

波風併存下における錨泊船の振れ回り運動に関する模型実験

鈴木 良介*, 宮崎 英樹*, 河村 昂軌*, 塚田 吉昭*,
齋藤 昌勝**, 渡邊 充史**

Experimental Study on the Slewing Motion of Ships Moored by Anchor in Wind and Waves

by

SUZUKI Ryosuke*, MIYAZAKI Hideki*, KAWAMURA Kouki*, TSUKADA Yoshiaki*,
SAITO Masakatsu** and WATANABE Mitsushi**

Abstract

In this study, we conducted a tank test on the slewing motion of ships moored by an anchor in wind and waves, using models of a half-loaded tanker and a fully loaded ferry. In the test, instead of using wind blowers, we simulated the effects of wind on the ships using the wind loads simulator (WiLS), which directly exerts intended forces equivalent to wind loads on the ship model. First, we clarified the applicability of the WiLS to a tank test on anchoring ships by checking the forces generated by the WiLS under ships' slewing motion in wind and the relation of measured values between the slewing motion and the horizontal anchor tension. Next, we carried out the test under various wind and wave conditions for ships moored by a single anchor, two anchors, and a single anchor with a second anchor as a snubber. The qualitative results are summarized as follows:

- Anchor tension in both wind and waves consist of components in wind and fluctuating at the wave period.
- The maximum anchor tension in wind and waves is larger than that without waves.
- The amplitude of the anchor tension component fluctuating at the wave period depends on the magnitude of vertical displacement at the top end of the anchor chain and the mean tension. Thus, it increases in large and long waves, and strong wind.
- Mooring a ship with two anchors or a single anchor with a second anchor as a snubber is effective for reducing the risk of dragging anchor in waves. This is because they can decrease the maximum value and amplitude of the component fluctuating at the wave period in the anchor tension, as well as the width of slewing motion of ships, compared to mooring with a single anchor.

* 流体性能評価系, ** 海洋開発系

原稿受付 令和 5年1月 25日

審査日 令和 5年3月 1日

目 次

1. 緒言	25
2. 実験方法	27
2.1 実験施設	27
2.2 座標系	27
2.3 対象船	28
2.4 錨鎖ならびに振れ止め錨模型	30
2.5 実験の設営および計測項目	32
2.5.1 模型船周り	32
2.5.2 水中部	34
2.6 風荷重模擬装置	34
2.7 実験条件・計測手順・解析方法	36
3. 実験結果	38
3.1 風荷重模擬装置の検証	38
3.2 振れ回り運動に及ぼす波の影響	38
3.2.1 単錨泊	38
3.2.2 双錨泊	44
3.2.3 振れ止め泊	44
4. 結言	46
謝 辞	47
References	47

記 号

A_F	: 水面上の正面船体投影面積 [m ²]
A_L	: 水面上の側面船体投影面積 [m ²]
A_R	: 側面舵可動部投影面積 [m ²]
B	: 船幅 [m]
C_B	: 方形係数 [-]
$C_{X_A}, C_{Y_A}, C_{N_A}$: 風圧力係数の前後・左右・回頭方向成分 [-]
d_a	: 船尾喫水 [m]
d_f	: 船首喫水 [m]
d_m	: 船体中央喫水 [m]
D_P	: プロペラ直径 [m]
GM_t	: 横メタセンタ高さ[m]
$G-x,y,z$: 船体固定座標系 [m]
$G-x',y',z'$: 船体水面固定座標系 [m]
H_R	: 舵高さ [m]
H_W	: 波高 [m]
k_{xx}	: 横慣動半径 [m]
k_{yy}	: 縦慣動半径 [m]
l_a	: 船体重心位置を基準とした船尾部横方向用ダクトファン船長方向距離 [m]
LCB	: 船長方向浮心位置 [m]
l_f	: 船体重心位置を基準とした船首部横方向用ダクトファン船長方向距離 [m]
L_{OA}	: 全長 [m]

L_{PP} : 垂線間長 [m]
 l_R : 水面を基準とした風圧横力の着地点高さ[m]
 m : 船の排水量 [kg]
 $O-X_0, Y_0, Z_0$: 空間固定座標系 [m]
 P : プロペラピッチ [m]
 r : 船の回頭角速度 [deg/s]
 t : 時間 [s]
 T_H : 船体側の取り付け位置(上端点)での錨鎖張力の水平方向のスカラー量 [$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$]
 T_x, T_y, T_z : 錨鎖上端張力の船体固定座標系各軸方向成分 [$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$]
 T_{X0}, T_{Y0}, T_{Z0} : 錨鎖上端張力の空間固定座標系各軸方向成分 [$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$]
 T_W : 波周期 [s]
 T_z : 船の上下揺れ固有周期 [s]
 T_ϕ : 船の横揺れ固有周期 [s]
 T_θ : 船の縦揺れ固有周期 [s]
 u : 船の前進速度 [m/s]
 U_A : 見かけの風速 [m/s]
 U_T : 真風速 [m/s]
 v : 船の横流れ速度 [m/s]
 V : 合成船速 [m/s]
 X_A, Y_A, Z_A : 風圧力の前後・左右・回頭方向成分 [$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2, \text{kg} \cdot \text{m/s}^2, \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m/s}^2$]
 X_g, Y_g, Z_g : 空間固定座標系における船の重心位置 [m]
 X_f : 船首部前後方向用ダクトファンの風荷重 [$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$]
 Y_a : 船尾部横方向用ダクトファンの風荷重 [$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$]
 Y_f : 船首部横方向用ダクトファンの風荷重 [$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$]
 β : 船の斜航角 [deg]
 θ : 船のピッチ角 [deg]
 A_R : 舵アスペクト比 [-]
 μ_{TH} : 船体側の取り付け位置(上端点)での水平方向の錨鎖張力の空間固定座標系における向き(錨鎖の向き) [deg]
 ρ : 空気密度 [kg/m^3]
 ϕ : 船のロール角 [deg]
 ψ : 船の回頭角 [deg]
 ψ_A : 船首方位を基準とした見かけの風向 [deg]
 ψ_T : 真風向 [deg]

1. 緒言

錨を下したままの船舶が荒天下で外乱によって流される「走錨」は、座礁や衝突といった重大事故につながる恐れがある。井上¹⁾によれば、「走錨後に操船者がとり得る措置としては、第2錨の投下、錨鎖の伸長、バウスタの使用、主機、舵の使用などが考えられるが、一旦一定速度で風下に圧流されはじめた後では、これらの処置だけでは圧流を止めることは容易ではない。」と示されている。一方で、走錨に至る前の圧流運動が未だ発生していない段階、すなわち船体航跡が周期的に8の字を周期的に描く振れ回り運動の状態では、これらの措置による効果は大きい²⁾。この振れ回り運動は、一般に錨泊船が風を受ける場合に生じ、波のみでは起こらないと認識されている³⁾。一方で、走錨による事故は9,10月という台風の来襲する季節に集中しているとの報告がある⁴⁾ため、風圧下の錨泊船の振れ回り運動に対する波の影響を解明することも不可欠であると著者らは考える。

上記の解明には、数値計算等を用いた理論的方法と、実船あるいは模型船を用いた実験的方法が候補として挙げられる。理論的研究の殆どでは、錨泊船と錨・錨鎖を1つの系として扱った上で、錨・錨鎖による水平方向の張力を外力項に考慮した船体の運動方程式が用いられている。また、錨鎖張力の推定法には、カタナリー理論^{例え}ば⁵⁾および Lumped mass 法^{例え}ば⁶⁾の2つの手法が一般的に使用される。このような理論的方法は、風中の振れ回り運動計算に適用された実績^{例え}ば^{7~10)}は豊富にある一方で、風に加えて波も併存する場合の研究は極一部^{例え}ば^{5, 11~13)}である。その中でも、振れ回り運動に対する波の影響について検討を試みたものは、著者らの調査では貴島¹¹⁾および笹ら¹²⁾の研究程度で殆どない。貴島¹¹⁾は、カタナリー理論を基に3隻の内航船に関する風と波中の振れ回り運動計算を実施し、幅広い風と波条件ならびに錨泊方法における走錨発生の有無を体系的に調査した。笹ら¹²⁾は、風圧力と波力(波浪強制力と変動漂流力)を考慮した錨泊船の船体運動に関する数値解析を行い、風に加えて波浪強制力を考慮することで、また更に波浪の非線形性に起因する変動漂流力を考慮することで、風のみの場合と比べて振れ回り運動の振幅は大きくなり、実際には走錨に至っている現場の状況を再現できることを示した。これらの研究は、錨泊船の振れ回り運動に対する波の影響を考察する上で大変有益であるものの、模型実験等による詳細な検証はなされていないためその推定精度は不明である。また、貴島らの研究¹¹⁾では、波浪外力として高次の時間平均的成分(定常波力)のみで、波周期で変動する1次の成分(波浪強制力)は考慮されていない。さらに、定常波力は船の横流れ速度によっても変化する¹⁴⁾ことが知られている一方で、大きな横流れが生じる振れ回り運動中であっても両研究^{11,12)}の計算では停止時の値で代表されている。そのため、風と波中の錨泊船の振れ回り運動を評価する方法として、理論的方法は現時点で十分に確立されておらず、実験的方法に頼らざるを得ないと考えられる。

実験的研究は、理論的方法よりも労力がかかるものの、実現象を直接捉えることが出来る非常に有効な方法である。これは、実海域実験と水槽実験に大別できる。実海域実験は、実船を用いて実際の錨泊地で行うものであるため、結果に実際の錨性能が反映される利点があり、振れ回り運動に対する実例^{15~17)}もいくつか見られる。しかし、実施に必要な機器や人員を準備することが容易ではなく、実施できたとしても必ずしも理想とする条件とはならない等の大きな欠点がある。他方、実船の等縮尺模型を用いた水槽実験は、水底の地質等は完全には実海域に一致しないものの、実海域実験の欠点を解決した手法である。風洞水槽で錨泊船模型の振れ回り運動を計測するような実験的研究^{例え}ば^{18~21)}はこれまでに数多くの実績があり、これにより風中の振れ回り運動と錨鎖張力の特性が明らかにされてきた。しかし、波も併存する場合については、著者らの調査した限り米田ら²²⁾ならびに平石ら²³⁾の研究程度であり、理論的研究同様に殆どない。これらの研究は非常に貴重である一方で、米田ら²²⁾の実験は模型船の長さが約1mと小さいため、その計測結果の精度には注意が必要であると考えられる。また、波の有無による影響の考察は振れ回り運動に関するものが中心で、錨鎖張力については僅かしか示されていない。平石らの研究²³⁾は、不規則波で実際の海象により近い状態で実施されたが、波条件が限定的である。波浪中での水槽実験の実績の少なさから、まずは現象を簡略化した規則波中において錨泊船の振れ回り運動の変化を明らかにすべきと考えられる。

本研究では、以上の背景から、波風併存下における錨泊船の振れ回り運動ならびに錨鎖張力に対する波の影響を調査するために、タンカーとフェリーの2隻を対象に風と規則波中における振れ回り運動に関する水槽模型実験を実施した。続く第2章では、模型および実験方法の詳細について述べる。本実験の新しい側面の一つとして、送風装置等によって模型船に風を与える代わりに、風荷重模擬装置²⁴⁾を用いて風圧力に相当する外力を直接模型船に与えることで、風の影響を容易に模擬した点が挙げられる。第3章では、実験結果について述べる。最初に、模擬風中の船体の振れ回り運動や錨鎖張力・風荷重模擬装置²⁴⁾が発生した力の時系列を示しながら、錨泊船の振れ回り運動実験に対する本装置の適用性を考察する。次に、波と風の外乱条件ならびに錨泊方法を種々変更した際の実験結果を示し、これに基づき単錨泊・双錨泊・振れ止め泊する対象船の振れ回り運動と錨鎖張力に対する波の影響について考察する。

2. 実験方法

2.1 実験施設

実験は、国立開発研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所（以下、「海技研」と記す。）の海洋構造物試験水槽(図1)で実施した。本水槽の長さ・幅・最大水深はそれぞれ 44.5 m, 27.1 m, 2.0 m である。水深は可変であり、本実験では 1.0 m(実船尺度で後述のタンカーの場合 30 m, フェリーの場合 36 m)とした。湾内での錨泊を想定し、実船尺度水深約 18 m(模型尺度でタンカーの場合約 0.6 m)が理想の条件であったが、それでは要求を満たす造波が出来ない可能性が高かったため造波性能が保証される最低限の水深で実施した。本研究に関連する付帯設備として、曳引台車、造波装置がある。曳引台車は、長さ方向に走行可能な主台車、主台車に吊り下げられた幅方向に走行可能な副台車で構成される。副台車にはターンテーブルが備わっており、これにより水槽内の任意の位置と方向に対して、模型船を曳航可能である。水槽短辺の片側には、ピストン型の造波装置が備わっており、これにより規則波ならびに一方不規則波を発生させることができる。

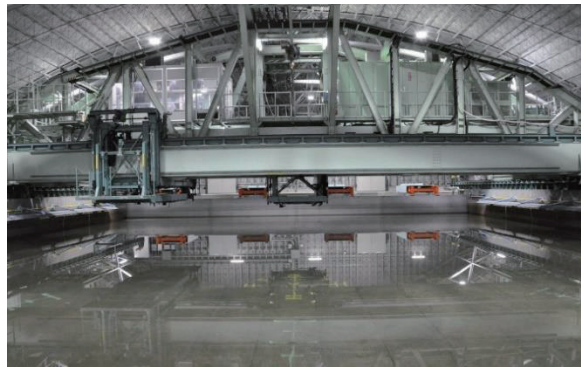


図1 海洋構造物試験水槽

2.2 座標系

本研究で用いた座標系を図2に示す。 $O-X_0, Y_0, Z_0$ は空間固定座標系であり、 X_0 軸と Y_0 軸は水槽座標の長さ方向と幅方向に一致する。 Z_0 軸は鉛直下方向を正とする。 X_0, Y_0 軸方向の座標原点は、水槽座標の原点すなわち水槽中央に一致するものとする。 Z_0 軸方向の座標原点は、平水中直立時の船の重心高さに一致する。 $O-X_0, Y_0, Z_0$ における船の重心位置を (X_g, Y_g, Z_g) で表す。 $G-x', y', z'$ は水平面内の重心位置と船首方位のみ追従する船体水面固定座標系²⁵⁾であり、原点高さは平水中直立時の船の重心高さに一致する。船の前進速度 u と横流れ速度 v はこの座標系に基づき定義する。また、これらを用いて合成船速 V と斜航角 β を次式で定義する。

$$\begin{cases} V = \sqrt{u^2 + v^2} \\ \beta = \tan^{-1}(-v/u) \end{cases} \quad (2.1)$$

