

論文の内容の要旨

論文題目 実験水槽におけるフリーク波再現に関する研究
(Reproducing freak waves in experimental wave basin)

氏 名 宝谷 英貴

フリーク波 (freak wave) は外洋で突発的に現れる巨大波のことである。フリーク波との遭遇が原因と疑われる海難事故が複数報告されており、船舶の安全に脅威を与える存在と考えられている。しかし、事故現場における観測情報がないため、実際にフリーク波が事故原因であったのか、またフリーク波のどのような特徴が事故を引き起こす原因となったのかを知ることは困難である。本研究が最終的に目指すところは、船舶に重大な危険を及ぼすフリーク波の特徴を明らかにし、海難事故原因の究明につなげていくことである。

第1章ではフリーク波に関する研究のレビューを行い、研究の目的を述べた。近年の研究で、フリーク波の形成には波の準共鳴相互作用という物理過程が関連していることを述べた。特に確率的な面からの研究が進んでおり、波浪スペクトルの周波数幅、方向幅が狭まるほど準共鳴相互作用が卓越し、フリーク波の発生確率が上昇することが明らかになってきている。次に、実験水槽にフリーク波を発生させる既存の手法について整理した。これまでは主に線形波理論に基づいた造波が行われてきており、準共鳴相互作用の影響を考慮した造波はあまり行われてきていない。特に、一方向不規則波、多方向不規則波について準共鳴相互作用を考慮した造波手法は開発されていない。次に、フリーク波が船体に及ぼす影響について、これまでに行われてきた研究のレビューを行った。縦強度や横揺れの観点から、フリーク波の波高だけでなく、波形勾配や波長、水平粒子速度といった局所的な特徴が重要であることが明らかにされてきている。続いて、フリーク波の局所的な特徴に関する研究のレビューを行い、準共鳴相互作用がこれら局所の特徴に及ぼす影響について、まだまだ明らかになっていないことを述べた。

以上のレビューから、船舶に対するフリーク波の危険性を評価する上で、フリーク波の局所的な幾何学や運動学という特徴を把握することが重要であることがわかる。また、フリーク波の関連が疑われる海難事故原因の解明に向けて、事故当時の海象や物理過程を考慮したフリーク波を実験水槽に造波する技術は重要であると考えられる。これらをふまえ、本研究の目的を、次の2

点に設定した。

(1) 方向スペクトル及び波の準共鳴相互作用を考慮したフリーク波の造波法を開発し、その妥当性を評価する。

(2) 準共鳴相互作用がフリーク波の局所的な幾何学的／運動学的特徴に及ぼす影響を明らかにする。本研究ではその基礎段階として、開発した造波法を用い、準共鳴相互作用がBF (Benjamin-Feir) 不安定波の幾何学的／運動学的特徴に及ぼす影響を明らかにする。

第2章ではHOSM造波法の構築を行った。HOSM (Higher-Order Spectral Method) は、水位及び自由表面上の速度ポテンシャルで表現されるZakharov方程式という非線形な自由表面境界条件式をスペクトル法により効率的に解く数値手法である。HOSMにより、準共鳴相互作用を考慮した波の非線形な時間発達を計算することができる。HOSM造波法は、HOSM計算で検出したフリーク波をそのまま実験水槽に再現することを狙った造波法である。

従来、準共鳴相互作用による波の非線形な発達は、造波機に時間周期的な運動を与え、波を空間発達させることで実験的に研究されてきた。これは、Zakharov方程式のような波の時間発達を記述する方程式について、時間 t と空間 x を入れ替えることに相当する。しかし、多方向波の非線形な発達を実験的に調べる場合、時間 t は1次元に対し、空間 x, y は2次元のため、このような座標変換を適用することができない。本研究で提案したHOSM造波法は、HOSM計算に基づき時間発達する造波信号を作成し、時間発達する波浪場を水槽に再現する手法であり、このような困難を解決することができる。その他のHOSM造波法の特徴としては、海上技術安全研究所にある実海域再現水槽のような全周造波機を備えた水槽を使用することで任意の方向スペクトルを考慮することができる点、発生確率の低いフリーク波を予めHOSMのモンテカルロシミュレーションにより探し出しておくことでdeterministicに水槽にそのフリーク波を再現できる点、また水槽内におけるフリーク波の発生位置や時刻を制御することが可能である点などが挙げられる。

また、HOSM計算で得られる水位は自由波成分だけでなく束縛波成分を含むため、そのまま造波信号計算に用いると、意図しない自由波まで造波してしまう。それを改良する方法として、自由波成分の抽出、波数空間での造波効率の適用、Schafferの制御法の適用を提案した。

第3章では、第2章で構築したHOSM造波法の検証を行った。検証は、全周造波機を備える実海域再現水槽と比較的幅の狭い動揺水槽における造波実験、及びfully nonlinear な2次元数値造波水槽によるシミュレーションにより実施した。BF不安定波、一方向不規則波中のフリーク波、多方向不規則波中のフリーク波の造波を行った。

