

鹿島港における長周期波の長期観測

Observation of Long Period Waves in Kasima-Port

平石哲也*・藤咲秀可*・近藤充隆*・佐藤恒夫**・山口孝市**

Tetsuya HIRAISHI, Hideyosi FUJISAKU, Mitsutaka KONDOH, Tsuneo SATOH and Kouichi YAMAGUCHI

Long period waves with periods of 1 ~ 5 minutes sometimes terminate the cargo handling and cause the break of mooring ropes in Japanese several major ports. Such damages sometimes occur in Kasima-port located at the central part of Japanese main island. A series of field observation for long period wave height was carried out in the port employing several wave gages. The observation results demonstrate that long period waves induce the large surging motion by resonance between the wave agitation and a mooring system consisting of vessel and elastic mooring ropes. The variation of bounded wave components included in the long period waves is also investigated in the paper.

1. はじめに

近年、細島港、苫小牧港および能代港等では、長周期波による荷役障害や係留ロープ切断の事故が生じている。これらの港では5万トクラス船舶が荷役に支障をきたすような動揺を生じ、そのサージングの振幅が数メートルに及ぶことが確認されている(平石ら, 1996)。鹿島港でも近年大型船舶の入港にともない、大きな動揺のため荷役が中断されたり、ロープが切断される事故が発生している。鹿島港ではこれまで長周期波の現地観測は行われておらず、これらの荷役障害の原因が長周期波によるものかどうか特定できていない。そこで港内の多点で同時に現地の波浪観測を行い長周期波の性質を解明することを試みた。また問題になっているバースに係留された船舶の動揺を観測し、その動揺周期、長周期波との相関等を検討した。

2. 観測の概要

(1) 波浪観測

図-1に鹿島港の現地観測点の位置を示す。現地観測では、港外のP.1および港内のP.2とST.1, ST.2, ST.3に超音波式および水圧式の波高計を設置して、1996年9月18日~1996年10月16日での29日間の連続波形データを取得した。観測点の水深はP.1が-23.4m, P.2が-10.0mで、またST.1, ST.2, ST.3は全て-14mである。

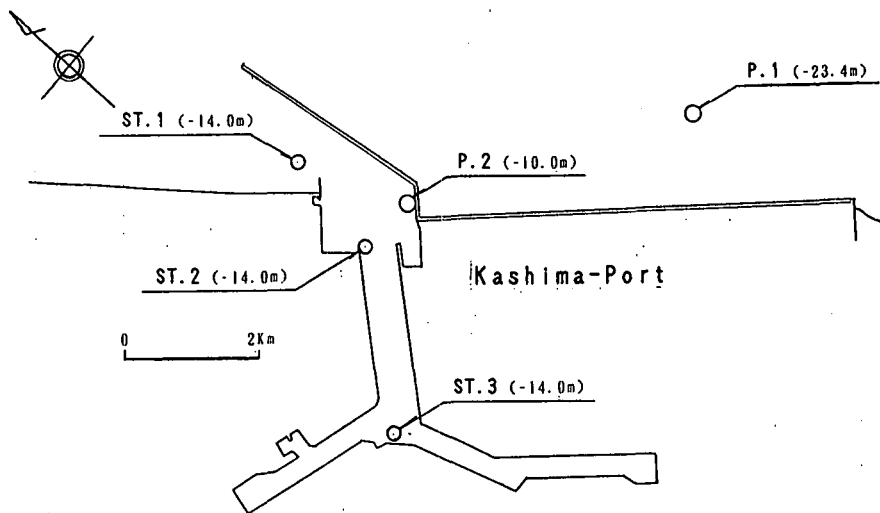
表-1に今回行った観測のデータ収集状況の詳細を示す。P.1とP.2では港外と港内の波浪の相関関係を調べている。またST.1, ST.2, ST.3では港内の波浪の伝播経路や、港内での波高変化を調べている。解析ではまず観測結果の時系列からゼロアップクロス法により有義波高($H_{1/3}$)と有義波周期($T_{1/3}$)を求めた。次に連続波形データをスペクトル解析すると、周波数スペクトルが得られる。このうち周期30秒以上の成分波からなるスペクトルを抽出し、逆FFTによって波形を再構成する。こうして得られた長周期波形を再度ゼロアップクロス法で解析して、長周期波高(H_L)と長周期波周期(T_L)等を求めた。

