

可動アーム式過回転抑制機構を有した 7m バタフライ風車の挙動解析

Behavior analysis of 7m Butterfly Wind Turbine with over-speed control using movable arms

○正原豊^{*1}, 斎藤栄徳^{*2}, 朴玉丹^{*3}石川博光^{*3}, 小野猛^{*3}, 樋上博幸^{*3}Yutaka HARA^{*1}, Shigenori SAITO^{*2}, Okdan PARK^{*3},
Hiromitsu ISHIKAWA^{*3}, Takeshi ONO^{*3} and Hiroyuki HIGAMI^{*3}^{*1} 鳥取大学 Tottori University^{*2} 日本軽金属株式会社 Nippon Light Metal Company, Ltd.^{*3} 日軽金アクト株式会社 Nikkeikin Aluminium Core Technology Co., Ltd.

A prototype of a 7 m diameter Butterfly Wind Turbine equipped with a new over-speed control system using movable arms was developed. A unit consisting of a movable arm (MA) and an aileron installed below the MA is inclined according to the balance of the centrifugal force, the aerodynamic force, and the gravitational force acting on the unit. The slant angle of a movable arm (and an aileron) was measured to show the behavior. It was clarified that the slant angle amplitude was different between the state where the aerodynamic force was dominant and the state where the centrifugal force was dominant. In the aerodynamic dominant state, the azimuth angle in which the slant angle took the maximum depended on the wind speed level. The measured maximum rotation speed of the wind turbine is currently less than the design maximum rotation speed, and the operation is as expected.

Key Words : Butterfly Wind Turbine , Movable Arm, Over Speed Control, Wind Power, Vertical Axis Type

1. 緒 言

2050年までのカーボンニュートラル実現に向けて、再生可能エネルギーの大量導入が期待されている。風力発電は、大型の洋上風力発電を中心に導入が進められているが、コスト低減は大きな課題である。一方、小形風力は、一時期のFIT制度の導入によって認証増加のブームもあったが、コストの高止まりで導入は進んでいない。本研究では、そのような小形風力発電の状況を大きく変えることを目標に、低高度の風向変化の激しい場所に適しており、形状が簡素になり得る垂直軸風車に分類されるバタフライ風車によって低コスト化を目指している⁽¹⁾。本発表では、従来式に比べて簡素で耐久性が期待できる可動アーム式の過回転抑制機構^{(2),(3)}を備えた7m直径の試作機で得られた可動アームの挙動について、その特性の一部を報告し、可動アーム式過回転抑制機構の有効性と現状の課題を示す。

2. 試作機概要

本研究で最終的に開発するバタフライ風車は直径14m、翼幅(翼高)14.2mの小形風車として最大サイズを予定しているが、そのプロトタイプとして、翼弦長($c=375$ mm)を固定したまま、直径と翼幅を各々約1/2サイズとした3枚翼のバタフライ風車を開発した。その模式図を図1に示す。翼はアルミ押出で製作し、三角形のルーブ翼となっている。ロータ中央のハブから鉛直翼に向けて設置された水平アームの一部は可動アームとなっており、その下部には補助翼を取付けてある。この可動アームと補助翼は一体となっており、図2に示すように、可動アームの両側に取付けた軸の周りに回転可能としてある。可動アームと補助翼に作用する遠心力の一部と空気力および重力のバランス状態に応じて可動アーム(または補助翼)の回転角度: η は変化し、傾斜した場合には大きな空気抵抗が可動アームに働き、風車に対して受動的なブレーキになる仕組みである。図3は、2022年3月22日に鳥取大学乾燥地研究センターに設置した試作機の写真である。本試作機の目的の1つは、新規に考案した可動アーム式過回転抑制機構の挙動確認と有効性を示すことであり、風車は設計上100rpm程度までの回転数で

