

令和元年6月12日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06137

研究課題名(和文) 船舶の波浪中横運動がプロペラ推力・トルク及び推進性能に与える影響の解明

研究課題名(英文) Investigations on effects to performance of ship propeller and propulsion by ship transverse motion in waves

研究代表者

北川 泰士 (Kitagawa, Yasushi)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・主任研究員

研究者番号：50579852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の主な目的は、波浪中を航走する船舶の横運動によるプロペラ推力・トルクへの影響の解明とこれらを考慮した新しい予測モデルの構築にある。

そのため、斜航時及び旋回時のプロペラ単独特性を実験的に評価するための水槽試験機を製作し、実験結果から横方向から流体が流入する状況下の単独特性に関して有益な知見を得た。そして、波浪中プロペラ流入速度モデルの推定精度向上の一環として、船舶の波浪中性能評価のための代表的手法であるストリップ法の改良を行った。

横運動影響を考慮したプロペラ推力・トルクモデルの完成は現状では未遂であるが、幅広い波向き条件下で計測した模型船実験結果を基に引き続き検討を続ける計画である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶のプロペラ推力・トルク特性について、横方向から水が流入した場合の特性に関する研究は過去にほとんど例が無く、本研究で実施した調査研究の意義は大きいと言える。また、模型実験に基づく知見ではあるが、プロペラトルク変動が激しくなる波向き条件を示せたことは船舶主機負荷変動の評価や安全航行への議論に貢献できる。

そして、船舶の波浪中性能を推定するための理論計算手法として半世紀近く前から用いられているストリップ法について、より厳密に定式化した新しいストリップ法を提案できたことの学術的意義は高いと言える。

研究成果の概要(英文)：Main aims of this study are investigations on the effects of ship transverse motion to propeller thrust and torque in waves, and developments of new mathematical propeller model including these effects.

At first, a new dynamometer, specially designed to experimentally evaluate the propeller open-water characteristics (POC) under oblique or turning situation of the ship, was produced. Through the experimental results by the new dynamometer, the effects by the velocity component of transverse direction to the POC was successfully confirmed. Secondly, as one action to improve estimation accuracy of the propeller inflow velocity in waves, new formulations of the strip method, which have been still representative method to estimate the ship seakeeping performance, were proposed and validated.

However, the development of the new model for propeller thrust and torque have been still investigated, although fundamental data were obtained from the self-propulsion test in oblique or beam waves.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：斜航時プロペラ単独特性 横方向流入速度 プロペラ推力 プロペラトルク 船舶耐航性能 ストリップ法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

国際海事機関 IMO が就航船舶の機能要件としてエネルギー効率指標 EEDI を導入し、搭載主機の出力を低くすることがこの基準を現実的に満足する方策として有力視されている。一方で、荒天下を航行する船舶が一定の操縦性能を保持するために必要な最低限の推進出力に関する議論も今なお IMO にて議論されており、主機の低出力化に伴う船舶安全運航及び主機稼働の安全性に関する議論及び研究は今後増加するものと予想される。

斯様な情勢を考慮し、申請者は波浪中を航走する船舶の主機負荷変動を予測するための研究開発に取り組んでいる。ここで、波浪中の船尾で回転するプロペラ推力及びトルク変動を予測する場合、一般的にはプロペラ面に流入する水の船の長さ方向の流速変動を評価する。これは、過去の研究により、プロペラ流入速度の波浪中変動は波浪中船体前後運動成分とプロペラ位置での波粒子運動による前後方向流速成分が支配的であると考えられてきたためである。一方で、実船乗船体験者からのヒヤリングや申請者が実施した波浪中自由航走模型船試験結果より、斜め波や横波中のプロペラ推力及びトルク変動が向波や追波中よりも大きい場合が散見された。斜め波や横波では、前後揺れ・上下揺れ・縦揺れで代表される縦運動に加えて、左右揺れ・横揺れ・船首揺れで代表される横運動が発達することも多い。よって、プロペラ推力・トルク変動に及ぼす横運動による影響を改めて検証することは重要であり、その影響を予測モデル化できれば主機負荷変動の予測技術の高度化に貢献することができる。

### 2. 研究の目的

以上の研究背景に基づき、本研究では以下の通り 3 つの目的を設定した。

(1) プロペラ推力及びトルクの単独特性に及ぼす横方向からの流入速度影響について、理論的及び実験的に明らかにする、(2) 横運動を伴う波条件にて模型船自航試験を行いプロペラ推力・トルク変動を計測し、横運動の影響量を考慮しつつ波浪中プロペラ流入速度モデルを高度化する。(3) 高度化した波浪中プロペラ流入速度モデルと所属機関の研究課題で開発された主機特性数学モデルを用いて、不規則波中の船速及び主機状態シミュレーションを行い、横運動による影響を検証する。

