

船体動揺解析に用いる港湾内バース地点での 入射波スペクトルのモデル化に関する検討

興野俊也¹・長船 徹²・阿部光信³

外洋に面した大規模港湾では、係留中の大型船舶の荷役作業に対する長周期波の影響が予想されることから、長周期波対策を立案する上では、港内外での長周期波成分を含めた波浪特性と係留船舶の動揺特性を把握することが極めて重要である。本研究では、常陸那珂港石炭バースを対象として、長周期波のスペクトル特性を詳細に分析し、長周期波の多方向性を考慮して、船体動揺解析に用いるモデルスペクトルを提案した。さらに、提案したモデルスペクトルを用いて三次元特異点分布法による係留船舶動揺解析を実施し、動揺計測結果と比較することにより、モデルスペクトルによる解析精度を検討し、その妥当性を確認した。

1. はじめに

外洋に面した港湾周辺での来襲波浪には、周期 6 秒から 12 秒の通常波浪成分の他に、波群に拘束されたセットダウン波や外海での自由進行長波、港内で発生する自由波などの長周期波成分が含まれている。これらの長周期波の周期は 1 分から 20 分程度で、大型船舶の係留系固有周期と一致する領域にあるため、荷役限界波高よりも小さな波高であっても係留船舶の大きな動揺を引き起こし、荷役作業の中断や係留索の破断等の障害の発生が報告されている(平石ら, 1997)。

長周期波に起因する荷役障害の対策としては、波浪制御構造物による長周期波制御対策、係留系改造による船舶動揺制御対策、波浪予測による危険予知対策があるが、いずれの対策においても、港内外での波浪・長周期波特性とそれらを考慮した係留船舶の動揺特性を把握する必要がある。

このような問題に対して、筆者らはこれまでに、太平洋岸に面した常陸那珂港の石炭バースを対象として、1 年間の現地波浪観測ならびに大型石炭運搬船の係留時動揺計測を実施し、港内長周期波特性および係留船舶動揺特性を把握した(安田ら, 2005)。その結果、船体動揺解析によって係留船舶の動揺量を求めるためには、バース位置での長周期波のスペクトル特性を適切に評価することが重要であることが明らかとなった。

本研究では、常陸那珂港石炭バースで実施した係留船舶動揺計測期間中に観測された長周期波のスペクトル解析を行い、方向スペクトル特性を詳細に分析した。さらに、これらの分析結果をもとに、当該地点で船体動揺解析を行う場合の長周期波のモデルスペクトルを提案し、

モデルスペクトルを用いた船体動揺解析の解析精度について検討した。

2. 石炭バースにおける長周期波スペクトル特性

(1) 現地波浪観測概要

現地波浪観測は、図-1 に示す常陸那珂港北埠頭東端の石炭バースにおいて、2003 年 7 月から 2004 年 7 月の 1 年間実施した。観測地点には 4 成分波浪計(超音波、水圧、電磁センサー)を設置し、1 時間ごと 20 分間の水位、水圧および 2 成分流速を 0.5 秒ピッチで計測した。

長周期波の解析は、波浪成分との境界を 0.04 Hz、潮汐等のリニアトレンドとの境界を 0.0008 Hz としてこの間の周波数帯を長周期波成分と考え、フィルター法を用いて長周期波の時系列データを作成した。また、長周期波の有義波諸元は波別解析により求めた。

(2) 石炭バースにおける長周期波のスペクトル特性

係留船舶動揺計測期間中において、大型石炭運搬船の Surge 動揺量が顕著であった表-1 の 6 ケースを対象に、長周期波の水位ならびに 2 成分流速データに基づくスペクトル解析を実施した。

