

# 可変ピッチ式帆布羽根垂直軸風車\*

## Variable Pitch Controlled Vertical Axis Wind Turbine with Sailcloth Blades

林 亮馬\*\*

Ryoma HAYASHI

高村 泰広\*\*\*

Yasuhiro TAKAMURA

佐藤 建吉\*\*\*\*

Kenkichi SATO

小野寺 京子\*\*\*\*\*

Kyoko ONODERA

### 1. 緒言

地球温暖化やエネルギー問題などへの対策として再生可能エネルギー（可再生エネルギー）の利用が促進されている。風力発電は、潜在性や発電量、そして初期コスト、運転コストにおいても競争力のある代替可能な自然エネルギー（可再生エネルギー）であると言えるが、日本においては、欧米、中国などに比べ、大きく遅れをとっている。風力エネルギーの普及拡大には、風力受容性を高めてその価値と有効性を衆知することが重要であると言える。

現在の風力発電は水平軸風車が主流で、大型化が進んでおり、また洋上風力も拡大している。一方で、垂直軸風車も、小型から大型までその活躍の機会を模索しながら登場の機会を得ようとしている。垂直軸風車は、水平軸風車と異なり風向変化によらず、回転できるという利点があるが、対照的に垂直軸であるがゆえに風上に向かって回転しなければならないという欠点も兼ね備えている。これが、一般に垂直軸風車における特徴であるが、用途拡大に向けてその対策が色々行われている<sup>1)</sup>。

著者の一人、小野寺の会社（チバマシナリー）では、垂直軸風車の欠点をなくするために、回転中に風向に対する羽根角度（ピッチ角）を、定常的に偏向させて、ある角度では抗力型風車として、ある角度では揚力型風車として機能させることを目的として、羽根（翼）材にヨットの帆布を用いた「可変ピッチ式帆布羽根垂直軸風車」（帆船翼風車）を開発している。この風車は、好条件ではパワー係数  $C_p=0.33$  を発揮でき<sup>2)</sup>、しかも原理・構造が簡単であるなどの特長を有している。

羽根素材が布製（帆布）であることは、製作や補修も簡単で、安価となる面もあり、途上国での風力発電へ適用できる。また羽根にはデザインを加えることもでき、都市型風車としての利用のほか、教育

ツールや社会受容性ツールとしても利用できる。

一方で、帆布材料を用いると、その縫製や加工のバラツキによっては、劣化破損・強度不足などに起因した問題も上げられる。さらには、振動騒音を発生させるなどの課題もありそうである。特に強風対策が重要であり必須であると言える。

以上の点から、本報では「可変ピッチ式帆布羽根垂直軸風車」の信頼性向上と新たな用途拡大を進めるために、可変ピッチ方式の有効性と、考案し採用したマグネット式の強風対策法について検討した結果について報告する。

### 2. 可変ピッチ制御の有用性

#### 2.1 可変ピッチ式帆布羽根垂直軸風車の概要

本報で使用した可変ピッチ式帆布羽根垂直軸風車の外観写真を図1に示す。この風車は、外形寸法が風車高さ 400mm、回転直径 270mm と小型であり、帆布製の3枚羽根を持つ垂直軸風車である。

図2に示すように風車回転主軸と、各羽根を取付けている羽根板の中心軸にタイミングギアを設け、両軸をタイミングベルトで連結する。風車回転主軸と羽根板回転軸のギア比を 1:2 とすると、風車回転主軸の1回転に対して、羽根板軸は1/2回転になる。具体的には、図3において、風車回転主軸が角度  $0^\circ$  の位置で羽根を主風向に垂直（点 a）となるようにセットすると、 $90^\circ$  の回転で羽根板は  $45^\circ$  回転し（点 c）、 $180^\circ$  の回転で羽根板は  $90^\circ$  回転する（点 e）。点 e は、主風向が回転方向と反対の位置であるが、この方式では、羽根は回転に対する抵抗とならない。この時、点 e 付近では、むしろ揚力を発生するので、この風車の出力特性<sup>3)</sup>（パワー係数やトルク係数）を高める役割をつくり出している。

