

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01649

研究課題名(和文)キャビテーションを考慮した弾性変形プロペラのフラッター・ダイバージェンス特性解明

研究課題名(英文)Elucidation of flutter / divergence characteristics of elastic deformation propeller considering cavitation

研究代表者

川北 千春 (Kawakita, Chiharu)

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・研究員

研究者番号：70767813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：フラッターやダイバージェンスの発生条件、それらに及ぼすキャビテーションおよびプロペラ形状の関係を明らかにすることを目的に実験および計算を実施し、以下の成果を得た。(1)弾性変形プロペラを対象とした流体構造連成解析法を開発し、実験との比較によりその有効性を検証した。(2)水中翼に発生するフラッターは、部分キャビテーション状態では、発生しやすくなり、遷移キャビテーションおよびスーパーキャビテーション状態では、発生しにくくなる。(3)プロペラ正転時にはフラッターやダイバージェンスが発生するリスクは小さく、プロペラ逆転時には、スキュー角の大きいプロペラほど、ダイバージェンスの発生リスクが高くなる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フラッターやダイバージェンスに関する研究は、航空機等の翼を設計する際に必要不可欠となる空力弾性学として多くの研究事例が報告されている。また、水中翼を対象に、フラッターやダイバージェンスに及ぼすキャビテーション影響を研究された事例はある。しかし、回転機械である弾性変形プロペラを対象にキャビテーションを考慮した状態のフラッターやダイバージェンスに関する研究事例は、研究代表者の知る限りない。本研究は弾性変形プロペラの形状、特にスキュー角とフラッターおよびダイバージェンスの関係を解明し、フラッターやダイバージェンスの発生リスクを低減可能とする信頼性の高い弾性変形プロペラ的设计に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：Experiments and calculations were carried out to clarify the conditions for the occurrence of flutter and divergence, and the relationship between cavitation and propeller shape on these conditions. The following results were obtained. (1) A fluid-structure interaction analysis method was developed for an elastically deformed propeller, and its effectiveness was verified by comparison with experiments. (2) Flutter on the hydrofoil is more likely to occur under partial cavitation conditions and less likely to occur under transitional cavitation and super-cavitation conditions. (3) In propeller forward rotation, the risk of flutter and divergence is small, while in propeller reverse rotation, the risk of divergence is higher for propellers with larger skew angles.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：フラッター ダイバージェンス キャビテーション プロペラ 水中翼 流体構造連成解析

1. 研究開始当初の背景

- (1) 回転流体機械である現状のプロペラの材料は、主にニッケルアルミ青銅系の金属製プロペラが一般であるが、近年、CFRP や GFRP 等の複合材料を用いた弾性変形プロペラが出現し注目を集めている。
- (2) 弾性変形プロペラの場合、プロペラ形状やプロペラ作動条件により、製品破壊に繋がる、自励振動現象であるフラッターや静的不安定現象であるダイバージェンスの発生するリスクが高まると考えられる。このため、信頼性の高い弾性プロペラを設計するためには、キャビテーションも考慮したフラッターやダイバージェンスの発生条件を特定する予測技術が必要となる。
- (3) 弾性変形プロペラの変形量計測結果は少なく、流体構造連成解析法（Fluid Structure Interaction、以後、FSI 解析と称する）の精度検証は十分に行われていない。さらに、フラッターやダイバージェンスに関する研究事例は報告されていない。

