

令和 2 年 9 月 14 日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06245

研究課題名(和文) 台風下における風車ブレードの振動解析と制振

研究課題名(英文) Analysis and Suppression of Vibrations of a Wind Turbine Blades in a Typhoon

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：台風通過時には風車システムの破損を防ぐためブレードの回転を止めるが、それでも強風のためブレードが折れる事故がたびたび発生している。その振動特性を明らかにし、防振方法を見つけるため、ブレード(1枚)とタワーから構成される2自由度系に周期的励振力が加わったときの励振力の振動数に対する振幅の変化を、実験と理論の両面から調べた。その結果、静止したブレードの角位置によって、ブレードの振動振幅が大きく異なることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然エネルギーを利用するため、世界中で発電用風車が増えている。発電の効率を高めるため、最近の風車はますます大型化しており、それに伴い建設費も増加している。一方、日本はヨーロッパと異なり、毎年多くの台風が通過する経路にあり、それによる風車の破損を防ぐことは、日本特有の問題として重要である。台風に襲われることはやむおえないこととしても、回転を止めたときのブレードの角位置によって振動振幅が異なることを明らかにできたことは、学術的・社会的意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：When a typhoon passes over a wind turbine system, the rotation of the turbine blades is stopped to avoid the damage of the system. However, it was often reported that blades were broken. In order to clarify the mechanism of vibrations and find a vibration suppression means, the response of the blade is investigated using a two-degree-of-freedom system composed of a blade and a tower theoretically and experimentally. As a result, it was clarified that the vibration amplitude of the blade varied remarkably depending its angular position.

研究分野：機械力学，回転体力学

キーワード：風車 弾性ブレード 弾性タワー 共振 振動モード

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

風力発電の増加とともに風車の破損事故も増えている。日本では最近の事故に限っても、2002年の宮古島、2013年の太鼓山風力発電所、ウィンドパーク笠取風力発電所、苫小牧グリーンヒルウィンドパーク、2015年の与那国島⁽¹⁾など事故が多発している。日本の事故の特徴としては、台風通過時の破損が多い。事故の発生メカニズムについてはいろいろ提案されているが、確定的なものはない。

2. 研究の目的

台風通過時に回転を止めた場合でも強風によってブレードが破損するが、振動工学の理論に基づき、特に振動モードに注目してその事故発生のメカニズムを明らかにし、防振方法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 理論モデルの構築のために実験を行う：実験装置を図1に示す。土台にタワーを模した板ばねを垂直に立てる。タワー先端にナセルに対応する質量を設け、そこに風車ブレードを模した鋼製の板ばねを3枚取り付ける。ブレードは任意の角度で固定できる。ばねを介してタワーを加振する。まず、1枚のブレードを水平に固定し、加振振動数を徐々に増加させて、タワー先端およびブレードの先端の振幅の変化を測定する。次に、加振振動数をブレードの固有振動数付近に固定し、ブレードの角度位置を変えながら振幅の変化を測定する。

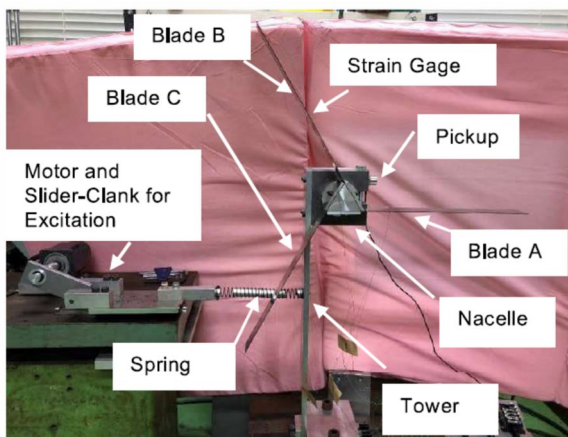


図1. 実験装置

(2) 理論モデルの構築し、理論解析を行う：実験で明らかとなった振動モードを近似できる理論モデルを作る。そのモデルを用いて実験条件と同様な解析を行い、モデルの精度を確認するとともに、実際の風車では明らかにすることが困難な状態も含めて、応答を明らかにし、疲労破壊する危険性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 加振周波数の変化に対する振幅の応答実験：

実験の結果の一例を図2に示す。図において横軸は加振振動数、縦軸はタワー先端およびブレードA~Cの先端の振幅である。この結果は、図1に示すようにブレードAが水平に、ブレードB、Cはそれぞれ±120°となっている場合のものである。図から、ブレードとタワーからなる系の固有振動数付近で共振を起こしていることがわかる。さらに、ブレードAは加振方向に対して平行で

