

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

安田勝則*・興野俊也*・長船 徹**・阿部光信***

外洋に面した大規模港湾では、長周期波による係留中の大型船舶への荷役障害がたびたび報告されている。港湾の長周期波対策を立案する上で、港内外での長周期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は極めて重要である。常陸那珂港石炭バースを対象とした波浪観測と船体動揺計測を行い、港外から石炭バースへの長周期波の伝播特性を明確にしたと共に、石炭バースに係留中の石炭運搬船の動揺特性については、SurgeとSwayの各動揺成分でそれぞれの固有周期となる領域で、長周期波高に対する応答が10倍程度になることが確認された。

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すことが予想される。長周期波が主要因である船体動揺による荷役作業の中断や係留索の破断等の障害の発生事例については、平石ら(1997)が港湾施設での被害特性とその対策工について報告している。

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による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、太平洋岸に面した大規模港湾の常陸那珂港を対象として、港内での1年間の長期波浪観測を実施し、年間を通しての長周期波の伝播特性を把握した。さらに、港内の石炭バースにおいて、GPSを用いて大型石炭運搬船の係留時の動揺を計測し、長周期波による係留船舶の動揺特性を検討した。

2. 常陸那珂港における長周期波の特性

(1) 波浪観測の概要と長周期波出現特性

常陸那珂港における長周期波特性を把握するため、図-1に示す石炭バース近傍において、2003年7月以降継

続して現地波浪観測を実施した。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60分間の水位、水圧、2成分流速を0.5秒ピッチで計測した。また、併せて国土交通省が実施しているNOWPHAS地点の同期間の波浪観測データ(2時間ごと20分間0.5秒ピッチ)を取得した。長周期波の解析は、観測波形データをもとに、波浪成分との分離周波数を0.04 Hz、潮汐等のトレンドとの分離周波数を0.0008 Hzとして、フィルター法を用いて長周期波成分の分離を行い、波別解析により有義波諸元を求めた。

図-2は2003年7月から1年間のNOWPHAS地点における長周期波成分の有義波高と波浪成分の有義波諸量(有義波高と有義波周期の積)の関係を示したものであ

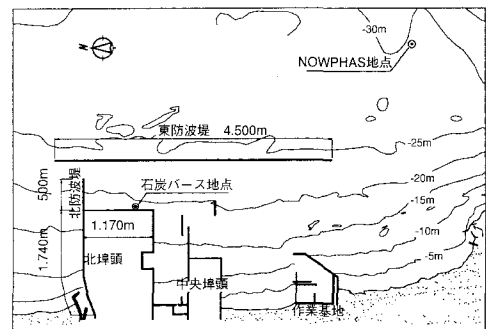


図-1 波浪観測位置

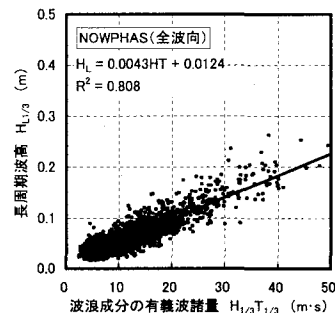


図-2 長周期波高と波浪成分の有義波諸量の関係

* 正会員 東京電力(株) 技術開発研究所 設備基盤技術グループ
** 東電設計(株) 第二土木本部 湾岸・海岸部
港湾・空港グループ
*** 正会員 東電設計(株) 第二土木本部 湾岸・海岸部
港湾・空港グループ

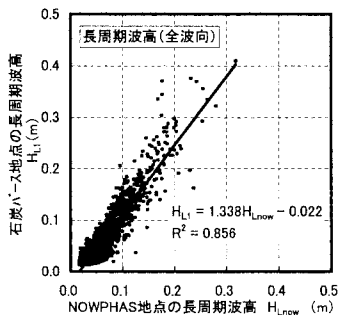


図-3 港内外長周期波高の関係

る。既往の研究成果(阿部ら, 1999)でも報告されているように、両者の相関は非常に高いが、その比例定数は他地点と異なり、地点特性に依存するものと考えられる。

図-3 は港外の NOWPHAS 地点と港内の石炭バース地点の長周期波の有義波高の関係を示したものである。港内外での長周期波高の間には明瞭な相関関係が見られ、長周期波高が 0.10 m 以下の場合には港内外での値はほぼ同程度となるが、長周期波高が 0.10 m 以上の場合には石炭バース地点の方が NOWPHAS 地点より波高が若干高い。

