

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 4 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420187

研究課題名(和文) ジャイロを利用した浮体式洋上発電風車の制振に関する研究

研究課題名(英文) Vibration Control of Floating Wind Turbines Utilizing Gyroscopes

研究代表者

池田 隆 (IKEDA, TAKASHI)

広島大学・工学研究院・教授

研究者番号：50115523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、浮体式洋上風車に発生する振動について理論的、実験的に調べ、その制振対策を検討した。浮体の上に設置される風車では、浮体とブレードとタワーが連成するため、風や波浪の影響により、陸上用風車では起こらないような振動が発生する。例えば、浮体式風車が鉛直方向の正弦励振を受ける場合、ブレードの回転数と励振振動数に依存して、ブレードに不安定振動が発生することを示した。このような振動の制振対策として、高速に回転するロータを内蔵するジャイロ装置、振り子、液体容器などを利用することにより、風や波浪による浮体式洋上風車の振動を抑えることを提案し、それらの制振装置が浮体式洋上風車に有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：This research theoretically and experimentally investigated the vibrations in floating wind turbines and proposed the methods for suppressing those vibrations. Because wind turbines are installed on the floating bodies, the turbine blades and tower are coupled with the floating body and are subjected to winds and waves. As a result, the floating wind turbine encounters various kinds of vibrations which are not observed in wind turbines installed on the ground. For example, when the floating wind turbine is subjected to vertical, sinusoidal excitation due to waves, it is found that unstable vibrations may appear in the blades depending on the rotational speed of the blade and excitation frequency. In order to prevent these vibrations from occurring, the performances of vibration suppression devices, such as gyroscopes, pendulums and liquid dampers, have been examined. It was shown that these devices effectively suppressed vibrations of floating bodies in floating wind turbines.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御 ジャイロスコープ 浮体式洋上発電風車 制振 回転体の振動 風車ブレード

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内外の関連する研究の中での位置づけ

発電用風車に関する従来の研究では、発電効率を上げるためブレード断面の最適形状を求めることを目的とした流体力学的研究が主流であり、風車の振動に関する研究は極めて少ない。例えば、陸上用発電風車に発生する振動の発生原因について、二枚翼風車の不安定振動(生井, 1989; 近藤, 1988)、ティータ式ロータを有する風車実験機の振動特性(山根ら, 1990)、風車ブレード単体の振動解析(石田ら, 2008)などの研究が報告されているが、振動学的な観点からは十分に解明されていないのが現状である。浮体式洋上風車(図1参照)の制振対策に関する研究は、研究代表者らによる報告(池田ら, 2012)以外には見当たらない。

2011年3月11日の東日本大震災における福島第一原子力発電所の事故以来、特に風力発電が注目されている。なかでも浮体式洋上風力発電が有望視されている。その理由は、(a)海上では障害物がないため、安定した発電が可能である、(b)設置の有望な地域が多く存在する、(c)豊富な資源量、(d)陸上用発電風車の騒音問題からの回避可能、などの多くの長所をもつためである。そのため、浮体式洋上風力発電による将来の電力供給量は予想以上に伸び代が大きいと言われている。我が国では長崎県五島沖で実証試験が始められつつあり、平成27年度以降より浮体式洋上風力発電が本格的に展開される予定である。しかし、世界的に技術が確立していないため、浮体式洋上風車の振動対策を講じておくことが急務である。

(2) 着想に至った経緯

研究代表者らは、(a)回転機械の振動解析および実験解析、(b)液体容器内のスロッシングと構造物の連成振動、(c)複数の非線形動吸振器による局在化現象、(d)非線形系におけるランダム応答解析、などに関する研究に携わってきた。最近、浮体式洋上風車の制振装置のアイデアを検討している際、機械構造物の運動に対する安定化装置として、船舶、長大吊り橋、およびロープウェイなどに回転体のジャイロ作用が利用されてきたことにヒントを得て、高速に回転するロータを内蔵する装置(以下、ジャイロと呼ぶ)を浮体式洋上風車に適用することを思いついた。上記の回転機械の振動、動吸振器や液体容器による制振に関する研究成果を総合して、これまで、ジャイロによる制振効果について解析的に検討を始めてきたが、実験的にはその効果の検証は未確認である。