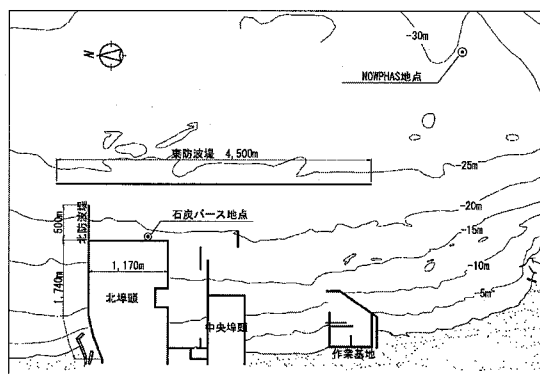


図-1 波浪観測位置

1 正会員 東京電力㈱ 技術開発研究所設備基盤技術グループ
2 東電設計㈱ 第二土木本部港湾・海岸部
3 正会員 東電設計㈱ 第二土木本部港湾・海岸部

表-1 検討ケースの波浪諸元

ケース名	年月日時	NOWPHAS 地点			バース地点			
		波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)	波向	長周期 波高 $H_{LL/3}$ (m)	波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)	長周期 波高 $H_{LL/3}$ (m)
CASE1	2003. 9. 25. 12	1.99	9.3	E	0.09	0.36	8.0	0.10
CASE2	2003.10.19.18	1.43	9.6	E	0.07	0.27	6.9	0.06
CASE3	2003.10.31.16	1.31	11.1	ESE	0.08	0.27	7.2	0.08
CASE4	2003.12.22. 4	1.51	11.9	ENE	0.11	0.24	6.8	0.14
CASE5	2004. 2. 3.10	1.72	8.8	E	0.08	0.34	7.5	0.08
CASE6	2004. 3. 7.14	1.97	10.6	NE	0.07	0.32	5.4	0.10

図-2 は、6 ケースの日時における水位と流速のパワースペクトルおよびクロススペクトル（コヒーレンス、フェーズ）を示したものである。

水位変動のパワースペクトル S_η は、CASE5 以外のケースでは概ね同様のスペクトル形状を示し、0.01~0.02 Hz 付近でピークとなる傾向が見られた。また、2 成分流速のパワースペクトルは、岸沖方向 S_u に比べて沿岸方向 S_v の方が強く、水位変動のパワースペクトルと同様に 0.01~0.03 Hz 付近でピークとなることが多く見られた。

水位と 2 成分流速のクロススペクトルのコヒーレンスについては、CASE2 を除いて沿岸方向 γ_{nv} に比べて岸沖方向 γ_{nu} の方が強くなる傾向が見られた。また、フェーズについては、水位変動のパワースペクトルのピーク周波数付近に着目すると、いずれのケースも岸沖方向 θ_{nu} では $\pi/2$ 程度を示しており、石炭バース背後護岸の影響による重複波を形成しているものと考えられる。一方、沿岸方向 θ_{nv} では π 程度を示すケースと $\pi/2$ 程度を示すケースとが見られ、石炭バース背後護岸に沿った進行波の傾向と北防波堤からの反射波の影響を受けた重複波の傾向が混在しているものと考えられる。

以上のように、石炭バースでの長周期波は、いずれのケースにおいても大型船の係留系固有周期とほぼ一致する 0.01~0.02 Hz 付近にパワースペクトルのピークが見られ、南側港口から進入する沿岸方向の進行波および重複波と、東防波堤と石炭バース背後護岸との間の多重反射波とが共存しているものと考えられる。これは、港外から進入した長周期波や港内で発生した長周期波が自由波として伝播し、港湾形状に依存した水面変動が発生していることによるものと推察される。

