

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：55201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360362

研究課題名(和文) 振動水柱型波力発電プラントの実用化を目指したツイン衝動型タービンの開発

研究課題名(英文) Development of Twin Impulse Turbine for Wave Energy Conversion

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) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ツイン衝動型タービンの発電機台数、ロータ翼型、案内羽根設定角、ロータと案内羽根の弦節比などのタービンに及ぼす影響について実験的、解析的に調査し、本タービンの好適幾何形状を提案した。一方、本タービンにおける逆方向タービン(例えば、吐出し時の吸込み用タービン)への気流の流入を抑制するため、流体ダイオードと呼ばれる整流作用を有する流体素子を設置した場合の影響について調査し、流体ダイオードの有性を検討した。

研究成果の概要(英文)：As a system using a conventional unidirectional air turbine in oscillating water column (OWC) based on a wave energy plant, a twin unidirectional impulse turbine topology has been suggested in previous studies. The performances of a unidirectional impulse turbine under steady flow conditions were investigated experimentally by using a wind tunnel in this study. Then, mean efficiency of the twin impulse turbine in bidirectional airflow has been estimated by a quasi-steady analysis using experimental results in order to propose the suitable turbine geometry on the performance. On the other hand, the mean efficiency is considerably lower than the efficiency under steady flow condition because reciprocating air flow can't be rectified adequately by a unidirectional turbine. In order to improve the efficiency, using fluidic diode is discussed. In this study, two different fluidic diodes were discussed by CFD and a wind tunnel test.

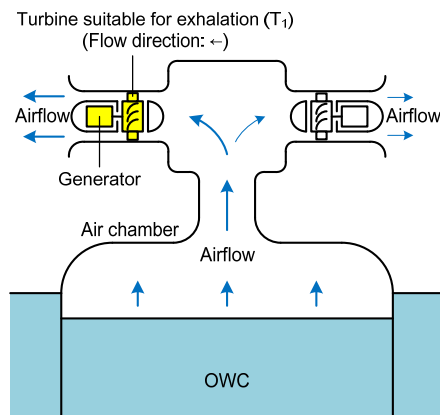
研究分野：流体工学

キーワード：波力発電 衝動タービン

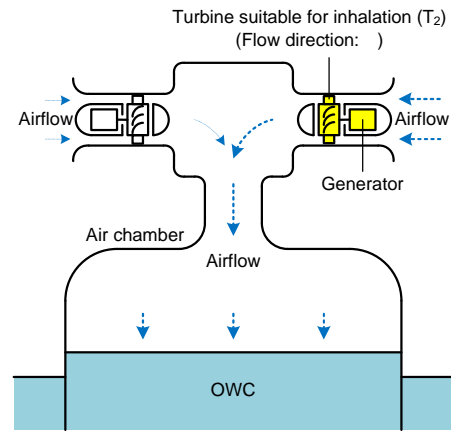
1. 研究開始当初の背景

振動水柱型 (OWC) 波力発電装置では、2 次変換装置としてエアタービンが使用されるが、現在の主流はウエルズタービンなど無弁式のタービンである。しかし、これらのタービンは往復気流中で常に同一方向に回転できるように、幾何形状をロータの回転中心面に対して対称にしなければならず、一般にエネルギー変換効率は在来のタービンに比べて低い。一方、整流装置を有する波力発電用エアタービンについては、整流弁を用いて往復気流を整流する方法が一般的であり、その代表的な装置としては、1965 年に開発され海上保安庁が採用した航路標識用ブイ⁽¹⁾がある。しかし、この方法では波の周期ごとに弁が往復運動を行うため、弁とその運動を止めるためのストッパが頻繁に接触し、耐久性に問題がある。さらに、弁機構の複雑化や装置の大型化という問題が生じる。東北電力により往復気流を水弁で一方方向の気流に変換し、衝動型エアタービンを用いる水弁集約式波力発電装置⁽²⁾が提案されているが、これについても装置の複雑化や大型化の問題が指摘されている。

