

タイトル：小形垂直軸風車の研究開発

英文タイトル：Research and Development of Small-Sized Vertical Axis Wind Turbines

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

2012年7月に国内における再生可能エネルギーの固定価格買取制度いわゆるFIT制度が開始された。この制度の中で、20kW未満の小形風力発電は最も高い買取価格(平成27年度において税抜55円/kWh)が継続しているが、未だに導入量は少ない。その理由としては、発電コストが高いことが第1に挙げられる。大形風車に比べると、小形風車は環境アセスなどの手間がなく比較的導入はしやすいが、必然的に低高度の設置になるケースが多く、風況が良好ではないことや、人間の生活空間に近いところへの設置が多いことから、安全面における十分な配慮が必要になることなどが、コスト低減が進まない理由の一部と考えられる。

大形・小形を問わず、現在の風力発電として風車の主流は3枚翼を持つプロペラタイプの水平軸風車であるが、研究開発としては様々な形状を持つ風車の考案・研究が行われている。特に小形風車では、風向に依存しない特徴から構造が簡単にできる垂直軸風車(VAWT: Vertical Axis Wind Turbine)への関心が高く、最近は多くの研究や開発が行われている<sup>(1)~(3)</sup>。本稿では、著者が所属する鳥取大学で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研究の概要を紹介する。

## 2. 低重心風車

垂直軸タイプとして有名な風車に、回転する縄跳びの綱の形状(トロポスキエン形)を持ったダリウス風車<sup>(4)</sup>があるが、翼の製造コストの面から、Fig. 1に示すような直線翼垂直軸風車

(ストレート・ダリウス風車)<sup>(5)</sup>が、揚力型の垂直軸風車として数多く開発・研究されている。本稿著者も揚力型の垂直軸風車の研究として最初に扱った風車は直線翼タイプであり、現在も直線翼に取付けた翼端板の効果<sup>(6)</sup>などについて研究を継続している。

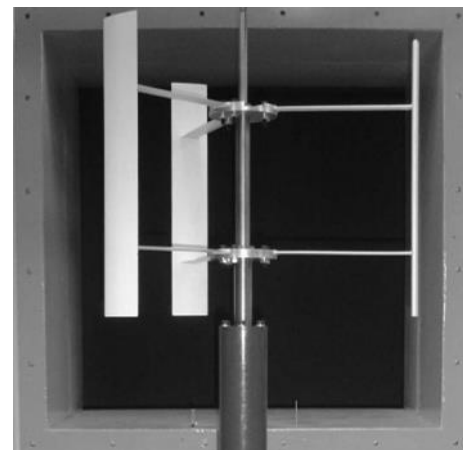
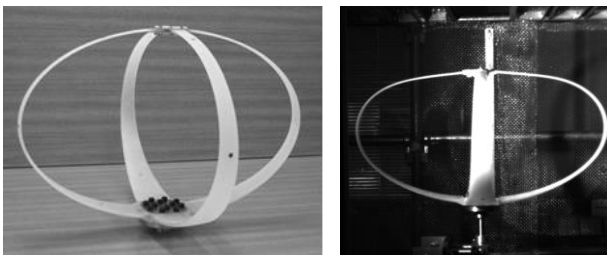


Fig. 1 Straight-bladed VAWT

垂直軸風車の低コスト化を主課題として考え始めた頃、最初に考案したものが、Fig. 2(a)に示す低重心風車(LCGWT: Low Center-of-Gravity Wind Turbine)<sup>(7)</sup>である。直線翼垂直軸風車では構造的に翼と回転軸を結合するアーム(あるいはストラット)を必要とするが、水平なアームの場合は揚力を発生せず空力抵抗のみを生じる。また、一般にソリディティ( $\sigma = Bc/(\pi D)$ 、 $B$ : 翼数、 $c$ : 翼弦長、 $D$ : ロータ直径)が小さい揚力型風車は起動性が劣る特性を持つ。そこでアームを無くしてアームレス構造とし(Fig. 2の風車ではロータ内の回転軸も除去)、翼の弦長をロータ上方で短く、下方で長くしたテーパ翼とした。

