

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：54102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06970

研究課題名(和文) 海流発電に適した浮遊式二重反転水車の開発に関する研究

研究課題名(英文) Study on the Development of Floating Type Contra-Rotating Ocean Current Turbine

研究代表者

渡辺 幸夫 (Watanabe, Yukio)

鳥羽商船高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：20332033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能エネルギーの利用は、近年、注目を集める分野となっている。本研究では海洋エネルギーの利用法のひとつとして海流発電に着目し、海中に沈めた水車で機械的なエネルギーに変換し発電するものを対象とした。本研究では、海流発電における発電用水車の出力効率向上とシステムを安定化させる役割をもった、二重反転水車システムについて検討した。はじめにこのシステムの流体力学的な特徴や水車へシュラウドを設置する効果について把握するため、数値解析を実施した。次に、この水車システムの模型を作製し、水槽実験を行うことで、係留力の測定や動的特性を調査した。これらの結果から、提案した水車システムが実用に資するものと判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国内で研究が進んでいる海流発電用水車には様々な方式がある。その中でも(株)IHIが取り組んでいるのは、本研究同様水中浮遊方式で水平に水車を二機逆回転させる方式であり、本研究で提案する方式とコンセプトが近い。しかしながら本研究にて検討するような、浮体にシュラウド、水車を(前後に)二重反転にしたものは見受けられない。総合的に判断すると、今回提案する方式が海流発電実用化へ最も適したものであると考える。本研究によって得られる成果をもとにして実証実験を行なうことで、目標とされている海洋エネルギー利用の実用化に寄与し、更に多数の同形式水車を集積することで海洋発電所まで発展させることができると考える。

研究成果の概要(英文)：The environmental problem and related energy problem are recently a serious problem all over the world. The possible use of ocean current as an energy resource begins to draw attention in renewable energy. In this study, the contra-rotating turbines are adopted as an ocean current power generator. Firstly, the contra-rotating turbine performance estimated by Computational Fluid Dynamics (CFD) is carried out. The water tank test and CFD to investigate the influence of upstream and downstream turbine hydrodynamic interaction is performed. Next, The dynamic characteristic and mooring force of the floating type contra-rotating turbine system is investigated by the water tank test using the contra-rotating turbine model. From these results, the possibility of the practical application of the floating type contra-rotating ocean current turbine system is shown.

研究分野：流体工学

キーワード：再生可能エネルギー 海流発電 二重反転水車 CFD シュラウド 係留力

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本の領海・排他的経済水域 (EEZ: Exclusive Economic Zone) は世界第 6 位の面積を誇り、この EEZ における海洋再生可能エネルギーの利用は温室効果ガスの排出抑制や、エネルギー安全保障の面からも積極的な推進が求められている。一方、有効活用する為にクリアすべき技術的課題も多く、政府は国内 5 県 7 海域を実証フィールドに指定<sup>1)</sup>し、新潟県沖の粟島では 2014 年、2016 年に実証実験が実施されるなど、課題解決のため積極的な取り組みがなされている。

ところで、黒潮に代表される海流は、日本の沿岸付近を季節にかかわらず安定して流れており、保持するエネルギー量は約  $15.6 \times 10^7 \text{kW}$  と膨大である<sup>2)</sup>ため、この巨大なエネルギーを利用することで日本の自然エネルギーを利用したクリーンな安定電源を新たに構築することができると期待されている。水中浮遊式海流発電システムの開発は、日本国内において (株) 東芝、(株) IHI、国立大学法人東京大学、及び (株) 三井物産戦略研究所がコンソーシアムを組んで実施している<sup>3)</sup>。このシステムは海中に風のように浮遊させて発電する方式であり、次のような優れた特徴がある。(1) 安定して大容量の発電が可能...昼夜や季節による流れの速さと向きの変動が少ない安定した海流エネルギーを長期的かつ連続的に利用できるため、年間を通して安定的な発電が可能でベース電源として大容量の発電も期待できる。(2) 設置が比較的容易で安定した運用が可能...発電装置を海底に係留し水面から 50m 程度の海中に浮遊させることで、深水域での設置にも比較的容易に対応できる。また、発電システムを全て海中に設置するため、波浪の影響を受けず安定した運用が可能で船舶の航行にも支障がない。このような特徴により、この方式は設置海域の制約が少なく、多数の発電装置を設置する大規模発電ファームの展開が可能である。(3) 効率的な発電が可能...二重反転タービン (本助成研究において提案) を互いに逆回転させてタービンの回転に伴うトルクを相殺することで、海中での安定した姿勢を保持し効率的な発電が可能である。(4) メンテナンス・修理が容易...保守整備時にはタービンなどの発電機システムと浮力を調整することで、必要に応じて海上に浮上させることができるため、メンテナンスや修理が容易となる。本助成研究においては、海流発電用水車の高出力化を実現する方法として二重反転機構と水車をシュラウドで囲むことを提案する。提案するこの 2 つの技術は、実用化に迫る上記の水中浮遊式海流発電システムの実用化を促進する一助となることも期待される。