$G-x, y, z$ は、原点が船の重心位置に一致する船体固定座標系である。 φ, θ, ψ はそれぞれ船のロール角、ピッチ角、回頭角である。これらは、それぞれ平水中直立時の船の姿勢ならびに X_0 軸方向を基準とする。 φ は右舷沈を正、 θ は船首上げを正、 ψ は右回頭を正と定義する。 r は回頭角速度である。船体側の取り付け位置(上端点)での錨鎖張力の x, y, z 軸(船体固定座標系)方向成分ならびに X_0, Y_0, Z_0 軸(空間固定座標系)方向成分をそれぞれ (T_x, T_y, T_z) と $(T_{X_0}, T_{Y_0}, T_{Z_0})$ で、これらの水平面内スカラー量を T_H で表す。また、 X_0 軸を基準とした空間固定座標系における T_H の向き(錨鎖の向き)を μ_{TH} と定義する。従って、船首方位を基準とした T_H の向きは、 $\mu_{TH-\psi}$ で与えられる。これらの錨鎖張力に関する変数は、それぞれ上添え字の P ならびに S で左右舷に対するものとして区別する。波は X_0 軸正方向から負方向に伝搬すると定義する。真風向 ψ_T は X_0 軸正方向からの風を0度とし、反時計回りを正と定義

する。このとき、見かけの風速 U_A と船首方位を基準とした見かけの風向 ψ_A は、真風速 U_T と真風向 ψ_T を用いて次式で計算できる。

$$\begin{cases} U_A = \sqrt{U_T^2 + V^2 + 2VU_T \cos(\beta + \psi_T - \psi)} \\ \psi_A = \tan^{-1} \frac{U_T \sin(\psi_T - \psi) - V \sin \beta}{U_T \cos(\psi_T - \psi) + V \cos \beta} \end{cases} \quad (2.2)$$

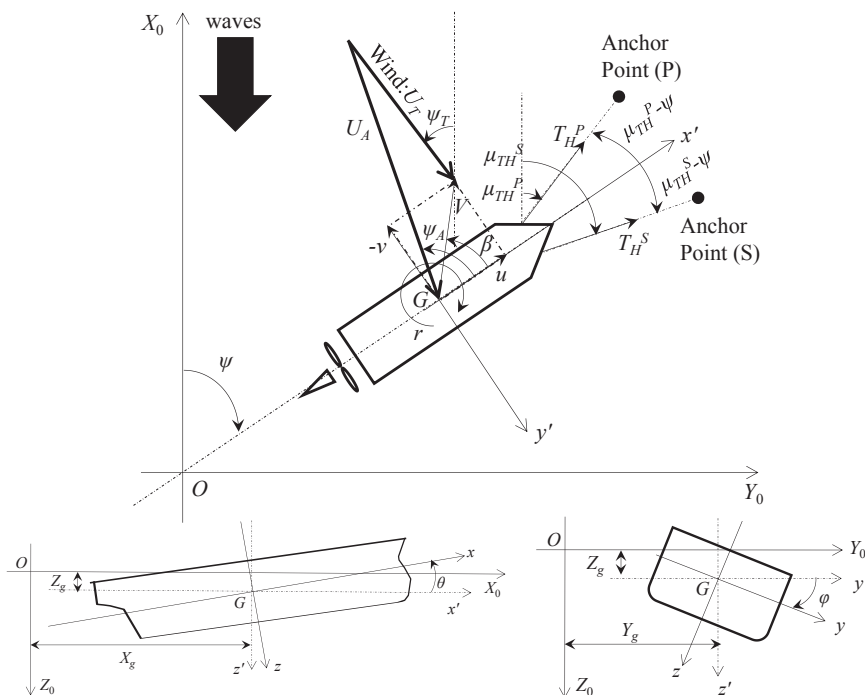


図2 座標系

2.3 対象船

船体が比較的小さく、港外への安全な避難が困難で荒天下での錨泊を行う場合が多いとされる内航船を、本試験の対象とした上で、船種としてタンカーとフェリーの2隻を選定した。両船の横断面図(実船尺度)を図3に示す。なお、両船は内航タンカー・フェリーとして一般的な船型を想定して設計されており、実船は存在しない。試験ではタンカーとフェリーそれぞれ1/30と1/36の等縮尺模型を用いた。実船と模型尺度での実験時における本対象船の主要目を表1に示す。载荷状態として内航タンカーは半載状態、内航フェリーは満載状態を想定した。プロペラ・舵・バウスラスタのインペラ付きの状態で行ったが、これらは作動させていない。タンカーの上下揺れ・横揺れ・縦揺れ固有周期(T_z, T_ϕ, T_θ)は、自由揺れ試験で求めた値である。フェリーについては自由揺れ試験を実施できていないため、タンカーを含めて次式²⁶⁾で推定した値を括弧書きで示した。

$$\begin{cases} T_z = 2.7\sqrt{d_m} \\ T_\phi = 2.01k_{xx}/\sqrt{GM_L} \\ T_\theta = 2.01\sqrt{(0.77C_B + 0.26)(0.92 + 0.44B/d_m)d_m} \end{cases} \quad (2.3)$$

ただし、横慣動半径 k_{xx} は $0.4B$ と仮定した。タンカーに対する錨鎖ラインを含む前後揺れの固有周期は、後述の双錨泊状態で逆転の一定プロペラ回転数を与えながら実施した自由揺れ試験の結果の平均値である。なお、本結

果はばらつきが大きく、プロペラ回転数によっても変わっているので参考値とする。また、他の錨泊状態では計測中に回頭角 ψ が発散するなど上手く計測出来なかったのが記載していない。

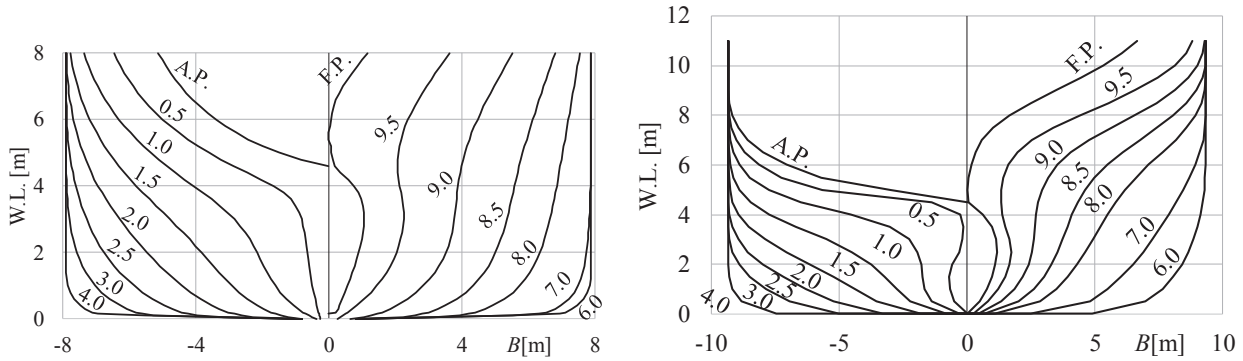


図3 対象船の横断面図(左図：内航タンカー、右図：内航フェリー)

表1 対象船の実験状態における主要目

項目	タンカー		フェリー	
	実船	模型	実船	模型
縮尺[-]	1	1/30	1	1/36
垂線間長 L_{PP} [m]	86.0	2.87	100	2.78
船幅 B [m]	15.8	0.527	18.7	0.518
喫水(船体中央) d_m [m]	4.59	0.153	5.00	0.140
喫水(船尾) d_a [m]	4.83	0.161	5.00	0.140
喫水(船主) d_f [m]	4.35	0.145	5.00	0.140
方形係数 C_B [-]	0.710	0.710	0.630	0.630
排水量 m [t(実船), kg(模型船)]	4436	164.3	6083	130.4
横メタセンタ高さ GM_L [m]	2.28	0.076	1.61	0.045
船長方向浮心位置 LCB [m] (船首方向：+)	0.748	0.025	-1.75	-0.048
縦慣動半径 k_{yy}/L_{PP} [-]	0.257	0.257	0.257	0.257
上下揺れ固有周期 T_z [s]	5.97 (5.78)	1.09 (1.06)	(6.06)	(1.01)
横揺れ固有周期 T_φ [s]	7.78 (8.41)	1.42 (1.54)	(11.81)	(1.97)
縦揺れ固有周期 T_θ [s]	5.70 (6.04)	1.04 (1.10)	(6.22)	(1.04)
前後揺れ固有周期(錨鎖ラインを含む) [s]	247 (双錨泊)	45.1 (双錨泊)	-	-
全長 L_{OA} [m]	90.0	3.00	110	3.06
水面上の正面船体投影面積 A_F [m ²]	228	0.254	319	0.246
水面上の側面船体投影面積 A_L [m ²]	578	0.642	1325	1.023
ビルジキール	あり		あり	
プロペラ種類	1軸固定ピッチプロペラ		1軸固定ピッチプロペラ	
プロペラ翼数[枚]	4	4	5	5
プロペラ直径 D_P [m]	2.95	0.098	3.78	0.105
プロペラピッチ比 P/D_P [-] (0.7R位置)	0.665	0.665	1	1
舵種類	シューピース付逆G型1枚舵		マリナー型1枚舵	
舵高さ H_R [m]	3.41	0.114	4.10	0.114
側面舵可動部投影面積 A_R [m ²]	7.78	0.00865	13.4	0.0104
舵アスペクト比 A_R [-] ($=H_R^2/A_R$)	1.49	1.49	1.25	1.25

図4に模型船の外観図を示す．前述の通り送風装置は用いていないため，模型では水面上の上部構造物まで模擬していない．表1の上部構造物主要目は，船体同様に内航タンカー・フェリーとして一般的な船型を想定して設定した値である．想定した両船の風圧力係数を図5に示す．ここに， C_{XA} ， C_{YA} ， C_{NA} は，それぞれ次式に従う前後・左右・回頭方向の風圧力係数である．

$$C_{XA} = \frac{X_A}{(\rho_A/2)A_F U_A^2}, \quad C_{YA} = \frac{Y_A}{(\rho_A/2)A_L U_A^2}, \quad C_{NA} = \frac{N_A}{(\rho_A/2)A_L L_{OA} U_A^2} \quad (2.4)$$

ただし， ρ_A は空気密度， A_F ， A_L ， L_{OA} はそれぞれ水面上の正面と側面船体投影面積および全長である．また， X_A ， Y_A ， N_A はそれぞれ船体に働く前後・左右・回頭方向の風圧力・モーメントである．これら風圧力係数は藤原の式²⁷⁾で推定した．



図4 模型船外観図 (左図：内航タンカー，右図：内航フェリー)

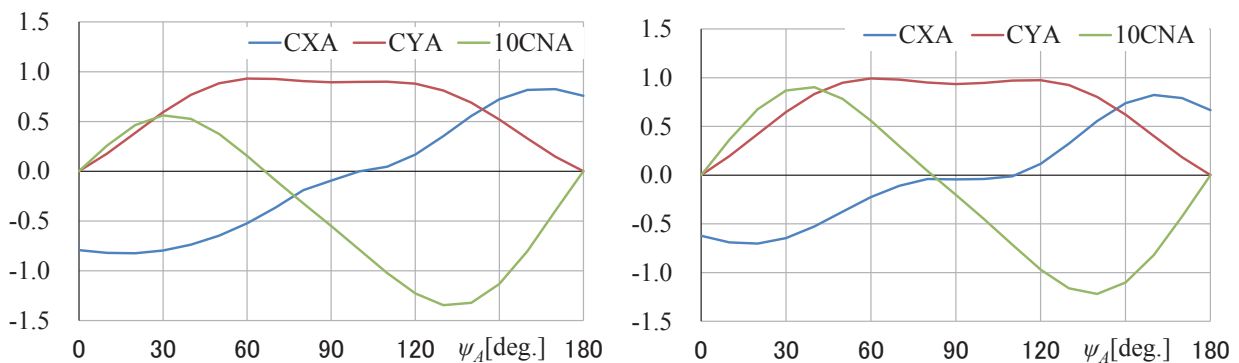


図5 風圧力係数(推定値)(左図：内航タンカー，右図：内航フェリー)

2.4 錨鎖ならびに振れ止め錨模型

実験に用いた錨鎖模型の写真と仕様を，それぞれ図6と表2に示す．一般的なスタッドレスの市販品C型チェーンの中から，呼び径が実船で使用されている値に大略相当するものを，錨鎖模型として選定した．後述の各錨泊方法における係留用錨鎖と振れ止め泊用の錨鎖は，長さのみ異なる同一のものである．係留用錨鎖の長さは，風速 20 m/s までの通常天候状態の目安⁴⁾としての $3 \times (\text{水深}) + 90 \text{ m}$ に概ね一致するように設定した．なお，風速 30 m/s までの荒天状態の目安⁴⁾としての $4 \times (\text{水深}) + 145 \text{ m}$ の条件でもいくつか実験を行ったが，その結果から明確な結論は得られなかったため，本論文では割愛する．また，本研究では特にその結果を考察等に用いてはいないが，後に開発予定の波風併存時の荒天下の錨泊船の振れ回り運動と錨鎖張力の計算法の検証用に，本実験では水中の係留用錨鎖の挙動計測も行っており，そのためのマーカーを取り付けたものと取り付けていないものとで僅かに重量等が異なっている．マーカーは 10 リンク毎に取り付けられており，その直径は約 15 mm である．振れ止めの効果を上げるためには振れ止め錨鎖長は錨が海底にねる程度で短い方がよい(具体的には水深の 1.25~1.50 倍程度が適切)との報告¹⁹⁾を参考にしながらも，著者らが船主を対象に実施した聞き取り調査(非公表)によれば実際

