補助推力装置を用いた新しい自由航走模型試験

塚田 吉昭*, 上野 道雄*, 谷澤 克治*, 北川 泰士* 宮崎 英樹*, 鈴木 良介*

New free-running model ship tests using auxiliary thruster

by

Yoshiaki TSUKADA, Michio UENO, Katsuji TANIZAWA Yasushi KITAGAWA, Hideki MIYAZAKI and Ryosuke SUZUKI

Abstract

The authors have developed a duct fan type auxiliary thruster that consists of a duct fan, a signal amplifier, a load cell, and a PC. The auxiliary thruster can provide a free-running model ship with additional longitudinal force controlled by the PC. This mechanism makes it possible relatively easily to adjust the propeller load of a free-running model ship to designated time varying values. Since the large difference of Reynolds number between free-running models and full-scale ships has long compelled us to accept the large difference of propeller load between them, the development should lead to innovative model ship test methodologies. This report proposes, after brief introduction of the development of the auxiliary thruster, a couple of new free-running model test procedures making use of the auxiliary thruster assembled for practical use. One is the rudder effectiveness correction that realizes full-scale equivalent manoeuvring motion using free-running model ships. The other is a free-running test to measure the speed decrease in waves using a model ship running at a propeller rate of revolution corresponding full-scale ship self-propulsion point. These examples offer promising prospects of the duct fan type thruster.

 ^{*} 流体性能評価系
 原稿受付 平成 27 年 7 月 9 日
 審 査 日 平成 28 年 1 月 18 日

目 次

 まえがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
2. 補助推力装置	3
2.1 補助推力装置の概念設計と試作機 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
2.2 実用型補助推力装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
3. 舵効き修正への適用試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
3.1 舵効き修正の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
3.2 自由航走模型試験 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	$\overline{7}$
3.2.1 模型船および試験状態 ······	$\overline{7}$
3.2.2 速力試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
3.2.3 旋回・逆スパイラル試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
3.2.4 Z 操舵試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	12
3.3 数値シミュレーションによる実船性能との比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14
3.3.1 計算の方法と計算状態・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14
3.3.2 操縦運動シミュレーション結果 ・・・・・	14
4. 波浪中自由航走模型試験への適用・・・・・	18
4.1 自由航走模型試験	18
4.1.1 模型船および試験状態等······	18
4.1.2 波浪中における補助推力装置の機能確認・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	18
4.1.3 波浪中船速低下の試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
4.2 数値シミュレーションによる船速低下・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	22
4.2.1 計算の方法と計算状態・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	22
4.2.2 船速低下のシミュレーション結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	22
5 まとめ······	22
** ◇ _ > _ ** **************************	23
#20月1 参考文献	23
	-0

1. まえがき

船舶の性能推定や船型開発等について、縮尺模型を用いた水槽試験が行われる.このとき、実船と模型船間に は尺度影響があるため、水槽試験における模型プロペラの作動点(荷重度)は実船と大きく異なる.曳航試験水 槽で行われている一般的な推進性能試験では、抵抗試験装置で模型船を曳航する方法でプロペラ荷重度を実船の 自航状態に近いものにしている.一方、角水槽などで行われる自由航走模型試験は物理現象を直接計測できるこ とに最大の利点があるが、模型船の運動が直線的で無いこともありプロペラ荷重度の変更が試験技術的に難しく、 現在、各試験研究機関においては一般に模型船の自航状態のまま試験を行っている.このことは、自由航走模型 試験で行われる試験結果にはプロペラ荷重度の影響があらわれることを意味する.例えば、操縦性能試験では実 船の操縦運動が的確に再現されない.このため実船の操縦性能推定では尺度影響を考慮した数値シミュレーショ ンの手法がとられ、模型試験結果については計算における数学モデルの妥当性の確認のための役割を果たしてい る.また、波浪中の自由航走模型試験より実船の波浪中船速低下を求めたい場合も、模型船の自航状態でえられ た結果がどの程度実船性能をあらわしているかは十分検討して取り扱わなければならない.ここで自由航走模型 試験についてもプロペラ荷重度を任意に変更することが可能ならば、実船状態に近い性能を直接実験から求めら れる有効な手段になる.著者らは、このような背景^{1,1,2)}と自由航走模型試験の高度化の観点から、プロペラ荷重 度を自由に変更できる装置を開発^{3,4)}した、開発した装置(補助推力装置)は、模型船に取り付けた小型ダクト ファンからの推力を船体に付加してプロペラ荷重度を制御する.その推力はフィードバック制御され時々刻々の 任意の推力を正確に模型船へ与えることができる.装置は小型軽量で取り扱いも非常に容易で,狭い空間に多く の装備品を搭載する小型模型船を使った自由航走模型試験にとって実用的な装置である.

本報告では、まず、補助推力装置の概念設計について、そして試験で使用する実用型機について概説を行う. 次に、開発した補助推力装置を使用することで、可能となる2例の自由航走模型試験について述べる.これらは、 実船と操縦運動を近似的に相似にする舵効き修正法による操縦性能試験と実船自航状態の波浪中自由航走模型試 験である.これらの2つの試験は模型船のプロペラ荷重度を制御することで初めて実施可能になる.前者の試験 で用いた舵効き修正法は自由航走模型船で実船の操縦運動を再現するために著者らが提案する手法⁵⁰0で、操縦 運動の起源である舵力すなわち舵直圧力を補助推力装置を使って実船と近似的に相似にする.具体的には舵への 有効流入速度を実船と相似になるように補助推力を制御する.本報告では、模型船に舵効き修正した操縦性能試 験結果と、実船および模型船対応の数値シミュレーション結果の比較によってこの手法の妥当性を検証した.後 者の実船自航状態の波浪中自由航走模型試験は、模型船のプロペラ荷重度を従来の推進性能試験のように実船自 航点に一致させ、これまでは実現できなかった実船自航状態での波浪中船速低下を自由航走試験から直接的に求 める試験である.本報告では正面規則波中で行った上記方法による模型船の船速低下の結果を数値シミュレーシ ョンと比較検討するとともに、波浪中における補助推力装置の機能の確認を行った結果について述べる.

