

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289146

研究課題名(和文)実風車運転時の風速と応答の同時測定に基づくブレード対風応答の高精度予測手法の確立

研究課題名(英文) Development of accurate wind-induced response analysis method for a wind turbine under operation based on simultaneous measurement of wind speed and blade tip response

研究代表者

木村 吉郎 (KIMURA, Kichiro)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：50242003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：風車の風応答解析の高精度化を目的として、実風車ブレードの先端の応答を、3次元運動解析ソフトを2台の高速度カメラで撮影した動画に用いて測定した。同時に、ドップラーライダーを用いて風車に作用する風速を高サンプリングで測定し、それを入力とした応答解析を、NRELが開発しているFASTを用いて実施した。対象は、駒井ハルテック富津工場内にあるKWT300である。キャリブレーションに風車自体のブレード先端を用いることにより、測定精度が向上した。しかしながら、ブレードに作用する変動空気力の空間相関が高い状況を模擬した解析を、想定していた方法では行えなかったことから、解析手法の高精度化は課題として残った。

研究成果の概要(英文)：In order to develop high accuracy analysis method for a wind turbine response under operation, blade tip responses were measured using 3 dimensional motion analysis software with motion pictures of two high speed cameras. At the same time, the approaching fluctuating wind speed was measured by a Doppler radar with relatively high sampling frequency. The response analysis was conducted using the wind speed as the input with FAST that is developed by NREL. The wind turbine used is KWT300 that is located in Futtu factory of KOMAIHALTEC Inc. The measurement accuracy of the tip displacement was improved by the calibration procedure where the blade tips of the still rotor were used. However, the high accuracy analysis method is still to be developed, because the higher space correlation of aerodynamic forces acting on the blade could not be analyzed by the planned procedure.

研究分野：風工学，構造工学

キーワード：発電用風車 応答解析 運動解析ソフトウェア 高速度カメラ ドップラーライダー 空間相関 変動空気力 変動風速

## 1. 研究開始当初の背景

(1) わが国でも風力発電の導入が精力的に進められている。しかし、主としてヨーロッパで開発が進められてきた大型風車を日本に設置する場合、台風による強風や、起伏の大きな地形中に設置されることにより生じる大きな風速変動の影響を適切に考慮した耐風設計を実施する必要がある。過去には不適切な耐風設計を原因とした風車の強風被害例も多かったが、2007年に土木学会より風力発電設備支持物構造設計指針・同解説が出され、今後はそれに基づいた設計が行われていくことにより、タワー(支柱)や基礎などの強風被害は低減していくと考えられる。

一方、強風時に大型風車のブレード(羽根)が破損する事故は後を絶たず、大きな問題となっている。ブレードが疲労破壊する場合や、ブレードが風により過大変形することによりタワーに衝突して破損するといった事故例があり、1枚のブレードの破損によりバランスが崩れ、風車全体の崩壊につながるなど、深刻な事故となる。こうした被害を防ぐには、風速の時間変動だけでなく、風速・風向や風速変動特性が風車ブレードの回転に伴って変化する影響も考慮する形で応答特性を明確に把握し、それに基づく耐風設計手法を確立することが必要である。

現行の風車ブレードの設計においても、風速が変動する自然風が作用することで生じる不規則振動について考慮されているが、ここではブレードのスパン方向に分布して作用する空気力を断面毎に分割して求める、Blade Element Momentum理論が用いられることが多い。しかし、場所によって異なる変動風速が作用する影響を正確に反映するためには、橋梁の不規則変動風に対する対風応答解析手法(=ガスト応答解析)におけるように、断面間の空気力の相関等を考慮した解析を行う必要がある。

(2) 実風車ブレードの応答測定は計測には多大な労力を必要とすることから多くは実施されておらず、予測手法の精度の確認は不十分である。近年、効率化を目指した風車の大型化が進んでおり、それに伴い、ブレード振動の影響はより大きくなり、設計に際してのその予測精度の重要性も増すため、高精度の予測手法が必要である。

## 2. 研究の目的

ドップラーライダーを用いて実風車に作用する変動風速を高いサンプリング周波数で測定する手法を開発し、そのデータを測定すると同時に、2台の高速度高解像度 CCD カメラを用いて撮影した画像を3次元運動解析することによって得られる実風車ブレードの応答を求める。この同時測定結果を、別途定式化する風車ブレードの変動風に対する応答解析に用いる空力アドミッタンスの同定に用いるとともに、複数の測定データを用い

