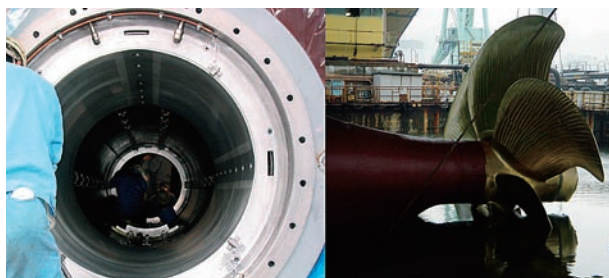


旋回時のプロペラシャフトフォースを考慮したプロペラ軸受の信頼性向上

Reliability Improvement of Stern Tube Bearing Considering Propeller Shaft Forces during Ship Turning



黒岩 良太^{*1} Ryota Kuroiwa
大島 明^{*2} Akira Oshima
西岡 忠相^{*3} Tadasuke Nishioka
立石 智裕^{*4} Tomohiro Tateishi
大山 賢二^{*4} Kenji Ohyama
石島 隆至^{*4} Takashi Ishijima

近年のコンテナ輸送の増大と運航経済性の追求に伴い、コンテナ船は大型・大馬力化が進んでいる。これらの船舶は馬力、スラストの増加により、プロペラ重量とプロペラシャフトフォースが従来に比べ増大し、プロペラ軸受の片当たりや焼き付きが懸念されている。このため、プロペラ軸受設計の重要性が増してきている。当社では、プロペラ重量に加え、プロペラシャフトフォースを考慮した軸受設計を行うことで、軸受焼損によるトラブルのない船舶を提供している。

1. ま え が き

プロペラ軸受が焼き付きを起こすと、船は航行不能となり、軸受復旧まで運航停止となってしまふ。この間の損失を考えると、プロペラ軸受の信頼性が非常に重要であることが理解される。そのため当社では、プロペラ重量に加え、軸受に作用するプロペラシャフトフォース⁽¹⁾ (3. で詳しく紹介する) と呼ばれる力を考慮した軸受設計を実施し、プロペラ軸受の焼損トラブルの未然防止に努めている。

上記設計法の検証のため、模型試験によるプロペラシャフトフォース計測⁽²⁾ 及び実船の海上試運転におけるプロペラ軸受内油膜厚さ計測を実施し、本設計法が有効であることを確認した。

本報では、当社で実施しているプロペラ軸受設計について紹介するとともに、この中で開発したCFD及び操縦運動シミュレーション計算を援用したプロペラシャフトフォース推定法について説明する。

2. プロペラ軸受設計法の概要

図1に示すように、船体の船尾部にはプロペラシャフトが貫通する船尾管と呼ばれる管状の部分があり、この中にプロペラ軸受が配置されている⁽³⁾。当社では、このプロペラ軸受設計は図2に示す手順で実施している。以下にこの手順の概要を紹介する。

プロペラ軸受の寸法や、図3に示すような軸受形状の検討は、設計の初期段階に実施される。この時、船型やプロペラ形状は確定されていない。そのため、初

期計画時の船型、プロペラ形状を用いて検討がなされる。

軸受の寸法や形状の設計では、静止時を想定し、プロペラ重量のみを考慮した弾性梁計算 (静的アライメント計算) を行うことが基本である。この計算により、プロペラ軸受荷重、軸傾斜角、曲げモーメント分布等を求め、船級協会の規定する基準を満足させる。

しかし、船の大型化に伴い、プロペラシャフトフォースは無視できない量となってきているため、上記プロペラ重量に加え、船の旋回時などに生じるプロペラシャフトフォースを考慮した動的アライメント計算も併せて行い、軸受の寸法や形状が仮決定される。

また、軸受形状設計においては、タグチメソッド^(注)を用いたロバスト設計も行っている。

設計が進み、船型やプロペラ形状が確定した後は、この最終形状を用いて上記と同様に静的アライメント計算及び動的アライメント計算を実施し、プロペラ軸受性能の確認を行う。ここで船級協会規定を満たし、

