

審査の結果の要旨

氏名 藤本 航

本論文は5章からなる。第1章は Introduction、第2章は Theory and numerical method、第3章は Impact of the four-wave quasi-resonance to the freak wave patterns、第4章は Efficient wave reconstruction considering the four-wave quasi-resonance、第5章は Concluding remarks となる。

本研究の目的は、観測されたフリーク波の統計的特性を数値的に求め、発生メカニズムを明らかにすること、そして、フリーク波を観測データから再構成するためのフリーク波インバージョン手法を提案することである。

第1章では、本研究の意義と既存研究のレビュー、および課題の整理を行った。非線形性を考慮すると、スペクトルの狭帯化と4波準共鳴によりフリーク波は変形し、船体や海洋構造物にとって危険な形状となる可能性がある。しかし、既存研究においては、4波準共鳴とフリーク波の発生確率の関係については重点的に取り上げられているが、実海域のフリーク波形状との関係については、詳しく調べられてない。本研究で扱う問題は大きく分けて1) 4波準共鳴によるフリーク波の変形についての検証、2) 4波準共鳴を考慮してフリーク波を再現することである。

第2章では、本研究で用いる数値計算法 (HOSM) の結果を、波浪の基礎理論からどのように解釈するかを議論した。水面波に対する DNS 手法である Higher Order Spectral Method (HOSM) はポテンシャル理論にもとづき、波形の時間発展を高速・高精度に数値計算する。非線形性を考慮できるが、分散関係を満たす自由波と満たさない束縛波を分離できないという課題がある。一方、波浪理論の基礎方程式である Zakharov 方程式は4波共鳴/準共鳴を自由波だけを用いて記述できる。これらの比較から、HOSM における2次非線形 ($M=2$) と3次非線形 ($M=3$) の違いは、Zakharov 方程式の4波準共鳴の相互作用係数における direct interaction と呼ばれる成分の有無であるということを示した。これにより、 $M=2$ と $M=3$ での計算結果の比較から direct interaction の影響を評価できることが示された。

第3章では、4波準共鳴が実海域で観測されたフリーク波にどう影響するかを検証した。ケーススタディとして、台風通過時に日本近海で観測されたフリーク波を統計的に推定した。第3世代波浪モデル WAVEWATCH III で波浪方向スペクトルを推定し、波の位相を解像するため、乱雑位相仮定にもとづく HOSM のモンテカルロシミュレーションを行った。その結果から、フリーク波の発生確率、存在時間の分布と平均的な波形を推定し

た。フリーク波の発生頻度は、スペクトルが狭くなるほど高くなるが、より顕著な違いとして、存在時間が長くなり、また、波形が非対称になることがわかった。この違いは、2次の非線形性では現れないことから、波形の非対称性、そして、存在期間の長さが、非線形発達の結果発生するフリーク波の特徴であることが示された。すなわち、**direct interaction** による4波準共鳴がフリーク波を変形させるのである。

第4章では、アンサンブル変分法を用いた観測データのインバージョン手法を提案する。既存研究ではHOSMと水位観測データから、変分法により波形を再構成する際に、損失関数の勾配を要さない最適化手法を使用していたため、多数のイタレーション回数を要した。本研究では高速化を目的として、アンサンブル4次元変分法を用いた。アンサンブル計算により損失関数の勾配を推定するため、容易に並列化が可能であり実装が簡易である。本研究では、**Adjoint-free Four Dimensional Variational Method (a4dVar, Yaremchuk et al. 2009)**を、HOSMデータ同化へ応用した。a4dVarは各イタレーションで摂動を与える方向を変化させる点の特徴であるが、本研究では、波浪の特徴を生かし、スペクトル空間における観測と推定の差が大きい周波数帯に選択的に摂動を与えることで効率よく収束する工夫を行った。これをスタッキングと呼ぶ。そして、提案手法について、一方向波と多方向波のケースについて双子実験により検証を行った。その結果、スタッキングにより損失関数が安定して遞減することを示した。また、30%程度のノイズがある観測データでも再現性が良いことを示した。

第5章では、全体の結論を述べている。本研究により、方向スペクトルが狭帯化すると、フリーク波が変形し、存在時間が長くなることを示した。また、4波準共鳴を考慮した上でフリーク波を効率よく再現する、新しいデータ同化手法を確立した。よって、本研究の目的は達成されたと言える。

本研究で得られた知見は実海域におけるフリーク波の研究において、発生確率だけでなく、波形や存在時間も考慮すべきであることを指摘した点、そして、さまざまな応用が考えられる新しいデータ同化手法を考案した点が画期的である。

第3章の内容の一部は、日本船舶海洋工学会論文集に早稲田とWebbとの共著論文として発表されている。また、第4章の内容の一部は、日本船舶海洋工学会論文集に早稲田との共著論文として発表している。いずれも、藤本航が主体的に行った研究である。

以上により、博士（環境学）の学位を授与できると認める。

以上 1942 字