2. 補助推力装置

2.1 補助推力装置の概念設計と試作機

自由航走模型試験でプロペラ荷重度などを実船に合わせるために模型船に推力を付加する方法として,過去に 窒素ガスの噴出方式[¬]や空中プロペラによる方法[®]も試みられている.近年では,模型船を自動追尾する台車上 のサーボモータで制御したワイヤーにより,模型船を曳航することで推力を与える方法が行われている[®].しか し,何れの方法もまだ一般的な方法とはなってないようである.この理由としては次の事項が考えられる.空中 プロペラ方式は比較的単純だが一般的にプロペラは斜流状態で横力が発生するため,模型船が旋回や斜航運動す る場合に発生する横力が模型船の運動に影響をおよぼした可能性が考えられ,他の2方法は比較的大掛かりな装 置や特殊で複雑な装置が必要である.

上記も踏まえて補助推力装置の開発検討は以下を目指した.

1)付加する推力はその目標値に極力一致し、横力等の他成分力の発生は無い.

2)目標値の時々刻々の変化に対応でき外乱(風や船体運動)の影響が小さい.

3)小型軽量で比較的単純な装置.

これらは模型船の運動の正確な模擬と小型模型(長さ3m程度)への適用に必要な要件と考えられる.そして, 波浪中試験にも使用できることも目標の一つとした.まず,前述のガス噴出方式やワイヤー・サーボモータ方式 のような大がかりな装置ではなく,推力の方向を制御する必要がなく模型船に搭載できる小型で単純な装置を考 えることにした.このように考えると空気力方式が有力となるが,前述の空中プロペラ方式で問題となったと思 われる横力発生を避けるためにその空気力発生装置を検討した結果,最終的に模型飛行機用の小型ダクトファン を選び出した.ダクトファンからの気流は模型船速度に比べ非常に大きいため,航走にともなって発生する気流 の外乱影響も無視できると思われる.さらに,発生させる補助推力を正確に目標値に一致させるため,ダクトフ ァンが発生する推力を検力計で計測し目標値と比較するフィードバック制御を行うことにした.

ホビー製品であるダクトファンやその関連品を使用するにあたり、ダクトファンの空力性能や取り扱い方の把 握を行った.空力性能に関しては、フィードバック制御を実際に行って推力の安定度や応答性と外乱の影響を調 査すると同時に使用時の留意点をえることにした.調査したダクトファンは直径 60mm でファンにはモータが直 結している.フィードバック制御は PID 制御で、これをパソコン (PC) で行った.この調査ではダクトファン を検力計の上部に固定し、目標の推力信号を信号発生器で与えて発生する推力を計測した.ダクトファンの基本 特性として、回転数と推力の関係を図1に示す.推力は回転数の二乗に比例している.一般的なプロペラの特性 と同じと考えてよい.ダクトファンに外的な作用(外乱)を与えた調査結果を図2に示す.図の回転指令(rps) は PC の回転指令信号を回転数に換算した値である.推力の目標値を0.98N(0.1kgf)一定に制御して次のとお りの外乱を与えた.①ダクトファン本体に前後方向からの力を与える.②ファン吸気口に気流を与える.③ファ ン後方口を障害物で少し塞ぐ.まず図を全体的にみると、其々の外乱により指令回転数は大きく変化するが、推 力は0.98N(0.1kgf)一定値をほぼ保っている.詳細にみると、外乱を与えた瞬間は推力にスパイク状の波形が みえる.しかし、通常模型試験中の運動状態の変化を考えると、図2からダクトファンとフィードバック制御の 組み合わせで十分な応答が有ると判断できる.②、③の気流的な外乱に対しても、推力には大きな変化はなく一 定である.



図2 外乱に対する推力の応答調査

以上より,ダクトファンを用い推力をフィードバック制御する補助推力装置を開発すれば,自由航走模型試験 でも推力を正確に模型船に付加することが可能であると考えて実際に模型試験で使用する補助推力装置を試作 した.

当所実海域再現水槽の自動追尾台車を使用した自由航走模型試験の例を図3に示し、補助推力装置を用いた試 験方法の概念図を図4に示す.補助推力装置は模型船尾に取り付けた.ダクトファンを上方に固定した検力計で 補助推力 Xと横力 Yを計測した.Yを計測するのは横力発生の有無を確認するためである.船上には専用のモー タ増幅器と目標信号をモータ増幅器用のパルス信号幅に変換する信号変換器を搭載した.これら機器は模型飛行 機用を利用しているためもともと小型で軽量である.自動追尾台車上には、フィードバック制御用の PC とモー タの動力用電源および検力計増幅器を置いた.これらと船上の機器とは柔らかいケーブルで接続した.図5に PC で行っているフィードバック制御の PID ブロック図を示す.この PC では制御の他、時々刻々の船速から SFC

(船体摩擦修正量)に必要な力(SFC)を算出するなど任意の補助推力目標値の設定ができる. 試験中の模型船 速度 Uは自動追尾台車からえられる. この台車は主台車,主台車から吊り下げた副台車,副台車上の回転盤で構 成されており,自由に航走する模型船に取り付けた目標点を回転盤上に設置した CCD カメラで認識しながら自 動追尾することができる. この台車の速度とカメラ画像処理から正確な Uが算出できる. 模型船の加減速は,副 台車上のクランプ装置のワイヤーで模型船を拘束して行う. 試作した補助推力装置は、動力用バッテリーを含め装置一式を模型船に搭載することが可能で、無線による自 由航走試験にも対応できる.このとき、補助推力の目標値の算出に通常は Uが必要なため、GPS や模型追跡装 置等の船速を計測する装置が別途必要である.



図3 自動追尾台車と自由航走模型船



図4 試験方法の概念図



図5 フィードバック制御のブロック図

試作した補助推力装置(表 1)を模型船長さ 3m のコンテナ船 KCS¹⁰に取り付け(図 6) て, SFC相当量の推 力を模型船に付加したことによる操縦性能への影響を調べた.その結果,補助推力の有無による操縦運動の違い は有意な差であってこの傾向は操縦運動シミュレーションでも確認されたことから,補助推力装置が有効に機能 することを確認した⁴.

