

巨大 Freak wave を含む観測波の母集団分布特性と その発生機構について

安田 孝志*・中山 晋一**・宮田 達磨***

1. 緒 言

日本沿岸 9 測点 (水深 50 m) での気象庁および山形県由良港沖 3 測点 (水深 40 m) での船舶技術研究所による観測データによって、10 m を超える Freak wave (巨大 Freak wave) の出現が確認され、これらの観測点での最高波の相当部分が Freak wave によっていることが明らかとなって来た (安田・森・中谷, 1993; 安田ら, 1994)。特に、巨大 Freak wave が一定風速 (10 m/s 以上) および風向 (W~NW) の冬期季節風下の日本海で出現することが明らかにされたことは、 $H_{1/3}$ が 5 m 近い十分に発達した波浪場であればどこでも巨大 Freak wave が発生することを示すものとして重要である。

このように、巨大 Freak wave の実態はかなり明らかとなって来たが、それがいかなる母集団分布に従っているのかについては必ずしも明らかになっていない。また、その発生に非線形干渉が関わっていることは確かであるが、発生機構そのものについての解明はほとんど進んでいない。

そこで本研究では、巨大 Freak wave 出現時の母集団分布を推定するため、これに必要な長時間の定常波浪データが得られる日本海の冬期季節風下の観測データに着目し、これを解析することによって上述の課題に応えたい。

2. 巨大 Freak wave を含む観測波の母集団分布特性

ここでは、著者ら (1994) によってこれまで解析がなされて来た山形県由良沖 (水深約 40 m) の波浪観測データに着目し、30 分単位の有義波高の変動性について定常性検定を行い、95 % の有意水準で定常と認められる区間 (定常区間) 内に巨大 Freak wave の出現がある 4 ケースに対して母集団分布特性の推定を行う。

表-1 は、これらのケースの代表諸量を示したものであり、ケース番号 Y 871124 は由良での 1987 年 11 月 24

表-1 定常区間の波浪諸量

Cace	Period(hr)	N	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$\langle ka \rangle_{1/3}$	β_1	GF
Y871124	15.0	6664	4.78	10.04	0.104	0.160	0.901
Y880109	10.5	4900	4.90	9.22	0.123	0.182	0.865
Y880202	13.0	5231	6.59	11.06	0.123	0.234	0.745
Y881214	15.0	6460	5.39	10.38	0.111	0.174	0.727

日の観測データであることを示し、Period は定常期間、N はその間のゼロダウン波の個数、 $\langle ka \rangle_{1/3}$ は有義波の steepness、 β_1 は歪度および β_2 は尖鋭度である。これから、いずれのケースも定常区間が 10 時間以上、その間の波の数もほぼ 5,000 波を超えており、母集団分布の推定に必要十分であると判断される。

2.1 水位 分布

図-1 は、代表例として Y 871124 のケースについて定常区間内の観測データより求めた水位分布と Gauss および Gram-Charlier 分布との比較を示したものである。歪度の値が 0.2 前後となっていることに対応し、標本分布は Gauss 分布よりも負側に少しずれ、Gram-Charlier 分布と良く対応している。また、尖鋭度の値は、非線形干渉の影響が波形の尖りに及んでいると考えられるが、水位分布で見る限りその影響は必ずしも明らかではない。他の 3 ケースについても同様であり、歪度をパラメータとして持つ Gram-Charlier 分布によって巨大 Freak wave を伴う波浪場の水位の母集団分布が表示され则认为て良い。

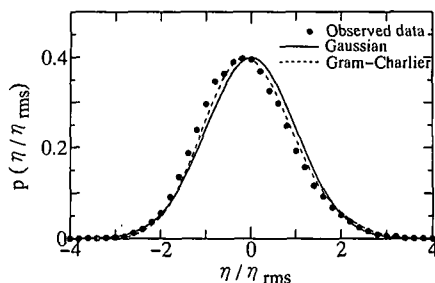


図-1 定常区間内の観測波の水位分布と理論分布との比較 (Y 871124)

