

日本近海における Freak Wave の出現特性について

安田 孝志*・森 信人**・林 修市***

1. 緒 言

Freak wave の定義としては 1989 年の NATO の Water Wave Kinematics のシンポジウム (Tørum & Gudmestad, 1989) における ' $H_{\max}/H_{1/3} > 2.0$ を満たす最高波' というものが一般的である。これは Freak wave が $H_{\max}$ の推算に用いられている $H_{\max} = (1.6 \sim 2.0)H_{1/3}$ の関係を超える波であることを意味し、水深が波高の上限となり得ない大水深域での $H_{\max}$ の推算において重要となる。このような Freak wave の発生原因については様々な指摘がなされているが、安田ら (1991) による 3 次以上の非線形干渉を考慮した不規則波列の伝播シミュレーションによって、共鳴干渉が Freak wave の原因となることが示され、Freak wave の発生機構の一端が解明されつつある。しかしながら、現地における Freak wave については、出現特性を初めとして未解明な点が多く、観測事実の蓄積が緊急の課題となっている。

そこで、本研究では気象庁による波浪観測データを解析し、Freak wave の出現特性およびこれに及ぼす各種波浪諸量の影響について調べるとともに、Freak wave 自体の特性や最大最高波との関係について検討を行い、日本沿岸における Freak wave の特性を明らかにしたい。

2. 波浪観測の概要

気象庁のデータを用いた最高波の統計的特性については既に山口ら (1991) によって調べられているが、ここでは Freak wave に着目し、図-1 に示す 7 測点での正常観測データのみを各測点ごとに解析した。各データは汀線より沖 1~2 km、水深約 50 m の地点に設置された超音波式波高計によるものであり、表-1 に各測点ごとの観測時間、有効観測回数、1 回の観測あたりの平均観

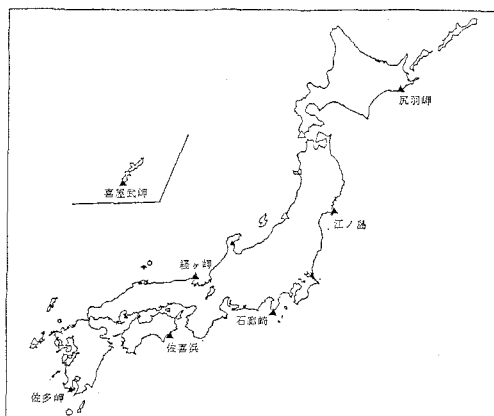


図-1 波高計の設置点

表-1 波浪観測の概要と観測波の諸量

測点	観測期間	有効観測回数	平均観測時間	$\langle H_{1/3} \rangle$	$\langle H_{\max} \rangle$	$\langle T_{1/3} \rangle$
尻羽岬	1985-1990	48648	222	1.24m	2.09m	7.40 s
江ノ島	1985-1990	16216	186	1.32	2.16	8.49
石廊崎	1985-1990	30401	220	1.22	2.05	6.93
経ヶ岬	1977-1981	13800	232	1.10	1.85	6.50
佐喜浜	1985-1990	41061	218	0.95	1.59	7.26
佐多岬	1985-1990	16395	200	0.85	1.40	7.57
喜屋武岬	1985-1990	17250	197	1.13	1.86	7.56

測波数に加え、 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ および $H_{\max}$ の観測平均 $\langle \rangle$ を示す。なお、観測は、尻羽岬、石廊崎、佐喜浜では毎時、その他の観測点では 3 時間毎に行われ、観測時間は 20 分である。

3. Freak wave の出現特性

3.1 $H_{\max}/H_{1/3}$ の分布

Freak wave の定義は上述のように $H_{\max}/H_{1/3} > 2.0$ のみであり、その出現確率を知るには $H_{\max}/H_{1/3}$ の分布を調べればよく、図-2 に代表例として佐喜浜における $H_{\max}/H_{1/3}$ の相対度数分布を全データ、 $H_{1/3} \geq 2$ m および ≥ 4 m のデータについてそれぞれ示す。図中の破線

