

令和 2 年 4 月 30 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06229

研究課題名(和文) 浮体式洋上発電風車の振動と制振に関する研究

研究課題名(英文) Vibrations and Their Control in Floating Offshore Wind Turbines

研究代表者

池田 隆 (IKEDA, Takashi)

広島大学・工学研究科・名誉教授

研究者番号：50115523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、浮体式洋上発電風車に発生する振動について理論的、実験的に調べるとともに、その制振法を提案した。波浪により風車プラットフォーム(土台)に上下運動や水平運動が生じるため、ブレードにはフラップ方向またはコード方向に係数励振振動が発生することを示した。また、タワーと風車ブレードが連成する場合には、ブレードに作用する非線形モーメントに起因して、3枚のブレードが異なる振幅で振動する局在化現象が発生することを示し、その発生原因は、複数の振動モードが同時に発生するためであることを明らかにした。制振対策としては、液体ダンパーや振り型動吸振器がそれぞれ土台やブレードの制振に有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

浮体式洋上風車のブレードには、回転中に加わる重力の作用が周期的に変動し、かつ波浪による上下運動が作用するため、複雑な振動が発生する可能性が示されたことは学術的意義が大きい。また、風車プラットフォームやブレードの振動の制振対策として、液体ダンパーや振り型動吸振器が有効であることが示されたことは、今後、多くの浮体式洋上風車が導入されることが予想されることを考えると、信頼性・安全性の高い風車の開発、および国際的産業競争力の強化に貢献することができ、社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：This research theoretically and experimentally investigated the vibrations of floating offshore wind turbines and proposed some ideas of their control. In the blades of such wind turbines, parametrically excited vibrations might appear in the flapwise or chordwise direction because the platforms were subjected to vertical or horizontal motion due to ocean waves. When the three blades and the tower were coupled with each other, localization phenomena might occur in the blades which vibrated in different amplitudes. It was interpreted by analyzing the vibrations in a nonlinear oscillator array that the localization phenomena occurred when multiple vibrational modes simultaneously appeared. It was shown that liquid dampers and pendulum-type dynamic absorbers were effective in order to suppress the vibrations of the platform and blades, respectively.

研究分野：機械力学

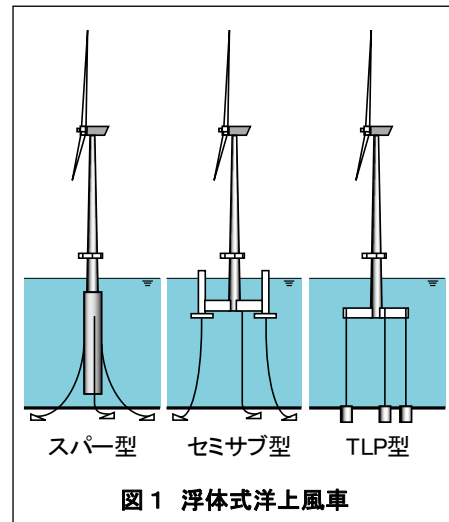
キーワード：振動工学 浮体式洋上発電風車 浮体式プラットフォーム 風車ブレード 制振 回転体の振動 係数
励振振動 局在化現象

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

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る。陸上用発電風車に発生する振動に関する研究はいくつか報告されているが、浮体式洋上発電風車の振動に関する研究は極めて少ない。浮体式洋上風車は、**図1**に示すように、大きく分けてスパー型、セミサブ型、TLP型（Tension Leg Platform）の3種類に分類される。スパー型よりセミサブ型とTLP型の方が波浪の影響を強く受けるため、主としてセミサブ型とTLP型の浮体構造物とタワーの動揺について調べられ、それらの振動を抑制するため、環状の液体ダンパーや動吸振器が用いられている。しかし、風車ブレードの振動とその制振に関する研究は見当たらず、風車ブレードをも含めた浮体式洋上風車に発生する振動を事前に把握し、その振動対策を講じて風車を安定な状態で稼働させることは、今後の洋上風力発電の導入拡大の上で極めて重要である。



