

現地観測と数値解析による細島港の湾内水面振動と係留船舶動揺特性

吉田明徳*・村上啓介**・入江 功***

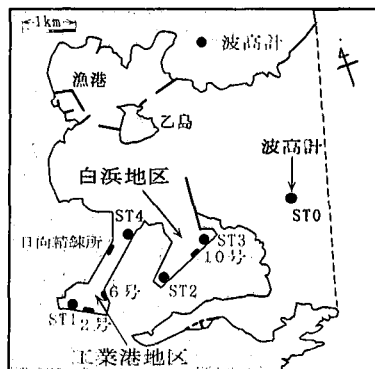
1. まえがき

宮崎県日向市の細島港では長周期波によると思われる荷役障害がしばしば発生している(沿岸開発技術センター, 1998). 港湾内の長周期波と船体動揺についてはこれまでも多くの知見が得られている(例えば平石ら, 1997). ただし, 長周期波による湾水振動や係留船舶動揺の特性は, 港湾の形状や来襲する波浪の特性など港湾個々の条件が大きく影響するため, 問題が生じている港湾ごとの調査研究が必要となる. 本研究は 1997~1998 年の 2ヶ年間の台風期(7~10月)における波浪の連続観測(港口 1 箇所, 港内 4 箇所)と, 同じ 2 か年間(8~9月)に行った船体動揺観測の解析, および湾内水面振動の数値解析から, 細島港における湾内水面振動特性と係留船舶動揺特性を把握し荷役障害低減対策の指針を得ることを目的とする.

2. 現地観測と解析の概要

(1) 係留船舶の動揺観測

細島港(図一)は工業港地区, 白浜地区, 商業港地区に分かれており, 宮崎県が実施した聞き取り調査によれば船体動揺による荷役障害は工業港地区と白浜地区に集中している. 船体動揺の観測は 1997 年と 1998 年の 2 年間いずれも 8 月から 9 月初旬にかけて, 図一に示す工業港地区の 2 号, 6 号, 日向精練所の岸壁, および白浜地区 10 号岸壁に接岸した主として 1 万トン以上の船舶を対象におこなった. そのうち有意な動揺量の得られた観測について表一に示している. 表中に示す沖波は宮崎港沖の観測タワー(運輸省)での定時観測による有義波高の日平均値である. 動揺観測は船腹にマーカーを取り付けこれをビデオカメラで撮影(数時間の連続観測)した. また一部は船尾より船体の動揺を同時撮影した. 解析では撮影したマーカーの軌跡を X-Y トラッカーを用いて読取り, Heave(上下揺)と Surge(前後揺)の時系列データを作成し, 波別解析およびスペクトル解析を



図一 細島港(観測岸壁と波高計位置)

おこなった.

(2) 港口および港内での波浪観測

宮崎県土木部港湾課では, 港内 4 箇所(ST1, ST2, ST3, ST4)と港口 1 箇所(ST0)で, 水圧式波高計によりサンプリングタイム 1 秒(1997 年は港内 4 箇所は 6 秒)での波浪の連続観測をおこなっている. 残念ながら, 1997 年の動揺観測期間中の港口の波浪データは欠測している. これらの観測データのうち, 表二に示す 1997~1998 年の 2ヶ年間(7~10月)に日本近海を通過した計 10 個の台風が影響を与えた期間を対象にスペクトル解析をおこなった. 解析では波浪の時系列よりデータ長 4 時間ずらし時間 2 時間のランニングスペクトルを算定し, 周期 5 秒~30 秒を風波成分, 30 秒~3 分を長周期成分, 3 分~を極長周期成分として, 次式により各成分のパワーの換算波高, H_H , H_L , H_{LL} を算定しその径時変化を求めた.

$$H = 4 \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S(f) df} \dots\dots\dots (1)$$

ただし上式中の f_1 と f_2 はそれぞれ各成分の下限と上限の周波数を意味する.