(2) 船体動揺観測

船体の動揺をビデオで撮影し、ビデオによる解析を行った。図-2にビデオ撮影時の船舶の係留状態を示す。図中の矢印の位置にビデオカメラを設置した。船体にはあらかじめマーカーを取り付けておき、ビデオ画像中のマーカーの横および縦方向運動から、サージングおよびヒービングの動揺量を求めた。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部(239 横須賀市長瀬3-1-1)

** 正会員 運輸省第二港湾建設局 鹿島港工事事務所



図－1 観測地点

表－1 観測機械と項目の一覧

観測地点	計測器の名称	観測期間	観測項目	1ケース当たりの長さ	サンプリング	データ数
OFF (P.1)	超音波式波高計	'96.09.17～'96.10.16	波高 波向 流速2成分 長周期波	連続観測 (119分/2時間)	0.5秒	14280
LPG (P.2)	超音波式波高計	'96.09.17～'96.10.16	波高 波向 流速2成分 長周期波	連続観測 (119分/2時間)	0.5秒	14280
ST.1	超音波・水圧 複合式波高計	'96.09.17～'96.10.16	波高 流速2成分 長周期波	20分/2時間 連続観測(120分/2時間)	0.5秒	2400
ST.2	超音波・水圧 複合式波高計	'96.09.17～'96.10.16	波高 流速2成分 長周期波	20分/2時間 連続観測(120分/2時間)	0.5秒	2400
ST.3	超音波・水圧 複合式波高計	'96.09.17～'96.10.16	波高 流速2成分 長周期波	20分/2時間 連続観測(120分/2時間)	0.5秒	2400
					1.0秒	7200



図－2 船体動揺の撮影状況

撮影対象	: 穀物専用運搬船
重量トン	: 59,076トン
全長	: 222.99m
荷揚げ期間	: 9月17日～9月20日

3. 観測期間中の波高・周期の変化

図－3および図－4にP.1(港外), P.2(港内)における全観測期間の, 全データによる有義波高, 周期および長周期波の有義波高, 周期を示す。図－3は有義波高($H_{1/3}$)と有義波周期($T_{1/3}$)の変化を示す。図－4に長周期波による有義波高($H_{11/3}$)と有義波周期($T_{11/3}$)を示した。図－3, 図－4共に横軸に時間, 上段および下段の縦軸にそれぞれ有義波高, 有義波周期を示した。図－3に示すように, 期間中港外P.1で2.0mを越える高波浪時は9月21日の一回だけで, 比較的穏やかな状態が続いてるといえる。また, 港内P.2で有義波高($H_{1/3}$)が50cmを越えたのは9月21日, 9月22日, 10月2日, 10月8日, 10月16日の5回だけであり, 港内も比較的穏やかな状態であったことがわかる。また港外と港内を比較すると, $H_{1/3}$ は港内で半分程度となり, 防波堤の効果が高いことがわかる。有義波周期($T_{1/3}$)は, 港内では小さく数秒程度である。

図－4の長周期波高の変化を見ると, 静穏時は港内・港外ともにほとんど同じ波高になり大きな変化はない。ただし9月22日前後の高波浪時は, 港外の方が高く1.3m以上になっている。長周期波の周期は港内で80～100秒程度であるが, 港外では60～80秒で, 港内の方が長い。これは港内においては港湾の副振動モードの影響等により, やや周期の長い振動成分が生じたためではないかと思われる。