* 正 会 員 工 博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科

*** 正 会 員 旭化成ホームズ(株)

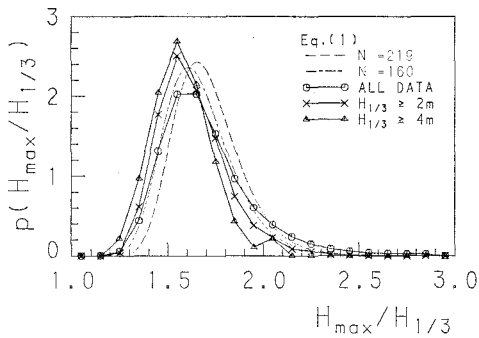


図-2 佐喜浜における $H_{\max}/H_{1/3}$ の相対度数分布と $H_{1/3}$ の影響

および1点鎖線は、Rayleigh 分布に基づく $H_{\max}/H_{1/3}$ の分布式

$$\left. \begin{aligned} p(H_{\max}/H_{1/3}) &= 2.832(H_{\max}/H_{1/3})^2 \exp(-\xi), \\ \xi &= N \exp\{-(1.416 H_{\max}/H_{1/3})^2\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

において N の値を 219 および 160 としたときの分布をそれぞれ示す。理論分布と実測分布の形状は良く似ており、 N の値を適切に選べば両者はマクロ的に良く対応するようになると思われるが、ここでの比較では両者は必ずしも一致しておらず、波高が Rayleigh 分布に従っているとは言えない。

そこで、Freak wave の発生領域である $H_{\max}/H_{1/3} > 2.0$ における理論分布との対応をより詳細に検討するため、 $H_{\max}/H_{1/3}$ の相対超過度数分布について比較を行う。図-3 はその結果を示し、図中の破線および1点鎖線は、式 (1) より得られる相対超過度数分布

$$\left. \begin{aligned} P(H_{\max}/H_{1/3}) \\ = 1 - \exp[-N \exp\{-(1.416 H_{\max}/H_{1/3})^2\}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

において N の値を 219 とした理論分布を示す。これから、 $H_{\max}/H_{1/3} > 2.0$ において式 (2) が全データに対しては過小評価となるが、 $H_{1/3} \geq 2\text{m}$ となる高波の Freak

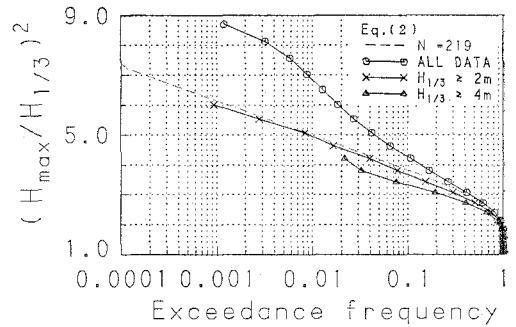


図-3 佐喜浜における $H_{\max}/H_{1/3}$ の相対超過度数分布と $H_{1/3}$ の影響

wave に対して Rayleigh 分布は若干過大評価となる。この傾向は $H_{1/3} \geq 4\text{m}$ の波において一層顕著であり、Rayleigh 分布が高波で過大評価となる合田の指摘(1985)に合致したものとなっている。 $H_{\max}/H_{1/3}$ の分布のこうした特性は、砕波による $H_{\max}$ の頭打ちに依っていると推察される。

このような $H_{\max}$ の頭打ちの有無を調べるため、図-4 に佐喜浜および江ノ島での $H_{1/3}$ と $H_{\max}$ の関係を示す。図中の直線は N の値をそれぞれ 218 および 186 とし計算した次式の $H_{\max}/H_{1/3}$ の期待による。

$$\left. \begin{aligned} E(H_{\max}/H_{1/3}) &= (\ln N)^{1/2} / a + \gamma / \{2a(\ln N)^{1/2}\} \\ &\quad - (\pi^2 + 6\gamma^2) / (48a(\ln N)^{3/2}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで $\gamma = 0.5772$, $a = 1.416$ である。 $H_{1/3}$ が 4m を超える付近から観測数が急減するという問題や、実線を大きく超える $H_{\max}$ (Freak wave と考えられる) が存在するという事実はあるが、この付近から実線を下回る $H_{\max}$ の方が多数を占めるようになり、砕波による $H_{\max}$ の頭打ち傾向を認めることができる。したがって、砕波を伴うような高波浪に対しては、単に Rayleigh 分布を用いれば安全側となって事足りるのではなく、砕波の影響を正しく評価した $H_{\max}$ の分布を導く必要がある。

