

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360414

研究課題名（和文） 船舶の非定常操縦流体力および操縦シミュレーションの研究

研究課題名（英文） Calculation of Un-steady Hydrodynamic Forces by CFD and Simulation with ship manoeuvring motion.

研究代表者

芳村 康男 (YOSHIMURA YASUO)

北海道大学・大学院水産科学研究院・教授

50322847

研究成果の概要：

船の操縦運動は航空機に比べて相対的に前進速度が低速であることから、操縦運動中の流体力は船の運動履歴の影響を少なからず受け、非定常な流体力が存在する。これが、操縦運動の推定を困難にする要因にもなっており、各国が新しい推定法の構築を急いでいる。本研究では、操縦運動中の複雑な流体力を実験的に明らかにする一方、ナビエ・ストークス方程式の数値解法を行う数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)を操縦運動中に適用することを試みた。その結果これまで、CFD は操縦運動中の定常流体力の推定にとどまっていたが、本研究によって、非定常流体力を含む操縦運動流体力の複雑な流体力の推定を可能にし、船舶操縦運動をより精度よく推定できる手法を構築することができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2007年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：船舶操縦運動の推定

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：船舶性能・構造・建造・艤装・計画・設計

1. 研究開始当初の背景

船の操縦性能については、昨今の海難事故、特に大型タンカーやケミカル船の事故は、船そのものの損傷より、大規模な火災や原油流出による海洋汚染といった、莫大な二次災害が社会的な大問題へと発展するに至り、船舶の操縦性について明確な性能基準が必要との要請が国際的に高まり、1993年IMO（国際海事機関）で暫定操縦性基準:A751(18)が採択された。その後、2002年に改訂されて正式な

操縦性基準として国際的に確立したが、この基準を達成するには船舶の設計段階から操縦性能を正確に推定する必要がある。今日、多くは模型実験等による定常流体力をベースに操縦運動を推定しているのが現状である。しかし、船の操縦運動は航空機に比べて相対的に前進速度が低速であること、及びタンカーやバルカーといった船型では船体が肥大化しており、流体力には船の運動履歴の影響を少なからず受け、非定常な流体力が存

在する。これが、操縦運動の推定を困難にする要因にもなっており、各国が新しい推定法の構築を急いでいる。

2. 研究の目的

船の波浪中の流体力の大部分はポテンシャル力であり、これらの非定常流体力とその運動推定は近年急速に発展してきた数値流体力学(CFD)によってもある程度、推定が可能になりつつある。しかし、操縦運動中の流体力の基本は旋回・斜航による揚力であり、流体の粘性が問題になる。この場合の研究は乱流モデルの扱いが鍵になる他、操縦運動することによる船体と流体の移動格子の取り扱いが重要になる。本研究ではこの点を重点的に攻めることによって、限られた人材・既存の設備を効率的に活用し、非定常流体力を含む操縦運動中の流体力を推定する手法を世界に先駆けて行うこととした。また、これらは模型実験によってバリデーションを行って、操縦運動全体の推定精度を高め、高度で信頼性のある操縦運動の推定手法を確立することが本研究の目的である。

なお、本研究では、その適用例として、ITTC（国際試験水槽会議）で取り上げられたタンカー船型2隻とコンテナ船型1隻を含む合計4隻の船型を供試模型船として選定した。これらの船型は、全て最新の船型であり、世界各国の研究所で性能推定精度を競うために特別に設計され、詳細な船型データが公開されたものである。実際、これらの船型の操縦運動の推定結果について国際シンポジウム(SIMMAN-2008)が開催され、このシンポジウムでは流体力の推定データ、およびCFDを使った操縦性能推定についての世界各国からの研究報告が行われ、その場で各機関の操縦性能推定に関する評価が行われた。わが国からは、まだ研究途上であったものの、この研究成果の一部を提出した結果、最も精度高い推定結果と評価され、わが国のこの分野の技術力の高さを示すことができたことを付記する。

3. 研究の方法

(1) 模型実験による操縦流体力の特定と従来法による操縦運動の推定

① 拘束模型試験

本研究では、前述の国際試験水槽会議で取り上げられたタンカー船型2隻とコンテナ船型1隻コンテナ船型を対象として拘束模型実験を実施して、CFDで推定する流体特性を評価するための基礎データをまず収集する。供試模型船の要目を表3-1に示す。また本研究で製作した模型船をFig.3-1に示す。拘束模型試験は主に本研究の分担者の所属する海上技術安全研究所の高性能の海洋性能水槽（角水槽）で実施する。

