

一方向波列における Freak wave の安定性と内部特性

安田 孝志*・森 信人**・中山 晋一***・田中 光宏****

1. 緒 言

Freak wave のような突出した高波の内部特性の解明は、海洋構造物の設計や船舶の安全性からも極めて重要であるが、現地での観測データが皆無に近く、また、実験室での Freak wave の再現や水面付近の流速測定の見難さもあって、Freak wave の内部特性の解明はほとんど進んでいない。

安田ら (1991) は、数値シミュレーションに基づく一連の研究によって、一方向波列においても共鳴干渉によって突出した波峰を持つ Freak wave が発生することを示し、その表面流速についての検討も行っている。それは、非回転波動の仮定など一定条件の下での結果であるが、流体力学の基礎方程式を解いて得られたものであり、その結果は非回転流体場での力学的事実を示すと言ってよい。また、この手法では、任意の流体内部での流速や圧力の計算が波形の計算と同時にできるため、Freak wave の内部特性の評価が容易となっている。

本研究では、こうした手法によって Freak wave の安定性および内部特性の解明を進め、これに及ぼす波形やその非定常性、さらに非線形性の影響を明らかにしたい。

2. 数値シミュレーションの手法

ここで用いる手法は、Dommermuth・Yue (1988) によるスペクトル法に基づいており、水面変動 η および自由表面上の速度ポテンシャル ϕ^s に関する発展方程式を解き、刻々の (η, ϕ^s) を求める。したがって、任意の流体内部点での水粒子速度などの表示を (η, ϕ^s) の関数として導けば、必要な時刻での内部特性が計算できる。

精度検証のため、 $ka=0.2$ の Stokes 波を厳密解によって初期波として与え、これを 100 周期伝播させたときのエネルギーおよび波形との最大相対誤差を調べた。その結果、速度ポテンシャルの非線形次数 M を 5、フーリエモードの次数 N を 16 とした場合、両者とも 10^{-5} のオー

ダーとなり、ほぼ厳密に近い精度となった。

シミュレーションは、深海波条件の下で $m=5$ および 30、 $k_p a=0.15$ の Wallops 型スペクトルを持つ初期波を生成し、 $M=5$ および $N=256$ として行った。ここで、 m はスペクトル幅パラメータであり、 k_p はスペクトルのピークモードの波数、 a は有義波の振幅である。なお、初期位相を与える乱数列の Freak wave の出現に対する影響を調べるため、3 通りの乱数列を用いた検討を行い、出現頻度に影響はあるものの Freak wave の波形への影響はないことを確認した。

3. Freak wave の波形と安定性

3.1 波形特性

一方向波列における Freak wave であってもその波形は多様であり、ここではそれらを、I) 突出型、II) 急変型、III) 波群型、IV) その他の 4 種類に大別した。図 1 はシミュレーション波形から取り出したこれら 4 種類の波形の代表例を示したものであり、波頂点に丸印を付けたものがその Freak wave である。また、表 1 はこれらの Freak wave の波形諸量および出現時間に加え、Freak wave が出現した波列のスペクトル幅パラメータ m の値を示したものである。表中の χ は Freak wave の波高 $H_{\max}$ の両側の波高の平均値 $(H_{i-1} + H_{i+1})/2$ に対する比、 χ は Freak wave の波高 $H_{\max}$ に対する比、 $(ka)_f$ は Freak wave の ka の値、 j^* は $H_{1/3}$ を境界値とする Freak wave の連長、 τ は Freak wave の出現時間である。突出型は波群を伴わずに単独で出現し、しかも突出した波峰を持つものであり、 $\chi \geq 2.0$ および $\chi \geq 0.65$ の条件を満たす。急変型は、II-1 および 2 の波形からもわかるように Freak wave の波峰の前方に深い波谷を伴うものであり、単独で出現し、 χ の値が 2 を超える点は突出型と同じであるが上下の対称性が特徴であり、このため χ の値は必ずしも 0.65 を超えない。しかし、水面が深い波谷から波峰まで急変するため、船舶などには極めて危険となる。これら両タイプはスペクトル幅に関係なく出現するが、波群型は $m=30$ の場合にしか見られず、線形波列において見られるような最高波を中心とした波群を形成している。このため、 χ の