### 3. 研究の方法

研究目的(1)については、回転翼に横方向から流体が流入する場合の推力・トルクを推定するための手法について文献調査を行い、新しいプロペラ流入速度モデル開発に向けての知見を得る。そして、海上技術安全研究所の実海域再現水槽にて利用可能なプロペラ単独試験機を開発する。実海域再現水槽の台車システムは高度な制御機能とターンテーブルを有しているため、このプロペラ単独試験機の開発により任意の斜航状態や回転運動を与えた上でプロペラ単独試験を行うことが可能となり、横方向から水が流入した状況下におけるプロペラ単独特性が実験的に評価できることになる。開発したプロペラ単独試験機を用いた斜航プロペラ単独試験と平面運動下プロペラ単独試験を実施する。

研究目的(2)については、肥大船と痩せ形船の 2 種の模型船を用いて、波向きを様々に変更した規則波中模型船自航試験を実施することで波向きによるプロペラ推力・トルク特性の定性的な傾向をまず把握する。そしてこれら計測結果を基にして、先の横方向からの流入状況を考慮したプロペラ単独特性を必要に応じて考慮し、横運動による影響を陽に考慮した規則波中プロペラ有効流入速度モデルの高度化を行う。また、この一環として、波浪中船体運動の代表的な推定手法であるストリップ法の高度化を行う。

研究目的(3)については、先で開発した規則波中プロペラ有効流入速度モデルを線形重ね合わせ法をベースに不規則波モデルに拡張した上で、不規則波中の船体抵抗モデルと主機特性数学モデルを併用した不規則波中の船速・プロペラ推力及びトルク・主機状態の短期予測プログラムを作成する。そして、従来のプロペラ流入速度モデルと本研究で開発したモデルによる計算結果の違いを分析し、横運動が推進性能に及ぼす影響を検証する。

### 4. 研究成果

まず、回転翼に横方向から流体が流入する場合の推力・トルク特性の文献調査として、ヘリコプターの翼に働く流体力について調査し、回転軸に対する流入角に応じた推力・トルクの計算方法について知見を得た。

次に、開発したプロペラ単独試験機について説明する。図 1 は製作したプロペラ単独試験機である。フレーム部分は鉄製、流線型のプロペラポート部分はステンレス製であり、一般的な試験機より小型である。通例では水面を貫通する支持部分は断面を流線的な翼形状として設計するが、本試験機は真横方向への曳航も想定していたため、流れをより滑らかにするため二本の円柱仕様とした。

次に本試験機を用いた実施した斜航プロペラ単独試験の結果を示す。本試験で用いた供試模型プロペラは本研究課題の対象船であるバルクキャリア船とコンテナ船用に設計されたプロペラであり、翼形状は MAU である。図 2 にコンテナ船用プロペラの斜航時プロペラ単独特性の解析結果を示す。横軸について、左はプロペラ前進定数の速度に曳航速度の合速度、右は曳航速度のプロペラ軸方向成分、をそれぞれ取っている。右図より、斜航角 30 度程度までの斜航角ならばプロペラに流れ込む流速の前進方向(軸方向)成分を用いれば直進時の単独特性とさほ