これにより、ロータ下部近くの幅広翼部分では起動性の向上、ロータ上部近くの翼弦長が短い部分では高速回転時の高効率への寄与が期待できる。また、この構造ではロータの重心が鉛直下方に下がるため、片持ち支持の場合には構造的安定性が増す。

Fig. 2(b)は、光造形で製作した最初の低重心風車の実験機(直径: 0.6 m、高さ: 0.392 m、翼弦長: 0.026~0.076 m)<sup>(8)</sup>の回転実験の様子である。ロータ内部に回転軸が無いいため、遠心力でロータ全体が扁平状に変形するが、回転軸がある場合よりも多少出力が増加する傾向が見られた。ただし、ソリディティが小さかったため( $\sigma = 0.14$ )、6m/s以下の低風速では自己起動しなかった。

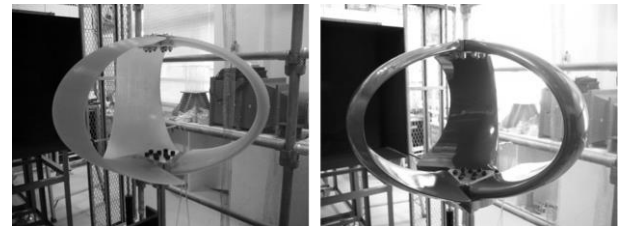


(a) Stationary condition (b) Deformation by rotation

Fig. 2 Original model of LCGWT

次の段階では、ソリディティを大きくした低重心風車の実験機( $\sigma = 0.286$ )を製作し、翼型の違いが風車特性に与える影響を研究した<sup>(9)</sup>。Fig. 3(a)は翼断面が対称翼(NACA 0018)であり、光造形で製作してある。一方、Fig. 3(b)の翼は外側が凸となったキャンバー翼であり、ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)製である。どちらのロータも直径は 0.4 m、高さは 0.25 m、翼弦長は上端で約 0.11 m、下端で約 0.16 m である。翼の回転半径  $R$  に対する翼弦長  $c$  の比  $c/R$  が大きい場合は、翼に対する相対的な流れ場の曲率が無視できなく、翼の形状や取付位置が風車特性に大きな影響を与える。すなわち、Fig. 4 の

上図に模式的に示すように、実際の相対的な流れ場は、翼から見るとある曲率を持って曲がっているが、これを等角写像<sup>(10)</sup>によって Fig. 4 の下図に示すような平行流れ場に変換するならば、対称翼(a)はロータ内側に凸となったキャンバー翼となり、逆に外凸のキャンバー翼(b)は対称翼に変換される。



(a) Symmetrical (b) Cambered

Fig. 3 Three-bladed LCGWTs

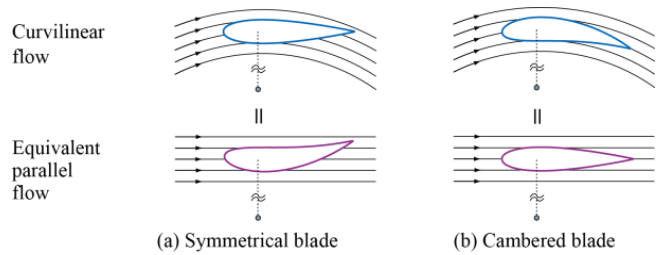


Fig. 4 Flow curvature effects and conformal mapping for a rotating blade in stationary fluid

