

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760680

研究課題名(和文)粘性CFDを用いた自由航走シミュレーションに関する研究

研究課題名(英文)Development of free running simulator using viscous CFD

研究代表者

坂本 信晶(Sakamoto, Nobuaki)

独立行政法人海上技術安全研究所・その他部局等・主任研究員

研究者番号：80550003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：非定常RaNS法を用いて、操縦運動数学モデルに依存せず、船舶の操縦性能を自由航走CFDシミュレーションにより推定出来るコードを開発した。計算上の操舵の取り扱いには局所格子変形を用い、船体運動を考慮する際は、計算領域全体を動かす方法を採用した。開発したコードを用いて、ESSO OSAKAタンカー船型の定舵角旋回運動計算およびzig-zag運動計算を行った。

定舵角旋回運動計算では、左舷側旋回径が右舷側旋回径に比べ小さくなるといった、1軸1舵船によく見られる特徴を捉えることが出来た。zig-zag運動計算では、計算により得た第1・第2行過ぎ角は概ね、試運転解析と良く一致する結果となった。

研究成果の概要(英文)：Maneuvering simulator is developed based on URaNS solver SURF with moving grid technique. The steering is treated by local grid morphing while the whole computational domain moves for the treatment of ship motions. The code is applied to solve turn zig-zag maneuvers for ESSO OSAKA, then the results are compared with the available sea trial data.

The computational results of turning circle maneuver qualitatively capture the trend of difference between starboard side turning and port side turning. The computational results of 10/10 zig-zag maneuver generally agree well with the sea trial data. Once the steering angle becomes 20/20, the phase lag becomes apparent in yaw angle, rate of turn and drift angle. Two possible reasons for this discrepancy are the lack of rudder area and grid resolution in the rudder/stern vicinity to capture vortices originated from hull and steering motions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：数値流体力学 操縦性能推定

1. 研究開始当初の背景

船舶の安全な航行を達成するには、その操縦性能を精度良く推定する必要がある。国際海事機関 (International Maritime Organization: IMO) は、2002 年に操縦性基準 MSC137(76) を改訂し、その基準は 100m 以上の船舶、若しくはケミカルタンカー・ガスキャリアに適用することが義務付けられている。また近年では省エネのため、主機関出力を抑えて運航することが珍しくない。そのため IMO は 2013 年に、荒天下でも操縦性能を確保することの出来る、最低機関出力に関するガイドライン MEPC232(65) を策定している。これらの基準およびガイドラインの制定は、新船型の開発に当たっては初期計画の段階から、抵抗推進性能だけでなく操縦性能についても考慮する必要があることを示している。

操縦性能の推定には、従来より操縦運動数学モデルがよく用いられてきた。このモデルでは、船体および舵に働く流体力・プロペラ推力・プロペラおよび舵流入速度・各種干渉影響係数(例えば整流係数・舵力増加係数など)等をモデル化し、船体運動方程式を解くことにより、操縦性能を推定する。操縦運動数学モデルは非常に実用的であり、比較的簡単に用いることが出来るものの、モデルへの入力パラメータを求める際には、多くの手間がかかる場合がある。最も重要な入力パラメータの 1 つである微係数を例に取れば、その推定には多くの拘束模型試験(例えば斜航・旋回・静的/動的 PMM 試験など)を行う必要がある。近年では、拘束模型試験の代わりに粘性を考慮した数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics: CFD) が用いられ始めてきてはいるが、微係数を求めるために多くのシミュレーションを行わなければいけないことには変わりはない。

もし粘性 CFD 手法を用いて、船舶の操縦性能を直接推定出来れば、先に述べたような模型試験・シミュレーションに関するコストを大幅に削減することが可能となると同時に、操縦運動数学モデルの構築に必要な仮定を、より実現象に近づけることが出来る。例えば、運動中の船体・舵に働く流体力・モーメントを非定常レイノルズ平均 Navier-Stokes (URaNS) 方程式を解くことにより求めれば、微係数を求める必要はなくなる。また、粘性 CFD 手法中でプロペラ影響が体積力若しくは実形状等を用いてモデル化されていれば、プロペラおよび舵流入速度もまた URaNS 方程式の解となり、操縦運動数学モデルで行っているようなモデル化は必要なくなる。このようなアプローチは、欧米では 2008 年頃より行われるようになってきているが、日本国内では未だ例を見ない。

