

応用力学研究所研究集会報告 No.17SP1-2
「海洋巨大波の実態と成因の解明」 (研究代表者 富田宏)

Reports of RIAM Symposium No.17SP1-2
Study on features and generation mechanisms of freak waves
Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu University,
Kasuga, Fukuoka, Japan, March 10 - 11, 2006

Article No. 01

フリーク波研究の歴史と現状

富田 宏 (TOMITA Hiroshi)

(Received May 31, 2006)



Research Institute for Applied Mechanics
Kyushu University
June, 2006

フリーク波研究の歴史と現状

海上技術安全研究所 富田 宏 † (TOMITA Hiroshi)

流体力学の一分野として水面波の研究はその最も古典に属する。海洋波浪の現代的な研究がランダム過程の統計と非線形力学という異なる2本の柱の上に立って新しい科学的発展を開始してからちょうど半世紀が過ぎようとしている。本稿では近年海洋流体力学での興味深い話題となっている <Freak Wave> と呼ばれる特異現象の研究の概要について述べる。Freak Wave は実海面で周辺の波から際立って、突然生起する孤立的な異常波浪である。この現象を解き明かすことは海洋流体力学における非線形ランダム問題の融合発展の可能性に対するひとつの試金石と言える。

1 緒言

“The basic law of sea waves is apparent lack of any law.” とは Lord Rayleigh の有名な言葉であるが、外洋海面を観察する人は誰もが同様の感慨を持つに違いない。海洋に生じる波動現象には潮汐、プラネタリ一波、高潮、津波をはじめ数々の種類があるがそのエネルギーの大部分を占めるものは周期 0.1 秒から 40 秒の風波である。風波は海面を吹く風によって起こることは明らかであるがその詳細な発生機構は未だに明らかではなく流体力学上の未解決問題の一つである。Rayleigh 卿による前記の設問に対する1つの解答は 20 世紀中葉にいたって急速に発達したランダム過程とスペクトルの研究によって与えられた。そこでは急速に変化する波の様相を統計と平均の言葉によって記述する方法が採用されている。一方、そもそも海洋波浪は水面波の集まりであり、水面波は非線形な力学の対象である。非線形水面波の流体力学的研究は古く 19 世紀の Stokes 波の研究に遡るが、より一般の非線形波動に関する研究はやはり 20 世紀後半に勃興し、ソリトン等の新しい物理のパラダイムを形成したがこの成果を直接海の波に適用する研究は未だ十分行われていない。本論の課題である FREAK WAVE (図 1) は上記2通りの幾分独立した研究の流れの狭間に位置するものであり、両者の融合または再構成を促す非常に興味深いと同時に困難な研究対象である。ここでは先ず第2節で海洋波の統計的性質について述べる。続く第3節では大規模海洋波の研究を自然災害の観点から考察する。それに続く各節では FREAK WAVE とは一体どのような現象であるのか、そしてどのような問題設定を行ってこれを取り扱ってゆくのが良いのかについての考察から始め、諸外国での研究も含めて斯学の最前線を概観する。最後に FREAK WAVE の予測と回避に向かって近い将来なされるべき研究の方向性と戦略についてご紹介したい。



図 1 FREAK WAVE BBC/ Science/ Horizon BBC ホームページより

2 海洋波浪

ここでは先ず海洋波浪の研究について概観してみる。海の表面は常に止まることなく一見不規則に上

下している。この海面の変動を支配する要因をそのスケールによって示したものが図 2 である。この図から明らかなように海面変動の最も大きな原因となっているものは風波である。風によって波が起こる機構の詳細は未だ理論的には明らかになっていないが、普通海洋波と呼ばれるものはこの風波 (wind sea) とうねり (swell) である。うねりは風波が発生域の風の影響を脱し無風の海面を進む状態を言う。

風によって波が起きるという事実はあまりにも明らかであるがその流体力学的メカニズムは思いの外複雑なようで前世紀有数の科学者たちによる挑戦によっても解明されずに残っている海洋学の大問題のひとつである。英国の地球物理学者 Harold Jeffreys 卿 (1924) ¹⁾ は波形の頂点で、風の流れの剥離が生じるとしてこの時の圧力差が大気から海面へとエネルギーを伝達するとの理論を発表している。その後米国の海洋学の権威 Owen Phillips (1957) ²⁾ は海面直上での乱流渦が平均風によって移流され、その大気圧変動と波面変位の共鳴によって波動が成長するという理論を提出し、同じく米国の海洋学者 John Miles (1957) ³⁾ は気流の鉛直シアーにより、層流境界層内で不安定が生じ、これが海面変動を成長させるというアイデアにもとづく一連の理論を発表し、さらに Phillips モデルとの融合理論をも発表している。しかしながらこれらの流体力学モデルも現実の海洋における波の発達率を十分に説明することが出来なかった。その理由の 1 つとして、風によって同時に海面直下の水中に引き起こされる流れの作用を十分に考慮していない点が上げられる。これについては気液 2 層流に対する CFD による大スケール直接シミュレーションが有効なのではないかと考えられる。筆者らは風の吹き始めに起きる水面の微小応答と初期波の発生について興味深い計算結果を得ている (Kawamura(1998) ⁴⁾ 参照)。この種の水面微細構造の解明はリモートセンシングにおける電磁波と海面との相互作用を評価する上で重要な役割を果たすものと期待される。