### 2. 研究の目的

韓国などでは、新しい風車として船用プロペラなどと同様の二重反転機構を採用する試みがなされており、12%程度発電量が増加するとの報告<sup>4)</sup>もある。本研究では、風車と作動流体が異なる海流発電用水車にこの二重反転機構を適応することを目的とする。一般的な風車と本助成研究で検討する海流発電用水車で異なる点は、第一にその設置方式である。実際に設置するフィールドとして黒潮海流を想定し、陸上における気球のように海中に浮遊させる方式を採用する。また採用した二重反転水車を水車出力の増加が確認されているシュラウド(ダクト)で取り囲み、発電の出力向上と海中浮遊物による損傷防止を実現する。係留索によって浮上させるのは、海上からメンテナンスすることを容易にするためである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 浮遊式二重反転水車の流体力学的特性とシュラウドの効果

浮体式二重反転水車の流体力学的特性については、一様流速  $u_{inf} = 1.53 [\text{m/s}]$ 、周速比  $TSR = 4.0$  ( $= 2\pi n R / u_{inf}$ ,  $n$ : 水車毎秒回転数 [rps]), ローター半径  $R = 0.15 [\text{m}]$ 、翼断面 NACA64<sub>2</sub>-415、羽根枚数 3 枚の条件下で設計された水車を上流側に、概形は同様で取付ピッチ角を変更した水車を下流側にしたものを対象に、汎用熱流体解析コード ANSYS CFX 2019 R1 を用いて 3 次元流れ解析を行なった。基礎方程式は質量保存方程式と運動量保存方程式であり、乱流モデルには  $k-\omega$  SST を採用した。計算領域は、計算対象と外部領域から構成されるが、本解析では二重反転水車システムによる干渉影響等について把握することを目的とし、このことと解析時間を勘案したうえで、外部領域は水車直径の 5 倍の直径に、水車中心から上流及び下流にそれぞれ水車直径の 5 倍および 8 倍の長さをとった円柱領域とした。精度検証のために行った本解析は水車単体を対象に、計算格子数は約 300 万要素、水車回転数変化やその他の影響についても格子依存性の事前確認を行った。計算領域の概形を図 1 に示す。以降、指標として用いる水車の出力係数  $C_p$  は以下の式で表される。

$$C_p = \frac{\text{Power}}{0.5 \rho \pi R^2 u_{inf}^3} \quad (1)$$

なお上式中の Thrust は主流方向に発生する力(流体による抵抗)であり Power は水車発生出力、 $\rho [\text{kg/m}^3]$  は流体の密度である。計算精度については、水槽実験の結果と比較し確認している。

