

港内副振動に関する現地観測と長周期波を考慮した 荷役稼働率の評価

朝崎 勝之*・松尾 憲親**・藤畑 定生**
鵜飼 亮行***・清水 琢三***

1. ま え が き

従来の港湾は、船舶の入出港に際しての航行安全性と岸壁での係留、荷役の安全性を確保するため、周期10秒前後の通常波浪（短周期波浪）に対して必要な静穏度が得られるように、外郭施設の形状や岸壁の位置などが決められている。しかしながら、来襲波浪には短周期波浪成分の非線形干渉による波群に拘束された周期1~2分の長周期波や周期数十分の湾水振動が含まれており、港内では副振動が励起されて長周期波高が増大する場合もある。しかもこれらの長周期波の周期が係留船舶の動揺の固有周期に近い場合、通常波浪が荷役限界波高よりも小さい場合でも荷役作業の中断や係留索の切断といった被害を生じる場合がある（例えば、菅沼ら、1995；白石ら、1995）。

本研究では、東シナ海に面した九州電力（株）苓北発電所専用港湾において港湾内外の長周期波観測を1年間継続して実施し、その出現特性を明らかにするとともに、長周期波が石炭運搬船の荷役・係留に及ぼす影響について考察した。

2. 現地観測の概要

九州電力（株）苓北発電所専用港湾は、熊本県の最西端の天草下島に位置し、東シナ海に直接面している。通常は比較的静穏な海域であるが、台風来襲時には南寄りの高波浪が、冬期には季節風ならびに低気圧の通過に伴う北寄りの高波浪が発生する。

現地観測は、1994年2月17日~1995年2月27日までの約1年間にわたり継続的に実施した。期間中、冬期（2~3月）と夏期（7~8月）には、短期集中調査として、図-1に示す港湾内外の5箇所での水位変動の連続観測を実施した。また、その他の期間は、港外のP0地点と岸壁北端のP2地点の2カ所で連続観測を実施した。観測機器としては、長期観測には水圧センサー式波高計を使用し、短期集中調査では水圧センサー付き電磁流速計を用



図-1 調査地点位置図

い、波浪および長周期波の波向も併せて計測した。データは、約1ヶ月毎にサンプリング間隔1sで連続で取得した。また、7月の集中調査では、P0, P1, P2の3カ所に超音波波高計を同時に設置し、水圧変動を水位変動に変換する際の補正係数を適切に評価した。得られたデータは、潮位変動を除去して1時間毎の時系列データに分割し、数値フィルターにより周期20s以下の短周期成分とそれ以上の長周期波成分に分離し、波別解析を行った。

調査期間中には、有義波高2.5m以上の時化が3回計測され、この内、夏期の集中調査期間中の8月10日には、T9413による最大有義波高3.26m、有義波周期11.9sの高波浪が観測された。したがって、長周期波の実態把握や数値シミュレーションの検証データとして有益なデータが取得されたものと考えられる。

3. 港湾内外の長周期波特性

3.1 港外の長周期波の出現特性

当地点の長周期水面変動は、高波浪時に主として波浪成分（周期20s以下）の非線形干渉によって生じる長周期波（いわゆるサーフビート）（周期20s以上）と波高が小さいときに生じる五島灘の湾水振動（卓越周期30分程度）に大別される。

（1）長周期波（サーフビート）の出現特性

図-2は、港外のP0地点（水深約20m）の短周期波成分の有義波高 $H_{1/3}$ と長周期波成分の有義波高 $H_{L1/3}$ の関係を示している。有義波高が1m以上になると、短周期波の波高が大きくなるにつれて長周期波の波高が増加す

* 正会員 九州電力（株）土木部 火力・原子力土木課
** 正会員 工修 九州電力（株）土木部 火力・原子力土木課
*** 正会員 工修 五洋建設（株）技術研究所 海岸海洋グループ

る傾向がみられる。これは短周期波の非線形干渉に起因する周期1分前後の長周期波であると考えられる。そこで、関本ら（1990）と同様、短周期波の時系列から2次の非線形干渉理論（Sand, 1982）により単一方向の非線形拘束波として入射波高 $H_{1/3}$ と長周期波高 $H_{L1/3}$ の関係を求めた。入射波高と長周期波高の関係は、水深 20 m, 有義波周期 5, 9 および 14 s に対して回帰式を求めておき、入射波の周期に応じて内挿した。

$$(H_{L1/3})_c = \alpha (H_{1/3})_{P0}^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 α は、水深と周期に依存する次元量 (m^{-1}) で、有義波周期 5, 9 および 14 s に対してそれぞれ、0.0183, 0.022 および 0.0415 が得られた。