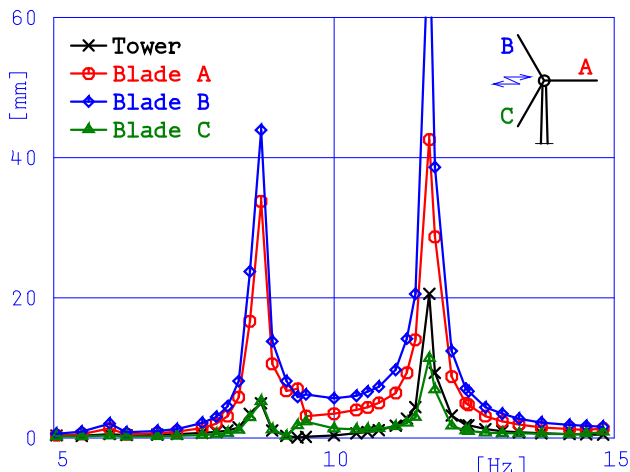


図2. 加振周波数に対する振幅変化

あるにもかかわらず大きく揺れていること、ブレード B, C は加振方向に対して上下対称であるにもかかわらず上向きのブレード B の振幅は大きく下向きのブレード C は小さくなっていることがわかる。

(2) ブレードの角位置の変化に対する振幅の応答実験：

加振振動数をブレードの固有振動数付近の 8.7[Hz] に固定し、ブレードの角度を変えながら振幅を測定したところ、図 3 のような結果を得た。図において横軸はブレード角で、0° で水平、

+90° で上に垂直、-90° で下に垂直である。縦軸はブレードの振幅である。図中の印は実験結果、実線・破線は後に述べる理論解析の結果である。図から、振幅は加振方向に対して上下対称とはならず、ブレードが上向きで振幅が大きく、下向きで小さくなっていることがわかる。

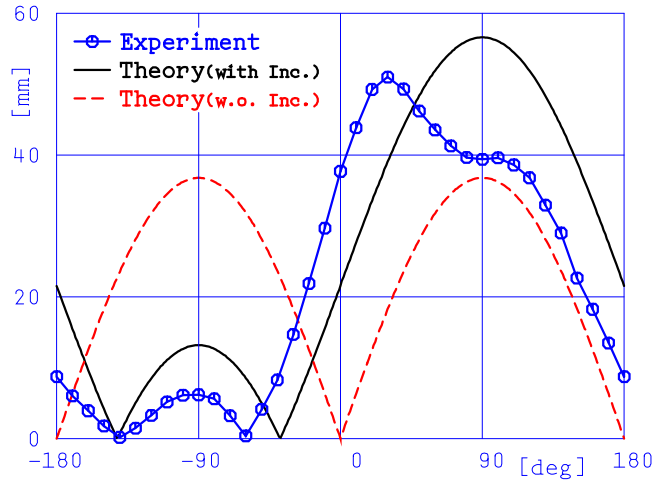


図 3 . ブレードの角位置に対する振幅の変化

(3) 運動方程式の導出

上記(1)の実験結果は、タワー先端が水平に移動するだけでなくわずかに傾くことが原因と考え、タワー先端の傾きを考慮した理論モデルを構築する。図 4 に理論モデルの概略を示す。垂直に立てられた長さ L のタワーの静止時の先端を原点 O とする。そこに長さ l のブレードが水平から角度 θ を持って取り付けられている (簡単のため、ブレードは 1 枚として説明する)。静止時のブレードに沿って s 軸をとり、 s 軸からのブレードのたわみを w とする。タワーが振動すると、タワー先端は水平方向に u だけ移動し、同時に τ だけ傾くものとする。タワーを片持ちはりとみなせば、先端の傾き τ はたわみの式より

$\tau = (-3/2)(u/L)$ となる。原点から s の位置のブレードの微小要素の座標は

$$x = u + s \cos(\theta + \tau) - w(s) \sin(\theta + \tau) \quad y = s \sin(\theta + \tau) + w(s) \cos(\theta + \tau) \quad (1)$$

となる。系の運動エネルギーおよびポテンシャルエネルギーは

$$T = \frac{1}{2} \int_0^l \rho A (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) ds + \frac{1}{2} M \dot{u}^2 \quad U = \frac{1}{2} \int_0^l EJ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \right)^2 ds + \frac{1}{2} K u^2 \quad (2)$$

