

長周期波の侵入による港内動揺の現地観測と数値計算

西井 康 浩* ・ 高瀬 和 博** ・ 大岡 弘 樹***
鵜崎 賢 一**** ・ 松永 信 博*****

全国各地の港では係留船舶の長周期動揺による荷役障害が発生しており, その原因の究明と有効な対策が求められている。本研究は, 現地観測と数値シミュレーションによって鹿児島県志布志港における長周期動揺の原因を特定することを目的としている。船舶動揺の画像解析と長期間の波浪観測から, 東シナ海を低気圧が通過中に港内において係留船舶が周期 1~2 分程度で動揺すること, ならびに同程度の周期の長周期波が湾口から港内に伝播してきていることがわかった。また数値シミュレーションから, 港内に伝播した長周期波が埠頭の周辺で重複波を形成している様子が明らかとなった。

1. はじめに

全国各地の港では, 岸壁に係留された船舶が 1~2 分程度の比較的長い周期で動揺するため, 係留索の切断や荷役作業の中止といった障害がしばしば発生し問題となっている(永井ら, 1997; 吉田ら, 1999)。こうした長周期動揺は通常波浪が比較的穏やかな場合においても発生することから, 外洋から微小振幅の長周期波が港内に伝播し, それによって励起された副振動, あるいは長周期波自体による重複波が特定の位置で係留系と共振するために発生すると言われているが, 他に様々な可能性も指摘されている(関本, 1999)。長周期動揺の原因とその詳細なプロセスは各港湾の波浪条件や港湾形状に大きく依存するため, それらを明らかにして有効な対策を得るには各港湾における検討が必要である。鹿児島県南部の志布志湾奥に位置する志布志港においても, 係留船舶の長周期動揺による荷役障害が問題となっている。志布志港では, 60 年代以降の防波堤の延伸に伴って荷役不可能日は減少傾向にあるものの, 依然年間 13 日の荷役不可能日が発生しており, その原因の特定と有効な対策の考案が急務となっている。そこで本研究では, 船舶動揺の画像解析と長期間の波浪観測, ならびに数値シミュレーションによって, 志布志港における係留船舶の長周期動揺の原因とそのプロセスについて検討を行った。

2. 画像解析

志布志湾は比較的水深が深く, 東シナ海に直接面した矩形湾であることから, 外洋の波浪が湾奥まで伝播しやすい。港湾関係者の間では, 東シナ海を低気圧が通過すると港内において係留船舶の長周期動揺が発生する傾向が指摘されている。そこで, 東シナ海を台風 6 号が通過した際に係留船舶をデジタル・ビデオ・カメラで撮影し, 画像解析によってその動揺特性を調べた。図-1 に観測

