

外洋に突発的に現れる異常波の発生と気象条件

早稲田卓爾*

要 旨

波浪スペクトルが狭くなり、波長と波向きがそろった時にフリーク波の発生頻度が高くなるのが水槽実験などの結果からわかってきた。しかしながら、そのような波浪場は現実的な海では非常に稀である。どのような気象条件下でそのような特殊な波浪場が形成されるのか、二つの海難事故時の波浪場の解析結果を紹介する。また、フリーク波の発生と概況的な気象場との関係について、北海油田における波浪計測の分析結果を紹介する。

緒 言

外洋に突発的におきる異常波 (abnormal wave) は、様々な呼称を持つ。フリーク波 (Freak Wave) は日本語としてもよく使われるが、直訳すると気まぐれ波となる。また、日本語としてはあまり浸透していないが、欧州ではRogue Wave (はみ出し者、ならず者の波) という言葉がよく使われる。台湾では、瘋狗浪 (日本語訳は狂犬波、英語訳はMad-dog wave) と呼ぶ。いずれも、予期せぬ波が突発的に現れることを示唆しており、科学的には統計上稀である波を意味する。唯一日本語では波の形状を暗示する、三角波という呼称が使われる。本論文では、以降、異常波を総称してフリーク波と呼ぶ。科学的にはフリーク波は形状ではなく波浪統計に基づき、有義波高の2倍または2.2倍の波高を持つ波と定義される。線形理論では波浪スペクトルが狭い場合、波高が有義波高の2倍を超えるフリーク波は3,000波に一度の頻度、2.2倍を超える波は16,000波に一度の頻度で出現する。この中で、波高数十mを越える巨大波の発生確率は1万年に一度とも言われている。なぜなら、有義波高が10m以上となること自体が確率的に稀だからである。しかし、北海油田や衛星合成開口レーダーによる観測で、波高30m近い波浪が実測されると、そもそもの波浪統計理論が修正されなければ到底説明できないと考えられるようになった。

フリーク波と巨大波が混同されることが多い。フリーク波は上述のように、周りの波 (有義波高) に対してどれだけ大きいかで定義されるので、例えば、有義波高50cmの海域で波高1mの波が観測されれば、それはやはり

フリーク波と呼ばれる。形状についての報告は様々である。日本語の三角波という言葉は、円錐形の波形を想起させるが、例えば衛星画像で捉えられたフリーク波は、どちらかという波の頂の長さが長い2次元的な波である (Lehner et al.⁽⁹⁾)。三角波という言葉は現在でも新聞報道等で盛んに使われるが、これは、主に本文で詳細に紹介する1980年の尾道丸海難事故調査が、2方向からうねりが交差したことが巨大波生成原因と報告したからであろう (Yamamoto⁽²³⁾)。すなわち、ふたつの正弦的な波が交差すると、ひし形に波高の高いところと低いところが周期的に現れ、一つ一つの波形はピラミッド状になるからである。後述するように、尾道丸事故時の波浪場は必ずしもふたつのうねりが混在した状況と結論付けることはできない。確率的に稀な波という定義を明らかにした上で、フリーク波と呼ぶことが適切と思われる。三角波はフリーク波の日本語訳と解釈するのが正しい。

波形については現在でもわかっていないことも多いが、フリーク波は単独で周囲の波より突出するわけではなく、複数の波の連なり (例えば3波) として現れると報告されている。これは、非線形波動論で盛んに研究されている波群の特徴と類似する (Donelan et al.⁽⁵⁾)。波群とは、正弦波のように振幅が一定で無限に連なる波列ではなく、振幅が有限長で減衰する、有限数の波の群れを指す。これは、古典的な光の波動説と粒子説の議論を想起させる。エネルギーを保持し、エネルギーが運動量と伝播速度で定まること (エネルギー = 運動量 × 位相速度) から、波群はまさに粒子のように振舞うと言ってよいであろう。このような波の粒子性は自由表面の弱い非線形性に起因することがわかっている。

弱い非線形性が波の分散性に対してどれだけ重要かは、スペクトル形状から推定でき、フリーク波の発生頻度と関係があることがわかってきた (Janssen⁽⁸⁾, Onorato et al.⁽¹³⁾, Mori & Janssen⁽¹²⁾)。これは、ストークス波の不

