

作業船の動揺計測装置の開発および現地実船実験

Development of Observation System of Motions for Working Craft and its Field Test

上田 茂*・白石 悟**・米山治男**・谷口武志***・伊藤公明****・小斉弥祐****

Shigeru.Ueda, Satoru.Shiraishi, Haruo.Yoneyama, Takeshi.Taniguti, Kimiaki.Ito, Yasuke.Kosai

In the marine construction work, many working crafts are used under the severe wave conditions. As for working crafts, motions influence on the efficiency of works. Up to this time, the judgment to continue or suspend the work is done by men based on the experience.

In this study, the system which observes the motions of working craft and displays the motions is developed. The field tests to evaluate the accuracy of this system were carried out in offshore site of the Port of Sendai.

This system supports the judgment for execution or interruption in marine construction works.

Keywords: Observation System of Ship Motions, Working Craft, Field Observation

1. はじめに

沿岸域における港湾及び海洋工事においては、厳しい自然条件の中で多くの作業船を使用しているが、工事は常に気象・海象条件に左右される。作業船の稼働に関しては、船体の動揺が作業の制約条件となるが、従来は乗員の経験に基づいて作業の継続および中止の判断がなされていた。また、荒天時には作業海域から安全な海域に避難曳航されるが、これまでは、その際の動揺量については定量的に把握されていなかった。

この様なことから、作業船の動揺を計測し、これを常にモニターに出力することによって、作業時および避難曳航時等における判断の一助となるシステムを開発することが必要であると考えた。

2. 動揺計測装置の構成及び機能

2. 1 機器構成

図-1は動揺計測装置の構成を示したものである。動揺計測装置は、船体動揺を検出する慣性測定装置(TMOS-2000)と、データ処理コンピュータから構成される。慣性測定装置は、船体の方位角、ローリング角、ピッチング角、3軸回りの角速度及び3軸方向の加速度を検出する装置で、センサユニット・演算ユニット及び磁気方位センサから構成される。センサユニットには、振動ジャイロ(レートセンサ)及び加速度計がそれぞれ3個ずつ組み込まれている。本装置は、これと方位計測のための磁気方位センサまたはジャイロコンパス1個の合計7個のセンサから構成されるストラップダウン方式の測定装置である。ストラップダウン方式とは、水平な台にセンサを取り付けるプラットフォーム方式(機械的に水平面を作る方式)と異なりセンサを船体に直接取り付け、7個のセンサからの信号に基づいて、演算ユニット内部に仮想のプラットフォームを作る方式である。7個のセンサ出力は演算ユニット内部で、航行体固定座標系より地球座標系に変換する座標変換マトリックスを用いて演算処理されて、地球座標に対する航行体の方位角、ローリング角、ピッチング角などが求められる。

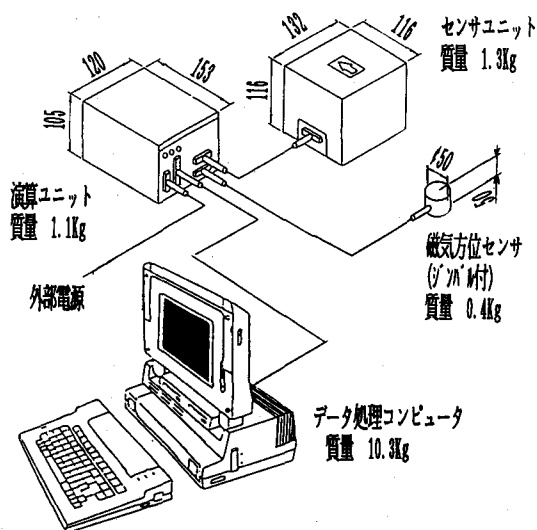


図-1 動揺計測装置の構成図

* 正会員 鳥取大学教授 工学部土木工学科(680 鳥取市湖山町南4丁目101)