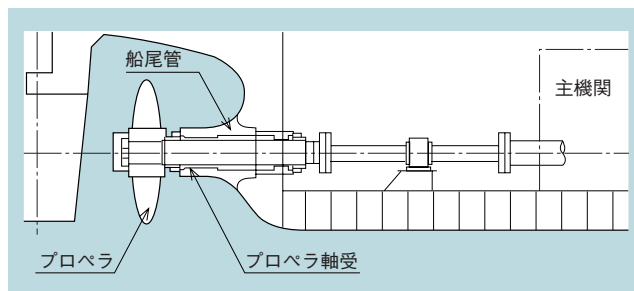


図1 シャフトアレンジメント
船尾管内には前後に軸受が配置されており、後部の軸受をプロペラ軸受と呼ぶ。

*1 技術本部長崎研究所船舶・海洋研究室

*2 技術本部長崎研究所船舶・海洋研究室主席

*3 技術本部長崎研究所トライボロジー研究室

*4 長崎造船所造船設計部機装設計課

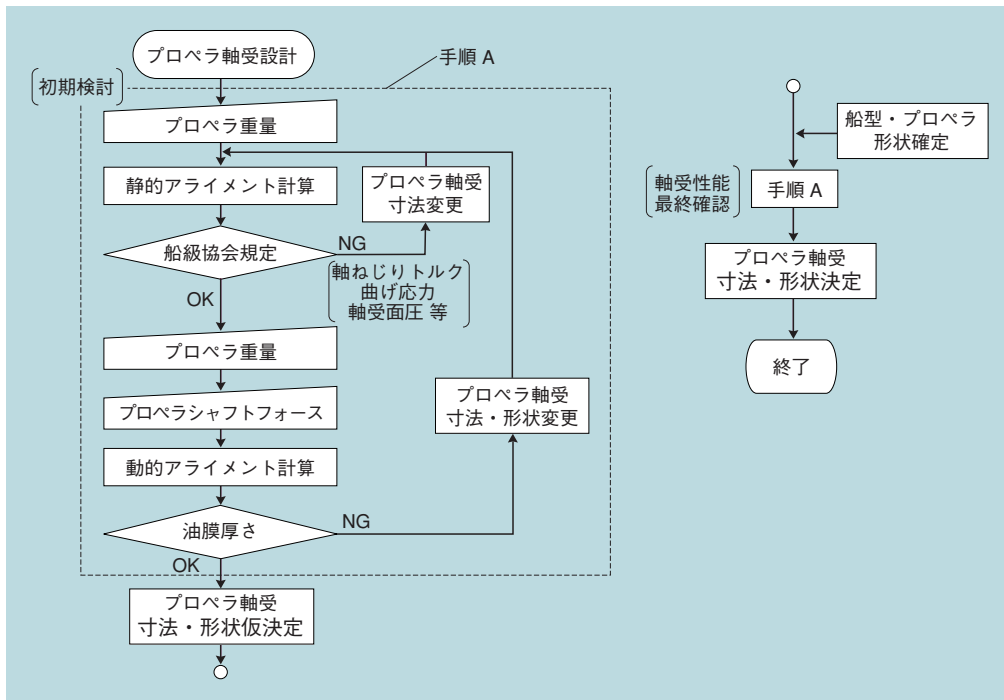


図2 プロペラ軸受設計手順
プロペラ軸受は、静アライメント計算及び動的アライメント計算を実施して設計される。

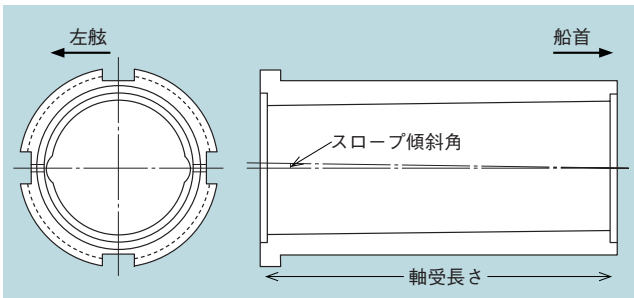


図3 プロペラ軸受形状
動的アライメント計算を実施し、軸受長さやスロープ傾斜角が決定される。

十分な油膜が確保されれば軸受の寸法及び形状が決定される。

注：構成部品や材料、製造工程のばらつきあるいは、ユーザーの手元で起きる使用環境のばらつきや内部劣化などの製品の故障や機能低下を引き起こす外乱の影響を受けても、可能な限り機能が乱れないように製品を開発する統計学を用いた手法。

3. プロペラシャフトフォースとは

ここでは、本報で度々ふれるプロペラシャフトフォースについて説明する。

スクリュープロペラは、プロペラ軸に対して回転対称に作成されており、軸を中心とする円周方向に均一な流場で作動すれば、推力とトルクのみを発生する。しかし、現実には船体後方の不均一な流場で作動するため、推力、トルクの他にも力とモーメントが生じる。これらを総じてプロペラシャフトフォースと呼ぶ。

