

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：55201
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20H02377
研究課題名（和文）波浪パワーの急激な変動に対して高いロバスト性を有する波力発電用二重反転タービン

研究課題名（英文）Counter-rotating Turbine for Wave Energy Conversion with High Robustness against Sudden Fluctuations in Wave Power

研究代表者
高尾 学（Takao, Manabu）
松江工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：00332057
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、波力発電用二重反転衝動タービンの性能予測に対する実証試験として風洞試験を行うことで本タービンの性能を調査するとともに、CFD解析によりタービンの内部流動を予測した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。（1）風洞試験により、中間羽根を有する二重反転タービンは最高効率0.452を示し、中間羽根なしの場合に比べて1.13倍に達した。（2）中間羽根が下流側ロータに流入する気流を増速、旋回方向成分に転向させることで、下流側ロータで得られるトルクが増加すると思われる。（3）中間羽根の設置により衝突損失や摩擦損失が増加し、タービン前後の圧力差が増加すると思われる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果、波力発電用二重反転衝動タービンは従来の波力発電プラントで採用されてきたウェルズタービンより作動範囲が広く、高トルクが得られ起動性に優れていることが風洞実験により実証されるとともに、中間羽根の効果が確認された。我が国周辺は世界的に見て波浪エネルギー密度が高いとは言えず、一方で台風襲来や冬季の日本海側などで海象異常が発生するため、幅広い流量係数で高トルクが得られる波力タービンの開発は波力発電の普及に不可欠である。この理由により、本研究の成果は学術的かつ社会的に有意義であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a wind tunnel test was conducted as a demonstration test for predicting the performance of a counter-rotating impulse turbine for wave energy conversion, and the internal flow of the turbine was predicted by CFD analysis. The results obtained in this research are summarized below. (1) A wind tunnel test showed that the counter-rotating turbine with middle vanes showed a maximum efficiency of 0.452, which is 1.13 times higher than that without middle vanes. (2) It is speculated from CFD results that the torque obtained by the downstream rotor increases because the middle vane accelerates the airflow entering the downstream rotor and turns it to the swirl component. (3) The installation of the middle vanes increases collision loss and friction loss, and it is speculated from CFD results that the pressure difference before and after the turbine increases.

研究分野：流体工学

キーワード：再生可能エネルギー 波力発電 タービン 振動水柱

1. 研究開始当初の背景

海洋エネルギー利用技術の一種である振動水柱 (OWC: Oscillating Water Column) 型波力発電では、波の振動で生じる往復気流のエネルギーを空気タービンで回転エネルギーへ変換し、発電する。作動流体の流量やロータの回転数を設定し、それに適したタービン形状を設計でき、かつ定常流で作動する一般的なタービンとは異なり、この波力発電用タービン(以下、波力タービン)は、数秒の周期で流れ方向が変わり常に流量が変動する往復気流で作動するため、入力となる波浪パワーが変動しても高い性能が発揮できるロバスト性が要求される。

波力タービンの一つとして 1978 年にアメリカ海軍兵学校の McCormick により波力発電用二重反転衝動タービン(図 1)が提案されている。このタービンは、1986 年の Richards によるモデル試験においてタービンの平均効率が 30%程度と低いことが示されているが、一方で 1985 年に山形県鶴岡市沖で実施された洋上実証試験では、小波のとき、波力発電用二重反転衝動タービン(以下、二重反転タービン)の発電出力は波力タービンの主流であるウエルズタービンより大きいという結果が報告されている。

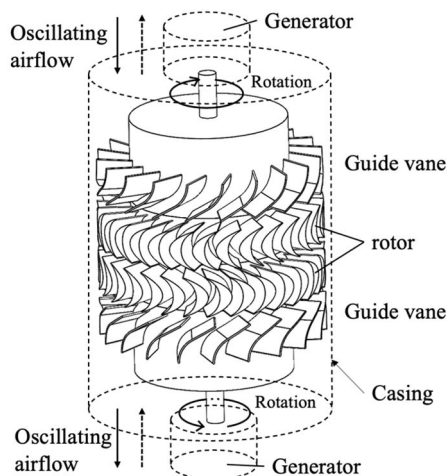


図 1 波力発電用二重反転衝動タービン

2. 研究の目的

研究代表者らが実施した 3 次元数値流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics) を用いた性能解析によれば、この二重反転タービンの 2 つのロータ間に中間案内羽根(以下、中間羽根)を設けて後段ロータのトルクを増加することが明らかにされている(引用文献(1))。本研究は、この性能予測に対する実証試験として風洞実験を行うことで本タービンの性能を調査するとともに、CFD 解析によりタービンの内部流動を予測することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 供試タービン

