

風荷重模擬装置の開発と実海域環境下の自由航走模型試験

塚田 吉昭*, 鈴木 良介*, 上野 道雄*

Development of a Wind Loads Simulator and Free-running Model Ship Tests in Actual Sea Conditions

by

Yoshiaki TSUKADA, Ryosuke SUZUKI and Michio UENO

Abstract

The authors have developed a wind loads simulator that enables us to carry out free-running model tests for investigating wind effects on ship performance. The wind loads simulator provides a free-running model ship with simulated wind loads taking account of supposed true wind speed and direction, and instantaneous model ship speed, drift angle, and heading angle. It does not generate environmental wind but exerts forces and moment on a model ship using three pairs of duct fans. A control PC calculates time varying longitudinal and lateral wind forces and yaw moment using wind loads coefficients estimated beforehand and ship motion data, and distribute them to the three pairs of duct fans. Feedback control ensures the intended wind loads using data from load cells on which the duct fans are mounted and those from accelerometers for correcting inertia forces of the duct fans. This paper reports the concept, configuration, and control procedure of the wind loads simulator, and presents tests data to validate the wind loads simulator. The tests include preliminary tests on shore and free-running tests in a model basin. The free-running tests are turning, zigzag, and course keeping tests in wind, and in wind and regular waves; and course keeping tests in wind and short-crested irregular waves. The test data confirms the effectiveness and usefulness of the wind loads simulator as a device in free-running model tests to evaluate ship performance in actual sea conditions.

* 流体性能評価系

原稿受付 平成29年10月25日

審査日 平成29年12月26日

目 次

1. まえがき	166
2. 風荷重模擬装置の開発	167
2.1 風荷重模擬装置の課題と解決策	167
2.2 風荷重模擬装置と自由航走試験の概要	169
2.3 風荷重の計算と分配	170
2.4 風荷重模擬装置の製作と陸上試験	171
3. 自由航走模型試験による風荷重模擬装置の検証	172
3.1 供試模型船と風荷重模擬装置の配置	172
3.2 風圧力特性	173
3.3 模型船と風・波の試験状態と保針試験	174
3.4 平水中および規則波中の保針試験	175
3.5 平水中 Z 試験	177
3.6 平水中および規則波中の 35 度旋回試験	177
3.7 シミュレーション計算	180
4. 実海域環境下の自由航走模型試験	180
4.1 模型船と実海域環境	180
4.2 実海域環境下の保針試験	181
4.3 風速の影響	182
5. まとめ	183
謝辞	184
参考文献	184

1. まえがき

風・波をとまなう実海域環境下を航行する船舶の性能評価は古くからの重要な課題である。近年では、2013 年に国際海事機関 (IMO) において海運分野におけるエネルギー効率設計指標 (EEDI) 規制が始まった。この EEDI 規制値を満足するために主機関出力を小さくした船が荒天下で操縦不能に陥ることを懸念して主機関の最低出力を定めるためのガイドラインの策定が国際的課題となっている。このように荒天中の操縦性能を含めた船の実海域性能を精度よく推定するための方法の必要性はますます高まっている。

従来平水中の船舶の基本的な性能の推定手法としては、模型実験に基づく実船性能推定法が確立されている。一方、自由航走模型を用いた実験で実海域環境下の船舶の性能を推定しようとする場合は、一般的には試験水槽に実海域環境を再現しこのなかで模型実験を実施する必要がある。実船の状態を模擬した縮尺模型を使用して風、波の環境下で得られた試験結果は、理解し易く直接的である。この模型実験から実船の性能を直接評価することができるなら、複雑な要素が絡みあう実海域環境下の性能を総合的に評価できると考えられる。しかし、波の中での試験の例は数多いが、同時に風も起こした状態での試験の報告例¹⁾はあまりみられない。これは風環境を模型船に与えることが難しいからである。模型船に風環境を与える方法としては、水槽の中または周りに送風装置を固定して設置する方法と模型船を追尾する走行台車に送風装置を取り付けて風を与える方法が考えられる。しかし、自由航走模型船の水槽内の位置は大きく変化するため前者の方法では大規模な装置が必要になるので一般には困難と思われる。後者の方法でも模型船と並行して送風装置も動くために、風速や風向を安定して与えるのは困難と思われる。このように自由航走模型船に送風装置を適用するには限界があることが大きな課題になっている。

著者らはこれまでに、ダクトファンを用いて自由航走模型船に補助的な推力を与えることのできる補助推力装置を開発^{2), 3)}してきた。この装置を応用することで、送風装置を用いなくても風環境を模型船に与えることがで

きると考えて風荷重模擬装置を開発^{4)・5)}した。この風荷重模擬装置は模型船に風を当てるのではなく、想定される風による風荷重と等しい力を模型船に与えることで風環境を擬似的に実現する。過去にも模型船上の空力発生装置で風荷重を与えた平水中の模型試験によって、風環境を擬似的に実現する方法の有用性が確認されている⁶⁾が、今回開発した模擬装置は小型で波の中の試験にも使用できることに特徴がある。この風荷重模擬装置は、複数のダクトファンのフィードバック制御により船体運動に応じて時々刻々想定した風環境中で推定した風荷重を発生することができる。波浪中では、船体動揺による装置の慣性力影響を考慮した風荷重制御を可能にした。この風荷重模擬装置の開発で、波と風が併存する実海域環境下の自由航走模型試験が各段に容易に再現できるようになった。

本報告は、最初に風荷重模擬装置の開発の概要を説明する。次に風荷重模擬装置の検証実験として行った操縦性能試験結果を数値計算と比較して示して模擬装置の有効性を述べる。おしまいに荒天中を模擬した実海域環境下の自由航走模型試験の例を示す。

2. 風荷重模擬装置の開発

2.1 風荷重模擬装置の課題と解決策

風荷重模擬装置は模型船の周りに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の推力で想定した風環境と模型船の運動状態に応じて、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。空力発生装置には当所実海域再現水槽の自由航走模型試験で実用化⁷⁾されている補助推力装置(図1)を応用した。この装置は自由航走模型船のプロペラ荷重度を任意に変更する目的で開発したもので、模型船尾に設置したダクトファンで模型船に推力を与えてプロペラ推力を補助する。その補助推力は、検力計で計測しフィードバック制御するため、正確で応答性も比較的高い。さらに小型軽量なので小型模型を使用する自由航走模型試験にとっても、実用的である。本研究で開発する風荷重模擬装置は、全方位の見掛けの風向に対する風荷重に対応するため複数台のダクトファンを模型船に取り付けて状況に応じて荷重を分配することになる。

これまでに平野ら⁶⁾は、模型船上の空力発生装置で想定した風荷重を発生させて自由航走模型試験を平水中で実施し、その有効性を報告確認している。

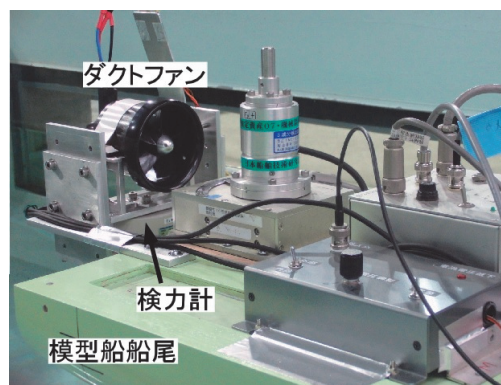


図1 模型船船尾に設置した補助推力装置

平野らの報告⁶⁾について次の点に着目した。

- 1) 模型試験は平水中のみである。
- 2) 模型船に与える風荷重は、陸上の静止状態における検定結果から模型船航走中のファンの回転数を制御している。ファンに流入する気流は模型船航走にともない変化する。したがって、静止状態の検定値そのままでは試験中の風荷重を正確に与えられないことが考えられる。
- 3) 模型船に対して空力発生装置のファンが大きい。

これらに対し、新しく開発する模擬装置では次のようにすることとした。

- 1) 波浪中でも使用可能とする。
- 2) 検力計を使った風荷重のフィードバック制御によって、模型船の航走がファンに流入する気流に与える影響を補正して正確な風荷重を与える。
- 3) 模型飛行機用のダクトファンを選択することで小型軽量を実現する。

中心となる技術課題は波浪中試験に適用可能にすること。すなわち、模型船の状況によって方向や大きさが様々なに変化する風荷重を、船体動揺中に時々刻々正確に与えることである。フィードバック制御のためにダクトファンの下に設置した検力計の計測値には、波浪中の動揺や操縦運動による装置の慣性力や船体傾斜による自重成分が含まれる。そして、この成分（外乱）は与えるべき風荷重よりも大きくなることが予想された。大きな外乱を含む計測値を直接フィードバックしても、正確な風荷重を与えることが難しいと考え、これを解決するために外乱を推定して補正することにした。方法は次の通りである。風荷重を分担する各装置の直近に加速度計を取り付け、荷重方向の加速度を正確に計測する。時々刻々の加速度と検力計上の装置質量（ファン、治具、検力計内部の質量含む）から外乱を推定する。そして、検力計の計測値から外乱成分を差し引き、ダクトファンが発生している荷重だけを求めて、フィードバック制御する。この方法で、波浪中における小さい風荷重でも正確に与えられる可能性がある。図2に風荷重模擬装置の制御ブロック図を示す。補助推力装置の制御方法³⁾に、新しく加速度と装置質量から推定した外乱成分を考慮してPID制御する。

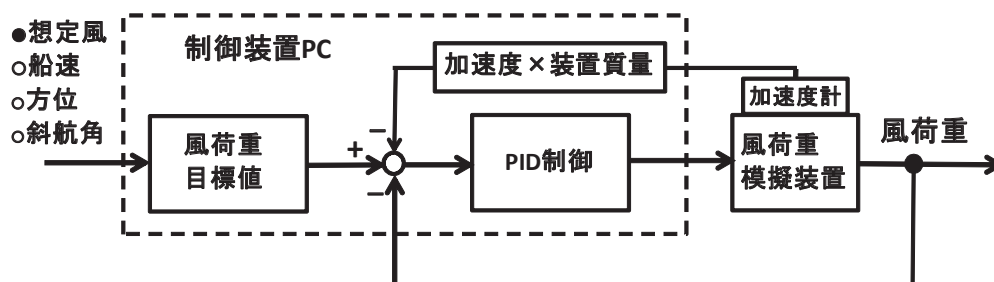


図2 風荷重模擬装置の制御ブロック図

図2で示した制御機能を確認するため、直径約0.07mの小型ダクトファン³⁾と加速度計を用いて確認試験をおこなった。試験は風荷重の目標値(WL_t)を0.784N (0.08kgf)一定に設定し、装置全体を手動で動揺ならびに傾斜させた。PID制御係数については、目標値との一致や応答性を確認したうえで適当なPI値を設定した。図3に検力計計測値(LC_{raw})とこれに外乱補正を加えた風荷重計測値(WL_m)を WL_t と比較して示す。図4には加速度の計測値 AG を示す。最大で約0.15gと大きな加速度を示している。図3に示した LC_{raw} は WL_t 周りに大きく変動しており、その波形は図4と類似している。一方、 WL_m に大きな変動成分は無く WL_t に良く一致している。このことから、加速度の計測による補正が有効であることがわかる。