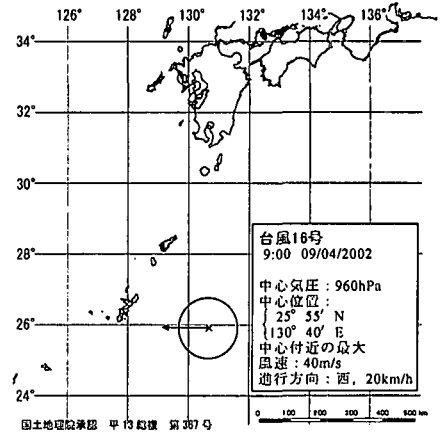


図-1 船舶動揺撮影時の天気図

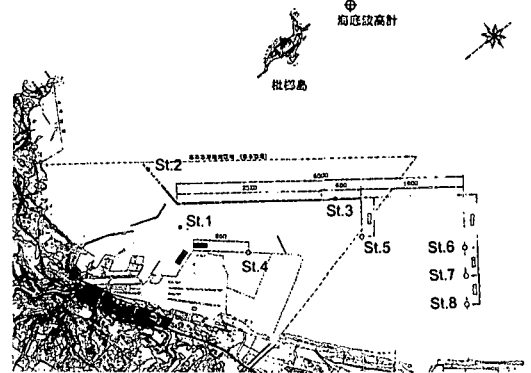


図-2 志布志港の概要図および観測点

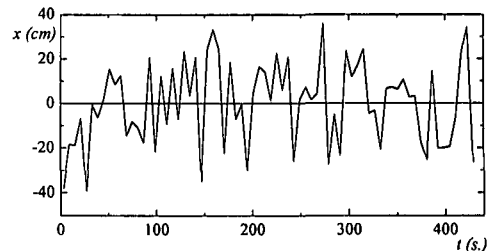


図-3 係留船舶の surging の経時変化

* 正会員 工 修 (株)三洋コンサルタント設計部開発課
** 正会員 (株)三洋コンサルタント調査部
*** (株)三洋コンサルタント設計部開発課
**** 正会員 博(工) 日本学術振興会特別研究員
***** 正会員 工 博 九州大学教授大学院総合理工学研究院

日(2002年9月4日)の天気図を示す。鹿児島県の真南、北緯25度付近の東シナ海を中型の台風16号が西進している。図-2に志布志港の概要図と観測点を示す。対象とした船舶は数百トン程度の貨物船であり、図中に■で示された若浜埠頭南東側バースに係留されていた。また、□は大型フェリー(さんふらわー)の接岸位置であり、このフェリーについても長周期動揺が問題となっている。図中のSt.は後節で示す波浪観測の観測点である。対象船舶を10分間にわたって撮影し、その動画をもとに2秒間隔でマーカーの位置を追跡して surging と heaving を調べた。図-3に、解析結果の一例として、係留船舶の surging の経時変化を示す。図から、周期60秒前後、振幅30 cm程度の surging が起きていることがわかる。

3. 波浪観測

こうした長周期動揺の原因とそのプロセスを調べるため、平成12年ならびに13年において志布志港周辺で波浪観測を行った。表-1に観測概要を示す。平成12年度は8月17日から10月5日まで、図-2に●で示されたSt.1~3の3点において観測を行った。平成13年度は8月28日から10月24日まで、図-2に○で示されたSt.4~8の5点で観測を行った。いずれの観測も、各測点において水圧式波高計で長周期波浪を、超音波波高計で短周期の通常波浪を測定し、同時に電磁流速計で流速を測定した。また、沖合い約4 kmの地点にある枇榔島近傍のナウファス・データについても解析を行った。

まず、平成12年度の観測結果について述べる。図-4(a), (b)に、枇榔島における観測期間中の有義波高と有義波周期の出現頻度を、図-5に波向別有義波高出現頻度を示す。図から、観測中は波高0.25~0.50 mの波浪が最も出現率が高いことがわかるが、2.0 m強の波浪も10%弱出現している。周期に関しては、6~7.0秒の波浪が卓越しているが、10秒程度の波浪も10%程度出現していることがわかる。波向きはSE~SSE方向に集中しており、湾口方向から波浪が伝播して来ることがわかる。図-6に、観測期間中の波高の経時変化を周期帯別に表示。観測期間中には2度の高波浪時が認められ周期20秒以上の長周期波の波高は通常波の波高の増減と連動していることがわかる。最も波高の増大が著しい9月12日後の高波浪時について、さらに波浪の発達期、ピーク期、減衰期にわけてそれぞれパワー・スペクトルを調べた。

図-7に発達期の9月11日の天気図を示す。東シナ海を中型の台風が北上していることがわかる。図-8に、発達期の港口(St.3)と港内(St.1)におけるパワー・スペクトルと振幅比を示す。図から、周期10秒程度の風波が卓越していること、ならびに6~70秒程度の長周期波が発生していることがわかる。振幅比から、現行の防波堤は