2. 研究の目的

本研究の申請者が所属する(独)海上技術安全研究所では、船舶用 3 次元非圧縮性粘性流

体ソルバー-SURF の開発を行っている。このソルバーには平成 22 年度 - 23 年度、本研究の申請者らにより、動的問題に対応する機能が実装された(科研費若手研究(B) 22760644)。本研究では、このソルバーに、プロペラ回転数、舵角制御機能等を追加することにより、自由航走 CFD シミュレーションを用いて、船舶の操縦性能を直接推定出来るコードを開発する。

3. 研究の方法

本研究では、以下に示す方法で行った。船舶の操縦運動は操舵に伴い斜航・旋回が生じることから、最初に開発に使用するコードを用いて、船体からの非定常な大規模剥離が解像出来るかどうかの調査を行った。次に、自由航走状態を達成するために必要な船速・方位角・プロペラ回転数・舵角の制御ルーチン開発およびコードへの実装を行った。そして、操舵と船体運動を 1 つの計算領域で取り扱えるようなコードの開発を行った。最後に、開発したコードを用いて低速肥大船の操縦運動性能推定を行い、計算結果を試運転解析結果と比較することで、開発したコードの妥当性を検証した。

4. 研究成果

最初に、開発に使用するコードの大振幅運動計算に対する計算精度検証結果を示す。解析対象には、操縦性能に関する国際ワークショップ SIMMAN2008 にて、ベンチマークケースとして使用されていた、護衛艦船型の Pure yaw 運動を選んだ。表 1 に、計算結果から得た微係数を示す。図 1 に、乱流モデルおよび格子密度が、流体力時系列に及ぼす影響を示す。図 2 に、旋回角速度が最大( $r' = 0.6$ )の時の船体周り流場を示す。図 1 および表 1 に示すように、開発に使用するコードは、大振幅運動する船体に働く流体力を、実用的なセル数(両舷約 120 万セル-300 万セル程度)で非常に精度良く捉える事が出来ている。乱流モデルによる差は、主に長手方向の流体力に表れており、結果として k-omega SST モデルを用いることで、実験値に対して普遍的に良く一致する傾向を示すことが分かった。

表 1 微係数計算結果  
(Pure yaw, k-omega SST model 使用)

$r'_{max}=0.15$	$Y_r$	Phase[deg]	$N_r$	Phase[deg]
Exp.	-0.0506	-93.9	-0.0436	-104.2
SURF	-0.0480	-85.9	-0.0445	-105.5
Ref.CFD	-0.0381	-103.1	-0.0414	-108.2
$r'_{max}=0.3$	$Y_r$	Phase[deg]	$N_r$	Phase[deg]
Exp.	-0.0469	-92.5	-0.0450	-102.6
SURF	-0.0422	-91.6	-0.0450	-106.8
Ref.CFD	-0.0305	-109.0	-0.0421	-106.2
$r'_{max}=0.6$	$Y_r$	Phase[deg]	$N_r$	Phase[deg]
Exp.	-0.0239	-99.5	-0.0477	-101.9
SURF	-0.0128	-116.0	-0.0495	-107.4
Ref.CFD	-0.0934	-120.3	-0.0422	-107.7

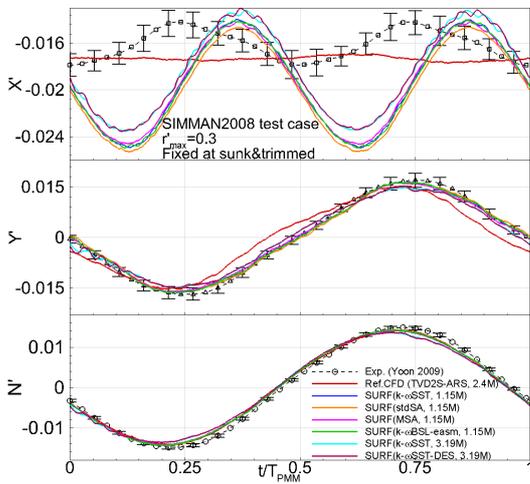


図1 乱流モデルおよび格子密度と流体力時系列の関係(Pure yaw,  $r' = 0.3$ )

