

波群特性を考慮した最高波高の出現確率に関する研究

関本 恒浩*・鵜飼 亮行*・今井 澄雄**・寺田 賢二***

1. ま え が き

波群に関する研究は、その現象が海岸工学上の諸問題と深く関わっていることから、ここ数年盛んに行われるようになった。これまでは、主として高波の連なりを統計的手法により評価することが行われ(合田, 1976; Kimura, 1980), 現地波浪に対する特性も明らかにされてきた(Goda, 1983)。また近年、波群を力学的に捉え、評価する試みがなされており(Janssen, 1985; 間瀬ら, 1985), 波群の伝播に伴う空間変化特性も明らかにされつつある(安田ら, 1989)。一方、波群特性と波高分布や最高波高との関係についても研究が行われている。安田ら(1989)は、波群の伝播に伴う変動と最高波高の変動が連動して起こることを示しており、設計波高の推定に波群の影響を考慮する必要があることを指摘している。また、間瀬ら(1986)は波高の度数分布を Weibull 分布で近似させたとき、Weibull 分布の母数 m と Groupiness Factor (GF) との間には負の相関があることを示している。このことは、波群化が進むことにより波高の度数分布形状が広がり、高波浪の出現する確率が大きくなることを意味している。

このような、波群化による最高波高の増大は、今後増えるものと予想される大水深構造物の設計において特に重要な問題であり、また、波群化による波高の度数分布の変化は、浅海域における海岸構造物の設計波高算定においても影響を及ぼすものと考えられる。さらに、最高波高の出現確率については、将来、信頼性設計を行う場合に必要不可欠な要素である。そこで本研究では、まず日本海における冬季季節風に伴う波浪の現地観測を実施し、既往の観測データも含めて、波群特性、波高の度数分布および $H_{max}/H_{1/3}$ に着目して解析を行った。さらに、波群と波高の度数分布との関係を明確にし、波群が最高波高の出現確率に及ぼす影響を明らかにするとともに、波群特性を考慮した設計波高の考え方について察考

した。

2. 現地観測の概要

現地観測は、1989年1月31日より3月31日までの約2ヶ月間、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所周辺において実施した。観測位置は、図-1に示すように南防波堤延長上、防波堤先端より250mに位置する $St. A$ (水深13m)である。 $St. A$ には、同期ケーブルで接続された自記式の超音波波高計および水圧センサー付2成分電磁流速計を設置し、サンプリング間隔0.5sで2時間おきに約17分間の計測を行った。

得られたデータは、スパイク状のノイズの除去を行った後、数値フィルターにより0.05 Hz以上の周波数成分を抽出し、以後の解析に用いた。

観測期間中の $St. A$ における最大有義波は、2月3日に $H_{1/3}=3.45\text{ m}$, $T_{1/3}=8.3\text{ s}$ を記録したが、それ以後は波高2m前後の時化が6回程度来襲したにとどまり、例年に比べ高波浪の出現頻度は少なかった。有義波周期は5sから8sの間で変動し、時化時に長くなる傾向を示した。

なお、観測期間中は上述のように例年に比べ高波浪の来襲する頻度が少なかったため、図-1に示した定時観測地点(水深15m)において超音波波高計により観測された波浪データのうち、高波浪の来襲頻度が比較的多かった1987年1月および3月のデータも解析の対象とした。

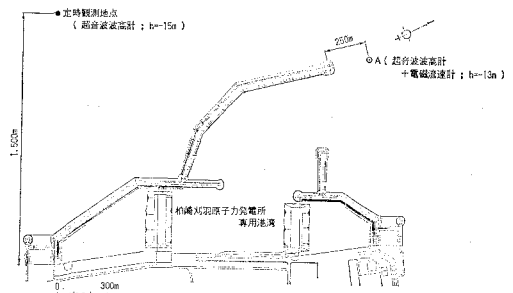


図-1 観測地点位置図

* 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部

** 正会員 東京電力(株) 柏崎刈羽原子力建設所

*** 正会員 工修 東京電力(株) 柏崎刈羽原子力建設所

この時の最大有義波は、1月17日の $H_{1/3}=5.13\text{ m}$, $T_{1/3}=9.9\text{ s}$ であり、3 m 以上の時化も何度か観測されている。