3. 解析結果と考察

(1) 船体動揺の波別解析

ゼロアップクロス法により動揺の時系列を波別解析

* 正会員 工博 九州大学助教授 工学研究科海洋システム工学専攻
 ** 正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部土木環境工学科
 *** 正会員 工博 九州大学教授 工学研究科海洋システム工学専攻

表-1 動揺観測

年度	岸壁	船名	トン数 (G. T.)	全長 (m)	日付	開始時刻	観測時間 (h)	沖波有義波	
								波高 (cm)	周期 (s)
H. 9	精練	S. PROSPECT	18,793	176.5	8月 6日	11:09	4.18	127	9.0
	10号	O. EHIME	3,970	107.8	8月 7日	9:35	5.09	200	9.6
	6号	SAPAI	17,590	170.0	8月14日	10:24	6.05	165	11.9
	6号	SAPAI	17,590	170.0	8月15日	10:10	3.30	443	12.6
	2号	R. FOREST	16,722	169.0	8月15日	14:22	1.76	443	12.6
	6号	SAPAI	17,590	170.0	8月26日	9:54	1.94	88	10.5
H. 10	精練	N. VEGOR	17,999	174.9	9月13日	9:50	5.97	欠測	欠測
	2号	C. PACIFIC	13,036	155.2	8月25日	9:33	6.91	61	6.7
	2号	C. PACIFIC	13,036	155.2	8月26日	9:23	5.88	79	8.0
	2号	C. PACIFIC	13,036	155.2	8月27日	9:31	6.95	65	8.5
	6号	自衛艦 みねぐも	2,100	114.0	8月27日	11:06	4.91	65	8.5
	10号	O. MICEAZAKI	3,994	107.0	8月27日	13:53	2.34	65	8.5
	2号	C. PACIFIC	13,036	155.2	8月28日	9:18	6.77	97	9.0

表-2 波浪観測

年度	No.	観測点					期間	備考 (台風)
		ST0	ST1	ST2	ST3	ST4		
H. 9	1	×	●	●	●	●	7月22日0:00-7月28日23:00	9号
	2	×	●	●	●	●	8月4日0:00-8月9日23:00	11号
	3	×	●	●	●	●	8月12日0:00-8月20日23:00	13号
	4	×	●	●	●	●	9月13日0:00-9月17日23:00	19号
H. 10	5	●	×	●	●	●	8月26日10:00-9月1日9:00	4号
	6	●	●	●	●	●	9月11日15:00-9月17日13:00	5号
	7	●	●	●	●	●	9月17日14:00-9月21日14:00	6号
	8	●	●	●	●	●	9月21日15:00-9月25日13:00	7, 8号
	9	●	●	●	●	●	7月28日15:00-10月2日14:00	9号
	10	●	●	●	●	●	10月14日15:00-10月20日12:00	10号

×欠測

し、Surgeの有義波高が20cmを越えたものについて表-3に示している。特に1997(H.9)年9月13日の日向精練所岸壁では、最大値が5m近いSurge波高が観測された。工業港湾奥の2号および6号岸壁でも同様の大きな動揺が観測されており、細島港では波浪条件によって極めて大きな船体動揺が生じることが確認された。9月13日の日向精練所での動揺はSurgeに対するHeaveの波高は相対的に小さく、工業港の細長い形状によって生じる水面振動の節の位置に岸壁が位置することによるものと推測され、これは後述の数値解析の結果から確認できた。

(2) 船体動揺とST1での水面振動のスペクトル

図-2に、1997年8月15日の6号岸壁に係留された船体動揺(Surge)のスペクトルと、対応する時刻に港内湾

表-3 動揺の波別解析結果

年度	日付	岸壁	Surge			Heave		
			X_{max}	$X_{1/2}$	$T_{1/2}$	X_{max}	$X_{1/2}$	$T_{1/2}$
H. 9	8月7日	10号	0.8	0.4	65	0.6	0.3	16
	8月14日	6号	0.7	0.3	47	0.4	0.2	12
	8月15日	6号	1.2	0.6	59	0.5	0.3	15
	8月15日	2号	2.1	0.8	106	1.2	0.7	11
H. 10	9月13日	精練	4.9	2.5	140	0.8	0.4	17
	8月27日	2号	0.6	0.3	59	0.4	0.1	21
	8月28日	2号	1.4	0.8	62	0.7	0.4	11

振幅の単位 (m) 周期の単位 (sec.)