風車回転主軸が  $360^\circ$  回転すると、羽根板軸は  $180^\circ$  回転して再び主風向に垂直な状態（点 a）となるが、風車回転主軸が角度  $0^\circ$  の時とは、羽根の前面と後面は入れ替わっている。したがって、金属製や FRP 製の羽根では、対称翼型でないとならないが、帆布製羽根では風圧によって、撓み（湾曲）し、そり（キャンバー）が付くという特徴がある。

\*平成 25 年 11 月 13 日 第 35 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

\*\*学生員 千葉大学大学院 千葉県千葉市稲毛区弥生町

\*\*\*会員 千葉大学大学院/福島県立新地高校 福島県相馬郡新地町小川字貝塚

\*\*\*\*会員 千葉大学大学院 千葉県千葉市稲毛区弥生町

\*\*\*\*\*非会員 有限会社 チバマシナリー 千葉県茂原市本納



図1 可変ピッチ式帆布羽根垂直軸風車

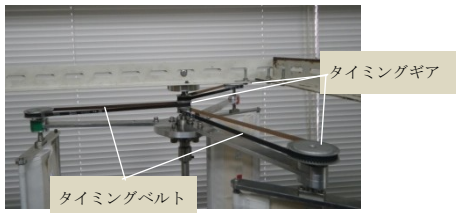


図2 リンク機構

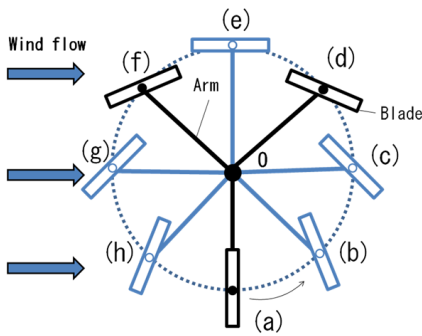


図3 可変ピッチ制御式風車の概要図

## 2.2 実験内容

はじめに可変ピッチの有効性について検証した。可変ピッチ式風車の特徴として、抗力と揚力を両方利用する点にある。その点を確認するため、図4.1のような可変ピッチ式風車と図4.2のように風向きに対し風車の半分を板でふさいだ固定ピッチ式風車で風洞実験を行い、回転速度を測定、比較した。用いた風洞は、出口流路が0.6m×0.9m、最大風速12m/sの開放型である。実験は、定格30Wの発電機と外部抵抗10Ωの負荷の下で行った。

## 2.3 実験結果

図5に風洞実験による可変ピッチ式風車と固定ピッチ式風車の回転速度の推移を示した。可変ピッチ式風車は固定ピッチ式風車に比べて、回転速度が約2倍に増加した。これより、可変ピッチ式風車は風荷重の抗力だけで回転しているのではなく、揚力も利用することによって風車を回転させていることがわかり、可変ピッチの有効性が示された。