図1 製作した実海域再現水槽用プロペラ単独試験機（左：正面、中央：側面、右：実海域再現水槽台車ターンテーブル搭載時）

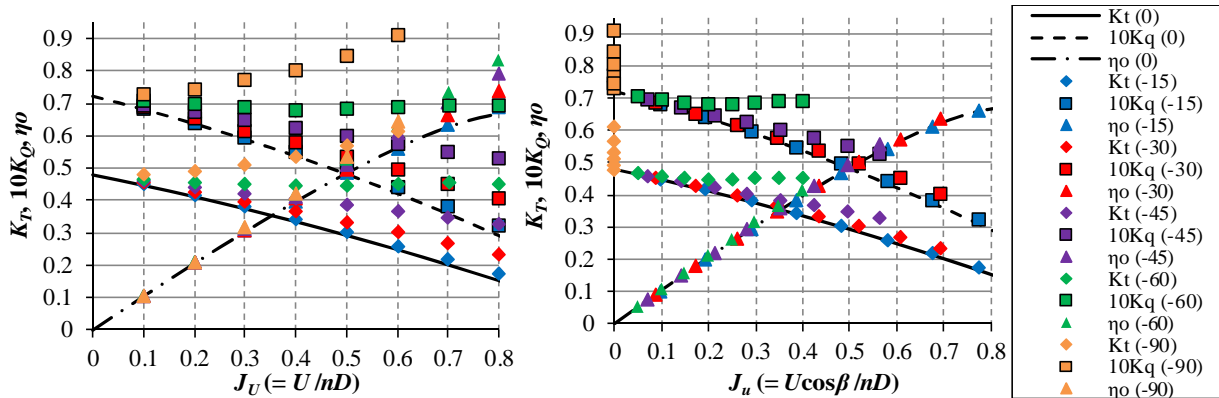


図2 斜航プロペラ単独試験結果（括弧内は時計回りを正としたターンテーブル回転角度）

ど違いは無いことが確認できるが、それ以上の斜航角の場合は推力・トルク特性が直進時より過大傾向になることが確認できた。これは横運動の船尾にて駆動されるプロペラの推力・トルク特性を評価する上で有用な知見である。他にも本試験機を用いて、非定常な周期的平面運動を与えながらプロペラ推力及びトルクを計測する実験も行い、周期的に変動する推力及びトルクは斜航時のプロペラ単独特性をういて概ね準定常的に推定できることも確認した。

次に規則波中模型船自航試験について説明する。本試験は横運動を伴う規則波条件にて自航試験を実施し、プロペラ推力・トルク変動を計測して横運動影響を体系的に分析するための基礎データを収集することが目的である。対象船はバルクキャリア船とコンテナ船の2隻で、試験は海上技術安全研究所の実海域再現水槽で実施した。計測結果の例として、バルクキャリア船のプロペラ推力の変動両振幅の解析値を図3に示す。試験条件は、曳航船速は設計船速14.5ktの85%相当値、プロペラ回転数はship-point相当の8.9rps、波振幅は3cmで波長は図の波長船長比( $\lambda/L$ )条件の通りである。変動両振幅は同じ速度で平水中を航走した際のプロペラ推力に対する%表示で示した。結果を分析すると、波浪中前後運動のみが発達する向波及び追波中における変動量に対し、横運動も発達する斜め波及び横波中においても変動量が大きい事が確認できる。特に、変動量が最も大きくなったのは斜追波中であること、前後運動量が僅かである横波中においても一定量の変動があること、が確認できた。なお、トルク変動においても同様の变化傾向は確認された。また、コンテナ船模型による計測結果においても、波長船長比による変化傾向はやや異なる部分もあるが、波向きに応じた変動量の大小関係はバルクキャリア船と同様の傾向であった。

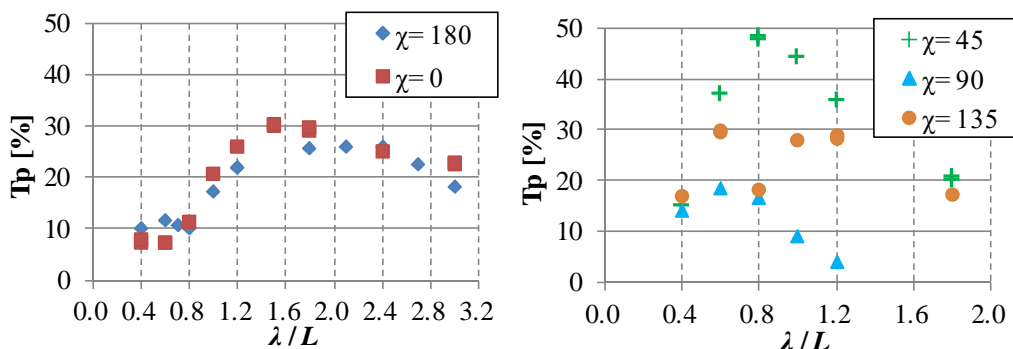


図3 規則波自航試験から得たプロペラ推力変動両振幅 ( $\chi$ : 波との出会い角、0度~追波、90度~左横波、180度~向波、左図：向波と追波、右図：斜追波・横波・斜向波)



これらの実験結果を用いて横運動の影響を考慮した波浪中プロペラ推力・トルクモデルの構築することが本研究の目標である。具体的には、プロペラ有効流入速度がプロペラ単独特性及びトルク単独特性から評価可能という過去の知見を基に、図2に示す斜航時のプロペラ単独特性を用いて、前後方向の流速変動のみを考慮した従来の波浪中プロペラ有効流入速度モデルに横方向からの流速成分を組み込むことで新しいモデル構築を検討する。

