

港湾技研資料

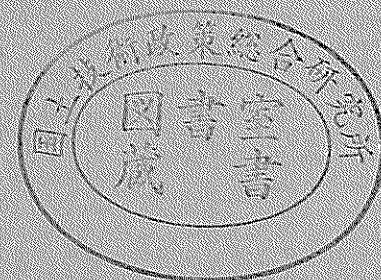
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 966 Sept. 2000

起重機船の吊フック振れ止めシステムの開発
— 水理模型実験による減揺効果の確認 —

白	石		悟
鈴	木		亮
川	原	智	靖
平	石	弘	也
堀	地	哲	郎
西	原	達	直

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 振れ止め装置の制御方法	4
2.1 基本概念	4
2.2 制御ロジック	5
3. 水理模型実験	6
3.1 模型諸元および装置概要	6
3.2 実験条件	11
3.3 実験方法	12
4. 動揺特性および吊フックの減揺効果	14
4.1 フック中心部の振れ止め効果の概要	14
4.2 船体動揺特性	15
4.3 吊フックの減揺特性	26
4.4 吊フック振れ止めシステムによる作業限界の改善効果	30
5. 結論	32
6. あとがき	32
参考文献	33
主要記号表	33

Development of a System for Decreasing Vibration of a Hang Hook of Floating Crane

Satoru SHIRAISHI*
Tomoaki SUZUKI**
Hiroyasu KAWAHARA***
Tetsuya HIRAISHI****
Taturo HORICHI*****
Naoshi NISHIHARA*****

Synopsis

At coastal area in Japan, marine construction works have been carried out in severe environmental conditions such as winds, waves and so on. Schedule of constructions are always affected by such sea conditions. Even if the wave height considerably small, operation rate of cargo handling on a floating crane may fall because the hang hook moves to every direction with ship motion and slinging works becomes difficult when the swell acts in the open sea. From this viewpoint, development of a system to decreasing vibration of the hang hook of a floating crane is expected eagerly.

In this research, an experiment is conducted in a wave tank, we produced a scale model of a floating crane of rotary type that arm device to control vibration is equipped with. The amplitude of horizontal displacement of a hook is decreased by letting the arm device expand and contract. The effect of a system for decreasing vibration of hook is tested in variety of wave conditions. As a result, the amplitude of the hang hook of a floating crane is shown to be largely decreased by controlling arm device.

Key Words: floating crane, system for decreasing vibration of a hang hook,
marine construction works, limit conditions of marine construction works,
work operation rate

* Chief of Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division
** Member of Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division
*** Former Member of Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division
(Kumamoto Ports and Airports Construction Office, The Forth District Ports and Harbours Construction Bureau)
**** Chief of Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division
***** Trainee of Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division
(Yorigami Maritime Construction Company)
***** Yorigami Maritime Construction Company
Ministry of Transport, Port and Harbour Research Institute
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-468-44-5032 Fax : +81-468-44-4161 e-mail:shiraishi@cc.phri.go.jp

起重機船の吊フック振れ止めシステムの開発 ——水理模型実験による減揺効果の確認——

白石 悟*
鈴木 智亮**
川原 弘靖***
平石 哲也****
堀地 達郎*****
西原 直*****

要 旨

我が国の沿岸海域では、風・波浪等の外力の作用する厳しい自然条件の下で海上工事が実施されており、その施工は常に気象・海象条件に大きく左右される。そのなかでも起重機船による荷役作業等では目視される波高はかなり小さくても、うねり性の波浪が作用する場合には起重機船の吊フックが、船体動揺に伴い前後・左右に振れまわり、玉掛け作業が困難となることから、工事の稼働率が低下することがある。このようなことから、稼働率を向上させ、かつ安全に玉掛け作業等が実施できるように起重機船の吊フックの振れ止め装置の開発が待ち望まれている。

本研究においては、吊能力 300 トンクラスの全旋回式起重機船の模型船を製作して、模型船の起重機部に二又アーム装置を取り付け、船体動揺に連動してフックの水平変位量が最小となるように、二又アームを伸縮制御してフックの水平動の減少を図る振れ止めシステムの開発を行なった。この二又アーム装置によるフックの振れ止めの効果を検証するために、平面水槽において波浪条件を種々変更して動揺実験を行った。その結果、二又アーム装置を制御することにより、起重機船の吊フックの振れ量は大幅に減少させることができることが確認された。

キーワード：起重機船，吊フック振れ止めシステム，海上施工，施工限界，作業稼働率

* 構造部 海洋構造研究室長
** 構造部 海洋構造研究室
*** 前構造部 海洋構造研究室（現第四港湾建設局熊本港湾空港工事事務所）
**** 水工部 波浪研究室長
***** 構造部 海洋構造研究室研修生(寄神建設株式会社)
***** 寄神建設株式会社
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所
電話：0468-44-5032 Fax：0468-44-4161 e-mail:shiraishi@cc.phri.go.jp

1. まえがき

四方を海に囲まれた我が国では、船舶による海上輸送が重要であることから海陸輸送の結節点である港湾の整備事業が進められてきた。従来港湾は主として都市圏に近く、自然条件の比較的穏やかな内湾部に立地してきたが、近年では物流の効率化による物流コストの縮減や地方における産業立地等の目的等により、外洋に面した自然条件の厳しい海域にも立地するようになってきている。

港湾構造物の建設に際しては、ケーソンやブロックの据付けなどの海上起重作業に起重機船が使用されてきた。厳しい自然海象条件下では、起重機船は動揺し、その影響を受け吊フックが振れまわり起重作業が困難となることがある（上田ら，1991）；（白石ら，1998）。起重機船の減揺装置としては、船体本体の揺れ量を抑制する装置として、ビルジキール、アンチローリング装置等を船体に装備した作業船がある。また起重機船の吊フックに吊り上げられた吊金具の減揺装置としては、金具本体に減揺装置を取り付けた構造により動揺抑制効果を図るものもあるが（今関ら，1997）、吊フック本体の振れまわりを抑制する装置は、いまだ開発されていない。そこで本研究においては、船体動揺による吊フックの動揺特性を把握して、新たに開発した二又アーム方式による吊フックの振れ止めシステムの振れ止め効果の確認を水理模型実験によって行なう。

2. 振れ止め装置の制御方法

2.1 基本概念

船体動揺により起重機船の吊フックは前後・左右・上下方向に振れまわる。本報告では、吊フックの前後・左右（X，Y軸）方向の揺れ量が、最小となるような制御方法として、起重機部より左右二又のアームを水平にフックまで伸ばし、フック中心部を頂点とする三角形を形成して、この三角形の頂点（フック中心部）の動揺による変位量に応じたアームの伸縮によりフック中心部の揺れ量を抑制する方式を提案する。本提案のアームによる振れ止め制御は、フック位置の水平（X，Y軸）方向のみ制御を行ない、上下（Z方向）については制御しない。

起重機船の動揺成分を図-1に示す。また、アームの制御概念を図-2に示す。仮にアーム位置が図中の点線位置にあったとすると、制御は図中の実線位置にフック中心が位置保持されるようにアームを伸縮させるこ

とを基本とする。すなわちアームに対する制御信号の出力方法は、船体中央部取付の船体位置および姿勢角計測装置信号より、フック部の（X，Y）座標計算を行い、それに伴い、制御目標位置に対する変位量の差分 Δx 、 Δy に応じた、補正量を左右アームストローク量に変換計算して、アームを伸縮動作させ振れ止め制御をする方式、すなわち船体重心およびフック部の揺れ情報によりフック部の位置計算を行って制御する方法とした。

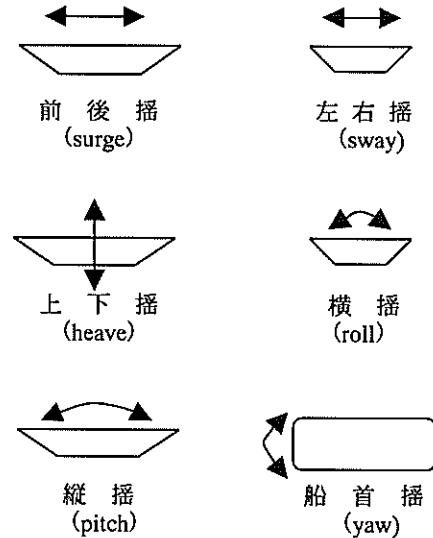


図-1 動揺の成分

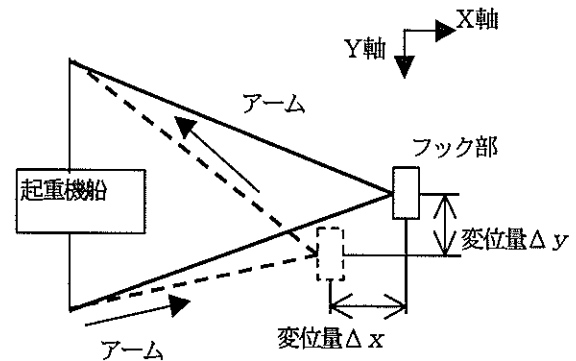


図-2 アームの制御概念

制御信号の流れを図-3に示す。船体姿勢計測装置により計測される揺れ角度(roll, pitch, yaw)および船体中央部の上面に設置した画像位置検出力カメラ装置による水平変位(surge, sway)をシーケンサーに取りこみ、フィルター処理を施し、起重機船の重心位置における速度・変位計算を行ない、F Aパソコンへ起重機船の

重心およびフック部の現在値を出力する。マルチプログラムブルコントローラ（以下、MPCと記す）はシーケンサからのデータに基づいてフックの水平方向の現在の位置を計算する。さらに、各動揺成分の計測データに基づいて動揺周期、速度、加速度を計算し、フックの水平方向の将来の位置を予測計算する。この予測結果に基づいて、シーケンサに二又アームのストローク制御量を出力する。シーケンサからはストローク信号量に応じて、アーム用のドライバーに実際のアームを伸縮させるための信号を受け渡す。

模型船上に全て納められる制御機器は模型実験の周期1~2sの波に対して制御しなければならないことから、かなり周期的に激しいサイクルにて信号処理を行うことが必要であるため、信号処理の分散化による処理時間の短縮を図るために、シーケンサとMPCの2つの制御機器を搭載することとした。

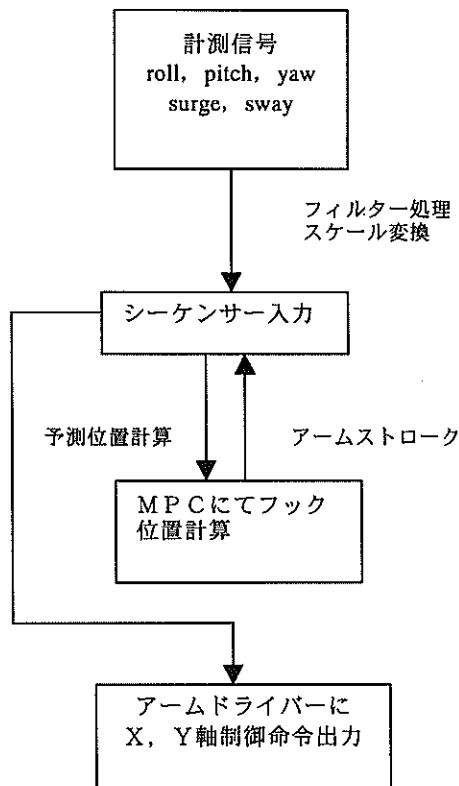


図-3 制御システムブロック図

2.2 制御ロジック

計測信号に対する座標位置計算は、MPCにて処理される。この処理フローを図-4に示す。また座標位置の計算式は各要素ごとにMPC内部に演算ブロックとして配置される。各演算ブロックの計算方法を下記に

示す。

(1)フック位置計算

船体動揺値の5成分 (roll, pitch, yaw, surge, sway) より、フック部位置の(X, Y)座標位置を計算により求める。X, Y軸方向の変位は式(1)により合成して求める。

X軸変位=pitch 変位+surge 変位

Y軸変位=roll 変位+ yaw 変位+sway 変位 (1)

(2)周期演算

動揺周期の演算は、50ms(0.05s)毎にデータをサンプリングして、各成分の測定データのうち(速度)が0近傍を通過する時に、カウントを開始してサンプリング回数を求める。そして再び同じ方向から0近傍を通過する時までのカウント数(Nk)より動揺周期Tiを式(2)によって求める。

$$T_i = 0.05 \times N_k \quad (2)$$

(3)変位の予測演算

50ms 毎にデータをサンプリングして、今回値と前回値(Δt秒前)より速度および加速度を計算してΔt秒後の予測変位量を求める。

予測変位量ΔxおよびΔy

$$= a \cdot s(k) + b \cdot v(k) \Delta t + c \cdot 0.5 \cdot A(k) \Delta t^2 \quad (3)$$

ここに、

x(k): 現在値

x(k-Δt): 前回値(Δt秒前の値)

s(k): 変位量, s(k)=x(k)-x(k-Δt)

v(k): 速度, v(k)=(ẋ(k)-ẋ(k-Δt))

A(k): 加速度, A(k)=(ẍ(k)-ẍ(k-Δt))

Δt: 遅れ時間, Δt=T₁+T₂+T₃

T₁: センサ検出遅れ時間

T₂: 制御演算遅れ時間

T₃: アーム動作遅れ時間

a: 変位パラメーター, a=1.0

b: 速度パラメーター

c: 加速度パラメーター

なお、実験時はΔt=0.25~0.3sとする。

また、動揺周期(実機換算)と式(3)のパラメータb, cとの関係を図-5に示す。

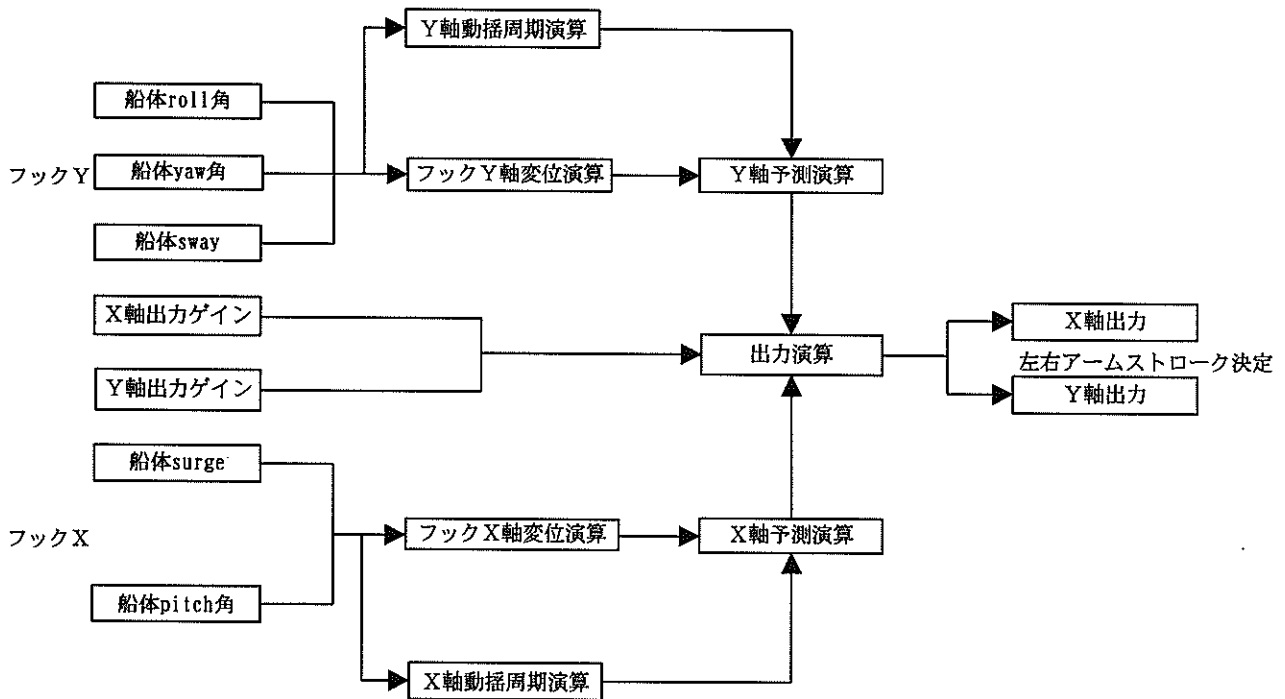


図-4 MPCによる処理座標位置計算フロー

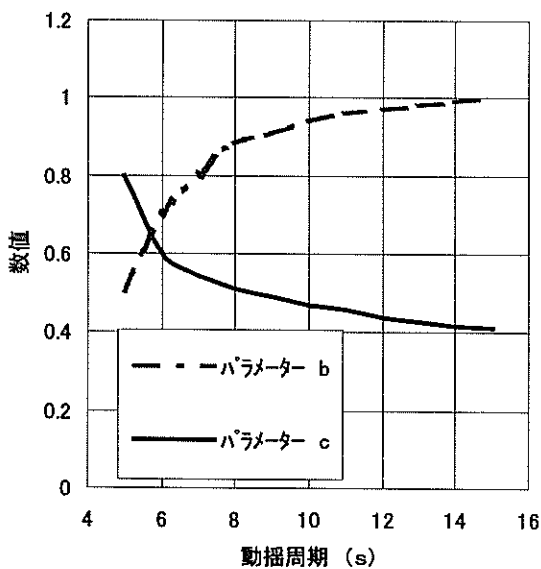


図-5 動揺周期とパラメータ b , c の関係

3. 水理模型実験

3.1 模型諸元および装置概要

(1) 概要

港湾技術研究所の平面水槽（長さ37m×幅23m）に、二又アーム装置を取り付けた模型船を4本の係留索により

係留し、サーベント型造波機により波を発生させ模型船を動揺させ、その状態でフック振れ止め装置を自動制御した。計測データは水槽内の架台上に設置したパソコンにて収集した。波向の変更は模型船の向きを造波機に対して変えることによって行い、波向 0° 、 45° 、 90° の3種類について実験を実施した。