これらの問題を解決するため、研究代表者らは、弁機構を使用せず、2 台の衝動型空気タービンにより往復気流を整流するツイン衝動型タービン (図 1) を提案している⁽³⁾。このタービンは、一方方向流れに対応する空気タービンがその流れが逆になる羽根車の前後では圧力差が大きくなり、それが抵抗となって空気が流れにくくなる性質を利用したものである。本タービンでは、図に示すように、吐出し時にはタービン前後の圧力差の小さい吐出し用タービン T_1 に大量の空気が流れ、吸込み用タービン T_2 には空気が流れないようにする。逆に吸込み時には T_2 に大量の空気が流れ、 T_1 には空気が流れないように 2 つのタービンが配置されている。本タービンでは、タービンが 2 つ必要となるが、弁機構を使用しなくても高効率が可能である。



(a) 吐出し時



(b) 吸込み時

図 1 ツイン衝動型タービンの作動原理

2. 研究の目的

本研究では、ツイン衝動型タービンの発電機台数、ロータ翼型、案内羽根設定角、ロータと案内羽根の弦節比などのタービンに及ぼす影響について実験的、解析的に調査した。一方、本タービンでは逆方向タービン (例えば、吐出し時の吸込み用タービン) への気流の流入が予想される。そこで、この気流の流入を抑制するため、流体ダイオードと呼ばれる整流作用を有する流体素子を設置した場合の影響について調査した。

3. 研究の方法

(1) 実験方法

タービン性能試験

本タービン性能を解明するため、風洞試験により定常流におけるタービン特性を求めた。実験装置の概要を図 2 に示す。直径 1.4m、長さ 1.7m の円筒シリンダ内でコンピュータ制御によりボールネジを回転させてピストンを駆動する往復気流発生風洞にタービン試験装置 (ケーシング直径 300mm) を接続し、定常流を発生させ、タービンの回転数を一定に保って実験を行った。実験では、空気流量 Q ($\leq 0.320 \text{ m}^3/\text{s}$)、出力トルク T_o 、案内羽根を含むタービン前後の全圧差 Δp とタービン角速度 ($\leq 367 \text{ rad/s}$) を測定した。本実験で使用した圧力センサとトルク検出器は、それぞれ TOYOTA AA3004、小野測器 SS-100 である。

本研究では、定常流におけるタービン単体の性能を、次式で定義するトルク係数 C_T 、入力係数 C_A 、効率 η と流量係数 ϕ の関係により評価する。

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

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

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

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

ここに、 A 、 u 、 v 、 ρ は、それぞれタービン流路面積、 R おけるロータ周速度、流路断面平均軸流速度、空気密度である。

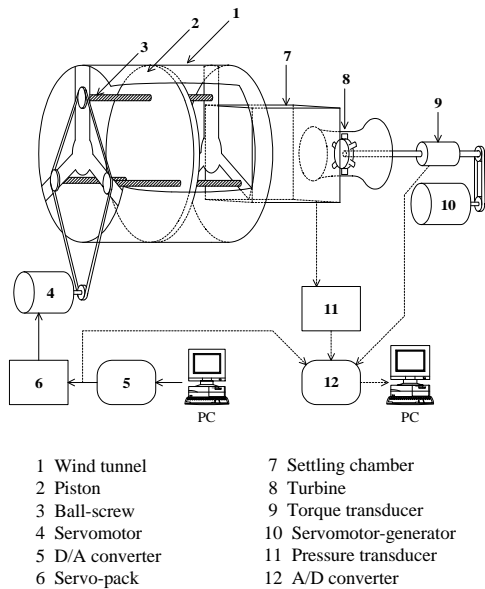


図2 タービン試験装置

流体ダイオード性能試験

流体ダイオードの整流特性を求めめるため、定常流による風洞試験を実施した。風洞試験は、図3に示すように、遠心式送風機と内径240mmの円管流路で構成される吸込み式試験装置を用いる。管路に流体ダイオード Type I を接続し、送風機により流体ダイオードに定常流を発生させて、ピトー管（岡野製作所，LK-0）により流量 $Q[m^3/s]$ を測定した。また、正方向、逆方向の両流れ方向にそれぞれ発生するダイオード前後の圧力差 $\Delta p_f [Pa]$ および $\Delta p_r [Pa]$ を求めるため、圧力検出器（岡野製作所，POP202）を用いてよどみ室の圧力を測定した。

