

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760677

研究課題名(和文) 翼端渦キャビテーションによって誘起される船尾変動圧力の理論計算法に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Theoretical Calculation Method of Pressure Fluctuation on Ship Stern Induced by Tip Vortex Cavitation

研究代表者

金丸 崇 (KANEMARU, Takashi)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90612127

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではパネル法を応用した翼端渦キャビテーションの計算、及び船尾変動圧力計算法を開発し、既に開発済みのシートキャビテーション計算法と組み合わせることにより、プロペラキャビテーションによって誘起される船尾変動圧力の実用的推定法を構築する。また、開発した計算法で用いる渦核半径推定式の精度向上のため、スキュー付プロペラ翼を模した、後退角付直進翼模型を製作し、翼端渦周りの流場をPIVシステムにより詳細に計測することで、後退角と渦核半径の関係を調査した。

適用範囲に限度があると考えられているパネル法について、前例のない応用問題に取り組んだことも、本研究の学術的成果として挙げられる。

研究成果の概要(英文)：This study presents the calculation method of tip vortex cavitation and pressure fluctuation induced by the cavitation using a panel method. Also this method is incorporated in the calculation method of sheet cavitation which was developed by the previous work. The present method for pressure fluctuation on ship stern is very practical because of the short computation time. In this study, the measurement of velocity vector around the tip vortex of 3D wings is conducted using PIV in order to investigate the relation between the swept back angle and the radius of vortex core. These results are used in the prediction method of vortex core in the present study.

This study is very challenging and innovative as the calculation method based on the panel method. This is one of the features of this study because it shows the advanced application using the panel method.

研究分野：船舶推進性能

キーワード：船用プロペラ 翼端渦キャビテーション 船尾変動圧力 パネル法 翼端渦流場計測

1. 研究開始当初の背景

一般に船用プロペラ(以下、プロペラ)は、船尾の複雑な不均一流中で作動するため、非定常なキャビテーションを伴う。このキャビテーションによって誘起される船尾変動圧力は船体振動の原因となり、船員の居住性悪化、計器類の故障等、様々な害をもたらす。

近年、国際海運におけるCO₂排出規制であるEEDI (Energy Efficiency Design Index for new ships) の発効に伴い、船舶の推進性能向上が強く求められている。プロペラ研究者、設計者は高効率プロペラの開発、改良に積極的に取り組んでいるが、プロペラ設計段階で船尾変動圧力を精度良く推定することは非常に難しい。プロペラキャビテーションの研究は古くから盛んに行われているが、これに誘起される船尾変動圧力まで信頼できる理論的推定法は未だ存在しないと云っても過言ではない。

2. 研究の目的

研究代表者らは最近、プロペラに発生するシートキャビテーションの計算法^①、及びこれを応用した船尾変動圧力計算法^②を開発し、一定の成果を得た。しかし、キャビテーションによって誘起される船尾変動圧力を精度よく推定するためには、シートキャビテーションのみを取り扱った計算法では不十分である。

本研究は、船尾変動圧力の特性に大きく影響する翼端渦キャビテーションの計算法を開発し、理論的な推定が難しいと考えられてきた船尾変動圧力の高次成分振幅まで算出できる、高精度かつ実用的な船尾変動圧力計算法の開発を目的とする。

なお、本研究では計算法のベースとなるプロペラ流場計算法として、九州大学が独自に開発したパネル法 SQCM (Source and QCM) ^{③④}を用いる。この計算法は高精度であるにもかかわらず計算時間が短いという特長を有するため、本研究により、高精度と実用性を両立できる前例のないシミュレーションツールの開発が期待できる。

3. 研究の方法

(1) プロペラ翼端渦キャビテーションの計算

翼端渦近傍の圧力を計算し、飽和蒸気圧以下となる領域を計算により評価し、翼端渦キャビティを円筒状のキャビティとして表現する。しかし、このモデル化を行うためには以下の2つの課題がある。