Table 3-1 Principal particulars of ship models

	KVLCC1	KVLCC2	KCS
scale	1/110	1/110	1/75.5
L_{pp} (=L) m	2.9091	2.9091	3.0464
B (molded) m	0.5273	0.5273	0.4265
D (molded) m	0.1891	0.1891	0.1430
Disp. volume m ³	0.2350	0.2349	0.1209
m kg	235.0	234.9	120.9
x_G (=Lcb) m	0.1009	0.1018	-0.0451
D_p m	0.0896	0.0896	0.1046
A_R/Ld	1/59.29	1/59.29	1/54.86
aspect ratio	2.224	2.224	2.164



Fig.3-1 Photographs of ship models

操縦流体力の計測においては、拘束運動を正確に与え、かつ与えた運動を正確に計測する。また、拘束運動は動的な運動になることから計測された力には流体力だけでなく、模型船の慣性力その他、検力部分の慣性力も含まれる。これらを正確に差引き、純粋の操縦流体力を抽出する。

計測された操縦流体力特性は、後述2)のCFDコードによる推定計算の妥当性、精度検定に資することはもちろんであるが、これらの模型実験データを国際試験水槽会議、国際シンポジウム(SIMMAN2008)に提供することとし、この研究分野におけるわが国の計測技術の高さをアピールする。

② 計測流体力を用いた操縦運動推定

ここでは従来のMMGモデルの考え方に基いて旋回試験・Z試験などの代表的な操縦運動をシミュレーション計算で推定する。また、この推定結果は上記の国際シンポジウムの推定コンペティションに参加投稿する。

(2) 非定常CFDコードの開発研究

① 計算時間の短縮を図るためには構造格子を用いた計算コードを使用するのが望ましい。そこで、操縦運動時に必要となる複雑形状を構造格子で取扱うための格子生成法について検討を行う。

② 定常拘束模型試験に本コードを適用して、有効性を確認する。

③ 複雑な操縦運動をシミュレーションするために、上記 CFD コードに移動格子法や dual time step 法を適用することで非定常 CFD 計算コードの開発を行う。

④ 自由航走による操縦運動をシミュレーションするために、上記 CFD コードと 3 自由度の操縦運動方程式のカップリングさせることで自由航走用 CFD コードの開発を行う。

4. 研究成果

(1) 模型実験による操縦流体力の特定と従来法による操縦運動の推定

① 拘束模型試験

拘束模型試験は、定常運動を与える CMT(Circular Motion Test) と PMM(Planar Motion Mechanism) を実施した。計測された力には流体力だけでなく、模型船の慣性力その他、検力部分の慣性力も含まれる。後者はわずかであるとして放置されてきたが、本研究では模型船の重心 x_G 、拘束位置 x_m のずれなどを考慮し正しくこれらの力を以下の理論式を設定して控除した。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_C + m\dot{x}_m - mv_m r_m + m(x_m - x_G)\dot{r}_m^2 \\ Y &= Y_C + m\{\dot{x}_m - (x_m - x_G)\dot{x}_m\} + mu_m r_m \\ N &= N_C + x_m[Y_C + m\{\dot{x}_m - (x_m - x_G)\dot{x}_m\}] \\ &\quad + \{I_{zz} + m(x_m - x_G)^2\}\dot{x}_m - m(x_m - x_G)\dot{x}_m \\ &\quad + mx_G u_m r_m \end{aligned} \right\}$$

ただし、 (X_C, Y_C, N_C) : 計測力

(X, Y, N) : 模型船に作用した流体力

(u_m, v_m, r_m) : 拘束運動

m, I_{zz} : 質量と慣性二次モーメント

この内、CMT で計測された定常流体力については、船体・舵・プロペラの力に分離し、解析を行った。

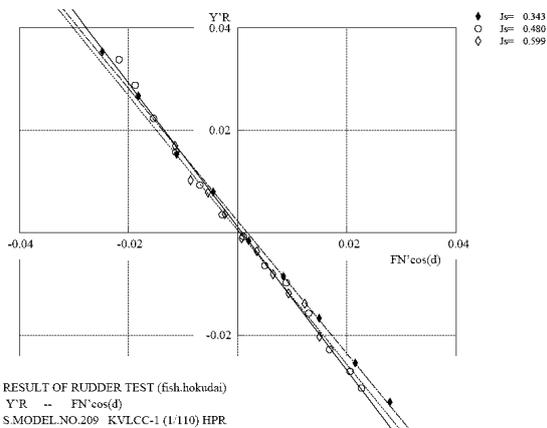


Fig.4-1 Comparisons of measured and fitted hull force components (VLCC1)

