

非線形不規則波列における Freak Wave とその特性

安田孝志*・伊藤一教**・森 信人***

1. 緒 言

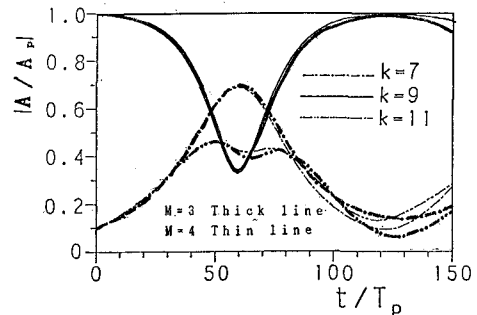
波高が有義波高の2倍を超えるような異常な高波は freak wave と呼ばれ、大水深海域の開発が進むにつれて広く知られるようになって来た。freak wave の特色は単独で出現する異常な高波という点にあり、その大半は波群を伴わずに単独で出現するが、稀には連なって出現するものもある(Kjeldsen, 1990)。その原因についても、多方向からの波の重畳による(Klinting・Sand, 1987)だけでなく、一方向不規則波列においても生じる(Stansberg, 1990)など確定していない。

Freak wave が従来言われているように、多方向からの波の合成や屈折・回折などの変形によるものとすれば、3次元空間での線形理論による取り扱いがまず必要となる。しかし、一方向不規則波列においても freak wave が発生する事実を重く見るならば、freak wave の発生と共鳴干渉とが密接に関わっているものと推察され、3次以上の非線形干渉を正しく評価した不規則波理論による取り扱いが必要となろう。

このように freak wave の研究は緒についたばかりであり、その全体像はなお不明であるが、本研究では、一方向不規則波列における freak wave に的を絞り、その発生に及ぼす3次干渉の影響について検討し、発生条件および頻度を明らかにする一方、シミュレーション結果を基に、計測困難な freak wave の水面における水粒子速度の特性について検討する。

2. 計算手法と精度

Freak wave の発生問題を数値シミュレーションで扱うには、高精度の計算手法が不可欠となる。同時に、風波に相当するスペクトルを持つ不規則波列をも対象とした長時間の伝播計算を行うため、計算時間の短縮化も重要な課題となる。前報(安田ら, 1990)で用いた Dommermuth・Yue(1987)の手法はこのような相反した要求



図—1 フーリエモードの変調不安定に対する M の次数の影響

に応え得るものであり、本研究でもこれを用いる。この手法では、水面での鉛直水粒子速度のみに近似が行われており、他の項は近似していないため、 $M=3$ としたときの解は Stokes 波の3次近似以上の精度を有することになる。

図—1 は、側帯波成分を有する準単色波の共鳴干渉によるモード変調の様子を $M=3$ および 4 の場合について示したものである。これから、 $M=3$ と 4 の差異は小さく、共鳴干渉についても $M=3$ で十分な精度が期待できることがわかる。以上より、 $M=3$ とすれば共鳴干渉による freak wave の発生問題を取り扱えると判断されるので、前報(安田ら, 1990)同様の方法で $k_p h = 3.0, 2.35, 1.72, 1.36, 1.04$, $k_p a = 0.17$, $m = 5, 10, 15, 30$ の 16 種類の初期波を生成し、 $M=3$ に固定して伝播計算を行うことにした。ここに、 k_p はスペクトルのピークモードの波数、 a は $(H_{1/3})/2$, h は水深、 m は Wallops スペクトルのバンド幅パラメーターである。計算では、周期的境界条件に従う波列の長さを $64 L_p$ (L_p はスペクトルのピークモードの波長)とした。なお、3次干渉の影響を明確にするため、比較用として Stokes 波流の展開による第2次近似解も求め、これを 2nd とした。

3. Freak Wave の発生とその条件

3.1 Freak wave の波形

図—2 に北海での典型的な freak wave の観測波形を

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学土木工学科

** 正会員 工修 大成建設株式会社 技術研究所

*** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科

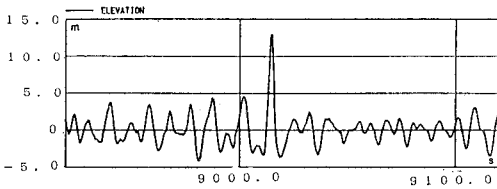


図-2 現地で観測された freak wave の時間波形 (Sand et al., 1990)

