

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6425241号
(P6425241)

(45) 発行日 平成30年11月21日(2018.11.21)

(24) 登録日 平成30年11月2日(2018.11.2)

(51) Int. Cl. F I
GO 1 M 10/00 (2006.01) GO 1 M 10/00

請求項の数 12 (全 35 頁)

(21) 出願番号	特願2014-207705 (P2014-207705)	(73) 特許権者	501204525
(22) 出願日	平成26年10月9日(2014.10.9)		国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術 研究所
(65) 公開番号	特開2016-75641 (P2016-75641A)		東京都三鷹市新川6丁目38番1号
(43) 公開日	平成28年5月12日(2016.5.12)	(74) 代理人	110001210
審査請求日	平成29年9月19日(2017.9.19)		特許業務法人 Y K I 国際特許事務所
		(72) 発明者	上野 道雄
			東京都三鷹市新川6丁目38番1号 独立 行政法人海上技術安全研究所内
		(72) 発明者	塚田 吉昭
			東京都三鷹市新川6丁目38番1号 独立 行政法人海上技術安全研究所内
		審査官	島田 保
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法及びそれに用いられる自由航走模型船試験装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

外乱下の自由航走模型船の船体運動を舵効き船速修正を用いて実船と相似にする第1のステップと、

前記自由航走模型船の推力又はトルクの計測データからプロペラ有効流入速度の波成分を推定する第2のステップと、

前記自由航走模型船の船速の計測データと前記プロペラ有効流入速度の前記波成分の推定値から前記実船の前記プロペラ有効流入速度を推定する第3のステップと、

前記実船の前記プロペラ有効流入速度の推定値から前記実船の変動トルク又は変動推力を推定する第4のステップと、

を備えたことを特徴とする自由航走模型試験から実船の変動トルクと変動推力を推定する方法。

【請求項2】

前記第1のステップにおける前記船体運動の前記舵効き船速修正は、外乱下で変化する前記自由航走模型船の船速を計測し、前記船速と想定する前記実船のプロペラ回転数とを基に前記自由航走模型船のプロペラ回転数と補助推力を制御し、外乱下における前記自由航走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するものであることを特徴とする請求項1に記載の自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法。

【請求項3】

前記第2のステップにおいて前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' の前記波成分 u_w' を推定するにあたり、前記自由航走模型船の前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' を前記自由航走模型船で計測された前記トルクを用いたトルク一致法、又は計測された前記推力を用いた推力一致法によって求めることを特徴とする請求項1又は請求項2に記載の自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法。

【請求項4】

前記トルク一致法又は前記推力一致法は、

【数1】

$$Q_m' = K_{Qm} |_{J_m} n_m'^2 D'^5 = K_{Qm} |_{J_m} \tilde{n}_m'^2 D'^5 \dots (1)$$

Q_m' : トルク、 K_{Qm} : トルク係数、 n_m' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、 J_m : プロペラ前進率、添字 m は自由航走模型船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、

【数2】

$$T_m' = K_{Tm} |_{J_m} n_m'^2 D'^4 = K_{Tm} |_{J_m} \tilde{n}_m'^2 D'^4 \dots (2)$$

T_m' : 推力、 K_{Tm} : 推力係数、 J_m : プロペラ前進率、 n_m' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、添字 m は自由航走模型船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、を用い、前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' を、

20

【数3】

$$J_m = \frac{u_{Am}'}{n_m' D'} = \frac{u_{Am}'}{\tilde{n}_m' D'} \dots (3)$$

J_m : プロペラ前進率、 u_{Am}' : プロペラ有効流入速度、 n_m' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、添字 m は自由航走模型船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、により求めたことを特徴とする請求項3に記載の自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法。

【請求項5】

前記式(3)で求めた前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' と計測された前記船速 u' を用いて、

【数4】

$$\Delta u_w' = u_{Am}' - (1 - w_m) u' \dots (4)$$

u_w' : プロペラ有効流入速度の波成分、 u_{Am}' : プロペラ有効流入速度、 $1 - w_m$: 伴流係数、 u' : 船速、添字 m は高周波数成分、 m は自由航走模型船、 $'$ は無次元値、

から前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' の前記波成分 u_w' を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試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法。

40

【請求項6】

前記第3のステップにおいて前記実船の前記プロペラ有効流入速度を推定するにあたり、前記自由航走模型船と前記実船の前記プロペラ有効流入速度の前記波成分に尺度影響はないと仮定して推定したことを特徴とする請求項1から請求項5のうちのいずれか1項に記載の自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法。

【請求項7】

前記第4のステップにおける前記実船の前記変動トルク Q_s' を、

【数5】

$$Q_s' = 2\pi I_a' n_s' + K_{Qs} |_{J_s} n_s'^2 D'^5 \dots (5)$$

Q_s' : 変動トルク、 I_a' : プロペラの付加慣性モーメント、 n_s' : プロペラ回転数、 K_Q : トルク係数、 J_s : プロペラ前進率、 D' : プロペラ直径、添字の s は実船、 $'$ は無次元値、変数の上の \cdot は時間微分、

【数 6】

$$J_s = \frac{u_{As}'}{n_s' D'} = \frac{(1 - w_s) u' + \Delta u_w'}{n_s' D'} \dots (6)$$

J_s : プロペラ前進率、 u_{As}' : プロペラ有効流入速度、 n_s' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、 $1 - w_s$: 伴流係数、 u : 船速、 u_w' : プロペラ有効流入速度の波成分、添字の s は実船、 $'$ は無次元値、変数の上の \cdot は時間微分、 \sim は高周波数成分、に基づいて求めたことを特徴とする請求項 5 に記載の自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法。

【請求項 8】

前記第 4 のステップにおける前記実船の前記変動トルク Q_s' を、

【数 7】

$$Q_s' = \widetilde{Q}_s' + \Delta Q_s' \dots (7)$$

Q_s' : 変動トルク、 $Q_{s\sim}'$: 低周波数成分変動トルク、 $Q_{s\sim}'$: 高周波数成分変動トルク、添字 s は実船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、 \sim は高周波数成分、に基づいて高周波数成分変動トルクと低周波数成分変動トルクから求めたことを特徴とする請求項 5 に記載の自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法。

【請求項 9】

前記第 4 のステップにおける前記実船の前記変動推力を、

【数 8】

$$T_s' = m_a' P' n_s' + K_{T_s} J_s n_s'^2 D'^4 \dots (8)$$

T_s' : 変動推力、 m_a' : プロペラ回転数変動に関する付加質量、 P' : プロペラピッチ、 n_s' : プロペラ回転数、 K_{T_s} : 推力係数、 J_s : プロペラ前進率、 D' : プロペラ直径、添字 s は実船、 $'$ は無次元値、変数の上の \cdot は時間微分、に基づいて求めたことを特徴とする請求項 5 に記載の自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法。

【請求項 10】

前記第 4 のステップにおける前記実船の前記変動推力を、

【数 9】

$$T_s' = \widetilde{T}_s' + \Delta T_s' \dots (9)$$

T_s' : 変動推力、 $T_{s\sim}'$: 低周波数成分変動推力、 $T_{s\sim}'$: 高周波数成分変動推力、添字 s は実船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、 \sim は高周波数成分、に基づいて求めたことを特徴とする請求項 5 に記載の自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法。

【請求項 11】

前記第 4 のステップで得られた前記実船の前記変動トルク又は前記変動推力の推定結果を、主機特性又は推進機特性に適用して前記実船の燃費性能を推定したことを特徴とする請求項 1 から請求項 10 のうちのいずれか 1 項に記載の自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法。

【請求項 12】

前記第 4 のステップで得られた前記実船の前記変動トルク又は前記変動推力の推定結果

を、主機特性又は推進機特性に適用して外乱下における前記実船の挙動を推定したことを特徴とする請求項 1 から請求項 10 のうちのいずれか 1 項に記載の自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法及びそれに用いられる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）。これら特許文献 1 から 3 は、いずれも自由航走模型船試験に関するものである。

【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。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。また、補助推力装置及びプロペラ回転数の制御を用いた操縦性能試験により実船の操縦性能をより合理的に推定する方法も研究されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【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

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

ところで、実海域を航行する船は外乱によって船速が一般に低下する。外乱がなくても針路変更や旋回時には船速が変化する。このような船の運動状態の変化に伴ってプロペラにかかる負荷は変化する。さらに、実海域では一般に波が存在するため船のプロペラにかかる負荷は出会波周期で変動する。プロペラの負荷が変動すると主機の特性に応じて一般にプロペラトルク（以下「トルク」と記す）もプロペラ回転数も出会波周期で変動する。これらは馬力も出会波周期で変動することを意味する。

