

山形県由良沖の3測点同時波形データに基づく Freak wave の特性

安田孝志*・森 信人**・吉元博文***

1. 緒 言

この2月の東シナ海での第7蛭子丸の沈没は、突発的な大波によるものとされているが、何故、6隻の船団の真中の第7蛭子丸だけが巨浪と遭遇したのかなど大きな謎を残し、外洋における波浪に未だ説明すべき課題が多いことを強く印象付けた。しかしながら、漁業や海運関係者の間では、こうした突発的な大波は三角波や一発大波と呼ばれて古くから知られており、これまで原因不明とされて来た海難事故に深く関わっていると目されている。また、その発生原因についても方向の異なる波のぶつかり合いや潮流などの流れが原因とされて来た。しかし、それだけで『突然発生し、どこから来るかわからない高さが10mを超える大波』の発生を説明することは難しく、第7蛭子丸の場合、沈没地点が水深約120mの外洋であり、また当時の気象状況を考えれば、こうした説明では突発的な大波の出現に対して不十分である。

一方、海洋油田などの開発に関連して関心を集めているFreak waveは、 $H_{max}/H_{1/3} > 2.0$ によって定義されるが、その実測波形などからは上述の突発的な大波に相当しているものと考えられる。しかし、その原因については上に挙げたものの他にうねりと風波の重畳等が挙げられているが、いずれも単に可能性を示唆するに留まっている。このように、一発大波あるいはFreak waveと呼ばれる突発的な大波(以下では、Freak waveと総称)の存在自体は広く知られており、その実態説明が強く望まれているが、これまでの実測データは1測点での時間波形データに過ぎず、ほとんど未説明と言ってよい。

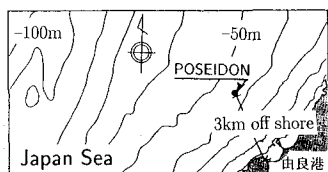
本研究では、山形県由良沖において得られたFreak waveの実測波形データを解析し、冬期季節風(一樣風)下のFreak waveの出現特性、出現時の方向スペクトルなどの波浪特性および波形特性について検討することによって、一樣風下のFreak waveの実態説明を図りたい。

2. 波浪観測と観測波の概要

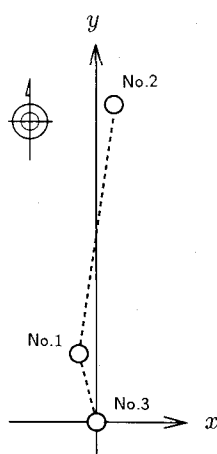
波浪観測は、運輸省船舶技術研究所による『浮遊式海洋構造物の開発研究』に関連して1986年9月～1990年7月の約4年間にわたって実施された。観測地点は、図一に示す山形県由良港沖合い約3kmであり、水深約40mの海底に3台の大型超音波式波高計が図二のように設置された。

データは、通常の2時間毎20分の定時観測に加えて、高波浪時に実施された臨時観測(20時間以上の連続観測)によって得られた。これによる方向スペクトルを中心とした波浪特性については、吉元ら(1990)によって報告がなされているが、ここではFreak waveに着目して検討を行う。表一は、吉元・加藤(1992)のゼロアップ法による解析結果から、10mを超える H_{max} が観測された時刻とこのときの波浪・風速諸量を整理したものである。観測時刻の前の*は臨時観測時におけるものを示し、このときの連続データは30分単位に分割されている。これから、10mを超える最高波のほとんどがFreak waveであり、Freak waveが最大最高波高($H_{max})_{max}$ の推算において無視できないことがわかる。事実、この間の最大有義波高($H_{1/3})_{max}$ が7.6mであるのに対し、($H_{max})_{max}$ はFreak waveによる14.6mであり、その比は1.92と通常用いられる1.6や1.8を大きく超えている。