図4のようにプロペラの座標系を定義すると、プロ

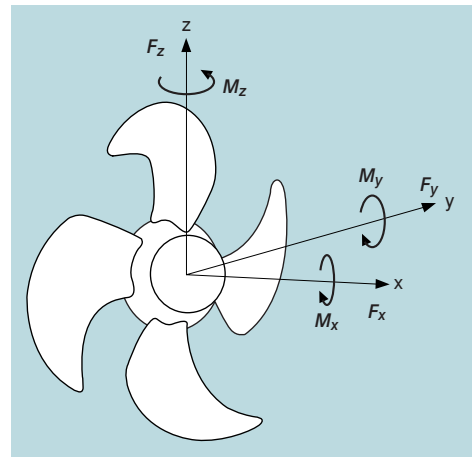


図4 プロペラの座標系
 x, y, z 軸方向に働く力を F_x, F_y, F_z 、各軸周りのモーメントを M_x, M_y, M_z と定義する。

ペラ軸受設計に関して問題となるのは、横、上下方向の力 F_y, F_z 、縦曲げ、横曲げのモーメント M_y, M_z である。 M_y, M_z は推力が周方向に一樣でないため発生するものであり、 F_y, F_z はトルクを発生する力が周方向に一樣でないために生じるものである。

一般的に、船舶は直進状態、旋回状態、横移動状態などの様々な状態で運航されるが、この中でも最大舵角における旋回時にはプロペラ位置に強い横流れが生じるため、プロペラシャフトフォースはプロペラ重量に匹敵するほど増大し、プロペラ軸受にとって最も過酷な状況となる。

4. プロペラシャフトフォース推定法

4.1 プロペラシャフトフォース推定手順

プロペラシャフトフォース推定手順を図5に示す。この手順は、はじめに船が旋回運動を行う際の運動特性を推定し、後述する実斜航角を求める。次にこの実斜航角でのプロペラ面流場を推定する。最後に、求めたプロペラ面流場とプロペラ形状を入力データとし、UQCM (Unsteady Quasi-Continuous Method: 当社開発の非定常揚力面理論によるプロペラ特性の計算法)⁽⁴⁾によって式(1)に示すプロペラシャフトフォース無次元値 K_{Fy} , K_{Fz} , K_{My} , K_{Mz} を求めるというものである。

$$\begin{aligned} K_{Fy} &= \frac{F_y}{\rho n^2 D^4}, & K_{Fz} &= \frac{F_z}{\rho n^2 D^4} \\ K_{My} &= \frac{M_y}{\rho n^2 D^5}, & K_{Mz} &= \frac{M_z}{\rho n^2 D^5} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

- ρ : 海水の密度
- n : プロペラ回転数
- D : プロペラ直径

旋回状態におけるプロペラシャフトフォースを推定するためには、この状態におけるプロペラ面流場が必要になる。しかし、この流場を実験もしくは数値計算を用いて、求めることは大変困難であるため、プロペラ面への流れが略等価となるような斜航流場に置き換えて計算を行う。図6に2種の無次元化されたプロペラシャフトフォース(旋回試験で計測した結果と斜航流場を与えて計算した結果)の比較を示す。両者は良く一致しており、斜航流場に置き換えて問題が無いことが分かる。

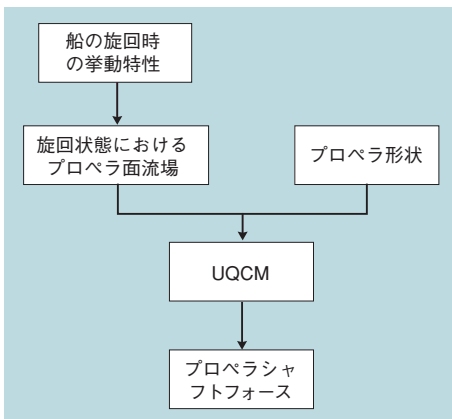


図5 プロペラシャフトフォース推定手順
旋回時の船の挙動を推定し、この状態におけるプロペラ面流場を求める。この流場とプロペラ形状を用いてUQCMでプロペラシャフトフォースを求める。