【0008】

また、重要な船の性能の一つに燃費性能がある。燃費を推定するためには必要馬力を推定する必要があり、特に、主機特性に応じた燃費性能を推定するためにはトルクを推定す

10

20

30

40

50

る必要がある。さらに、荒天時の航行の安全性を確保するためには荒天下の推力やトルクの変化を主機の特性と関連づけて考える必要がある。国連海事機関（IMO）では燃費性能向上のためのEEDI規制が始まっている。他方、これを満足するために燃料消費の少ない小出力の主機を搭載する船が増加することで荒天下の操船限界が広がる心配が広がっており、EEDIとは別に最低出力を定める規制も始まろうとしている。いずれも実海域を航行するために必要な推力・トルクと主機性能が関係する問題である。これらの問題を議論するためには実船の実海域における変動トルクを合理的に推定する必要がある。

【0009】

実船の変動トルクを合理的に推定する手法は現在のところ理論的な数学モデルに基づくシミュレーション計算しかない。

10

【0010】

外乱下を航行する船は直線的な航路をとる場合でも外乱の非対称性のために一般に斜航を伴う。また、針路変更や旋回運動を伴う場合は回頭運動も伴う。外乱による船の前後方向の抵抗成分については理論的研究が比較的進んでおり、推定法も信頼できるものが存在する。一方、外乱の左右方向の力と回頭モーメント成分に関しては、合理的な理論式は存在するものの、実験的な研究の困難さもあって信頼される推定法が現在のところ確認されていない。これらの力の成分の推定の信頼性は船体運動の推定の信頼性に直結する。船体運動の推定が異なれば外乱下において船の状況が異なるためにトルクの推定も異なることになる。

【0011】

仮に船体運動の推定が精度よくおこなわれたとしてもトルクの推定はさらに困難である。すなわち、トルクの推定にはプロペラへ流入する水の速度、プロペラ有効流入速度、を推定する必要があり、外乱下のプロペラ有効流入速度を推定するためには船の前後揺れと波による水粒子の円運動成分、波成分、を推定する必要がある。船の前後揺れに関してはストリップ法などいくつかの信頼できる推定法が存在するが、波成分の推定に関しては研究例も少なく、理論計算値は実験値と必ずしも一致しないことが報告されている。

20

【0012】

本発明は、航行中のプロペラ荷重度を自由に变化させることができる自由航走模型船を用いた外乱下における自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法及びそれに用いられる自由航走模型船試験装置を提供することを目的としている。

30

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明の請求項1に係る外乱下の自由航走模型船の船体運動を舵効き船速修正を用いて実船と相似にする第1のステップと、前記自由航走模型船の推力又はトルクの計測データからプロペラ有効流入速度の波成分を推定する第2のステップと、前記自由航走模型船の船速の計測データと前記プロペラ有効流入速度の前記波成分の推定値から前記実船の前記プロペラ有効流入速度を推定する第3のステップと、前記実船の前記プロペラ有効流入速度の推定値から前記実船の変動トルク又は変動推力を推定する第4のステップと、を備えたことを特徴とする自由航走模型試験から実船の変動トルクと変動推力を推定する方法である。

40

【0014】

また、前記第1のステップにおける前記船体運動の前記舵効き船速修正は、外乱下で变化する前記自由航走模型船の船速を計測し、前記船速と想定する前記実船のプロペラ回転数とを基に前記自由航走模型船のプロペラ回転数と補助推力を制御し、外乱下における前記自由航走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するものであることが好適である。

【0015】

また、前記第2のステップにおいて前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' の前記波成分 u_w' を推定するにあたり、前記自由航走模型船の前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' を前記自由航走模型船で計測された前記トルクを用いたトルク一致法、又は計測された前記

50

推力を用いた推力一致法によって求めることが好適である。

【0016】

また、前記トルク一致法又は前記推力一致法は、

【数1】

$$Q_m' = K_{Qm} |_{J_m} n_m'^2 D'^5 = K_{Qm} |_{J_m} \tilde{n}_m'^2 D'^5 \dots (1)$$

Q_m' : トルク、 K_{Qm} : トルク係数、 n_m' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、 J_m : プロペラ前進率、添字 m は自由航走模型船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、

【数2】

$$T_m' = K_{Tm} |_{J_m} n_m'^2 D'^4 = K_{Tm} |_{J_m} \tilde{n}_m'^2 D'^4 \dots (2)$$

T_m' : 推力、 K_{Tm} : 推力係数、 J_m : プロペラ前進率、 n_m' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、添字 m は自由航走模型船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、
を用い、前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' を、

【数3】

$$J_m = \frac{u_{Am}'}{n_m' D'} = \frac{u_{Am}'}{\tilde{n}_m' D'} \dots (3)$$

J_m : プロペラ前進率、 u_{Am}' : プロペラ有効流入速度、 n_m' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、添字 m は自由航走模型船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、
により求めることが好適である。

【0017】

また、前記式(3)で求めた前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' と計測された前記船速 u' を用いて、

【数4】

$$\Delta u_w' = u_{Am}' - (1 - w_m) u' \dots (4)$$

u_w' : プロペラ有効流入速度の波成分、 u_{Am}' : プロペラ有効流入速度、 $1 - w_m$: 伴流係数、 u' : 船速、添字 $'$ は高周波数成分、 m は自由航走模型船、 $'$ は無次元値、
から前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' の前記波成分 u_w' を求めることが好適である。

【0018】

また、前記第3のステップにおいて前記実船の前記プロペラ有効流入速度を推定するにあたり、前記自由航走模型船と前記実船の前記プロペラ有効流入速度の前記波成分に尺度影響はないと仮定して推定することが好適である。

【0019】

また、前記第4のステップにおける前記実船の前記変動トルク Q_s' を、

【数5】

$$Q_s' = 2\pi I_a' \dot{n}_s' + K_{Qs} |_{J_s} n_s'^2 D'^5 \dots (5)$$

Q_s' : 変動トルク、 I_a' : プロペラの付加慣性モーメント、 n_s' : プロペラ回転数、 K_Q : トルク係数、 J_s : プロペラ前進率、 D' : プロペラ直径、添字の s は実船、 $'$ は無次元値、変数の上の \cdot は時間微分、

【数 6】

$$J_s' = \frac{u_{As}'}{n_s' D'} = \frac{(1 - w_s) u' + \Delta u_w'}{n_s' D'} \dots (6)$$

J_s' : プロペラ前進率、 u_{As}' : プロペラ有効流入速度、 n_s' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、 $1 - w_s$: 伴流係数、 u : 船速、 u_w' : プロペラ有効流入速度の波成分、添字の s は実船、 $'$ は無次元値、変数の上の \cdot は時間微分、 \sim は高周波数成分、に基づいて求めることが好適である。

10

【0020】

また、前記第 4 のステップにおける前記実船の前記変動トルク Q_s' を、

【数 7】

$$Q_s' = \tilde{Q}_s' + \Delta Q_s' \dots (7)$$

Q_s' : 変動トルク、 $Q_{s\sim}'$: 低周波数成分変動トルク、 $Q_{s\sim}'$: 高周波数成分変動トルク、添字 s は実船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、 \sim は高周波数成分、に基づいて高周波数成分変動トルクと低周波数成分変動トルクから求めることが好適である。

【0021】

また、前記第 4 のステップにおける前記実船の前記変動推力を、

【数 8】

$$T_s' = m_a' P' n_s' + K_{Ts} |J_s' n_s'|^2 D'^4 \dots (8)$$

T_s' : 変動推力、 m_a' : プロペラ回転数変動に関する付加質量、 P' : プロペラピッチ、 n_s' : プロペラ回転数、 K_{Ts} : 推力係数、 J_s' : プロペラ前進率、 D' : プロペラ直径、添字 s は実船、 $'$ は無次元値、変数の上の \cdot は時間微分、に基づいて求めることが好適である。

【0022】

また、前記第 4 のステップにおける前記実船の前記変動推力を、

【数 9】

$$T_s' = \tilde{T}_s' + \Delta T_s' \dots (9)$$

T_s' : 変動推力、 $T_{s\sim}'$: 低周波数成分変動推力、 $T_{s\sim}'$: 高周波数成分変動推力、添字 s は実船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、 \sim は高周波数成分、に基づいて求めることが好適である。

【0023】

また、前記第 4 のステップで得られた前記実船の前記変動トルク又は前記変動推力の推定結果を、主機特性又は推進機特性に適用して前記実船の燃費性能を推定することが好適である。

40

【0024】

また、前記第 4 のステップで得られた前記実船の前記変動トルク又は前記変動推力の推定結果を、主機特性又は推進機特性に適用して外乱下における前記実船の挙動を推定することが好適である。

【発明の効果】

【0025】

本発明に係る自由航走模型試験から実船の変動トルクと変動推力を推定する方法によれば、外乱下の自由航走模型船の船体運動を舵効き船速修正を用いて実船と相似にする第 1 のステップと、前記自由航走模型船の推力又はトルクの計測データからプロペラ有効流入

50

速度の波成分を推定する第2のステップと、前記自由航走模型船の船速の計測データと前記プロペラ有効流入速度の前記波成分の推定値から前記実船の前記プロペラ有効流入速度を推定する第3のステップと、前記実船の前記プロペラ有効流入速度の推定値から前記実船の変動トルク又は変動推力を推定する第4のステップと、を備えることによって、実船の変動トルク及び変動推力について信頼できる推定を行うことができる。