表-1 波浪観測概要

	平成 12 年度		平成 13 年度	
期 間	8 月 17 日～10 月 5 日		8 月 28 日～10 月 24 日	
観測点	St. 1	港内	St. 3	港内
			St. 4	南西側港口
	St. 2	北東側港口	St. 5	港外
			St. 6	港外
	St. 3	南西側港口	St. 7	港外
観測機器	DL-2 Wave Observer		DL-2 Wave Observer	5 台
	Wave Hunter-Σ			
観測方法	通常波	毎偶数時前後 10 分間（計 20 分間）		
		サンプリング間隔 0.5 秒		
	長周期波	連続計測		
		サンプリング間隔 1.0 秒		

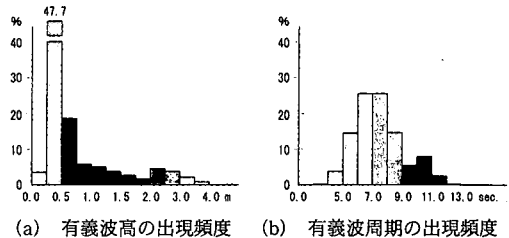


図-4 観測期間中の有義波高および有義波周期の出現頻度(平成12年度)

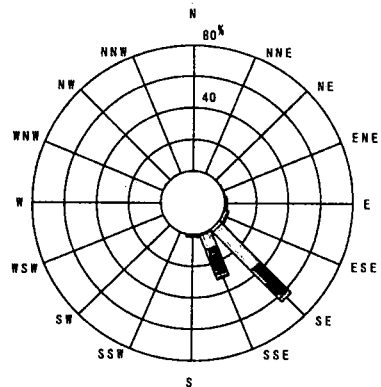


図-5 観測期間中の波向別有義波高出現頻度(平成12年度)

風波などの短周期成分に対しては静穏効果が高いものの、長周期成分に対してはあまり効果があるとは言えないことがわかる。これらの結果を基に、周期20秒以下を通常波成分、20秒以上を長周期波成分と定義する。平成13年度の波浪観測データについては、20秒をしきい値と

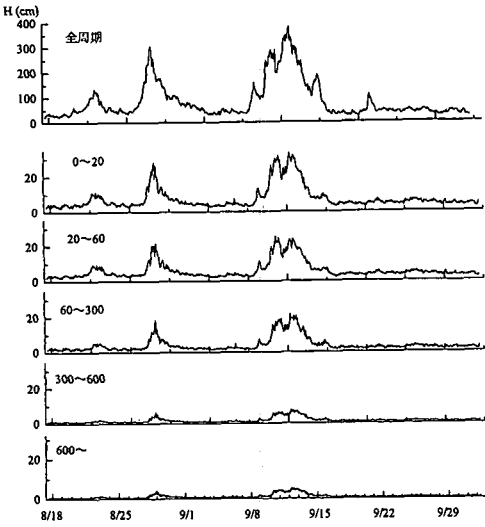


図-6 観測期間中の周期帯別波高時系列データ (平成12年度)

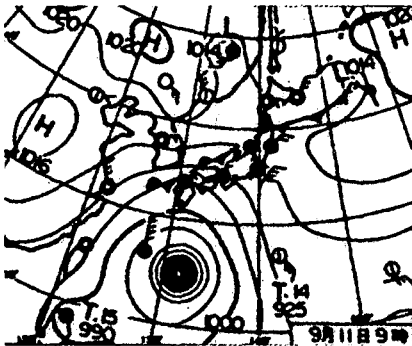


図-7 発達期における天気図 (平成12年度9月11日)

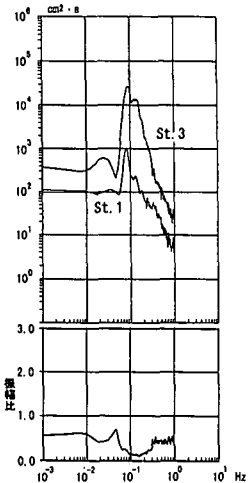


図-8 発達期における港内 (St. 1) と港口 (St. 3) でのパワー・スペクトル

表-2 波浪諸元 (平成13年度9月10日)