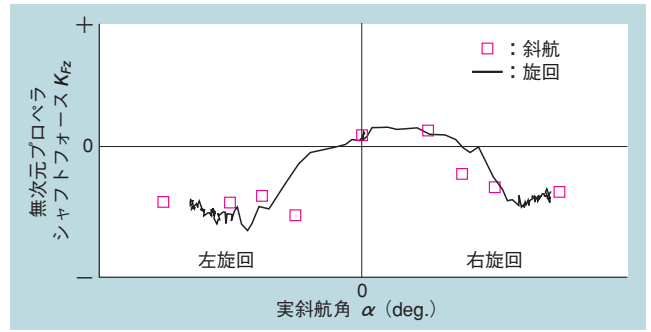


図6 旋回時と斜航時のプロペラシャフトフォース K_{Fz} を代表値として示す。旋回時と斜航時のプロペラシャフトフォースは良く一致する。

4.2 実斜航角の推定

船が旋回を開始すると転舵直後に回頭角速度 r が急激に増加し、これによる強い横流れが発生する。回頭角速度は旋回開始直後に一度ピークを持ち、その後定常値に落ち着く。図7に示すように旋回時のプロペラシャフトフォース(無次元値)は回頭角速度の変化にほぼ比例した変化をし、回頭角速度が最大となるときにほぼ最大となる。そしてこの最大値は、時間が経ち定常旋回に至った後も維持され続ける。したがって、定常旋回時には過大なプロペラシャフトフォースが長時間にわたり作用するので、軸受にとって厳しい状態となる。そのため、プロペラ軸受設計は、定常旋回時のプロペラシャフトフォースを考慮して行われる。

旋回中のプロペラ面への流れは、図8に示すように斜航角 β と回頭角速度により、 α の角度を持つことになる。これを実斜航角と呼んでおり、この実斜航角は式(2)で求められる。

$$\alpha = \beta + \tan^{-1} \left(\frac{x_p}{U} \cdot r \right) \doteq \beta + \frac{x_p}{U} \cdot r \quad (2)$$

