

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 17 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540451

研究課題名（和文）強非線形波群解とそれに基づくフリーク波発生メカニズムの解明

研究課題名（英文）Elucidation of the occurrence mechanism of freak waves via strongly nonlinear wave group solutions

研究代表者

田中 光宏（TANAKA MITSUHIRO）

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：70163582

研究成果の概要（和文）：

船舶の安全航行を確保するために、海洋における巨大波「freak wave」の発生メカニズムの解明が求められている。本研究では不規則波浪場中にも存在するであろう強非線形な「波群構造」を要素として、その相互作用という観点から freak wave の発生に関する新たな知見の獲得を目指した。残念ながら研究途上で期限を迎えて、目標の完全な達成には到らなかったが、副産物として、たとえば波動乱流場中の成分波の振幅ゆらぎの発達特性など、巨大波の出現に密接に関係すると思われる多くの新たな知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：

Elucidation of the occurrence mechanism of "freak waves" in the ocean has long been desired for safe navigation of vessels and ships. In this study, we aimed at obtaining new information on the phenomenon of freak waves in terms of interactions of strongly nonlinear wave groups. Unfortunately the research period ended before fully achieving this goal, but in the course of the research, we have obtained various significant results on the characteristics of amplitude fluctuations of component waves in a nonlinear random wave field, which should be relevant to further understanding of freak wave phenomenon.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：流体力学，非線形波動

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象海洋物理陸水学

キーワード：流体力学，海洋波，freak wave / rogue wave，直接数値シミュレーション，水面波，波群構造，定常進行波解

1. 研究開始当初の背景

近年，比較的静穏な海況から突如出現し，船

舶航行や石油プラットフォームなど海洋構造物に脅威をもたらす巨大波「freak wave」

の発生メカニズムの解明に向けた研究が世界各地で精力的に行われている。Onorato や Janssen をはじめとするヨーロッパの指導的研究者たちは、狭帯域な波列に見られる変調不安定の一般化によって、この freak wave の出現を説明しようとしている。しかしこのような都合の良い狭帯域スペクトルが、現実の風浪中でどのようにして実現されるのかという点において、この類の理論に疑問を投げかける研究者も少なくない。本研究は現在主流である「狭帯域」を出発点とする路線と一線を画し、通常の風浪が有する広帯域スペクトルをそのまま受け入れた上で、freak wave 出現の新たなメカニズムを探ることを目指したものである。

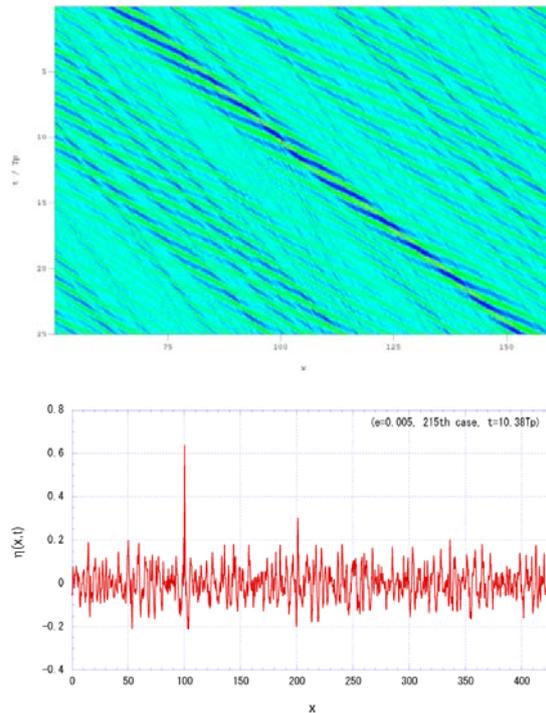
2. 研究の目的

我々自身の従来の研究の結果、(1)風浪の典型的スペクトル形である Pierson-Moskowitz スペクトルを有する 1 次元広帯域不規則波動場の直接数値シミュレーションの中で、広帯域スペクトル場においても、「波群構造」を確認することができること、(2)これらの波群は、線形分散による振幅減少よりも、強非線形性によるエネルギー集中が勝り、その結果伝播に伴い波群の局在化が促進される場合があること、(3)そのような強非線形波群の衝突時には空間的に突出した、まさに freak wave と呼ぶにふさわしい異常な大波が出現するケースがあることなどを見出している。