以上のことから、港内の石炭バース地点での長周期波高は、波浪観測データに基づく相関式を用いることによって NOWPHAS 地点の波浪成分の有義波諸量から推定することができることが明らかとなった。

(2) 石炭バース地点の長周期波スペクトル特性

図-4 は NOWPHAS 地点と石炭バース地点での長周期波成分の流速データに基づく軌道流速散布図で左図が台風性波浪時、右図が低気圧性波浪時の代表例である。これによれば、NOWPHAS 地点での軌道流速は分散が大きく明瞭な方向性が見られない。これに対して、石炭バース地点での軌道流速は、NOWPHAS 地点に比べて分散が少なく、台風性波浪時では沿岸方向(V方向)の流速がやや強いものの、明瞭な卓越方向は見られない。これは、長周期波の水粒子が360°の全方向に運動しているため、長周期波の波向の特定は困難であると考えられる。

港内での長周期波の伝播特性を明らかにするため、石炭バース地点における水位ならびに2成分流速データに基づくスペクトル解析を行った。図-5 は石炭バース地点における代表日時の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)で、左図が台風性波浪時、右図が低気圧性波浪時の結果である。

水位変動のパワースペクトル S_η は、いずれの気象擾乱の場合でも 0.01 Hz 付近に最大のピークが見られ、その2倍、3倍周波数付近にも第2、第3のピークが見られた。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 の方が強くなる傾向が見られた。

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、岸沖方向 $\gamma_{\eta u}$ 、沿岸方向 $\gamma_{\eta v}$ 、いずれも水位変動のパワースペクトルと同様に 0.01 Hz 付近にピークが見られた。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、岸沖方向 $\theta_{\eta u}$ 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り重複波を形成しているものと考えられる。