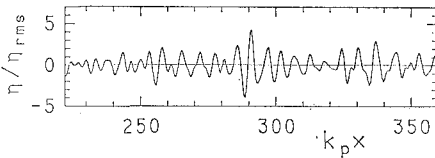


図-3 線形不規則波列における freak wave ($k_p a = 0.17$, $k_p h = 3.0$, $m = 30$)

示す。このような異常な高波は線形干渉では現れ難く、図-3 に示す線形波列における $H/H_{1/3} \geq 2$ の高波とは全く別物と言ってよい。図-4 は、上述の手法で行った $M=3$ でのシミュレーション波形に見られる $H/H_{1/3} \geq 2$ の高波の代表例を示したものであるが、図-2 の波形と

良く似ていることがわかる。これは、3次干渉によってスペクトルのバンド幅に関係なく現地での freak wave と極めてよく似た高波が出現しうることを示し、3次干渉が freak wave の有力な発生原因となることを示唆するものと言える。

3.2 3次干渉の影響

図-5 は、上述の不規則波列を $M=3$ および2次近似(2nd)のオーダーで解き、 $t/T_p = 75$ (T_p は k_p に対応した周期)まで伝播させ、 $\Delta t/T_p = 1.0$ ごとの空間波形より $H_{\max}/H_{1/3}$ を求め、その度数分布を Rayleigh 分布から導かれる次式の理論分布と比較したものである。

$$p(x_{\max}) = 2.832 x_{\max} \xi e^{-\xi}, \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $x_{\max} = H_{\max}/H_{1/3}$, $\xi = N \exp(-1.416 x_{\max}^2)$ であり、図中の $N_{\min}$ および $N_{\max}$ は、 $M=3$ の場合の伝播過程でのゼロダウン波の個数の最小および最大値を示す。2次干渉は波高分布に影響を与えない (Tayfun, 1983) ことから推察されるように、2次近似による結果は $H_{\max}/H_{1/3} \geq 2$ の部分において Rayleigh 分布によるものと余り違わず、ここに現れているような差異は統計的変動によるものと見ることができる。これに対し、 $M=3$ の結果では、狭帯化とともに $H_{\max}/H_{1/3} \geq 2$ の度数が

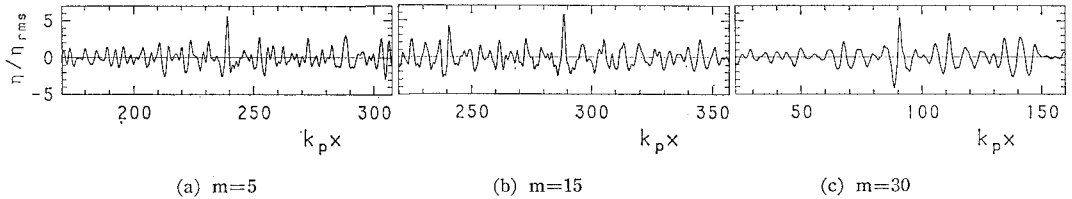


図-4 非線形不規則波列における freak wave ($k_p a = 0.17$, $k_p h = 3.0$)

