

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420190

研究課題名(和文)陸上風車および洋上風車(着床式と浮体式)の制振

研究課題名(英文)Vibration Suppression of Land Wind Turbines and Offshore (Fixed Foundation and Floating) Wind Turbines

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の対象となっている風車は、(A)タワーの基礎が固定された陸上風車と着床式風車、(B)風車が洋上に浮いている浮体式風車に大きく分けられる。前者については、回転する1枚ブレードの振動の応答曲線を求め、さらに遠心振り子式動吸振器あるいは、ばね・質量動吸振器によって制振できることを明らかにした。また、2枚ブレードの不安定振動についても調べた。

後者については浮体式洋上風車に発生する不安定振動を解析するとともに、2つの振り子によって浮体式構造物の振動を制振できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Wind turbines are classified into (A) land and offshore wind turbines whose bases are fixed in ground and (B) offshore floating wind turbines. In the former case, we obtained the resonance curve of a rotating blades, and showed that vibration of a rotating blade can be suppressed by a centrifugal pendulum vibration absorber and a tuned mass damper. Unstable vibrations of a two-blade wind turbine is investigated.

In the latter case, stable vibration due to wind force and unstable vibrations due to heaving motion made by sea wave were investigated. In addition, it was clarified that the motion can be suppressed by pendulums.

研究分野：機械力学

キーワード：着床式風車 浮体式風車 ブレード 振動 制振

## 1. 研究開始当初の背景

CO<sub>2</sub>排出による地球温暖化防止のため、クリーンで枯渇しない再生可能エネルギーが求められている。その代表的な再生可能エネルギー源は太陽光発電と風力発電である。この研究では、後者の風力発電に関わる様々な振動問題に注目する。現在、世界各国で、さまざまな形式の風車の建設が急増しており、それに伴い、低周波騒音など、振動と騒音問題が発生している。また、最も標準的で広く用いられているのは、3枚のブレードをもつ風車であるが、それらは発電効率の観点から、年々大型化している。しかし、ヨーロッパや中国などと異なり、毎年台風に襲われ、複雑で急峻な山の多い日本では、このような風車の倒壊事故も多い。風車に関するこれまでの研究は、発電効率を上げるため、ブレードの形状に関わる流体力学的研究が多く、風車の倒壊事故をもたらすブレードやタワーの振動の解析や制振の研究はあまり行われてこなかった。

最近、国土が狭く、低周波騒音などの住民被害が起きやすい日本では、洋上の浮体式風車が建設され始めたが、その振動や制振に関する研究はほとんど行われていない。

## 2. 研究の目的

高い位置で強風の影響を受けながら回転する長大なブレードをもち、それらが鉛直面内で回転している風車は、一般の回転機械とはかなり異なった状況で使われる。さらにタワーの基礎が地面に固定されたり、洋上の浮体上に建設されたりと様々な形態をもつ風車は、通常回転機械とは異なる様々な振動の原因を抱えているが、その振動特性もあまり明らかにされておらず、また制振対策はほとんど知られていない。

このような状況を鑑み、本研究においても、以下のように、いろいろな振動問題を取りあげ、解決することを目的とした。ここでは、分かりやすいように、研究Aを固定式風車(陸上風車と洋上着床風車)、研究Bを洋上浮体式風車に関するものとして分類する。なお、右上の小括弧の番号は文献番号を示す。

(A-1)<sup>(1)</sup> 水平な回転軸に取り付けられた1枚ブレードの振動を、振り子式動吸振器を用いて制振する方法を調べる。

(A-2)<sup>(2)</sup> 前記(A1)と類似な研究であるが、ここでは同調させたばね・質量式動吸振器を用いて制振する方法を調べる。

(A-3)<sup>(3)</sup> 風車の主流は3枚ブレードであるが、作りやすさと経済的な理由から、2枚ブレードも使われている。しかし、回転機械の立場からは、このように慣性モーメントに方向差をもつロータでは不安定振動が現れる危険性がある。そこで2枚ブレードの風車に不安定振動が現れるか否かを調べる。

(B-1)<sup>(4)</sup> 浮体式風車は波により上下に変位加振されるが、風車のように回転するブレードがこのように加振されるとき振動についてはこれまでほとんど研究されていないので、その振動特性を明らかにする。

(B-2)<sup>(5)</sup> 実際の浮体式風車は浮体が海に浮かんでおり、その上にタワーが立ち、上部に3枚のブレードがついて回転している。風車は波により上下運動と傾き運動を同時に行う。このようなより現実に近い浮体式風車に関して発生する振動を調べる。

(B-3)<sup>(6)</sup> 上記B1の研究をさらに発展させ、そこに発生する係数励振による不安定振動に関してさらに詳細に調べる。

(B-4)<sup>(7)</sup> 上記のB1~B3までは浮体式風車のブレード、タワー、浮体などに発生する振動を解析的に明らかにしてきたが、この研究では、それらの振動を抑える方法を検討する。

## 3. 研究の方法

(A-1)<sup>(1)</sup> 回転する剛性ブレードの先端に遠心振り子式動吸振器を取り付けた。そこに高さによって速度が変化する風を励振力として考えたモデルに関して、理論解析を行った。