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 五洋建設株式会社 東京支店

*** 愛知県企業庁

2.2 スペクトル

定常データより得られる周波数スペクトルは、ピーク位置が異なるだけでピーク周波数 f_p よりも高周波側ではほぼ同一のベキ則に従っているため、 $H_{1/3}$, $T_p (=1/f_p)$ およびスペクトル幅パラメータ m (周波数のベキに相当) をパラメータとして持つ Wallops スペクトルによってこれらのスペクトルのモデル化を試みる。

図-2 は、このときの全ケースのスペクトルと Y 871124 のスペクトルのピーク位置に一致させた $m=4.5$ の Wallops スペクトルとを比較したものである。ケースによって $H_{1/3}$ や T_p の値が異なるため、ピーク位置も変化しているが、ピークよりも高周波側ではいずれのケースも Wallops スペクトルにほぼ一致しており、巨大 Freak wave を伴う波浪場であっても $m=4.5$ の Wallops スペクトルに大略従うと判断できる。

ついで、このときの方向分布を合田・鈴木 (1975) の方向分布関数の簡略式によってモデル化し、平均波向を 270 度 (W) および $S_{max}=45$ としたモデルと各ケースの方向分布との比較を行う。図-3 はその結果を示したものであり、平均波向がモデルおよび各ケースごとに異なっているが、方向分布形状自体は極めて相似性が高く、このときの方向分布が合田・鈴木 (1975) の簡略式でモデル化できることがわかる。したがって、上述の $m=4.5$ とした

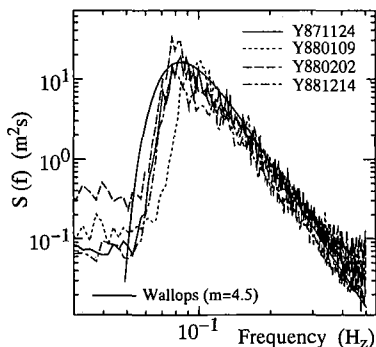


図-2 各ケースの周波数スペクトルと Wallops スペクトル ($H_{1/3}=4.78$ m, $T_{1/3}=10.04$ s, $m=4.5$) との比較

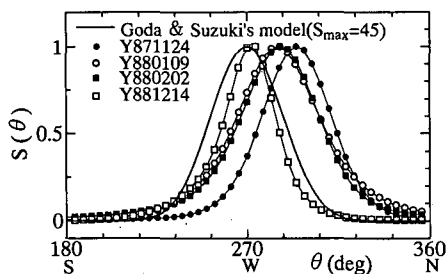


図-3 巨大 Freak wave 出現時の各ケースの方向分布と合田・鈴木モデル ($S_{max}=45$) との比較

Wallops スペクトルと組み合わせれば、巨大 Freak wave 出現時の概略の波浪場を推定することができる。

2.3 波高分布

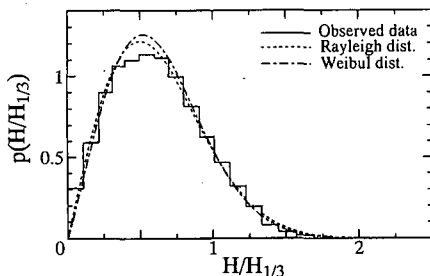
図-4 は、代表例として Y 871124 のケースについて定常区間内の $H/H_{1/3}$ の標本分布と Rayleigh 分布および最尤法で母数 m_w を推定した Weibull 分布とを比較したものである。これから、標本分布は全体的に Rayleigh 分布に比べて少し低波高側にずれているが、 $m_w=2.10$ の Weibull 分布によってほぼ表示できることがわかる。

