

発生頻度を考慮した長周期波対策工法の選定法

平石 哲也* ・宮 地 豊** ・石井 幸生*** ・佐藤 峰雄****
立石 賢吾***** ・松浦 邦明***** ・仲井 圭二***** ・山川 真*****

1. はじめに

外洋から港湾に侵入する周期 1～数分程度の長周期波による荷役障害が、近年、各地の港湾で報告されており、特に苫小牧港から鹿島港にかけての太平洋沿岸の港湾で顕著になっている(平石ら, 1996)。荷役障害の原因は、ナイロン製ロープで岸壁に係留された数千～数万 DWT クラスの大型船のサージ運動が許容値を超えることにより引き起こされている。これは、船体と係留索からなる振動が、長周期波との共振によって励起されたもので、荷役効率を向上させ、港湾の経済性と安全性を確保するためには、その対策が緊急に必要である。

長周期波による荷役障害への効果的な対策の一つに、沖合防波堤を最適方向へ延伸し、侵入する長周期波のエネルギーを低減することが考えられる(平石ら, 1997a)。しかし、延伸形状や延伸長を決めるための指標は未だ確立されていない。また、完成形状に達していない港湾における暫定供用バースの使用可能性に対する判定も明確にされていない。指標の一つとして、対象岸壁の長周期波に対する荷役稼働率が提案されている(平石ら, 1998)。これは、風波の出現頻度分布を整理したデータベースから、長周期波標準スペクトル(平石ら, 1997b)を用いて風波の波高と周期に対応する長周期波高を推定し、線形長波の伝播計算によって対象岸壁前面の長周期波高を求め、荷役限界波高以下の頻度を荷役稼働率として定義する。

この手法は、防波堤の延伸方向を決定するための近似推定法として適しているものの、風波と長周期波の波向を同一と仮定し、荷役可能限界波高を苫小牧港での設定値で代表させており、精度が十分ではない。本研究では、現地観測結果から導いた波向分布を用いる荷役稼働率算定手法を提案するとともに、比較的建設が容易な長周期波対策法の適用性を検討する。

2. 現地観測の内容と結果

(1) 観測の概要

長周期波の現地観測は石巻港、常陸那珂港の港外の水深 20 m 以上の沖合観測点と港内の複数観測点で 2000 年 2～3 月(春期)と 8～10 月(秋期)に 0.5 s 間隔で 60 日間連続で水位および水平 2 成分流速データを取得した。水位データについては、フーリエ解析を実施し、周期 20 s 以上の成分から長周期波形を再合成し、有義波高・周期を求めた。長周期波の波向は、10 周期分の水平 2 成分長周期流速 u と v を用いて、卓越波向 θ として計算した。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\overline{uv}}{u^2 - v^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、波向 θ は、 u の正方向から時計回りに測られる角度で、現地観測データは 16 方位で整理した。

図-1 に石巻港の観測点を示す。図中の No.1 は、水深 20 m の港外の沖波観測点で、水位変化と水平 2 成分流速を測定した。港内観測点の No.3 は、荷役障害が生じている岸壁 Q より 20 m 離して海底に設置した水位・流速計である。観測データ中の風波成分の解析においては、波形を統計処理し、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ および EMEP (Hashimoto ら, 1994) で求めた主波向 θ_p を整理した。常陸那珂港の観測点は後述の図-7 で示す沖合の水深 20 m 地点である。ここでは港内は水位計測のみで流速は観測していない。収集した長周期波形は、スペクトル解析し、各周波数毎に港内と港外のスペクトル密度の比の平方根を求め、各周波数帯の長周期波高比を求めた。

船体の動揺観測は 2000 年 2 月 24 日および 10 月 18 日に約 6000 DWT の貨物船を対象として、図-1 の岸壁 Q で実施した。観測では、港内波高計で長周期および短周期波の変化を計測すると同時に、ブリッジ頂上に取り付けたアンテナを用いて衛星による地上位置観測 (GPS) 法を用いて船体のサージ、スウェー、ヒープの移動量を測定した。