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 構造部

*** 社団法人日本海上起重技術協会

**** 株式会社トキメック マリンシステム事業部

図-2は本システムの構成を示したものである。データ処理コンピュータでは慣性測定装置からの出力信号（3軸方向の加速度、ローリング、ピッチング、ヨーイング）をA/D変換し、演算処理を行った後に、時系列波形、統計値のトレンド、統計値の数値をコンピュータの画面に表示し、ハードディスクにデータを保存する。

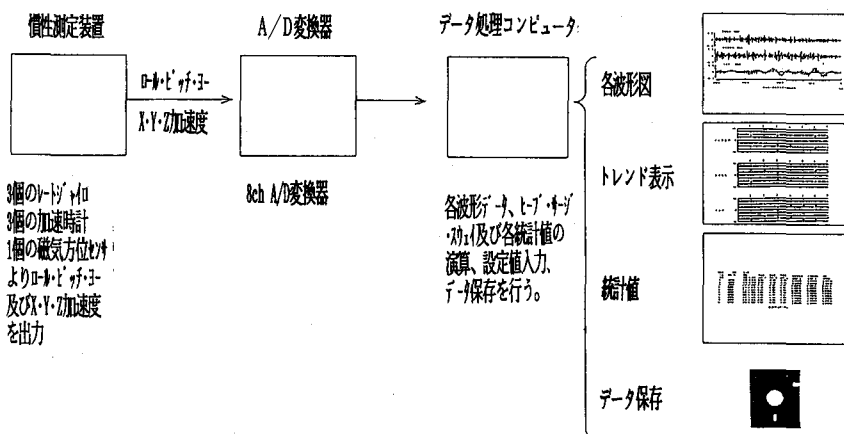


図-2 システム概要図

2. 2 計測システムの機能

データ計測システムは以下の機能を有する。

1) 計測及び演算処理

以下の①、②についてデータ計測を行い、処理コンピュータによる演算処理により、③、④が求められる。

- ① ローリング、ピッチング、ヨーイング
- ② X方向（前後方向）加速度、Y方向（左右方向）加速度、Z方向（上下方向）加速度
- ③ サージング、スウェイング、ヒーピング
- ④ 船首、船尾、舷側の上下動

統計処理を行い有義値を求めるためには、計測時間は20分ぐらいが適当と思われるが、サージング、スウェイング、ヒーピングの変位については加速度記録から積分処理して求める必要があるので、出来る限りリアルタイムに近いシステムを構築するために、一つの計測時間は409s（約7分）とした。すなわち、サンプリング・タイムを0.2s、データ数を2048個とした。サージング、スウェイング、ヒーピングの変位は、船体の3軸方向の加速度記録をFFT（高速フーリエ変換）処理し、周波数上で2階積分して求める。2階積分の際、周波数範囲を0.05～0.5Hzとしている。

2) 統計処理

計測データ及び演算処理により求めたデータについて、約7分毎にゼロアップクロス解析を行い、以下の統計量を求める。

- ・最大値
- ・最小値
- ・平均値
- ・最大両振幅
- ・有義両振幅
- ・有義周期
- ・1/10最大両振幅
- ・1/10最大周期

3) データ保存

以下のデータを処理コンピュータのハードディスクに保存する。

- ・統計値データ
- ・海域・海象データ

4) データ入力機能

以下の項目につきキーボードから入力できる。入力したデータは、後に参照できる。

- ① 海域・海象の入力 : 海域データ、波高、風速等の海象条件を情報として入力できる。過去の入力データを参照することができる。
- ② 限界値の入力 : 動揺量の限界値を設定しグラフ上に表示できる。
- ③ 船体諸元の入力 : 船体の諸元（センサ取り付け位置を含む）を入力することにより、船首、船尾、舷側の動揺を表示できる。