(3) 長周期波の方向スペクトル特性

石炭バースでの長周期波の多方向性を把握するため、水位変動および 2 成分流速のデータを用いて EMEP 法（橋本ら、1993）による方向スペクトル解析を行った。

図-3 は、各ケースの長周期波の方向スペクトルを示したものである。長周期波の方向スペクトルは、いずれのケースにおいても N 方向および S 方向にピークが見

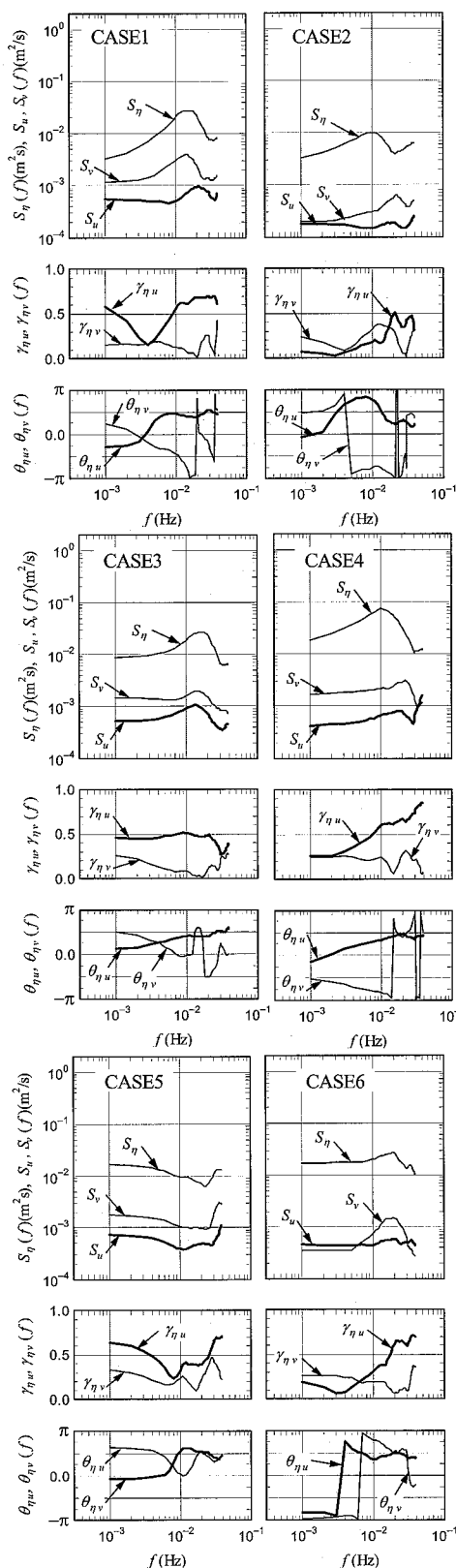


図-2 パワースペクトルおよびクロススペクトル

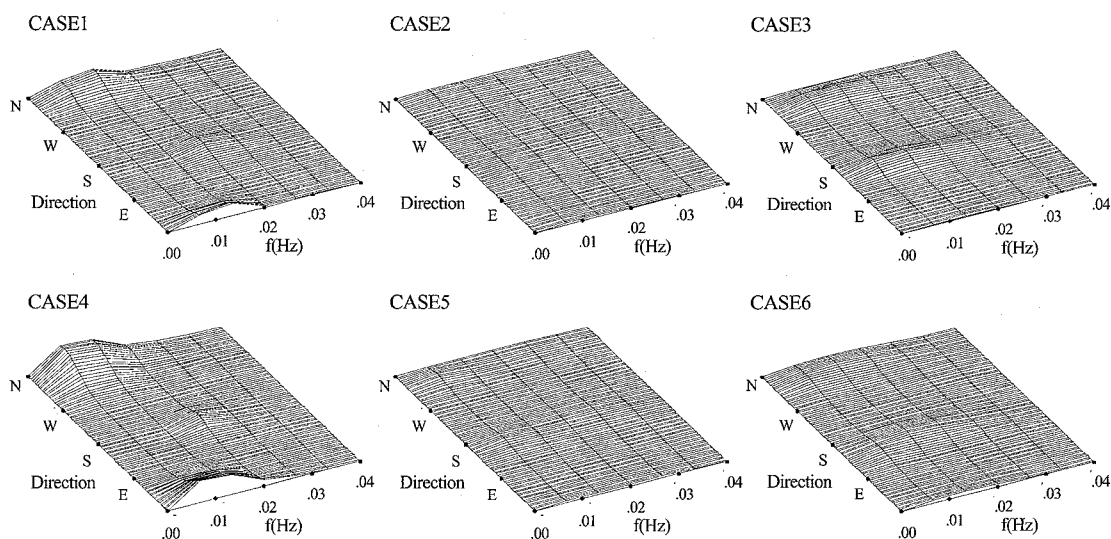


図-3 バース地点における長周期波の方向スペクトル

られた。周波数ごとに相違に着目すると、パワースペクトルのピーク周波数である0.01Hz付近では、すべてのケースでN方向に著しいピークが見られ、CASE1およびCASE4を除けば、S方向にもピークが見られた。