2. 研究の目的

- (1) 本研究では信頼性の高い弾性プロペラを実現させるために必要不可欠と考えられる正転時および逆転時にける弾性プロペラのフラッターやダイバージェンスの発生メカニズムと発生条件の明確化と、それらに及ぼすキャビテーション影響およびプロペラ形状の関係を解明することを目的とする。
- (2) 弾性プロペラの実用化を見据え、弾性プロペラの形状、特にスキュー角とフラッターおよびダイバージェンスの関係を明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) 流体構造連成解析法（FSI）の開発  
 商用計算コードを用いた FSI 解析法を開発し、水中翼およびプロペラを対象とした FSI 解析を実施した。計算精度検証のために、変形可能な樹脂製弾性単独翼模型および樹脂製弾性模型プロペラを製作し、単独翼の揚抗力特性、プロペラの推力・トルク特性ならびにライン CCD 法を用いた変形量計測を実施し、FSI 解析の有効性を検証した。
- (2) キャビテーション発生時の水中翼のフラッター特性  
 翼部部材（アクリル・A6061・SUS304）を変えた 3 種類の平板翼を用いて、フラッター安定限界をキャビテーション水槽にて非キャビテーション時およびキャビテーション発生時の水槽試験により評価した。供試翼には 2 つのひずみゲージを貼り付け、それぞれのひずみゲージの値を比較することで、翼に作用する非定常ひずみを曲げ方向のひずみと、ねじり方向のひずみに分解し評価した。  
 さらに、FSI 解析を実施し、非キャビテーション時およびキャビテーション発生時のフラッター安全限界について評価した。
- (3) プロペラ形状の影響  
 弾性プロペラのフラッターおよびダイバージェンス特性を含めた流体力学的性能を実験的に調査するために、プロペラの材料剛性およびプロペラ形状として弾性変形の影響が大きいと予測したスキュー角を変更した 749 型内航船を対象に新たに設計した 3 種類の模型プロペラを製作し、プロペラ単独試験およびキャビテーション試験を実施した。

4. 研究成果

- (1) 流体構造連成解析法（FSI）の開発（引用文献①、②）

流体構造連成解析法（FSI）を開発し、模型プロペラを対象とした FSI 解析及び水槽試験を実施した。図 1 に開発した FSI 解析のフローを示す。カーボン樹脂製の弾性変形プロペラについて、伴流中の三次元変形量計測を実施し、プロペラ翼が周期的な形状変化を伴いながら作動する様子を確認した。水槽試験との比較検証結果から、回転数や流速変化に応じた弾性変形プロペラの性能変化について、FSI 解析によって、その特徴を捉えられることを確認した。図 2 にプロペラ回転数の違いによる流体力変化の実験と FSI 解析の比較を示す。図 3 に位相角 45deg における実験にて三次元変形量計測を実施しと FSI 解析の 3 次

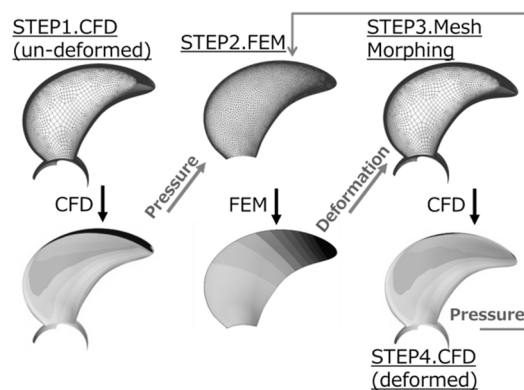


図 1 FSI 解析フロー

元形状の比較を示す。FSI 解析結果は実験結果と定量的に良い一致を示した。

本 FSI 解析手法は、作動中の弾性プロペラの流体力及び形状変化について、定量的に推定可能であると考えられる。これにより、実際の作動条件において、流体力により翼変形した状態の適切な翼形状における弾性変形プロペラの評価が可能となった。

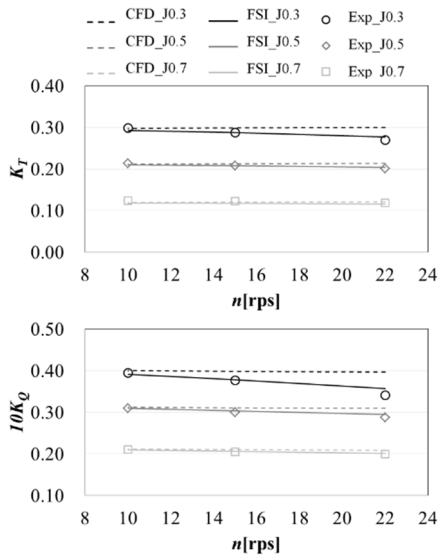


図2 プロペラ回転数の違いによる推力係数  $K_T$  およびトルク係数  $K_Q$  の比較  
記号：Exp, 実線：FSI, 破線：無変形(CFD)