【0026】

また、前記第1のステップにおける前記船体運動の前記舵効き船速修正は、外乱下で変化する前記自由航走模型船の船速を計測し、前記船速と想定する前記実船のプロペラ回転数とを基に前記自由航走模型船のプロペラ回転数と補助推力を制御し、外乱下における前記自由航走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するものであることによ

【0027】

り、舵効きを実船相似にした自由航走模型船によって求められた模型船のトルク又は推力に基づいて実船の変動トルク及び変動推力について信頼できる推定を行うことができる。

【0028】

また、前記トルク一致法又は前記推力一致法は、

【数10】

$$Q_m' = K_{Qm} |_{J_m} n_m'^2 D'^5 = K_{Qm} |_{J_m} \tilde{n}_m'^2 D'^5 \dots (10)$$

Q_m' : トルク、 K_{Qm} : トルク係数、 n_m' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、 J_m : プロペラ前進率、添字mは自由航走模型船、'は無次元値、~は低周波数成分、

【数11】

$$T_m' = K_{Tm} |_{J_m} n_m'^2 D'^4 = K_{Tm} |_{J_m} \tilde{n}_m'^2 D'^4 \dots (11)$$

T_m' : 推力、 K_{Tm} : 推力係数、 J_m : プロペラ前進率、 n_m' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、添字mは自由航走模型船、'は無次元値、~は低周波数成分、を用い、前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' を、

【数12】

$$J_m = \frac{u_{Am}'}{n_m' D'} = \frac{u_{Am}'}{\tilde{n}_m' D'} \dots (12)$$

J_m : プロペラ前進率、 u_{Am}' : プロペラ有効流入速度、 n_m' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、添字mは自由航走模型船、'は無次元値、~は低周波数成分、により求めることによって、具体的な算出式によって実船の変動トルク及び変動推力を求めることができる。

【0029】

また、前記式(12)で求めた前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' と計測された前記船速 u' を用いて、

【数13】

$$\Delta u_w' = u_{Am}' - (1 - w_m) u' \dots (13)$$

u_w' : プロペラ有効流入速度の波成分、 u_{Am}' : プロペラ有効流入速度、 $1 - w_m$: 伴流係数、 u' : 船速、添字は高周波数成分、 m は自由航走模型船、 $'$ は無次元値、から前記プロペラ有効流入速度 u_{Am}' の前記波成分 u_w' を求めることによって、実船の変動トルク及び変動推力を算出するためのプロペラ有効流入速度 u_{Am}' の波成分 u_w' を求め、当該波成分 u_w' を用いて実船の変動トルク及び変動推力を求めることができる。

【0030】

また、前記第3のステップにおいて前記実船の前記プロペラ有効流入速度を推定するにあたり、前記自由航走模型船と前記実船の前記プロペラ有効流入速度の前記波成分に尺度影響はないと仮定して推定することによって、自由航走模型船を用いた試験から求められた波成分 u_w' を用いて実船の変動トルク及び変動推力を求めることができる。

【0031】

また、前記第4のステップにおける前記実船の前記変動トルク Q_s' を、

【数14】

$$Q_s' = 2\pi I_a' n_s' + K_{Qs} |J_s n_s'|^2 D'^5 \dots (14)$$

Q_s' : 変動トルク、 I_a' : プロペラの付加慣性モーメント、 n_s' : プロペラ回転数、 K_Q : トルク係数、 J_s : プロペラ前進率、 D' : プロペラ直径、添字の s は実船、 $'$ は無次元値、変数の上の \cdot は時間微分、

【数15】

$$J_s = \frac{u_{As}'}{n_s' D'} = \frac{(1 - w_s) u' + \Delta u_w'}{n_s' D'} \dots (15)$$

J_s : プロペラ前進率、 u_{As}' : プロペラ有効流入速度、 n_s' : プロペラ回転数、 D' : プロペラ直径、 $1 - w_s$: 伴流係数、 u : 船速、 u_w' : プロペラ有効流入速度の波成分、添字の s は実船、 $'$ は無次元値、変数の上の \cdot は時間微分、 $'$ は高周波数成分、に基づいて求めることによって、実船のプロペラの慣性モーメントを考慮して具体的な算出式に基づいて実船の変動トルクを求めることができる。

【0032】

また、前記第4のステップにおける前記実船の前記変動トルク Q_s' を、

【数16】

$$Q_s' = \widetilde{Q}_s' + \Delta Q_s' \dots (16)$$

Q_s' : 変動トルク、 $Q_{s\sim}'$: 低周波数成分変動トルク、 $Q_{s\sim}'$: 高周波数成分変動トルク、添字 s は実船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、 $'$ は高周波数成分、に基づいて高周波数成分変動トルクと低周波数成分変動トルクから求めることによって、実船の変動トルク Q_s' を低周波数成分変動トルク $Q_{s\sim}'$ と高周波数成分変動トルク $Q_{s\sim}'$ とに分けて具体的な算出式に基づいて求めることができる。

【0033】

また、前記第4のステップにおける前記実船の前記変動推力を、

【数17】

$$T_s' = m_a' P' n_s' + K_{Ts} |J_s n_s'|^2 D'^4 \dots (17)$$

T_s' : 変動推力、 m_a' : プロペラ回転数変動に関する付加質量、 P' : プロペラピッチ、 n_s' : プロペラ回転数、 K_{Ts} : 推力係数、 J_s : プロペラ前進率、 D' : プロペラ直径、添字 s は実船、 $'$ は無次元値、変数の上の \cdot は時間微分、に基づいて求めることによって、実船のプロペラ回転数変動に関する付加質量を考慮して具体的な算出式に基づいて実船の変動推力を求めることができる。

【0034】

10

20

30

40

50

また、前記第 4 のステップにおける前記実船の前記変動推力を、
【数 1 8】

$$T_s' = \tilde{T}_s' + \Delta T_s' \cdots (18)$$

T_s' : 変動推力、 $T_{s \sim}'$: 低周波数成分変動推力、 $T_{s \cdot}'$: 高周波数成分変動推力、添字 s は実船、 $'$ は無次元値、 \sim は低周波数成分、 \cdot は高周波数成分、に基づいて求めることによって、実船の変動推力 T_s' を低周波数成分変動推力 $T_{s \sim}'$ と高周波数成分変動推力 $T_{s \cdot}'$ とに分けて具体的な算出式に基づいて求めることができる。

【0035】

また、前記第 4 のステップで得られた前記実船の前記変動トルク又は前記変動推力の推定結果を、主機特性又は推進機特性に適用して前記実船の燃費性能を推定することによって、実船の変動トルク及び変動推力についての信頼できる推定に基づいて実船の燃費性能を推定することができる。

【0036】

また、前記第 4 のステップで得られた前記実船の前記変動トルク又は前記変動推力の推定結果を、主機特性又は推進機特性に適用して外乱下における前記実船の挙動を推定することによって、実船の変動トルク及び変動推力についての信頼できる推定に基づいて外乱下における実船の挙動を推定することができる。

【図面の簡単な説明】

【0037】

【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 L 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。

【図 14】第 3 の実施の形態における実船のトルク及び推力を推定する方法を示す図である。

【図 15】第 3 の実施の形態における実船のトルク及び推力を推定する方法を示す図である。

【図 16】第 3 の実施の形態における実船のトルク及び推力を推定する方法を示す図である。

【図 17】第 3 の実施の形態における実船のトルク及び推力を推定する方法を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0038】

[第 1 の実施の形態]

< 自由航走模型船試験方法 >

10

20

30

40

50

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(19)で表される。

【数19】

$$(1-t)T + T_A - R_T = 0 \quad \dots (19)$$

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_Tは全抵抗を表す。

【0039】

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。

【0040】

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。

【0041】

ここで、数式(19)を無次元化すると次式を得る。

【数20】

$$(1-t)\tau + \tau_A - C_T \frac{S}{\pi(D/2)^2} = 0 \quad \dots (20)$$

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21】

$$\tau = \frac{T}{\frac{\rho}{2} u^2 \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad \dots (21)$$

【数22】

$$\tau_A = \frac{T_A}{\frac{\rho}{2} u^2 \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad \dots (22)$$

【数23】

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{\rho}{2} u^2 S} \quad \dots (23)$$

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

【0042】

模型船と実船で幾何学的形状が相似とするとS / { (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

【 0 0 4 3 】

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 T_A が 0 の場合、数式 (2 0) 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 σ 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 σ も異なることになる。

【 0 0 4 4 】

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 0) の T_A あるいは数式 (1 9) 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 0) あるいは数式 (1 9) が成立している。

【 0 0 4 5 】

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 2 4 】

$$R_{SFC} = \frac{\rho_m}{2} S_m u_m^2 \left\{ (1+k) (C_{F0m} - C_{F0s}) - \Delta C_F \right\} \quad \dots (24)$$

【 0 0 4 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ると良い。 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。 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。