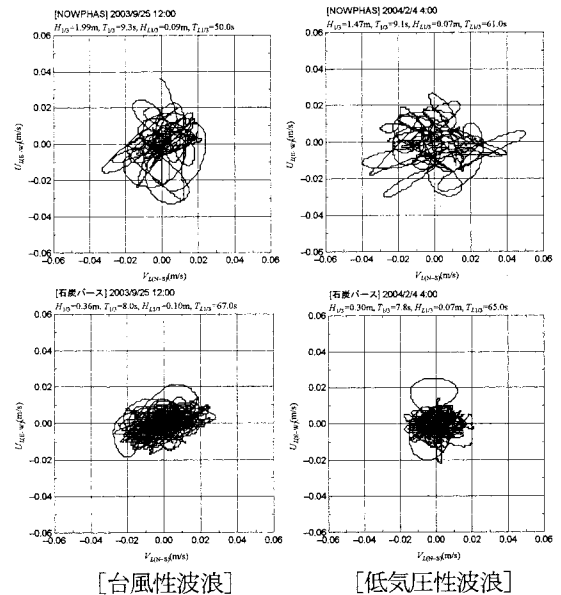


図-4 長周期波の軌道流速散布図

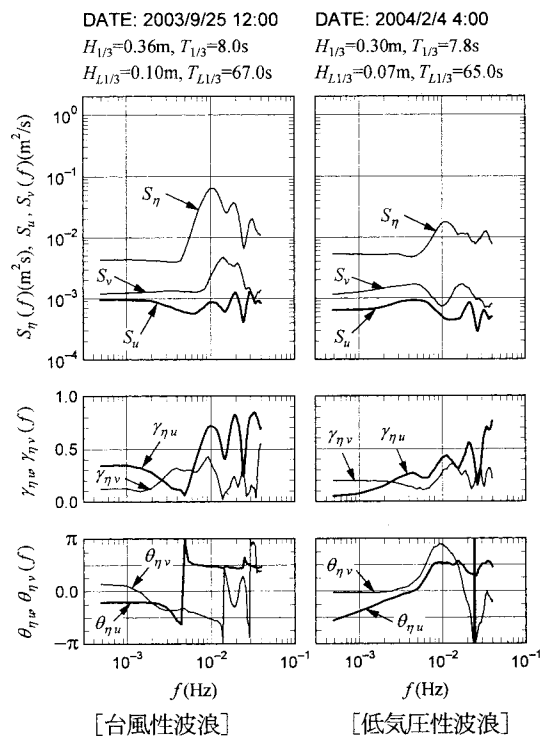


図-5 パワースペクトルおよびクロススペクトル

一方、沿岸方向 θ_{ν} では π となるケースと $\pi/2$ となるケースが見られ、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とが混在しているものと考えられる。

以上のように、当該地点の石炭バース付近では、南側港口から進入する沿岸方向の長周期波成分だけでなく、東防波堤と石炭バース背後護岸との間で多重反射する長周期波成分や、北防波堤からの反射による長周期波成分など、様々な方向から伝播する長周期波の影響を受けており、非常に複雑な特性を示しているものと推察される。

3. 石炭運搬船の船体動揺特性

(1) 船体動揺計測の概要

石炭運搬船の船体動揺特性を把握するため、2003年8月～2004年3月の台風期、低気圧期を対象に当該石炭バースに係留された石炭運搬船11隻でGPSによる船体動揺計測を行った。石炭運搬船の載貨重量は70～142千DWTである。図-6に船体動揺計測時のGPSの配置と係留状態の一例を示す。船体動揺は、船上にGPSを3台とTSSを1台、陸上にGPS基準局を設置して、揚炭作業中の約3～4昼夜連続で計測した。計測データのサンプリング間隔は、波浪観測と同様の0.5秒ピッチで、石炭運搬船の重心位置での6成分の動揺量に変換した。

計測対象とした石炭運搬船の係留系は、栈橋に32m間隔で設置された防舷材（空気式：2000H×2000φ）のうちの5基が船体に接し、係留索16本（船首側8本、船尾側8本）を曲柱に取る図-6のような構成がいずれも標準形である。係留索の仕様は、表-1の石炭運搬船Cがナイロントエルロープφ70である以外はナイロンタフレロープφ70またはφ80である。しかし、船体動揺

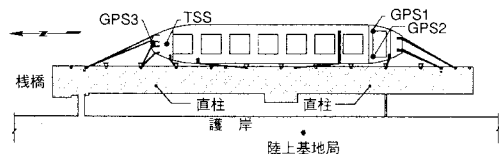


図-6 船体動揺計測時のGPSの配置と係留状態の一例

が大きい場合には、それぞれ2本ずつある船首側と船尾側のプレストラインを曲柱から栈橋奥の直柱へ取り直す変更を行っている。ただし、この変更については、栈橋上を荷役のために移動するアンローダの位置により、船首側または船尾側のいずれか片側のみの場合もあった。また、石炭運搬船Dではこの変更に追加して、新たなロープ（ナイロンSトエルロープφ70）を用いて船首側と船尾側のプレストラインとスプリングラインをそれぞれ1本ずつ計4本取り増す変更を行っている。

(2) 船体動揺計測結果

船体動揺計測を実施した11隻のうち1m以上のSurgeが計測された石炭運搬船は、表-1に示す諸元を有する6隻である。表-1には、船舶諸元の他にSurgeで1mを超える大きな船体動揺が計測された代表時刻とその時に石炭バースで観測された波浪状況も併記した。1m以上の大きな船体動揺が生じる際の石炭バースにおける波浪状況は、概ね有義波高 $H_{1/3}$ が30cm以上、長周期波高 $H_{L1/3}$ が10cm以上となっていた。石炭運搬船に生じた大きな動揺の要因は、石炭運搬船A～Cが台風性波浪、石炭運搬船D～Fが低気圧性波浪によるものである。