① 翼端渦モデルの開発

SQCM における半径方向パネル分割に従った翼端渦(最翼端の自由渦)のみを翼端渦として扱うことは無意味である。まず、キャビテーションがない状態において、翼端近傍から放出される自由渦のうち、翼端渦の生成に寄与する範囲を求め、翼端渦生成の現象をモデル化し、翼端渦強さを決定する。

② 翼端渦近傍の圧力計算

パネル法は非粘性流体力学に基づくポテンシャル理論であるため、渦はポテンシャル渦として取り扱われる。従って、渦糸上の流速は無限大となり、無限の負圧が生じることとなる。この場合、必ず翼端渦キャビテーションが発生することとなり、実現象に合わない。翼端渦キャビテーションをモデル化するためには、流体の粘性の影響を受ける渦核部(渦核半径内部)で別途モデル化が必要である。

(2) プロペラ翼端渦キャビテーションによって誘起される船尾変動圧力の計算

(1)により求めた時々刻々のキャビティ形状から誘起される船尾変動圧力を計算する。計算はシートキャビテーションによって誘起される船尾変動圧力計算法^②に従い、キャビティ表面を時々刻々変動する固定壁面として取り扱い、境界条件(物体表面条件)を課す。

(3) 直進楕円翼の後流場計測

前述した(1)-(2)における渦核半径とプロペラ翼形状の関係を調査するため、研究代表者が所属する研究室所有の高速回流水槽において、直進楕円翼の翼端部後流場を計測する。計測には本研究室にて構築した PIV (Particle Image Velocimetry) システムを用いる。楕円翼は後退角を有するシリーズ模型を用い、後退角と渦核半径の関係を捉え、得られた知見を活用することで、プロペラ翼のスキュー角と渦核半径の関係を簡易的に表現するモデルを構築する。

4. 研究成果

(1) 計算法

① 翼端渦モデル

翼端渦キャビテーションのモデル化を行うため、翼端渦を1本の渦で表現する。実際の翼端渦は、翼端近傍から放出される自由渦の集合により生成され、その強さは翼端より幾分内側の翼断面における循環の大きさに置き換えることができる。本論文では大島ら^⑤の実験結果を参考にして、翼端渦強さは0.95R (Rはプロペラ半径)断面における循環の大きさで表現できると仮定した。(図1)

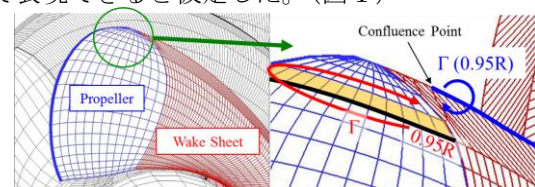


図1 翼端渦モデル

② 翼端渦周り流場計算モデル

ポテンシャル理論で用いる非粘性渦の中心は流速が無限大となるが、実際の渦中心は有限の負圧となるため、これをモデル化する必要がある。本研究では Szantyr^⑥の2次元モ

デルを参考にするが、これを以下のようにして3次元モデルに拡張する。

図2右に示すように単位強さの渦線分により点 P に誘導される速度ベクトル \vec{v}_γ はビオサバールの式と修正係数 β の積で表すことができる。

$$\vec{v}_\gamma = \frac{1}{4\pi} \frac{\vec{r}_1 \times \vec{r}_{12}}{|\vec{r}_1 \times \vec{r}_{12}|^2} \left\{ \frac{\vec{r}_2}{|\vec{r}_2|} - \frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_1|} \right\} \cdot \vec{r}_{12} \cdot \beta \quad (1)$$

$$\text{ただし、} d \geq r_0 : \beta = 1, \quad d \leq r_0 : \beta = \sqrt{2 - \left(\frac{d}{r_0}\right)^2}$$

