

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17997

研究課題名(和文)ハイブリッド型洋上発電用風車の制振に関する研究

研究課題名(英文)A Study on Vibration Control in Hybrid Offshore Wind Turbines

研究代表者

原田 祐志 (Harata, Yuji)

広島大学・工学研究科・助教

研究者番号：00456691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、発電用陸上風車と浮体式洋上風車の振動解析、およびその制振性能について調べた。それぞれの風車のモデル化を行い、運動方程式を導出し、その系の固有振動数、共振曲線、時刻歴波形を求めた。まず、回転型動吸振器や液体ダンパなどの非線形動吸振器の制振性能について調べた。次に、二枚翼風車と浮体式風車のブレードについて、振幅が時間とともに増大する不安定振動が発生する領域について解析的、実験的に求めた。さらに、陸上風車ブレード単体について、ブレードの複数の回転速度領域に現れる共振ピークを一つの振り型動吸振器により、低減できることを解析的、実験的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, the vibrations of onshore and offshore wind turbines for electrical power generation and suppression of their vibrations are investigated. The wind turbines are modeled as lower degrees-of-freedom systems, the equations of motion of the systems are derived, and the natural frequencies, response curves and time histories are calculated. Vibration suppression of roller-type vibration absorbers for the horizontal motions of structures and tuned liquid dampers for roll motions of structures are investigated. Unstable regions, where the amplitude of vibration of the system increases with time, are determined analytically and experimentally in two-blade wind turbines and offshore wind turbine blades. It is shown that in onshore wind turbine blades resonant peaks appear at some rotational speeds of the blades and the peaks can be suppressed by using a single pendulum-type vibration absorber theoretically and experimentally.

研究分野：工学

キーワード：振動学 発電用風車 動吸振器 非線形振動 振動抑制

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

風力発電用風車における研究は、流体力学や土木工学の分野において盛んであるが、振動や制振の観点から捕らえた研究は少なく、近年非常に注目を集めてきている浮体式洋上風力発電に生じる振動現象に関する研究は、さらに少ない。例えば、風力発電用風車の振動現象に関する研究として、風車ブレードの非線形振動、ばね支持された弾性ブレードをもつ陸上風車の解析、弾性ブレードと弾性タワーが連成された5自由度系モデルを用いた風車の安定性解析などがある。一方、風車の制振に関する研究には、風車のブレードのピッチ角度をタワーの振幅に応じて調整するアクティブ制御、アクティブダンパーによるブレードの制振などがある。また、浮体式風力発電については、ブレードが風荷重を受けながら回転する場合の浮体の動揺、荒れた天候における風車の応答など、波浪と風による浮体式洋上風車の振動応答が調べられている。

(2) これまでの研究成果とその発展

申請者は、従来の風車倒壊事故のビデオをコマ送りして注意深く分析した結果、ブレードが共振で大きく振動することにより、まずブレードが折れ、次に折れたブレードがタワーに衝突し、風車が倒壊することに気付いた。そこで、風車ブレードの振動を抑制するため、風車ブレードに質量・ばね・ダッシュポットから成る動吸振器や振子型動吸振器を取り付け、その制振性能について調べた。しかし、その制振性能について実験的には十分に調べられていない。また、ブレード単体だけでなく風車タワーとの連成も考慮して、ブレードの振動抑制の効果がタワーの振動に与える影響についても調べる必要がある。さらに、陸上風車だけではなく、浮体式洋上風車に対する振動抑制についても明らかにする。加えて、風力発電に潮流発電を組み合わせた、ハイブリッド型洋上風車を提案し、その振動現象と制振方法について調べる。

2. 研究の目的

本研究では、まず非線形動吸振器の制振性能について調べ、その制振メカニズムを明らかにする。次に、陸上風車、浮体式洋上風車、およびその風車ブレード単体において生じる振動現象について解析的、実験的に明らかにする。さらに、それらの振動を抑制する動吸振器の開発を行う。最後に風力発電と潮流発電を組み合わせたハイブリッド型洋上風車に生じる振動現象の解明とその制振を目指す。