水車システムへのシュラウド付加による効果については、数値解析法を拡張し、解析対象とし

てはシュラウド単体と、水車とシュラウドの複合体とした。

## (2) 水車システムの係留力測定と動的特性調査

水車システムの係留力と動的特性を調査するため、鳥羽商船高等専門学校の回流水槽(垂直循環式、観測部 3.0m×1.5m×0.8m、最大流速 1.5m/s)を用いて模型実験を実施した。実験模型は前章で計算対象とした水車の 1/2 サイズ ( $R=0.075[m]$ ) とし、ローター間距離  $L$  については風車に関する既往論文を参考に  $R/L=0.125$  を採用した。なお模型は 3D CAD ソフトでモデリングし 3D プリンタを用いて製作した。流入流速は 0.40[m/s]、0.50[m/s]、0.6[m/s] の 3 種類とし、水槽停止状態から動画の撮影と三分力計(日章電機 LMC-3500-20)による係留力の計測を実施した。この水槽実験の概念図を図 2 に示す。

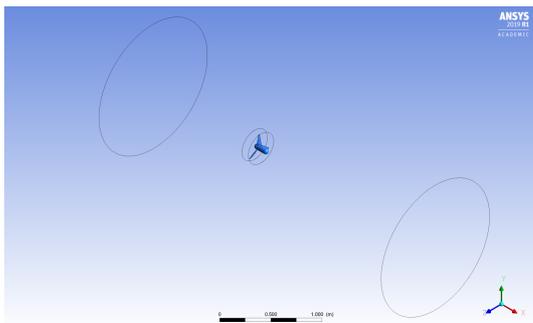


図 1 CFD 解析の計算領域

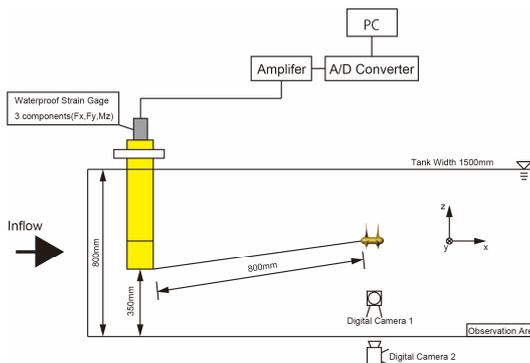


図 2 水槽実験の概念図

## 4. 研究成果

### (1) 浮遊式二重反転水車の流体力学的特性の調査結果

二重反転水車を対象に数値解析を実施し、得られた水車周りの流速分布について図 3 に示す。上流側ローターは  $TSR=4.0$  (400[rpm]) の速度、下流側ローターについては  $TSR=3.0$  (300[rpm]) で回転しており、定常状態での流速場である。なお図中において、流速が高い領域は赤色で、低い領域は青色で表している。二重反転水車の下流側にローター直径よりも少し大きな流速が遅い青色や緑色の領域が存在しており、このシステムが流体の速度エネルギーを利用していることが分かる。また、この速度が遅くなる領域の外側に赤色の流速の大きな領域が存在する。これは翼端から発生する渦の影響と考えられるが、計算結果を詳細に検証する必要がある。また水車取付けハブの下流に流速が低い領域があることも分かる。水車の存在が流場へ大きな影響を与えていること、取付けハブの後流付近で二重反転水車の速度回復が早いことなどが明らかになった。

実際に下流側ローターへ流入する流れは、上流側よりも複雑になることが想定されるため、これらの影響についても数値解析を実施した。解析の条件としては、上流側ローターは  $TSR=4.0$  で一定とし、下流側ローターの  $TSR$  と取付ピッチ角を変化させたものとした。 $TSR$  とピッチ角を変化させた解析より得られた二重反転水車システム全体の出力係数を図 4 に示す。図中の青が、それぞれの条件下における上流側ローターの出力係数を示し、オレンジが下流側ローターの出力係数を表している。また、赤色の線は 1 台の水車だけの出力係数である。まず、下流側ローターの回転数や翼の取付ピッチを変化させることで、上流側ローターの出力へ大きな影響を及ぼす事がわかった。端的には、下流側水車の出力が増加すると上流側水車の出力が増減する。簡易的な水槽実験では、下流側ローターは  $TSR=3.0$  程度となることを考え合わせると、解析の結果から、上流・下流側いずれのローターも設計ピッチで設置することが、水車システムの出力が最大化されることがわかった。

