性が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の外洋で発生する巨大波と同一のメカニズムでは、沿岸域では巨大波は発生し得ないことは知られており、それ故高波による海岸災害が幾度となく繰り返されてきたにも拘らず既存の海岸工学の統計的枠組みを超えた巨大波の影響について考えられたことはなかった。本研究は、既に導出済みである浅水包絡波集中理論をベースに、沿岸域における巨大波の発生機構を実験的、数値的に再現し、異常波発生気象条件とその予測を支持する学術的根拠を与えるものである。本研究成果は、海岸防災に関わる新たなイノベーションを誘導するだけでなく、既存体系では予期できない超巨大波による未曾有の海外災害に備え強固な防災体系の実現を促すものである。

研究成果の概要（英文）：A nonlinear wave model to estimate wave growth and maximum crest height of focussing wave groups was developed and validated with the experimental results. The shallow water wave focusing theory has been also extended to the one with wave-current interactions. We found that the presence of opposing current significantly amplifies the focusing waves up to six times of the initial wave height, which depends on a wave spectrum of the initial wave group. We also performed physical and computational experiments to simulate planar focusing wave groups, and found that possible effects of nonlinear energy transfers among crossing waves and flip-through phenomenon caused by the crossing wave impacts to further growth of focussing waves expected in a coastal region.

研究分野：海岸工学

キーワード：水工水理学

1. 研究開始当初の背景

外洋では 25m を超える超巨大波が数日に 1 回の頻度で瞬間的局所的に形成されていることが衛星画像解析によって観測され (ESA Report), 未だに後を絶たない海難事故の原因としてその発生機構の解明及び予測を目指して世界中で研究されている一方, 未だ発生機構に対する明確な解答は得られていない。この巨大波 (Freak wave) は, 多方向不規則波浪の重畳とそれに伴う非線形共鳴の観点から統計的に検討されている一方, 沿岸域では, 風波の分散性の低下に起因して外洋と同様なメカニズムによる巨大波は発生し得ないと考えられてきた。

しかしながら, 過去から繰り返されてきた沿岸域で操業中の漁船の突然の巨大波による転覆の記録 (Liu 2007) や, 2004 年台風 18 号通過時に海拔 10m に建設された橋梁が高波によって落橋した事例, 2016 年台風 9 号の暴風圏から十分離れているにもかかわらず予測を遥かに上回る高波によって堤防が崩壊した事例, 2017 年には留萌港の高さ 16m の灯台が高波によって倒壊された事例など, 沿岸域においても, 瞬間的にピンポイントで発達する巨大波の発生が疑われる事例が後を絶たない。一般に沿岸域に襲来する風波の最大波高は, 水深に応じた砕波限界によって定義され, これを超える高波は砕波によって波高が減少するため, 砕波限界波高を超える高波を見積もることはできない。海岸構造物の設計や海浜変形の評価のために行われる造波実験においても同様に対象水深において砕波限界以上の高波を造波し得ないため, 巨大波に対する応答は調査すらできないのが現状である。

一方申請者は, 外洋でのみ適用可能な周波数の時間変動を伴う包絡波の集中理論 (Longuet-Higgins 1974) を一般化し, 任意の海底地形をもつ沿岸域に適用可能な浅水包絡波集中理論を導出した (Watanabe et al. Coastal Eng J. 2020)。理論検証のために行った造波実験では, 浅水域で同等の規則波の最大波高の 4 倍を超える波高をもつ巨大波が所定の水深, 時刻で発生し, その後大規模な砕波が発生することを実証している。これは, 沿岸域においてこれまで造波することさえできなかった砕波限界波高を遥かに超える巨大波に対する海岸構造物あるいは海浜の応答を実験的に調査するための造波手法を提案するだけでなく, そもそも外洋以外では発生し得ないと考えられてきた巨大波に対して従来の前提を覆す発見である。

2. 研究の目的

従来の外洋で発生する巨大波と同一のメカニズムでは, 沿岸域では巨大波は発生し得ないことは知られており, それ故高波による海岸災害が幾度となく繰り返されてきたにも拘らず既存の海岸工学の統計的枠組みを超えた巨大波の影響について考えられたことは一切なかった。

本研究は, 申請者が既に導出した浅水包絡波集中理論をベースに, 現在まで皆無であった沿岸域における巨大波の発生機構を実証し, 異常波発生気象条件とその予測を支持する新たな体系を構築するものである。これは, これまで生成することができなかった巨大波を室内実験あるいは数値実験において再現し, 異常波浪に対する海岸構造物及び海浜の応答調査を通して海岸防災に関わる新たなイノベーションを強力に誘導するだけでなく, 気候変動の中, 既存体系では予期できない超巨大波による未曾有の海外災害に備え強固な防災体系の実現を支持するものである。

3. 研究の方法

以下の 3 つのタスクを並行して行い, 時空間的包絡波集中による沿岸巨大波生成理論を室内実験並びに数値実験によって実証するとともに, 生成した巨大波群の襲来に対する予測, 対策に向けた学術的根拠を誘導する。