2. 研究の目的

化石燃料の枯渇問題やその消費に伴う環境問題が深刻化し、漸く最近になって再生可能な自然エネルギーの一つである風力による洋上発電の重要性が再認識されてきた。特

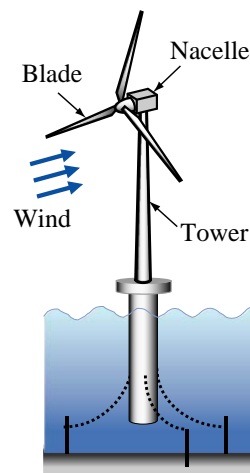


図1 浮体式洋上風車

に、我が国では浮体式洋上風車による発電が有望視されているが、その開発とその実用化は緒に就いたばかりである。浮体式洋上風車では、回転するブレードが風を受けると同時に、浮体が波浪に晒されるなど、さまざまな要因による振動の発生が予想され、その制振対策を講じることは極めて重要である。

本研究では、浮体式洋上風車に発生する振動を解析的に明らかにする。浮体の上に設置される風車では、浮体とブレードとタワーが複雑に連成するため、陸上用風車では起こらないような振動の発生が予測され、その発生メカニズムを明らかにする。このような振動対策として、ジャイロ、振子、液体容器などを利用することにより、風や波浪による浮体式洋上風車の振動を抑えることを提案し、その制振装置を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、以下の3つのステップで実施した。

(1) 第1段階では、陸上用発電風車の解析モデルに浮体を加えた系のモデリングを行い、発生する可能性のある振動を理論解析によって調べた。特に、浮体式洋上風車が波による鉛直励振を受ける場合、風車ブレードに発生する不安定振動について理論的、実験的に調べた。

(2) 第2段階では、浮体のみを振動を対象とし、ジャイロ、振子、液体容器を用いた制振装置による浮体の制振解析を行い、理論解析と数値シミュレーションによって制振性能を調べた。

(3) 第3段階では、各種の制振装置による浮体式洋上風車の制振解析を行うとともに、実験機を用いて浮体式洋上風車の制振に対する制振装置の有効性を確かめた。

4. 研究成果

以下の4項目に分けて、得られた研究成果をまとめる。

(1) 波による鉛直励振を受ける風車ブレードの不安定振動

図2に示すように、静止座標系 $O-xyz$ に対して、その上方に y_p だけ離れた点 P を原点とし、水平な剛性回転軸の中心軸方向に z' 軸を一致させた移動座標系 $P-x'y'z'$ を考える。剛体平板で仮定されたブレードは、点 P において剛性回転軸にピン支持され、ばね定数 k の回転ばねが取り付けられている。ブレードの回転速度を ω 、風車の回転軸に直交する鉛直面 xy からのブレードの傾きを θ とする。ブレードの支持点 P は、波の作用により $y_p = b_y \sin \Omega t$ で鉛直方向に励振されるとする。

図3は、理論解析による (ω, Ω) 平面上における不安定領域を示す。図中の陰影部は不安定領域を表す。運動方程式を直接数値積分することによって得られた時刻歴波形より、○、●印で示す位置で、それぞれ安定な減衰振動、不安定振動が観察された。各不安定領域の中央部を貫く曲線は、次式で与えられる。

$$\Omega = -n\omega + 2p \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (1)$$

ここに、 p はブレードの固有角振動数であり、 $p = \sqrt{3k + \omega^2}$ で与えられる。

図3の理論解析結果の妥当性を確認するため、図4に示すような理論解析モデルに対応した実験装置を製作し、実験を行った。

図5は、実験装置に対する (ω, Ω) 平面上の不安定領域を示す。陰影部は、理論解析による不安定領域を表す。実験では、ブレードの回転数 $\omega = 10, 15, 20$ rpm において、加振機によって振動数 Ω を変化させて鉛直方向に変位励振を与えた。その結果、赤い線分で表され

