

海洋におけるフリーク波の統計的予測とその船舶設計への応用に関する研究

石黒, 仁規

<https://doi.org/10.15017/1441214>

出版情報：九州大学, 2013, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済



海洋におけるフリーク波の統計的予測と
その船舶設計への応用に関する研究

平成 26 年 1 月

石黒 仁規

目 次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 フリーク波の研究の現状と本研究の位置付け	3
1.3 本研究の内容	6
第 2 章 フリーク波の構造	8
2.1 緒言	8
2.2 実海域におけるフリーク波の観測例	10
2.3 異常波ならびにフリーク波の分類と諸定義	12
2.3.1 異常波の分類	12
2.3.2 フリーク波の定義	14
2.4 フリーク波の基本的性質	16
2.4.1 フリーク波の数理的・物理的特性	16
2.4.2 フリーク波の統計的特性	19
2.5 結言	20
第 3 章 波浪の統計的特性とその推定	27
3.1 緒言	27
3.2 波浪の統計的性質	29
3.2.1 短期海象の波高分布	29
3.2.2 海象の発現確率	31

3.3	長期波浪統計データベースに基づく異常波の推定	34
3.3.1	長期波浪統計データベースの概要	34
3.3.2	長期波浪統計データベースの異常波発生確率推定への適用	36
3.4	結言	39
第4章	フリーク波の統計的予測法	43
4.1	緒言	43
4.2	連続する二つの波の波高差の統計的特性	45
4.3	フリーク波の短期発現確率と予測	48
4.4	フリーク波の長期発現確率と予測	50
4.4.1	二つの時間スケールを用いた長期予測手法	50
4.4.2	長期予測シミュレーション	51
4.5	結言	54
第5章	フリーク波の統計的予測と新船体応答長期予測法	61
5.1	緒言	61
5.2	船体応答長期予測法	63
5.2.1	船体応答長期予測法の種類	63
5.2.2	福田法	64
5.3	フリーク波環境下における船体応答長期予測	69
5.4	結言	72
第6章	結論	77

謝辭	80
参考文献	81
主要記号一覽	85
図表題目一覽	89

第1章 緒論

1.1 研究の背景と目的

船舶設計では、20年～30年に一度生起する異常波を設計条件として取り扱う。異常波は海難事故の主要な原因の一つであると考えられており、その設計条件の適否が乗組員・乗客の生命の安全ならびに積荷の保全へ直接影響を与えるため、波浪を評価する方法の選択が最重要課題の一つとなっている。

波浪を評価する方法として、波浪を確率・統計的に考慮する予測法、いわゆる“短期予測”及び“長期予測”と呼ばれる手法がある[1]。これらの手法は海洋の波浪を不規則現象であるとして定式化し、短期の海象のスペクトル解析を実施して、海象を統計パラメータにより表現することで短期の統計的予測を可能にする。さらに、短期の統計的予測の結果と長期間に渡る短期海象自体の発現頻度を組み合わせることで船体応答がある一定値を超える確率いわゆる長期予測値を求めるものである。これらの手法を用いて異常波を設計条件として取り扱うことが可能となり、歴史的に、原油タンカーの大型化、コンテナ船の設計開発、新型の船舶の開発等に貢献した有効・有力な設計手法として確立されて、現在、造船所の標準的な設計ツールとなっている。

波浪の設計条件を合理的に設定することで、船舶の安全性・信頼性が大幅に向上することになったわけであるが、海象（特に波浪）が原因と思われる海難事故を詳細に分析してみると、標準的な設計ツールでは捉えることが出来ない想定を超えた異常波に遭遇した可能性が示唆される事例が少なからず存在することが判明している[2][3]。大型の撒積貨物船が船体を折損して沈没という海難が発生し、救助された乗組員への事情聴取により、さほど極端に厳しい海象ではない状況下で大波に遭遇したことが証言されている。異常波を設計条件として取り扱うことができるとされている標準的な設計ツールで

は捉えることが出来ない波浪の存在が予見され、このような波浪の存在を織り込んだ船舶設計の手法の開発が切実に希求されている。

本研究では異常波の一つとしてフリーク波に着目し、フリーク波を統計学的に評価する方法を構築することで、標準的な設計ツールでは捉えることが出来ない波浪を船舶の設計条件に取り込む手法を提案することを目的とする。一般的に、波高確率分布の裾野すなわち異常に大きな波高の発現確率に対応する波という条件に加えて、時間的・空間的な不規則変動の両面において、事象の直前・直後の変動の大きさに比較して卓越した大きさの変動の波がフリーク波として想定される。従来の手法における波高分布から得られる最大波高の予測とは異なり、フリーク波の突発性という物理的特性を組み込むために、連続する二つの波の波高差に関する統計的特性を取り入れ、フリーク波の統計的予測を実施し、フリーク波を評価して、船体応答長期予測計算を行うことを可能にすることが本研究の目標である。

1.2 フリーク波の研究の現状と本研究の位置づけ

フリーク波の観測例が増加するにつれ、その存在が認識されるようになり、フリーク波の原因解明や予測に関する研究も増加してきた[4]。フリーク波の研究は物理モデルや発生メカニズムに関する研究、発生確率に関する研究、そして波浪荷重に関する研究の三つの分野に大別することができる。

フリーク波の物理モデルとして様々な非線形波動方程式が提案されている。Zakharovらは非線形シュレディンガー方程式によって変調された弱非線形のストークス波を表した[5]。この方程式はザフハロフ方程式と呼ばれる。また、波長が水深に比べて十分長いとして波の基礎方程式を変形することにより、コールトウェーグ - ド・フリス方程式 (KdV 方程式) が導かれる。この方程式の安定した解としてクノイド波と孤立波の二つの波形が得られる[6]。

そして、フリーク波の発生メカニズムの1つとして波列の変調不安定性が提案されている。ベンジャミン - フェア不安定と呼ばれる波の非線形な振る舞いについて、多くの研究が解析的、数值的、実験的に行われている[7]。ベンジャミン - フェア不安定により、ゆっくりと波列が変調し、高エネルギーの波群が形成されることが数値シミュレーションにより示されている[7]。

実海域におけるデータを利用した研究として、安田らにより日本近海におけるフリーク波の観測データからフリーク波の出現特性について研究されている[8][9]。そして、日本海におけるフリーク波の発生は異常気象や異常波浪の発生とは直接関係しないことを明らかにした。

早稲田ら[10]はフリーク波に遭遇したと思われる海難事故時の波浪場の推算や実海域における観測データを基に、フリーク波発生時の波浪スペクトルの特徴を解析した。その結果、フリーク波の発生頻度の上昇と波浪スペクトルの狭帯化に強い相関があることを間接的に確認した。

森は3次の非線形干渉と異常波浪の出現特性の関係に関する研究を行った。この研究ではフリーク波を有義波高の2倍を超える最大波として定義し、Gauss 過程・Rayleigh 分布からのかい離を異常波浪と考えている[11]。

木村ら[12]はフリーク波の発生確率について Klinting らの定義を定式化し、フリーク波の発生は、十分に発達した風波ではおよそ 65000 波に一度の事象となることを示した。

さらに、田中[13]はフリーク波の出現確率と波動場の非線形性との関連について決定的な数値シミュレーションを行い調査した。そして、エネルギー密度が低く非線形性が重要でない場合に Rayleigh 分布がフリーク波の発生を過大評価する一方、エネルギー密度を上げた場合、Rayleigh 分布がフリーク波の発生を過小評価するという結果を得た。

以上のように、フリーク波の発生メカニズムや発生確率に関する研究は理論や実験、観測データの解析などの多方向から研究がなされている。しかし、海洋におけるフリーク波の具体的な特性については不明な点が多く、船舶や海洋構造物の設計にフリーク波の影響を取り入れる手法は確立されていない。

また、フリーク波遭遇時に船体に作用する波浪荷重について実験による研究が行われている[14] [15] [16]。疑似フリーク波として規則波と線型集中を重畳させたものを発生させた実験水槽において、集中波波高が縦曲げモーメントのサギング最大値に影響を与えるという結果を得ている。しかし、実験水槽で発生させた疑似フリーク波が実海域において発生するフリーク波の波形とは異なるため、船体に作用する荷重が十分に評価できているとはいえない。

本研究ではフリーク波の統計的予測を行い、船舶が一生の間に一度出会うフリーク波を推定し、船舶設計への応用を行う。本研究は従来の手法における波高分布から得られる最大波高の予測とは異なり、フリーク波の突発性という物理的特性を統計的予測に組

み込むために連続する二つの波の波高差の統計的特性を取り入れ、より精度の高いフリーク波の統計的予測手法を開発し、船舶の設計開発へ応用することを目的としている。すなわち、フリーク波の統計的予測の船舶設計への応用として、船体応答長期予測計算にフリーク波の統計的予測結果を取り入れる。従来の船体応答推定法と比較して厳しい条件で船体応答を推定することにより、より安全性の高い設計値を算出することが可能となる。本研究は船舶設計の信頼性向上を達成するために非常に意義のある研究である。

1.3 本研究の内容

本研究ではフリーク波の発現確率の統計的推定とその推定結果の船舶設計への応用による船舶設計の信頼性向上を目的として、フリーク波の統計的予測手法の開発と船体応答長期予測への応用について研究する。本論文は6章から構成されており、各章の内容は次の通りである。

第1章は、緒論であって、研究の背景と目的、フリーク波に関する研究の現状と本研究の位置付けならびに本研究の内容について説明する。

第2章では、異常波の一つとしてのフリーク波について説明する。観測機器の発達により存在が改めて認知されるようになったフリーク波について実海域における観測例を紹介する。用語としての異常波について文献探査による分類・整理を行い、異常波の一つとされているフリーク波の特徴を明らかにしてその他の異常波との違いを明確にする。さらに、フリーク波の数理的、物理的、統計的特性について考察しフリーク波の定義を確定する。

第3章では、フリーク波発現確率の予測に利用する長期波浪統計データベース[17]について説明する。短期海象における波浪の波高の確率分布が利用され、長期の波浪統計情報として海象の発現確率である有義波高と平均波周期の同時確率が利用される。長期波浪統計データベースに基づいて海象の発現確率とフリーク波の大きさの関係を分析し、フリーク波発現確率の予測可能性を明証する。

第4章では、物理的特性を考慮したフリーク波の短期海象における推定結果について説明し、フリーク波の長期予測法の提案を行って具体的なフリーク波の長期予測例を紹介する。物理的特性を考慮したフリーク波の統計的予測では連続する二つの波の波高差を確率変数として取り扱い、モンテカルロシミュレーションを実施し、フリーク波の統計的特性を推定することが骨子となる。

第5章では、フリーク波の統計的予測を利用した船体応答に関する長期予測を実施す

る．船体応答長期予測法の一つである福田法にフリーク波の統計的予測プロセスを組み込むことにより構成される，フリーク波環境下における船体応答予測法について説明する．ここでのフリーク波環境下とはフリーク波を含む海象状態を意味する．このような海象状態における船体応答推定計算を実行し，その推定結果を従来の手法による船体応答長期予測値と比較検討して，提案した予測法が有効であることを示す．

第 6 章は結論であり，本研究の総括と展望について述べる．

第 2 章 フリーク波の構造

2.1. 緒言

本研究で取り扱うフリーク波は前後の波と比較して空間的・時間的に卓越して大きな波高をもつという特性がある．これは大洋で発生する異常波の一つであり，海難事故の原因の一つとして考えられている[10]．

従来，巨大な波高をもつ異常波については，それに遭遇した多くの船員による証言や研究者により言及されていた．例えば，フリーク波が原因と考えられる海難事故として 1980 年の尾道丸遭難事故が挙げられる．この事故においては全乗組員が救助されており，事故時の状況が詳しく分かっている．しかし，このような証言だけでは客観性を欠いており，遭遇したフリーク波の波高については推測の域を出ない．このように，観測機器が未発達であった時代においては異常波の客観的な情報が少なく，異常波の研究が十分になされることはなかった[18]．そのため，異常波の一つであるフリーク波についてもその研究の歴史は浅く，フリーク波の特性や発生メカニズムは未だに解明されていない．

しかし，近年，観測技術の発達により実海域において多くのフリーク波が観測されるようになった．1995 年，北海において石油掘削リグ **Draupner** の波高計により極端に大きな波高（25.6m）が観測された．**Draupner** の波高計により観測されたフリーク波を Fig.2.1 に示す[18]．このような観測例を基にフリーク波の特性やメカニズムを解明するための研究が行われている（例えば，[19]）．

フリーク波のような異常波の研究が進むにつれ，異常波を指す多くの用語が使用されるようになった．**Rogue wave** や **Freak wave** などは多くの論文で使用されているが，近年，**Unexpected wave** という異常波も提案されている[20]．さらに，船員の間では一

発大波や三角波と呼称される異常波が知られている[18]。また、最大波と最高波は同じような用語であるが、前者は統計的概念をもち後者は決定論的概念をもつというように厳密には異なる波を意味する。このように異常波や巨大な波高をもつ波に関する用語は数多くあり、意味を取り違えて使用されてしまう危険がある。このような混同は異常波研究において研究者間の意思疎通を妨げる障害となりうるため、言葉の定義を明確にする必要がある。特に、本研究において対象とするフリーク波とはどのような波であるか明確にするために、様々な異常波や高波高の波の用語の意味を整理しなければならない。

本章は、フリーク波の定義を明確にし、その特性を追及することを目的とする。初めに実海域におけるフリーク波の観測例を紹介する。そして、用語としての異常波について文献探査による分類・整理を行い、異常波の一つとされているフリーク波の特徴を明らかにしてその他の異常波との違いを明確にする。さらに、フリーク波の数理的、物理的、統計的特性について考察しフリーク波の定義を確定する。

2.2. 実海域におけるフリーク波の観測例

海洋において突発的に発生するフリーク波の情報については、観測機器が未発達だった時代では船員による証言に頼るしかなかった。しかし、観測機器の発達によりフリーク波が世界中の様々な海域で観測されるようになり、フリーク波の存在が明らかになるだけでなく、波高などの情報を得ることができるようになった。本節では参考文献を基にフリーク波の観測事例や被害について述べ、フリーク波の危険性を示すことを目的とする。

Fig.2.2 は Kjeldsen[21]により示されたフリーク波と思われる巨大波の観測された地点を表している。また、2006年から2010年にかけて巨大波が発生した海域を Fig. 2.3 に示す[22]。Fig.2.3 において示された巨大波は突発的に発生した単一の波であるフリーク波だけでなく連続した巨大波に関するデータを含んでいる。二つの図のどちらにおいてもフリーク波もしくは巨大波が地球上の全ての大洋で発生していることが分かる。さらに、Fig.2.2 と Fig.2.3 に表示されている巨大波の観測例は観測時期が重複していないにも関わらず、巨大波の発生海域が類似している。2つの図において共通している海域として北海、北大西洋、アフリカ大陸東岸などが挙げられる。また、Table 2.1 に示すようにフリーク波の発生要因は外的要因と内的要因に分けられる[23]。このような条件を満たす海域においてフリーク波の発生頻度が大きくなっていると考えられる。従って、フリーク波は世界中のあらゆる海域で発生する可能性があるが、その発生確率は海域によって異なると考えられる。例えば、アフリカ大陸東岸においてフリーク波が発生しやすい理由について Lopatoukhin と Boukhanovsky は海底の地形（大陸棚の急激な減少）、アガラス海流、西もしくは北西の冬の風、そして局地的に発生する波と南洋から伝わる波との結合としている[23]。

また、Fig. 2.4 は北海で観測されたフリーク波の記録である（Slunyaev ら[24]）。その記録によると a から d の四つの波高記録における最大波高はそれぞれ 16.4m, 17.6m, 18.2m, 17.8m である。そして、有義波高と最大波高の比は 2.38, 2.18, 2.31, 2.29

であり、全ての波高記録において有義波高の 2 倍以上となる大きな波が発生している。波高の大きさだけでなく、前後の波の波高と比べてフリーク波は卓越して大きな波高を持っていることが分かる。

また、フリーク波はその波高の大きさにより船舶に与える被害は甚大なものになることが予想される。フリーク波による被害は、船舶の損傷や積み荷の損失による経済的損失、船舶の燃料や積み荷の流出による環境的損失、そして船員や乗客の人材的損失が挙げられる。2006 年から 2010 年にかけて発生した巨大波が原因と考えられる海難事故について Nikolkina と Didenkulova [22]が調査している。この調査によると、2006 年から 2010 年の間において、9 隻の船舶が深海域において発生した巨大波と遭遇し、死者 9 名、負傷者 27 名の被害が生じた。

2. 3. 異常波ならびにフリーク波の分類と諸定義

2. 3. 1 異常波の分類

大洋において発生する巨大な波高をもつ波浪は様々な名前を付けられ、混同して用いられる危険性がある。本項では異常波について分類・整理を行い、本研究で対象とするフリーク波の位置付けを明確にする。高波高の波の用語の分類において、富田による分類は一つの例として挙げられる。この分類は統計的概念と決定論的概念を区別している。以下に富田による分類を引用する[25]。

Maximum Wave (最大波) 統計的概念で、連続して観測された N (有限) 波の中で最大波高をもつ波。

Highest Wave (最高波) 決定論的概念で、最大の波高勾配を有する規則波。

Limiting Wave (極限波) 決定論的概念で、通常最高波と同一であるが波峰が淀み点になる条件から Stokes により求められた。

Extreme Wave (異常波) 通常考えられないような大きさや形態を有する波浪の総称、時に **Abnormal Wave** も用いられる。

Extreme Value (極値) 統計的概念で、長期間にわたっての最大波中の最大を意味する。この **Extreme Value** を与える波を **Extreme Wave** と呼ぶこともある。

Maxima (極大値) 数学用語で波の峰での水位を意味する。語学的に **Maximum** の複数形である。

Minima (極小値) 数学用語で波の谷での水位を意味する。語学的に **Minimum** の複数形である。

以上が富田による分類である。この分類方法では高波高の波については十分区別され

ているが、異常波の分類については不十分であり、Abnormal Wave と Extreme Wave との区別がなされていない。Extreme Value（極値）を与える波を Extreme Wave としていることから、Extreme Wave は統計的概念が含まれているとみなせる。それに対して、通常考えられないような大きさや形態を有する波浪の総称として用いられる Abnormal Wave は、統計論的概念と決定論的概念のどちらも含まれると考えられる。以上より、Abnormal Wave を通常考えられないような大きさや形態を有する波浪の総称とし、Extreme Wave を Extreme Value（極値）を与える波とする。

続いて、一般的に用いられている異常波や様々な研究者や研究機関により提案されている異常波の名称の分類について説明する。

Rogue wave： 巨大な波高をもつ波。Freak wave と併記されることもあり（例えば [21][26]）、Freak wave とほぼ同じ意味で用いられている [18]。本論文では Rogue wave は用いず、Freak wave という用語を用いる。

三角波： 様々な方向に進む波の合成や、波が流れに逆らって進行する場合に生じる波形勾配の大きな波の俗称である [27]。例えば、ある地点に伝播するうねりと風波の方向が一致しないことにより発生することがある。

一発大波： 海洋において 100 波に 1 波は有義波高の 1.5 倍、1000 波に 1 波は 2 倍に近い巨大波が発生する。このような巨大波を一発大波という [28]。統計的に巨大波が発生するということを意味する。

Unexpected Wave： ガウス過程と仮定される海象において発生する任意の 30 周期の波の中でどの波の波高よりも 2 倍以上の波高をもつ波を指

す[20]. この波は非線形な共鳴干渉を原因とする非ガウス分布において発生する異常波と区別するために定義されている.

フリーク波とは前後の波と比較して卓越して大きな波高をもつ波を指す. フリーク波と Unexpected Wave は統計的な定義が異なるものの, 同じ特徴をもつ波を指していると考えられる. 海洋波はガウス過程であると仮定すると, 当然, 異常波を含む確率過程もガウス過程であると近似することができ, フリーク波と Unexpected Wave を区別する必要はない. 従って, 前後の波と比較して突出して大きな波高を持つ波の名称をフリーク波とする.