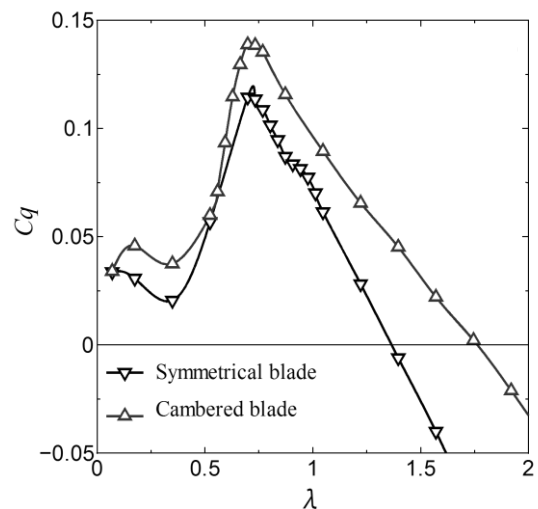


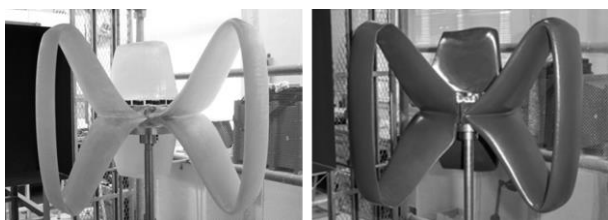
Fig. 5 Torque coefficients of LCGWTs with symmetrical or cambered blades

Fig. 5 は風速 6m/s の条件下における、対称翼を持った低重心風車(Fig. 3(a))と外凸キャンバー翼を持った低重心風車(Fig. 3(b))のトルク特性( $C_q$ : トルク係数)を比較したグラフである。この実験結果では、どの先端周速比( $\lambda$ )状態においてもキャンバー翼が対称翼よりもトルクが高くなっている。すなわち、 $c/R$  の大きな低重心風車では、外凸キャンバーとすることで、対称翼の場合に比べて、最大出力と起動性のいずれもが向上することが示されている。

### 3. バタフライ風車

低重心風車では、ロータ重心が鉛直下方にシフトするため、小形垂直軸風車の構造として多い片持ち支持の場合に構造的安定性が増すことはすでに述べた。しかし、その重心のシフト量は最大でもロータ高さの 1/4 程度である。そこで、風車の投影面積範囲内に空力抵抗体(回転軸やハブ)が入らざるを得ないが、低重心風車の持つアームレス構造は継承しながら、風車ロータの重心位置に発電機を設置可能となる構造にしたものが、Fig. 6 に示すバタフライ風車<sup>(11)</sup>である。名称は風車ロータの形状が蝶に似ていることから付けている。

Fig. 6 に示す 2 つの実験用バタフライ風車は、いずれもロータ直径は 0.4 m、高さは 0.3 m、翼弦長は最大半径位置にある最短部が約 0.11 m、ロータ中央近傍にある最長部で約 0.18 m である。Fig. 6(a)は光造形で製作してあり、翼断面は対称翼(NACA 0018)となっている。一方、Fig. 6(b)はビニロン繊維を使用した FRP 製で

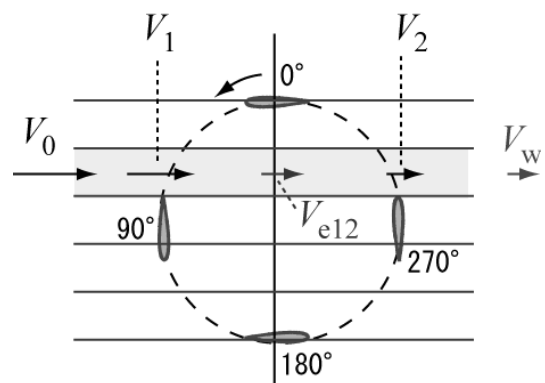


(a) Symmetrical (b) Cambered

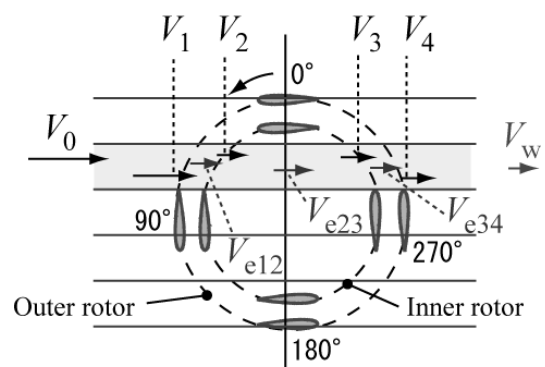
Fig. 6 Three-bladed Butterfly Wind Turbines