3. 波群特性

波群特性は、波群化指標 GF (Groupiness Factor) を用いて整理を行い、分散性 kh 、非線形性 ka および Ursell 数 $Ur (= H_{1/3} L_{1/3}^2 / h^3)$ との関係を調べた。ただし、 k は有義波周期より求めた波数、 h は水深、 a は入射波の振幅 (ここでは有義波の半波高)、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $L_{1/3}$ は有義波周期より求めた波長 ($=2\pi/k$) である。

図-2 は、分散性 kh と GF の関係を示したもので、 ka で分類し (a)~(d) にプロットしている。 GF のばらつきは大きいものの、全体的にみると間瀬ら(1989)も指摘しているように、 kh が小さくなるにしたがって GF の減少する、いわゆる波群の浅水効果がみられる。また、 ka の増加によってこの傾向は顕著になる。

安田ら(1989)は、波群の伝播による変動特性を調べ、スペクトルの狭帯域化が進むと、 kh が大きい場合 ka の増大に伴い波群化が進み、 kh が小さい場合は逆に波群は縮小し、その変動も小さくなることを示している。本研究で用いたデータは、スペクトル先鋭度パラメータ Q_p が最大でも 4.5 であり、その多くは 2~3 程度と安田らが検討に用いたものよりもスペクトル幅が広く、また、安田らの研究は波群の伝播特性を対象としているのに対し、本研究では定点観測データを対象としているため、直接的な比較はできないが、図-2 に示した波群特性における非線形効果は安田らの示した結果に対応している

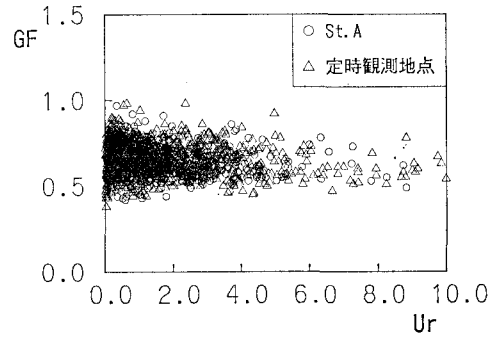


図-3 GF とアーセル数の関係

ものと考えられる。

kh と ka が波群化に及ぼす影響は、ほぼ逆の関係となっていることから、Ursell 数を用いることにより、この2つの効果のある程度統一的に取り扱うことができるものと考えられる。

図-3 は、 GF と Ursell 数との関係を示したものである。 Ur が増加するにつれ、 GF が減少するとともに、 GF の散らばりも抑えられることがわかる。

波群の伝播に伴う変動と最高波高 $H_{\max}$ の変動とは連動することが安田らにより示されている。そこで、 GF と $H_{\max}/H_{1/3}$ の関係を調べた。その結果が図-4 であり、(a) は Ur の比較的小さい場合 ($Ur < 1.7$)、(b) は Ur の比較的大きい場合 ($Ur > 3.2$) をそれぞれ示したものである。 GF と $H_{\max}/H_{1/3}$ との間には弱い相関があり、両者は連動している傾向がうかがわれる。ただし、