図-7および図-8は、石炭バースでの長周期波高と石炭運搬船の動揺量（Surge, Sway）の関係を示したものであり、代表例として載貨重量の異なる、石炭運搬船D（載貨重量142千DWT）と石炭運搬船E（同96千DWT）を示した。計測期間中の石炭運搬船は、排水量が荷役の進捗に伴って減少し喫水が浅くなることの他に、どちらも途中で船体動揺量が大きくなったために前述した係留系の変更を2回ずつ行っている。Surge, Swayの船体動揺量は、石炭バースでの長周期波高 $H_{L1/3}$ が大きくなると比例的に船体動揺量も大きくなっており、長周期波高 $H_{L1/3}$ の10倍程度である。図中には、95%信頼区間としてばらつきの上下限を破線で示したが、長周期波高 $H_{L1/3}$ の10倍の ± 0.3 mでSurge, Swayの船体動揺量が概ね想定することができる。これらの傾向は、載貨重量75千DWT前後の石炭運搬船に対しても同様であった。また、石炭運搬船の大きさや係留系の配置が異なってもSurge, Swayの船体動揺量に顕著な違い

表-1 1m以上の動揺量が計測された石炭運搬船

船舶	船舶諸元			計測期間	石炭バースの波浪および船体動揺の状況				
	全長	型幅	載貨重量		月日 時刻	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	$H_{L1/3}$	Surge
A	230 m	36.0 m	75千 DWT	09/19-09/25	09/25 12 h	0.35 m	5.2 s	0.10 m	1.15 m
B	230 m	36.0 m	75千 DWT	10/19-10/22	10/22 03 h	0.39 m	7.7 s	0.06 m	1.02 m
C	225 m	32.2 m	78千 DWT	10/31-11/04	10/31 11 h	0.33 m	8.8 s	0.09 m	1.47 m
D	270 m	47.0 m	142千 DWT	12/17-12/23	12/22 04 h	0.24 m	6.8 s	0.14 m	1.58 m
E	240 m	43.0 m	96千 DWT	02/01-02/04	02/04 03 h	0.32 m	7.7 s	0.07 m	1.02 m
F	229 m	36.5 m	74千 DWT	03/07-03/10	03/07 15 h	0.32 m	5.6 s	0.10 m	1.11 m

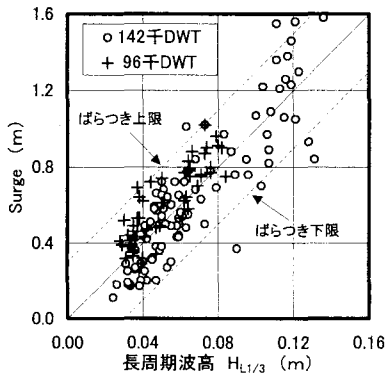


図-7 石炭バースの長周期波高と Surge の関係

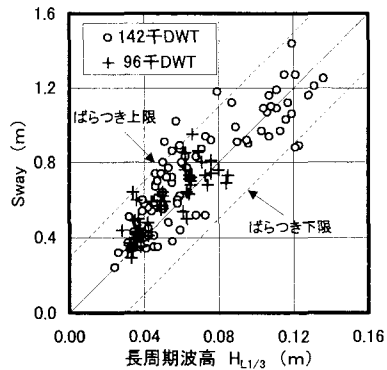


図-8 石炭バースの長周期波高と Sway の関係

が見られなかった。

(3) 船体動揺特性

図-9 には、図-4 に示した波浪観測と同時刻の Surge および Sway の動揺スペクトルと波浪スペクトルに対するその伝達関数 K_{surge} , K_{sway} を示した。係留船舶は、9月25日12時が石炭運搬船 A (載貨重量75千 DWT)、2月4日4時が石炭運搬船 E (同96千 DWT) であり、その時刻の係留系は、前者が船尾側プレストラインを直柱から、後者が船首側と船尾側のプレストライン直柱から取るように標準形に対して変更されている。