ここで、 d は渦糸から計算点 P までの距離、 r_0 は渦核半径である。 r_0 はコード長 c (at $0.95 R$)、及びこの断面の流入速度によるレイノルズ数 Re を用いて、次式で求める。

$$r_0 = \frac{0.37c}{Re^{0.2}} \quad (2)$$

計算点が r_0 より内部にある場合、 d の関数である係数 β を与える。この β における d の算出については実際の計算点 P をそのまま適用するが、ビオサバールの式 ((1)式の β 以外の部分) の計算においては、分母が0になる場合を避けるため、次式を用いて計算点を渦核 (半径 r_0 の円筒) 表面に投影した P_m に置き換える。

$$\vec{P}_m = \vec{P} + (1-\alpha)\vec{r}_1 + \ell(1-\alpha)\vec{r}_{12} \quad (3)$$

ただし、

$$\alpha = \sqrt{\frac{r_0^2}{|\vec{r}_1|^2 + 2\ell|\vec{r}_1||\vec{r}_{12}| + \ell^2|\vec{r}_{12}|^2}}, \quad \ell = 1 - \frac{\vec{r}_2 \cdot \vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|^2}$$

ここで、 \vec{P} 、 \vec{P}_m はそれぞれ P 、 P_m の位置ベクトルである。

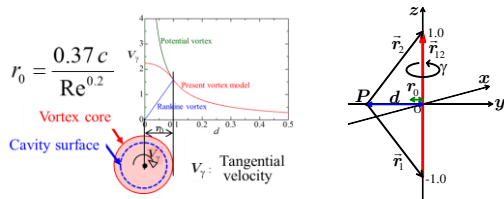


図2 渦線分 (右) による誘導速度

③ 翼端渦キャビテーションモデル

翼端から少し後方の渦線分について d と圧力の関係を計算し、その圧力が飽和蒸気圧を下回る領域にキャビティ半径 R_T の円筒で表現される翼端渦キャビテーション (図4) が発生するものとする。一度発生した翼端渦キャビテーションの R_T は Rayleigh 方程式に従って変化するものとする。

$$R_T \frac{d^2 R_T}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_T}{dt} \right)^2 = -\frac{1}{2} n^2 D^2 (C_{pn}(t) + \sigma_n) \quad (4)$$

ここで、 t は時間、 n 、 D はプロペラ回転数、直径、 $C_{pn}(t)$ は円筒要素表面の圧力係数、 σ_n はキャビテーション数である。

④ 翼端部の局所的スーパーキャビテーションモデル

プロペラ翼面上のシートキャビテーションから翼端渦キャビテーションに至る過程で、翼端部に局所的なスーパーキャビテーションが発生する。翼端部の非定常、且つ局所的なスーパーキャビテーションをシートキャビテーションの一部として取り扱うことは非常に難しい。そこで、本論文ではスーパーキャビテーション部に気泡追跡法を適用することを試みる (図3)。これには、山口⁷⁾が部分キャビテーションの後縁部に適用した例を参考にするが、翼表面のシートキャビテーションについては翼後縁まで自由流線理論を適用する。スーパーキャビテーションは半径方向の円筒要素で表現する。時刻 t における1個目 (翼後縁上) の気泡の半径 $R_B(t,1)$ は、シートキャビテーションの計算における各翼断面の翼後縁の開き幅 $\delta_{T.E.}(t)$ を用いて次式で表す。

$$R_B(t,1) = \frac{\delta_{T.E.}(t)}{2} \quad (5)$$

この翼後縁の気泡は後流渦面上を流れ、その円筒半径は翼端渦キャビテーションの円筒要素と同様、Rayleigh 方程式に従って変動するものとする。ただし、 $C_{pn}(t)$ は円筒要素中心で代表させる。プロペラキャビテーションは、シートキャビテーション、翼端渦キャビテーション、翼端部のスーパーキャビテーションの組み合わせで表現される (図4)。