2. 研究の目的

平成26年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」には、再生可能エネルギーの導入を最大限に加速させるため、浮体式洋上発電風車の実証研究の推進、および技術開発や安全性・信頼性・経済性の評価等の確立を行うことが盛り込まれている。しかし、その技術開発と実用化は緒に就いたばかりである。本研究では、浮体式洋上風車を対象とし、風車ブレードとタワーに発生が予想される振動を明らかにするとともに、それらの振動に対する制振法を提案し、洋上風力発電の導入拡大および国際的産業競争力の強化に資することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、以下の方法で実施した。[]内の数字は、下記の引用文献の番号を示す。

(1) 浮体式洋上風車のブレードの振動解析

- ① 波浪による鉛直励振を受けるブレードのフラップ方向の面外振動[1]： 浮体式洋上風車のブレード単体を対象とし、ブレードが一様な風と正弦的な波による鉛直励振を受ける場合に、ブレードのフラップ方向に生じる振動現象を理論的、実験的に調べた。**図2**に示すように、発電機の水平回転軸に回転ばねを介して剛体ブレードがピン支持され、その支持点 P が波により周期的に上下運動をする理論解析モデルを対象として、ブレードに生じる振動について理論解析を行った。対応する線形系において、不安定振動が発生するパラメータの値の範囲を解析的に求めた。**図3**に示す実験装置を製作し、実験により理論解析結果の妥当性を確認した。
- ② 波浪による鉛直励振を受けるブレードのコード方向の面内振動[2]： **図2**において、ブレードのコード方向に生じる面内振動について理論解析を行い、対応する線形系において不安定振動が発生するパラメータの値の範囲を求めた。
- ③ 波浪による水平励振を受けるブレードのパラメトリック振動[3]： **図2**におけるブレードの支持点 P が波により周期的に水平方向に励振され、高さに依存して風速が線形的に増加する風がブレードに作用する場合、運動方程式を直接数値積分することによって、ブレードの回転速度および波の振動数に対する応答曲線を求めることにより、共振ピークの発生位置およびその大きさを調べた。

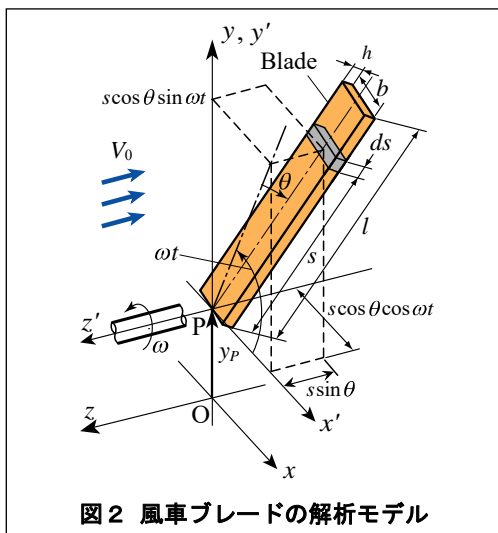


図2 風車ブレードの解析モデル

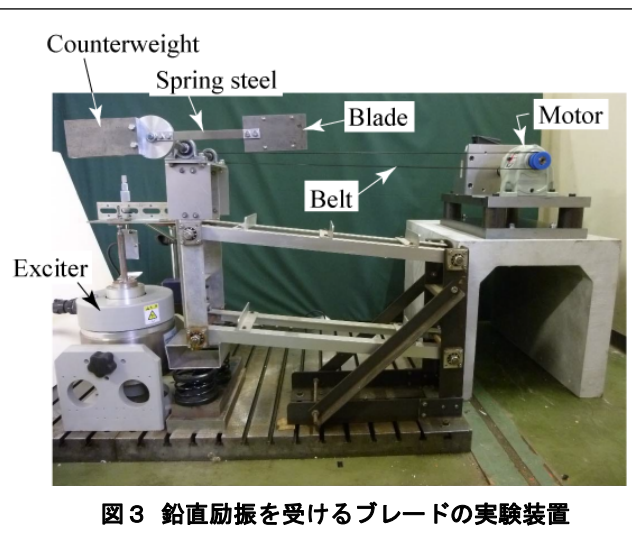


図3 鉛直励振を受けるブレードの実験装置

(2) 液体ダンパーによる土台の傾き振動の抑制[4]