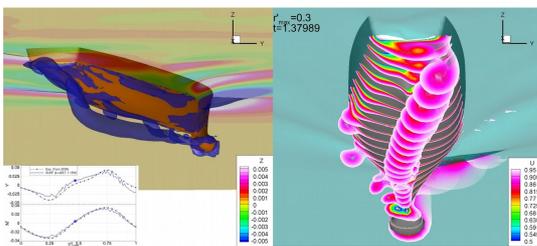


図2 大振幅運動する船体周りの流場(Pure yaw,  $r' = 0.6$ , k-omega SST model 使用)

次に、自由航走状態を達成するために必要な、船速・方位角・プロペラ回転数・舵角の制御ルーチンの開発について示す。これらの制御には、欧米での先行研究で既に適用実績があるPIコントローラーを用いた。PIコントローラーを、船速一定を目的としたプロペラ回転数制御に用いる例を、式(1)に示す。

$$n = K_p e + K_I \int_0^t e dt \quad \text{式(1)}$$

$$e = u_{\text{target}} - u_{\text{present}}$$

ここに、 $n$  はプロペラ回転数、 $u_{\text{target}}$  は目標船速、 $u_{\text{present}}$  は現在の船速、 $e$  は偏差、 $K_p$ 、 $K_I$  はそれぞれ、微分・積分ゲイン定数である。また、同様なPIコントローラーを方位角一定を目的とした舵角制御に用いる例を、式(2)に示す。

$$\frac{d\delta}{dt} = K_p \dot{e} + K_I e \quad \text{式(2)}$$

$$\delta^{n+1} = \delta^n + d\delta$$

ここに、 $d/dt$  は操舵速度、 $\delta_{\text{target}}$  は目標方位角、 $\delta_{\text{present}}$  は現在の方位角、 $\delta$  は舵角である。これらのコントローラーを用いて、タンカー船型直進時の、船速一定を目的としたプロペラ回転数制御例を図3に、方位角一定を目的とした舵角制御例を図4に示す。図3では、時間進行と共に無次元船速  $u/U$  を1に近づけるべく、プロペラ回転数が自動的に変更されていく様子が分かる。図4では、舵角に

PIコントローラーを適用しなければ、時間進行と共に船体運動軌跡が目標方位角(図4の場合には直進)から外れていくことが分かる。これは、プロペラが造る旋回流により、舵に流入する速度が左右舷で非対称となり、舵角を  $0^\circ$  としていても、船体は直進せず、当て舵が必要となることを示している。PIコントローラーを適用すると、船体は直進する。船体運動の軌跡および方位角に振動が生じているが、これはゲイン定数を適切に設定出来ておらず、結果として舵角の制御量が大きくなりすぎていることが原因であると考えられる。以上により、ゲイン定数を適切に選びさえすれば、実装した制御ルーチンは、船速・方位角・プロペラ回転数・舵角の制御に使用できることが分かった。

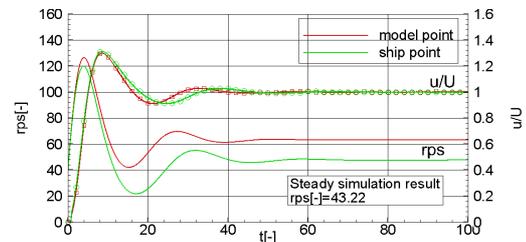


図3 タンカー船型直進時の船速および回転数時系列(制御対象はプロペラ回転数)

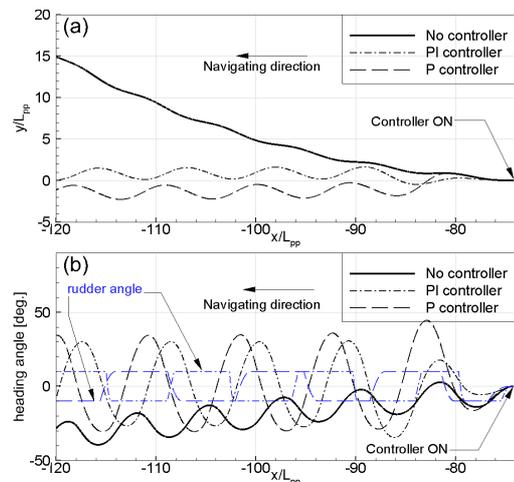


図4 タンカー船型直進時の運動軌跡および方位角時系列(制御対象は舵角)