ここでは、表一に示す上位



図一 観測点の位置と周辺海域



図二 波高計の配置

波高計	x(m)	y(m)
No.1	-4.93	25.02
No.2	5.80	92.12
No.3	0.00	0.00

* 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)

*** 工 修 運輸省船舶技術研究所 海洋開発部工学部

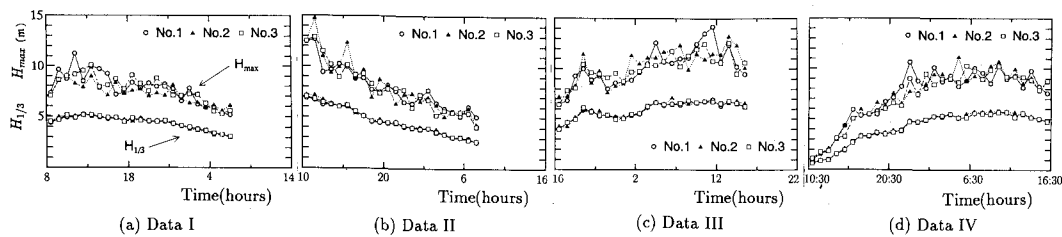


図-3 3 測点における $H_{1/3}$ および H_{max} の時間変化

表-1 H_{max} が 10 m を超える観測例とその諸量

Observed date	H_{max} (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{max}/H_{1/3}$	$U_{19.5}$ (m/s)	風向き
1987/01/01 05:35	11.5	9.1	2.17	1.81	NW
1987/01/04*12:18	10.8	9.2	2.04	20.9	WNW
1987/01/18*10:28	10.0	9.6	2.08	20.0	W
1987/02/16 11:35	11.2	9.5	2.11	15.8	WNW
1987/02/26*23:39	11.3	10.1	1.98	19.6	W
1987/03/25*17:58	11.1	10.4	1.88	23.8	SW
1987/09/01*02:18	13.1	11.7	1.96		
1987/11/24*11:42	13.6	10.8	2.67	13.6	WNW
1987/12/17*10:13	14.6	10.6	2.06	20.8	WNW
1988/01/09*22:48	10.9	9.2	2.06	16.4	WNW
1988/02/03*11:13	14.9	11.2	2.22	17.6	WNW
1988/12/15*09:03	12.8	10.9	2.13	20.9	WSW
1989/11/19*23:42	12.4	10.9	1.82	15.7	WSW
1990/01/25*18:34	10.7	9.5	2.10	17.8	WNW

表-2 データ番号と観測期間

Data No.	観測時刻
I	1987.11.24. 8:12~11.25. 8:00
II	1987.12.17.10:13~12.17. 8:37
III	1988. 1. 2.16:13~ 1. 3.16:55
IV	1988.12.14.10:33~12.15.16:39

表-3 Freak wave の出現頻度

Data No.	Points	N_0	N_f	N_f/N_0	$\bar{N}$	$\bar{N}N_0/N_f$
I	No. 1	47	2	0.0426	231	5428.5
	No. 2	47	2	0.0426	230	5405.0
	No. 3	47	1	0.0213	230	10810.0
II	No. 1	44	0	0.0000	220	-
	No. 2	44	2	0.0455	222	4884.0
	No. 3	44	0	0.0000	222	-
III	No. 1	49	1	0.0204	213	10437.0
	No. 2	49	1	0.0204	210	10290.0
	No. 3	49	1	0.0204	209	10241.0
IV	No. 1	60	4	0.0667	260	3900.0
	No. 2	60	1	0.0167	259	15540.0
	No. 3	60	1	0.0167	259	15540.0