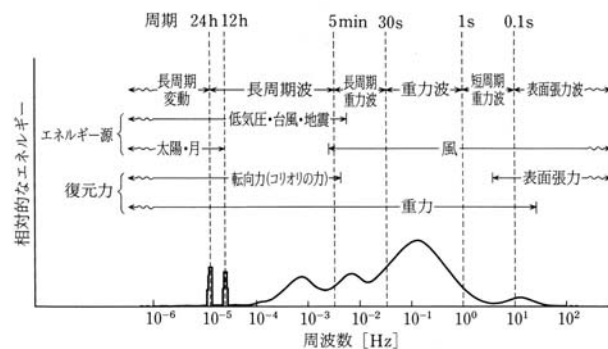


図 2 海洋波浪のエネルギー分布

Kinsman (1965) ⁵⁾ 及び Mitsuyasu (1995) より ⁶⁾

海洋波の研究は 20 世紀中葉に大きな変革期を迎えた。当時急速に発展しつつあった通信工学の分野からランダム過程とそのスペクトルという新しい概念を吸収して海洋波を統計的に取り扱う手法が取り入れられたからである。そこでは規則波に変わって任意の波長、波高および波向きをもつ無数の正弦波の重ね合わせとして海面を記述する。それは海面上の 1 点での水位の変化がガウス過程として表されることを意味する。そこから直ちに導かれる統計量として Longuet-Higgins(1952) ⁷⁾ はスペクトルのバンド幅が十分狭い場合に波高分布が Rayleigh 分布

$$p(H)dH = \frac{H}{4m_0} \exp\left[-\frac{H^2}{8m_0}\right]dH \quad (1)$$

で表されることを示した。ここで $m_0^{1/2} = \eta^{rms}$ は水面変位の root mean square である。この公式は海面の状態が統計的に定常であり、水面の変位がガウス分布に従い、かつそのスペクトルが狭帯域 (narrow banded) であることを仮定している。実際の海ではそのどれも厳密には満足されていないけれども、Rayleigh 分布は海洋波の統計的研究において基本的な重要性を持っている。実海域波浪データの波高分

布と Raileigh 分布との比較を **図 3** に掲げておく。本研究のように高波高の波を対象とするときには先ずこの分布関数の再検討から入る必要がある。

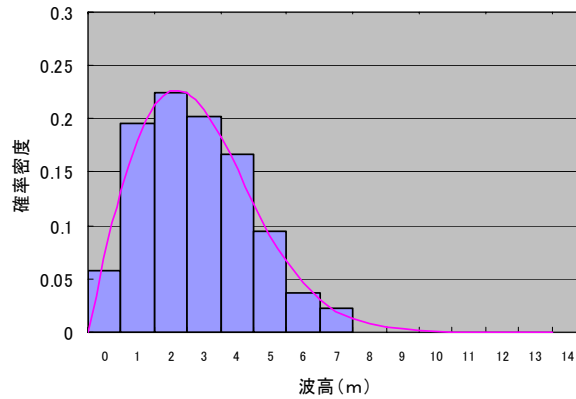


図 3 波高分布の理論値と観測値の比較

一方、現実の観測データは無限の長さではない。海面水位の観測はサンプリング間隔 Δt が 0.3 秒、0.5 秒、1.0 秒、記録時間 20 分、17 分等が代表的である。このデータに含まれる波の数を N 、各波高の root mean square を H_{rms} とし、データの中の最高波高を無次元化したものを $x_{max} = H_{max} / H_{rms}$ で表せばその分布関数 (pdf) は

$$p(x_{max}) = 2x_{max}\xi \exp(-\xi) \quad (2)$$

で与えられる。ここで、

$$\xi = N \exp(-x_{max}^2) \quad (3)$$

である。大規模波浪は多くの場合観測最大波であるから、この分布は波高分布の次の段階で重要なものである。

一般の場合、有義波高が時間の関数として与えられるとし、各時刻毎に前記の Rayleigh 分布が成り立つと仮定しその確率分布を $P(H; H_s = h)$ と表せば任意の変動海象 (ストーム等) に対してその持続期間 D の間の最高波が H を超える確率は次の式で推定することが出来る (Boccotti (2000)⁸⁾参照)。

$$P(H_{max} > H) = 1 - \exp\left[\int_0^D \frac{1}{\bar{T}(h(t))} \ln\{1 - P(H; H_s = h(t))\} dt\right] \quad (4)$$