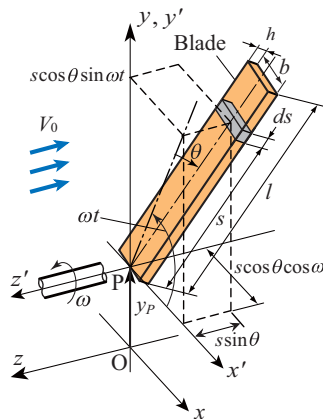


図2 風車ブレードの理論解析モデル

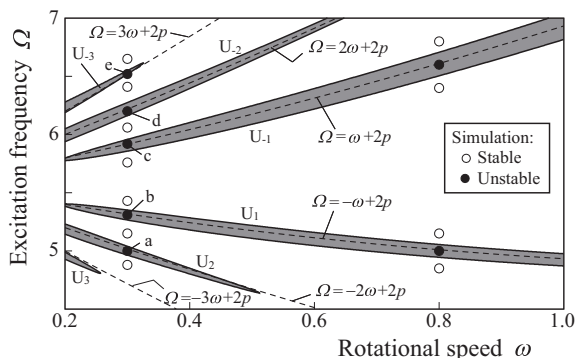
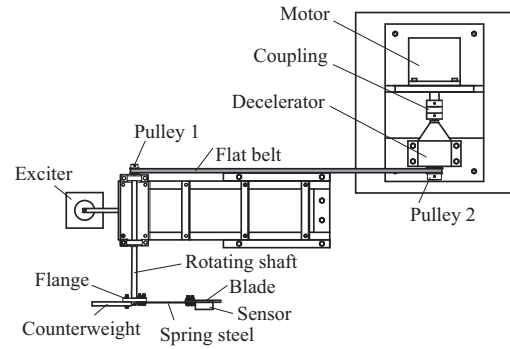
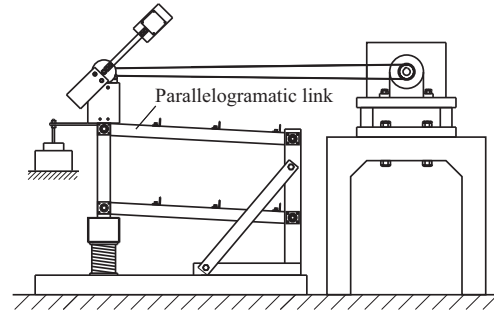


図3 理論解析による (ω, Ω) 平面上の不安定領域



(a) 平面図



(b) 正面図

図4 実験装置の概略

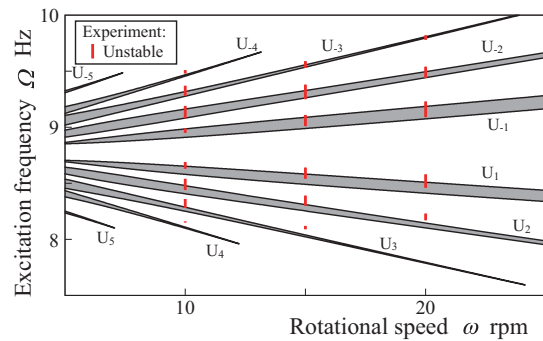
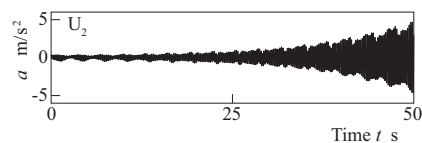
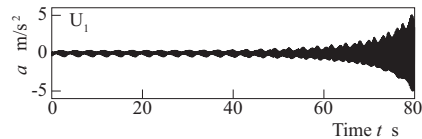


