

京都大学	博士 (工学)	氏名	呂 祚叡
------	---------	----	------

論文題目	Freak Wave Analysis in High-Order Weak Non-linear Wave Interaction with Bottom Topography Change (海底面の変化に伴う高次弱非線形波相互作用におけるフリークウェーブの解析)
------	---

(論文内容の要旨)

外洋では、Freak Wave (フリークウェイブ) /異常波浪と呼ばれる巨大波浪の発生が観測されている。これまでの研究では、Freak Wave の発生は 3 次の相互作用による非線形 4 波相互作用が 1 つの原因であることがわかっている。Freak Wave に関する研究は、実用的な船舶の航行や海洋工学のための海洋波の推定に役立つだけでなく、海洋の自然現象における非線形相互作用の理解に貢献するものである。

本研究では、沖合から中程度までの水深の変化と Freak Wave の出現の関係に着目し、Freak Wave の出現に与える水深および海底勾配の影響について数値モデルを用いて検討した。まず、3 次の非線形干渉を考慮した弱非線形不規則波の伝播過程を表現するため、平面 2 次元場の Nonlinear Schrödinger (NLS) 方程式をもとに、水深がゆっくりと変化する海底境界を考慮した修正 NLS 方程式を導出した。ついで、沖合から中程度の水深までの波浪変形に焦点を当て、海底勾配が非線形波列に与える影響を調べた。具体的には、1 方向および多方向波動場を対象に初期値を様々に変化させたモンテカルロシミュレーションを実施し、斜面上での Freak Wave の出現特性について解析を行った。モンテカルロシミュレーションの結果、深海域では、3 次の非線形相互作用による不安定性が増加し、Freak Wave の発生確率が増加するとともに、これに関係する水面変位の 3 次および 4 次モーメントの尖り度と歪度が増加することを明らかにした。さらに、初期の非線形性の大きさと周波数スペクトルの周波数分散が小さい場合、深海域では Freak Wave の発生率が増加するが、浅海では逆に減少させる効果があることがわかった。ついで、斜面を考慮した多方向波浪場について検討を行い、斜面上における Freak Wave の発生について検討した。その結果、主波向きが斜面勾配の主方向に対してやや斜めの角度を持つ場合、浅海域では、水面変位の尖り度と歪度はほとんど変化しないが、方向スペクトルの周波数集中度が増加することを明らかにした。全体的に、3 次の非線形相互作用は、斜面上で波エネルギーをより多くの方向に分散させ、Freak Wave の発生率を減少させることを明らかにした。

以上のように、本研究結果は新規の知見を多く含み、かつ実務に対して有益なものとなっている。

本論文は 5 章で構成されている。各章の論文の要旨を以下に示す。

第 1 章では、本研究の背景と目的を示した。特に、沖合から中程度までの水深変化に焦点を当て、水深や海底地形の変化が 3 次の非線形不規則波に与える影響について概説を行った。

第 2 章では、弱非線形および地形が波長に対してゆっくり変化するという条件の下で、これまでの理論的研究と整合する形で Nonlinear Schrödinger (NLS) 方程式を拡張し、平面 2 次元における修正 NLS 方程式を導出した。さらに修正 NLS 方程式を疑似スペクトル法により数値的に解く数値モデルの開発を行い、妥当性の検証を行った。これにより、

京都大学	博士 (工学)	氏名	呂 祚叡
<p>第 3 章および 4 章における 1 方向および多方向場における 3 次の非線形不規則波の変化特性を検討可能とした。</p> <p>第 3 章では、1 方向波浪場における不規則波を対象に、高次の非線形性の波浪統計量に対する影響と Freak Wave の発生特性について検討した。まず、モンテカルロシミュレーションを実施し、アンサンブル平均値とその分散の変化特性を主眼に数値計算結果の解析を行った。不規則波の初期条件として、周波数スペクトルをガウス分布、位相を一様乱数で与えることでモンテカルロシミュレーションを行った。波浪の非線形性の強さを示す初期の Benjamin-Feir Index (BFI) と海底勾配を変化させた結果、大水深条件では、初期の BFI が大きいほど水面波形の尖度と歪度が大きくなり、Freak Wave の発生確率が増加する。一方で、中・浅海では BFI の増加に伴い、尖度と歪度が減少し、Freak Wave の発生確率が減少する。</p> <p>第 4 章では、修正 NLS 方程式を用い、平面 2 次元波動場を対象としたモンテカルロシミュレーションの実施と数値計算結果の解析を行った。不規則波の初期の方向スペクトルに周波数と方向分散を考慮し、不規則波の伝播過程における水深変化の影響を調べた。数値計算結果より、方向分散性は非線形 4 波相互作用を弱くする効果がある。また、方向分散が大きくなると、大水深では波形の尖度が小さくなるが、浅海では逆に尖度が大きくなる傾向がある。一方、尖度とは異なり、方向分散の影響は波形の歪度に影響を与えないことを示した。さらに、浅海域では、非線形 4 波相互作用に比べて 2 次の非線形効果による拘束波の影響が卓越し、斜面上において、水深の減少に伴い群速度が変化し、2 次の非線形性の増加による歪度の変化が支配的になることを明らかにした。また、主波方向が水深変化の勾配に対してやや斜めの角度を持つ場合、浅海域では、尖り度と歪度はほとんど変化しないが、方向スペクトルの集中度は増加する。このため、斜面上で方向分散の影響が強くなり、Freak Wave の発生率を減少させることを明らかにした。</p> <p>第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後の研究の展望について論じている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本研究では、沖合から中程度までの水深の変化と Freak Wave の出現の関係に着目し、Freak Wave の出現に与える水深および海底勾配の影響について数値モデルを用いて検討している。深海域では、非線形 4 波相互作用による不安定性が増加し、Freak Wave の発生確率が増加するが、斜面上は水深が浅くなるのに従い、方向分散の影響が強くなり、Freak Wave の発生率を減少させることを明らかにしている。以下に本研究で得られた結果の要旨を示す。

第 1 章では、本研究の背景と目的を示している。特に、水深や海底地形の変化が 3 次の非線形不規則波に与える影響について概説を行っている。

第 2 章では、弱非線形および水深が波長に対してゆっくり変化するという海底地形の条件の下で、これまでの理論的研究と整合する形で Nonlinear Schrödinger (NLS) 方程式を拡張し、平面 2 次元における修正 NLS 方程式を導出している。さらに修正 NLS 方程式を疑似スペクトル法により数値的に解く数値モデルの開発を行い、妥当性の検証を行っている。

第 3 章では、1 方向波浪場における不規則波を対象に、Freak Wave の発生特性について検討している。大水深条件では、初期の非線形性が大きいほど Freak Wave の発生確率が増加し、水深が浅くなると減少することがわかった。

第 4 章では、修正 NLS 方程式を用い、平面 2 次元波動場を対象としたモンテカルロシミュレーションの実施と数値計算結果の解析を行っている。その結果、方向分散が大きくなると、Freak Wave の発生確率が減少し、また主波方向が水深変化の勾配に対してやや斜めの角度を持つ場合、さらに Freak Wave の発生率を減少させることを明らかにしている。

第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後の研究の展望について論じている。

以上のように、本論文は、巨大波浪 Freak Wave の出現に与えるの海底地形の影響について詳細に解析し、その出現特性を明らかにしている。本論文で得られた成果は今後の海洋および海岸工学における外力設計に対して重要な知見であり、学術上、實際上、寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

令和 3 年 8 月 12 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日：2021年11月23日以降