2.3.2 フリーク波の定義

異常波の一つであるフリーク波は波高の確率分布の裾野すなわち異常に大きな波高の発現確率に対応する波という定義に加えて, 時間的・空間的な不規則変動の両面において, 事象の直前・直後の変動の大きさに比較して卓越した大きさの変動(波)についても定義される[29]. しかし, 研究者や研究機関によってフリーク波の詳細な定義は異なる[23]. 提案されているフリーク波の定義を Table2.2 に示す. 波高に着目した場合, Faulkner はフリーク波の波高を有義波高 H_s の 2.4 倍以上と定義しているのに対し, Wolfram et al.は有義波高 H_s の 2.3 倍以上となる波高をもつ波をフリーク波と定義している. Wolfram et al.の提案する 2.3 H_s という数字は確率論的な観点から提案されている[19]. しかし, Faulkner の提案する 2.4 H_s という値に理論的な裏付けはない[26]. さらに, フリーク波の簡単な定義として 2 H_s を超える波高をもつ波をフリーク波とするものがあるが, この定義における 2 H_s という値にも明確な決定論的もしくは確率論的な根拠はない[30]. 従って, フリーク波の波高について理論的に導出された定義があるわけではない. フリーク波の定義は時間的・空間的な不規則変動の両面において, 事象

の直前・直後の変動の大きさに比較して卓越した大きさの変動（波）となる．

2.4. フリーク波の基本的性質

フリーク波の特徴として以下の条件が挙げられている[23].

- ・ 厳しい海象状態において発生する波
- ・ 波高に関する条件(e.g. $H \geq 2H_s$)
- ・ Crest の高さに関する条件(e.g. $\eta \geq 0.65H$)
- ・ 波の出現する位置に関する条件(前後の波に対して卓越している波)

しかし、これらの条件だけではフリーク波の特徴を十分に捉えられているとは言い難い。例えば、一つ目の「厳しい海象状態において発生する波」という条件に関しては穏やかな海象においてもフリーク波が発生したと推定される海難事故も報告されている[10]。また、日本海におけるフリーク波の観測データの解析によりフリーク波の発生は異常気象や異常波浪の発生とは直接関係ないことが明らかになっている[9]。従って、厳しい海象状態において発生する波という条件はフリーク波の特徴を表しているとはいえない。フリーク波は海象に左右されることなく発生し、波形と波高によって特徴づけられる。しかし、それらの条件について決定論的もしくは確率論的に導かれた定義が定まっているわけではない。例えば、Fig.2.5 に示す『葛飾北斎の富嶽三十六景 神奈川沖波裏』に描かれている波はフリーク波と称することができるのか? という問い答えることができるようなフリーク波の定義を確定すべきである[29]。本節では数理的・物理的特性、統計的特性等の観点からフリーク波の特徴を捉えることを試みる。

2.4.1 フリーク波の数理的・物理的特性

急峻な波頂をもち、そして波頂の高さと比較して浅い谷をもつフリーク波の数理的・物理的特性として波形と周期に着目する。

フリーク波の波形を特徴づけるために有限振幅波の理論を利用する[29]. 有限振幅波は波動の基礎方程式を解く際に, 自由表面の力学的条件と運動学的条件を線形化することが許されないような波であり, その解としてストークス波やゲルストナー波などがある[6]. 本項ではフリーク波の数理的・物理的特性として, 有限振幅波理論におけるストークス波について説明する.

無限小振幅波の理論から脱し, 波形を保ったまま進行する定常波がストークスにより数学的に導かれた[27]. Fig.2.6 に示すように空間固定座標系 $O\text{-}XZ$ を定める場合, 2 次までの近似をとったストークス波の波面 $\eta(\mathbf{x}, t)$ は以下の式で与えられる[6].

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{H^2}{16} k \frac{\cosh kh (2 + \cosh 2kh)}{(\sinh kh)^3} \cos 2(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

ここに,

h : 静止水面から水底までの距離

H : 波高

k : 波数

ω : 波の円周波数

さらに, ストークス波の尖った山と浅い谷を極限にもっていった場合, その波形 η と波速 c は以下の式で与えられる.

$$\eta = H \left[\operatorname{sech} \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right]^2 \quad (2.2)$$

$$c = \sqrt{g(H + h)} \quad (2.3)$$

ここに,

g : 重力加速度

この波は波形, 波高を変えることなく進行するという特徴をもち, 孤立波と呼ばれる [6]. 式 (2.2) を用いた孤立波の計算例を Fig.2.7 に示す. 図より, フリーク波のように尖った山をもつ波が, 波形を変化させることなく進行していくことが分かる. 突発的に発生するフリーク波も孤立波のように進行すると考えられる.

また, Levi-Civita はベルヌーイの式に含まれる運動エネルギーを表す項を残し, 定常な波動解を数学的に厳密な方法で求めた [27]. これは副組関数による等角写像の原理により, 有限振幅波の流体の場を単位円に写して解を得るという手法である. この手法を用いると, 自由表面の座標 (x_l, z_l) の解は以下の式で与えられる.

$$x_l = \frac{\lambda}{2\pi} \int_0^\xi e^{-\tau} \cos \vartheta d\xi \quad (2.4)$$

$$z_l = \frac{\lambda}{2\pi} \int_0^\xi e^{-\tau} \sin \vartheta d\xi \quad (2.5)$$

ここに,

λ : 波長

ξ : 極座標における偏角

さらに, 波形勾配が 30° 以下ならばこのような波形の波が存在することが数理的に証明されており, 波形勾配が 30° になる波形は波頂が尖頭となりその点における接線のなす角が 120° になる深い波の極限に相当する. このような理論を用いてフリーク波の波形を特徴づけることができる.

また, 波の陰しさを表す指標の一つに波高と波長の比である波形勾配が定義される.

ストークス波は波形勾配が $1/7$ 以上になると碎波することが理論と実験から確かめられている[27]。しかし、実海域では波形勾配が $1/7$ 以上となる波高をもつ大波も観測されている[31]。従って、フリーク波の特徴を考える場合、波形勾配の制限を考慮する必要はない。

2.4.2 フリーク波の統計的特性

フリーク波の統計的特性の解釈スキームの1つとして、激しい海象の嵐の時空間領域内最大波の一般化確率分布が与えられている[23]。嵐の時空間領域 $\Omega(t) = \{\bar{l} : h(\bar{l}, t) > z_s\}$ において幾何学的中心 $l_0(t)$ 、最大波高 $h^+(t)$ 、面積 $S_\Omega(t)$ によって特徴づけられた嵐 $\{l_0(t), h^+(t), S_\Omega(t)\}$ を考えた場合、激しい海象の嵐の時空間領域内最大波の一般化確率分布 $F_m(h)$ は以下の式で与えられる。

$$F_m(h) = \exp \left[2\pi \int_0^L \left(-\exp \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{h}{\bar{h}(l)} \right)^2 \right) \right) \frac{ldl}{\lambda(l)} \right] \quad (2.6)$$

ここに、

l : 嵐の中心からの距離

$2L$: 嵐の直径

$\bar{h}(l)$: 嵐の衝撃

$\lambda(l)$: 微小振幅波に対して $36\bar{h}(l)$ とする

ここに示す嵐の時空間領域内最大波の一般化確率分布はフリーク波の統計的特性の一例であり、フリーク波は任意の波高分布から推定される最大値としてではなく、フリーク波特有の発現確率を表す分布をもつと考えられる。

2. 5. 結言

本章ではまず始めに実海域におけるフリーク波の観測例を示し、従来の想定を超えた波高をもつ巨大波が存在することを説明した。そして、様々な異常波や大波高をもつ波の名称を分類し、フリーク波と他の異常波との違いを示した。また、未だに定義が定まっていないフリーク波の特徴について説明した。

フリーク波の定義は「突発的に発生し、前後の波と比較して卓越して大きな波高をもつ波」となる。特に波高について有義波高の 2 倍や 2.4 倍以上の波高と決定するには根拠に乏しく、具体的な数値を用いてフリーク波を定義することは適切でないことを述べた。

さらに、フリーク波の数理的、物理的、統計的特性の観点からフリーク波の把握について説明した。数理的、物理的特性として有限振幅波理論を用いてフリーク波の波形を捉えることができる。また、統計的特性として、嵐の時空間領域内の最大値分布のようにフリーク波は特有の分布をもつと考えられる。

Table 2.1 Main reasons of freak wave generation (cited from [23])

External	Internal
Wave and opposing current interaction	Frequency modulation in random sea
Focused wave groups and their Interaction	Frequency modulation leads to larger amplification of the freak waves than the amplitude modulation
Refraction around shoals or from inclined sea beds	Cooperative effect of four- and five-wave interaction
Wave caustics from diffraction at coastlines and around islands	The high-order nonlinearities more than third order
Young waves are steep ; especially in Intensifying winds	Temporal-spatial focusing, nonlinear focusing (BF instability)
Crossing wave systems and (or) opposing wave trans	The phasing and direction of freely propagating wave components is such, that larger number of wave crest arise at one point.
An inherent energy fluctuation with a period much larger than 20 minutes	Directionality of a wave fields play a crucial role. Large ocean waves occur as isolated events

Table 2.2 Some definitions of freak waves (cited from [23])

Source	Statistical sample Parameters	Individual wave parameters
WMO, 1975	—	high wave with the deep trough
Faulkner, 2000	$H/H_s \geq 2.4$	—
Kimura and Ohta 1992	—	$H > 2H^-, H > 2H^+, c > 0.65H$
Wolfram et al. 2000	$H/H_s \geq 2.3$	$\delta = (gT^2 / 2\pi h_s) > 0.5$
Kjeldsen, 2000	$\max c > 4\sqrt{m_0}$	$\max c^- < 4\sqrt{m_0}, \max c^+ < 4\sqrt{m_0},$ $\mu = (c / h) \approx 0.7, \varepsilon = c / L'$ $\Lambda = (L'' / L') > 2.0$

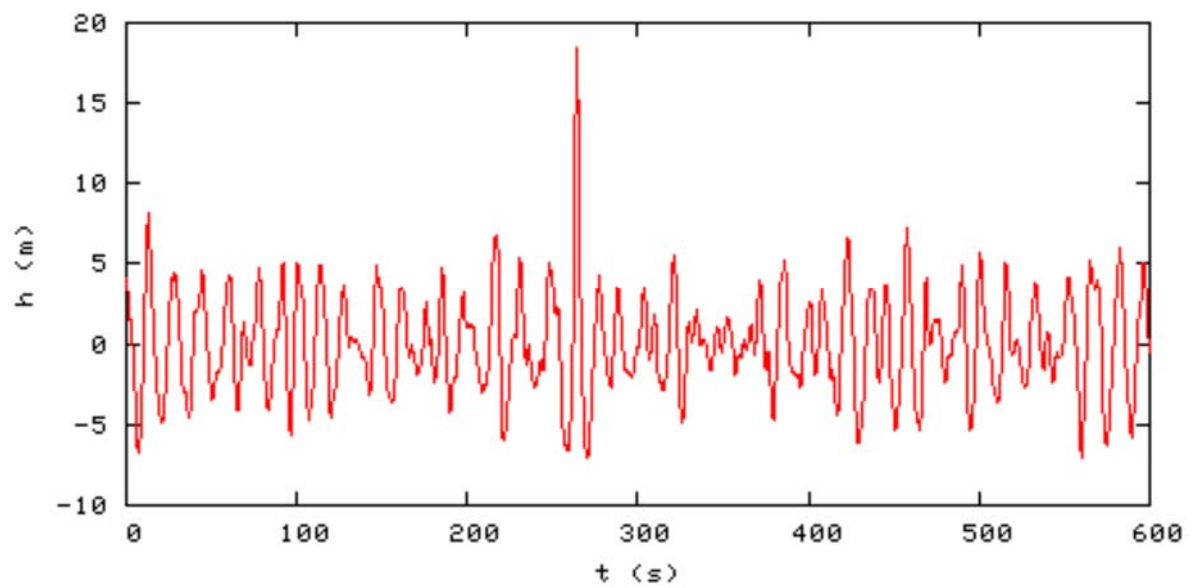


Fig.2.1 Example of freak wave (cited from Tomita(2006)[18])

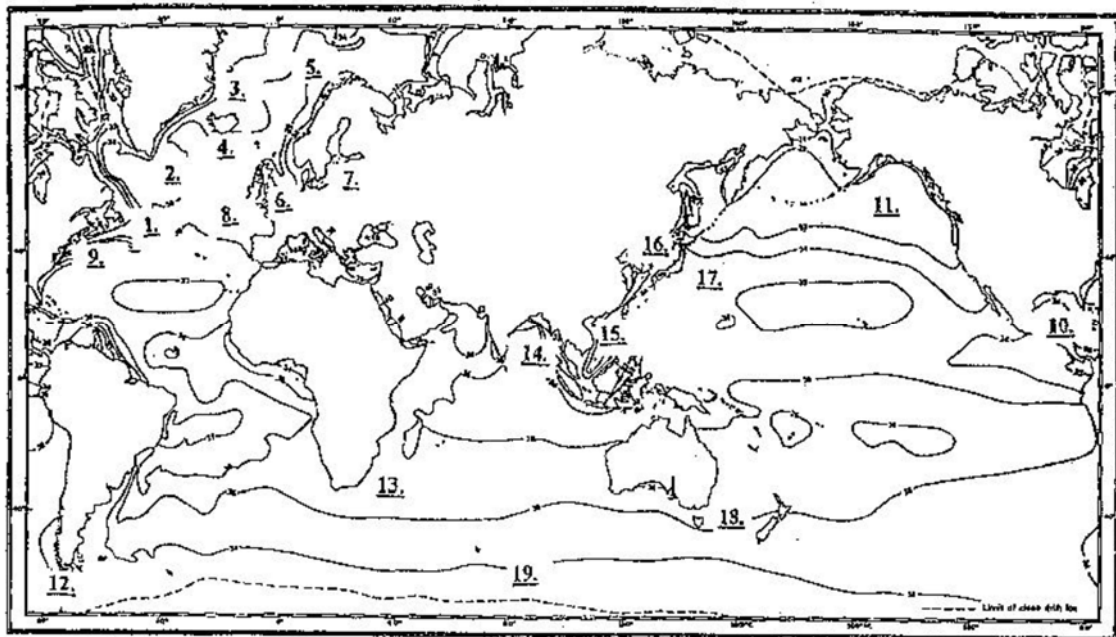


Fig. 2.2 Dangerous areas that contain freak waves under certain meteorological condition (cited from Kjeldsen (2000) [21])

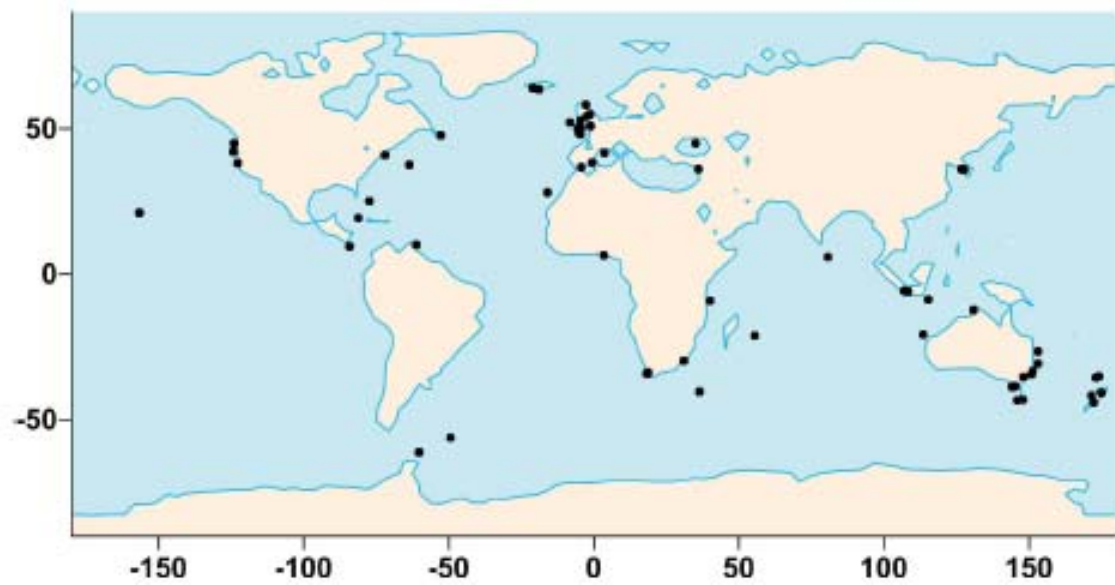


Fig. 2.3 Geographic distribution of rogue wave events in 2006–2010
(cited from Nikolknia and Didenkulova (2011) [22])

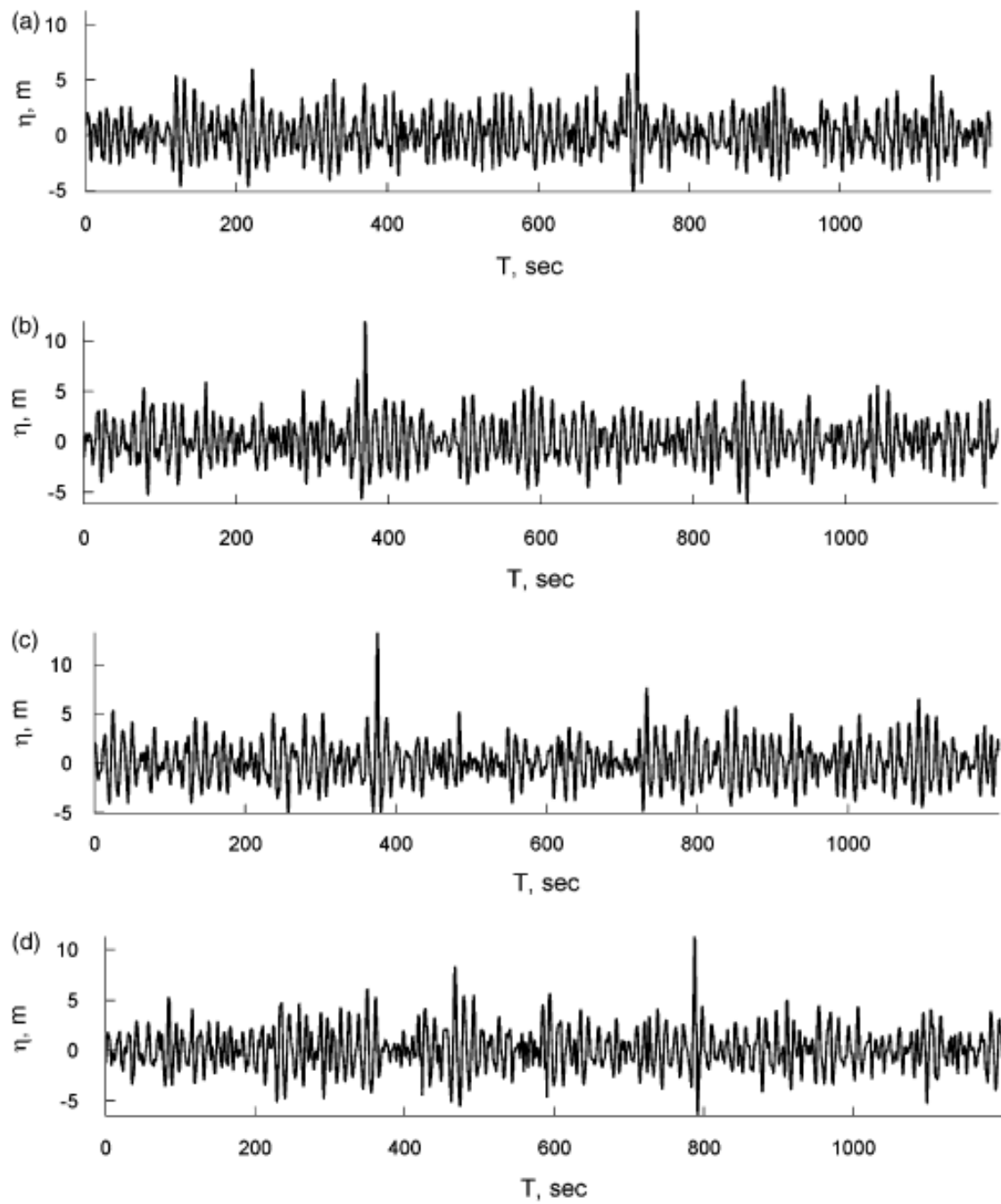


Fig. 2.4 Examples of freak wave (cited from Slunyaev et.al (2005) [24])