したがって、波高の母集団分布の推定は適切な m_w の値の推定問題に帰着されるが、それについては安田ら (1994) による次の推定式を用いることができる。

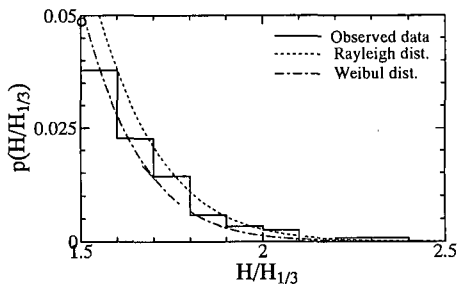
$$m'_w = 2.35 - 1.16 k_{pa} \times \ln(m) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 k_{pa} の値は $(ka)_{1/3}$ によって与えられ、 m の値は上述の図-2 における 4.5 として計算している。式 (1) による推定値 m'_w と標本分布による m_w の値との比較を示した表-2 からわかるように、推定値の方が少し小さくなっているが、両者はほぼ一致している。それ故、 $(ka)_{1/3}$ の値が与えられれば、式 (1) によって m_w の値が求まるため、巨大 Freak wave 出現時の波高分布が推定できることになる。

しかしながら、図-4(b) の $H/H_{1/3} \geq 1.5$ の高波高部の分布について見ると、Weibull 分布は明らかに過小評価であり、Rayleigh 分布も $H/H_{1/3}$ の値が増大するに従って過大評価から過小評価傾向となり、 $H/H_{1/3} > 2.2$ では完全



(a) 全体の比較



(b) 高波高部 ($H/H_{1/3} \geq 1.5$) での比較

図-4 Y 871124 の波高の標本分布と Rayleigh および Weibull ($m_w=2.10$) 分布との比較

表-2 推定式による Weibull 母数 m'_w と標本分布より求めた母数 m_w との比較

Case	m'_w	m_w
Y871124	2.18	2.10
Y880109	2.13	2.12
Y880202	2.13	2.11
Y881214	2.15	2.10

表-3 Freak wave の出現頻度

Case	N	Freak wave の個数	Freak wave の出現確率(%)
Y871124	6664	4	0.060
Y880109	4900	3	0.061
Y880202	5231	3	0.057
Y881214	6460	1	0.016

に過小評価となることがわかる。こうした傾向は他のケースにおいても見られ、全体的には Weibull 分布で波高分布を表示できても、 $H/H_{1/3} > 1.5$ の高波高に対しては過小評価となる。

図-5 はこのときの 4 ケースについてそれぞれの $H/H_{1/3}$ の超過確率の標本分布と Rayleigh 分布および Weibull 分布との比較を示したものである。これから、 $(H/H_{1/3})^2 < 2$ ではいずれのケースも Weibull 分布にほぼ従っていると見なせる。しかしながら、Y 881214 のケースは $(H/H_{1/3})^2 > 2$ においても Weibull 分布に従っているが、これ以外のいずれのケースも $(H/H_{1/3})^2$ の値が 2 を超える付近から Weibull 分布を上回り、Rayleigh 分布に従うようになる。さらに $(H/H_{1/3})^2$ が 4 を超える付近からは Rayleigh 分布をも上回るようになり、Freak wave の出現確率に対して Rayleigh 分布が過小評価となることがわかる。

表-3 は各ケースごとの定常区間内の全波高を対象として $H/H_{1/3} > 2$ となる波高の出現確率を示したものである。Rayleigh 分布による $H/H_{1/3} > 2$ の超過確率は 0.03 % であることを考えると、確率自体は低い値であるが、4 ケース中 3 ケースにおいて巨大 Freak wave の発生確率が 0.06 % 前後の値となる事実は、改めて巨大 Freak wave の推定に Rayleigh 分布では不十分となることを示すものとなっている。したがって、 $(H/H_{1/3})^2 < 4$ となる大部分の波高は Rayleigh 分布や Weibull 分布に従うと考えてよいが、Freak wave となる $(H/H_{1/3})^2 \geq 4$ の高波高に対しては別の分布を考える必要がある。しかしながら、

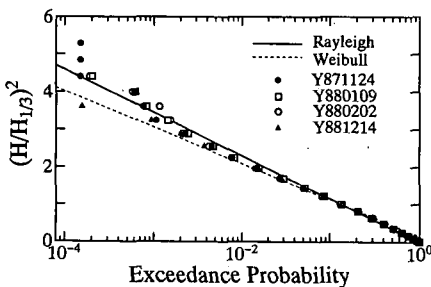


図-5 巨大 Freak wave 出現時の波高の超過確率に関する標本分布と Rayleigh および Weibull 分布 ($m_w = 2.10$) との比較

