

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360353

研究課題名(和文)横傾斜を含む4自由度操縦運動推定法の研究

研究課題名(英文)Mathematical model and prediction of 4-DOF roll coupled manoeuvring ship motion

研究代表者

芳村 康男 (YOSHIMURA, YASUO)

北海道大学・水産科学研究科(研究院)・特任教授

研究者番号：50322847

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では4隻の模型船を製作し、自由航走模型実験によって、操舵・旋回に伴う横傾斜が操縦運動に及ぼす影響を明らかにした。その結果、復原力が弱くまた船速の大きい船では旋回に伴う横傾斜が大きく、これにより急速な旋回運動と針路安定性の低下を明らかにした。続いて、横傾斜をパラメータに加えた拘束模型実験を行うことによって横傾斜を伴う場合の操縦流体力を明らかにし、これらのデータを基に横傾斜を含めた操縦運動を推定可能な新しい数学モデルを確立した。また、実用的な観点から、使い易い簡易数学モデルについても検討を行った。以上の研究成果は日本船舶海洋工学会、日本航海学会をはじめ、海外のシンポジウムなどで公表を行った。

研究成果の概要(英文)：Mathematical model for ship manoeuvrability has been investigated within 3-DOF; yaw-sway-surge. However the effect of a roll motion on the manoeuvrability is considerably strong for a high or medium-speed ship, which often causes the serious marine traffic accidents. In this study, free-running model tests have been conducted with 4 ship models, and then the effects of a roll motion are clarified. Then, the captive model tests have been carried out with these ship models, and then the hydrodynamic characteristics are clarified due to the roll motion. Using these hydrodynamic data, 4-DOF mathematical model is formulated and they are also validated by the simulations of typical manoeuvring motions. Through this study, it is found that the larger roll motion that is caused by the small GM or high ship's speed more strongly affects on the course stability as well as turning motion. These scientific results are presented and published both in the domestic and international conferences.

研究分野：船舶操縦運動

キーワード：船舶工学 流体工学 船体運動 操縦性能

### 1. 研究開始当初の背景

操舵による旋回運動が横傾斜に及ぼす影響については、操舵による転覆事故などの事例があり、多くの研究がある。しかし、横傾斜が操縦性能に及ぼす影響についての研究は数少なく、またその現象やメカニズムは明確でない。

高速コンテナ船、フェリー、Ro/Ro 船などでは、横傾斜を伴うことによって操船困難が生じることがしばしば指摘されている。操舵だけでなく波浪によって横傾斜すると、船の針路安定性が低下し、急速な旋回運動が発生した事例も報告されている。下図は 2009 年 11 月に伊勢湾沖で斜め追い波に遭遇して大角度の横傾斜が発生し、荷崩れによって船体が大きく傾斜し横倒しとなった事故である。船の航跡は Fig.1 に示すように、横傾斜した直後に急速な左旋回状態となり、船の旋回の遠心力で荷崩れを更に加速したと考えられる。しかし、これらの力学的メカニズムが明らかでなく、運輸事故調査委員会の報告書ではこの現象については触れられていない。

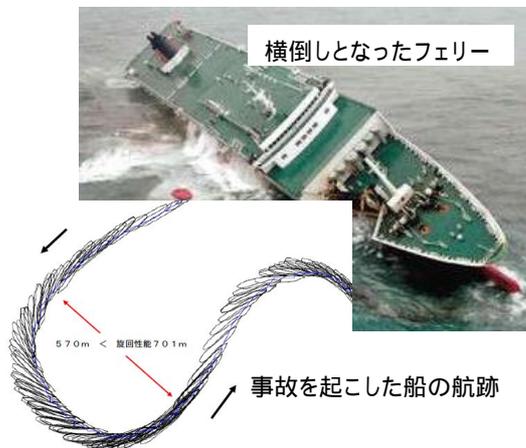


Fig.1 フェリーの事故

一方、船の操縦運動の予測や設計法は、タンカー、バルカーなどの肥大船型に主眼を置いて研究され、こうした船舶では、横傾斜は小さく、平面の3自由度(前進・横流れ・旋回)で取り扱われてきた。今日の操縦運動の研究も多くは、この運動に限定されており、横傾斜を含めた操縦運動の力学を基本から構築し直す必要がある。