Fig.2.5 Kanagawa-oki nami-ura (Ukiyoe of Hokusai)

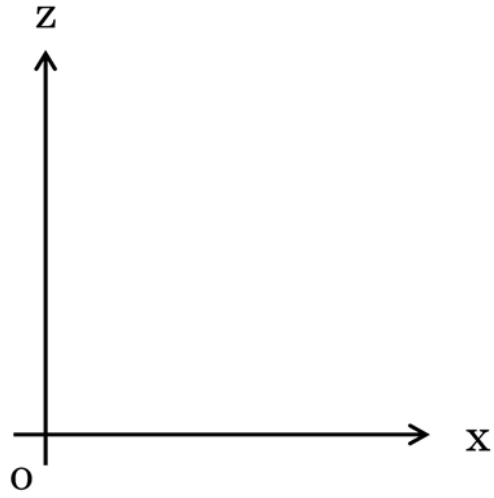


Fig.2.6 Coordinate system in finite amplitude wave

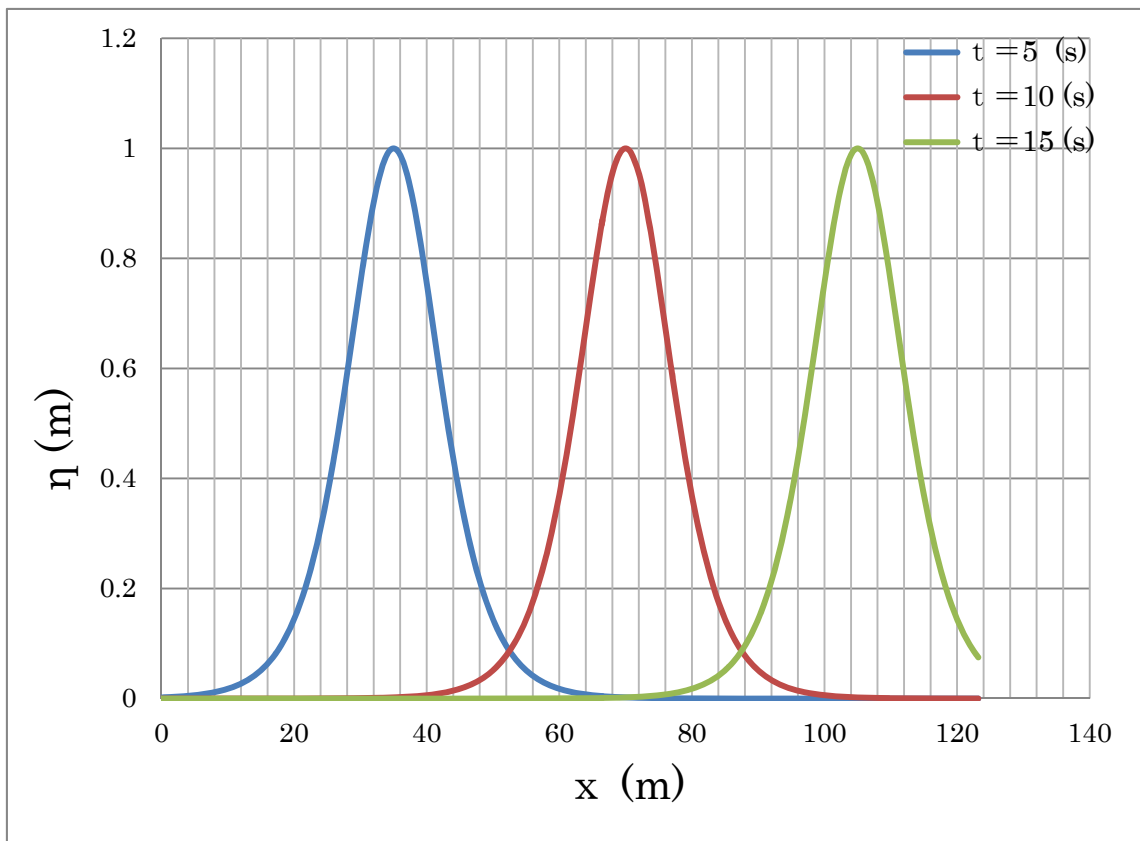


Fig.2.7 Calculation example of solitary wave

第 3 章 波浪の統計的特性とその推定

3.1 緒言

海洋における波浪は不規則な波であるため、確率過程であるとみなし統計的に扱われる[32]。波浪の統計情報を表すパラメータとして、有義波高 H_s と有義波周期 T_s がよく用いられ[33]、波浪統計資料としてまとめられている。例えば、Hogben らの資料 (GWS : Global Wave Statistics)には、極地を除くほぼ地球全海域をカバーする波浪のデータとして 104 の小海域ごとに統計情報がまとめられている[34]。日本沿岸もしくは近海における波浪統計情報としてナウファス（全国港湾海洋波浪情報網：NOWPHAS : Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours）や気象庁の提供する波浪データがある。ナウファスとは国土交通省港湾局、各地方整備局、北海道開発局、沖縄総合事務局、国土技術政策総合研究所及び独立行政法人港湾空港技術研究所の相互協力のもとに構築・運営されている日本沿岸の波浪情報網である[35]。観測データは 2 時間毎の波高と周期だけでなく、周期帯別の波高データもまとめられている。また、気象庁により沿岸の波浪データだけでなく、漂流型海洋気象ブイロボットによる外洋の観測データも公開されている[28]。観測データは観測地点の緯度と経度、大気圧、海面水温、有義波高および有義波周期がまとめられている。

波浪の統計情報は船舶設計において設計値を決定するための船体応答の長期予測計算において利用される。例えば、船体応答の長期予測手法の一つである福田法では波浪海面の長期の発現確率を長期波浪統計資料から直接利用している[36]。従って、船舶や海洋構造物の設計の信頼性を構成する一つの要素として長期波浪統計資料が実際の海象をどの程度正確に反映しているかが重要となる。従来、目視によって波高や波周期を計測していたため、航路から外れた海域や船舶が航行を避ける暴風域において観測デー

タが少なく、統計値の信頼性が低いという欠点があった[33]。新開ら[37]は統計データの質が波浪統計資料のデータの収集期間や収集方法に大きく支配されることを確認した。このような問題は観測機器の発達により精度の高い観測が可能となることで解決されてきている。観測機器としては海洋に直接機器を設置するブイ型波浪計や、人工衛星や航空機に搭載され、離れた個所から観測を行うマイクロ波高度計や合成開口レーダーなどが挙げられる[38]。

さらに、船体応答の長期予測に利用できる程度の精度と信頼性をもつ長期波浪統計資料を提供することを目的として長期波浪統計データベースが構築され、船体応答の長期予測への適用が提案されている[39]。

本章では、はじめに波浪の統計的性質について述べる。短期における波浪の統計的性質と長期における海象の統計的性質を説明する。そして、波浪統計資料の一つである長期波浪統計データベースについて説明する。このデータベースは観測衛星から取得された波高情報を基に、GWSによる海洋の小海域区分を用いて地球上の大洋を104つの小海域に分け、その小海域毎に波浪の統計情報をまとめたものである[17]。また、長期波浪統計データベースのフリーク波発現確率の推定への適用の可能性の検討として、長期波浪発現確率分布のヒストグラムと波高分布を Rayleigh 分布としたときの最大波高との関係を分析し、フリーク波発現確率の予測可能性を明証する。

3.2 波浪の統計的性質

不規則に変動する波浪は確率過程とみなされ統計的に取り扱われる．短期海象では個々の波に着目するのに対し，長期の波浪を統計的に表すパラメータとして，有義波高と有義波周期がよく用いられる．本節では短期海象と長期海象における波浪の統計的性質をそれぞれ説明する．

3.2.1 短期海象の波高分布

確率過程であるとみなし統計的に扱われる波浪は定常なガウス過程として近似的に取り扱われ，さらに，エルゴード性の仮定も許される．波面の極大値の分布に対して波浪スペクトルが非常に狭い場合の極限として Rayleigh 分布に対応する波高分布が得られる[38]．波高の分布は Rayleigh 分布とよく一致することが多くの観測により実証されている[33]．以下に Rayleigh 分布の確率密度関数と累積分布関数を示す．

$$F(H) = 1 - \exp \left\{ -\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}} \right)^2 \right\} \quad (3.1)$$

$$f(H) = \frac{\pi}{2} \frac{H}{\bar{H}} \exp \left\{ -\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}} \right)^2 \right\} \quad (3.2)$$

ただし，

$f(H)$: probability density function of wave height H

$F(H)$: cumulative distribution function of wave height H

$\bar{H}$: mean wave height

また、波高の分布を Rayleigh 分布で仮定した場合、以下のように波高の特性値が得られる。

$$\bar{H} = 0.626 H_s \quad (3.3)$$

$$H_s = 1.597 \bar{H} \quad (3.4)$$

$$H_{1/10} = 2.031 \bar{H} \quad (3.5)$$

$$H_{1/100} = 2.662 \bar{H} \quad (3.6)$$

有義波高 H_s を持つ、ある海面状態で起こりうる最大波高について考える。波高の分布は Rayleigh 分布であるとするれば、波浪記録の中で期待される最大波高 H_{max} は確率変数で、観測ごとにかなり変化する。しかし、波の全体の数を固定すると次のように表せる[33]。

$$H_{\max} = 0.706 H_s \sqrt{\ln N} = 1.07 H_s \sqrt{\log_{10} N} \quad (3.7)$$

100 波からなる波浪記録中の H_{max} は $1.52 H_s$ 程度、1000 波からなる波浪記録中では $1.86 H_s$ 程度である。次に、超過確率 P_e を考える。波数 N の極限波高 H_e は次式で表すことができる。

$$H_e = H_s [0.5 (\ln N - \ln(-\ln(1 - P_e)))]^{0.5} \quad (3.8)$$

3.2.2 海象の発現確率

長期の統計情報を表すパラメータとして，有義波高と有義波周期がよく用いられる[33]．短期海象における波高の分布と同様に，有義波高や有義波周期は観測結果を基にそれぞれ確率分布で近似される．そして，有義波高と有義波周期の同時確率で表されることが多い[40]．

有義波高の発現確率を表す分布として対数正規分布，ワイブル分布，およびグンベル分布が利用されることが多い[33]．以下に，対数正規分布，ワイブル分布，およびグンベル分布の確率密度関数と累積分布関数を示す．

対数正規分布：

$$f(H_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{H_s}H_s} \exp\left\{-\frac{(\log H_s - \mu_{H_s})^2}{2\sigma_{H_s}^2}\right\} \quad (H_s > 0), \quad 0 \quad (H_s \leq 0) \quad (3.9)$$

ただし，

$$\text{mean value} = \exp\left(\mu_{H_s} + \frac{\sigma_{H_s}^2}{2}\right)$$

$$\text{variance} = \exp(2\mu_{H_s} + 2\sigma_{H_s}^2) - \exp(2\mu_{H_s} + \sigma_{H_s}^2)$$

μ_{H_s} ：location parameter of the distribution

σ_{H_s} ：shape parameter of the distribution

ワイブル分布：

$$f(H_s) = \frac{bH_s^{b-1}}{a^b} \exp\left\{-\left(\frac{H_s}{a}\right)^b\right\} \quad (a, b, H_s \geq 0), \quad 0 \quad (H_s < 0) \quad (3.10)$$

$$F(H_s) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{H_s}{a}\right)^b\right] \quad (H_s > 0) \quad (3.11)$$

$$\text{mean value} = a\Gamma(1+b^{-1})$$

$$\text{variance} = a^2 \left\{ \Gamma(1+2b^{-1}) - \Gamma^2(1+b^{-1}) \right\}$$

$\Gamma(\cdot)$: Gamma function

a : scale parameter of the distribution

b : shape parameter of the distribution

ガンベル分布 :

$$f(Hs) = \frac{1}{a} \exp \left\{ -\frac{Hs-b}{a} - \exp \left(-\frac{Hs-b}{a} \right) \right\} \quad (a > 0) \quad (3.12)$$

$$F(Hs) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{Hs-b}{a} \right) \right] \quad (3.13)$$

ただし,

$$\text{mean value} = b + \gamma a \quad \gamma = 0.5772 \quad : \text{Euler's constant}$$

$$\text{variance} = \frac{a^2 \pi^2}{6}$$

a : scale parameter of the distribution

b : location parameter of the distribution

ここに,

$f(Hs)$: probability density function of significant wave height Hs

$F(Hs)$: cumulative distribution function of significant wave height Hs

また, Ochi は北海における観測結果と分布関数との比較について述べている[30]. 対数正規分布は高波高の部分で観測値より小さな値をとり, ワイブル分布では累積確率が30%のあたりで観測値より大きな値をとることを示している. そこで Ochi はより精度の高い分布関数として以下のような一般化ガンマ分布を提案している[30].

$$f(H_s) = \frac{c}{\Gamma(m)} \lambda^{cm} H_s^{cm-1} \exp\left\{-(\lambda H_s)^c\right\} \quad (3.14)$$

$$F(H_s) = \Gamma\left\{m, (\lambda x)^c\right\} / \Gamma(m) \quad (3.15)$$

ただし,

m, c, λ : parameters of this distribution

$\Gamma\left\{m, (\lambda x)^c\right\}$: incomplete gamma function

$f(H_s)$: probability density function of significant wave height H_s

$F(H_s)$: cumulative distribution function of significant wave height H_s

3.3 長期波浪統計データベースに基づく異常波の推定

3.3.1 長期波浪統計データベースの概要

船体応答長期予測計算に利用可能な精度と信頼性のある新しい波浪発現頻度表のデータベースを構築することを目的として、人工衛星の観測データを利用した長期波浪統計データベースがまとめられている[39]。人工衛星によるリモートセンシングは、従来の目視観測情報に基づき作成されていた長期波浪発現頻度表に比べ観測期間や観測海域の偏りがなく、高精度な観測が可能である[39]。そのため、長期波浪統計データベースは従来の波浪発現頻度表と比較して、その精度と信頼性の高さから大洋における海象の発現確率を推定するのに有用である。

長期波浪統計データベースは松尾[17]がその骨子を確立し、北太平洋のデータをまとめた。そして、新開ら[39]により全ての海域におけるデータがまとめられ地球上のほぼすべての海域を含むデータベースとして完成した。このデータベースには有義波高と平均波周期の同時発現確率が GWS による海洋の小海域区分を基本とした小海域毎にまとめられている。

有義波高のデータは観測衛星 ERS-2 に搭載されたレーダー高度計により 1996 年から 2000 年までの 5 年間に観測されたデータに対し Quality Control を行い、有効な有義波高データを取り出し利用している。有義波高はワイブル分布、グンベル分布、そして対数正規分布の三つの確率分布により近似されている。各分布のパラメータは観測データのヒストグラムより推定されている。

観測衛星 ERS-2 には波周期を観測する機器は搭載されていないため、平均波周期は Bitner-Gregersen, E.M. らの定点観測結果を参考として次式に示すように有義波高 H_s に対する条件付確率密度関数として対数正規分布により表され、そのパラメータは GWS (Global Wave Statistics) の波浪統計資料[34]から推定されている[17]。

$$f(T | Hs) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T(Hs)T} \exp\left[-\frac{(\log T - \mu_T(Hs))^2}{2\sigma_T^2(Hs)}\right] \quad (3.16)$$

ただし,

$f(T | Hs)$: conditional probability density function of the wave period T
given the significant wave height Hs

$$\begin{cases} \mu_T(Hs) = E(\log T(Hs)) \\ \sigma_T^2(Hs) = \text{Var}(\log T(Hs)) \end{cases} \quad (3.17)$$

さらに, 有義波高の分布と平均波周期の分布を用いて, 有義波高と平均波周期の同時確率分布が以下のように得られる.

周辺対数正規分布と条件付対数正規分布による同時確率:

$$\begin{aligned} P(Hs_j, T_i) = & \left[\int_{Hs_{lower}}^{Hs_{upper}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Hs}Hs} \exp\left\{-\frac{(\log Hs - \mu_{Hs})^2}{2\sigma_{Hs}^2}\right\} dHs \right] \\ & \times \left[\int_{T_{lower}}^{T_{upper}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T(Hs)T} \exp\left[-\frac{(\log T - \mu_T(Hs))^2}{2\sigma_T^2(Hs)}\right] dT \right] \end{aligned} \quad (3.18)$$

周辺ワイブル分布と条件付対数正規分布による同時確率:

$$\begin{aligned} P(Hs_i, T_j) = & \left[\int_{Hs_{lower}}^{Hs_{upper}} \frac{bHs^{b-1}}{a^b} \exp\left\{-\left(\frac{Hs}{a}\right)^b\right\} dHs \right] \\ & \times \left[\int_{T_{lower}}^{T_{upper}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T(Hs)T} \exp\left[-\frac{(\log T - \mu_T(Hs))^2}{2\sigma_T^2(Hs)}\right] dT \right] \end{aligned} \quad (3.19)$$

周辺グンベル分布と条件付対数正規分布による同時確率:

$$\begin{aligned} P(Hs_j, T_i) = & \left[\int_{Hs_{lower}}^{Hs_{upper}} \frac{1}{a} \exp\left\{-\frac{Hs-b}{a} - \exp\left(-\frac{Hs-b}{a}\right)\right\} dHs \right] \\ & \times \left[\int_{T_{lower}}^{T_{upper}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T(Hs)T} \exp\left[-\frac{(\log T - \mu_T(Hs))^2}{2\sigma_T^2(Hs)}\right] dT \right] \end{aligned} \quad (3.20)$$

また、長期波浪統計データベースにおける地球上の海域区分については、GWS による海洋の小海域区分を基本として、北太平洋、北大西洋等の 5 つの大洋についても、小海域を集成海域として捉えそれぞれのデータが構成されている。Fig. 3.1 は長期波浪統計データベースにおける海域区分を示している。

長期波浪統計データベースのデータの一例として Fig3.2 に北大西洋に位置する小海域 1 番のデータを示す。図に示すように波高一波周期の同時発生確率については、1 頁につき、1 海域・1 対象期間に関する統計がまとめられている。頁左上には入力となる衛星観測有義波高データがヒストグラムで示され、項左下（周辺ワイブル分布）、項右上（周辺対数正規分布）、項右下（周辺グンベル分布）それぞれによる有義波高(m)と平均波周期(s)に関する同時発生確率が示されている[17]。同時発生確率は 1000 分の 1 の単位で表示されており、有義波高に関しては階級幅 1m、平均波周期に関しては階級幅 1s ごとに確率がとられている。そして、各分布のパラメータも表示されている。例えば、小海域 1 番におけるワイブル分布の scale parameter は 2.7180, shape parameter は 1.6349 である。これらの値は任意の海域の有義波高の分布を再現し、統計的数値シミュレーションを行うために利用することができる[41]。

3.3.2 長期波浪統計データベースの異常波発生確率推定への適用

異常波のように大きな波高をもつ波は長期発現確率の分布の裾野に対応する。大きな波高としての異常波の発現について、順序統計量シミュレーション技法の適用により、その統計的性質を調査することができる[42]。本節では、長期波浪統計データベースのフリーク波発現確率の推定への適用の可能性の検討として、長期波浪発現確率分布のヒストグラムと波高分布を Rayleigh 分布としたときの最大波高との関係を示し、異常波の発現確率と長期波浪発現確率との対応づけについて考察する。

1980 年 12 月に野島埼沖で遭難した尾道丸の事故を例にとり、長期波浪統計データベ

ースを用いて検証する。尾道丸の遭難事故は乗組員が全員救助されており、事故時の状況がよく分かっている。尾道丸は、有義波高 8~9m の西からのうねりの中を航行中、やや船首右舷よりから突然波高数十メートルと思われる大波の直撃を受けて損傷し遭難した。遭難地点は北緯 31 度 00 分東経 156 度 11 分であり、これは長期波浪統計データベースの中で 30 番の小海域に相当する。Fig.3.3 に尾道丸が遭難した地点と海域を示す。赤丸で囲まれた地点が尾道丸の遭難地点を表し、赤い枠で囲まれた海域が長期波浪統計データベース中の 30 番の小海域を表している。