* 正 会 員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 岐阜大学大学院 工学研究科 (日本学術振興会 特別研究員)

*** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科

**** 理博 岐阜大学助手 工学部共通講座

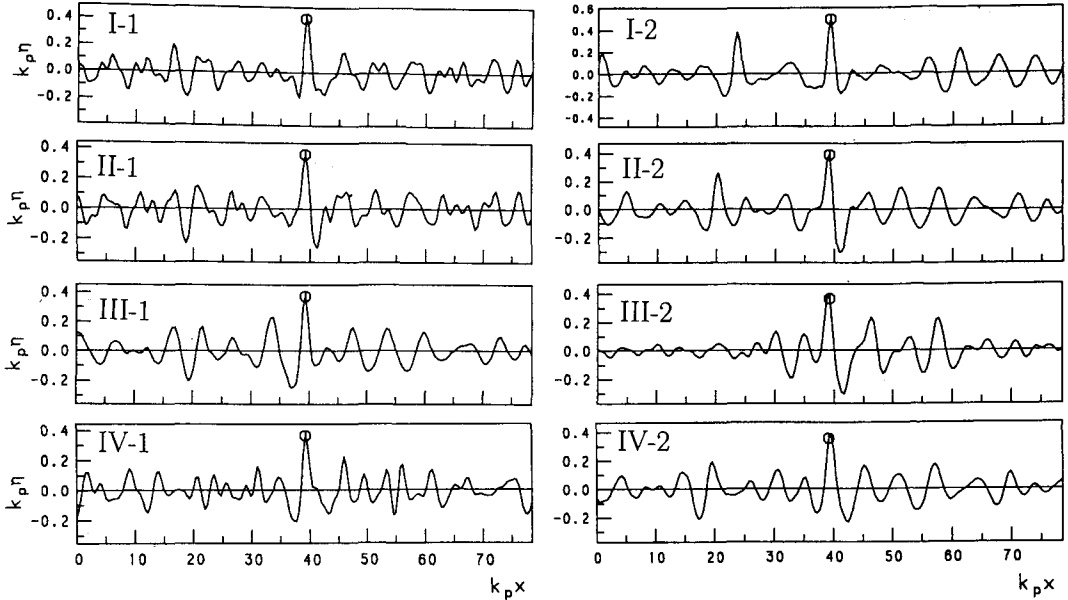


図-1 4種類に大別されたFreak waveの代表例

表-1 4タイプのFreak waveの波形諸量

	m	$H_{\max}/H_{1/3}$	κ	χ	$(ka)_f$	j^*	τ/T_p
I-1	5	2.02	2.20	0.72	0.31	1	0.25
I-2	30	2.19	10.12	0.73	0.47	1	0.63
II-1	5	2.11	2.61	0.61	0.29	1	0.25
II-2	30	2.38	3.39	0.57	0.32	1	0.88
III-1	30	2.05	7.48	0.63	0.45	2	0.13
III-2	30	2.01	1.74	0.55	0.36	2	0.13
IV-1	5	2.04	2.35	0.64	0.28	1	0.13
IV-2	30	2.03	2.39	0.61	0.32	1	0.75

値は必ずしも2を超えず、逆にFreak waveの連長 j^* は他のタイプのものに比べて大きくなる。IVのその他のタイプは、これらの3タイプのいずれにも属さないものであるが、IV-1および2の波形からわかるようにこれらの中間的なものと言える。これらの分類を κ 、 χ および j^* の値を基に行うと、概略次のようになろう、I)突出型： $\kappa \geq 2.0$ および $\chi \geq 0.65$ 、II)急変型： $\kappa \geq 2.0$ および $\chi \leq 0.65$ 、III)波群型： $\kappa \leq 2.0$ あるいは $\chi \leq 0.65$ および $j^* \geq 2$ 。

3.2 Freak waveの安定性

表-1に示すI-2のFreak waveの $(ka)_f$ の値は、Stokes波の限界値0.443を超えているが、この波が実際に砕波せずに存在できるか否かはEuler座標による限り不明である。そこで、Dold (1992)によって開発されたBIMによる計算を行い、砕波の有無について検討した。具体的には、スペクトル法による伝播シミュレーション