式（1）を用いて推定した長周期波高と実測の長周期波高を比較したところ、実測値と概ね対応はよいものの、実測値をやや過大評価することがわかった。その原因としては、現地は多方向不規則波であるにもかかわらず、単一方向不規則波を仮定していること、また海域には非線形干渉以外の原因で生じた自由長周期波が存在することが考えられる。そこで本検討では、式（1）から推定した長周期波高 $(H_{L1/3})_c$ を実測値に基づき補正した。

$$(H_{L1/3})_{P0} = 0.484 (H_{L1/3})_c^{0.668} \dots \dots \dots (2)$$

補正結果によれば、港外 P0 での長周期波高は短周期波の有義波高の約 1.3 乗に比例することになる。このよ

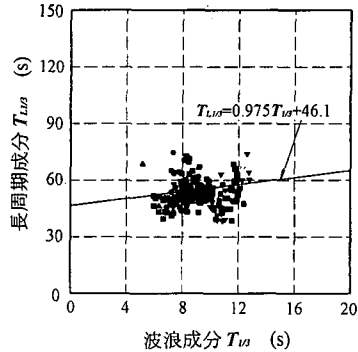


図-4 入射波周期と長周期波周期の関係 (P0 地点)

うな傾向は大平洋北部海岸における観測結果でも報告されている（金山ら, 1995）。

図-3 は、式（2）により補正した推定値と実測値の比較を示している。また、図-2 中に周期毎に補正された推定式も併せて示されているが、補正した結果は実測値と良好に対応している。また、入射波の波向によらず、補正式の適用性は高いことがわかる。

また、図-4 は、短周期波の有義波周期 $(T_{1/3})_{P0}$ と長周期波の有義波周期 $(T_{L1/3})_{P0}$ の関係を示しているが、短周期波の有義波周期 6~12 s に対して長周期波の有義波周期は 50~60 s とあまり変化しない。

$$(T_{L1/3})_{P0} = 0.975 (T_{1/3})_{P0} + 46.1 \dots \dots \dots (3)$$

以上のように、式（1）~（3）により短周期波の有義波諸元がわかれば、入射波浪に含まれる長周期波を概ね推定できることがわかった。

（2） 湾水振動の出現特性

図-2 によれば、短周期波の有義波高が 1 m 以下と小さい場合でも長周期波の有義波高が 0.3 m 以上と大きくなることもある。図-5 は、湾水振動が顕著であった 1994 年 2 月 24 日 12 時の周波数スペクトルを示している。解析には、サンプリング間隔 1 s の連続データを 20 s 間の移動平均を行って作成した 24 時間データ（サンプリング間隔 20 s）を用いた。湾水振動の卓越周期は 27 分で、52 分、11 分付近にもピークがみられる。五島灘の湾水振

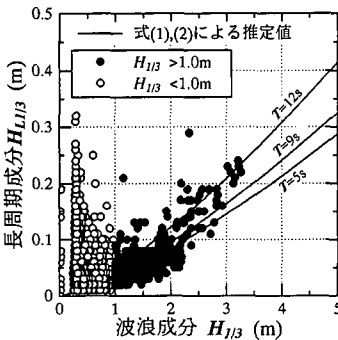


図-2 入射波高と長周期波高の関係 (P0 地点)

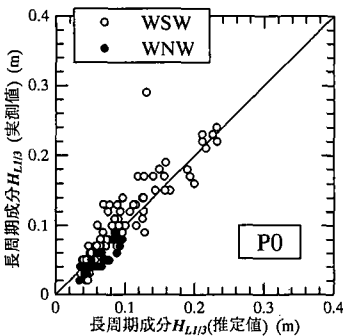


図-3 長周期波高の計算値と実測値の比較 (P0 地点)

