一方向波列の伝播過程におけるFreak Waveの出現と 浅水変形の関係について

Relationship between Freak Wave Occurrence and Wave Shoaling for Uni-Directional Random Waves

加島寛章¹・平山克也²・森 信人³

Hiroaki KASHIMA, Katsuya HIRAYAMA and Nobuhito MORI

Nonlinear four-wave interactions influence the statistical properties of deep-water extreme waves such as a freak wave. However, it is still not clear the characteristics of deep-water generated freak wave shoaling to shallow water region. In this study, the experiments with several bathymetry model are conducted to uni-directional random waves. The maximum wave height increases with an increase in kurtosis by third-order nonlinear interactions in deep water. The dependence of the kurtosis on the freak wave occurrence weaken by second-order nonlinear interactions associated with wave shoaling when the dimensionless depth $kh < 1.36$.

1. 緒言

外洋における漁船等の海難事故の原因の1つに挙げられる突発波浪はFreak Waveと呼ばれ、北海油田の開発に係わるヨーロッパの国々を中心に研究が進められている。その結果、深海域では、3次の非線形干渉の影響が顕著になると、kurtosisが増大し、これに伴ってFreak Waveのような突発波浪の出現確率が増大することが報告されている (Janssen, 2003)。

Mori・Janssen (2006) は、Freak Waveを有義波高の2倍を超える最大波と定義し、4波相互作用を考慮した非線形理論をもとに、深海域におけるFreak Waveの予測理論を提案している。この予測理論の考え方は、スペクトル形状からkurtosisを求め、これと波列の長さ N から最大波高を推定するものである (式 (1))。

$$p_m(H_{max}) = \frac{N}{4} H_{max} e^{-\frac{H_{max}^2}{8}} [1 + \kappa_{40} A_H(H_{max})] \times \exp \left\{ -N e^{-\frac{H_{max}^2}{8}} [1 + \kappa_{40} B_H(H_{max})] \right\} \dots (1)$$

ここで、 $\kappa_{40} = \mu_4 - 3$ であり、 A_H および B_H は H についての多項式である。このように、深海域におけるFreak Waveの発生特性や予測について明らかになりつつある。しかしながら、水深の影響を含む浅海域における振る舞いについては、未だほとんど検討されていない。

そこで本研究では、深海域や浅海域、深海域から汀線までを伝播する一方向波列を対象に、水深変化に着目した断面水路実験を行い、Freak Waveの出現と浅水変形の

関係について明らかにする。

2. 断面水路実験の概要

実験は、長さ35m、幅0.6m、高さ1.3mの断面水路内に、図-1に示すような深海域から汀線までを想定した海底地形（一様水深地形、1/20一様勾配斜面地形、2勾配斜面地形、ステップ地形）を模型により再現し、一方向不規則波列を造波して水路内の波形変化を計測した。

実験に用いた一方向不規則波列は、入射波周期 T を1.0sに固定し、JONSWAP型スペクトルのスペクトル尖鋭度 γ や入射波高 H に対する波形勾配 H/L_0 、造波水深 h を変化させて合計13ケースと設定した (表-1)。表中の k_0 および L_0 は、 $T=1.0$ sの深海波の波数および波長を表している。統計的な変動性を抑制するために10000波以上造波し、サンプリング周波数20Hzで15～22地点の水面波形を計測した。また、1波列の波の数 $N=200$ と仮定した50波列を対象に、各地点で計測された水面変位から波の非線形性を表す波浪統計量のskewness (μ_3) やkurtosis (μ_4)、最大波高の期待値 $\langle H_{max}/H_{1/3} \rangle$ を算出した。

3. 結果と考察

(1) 深海域におけるFreak Waveの出現特性について

深海域 (図-1 (a)) におけるFreak Waveの出現特性について、まずFreak Waveの発生に重要なファクターである非線形性について検討を行った。図-2に示すのは、深海域を対象としたcase1～5の全計測データから算出された μ_3 と μ_4 の空間変化である。横軸は深海波の波長で無次元化した造波板からの距離 x を表している。なお、図中の μ_3 および μ_4 は50波列の平均値を表しており、これ以降の解析では、特段の断りがない限り平均値を採用する。

1 正会員 修(工) (独法) 港湾空港技術研究所
2 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所
3 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所

図-1 海底地形断面 (w: 波高計)