### 2. 研究の目的

横傾斜が操縦性能に及ぼす影響についての既往研究や実験例は少なく、またその現象やメカニズムも明確でない。

本研究では、船の操縦運動を、横傾斜を含めた4自由度に拡張して取扱う方法を研究し、横傾斜を含めた操縦運動の新しい数学モデルを構築し、操縦運動の予測法を確立して提案することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 自走模型試験による操縦性能の把握

製作した4隻の供試模型船について、GM(復原力の大きさ)および船速を変えて、自由航走模型実験を行った。この実験において、復原力を小さくすると模型船が転覆する危険性がある。このため模型船や搭載する各種の実験計測機器を小型化して防水を容易にする必要がある。本研究ではこれらの実験計測・制御装置についても研究開発を行った。供試模型船の主要目を Table 1 に、また模型船の形状を Fig.2 に示す。模型船の長さは2m前後で排水量が約 50kg であり、従来の自航模型船サイズの 1/5 程度の小型化を実現した。

Table 1 供試模型船の主要目

	KCS コ ンテナ船	2軸1舵 フェリー	旋網 漁船	漁業調査 船
scale	1/105	1/64	1/20	
$L_{PP}(=L)$ m	2.190	2.344	1.850	1.447
$B$ m	0.307	0.356	0.395	0.342
$d$ m	0.103	0.100	0.145	0.137
トリム m	0.000	0.000	0.000	0.000
排水容積 $m^3$	0.045	0.044	0.059	0.046
$x_G$ m	-0.032	-0.100	-0.092	-0.029
$AR/Ld$	1/53.6	1/46.7	1/26.0	1/25.6
$Dp$ m	0.076	0.076	0.160	0.100

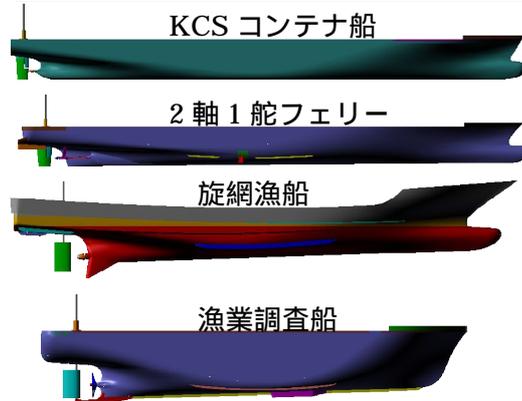


Fig.2 供試模型船

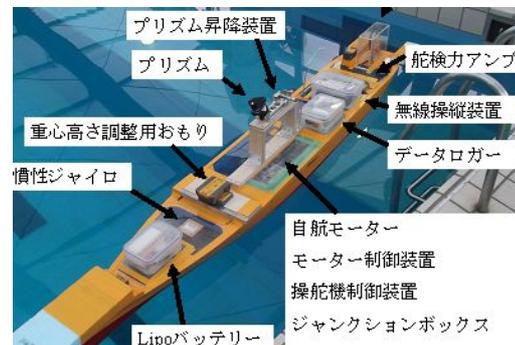


Fig.3 自由航走模型実験の写真

#### (2) 拘束模型実験による操縦流体力の把握

横傾斜した状態で船が旋回・斜航、および操舵した場合の操縦流体力を、各模型船について拘束模型実験を実施して計測した。流体

力の計測には本研究用に製作した精密4分力計、プロペラ推力・トルク検出器、および舵力検出装置を使用した。実験中の写真をFig.4に示す。

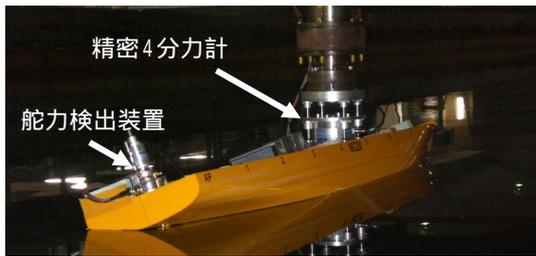


Fig.4 拘束模型実験の写真

### (3) 4自由度操縦運動数学モデルの開発

横傾斜角・旋回角速度・斜航角・舵角・プロペラ回転数を物理変数として計測された操縦流体力を解析し、これらをパラメータにした数学モデルの開発を行った。また、この数学モデルを用いて各種の操縦運動のシミュレーションを実施し、上記(1)で計測した実際の操縦運動と比較検討することによって数学モデルのバリデーションやシミュレーションの妥当性の検証を行った。