【 0 0 4 7 】

以上、数式 (2 4) 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。

【 0 0 4 8 】

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。

【 0 0 4 9 】

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 2 5 】

$$\frac{F_N}{\frac{\rho}{2} A_R V^2} = f_\alpha \left(\frac{U_R}{u} \right)^2 \left(\frac{u}{V} \right)^2 \sin \alpha_R \quad \dots (25)$$

【 0 0 5 0 】

ここで、 A_R は舵面積、 f 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、 α_R は舵有効流入角をそれぞれ表す。また、 u/V は \cos 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、 α 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 α を介して $u = V \cos \alpha$ 、 $v = -V \sin \alpha$ 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 α_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 α_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

α_R に大きな影響をおよぼすのは u_R とプロペラ回転数である。

【0051】

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26】

$$\frac{U_R}{u} = \sqrt{\left(\frac{u_R}{u}\right)^2 + \left(\frac{v_R}{u}\right)^2} \quad \dots (26)$$

ここで、 α_R は次式で表される。

【数27】

$$\begin{aligned} \alpha_R &= \delta - \left(\frac{v_{RP}}{u_R}\right) - \gamma_R \left(\beta - l'_R r'\right) \left(\frac{v}{u_R}\right) \\ &= \delta - \left(\frac{v_{RP}}{u_R}\right) - \gamma_R \left(\beta - l'_R r'\right) \left(\frac{v}{u}\right) / \left(\frac{u_R}{u}\right) \quad \dots (27) \end{aligned}$$

10

ここで、 v_{RP} はプロペラの回転による横方向流速成分、 γ_R は整流係数、 $l'_R r'$ 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。

【0052】

数式(26)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(27)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(27)の第3項は0となり、支配的な項のみを残すと数式(26)と数式(27)は次式のように書ける。

20

【数28】

$$\frac{U_R}{u} \simeq \frac{u_R}{u}, \quad \alpha_R \simeq \delta \quad \dots (28)$$

【0053】

数式(28)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。わかる。

【0054】

u_R/u は数式(29)で表される。

【数29】

$$\begin{aligned} u_{R'}' &= \frac{u_R}{u} = (1-w) \varepsilon \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)} \\ &= (1-w) \varepsilon \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + \frac{\tau}{(1-w)^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)} \quad \dots (29) \end{aligned}$$

ここで、 $1-w$ は伴流係数、 ε は舵位置の伴流係数とプロペラ位置の伴流係数の比、 η はプロペラ後流の増速率、 κ 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。

50

【数 3 0】

$$K_T = \frac{T}{\rho D^4 n^2} \dots (30)$$

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 3 1】

$$J = \frac{(1-w)u}{nD} \dots (31)$$

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。

【0055】

数式(29)によって u_R/u に対してはプロペラ荷重度 K_T 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 K_T 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 u_R/u とプロペラ後流の増速率 J 、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。

【0056】

ここで、補助推力 T_A を次のように表す。

【数 3 2】

$$T_A = f_{TA} R_{SFC} \dots (32)$$

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。

【0057】

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(19)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 K_T 、 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(32)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。

【0058】

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。

【0059】

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な補助推力を与えたときである。

【0060】

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。

【0061】

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たり減っても f_{REC} は大きくは変化しないことがわかる。

【0062】

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。

【0063】

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。

10

【0064】

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。

【0065】

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、プロペラ後流の増速率、プロペラ直径と舵高さの比、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 に関し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とプロペラ後流の増速率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。

20

【0066】

図4は、20度Z試験について補助推力なし ($f_{TA}=0$, Model(w/o c o r r.)) 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。

30

【0067】

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。

40

【0068】

<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。

【0069】

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。

50

【 0 0 7 0 】

自由航走模型船 1 0 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 1 0 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 2 0 は、カメラ 2 2 によって自由航走模型船 1 0 を撮像し、その情報に基づいて制御コンピュータ 2 6 による制御によって自由航走模型船 1 0 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 2 0 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 1 0 を追尾できるように構成される。さらに、自動追尾台車 2 0 の追尾によって自由航走模型船 1 0 の速度（船速）が測定され、制御コンピュータ 2 6 に入力される。

10

【 0 0 7 1 】

自由航走模型船 1 0 には、補助推力付加手段としてダクトファンモータ 1 6 が搭載されている。ダクトファンモータ 1 6 は、アナログ／パルス変換器 1 2 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 1 0 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 1 2 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 1 6 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 1 4 によって増幅されてダクトファンモータ 1 6 に入力され、ダクトファンモータ 1 6 が駆動される。これにより、ダクトファンモータ 1 6 によって自由航走模型船 1 0 に対して所望の補助推力が与えられる。

【 0 0 7 2 】

また、自由航走模型船 1 0 には、ダクトファンモータ 1 6 の出力を検出して出力する検力計 1 8 が搭載されている。検力計 1 8 は、ダクトファンモータ 1 6 の補助出力を検出して、検力計増幅器 2 4 へ出力する。

20

【 0 0 7 3 】

自動追尾台車 2 0 には、検力計増幅器 2 4 が搭載されており、検力計 1 8 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 2 4 は、実際の補助出力を増幅して制御 P C 2 6 へ出力する。制御 P C 2 6 は、検力計増幅器 2 4 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 1 2 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 1 0 に対して所望の補助推力を付与することができる。

30

【 0 0 7 4 】

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（32）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。

【 0 0 7 5 】

また、図 6 に示す自由航走模型船試験装置 1 0 2 のような構成としてもよい。自由航走模型船試験装置 1 0 2 では、検力計増幅器 2 4 及び制御コンピュータ（制御 P C ） 2 6 も自由航走模型船 1 0 に搭載される。なお、自由航走模型船試験装置 1 0 0 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。

40

【 0 0 7 6 】

自由航走模型船試験装置 1 0 2 では、さらに船速検出器 7 0 が自由航走模型船 1 0 に搭載される。船速検出器 7 0 は、自由航走模型船 1 0 の速度（船速）を計測し、制御コンピュータ 2 6 に入力する。船速検出器 7 0 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 1 0 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。

50

【 0 0 7 7 】

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 (32) 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。

【 0 0 7 8 】

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。

【 0 0 7 9 】

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 (32) に従って補助推力とプロペラ回転数を設定すればよい。

【 0 0 8 0 】

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。

【 0 0 8 1 】

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。

【 0 0 8 2 】

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。

【 0 0 8 3 】

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 θ 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。

【 0 0 8 4 】

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 θ 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 θ_c と記す。曳引車 A の位置と方向 X_c, Y_c, θ_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。

【 0 0 8 5 】

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

10

20

30

40

50

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。

【0086】

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 θ 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 軸回りの回転方向が回転盤 36 の回転に伴って変化することはない。

【0087】

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。

【0088】

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。

【0089】

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 、 θ と記す。

【0090】

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。

【0091】

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。

【0092】

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

10

20

30

40

50

30の排水量に含むようにすることが好適である。

【0093】

また、検出された x, y, θ を信号に変換して曳引車Aに入力し、これら x, y, θ 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_c, Y_c, θ_c 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。

【0094】

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事ができる、計測できることの意義は大きいといえる。

【0095】

[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。

【0096】

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。

【0097】

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(33)の運動方程式で表現される。

【数33】

$$\begin{cases} M'_s \dot{u}'_s = (1 - t_s) T'_s - R'_s - E'_s - F'_s \\ M'_m \dot{u}'_m = (1 - t_m) T'_m - R'_m + T'_A - E'_m - F'_m \end{cases} \dots (33)$$

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。

【0098】

また、「 $'$ 」は水の密度、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 L^3 、速度は (Lg) 、力は L^3g 、時間は (L/g) によって無次元化が行われる。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(34)として表わすことができる。

【数34】

$$u'_R = \frac{u_R}{\sqrt{Lg}} \dots (34)$$

【0099】

船速応答が模型船と実船で相似になるためには数式(33)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(35)で近似される。

【数35】

$$u_{R_s}' = u_{R_m}' \quad \dots (35)$$

ここで、 u_{R_s}' 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_{R_m}' 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。

10

【0100】

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36】

$$(1 - t_s)' T_s' - R_s' = (1 - t_m)' T_m' + T_A' - R_m' \quad \dots (36)$$

【0101】

ここで、補助推力 T_A' は数式(37)で表わされる。

【数37】

$$T_A' = f_{TA}' T_{SFC}' \quad \dots (37)$$

20

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。

【0102】

数式(37)を数式(36)に代入すると数式(38)が得られる。

【数38】

$$(1 - t_s)' T_s' = (1 - t_m)' T_m' - (1 - f_{TA}') T_{SFC}' \quad \dots (38)$$

【0103】

F' 及び E' に関する模型船と実船の相似が数式(35)により確保され、 T_A' の制御によって数式(38)が成り立つようにすることで数式(33)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(35)と数式(38)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。

30

【0104】

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(39)で推定することができる。

40

【数39】

$$\begin{cases} u_{R_s}' = n_s' P' \lambda_s \\ u_{R_m}' = n_m' P' \lambda_m \end{cases} \quad \dots (39)$$