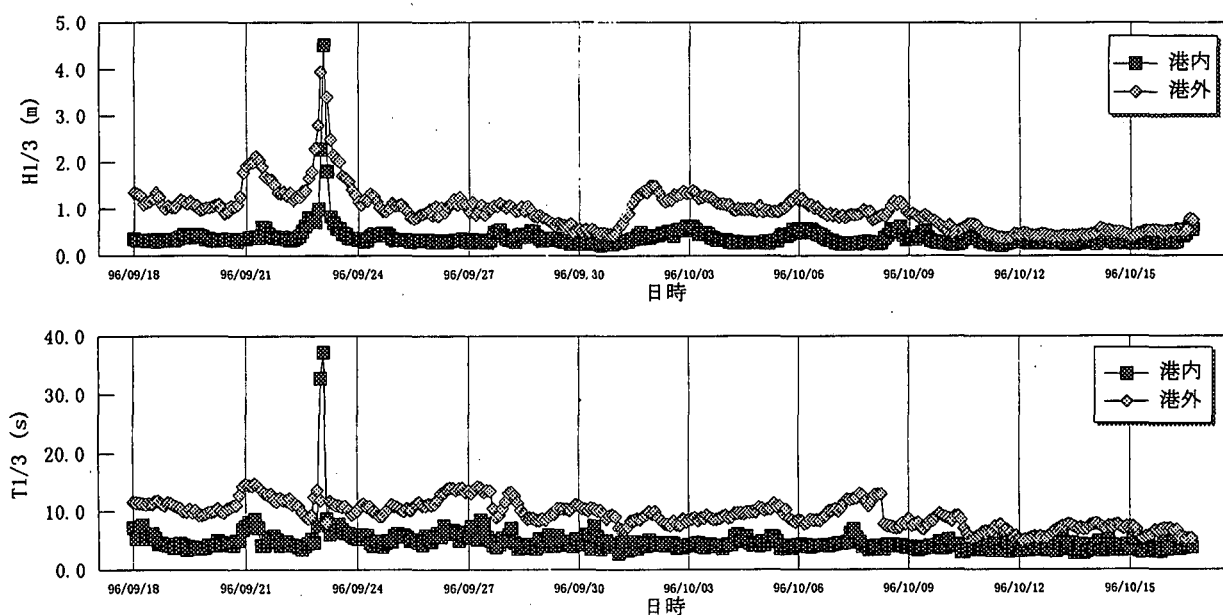


図-3 風波成分を含めた有義波高・周期の変化

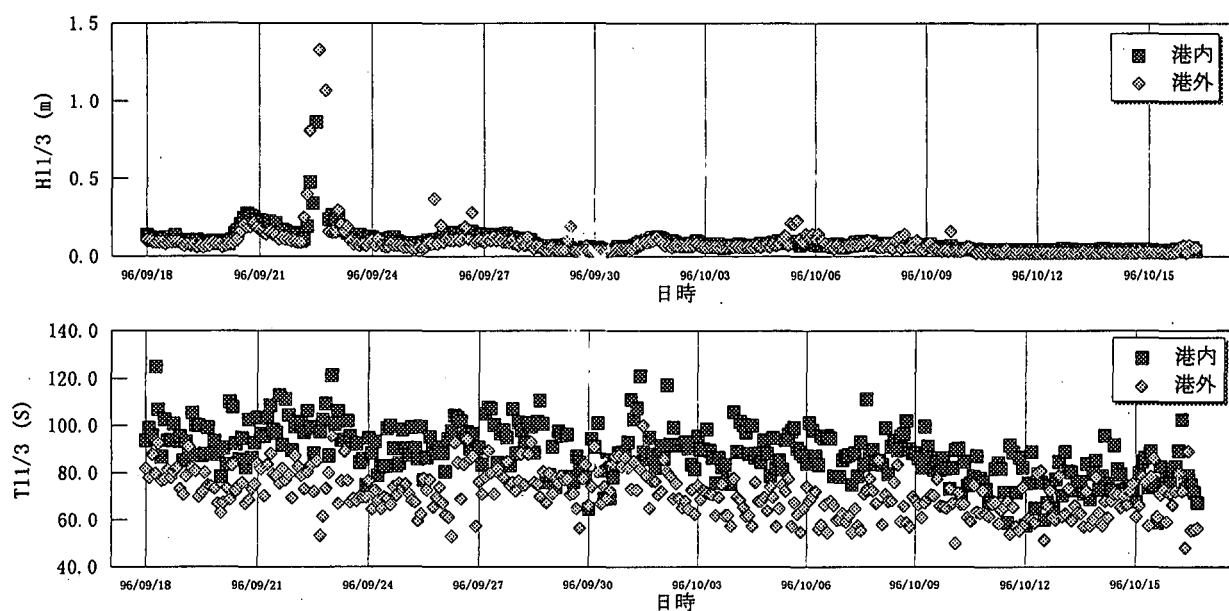
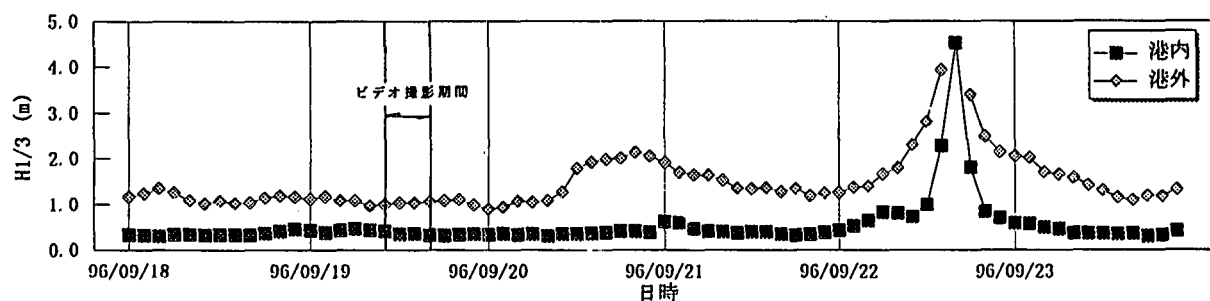