まず、短期海象における波高の統計的性質から異常波の統計的推定について考える。尾道丸遭難時の海象は有義波高 8~9m、平均波周期 12 秒であった。この短期海象の波高分布を Rayleigh 分布と仮定すると、式(3.7)より最も出現しやすい最大波高は 3 時間 20 分 (N=1000) では 16.70m、16 時間 40 分 (N=5000) では 18.54m、そして 33 時間 20 分 (N=10000) では 19.28m となり、有義波高の 2 倍程度となる。また、式(3.8)より、波高が有義波高の 2.4 倍以上となるような超過確率は 3 時間 20 分 (N=1000) では 1.0%、16 時間 40 分 (N=5000) では 4.8%、そして 33 時間 20 分 (N=10000) では 9.5% となる。

次に、小海域 30 番の長期波浪発現確率分布のヒストグラムと波高分布を Rayleigh 分布としたときの最大波高との関係を Fig. 3.4 に示す。この図では有義波高 9 m とその値から計算される波高の特性値がヒストグラムのどの位置と対応するか示している。また、一般的なフリーク波の定義として用いられる有義波高の 2 倍以上となる波高も示している。

Fig.3.4 からフリーク波のような大きな波高をもつ異常波が波高分布の裾野部分に対応することが分かる。しかし、ここで示した最大波高としてのフリーク波の例示は、直接的な意味での統計的予測と少し異なる。波高分布に基づく極限波高の波をフリーク波として長期波浪発現確率と対応づけているが、フリーク波の発現確率を予測しているわ

けではない．フリーク波の特徴を考慮した統計的予測技法の確立し，長期波浪統計資料を利用することによりフリーク波の長期発現確率の直接的な統計的予測が可能となる．

3.4 結言

海洋で利用する構造物の設計値を決定するために不可欠である波浪統計情報について説明した。波浪統計情報として短期海象における波浪の波高分布は Rayleigh 分布で近似される。また、短期海象の発現確率分布は有義波高を海象の代表値として取り扱うことで表され、対数正規分布、ワイブル分布、グンベル分布および一般化ガンマ分布を用いて近似される。

長期波浪統計情報の一つとして長期波浪統計データベースを参考にすることができる。この長期波浪統計データベースは観測衛星が得た波高データを利用しており、これまでの波浪統計資料に比べ精度の高い資料となっている。

船舶設計において長期波浪統計資料は船体応答の長期予測計算に利用される。本章では長期波浪統計データベースのフリーク波発現確率の推定への適用の可能性を検討した。長期波浪発現確率分布のヒストグラムと波高分布を Rayleigh 分布としたときの最大波高との関係を示し、フリーク波の発現確率と長期波浪発現確率との対応づけについて考察した。フリーク波を波高分布に基づく極限波高として捉えるだけでは直接的な統計的予測とはいえないことを述べた。この結果はフリーク波発現確率推定において長期波浪統計データベースの適用の可能性を否定するものではない。短期海象における直接的なフリーク波の統計的予測法を確立し、長期波浪統計データベースの海象の発現確率を利用することでフリーク波発現確率の長期予測が可能であると考えられる。

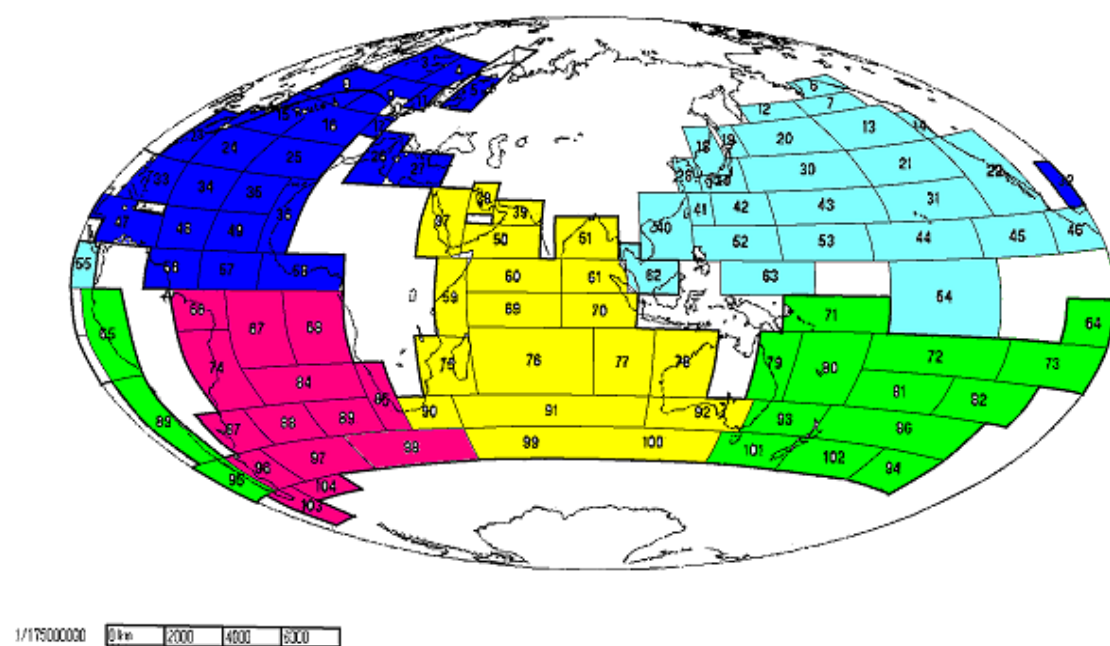
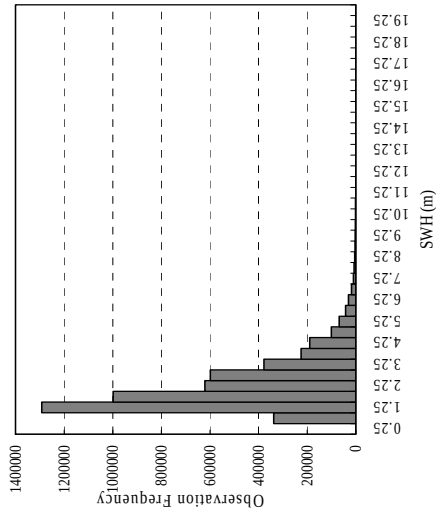


Fig.3.1 Sub sea area by GWS

AREA: 1 Annual

SWH Statistics	
NO. of Data	4926061
Mean (m)	2.264
Variance (m ²)	1.570
Quartiles 25% (m)	1.346
Median (m)	1.918
Quartiles 75% (m)	2.873
Mode (m)	1.374

Wave Period Regression coefficient	
a=	1.7561
a1=	0.1297
b1=	0.1960
b2=	-0.0320



LOG-NORMAL	
Parameter_estimation	MOMENT
Location_parameter	0.6835
Shape_parameter	0.5169

	Zero Crossing Wave Period (s)														
	4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-				
0-1	6.85	28.93	33.32	17.12	5.34	1.22	0.23	0.04	0.01	0.00	0.00				
1-2	4.93	54.40	132.94	126.27	65.33	22.73	6.08	1.37	0.27	0.05	0.01				
2-3	0.98	19.08	70.90	92.82	61.44	25.83	7.99	2.01	0.44	0.09	0.02				
3-4	0.15	4.68	24.29	40.59	32.07	15.30	5.17	1.38	0.31	0.06	0.01				
4-5	0.02	1.09	7.65	15.81	14.47	7.62	2.74	0.75	0.17	0.03	0.01				
5-6	0.00	0.26	2.41	6.08	6.36	3.64	1.37	0.38	0.09	0.02	0.00				
6-7	0.00	0.06	0.78	2.38	2.82	1.74	0.68	0.19	0.04	0.01	0.00				
7-8	0.00	0.02	0.26	0.96	1.29	0.85	0.34	0.10	0.02	0.00	0.00				
8-9	0.00	0.00	0.09	0.40	0.60	0.43	0.18	0.05	0.01	0.00	0.00				
9-10	0.00	0.00	0.03	0.17	0.29	0.22	0.09	0.03	0.01	0.00	0.00				
10-11	0.00	0.00	0.01	0.07	0.14	0.12	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00				
11-12	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00				
12-13	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00				
13-14	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				
14-15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				
15-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				

GUMBEL	
Parameter_estimation	MOMENT
Scale_parameter	0.9770
Location_parameter	1.7001

	Zero Crossing Wave Period (s)														
	4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-				
0-1	9.50	40.13	46.23	23.75	7.41	1.70	0.32	0.05	0.01	0.00	0.00				
1-2	4.17	45.97	112.32	106.68	55.19	19.20	5.14	1.15	0.23	0.04	0.01				
2-3	1.00	19.55	72.64	95.11	62.95	26.47	8.19	2.06	0.45	0.09	0.02				
3-4	0.17	5.34	27.75	46.37	36.64	17.48	5.91	1.57	0.35	0.07	0.02				
4-5	0.03	1.23	8.67	17.91	16.40	8.63	3.10	0.85	0.19	0.04	0.01				
5-6	0.00	0.27	2.50	6.30	6.59	3.77	1.42	0.40	0.09	0.02	0.00				
6-7	0.00	0.06	0.70	2.13	2.52	1.56	0.61	0.17	0.04	0.01	0.00				
7-8	0.00	0.01	0.19	0.70	0.94	0.62	0.25	0.07	0.02	0.00	0.00				
8-9	0.00	0.00	0.05	0.23	0.35	0.25	0.10	0.03	0.01	0.00	0.00				
9-10	0.00	0.00	0.01	0.07	0.13	0.10	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00				
10-11	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00				
11-12	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				
12-13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				
13-14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
14-15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
15-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				

WEIBULL	
Parameter_estimation	LEAST SQUARES
Scale_parameter	2.7180
Shape_parameter	1.6349

	Zero Crossing Wave Period (s)														
	4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-				
0-1	13.00	55.09	63.45	32.60	10.18	2.33	0.44	0.07	0.01	0.00	0.00				
1-2	3.30	36.38	88.89	84.43	43.68	15.20	4.07	0.91	0.18	0.03	0.01				
2-3	0.82	16.05	59.66	78.11	51.70	21.74	6.73	1.69	0.37	0.07	0.02				
3-4	0.19	5.90	30.62	51.16	40.43	19.29	6.52	1.74	0.39	0.08	0.02				
4-5	0.04	1.86	13.04	26.94	24.67	12.99	4.67	1.28	0.29	0.06	0.01				
5-6	0.01	0.51	4.76	11.98	12.53	7.17	2.70	0.76	0.17	0.03	0.01				
6-7	0.00	0.12	1.51	4.81	5.46	3.37	1.32	0.37	0.08	0.02	0.00				
7-8	0.00	0.03	0.42	1.56	2.08	1.38	0.56	0.16	0.03	0.01	0.00				
8-9	0.00	0.00	0.10	0.47	0.71	0.50	0.21	0.06	0.01	0.00	0.00				
9-10	0.00	0.00	0.02	0.12	0.21	0.16	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00				
10-11	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00				
11-12	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				
12-13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
13-14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
14-15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
15-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				

Fig. 3.2 The format of the long-term wave database (Sub sea area No.1)

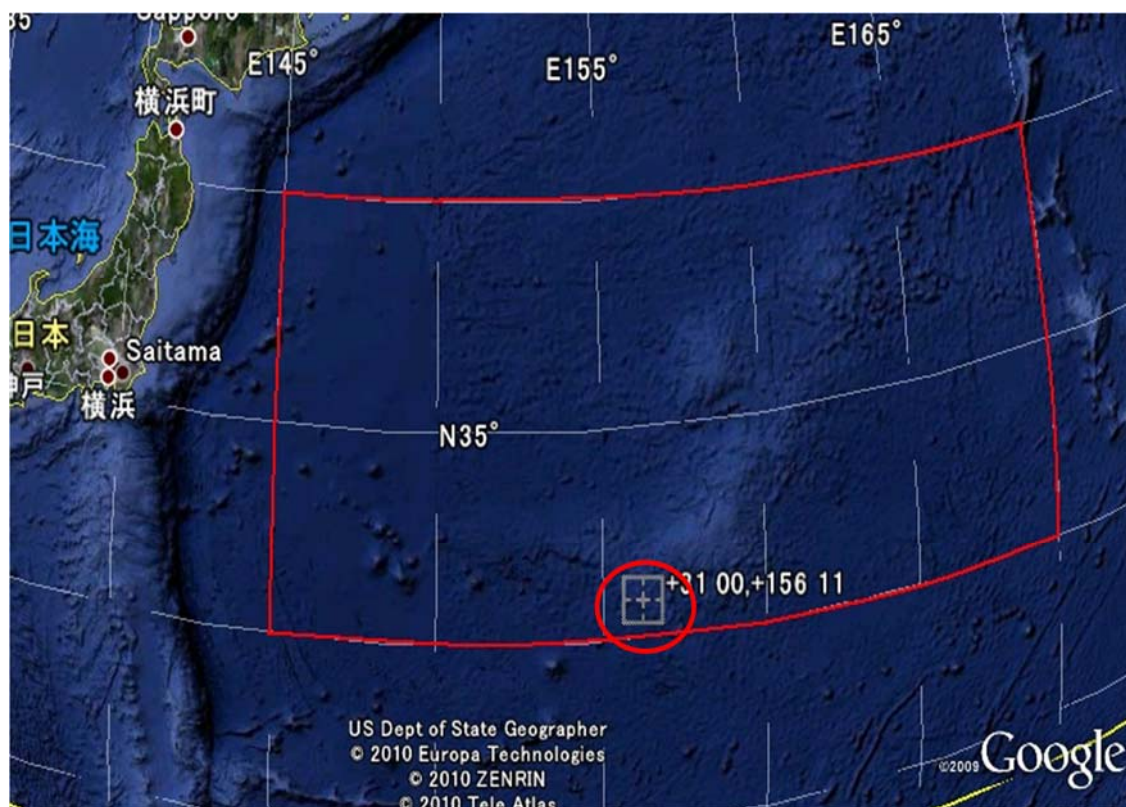


Fig. 3.3 The sea area and disaster point of accident of Onomichi-Maru

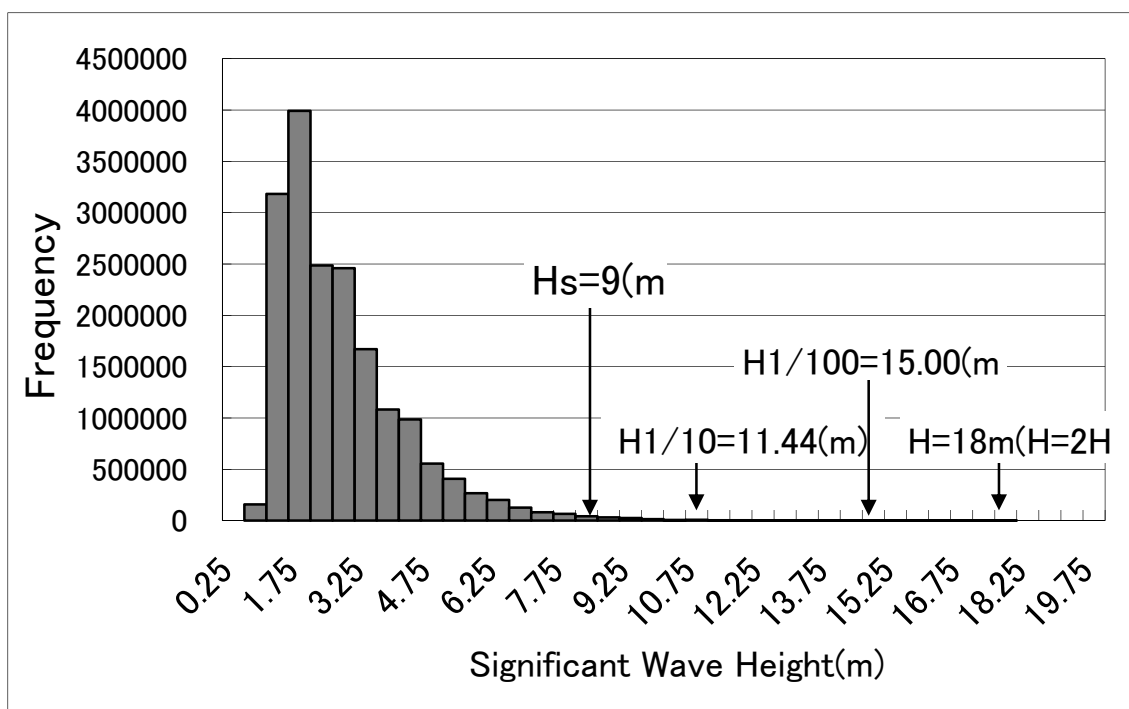


Fig. 3.4 Relations between histogram of long-term wave frequency distribution and extreme wave heights (Sub sea area No.30) (cited from [29])

第4章 フリーク波の統計的予測法

4.1. 緒言

従来、船舶や海洋構造物が遭遇する異常波の統計的予測法は波高を確率変数として取り扱い、ある一定の値を超える巨大波の波高の発生する確率を求める方法や、もしくは、ある期間において発生する最大波の波高を推定する方法が用いられてきた。例えば、第2章で示した嵐空間領域内最大波の一般化確率分布も波高を確率変数として取り扱っている。しかし、波高を確率変数とした場合、前後の波との関係が不明であるため、“事象の直前・直後の変動の大きさに比較して卓越した大きさの変動（波）”というフリーク波の特性が統計的予測に反映されない。

本研究ではフリーク波の前後の波と比較して卓越した大きさの波高をもつという特性を統計的予測に組み込むために、連続する二つの波の波高差を新たな確率変数として取り扱い、その統計的特性からフリーク波発現確率の推定を行う。連続する二つの波の波高差を導入することにより、着目した波とその前後の波との関係が明らかになる。つまり、前後の波との波高差が大きい波をフリーク波とみなすことができる。従って、波高差を用いることにより、従来の手法では捉えることができなかったフリーク波の推定が可能となる。

そして、船体応答の長期予測計算にフリーク波の統計的予測を組み込むためには、長期におけるフリーク波発現確率の推定結果が必要となる。海洋波は短時間ならば定常なガウス過程として近似的に取り扱う事ができる[38]。しかし、船の寿命である20年～30年という長期間には風いだ海象や荒れた海象等のように様々な海象が含まれており定常性が仮定されない。そのため、長期予測に対して短期海象における統計的予測法と同様の方法を用いることは統計学的に適切でない。この問題を解決するために、

Athanassoulis が提案する長期と短期の二つの時間スケール[43]をフリーク波の長期予測手法に導入する．例えば，新開らは二つの時間スケールを用いて船体応答長期予測手法について統計学的に厳密な説明を与えている[44]．二つの時間スケールにより個々の波浪を短期の時間スケールで表し，短期海象の特性値を長期の時間スケールにより表すことができる．この二つの時間スケールを導入することにより，長期の海象の取り扱いにおいて統計学的に厳密なフリーク波発現確率の長期予測法を提案することが可能となる．

本章の内容は以下の通りである．始めに，連続する二つの波の波高差の統計的性質について説明するモンテカルロシミュレーションを行い波高差の分布と波高差の取り得る最大値の分布を求め，波高差の統計的性質を追及する．次に，短期海象におけるフリーク波発現確率をモンテカルロシミュレーションにより推定した結果を示す．さらに，二つの時間スケールを利用したフリーク波発現確率の長期予測法について説明し，長期波浪統計データベースにおける第 30 番目と第 90 番目の海域におけるフリーク波の長期発現確率を推定した結果を示す．

4.2. 連続する二つの波の波高差の統計的特性

本節では連続する二つの波の波高差の統計的特性について説明する．今後、二つの連続する波の波高差を「波高差」と呼ぶ．波高差はフリーク波の突発性を統計的予測に組み込み、より精度の高いフリーク波の発現確率を推定することを目的として導入される．任意の波高の時系列データにおける i 番目の波高差は i 番目の波の波高 H_i と $i-1$ 番目の波の波高 H_{i-1} との差を用いて以下の式のように求められる．

$$H_{sub.i} = H_i - H_{i-1} \quad (4.1)$$

また、波高差の模式図を Fig.4.1 に示す．

任意の分布から得られる連続する二つの確率変数の特性に関する数学的理論は確立されていない．従って、短期海象における波高差の特性を捉えるためシミュレーションを実施する必要がある．確率論的な事象を取り扱うことを目的としたモンテカルロシミュレーションは乱数を取り扱う技法の総称であり、乱数を繰返し用いて実験を行い、多数回の実験結果から普遍性のある共通因子を求めることを目的としている[45]．