表1 試作補助推力装置の仕様

Item	Dimension	Note
Duct length(m)	0.082	
Duct diameter(m)	0.08	Inside
Fan diameter(m)	0.0792	
Mass(kg)	0.282	Inc.motor
Blade number	5	
Revolution,rated max.(rpm)	39000	
Thrust, rated max.(N)	19.6	
Power source(V,DC)	12	At the test



図6 試作補助推力装置の模型船取り付け状況

2.2 実用型補助推力装置

試作した補助推力装置の有効性が確認できたので,試作機に比べより使いやすく実用性の高い装置を製作する こととした.表2に実用型補助推力装置の仕様を,図7に実用型補助推力装置で用いた大きさが異なる3種類の ダクトファンを示す.模型船の大きさや船種で異なる補助推力に対し,適当な大きさのダクトファンを選択でき るように考えた.検力計は本体高さの低い型式を採用して船体へのダクトファン取り付け位置を極力低くすると ともに,船体取り付け用冶具も検力計の取り付け高さが容易に変更可能なようにした.ダクトファン3種類の実 用的な推力範囲は0.196N (0.02 kgf)~14.7N (1.5 kgf)である.信号変換器には単独でモータ回転数の試験や 調整が可能なように回転数ダイヤルを付け使いやすくした.自由航走模型船の船尾に取り付けた実用型補助推力 装置を図8に示す.

Item	Large	Medium	Small	Note
Duct length,overall(m)	0.145	0.125	0.100	Inc.motor
Duct diameter(m)	0.102	0.09	0.070	External
Mass(kg)	0.28	0.19	0.115	Inc.motor
Rate of revolution(rps)	650	633	617	Rated max
Thrust(N)	19.61	11.28	5.1	
Power source(V,DC)	22.2	14.8	11.1	Rated max
Output(W)	1021	608	223	Rated max

表2 実用的な補助推力装置の仕様



図7 大きさが異なる3種類のダクトファン



図8 模型船上の実用型補助推力装置

3. 舵効き修正への適用試験¹¹⁾

3.1 舵効き修正の概要

著者らは、自由航走模型試験で実船と近似的に相似な操縦運動を実現するための舵効き修正の手法を提案⁵⁾⁶している.これは操縦運動の起源である舵力、とりわけ舵直圧力が実船と相似になるように修正を行うものである.この手法を実験で実際に採用するには、所定の船速で舵への有効流入速度比が実船と同じ値になるように模型船に補助推力を与えることが必要で、開発した補助推力装置を応用すればよい.舵効き修正の手法では補助推力 T_A と船体摩擦抵抗修正に必要な補助推力 T_{SFC} との比を舵効き修正係数 f_{TA} と定義している(式 3.1).この f_{TA} の値は模型船の運動が大きくても通常の操縦運動の範囲内であれば模型船毎に一定としても大略実船の操縦運動を実現できることが確認 5⁻⁶ されている.

 $T_A = f_{TA} T_{SFC}$

(3.1)

本章では補助推力装置を用いることで新しく実施可能となる試験として, 舵効き修正による自由航走模型試験 を取り上げ, 模型船と実船を対象とした数値シミュレーションと実験結果を比較検討した結果について述べる.

3.2 自由航走模型試験

3.2.1 模型船および試験状態

模型船はコンテナ船 KCS と大型タンカーKVLCC1¹²で,主要目と模型船の状態を表3に示す.2船の模型船とも満載状態である.実験状態と試験項目を表4に示す.実施した操縦試験は旋回試験,逆スパイラル試験,Z

試験である.実験状態は舵効き修正 $f_{TA}=f_{REC}$ (舵効き修正:REC)の他 $f_{TA}=0$ (補助推力なし:None), $f_{TA}=1$ (摩擦抵抗修正:SFC)の3状態である.

	KCS	KVLCC1
Scale ratio	1/75.5	1/110
Lpp(m)	3.046	2.909
<i>B</i> (m)	0.427	0.527
<i>d</i> (m)	0.143	0.189
$\nabla(m^3)$	0.1209	0.235
$S_W(m^2)$	1.692	2.277
Dp(m)	0.105	0.0896
<i>GM</i> (cm)	1.69	11.0
Kyy/Lpp	0.251	0.251

表3 模型船の主要目と状態

表4 実験状態と試験項目

	KCS	KVLCC1	
Fn (VM)	0.26(1.42m/s)	0.14(0.76m/s)	
Propeller Revolution[RPS] (SFC,REC,None)	(14.0,15.1,17.0)	(11.3,14.3,17.2)	
Rudder Steering Speed [deg/s]	20.17	24.35	
$f_{\it REC}$	0.644	0.566	
Turning			
Rudder Angle[deg]	±10,±20,=	±30,±35	
	Reverse	Spiral	
Set Yaw-Rate[deg/s]	-5,-3.5,-2,-0.8	$\pm 0.5, \pm 1.0$	
	0.9, 1.9, 3, 4.5	$\pm 1.5,\pm 2.0,-2.25$	
	Zig-z	zag	
$\delta R/\varphi$ [deg]	±10/±10,±20/±20		

SFCの算出にあたり平板の摩擦抵抗 Crolcついては文献 13)の推定式を, 粗度修正量 △Crcついては文献 14) の推定式を用いた.諸係数は KCS が文献 15) から, KVLCC1 は文献 16), 17)と当所で行われた水槽試験結果を 使用した.実船計画速力(初期船速 Uo)に対する SFCは, KCS (Uc=1.42m/s)が 3.72N (0.38kgf)で KVLCC1 (Uc=0.76m/s)は 2.06N (0.21kgf)である.この SFC 状態や REC 状態の補助推力を付加するために適した ダクトファンとして KCS には表 2 中の Mediun を KVLCC1 には最も小型である Small を選択した.装置の模 型船取り付け位置は、ダクトファンの中心が船尾端の船体幅方向中心の甲板から上方に

KCS=0.068m:KVLCC1=0.110mで,船尾端からKCS=0.096m:KVLCC1=0.070m後方である.KVLCC1では 検力計と水面の間隔の小ささを考慮しKCSに比べ甲板からは少し高くした.フィードバック制御係数は,2船 其々において目標値との一致や応答性を確認したうえで設定した.操舵速度はSOLAS条約で定められた要件で ある65/28[deg/s]を模型スケールに換算した値で,操舵はオートパイロットによることとした.船体運動や船首 方位は船体浮心位置LcBに取り付けた高精度光ファイバージャイロで計測した.