		$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)
通常波	枇榔島	1.37	9.7
	St. 4	0.15	6.4
	St. 5	1.08	9.0
長周期波	St. 5	22.5 cm	58.8

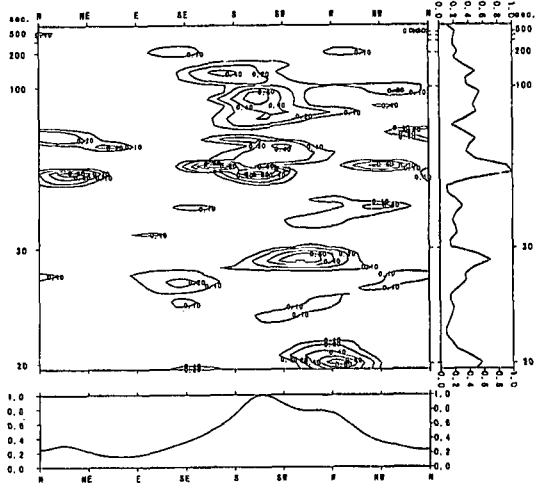


図-9 長周期成分の方向スペクトル (発達期: 平成13年度9月9日14:00, St. 5)

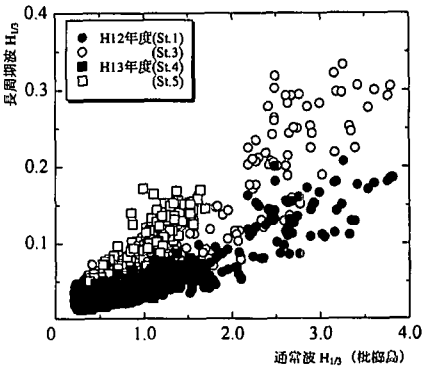


図-10 通常波の波高と港内外の長周期波の波高の相関関係

してFFTによってフィルタリングを行った。平成13年度は観測期間中に3回の高波浪時が認められた。そのうち、最も顕著な1回目の高波浪時について、波浪データをもとにゼロ・アップ・クロス法によって通常波成分と長周期波成分について波浪諸元を求めた。表-2にその結果を示す。1回目の高波浪時の発達期にあたる9月9日において、港口 (St. 5) における長周期成分の方向スペクトルを図-9に示す。図から、周期6~70秒の長周期波が最も卓越しており、ほぼS方向から、すなわち湾口方向から伝播してくることがわかる。

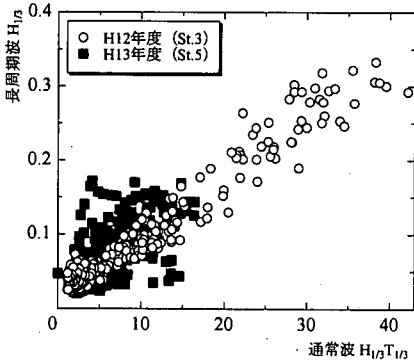


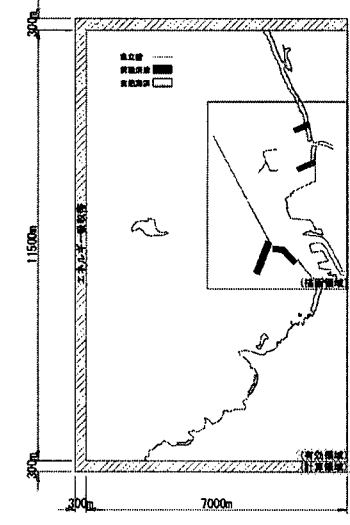
図-11 港口 (St. 3, 5) における長周期波高と通常波の特性量との関係