### (4) 実用的数学モデルの検討

前述の操縦運動数学モデルはかなり複雑な構造になっている。船舶設計段階において操縦性能を推定するには、数学モデルが簡潔で数学モデルの係数も詳細な模型実験を行うことなく容易に推定できることが望ましい。こうした観点から実用的な操縦運動数学モデルの検討を行った。

## 4. 研究成果

前述の研究方法で示した項目について以下、順に成果を述べる。

### (1) 自走模型試験による操縦性能の把握

自由航走模型実験の結果から、各模型船共に以下のことが明らかになった。

船が横傾斜すると、直進できず左右いずれかに回頭しはじめる。フェリーやコンテナ船型では、直進するための平均当舵は横傾斜させた方向となり、トロール漁船や漁業調査船では逆に横傾斜角と反対方向の当舵が必要になる。

最大舵角  $35^\circ$  の旋回航跡は Fig.5(a)に示すように GM(横復原力)が低く、また船速が早くなると旋回による横傾斜角が増大し、急速に旋回しやすくなって旋回航跡が小さくなる。

左右に小舵角をとって蛇行する Z 試験のオーバーシュート(回頭角の行き過ぎ)は Fig.5(b)に示すように、GM(横復原力)が小さく船速が早い場合は横傾斜が大きくなって、船の針路安定性が低下する。

以上の実験結果から、船の操縦性能は横傾斜運動と密接な関係があり、GM(横復原力)が低く、また船速が早い場合は旋回による横傾斜が大きくなり、操船が困難になる現象を確認した。

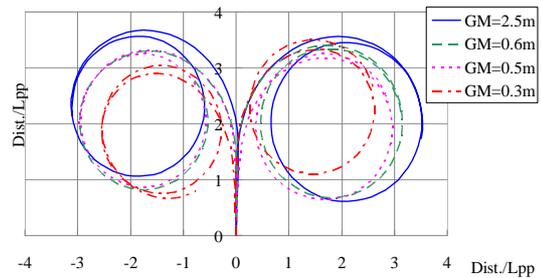


Fig.5(a) GMの違いによる旋回航跡の比較 (KCS コンテナ船の例)

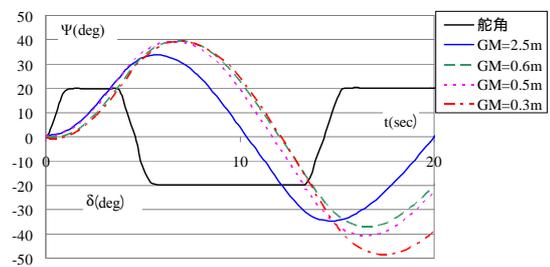


Fig.5(b) GMの違いによる Z 試験の比較 (KCS コンテナ船の例)

(2) 拘束模型実験による操縦流体力の把握  
拘束模型実験を詳細に解析した結果、以下のことが明らかになった。

直進状態で横傾斜角の大きさに比例した流体力係数が Fig.6(a)のように存在し、これが直進時の平均当舵を発生させる要因になる。船首バルブを有するコンテナ船、フェリー、漁船の模型船ではいずれも横傾斜した方向に当舵が必要になることを示した。これに対して、船首バルブの無い漁業調査船では逆の特性が認められた。

旋回・斜航による流体力微係数が横傾斜角によって変化する。これらの変化が横傾斜によって旋回性能や針路安定性が変化する要因になる。旋回・斜航による線形の流体力微係数の変化を Fig.6(b)に示す。横傾斜角の大きさの絶対値で斜航角の旋回モーメント微係数が増加し、旋回の微係数が減少することを示し、その結果、船の針路安定が横傾斜角の絶対値で低下することが明らかになった。

