

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2014年10月16日(16.10.2014)



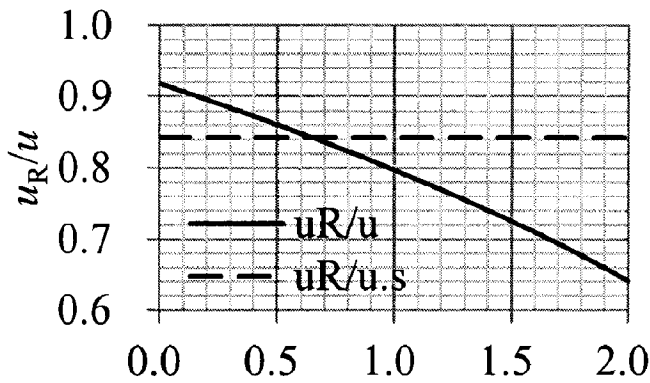
(10) 国際公開番号  
WO 2014/168250 A1

- (51) 国際特許分類:  
G01M 10/00 (2006.01) B63B 9/02 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/060555
- (22) 国際出願日: 2014年4月11日(11.04.2014)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2013-084224 2013年4月12日(12.04.2013) JP
- (71) 出願人: 独立行政法人海上技術安全研究所(NATIONAL MARITIME RESEARCH INSTITUTE) [JP/JP]; 〒1810004 東京都三鷹市新川6丁目3番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 上野 道雄(UENO, Michio); 〒1810004 東京都三鷹市新川6丁目3番1号 独立行政法人海上技術安全研究所内 Tokyo (JP). 塚田 吉昭(TSUKADA, Yoshiaki); 〒1810004 東京都三鷹市新川6丁目3番1号 独立行政法人海上技術安全研究所内 Tokyo (JP). 谷澤 克治(TANIZAWA, Katsuji); 〒1810004 東京都三鷹市新川6丁目3番1号 独立行政法人海上技術安全研究所内 Tokyo (JP). 北川 泰士(KITAGAWA, Yasushi); 〒1810004 東京都三鷹市新川6丁目3番1号 独立行政法人海上技術安全研究所内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人 Y K I 国際特許事務所 (YKI Patent Attorneys); 〒1800004 東京都武蔵野市吉祥寺本町一丁目34番12号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI

[続葉有]

(54) Title: FREE RUNNING MODEL SHIP TESTING METHOD AND FREE RUNNING MODEL SHIP TESTING DEVICE

(54) 発明の名称: 自由航走模型船試験方法及び自由航走模型船試験装置



AA 計画船速における  $f_{TA}$  と  $u_R/u$  の関係

AA Relationship between  $f_{TA}$  and  $u_R/u$  at planned ship speed

(57) Abstract: In order that in a test on a free running model ship, in which steering force has a dominant influence, auxiliary thrust is set such that steering effectiveness of the model ship and an actual ship are similar, an auxiliary thrust application means for applying auxiliary thrust to a model ship is controlled according to the calculation result of the auxiliary thrust calculated on the basis of the ship speed of the model ship such that the similarity of steering effectiveness is ensured to thereby apply the auxiliary thrust for ensuring the similarity of the steering effectiveness to the model ship.

(57) 要約: 舵の力が支配的な影響をおよぼす自由航走模型船での試験において、舵効きそのものを模型船と実船とで相似にするように補助推力を設定する。模型船に補助推力を付加する補助推力付加手段を、舵効きの相似性を確保するように模型船の船速に基づいて計算した補助推力の計算結果に応じて制御し、模型船に舵効きの相似性を確保する補助推力を付加する。

WO 2014/168250 A1

(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG). 添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

## 明 細 書

発明の名称：

自由航走模型船試験方法及び自由航走模型船試験装置

### 技術分野

[0001] 本発明は、模型船の自走試験における自由航走模型船試験方法及び自由航走模型船試験装置に関する。

### 背景技術

[0002] 補助推力装置を用いて曳航水槽での自航試験と同等の摩擦修正を行った自由航走模型試験方法が開示されている（特許文献1）。自由航走模型船が操舵を伴う場合あるいは波や風などの外乱が作用する場合はこれらが誘起する旋回や斜航のため船速が時々刻々変化する可能性がある。このような状況下でも、時々刻々船速に応じた補助推力を発生させることで摩擦修正が可能である。

[0003] 摩擦修正は、本来、模型船のプロペラ荷重度を実船と相似にすることによってプロペラ推力に関する力学的相似則を確保し、その条件下での模型試験によって実船の有効伴流率、プロペラ効率比、有効馬力など船の推進性能を推定するために用いられる方法の一つである。

[0004] また、圧縮窒素ガス等により摩擦修正推力を模型船に対して真っ直ぐ後ろ向きに発生でき、摩擦修正推力の発生源を模型船体上に搭載しない自由航走模型試験方法が開示されている（特許文献2）。さらに、模型船の航走計画の変更が模型船からの遠隔操作で可能な模型船試験装置が開示されている（特許文献3）。

[0005] 一方、自由航走模型試験は一般に推進性能を調べるためだけの試験ではなく、操縦性能試験など推進性能以外の性能を調べる目的でも実施される。

[0006] 補助推力装置を装備していない従来の自由航走模型船を用いた操縦性能試験では、模型船のプロペラ荷重度が実船に比べて相対的に大きいため舵効きが実船よりも相対的に良くなることが知られている。すなわち、自由航走模

型船を使った従来の操縦性試験結果は厳密にはそのまま実船の操縦性能とはみなすことができない。

[0007] 実船の操縦性能をより合理的に推定する手法として、拘束模型試験で得られた流体力データに基づくシミュレーション計算による手法が上げられる。拘束模型試験でプロペラ回転数を実船自航点にして計測をおこなって流体力特性を把握した上で実船対応のシミュレーション計算をおこなう方法である。この拘束模型試験時に曳引台車が摩擦修正に相当する力を模型船に加えることは定常直進時の自航試験の考え方と基本的に同じである。従来の補助推力のない自由航走模型試験結果は模型自航点で計測された流体力特性を用いた模型船対応シミュレーション計算に対応するが、実際の物理現象であることから、模型船の尺度で計算法の有効性を確認するための有力な検証データとなる。

[0008] このように、これまでの模型船を用いた試験では曳航試験を含む拘束試験と自由航走試験のいずれにおいても模型試験におけるプロペラ回転数の設定は模型自航点か実船自航点の2つ、すなわち摩擦修正の有無が専ら関心の対象であった。実際、窒素ガス噴射による補助推力装置を用いた操縦性能試験でも定常直進状態での摩擦修正に相当する補助推力を発生させるようにしていた（非特許文献1）。

### 先行技術文献

#### 特許文献

- [0009] 特許文献1：特開2012-112878号公報  
特許文献2：特開2001-174364号公報  
特許文献3：特開2009-264781号公報

#### 非特許文献

- [0010] 非特許文献1：小林英一，山崎啓市，籾一之，大森拓也，佐々木紀幸，鳥井幸典；第5章IMO操縦性基準に対する造船所の対応（2000）操縦性および復原性基準に関する研究の動向，試験水槽委員会シンポジウム，日本造船学会，pp. 5-1-5-30.

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0011] ところで、操縦性試験のように舵の力が支配的な影響をおよぼす試験においては、模型船のプロペラ荷重度を実船と同じにする摩擦修正ではなく、舵効きそのものを模型船と実船とで相似にするように補助推力を設定する方が合理的と考えられる。

[0012] また、波・風等の外力による船の船速低下は、船の基本的な性能の一つに属し、運航計画を左右する重要な要素となる。近年では、国連海事機関を中心として船からの温暖化ガスの排出削減を目的とした規制が始まっており、その指標にも波・風が併存する実海域環境下での船速低下率が考慮されている。その一方で、国連海事機関の規制を満足するような燃料消費量の少ない船の開発が進む中、必要以上に出力の小さい機関を搭載した船が荒天下で操船不能になって海難事故に至る可能性が増加することが指摘されている。

[0013] 荒天下でどの程度船速が低下するのか、どの程度荒れた海象まで操船可能であるのかといったことを推定するための手法としては現状では推定計算によるほかない。波浪中における抵抗の増加に関する研究実績に基づき、外力下における通常航行時の船速低下に関する推定計算は実用的な水準に達していると考えられる。しかし、通常航行時の船速低下とは異なり、荒天下で操船不能近くまで船速が低下する状況では外力の船の前後方向成分だけではなく左右方向成分と回頭モーメント成分まで精度良く推定し、さらに操舵力も含めて船の航行状態を推定する必要がある。ところが、特に波漂流力の左右方向成分と回頭モーメント成分の実用的な推定法は現段階では確立されていない。

[0014] 本発明は、航行中のプロペラ荷重度を自由に変化させることができる自由航走模型船を用いて、従来の補助推力装置のない自由航走模型船あるいは補助推力装置による摩擦抵抗修正では実現できない、舵の効果（舵効き）を実船と相似にする、また外乱下においても舵の効果（舵効き）を実船と相似にする自由航走模型船試験方法及び自由航走模型船試験装置を提供する。

## 課題を解決するための手段

[0015] 本発明の請求項 1 に係る自由航走模型船試験方法は、プロペラと舵を有した自由航走可能な模型船を用いた自由航走模型船試験方法において、前記模型船に補助推力を付加する補助推力付加手段を、舵効きの相似性を確保するように前記模型船の船速に基づいて計算した補助推力の計算結果に応じて制御し、前記模型船に舵効きの相似性を確保する補助推力を付加することを特徴とする。

[0016] ここで、舵直圧力に最も支配的な影響をおよぼす舵有効流入速度を用いて前記補助推力を計算することが好適である。なお、主として船速とプロペラ回転数により舵に流入する流れが決まり、舵有効流入速度及び舵直圧力が影響を受ける。

[0017] また、前記補助推力の計算は、前記舵有効流入速度の前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  に基づいて計算することが好適である。

[0018] また、前記模型船と実船の双方の前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  が等しくなる条件である

[数1]

$$u_{Rs}' = u_{Rm}'$$

$u_{Rs}'$  : 実船の舵有効流入速度の前後方向成分（無次元値  $u_R'$  : プロペラ回転数と船速の関数）

$u_{Rm}'$  : 模型船の舵有効流入速度の前後方向成分（無次元値  $u_R'$  : プロペラ回転数と船速の関数）

に基づいて前記補助推力を計算することが好適である。

[0019] 具体的には、前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  を、プロペラ前進率  $J$  に基づいて、

[数2]

$$u_R' = \frac{u_R}{u} = (1 - w)\varepsilon \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right) \right\}^2} + (1 - \eta)$$

$u_R$  : 舵有効流入速度の前後方向成分、 $u$  : 船速の前後方向成分、 $1-w$  : 伴流係数、 $\varepsilon$  : 舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比、 $\eta$  : プロペラ直径と舵高さの比、 $\kappa$  : プロペラ後流の増速率に関する係数、 $K_T$  : 推力係数、 $J$  : プロペラ前進率に基づいて求めることが好適である。

[0020] また、具体的には、前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  を、プロペラ荷重度  $\tau$  に基づいて、

[数3]

$$u_R' = \frac{u_R}{u} = (1-w)\varepsilon \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{\tau}{(1-w)^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)}$$

$u_R$  : 舵有効流入速度の前後方向成分、 $u$  : 船速の前後方向成分、 $1-w$  : 伴流係数、 $\varepsilon$  : 舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比、 $\eta$  : プロペラ直径と舵高さの比、 $\kappa$  : プロペラ後流の増速率に関する係数、 $K_T$  : 推力係数、 $\tau$  : プロペラ荷重度に基づいて求めることが好適である。

[0021] また、具体的には、前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  を、プロペラスリップ比  $s$  に基づいて、

[数4]

$$u_R' = \frac{u_R}{\sqrt{Lg}} = \frac{nPe\varepsilon}{\sqrt{Lg}} \left[ \eta \left\{ (1-s)(1-\kappa) + \kappa \sqrt{(1-s)^2 + \frac{8}{\pi} \left(\frac{P}{D}\right)^2 K_T} \right\}^2 + (1-\eta)(1-s)^2 \right]^{1/2}$$

$u_R$  : 舵有効流入速度の前後方向成分、 $\varepsilon$  : 舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比、 $\eta$  : プロペラ直径と舵高さの比、 $\kappa$  : プロペラ後流の増速率に関する係数、 $K_T$  : 推力係数、 $L$  : 船の長さ、 $g$  : 重力加速度、 $P$  : プロペラピッチ、 $D$  : プロペラ直径、 $n$  : プロペラ回転数、 $s$  : プロペラスリップ比に基づいて求めることが好適である。

[0022] また、前記模型船と前記実船の双方の前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  から前記補助推力の摩擦抵抗修正量に対する補助推力係数  $f_{TA}$  を求めることが好適である。

[0023] また、前記補助推力係数  $f_{TA}$  を前記摩擦抵抗修正量に掛けて前記補助推力を算出することが好適である。

[0024] また、前記補助推力係数  $f_{TA}$  を前記模型船の船速により補正することが好適である。

[0025] また、外力下で変化する模型船の前記船速を検出し、実船の前記船速を基に前記模型船の前記プロペラのプロペラ回転数と前記補助推力を制御し、前記外力下における前記模型船の船速応答を考慮した舵効きを前記実船と相似にしたことが好適である。

[0026] 前記模型船の前記プロペラ回転数と前記補助推力を

[数5]

$$u_{Rs}' = u_{Rm}'$$

$u_{Rs}'$  : 実船の舵有効流入速度の前後方向成分（無次元値  $u_R'$  : プロペラ回転数と船速の関数）

$u_{Rm}'$  : 模型船の舵有効流入速度の前後方向成分（無次元値  $u_R'$  : プロペラ回転数と船速の関数）

[数6]

$$(1 - t_s)T_s' = (1 - t_m)T_m' - (1 - f_{TA})T_{SFC}'$$

$t_s$  : 実船の推力減少率、 $T_s'$  : 実船のプロペラ推力（無次元値：プロペラ回転数と船速の関数）、 $t_m$  : 模型船の推力減少率、 $T_m'$  : 模型船のプロペラ推力（無次元値：プロペラ回転数と船速の関数）、 $f_{TA}$  : 補助推力係数、 $T_{SFC}'$  : 摩擦修正に必要な力（無次元値：船速の関数）に基づいて導出される前記模型船のプロペラ回転数と補助推力係数  $f_{TA}$  に基づき制御したことが好適である。