(2) 観測の結果

図-2 に石巻港 No.1～No.3 における流速ベクトルの

* 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所海洋・水工部
** 正会員 工修 (前)国交省東北地整局塩釜港湾空港工事事務所
*** 正会員 工修 国交省関東地整局鹿島港湾空港工事事務所
**** 正会員 三洋テクノマリン(株)技術コンサルタント部
***** 正会員 水修 (財)日本気象協会首都圏支社
***** 正会員 理修 (財)沿岸開発技術研究センター波浪情報部

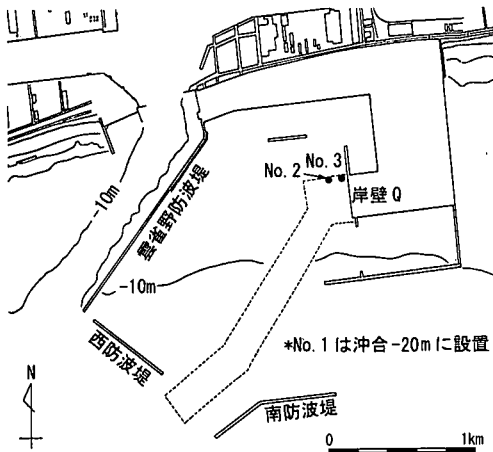


図-1 石巻港における波浪観測点

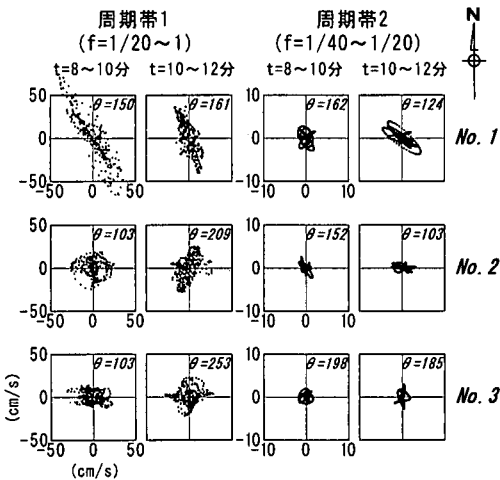


図-2 観測流速ベクトルの散布図

散布図の一例を示す。1時間程度の長時間観測値の散布図を作成すると図示点数が多くなり、図面が煩雑になる。ここでは、観測時間 t を 8~10 分および 10~12 分に分割し、それぞれ周期帯 1 ($f=1/20 \sim 1$ (1/s)) および周期帯 2 ($f=1/40 \sim 1/20$ (1/s)) および周期帯 3 ($f=1/60 \sim 1/40$ (1/s)) での流速の散布図を求めた。なお、図中には周期帯 1 と周期帯 2 のみを示す。図の縦軸および横軸がそれぞれ、南北成分および東西成分流速に相当する。風波の周波数帯における流速散布図には卓越方向が顕著に表れている。長周期波の周波数帯では、楕円状の散布図が表れており、楕円の長軸を求めることにより流速の卓越方向を求めることができる。卓越方向は岸と沖方向に表れるので、岸側へ向かう方向を示す長軸向きを長周期波の波向とした。

図-3 は、石巻港 No. 1 における観測波高 $H_{1/3}$ と波向 θ_p の経時変化を示したものである。2000 年 8 月 13-15

日、10 月 17-19 日には $H_{1/3}$ は 1.0 m より大きくなり、長周期波成分有義波高 $H_{1/3}$ も 0.1 m より大きくなる。 $H_{1/3}$ のピークが出現するときには、 $H_{1/3}$ もピークを示し、長周期波と短周期波の相関は強い。したがって、短周期波のスペクトル形から長周期波エネルギーを類推する近似手法(平石ら, 1997b)は有効である。しかし、波向を比較すると、短周期波の場合には、波高が大きくなると、ほとんどの時間帯に波向は SE で示されるが、長周期波には SW の波向が顕著に出現しており、短周期波の波向で代表させると誤差が大きくなることが推測できる。