ここで、

- x_p : プロペラから船体重心までの距離
- U : 船速

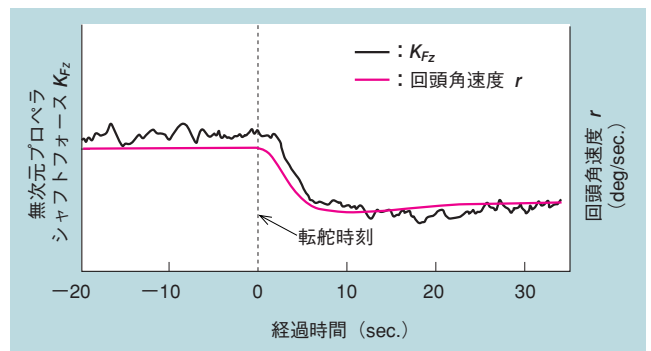


図7 旋回時のプロペラシャフトフォースの変化 K_{Fz} を代表値として示す。旋回時のプロペラシャフトフォースは、回頭角速度 r とほぼ比例した変化を示す。

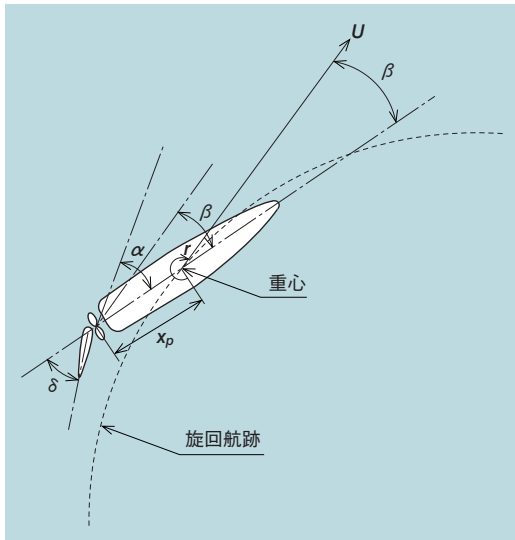


図8 プロペラへの流入角
舵角 δ を取り、回頭角速度 r 、斜航角 β で旋回するとき、プロペラ面には α の角度を持つ流れが流入する。

この実斜航角を求める過程には、操縦運動シミュレーション計算を導入しており、個船毎に旋回時の実斜航角を求めることが可能である。

操縦運動シミュレーション計算で求めた実斜航角が斜航時の横流れ角に相当するものとして、次ステップでは斜航状態におけるプロペラ面流場を求める。

4.3 CFDを用いた斜航時流場推定

斜航状態におけるプロペラ面流場の推定にはCFDを適用している。従来、模型試験にて斜航時のプロペラ面流場を計測し、これを使用していた。しかし、軸受設計が行われる設計の初期段階では船型が確定しておらず流場が得られない。このため類似船の模型試験結果を用いてプロペラシャフトフォースを推定することになるが、これでは船型差に起因するプロペラ面流場の変化には対応できず、プロペラの差に起因するプロペラシャフトフォースの変化を評価するに留まっていた。軸受設計における信頼性を高めるためには、船型に起因するプロペラシャフトフォースの差も評価する必要がある。そこで当社は、プロペラ面流場推定にCFDを適用し、この評価を可能にした。

図9に模型試験で計測したプロペラ面流場とCFDで推定したプロペラ面流場を示す。CFDで推定したプロペラ面流場は模型試験結果に見られる横流れの状況を良く再現している。図10は、上記2種のプロペラ面流場からプロペラの代表半径 $0.7R$ 位置における周方向流速 V_t を船速 U で無次元化して示したものである。周方向流速の各翼回転角 θ での変化をCFDは良く再現している。図10でプロペラ一回転の分散を計算すると 0.004 となり定量的にも良く一致している

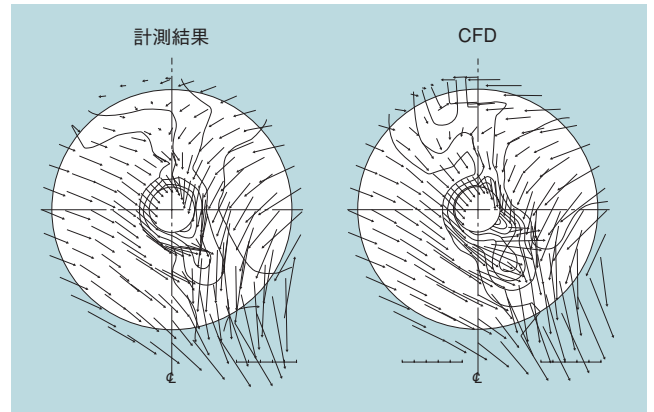


図9 プロペラ面流場分布の比較
CFDで求めたプロペラ面の流場は、模型試験結果に見られた横流れの様子をよく再現した。

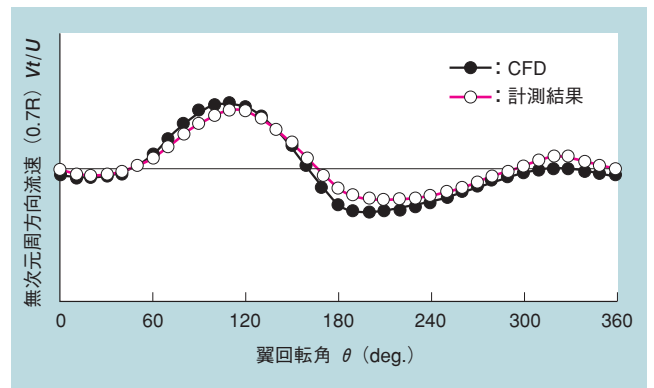


図10 代表半径 $0.7R$ における V_t/U の比較
CFDによる計算結果は模型試験結果とよい一致を示す。

といえよう。

このように、斜航時のプロペラ面流場を精度良く推定できる有効なツールとしてCFDを利用している。

なお、複数の斜航状態に対してプロペラシャフトフォースを計算し、斜航角とプロペラシャフトフォースの関係を求めておけば、操縦運動シミュレーション計算で得られる実斜航角の時刻歴データを用いて内挿することで、プロペラシャフトフォースの時刻歴データを求めることもできる。

5. 軸受設計手法適用例

本手法をコンテナ船の軸受設計に適用し、検証のために模型試験および実船試験を実施した。模型試験ではプロペラシャフトフォースを計測した。実船試験ではプロペラシャフトフォースを計測することが困難であるため、油膜厚さを計測し、油膜成立性の確認及びプロペラシャフトフォース推定結果の妥当性を検証した。