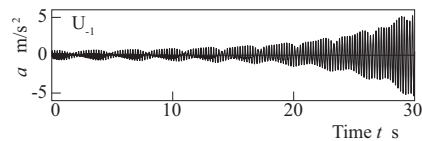
図5 実験による不安定領域



(a) $\Omega = 8.67$ Hz



(b) $\Omega = 8.96$ Hz



(c) $\Omega = 9.59$ Hz

図6 不安定振動の波形 (図5の $\omega = 20$ rpm)

た励振振動数範囲で不安定振動が発生した。理論解析結果は実験結果とほぼ一致していることがわかる。

図6(a)-(c)は、図5の $\omega=20$ rpmにおいて、それぞれ $\Omega=8.67, 8.96, 9.59$ Hzの場合に観察された不安定振動の波形を示す。各波形に含まれる主振動数は、図6(a)-(c)に対して、式(1)にそれぞれ $n=2, 1, -1$ を代入した関係式、すなわち $(\Omega+n\omega)/2$ を満たすことを確かめている。

(2) ジャイロによる風車土台の制振

図7は、洋上発電用風車の浮体に設置されたジャイロ制振装置の解析モデルを示す。浮体に取り付けられたO-xyz座標系を考え、x, y, z軸まわりの慣性モーメントをそれぞれ I_x, I_y, I_z とする。この浮体の鉛直方向の変位を z （ヒービング）、y, z軸回りの角変位をそれぞれ θ （ローリング）、 ψ （ヨーイング）とする。浮体に作用する波の形状を直線近似した水面の傾きが $\theta_w=b_0\cos\Omega t$ 、波による水面の鉛直変位が $z_w=b_2\sin\Omega t$ で表されると仮定する。波による浮体の振動を抑制するため、水平方向に回転軸をもつジャイロを浮体に取り付け、ジャイロの極慣性モーメントを I_p 、ジャイロの回転数を ω とする。

浮体の運動方程式を直接数値積分することによって、ヒービング z 、ローリング θ 、およびヨーイング ψ の最大振幅を計算した。その際、波による正弦励振はスイープ励振に置き換えて、上述の Ωt の代わりに $(1/2)\lambda t^2 + \Omega_0 t$ を用いると、瞬時的な励振振動数 $\Omega(t)$ は $\Omega(t) = \lambda t + \Omega_0$ で与えられる。その結果、図8に示す振幅応答曲線が得られた。実線と破線は、それぞれジャイロの回転数 ω が $\omega=0, 300$ の場合である。 $\omega=0$ の場合、図8(b)に示すように $\Omega=1$ 付近でローリング θ の振幅