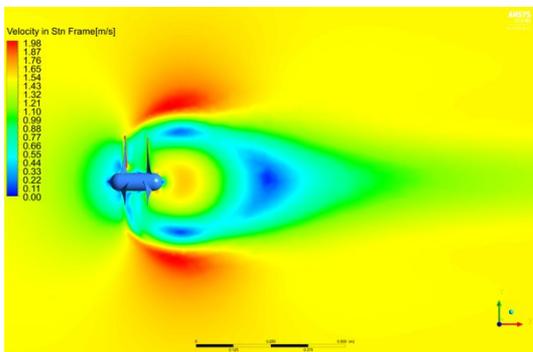


図 3 水車周りの流速分布

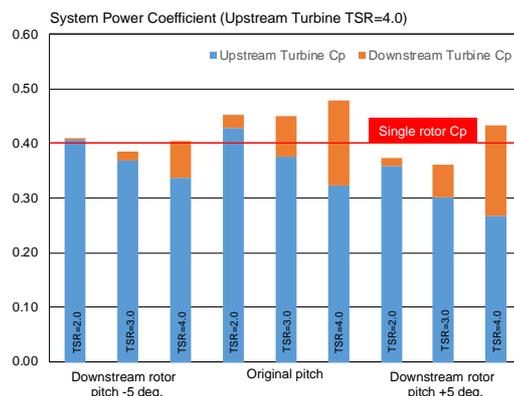


図 4 水車システム出力への  $TSR$ ・ピッチの影響

## (2) 水車システムへのシュラウド付加による影響

シュラウドの主流方向増速比の  $x$  方向分布を図 5 に示す。なお、この増速比を算出した場所はシュラウド中央部である。横軸はシュラウド内部の  $x$  方向位置 ( $x_s$ ) をシュラウド長さで除した無次元値、縦軸はそれぞれのシュラウドの増速比 ( $u/u_{inf}$ ,  $u$ : 各シュラウド断面  $x_s$  の平均流速) をあらわしている。解析結果より、シュラウドの増速効果は、NACA4412 (-5deg.) 断面のもので最も大きくなることが判明し、その値は 1.33 となった。流体の運動エネルギーは流速の 3 乗に比例するので、増速比が 1.33 倍ということは、出力が最大で 2.35 倍となる可能性がある。また増速比が最大になる位置が  $x_s/L=0.2$  であることも数値解析により判明した次節のシュラウドと水車の複合体の解析には、増速効果が最大となる NACA4412 (-5deg.) 断面のシュラウドを採用できる。

水車と最も増速効果が高かったシュラウド【NACA4412 (-5deg.) 断面】を組み合わせさせた水車シュラウドシステムの周速比と出力係数  $C_p$  の解析結果を図 6 に示す。グラフ中の は水槽実験の結果<sup>5)</sup>、緑色の実線は水車単体の CFD 解析結果、青色の実線は水車シュラウドシステムの解析結果である。水車単体の解析結果と水槽試験の結果は概ね一致しており、CFD 解析の精度がある程度保証されたと考えてよいと判断できる。出力係数  $C_p$  は水車単体において TSR=4.0 付近で最大値 0.406 となる。また、水車シュラウドシステムの  $C_p$  の最大値は TSR=7.0 のとき 0.730 となった。したがって、シュラウドを水車周りに設置することで、 $C_T$  同様  $C_p$  の最大値も高周速比側に移行すること、かつ水車単体の約 1.81 倍に向上することが判明した。なお、水車とシュラウドの位置関係としては、シュラウド中央部の増速率が最大となる水車ブレードの  $x$  方向の中心が、シュラウドの  $x_s/L=0.25$  の位置となるように設置した約 1.81 倍という出力向上の割合は、前述した値よりも小さいが、エネルギー利用効率の面から考慮しても、ある程度妥当性があるものとする。また、 $C_p$  の最大値が高周速比へ移行することについては、シュラウドの増速効果による水車ブレードへの水の流入条件が変わったためと考えられるが、さらなる検討が必要である。水車シュラウドシステムの性能特性を一つのケースのみ検討し、シュラウド長さ  $L$  について固定するなど限定的な解析であったが、大きく水車性能が向上することを確認できた。