動揺スペクトルのピーク周波数は、どちらの時刻も Surge で 0.015 Hz 程度、Sway で 0.02 Hz 程度であり、水位変動のパワースペクトル S_η の第 1 ピーク (0.01 Hz) 付近、第 2 ピーク (0.02 Hz) 付近とはほぼ一致しており、これらの周波数帯で船体動揺が生じたと考えられる。また、石炭船の大きさや係留系の違いが Surge, Sway の固有周波数の変化に与える影響が顕著に見られなかった。これは、排水量が大きくなると、それに対応して石炭運搬船に作用する減衰力も大きくなるためであると推察される。伝達関数は、動揺スペクトルのピーク周波数で Surge, Sway 共に最大の応答を示し、その倍率は10倍程度である。

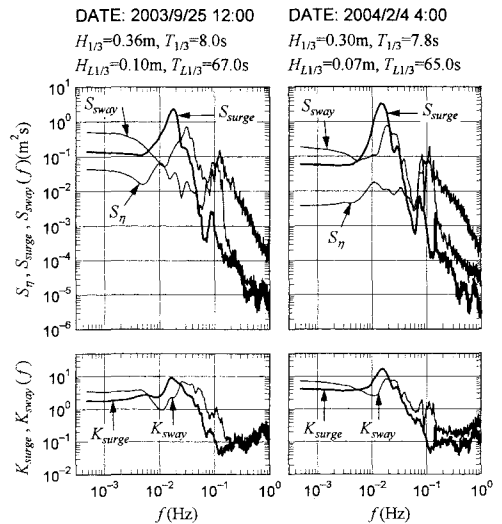


図-9 石炭運搬船の動揺スペクトルと伝達関数

以上、船体動揺量の観測結果から、石炭運搬船の大きさや係留方法に係わらず各運動モードの固有周波数は Surge が 0.015 Hz 付近、Sway, Yaw が 0.02 Hz 付近、Heave, Roll, Pitch が 0.1 Hz 付近に見られた。また、Surge, Sway の動揺量低減を図るため荷役作業中、プレストラインを曲柱から直柱への変更、増し取りなどを行ったが、動揺量低減の効果が殆ど見られなかった。これは係留索による拘束力の変化が大きいと推察される。

4. 解析による船体動揺量の再現性の検証

石炭バースの波浪観測結果を用いて船体動揺解析を行い、船体動揺計測結果と比較することで解析の再現性を検証した。船体動揺解析手法には、流体力および波浪強制力の周波数解析がストリップ法、船体動揺の運動方程式の時系列解析が粘性減衰を考慮した遅延関数法である上田 (1984) の手法を用いた。解析の条件として、排水量や喫水等の石炭運搬船の諸元を当日荷役開始前の状態、解析対象時刻の係留系とし、石炭バースで観測された波浪スペクトルの 0.04 Hz までの長周期側を 10 分割、0.04 Hz を超える領域を 10 分割の計 20 分割した波浪スペクトルを用いた。タイムステップは 0.5 s、シミュレーション時間は 3600 s と 7200 s で数ケース行ったところ有意な差が表れないため 3600 s とした。なお、解析結果は、シミュレーション時間内で表れた最大値で整理した。

0.8 m 以上の Surge が計測された 25 ケースを対象とした Surge, Sway の解析結果と計測結果との比較を図-10 および図-11 に示す。Surge および Sway について、解析値は計測値に対して ± 0.2 m 程度の範囲に分布しており、石炭バースでの観測波浪スペクトルを用いることにより

