

タイトル：過回転抑制機構を持ったバタフライ風車の開発

英文タイトル：Development of Butterfly Wind Turbine equipped with Over-Speed Control System

著者名：原 豊

著者名(英文名)：Yutaka HARA

E-mail：hara@damp.tottori-u.ac.jp

所属：鳥取大学大学院 工学研究科 機械宇宙工学専攻 応用数理工学講座

1. はじめに

2015年12月のパリ協定採択以降、再生可能エネルギーに対する期待と注目度が国内外で増えてきているが、小形風力発電は国内FIT(再エネの固定価格買取制度)の開始から5年以上が経った今日においても、未だにコストが高く普及の状態にはない。それでも太陽光発電の買取価格が年々低下する状況に伴って、2015年頃より徐々にではあるが、海外製の水平軸型風力発電機を中心として小形風車の認証取得が増加してきた。本解説では、平成27年度から始まった鳥取県産学共同事業化プロジェクト支援事業の1つとして実施している、鳥取大学と鳥取県内の中小企業を含む企業4社(㈱日本マイクロシステム、㈱エナテクス、㈱スカイ電子・米子研究所、日軽金アクト㈱)で構成された共同体による小形垂直軸風車の開発プロジェクトについて報告を行う。

2. 開発風車の概要

本プロジェクト(期間：2016.1.28～2018.1.27)は、鳥取大学で2010年頃より実施してきた小形垂直軸風車の低コスト化を目指した一連の研究^{(1)~(3)}の延長として開始された。開発を目指している小形垂直軸風車の試作機をFig. 1に示す。試作機は鳥取県中部にある北栄高千穂太陽光発電所(エナテクス)の敷地内に設置し

てある。

本風車は角部が丸みを帯びた三角形のルーブ翼を5枚持っており、鳥取大学で考案した『バタフライ風車』と名付けた風車構造をしている。ロータ直径は7m、翼高さは2.7mある。翼の断面形状は対称翼型のNACA 0018であり、その翼弦長は0.242mである。翼の材質はアルミ合金(A6005CS-T5)であり、押出で製造されている。本風車のコンセプトは『大きな風車に小さい発電機でコストダウン』であり、大量生産によってコストが大幅に低くできるアルミ押出の翼で大きな受風面積を実現し、一方、比較的にコストが高くなりがちな電装系(発電機やパワコンなど)の容量を小さくして、システム全体のコスト低下を目指している。

本バタフライ風車試作機の仕様をTable 1に示す。Fig. 1は発電機を取付けていない状態であるが、インナーロータ型のコアレス発電機(スカイ電子製、定格5kW)が遊星歯車を用いた3倍増速機を間に挟んで風車ロータと直結される。発電機の出力は発電コントローラを介して、パワコン(ダイヤモンド電機製、定格4.5kW)に接続される構成となっている。発電コントローラ、パワコンのほか、電気ブレーキ用ダンブ抵抗やデータロガー装置などは、制御盤(日本マイクロシステム)として統合されている。

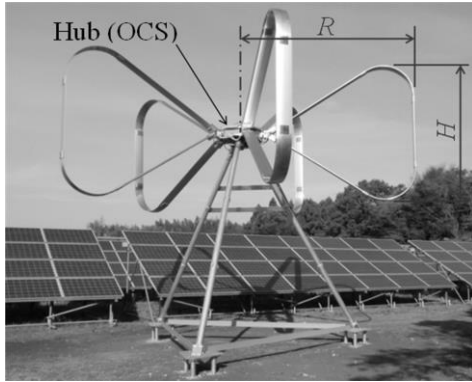


Fig. 1 Butterfly Wind Turbine with OCS (Over-Speed Control System)

Table 1 Specifications of Butterfly Wind Turbine rotor

| | |
|--------------------------------|---------------------|
| Rotor radius, R | 3.5 m |
| Rotor height, H | 2.7 m |
| Chord length, c | 0.242 m |
| Number of blade, B | 5 |
| Blade section | NACA 0018 |
| Swept area, A | 18.6 m ² |
| Solidity, $\sigma(=Bc/2\pi R)$ | 0.055 |
| Material | A6005CS-T5 |
| Mass of a blade | 36.3 kg |