5) 画面表示機能

以下の項目を処理コンピュータの画面に表示することができる。

- ① ローリング、ピッチング、ヨーイングの時系列波形データ
 - ② X、Y、Z 軸の加速度の時系列波形データ：X、Y、Z 軸の加速度の時系列波形データをリアルタイムに表示することができる。
 - ③ サージング、スウェイング、ヒービングの時系列波形データ
 - ④ 船首、船尾、舷側の上下動の時系列波形データ
 - ⑤ 統計値のトレンド表示
 - ⑥ 統計値の数値データ
 - ⑦ 保存データのファイル一覧
- ：ローリング、ピッチング、ヨーイングの時系列波形データをリアルタイムに表示することができる。
 - ：積分処理して求めたサージング、スウェイング、ヒービングの時系列波形データを過去 7 分間さかのぼって表示することができる。
 - ：船首、船尾、舷側の上下動の時系列波形データを過去 7 分間さかのぼって表示することができる。
 - ：動揺量の統計値データをトレンド表示することができる。また、過去の計測記録の統計値データのトレンド表示を日時を指定して参照できる。
 - ：動揺量の統計値の数値データを表示する。また、過去の計測記録の統計値データを日時を指定して参照できる。
 - ：保存ファイル（統計値、海域・海象データ）のファイル一覧を表示することができる。

3. 現地実船実験

3. 1 観測概要

1) 観測地点および対象船舶

2. で示した動揺計測システムの実用性を確認するために、平成 5 年 9 月 2 日、塩釜港仙台港区沖合において現地実船実験を行った。図-3 は動揺計測時の航行軌跡を示す。航行軌跡は計測時に本船に搭載した GPS の記録に基づくものである。GPS による航行記録から求めた船速（対地速度）は約 6 ノットであった。

表-1 は実船実験を行った第 8 東華丸の船体諸元を示す。表には、船体の主要寸法と重心位置、および動揺計測装置の検出部である慣性測定装置のセンサ取付位置を示している。写真-1 は同船の外観形状である。試験時の载荷状態は空載状態で、起重機は左舷側に倒した状態で行った。

図-4 は、第 8 東華丸の構造および計測器の配置を示したものである。センサユニットはブリッジ内に、磁気方位センサは右舷側の手すりに設置した。センサユニットは 2 組搭載し、方位計測には、それぞれ、磁気方位センサとジャイロコンパスを用いた。ただし、磁気方位センサを用いたシステムを正システムとし、ジャイロコンパスを用いたシステムを副システムとし、両者の計測記録を比較することにより、本計測システムの安定性を確認することにした。

センサの取付位置は重心位置と異なるが、サージング、スウェイング、ヒービングの動揺量は動揺計測装置内で補正計算を行い重心位置に換算されモニタに表示される。

2) 観測方法

動揺計測に先だって、磁気方位センサの自差修正を実施した。磁気方位センサの周囲には、地磁気の他に船舶自体が大きな磁性体であるため、着磁等により固有の磁界を持っており、この影響により正確な方位が検出されない。この影響を取り除くことを自差修正という。