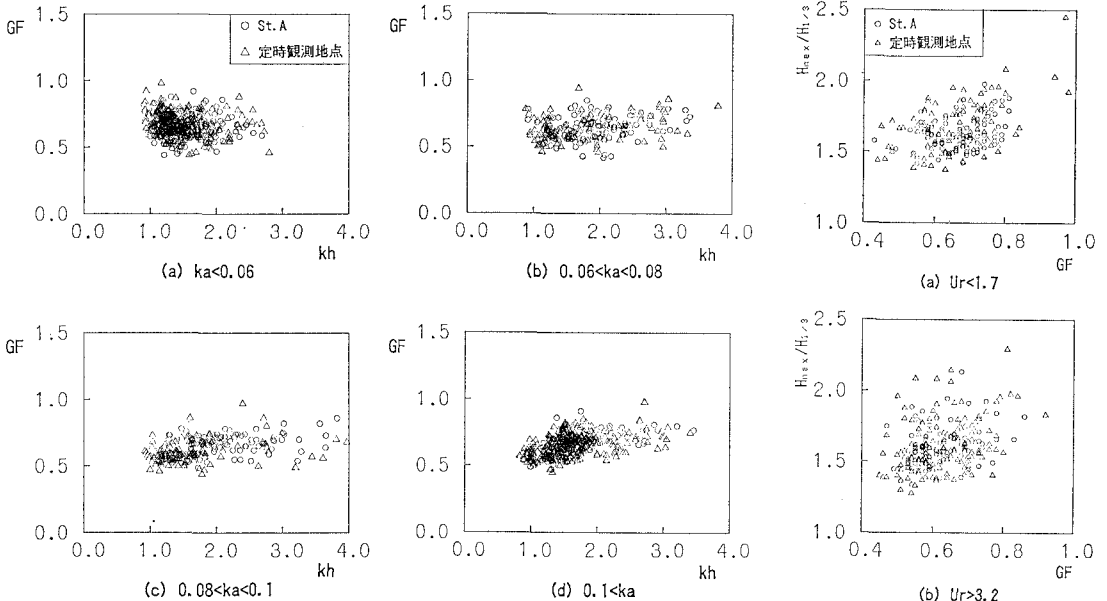


図-2 GF と kh との関係

図-4 GF と $H_{\max}/H_{1/3}$ との関係

Ur が大きい場合は、小さい場合に比べてわずかながら $H_{max}/H_{1/3}$ の大きなものが出現することがわかる。つまり、非線形性の増加は、 GF のみならず $H_{max}/H_{1/3}$ の関係にも影響すると考えられる。

4. 波高の度数分布

本研究では間瀬ら(1986)と同様に、波高の度数分布として Weibull 分布によるあてはめを試みた。

平均波高で正規化したときの Weibull 分布は、Kimura (1981)によれば、次式で表わされる。

$$p(x) = \frac{m}{2\phi} x^{m-1} \exp\left(-\frac{x^m}{2\phi}\right); \quad x = \frac{H}{\bar{H}} \quad \dots\dots(1)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \left[\Gamma\left(\frac{m+1}{m}\right) \right]^{-m} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 Γ はガンマ関数であり、 m は Weibull 分布の形状母数を表す。なお、観測された波高の度数分布に Weibull 分布をあてはめる場合、形状母数 m を間瀬らにならって Cohen(1965)による最尤法によって求めた。

$$m = \frac{N_w}{\frac{1}{2\phi} \sum_{i=1}^{N_w} x_i^m \ln x_i - \sum_{i=1}^{N_w} \ln x_i} \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 N_w は波の数、 $\ln$ は自然対数である。

図-5 は、波高の度数分布に Weibull 分布をあてはめたときの代表例を示したもので、ここでは Ursell 数および GF の異なるものを示した。この場合波の数が 140~200 波程度であるため、統計的に十分安定とはいえない

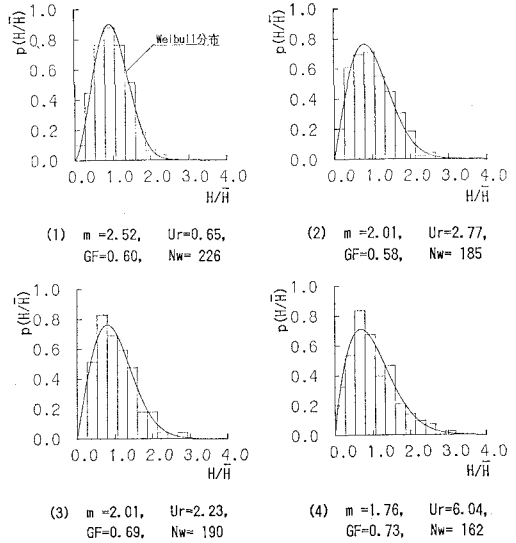


図-5 波高の度数分布の Weibull 分布へのあてはめ

ものの、比較的広い範囲の Ursell 数および GF の値に対して波高の度数分布に対する Weibull 分布の適合性は良好である。

波群特性と波高の度数分布との関係を調べるため、間瀬らと同様に Weibull 分布の形状母数 m と GF との関係について検討した。なお、 GF や $H_{max}/H_{1/3}$ には波の非線形性の効果が存在するようであり、また $H_{max}/H_{1/3}$

の関係は波高の度数分布の一表現であることを考えれば、当然 GF と m の関係にも非線形性の影響が存在するはずである。そこで、 Ur をパラメータとして整理を行った。