[0027] また、プロペラ回転数一定、プロペラトルク一定、プロペラ出力一定、あるいは任意のプロペラ回転数変化を含む状態の前記実船を対象として、当該2つの式を基に前記模型船のプロペラ回転数と補助推力係数  $f_{TA}$  を導出し、前記模型船のプロペラ回転数と補助推力を制御したことが好適である。

[0028] 本発明の請求項14に係る自由航走模型船試験装置は、舵を有した自由航



走可能な模型船に補助推力を付加する補助推力付加手段と、前記模型船の船速を検出する船速検出手段と、前記船速と前記舵に流入する流れの舵有効流入速度に基づいて前記補助推力を計算する補助推力計算手段と、前記補助推力計算手段の計算結果に応じて補助推力付加手段を制御する制御手段を備え、前記模型船に前記舵有効流入速度に基づいた前記補助推力を付加することを特徴とする。

[0029] ここで、前記補助推力計算手段は、前記舵有効流入速度の前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  に基づいて前記補助推力を計算することが好適である。

[0030] また、前記模型船と実船の双方の前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  から前記補助推力の摩擦抵抗修正量に対する補助推力係数  $f_{TA}$  を求めることが好適である。

[0031] また、前記補助推力係数  $f_{TA}$  を予め求めた前記摩擦抵抗修正量に掛けて前記補助推力を算出することが好適である。

[0032] また、前記摩擦抵抗修正量は、実験で求めた値を用いることが好適である。

[0033] また、船速の前後方向成分検出手段を備え、検出した船速の前後方向成分  $u$  に基づいて前記補助推力を計算することが好適である。

[0034] 本発明の請求項 20 に係る自由航走模型船試験装置は、プロペラと舵を有した自由航走可能な模型船に補助推力を付加する補助推力付加手段と、前記模型船の船速を検出する船速検出手段と、実船の基本的性能推定と検出した前記船速に基づき前記プロペラのプロペラ回転数と前記補助推力付加手段の出力を制御する制御手段を備え、前記模型船の外力下における船速応答を考慮して舵効きを前記実船と相似にしたことを特徴とする。

[0035] また、前記制御手段は、上記自由航走模型船試験方法を実行したことが好適である。

[0036] また、前記制御手段は、上記自由航走模型船試験方法により予め求めた前記模型船のプロペラ回転数と補助推力係数  $f_{TA}$  の前記船速との関係を記憶して制御したことが好適である。

[0037] また、前記補助推力付加手段を前記模型船に搭載し、前記模型船を追尾する追尾手段を設け、前記船速検出手段を前記追尾手段に搭載し、前記船速検出手段によって検出された前記船速をフィードバックして前記補助推力付加手段を制御することが好適である。

[0038] また、前記補助推力付加手段を前記模型船に搭載し、前記船速検出手段によって検出された前記模型船の船速をフィードバックして前記補助推力付加手段を制御することが好適である。

[0039] また、前記補助推力付加手段を前記模型船を追尾する追尾手段に設け、前記追尾手段として、 $X-Y-Z$  3次元直交座標系において $X$ 軸方向に動く主台車と、この主台車上に設置された $Y$ 軸方向に動く副台車と、この副台車に設けた $Z$ 軸回りに回転する回転盤とを有した曳引車を用い、前記模型船の位置と方位に応じて前記主台車と前記副台車と前記回転盤を制御することが好適である。

### 発明の効果

[0040] 本発明に係る自由航走模型船試験方法は、プロペラと舵を有した自由航走可能な模型船を用いた自由航走模型船試験方法において、前記模型船に補助推力を付加する補助推力付加手段を、舵効きの相似性を確保するように前記模型船の船速に基づいて計算した補助推力の計算結果に応じて制御し、前記模型船に舵効きの相似性を確保する補助推力を付加することによって、例えば、風や波等の外力の影響下であっても舵の力が支配的な影響を及ぼすような状況下における自由航走模型船試験において舵の影響を適切に考慮した航走試験を実現することができる。

[0041] ここで、前記舵直圧力に代わり、前記舵直圧力に最も支配的な影響をおよぼす舵有効流入速度を用いて前記補助推力を計算することによって、模型船における舵の影響をより実船に近づけることができる。ここで、前記舵直圧力に代わり、前記舵直圧力に最も支配的な影響をおよぼす舵有効流入速度を用いて前記補助推力を計算することによって、さらに、前記補助推力の計算は、前記舵有効流入速度の前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  に基づいて計算

することによって、模型船における舵の影響をより実船に近づけることが可能となる。

[0042] また、前記模型船と実船の双方の前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  が等しくなる条件である

[数7]

$$u_{Rs}' = u_{Rm}'$$

$u_{Rs}'$  : 実船の舵有効流入速度の前後方向成分（無次元値  $u_R'$  : プロペラ回転数と船速の関数）、 $u_{Rm}'$  : 模型船の舵有効流入速度の前後方向成分（無次元値  $u_R'$  : プロペラ回転数と船速の関数）に基づいて前記補助推力を計算することによって、外力下において模型船に与えられる影響も考慮した試験結果を得ることが可能となる。

[0043] 具体的には、前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  を、プロペラ前進率  $J$  に基づいて、

[数8]

$$u_R' = \frac{u_R}{u} = (1-w)\varepsilon \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right) \right\}^2} + (1-\eta)$$

$u_R$  : 舵有効流入速度の前後方向成分、 $u$  : 船速の前後方向成分、 $1-w$  : 伴流係数、 $\varepsilon$  : 舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比、 $\eta$  : プロペラ直径と舵高さの比、 $\kappa$  : プロペラ後流の増速率に関する係数、 $K_T$  : 推力係数、 $J$  : プロペラ前進率に基づいて求めることによって、模型船と実船との相似性を考慮して、模型船における舵の影響を適切に考慮した自由航走模型船試験が可能となる。

[0044] また、具体的には、前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  を、プロペラ荷重度  $\tau$  に基づいて、

[数9]

$$u_R' = \frac{u_R}{u} = (1-w)\varepsilon \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{\tau}{(1-w)^2}} - 1 \right) \right\}^2} + (1-\eta)$$

$u_R$  : 舵有効流入速度の前後方向成分、 $u$  : 船速の前後方向成分、 $1 - w$  : 伴流係数、 $\varepsilon$  : 舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比、 $\eta$  : プロペラ直径と舵高さの比、 $\kappa$  : プロペラ後流の増速率に関する係数、 $K_T$  : 推力係数、 $\tau$  : プロペラ荷重度に基づいて求めることによって、模型船と実船との相似性を考慮して、模型船における舵の影響を適切に考慮した自由航走模型船試験が可能となる。

[0045] また、具体的には、前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  を、プロペラスリップ比  $s$  に基づいて、

[数10]

$$u_R' = \frac{u_R}{\sqrt{Lg}} = \frac{nP\varepsilon}{\sqrt{Lg}} \left[ \eta \left\{ (1-s)(1-\kappa) + \kappa \sqrt{(1-s)^2 + \frac{8}{\pi} \left(\frac{P}{D}\right)^2 K_T} \right\}^2 + (1-\eta)(1-s)^2 \right]^{1/2}$$

$u_R$  : 舵有効流入速度の前後方向成分、 $\varepsilon$  : 舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比、 $\eta$  : プロペラ直径と舵高さの比、 $\kappa$  : プロペラ後流の増速率に関する係数、 $K_T$  : 推力係数、 $L$  : 船の長さ、 $g$  : 重力加速度、 $P$  : プロペラピッチ、 $D$  : プロペラ直径、 $n$  : プロペラ回転数、 $s$  : プロペラスリップ比に基づいて求めたことによって、模型船と実船との相似性を考慮して、模型船における舵の影響を適切に考慮した自由航走模型船試験が可能となる。

[0046] また、前記模型船と前記実船の双方の前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  から前記補助推力の摩擦抵抗修正量に対する補助推力係数  $f_{TA}$  を求めたことによって、補助推力係数  $f_{TA}$  によって舵の影響を適切に反映した試験結果を得ることができる。具体的には、前記補助推力係数  $f_{TA}$  を前記摩擦抵抗修正量に掛けて前記補助推力を算出することによって、舵の影響を反映させることができる。

[0047] また、前記補助推力係数  $f_{TA}$  を前記模型船の船速により補正することによって、前記模型船の船速に応じた適切な補助推力係数  $f_{TA}$  を選択することが可能となり、船速によって変化する舵の影響を適切に考慮した試験結果を得

ることができる。

[0048] また、外力下で変化する模型船の前記船速を検出し、実船の前記船速を基に前記模型船の前記プロペラのプロペラ回転数と前記補助推力を制御し、前記外力下における前記模型船の船速応答を考慮した舵効きを前記実船と相似にしたことによって、さらに、前記模型船の前記プロペラ回転数と前記補助推力を

[数11]

$$u_{Rs}' = u_{Rm}'$$

$u_{Rs}'$  : 実船の舵有効流入速度の前後方向成分（無次元値  $u_{R}'$  : プロペラ回転数と船速の関数）

$u_{Rm}'$  : 模型船の舵有効流入速度の前後方向成分（無次元値  $u_{R}'$  : プロペラ回転数と船速の関数）

[数12]

$$(1 - t_s)T_s' = (1 - t_m)T_m' - (1 - f_{TA})T_{SFC}'$$

$t_s$  : 実船の推力減少率、 $T_s'$  : 実船のプロペラ推力（無次元値：プロペラ回転数と船速の関数）、 $t_m$  : 模型船の推力減少率、 $T_m'$  : 模型船のプロペラ推力（無次元値：プロペラ回転数と船速の関数）、 $f_{TA}$  : 補助推力係数、 $T_{SFC}'$  : 摩擦修正に必要な力（無次元値：船速の関数）に基づいて導出される前記模型船のプロペラ回転数と補助推力係数  $f_{TA}$  に基づき制御したことによって、風や波等の外力の影響下であっても自由航走模型船試験において舵の影響を適切に考慮した航走試験を実現することができる。

[0049] また、プロペラ回転数一定、プロペラトルク一定、プロペラ出力一定、あるいは任意のプロペラ回転数変化を含む状態の前記実船を対象として、当該2つの式を基に前記模型船のプロペラ回転数と補助推力係数  $f_{TA}$  を導出し、前記模型船のプロペラ回転数と補助推力を制御したことによって、プロペラ回転数一定、プロペラトルク一定、プロペラ出力一定の条件において風や波等の外力の影響下であっても自由航走模型船試験において舵の影響を適切に考慮した航走試験を実現することができる。

- [0050] 本発明に係る自由航走模型船試験装置は、舵を有した自由航走可能な模型船に補助推力を付加する補助推力付加手段と、前記模型船の船速を検出する船速検出手段と、前記船速と前記舵に流入する流れの舵有効流入速度に基づいて前記補助推力を計算する補助推力計算手段と、前記補助推力計算手段の計算結果に応じて補助推力付加手段を制御する制御手段を備え、前記模型船に前記舵有効流入速度に基づいた前記補助推力を付加することによって、舵の力が支配的な影響を及ぼすような状況下における自由航走模型船試験において舵の影響を適切に考慮した航走試験を実現することができる。
- [0051] ここで、前記補助推力計算手段は、前記舵有効流入速度の前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  に基づいて前記補助推力を計算することによって、模型船における舵の影響をより実船に近づけることができる。例えば、前記模型船と実船の双方の前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  から前記補助推力の摩擦抵抗修正量に対する補助推力係数  $f_{TA}$  を求めることによって、又は前記補助推力係数  $f_{TA}$  を予め求めた前記摩擦抵抗修正量に掛けて前記補助推力を算出することによって、補助推力係数  $f_{TA}$  によって舵の影響を適切に反映した試験結果を得ることができる。具体的には、前記補助推力係数  $f_{TA}$  を予め求めた前記摩擦抵抗修正量に掛けて前記補助推力を算出することによって、舵の影響を反映させることができる。このとき、前記摩擦抵抗修正量は、実験で求めた値を用いることによって、実際の摩擦抵抗に応じた舵の影響を試験に反映させることが可能となる。
- [0052] また、船速の前後方向成分検出手段を備え、検出した船速の前後方向成分  $u$  に基づいて前記補助推力を計算することによって、船速に応じて変化する舵の影響を適切に考慮した試験結果を得ることができる。
- [0053] また、自由航走模型船試験装置は、プロペラと舵を有した自由航走可能な模型船に補助推力を付加する補助推力付加手段と、前記模型船の船速を検出する船速検出手段と、実船の基本的性能推定と検出した前記船速に基づき前記プロペラのプロペラ回転数と前記補助推力付加手段の出力を制御する制御手段を備え、前記模型船の外力下における船速応答を考慮して舵効きを前記

実船と相似にしたことによって、特に、前記制御手段は、上記自由航走模型船試験方法を実行したことによって、上記の自由航走模型船試験方法を実現することができる。ここで、前記制御手段は、上記自由航走模型船試験方法により予め求めた前記模型船のプロペラ回転数と補助推力係数  $f_{TA}$  の前記船速との関係を記憶して制御したことによって、風や波等の外力の影響下であっても舵の力が支配的な影響を及ぼすような状況下における自由航走模型船試験において舵の影響を適切に考慮した航走試験を実現することができる。また、前記補助推力付加手段を前記模型船に搭載し、前記模型船を追尾する追尾手段を設け、前記船速検出手段を前記追尾手段に搭載し、前記船速検出手段によって検出された前記船速をフィードバックして前記補助推力付加手段を制御することによって、または、前記補助推力付加手段を前記模型船に搭載し、前記船速検出手段によって検出された前記模型船の船速をフィードバックして前記補助推力付加手段を制御することによって、自走する模型船の運動情報に基づいて適切な補助推力を模型船に与えつつ試験を行うことができる。特に、船速に応じて変化する舵の影響を適切に考慮した試験結果を得ることができる。

[0054] また、前記補助推力付加手段を前記模型船を追尾する追尾手段に設け、前記追尾手段として、 $X-Y-Z$  3次元直交座標系において $X$ 軸方向に動く主台車と、この主台車上に設置された $Y$ 軸方向に動く副台車と、この副台車に設けた $Z$ 軸回りに回転する回転盤とを有した曳引車を用い、前記模型船の位置と方位に応じて前記主台車と前記副台車と前記回転盤を制御することによって、自走する模型船の運動情報に基づいて適切な補助推力を模型船に与えつつ試験を行うことができる。