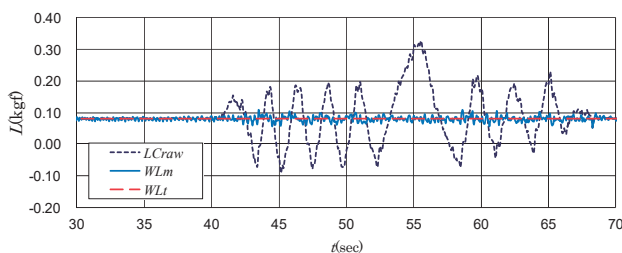


図3 制御機能試験結果

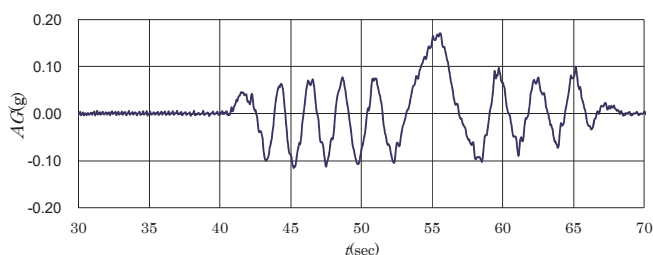


図4 制御機能試験時のAG

2.2 風荷重模擬装置と自由航走試験の概要

回頭運動の影響は小さいとの報告⁸⁾に基づき、模型船に与える風荷重は想定する風環境と時々刻々の船速と船首方位、横流れ角から見掛けの風向・風速に応じて推定する。本方法では、供試船の風圧力特性を予め推定する必要がある。風圧力特性の推定には次のような方法がある。

- ・風洞実験
- ・CFD等の数値計算
- ・船の水面上形状を変数とする風洞実験データの回帰分析式^{9), 10), 11)}
- ・船種と船の長さ・幅のみを用いる簡易推定¹¹⁾

風荷重模擬装置の概念図を図5に示す。ダクトファン（ファン）の回転方向（推力方向）は変えることができないため、荷重の正負の切替えは治具を介して向かい合わせに設置した2台1対のファンの切り換えで行う。横風荷重（左右力と回頭モーメント）用としては、ファンを船首側と船尾側に各1対配置する。これら船首尾各1対のファンの荷重は各1台の検力計で計測する。前後荷重用としては船尾（補助推力装置と兼用）と船首（向かい風用）に配置する。これらも前後荷重用の1対のファンとなるが、制御に用いる検力計は別々である。なお、図5では、船首横風荷重用ファン1対と船首前後荷重用ファン1台は共通の治具に取り付けた場合を示した。横風荷重の着力点の水線面からの高さ IR は見掛けの風向によらずほぼ一定とみなせる⁶⁾ので、ファンの取り付け高さを IR に合わせることによって風による傾斜モーメントも正しく模擬することができる。加速度計は各検力計に近接させて取り付ける。

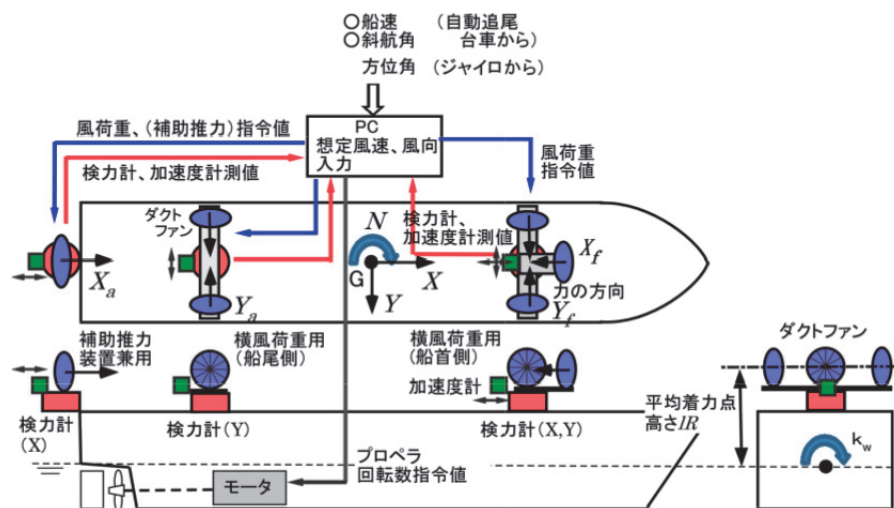


図5 風荷重模擬装置の概念図

制御系は、推定した風圧力特性と想定した真風速と真風向、時々刻々計測される船速、方位角、横流れ角から、見掛けの風速と風向を求め、各ファンに対して目標値を算出する。当所の実海域再現水槽では、船速と横流れ角は模型船を自動追尾する曳引台車の出力データを用いる。そして、加速度計測値を用いて検力計計測値を補正して制御量を求め、目標値と比較して各ファンに対してフィードバック制御を行う。

図6に当所実海域再現水槽における風荷重模擬装置を使った自由航走試験の構成を示す。模型船の加速や減速にはワイヤー式クランプ装置を用いる。模型船は基本的に自動操舵で走らせる。曳引台車は模型船中央上部に設けた追尾用ターゲットを光学方式（デジタル映像）で認識して自動追尾する。制御PCは曳引台車上に置き、主台車上の計測室から遠隔操作する。重心位置に取り付けた姿勢計測器（ジャイロ）など必要な機器は極力模型船に搭載するが、それでも必要となる台車・模型船間の電源や通信等のケーブルは柔軟な物を用い配置も含めて自由航走に影響が無いように留意した。図中には示していないが、PCとファンの間に必要なアナログ/パルス変換器³⁾は模型船上に搭載した。なお、自由航走模型船の操縦運動を実船相似にするための舵効き船速修正¹²⁾ (RSC)を同時に行う場合は補助推力とプロペラ回転数もあわせて制御する。

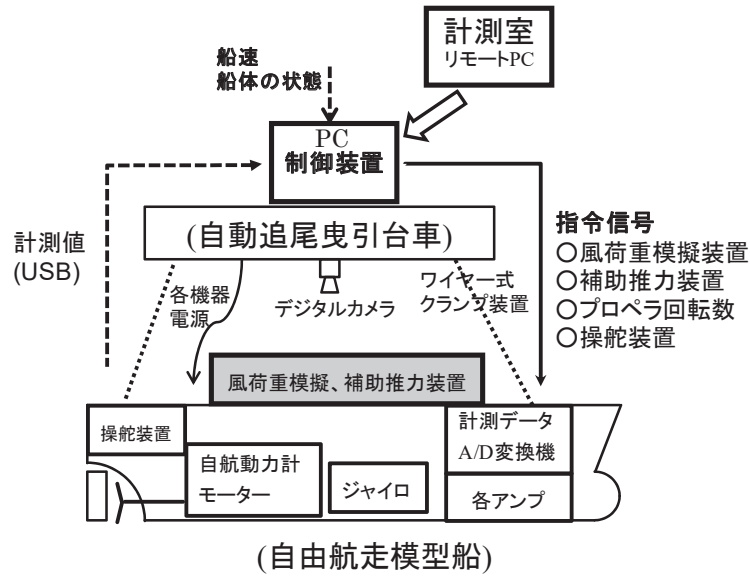


図6 風荷重模擬装置を使った自由航走模型試験の構成

2.3 風荷重の計算と分配

座標系を図7に示す。想定する真風速 U_T 、真風向 ψ_T と模型船の船速 V 、船首方位 ψ 、横流れ角 β から見掛けの風速 U_A 、風向 ψ_A を求め、風圧力係数（前後力係数 C_{XW} 、横力係数 C_{YW} 、回頭モーメント係数 C_{NW} ）を用いて船体重心を基準とする前後風荷重、横風荷重（左右力と回頭モーメント）の3成分 X_w 、 Y_w 、 N_w を計算する。これら船体重心を基準とする3成分を各ファンに分配する手順は、下記のとおりである。

1) 見掛けの風速 U_A 、見掛けの風向 ψ_A

$$U_A = \sqrt{u_A^2 + v_A^2}$$

$$\psi_A = \tan^{-1}(v_A / u_A)$$
(2.1)

ただし

$$u_A = V \cos \beta + U_T \cos(\psi_T)$$

$$v_A = -V \sin \beta + U_T \sin(\psi_T)$$
(2.2)

V 、 β は自動追尾台車による計測値を表す。

2) 船体重心位置の風荷重：前後風荷重 X_w 、横風荷重 Y_w 、重心周り回頭モーメント N_w

$$X_w = \frac{1}{2} \rho_A A_F U_A^2 C_{XW}(\psi_A)$$

$$Y_w = \frac{1}{2} \rho_A A_S U_A^2 C_{YW}(\psi_A)$$

$$N_w = \frac{1}{2} \rho_A A_S L U_A^2 C_{NW}(\psi_A)$$
(2.3)

ただし、空気密度 ρ_A 、水面上の船体正面投影面積 A_F 、水面上の船体側面投影面積 A_S 、船長 L （全長）
船体静止時の風圧力係数、 C_{XW} 、 C_{YW} 、 C_{NW}

3) 風荷重の各ファンへの分配

横風荷重は船首と船尾の2対のファンをそれぞれ Y_f と Y_a として扱い、前後風荷重は制御のための検力計が正負で別々になるのでこれらを分けて X_f と X_a として扱う。

$$\begin{aligned}
Y_f &= (l_a Y_w - N_w) / (l_a - l_f) \\
Y_a &= (l_f Y_w - N_w) / (l_f - l_a) \\
X_f &= -X_w (X_w \leq 0) \\
X_a &= X_w (X_w \geq 0)
\end{aligned}
\tag{2.4}$$

ただし、船首横風荷重 Y_f 、船尾横風荷重 Y_a 、船首前後風荷重 X_f 、船尾前後風荷重 X_a 、 l_f と l_a は船体重心から船首、船尾の横風荷重用装置の x 軸方向長さで、重心位置から船首側を正とする。