図5に示すように、風車プラットフォームを、その回転中心の周りで傾き振動する土台と見なし、1自由度系の傾き振動系にモデル化した。その土台に波による正弦的な強制トルクが作用する場合、強制トルクの振動数が系の固有振動数に近くなると、土台は共振する。この共振を抑制するために土台に長方形断面の液体容器を取り付けた場合、周波数応答曲線を理論的に求めることによって、この液体ダンパーの制振性能を調べた。

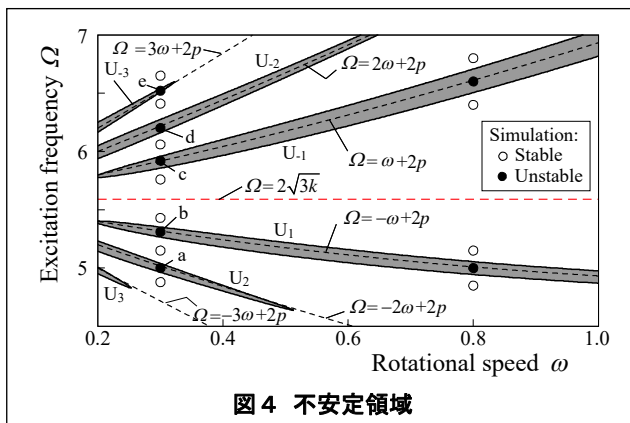


図4 不安定領域

(3) 振子型動吸振器によるブレードの制振[5]

図7に示すように、風速が高さに依存して直線的に増加する風を受ける風車ブレードの内部に、1つの振子型動吸振器を取り付けた系を対象とし、運動方程式をスイープ励振によって数値的に積分して時刻歴を計算し、それを基にして求めた周波数応答曲線から、その制振性能を調べた。また、図8に示す実験装置を製作し、実験的に振子型動吸振器の有効性を確認した。

4. 研究成果

上記3の研究方法に対応する3項目、および当初予定していなかった2項目に分けて、得られた研究成果を以下にまとめる。[]内の数字は、下記の引用文献の番号を示す。

(1) 浮体式洋上風車のブレードの振動解析

① 波浪による鉛直励振を受けるブレードのフラップ方向の面外振動[1]： 運動方程式には、重力、ブレードの回転、および波の上下運動に起因する3種類の振動数をもつ係数励振項が含まれるため、単一の係数励振項が含まれるマシュー方程式に用いられてきた従来の解析法を適用することができず、本研究では経験的近似解法を独自に開発した。図4は、ブレードの回転速度 ω と波の振動数 Ω に対して、 (ω, Ω) 平面内で不安定振動が発生する不安定領域(陰影部)を示す。ブレードの固有角振動数を p とすると、 $p = (\Omega + n\omega)/2$ ($n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$)が満たされる ω と Ω の付近に不安定領域が現れることがわかった。従って、陸上風車では発生しない不安定振動が浮体式風車では発生するので、この発生の危険性を避けるように浮体式風車を設計する必要がある。

② 波浪による鉛直励振を受けるブレードのコード方向の面内振動[2]： 上記①と同様の不安定振動が発生することに加え、 $p = \Omega + n\omega$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$)が満たされる ω と Ω の付近において共振が発生することを明らかにした。この種の振動は、ブレードに回転ムラを生じさせる原因となり、安定な電力供給に対して障害となる可能性がある。

③ 波浪による水平励振を受けるブレードのパラメトリック振動[3]： $p = \Omega + n\omega$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$)が満たされる ω と Ω の付近において共振ピークが現れることを明らかにした。

(2) 液体ダンパーによる土台の傾き振動の抑制[4]

図6は、土台の傾き振動と液面変位の1次モードについての共振曲線を示す。ここに、容器の設置位置は $d/l = 1.0$ (d : 土台の回転中心から容器底面までの距離, l : 容器の横幅)である。土台の回転中心から遠ざけて液体容器を設置する方が、土台の振動はより広い励振振動数範囲で抑制されることを明らかにした。ただし、液体容器を $d/l = -0.929$ 付近に設置すると、液面が振動せず、土台の振動を抑制できないので、液体ダンパーの設置位置に注意する必要がある。

