

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560258

研究課題名(和文) 発電用風車ブレードとタワーの振動解析と制振法の研究

研究課題名(英文) Vibration Analysis and Suppression of Wind Turbine Blades and Towers

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・その他部局等・研究員

研究者番号：10092991

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、風車のタワーとブレードの振動を解析するとともに、それらに対する各種の制振法を調べた。まず、つぎの2つの現象を解析的に調べた。(1)ブレードの慣性モーメントに差がある二枚翼を取り付けた風車の不安定振動、(2)三枚翼とタワーが連成する風車の共振現象とモードの局在化現象(各翼の振動振幅が異なる非線形現象)。

制振に関しては、つぎの2つの方法を試み、理論と数値シミュレーションにより、その効果を確認した。(1)円筒型同調液体ダンパーによる風車タワーの制振、(2)ジャイロスコープを用いた浮体式風車の制振

研究成果の概要(英文)：Vibrations of towers and blades of wind turbines were investigated and various methods were attempted to suppress them. From vibration analysis, the following two phenomena were clarified analytically. (1) Unstable vibrations of a wind turbine with a two-blade rotor which has an asymmetry of moment of inertia, and (2) Resonance phenomena and a mode localization of wind turbines.

Concerning vibration suppression, the following three methods were attempted. (1) Vibration suppression of a wind turbine tower using a cylindrical tuned liquid damper, (2) Vibration control of floating structures utilizing gyroscopes.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 機械力学・制御

キーワード：Wind turbine Wind turbine tower Floating wind turbine Dynamic Absorber Liquid damper Gyroscope Mode localization

1. 研究開始当初の背景

最近のエネルギー不足とともに、クリーンで枯渇しないエネルギー源として風力発電が急激な伸びをしている。一般に、風車の発電効率を向上させるためには、風車の寸法(ブレードの回る面積)を大きくするとともに、風速の速い高い位置を確保するため、タワーを長くしてブレードの位置を高くする必要がある。その結果、風車の寸法はますます大型化し、その結果、様々な振動問題あるいは事故が発生している。風車に関するこれまでの研究は発電効率を上げるため、たとえば翼の断面形状を最適化するなどの流体力学的研究がほとんどであり、振動学の立場からの研究は極めて少ない。

また、風車から発生する渦は低周波騒音を作り出し、住民とのトラブルが発生しているが、国土の狭い日本ではこれ以上、陸上に風車を設置することは不可能である。このようなことから、風車の建設は、今後は洋上へ向かう方向にある。また、海の上のほうが安定した風が得られることと、大型の風車を設置しやすいという利点もある。ただし、多くのヨーロッパの海と異なり、日本の近海は地形上急激に深くなっているため、着床式ではなく浮体式洋上風車の試験運転が始まっている。

2. 研究の目的

上述のように、風車はますます大型化する傾向にあり、そのことが風車の振動を起こしやすくしている。また浮体式風車では、風車がゆれやすく、風の影響、台風の影響などいろいろなことがその効率の低下あるいは安全性に影響を及ぼしやすくなっている。そこで本研究では、以下のような4つの問題に取り組んだ。ここでは、それらを研究A~Dと呼ぶことにする。

(1) 研究A: 風車のもっとも多く見られる形状は、3枚ブレードであるが、その構造の簡単さから、2枚ブレードの風車も、最近では比較的その建設は減ってきたが、なお使われている。この研究では、2枚ブレードとタワーからなる風車の振動を明らかにする。一般に、このような回転機械は非対称ロータとよばれ、ある回転速度範囲(不安定領域)で不安定振動が発生することが知られている。2枚ブレードの風車は極端にその非対称性が大きい場合であるが、この研究では、2枚ブレードとタワーから成る風車の振動特性を調る

(2) 研究B: 上記の研究Aでは、風車のモデル化にあたり線形近似し、解析は線形の範囲内で行っている。しかし、ブレードの復元力を精度よく表現すると、それは非線形特性をもつ。風車は独立に振動する3枚のブレードが、タワーによって結びついているシステムであると見ることもできる。一般にこのような系では、モードの局在化が現れやすいことが知られている。この研究では、非線形性

まで考慮したときの風車の振動を明らかにするとともに、モードの局在化の表れかたについて調べる。

(3) 研究C: 台風などが襲ったとき、タワーが倒壊した例がいくつか報告されている。また、台風以外の強風下でもタワーの振動が問題となっている。この研究では、最も簡便で、製作も簡単な同調液体ダンパーを風車のタワーの制振に適用し、その効果をしらべる。同調液体ダンパーは多くの高層ビルなどに設置され、地震などによる過渡的自由振動に対する制振効果は認められているが、ここでは風車の定常応答に対する効果を調べた。

(4) 研究D: 浮体式風車では、海に浮かんでいるため、新たな振動問題も発生すると予想される。陸上固定式あるいは洋上着床式の風車と比べより大きく振動すると予想される。また、風の力を受けて発電している状況では、タワーもかなり傾いている。風車を最大の発電効率で使うには、ブレードの回転面が常に風の方向に垂直でなければならない。風の圧力変動、波の影響があっても常に最適なタワーの傾きに保つため、また台風などの強風のもとで振動を小さくするため、ジャイロスコープを適用し、その制振効果を調べる。

3. 研究の方法

(1) 研究A: 2枚ブレードとタワーからなる風車を5自由度系でモデル化した。そのモデルで理論解析と数値シミュレーションを行う。ブレードは剛体とし、ばねとピンで支持されていると仮定する。まず、運動方程式を導き、それから固有振動数線図と応答曲線を理論的に計算する。つぎに数値シミュレーションによって発生する振動の時刻歴を求め、特徴を調べる。