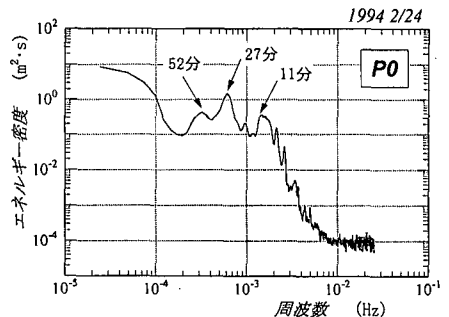


図-5 湾水振動の周波数スペクトル

動の固有周期は、約25分、約35分、約70分であり、約35分が卓越することが知られている (Hibiya・Kajiura, 1982)。実測値でも30分足らずの周期が卓越しており、苓北地点に来襲する湾水振動は長崎にアビキをもたらす五島灘の湾水振動と同一であると推察される。

3.2 長周期波の港内への伝播

(1) 長周期波 (サーフビート) の伝播特性

図-6は、冬期と夏期の集中調査結果による港外P0と港内P2の長周期成分波高の関係をj示している。港内P2の長周期波高は、港外P0の長周期波高の1.0~1.5倍、平均的には1.2倍に増幅されている。また、増幅率は、波浪成分と違って入射波の波向によらないことがわかる。長周期波の有義波周期は、港外が50~60sであるのに対して、ばらつきはあるものの、平均的には1.6倍程度長く

なり、80~100sが卓越する。

港外のP0および港内のP2の周波数スペクトルならびに港外に対する港内の周波数応答の一例として、夏期集中調査期間中の高波浪時 ($H_{1/3}=3.26\text{ m}$, $T_{1/3}=11.9\text{ s}$)の結果を図-7に示す。周期500sおよび100s前後の110s, 90s, 70sに共振点がみられる。港内ではこの100s前後がエネルギー的にもピークである。このことから港内では副振動により長周期波が増幅されるとともに、周期が長くなることがわかる。

(2) 湾水振動の伝播特性

湾水振動は、港内に伝播して平均的には1.7倍程度増幅されることがわかった。しかしながら、湾水振動は波高の小さいときに発生しており、その周期も30分程度と係留船舶の固有周期60s程度に比べて非常に長いことから、波高は港内で0.4m程度と比較的大きくとも係留索の調整による対処が可能であると判断される。したがって、以下の検討では、高波浪時に生じる周期1分程度の長周期波のみを対象として、石炭運搬船の長周期動揺について検討した。

4. 数値シミュレーションによる港内副振動解析

4.1 現地調査結果の再現計算

1994年8月10日11:20~12:00のP0地点における波浪時系列 (港外有義波3.27m, 12s; 長周期有義波0.22m, 69.5s) を入力条件 (単一方向不規則波を仮定) として、ブシネスク方程式による現地再現計算を行った。計算には、佐藤・Kabiling (1993) と同様、砕波減衰項を付加した平面2次元のブシネスク方程式を用いた。また、金山ら (1995) と同様に、傾斜堤部分をスポンジレイヤーとして、砕波減衰項の係数を調整することにより傾斜堤の消波効果 (反射率0.4) を表現した。

表-1にP2, P3およびP4における波浪成分と長周期波成分の有義波の計算値と実測値の比較を示す。短周期波浪成分については、入射波向が実際にはWSWにもかかわらず、海岸線に直角のWとしていること、また多方向性を考慮していないことから計算結果が過大評価されているが、長周期波については、有義波高、有義波周期ともに実測値との対応は概ね良好である。

前出の図-7に、港内P2地点の周波数スペクトルと港外P0に対する周波数応答関数の計算結果も併せて示した。多少のずれはあるものの、 10^{-2} Hz (100s) 前後にピークが2つみられる点など、計算結果は実測結果を良好に再現している。

また、P4ではP2の波高の約0.7倍になるなど、汎用岸壁に近いP2で大きく、港内中央のP4で小さくなる傾向も計算で精度良く評価できることがわかった。

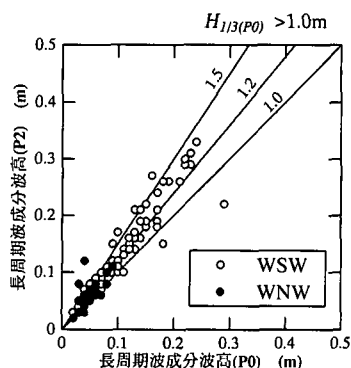
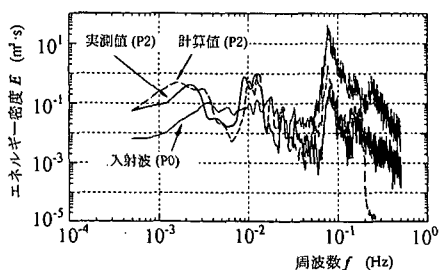
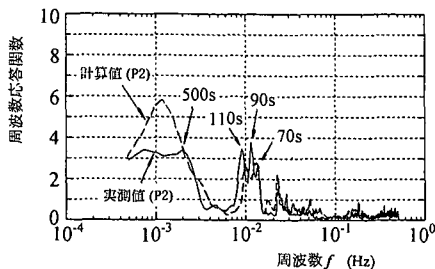