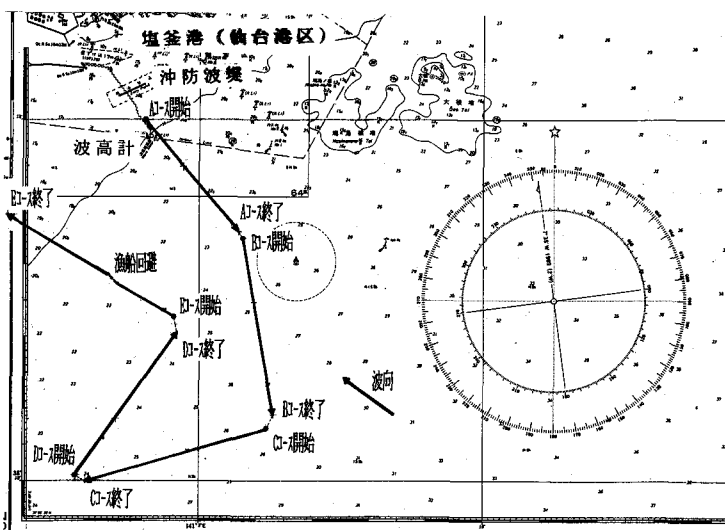


図-3 航行コース

表-1 船舶の諸元及び計器設置位置

船名	第 8 東 華 丸
総 ト ン 数	5 7 9 (t)
載 荷 重 量	7 9 7 (t)
満 載 排 水 量	1 6 7 7 (t)
全 長	5 1. 2 1 (m)
垂 線 間 長	4 7. 2 0 (m)
型 幅	1 6. 5 0 (m)
型 深	3. 0 0 (m)
満 載 喫 水	2. 8 1 (m)
計 測 時 喫 水	1. 2 0 (m)
重 心 位 置 x	1. 3 9 (m)
重 心 位 置 z	3. 1 4 (m)
センサ位置 x	- 1 3. 0 0 (m)
センサ位置 y	0. 0 0 (m)
センサ位置 z	9. 2 0 (m)

注) 重心位置、センサ位置の極性を以下に示す。

項 目	正 極 性
重 心 位 置 x	船体中央から前方
重 心 位 置 z	船底から上方
センサ位置 x	船体中央から前方
センサ位置 y	船体中央から右側
センサ位置 z	船底から上方

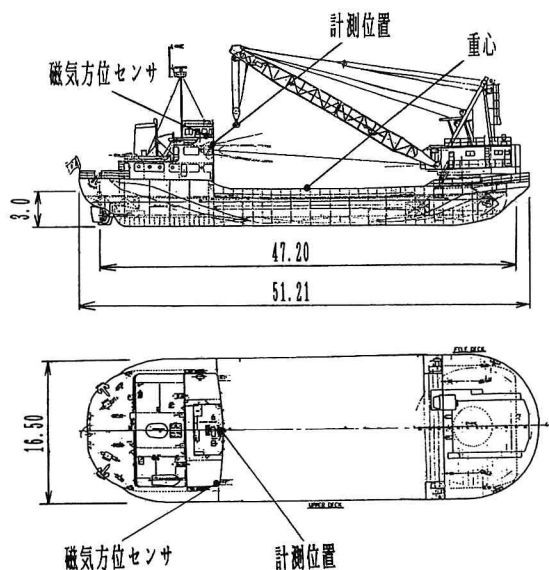


図-4 計測機器の配置図

計測は航行時、係留時について行い、午前（9時12分～11時44分）に航行時の動揺計測、午後（12時24分～13時48分）に係留時の動揺計測を行った。計測は、0.2sのサンプリング間隔で約7分（データ数2048個）を1ケースとして各波向で連続で3ケース（約21分）ずつ計測した。

航行時はコースを変え、図-5のように5方向の波向に対して作業船の動揺を計測した。図中の番号は計測ケース番号である。

係留時の計測では、図-3に示す沖防波堤の波高計の近くで4点のアンカを取り、波に対して縦と横の2方向となるように係留した。しかしながら、縦係留では波向360°を目標にしたが、実際には、約315°であった。また、横係留では波向270°を目標としたが、実際には約290°であった。

表-2は各計測ケースのNから時計回りに計った方位角および船首から時計回りに計った相対波向を示す。表には、磁気方位センサ(MASS)、ジャイロコンパス(TSG)を用いた方位の計測値を示している。

3. 2 観測結果

1) 海象データ

表-3は観測時の気象・海象条件を示したものである。

航行時の波は有義波高約60cm、周期約8s、波向SEまたはESEである。風は8:00が平均風速3.7m/s、風向 NNW、10:00

表-3 観測時の気象、海象条件

時間	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (s)	波向 (°)	風速 (m/s)	風向
7:50- 8:10	0.66	8.1	SE (126)	3.7	NNW
9:50-10:10	0.64	8.4	SE (123)	3.6	NNE
11:50-12:10	0.59	7.8	ESE(118)	6.3	E
13:50-14:10	0.63	6.9	SE (127)	6.9	E