(2) 模型起重機船の諸元

水理模型実験においては、300トン吊り全旋回式起重機船の縮尺模型を用いた。模型船の縮尺は、先行して実施した気中における振動装置を用いた予備実験におけるジブ模型をそのまま使用したことから $S=1/28.42$ とした。模型船の船体寸法、ジブ長さ、排水量、重心高さ、喫水等はフルード相似則にしたがい縮尺している。水理模型実験における模型縮尺における各物理量の縮尺を表-1に示す。なお模型船には、実物の起重機船には存在する建屋等は設けていない。模型船の船体内部には、トリムおよび重心高さ、慣性モーメント等を調整するために重錘を前後・上下方向に移動可能な調整装置を装備した。また排水量およびヒールを修正するために、重量の異なる重錘を船体の4隅に装備している。

模型船上には、二又アーム装置を制御するシーケンサーおよびMPC類および計測機器全てを装備しており、アーム制御は初期値を設定すると、全ての自動制御を模

型船単独で行なうことが可能である。

水理模型実験においては水槽内の計測架台上に設置したFAパソコンによって各種パラメーターの設定、動揺量等の計測データの収録を行なった。模型船上には、この搭載した計測機器類等の重量がかなり大きくなることから、重心高さを実機と相似させる目的で、計測機器は模型船甲板下の船体内部に納めることとした。

水理模型実験時の模型船の喫水状態は、実船の作業状態の喫水条件に、さらに二又アーム装置が装着された状態について、模型船の四隅4点において喫水が同一となるように、すなわち船体トリムが無いように模型船の重量調整を行なって実施した。つまり実船のバラスト状態より、アーム装置の重量分に相当するだけ深い喫水状態で実験を行った。

なお、模型船の慣性モーメントは縮尺換算した値が実

機と完全に合致させることが困難であったために実機とは一致しておらず、若干の相違がある。

模型船の一般図を図-6に、模型船の写真写真-1に、模型船と実機の諸数値を表-2に示す。

表-1 模型実験における模型縮尺

物理量	模型	実物
長さ	$S=1/28.42$ $=0.0351$	1
荷重	$S^3=(1/28.42)^3$ $=0.000043564$	1
質量	$S^3=(1/28.42)^3$ $=0.000043564$	1
ばね定数	$S^2=(1/28.42)^2$ $=0.001238$	1
時間・周期	$S^{0.5}=(1/28.42)^{0.5}$ $=0.1875$	1

$S=1/28.42$

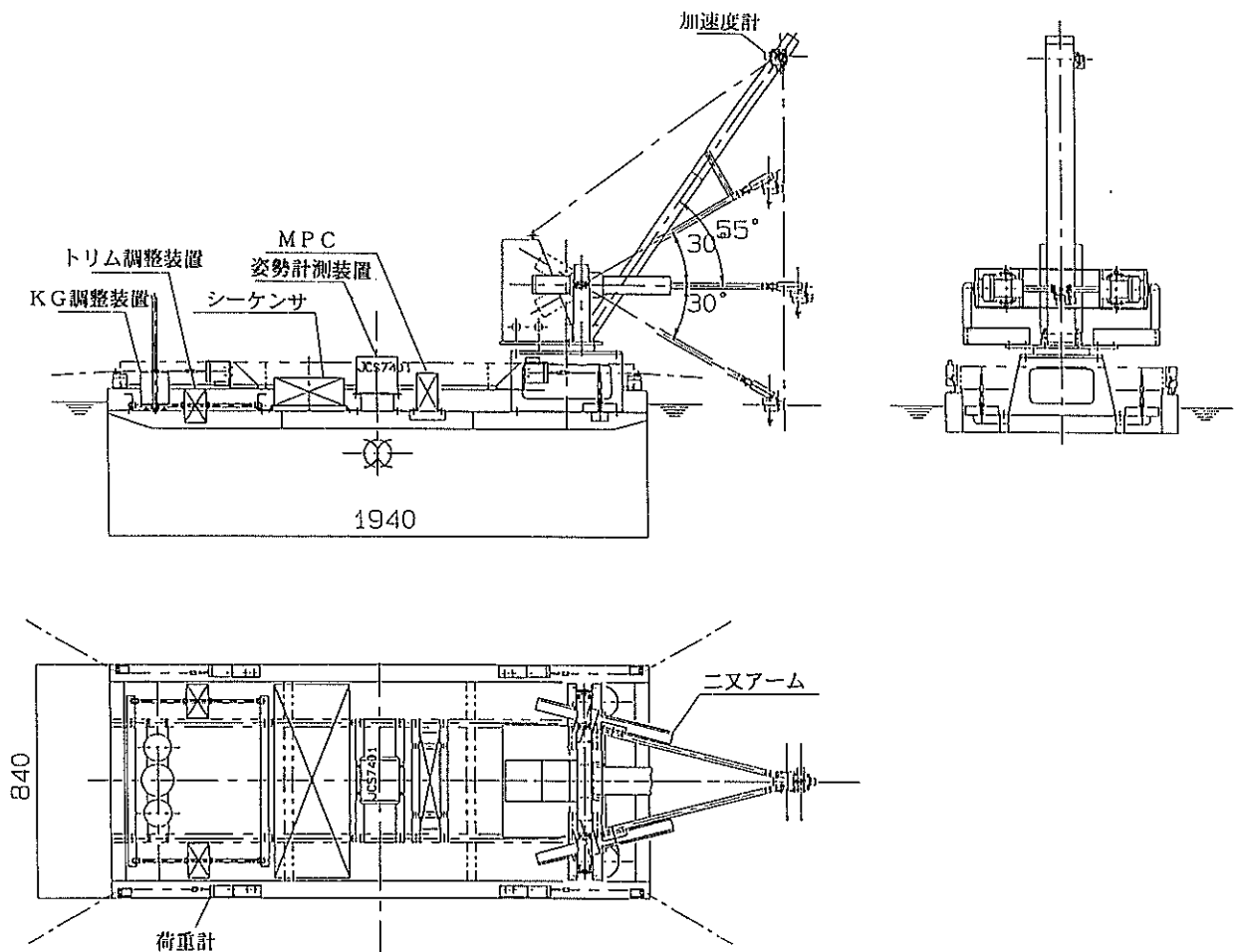


図-6 模型船一般図

表-2 模型船と実船の諸数値

	実船	模型船
全長 (m)	55.00	1.94
全幅 (m)	24.00	0.84
深さ (m)	4.00	0.14
排水量 (kg)	3767.00	164.11
喫水 (m)	2.96	0.10
浮心高さ (m)	1.48	0.05
重心高さ (m)	5.33	0.19
横メタセンター高さ (m)	12.22	0.43
縦メタセンター高さ (m)	81.85	2.88
慣性モーメント $I_{xx}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	4.89E+08	26.37
慣性モーメント $I_{yy}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	3.73E+09	201.38
慣性モーメント $I_{zz}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	3.73E+09	201.38



写真-1 模型船の全景

(3) 二又アーム装置の機構

二又アーム装置は、起重機部旋回台上にアームの張り出し台を設けて設置する。アーム装置は水平レベルを基準にして、起重機部旋回台上の張り出し台の根元軸を中心にして、上下方向 $\pm 30^\circ$ の傾斜が可能な機構である。

平面的には、根元部の回転軸を中心としてスムーズに回転可能な構造である。この左右の根元軸よりフック中心部に向かいリニアアクチュエータに連結されたアームがフック部まで伸びて、先端部でフックに連結される。

フック部を吊り下げている主巻きのワイヤーは、二又アームの中心部を貫通しており、アーム先端部の重量は、フック部を介して主巻きワイヤーに作用する機構である。

またアーム先端部のフックとの連結部には、片軸のみ上下（Z軸）軸を中心とした回転可能な構造として、もう片方は固定する。アームによる振れ止め動作は、アームの根元部を基点としてリニアアクチュエータの伸縮により、フック部をX、Y方向の水平面内で移動させる。二又アーム装置の一般図を図-7に示す。フック部の写真を写真-2に示す。

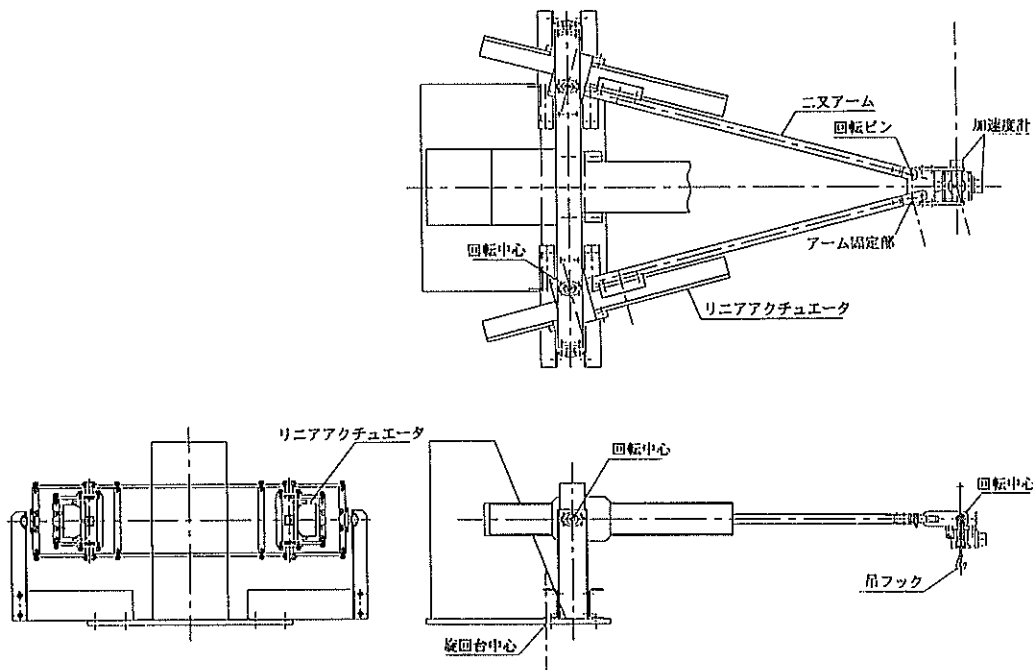


図-7 二又アーム装置一般図

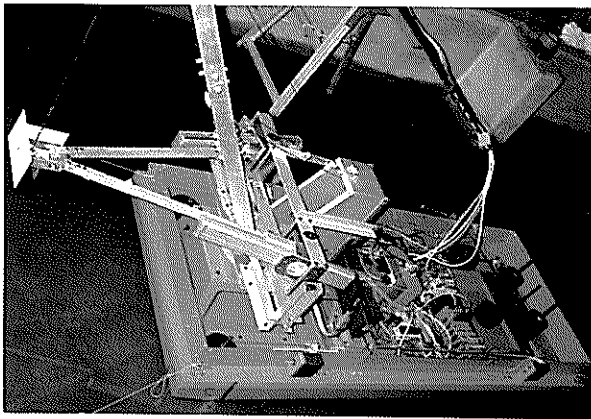


写真-2 フック部

(4) アーム装置関連の機器構成

アーム装置は、アーム本体・フック部・リニアアクチュエータ・根元部及び取り付け台・リニアアクチュエータ制御用のドライバー・MPC・シーケンサー等にて構成される。

表-3 アーム装置関係の諸元

a) リニアアクチュエータ

メーカー名	マツメ(株)
品名	リニアアクチュエータ
型式	KM-30
ストローク	300mm
最大水平荷重	176.4N
最大速度	300mm/s

b) MPC

メーカー名	i c o n
品名	マルチプログラマブルコントローラー
型式	MPC-200-03
入力	アナログ入力 14ch デジタル入力 20ch
出力	アナログ出力 4ch デジタル出力 20ch
制御演算機能	数値演算 条件演算 関数演算 外部入出力等 約 80 通り
データ転送	RS-232C

c) シーケンサー

メーカー名	横河電機(株)
品名	シーケンサー
型式	FA-M3

二又アーム装置は、既存のものがないために重量・寸法等の相似則を考慮して製作していないが、模型装置の大まかな位置関係あるいは、取付高さおよび可動範囲は実機にでも対応可能な寸法である。リニアアクチュエータ・MPC・シーケンサー等の諸元を表-3に示す。

(5) 実験水槽配置

水理模型実験を行なった平面水槽には、電動式の造波板が78枚装備されている、この造波板を各々前後に運動させることにより、規則波・単一方向不規則波・多方向不規則波を発生させることが可能である。平面水槽・造波機の性能を表-4に示す。

表-4 平面水槽・造波機性能表

平面水槽の寸法	37m×23m
水槽の深さ	2m
最大造波水深	1m (実験時 0.53m=水深 15m)
使用水	清水
造波板	0.6m×78枚 総延長 46.8m
発生波形	規則波・斜め規則波・単一方向不規則波・斜め単一方向不規則波・多方向不規則波
最大波高	40cm以上 水深 1m 周期 1.5s 前後
造波周期	0.7~5s (短周期成分) 10~30s (長周期成分)

平面水槽の造波機側に向かって左側には、コーナー部があるため反射波の影響を考慮して、規則波および単一方向不規則波においては、消波工を設置して水槽を仕切って実験を行なった。消波工は、壁面の影響を考慮して横壁に並べて設置した。また波下側の消波斜面による反射波の影響を低減させるために消波斜面前面に消波材を追加設置した。

模型船のアーム装置の制御機器は、全て模型船側に設置されているために、その監視パソコンを近くに設置する必要があったことから、模型船に対して波下側で、かつ、波浪に対する影響が可能な限り少ない位置に作業足場および歩廊を設置した。平面水槽内には、フックカメラ監視用のカメラ架台(3ヶ所)および波高計(3ヶ所)架台を設けた。実験時の全景写真を写真-3、造波装置の写真を写真-4に示す。また平面水槽内の機器配置図を図-8に示す。

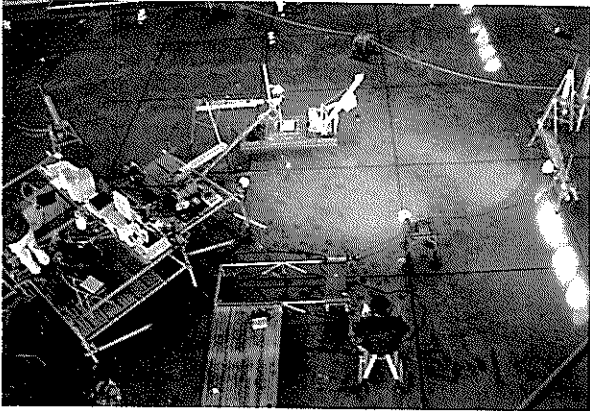


写真-3 全景写真

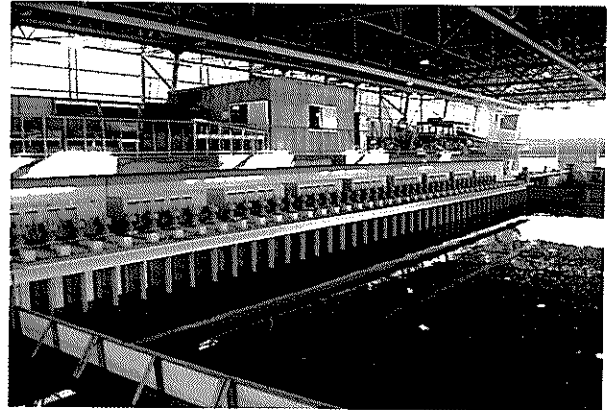


写真-4 造波機

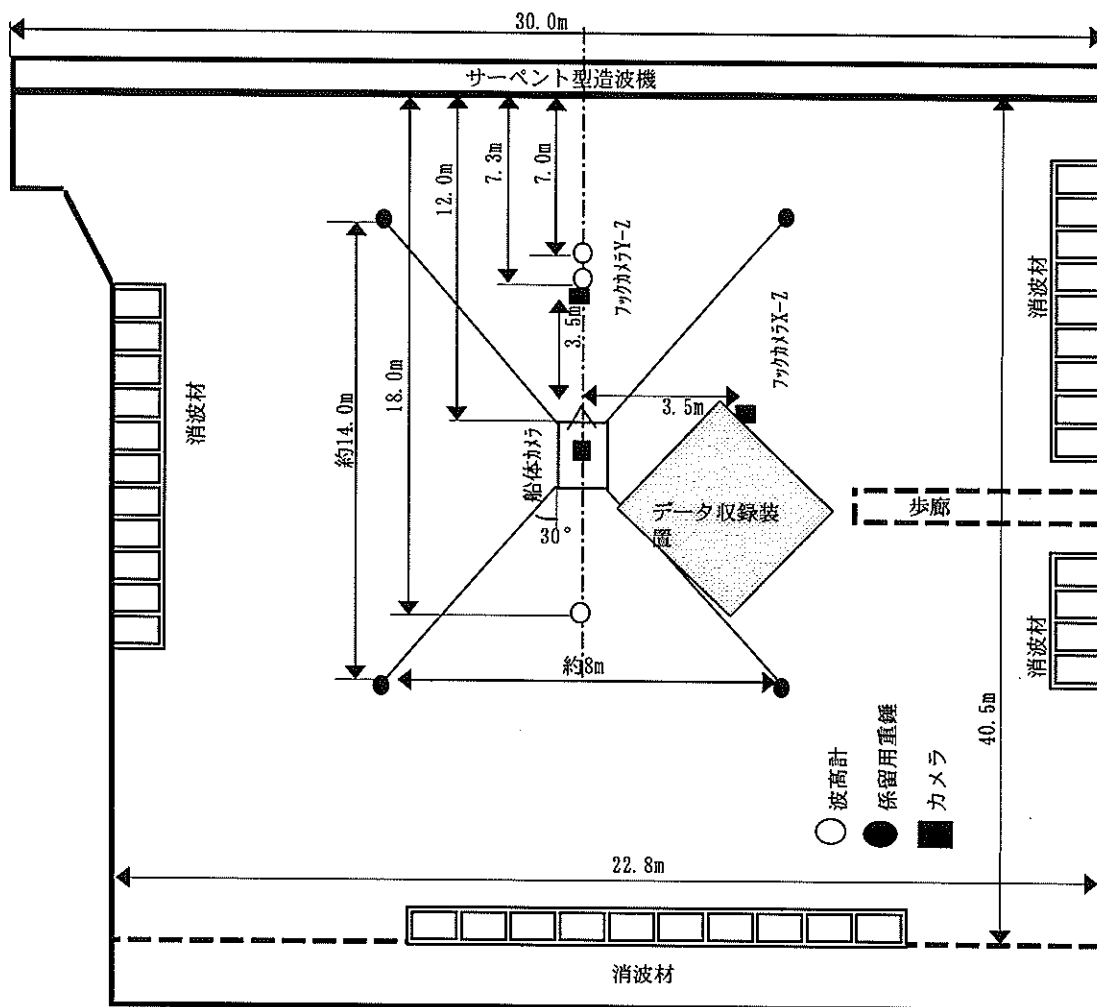


図-8 平面水槽内における機器配置図

3.2 実験条件

(1) 実験ケース

水理模型実験では、波向を3種類、波特性を3種類、波高を3種類、波周期を4種類、アーム制御を3種類、吊荷の有無を2種類、それぞれ条件を変えて実験を行なった。吊荷の重量は、2.6kgf（実機換算約60tf）としてこれをアーム下のフック部に取りつけた。また実船の状況との相似性を確認するために、アーム装置を+30°上げてジブに固定して格納した状態についても実験を行った。波向に関しては、造波機側を基点として0°、45°、90°と模型船の向きを変えた。波向45°および90°は、模型船の左舷方向から入射する波である。