図-6 港外 (P0) と港内 (P2) の長周期波高の関係



(a) 周波数スペクトル



(b) 周波数応答

図-7 周波数スペクトルおよび周波数応答 (P2 地点)

表-1 プシネスク方程式による計算値と実測値の比較

地 点		波浪成分 (0~20 s) $H_{1/3}, T_{1/3}$	長周期波成分 (20 s 以上) $H_{L1/3}, T_{L1/3}$
P0	実測値	3.27 m, 12.0 s	0.22 m, 69.5 s
P2	実測値	0.37 m, 10.2 s	0.32 m, 87.6 s
	計算値	0.46 m, 12.0 s	0.32 m, 85.8 s
P3	実測値	0.34 m, 9.9 s	0.27 m, 95.3 s
	計算値	0.13 m, 12.7 s	0.30 m, 76.5 s
P4	実測値	0.33 m, 9.4 s	0.21 m, 88.1 s
	計算値	0.48 m, 7.4 s	0.25 m, 57.7 s

4.2 港内長周期波の波向特性

係留船舶の動揺解析を行うに当たって、船体に対する長周期波の入射角をどのように設定するかは重要な問題である。港内では、港口から回折して入射する長周期波と副振動により港内で発生する長周期波が混在しており、多重反射場での長周期波の波向をどのように設定すべきかは明らかではない。そこで、岸壁前面 P2, P4 での流速の実測値ならびにプシネスク方程式による計算値から長周期波の波向特性を調べた。

図-8 は、実測および計算による流速のスカッタープロットを示している。計算結果によれば、P2 では港口からの回折波が卓越するのに対して、P4 では汎用岸壁と南防波堤間の岸壁に沿った副振動が卓越する様子がわかる。これは、P4 がちょうど防波堤間のほぼ中央に位置しており、岸壁平行方向の副振動モードの節になっているためと推定される。逆に P2 は反射面に近く、重複波の腹に近いので、副振動による流速は小さく、港口からの回折波が卓越しているものと推定される。実測結果では、計算結果ほどは明確ではないが、同様の傾向がみられる。

以上のように、長周期波の波向を一つで代表させることは難しく、船体動揺解析においていずれの波向で代表させるかは難しい問題ではあるが、本検討では、港口からの回折波の波向で代表させることにした。しかしなが

ら、計算による流速値は実測値を過大評価しており、底面摩擦項の考慮するなど改善の余地が残されている。

5. 係留船舶の動揺シミュレーション

5.1 検討方法の概要

白石ら (1995) により実船計測結果に対してある程度現地適用性が確認されている久保ら (1988) の方法を用いて、石炭運搬船 (6 万 DWT) の係留時の動揺解析を行った。また、粘性抵抗力も考慮した。

波外力は、4. の港内副振動解析に用いた P2 地点の実測波浪時系列を用いて、波浪成分 ($T < 20$ s) と長周期波成分 ($T > 20$ s) に分離して各成分ともに 10 成分の規則波の合成波として扱い、それぞれの振幅を調整することにより計算入力波形を作成した。検討波浪条件は、表-2 に示すように、港外の入射有義波高が 1.5, 2.0, 2.5 および 3.0 m、いずれも有義波周期は 12 s とし、3. で示した方法により港内長周期波を設定した。港内波浪は、冬の波浪の卓越波向 W を想定して設定した。結果として得られた港内の波浪成分および長周期波成分の有義波周期はそれぞれ約 11.5 s, 約 90 s である。また、波向は、波浪、長周期波ともに港口からの回折波を想定して設定した。なお、風については、冬期高波浪時には船を岸壁に押し付ける方向であることがわかったので、考慮していない。

係留索は索径 70 mm の繊維索 (破断強度 67 t)、防舷材は定反力型 (設計標準歪み 52.5%) である。係留索 16 本、防舷材 6 基で係留し、左舷付けしている状態を想定した。