は1.1~1.2倍程度で錨泊していることが多かったことから、振れ止め用錨鎖の長さは水深の約1.1倍に設定した。錨鎖模型と水槽底間との静止摩擦係数は、本実験の前に先立って計測した結果である。



図6 錨鎖模型 (左図：マーカーなし，右図：マーカー有)

表2 錨鎖模型の仕様

項目	係留用錨鎖(通常状態)		振れ止め用錨鎖
	マーカー無	マーカー有	マーカー無
呼び径 [m]	0.001	0.001	0.001
1リンク長 [m]	0.017	0.017	0.017
錨鎖長 [m]	6.003	6.003	1.114
空中重量 [kg]	0.246	0.294	0.046
水中重量 [kg]	0.204	0.222	0.038
単位長さ当り空中重量[kg/m]	0.041	0.049	0.041
単位長さ当り水中重量[kg/m]	0.034	0.037	0.034
水槽底間との静止摩擦係数 [-]	0.672	0.668	0.672

振れ止め錨鎖の先端に取り付けた振れ止め錨模型の写真と仕様をそれぞれ図7と表3に示す。振れ止め泊は、振れ止め錨の側部と海底との摩擦により船体の振れ回り運動低減を狙ったものである。そのため、水槽底間との摩擦力が海底における想定実船のものと概ね相似になるように、振れ止め錨模型の重量を決定した。更に、形状も簡略化して実際の錨を模した。振れ止め錨模型と水槽底間との静止摩擦係数も、本実験の前に先立って計測した結果である。

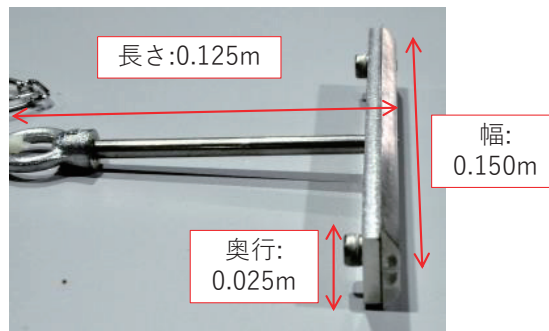


図7 振れ止め錨模型

表3 振れ止め錨模型の仕様

項目	値
長さ [m]	0.125
幅 [m]	0.150
奥行(最大) [m]	0.025
空中重量 [kg]	0.258
水中重量 [kg]	0.225
水槽底間との静止摩擦係数 [-]	1.80

2.5 実験の設営および計測項目

本実験の計測は、大きく(1)模型船周りと(2)水中部の2つで構成されるため、実験の設営方法等はこれらの分類に従って、各項で説明する。

2.5.1 模型船周り

本実験における模型船周りの計測システム図((a):配置図,(b)ブロック図)を図8に示す。また、副台車に模型船を設置した様子を図9に示す。模型船は、張力を変更可能な模型船固定用クランプワイヤーと制御・計測信号用のケーブルを介して、副台車に接続されている。クランプワイヤーを張ることで、波が船体に当たるまで船首方位や位置を保持することが可能である。また、クランプ装置自体は360度自由に回転可能な副台車上のターンテーブル内に設置しているため、ターンテーブルの角度を変更することで、初期船首方位を変更可能である。データ計測中は、クランプワイヤーは十分緩められ、主・副台車上の CCD カメラが模型船船体中央付近の甲板におかれたターゲットを認識することにより、主・副台車ならびにターンテーブルは自動で模型船を追尾する。また制御・計測信号用のケーブルも十分緩く結んでいるため、これらが船体運動に影響を及ぼすことはほとんどない。

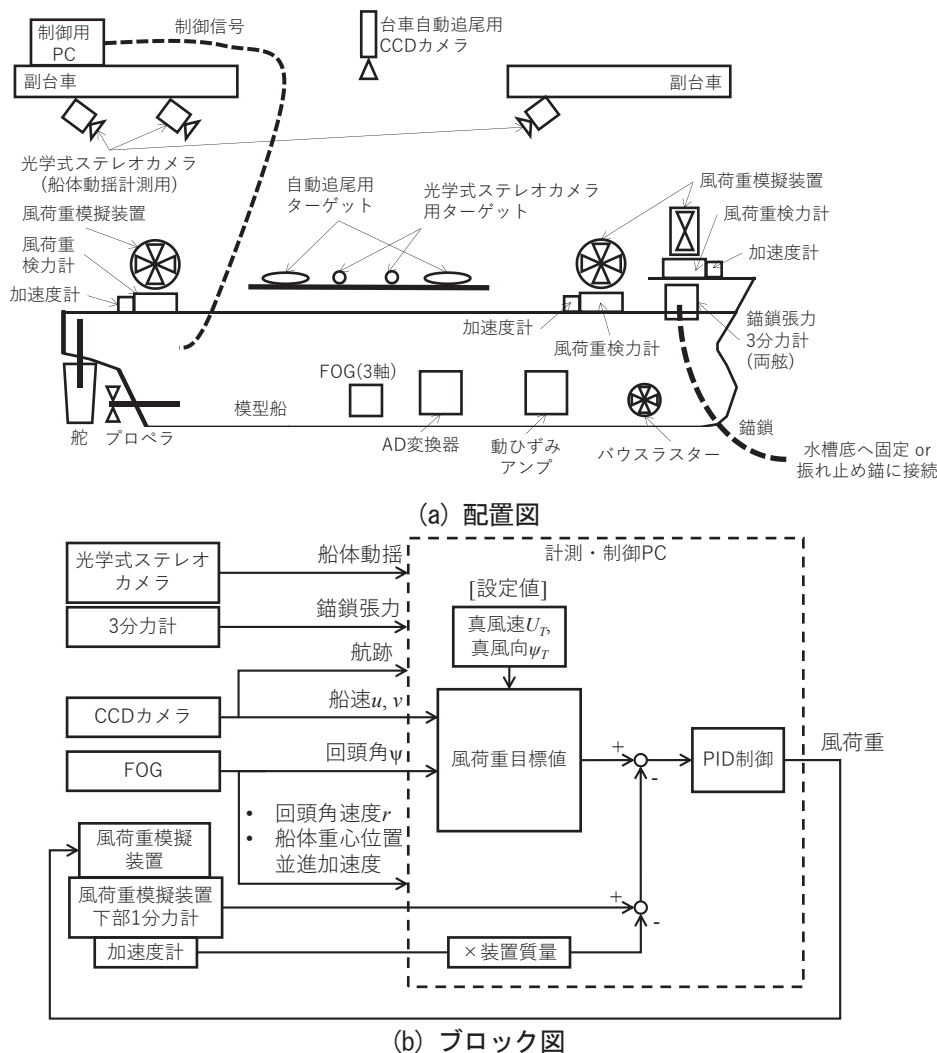


図8 模型船周りの計測システム図

本試験における計測項目ならびにその計測機器を表4に示す。船の前進速度 u ・横流れ速度 v ・重心位置の航跡 (X_g, Y_g) 等の平面運動は、自動追尾用の CCD カメラで計測した。回頭角 ψ ・回頭角速度 r ・船体重心位置並進加速度3成分(前後・左右・上下方向)は光ファイバージャイロ(FOG)で計測した。波による6自由度船体動揺は、副台

車下に設置された3台(図9では1台が副台車で隠れているため見えないが、実際はもう1台左舷船尾側付近にある)の光学式ステレオカメラで白地の板上の小さい複数の赤外線反射マーカのターゲットを認識することで計測した。船首部の甲板上の両舷に設置された3分力計で、船体側の取り付け位置(上端点)での両舷の錨鎖張力の船体固定座標系各軸方向成分(T_x, T_y, T_z)を計測した。図10に示すように、錨鎖張力用3分力計の先端は錨鎖を支持できるような形状となっており、この支持点が両模型船で想定したベルマウス位置に合うように3分力計の位置を定め、前述の錨鎖模型を接続した。他端は、次項で述べる水槽底のアンカー点位置の検力計、または振れ止め錨に接続された。前述の通り、風の影響は風荷重模擬装置²⁴⁾によって考慮されており、その制御に必要なデータとして、(1)風荷重模擬装置を構成する各ダクトファン下部に設置した1分力計でファンによって発生する力を、(2)各ダクトファン付近に置かれた1軸加速度計でファンの出力方向の加速度を計測した。風荷重模擬装置²⁴⁾の詳細は次節で述べる。6自由度船体動揺以外の全ての計測データは、船内のA/D変換器でデジタルデータに変換された後に、有線で副台車上のPCに送られ保存された。6自由度船体動揺は直接副台車上のPCに保存された。同副台車上のPCでは計測と同時に風荷重模擬装置の指令値が計算され、有線で船内の各装置に制御信号が送られた。

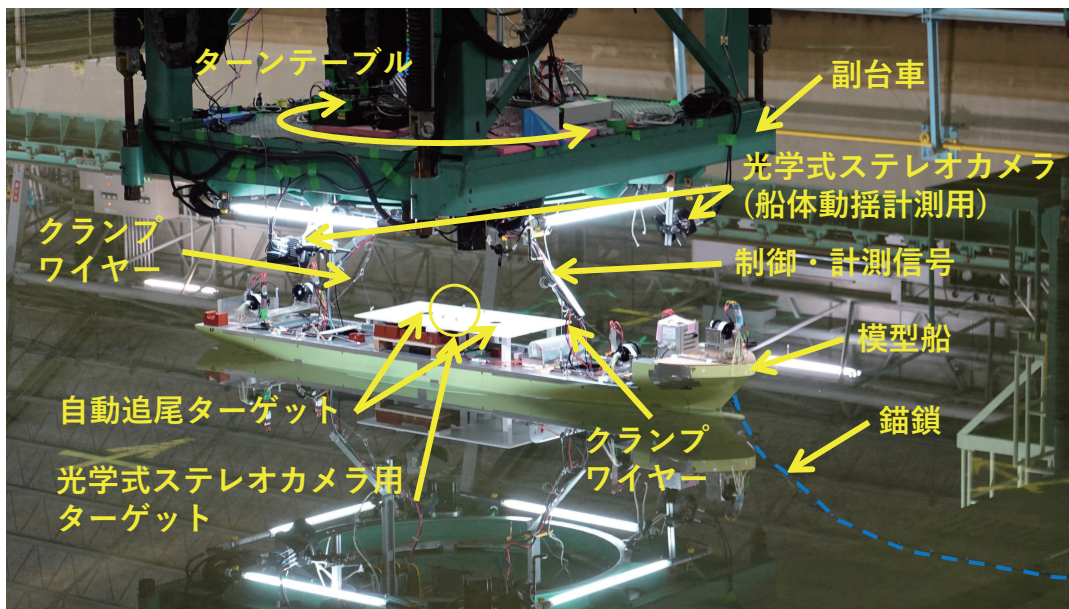


図9 模型船設置の様子

表4 模型船周りの計測項目および機器機器

計測項目	計測機器
平面運動：前進速度 u , 横流れ速度 v , 航跡(X_g, Y_g)	自動追尾用 CCD カメラ
回頭角 ψ , 回頭角速度 r , 船体重心位置並進加速度 3 成分 (前後・左右・上下方向)	光ファイバージャイロ(FOG)
波による 6 自由度船体動揺	光学式ステレオカメラ
船体側の取り付け位置(上端点)での両舷の錨鎖張力船体固定座標系各軸方向 3 成分(T_x, T_y, T_z)	3 分力計
風荷重模擬装置の出力	各ダクトファン下部に設置した 1 分力計 (船長方向×1, 幅方向×2)
各ダクトファンでの出力方向の加速度	1 軸加速度計

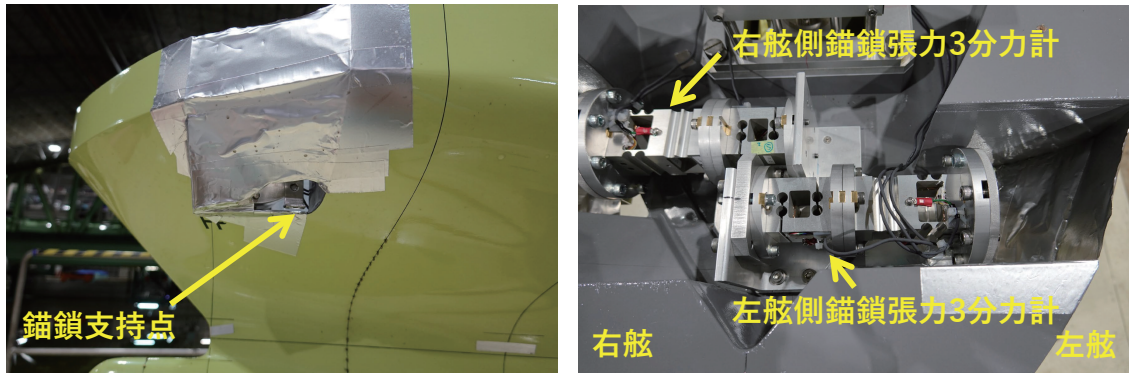


図10 錨鎖張力用3分力計(フェリー模型)(左図：船外，右図：船内)

2.5.2 水中部

本実験における水中部の計測システム図を図11に示す。想定した錨の水槽底位置(アンカー一点)に、防水型6分力計を2台固定した。錨泊方法に応じて、水中部の錨鎖の端点をこれらの6分力計に接続した。6分力計No.1は左舷側の錨鎖用、No.2は右舷側の錨鎖用として使用した。船体運動に応じて振れ止め錨模型が自由に動くようにするために、振れ止め用錨鎖は6分力計には接続しておらず、水底側での張力の計測は行っていない。いくつかの計測条件において水底側と船体側での水平方向の錨鎖張力計測値を比較したところ、水底側での結果が船体側よりも定量的に小さくなる傾向にあるが、時系列の定性的な特性はほぼ同じで、船体側での結果の考察によって得られる結論は水底側によるものと定性的には変わらないと考えられるため、本研究においては船体側での計測結果のみ示すこととする。なお、水底側と船体側での水平方向の錨鎖張力計測値の定量的な差は、錨鎖と水槽底間の摩擦力によるものと思われる。更に参考に、3台の水中用光学式ステレオカメラで、前述の通り錨鎖に取り付けたマーカーの位置を認識することにより、6分力計No.1側に取り付けた錨鎖の着底点近傍の形状を計測した。また、入射波高として、造波機付近における定点での波高を容量式波高計で計測した。これら水中部の全ての計測信号は、有線で陸上のPCに伝送・保存された。水槽における模型船等の相対位置が分かるように、図11には水槽座標系における模型船の初期位置(双錨泊の例)と防水型6分力計の位置(X_0, Y_0)も併記した。