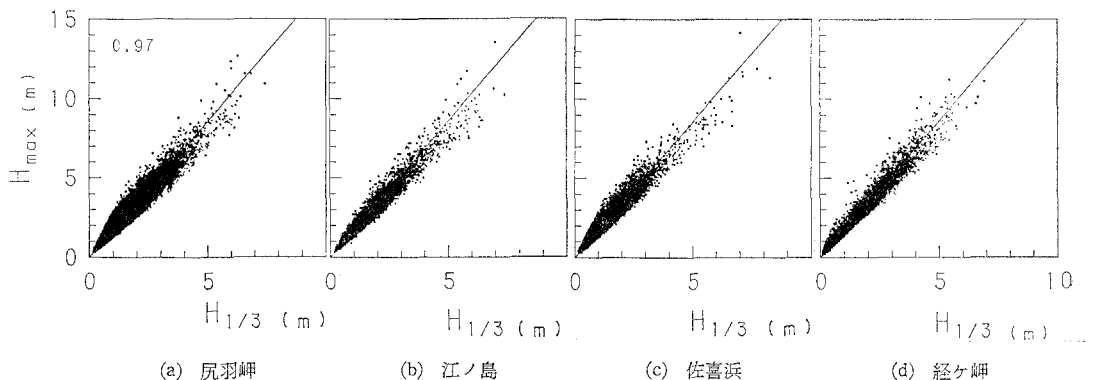


図-4 各観測点における $H_{1/3}$ と $H_{\max}$ の関係

表-2 Freak wave の出現確率に及ぼす $H_{1/3}$ の影響

測点	全データ	$H_{1/3} \geq 1\text{m}$	$H_{1/3} \geq 2\text{m}$	$H_{1/3} \geq 4\text{m}$	$H_{1/3} \geq 5\text{m}$
尻羽岬	9.04(7.04)	6.62	3.33	1.82	5.26
江ノ島	5.00(5.93)	2.84	2.39	2.44	5.08
石廊崎	6.42(6.98)	4.18	2.96	1.82	3.23
経ヶ岬	10.50(7.34)	4.01	2.94	2.22	3.23
佐喜浜	9.75(6.91)	4.63	3.72	2.17	2.27
佐多岬	5.95(6.36)	3.76	1.96	0.00	0.00
喜屋武岬	4.66(6.27)	3.59	3.14	2.32	2.24

3.2 出現確率

表-2 は、各測点での全観測波および $H_{1/3}$ が 1 m, 2 m, 4 m, 5 m 以上の観測波ごとの Freak wave の出現確率 (%) を示したものであり、() 内の数字は表-1 の平均観測波数を用いて式 (2) により求めた Freak wave の出現確率を示す。Freak wave の出現確率は、 $H_{1/3}$ の値が 5 m 未満では $H_{1/3}$ の値が大きくなるに従って低下している。これは、砕波の影響によると思われるが、 $H_{1/3} \geq 5\text{m}$ ではこのような低下傾向は消え、佐多岬および喜屋武岬を除いて $H_{1/3} \geq 4\text{m}$ の場合よりもむしろ増大している。特に江ノ島では Rayleigh 分布に基づく出現確率 5.93% に近い 5.08% にも及んでおり、同じ高波浪でも $H_{1/3} \geq 5\text{m}$ 以上では Freak wave の出現の様相にかなりの違いがあると言えそうである。

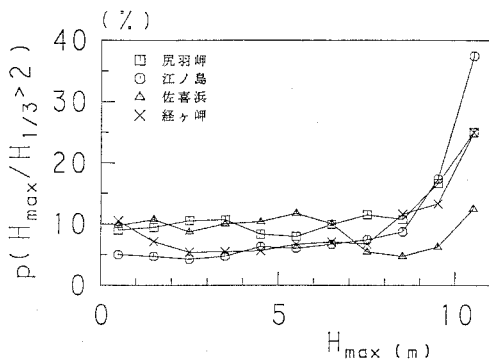
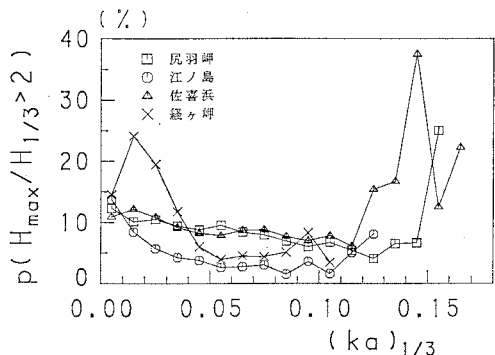
図-5 は、尻羽岬、江ノ島、佐喜浜および経ヶ岬での全観測波および $H_{\max}$ が 1 m, 2 m, ..., 10 m 以上となる観測波ごとの Freak wave の出現確率 (%) と $H_{\max}$ の関係を示したものである。 $H_{\max}$ にも砕波の影響は及んでいるが、 $H_{1/3}$ との関係で捉えた場合と異なり、 $H_{\max}$ の値が増大しても Freak wave の出現確率は低下せず、逆に $H_{\max} \geq 8\text{m}$ において急増し、江ノ島では 10 m を超える $H_{\max}$ の 40% 近くが Freak wave となっている。江ノ島において 表-1 に示した観測期間中に 10 m