ここで、 $\bar{T}(h(t))$ は各時刻における平均周期である。実海域における長期間にわたる有義波高と最大波高の変動の実例を **図 4** に掲げておく。

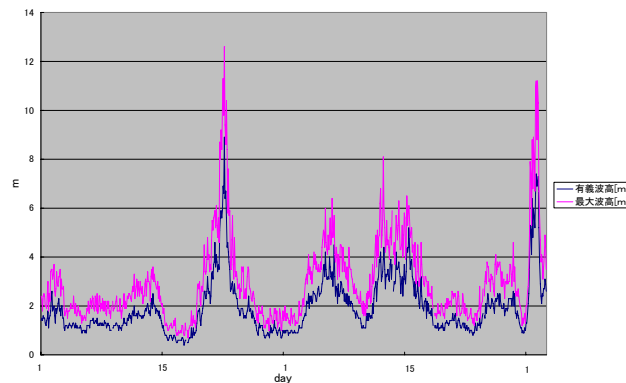


図 4 北太平洋 (青ヶ島、1997) における有義波高と最大波高の 2 ヶ月間の時系列

3 自然災害と科学

海洋波浪の研究は我が国では応用数学、海洋物理学、船舶工学、海洋工学、海岸工学等の多くの分野にまたがって行われており、それぞれの専門家の興味が異なっているためもあり、これまでのところ横断的な連携は余り無いように思われる。理論的見地から見れば海洋波浪は非線形ランダム過程という他に殆ど例を見ない難解かつ魅力的な研究対象である。また工学の対象としては、波は船舶・海洋構造物に対する最も重大な自然界の脅威であり、構造物の設計、運用、海難による人命の喪失、経済的損失の防止の観点からなるべく簡単な実用的推定法の確立が望まれている。近代海洋学の標準的方法はランダム過程である波動場のスペクトルと言う概念を利用し、風による波の発生と砕波によるその減衰のエネルギーバランスを輸送方程式にあてはめ、気象学の知識から得られる海上風の予測値を入力として数日後の特定海域でのスペクトル、すなわち有義波高と周期ならびに波向きをかなりの精度で予測できるまでになった。さらに近年は前記の純理論的非線形ランダム海面における波共鳴相互作用による成分間エネルギー交換の研究成果を取り入れ波浪の推定精度も著しく向上していると聞く。しかしながら、この方法で得られるのはあくまでも統計的平均値であり、個々の波そのものではない。そこでもし得られた平均値を大幅に超過する‘異常な波’が存在した場合は現在までの手法はそれに対して必ずしも万全でない。本論で述べている大規模海洋波 **Freak Wave** はその様な厄災の一つであり、実際に存在し、甚大な被害をもたらす一種の自然災害であると言えよう。本節ではこの様な自然災害（地球物理的災害）に対してどのように対処すべきかを考えてみる。

自然災害の代表的なものに、地震、津波、火山、台風等、広域的なものから洪水、高潮、竜巻、雷等局地的なものまでいろいろあるが、これらに対処するために人類が長年にわたって希求してきた最大の関心事は先ずこれらの現象を理解することであった。近代科学精神の最大の貢献は自然災害がそれ自身1つの自然法則に従うものであるということをして万人に認めさせたことであろう。災害を天の災い（*scourge of Heaven*）として恐れるのではなく、自然現象として受け入れる態度は近代文明の証であり、科学が社会に与えた最大のインパクトの一つである。しかしながらこれらの災害を事前に予測するという実際問題となると事はそれほど簡単ではない。大規模な地球物理的現象になるほどその原因は多重であり、現象は非一様、非定常、非可逆な場に生じるので理論や実験室のようなパラメータのコントロールも出来ない。従って現象の理解とその予知には恒に一定の乖離があることはやむを得ないであろう。

もう一つの特徴は、自然災害の多くが希現象であることである。激甚災害の再帰期間は数十年、数百年といわれ、我々の感覚からは喫緊の急とは思われないことも多い。しかし、昨今の大地震、神戸震災やスマトラ津波等を見ても希現象だという理由でそれを無視することは自然災害に関しては許されないことは明白である。**Freak Wave** による遭難事故のうち特に著名な 1980 年東シナ海において沈没した英国汽船 *Derbyshire* 号事故、同年北太平洋で喪失した日本のコンテナ船、尾道丸事故、1993 年の米国タンカー *USS Ramapo*（北太平洋において 34.1m の巨大波に遭遇）、1995 年の英国豪華客船 *Queen Elizabeth II*（北大西洋において 29m の巨大波に遭遇）等の海難からは 10 年が過ぎようとしているが、これは決してこの様な危険が過ぎ去った事を示すものではないことに注意すべきである。