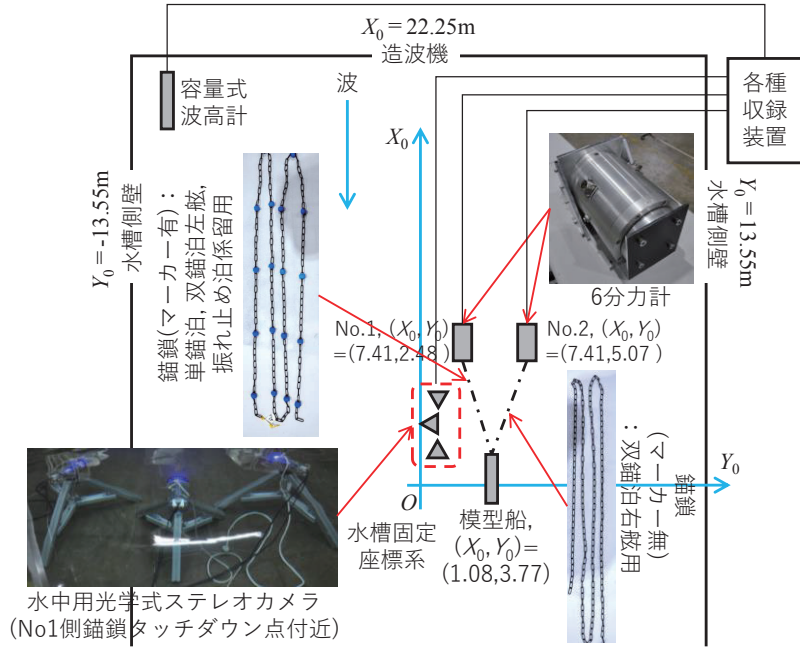
2.6 風荷重模擬装置

風荷重模擬装置²⁴⁾は模型船の周りに直接風を吹かせるのではなく、模型船上に取り付けた空力発生装置(ダクトファン)の推力で、時々刻々推定した風荷重を与えることで風環境を擬似的に実現する。振れ回り運動の実験に対する本装置の適用はこれまでにないが、操縦性能模型試験へは適用例²⁴⁾があり、既存の数値計算法との比較により平水中風圧下の35度旋回時の運動を水槽実験で妥当に再現できることが確認されている。また、同文献²⁴⁾で波浪中においても制御に問題がないことが検証されている。

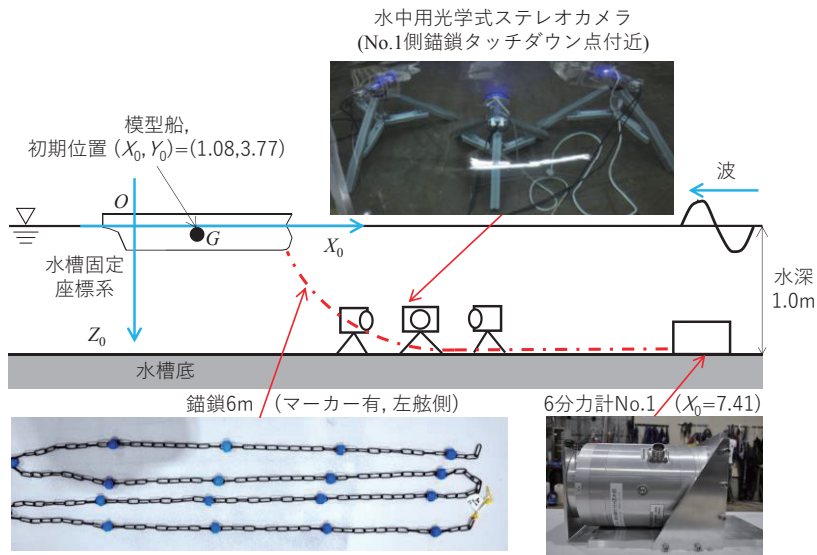
実験に用いた本装置の外観図を図12に示す。船体に働く風圧力に対する回頭角速度の影響は小さいとの報告²⁸⁾に基づき、模型船に与える風荷重(X_A, Y_A, N_A)は想定する風環境(真風速 U_T と真風向 ψ_T)と時々刻々計測される操縦運動状態に応じて準定常的に推定する。具体的には、事前用意した風圧力係数(C_{XA}, C_{YA}, C_{NA})を、(2.4)式に基づき見かけの風速 U_A と想定した上部構造物の主要目 L_{OA}, A_F, A_L で次元化する。図5の通り、 C_{XA}, C_{YA}, C_{NA} は見かけの風向 ψ_A によって変化するため、現在の時刻の ψ_A に対して内挿して求めることとなる。計算された風荷重(X_A, Y_A, N_A)は、次式に従い各ダクトファンに分配される。

$$\begin{cases} Y_f = (l_a Y_A - N_A) / (l_a - l_f) \\ Y_a = (l_f Y_A - N_A) / (l_f - l_a) \\ X_f = X_A \end{cases} \quad (2.5)$$

ここに、 X_b, Y_b, Y_a は、それぞれ船首部前後方向用ダクトファンの風荷重、船首部横方向用ダクトファンの風荷重、船尾部横方向用ダクトファンの風荷重である。また、 l_f と l_a は、それぞれ船体重心から船首部と船尾部横方向用ダクトファン船長方向距離である。本ダクトファンは一方向のみにしか力を発生できないので、横方向用のダクトファンは、船首部と船尾部それぞれ2台で一对とした。また、追風の場合に船首方向の前後力が発生することになるが、そのような条件は本実験に含まれていないため船尾部前後方向用ダクトファンは用いていない。



(a) 上面図



(b) 側面図(6分力計 No. 2 と右舷側錨鎖は省略)

図 11 水中部の計測システム図

風荷重模擬装置は、前後・左右・回頭の3成分のみを算出するが、横方向の風圧力 Y_a の着力点の水線面からの高さ l_R に、横方向用ダクトファンの取り付け高さを合わせることで横傾斜モーメントも模擬することができる。本試験では、横方向の風圧力が主要な横風からの l_R として、横方向用ダクトファンの水面からの取り付け高さ(船首と船尾側の平均)をタンカーで0.208 m、フェリーで0.235 mにした。

実験では、実際の風荷重模擬装置の出力が(2.5)式で算出した目標値になるように、各ダクトファンの下に設置した検力計で実際の出力を計測することにより、フィードバック制御を行っている。また、特に船体動揺の生じ

る波浪中では、検力計の計測値には、実際の出力以外にもダクトファンの慣性力や船体傾斜による自重成分が含まれる。そのため、各ダクトファンの直近に加速度計を取り付け、出力方向の加速度を計測することで、それらの成分を差し引いた。

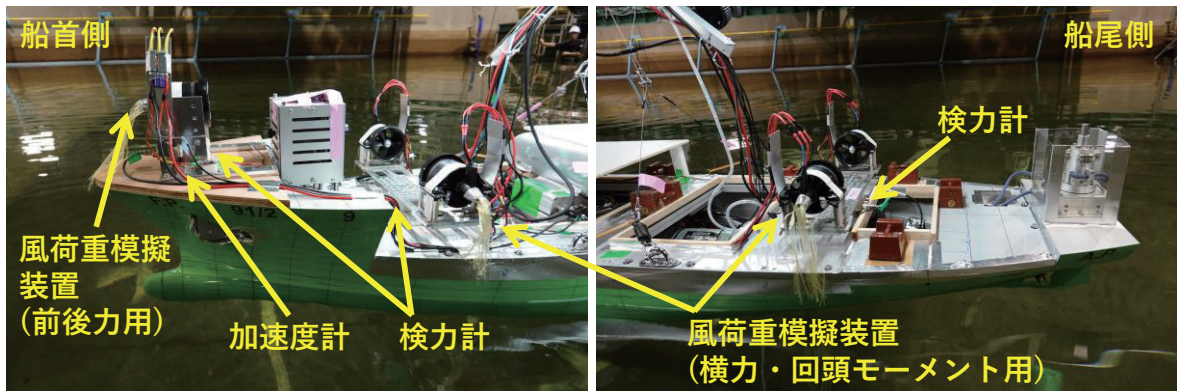


図 12 風荷重模擬装置外観図(タンカー模型)

2.7 実験条件・計測手順・解析方法

錨泊方法として、単錨泊と双錨泊、振れ止め泊の3条件を設定した。各錨泊方法における模型船および錨鎖模型等の概略図を図13に示す。本図には、水槽座標系における模型船の初期位置と防水型6分力計の位置(X_0, Y_0)も併記した。単錨泊では、左舷側に錨鎖を取り付けた。双錨泊では、両錨鎖の開き角を30度とした。振れ止め泊では、左舷に係留用錨鎖を、右舷に振れ止め用錨鎖を取り付けた。波は規則波で、波高 H_w (実船尺度)をそれぞれタンカーで1.35, 1.83, 2.28 mとフェリーで1.62, 2.20, 2.74 mの各3条件(模型尺度で4.5, 6.1, 7.6 cmに対応)、波周期 T_w (実船尺度)をそれぞれタンカーで4.66, 5.70, 6.63, 7.45 sとフェリーで5.10, 6.24, 7.26, 8.16 sの各4条件(模型尺度で0.85, 1.04, 1.21, 1.36 sに対応)、また波長船長比に換算してそれぞれ約0.4, 0.6, 0.8, 1.0とした。この波周期 T_w の範囲は、別途両対象船を用いて実施した実験結果²⁹⁾を基に、停止時の定常波力が大きくなる短周期と小さくなる長周期を網羅するように設定した。風は定常風で、真風速 U_T (実船尺度)を15.0~25.0 m/s(模型尺度でタンカーの場合2.74~4.56 m/s, フェリーの場合2.50~4.17 m/s)の範囲で設定した。真風向 ψ_T は波向きに一致しており、全て初期状態において正面向波・風とした。実験期間の都合上、これら全ての組み合わせを実施できなかったわけではない。表5に実験を実施した条件の一覧を示す。

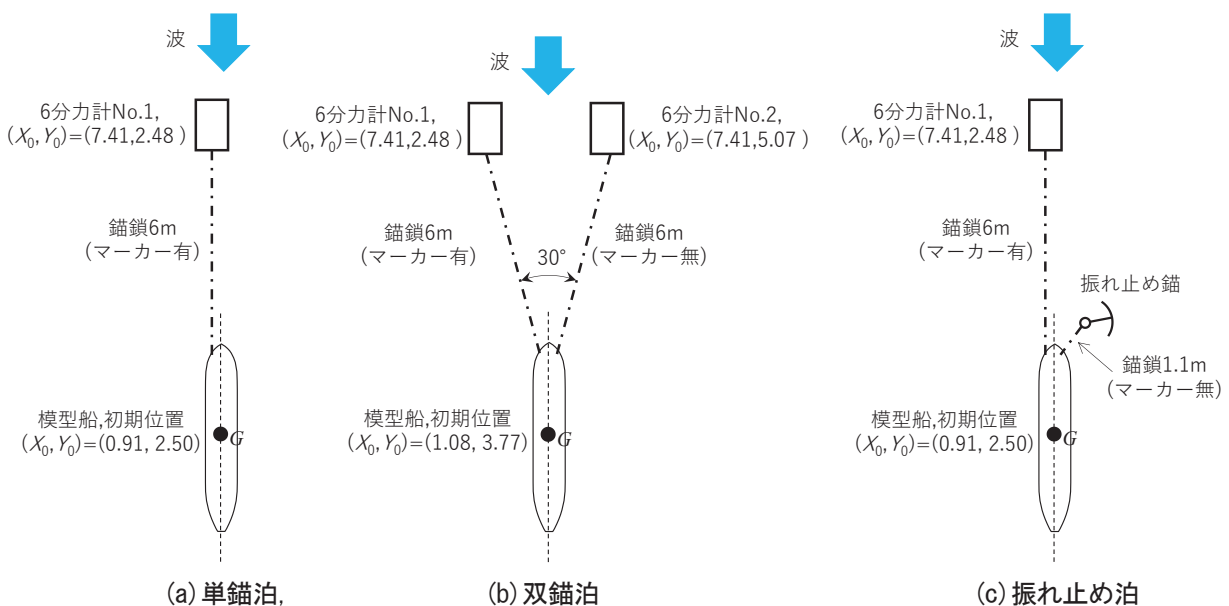


図 13 各錨泊方法における模型船と錨鎖の概略図

表5 実験条件一覧(模型尺度, 括弧内の数値は実船尺度)