2009年9月7日受理

* 東京大学新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻

安定 (Benjamin and Feir⁽³⁾) と密接な関係があり、深海重力波の 4 波共鳴条件を満たさない波の組み合わせの相互作用 (準共鳴相互作用 quasi-resonance) に起因すると考えられる。さらに、ここ数年で波浪スペクトルの方向分散性が狭くなり波の頂の長さが長くなるに従い、準共鳴相互作用の相対的な強さが大きくなり、フリーク波の発生頻度が高まることがわかってきた (Gramstad and Trulsen⁽⁶⁾, Waseda et al.⁽²⁰⁾, Onorato et al. 2009^{(14), (15)}). これらの研究の基礎は Alber⁽¹⁾ や Yuen and Lake⁽²⁴⁾ の自由表面波の非線形波動理論研究の成果として 20 年以上前に確立されていたが、そのような特殊な波浪場 (非常に急峻な波浪スペクトル) が現実的にありえるとは思われず、実現象との繋がり希薄であった。フリーク波の存在が確かになるに従い、にわかにはこれらの研究成果が見直されたが、依然として急峻な波浪スペクトルの形成過程は謎である。本論文では、そのような特殊な波浪スペクトルがどのような気象条件で起こりうるかということ、二つの海難事故時の気象・波浪場の解析と、北海油田での観測結果から概説する。2 節でフリーク波の発生機構とそこから導かれる指標についてまとめ、3 節で二つの海難事故時の気象条件・波浪場、4 節で北海油田波浪時系列解析についてまとめる。以上の解析から成り立つ仮説を実証するための観測計画を 5 節で紹介する。

1. フリーク波発生のメカニズムと指標

ストークス波 (有限振幅波) が擾乱に対して不安定であるということは、長水槽において実験的に Feir により発見され、後に Benjamin により理論的に証明された (Benjamin and Feir⁽³⁾). 長水槽で造波された規則波の伝播に伴い、振幅が自然に変調し、やがて、数波の群れとなって進行するという現象は、後に水面波だけでなく多くの非線形波動現象に共通に現れる、普遍的な現象であることがわかった。水面波においては、Benjamin-Feir 不安定は自由表面重力波の 4 波共鳴と密接な関係があることが示された (Phillips⁽¹⁶⁾). すなわち、主波と二つの側帯波 (擾乱) とでなす周波数と波数の組み合わせが、4 波共鳴条件から微小にずれるため、有限振幅による位相の変化と共鳴デチューニングとが相殺し、擾乱は指数関数的に成長するのである：

$$\left. \begin{aligned} k_0 + k_1 &= k_2 + k_3 \\ \omega_0 + \omega_1 &= \omega_2 + \omega_3 \end{aligned} \right\} \text{4 波共鳴条件}$$

$$\left. \begin{aligned} k_0 + k_1 &= k_2 + k_3 \\ \omega_0 + \omega_1 &= \omega_2 + \omega_3 + \Delta\omega \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{共鳴デチューニング} \\ \Delta\omega \text{ の導入} \end{array} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} 2k_0 &= k_+ + k_- \\ 2\omega_0 &= \omega_+ + \omega_- + \Delta\omega \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Stokes 波 } (\omega_0, k_0) \text{ の不安定,} \\ \text{主波と側帯波} \end{array}$$

側帯波は主波に対して角度を持つことができ、その成長率は擾乱波数に依存する (McLean⁽¹¹⁾, Crawford et al.⁽⁴⁾).

Alber⁽¹⁾ は Benjamin-Feir 不安定を不規則方向波の安定性理論へと発展させ、非常に急峻な波浪スペクトルが、ある条件下では不安定であることを示した。また、準ガウス過程に従う不規則方向波に関しては、(1) の共鳴デチューニングを考慮した Zakharov 方程式 (Zakharov⁽²⁵⁾, Benny⁽²⁾ は共鳴 4 波に対する式) から、高次の統計量 (Skewness, Kurtosis など) の発達方程式が導かれることが示された (Yuen and Lake⁽²⁴⁾). すなわち、確率変数としての水位の高次モーメントは不変ではないのである。これらの成果は、非線形波動理論における重要な結果であるが、近年まで海洋波への適用は考えられていなかった。Janssen⁽⁸⁾ はモンテカルロシミュレーションにより Zakharov 方程式を不規則直進波について解き、フリーク波の発生頻度が波形勾配とスペクトル周波数バンド幅に依存すること、時間とともに Kurtosis が増大することを数値的に示した。この結果は、直進波の水槽実験により実証され (Onorato et al.⁽¹³⁾), Mori and Janssen⁽¹²⁾ は、フリーク波の発生頻度を Kurtosis の関数として定式化した。

しかしながら、直進波 (波の頂の長さが無限大) に関するこれらの結果は、方向分散性を考慮した数値シミュレーション結果とは矛盾する (Soquet-Juglard et al.⁽¹⁸⁾). すなわち、現実的な海洋波の方向スペクトルを考慮すると、Kurtosis の増大 (すなわちフリーク波の発生頻度) は、波形の非対称性に起因する、束縛波の生成のみで説明できるのである。このような一見相反する結果は、フリーク波の発生頻度が波形勾配、周波数バンド幅に加え、方向分散性に強く依存するということが説明が出来る。即ち、方向分散性が狭まるに従い、準共鳴相互作用 (式 (1) の共鳴デチューニングが重要となる時間における波浪間の相互作用を総称する) の効果が、共鳴相互作用の効果より卓越するのである (Waseda et al.⁽²¹⁾). 結果として、フリーク波の発生頻度は方向分散性の関数となる (Gramstad and Trulsen⁽⁶⁾, Waseda et al.⁽²⁰⁾, Onorato et al.^{(14), (15)}). その結果、Janssen⁽⁸⁾ により提唱されたフリーク波発生指標である *BFI* (Benjamin-Feir Index) は、周波数バンド幅を Alber により提唱された Effective Wave Number に置き換えることで、拡張できる (Waseda et al.⁽²⁰⁾):

$$BFI = \frac{\varepsilon}{\delta\omega/\omega} \quad (2)$$

$$BFI_{eff} = \frac{\varepsilon_{eff}}{\sqrt{(\delta k/k)^2 - 2(\delta l/k)^2}}$$