図-10 に、沖合いの枇榔島における通常波の有義波高 $H_{1/3}$ と港内 (St. 1, St. 4) および港口 (St. 3, St. 5) の長周期波の有義波高 $(H_L)_{1/3}$ との相関を示す。図において、黒いプロットが港内、白いプロットが港口におけるデータを示す。図から、 $(H_L)_{1/3}$ はいずれも枇榔島の $H_{1/3}$ と強い相関が認められる。また、とくに港内の長周期波高 $(H_L)_{1/3}$ は顕著な相関があることがわかる。図-11 に、港口 (St. 3, 5) における長周期波高 $(H_L)_{1/3}$ と通常波の特性量 $H_{1/3}/T_{1/3}$ との関係を示す。図から、とくに平成 12 年度の観測において $(H_L)_{1/3}$ と $H_{1/3}T_{1/3}$ はほぼ線型関係にあることがわかる。平成 13 年度は観測期間中に暴浪が発生せず、 $(H_L)_{1/3}$ 、 $H_{1/3}$ とともに小さいために線型関係が弱いと考えられる。

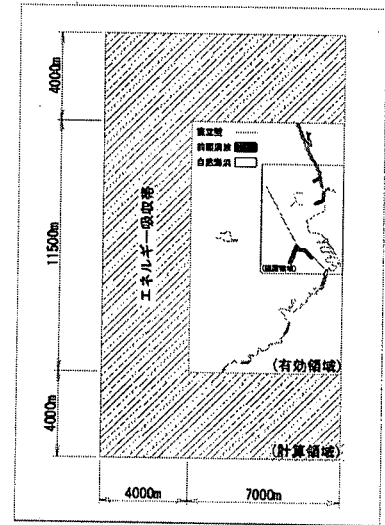
4. 数値シミュレーション

長周期波の伝播プロセスと港内の波浪状況をより詳細に把握し、その抑制の対策を考案するために数値シミュレーションを行った。シミュレーションは、通常波と長周期波を対象としてそれぞれ行い、基礎方程式には浅海域においていずれの波浪計算も行える修正ブシネスク方程式 (港空研 非線型波浪モデル NOWT-PARI ver 4.6) を用いた。図-12(a), (b) に計算領域の概要を示す。エネルギー吸収帯には高次型スポンジ層 (平山ら, 2002) を、自然海浜においては海岸モデルを用いた。表-3 に計算条件を示す。

図-13 に、通常波に対する計算結果の一例として、有義波高の平面分布を示す。沖側境界において $H_{1/3}=2.0$ m で入射した波浪は、志布志港周辺で 1.50 m 程度とさほど減衰せずに伝播する。港内では防波堤による静穏効果によって 0.20 m と大きく減衰する。この結果は、表-2 に示した波浪観測結果とほぼ一致しており、本計算結果の妥当性を示す結果といえる。図-14 に、長周期波に対する計算結果の一例として、港周辺部における平面



(a) 通常波についての計算領域



(b) 長周期波についての計算領域

図-12 計算領域の概要

波高分布を示す。計算領域の左方から水平に入射した長周期波が、沖側防波堤や自然海浜において SE 方向に反射し、その方向に重複波が形成されている様子がわかる。また、港内においても長軸方向に周期的な波高分布が認められ、重複波が形成されていると考えられる。画像解析を行った係留船舶やフェリーが接岸する若浜埠頭周辺は、南西側港口から侵入した長周期波が埠頭周辺で回折し、岸壁に沿って重複波を形成している。その接岸位置付近では重複波の節が存在しており、定在的に水平流速の振幅が大きい場所となっている。そのため、係留系と共振しやすい位置であることがわかる。

表-3 計算条件

波浪条件						地形条件		計算条件		
波浪種別	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	波向	S_{max}	成分波数	計算領域	地形	差分格子幅	時間積分間隔	計算時間
風波	2.0 m	10 sec	SSE	25	512	7,300 m×8,000 m	冲防波堤延長(約 2,900 m)	10 m	$T_{1/3}/200$	$240 T_{1/3}$
長周期波	0.2 m	60 sec		一方向	1	11,000 m×19,500 m	+ 平成 13 年度整備地形	25 m	$T_{1/3}/80$	$40 T_{1/3}$