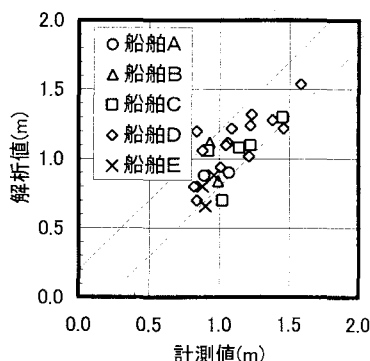


図-10 Surgeの解析値と計測値の比較

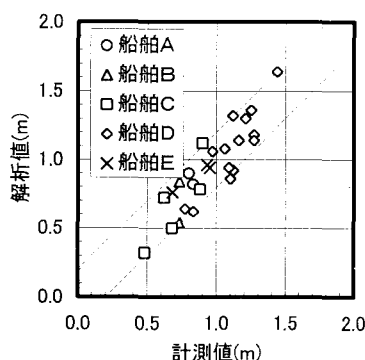


図-11 Swayの解析値と計測値の比較

ストリップ法で精度良く再現できることが分かった。

5. 石炭バース運用管理への適用

当該石炭バースでは、荷役管理値を Surge が ± 0.5 m, Sway が $+1.0$ m, Heave が ± 0.25 m と定めて船体動揺量を目視計測して管理している。これまでの運用状況において、荷役が中止となる場合の船体動揺モードとしては、Surge がはじめに荷役管理値を超えて、続いて Sway も超えるようになるケースがほとんどである。船体動揺量は、Surge, Sway 共に現地波浪観測、船体動揺観測結果から長周期波高の10倍程度になるため、安全管理上のひとつの目安として、石炭バースでの長周期波高 $0.08 \sim 0.10$ m を管理基準として運用するのが適当であると考えられる。

石炭運搬船の揚炭作業に当たっては、長時間の荷役作業中断や緊急離棧、係留索破断等の障害を未然に防ぐことが作業安全上重要である。その対応策として、沖合の波浪予報値から港内の石炭バース位置での波浪、長周期波と係留船舶の動揺量を予測し、バース管理者に対して荷役作業可否判断の基礎データを提供する「石炭バース荷役可否判断支援システム」(興野ら, 2005)を開発し、運用開始している。開発したシステムでは、現地データ

を活用した予測方法を極力取り入れることを基本とし、港内波浪の予測には現地波浪観測に基づく予測式を用いていること、港内波浪に加えて港内長周期波高も予測できること、係留船舶動揺量の予測には運用実績に応じて修正が容易なデータベースを用いていること、などの特徴を有している。このシステムによる荷役可否判定は、2003年9月～2004年9月の期間に入港した25隻の石炭運搬船を対象にした前日予報での適中率は97%であり、荷役可否判断での情報として大いに役立っている。

6. おわりに

本研究の結論をまとめると以下ようになる。

- ① 石炭バースでは、岸沖方向より沿岸方向の流速が強い。水位変動のピークは 0.01 Hz 付近に表れやすく、重複波となっているが、沿岸方向には進行波が混在していると見られる。
- ② 石炭運搬船の動揺の固有周波数は、Surge が 0.1 Hz 付近、Sway が 0.15 Hz 付近にあり、船体動揺量は、長周期波高の約10倍になる。また、排水量や係留系の変化は、船体動揺に対し顕著な影響を与えない。
- ③ 石炭バースで観測した波浪スペクトルを用いることにより、ストリップ法により、概ね ± 20 cm の精度で船体動揺量の想定が可能である。

謝辞：本研究にあたっては、「常陸那珂石炭バース長周期波検討会（主催：東京電力(株)）」を設置し、磯部雅彦東京大学教授、平石哲也(独)港湾空港技術研究所波浪研究室長、池野正明(財)電力中央研究所上席研究員をはじめ各委員よりご意見・ご指導を頂いた。常陸那珂港 NOW-PHAS データの利用にあたっては、永井紀彦(独)港湾空港技術研究所海象情報研究室長に特別なご配慮を頂いた。ここに記して謝意を表し感謝を申し上げる次第である。

参考文献

- 阿部光信・興野俊也・青野利夫 (1999)：現地連続観測に基づく港湾内の長周期波の伝播特性に関する研究，海岸工学論文集，第46巻，pp. 311-315。
- 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，港湾技研資料，No.504，pp. 1-372。
- 沿岸技術研究センター編：港内長周期波影響評価マニュアル，沿岸技術ライブラリー，No.27，p86。
- 興野俊也・安田勝則・阿部光信・長松 徹 (2005)：長周期波予測に基づくバース荷役可否判断支援システムの開発と運用実績，海洋開発論文集，Vol.21，pp. 803-808。
- 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解析法による再現性に関する比較検討，港湾技研資料，No.931，pp. 1-80。
- 平石哲也・白石 悟・永井紀彦・横田 弘・松岡 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，港湾技研資料，No.873，pp. 1-39。