詳細は Waseda et al. (20) にゆだねるが、不規則波浪スペクトルの形状と $(\delta k, \delta l)$ との関係は任意であり、現実的な波浪場に適用するためには、現場計測に基づく、詳細な検討が必要であろう。

水槽実験（東京大学生産技術研究所海洋工学水槽）からは、 BFI_{eff} と波列の変調の度合いを示唆する Kurtosis とは良い相関があることが示された (Fig. 1)。この成果を受け、これまで着目されてきた波形勾配と周波数バンド幅（その比が BFI ）ではなく、周波数バンド幅：

$$Q_p = 2m_0^2 \int_0^\infty \sigma \left[\int_0^{2\pi} F(\sigma, \theta) d\theta \right]^2 d\sigma \quad (3)$$

$$m_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

と方向分散性：

$$\sigma_\theta = \left[2 \left\{ 1 - \left(\frac{a^2 + b^2}{E^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$a = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \cos(\theta) F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (4)$$

$$b = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \sin(\theta) F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

をスペクトル形状 $F(\sigma, \theta)$ を代表する指標として、二つの海難事故例について、第三世代波浪モデルにより推定された波浪場を解析した。

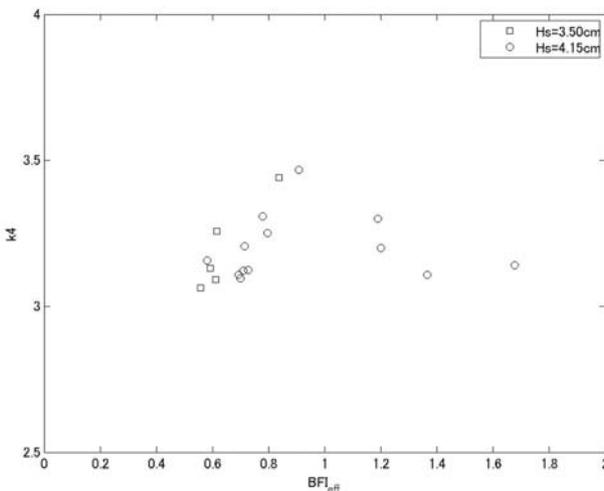


Fig. 1 Kurtosis plotted against the effective Benjamin-Feir index (2b) for random directional wave of average wavelength 1m and significant wave height $H_s=4.15\text{cm}$.

2. 海難事故時の気象条件について

本節では、二つの海難事故時の波浪場と気象条件の再解析結果を要約する。海難事故（転覆）は様々な要因で起こり、操船ミス、船舶の設計上の問題、他の船舶や海洋構造物との衝突など、波浪以外の原因も考えられる。以下の解析は飽くまでも、二つの海難事故時の波浪場の特殊性と気象条件についての概説であり、事故要因を特定するわけではない。また、フリーク波は有義波高の2倍を超える波と定義され、平均的な海況でも、稀ではあるが、存在する。さらに、仮に船舶がフリーク波に遭遇しても、必ず転覆するとは限らない。このように考えると、以下の解析は、フリーク波が起こりやすい波浪場であることを示唆するだけであり、決して船舶がフリーク波に遭遇したことを決定付けるものではないことに注意が必要である。

2.1. 海難事故時の気象・海象条件 — 寿和丸事例

巻網漁船第58寿和丸 (135 t) 事故当時の詳細な海況・気象場の解析結果を Tamura, Waseda and Miyazawa (19) から引用し紹介する。2008年6月、犬吠崎東350kmほど沖で、第58寿和丸は転覆し、沈没した。新聞速報で、早くから三角波との遭遇が指摘されたが、シーアンカーの影響などそのほかの要因も検討されている。下記に記載する波浪場の特性は、海洋波と気象場との関係という観点からも、また、力学的にも特異な現象ではあるが、確率的にフリーク波の発生しやすい海況であったということを示唆するに留まる。

波浪追算は第三世代波浪モデル WAVEWATCH III™ を基盤とする、太平洋 (1度格子)、日本近海 (1/4度格子)、事故海域周辺 (1/16度格子) の3重ネスティングモデルにより行った。非線形伝達項の数値解法を改善し (SRIAM法採用)、事故海域周辺は気象庁 MSM の高解像度 (およそ 1/10度格子) 風応力場と、海洋研究開発機構 JCOPE2 (1/10度格子) 海流再解析値によって駆動する。この解析結果から二つのことがわかる。ひとつは、事故前後で波浪スペクトル形状が急速に変化し、事故当時に最も狭く急峻なスペクトル形状となったこと、二つ目はそのスペクトルの発達が梅雨前線と低気圧の通過とこの時期の日本近海特有の気象条件に起因することである。前者については、Tamura, Waseda and Miyazawa (19) に詳しいので詳細は省くが、スペクトル形状の変化を特徴づける $Q_p - \sigma_\theta$ 図を引用する (Fig. 2)。軌跡はスペクトル形状の時間変化を示しており、第4象限 (右下) に近づくほど、周波数バンド幅、方向分散性共に狭くなり、フリーク波の発生頻度が高くなることを示唆している。事故時にはまさにフリーク波が発生しやすくなっていた