以上の $H_{\max}$ が観測された回数が 9 回しかないため、この結果を一般化することはできないが、Freak wave の発生が 10 m を超えるような $H_{\max}$ の出現の大きな要因になっていることがわかる。上述したように、砕波の影響がなければ高波浪時の Freak wave の出現に対して Rayleigh 分布は必ずしも過大評価とはいえない点を考慮すると、 $H_{\max}$ の推算を Rayleigh 分布の枠内で行うことには注意が必要といえよう。

3.3 非線形性の影響

Freak wave の出現確率が $H_{1/3} \geq 5\text{m}$ において増加に転じることを示す上述の結果は、出現確率が砕波だけでなく非線形干渉にも依存していることを示唆している。そこで、 $(ka)_{1/3}$ を非線形性指標として Freak wave の出現確率に及ぼす非線形性の影響について検討する。ここに、 a は $H_{1/3}$ の 1/2、 k は $T_{1/3}$ より線形分散関係によって計算される波数。図-6 は、 $(ka)_{1/3}$ の値を 0.01 の間隔ごとに分割化し、各分割領域ごとに Freak wave の出現確率を求めて $(ka)_{1/3}$ との関係を整理したものである。対象とした測点は図-5 と同様の 4 測点である。経ヶ岬を除いた測点では、 $(ka)_{1/3}$ の値が 0.1 を超える付近から Freak wave の発生確率が増大を始め、 $(ka)_{1/3}$ の影響が顕著になって来ている。安田ら (1991) の数値シミュレーションでも 3 次干渉の影響が顕著になるのが $k_p a \geq 0.1$ であることを考え併せれば、このような $(ka)_{1/3} \geq 0.1$ での Freak wave の発生確率の増大に非線形干渉が関与しているものと考えられる。

図-7 は、図-6 と同様に $(ka)_{1/3}$ の値を分割し、各分割領域ごとの $(ka)_{1/3}$ とそこでの $H_{\max}/H_{1/3}$ の平均値 $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ との関係を示している。Freak wave の出現確率が $(ka)_{1/3} \geq 0.1$ において増大したのと同様、 $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ も増大する傾向にあり、とくに尻羽岬および佐喜浜においてその傾向は著しい。しかし、そのまま $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ は一様に増大するのではなく、砕波のためと考えられるが、極値に達した後は逆に減少に転じている。ここに見られる $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ と $(ka)_{1/3}$ の関係から

図-5 $H_{\max}$ の波に占める Freak wave の割合と $H_{\max}$ の関係図-6 Freak wave の出現確率に及ぼす $(ka)_{1/3}$ の影響

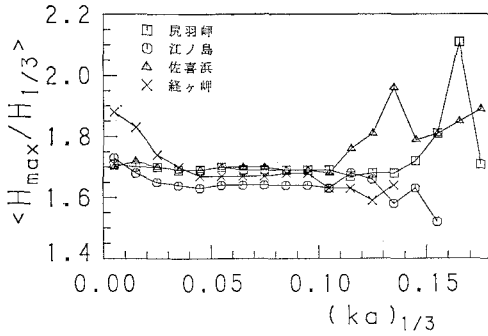


図-7 $H_{\max}/H_{1/3}$ の平均値 $\langle \rangle$ と $(ka)_{1/3}$ の関係

すれば、非線形性の増大とともに $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ の値も増大し、これに伴って図-6におけるような Freak wave の出現確率の増大が生じたと考えるのが自然である。

4. Freak wave の特性

図-8 は、佐喜浜および江ノ島での Freak wave の $H_{\max}$ と $(ka)_f$ ($a=H_{\max}/2$, k は $T_{\max}$ より計算される波数、添字の f は Freak wave を意味する。) の関係を代表例として示す。 $(ka)_f$ の値が Stokes 波の限界状態における 0.443 を超えるものもあるが、それらのほとんどは $H_{\max} \leq 4$ m におけるものである。これに対し、 $H_{\max}$ が 8 m を超えるような Freak wave では $(ka)_f$ の値は 0.3 以下に留まっており、 $H_{\max} \geq 8$ m となるような有意な波高を持つ Freak wave に関する限り、安田ら (1991) の数値シミュレーションで顕れたような $(ka)_f$ が 0.4 を超えるような Freak wave は見られない。