本研究で用いる二重反転タービンの翼列を図 2 に示す。二重反転タービンは、円弧と楕円の一部からなる翼型をもつ二次元形状の衝動型ロータ 2 列を有する。そして、2 列のロータの前後に円弧と直線で構成された翼型をもつ案内羽根 2 列を有する。本研究では、さらに 2 列のロータ間に整流作用を及ぼす中間羽根(図 3)を設置した。供試ロータ形状は、弦長 43.2 mm、ロータ入口(出口)角 70°、厚み比 0.3、ハブ直径 168 mm、ハブ比 $v=0.7$ 、1 段当たりの翼枚数 30、平均半径 $r = D(1+v)/4 = 102$ mm におけるロータ弦節比 2.02 である(図 4)。供試案内羽根は、2 列のロータ翼列前後にロータと 7.7 mm の間隔で設置された厚み 1.6 mm の薄翼で、弦長 56 mm、直線部長さ 27.8 mm、円弧部半径 29.8 mm、設定角 30°、1 段当たりの羽根枚数 20、 r における弦節比 1.75 である。供試中間羽根は、ロータの翼列間にそれぞれの翼列から 8 mm の間隔で設置された厚さ 1.6 mm の平板翼である。設定角 65°、弦長 $l = 23.2$ mm、羽根枚数 34、 r における弦節比は 1.23 であり、前・後縁の断面形状は半円である。

(2) 風洞実験

図 5 に本研究で使用した試験装置を示す。この装置は、遠心式送風機とよどみ室からなる定常流発生風洞にタービン試験装置を接続したもので、内径 240 mm のケーシング内で供試タービンを一定速度で回転させた。実験では流量 $Q (\leq 0.459 \text{ m}^3/\text{s})$ において、ロータ回転数 N を $0 \leq N \leq 1400$ rpm の範囲で 100 rpm ずつ変化させた。そして、出力トルク T_o 、タービン前後の圧力差 Δp 、平均半径における軸流速度 $v (= Q/A)$ を測定した。

そして、定常流におけるタービン性能を、次式で表すトルク係数 C_T 、入力係数 C_A 、効率 η と流量係数 ϕ の関係により評価した。

$$C_T = T_o / \{\rho(v^2 + u^2)Ar/2\} \quad (1)$$

$$C_A = \Delta p Q / \{\rho(v^2 + u^2)Av/2\} = \Delta p / \{\rho(v^2 + u^2)/2\} \quad (2)$$

$$\eta = T_o \omega / (\Delta p Q) = C_T / (C_A \phi) \quad (3)$$

$$\phi = v/u \quad (4)$$

ここで、 A : タービン流路断面積 $\{= \pi D^2(1-v^2)/4 = 0.02307 \text{ m}^2\}$ 、 T_o : 出力トルク、 u : r におけるロータ周速度、 v : 軸流速度 $(= Q/A)$ 、 Δp : タービン前後の全圧差、 ρ : 空気密度、 ω : ロータ角速度である。