モンテカルロシミュレーションを実施し、Rayleigh 分布に従う波高分布から得られる波高差の分布を推定した．Rayleigh 分布に従う乱数は逆関数法によって一様乱数から得られる．発生させた Rayleigh 分布に従う乱数のヒストグラムの一例を Fig.4.2 に示す．横軸は波高を表し、縦軸は発生回数を表している．そして、赤線は有義波高が 10 m となる Rayleigh 分布の確率密度関数を表している．ヒストグラムと Rayleigh 分布の確率密度関数はよく一致しており、発生させた乱数が Rayleigh 分布に従っていることを示している．

乱数を発生させた順番に並べた場合、その乱数の集合を波高の時系列データとみなす

ことができる． Fig.4.3 は波高として発生させた 10 の 4 乗個の乱数を発生させた順番に並べたものである． このデータを波高の時系列データとして取り扱えば式 (4.1) を用いて波高差が計算される． Fig.4.4 は Fig.4.3 に示す波高データから算出された波高差を表している．

波高差の最小値は-19.20m, 最大値は 16.95m, そして平均値は 0.00m であった． 平均周りの 3 次のモーメントである歪度は 0.019 であり, 平均周りの 4 次のモーメントである尖度は 0.146 であった． 歪度と尖度がともに 0 となる場合, 正規分布に従う [46]． シミュレーションにより得られた歪度と尖度から波高差の分布は正規分布に近い分布であることが推定される． 正規分布の確率密度関数は平均と分散をパラメータとして以下の式で与えられる．

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (4.2)$$

ただし,

σ : standard deviation

μ : mean value

Fig.4.5 は Fig.4.4 に示された波高差のデータを基に作成されたヒストグラムを表している． 横軸は波高差を表し, 縦軸は発生回数を表している． 図中の赤い実線は正規分布の確率密度関数を表している． この正規分布は波高差のデータから得られた平均値と分散を用いており, これらの値はそれぞれ 0.00 と 4.61 である． 波高差の分布は正規分布とよく一致していることが分かる． 従って, 波高差の分布は正規分布に近似して取り扱う事ができる．

次に, 短期海象において波高差のとりうる最大値と波高のとりうる最大値の統計的特

性をシミュレーションにより求め比較する。シミュレーション方法は以下の通りである。始めに Rayleigh 分布に従う乱数を波高として発生させ、波高差を算出する。発生させる乱数の数は 10000 個であり、従って 9999 個の波高差が得られる。次に、これらの波高と波高差の中からそれぞれの最大値を求める。そして、この過程を 1000 回繰返すことで波高と波高差についてそれぞれ 1000 個の最大値を求める。ただし、各セットにおいて発生させる乱数は異なる乱数の種を用いるため波高のデータが重複することはない。また、波高が最大となる波と波高差が最大になる波とが同じ波で有るとは限らない。

シミュレーション結果を Fig.4.6 と Fig.4.7 に示す。Fig.4.6 は波高差の取りうる最大値のヒストグラムを表している。横軸は波高差を有義波高で無次元化した値を表し、縦軸は発生回数を表している。1000 個の最大値の中で最も小さな値は 1.54、最も大きな値は 2.77、平均値は 1.91 である。有義波高の 2 倍以上となる波高差の最大値は 2468 個、2.4 倍以上となるのは 50 個である。

フリーク波は前後の波と比較して大きな波高をもつ波であるので、波高差の最大値の推定を行うだけではフリーク波の推定とはいえない。しかし、短期海象において有義波高を大きく上回る波高差が出現することがシミュレーションにより明らかになり、波高差を取り扱う事で波浪統計資料から前後の波と比較して卓越して大きな波高を持つフリーク波の統計的推定の可能性を示すことができる。

4.3. フリーク波の短期発現確率と予測

本節では短期海象におけるフリーク波の統計的予測の方法と結果を説明する。フリーク波の前後の波と比較して卓越した大きさの変動をもつという特徴を統計的予測に取り込むために、モンテカルロシミュレーションを実施して前後の波との波高差が大きくなる波の発現確率を推定する。

フリーク波は前後の波と比較して卓越して大きな波高を持つため、前後の波との波高差が大きくなる。従って、閾値を超える波高差が連続して2回発生するケースをフリーク波であるとみなし、その発現回数を計測する。

フリーク波を判定するための閾値について説明する。第2章でも述べたように、フリーク波の波高は海象の有義波高により無次元化して表すことが一般的である。例えば、有義波高の2倍以上の波高を持つ波というフリーク波の条件を適用すると、有義波高が2mの海象において発生する4m以上の波高をもつ波と有義波高が10mの海象において発生する20m以上の波高をもつ波とが同じようにフリーク波として取り扱われる。しかし、船舶設計のために推定すべきフリーク波は船体に損害を与えるような大きな波高をもつ波である。無次元化された値を取り扱う場合、フリーク波の突発性は考慮されるが、船体に損傷を与えるほどの波高をもつかどうか考慮されない。したがって、次元をもつ値を閾値とした。また、第2章で述べたようにフリーク波の波高について明確な定義はされていないため、フリーク波を判定するための閾値をただ1つに定めることはできない。そのため、複数の閾値を設定し、波高差が閾値を2回連続して超えるような波の発現確率を推定する。また、閾値の大きさによるフリーク波発現確率の変化について考察する。

フリーク波発現確率の推定方法について説明する。始めに、Rayleigh 分布に従う乱数を10000個発生させ波高差を計算する。次に、波高差が閾値を2回連続して超える回数を計測する。そして、この計算を10000回繰返し、フリーク波の発現回数の平均

値を算出し発現確率を求める．以上の計算を各有義波高に対して行い，有義波高毎のフリーク波の発現確率を推定する．

Table 4.1 に推定結果の一例を示す．海象については有義波高が 10m から 15m までの短期海象を示し，フリーク波の閾値は 15m, 20m, そして 25m の場合について示す．閾値によってフリーク波の発現確率が異なることが分かる．有義波高が 10m の場合，波高差が 15m 以上となるフリーク波の発現確率 4.27×10^{-4} であるのに対し，波高差が 25m 以上となるフリーク波の発現確率は 6.00×10^{-8} となり，約 71 倍の差がある．

さらに，Fig.4.7 は推定結果をグラフに表したものである．横軸はフリーク波の発現確率を表し，縦軸は短期海象の有義波高を表している．このグラフでは有義波高が 10 m から 30m までの短期海象について前後の波との波高差がそれぞれ 15m, 20m, そして 25m 以上となるフリーク波の発現確率を示している．各閾値に対して，短期海象の有義波高が増加するにつれフリーク波の発現確率が増加していることが分かる．つまり，荒れた海象において船体に損傷を与えるような波高差が大きなフリーク波の発現確率が増加するといえる．

4.4. フリーク波の長期発現確率と予測

4.4.1. 2つの時間スケールを用いた長期予測手法

新開ら[44]は Athanassoulis[43]が提案する二つの時間スケールの概念を導入し、従来の船体応答長期予測法に対して統計学的に厳密な説明を与えている。そして、2つの時間スケールの概念を用いたフリーク波発現確率の長期予測法が提案されている[41]。

Athanassoulis は海象の中の波浪について、短期と長期に分けて取り扱うことを統計学的に厳密化するために、現象について以下の2種類の時間スケールを導入することを提案している。

t : short-term, fast or fine time scale

τ : long-term, slow or coarse time scale

ある海象状態を時間スケール t で捉える場合、従来と同じ短期の波浪海面の取り扱いを意味するが、その短期の集成として長期の海面隆起を時系列 $\eta(t)$ で与え、対応するスペクトルの特性値を時間スケール τ を導入して $A(\tau)$ のように表示定義する。個々の海象状態の標本過程は i 番目の海象状態のスペクトル特性値 $A(\tau)$ と海象の持続時間(現実には海象の観測時間を意味する) ΔY_i を用いて確率系列 $\Xi(i)$ を以下のように定めている。

$$\Xi(i) = \{ \Delta Y_i, \Lambda_i \} \quad (4.3)$$

二つの時間スケールを導入したフリーク波の長期予測手法について説明する。任意の小海域 A における有義波高 H_S となる短期海象の発現確率を $P_{State}(H_S)$ とし、有義波高 H_S

となる短期海象における波高差が Fm 以上となるフリーク波の発現確率を $P_{Freak}(H_S)$ とする．短期海象におけるフリーク波の発現確率 $P_{Freak}(H_S)$ は短期の波浪海面に対して計算されるため時間スケールは短期である．短期海象の発現とフリーク波の発現は独立な事象であるため小海域 A において有義波高 H_S となる短期海象となった条件のもとでフリーク波が発現する確率は短期海象の発現確率 $P_{State}(H_S)$ とフリーク波の発現確率 $P_{Freak}(H_S)$ の積で表される [47]．短期海象の発現確率 $P_{State}(H_S)$ は海象状態を表す特性値の 1 つである有義波高を確率変数として取り扱うため，時間スケールは長期となる．短期海象の発現確率 $P_{State}(H_S)$ は長期波浪統計データベース等の長期波浪統計資料を参照すればよい．小海域 A における波高差が Fm 以上となるフリーク波の長期発現確率 $P_A(F)$ は各有義波高における $P_{State}(H_S)$ と $P_{Freak}(H_S)$ の積の総和であり，以下の式で表される．

$$P_A(F) = \sum_{H_S=1}^{\infty} P_{Freak}(H_S) P_{State}(H_S) \quad (4.4)$$

ここに，

$P_{State}(H_S)$: the event probability of a sea state

$P_{Freak}(H_S)$: the freak wave generation probability at the sea state

4.4.2. 長期予測シミュレーション

前項において説明した長期予測法を用いてフリーク波の発現確率を推定する．対象とする海域は長期波浪統計データベースにおける第 30 番目と第 90 番目の小海域とする．短期海象の発現確率 $P_{State}(H_S)$ はワイブル分布に従う分布と対数正規分布に従う分布の 2 通りとし，分布のパラメータは長期波浪統計データベースを参照する．

フリーク波の長期発現確率の計算の一例として，第 30 番目の小海域における前後の波との波高差が $20m$ 以上となるフリーク波の長期発現確率の計算過程を Table 4.2 に示

す. 有義波高の分布をワイブル分布で近似した短期海象の有義波高毎に海象の発現確率 $P_{State}(H_S)$, 短期海象におけるフリーク波の発現確率 $P_{Freak}(H_S)$, 長期におけるフリーク波の発現確率が表されている. 長期におけるフリーク波の発現確率は $P_{State}(H_S)$ と $P_{Freak}(H_S)$ の積で表され, 式 (4.4) より有義波高毎の長期におけるフリーク波の発現確率の総和が小海域における前後の波との波高差が閾値を超えるフリーク波の発現確率となる. そして, 閾値を 15m から 30m まで 1 m 毎に変化させ同様の計算を行う. Table 4.3 に短期海象の発現確率をワイブル分布で近似した場合の第 30 番目の小海域におけるフリーク波の長期発現確率の計算結果を示す. 以上のように各小海域におけるフリーク波の長期発現確率を求める. Fig.4.8 と Fig.4.9 に第 30 番目と第 90 番目の小海域におけるフリーク波の長期発現確率の計算結果を示す. 図の横軸は前後の波との波高差を表しており, 縦軸は閾値を超える波の発現確率を表している. 第 30 番目と第 90 番目のどちらの小海域においてもフリーク波の発現確率は短期海象がワイブル分布で近似される場合と比較して, 対数正規分布で近似される場合の方がフリーク波の発現確率が大きくなる. さらに, 短期海象の有義波高が大きくなるにつれ二つのフリーク波発現確率の差は大きくなる. これは短期海象の近似に用いた分布関数の特性による影響であると考えられる. 高波高域においてワイブル分布が観測データにより推定された母集団に対して良い一致を示すことに比べ, 対数正規分布は推定母集団より外れる[17]. さらに, 閾値が大きくなるにつれ高波高域の海象の発現確率がフリーク波の発現確率に影響を与えるため, フリーク波の閾値が大きくなるにつれて二つの発現確率の差が大きくなると考えられる. ワイブル分布は有義波高の低い領域では推定母集団との一致度が良くないことが指摘されている[17]. しかし, 波高の低い領域におけるフリーク波の発現頻度は全ての海象におけるフリーク波の発現頻度と比較して小さいため, 推定結果に大きな影響を与えることはない. 従って, 短期海象の発現頻度の計算にはワイブル分布を利用することが望ましい.

海洋における平均波周期を 10 秒と仮定すると，船舶がその一生の間に遭遇する波の数はおよそ $10^7 \sim 10^8$ 個となる．短期海象の発現頻度をワイブル分布で近似する場合，第 30 番目の小海域において船舶がその一生の間に遭遇する最大のフリーク波は前後の波と比較して約 20m～24m の波高差をもち，第 90 番目の小海域では約 16m～19m の波高差をもつことが読み取れる．

4.5. 結言

フリーク波の物理的特性を組み込んだフリーク波の統計的予測を行うために、連続する二つの波の波高差を確率変数として取り扱う手法を説明した。そして、モンテカルロシミュレーションを実施し、波高差の分布が正規分布で近似できることを示した。さらに、波高差の取り得る最大値について推定し、短期海象において有義波高を大きく上回る波高差が出現することが明らかになった。従って、前後の波と比較して卓越して大きな波高を持つフリーク波の統計的推定を行うために波高差を利用することが可能であるといえる。

そして、Rayleigh 分布に従う波高をもつ短期海象におけるフリーク波の発現確率をモンテカルロシミュレーションにより推定した。フリーク波の発現確率は設定する閾値により大きく異なることを示した。

また、Athanasoulis が提案する長期と短期の二つの時間スケールを利用したフリーク波発現確率の長期予測法について説明し、長期波浪統計データベースにおける第 30 番目と第 90 番目の小海域におけるフリーク波の長期発現確率を推定した。

Table 4.1 The probability of freak wave generation based on count-up successive wave difference which is above threshold values

Hs (m)	Threshold value >15m	Threshold value >20m	Threshold value >25m
10	4.27×10^{-6}	6.22×10^{-8}	6.00×10^{-10}
11	1.17×10^{-5}	3.23×10^{-7}	5.00×10^{-9}
12	2.62×10^{-5}	1.15×10^{-6}	2.98×10^{-8}
13	5.05×10^{-5}	3.18×10^{-6}	1.31×10^{-7}
14	8.73×10^{-5}	7.32×10^{-6}	4.26×10^{-7}
15	1.38×10^{-4}	1.46×10^{-5}	1.15×10^{-6}

Table 4.2 Calculation process of freak wave generation probability
(sub sea area No.30, Weibull distribution)

Hs(m)	Event probability (Weibull dis.) $P_{\text{State}}(H_s)$	Short-term freak wave probability $P_{\text{Freak}}(H_s)$	Long-term freak wave probability
1	0.156	0	0
2	0.212	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮
10	2.34×10^{-3}	6.22×10^{-6}	1.45×10^{-8}
11	7.88×10^{-4}	3.23×10^{-5}	2.54×10^{-8}
⋮	⋮	⋮	⋮
30	5.31×10^{-20}	9.83×10^{-2}	5.22×10^{-21}

Table 4.3 Calculation result of freak wave generation probability
(sub sea area No.30, Weibull distribution)

Threshold value	Long-term freak wave probability $P_A(F)$
15	3.12×10^{-6}
16	2.02×10^{-6}
17	9.90×10^{-7}
18	4.78×10^{-7}
19	2.38×10^{-7}
20	1.10×10^{-7}
21	5.83×10^{-8}
22	2.85×10^{-8}
23	1.42×10^{-8}
24	7.19×10^{-9}
25	3.57×10^{-9}
26	1.82×10^{-9}
27	8.91×10^{-10}
28	4.57×10^{-10}
29	2.44×10^{-10}
30	1.16×10^{-10}

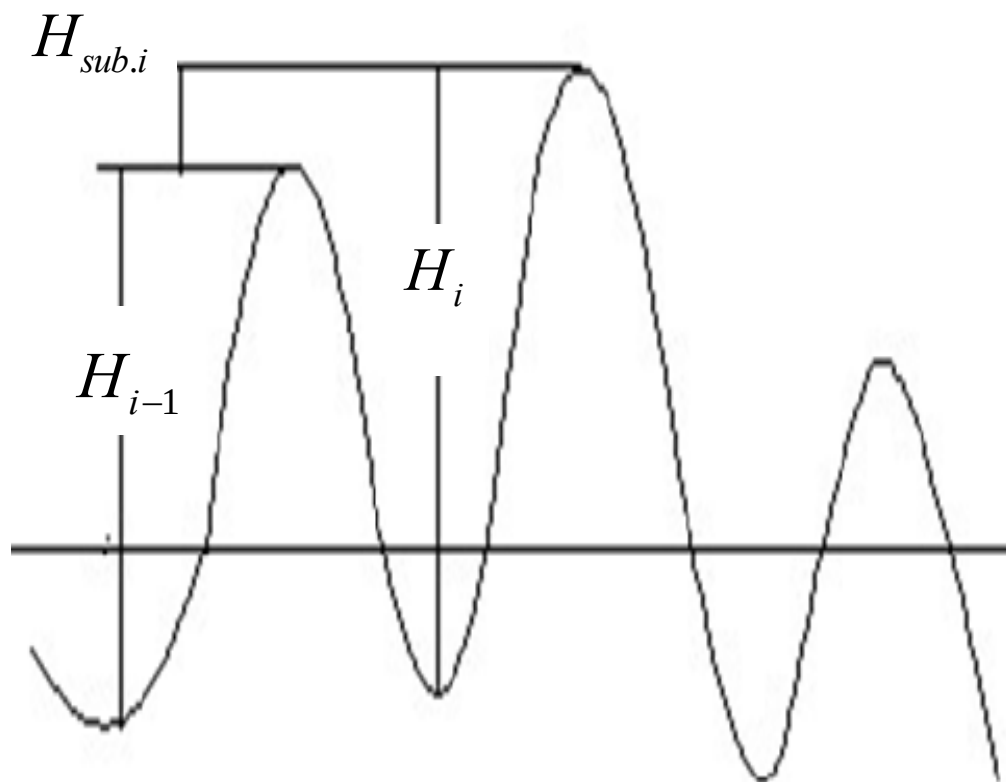


Fig.4.1 A conception diagram of wave height difference

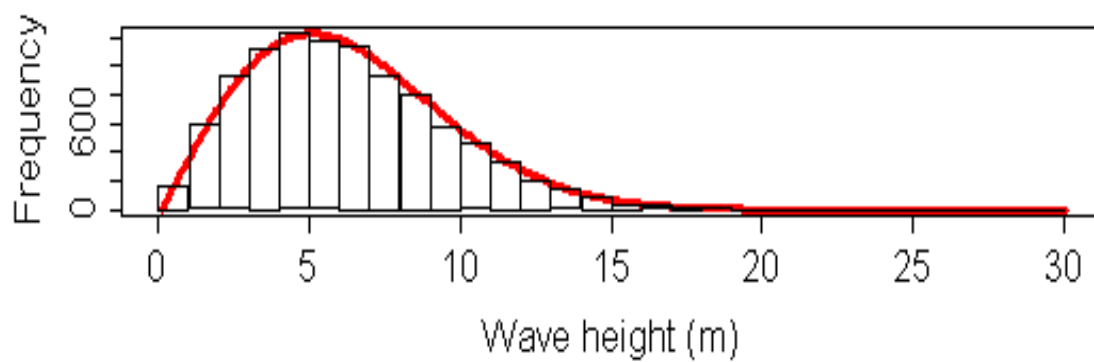


Fig.4.2 Rayleigh distribution ($H_s=10\text{m}$)