これらを総合すると総実験ケースは、182ケースとなった。実験ケースの種類を表-5に示す。

表-5 実験ケース組み合わせ

波向き	0°, 45°, 90°
波特性	規則波 RE 単一方向不規則波 IS 多方向不規則波 IM
波高	0.3m, 0.5m, 0.7m [1.1cm, 1.8cm, 2.5cm]
波周期	規則波 $T=6,8,10,12s$ [1.13,1.5,1.88,2.25s] 単一方向不規則波 $T_{1/3}=8,10,12s$ 多方向不規則波 $T_{1/3}=8,10s$ (不規則波は、有義波周期)
アーム	アーム制御 CO アーム非制御 NO アーム取り外し OF
吊荷	吊荷有り LW 吊荷無し LF

[] 数値は模型寸法

実験ケース毎の、収録データファイル名を識別するために各実験条件の実験ケースの頭2文字を割り当てた収録ファイル名を用いた。以下にその例を示す。

例) 00RE0306COLW

00 (波向: 0°)
RE (波特性: 規則波)
03 (波高: 0.3m)
06 (波周期: 6s)
CO (アーム: 制御有り)
LW (吊荷: 有り)

(2) 係留状態

図-9は、起重機船の係留索配置図を示したものである。模型船はその船首および船尾側より展開された合計4本の

係留索にて係留する。実験時の水深は0.53m（実船約10m相当）であった。係留索は、船体側は張力計にコイルスプリングを取り付け、その先に長さ7m（実船約200m相当）のピアノ線を組合わせ水槽底面に固定した。これは実船の係留索の弾性係数（関西造船協会、1976）と直径および長さから求めた変位復元力特性（ばね定数）を、1種類の係留索で相似させることが困難であったために、コイルスプリングとピアノ線を組合わせることにより、実機とフルード相似則を満足する条件のばね定数を有する線形な変位復元力特性とした。表-6は実験に用いた各係留索に用いたコイルスプリングのばね定数を示す。

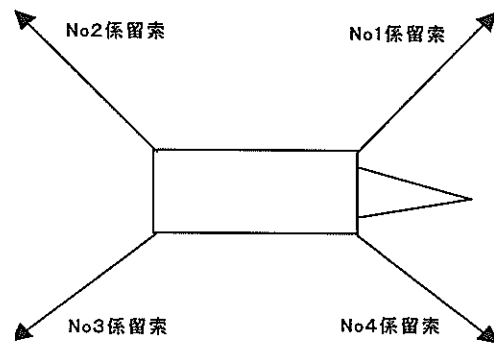


図-9 係留索配置図

表-6 スプリングのばね定数

ばね番号	ばね定数
スプリング NO.1	2.19N/cm
スプリング NO.2	2.42N/cm
スプリング NO.3	2.46N/cm
スプリング NO.4	2.45N/cm

係留索端部は、アンカーとして水底に13kgの重錘を設置して、重錘とピアノ線を接続した。模型船は、実船での係留と相似にするために初期張力として約4.2N（実船約98kN）の初期張力を作用させ係留した。

(3) 模型起重機船の固有周期および減衰定数

動揺実験に先立って、模型船の自由振動実験を行ない固有周期および減衰定数を求めた。今回は、制御の対象外としたheave以外は、全成分について自由振動実験を行なった。rollおよびpitchについては無係留状態にて自由振動試験を行ない、yawおよびsurge, swayについては弛緩係留状態にて実験を行なった。yawについては、固有周期が長いために良好な自由減衰波形が得られなかった。自由振動実験で得られた模型船の各動揺成分に対する減衰定数と固有周期を表-7に示す。また、自由振動実験結果の時系列の一例を図-10に示す。これはrollについての自

由振動波形の時系列を示したものである。

表-7 減衰定数と固有周期

	固有周期 (s)	減衰定数
roll	1.22	0.123
pitch	1.31	0.327
sway	4.80	0.578
surge	2.16	0.537

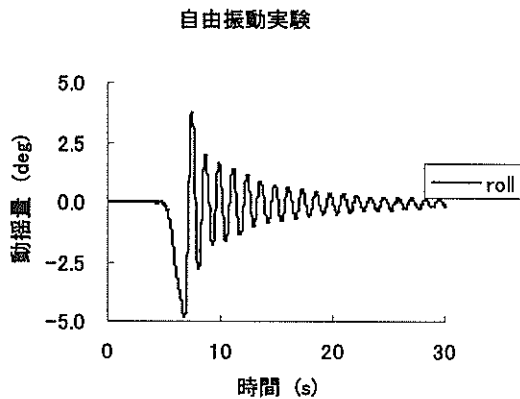


図-10 自由振動実験の時系列 (roll)

3.3 実験方法

(1) 計測項目および計測システム

計測機器のシステムブロックを図-11に示す。動揺実験では、最速制御周期が1s前後にて各種センサーの信号に基づいて振れ止め制御を行なうために、それに対応可能な応答性を有するセンサーを選定した。各種計測機器で得られるデータは、全てデータ収集用パソコンに取りこみ一元管理にて時系列データとして収録した。荷重計と加速度計の信号処理はシーケンサがA/D変換と校正を行なった。また模型実験中は船体カメラおよびフックカメラにより、船体およびフックの動揺量の軌跡を表示モニターにてリアルタイムに確認した。計測機器の取り付け数を、表-8に示す。また計測時間は、それぞれの波周期にて150波以上の波を計測するよう時間設定を行なった。波周期ごとの計測時間を表-9に示す。

表-8 計測機器数量表

名称	取付場所	数量
船体姿勢計測	船体中央部	1
ジブ頂部加速度計	ジブ頂部	3
カメラ船体	船体中央部上面	1
カメラフック正面	水槽内フック正面	1
カメラフック側面	水槽内フック側面	1
係留張力計	船体上部	4
波高計	平面水槽内	3

表-9 データー収録時間

波周期 (s)	データ収録時間(150波相当)
6	2分50秒
8	3分45秒
10	4分42秒
12	5分38秒

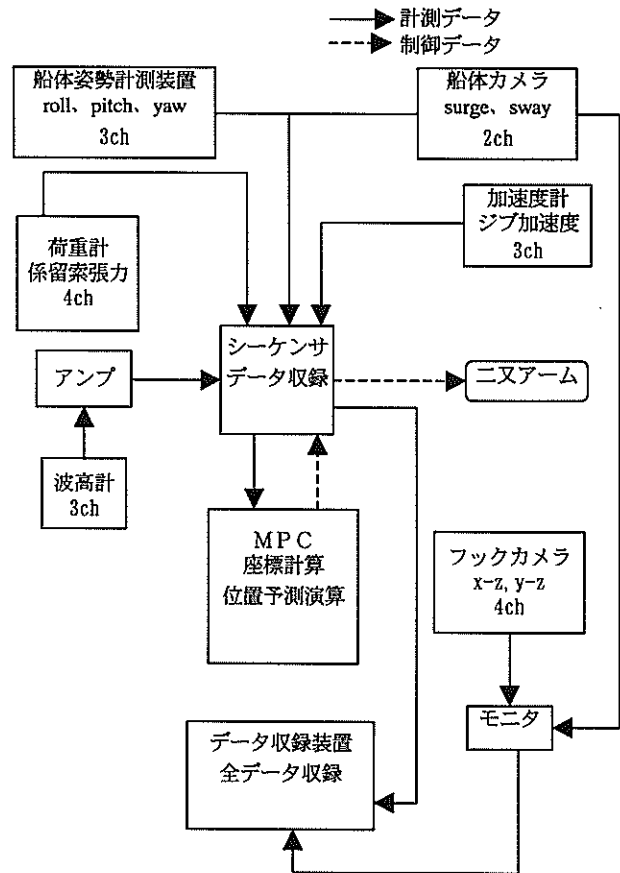


図-11 計測システムのブロック図

個々の計測項目について詳細は以下に記述する。

a) フック部の動揺

二又アーム取付部の軌跡管理を行なうために、画像位置検出装置のCCDカメラをフック正面と側面に設置した。画像位置検出装置は、物体の相対位置や変位を計測する機器であり、任意の形状を初期値として認識させると、その後はトラッキング機能により、自動追跡を行うことができ、また画素数変換を行なうことにより初期位置との相対偏差 (mm表示にて) をリアルタイムに出力できる計測機器である。フック部には、自動追跡の対象物を認識させるために正面と側面に白板を取り付けて、中心部にカラーマーカーによるターゲットを取り付けた。さらに、カメラモニターにて、視覚的にも変位量を確認することができる。このシステムの追尾範囲はカメラとタ

ターゲットの距離に応じて変化し、両者の距離を離すと追尾の範囲も広がるが画素数が低下して計測精度が落ちることから、実験では $l=3.45\text{m}$ とした。このときには、フック部でおよそ $\pm 70\text{mm}$ の追尾範囲となる。したがって、追尾範囲がかなり狭いために、アーム取り外しの状態では、フック部の吊り金具の揺れが大きいことから本装置での位置計測は不可能であった。その場合には、ビデオで揺れを計測し、テレビモニタ上で揺れの振幅を読み取った。

b) 船体中央部の動揺

起重機船の6成分の動揺値は、船体中央部に取り付けられた船体姿勢計測装置によって行なう。動揺成分の定義は前述の図-1に示した動揺の座標系の定義に示すように、roll, pitch, yaw, surge, sway, heaveである。この姿勢計測装置は、3成分の揺れ角度と3方向の加速度を検出する計測機器である。ただし、加速度計による計測信号には高周波の振動成分が含まれていたため、この信号を採用して制御することができないことから、これを用いなかった。そこで、船体のsurge, swayの情報は、水槽内に架台を設置してカメラの設置のための治具を張り出して、フック取付部の画像位置検出装置と同じ仕様のカメラを用いて船体上面より動揺量を計測し、これを水平移動に関する制御信号を出力する際の演算用のデータとした。

c) 加速度

ジブ頂部の左側にジブ角度 55° の状態では、X, Y, Z軸方向の加速度を計測するためにサーボ型加速度計を3個設置した。

d) 張力計

起重機船に係留する係留索の張力は、係留索の船体側面の船首側および船尾後の端部に設置した張力計によって測定した。写真-5は、模型船上の張力計の設置状況である。

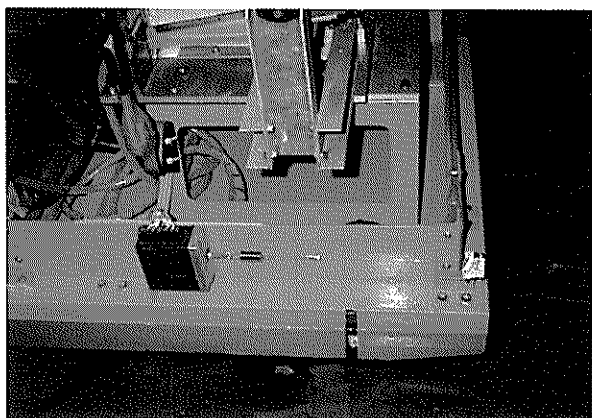


写真-5 張力計

表-10 データ収録成分の一覧

名称	記号	単位
1 経過時間	TIME	s
2 制御フラグ	CTL-FLG	0: non 1: cnt
3 船体加速度AX-R	SHIP-AX-R	mm/s ²
4 船体加速度AY-R	SHIP-AY-R	mm/s ²
5 船体加速度AZ-R	SHIP-AZ-R	mm/s ²
6 ロール角-R	ROLL-R	deg
7 ピッチ角-R	PITCH-R	deg
8 ヨー角-R	YAW-R	deg
9 ジブ頂部加速度AX-R	JIB-AX-R	mm/s ²
10 ジブ頂部加速度AY-R	JIB-AY-R	mm/s ²
11 ジブ頂部加速度AZ-R	JIB-AZ-R	mm/s ²
12 船体加速度(フック)AX-R	HOOK-AX-R	mm/s ²
13 船体加速度(フック)AY-R	HOOK-AY-R	mm/s ²
14 船体加速度AX-F	SHIP-AX-F	mm/s ²
15 船体加速度AY-F	SHIP-AY-F	mm/s ²
16 船体加速度AZ-F	SHIP-AZ-F	mm/s ²
17 ロール角F	ROLL-F	deg
18 ピッチ角F	PITCH-F	deg
19 ヨー角F	YAW-F	deg
20 ジブ AX-F	JIB-AX-F	mm/s ²
21 ジブ AY-F	JIB-AY-F	mm/s ²
22 ジブ AZ-F	JIB-AZ-F	mm/s ²
23 フックAX-F	HOOK-AX-F	mm/s ²
24 フックAY-F	HOOK-AY-F	mm/s ²
25 左アーム長	ARM-LEN-L	mm
26 右アーム長	ARM-LEN-R	mm
27 フック位置X	HOOK-POS-X	mm
28 フック位置Y	HOOK-POS-Y	mm
29 MPC指令X	MPC-COM-X	mm
30 MPC指令Y	MPC-COM-Y	mm
31 係留索荷重-前右	WEIGHT-FR	g
32 係留索荷重-前左	WEIGHT-FL	g
33 係留索荷重-後右	WEIGHT-RR	g
34 係留索荷重-後左	WEIGHT-RL	g
35 波高計1	WAVE-HIGHT1	mm
36 波高計2	WAVE-HIGHT2	mm
37 波高計3	WAVE-HIGHT3	mm
38 カメラ-フックX	HOOK-CAM-X	mm
39 カメラ-フックZ側面	HOOK-CAM-RZ	mm
40 カメラ-フックY	HOOK-CAM-FY	mm
41 カメラ-フックZ正面	HOOK-CAM-FZ	mm
42 カメラ-船体X	SHIP-CAM-X	mm
43 カメラ-船体Y	SHIP-CAM-Y	mm
44 収録回数	REC-CNT	cnt
45 エラ-番号	ERR-NUM	No
46 パラメ-タ	PRM	No

e) 波高計

波高計は、模型船前面（造波機側）に2基また模型船後部（造波機反対側）に1基の計3基の容量式波高計を設置した。実験開始時に遠隔方式でキャリブレーションする必要性から、信号ケーブルを造波運転室のアンプまで配線して、さらに起重機船の動揺量などのデータと同じシステムで収録させるために再度模型船近傍のデータ収録用パソコンまで信号ケーブルを戻した。

(2) データの収録

a) 収録データ

収録パソコンに収録したデータの一覧表を表-10に示す。表中の名称に記述されている〔-R〕は直接の計測データ値を表し〔-F〕は計測データを1次フィルター処理したものを表す。計測機器で得られたデータ以外にもアームのストローク量およびMPCの位置演算値等を時系列で収録している。収録値は全て較正係数による変換がなされた物理値である。