これについては波の非線形性の影響を正しく取り入れた波高分布を導けば、これによって統一的に記述できると考えるべきであろう。

2.4 波高と周期の結合分布特性

図-6 は、代表例として Y 871124 のケースの波高・周期結合確率密度分布 $p(H, T)$ と Longuet-Higgins の理論分布 (1975) を比較したものである。標本分布は全体的に理論分布と良く対応しているが、 $H/H_{1/3} > 1.5$ となる高波高部分ではばらつきが大きい。しかしながら、基本的には理論分布に対応しており、巨大 Freak wave の波高と周期の関係は理論分布によってほぼ推定できる。

2.5 連 特 性

Freak wave は、従来一般的に仮定されて来た $H_{max} = (1.6 \sim 1.8)H_{1/3}$ を大きく超える波高を持つため、Freak wave を設計波として考慮することは設計波高を大幅に増大させることに繋がる。ただし、Freak wave は波群を伴わずに単独で出現する点に特色があるため、設計波高を増大させてもこれを継続させる必要がない。したがって、1 波では破壊しないような粘りのある構造様式を採用すれば、Freak wave に対しては安全率を下げることも可能となる。そこで、ここでは各ケースの定常データより観測波の連長分布を調べるとともに、Freak wave の連特性について考察する。

図-7 は、 $\bar{H}$ および $H_{1/3}$ をそれぞれ設定波高 H_c としたときの連長 j_1 の確率密度分布 $p(j_1)$ と合田 (1976) およ

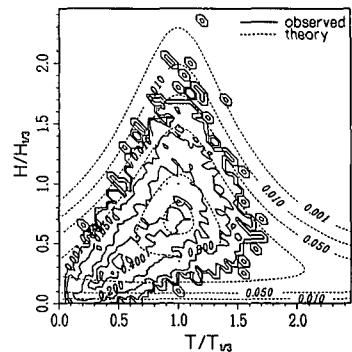


図-6 Y 871124 のケースの波高と周期の結合分布と Longuet-Higgins の理論分布との比較

び木村(1980)の理論分布との比較をY 871124のケースについて示したものである。ここで、 ρ_{HH} は隣接波高の相関係数を示す。いずれの観測波にも0.3程度の弱い相関があり、このため、 H_c の大きさに関係なく木村の理論との間に良好な対応が認められる。これは、高波高を除いた大部分の波高がRayleigh分布に従っていることから来る当然の結果であり、巨大Freak waveを含んでいても観測波の連長の母集団分布特性は、 ρ_{HH} が与えられれば木村理論で大略推定できることになる。ただし、巨大Freak waveなどの高波高がRayleigh分布には必ずしも従っていないことから、巨大Freak waveの連長を木村理論によって推定することはできず、それについては別途検討する必要がある。

図-8は、設定波高を $H_{1/3}$ としたときの巨大Freak waveの連長 j^* と波高比 $H_{\max}/H_{1/3}$ との関係を示したものである。データ数が少ないという問題はありますが、半数以上の巨大Freak waveの連長が2以下となっており、連長からもその単独性が裏づけられ、巨大Freak waveが波群を伴わずに単独で出現する傾向が強いことがわかる。

3. 巨大Freak waveの発生機構

Stokes波のような準単色波の場合、側帯波不安定によって波列の変調が進み、最大波高が著しく増大する。このような不安定が風波スペクトルを持つ不規則波の下でも生じれば、波群が発達し、Freak waveの発生に繋がることになる。また、高周波モードが側帯波不安定を伴う非線形干渉によって拘束モードとして励起される場合、これらのモードは非分散性となり、スペクトルのピーク