図-6 は St. A におけるデータと定時観測地点における 1987 年の観測データのうち有義波高 1m 以上のものを対象に、 GF と形状母数 m との関係を示したものである。最も左の図は観測値と式(4)で示される間瀬らの実験式を同時に示したもので、右側3つの図は Ursell 数の段階別に母数 m を3つの範囲に分けその間に含まれる GF の平均値と分散を示したもので、図中の実線は観測データから最小2乗法により求めた実験式、破線は間瀬らの実験式

$$m = 3.44 - 1.99 GF \quad \dots(4)$$

である。

観測データには、 GF と m の間に

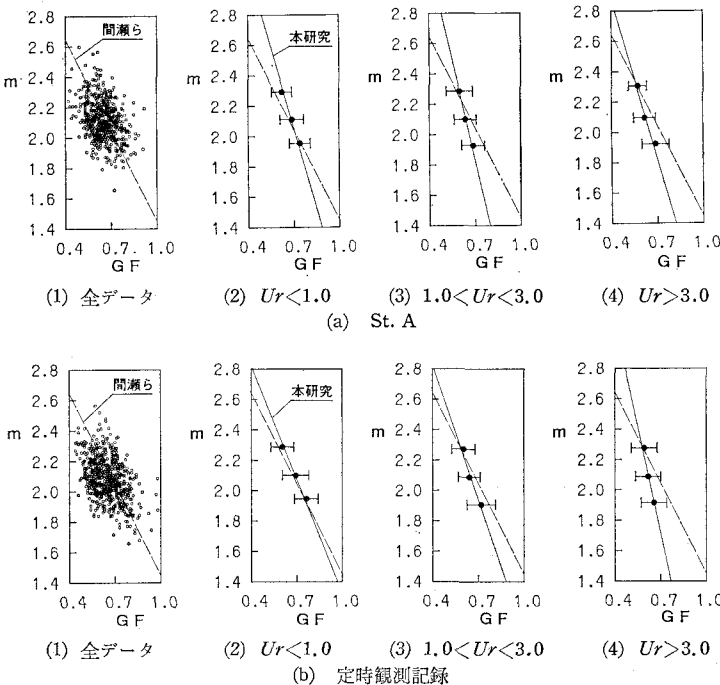


図-6 GF と Weibull 分布の母数 m の関係

明瞭な負の相関がみられ、近似的には間瀬らによる実験式で説明できる。しかし、この関係は Ur 依存しており、本研究による実験式の勾配は Ur の増加に伴い急になっている。つまりこれは、非線形性の増加によって m が小さくなり、波高の度数分布が広がることを意味するものである。

Tayfun (1990) は深海波を対象として、包絡波と位相関数に関する2次の非線形性の影響を調べたところ、非線形性の増加に従い、包絡波の振幅(つまり波高)の度数分布が広がるとともに、位相関数も一様分布から系統的にずれることを示した。Tayfun の理論では、弱非線形の場合を対象としているため、包絡波の振幅の度数分布に及ぼす影響は小さいものとなっているが、定性的には本研究による結果と対応しているものと思われる。

5. 最高波高の出現確率

波高の度数分布が Weibull 分布でよく近似できたことから、波高の度数分布に Weibull 分布を仮定した場合の最高波高 $H_{\max}$ の出現確率と実測された $H_{\max}$ の出現頻度の比較を行った。

波高の度数分布が Weibull 分布するとき、 q 最大波 $H_q (q \leq 1)$ で正規化した最高波高 $H_{\max}/H_q$ の出現確率 p^* は、Longuet-Higgins (1952) と同様の手法を用いると次式のように表せる。

$$p^*(X) = m N_W \beta (\beta X)^{m-1} [1 - \exp\{-(\beta X)^m\}]^{N_W-1} \times \exp\{-(\beta X)^m\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta = (-\ln q)^{1/m} + \Gamma(1/m, -\ln q)/(qm) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 X は $H_{\max}/H_q$ 、 N_W は波の数、 $\Gamma(*,*)$ は不完全ガンマ関数を表す。ただし、式(5)は導く際の仮定として波高の相関性は無視しているため、波群化の進んだものに対して推定精度が低下することが予想される。

図-7 は、形状母数 m の段階別に示した有義波高で無

次元化した最高波高の出現頻度分布を示したものである。図には同時に、あらかじめ平均波高で無次元化した波高に対し、それぞれの m の範囲に含まれるものすべてを用いて求めた波高の度数分布を同時に示している。波高の度数分布に示された曲線は、その分布に適合した母数 m の Weibull 分布を表す。また、最高波高の出現頻度分布に示した3本の曲線は、その母数 m の Weibull 分布から求められる理論曲線であり、各 m の範囲のなかで実測された波の数が最小の場合と最大の場合および波の数の平均値に対応するものを表している。