て検証することにより、実風車のブレードの対風挙動を精度良く予測できる手法を確立する。

## 3. 研究の方法

(1) 現在開発中の実風車ブレードの応答計測手法の精度を、高解像度の CCD カメラを用いることで向上させて高次モードまでの応答を計測できるようにするとともに、ドップラーライダーのレーザを風車風上の狭い範囲に照射することで変動風速を数 Hz のサンプリングで計測する手法を開発する。同時に計測された変動風速と応答データを、長大橋のガスト応答解析を拡張する形で新たに定式化した、風車ブレードの変動風速に対する応答予測手法に用いられる補正関数である、空力アドミッタンスのパラメータ同定に用いる。同時計測を、異なる特性を持つ自然風に対して実施し、同定した空力アドミッタンスの適用性を検証することにより、精度の高い風車ブレードの応答予測手法を確立する。

(2) 研究対象とした風車は、(株)駒井ハルテックが所有するアップウィンド式発電用中型水平軸風車 KWT300 である。主な諸元は、定格出力 300 kW、定格回転数 40.5 rpm、定格風速 11.5 m/s、カットイン風速 3.0 m/s、カットアウト風速 25 m/s、ローター直径 33 m である。

ブレードの撮影には、高速度カメラ HAS-D72 ((株)DITECT 社製)を2台用い、それらの動画に対して、運動解析ソフト DippMotion ((株)DITECT 社製)を用いてブレード先端の座標の時刻歴を算出した。なお、1回の測定時間は、高速度カメラに内蔵されているメモリ容量の制限により、約7秒である。ブレード先端の座標の時刻歴に対して、座標変換を行い、ブレード先端回転面直角方向の変位の時刻歴を求めた。なお測定時には、ドップラーライダー(三菱電機(株)製)を用いて、概ねハブ高さにおいて風車に作用する風速を同時に測定した。

(3) 風車の応答解析は、NRELが開発している FAST(Fatigue Aerodynamics Structures and Turbulence)を用いた。風車モデルは、KWT300の設計時のデータを参考に作成した。FASTを用いた解析結果と設計時の解析結果を比較し、本研究の解析においても、風車の応答が概ね再現されていることを確認した。

## 4. 研究成果

(1) 運動解析によりターゲットの座標を求める際には、キャリブレーションの良否が得られるデータの精度を大きく左右する。本研究では種々のキャリブレーション方法を検討したが、結果として、風車のブレード先端を用いる手法が精度において良好であることがわかった。具体的には、図1に示す4ケースの位置でローターを静止させ、その際の

静止画とブレード先端の座標を用いてキャリブレーションを行うこととした。

また、2台の高速カメラの設置位置を工夫することにより、測定されるブレード先端変位の時刻歴に欠損がほぼ生じないようにした。しかし、ブレード先端の位置によっては、正確にはカメラで捉えられないタイミングもあり、そういった時刻では測定結果は誤差を含んだものとなっていることに注意が必要である。

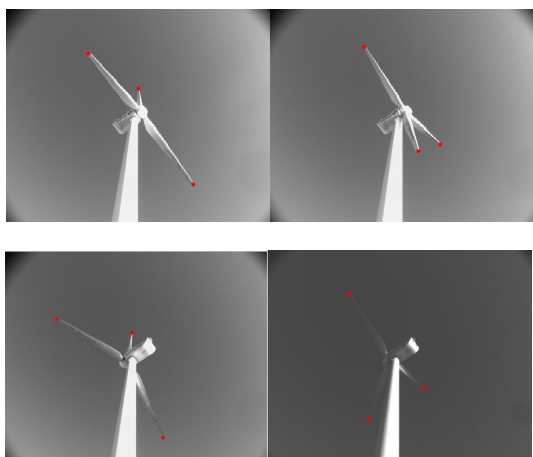
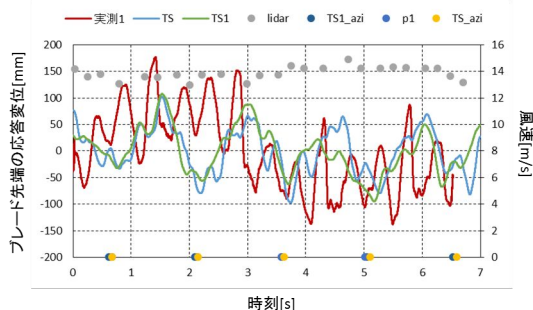