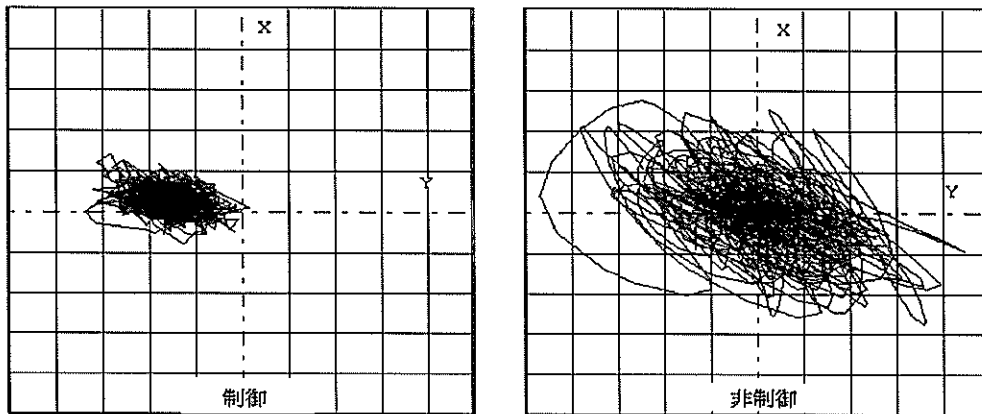
b) データの解析

収録データのうち、波高データのみ波高計によるキャリブレーション補正等を行ない、その他のデータはそのままパソコンの磁気ディスクに保存した。データ解析は解析用パソコンにて全データ150波のうち、データが安定していない実験開始から30sまでのデータを全て除外して、これ以降について波高データの波数100波分相当のデータについてゼロアップクロス法にて統計解析を行い、また、スペクトル解析を行なった。

4. 動揺特性および吊フックの減揺効果

4.1 フック中心部の振れ止め効果の概要

各実験条件ごとにデータの解析処理を行なった。特に、フックの減揺効果については、CCDカメラにて計測したフック中心部の(X, Y)座標データにより確認した。実験結果の代表例として、波向 45° 、単一方向不規則波、有義波高25mm(実機換算0.7m)、有義波周期1.88s(実機換算10s)の波浪条件におけるフック中心部のX-Y平面上の軌跡を図-12に示す。この図よりフックの動揺量は制御状態においては、X, Y方向とも大幅に減少することが確認できる。非制御状態では前後左右にフックが大きく振れ回っているが、制御状態では、X, Y方向の動揺量はいずれも非制御状態の約 $1/3$ 以下になる。また同じ波浪条件におけるフックの動揺量の時系列波形を図-13に示す。これを見ると、特に非制御時の動揺量がピーク値を示す時間においても、アームを制御すると動揺振幅は大きく低減し、かつ、動揺振幅の変化が時間によらずほぼ一定状態に近づく。また同じ波浪条件でフック動揺量のパワースペクトルを図-14に示した。フックX方向の非制御状態ではsurge成分の固有周波数付近でピーク値がみられるが、制御状態では大幅にそのピーク値が減少する。フックY方向も非制御状態のsway, yaw成分の固有周波数付近のピーク値が制御状態では大幅にピーク値が減少する。なお、以後の記述において断りのない限り船体動揺およびフック動揺量は動揺両振幅の有義値を表す。また図中の表示は、模型実験値を相似則に従い実機換算して表し、動揺量の単位はroll, pitch, yawは(deg), surge, swayは(m)にて表示する。



単一方向不規則波、波向 45° 、有義波高0.7m、有義波周期10s

図-12 フック動揺量のX-Y平面軌跡図

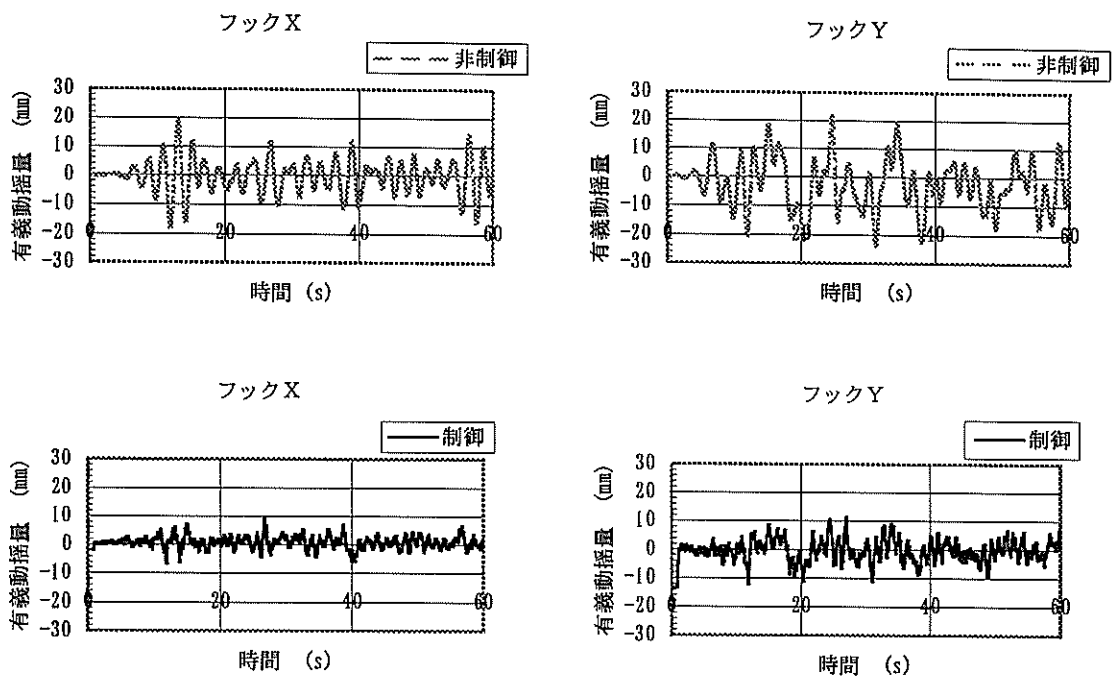


図-13 フック動揺量の時系列波形
 (単一方向不規則波, 波向 45°, 有義波高 25mm (実機 0.7m), 有義波周期 1.88s (実機 10s))

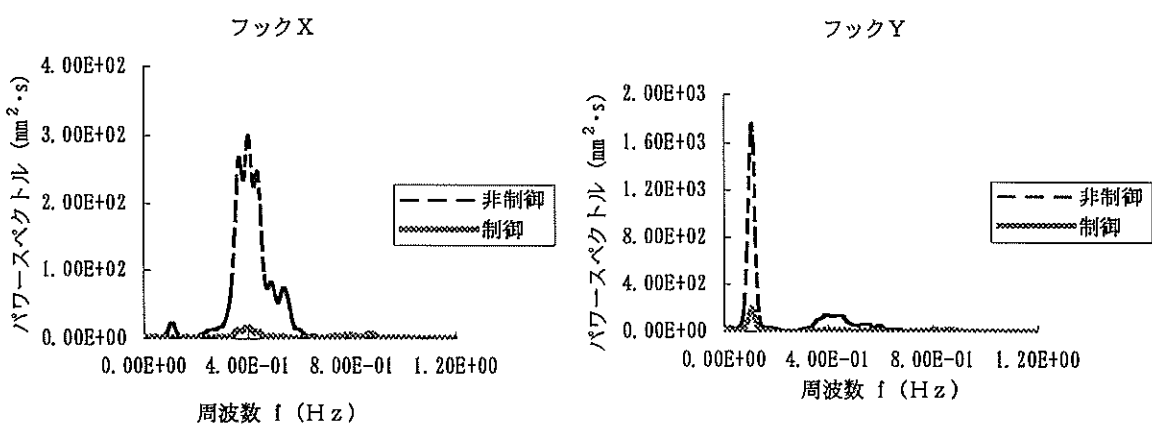


図-14 フック動揺量のパワースペクトル

4.2 船体動揺特性

(1) 起重機船の船体動揺量

起重機船の船体中心部の各動揺成分について規則波中、および不規則波中における波周期と動揺両振幅の有義値との関係を取りまとめ図-15～図-49に示す。なお、起重機船自体の動揺量は吊フックの制御の有無にほとんど影響しないことから、ここでは非制御状態のデータを用いた。なお、roll, pitch, yawについては、船体姿勢計測装置にて、surge, swayは船体上部設置のCCDカメラ装置に

て取得された値である。なお、船体のheaveについては今回計測を行っていない。

a) surge

図-15～図-17は規則波中の、また図-18～図-21は不規則波中のsurgeの動揺量の波周期に対する関係を示したものである。それぞれ、波向0°, 45°, 90°に対するものである。これらの図から以下のことが言える。

- ①規則波中および不規則波中のいずれにおいても、波周期が長くなると動揺量が増加する。

②不規則波中の有義動揺量が最も大きいのは、波向 0° のときで、有義波周期 $T_{1/3}=8s, 10s, 12s$ 、有義波高 $H_{1/3}=0.7m$ の波に対して、それぞれ、 $1.05m, 1.36m, 2.31m$ である。

b) sway

図-22～図-24は規則波中の、また図-25～図-28は不規則波中のswayの動揺量の波周期に対する関係を示したものである。それぞれ、波向 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ に対するものである。これらの図から以下のことが言える。

①規則波中および不規則波中のいずれにおいても、波周期が長くなると動揺量が増加する。

②不規則波中の有義動揺量が最も大きいのは、波向 90° のときで、有義波周期 $T_{1/3}=8s, 10s, 12s$ 、の有義波高 $H_{1/3}=0.7m$ の波に対して、それぞれ、 $0.90m, 0.90m, 1.43m$ である。

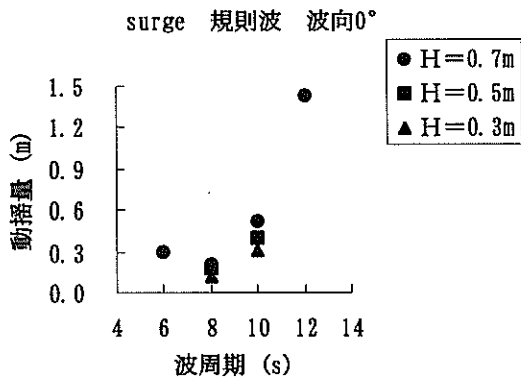


図-15 起重機船の動揺量
(規則波, 波向 0° , surge)

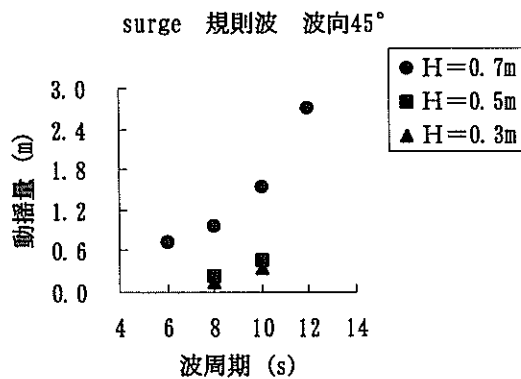


図-16 起重機船の動揺量
(規則波, 波向 45° , surge)

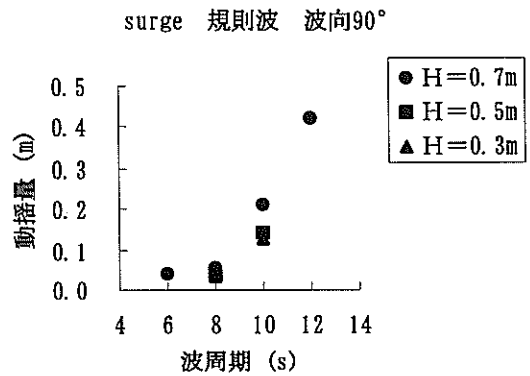


図-17 起重機船の動揺量
(規則波, 波向 90° , surge)

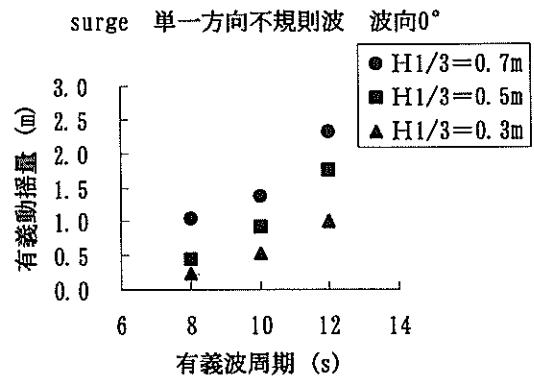


図-18 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向 0° , surge)

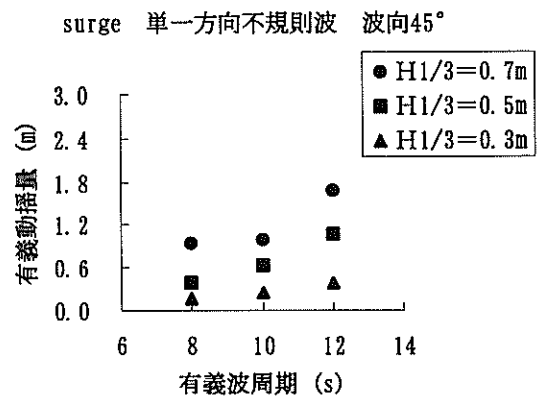


図-19 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向 45° , surge)

surge 単一方向不規則波 波向90°

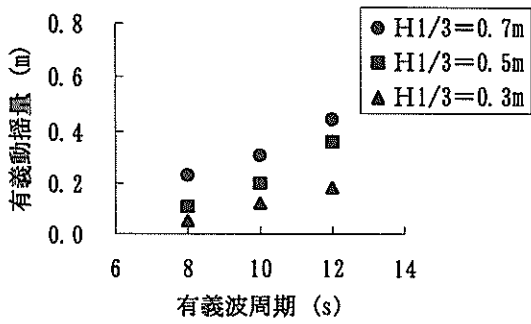


図-20 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向90°, surge)

sway 規則波 波向45°

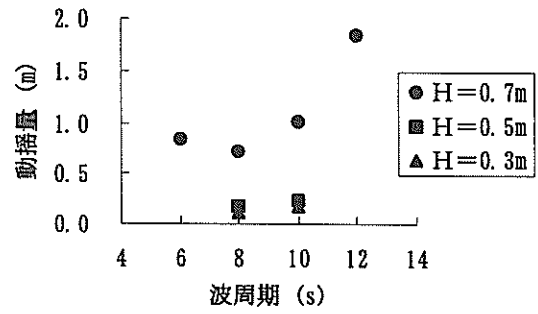


図-23 起重機船の動揺量
(規則波, 波向45°, sway)

surge 多方向不規則波 波向90°

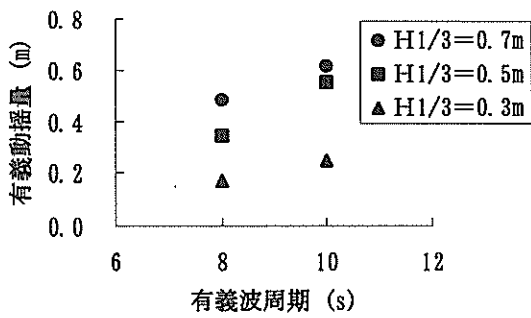


図-21 起重機船の動揺量
(多方向不規則波, 波向90°, surge)

sway 規則波 波向90°

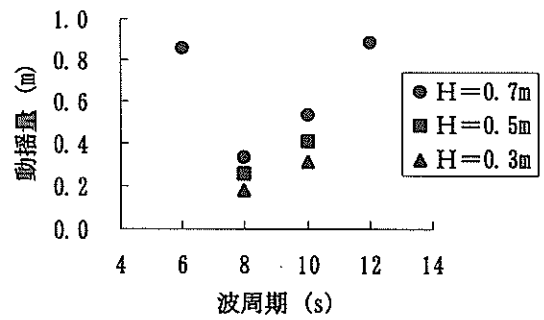


図-24 起重機船の動揺量
(規則波, 波向90°, sway)

sway 規則波 波向0°

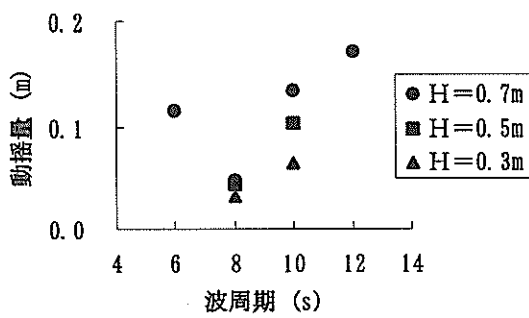


図-22 起重機船の動揺量
(規則波, 波向0°, sway)

sway 単一方向不規則波 波向0°

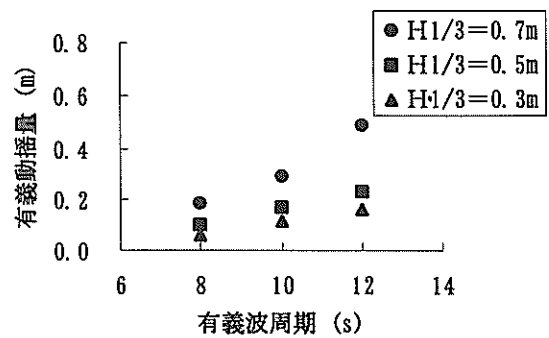


図-25 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向0°, sway)

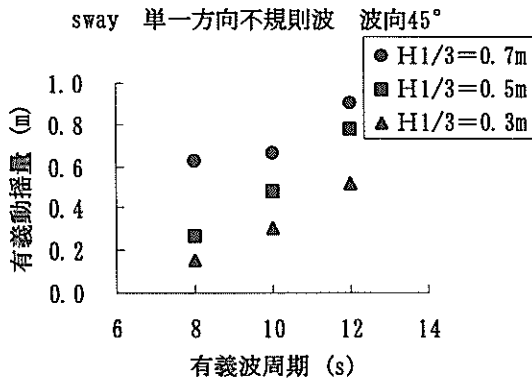


図-26 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向45°, sway)

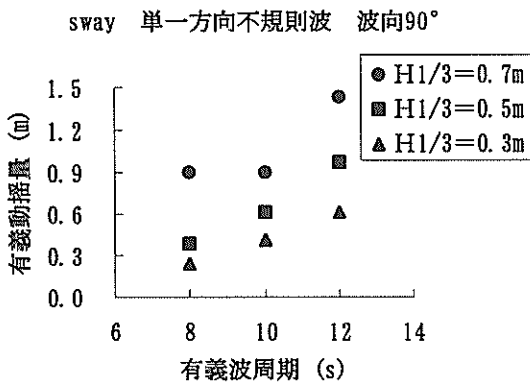


図-27 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向90°, sway)

