

三隅港における長周期波と大型石炭運搬船の動揺特性

齊藤 直*・朝倉一雅**・高橋陸悟***・市川芳宏***

1. はじめに

島根県の日本海に面する中国電力(株)三隅発電所は、出力 100 万 KW の石炭火力発電所である。近年、外洋に面した港において、長周期波を原因とする船舶の損傷事故や荷役障害が報告されており、白石ら(1995)がその対策について提言している。当発電所が位置する重要港湾三隅港においても、通年入港する石炭運搬船の安全性について検討を行なう必要性があった。

本研究では当該港湾の港内外に設置した波浪計データから、長周期波の特性を明らかにした。また、船体の動揺観測を GPS 機を用いて行ない、動揺データを効率的に取得、処理した。そのデータより動揺の 6 成分を抽出してその特性を解析すると共に、当該港湾における係留船舶の安全性についても評価した。

2. 三隅港における長周期波の特性

(1) 波浪観測

波浪観測は、超音波式波浪計により図-1に示す港内外の 2ヶ所で実施している。設置水深、観測項目を表-1に示す。本研究で対象とした期間は 1996 年 12 月~1998 年 3 月の 1 年余りである。

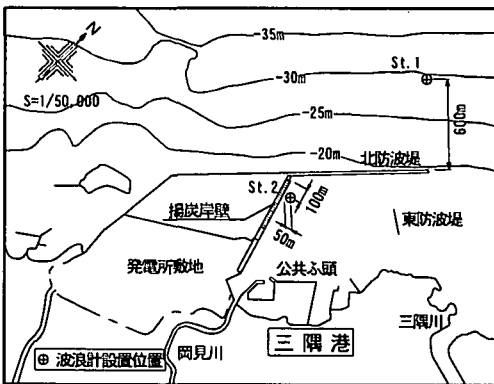


図-1 波浪計設置位置

* 正会員 中国電力(株)土木部 副長
** 正会員 中電技術コンサルタント(株)土木本部 臨海・都市部 課長
*** 中電技術コンサルタント(株)土木本部 臨海・都市部

表-1 波浪計諸元

	港外 (St. 1)	港内 (St. 2)
観測項目	・水位変動 ($\Delta t=0.5$ s) ・有義波高・有義波周期・波向 (毎正時)	
設置水深	30 (m)	15 (m)

(2) 長周期波の抽出

観測した波浪のスペクトルは、図-2に示すとおりで、0.1 Hz 以下にエネルギー密度の高い領域が存在し、長周期波の存在が認められる。長周期波は、水位データを FFT により周波数分解した後、長周期波領域を逆 FFT で再合成して求めた。対象とする長周期波領域は、カットした周波数成分で、ゼロアップクロス法により定義した長周期波の特性が変わらない領域とした。ここでは、図-3に示すように短周期側は波数、長周期側は周期の変化に着目して、20~500 s を長周期波対象領域とした。

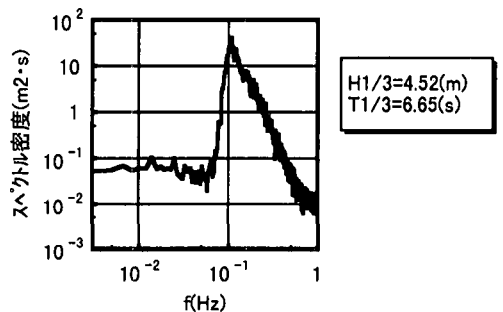


図-2 港外波浪スペクトル

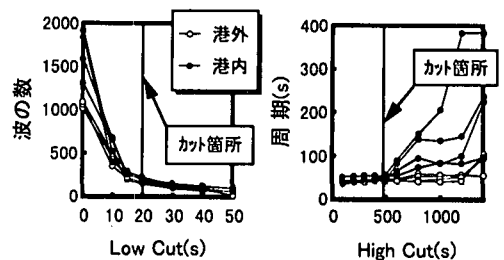


図-3 短周期側・長周期側での周期のカット箇所

(3) 港内外の表面波と長周期波の特性

港外における表面波と長周期波の波高比は、図-4に示すとおり、波向に関らずほぼ一定で、長周期波の波高は表面波の4.3%となる。

一方、港内外における波高比は波向により異なる。山陰沖の波浪の特徴として、時化始めの波向はW方向で、時間の経過と共にN方向へ変化する。当該港湾の防波堤の法線はNW方向に直角であるため、時化始めは防波堤により波浪の侵入を防いでおり、表面波と長周期波の港内外の波高比は図-5に示すとおり、各々0.15, 0.55となる。その後波向がN方向へ変化し直接表面波が港内に侵入するようになると、表面波と長周期波の港内外の波高比は各々0.18, 0.78となり、時化始めより増大する。波向および港内外の表面波と長周期波の波高比の時系列変化を図-6に示す。波向の変化と共に表面波が港内に直接侵入し始めると、長周期波の波高比は増大する。

以上より、平石ら(1996)の報告と同様に、三隅港周辺海域においても長周期波には拘束波が含まれており、表面波と共に港内に侵入していると考えられる。

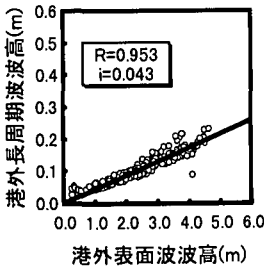


図-4 港外波浪の表面波波高と長周期波波高の相関

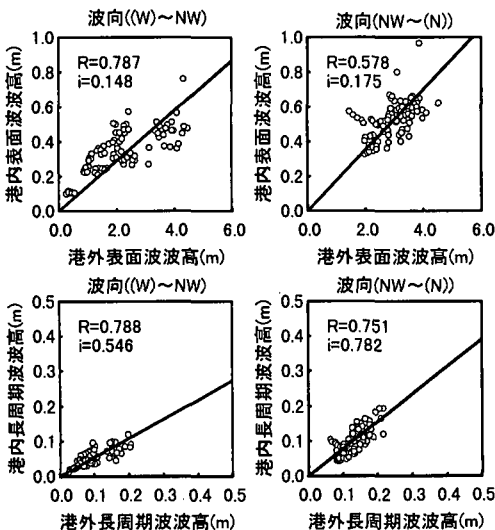


図-5 波向変化と港内外表面波波高と長周期波波高の相関

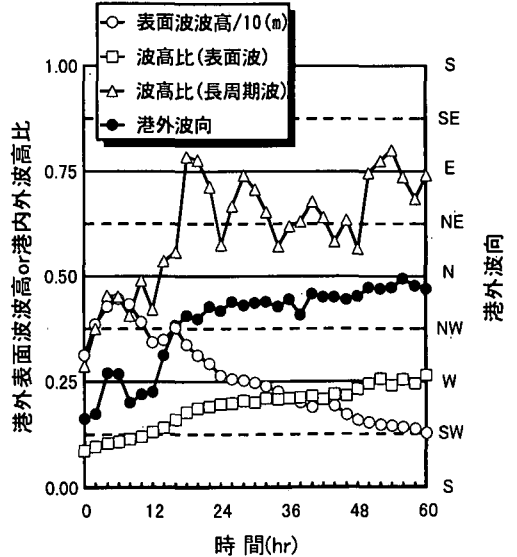
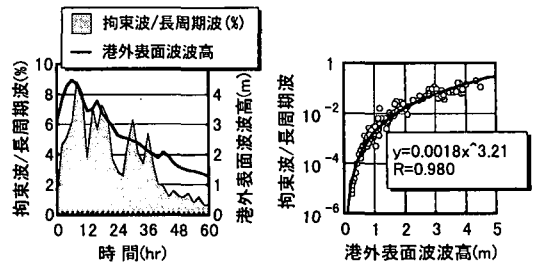


図-6 波向、港内外表面波と長周期波波高比の時系列変化

(4) 長周期波と拘束波の関係

長周期波は波群拘束波だけでは説明できないことが、近年の研究で指摘されている。図-7(a)は、水深30m地点の港外の長周期波に占める拘束波のエネルギー比率を時系列で示したもので、図-7(b)のように、その比率と表面波の波高の関係を整理することができる。沖合においては、平石ら(1996)の報告と同様に、拘束波の占める割合は1割程度であった。拘束波が相当量含まれてい



(a) 時系列変化 (b) 表面波との相関

図-7 港外における長周期波に占める拘束波の比率

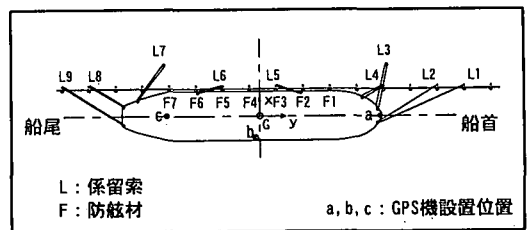


図-8 動揺観測時係留状態および動揺観測位置

ないと、先述の波向との相関関係が説明できないため、平石ら (1996) が指摘したように、三隅港周辺海域においても水深が浅くなるにつれて拘束波の含まれる割合が多くなっていると考えられる。

3. 船体の動揺特性

(1) 船体動揺観測

当該港湾の-14 m 専用岸壁に揚炭のため着岸した、60,000 DWT 石炭運搬船に3台のGPS機を取付け、各地点で船体の3方向変位の連続観測を、1998年1月17日から3昼夜行なった。船舶の諸元は、全長×全幅=220 m×43 m、喫水10 mであった。係留状態およびGPS機の設置位置は図-8に示すとおりである。

なお、観測データのサンプリング間隔は1.0 sで、測定誤差の公称値は±2 cmである。

(2) 船体の動揺特性

最も動揺量が多い日のデータを使用し、式(2)を用いて船体重心における6成分の動揺を時系列で抽出した。ここで、式(1)は船体重心における座標系(x, y, z)とGPS機により観測された絶対座標系(X, Y, Z)との関係式であり、式(2)は回転角S₁~S₆が微小であると仮定することにより、式(1)から得られる関係式である。S₁~S₆はそれぞれ、S₁: Surge, S₂: Sway, S₃: Heave, S₄: Roll, S₅: Pitch, S₆: Yawである。

この時の港内・外の波浪諸元は表-2のとおりである。抽出した動揺成分のスペクトル密度・応答関数を図-9の○で示す。表-3は図-9から読み取った動揺成分の卓越周波数を示したもので、Surge, Sway, Yawのピーク周波数は0.01~0.025 Hz付近であり、長周期波のピーク周波数とほぼ一致している。一方、Roll, Pitchのピーク周波数は0.1 Hz付近であり、表面波のピーク周波数とほぼ一致する。Heaveについては明確なピークが現れなかった。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= \cos S_5 \cos S_6 \\ A_{12} &= \sin S_4 \sin S_5 \cos S_6 - \cos S_4 \sin S_6 \\ A_{13} &= \cos S_4 \sin S_5 \cos S_6 + \sin S_4 \sin S_6 \\ A_{21} &= \cos S_5 \sin S_6 \\ A_{22} &= \sin S_4 \sin S_5 \sin S_6 + \cos S_4 \cos S_6 \\ A_{23} &= \cos S_4 \sin S_5 \sin S_6 - \sin S_4 \cos S_6 \\ A_{31} &= -\sin S_5 \\ A_{32} &= \sin S_4 \cos S_5 \\ A_{33} &= \cos S_4 \cos S_6 \end{aligned} \right\}$$

表-2 動揺観測時港内外波浪

	港外	港内
有義波高 H _{1/3}	3.69 (m)	0.47 (m)
有義波周期 H _{1/3}	7.9 (s)	
長周期波波高 G _{1/3}	0.16 (m)	0.09 (m)
長周期波周期 T _{01/3}	41.6 (s)	53.0 (s)
港外波向	N 307°	

表-3 動揺成分の卓越周波数

項目	卓越周波数	
現地波浪観測	0.1 Hz 付近がピーク	
船体動揺成分	Surge	0.01 Hz~0.025 Hz 付近がピークで低周波側が大きい
	Sway	0.01 Hz~0.025 Hz 付近がピークで低周波側が大きい
	Heave	0.02 Hz 以上の低周波側が卓越
	Roll	0.1 Hz 付近がピークおよび低周波側が大きい
	Pitch	0.1 Hz 付近がピーク
	Yaw	0.1 Hz 付近, 0.01 Hz~0.025 Hz 付近でピーク

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -S_6 & S_5 \\ S_6 & 1 & -S_4 \\ -S_5 & S_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \dots\dots (2)$$

4. 船体動揺シミュレーション手法の評価

(1) 動揺シミュレーション

船体の動揺シミュレーションは係留索や防舷材の変位復元特性の非線型性が考慮でき、波浪・風等の複合外力を合せて考慮できる上田 (1984) の手法により行なった。

流体力係数は表-4に示すとおりである。Sway, Yawはストリップ法により、観測したスペクトルのピーク周波数の0.025 Hzと合わせ、Heave, Roll, Pitchについても同様に、波浪の代表周期と合わせた。また、Rollの非線型減衰係数を求めるための減減係数は、元良(1982)が整理した既存の各種実験結果からb=0.01とした。

Surgeについてはストリップ法より得られないため、既存のデータを参考にせざるを得ない。そのため、付加質量係数については、既存資料(例えば樫木(1991))により1.1とする。線形減衰係数を求めるための減減係数は久保(1988)の実験結果では、a=0.431が報告されて

表-4 流体力係数

動揺成分	付加質量係数	線形減衰係数	非線形減衰係数
Surge	1.1	a=0.8	-
Sway	0.025 Hz に対する理論値	0.025 Hz に対する理論値	-
Heave	有義波周期に対する理論値	有義波周期に対する理論値	-
Roll	有義波周期に対する理論値	有義波周期に対する理論値	b=0.01
Pitch	有義波周期に対する理論値	有義波周期に対する理論値	-
Yaw	0.025 Hz に対する理論値	0.025 Hz に対する理論値	-

いるが、本研究ではトライアルにより、観測した Surge の再現シミュレーションを行なった結果、 $a=0.8$ と既存の報告値より大きい値となった。

(2) 動揺観測の再現シミュレーション

上述のように設定した諸定数と現地観測した波浪データ(水位記録)から、動揺観測の再現シミュレーションを行なった。その結果により算定した応答関数を図-9の実線で示す。Yaw を除き、観測値(○)と比べ、ピーク値は小さめとなるがピーク周波数はほぼ一致している。

特に、Heave はよく一致しており、観測データおよびシミュレーション手法は妥当性の高いものであると確認した。Yaw については、シミュレーション結果と比べ観測結果では、ピーク周波数 0.025 Hz で大きな値となっており、Surge との運動があるようにも見られ、その原因について今後解明する必要がある。

5. 係留限界波浪の設定

(1) 標準スペクトル

後述する動揺シミュレーションの際に、必要となる波浪の標準スペクトルを堀沢ら(1998)の方法により設定した。設定した標準スペクトルと、観測した波浪スペク

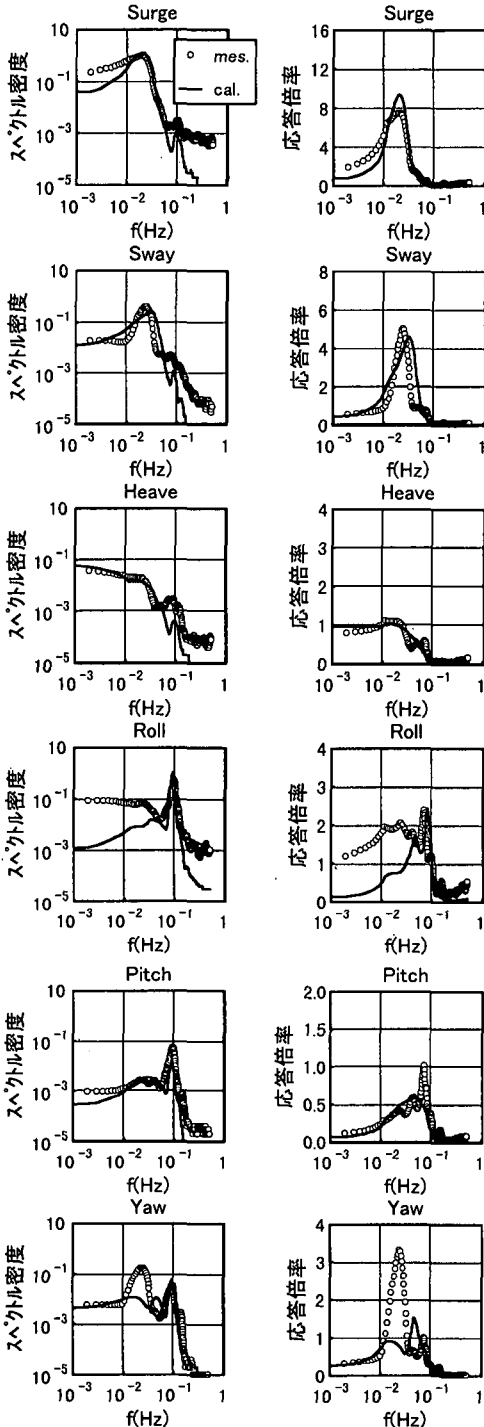


図-9 動揺観測結果とシミュレート結果によるスペクトルおよび応答関数の比較

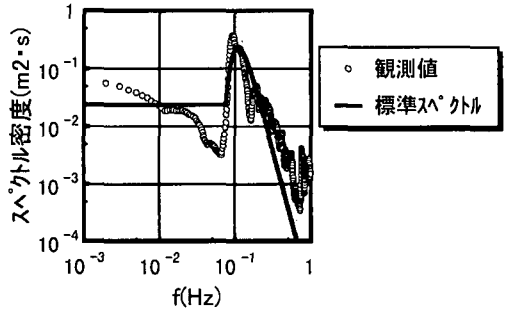


図-10 観測されたスペクトルおよび標準スペクトル

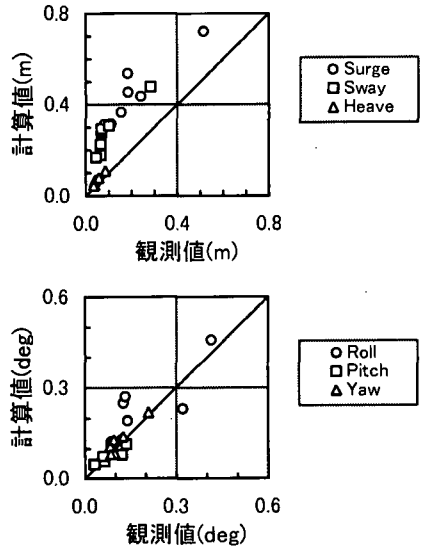


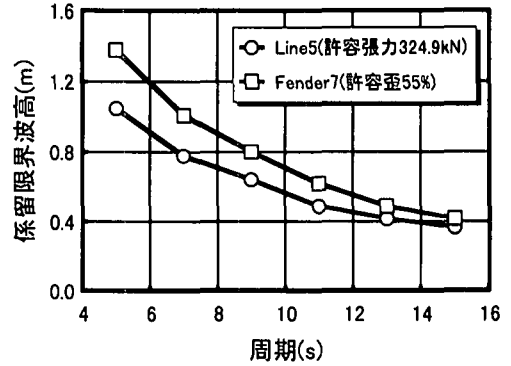
図-11 観測動揺量と標準スペクトルによる計算値との比較

表一五 係留限界波高計算時の外力条件

項目	設定値
波高	各周期に対して、0.5 m および限界波高前後の計2ケース
周期	5, 7, 9, 11, 13, 15 s の計6ケース
波向	45° (船舶の長手方向を0°とする)
風速	15 m/s (ダーベンポートの標準スペクトルにより入力)
風向	N, NW, NNW の3ケース