ここで、従来の波浪中プロペラ有効流入速度モデルは(1)式の通り表される。

$$u_p = (1 - w_p) \left\{ u_0 - \omega_e \zeta_a \sin(\omega_e t - \varepsilon_\varepsilon) \right\} + \alpha_w \omega h_a \exp(-kz_p) \cos \chi \cos \{ \omega_e t - kx_p \cos \chi \} \quad (1)$$

前項は船体の波浪中前後運動に基づく成分、後項はプロペラ位置での波の粒子運動による成分である。波浪中船体運動の影響は前後運動成分項における前後揺れ振幅及び位相差でのみ考慮されている所である。ここで、波浪中船体運動を推定する手法として代表的なのは船体が細長体であることを前提として2次元的に流体力を求めるストリップ法であり、流体力を厳密に取り扱うランキンパネル法等の3次元理論による高度な推定手法も近年は実用されている。しかし、ストリップ法の枠内では前後揺れの推定は非常に簡易であり、具体的には他の運動モードで考慮されるラディエーション力やスキヤタリング力が無視されている。これは物体表面法線ベクトルの船体長手方向成分( $n_x$ )を細長体の前提から微小と見なすことによる。一方、3次元理論による推定ではこれらは高精度に取り扱えるものの、ストリップ法と比較すると計算コストが非常に大きい。以上の背景より、波浪中前後揺れの推定手法を実用的な範囲で高度化することの重要性を改めて認識したことから、波浪中プロペラ有効流入速度の推定精度向上の一環として  $n_x$  影響を考慮した新しいストリップ法を開発した。なお、この開発に際し、船舶耐航性理論の研究において著名な柏木教授の助言及び指導を受けたことを記しておく。

開発したストリップ法の定式化の特徴として、前後揺れモードや上下揺れ及び縦揺れとの連成ラディエーション力を計算する、スキヤタリング力の計算を NSM・STFM・溝口・渡辺法(MWM)を拡張させる形で  $n_x$  影響項を厳密に考慮して計算する、MWMについては柏木によるEUTのスキヤタリングポテンシャルの物体表面境界条件を踏襲する、各種流体力の計算に  $n_x$  影響項を考慮する、を挙げる。開発したストリップ法はスキヤタリング力の取扱いに依じて、"Nx-NSM"・"Nx-STFM"・"Nx-MWM"・"Nx-MWMx"の4通りの手法を提案した。詳細は5項「主な発表論文」の雑誌論文[1]に委ねる。開発したストリップ法で計算した前後揺れ・上下揺れ・縦揺れの計算例を図4に示す。対象船はバルクキャリア船であり、点は実験結果、線は計算結果を表す。上段は応答振幅、下段は入射波との位相差を示している。本結果は斜向波中( $\chi=135$ 度)が対象である。新しいストリップ法は"Nx-STFM"と"Nx-MWMx"が示されており、上下揺れ(中央)・縦揺れ(右)については代表的なストリップ法である"STFM"、前後揺れ(左)は波浪強制力としてフルードクリロフ力のみを考慮する"F-K M"と  $n_x$  を陽に用いない従来手法である"F-K M(w/o  $n_x$ )"を比較対象として示す。開発したストリップ法は、上下揺れ・縦揺れは従来手法と遜色なく良好な精度で推定されており、前後揺れは振幅及び位相差の一致は従来手法より良好であると言える。