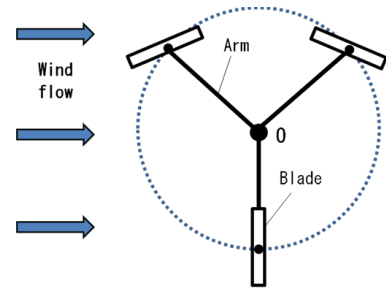


図4.1 可変ピッチの風車の平面図

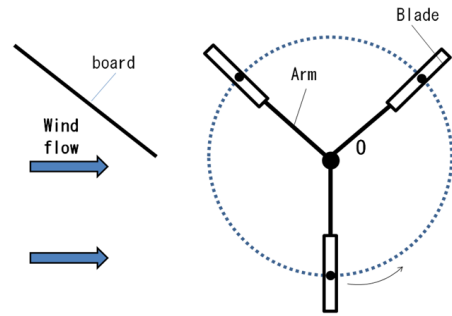


図4.2 固定ピッチの風車の平面図

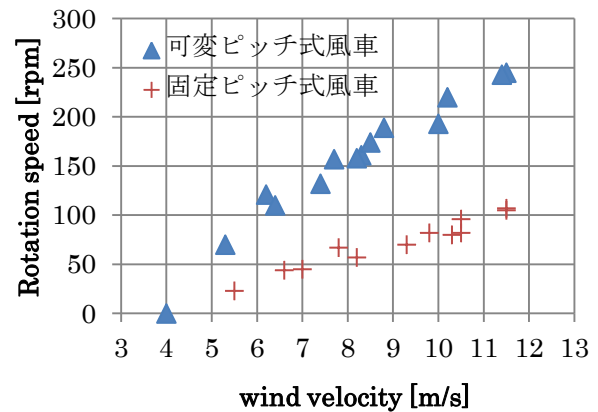


図5 風速と回転速度の関係

## 3. 強風対策

風力発電において、強風による破損は一つの大きな課題となっている。平均風速が低い場所に置くことが一般的な小型風車についても同様で、台風などの強風発生時の対策をしておく必要がある。特に、市街地の屋上や路上などの人が頻繁に行き来する場所に設置する場合には強風対策は必要不可欠である。

本報では、永久磁石を羽根に設置することによって、強風対策を安価かつ自動で行う風車の開発・設計を行うことも目的とした。

### 3.1 永久磁石を使用した羽根の設計と風洞実験

過回転防止は強風対策の一つとしてあげられる。本報では、任意の羽根が回転中に中心で分離することによって、羽根にかかる風荷重を減少させ回転速度を下げ、過回転を抑制することをねらいとした。

図 6 のように羽根を二分割し、その重なり部に永久磁石を等間隔に取り付け、通常時は磁石の吸引力で長方形の羽根として働くが強風時は風圧や遠心力などで、磁力を超えた力によって羽根が分離し、風車の回転速度が低下・減速することを期待した。そのため、本報では一つの羽根に対して、表と裏に S 極と N 極それぞれ 10 個ずつの磁石を交互に設置した。磁石は一つ直径 10mm×厚さ 1.7mm のネオジウム (Nd-Fe-B) 磁石を使用し、この羽根を製作した(図 7)。3 枚の羽根のすべてを磁石付きの羽根として、風洞実験を行い、風速、回転速度を測定した。

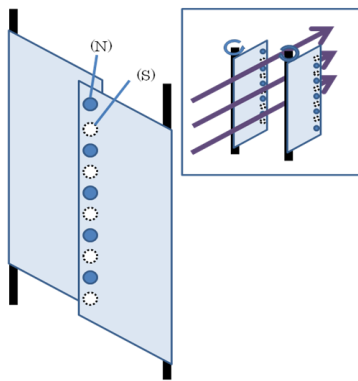


図 6 永久磁石を使用した羽根の概要図



(a) 通常の状態 (b) 磁石が離れた状態

図 7 永久磁石を使用した羽根

### 3.2 風洞実験の結果

30 秒間隔で風速を 6.0、7.2、8.2、10m/s に順次増加させて、回転速度の増加の推移を示した結果を図 8 に示した。

図 8 から平均風速が 10m/s、回転速度が 180rpm になった直後に、1 枚の羽根が分離し、回転速度が 140rpm 付近まで低下し、その後、安定していることが分かる。これより、磁石を使うことによって回転速度を抑制できるということが明らかにされた。試行回数を増やすと、風速 10m/s～12m/s、回転速度 180rpm 付近で一つの羽根が分離することが再現された。

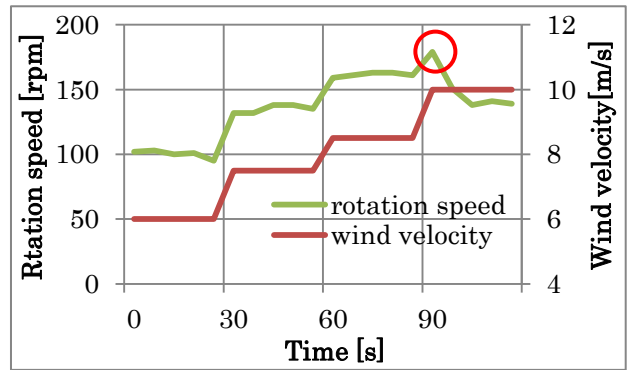


図 8 風速と回転速度の関係

また、その後、風速を弱めると分離した羽根が吸着し復元した。復元するための風速は一定ではなく、低風速とした時でも復元しない場合も存在した。これは風洞実験では、風向きが一定であるため、分離した羽根が 2 枚の旗のように並行して回転し、吸着・復元しなかったのであった。屋外設置の場合には、強風時は風向変動もあり、羽根の復元は容易に行われると思われる。

