

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

平石 哲也*・河野 信二**・片山 裕之***・松島 三郎****

1. はじめに

セットダウン波や自由進行長波を主要因として沖合で発達した長周期波が、港湾に伝播すると、船舶の係留系の共振を引き起こされ、荷役障害や係留索の切断事故が発生することが報告されている(平石, 1996)。特に、太平洋沿岸の苫小牧港、鹿島港等では、被害の発生頻度が高く、それぞれ港内における長周期波の特性に関して現地観測が実施されている(菅沼ら, 1995, 土田ら, 1997)。その結果、苫小牧港においては岸壁前面の長周期波高が、有義値で 10 cm を越えると、荷役障害が著しくなることが判明している。長周期波が港内へ侵入した場合には、係留系の共振を引き起こすとともに、港内の多重反射により長周期波そのものが増幅される可能性がある(木村ら, 1996)。

長周期波の対策としては、①侵入する長周期波を抑止するために防波堤を新設・延長する、②係留索や防舷材の材質や構造を変更し、共振を防ぐ、③港内に人工海浜等を整備し増幅を防ぐ(平石ら, 1997 a)、④長周期波の予測手法を開発し、未然に事故を防ぐ等の工法が提案されている(Hiraishi et al., 1997)。これらの対策工法を検討するためには港湾へ侵入する長周期波の周期特性とエネルギーの代表値を設定する必要がある。平石ら(1997 b)は、それらの検討において用いる長周期波の標準スペクトルを提案している。一方、対策が必要かどうかの判断基準となるのは船舶の荷役稼働率で、風波(短周期波)と同様に、長周期波に対する荷役稼働率を定量的に明らかにしておく必要がある。上田ら(1994)によると、長周期波によりその振幅が顕著になるサージに対しては、有義値で前後にそれぞれ 1 m 以上船体が動くとは荷役不可能現象が生じることが報告されている。

荷役稼働率は、本来、船体動揺量で評価すべきであり港内の長周期波高と船体動揺量の関係を拡張緩勾配方程式で推定する試みを行った(土田ら, 1998)。その結果、長周期波高が一定であっても、排水量、係留索の初期張

力等によってサージ振幅はある程度異なるものの、荷役限界波高を 10 から 15 cm として求めた長周期波高のみを基準として求めた荷役稼働率と船体動揺量から判断できる荷役稼働率は、同じオーダーで評価できた。したがって、荷役限界波高を船体の諸条件によって変更できるように設定しておけば、波高計算からだけでも港内の荷役稼働率を評価でき、どの程度の規模の対策工法が必要かを定量的に判断できる。さらに、現場で取り扱える簡易なシステムを開発しておけば、各港湾において個別の対応が可能で作業効率の上昇を図ることができる。

船舶の荷役稼働率すなわち港湾の静穏度の算定には、沖合における長周期波の年間出現頻度を基に、長周期波の港内での伝播計算を実施して、岸壁前面における長周期波高の発生頻度を求めておかなければならない。しかし、港外における長周期波の発生頻度については、長期間の解析データが無く、これまで検討されていない。そこで、比較的観測データが整備されている鹿島港と常陸那珂港を対象として、年間の長周期波出現頻度を検討した。また、長周期波の出現頻度が解析されていない港湾でも稼働率が推定できるように、従来から整理されている風波の出現頻度表から標準スペクトル型を用いて長周期波の出現頻度表を作成する手法を提案し、その妥当性を検証した。さらに、港内の任意岸壁の長周期波に対する稼働率を現場作業者が算定できるシステムを開発した。

2. 鹿島灘における長周期波の発生頻度

図-1 に観測点の位置を示す。解析では、常陸那珂港外の水深 24 m および鹿島港外の水深 23 m 測点の超音波波高計で観測された水位データを用い、毎偶数時 20 min 間 0.5 s 間隔で取得されたデータを、常陸那珂港においては 1995.8.1~1997.7.31 の 2 年間、鹿島港については 1996.8.1~1997.8.31 の 13 ヶ月間収集した。各ケースにおいて高速フーリエ変換法により、周波数スペクトル解析を実施した。周波数成分の範囲は 0.0098 Hz から 1 Hz までである。この中から、長周期波成分(周期: 30 s~300 s)を抽出し、逆フーリエ変換から得られた波形のゼロアップクロス法による解析から、長周期波成分の代表波

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部
** 正会員 沿岸海洋調査(株)解析調査課
*** 正会員 工修 横浜国立大学工学部建設工学科
**** 日本海洋コンサルタント(株)

高 H_t と周期 T_t を求め、沖合における出現頻度分布表を作成した。風波については、通常の波浪台帳作成で用いられるように、観測波形をゼロアップクロス法で解析して、 $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ を求めた。

表-1 に観測値から直接求めた長周期波の出現頻度表を示す。これを表 A とする。例として示した鹿島港外では、苫小牧港での荷役限界値として報告されている $H_{11/3}=10\text{ cm}$ を越える頻度が 24% あり、港内における減衰がなければ、岸壁における荷役稼働率は短周期波に対するものよりも著しく低くなることになる。一般に、我が国の港湾は、97.5% の稼働率が確保できるように計画されており、稼働率がそれより低くなることは、所定の経済効果が得られないことを示す。

図-2 は、港外における短周期波高 $H_{1/3}$ と長周期波高 $H_{11/3}$ の相関を示す。波高間の相関は強く、 $H_{1/3}$ が大きいときには $H_{11/3}$ も大きくなる。観測期間中の最大の $H_{11/3}$ は 36 cm であった。

次に、短周期波の波高・周期のみの情報を用いて、長周期波の発生頻度を推定することを試みる。図-3 に、長周期波成分を含む標準スペクトル形（近似形）を示す。標準スペクトル（近似形）は、長周期波のエネルギー密度は一定で、次式で表される。

$$S_L(f) = 0.257 H_{1/3}^{1/3} T_{1/3} (T_{1/3} f_{ba})^{-5} \cdot \exp[-1.03 (T_{1/3} f_{ba})]^{-4} \dots\dots\dots (1)$$

標準スペクトル型における短周期波成分と長周期波成分

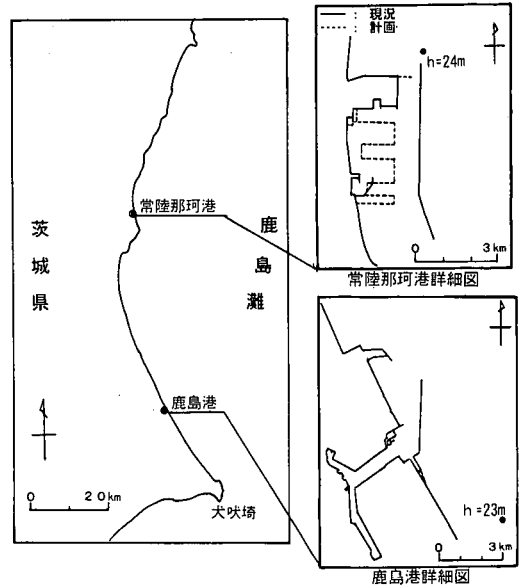


図-1 鹿島灘における現地観測地点

を分割し、長周期波成分のスペクトル密度を設定する周波数 f_{ba} は、パラメーター a_l によって決まる ($f_{ba}=1/a_l \cdot f_p$, f_p は周波数スペクトルのピーク周波数)。観測値のスペクトル形の平均値と比較すると、これまでの観測結果をもとに提案されている（平石ら, 1997b) $a_l=1.65$ が採用できる。標準スペクトル形が $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ および a_l で設定で

表-1 長周期波の観測値の出現頻度（表 A）

	周期 (sec)	長周期波周期 30.0~49.9 (sec)										合計	長周期波周期 50.0~69.9 (sec)										合計	長周期波周期 70.0~121.4 (sec)										合計
		0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	2.0		4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	4.0	6.0	8.0		10.0	12.0	14.0	16.0							
		波高(m)	1.0	3.9	5.9	7.9	9.9	11.9	13.9	15.9	3.9		5.9	7.9	9.9	11.9	13.9	15.9	17.9	5.9	7.9	9.9		11.9	13.9	15.9	17.9							
長周期波高 0.0-9.9 (cm)	0.00-0.49		1	10	26	2				39	1	17	36	5				59	1	3	1				5									
	0.50-0.99		2	60	219	184	12			477	2	129	345	281	66	1		833	15	24	23	9			71									
	1.00-0.49			63	189	102	14			377		107	395	344	90	1	1	938	5	15	26	14	1	1	62									
	1.50-1.99			32	64	26	1		1	124		32	161	127	17	2		339		6	20	2	2		1	31								
	2.00-2.49			2	29					31		4	45	7				56		2	2					4								
	2.50-2.99				2					2			6					6																
長周期波高 10.0-19.9 (cm)	合 計	3	167	538	314	27			1	1050	3	289	997	764	173	4	1	2231	21	50	72	25	3	1	1	173								
	0.50-0.99											1						1																
	5.00-1.49					1			1	2		1		20	14			35	1	2	9	19	2	2		35								
	1.50-1.99		2	3	11	7				23			19	131	102	16	5	5	274	11	40	31	14	18	5	119								
	2.00-2.49			3	6	5				14		2	36	77	78	14	2	1	210		6	26	44	12	5	4	97							
	2.50-2.99			1	3	4	2	1		11			14	40	25	13			92		5	8	21	7	2		43							
	3.00-3.49					4				4			9	13	2	3			27		2	1	4			7								
	3.50-3.99													1					1			1				1								
	4.00-4.49					1				1																								
	4.50-4.99					1				1																								
長周期波高 20.0-35.5 (cm)	合 計	3	9	29	14	2				56	4	79	281	221	46	7	2	640	1	24	26	116	39	27	9	302								
	2.00-2.49													1				1		1		2	2	1		6								
	2.50-2.99													1	10	8		19			1	10	5	3		19								
	3.00-3.49													3	8			11			2	2	18			22								
	3.50-3.99													1	1			2			1		7	1		9								
	4.00-4.49												1	2	3	2		8					8	3		11								
	4.50-4.99					1				1				1	1			2					8	3		11								
	5.00-4.03																						1			1								
合 計					1				1				2	18	21	2	43		1	5	15	41	8		70									

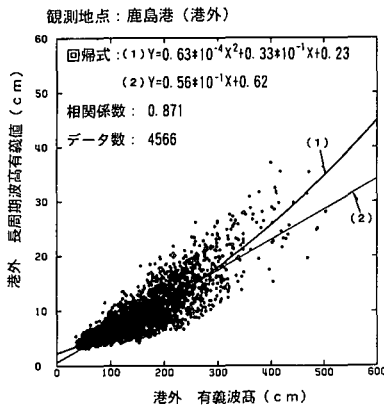


図-2 短周期波高と長周期波高の相関

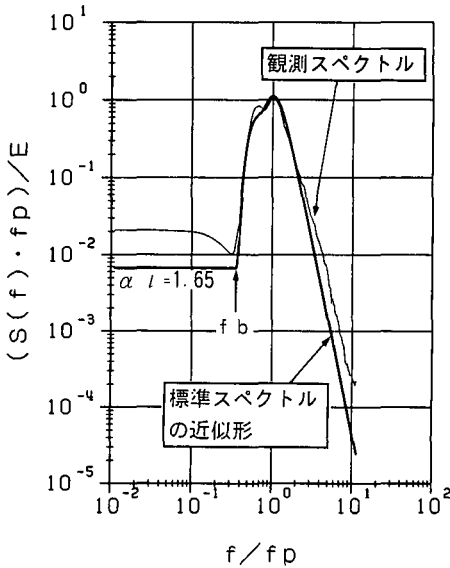


図-3 標準スペクトル (近似形) の提案

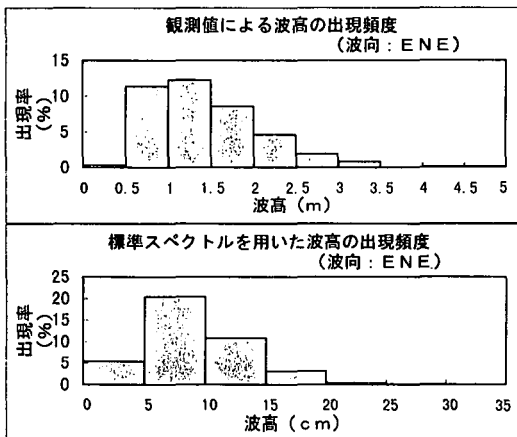


図-4 標準スペクトルを活用して求めた長周期波の頻度分布の例 (鹿島港, ENE 方向)

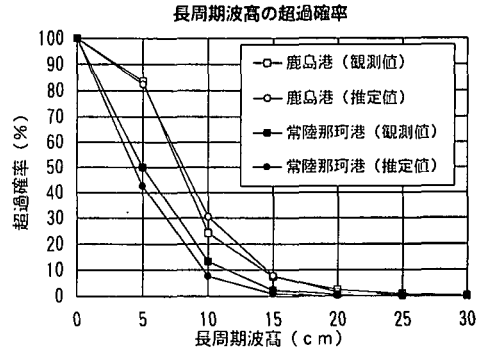


図-5 港外における長周期波高出現頻度の観測値と推定値の比較

きると、長周期波成分の範囲 ($f_{\min} \sim f_{ba}$) に含まれる長周期波エネルギー m_{0L} (永井ら, 1997) より、 $H_{1/3} = 4(m_{0L})^{1/2}$ として長周期波の波高を推定した。

風波成分の頻度分布表から間接的に求めた長周期波の出現頻度表を表 B とする。風波の頻度分布は各波向毎に作成されており、表 B も各波向毎に求めることができる。図-4 は、表 B 中の鹿島港における ENE 方向の風波の頻度分布と長周期波の頻度分布をヒストグラムで示したものである。ただし、現在のところ、観測長周期波の波向は整理されていないので、比較のために表 B についても、表 A と同様に全方位を重ねた頻度分布表を作成した。このように、標準スペクトル形を用いると、既存の風波の発生頻度の整理表から長周期波の発生頻度を推定できるだけでなく、風波の波向と長周期波の波向を同一と仮定することによって各波向毎の長周期波の発生頻度を近似的に表すことができる。

次に、すべての波向について重ね合わせた表 B の妥当性を検討するために、表 A との比較を行った。比較は、図-5 に示すように波高の超過確率の値で行った。表 A と表 B における長周期波の出現頻度を、観測値および推定値の超過確率として整理すると、鹿島港および常陸那珂港において観測値と推定値はよく一致し、標準スペクトル型を用いて現地における長周期波の超過確率を精度よく推定できることがわかる。したがって、沖合の長周期波そのものの観測値が無い港湾においても、既存の波浪台帳などから風波の発生状況を整理して、長周期波の発生頻度を推定してもよいと考えられる。

3. 港内における稼働率算定システム

次に、風波ならびに長周期波に対する港湾稼働率を算定するシステムを作成する。従来の港湾計画においては、担当者が港湾地形ならびに水深データを作成し、観測値から整理された波高頻度の各波高レベル毎に港内波高を計算し、あらためて対象岸壁前面の計算波高を整理して、

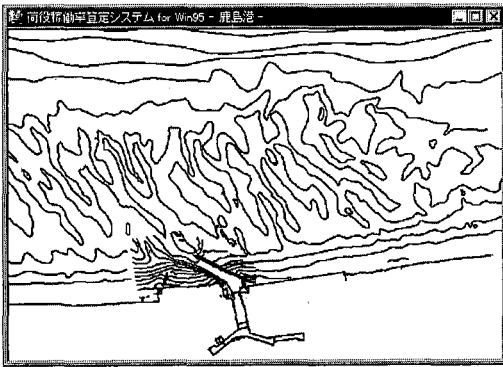


図-6 鹿島灘における水深とその出力状況

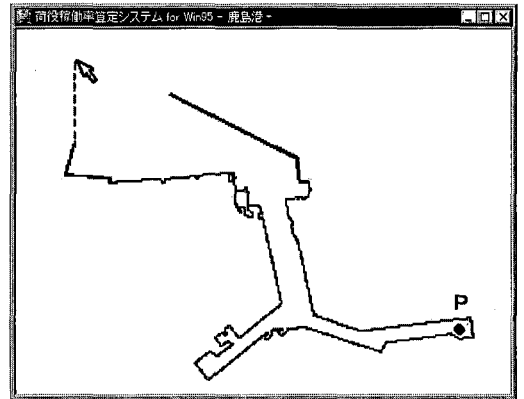


図-7 計算で用いる港内の海一陸境界

港内における荷役稼働率を推定していた。これには、多大な労力を伴うとともに、各作業についてある程度の理解が必要で、どうしても作業者が限られてしまい、現場の事務所等で誰でも簡単に稼働率を推定することが困難であった。また、防波堤の延長や、突堤の新設に対して港内の稼働率がどのように変更するかについて短時間で結果を得ることができず、港湾計画の作成・修正に困難を伴っていた。そこで、本システムでは、あらかじめ対象港湾の平面形状、水深分布およびこれまでに整備されている港外の観測点における風波の頻度分布表(波高、周期、波向)をハードディスクに収録することにより、他港への汎用性を持たない代わりに、対象港については、算定作業を極めて簡単にするシステムの開発を目指した。

まず、風波については、あらかじめ入力された風波の頻度分布表の各項毎に、エネルギー平衡方程式(高山ら, 1991)および港内回折計算法(高山, 1981)により岸壁前面の短周期波高を計算する。その手順を次に示す；

(1) 鹿島灘全域を含む水深データより計算対象港を含む範囲を切り取って計算データとする。図-6にシステム内にあらかじめ収録された水深情報の画像出力状況を示す。次に、計算波向を入力すると、波向に境界格子辺が直交するような格子を作成し、各格子点に計算で用いる水深を割り当てる。

(2) 図面上で、沖側のエネルギー平衡方程式による浅海域波高推定プログラムの結果を、港内の回折計算法の入力データとして引き移す点を設定する。

(3) 港内地形は、図-7に示す直線で囲まれたものが初期値として入力されている。もし、防波堤形状や長さに変更を加える場合は、図の破線で示したようにマウスによって直線を加えると港内地形が任意に変更できる。また、図中のP点は稼働率を計算するために指定する点であり、稼働率を計算する岸壁前面の格子点に相当する。

鹿島港												
書き込み												
終了												
波高(m)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	合計	
0.00~0.05	0	2	461	2118	6767	6796	555	36	56	0	16791	
0.05~0.10	3	15	733	2407	6292	5073	1175	35	45	1	15778	
0.10~0.15	2	6	127	448	1089	785	202	7	3	0	2669	
0.15~0.20	0	0	7	51	218	148	25	2	0	0	452	
0.20~0.25	0	0	0	11	60	36	4	2	1	0	114	
0.25~0.30	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	
0.30~0.35	0	0	0	2	3	9	2	0	1	0	17	
0.35~0.40	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	
0.40~0.45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.45~	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
合計	5	23	1326	5037	14430	12051	1953	82	106	1	35826	

図-8 システムに登録されている頻度分布表と修正状況

(4) 以上のデータが設定できた後に計算を実行すると、指定点での波高の超過確率が出力される。

長周期波については、以下の手法で計算を行う。

(1) まず、沖合長周期波頻度分布表の確定を行う。

図-7は2.で示した計算により、風波頻度分布表から標準スペクトル形を用いて求めて、あらかじめデータとして作成し登録した長周期波の頻度分布表である。現地観測等により、より精度の高い確定値が得られたときにはこの画面で頻度の修正ができ、また登録も実施できる。

(2) 計算領域は、風波計算で使用したものをそのまま用いるが、港内においても水深がデータとして用意されている。沖合の長周期波から港内における長周期波を求める手法は、高山ら(1988)による線形規則長波の計算解を重ね合わせる手法を用いた。まず、長周期波成分に含まれるエネルギーを等分割し、それぞれのエネルギー $S_L(f) \times df_i (f_{min} < f < f_{ba})$ から i 番目の成分波の振幅を、 $a_{Li} = (2S_L(f)df_i)^{1/2}$ として求める。この成分長周期波を沖境界における規則入射波とし、長波の伝播方程式を解くと、各岸壁前面での i 番目の成分波に対する波高比 k_{Li} が出力される。合成波高比は次式で計算する。

$$K = \left(\sum_{i=1}^M k_{Li}^2 \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

荷役稼働率算定システム for Win95 - 鹿島港 -

港湾名: 鹿島港

風波 限界波高 0.5 m

☐ 波高・周期別波高比表
☐ 波向別出現率算定図
☐ 稼働率算定図

長周期波 限界波高 0.2 m

長周期波頻度表による 風波頻度表による
☐ 波向別波高比表 ☐ 波高・周期別波高比表
☐ 稼働率算定図 ☐ 波向別出現率算定図
☐ 稼働率算定図

図-9 荷役限界波高の入力画面

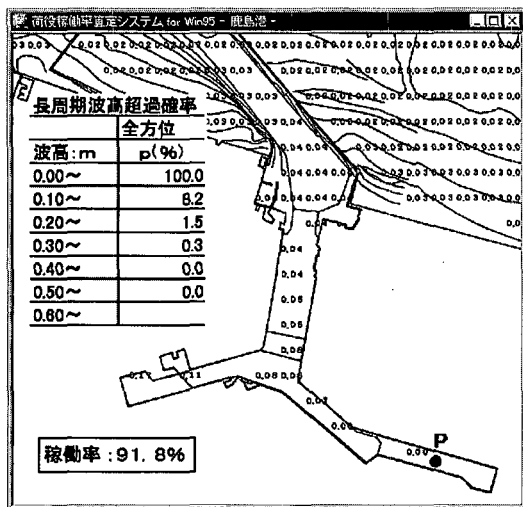


図-10 鹿島港内における計算波高比の分布とP点における長周期波高の超過確率

計算では、あらかじめ単位波高に対する上記の波高比を任意の波向に対して求めておき、港外における風波の頻度分布表に従って、港内の対象点における長周期波高の計算値を抽出して、頻度分布として整理した。

(3) 荷役限界波高の入力は、図-9に示すように任意に行える。鹿島港においては、苫小牧港と同様に10~15 cmの数値を入力する。風波についても任意に限界値が入力できる。現行の基準では限界波高 $H_L=50$ cmであるが、小型客船等が着船する観光桟橋等では乗降客の安全を図るために30 cmを基準として考えることもできる。

図-10は、稼働率算定システムにおける鹿島港内にお

けるSSE波向の長周期波に対する波高比計算例である。図-10には、計算された出現頻度表も合わせて示した。苫小牧港の観測から導かれた $H_L=10$ cmを入力した場合には、長周期波稼働率 $p_M(\%)=91.8\%$ が瞬時に算定でき、現場の荷役の安全性向上に資することができる。

4. あとがき

本研究では、観測した長周期波の頻度分布表を基に、港内の静穏度を算定し、作業効率を向上させるシステム開発を図った。推定精度を向上させるためには、数年にわたる長周期波の連続観測が必須で、今後の沖合観測網の充実が望まれる。本研究の実施にあたっては、運輸省第二港湾建設局ならびに電源開発株式会社建設部の御支援と御教示を賜った。関係者の皆様に深く感謝します。

参考文献

- 上田 茂・白石 悟・大島弘之・浅野恒平 (1994): 係岸船舶の動揺に基づく荷役許容波高及び稼働率, 港湾技研資料, No. 779, 44 p.
- 木村 晃・喜田昌裕・山崎樹実也 (1996): 2次長周期波による港湾の振動について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 211-215.
- 菅沼史典・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.
- 高山知司 (1981): 波の回折と港内波高分布に関する研究, 港湾技研資料, No. 367, 140 p.
- 高山知司・平石哲也 (1988): 数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討, 港湾技研資料, No. 636, 70 p.
- 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991): 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港研報告, Vol. 30, No. 1, pp. 21-67.
- 土田 充・灘岡和夫・西村剛士・佐藤恒夫・山口孝市・平石哲也 (1997): 多点観測による港内外の波浪特性と港内係留船舶の長周期動揺特性について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 231-235.
- 土田 充・大山 巧・平石哲也・富田孝史 (1998): 港内係留船舶の長周期動揺に基づく静穏度評価法について, 海岸工学論文集, 第45巻, (印刷中).
- 永井紀彦・橋本典明・白石 悟・川口浩二・清水勝義・上野成三・小林昭男・東江隆夫・柴田孝雄 (1997): 現地連続観測による沖合長周期波の発達・減衰過程と港内係留船舶の動揺, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 226-230.
- 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, 港研報告, Vol. 35, No. 3, pp. 3-36.
- 平石哲也・白石 悟・永井紀彦・横田 弘・松淵 知・藤咲秀司・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.
- Hiraishi, T., Y. Atsumi, A. Kunita, S. Sekiguchi, S. Mifune and T. Kawaguchi (1997): Observation and hindcasting of long period wave for port operation, Proc. Pacific Coasts and Ports '97, pp. 763-768.