4 Freak Wave 研究の起源

Freak Wave の研究はおおよそ 1980 年代前半に遡るものと思われる。その当時まで海洋波浪の研究は一方ではランダム現象の典型的なものとして統計的接近が行われ、他方個々の波の与える波浪荷重や非線形効果等については主に単一の規則波として取り扱われてきた。従って、不規則波中に現れる突発的ないし孤立的大波高波と言うようなものは直接の科学的研究対象となり難かったのは当然のなりゆきである。勿論この様な一種の異常波浪についてはそれ以前から多くの研究者や観察者によって言及されており特に海員の間では「一発大波」、「三角波（*Pyramidal Wave*）」等の呼称で何世紀も前から知られかつ恐れられてきた。それにも関わらず一般に異常波は目撃者の主観的報告、伝承の域を出ず、該当する波浪の信頼性のある計測等十分な科学的根拠を欠いていたためごく最近まで近代科学の恩恵に浴すること

が少なかったと言えよう。

Freak Waveについて初めて定量的な定義を与えたのは Per Klinting & Stig Sand (1987)⁹⁾によるものであろう。これを見ると考え方が現在のものとはちょうど反対になっているのが分かり、非常に興味深いので、その内容を簡単に紹介したい。

彼らはまず 1981 年 11 月 23 日に北海の Gorm field で得られた 5 分間の計測データを示し (全体では 0.3sec サンプルの 20 分計測 4096 点)、これが Freak Wave であるという前提から出発する。図 5 参照。波高は ZDC(zero down crossing)法で 15.9m と記述されている。後に Sand 等(1990)¹⁰⁾の論文では ZUC(zero up crossing)法で書き直してあり、それによるとこの最高波の波高は 17.8m 有義波高は 6.8m で、 $H_{\max}/H_s=2.6$ に相当している。しかしここで彼らの採用した Freak Waveの判別方法は次の 3 点である。

1. 最大波は孤立して現れている。
2. 最大波の峰の高さはその前後の波の峰の 2 倍以上である (実際には峰の高さは 12.1m で、隣の峰の 2.2 倍)
3. 峰の高さが波高の 0.65 倍を超えている。

すなわち、Horizontal Asymmetry $\mu_H = a_c/H = 0.76$ に相当し、Stokes の極限波での上下非対称性 0.75 より大きい。次に彼らはこの様な高い峰が実際に出現する確率を水位の Gauss 分布から計算している。その結果、4096 点の観測値のうち (少なくとも 1 つが) 12.1m を超える確率を大雑把に見積もってみるとその再現期間は数百年に相当する。またちなみに当該大波高波の波形勾配はおよそ 1/8.8 に達し、Stokes 波の極限波形勾配である 1/7 に迫るものであり、通常殆ど実現されることは考えられない (海洋波の波形勾配は 1/50 位が普通で極めて荒天時でも 1/20 を超えることは稀である)。

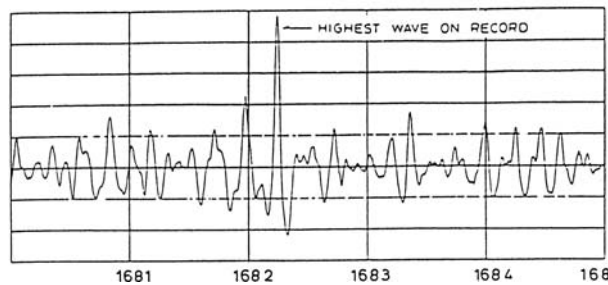


図 5 Gorm field で計測された FreakWave の典型
Klinting et.al. (1987)⁹⁾ 中のFig.1 より

次に Freak Waveの発生機構として初めて提案された Dean (1990)¹¹⁾の論文について紹介する。ここでは Freak Wave的な現象は単一方向波においてのみ現れるという Stansberg の示唆をもとに、Freak Waveの原因を規則波の非線形的重ね合わせに求めている。則ち同一波高で波長の異なる 2 つの Stokes 波を合成した場合を高次まで計算した結果、波高の合成値は線形重ね合わせの場合に比べ 6.1% 大きくなること、殊に峰の高さについては線形重ね合わせより 15.2% の増大となるとの結論を得ている。Freak 波に特有の峰の高さの異常性に着目した場合、考え得る種々の機構の内でもやはり波浪の非線形効果を見捨てることは出来ないと思われる。また同一論文において著者は「有義波高」との関係について言及している。有義波高の概念は考えているランダムな海象が定常確率過程であることを暗に予想しており、この仮定は一般に満足されることが少ない。ここでは統計的定常性がおよそ 4 時間程度と見積もってその間での一定な有義波高に対する最高波高の標本分布を計算し、2 つの量の比、 H_{\max}/H_s の最頻値 (Most Probable Value) が 2 であることを確認している。この議論がおそらくその後の Freak Waveの定義の起源になったのであろう。