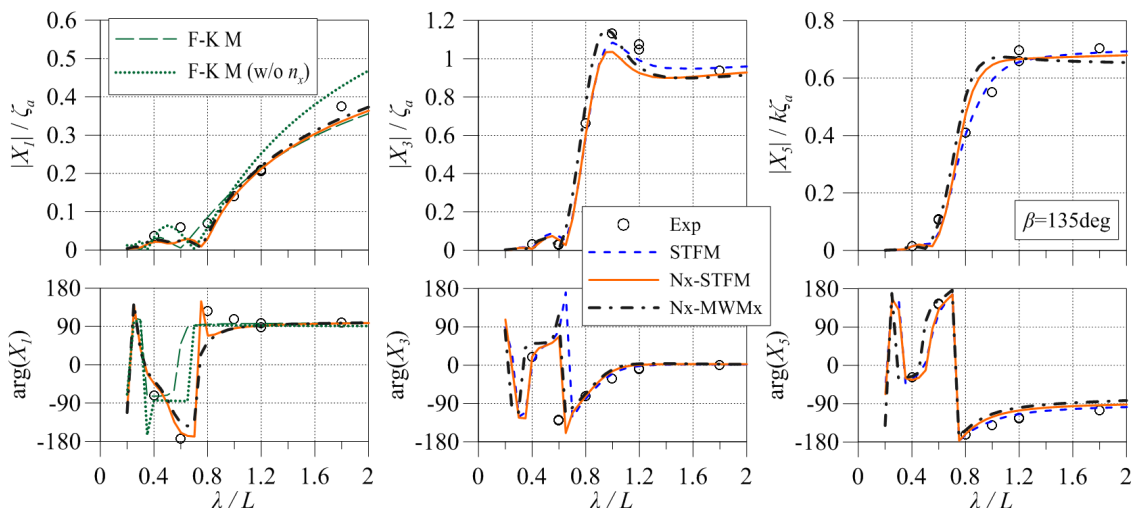


図4  $n_x$  影響を考慮した新しいストリップ法による規則波中縦運動計算例(斜向波)

このように新しく開発したストリップ法は従来法と遜色ない推定精度を示し、波条件によっては改善傾向にあった。一方、従来手法の方が推定精度の高い波条件があったことも記しておくが、昭和の後半期から研究が進められ現在も実用されているストリップ法に対し、定式化をより厳密にして高度化した新しいストリップ法を提案したことの学術的意義は大きいと言える。

以上のように、波浪中プロペラ有効流入速度をより高精度に推定するための基礎的検討として、新しいストリップ法を提案した。一方で、横運動の影響を考慮した新しい波浪中プロペラ有効流入速度モデルについては、前述の通り斜航時のプロペラ単独特性とプロペラ横方向から

の流速成分を考慮することで構築を試みていたが、新しいストリップ法の開発に注力したこともあり検討時間を十分に確保できず、未遂に終わっている。この要因として、波粒子運動成分による横方向流速成分も含め、船体運動による流速成分と波粒子運動による流速成分のそれぞれについて、船体との干渉影響係数を同定することが困難であったことを挙げる。なお、不規則波中の主機負荷変動推定プログラムは別研究課題でも対象としていたため計算プログラムの作成は凡そ終了している。よって、横運動の影響を考慮した波浪中プロペラ有効流入速度モデルの構築が終了すれば、不規則波中の船速・主機状態推定シミュレーションに取り組むことができる。横運動影響を考慮したプロペラ有効流速モデルの係数同定については AI 技術を用いた係数同定手法の調査も行っている所であり、今後も継続してモデル構築に取り組む計画である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- [1] Yasushi Kitagawa, Masashi Kashiwagi : A Strip Method Including  $n_x$ -Related Terms and Its Effects on Propeller Inflow Velocity in Waves, J. JASNAOE, 査読有, Vol.29, 2019, in press.
- [2] 北川泰士, 塚田吉昭, 柏木正: ストリップ法における  $n_x$  影響項が前後揺れと波浪中プロペラ流入速度変動に与える影響, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読無, 第 28 号, 2019 年, pp.487-490.
- [3] Yasushi Kitagawa, Masashi Kashiwagi : A New Strip-Theory Method Including Effects of Longitudinal Direction Component of Normal Vector on Body Surface, Conf. Proc. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng., 査読無, Vol.26, 2018, pp.19-24.
- [4] 北川泰士, 塚田吉昭: 非定常な横方向流入状況下におけるプロペラ単独特性に関する実験的研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読無, 第 25 号, 2017 年, pp.171-175.  
(加えて、2019 年 6 月 13 日現在、国際ジャーナル Applied Ocean Research にて査読中の論文が 1 件あり)

〔学会発表〕(計 2 件)

- [1] 北川泰士: 物体表面法線ベクトルの船体長手方向成分の影響を考慮した新しいストリップ法, 第 76 回 実海域推進性能研究会, 2018 年.
- [2] 北川泰士: 波浪中主機負荷変動推定のためのプロペラ有効流入速度モデルに関する研究, 第 196 回 船用プロペラ研究会, 2018 年.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等: 特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

若手研究課題につき無し

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名: 塚田吉昭 (実施した水槽試験への協力) 柏木正 (開発した新しいストリップ法に関する助言)

ローマ字氏名: Tsukada Yoshiaki (Aids for carrying out of the tank test in this research), Kashiwagi Masashi (Tutelage for the newly developed strip method)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。