(注)波向の () 内は北から時計回りに計った角度。



写真-1 第8東華丸の外観

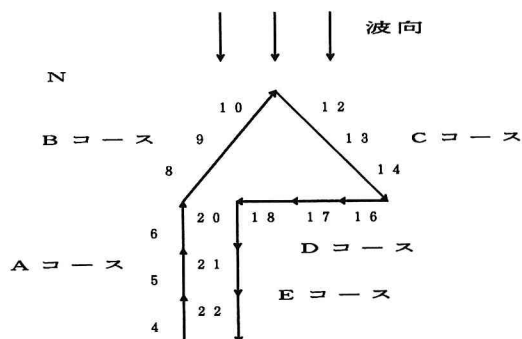


図-5 航行コースと計測ケース番号

表-2 各ケースの船首方位角と相対波向

コース	計測 ケース 番号	相対 波向 (°)	船首 方位角 (MASS) (°)	船首 方位角 (TSG) (°)
A	4	352.0	131.0	136.9
	5	354.6	128.4	131.9
	6	352.6	130.4	133.1
B	8	310.7	172.3	162.5
	9	311.4	171.6	169.3
	10	311.8	171.2	168.4
C	12	226.1	256.9	252.4
	13	228.1	254.9	250.1
	14	226.7	256.3	252.4
D	16	77.9	45.1	40.4
	17	73.3	44.7	39.0
	18	73.5	44.5	39.5
E	20	177.5	300.5	306.4
	21	181.3	296.7	302.7
	22	178.4	299.6	305.4
係留 (向波)	23	314.4	163.6	162.1
	24	314.9	163.1	161.6
	25	315.1	162.9	161.5
	26	315.1	162.9	161.7
係留 (横波)	27	289.6	197.4	-
	28	287.4	199.6	-
	29	288.3	198.7	-

方位角は北から時計回りに計った角度
相対波向は船首から時計回りに計った角度

が平均風速3.6m/s、風向NNEである。

係留時の波高は、航行時とおおむね等しいが、周期が6.9sとやや短くなっている。また、風は平均風速6.9m/s、風向Eであり、航行時に比べてやや強くなっている。

2) 動揺量の統計値

図-6はローリング、ピッチング、ヨーイングの3成分について、最大値、最小値及び最大両振幅、有義両振幅についてトレンド表示したものである。本システムでは、図-6が画面に表示されるので、動揺量の時間的な推移が容易に把握できる。

ローリングはDコース（横波，ケース番号16～18）において、揺れが大きく有義両振幅で約3°を示している。これは、Aコース（向い波，ケース番号4～6）、Eコース（追い波，ケース番号20～22）の両振幅に比べ約2倍である。なお、周期については図示していないが、各ケースとも5～7sであり波向による差はあまり大きくない。係留時のローリングの動揺は航行時と同様に横波の時に大きい。

ピッチングは、ローリングとは逆にAコース（向い波）の時、有義両振幅で約2°と大きく、係留時も同じ傾向になっている。周期については、図示していないが、Bコース（左45°前方からの波）の時には5.7sであり短い、Eコース（追い波）では11.7sであり、Bコースの2倍の周期になっている。追い波のときには、出会い周期が長くなるので、ピッチングはその影響を受けているものと思われる。

ヨーイングは、舵取りの影響を受けるが、Cコース（左45°後方からの波）のとき、動揺が大きくなっている。図示していないが、周期は100sから400sと非常に長くなっている。また係留時は横波のときに有義両振幅が約3°であり、向い波のときより大きくなっている。

3) 波向による動揺量の相違について

図-7は相対波向と動揺量との関係を示したものである。回転成分については、縦軸の動揺量は有義振幅を船の主要寸法と波高により無次元化している。ローリングについては、有義両振幅に船の半幅（ $B/2$ ）を乗じ、有義波高（ $H_{1/3}$ ）で除している。すなわち、無次元化した値は単位有義波高当たりのローリングによる舷側位置の上下動の有義両振幅を示している。ローリングに関しては横波（相対波向90°、270°）のときに他の波向のときに比べて動揺量が大きくなっている。

