

氏 名	よこ 横 山 直 人
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2739 号
学位授与の日付	平 成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Statistics of Gravity Waves The Weak Turbulence Theory and Its Breakdown (水面重力波の統計 弱乱流理論とその破れ)
論文調査委員	(主 査) 助教授 藤 定 義 教 授 蔵 本 由 紀 教 授 小 貫 明

論 文 内 容 の 要 旨

水面波の乱流において、K. Hasselmann と V. E. Zakharov によって独立に導出された運動論的方程式に基づく研究が、理論、応用の両面で広くなされてきた。この運動論的方程式の背後にある乱雑位相近似、ならびに運動論的方程式の帰結である共鳴関係を満たす 4 波間のエネルギー授受 (4 波共鳴) の 2 つの考えに基づく理論は、弱乱流理論と呼ばれる。申請論文では、以下に示すように、運動論的方程式の起源である決定論的方程式を直接数値計算することで、未だ正当性、適用範囲などの明らかにされていない弱乱流理論が検証され、水面波乱流の持つ統計則が明らかにされた。

(1) [直接数値計算の正当性] 波数空間内で離散化された格子点を用いた直接数値計算では、必ずしも物理現象を反映しないことがある。実際、3 波共鳴によって波数間のエネルギー授受が引き起こされる表面張力波系では、数値計算の離散化のために、実質的に波数間のエネルギー授受のない凍結乱流と呼ばれるものが確認されている。水面重力波の直接数値計算において、4 波共鳴によるエネルギー輸送に対する離散化の影響が調べられた。偶数波共鳴の場合、離散化の程度に依らず、エネルギー輸送に関与する波数の組合せが存在することを示した。その結果、離散化の程度に応じたアンサンブル平均におけるサンプル数を調整することで、従来の弱乱流理論に基づく計算によく一致したエネルギー輸送率が得られることを示した。(2) [弱乱流理論の検証] 直接数値計算から得られたスペクトルおよび波面の変位に対する構造関数の振る舞いが、弱乱流理論の予測と比較された。そのスペクトル、低次の構造関数の冪則挙動の指数は、弱乱流の予測と高い精度で一致することが確認された。一方、高次の構造関数の指数は、弱乱流理論の予測とはわずかに異なった。また、波面変位の確率密度関数の正規分布からの差異が検討された。この差異は、最低次の非線形相互作用の現れである束縛波と関係づけられた。さらに、この波動場に突如出現する巨大な波の挙動についても論じられた。この巨大な波の発生は局所的なエネルギーカスケードを破る非局所的な相互作用に支配されるので、弱乱流理論のみならず、振幅展開に基づく基礎方程式の破綻が生じ得ることを示唆する。

参考論文には、(1)に関係する水面波乱流の数値的研究におけるエネルギースペクトルに対する離散化の影響、(2)に関係する直接数値計算で得られた統計則、さらに、実空間の構造のそれぞれを報告する 3 編の会議録がある。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

水面波乱流は通常の流体乱流とは異なり、線形波が弱非線形相互作用を通して結合した系の乱流状態である。エネルギーの輸送は、弱非線形性が保たれる限り共鳴相互作用が支配するので、特徴的時間は波の変動時間に比べ桁違いに長い。更に、空間 3 次元の現象であるから、基礎方程式系を弱非線形性に基づく振幅展開を用いて空間 2 次元に縮約はするが、多数の非線形項を扱うことになる。この結果、直接数値計算は膨大な計算機資源を必要とするために実用的ではなかった。従って、統計的性質の研究では、弱乱流理論に基づく運動論的方程式が広く用いられてきた。しかし、この理論に基づく二つの仮定「乱雑位相近似」と「4 波共鳴相互作用によるエネルギー輸送」の正当性、適用範囲などは明らかにされていない。

本研究では、振幅展開を用い4次の非線形項まで取り込んだ基礎方程式系に基づく直接数値計算が実用可能であることを初めて物理的に明らかにし、水面波乱流研究への端緒を開いた。特に、偶数個の波数間の共鳴では疎な離散格子点上でもエネルギーの実質的な輸送を伴う波数の組合せが必ず存在することを示す結果は、これまでの常識を覆すもので、基礎研究のみならず多くの応用分野での数値計算の基礎を与える価値の高いものである。

更に、等方的な水面重力波乱流に対し、直接数値計算を適用して弱乱流理論が予測するウェーブアクションスペクトルの冪則域を初めて確認するなど、弱乱流理論を支持する乱流統計結果を得た。しかしながら、高次の統計量に見られる差異(間欠性)は「乱雑位相近似」が弱いながら破れていることを示すものである。更に、冪則域を増した計算では、フリーク波と呼ばれる波の局所的な強い高まりが出現し計算が破綻することを見出した。この結果は、エネルギーカスケードの局所性が破れ、様々なスケールの波が「4波共鳴相互作用」を介さず直接相互作用をすることを強く示唆するもので、広帯域の系では弱乱流論のみならず、従来から用いられている弱非線形性に基づく基礎方程式系にも適応限界があることを示し、今後の水面波乱流研究に大きな影響を与えると期待されるものである。

以上の結果から本申請論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。

なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。