

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289340

研究課題名(和文) ピッチ制御機構を有する浮体式垂直軸型水車の耐海水・生物付着性能を考慮した実証研究

研究課題名(英文) A Demonstration Study on a Floating Type Pitch-Controlled VAMT in Consideration of Seawater and Biofouling

研究代表者

居駒 知樹 (IKOMA, Tomoki)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：50302625

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)：本研究では可変ピッチ機構を導入した潮流発電用の垂直軸水車の実海域での性能を明らかにするために、海上での曳航試験を実施した。新規を含めて2機の浮体式水車モデルを製作した。曳航試験の結果から、水車の高性能化のための可変ピッチの導入は極めて有効であることがわかった。また、海上における波浪による水粒子速度の変化は水車回転とパワーに敏感に反応するため、発電量評価にはこれを無視できない可能性があることを示唆した。本研究での水車1号機の水槽実験結果から得られたパワー係数は発電機を伴うネット性能は20%を記録した。2号機は6%程度の結果を海上実験から得たが、水車の組立方法が非常に重要であることを示唆した。

研究成果の概要(英文)：This study conducted towing tests using a fishing boat at actual seas in order to clarify turbine performance of VAMT with pitch-controlled straight blades for tidal power generation. Two of floating type VAMT models including completely new one were manufactured. From the towing tests, we obtained that introduction of pitch-control with cyclic mechanism into VAMT in order to improve turbine performance very much. The results of towing tests suggested that it would be necessary to take into account of variation of fluid velocity because of ocean waves when we evaluate electrical power generation because rotation and output power of the turbines were sensitively affected by the variation. The net-efficiency of the first turbine of this study was recorded with 20% from laboratory tests. The second one which had diameter of 1.0m showed only 6% in maximum net-efficiency from the sea test. However, the results of the sea test suggested that the turbine with 1.0m diameter had surplus power.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：潮流発電 垂直軸水車 可変ピッチ 浮体 実海域実験 高効率 波浪影響

### 1. 研究開始当初の背景

世界的な再生可能エネルギー利用機運の高まりと合わせて、海洋再生可能エネルギー利用のため技術開発も盛んに行われている。そのひとつである潮流発電は、技術的には実用化直前のレベルであるが、検討すべき課題も未だ多い。タービンを利用する潮流発電用水車には水平軸型と垂直軸型の2つがある。2つを比較すると、前者が高回転型であり後者はそれよりも低回転で高トルクを稼ぐことができる。日本周辺海域の潮流は欧州等のそれと比べると決して潮流発電に向けた特性をもっていない。それでも、いくつかの海域では最大流速が 2.0m/s を超える潮流発電に適したポイントもある。しかしながら、流向を変える潮流は潮どまりの状態から流速が挙がる時間帯があり、そういった理由から常に定常的な好条件の流れを発電に利用できるわけではない。よって、より流速の低い流れから強流速域までの幅広い流況において効率的な潮流発電を実現できることは、日本における潮流発電を実用化するために重要であるといえる。

そこで著者らは垂直軸水車にサイクロイダル機構による可変ピッチ翼を導入した。可変ピッチ機構によるトルク増大と水車パワー増大を見込めることを水槽実験と CFD 計算等から確認したが、それを海上で実現できるか否かの実証と装置製作方法についての妥当性は検討できていなかった。海上で可変ピッチ水車を実現するには耐海水性能や生物付着等を抑制するための技術も必要であるが、それらについての検討は日本国内ではあまりにも少ない状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究開始当初の目的は、可変ピッチ垂直軸水車の最大ネット効率 40%を目指し、かつ低流速条件下においても相応の発電出力を見込める潮流・海流発電水車を開発して実証することであった。そのために次のような具体的な目標を設定した。

- 水槽実験レベルでの高性能水車の実証：ネット効率 40%以上の達成
- そのための既存可変ピッチ水車からのブレード・材料・組立方式の改良：可変ピッチ+弾性体ブレード適用やブレード枚数とソリディティ影響の関係からの詳細な検討
- 実海域での耐海水性能および水車性能の実証：ブレードへの生物付着防止対策実証と海域条件下での実稼働率と水車効率の把握
- 浮体式の適用：係留方式の検討および水車トルクと浮体規模・動揺特性との相互作用の把握