(右段の図参照) これらの知見から、広帯域不規則波動場においても「波群構造」が存在すること、およびその力学が freak wave の出現メカニズムに重要な役割を果たしている可能性があることが期待された。

このような経緯から本研究は以下の(I),(II) 2段階から構成される。(I) まず狭帯域性も弱非線形性も仮定しない、強非線形領域で適用可能な定常波群解を求める。水面波に限らず、弱非線形領域における普遍的波動形態として、(1) 周期波列を表すストークス波、(2) 弱分散性における K-dV 方程式のソリトン解、(3) 強分散狭帯域における非線形 Schrodinger(NLS)方程式の包絡ソリトン解がよく知られている。このうち(1)と(2)については数値計算により極限波高まで届くような強非線形領域への解の拡張が知られているのに対し、(3)の NLS 方程式の包絡ソリトン解については未だその強非線形版に対

する精密な研究がされておらず、したがって強非線形領域における対応物が欠落しているのが現状である。まずは本質的に不満足なこの状況の解消を目指す。(II) 上記(I)の強非線形波群構造の解明に成功した後は、それらの相互作用を主に数値的に研究することによって、どのような相互作用の元でどのような巨大波が出現するのか、またその出現確率はどの程度になるか・・・などについて明らかにする。



3. 研究の方法

研究の具体的な方法は以下の部分で構成される。

- (1) NLS 方程式を代表とする弱非線形な包絡方程式ではなく、full-nonlinear な水面波の基礎方程式に基づいて、強非線形な波群解を求めることは初めての試みであり、まずは方法論の開発から取り組む必要がある。
- (2) (1)の方法論に基づき、強非線形波群解を得ることができるようになったならば、その解が含むパラメタについて走査することにより、解の性質を系統的に調査する。特に小振幅の極限で、どのように NLS 方程式の包絡ソリトン解と接続するのか？また大振幅の極限で波群内の個々波のクレスト形状と大振幅ストークス波の形状との関係はいかに？などの点

を明らかにしたい。

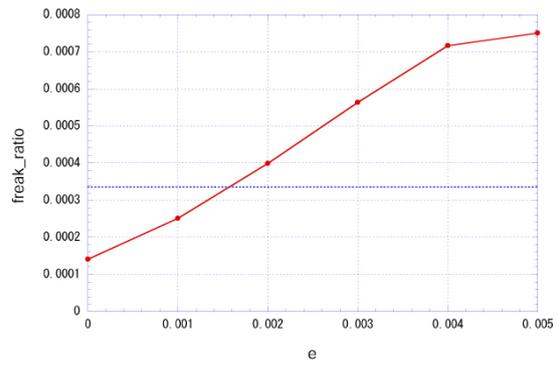
- (3) (1),(2)の強非線形波群解の解法と並行して、それらの相互作用を数値的に研究するために、水面波の基礎方程式を直接数値シミュレーションするためのプログラムを開発する。手法としては「高次スペクトル法」がもっとも有力と考えている。
- (4) (1),(2),(3)の成果に基づいて、まずは強非線形波群間の相互作用の素過程として2つの強非線形波群の衝突・追い抜き時に発生する大振幅波について検討を行う。相互作用する2つの波群のパラメタのどのような組み合わせにおいてどの程度の大波高の波が出現するか明らかにする。
- (5) 次に、Pierson-Moskowitz スペクトルや JONSWAP スペクトルといった、海洋波浪場の現実的なスペクトルを有する不規則波動場を初期に与えた場合、時間発展の過程でどのような波群構造が、どの程度の確率で出現しうるかについて検討を行う。
- (6) 上記(4),(5) 2つのステップの成果を有機的に結合することにより、広帯域不規則波動場中で、強非線形波群の相互作用の結果として、どの程度の巨大波が、どの程度の確率で出現しうるかを明らかにし、freak wave の発生メカニズムに関連する新たな知見としてまとめる。