あり、翼断面は外凸キャンバー翼となっている。

バタフライ風車の特徴としては、翼がループ状になっているため、ある高さ断面を横切る流体(風車の場合は空気すなわち風)が翼と最大で 4 回交差する可能性があることである。そのため、直線翼や低重心風車の特性予測において適用可能な翼素運動量理論(BEM: Blade Element Momentum theory)に基づく二重多流管モデル<sup>(4)</sup>(DMS: Double-Multiple Streamtube model)はそのままでは適用できない(Fig. 7(a)参照)。そこで DMS モデルを入れ子構成にした四重多流管モデル<sup>(12)</sup>(QMS: Quadruple-Multiple Streamtube model)を提案し、バタフライ風車の特性予測に用いている(Fig. 7(b)参照)。Fig. 7(b)に示すように、バタフライ風車のある水平断面を考えた場合、大小 2 つの直径を持つ 2 重ロータ構造であることが理解できる。2 重ロ



(a) DMS model



(b) QMS model

Fig. 7 Double and Quadruple-Multiple Streamtube models

ータに対応させて、1つのループ翼を外翼と内翼に分けて区別するならば、通常の垂直軸風車に比べて翼枚数が2倍に増えているため、起動性が向上することが期待できる。

Fig. 8は風速6m/sの条件下における、Fig. 6(a)と(b)のバタフライ風車のトルク特性を比較している。低重心風車の場合と同様に、外凸キャンバー翼を持つ風車が、対称翼の風車よりも最大トルクが大きくなっている(すなわち、最大出力も大きい)。しかし、低い先端周速比の状態では、対称翼風車のトルクが大きくなっており、起動性の点では対称翼が優れることを示している。この点において、低重心風車とバタフライ風車の間で差異が生じたのは、バタフライ風車の外翼半径がほぼ均一で直線翼垂直軸風車に近い形状を持っていることから、対称翼や内側に凸となったキャンバー翼が、低速回転状態でロータの上流側にある時に、外凸キャンバー翼よりも大きなトルクを生むという性質をより強く表したと考えられる。一方、高速回転状態では、Fig. 4(a)の下図に示すように、対称翼(あるいは内凸キャンバー翼)は等角写像された平行流場に対して反りを持つため、大きな空力抵抗を生んで回転の妨げになり、回転トルクは減少する。しかし、外凸キャンバー翼は等角写像された場合に平行流に対して反りを持たない対称翼となるため、高い回転数においても抗力が小さい。

なお、Fig. 5とFig. 8を比較するとわかるように、低重心風車に比べて、2重ロータ構造であるバタフライ風車の起動性は良好である( $\lambda$ の小さい範囲でトルク係数が高い)。また、Fig. 5とFig. 8の比較からはわかりにくいですが、出力係数で比較すると、低重心風車よりもバタフライ風車の最大出力係数が高くなっている<sup>(13)</sup>。

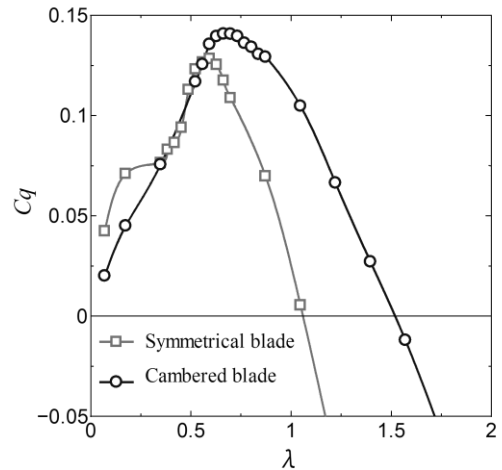


Fig. 8 Torque coefficients of butterfly wind turbines with symmetrical or cambered blades