3.2.2 速力試験

速力試験から求めた計画速力のプロペラ回転数を表5に示す. RECの回転数は2船ともSFCとNoneの間にある. 操縦性能試験では表に示した回転数一定で実験を行った.

9

表 5	速力試験から	ら求めたブ	ロペラ	回転数
10				

Propeller Revolution[RPS]				
	None			
KCS	14.0	15.1	17.0	
KVLCC1	11.3	14.3	17.2	

3.2.3 旋回・逆スパイラル試験

はじめに実用型補助推力装置の機能の確認として、試験中で付加した *T_A*が最も小さい KVLCC1 の REC にお ける右 35 度旋回試験の時系列データを図 9 に示す. 定常旋回中の *U*は 0. 27m/s で、このときの *T_A*は約 0. 196N (0. 02kgf) である. 図ではこの小さな *T_A*にも関わらず目標値とよく一致し安定しているのが確認できる. 適当 なダクトファンを選択すれば、小さな補助推力値にも対応できる. 同図には *Y*も示したが操舵開始後の発生はみ られない. KCS の旋回試験では *Y*がみられた⁴が、これはダクトファンの質量が船体横傾斜 *Roll*と *y*軸加速度 の影響をうけるため *Y*が発生したもので、図 9 に示す肥大船の KVLCC1 の場合には旋回にともなう *Rollや y*軸 加速度が小さかった事によると考えられる.

旋回・逆スパイラル試験結果として、KCS、KVLCC1の右35度旋回試験の航跡例を図10,11に、同じく定常旋回特性を図12~23にSFC、REC、Noneを比較して示す.表6には図10,11から求めた旋回縦距Advanceと旋回圏 Tactical Dia.を示す.図10,11では3状態で明確な差がみられる.図10,11の通り過渡応答の違いは、航跡に大きくあらわれることがわかる.RECの旋回圏の大きさは、2船とも旋回圏が大きいSFCと小さいNoneの間にある.2船で3状態の旋回圏の大きさの差を比較すると、KVLCC1の方が状態の違いによる差が大きくあらわれている.表6よりRECはNoneに対して、KCSがAdvance、Tactical Dia.とも約7%、KVLCC1ではAdvanceが9.2%、Tactical Dia.は12.9%大きくSFCでは両者ともさらに大きい.









表6 右35度旋回における旋回縦距および旋回圏

	K	CS	KVI	LCC1
	Advance	Tactical Dia.	Advance	Tactical Dia.
SFC	3.31	3.48	3.54	3.69
REC	3.30	3.20	3.20	3.51
None	3.08	2.99	2.93	3.11

次に定常旋回特性について計測項目別に述べる.

(1) 無次元回頭角速度 rL/U (図 12, 13)

舵角ごとの無次元回頭角速度は2船とも同じ傾向で、SFC が最も小さく、REC が中間位置にあるものの、あまり大きな差はみられない.小舵角範囲を拡大してみると(図14,15)、不安定ループ幅の違いから、明らかに3状態で針路不安定の程度が異なる. KVLCC1の方が3状態の差が顕著にあらわれている.本図から求めた不安定ループ幅を表7に示すが、2船ともSFC が最もループ幅が広く、次にREC、Noneの順番である. (2) 船速低下 UIU₀(図16,17)

舵角ごとの船速低下は2船とも同じ傾向で、低下量はSFCが最も大きく、RECはNoneとSFCの間に位置 している.これらの差はKVLCC1の方が大きい.2船とも左旋回時(マイナス舵角)の方が同じ右舵角(プラ ス舵角)に比べて低下量が少し大きい.全体的な低下量をみるとKVLCC1の方が大きい.

(3) 斜航角 *B* (図 18, 19)

2船とも旋回特性と同じ傾向で, REC は他 2 状態の間にある.

(4) プロペラスラストの無次元値 *T'=TI*(0.5*pLdU*)と舵直圧力の無次元値 *F_N'=F_N*(0.5*pLdU*)(図 20, 21 と 22, 23)

2船とも同様な傾向で SFC が最も小さく, REC が2状態の間にある. 舵角が大きいほど3状態の差は大きく, 船種では KVLCC1 の方が顕著である.

定常旋回特性に関する上記の傾向は、運動が小さいときの針路安定性は実船より模型船が安定側に出るという 従来の指摘を裏付けているものと考えられる.

試験の終わりには、 T_A を初期船速のSFCで一定の状態に制御した舵角+10度と+35度の旋回試験をKVLCC1 で行った.その航跡を点線で図11(図中:SFC一定)に、定常旋回特性を中塗りで図13(図中:SFC一定)に示 す.SFCの航跡と比較すると旋回直径は約22%大きい.定常旋回特性は舵角35度で20%程度小さく、舵角10度ではほぼ同じである.運動状態の変化に応じて T_A を制御する場合、当然ながら運動の変化が大きいほど指令 値一定の試験結果との間に大きな違いがあらわれる.