図-4 は、夏期の観測期間(2000 年 8 月 10 日~10 月 20 日)の短周期および長周期波の波向別波高出現頻度分布を示したものである。短周期波の波向は、SSE が卓越し、出現頻度は 70% を越えている。対策工法としては、SSE 波向の入射波を遮蔽できるように防波堤の延長を図ればよく計画は比較的容易である。一方、長周期波の波向は S を中心に W から E まで幅広く分布しており、特定方向だけの入射長周期波に関して対策を計画することは困難で、観測波向全範囲について有効な対策を図る必要がある。

次に船体動揺観測の結果を示す。表-1 に、夏期における動揺観測時の港内の波浪状況を示す。対象岸壁前面での長周期波高は 5 cm 程度で、本観測期間中でも小さい方である。観測水位、船体変位の波形をスペクトル解析し、船体変位のスペクトル密度を水位のそれで除し、平方根をとって応答関数を求めた。図-5 にサージ運動の応答関数を示す。応答関数のピークは 80 になり、周期 100 s 程度の長周期波成分によってサージ運動が励起さ

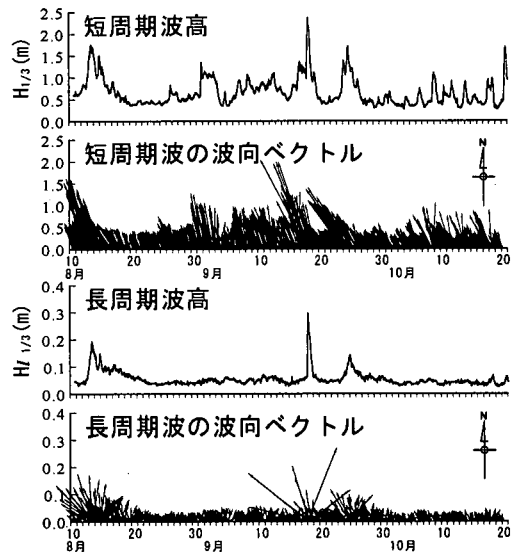


図-3 観測波高と波向の経時変化

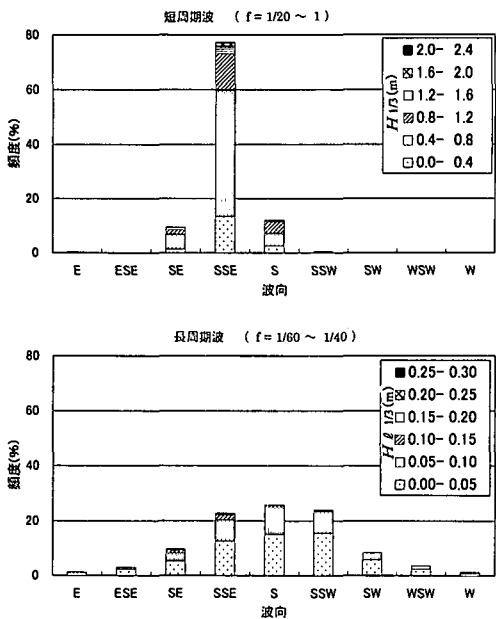


図-4 風速と長周期波の波向出現頻度

表-1 船体動揺時の海象状況 (測点 No. 3)

月	時	風速		長周期波		風速	風向
10 日		$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	U (m/s)	
18	12：00	0.44	2.6	5.5	47.0	10.2	NW
	14：00	0.45	2.6	5.4	52.2	11.3	NW
	16：00	0.34	3.3	4.4	46.7	8.1	WN
19	8：00	0.18	7.7	2.5	55.4	0.4	WNE

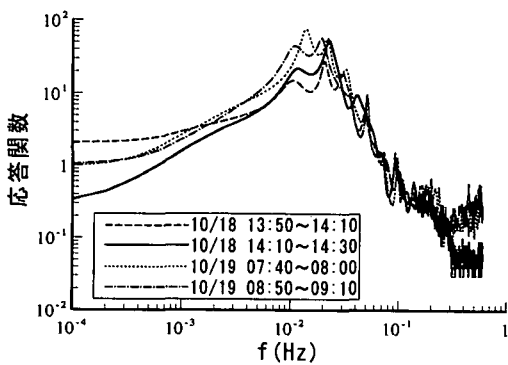


図-5 サージ動揺の応答関数

れることがわかる。

観測期間中の岸壁前面測点 No. 3 の $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ から標準スペクトル形を用いて、船体へ作用する長周期波の周波数スペクトルを求めると周期 20~300 s の範囲で、密度一定のスペクトル形を得る。長周期波スペクトルに、