ことがわかる。ただし、絶対値としての方向分散性は広く、水槽実験で示されたフリーク波が発生しやすい条件とは定量的には合致しない。

ここでは、少し詳しく事故現場の気象場を概説する (Fig.3)。低気圧の通過に伴い梅雨前線が南下し、現場付近では事故前後に低気圧に伴う寒冷前線が通過した。前線の通過に伴い、現場での風速は 6 m/s から 16 m/s に 24 時間で上昇し、やや風速が低下した時点で海難事故が発生した。この間、有義波高はおよそ 2 m から 4 m へ上昇する。事故時、現場付近の風向は南風が卓越していた。波浪場は時間とともに急速に変化する。はじめは太平洋からのうねりと、梅雨前線に沿って生成される南西からのうねりが互いに影響することなく混在していたが、やがて、現場での風が強くなるにつれ、局所的に生成された風波がさらに重なる。生成された風波は風速の上昇に伴い、波長が長くなり、波高も増大する。やがて、梅雨前線に伴う南西からのうねりと周期が近づき、進行方向がおよそ 30 度ずれるという条件が満たされたとき、急速に風波からうねりへとエネルギーが伝達された。このようなうねりと風波の相互作用は、Masson⁽¹⁰⁾の理論と類似する (Tamura et al.⁽¹⁹⁾)。即ち、風波とうねりが共存するとき、うねりが指数関数的に成長し、その成長率は進行角度がおよそ 30 度、周波数が 1 割弱異なるときに、最大となるのである。事故時のうねりと風波の関係はおよそ最大成長条件を満たしており、梅雨前線と低気圧の通過という複雑な気象条件下で、このような特異な波浪場が形成されたということは、非常に興味深い。しかしながら、このような気象条件はフリーク波発生の必要十分条件ではなく、フリーク波が発生しやすい波浪場の形成は、様々な気象条件下で起こると考えられる。

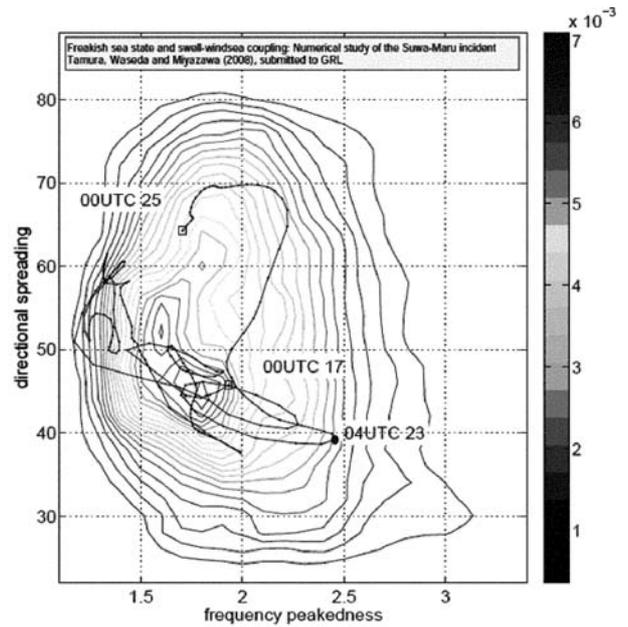


Fig.2 Joint probability density function of frequency peakedness and directional spreading (contour). The trajectory represents temporal evolution of the sea-state before and after the Suwa-maru incident on 04UTC 23.

2.2. 海難事故時の気象・海象条件 —尾道丸

前節の漁船の転覆事故は、本稿の執筆時期には、転覆の直接的な原因は判明していない。従って、実際にフリーク波が起きたかどうかはわかっていない。一方、1980年12月、野島崎沖東方1500kmで起きた尾道丸の事故は、大型貨物船の船首が折損するという異常事態から、事故原因解明のための船体の構造解析が徹底的になされ