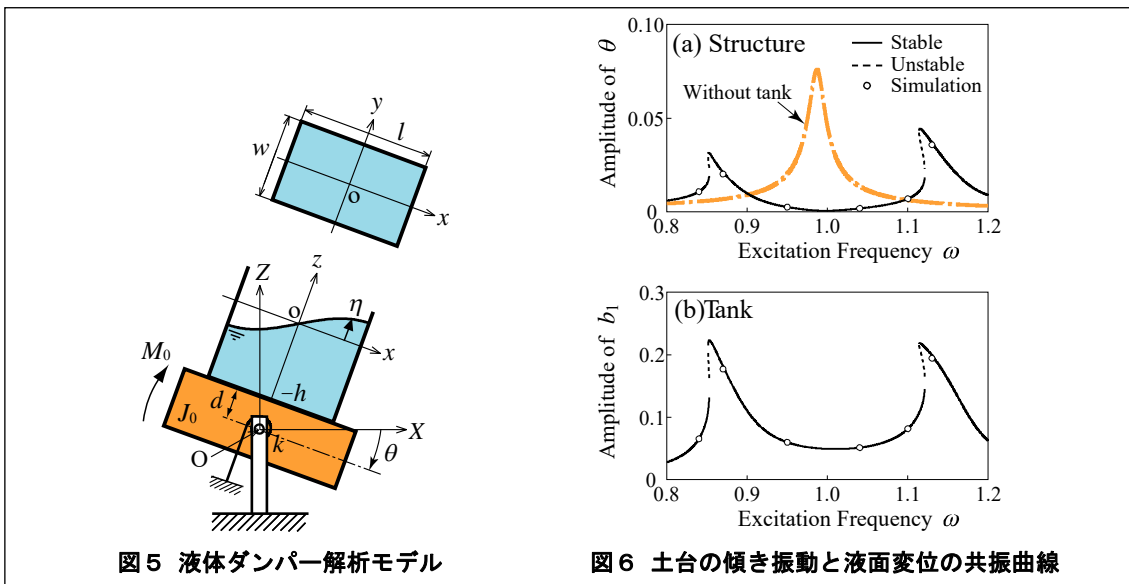


図5 液体ダンパー解析モデル

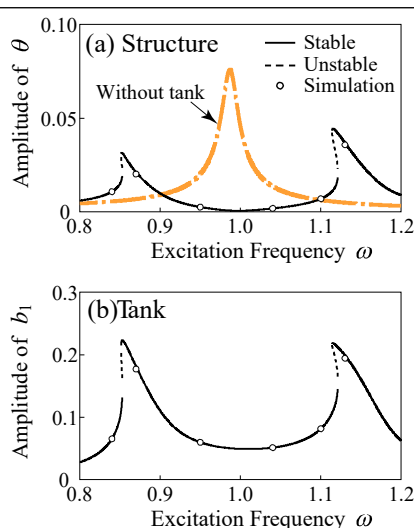


図6 土台の傾き振動と液面変位の共振曲線

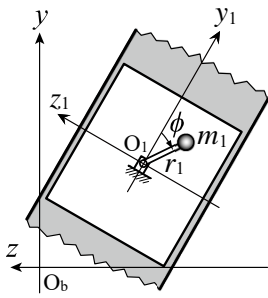


図7 ブレード内に設置した振り型動吸振器の解析モデル

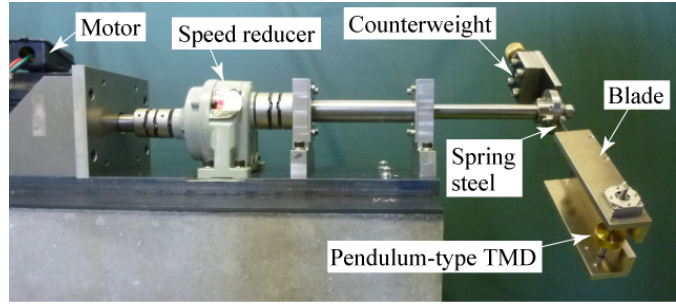


図8 ブレードに設置した振り型動吸振器の実験装置

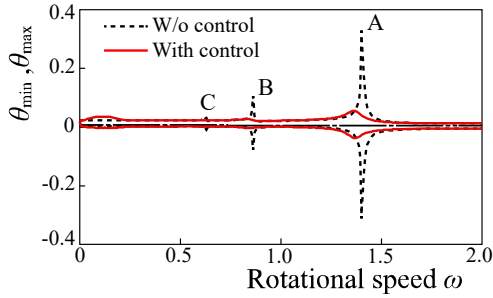


図9 数値シミュレーションによる応答曲線

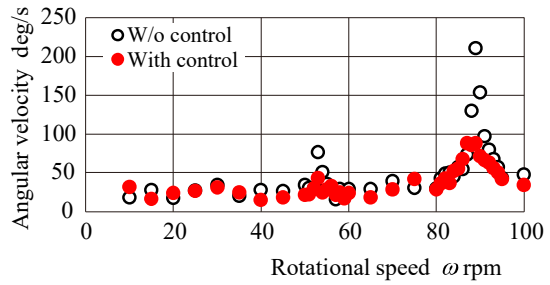


図10 実験結果（ブレードの加速度）

(3) 振り型動吸振器によるブレードの制振[5]

図9は、ブレードの回転速度 ω に対するブレードの傾き振動の振幅の最大値 θ_{max} と最小値 θ_{min} を求めた応答曲線である。動吸振器を取り付けない場合には、破線で示すように点A, B, Cの共振ピークが見られるが、動吸振器を取り付けると、赤い実線で示すようにそれぞれの共振ピークは低く抑えられることがわかる。