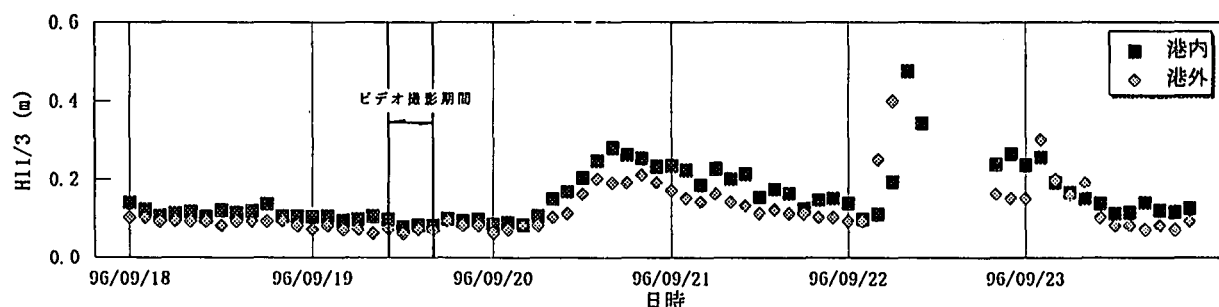
図-4 長周期波の波高・周期の変化

4. 船体動揺時の波高変化

図-5は船体動揺のビデオ撮影を行った前後の、9月18日～9月23日の港内と港外の(a)風波を含めた全成分の波高および(b)長周期波高の変化を示したものである。横軸に時間、縦軸に有義波高を示している。また、矢印の期間内がビデオ撮影を行った期間で、撮影期間は9月19日11:00～9月19日16:45の5時間45分間である。風波、長周期波共に穏やかな状態で、 $H_{11/3}$ は50cm以下であった。ところが後述の図-7に示されるように、船体のサージ振幅が片側で1m近くになっている。したがって波高が比較的小さくても船体の動揺量は大きくなり、従来から言われているように、係留船との共振関係によって大きな振幅が生じるものと考えられる。すなわち長周期波は、波高がわずかでも、大きく船体を動かす場合があり、年間100パーセントに近い荷役稼働率を得るためには、風波に対する対策だけでなく、長周期波を考慮した港湾計画の策定が重要であることがわかる。



(a) 風波成分



(b) 長周期波

図-5 ビデオ解析時における波高の変化

5. 船体動揺の特性

図-6はビデオ解析による船体動揺の様子を、サージングとヒービングに分けて示した。図-6(1)は横軸に時間、縦軸にサージングをとり、図-6(2)は横軸に時間、縦軸にヒービングの動揺量を示した。ヒービングの振幅は小さく、その周期は短い。これに対し、図-6(1)に示すサージングの動揺は振幅が最大で1m程度になっている。またその周期は長く、90秒程度である。したがってヒービングは主に波浪成分による直接の船体の上下運動を示しているが、サージングは船体と係留ロープからなる系が有する固有振動による共振によって起こる運動であると考えられる。