流体ダイオードは Δp_r と Δp_f の比が大きいほど整流作用が高いと考えられるため、本研究では流体ダイオードの圧力比 R_D を次式で定義し、その値により整流作用を評価した。

$$R_D = \Delta p_r / \Delta p_f \quad (5)$$

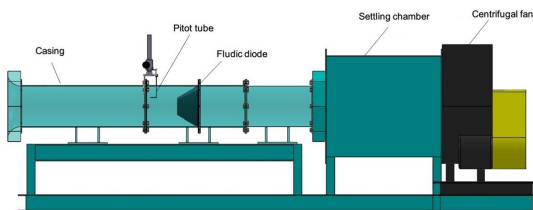


図3 風洞試験装置

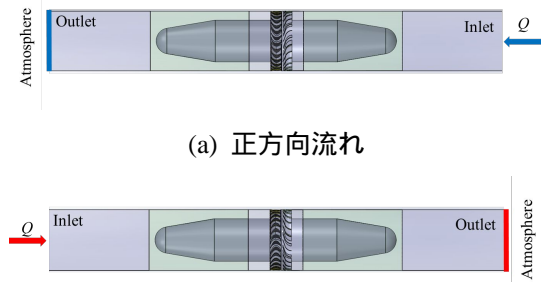
(2) 計算方法

CFD による性能解析

CFD については、解析ソフトに Cradle 社の SCRYU/Tetra を用いた。支配方程式はレイノルズ平均 Navier-Stokes 方程式(RANS)とし、乱流モデルには SST $k-\omega$ モデルを用いた。作動流体は 20°C における非圧縮性の空気とした。解析領域は円管と衝動型ロータ、案内羽根で構

成される領域であり、各タービンにおいて約 400 万要素の格子で構成されている。境界条件として壁面は No-slip 条件とし、入口で一定流量を流入させ、出口は大気開放とした(図4)。

さらに、本タービンの整流効果を評価するため、流量 $Q=0.320 m^3/s$ の定常流において正方向、逆方向の両流れ方向における、それぞれのタービンから上流と下流に十分離れた位置でのタービン前後の圧力差 Δp_f 、 Δp_r を求め、式(5)で定義するタービンの圧力比 R_D により整流作用を評価した。



(a) 正方向流れ

(b) 逆方向流れ

図4 CFDにおける解析領域

準定常解析法による性能解析

波力発電用ツイン衝動型タービンの往復気流中での性能を明らかにするため、 $C_T-\phi$ 、 $C_A-\phi$ 特性により準定常解析を用いた数値シミュレーションを行う。本シミュレーションでは周期的往復流として、図5に示すような正弦波の速度変化を採用する。さらに本タービンは、気流の方向や速度によりトルクが変動するが、定回転数制御のもとで作動し、タービン角速度は一定であると仮定する。

図1に示す空気室における流量 q およびタービン角速度 ω を次式で表す。

$$q = Q_0 \sin(2\pi t/T) \quad (6)$$

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega = \text{const.} \quad (7)$$

ここに、 Q_0 、 t 、 T は、それぞれ最大流量、時間、波の周期であり、添字“1”と“2”はそれぞれ吐出し用タービン T_1 と吸込み用タービン T_2 を意味する。