【0105】

ここで、 P' は数式(40)で定義されるプロペラピッチの無次元値を示す。

【数 4 0】

$$P' = \frac{P}{L} \quad \dots (40)$$

【0106】

また、 s と m は数式 (41) の添字の * をそれぞれ s と m に読み替えて得られる。

【数 4 1】

$$\lambda_* = \varepsilon_* \left[\eta \left\{ (1 - s_*) (1 - \kappa_*) + \kappa_* \sqrt{(1 - s_*)^2 + \frac{8}{\pi} \left(\frac{P'}{D'} \right)^2 K_{T*}} \right\}^2 + (1 - \eta)(1 - s_*)^2 \right]^{1/2} \quad \dots (41)$$

【0107】

ここで、 λ は舵位置とプロペラ位置での伴流係数の比、 ε はプロペラ直径と舵高さの幾何学的寸法比を表す。 η はプロペラ増速率に関する係数を表す。また、 s は数式 (42) で定義されるプロペラスリップ比を表す。

【数 4 2】

$$\begin{cases} s_s = 1 - J_s \frac{D'}{P'} \\ s_m = 1 - J_m \frac{D'}{P'} \end{cases} \quad \dots (42)$$

【0108】

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 度旋回を行ったときの舵直圧力 (FN) の時間変化を示す。図 10 (c) は、左 35 度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 , θ) 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 (FN) 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 (δ_{a1}) 及び第 2 行き過ぎ角 (δ_{a2}) の対比を示す。

【0109】

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。

【 0 1 1 0 】

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の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。

【 0 1 1 1 】

図 1 1 (a) ~ 図 1 1 (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 (β) 、舵角 (δ) 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 1 0 と同様に示した。

【 0 1 1 2 】

波浪中の航行に対するシミュレーション計算結果も、通常の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。

【 0 1 1 3 】

図 1 2 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 1 2 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。

【 0 1 1 4 】

図 1 0 及び図 1 1 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 1 2 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。

【 0 1 1 5 】

なお、数式 (33) 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。

【 0 1 1 6 】

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単純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。

【 0 1 1 7 】

ここで、操縦運動で現れる船速の左右方向成分 (u'_x) 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 (K_t) 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。

【 0 1 1 8 】

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。

【 0 1 1 9 】

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。

【 0 1 2 0 】

<自由航走模型船試験装置>

図 1 3 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 3 0 0 を示す図である。

【 0 1 2 1 】

自由航走模型船試験装置 3 0 0 の基本構成は、自由航走模型船試験装置 1 0 0 と同様であるが、プロペラ 8 0 及びプロペラ駆動部 8 2 を制御要素として含んで構成される。プロペラ駆動部 8 2 は、自由航走模型船 1 0 の主駆動系であるプロペラ 8 0 を駆動するためのモータを含む。プロペラ駆動部 8 2 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。

【 0 1 2 2 】

第 1 の実施の形態と同様に、自動追尾台車 2 0 の追尾によって自由航走模型船 1 0 の速度（船速）が測定され、制御コンピュータ 2 6 に入力される。制御コンピュータ 2 6 では、図 1 2 に示したように試験条件及び自由航走模型船 1 0 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 1 2、モータ増幅器 1 4 を介してダクトファンモータ 1 6 に入力され、ダクトファンモータ 1 6 が駆動される。これにより、ダクトファンモータ 1 6 によって自由航走模型船 1 0 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 8 2 に入力され、これによりプロペラ 8 0 の回転数が制御される。

【 0 1 2 3 】

また、図 6 や図 7 に示した自由航走模型船試験装置 1 0 2、1 0 4 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 1 0 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 0 0 9 2、0 0 9 4 で述べた各種の手段で測定できる。

【 0 1 2 4 】

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。

【 0 1 2 5 】

[第 3 の実施の形態]

<自由航走模型試験を使って実船の変動トルク及び変動推力を推定する方法>

以下、自由航走模型船の船体運動を実船相似にした上でプロペラ有効流入速度の波成分を推定し、これらをもとに実船の変動トルクを推定する方法について説明する。

【 0 1 2 6 】

上記第 2 の実施の形態と同様に、変数の右肩に付けたダッシュ' は重力加速度と水の密度、船の長さを用いて無次元化した値を示す。また、変数の上の ~（文章中においては記

10

20

30

40

50

号の後ろに～を付けて示す)は低周波数成分であること、変数の前の'は高周波数成分であることを示す。また、添え字のmは模型船の値、sは実船の値であることを表す。添え字がないのは実船と模型船で同じ値をとる無次元変数である。

【0127】

まず、舵効き船速修正を用いて自由航走模型船の外乱下における船体運動を実船相似にする。舵効き船速修正を用いれば、任意の外乱下において任意の操縦運動中の船体運動を実船相似にすることができる。

【0128】

舵効き船速修正に基づいて模型船の補助推力とプロペラ推力を制御する。このとき、制御のための補助推力係数 f_{TA} と模型船プロペラ回転数 n_m' は、想定する実船プロペラ回転数 n_s' と模型船で計測される模型船の船速 u' をもとにあらかじめ船速の関数として求めておくか、あるいは時々刻々決められた舵効き船速修正の手順に従って求める。ただし、プロペラ回転数の高周波数での変動が船体運動におよぼす影響は無視できるとの仮定に基づき、想定する実船プロペラ回転数 n_s' と計測される模型船の u' の低周波数成分、 $n_{s\sim}'$ と u_{\sim}' のみを用い、出会波周期で変動する高周波数成分は考慮しない。この仮定の有効性は模型実験で確認されている。したがって、制御する補助推力係数 f_{TA} と模型船プロペラ回転数 n_m' は出会波周期で変動せずゆっくり変動する低周波数成分のみからなる。したがって模型船プロペラ回転数 n_m' については次式が成り立つ。

【数43】

$$n_m' = \tilde{n}_m' \quad \dots (43)$$

【0129】

次に、プロペラ有効流入速度中の波成分の推定を行う。プロペラ有効流入速度中の波成分 u_w' を推定するにあたって波成分 u_w' に尺度影響はないと仮定する。

【0130】

模型船のプロペラ有効流入速度 u_{Am}' を計測されたトルクを用いたトルク一致法または計測された推力を用いた推力一致法によって求める。プロペラ流入速度が非定常の場合でもプロペラ回転数が一定の場合にはトルク一致法と推力一致法が有効であることは確認されている。今考えている模型船プロペラ回転数は一定ではないが、式(43)で示すように変動周波数が低周波数であることから同じ取り扱いが可能と考えられる。したがってトルク一致法と推力一致法にはそれぞれ式(44)及び式(45)を用いることができる。

【数44】

$$Q_m' = K_{Qm}|_{J_m} n_m'^2 D'^5 = K_{Qm}|_{J_m} \tilde{n}_m'^2 D'^5 \quad \dots (44)$$

$$T_m' = K_{Tm}|_{J_m} n_m'^2 D'^4 = K_{Tm}|_{J_m} \tilde{n}_m'^2 D'^4 \quad \dots (45)$$

ここで、 Q' はトルク、 T' は推力を示す。 K_Q はトルク係数を、 K_T は推力係数を表す。また、 n' はプロペラ回転数を、 D' はプロペラ直径を示す。 J はプロペラ前進率を示し、模型船に関して次式で定義される。

【数45】

$$J_m = \frac{u_{Am}'}{n_m' D'} = \frac{u_{Am}'}{\tilde{n}_m' D'} \quad \dots (46)$$

【0131】

ここで、トルク Q_m' 又は推力 T_m' を計測することで、模型船プロペラ回転数 n_m' 、プロペラ直径 D' は既知であるから、式(44)又は式(45)と式(46)との関係

から模型船のプロペラ有効流入速度 u_{Am}' を求めることができる。

【0132】

求めた模型船のプロペラ有効流入速度 u_{Am}' と計測された船速 u' を用いて次式で波成分 u_w' を求める。

【数46】

$$\Delta u_w' = u_{Am}' - (1 - w_m) u' \quad \dots (47)$$

【0133】

伴流係数 $(1 - w)$ は別途推定されている、又は、計測される船速 u' の低周波数成分 $u \sim'$ と模型船のプロペラ有効流入速度 u_{Am}' の低周波数成分 $u_{Am} \sim'$ から次式で求めることができる。 10

【数47】

$$1 - w_m = \frac{\widetilde{u_{Am}'}}{u'} \quad \dots (48)$$

【0134】

ただし、船速 u' と低周波数成分 $u \sim'$ 、模型船のプロペラ有効流入速度 u_{Am}' と低周波数成分 $u_{Am} \sim'$ は次の関係がある。 20