近傍モードに拘束される。この結果、位相が揃ってコヒーレントとなり、局所的に波高を増大させ、Freak waveを発生させる可能性がある。いずれの場合も3次以上の高次の非線形干渉によっているが、前者は高周波モードと無関係であるのに対し、後者はピーク近傍より高周波側モードに依存するなど高周波モードとの関連において相違がある。ここで対象としている巨大Freak waveがこのような機構によるものであるか否かについては不明であるが、上述したように非線形干渉によるものであることは確かであることから、以下ではFreak waveの発生と高周波モードの関係について検討する。

図-9は、代表例3ケースについて巨大Freak waveを含む観測波形とこれの $f/f_p \geq 1.5$ の高周波成分のみによる波形、さらにこの高周波成分の位相を一樣乱数で与えた $f/f_p \geq 1.5$ の波形、この波形を元の波形の $f/f_p < 1.5$ の成分に加えて合成した波形を比較したものである。Y 880109のケースではFreak waveが $f/f_p \geq 1.5$ の高周波成分に無関係に生じ、このため、これらの成分の位相を乱数化した波形は観測波とほとんど変わらない。これに対し、Y 871124およびY 880202のケースは、Freak waveが $f/f_p \geq 1.5$ の高周波成分によっていることを明瞭に示し、これらの高周波成分の位相を乱数化した波形ではFreak waveの原因となる波峯の突出が消えている。この結果、これを元の $f/f_p < 1.5$ の成分に加えた場合、スペクトルは一致するが、図-9(b)および(c)に示されるようにFreak waveは消失してしまう。このことは、Freak waveの生成に単なる高周波モードでなく、非分散性の高周波モードの存在が重要であることを示している。したがって、(a)に示されるFreak waveは上述の前者によるピーク周辺モードの側帯波不安定が原因と考えられ、(b)および(c)のFreak waveは後者の高周波拘束モードのコヒーレンスが原因と考えられるが、原因の特定化にはなお検討の必要がある。なお、定常区間内に出現した9個の巨大Freak wave中、前者によるものは4個であり、残りはいずれも高周波モードによってお

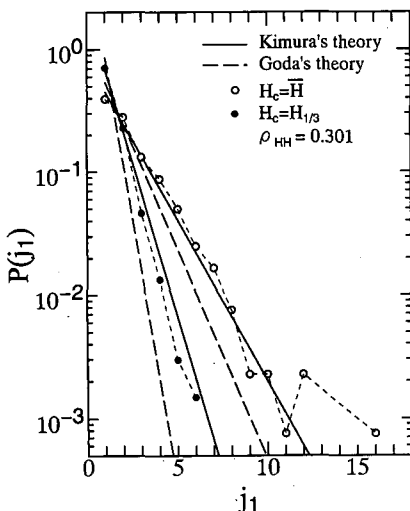


図-7 連長の標本分布(Y 871124)と合田および木村理論との比較

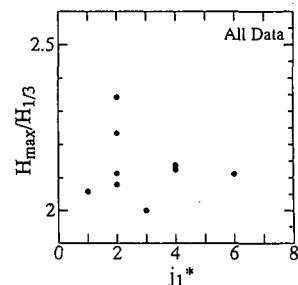
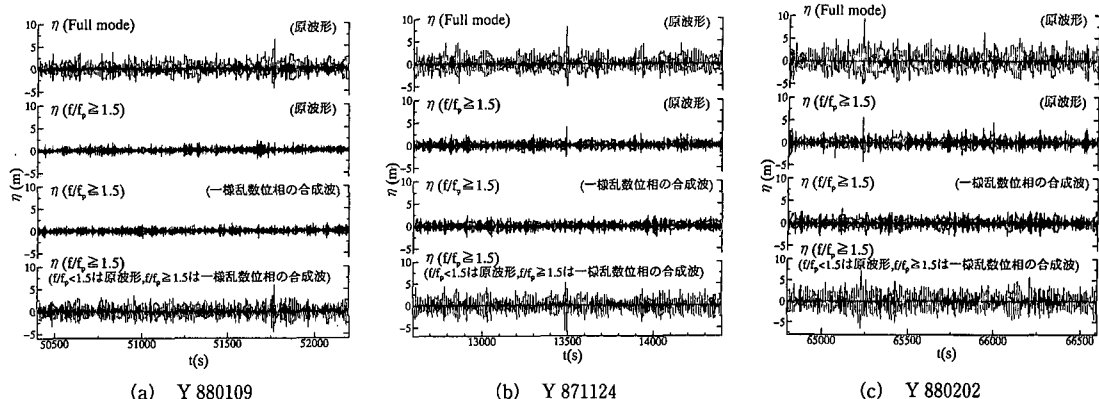