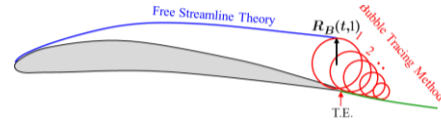


図3 局所的スーパーキャビテーションモデル

⑤ 後流渦面の計算

本研究では、翼端部のキャビテーションを取り扱う上で、重要と考えられる後流渦面の変形を文献⁸⁾に従い考慮する。ただし、計算の安定を考慮し、変形させる領域はプロペラ後縁から 45 度 (プロペラ回転角度) 後流位置までとする。なお、これより後流は幾何ピッチモデルとした。図4に後流渦変形有無の後流渦面を比較する。

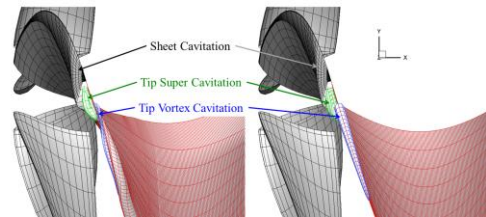


図4 後流渦面と各キャビテーション

⑥ 変動圧力計算モデル

①~⑤により算出された、翼端渦キャビテーション、及び局所的スーパーキャビテーションのキャビティ形状表面に吹き出しパネルを配置し、文献^②の方法と同様に、変動圧力計算する。境界条件 ((6)式) は、すべての吹き出しパネルで同時に満足させることが望ましいが、計算時間を考慮し、円筒要素毎に与える。円筒は1要素8面の八角柱で表現する (図5)。

$$\vec{V}_T \cdot \vec{n}_T = 0 \quad (6)$$

ここで、 \vec{V}_T はキャビティ表面への流入速度ベクトル、 \vec{n}_T はキャビティ表面パネルの法線方向単位ベクトルである。なお、

$$\vec{V}_T = \vec{V}_{ST} + \vec{V}_{mT} \quad (7)$$

となる。 \vec{V}_{ST} は翼端渦キャビティ半径、またはスーパーキャビティ半径の変化による相対流入速度ベクトルであり、次式となる。

$$\vec{V}_{ST} = \frac{R_T(t_n) - R_T(t_{n-1})}{\Delta t} \quad (8)$$

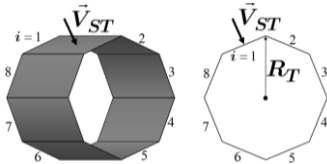


図5 八角柱キャビティ要素

ここで、 t_n はタイムステップ番号である。 \vec{V}_{mT} は吹き出しパネルによる誘導速度ベクトルであり、次式で表せる。

$$\vec{V}_{mT} = \sum_{i=1}^8 \sigma \vec{C}_i \quad (9)$$

ここで、 i は八角柱要素のパネル番号、 σ は吹き出し強さ、 \vec{C}_i は影響係数である。

(2) 計算例

図6、及び7に青雲丸I世の通常型プロペラ (以下、CP)、及びハイスキュープロペラ (以下、HSP)^⑨のキャビテーションパターンを示す。高負荷時にシートキャビテーションが発達すると同時に、翼端渦キャビテーション、及び翼端部の局所的スーパーキャビテーションが発生する様子が表現できている。

次に文献^⑨と同様に、青雲丸I世の船尾変動圧力の計算を行った。キャビテーションによって誘起される変動圧力 K_p は、文献^⑨の計算法による変動圧力 K_{pShC} と翼端渦キャビテーションによる成分 K_{pTVC} 、及びスーパーキャビテーションによる成分 K_{pTSC} の和で表す。

$$K_p = K_{pShC} + K_{pTVC} + K_{pTSC} \quad (10)$$

図8、及び9に船体表面のプロペラ直上にあたる点における圧力波形の計算値を示す。 K_{pShC} にはシートキャビテーションによる成分の他、プロペラの揚力、翼厚による成分が含まれている。翼端渦キャビテーションによる成分 K_{pTVC} の圧力変動が小さいのは、