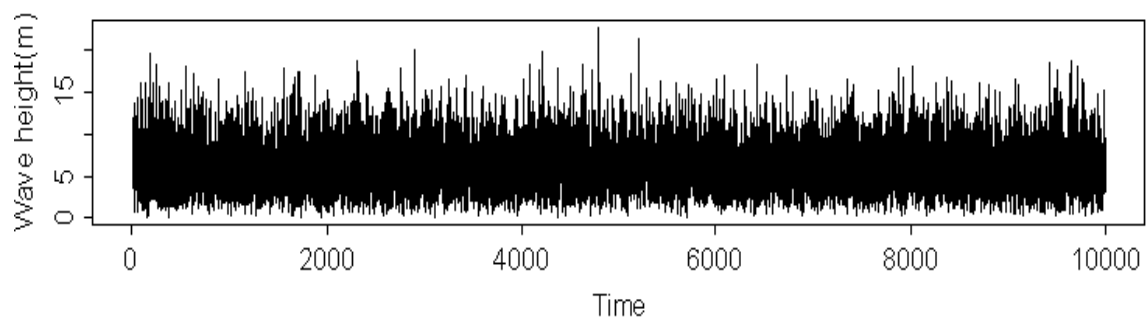


Fig.4.3 Time series of random number

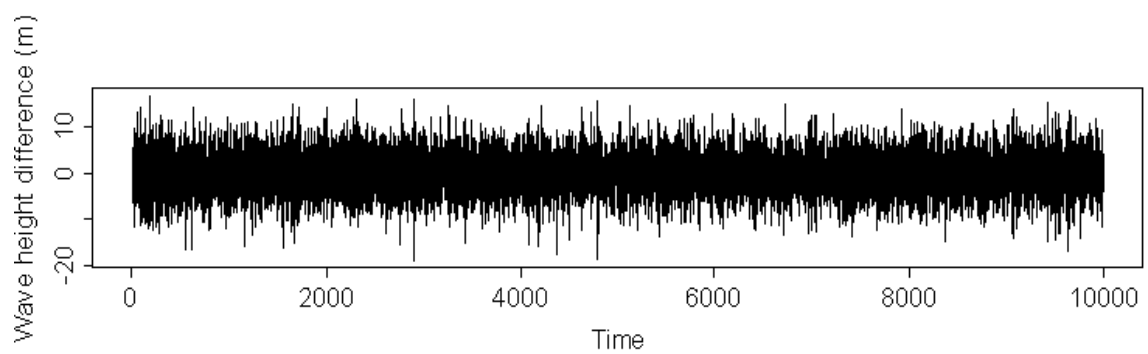


Fig.4.4 Time series of difference between wave heights

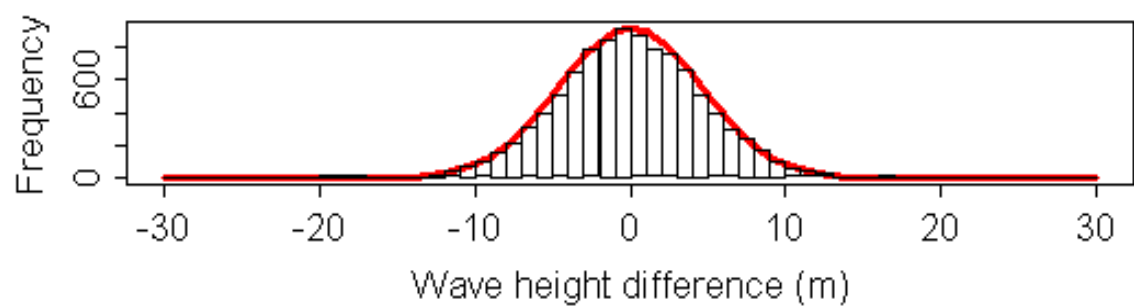


Fig.4.5 Histogram of difference between wave heights

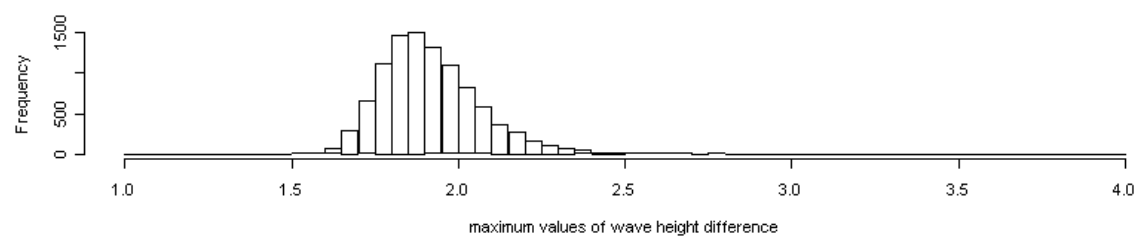


Fig.4.6 Histogram of maximum of wave heights difference

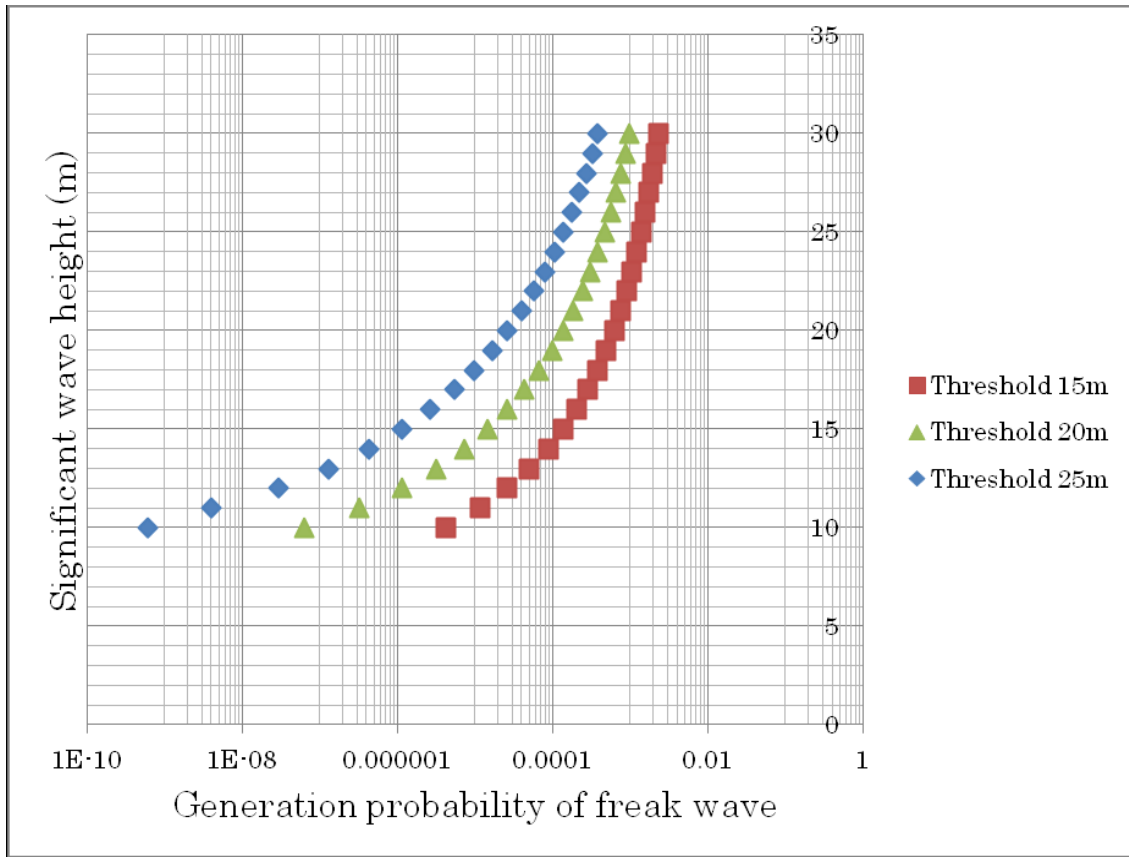


Fig.4.7 Freak wave generation probability for thresholds

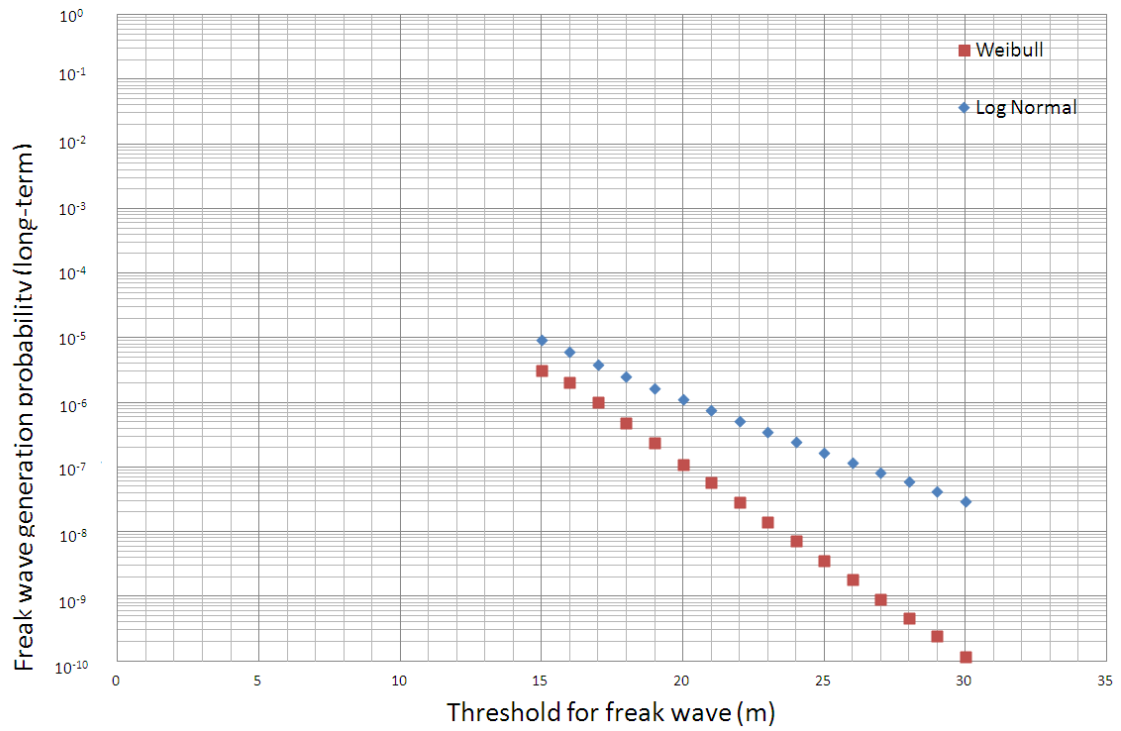


Fig.4.8 Freak wave generation probability including event probability of sea state (Sub sea area No.30)

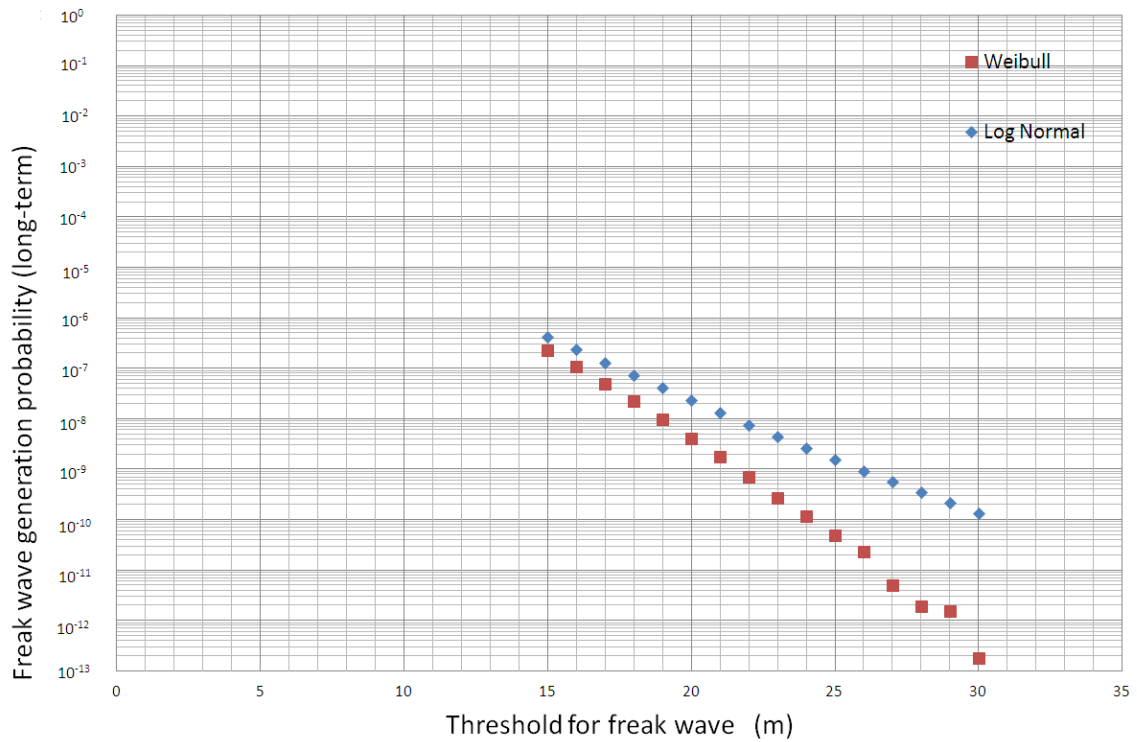


Fig.4.9 Freak wave generation probability including event probability of sea state (Sub sea area No.90)

第5章 フリーク波の統計的予測と 新船体応答長期予測法

5.1. 緒言

観測機器の発達により船舶が航行する海洋において従来の想定を超えた波高を持つフリーク波が存在することが明らかになっている。そして、尾道丸やダービシャー号等の海難事故のようにフリーク波が原因と考えられる事故も発生している。航行中の船舶がフリーク波の発現を予測し、回避する方法として木下らによりスペクトル予報モデルに改良を加え、巨大波浪発生指標の予報を目指した研究がなされている[48]。しかし、この方法はまだ実用化されていない。従って、船舶の安全性を向上させるためにはフリーク波の影響を考慮した設計が必要となる。

船舶設計において設計値の決定のために船体応答の長期予測計算により得られた応答値が利用される。これは船がその一生において平均して一回受けるような応答値である[49]。船体応答の長期予測法には様々な方法があるが、その一つとして福田法がある[1]。福田法は短期海象を表す波スペクトルと規則波中の応答を重ね合わせることで応答スペクトルを求め、これより短期不規則波中における船体応答の統計的性質を記述する。そして、短期海象の統計量とその短期海象の発現頻度を組み合わせることで長期の応答を予測する。しかし、フリーク波に遭遇したとされる船舶の損傷事故において、福田法による船体応答の推定結果を用いてその原因を十分に説明することはできない。これは、福田法において利用される短期海象の発現頻度の中にフリーク波の影響が考慮されていないためであると考えられる。他の長期予測法についても同様であり、従来の船舶設計では大洋で遭遇するフリーク波の影響が取り入れられていない。本章では、フリーク波の統計的予測の応用としてフリーク波環境下における船体応答長期予測を行う。従来

の船体応答の長期予測法に第4章で説明したフリーク波の統計的予測を組み込みに
より、フリーク波環境下における船体応答長期予測が可能となる[50]。これは、従来法
と比較してより厳しい条件の下で船体応答を推定することにより、船舶設計の信頼性増
進を目的としている。

本章の内容は以下の通りである。始めに、船体応答の長期予測計算法について説明し、
フリーク波の統計的予測を組み込むのに最適である福田法についてその詳細を述べる。
次に、フリーク波の統計的予測の応用としてフリーク波環境下における船体応答の推定
法について説明する。そして、コンテナ船を計算対象としてフリーク波環境下における
船体応答を推定する。その推定結果を従来の手法による船体応答長期予測値と比較検討
して、提案した予測法が有効であることを示す。

5.2. 船体応答長期予測法

5.2.1 船体応答長期予測法の種類

船がその一生の間に受ける応答値を予測するための長期予測法として以下の 3 つの方法が挙げられる[49].

1. 厳しい短期海象を仮定する方法
2. 極値理論に基づく方法
3. 長期波浪統計に基づく方法

1 つ目の厳しい短期海象を仮定する方法は船が寿命中に遭遇するであろう最も厳しい短期海象を設定し、そこで得られる応答の最大期待値を推定する方法である。

2 つ目の極値理論に基づく方法は就航している船舶の運動や応答を測定し、そのデータに基づき観測期間より長い期間における最大値（極値）を推定する方法である。極値を推定する方法として極値統計理論が利用される。しかし、フリーク波は稀な現象であるだけでなく、フリーク波に遭遇した船舶の多くは損傷しており、船舶の応答に関するデータを十分に得ることはできない。

3 つ目の長期波浪統計に基づく方法は福田法と呼ばれ、短期海象を表す波スペクトルと規則波中の応答を重ね合わせることで応答スペクトルを求め、これより短期不規則波中における船体応答の統計的性質を記述する。そして、長期波浪統計資料を利用して船体応答の極大値が一定値を超える長期の累積確率（長期超過確率）が得られる。フリーク波の統計的予測結果は長期波浪統計資料のように海域、海象毎にまとめられている。そのため、福田法にフリーク波の統計的予測を取り入れることが可能である。

5.2.2 福田法

本項では船体応答長期予測法の1つである福田法について説明する。福田法は規則波中の船体応答関数計算，短期不規則波中の船体応答スペクトル計算，船体応答長期予測から構成される。

始めに規則波中の船体応答計算について説明する。波の平均進行方向に対し，一定の出会角 χ と一定の船速 V を保ち，上下揺 ζ ，縦揺 θ ，左右揺 η ，船首揺 ψ および横揺 ϕ の5自由度で運動する船を想定する。Fig.5.1 に示すように，空間固定座標系 O-XYZ (OX: 船の進行方向)，O-X₁Y₁Z₁ (OX₁: 規則波の進行方向)，ならびに船体固定座標系 o-xyz (ox: 船の長さ方向) を定める。

線形ストリップ法(Ordinary Strip Theory)に基づき，上下揺と縦揺の連成運動方程式ならびに左右揺，船首揺および横揺の連成運動方程式はそれぞれ次式のように表せる。

$$\begin{aligned} B_{11}\ddot{\zeta} + B_{12}\dot{\zeta} + B_{13}\zeta + B_{14}\ddot{\theta} + B_{15}\dot{\theta} + B_{16}\theta &= F_{\zeta} \\ B_{21}\ddot{\zeta} + B_{22}\dot{\zeta} + B_{23}\zeta + B_{24}\ddot{\theta} + B_{25}\dot{\theta} + B_{26}\theta &= M_{\theta} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} C_{11}\ddot{\eta} + C_{12}\dot{\eta} + C_{13}\eta + C_{14}\ddot{\psi} + C_{15}\dot{\psi} + C_{16}\psi + C_{17}\ddot{\phi} + C_{18}\dot{\phi} + C_{19}\phi &= F_{\eta} \\ C_{21}\ddot{\eta} + C_{22}\dot{\eta} + C_{23}\eta + C_{24}\ddot{\psi} + C_{25}\dot{\psi} + C_{26}\psi + C_{27}\ddot{\phi} + C_{28}\dot{\phi} + C_{29}\phi &= M_{\psi} \\ C_{31}\ddot{\eta} + C_{32}\dot{\eta} + C_{33}\eta + C_{34}\ddot{\psi} + C_{35}\dot{\psi} + C_{36}\psi + C_{37}\ddot{\phi} + C_{38}\dot{\phi} + C_{39}\phi &= M_{\phi} \end{aligned} \quad (5.2)$$

ただし，

$F_{\zeta}, M_{\theta}, F_{\eta}, M_{\psi}, M_{\phi}$: wave excited forces and moments for heaving, pitching,
swaying, yawing and rolling motion

B_{ij}, C_{ij} : hydrodynamic coefficients for ship motions

(5.1) 式を解いて、上下揺および縦揺の周波数解が次の形で求められる。

$$\zeta = \zeta_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_\zeta) = \zeta_c \cos \omega_e t + \zeta_s \sin \omega_e t \quad (5.3)$$

$$\theta = \theta_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_\theta) = \theta_c \cos \omega_e t + \theta_s \sin \omega_e t \quad (5.4)$$