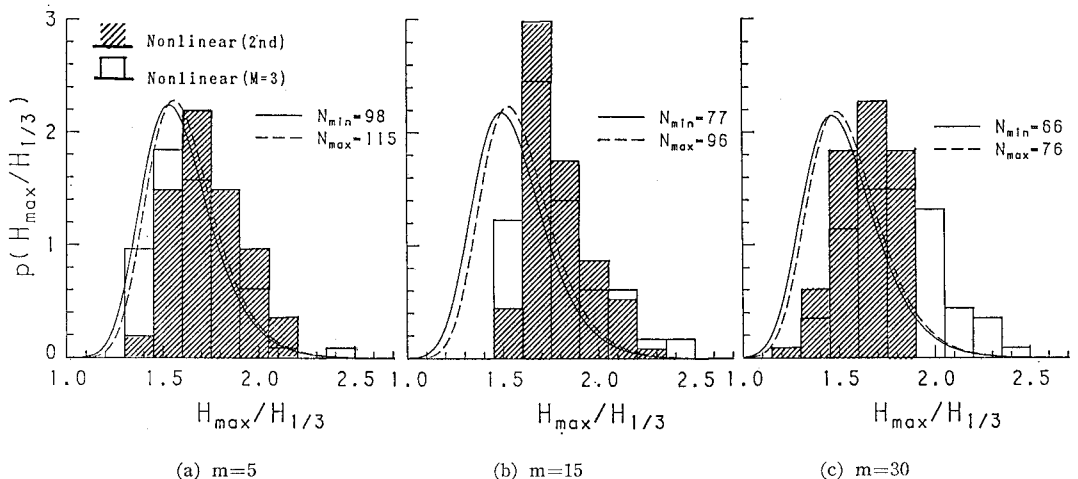


図-5 $H_{\max}/H_{1/3}$ の確率度数分布に及ぼす非線形干渉の影響 ($k_p a = 0.17$, $k_p h = 3.0$)

Rayleigh 分布によるものを大きく上回るようになり、3 次干渉が freak wave の発生原因になっていると認めることができる。このような freak wave は前述したようにバンド幅に関係なく現れるが、 $m \geq 15$ のような狭帯化が進んだ不規則波列においては発生確率が大きくなり、波群の発達だけでなく、freak wave の発生にも注意が必要となろう。

Freak wave の判定条件を $H_{\max}/H_{1/3} \geq 2$ とした場合、波の数 N が増せばそれに応じて $H_{\max}/H_{1/3}$ の値も増大する。波高が Rayleigh 分布に従うとしたときの $H_{\max}/H_{1/3} \geq 2$ の超過確率 μ は、

$$\mu = 1 - \exp(-N/3041) \dots\dots\dots (2)$$

によって与えられるが、3 次干渉の影響が加わった場合については明らかにされていない。

図-6 は、 $k_p h = 3.0$, $k_p a = 0.17$, $m = 30$ の波についてその伝播過程でのシミュレーション波形より $H_{\max}/H_{1/3}$ の度数分布を求め、それより計算した $H_{\max}/H_{1/3} \geq 2$ の超過確率 μ と式(2)による超過確率との比較を示す。このときの計算は、初期波形のゼロダウンクロス波高の数 N が 70, 150 および 500 の場合について行ったものであり、実線は式(2)による。線形波によるものは実線と一致しているとはいえないが、ほぼそれに沿っており、この程度の差異は統計的変動の枠内として捉えるべきであろう。これに対し、 $M=3$ の μ は N の値に関係なく式(3)による結果を常に大きく上回り、3 次干渉によって超過確率が Rayleigh 分布によるものを 10 倍($N=70$)か

ら 5 倍($N=500$) 程度上回るようになると考えるべきであろう。

3.3 Freak wave と波群の関係

波動の場合がフーリエモードの合成によっているとするなら、freak wave をフーリエモードの干渉による波列の異常と見ることができ、3 次干渉はフーリエモードの変調を介してこのような異常を強めていると考えるべきであろう。ところで、波列に現れる異常(例えば、高波の異常な連なりや増幅)を広く波群と捉えることにすれば、freak wave は高波の異常な増幅によるものであり、波群現象の 1 つの現れと見ることもできる。波群をこのように広義に捉えた場合の指標としては、波列上のポテンシャルエネルギーの集中度を表す Groupiness Factor (GF) が適切である。ここでは、GF と $H_{\max}/H_{1/3}$ の関係について調べ、freak wave と波群の関係を明らかにしたい。

図-7 は、 $k_p h = 3.0$, $k_p a = 0.17$, $m = 30$ の波について伝播過程での $H_{\max}/H_{1/3}$ と GF の変動を示したものである。これからも、3 次干渉の GF および $H_{\max}/H_{1/3}$ に対する影響は際立っており、3 次干渉の影響が波群を介して $H_{\max}$ や freak wave の発生と密接に関わっていることがわかる。また、 $H_{\max}/H_{1/3}$ と GF の変動もほぼ対応するようになり、3 次干渉による波群の発達が $H_{\max}/H_{1/3}$ を増大させ、freak wave の発生にも連がっていることがわかる。