波高の度数分布については、 m が大きくなるにつれて、分布が狭まるのが確認できる。また、どの m の範囲にあっても Weibull 分布の適合度は非常に良好である。一方、最高波高の出現頻度については、 m が小さくなるにつれて最高波高も大きくなり、 $m > 2.2$ で平均で $H_{\max}/H_{1/3} = 1.5$ 程度であったのが、 $m < 2.0$ で1.7近くまで増加しており、 $H_{\max}/H_{1/3} = 2$ を超える頻度も増える傾向にある。

なお、 m が2.0以上のものは、波の数の平均値に対する Weibull 分布による理論的とい一致を示しているが、 m が2.0以下の場合、理論値がやや過大となる傾向が見られる。これは、前述の波高の相関性の影響と考えられる。間瀬ら(1988)によれば、最高波を含む波群の特性として、波群相関係数が大きければ最高波の前後の波高も比較的高く、相関係数が小さければその逆となる。一般に m が小さい、つまり GF が大きいとき波群相関係数も大きくなり、波高の大きい波は単独では現れずに比較的大きな波を伴って存在するため、最高波高に比して有義波高が大きくなり、その結果 $H_{\max}$ と $H_{1/3}$ の比が小さくなるためと考えられる。したがって、 m の減少に伴い $H_{\max}$ は大きくなるが、 m が2以下の場合、実際には理論値ほどの $H_{\max}$ の増加はみられないであろう。

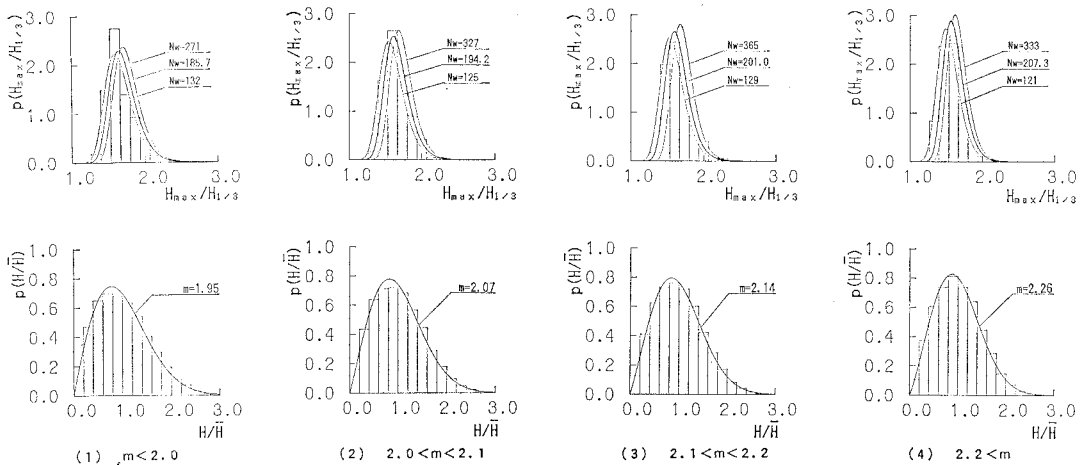


図-7 Weibull 分布の形状母数段階別の最高波高の出現確率

ただし、波高の相関性による実測値と理論値の分布形状のずれは小さく実用上の問題はないものと考えられる。

6. 設計波高の考え方

混成防波堤の設計波高のように、最高波高を設計波高として採用する場合には、設計波高に波群の影響を考慮する必要がある、特に大水深域において重要となる。

図-8 は、Weibull 分布の母数 m と $H_{\max}/H_{1/3}$ の平均値と標準偏差を示したものである。図中の一点鎖線は対象としたデータの波の数の平均値(196 波)に対する最高波高の期待値であり、実線は $H_{1/250}/H_{1/3}$ を示す。水深が大きく砕波の影響のない場合については、 GF と形状母数 m との関係から波群化を考慮した Weibull 分布による理論値を用いて、実用上十分な精度で $H_{\max}$ を推定できることがわかる。