舵・プロペラの力は種々の干渉力を含めて斜航角の影響が少ない。

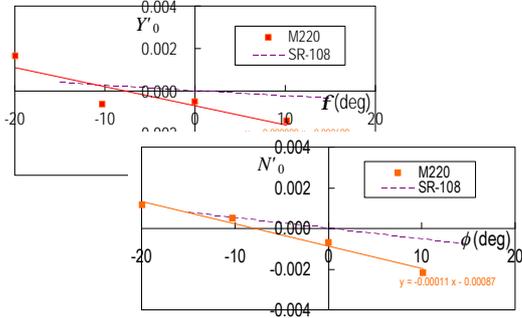


Fig.6(a) 直進時の流体力係数の横傾斜角変化 (KCS コンテナ船の例)

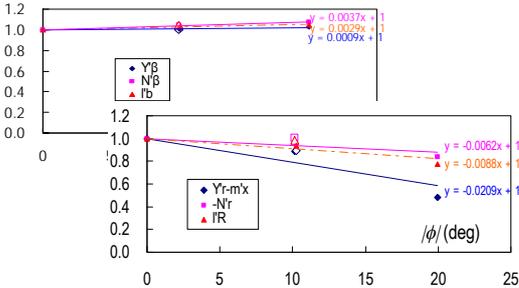


Fig.6(b) 線形操縦微係数の横傾斜角変化 (KCS コンテナ船の例)

### (3) 4自由度操縦運動数学モデルの開発 数学モデル

以上の流体力計測結果を考慮して4自由度操縦運動数学モデルを以下のように構築した。

運動方程式は(1)式であり、各式の右辺が操縦流体力である。

$$\left. \begin{aligned} (m+m_x)\dot{u}_G - (m+m_y)v_G r_G &= X_S \\ (m+m_y)\dot{v}_G + (m+m_x)u_G r_G &= Y_S \\ (I_{zz}+J_{zz})\dot{r}_G &= N_S - x_G Y_S \\ (I_{xx}+J_{xx})\dot{\phi}_G - z_H(m_y \dot{v}_G + m_x u_G r_G) &= K_S \end{aligned} \right\} (1)$$

ただし、 $u_G, v_G, r_G, \phi_G$ は船体重心における速度成分と横傾斜角を、また  $X_S, Y_S, N_S, K_S$ は船体中央の重心高さにおける定常流体力成分を表す。ここに、右辺の定常流体力は船体(H)、舵(R)、プロペラ(P)に分離して次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} X_S &= X_H + X_R + X_P \\ Y_S &= Y_H + Y_R \\ N_S &= N_H + N_R \\ K_S &= K_H + K_R \end{aligned} \right\} (2)$$

船体の流体力は、横傾斜による流体力特性を考慮して次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} X_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\ &\times \left\{ \begin{aligned} &X'_0(1+c_{x0}|\phi|) + X'_{\beta\phi}\beta\phi + X'_{\phi}r'\phi \\ &+ X'_{\beta\beta}(1+c_{x\beta\beta}|\phi|)\beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y)(1+c_{x\beta r}|\phi|)\beta r' \\ &+ X'_{rr}(1+c_{xrr}|\phi|)r'^2 + X'_{\beta\beta\beta}(1+c_{x\beta\beta\beta}|\phi|)\beta^3 \\ &+ X'_{\beta r r}(1+c_{x\beta r r}|\phi|)\beta r'^2 + X'_{rrr}(1+c_{xrrr}|\phi|)r'^3 \end{aligned} \right\} \\ Y_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\ &\times \left\{ \begin{aligned} &Y'_\phi\phi + Y'_\beta(1+c_{y\beta}|\phi|)\beta + (Y'_r - m'_x)(1+c_{yr}|\phi|)r' \\ &+ Y'_{\beta\beta\phi}\beta^2\phi + Y'_{\beta r}\beta r'\phi + Y'_{rr}r'^2\phi \\ &+ Y'_{\beta\beta\beta}(1+c_{y\beta\beta\beta}|\phi|)\beta^3 + Y'_{\beta\beta r}(1+c_{y\beta\beta r}|\phi|)\beta^2 r' \\ &+ Y'_{\beta r r}(1+c_{y\beta r r}|\phi|)\beta r'^2 + Y'_{rrr}(1+c_{yrrr}|\phi|)r'^3 \end{aligned} \right\} \\ N_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\ &\times \left\{ \begin{aligned} &N'_\phi\phi + N'_\beta(1+c_{n\beta}|\phi|)\beta + N'_r(1+c_{nr}|\phi|)r' \\ &+ N'_{\beta\beta\phi}\beta^2\phi + N'_{\beta r\phi}\beta r'\phi + N'_{rr\phi}\beta r'^2\phi \\ &+ N'_{\beta\beta\beta}(1+c_{n\beta\beta\beta}|\phi|)\beta^3 + N'_{\beta\beta r}(1+c_{n\beta\beta r}|\phi|)\beta^2 r' \\ &+ N'_{\beta r r}(1+c_{n\beta r r}|\phi|)\beta r'^2 + N'_{rrr}(1+c_{nr r r}|\phi|)r'^3 \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} (3)$$