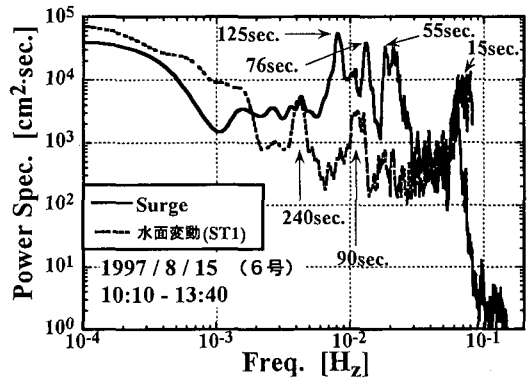


図-2 動揺 (Surge) と水面振動のスペクトル

奥のST1で得られた水面変動のスペクトルを示している。Surgeのスペクトルには125秒、76秒、55秒近傍の周期で大きなピークが見られるが、水面振動のスペクトルではこれらの周期でのスペクトル値は逆に小さい。水平流速が大きい水面振動の節位置でSurgeが大きいこと、および節近くでは水面振動が小さいことを考えると、6号岸壁とST1とが共に水面振動の節に位置するような振動モードがこれらの周期で生じていることを示唆している。

(3) 換算波高 H_H , H_L , H_{LL} の径時変化

港口(ST0)と港内(ST1, ST2, ST3, ST4)の波浪観測の時系列より算定した換算波高 H_H , H_L , H_{LL} の径時変化を、表-2のNo.6の波浪データを例にとって表-3に示した。この間、台風5号が四国のはるか沖合をかすめて関東地方に上陸し、仙台から北海道に抜けるコースを取っている。台風が宮崎に最も接近した時刻あたりから波高が増大し始め、台風の通過とともに波高が急速に減少している。これらの径時変化を各観測点について見ると、換算波高の風波成分 H_H と長周期成分 H_L はほぼ相似な径時変化を示し特に港口において顕著である。風波成

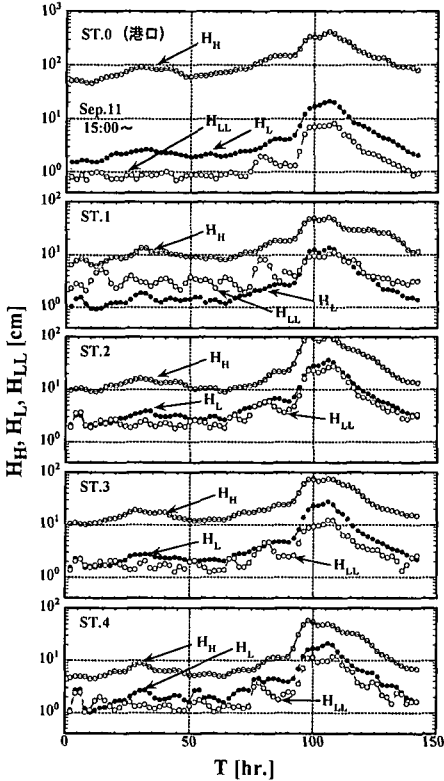


図-3 H_H , H_L , H_{LL} の径時変化 (1998年台風5号)

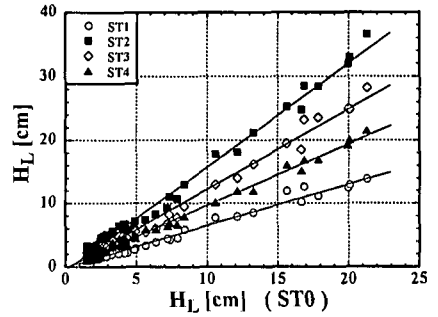


図-4 港口と港内の H_L の相関 (波浪データ No. 6)

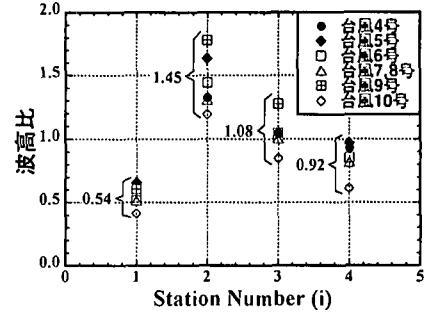


図-5 H_L の波高比 (1998)