5.2 荷役限界および係留限界の推定

荷役限界はアンローダーの許容動揺量 (サージ ± 1.0 m, スウェイ $+1$ m)、係留限界は許容動揺量 (サージ ± 2.5 m, スウェイ $+2$ m)、係留索の許容張力 (31.5 t)、防舷材許容歪み (47.2%) を目安として動揺解析結果を評価した。計算結果は、表-2 に示されているが、荷役限界はスウェイの動揺量で決まり、荷役限界長周期有義波高は約 0.1 m と推定される。この値は実際の荷役状況からも妥当性が確認されている。

また、係留限界についても、係留索や防舷材の強度からは余裕があるものの、スウェイの動揺量から決まり、係留限界長周期有義波高は約 0.2 m と推定される。

菅沼ら (1995) は苫小牧東港での荷役状況から荷役限界長周期波高を 0.15 m と設定しているが、現実には荷役中断前に係留索の破断が生じることがあり、荷役限界波高はもう少し小さくなることを報告している。また、白石ら (1995) は、長周期波 0.4 m, 2.5 分のとき係留索が破断したことを報告しているが、有義値でみれば長周期波高は約 0.2 m と考えられるので、今回の荷役限界、係留限界は概略妥当な値であると考えられる。

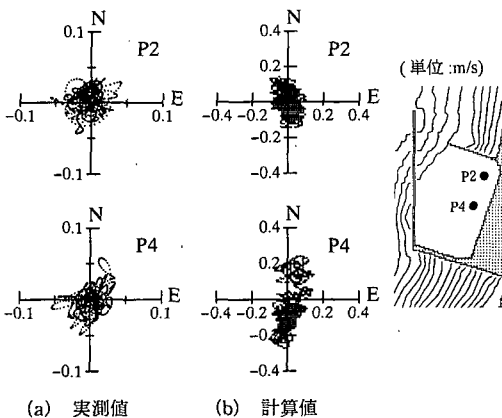


図-8 流速のスカッタープロット

表-2 船体動揺シミュレーション結果

ケース	1	2	3	4
入射波高	1.50m	2.00m	2.50m	3.00m
港内波高	0.30m	0.40m	0.55m	0.70m
港内長周期波高	0.08m	0.15m	0.23m	0.30m
動揺量: θ - ψ ± 2.5 m 19.14 ± 2.0 m	0.31/-0.25 0.85/-0.07	0.45/-0.32 2.08/-0.11	0.87/-0.74 2.87/-0.31	1.05/-1.09 3.05/-0.84
索張力: 限界張力 (最大) 33.5t	12.9	13.4	23.0	22.9
防触材: 限界値 47.25%	13.8	16.7	28.9	43.5
荷役/係留	可/可	不可/可	不可/不可	不可/不可

有義波周期: 波高成分11.5s, 長周期成分90s

表-3 荷役稼働率と係留可能率

(%)		港内長周期波を基準		港内波浪を基準	
検討条件		係留限界	荷役限界	係留限界	荷役限界
限界波高(m)		0.2	0.1	1.0	0.5
通年	苅北 (1978~1994)	99.73	98.35	100.00	99.85
	苫小牧 (1982~1989)	99.45	94.90	100.00	99.74
	鹿島 (1984~1989)	96.24	75.60	99.99	99.20
	油津 (1980~1989)	98.28	87.88	99.97	99.24
	玄界灘 (1983~1988)	99.02	89.06	99.99	99.52
	酒田 (1973~1989)	93.21	77.42	99.95	96.04
	苅北 (1978~1994)	99.54	98.32	100.00	99.70
夏期 (6月~8月)	苫小牧 (1982~1989)	99.85	95.53	100.00	99.99
	鹿島 (1984~1989)	99.07	88.47	100.00	99.52
	油津 (1980~1989)	97.66	85.45	99.97	98.84
	玄界灘 (1983~1988)	99.96	97.96	100.00	99.96
	酒田 (1973~1989)	99.80	98.43	100.00	99.88
	苅北 (1978~1994)	99.82	97.37	100.00	99.89
	苫小牧 (1982~1989)	99.70	96.70	100.00	99.87
冬期 (12月~2月)	鹿島 (1984~1989)	96.33	77.09	100.00	98.19
	油津 (1980~1989)	99.90	96.00	100.00	100.00
	玄界灘 (1983~1988)	98.60	76.49	99.96	99.46
	酒田 (1973~1989)	82.93	47.25	99.91	90.03