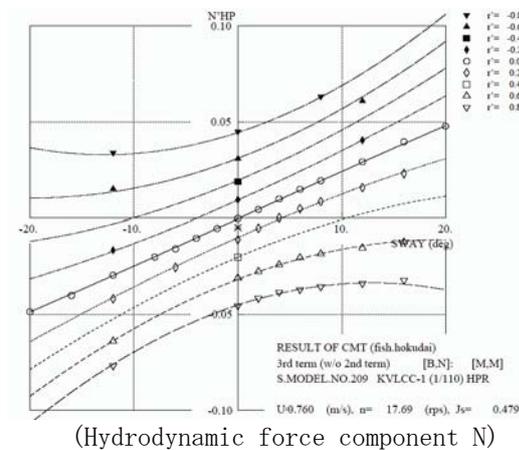
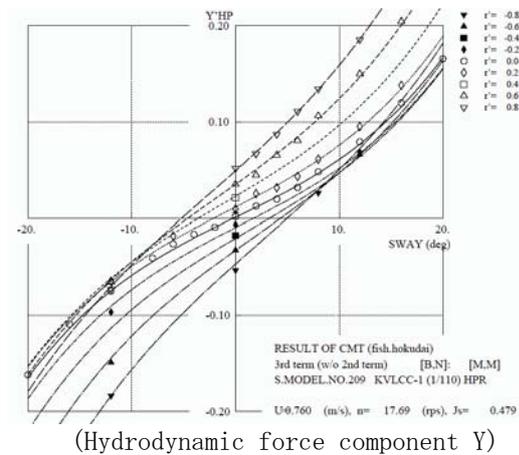
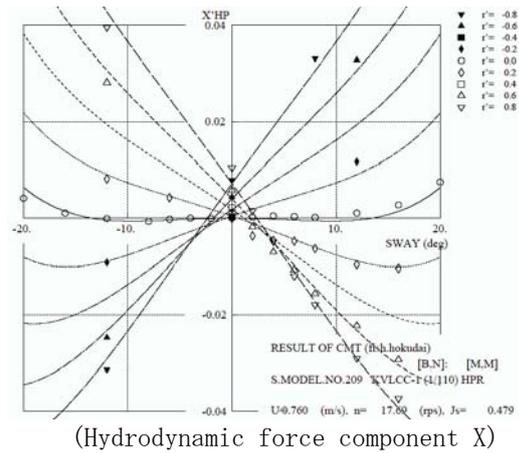


Fig. 4-2 An example of the comparisons of measured and fitted rudder force components (VLCC1)

計測された舵の力を Fig. 4-1 に、船体の定常流体力の一例を Fig. 4-2 に示す。

(2) 計測流体力を用いた操縦運動推定

上記の計測された流体力を用いて船の操縦運動をシミュレーション計算で推定する。運動方程式は次式であり、各式の右辺が操縦流体力である。

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{x}_G - v_r - x_G r^2) &= X \\ m(\dot{y}_G + x_G \dot{r} + u_r) &= Y \\ (I_{zz} + m x_G^2) \dot{r} + m x_G (\dot{x}_G + u_r) &= N \end{aligned} \right\}$$

計測した操縦運動の一例を Fig. 4.3 に示す。◇はオランダの研究所 MARIN で実施され、国際シンポジウム (SIMMAN2008) で公表されたものであるが、シミュレーション計算結果は実測の操縦運動を比較的精度良く推定できたことを示している。

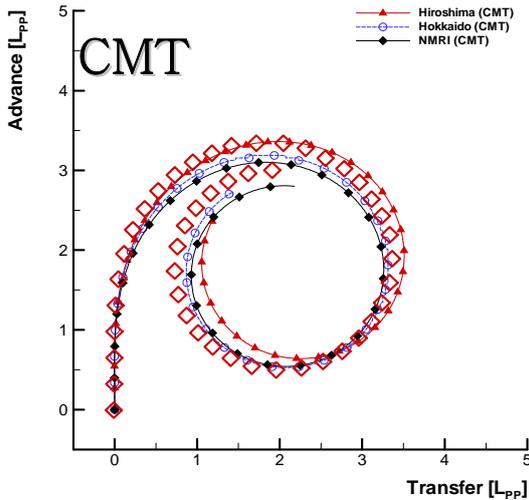


Fig. 4-3 Predicted turning motion of tanker ship (VLCC1)