図-4は、各ケースの方向スペクトルを周波数方向に積分して求めた方向分布関数である。いずれのケースでもN方向とS方向にピークが見られた。CASE1とCASE4ではN方向の値がS方向に比べて大きい、その他のケースではN方向、S方向ともほぼ同程度の値であった。

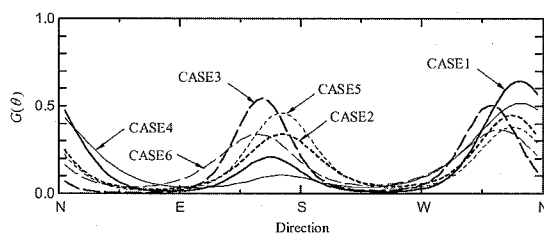


図-4 周波数方向に積分した方向分布関数

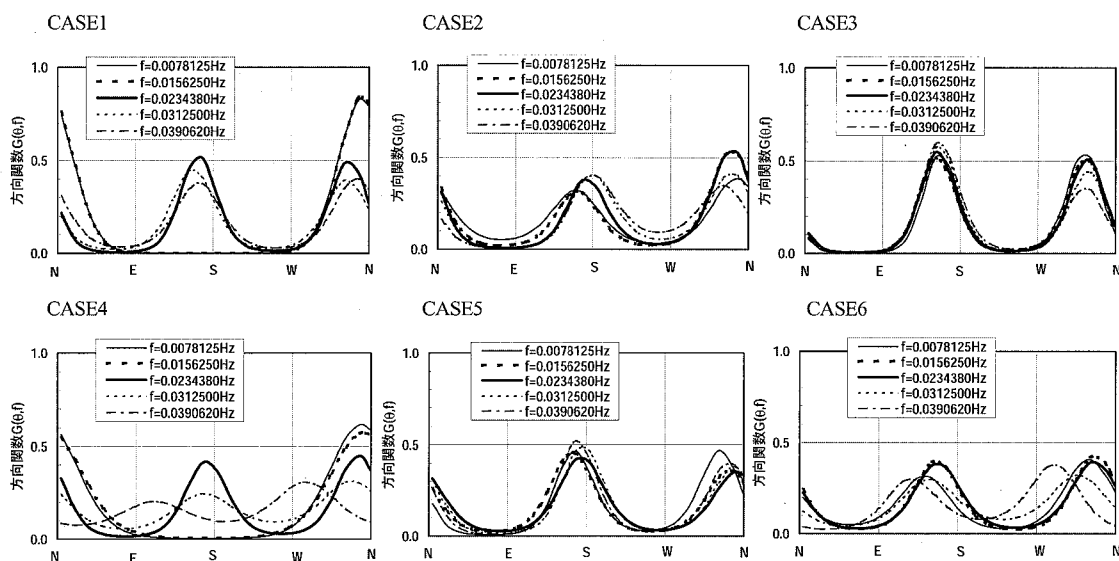


図-5 代表周波数における方向分布関数

前項の水位と2成分流速のクロススペクトルでは、石炭バース位置での長周期波は沿岸方向の進行波や重複波、岸沖方向の重複波が共存する複雑な特性が見られたが、方向スペクトル解析の結果によれば、係留船舶の船首尾方向 (Surge 方向) のN方向およびS方向の2方向が卓越する波向特性を示すことが明らかとなった。これは、2成分流速のパワースペクトルにおいて岸沖方向よりも沿岸方向の方が強いことと同様の傾向である。

図-5は、各ケースの代表的な周波数における方向分布関数を示したものである。CASE1およびCASE4を除けば、いずれのケースも方向分布関数の周波数による相違は見られず、N方向とS方向の2方向が卓越する分布を示し、その値もほぼ同程度である。