### 図面の簡単な説明

[0055] [図1]計画船速における  $f_{TA}$  と  $u_R/u$  の関係を示す図である。

[図2]計画船速における模型船長さ と  $f_{REC}$  との関係を示す図である。

[図3]計画船速における模型船船速 ( $V_m$ ) と  $f_{REC}$  との関係を示す図である。

[図4]第1の実施の形態における20度 $Z$ 試験における航跡と舵直圧力のシミ

ュレーション結果を示す斜視図である。

[図5]第1の実施の形態における自由航走模型船試験装置の一例を示す図である。

[図6]第1の実施の形態における自由航走模型船試験装置の別例を示す図である。

[図7]第1の実施の形態における自由航走模型船試験装置の別例を示す図である。

[図8]第1の実施の形態における水槽と曳引車の構造を示す図である。

[図9]第1の実施の形態における自由航走模型船試験装置の別例を示す図である。

[図10]第2の実施の形態における自由航走模型船試験（平水中操縦性能）のシミュレーション計算結果を示す図である。

[図11]第2の実施の形態における自由航走模型船試験（規則波中定常航行状態）のシミュレーション計算結果を示す図である。

[図12]第2の実施の形態における補助推力係数と模型船プロペラ回転数の船速依存性のシミュレーション計算結果を示す図である。

[図13]第2の実施の形態における自由航走模型船試験装置の一例を示す図である。

## 発明を実施するための形態

[0056] [第1の実施の形態]

<自由航走模型船試験方法>

自由航走する模型船に補助推力装置を搭載することによりプロペラ荷重度を自由に変化させることができる。模型船が直進している状態を考えると、補助推力装置により補助推力が与えられた模型船に加わる前後方向の力の釣り合いは数式（1）で表される。

[数13]

$$(1-t)T + T_A - R_T = 0 \quad \dots (1)$$

ここで、 $(1-t)$ は推力減少係数、 $T$ はプロペラ推力、 $T_A$ は補助推力、 $R$



$\tau$ は全抵抗を表す。

[0057] 一般的に、推力減少係数は、船体とプロペラとの組み合わせによって特定の値となる。プロペラ推力は、船速とプロペラ回転数によって決まる。全抵抗は、船速によって決まる。補助推力は、船速及びプロペラ回転数に依存せず、任意に選ぶことができる。すなわち、ある船速について、補助推力を適当に選べば、プロペラ回転数を任意に設定することができる。また、あるプロペラ回転数について補助推力を適当に選ぶことによって船速を任意に設定することが可能である。これらの関係は、直進時以外の旋回や斜航中でも必要な特性がわかれば原理的には成り立つ。

[0058] 模型船を用いた船の試験では一般にフルードの相似則に則って、すなわち模型船のフルード数を実船と同じ値になるように船速を定める。このとき、模型船のレイノルズ数は実船と大きく異なるので粘性に関する現象が模型船と実船では相似にならない。特に、粘性が支配的な影響をおよぼす摩擦抵抗については模型船と実船で大きく異なる。

[0059] ここで、数式(1)を無次元化すると次式を得る。

[数14]

$$(1-t)\tau + \tau_A - C_T \frac{S}{\pi(D/2)^2} = 0 \quad \dots (2)$$

ここで、Sは船の浸水表面積、Dはプロペラ直径を表す。他の変数は次式で定義される。

[数15]

$$\tau = \frac{T}{\frac{\rho}{2} u^2 \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad \dots (3)$$

[数16]

$$\tau_A = \frac{T_A}{\frac{\rho}{2} u^2 \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad \dots (4)$$

[数17]

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{\rho}{2} u^2 S} \quad \dots (5)$$

ここで、 $u$ は船速の前後方向成分、 $\rho$ は水の密度、 $\tau$ がプロペラ荷重度、 $C_T$ が全抵抗係数を表す。

[0060] 模型船と実船で幾何学的形状が相似とすると  $S / \{ \pi (D / 2)^2 \}$  は模型船と実船で同じ値である。また、一般に模型船と実船で推力減少係数  $(1 - t)$  は同じと考えて良い。

[0061] 摩擦抵抗が模型船と実船とで異なることは全抵抗係数  $C_T$  が模型船と実船で異なることを意味する。補助推力がない場合、すなわち  $\tau_A$  が 0 の場合、数式 (2) より、全抵抗係数  $C_T$  が模型船と実船とで同じであればプロペラ荷重度  $\tau$  も模型船と実船とで同じになるが、両者で全抵抗係数  $C_T$  が異なるため  $\tau$  も異なることになる。

[0062] 船の馬力推定あるいは抵抗・推進の分野で実施される自航試験では、船速はフルードの相似則に従って決め、プロペラ回転数は模型船のプロペラ荷重度が実船と同じになるように設定される。この時、数式 (2) の  $\tau_A$  あるいは数式 (1) の補助推力  $T_A$  に相当する力は試験水槽の曳引台車が受け持つことで数式 (2) あるいは数式 (1) が成立している。

[0063] このとき、模型船に加えるべき補助推力  $T_A$  は次式で定義される摩擦抵抗修正量  $R_{SFC}$  に対応した値として求めることができる。

[数18]

$$R_{SFC} = \frac{\rho_m}{2} S_m u_m^2 \{ (1 + k)(C_{F0m} - C_{F0s}) - \Delta C_F \} \quad \dots (6)$$

添え字の  $m$  と  $s$  はそれぞれ模型船と実船の値であることを表す。推力減少係数  $(1 + k)$  は船の形状によって決まる形状影響係数を表す。一般に模型船と実船で同じ値と考えて良い。 $C_{F0}$  はレイノルズ数によって決まる相当平板の摩擦抵抗係数を表す。 $\Delta C_F$  は粗度修正係数で、実船の長さを用いて推定することができる。

[0064] 以上、数式(6)で表される補助的な力を模型船に加えることを模型試験における摩擦抵抗修正あるいは単に摩擦修正と呼ぶ。なお、摩擦修正をおこなわない場合のプロペラ回転数を模型自航点、摩擦修正をおこなった場合のプロペラ回転数を実船自航点と呼ぶ。

[0065] さらに、本実施の形態では、任意の補助推力を発生することのできる荷重程度変更自走試験装置を用いて、自由航走模型試験において舵効きを実船と相似にする補助推力設定法を提供する。

[0066] 幾何学的な相似とフルードの相似則のもと、模型船の舵効きを実船相当にするためには、次式で表される舵直圧力 $F_N$ の無次元値を模型船と実船とで一致させれば良いと考えられる。

[数19]

$$\frac{F_N}{\frac{\rho}{2} A_R V^2} = f_\alpha \left( \frac{U_R}{u} \right)^2 \left( \frac{u}{V} \right)^2 \sin \alpha_R \quad \dots (7)$$

ここで、 $A_R$ は舵面積、 $f_\alpha$ は舵の縦横比で決まる直圧力係数勾配、 $U_R$ は舵有効流入速度、 $V$ は船速、 $\alpha_R$ は舵有効流入角をそれぞれ表す。また、 $u/V$ は $\cos \beta$ に等しく、斜航角が小さい場合はほぼ1とみなすことができる。なお、 $\beta$ は船の斜航角である。船速 $V$ は船速の前後方向成分 $u$ と左右方向成分 $v$ に分けられ、斜航角 $\beta$ を介して $u = V \cos \beta$ 、 $v = -V \sin \beta$ の関係がある。舵有効流入速度 $U_R$ は舵有効流入速度の前後方向成分 $u_R$ と舵有効流入速度 $v_R$ に分けられ、舵有効流入角 $\alpha_R$ を介して $u_R = U_R \cos \alpha_R$ 、 $v_R = -U_R \sin \alpha_R$ の関係がある。舵直圧力 $F_N$ は舵有効流入速度 $U_R$ 、舵有効流入角 $\alpha_R$ によって決まるが、この時 $v_R$ よりも $u_R$ が支配的影響をおよぼす。 $u_R$ に大きな影響をおよぼすのは $u$ とプロペラ回転数である。

[0067]  $U_R$ は前後方向成分 $u_R$ と左右方向成分 $v_R$ を用いて次式で表される。

[数20]

$$\frac{U_R}{u} = \sqrt{\left( \frac{u_R}{u} \right)^2 + \left( \frac{v_R}{u} \right)^2} \quad \dots (8)$$

ここで、 $\alpha_R$ は次式で表される。

[数21]

$$\begin{aligned}\alpha_R &= \delta - \left(\frac{v_{RP}}{u_R}\right) - \gamma_R(\beta - l'_R r') \left(\frac{V}{u_R}\right) \\ &= \delta - \left(\frac{v_{RP}}{u_R}\right) - \gamma_R(\beta - l'_R r') \left(\frac{V}{u}\right) / \left(\frac{u_R}{u}\right) \quad \dots (9)\end{aligned}$$

ここで、 $v_{RP}$ はプロペラの回転による横方向流速成分、 $\gamma_R$ は整流係数、 $l'_R$ は舵の流体力学的前後位置、 $r'$ は無次元旋回角速度をそれぞれ表す。

[0068] 数式(8)において左右方向成分 $v_R$ は一般に前後方向成分 $u_R$ に比べて小さく、支配的なのは舵有効流入速度の前後方向成分 $u_R$ と船速の前後方向成分 $u$ との比 $u_R/u$ の項である。数式(9)においてもプロペラの回転による横方向流速成分 $v_{RP}$ は舵有効流入速度の前後方向成分 $u_R$ に比べて小さく、従って第二項は支配的ではない。さらに、問題の見通しをよくするために直進状態を考えると数式(9)の第3項は0となり、支配的な項のみを残すと数式(8)と数式(9)は次式のように書ける。

[数22]

$$\frac{u_R}{u} \simeq \frac{u_R}{u}, \quad \alpha_R \simeq \delta \quad \dots (10)$$

[0069] 数式(10)から、直進状態においては、 $u_R/u$ を模型船と実船で同じ値にすれば近似的に無次元直圧力すなわち舵効きを模型船と実船とで相似にすることができることがわかる。

[0070]  $u_R/u$ は数式(11)で表される。

[数23]

$$\begin{aligned}u_{R'} &= \frac{u_R}{u} = (1-w)\varepsilon \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)} \\ &= (1-w)\varepsilon \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{\tau}{(1-w)^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)} \quad \dots (11)\end{aligned}$$

ここで、 $1 - w$ は伴流係数、 $\varepsilon$ は舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比、 $\kappa$ はプロペラ後流の増速率、 $\eta$ はプロペラ直径と舵高さの比をそれぞれ表す。 $K_T$ は次式で表される推力係数を表す。

[数24]

$$K_T = \frac{T}{\rho D^4 n^2} \quad \dots (12)$$

ここで、 $n$ はプロペラ回転数を表す。 $J$ は次式で表されるプロペラ前進率を表す。

[数25]

$$J = \frac{(1 - w)u}{nD} \quad \dots (13)$$

なお、推力係数 $K_T$ は一般にプロペラ前進率 $J$ の関数である。

[0071] 数式(11)によって $u_R/u$ に対してはプロペラ荷重度 $\tau$ が大きな影響をおよぼすことがわかる。同時に、模型船と実船でプロペラ荷重度 $\tau$ が同じでも、舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比 $\varepsilon$ とプロペラ後流の増速率 $\kappa$ 、伴流係数 $1 - w$ が異なれば無次元舵直圧力は同じにならないことがわかる。特に、伴流係数 $1 - w$ は粘性の影響を受けて模型船と実船で明らかに異なることが知られている。

[0072] ここで、補助推力 $T_A$ を次のように表す。

[数26]

$$T_A = f_{TA} R_{SFC} \quad \dots (14)$$

ここで、 $f_{TA}$ は補助推力が摩擦修正量の何倍の値であるかを表す変数で、ここでは補助推力係数と呼ぶことにする。補助推力係数 $f_{TA} = 0$ が摩擦修正なしの模型自航点、補助推力係数 $f_{TA} = 1$ が摩擦修正有りの実船自航点を表す。

[0073] ある船速について補助推力係数を決めればその値に応じて数式(1)を解くことで対応するプロペラ回転数 $n$ やプロペラ荷重度 $\tau$ 、 $u_R/u$ 、プロペラ前進率 $J$ 等を求めることができる。つまり、 $u_R/u$ が実船の値と等しくなる

補助推力係数  $f_{TA}$  の値を求め、その値を使って数式 (14) に従って補助推力とプロペラ回転数を設定すれば無次元舵直圧力すなわち舵効きを実船相当にした自由航走模型試験を実施することができる。

[0074] 図1は、縮尺  $1/75.5$  (長さ約3m) の模型船が計画船速対応の船速での定常直進航行時を対象として補助推力係数  $f_{TA}$  を変化させたときの  $u_R/u$  が変化する様子を示す。図1において、実線が模型船の値を示し、破線は実船の推定値を示す。

[0075] 摩擦修正なしに対応する補助推力係数  $f_{TA} = 0$  では  $u_R/u$  は模型船が実船より大きな値を示しており、無次元舵直圧力は模型船の方が実船より大きいことを意味する。すなわち模型自航点では舵効きは模型船の方が良いことを示している。一方、摩擦修正有りに対応する補助推力係数  $f_{TA} = 1$  ではプロペラ荷重度は模型船と実船で等しくなるが、 $u_R/u$  は模型船が実船より小さな値を示している。これは、相対的に模型船の舵効きが実船より悪くなっていることを示している。 $u_R/u$  が模型船と実船で等しくなるのはこの船の場合、補助推力係数  $f_{TA}$  が約0.67のとき、摩擦修正量よりもやや小さめの補助推力を与えたときである。

[0076] 次に、舵効き修正係数  $f_{REC}$  を用いた補助推力とプロペラ回転数の設定について考察する。 $u_R/u$  が模型船と実船で等しくなる補助推力係数  $f_{TA}$  をあらためて  $f_{REC}$  と書くことにする。

[0077] 図2は、模型船の縮尺を変化させたときの  $f_{REC}$  の変化を示す。図2に示されるように、一般的な船の場合、模型船の長さが増えようとも  $f_{REC}$  は大きくは変化しないことがわかる。

[0078] 図3は、模型船の船速を変化させたときの  $f_{REC}$  の変化を示す。図3に示されるように、一般的な船の場合、船速が大きくなるとやや  $f_{REC}$  が減少する傾向が見られる。

[0079] このように、舵を考慮した試験を行うために模型船と実船との  $u_R/u$  を一致させる場合、船速に応じて適切な補助推力係数  $f_{TA}$  は変化するので、船速に応じて適切な補助推力係数  $f_{TA}$  を設定することが好適である。また、船速