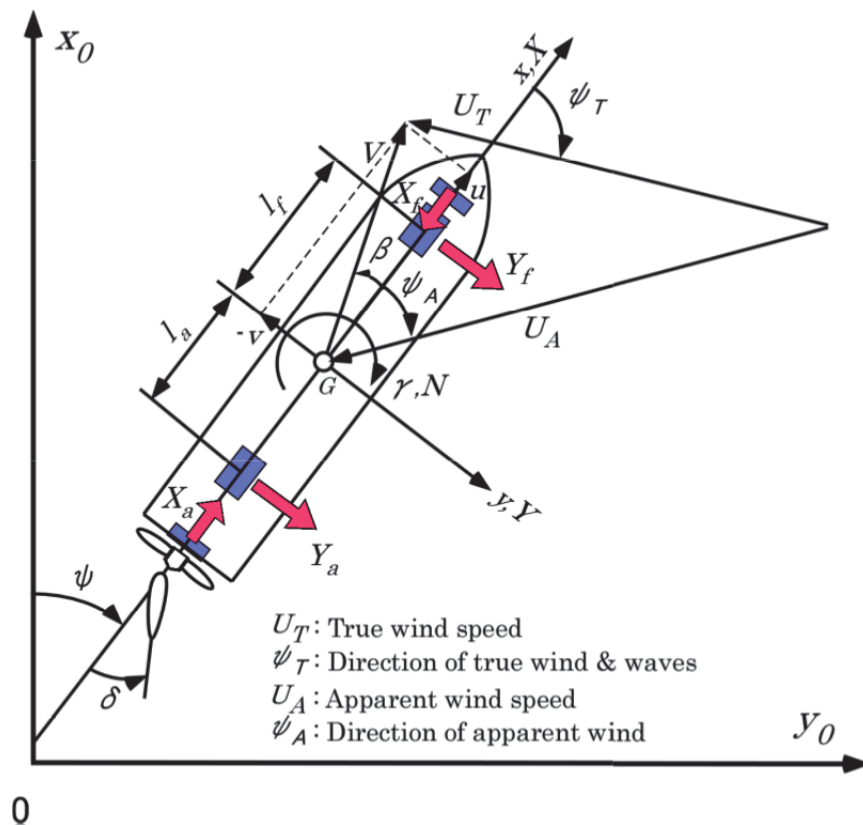


図7 座標系

2.4 風荷重模擬装置の製作と陸上試験

風荷重模擬装置のダクトファンには後述する長さ3mのタンカー模型を対象に、想定される風荷重の範囲を検討したうえで小型³⁾のものを選択した。図8に船尾側の横風荷重用の1対のファンを示す。ファンの直径は約0.07mで実用的な荷重範囲は0.147N (0.015 kgf) ~ 1.96N (0.20kgf) である。検力計は薄形で X と Y 方向が計測できる。小型の加速度計を検力計の直上に取り付けた。取り付け治具は軽量化に留意した。そして、1対のファンの間隔を変更できるように長さの異なる治具も用意した。

製作した模擬装置を、水槽試験前に供試模型船に取り付けて陸上に固定した状態で機能を確認した。ここで用いている模型船の風圧力係数は3.2節で述べる。試験は船速一定で直進中の模型船に、一定風速が模型船全方位に亘り連続で与えられた状況を模擬した。試験状態は $U_T (= U_A) = 4\text{m/s}$ で $V = 0.6\text{m/s}$, $\psi = 0\text{deg}$ を想定した。模型船に対する $\psi_T (= \psi_A)$ の変更は、ジャイロを手動で360度回転させて行った。模擬装置の制御変数は、目標値との一致や応答性が適正と判断したPI値を各ファン同じ値で設定した。図9に各ファンに分配された風荷重 X_f , X_a , Y_f , Y_a の WL_m と WL_i を比較し時系列で示す。図10は船体重心を基準とする風荷重 X_w , Y_w , N_w を横軸に見掛けの風向

角 ψ_A で示したものである。ジャイロを回転させた平均の角速度は 2.4deg/sec であった。図 9, 10 とともに WL_m と WL_t の一致は良いことから、風荷重模擬装置は正しく機能することが確認できた。

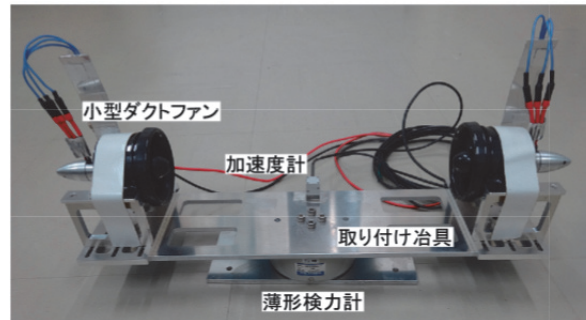


図 8 製作した風荷重模擬装置（船尾横風荷重用）

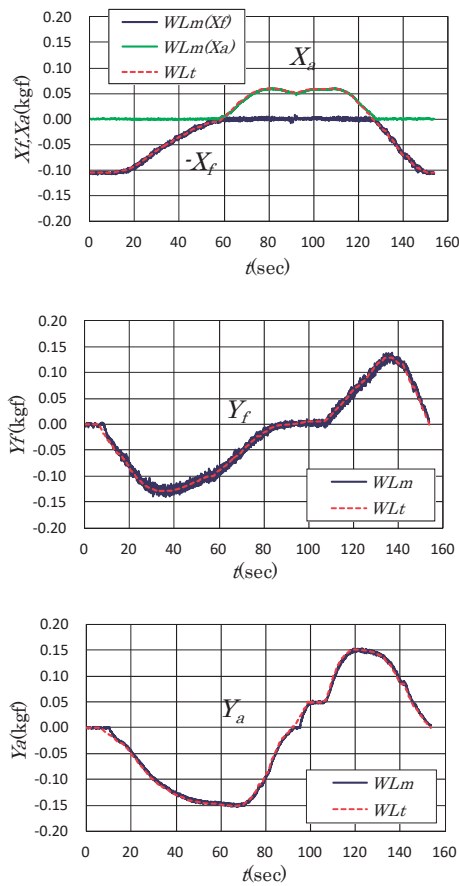


図 9 各ファンに分配された風荷重の時系列

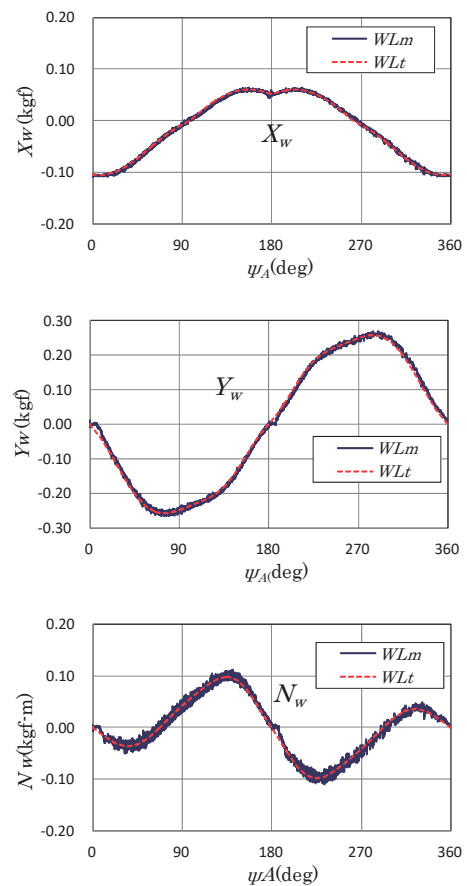


図 10 ψ_A に対する X_w , Y_w , N_w

3. 自由航走模型試験による風荷重模擬装置の検証

平水中と波浪中の操縦性能試験を行いシミュレーション計算と比較して、装置の有効性を検証した。

3.1 供試模型船と風荷重模擬装置の配置

供試模型船は縮尺 1/110 (長さ約 3m) のタンカー模型である。主要目を表 1 に示す。

表 1 模型船主要目

	KVLCC1		
Scale ratio	1/110	$\nabla(\text{m}^3)$	0.235
$Loa(\text{m})$	3.306	$S_w(\text{m}^2)$	2.277
$L_{pp}(\text{m})$	2.909	$GM(\text{cm})$	5.2
$B(\text{m})$	0.527	K_{yy}/L_{pp}	0.25
$d(\text{m})$	0.189	$Dp(\text{m})$	0.0896

模型船上の風荷重模擬装置の配置を図 11 に、模型船の写真を図 12 に示す。横風荷重用ファンの模型前後の取り付け位置は、風荷重の船体重心周りのモーメントを考慮し且つ自動追尾用ターゲットの干渉を避けて配置した。取り付け高さは、後述する風圧力特性から求めた IR に一致させた。横風荷重用の各対のファンの間隔は、互いに干渉しないことと模型船幅を考慮して決めた。補助推力装置と兼用となる船尾の前後風荷重用ファンは、操舵装置との干渉を避けるために船尾から張り出して配置し、取り付け高さは水線面との間隔を考慮して他のファンに比べ少し高くした。船首の前後風荷重用のファンは船首の横風荷重用ファンと同じ治具に取り付けた。

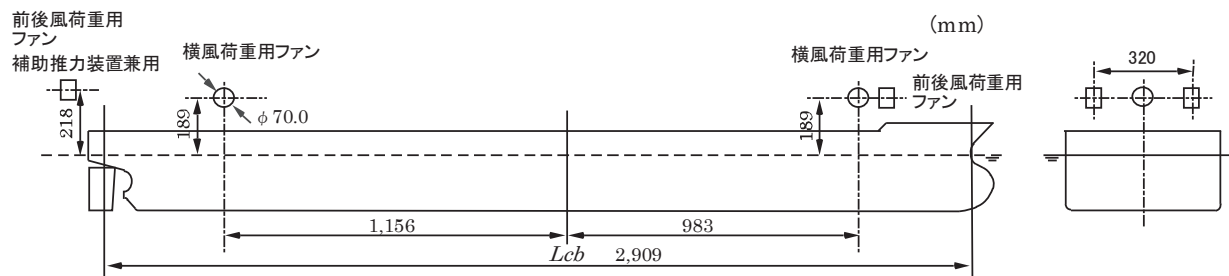


図 11 風荷重模擬装置の配置図

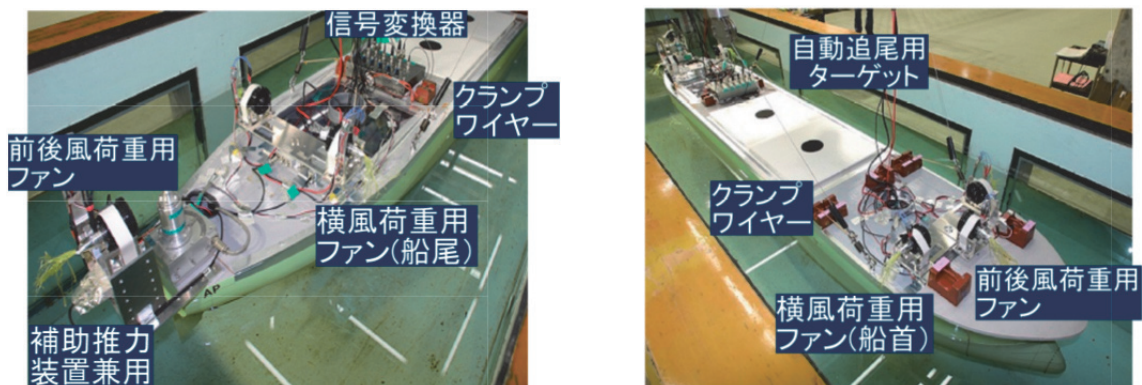


図 12 風荷重模擬装置を搭載した模型船(左:船尾, 右:船首)

3.2 風圧力特性

供試模型船は実船が存在しないため風圧力特性は船種と長さ・幅のみを用いた簡易推定法 11) で推定した。水面上船体形状を表わす変数を表 2 に示す。 A_L :水面上の側面投影面積, A_F :水面上の正面投影面積, H_B :喫水から主要構造物の最高位, H_c :喫水から側面積中心までの高さである。表 2 の変数から求めた各風圧力係数, C_{XW} と C_{YW}

を図 13 に, C_{nw} と横傾斜モーメント係数 C_{kw} を図 14 に横軸 ψ_A で示す. 図の C_{yw} と C_{kw} から求めた Y_W の平均着力点高さ lR は, 水線面上 0.189m である.