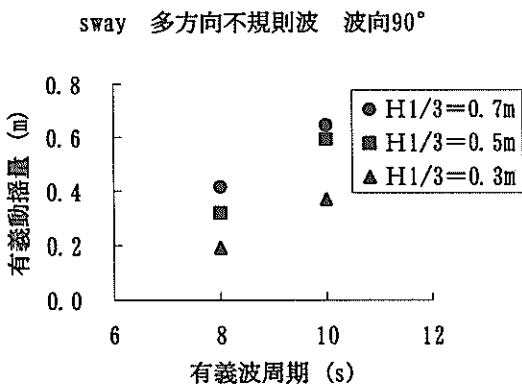


図-28 起重機船の動揺量
(多方向不規則波, 波向90°, sway)

c) roll

図-29～図-31は規則波中の、また図-32～図-35は不規則波中のrollの動揺量の波周期に対する関係を示したものである。それぞれ、波向0°, 45°, 90°に対するものである。これらの図から以下のことが言える。

①規則波中でrollの固有周期付近の波周期6sで動揺両振幅の有義値が最大であり、不規則波中においては、実験した波周期がすべてこれよりも長かったため、波周期が長くなると動揺量が減少する。

②不規則波中の有義動揺量が最も大きいのは、波向90°のときで、有義波周期 $T_{1/3}=8s, 10s, 12s$, 有義波高 $H_{1/3}=0.7m$ の波に対して、それぞれ、6.18deg, 3.41deg, 2.84degである。

d) pitch

図-36～図-38は規則波中の、また図-39～図-42は不規則波中のpitchの動揺量の波周期に対する関係を示したものである。それぞれ、波向0°, 45°, 90°に対するものである。これらの図から以下のことが言える。

①規則波中でpitchの固有周期付近の波周期8sで有義動揺量にピークがみられ、不規則波中においては、実験した波周期がこれよりも長かったため波周期が長くなると動揺量が減少する。

②不規則波中の有義動揺量が最も大きいのは、波向0°のときで、有義波周期 $T_{1/3}=8s, 10s, 12s$, 有義波高 $H_{1/3}=0.7m$ の波に対して、それぞれ、3.45deg, 1.91deg, 1.72degである。

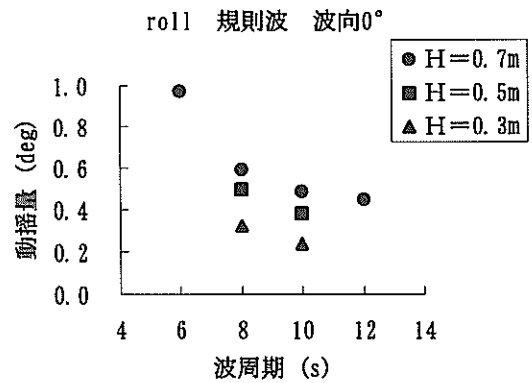


図-29 起重機船の動揺量
(規則波, 波向0°, roll)

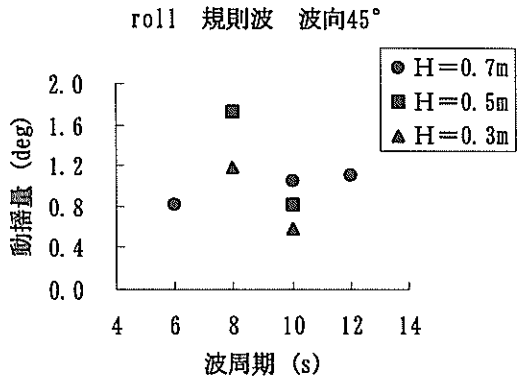


図-30 起重機船の動揺量
(規則波, 波向45°, roll)

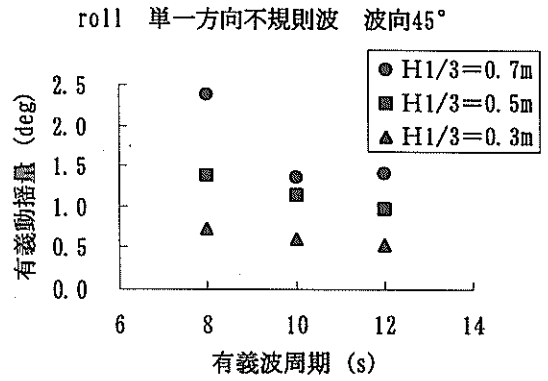


図-33 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向45°, roll)

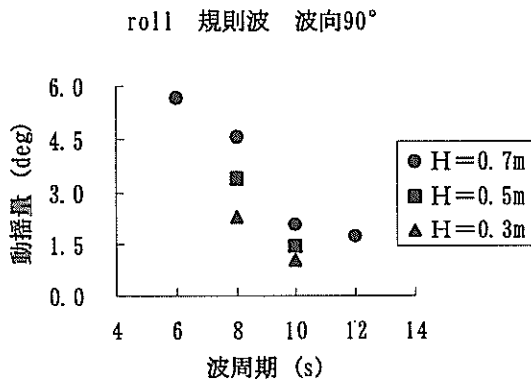


図-31 起重機船の動揺量
(規則波, 波向90°, roll)

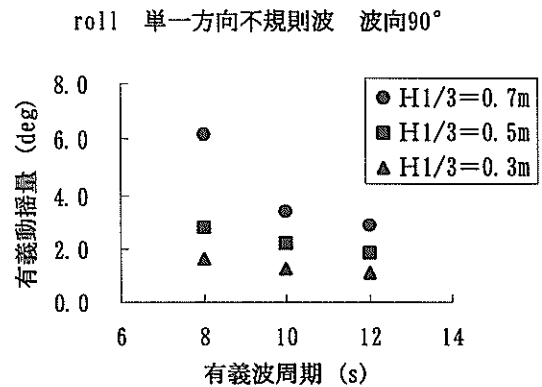


図-34 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向90°, roll)

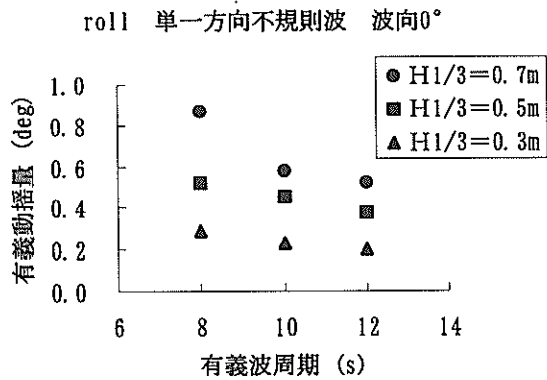


図-32 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向0°, roll)

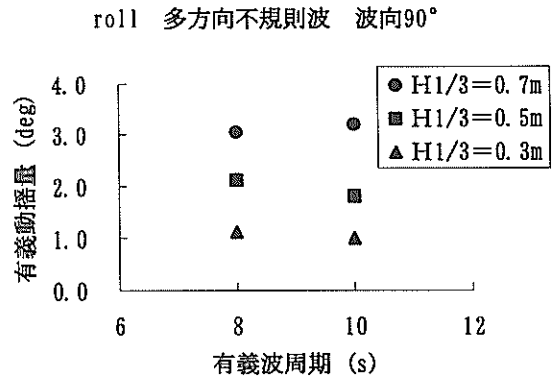


図-35 起重機船の動揺量
(多方向不規則波, 波向90°, roll)

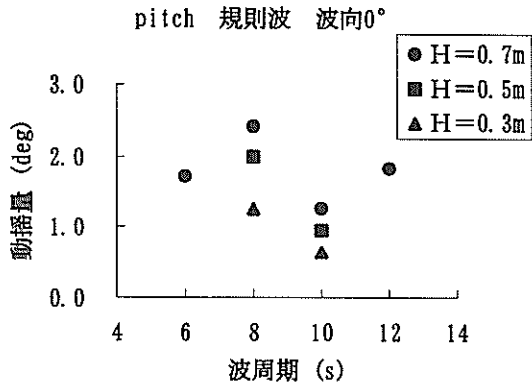


図-36 起重機船の動揺量
(規則波, 波向0°, pitch)

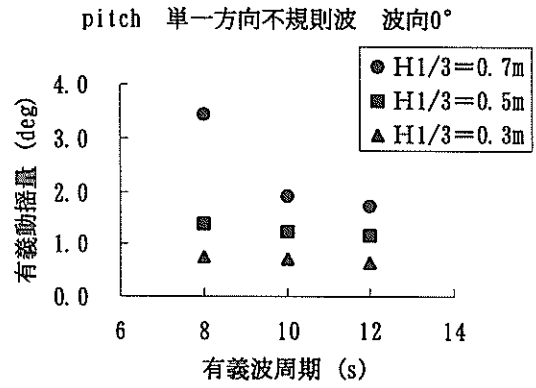


図-39 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向0°, pitch)

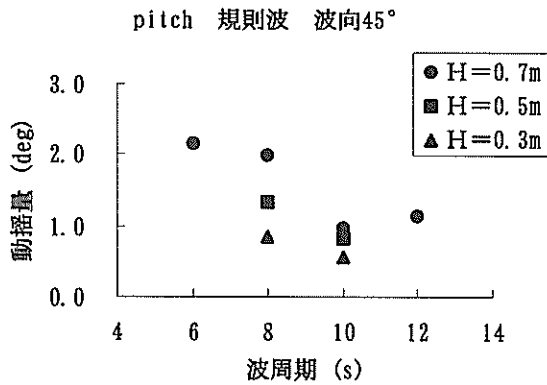


図-37 起重機船の動揺量
(規則波, 波向45°, pitch)

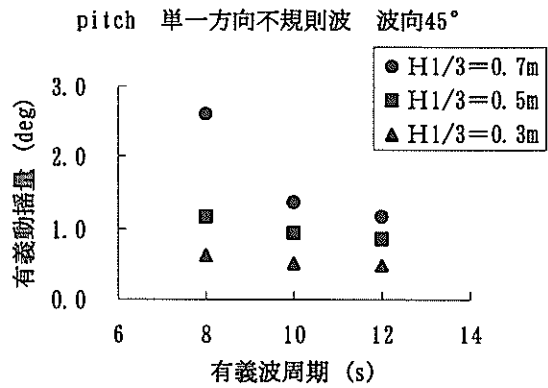


図-40 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向45°, pitch)

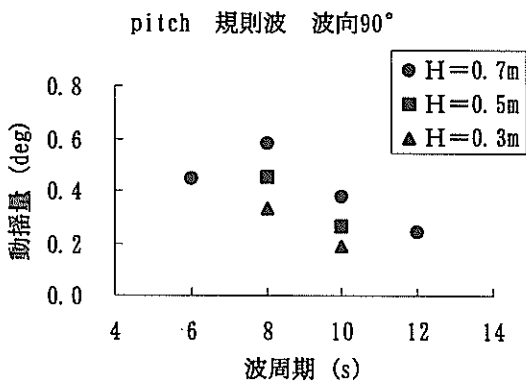


図-38 起重機船の動揺量
(規則波, 波向90°, pitch)

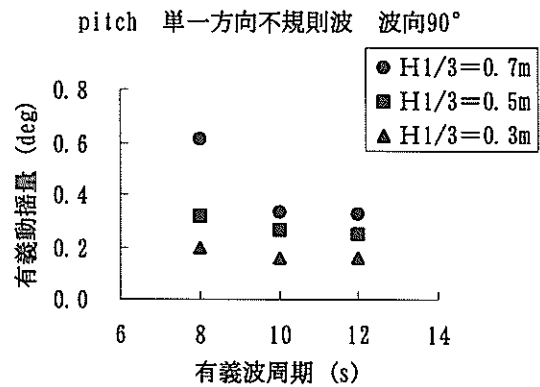


図-41 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向90°, pitch)

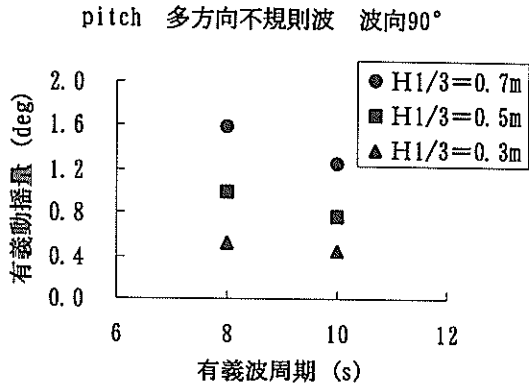


図-42 起重機船の動揺量
(多方向不規則波, 波向90°, pitch)

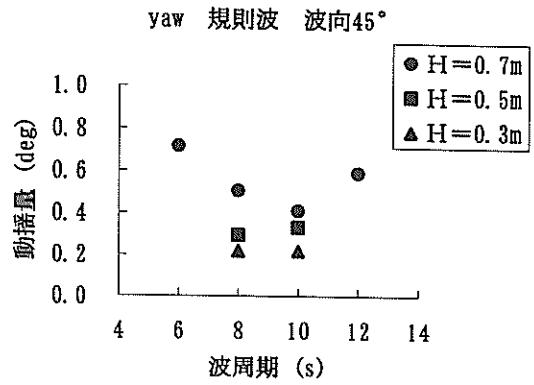


図-44 起重機船の動揺量
(規則波, 波向45°, yaw)

e) yaw

図-43～図-45は規則波中の、また図-46～図-49は不規則波中のyawの動揺量の波周期に対する関係を示したものである。それぞれ、波向0°, 45°, 90°に対するものである。これらの図から以下のことが言える。

①規則波中および不規則波中においては、波周期が長くなると動揺量が減少する傾向がみられる。波向0°では、yawは微小である。

②不規則波中の有義動揺量が最も大きいのは、波向45°のときで、有義波周期 $T_{1/3}=8s, 10s, 12s$ 、有義波高 $H_{1/3}=0.7m$ の波に対して、それぞれ、2.85deg, 1.58deg, 1.48degである。

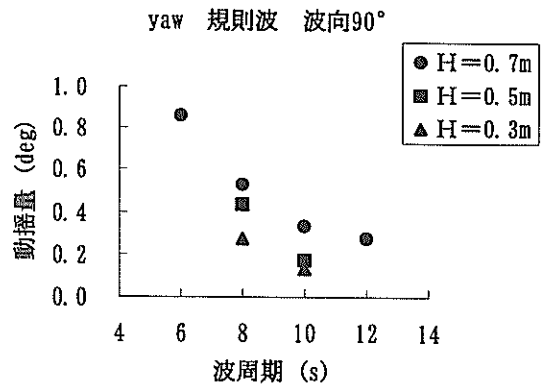


図-45 起重機船の動揺量
(規則波, 波向90°, yaw)

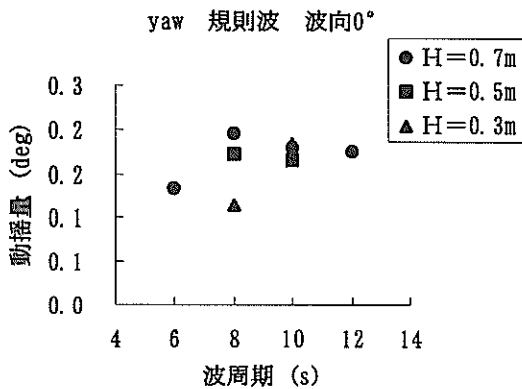


図-43 起重機船の動揺量
(規則波, 波向0°, yaw)

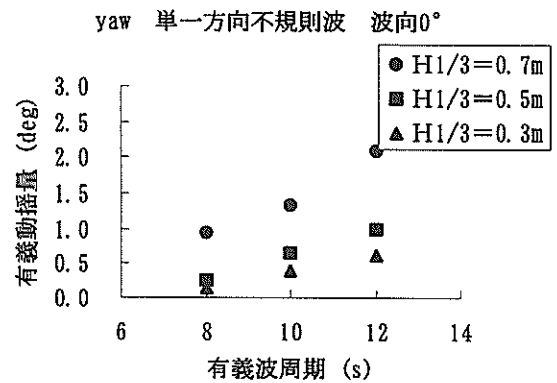


図-46 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向0°, yaw)

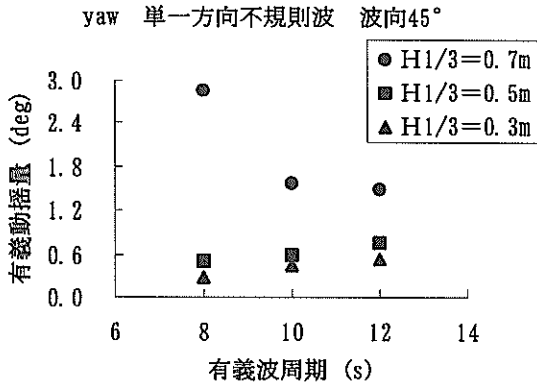


図-47 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向45°, yaw)

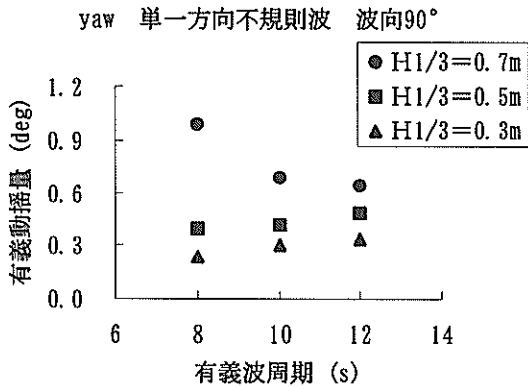


図-48 起重機船の動揺量
(単一方向不規則波, 波向90°, yaw)