図10は、ブレードの各回転速度におけるブレードの角加速度を計測した実験結果を示す。実験においても、動吸振器を取り付けない場合(○印)の共振ピークは、動吸振器を取り付けることにより低く抑えられる(●印)ことが観察された。

(4) タワーと連成するブレードに発生する局在化現象[6]

図11に示すように、一般に3枚翼風車が多く用いられている。風車タワーは比較的たわみやすく柔軟な構造物であり、タワーの先端部のナセル内には発電機が設置され、その水平回転軸に3枚のブレードが取り付けられた構造をもつ。このような風車では、タワーの振動とブレードの振動が互いに連成し、かつブレードには非線形復元モーメントが働くため、複雑な振動が発生する可能性がある。タワー先端部の水平2方向(x_0, z_0 方向), および3枚のブレードの傾き角 θ_i ($i=1, 2, 3$)についての運動方程式を導き、数値シミュレーションによって時刻歴を計算すると、図12に示すように、2つのブレードは大きい振幅で振動し、他の1つのブレードは小さい振幅で振動する、いわゆる局在化現象が発生することを明らかにした。別の振動パターンとして、1枚のブレードだけが大きく振動するような局在化現象も発生する。このような現象は当初予期していなかった結果であり、ブレードに局在化現象が発生した状態で風車を運転することは安全上の観点から避けなければならないことを指摘した。