表 2 水面上船体形状を表わす変数

$AL(m^2)$	0.332
$AF(m^2)$	0.091
$HB(m)$	0.244
$HC(m)$	0.065

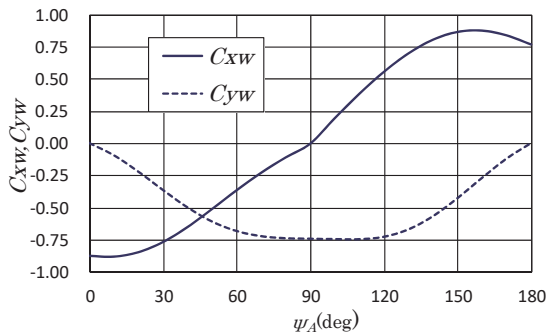


図 13 推定した C_{xw} , C_{yw}

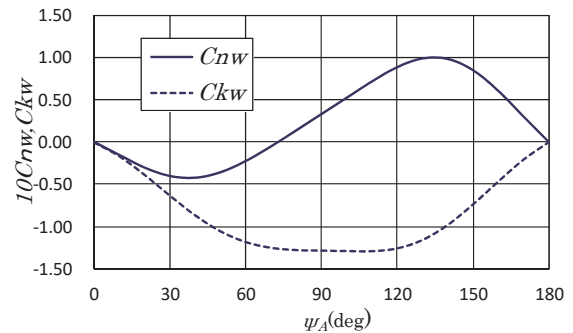


図 14 推定した C_{nw} , C_{kw}

3.3 模型船と風・波の試験状態と保針試験

模型試験の状態を表 3 に示す. 計画船速 $V_0=0.76\text{m/s}$ における模型船自航点のプロペラ回転数は, 速力試験を行い求めた. 模型試験はすべてこの回転数一定で行った. 操舵速度は SOLAS 条約で定められた最小の要件である $65/28\text{deg/s}$ を模型スケールに換算した値である. オートパイロットでは (3.1) 式に従い, 舵角 δ を比例制御した. 比例ゲイン K_P を 2 に, 目標針路 ψ_0 を 0 に設定した.

$$\delta = K_P(\psi_0 - \psi) \quad (3.1)$$

模擬する風は一様風として, 想定する真風速 U_T は模型尺度で 3.8m/s にした. これは実船相当で 39.9m/s に相当する. 風速を大きく想定することで風の影響が試験結果に対して明確にあらわれるようにした.

波は表 3 に示すように波高船長比 H_w/L_{pp} が $1/97$, 波長船長比 λ/L_{pp} が 0.6 の規則波を用いた. 波向きは ψ_T に一致させた.

表 3 模型試験状態

	KVLCC1
$Fn(V_0)$	0.14(0.76m/s)
Propeller Revolution[RPS]	18.2
Rudder Steering Speed [deg/s]	24.35
U_T [m/s]	3.8
Wave Height[cm](H_w/L_{pp})	3.0(1/97)
Wave Length(λ/L_{pp})	0.6

3.4 平水中および規則波中の保針試験

ψ_T は平水中では0度(向かい風)から180度(追い風)まで, 規則波中では0度(向かい風)から90度(横風)まで, 30度間隔に変化させた. これらの状態では模型船の右舷から風荷重が与えられる. なお, 自由航走試験であるから定常状態における見掛けの風向角は, 上記設定から船首方位 ψ と横流れ角 β だけずれる.

試験手順は次のとおりである. 模型船をクランプワイヤーで拘束した状態で, 風荷重模擬装置の制御とプロペラ回転を開始し, 曳引台車で設定した初期速度まで模型船を加速する. 風荷重は加速開始から制御されて船体を与えられるが加速中は目標進路 $\psi_0=0$ 度に合わせて直進させるため ψ と β は0度である. 初期速度に達するとクランプは自動解除され, 模型船は自由航走を開始し曳引台車は模型船を自動追尾する. 風荷重模擬装置は模型船が停止するまで風荷重を制御して与える.

保針試験では, 初期速度を変化させながら船速が定常状態に達したと判断しうるデータが得られるまで繰り返して計測を行い, 採用したデータの定常区間を平均処理した. 図15に平水中と規則波中の ψ_T に対する船速比(V/V_0)を示す. 図16に平水中保針試験時の船体応答として $\Delta\psi(=\psi-\psi_0)$, β , δ を, 図17には規則波中保針試験時のそれらを示す. 図15に示す平水中の結果では向かい風($\psi_T=0$ 度)で V/V_0 が一番小さい. 横風状態($\psi_T=90$ 度)で1より少し小さく, 追い風状態($\psi_T\geq 120$ 度)で1より大きくなる. 規則波中の V/V_0 は平水中よりも全体的に小さい. これは波による外力が複合されて模型に加わり, 波浪中抵抗増加や船体の状態がさらに変化するためと理解できる. 一番小さい V/V_0 は $\psi_T \approx 60$ 度になっていて, これは平水中と異なる.

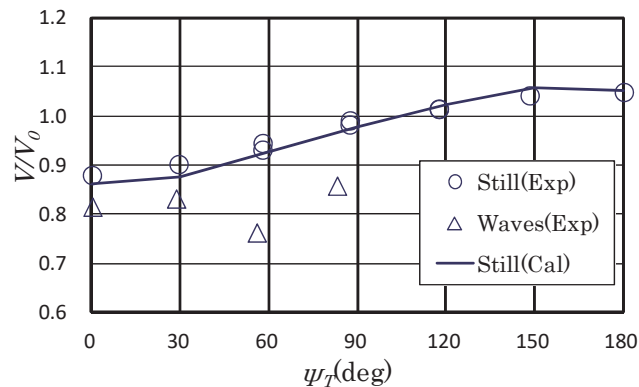


図15 風模擬状態の V/V_0 (平水, 規則波中)

図16に示す平水中の $\Delta\psi$ と δ は $\psi_T=90$ 度に近いほど大きく, $\Delta\psi$ は ψ_T によらず風上側に δ は負側である. β は斜め向風 $\psi_T \approx 60$ 度で最大となり, 斜め追い風になるに従い小さくなる. 規則波中の図17をみると, 各船体応答は平水中に比べて大きい. β は図16の平水中と同様に $\psi_T \approx 60$ 度で最大値を示し, これは平水中の約5.5倍である. 波浪中の V/V_0 が $\psi_T \approx 60$ 度で小さな値を示した主要因のひとつがこの β の傾向だと思われる.