計算上、現象が安定しており、各円筒要素のキャビティ体積変動が小さいためである。一方、局所的スーパーキャビテーションによる成分 K_{pTSC} は無視できず、かなり大きな圧力変動が生じている。これらのキャビテーション、特にスーパーキャビテーションによる影響を考慮することにより、全成分による圧力波形が従来法による結果に比べ変化する。

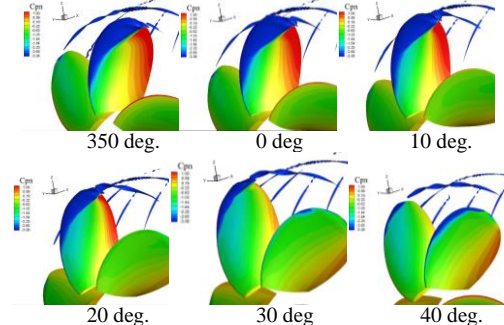


図6 キャビテーションパターン(CP)

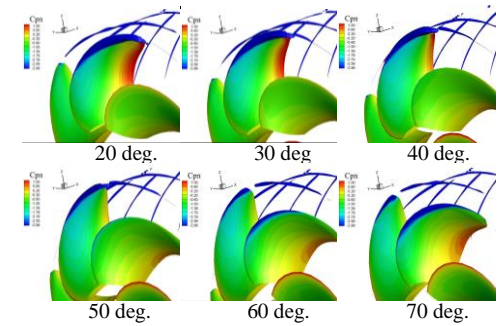


図7 キャビテーションパターン(HSP)

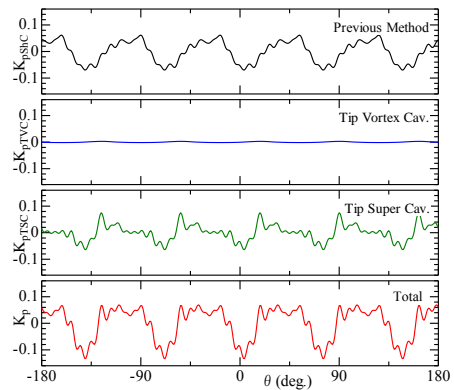


図8 変動圧力波形 (CP)

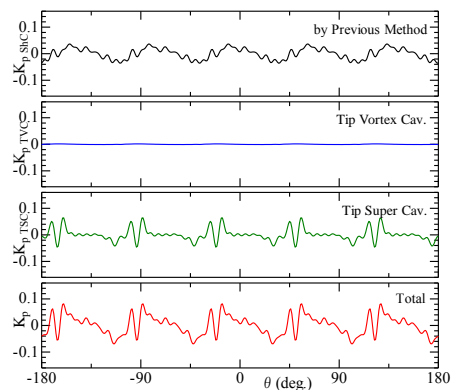


図9 変動圧力波形 (HSP)

図10、及び11にCP、及びHSPによる変動圧力振幅の各次数成分を黒部ら[®]の実験値と比較して示す。CP、HSP共に、従来法に比べ全体的に振幅が大きくなると同時に高次成分振幅も大きくなり、本計算法によって傾向として実験値に近づいている。従って、翼端部のキャビティの厳密な取り扱いは、推定精度向上を考える上で重要な課題と言える。今後、それぞれのキャビテーションを独立させず、混合させて解くモデルの開発や、これによって得られたキャビティ形状をより正確に取り扱う変動圧力計算法等に取り組む必要がある。

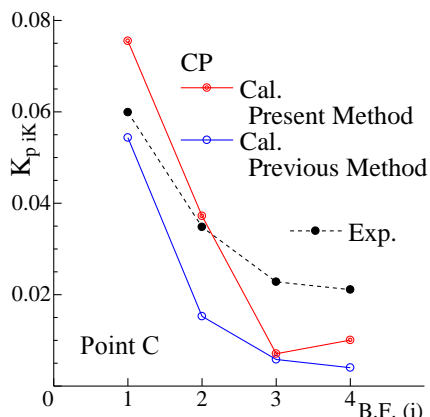


図10 変動圧力振幅 (CP)