3. 長周期波スペクトルのモデル化の検討

(1) 周波数スペクトルのモデル化の検討

前項で明らかのように、石炭バースでの長周期波の周波数スペクトルは、ピーク値には差が見られるものの、そのスペクトル形状はいずれのケースも同様の形状を示した。そこで、当該地点における長周期波の周波数スペクトルのモデル化を試みた。

図-6の細線は、石炭バースにおける各ケースの長周期波の周波数スペクトルを長周期波高に基づく総エネルギーで正規化して、周波数毎の増幅率として表したものである。これらの増幅率には若干ばらつきがあるものの、何れのケースも周波数0.01~0.02 Hzでピークとなる同様の形状を示した。

本検討では、これらの増幅率の平均値 (図中黒太線) を長周期波のモデル周波数スペクトル増幅率とした。石炭バースでの長周期波の周波数スペクトルを求めるには、この増幅率に石炭バースにおける長周期波高に基づくエネルギーを乗じることによって設定することができる。

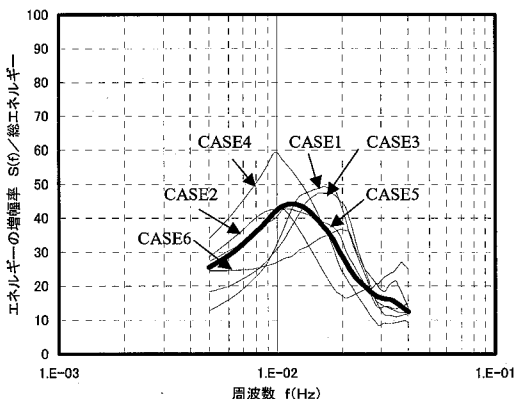


図-6 長周期波のエネルギー増幅率

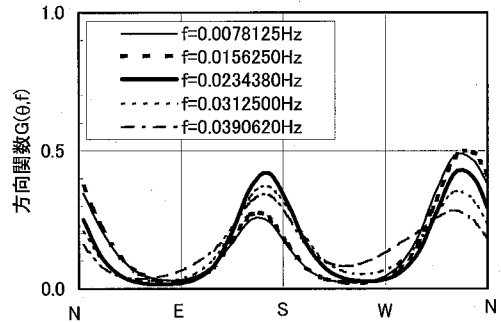


図-7 モデル方向関数

(2) 方向スペクトルのモデル化の検討

石炭バースでの長周期波の方向スペクトルについても、その方向分布関数はいずれのケースも同様の形状を示した。そこで、周波数スペクトルと同様に、当該地点における長周期波の方向分布関数のモデル化を試みた。

図-7は前述図-5で求めた代表周波数における方向分布関数の平均値を示したものである。代表周波数における方向分布関数は、いずれのケースも概ね同様の傾向を示していることから、本検討では、図-7を長周期波のモデル方向分布関数とした。

4. モデルスペクトルによる船体動揺量の再現性検討

前項において設定したモデル周波数スペクトルおよびモデル方向分布関数を用いて船体動揺解析を行い、係留船舶動揺量の再現性を検証した。

本検討において用いた船体動揺解析手法は、周波数毎に流体力および波浪強制力を求め、これを外力として船体動揺の運動方程式を時系列シミュレーションにより解くものである。流体力および波浪強制力の算定は、船型形状を任意に考慮できる三次元グリーン関数に基づいて直接求める三次元特異点分布法を、運動方程式の時系列解析は、粘性減衰を考慮した遅延関数法を用いた (上田, 1984, 笹ら, 1999)。長周期波の多方向性については、長周期波の進行波方向のN~E~Sの180°を等分割し、前項で提案したモデル方向分布関数をもとに時系列外力を求め、運動方程式の時系列解析で成分波の重ね合わせとして評価した (村松ら, 2002)。なお、検討ケースは前述表-1に示す6ケースとした。