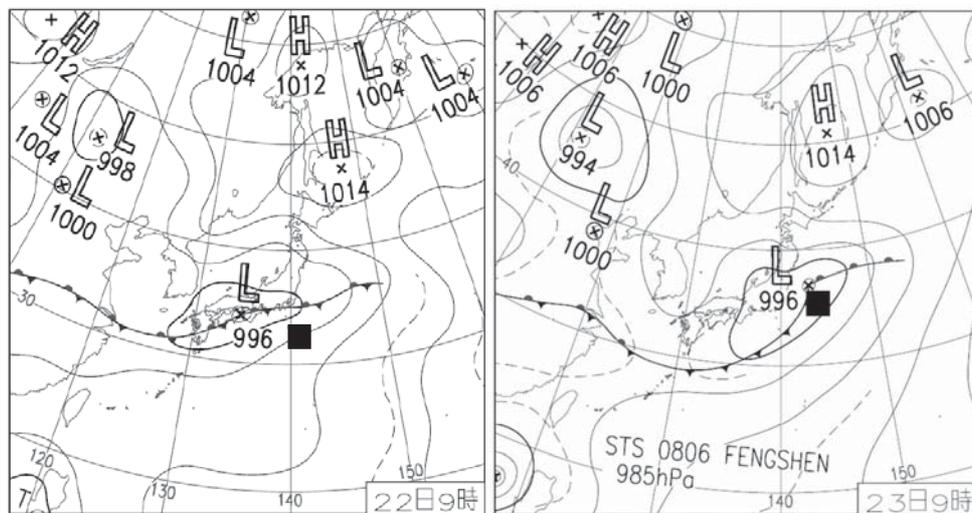


Fig.3 Weather maps of the day before the accident (June 22, 9:00AM left) and at the time of the accident (June 23, 9:00 right). The solid square denotes the estimated accident site.

た。その結果、20mを超える大波に船体が乗り上げ、船底が海面をたたくというスラミングによる衝撃荷重によって船首が折損したと結論づけた。その当時の有義波高はせいぜい8~9m程度と言われ、従って、20mを超える波はフリーク波である。しかしながら、その当時はフリーク波という概念がまだ確立されていず、巨大波の生成原因は2方向からくるうねりの交差によるものと説明された。正弦的な波が交差すると、空間的には波高が高いところと低いところが、ひし形に分布し、波形はピラミッド状になる。その形状の特徴から、三角波とも呼ばれた。しかしながら、今回改めて行った波浪再解析の結果は、この事故調査報告とは異なり、むしろ、波形は波の頂の長さが長い直進波であったことがわかった。

波浪場の解析は、前述の事故事例と同様にWAVEWATCH IIITMを基盤とした、太平洋からの3重ネスティングにより、事故海域の高解像度波浪推算を行った (In et al.⁽⁷⁾)。その結果、事故当時の海況は、およそ二日間、卓越する波の周期が変わらず (12秒ほど)、波高だけが上昇するという異常な状況であることがわかった。波浪スペクトルは単峰的で、従って、波形勾配、周波数バンド幅、方向分散性などの危険指標の全てが、事故時に最も危険な状況になることがわかった。波高の上昇に伴う周波数ダウンシフトが起きないという特殊な状況で、それは、波浪スペクトルの伝達関数の特異な形状にも表れている (詳しくは、In et al.⁽⁷⁾)。従って、船体の構造解析から類推された20mの大波は、波浪スペクトルが急峻になりフリーク波が発生しやすい条件下で生成されたことが類推される。再解析で得られた有義波高の分布は、当時の波浪解析図と良く似ており (Fig.4)、事故現場の北

には西からのうねり、南には北西からのうねりが存在する。しかしながら、事故現場ではそれらのうねりは混在していないことが、今回の解析で判明した。波形はむしろ2次元的であったと想定される。

このように、事故時に波浪スペクトルが急峻化していたという点では、前節の漁船事故時の波浪場と共通であるが、波浪スペクトルの発達過程という点では全く異なる。尾道丸事故が発生した冬季は、季節風である西風が卓越する。当時、事故現場では、風速10m/sを越える西風が徐々に上昇し、事故時には18m/sほどになった。空間的にはおよそ2000kmに渡って西風強風域が分布し、その風況が全体的に東に移動していることがわかる (Fig.5)。このような風速の空間分布と、その移動速度の関係で、ちょうど事故海域での波浪の周期が変わらず、波高だけが上昇するという特異な状況が生じたのではないかと推測される。

3. 北海油田におけるフリーク波発生と気象条件

二つの事故時の海況解析から、フリーク波の発生しやすい波浪場は、特定の気象条件と関連があることがわかった。気象場は常に変化しており、二つの事故時の気象場自体が異常であったわけではないが、フリーク波の発生しやすい波浪場が生じやすい気象場というのは存在しうるだろう。そのような観点から、北海油田で計測された波浪データに基づき、大気データを分析した (Waseda et al.⁽²²⁾)。