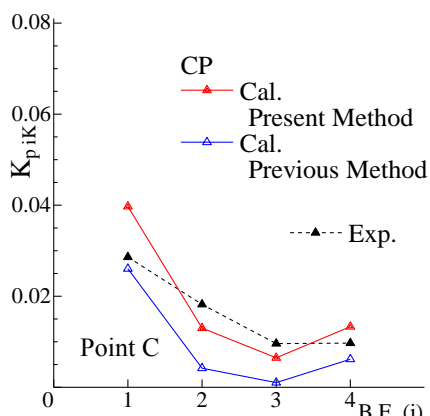
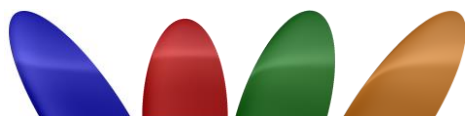


図11 変動圧力振幅 (HSP)

(3) 楕円翼の翼端部後流場計測

図12に示すように、楕円翼(翼弦長200mm、翼幅236mm)を基準翼として、後退(前進)角を変えた直進翼3種類(前進角30deg、後退角15deg、30deg)の計4種類の直進翼について、翼端渦後流場の計測を行った。



前進黨 基準翼 後退翼 A 後退翼 B

図12 楕円翼形状

計測は、研究代表者が所属する研究室所有の高速回流水槽において、PIV (Particle Image Velocimetry)システムにより行った。図13に計測胴内の直進翼模型、及び計測機器の配置

図を示す。翼端渦周りの流れを測るには、流れの方向に対して垂直面内の流れを正確に捉える必要がある。そこで、図13に示すように直進翼から十分離れた後流場に鏡を配置し、鏡面に映し出された翼端渦周りの流れを撮影した。図14に計測時の様子と撮影画像を解析して得られた翼端渦周りの速度ベクトルの一例を示す。なお、流体粒子には、諸検討の結果、銀コート中空ガラスビーズを用いた。

後退角が大きくなるほど、渦中心の流れが遅くなる範囲が大きくなり、渦核半径に相当する長さが大きくなる傾向があることが分かった。これは、2次元的境界層計算に基づく(2)式では不十分であることを示している。今後、青雲丸I世以外のプロペラに対しても、本研究で開発したシミュレーション計算を実施し、計算法の検証のためのデータを蓄積しながら、スキュー角の影響を含めた渦核半径の推定式の構築に努める。

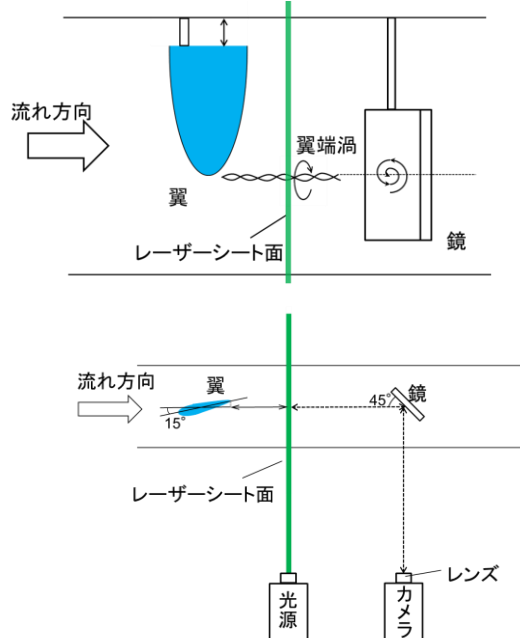


図13 高速回流水槽計測胴内配置図 (上:側面図、下:上面図)