となる。ここで ρ, A, E, J はブレードの密度、断面積、ヤング率、断面 2 次モーメントであり、 M, K はタワーの等価質量、等価ばね定数である。ここでブレードのたわみ $w(s)$ を片持ちはりの第 1 モードのモード関数 $\phi_1(s)$ を用いて

$$w(s) = X \phi_1(s) \quad (3)$$

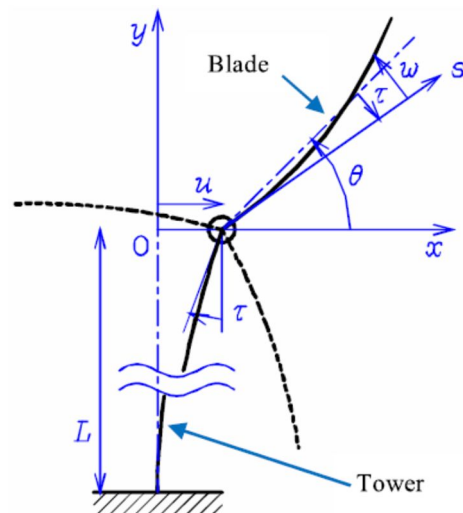


図 4 . 理論モデル

とする。式(3)を式(1)に代入し、それを式(2)に代入して積分を実行すれば、最終的に

$$T = \frac{1}{2} \{ \dot{u} \quad \dot{X} \} [M] \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{X} \end{Bmatrix} \quad U = \frac{1}{2} \{ u \quad X \} [K] \begin{Bmatrix} u \\ X \end{Bmatrix} \quad (4)$$

の形の式が得られ、ここから系の質量・剛性マトリックスが得られる。ただし τ は微小と仮定し、高次の微小量は省略した。

(4) 理論解析の結果

上述の理論を用いて計算を行った結果を図5に示す。図において横軸は加振振動数、縦軸はタワー先端およびブレードA~Cの先端の振幅である。図から、加振方向に平行なブレードAも大きく振動すること、上向きブレードBの振動は大きくなり、下向きブレードCの振動は小さくなることなど、実験結果の特徴と一致している。

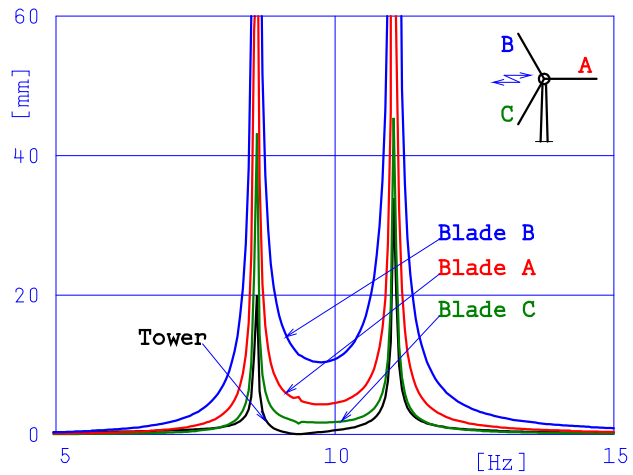


図5 振幅変化に関する理論解析結果

加振振動数を固定してブレードの角度を変化させたときの振幅の変化を、

図3中に実線・破線で示した。破線はタワー先端の傾きを考慮しない場合(without Inclination)の計算結果、実線は上述のタワー先端の傾きを考慮した理論(with inclination)に基づく計算結果である。先端の傾きを考慮しない場合は、ブレードが水平の時に振幅が0になり、振幅は上下対称である。これに対して先端の傾きを考慮した場合は、ブレードが上向きで振幅が大きく、下向きで小さくなっているなど、実験結果の特徴と一致している。このことから、実験結果の特徴はタワー先端の傾きの影響によるものであると結論づけられる。

<引用文献>

- (1) https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/newenergy_ha tsuden_wg/pdf/009_04_00.pdf

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 1件/うちオープンアクセス 1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 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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鳥居孝夫, 石田幸男
2. 発表標題 発電用風車ブレードとタワーの連成振動（タワー先端の傾きの影響）
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第69回総会・講演会
4. 発表年 2020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	鳥居 孝夫 (Torii Takao) (70188829)	静岡大学・工学部・教授 (13801)	
連携研究者	池田 隆 (Ikeda Takashi) (50115523)	広島大学・工学系研究院・名誉教授 (15401)	
連携研究者	林 農 (Hayashi Tsutomu) (00093063)	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 (73905)	