3. 過回転抑制機構

本風車の一番の特徴は、垂直軸風車用としての機械式過回転抑制機構⁽³⁾(OCS: Over-Speed Control System)を備えていることである。Fig. 2 は、5 枚翼を持つ本試作風車用の過回転抑制機構全体の外観写真であり、各翼を取り付けるブレード軸を主要部品とする5つの過回転抑制ユニットが、自在継手のついたリンクによって機構中央の同調円盤に結合されている。Fig. 3 と Fig. 4 に1つの過回転抑制ユニットと同調円盤の模式図を示す⁽⁴⁾。本機構はブレード軸を、翼に作用する遠心力を利用してロータ半径方向に移動させる。特定の回転数以上になると、ブレード軸の中心軸まわりに翼を傾斜（ツイスト）させる。これによって翼そのものを空力ブレー

キとして使用して、ロータが過回転になることを防止する。この動きはブレード軸の側面に突き出ているピンがガイド溝に沿って移動することで実現される。Fig. 5 に、モータを使用した風車ロータの強制回転実験で得られた翼傾斜状態を示す。Fig. 5 では、翼は30°まで傾斜した状態となっているが、ガイド溝の改良などによって、最終的な最大傾斜角度は18°程度になる予定である。後述の翼素運動量理論に基づく計算によれば、傾斜角度が17.4°になると風速20~60 m/sの状態にある風車のトルクは、定格回転数120 min⁻¹のあたりの回転状態では負の値となり、それ以上の回転数増加は不可能になることが予測されている。

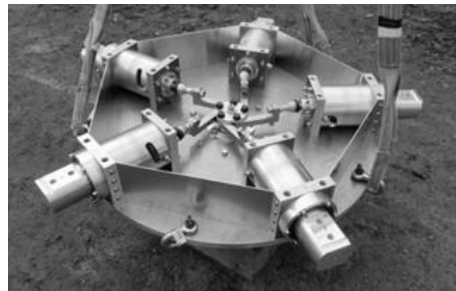


Fig. 2 Over-Speed Control System (OCS) for 5-blade Butterfly Wind Turbine

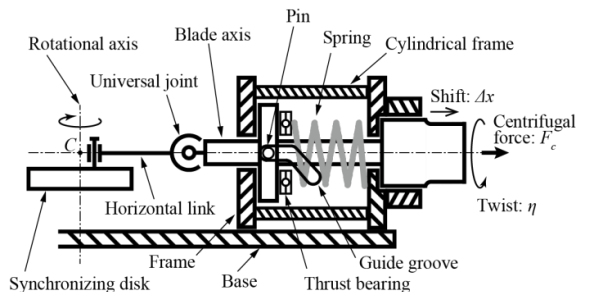


Fig. 3 Schematic diagram of an over-speed control unit

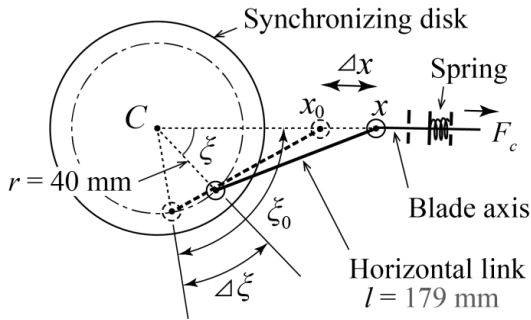


Fig. 4 Schematic diagram illustrating relation between the displacement Δx and the rotational angle $\Delta \xi$ of synchronizing disk



Fig. 5 Twist state of blades of Butterfly Wind Turbine observed in experiment driven by an induction motor

4. 開発風車の特性予想

過回転抑制機構(OCS)は電気的制御が不能となった場合の安全装置としての役割だけでなく、本プロジェクトが目標とするコストダウンにも役立つ。

Fig. 6 は翼素運動量理論(BEM : Blade Element Momentum theory)に基づいて予想した開発風車のパワーカーブを示している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。過回転抑制機構を動作させない場合(通常風車相当)は、カットアウト風速を 12 m/s と仮定し、過回転抑制機構を動作させる場合(本開発風車)では、カットアウト風速は存在しないと仮定している