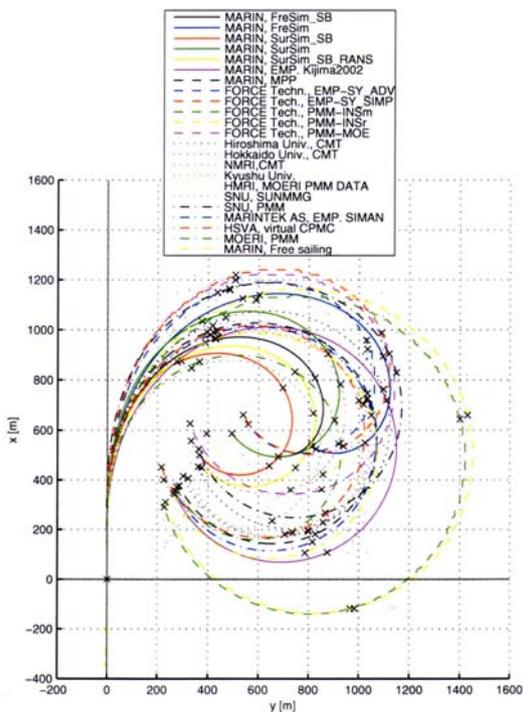


Fig. 4-4 Predicted turning motions of KVLCC1

これに対して各国大学・研究機関の推定結果は Fig. 4.4 に示すように、大きくばらついており、わが国の船舶操縦性推定レベルの高いことが確認できた。

(3) 非定常 CFD コードの開発研究

① 格子生成法について

操縦運動時の大舵角に構造格子を適用するため、格子形状が最も厳しくなる舵の前・後縁や、上・下端付近での格子生成を工夫することで、舵角 24 度までの格子生成法を開発した。

② 定常拘束模型試験への適用

計算コードの操縦運動への有効性を確認するため、定常旋回試験（無次元角速度 $r' = -0.3$ ）で得られた操縦流体力との比較を行った。その結果を Fig. 4-5, 4-6 に示す。

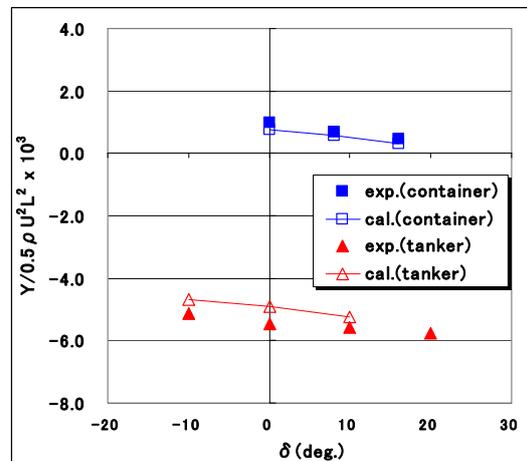


Fig. 4-5 comparison of sway force

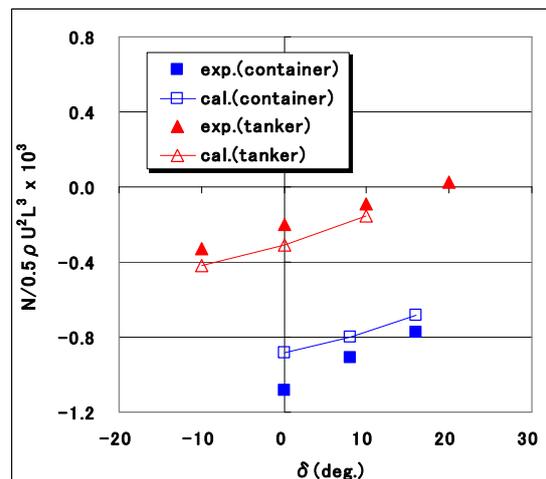


Fig. 4-6 Comparison of yaw moment

操縦運動を推定する上で重要となる横力・舵直圧力については良好な結果が得ることが出来たが、回頭モーメントについては若干の誤差が生じている。本コードでは自由表面が操縦運動に及ぼす影響は少ないと仮定した 2