北海ノルウェー沖にあるKvitebjornプラットフォームにて、2003年から2005年に測定されたおよそ2700サンプル

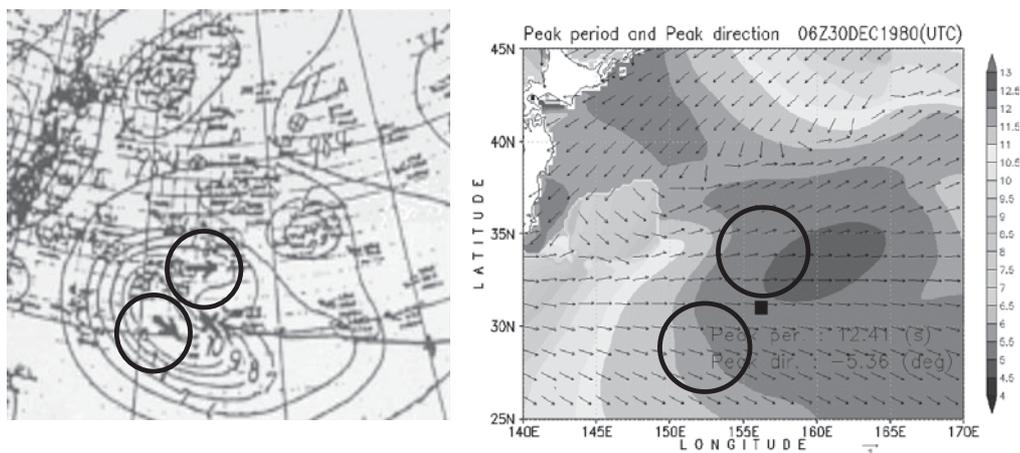


Fig. 4 Wave chart at the time of the Onomichi-maru incident in 1980 (left). The contour indicates the significant wave height. The circled arrow indicates two dominant wave propagating direction in the vicinity of the accident site (cross). The reanalyzed wave field (right) is quite similar to the historical wave chart (contour indicates the wave period and the arrow indicate the wave propagation direction). The circles indicate the wave systems corresponding to those of the left figure. The solid square is the accident site.

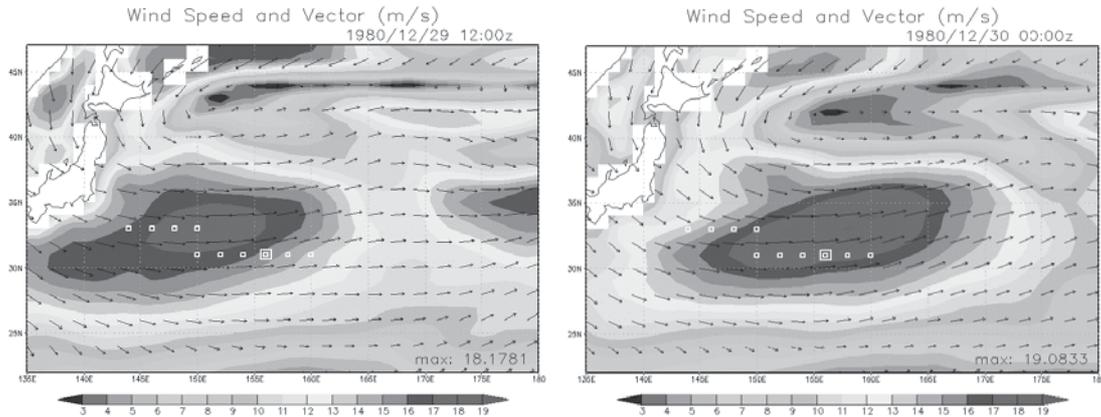


Fig. 5 Wind speed (contour) and wind vector field (arrow) before the Onomichi-maru accident (left, 12/29/1980 12:00z) and at the time of the accident (right, 12/30/1980 00:00z). The large square indicates the estimated accident site.

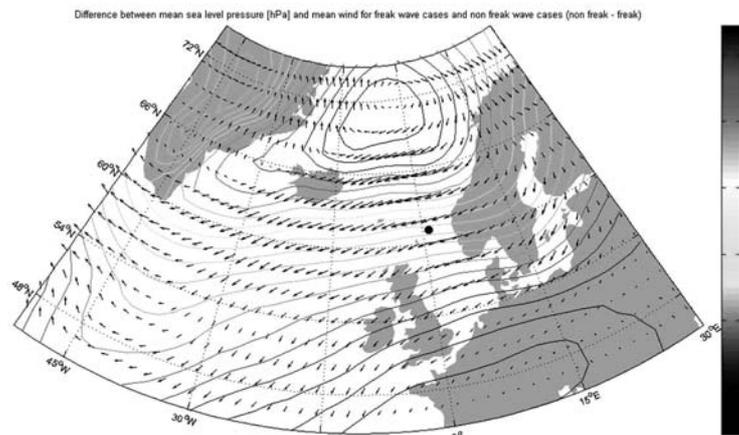


Fig. 6 The sea level pressure (SLP) difference between the cases with freak waves observed in a day and the cases without freak wave (Iceland low and the Azores high are strengthening). The arrow indicates the mean wind vector difference where the cyclonic circulation of the Icelandic low is weaker for the non-freak wave cases.

ルの20分間波高時系列データを解析した。このうち、57ケースでフリーク波（有義波高の2倍を超える）が見つかった。20分間のサンプルの取得頻度は一定ではないので、日によってサンプル数は異なる。およそ100日相当のデータがあり、そのうち36日にフリーク波が観測された。フリーク波が観測された日と、観測されなかった日を場合分けの基準として、条件つき平均を大気・波浪の各種物理パラメータについて求めた。その結果、海面気圧（Sea Level Pressure）の概況的な分布に有意な差が見られ、そのほかの変数（平均風速、有義波高）には有意な差は見られなかった（Fig.6）。フリーク波が観測された日は、アイスランド低気圧とアゾレス高気圧が強化され、北海からノルウェーに吹く西風が強化されていることがわかる。この気圧差は、一見、北大西洋振動（North Atlantic Oscillation NAO）を想起させるが、最大波高と