対象船	錨泊法	初期波・風向き	真風速 U_T [m/s]	波高 H_W [cm]	波周期 T_W [s]	波長船長比
タンカー	単錨泊	正面向波・風	2.74 (15.0)	6.1 (1.83 m)	0.85 (4.66)	0.4
		正面向波・風	2.74 (15.0)	6.1 (1.83 m)	1.04 (5.70)	0.6
		正面向波・風	2.74 (15.0)	6.1 (1.83 m)	1.21 (6.63)	0.8
		正面向波・風	3.65 (20.0)	w/o	w/o	w/o
		正面向波・風	3.65 (20.0)	6.1 (1.83 m)	0.85 (4.66)	0.4
		正面向波・風	3.65 (20.0)	6.1 (1.83 m)	1.04 (5.70)	0.6
		正面向波・風	3.65 (20.0)	7.6 (2.28 m)	0.85 (4.66)	0.4
		正面向波・風	3.65 (20.0)	7.6 (2.28 m)	1.04 (5.70)	0.6
		正面向波・風	3.65 (20.0)	7.6 (2.28 m)	1.21 (6.63)	0.8
		正面向波・風	4.56 (25.0)	7.6 (2.28 m)	0.85 (4.66)	0.4
	正面向波・風	4.56 (25.0)	7.6 (2.28 m)	1.21 (6.63)	0.8	
	双錨泊	正面向波・風	3.65 (20.0)	w/o	w/o	w/o
		正面向波・風	3.65 (20.0)	6.1 (1.83 m)	0.85 (4.66)	0.4
		正面向波・風	3.65 (20.0)	6.1 (1.83 m)	1.04 (5.70)	0.6
		正面向波・風	3.65 (20.0)	7.6 (2.28 m)	1.04 (5.70)	0.6
		正面向波・風	4.56 (25.0)	7.6 (2.28 m)	0.85 (4.66)	0.4
		正面向波・風	4.56 (25.0)	7.6 (2.28 m)	1.21 (6.63)	0.8
	振れ止め泊	正面向波・風	3.65 (20.0)	6.1 (1.83 m)	0.85 (4.66)	0.4
		正面向波・風	3.65 (20.0)	6.1 (1.83 m)	1.04 (5.70)	0.6
正面向波・風		3.65 (20.0)	6.1 (1.83 m)	1.21 (6.63)	0.8	
正面向波・風		4.56 (25.0)	7.6 (2.28 m)	1.21 (6.63)	0.8	
フェリー	単錨泊	正面向波・風	2.50 (15.0)	w/o	w/o	w/o
		正面向波・風	2.50 (15.0)	4.5 (1.62 m)	1.21 (7.26)	0.8
		正面向波・風	2.50 (15.0)	4.5 (1.62 m)	1.36 (8.16)	1.0
		正面向波・風	2.50 (15.0)	6.1 (2.20 m)	1.36 (8.16)	1.0
		正面向波・風	3.20 (19.2)	w/o	w/o	w/o

各計測の初めに、まず模型船の初期船首方位を目標値に合わせてから、図13に示す上面から見て錨鎖がほぼ一直線且つ上端張力の計測値が錨鎖の自重成分のみとなるような初期位置(水平方向の錨鎖張力が生じない程度に錨鎖が張った位置)に移動した。振れ止め泊の場合は、更に振れ止め錨鎖と錨が、ほぼ右舷側の錨鎖上端点の鉛直真下となるようにその位置を調整した。次に、クランプワイヤーを緩めて直立状態での基準点の計測をした。その後、造波・風荷重の負荷・自動追尾・計測を開始した。外乱が強い条件では、船体運動と錨鎖張力における過渡的な応答が減るように、基準点計測後に一度クランプワイヤーを締めて定常状態付近の手前まで模型船を移動させてから、造波・風荷重の負荷・自動追尾・計測・クランプの開放をした。

計測結果を確認して、周期的にほぼ定常と見なせる範囲を選んだうえで、2.1節で示した座標系に基づいて実験結果を整理した。船体側の取り付け位置(上端点)での錨鎖張力用の3分力計は船内に固定されているため、船体運動に伴い3分力計の慣性力成分がその計測値に含まれる。事前に計測した3分力計の各軸方向の自重と試験中の船体の姿勢・加速度の計測値から、この成分を取り除いた。更に、予め各錨泊方法における初期位置ならびに初期船首方位で、船体側の取り付け位置(上端点)での錨鎖張力用の3分力計に加わる力(錨鎖の自重成分)を計測し、これを上記の解析結果に足し合わせた。この船体側の取り付け位置(上端点)での錨鎖張力を、併せて計測した船体運動から空間固定座標系の成分(T_{X0} , T_{Y0} , T_{Z0})に変換した後に、この成分を基に水平方向のスカラー量 T_H (以降

これを単に“錨鎖張力”と記す)とその空間固定座標系における向き(錨鎖の向き) μ_{TH} を算出した。併せて、計測した船体重心位置の並進変位と姿勢から、錨鎖上端点での変位3成分(前後・左右・上下)を算出した。

3. 実験結果

3.1 風荷重模擬装置の検証

風中の振れ回り実験結果の一例として、真風速 $U_T=3.20$ m/s (19.2 m/s)の条件下での単錨泊のフェリーに対する (a) 船体航跡と錨鎖(左舷)の向き μ_{TH}^P , (b) 錨鎖張力(左舷) T_H^P ・回頭角 ψ ・錨鎖(左舷)の向き μ_{TH}^P の時系列, (c) 風荷重の出力(計測値)と目標値の時系列の比較を、図 14 に示す。図 14(a)より、回頭角 ψ と錨鎖(左舷)の向き μ_{TH}^P を変化させながら、船体が左右に振れ回っていることが分かる。図 14(c)より、風荷重模擬装置²⁴⁾による風圧力3成分の実際の実出力値は、このような振れ回り運動中でほぼ遅れがなく目標値に精度よく一致していることが分かる。詳細に見ると、横力 Y_A と回頭モーメント N_A の符号が切り替わる際に、誤差が僅かながらに大きくなることが確認できる。これは、符号が切り替わる際に前述の通り作動させるダクトファンを切り替える必要があるため、ファンが持つ固有の不感帯の影響によるものである。振れ回り運動中に発生する横力 Y_A と回頭モーメント N_A の最大値と比較してこれらの誤差は小さく、ファンの作動しない時間も振れ回り周期と比較して短いため、この不感帯が与える振れ回り運動への影響は無視できると考えられる。前後力 X_A の計測値にも、その絶対値が小さくなる時間でスパイク状の信号が確認できるが、これも同様に不感帯の影響である。

次に、図 14(b)より、錨鎖張力(左舷) T_H^P の最大値(衝撃力)は、錨鎖の向き μ_{TH}^P と船の回頭角 ψ が一致する時刻(図中の破線)よりも少し後の ψ の絶対値が最大になる時刻付近(図中の一点鎖線)に生じていることが分かる。この傾向は、錨泊船の風中での振れ回り運動に関する実船実験結果に一致している¹⁷⁾。その後、衝撃力よりも小さい第2の山が生じており、この傾向は実船実験結果¹⁷⁾に加えて実際の風中での模型実験結果^{18,21)}にも一致している。文献21)に従い、この時の T_H^P を定常張力と呼ぶことにする。更に、文献3)によればこの定常張力が生じるのは錨鎖が風軸と一致する時刻付近とされおり、本実験結果もそれに大略整合している(点線で示した真風向 $\psi_T = \mu_{TH}^P = 0$ の時刻付近)。本模型実験の錨鎖張力 T_H^P の衝撃力の大きさに注目すると、正面向風中で船に働く風圧前後力 X_A の絶対値(0.98 N)に対して、約7倍となっている。タンカー模型についてもこの比率を求めたところ、約2倍であった。文献4)で示されているこの比率の試算値は旅客船などで5~6倍、タンカーなどで3~4倍であるため、本実験による結果はその試算値に大略一致しており、船型による違いも捉えているものと判断できる。なお、三島型貨物船を対象とした実際の風中の模型試験によるその比率は4~5倍と報告されている¹⁸⁾ため、その報告と水面上の側面船体投影面積 A_L の違いから予測される本実験の両対象船に対する衝撃力比率にも、本実験結果は定性的に整合している。図 14(b)より、回頭角の絶対値 $|\psi|$ が最大となる付近において、 ψ の時系列が必ずしも滑らかに変化していないことが確認できる。これは、 ψ の変化に伴って波と風を受ける左右舷の向きが変化した後に生じる錨鎖の衝撃力によって、船首方位が急激に変化したためと考えられる。

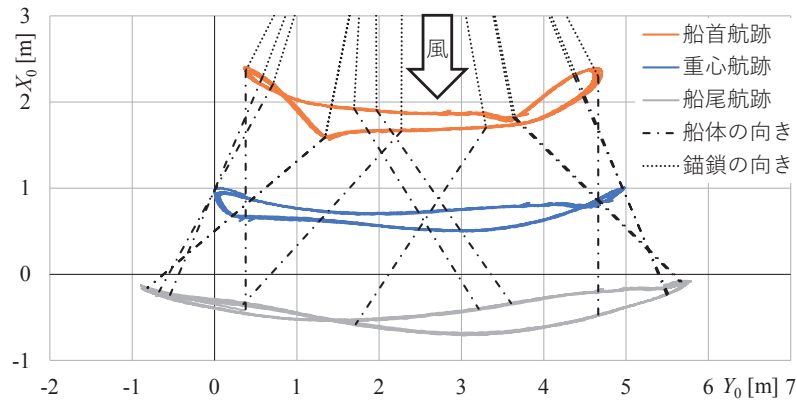
結果は省略するが、この条件の他、波浪中でも風荷重模擬装置が目標値通りに制御されること、タンカー模型に対する風中の実験でもフェリー模型と同様の錨鎖張力の特性が得られることが確認された。上記の結果から、風荷重模擬装置²⁴⁾の振れ回り実験への適用は実用上問題ないと考えられる。

3.2 振れ回り運動に及ぼす波の影響

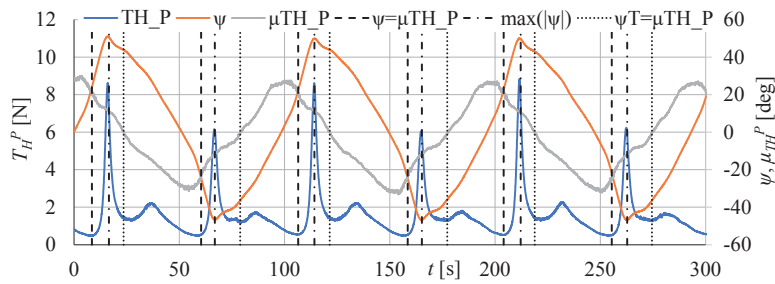
3.2.1 単錨泊

波風併存中の単錨泊時の振れ回り実験結果の一例として、真風速 $U_T=2.50$ m/s (15.0 m/s)・波高 $H_W=4.5$ cm (1.62 m)・波周期 $T_W=1.36$ s (8.16 s)の条件下でのフェリーに対する(a) 船体航跡と錨鎖(左舷)の向き μ_{TH}^P , (b) 錨鎖張力(左舷) T_H^P ・回頭角 ψ ・錨鎖(左舷)の向き μ_{TH}^P の時系列, (c) 船体重心の上下変位 Z_g ・ロール角 ϕ ・ピッチ角 θ の時系列を、図 15 に示す。図 14 に示した風のみの場合と真風速 U_T が異なるため波による定量的な変化までも述べることは出来ないが、本図より、本条件の波風併存中においても風中と同様の振れ回り運動が生じることが確認できる。錨鎖水平張力も風中と同様に衝撃成分と定常成分が生じているが、波が併存する場合には更に高周波

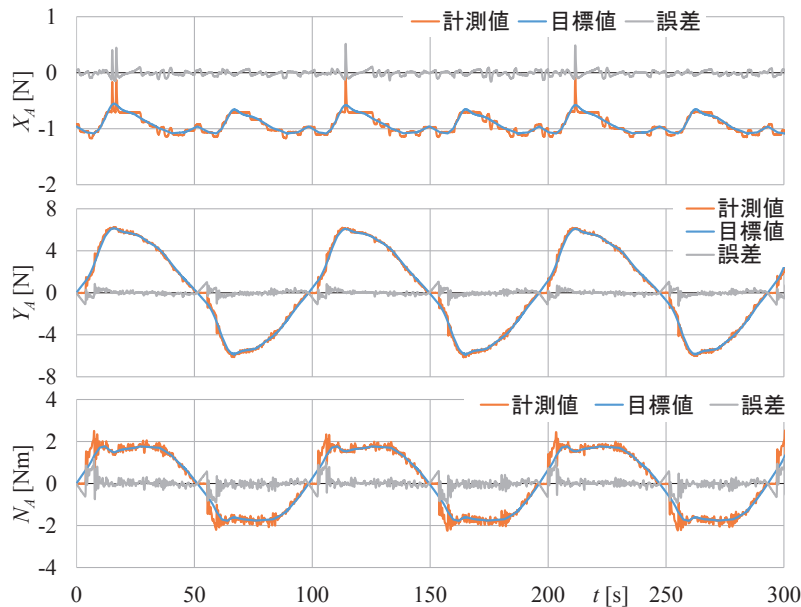
数の変動成分が重ね合わさっている。この変動周期を解析したところ、1.35 s (8.10 s)で波周期にほぼ一致していた。従って、この変動成分は、波によって船体が動揺(図15(c)参照)し、錨鎖の上端点が上下に変動することで生じたものであると判断できる。他の波・風条件、またタンカーの場合でも、同様に変動張力が重ね合わさっていることを確認している。図15(b)より、本条件では、 $\psi > 0$ の場合と比較して $\psi < 0$ のときに回頭角の絶対値 $|\psi|$ が最大となる付近においても、 ψ は比較的滑らかに変化しているが、これは主に錨鎖の上端点が船体のセンターライン上にないことに起因する振れ回り運動および錨鎖張力の非対称性によるものと考えられる。なお、図14の風中の結果においても振れ回り航跡と錨鎖張力の非対称性は確認できる。