(2) 研究B: 2枚あるいは3枚ブレードをもつ風車について、ブレードの復元力の非線形性を考慮して解析と数値シミュレーションを行った。また、2枚ブレードと3枚ブレードの違いについても検討する。ここでは、特に低速で発生する共振に注目した。

(3) 研究C: 液体同調ダンパーを3枚ブレードとタワーからなる風車のナセル部へ設置し、その系の定常振動応答を、ダンパーがある場合とない場合を調べ、比較検討し、液体のスロッシングが振動を抑える効果を調べた。

(4) 研究D: 最初に浮体をばねとダッシュポットで支持したモデルで解析を行った。そのモデルでは、ジャイロを縦軸とし、ロータを1す用いた場合と、2つ直列に用いた場合について、それらの制振効果を確かめた。

つぎに、浮体を液体へ浮かべたモデルを用いて解析を行った。ロータの軸は水へとした。このようなモデルで、減衰係数、ロータの質量と慣性モーメント、ロータの設置位置などのパラメータの値をいろいろ変えて応答曲線を求めた。

4. 研究成果

(1) 研究 A: この系は、連成の観点から、ブレードの回転面内の振動(2自由度系)とそれに直角方向の振動(3自由度系)に分かれることがわかった。後者の系では、慣性モーメントの非対称性に起因して最大5箇所回転速度領域で不安定振動が発生すること、不安定振動には2種類のタイプが存在することなどを見つけ、それらの振動が系のパラメータによってどのように変化するかを明らかとした。

(2) 研究 B: ブレードの係数励振作用と風圧による強制外力の相乗作用によって、回転速度の整数倍の振動数をもつ振動の共振が低回転速度領域でおきること、またそれらの振動には複数の振動数成分が含まれることがわかった。さらに、ブレードの寸法が同じ場合でも、ブレードの復元モーメントの非線形性に起因して、各ブレードが異なった振幅で振動するという局在化現象が発生することを見つけた。このことは、風車の振動をモニタリングする場合、すべて同じという前提で1枚のブレードの振動のみを監視するのではなく、すべてのブレードの振動を監視しなければならないことを意味する。

(3) 研究 C: 円筒型の同調液体ダンパーを用いることにより、風車タワーに発生する振動のうち、風向きに対して垂直な方向では、静不つりあいに起因する共振ピーク、および回転速度の3倍の振動数で起きる共振ピークを抑えることが可能であること、さらに風向き方向では、回転速度の3倍の振動数で起きる共振を抑えることが可能であることなどを明らかにした。

(4) 研究 D: 浮体のローリング、ヨーイング、ヒーピングに対するジャイロスコープの以下のような効果を明らかにできた。形の固有振動数のうち、ローリングに対する固有振動数はジャイロ作用を受け、ジャイロスコープの回転速度に依存して変化する。一方、ヒーピングとヨーイングに対する固有振動数は回転速度の影響を受けず、一定となる。ジャイロスコープを回転させることにより、共振曲線には2つのピークが現れる。ジャイロスコープの回転速度を上げると、共振のピークが波浪の振動数の高周波数側へ移り、共振曲線の右側のピークの大きさが低減される。また、制振効果が十分得られるためには、ジャイロスコープの質量を全体の10%程度にする必要がある。

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)

[学会発表](計10件)

(1) 池田隆、原田祐志、石田幸男、二枚翼風車タワーの不安定振動、日本機械学会 D&D 講演会、2011-9.

(2) 池田隆、原田祐志、高橋尚士、石田幸

男、円筒型同調液体ダンパーによる風車タワーの制振解析、日本機械学会 D&D 講演会、2011-9.

(3) 池田隆、原田祐志、住田淳、石田幸男、動吸振器による風車タワーの制振解析、日本機械学会中国四国支部第50期総会・講演会、No.125-1、2012-3、605.

(4) Takashi Ikeda、Yuji Harata、Yukio Ishida、Unstable Vibrations of a Wind Turbine Tower with Two Blades, American Society of Mechanical Engineers, DETC2012, 2012-8.

(5) 池田隆、原田祐志、石田幸男、ブレードとタワーの連成振動、日本機械学会 D&D 講演会、2012-9.

(6) 池田隆、原田祐志、石田幸男、ジャイロ作用を利用した浮体式構造物の制振解析ブレードとタワーの連成振動、日本機械学会 D&D 講演会、2012-9.

(7) Takashi Ikeda、Yuji Harata、Hisashi Takahashi、Yukio Ishida、Localization Phenomena of Nonlinear Vibrations in Three-Blade Wind Turbine, American Society of Mechanical Engineers, DETC2013, 2013-8.

(8) 池田隆、原田祐志、石田幸男、ジャイロ作用を利用した浮体式構造物の制振解析、日本機械学会 D&D 講演会、2012-9.

(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式構造物の制振解析、日本機械学会 D&D 講演会、2013-8.

(10) Takashi Ikeda、Yuji Harata、Yusuke Sasagawa、Yukio Ishida、Vibration Suppression of Wind Turbine Blades Using Tuned Mass Dampers, American Society of Mechanical Engineers, DETC2014, 2014-8.

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

井上 剛志 (INOUE, Tuyoshi)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号: 70273258

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

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

研究分担者

原田 祐志 (HARADA, Yuji)

広島大学・工学研究科・助教

研究者番号：00456691

(3) 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