図 12 KCS 回頭角速度



図 13 KVLCC1 回頭角速度



図 18 KCS 斜航角

(265)

12



表7 不安定ループ幅

Unstable Loop Breadth [deg]			
	KCS	KVLCC1	
SFC	3.9	7.9	
REC	2.8	4.7	
None	2.1	3.3	

3.2.4 Z 操舵試験

Z 操舵試験から第一および第二オーバーシュート角(OA1, OA2)を求めた結果を, KCS を図 24, 26 に KVLCC1 を図 25, 27 に示す.各舵角での REC のオーバーシュート角をみると,2 船ともオーバーシュート角が大きい SFC と小さい None の間に位置している.これは定常旋回特性と同様な傾向である. KCS は OA1 の±10 度, OA2 の±10 度では 3 状態で差が判別できるが,この 3 状態の差は小さい.一方,KVLCC1 では KCS より 3 状態の差 が有意にあらわれている.OA1 の-10 度と OA2 の+10 度では特に差が大きい.なお,図 27 の-10 度の SFC は示 していないが,航走範囲の制限からデータが取得できなかったためである.次に,第一および第二変針おくれ時 間 (TL1, TL2 time)を求め無次元化 (*time*(sec)/*L/U*)して,KCS を図 28,30 に KVLCC1 を図 29,31 に示す. 各舵角での REC の無次元時間は,2 船ともオーバーシュート角と同じく SFC と None の間に位置している.3 状態の差は KCS でも、オーバーシュート角に比べ明瞭にあらわれている. これは特に航跡で違いがあらわれる ことを意味する.



3.3 数値シミュレーションによる実船性能との比較

3.3.1 計算の方法と計算状態

操縦運動シミュレーションにより実験でえられた操縦性能の確認と舵効き修正方法の有効性の検討を行った. 計算条件は実験状態と同じく fra=0 (None), fra=1 (SFC), fra= frec (REC)の模型対応計算3状態と実船対応計算Full-scale である.流体力微係数等は文献16)の値を用いた.実船対応計算では模型船プロペラ面伴流と抵抗,プロペラ単独性能にのみITTCの方法で尺度影響を考慮した.実船船速はKCSが24kt, KVLCC1が15.5Ktで,対応するフルード数Fnはそれぞれの模型実験での値と同じである.

3.3.2 操縦運動シミュレーション結果

計算でえられた模型対応のプロペラ回転数を表8に示す.模型実験でえられた回転数と比べKVLCC1のSFC 状態でやや差が大きいが他はほぼ同じである.

Propeller Revolution[RPS]				
	SFC REC None			
KCS	13.9	15.1	17.0	
KVLCC1	12.1	14.7	17.3	

表8 計算でえられた模型プロペラ回転数

旋回航跡の計算例として、KCS、KVLCC1の右35度旋回についてSFC、REC、None、Full-scaleの4状態を比較し図32、33に示す.2船ともSFC、REC、None、3状態に明確な差がみられ、RECはそれらの間にある.これらは実験の航跡結果と定性的に同じである.そして、点●で示したFull-scaleをみると2船とも同じくSFCとNoneの間にあり、RECに近い値を示しているのがわかる.次に定常旋回特性を同じく4状態比較して図34~45に示す.2船ともSFC、REC、Noneの3状態で*UUb*(図38、39)と*T*′(図42,43)にはやや差がみられるものの回頭角速度や他の特性に大きな差はみられない.回頭角速度の小舵角範囲を拡大し図36、37に示すが、明らかに3状態で針路不安定の程度が異なることがわかる.以上の結果は、実験結果と同じ傾向である.Full-scaleをみると、2船ともごく小舵角の範囲を除いてRECに近い位置にある.KVLCC1の小舵角の回頭角速度で両者の一致はよい.同じくZ操舵の計算結果をKCSは図46に、KVLCC1は図47に示す.Z操舵についてもオーバーシュート角や無次元時間に3状態で差がみられる.実験結果と定量的な差はみられるものの、SFC、REC、Noneの実験結果にみられる関係は実験と同じ傾向を示している.Full-scale はRECとよく一致している.



計算と実験結果の定量的な差の原因については次のように考えられる. KCS の計算で用いた流体力微係数は, 船速1.10m/s, GM=0.097m, プロペラ回転数は模型船の自航点で行った拘束模型試験 CMT¹⁸からえられた値 であるのに対し,模型実験では船速1.42m/s, GM=0.017m で,プロペラ回転数も異なる点である. 特に GMの 違いが影響¹⁹していると考えられる. KVLCC1 については流体力微係数を求めた CMT に用いた模型船および模 型プロペラと自由航走試験に用いたそれらは,縮尺こそ同じであるものの異なる模型であったため,模型製作上 の理由による形状の違いの影響があらわれた可能性も考えられる. 計算と実験結果に定量的な差はみられるもの の,その差は舵効き修正の有効性を否定するものではなく,操縦運動シミュレーションにおける数学モデルで用 いられる流体力微係数の推定精度あるいは物理現象を表現するべき数学モデルそのものの有効性によるものと考 えられる.

操縦運動シミュレーションは実験と同様な傾向であり, 舵効き修正法は実船の対応計算に近い結果がえられた. これらから,補助推力の異なる3状態の実験結果は妥当であること,補助推力装置を適用した舵効き修正法によ る操縦試験を実施すれば実船に近い操縦運動を再現できる可能性を示している.



図 36 KCS 小舵角範囲の回頭角速度(計算)



図 38 KCS 船速(計算)



図 35 KVLCC1 回頭角速度(計算)







図 39 KVLCC1 船速 (計算)



図 40 KCS 斜航角(計算)



図 42 KCS スラスト (計算)



図 44 KCS 舵直圧力(計算)







図 43 KVLCC1 スラスト (計算)



図 45 KVLCC1 舵直圧力 (計算)



4. 波浪中自由航走模型試験への適用

波浪中で補助推力装置を適用して自由航走模型試験を実施し,波浪中における補助推力装置の基本機能の確認 を行うとともに,*SFC*相当量を付加した実船自航点における模型船の波浪中船速低下を数値シミュレーションと 比較して検討した結果について述べる.