2つのタービンを通過する流量 q_1 、 q_2 は、 $C_T-\phi$ 、 $C_A-\phi$ 特性と次の4つの式を連立して解くことで求める。

$$q = q_1 + q_2 \quad (8)$$

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p \quad (9)$$

$$\phi_1 = v_1/u_1 = (q_1/A)/(R\omega) \quad (10)$$

$$\phi_2 = v_2/u_2 = (q_2/A)/(R\omega) \quad (11)$$

ここに、 A はタービン単体の流路面積である。図1に示すように、2台の衝動型タービンはそれぞれ独立した発電機を有している場合、出力は高効率を得られる気流が正方向のタービンからのみ得られると仮定した。したがって、周期的往復流におけるタービンの作動特性は、次式で定義される平均効率 η_m と流量係数 Φ の関係により評価する。

$$\eta_m = \frac{\frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} T_{O_1} \omega dt + \int_{T/2}^T T_{O_2} \omega dt \right)}{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p q dt} \quad (12)$$

$$\Phi = (Q_0/A)/u \quad (13)$$

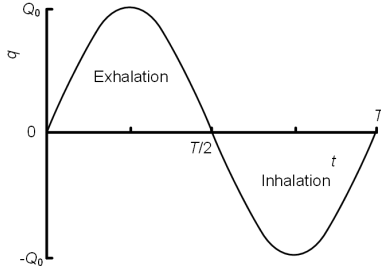
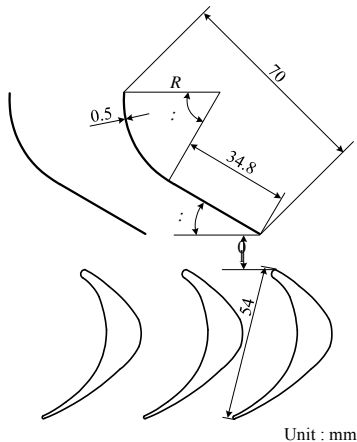


図5 周期的往復流の流量変化

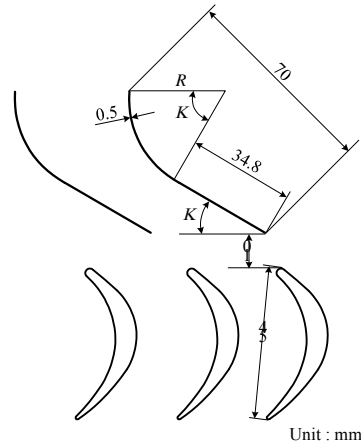
(3) 供試タービン

本研究では、図6に示す2次元形状を有する衝動型タービン⁽⁴⁾の性能を求めた。本研究で用いる翼型は、軸流式ガスタービンの設計法⁽⁵⁾を参考に設計し、案内羽根を有するウエルズタービン⁽⁶⁾の最大効率点を基準としたタービンの回転数と出力が、それぞれ0.5倍と1.5倍に設定された翼型をType A(反動度0.12)、さらに低速回転域で最大効率を得られるように回転数をウエルズタービンの0.3倍に設定した翼型をType B(反動度0.044)とする。いずれの翼型とも流路幅が中間で最大となるロータ翼列であり、翼弦長 $l=54\text{mm}$ 、翼高さ 44mm 、翼先端すき間 1mm 、平均半径 R における弦節比 2.02 、前縁半径 1.5mm 、後縁半径 0.5mm 、ハブ比 $v=0.7$ の2次元形状を有する衝動型ロータである。平均半径 r における弦節比 σ_r は、 $1.0 \leq \sigma_r \leq 2.0$ の範囲で変化させ、タービン性能に及ぼすその影響を調べた。

案内羽根は、図6に示すように円弧と直線からなる弦長 70mm 、厚さ 0.5mm の薄翼で、ロータと案内羽根の間隔 10mm である。本研究では、案内羽根設定角 θ および弦節比 σ_g の影響を調べるため $14^\circ \leq \theta \leq 26^\circ$ と $1.1 \leq \sigma_g \leq 2.8$ の範囲で変化させて実験および計算を行った。