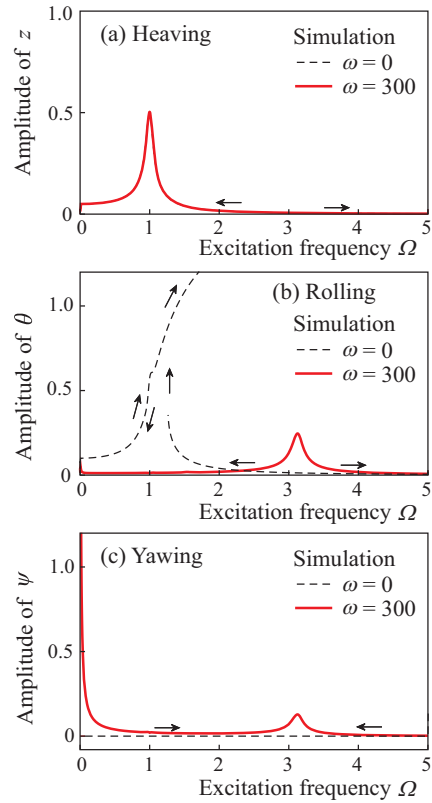


図8 土台のヒービング z 、ローリング θ 、およびヨーイング ψ の振幅応答曲線

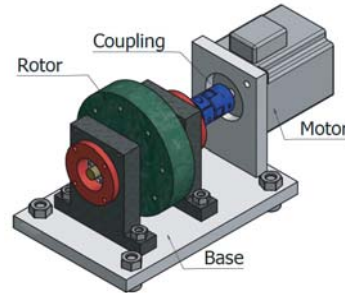


図9 ジャイロの実験装置

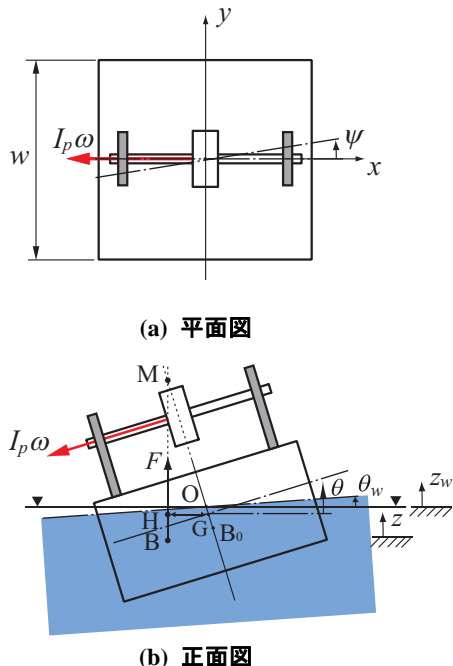


図7 浮体に設置されたジャイロの解析モデル

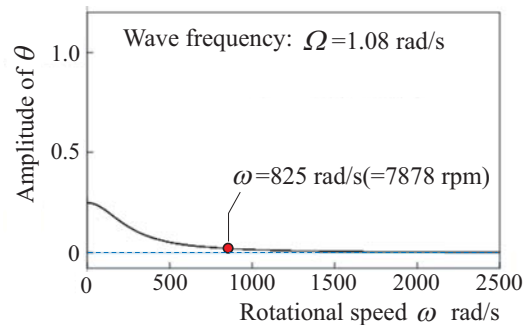


図10 ジャイロの回転数と浮体の振幅の関係

が非常に大きくなるが、 $\omega=300$ に大きく設定すると、 $\Omega=1$ 付近における振幅はほぼ零に抑制されることがわかる。

浮体の振動に対するジャイロの制振性能を調べるため、図9に示すようなジャイロ制振装置を製作し、実験を行った。

図10は、波による励振振動数が $\Omega=1.08$

rad/s の場合、ジャイロの回転数 ω を変化させた場合に予測される傾き振動の振幅を示す。 $\omega=0$ の場合の θ の振幅は比較的大きいが、 $\omega=825$ rad/s では振幅がほぼ零に抑制されることがわかる。

(3) 振子による風車土台の傾き振動の制振

図 11 は、両端がばねとダッシュポットで支持された剛体によって浮体をモデル化し、剛体に 2 つの振子を取り付けられた理論解析モデルを示す。剛体の右端には、波により上下方向の正弦励振力 $F_0 \cos \omega t$ が作用するものとする。浮体は上下運動 z_0 と傾き運動 θ_0 が連