実船の波浪中船速低下の高精度の推定は,船型計画や運航法など各方面から要望されている.模型試験から直 接求めた波浪中船速低下の公表データは少なく,その例^{20,20)}をみる限りでは模型船の自航状態で行われている. 自由航走模型船のプロペラ荷重度の変更が試験技術上難しいことは前に述べたが,波浪中では波による大きな船 体動揺も加わりさらに困難となる.補助推力装置の開発にあたっては,波浪中での使用についても 目標に含めた.しかしながら,波浪中での使用に関しては,問題が出た都度に装置の改良を行う事 にしていた.波浪中でも本装置がそのまま問題無く機能すれば,実船自航状態の波浪中船速低下も容易に直接計 測できることから,従来に比べ精度が増した実船の船速低下が推定可能になる.無論,実船の波浪中船速低下は 実船自航状態の模型試験を行えば直ちにえられるのではなく,模型船のプロペラ面伴流やプロペラ性能等の尺度 影響や実船の主機特性も考慮しなければならない.現在,これらも考慮した自由航走模型試験を可能にするため, 主機特性模擬自航装置の開発²¹⁾を模型船尺度影響を取り込んだ補助推力の与え方の研究^{6,22)}を進めている.

4.1 自由航走模型試験

4.1.1 模型船および試験状態等

供試模型船は3.2節と同じ KCS と KVLCC1 で満載状態である(表3参照). ここで示すのは正面規則波中の 船速低下の結果で,自航状態はSFC と None の2 状態である. 試験状態と試験項目を表9に示す. SFC の算出 は3章と同じで ITTC の方法による. プロペラ回転数は3.2.2項の速力試験結果で一定とした. 補助推力装置の 仕様や模型船取り付け位置,制御のフィードバック係数は3.2節の操縦試験とすべて同じである. 船体運動や船 首方位は高精度光ファイバージャイロで計測し,出合い波高 Hwは自動追尾台車の前方に張り出したサーボ式波 高計で計測した. 試験中の直進航走の保持は,オートパイロット操舵による.

	KCS	KVLCC1
Fn(VM)	0.26(1.42m/s)	0.14(0.76m/s)
Propeller Revolution[RPS] (SFC,None)	(14.0,17.0)	(11.3,17.2)
Wave Height[cm] (<i>Hw/Lpp</i>)	7.5(1/40)	4.0(1/73)
Wave Length/Lpp	0.4,0.6,0.8,1.0,1.2	
Encounter Wave Direction	HeadingWave	

表9 試験状態と試験項目

自由航走模型による波浪中船速低下の試験では、波による船体抵抗増加のために平均船速がほぼ定常になるま では通常長い航走距離が必要である.このため実海域再現水槽では次の試験方法で波浪中の船速を計測した.ま ず、事前に船速低下量を推定してこの低下量を考慮した速度(台車初期速度)まで台車で模型船を加速する.そ して一航走中の平均船速と台車初期速度の差が小さく、さらにほぼ一定船速で航走しているデータを採用した. このとき、判断基準を満足しない場合は、台車初期速度を調整して再試験を行った.

4.1.2 波浪中における補助推力装置の機能確認

はじめに波浪中における補助推力装置の機能を確認する. 波による船体動揺が KVLCC1 に比べ大きい KCS について, *ML*=0.6, 1.0, 1.8の *SFC*(exp)と *SFC*(set point)の時系列データを比較し *U*とともに図 48~50 に示す. すべての図で *U*は *U*₀=1.42m/s に対し小さくなっていて, 図 49の *ML*=1.0 が最も小さい. また波の出合い 周期にともなう船体前後揺からの小さな変動がみられる. 航走中を全体でみると大きな変化は無く一定船速とみなせる. このことから模型船は波浪中を定常航走しているのがわかる. *SFC*(exp)は *SFC* (set point)上にみられるものの, 図 49, 50 では *U* の変動から算出される *SFC* (set point)の振幅よりも大きく位相も少し異なる. し

かし、模型船の排水量や運動応答の感度を考慮すると、この程度の振幅や位相の違いが船速低下に与える影響は 無視できると考えられる.なお、*SFO*(exp)の振幅や位相の違いは、船体縦揺や船体前後揺により発生するファン やその取り付け冶具の慣性力が計測されフィードバック制御系に影響したことが大きな要因と考えている.これ は、補助推力装置に加速度計を付けて上記成分を推定して除去するように PC 制御装置に入力することで改善で きると考えられる.





ここでは正面規則波中試験の結果を示したが多方向からの入射波や不規則波中試験²³も実施し、これらの状態 でも補助推力装置は有効に機能することを確認した.なお、*Roll*が発生すると横力 Yもあらわれるが、*Rollとy* 方向加速度からこの Yは説明可能である.

4.1.3 波浪中船速低下の試験結果

SFC と None の波浪中船速低下 U/U_0 を比較し, KCS を図 51 に KVLCC1 を図 52 に示す. 同図には船速低 下のミュレーションもあわせて示した. 実験点はすべての条件で 2 航走分を示したが,実験点の一致はよい. U/U_0 は KCS , KVLCC1 ともすべての ML で SFC の方が None より船速低下は大きい. そして ML=1.0 が最も低 下している. SFC と None の差は KVLCC1 の方が大きい. 表 10 に船速低下が最も大きい ML=1.0 の低下量を 百分率%で示した. SFC で KCS が 67% で KVLCC1 が 49% である. None からは KCS が 10% で KVLCC1 では 20%も大きく船速低下することがわかった. この主たる要因は船速低下にともなって付加する SFC も小さくなる からである. すなわち波による船体抵抗の増加で船速が低下するとそれにともない SFC が小さくなり,模型船 の推進力の合力 {SFC+T(SFC): 実船自航点のスラスト T(SFC)} が模型船自航点のスラスト T(None)より小さ くなるためである.



図 51 KCS の波浪中船速低下





図 53, 54 に KCS, KVLCC1 の異なる自航状態のスラスト T(SFC)と T(None)の平均値,そして SFCの平均値および {SFC+T(SFC)} を示す. {SFC+T(SFC)} は何れの MLでも T(None)より小さいことがわかる. ML=1.0の {SFC+T(SFC)} は T(None)に対し, KCS が 83%で KVLCC1 は 56%に小さくなり両者に大きな差

がある.この差は KVLCC1 の方で大きいが None からの船速低下が大きいことからも理解できる.同図には *SFC*(set point)の平均値を実線で結び示したが2船ともすべての実験点で *SFC の*平均値と非常によく一致している.補助推力装置は波浪中の定常航走時において正確に補助推力を付加できる.