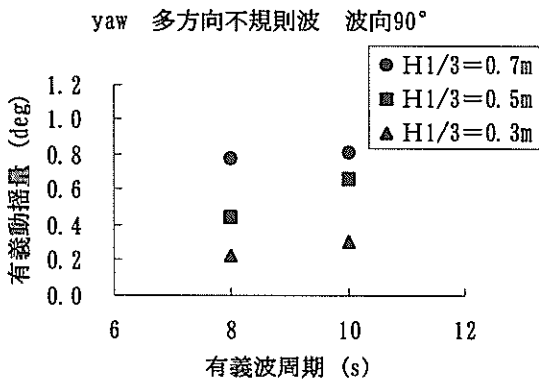


図-49 起重機船の動揺量
(多方向不規則波, 波向90°, yaw)

(2) 起重機船の動揺周期

規則波の代表例として、波向45°, 波高0.7mにおける船体動揺周期を図-50~図-54に示す。船体動揺の5成分いずれにおいても波周期の増加とともに船体動揺周期も増加する傾向となり、規則波ではyawの波周期(6sおよび12s, 実機換算)を除いて他の動揺成分では動揺周期と波周期とは一致する。

単一方向不規則波の例として波向45°, 有義波高0.7mにおける船体動揺周期を図-55~図-59に示す。単一方向不規則波ではrollおよびpitchにおける動揺周期はそれぞれの固有周期に近い値となるが、その他の成分は動揺周期が波周期よりやや長くなる傾向がみられる。とくに、yawについては波周期よりかなり長くなる傾向がみられる。

多方向不規則波については、波向90°, 有義波高0.7mにおける各成分の動揺周期を図-60~図-64に示す。多方向不規則波ではyawの有義波周期12sにて動揺周期が波周期と大きく異なる他は、単一方向不規則波と同じ傾向である。

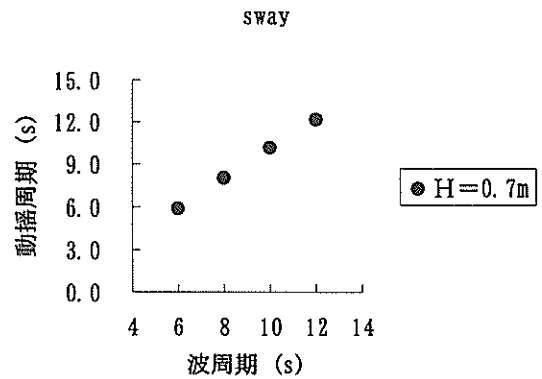


図-50 起重機船の動揺周期
(規則波, 波向45°, 波高0.7m, surge)

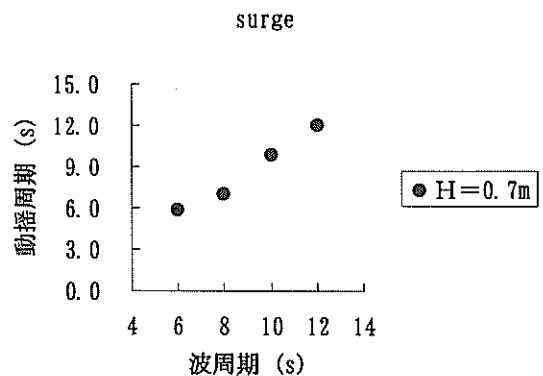


図-51 起重機船の動揺周期
(規則波, 波向45°, 波高0.7m, sway)

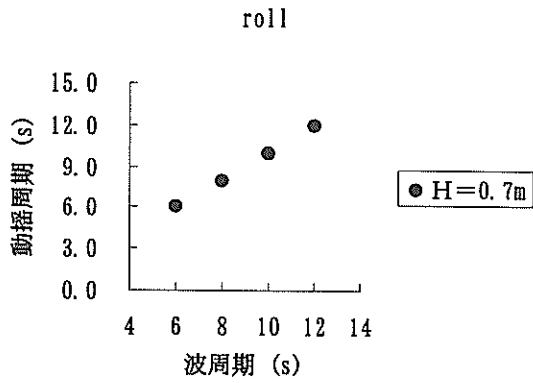


図-52 起重機船の動揺周期
(規則波, 波向45°, 波高0.7m, roll)

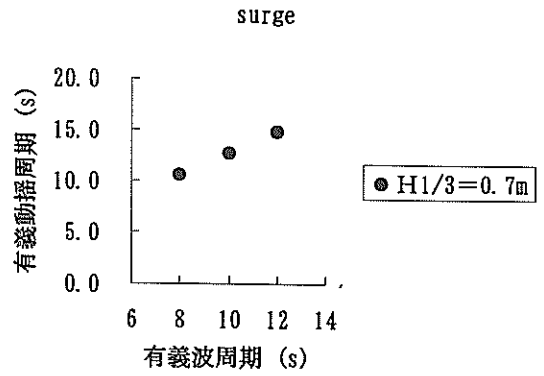


図-55 起重機船の動揺周期
(単一方向不規則波, 波向45°, 有義波高0.7m, surge)

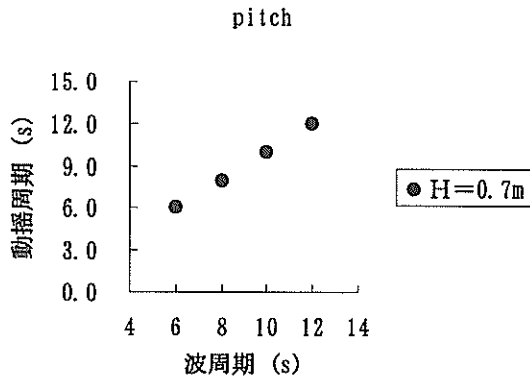


図-53 起重機船の動揺周期
(規則波, 波向45°, 波高0.7m, pitch)

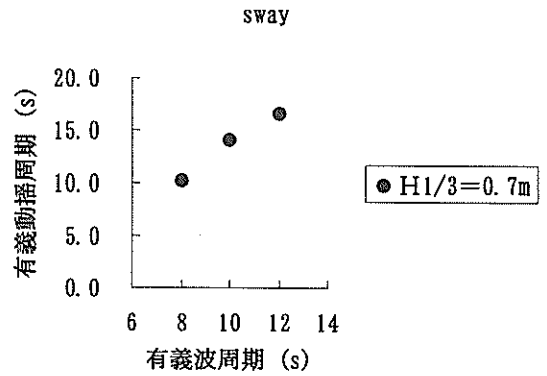


図-56 起重機船の動揺周期
(単一方向不規則波, 波向45°, 有義波高0.7m, sway)

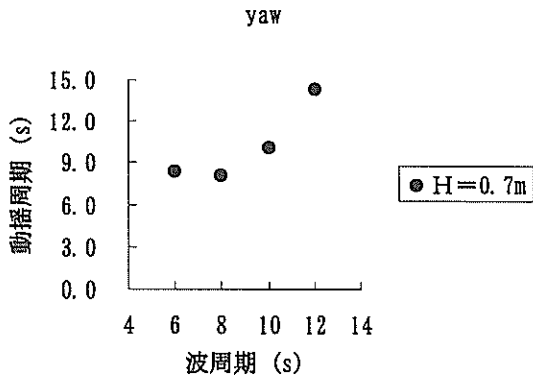


図-54 起重機船の動揺周期
(規則波, 波向45°, 波高0.7m, yaw)

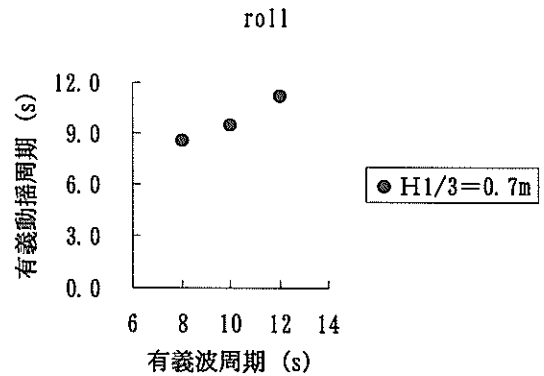


図-57 起重機船の動揺周期
(単一方向不規則波, 波向45°, 有義波高0.7m, roll)

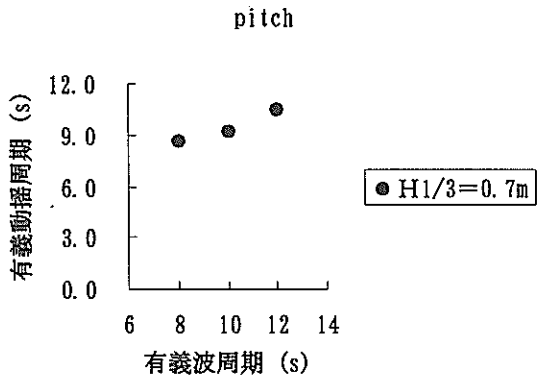


図-58 起重機船の動揺周期
(単一方向不規則波, 波向45°, 有義波高0.7m, pitch)

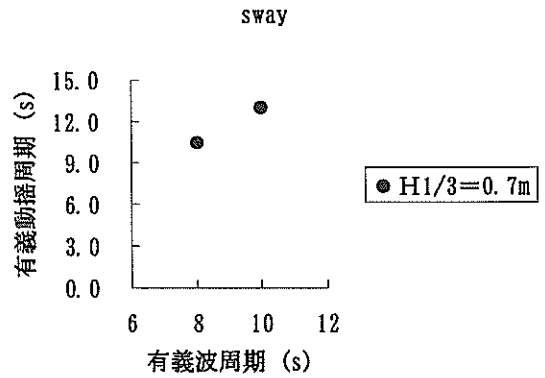


図-61 起重機船の動揺周期
(多方向不規則波, 波向90°, 有義波高0.7m, sway)

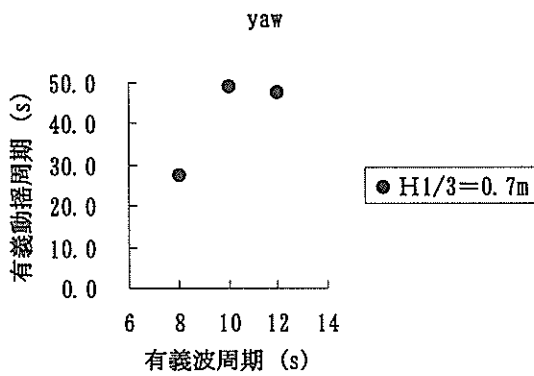


図-59 起重機船の動揺周期
(単一方向不規則波, 波向45°, 有義波高0.7m, yaw)

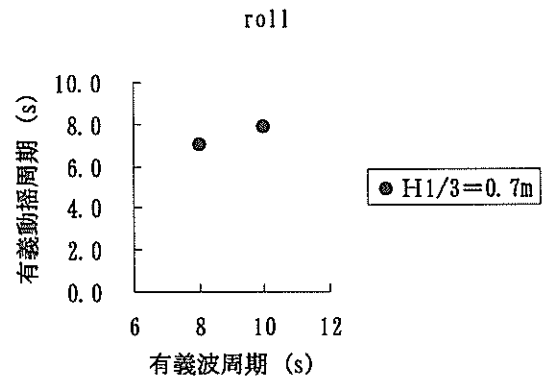


図-62 起重機船の動揺周期
(多方向不規則波, 波向90°, 有義波高0.7m, roll)

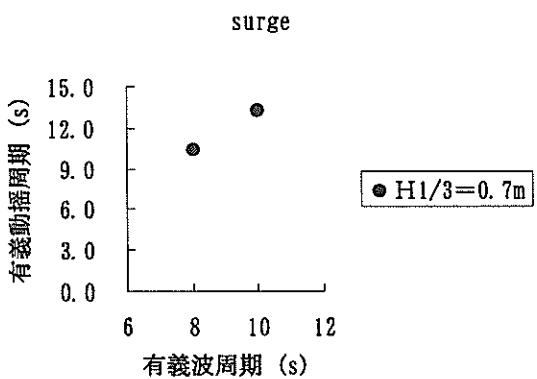


図-60 起重機船の動揺周期
(多方向不規則波, 波向90°, 有義波高0.7m, surge)

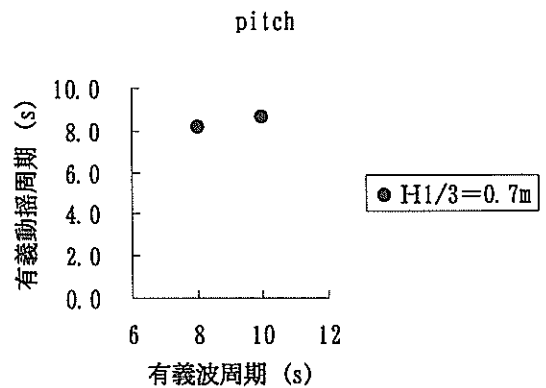


図-63 起重機船の動揺周期
(多方向不規則波, 波向90°, 有義波高0.7m, pitch)

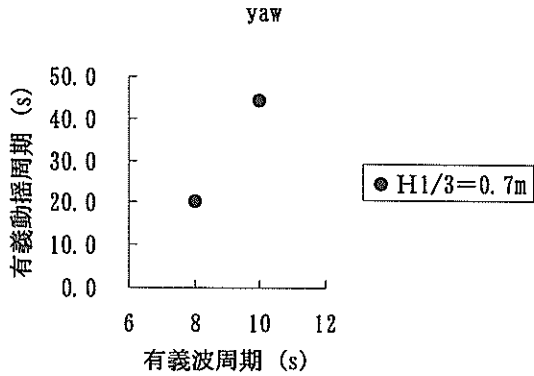


図-64 起重機船の動揺周期

(多方向不規則波, 波向90°, 有義波高0.7m, yaw)

(3) 係留力

ここでは, 単一方向不規則波の有義波高0.7mにおいて波向を0°, 45°, 90°と変更したとき, および多方向不規則波の有義波高0.7m, 波向90°のときの係留索の最大張力を図-65に示す. 模型船の係留索には実機換算で約98kNの初期張力を作用させているが, 図-65で示した張力はこの初期張力も含めた係留索の最大張力である. 0°, 45°, 90°のいずれの波向においても, 有義波周期が長くなるとともに係留索の最大張力は増加する. また波向の相違による最大張力の大小関係は, 0° > 45° > 90°となっている. これは前後の並進運動であるsurge成分が波向0°のときに, 最も大きくなることによるものである. すなわち, 船体の前後並進運動により係留索の最大張力が大きくなったものと考えられる.

次に有義波周期ごとの係留限界波高を調べる. 実船のワイヤーφ32mmの切断荷重は616kNであるので, 安全率を2.5とすると許容荷重は246kNである.

波向0°および45°においては, 有義波周期10s以上では許容荷重以上となる. 波向90°においてはいずれの波周期においても最大張力は許容荷重以下であった. 現場における係留索の展張角度あるいは, 初期張力の大小の相違はあるが, 水理模型実験のうち単一方向不規則波の有義波高0.7mにおける係留力から求められる係留限界となる波周期の条件は, おおむね有義波周期10s以下である. なお, 図-65に示すように, 波向90°における単一方向不規則波と多方向不規則波における最大張力を比較すると, 多方向不規則波中の張力の値が大きくなっていることがわかる. 多方向不規則波中では, 前出の動揺量の図面で示したように, 波向90°においては, surge, pitch, などの動揺量が単一方向不規則波中よりも大きくなっており, これが最大張力の増大の原因になっていると思われる.

係留力による係留限界波高の設定については, この点についても配慮する必要がある.