(Fig. 6 の横軸の風速は 30 m/s までを記載)。

Fig. 7 は Fig. 6 のパワーカーブに基づき、風速出現率としてレイリー分布を仮定して算出した年間発電量予想である。年平均風速が 6 m/s 以下では、過回転抑制機構の有無で年間発電量にほとんど差は見られない。Fig. 6 を見れば明らかかなように、過回転抑制機構が存在しない通常の風力発電システムならば最大発電出力は高くなるが、それを実現する十分な容量を持った発電機が必要となる。一方、過回転抑制機構を備えたシステムであれば、同じ年間発電量を得るために、より小さい容量の発電装置で十分である。発電機は高価なレアメタルなどで構成されているため、容量が小さい分だけ発電機のコストは下がり、その出力を制御するためのパワコンの定格も小さくなるため、システム全体のコストダウンに繋がる。

プロジェクトの開始当初からは、多少の風車仕様の変更などもあり、Fig. 7 に示した予想にも若干の修正が施されてきている。現状に基づくならば、年平均風速 5 m/s において、年間発電量は約 5,800 kWh を予想しており、風車のシステム価格(基礎設置費を含む)を 300 万円と想定して、発電単価約 26 円/kWh(維持費は含まない)を目指している。

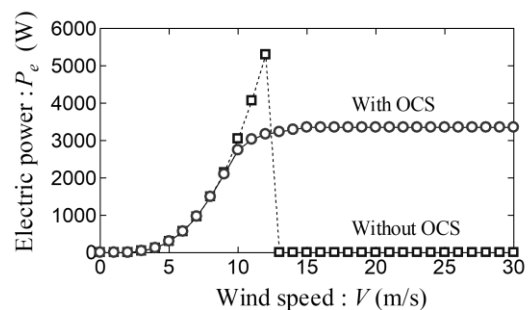


Fig. 6 Power curves predicted for Butterfly Wind Turbine with OCS and without OCS

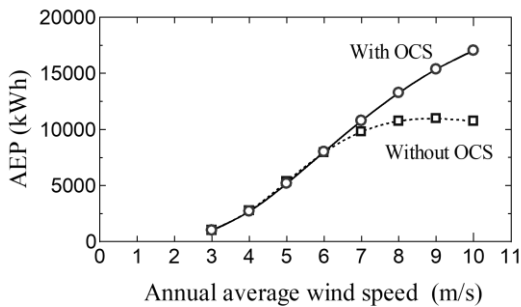


Fig. 7 Annual Energy Production (AEP) expected for Butterfly Wind Turbine with OCS and without OCS

5. その他の特徴

本開発風車は風況の良好な場所で発電を行うため、高層ビルの屋上への設置を想定している。最上階までエレベータで運搬できるように、翼や架台はエレベータで運搬可能な長さ以下になるようにパーツに分けられている。屋上に部材を運搬後、組立てを行うシステムとして設計を行った。

風車は発電コントローラおよびパワコンによる電氣的制御と過回転抑制機構による機械的制御を受けるが、そのいずれもが不能となった場合には、強風時に過回転になり翼が破損する可能性がある。翼が破損した場合の飛び散りを防ぐため、本風車の翼内部には、高強度の軽量ロープ(材質：ベクトラン、破断荷重：53.9 kN)を挿入し、ロープの両端を風車ハブ部に相当する過回転抑制機構の基盤に接続してある。

上述のように、本風車はビル屋上への設置を想定しているが、試作機(Fig. 1)は地面に設置されている。本風車の架台はアルミパイプ(φ110)で構成された三脚構造であるが、地面設置においては、コンクリート基礎は用いずに、太陽光発電パネル用の杭を用いて架台の固定を行った。風況の良い場所であれば地面設置による適用は可能であるため、その場合に杭による架台固定は設置コストの低減に役立つ。

6. 数値シミュレーション

6-1 数値流体力学解析

本プロジェクトでは、風車の設計と性能予測において、前述した翼素運動量理論をベースとした解析⁽⁶⁾を用いているが、より高度な解析として、数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)による流体力と流れ場についての解析および有限要素法に基づく構造解析(FEA: Finite Element Analysis)も実施している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。CFDとFEAの両解析とも、汎用熱流体解析プログラム STAR-CCM+を用いている。