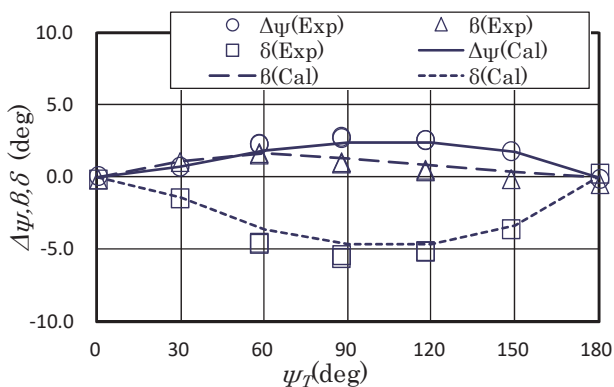


図16 平水中風模擬状態の船体応答

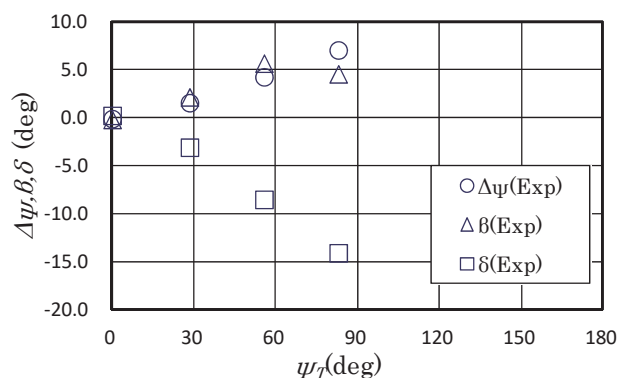
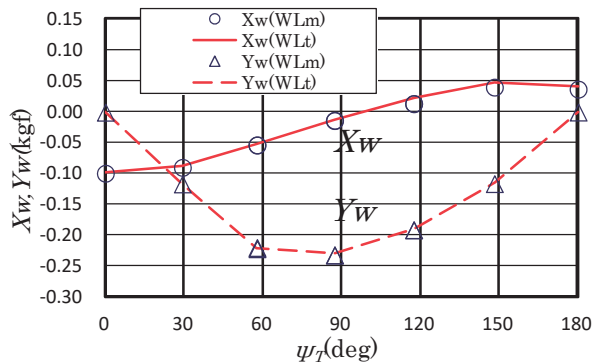
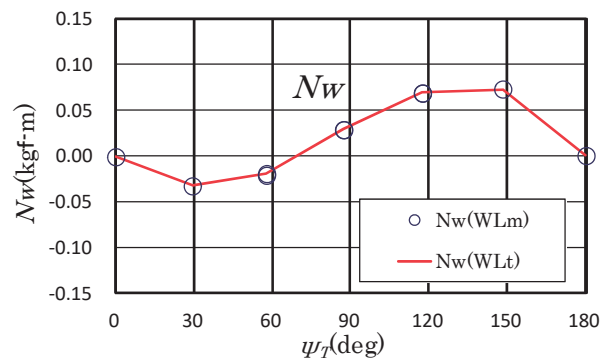
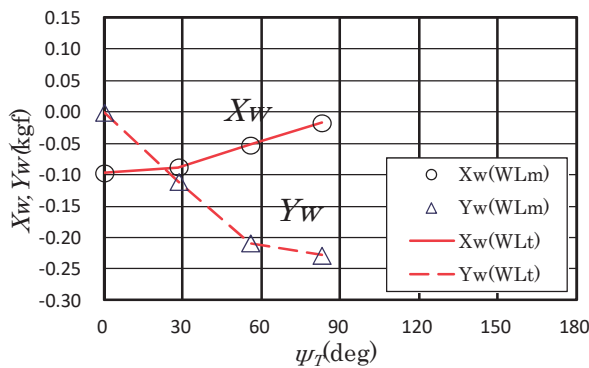
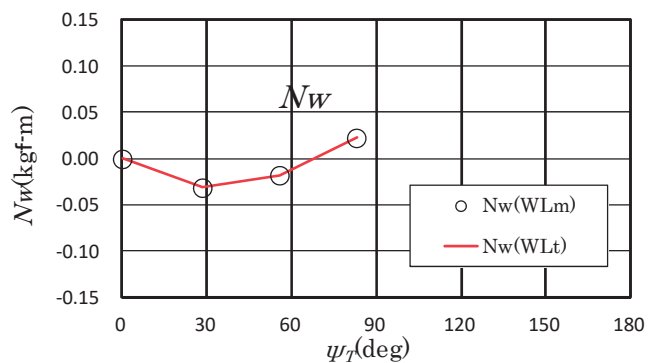
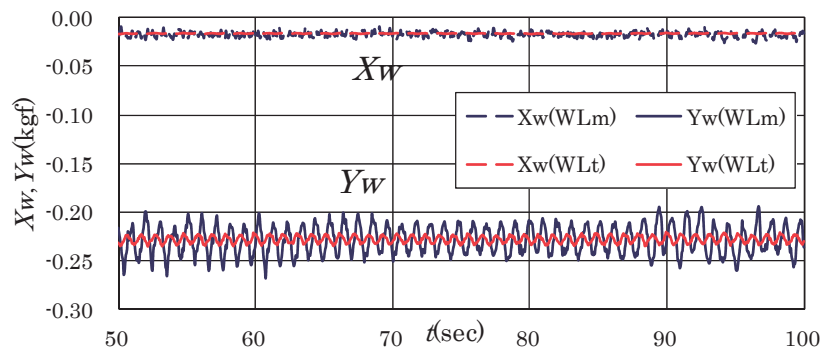


図17 規則波中風模擬状態の船体応答

次に、各風荷重 X_w , Y_w , N_w の WL_m と WL_t を比較して、平水中を図 18, 19 に規則波中を図 20, 21 に ψ_T に対して示す。 WL_m を点で WL_t を線で結び示した。平水中、規則波中ともに両者の一致は良い。図 22 に規則波中の $\psi_T \doteq 90$ 度における X_w と Y_w の WL_m と WL_t を時系列データで比較して示す。示した例は試験中の船体の横揺れが大きかった状態である。 Y_w をみると波形の振幅は WL_m の方が大きくて、両者の波形には位相差が確認できる。両者の周期はいずれも船体横揺れの約 1sec 周期と一致していた。この WL_m の比較的大きい変動は、船体の揺れの周期が短い場合に見られる LC_{raw} と加速度計の波形の位相差が原因と考えられる。両者に位相差が生じると LC_{raw} に含む外乱を正しく補正できなくなるが、この例の場合は周期が短く平均値では目標値にほぼ等しいことから、試験結果に対する影響は無視できると考えられる。なお、2 章で述べた陸上における事前調査（図 3 参照）でこのような事象は認められなかったのは、手動による動揺周期が比較的大きかったことによる。

図 18 平水中の X_w , Y_w 図 19 平水中の N_w 図 20 規則波中の X_w , Y_w 図 21 規則波中の N_w 図 22 規則波中 ($\psi_T \doteq 90$) における X_w , Y_w の時系列データ

3.5 平水中 Z 試験

風の中での Z 試験の操舵開始時の目標 $\psi_T(\psi_{T0})$ は 0 度と 90 度とし、風を想定しない状態と比較した。左 20 度 Z 試験結果から、第 1 オーバーシュート角 (OA1) と第 2 オーバーシュート角 (OA2) を求めた。初期速度は保針試験結果を参考に設定した。 $\psi_{T0}=90$ 度の試験では、加速終了後定常状態中の Z 操舵開始までに ψ が変化してしまうが、操舵開始直前の ψ を基準にしてその後の転舵を指令した。

左 20°Z 試験として風無し状態 (NA) の δ と ψ を時系列で図 23 (Exp1,2) に示し、風を模擬した例として $\psi_{T0} = 90$ 度の結果を図 24 (Exp1,2) に示す。両図とも 2 回行った計測結果は良い再現性を示している。また、両図には転舵の時刻や行き過ぎ角に差が見られる。図 25 に試験 (Exp) から求めた OA1 を図 26 に OA2 を示す。これらは、それぞれ複数回の計測の平均値である。NA と比較すると、 $\psi_{T0}=0$ 度での OA1 と OA2 はともに 1 度程度小さく風の影響はあまり大きく無い。 $\psi_{T0}=90$ 度では OA1 は約 4 度小さく、OA2 は逆に大きくなるとともに OA1 と OA2 の大小関係が逆転しており、横風が与える影響が無視できないことがわかる。

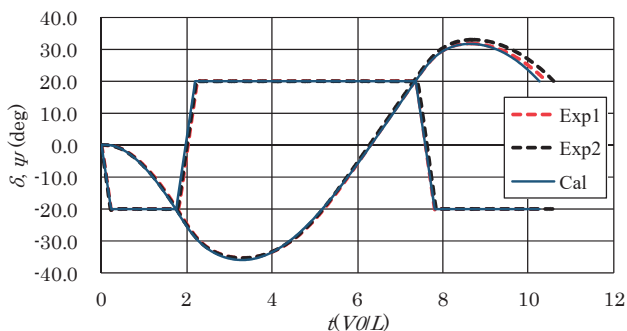


図 23 風無しの左 20°Z 試験の δ と ψ

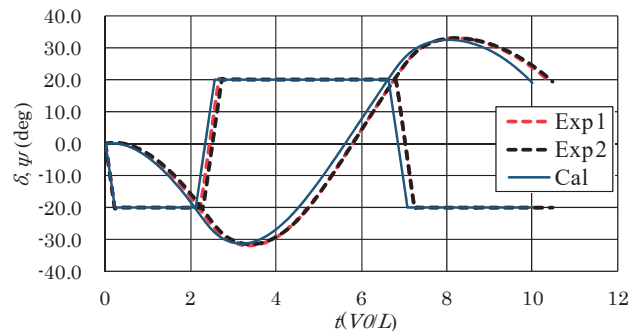


図 24 $\psi_{T0}=90$ 度の左 20°Z 試験の δ と ψ

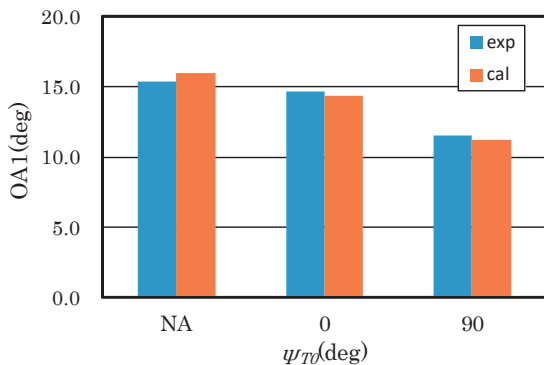


図 25 左 20°Z 試験の OA1

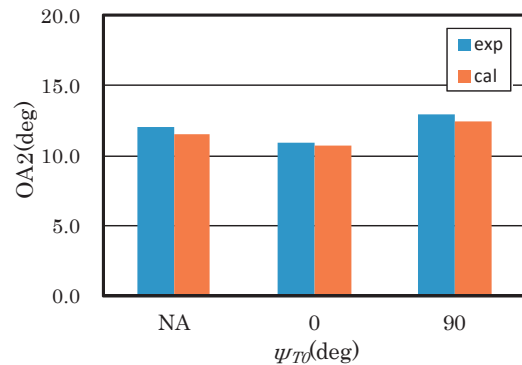


図 26 左 20°Z 試験の OA2

Z 試験の風荷重の例として、 $\psi_{T0}=90$ 度における X_w と Y_w を図 27 に N_w を図 28 に、 WL_m と WL_t の時系列を比較して示す。横軸の時刻 t の 0sec は操舵開始時刻である。図 27, 28 とともに全体的にみて両者の一致は良い。詳細にみると X_w (図 27) の WL_m で、正負が逆転する 0kgf 近傍の波形が滑らかではない。この 0kgf を境に X_f と X_a のファンが切り替わる。0kgf 近傍には装置固有の不感帯があつてこれが影響したと考えられる。図 28 の N_w をみると WL_m に若干の応答遅れが確認できるが、試験結果に対する影響は小さいと思われる。

3.6 平水中および規則波中の 35 度旋回試験

$\delta=+35$ 度の旋回試験を平水中では $\psi_{T0}=0$ 度と 90 度で行った。規則波中では $\psi_{T0}=0$ 度のみで行った。初期速度は保針試験結果を参考に設定した。

図 29～32 に航跡 (Exp1,2) を示す。各状態で 2 回行った計測結果は良い再現性を示しており、風荷重模擬装置を用いた試験が安定して行えることを裏付けている。図 30 ($\psi_{T0}=90$ 度) と図 31 ($\psi_{T0}=0$ 度) は、風の影響で航跡は何れも風下側へ移動することを示している。規則波中の図 32 ($\psi_{T0}=0$) をみると、波がさらに加わったこと

で平水中の図 31 に比べて風下側への航跡の移動が大きい. 図 33 (左の図) に平水中試験の航跡から求めた旋回性能を表す指標 (Advance, Transfer, Tactical Diameter ; TD) を示す. いずれも 2 回行った計測の平均値である. NA と比較すると, $\psi_{T0}=0$ 度と 90 度では何れの指標も少し小さい.