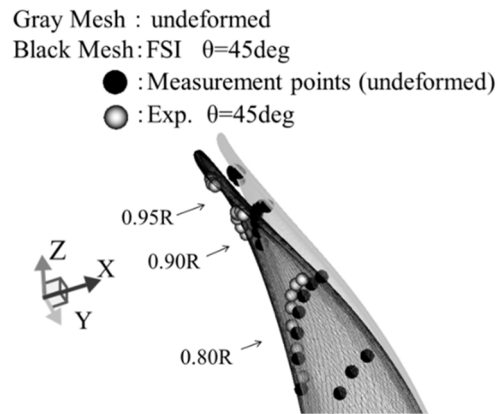


図3 位相角 45deg における実験と FSI の 3次元形状比較

(2) キャビテーション発生時の水中翼のフラッター特性 (引用文献③、④)

様々なフラッター種類がある中で、水中翼のフラッターは主に、ストールフラッターと曲げねじりフラッターの2種類である。本研究で実施した実験より2自由度かつ曲げとねじりのある一定の位相差を持つ振動であったことから、水中単独翼に曲げねじり連成フラッターが発生していることが分かった。

キャビティ長さよりキャビテーション形態3種類を選定し、それぞれのキャビテーション形態がフラッターの安定限界流速に対して、別々の影響を与えることを実験およびFSI解析より確認した。翼面上に発生したキャビテーションパターンの一例を図4に、計測したひずみのFFT解析結果を図5および図6に示す。部分キャビテーション状態では、フラッターが発生しやすくなることがわかった。要因として前縁で発生したキャビテーションによって曲げねじりの位相のずれが誘起され、フィードバックが助長されるためであると予想される。遷移キャビテーション状態およびスーパーキャビテーション状態では、フラッターが発生しにくくなることがわかった。要因として、翼周りのキャビティが付加質量逆効果を与え角振動数が増加する方向に作用することなどがあげられる。

非キャビテーション発生状態と同様に、FSI解析では実験に対して高流速側に予測してしまうことを確認した。FSI解析は多くの計算時間要するため、パラメータスタディには不向きである。そこで、解析の高速化のため、2自由度の周波数応答解析を実施した。非キャビテーション状態において手法を確立した2自由度の強制振動解析はキャビテーション状態においても適用可能であることが分かった。2自由度の周波数応答解析より得られた安定限界を図7に示す。

ねじり1次固有振動数がとても大きくなる翼型は、フラッターは発生しにくいことが分かった。曲げ1次固有振動数とねじり固有振動数がある程度低いものは、曲げ1次固有振動数の値と、エネルギーベースの理論式からおよそのフラッター安定限界流速が推測できるが、それ以外の(ねじり1次固有振動数がとても大きくなる)翼型は曲げ1次固有振動数及びねじり1次固有振動数の情報を適切に用いた予測手法が今後必要であることが分かった。