我が国における Freak Waveの研究の先駆的なものは水力学と関連の深い海岸工学の分野にまず現れている。現在の視点から見ても極めて重要と思われるものは安田等 (1991, 1992)^{12) 13)}及び木村等 (1992)¹⁴⁾で、いずれも海岸工学論文集に所載されている。海洋波浪の研究手法として良く用いられるものに、

実海域観測例の解析、確率論的理論解析、数値シミュレーションの3つが上げられるが、この3論文はちょうどそれらのよい例となっている。先ず安田等（1992）¹³⁾では日本沿岸の7カ所の観測点（気象庁所管）における1985年–1990年の観測データが詳しく解析されている。ここで著者等は前述のSand等（1990）¹⁰⁾に従ってFreak Waveの criterion として波高が有義波高の2倍を超える $H_{\max}/H_s > 2$ を採用している。

観測データは概ね各正時から20分間の観測値であるため彼らは1回のデータの中の最大波の波高がそのデータの有義波高の2倍を超えるときこのデータをFreak Event とみなし、その出現割合をもってFreak Waveの出現確率としている。この論文の重要な結果のひとつはFreak Waveを単なる大規模波とせず、より一般的な規範の中でFreak Event を見ている点にある。それはFreak Wave出現確率の有義波高依存性の指摘であり、Freak Waveは有義波高の小さいときによく現れるが、最大波高が大きい時はそれがFreak Waveである確率が高いという興味深い成果を得ている。また安田等（1991）¹²⁾においては2次元問題として非線形ランダム波のシミュレーションを手がけ、典型的なFreak Wave形を得るなど今日の研究手法のさきがけとなっている。木村等（1992）¹⁴⁾では前記の1, 2, 3の条件を確率論的に定式化し、疑似非線形理論ながらFreak Waveが孤立して現れる確率を計算し、0.00155% という値を得ている。

5 Freak Wave 研究の目的と方法

海洋波研究の工学的側面として重要な目的の一つは船舶・海洋構造物周りの海洋環境としての実海域での短期（20分以下）、中期（数時間～数日）ならびに長期（10年～100年）における最大波を推定することである。第3節ではその様な推定に利用されてきた標準的方法を説明した。第5節において実海域で見いだされたFreak Wave という“風変わりな”大規模波の存在とその初期の研究について述べている。この様な突発的な大規模波浪が存在すれば従来の標準（線形）理論に基づく推定値は大幅な変更を余儀なくされる。

ここで浮かび上がってくる疑問は先ず第1にFreak Wave はどのような機構によって生成されるのか？次にFreak Wave の出現を予知するにはどうすればよいのか？に絞られるのであろう。またどうすればFreak Wave を効率的に観測できるか？も重要な未解決問題である。線形ガウス過程を放棄するとしてこれまでFreak Wave の成因として提案されてきたアイデアには次のようなものがある：

- ・ 海底地形の変化による波の収束
- ・ 海潮流の影響による波の収束
- ・ 風速の変化による波の収束
- ・ 水面波自身の非線形効果による波の自己収束
- ・ 非ガウス型ランダム過程としての水位の突出性

ここではこれらのうち3番目と4番目のモデルの可能性について筆者等の研究を簡単に紹介する。

海面での風速が大きいほど生成される波の波長も長くなる。もし風速が徐々に増大してゆくと、或いは進行方向に変化が生じると（サイクロン等）、波の主な進行方向に沿って波長が変化する。進行方向に波長が減少する場合には水面波としての分散性によって後ろの波が前方の波に追いつくようになり、分散性収束が生じる。理想的な場合にはこれによってFreak Waveに類似した孤立した巨大波が出現することが物理水槽およびそれを模擬した完全非線形境界条件を有する数値水槽内に出現することが示されている（I. K. Ten & H. Tomita 2005）¹⁵⁾。図6にその1例を示す。この手法はまたFreak Waveに遭遇した船体に働く急激な波浪荷重増大の実験にも用いられている（Waseda, et. al 2005）¹⁶⁾。水面の非線形波動の概要については第2節で簡単に説明したがそのうちNLS方程式は深水波のエンベロープの振る舞いを記述する方程式として最も本研究に関連が深い。Waseda et. al (2005)¹⁶⁾はこの様な観点から上記収束波の問題を取り扱っている。