Fig. 8はCFD解析の例であるが、計算コストの問題から、計算対象としては、実機と同サイズの1枚の翼が鉛直軸まわりを回転する1翼ロータとしている。Fig. 8は翼から放出される渦管を可視化するため、 Q 値(速度勾配テンソルの第2不変量)の等値面を示している。計算条件は、上流風速が $V_\infty = 8 \text{ m/s}$ であり、翼の毎分回転数は $N = 110 \text{ min}^{-1}$ 、先端周速比は $\lambda = 5$ の状態(1翼ロータの最大出力状態)である。5枚翼を持った実機とは異なるが、三角形の翼の上下にある曲線翼部分から、翼端渦に相当する渦放出があることが示されている。空気力については、翼素運動量理論(BEM)によって求めた1翼ロータに関する予測と比べているが、CFDの方がBEMによる予測と比べて小さく計算されることがわかっている⁽⁷⁾。BEMによる予測は、サイズが異なるが、直径3mの実験機データを用いて補正してあるため⁽⁹⁾、現状では、その差異の原因は計算格子の密度不足と考えている。CFDとBEMの差異の原因解明と一致度を向上することは今後の課題の一つである。

6-2 構造解析

Fig. 9は構造解析の例である⁽⁷⁾。FEAにおいてもCFDと同様に翼1枚を対象としているが、空気力は考慮していなく、回転に伴う遠心力と重

力のみを考慮した計算としている。本解析では、境界条件として、翼の取付位置近傍に相当する翼端面を完全固定している。翼の毎分回転数は開発風車で想定する最大回転数の $N = 120 \text{ min}^{-1}$ を仮定している。実際は、最大回転数では翼が傾斜することになるが、Fig. 9 の解析では翼の傾斜は考慮していない。Fig. 9 には、変形前の翼と、変形後の翼の形状 (変形量を 10 倍に拡大表示) が示されている。変形後の翼の色の濃淡は解析された相当応力の分布を示す。Fig. 9 に示されるように、翼は重力で鉛直下方に下がり、遠心力によって半径方向外向きに引っ張られるように変形する。相当応力が大きくなる箇所は図中に示した点 A~D であり、点 B と点 C の近傍では、横から見て S 字状に翼が変形することがわかる。なお、変形量が最も大きい箇所は赤道面に相当する点 D であり、Fig. 9 の条件において、その最大変形量は 79.5 mm である。点 B ~D では、風速 8 m/s の条件下であるが、最大回転数以下において相当応力は翼材料の許容値 (136 MPa を仮定) を超えないことが示されている (Fig. 10 参照)。しかし、翼の根元である点 A では、最大回転数の 120 min^{-1} において、許容値を超えている。ただし、実際の翼根元の形状は FEA で用いた簡易なモデルとは異なっており、補強も施されている。より実際に近いモデルで強度計算を行うことは、実用化に向けての課題である。

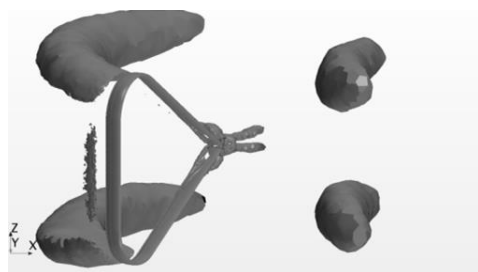


Fig. 8 CFD analysis of Q -criterion isosurface around an

1-blade rotor of Butterfly Wind Turbine ($V_{\infty} = 8 \text{ m/s}$, $N = 110 \text{ min}^{-1}$, $\lambda = 5$)

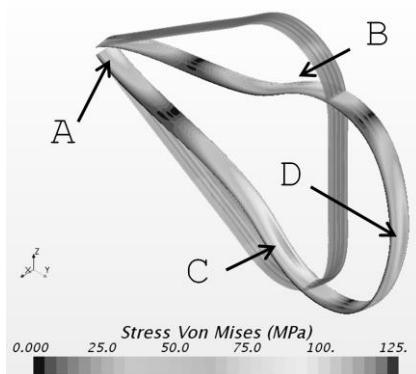


Fig. 9 FEA (Finite Element Analysis) on a blade of Butterfly Wind Turbine ($N = 120 \text{ min}^{-1}$)