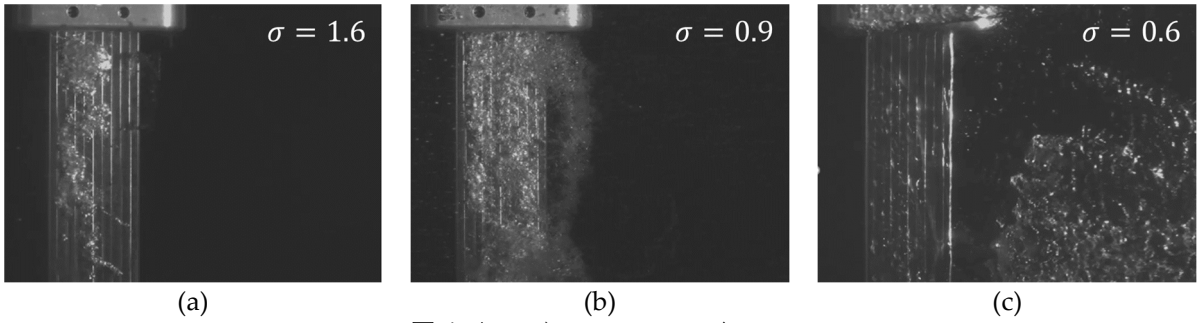


図4 キャビテーションパターン  
(a)部分キャビテーション, (b)遷移キャビテーション, (c)スーパーキャビテーション

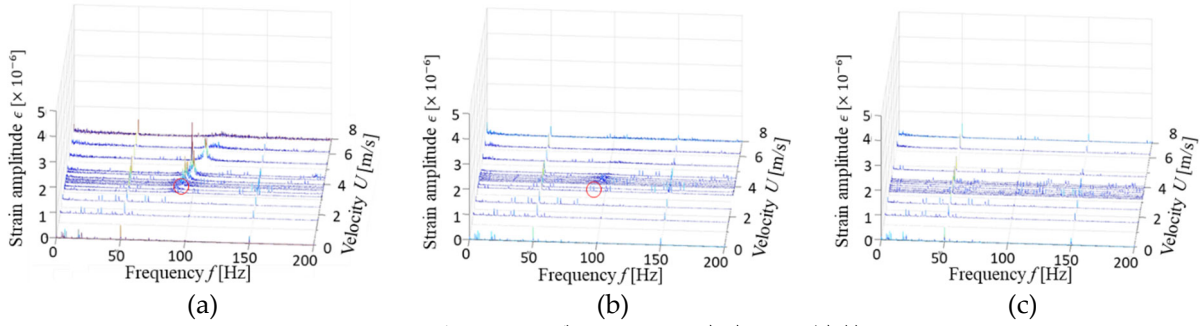


図5 ねじりひずみにおける振幅と周波数  
(a)部分キャビテーション, (b)遷移キャビテーション, (c)スーパーキャビテーション

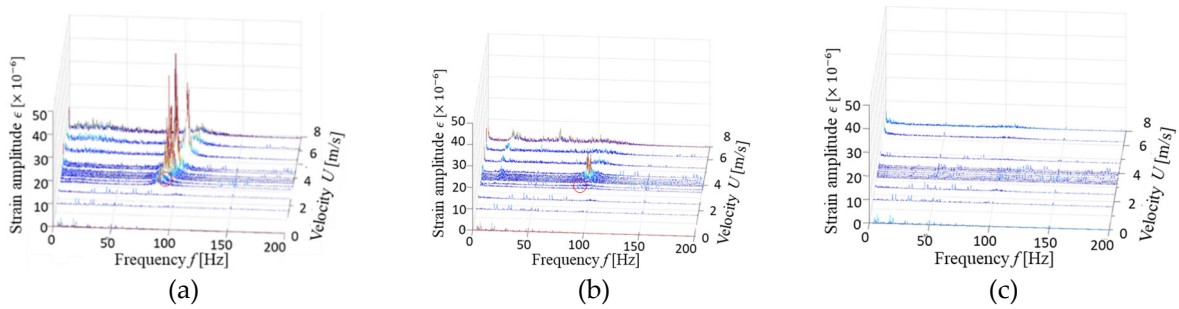


図6 曲げひずみにおける振幅と周波数  
(a)部分キャビテーション, (b)遷移キャビテーション, (c)スーパーキャビテーション

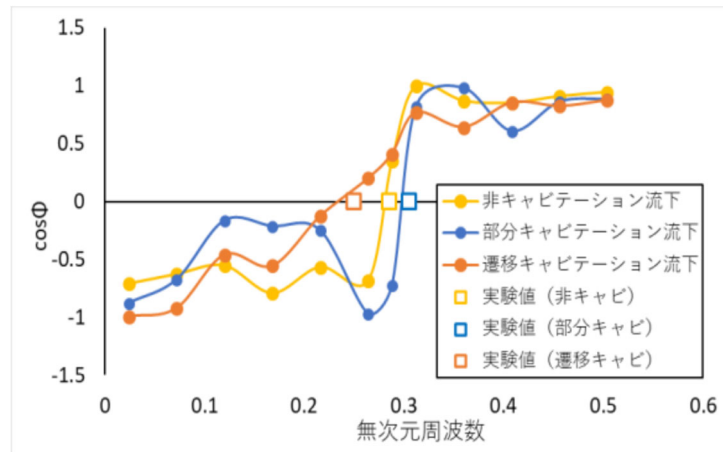


図7 フラッター安定限界 (FSI)  
(負となる領域がフラッターに対し不安定になる領域)

(3)プロペラ形状の影響 (引用文献⑤、⑥)

弾性プロペラの模型プロペラ材料としては、実機プロペラとの相似則を考慮して、曲げ弾性率が約 9000MPa である 6 ナイロン GF30 を採用した。

水槽試験の結果、弾性プロペラはプロペラ荷重度が大きくなると、翼端が変形し、推力・トルクが低下する。その低下量や翼変形量は、スキュー角の大きなプロペラほど大きい。ただし、キャビテーション性能は向上することが明らかとなった。スキュー角の大きなプロペ