ピッチングについては、船の長さの半分（ $L/2$ ）を乗じて船首または船尾位置におけるピッチングによる上下動の有義両振幅を図示している。相対波向180°、360°付近の動揺量は波高の1.5倍程度になっている。また、相対波向90°、270°付近では、波向180°または360°付近に比べて動揺量が小さいが、動揺量がゼロにならないのは波の多方向性によるものであると考えられる。

ヨーイングについては、波向に対する有意な差異はみられない。計測では目標方位を定め、各方向について約20～25分間航行したが、波、潮流、風などの影響を受けて方位が多少ずれる。この方位のずれがヨーイングとして計測されている。

4) 磁気方位センサとジャイロコンパスの比較

すでに示したように、計測では磁気方位センサとジャイロコンパスを用いた正副の2計測システムを搭載した。

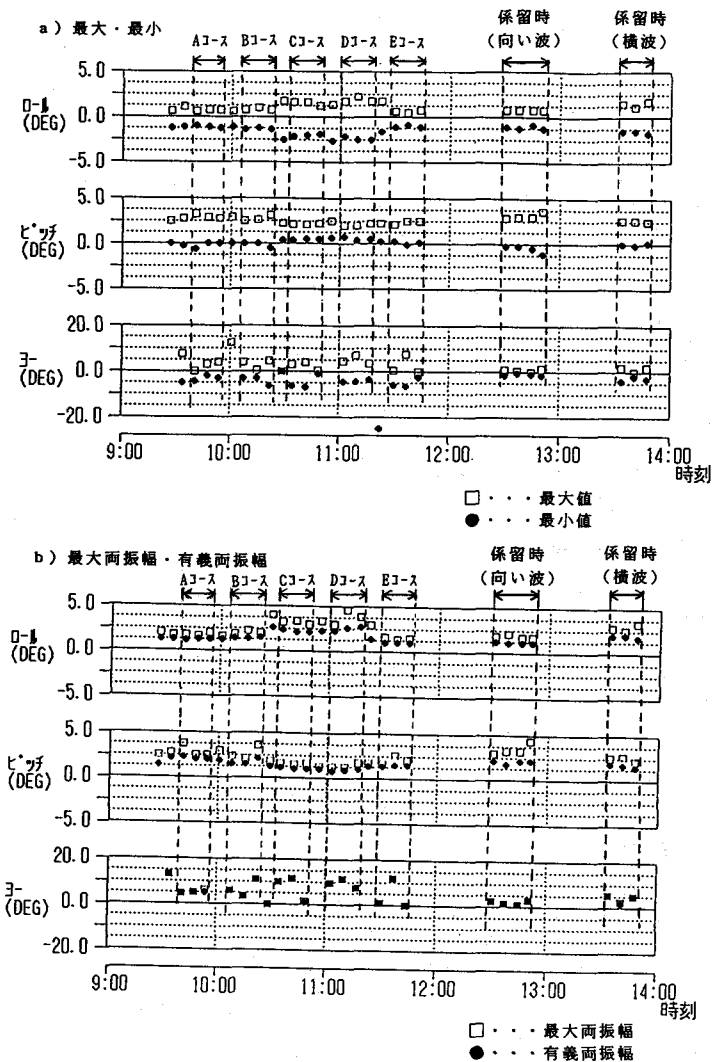


図-6 動揺量の計測結果

磁気方位センサとジャイロコンパスによる方位角の差異は、表-2に示すように最大約5°であった。通常、磁気方位センサは自差修正すると、方位誤差は1.5°以下になるが、今回の計測ではブリッジの外の手すりに設置したため、ブリッジによる磁場の乱れの影響が完全には消去できていなかったものと考えられる。また、本計測に用いたジャイロコンパスは低速移動体用のものであったため、5km/hの速度変化に対して約1°の誤差を有する。今回の航行速度は約6ノット(約11km/h)であったことからジャイロコンパスにも最大約2°の誤差があったものと考えられる。以上から、正副の計測システムによる方位角には差異がみられたが、図-8に示すようにヨーイングの有義両振幅については両システムによる差異は小さい。また、図示していないが、ローリングおよびピッチングについては正副両システムによる計測値の差異は極めて小さい。したがって、取り扱いの簡便性から磁気方位センサによるシステムを採用するのが良いと考えられる。