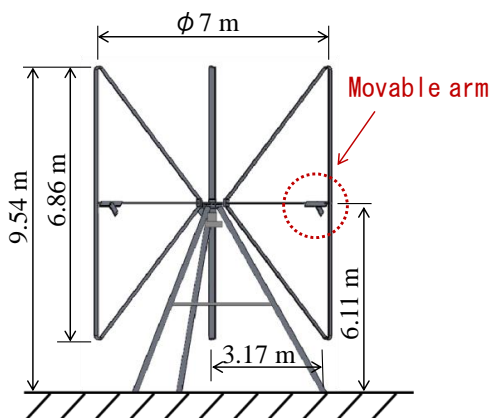


Fig. 1 Schematic of 7-m Butterfly Wind Turbine

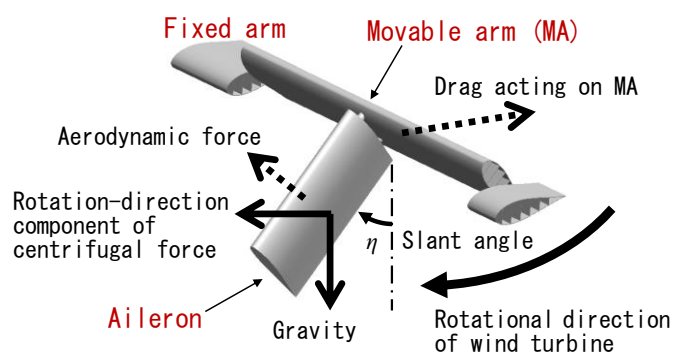


Fig. 2 Schematic of movable arm (MA)



Fig. 3 7-m Butterfly Wind Turbine (prototype) installed at Arid Land Research Center of Tottori University

回転可能であるが、安全を優先して最大回転数が 70 rpm 以下になるように、可動アーム長さ(1.7 m)と補助翼長さ(0.6 m)を設定した。また、発電機(定格: 5 kW, 3 倍増速機付)と制御盤は以前に開発した風車⁽¹⁾(7 m×2.7 m, 5 枚翼)で使用していたものを利用している。そのため、本試作機で期待される出力は最適化されておらず、最適化した場合に受風面積(約 48 m²)から期待される年間発電量の 50%以下になると予想している。

3. 計測装置

本研究では、可動アームの挙動を調べるために、可動アームの 1 つに姿勢角センサ(M21-0455, 共和電業)を取付け、傾斜角 η を測定した。光電センサ(E3Z-R61, オムロン)を風車の脚部の 1 つに取付け、姿勢角センサを設置した可動アームの鉛直下方に位置する斜翼に取付けた反射板からの反射光をパルス信号として検出し、風車回転数および姿勢角センサ付き可動アームの方位角(アジマス角)の算出に用いた。風速と風向は、風車の南約 15 m の位置にある高さ 5 m の風況ポールに、三杯式風速計と矢羽根式風向計を設置して計測した。傾斜角、光電パルス、風速、風向の信号は同一のロガー(GL840, グラフテック)によって同時計測した。サンプリングは 50 ms とした。なお、従来から設置している二次元超音波風向風速計(CYG-85000, クリマテック)による風速と風向、および制御盤によって取得可能な発電機の出力と回転数データの計測(サンプリング: 約 1.5s)の計測も同時に実施している。

4. 計測結果

図 4 に、2022 年 4 月 16 日 0:12:00 から 0:13:20 までの 80 秒間に計測された傾斜角、風速、風車回転数のデータを示す。横軸は、本データの抽出開始からの相対時間を示す。同様に、図 5 には、同日の 5:20:00 から 5:21:20 ま

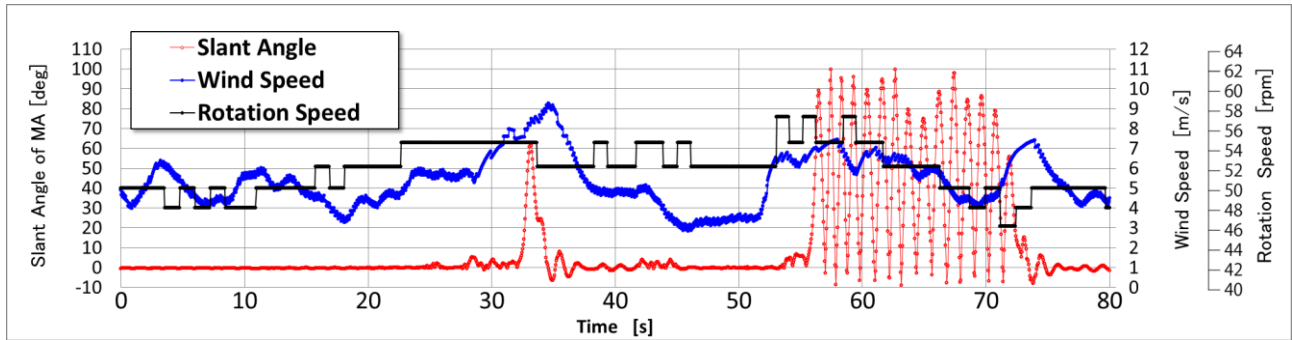


Fig. 4 Variations of slant angle of MA, wind speed, and rotational speed in high-wind condition
(ave. wind speed = 5.37 m/s, ave. rotation speed = 51.9 rpm)