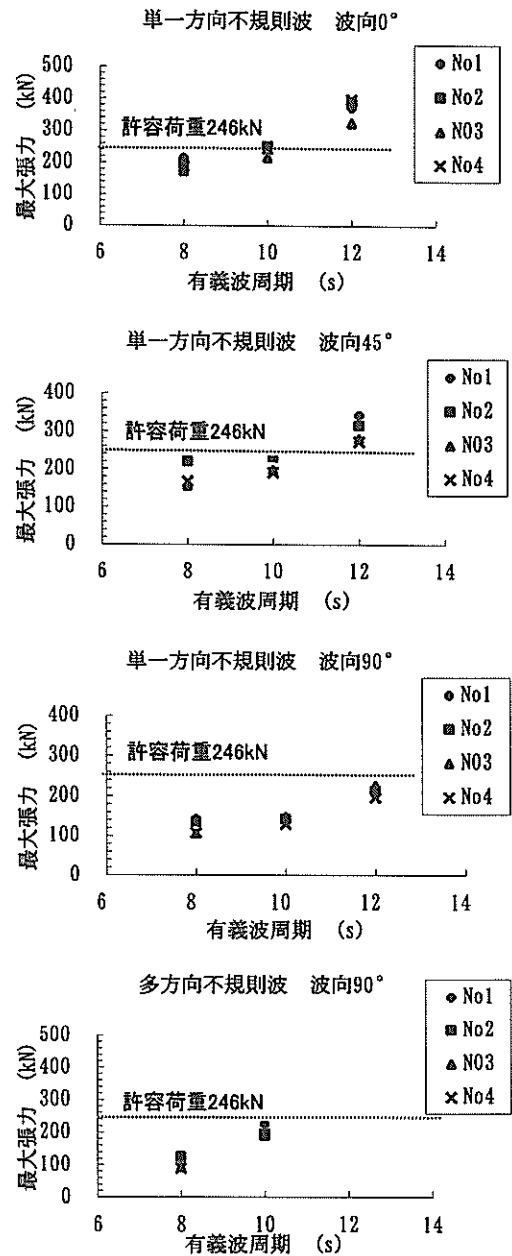


図-65 係留索の最大張力

4.3 吊フックの減揺特性

(1) 吊フックの減揺効果

吊フックの減揺効果を同一波特性・波高にて、波向ごとに図-66～図-80に示す。図の横軸は波周期を表し、縦軸は吊フック動揺量 X 、 Y 成分の動揺有義値を有義波高で除算して無次元化して表している。

a) 規則波

図-66～図-71は規則波、波向 0° 、 45° 、 90° について吊フックの動揺量を表したものである。非制御状態で吊フック X 、 Y 動揺量は、波漂流力の影響が大きい波周期 $T=6s$ を除いて、有義波周期が長くなるにつれて X/H 、 Y/H も増加するが、制御状態では無次元値の X/H 、 Y/H は波周期の相違による変化は顕著に表れず、アーム装置の制御による減揺効果が十分大きくなることがわかる。しかし波周期 $T=6s$ の場合は装置の制御タイムステップの関係から波の1周期の中における波予測データ数の不足のため、位置予測計算が不十分でアームの減揺効果はあまりみられない。実機においては、波の1周期に対する制御のタイムステップが相対的に細かくとることが可能となることから、水理模型実験の状態に比較すると制御がより容易になると思われる。

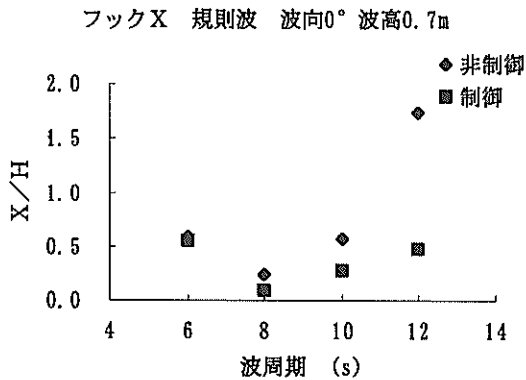


図-66 吊フックX成分の減揺効果
(規則波、波向 0° 、波高0.7m)

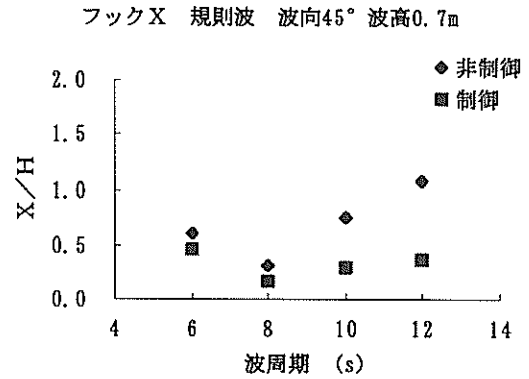


図-67 吊フックX成分の減揺効果
(規則波、波向 45° 、波高0.7m)

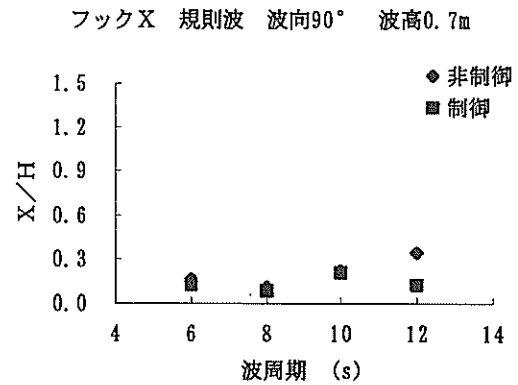


図-68 吊フックX成分の減揺効果
(規則波、波向 90° 、波高0.7m)

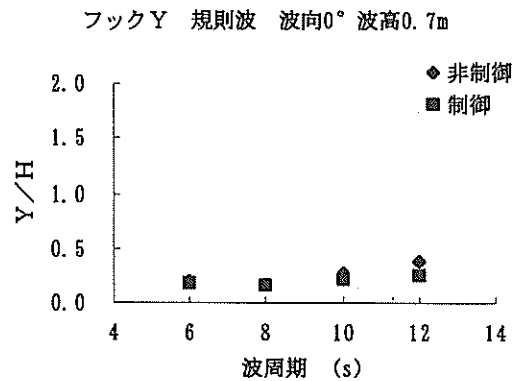


図-69 吊フックY成分の減揺効果
(規則波、波向 0° 、波高0.7m)

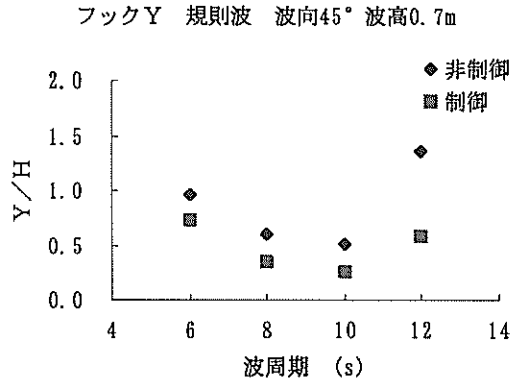


図-70 吊フック Y成分の減揺効果
(規則波, 波向45°, 波高0.7m)

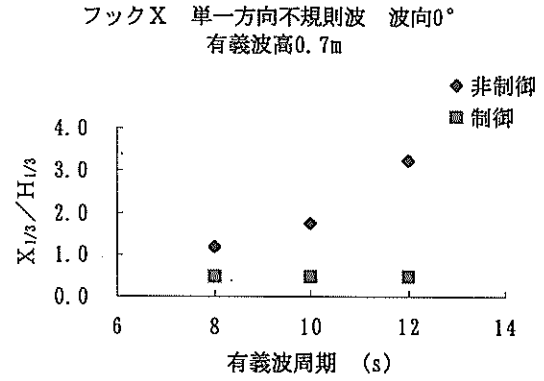


図-72 吊フック X成分の減揺効果
(単一方向不規則波, 波向0°, 有義波高0.7m)

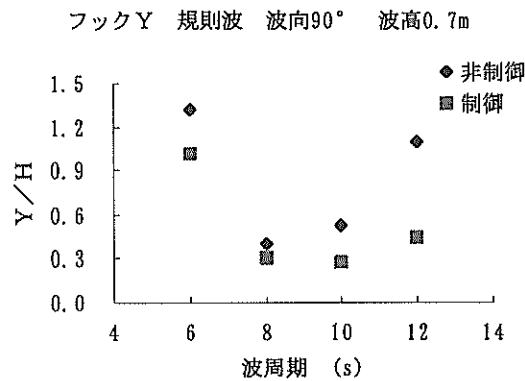


図-71 吊フック Y成分の減揺効果
(規則波, 波向90°, 波高0.7m)

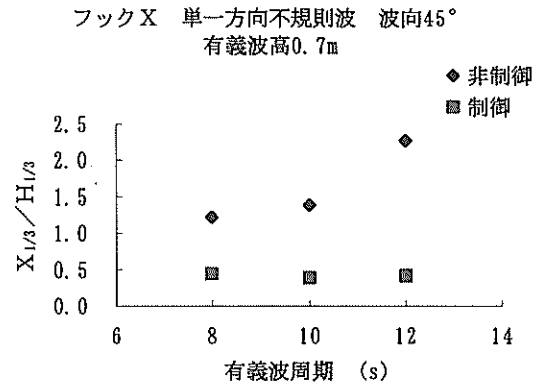


図-73 吊フック X成分の減揺効果
(単一方向不規則波, 波向45°, 有義波高0.7m)

b) 単一方向不規則波

図-72~図-77は単一方向不規則波, 波向0°, 45°, 90° についての吊フックの X, Y動揺量を示すが, 非制御状態においては, 有義波周期が長くなるにつれての増加と共に $X_{1/3}/H_{1/3}$, $Y_{1/3}/H_{1/3}$ が増加するが, 制御状態では無次元値の $X_{1/3}/H_{1/3}$, $Y_{1/3}/H_{1/3}$ は有義波周期の相違による変化は顕著ではなく, 非制御状態の動揺量と比べるとアーム装置の制御による減揺効果が十分に大きいことがわかる. とくに, 周期の長い波に対しては, 減揺効果が大きいことがわかる.

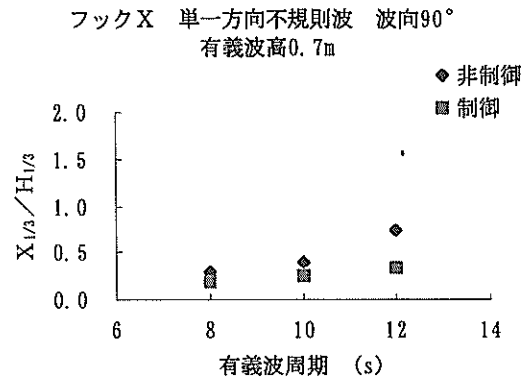


図-74 吊フック X成分の減揺効果
(単一方向不規則波, 波向90°, 有義波高0.7m)

フック Y 単一方向不規則波 波向0°
有義波高0.7m

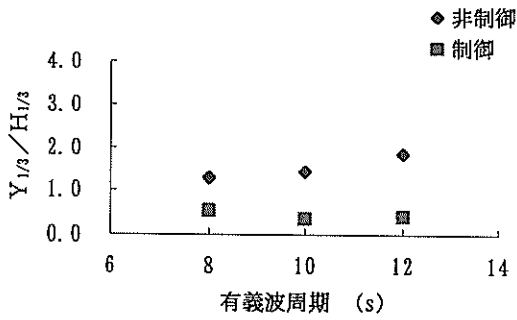


図-75 吊フック Y成分の減揺効果

(単一方向不規則波, 波向0°, 有義波高0.7m)

フック Y 単一方向不規則波 波向45°
有義波高0.7m

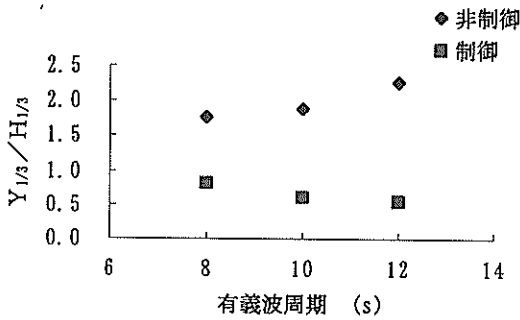


図-76 吊フック Y成分の減揺効果

(単一方向不規則波, 波向45°, 有義波高0.7m)

フック Y 単一方向不規則波 波向90°
有義波高0.7m

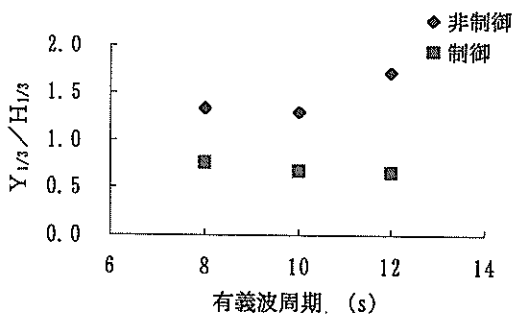


図-77 吊フック Y成分の減揺効果

(単一方向不規則波, 波向90°, 有義波高0.7m)

c) 多方向不規則波

図-78, 図-79は多方向不規則波, 波向90° についてフックの X, Y動揺量を示すが, 非制御状態ではフックの X, Y動揺量は, 有義波周期が長くなるにつれて無次元値 $X_{1/3}/H_{1/3}$, $Y_{1/3}/H_{1/3}$ も増加するが, 制御状態では無次元値の $X_{1/3}/H_{1/3}$, $Y_{1/3}/H_{1/3}$ は有義波周期の相違による変化は単一方向不規則波のときと同様に顕著に表れず, アーム装置の制御による減揺効果が多方向不規則波中においても十分に大きいことがわかる. とくに, 周期の長い波に対しては, 減揺効果が大きいことは, 単一方向不規則波の場合と同様である.

フック X 多方向不規則波 波向90°
有義波高0.7m

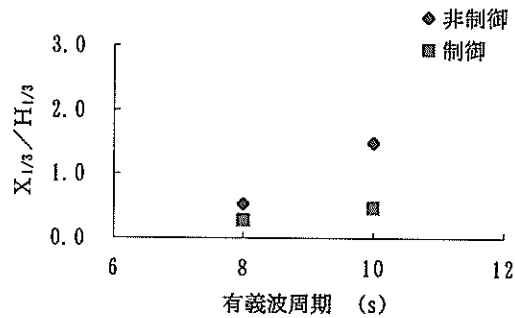


図-78 吊フック X成分の減揺効果

(多方向規則波, 波向90°, 有義波高0.7m)

フック Y 多方向不規則波 波向90°
有義波高0.7m

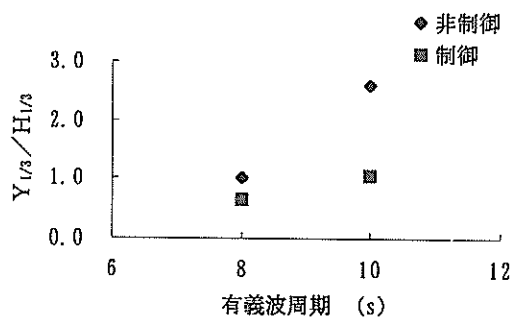


図-79 吊フック Y成分の減揺効果

(多方向規則波, 波向90°, 有義波高0.7m)

d) 単一方向不規則波と多方向不規則波との相違

図-80, 図-81は波向90°について, 単一方向不規則波と多方向不規則波におけるフックのX, Y動揺量を非制御状態, 制御状態について無次元値で示している. 非制御状態では, 単一方向不規則波の場合と多方向不規則波の場合の吊フックの動揺量とを無次元値 $X_{1/3}/H_{1/3}$, $Y_{1/3}/H_{1/3}$ で比べると, 多方向不規則波の場合のほうが大きいことがわかる. とくに吊フックX成分で著しく増加することがわかる. 多方向不規則波の場合には斜波成分が入ることにより船体のyawが生ずるため, フック位置の動揺が大きくなることが原因として考えられる. 制御状態では単一方向不規則波の場合と多方向不規則波の場合について無次元値 $X_{1/3}/H_{1/3}$, $Y_{1/3}/H_{1/3}$ で比べると, 両状態ともアーム装置の制御による減揺効果が十分に大きいことがわかる. このように, 多方向不規則波中においても本システムの減揺効果は大きなことが確認された.

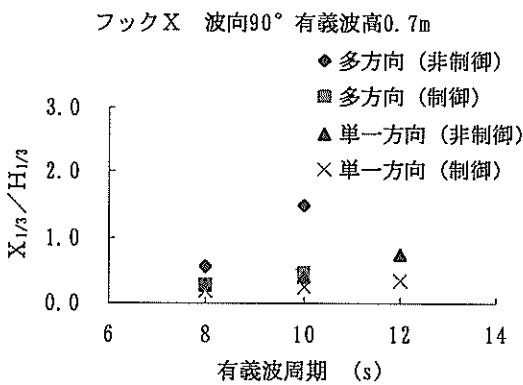


図-80 吊フック X成分の減揺効果 (波向90°, 有義波高0.7m)

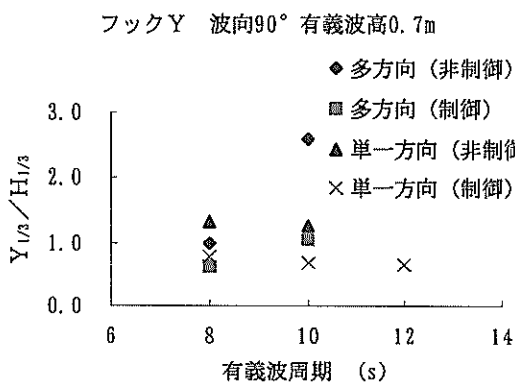


図-81 吊フック Y成分の減揺効果 (波向90°, 有義波高0.7m)

e) 吊荷状態

水理模型実験では, 吊フックの先端に重量2.6kg (実機60t) の荷を吊った状態についても実験を行った. 図-82, 図-83は吊荷状態の吊フックの減揺効果を表したものである. 吊荷が無い状態と同様に非制御状態では吊フックのX, Y動揺量は, 有義波周期が長くなるにつれて, $X_{1/3}/H_{1/3}$ / $Y_{1/3}/H_{1/3}$ も増加する. 制御状態では無次元値の $X_{1/3}/H_{1/3}$ / $Y_{1/3}/H_{1/3}$ は有義波周期の相違による変化は顕著に表れず, かつ非制御状態に比べて揺れの振幅の低減が大きく, アーム装置の制御による減揺効果が十分に大きいことがわかる.