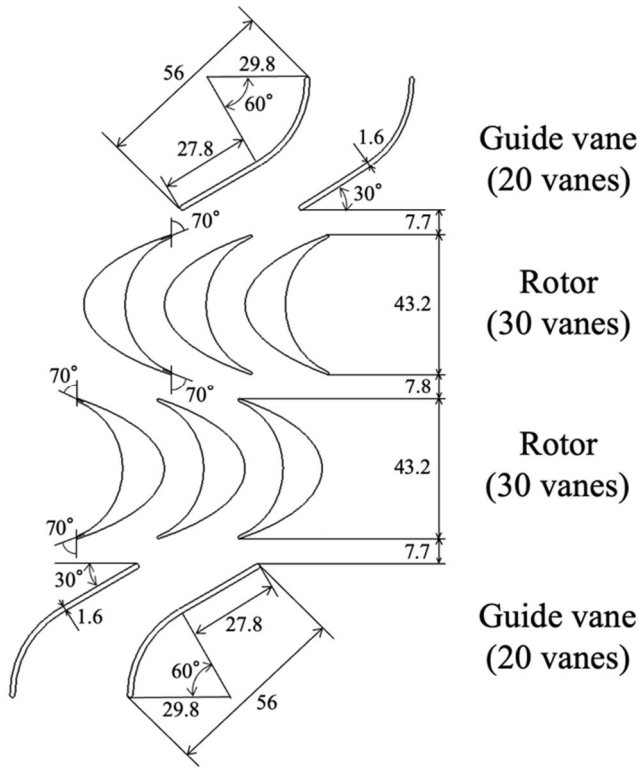


図2 供試タービンの翼列（中間羽根なし）

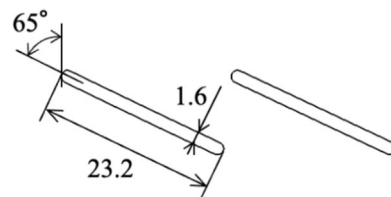


図3 供試中間羽根の仕様

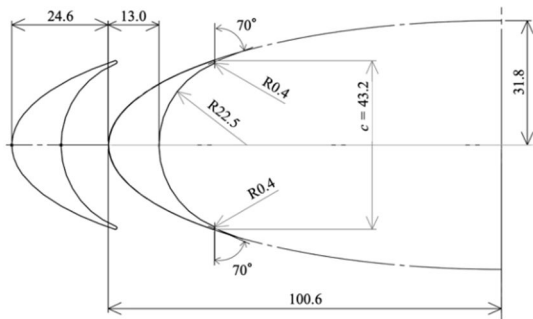


図4 供試ロータの仕様

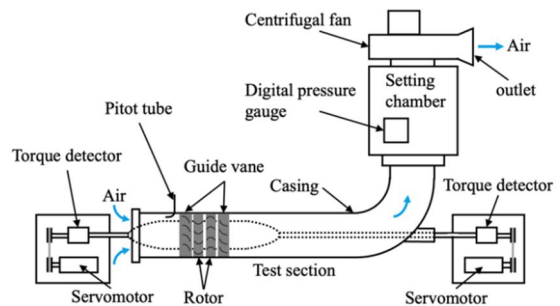


図5 風洞試験装置

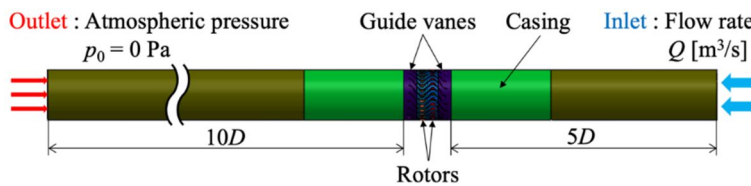


図6 解析領域

(3) CFD 解析

解析ソフトウェアはCradle社 scFLOW を使用し、支配方程式はレイノルズ平均 Navier Stokes 方程式 (RANS) 乱流モデルには AKN 線形低レイノルズ型モデルを用いた。図6に示すように、解析領域は内径 $D = 240$ mm のケーシングとタービンからなる流路で、入口からタービンまでが $5D$ 、タービンから出口までを $10D$ とした。要素数については、中間羽根なしのとき約 1000 万、中間羽根ありのとき約 1100 万でそれぞれ解析モデルを構築した。境界条件は、壁面を No-slip 条件、入口を流量 Q 、出口を大気開放とした。

本研究では、図7に示すように実験値と解析値の定量的一致は達成できなかったが、定性的には一致しており傾向は把握できるものとして、 $\phi = 0.90$ における流れ場の観察を行った。(図略)

4. 研究成果

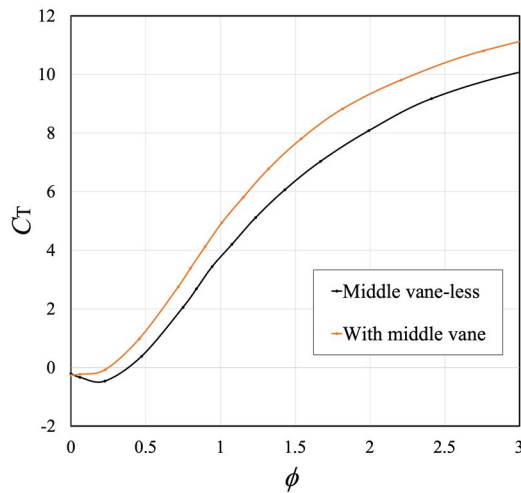
(1) 風洞実験

図8に風洞試験によって得られた、タービン性能に及ぼす中間羽根の影響を示す。図8(a)より、 C_T は中間羽根を設置することにより上昇することがわかった。また、図8(b)より、上流側口