ラの方が、その向上効果は高い。スキュー角  $35^\circ$  の金属プロペラおよび樹脂プロペラに発生するキャビテーションの様子を図 8 および図 9 に示す。樹脂プロペラは翼端部の変形によりキャビテーション発生面積が狭くなっている。

プロペラ正転時ではフラッターやダイバージェンスが発生するリスクは小さいが、プロペラ逆転時には、スキュー角の大きいプロペラほど、ダイバージェンスの発生リスクが高くなることが明らかとなった。

パネル法を用いたプロペラ特性計算結果からの推定によると、スキュー角が大きいプロペラほど、正転時では翼の変形量（翼端部付近が翼負圧面方向への曲げ）が大きくなり、推力の減少が起こることが予想され、実験結果とも定性的に一致する結果が得られた。また、逆転時では、翼後縁のプロペラ半径 70% 付近に応力集中が発生し、その付近を中心に実験結果と同様に、ダイバージェンス発生リスクが高まることが分かった。パネル法による逆転時の圧力分布を図 10 に示す。

弾性プロペラの実機設計においては、パネル法による流体力計算と応力計算によりプロペラ作動時の翼応力分布をチェックし、翼面上の応力集中が翼剛性の閾値を超えないようにスキュー角等の翼形状を設定することが重要であることが分かった。