タスク 1 浅水包絡波集中理論の一般化と予測モデルの導出

申請者が既に導出済みである周波数変化による一次元浅水包絡波集中理論 (Watanabe, Coastal Eng J. 2020) をベースに, 多方向から入射し水深変化に応じた屈折を含む任意の沿岸波浪場に適用可能な理論へと一般化を行う。これは任意海底地形上の複数の場所において任意時刻での巨大波群の生成並びに離散的砕波群の完全な制御を実現するものである。一方, 従来の波動方程式は, ある固定された角周波数をもち三角関数で記述された波が重畳する不規則波の伝播が前提とされており, 周波数が時間的に変化する集中包絡波を見積もる理論体系は存在しない。周波数に代わって波浪の位相自体を解像する新たな波動方程式の理論体系を新たに構築し, 任意の海底地形を伝播する集中包絡波の発達の予測計算を可能とするモデルを導出する。

タスク 2 一般化された包絡波集中理論の実証と巨大波の力学的応答分析

一般化された時空間的包絡波集中理論を現有の造波水槽による室内実験並びに, 申請者が既に開発し高い精度が検証されている砕波乱流計算モデルによる数値実験によって検証する。同時に, 巨大波の水面変位, 砕波位置で発生する最大波力及び流速を既に開発済みである画像計測法により分析し, 既存の砕波限界, 構造物に対する設計波力, 流体力との比較により, 現状の海岸の対巨大波脆弱性を評価する。

タスク3 波浪統計分析による沿岸巨大波発生条件の推定

巨大波を誘発する周波数が時々刻々変化する集中包絡波は、固定された観測点において準定常な波浪スペクトル場を仮定する従来の波浪統計の枠組みではその抽出は不可能である。本タスクは、現地波浪データの短時間スペクトルの動的な変化から周波数変動を伴う包絡波を抽出し、包絡波集中条件を満足する波群の発生確率を算定すると同時に沿岸域で発生し得る巨大波の規模を推定する。

4. 研究成果

当初、本研究の核となる沿岸巨大波の実規模実証実験をエジンバラ大学の世界最大波流れ実験水槽を行う予定であったが、新型コロナウイルスの蔓延防止措置による渡航規制、実践施設の使用禁止のため、急遽一部を代替研究へと切り替えざるを得なかった。実規模実証実験を通してはじめて証明できる沿岸巨大波の発生は、極めて重要な課題であり、今後も再度研究計画を策定して取り組む必要がある。

タスク1 浅水包絡波集中理論の一般化と予測モデルの導出:

- ・既に開発済みである一次元浅水包絡波集中理論に対して、その包絡波形の発達並びに最大波高の予測を行うため、非線形 Schrodinger 方程式による数値解析を導入した。急変する周波数にตอบสนองして不連続に変化する波速に伴うオーバーシュートを防ぐため適切な Shock Capturing 法を導入し、実験結果を高精度で予測することに成功した。
- ・一次元浅水包絡波集中理論をさらに応用し、流れ場における包絡波集中条件を新たに導出した。この理論は、新たに導入した波流れ共存場を実現する小規模波浪実験に導入し、逆流場において、集中波高は顕著に増大し、最大流速のケースにおいて、初期波浪振幅の6倍を超える巨大波が発生し得ることが明らかになった。
- ・複数の波浪スペクトルをもつ波群に適用し、実証実験を行った。造波位相シフトの波浪集中への影響を集中理論に導入した。

タスク2 一般化された包絡波集中理論の実証と巨大波の力学的応答分析:

- ・一次元浅水包絡波集中理論による集中波が発達する前に、水深変化あるいは波形勾配の増加に伴う砕波が生じた場合、巨大波の予測最大波高より低い値が観測されることが判明した。現有の造波水槽において詳細な観測を行い、浅水変形を経由した集中波と砕波との関係を明らかにした。また、砕波限界を考慮した巨大波生成のための造波振幅の最適化へ向けた研究に着手し、集中波高のスペクトル依存性を明らかにした。
- ・鉛直堤防の1点に集中する多方向波のモデルとして Faraday 共鳴波を発生させ、空間集中波の特徴並びに非線形重複波の発達過程を調査し、波浪衝突時に発生する flip-through 現象が複数の同心モードの重畳に伴う鉛直ジェット形成に寄与し、巨大波のさらなる増幅に寄与する可能性を明らかにした。さらに、空間集中波の特徴並びに非線形重複波の発達過程を動画像計測によって調査し、複数の同心モードの重畳に伴う異常波発生時の流速分布、時空間スペクトルの変調、スペクトル形状の励振周波数依存性を明らかにした。

タスク3 波浪統計分析による沿岸巨大波発生条件の推定:

- ・海洋波浪スペクトルに従う波浪に対して浅水変形を経た海岸波浪の Benjamin-Feir 不安定と砕波との関係を調査した。
- ・一定の海底勾配を持つ海浜において、多方向波が一点に集中する面的波浪集中を発生させる手法を開発した。面的集中波を数値的に発生させ、波浪の集中過程を明らかにすると同時に時空間3次元スペクトル解析によって集中時の周波数-波数の特徴を抽出した。時間平均波高は空間的に高波数で変動する典型的な非線形エネルギー輸送に起因する現象が発生し、交差波による非線形相互作用が浅水域においても発生することが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Chang Che-Wei、Mori Nobuhito	4. 巻 63
2. 論文標題 Green infrastructure for the reduction of coastal disasters: a review of the protective role of coastal forests against tsunami, storm surge, and wind waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 370 ~ 385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2021.1929742	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 KANETO Toshimichi、KIMURA Tatsuto、WATANABE Yasunori	4. 巻 77
2. 論文標題 A METHOD TO EVALUATE SUPERIMPOSITION TSUNAMI CAUSED BY SUBMARINE LANDSLIDE AND ACTIVE FAULT.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_229 ~ I_233
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_229	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 WATANABE Yasunori、OGUMA Takashi	4. 巻 77
2. 論文標題 WAVE PACKET FOCUSING UNIFORM CURRENT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_31 ~ I_36
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_229	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 Watanabe Yasunori、Tsuda Yosuke、Saruwatari Ayumi	4. 巻 62
2. 論文標題 Wave packet focusing in shallow water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 336 ~ 349
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_31	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 Inoue Takuya, Watanabe Yasunori, Iwasaki Toshiki, Otsuka Junichi	4. 巻 45
2. 論文標題 Three dimensional antidunes coexisting with alternate bars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth Surface Processes and Landforms	6. 最初と最後の頁 2897 ~ 2911
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2020.1756033	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 Watanabe Yasunori, Oyaizu Haruhi, Satoh Hisashi, Niida Yasuo	4. 巻 136
2. 論文標題 Bubble drag in electrolytically generated microbubble swarms with bubble-vortex interactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 103541 ~ 103541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/esp.4938	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 WATANABE Yasunori, KOJIMA Ryota	4. 巻 76
2. 論文標題 Formation and collapse of concentric focusing waves in Faraday wave field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_13 ~ I_18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103541	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 WATANABE Yasunori, TSUCHIYA Hiroataka	4. 巻 76
2. 論文標題 MECHANISM TO FORM WIND WAVES VIA AIR-WATER INTERACTIONS IN WIND/OCEAN BOUNDARY LAYERS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_157 ~ I_162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_I_13	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 Saruwatari A., Fukuhara K., Watanabe Y.	4. 巻 61
2. 論文標題 Probabilistic assessment of storm surge potential due to explosive cyclogenesis in the northwest Pacific region	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 520 ~ 534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2019.1651519	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 津田洋輔, 渡部靖憲, 猿渡亜由未	4. 巻 2019
2. 論文標題 浅水域の包絡集中波の波高予測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 混相流シンポジウム講演論文集(Web)	6. 最初と最後の頁 .B223_0124
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 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 足立天翔, 猿渡亜由未, 宮武誠, 渡部靖憲	4. 巻 2019
2. 論文標題 日本周辺海域における台風に誘発される内部波振動モード	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 混相流シンポジウム講演論文集(Web)	6. 最初と最後の頁 .B212_0114
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 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 Luxmoore Jamie F., Ilic Suzana, Mori Nobuhito	4. 巻 876
2. 論文標題 On kurtosis and extreme waves in crossing directional seas: a laboratory experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 792 ~ 817
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2019.575	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 Ducrozet Guillaume, Bonnefoy Felicien, Mori Nobuhito, Fink Mathias, Chabchoub Amin	4. 巻 884
2. 論文標題 Experimental reconstruction of extreme sea waves by time reversal principle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A20-1 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2019.939	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 Watanabe Y., Tsuda, Y., Saruwatari A.	4. 巻 62
2. 論文標題 Wave Packet Focusing in Shallow Water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 1756033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2020.1756033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Y., Tsuda, Y., Saruwatari A.	4. 巻 62
2. 論文標題 Wave Packet Focusing in Shallow Water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 1756033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2020.1756033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 金戸俊道
2. 発表標題 海底地すべりと活断層による津波の長重評価手法の提案
3. 学会等名 海岸工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小熊多佳史
2. 発表標題 一様流れ中における集中包絡波
3. 学会等名 海岸工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津田洋輔
2. 発表標題 浅水域の包絡集中波の波高予測
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立天翔
2. 発表標題 日本周辺海域における台風に誘発される内部波振動モード
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yasunori Watanabe	4. 発行年 2022年
2. 出版社 CRC Press	5. 総ページ数 300
3. 書名 Dynamics of Water Surface Flows and Waves	

〔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	猿渡 亜由未 (Saruwatari Ayumi) (00563876)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	
研究分担者	森 信人 (Nobuhito Mori) (90371476)	京都大学・防災研究所・教授 (14301)	

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