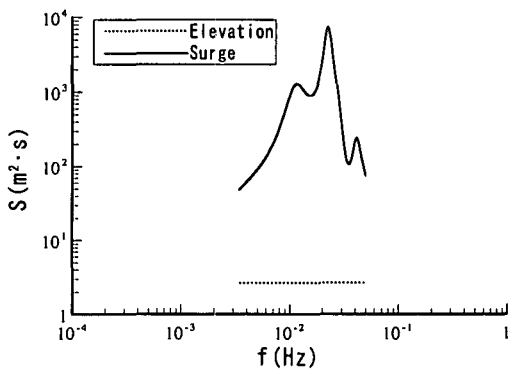


図-6 長周期波と推定サージ運動のスペクトル

観測で求めた応答スペクトルを乗ずることにより、船体動揺に相当するスペクトル形を得る。図-6 は、サージ運動のスペクトル形の算出例である。この動揺スペクトルのフーリエ逆変換により、サージ動揺の波形が推算できるので、動揺の有義振幅等の統計量が求められる。

夏期および冬期の観測結果から、港内 No. 3 での長周期波の有義波高 $H_{1/3}$ を 1 cm とした場合のサージ振幅最大値を推定すると、それぞれ、25 cm および 15 cm になった。サージ振幅の許容値については、貨物船が障害無く荷役できる数値として、2.0 m が提案されている (Ueda ら, 1988)。したがって、岸壁 Q での観測水位とサージ動揺の比率を用いると、荷役限界長周期波高 $H_{lc1/3}$ は、夏期および冬期に関して、それぞれ $200/25=8$ cm および $200/15=13$ cm として設定できる。港湾施設の設計基準 (日本港湾協会, 1999) では、苫小牧港での石炭船の事故例から、長周期波の荷役限界波高として 10~15 cm を提案しており、本観測によって得られた限界波高は、基準に提案された値よりも小さく、長周期波荷役限界波高は、船舶の係留状態、トン数の違いによっても変動し、各港における荷役障害時の波高観測結果から推定する必要がある。本調査対象岸壁でのサージに対する荷役限界波高 $H_{lc1/3}$ は、年間を通じた安全性を確保できる 8 cm として推定した。

3. 長周期波対策工の適用性

次に、長周期波による荷役障害の対策工法の適用性を検討した。港内の長周期波対策としては、係留索の材質を変更して共振現象を軽減する工法 (白石ら, 1995) や長周期波の 48~72 時間後の波高変化を予測し、警報を伝達して波高増大時の荷役や係留をできるだけ避ける手法 (菅原ら, 1995) が提案されている。ただし、係留索の材質を変更しても、別の周期帯の波と共振する可能性がある。警報システムは被害を軽減できるが、荷役時間を制限することになり港湾の有用性の低下を招く。防波堤

を延伸し、侵入する長周期波を抑止する工法は、卓越周期が変化する長周期波や短周期波に対しても有効で、港湾の安全性を向上させ、静穏な水域を広くすることができ、最も適用性が高いと考えられる。

できるだけ小さな費用で、短期間に長周期波対策を図る暫定的な工法として、本調査では、仮設防波堤による波除堤案の適用性を検討した。これは、将来、沖防波堤を延長するために必要とされるケーソン函を港口部の波除堤として仮置きしておくものである。仮設堤として製作すればよいので、設計波高が小さく、通常、被覆ブロックを施工しないので、建設費は比較的小さい。

ここでは、港形が比較的簡単で、防波堤延長の効果が明瞭に表れる常陸那珂港をモデルとして波除堤による対策工法を検討した。常陸那珂港などの長周期波対策を必要とする港湾では港外の波浪観測点を一つ有しているが、港内では特定期を除いては波浪観測を実施していない。港内の長周期波高、周期を推定する数値計算法としては、ブシネスクタイプ伝播計算モデル(平山ら, 2000)を用いた。