(a) Type A



(b) Type B

図6 タービン翼列

4. 研究成果

本研究で得られた結論を要約すると、以下の通りである。

- (1) 2つのタービンを発電機1台で統合した場合、非定常流におけるタービンの平均効率は2台の場合に比べて大きく低下する(図7)
- (2) ロータ翼型は、効率の観点からはType A、整流効果の観点からはType Bがそれぞれ好適であると考えられる。(図8、図9)
- (3) ロータ弦節比は1.5~2.0程度が好適であると思われる。
- (4) 案内羽根設定角は、 $20^\circ \sim 23^\circ$ 程度が好適であると思われる。
- (5) 案内羽根弦節比は、2.0程度が好適であると思われる。
- (6) ツイン衝動型タービンの最大効率点において、全入力パワーの3割以上が逆方向のタービンで失われ、タービンの平均効率が大きく低下する。
- (7) 逆方向タービンの回転数を正方向タービンのそれより大きくすることで、逆方向タービンの流量抑制が可能であると思われる。
- (8) 円錐型ノズルのみで構成される流体ダイオード(Type I)は本タービンには適さず、一方で特殊型流体ダイオード(Type II)はタービン性能改善の可能性を有することがわかった。(図10)
- (9) 流体ダイオードを設置することで、わずかではあるがタービン出力が増加する一方、大気と空気室の圧力差が増加し、タービン効率が低下する。
- (10) 流体ダイオードの使用により逆方向タービンへの気流流入が抑制され、わずかではあるがタービンの起動特性が向上する。
- (11) 周期的往復流における平均効率について、ウエルズタービンとの比較により、ツイン衝動型タービンの有用性が確認された。(図11)

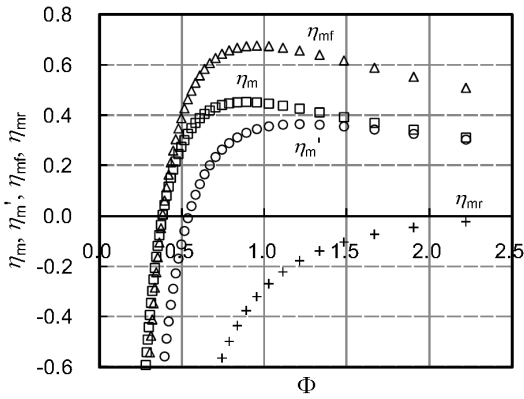
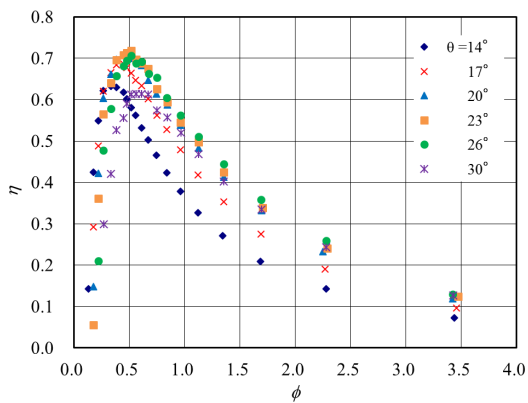
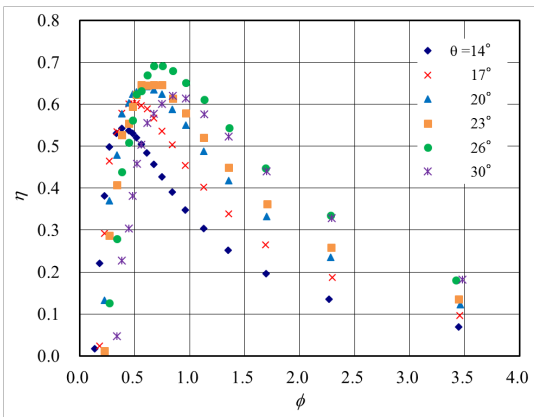


図7 ツイン衝動型タービンの平均効率
(η_m : 発電機 2 台の場合, η_m' : 発電機 1 台の場合)