分は港内のいずれの測点においても港口に比べると1オーダー小さな値に減衰しており、風波成分に対しては白浜地区の防波堤による遮断効果や北側の漁港に隣接する砂浜海浜の消波効果が大きいことが推測される。しかし長周期成分 H_L は大きくは減衰せず湾奥に到達し、白浜地区湾奥のST2では明らかに増大している。3分以上の極長周期波成分 H_{LL} には観測点による違いが大きく現れるが、工業港湾奥のST1では台風接近以前の早い時期から H_L を超える H_{LL} が生じている。極長周期成分は港湾形状に大きく支配されると推測され、ST1やST2のような湾奥では大きな値を取る。このような換算波高 H_H , H_L , H_{LL} の径時変化の様相は、今回解析した波浪データについてはほぼ共通して言える。

(4) 長周期成分 H_L の相関

長周期成分の増減についてさらに詳しく見るため、図-3に示す径時変化より港口と各測点間で H_L 成分の相関を取った結果を図-4に示した。いずれの測点の H_L 成分も港口の H_L 成分と線形の相関関係が見られる。白浜地区のST3とST2では H_L は港口での値より大きくなっており、白浜地区先端の防波堤は長周期成分についてはなら遮断効果を有しないと見える。これらの相関図を港口のデータが測得されている1998年(平成10年)

のデータについて作成し、それらより読み取った回帰直線の傾きを波高比として各測点についてプロットした結果を図-5に示す。プロットの横に記したのは平均値である。工業港地区湾奥のST1において波高比が0.54と小さくなっているが、これは必ずしも長周期成分が湾奥に十分到達していないことを意味しない。ST1の近傍には庄手川(幅90m)と亀崎川(幅30m)の2河川が注いでおり、これらの2河川の湾水振動に対する減衰効果(余ら、1996)によって小さく現れているものと推測される。1997年のデータでは港口のデータが欠測しており、図-4の相関図を作成できないが、図-5の結果よりST3の波高比がほぼ1となることから、港口の H_L の代りにST3の H_L を用いて相関を取り図-5と同様に波高比を求めた結果を図-6に示す。白浜地区湾奥のST2、工業港の入口ST4と湾奥のST1ともに1998年の結果(図-5)に比べて小さくなっており、1997年より1998年の方が細島港の長周期水面振動が激しくなったことを意味する。港内の異なる2点での長周期水面振動の相対的な大きさが年によって異なるのは港湾形状の変化によるものとしか考えられず、埋立をおこなって護岸を増設していることが原因ではないかと推測される。1997年の観測時期には、白浜地区の護岸はST2とST3のほぼ中間位置の250m部分は護岸が無く、奥行き300mほど先の陸地に開いた状態であったものが、1998年の観測時期には護岸ケーソンの設置がほぼ終了しておりこれが、対岸との

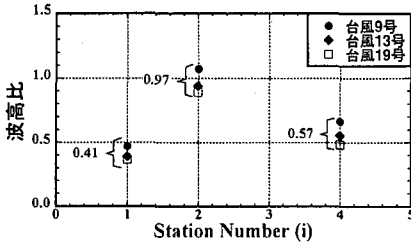


図-6 H_L の波高比 (1997)

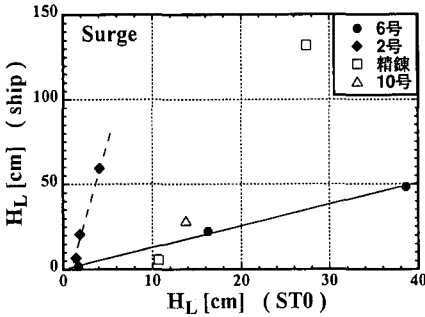


図-7 動揺と波浪 (ST0) の H_L の相関

共振モードを増大させ、その結果波高比が増大したものと考えられる。一方、工業港地区では1997年の観測時期以降、ST4の対岸の日向精練所の岸壁に接する延長600m程が埋め立てられ(図-1は埋立後の形状)乙島横の海域に漏斗のように徐々に開いた形状になったことが理由ではないかと考えられる。