図-7に常陸那珂港をモデルとした計算格子地形を示す。図中の測点 P.1 は、現地における沖波観測点である。常陸那珂港周辺には自然海浜が多数存在し、数値計算においても海浜による長周期波の反射率低減効果を考慮する必要がある。長周期波の反射率について、岡安ら(1998)が、0.7 程度の反射率を提案している。本調査では、図-7の斜線で示された海浜地形において 2000 m 幅のスポンジ層を設け、長周期波エネルギーの吸収を図った。平面計算にさきだって、数値波動水路(平山ら, 2000)で周期 100 s の規則波を入射させ、幅 2000 m のスポンジ層の

反射率を検討したところ、0.7 になることが確認できた。

複数の波除堤案の適用性を比較するために、最初に SE 方向の波に対して港内代表点の港外入射波に対する波高比を求めた。常陸那珂港では SE からの長周期波が卓越することが明らかになっている(平石ら, 1998)ので、それに対して南側の防波堤を延長する将来港形と複数の波除堤案を提案した。図-8に、将来の完成港形と現況地形(1)、波除堤案(2)を示す。図-9に港内の船舶係留地点での波高比の計算結果を示す。現況では、P.2、G.1 で波高比が 1.5 を越えており、港湾形状での長周期波の抑止効果は小さい。完成形状になると、港内のすべての代表点で、波高比は 0.5 以下になる。図-8(2)の波除堤案では、港口部に 200 m 長の突堤を 1 本単基で設ける場合と 3 本の複数基を平行に設ける場合を示した。

防波堤の沿い波抑止のためには波除堤を複数本建設することが有効と考えられている。しかし、長周期波に対しては、波除堤で共振による水位の増幅が生じるために、図-9に示すように P.2 および G.1 における波高比は、単機の波除堤を設置する方が小さくなる。200 m の単基波除堤を港口部に設けると、P.2 と G.1 での波高比は、現況より 20% 小さく、長周期波対策として適切である。

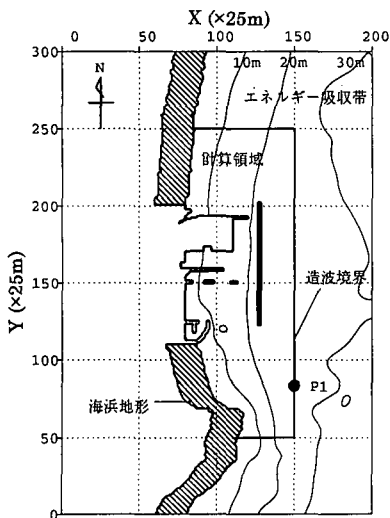
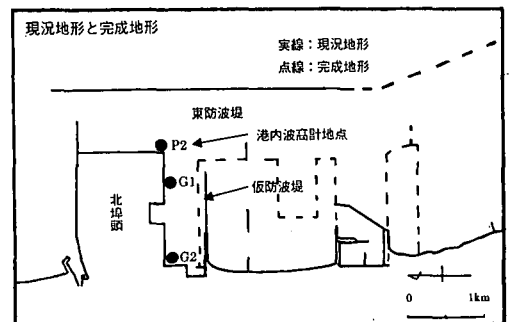
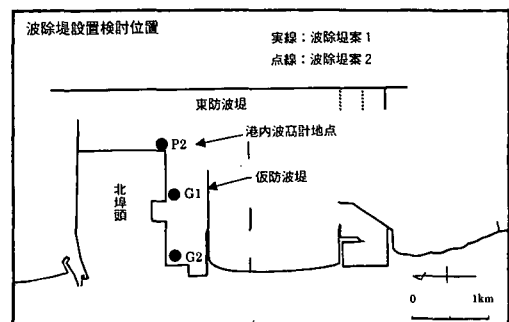


