

令和元年6月28日現在

機関番号：55201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04607

研究課題名(和文) 波高変動に対して高いロバスト性を有する波力発電用往復流型タービンの開発

研究課題名(英文) Development of a Wave-powered Turbine for Bi-directional Flow with High Robustness against Wave Height Variations

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) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、波高変動に対して高いロバスト性を有する波力発電用往復流型タービンとしてブースター付きウエルズタービンを提案し、風洞試験とCFDを用いた性能解析により、次の結論を得た。(1) ブースター(小型の往復流型衝動タービン)により、本タービンの高流量域または低回転域の作動と起動の両特性が向上する。(2) 本タービン性能は衝動、ウエルズの両タービンの直径比に強く依存し、その好適値は0.5程度である。(3) 本タービンの最大効率は46%でウエルズタービン単体(同50%)より低いですが、失速点の効率は前者が後者より30%以上高く、本タービンにより振動水柱型波力発電の発電コストが大幅に低下すると予想される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、特性が大きく異なる2つの往復流型タービンを組合せることで、実際の海洋で発生する様々な海象条件に幅広く対応可能な波力発電用タービンを提案し、独自性と実用性を有する本タービンの性能とタービン内部の流れ状態を解明した。その結果より、このロバスト性の高い波力発電用タービンを振動水柱型波力発電に採用することで、この発電方式による発電単価の低下が期待できる。したがって、本研究の成果は、従来のターボ機械技術では解決できない海洋ターボ機械分野の発展のみならず、脱炭素社会の構築に対して有意義である。

研究成果の概要(英文)：In this study, the researcher proposed a Wells turbine with a booster as a wave-powered turbine for bi-directional flow with high robustness against wave height fluctuation, and the following conclusions were obtained by wind tunnel test and performance analysis using CFD. (1) A small impulse turbine for bi-directional flow, which is a booster, improves the running and starting characteristics in the high flow rate region or low rotational speed region of this turbine. (2) The performance of the proposed turbine strongly depends on the diameter ratio of both the impulse and Wells turbines, and its suitable value is approximately 0.5. (3) The maximum efficiency of the present turbine is 46%, which is lower than that of Wells turbine alone (50%). However, the efficiency of the proposed turbine at the stall point is higher than that of Wells turbine alone by 30% or more. Therefore, the power generation cost in the case of the proposed turbine is expected to decrease significantly.

研究分野：海洋エネルギー利用，流体機械

キーワード：再生可能エネルギー 波力発電 ウエルズタービン 衝動タービン

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 (図1) について、我が国や欧州を中心に実海域試験が実施されている<sup>(1),(2)</sup>。近年の代表例として、我が国の海洋科学技術センター (現・海洋研究開発機構) による浮体式波力発電装置「マイティ・ホエール」(定格出力 110kW)、英国・スコットランドの民間企業による沿岸固定式波力発電装置「LIMPET」(同 500kW)、EU の支援によりポルトガル・ピコ島に設置されている沿岸固定式波力発電装置 (同 400kW) が挙げられる。これらの発電プラントでは、2 次変換装置である空気タービンとして、往復気流で常に同一方向に回転するが、高波浪パワー時に失速が生じるウエルズタービン<sup>(3)</sup> (図2) が採用され、そのため発電プラントの総合変換効率が著しく低下することが、申請者らによる風洞試験<sup>(4),(5)</sup> と実海域試験<sup>(6)</sup> において解明されている。