表-1 入射波諸元

case	$H(\text{cm})$	$h(\text{m})$	k_0h	H/L_0	γ	section
1	6.24	0.8	3.22	0.04	1	flat
2	6.24	0.8	3.22	0.04	3.3	flat
3	6.24	0.8	3.22	0.04	10	flat
4	3.12	0.8	3.22	0.02	10	flat
5	4.68	0.8	3.22	0.03	10	flat
6	6.24	0.32	1.29	0.04	10	flat
7	6.24	0.8	3.22	0.04	1	1-slope
8	6.24	0.8	3.22	0.04	3.3	1-slope
9	6.24	0.8	3.22	0.04	10	1-slope
10	3.12	0.8	3.22	0.02	10	1-slope
11	4.68	0.8	3.22	0.03	10	1-slope
12	6.24	0.5	2.01	0.04	10	step
13	6.24	0.5	2.01	0.04	10	2-slope

図-2より, 2次の非線形の影響を受けてskewnessは伝播距離に依存せず, 各波形勾配に応じた値で一定である。一方, kurtosisは伝播に従って単調増加し, この傾向は同じ波形勾配に対してスペクトル尖鋭度が大きいほど顕著である。また, 同一のスペクトル尖鋭度に対し, 波形勾配が大きいほど造波直後のkurtosisは大きい。

図-2 深海域における μ_3 と μ_4 の空間変化

(a) skewness (μ_3)

(b) kurtosis (μ_4)

図-3 深海域における μ_3 および μ_4 と $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ の関係

次に, 最大波高に及ぼす非線形性の影響を確認するため, μ_3 および μ_4 と $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ の関係を図-3に示す。図-3(a)より $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ はskewnessに依存しないことがわかる。一方, kurtosisは3次の非線形補正として波高分布に直接影響を与えるため, $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ とkurtosisには良い相関が見られる(図-3(b))。ここで, 図中に示す実線は, 式(1)で表される4波相互作用を考慮した非線形理論に基づくkurtosisと最大波高の期待値の関係(Mori・Janssen, 2006)である。この非線形理論では, 狭帯域ス

図-4 μ_3 と μ_4 の空間変化 ($H=6.24\text{cm}$, $\gamma=10$, $H/L_0=0.04$)

ペクトルを持つ非線形不規則波を対象としているため、スペクトル尖鋭度や波形勾配が最も大きいcase3 ($\gamma=10$)の実験結果と一致し、それ以外では過大である。

このように、深海域では、波が伝播するほど3次の非線形干渉により kurtosis が増大し、その変化に依存して Freak Wave の発生する可能性 (最大波高の期待値) が大きくなることが、理論式のみならず実験結果からも確認された。

(2) 浅海域における Freak Wave の出現特性について

上記のように、理論式で予測された深海域における非線形干渉と Freak Wave の出現の関係についてはこれまで検討されてきたが、浅海域では海底地形の影響を受けるため、Freak Wave の出現特性が深海域と異なることが考えられる。そこで、この海底地形の影響を2つの単純な伝播過程 (浅海域の一樣水深海域を波が伝播する過程: 浅海域, 深海域から汀線まで波が伝播する過程: 遷移海域) を想定した地形 (図-1 (a) および (b)) を用いて表現し、浅水変形を伴う水深変化が Freak Wave の出現特性に及ぼす影響について検討を行った。まずここでは、Freak Wave が発生しやすい波浪条件 ($H=6.24\text{cm}$, $\gamma=10$, $H/L_0=0.04$) を対象とした。

a) 浅海域における非線形性

図-4 に同一の波浪条件 (case3, 6, 9) に対する skewness と kurtosis の空間変化を示す。なお、case6 の浅海域の実験結果の造波直後 ($x/L_0 < 2.5$) における skewness の減少は、造波直後の乱れた波形が伝播とともに安定したことによるものと考え、これ以降では、これらのデータは省いて解析を行う。

図-4 (a) より、浅海域の一樣水深海域の case6 では、

図-5 μ_3 と μ_4 の関係 ($H=6.24\text{cm}$, $\gamma=10$, $H/L_0=0.04$)
(着色: $k_0h < 1.36$, 非着色: $k_0h \geq 1.36$)