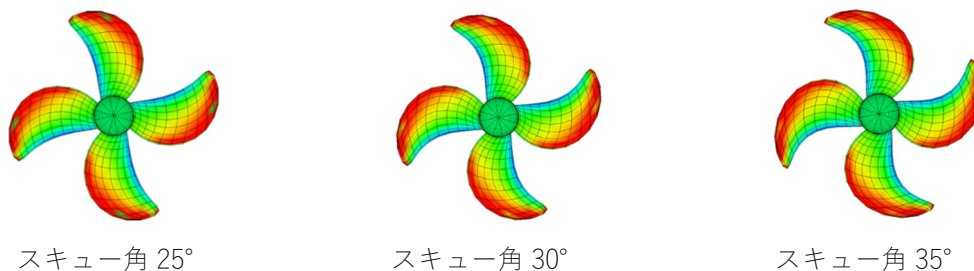
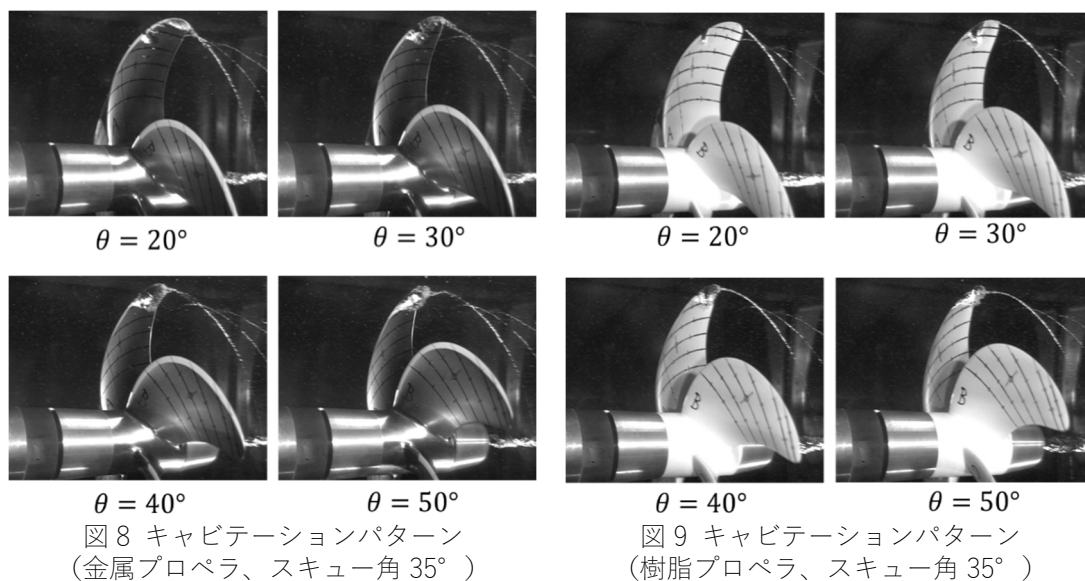


図 10 パネル法による逆転時の圧力分布  
(赤色：低圧領域、青色：高圧領域)

#### <引用文献>

- ① Suyama, N, Fujita, S, Kimura, K, Shiraishi, K, Sawada Y, Kawakita, C, Study on Method to Predict Performance of Composite Propeller Using FSI Analysis, Sixth International Symposium on Marine Propulsors, 2019
- ② 須山望, 木村校優, 白石耕一郎, 川北千春, 澤田祐希, 流体-構造連成解析を用いた複合材プロペラの性能推定に関する研究。ターボ機械 48(2)、2020、85-92
- ③ 峰島大誠, 中居俊介, 向井善郁, 宮川和芳, 川北千春, 白石耕一郎, 水中翼のフラッタ特性の把握及びキャビテーションによる影響評価、ターボ機械協会講演会、82nd, 2019
- ④ Irie, T, Nakai, S, Miyagawa, K, Kawakita, C, Koichiro, S, Characteristics of a Hydrofoil Flutter under Cavitation Conditions, CAV2021, 2021, 744-748
- ⑤ Kawakita, C, An Experimental Study on Hydrodynamic Performance of Flexible Composite Model Propellers, Sixth International Symposium on Marine Propulsors, 2019
- ⑥ 川北千春, 川並康剛, 山磨敏夫, 船用弾性変形プロペラのスキュー角影響、ターボ機械協会講演会、82nd, 2019