図-7は岸壁前面のST.3の長周期波と船体動揺のスペクトルを比較したものであり、横軸に周波数(Hz)、縦軸に波のエネルギー密度 $S(f)$ を表している。このグラフが示すようにサージ方向の動揺のピークは約 $f=10^{-2}$ Hzの時である。長周期波スペクトルのピークは約 $f=10^{-2}$ Hzである。したがって船体動揺の周期は長周期波の周期と一致していることがわかる。

図-8は周波数スペクトルのエネルギー比より求めた増幅率の変化を示す。増幅率は $f=10^{-2}$ Hzで顕著なピークを示し、共振現象が生じていることがわかる。すなわち鹿島港においては、振幅の大きいサージ動揺量は長周期波と船舶係留系の固有周期が一致することによって生じる共振現象が主因となっていることがいえる。

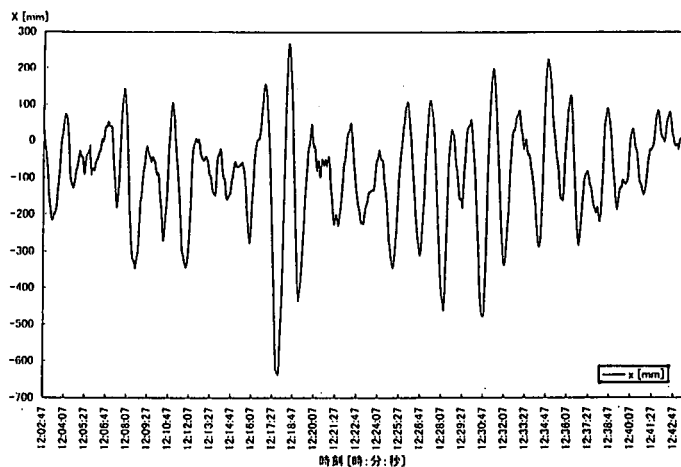
港外の長周期波の主成因は、波群に拘束されたセットダウン波であると考えられている(平石ら, 1996) セットダウン波(拘束波)は Longuet-Higgins & Stewart(1962) によると次式で求められる。

$$\eta_1 = -\frac{S_s}{\rho(g h - C_g^2)} \quad (1)$$

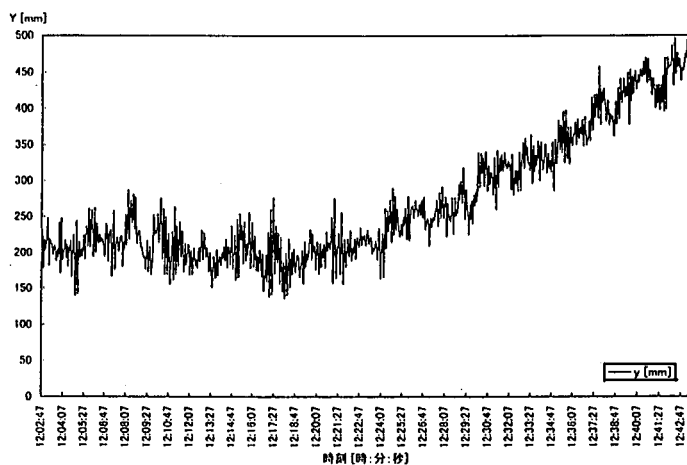
$$S_s = \frac{1}{2} \rho g a^2 \left(\frac{2C_g}{C} - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

ここに、 η_1 : 長周期波の水位変動、 g : 重力加速度、 a : 風波の片振幅、 C : 波速、 C_g : 群速度、 h : 水深、 ρ : 水の密度である。

不規則波な波群の場合には、一波毎に個別の η_1 を求め、観測期間中の連続した η_1 を求めることが出来る。



(1) (サージング)



(2) (ヒーピング)