ただし,

$$\zeta_c = \zeta_0 \cos \varepsilon_\zeta, \quad \zeta_s = \zeta_0 \sin \varepsilon_\zeta$$

$$\theta_c = \theta_0 \cos \varepsilon_\theta, \quad \theta_s = \theta_0 \sin \varepsilon_\theta$$

$$\zeta_0, \theta_0 : \text{response amplitude for heave and pitch motion}$$

$$\varepsilon_\zeta, \varepsilon_\theta : \text{phase for heave and pitch motion}$$

$$\omega_e : \text{circular frequency of heave and pitch motion}$$

上下揺と縦揺を合成して求められる船の任意の位置の諸応答として、垂直方向変位 Z , 垂直方向速度 $\dot{Z}$ および垂直方向加速度 $\ddot{Z}$ を考慮すれば、各応答の計算式は次の通りである。

$$Z = \zeta - (x - x_G) \theta = Z_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_Z) = Z_c \cos \omega_e t + Z_s \sin \omega_e t \quad (5.5)$$

$$Z_c = Z_0 \cos \varepsilon_Z = \zeta_c - (x - x_G) \theta_c \quad (5.6)$$

$$Z_s = Z_0 \sin \varepsilon_Z = \zeta_s - (x - x_G) \theta_s \quad (5.7)$$

$$\dot{Z} = \dot{Z}_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_{\dot{Z}}) \quad (5.8)$$

$$\dot{Z}_0 = |\omega_e| Z_0 ; \quad \varepsilon_{\dot{Z}} = \varepsilon_Z - \pi/2 : \omega_e \geq 0, \quad \varepsilon_Z + \pi/2 : \omega_e < 0 \quad (5.9)$$

$$\ddot{Z} = \ddot{Z}_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_{\ddot{Z}}) \quad (5.10)$$

$$\ddot{Z}_0 = \omega_e^2 Z_0 \quad ; \quad \varepsilon_{\ddot{Z}} = \varepsilon_Z - \pi \quad (5.11)$$

ここに,

Z_0 : response amplitude for vertical displacement

ε_Z : phase for vertical displacement

次に、短期不規則波中の船体応答短期予測について説明する。短期不規則波中の船体応答の統計的分散 R^2 は、線形重ね合わせの理論に基づく船体応答スペクトル計算によって次式で求められる。

$$R^2 = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\infty [f(\omega)]^2 [A(\omega, \delta - \gamma)]^2 \cos^2 \gamma d\omega d\gamma \quad (5.12)$$

ここで、 $[f(\omega)]^2$ には長波頂不規則波スペクトルとして次の ISSC スペクトルを用い、波スペクトルの方向性分布については、 $-\pi/2$ から $\pi/2$ にわたる $(\cos^2 \gamma)$ 分布を仮定している。

$$[f(\omega)]^2 = 0.11 H^2 \omega_T^{-1} (\omega / \omega_T)^{-5} \exp[-0.44(\omega / \omega_T)^4] \quad (5.13)$$

ただし,

$$\omega_T = 2\pi / T$$

ここに,

R : standard deviation of a ship response in short crested irregular waves

from the direction of δ

$[A(\omega, \delta - \gamma)]$: response amplitude of a ship in regular waves from the
direction of $(\delta - \gamma)$

ω : circular frequency of wave

δ : angle between the average wave direction and the average ship course

γ : angle between the average wave direction and a component wave direction

$\delta - \gamma$: angle between the average ship course and a component wave direction

T_M : visual average wave period

H_S : significant wave height

応答の統計的分散 R^2 を用いて，短期波浪海面上での船体応答の統計的予測が可能となる．船体応答 r の極大値（または極小値）の確率分布が Rayleigh 分布（形状母数 2 の Weibull 分布）で近似でき，さらに応答の時間的変動量の確率分布が正規分布に従うとき，極大値（または極小値）がある一定値 r_1 を超える確率は，次式で与えられる．

$$q(r > r_1) = \exp(-r_1^2 / 2R^2) \quad (5.14)$$

ただし，

$q(r > r_1)$: exceeding probability for a level r_1 of ship response in a short-term
sea condition

最後に船体応答長期予測について説明する．船がある海域を長期間に渡って常に一定の速度を保ちかつ波の平均進行方向に対して常に一定の出会角を保って航海している

と仮定すれば、その海域の長期波浪発現確率 $p(H_s, T_M)dHdT$ を利用して、船体応答の長期予測を行なうことができる。船体応答の極大値が一定値 r_1 を超える長期の累積確率（長期超過確率）は次式によって与えられる。

$$\begin{aligned} Q(r > r_1 ; \chi) &= \int_0^\infty \int_0^\infty q(r > r_1) p(H_s, T_M) dHdT \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \exp(-r_1^2 / 2R^2) \cdot p(H_s, T_M) dHdT \end{aligned} \quad (5.15)$$

ただし、

$Q(r > r_1, \chi)$: long-term exceeding probability for a level r_1 of a ship response in the case of encounter angle between the ship direction and the average wave direction is constant

$p(H_s, T_M)$: long-term probability density of a occurrence for the short-term sea condition of the significant wave height H_s and the average wave period T_M

さらに、船と波との出会角の確率密度が方向 χ によらず一定であるとすれば、累積確率は次式で与えられる。

$$Q(r > r_1) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Q(r > r_1 ; \chi) d\chi \quad (5.16)$$

ただし、

$Q(r > r_1)$: long-term exceeding probability for a level r_1 of a ship response in the case of all of the encounter angle between the ship direction and the average wave direction is equally appeared

5.3. フリーク波環境下における船体応答長期予測

本節ではフリーク波環境下における船体応答の長期予測計算法とコンテナ船を計算対象とした長期予測結果について述べる．従来の船体応答長期予測法（福田法）にフリーク波発現確率を取り込むことでフリーク波環境下における船体応答が推定される[50]．(5.15) 式における短期海象の頻度である有義波高と波周期の同時確率分布 $P(H_S, T_M)$ をフリーク波の長期発現確率 $P_{Freak}(H_S, T_M)$ に置き換えることにより，フリーク波の統計的予測結果を取り込んだ船体応答長期予測を行うことができる．フリーク波環境下において船体応答の極大値が一定値 r_l を超える長期の累積確率は次式で与えられる．

$$Q(\chi) = \int_0^\infty \int_0^\infty \exp(-r_l^2 / 2R^2) \cdot p_{Freak}(H_S, T_M) dH dT \quad (5.17)$$

しかし，フリーク波の周期を特定することは困難であるため $P_{Freak}(H_S, T_M)$ を求めることはできない．従って，フリーク波の周期については波浪統計資料から得られる周辺分布を近似的に用いる．また，フリーク波の波高に関する発現確率は短期海象の発現確率 $P_{State}(H_S)$ と，その短期海象におけるフリーク波の発現確率 $P_{Freak}(H_S)$ の積で表される．従って，式(5.17)は以下のように書き換えることができる．

$$Q(\chi) = \int_0^\infty \int_0^\infty \exp(-r_l^2 / 2R^2) P_{Freak}(H_S) p_{State}(H_S) p(T_M) dH dT \quad (5.18)$$

上記の船体応答長期予測手法を用いて，船長 175m の SR108 型コンテナ船を計算対象として長期波浪統計データベースにおける 30 番の小海域における船体応答の長期予測計算を実施し，船首部に作用する上下加速度と縦揺れ角を推定する．Table 5.1 に

SR108 の主要目を示す．船速は 22.45kt（フルード数 $Fr=0.275$ ），波との平均出合い角を 22.5 度刻みの 16 方向とする．また，フリーク波の大きさは前後の波との波高差が 15m 以上あるものとする．

フリーク波の長期発現確率の算出の過程において利用する短期海象の発現確率 $P_{State}(H_s)$ はワイブル分布と対数正規分布の 2 つの確率分布を用いて近似する．また，従来の方法と計算結果を比較するために福田法による長期予測計算も行う．福田法においても海象の有義波高の分布はワイブル分布と対数正規分布による近似を利用する．

第 30 番目と第 90 番目の小海域における上下加速度と縦揺れ角の推定結果を Fig.5.2 ～Fig.5.5 に示す．上下加速度と縦揺れ角のどちらもフリーク波環境下における推定値は福田法による推定値より大きな応答となる．一般的な船舶の設計の目安である超過確率が 10^{-8} となる応答について福田法による推定値とフリーク波環境下における推定値との比を計算すると，第 30 番目の小海域では，上下加速度の場合，ワイブル分布において 1.93 倍，対数正規分布において 1.36 となる．縦揺れ角の場合，ワイブル分布において 1.83，対数正規分布において 1.31 となる．第 90 番目の小海域では，上下加速度の場合，ワイブル分布において 1.38，対数正規分布において 1.83 となる．縦揺れ角の場合，ワイブル分布において 1.35，対数正規分布において 1.80 となる．このような大きな値が推定される理由として，長期波浪統計データベースにおいて発現確率の値が 0.00 となる有義波高の高い領域において，フリーク波の発現確率が考慮されているためであると考えられる．また，福田法においてワイブル分布を用いた推定値と対数正規分布を用いた推定値との間に差異があることについては松尾[17]が指摘している．これは有義波高の低い領域に卓越する傾向のある衛星データの分布形状をワイブル分布が追従できていないことが理由である．そのため，有義波高の低い領域への一致度が低くなり，対数正規分布を用いた場合とワイブル分布を用いた場合では船体応答の推定値が異なる．また，フリーク波環境下における船体応答の二つの推定値も異なる．これは，

第4章に示したように、フリーク波の長期発現確率が短期海象の発現頻度分布を近似するために用いた確率分布により異なるためであると考えられる。従って、フリーク波環境下における船体応答の推定値は短期海象の発現確率の設定に影響を受けることが分かる。

従来の長期予測法による設計条件の決定においては20年～30年に一度生起する異常波を設計条件として考慮できていない可能性がある。従って、船舶設計に従来法より厳しい条件であるフリーク波の影響を考慮した船体応答推定を取り入れることにより船舶の安全性が向上されることが考えられる。

5.4. 結言

フリーク波の統計的予測の応用として船舶設計の信頼性向上を目的としたフリーク波環境下における船体応答の長期予測計算を行った。船体応答の長期予測法の一つである福田法において用いられる短期海象の発現頻度をフリーク波の長期発現確率に置き換えることでフリーク波環境下の船体応答を予測する手法を提案した。そして、長期波浪統計データベースにおける第 30 番目と第 90 番目の小海域における船体応答の長期予測計算を実施した。どちらの海域においても従来法と比較して大きな応答が推定された。

フリーク波の統計的予測を取り込むことで、従来の手法と比較して厳しい条件の下での船体応答の推定が可能となり、船舶設計の信頼性向上が期待される。

Table 5.1 Principal dimensions of container ship

Item		SR108 Container ship
Length between perpendiculars	(m)	175.000
Breadth	(m)	25.400
Depth	(m)	15.400
Draft	(m)	9.500
Displacement	(ton)	24742.000
Block coefficient		0.572

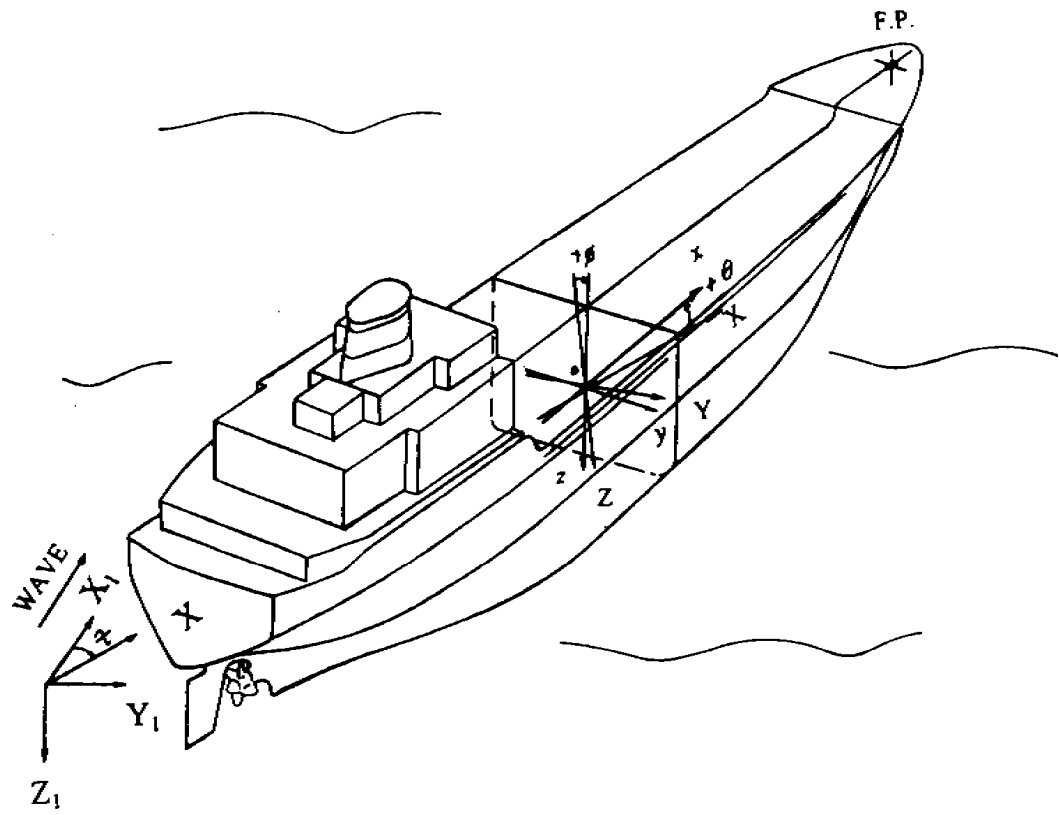


Fig.5.1 Coordinates system in regular wave

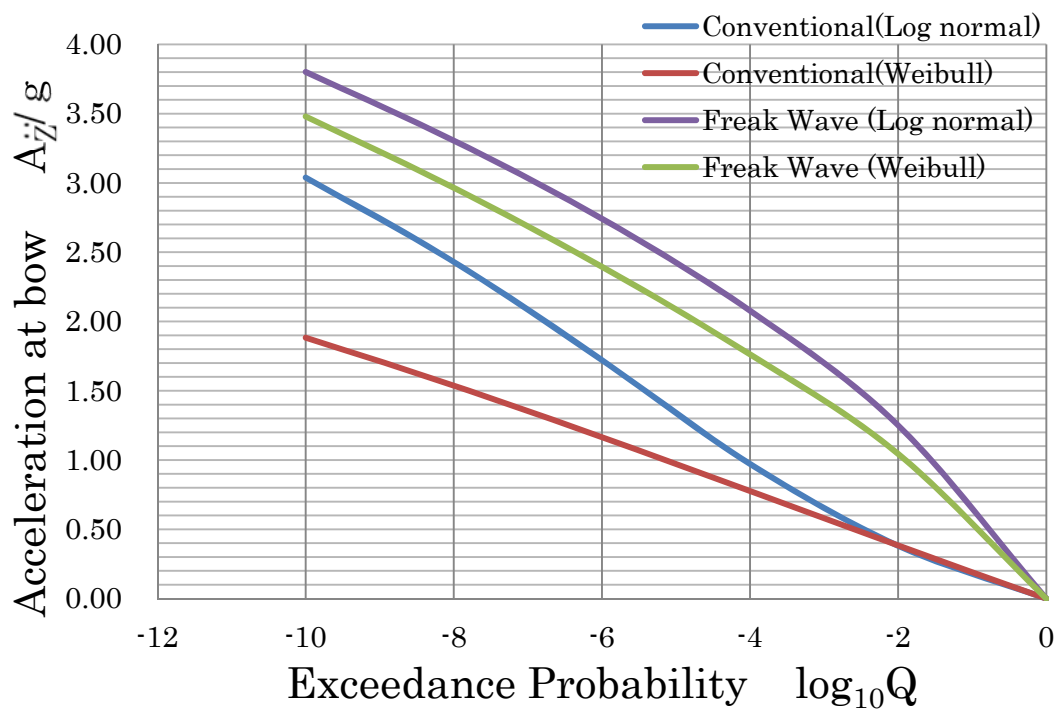


Fig.5.2 Long-term distribution of vertical acceleration at bow
(Sub sea area No.30)

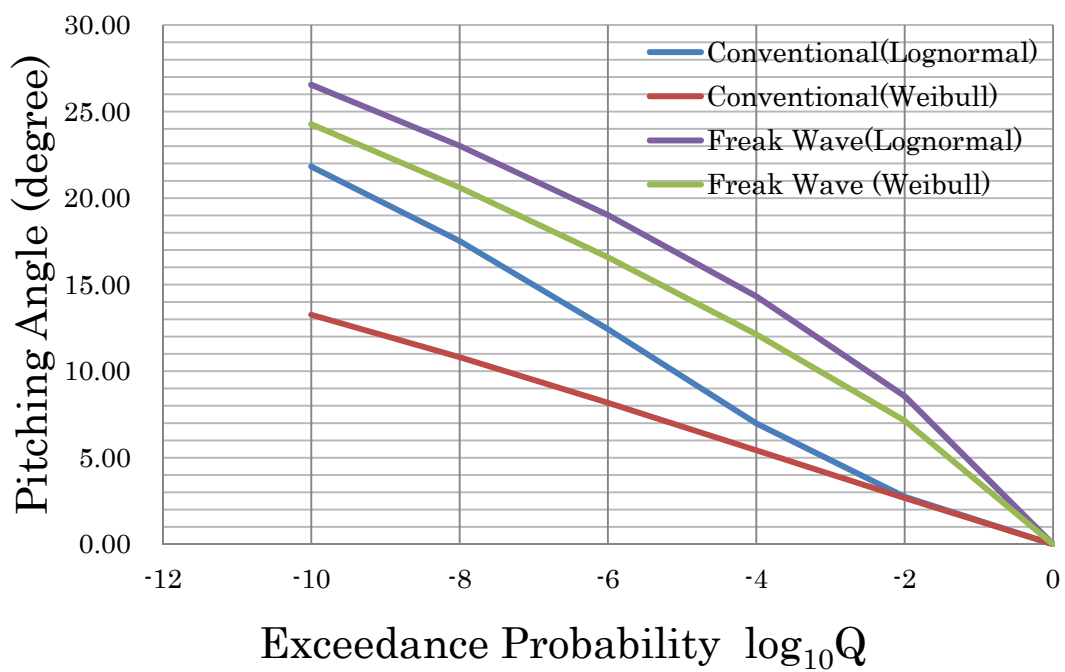


Fig.5.3 Long-term distribution of pitching angle at bow
(Sub sea area No.30)

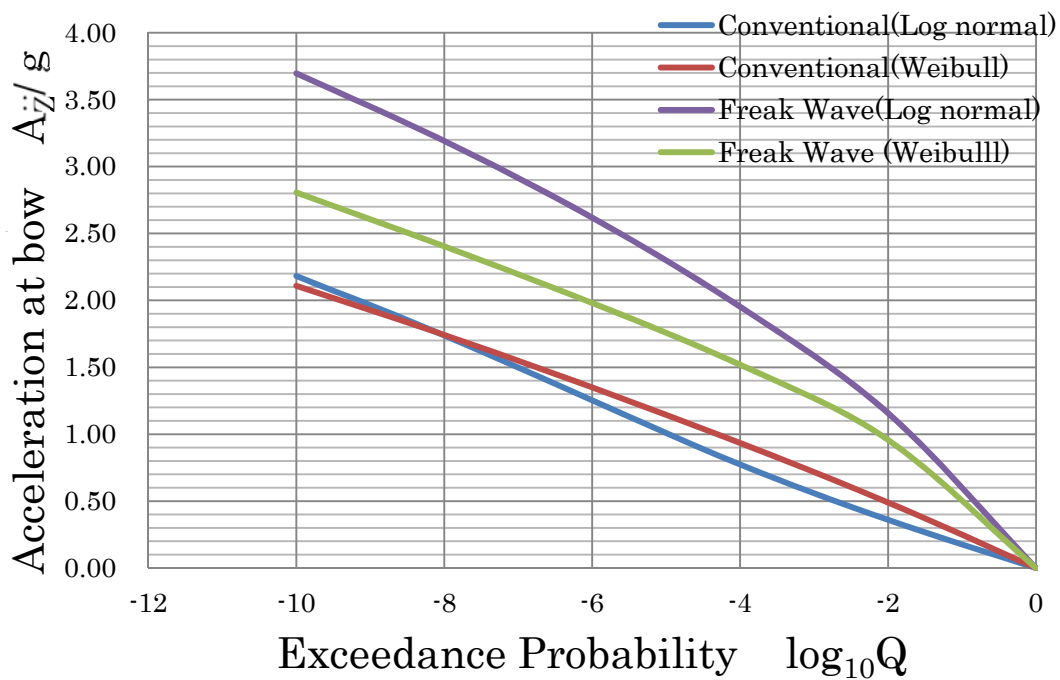


Fig.5.4 Long-term distribution of vertical acceleration at bow
(Sub sea area No.90)