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 須山 望、木村 校優、白石 耕一郎、川北 千春、澤田 祐希	4. 巻 48
2. 論文標題 流体 - 構造連成解析を用いた複合材プロペラの性能推定に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 85 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11458/tsj.48.2_85	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kawakita, C.	4. 巻
2. 論文標題 An Experimental Study on Hydrodynamic Performance of Flexible Composite Model Propellers, Sixth International Symposium on Marine Propulsors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Sixth International Symposium on Marine Propulsors	6. 最初と最後の頁 424-430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Suyama, N., Fujita, S., Kimura, K., Shiraishi, K., Sawada Y., Kawakita, C.	4. 巻
2. 論文標題 Study on Method to Predict Performance of Composite Propeller Using FSI Analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Sixth International Symposium on Marine Propulsors	6. 最初と最後の頁 437-444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koichiro Shiraishi, Yuki Sawada, Daijiro Arakawa, Koyu Kimura	4. 巻
2. 論文標題 A Study on Deformation Measurements and Hydrodynamic Investigation of the Flexible Composite Marine Propeller	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Sixth International Symposium on Marine Propulsors	6. 最初と最後の頁 431-436
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 川北千春	4. 巻 83
2. 論文標題 船舶における推進装置に関する評価研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 化学工学誌	6. 最初と最後の頁 17-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsuya Irie, Shunsuke Nakai, Kazuyoshi Miyagawa, Chiharu Kawakita and Koichiro Shiraishi	4. 巻 1
2. 論文標題 Characteristics of a Hydrofoil Flutter under Cavitation Conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 11th International Symposium on Cavitation	6. 最初と最後の頁 744-748
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 須山望, 藤田敏, 木村校優, 白石耕一郎, 澤田祐希, 川北千春	4. 巻 27
2. 論文標題 複合材プロペラの流体 - 構造連成に関する研究-第2報-	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 195-198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Kawakita, C.
2. 発表標題 An Experimental Study on Hydrodynamic Performance of Flexible Composite Model Propellers, Sixth International Symposium on Marine Propulsors
3. 学会等名 Sixth International Symposium on Marine Propulsors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suyama, N., Fujita, S., Kimura, K., Shiraishi, K., Sawada Y., Kawakita, C.
2. 発表標題 Study on Method to Predict Performance of Composite Propeller Using FSI Analysis
3. 学会等名 Sixth International Symposium on Marine Propulsors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichiro Shiraishi, Yuki Sawada, Daijiro Arakawa, Koyu Kimura
2. 発表標題 A Study on Deformation Measurements and Hydrodynamic Investigation of the Flexible Composite Marine Propeller
3. 学会等名 Sixth International Symposium on Marine Propulsors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川北千春, 川並康剛, 山磨敏夫
2. 発表標題 船用弾性変形プロペラのスキュー角影響
3. 学会等名 第82回タ - ボ機械協会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 峰島大誠, 中居俊介, 向井善郁, 宮川和芳, 川北千春, 白石耕一郎
2. 発表標題 水中翼のフラッタ特性把握及びキャピテーションによる影響評価
3. 学会等名 第82回タ - ボ機械協会講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 須山望, 木村校優, 白石耕一郎, 川北千春, 澤田祐希
2. 発表標題 流体-構造連成解析を用いた複合材プロペラの性能推定に関する研究
3. 学会等名 第82回タ - ボ機械協会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 峰島大誠, 大西馨子, 中居俊介, 宮川和芳
2. 発表標題 水中翼のキャビテーション発生時におけるフラッタ特性の評価
3. 学会等名 第19回キャビテーションに関するシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 須山望, 藤田敏, 木村校優, 白石耕一郎, 澤田祐希, 川北千春
2. 発表標題 複合材プロペラの流体 - 構造連成に関する研究-第2報-
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会 平成30年秋期講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuya Irie, Shunsuke Nakai, Kazuyoshi Miyagawa, Chiharu Kawakita and Koichiro Shiraishi
2. 発表標題 Characteristics of a Hydrofoil Flutter under Cavitation Conditions
3. 学会等名 CAV2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	宮川 和芳  (Miyagawa Kazuyoshi)  (30623673)	早稲田大学・理工学術院・教授   (32689)	
研究 分担者	白石 耕一郎  (Shiraishi Koichiro)  (40586591)	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・研究員   (82627)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------