【数48】

$$u' = \bar{u}' + \Delta u' \quad \dots (49)$$

$$u_{Am}' = \widetilde{u_{Am}'} + \Delta u_{Am}' \quad \dots (50)$$

【0135】

また、模型船のプロペラ有効流入速度の低周波成分 $u_{Am} \sim'$ と高周波成分 u_{Am}' は次式で表される。

【数49】

$$\widetilde{u_{Am}'} = (1 - w_m) \bar{u}' \quad \dots (51)$$

$$\Delta u_{Am}' = (1 - w_m) \Delta u' + \Delta u_w' \quad \dots (52)$$

【0136】

なお、波成分 u_w' は式(47)のほかにトルクの高周波成分 Q_m' または推力の高周波数成分 T_m' を解析することによって次式で求めることもできる。式(53)及び式(54)の導出方法は付記として後述する。

【数50】

$$\Delta u_w' = \frac{\Delta Q_m'}{\left. \frac{\partial K_{Qm}}{\partial J_m} \right|_{\bar{J}_m} D'^4 \bar{n}_m'} - (1 - w_m) \Delta u' \quad \dots (53)$$

$$\Delta u_w' = \frac{\Delta T_m'}{\left. \frac{\partial K_{Tm}}{\partial J_m} \right|_{\bar{J}_m} D'^3 \bar{n}_m'} - (1 - w_m) \Delta u' \quad \dots (54)$$

【0137】

なお、プロペラ前進率の低周波成分 $J_{m \sim}$ は次式で表される。

【数 5 1】

$$\widetilde{J}_m = \frac{\widetilde{u}_{Am}'}{\widetilde{n}_m' D'}$$

・・・ (5 5)

【0 1 3 8】

このように、波成分 u_w' を求めた後、実船の変動トルクと変動推力の推定を行う。実船の変動トルク Q_s' は実船のプロペラ回転数 n_s' の高周波数での変動に基づく付加慣性モーメントを考慮して次式で推定する。

10

【数 5 2】

$$Q_s' = 2\pi I_a' n_s' + K_{Qs} |_{J_s} n_s'^2 D'^5 \quad \dots (5 6)$$

【0 1 3 9】

変数の上の \cdot は時間微分を示す。 I_a' はプロペラの付加慣性モーメントであり、別途推定されているとする。実船のプロペラ前進率 J_s は実船のプロペラ有効流入速度 u_{As}' とプロペラ回転数 n_s' を用いて次式で求める。

【数 5 3】

$$J_s = \frac{u_{As}'}{n_s' D'} = \frac{(1 - w_s) u' + \Delta u_w'}{n_s' D'}$$

・・・ (5 7)

【0 1 4 0】

自由航走模型試験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 R S C を適用することによって船速 u' には尺度影響がなくなるので模型船の計測値を用いることができる。実船のプロペラ回転数 n_s' は別途あらかじめ決めておくこともできるし、適当な主機モデルを考慮することによって出会波周期で変動してもよい。伴流係数 $(1 - w_s)$ は $(1 - w_m)$ 等をもとに別途推定される。このときプロペラ荷重度等を考慮することも

30

【0 1 4 1】

実船トルク Q_s' は式 (5 6) の他に次式のようにトルクの低周波成分 $Q_{s \sim}'$ と高周波成分 Q_s' に分けて推定することもできる。

【数 5 4】

$$Q_s' = \widetilde{Q}_s' + \Delta Q_s' \quad \dots (5 8)$$

【0 1 4 2】

低周波成分 $Q_{s \sim}'$ は次式で推定することができる。

【数 5 5】

$$\widetilde{Q}_s' = K_{Qs} |_{J_s} \widetilde{n}_s'^2 D'^5 \quad \dots (5 9)$$

【0 1 4 3】

ここで、実船のプロペラ前進率の低周波成分 $J_{s \sim}$ は次式で求める。

40

【数 5 6】

$$\tilde{J}_s = \frac{\tilde{u}_{As}'}{\tilde{n}_s' D'} = \frac{(1-w_s) \ddot{u}'}{\tilde{n}_s' D'} \dots (60)$$

【0 1 4 4】

実船のプロペラ回転数 n_s' は、高周波成分 $n_{s'}'$ と低周波成分 $n_{s\sim}'$ と次式の関係がある。

【数 5 7】

$$n_s' = \tilde{n}_s' + \Delta n_s' \dots (61)$$

【0 1 4 5】

実船トルクの高周波成分 Q_s' は次式で求められる。式(62)の導出方法は付記として後述する。

【数 5 8】

$$\begin{aligned} \Delta Q_s' = & 2\pi I_a' \dot{\Delta n}_s' + \left. \frac{\partial K_{Qs}}{\partial J_s} \right|_{\tilde{J}_s} D'^4 \{ (1-w_s) (\Delta u' \tilde{n}_s' \\ & - \tilde{u}' \Delta n_s') + \tilde{n}_s' \Delta u_w' \} + 2K_{Qs}|_{\tilde{J}_s} D'^5 \tilde{n}_s' \Delta n_s' \dots (62) \end{aligned}$$

【0 1 4 6】

実船のプロペラ回転数の高周波成分の時間微分 $\dot{n}_{s'}'$ に関しては低周波成分の時間微分 $\dot{n}_{s\sim}'$ が微量として無視できるので次式の関係がある。

【数 5 9】

$$\Delta \dot{n}_s' = \dot{n}_s' \dots (63)$$

【0 1 4 7】

実船の変動推力は変動トルク Q_s' と同じ手順により推定できる。この場合も推力 T_s' を直接推定する方法と低周波成分 $T_{s\sim}'$ と高周波成分 $T_{s'}'$ に分けて推定する方法が考えられ、その際、次式の関係を用いる。

【数 6 0】

$$T_s' = m_a' P' \dot{n}_s' + K_{Ts}|_{J_s} n_s'^2 D'^4 \dots (64)$$

$$T_s' = \tilde{T}_s' + \Delta T_s' \dots (65)$$

$$\tilde{T}_s' = K_{Ts}|_{\tilde{J}_s} \tilde{n}_s'^2 D'^4 \dots (66)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_s' = & m_a' P' \dot{\Delta n}_s' + \left. \frac{\partial K_{Ts}}{\partial J_s} \right|_{\tilde{J}_s} D'^3 \{ (1-w_s) (\Delta u' \tilde{n}_s' \\ & - \tilde{u}' \Delta n_s') + \tilde{n}_s' \Delta u_w' \} + 2K_{Ts}|_{\tilde{J}_s} D'^4 \tilde{n}_s' \Delta n_s' \dots (67) \end{aligned}$$

【0 1 4 8】

m_a' はプロペラ回転数変動に関する付加質量を表す。プロペラ回転数変動に関する付加質量 m_a' は別途推定されているとする。P' はプロペラピッチを示す。なお、実船の

トルク Q_s' と推力 T_s' の推定では必要に応じてプロペラ効率比を考慮する。

【0149】

図14～図17に、実船のトルク Q_s' と推力 T_s' の推定手順を示す。上記のように、波成分 u_w' の推定方法とトルク Q_s' (推力 T_s') の推定方法はそれぞれ2種類あるので合わせて4つの組み合わせが考えられる。

【0150】

図14では、舵効き船速修正(RSC)を用いて外乱下の自由航走模型船の船体運動を実船相似にし、補助推力係数 f_{TA} と模型船プロペラ回転数 n_m' (低周波成分 $n_{m\sim}'$) を求める。次に、自由航走模型船のトルク Q_m' 又は推力 T_m' の計測データからプロペラ有効流入速度の波成分 u_w' を推定する。さらに、自由航走模型船の船速 u' の計測データとプロペラ有効流入速度の波成分 u_w' の推定値から実船のプロペラ有効流入速度 u_{As}' を推定する。そして、実船のプロペラ有効流入速度の推定値 u_{As}' から実船の変動トルク Q_s' 又は変動推力 T_s' を推定する。

【0151】

さらに、求められた実船の変動トルク Q_s' を主機モデル(図中エンジン(Engine)と記載)に導入することにより、指令回転数 n_{sd}' に応じた実船のプロペラ回転数の時間微分 $n_{s\cdot}'$ を求めることもできる。実船のプロペラ回転数の時間微分 $n_{s\cdot}'$ から実船のプロペラ回転数 n_s' を求めて、それを舵効き船速修正(RSC)を用いた外乱下の自由航走模型船試験に用いることにより連続的に推定を繰り返すことができる。

【0152】

なお、実船のプロペラ回転数の時間微分 $n_{s\cdot}'$ に関する付加質量・付加慣性モーメント項は主機モデルに含めて考えることもできる。その場合は式(56)と式(62)、式(64)、式(67)から時間微分 $n_{s\cdot}'$ に関する項と時間微分 $n_{s\cdot}'$ から実船の変動トルク Q_s' またはその高周波成分 Q_s' への矢印は不要となる。ただし、複雑な主機モデルを適用せずに回転数一定やトルク一定、馬力一定などの簡単な規則を適用してもよい。

【0153】

図15～図17においても同様に推定処理を行うことができる。なお、図15及び図17では、自由航走模型船のトルク Q_m' の高周波成分 Q_m' 又は推力 T_m' の高周波成分 T_m' から波成分 u_w' を求める。図16及び図17では、実船の変動トルク Q_s' 又は変動推力 T_s' を式(58)及び式(65)に基づいて求める。