次に、操舵と船体運動を1つの座標系で取り扱う方法について説明する。操舵には、舵周囲の計算格子を局所的に変形する方法、重合格子を用いる方法があるが、本研究では前者を採用した。この方法では、舵の回転中心からある一定の距離内のみ、局所格子変形領域を設定する。その領域内において、図5に示すよう各格子点に重み(weight)を与える。Weightの値は、舵角と同じ量だけ格子が変形する点では1、それ以外では  $0 < \text{weight} < 1$  の値となり、領域の外周では0を与える。この方法では、単一格子内で容易に舵角変更が可能である反面、以下の点に留意する必要がある。それは格子生成の際、局所変形領域と

船体との干渉を避ける必要があるため、特に舵上端と船尾オーバーハング部分との間にある程度の空間を持たせなければならないことである。そのため、ラダーホーン・シューピースは計算格子の一部として再現出来ず、また舵面積が実際よりも小さくなってしまふ。

船体運動を取り扱う際は操舵とは異なり、船体運動に追従して計算格子全体を動かす方法を採用した。計算に用いる境界条件で考えると、船体表面の速度は0ではなく、船体の運動速度とする。また、流入境界で与える速度を0とすることで、船体運動との整合性を保っている。

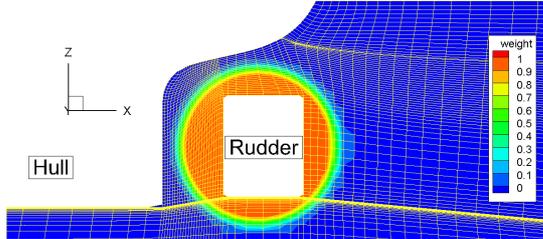


図5 舵周りの局所格子変形に用いる重み

最後に、開発したコードを用いて低速肥大船の操縦性能推定を行った結果を示す。対象船には、操縦性能推定分野で良く用いられている ESSO OSAKA タンカー船型を選んだ。本船型は国際水槽試験委員会 (ITTC) でも取り上げられている形状であり、実機での試運転解析から得られた船体の操縦運動データが、計算モデル等の検証用として一般に公開されている。本報告書では、定舵角旋回運動および 10/10, 20/20 zig-zag 運動計算結果、それらの試運転解析結果との比較を紹介する。

計算は全て模型スケールで行い、プロペラ回転数は一定とした。直進時の船体抵抗は、実船スケールに対する摩擦修正を考慮しないモデルポイントとした。船体は、surge, sway, yaw の 3 自由度運動を行うものとし、運動方程式と URaNS 方程式は弱形式にてカップリングした。計算格子で再現した舵面積は、前述のように舵上端と船尾オーバーハング部との間に空間を持たせるため、実機より約 19% 小さくなった。定舵角旋回運動シミュレーションを実施する際、試運転で設定されていた舵角  $\pm 35^\circ$  を計算格子上で再現することが困難であったため、計算では舵角を  $\pm 20^\circ$  とした。

図6に定舵角旋回運動時における、船体重心の軌跡、図7に定舵角旋回運動時における船速低下量および旋回角速度の時系列を示す。左舷側旋回は右舷側旋回に比べ、Advance ( $A_b$ )が約 12%、Tactical diameter ( $T_b$ )が約 14% 小さい結果となった。この現象は、1軸1舵で右回りのプロペラを装備している船体において一般的に観察される特徴であり、本計算結果はこの特徴をよく捉えることが出来ている。計算により得た船速低下量は、右

舷側旋回に比べ左舷側旋回の方が約 1% 大きくなった。前述のように、左舷側旋回の旋回半径が右舷側旋回よりも小さくなっているため、この船速低下量に見られる傾向は妥当であると考えられる。一方、試運転解析結果では、左舷側旋回と右舷側旋回の旋回半径がほぼ同一であるため、船速低下量について両者に差は見られない。旋回角速度については、計算と試運転とで舵角が異なるにもかかわらず、同じ値に収束する結果となった。