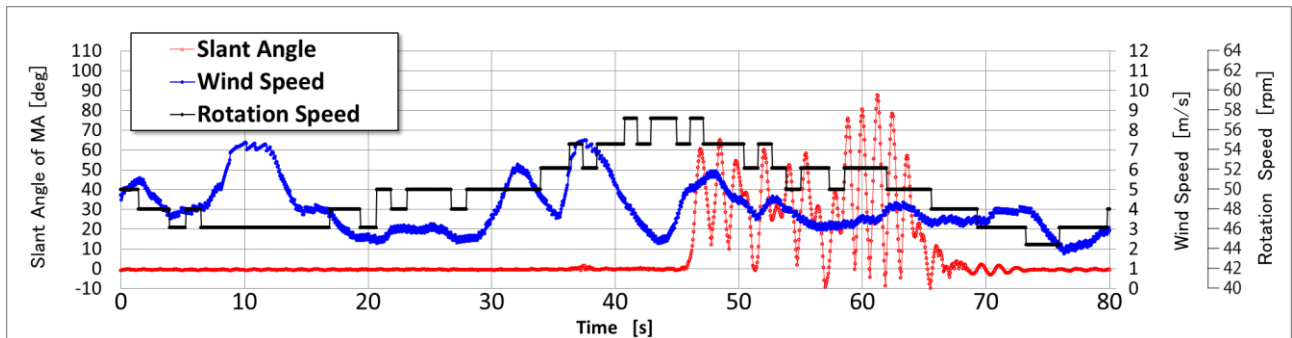


Fig. 5 Variations of slant angle of MA, wind speed, and rotational speed in low-wind condition
(ave. wind speed = 4.04 m/s, ave. rotation speed = 49.7 rpm)

での80秒間に計測されたデータを示す。図4に示した80秒間の平均風速は5.37m/s、風車の平均回転数は51.9 rpmである。一方、図5の80秒間のデータでは、平均風速は4.04 m/s、風車の平均回転数は49.7 rpmであり、両抽出データを比べた場合、風車回転数はほぼ同程度であるが、平均風速においては、図5に比べて図4の方が高い状態となっている。どちらの場合も風車回転数が約54 rpm以上の状態が継続すると可動アームが繰り返し大きく傾斜しており、その間、風車回転数は徐々に減少し、48 rpm程度になっている。このことから、可動アーム式過回転抑制機構は受動空力ブレーキとして有効に機能しているといえる。なお、図4と5に示している回転数データが階段状になっているのは、光電パルス間隔が風車1回転に相当するが、その間は回転数が一定であると仮定して、計測されるパルスの時間間隔の逆数から毎分回転数を算出しているためである。さらに両図の可動アーム傾斜角データを見ると、最大傾斜角は90°を最大20°程度超えており、一方、傾斜角の最小値はマイナス側に最大約10°振れている。可動アームは、それよりもハブ側に位置する固定アームに対して、0°から90°の範囲のみで回転するように規制されているが、上記の傾斜角の最大と最小が規制範囲を超えた値を示していることは、固定アーム部も含めた各ループ翼の全体が可動アームの動きに同調して傾斜している可能性がある。

風向に対して、どの位置で可動アームが傾斜をしているのかを明らかにするために、風車が反時計方向に回転すると仮定した上で(実際の風車は上から見て時計方向回転)、平均風向を基準として、その方向を図6のように、左から吹く場合を90°とする解析上のアジマス角 Ψ を定義する。この時、アジマス角の原点($\Psi = 0^\circ$)は基準風向から90°時計方向に回転した上部となり、図6の左半面が上流側($0^\circ \leq \Psi \leq 180^\circ$)、右半面が下流側($-180^\circ < \Psi < 0^\circ$)となる。

図7(a)は図4の60秒から70秒までの10秒間のデータについて、図6で定義した解析アジマスに対する可動アームの傾斜角と平均風向を90°とした場合の各瞬間の解析風向の変化を示す。この10秒間の平均風速は5.66 m/s、風車の平均回転数は51.5 rpmである。同様に、図7(b)は図5の55秒から65秒までの10秒間のデータについて、解析アジマスに対する可動アームの傾斜角と各瞬間の解析風向の変化を示しており、この10秒間の平均風速は