重モデルを適用していることに起因すると考えられるが、実用上は問題ないと考えられるので本計算コードの定常運動への有効性が確認できた。

③ 非定常CFDコードの開発

PMM 試験や z 操舵試験などの複雑な操縦運動をシミュレーションするために、船体を含む計算領域全体を運動させる移動格子法の導入を行った。また、既存のCFDコードでは圧力の解法に擬似圧縮性法を適用しており、流速が連続の式を満足した段階で圧力が求まる。そのため、計算中で連続の式を満足させるために、繰返し計算が行っている。開発している非定常計算用CFDコードでも擬似圧縮性を適応するため、各時間ステップで繰返し計算を行う必要となる。そこで、非定常計算への拡張では実時間に擬似時間を付加した dual time step 法を適用した。これにより非定常CFDコードの開発を行った。

開発したCFDコードでのPMM試験結果の一例を Fig. 4-7~4. 11 に示す。計算はPMM試験のうちの pure sway モードで、タンカー模型の船体単独状態である。

実験結果と比較すると最大・最小値に多少の誤差が確認できるが、実験結果の傾向を良く捕らえており本計算コードの有効性は確認された。

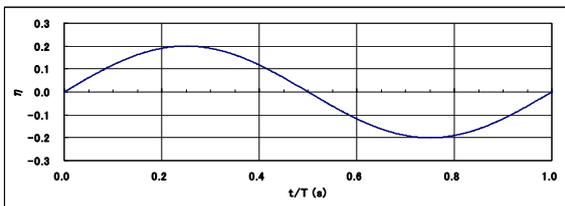


Fig. 4-7 Transverse position

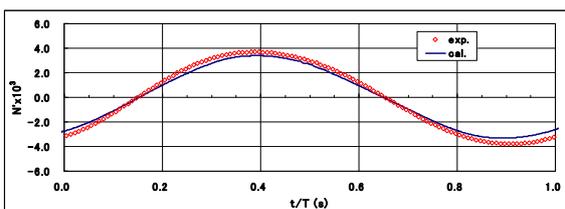


Fig. 4-8 Sway velocity v (m/s) and acceleration dy/dt (m/s^2)

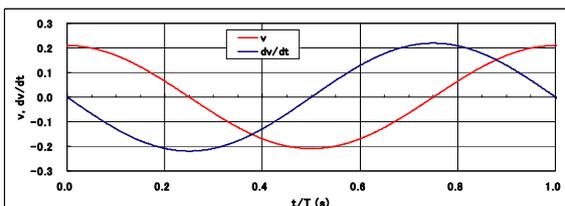


Fig. 4-9 Comparison of sway force

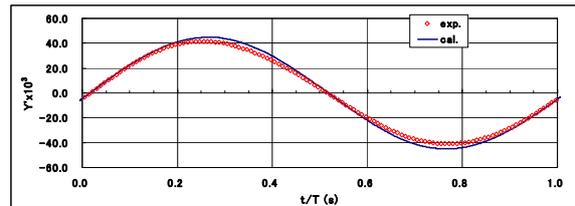


Fig. 4-10 Comparison of yaw moment

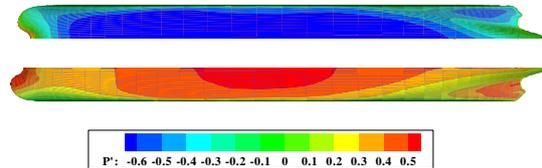


Fig. 4-11 Pressure distribution ($t/T = 0.25$)

④ 自由航走用CFDコードの開発

より現実的な操縦運動である旋回運動や z 操舵試験などの水平面内の自由航走をシミュレーションするための拡張を行った。自由航走をシミュレーションする上で問題となるのは、操舵する際に変形する舵近傍の計算格子の取り扱いである。今回は事前に操舵に対応した計算格子を準備しておき、時々刻々と計算格子を変更していく方法を適用した。

自由航走は水平面内の操縦運動と仮定して、前後・左右、回頭モーメントの3自由度の運動方程式とする。運動方程式の外力項はCFD計算で推定した流体力を用いることで、ナビエ・ストークス方程式と運動方程式のカップリングを行った。これにより自由航走用CFDコードの開発を行った。

開発したCFDコードでの旋回試験結果の一例を Fig. 4-12~4. 14 に示す。計算はコンテナ船型の舵角が 10° での旋回試験である。

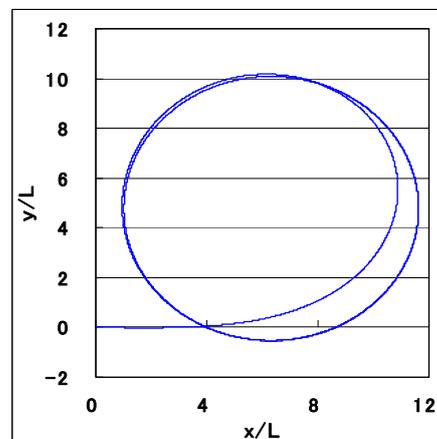


Fig. 4-12 Trajectory ($\delta = 10$ deg.)