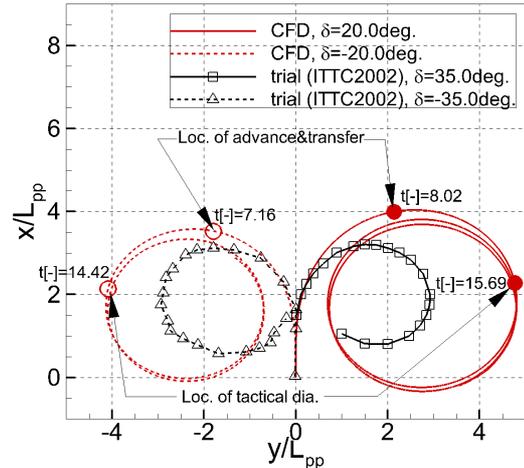


図6 ESSO OSAKA 旋回運動軌跡 (CFD:  $\pm 20^\circ$ , 試運転:  $\pm 35^\circ$ )

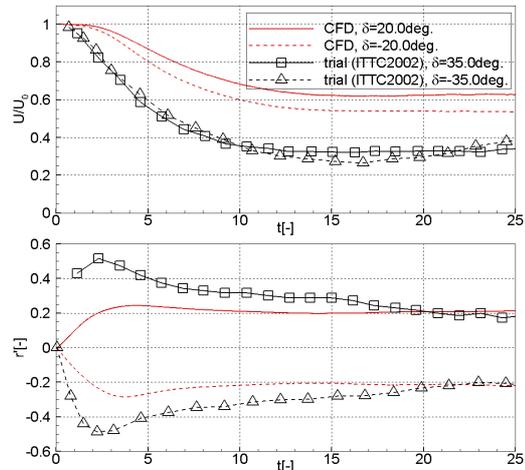


図7 ESSO OSAKA 定舵角旋回運動時における船速低下量および旋回角速度時系列 (CFD:  $\pm 20^\circ$ , 試運転:  $\pm 35^\circ$ )

表3に、zig-zag 運動計算結果のまとめを示す。図8に、10/10 zig-zag 運動時のYaw角・舵角および旋回角速度の時系列を示す。図9に、10/10 zig-zag 運動時の船速低下量およびドリフト角の時系列を示す。図10に、10/10 zig-zag 運動で  $+10^\circ$  から  $-10^\circ$  まで操舵する際の船尾周り流場を、第2回転不変量  $Q$  の  $Q=30$  等値面で示す。図11、図12および図13は、図8、図9および図10と同様であるが、操舵条件が 10/10 ではなく 20/20 である。

10/10 zig-zag 運動では、第1行き過ぎ角 (1<sup>st</sup> OSA) および操舵に対する船体応答時間

( $T_1^{st\ OS}$ ,  $T_2^{nd\ OS}$ )の計算結果は、試運転解析結果に比べ凡そ一致しているが、第2行き過ぎ角(2<sup>nd</sup> OSA)については、計算結果は試運転解析結果に比べ5°程度小さい値を示している。一方20/20 zig-zag運動では、1<sup>st</sup> OSAおよび2<sup>nd</sup> OSAの計算結果は試運転解析結果に非常に良く一致している。しかし、 $T_2^{nd\ OS}$ の計算結果は、試運転解析結果に比べ位相遅れが大きい。旋回角速度およびドリフト角の時系列については、10/10, 20/20 zig-zag運動計算結果は、試運転解析結果に比べ概ねその傾向を捉えている。しかし20/20 zig-zag運動ではYaw角時系列同様、旋回角速度にも試運転解析結果に対する位相遅れが目立った。船速低下量の時系列についても、計算結果は試運転解析結果の傾向を捉えることが出来ている。しかし、計算結果は試運転解析結果に比べ、船速低下量が一定となるまでに時間を要している。

Q=30等値面で示した船尾流場変化では、zig-zag運動および操舵に伴い、船尾には2種類の渦が存在していることが分かる。1つ目は図10, 図13中で“V1”と示している渦であり、船体運動そのものに由来すると考えられ、船体運動に追従している。2つ目は図10, 図13で“V2”と示している渦であり、操舵に伴い舵後方より発生している。これは、操舵およびプロペラが生じる旋回流によって生じる大規模な流れの剥離に由来していると考えられる。図10と図13を比較すれば、舵角が大きくなる-即ち10/10から20/20になると、時間進行に従ってV1とV2が結合し、より大きな渦が出来ていることが分かる。