またNLS方程式の厳密解の1つであるBreather解は単一の規則波のうちの1波が突然3倍の大きさになるという特異な性質を持ち、前記ソリトン解とともにFreak Waveのモデルとして有望なものである。図7参照。

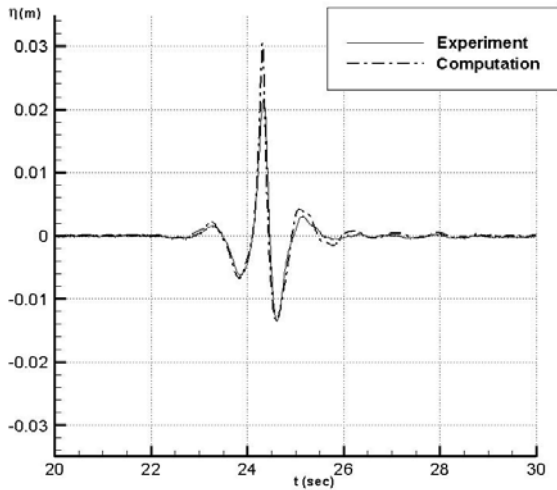


図 6 物理水槽並びに数値水槽に生成された収束波

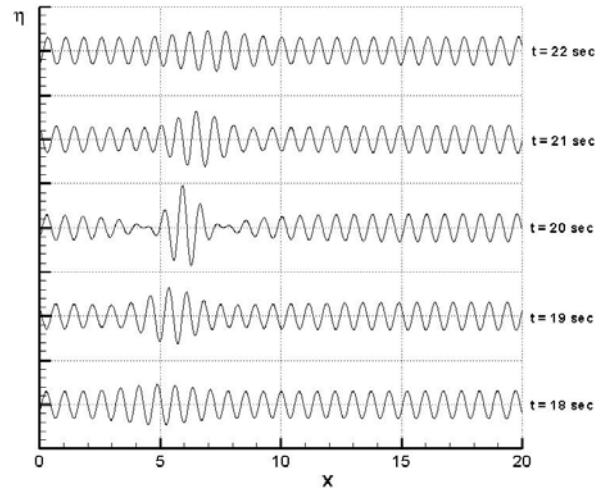


図 7 規則波列中に生じる Breather 解

6 Freak Wave の最前線

6-1 Freak Wave の観測例 北海の Draupner field で得られた孤立巨大波浪(最大波高 26m)の記録を図 8 に示す。

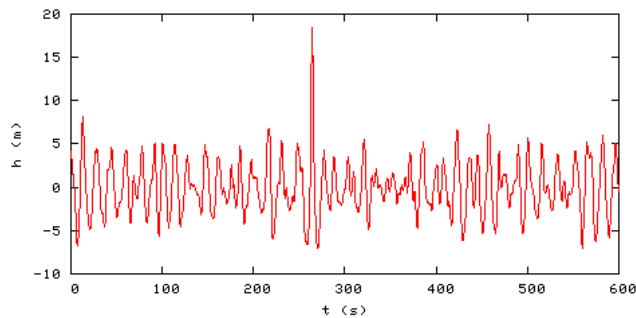


図 8 Draupner の New Year Wave, 1995 年 1 月 1 日

上図は先に掲げた Prototype at Gorm field とともに典型的な Freak Wave の観測例として有名なものである。この 2 例は何れもデンマークとノルウェーに近い北海石油プラットフォームにおいて観測されたものであるが、他の海域では観測されていないのであろうか？ここでは筆者等が解析した日本近海に出現した Freak Wave の観測例のうち典型的なものを図 9 に示す。この他にも、同様の異常な巨大波浪の観測例は北太平洋、北大西洋、メキシコ湾流域の大洋のみならずバルト海、黒海等の閉塞海域を含む世界各地の海域で報告されている。