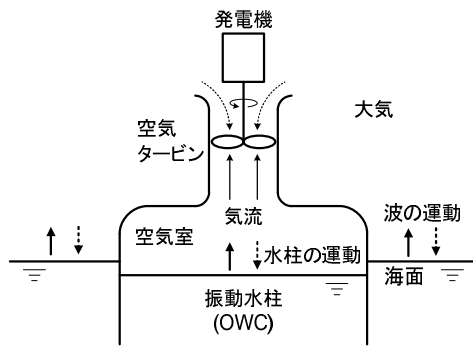


図1 振動水柱型波力発電の原理

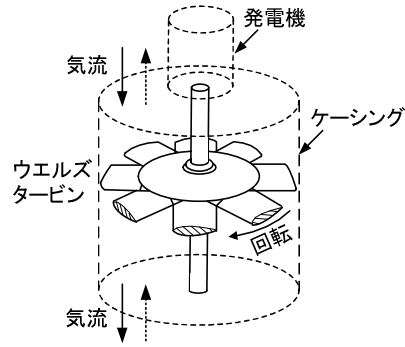


図2 ウエルズタービン

< 引用文献 >

- (1) R. Bhattacharyya et al., *Wave Energy Conversion*, Elsevier, (2003).
- (2) A. F. de O. Falcao, *Renewable Energy*, **14**, 899, (2010).
- (3) S. Raghunathan, *Prog. in Aerospace*, **31**, 335, (1995).
- (4) 瀬戸口・他3名, *日本機械学会論文集 (B 編)*, **65**, 255, (1999).
- (5) T. Setoguchi et al., *Renewable Energy*, **23**, 261, (2001).
- (6) 高尾・他5名, *ターボ機械*, **36**, 766, (2008).

2. 研究の目的

本研究では、高波浪パワー時の大きな波高変動でもエネルギー取得が可能なウエルズタービンを開発するため、メインタービンであるウエルズタービンに小型の往復流型衝動タービン<sup>(4)-(6)</sup> (図3) をブースタータービンとして組合せたロバスト性の高い新型波力タービン (図4) を提案し、その性能を実験的および解析的に調査することで本タービンの有用性を検討する。

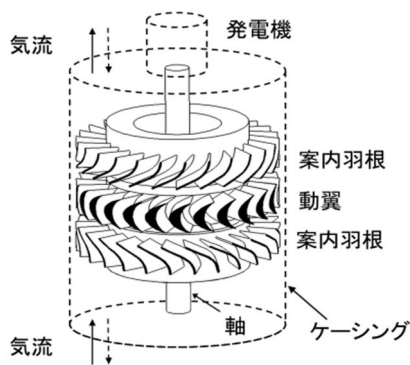


図3 往復流型衝動タービン

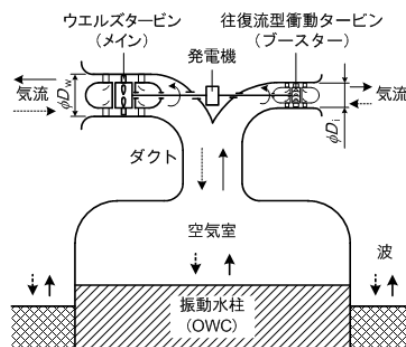


図4 ブースター付きウエルズタービン

3. 研究の方法

本研究では、3次元CFDによる数値解析およびピストン式特殊風洞による風洞試験を用いて、定常流におけるタービン性能を求める。数値解析においては、解析ソフトに Cradle 社の SCRYU/Tetra を使用した。支配方程式は 3次元レイノルズ平均 Navier-Stokes 方程式 (3D-RANS) とし、乱流モデルは SST  $k-\omega$  モデルを採用した。作動流体は 20°C における非圧縮性の空気とし、解析領域は円管 (ケーシング直径 300mm) とロータ、案内羽根で構成される領域で

あり、全ての供試タービンについて格子点数は 500 万から 600 万である。また壁面は静止壁とし、入口では一定流量を流入させ、出口は大気開放とした。

本研究では、定常流におけるタービン性能を、トルク係数  $C_T (= T/\{\rho(v^2+u^2)Ar/2\})$ 、入力係数  $C_A (= \Delta p Q/\{\rho(v^2+u^2)Av/2\})$ 、効率  $\eta (= T\omega/(\Delta p Q) = C_T/(C_A\phi))$  と流量係数  $\phi (= v/u)$  との関係で評価する。ここで、 $A$ : タービン流路断面積  $\{=\pi D^2(1-v^2)/4\}$ 、 $Q$ : 空気流量 ( $\leq 0.320\text{m}^3/\text{s}$ )、 $r$ : 平均半径  $\{=D(1+v)/4\}$ 、 $u$ : ロータ周速度 ( $=r\omega$ )、 $v$ : 流路断面平均軸流速度 ( $=Q/A$ )、 $\Delta p$ : 案内羽根を含むタービン前後の全圧差、 $\rho$ : 空気密度、 $\omega$ : タービン角速度 ( $\leq 367\text{rad/s}$ ) である。