#### 4. アルミ円形翼バタフライ風車

前節までに述べてきた低重心風車とバタフライ風車は、低コスト化を主課題として、アームレスの特徴から性能向上や部品点数の削減を期待して考案した。しかし、テーパ状やループ状の複雑な翼形状を持つため、いかにして安価に翼を製造するかという課題が残っていた。そこで、企業等の協力もあって、次に取り組んだ風車が、Fig. 9に示すアルミ円形翼バタフライ風車

<sup>(14)</sup>(ACBBWT: Aluminum Circular-Blade Butterfly Wind Turbine)である。

この風車翼はアルミの押出で製作され、それを曲げて円形翼としており、安価かつ大量生産に向いている。ただし、曲げの限界からFig. 9のプロトタイプ(ロータ直径:2.06 m、円形翼直径:0.8 m、翼弦長:0.183 m)では、Fig. 6のオリジナルの蝶形状の翼ではなく円形翼となっている。基本的な特徴は同じであり、翼端が閉じているため、直線翼などの翼端から発生する翼端渦の強さ(渦度)が弱まり、騒音低減などが期待できる。円形翼では、オリジナル形状よりも曲げの曲率が小さいため、その効果がより大きいことが期待される。

Fig. 10は数値流体力学解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)によって円形翼ロータまわりの渦

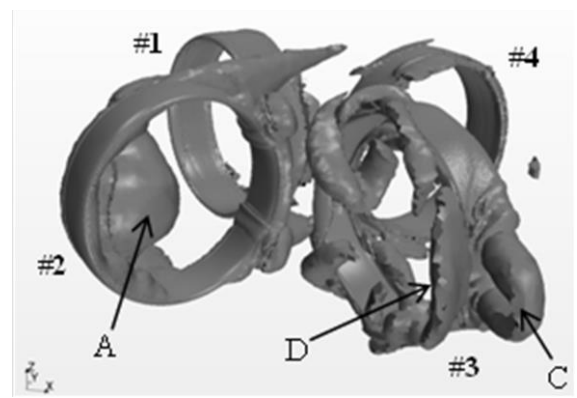
度分布を数値予測し可視化した結果である<sup>(15)</sup>。

Fig. 10(a)は先端周速比が $\lambda=1.5$ の回転状態における渦度の等値面( $60 \text{ s}^{-1}$ )を示しており、Fig. 10(b)は同じ状態の赤道面(ロータ中央水平断面)における渦度の鉛直成分(回転軸方向成分)の分布を示している。両図の記号は対応しており、主流は各図の左から右に向かって流れている。Fig. 10の渦度分布から、上流側にある翼#2から動的失速現象<sup>(4)</sup>に起因する双子渦(AおよびB)が放出されている様子がわかる。また、下流側にある翼#3からは上流側とは反対の外側翼面から渦C, Dが放出されている。特に、渦Cはループ状になっているが、円形翼であることが、このように特徴的な形態の渦放出を生み出していると考えられる。Fig. 10からはわかりにくいですが、円形翼の上部と下部からも翼端渦に相当する渦が放出されている。しかし、その渦度は、直線翼などから放出される翼端渦に比べると弱いものになっている。

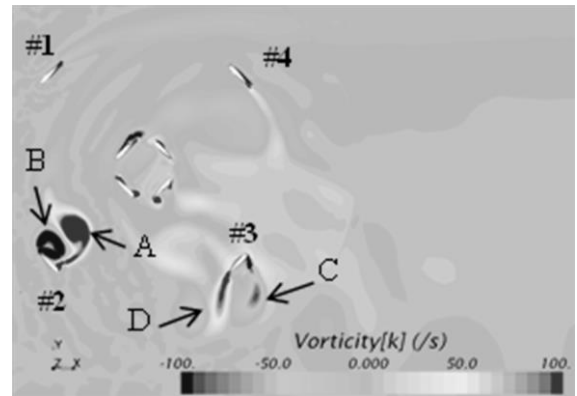
Fig. 11はFig. 9の実験風車について、風速 $7\text{m/s}$ の条件下で計測された発電効率 $\eta$ とそれにフィッティングして求めたQMSモデルを用いた翼素運動量理論(BEM)に基づく特性予測曲線、およびCFDで計算された出力係数 $C_p$ に発電機等の効率として $0.8$ を乗じて算出したCFD計算に基づく発電効率の比較である。Fig. 11に示す程度に比較的に良好な一致が得られている。