(a) 船体航跡と錨鎖(左舷)の向き

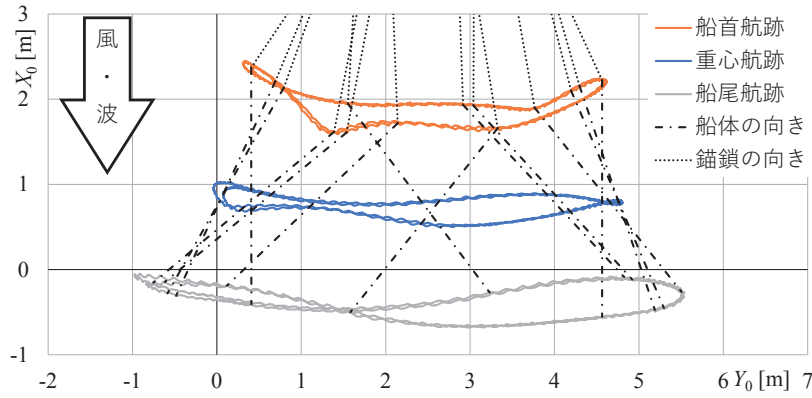


(b) 錨鎖張力(左舷) T_H^P ・回頭角 ψ ・錨鎖(左舷)の向き μ_{TH}^P の時系列

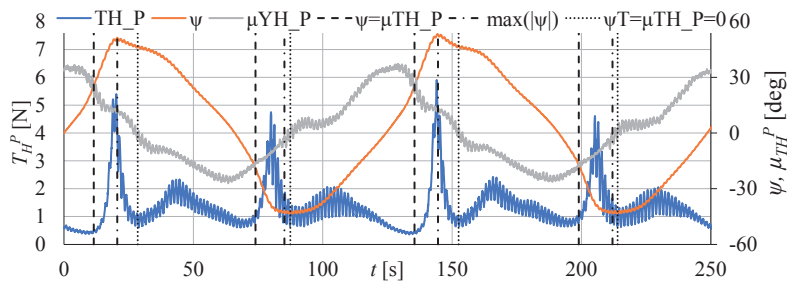


(c) 風荷重の出力(計測値)と目標値の時系列の比較

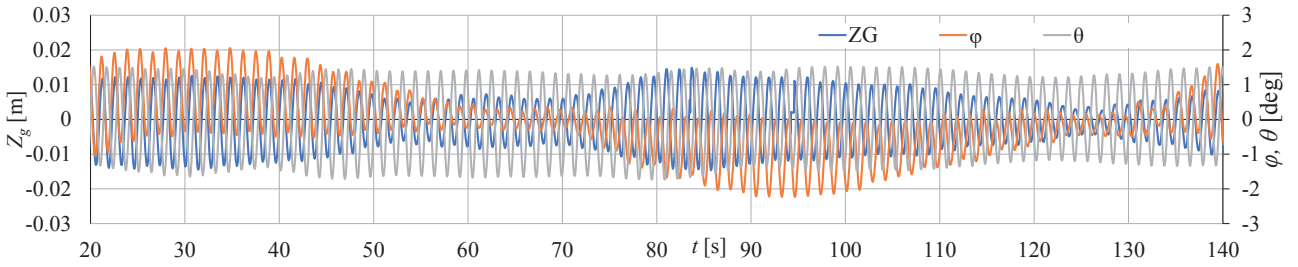
図14 風中の振れ回り実験結果(フェリー, 単錨泊, $U_T = 3.20$ m/s (19.2 m/s), 波なし)



(a) 船体航跡と錨鎖(左舷)の向き



(b) 錨鎖張力(左舷) T_H^P ・回頭角 ψ ・錨鎖(左舷)の向き μ_{TH}^P の時系列



(c) 船体重心の上下変位 Z_g ・ロール角 φ ・ピッチ角 θ の時系列

図 15 波と風中の振り回り実験結果(フェリー, 単錨泊, $U_T = 2.50 \text{ m/s}$ (15.0 m/s), 波高 $H_W = 4.5 \text{ cm}$ (1.62 m), 波周期 $T_W = 1.36 \text{ s}$ (8.16 s))

振り回り運動の生じた各波と風条件中での単錨泊時の実験結果について、タンカーとフェリーのそれぞれを対象にまとめたものを図 16 と図 17 に青線で示す。(a), (b), (c), (d)は、それぞれ波浪による変動成分も含めた衝撃力に相当する最大錨鎖張力、横方向における船体重心航跡 Y_g の振り回り片振幅、回頭角 ψ の振り回り片振幅、振り回り運動の周期である。これらは、各応答の時系列に対して振り回り運動半周期毎にその絶対値の最大値と時刻を読み取り、定常と見なせる区間で平均化することで求めた。(e)と(f)は、錨鎖上端点でのそれぞれ上下変位ならびに錨鎖張力 T_H における波周期で変動する成分の極値間片振幅を振り回り 1 周期で平均化した値である。なお、図 17 におけるフェリーの風のみの場合の実験結果については、必ずしも定常と見なせる時間は長くないため、計測精度の影響も少なからず含まれていることに注意が必要である。

図 16(a)~(d)の真風速 $U_T = 3.65 \text{ m/s}$ (20.0 m/s)の結果より、タンカーについては、風に加えて波も存在する場合は、風のみの場合と比較して最大錨鎖張力は大きくなり、横方向における船体重心航跡 Y_g の振り回り片振幅と回頭角 ψ の振り回り片振幅は小さく、また振り回り運動の周期は短くなる傾向を確認できる。このことは、波により船体はより短い周期で一定の大きさの変位を繰り返すようになり、それだけ船体は激しく振り回ること意味している。更に、波高 H_W が大きくなるにしたがって、波によるこれらの錨鎖張力や船体の振り回り運動の変化量は概ね大きくなる傾向を確認できる。次に、これら変化量の波周期 T_W による影響について注目すると、波周期 T_W が長くなるにつれて、大略最大錨鎖張力は大きくなり、横方向における船体重心航跡 Y_g ならびに回頭角 ψ の振り回り片振幅は小さくなる傾向を確認できる。しかし、最大錨鎖張力と回頭角 ψ の振り回り片振幅は波周期 T_W

=1.04 s (5.70 s)で最も小さくなっているように、詳細には例外が見られる。表1から分かるようにこの例外の波周期 T_W は上下揺れと縦揺れの固有周期に近い条件であるため、これが影響している可能性が考えられるが、後述の錨鎖上端点の上下変位における波浪変動成分の平均値(図16(e)参照)は、本波周期 T_W で特異な結果にはなっていないため、その詳細は今のところ明らかとなっていない。振れ回り運動に与える波浪の影響は定常波力が支配的と仮定すると、波周期 T_W が長くなるにつれて風の場合の結果に近づくと考えられる。実験結果がそうならないのは、波周期で変化する波浪強制力も低周波数の振れ回り運動に影響を及ぼしており、また波周期 T_W が長くなるにつれて波浪強制力も大きくなることで、その定量的な影響度合いが変化したことによると考えられる。このことは、緒言で述べた笹らの波風併存下における数値計算¹²⁾によって、波浪外力として波浪強制力のみを考慮した場合でも振れ回り運動は風中のみの場合よりも大きくなることが示されていることから妥当といえる。従って、最大錨鎖張力と回頭角 ψ の振れ回り片振幅が波周期 $T_W = 1.04$ s (5.70 s)で最も小さくなるという現象は、波周期 T_W が長くなることに伴い一般に大きくなる波浪強制力と小さくなる定常波力が複雑に影響し合った結果とも捉えられる。ただし、波浪強制力と定常波力を分離することが出来ない実験のみでは、本条件においてそれぞれの程度の割合で振れ回り運動に影響を及ぼしているかは評価できない。これには波風併存下の錨泊船の振れ回り運動を妥当に推定できる計算法との併用が不可欠であるため、今後の課題とする。図16(b)より、振れ回り運動の周期については、波周期 T_W による定量的な影響が必ずしも大きくはないが、波高 H_W 毎に定性的な傾向は異なっている。波高 H_W が変化することでも波浪強制力と定常波力の影響度合いが変化したものと思われる。なお、真風速 $U_T = 2.74$ m/s (15 m/s)の結果から判断すれば、真風速 U_T が異なっても、波高 H_W が同じであれば、振れ回り運動に与える波周期 T_W の影響は定性的に同一と見なすことが出来る。

図16(f)より、波高 H_W が大きくなると、また波周期 T_W が長くなると、錨鎖張力 T_H における波浪変動成分の平均値は大きくなる傾向を確認できる。これは、波浪強制力が大きくなることで、図16(e)に示すように錨鎖上端点の上下変位における波浪変動成分の平均値も大きくなるためである。上端点における錨鎖の上下変位と張力間の波浪変動成分片振幅平均値の関係(図16(e)と(f)の縦軸の関係)を、図18に示す。本図より、錨鎖上端点の上下変位における波浪変動成分の平均値に対して、錨鎖張力 T_H における波浪変動成分の平均値は単調増加することが分かる。更に、真風速 U_T が大きい場合、同じ上下変位量でも錨鎖張力 T_H における波浪変動成分の平均値はより大きくなることが分かる。これは、真風速 U_T が大きくなることで生じる平均的な錨鎖張力が大きくなることによると考えられる。実際に、錨鎖上端の上下動変位と平衡状態での水平方向の錨鎖張力に応じて、上下動に伴う水平方向の錨鎖張力成分の変動量も大きくなること、佐野ら³⁰⁾によってカテナリ理論に基づいて示されており、本実験結果はその傾向に整合している。佐野ら³⁰⁾は、更に錨鎖上端の上下動変位とそれに伴う水平方向の錨鎖張力の変動量との関係は近似的に線形性であることも示した。図18に併せて示した各真風速 U_T での結果に対する線形近似直線によれば、概ね同様の線形性を確認できるが、実験点は必ずしも多くはなく、更に波周期の短い間に大きく変動する瞬時の錨鎖形状に対してカテナリ理論は適用の限界があると考えられるため、本研究では以上の定性的な考察までに留めることとする。

図17より、フェリーにおいても、タンカー同様に波があると最大錨鎖張力は大きくなる点、錨鎖上端点の上下変位における波浪変動成分の平均値に対して錨鎖張力 T_H における波浪変動成分の平均値は単調増加する点を確認できる。一方で、船の振れ回り運動については、タンカーの場合ほど波による明確な変化が見られない。フェリーの方が風圧側面積は大きいため、相対的に波の影響を受けにくくなったという船型影響とも捉えられるが、波と風の条件は必ずしもタンカーの場合と同じではないため本結果からのみでは断定できず、そのためには更に幅広い外乱条件の検証が必要であると考えられる。