4. 研究成果

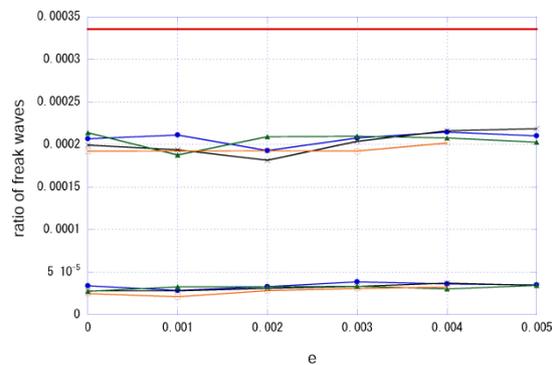
(1) freak wave の発生について：

本研究全体の基礎となる強非線形定常進行波群解は従来求められたことがなく、その方法論から開発する必要があった。Bryant など関連する論文を精査し、その開発に努力したがさまざまな困難があり、最終的に研究期間内に目的を達成するに到らなかった。しかし上記方法(3)に触れた数値シミュレーション手法については開発に成功したため、それを駆使してさまざまなスペクトル形状を有する不規則波動場について freak wave の発生イベントについて詳細に検討した。その結果得られた主な結果は以下のようなものである：

- (a) 伝播方向を1次元に限った計算においては下図に示すように、波動場のエネルギー密度 E (非線形性の度合い) の増加に伴い、freak wave の発生確率も単調に増大するという自然な結果が得られる。



- (b) しかし、伝播方向を実際の海面と同様2次元平面にした計算においては、ある程度の拡がりを持つ方向分布を与えた場合、下図に示すように、波動場のエネルギー E が増大しても、freak wave の出現確率は、Rayleigh 分布から期待されるより低い値でほぼ横ばい状態を示すことを見出した。



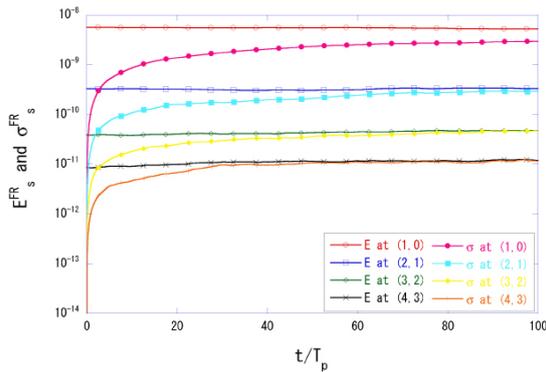
- (c) ここには示さないが、(b)の2次元伝播の場合にも、波動場の kurtosis は場のエネルギー密度 E の増大とともに単調に増大することが見られた。この意味で、2次元伝播の場合、kurtosis と freak wave の発生確率との間の相関はそれほど高くないという結果を得た。近年Mori や Janssen らによって、kurtosis の予測に基づいて freak wave の発生を予測する研究が進められているが、本研究の結果はその方法論の有効性に多少疑問を投げかけるものとなっている。この点は今後の当該分野の研究の方向性にも影響を与える可能性のある重要な点であり、本研究の期間終了後もさらなる検討を要するものと考えている。

(2) 成分波のエネルギーゆらぎについて：

従来、非線形不規則波動場の統計的研究は、エネルギースペクトルとその発展の記述に集中していたが、最近の研究ではスペクトル (すなわち成分波エネルギーの平均値) のみ