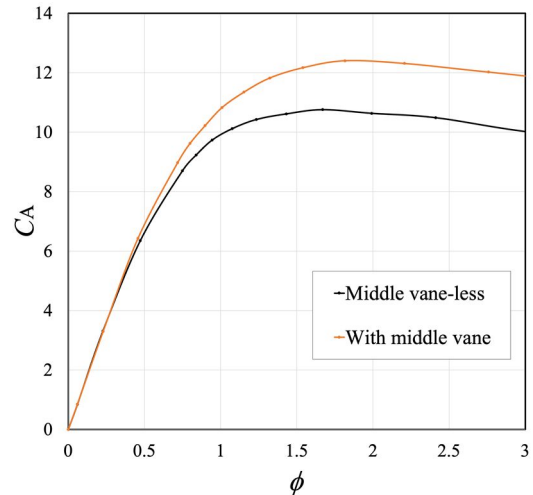
一タのトルク係数はほぼ変化せず，下流側ロータのトルク係数が大きく向上していることがわかった。これは，中間羽根を設置したことにより2列のロータ間を整流し，下流側ロータに流入する気流の旋回速度成分が増大することで得られるトルクが増加したためと考えられる。

図8(c)に係数 C_A に及ぼす中間羽根の影響を示す。図より， C_A は中間羽根を設置することにより上昇することがわかった。これは，中間羽根の設置によって中間羽根入口での衝突損失や中間羽根表面の摩擦損失が増加し，タービン前後の圧力差が増加したためと考えられる。

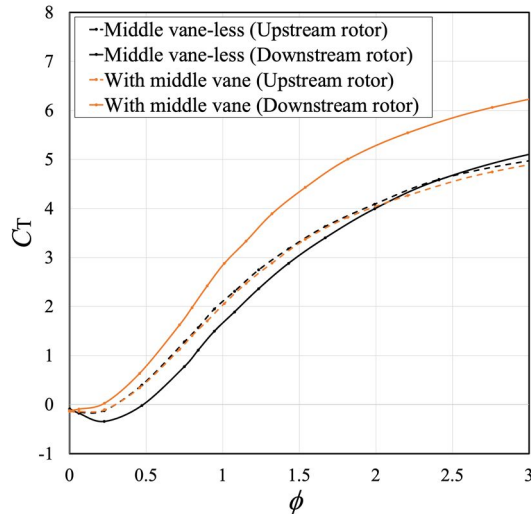
図8(d)に効率 η に及ぼす中間羽根の影響を示す。図より， η は中間羽根を設置することにより向上することがわかった。これは，中間羽根を設置したことによる C_A の上昇よりも C_T の上昇の割合が大きいためと考えられる。最大効率は，中間羽根なしの二重反転タービンで $\eta_p = 0.399$ ，中間羽根を有する二重反転タービンで $\eta_p = 0.452$ となり，中間羽根を設置することで最大効率が1.13倍に増加した。