3. 研究の方法

陸上風車、洋上風車、および風車ブレード単体のモデル化を行い、運動方程式を導出し、

その系の固有振動数、共振曲線、時刻歴波形を求め、FFT解析を行い、それぞれの風車に現れる振動現象を明らかにする。さらに、風車に動吸振器を取り付け、運動方程式の導出、振動解析を行うことにより、動吸振器による風車の振動抑制の効果を明らかにする。特に(1)制振装置の開発、(2)風車の振動解析と制振、(3)浮体式風車の振動解析と制振、について行う。

4. 研究成果

4. 1. 制振装置の開発

4. 1. 1. 転動型動吸振器の開発

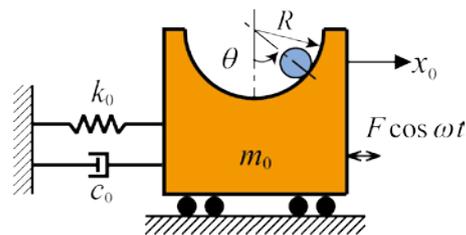


図1 転動型動吸振器を取付けた振動系

転動型動吸振器の制振性能を明らかにするため、1自由度系にモデル化した機械構造物に転動面と転動体から構成される転動型動吸振器を取り付けた場合(図1)の共振曲線を、理論解析および実験により求め、以下の結果を得た。

- 1) 構造物に一つの動吸振器を設置することにより、構造物の振幅を低く抑えられることができる(図2)。
- 2) 構造物と転動体の同調条件は、転動体の慣性モーメント、転動体と転動面の半径差、転動体の質量にのみ依存するため、これらの値を適切に定めることでより制振性能を向上させることができる。
- 3) 構造物の振動が大きくなる励振振動数では、転動体に作用する垂直抗力が負となる状態が現れ、転動体は転動面から離脱すること

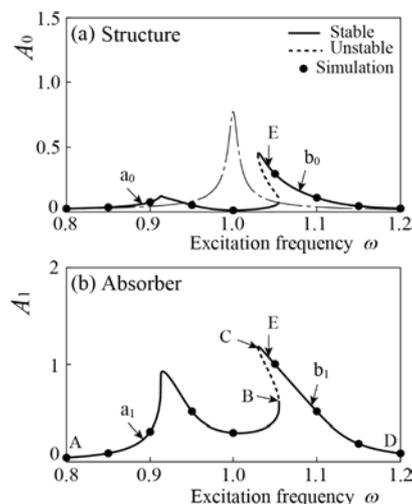


図2 転動型動吸振器による制振効果

が予測されるが、励振外力が比較的小さい場合は振動振幅の定常解に跳躍し、構造物の振動が抑制される可能性がある。

4) 励振外力が比較的大きい場合、転動面から転動体が離脱し、転動面への衝突を繰り返す挙動が現れる励振振動数区間が存在するため、制振性能が低下する恐れがある。

4. 1. 2. 液体容器による傾き振動の抑制

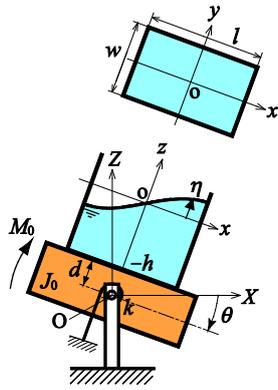


図3 液体容器を設置した傾き振動系

傾き励振を受ける構造物を一自由度系の傾き振動系にモデル化し、その共振を抑制するため、部分的に液体で満たされた長方形容器を構造物に取り付け（図3）、液体のスロッシングの非線形性を考慮して、液体容器による構造物の制振性能を理論的、実験的に調べ、以下の結果を得た。

- 1) 構造物の固有角振動数と液面スロッシングの1次モードの固有振動数の間に1:1の同調条件が満たされる場合、主系のピークを小さくできる（図4）。
- 2) 液体容器が構造物の回転中心の上側か下側かを問わず、回転中心から遠ざけて設置する方が、構造物の振動はより広い励振振動数範囲で抑制される。
- 3) 液体容器の設置位置によっては、液体が振動せず、構造物の振動を抑制できない場合がある。