有義波高の比（Abnormality Index AI）とNAOの相関は低い。一方で、海面気圧の平均値（62.5N-70N、20W-15Wと44N-45N、27.5W-2.5E）の差はAIと高い相関（0.48）があることがわかった。また、Kvitebjornプラットフォームで直接測定された風速とAIとの相関は低いが、その日の最大風速とAIとの相関は高く（0.46）、突風が吹きやすい条件下でフリーク波の発生頻度が高くなった可能性が示唆される。

ノルウェー沖には、突風（20m/sを超える風速）の発生頻度が高い海域が広がっている（Sampe & Xie⁽¹⁷⁾）。その理由は、ノルウェーの急峻な山岳に風がぶつかることが原因と推測している。従って、概況的な気圧分布の変化（もしくはアイスランド低気圧の強化）に伴う風向きや風速の変化が、局所的に地形との相互作用で強化され、突風がふきやすくなり、そのときにフリーク波が発

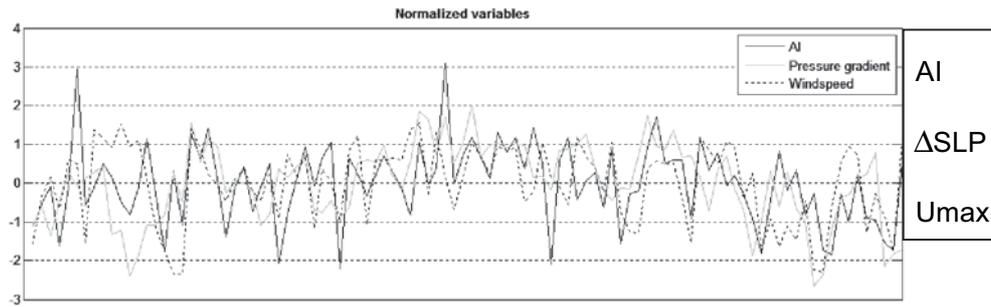


Fig. 7 The correlation of the three parameters, AI (Abnormality index defined as H_{max}/H_s), ΔSLP (difference of the mean pressure in regions 62.5N-70N, 20W-15W and 44N-45N, 27.5W-2.5E), and the maximum wind speed U_{max} . The horizontal axis is arbitrary (placed in chronological order of the dates when the samples were taken).

生しやすい海況が形成された可能性が考えられる。今後、より詳しい風の場と波浪の調査を行う予定である。

4. 黒潮続流における観測計画

海難事故時の波浪場、北海の実測波形と気象場との関連から、ある特定の大気の状態とフリーク波の発生しやすい海況とが相関があることがわかった。しかしながら、海難事故事例では波形の実測値が無い、北海計測では方向スペクトルの実測値が無いなど、概況的な気象場と局所的な波浪場との間には、まだ、情報が欠如している。そこで、黒潮続流北側の海洋研究開発機構の定点観測ブイ（北緯38度、統計146度、水深5400m、K-Triton）を利用して、波浪の長期計測を計画している。GPSにより緯度・経度・高度を直接測定し、各種統計量の推定およびイベント時の時系列送信を行う。また、漂流型GPS波浪ブイに風速計を設置し、K-Tritonの周辺で同時観測を行う予定である。その際には、衛星合成開口レーダーによる観測や現在準備している高解像度・高精度波浪予測モデルとの相互比較をおこなうことにより、フリーク波発生機構の解明を目指す。

5. まとめ

本稿では、水槽実験などからの帰結である「波浪スペクトルが狭くなり、波長と波向きがそろった条件下でフリーク波の発生頻度が増大する」という仮説に基づく、日本近海海難事故時の波浪場と北海における波浪場の解析例を紹介した。いずれも、数日で変化する気象場の影響で波浪場が短期間に大きく変化し、その中で、フリーク波の発生頻度が変化することを示唆している。今後、実際にフリーク波が発生しやすいと思われる危険海域での実証を行う予定である。

謝 辞

この研究報告は、東京大学木下健、因和久、上智大学富田宏、海洋研究開発機構田村仁、宮澤泰正、ベルゲン大学Matilda Hallerstigらとの共同研究の成果に基づく。以上は、学術振興会科学研究費補助金の補助により行われた。

参考文献

- (1) Alber, I. E. (1978): The effects of randomness on the stability of two-dimensional surface wavetrains. *Proc. R. Soc. Lond. A*, **363**, 525-546.
- (2) Benny, D. J. (1962): Nonlinear gravity wave interactions. *J. Fluid Mech.*, **14**, 574-584.
- (3) Benjamin, B. and Feir (1967): The integration of wave trains on deep water, Part 1. Theory. *J. Fluid Mech.* **27**, 417-430.
- (4) Crawford, D. R., B. Lake, P. G. Saffman and H. Yuen (1981): Stability of weakly nonlinear deep-water waves in two and three dimensions. *J. Fluid Mech.*, **105**, 177-191.
- (5) Donelan, M. A., M. S. Longuet-Higgins and Turner (1972): Periodicity in whitecaps. *Nature*, **239**, 449-451.
- (6) Gramstad, O. and K. Trulsen (2007): Influence of crest and group length on the occurrence of freak waves. *J. Fluid Mech.*, **582**, 463-472.
- (7) In, T. Waseda, K. Kiyomatsu, H. Tamura, Y. Miyazawa, K. Iyama (2009): Analysis of a marine accident and freak wave prediction with an operational wave model. Proceedings, June, ISOPE-Osaka.
- (8) Janssen, P. A. E. M. (2003): Nonlinear four-wave