表一六 係留索および防舷材の許容値

	定格値	安全率	許容値
係留索張力	1234.8 kN	3.8	324.9 kN
防舷材歪み	65%	—	55% (定格値の10%減)



図一12 係留限界波高算定結果

トルを図一10 に示す。

標準スペクトルの妥当性を検証するため、標準スペクトルを用いてシミュレートした動揺量と観測した動揺量を比較した。図一11 はその結果を示したもので、0.1 Hz 以下の低周波数側を多少安全側に設定したため、Sway では大きめの傾向を示す。全般的に観測値と比べほぼ同様、あるいは多少安全側の評価となっており、標準スペクトルの設定は妥当であるといえる。

(2) 係留限界波高

動揺シミュレーションより得られる係留索張力および防舷材歪り、係留限界波高の算定を行なった。ここで、係留限界の定義としては、発生する係留索張力または防舷材歪りが、所定の許容値を越えた時とし、その波高を係留限界波高とした。ここで、動揺シミュレーションはある限られた継続時間内での結果であるため、シミュレーション結果から得られる動揺両振幅の分布が、レーリー分布にしたがうと仮定し、1/1,000 期待値を用いる。

入力した波浪条件と風条件を表一五、係留索と防舷材の許容値を表一六に示す。

係留索張力および防舷材歪の、それぞれの許容値に対する限界波高と波周期の関係を示したものが図一12 である。なお、対象としたのは最も大きい荷重を受ける部材で、係留索は船首側のスプリングラインである L5、防舷材は最も船尾側の F7 である。これによると、係留索がクリティカルとなる。現実的な波浪諸元の組み合わせとして、周期 8 s の時に港内波高 0.8 m が考えられる。この時の港外の波高は、先述した港内外の波高の相関解析より約 4 m と見積もられた。ただし、この波浪条件の時に係留索が破断する訳ではなく、定めた許容値以上の張力が発生するということである。港外において係留限界を越える波浪が出現する確率を、1997 年の 1 年間の観測期間中で算定すると約 3% となった。したがって長周期波に対する港内静穏度という観点でも、当港湾は安全であると言える。

6. おわりに

1 年余りの三隅港の港内外における波浪観測データから、長周期波の特性を明らかにした。さらに、長周期波を原因とする大型石炭運搬船の動揺についても、GPS 機による観測を行ない、その特性を明らかにした。また、動揺シミュレーションにより係留限界波高を算定した。得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 表面波の波向が変化し、港内に表面波が直接侵入し始めると同時に、長周期波も港内へ侵入している。したがって、長周期波には拘束波もしくは拘束波起源のものが相当量含まれている。
- (2) 動揺観測結果より、Surge, Sway, Yaw の 3 成分のピーク周波数は長周期波の周波数と、Roll, Pitch は表面波の周波数と対応している。
- (3) 当該港湾における係留限界波高は、港内波高で約 0.8 m、港外の波高に換算すると約 4 m と算定され、その非超過確率は約 97% となる。

謝辞：本研究を行なうにあたって、貴重な御助言を頂いた運輸省港湾技術研究所 白石悟海洋構造研究室長ならびに永井紀彦海象調査研究室長に謝意を表します。

参考文献

- 上田 茂 (1984): 係留船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究。港湾技術資料, No. 504, 372 p.
- 久保雅義・斎藤勝彦・下田直克・岡本俊策 (1988): 岸壁前面係留浮体の不規則波による船体運動の時系列解析について, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 687-691.
- 樺木 亨編著 (1991): 波と礫砂と構造物, 技報堂出版, pp. 111.
- 白石 悟・久保雅義・上田 茂・柳原繁樹 (1995): 係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 941-945.
- 平石哲也・田所篤博・藤咲秀可 (1996): 港湾で観測された長周期波の特性, 港湾技術研究所報告, Vol. 35, No. 3, pp. 3-36.
- 堀沢真人・佐藤典之・大中 晋・菅野利夫・Eric C. Cruz・早川 淳 (1998): 港外長周期波の現地観測とその予測手法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 301-305.
- 元良誠三監修 (1992): 改訂版 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂, p. 83.