図-8 巨大Freak waveの連長 j^* (設定波高 $H_{1/3}$)と波高比 $H_{\max}/H_{1/3}$ の関係



図一 観測波形中の突出波峰 (巨大 Freak wave) と高周波モードの関係

り、半数強が高周波拘束モードによって生成されていると推察される。いずれにせよ、このような側帯波モードの不安定や非分散性の高周波モードの生成には共鳴を伴う3次以上の高次干渉が不可欠であり、こうした点からも海の波における高次干渉の重要性が明らかである。

4. 結 語

定常区間が10時間以上続き、その間に巨大Freak waveの出現があった日本海での観測データを解析し、巨大Freak waveを含む観測波の母集団分布特性の推定を行った。その結果、水位分布についてはGram-Charlier分布、スペクトルについては $m=4.5$ のWallopsスペクトル、方向分布は合田・鈴木の簡略式でそれぞれ大略モデル化できることが明らかとなった。また、波高分布についても全体的にはWeibull分布でモデル化でき、その母数も推定式によって与えられるが、 $H/H_{1/3} \geq 1.5$ の高波高に対しては過小評価となることが明らかとなった。事実、 $H/H_{1/3} > 2$ の超過確率について見ると、4ケース中3ケースにおいてRayleigh分布の下で期待される確率のほぼ2倍となっており、Freak waveの出現をRayleighやWeibull分布で扱うことには問題があり、非線形性の影響を正しく評価した波高分布のモデル化が必要となる。さらに、連長の分布は木村の理論によってほぼモデル化できるが、巨大Freak wave自体の連長(有義波高を設定波高)は大半が2以下であり、巨大Freak waveが波群を伴わずに単独で出現する傾向が強いことが明らかとなった。

こうした巨大Freak waveの生成機構について検討を行い、その大半がピーク周波数の1.5倍以上の高周波モ

ード(側帯波不安定を伴う非線形干渉による非分散性拘束モードと推察される。)のコヒーレンスによる波長の突出によって生成されていることを示し、巨大Freak waveの生成に果たす高次干渉やその影響を受けた高周波モードの重要性を明らかにした。このような非線形干渉は全体の1%弱の高波の波高や連長には効いてくるが、全体的影響は小さく、母集団分布の推定においては無視されて来たが、最大波の推算などにおいて重要であり、その影響を正しく評価した母集団分布の推定が今後の課題となろう。

最後に、本研究は造船学術研究推進機構からの交付金および文部省科学研究費一般C(06650559)による成果であることを付記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 合田良実・鈴木康正 (1975): 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港研資料, No. 230, 45 p.
- 安田孝志・森 信人・中谷行男 (1993): 最大波高を与える日本近海でのFreak waveの出現特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 81-85.
- 安田孝志・森 信人・中山晋一・赤羽 透・吉元博文 (1994): 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, pp. 36-40.
- 安田孝志・森 信人・川口浩二・多田彰秀 (1994): 一方向波列の波高分布に及ぼす非線形干渉と砕波の影響について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 31-35.
- 合田良実(1976): 波の連年の統計的性質について, 港研報告, 第15巻, 第3号, pp. 3-14.
- Kimura, A. (1980): Statistical properties of random wave groups, Proc. 17th ICCE, Sydney, pp. 2955-2973.
- Longuet-Higgins, M. S. (1975): On the joint distribution of the periods and amplitudes of sea waves, J. Geophys. Res., Vol. 80, No. 18, pp. 2688-2694.