Fig. 9 Experimental rotor of the aluminum circular-blade butterfly wind turbine (ACBBWT)



(a) Iso-surfaces of vorticity magnitude of  $60 \text{ s}^{-1}$



(b) Vorticity distribution on the horizontal plane

Fig. 10 Calculated vorticity distributions by 3D-CFD around a rotor of ACBBWT

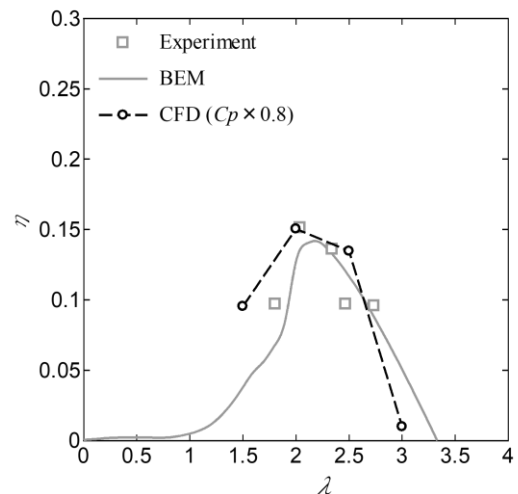


Fig. 11 Electric power efficiency obtained by CFD analysis and experiments, which is fitted by a BEM-based prediction curve

## 5. 垂直軸風車の過回転抑制機構

風車の低コスト化において、稼働率を上げることは効果が大きい。それには、強風時においても過回転になることなく回転（発電）を継続させる必要があり、特に機械的な過回転防止策を備えることは安全性の向上としても重要である。水平軸風車では、ファーリングや可変ピッチ方式など様々な過回転防止策が考案され実用化されている<sup>(16)</sup>。しかし、垂直軸風車では、いくつか方法は考案されているが<sup>(2)(17)~(19)</sup>、実用化されている例は少ない。

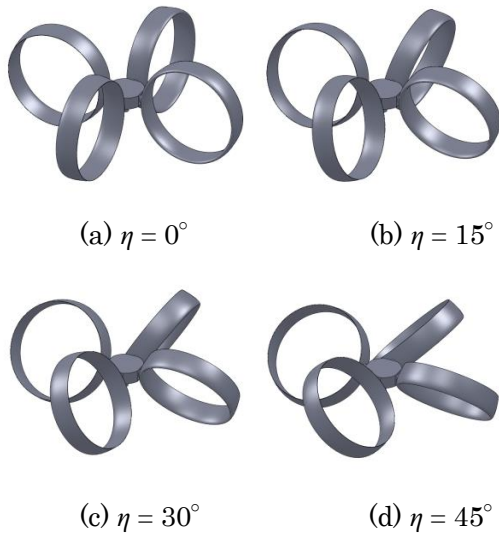


Fig. 12 Concept of over-speed control by tilting circular blades using centrifugal force

本稿著者らは、アルミ円形翼バタフライ風車の過回転抑制機構として、Fig. 12 に示すように、回転ハブに1軸で取付けてある各円形翼を回転数増加に伴う遠心力の作用によってツイスト（傾斜）して空気ブレーキとする方法を提案している<sup>(20)</sup>。Fig. 13 に過回転抑制機構の1つのユニットの模式図を示す。翼が取付けられるブレード軸が、遠心力で半径外向き（Fig. 13 では右方向）に引っ張られ、スライドする。この時、ブレード軸から横に飛び出しているピンが、周囲のガイド溝（直線溝と螺旋溝から成る）に案内されて移動する。回転数