### 3. 研究の方法

本研究では主として高効率な水車を製作してそれを実証するために CFD ソフトによ

る数値計算と水槽実験ならびに実海域での曳航実験を実施し水車性能に関する評価を行った。また、浮体式水車とした場合を考え、波浪中動揺に与える水車の回転の影響を調べるために水槽実験を実施した。

水車模型の可変ピッチを実現するためにサイクロイダル機構を導入した。その概念図を図 1 に示す。また、一回転中の翼断面のピッチ角変化の様子を図 2 に示す。

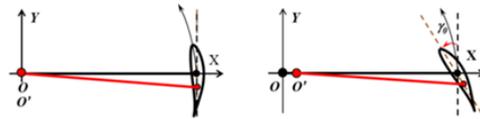


図 1 可変機構と設置角の定義

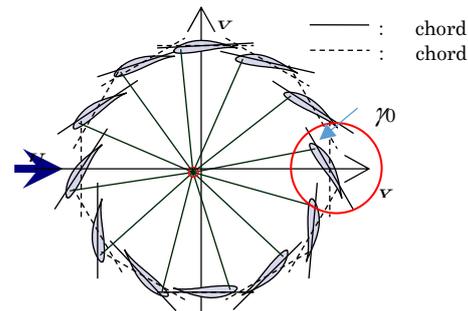


図 2 翼ピッチ角度の一回転中の変化

### 4. 研究成果

#### (1) 第 1 回海上曳航実験

平成 26 年 10 月に新潟県粟島浦村のある粟島にて水車の曳航実験を実施して、水車製作過程・方法のチェックを行った。本実験用の水車モデルはすでに前年度までに製作したものをブレードやフレームを作り変えることで海上試験用に改造し、また海上試験用計測装置を搭載し直した。(図 3~5 参照)

表 1 に示す仕様の水車と発電機を搭載した浮体を漁船で曳航することで試験を行った。3m 角の浮体構造物の制作ならびに曳航試験には新潟県と新潟県海洋エネルギー研究会の協力を得た。曳航時に水車に流入する海水の流速は 0.5m/s~1.5m/s 程度であった。

表 1 第 1 回海上試験水車モデル諸元

水車直径	0.5m
翼長さ	ストレート, 0.8m
翼材料	高強度アルミニウム合金 (一枚板)
翼枚数	6枚でソリディティ 0.294
翼断面	NACA 0018の円弧キャンバー型
ギア比 (水車一回転計)	8:3
ギア比 (回転計-発電機)	1.5:1
発電出力機器	可変負荷電力テスター (5~105Ω 可変, 手動)
発電機	同期型インナーロータコアレス 直径: 340mm 軸径: 15mm 電流定格: 4A 最大出力: AC三相150W



図3 6枚翼可変ピッチ水車模型



図4 発電機とトルクメータ



図5 浮体式水車発電システム全体の様子

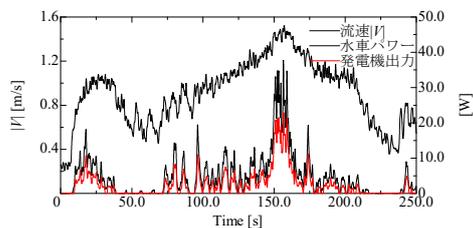


図6 流速及びパワーの時系列

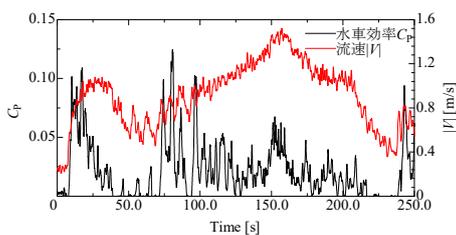


図7 流速および水車効率の時系列

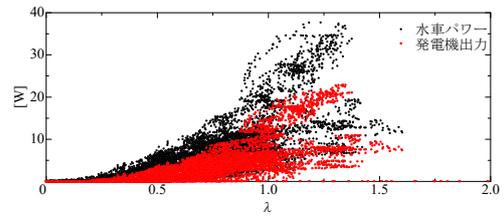


図8 周速比に対する水車パワーと出力

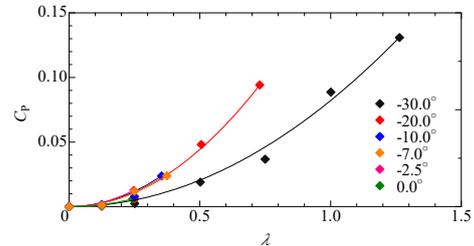


図9 周速比に対する設置角毎の水車効率

計測データの中でも典型的な例を示す。図6は流入流速（縦軸左）と水車パワーおよび発電機出力（それぞれ縦軸右）の時系列である。水車パワーは計測したトルク（Nm）と回転数（水車回転数の8/3倍）（rad./s）の積で計算される、軸パワーそのものである。発電機出力は電流（A）と電圧（V）の積で与えられる。流速はX軸とY軸成分があるので、それらから得られる絶対値を用いている。なお、可変ピッチの角度設定はX軸方向からのみ、流れが流入する前提で行われる。