図-8は三次元特異点分布法による船体動揺解析結果と実測動揺量を比較したものである。上段は6成分の船体動揺量のうち Surge, 下段は Sway で、それぞれ横軸は実測動揺量、縦軸は解析動揺量である。図中のプロットの○は前項で提案したモデルスペクトルを用いた解析結果、●は観測スペクトルを用いた解析結果である。

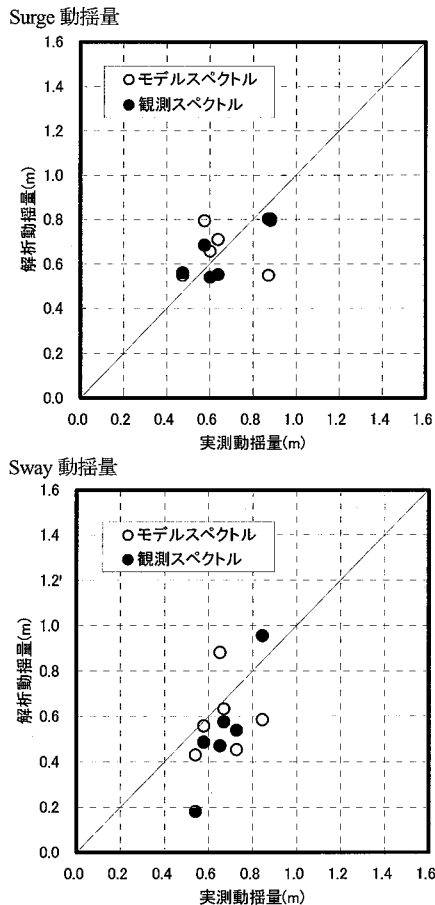


図-8 モデルスペクトルによる船体動揺解析結果

これによれば, Surge, Sway の解析結果は概ね実測値と一致した。また, モデルスペクトルを用いても実測スペクトルを用いた場合と同様の結果が得られ, モデルスペクトルによる船体動揺量の再現性が確認できた。

5. おわりに

本研究で得られた成果をまとめると, 以下のとおりである。

- ① 港内における長周期波のスペクトル解析の結果, パワースペクトルのピークが大型船の係留系固有周期とほぼ一致する $0.01 \sim 0.02$ Hz 付近に見られること, 港内での長周期波は自由波として進行し, 港湾形状に依存した水面変動が発生していることが明らかとなった。
- ② 港内で観測した長周期波の周波数スペクトルおよび方向分布関数より, 長周期波の多方向性を考慮して, 船体動揺解析に用いるモデルスペクトルを提案した。
- ③ 提案したモデルスペクトルを用いて, 三次元特異点分布法による船体動揺解析を行った結果, Surge および Sway の動揺量が動揺計測結果とほぼ一致し, モデルスペクトルの妥当性が確認できた。

なお, 本研究で提案した長周期波のモデルスペクトルは, 常陸那珂港での波浪観測データに基づくもので, 長周期波の地点特性が含まれたモデルであると考えられる。今後他地点での長周期波の観測データが入手できた場合には, 同様の分析を行って長周期波のスペクトル特性に関する知見を深め, 地点特性に依存しない長周期波スペクトルのモデル化について検討したい。

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, 港研資料, No.504, pp.1-372.
- 笹健児・白石悟・榎原繁樹(1999): 係留船舶の長周期動揺の各種数値計算法による再現性に関する比較検討, 港研資料, No.931, pp.1-80.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井正・菅原一晃・久高将信・小野修平(1993): 方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法の拡張, 第40回海講論文集, pp.136-140.
- 平石哲也・白石悟・永井紀彦・横田弘・松淵知・藤咲秀可・清水勝義(1997): 長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査, 港湾技術資料, No.873, pp.1-39.
- 村松信・興野俊也・安田勝則・佐々木政秀・阿部光信(2002): バース稼働状況シミュレーションを用いたバース運用予測手法の研究, 海洋開発論文集, VOL.18, pp.623-628.
- 安田勝則・興野俊也・長船 徹・阿部光信(2005): 大規模港湾における長周期波観測とGPSを用いた船体動揺観測に基づく係留船舶の動揺特性, 第52回海講論文集, pp.766-770.