においてI-2のFreak waveの発生した時刻 $t/T_p=35.70$ での (η, ϕ^*) をBIMによる計算の初期値として与え、波峯の $overturn$ が始まる $t/T_p=37.98$ までの時間発展計算を行った。このときの計算領域はスペクトル法の場合と同じ $k_p x=128\pi$ であり、水面での接点数は1024である。図-2は、こうして計算された波形からFreak waveの周辺だけを取りだし、スペクトル法による計算結果と比較したものである。これから、BIMによるFreak waveはStokes波の安定限界である0.443をこえてなお安定であり、スペクトル法によるものと $(ka)_f=0.447$ においてほぼ完全に一致している。そして、BIMによるFreak waveの $(ka)_f$ の値は0.49まで増大し、そこで波峯が $overturn$ し、最終的に砕波してしまっているが、表-1に示した $(ka)_f=0.47$ までは非砕波Freak waveとして伝播している。また、スペクトル法による結果ともほぼ一致していることから、スペクトル法による非砕波Freak waveはいずれも正しいと判断できる。

4. Freak waveの内部特性とその表示

4.1 水平水粒子速度の水平分布

ここでは、自由表面 $k_p z=\eta$ および平均水面下 $k_p z=-1.0$ での水平水粒子速度 u の水平分布を線形フィルターによる結果との比較によって考察する。図-3は、前述のII-2の急変型Freak waveを含む波列についてこれらの比較を行ったものである。 $k_p z=-1.0$ の位置では線形フィルターの結果はシミュレーション結果とほぼ一致した結果を与えるが、表面流速では、線形フィルターは

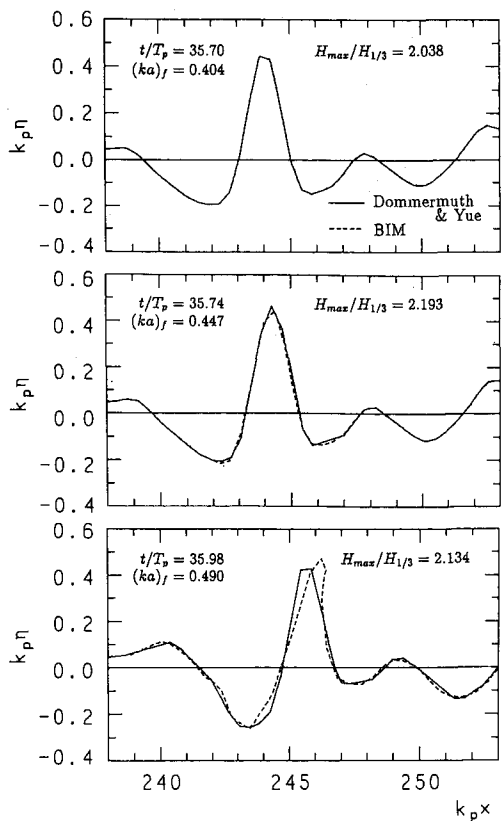


図-2 BIMによって計算された $(ka)_f$ が0.443を超える Freak waveの波形変化

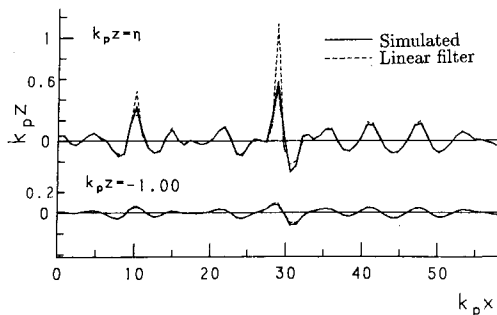


図-3 Freak waveを伴う波列における水平水粒子速度のシミュレーション結果と線形フィルターとの比較

Freak waveの波峰で過大となっているのに対して波谷で過小となっている。これは、不規則波の水平流速に対して指摘されていること (Zhang et al., 1992) であるが、Freak waveの内部特性に非線形干渉の影響が重要となることを示している。

4.2 水粒子速度の鉛直分布

ここでは、図-1に示した $(ka)_f$ の値が0.3前後の4つのタイプのFreak wave (I-1, II-1, III-2, IV-1)の波峰直下の水平および鉛直水粒子速度 u および w の鉛直分布を比較し、Freak waveの波形と内部特性の関係に