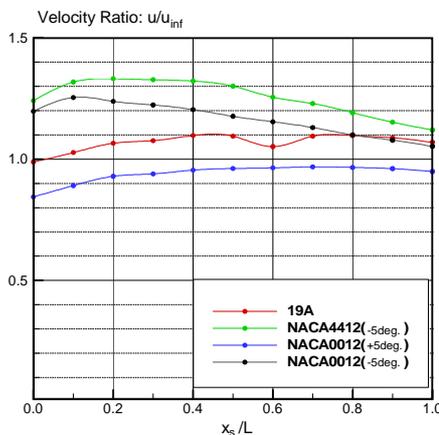


図 5 シュラウド中央部の増速効果

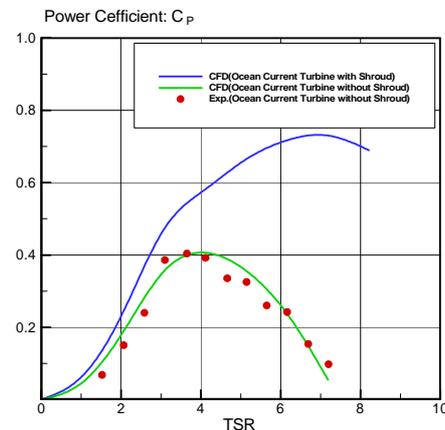


図 6 水車出力へのシュラウド付加の効果

## (3) 水車システムの係留力測定と動的特性調査結果

図 2 に示す計測システムを用いて水車システムの係留力とその時間変化、動的な特性を解析するため動画の撮影を行った。図 7 に流速の変化に対する係留力の時間平均値を示す。赤の丸は主流方向、緑の丸は横方向の係留力を表している。主流方向の係留力の平均値は流速の増加とともに大きくなっていくことが分かり、一般的な抵抗試験結果と同等とみなせる結果を得ることができた。更に、この係留力を  $0.5\rho\pi R^2 u_{inf}^2$  で除した係留力係数 0.53242 となり、数値解析結果ともよく一致しているため、数値解析結果から実機の抵抗を推定することも可能と言える。また、横方向の係留力の平均値はほぼ 0 であった。

図 8~図 10 に水車システムの動的特性調査結果を示す。図 8 は撮影した動画のうち、側面からとった一部である。また図 9 と図 10 は流速が 0 の状態から 0.4[m/s]まで増速する間の水車システムの係留力(主流方向と横方向)である。静止状態から  $u_{inf}=0.4$ [m/s]まで増速する時間は約 40 秒であったので、流速の安定後 10 秒程度で主流方向の係留力が安定していることが分かる。また、横方向の係留力は時間変動が小さくでほぼ 0[N]付近一定であり、動画からも水車システムが実験中に左右に振られる様子も確認できなかったため、このシステムが一樣流中で不安定な状態に陥ることはない。また、実験中撮影した動画の画像解析結果から水車システムの上下方向姿勢変動を見ると、これについても変動幅は小さく、上下方向にも安定したシステムであることが判明した。