(5) 波浪と動揺の長周期成分 H_L の相関

図-7は動揺観測のスペクトル解析より求めた Surge の長周期成分 H_L と、港口での長周期成分 H_L との相関を表-1の動揺観測のうち観測時間が3時間を超えるものについて求めたもので、1997年の観測においては港口の波浪のデータは得られていないのでST3における H_L の値を用いている。動揺が水面振動モードに大きく左右されることを考えると接岸岸壁の異なる動揺データ間での全体としての相関は当然のことながら認められないが、同じ接岸岸壁(6号岸壁および2号岸壁)での動揺に限ると、それぞれ港口の長周期成分 H_L との強い相関が認められ、しかも波浪の H_L 成分に対する Surge の H_L 成分の増大の割合が、同じ工業港であっても岸壁によって大きく異なることがわかる。

4. Lee の方法による水面振動解析

(1) 境界形状と領域分割

細島港は海岸線が主として切り立った岸壁から成る天然の入江(幅6.5km程)に作られた港で、港口から工業港の湾奥までの奥行きが5km近くあり、この間で水深

は港口近傍での30m程度から湾奥の10m程度まで変化する。したがって一定水深を仮定する Lee の方法を直接適用するのは無理がある。水深変化を考慮して解析する方法 (Mattioli, 1978; 郭ら, 1997) も提案されているが、細島港のような広大な港湾における水面振動特性の検討をおこなう際には、Lee (1971) の方法の簡便さは実用面からは捨て難いと考えられる。そこで、細島港の長周期水面振動の特性を把握する目的で、近似的に水深変化を考慮する領域分割計算をおこなった。この際、これまで必ずしも明確にされていない、港湾平面形状の近似の程度および水深変化を考慮するための領域分割の程度が解析解に与える影響について、いくつか異なる条件についての計算をおこなって比較検討した。

(2) 数値計算結果

図-2に用いた境界線の形状を示している。(A)は海岸線の形状を出来るだけ忠実に近似したもので、(B)は数百m程度の凹凸は無視して境界線を取ったものである。数値計算上の港口は、入江の左右の突端を結ぶ線に取っている。150m間隔の格子点上の水深を海図より読み取って平均水深を算定し、隣り合う領域の水深差が5~8m程度となるように6領域に分割した。

図-9は平面形状について工業港湾奥のST1での増幅率を比較したものである。領域の水深は(1)(2)(3)(4)(5)(6)においてそれぞれ、30m, 22.5m, 17.5m, 15m, 10m, 10mに取っている。周期が30秒から40秒の比較的短周期においては幾分共振周期のずれが見られるが、それ以外は両者に大きな差はなく(B)程度の平面形状の近似で問題無いようである。周期125秒近傍では増幅率が小さく、また、90秒および240秒近傍で増幅率のピークが生じており、図-2に示したST1での水面振動の実測値のスペクトルと合致する結果を与えている。

図-10は境界形状はともに(A)に取り、図-9の水深

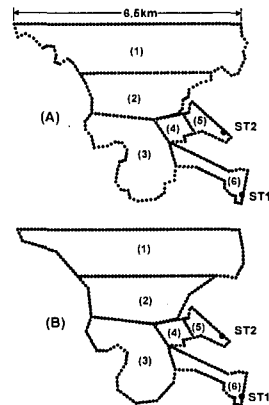


図-8 境界形状と領域分割

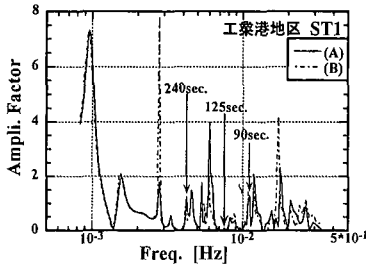


図-9 増幅率の比較 (平面形状)