一方、合田(1977)は、設計波高の算定において現地防波堤の滑動・非滑動との適合性から 1/250 最大波を用いることを推奨している。ここでは示していないが 1/250 最大波は m によらず 400 波に対する $H_{\max}$ の期待値とほぼ一致しており、約 200 波に対する観測値と理論値との適合性や観測値の標準偏差の広がりやを考慮すると、Weibull 分布による 1/250 最大波を $H_{\max}$ 推定の目安としてよいものと考えられる。

次に、浅海域において設計波クラスの波浪が来襲する場合を考える。波群の発達は、変調不安定により生ずるものとすれば、浅海域では浅水効果と非線形性の影響により、波群はすでに固定化される。したがって、浅海域における $H_{\max}$ の推定は、波群を考慮した浅水・破波変形モデルを用いることにより可能であると思われる。この場合波群の効果は、波高分布として Weibull 分布

を用いることにより考慮できる。つまり、図-6 によって GF と波高の度数分布を結び付け、波高の度数分布として Weibull 分布を用いた浅水・破波変形モデル(例えば間瀬ら, 1986)により算定すればよい。

7. あとがき

波群と波高の度数分布および $H_{\max}$ の出現頻度に対する検討を行うとともに、波群特性を考慮した設計波高の算出方法について述べた。本研究では、波高の度数分布として Weibull 分布を用いることにより、波群特性と波高の度数分布との関係、さらには波群特性と最高波高の出現確率の関係を明らかにすることができた。

しかしながら、設計条件としての波群特性の与え方、波高の相関性を考慮した $H_{\max}$ の出現確率、ならびに波群化指標 GF と Weibull 分布の形状母数の関係など、現在までのところ十分明確にされていない課題も多く残されており、現地データの蓄積が望まれる。

参考文献

- 合田良實 (1976): 波の連りの統計的性質について, 港湾技術研究所報告, 第 15 巻, 第 3 号, pp. 3~9.
- 合田良實 (1977): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 237p.
- 間瀬 肇・岩垣雄一 (1985): 波の変調不安定値論にもとづく現地波浪の Weve Group 特性の解析, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 184~188.
- 間瀬 肇・松本明男・岩垣雄一 (1986): 不規則波の浅水・破波変形モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第 375 号/II-6, pp. 221~230.
- 安田孝志・鶴岡亮行・土屋義人 (1989): 1 次元的に伝播するうねりの統計的性質の空間変動, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 109~113.
- Cohen, A. C., Jr. (1965): Maximum likelihood estimation in Weibull distribution based on complete and on censored samples, Technometrics, Vol. 7, No. 4, pp. 579~588.
- Goda, Y. (1983): Analysis of wave grouping and spectra of long-travelled swell, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 22, No. 1, pp. 3~41.
- Janssen, P. (1985): Stability of a random inhomogeneous field of weakly nonlinear surface gravity waves with application to the JONSWAP study, The Ocean Surface (Eds. Y. Toba and H. Mitsuyasu, D. Reidel Pub. Co.), pp. 39~49.
- Kimura, A. (1980): Statistical properties of random wave groups, Proc. 17 th Coastal Engrg. Conf., ASCE, pp. 2955~2973.
- Kimura, A. (1981): Joint distribution of the wave height and periods of random sea waves, Coastal Eng. in Japan, Vol. 24, JSCE, pp. 77~92.
- Longuet-Higgins, M. S. (1952): On the statistical distribution of sea waves, Jour. Marine Res., Vol. XI, No. 3, pp. 245~265.
- Tayfun, M. A. and J. Lo (1990): Nonlinear effects on wave envelope and phase, Jour. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 116, No. 1, ASCE, pp. 79~100.

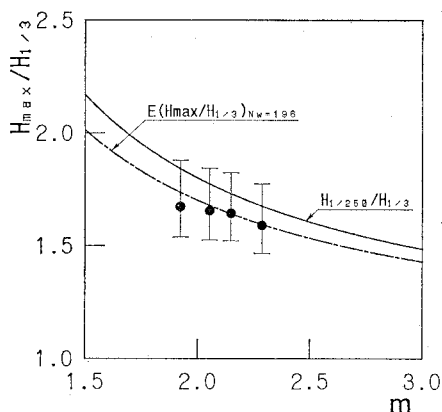


図-8 Weibull 分布の母数 m と $H_{\max}$ の関係