図-6 船体動揺

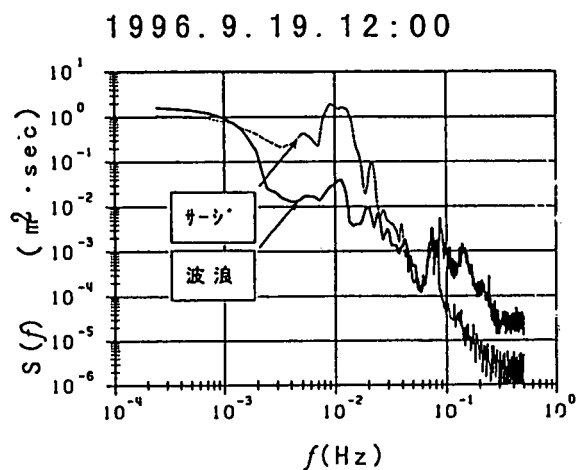


図-7 長周期波と船体サージ運動のスペクトル

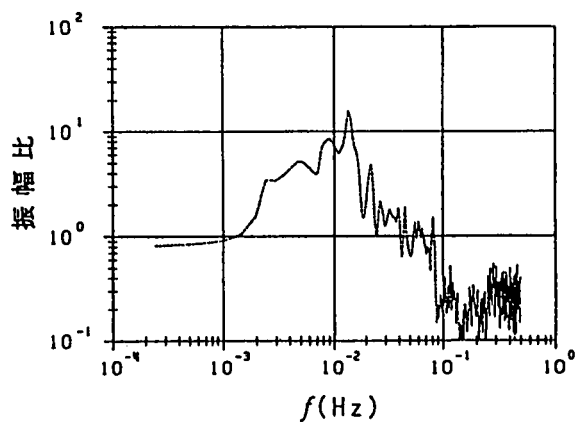
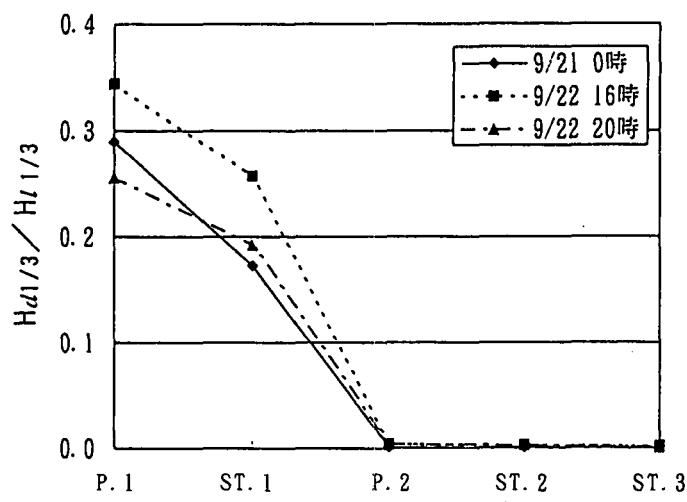


図-8 増幅率の変化

図－9は長周期波に含まれる拘束波成分の割合を各観測点で示したものである。 $H_{d1/3}$ が理論的に求められる拘束波、 $H_{l1/3}$ が観測水位より求められる長周期波である。 $H_{d1/3} / H_{l1/3}$ について港外のP.1では0.3程度であり、この場所では長周期波に含まれる拘束波の割合はそれほど大きくないことがわかる。この比率は港奥へ行くにしたがって減少し、P.2、ST.2、ST.3では、ほとんど0である。したがって港奥部では長周期波は拘束波としてではなく自由進行波として伝播していることがわかる。



図－9 拘束波成分の占める割合の変化

6. まとめ

- 以上の結果から判明したことについてまとめると次の様になる。
1. 鹿島港では、周期 100 秒程度の長周期波が生じている。
 2. 長周期波と船舶～ロープ系の共振現象により、大きなサージ動揺が生じる。
 3. 長周期波の主成因である拘束波の割合は港内で次第に小さくなる。

参考文献

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 第35巻 第3号
 Longuet-higgins M.S. and R.W.Stewart (1962) : Radiation stress and mass fransport in gravity waves , with application to 'surf beats' , j.of Fluid Mechanics , Vol. 13 , NO. 4 , PP. 481-504.