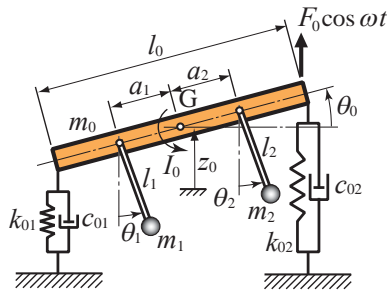


図 11 浮体に設置された 2 つの振子の解析モデル

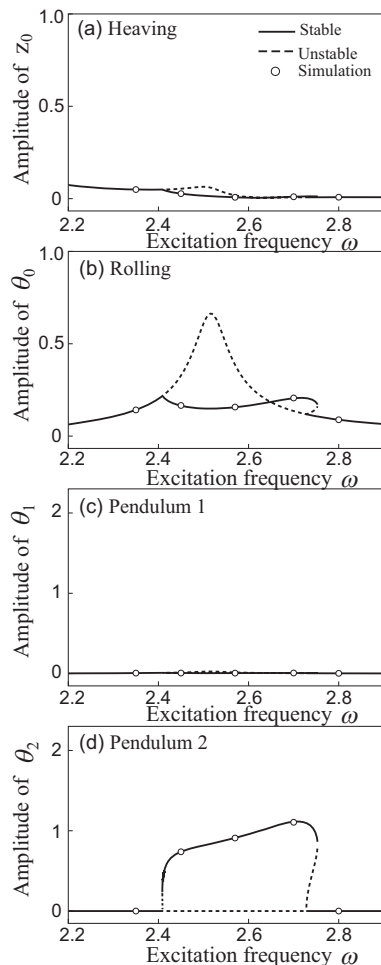


図 12 振幅応答振幅

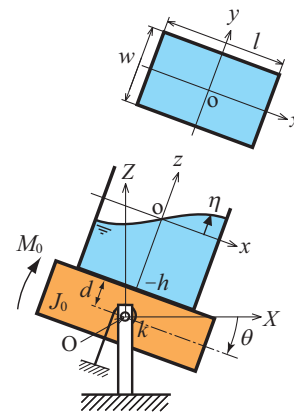


図 13 浮体に設置された液体容器の解析モデル

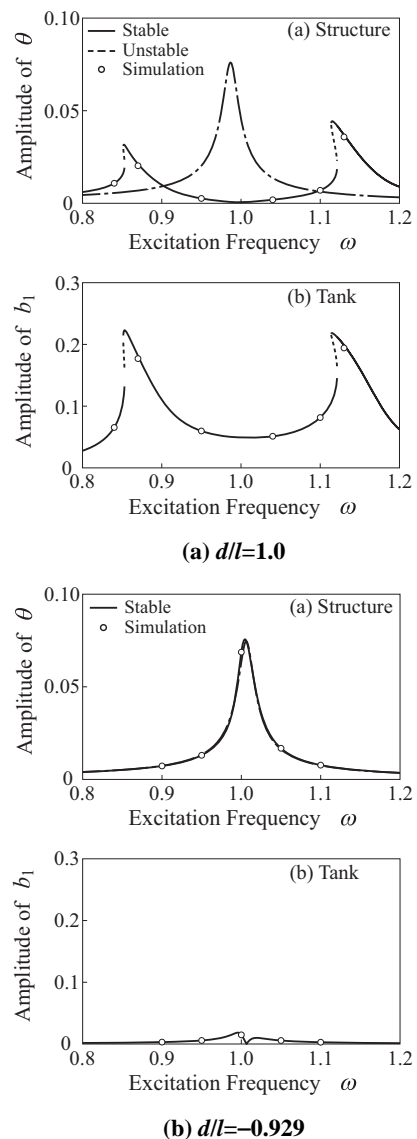


図 14 浮体の傾き振動の応答振幅、および液面の(1,0)モードの応答振幅

成する 2 自由度系であり、上下振動が優勢な固有角振動数を p_a 、傾き振動が優勢な固有角振動数を p_b とする。一方、各振子単体の固有角振動数を p_1, p_2 とする。本研究では、剛体の傾き振動を抑制するため、同調条件として、

$p_b=2p_2$ が満たされるように、系のパラメータの値を設定した。

図12(a)-(d)は、それぞれ剛体の上下振動 z_0 、傾き振動 θ 、振子1, 2の傾き θ_1, θ_2 についての振幅応答曲線を示す。実線は安定な振幅、破線は不安定な振幅を表す。振子の運動が拘束され、制振装置として機能しない場合には、剛体の傾き振動の振幅は $\omega=2.5$ 付近でピークを迎えるが、振子を制振装置として機能させた場合には、図12(b)に示すように振幅が小さく抑えられていることがわかる。このような振子の振動状態はオートパラメトリック共振として知られ、浮体の傾き振動の制振装置として利用できることがわかる。

(4)液体容器による風車土台の傾き振動の制振

図13は、浮体を1自由度の傾き振動系にモデル化し、長さ l 、液位 h の長方形断面の液体容器を浮体の回転中心から距離 d の位置に取り付けた理論解析モデルを示す。剛体には波による励振モーメント $M_0 = a \cos \omega t$ が作用し、剛体の傾き θ と液面変位 η が連成する。