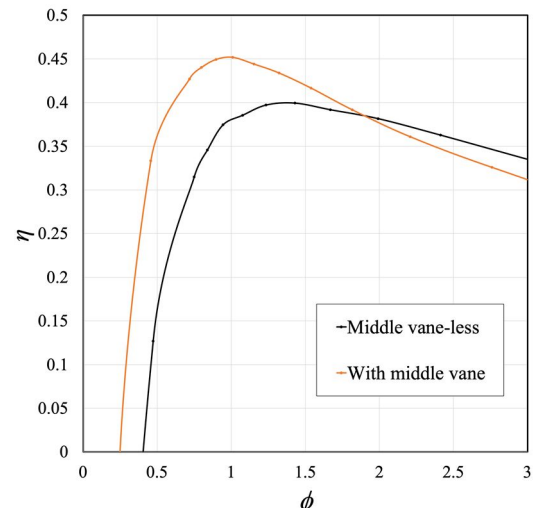
(a) トルク係数



(c) 入力係数



(b) 上流側および下流側ロータのトルク係数

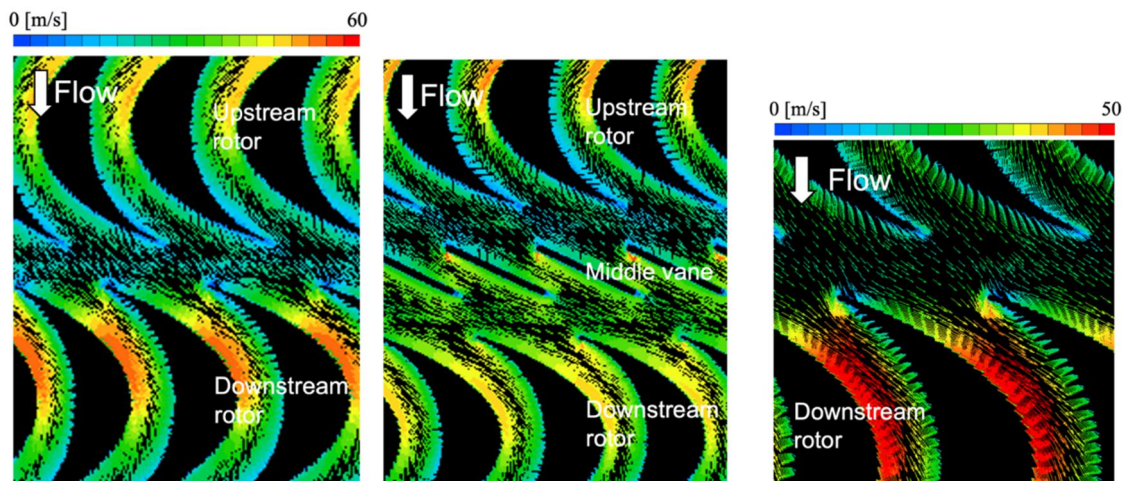


(d) 効率

図8 タービン性能に及ぼす中間羽根の影響（風洞実験）

(2) CFD 解析

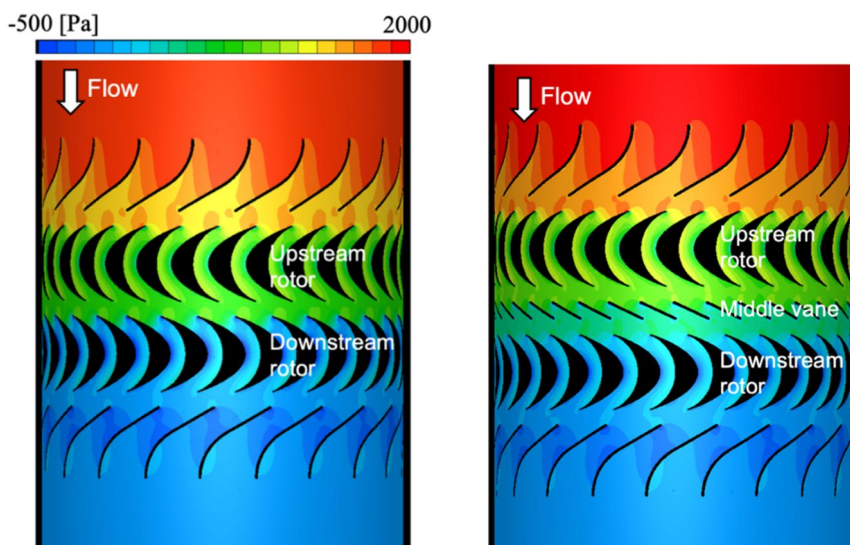
図9にタービン内部の流速分布を示す。図9(a),(b)より，中間羽根を設置することにより2列のロータ間が整流され，中間羽根通過後の流速が増速していることがわかった。図10より，中間羽根なしの二重反転タービンの下流側ロータ内部で局所的に流速が増加しているが，これは下流側ロータ入口において気流の流入角度と下流側ロータ入口角の相違により気流の方向が乱れ，一部分に流れが集中したためと考えられる。また，図は省略するがロータ前後の速度三角形より，中間羽根ありは下流側ロータ入口における絶対流入速度の旋回速度成分 v_u が中間羽根なしのそれに比べて大きいことがわかった。このように，中間羽根通過後の気流の増速，旋回方向成分の増加により，図8(b)に示すように下流側ロータで得られるトルクが大きく増加したと考えられる。



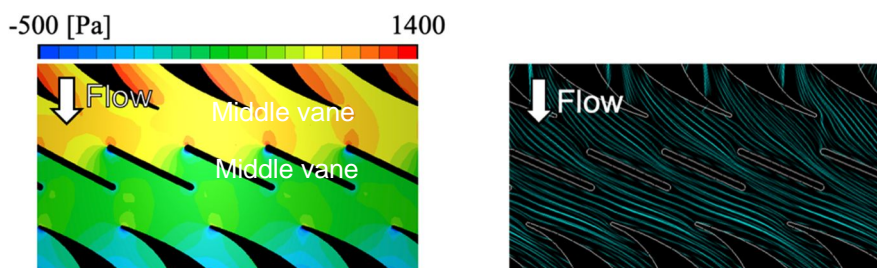
(a) 中間羽根なし (b) 中間羽根あり
 図9 ロータ翼列間の流速分布 ($\phi = 0.90$)