(a) Type A



(b) Type B

図8 定常流におけるタービン効率

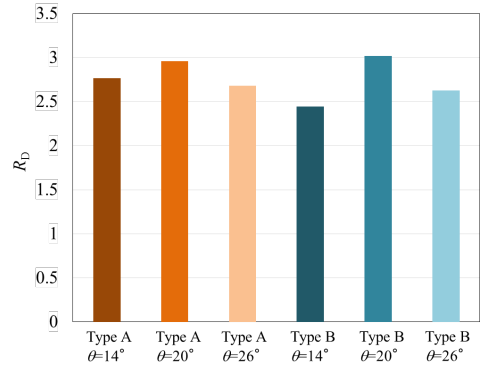


図9 整流効果に及ぼすタービン形状の影響

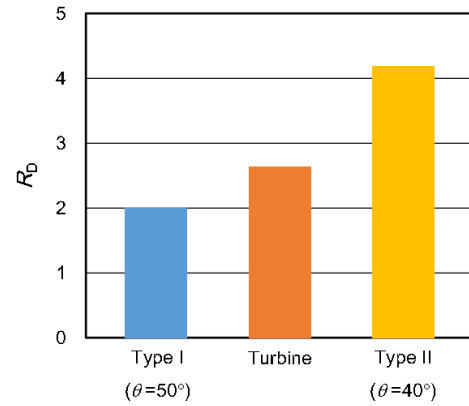


図10 流体ダイオードの整流効果

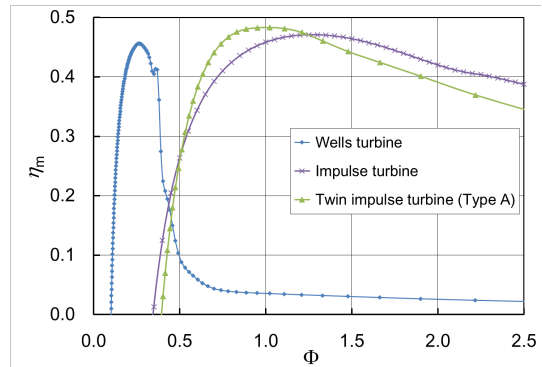


図11 ツイン衝動タービンの有用性

<引用文献>

- (1) 勝原光治郎・ほか 3 名, “灯標用波浪発電装置におけるエアタービンの特性 - 衝動型・ウェルズ型・サボニウス型 -”, 第 2 回波浪エネルギー利用シンポジウム講演論文集, 海洋科学技術センター, (1987), 83-91.
- (2) 小宮俊夫, “水弁集約式波力発電システムの開発”, 三井造船技報, 160, (1997), 17-19.
- (3) 高見昭康・ほか 3 名, “波力発電用ツイン衝動型タービン”, ターボ機械, 39, (2011), 632-637.
- (4) 前田英昭・ほか 4 名, “波力発電用整流弁方式衝動タービンに関する研究”, 機論, 66(646), B (2000), 1421-1427.

- (5) 浜島操, “ガスタービン - 理論と設計 -”, コロナ社, (1973), 178-222.
- (6) 高尾学・ほか 3 名, ”ウエルズタービン性能に及ぼす案内羽根の影響”, 機論, 63-606, B(1997), 577-582.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

S. Okuhara, M. Takao, H. Sato, A. Takami, T. Setoguchi, A Twin Unidirectional Impulse Turbine for Wave Energy Conversion -Effect of Fluidic Diode on the Performance-, Open Journal of Fluid Dynamics, 査読有, Vol.4, 2014, 433-439

S. Okuhara, M. Takao, A. Takami, T. Setoguchi, A Twin Unidirectional Impulse Turbine for Wave Energy Conversion -Effect of Guide Vane Solidity on the Performance-, Open Journal of Fluid Dynamics, 査読有, Vol.2, 2012, 343-347

〔学会発表〕(計 13 件)