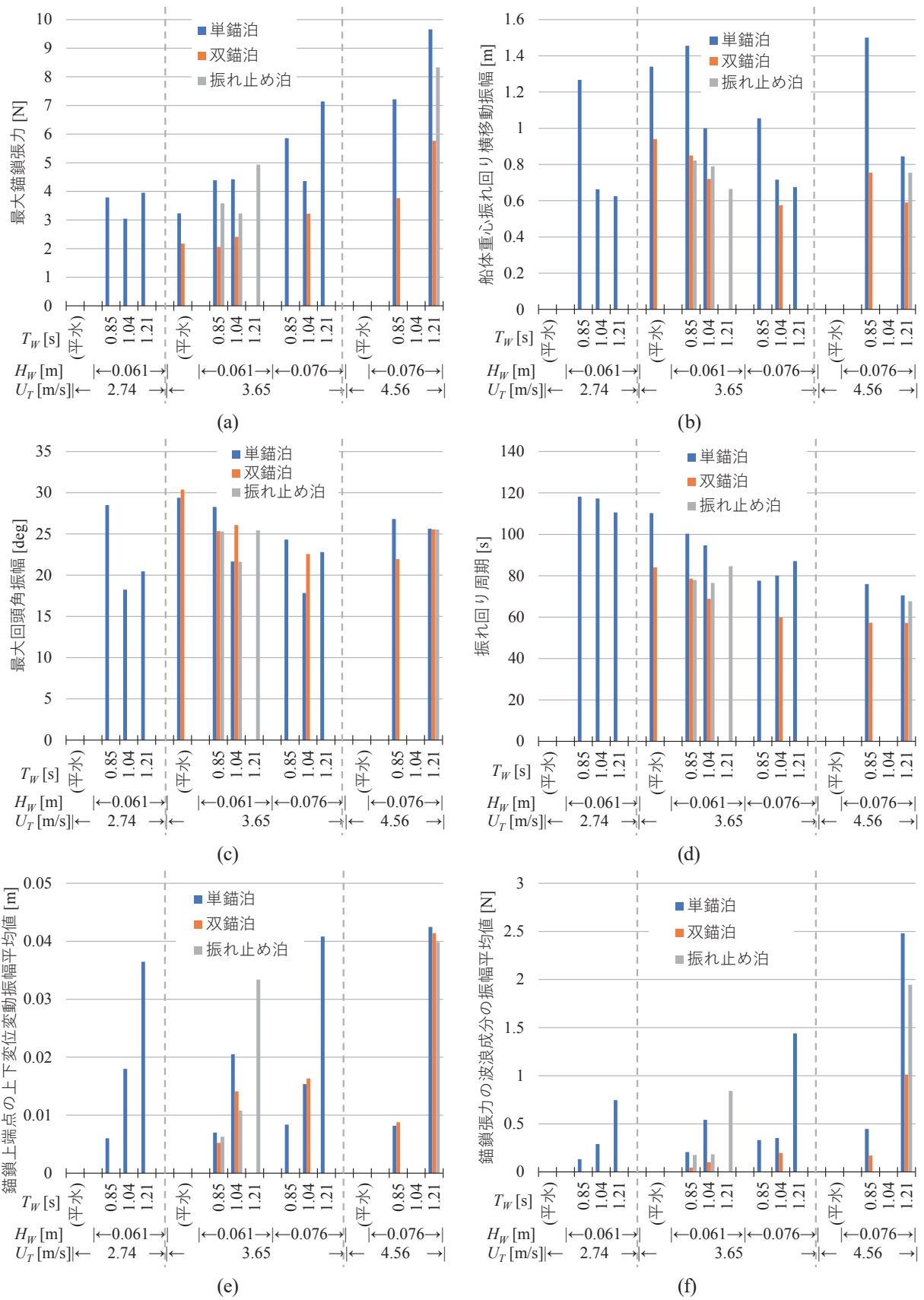


図 16 タンカーに対する振れ回り実験結果のまとめ

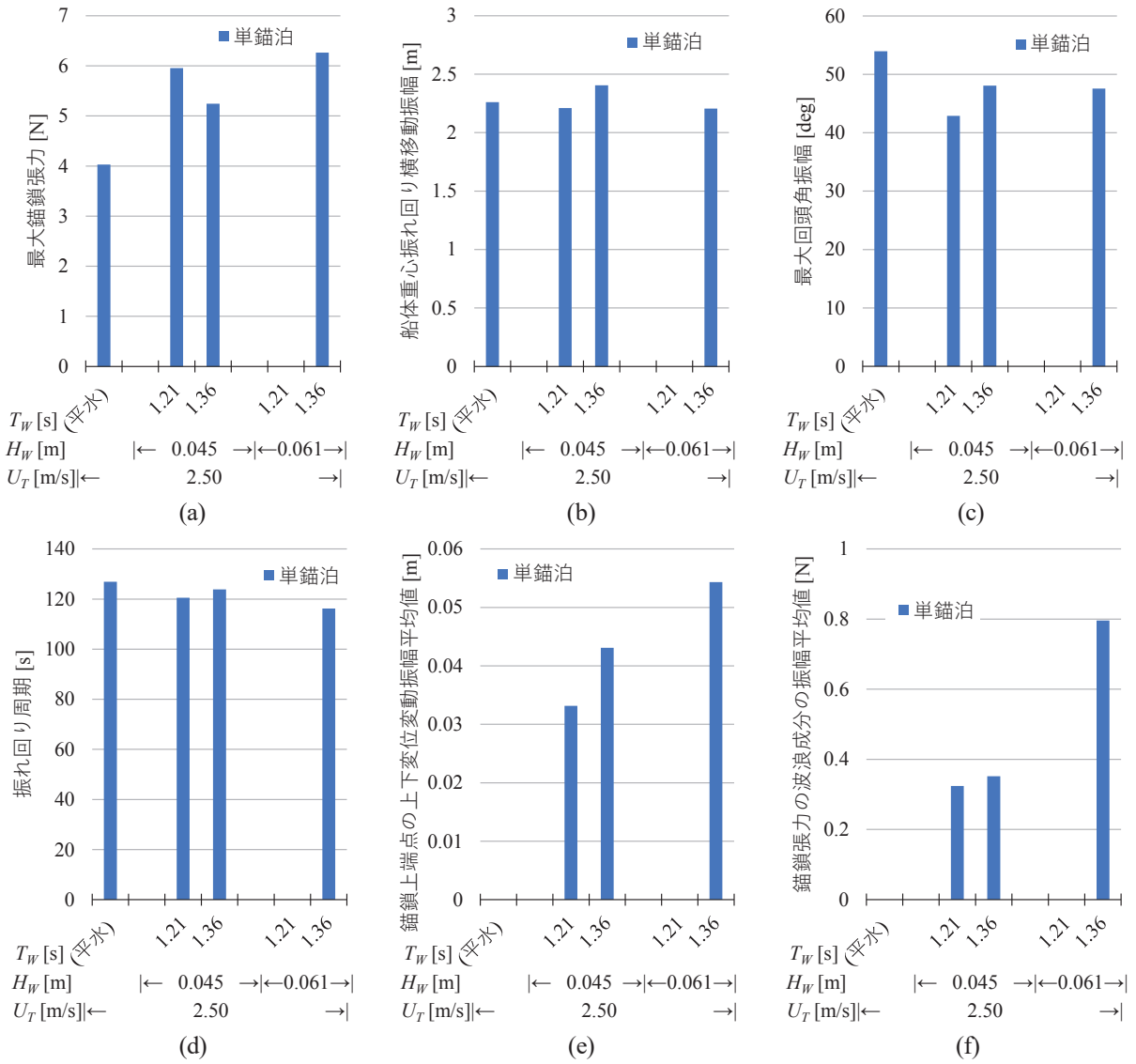


図17 フェリーに対する振れ回り実験結果のまとめ

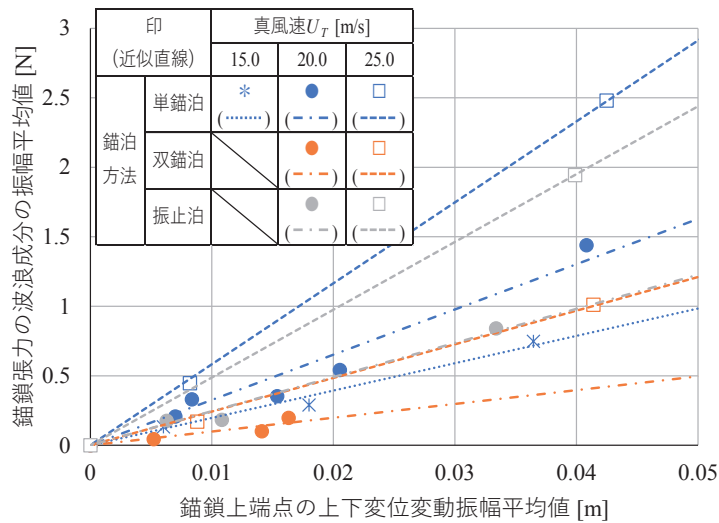


図18 上端点における錨鎖の上下変位と張力間の波浪変動成分片振幅平均値の関係(タンカー)

3.2.2 双錨泊

波と風併存中の双錨泊時の振れ回り実験結果の一例として、真風速 $U_T = 3.65 \text{ m/s}$ (20.0 m/s)・波高 $H_W = 6.1 \text{ cm}$ (1.83 m)・波周期 $T_W = 0.85 \text{ s}$ (4.66 s)の条件下でのタンカーに対する(a) 船体航跡と錨鎖の向き(左舷 μ_{TH}^P , 右舷 μ_{TH}^S), (b) 横方向船体重心航跡 Y_g ・回頭角 ψ ・錨鎖の向き(左舷 μ_{TH}^P , 右舷 μ_{TH}^S)の時系列, (c) 錨鎖張力(左舷 T_H^P , 右舷 T_H^S)の時系列を, 図 19 に示す. 本図より, 本条件の波風併存中においても, 振れ回り運動が生じることが確認できる. また, 図 19(b), (c)より, 米田ら¹⁹⁾の実際の風中の左右舷の錨鎖の開き角が小さい場合(具体的には 30, 40 deg)における双錨泊時の模型実験結果による報告と同様に, 本実験条件でも振れ回り半周期の間に両錨鎖に張力の授受が行われていることが確認できる. より具体的には, 船体が横方向の振れ回り航跡の中心線よりも左側に寄ったときは, 右舷側の錨鎖の方が張るため, 右舷側の錨鎖張力 T_H^S が大きくなり, 右舷側に寄ったときはその逆となっている. 更に波浪中であるため, この傾向に加えて, 単錨泊時同様に波周期で変動する成分が両舷の錨鎖水平張力に含まれている. 図 19(b)より, 単錨泊時のフェリーと比較して回頭角 ψ の極値付近が滑らかに変化し \sin 波形に近いものになっていることが分かる. これは, 3.1 節で述べた通りタンカー模型の方の風圧面積が小さいことに加えて, 後述のように双錨泊によって振れ回り運動と最大錨鎖張力が小さくなったことによると考えられる(次節の振れ止め泊も同様). なお, 本条件においては錨鎖と模型船は波と風の方向に対して線対称であるため, 振れ回り運動や錨鎖張力といった実験結果も回頭角 ψ の符号によらず理論上対称となると考えられる. しかし, 本実験結果が厳密にはそうになっていないのは, 主にマーカーの有無の違いで左右舷の錨鎖の質量や摩擦係数・その他流体力特性が異なっていることに加えて, 水槽底の摩擦の不均一性や錨鎖の左右の長さ・取り付け位置等の僅かなの違いが原因であると考えられる.

振れ回り運動の生じた各波と風条件中での双錨泊時の実験結果について, タンカーを対象にまとめたものを図 16 に橙色線で示す. なお図 16(a)では, 双錨泊に対する結果として, 振れ回り 1 周期における各舷の錨鎖張力の最大値を読み取った上で両舷の値を平均化した値を示した. 図 16(a)~(d)の真風速 $U_T = 3.65 \text{ m/s}$ (20 m/s)の結果より, 双錨泊時も単錨泊時同様の振れ回り運動に対する波の影響を確認できる. 具体的には, 風に加えて波も存在する場合に風のみの場合と比較して最大錨鎖張力は大きくなり, 横方向における船体重心航跡 Y_g の振れ回り片振幅・回頭角 ψ の振れ回り片振幅は小さく, また振れ回り運動の周期は短くなる. 更に, 波高 H_W が大きくなるにしたがって, 波によるこれらの錨鎖張力や船体の振れ回り運動の変化量は大きくなる. 単錨泊と双錨泊における振れ回り運動を比較すると, 風のみの場合と同様に, 波風併存時も全ての外乱条件において双錨泊の方が, 最大錨鎖張力・横方向における船体重心航跡 Y_g の振れ回り片振幅は小さく, また振れ回り運動の周期は短くなっている. 一方, 回頭角 ψ の振れ回り片振幅については, 波条件によって大小関係が異なっている. 次に, 図 16(e), (f)ならびにこれらの縦軸の関係を示した図 18 より, 双錨泊時も単錨泊時同様に, 錨鎖上端点の上下変位における波浪変動成分の平均値に対して, 錨鎖張力 T_H における波浪変動成分の平均値は単調増加することと, 真風速 U_T が大きい場合には同じ上下変位量でも錨鎖張力 T_H における波浪変動成分の平均値はより大きくなることが分かる. 更に, 双錨泊時には単錨泊時と比較して, 同じ上下変位量で生じる同風条件での錨鎖張力 T_H における波浪変動成分の平均値は小さくなっていることが分かる. 真風速 $U_T = 3.65 \text{ m/s}$ (20 m/s)の風のみでの振れ回り運動中に生じる単位錨鎖当たりの錨鎖張力の振れ回り 1 周期の平均値を求めると, 単錨泊時で 1.91 N, 双錨泊時で 0.99 Nであった. そのため, これら錨泊方法の違いによる錨鎖張力 T_H における波浪変動成分の平均値の差は, 単錨泊における真風速 U_T に対する考察同様に, 変動成分を除いた平均的な錨鎖張力が大きくなることによるものと判断できる. 以上により, 錨鎖張力の最大値・波浪変動成分ならびに振れ回り航跡の幅を小さくさせる観点から, 双錨泊は波浪中においても走錨の可能性を減らすための有効な方法であると言える.

3.2.3 振れ止め泊

波風併存中の振れ止め泊時の振れ回り実験結果の一例として, 真風速 $U_T = 3.65 \text{ m/s}$ (20 m/s)・波高 $H_W = 6.1 \text{ cm}$ (1.83 m)・波周期 $T_W = 1.04 \text{ s}$ (5.70 s)の条件下でのタンカーに対する(a) 船体航跡と錨鎖(左舷)の向き μ_{TH}^P , (b) 錨鎖張力(左舷 T_H^P , 右舷 T_H^S : 振れ止め錨用)・回頭角 ψ ・錨鎖(左舷)の向き μ_{TH}^P の時系列, (c) 振れ止め錨鎖の上端点における水平合速度と水平張力(右舷) T_H^S の時系列を, 図 20 に示す. 図 20 より, 本条件の波風併存中においても, 振れ回り運動が生じることが確認できる. また, 図 20(b)より, 振れ止め泊時の係留用錨鎖(左舷)には, 単錨泊時同様に, 錨鎖の向き μ_{TH}^P と船の回頭角 ψ が一致する時刻(図中の破線)よりも少し後の ψ の絶対値が最大になる時

刻付近と、更にその少し後で、振れ回り半周期毎に2つの極大値が生じていることが確認できる。単錨泊時のフェリー(図14,15)同様に前者を衝撃張力、後者を定常張力と見なすことが出来るが、本条件では両成分の差は必ずしも顕著ではない。これは前述の通りタンカー模型の方の風圧面積が小さいことに加えて、後述のように振れ止め泊によって振れ回り航跡が小さくなったことによると考えられる。更に、回頭角 $\psi < 0$ における錨鎖張力は $\psi > 0$ の場合よりも小さい。これは、錨鎖と船体を含めた系全体の非対称性(左舷に係留用錨鎖、右舷に振れ止め錨鎖が取り付けられていること)によると考えられる。その他に、図20(b)より、相対的に係留用錨鎖よりも小さいが、振れ止め錨鎖(右舷)にも張力 T_H^S が働いていることが確認できる。図20(c)より、錨鎖上端点における水平合速度が大きい時刻付近で振れ止め錨鎖の張力 T_H^S は大きくなっていることがわかる。少なくとも振れ止め泊において振れ回り運動が生じるその他の外乱条件では同様の振れ止め錨鎖の張力 T_H^S の変化傾向が確認されたが、振れ止め錨鎖自体の動きや船体への接触の有無までは記録出来ていないため、このような錨鎖張力 T_H^S が生じるメカニズムまでは明らかとなっていない。

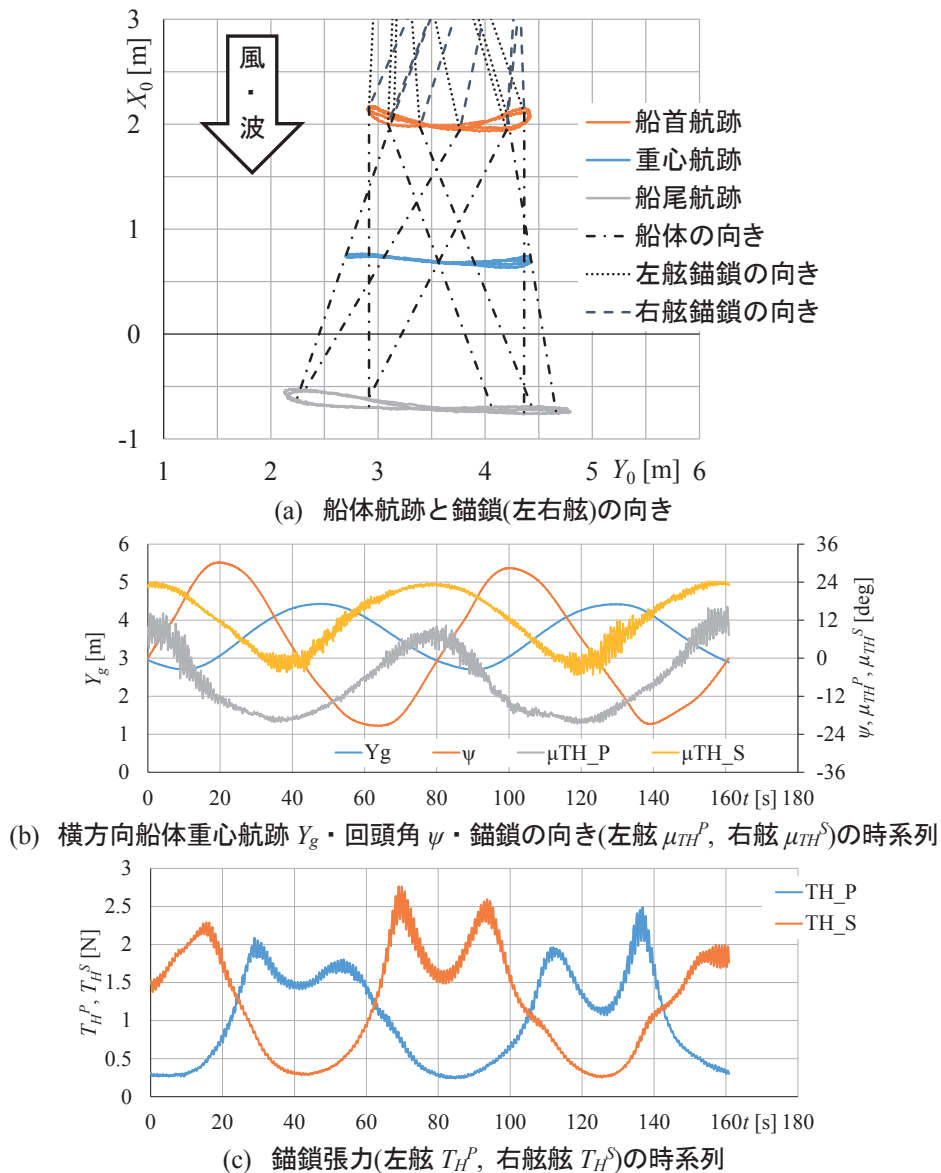
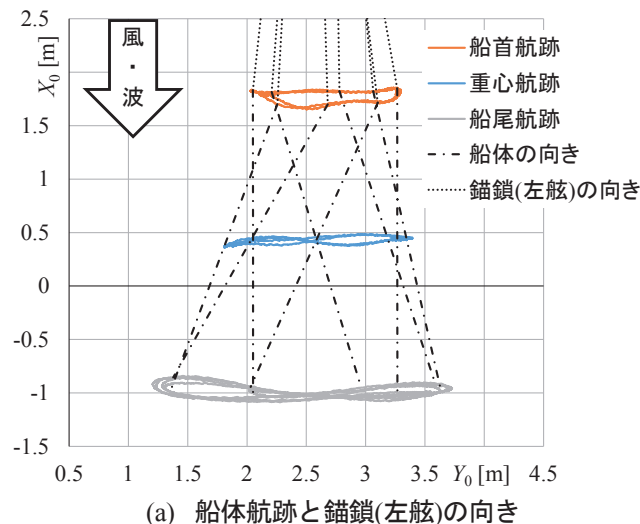