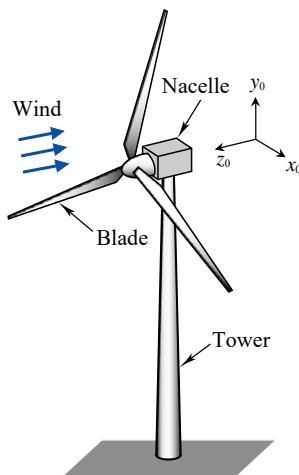


図11 3枚翼風車の解析モデル

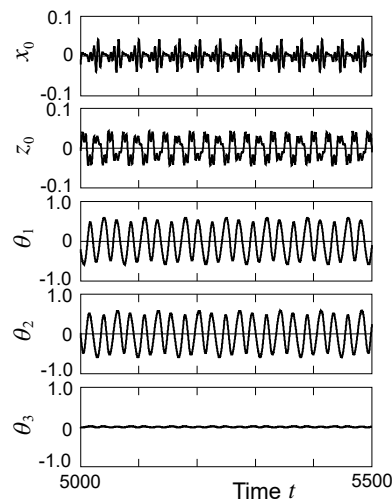
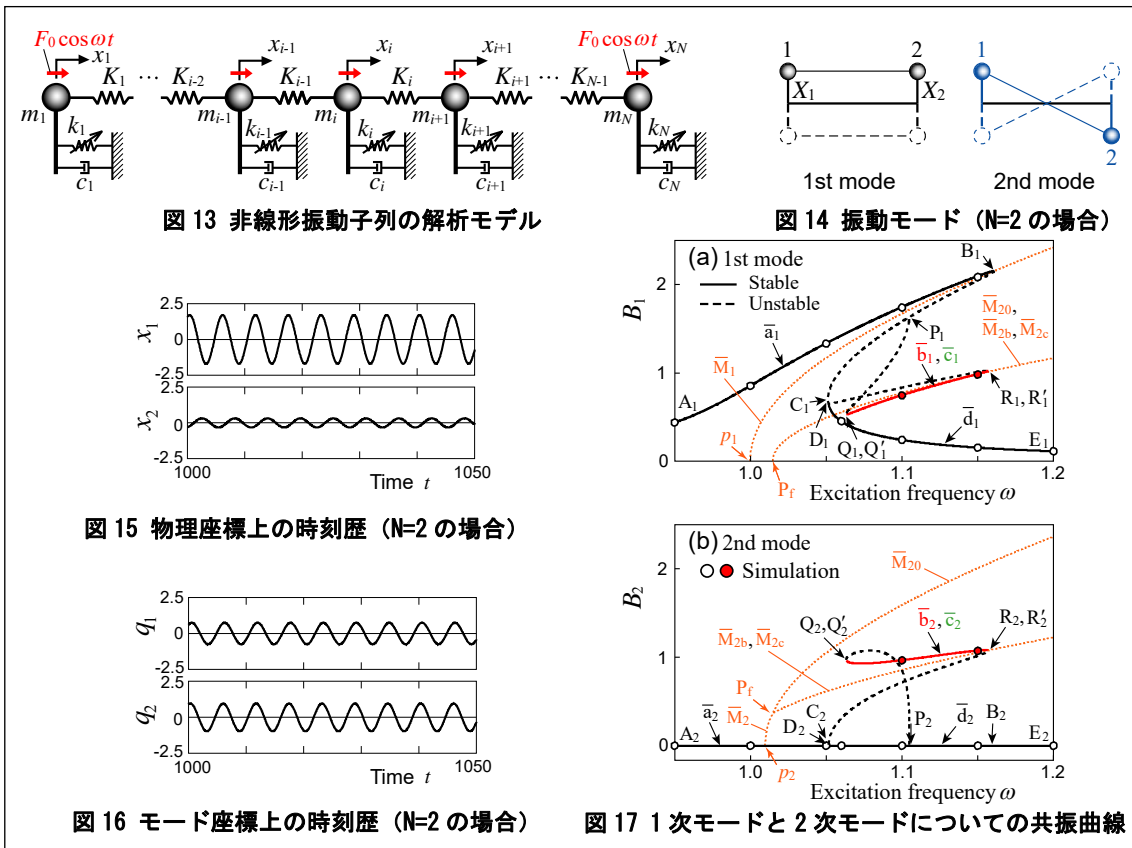


図12 タワーとブレードの数値シミュレーション波形



(5) モード解析による局在化現象の発生メカニズムの解明[7, 8]

上記(4)に述べた局在化現象がなぜ発生するかという本質的な理由を調べるため、 N 個の非線形振動子が弱いばねで連結された系 (図 13 を参照) を対象とし、振動子の変位 x_i ($i=1, 2, \dots, N$) とする物理座標で表された運動方程式をモード座標 q_r ($r=1, 2, \dots, N$) で表されたモード方程式に変換した。図 14 は、 $N=2$ の場合の 1 次モードと 2 次モードの形状を示す。図 15 の時刻歴に示すように、物理座標上では 2 つの振動子はそれぞれ異なる振幅で振動する局在化現象が発生する場合がある。この時刻歴に対応して、モード座標上では 1 次および 2 次モードが同時に発生する (図 16 を参照)。図 17 は、モード方程式において、1 次モードと 2 次モードについて理論的に求められた共振曲線を示す。図 16 の振動は、図 17 における赤い実線で示された曲線上で発生し、1 次モードと 2 次モードがほぼ同位相で発生していることがわかる。この振動状態について、図 14 の振動モードを考慮して 1 次モードと 2 次モードの応答を合成することにより、物理座標上では振動子 1 が振動子 2 よりも大きい振幅で振動することを説明することができる。局在化現象の発生メカニズムについての以上の説明は、任意の N の値に対しても有効である。従って、非線形振動子列に発生する局在化現象は、複数の振動モードが同時に現れる場合に、それらのモードが重ね合わされて発生する現象であることが本研究によって初めて明らかにされた。