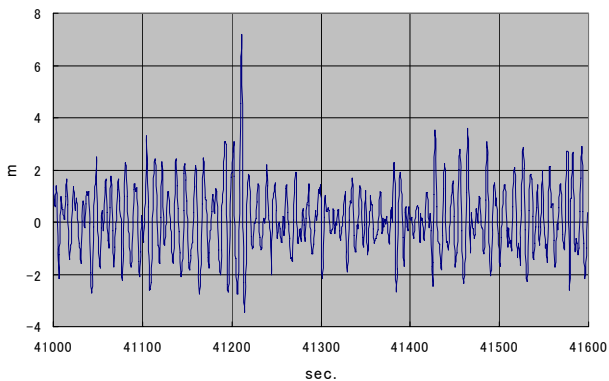


図 9 日本海由良沖に出現した Freak Wave
1988 年 1 月 9 日

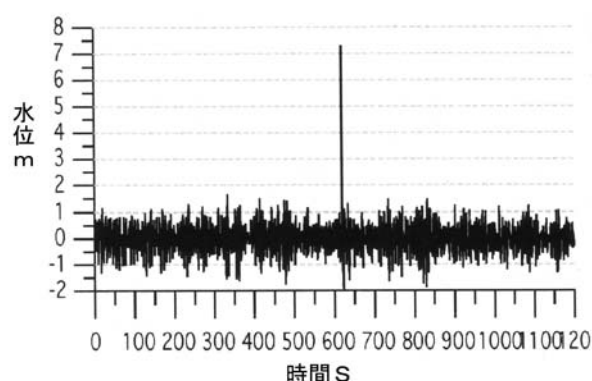


図 10 黒海 (Black Sea) で記録されたFreak Wave Lopatoukhin et al. (2004)¹⁷⁾より

図 10 に示された後者の記録は、当該現象が単なる偶然性によるものでないことを如実に示している。

6-2 諸外国における研究状況 1980 年代に実質的に立ち上がった Freak Wave 研究は 90 年代に入ってさらに加速されヨーロッパを中心に各国でプロジェクトが推進されるようになった。これをうけてフランスの国立海洋研究機構 (Ifremer) では世界の波浪研究者に呼びかけ Rogue Wave 2000 シンポジウムを Brest において開催した。日米欧 17 カ国から 74 名の研究者が参加したこのシンポジウムのセッション名を見ると当時の斯学における研究動向がわかるので下に掲げる。

Session 1. Design and Operation Problems Related with Rare or Unexpected Wave Events

Session 2. State-of-the-art Modeling of Surface Elevation and Near Surface Kinematics

Session 3. Observations and Measurements of Rogue Waves

Session 4. Possible Generation Mechanisms of Rogue Waves

Session 5. Numerical Modeling of Rogue Waves

Session 6. Physical Simulation of Rogue Waves

Session 7. Statistics for Extreme Waves

現在 Rogue Wave という言葉はFreak Wave とほぼ同じ意味に用いられている。またこの同じ年にヨーロッパ連合 (EU) 加盟で海に面した国々が協力して大規模海洋波浪、特に Freak Wave を研究するための国際プロジェクト MAXWAVE¹⁸⁾を立ち上げこれはその後 4 年間続いた。これらの活動が一段落した後 Ifremer は再び Brest において第 2 回目のシンポジウム Rogue Waves 2004¹⁹⁾を開催した。両者を比較するとこの 4 年間に内容が純粋な基礎的興味によるものから Freak Waveの予報・警報、Freak Waveの存在を前提とした設計基準の見直し等実務に直結した研究に動向がシフトしているのがうかがえる。研究面でも数値シミュレーションによる Freak Waveの生起確率の推定等これを支持する基礎データを提供するためのツールの開発が中心課題となってきている。

7 Freak Wave 研究の問題点

最近の数年にわたって世界中で Freak Wave に関する研究が脚光を浴び、それについて特化されたシンポジウムや講演会が相次いで開催されている。それにもかかわらず、この現象が完全に解明されているとは言いがたい。ここでは海洋波浪としての Freak Wave を研究する上での問題点について触れてみたい。まず、第一にあげられる疑問は、Freak Wave ははたして稀現象であるかという点である。たしかに Freak Wave が科学的に観測されるようになって日は浅く、観測例は極端に少ない。しかしながらこれは海洋における (特に外洋) 波浪の観測そのものが極めて希薄であるためでもある。現状では観測データから Freak Wave の統計を得ることは困難であると言えよう。しかしそれは実際に広大な海洋全域にお

いてこのような現象がしばしば起こっていると言う可能性を否定するものではない。Freak Wave についての全球的な Morphology は未だ確立されていないのである。

次に問題となるのは Freak Wave の定義である。現在最も多くの研究者に採用されているものは「20分間の全観測波のうち有義波高の2倍を超える最高波」とするものであるが、言うまでもなくこれは相対的かつ線形的定義である。このような最高波のうち実際危険なのは波高10m程度以上のものであろうし、逆に静穏時には波高2m程度の「Freak Wave」はかなり多く見られる。Freak Wave の出現機構は有義波高の大きさによって異なっている（非線形的）と考えねばならないとすれば、この定義は実用上便利ではあるが科学的には不十分である。