図-7 モデル港湾の計算地点と現地沖波観測点



(1) 現況地形と完成港形



(2) 単基および複数基の波除堤設置位置

図-8 モデル港湾の長周期波対策工法の例

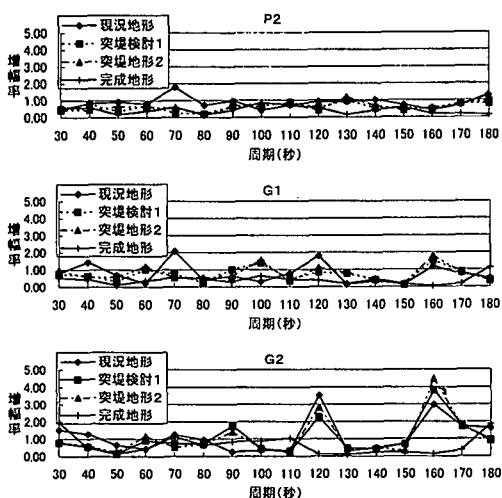


図-9 モデル港湾の周期別波高比

表-2 沖側の長周期波高・波向頻度分布

H_t (cm)	NNE	NE	ENE	E	ESE	合計
0- 5	1	127	734	448	16	1326
5-10	3	342	1198	787	69	2399
10-15	1	136	188	155	25	505
15-20	0	29	36	25	10	100
20-25	1	11	6	6	4	28
25-	0	1	16	2	0	19
合計	6	646	2178	1423	124	4377

次に、対策工法の適用性を示す指標の一つである荷役稼働率を検討した。荷役可能限界波高は2.で得られた $H_{crit}=8\text{ cm}$ とした。沖合の長周期波頻度分布は、現地観測(平石ら, 1998)結果等を参考にして、表-2に示ものをを用いた。各沖波条件での対象岸壁の波高は、図-9で示した波高比を乗じて計算できる。

図-10にG.1における全波向を合成した波高発生頻度より計算した年間の荷役稼働率を示す。図には、現況地形、完成港形、波除堤案1(単基)および波除堤案2(複数基)に対する曲線を示した。稼働率は港内の地点によって異なり、現況地形のP.2およびG.1では90%が確保できるが、G.2では80%である。港口部に単基の波除堤を設置すると、P.2とG.1で稼働率は92%となり、G.2で84%が確保できる。完成港形では、港内の3地点で稼働率は95%以上に上昇し、港湾の経済性が高くな

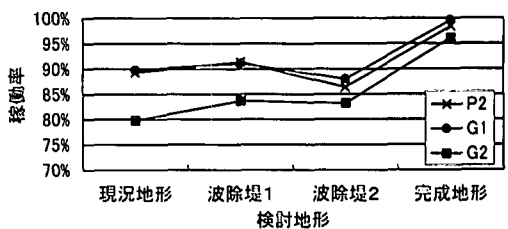


図-10 対策工法による荷役稼働率の変化

る。すなわち、完成港形に比較すると、波除堤案のほうで稼働率は低いが、現況地形に比較すると港内の全地点で稼働率を上昇させることができることがわかる。したがって、波除堤工法は、沖側の防波堤を延伸し、港湾を完成させるまでの暫定的な対策工として活用できる。

参 考 文 献

岡安章夫・鈴木康之・花田昌幸 (1998): 砕波帯内長周期波の現地観測と数値計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 286-290.
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.
菅原史典・神谷昌文・渥美洋一・小泉信男 (1995): 現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺発生予測の検討, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 951-955.
日本港湾協会 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 上巻, pp. 129-131.
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.
平石哲也・白石 悟・永井紀彦・横田 弘・松瀬 知・藤咲秀可・清水勝義 (1997a): 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, 39 p.
平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三 (1997b): 港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 246-250.
平石哲也・河野信二・片山裕之・松島三郎 (1998): 鹿島灘における長周期波の出現頻度と荷役稼働率について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 316-320.
平石哲也・平山克也・河合弘泰・上原 功 (2000): 熊本県竜ヶ岳町における台風9918号高潮災害の特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 306-310.
平山克也・上原 功・平石哲也 (2000): 領域接続法を用いた時間発展型地形変化予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 196-200.
Hashimoto N., T. Nagai and T. Asai (1994): Extension of maximum entropy principle method (MEP) for estimating directional wave spectrum, 24th Inter. Conf., Coastal Engineering, Vol. 1, pp. 232-246.
Ueda S. and S. Shiraishi (1988): The allowable ship motions for cargo handling at wharves, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 27, No. 4, pp. 3-61.