一方、風洞試験においては、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試験を行った。実験では、空気流量  $Q$ 、出力トルク  $T$ 、案内羽根を含むタービン前後の全圧差  $\Delta p$  とタービン角速度  $\omega$  を測定した。本試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。

#### 4. 研究成果

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

ブースターとして小型の往復流型衝動タービンを使用することで、高流量係数域における本タービンの効率とトルクが向上し、高流量域または低回転域の作動と起動の両特性を改善できる。

準定常解析手法により算出した周期的往復気流における本タービンの最大効率は 46% を示し、ウエルズタービン単体の場合 (同 50%) より低い、失速点の効率はブースター付きウエルズタービンのほうが 30% 以上高い。

の結果より、本タービンを採用することで振動水柱型波力発電の発電単価が大幅に低下すると予想され、本タービンの有用性は高いと考えられる。

本タービンの効率は、メインタービン (ウエルズタービン) とブースターの直径比 (=ブースター直径/メインタービン直径) に強く依存し、その直径比の減少にともないブースターへ流入する流量が低下することで、本タービンの効率はウエルズタービン単体のそれに近づく。また、本タービンにおける直径比の好適値は 0.5 程度である。

ブースターの流量は、本タービンの失速点において最も低い値を示す。

ブースターである往復流型衝動タービンの案内羽根設定角について、その設定角が小さいとブースター前後の圧力差が大きくなり、ブースターへの流量が減少する。また、その設定角の好適値は約 30° である。

波力発電用往復流型空気タービンとして提案されている 3 つのタービン (ウエルズタービン、往復流型衝動タービン、往復流型二重反転衝動タービン) と本タービンの性能比較を行い、本タービンの有用性を示した。

メインタービンの性能改善を図るため、案内羽根を有するウエルズタービンの内部流動を調査し、タービンの失速特性に及ぼす案内羽根の影響を解明した。

ブースターとして往復流型衝動タービンの代わりに往復流型二重反転衝動タービンを採用することで本タービンの失速特性は大きく改善される。しかし、往復流型二重反転衝動タービンはタービン前後の圧力差が大きく、ブースターへの気流の流入量が抑制されるため、単段ロータである往復流型衝動タービンのほうが、本タービンのブースターとして好ましい。

ウエルズタービン用案内羽根を設置することで、本タービンの効率は幅広い流量係数において 5% 前後の増加が見られた。しかし、その案内羽根の有無に関わらず流量比 (=ブースターの流量/全流量) は 0.25 未満を示しており、ウエルズタービン用案内羽根が流量比に及ぼす影響は小さい。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

Manabu Takao, Haruka Katsube, Miah Md. Ashraful Alam, Seisuke Fukuma, Shinya Okuhara, Yoichi Kinoue, "Effect of Impulse Turbine Geometry on the Performance of a Dual-Turbine System for Wave Energy Conversion", International Journal of Fluid Machinery and Systems, 査読有, Vol.11, pp.110-114, (2018).

Manabu Takao, Seisuke Fukuma, Shinya Okuhara, Miah Md. Ashraful Alam and Yoichi Kinoue, "Performance Comparison of Turbines for Bi-directional Flow", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 査読有, Vol.240, Paper No.052002, (2019).

[学会発表] (計 14 件)

Haruka Katsube, Miah Md. Ashraful Alam, Akiyasu Takami, Manabu Takao and Toshiaki Setoguchi, "Wells Turbine with Booster -Effect of Rotational Speed Ratio on the Performance-", Proceedings of Techno-Ocean 2016, October 6-8, Kobe, Japan, Paper No.P-3, (2016).

Miah Md. Ashrafal Alam, Manabu Takao, Akiyasu Takami, Shinya Okuhara, Yoichi Kinoue, Toshiaki Setoguchi, “Wells Turbine with Booster -Effect of Guide Vanes on the Performance-“, Proceedings of 5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, November 20-23, Birmingham, UK, Paper ID-49, (2016).