【0154】

以上のように、第3の実施の形態によれば、波漂流力の左右力成分と回頭モーメント成分については補助推力と模型プロペラ回転数両方を制御したRSCを適用した自由航走模型試験により解決し、プロペラ有効流入速度中の波成分を推定し、推定された波成分に基づいて実船のプロペラ有効流入速度と変動トルク及び変動推力についても信頼できる推定方法を提供することができる。

【0155】

また、実船のプロペラ回転数決定手段にトルクの推定値を入力とする主機モデルを導入できる。さらに、適切な主機モデルを導入することによって、外乱下における実船のプロペラ回転数・馬力の変動、実海域における実船の燃料消費量、自由航走模型試験で主機特性を考慮した実海域での速力を推定することができる。

【0156】

また、主機特性・運転限界を考慮した実船相似の船体運動を自由航走模型船で実現でき、主機特性・運転限界を考慮した操船限界を自由航走模型船を使って明らかにすることができる。

【0157】

<付記>

当該付録中では、簡単のため添え字の m と s を省略して一般論として論ずる。

【0158】

10

20

30

40

50

変動トルク Q' を付加慣性モーメントを考慮して次式のように表す。

【数 6 1】

$$Q' = \bar{Q}' + \Delta Q' = 2\pi I_a' \dot{n}' + K_Q n'^2 D'^5 \dots (68)$$

【0 1 5 9】

式 (68) の右辺第 2 項は次式で近似できる。

【数 6 2】

$$K_Q n'^2 D'^5 = K_Q \Big|_{\bar{u}_A', \bar{n}'} \tilde{n}'^2 D'^5 + \frac{\partial(K_Q n'^2 D'^5)}{\partial u_A'} \Big|_{\bar{u}_A', \bar{n}'} \Delta u_A' + \frac{\partial(K_Q n'^2 D'^5)}{\partial n'} \Big|_{\bar{u}_A', \bar{n}'} \Delta n' \dots (69)$$

【0 1 6 0】

式 (68) 式と式 (69) より次式を得る。

【数 6 3】

$$\tilde{Q}' = K_Q \Big|_{\bar{u}_A', \bar{n}'} \tilde{n}'^2 D'^5 = K_Q \Big|_J \tilde{n}'^2 D'^5 \dots (70)$$

式 (69) の第 2 項に含まれる微分は次式で表される。

【数 6 4】

20

$$\frac{\partial Q'}{\partial u_A'} = \frac{\partial (K_Q n'^2 D'^5)}{\partial u_A'} = \frac{\partial K_Q}{\partial J} \frac{\partial J}{\partial u_A'} n'^2 D'^5 = \frac{\partial K_Q}{\partial J} n' D'^4 \dots (71)$$

【0 1 6 1】

式 (69) の第 3 項に含まれる微分は次式で表される。

【数 6 5】

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q'}{\partial n'} &= \frac{\partial (K_Q n'^2 D'^5)}{\partial n'} = \frac{\partial K_Q}{\partial J} \frac{\partial J}{\partial n'} n'^2 D'^5 + 2K_Q n' D'^5 = \\ &= -\frac{\partial K_Q}{\partial J} u_A' D'^4 + 2K_Q n' D'^5 \dots (72) \end{aligned}$$

【0 1 6 2】

以上より式 (69) の右辺の第 2 項と第 3 項は次式のようにになる。なお、第 2 行以降では、トルク係数 K_Q 及びその微分値に関する条件を省略した。

【数 6 6】

$$\begin{aligned}
& \left. \frac{\partial(K_Q n'^2 D'^5)}{\partial u_A'} \right|_{\tilde{u}_A', \tilde{n}'} \Delta u_A' + \left. \frac{\partial(K_Q n'^2 D'^5)}{\partial n'} \right|_{\tilde{u}_A', \tilde{n}'} \Delta n' \\
& = \left(\frac{\partial K_Q}{\partial J} n' D'^4 \right) \Big|_J \Delta u_A' + \left(-\frac{\partial K_Q}{\partial J} u_A' D'^4 + 2K_Q n' D'^5 \right) \Big|_J \Delta n' \\
& = \frac{\partial K_Q}{\partial J} \tilde{n}' D'^4 \{ (1-w) \Delta u' + \Delta u_w' \} + \left\{ -\frac{\partial K_Q}{\partial J} (1-w) \tilde{u}' D'^4 + 2K_Q \tilde{n}' D'^5 \right\} \Delta n' \\
& = \frac{\partial K_Q}{\partial J} D'^4 \{ (1-w) (\Delta u' \tilde{n}' - \tilde{u}' \Delta n') + \tilde{n}' \Delta u_w' \} + 2K_Q D'^5 \tilde{n}' \Delta n' \\
& \dots (73)
\end{aligned}$$

【0163】

以上より、式(68)の右辺第1式第2項は次式となる。

【数 6 7】

$$\begin{aligned}
\Delta Q' & = 2\pi I_a' \dot{n}' + \left. \frac{\partial K_Q}{\partial J} \right|_J D'^4 \{ (1-w) (\Delta u' \tilde{n}' \\
& \quad - \tilde{u}' \Delta n') + \tilde{n}' \Delta u_w' \} + 2K_Q \Big|_J D'^5 \tilde{n}' \Delta n' \\
& \dots (74)
\end{aligned}$$

【0164】

式(74)を模型船に適用するとプロペラ回転数の時間微分 $n \cdot '$ とプロペラ回転数の高周波成分 n' が0と見なせるから式(53)を得る。また、式(74)を実船に適用すれば式(62)が得られる。

【0165】

また、推力に関しては次式を適用して式(53)と式(67)を得る。

【数 6 8】

$$\begin{aligned}
\Delta T' & = m_a' P' \dot{n}_s' + \left. \frac{\partial K_T}{\partial J} \right|_J D'^3 \{ (1-w) (\Delta u' \tilde{n}' \\
& \quad - \tilde{u}' \Delta n') + \tilde{n}' \Delta u_w' \} + 2K_T \Big|_J D'^4 \tilde{n}' \Delta n' \\
& \dots (75)
\end{aligned}$$

【産業上の利用可能性】

【0166】

本発明における自由航走模型試験から実船の変動トルク又は変動推力を推定する方法及びそれに用いられる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模型試験から実物体の変動トルク又は変動推力を推定する方法及びそれに用いられる試験装置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外乱下における自由航走試験から、実浮体、実水中航行体等の変動トルク又は変動推力を推定する用途に適用することができる。

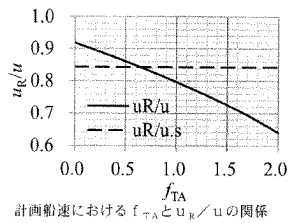
【符号の説明】

【0167】

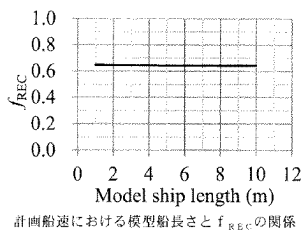
10 自由航走模型船、16 ダクトファンモータ、18 検力計、20 自動追尾台車、26 制御コンピュータ、30 自由航走模型船、32 主台車、34 副台車、36 回転盤、38 レール、70 船速検出器、72 船速情報受信器、74 船速検出