$K_H$ は見掛けの横力の作用位置  $z_H$  を用いて次式で表す。

$$K_H = -z_H Y_H - B_{44}\dot{\phi} - C_{44}\phi \quad (4)$$

舵・プロペラの流体力モデルについては、横傾斜の影響がほとんどないことが実験で確認できたので、従来の3自由度運動の数学モデルに横傾斜角の修正を加えて次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} X_R &= -(1-t_r)\left(\frac{\rho}{2} L d U^2\right) F'_N \sin\delta \cos\phi \\ Y_R &= -(1+a_H)\left(\frac{\rho}{2} L d U^2\right) F'_N \cos\delta \cos\phi \\ N_R &= -(x'_R + a_H x'_H)\left(\frac{\rho}{2} L^2 d U^2\right) F'_N \cos\delta \cos\phi \\ K_R &= -z_R Y_R \end{aligned} \right\} (5)$$

### シミュレーションによる数学モデルの検証

前述の数学モデルを用いて横傾斜を含めた4自由度の操縦運動を計算し、(1)の自由航走模型試験結果と比較して操縦運動シミュレーション計算による理論推定の妥当性を確認した。

#### i) 旋回性能

コンテナ船の舵角  $35^\circ$  旋回航跡について、自由航走模型試験とシミュレーションの比較を Fig.7(a)に示す。計算結果は曲線で示している。これより、シミュレーションによる計算結果は GM の減少や船速の増加によって横傾斜が大きくなると旋回圏が小さくなって旋回性能が強くなり、自由航走模型試験とも良い一致が確認できた。

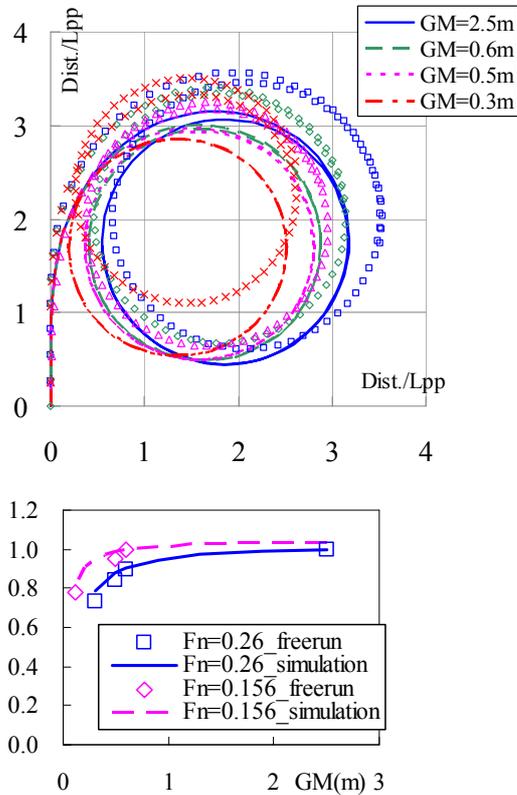


Fig.7(a) シミュレーションと実測の比較  
(KCS コンテナ船の旋回航跡)

ii) 針路安定性

Z 試験の第一オーバーシュート角(OVS)のシミュレーション結果を Fig.7(b)に示す。この比較から、GM の減少や Fn の増加によって横傾斜が大きくなって、第一オーバーシュート角が大きくなり、針路安定性が低下し、自由航走模型試験との一致が確認できた。