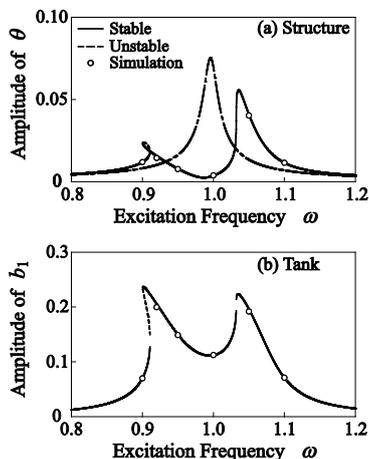


図4 液体ダンパによる制振効果

- 4) 強制トルクを大きくすると、構造物、液体のそれぞれに、超和差調波振動が発生する。
- 5) 実験により、理論解析結果は実験結果と定量的に一致することが確かめられ、理論解析結果の妥当性が一部確認された。

4. 2. 発電用風車に生じる振動と制振

4. 2. 1. 二枚翼風車に生じる不安定振動

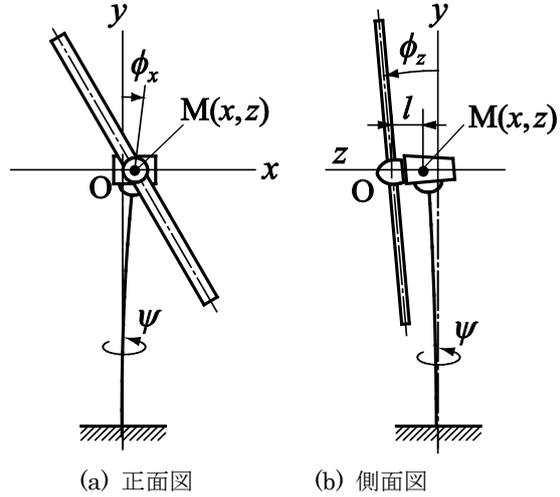


図5 二枚翼風車

二枚翼風車を剛体平板が回転軸に剛に取付けられた風車ロータとタワーの連成系の5自由度系（図5）にモデル化し、その安定性を解析的、実験的に調べ、以下の結果を得た。

- 1) 二枚翼の慣性モーメントの非対称性に起因する係数励振作用により、複数の回転速度範囲において不安定振動(A-G)が発生する（図6）。
- 2) 不安定振動には、優勢な振動数が ω （ブレードの回転速度）の1モードタイプと優勢な振動数が $\omega \pm \sigma$ の2モードタイプの二種類がある。
- 3) 実験において、複数の回転速度範囲において不安定振動が発生することが確認された。

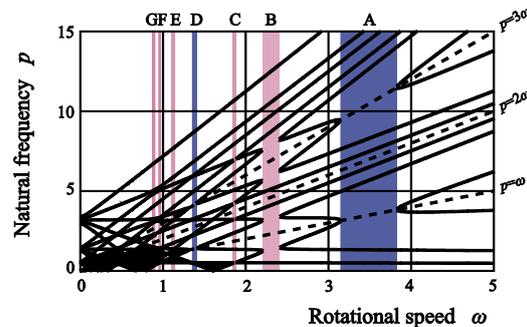


図6 固有振動数線図と不安定領域

4. 2. 2. 動吸振器による翼の制振

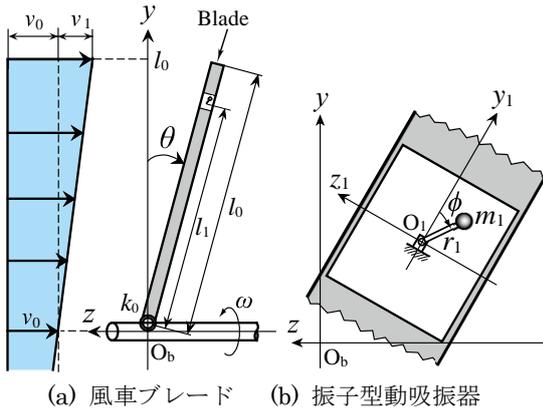


図7 振子型動吸振器を取付けた風車ブレード

風速が高さに依存して直線的に変化する風を受ける風車ブレード単体に、1つの振子型動吸振器を取り付けた系(図7)の振動について理論解析と実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 風車ブレードの係数励振作用と強制外力の相乗効果により、風車ブレードには複数の回転速度において各種の振動数成分を含む振動ピークが発生する。
- 2) 風車ブレードに1つの振子型動吸振器を取り付けることで複数の振動ピークが抑制されることが数値解析により明らかとなり、実験により理論解析結果の妥当性が確認された。