図14は、浮体の傾き振動 θ の応答振幅曲線、および液面変位 η の(1,0)モードの応答振幅曲線を示す。図14(a), (b)では、容器の取付位置が $d/l=1.0, -0.929$ である。浮体の傾き振動 θ の一点鎖線は液体が凍った場合の振幅を表す。図14(a)の場合には浮体の共振ピークは液体が振動することにより抑制されている。しかし、図14(b)の場合には、液体が振動しないため、浮体の共振ピークは抑制されないことがわかる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計10件)

- ①中村 亮, 池田 隆, 原田祐志, 液体容器内のスロッシングによる傾き振動系の制振, 日本機械学会中国四国支部第54期総会・講演会, #1006 in CD-ROM (2 pages), 2017.3.7, 広島工業大学 (広島県広島市).
- ②佐々木大輔, 池田 隆, 原田祐志, 振子によるオートパラメトリック共振を利用した傾き振動系の制振, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2016, #127 in CD-ROM (12 pages), 2016.8.24, 山口大学 (山口県宇部市).
- ③宮澤侑吾, 池田 隆, 原田祐志, 石田幸男, 鉛直励振を受ける浮体式洋上発電風車ブレードの不安定振動, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2016, #110 in CD-ROM (9 pages), 2016.8.23, 山口大学 (山口県宇部市).
- ④宮澤侑吾, 池田 隆, 原田祐志, 石田幸男, 浮体式洋上発電風車ブレードの振動解析, 日本機械学会中国四国支部第54期総会・講演会, #613 in CD-ROM (2 pages), 2016.3.9, 愛媛大学 (愛媛県松山市).

- ⑤佐々木大輔, 池田 隆, 原田祐志, 石田幸男, 2つの振子による変異と傾きが連成する2自由度系の制振, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2015, #145 in CD-ROM (9 pages), 2015.8.27, 弘前大学 (青森県弘前市).
- ⑥原田祐志, 池田 隆, 石田幸男, 風と波を受ける浮体式洋上発電風車の振動解析, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2014, #229 in CD-ROM (10 pages), 2014.8.26, 上智大学 (東京都千代田区).
- ⑦Ikeda, T., Harata Y., Sasagawa, Y., Ishida, Y., Vibration suppression of wind turbine blades using tuned mass dampers, Proceedings of the ASME 2014 Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2014), Paper No. DETC2014-34336 in CD-ROM (8 pages), August 17-20, 2014, Buffalo, New York, USA, 査読有.
- ⑧Ikeda, T., Harata Y., Ishida, Y., Vibration suppression of wind turbine blades using pendulum-type dynamic absorbers, Proceedings of the Grand Renewable Energy 2014 Internal Conference and Exhibition, Paper No. O-Wd-4-1 in CD-ROM (4 pages), July 27-August 1, 2014, Tokyo, Japan, 査読有.
- ⑨池田 隆, 原田祐志, 成石久弥, 石田幸男, ジャイロスコープによる浮体構造物の制振解析, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2013, #619 in CD-ROM (10 pages), 2013.8.29, 九州産業大学 (福岡県福岡市).
- ⑩Ikeda, T., Harata Y., Takahashi, H., Ishida, Y., Localization phenomena of nonlinear vibrations in three-blade wind turbines, Proceedings of the ASME 2013 Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2013), Paper No. DETC2013-12773 in CD-ROM (11 pages), August 4-7, 2013, Portland, Oregon, USA, 査読有.

[図書] (計1件)

- ①石田幸男, 池田 隆, 回転体力学の基礎と制振 (共著), 2016, pp.1-238, コロナ社

6. 研究組織

(1)研究代表者

池田 隆 (IKEDA TAKASHI)

広島大学・工学研究院・教授

研究者番号: 50115523

(2)研究協力者

石田 幸男 (ISHIDA YUKIO)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・研究部・上席研究員

研究者番号: 10092991