4 番までの Freak wave による H_{max} を含む臨時観測データを 30 分単位に分割し、ドリフト除去などの処理を行い、ゼロダウン法によって個別波の定義を行った。このため、 H_{max} の値は表-1 におけるものと若干異なっているが、こうして求めた 3 測点における $H_{1/3}$ および H_{max} の同時時間変化を各データごとに図-3 に示す。これから、トレンドとしては両者は対応しているが、 $H_{1/3}$ の変化が緩やかであるのに対して H_{max} の変化は激しく、Freak wave の出現が限られた時間におけるものであることがわかる。また、 $H_{1/3}$ は測点間でほぼ一致しているが、 H_{max} は各測点での差異が大きく、特に H_{max} が突出する場合にこの傾向が著しい。このように、突出した H_{max} は時間的にも空間的にも変動が著しいが、それが単なる統計的変動あるいは何らかの特有の要因によるものかについては検討が必要である。

3. Freak wave の出現特性

まず、前述の表-2 に示した連続データを基に Freak wave の出現頻度について検討するため、各測点ごとの 30 分単位データの総数 N_0 、Freak wave を含む 30 分単位データ数 N_f および 30 分単位データ中の平均観測波数 $\bar{N}$ を調べ、これらを表-3 に整理した。表中の N_f/N_0 は 1 回 30 分の観測によって Freak wave を捕捉する割合を示し、これをさらに $\bar{N}$ で除すれば、このときの Freak wave の出現確率 $N_f/N_0\bar{N}$ が計算できる。したが

って、この逆数は Freak wave 1 波に対する観測波数を与え、Rayleigh 分布の下では約 3,000 波に 1 波の割合で Freak wave が出現することからすれば、いずれもそれより出現確率が低く、Freak wave に対して Rayleigh 分布は安全側と言える。ただし、このときの $(H_{1/3})_{max}$ の平均値 2.07 について見れば、Rayleigh 分布の下でもそのような波の出現は 5,300 波に 1 波の割合となり、表に示した結果と余り変わらない。

こうした Freak wave を伴う波列の波高分布と Rayleigh 分布との関係を明らかにするため、代表例として II および III の連続データ (それぞれの波数は約 230) より波高の相対超過度数分布を求め、それと Rayleigh 分布による理論分布との比較を行った。図-4 はその結果であり、データ III では Rayleigh 分布にほぼ従っているが、 $H/H_{1/3}$ が 2 を超える付近から Rayleigh 分布を上回るようになっていく。このような傾向はデータ II においてより顕著であり、 $H/H_{1/3}$ が 1.5 を超える付近からすでに Rayleigh 分布を大きく上回っている。これを前述の表-1 の結果と併せ考えれば、これまで Rayleigh 分布は高波の出現に対して過大評価になると言われて来たが、逆の場合もあることに注意すべきであろう。

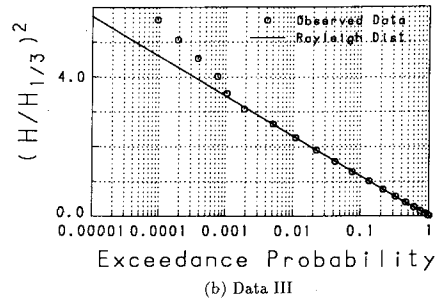
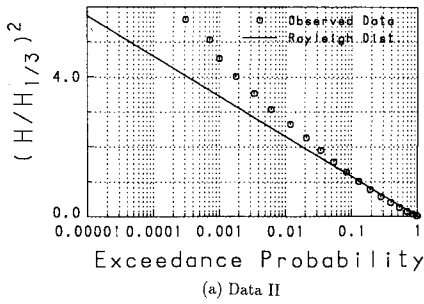