が小さい時はピンは直線溝部にあり、ブレード軸はツイストせずに平行移動する。回転数が大きくなり、ピンが螺旋溝部に入るとツイストが起こり、翼が傾斜し空気ブレーキとして作用する。回転数が再び小さくなれば、圧縮バネの復元力によって元のツイストの無い状態に戻る。なお、複数の翼を同調して動作させるために、ブレード軸の一端は、自在継手と水平リンクによって、ロータ回転軸と同心位置にある同調円盤に結合されている。

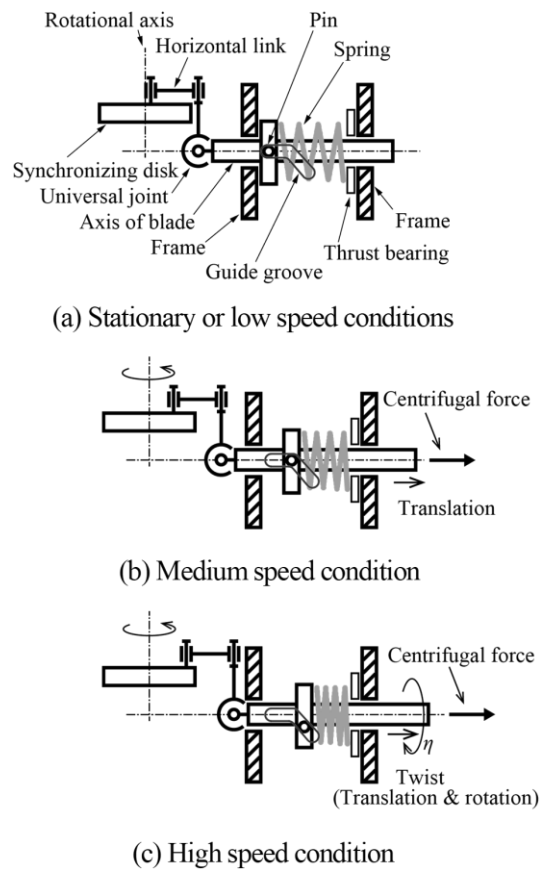


Fig. 13 Schematic diagrams of structure for over-speed control with synchronizing system

Fig. 14 は過回転抑制機構の試作機<sup>(21)</sup>であり、基盤の直径は0.56mである。4枚翼用であり、4つのユニットが見えている。各ユニットの円筒状の部分にガイド溝が形成されており、中に圧縮バネ（定数：445N/mm）が設置されている。

Fig. 15 は Fig. 14 の過回転抑制機構をロータ中

心部に設置した実証実験用のアルミ円形翼パタフライ風車であり、ロータ直径は約 3 m、円形翼直径は 1.1 m、翼弦長は 0.2285 m である。Fig. 15(a) は静止中の翼がツイストしていない状態であり、Fig. 15(b) は回転中の翼がツイストしている状態である。実験では最大で 6° 程度のツイスト角度までを計測しており、連続したツイスト動作と回転数の抑制を確認している。

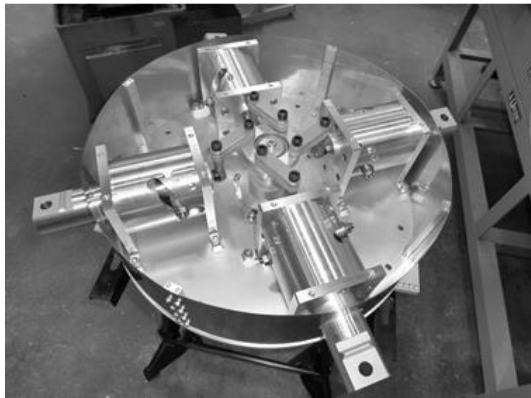


Fig. 14 Over-speed control (OSC) system



(a) No twist state



(b) Twist state

Fig. 15 Experimental rotor of ACBBWT installed with OSC system and a state of blades twisted by the centrifugal force