BF不安定とは、ストークス波の側帯波擾乱 (ストークス波とわずかに波数／周波数の異なる成分の擾乱) に対する不安定性のことを言う。このBF不安定により波の変調が増大し、巨大な波が現れる。BF不安定波の造波ではまず、水槽内波浪場の初期化に関する造波機の制御方法の検証を行った。波下側の造波機を吸収制御のみとすることで、初期の波下側から逆向きに進行する波の発生を防ぐことができることを確認した。これを多方向不規則波に拡張すると、水槽の外側に伝

播する成分を造波信号から除去すれば良いということになる。その他、HOSMにおける非線形オーダーを大きくするほど再現精度が良くなること、造波改良法として提案した自由波成分の抽出、波数空間での造波効率の適用、Schafferの制御法の適用のそれぞれに効果があること、初期波形勾配(すなわち波システムの総エネルギー)が大きくなるほど再現精度が落ちることを確認した。

一方向不規則波中のフリーク波も良く再現できることを確認し、スペクトルの周波数幅が大きくなるほど再現精度が落ちることを確認した。また周波数スペクトルに、一方向不規則波中の変調不安定を示唆するピークが表れていることを確認した。多方向不規則波中のフリーク波についても、おおよそ良く再現できることを確認した。ただし、まだ造波法に改善の余地があり、経験的な造波効率修正を行うことで、わずかながら造波が改善される結果が得られた。

また、HOSM造波の特徴として、HOSMにおいて予め準共鳴相互作用により十分に発達した波浪場を計算し、それに基づき造波信号を作成していることが挙げられる。そのため、 ϵ を代表的な波形勾配、 λ_p をピーク波長とすると、従来の造波法では波を十分に発達させるのに $O(\epsilon^{-2}\lambda_p)$ 程度の空間スケールを必要としていたが、HOSM造波法では $O(\epsilon^{-1}\lambda_p)$ 程度の空間スケールで、準共鳴相互作用により十分に発達した波浪場を再現することが可能となった。

第4章では、HOSM造波法を用い、BF不安定波の局所的な幾何学、運動学に関する考察を行った。考察するにあたり、波前面の勾配、波の前後の非対称性、波の上下の非対称性、水平粒子速度、波頂の速度、波長等の無次元パラメータを導入した。

まず、従来の造波法により発生した空間発達するBF不安定波と、HOSM造波法により発生した時間発達するBF不安定波には、集中点付近の幾何学的、運動学的特徴の時間発達の様子に大きな違いが見られないことを確認した。ただし、各パラメータの絶対値には多少の差が見られた。

次に、BF不安定波の初期波形勾配(総エネルギー)が、幾何学的、運動学的特徴に及ぼす影響について整理した。総エネルギーが大きくなるほど、すなわち準共鳴相互作用が卓越するほど、波頂高さや波前面の勾配、波頂の水平粒子速度が上昇するというような、船体にとって危険側に影響が出ることが明らかになった。

そして、準共鳴相互作用がこれら局所の特徴に及ぼす影響をZakharov方程式とHOSM計算から詳細に検証した。準共鳴相互作用によりスペクトルが特に高波数側へ広がること、それにより波数空間における振幅和が大きくなること、また集中点付近で自由波及び束縛波成分の位相が一致するということが、BF不安定波の局所的な特徴に大きく影響を及ぼしていることを明らかにした。これまで、準共鳴相互作用がフリーク波に及ぼす影響については確率論的な面から明らかにされてきたが、準共鳴相互作用が波の幾何学、運動学にも影響を及ぼすという重要な知見を得ることができた。このような観点からも、フリーク波を実験水槽に発生する上で、HOSM造波法のように波の準共鳴相互作用を考慮した造波を行うことが重要であると言える。

第5章では、まず各章で得られた結論をまとめた。波のスペクトル及び準共鳴相互作用を考慮

してフリーク波を実験水槽に再現するHOSM造波法を開発し、水槽実験と数値造波実験によりその妥当性の検証を行ったこと、そして、HOSM造波法によりBF不安定波の局所的な幾何学、運動学について調べ、準共鳴相互作用がそのような局所的な特徴に影響を及ぼすことを明らかにしたということをもとめた。

本研究の第4章では、波の準共鳴相互作用によりスペクトルが広がることが、BF不安定波の局所的な幾何学、運動学に影響を及ぼしていることを明らかにした。一方、近年の研究で、一方向不規則波、多方向不規則波についても、準共鳴相互作用によりスペクトルが広がることが明らかになっている。つまり、不規則波中のフリーク波の局所的な幾何学、運動学にも準共鳴相互作用が影響することが予想される。この点についてHOSM造波法を活用して検証し、準共鳴相互作用を介してスペクトル形状とフリーク波の局所的特徴の関連性を明らかにしていくことが今後の課題である。