skewness は空間変化を伴わず一定であり ($\mu_3=0.19$)、深海域における傾向に類似する。これは、 $\mu_3 < 0.2$ では、水面変位は Gauss 過程で近似できることによるものと考えられる (Ochi・Wang, 1984)。また、kurtosis は深海域の case3 ほど顕著な増大は見られず、kurtosis の増大率に対する伝播距離の影響が小さいと言える。このことは、Yuen・Lake (1982) が述べている $k_0h < 1.36$ では、3次の非線形干渉は高波高の出現を抑制し、深海域で確認される波形の特異性がなくなることをよく表している。一方、遷移海域とした case9 では、skewness および kurtosis はともに、斜面の中腹: $x/L_0=6.9$ ($k_0h=1.36$) を境にその挙動が変化する (図-4 (b))。 $x/L_0 < 6.9$ ($k_0h \geq 1.36$) では、skewness は伝播距離に依存せず一定であり、kurtosis は3次の非線形干渉により波の伝播とともに増大する。 $x/L_0 \geq 6.9$ ($k_0h < 1.36$) では、skewness および kurtosis はともに急増する。後で詳細な検討を行うが、これは浅水変形を伴う2次の非線形干渉によるものである。

上記より、一方向波列に対する非線形干渉の影響が深海域と浅海域で異なることが確認された。そこで、より詳細に水深変化と非線形性の関係を確認するため、図-5 に skewness と kurtosis の関係を示す。着色・非着色プロットは、それぞれ $k_0h < 1.36$ および ≥ 1.36 に対応するデータである。また、図中の実線は2次近似 Stokes 波に対して水深の影響を考慮した場合における skewness と kurtosis の関係式 (Mori・Kobayashi, 1998) を、破線は水深 1.4 ~ 24.4m をもつ海浜で観測された現地データから導出された経験的な関係式 (Ochi・Wang, 1984) を表している。 skewness と kurtosis がこれらの関係式に従う場合には、浅水変形に伴う2次の非線形干渉が支配的な skewness が kurtosis 変化に影響を与えていることを意味する。図-5 より、 $k_0h \geq 1.36$ では、kurtosis の skewness 依存は確認されず、3次の非線形干渉により kurtosis が変化することがわかる。一方、 $k_0h < 1.36$ では、kurtosis は2次の非線形干渉が支配的な skewness に依存する。

図-6 遷移海域における μ_3 と μ_4 の関係
(着色： $k_0h < 1.36$ ，非着色： $k_0h \geq 1.36$)

このように、 $k_0h=1.36$ を転移点として、それよりも深い海域では4波相互作用の効果による3次の非線形干渉が、それよりも浅い海域では浅水変形に伴う2次の非線形干渉がkurtosis変化に影響を及ぼすことが確認された。

b) 浅水変形を伴う水深変化とFreak Wave出現の関係

上記を踏まえ、 k_0h の変化に着目して遷移海域を対象にFreak Waveの出現特性について検討を行った。

まず、水深変化と非線形性の関係を確認するため、図-6に、遷移海域を対象としたcase7～11の全計測データから算出されたskewnessとkurtosisの関係を示す。図-5と同様に、着色・非着色は、それぞれ $k_0h < 1.36$ および ≥ 1.36 を表す。右図は $\mu_3=0.1$ 、 $\mu_4=3.0$ 近傍の拡大図である。前節で述べたように、 $k_0h < 1.36$ において、kurtosisはskewnessに依存し、Mori・Kobayashi (1998)やOchi・Wang (1984)の関係式に概ね従う。一方、 $k_0h \geq 1.36$ では、造波直後のkurtosisが波形勾配により異なるため、kurtosisは何らかの関係式に従うように見えるが、各波形勾配に対して見ると、深海域と同様にkurtosisのskewness依存は見られない。

次に、最大波高に及ぼす非線形性の影響を確認するため、図-7に μ_3 および μ_4 と $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ の関係を示す。図の説明は図-3と同様で、着色・非着色は、それぞれ $k_0h < 1.36$ および ≥ 1.36 を表し、特に黄色で塗られたものは砕波帯内のデータである。これらの図より、 $k_0h \geq 1.36$ では、深海域の場合(図-3)と同様に、入射波浪ごとに最大波高のkurtosis依存性が確認できる。一方、 k_0h が1.36を下回ると、最大波高の期待値は2次の非線形干渉により急増するskewnessやkurtosisに対してほぼ一定値をとり(最大波高のkurtosis依存が弱まり)、その後、砕波により減少する。

(3) 現地単純化地形におけるFreak Waveの出現特性

これまでの結果を踏まえ、現地を単純化した断面地形(斜面上に一樣水深部を有するステップ地形：図-1(c)、2つの異なる勾配をもつ傾斜地形：図-1(d))におけるFreak

(a) skewness (μ_3)

(b) kurtosis (μ_4)