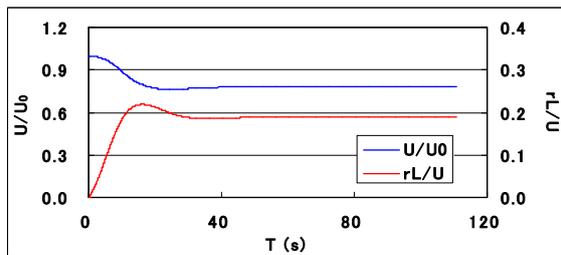


Fig.4-13 Ship speed (U/U_0) and angler velocity (r')

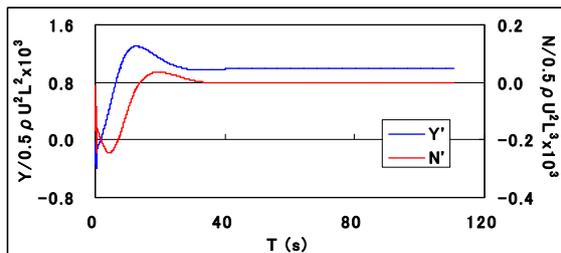


Fig.4-14 Sway force (Y') and Yaw moment (N')

他の手段で推定した推定値とほぼ同等な値を示しており、本コードの有効性が確認された。

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 2 件)

1) Hino, T., Hirata, N., Miyazaki, H., Ohashi, K. : Ship Performance Evaluations using CFD, Proc. 3rd PAMMES and AMEC2008, (2008), p. 89-98. (査読あり)

2) Ueno, M., Yoshimura, Y., Tsukada, Y., Miyazaki, H. : Circular Motion Test and Uncertainty Analysis for Ship Manoeuvrability, *Journal of Marine Science and Technology* (accepted and in printing, 査読あり)

[学会発表] (計 4 件)

1) Miyazaki, H. : Numerical Study of Planar Motion Mechanism Test (Pure Sway Mode), SIMMAN2008 Workshop, (2008年4月16日, Frederiksdal(Copenhagen)).

2) Miyazaki, H. : Uncertainty Analysis for the Circular Motion Test of Model Ships, SIMMAN2008 Workshop, (2008年4月15日, Frederiksdal(Copenhagen)).

3) Yoshimura, Y. : Analysis of Steady Hydrodynamic Force Components and Prediction of Manoeuvring Ship Motion with KVLCC1/2 and KCS, SIMMAN2008 Workshop,

(2008年4月15日, Frederiksdal(Copenhagen)).

4) Yoshimura, Y. : Effects of Rudder and Propeller on Hull Force Derivatives with KVLCC1 and KVLCC2, SIMMAN2008 Workshop, (2008年4月15日, Frederiksdal(Copenhagen)).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芳村 康男 (YOSHIMURA YASUO)

北海道大学・大学院水産科学研究院・教授)

研究者番号：50322847

(2) 研究分担者

前川 和義 (MAEKAWA KAZUYOSHI)

北海道大学・大学院水産科学研究院・助教

研究者番号：80250504

日野 孝則 (HINO TAKANORI)

海上技術安全研究所・CFD 研究開発センター・研究員)

研究者番号：60373429

上野 道雄 (UENO MICHIO)

海上技術安全研究所・流体部門運動性能研究グループ・研究員

研究者番号：60358405

宮崎 英樹 (宮崎 英樹)

海上技術安全研究所・CFD 研究開発センター・研究員

研究者番号：10415797

原口 富博 (HARAGUCHI TOMIHIRO)

海上技術安全研究所・流体部門運動性能研究グループ・研究員

研究者番号：60360715

塚田 吉昭 (TSUKADA YOSHIAKI)

海上技術安全研究所・流体部門運動性能研究グループ・研究員

研究者番号：90425752

(3) 連携研究者

なし