高尾学, 勝部春花, 奥原真哉, アラム アシユラフル, 高見昭康, 瀬戸口俊明, “ブースターを有するウエルズタービンの性能解析”, 第 94 期日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 宇部, 論文番号 609, (2016).

勝部春花, 高尾学, 奥原真哉, アラム アシユラフル, 瀬戸口俊明, ブースターを有するウエルズタービンに関する研究 (性能に及ぼす衝動タービン形状の影響), 日本機械学会中国四国支部第 55 期総会・講演会講演論文集, 広島, 論文番号 408, (2017).

勝部春花, 高尾学, 奥原真哉, アラム アシユラフル, 木上洋一, 瀬戸口俊明, “ブースターを有するウエルズタービンの性能解析”, 日本機械学会九州支部第 70 期総会・講演会講演論文集, 佐賀, 論文番号 405, (2017).

Manabu Takao, Haruka Katsube, Seisuke Fukuma, Miah Md. Ashrafal Alam, Akiyasu Takami, Toshiaki Setoguchi, “Numerical Experiments on Performance of Wells Turbine with Booster”, Proceedings of 13th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, May 7-11, Okinawa, Japan, Paper No. ISAF13-S-0064, (2017).

Manabu Takao, Haruka Katsube, Miah Md. Ashrafal Alam, Seisuke Fukuma, Shinya Okuhara, Yoichi Kinoue, “A Dual-turbine System for Wave Energy Conversion -Effect of Impulse Turbine Geometry on the Performance-”, Proceedings of 10th International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer, May 28-June 1, Seoul, Korea, Paper No.160227, (2017).

Manabu Takao, Seisuke Fukuma, Mish Md. Ashrafal Alam, Shinya Okuhara, Yoichi Kinoue, Shuichi Nagata, “A Dual-turbine System for Wave Energy Conversion”, Proceedings of 12th European Wave and Tidal Energy Conference, August 27-September 1, Cork, Ireland, Paper No.1127, (2017).

高尾学, 福岡清祐, 奥原真哉, アラム アシユラフル, 木上洋一, 瀬戸口俊明, “往復流型タービンの性能比較”, 日本機械学会第 22 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 豊橋, 論文番号 E122, (2017).

福岡清祐, 高尾学, 奥原真哉, アラム アシユラフル, 木上洋一, “波力発電用ウエルズタービン (案内羽根による性能改善のメカニズム)”, 日本機械学会中国四国支部第 56 期総会・講演会講演論文集, 徳島, 論文番号 K715, (2018).

Manabu Takao, Seisuke Fukuma, Miah Md. Ashrafal Alam, Yoichi Kinoue, Shuichi Nagata and Toshiaki Setoguchi, “Performance Prediction of Impulse Turbine for Wave Energy Conversion -Effect of Simple Cascade on the Performance-”, Proceedings of 4th Asian Wave and Tidal Energy Conference, September 9-13, Taipei, Taiwan, Paper No. AWTEC2018-331, (2018).

福岡清祐, 高尾学, 奥原真哉, アラム アシユラフル, 木上洋一, 瀬戸口俊明, “往復流型タービンの性能予測”, 日本機械学会第 23 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 宇部, 論文番号 E131, (2018).

福岡清祐, 高尾学, 奥原真哉, アラム アシユラフル, 木上洋一, “ウエルズタービンに関する研究 (往復流型二重反転衝動タービンによる性能改善)”, 日本機械学会第 96 期流体工学部門講演会講演論文集, 室蘭, 論文番号 OS6-16, (2018).

福岡清祐, 高尾学, 奥原真哉, アラム アシユラフル, 木上洋一, “ブースターを有するウエルズタービンの性能解析 (案内羽根の効果)”, 日本機械学会第 57 期中国四国支部総会・講演会講演論文集, 宇部, 論文番号 606, (2018).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：アラム アシュラフル  
ローマ字氏名：ALAM, Ashraful  
所属研究機関名：松江工業高等専門学校  
部局名：機械工学科  
職名：准教授  
研究者番号(8桁): 60759819

研究分担者氏名：高見 昭康  
ローマ字氏名：TAKAMI, Akiyasu  
所属研究機関名：松江工業高等専門学校  
部局名：機械工学科  
職名：教授  
研究者番号(8桁): 70259919

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：  
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。