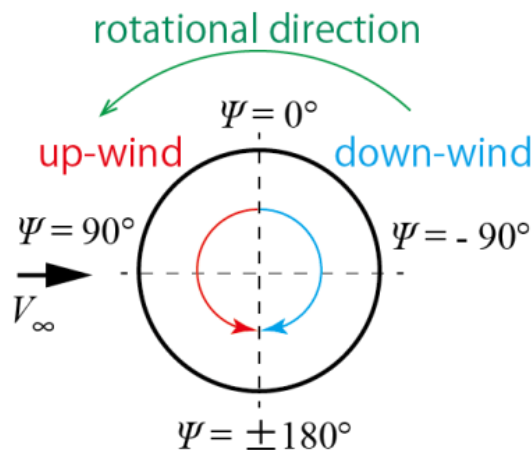


Fig. 6 Definition of azimuth angle (or analysis wind direction)

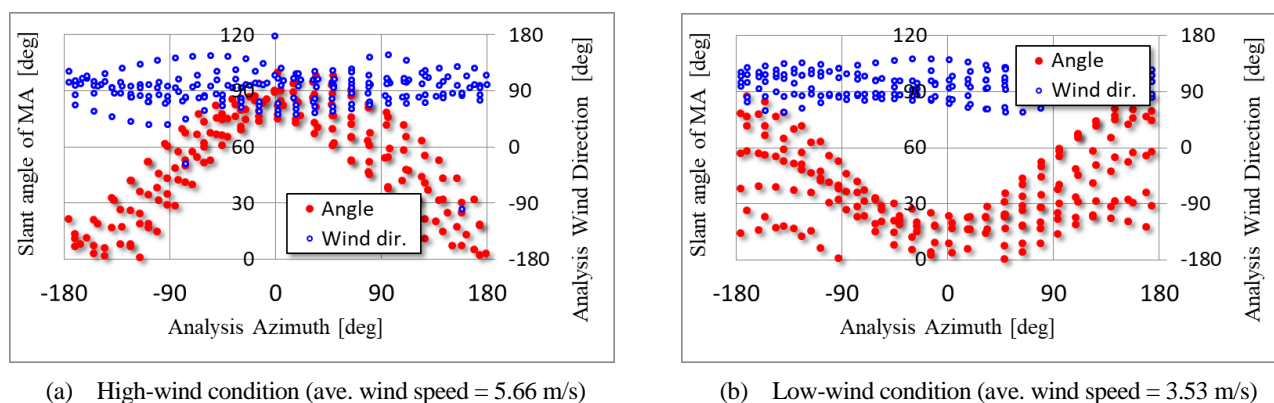
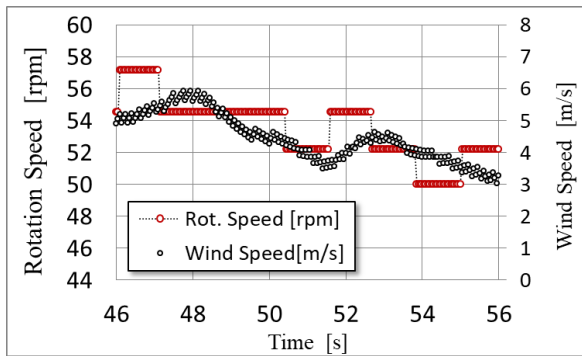


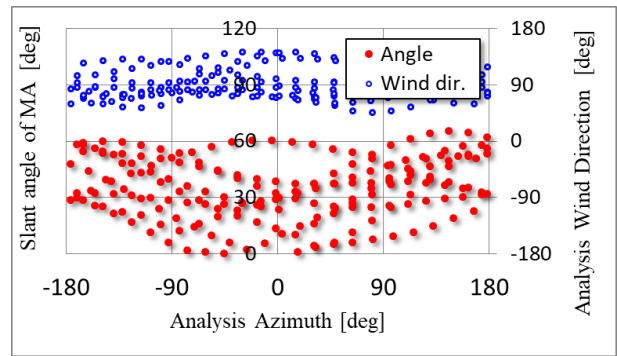
Fig. 7 Variations of slant angle of MA and wind direction as functions of analysis azimuth defined in Fig. 6

3.53 m/s, 風車の平均回転数は 51.2 rpm である. 図 7 (a)と(b)のデータは, 風車の回転数が 54 rpm を超えて可動アームの繰り返し傾斜が開始されてから数秒後の, いずれも回転数が 54 rpm 以上を占めている時間が短いかほとんどない状態であるが, これらを比較すると, 風速が高い場合 (図 7 (a)) には, 可動アームは下流側から上流側に向かうアジマス角 $\Psi = 0^\circ$ の付近で 90° に近い大きな傾斜をし, 反対に風速が低い場合 (図 7 (b)) には, 上流側から下流側に向かうアジマス角 $\Psi = \pm 180^\circ$ の付近で大きな傾斜状態となる傾向がある. 風速が高い場合 (図 7 (a)) に, $\Psi = 0^\circ$ の付近で大きく傾斜する傾向は, このアジマスで相対風速が高くなることから理解しやすいが, 風速が低い場合 (図 7 (b)) に, 逆傾向になる理由は現状では説明ができなく, 今後の課題である. なお, 傾斜角のピーク位置のばらつきは風向のばらつきに依存していると推測される.