図10 下流側ロータ入口付近の流速分布 ($\phi = 0.90$)

一方、図11にタービン内部の圧力分布を示す。図11(a),(b)より、中間羽根を設置することによりタービン前後の圧力差が増加していることがわかった。これは、図12(a),(b)に示すように中間羽根入口で中間羽根設定角と気流の流入角度の相違により衝突し、これによって衝突損失が発生することや、中間羽根壁面での摩擦損失が増加したためと考えられる。このタービン前後の圧力差の増加により、入力係数が増加したと考えられる。



(a) 中間羽根なし (b) 中間羽根あり
 図11 タービン内部の圧力分布 ($\phi = 0.90$)



(a) 圧力分布 (b) オイルフロー
 図12 中間羽根入口で生じる衝突損失 ($\phi = 0.90$)

< 引用文献 >

- (1) 高尾学, 山田航平, 奥原真哉, 木上洋一, 永田修一, 瀬戸口俊明, “波力発電用二重反転衝動タービンに関する研究 (性能に及ぼす中間羽根の影響)”, ターボ機械, **46**(11), 692-698, (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Ogawa, M. Takao, M. M. A. Alam, S. Okuhara and Y. Kinoue	4. 巻 2217
2. 論文標題 A Study of Counter-rotating Impulse Turbine for Wave Energy Conversion -Effect of Middle Vane Thickness on the Performance-	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2217/1/012073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 M. Takao, K. Kanetsuki, M. M. A. Alam, S. Okuhara and Y. Kinoue	4. 巻 1909
2. 論文標題 Comparative Study on Starting Characteristics of Turbines for Wave Energy Conversion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 Paper No.012057
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1909/1/012057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 T. Ogawa, M. Takao, S. Okuhara, S. Sasaki, M. M. Ashraful Alam and Y. Kinoue
2. 発表標題 Numerical Analysis of Counter-rotating Impulse Turbine for Wave Energy Conversion
3. 学会等名 5th International Conference on Renewable Energies Offshore（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichiro Suto, Toi Ogawa, Manabu Takao, Ashraful Alam, Shinya Okuhara, Yoichi Kinoue and Toshiaki Setoguchi
2. 発表標題 Experimental Study of Counter-rotating Impulse Turbine for Wave Energy Conversion -Effect of Middle Vane on the Performance-
3. 学会等名 9th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川登生, 高尾学, 奥原真哉, アラム アシュラフル, 木上洋一
2. 発表標題 波力発電用二重反転衝動タービンの実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会第 26 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 周藤功一郎, 小川登生, 高尾学, 奥原真哉, アラム アシュラフル, 木上洋一, 高崎克也
2. 発表標題 波力発電用二重反転衝動タービンの実験的研究 (性能に及ぼす中間羽根の影響)
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Ogawa, M. Takao, M. M. A. Alam, S. Okuhara and Y. Kinoue
2. 発表標題 A Study of Counter-rotating Impulse Turbine for Wave Energy Conversion -Effect of Middle Vane Thickness on the Performance-
3. 学会等名 16th Asian International Conference of Fluid Machinery (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川登生, 高尾学, 奥原真哉, アラム アシュラフル, 木上洋一
2. 発表標題 波力発電用二重反転衝動タービンの開発
3. 学会等名 日本機械学会第25 回動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川登生, 松本啓人, 高尾学
2. 発表標題 波力発電用二重反転衝動タービンに関する研究 (性能に及ぼす S字型中間羽根の影響)
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会 第51回学生員卒業研究発表講演会 講演論文集
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	奥原 真哉 (Okuhara Shinya) (90835779)	松江工業高等専門学校・実践教育支援センター・技術専門職員 (55201)	
研究分担者	A l a m A s h r a f u l (Alam Ashraf ul) (60759819)	大阪産業大学・工学部・教授 (34407)	
研究分担者	木上 洋一 (Kinoue Yoichi) (50274486)	佐賀大学・海洋エネルギー研究所・教授 (17201)	

	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
研究協力者	木原 一禎 (Kihara Kazuyoshi)		

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			
インド	Indian Institute of Technology, Madras			