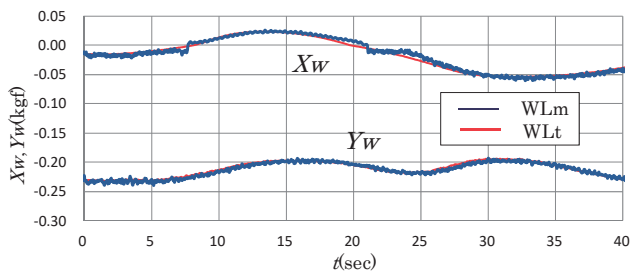


図 27 Z 試験の X_w , Y_w の時系列

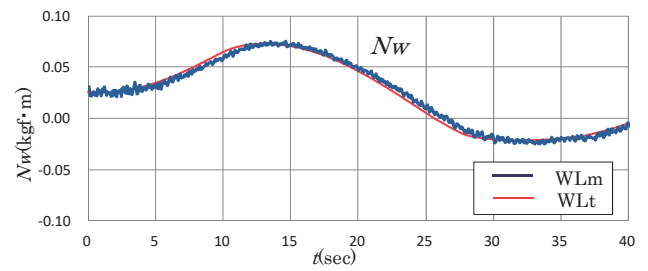


図 28 Z 試験の N_w の時系列

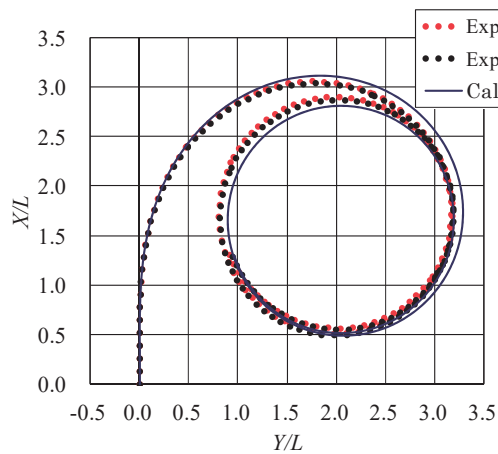


図 29 風模擬無し旋回航跡

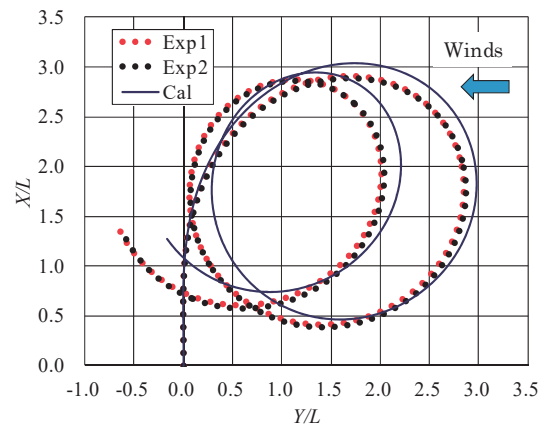


図 30 $\psi_{T0}=90$ 度の旋回航跡

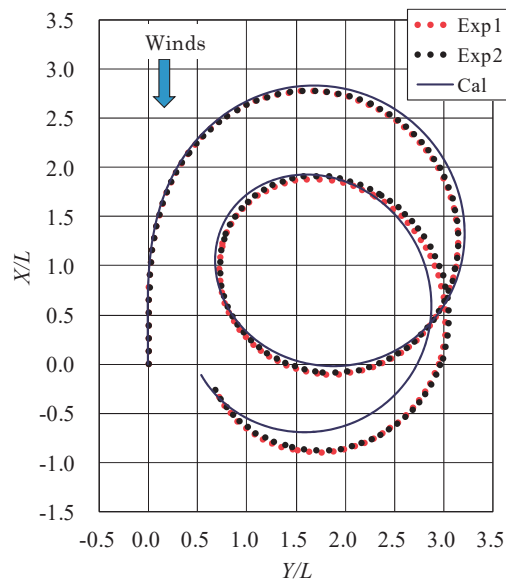


図 31 $\psi_{T0}=0$ 度の旋回航跡

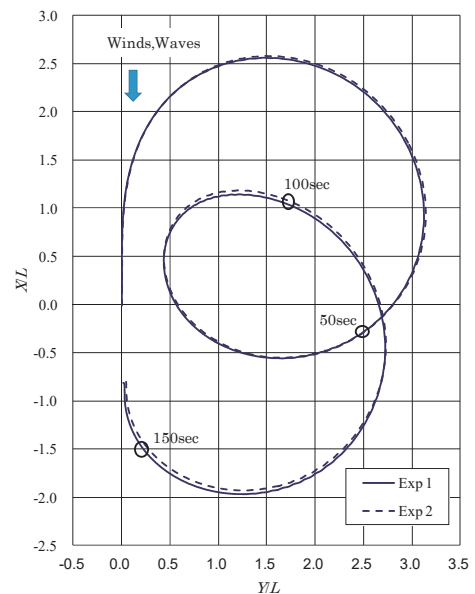


図 32 $\psi_{T0}=0$ 度の規則波中の旋回航跡

図34に規則波中旋回試験(図32のExp1)時の各風荷重 X_w と Y_w , N_w の WL_m と WL_t の時系列を比較して示す。横軸の時刻 t は、図32中で示した t に対応する。各図をみると WL_m と WL_t の一致度は概ね良い。詳細には、各図0kgf近傍の WL_m に波形の不連続がみえるが、これは図27と28に関して述べた不感帯によるものである。また、 WL_m の波形の線に幅をもつ時間帯がある。これは図22に関して述べた短い周期の動揺に対する特性が原因

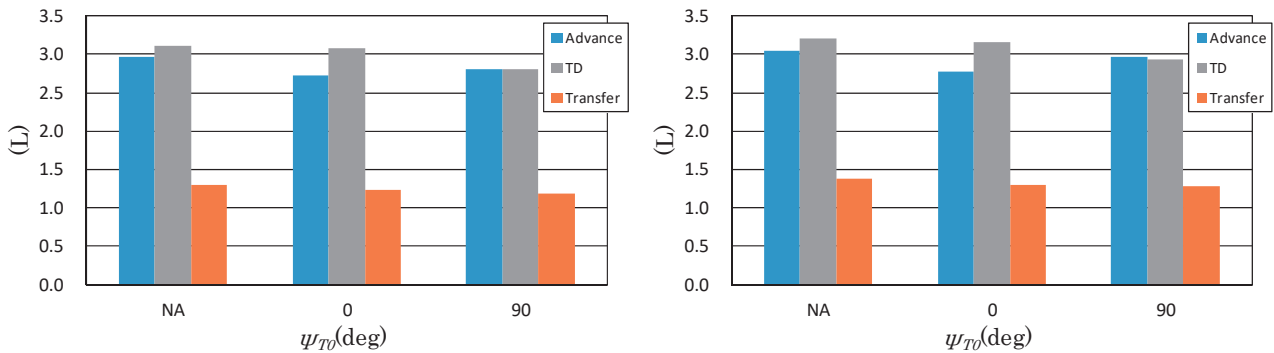


図33 風の中での旋回性能指標(左; Exp, 右; Cal)

と考えられる。ただし、図の通り全体では両者は良く合っていることからこれらの影響は小さいと考えられる。図35にジャイロで計測した横揺れ *roll* と縦揺れ *pitch* を、図36に同じくジャイロによるX方向加速度 XG とY方向加速度 YG の時系列を示す。両者の波形とも大きく振幅が変化している。*roll* の振幅は最大約1.7degで YG は最大約0.07gであったことから船体動揺が大きいことが確認できる。この様な状況下でも、風荷重模擬装置は図34に示した通り想定した風荷重を正確に与えており、波浪中も有効に機能することを確認した。