(A-2)<sup>(2)</sup> 回転する剛性ブレードの先端に同調ばね・質量式動吸振器を取り付けた。そこに高さによって速度が変化する風を励振力として考えたモデルに関して、理論解析を行った。

(A-3)<sup>(3)</sup> 弾性変形するタワーの先端に細長い板状(直線)のブレードを取り付けたモデルを考えた。そのモデルで発生する共振現象と不安定振動を調べた。実験も行った。

(B-1)<sup>(4)</sup> 1枚のブレード(剛体)が鉛直平面内で水平軸まわり回転するモデルを考える。そのブレードは回転軸にばねで結合されている。このブレードに一樣な風と、波により鉛直方向に変位励振が作用するときのブレードの回転軸方向の振動に関して、不安定領域と共振曲線を解析的に明らかにする。

(B-2)<sup>(5)</sup> ブレードを3枚持ち、上下運動と傾き運動を行う浮体式風車の理論解析モデルを導き、ブレードの振動の応答曲線を求める。特に、波浪の振動数の影響と、ブレードの回転速度の影響を明らかにする。

(B-3)<sup>(6)</sup> 上下に励振される1枚のブレードに発生する不安定振動について、各パラメータ(波による鉛直変位、ブレードの回転ばねのばね定数など)の影響を詳細に調べるとともに、線形解析と非線形解析を行い、両者を比較する。

(B-4)<sup>(7)</sup> 簡単のため、浮体構造物の洋上モデルとして両端をばねで支持された剛体に2つの振り子を取り付けたモデルを考え、非線形性を考慮して理論解析を行うことによって共振曲線を求め、剛体の鉛直振動と

傾き振動に対する振り子の制振特性を明らかにする。

#### 4. 研究成果

(A-1) ①固有振動数線図と応答曲線を求めた。その結果、振り子を固定したとき、すなわち、遠心振り子式動吸振器が作用しないときは、係数励振作用により様々な種類の共振現象が現れるがわかった。つぎに遠心振り子式動吸振器を起動させると、これらの共振が抑えられることも明らかにした。

(A-2) ②同調ばね・質量式動吸振器を用いても遠心振り子式動吸振器と同様な効果があることを明らかにした。

(A-3) ③風車においても、いろいろな回転速度領域で共振現象が現れ、また不安定振動も現れることを明らかにできた。

(B-1) ④風車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成分を含む不安定振動が発生すること、また共振曲線はブレードの復元モーメントの非線形性により漸軟性を示し、ブレードの回転速度が大きくなるにつれてその性質が顕著になることが明らかとなった。

(B-2) ⑤ブレードの固有角振動数は回転速度に依存して変化するが、浮体の固有角振動数はほとんど変化しないこと、浮体の応答曲線は、非線形性のため漸硬形となること、ブレードの回転速度が2.0（無次元）となったとき、ブレードに係数励振振動が発生することなどを明らかにした。

(B-3) ⑥線形解析においては、固有角振動数、ブレードの回転速度、波の励振振動数がある特定の関係をもつと不安定振動がはっせいすること、波の振幅が大きいかほど不安定領域の幅が大きくなることを明らかにした。非線形解析では、応答曲線が漸硬形となることを明らかにした。

(B-4) ⑦2つの振り子に対して、浮体の上下振動と傾き振動の固有振動数の2倍の固有振動数になるように同調条件を設定した結果、オートパラメトリック共振により、構造物の振動を抑えることができることを示した。

#### 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 7 件)

(1) T. Ikeda, Y. Harata, and Y. Ishida, Vibration Suppression of Wind Turbine Blades Using Pendulum-Type Dynamic Absorbers, Proc. of Grand Renewable Energy, 2014, O-Wd-4-1, Tokyo.

(2) T. Ikeda, Y. Harata, Y. Sasagawa, and

Y. Ishida, Vibration Suppression of Wind Turbine Blades Using Tuned Mass Dampers, Proc. of the 2014 ASME DETC2014-34336, pp.1-8, 2014-8, Buffalo.

(3) T. Ikeda, Y. Harata, and Y. Ishida, Unstable Vibrations in Two-Bladed Wind Turbines, ASME IDETC 2017, submitted.

(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, 日本機械学会中国史国支部第 54 期総会・講演会講演論文集, No.613, 2016-3.

(5) 原田祐志, 池田隆, 石田幸男, 波と波浪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 and Design Conference 2014 CD-ROM 論文集, No.229, 2014-8.

(6) 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 and Design Conference 2016 CD-ROM, No.110, 2016-8.

(7) 小野祥太, 池田隆, 原田祐志, 石田幸男, 複数の遠心振り子によるジェフコットロータの制振, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015 CD-ROM, No.632, 2015-8.

[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：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

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

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 幸男 (ISHIDA, Yukio)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・その他の部局等・研究員

研究者番号：10092991

(2) 研究分担者

池田 隆 (IKEDA, Takashi)  
広島大学・工学研究科・教授  
研究者番号：50115523

(3) 研究分担者

長坂 今夫 (NAGASAKA, Imao)  
中部大学・工学部・教授  
研究者番号：60102779

(4) 連携研究者

林 農 (HAYASHI, Tsutomu)  
公益財団法人名古屋産業科学研究所・その  
他の部局等・研究員  
研究者番号：00093063