まず、水車パワーと発電機出力を比較した場合、当然ながら発電機出力の方が若干小さな値となる。これにはトルク計から発電機までの間にプーリーを使った増速装置が存在することによる機械的損失と発電機自体の効率によるものである。両者を合わせた効率は約60～65%であった。これは機械装置の洗練と発電機開発によりさらに高効率にすることは可能である。

流速の時系列の時間的な変化は船速そのものを変化させていることによる。この時系列には細かな振動が見られる。これは波浪と前進中流れの影響による浮体モデルそのものの動揺と波浪そのもの影響による。浮体モデルはロープでつながっており、曳航する漁船とは異なる運動をしていた。流速が10秒くらいから立ち上がると0.8～1.0 m/sの流速中であっても水車パワーは10Wを瞬間的に超える。25秒位から一度船速が落ち着く。これに伴い、水車パワーは急激に下がる。船速が等速運動になる時に、浮体モデルはブレイキ状態となる。

図7に同じケースにおける流速の絶対値と水車効率の時系列を比較して示した。水車効率は水車軸パワーと流速の絶対値の値から換算した流れのパワーとの比である。本実験での最大効率は12%程度であった。また、この時の出力は決して大きな宛位ではなく、15W程度の時である。図6の最大出力は瞬間

的に 35W ほどである。この時間帯においては流速も 1.5 m/s を超えているが、水車効率は 5% 程度しか出ていない。

図 8 に水車の回転数から得た周速と流速計で計測した流速から計算される時々刻々の周速比  $\lambda$  に対するその時刻の水車軸パワーと発電機出力をプロットした。計測時間分全てである。どちらの出力も周速比が上昇するに従って上昇する傾向が見られる。水車パワーと発電機出力の両結果には 2 つの分布があるように見える。出力の高い側の分布の傾向からは周速比がさらに上昇すれば出力も増加することが予測される。それに対して、低い側の分布は、明らかに周速比 1.0 を超えた当りから出力の上昇傾向は見られず、頭打ち状態である。

本曳航実験より以下の結論が得られた。

- 波浪や浮体動揺による微小な流速の変動は、1 m/s 程度の流れ中ではその数パーセントとなり、結果として水車パワーや発電機出力に非常に大きく影響を与える。また、それは水車効率にも顕著に現れる。よって、一様流中での水車性能だけでは、実海域での性能評価は必ずしも十分でない場合があることが今後の課題である。
- 上述の流速変動の影響は、別の形、すなわち流速が加速中と減速中で水車性能が異なってしまう可能性を示唆する結果としても現れた。より詳細な検討が重要であり、特に時間変動の継続時間がどれほど長いとそのようになるのかを明らかにする必要がある。また、浮体の場合特有の問題なのか、流速変化の影響のどちらなのかも、明確にする必要がある。

### (2) 第 1 回海上曳航実験モデルの空気中試験および水槽実験結果

前述の曳航試験に用いた水車模型について、空気中での強制回転試験により水車模型の機械摩擦等によるパワー損失の程度を調べた。図 10 は実験装置である。モーターで強制回転させて、発電機負荷をかけない場合の水車トルクと回転数からパワーを算出した。その水車パワーは機械的摩擦による損失そのものである。それをモーターにかけたパワーで除して百分率で図 11 に示す。回転数 60rpm では 30% 程度の損失があることがわかった。曳航実験時の水車の回転数は 60~80 回転が非常によく回っている状態であった。

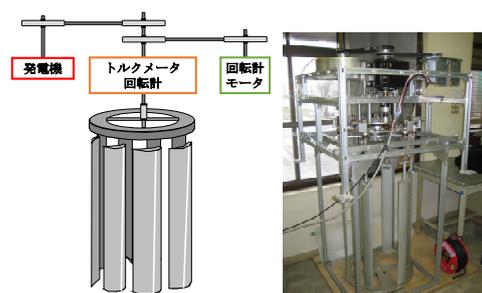


図 10 空気中強制回転試験装置

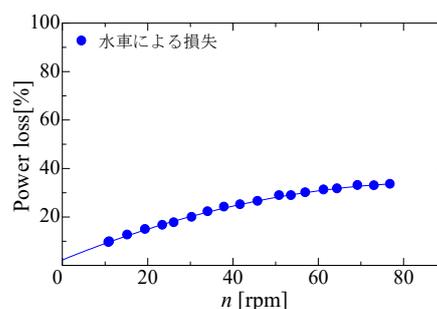


図 11 水車システムの機械的パワー損失

(3) 第 1 回海上曳航実験モデルの水槽実験  
 実海域での曳航状態は水車にとって理想的な流れ場ではないため、曳航実験用に改良した水車模型の性能を改めて回流水槽にて調べた。周速比に対する水車パワーを評価するため、用いる流速によって周速比が大きく変化しては困ることから図 12 によってその影響が大きいことを調べた。この結果から流速 1.2m/s での水車パワー計測試験を実施した。可変ピッチ幅を変えた場合の水車パワーを図 13 に、その際の水車パワー係数を図 14 に示す。曳航実験で用いたものと同じ発電機によって水車へ負荷をかけた。発電機出力は図 13 の軸パワーの 8 割ほどであった。設置角度 -30 度のときに、出力も水車パワー係数も最大であることがわかった。この結果は実海域実験の結果に近い。ただし、最大水車効率は 20% 程度出ており、曳航実験時よりもよい。前節で検討した水車の機械的パワー損失が 30% 程度あることを考えれば、水車そのものの効率は 60% を超えることになる。回転数にも大きく影響するので、単純な計算とはならないが、水車設定そのもののポテンシャルの高さを期待できる。

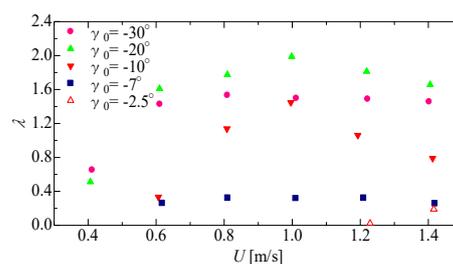


図 12 流速に対する周速比の変化

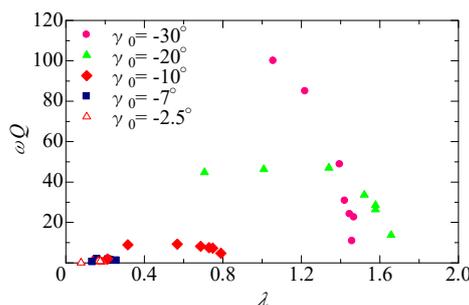


図 13 周速比に対する軸パワー

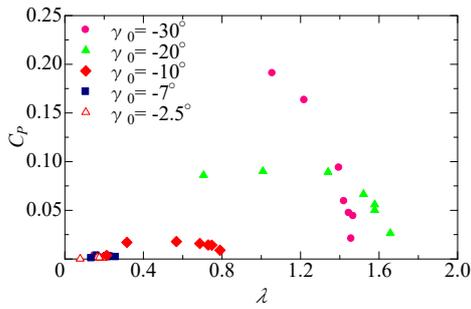


図 14 周速比に対するパワー係数

(4) 第 2 回海上曳航実験

平成 28 年 7 月に第 1 回と同じ栗島にて、漁船による浮体式水車の曳航実験を実施した。水車直径を 1m と大型化して全く新規に浮体式水車 (図 15) を製作した。水車モデルの諸元を表 2 に示す。本モデルは 3 枚翼でソリディティは第 1 回の 6 枚翼水車と同じ設定である。

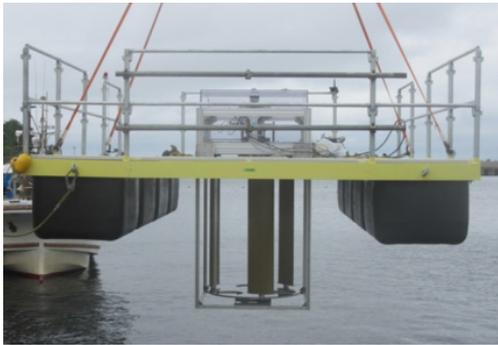


図 15 第 2 回曳航試験モデル

表 2 第 2 回海上試験水車モデル諸元

水車直径	1.0m
翼長さ	ストレート, 1.3m
翼材料	高強度アルミニウム合金 (一枚板)
翼枚数	3枚でソリディティ 0.294
翼断面	NACA 0018の円弧キャンパー型
ギア比 (水車一回転計)	1:2.5
ギア比 (回転計-発電機)	1:1.4
発電出力機器	可変負荷電力テスター (6~625Ω 可変, 手動)
発電機	同期型インナーロータコアレス 直径: 340mm 軸径: 15mm 電流定格: 4A 最大出力: AC三相300W