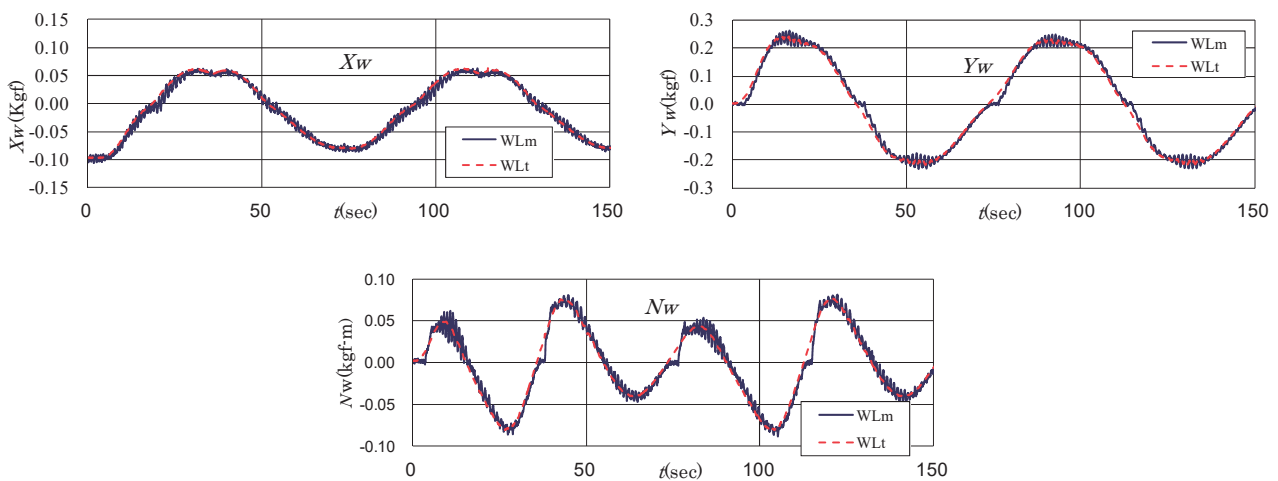


図34 規則波中旋回試験時の X_w , Y_w , N_w の時系列

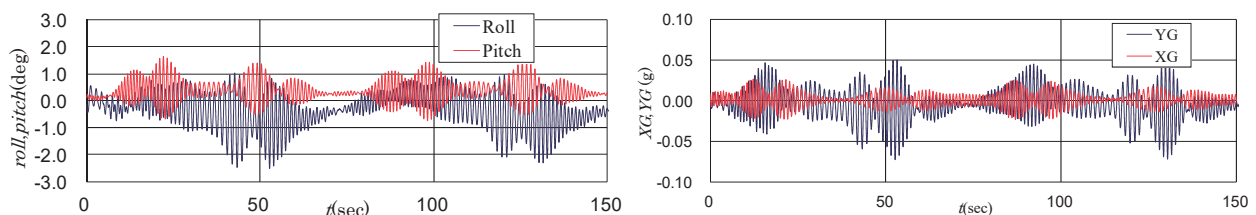


図35 規則波中旋回試験時の *roll* と *pitch*

図36 規則波中旋回試験時の XG と YG

3.7 シミュレーション計算

風荷重模擬装置の有効性検証のためにシミュレーション計算を行った。計算には MMG モデルにしたがった当所開発の 3 自由度の操縦運動タイムシミュレーションプログラムを用いた。模型船の風圧力係数には実験と同じ図 13, 14 に示す値を使用した。必要な流体力係数等は当所で行った水槽試験結果 (13), (14), (15) を一部再解析して用いた。 V_0 は模型実験と同じ 0.76m/s で、この時のプロペラ回転数は 17.8rps であった。これは模型実験から求めた回転数 (表 3 参照) とほぼ同じ回転数である。平水中保針試験の図 15, 16 にシミュレーション計算 (Cal) をあわせて示す。船速低下 (図 15) や船体の応答 (図 16) とともに、全体的に実験値とよく対応している。次に Z 試験結果例の図 23, 24 に Cal をあわせて示し、オーバーシュート角を示した図 25, 26 に Cal による OA1 と OA2 を示す。Cal は風模擬の有無や風向きの違いで実験値にみられる傾向を良く捉えている。最後に旋回試験からの航跡図 29~31 に Cal の航跡を合わせて示し、図 33 (右の図) に Cal の航跡から求めた旋回性能指標を示す。いずれの図においても Cal は、試験結果をよく説明している。シミュレーション計算と試験結果に見られる僅かな定量的な差は、第一に、風が無い状態でも同じように見られることから流体力係数等に起因するものと判断できる。第二に、風模擬の旋回試験では、試験中に発生した斜航角と旋回角速度が大きな値を示し、流体力微係数を求めた水槽試験 (14), (15) の実験状態の外挿範囲になり操縦流体力の推定精度が低くなったことが原因として挙げられる。そのため、この僅かな差は風の影響評価によるものではないと考えられる。風模擬の旋回試験時の上記流体力微係数が内挿範囲となる $\psi=90, 180, 270, 360$ 度の航跡の座標 ($X/L, Y/L$) について、同じく風模擬無し の $X/L, Y/L$ からの変化量を Cal とあわせて求め、図 37 ($\psi_{T0}=90$ 度) と図 38 ($\psi_{T0}=0$ 度) に示す。Cal との差を見ると図 37 の $\psi=360$ 度の Y/L で最も大きい、その差は 0.14L と小さいことがわかる。

以上シミュレーション計算と試験結果の比較から開発した風荷重模擬装置は、自由航走模型試験に有効であると判断できる。

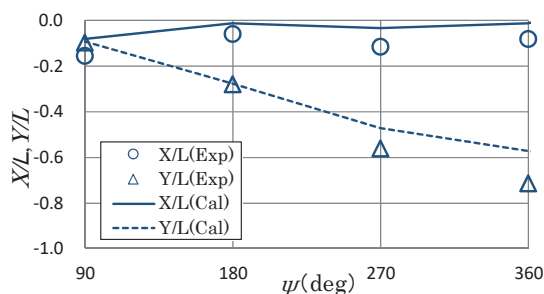


図 37 $\psi_{T0}=90$ 度の旋回試験航跡の変化量

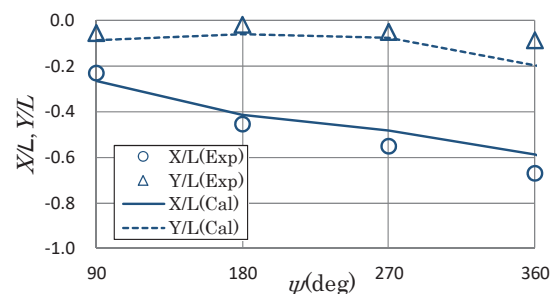


図 38 $\psi_{T0}=0$ 度の旋回試験航跡の変化量

4. 実海域環境下の自由航走模型試験

風荷重模擬装置の開発目的である風と波が併存する実海域環境下の自由航走模型試験を実施した。試験例として、風速と波高が大きい荒天中の保針性能を模型実験から直接求める。

4.1 模型船と実海域環境

供試模型船は 3 章で述べたタンカー模型である (表 1)。プロペラ回転数 (表 3) は模型船自航点で一定である。

風環境はビューフォート風力階級 BF9 を想定して一定風速にした。この条件の中央値の風速は 22.7m/s で、模型尺度では 2.16m/s になる。波の環境は $\cos^2$ 型の方向分布と ISSC 型スペクトルをもつ BF9 相当の短波頂不規則海象とした。このときの有義波高は 7m で、これは模型尺度では 0.064m になる。平均波周期は、有義波高との関係から求められる値で、実船尺度で 10.2sec、模型尺度で 0.97sec である。これらの波環境値を目標に波検定を行い当所実海域再現水槽造波装置の設定値を決めた。風向きは正面向かい風 ($\psi_T=0$ 度) から斜め追い風 ($\psi_T=135$ 度) までを $\psi_T=0, 30, 60, 90, 135$ 度で変化させた。波の主方向は風向きと同じとした。

4.2 実海域環境下の保針試験

風荷重模擬装置を使った実海域環境下を自由航走する模型船の写真を図39に示す。



図39 実海域環境下の自由航走模型船

試験手順は3章で述べた操縦性能試験の場合と同じである。初期速度は船速低下量を予測して設定した。そのうえで、計測区間の船速を時系列で確認し、平均船速が初期速度と大きく異なることなく、かつその変化が風や波の状況からみて妥当と判断したデータを採用した。

図40に波風方向 ψ_T に対する $V/V0$ を示す。図41に船体応答の $\Delta\psi$, β , δ を示す。図中の線は実験点を滑らかに結んだものである。 $\psi_T \div 30$ 度と60度は、同じ初期速度で試験した各々2回の結果を示している。 $\psi_T \div 30$ 度、60度ともに、各2回の試験点の一致は良いため実海域環境下における実験も、再現性は高く安定して実施できていることが確認できる。図40の $V/V0$ は $\psi_T \div 0$ 度のときが一番小さな値で、これは約25%の船速低下量に相当する。 $\psi_T \div 30$ 度も同程度の船速低下が生じている。そして、 ψ_T が船体横風から斜め追い風になるにしたがって $V/V0$ は1に近づいているが、 $\psi_T \div 130$ 度でも約7%の船速低下がある。図41の δ と $\Delta\psi$ は $\psi_T \div 90$ 度で最も大きく、 δ は-7.8度、 $\Delta\psi$ は3.9度で風上方向である。 β は $\psi_T \div 60$ 度と90度で大きく、 $\psi_T \div 60$ 度では3度程度あった。また、 $\psi_T \div 130$ 度でも有意な値を持つ。以上のように風荷重模擬装置を用いることで実海域環境下の保針性能を自由航走模型試験で総合的に評価することができた。今後はシミュレーション計算との比較検討を行いたい。

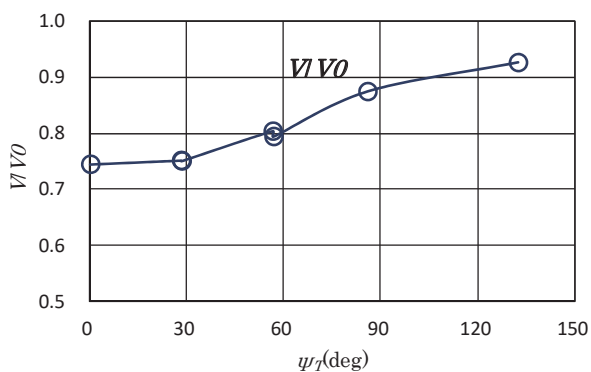


図40 実海域環境下の $V/V0$

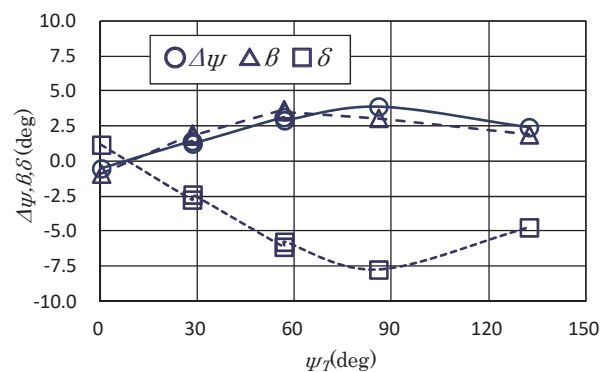
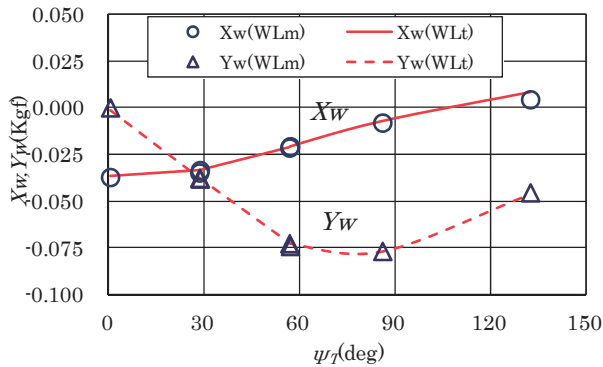
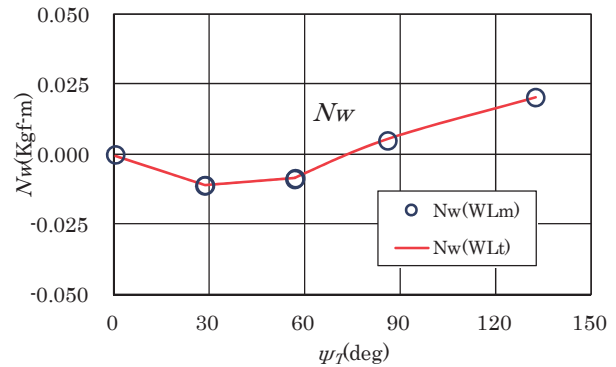


図41 実海域環境下の船体の応答

各風荷重の X_w , Y_w , N_w の WL_m を WL_t と比較した。図42に X_w と Y_w を、図43に N_w を横軸に ψ_T をとって示す。図中、点で示す WL_m と線で示す WL_t の一致は良い。試験中の風荷重の最大値は、 X_w が $\psi_T \div 0$ 度で約-0.04kgf、 Y_w は $\psi_T \div 90$ 度で約-0.08kgfであった。