図-4 観測波の波高の相対度数分布

表-4 10 m を超える Freak wave 出現時の 3 測点での
波形統計量

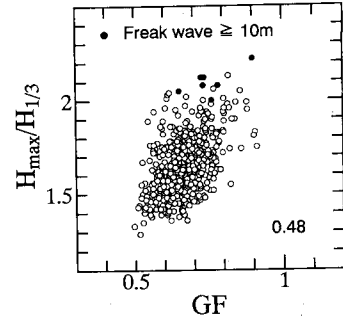
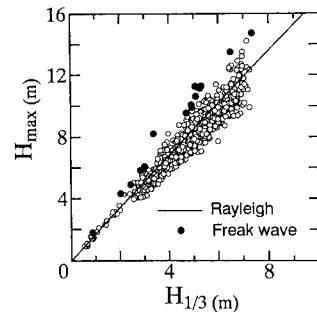
Data No.	測点	H_{max}	$H_{max}/H_{1/3}$	GF	$(ka)_{1/3}$	Skewness	ε
I-1	No. 1	11.26	2.22	0.901	0.0941	0.293	0.810
	No. 2	8.25	1.58	0.713	0.0998	0.048	0.783
	No. 3	9.17	1.84	0.800	0.0884	0.105	0.800
I-2	No. 1	9.94	2.02	0.677	0.0875	0.149	0.805
	No. 2	7.33	1.58	0.600	0.0867	0.127	0.792
	No. 3	10.08	2.05	0.652	0.0922	0.160	0.788
II-1	No. 1	12.70	1.83	0.802	0.1184	0.251	0.826
	No. 2	14.73	2.00	0.762	0.1209	0.306	0.799
	No. 3	12.93	1.90	0.762	0.1216	0.217	0.818
III-1	No. 1	8.87	1.74	0.600	0.1025	0.128	0.803
	No. 2	11.29	2.12	0.737	0.1082	0.150	0.773
	No. 3	9.70	1.82	0.633	0.0997	0.197	0.782
III-2	No. 1	13.50	2.08	0.734	0.1119	0.222	0.843
	No. 2	10.78	1.59	0.701	0.1065	0.214	0.793
	No. 3	12.47	1.94	0.731	0.1056	0.266	0.809
IV-1	No. 1	10.61	2.08	0.784	0.1064	0.257	0.781
	No. 2	7.68	1.46	0.699	0.1085	0.220	0.772
	No. 3	8.98	1.77	0.743	0.1062	0.207	0.770
IV-2	No. 1	8.25	1.57	0.653	0.0980	0.173	0.794
	No. 2	11.14	2.12	0.727	0.0942	0.261	0.798
	No. 3	8.17	1.52	0.625	0.0979	0.222	0.785

4. Freak wave 出現時の波浪状況

4.1 時間波形の統計量

まず、波高が 10 m を超える Freak wave を含む 30 分単位のデータより各種統計量を求め、このときの波浪状況について考察する。表-4 は、統計量の空間分布も併せて考察するため、3 測点での統計量を同時に示したものである。これから、10 m を超える Freak wave 出現時の GF、 $(ka)_{1/3}$ および Skewness について見ると、それぞれ 0.65、0.09 および 0.15 以上であり、これらが突発的大波に相当する Freak wave の出現条件となっていると言える。また、このときの波が、表中のスペクトル幅パラメータ ε の値からわかるように、ほぼ深海における風波であることから、このときの波浪状況は波群が比較的発達した非線形波浪であると判断される。

ついで、I~IV の全データについて $H_{max}/H_{1/3}$ と GF の関係を調べ、その結果を図-5 に示す。図中の数字は相関係数の値を示す。これから、弱いながらも GF と $H_{max}/H_{1/3}$ の間に相関があり、波群が顕著となるに従って、最高波が Freak wave になる確率が増大すると言え

図-5 全データ (I~IV) による $H_{max}/H_{1/3}$ と GF の関係図-6 全データ (I~IV) による H_{max} と $H_{1/3}$ の関係

る。ところで、前述の表-1 に示した風速や $H_{1/3}$ の値から判断して、このときの H_{max} には碎波の影響が及んでおり、それが H_{max} の $H_{1/3}$ に対する関係に顕れているものと考えられる。この点について検討するため、図-6 に全データ (I~IV) による H_{max} と $H_{1/3}$ の関係を示す。図中の実線は、観測波数を 200 としたときの Rayleigh 分布に基づく $H_{max}/H_{1/3}$ の期待値によるものである。全体的に H_{max} は期待値周りに分布しているが、Freak wave に関する限り、 H_{max} の値は当然ながら期待値を上回り、 $H_{1/3}$ とともにほとんど直線的に増大している。このことは、 H_{max} には碎波による影響が全く顕れていないことを示し、これが Freak wave の特性によるとすれば、Freak wave の特異性を示唆するものとして重要である。

4.2 方向分布特性

ここでは、前述の図-2 に示した 3 台の波高計データ

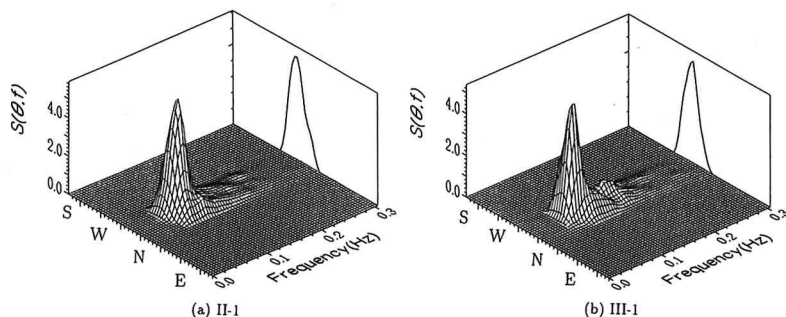


図-7 Freak wave 出現時の方向スペクトルと方向分布図

より方向スペクトルを求め、10 m を超える Freak wave 出現時の方向分布特性について検討する。このための方向スペクトルの計算には最尤法 (EMLM) を使い、前述の表-4 に示した 30 分単位のデータより Freak wave 出現時の方向スペクトルを求めた。図-7 はそれらの代表例を鳥瞰図として示すとともに、その方向分布を併せて示したものである。また、表-5 にこのときの方向スペクトルより計算した代表波向きを各データごとに示す。表中の $\bar{\theta}$, θ_p , γ および θ_k は、それぞれ平均波向、主波向、波峰長パラメータおよび平均分散角を示し、波向は北をゼロとした反時計周りの度数によって波源方向を示している。これから、いずれも平均波向及び主波向がほぼ一致し、波向きも NW から N 方向となっており、風向きとほぼ対応していることがわかる。また、 θ_k が $30^\circ \sim 40^\circ$ であるのに対し、 γ の値は 0.36 から 0.51 の間に分布しており、これらの γ と θ_k の関係から、この時のスペクトルは単峰型と判断される。このことは図-7 の方向分布図からも明らかであり、この時の波がすべて方向集中度の高い一方向波であると言える。

表-5 Freak wave 出現時の代表波向諸量

Data No.	$\bar{\theta}$	θ_p	γ	θ_k
I-1	32.3	32.1	0.51	40.1
I-2	5.5	1.6	0.53	44.0
II-1	18.5	16.2	0.36	31.9
III-1	3.2	2.5	0.53	40.6
III-2	18.0	16.1	0.36	32.3
IV-1	2.5	2.7	0.52	38.5
IV-2	8.2	7.6	0.43	34.1

以上の結果は、10 m を超える Freak wave が季節風 (一樣風) 下のほぼ一方向波動場において出現することを実証するものであり、Freak wave の発生原因としてこれまで考えられて来た上述のような説明では不十分なことを示している。

5. Freak wave の波形特性

図-8 および 9 は、3 測点での波形の差異が大きい場合および小さい場合の Freak wave の時間波形をそれぞれ示したものである。No. 1 と 2 の測点間距離が約 68 m であるのに対し、No. 1 と 3 の測点間距離が約 25 m と短いこともあり、No. 1 と 3 の波形の相関が No. 1 と 2 のものに比べて全般的に高いのは当然と言える。しかし、図-8 では、No. 1 と 3 の間でも波峰高に 3 m 以上の差異が生じている場合があり、その出現が非常に局所的であることがこれらの波形からもわかる。これに対し、図-9 では測点間の差異が小さく、前述の表-4 に示したこの時の波向を考えると、70 m 近い波峰長を有した Freak wave (II-1 および III-3) も出現しうることがわかる。ま

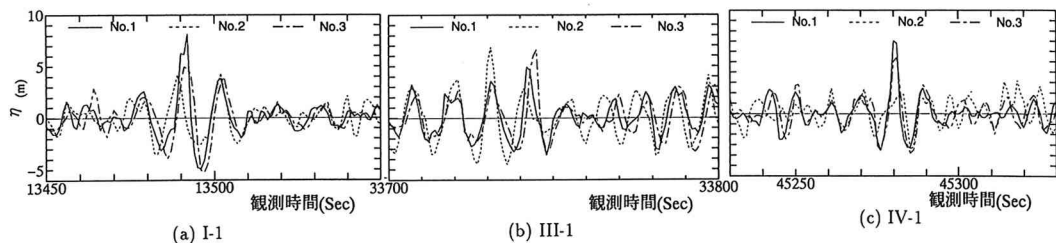


図-8 3 測点での差異が大きい場合の Freak wave 時間波形

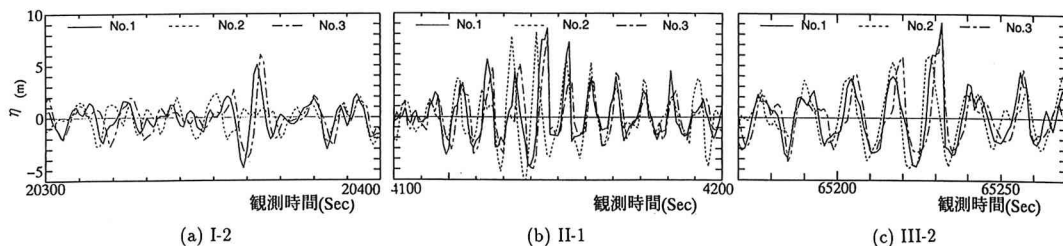


図-9 3 測点での差異が小さい場合の Freak wave 時間波形

表-6 Freak waveの時間波形諸量

Data No.	H_{max}	$H_{max}/H_{1/3}$	$(ka)_f$	χ	α	j^*	μ	λ	S_c
I-1	11.26	2.22	0.152	0.71	1.58	2	0.072	0.0567	0.392
I-2	10.08	2.05	0.231	0.60	2.21	1	2.645	0.0784	1.518
II-1	14.73	2.00	0.223	0.57	1.26	4	2.997	0.0815	1.390
III-1	11.29	2.12	0.201	0.61	1.54	4	1.165	0.0711	1.011
III-2	13.50	2.08	0.174	0.63	1.90	5	0.022	0.0657	0.236
IV-1	10.61	2.08	0.246	0.65	2.27	2	1.047	0.0833	1.205
IV-2	11.14	2.12	0.240	0.55	2.27	2	0.265	0.0820	0.423

表-7 シミュレーション中に出現したFreak waveの波形統計量の平均値

Data No.	初期条件			Nonlinear					Linear				
	$k_p a$	m	$k_p h$	$H_{max}/H_{1/3}$	χ	α	j_1		$H_{max}/H_{1/3}$	χ	α	j_1	
I-1	0.094	5	1.76	2.15	0.59	1.96	2.39		2.10	0.49	2.98	2.17	
II-1	0.12	7	1.59	2.11	0.57	2.07	2.67		2.07	0.51	2.43	2.08	
III-2	0.11	6	1.65	2.16	0.57	1.81	2.62		2.11	0.51	2.81	2.08	
IV-2	0.094	5	1.71	2.23	0.58	2.42	2.25		2.07	0.48	2.65	2.08	

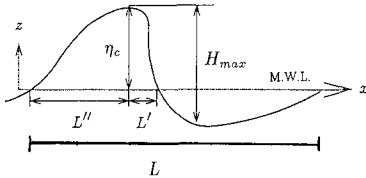


図-10 波峯に関するパラメータの定義

た、これらの図に示すI-1, III-1およびIV-1などのFreak waveは、その波形からわかるように単独で出現し、突出した波高を持つ、いわゆる三角波や一発大波と呼ばれる突発的大波に相当していることがわかる。このことは、季節風下のほぼ一方向波と見なせる波浪条件の下でもこうした波形を持つFreak waveが実際に出現することを示すものであり、一方向波列の下での共鳴干渉によるFreak wave出現の可能性を示した安田ら(1991)の結果を裏付けるものと言える。

この点をさらに明確にするため、図-10に定義するパラメータに基づく各種波形指標によって、10 mを超えるFreak waveの波形特性の定量的評価を行う。表-5は、そのための各指標の値を示したものである。表中の $(ka)_f$ は $\pi H_{max}/L$ 、 χ は η_c/H_{max} 、 α は $2H_{max}/(H_{i-1}+H_{i+1})$ 、 $H_{i\pm 1}$ はFreak waveの両隣の波高、 j^* は $H_{1/3}$ を設定値とするFreak waveの連長、 μ は L''/L' 、 S_c は η_c/L' でそれぞれ与えられる。なお、 L 、 L' および L'' はそれぞれの時間長から線形分散関係を用いて換算している。図-10からわかるように1を超える μ の値は波形の前傾を意味するが、後傾しているものもあり、必ずしも全て前傾しているとは言えない。また、 j^* や α の値からこの時のFreak waveの幾つかは波群を伴っており、全てが突出した波高を有している訳ではない。しかしながら、 $\chi \geq 0.65$ 、 $\alpha \geq 2.0$ を満たすFreak waveはIV-1のみ

であるが、その j_1 の値も2であり、図-8(c)に示したように典型的なFreak waveの波形特性を有していると言える。これは、より厳格な定義を満たすFreak waveが季節風下でも生じることを実証するものであり、同時に、強風下であれば、場所を問わず突発的大波に相当するFreak waveが出現することを示しており、注意が必要と言える。

6. Freak waveの再現シミュレーション

これまで示してきたように、ここで対象としている現地波浪は季節風下の方向集中度の高い波であるため、これをそのまま一方向波列と見なし、その周波数スペクトルを線形分散関係によって波数スペクトルに変換して、時間発展計算を行った。計算は、安田ら(1991)による共鳴干渉を考慮した手法($M=4$)および線形伝播による手法によって、ピーク周期の100倍の時間まで伝播させて行った。表-7は、シミュレーション波形より求めたFreak wave出現時の各諸量の値の平均値を比較したものである。これから、前述の表-6における観測値と比べればわかるように、共鳴干渉を評価した場合の方が全体に観測値に近く、共鳴干渉の影響がFreak waveの発生に無視できないものであると言える。

7. 結 論

山形県由良沖での波浪観測データによって、これまで一発大波や三角波と呼ばれて来た突発的大波が典型的Freak waveに相当するものであることを示すとともに、そのような典型的Freak waveが季節風下の方向分散角が30度近い発達した波浪条件下で生じうることを明らかにした。また、その波形データから、70 m近い波峯長を持つFreak waveから空間的にも局在した突出性の強いものまで多様なFreak waveが出現することを示すと同時に、その再現シミュレーションによってその出現に共鳴干渉が関わっていることを示した。

最後に、本研究は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37巻, pp. 106-110.
- 吉元博文・安藤定雄・小林健太郎 (1990): 浮遊式海洋構造物の実海域実験; その3. 実験海域の波方向スペクトルについて, 日本造船学会論文集, 第168号, pp. 225-262.
- 吉元博文・加藤俊司 (1992): 浮遊式海洋構造物の実海域実験; VII. 設計値と実測値, 船舶技術研究所報告別冊, pp. 109-140.