以上の結果は、freak wave の発生が波群の発達と密接に関わっていることを示し、波群を伴わずに単独で出現

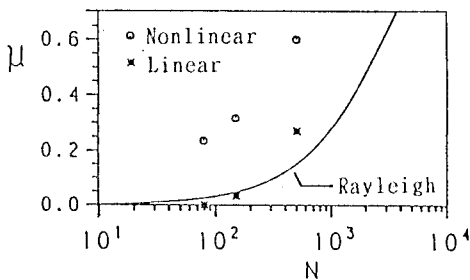


図-6 超過確率に及ぼすゼロダウンクロス波の個数の影響

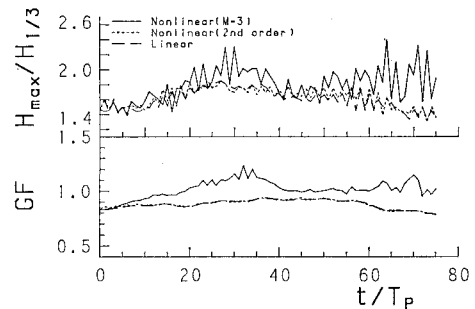
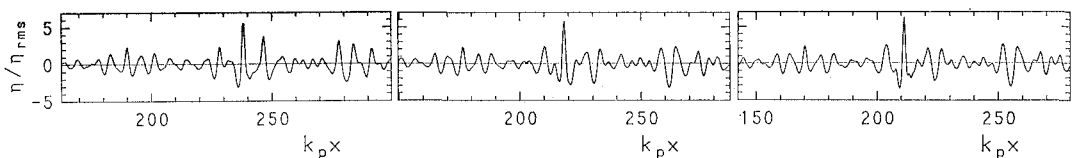


図-7 伝播に伴う GF と $H_{\max}/H_{1/3}$ の変動 ($k_p a = 0.17$, $k_p h = 3.0$, $m = 30$)

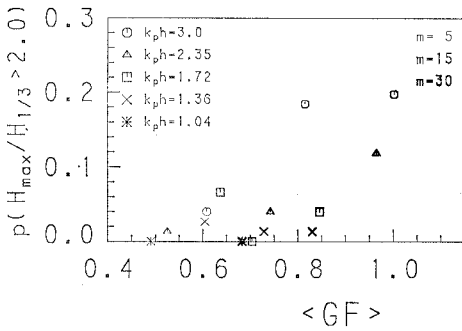


(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

図-8 非線形不規則波列における freak wave の出現例 ($k_p a = 0.17$, $k_p h = 3.0$, $m = 30$)



図—9 伝播過程での平均の GF と最高波が freak wave となる頻度 $p(H_{\max}/H_{1/3} > 2)$ の関係

する freak wave の特色とは一見矛盾している。この点を明確にするため、図—8 に $m=30$ の場合の freak wave の波形の数例を示す。このときの GF 値は 1 を超え、波動場全体における波群は十分に発達していると判断されるが、いずれの freak wave もほぼ単独で出現しており、高波の連なりを意味する狭義の波群は伴っていない。したがって、freak wave の発生に関わる波群は GF によって評価される広義の波群であり、freak wave に対してこの広義と狭義の波群を明確に区別することが上述のような矛盾や誤解を防ぐために必要である。

図—9 は、伝播の過程で最高波が freak wave となる頻度とそのときの GF の伝播過程での平均値 $\langle GF \rangle$ との関係を示したものであり、 k_{ph} および m の値ごとに示したものであり、 k_{ph} による違いはプロットの記号によって、 m については濃淡によって区別してある。このときの波の数は 80~100 波程度であり、Rayleigh 分布に従うとすれば、頻度は 0.026 となることから、0.03 以上に 3 次干渉の有意性が認められる。 k_{ph} の値が 1.72 までは freak wave の発生頻度は、 $\langle GF \rangle$ ととも無関係であるが、 k_{ph} が 2.35 を超え、狭帯化が進んでくると、3 次干渉の影響が顕著となり、 $\langle GF \rangle$ にも依存するようになる。したがって、深海において狭帯化が進み、伝播の過程を通じて GF が 0.8 程度