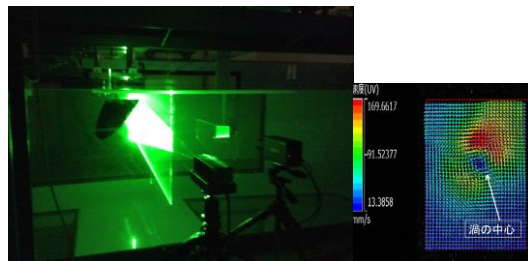


図14 計測状況と翼端渦周りの速度ベクトル

<引用文献>

- ① 金丸崇、安東潤、簡便なパネル法による非定常プロペラキャビテーションの計算、日本船舶海洋工学会論文集、第9号、2009、45-53
- ② 金丸崇、安東潤、簡便なパネル法による

プロペラキャビテーションと船尾変動圧力の計算、日本船舶海洋工学会論文集、第10号、2009、1-10

- ③ 安東潤、毎田進、中武一明、簡便なパネル法による定常プロペラ性能解析、日本造船学会論文集、第178号、1995、61-69
- ④ 毎田進、安東潤、中武一明、簡便なパネル法による非定常プロペラ性能解析、日本造船学会論文集、第182、1997、71-80
- ⑤ 大島明、川北千春、星野徹二、松尾博、高精度キャビテーション予測によるプロペラ騒音の低減、三菱重工技報、Vol. 34、No. 5、1997、338-341
- ⑥ Szantyr J.、 A.Dynamic Interaction of the Cavitating Propeller Tip Vortex with the Rudder、 Polish Maritime Research、 Vol. 14、 2007、 10-14
- ⑦ 山口一、加藤洋治、翼型に発生する部分キャビテーションの非線形理論、日本造船学会論文集、第152号、1983、117-124
- ⑧ 金丸崇、安東潤、後流渦の変形を考慮した非定常プロペラ性能解析、日本船舶海洋工学会論文集、第6号、2007、267-279
- ⑨ 工藤達郎、右近良孝、黒部雄三、谷林英毅、模型プロペラ翼面上に発生するキャビティ形状の計測、日本造船学会論文集、第166号、1989、93-103
- ⑩ 黒部雄三、右近良孝、小山鴻一、牧野雅彦、青雲丸の実船対応キャビテーション試験、船舶技術研究所報告、第20巻、第6号、船研報告、1983、395-429

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

- ① 金丸 崇、安東 潤、Numerical Analysis of Tip Vortex Cavitation on Marine Propeller Using a Simple Surface Panel Method “SQCM”、Proceedings of 4th International Symposium on Marine Propulsor、査読有、Vol.3、2015、505-512
- ② 金丸 崇、安東 潤、簡便なパネル法によるプロペラ翼端部に発生するプロペラキャビテーションの計算、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読有、2015、399-402
- ③ 金丸 崇、安東 潤、Numerical analysis of cavitating propeller and pressure fluctuation on ship stern using a simple surface panel method “SQCM”、Journal of Marine Science and Technology、査読有、Vol.18、No.3、2013、294-309
DOI:10.1007/s00773-012-0208-8

〔学会発表〕(計8件)

- ① 金丸 崇、Numerical Analysis of Tip Vortex Cavitation on Marine Propeller Using a Simple Surface Panel Method “SQCM”、

Proceedings of 4th International Symposium on Marine Propulsor、2015年6月3日、オースティン(アメリカ合衆国)

- ② 金丸 崇、簡便なパネル法によるプロペラ翼端部に発生するプロペラキャビテーションの計算、平成27年度日本船舶海洋工学会春季講演会、2015年5月26日、神戸国際会議場
- ③ 金丸 崇、プロペラ翼端渦キャビテーションの一計算法、第17回キャビテーションに関するシンポジウム、2014年11月21日、東京大学生産技術研究所

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金丸 崇 (KANEMARU、Takashi)
九州大学大学院・工学研究院・助教
研究者番号：90612127