<引用文献>

- [1] Ikeda, T., Harata, Y., Ishida, Y., Parametric resonances of floating wind turbine blades under vertical wave excitation, The 14th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC XIV), 10-13 September, 2018, Lisbon, Portugal
- [2] 原田祐志, 立田典久, 池田 隆, 鉛直励振を受ける浮体式洋上風車ブレードの面内振動, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2019, #116, 2019.8.27, 九州大学 (福岡県福岡市)
- [3] 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, 2018.3.7, 徳島大学 (徳島県徳島市)
- [4] Ikeda, T., Harata, Y., Nakamura, R., Suppression of structure's roll motion using a tuned liquid damper, International Conference on Engineering Vibration (ICoEV2017), 4-7 September 2017, Sofia, Bulgaria, 査読有
- [5] 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, 2018.3.7, 徳島大学 (徳島県徳島市)
- [6] Ikeda, T., Harata, Y., Ishida, Y., Parametric instability and localization of vibrations in three-blade wind turbines, ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, Vol. 13, No. 7, 2018, p. 071001
- [7] 原田祐志, 池田 隆, 複数の振動子列に生じる局在化現象のモード解析, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2019, #137, 2019.8.28, 九州大学 (福岡県福岡市)
- [8] Harata, Y., Ikeda, T., Modal analysis to interpret localization phenomena of harmonic oscillations in nonlinear oscillator arrays, Proceedings of the ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2019), Paper No. DETC2019-97780, August 18-21, 2019, Anaheim, CA, USA

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Ikeda, Y. Harata, Y. Ishida	4. 巻 13
2. 論文標題 Parametric instability and localization of vibrations in three-blade wind turbines	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Computational and Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 071001-1, -11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://dx.doi.org/10.1115/1.4039899	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 T. Ikeda, Y. Harata, Y. Miyazawa, Y. Ishida
2. 発表標題 Parametric resonances of floating wind turbine blades under vertical wave excitation
3. 学会等名 The 14th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC XIV), Lisbon in Portugal, 10-13 September 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ikeda, Y. Harata, R. Nakamura
2. 発表標題 Suppression of structure's roll motion using a tuned liquid damper
3. 学会等名 International Conference on Engineering Vibration (ICoEV2017), Sofia in Bulgaria, 4-7 September 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 谷尾総一郎, 原田祐志, 池田 隆, 石田幸男
2. 発表標題 振子型動吸振器を用いた風車ブレードの制振解析
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第56期総会・講演会, 徳島大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立田典久, 原田祐志, 池田 隆
2. 発表標題 水平励振による浮体式風車ブレードの振動解析
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第56期総会・講演会, 徳島大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Harata, Y., Ikeda, T.
2. 発表標題 Modal analysis to interpret localization phenomena of harmonic oscillations in nonlinear oscillator arrays
3. 学会等名 ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2019), August 18-21, 2019, Anaheim, CA, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田祐志, 立田典久, 池田 隆
2. 発表標題 鉛直励振を受ける浮体式洋上風車ブレードの面内振動
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics & Design Conference 2019, 九州大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田祐志, 池田 隆
2. 発表標題 複数の振動子列に生じる局在化現象のモード解析
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics & Design Conference 2019, 九州大学
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	原田 祐志 (HARATA Yuji) (00456691)	愛知工業大学・工学部・准教授 (33903)	
連携 研究者	石田 幸男 (ISHIDA Yukio) (10092991)	公益財団法人名古屋産業科学研究所・研究部・上席研究員 (73905)	