以上の結果により、本研究ではURANS法を用いて船体の操縦性能を、操縦運動数学モデルに頼らず推定するコードを開発出来たことを示した。

表3 zig-zag運動計算結果のまとめ

10°/10° zig-zag				
	1 <sup>st</sup> OSA	$T_1^{st\ OS}$ [s]	2 <sup>nd</sup> OSA	$T_2^{nd\ OS}$ [s]
Trial	4.21°	3.40	13.34°	8.61
CFD	3.13°	3.94	8.19°	8.67
20°/20° zig-zag				
Trial	8.93°	3.26	13.25°	8.02
CFD	9.36°	4.29	13.66°	10.62

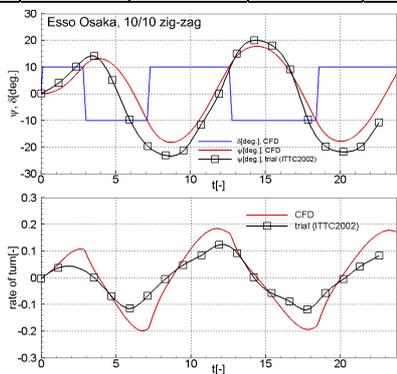


図8 ESSO OSAKA 10/10 zig-zag運動時におけるyaw角・舵角および旋回角速度時系列

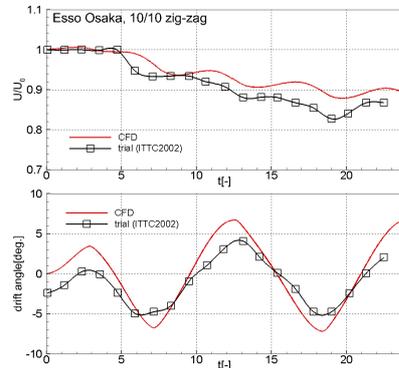


図9 ESSO OSAKA 10/10 zig-zag運動時における船速低下量およびドリフト角時系列

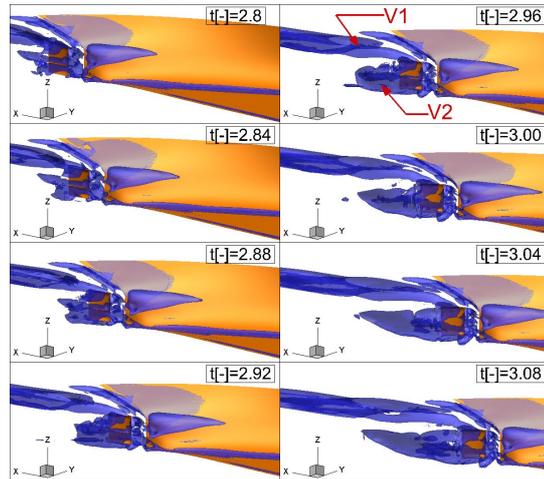


図10 ESSO OSAKA 10/10 zig-zag運動の操舵に伴う船尾流場の変化

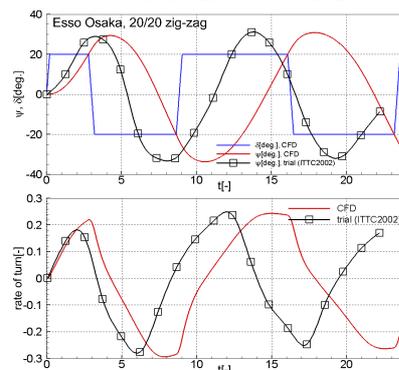


図11 ESSO OSAKA 20/20 zig-zag運動時におけるyaw角・舵角および旋回角速度時系列

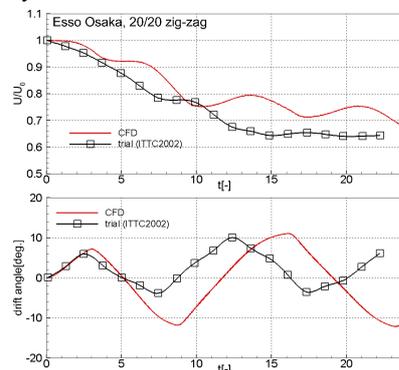


図12 ESSO OSAKA 20/20 zig-zag運動時における船速低下量およびドリフト角時系列

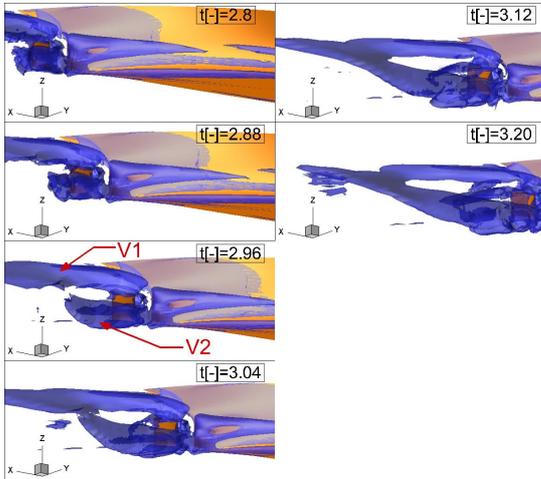


図 13 ESSO OSAKA 20/20 zig-zag 運動の操舵に伴う船尾流場の変化

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

1. Sakamoto N., Ohashi K. and Hirata N., 2012, Simulations of ship motions in waves by unstructured grid based RANS solver, 概要査読有り, Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Hydrodynamics (ICH2012), s24-1.
2. Sakamoto N., Kawanami Y. and Shotaro U., 2012, Investigations of design criteria for ships with split-stern by RANS, 査読無し, Proceedings of 15<sup>th</sup> Numerical Towing Tank Symposium, [https://www.uni-due.de/IST/ismt\\_nutt\\_s8](https://www.uni-due.de/IST/ismt_nutt_s8)
3. Sakamoto N. and Ohashi K., 2012, Viscous CFD simulations of DTMB model 5512 under pure yaw maneuvering motion, 査読無し, 日本船舶海洋工学会秋季講演会講演会論文集, pp.197-200.