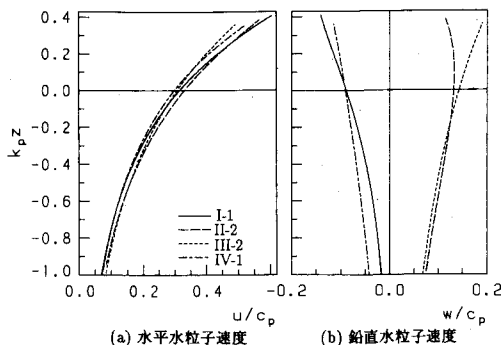


図-4 Freak waveの波形と水粒子速度との関係

ついて考察する。図-4はその結果を示したものであり、 c_p で与えられる線形波の波速 c_p は $\sqrt{g/k_p}$ を示す。これから、鉛直水粒子速度はFreak waveのタイプによって大きく変化するが、水平水粒子速度はほぼ一定の分布を持つことがわかる。

ついで、水平水粒子速度の鉛直分布を線形フィルター、WheelerのフィルターおよびStokes波理論による結果と比較する。ここでは、第5次近似によるStokes波理論を用い、図-5に示すようにStokes波の ka をゼロダウン法によるFreak waveの ka と一致させた場合および波頂点を基準にして両者の $k\eta_c$ を一致させた場合のそれぞれについて比較を行った。なお、線形フィルターによる比較は、過大な値を与えるため、I-1の場合のみ行っている。図-6はその結果であり、線形フィルターは確かにFreak waveの波峰直下の広い範囲で過大な評価を与え、Freak waveの内部特性評価に適していないことがわかる。これに対し、Wheelerのフィルターによる u は鉛直方向全域にわたって過小となり、波形データから内部特性を評価するフィルター法はFreak waveに対して不十分であり、何らかの修正が必要となる。

一方、Freak waveをそれと同一の ka あるいは $k\eta_c$ を持つStokes波と扱い、内部特性を計算する方法では、波形の不一致はあるものの5次までの非線形干渉の影響が評価されているため、シミュレーション結果との対応はフィルター法によるものよりもむしろ良好である。特に、平均水面上での波形の対応が良好なIII-1のケースでは $(ka)_f$ の値が0.446と0.443を超えているにも拘わらず、 $k_p z \geq -0.2$ においてシミュレーション結果とほぼ完全に一致していることがわかる。このときのFreak waveの出現時間 t/T_p はわずか0.125であるが、水平水粒子速度に関する限り、非定常性の影響は顕れておらず、定常波として扱えると言える。また、 ka よりも $k\eta_c$ を一致させた方がいずれの場合もFreak waveの波峰直下の水平水粒子速度の表示は良好であり、内部特性の評価においては波高よりも峯高の方が重要となることがわか