- interactions and freak waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 863-884.
- (9) Lehner, S., Schulz-Stellenfleth, J., Niedermeier, A. (2002): Detection of extreme waves using synthetic aperture radar images, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. *IGARSS '02. IEEE International*, 24-28 June, 3, 1893-1895.
- (10) Masson, D. (1993): On the nonlinear coupling between swell and wind waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **23**, 1249-1258.
- (11) Mclean (1982): Instabilities of finite amplitude water waves. *J. Fluid Mech.*, **114**, 331-341.
- (12) Mori, N. and P. A. E. M. Janssen (2006): On Kurtosis and occurrence probability of Freak Waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **36**(7), 1471-1483.
- (13) Onorato, M., A. R. Osborne, M. Serio, L. Cavaleri, C. Brandini, C. T. Stansberg (2004): Observation of strongly non-Gaussian statistics for random sea surface gravity waves in wave flume experiments. *Phys. Review E*, **70**, 067302.
- (14) Onorato, M., T. Waseda, A. Toffoli, L. Cavaleri, O. Gramstad, P. A. E. M. Janssen, T. Kinoshita, J. Monbaliu, N. Mori, A. R. Osborne, M. Serio, C. T. Stansberg, H. Tamura and K. Trulsen (2009a): "On the statistical properties of directional ocean waves: the role of the modulational instability in the formation of extreme events." *Phys. Rev. Letters*, **102**, 114502.
- (15) Onorato, M., L. Cavaleri, S. Fouques, O. Gramstad, P. A. E. M. Janssen, J. Monbaliu, A. R. Osborne, C. Pakozdi, M. Serio, C. T. Stansberg, A. Toffoli and K. Trulsen (2009b): Statistical properties of mechanically generated surface gravity waves: a laboratory experiment in a 3D wave basin. *J. Fluid Mech.* **627**, 235-257.
- (16) Phillips, O. M. (1974): Nonlinear dispersive waves. *Annual Review Fluid Mech.*, **6**, 93-110.
- (17) Sampe, T. and S. P. Xie (2007): Mapping High Sea Winds from Space: A Global Climatology. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88**, 1965-1978.
- (18) Soquet-Juglard, H., K. Dysthe, K. Trulsen, H. E. Krogstad and J. Liu (2005): Probability distribution of surface gravity waves during spectral changes. *J. Fluid Mech.*, **542**, 195-216.
- (19) Tamura, T. Waseda and Y. Miyazawa (2009), Freakish sea state and swell-windsea coupling: Numerical study of the Suwa-Marui incident. *Geophys. Res. Letters*, **36**, L01607, doi:10.1029/2008GL036280.
- (20) Waseda, T., Kinoshita, T. and Tamura, H. (2009a): Evolution of a Random Directional Wave and Freak Wave Occurrence. *J. Phy. Oceanogr.*, **39**, 621-639.
- (21) Waseda, T., Kinoshita, T. and Tamura, H. (2009b): Interplay of resonant and quasi-resonant interaction of the directional ocean waves. *Journal of Physical Oceanography*: **39**, 2351-2368.
- (22) Waseda, T., M. Hallerstig and H. Tomita (2009c): Meteorological causes of freak wave. *Geophysical Research Letter*, submitted.
- (23) Yamamoto, Y., Otsubo, H., Iwai, Y., Watanabe, I., Kumano, A., Fujino, M., Fukasawa, T., Aoki, M., Ikeda, H. and Kuroiwa, T. (1983): "Disastrous Damage of a Bulk Carrier due to Slamming." *The lecture of The Society of Naval Architects of Japan in 1983*.
- (24) Yuen, H. and B. Lake (1982): Nonlinear dynamics of deep-water gravity waves. *Adv. Appl. Mech.*, **22**, 67-229.
- (25) Zakharov, V. E. (1968): Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid. *Zh. Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.*, **2**, 86-94 (Translated in *J. Apply. Mech. Tech. Phys.* **2**, 190-194).

.....
 Generation of Freak Wave and Possible
 Meteorological Causes

Takuji WASEDA*

Abstract

The probability of the freak wave occurrence increases as the directional wave spectrum narrows and the wavelength and wave direction tend to coincide. However, such narrow directional spectrum generated in a laboratory wave tank is rarely found in the ocean in reality. In this report, analyses of two marine accident cases will be introduced where such rare meteorological conditions are realized. Second, the analysis of the North Sea record will be introduced to illustrate a possible connection between the occurrence of freak wave and synoptic meteorological condition.

.....
 Accepted 7 September 2009

*Department of Ocean Technology Policy and Environment,
 Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo