

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検討

阿部光信*・興野俊也**・青野利夫***

1. はじめに

一般の港湾では, 入出港船舶の航行, 係留, 荷役の安全性を確保するため, 通常波浪に対して所要の静穏度を確保するように防波堤等の形状やバースの位置などが決定されている。

このとき, 検討対象の通常波浪の周期は 6 秒から 12 秒であるが, 実際の港湾周辺での来襲波浪には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。これらの長周期波成分は周期 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い港内波高であっても係留船舶の動揺を引き起こし, 荷役作業の中断や係留策の切断などの被害が生じることが予想される。このような長周期波による係留船舶への影響は近年多くの港湾で発生しており, 長周期波による港内波高, 船舶動揺量の予測評価や, 長周期波に対する対策工に関する検討などが実施されている(たとえば, 平石ら, 1997)。しかし, すでに運用されている港湾において, 長周期波の影響を軽減することは容易なことではなく, 合理的な港湾を建設するためには, 港湾配置計画, 係留施設設計の段階から長周期波の影響を考慮した検討を行う必要がある。

本研究は, 長周期波の影響を考慮した係留施設の合理的な計画・設計手法の確立を目的として実施したもので, 港湾内において連続波浪観測を行い, 長周期波の港内伝播特性を把握するとともに, 既往の略算式や数値解析モデルによる推定方法の適用性について検討した。

2. 現地観測

(1) 観測概要

現地観測は, 茨城県ひたちなか市に建設中の東京電力(株)常陸那珂火力発電所周辺海域で行った。観測地点は, 図-1 に示すように, 東防波堤北側に 1 地点 (No. 0, 入射波観測地点, 水深-25 m), 港内に 3 地点 (No. 1~No.

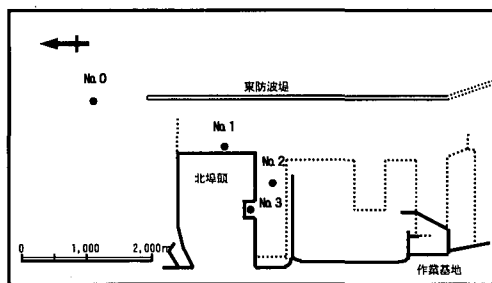


図-1 現地観測位置図

3) とした。各観測地点には 4 成分型波浪計 (超音波, 水圧, 電磁センサー付き) を設置し, 毎偶数時前後 60 分間の水位値, 水圧値, 成分流速値を 0.5 秒間隔で計測した。

観測期間は 1998 年 10 月 7 日~11 月 25 日 (途中 10 月 23 日~28 日はバッテリー交換のため欠測) の約 40 日間実施した。観測期間中の高波浪の来襲は 10 月 17 日~18 日, 10 月 22 日~23 日, 11 月 7 日~9 日の 3 回あり, No. 0 地点で有義波高 $H_{1/3}=2.0$ m 以上のデータは 40 回得られている。観測期間中の最大波高は低気圧の通過に伴って 10 月 22 日 20 時に発生し, No. 0 地点で $H_{max}=5.38$ m, $H_{1/3}=3.47$ m, $T_{1/3}=9.7$ s の波浪を観測した。なお, 今回の波浪観測で取得した No. 0 地点での浪波を過去 5 年間の統計データと比較したところ, その出現特性は標準的なものであった。

(2) 解析方法

水面変動は, 波浪計の超音波センサーから得られたデータを用いて算定した。ただし, 高波浪時の碎波の影響によって超音波センサーが欠測となった場合には, 水圧センサーから得られる水圧波形を水面波形に換算して用いることとしたが, 今回の観測では超音波センサーの欠測はなかった。

各観測地点の有義波諸元は, ゼログラウクロス法により統計処理を行って算定した。周波数スペクトルは, 観測データを FFT 法 (データ数: 8192, 自由度: 40) によりフーリエ変換して求めた。また, 波向特性や周波数ごとの方向分散特性を把握するため, EMEP 法 (橋本ら, 1993) による方向スペクトル解析を行った。

* 正会員 東電設計(株)第二土木本部火力土木部
** 正会員 東京電力(株)電力技術研究所土木グループ
*** 正会員 工博 東亜建設工業(株)技術研究所数値解析研究室

長周期波の解析は、入射波観測地点のNo.0地点での周波数スペクトルをもとに、波浪成分との境界を0.04 Hz、リアトレンドを除去するための周波数を0.001 Hzとしてこの間の周波数帯を長周期波成分と考え、FFT法による帯域フィルターを用いて行い、長周期波の時系列データを求めた。

3. 港湾内における長周期波の伝播特性

(1) 長周期波の有義波高・周期の出現特性

表一は港口のNo.0地点、港内のNo.1地点およびNo.3地点における長周期波の有義波高・周期複合出現頻度を示したものである。

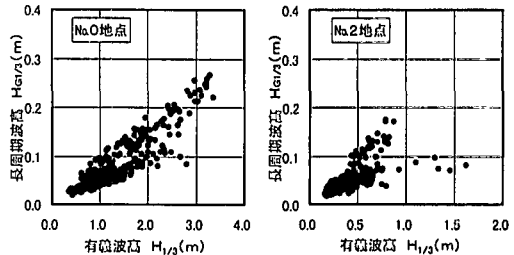
入射波であるNo.0地点での長周期波出現頻度特性は、波高値が0.1m以上と高くなるのは周期が50~80秒の範囲に限定され、波高値が低い場合は周期が25~120秒と非常に広い範囲に分布している。このことは後述する高波高時における拘束波成分に起因するものの比率の増大が頻度分布特性に明瞭に現れていることを示している。港内のNo.1地点では、No.0地点に比較的類似した分布形を示しているが、波高値が0.05~0.20mの範囲では70秒以上の周期は観測されていない。一方、港奥のNo.3地点では明らかに他地点と特性が異なり、

表一 長周期波の有義波高・周期の複合出現頻度

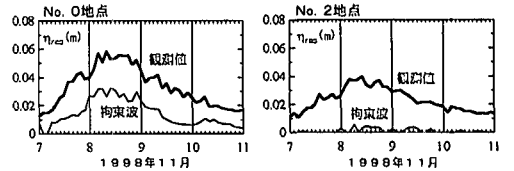
[No.0地点]														
周期(s)	25-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-	出現率(%)	累積率(%)
0.30-													0.0	100.0
0.25-0.30			0.1	0.3									0.5	100.0
0.20-0.25				1.1	1.0								2.2	99.5
0.15-0.20			1.0	2.7	0.3								4.1	97.3
0.10-0.15			4.7	3.7	0.5								9.1	93.2
0.05-0.10	13.8	17.4	3.5	0.3	0.1			0.1					35.6	84.1
0.00-0.05	0.1	11.7	23.0	9.9	2.7	0.3	0.1	0.1	0.1				48.5	48.5
出現率(%)	0.2	25.6	46.5	21.5	5.0	0.5	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	100.0	-
累積率(%)	0.2	25.8	72.3	93.8	98.8	99.3	99.5	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	-	-

[No.1地点]														
周期(s)	25-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-	出現率(%)	累積率(%)
0.30-				0.3									0.4	100.0
0.25-0.30				0.1	0.5								0.8	99.6
0.20-0.25			0.7	1.9	0.1								2.9	98.9
0.15-0.20			1.9	0.3									2.3	96.0
0.10-0.15		0.9	3.4	0.3									4.8	93.7
0.05-0.10		13.7	15.1	2.1									31.0	88.9
0.00-0.05	0.5	12.4	23.5	13.9	5.3	1.1	0.3	0.1	0.1			0.1	57.9	57.9
出現率(%)	0.6	27.2	44.7	19.3	6.1	1.1	0.4	0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	100.0	-
累積率(%)	0.6	27.7	72.5	91.8	97.9	99.0	99.4	99.6	99.8	99.8	100.0	100.0	-	-

[No.3地点]														
周期(s)	25-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-	出現率(%)	累積率(%)
0.30-									0.1	0.1			0.4	99.8
0.25-0.30													0.0	99.4
0.20-0.25									0.5	0.7	0.5		1.9	99.4
0.15-0.20								0.5	0.1	1.3			2.1	97.5
0.10-0.15								0.5	0.9	0.7	0.3		2.7	95.4
0.05-0.10						0.5	2.4	3.8	2.4	1.1	0.3	0.9	11.8	92.8
0.00-0.05		0.1	2.4	7.2	12.7	15.9	14.4	9.1	5.3	4.1	9.3		81.0	81.0
出現率(%)	0.0	0.0	0.2	2.5	7.2	13.3	18.4	19.4	13.5	9.5	5.5	10.5	100.0	-
累積率(%)	0.0	0.0	0.2	2.7	9.9	23.2	41.6	61.0	74.5	84.0	89.5	100.0	-	-



図二 各観測地点でのHm0とH1/3の関係



図三 長周期波の観測値と理論拘束波の関係

高波高の発生する周期が100~130秒に変化している。これらの各観測地点による長周期波特性の相違は、港湾の応答特性-副振動-に起因するものと考えられる。

図二は港口のNo.0地点および港内のNo.2地点における長周期波成分と波浪成分の有義波高の相関を示したものである。

No.0地点では長周期波と波浪成分の有義波高の相関は高く、長周期波高は有義波高の5~10%となっている。これに対して、港内のNo.2地点では長周期波高と有義波高の相関は低くなっている。また、No.2地点での有義波高に対する長周期波高の比率はNo.0地点に比べて高くなっており、港内での長周期波高の減衰率が波浪成分に比べて小さいことが分かる。

(2) 長周期波と理論拘束波の関係

港内外での長周期波が波群によって発生する拘束波であるとすれば、非線形干渉理論によって推定可能となる。そこで、各観測地点でのデータをもとに理論拘束波を計算し、観測値との比較を行った。

図三に港口のNo.0地点と港内のNo.2地点での11月7日~11日における長周期波のηrmsの経時変化を示す。図中の太線は観測値によるηrms、細線は木村(1985)の方法で求めた理論拘束波のηrmsである。

No.0地点では波高の増大に対応して拘束波成分の比率が増加する。また、港内のNo.2地点では拘束波成分がほとんどなく、港内での長周期波は自由波のみが進行

していると考えられる。図-2に示したNo.2地点の長周期波成分と波浪成分との相関関係の低下はこの結果を反映している。

(3) 長周期波の周波数スペクトル特性

図-4は高波浪来襲時の各観測地点における周波数スペクトルの代表例を示したものである。グラフはすべてのスペクトルの積分値が1になるように無次元化しており、縦軸の数値はNo.3地点に対する値で、その他の地点は 10^2 ずつずらして表示している。

港口のNo.0地点での周波数スペクトルは長周期波成分のスペクトルは波浪成分に比べて小さいが、港内でのNo.1地点、No.2地点、No.3地点では長周期波成分のスペクトルが相対的に大きくなっている。これは、港内での波浪成分のエネルギー減衰効果は顕著であるが、長周期波成分の減衰効果は少ないことを示している。

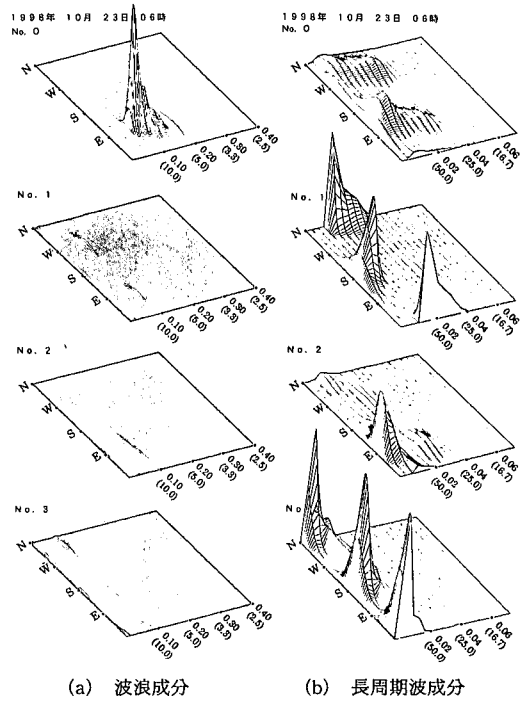
長周期波の周波数スペクトルの標準形としては、平石ら(1997)の提案式があり、また、平石らの式に観測値を用いた堀沢ら(1998)の方法がある。

図-5は港口のNo.0地点での周波数スペクトルの観測値と平石ら(1997)、堀沢ら(1998)による周波数スペクトルを比較したもので、(a)が10月23日6時のデータ、(b)が11月8日4時のデータである。

平石ら(1997)の標準スペクトルは、10月23日のデータでは観測値よりも小さい値を、11月8日のデータでは観測値よりも大きな値を示している。これに対して堀沢ら(1998)の方法ではいずれのデータも観測値に近い値を示しており、今回の現地観測データに対しては平石ら(1997)の標準スペクトルよりも適用性が高かった。

(4) 長周期波の方向スペクトルに基づく波向特性

図-6および図-7は、高波浪来襲時の1998年10月23日6時の各観測地点での方向スペクトルおよび方向関数の代表例を、それぞれ波浪成分と長周期波成分とに



(a) 波浪成分 (b) 長周期波成分

図-6 各観測地点での方向スペクトル

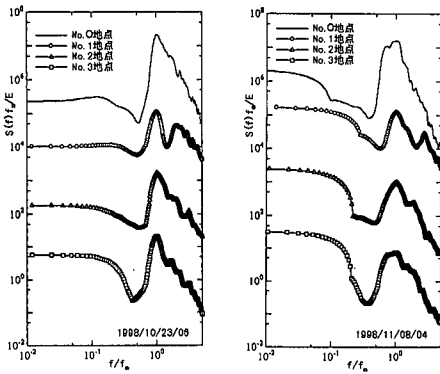


図-4 各観測地点での水位の周波数スペクトル

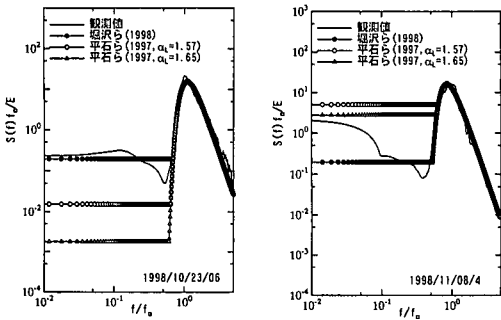


図-5 標準周波数スペクトルとの比率

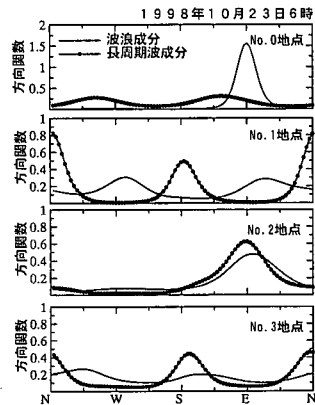


図-7 各観測地点での方向関数

分けて示したものである。

波浪成分の方向スペクトルは、港口の No.0 地点では波向 E が卓越した単峰型のスペクトル形状を示しており、港内の No.1 地点, No.2 地点でも同様に E が卓越している。No.3 地点は 3 方を構造物に囲まれているため複雑なスペクトル形状を示し、卓越波向は S E である。

長周期波の方向スペクトルは、No.0 地点では波浪成分と同様に波向 E が卓越しているが、No.1 地点および No.3 地点では波向 S, N が卓越し、波浪成分の波向特性と異なる傾向を示している。このような波浪成分と長周期波成分の波向特性の相違は、港内での長周期波が自由波として進行すること、波浪に比較して長周期波の空間スケールが大きいために港湾形状に依存した水面変動が発生することなどによると考えられる。この特性は、比較的波高の高い他の日時でも同様の傾向が認められた。

4. 長周期波の推定方法の検討

(1) 既往の長周期波高推定式の検討

長周期波の推定方法としては、現地観測データによる分析、数値解析モデルによる検討などの方法があるが、ここでは最も簡便な方法として、既往の推定式による方法について検討した。

長周期波の簡便な推定方法のひとつに Bowers (1992) の推定式がある。図-8 は港口の No.0 地点での観測データと Bowers (1992) の推定式で用いられている波浪成分関数の関係を示したものである。(a) は拘束波と考えたもの、(b) は自由波と考えたもので、それぞれ推定式を併記している。先の図-3 でも示したように、港外での長周期波は拘束波と自由波が共存していると考えられるため、拘束波、自由波のいずれも推定式に対して観測値は高くなっている。

渥美ら (1997) は、苫小牧東港の長周期波高予測式を検討するにあたり、波浪成分の有義波諸元による種々の関数と長周期波高の相関関係を検討し、長周期波高 $H_{C1/3}$ と波浪成分の有義波高と有義波周期の積 $H_{1/3}T_{1/3}$ との相関が高いことを示した。同様の傾向は堀沢ら (1998) の研究でも述べられている。図-9 は、これらの研究と同様に、港口の No.0 地点での観測データによる長周期波高 $H_{C1/3}$ と波浪成分の有義波諸元 $H_{1/3}T_{1/3}$ との相関を示したものである。これによれば、 $H_{C1/3}$ と $H_{1/3}T_{1/3}$ との相関は非常に高いが、その比例定数は渥美ら (1997)、堀沢ら (1998) よりも小さくなっている。この方法は Bowers (1992) の推定式よりも適用性が高いが、比例定数は地点特性に依存するものと考えられる。

(2) 観測データを用いた港内長周期波推定法の検討

今回の調査では、港内外での波浪成分と長周期波成分の同時刻の有義波諸元が得られている。このデータを用

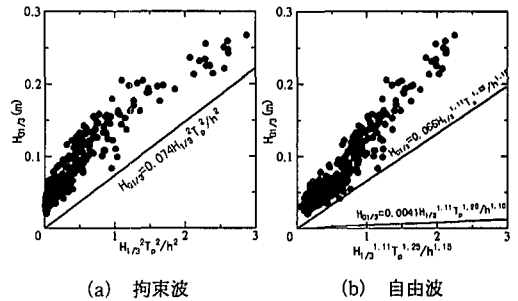


図-8 入射波観測地点の長周期波推定式との比較

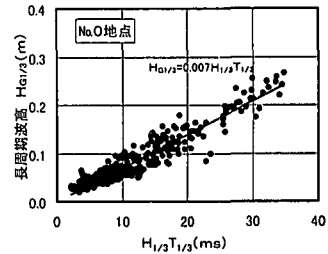


図-9 入射波観測地点での $H_{C1/3}$ と $H_{1/3}T_{1/3}$ の関係

いて、港内での長周期波成分の出現特性を港外での波浪成分で表示することができれば、港内での荷役作業による予測等が簡易に行うことができる。

ここでは、港口の No.0 地点での波浪成分の有義波高・周期別出現頻度表に港内の観測地点での長周期波成分の有義波高・周期別出現頻度表を組み合わせた複合出現頻度分布を考えた。表-2 に No.1 地点に対する複合出現頻度分布を示す。

今回の調査ではデータ数が少ないため有意な分布とはならなかったが、港外での有義波諸元が分かれば港内での長周期波の出現頻度が推定でき、これに係留船舶動揺解析などから決定される稼働限界条件をあてはめることによって、パースの稼働率を算定することが可能となる。

(3) 長周期波の数値解析モデルの検討

港内での長周期波を推定する方法として、数値解析モデルによる方法がある。ここでは、長周期波の数値解析モデルとして頻繁に用いられる線形・非線形長波方程式により現地再現計算を行った。

検討ケースは、港口の No.0 地点で高波浪が観測された 1998 年 10 月 18 日 8 時 (長周期有義波 0.06 m, 43.8 s), 10 月 23 日 6 時 (0.26 m, 68.4 s), 11 月 8 日 4 時 (0.21 m, 67.3 s) の 3 ケースである。数値計算は線形長波方程式、非線形長波方程式共にスタガードリーブフロッグ法で行い、計算格子間隔は 40 m、計算時間間隔は 1.8 s、沖側境界および側方境界は日野 (1988) による無反射境界、汀線境界は水面変位をゼロとする境界とした。入力波形

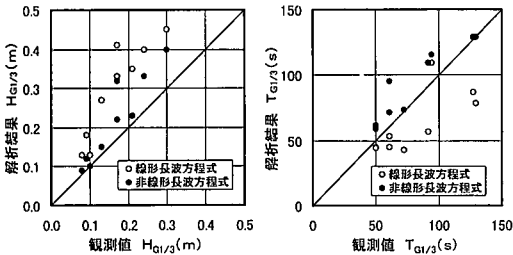
表一 港内における長周期波高・周期の複合出現頻度表

		[No. 1地点]																	
		0.0 s-6.0 s				6.0 s-8.0 s				8.0 s-10.0 s				10.0 s-					
港外波高	港外周期 $T_{0.0}(s)$ $H_{0.0}(m)$	25.0-	50.0-	70.0-	#	25.0-	50.0-	70.0-	#	25.0-	50.0-	70.0-	#	25.0-	50.0-	70.0-	#		
		50.0	70.0	50.0		70.0	50.0	70.0		50.0	70.0	50.0		70.0					
2.5 m-	0.2-				0				0				2				11	2	13
	0.1-0.2				0				0				3						0
	0.0-0.1				0				0				1						0
	計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	6	0	11	2	13		
2.0 m-	0.2-				0				1				1						4
	0.1-0.2				0	2	4		6				3				4		4
	0.0-0.1				0	2			2				0						0
	計	0	0	0	0	4	4	1	9	0	3	0	3	0	7	1	8		
1.5 m-	0.2-				0				0				0						0
	0.1-0.2				0		1		1		3	5		8			4		4
	0.0-0.1				0	2	6		8	2	7		9						0
	計	0	0	0	0	2	7	0	9	5	12	0	17	0	4	0	4		
1.0 m-	0.2-				0				0				1						0
	0.1-0.2				0		2		2			1		1			5		5
	0.0-0.1	8	18		26	22	35		57	24	31		55					0	
	計	8	18	0	26	22	37	0	59	24	32	0	56	0	5	0	5		
0.5 m-	0.2-				0				0				1						0
	0.1-0.2				0				0				0						0
	0.0-0.1	5	29	5	39	39	83	26	148	32	42		74				1	1	
	計	5	29	5	39	39	83	26	148	32	43	0	75	0	1	0	1		
0.0 m-	0.2-				0				0				0						0
	0.1-0.2				0				0				0						0
	0.0-0.1		5		5	4	26	8	38			2		2					0
	計	0	5	0	5	4	26	8	38	0	2	0	2	0	0	0	0		

標準形とはやや異なり、観測値を用いた堀沢ら (1998) の標準スペクトルに近い形状を示す。

③港内での長周期波の波向は波浪の波向と異なっている。これは、長周期波が自由波として進行すること、波浪に比較して長周期波の空間スケールが大きいため防波堤形状の影響をより強く受けることによると考えられる。設計にあたっては、このような波浪と長周期波の波向の違いについても十分配慮する必要がある。

④長周期波の数値解析モデルである線形・非線形長波方程式は港内での長周期波の伝播特性を適切に再現しており、特に非線形長波方程式の再現性がより



図一 10 長周期波の解析結果と観測値の比較

は、設計等では図一5の標準スペクトルによる方法が用いられるが、ここでは No. 0 地点での長周期波時系列を入力条件として港内波を算定した。

図一10は港内各観測地点での長周期波高および長周期波周期の観測値と計算値を比較したものである。いずれの手法においても波高・周期共に計算値は観測値とほぼ一致し、良好な再現性を示しているが、非線形長波方程式の方がより観測値に近い結果が得られている。

5. おわりに

本研究で得られた成果を以降に示す。

①入射波観測地点での長周期波には拘束波と自由波とが共存しており、長周期波高は $H_{1/3}T_{1/3}$ と高い相関を示す。また、港内では自由波として進行する。

②長周期波の周波数スペクトルは、平石ら (1997) の

高い。

今後は、本調査で得られた港湾内での長周期波の特性を踏まえて、係留船舶への影響を考慮した係留施設の合理的な計画・設計手法を検討する予定である。

参考文献

渥美洋一・若山義樹・園田 淳・関口信一郎・川口 勉・平石哲也・青木伸一・上田 茂 (1997): 長周期波の港内侵入過程の現地観測と長周期波高予測式の検討, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 221-225.

木村晃 (1985): 非線形長周期波の2次元スペクトル, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 154-157.

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, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 136-140.

日野幹雄 (1988): 解説一波の無反射透過境界の計算スキームについて, 東工大土木工学科研究報告, No. 39, pp. 1-7.

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・河野信二・玉城重則・長谷川準三 (1997): 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・白石 悟・永井紀彦・横田 弘・松濑 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.

堀沢真人・佐藤典之・大中 晋・青野利夫・Eric C.Cruz・早川淳 (1998): 港内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.

Bowers E. C. (1992): Low frequency waves in intermeditate water depth, Proc. 23 rd ICCE, Venice, pp. 832-845.