図-7 遷移海域における μ_3 および μ_4 と $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ の関係
(着色： $k_0h < 1.36$ ，非着色： $k_0h \geq 1.36$ ，黄色：砕波帯内)

Waveの出現特性について検討を行った。この検討でも、 $H=6.24\text{cm}$ 、 $\gamma=10$ 、 $H/L_0=0.04$ の入射波浪を対象とした。

まず、図-8に示すskewnessとkurtosisの空間変化についてみると、両地形のskewnessおよびkurtosisは、造波板前面から斜面上では、図-4に示すような k_0h の観点から見た深海域や遷移海域における特性と同様なる振舞いをする。また、2勾配斜面地形の斜面勾配変化部では、砕波点直前に相当するために波形が切り立ち、skewnessおよびkurtosisが急増する。一方、ステップ上では、skewnessはほぼ一定となり($\mu_3 \approx 0.3$)、kurtosisは単調減少する。これは、波群の扁平化によるものと考えられるが、詳細については、今後検討が必要である。

図-9に示すのは、skewnessとkurtosisの関係である。図中の○および△はステップおよび2勾配斜面地形のデータであり、白や黒、灰色は、それぞれ $k_0h \geq 1.36$ 、 $k_0h < 1.36$ 、ステップ上に対応するデータである。これより、両地形に対して $k_0h < 1.36$ (黒印)となるkurtosisは、遷移海域でみられたようにMori・Kobayashi (1998)やOchi・Wang (1984)の関係式とほぼ同一勾配で増大するが、関係式に比べて過大である。これは、 $k_0h \geq 1.36$ で生じた3次の非線形干渉の履歴が $k_0h < 1.36$ で生じる2次の非線形干渉にそのまま残ることを示している。したが

図-8 現地単純化地形における μ_3 と μ_4 の空間変化 図-9 現地単純化地形における μ_3 と μ_4 の関係 (a) skewness (μ_3) (b) kurtosis (μ_4)図-10 現地単純化地形における μ_3 および μ_4 と $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ の関係

って、深海域からの急激な水深変化をもつ孤立島しょ周辺海域における最大波高を考える際には注意を要する。

最後に、skewnessおよびkurtosisと $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ の関係について調べた (図-10)。プロットの説明は図-9と同様であり、実線は図-3に示したMori・Janssen (2006) の非線形理論である。これより、図-7で示したような $k_0h=1.36$ を転移点とした $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ の振る舞いを確認することができる。しかし、これらのcaseでは、斜面およびステップ上の水深が伝播する波に対して碎波水深に達していないため、遷移海域のような碎波による $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle$ の減少は見られない。また、 $k_0h=2.01$ なる海域からの造波により深海域ほどのkurtosis発達がないため、これらのデータは非線形理論を下回る。

4. 結語

本研究では、十分なサンプル数を有する断面水路実験のデータをもとに、浅水変形を伴う水深変化とFreak Waveの出現特性の関係について検討を行った。

主な成果は以下のとおりである。

- $k_0h \geq 1.36$ となる海域では、3次の非線形干渉によりkurtosisが増大し、その変化に依存して最大波高が大きくなり、伝播距離が長いほどFreak Waveが出現す

る可能性が高くなる。

- k_0h が1.36を下回ると、浅水変形に伴う2次の非線形干渉の影響を受けて最大波高のkurtosis依存性が弱くなるが、地形によっては深海域の影響が大きく残る。
- $k_0h=1.36$ を転移点とした2つの海域から、現地海域におけるFreak Waveの出現特性を整理できる。

最後に、本研究の成果の一部は科学研究費補助金 (代表者: 森 信人) によるものであることを付記する。

参考文献

- Janssen, P.A.E.M. (2003) : Nonlinear four-wave interactions and freak waves, J. Phys. Oceanogr., 33, 4, pp.863-884.
- Mori, N. and N. Kobayashi (1998) : Nonlinear distribution of nearshore free surface and velocity, Proc. 26th ICCE, pp.189-202.
- Mori, N. and P.A.E.M. Janssen (2006) : On kurtosis and occurrence probability of freak waves, J. Phys. Oceanogr., 36, 7, pp.1471-1483.
- Ochi, M. and W.C. Wang (1984) : Non-Gaussian characteristics of coastal waves, Proc. 19th ICCE, pp.516-531.
- Yuen, H. and B.M. Lake (1982) : Nonlinear dynamics of deep-water gravity waves. Advances in Applied Mech. 22, pp.67-327.