となる波では、freak wave の頻度は 0.2 近くなり、極めて危険となる。

4. Freak Wave の波形と水粒子速度

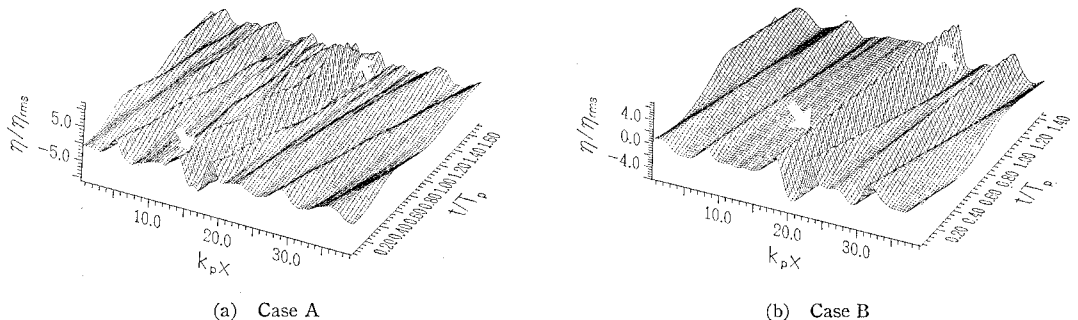
4.1 Freak wave の発生の様子

これまで得られている freak wave の計測データは 1 測点におけるものであり、その発生の様子を知るには不十分と言わねばならない。そこで、シミュレーション波形を基に freak wave の発生過程について検討する。図—10 は、freak wave を含む波列の一部を取り出し、その時間発展を示したものである。図中の矢印に狭まれた区間が freak wave の出現区間 Δt を示し、図の (a) および (b) での $\Delta t/T_p$ はそれぞれ 1.32 および 0.93 である。いずれの freak wave も瞬間的に形成されて消えていくものではなく、 Δt の時間程度は安定な波峯として進んでいくことがわかる。特に、(b) の freak wave の安定性は高く、疑似定常波としての扱いが可能となると考えられる。

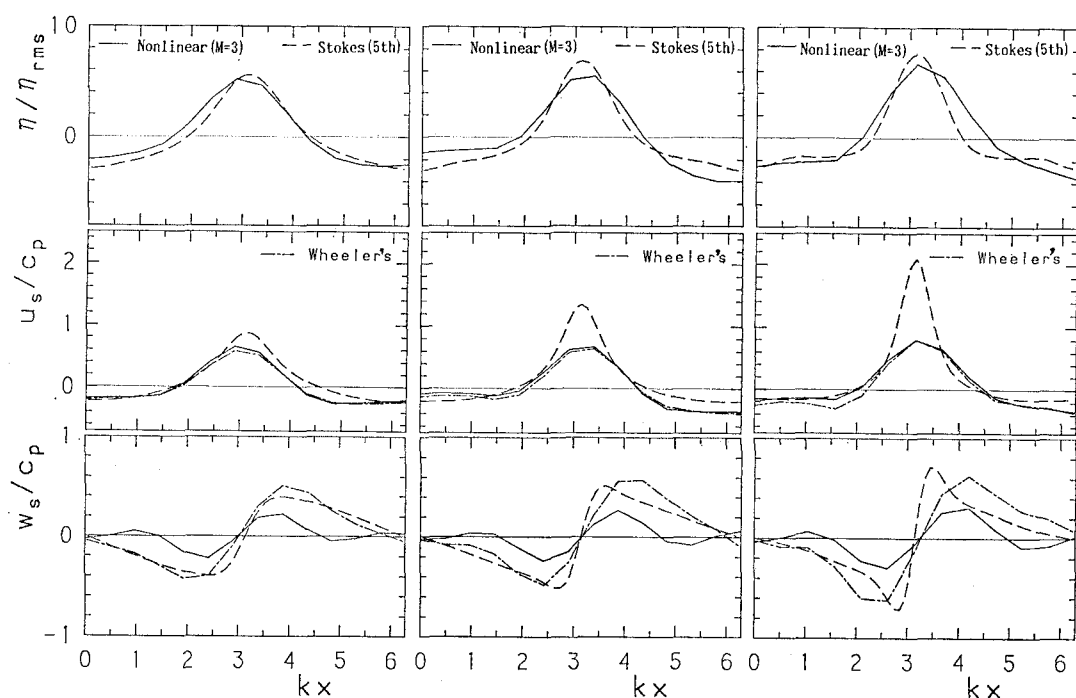
4.2 Freak wave の表面流速

静水面上の水粒子速度は構造物に作用する波力の評価や、それによる応答解析を行う上で非常に重要であるが、計測の困難さにより、信頼できるデータは極めて少ない。このため、線形フィルターによって水粒子速度を計算する場合に必要な Stretched 自体が確定せず、データの蓄積が待たれている状況にある (Klinging・Jacobsen, 1990)。これが freak wave となるとほとんど未知に近く、構造物の応答から逆に水粒子速度が推算されているのが現状である (Sand ら, 1990)。そこで、ここで行っているシミュレーションの結果より freak wave の水面での水粒子速度 u_s および w_s を計算し、その特性について調べる。