に応じて適切な補助推力係数  $f_{TA}$  は決定されるので、補助推力係数  $f_{TA}$  の代わりに船速を用いて制御を行うことができる。

[0080] 定常直進付近は操縦性能において重要な針路安定性を判定する上で重要であるため、この定常直進時の  $f_{REC}$  が模型船と実船の舵効きの対応に関する基本となると考えられる。従って、定常直進中の  $f_{REC}$  とそれに対応したプロペラ回転数で自由航走模型試験を実施するのが最も基本的な方法となる。

[0081] 定常直進時の  $f_{REC}$  を求めるためには伴流係数  $1 - w$  と舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比  $\varepsilon$ 、プロペラ後流の増速率  $\kappa$ 、プロペラ直径と舵高さの比  $\eta$ 、推力係数  $K_T$ 、プロペラ前進率  $J$  が必要である。伴流係数  $1 - w$  は船の設計段階で何らかの推定値が得られているのが一般的である。プロペラ前進率  $J$  は、定常直進時のプロペラ回転数と船速と伴流係数  $1 - w$  で決まる。これらも設計段階で計画船速とそのときのプロペラ回転数が求められていると考えられる。プロペラ単独性能を表す推力係数  $K_T$  についても設計段階でプロペラ前進率  $J$  の関数として推定されているのが一般的である。プロペラ直径と舵高さの比  $\eta$  は幾何学的に決まる値である。舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比  $\varepsilon$  とプロペラ後流の増速率  $\kappa$  については模型実験等で何らかの推定値が得られていればそれを用いればよい。推定値がない場合は、文献に挙げられている値や類似する船のデータを用いても大きな間違いとはならないと推察される。

[0082] 図4は、20度Z試験について補助推力なし ( $f_{TA} = 0$ , Model (w/o corr.)) の場合と摩擦修正をした場合 ( $f_{TA} = 1$ , Model (SFC))、舵効き修正をした場合 ( $f_{TA} = f_{REC}$ , Model (REC))、実船推定値それぞれの航跡と舵直圧力の時系列のシミュレーション結果を示す。実船推定値は、補助推力なしの場合と摩擦修正をした場合の間にあり、舵効き修正をした場合は実船推定値に近い値を示していることがわかる。

[0083] このように、定常直進時の  $f_{REC}$  は、船の設計段階での推定値、船の幾何学的な構造、模型試験での推定値を用いて求めることができ、上記のように決

定される補助推力係数  $f_{TA}$  と  $f_{REC}$  とを用いて補助推力  $T_A$  を算出することができる。以下に説明する自由航走模型船試験装置を用いた自由航走模型船試験では、このようにして算出できる補助推力  $T_A$  を用いて舵を考慮して試験を行う。

[0084] <自由航走模型船試験装置>

図5は、本発明の実施の形態における自由航走模型船試験方法を実現するための自由航走模型船試験装置100を示す図である。

[0085] 自由航走模型船試験装置100は、図5に示すように、自由航走模型船10に搭載されたアナログ／パルス変換器12、モータ増幅器14、ダクトファンモータ16及び検力計18と、自動追尾台車20に搭載されたカメラ22、検力計増幅器24及び制御コンピュータ（制御PC）26と、を含んで構成される。

[0086] 自由航走模型船10は、試験対象となる実際の船舶を模倣した模型船である。自由航走模型船10は、以下に説明する補助推力系とは別にプロペラ等の主推力系を有し、水上を自由航走することができるように構成されている。自動追尾台車20は、カメラ22によって自由航走模型船10を撮像し、その情報に基づいて制御コンピュータ26による制御によって自由航走模型船10を自動に追尾するように構成されている。例えば、自動追尾台車20は、試験用プール上に配置されたレールに取り付けられ、レール上を走行することによって自由航走模型船10を追尾できるように構成される。さらに、自動追尾台車20の追尾によって自由航走模型船10の速度（船速）が測定され、制御コンピュータ26に入力される。

[0087] 自由航走模型船10には、補助推力付加手段としてダクトファンモータ16が搭載されている。ダクトファンモータ16は、アナログ／パルス変換器12に入力された補助推力指令信号に基づいて出力が制御され、その出力が自由航走模型船10の主推力系とは別に設けられた補助推力となる。アナログ／パルス変換器12に補助推力指令信号が入力されると、その信号に応じた推力を生み出すようにダクトファンモータ16を制御するパルス信号に変



換され、パルス信号がモータ増幅器 14 によって増幅されてダクトファンモータ 16 に入力され、ダクトファンモータ 16 が駆動される。これにより、ダクトファンモータ 16 によって自由航走模型船 10 に対して所望の補助推力が与えられる。

[0088] また、自由航走模型船 10 には、ダクトファンモータ 16 の出力を検出して出力する検力計 18 が搭載されている。検力計 18 は、ダクトファンモータ 16 の補助出力を検出して、検力計増幅器 24 へ出力する。

[0089] 自動追尾台車 20 には、検力計増幅器 24 が搭載されており、検力計 18 で検出された実際の補助出力が入力される。検力計増幅器 24 は、実際の補助出力を増幅して制御 PC 26 に出力する。制御 PC 26 は、検力計増幅器 24 から補助出力に応じた信号を受けて、補助出力を所望の値となるように補助推力指令信号を生成してアナログ／パルス変換器 12 へ出力する。このように、フィードバック制御を行うことによって、自由航走模型船 10 に対して所望の補助推力を付与することができる。

[0090] ここで、所望の補助推力は、上記の自由航走模型船試験方法にしたがって設定することができる。すなわち、 $u_R/u$  が実船の値と等しくなるように補助推力係数  $f_{TA}$  の値を求め、その値を使って数式 (14) に従って補助推力とプロペラ回転数を設定する。このとき、補助推力係数  $f_{TA}$  の値は、船速に応じて設定することが好適である。また、 $f_{REC}$  は、例えば定常直進時であれば上記のように船の設計段階での推定値、船の幾何学的な構造、模型試験での推定値を用いて求めることができる。これにより、無次元舵直圧力すなわち舵効きを実船相当にした自由航走模型試験を実施することができる。

[0091] また、図 6 に示す自由航走模型船試験装置 102 のような構成としてもよい。自由航走模型船試験装置 102 では、検力計増幅器 24 及び制御コンピュータ (制御 PC) 26 も自由航走模型船 10 に搭載される。なお、自由航走模型船試験装置 100 と同じ構成については、同一の符号を付して説明を省略する。

[0092] 自由航走模型船試験装置 102 では、さらに船速検出器 70 が自由航走模

型船 10 に搭載される。船速検出器 70 は、自由航走模型船 10 の速度（船速）を計測し、制御コンピュータ 26 に入力する。船速検出器 70 は、例えば、ピトー管等の速度計測手段から船速を求めてもよいし、GPS 等の位置計測手段から得られる自由航走模型船 10 の位置の時間的な変化から船速を求めてもよい。また、電磁 LOG センサやドップラー LOG センサ等を用いて対水船速を求めてもよい。

[0093] 制御コンピュータ 26 は、自由航走模型船試験装置 100 と同様に、上記の自由航走模型船試験方法にしたがって  $u_R/u$  が実船の値と等しくなるように補助推力係数  $f_{TA}$  の値を求め、その値を使って数式 (14) に従って補助推力とプロペラ回転数を設定する。このとき、補助推力係数  $f_{TA}$  の値は、船速に応じて設定することが好適である。また、 $f_{REC}$  は、例えば定常直進時であれば上記のように船の設計段階での推定値、船の幾何学的な構造、模型試験での推定値を用いて求めることができる。

[0094] また、図 7 に示す自由航走模型船試験装置 104 のような構成としてもよい。自由航走模型船試験装置 104 では、船速検出器 70 の代わりに、自由航走模型船 10 には船速情報受信器 72 が搭載される。船速情報受信器 72 は、陸上に設けた船速検出器 74 から自由航走模型船 10 の船速の情報を受信し、制御コンピュータ 26 に入力する。船速検出器 74 は、例えば、光学的方法や無線を用いた方法により自由航走模型船 10 の船速を求めるようにすればよい。また、GPS 等の位置計測手段から得られる自由航走模型船 10 の位置の時間的な変化から船速を求めてもよい。

[0095] 自由航走模型船試験装置 104 においても、自由航走模型船試験装置 100, 102 と同様に、上記の自由航走模型船試験方法にしたがって  $u_R/u$  が実船の値と等しくなるように補助推力係数  $f_{TA}$  の値を求め、その値を使って数式 (14) に従って補助推力とプロペラ回転数を設定すればよい。

[0096] なお、自由航走模型船試験装置 102, 104 では、自由航走模型船 10 に電池等の電源を搭載し、試験に必要な電力を当該電源から供給するようにしてもよい。これにより、自動追尾台車 20 等から外部電力を供給すること

なく、自由航走模型船10単体で試験を実施することができる。

[0097] また、図8に示すような荷重度変更自走試験装置200による自由航走模型船試験装置によっても本発明の実施の形態における自由航走模型船試験方法を実現することができる。図8は、荷重度変更自走試験装置200に用いる試験水槽と曳引車の構造を示す要部平面図である。

[0098] 図8に示すように、曳引車（追尾手段）Aは主台車32、主台車32上の副台車34、および副台車34上の回転盤36を含んで構成される。

[0099] 水槽Hは、自由航走模型船30を自走させるためのものであり、X-Y-Z 3次元直交座標系が設定されている。以下、水槽Hに設定されている座標系を用いて自由航走模型船30の位置・方向を特定する場合、大文字のX、Y、Z及び $\psi$ を用いる。本実施形態においては、X-Y-Z 3次元直交座標系のX方向は、水槽Hに水が入った状態において水面の外郭により形成される長方形の長手方向をいう。そして、水面上でX軸に直交する方向をY方向、X方向およびY方向の何れとも直交する鉛直方向をZ方向とする。

[0100] 曳引車Aは主台車32によってレール38上をX方向に動くことができる。主台車32には副台車34が設置されており、副台車34は主台車32上をY方向に動くことができる。副台車34は、回転盤36を備えている。回転盤36は、Z方向（Z軸）を回転軸として回転することができる。X軸を基準として、回転盤36がZ軸回りに回転する回転方向を $\psi$ 方向と記す。曳引車Aの位置を $X_c$ 、 $Y_c$ と記し、X軸を基準とした回転方向を $\psi_c$ と記す。曳引車Aの位置と方向 $X_c$ 、 $Y_c$ 、 $\psi_c$ は外部からの信号によってそれぞれ制御することができる。

[0101] 図9は、荷重度変更試験装置200の構造を示す要部斜視図であり、変位検出・補助推力付加のための荷重度変更試験装置200の構造の概略を示している。この荷重度変更試験装置200は、図8に示した曳引車Aの回転盤36上に設置される。そして、その下端の模型固定部40において、破線で示した自由航走模型船30の重心位置に固定される。自由航走模型船30を水平に保つためのジンバル部42を備えていることによって、図8に示す曳

引車Aが自由航走模型船30の横揺れ・縦揺れ・船首揺れを拘束することがなくなる。すなわち、ジンバル部42により、自由航走模型船30のピッチ方向、ロール方向、ヨー方向に対する運動が許容される。

[0102] 水槽Hに設定されているX-Y-Z 3次元直交座標系（図8参照）とは別に、荷重度変更試験装置200にはx-y-z 3次元直交座標系が設定されている。以下、荷重度変更試験装置200に設定されている座標系を用いて自由航走模型船30の位置・方向を特定する場合、小文字のx、y、z及びφを用いる。このx-y-z 3次元直交座標系のx方向とは、回転盤36上に固定された水槽Hの水面に平行な所定方向をいう。そして、水面に平行でx軸に直交する方向をy方向、x方向およびy方向の何れとも直交する鉛直方向をz方向とする。x-y-z 3次元直交座標系は、回転盤36上に固定されたものであるから、回転盤36の回転に伴って、x方向、y方向が変化する。ただし、z軸回りの回転方向の基準位置をx方向としているから、z軸回りの回転方向φが回転盤36の回転に伴って変化することはない。

[0103] 荷重度変更試験装置200では、模型固定部40およびジンバル部42を備えている支柱部44が、鉛直方向に移動可能な状態でx移動部（補助推力付加手段）46に取付けられている。支柱部44は、x移動部46内のローラー（補助推力付加手段）48によって、鉛直となるように保たれると同時に自由航走模型船30の上下揺れを拘束することはない。

[0104] x移動部46は下方にローラー48を備えており、ローラー48がxレール50上に乗っている。ローラー48が回転してxレール50を移動することにより、x移動部46はx方向に動くことができる。xレール50の下方にはローラー（補助推力付加手段）52が設けられており、ローラー52がyレール（補助推力付加手段）54上に乗っている。ローラー52が回転してyレール54上を移動することにより、xレール50はy方向に動くことができる。

[0105] 自由航走模型船30のx方向の揺れはx揺れ検出用ポテンシオメータ（運動状態検出手段）56によって検出される。自由航走模型船30のy方向の

揺れは  $y$  揺れ検出用ポテンシオメータ（運動状態検出手段）58によって検出される。自由航走模型船30の船首揺れは船首揺れ検出用ポテンシオメータ（運動状態検出手段）60によって検出される。これらのポテンシオメータによって検出される  $x$  揺れと  $y$  揺れ、船首揺れの値を  $x$ ,  $y$ ,  $\phi$  と記す。

[0106]  $x$  移動部46には  $x$  揺れ用ワイヤー62を介して  $x$  力用サーボモータ（補助推力付加手段）64が接続されており、これらを介して  $x$  移動部46に  $x$  方向の力をかけることができる。 $x$  レール50には  $y$  揺れ用ワイヤー66を介して  $y$  力用サーボモータ（補助推力付加手段）68が接続されており、これらを介して  $x$  レール50に  $y$  方向の力をかけることができる。 $x$  力用サーボモータ64が生み出す  $x$  方向の力を  $F_x$ 、 $y$  力用サーボモータ68が生み出す  $y$  方向の力を  $F_y$  と記す。

[0107] ここで、所望の補助推力は、上記の自由航走模型船試験方法にしたがって設定することができる。これは、図8に示した自由航走模型船試験装置と同様である。

[0108] なお、模型固定部40、ジンバル部42および支柱部44の合計重量は自由航走模型船30の排水量に含むようにすることが好適である。

[0109] また、検出された  $x$ ,  $y$ ,  $\phi$  を信号に変換して曳引車Aに入力し、これら  $x$ ,  $y$ ,  $\phi$  が0になるように例えばPID制御のようなフィードバック制御によって  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $\Psi_0$  を制御する。その結果、曳引車Aは自走する自由航走模型船30の位置と方位を追尾して動くことになる。