図 5 の 46 秒から 56 秒の 10 秒間のデータを見ると, 可動アームの繰り返し傾斜の始まり部分では, 傾斜角の極大値は 90° まで到達してはいるが, 極小値も 0° 付近まで至っていない場合が多くみられる. 図 8(a)はこの 10 秒間における風車回転数と風速の時間変化であり, 図 8(b)は同じ 10 秒間における解析アジマスに対する可動アームの傾斜角と各瞬間の解析風向の変化を示す. 図 8(a)に示すように, 可動アームの繰り返し傾斜の開始時は, 54 rpm 以上の回転数であり, 風速の増加に対して, 可動アームが傾斜することで回転数が減少する傾向が見られる. 抽出した 10 秒間の後半では風速が低下しているため, その影響もあるかもしれないが (それでも区間平均風速は 4.46 m/s であり, 図 7(b)よりは高い), 本抽出区間における平均回転数は 53.5 rpm と高くなっており, 図 8(b)に示すように, 傾斜角の振幅は小さく, 傾斜した状態を保って周回している傾向が見られる. 実際のところ, 図 8(b)における最大傾斜角は 65° , 最小傾斜角は -0.8° である. これは遠心力が支配的であるためと考えられる. 逆に考えると, 図 7 (a), (b)の状態は, 空気力が支配的な状態といえ, その場合, 可動アームの振幅が大きくなる傾向がある.



(a) Time-variations of rotor-rotational speed and wind speed



(b) Variations of slant angle of MA and wind direction

Fig. 8 Measured data in high rotor-rotational speed condition observed in Fig. 5 (46 s~56 s)

(ave. wind speed = 4.46 m/s, ave. rotation speed = 53.5 rpm)

本稿で示したデータは、実証実験を始めてからの短い期間におけるデータから、典型的と考えられるデータを選択して得られたものであり、今後、さらにデータを蓄積して強風状態のデータを得る必要はある。それでも、点検期間を除いた信頼できるデータが取得できている期間（2022.3.29~4.19）において、従来からの計測装置(制御盤内蔵ロガー)で記録された最大風速は 12.9 m/s であり、風車回転数の最大は 63 rpm である。本試作機の設計において、70 rpm を最大回転数としたので、現時点までは、可動アーム式過回転抑制機構は、ほぼ設計通りの動作をしているといえる。

5. 結 語

本研究では、新規の可動アーム式過回転抑制機構を備えた 7 m 直径のバタフライ風車を試作し、可動アームの傾斜角を計測して、その挙動の一端を示した。空気が支配的な状態と遠心力が支配的な状態で、傾斜角振幅が異なることが明らかになった。計測された風車の最大回転数は、現時点において設計最大回転数以下となっており予想通りの動作ができている。ただし、可動アームの動作に同調して翼全体の傾斜が発生している可能性があり、今後、対策を講じる必要がある。さらに、発電量の予想と実測の比較・検証ができるように、今後さらに信頼性の高いデータを蓄積していく必要がある。

謝 辞

本研究は、日軽金アクト株式会社と鳥取大学の共同研究、鳥取大学国際乾燥地研究教育機構(IPDRE)の研究プロジェクト、令和3年度工学部特別共同プロジェクト、および令和4年度佐賀大学海洋エネルギー研究所の共同利用研究(22D02)により実施された。ここに明記して謝意を表す。

文 献

- (1) Hara, Y., et al., “Development of a Butterfly Wind Turbine with Mechanical Over-Speed Control System”, *Designs*, Vol. 12 (2018), 17.
- (2) 原豊, 吉位真公, 澤田周吾, 吉田茂雄, 斎藤栄徳, “可動アーム式過回転抑制機構を備えたバタフライ風車の特性予測”, 第 28 回 日本流体力学会 中四国・九州支部講演会 (Web 開催, 鳥取大学), (2021).
- (3) 吉位真公, 原豊, 澤田周吾, 吉田茂雄, 斎藤栄徳, “可動アーム式過回転抑制機構を備えたバタフライ風車の 3D プリンターモデルによる実験”, 日本機械学会 中国四国学生会第 52 回学生員卒業研究発表講演会 (Web 開催, 高知工科大学), (2022), 07d3.