曳航時の水車パワーの時系列の典型的な結果を図 16 と 17 に水車の軸トルク, 発電機出力と流入流速の絶対値の時系列として示す。流入流速の絶対値とは 2 軸 (x および y 成分) で計測された流速の絶対値をとったという意味である。発電機出力は発電機からの電流出力と電圧出力の積で推定した。軸パワーは回転角速度とトルクの積によって算定した。それぞれの図において、パワーの時系

列が途中で不連続的に変化しているが、これは回路抵抗値を  $10\Omega$  から開始して、およそ 60 秒毎に  $7\Omega$ ,  $6\Omega$  と小さくしていったためである。先に述べたとおり、回路抵抗値が小さいほど、水車に対する発電機負荷は大きくなる。2 つの図から発電機負荷が大きくなると軸パワーおよび発電機出力の平均値が大きくなることが確認できる。本装置では  $6\Omega$  未満の設定ができなかったが、このことはむしろ水車の基本性能としてのパワーに余力を残していることを示唆している。

発電機効率ならびに主軸から 1.4 倍増速用プーリーを発電機に介していることで、パワー損失が発生するため、軸パワーよりも発電機出力の方が小さい。どの条件においても、この両者間の損失は 30% 強である。すなわち、発電機出力は軸パワーの 70% 弱といったところであった。

結果はいくつかある設置角度 (setting angle) のうちでも最もパワーが大きくなったものを示している。軸パワーでみれば、 $1.5 \text{ m/s}$  の流速において最大で  $50 \text{ W}$  近い値がみられる。また、それぞれの時系列において細かな振動がみられる。これは波浪と浮体動揺による水粒子速度変化によって、水車の回転数が変動するためであると推察される。回転数の時系列の一例を図 18 に示す。設置角度毎に回転数は異なるが、細かな時系列の振動周期は 5 秒~7 秒であり、船の前進速度を考慮しても波浪の範囲であり、波浪による影響が極めて敏感に水車の回転に現れることがわかる。時系列データの時々刻々の結果のうちの最大効率の点を抜き出したのが図 19 のパワー係数である。本水車は 6% 程度の水車効率しか得られなかった。