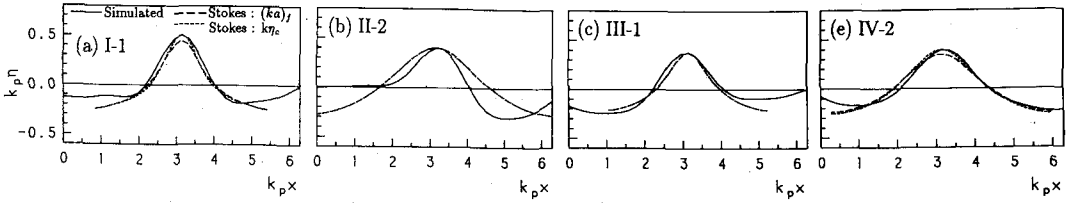


図-5 Freak wave の波形と ka および $k\eta_c$ をそれぞれ一致させた Stokes 波の波形との比較

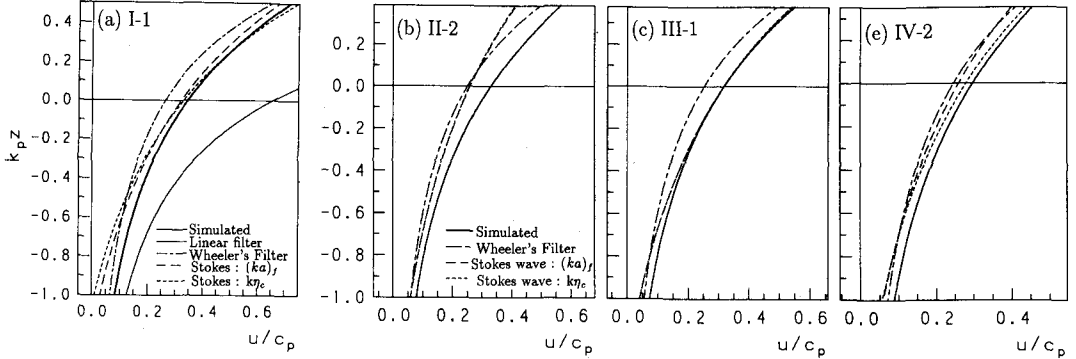


図-6 水平水粒子速度の鉛直分布に関する各モデルとの関係

る。以上のように、平均水面上の波形がFreak waveの内部特性には決定的に重要であり、Freak waveのタイプや出現時間(非正常性)、またその $(ka)_f$ の値に関係なく、この部分での波形がStokes波のものと一致すれば、Stokes波理論による内部特性の評価が可能となる。これに対し、波形が完全に一致しても非線形性を考慮しない線形フィルターでは過大評価となることから、Freak waveのような非線形性の顕著な波の内部特性の評価には、高次の非線形干渉を考慮したモデルが必須と言える。

4.3 波頂点での水平水粒子速度

最高波の波頂点での水平水粒子速度 u_c は一般に最大流速を与えるため、最大波力の算定において特に重要となる。ここでは、シミュレーション結果を基に最高波の u_c/c_p の値と $H_{\max}/H_{1/3}$ の関係について検討する。図-7は、その結果を示したものである。図中の実線は、最高波の波高比 $H_{\max}/H_{1/3}$ および初期波の $k_p a = 0.15$ より、 $ka \approx k_p a (H_{\max}/H_{1/3})$ によって近似的に最高波の ka の値を求め、これをStokes波理論に適用して計算した u_c/c_p と $H_{\max}/H_{1/3}$ の関係である。この場合、上述の ka の値が実際の各最高波の値とは完全に一致しておらず、若干過小となっており、Stokes波の u_c はシミュレーション結果に対して全体的に過小評価となっている。

図-8はシミュレーション波形に顕れるFreak waveに着目し、その $(ka)_f$ の値と u_c/c_p の関係を示したものである。図中の実線はStokes波理論によって求めた ka と u_c/c_p の関係を示す。この場合は、 ka の値が直接与え

られているため、両者の関係は正確である。これより、 $(ka)_f$ の値がほぼ0.35以下ではシミュレーション結果による u_c の値の方が常にStokes波のものを上回っており、Stokes波理論が過小評価となっているが、 $(ka)_f$ が0.4を超える付近から逆にStokes波理論の方が過大評価となることがわかる。これは、厳密解によるStokes波の上限が $ka = 0.443$ であり、ここで用いているStokes波理論は第5次近似解によるものであるが、やはり ka の値が0.44付近で u_c/c_p の値も1に近くなるのに対し、シミュレーション結果の方は前述したように安定に留まっていることによる。