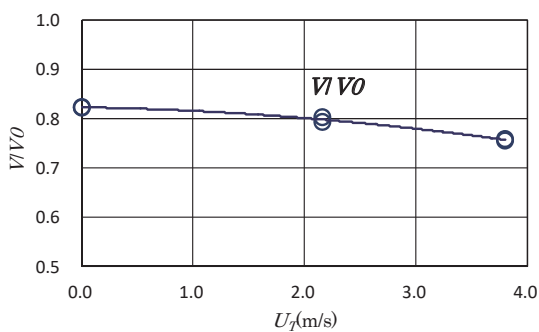
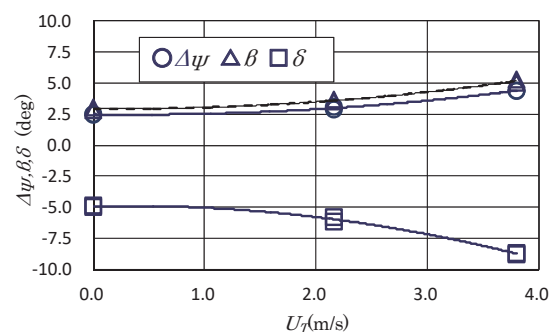
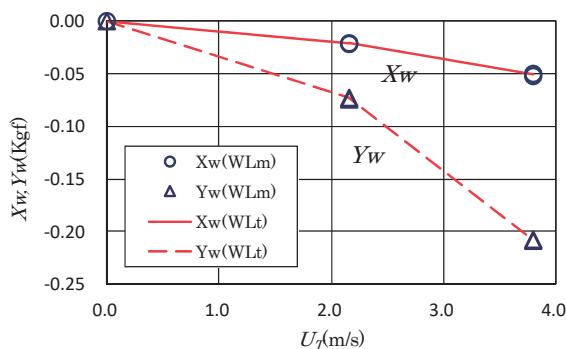
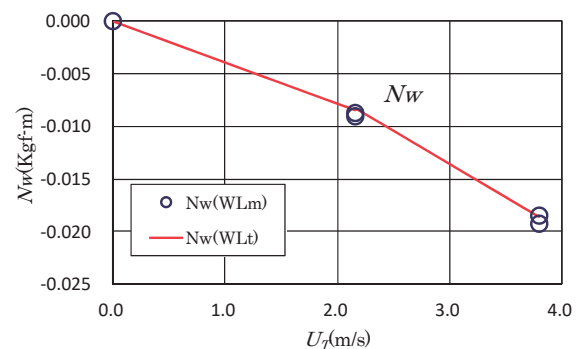
図 42 実海域環境下の X_w , Y_w 図 43 実海域環境下の N_w

4.3 風速の影響

4.1 節で述べた短波頂不規則波 (ISSC- $\cos^2$), $U_T=2.16\text{m/s}$ の状態に加えて, 波条件は同じで風速 U_T を 0m/s と 3.8m/s に変えた状態で保針試験を行って風速の影響を調べた. 波と風向きは $\psi_T=60$ 度とした.

U_T を横軸にとって $V/V0$ を図 44 に, 船体応答 $\Delta\psi$, β , δ を図 45 に示す. U_T が大きくなるにしたがい図 44 の $V/V0$ の値は小さくなり, 図 45 の船体応答を示す各絶対値は大きくなる. これらの傾向は, 風速の影響が試験に適切に反映された結果とみられることから, 実海域環境下を模擬した自由航走試験における風荷重模擬装置の効果が確認できた.

図 46 と 47 に U_T を横軸にとって各風荷重の X_w , Y_w , N_w を示す. 点で示した WL_m と線で示した WL_t の一致は良い. 図 48 に $U_T=2.16\text{m/s}$ で $\psi_T=60$ 度の試験における $roll$ と $pitch$ の時系列を示す. $roll$, $pitch$ とも, 不規則に変動し $roll$ の振幅は最大で 4 度程度ある. このような実海域環境下の実験でも, 上記のとおり風荷重模擬装置は有効に機能している.

図 44 U_T に対する $V/V0$ 図 45 U_T に対する船体の応答図 46 U_T に対する X_w , Y_w 図 47 U_T に対する N_w

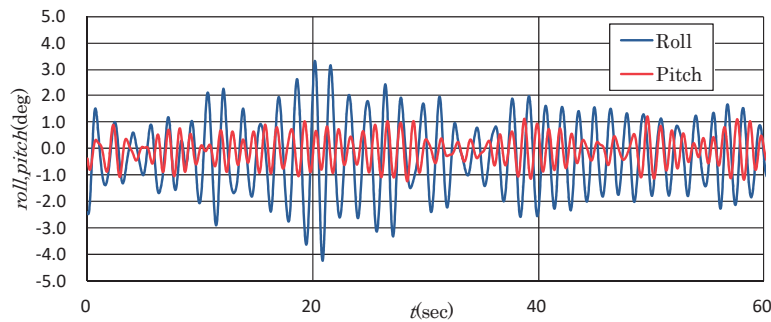


図48 実海域環境下の roll と pitch

5. まとめ

自由航走模型船に、風から受ける力を模型船上の装置で与えて風環境を疑似的に実現する風荷重模擬装置を開発した。この装置により、大がかりな送風装置が必要であった風圧下の自由航走模型試験が容易に再現できるようになった。本装置は波浪中試験にも適用可能で、風と波が併存する実海域環境下の自由航走模型試験も実施できる。本稿では、はじめに風荷重模擬装置の開発に関する課題と装置の概要ならびに荷重の設定方法と予備試験結果について述べた。次に、タンカー模型を用いた操縦性能試験を実施し、数値計算との比較検討結果から平水中と波浪中における装置の有効性を示した。おしまいに実海域環境下の実験例として、風、波とも大きい荒天下を模擬した自由航走模型試験について述べた。以下に要点をまとめる。

1) 風荷重模擬装置の開発に関して

風荷重模擬装置は補助推力装置を応用して開発した装置で、小型、軽量で、小さな風荷重でも船体に正確に与えられる。開発における課題であった波浪中試験への適用については、加速度計を使って装置に加わる慣性力を補正して制御することで可能とした。これらの基本的機能は陸上における予備試験で確認した。

2) 自由航走模型試験による風荷重模擬装置の検証

風荷重模擬装置を使って保針試験と旋回試験、Z試験を行った。実験結果の再現性も良く試験は安定して行われ、船速低下や横流れ角、舵角、航跡の特性を計測することができた。平水中風模擬状態のシミュレーション計算と模型実験結果はよい対応を示していることから、風荷重模擬装置が自由航走模型試験に有効であることが確認できた。模擬した風荷重の計測結果から、本装置が波浪中試験においても風荷重を正確に与えることが可能で、船体が動揺する中でも有効に機能することを確認した。

3) 実海域環境下の自由航走模型試験

実海域環境下の試験例として、風、波とも大きい荒天下を模擬した環境下での保針試験を行った。模型実験から直接的に実海域環境における船速低下や横流れ角、舵角を評価することができた。実験結果の再現性も良く、実海域環境下でも安定した試験が行えた。風速の影響調査からも風荷重模擬装置の効果が確認できた。

開発した風荷重模擬装置を著者らが提案する舵効き船速修正¹²⁾(RSC)と組み合わせる¹⁶⁾ことで、実海域環境下における実船相似の自由航走模型実験を実現できる。さらに自由航走模型船に実船の主機作動制限を考慮¹⁷⁾することで、今まで困難とされていた荒天下の実船の操縦性能を直接評価できる可能性がある。

風荷重模擬装置は模型船の全方位に対して任意の荷重を与えることができる。本装置を活用することで自由航走模型試験の高度化や何らかの他の種類の外力が加わる試験など新しい用途の模型実験が期待される。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 15H04219 の助成をうけたものです。関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 藤原敏文, 二村 正, 南 佳成, 佐々木紀幸, 高木 健 : 大型コンテナ船の風・波併存下自由航走模型試験, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 6 号, pp.15-18, 2008.
- 2) Tsukada Y., Ueno M., Miyazaki H. and Takimoto T. : An Auxiliary Thruster for Free-running Model Ship Test, Proc. of the ASME 2013 32nd Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE, paper No. 10569, 2013.
- 3) 塚田吉昭, 上野道雄, 谷澤克治, 北川泰士, 宮崎英樹, 鈴木良介 : 自由航走模型試験のための補助推力装置の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 20 号, pp.59-67, 2014.
- 4) 塚田吉昭, 鈴木良介, 上野道雄 : 自由航走模型試験のための風荷重模擬装置の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 23 号, pp.443-444, 2018.
- 5) Tsukada Y., Suzuki R. and Ueno M. : Wind Loads Simulator for Free-running Model Ship Test, Proc. of the ASME 2017 36nd Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE, paper No. 61158, 2017.
- 6) 平野雅祥, 高品純志, 森谷周行 : 船舶の風圧下操縦性能について (第 1 報 : 模擬風圧力発生装置を用いた模型試験), 日本造船学会論文集, 第 155 号, pp.122-131, 1984.
- 7) 塚田吉昭, 上野道雄, 谷澤克治, 北川泰士, 宮崎英樹, 鈴木良介 : 補助推力装置を用いた新しい自由航走模型試験, 海上技術安全研究所報告, 第 15 巻 第 3 号, pp.255-279, 2015.
- 8) 芳村康男, 永島実郎 : 風力下の操縦運動の推定について, 日本造船学会論文集, 第 158 号, pp.125-136, 1985.
- 9) 藤原敏文, 上野道雄, 二村 正 : 船体に働く風圧力の推定, 日本造船学会論文集, 第 183 号, pp.77-90, 1998.
- 10) 藤原敏文, 上野道雄, 池田良穂 : 成分分離型モデルを利用した新しい風圧力推定法, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 2 号, pp.243-255, 2005.
- 11) Kitamura F., Ueno M., Fujiwara T. and Sogihara N. : Estimation of Above Water Structural Parameters and Wind Loads on Ship, Ships and Offshore Structures, 2017.
- 12) Ueno M. and Tsukada Y. : Rudder Effectiveness and Speed Correction for Scale Model Ship Testing, Ocean Engineering, 109, pp.495-506, 2015.
- 13) <http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC1/tanker1.html>
- 14) Yoshimura Y., Ueno M. and Tsukada Y. : Analysis of Steady Hydrodynamic Force Component and Prediction of Manoeuvring Ship Motion with KVLCC1, KVLCC2 and KCS, Proc. of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods, SIMMAN, Vol. 1, pp. E80-86, 2008.
- 15) Suzuki R., Tsukada Y., Ueno M. : Analysis of Hydrodynamic Characteristics and Predictions of ship motions on Steady Advancing Conditions in Adverse Weather, Proceedings of MARSIM2015, Paper 3/1/1.
- 16) 鈴木良介, 塚田吉昭, 上野道雄 : 自由航走模型試験における舵利きと船速修正について (続報) - 模型実験 -, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 23 号, pp.445-446, 2016.
- 17) 鈴木良介, 塚田吉昭, 上野道雄 : 主機作動制限を考慮した操縦性能模型試験に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 24 号, pp. 609-611, 2017.