[0110] 以上のように、舵効きを模型船と実船とで相似にすることによって、自由航走模型船で実船の操縦性能を直接調べることが可能となる。すなわち、検証の困難な実船対応のシミュレーション計算をおこなわなくても、幾何学的な寸法とフルードの相似則に従った時間の変換のみで、自由航走模型船の操縦運動を実船の操縦運動とみなすことができるようになる。様々な操舵に対する船の運動応答を模型船を使って直接の物理現象として再現して目で見ることができる、計測できることの意義は大きいといえる。

[0111] [第2の実施の形態]

<自由航走模型船試験方法>

上記第1の実施の形態では、直進時船速  $V$  が一定、したがって船速の前後方向成分  $u$  が一定である場合に実船と模型船で舵効きを相似させる態様について説明した。第2の実施の形態では、直進時船速  $V$  が一定の場合に限らず風や波等の外力の影響等により直進時に限らず斜航・旋回時の船速の前後方向成分  $u$  が一定とならない場合にも実船と模型船で舵効きを相似にする態様について説明する。

[0112] 本実施の形態では、実船の基本的性能推定に基づき、外力下で変化する船速の前後方向成分  $u$  を計測しながらその計測データに基づきプロペラ回転数と補助推力装置の出力を制御することで外力下における模型船の船速応答を実船と相似にする。外力下では船は一般に操舵を必要とする。操舵は舵抵抗と斜航・旋回抵抗を誘起するので、船速応答を相似にするためにはこれらの抵抗成分も模型船と実船で相似にする必要がある。

[0113] まず、外乱下の操縦運動において実船と模型船で船速の前後方向成分  $u$  の応答が相似となる条件は数式(15)の運動方程式で表現される。

[数27]

$$\begin{cases} M'u_s' = (1 - t_s)T_s' - R_s' - E_s' - F_s' \\ M'u_m' = (1 - t_m)T_m' - R_m' + T_A' - E_m' - F_m' \end{cases} \quad \dots (15)$$

ここで、 $M'$  は付加質量を含む船の質量、 $u'$  は船速の前後方向成分、 $t$  は推力減少率、 $T'$  はプロペラ推力、 $T_A'$  は補助推力、 $R'$  は直進時の抵抗成分、 $F'$  は舵と斜航・旋回による抵抗成分、 $E'$  は外乱による抵抗成分を示す。

[0114] また、「 $'$ 」は水の密度  $\rho$ 、船の代表長さ  $L$ 、重力加速度  $g$  による無次元値であることを意味する。すなわち、質量は  $\rho L^3$ 、速度は  $\sqrt{Lg}$ 、力は  $\rho L^3 g$ 、時間は  $\sqrt{L/g}$  によって無次元化が行われる。 $\rho$  と  $L$  は、実船と模型船のそれぞれに対応する値を用いる。例えば、船速  $u'$  を無次元化すると、数式(16)として表わすことができる。

[数28]

$$u'_R = \frac{u_R}{\sqrt{Lg}} \quad \dots (16)$$

[0115] 船速応答が模型船と実船で相似になるためには数式(15)の2つの右辺が時々刻々の船速の変化に応じて等しい振る舞いをすればよい。ここで、 $F'$  は舵直圧力と操縦運動が、 $E'$  は実験条件と操縦運動が相似であればそれぞれ実船と模型船で相似性が確保される。舵直圧力とそれによって誘起される操縦運動の相似は数式(17)で近似される。

[数29]

$$u'_{Rs} = u'_{Rm} \quad \dots (17)$$

ここで、 $u'_{Rs}$  は、実船の舵有効流入速度の前後方向成分（無次元値  $u'_R$  : プロペラ回転数と船速の関数）を示し、 $u'_{Rm}$  は、模型船の舵有効流入速度の前後方向成分（無次元値  $u'_R$  : プロペラ回転数と船速の関数）を示す。

[0116] 舵効きの相似を前提とすれば、任意の  $u'$  について次式が成立すれば実船と模型船の相似性が確保されると考えられる。

[数30]

$$(1 - t_s)T'_s - R'_s = (1 - t_m)T'_m + T'_A - R'_m \quad \dots (18)$$

[0117] ここで、補助推力  $T'_A$  は数式(19)で表わされる。

[数31]

$$T'_A = f_{TA}T'_{SFC} \quad \dots (19)$$

ここで、 $f_{TA}$  は補助推力が摩擦修正量の何倍の値であるかを表す補助推力係数である。 $T'_{SFC}$  は摩擦修正に必要な力である。

[0118] 数式(19)を数式(18)に代入すると数式(20)が得られる。

[数32]

$$(1 - t_s)T'_s = (1 - t_m)T'_m - (1 - f_{TA})T'_{SFC} \quad \dots (20)$$

[0119]  $F'$  及び  $E'$  に関する模型船と実船の相似が数式(17)により確保され

、 $T_A'$  の制御によって数式 (20) が成り立つようにすることで数式 (15) の右辺が実船と模型船の速度  $u'$  に対して等しく振ることになる。すなわち、数式 (17) と数式 (20) を非線形連立方程式とし、 $f_{TA}$  と模型船のプロペラ回転数  $n_m'$  を  $u'$  を助変数とする未知数として解けば補助推力とプロペラ回転数を船速に応じてどのように制御すれば外乱下において実船と模型船で船速の前後方向成分の応答を相似にすることができるかがわかる。このことによって、船速応答の相似性が確保される。

[0120] なお、舵有効流入速度  $u_R'$  を具体的に求めるための推定式はいくつか提案されているが、たとえば数式 (21) で推定することができる。

[数33]

$$\begin{cases} u'_{Rs} = n'_s P' \lambda_s \\ u'_{Rm} = n'_m P' \lambda_m \end{cases} \dots (21)$$

ここで、 $P'$  は数式 (22) で定義されるプロペラピッチの無次元値を示す。

[数34]

$$P' = \frac{P}{L} \dots (22)$$

また、 $\lambda_s$  と  $\lambda_m$  は数式 (23) の添字の \* をそれぞれ s と m に読み替えて得られる。

[数35]

$$\lambda_* = \varepsilon_* \left[ \eta \left\{ (1 - s_*) (1 - \kappa_*) + \kappa_* \sqrt{(1 - s_*)^2 + \frac{8}{\pi} \left( \frac{P'}{D} \right)^2 K_{T*}} \right\}^2 + (1 - \eta) (1 - s_*)^2 \right]^{1/2} \dots (23)$$

ここで、 $\varepsilon$  は舵位置とプロペラ位置での伴流係数の比、 $\eta$  はプロペラ直径と舵高さの幾何学的寸法比を表す。 $\kappa$  はプロペラ増速率に関する係数を表す。また、 $s$  は数式 (24) で定義されるプロペラスリップ比を表す。



[数36]

$$\begin{cases} s_s = 1 - J_s \frac{D'}{P'} \\ s_m = 1 - J_m \frac{D'}{P'} \end{cases} \dots (24)$$

[0121] 図10は平水中操縦性能について模型船の4状態と実船の推定値を比較したものである。いずれも実船プロペラ回転数一定状態に対応するシミュレーション計算である。図10(a)は、左35度旋回を行ったときの航跡(X, Y)を示す。図10(b)は、左35°旋回を行ったときの舵直圧力(F<sub>N</sub>)の時間変化を示す。図10(c)は、左35°旋回を行ったときの縦距(Advance)及び旋回圏(Tactical d.)の対比を示す。図10(d)は、平水中において右20度Z試験を行った場合の航跡(X, Y)を示す。図10(e)は、平水中において右20度Z試験を行った場合の蛇角と船首方向(δ, ψ)の時間変化を示す。図10(f)は、平水中において右20度Z試験を行った場合の舵直圧力(F<sub>N</sub>)の時間変化を示す。図10(g)は、平水中において右20度Z試験を行った場合の第1行き過ぎ角(ψ<sub>。a1</sub>)及び第2行き過ぎ角(ψ<sub>。a2</sub>)の対比を示す。

[0122] 図中の添字NCは通常的自由航走模型試験のシミュレーション計算結果(小破線)、SFCは補助推力を使っていわゆる摩擦修正をおこなったシミュレーション計算結果(大破線)、REC及びRSCは本発明の手法に従ったシミュレーション計算結果を示す。RECは補助推力のみを制御した場合のシミュレーション計算結果(点線、第1の実施の形態)であり、RSCは補助推力と模型プロペラ回転数両方を制御した場合のシミュレーション計算結果(実線、第2の実施の形態)である。なお、図中のプロット(点)は、実船における推定値を示す。

[0123] 本発明の手法に従ったシミュレーション計算結果は、補助推力のみを制御した場合及び補助推力と模型プロペラ回転数両方を制御した場合のいずれにおいても通常的自由航走模型試験のシミュレーション計算結果及び補助推力を使っていわゆる摩擦修正をおこなったシミュレーション計算結果に比べて

改善された。補助推力のみを制御した場合と補助推力と模型プロペラ回転数両方を制御した場合は大差なく、いずれも実船相似の平水中操縦性能を示した。厳密には、補助推力と模型プロペラ回転数両方を制御した場合が補助推力のみを制御した場合よりも精度が高かった。

[0124] 図11(a)～図11(c)は、それぞれ波浪中定常航行時の平水中を基準とした船速比( $V/V_0$ )と斜航角( $\beta$ )、舵角( $\delta$ )を、先の模型船4状態と実船の推定値を比較したものである。シミュレーション計算結果は、実船プロペラ回転数一定状態に対応している。入射波の方向は船首右舷30度、すなわち入射波との出会角は150度とした(船と正面からぶつかる波の出会角を180度とする)。波と船長との比(波高船長比: $H_w/L$ )は1/60とした。横軸は波長船長比を表す。なお、図中の添字、線種等は図10と同様に示した。

[0125] 波浪中の航行に対するシミュレーション計算結果も、通常的自由航走模型試験のシミュレーション計算結果及び補助推力を使っていわゆる摩擦修正をおこなったシミュレーション計算結果に比べて改善された。特に、補助推力と模型プロペラ回転数両方を制御した場合が補助推力のみを制御した場合よりも精度が高かった。この結果から、補助推力と模型プロペラ回転数両方を制御した場合、波等の外力の影響下においても実船と相似の操縦性能を示すことがわかる。

[0126] 図12は、上記計算例において補助推力と模型プロペラ回転数両方を制御した場合(RSC)において用いた補助推力と模型船のプロペラ回転数の制御特性を示す。横軸は、時々刻々と変化する船速( $u'$ )と平水中船速( $u_0'$ )との比を表す。図12は、実船のプロペラ回転数 $n_s'$ が一定( $n_s' = \text{const.}$ )、実船のトルク $Q_s'$ が一定( $Q_s' = \text{const.}$ )、実船の出力馬力 $W_s'$ が一定( $W_s' = \text{const.}$ )の場合について示している。 $f_{TA}$ は、制御に用いる補助推力と摩擦修正係数に必要な力の比を表す。 $n_m'$ は、無次元の模型船プロペラ回転数を表す。

[0127] 図10及び図11では、実船のプロペラ回転数が一定の状態に対応した自

由航走模型試験をおこなう場合の例を示したが、図12の制御特性を利用することによって実船の任意の状態に対応した模型船の制御が可能である。また、補助推力のみを制御した場合（REC）の場合は、 $u' / u_0' = 1$ のときの補助推力と模型プロペラ回転数を用いればよい。

[0128] なお、数式（15）において $E'$ の項を考慮しない場合は船速変化の起源は操舵とこれが誘起する操縦運動のみとなる。この場合、船速応答の相似は舵効き応答の相似を必要とする。

[0129] 自由航走模型試験で補助推力装置を用いた舵効き修正によって模型船の操縦運動を近似的に実船と相似にする手法では、プロペラ回転数一定の自由航走模型試験における補助推力係数の制御の簡単化と実用性を考慮して、平水中の定常直進時の状態をもとに舵効き修正係数を決め、その値を操縦運動中で一定としている。そのため、操縦運動中においては船速応答及び舵効きの相似が必ずしも厳密には保証されない。

[0130] ここで、操縦運動で現れる船速の左右方向成分 $v'$ と無次元回頭角速度 $r'$ が伴流係数などの自航要素に及ぼす影響が直接ではなく、これらが船速 $u'$ やプロペラ荷重度 $\tau$ におよぼす影響を通して考慮できると仮定すれば、複雑な操縦運動下での取り扱いが簡単化されて本実施の形態における手法が操縦運動中にも適用できる。

[0131] 具体的には、舵効きと船速応答を同時に満足するプロペラ回転数 $n'$ と補助推力係数 $f_{TA}$ を本実施の形態における自由航走模型船試験方法によってあらかじめ船速の関数としてあらかじめ求めておいて、操縦運動中の船速に応じてプロペラ回転数 $n'$ と補助推力係数 $f_{TA}$ を制御してやればよい。これによって、操縦運動中も従来の手法より操縦運動の相似性の近似度を向上できる。

[0132] なお、プロペラ回転数も制御することで実船のプロペラ回転数一定状態だけでなくトルク一定と馬力一定、あるいは機関応答を模擬した実船の状態推定に基づいて舵効きと船速応答の相似性を実現できる。

[0133] <自由航走模型船試験装置>

図 13 は、第 2 の実施の形態における自由航走模型船試験方法を実現するための自由航走模型船試験装置 300 を示す図である。

[0134] 自由航走模型船試験装置 300 の基本構成は、自由航走模型船試験装置 100 と同様であるが、プロペラ 80 及びプロペラ駆動部 82 を制御要素として含んで構成される。プロペラ駆動部 82 は、自由航走模型船 10 の主駆動系であるプロペラ 80 を駆動するためのモータを含む。プロペラ駆動部 82 は、サーボモータ等の回転数を制御可能なモータとすることが好適である。

[0135] 第 1 の実施の形態と同様に、自動追尾台車 20 の追尾によって自由航走模型船 10 の速度（船速）が測定され、制御コンピュータ 26 に入力される。制御コンピュータ 26 では、図 12 に示したように試験条件及び自由航走模型船 10 の速度に基づいて補助推力及びプロペラ回転数が設定され、設定された補助推力及びプロペラ回転数に応じた補助推力指令信号及びプロペラ回転数指令信号が生成される。補助推力指令信号は、第 1 の実施の形態と同様に、アナログ／パルス変換器 12、モータ増幅器 14 を介してダクトファンモータ 16 に入力され、ダクトファンモータ 16 が駆動される。これにより、ダクトファンモータ 16 によって自由航走模型船 10 に対して所望の補助推力が与えられる。また、プロペラ回転数指令信号は、プロペラ駆動部 82 に入力され、これによりプロペラ 80 の回転数が制御される。