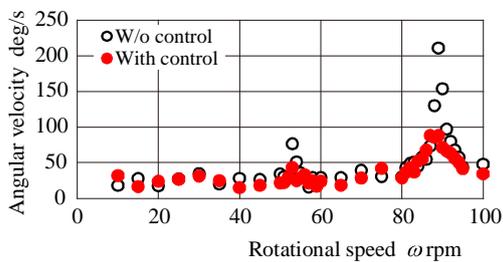


図8 振子型動吸振器の制振効果

4. 3. 浮体式風車の振動解析と制振

4. 3. 1. 鉛直励振を受ける浮体式風車ブレードの振動解析

浮体式洋上風車のブレード単体を対象とし、風車ブレードが一様な風、および、波による規則的な鉛直励振を受ける場合(図9(a))に、ブレードに生じる振動現象を理論的、実験的に調べ、以下の結論を得た。

- 1) 浮体式洋上風車のブレードは、ブレードの回転速度 ω と鉛直励振の振動数 Ω に関し、 ω 、 $\Omega+\omega$ 、 $\Omega-\omega$ の3種類の振動数を含む係数励振系である。
- 2) ブレードの回転速度 ω が大きくなるにつれて、ブレードの固有角振動数 p は増大する。
- 3) $p=(\Omega+n\omega)/2$ ($n=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) の関係式を満たす ω と Ω の付近において、 $(\Omega+n\omega)/2$ を優勢な振動数にもつ不安定振動が発生する(図

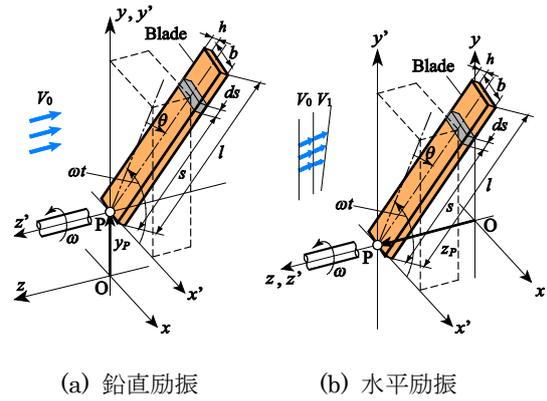


図9 浮体式風車のブレード

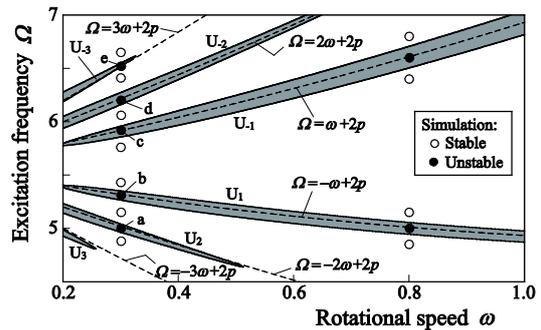


図10 浮体式風車の不安定領域

- 10).
- 4) 実験において、複数の不安定振動が発生する領域が現れることを確認した。

4. 3. 2. 水平励振を受ける浮体式風車ブレードの振動解析

浮体式風車のブレードに、高さにより変化する風と、波による水平励振が作用する場合(図9(b))について理論解析を行い、以下の結論を得た。

- (1) ブレードの回転と波の励振作用により、ブレードには各種の振動数成分を含む振動が発生する。
- (2) ブレードの回転速度 ω 、波の励振振動数 Ω 、および系の固有角振動数 p の間に、 $\Omega+n\omega=p$ の関係が満たされる付近に共振ピークが現れる(図11)。