図19 波と風中の振れ回り実験結果(タンカー, 双錨泊, $U_T=3.65$ m/s (20 m/s), 波高 $H_W=6.1$ cm (1.83 m), 波周期 $T_W=0.85$ s (4.66 s))



(a) 船体航跡と錨鎖(左舷)の向き

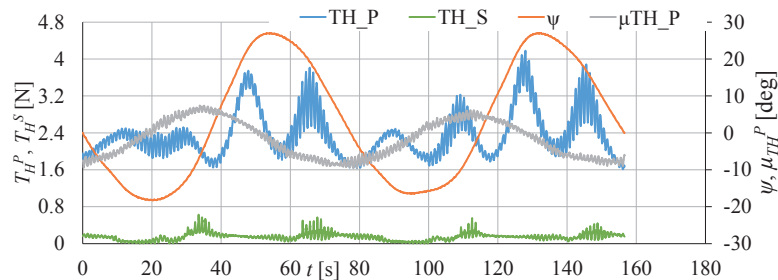
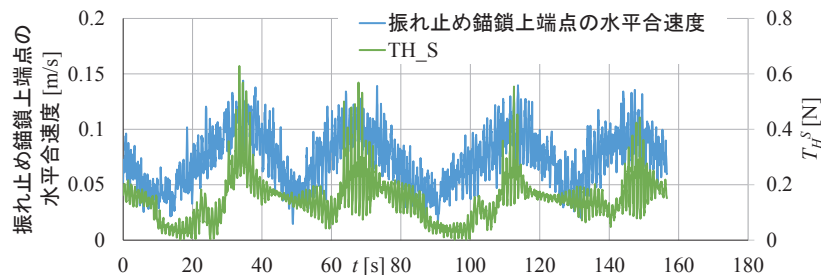
(b) 錨鎖張力(左舷 T_H^P , 右舷 T_H^S : 振れ止め鎖用)・回頭角 ψ ・錨鎖(左舷)の向き μ_{TH}^P の時系列(c) 上端点における振れ止め錨鎖の水平合速度と張力(右舷) T_H^S の時系列

図 20 波と風中の振れ回り実験結果(タンカー, 双錨泊, $U_T = 3.65$ m/s (20 m/s), 波高 $H_W = 6.1$ cm (1.83 m), 波周期 $T_W = 1.04$ s (5.70 s))

振れ回り運動の生じた各波と風条件中での振れ止め泊時の実験結果について, タンカーを対象にまとめたものを図 16 に灰色線で示す. なお図 16(a)では, 振れ止め泊に対する結果として, 半振れ回り周期における左舷(係留用錨鎖)の張力の最大値を読み取って平均化した値を示した. 図 16 ならびに図 16(e), (f)の縦軸の関係を示した図 18 より, 錨鎖張力の最大値・波浪変動成分ならびに振れ回り航跡の幅を小さくさせる観点から, 双錨泊同様に振れ止め泊は波浪中においても走錨の可能性を減らすための有効な方法であると言える.

4. 結 言

本研究では, 半載状態の内航タンカーと満載状態の内航フェリーの 2 隻を対象に, 波風併存下における錨泊船の振れ回り運動に関する水槽模型実験を実施した. 本模型実験では, 送風装置等によって模型船に風を与える代わりに, 風荷重模擬装置²⁴⁾を用いることで推定される風圧力に相当する外力を直接模型船に与えることで, 船に対する風の影響を模擬した. 最初に, 想定風圧力と実際に風荷重模擬装置が発生した力を比較することで, また

模擬風中の船体の振れ回り運動と錨鎖張力の関係を調べることで、錨泊船の振れ回り運動実験における本装置の適用性を明らかにした。

次に、波と風の外乱条件を種々変更して実験を行い、単錨泊・双錨泊(開き角 30 deg)・振れ止め泊をする船の振れ回り運動に及ぼす波の影響を調査した。この結果、定性的ではあるが、主要なものとして以下の点を明らかにした。

- ・ 風に加えて波が存在する場合には、風のみで生じる錨鎖張力の成分に、波周期で変動する成分も加わる。
- ・ 風に加えて波も存在する場合は、風の場合よりも最大錨鎖張力は大きくなる。更に少なくともタンカーについては、波により振れ回り運動は小さくなり、振れ回り周期も短くなる。
- ・ 錨鎖張力の波浪変動成分の振幅は、錨鎖上端点の上下動の大きさに依存するため、船体動揺振幅が大きくなるような大波高・長波周期で特に有意なものとなる。更に、同波条件であっても平均的な錨鎖張力が大きくなる強風下でも、この波浪変動振幅は大きくなる。
- ・ 双錨泊ならびに振れ止め泊は、単錨泊時と比較して、錨鎖張力の最大値ならびに振れ回り航跡の幅だけでなく、錨鎖張力の波浪変動成分の振幅も小さくすることが出来る。この観点から、波浪中においても走錨の可能性をより減らすための有効な方法である。

謝 辞

本研究は、国土交通省海事局の「走錨リスク判定システム確立のための調査事業」の委託費により実施しました。また、模型実験の実施に当たっては、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所の流体性能評価系および海洋開発系海洋システム研究グループの皆様にご多大なご協力をいただきました。関係各位に厚くお礼申し上げます。

References

- 1) Inoue K.: Detection of dragging anchor, Navigation, Vol.97 (1988), pp.60-68 (in Japanese).
- 2) Inoue K.: Countermeasures to assure the safety of the outside-harbour-refuge, Journal of Japan Institute of Navigation, Vol.78 (1988), pp.129-138 (in Japanese).
- 3) Honda K.: Outline of ship handling (6th edition), Seizan-Do Shoten, (2001), ISBN 4-425-47085-0 (in Japanese).
- 4) The Japan Ship Owners' Mutual Protection & Indemnity Association Loss Prevention and Ship Inspection Department: Dragging Anchor - Case Studies and Preventive Measures, P&I Loss Prevention Bulletin, Vol.43 (2018).
- 5) Shoji K.: Study on the motion of a moored body and the tension of mooring lines, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.138 (1975), pp.233-246 (in Japanese).(11)
- 6) Nakajima T., Motora S., and Fujino M.: A three-dimensional lumped mass method for the dynamic analysis of mooring lines, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.154 (1983), pp.192-202 (in Japanese).
- 7) Ura T., Toshima T., and Takahashi Y.: Behaviors of moored structure on the sea, SEISAN KENKYU, Vol.32, No.2 (1980), pp.70-73 (in Japanese).
- 8) Kijima K. and Takaoka Y.: On the slewing motion of ship of riding at a single anchor in shallow water, Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol.73 (1987), pp.44-52 (in Japanese).
- 9) Inoue K. and Usui H.: Guideline for safe anchoring based on a risk-index of dragging anchor - wind force, water depth and anchor cable to be paid out -, Journal of Japan Institute of Navigation, Vol.90 (1994), pp.233-241 (in Japanese).
- 10) Inoue K. and Usui H.: Guideline for safe anchoring based on a risk-index of dragging anchor - safety of mooring at tow anchor -, Journal of Japan Institute of Navigation, Vol.92 (1995), pp.213-221 (in Japanese).

- 11) Kijima K.: Column, study of anchorage of domestic ships under typhoons, Collection of Marine Accident Analysis of Marine Accident Inquiry Agency, No.6 (2006), pp.88-99, (in Japanese).
- 12) Sasa K., Nagai T., Shiraishi S., Yoneyama H., and Mizui S.: Safety evaluation of anchored ship during offshore refuge of harbour using observed waves from viewpoint of ship motions, Proceedings of Coastal Engineering, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 52 (2005), pp.1246-1250 (in Japanese).
- 13) Sasa K. and Atilla I.: Safety evaluation of advanced vessel considering dynamic mooring and wave diffraction, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B2 (Coastal Engineering), Vol.67, No.2 (2011), pp.756-760 (in Japanese).
- 14) Ueno M., Nimura T., Miyazaki H., and Nonaka K.: Steady wave forces and moment acting on ships in manoeuvring motion in short waves, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.188 (2000), pp.163-172 (in Japanese).
- 15) Fujii T., Hashimoto S., Omoto N., Matsubara S., Okabe M., Furusho M., and Arai Y.: On the ship's movement lying at anchor in rough weather, Journal of Japan Institute of Navigation, Vol.62 (1980), pp.145-151 (in Japanese).
- 16) Hashimoto S., Yamada T., and Yano Y.: Experimental study on reducing the swing motion of a ship lying at single anchor in stormy weather, Journal of Japan Institute of Navigation, Vol.69 (1983), pp.9-15 (in Japanese).
- 17) Saito S. and Yokosuka Y.: A study on anchoring in stormy weather – on the measurement of ship's cable tension at anchor -, Journal of Japan Institute of Navigation, Vol.74 (1985), pp.9-18 (in Japanese).
- 18) Samejima N., Yokota T., Iwai A., Yoneda K., Nohara T., Okada M., Kikutani H., Kawamoto F., and Oikawa K.: Experimental Studies on Anchoring in strong Wind (part 1) : On riding at single Anchor, Journal of the Nautical Society of Japan, Vol.22 (1960), pp.59-69 (in Japanese).
- 19) Yoneda K., Nohara T., Okada M., Kikutani H., Kawamoto F., and Oikawa K.: Experimental Studies on Anchoring in strong Wind (part 2) : on mooring and riding at single anchor with drag anchor, Journal of the Nautical Society of Japan, Vol.23 (1960), pp.55-68 (in Japanese).
- 20) Honda K. and Kosuda S.: Experimental study on mooring force and yawing motion of a ship moored at two anchors in wind, Journal of the Nautical Society of Japan, Vol.23 (1960), pp.55-68 (in Japanese).
- 21) Inoue K.: An investigation on reducing cable tension caused by swing motion of a ship moored at single anchor in wind I -on the factors affecting the magnitude of cable tension-, Journal of Japan Institute of Navigation, Vol.65 (1981), pp.1-12 (in Japanese).
- 22) Yoneda K., Nohara T., Tani H., Kikutani H., Iwai A., Oikawa K., Kugumiya H., and Yamada T.: Experimental Studies on Anchoring in strong Wind - on riding a single anchor and mooring under the strong wind with high wave -, Journal of the Nautical Society of Japan, Vol.36 (1966), pp.91-96 (in Japanese).
- 23) Hiraishi T. and Honjyo S.: Characteristics of the motion and tension of a ferry moored in a storm, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.30, No.2 (1991), pp. 59-153 (in Japanese).
- 24) Tsukada Y., Suzuki R., and Ueno M.: Development of a wind loads simulator and free-running model ship tests in actual sea conditions, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.17, No.3 (2017), pp.167-186 (in Japanese).
- 25) Hamamoto M. and Kim Y.-S.: A new coordinate system and the equation motions describing manoeuvring motion of a ship in waves, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.173 (1993), pp.209-220 (in Japanese).
- 26) A handbook of shipbuilding (Zosen Sekkei Binran), KAIBUNDO, Kansai Society of Naval Architects, Japan, 4th edition (1983) (in Japanese).
- 27) Fujiwara T., Ueno M., and Ikeda Y.: A new estimation method of wind forces and moments on ships on the basis of physical component methods, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 2 (2005), pp.243-255 (in Japanese).
- 28) Yoshimura Y. and Nagashima J.: Estimation of the manoeuvring behavior of ship in uniform wind, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.158 (1985), pp.125-136 (in Japanese).
- 29) Miyazaki H., Kawamura K., Yuichiro Y., Suzuki R., Watanabe M., Hasegawa K., Ishida K., Saito M., Sato H., Yukawa K., and Taguchi H.: Development of support system for selecting appropriate anchoring method and the anchoring area, Papers of National Maritime Research Institute, Vol. 21, extra issue (2021), pp.19-24 (in Japanese).

- 30) Sano M., Honda K.: On the influence of pitching and heaving of the ship on the tension of riding cable, Journal of the Nautical Society of Japan, Vol.10 (1954), pp.9-16 (in Japanese).