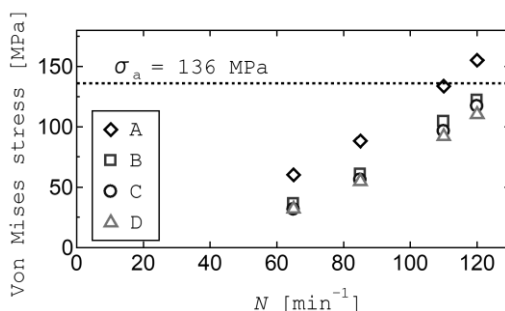


Fig. 10 Rotation-speed dependence of von Mises stress at each portion (A, B, C, D) designated in Fig. 9

6-3 流体-構造連成解析

前節までに述べた流体解析と構造解析に加えて、流体と構造を連成させた解析 (FSI : Fluid Structure Interaction) にも、本プロジェクトでは取り組んでいる。まだ十分な解析はできていないが、非連成の構造解析結果の約 1.4 倍まで、最大相当応力が増加する可能性があることが、これまでの計算結果として得られている。今後、さらに研究を進め、試作機の改良に役立たせる必要がある。

7. 現在の状況

本プロジェクトにおける最大の問題は、過回

転抑制機構のガイド溝の形状⁴⁾であり、試作したガイド溝による翼の傾斜動作と回転数の関係を確認するための強制回転実験をこれまでの約1年で4回実施してきた。3回目の強制回転実験の結果から、翼の傾斜角度の増加に伴って、遠心力だけでは説明がつかない別の半径方向の力が作用していることが半明した⁸⁾。4回目の強制回転実験では、その力を考慮することによって設計したガイド溝とバネの予圧方式を用いることにより、ある程度まで当初の設計に近い翼のツイスト動作を確認できている。

現在は、増速機付発電機を取付け、発電実験を開始したところであり、自然風に対する風車の応答を見ながら、発電コントローラの調整を実施している。本プロジェクトの終了期限までには最大発電電力3 kW 強、および、強風時の過回転抑制動作の確認ができることを期待している。

8. おわりに

本稿では、過回転抑制機構を備えたバタフライ風車の開発プロジェクトについての紹介と研究内容の一部および現在の進捗状況を述べてきた。普及している水平軸風車と比較して、垂直軸風車は研究や実績の点で不十分な技術と言える。特に、本解説で述べてきた垂直軸風車は、従来の垂直軸風車とは異なる点が多く、開発中の過回転抑制機構は新規の技術であるので、現状でも課題は多い。しかし、プロジェクト開始当初の予想動作に徐々に近づいている。本プロジェクトの次の計画としてさらに大型化をし、より低風速域へのバタフライ風車の導入を検討することも視野に入れている。本プロジェクトのメンバーおよび多くの協力者に感謝を述べて本解説を終りとする。

[謝辞]

本稿で解説したプロジェクトと関連研究は、鳥取県産学共同事業化プロジェクト支援事業、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の一部、九州大学応用力学研究所の共同利用研究(29 特 3-2)として実施されている。

<参考文献>

- (1) 原, 小形垂直軸風車の研究開発, ターボ機械, **44-7**(2016), 411.
- (2) 原・他 6 名, アルミ円形翼バタフライ風車の実証実験と性能予測, 日本風力エネルギー学会論文集, **38-1**(2014), 16.
- (3) 原・他 8 名, バタフライ垂直軸風車の過回転抑制機構, 日本風力エネルギー学会論文集, **41-1**(2017), 9.
- (4) Hara, Y. and Tagawa, K., Butterfly Wind Turbines with Mechanical Over-Speed Control System, Proceedings of the 1st International Symposium on Wind and Tidal Power, (2017), 1.
- (5) Hara, Y. ・他 5 名, Predicting Double-Blade Vertical Axis Wind Turbine Performance by a Quadruple-Multiple Streamtube Model, International Journal of Fluid Machinery and Systems, **7-1**(2014), 16.
- (6) 奥谷・他 4 名, 三角翼バタフライ風車の構造と流体力に関する数値解析, 日本機械学会中国四国支部第 55 期総会・講演会, (2017), No.409.
- (7) Hara, Y. ・他 4 名, Numerical Simulation on Fluid Forces and Structure of Triangular-Blade Butterfly Wind Turbine, Proceedings of the 6th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, (2017), Abstract No. 16.
- (8) 原・他 4 名, 過回転抑制機構を備えた三角翼バタフライ風車の強制回転実験, 第 39 回風力エネルギー利用シンポジウム, (2017), 442.