[0136] また、図 6 や図 7 に示した自由航走模型船試験装置 102, 104 のような構成にも同様に適用することができる。なお、自由航走模型船 10 の速度（船速）は、図 6 及び図 7 に示した構成の他、これらの説明に関連した段落 0092, 0094 で述べた各種の手段で測定できる。

[0137] 本実施の形態によれば、風や波等の外力の影響が考慮された自由航走模型試験を実現することができる。これにより、外力下においても自由航走模型試験によって実船の基本性能を推定することができる。

### 産業上の利用可能性

[0138] 本発明における自由航走模型船試験方法及び自由航走模型船試験装置は、船舶のみならず、外力及び流体から抵抗を受けて自走する物体の運動性能の

試験に適用することができる。例えば、船舶以外の浮体、水中航行体等の各種の模型を用いた自由航走試験に適用することができる。

### 符号の説明

[0139] 10 自由航走模型船、16 ダクトファンモータ、18 検力計、20 自動追尾台車、26 制御コンピュータ、30 自由航走模型船、32 主台車、34 副台車、36 回転盤、38 レール、70 船速検出器、72 船速情報受信器、74 船速検出器、80 プロペラ、82 プロペラ駆動部、100, 102, 104 自由航走模型船試験装置、200 荷重度変更試験装置（自由航走模型船試験装置）、300 自由航走模型船試験装置。

## 請求の範囲

[請求項1] プロペラと舵を有した自由航走可能な模型船を用いた自由航走模型船試験方法において、

前記模型船に補助推力を付加する補助推力付加手段を、舵効きの相似性を確保するように前記模型船の船速に基づいて計算した補助推力の計算結果に応じて制御し、前記模型船に舵効きの相似性を確保する補助推力を付加することを特徴とする自由航走模型船試験方法。

[請求項2] 舵直圧力に最も支配的な影響をおよぼす舵有効流入速度を用いて前記補助推力を計算することを特徴とする請求項1に記載の自由航走模型船試験方法。

[請求項3] 前記補助推力の計算は、前記舵有効流入速度の前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  に基づいて計算することを特徴とする請求項2に記載の自由航走模型船試験方法。

[請求項4] 前記模型船と実船の双方の前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  が等しくなる条件である

[数1]

$$u'_{Rs} = u'_{Rm} \cdots (1)$$

$u_{Rs}'$  : 実船の舵有効流入速度の前後方向成分 (無次元値  $u_R'$  : プロペラ回転数と船速の関数)

$u_{Rm}'$  : 模型船の舵有効流入速度の前後方向成分 (無次元値  $u_R'$  : プロペラ回転数と船速の関数)

に基づいて前記補助推力を計算することを特徴とする請求項3に記載の自由航走模型船試験方法。

[請求項5] 前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  を、プロペラ前進率  $J$  に基づいて、

[数2]

$$u_{R'} = \frac{u_R}{u} = (1-w)\varepsilon \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)} \cdots (2)$$

 $u_R$  : 舵有効流入速度の前後方向成分 $u$  : 船速の前後方向成分 $1-w$  : 伴流係数 $\varepsilon$  : 舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比 $\eta$  : プロペラ直径と舵高さの比 $\kappa$  : プロペラ後流の増速率に関する係数 $K_T$  : 推力係数 $J$  : プロペラ前進率

に基づいて求めたことを特徴とする請求項4に記載の自由航走模型船試験方法。

[請求項6] 前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_{R'}$  を、プロペラ荷重度  $\tau$  に基づいて、

[数3]

$$u_{R'} = \frac{u_R}{u} = (1-w)\varepsilon \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{\tau}{(1-w)^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)} \cdots (3)$$

 $u_R$  : 舵有効流入速度の前後方向成分 $u$  : 船速の前後方向成分 $1-w$  : 伴流係数 $\varepsilon$  : 舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比 $\eta$  : プロペラ直径と舵高さの比 $\kappa$  : プロペラ後流の増速率に関する係数 $K_T$  : 推力係数 $\tau$  : プロペラ荷重度

に基づいて求めたことを特徴とする請求項4に記載の自由航走模型船

試験方法。

[請求項7] 前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  を、プロペラスリップ比  $s$  に基づいて、

[数4]

$$u_R' = \frac{u_R}{\sqrt{Lg}} = \frac{nPe}{\sqrt{Lg}} \left[ \eta \left\{ (1-s)(1-\kappa) + \kappa \sqrt{(1-s)^2 + \frac{8}{\pi} \left(\frac{P}{D}\right)^2 K_T} \right\}^2 + (1-\eta)(1-s)^2 \right]^{1/2} \dots (4)$$

$u_R$  : 舵有効流入速度の前後方向成分

$\varepsilon$  : 舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比

$\eta$  : プロペラ直径と舵高さの比

$\kappa$  : プロペラ後流の増速率に関する係数

$K_T$  : 推力係数

$L$  : 船の長さ

$g$  : 重力加速度

$P$  : プロペラピッチ

$D$  : プロペラ直径

$n$  : プロペラ回転数

$s$  : プロペラスリップ比

に基づいて求めたことを特徴とする請求項4に記載の自由航走模型船試験方法。

[請求項8] 前記模型船と前記実船の双方の前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  から前記補助推力の摩擦抵抗修正量に対する補助推力係数  $f_{TA}$  を求めたことを特徴とする請求項4から請求項7のうちのいずれか1項に記載の自由航走模型船試験方法。

[請求項9] 前記補助推力係数  $f_{TA}$  を前記摩擦抵抗修正量に掛けて前記補助推力を算出することを特徴とする請求項8に記載の自由航走模型船試験方法。

[請求項10] 前記補助推力係数  $f_{TA}$  を前記模型船の船速により補正することを特徴とする請求項8あるいは請求項9に記載の自由航走模型船試験方



法。

[請求項11] 外力下で変化する模型船の前記船速を検出し、実船の前記船速を基に前記模型船の前記プロペラのプロペラ回転数と前記補助推力を制御し、前記外力下における前記模型船の船速応答を考慮した舵効きを前記実船と相似にしたことを特徴とする請求項1に記載の自由航走模型船試験方法。

[請求項12] 前記模型船の前記プロペラ回転数と前記補助推力を前記数式(1)及び

[数5]

$$(1 - t_s)T'_s = (1 - t_m)T'_m - (1 - f_{TA})T'_{SFC} \quad \dots (5)$$

$t_s$  : 実船の推力減少率

$T'_s$  : 実船のプロペラ推力 (無次元値 : プロペラ回転数と船速の関数)

$t_m$  : 模型船の推力減少率

$T'_m$  : 模型船のプロペラ推力 (無次元値 : プロペラ回転数と船速の関数)

$f_{TA}$  : 補助推力係数

$T'_{SFC}$  : 摩擦修正に必要な力 (無次元値 : 船速の関数)

に基づいて導出される前記模型船のプロペラ回転数と補助推力係数  $f_{TA}$  に基づき制御したことを特徴とする請求項11に記載の自由航走模型船試験方法。

[請求項13] プロペラ回転数一定、プロペラトルク一定、プロペラ出力一定、あるいは任意のプロペラ回転数変化を含む状態の前記実船を対象として、前記数式(1)及び前記数式(5)を基に前記模型船のプロペラ回転数と補助推力係数  $f_{TA}$  を導出し、前記模型船のプロペラ回転数と補助推力を制御したことを特徴とする請求項12に記載の自由航走模型船試験方法。

[請求項14] 舵を有した自由航走可能な模型船に補助推力を付加する補助推力付

加手段と、

前記模型船の船速を検出する船速検出手段と、

前記船速と前記舵に流入する流れの舵有効流入速度に基づいて前記補助推力を計算する補助推力計算手段と、

前記補助推力計算手段の計算結果に応じて補助推力付加手段を制御する制御手段を備え、

前記模型船に前記舵有効流入速度に基づいた前記補助推力を付加することを特徴とする自由航走模型船試験装置。

[請求項15] 前記補助推力計算手段は、前記舵有効流入速度の前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  に基づいて前記補助推力を計算することを特徴とする請求項14に記載の自由航走模型船試験装置。

[請求項16] 前記模型船と実船の双方の前記前後方向成分  $u_R$  の無次元値  $u_R'$  から前記補助推力の摩擦抵抗修正量に対する補助推力係数  $f_{TA}$  を求めることを特徴とする請求項15に記載の自由航走模型船試験装置。

[請求項17] 前記補助推力係数  $f_{TA}$  を予め求めた前記摩擦抵抗修正量に掛けて前記補助推力を算出することを特徴とする請求項16に記載の自由航走模型船試験装置。

[請求項18] 前記摩擦抵抗修正量は、実験で求めた値を用いることを特徴とする請求項16又は請求項17に記載の自由航走模型船試験装置。

[請求項19] 船速の前後方向成分検出手段を備え、検出した船速の前後方向成分  $u$  に基づいて前記補助推力を計算することを特徴とする請求項15から請求項18のうちのいずれか1項に記載の自由航走模型船試験装置。

[請求項20] プロペラと舵を有した自由航走可能な模型船に補助推力を付加する補助推力付加手段と、

前記模型船の船速を検出する船速検出手段と、

実船の基本的性能推定と検出した前記船速に基づき前記プロペラのプロペラ回転数と前記補助推力付加手段の出力を制御する制御手段を

備え、

前記模型船の外力下における船速応答を考慮して舵効きを前記実船と相似にしたことを特徴とする自由航走模型船試験装置。

[請求項21] 前記制御手段は、請求項11から請求項13のうちの1項に記載の自由航走模型船試験方法を実行したことを特徴とする請求項20に記載の自由航走模型船試験装置。

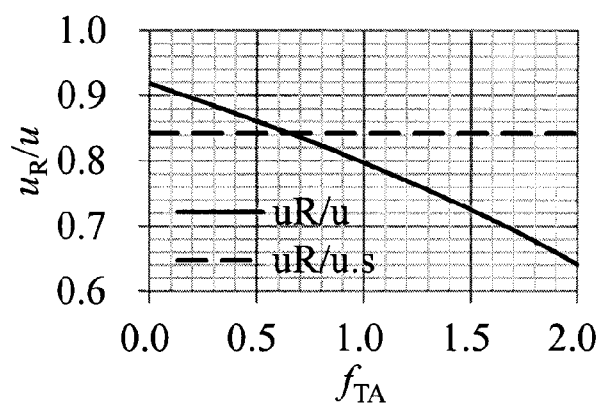
[請求項22] 前記制御手段は、請求項12又は請求項13に記載の自由航走模型船試験方法により予め求めた前記模型船のプロペラ回転数と補助推力係数  $f_{TA}$  の前記船速との関係を記憶して制御したことを特徴とする請求項20に記載の自由航走模型船試験装置。

[請求項23] 前記補助推力付加手段を前記模型船に搭載し、  
前記模型船を追尾する追尾手段を設け、  
前記船速検出手段を前記追尾手段に搭載し、  
前記船速検出手段によって検出された前記船速をフィードバックして前記補助推力付加手段を制御することを特徴とする請求項14から請求項22のうちの1項に記載の自由航走模型船試験装置。

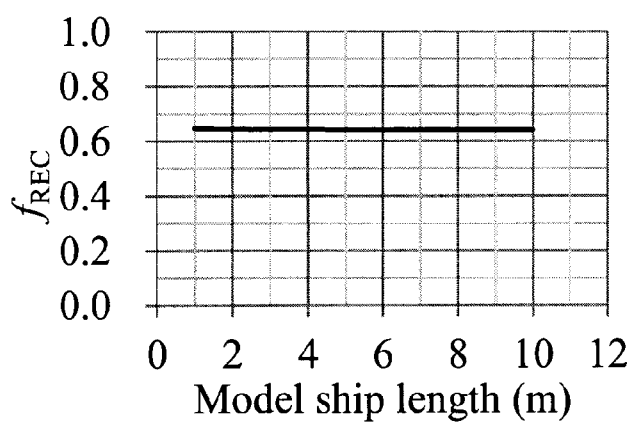
[請求項24] 前記補助推力付加手段を前記模型船に搭載し、前記船速検出手段によって検出された前記模型船の船速をフィードバックして前記補助推力付加手段を制御することを特徴とする請求項14から請求項22のうちのいずれか1項に記載の自由航走模型船試験装置。

[請求項25] 前記補助推力付加手段を前記模型船を追尾する追尾手段に設け、  
前記追尾手段として、 $X-Y-Z$  3次元直交座標系において $X$ 軸方向に動く主台車と、この主台車上に設置された $Y$ 軸方向に動く副台車と、この副台車に設けた $Z$ 軸回りに回転する回転盤とを有した曳引車を用い、前記模型船の位置と方位に応じて前記主台車と前記副台車と前記回転盤を制御することを特徴とする請求項14から請求項22のうちのいずれか1項に記載の自由航走模型船試験装置。

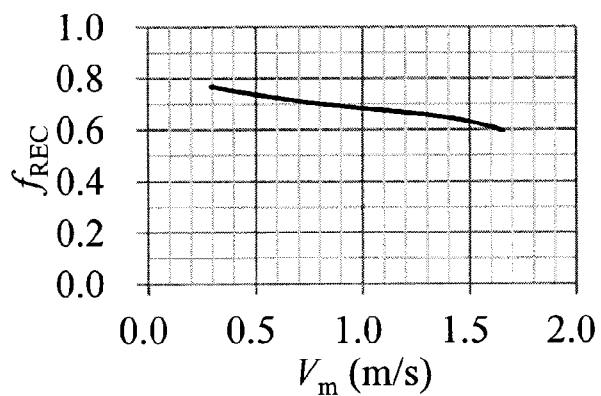
[図1]