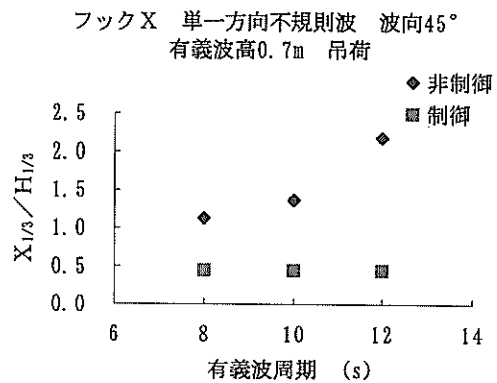


図-82 吊フック X成分の減揺効果 (単一方向不規則波, 波向45°, 有義波高0.7m, 吊荷)

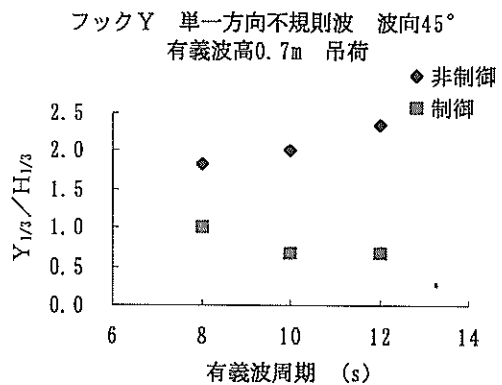


図-83 吊フック Y成分の減揺効果 (単一方向不規則波, 波向45°, 有義波高0.7m, 吊荷)

f) 振れ止め装置が無い状態

水理模型実験では、吊金具から振れ止め装置を外した状態についても実験を行った。図-84、図-85は単一方向不規則波、波向45°，有義波高 $H_{1/3}=0.7\text{m}$ における模型船に振れ止め装置が無い状態（図中ではアーム無と表す）と振れ止め装置が有り、かつ制御状態（図中では制御と表す）における吊フックのX方向、Y方向の最大動揺量(m)を比較したものである。ただし、両状態における動揺量の相違が大きいことから縦軸は対数表示としている。なお、ここで最大値で比較したのは、アーム無の状態は、動揺振幅が大きくCCDカメラでは追尾できなかったため、ビデオカメラのモニタから振幅値を読み取ったためである。これらの結果をみると振れ止め装置が無い状態では吊フックが船体幅以上に振れる状況になることがあり、これに対して、アーム装置の制御状態では、最大で約1/40の減揺効果が得られることがわかる。

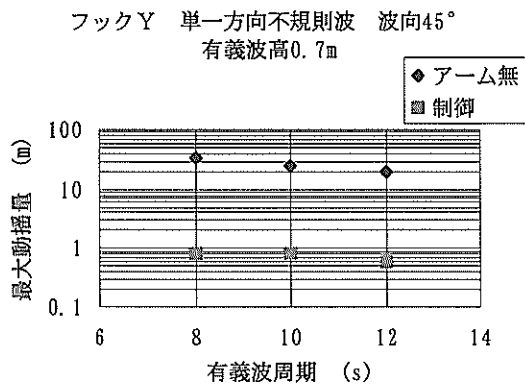


図-84 吊フック X成分の減揺効果

(単一方向不規則波、波向45°，有義波高0.7m, max)

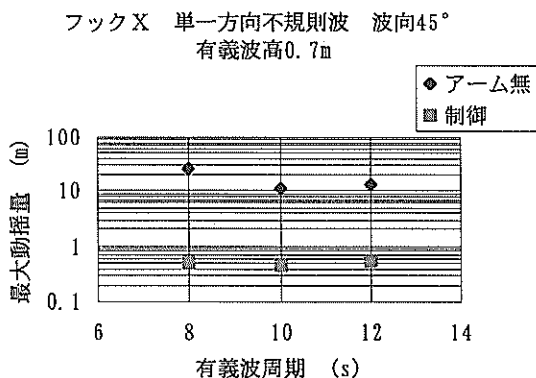


図-85 吊フック Y成分の減揺効果

(単一方向不規則波、波向45°，有義波高0.7m, max)

4.4 吊フック振れ止めシステムによる作業限界の改善効果

(1) 起重機船の吊フックの許容動揺量

起重機船の稼働限界条件として現場作業では吊フックの動揺量振幅の有義値を0.6m程度とするものが多いので、ここではこれに基づき、許容動揺量をフックX、Y方向ともに0.6mと仮定した。

(2) 稼働限界の波浪条件

前項で定めた吊フックの許容動揺量に基づいて、水理模型実験結果を用いて起重機船の稼働限界の波浪条件をアーム装置の制御状態と非制御状態とについて波周期ごとに示した。なお稼働限界波高とはフック動揺量が波高に比例すると仮定して求めた値(単位m)である。表-11は吊荷が無い状態で吊フックの許容動揺量に基づいて制御状態と非制御状態とについて稼働限界波高を求めたものである。また、表-12は吊荷が有る状態で、吊フックの許容動揺量に基づいて求めた稼働限界波高である。以上のようにして起重機船の稼働限界の波浪条件を求め、図化した。ただし、表-11および表-12において網掛けで表記したように限界波高はフックX、Yのうち波高が小さくなるもので定めている。図-86、図-87は吊荷が無い状態のときの吊フックの動揺量から求めた単一方向不規則波、多方向不規則波に対する稼働限界波高である。また図-88、図-89は吊荷があるときの吊フックの動揺量から求めた単一方向不規則波、多方向不規則波に対する稼働限界波高である。

表-11 稼働限界の波浪条件 (吊荷無)

波向	波特性	フック制御状態	8s	10s	12s	
0°	単一方向不規則波	X	制御	1.22	1.32	1.26
			非制御	0.50	0.34	0.18
		Y	制御	1.12	1.58	1.53
			非制御	0.46	0.42	0.33
45°	単一方向不規則波	X	制御	1.38	1.49	1.41
			非制御	0.49	0.43	0.26
		Y	制御	0.74	0.97	1.09
			非制御	0.34	0.32	0.26
90°	多方向不規則波	X	制御	3.15	2.43	1.74
			非制御	2.11	1.48	0.81
		Y	制御	0.79	0.90	0.92
			非制御	0.45	0.47	0.35
		X	制御	2.05	1.27	
			非制御	1.09	0.40	
Y	制御	0.96	0.57			
	非制御	0.60	0.23			

単位：有義波高(m)

表-12 稼働限界の波浪条件 (吊荷有)

波向	波特性	フック	制御状態	8s	10s	12s
0°	単一方向不規則波	X	制御	1.09	1.29	1.31
			非制御	0.48	0.33	0.18
		Y	制御	1.02	1.22	1.37
			非制御	0.48	0.43	0.33
45°		X	制御	1.34	1.37	1.36
			非制御	0.53	0.44	0.27
		Y	制御	0.60	0.90	0.89
			非制御	0.33	0.30	0.25
90°	多方向不規則波	X	制御	2.91	2.55	1.91
			非制御	2.09	1.53	1.01
		Y	制御	0.67	0.78	0.83
			非制御	0.43	0.43	0.33
	X	制御	1.88	1.99		
		非制御	1.06	0.55		
	Y	制御	0.97	0.81		
		非制御	0.70	0.35		

単位：有義波高(m)

a) 吊荷が無い状態

イ) 波向0°

有義波周期 $T_{1/3}=8s$ の非制御状態では稼働限界波高は、有義波高 $H_{1/3}=0.46m$ であるが、制御状態では有義波高が $H_{1/3}=1.12m$ に上昇する。また有義波周期が $T_{1/3}=10s, 12s$ の場合でも同じように非制御状態では稼働限界の有義波高が $H_{1/3}=0.34m, 0.18m$ であるが、制御状態では $H_{1/3}=1.32m, 1.26m$ に上昇する。

ロ) 波向45°

有義波周期 $T_{1/3}=8s$ の非制御状態では稼働限界波高は、有義波高 $H_{1/3}=0.34m$ であるが、制御状態では有義波高が $H_{1/3}=0.74m$ に上昇する。また有義波周期が $T_{1/3}=10s, 12s$ の場合でも同じように非制御状態では稼働限界の有義波高が $H_{1/3}=0.32m, 0.26m$ であるが、制御状態では $H_{1/3}=0.97m, 1.09m$ に上昇する。

ハ) 波向90°

単一方向不規則波の場合、有義波周期 $T_{1/3}=8s$ の非制御状態では稼働限界波高は、有義波高 $H_{1/3}=0.45m$ であるが、制御状態では有義波高が $H_{1/3}=0.79m$ に上昇する。また有義波高が $T_{1/3}=10s, 12s$ の場合でも、同じように非制御状態では稼働限界の有義波高が $H_{1/3}=0.47m, 0.35m$ であるが、制御状態では $H_{1/3}=0.90m, 0.92m$ に上昇する。

多方向不規則波の場合、有義波周期 $T_{1/3}=8s, 10s$ の非制御状態では稼働限界波高は、有義波高 $H_{1/3}=0.60m, 0.23m$ であるが、制御状態では稼働限界の有義波高が $H_{1/3}=0.96m, 0.57m$ に上昇する。

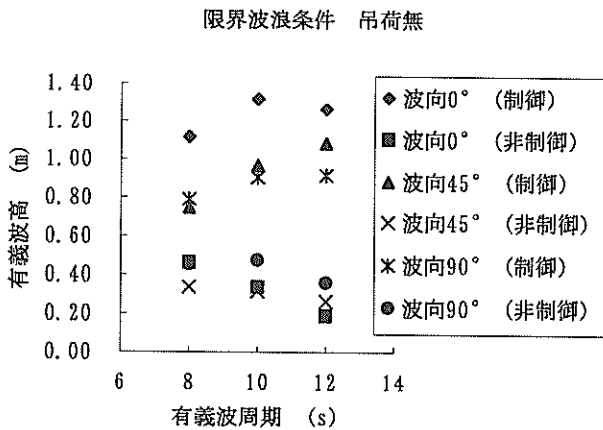


図-86 稼働限界の波浪条件 (単一方向不規則波, 吊荷無)

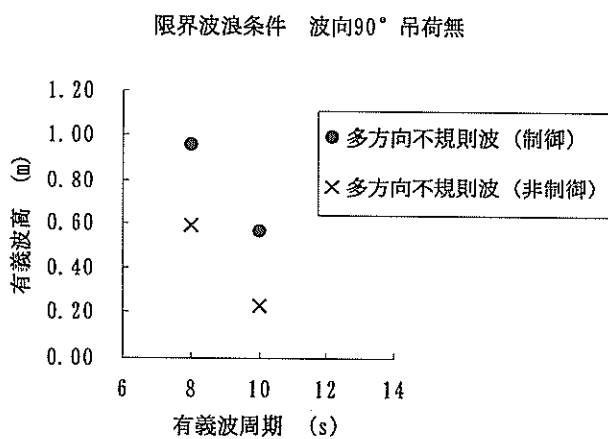


図-87 稼働限界の波浪条件 (多方向不規則波, 吊荷無)

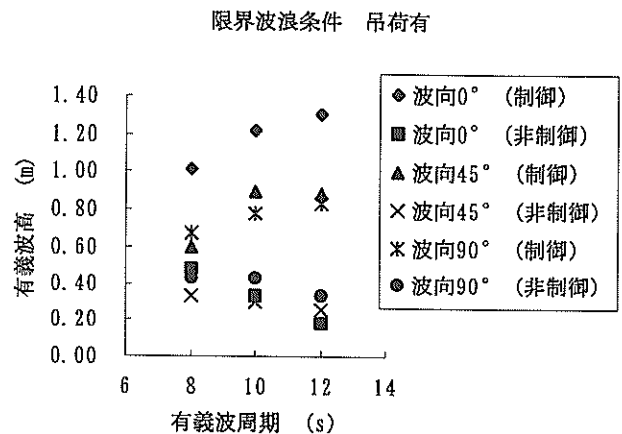


図-88 稼働限界の波浪条件 (単一方向不規則波, 吊荷有)

限界波浪条件 波向90° 吊荷有

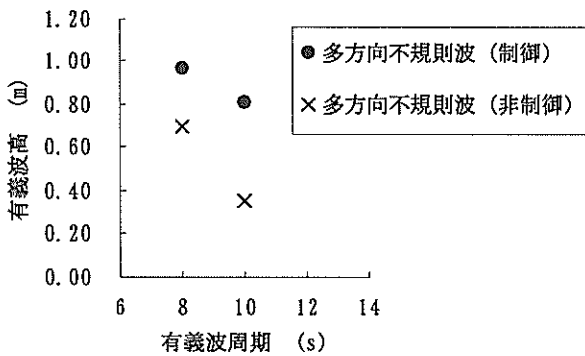


図-89 稼働限界の波浪条件
(多方向不規則波, 吊荷有)

b) 吊荷がある状態

イ) 波向0°

有義波周期 $T_{1/3}=8s$ の非制御状態では稼働限界波高は、有義波高 $H_{1/3}=0.48m$ であるが、制御状態では有義波高が $H_{1/3}=1.02m$ に上昇する。また有義波周期が $T_{1/3}=10s, 12s$ の場合でも同じように非制御状態では稼働限界の有義波高が $H_{1/3}=0.33m, 0.18m$ であるが、制御状態では $H_{1/3}=1.22m, 1.31m$ に上昇する。

ロ) 波向45°

有義波周期 $T_{1/3}=8s$ の非制御状態では稼働限界波高は、有義波高 $H_{1/3}=0.33m$ であるが、制御状態では有義波高が $H_{1/3}=0.60m$ に上昇する。また有義波周期が $T_{1/3}=10s, 12s$ の場合でも同じように非制御状態では稼働限界の有義波高が $H_{1/3}=0.30m, 0.25m$ であるが、制御状態では $H_{1/3}=0.90m, 0.89m$ に上昇する。

ハ) 波向90°

単一方向不規則波の場合、有義波周期 $T_{1/3}=8s$ の非制御状態では稼働限界波高は、有義波高 $H_{1/3}=0.43m$ であるが、制御状態では有義波高が $H_{1/3}=0.67m$ に上昇する。また有義波高が $T_{1/3}=10s, 12s$ の場合でも同じように非制御状態では稼働限界の有義波高が $H_{1/3}=0.43m, 0.33m$ であるが、制御状態では $H_{1/3}=0.78m, 0.83m$ に上昇する。

多方向不規則波の場合、有義波周期 $T_{1/3}=8s, 10s$ の非制御状態では稼働限界の有義波高 $H_{1/3}=0.70m, 0.35m$ であるが、制御状態では有義波高が $H_{1/3}=0.97m, 0.81m$ に上昇する。

5. 結論

本研究においては、起重機船の吊フック振れ止めシステムの不規則波浪条件下における減揺効果の確認を行うために、模型装置を製作して、水理模型実験を行った。水理模型実験は300t吊起重機船の縮尺1/28.42のモデルを用い、運輸省港湾技術研究所の平面水槽（長さ37m×幅23m）に、二又アーム装置を取り付けた模型船を4本の係留索にて係留し、サーベント型造波機により波浪を与え、模型船を動揺させて起重機船の吊フック振れ止めシステムを自動制御して、水槽内の架台上に設置したFAパソコンにてデータの収録を行った。模型船上には、二又アーム装置を制御するコントローラ類および計測機器を装備しており、二又アーム装置の制御はFAパソコンで初期値を設定すると、全ての自動制御が模型船単独で自動的にこなすことが可能である。実験条件は規則波、単一方向不規則波、多方向不規則波について、波周期、波高、および波向などの波浪条件を変化させて、起重機船の吊フックの動揺ならびに船体動揺、係留力を測定し、吊フックの振れ止め装置の減揺効果を調べた。

主要な結論は以下に示すとおりである。

(1) 規則波、単一方向不規則波、多方向不規則波のすべての実験条件に対して、制御状態では非制御状態に比べて大幅に運動振幅が減少することが確認された。現地換算で波向45°、有義波高0.7m、有義波周期10sの波浪条件では、運動振幅は制御前に比較してX方向0.28倍、Y方向0.33倍に減少した。

(2) 起重機船において作業限界のめやすとされている許容動揺量に基づいて、実験結果を用いて起重機船の稼働限界となる波浪条件を求めた。規則波、単一方向不規則波、多方向不規則波のいずれの条件についても、制御時には非制御時に比べると、明らかに施工限界波高が向上することが明らかになった。

(3) 本装置を用いることによって玉掛け等の作業が従来の限界波高条件以上の状態においても可能となり、起重機船の作業稼働率を向上させることが期待される。

6. あとがき

今回の水理模型実験により、起重機船の吊フックの振れ止めシステムの減揺効果を実験的に確認することができた。

今後は水理模型実験から得られたデータを相似則に基づいて、実機換算することにより実機への適応性についての検討を行う予定であるが、今回はX-Y平面内の動

揺に対する減揺方法についての検討であるため、今後は吊フックの上下方向（Z方向）についても減揺システムの検討を行う予定である。

なお、本研究は、平成11年度に運輸省港湾技術研究所と寄神建設株式会社の共同研究として実施したものである。本方法の検討をさらに進め、現場における作業稼働率の向上および作業の安全性の向上に資することを期待して結語とする。

(2000年5月31日受付)

参考文献

- 上田茂, 樋口豊志(1991):起重機船の動揺特性と稼働条件, 港湾技研資料, No. 709, pp. 83~92.
- 白石悟, 石見剛(1998):アンケートおよび動揺シュミレーションによる作業船の海上作業限界条件に関する検討, 港研技研資料, No. 898, pp. 3~26.
- 今関正典, 牟田口勝生, 岩崎 到, 谷田宏次(1997):起重機船吊枠制振装置, 石川島播磨技報, Vol. 37, No. 5, pp. 349~357.
- 関西造船協会(1976):造船設計便覧(第3版), 海文堂, 274p.

主要記号表

- $A(k)$: 加速度, $A(k) = (\ddot{x}(k) - \ddot{x}(k - \Delta t))$ (mm/s²)
- a : 変位パラメーター, $a = 1.0$
- b : 速度パラメーター
- c : 加速度パラメーター
- $H_{1/3}$: 有義波高 (m)
- $s(k)$: 変位量, $s(k) = x(k) - x(k - \Delta t)$ (mm)
- $T_{1/3}$: 有義波周期 (s)
- Δt : 遅れ時間, $\Delta t = T_1 + T_2 + T_3$ (s)
- T_1 : センサー検出遅れ時間 (s)
- T_2 : 制御演算遅れ時間 (s)
- T_3 : アーム動作遅れ時間 (s)
- $v(k)$: 速度, $v(k) = (\dot{x}(k) - \dot{x}(k - \Delta t))$ (mm/s)
- $x(k)$: 現在値 (mm)
- $x(k - \Delta t)$: 前回値(Δt 秒前の値) (mm)

港湾技研資料 No.966

2000.9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社ポートサイド印刷

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyrights ©(2000) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。