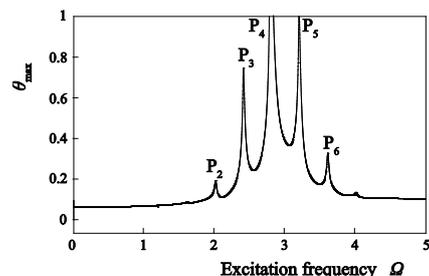


図11 水平励振を受ける風車ブレードの共振曲線

4. 3. 3. 振り型動吸振器を用いた浮体式風車土台の制振

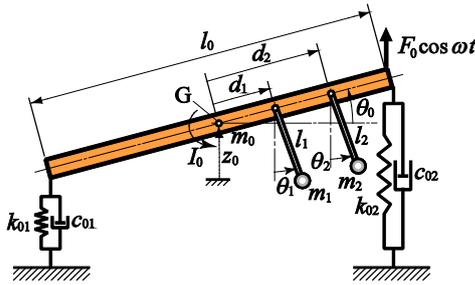


図 1 2 振り型動吸振器が設置された浮体構造物

鉛直・傾き運動が連成する系に 2 つの振子を取り付けられた場合 (図 1 2) について、オートパラメトリック共振を利用した振り型動吸振器による制振性能について理論的に調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 鉛直・傾き運動が連成する系の振動は、その優勢に現れる振動方向成分に 2 つの振子を同調させることにより、主系に現れる鉛直・傾き振動の共振を同時に抑制できる。
- (2) 二つの振子の取付位置を主系の回転中心に対して左右対称に変更する場合、この系の

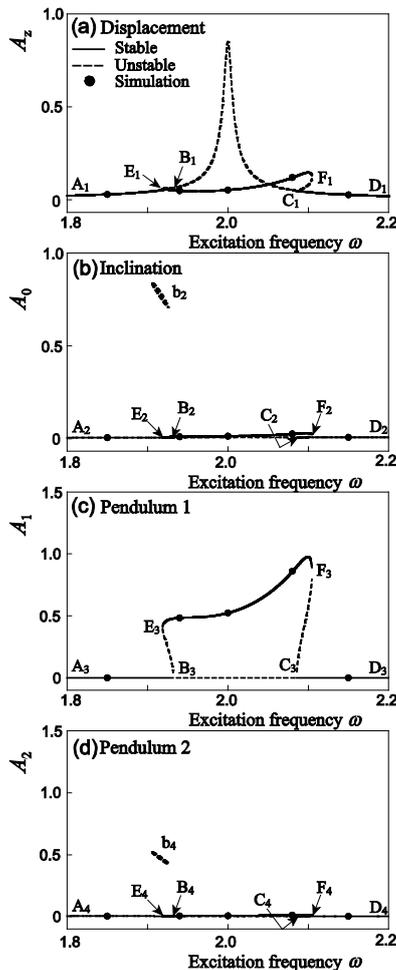


図 1 3 振り型動吸振器の制振効果

固有角振動数は、取付位置を変更する前の系と同一である。しかし、振子の取付け位置により制振性能が変化する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 9 件)

- ① 谷尾総一郎, 原田祐志, 池田隆, 石田幸男, “振り型動吸振器を用いた風車ブレードの制振解析,” 日本機械学会中国四国支部第 56 期総会・講演会, #1002, 徳島, 2018.3.
- ② 立田典久, 原田祐志, 池田隆, “水平励振による浮体式風車ブレードの振動解析,” 日本機械学会中国四国支部第 56 期総会・講演会, #1003, 徳島, 2018.3.
- ③ Takashi Ikeda, Yuji Harata, Ryo Nakamura, “Suppression of structure’s roll motion using a tuned liquid damper,” Proceedings of International Conference on Engineering Vibration, 53, Sofia, Bulgaria, Sep. 4-7, 2017 (査読有)。
- ④ 龍田康佑, 池田隆, 原田祐志, “垂直抗力を考慮した円柱型動吸振器の制振特性,” 日本機械学会中国四国支部第 55 期総会・講演会, # 1004, 広島, 2017.3.
- ⑤ 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 55 期総会・講演会, # 1006, 広島, 2017.3.
- ⑥ 宮澤侑吾, 池田隆, 原田祐志, “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,” Dynamics & Design Conference 2016, #110, 山口, 2016. 8.
- ⑦ 佐々木大輔, 池田隆, 原田祐志, “2 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,” Dynamics & Design Conference 2016, #127, 山口, 2016. 8.
- ⑧ 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, 愛媛, 2016.3.
- ⑨ 龍田康佑, 池田隆, 原田祐志, “転動体による 1 自由度構造物の制振,” 日本機械学会中国四国支部第 54 期総会・講演会, # 614, 愛媛, 2016.3.

(1) 研究代表者

原田 祐志 (HARATA YUJI)
 広島大学・工学研究院・助教
 研究者番号: 00456691

(2) 研究協力者

- ・池田 隆 (IKEDA TAKASHI)
 広島大学・工学研究院・教授
- ・石田 幸男 (ISHIDA YUKIO)
 名古屋大学・工学研究科・名誉教授