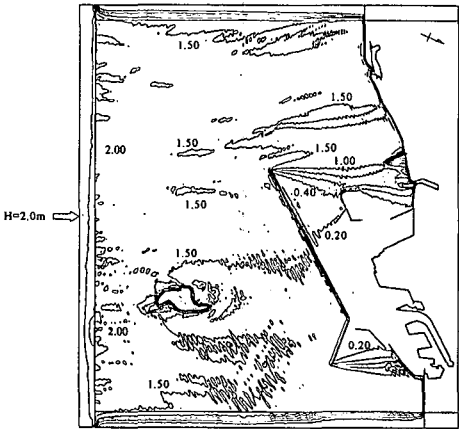


図-13 通常波の計算における有義波高の平面分布

5. 結 論

志布志港における係留船舶の長周期動揺の原因について、現地観測ならびに数値シミュレーションによって検討を行った。画像解析から、東シナ海を低気圧が通過する際に周期 6 ～ 70 秒程度の長周期動揺が発生していることがわかった。波浪観測の結果から、その場合湾内は波浪の発達期にあたり、周期 10 秒前後の風波とともに周期 6 ～ 70 秒程度の長周期波が発生していることがわかった。また方向スペクトルの解析結果から、この長周期波は湾口方向から伝播してくることがわかった。数値シミュレーションの結果、長周期動揺が問題となっている若浜埠頭周辺では、侵入した長周期波が埠頭に沿って回折するとともに、港奥の岸壁からの反射波によって重複波を形成していることが明らかとなった。

謝辞：本研究を進めるにあたりご協力頂いた国土交通省九州地方整備局志布志工事事務所の方々に深く感謝致します。

参 考 文 献

関本恒浩 (1999)： 港湾内外の長周期波の特性とその評価に関す

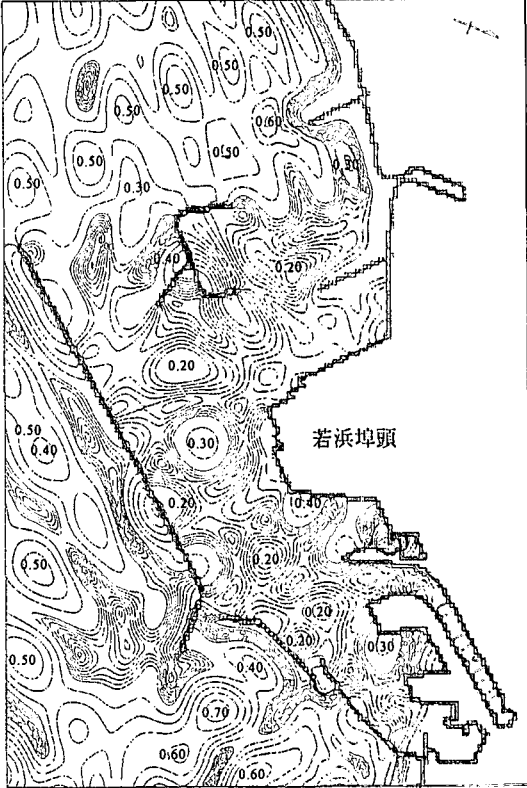


図-14 長周期波の計算における有義波高の平面分布

る研究, 中央大学大学院学位論文, pp. 6-13.
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 (1977): 現地連続観測による沖合い長周期波の発達・減衰過程と港内係留船舶の動揺, 海工論文集, 第 44 巻 pp. 226-230.
平山克也・平石哲也 (2002): プシネスクモデルにおける目標反射率の設定法とその港内波高分布計算に対する適用性, 海工論文集, 第 49 巻 pp. 676-680.
吉田明徳・村上啓介・入江 功 (1999): 現地観測と数値解析による細嶋港の湾内水面振動と係留船舶動揺特性, 海工論文集, 第 46 巻 pp. 306-310.