図11にプロペラシャフトフォースの推定値と模型試験での計測値の比較を示す。本手法による推定値は

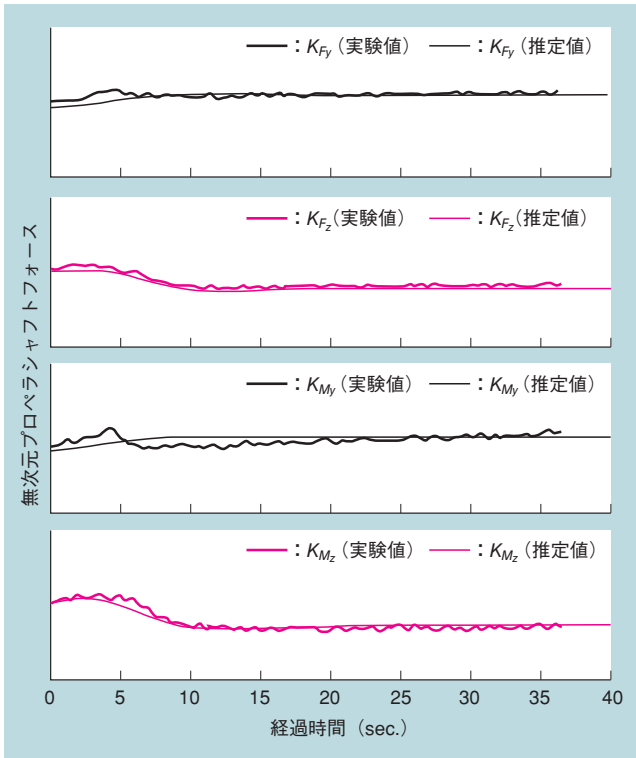


図 11 旋回時のプロペラシャフトフォース（無次元値）の比較
本手法による推定値は、模型試験結果とよい一致を示す。

旋回運動中にプロペラシャフトフォースが変化する様子を良く捕らえている。最も重要な定常旋回では、絶対値についても十分な精度で推定できている。また、図 12 にプロペラ軸受内油膜厚さの推定値と実船での計測値の比較を示すが、この両者も良く対応している。

このように本手法はプロペラシャフトフォース並びに油膜厚さを正しく推定することが可能であることから、有効なツールとして建造船のプロペラ軸受設計に活用している。

6. ま と め

CFD 及び操縦運動シミュレーション計算を援用したプロペラシャフトフォース推定法を構築しプロペラシャフトフォース並びにプロペラ軸受内油膜厚さを精度良く推定することが可能となった。

これによりプロペラ軸受の片当たりや焼き付きを未然に防ぐ軸受形状設計が可能となり、プロペラ軸受の信頼性向上を図ることができる。

今後も本軸受設計手法を当社建造船全船に適用する

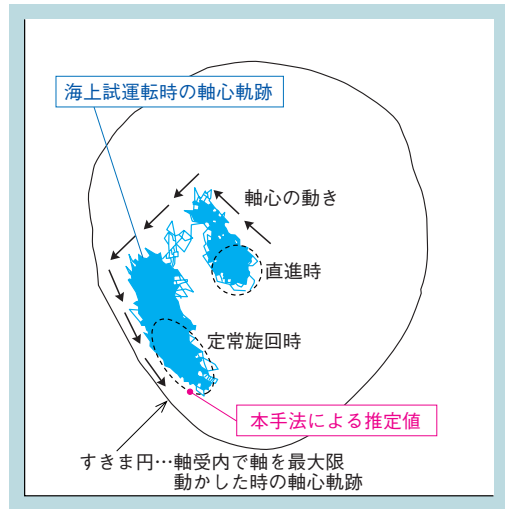


図 12 旋回時のプロペラ軸受内油膜厚さの比較
すきま円と軸心の距離が油膜厚さ。推定値は海上試運転結果とよい一致を示す。

ことで、軸受損傷を未然に防止し信頼性の高い船舶を提供していく。

参 考 文 献

- (1) 吉岡勝ほか, プロペラ強度, 材料, 軸径, 軸受, 第5回船用プロペラに関するシンポジウム (2005) p.201
- (2) 千葉規胤ほか, プロペラベアリングフォースの計測, 三菱重工技報 Vol.15 No.3 (1978) p.1
- (3) 右近良孝ほか, プロペラ・キャビテーションとこれが誘起する諸問題, 第5回船用プロペラに関するシンポジウム (2005) p.125
- (4) Tetsuji Hoshino, Application of Quasi-Continuous Method to Unsteady Propeller Lifting Surface Problems, 日本造船学会論文集 第158号 (1985) p.48



黒岩良太



大島明



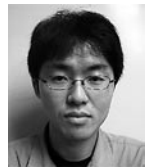
西岡忠相



立石智裕



大山賢二



石島隆至