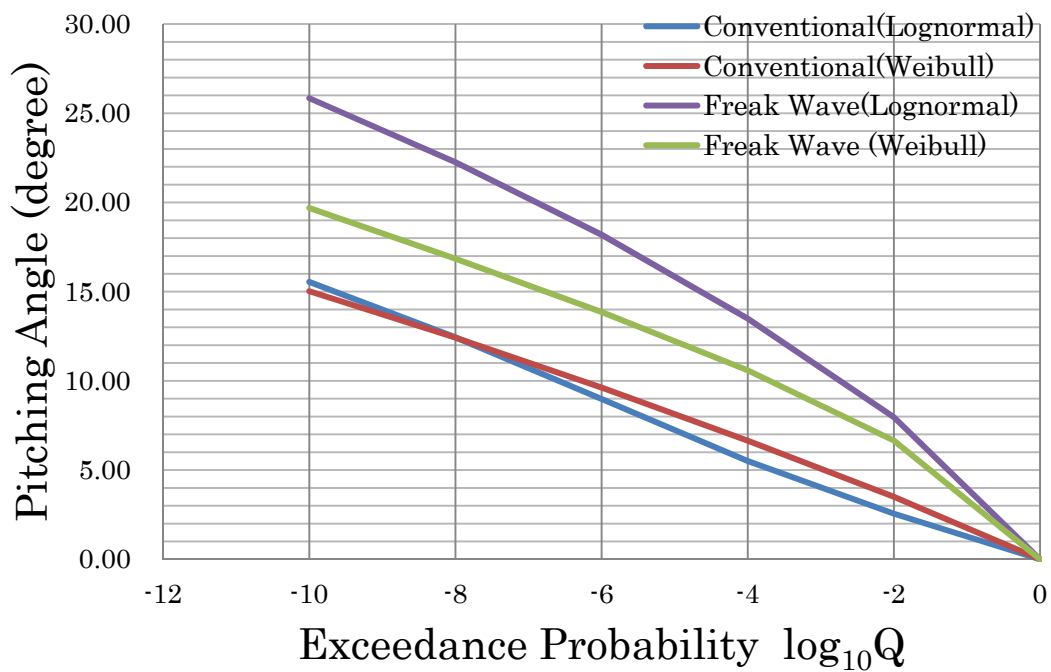


Fig.5.5 Long-term distribution of pitching angle at bow
(Sub sea area No.90)

第 6 章 結論

本研究では、船舶設計の信頼性向上を目的として、海洋において突発的に発生するフリーク波の統計的予測法を考案し、フリーク波環境下における船体応答の長期予測法を提案した。本手法を用いることで、船体応答の長期予測においては従来法と比較してより厳しい条件での船体応答を推定することが可能となる。この推定結果に基づき船舶を設計することにより、船舶の安全性の向上が期待される。

第 1 章では本研究の背景と目的、及びフリーク波に関するこれまでの研究と本研究の位置付けについて述べた。

第 2 章では、フリーク波の定義や特性について説明した。初めに異常波の分類を行い、フリーク波とその他の異常波との違いを明確にした。フリーク波の定義として提案されている様々な条件について述べ、理論的な根拠に基づくフリーク波の定義が未だに定まっていないこと示した。そして、本研究では前後の波と比較して卓越して大きな波高をもつ波をフリーク波とすることを述べた。次に、数理的、物理的特性として有限振幅波理論からフリーク波の特徴を追及し、統計的特性として嵐内時空間領域最大波の一般化確率分布について説明した。

第 3 章では、波浪の統計的性質について述べた。波浪と海象の統計的性質を説明した。そして、波浪統計資料の一つとして観測衛星から取得された波高情報を基に構成された長期波浪統計データベースについて説明した。さらに、長期波浪統計データベースのフリーク波発現確率の推定への適用の可能性の検討として、長期波浪発現確率分布のヒストグラムと波高分布を Rayleigh 分布としたときの最大波高との関係を示し、フリーク波の発現確率と長期波浪発現確率との対応づけについて考察した。その結果、波高分布に基づく極限波高として捉えるだけでなく、短期海象におけるフリーク波の特性を考慮し

た直接的な統計的予測が必要であることを確認した。

第4章では、前後の波と比較して卓越して大きな波高をもつ波というフリーク波の特性を統計的予測へ取り入れることを目的として、連続する二つの波の波高差を確率変数として利用する統計的予測法を提案した。連続する二つの波の波高差の統計的性質を追及するためにモンテカルロシミュレーションを行い、波高差が正規分布に従うことが示された。また、波高差が取りうる最大値の統計的性質についても説明した。そして、波高差を利用したフリーク波の統計的予測として短期海象におけるフリーク波発現確率をモンテカルロシミュレーションにより推定した。有義波高が大きくなるにつれフリーク波の発現確率が上昇することを確認し、荒れた海象においては船舶に対し大きな損害を与えるようなフリーク波に遭遇する可能性が高いことが示唆された。さらに、Assanathoulis の提案する二つの時間スケールを利用したフリーク波発現確率の長期予測法を考案し、長期波浪統計データベースにおける第30番目と第90番目の海域におけるフリーク波の長期発現確率を推定した。フリーク波の長期発現確率は短期海象の発現確率の影響を受けることが確認された。また、フリーク波発現確率の推定結果は波高差の大きさごとにまとめられ、船舶がその一生の間に遭遇する最大のフリーク波がもつ前後の波との波高差が推定されることを示した。

第5章では、船体応答の長期予測計算法の一つである福田法を基にフリーク波環境下における船体応答の推定法について説明した。短期海象の発現頻度である有義波高と波周期の同時確率をフリーク波の長期発現確率に置き換えることによりフリーク波環境下における船体応答が推定されることを説明した。そして、コンテナ船を計算対象としてフリーク波環境下における船体応答を推定した。フリーク波環境下では従来法と比較して大きな応答が推定された。この結果より、従来法による設計条件の決定において20年～30年に一度生起する異常波が設計条件として十分に考慮されていない可能性が示された。フリーク波の影響を考慮した船体応答推定結果を取り入れることにより船舶

設計の信頼性が向上されることが考えられる。

今後の課題について述べる。本研究において検討されたフリーク波は主に波高に着目しており、船体応答の長期予測計算において利用した周期は波浪統計資料から得られる周辺分布を用いており、フリーク波の周期について直接的な推定がされていない。より厳密なフリーク波の統計的予測やフリーク波環境下における船体応答の長期予測を行うために、フリーク波の周期について調査する必要がある。今後の研究によりフリーク波の周期の特性が解明され、フリーク波の統計的予測や船体応答長期予測に組み込まれるれば、より信頼性の高い船舶設計の実現が期待できる。

謝辞

本論文を纏めるにあたり，御懇篤なる御指導を御教示ならびに貴重な御意見，御討論を頂きましたあらゆる各位に厚く御礼の意を表します．

九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門教授 新開明二先生には，本研究のテーマの基となる段階より本論文をまとめるまで，終始懇切なご指導を賜りました．また，長年に渡る先生の温かい御指導と叱咤激励の御言葉に対して，ここに深謝致します．

九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門准教授 山口悟先生には，研究初期から本論文をまとめるまで，随時適切な御助言と激励を賜りました．心より感謝申し上げます．

また，研究の遂行にあたり，貴重な御教示と御討論を頂きました九州大学応用力学研究所地球環境力学部門准教授 中村昌彦先生，九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門教授 古川芳孝先生に深い感謝の意を表します．

並びに，船舶海洋システム工学コースの諸先生方より終始暖かい励ましの御言葉を頂戴いたしました．ここに厚く御礼申し上げます．

さらに，事務処理等で御世話して頂いた藤野容子さんに御礼申し上げます．

参考文献

- [1] 福田淳一：船体応答の統計的予測，耐航性に関するシンポジウム，日本造船学会，1969，pp.99-119
- [2] 谷澤克治：実海域での耐航性能，日本造船学会誌，第 884 巻，2005，pp.40-48
- [3] D Faulkner and R A Williams：Design for abnormal ocean waves, The Royal Institution of Naval Architects, vol.139, 1997, pp.1-32
- [4] 富田宏，水谷由宏：フリーク波の生成理論の現状と問題，応用力学研究所研究集会報告，No.18SP1-4，2007
- [5] V.E. Zakharov, A.I. Dyachenko, A.O. Prokofiev：Freak waves as nonlinear stage of Stokes wave modulation instability, European Journal of Mechanics B/Fluids, vol25, 2006, pp.677-692
- [6] 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，1992
- [7] Christian Kharif, Efim Pelinovsky：Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon, European Journal of Mechanics B/Fluids, vol22, 2003, pp.603-634
- [8] 安田孝志，森信人，林修市：日本近海における Freak Wave の出現特性について，海岸工学論文集，第 39 巻，1992，pp.131-135
- [9] 安田孝志，森信人，中山晋一，赤羽透，吉元博文：日本海における巨大 Freak Wave 出現時の気象・海象特性とその発生原因，海岸工学論文集，第 41 巻，1994，pp.36-40
- [10] 早稲田卓爾：海難事故とフリーク波，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 10 号，2010，pp.31-34
- [11] Nobuhito Mori：Occurrence probability of a freak wave in a nonlinear wave field，Ocean Engineering，vol31，2004，pp.165-175
- [12] 木村晃，太田隆夫：深海域における Freak Wave の発生頻度について，海岸工学

- 論文集, 第 39 卷, 1992, pp.136-140
- [13] 田中光宏: “Freak Wave”の出現確率と非線形性の関連に関する数値的研究, 数理解析研究所講究録, 1430 巻, 2005, pp.245-255
- [14] 南真紀子, 澤田博史, Sebasrien Jean, 谷澤克治: フリーク波中の船体応答と波浪荷重の推定, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 1 号, 2005, pp.63-64
- [15] 南真紀子, 澤田博史, 谷澤克治: フリーク波による船体応答と波浪荷重の推定について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 4 号, 2006, pp.107-114
- [16] 中住昭吾, 石江水, 鈴木克幸, 木下健: フリーク波による船体縦曲げ荷重の推定, 応用力学研究所研究集会報告, No.17SP1-2, 2006
- [17] 松尾宏平: 衛星情報に基づく長期波浪統計データベースの構築とその船舶設計への応用に関する研究, 九州大学博士論文, 2004
- [18] 富田宏: フリーク波研究の歴史と現状, 応用力学研究所研究集会報告, No.17SP1-2, 2006
- [19] Wolfram J., Linfoot B., Stansell P. : Long- and short-term extreme wave statistics in the North Sea: 1994-1998, Proceedings of a Workshop Rogue waves, Brest, France, 2000, pp.341-347.
- [20] Johannes Gemmrich, Chris Garrett : Unexpected waves, Journal of physical oceanography, vol38, pp.2330-2336
- [21] Peter Kjeldsen : A Sudden Disaster — in Extreme waves, Proceedings of a Workshop Rogue waves, Brest, France, 2000, p.19-36.
- [22] I. Nikolkina, I. Didenkulova: Rogue waves in 2006-2010, Natural Hazards and Earth System Sciences, vol11, 2011, pp.2913-2924
- [23] Leonid J. Lopatoukhin, Alexander V. Boukhanovsky : Freak wave generation and their probability, Int. Shipbuild. Progr., 51, no. 2/3 , 2004, pp. 157-171

- [24] A. Slunyaev , E. Pelinovsky , C. Guedes Soares : Modeling freak waves from the North sea, *Applied Ocean Research*, vol27, 2005, 12-22
- [25] 富田宏 : 異常波浪, 運動性能研究委員会第 13 回シンポジウム, 第 1 編, 1997, pp.57-62
- [26] Faulkner D. : Rogue Waves – Defining Their Characteristics for Marine Design, *Proceedings of a Workshop Rogue waves*, Brest, France, 2000, p.3-18.
- [27] 富永政英 : 海洋波動, 共立出版株式会社, 1976
- [28] 気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- [29] 石黒仁規, 新開明二, 山口悟 : 海洋におけるフリーク波の特性についての考察, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 12 号, pp.463-464
- [30] Michel K. Ochi : *Ocean waves*, Cambridge university press, 1998
- [31] 富田宏, 富田昌子, 大橋隼人 : 実海域データから見たフリーク波, 応用力学研究所研究集会報告, No.17SP1-2, 2006
- [32] 宇野木早苗, 久保田雅久 : 海洋の波と流れの科学, 東海大学出版, 1996
- [33] 磯崎一郎, 鈴木靖 : 波浪の解析と予報, 東海大学出版, 1999
- [34] British Maritime Technology (Primary contributors; N. Hogben, L. F. Dacunha and G. F. Olliver) : *Global wave statistics*, Unwin Brothers Limited, London, 1986.
- [35] 国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報網, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- [36] 福田淳一 : 長期の波浪曲げモーメント異常値の傾向について, 日本造船学会論文集, 第 123 号, 1968, pp.109-119
- [37] 新開明二, 万順涛 : 各種の長期波浪統計資料の特性値の傾向について, 西部造船会々報, 第 91 号, 1995, pp.107-117
- [38] 光易恒 : 海洋波の物理, 岩波書店, 1995

- [39] 新開明二, 山口悟, 西依亮, 松尾宏平, 慎 勝進: 地球観測衛星に基づく長期波浪統計データベースの構築, 西部造船会第 110 回例会論文梗概集, 2005, pp.85-88.
- [40] 山内保文: 船舶・海洋技術者のための不規則現象論, 海文堂, 1986
- [41] 石黒仁規, 新開明二, 山口悟: 海洋において船舶が遭遇するフリーク波の数値シミュレーションについて, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 14 号, 2012, pp.153-154
- [42] 新開明二, 池田 亮, 松尾宏平, 慎 勝進: 船舶が遭遇する荒天海象の発現頻度について — 順序統計量のシミュレーション技法の導入とその蓋然的推論 —, 西部造船会々報, 第 105 号, 2003, pp.133-139.
- [43] Athanassoulis, GA, Vranas, PB, and Soukissian, TH : A new model for long-term stochastic analysis and prediction – Part 1 : Theoretical background, *Journal of Ship Research*, , Vol.36, , No.1, 1992, pp.1-16
- [44] 新開明二, 万順濤: 長期予測法のための新しい統計学的数理モデルの構築, 日本造船学会論文集, 第 179 号, pp.59-65
- [45] 津田孝夫: モンテカルロ法とシミュレーション, 倍風館, 1995
- [46] Michael J.Crawly: 統計学 R を用いた入門書, 共立出版, 2008
- [47] 松原望: 入門確率過程, 東京図書, 2003
- [48] 木下健, 富田宏, 早稲田卓爾, 田村仁, 林昌奎, 川村隆文, 稗方和夫: Freak wave のメカニズムの解明と回避法提案の試み, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 10 号, 2010, pp.25-27
- [49] 山本善之, 大坪英臣, 角洋一, 藤野正隆; 船体構造力学 (二訂版), 成山堂書店 2004
- [50] 石黒仁規, 山口悟, 新開明二: 海洋におけるフリーク波の統計的予測と船体応答の長期予測, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 17 号, 2013, pp.465-466

主要記号一覧

$[A(\omega, \delta - \gamma)]$	規則波中における船体応答の応答関数
a, b	グンベル・ワイブル分布における分布関数のパラメータ
B_{ij}, C_{ij}	連成運動方程式の係数
c	波速
f	確率密度関数
F	累積分布関数
$F_{\zeta}, M_{\theta}, F_{\eta}, M_{\psi}, M_{\phi}$	波強制力と波強制モーメント g 重力加速度
H	波高
$\bar{H}$	平均波高
h	静止水面から水底までの距離
$\bar{h}(r)$	嵐の衝撃
$h^+(t)$	嵐内の最大波高
H_e	極限波高
H_i	任意の時系列データにおける i 番目の波の波高
$H_{\max}$	波浪記録の中で期待される最大波高
H_s	有義波高
$H_{\text{sub},i}$	任意の時系列データにおける i 番目の波高差
k	波数

L	嵐の半径
l	嵐の中心からの距離
$l_0(t)$	嵐の幾何学的中心
m, c, λ	一般化ガンマ分布における分布関数のパラメータ
$P_A(F)$	小海域Aにおけるフリーク波の長期発現確率
P_e	超過確率
$p_{Freak}(H, T)$	フリーク波の波高と周期の同時確率
$P_{Freak}(H_S)$	有義波高 H_S となる短期海象においてフリーク波が発生する確率
$P_{State}(H_S)$	有義波高 H_S となる短期海象の発現確率
$P(H)$	波高に関する周辺確率分布
$p(H, T)$	短期海象の発生頻度を表す有義波高 H と平均波周期 T の同時発生確率密度
$P(T H)$	波高に対する波周期の条件付確率
$Q(r > r_1, \chi)$	船体応答の極大値が r_1 を超える長期の超過確率
$Q(r > r_1)$	すべての出会角を考慮した船体応答の極大値が r_1 を超える長期の超過確率
$q(r > r_1)$	短期波浪海面において船体応答の極大値が r_1 を超える超過確率
R	短期波浪海面における船体応答の標準偏差
r	各種の船体応答
$S_\Omega(t)$	嵐の面積
T	波周期
T_M	平均波周期

T_s	有義波周期
t	短期の時間スケール
Z	船の任意の位置における垂直方向変位量
$\dot{Z}$	船の任意の位置における垂直方向速度
$\ddot{Z}$	船の任意の位置における垂直方向加速度
z_s	嵐のレベル
$\Gamma\{m, (\lambda x)^c\}$	不完全ガンマ関数
γ	素成波の進行方向と波の平均進行方向とのなす角
ΔY	海象の持続時間
ζ_0, θ_0	上下揺と縦揺の振幅
η	波面
Λ	海象状態のスペクトル特性値
λ	波長
μ	平均
μ_{Hs}, σ_{Hs}	対数正規分布における分布関数のパラメータ
$\Xi(i)$	海象状態の確率系列
ξ	極座標における偏角
δ	船の進行方向と波の平均進行方向とのなす角
$\delta - \gamma$	船の進行方向と素成波のなす角
$\varepsilon_\zeta, \varepsilon_\theta$	上下揺と縦揺の位相角
σ	標準偏差
τ	長期の時間スケール

$\Omega(t)$	嵐の時空間領域
ω	波の円周波数
ω_e	船と波との出会い円周波数

表図表題一覽

Table 2.1	Main reasons of freak wave generation
Table 2.2	Some definitions of freak waves
Table 4.1	The probability of freak wave generation based on count-up successive wave difference which is above threshold values
Table 4.2	Calculation process of freak wave generation probability (sub sea area No.30, Weibull distribution)
Table 4.3	Calculation result of freak wave generation probability (sub sea area No.30, Weibull distribution)
Table 5.1	Principal dimensions of container ship

Fig. 2.1 Example of freak wave

Fig. 2.2 Dangerous Areas that contain Freak Waves under certain Meteorological Condition

Fig. 2.3 Geographic distribution of rogue wave events in 2006–2010

Fig. 2.4 Example of freak wave

Fig. 2.5 Kanagawa-oki name-ura (Ukiyoe of Hokusai)

Fig. 2.6 Coordinate system in finite amplitude wave

Fig. 2.7 Calculation example of solitary wave

Fig. 3.1 Sub sea area by GWS

Fig. 3.2 The format of the long-term wave database (Sub sea area No.1)

Fig. 3.3 The sea area and disaster point of accident of Onomichi-Marui

Fig. 3.4 Relations between histogram of long-term wave frequency distribution and extreme wave heights (Sub sea area No.30)

Fig. 4.1 A conception diagram of wave height difference

Fig. 4.2 Rayleigh distribution ($H_s=10\text{m}$)

Fig. 4.3 Time series of random number

Fig. 4.4 Time series of difference between wave heights

Fig. 4.5 Histogram of difference between wave heights

Fig. 4.6 Histogram of maximum of wave heights difference

Fig. 4.7 Freak wave generation probability for thresholds

Fig. 4.8 Freak wave generation probability including event probability of sea state

Fig. 4.9 Freak wave generation probability including event probability of sea state

Fig. 5.1 Coordinate system in regular wave

Fig. 5.2 Long-term distribution of acceleration at bow (Sub sea area No.30)

Fig. 5.3 Long-term distribution of pitching angle at bow (Sub sea area No.30)

Fig. 5.5 Long-term distribution of pitching angle at bow (Sub sea area No.90)

Fig. 5.4 Long-term distribution of acceleration at bow (Sub sea area No.90)