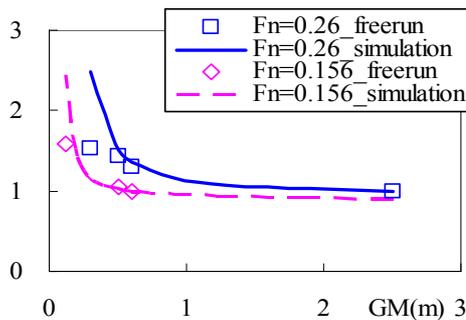


Fig.7(b) シミュレーションと実測の比較  
(KCS コンテナ船の Z 試験の OVS)

(4) 実用的数学モデルの検討

先の 4 自由度操縦運動数学モデルの中で、船体流体力モデルが複雑になっていた。これをどこまで簡略化可能かの検討を行った。その結果、(6)式で実用的に十分な精度で横傾斜を含む操縦運動が推定できることを確認した。

$$\begin{aligned}
 X_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\
 &\times \left\{ X'_0 + X'_{\beta\phi} \beta \phi + X'_{r\phi} r' \phi \right. \\
 &\quad \left. + X'_{\beta\beta} \beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' + X'_{rr} r'^2 + X'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \right\} \\
 Y_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\
 &\times \left\{ Y'_\phi + Y'_\beta (1 + c_{y\beta} |\phi|) \beta + (Y'_r - m'_x) (1 + c_{yr} |\phi|) r' \right. \\
 &\quad \left. + Y'_{\beta\beta} \beta^2 \phi + Y'_{\beta r} \beta r' \phi + Y'_{rr} r'^2 \phi \right. \\
 &\quad \left. + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta r r} \beta r'^2 + Y'_{r r r} r'^3 \right\} \\
 N_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\
 &\times \left\{ N'_\phi \phi + N'_\beta (1 + c_{n\beta} |\phi|) \beta + N'_r (1 + c_{nr} |\phi|) r' \right. \\
 &\quad \left. + N'_{\beta\beta} \beta^2 \phi + N'_{\beta r \phi} \beta r' \phi + N'_{r r \phi} \beta r' \phi \right. \\
 &\quad \left. + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta r r} \beta r'^2 + N'_{r r r} r'^3 \right\}
 \end{aligned} \tag{6}$$

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) 中村充博, 芳村康男, 四間大作, 齋藤史明: 小型模型船による自走試験方法の開発, 日本航海学会講演予稿集, 2(2), (2014), p. 208-211, (査読なし)
- 2) 矢野大行, 芳村康男, 福井 洋, 近藤匡寿: 横傾斜を含む 4 自由度操縦運動シミュレーションにおける主船体流体力数学モデルの検討, 日本航海学会講演予稿集, 2(2), (2014), p. 204-207, (査読なし)
- 3) 近藤匡寿, 矢野大行, 芳村康男: 2 軸 1 舵船の操縦運動の推定法, 日本航海学会講演予稿集, 2(2), (2014), p. 200-203, (査読なし)
- 4) 横田大武, 矢野大行, 福井 洋, 芳村康男: 中速船型の横傾斜を含む 4DOF 操縦運動の計測とシミュレーション, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 18, (2014), p. 367-370, (査読なし)
- 5) 安川宏紀, 芳村康男: 船の操縦性に及ぼす横揺れ連成影響について, 日本船舶海洋工学会論文集, 17, (2013), p. 57-64, (査読あり)

[学会発表](計 4 件)

- 1) Fukui Y., Yoshimura Y.: Investigation of Effect of Roll Motion on Manoeuvrability Using 4-DOF Mathematical Model, MARSIM2015, (2015年9月8日, Newcastle University (Newcastle upon Tyne, UK))
- 2) 近藤匡寿, 芳村康男: 種々の船型に対する定常横傾斜が操縦性能に及ぼす影響, 日本船舶海洋工学会春期講演会, (2015年5月25日, 神戸国際会議場(兵庫県神戸

- 市))
- 3) Yano H., Yoshimura Y.: Optimum Mathematical Model of 4-DOF Manoeuvring Simulation, SIMMAN2014 Workshop, (2014年12月8日, Frederiksdal (Lyngby, Denmark))
  - 4) Nakamura M., Yoshimura Y., Shiken D.: Model experiments in following and quartering seas using a small size ship model, ISSW-2014, (2014年9月29日, UTM SPACE (Kuala Lumpur, Malaysia))

## 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・特任教授

研究者番号 : 50322847