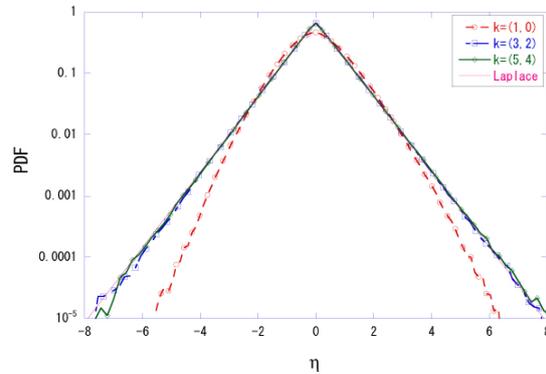
ではなく、その平均値回りのゆらぎに関する研究に大きな進歩が見られ、それによって Gaussian から大きくずれた成分波振幅の分布がはたして自律的に Gaussian に近づくのか、もしそうであればその時間スケールはどのように規定されるのか・・・などに答えることのできる理論が提案されてきている。しかし、これらはまだ実験や観測など独立な手段による検証を受けていないのが現状である。そこで本研究で開発した数値シミュレーションコードを用いて、freak wave の発生とも深く関係する、非線形波動場における成分波の振幅ゆらぎに関して数値的な研究を行った。それによって得られた主な結果は以下のようなものである：

- ①初期の各成分波振幅に初期スペクトル形状から決まる確定値を与え、初期ゆらぎを持たせない状況においても、他の成分波との非線形相互作用の結果、下図に示すように、すべての波数において成分波の振幅ゆらぎは時間的に増大し、分散がスペクトル密度と等しい、したがって変動係数が1となるような準定常状態へ自律的に移行する。またこの準定常状態への移行は高波数成分ほど速い。



- ②上図に見られるように、この振幅ゆらぎの成長の時間スケールは非線形時間スケール、すなわちスペクトル変動の時間スケールに比べかなり速く、したがってスペクトルが定常でなく、いわゆる kinetic equation にしたがって時間的に変動しつつある場合においても、上記(a)の準定常状態が実現する。これはゆらぎの成長の時間スケールがスペクトル変動の時間スケールと同じオーダーとする最近の Choi ら (2005) の理論的研究と一見矛盾するように見える。この点に関しては理論の正当性の核心部分にも関連する重要なポイントであり、今後更なる検討が必要である。
- ③どのような初期分布から出発しても、準定

常状態においては、各成分波の振幅は Gauss 分布に、したがってエネルギーは2自由度のカイ2乗分布に従う。また各成分波のエネルギー変化率は下図に示すごとく非常にきれいに Laplace 分布に従うことを見出した。またこれについては理論的な説明付けにも成功した。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 田中光宏, 波動乱流における「凍結乱流現象」について, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, 1771 巻, 2011, 24-33
- ② M. Tanaka, Yokoyama, N., A numerical study on statistical characteristics of amplitude fluctuations in a wave turbulence, Physica D, 査読あり, 240 巻, 2011, 1145-1155.
- ③ 田中光宏, 横山直人, 波動乱流における成分波エネルギーの非線形ゆらぎについて, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, 1721 巻, 2010, 35-44
- ④ 田中光宏, 横山直人, 波動乱流における成分波のエネルギーゆらぎの統計的性質, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, 1701 巻, 2010, 188-196

[学会発表] (計2件)

- ① M. TANAKA, Numerical study on the growth of amplitude fluctuation of wave modes and the role of resonant interactions, Wave Turbulence Meeting 2012 in Gifu, 2012/3/15, 岐阜大学.
- ② M. TANAKA, Isn't it necessary to improve the method of derivation of the kinetic equation describing the evolution of wave turbulence spectrum?, Wave Turbulence Meeting 2012 in Gifu, 2012/3/14, 岐阜大学.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.made.gifu-u.ac.jp/~tanaka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 光宏 (TANAKA MITSUHIRO)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：70163582

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：