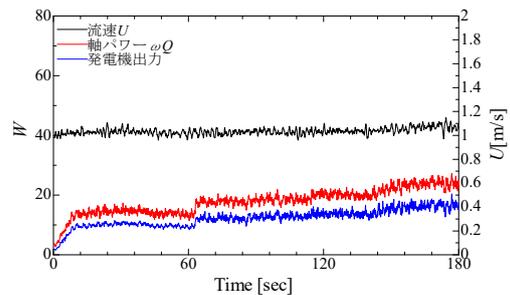


図 16 流速 1m/s の曳航時の軸パワーと出力の時系列

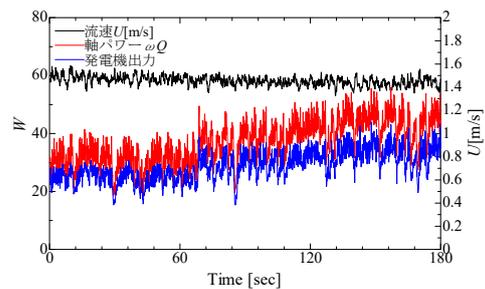


図 17 流速 1.5m/s の曳航時の軸パワーと出力の時系列

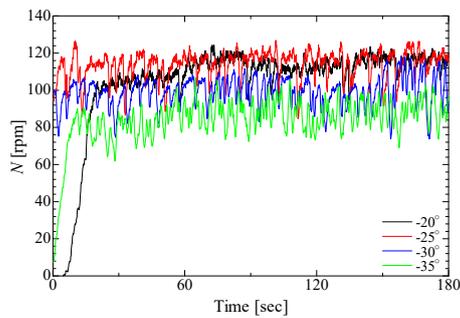


図 18 回転数 (増速後) の時系列

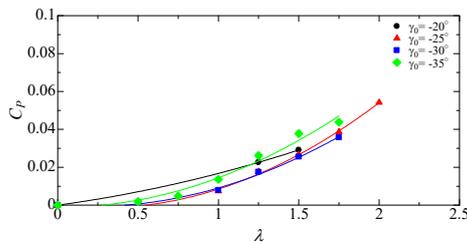


図 19 水車パワー係数

第2回曳航試験の水車モデルは種々の結果から水車パワーが余っていることが推察される。それは、発電機の回路抵抗を小さくして水車への発電機負荷を大きくしていても水車の回転数は下がり軸パワーも頭打ち状態にならなかったからである。ギア比をもっと大きくすることで発電機の回転数を上げることができたので、回転数設定に問題があったと思われる。ただし、水車の防水用のシールディングを含めた機械的パワー損失も非常に大きいことが予想されるので、ギア比を大きくできなかった。

本研究により、可変ピッチ垂直軸水車の有用性は実海域においても明らかであることを示すことができた。また、実際の水車における機械的パワー損失を考慮した場合に必要なトルクも十分に低流速から稼ぐことができることがわかった。今後の課題は、より高効率にするためのピッチ角の独立制御や水車本体の組立方法になると思われる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- ① 居駒知樹, 惠藤浩朗, 増田光一, 小口篤大: 垂直軸型可変ピッチ水車性能への流速変動の影響について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第24号, CD-ROM, 2017S-GS20-3, 2017. (査読無)
- ② 居駒知樹, 惠藤浩朗, 増田光一, 小口篤大: 浮体式垂直軸型可変ピッチ翼水車の性能に関する実海域曳航実験と水槽実験, 第26回海洋工学シンポジウム論文集, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, CD-ROM, OES26-077, 2017. (査読無)
- ③ 居駒知樹, 惠藤浩朗, 増田光一, 小口篤大: 垂直軸型可変ピッチ翼水車の性能に関する研究, 日本沿岸域学会研究討論会2016講演概要集, No.29, CD-ROM, 6-1, 2016.

- ④ Tomoki Ikoma, Koichi Masuda, Hiroaki Eto, Chang-Kyu Rheem and Osamu Enomoto, "Effects of Disturbance of Current Field on Power Characteristics of a Floating Type Pitch-Controlled VATM in a Real Sea," Proceedings of OMAE2016, OMAE2016-54693, CD-ROM, ASME, 2016. (査読有)
- ⑤ 居駒知樹, 増田光一, 惠藤浩朗, 榎本修: 浮体式垂直軸可変ピッチ水車の実海域での性能に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, Issue 2, pp.233-238, 2015. (査読有)
- ⑥ 居駒知樹, 増田光一, 惠藤浩朗, 榎本修: 実海域曳航試験による垂直軸可変ピッチ水車の性能と波浪影響の考察, 第25回海洋工学シンポジウム論文集, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, CD-ROM, OES25-102, 2015. (査読無)
- ⑦ 居駒知樹, 増田光一, 中澤那世留, 林昌奎, 惠藤浩朗: 垂直軸可変ピッチ翼水車のソリディティとピッチ制御角度が水車効率に与える影響, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70(2014), Issue 2, pp.91-96, 2014. (査読有)
- ⑧ Tomoki Ikoma, Koichi Masuda, Naseru Nakazawa, Chang-Kyu Rheem, Hiroyuki Eto and Takeshi Kinoshita, "Effects of the Number of Blades on Performances of a Variable-Pitch Type VAT," Grand Renewable Energy 2014 Proceedings, CD-ROM, O-Oc-5-4, 2014. (査読有)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

居駒 知樹 (IKOMA, Tomoki)  
日本大学・理工学部・教授  
研究者番号: 50302625

### (2) 研究分担者

二瓶 泰範 (NIHEI, Yasunori)  
大阪府立大学大学院・工学系研究科・准教授  
研究者番号: 00470055

### (3) 連携研究者

増田 光一 (MASUDA, Koichi)  
日本大学・理工学部・特任教授  
研究者番号: 10120552

大塚 文和 (OTSUKA, Fumikazu)  
日本大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 60513984

林 昌奎 (RHEEM, Chan-Kyu)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号: 70272515

惠藤 浩朗 (ETO, Hiroaki)  
日本大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 90360510