4. 結論

本研究の主要な結論をとりまとめる。

- (1) 実船実験の結果、本システムは、航行時および係留時の動揺を安定して取得できることが確認された。本システムを用いれば、ローリング、ピッチング、ヨーイングの動揺量、並進3成分の加速度をリアルタイムに表示することができる。また、加速度記録を積分して得られるサージング、スウェイング、ヒービングの動揺の時系列も表示できる。また、これら諸量の統計量をトレンド表示することにより、海象条件の変化に伴う動揺量の推移が把握できるので、作業の継続および中止の判断に有効と考えられる。
- (2) 実船実験により、船舶に作用する相対波向と動揺の関係が把握された。
- (3) 磁気方位センサとジャイロコンパスによる方位角にはやや差異がみられたが、動揺振幅を把握するという目的では両者の相違は小さいので、取り扱いの容易さから考えて磁気方位センサを使用しても良い。

5. あとがき

本システムの開発は運輸省港湾技術研究所、社団法人日本海上起重技術協会、株式会社トキメックの共同研究(平成4年度～5年度)によるものである。システムの開発および現地計測に際しては社団法人日本海上起重技術協会に設置された「作業船の荒天時避難対策調査研究委員会」の委員各位に貴重なご意見をいただいた。また、現地観測に際しては運輸省第二港湾建設局塩釜港工事事務所には大変お世話になった。ここに謝意を表す。

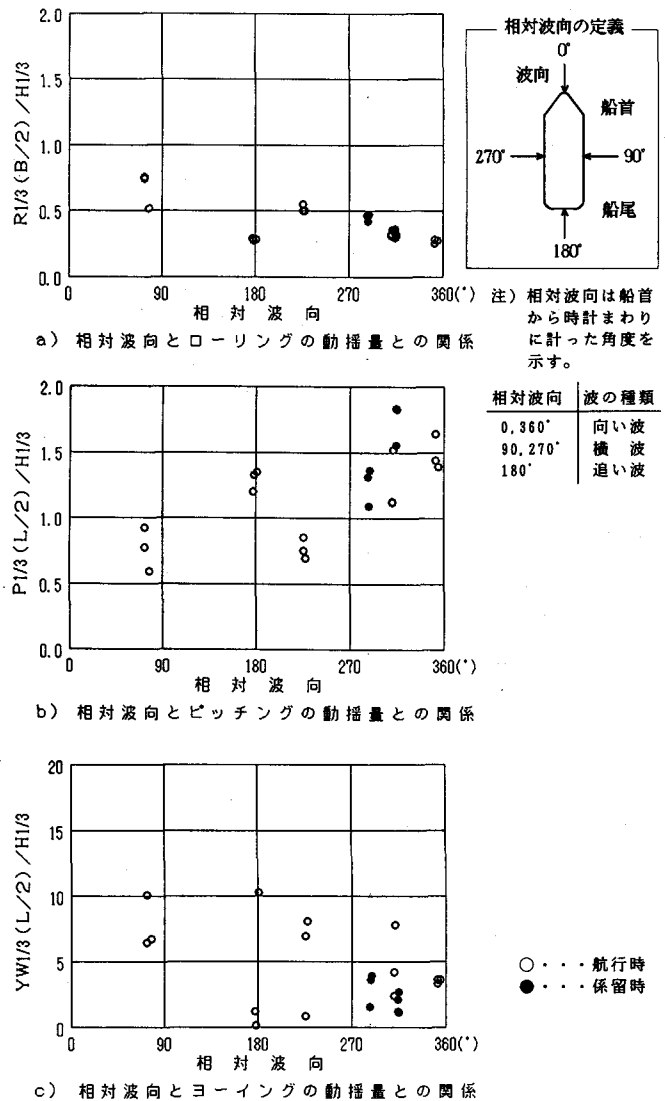


図-7 相対波向と動揺振幅の関係