計画船速における  $f_{TA}$  と  $u_R/u$  の関係

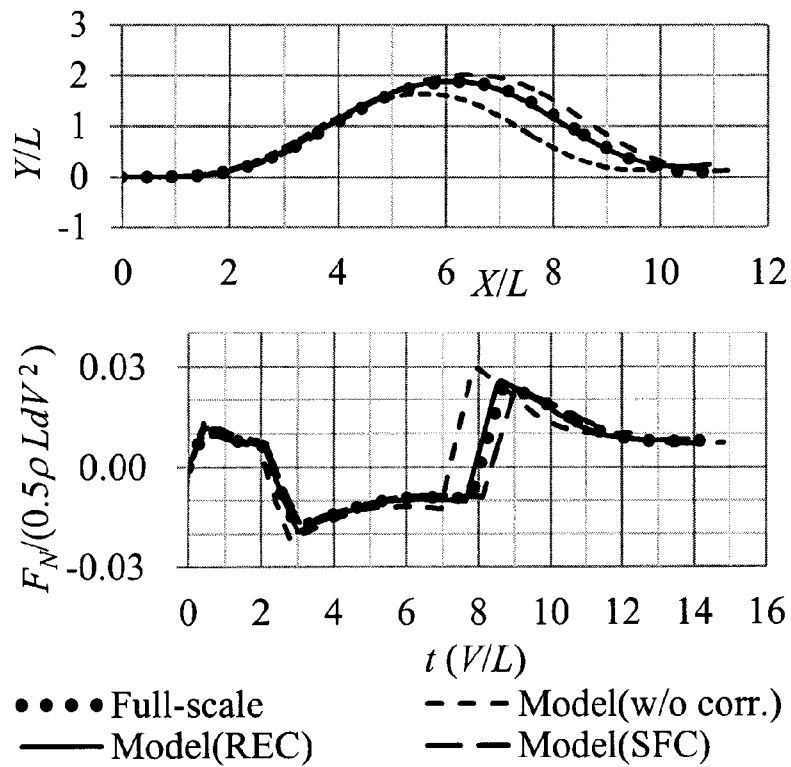
[図2]

計画船速における模型船長さと  $f_{REC}$  の関係

[図3]

計画船速における模型船船速 ( $V_m$ ) と  $f_{REC}$  の関係

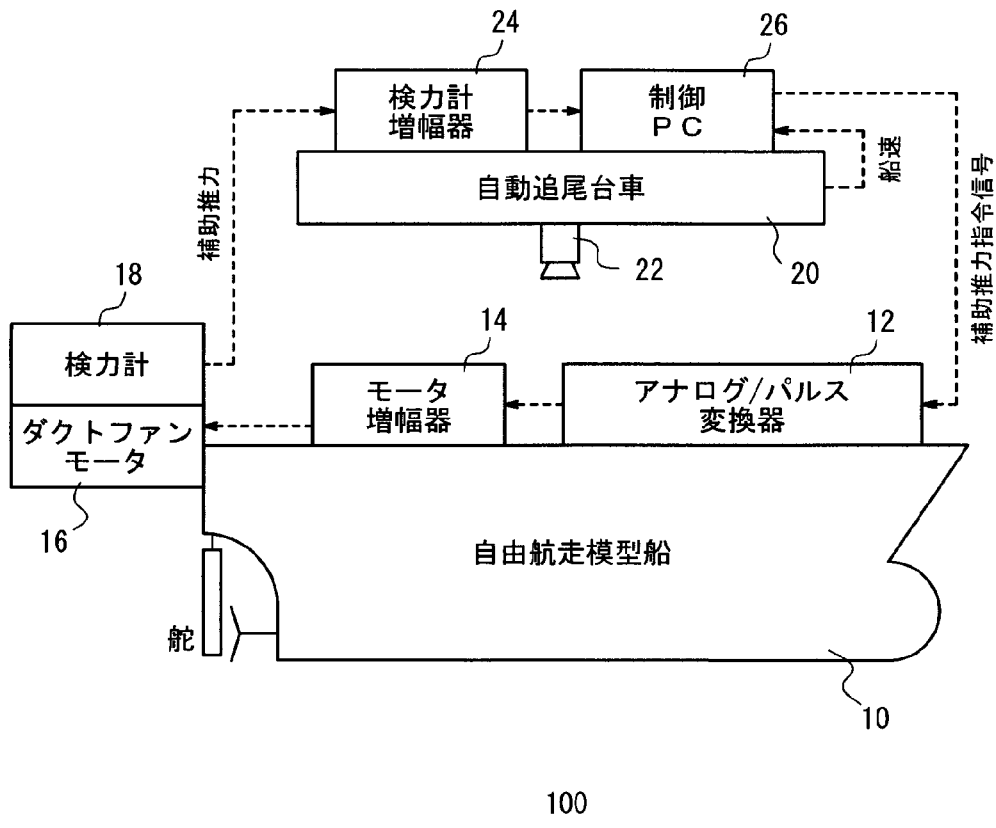
[図4]



20度Z試験における航跡と舵直圧力のシミュレーション計算結果

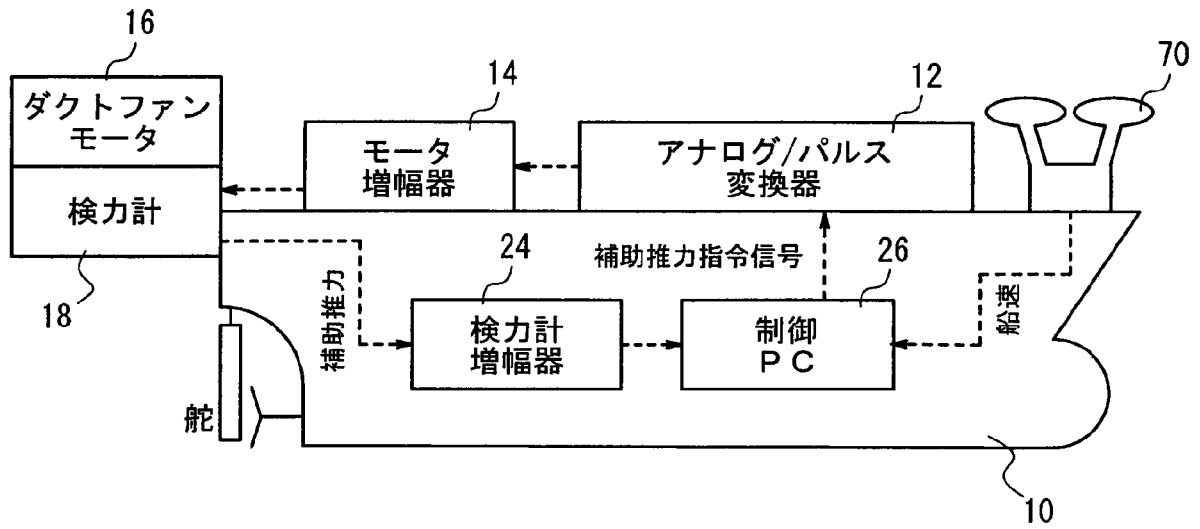
補助推力なし (Model (w/o corr.))  
 摩擦修正 (Model (SFC))  
 舵効き修正 (Model (REC))  
 実船推定値 (Full-scale) の比較

[図5]



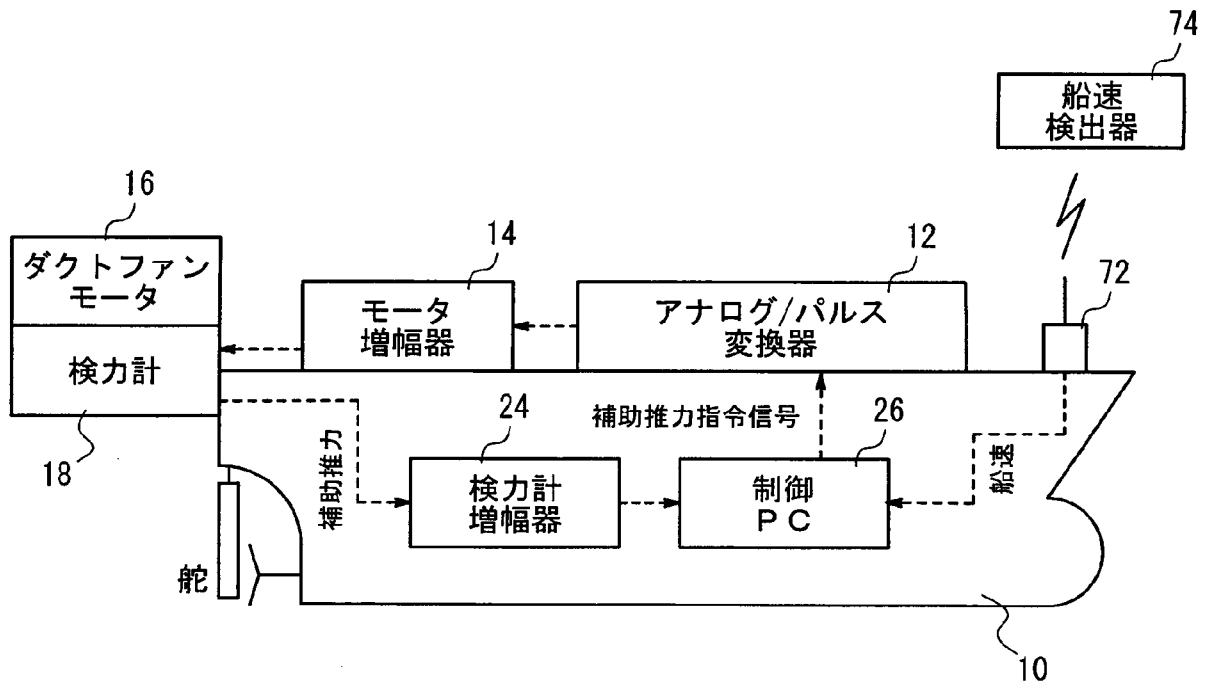
100

[図6]

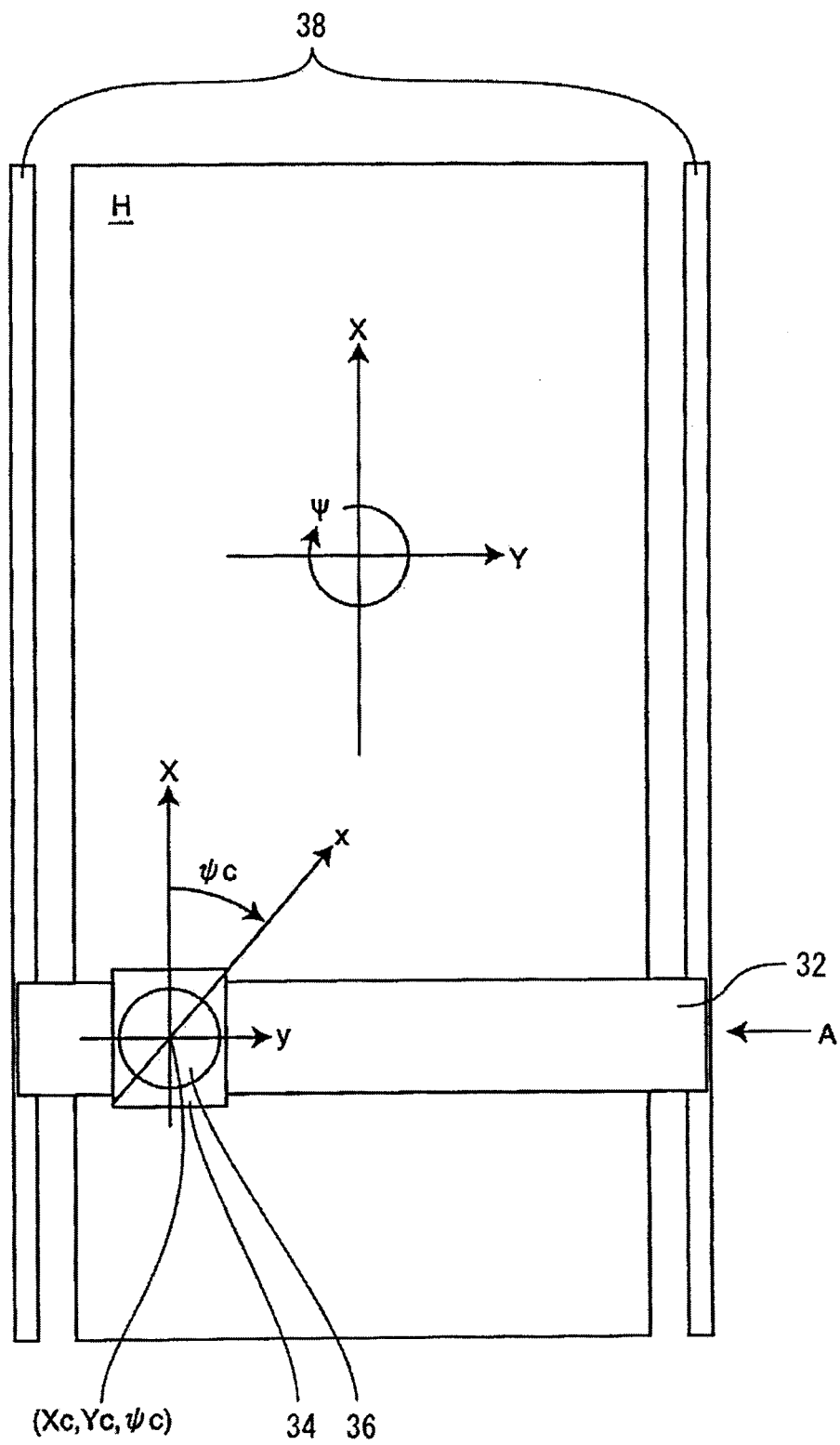


102

[図7]