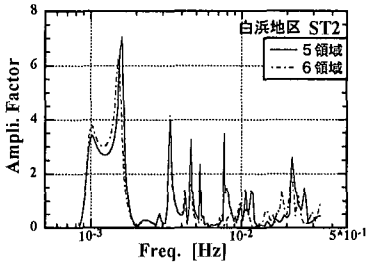


図-10 増幅率の比較 (領域分割)

設定の場合と領域 (4) (5) の水深を両領域の平均水深 12 m に取った場合との比較を白浜地区 (領域 (5)) の湾奥 ST2 における増幅率について示している。比較的周期の短いところで幾分差違は生じているがその差は小さく、数 m 程度の水深差となるように領域を分割しておけば実用上は十分であると言える。

図-11 は、湾水振動の数値解析により得られた工業地区と白浜地区における水面振動の波高分布で、図-2 に示す Surge のスペクトルが極大値を取る周期 125 秒について示している。先述したように、図-2 のスペクトルより推定される、6 号岸壁と ST1 が共に振動の節となる振動モードが生じていることが確認される。工業港地区への航路に沿う振動モードも生じており、動揺観測において Surge の最大波高が 5 m 近い値を記録した日向精練所岸壁が、有義周期 140 秒 (表-3) で節の位置に当たる振動モードが生じることも数値解析で確認できた。

5. あとがき

本研究で得られた主要な結論は次のようである。(1) 港口における長周期成分 (30 秒~3 分) は風波成分の急激な増大に同期して増大しており、風波最大時における外海からの入射長周期成分は 2 次のオーダの拘束波成分が主であると推測される。(2) 港口に対する湾奥での長周期水面変動の大きさが、1998 年には 1997 年よりも平均で 1.5 倍ほども増大したことがわかった。これは護岸の造成によって湾形状が変化し、長周期成分の共振モー

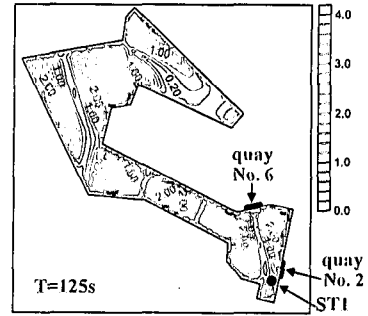


図-11 波高分布 (工業港地区と白浜地区)

ドが生じ易くなったことによる。(3) 細島港の係留船舶の動揺量は大きく最大振幅が Heave で約 1.0 m, Surge で 2 m を越える値が観測された。(4) 船体動揺の程度は同じ泊地内であっても接岸岸壁の位置によって大きく異なり、対象となる係留船舶の固有周期と泊地内の振動モードを考慮した利用を考える必要がある。(5) Lee の方法で水深変化を考慮するための領域分割は、隣合う領域の平均水深の差が数 m 程度となるように分割しておけば実用上は十分である。

謝辞：本研究における 8 月の動揺観測は学生の夏季実習としておこなった。実習の受入れと観測に便宜を図って頂いた運輸省第四港湾建設局宮崎港湾空港工事事務所、同細島港工事事務所ならびに宮崎県土木部港湾課の方々には謝意を表わす。また、酷暑の中での動揺観測を熱心におこなった 1997 年の山岡賢司、山岡敏之の両君 (当時九州大学学生) と、1998 年の樽井史郎、金丸敏宏 (当時九州大学学生) および吉村聡君 (当時宮崎大学学生) の諸君に謝意を表わす。論文の作成に当たっては、山城賢君 (九州大学大学院学生) の助力を得た記して謝意を表わす。

参考文献

- 沿岸開発技術センター (1998): 港湾内における長周期波の船体動揺への影響に関する研究報告書, pp. 1-116.
- 郭文秀・西村仁嗣 (1997): Green 関数法による任意水深域の波浪場解析, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 26-30.
- 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 (1997): 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, pp. 1-39.
- 余 錫平・富樫広由 (1996): 湾水振動に対する河川の影響について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 271-275.
- Lee, J. J. (1971): Wave-induced oscillations in harbors of arbitrary geometry, J. Fluid Mech., vol. 45, part 2, pp. 375-394.
- Mattioli, F. (1978): Wave-induced oscillations in harbors of variable depth, Computer and Fluid, vol. 6, pp. 161-172.