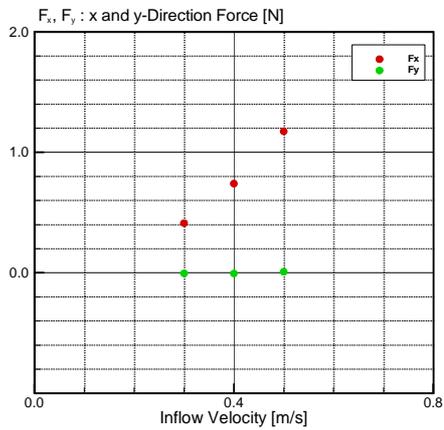


図7 流速に対する係留力の変化

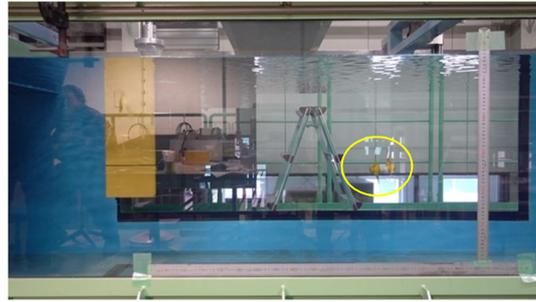


図8 係留中の水車模型（動画より切取り）

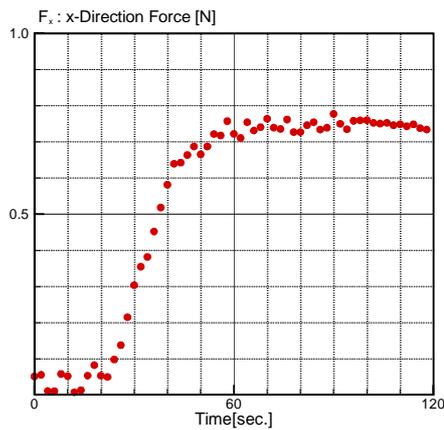


図9 主流方向の係留力変化(  $u_{inf}=0\sim 0.4$  [ m/s ] )

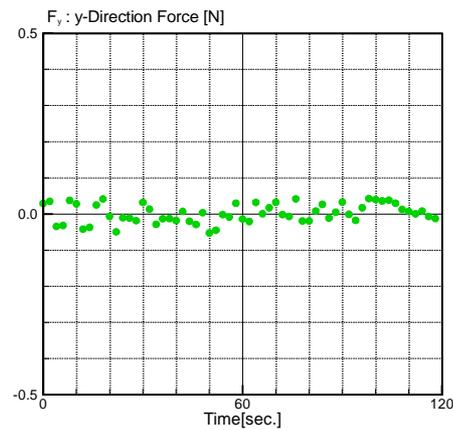


図10 横方向の係留力変化(  $u_{inf}=0\sim 0.4$  [ m/s ] )

本研究によって得られた成果は多いとも言えるが、まだまだ不足していると感じている。今後も研究を進め、今後られる成果をもとに、今後実海域での実証実験等を行なうことで、日本が目標としている海洋エネルギー利用の実用化に寄与し、更に多数の同形式水車を集積することで海洋発電所まで発展させることができると考える。

< 引用文献 >

- 1) 内閣官房総合海洋政策本部事務局：海洋再生可能エネルギー実証フィールドの選定結果について，2014
- 2) 木下健監修：海洋再生エネルギーの市場展望と開発動向，サイエンス&テクノロジー，2011，472
- 3) 長屋茂樹：水中浮遊式海流発電システムの開発，日本流体力学会誌「ながれ」，35，2016，3-6
- 4) Seungmin Leea, Eunkuk Sona, Soogab Lee : Velocity interference in the rear rotor of a counter-rotating wind turbine, Renewable Energy, 54, 2013, 235-240
- 5) 白澤克年，南潤一朗，岩下英嗣，新竹積：回流水槽における海流発電ブレードの性能評価，風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集，37，2016，431-434

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0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 渡邊幸夫	4. 巻 第97期
2. 論文標題 海流発電要二重反転水車上流・下流ローターの干渉影響に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 0S4-25
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 -

1. 著者名 渡邊幸夫	4. 巻 第96期
2. 論文標題 海流発電用二重反転水車の特性に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 0S6-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1299/jsmfed.2018.0S6-12">https://doi.org/10.1299/jsmfed.2018.0S6-12</a>	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 -

1. 著者名 渡邊幸夫，宇佐見健介	4. 巻 25号
2. 論文標題 海流発電用水車性能に対するシュラウドの影響	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演論文集	6. 最初と最後の頁 481 - 483
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 渡邊幸夫
2. 発表標題 海流発電要二重反転水車上流・下流ローターの干渉影響に関する研究
3. 学会等名 第97期日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊幸夫
2. 発表標題 海流発電用二重反転水車の特性に関する研究
3. 学会等名 第96期日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊幸夫
2. 発表標題 海流発電用水車性能に対するシュラウドの影響
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会平成29年度秋季講演会
4. 発表年 2017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