表10 波浪中船速低下の割合

Speed loss	$\lambda/L=1.0$	
	SFC	None
$\operatorname{KCS}(H_W/L=1/40)$	67%	77%
KVLCC1(Hw/L=1/73)	49%	70%



図 53 KCS の波浪中における各計測値



図 54 KVLCC1 の波浪中における各計測値

4.2 数値シミュレーションによる船速低下

4.2.1 計算の方法と計算状態

船速低下の数値シミュレーションは、当所開発のVESTA²⁴による波浪中抵抗増加の推定値を用いた.計算仮 定として、波浪中における模型プロペラ単独特性や自航要素(実船自航点の値)は平水中と同一値とした.回転 数一定のとき、船速が低下するとプロペラ荷重度は大きくなるが、プロペラ荷重度に対する自航要素の変化は考 慮していない.プロペラ回転数は実験と同じく一定で、操舵の影響は無視した.

4.2.2 船速低下のシミュレーション結果

数値シミュレーションで所定の平水中の船速がえられるように設定し求めたプロペラ回転数を表 11 に示す. 実験のプロペラ回転数(表 9)と比べると KVLCC1の SFC を除きほぼ同じである. KVLCC1の SFC の回転数 が実験値より大きいが,これは 3 章で述べた結果と同じ傾向である. 波浪中船速低下を示した図 51,52の計算 結果を実験結果と比べると、2 船とも SFC と None いずれも定性的な傾向は同じで SFC の方が船速低下は大き い. 定量的に比べると KVLCC1 は SFC と None とも比較的合っているが,KCS では何れも船速低下を大きく 推定している.この不一致の要因として,波による抵抗増加の推定精度が考えられる.KCS の波高船長比 *HwlLpp* は 1/40 と KVLCC1 の 1/73 に比べ倍程大きい.実験では波高が大きいと非線形影響があらわれて,波による抵 抗増加は厳密には波高の二乗に比例しない例も多くある.したがって,波高が大きいと計算では抵抗増加が大き く推定され,これより船速低下が過大に推定されたと考えている.大きな波高での波浪中抵抗増加の計算精度向 上が望まれる.さらに船速低下の推定精度向上のためには,波浪中状態やプロペラ荷重度の変化に対する自航要 素の影響も取り入れることが望まれる.

表11 計算からえられたプロペ回転数

Propeller Revolution[RPS]		
	SFC	None
KCS	14.0	17.0
KVLCC1	12.5	17.4

上記の通り, KCS の船速低下には実験と計算で大きな差がみられた. このため KCS の実験結果を確認するため,過去にコンテナ船型で行われた波浪中の自由航走模型試験による船速低下の結果 ²⁰で検討してみた. この実験は模型船の自航状態で行われ,満載状態の正面規則波中試験である. 試験は Fn=0.25, Hwl L=1/50 で設定され,プロペラ回転数は平水中の船速でえられた値で一定である. KCS の実験状態と比べ Fn および Hwl L は小さい.文献 2)に示されている船速低下の図を目視で読み取り平水中の船速比を求め図 51 に長い波線で示す. KCS の模型船自航状態の実験結果と比較すると波長に対する傾向は同じで船速低下は KCS の方が大きい. そもそも船型やプロペラが異なるのは記すまでもないが,この主な要因として Fn や Hwl L が KCS の方が大きかったことがあげられる. この試験状態の違いを考慮すると,KCS の実験結果は妥当であり,前記の考察の通り計算が船速低下を過大に推定していると考えられる.

以上,本章では補助推力装置を適用することで従来の自由航走模型試験では実現困難であった実船自航状態に よる波浪中船速低下を直接実験から求めるとともに,この実験結果を数値シミュレーション結果と比較検討した 結果について述べた.補助推力装置は波浪中自由航走模型試験でもプロペラ荷重度を任意に自由に変更できるこ と,そしてこれが有効に機能することを確認した.

5. まとめ

著者らは、自由航走模型試験で用いる模型船に小型ダクトファンを取り付けて推力を付加することで、模型船のプロペラ荷重度を容易に制御できる実用的な装置を開発した.この補助推力装置を用いることで、これまでの 自由航走模型試験では行えなかった新しい実験が可能になった.本稿では、まず補助推力装置の概念設計と試作 機,実用型機について概説した.次に,実用型の補助推力装置をコンテナ船とタンカーの自由航走模型船に取り 付け,実船相似の操縦運動を再現する舵効き修正法による操縦性能試験と実船自航状態の波浪中自由航走模型試 験を実施した結果について述べた.さらに,上記自由航走模型試験に関する数値シミュレーションを行い,試験 結果との比較検討結果について述べた.以下に試験別にまとめる.

1) 舵効き修正法による操縦性能試験

補助推力装置を適用し, 舵効き修正を行った操縦性能試験を実施した.その結果, 操縦運動シミュレーション で予想された舵効き修正効果を確認した.また,実用型補助推力装置は,適当なダクトファンを選択すること で非常に小さな推力値も正確に付加できることを確認した.操縦運動シミュレーションによる舵効き修正した 模型船対応の計算結果は実船対応の計算結果に近い結果であることから考えて,補助推力装置を適用した舵効 き修正方法による操縦試験を実施すれば実船に近い操縦運動を実現できる可能性がある.

2)実船自航状態の波浪中自由航走模型試験

補助推力装置を適用して実船自航状態の波浪中自由航走模型試験を実施した.実船自航状態における正面規則 波中の船速低下を直接実験から求めたところ,実船自航状態では模型船自航状態よりも船速低下が大きいこと がわかった.これは船速低下にともない補助推力も小さくなるためと考えられる.また,波浪中における補助 推力の平均値は目標値によく一致し,補助推力装置が波浪中でも有効に機能することを確認した.実船と模型 船の自航状態の違いによる船速低下の差をコンテナ船とタンカーの実験結果で比較したところ,タンカーの方 が大きく,この傾向は数値シミュレーションでも定性的に確認できた.数値シミュレーションによるコンテナ 船の船速低下の推定結果は実験結果よりもを大きな値となったが,これは数値シミュレーション計算において 波高の非線形影響が考慮されていないためと考えられる.