4. Sakamoto N. and Ohashi K., 2012, Unsteady wake analysis for Series60 ( $C_B=0.6$ ) pitching and heaving in regular head seas by RANS, 査読無し, 第 26 回数値流体力学シンポジウム講演予稿集, Paper No.D09-2.
5. Sakamoto N. and Ohashi K., 2014, Development of URANS maneuvering simulator and its application to ESSO OSAKA, 査読無し, Proceedings of 17<sup>th</sup> Numerical Towing Tank Symposium, [https://www.uni-due.de/IST/ismt\\_nutt\\_s8](https://www.uni-due.de/IST/ismt_nutt_s8)(掲載予定)

〔学会発表〕(計 5 件)

1. Sakamoto N., Ohashi K. and Hirata N., 2012, Simulations of ship motions in waves by unstructured grid based RANS

solver, 10<sup>th</sup> International Conference on Hydrodynamics (ICH2012), Oct.1-4, St.Petersburg, Russia.

2. Sakamoto N., Kawanami Y. and Shotaro U., 2012, Investigations of design criteria for ships with split-stern by RANS, 15<sup>th</sup> Numerical Towing Tank Symposium, Oct.7-9, Cortona, Italy.
3. Sakamoto N. and Ohashi K., 2012, Viscous CFD simulations of DTMB model 5512 under pure yaw maneuvering motion, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, Nov.26-27, 千葉.
4. Sakamoto N. and Ohashi K., 2012, Unsteady wake analysis for Series60 ( $C_B=0.6$ ) pitching and heaving in regular head seas by RANS, 第 26 回数値流体力学シンポジウム, Dec.18-20, 東京.
5. Sakamoto N. and Ohashi K., 2014, Development of URANS maneuvering simulator and its application to ESSO OSAKA, 17<sup>th</sup> Numerical Towing Tank Symposium, Sept.28-30, Marstrand, Sweden (発表予定).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕  
該当無し

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

坂本 信晶 (SAKAMOTO, Nobuaki)  
(独)海上技術安全研究所 流体設計系主任研究員  
研究者番号: 80550003

### (2)研究分担者

該当無し

### (3)連携研究者

該当無し

### (4)研究協力者

大橋 訓英 (OHASHI, Kunihide)  
(独)海上技術安全研究所 流体性能評価系主任研究員