図-9 は、佐喜浜および江ノ島での全観測波について $H_{\max}$ と $H_{\max}/H_{1/3}$ の関係を示したものである。 Freak wave のほとんどは $H_{\max} \leq 5$ m であり、 $H_{\max}/H_{1/3}$ の値が 3 を超えるものもあるが数は少ない。これに対し、 $H_{\max} \geq 8$ m となるような Freak wave の数は少ないものの観測波数自体も少ないため、図-5 に示したように $H_{\max} \geq 8$ m となる波に占める Freak wave の割合は数十%に及ぶことになる。ただし、このような高波におい

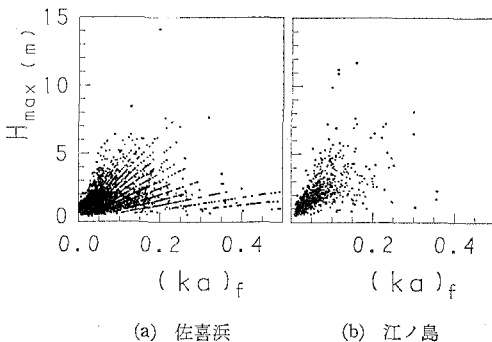


図-8 Freak wave の波高 $H_{\max}$ と $(ka)_f$ の関係

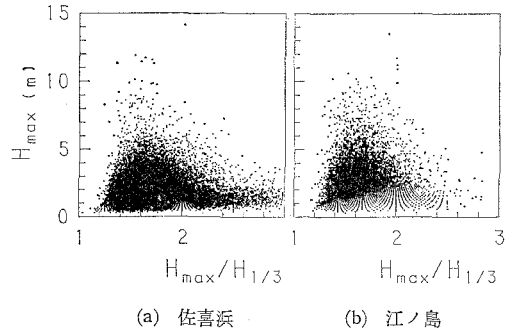


図-9 各観測波における $H_{\max}$ と $H_{\max}/H_{1/3}$ の関係

ては $H_{\max}/H_{1/3}$ の値が 2.5 を超えることはなく、前述した碎波による $H_{\max}$ の頭打ちの影響が顕れているものと見ることができる。

5. Freak wave と最大最高波高の関係

表-3 は各測点での上位 10 番までの $H_{\max}$ とそれを伴う波列の $H_{1/3}$, $H_{\max}/H_{1/3}$, $(ka)_{1/3}$ および波数 N の関係を示したものである。これから、佐多岬以外のいずれの測点においても上位 10 番までの $H_{\max}$ の中に Freak wave (ここでは、Freak wave を $H_{\max}/H_{1/3} > 2$ とする。) を見出すことができ、しかも、尻羽岬、石廊崎、経ヶ岬および佐喜浜での最大最高波高 $(H_{\max})_{\max}$ はいずれも Freak wave によっている。特に、佐喜浜での $(H_{\max})_{\max}$ は 14.15 m であるが、これは 1985 年から 1990 年までの最大有義波高 $(H_{1/3})_{\max} = 8.28$ m を持つ波列に生じたものではなく、これよりも小さい $H_{1/3} = 7.01$ m の波列において生じている。いま、 $H_{\max}$ を $1.6(H_{1/3})_{\max}$ とすれば、 $H_{\max} = 1.6 \times 8.28 \text{ m} = 13.25$ m に留まり、 $(H_{\max})_{\max} = 14.1 \text{ m}$ を 1 m 近く下回ることになる。勿論、合田が推奨している $H_{\max} = 1.8(H_{1/3})_{\max}$ を採用すれば、 $H_{\max} = 14.90$ m となって安全側となるが、最大最高波 $(H_{\max})_{\max}$ は必ずしも最大有義波高 $(H_{1/3})_{\max}$ を持つ波列に生じるのではなく、Freak wave の発生によってより小さい $H_{1/3}$ の波列においても生じる得ることは確かである。これは、 $(H_{1/3})_{\max}$ の波列において $(H_{\max})_{\max}$ が生じるとし、問題はいかに精度良く $(H_{1/3})_{\max}$ を推算するかにあるとする考え方に疑問を投げ掛けるものであり、単に $H_{\max}$ を $(1.8 \sim 2.0)H_{1/3}$ として済む問題ではない。為すべきことは、より小さい $H_{1/3}$ の波列から $(H_{\max})_{\max}$ を生み出す Freak wave の発生機構の解明とこれを踏まえた $H_{\max}$ の推算法の確立であろう。

6. 結 語

気象庁による実測データを用いて日本沿岸における Freak wave の出現確率を調べ、合田によって指摘されているように Rayleigh 分布は波高の小さい波に対して