ただし、港内波浪の伝達係数は0.15、港内長周期波の伝達係数は1.2とした。

6. 長周期波を考慮した荷役稼働率・係留可能率

過去の波浪観測記録 (1978~1994年) を用いて, 3. で述べた方法により入射波から岸壁前面の長周期波高を推定し, 5. で設定した荷役, 係留限界長周期波高に対して荷役稼働率および係留可能率を評価した。その結果を表-3に示す。ただし, 岸壁前面の通常波浪の波高伝達率は0.15, 長周期波の伝達率は1.2とした。

苅北地点では, 長周期波で決まる荷役稼働率は通年で98.4%であり, 通常波浪に対する値99.9%(荷役限界有義波高0.5m)に比べて小さい。また, 港外波浪条件の違いを比較するため, 全国港湾海洋波浪観測20年統計(永井ら, 1993)を基に, 日本沿岸の代表5地点の波浪条件に対して, 各地点に苅北港と同じ長周期波の静穏度を有する港を建設した場合の稼働率を検討した。例えば, 酒田の波浪条件では, 従来の通常波浪に対する評価では通年で96%, 厳しい冬期でも90%の荷役稼働率が確保されるのに対して, 長周期波の荷役限界から評価すると通年で77.4%, 冬期で47.3%と著しく低下することがわかった。このことは, 通常波浪に対しては防波堤により静穏度を向上できても, 長周期波は波高を低減できないため, 港外の長周期波の出現特性が荷役稼働率に大きく影響する場合があることを示している。また, 太平洋北部海岸の鹿島港の波浪条件も長周期波からみれば通年

で最も厳しいことがわかる。

7. あとがき

苅北発電所専用港湾内外における通年の長周期波観測結果に基づき, 長周期波の実態を明らかにするとともに, 石炭運搬船の荷役および係留に対する影響について検討した。その結果, 2次非線形干渉理論に補正を加えることで入射波浪がわかれば港外長周期波が推定できること, さらにはブシネスク方程式による港内副振動解析により港内長周期波が推定できることが明らかになった。また, 長周期波を含む港内波浪時系列に対して係留船舶の動揺解析を行うことにより, 荷役限界ならびに係留限界を長周期波高で概略評価できることがわかった。この長周期波からみた荷役, 係留限界条件から荷役稼働率を算定すると, 従来の通常波浪に対する荷役稼働率に比べて著しく低下する場合があることを示した。しかしながら, 港内副振動が卓越する場合の係留船舶の動揺解析手法は, 船体に対する長周期波の波向の設定や粘性抵抗力の評価法, 現地検証データの蓄積などの課題が残されている。また, 外郭施設あるいは係留施設などによる長周期波の制御方法についても今後の重要な検討課題である。

最後に, 本研究を進めるに当たり, (財)電力中央研究所我孫子研究所鹿島遼一氏ならびに池野正明氏には多くの有益な助言を賜りました。また, 船体動揺シミュレーションの実施に当たっては(株)郵船海洋科学津金正典氏のご協力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 金山 進・田口 智・清水琢三・長松 徹・植木一浩・中原和彦 (1995): ブシネスク方程式による港内長周期水位変動の数値計算, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 291-295.
- 久保雅義・斉藤勝彦・下田直克・岡本俊策 (1988): 岸壁前面係留浮体の不規則波による船体運動の時系列解析について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 687-691.
- 佐藤慎司・M. Kabiling (1993): Boussinesq方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 386-390.
- 白石 悟・久保雅義・上田 茂・榊原繁樹 (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対策, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 941-945.
- 菅沼史典・神谷昌文・堀美洋一・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.
- 関本恒浩・清水琢三・窪 泰浩・今井澄雄・島津昌央 (1990): 港湾内外のサーフビートの発生・伝播に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 86-90.
- 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正 (1993): 全国港湾海洋波浪観測20年統計, 港湾技術資料, No. 744, pp. 131-140.
- Hibiya, T. and K. Kajiura (1982): Origin of the Abiki Phenomenon (a Kind of Seiche) on Nagasaki Bay, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 38, pp. 172-182.
- Sand, S. (1982): Long waves in directional sea, Coastal Eng., Vol. 6, pp. 95-208.