Freak wave をゼロダウン法で取り出し、その波形および水面での水粒子速度を定常波 ($ka > 0.443$ では Stokes 波の厳密解が存在しないため、第 5 次近似解を用いている) のものと比較する。図—11 はその結果であり、



図—10 非線形不規則波列での freak wave の発生過程 ($k_{pa}=0.17$, $k_{ph}=3.0$, $m=30$)



(a) Case 1 ($ka=0.48$, $H/H_{1/3}=2.08$) (b) Case 2 ($ka=0.56$, $H/H_{1/3}=2.42$) (c) Case 3 ($ka=0.63$, $H/H_{1/3}=2.63$)

図-11 freak wave の波形と水面での水粒子速度に関する Stokes 波および線形フィルターとの比較

Wheeler の線形フィルターによる結果も併せて示してある。 ka が 0.44 を超えるような Stokes 波は厳密には存在しないこともあり、Stokes 波の波形に 2 次波峯が生じて来るが、それ以上に水粒子速度が過大評価されるようになり、freak wave を定常波として扱うことに問題のあることがわかる。勿論、 $ka > 0.443$ を超えるような freak wave の存在については検討が必要であろうが、前述の図-10 の freak wave の発達やここで示す水粒子速度の値から見て、freak wave は Stokes 波の限界を超えてなお安定であると言えそうである。これに対し、Wheeler の線形フィルターは、 u_s に関しては優れた精度を有しており、シミュレーション結果とほとんど一致した結果を与えることがわかる。ただし、 w_s については freak wave の波高が大きくなるに従って過大評価となり、この点になお問題のあることがわかる。

5. 結 語

任意のバンド幅を持つ不規則波の伝播シミュレーションを行い、1 方向不規則波列における freak wave の発生原因が 3 次干渉による波列の異常にあることを明らかにした。このような波列の異常を広く波群として捉え、それを GF によって評価することにより、freak wave の発生頻度を GF との関係で捉えられるようになることを示した。さらに、freak wave の水面の水粒子速度につい

て調べ、freak wave が Stokes 波の限界を超えてなお安定な非定常波ということもあり、定常波としての扱いでは過大評価となるが、Wheeler の波形フィルターでは鉛直成分は過大評価となるものの水平成分は精度の良い評価となることを示し、非定常波としての扱いの必要性を明らかにした。最後に、本研究は文部省科学研究費一般研究 (c) による成果であることを付記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 安田孝志・伊藤一教 (1990): 高波の連なりに及ぼす非線形干渉の影響について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 106-116.
- Demmermuth, D. and D. Yue (1987): A high order spectral method for the study of nonlinear gravity waves, J. Fluid Mech. Vol. 184, pp. 267-288.
- Kjeldsen, S. (1990): Breaking waves, in Water Wave Kinematics (Eds. A. Torum & O. Gudmestand, Kluwer Academic Pub.), pp. 453-473.
- Klitting, P. and S. E. Sand (1987): Analysis of prototype freak waves, in Coastal Hydrodynamics (Ed. R. A. Dalrymple, ASCE), pp. 618-632.
- Sand, S. et al. (1990): Freak wave kinematics, in Water Wave Kinematics (Eds. A. Torum & O. Gudmestand, Kluwer Academic Pub.), pp. 535-549.
- Stansberg, C. (1990): Extreme waves in laboratory generated irregular wave trains, in Water Wave Kinematics (Eds. A. Torum & O. Gudmestand, Kluwer Academic Pub.), pp. 573-589.
- Tayfun, M. (1983): Nonlinear effects on the distribution of crest-to-trough wave heights, Ocean Eng., Vol. 2, No. 2, pp. 97-106.