第三に、上述したような海洋波浪観測の困難さからそれに変わる方法として用いられる研究方法としての理論モデル、数値シミュレーション、物理水槽実験の仮定と現実の海洋の波浪環境との乖離の問題がある。これらの研究方法は従来の海洋学、海洋工学の研究には非常に有効であり、重要な役割をはたしてきたが、ここでは海洋波浪の方向性、ランダム性、砕波の存在、変動風応力等の海洋波浪に固有の性質を無視するか、個別に取り上げることによって研究を推進してきたといえる。非線形過程としての Freak Wave の成因機構に対してこれらの条件を有効に取り入れることは現代の数理解析、コンピュータ技術、水槽施設等をもってしても必ずしも容易ではなく、今後一層の breakthrough を要するものと考えられている。

最後に、実用的な Freak Wave の予測を外洋上で可能とするためには単にその発現の流体力学的機構を理解するのみならず、それを何らかの実行可能な観測手段によって得られるようなバルクな観測量ないし統計量によって置き換えることが必要である。その可能性のひとつとして現在すでに実用化されている非線形波浪推算モデルの活用が考えられるところであるが、波浪スペクトルを出力とするこのような統計力学的モデルに対して個々の波を問題にする解析力学的な Freak Wave の理論との間にどのような橋渡しを行って、有効な前兆現象を抽出することが出来るかという点に工学的な課題がある。

8 結語

大洋中に忽然と現れる大規模波浪、特にその突発性と孤立性によって船舶や海洋構造物に甚大な被害を与えている Freak Wave の研究の歴史と現状、筆者等の研究成果の一部ならびに将来における研究と実用化に向けての構想について述べた。

ここで扱われるような海洋学的研究が海洋波浪の統計とその異常の解明という課題を介して水力学の一分野である水面波の研究と深く結びついていることを示した。また一方では Freak Wave の存在は自然災害としてそのグローバルな観測と解析が必要である。第8節では地球規模の Freak Wave 予測・回避システムの構築について筆者等の抱いている構想の一端を紹介した。このような研究を通して実際の課題に対して基礎研究の結果を直接活用（例えば IST 等の純粋数学的理論と海洋大規模波浪の予測という、優れて実用的観点）することの重要性を認識し、さらにはグローバルな海洋空間利用の推進に対する水力学分野からの貢献のひとつの端緒を得ることが出来れば幸いである。

引用文献

- 1) H. Jeffreys: On the formation of water waves by wind, Proc. Roy. Soc. London, A 107 (1924)
- 2) O. M. Phillips: On the generation of waves by turbulent wind, J. Fluid Mech., 2 (1957)
- 3) J. W. Miles: On the generation of surface waves by shear flows, J. Fluid Mech., 3 (1957)
- 4) T. Kawamura: Numerical simulation of 3D turbulent free surface flows, PhD Thesis, U. Tokyo (1998)
- 5) B. Kinsman: *Wind Waves* (Prentice Hall, 1965)
- 6) 光易恒: *海洋波の物理* (岩波書店, 1995)
- 7) M. S. Longuet-Higgins: On the statistical distributions of sea waves, J. Marine Res., XI-3 (1952)
- 8) P. Boccotti: *Wave Mechanics for Ocean Engineering*, Elsevier Science (Oxford, 2000)
- 9) P. Klinting & S. Sand: Analysis of Prototype Freak Waves, Proc. Spec. Conf. Near-shore Hydrodynamics (1987)

- 10) S. Sand, N. E. Ottesen Hansen, P. Klitting, O. Gudmestad & M. J. Sterndorff: FREAK WAVE KINEMATICS, Water Wave Kinematics, (1990)
- 11) R. Dean: FREAK WAVES: A POSSIBLE EXPLANATION, Water Wave Kinematics, (1990)
- 12) 安田孝志、伊藤一教、森信人：非線形不規則波列における Freak Wave とその特性, 海岸工学論文集 38 巻(1991)
- 13) 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 39 巻(1992)
- 14) 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 39 巻 (1992)
- 15) I. K. Ten & H. Tomita: Creation and annihilation of extremely steep transient wave, ISOPE2005 (2005)
- 16) T. Waseda, C-K. Rheem, J. Sawamura, T. Yuhara, T. Kinoshita, K. Tanizawa & H. Tomita: Extreme Wave Generation in Laboratory Wave Tank, ISOPE2005, (2005)
- 17) L.J. Lopatoukhin, A.V.Boukhanovsky: FREAK WAVE GENERATION AND THEIR PROBABILITY, Int. Shipbuild. Progr., 51, no. 2/3 (2004)
- 18) MAXWAVE HP: <http://w3g.gkss.de/projects/maxwave/>
- 19) Rogue Waves HP: <http://www.ifremer.fr/web-com/stw2004/>