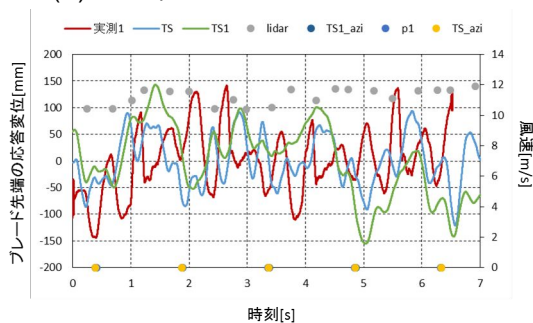
図1 キャリブレーションに用いる4ケース

(2) ドップラーライダーによる風速の測定では、サンプリング周波数をなるべく高く(4 Hz)するために、ポイント走査を用いた。観測場所の都合から、ライダーを風上位置に設置することは困難であったため、風車タワーの風上側に設置し、風上方向にビームを出し、ハブ高さの113 m 風上側位置付近の風速を測定することとした。ビームの仰角は20度程度であり、実際は傾いた風速成分を測定していることとなるが、近似的に水平風速が得られているものと考えた。また、測定した風速の時刻は、風速の変動は変化しないまま風車に到達すると仮定し、観測した風速が風車に作用するまでにかかる時間を加えることによって、風車に作用する時刻に変換した。このようにして得られたデータは、時間変化の様子がナセル上部の三杯風速計のデータと類似していることを確認した。

(3) 測定と解析結果の比較の例を図2に示す。図中の、赤線が実測のブレード先端の変位、TSおよびTS1がFASTによる解析結果で、TSが通常的空間相関特性を用いて生成した乱流、TS1が空間相関を大きくした(指数表示した係数が1/8.7程度となるようにした)乱流中でのものである。また、灰色のプロットlidarは、ドップラーライダーによる風速の実測結果(FASTによる解析では、この実測値をハブ位置で満たすように乱流を生成している)、TS1\_azi、p1、TS\_aziは、TS1、実測、TSのそれぞれのケースで、ブレードがタワーの前面を通過する時刻を表している。



(a) 例1, 平均風速 13.9 m/s



(b) 例2, 平均風速 11.2 m/s

図2 測定と解析結果の比較の例

(4) 図2を見てわかるように、実測と解析は、振動振幅の大きさは概ね近いが、時刻歴の詳細は異なっている。これは、風速測定を1点のみで行っており、解析で用いる風速の空間分布は、空間相関の統計的特性に基づいてシミュレーションされたものであることが原因である。ブレードの振動の主な要因が、風速がブレードの通過位置によって異なることを考えると、解析結果は概ね適切であると判断できる。

(5) 図2に示した、TS1のケースは、実際にブレードに作用する変動空気力の空間相関が、変動風速の空間相関よりも高くなることを模擬するものとして、解析において作用させる変動風速の空間相関を高くして実施したものである。しかし、TSと比べて、TS1のケースの応答が特に大きくなるといった違いは認められない。

当初は、変動風速の空間相関を高くした解析によって変動空気力の空間相関が高い場合を模擬できると考えていた。しかし実際は、変動空気力の空間相関が高くなるのは、ブレードに沿って作用する空気力である。一方、変動風速の空間相関を模擬的に高くすることにより、ブレードの回転に伴って時間変化する変動空気力の大きさは小さくなるため、ブレードに沿って変動空気力の相関が高くなる効果が相殺されてしまう。すなわち、空気力の定式化を詳細に検討するためには、FASTのソースコードを分析し、空気力を算出している部分を直接書き換える必要がある。そうした検討は途上段階であり、空力アドミ

ットランスの同定といった解析精度の向上につながる成果も、検討課題として残っている状況である。

#### 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)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

木村吉郎，新井那亜，日下拓哉，幽谷栄二郎，3次元運動解析ソフトを用いた実風車ブレードの簡易な振動測定，日本風工学会平成27年度年次研究発表会，日本風工学会誌，Vol.40、No.2 (No.143)，pp.115-116，2015

河合康太，新井那亜，幽谷栄二郎，木村吉郎，高速度カメラと3次元運動解析ソフトを用いた実風車ブレードの振動測定，土木学会第70回年次講演会講演概要集，1-575，pp.1149-1150，2015

鳥飼博史，望月康行，新井那亜，木村吉郎，細見雅生，幽谷栄二郎，運転時中型風車ブレードの応答測定と応答解析の比較，第37回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.283-286，2015

Kichiro Kimura，Hiroshi Torikai，Masao Hosomi，Eijiro Yukoku，FIELD MEASUREMENT OF BLADE TIP RESPONSE OF A MEDIUM SIZE WIND TURBINE IN OPERATION，First International Symposium on Flutter and its Application，ISFA-5R12，2016，Tokyo

鳥飼博史，木村吉郎，河合康太，細見雅生，幽谷栄二郎，FASTを用いた風車の応答解析の精度向上を目指した検討，土木学会第71回年次講演会講演概要集，1-574，pp.1147-1148，2016

〔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

木村 吉郎 (KIMURA, Kichiro)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：50242003

(2)研究分担者

なし ( )

研究者番号：

(3)連携研究者

なし ( )

研究者番号：

(4)研究協力者

細見 雅生 (HOSOMI, Masao)

幽谷 栄二郎 (YUKOKU, Eijiro)

岩井 憲一 (IWAI, Ken'ichi)

増本 勝 (MASUMOTO, Masaru)