高尾学, 佐藤秀樹, 奥原真哉, 瀬戸口俊明, 流体ダイオードを有する波力発電用ツイン衝動型タービン, 日本機械学会中国四国支部第 53 期総会・講演会, 講演 No.1315, 2015 年 3 月 6 日, 広島大学(東広島市)

波力発電用ツイン衝動型タービン(性能に及ぼす翼型の影響), 高尾学, 奥原真哉, 佐藤秀樹, 瀬戸口俊明, 日本機械学会中国四国支部第 53 期総会・講演会, 講演 No.1314, 2015 年 3 月 6 日, 広島大学(東広島市)

H. Sato, S. Okuhara, S. Suto, M. Takao, A. Takami, T. Setoguchi, Fluidic Diode for Twin Impulse Turbine, 4th International Symposium on Technology for Sustainability, Paper No.461, 2014 年 11 月 19-21 日, Taipei, Taiwan

奥原真哉, 高尾学, 佐藤秀樹, 高見昭康, 瀬戸口俊明, 波力発電用ツイン衝動型タービン(性能に及ぼすロータ形状の影響), 日本機械学会第 92 期流体工学部門講演会, 講演 No.0702, 2014 年 10 月 25-26 日, 富山大学(富山市)

奥原真哉, 高尾学, 佐藤秀樹, 瀬戸口俊明, 波力発電用ツイン衝動型タービンに関する研究(性能に及ぼす案内羽根設定角の影響), 第 72 回ターボ機械協会講演会大分講演会, 論文番号 A-07, 2014 年 10 月 3 日, 大分工業高等専門学校(大分市)

S. Okuhara, M. Takao, H. Sato, A. Takami, T. Setoguchi, A Twin Unidirectional Impulse

Turbine for Wave Energy Conversion -Effect of Fluidic Diode on the Performance-, Proceedings of 5th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, Paper No.JP46, 2014 年 9 月 23-26 日, Nagasaki, Japan

高尾学, 佐藤秀樹, 奥原真哉, 高見昭泰, 瀬戸口俊明, 波力発電用ツイン衝動型タービンに関する研究(性能に及ぼす流体ダイオードの影響), 第 71 回ターボ機械協会総会講演会, 講演番号 B-10, 2014 年 5 月 9 日, 東京大学(東京都)

高尾学, 奥原真哉, 高見昭康, 瀬戸口俊明, 波力発電用ツイン衝動型タービン(起動特性に及ぼす流体ダイオードの効果), 日本機械学会九州支部第 67 期総会・講演会, 2014 年 3 月 14 日, 九州工業大学(北九州市)

高尾学, 奥原真哉, 高見昭康, 瀬戸口俊明, 波力発電用ツイン衝動型タービン(流体ダイオードによる性能改善), 日本機械学会中国四国支部第 52 期総会・講演会, 2014 年 3 月 7 日, 鳥取大学(鳥取市)

奥原真哉, 高尾学, 高見昭康, 瀬戸口俊明, 波力発電用ツイン衝動型タービンの流量制御, 日本機械学会中国四国支部第 51 期総会・講演会, 2013 年 3 月 8 日, 高知工科大学(高知県香美町)

奥原真哉, 高尾学, 高見昭泰, 瀬戸口俊明, 波力発電用ツイン衝動型タービンに関する研究(性能に及ぼす案内羽根弦節比の影響), 日本機械学会第 90 期流体工学部門講演会, 2012 年 11 月 18 日, 同志社大学(京都市)

S. Okuhara, M. Takao, A. Takami, T. Setoguchi, A Twin Unidirectional Impulse Turbine for Wave Energy Conversion -Effect of Guide Vane Solidity on the Performance-, 4th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 2012 年 10 月 16 日, Busan, Korea

M. Takao, S. Okuhara, A. Takami, T. Setoguchi, Performance Estimation of Twin Unidirectional Impulse Turbine for Wave Energy Conversion, International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines, 2012 年 9 月 11 日, 東京大学(東京都)

6 . 研究組織

(1)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