## 6. おわりに

本稿では、鳥取大学において実施している小形垂直軸風車の低コスト化を目指した研究の紹介をしてきた。ここで紹介したのは風車ロータに関するものだけであり、小形風力発電の低コスト化のためには、発電機、制御系、基礎、タワー等のコストダウンも必要である。FIT 制度における高い買取価格の継続が、現在、小形風力発電にとって追い風となっているが、安全性が高く、高い性能を持ち、かつ低コストな(発電単価が安い)小形風力発電機を開発することは簡単ではない。様々な分野の要素技術の発展とその統合が必要と考えられる。本稿で紹介した研究は、多くの企業・自治体・共同研究者等の協力によって成り立ってきたが、未だ実用化されたものはない。微力ではあるが、小形風力発電が普及する手助けとなれるよう、今後も研究を継続していきたいと考えている。

## 7. 参考文献

- (1) 一般社団法人 日本小形風力発電協会 HP.  
<http://www.jswta.jp/>.
- (2) Yamada, T. ・他 5 名, Overspeed Control of a Variable-Pitch Vertical-Axis Wind Turbine by Means of Tail Vanes, *Journal of Environment and Engineering*, 7-1(2012-9), 39.
- (3) 村田・他 4 名, 直線翼垂直軸風車に対する解析手法の開発と検証, 第 37 回風力エネルギー利用シンポジウム, (2015-11), 361.
- (4) 林・他 3 名, 風車の理論と設計(ダリウス風車を中心とした垂直軸風車の解説), (2007), インデックス出版.
- (5) 関・牛山, 垂直軸風車, (2008), 151, パワー社.
- (6) 原・他 4 名, 直線翼垂直軸風車における翼端板の最適なサイズに関する数値解析, 日本機械学会中国四国支部第 54 期総会・講演会,

- (2016-3), No.1218.
- (7) 原, 低重心垂直軸風車の提案と翼素運動量理論による特性予測, 日本風力エネルギー学会誌, 35-2(2011-8), 134.
- (8) 原・他 2 名, 低重心垂直軸風車の回転実験, 日本機械学会 2011 年度年次大会, (2011-9), S051021.
- (9) Hara, Y. ・他 6 名, Comparison between Symmetrical and Cambered Blade Sections for Small-Scale Wind Turbines with Low Center of Gravity, Journal of Fluid Science and Technology, 9-1(2014-4), JFST0006.
- (10) Akimoto, H. ・他 4 名, A Conformal Mapping Technique to Correlate the Rotating Flow around a Wing Section of Vertical Axis Wind Turbine and an Equivalent Linear Flow around a Static Wing, Environmental Research Letters, 8-4(2013-11), 044040.
- (11) Hara, Y. ・他 6 名, Effects of Blade Section on Performance of Butterfly Wind Turbines as Double-Blade VAWTs, Journal of Fluid Science and Technology, 10-1(2015-2), JFST0003.
- (12) 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(2014-1), 16.
- (13) 原・他 4 名, 低重心風車とバタフライ風車の特性比較, 日本機械学会 2014 年度年次大会, (2014-9), J0540302.
- (14) 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(2014-5), 16.
- (15) Hara, Y. ・他 3 名, Numerical Simulation of Flow Field around a Circular-Bladed Butterfly Wind Turbine, Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, (2015-7), 22038.
- (16) 牛山・三野, 小型風車ハンドブック(4 版), (1994), 141, パワー社.
- (17) 野田・長尾, 過回転抑制機構を備えた直線翼垂直軸風車の開発, 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, (2009-11), 364.
- (18) 丹澤・他 3 名, 小型ジャイロミル型垂直軸風車の空気抵抗ブレーキに関する研究(第 1 報 強風下での回転数連続制御方法について), 日本機械学会論文集(B 編), 79-797(2013-1), 12.
- (19) 上野, 自動折畳み式垂直軸風車の試作, 第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム, (2014-11), 397.
- (20) 原・他 4 名, コンパクトな垂直軸風車用過回転抑制機構の提案, 第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム, (2014-11), 389.
- (21) 原・他 8 名, 翼傾斜による垂直軸風車用過回転抑制機構の実証実験, 第 37 回風力エネルギー利用シンポジウム, (2015-11), 343.