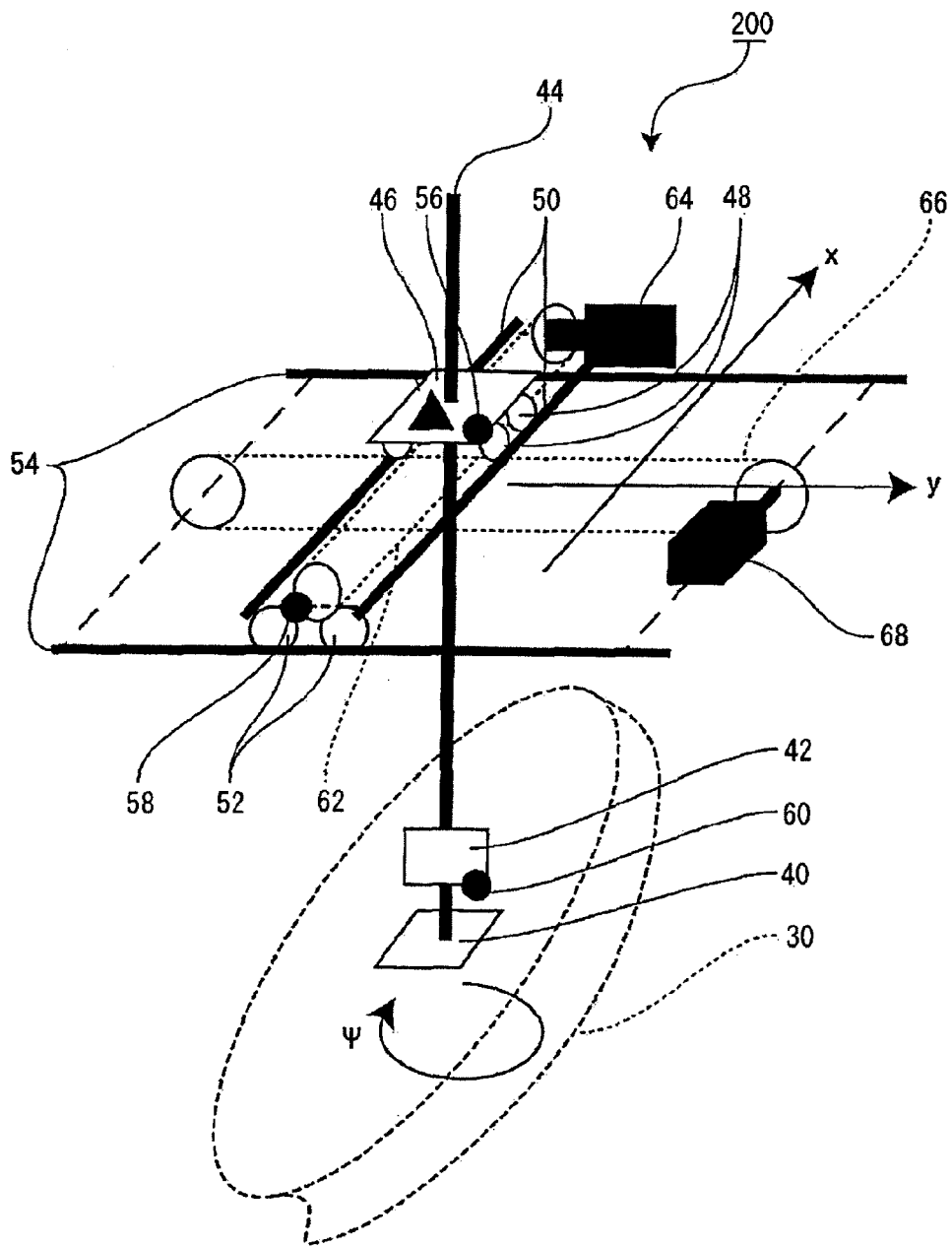


[図8]

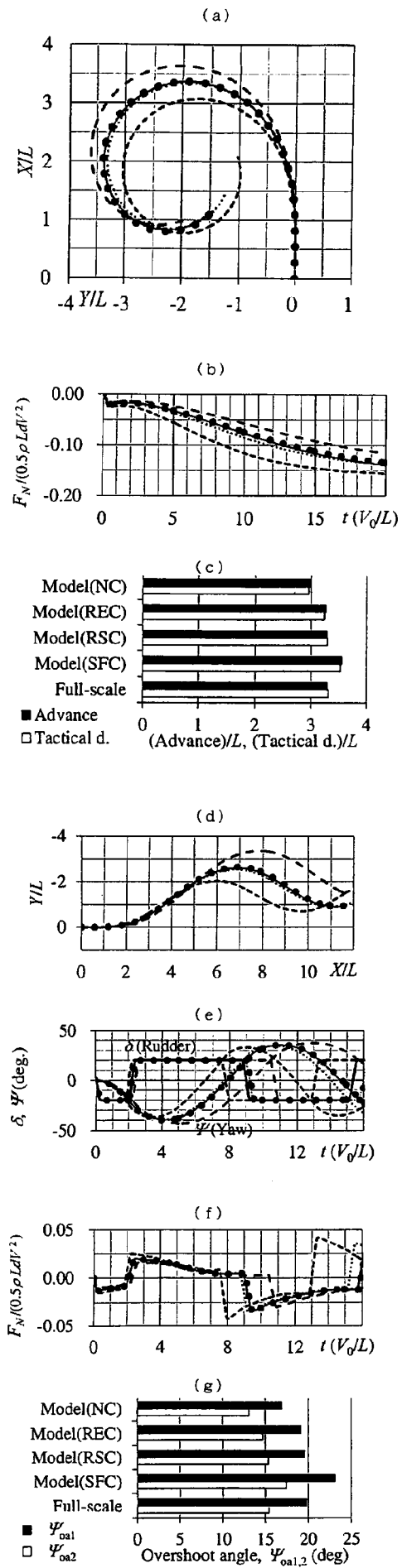




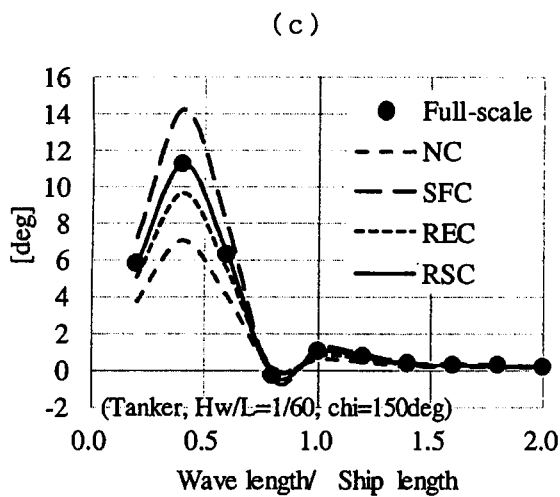
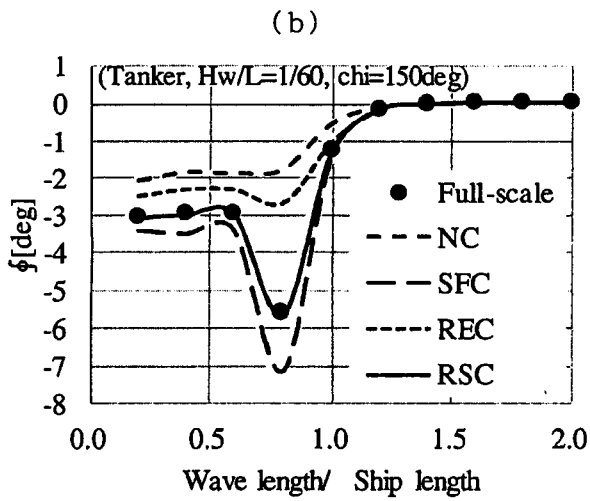
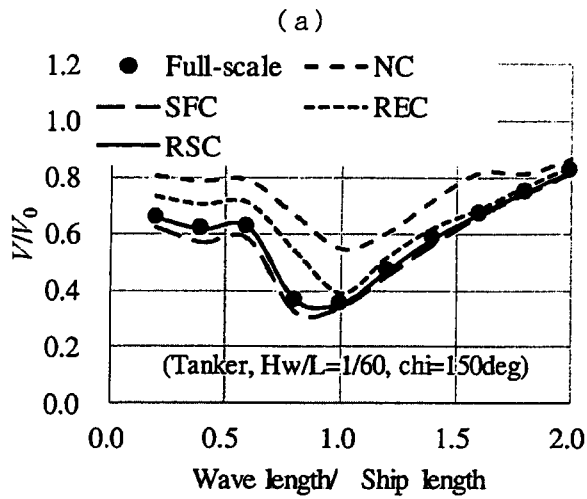
[図9]



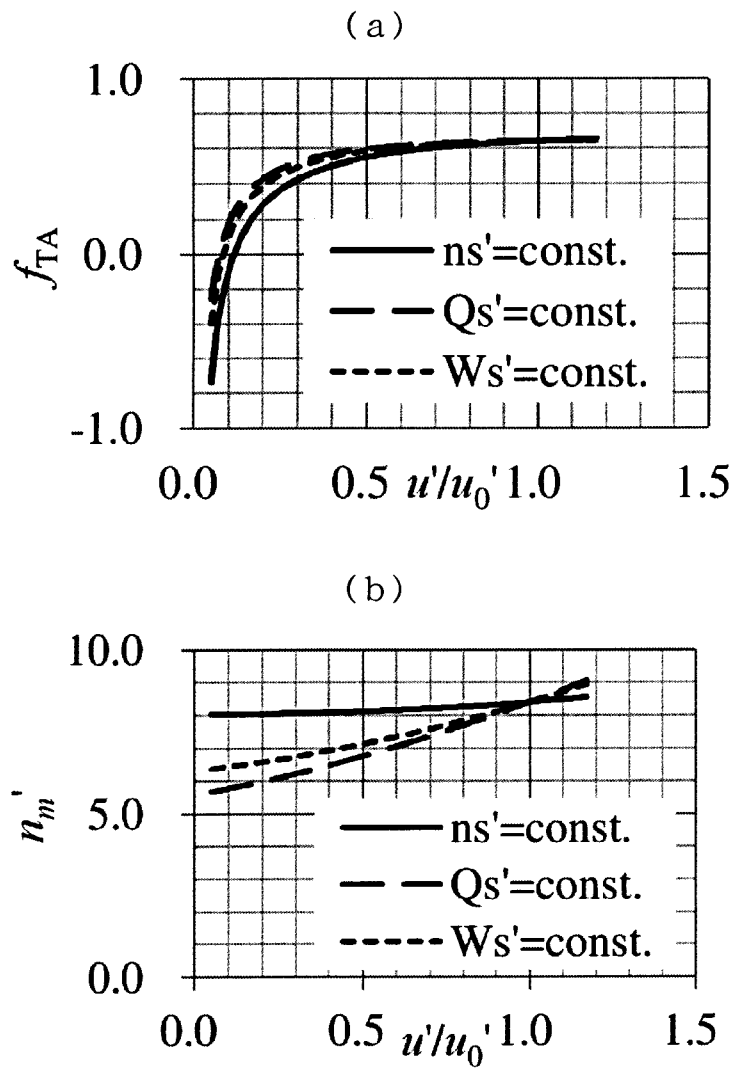
[10]



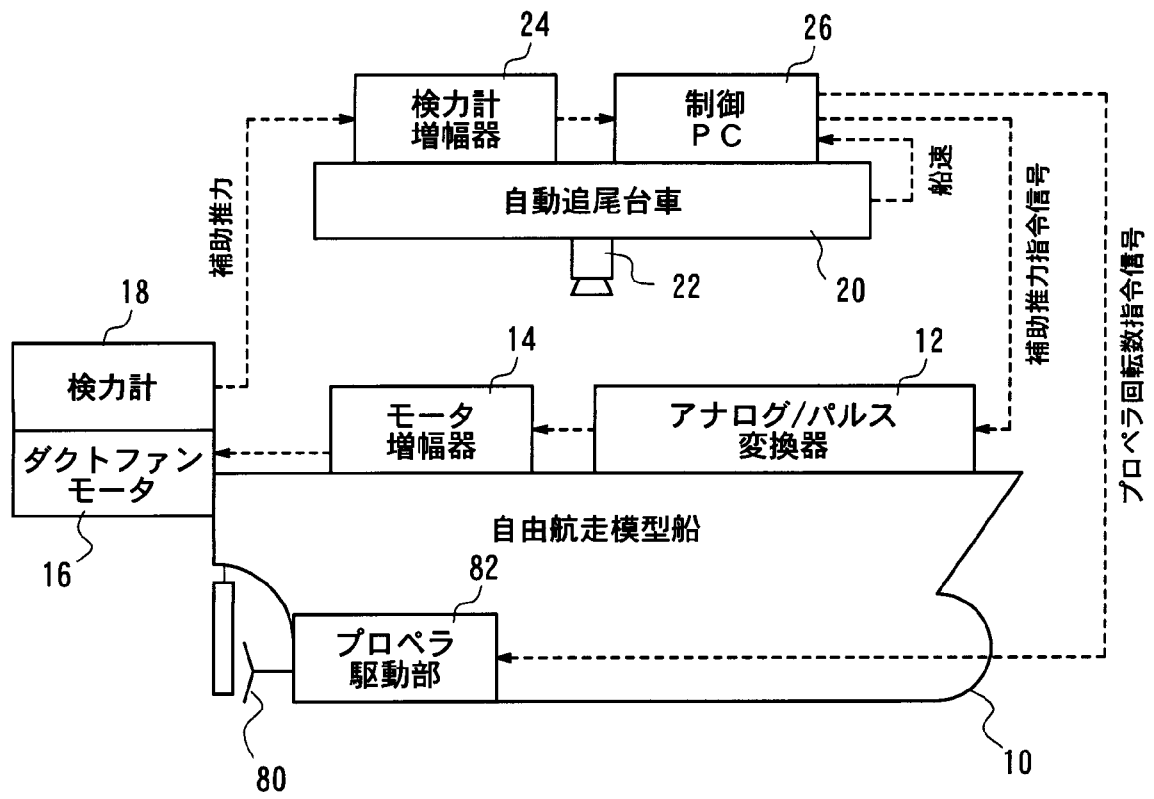
[図11]



[図12]



[図13]



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No. PCT/JP2014/060555
--

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
 G01M10/00(2006.01) i, B63B9/02(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
 G01M10/00, B63B9/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2014
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2014	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2014

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
 JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII), Science Direct, Thomson Innovation

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2012-112878 A (National Maritime Research Institute), 14 June 2012 (14.06.2012), entire text; all drawings (Family: none)	1-25
A	JP 2001-174364 A (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.), 29 June 2001 (29.06.2001), entire text; all drawings (Family: none)	1-25

Further documents are listed in the continuation of Box C.       See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 02 July, 2014 (02.07.14)	Date of mailing of the international search report 15 July, 2014 (15.07.14)
---	--

Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer
Facsimile No.	Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））  
 Int.Cl. G01M10/00(2006.01)i, B63B9/02(2006.01)i

B. 調査を行った分野  
 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））  
 Int.Cl. G01M10/00, B63B9/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの  
 日本国実用新案公報 1922-1996年  
 日本国公開実用新案公報 1971-2014年  
 日本国実用新案登録公報 1996-2014年  
 日本国登録実用新案公報 1994-2014年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）  
 JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII), Science Direct, Thomson Innovation

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2012-112878 A（独立行政法人海上技術安全研究所）2012.06.14, 全文, 全図（ファミリーなし）	1-25
A	JP 2001-174364 A（住友重機械工業株式会社）2001.06.29, 全文, 全図（ファミリーなし）	1-25

C欄の続きにも文献が列挙されている。  パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー	の日の後に公表された文献
「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献	「&」同一パテントファミリー文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願	

国際調査を完了した日 02.07.2014	国際調査報告の発送日 15.07.2014
--------------------------	--------------------------

国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ISA/J P） 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官（権限のある職員） ▲高▼見 重雄 電話番号 03-3581-1101 内線 3252	2 J	9 1 1 6
--	---	-----	---------