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。

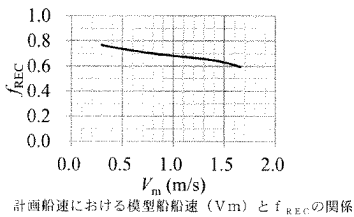
【図1】



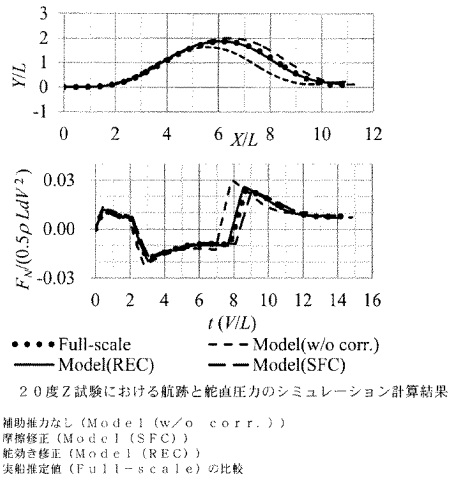
【図2】



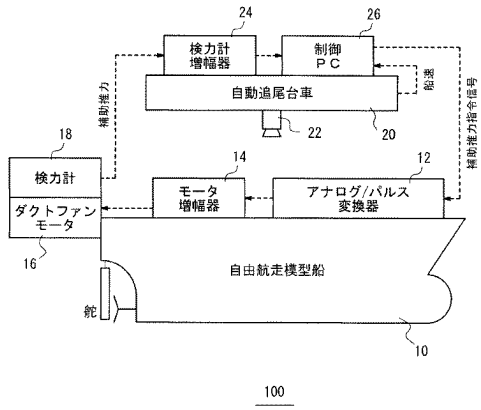
【図3】



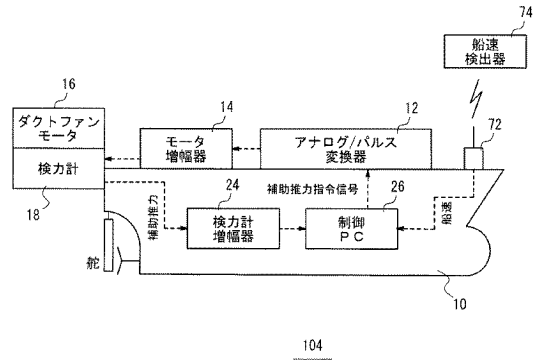
【図4】



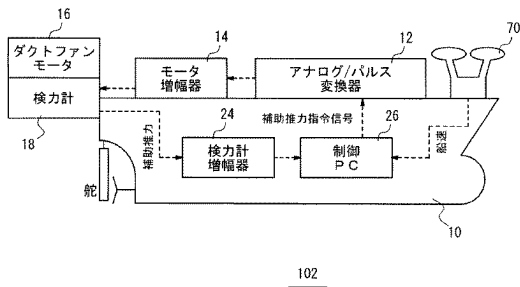
【図5】



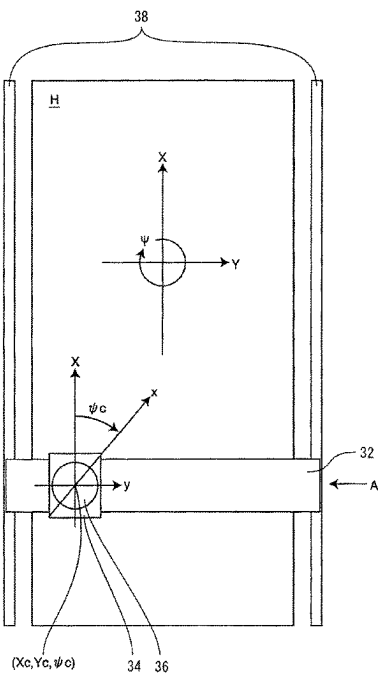
【図7】



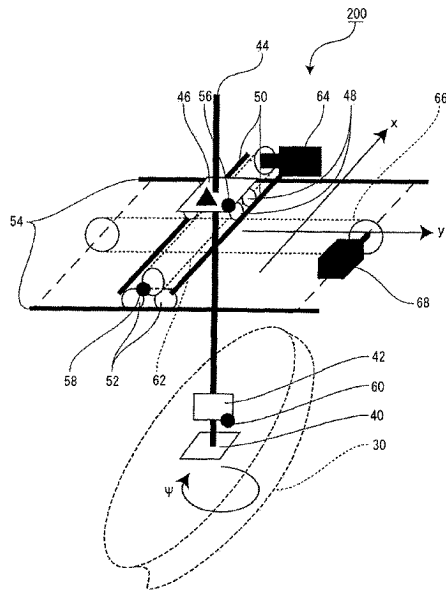
【図6】



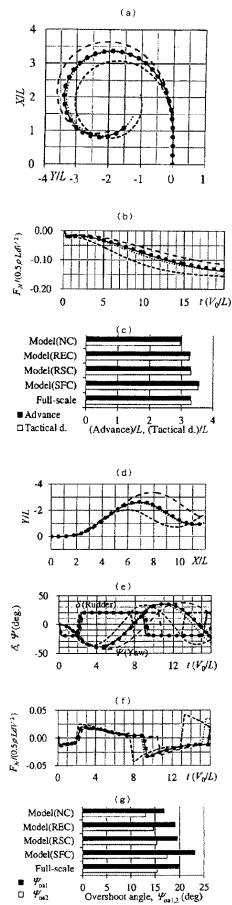
【図8】



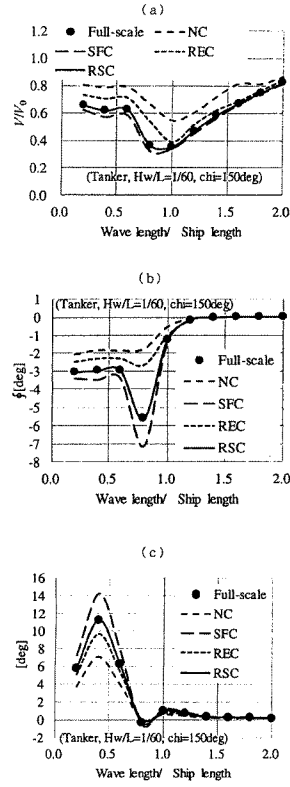
【図9】



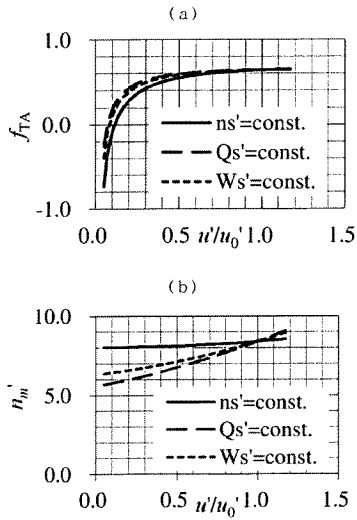
【図 1 0】



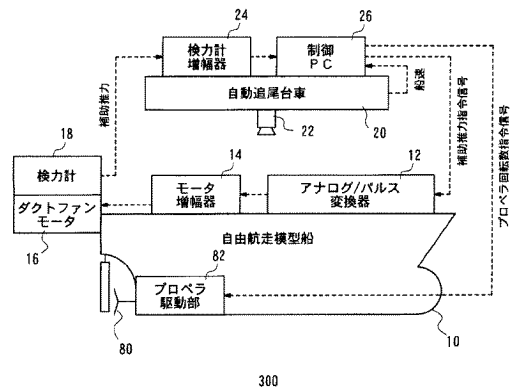
【図 1 1】



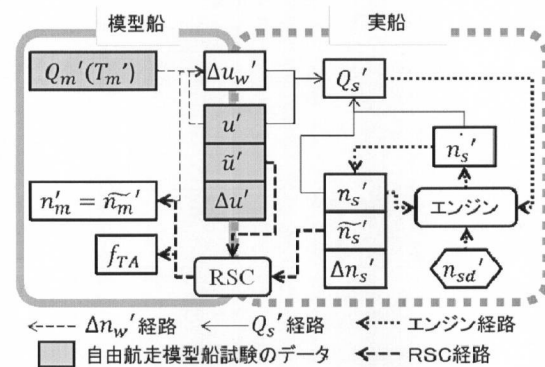
【図 1 2】



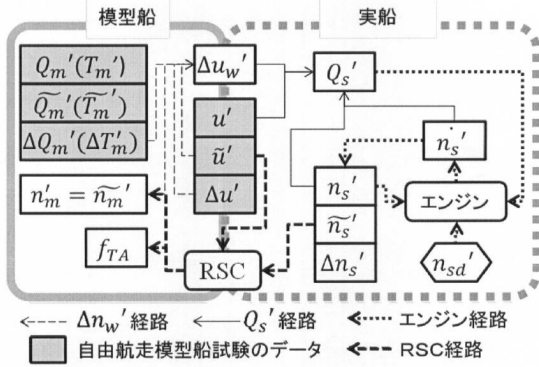
【図 1 3】



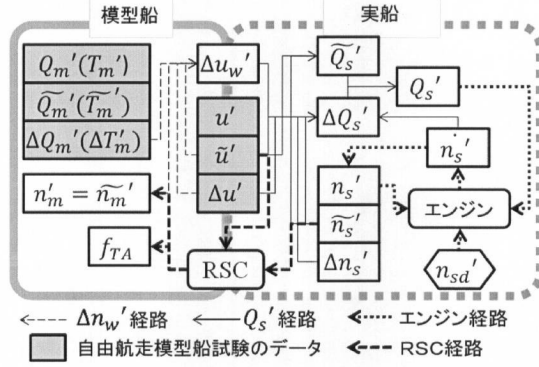
【図 1 4】



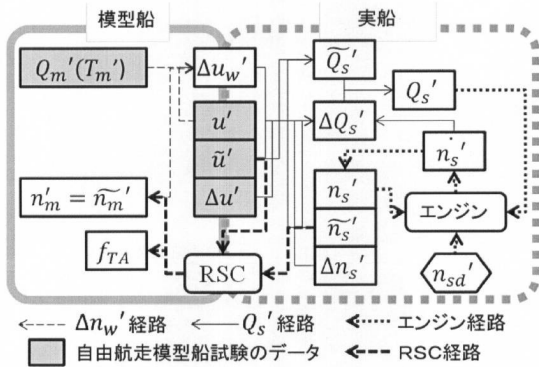
【図 15】



【図 17】



【図 16】



フロントページの続き

(56)参考文献 特許第6351045(JP, B2)

特開2012-112878(JP, A)

特開2001-174364(JP, A)

特開2009-264781(JP, A)

実開平04-066553(JP, U)

米国特許第04899580(US, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01M 10/00

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)