補助推力装置は波浪中試験でも有効であり、船体外力の付加装置としても応用できることから、他にも新しい 自由航走模型試験が可能になると思われる.例えば風圧下での船速低下や操縦性能の評価に関する模型試験を行 う場合、模型船外部から送風機によって風圧力を模型に直接与える方法が第一に考えられるが、運動している模 型船に設定した風速による風圧力を正確に与えるのは試験技術的に難しく、送風装置も大型で準備も大掛りにな る.この場合、補助推力装置を模型船に複数台設置し模型船に加わる風圧力を別途(例えば風洞試験より)推定 した上でこれと等しい外力を船の運動状態に応じて制御して与えれば、風圧下を模擬した試験²⁵⁾が比較的容易に 行えると思われる.この際、波を加えることで波風共存する実海域における船舶の性能を模型試験から検討でき る.さらに舶用エンジンの特性を考慮することで風波中の実船の船速低下や馬力増加なども模型実験から直接評 価できる可能性がある.また、舵効き修正法に船速修正を同時に考慮した外乱下にも適用可能な補助推力の与え 方の研究®を進めている.これより外乱下で実船と相似の模型船運動が再現²⁶⁾できる可能性がある.

補助推力装置を活用することで自由航走模型試験の高度化や自由航走模型試験用途の広がりが期待できる.

謝 辞

本研究は科研費基盤研究A(課題番号 23246152 と 23246153)の助成をうけたもので関係者にお礼申し上げます.

参考文献

- 1) 山崎啓市,小林英一,飯田 隆,箙 一之:「操縦性」特集 実船の操縦性能の推定,日本造船学会誌, 第 869 号, pp.36-40, 2002.
- 2) 池上国広, 今泉好照: 波浪中における船速低下の推定計算法と模型試験, 三菱重工技報, VOL.15・No.3,

24

pp.57-65, 1978.

- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Ueno M., Tsukada Y.: Numerical Study on Rudder effectiveness Correction of a Free-running Model ship, Proc. of The 12th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, PRADS, pp. 1120-1127, 2013.
- 6) Ueno M., Tsukada Y. : Similarity of Rudder Effectiveness and Speed Response of a Free-running Model Ship, Proc. of the ASME 2014 33nd Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE, paper No. 23805, 2014.
- 小林英一,山崎啓市,箙 一之,大森拓也,佐々木紀幸,鳥井幸典:操縦性および復原性基準に関する研究の動向 第5章 IMO 操縦性暫定基準に対する造船所の対応,日本造船学会試験水槽委員会,pp.(5.1)-(5.30),2000.
- 8) 藤井 斉: 自航模型船による舵特性の研究(1),造船協会論文集,第107号, pp. 105-111, 1960.
- 9) Son N.S., Kim S.Y., Kim Y.G., Oh B.I. and Ha W.H. : Development of Additional Towing Device With a Servo Motor For Free Model Tests, Proceedings of 10th Asian Conference on Marine Simulator and Simulation Research, pp. 67-74, 2010.
- 10) http://www.simman2008.dk/KCS/container.html
- Ueno M., Tsukada Y., Kitagawa Y.: Rudder Effectiveness Correction for Scale Model Ship Testing, Ocean Engineering, 92. pp. 267-284, 2014.
- 12) http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC1/tanker1.html
- 13) Saunders H. E. et al.: Concluding Technical Session, Proc. of the 8th ITTC, pp. 323-325, 1957.
- 14) ITTC performance committee: Appendix to the Report of Performance Committee, Proc of 15th International Towing Tank Conference, pp. 388-404, 1978.
- 15) Ukon Y., Fujisawa J., Yanagihara T., Takeshi H. and Kume K. : Manufacture accuracy of three KCS models and resistance test results, The 23rd ITTC group discussion on model manufacturing and accuracy, Proceedings of the 23rd ITTC, pp. 1-8, 2002.
- 16) 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.
- 17) Kim Wu-Joan et al. : Comparison of Turbulent Flows around Two KRISO 300K VLCCs with Stern Frameline Modification, *J. of Ships & Ocean Engineering*, Vol. 28, pp. 1-14, 1999.
- 18) Ueno M., Yoshimura Y., Tsukada Y. and Miyazaki H. : Circular Motion Tests and Uncertainty Analysis for Ship Manoeuvrability, J. of Marine Science and Technology, Vol. 14, pp. 469-484, 2009.
- 19) 宮崎英樹,塚田吉昭,瀧本忠教:コンテナ船の重心高さが操縦性能におよぼす影響の実験的検討について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集,第16号, pp.21-24, 2014.
- 20) 中村彰一, 内藤 林: 波浪中における船速低下及び推進性能について, 関西造船協会誌, 第166号, pp.25-34, 1977.
- 21) Kitagawa Y., Tanizawa K. and Tsukada Y. : Development of an Experimental Methodology for Self-Propulsion Test with a Marine Diesel Engine Simulator, Third Report – Auxiliary Thruster System-, Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference, pp.691-696, 2014.

- 22) Ueno M., Tsukada Y. : A Method to Realize Full-scale Equivalent Propeller Characteristics and Speed Using Free-running Model Ship, Proceedings of 2nd International Symposium on Naval Architect and Maritime (INT-NAM), pp. 483-494, 2014.
- 23) 北川泰士, 谷澤克治, 塚田吉昭: 主機特性自航装置と補助推力装置を用いた波浪中船速低下試験法の開発(第3報)-多方向不規則波中船速低下の計測-, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第19号, pp.185-186, 2014.
- 24) Tsujimoto M., Kuroda M., Sogihara N. : Development of Calculation Method for Fuel Consumption of Ships in Actual Seas with Performance evaluation, Proc. of 32nd OMAE, OMAE2013-11297 pp.1-10, 2013.
- 25) 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.
- 26) Suzuki R., Ueno, M. and Tsukada, Y. : A Numerical Study on Maneuverability under Steady Equilibrium Condition in Waves for Free-running Model Ship, Proc. of the 14th International Ship Stability Workshop, ISSW, pp. 167-173, 2014.