4.4 内部特性に対する高周波成分の影響

不規則波の波頂点周辺での水平水粒子速度が同一の波

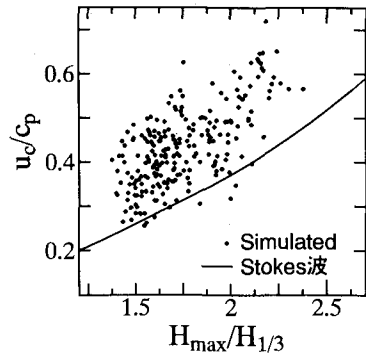


図-7 波頂点での水平水粒子速度 u_c/c_p と $H_{\max}/H_{1/3}$ の関係

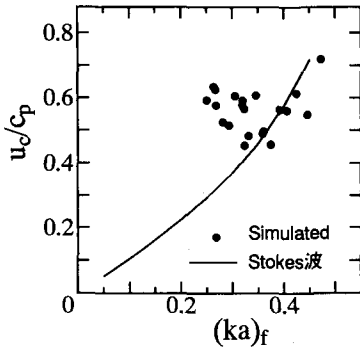
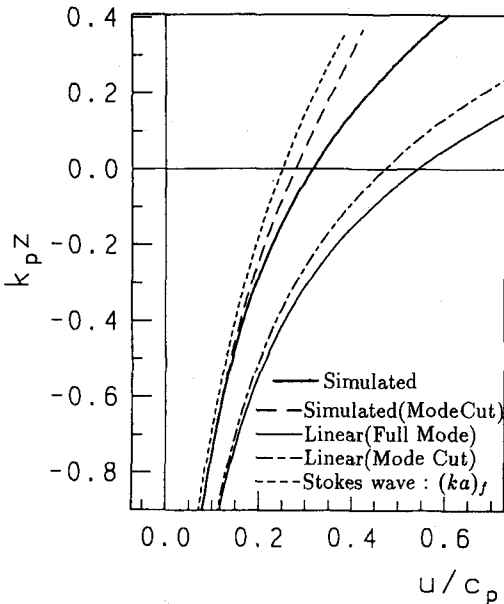
図-8 Freak wave の u_c/c_p と $(ka)_f$ の関係

図-9 水平水粒子速度に及ぼす高波数成分の影響

高を持つ Stokes 波のものに比べて過大となることは前述の Zhang ら (1992) によって検討され、その原因が高周波成分によることが示されている。Freak wave についても同様な傾向がより顕著に見られるため、 u の鉛直成分に及ぼす高波数成分の影響について調べる。図-9 は、前述の I-1 の波について $k/k_p > 3$ の高波数成分を除去した場合との比較を示す。なお、比較のために、 $k/k_p > 3$ の成分を同様に除去した線形フィルターによる結果に加え、 $(ka)_f$ を一致させた場合の Stokes 波の結果も併せ

て示してある。これから、 $k/k_p > 3$ を除去したものは平均水面での水粒子速度の値が大きく減少し、Stokes 波のものに接近して来ることがわかる。 $k/k_p > 3$ のモードのエネルギーは全体の 3% 未満であるにも拘わらず、それらの除去によって水粒子速度にこのような大きな変化が顕れるということは、 $k/k_p > 3$ のモードが Freak wave の平均水面上の水粒子速度に対して大きな影響を及ぼしていることを示すものと言える。こうした影響は線形フィルターにおいてはほとんど見られないことから、非線形干渉によって励起された拘束波としての $k/k_p > 3$ の高周波モードが内部特性にとって重要なことがわかる。

5. 結 語

一方向非線形不規則波列の伝播シミュレーションを行い、スペクトル法によって計算される Stokes 波の安定限界を超える Freak wave の安定性について BIM による検討を行い、それが Stokes 波の安定限界を超えても安定であることを明らかにするとともに、スペクトル法によるこのような Freak wave の計算結果の妥当性を確認した。ついで、Freak wave の波形および内部特性についての検討を行い、Freak wave の波形は 4 種類に大別されるが、それによる水平水粒子速度の鉛直分布の差異はほとんど見られず、波形の非定常性の影響も顕れず、内部特性は平均水面上の波峯の形状と 3 倍高調波成分に支配されており、その表示にはこれらの評価が必須となることを明らかにした。

最後に、本研究で用いた BIM のプログラムは J. W. Dold 博士によって提供されたものであり、謝意を表するとともに、本研究が造船学術研究推進機構からの交付金による成果であることを付記し、深謝する。

参 考 文 献

- 安田孝志・伊藤一教・森 信人 (1991): 非線形不規則波列における Freak wave とその特性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 101-105.
- Dold, J. W. (1992): An efficient surface-integral algorithm applied to unsteady gravity waves, J. Comp. Phys., Vol. 103, pp. 90-115.
- Dommermuth, D. and D. K. P. Yue (1987): A high order spectral method for the study of nonlinear gravity waves, J. Fluid Mech., Vol. 184, pp. 267-288.
- Zhang, J., R. E. Randall and C. A. Spell (1992): Component wave interactions and irregular wave kinematics, J. of WPCOE, ASCE, pp. 401-416.