次に、羽根の分離がどの位置で起こるかを、ハイスピードカメラ (Photron SA3) を使用し観察した。その結果、図 9 の楕円マーク A 付近で分離していることが分かった。その位置は、揚力 L、抗力 D、回転速度による遠心力 F の合力が、他の位置と比べ大きいためでないかと考えている。

関連で、3 枚のうち 1 枚の羽根だけが分離した状態で、前述の実験で羽根の分離が起こった風速 10m/s で風洞実験すると、他の羽根は分離せず、ほぼ 140rpm で回転し続けた。このことは、羽根の分離は、風荷重 (風圧) によるものではなく、回転速度が関係することを教えてくれる。今後、詳しく力学解析を行い、原因を明らかにしたい。

羽根が分離した後、吸着・復元する位置は、図 9 の楕円マーク B の付近であった。平行に回転していた羽根が、この位置で風圧により押し、吸着する。

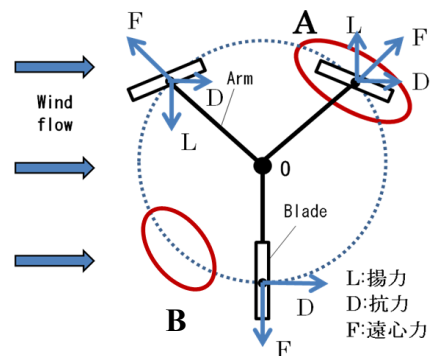


図 9 可変ピッチ式風車の羽根に働く力の模式図

### 3.3 マグネット式強風対策の課題

本報では、各羽根の表と裏にそれぞれ10個ずつ磁石を取付け、S極とN極間の吸引力を利用したマグネット式強風対策を施した結果、約180rpmの回転速度で羽根が分離し、過回転を抑制することができた。

この方式を原理として、設置する磁石の種類と大きさ、設置の個数と配置などを調整して分離する風速や回転速度の設定を行えば、有効な強風対策となり得ると言える。

なお、強風対策として磁石付きではあるが羽根が分離しないように、ラッピングフィルムで周囲を覆った羽根をもつ風車（ラップあり）と、ラッピングしない風車（ラップなし）について、風速と回転速度を比較する追加実験を行った。結果を図11に示す。図から、ラップせずマグネット式強風対策を施した風車は、ラップした風車に比べ回転速度が低くなることが示された。

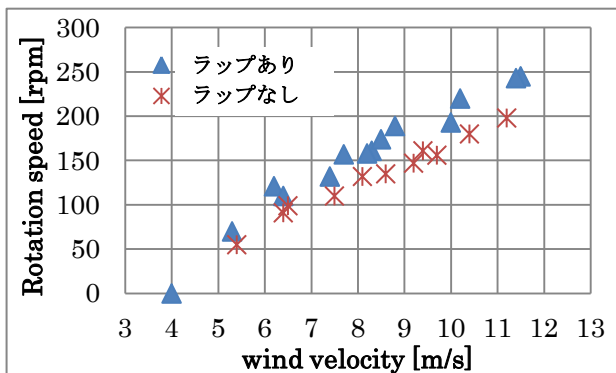


図11 ラップあり、なし風車の回転速度の比較

この原因について考えると、本報でのマグネット式強風対策を施した羽根は、磁石の設置が点状であり、隣り合う磁石の設置点との間に隙間ができ、その部分から風が通り抜けてしまい、回転速度が低めになったのではないかと推定できる。ラップしていない羽根には、羽根合せ面や磁石設置点など羽根面に凹凸があるが、ラップした羽根では凹凸がなくなっているなどの影響も関係していると思われる。したがって、こうした点を改良することも必要となる。

以上、磁石を用いた強風対策について、基本的な実験を行い、実用化に向けて検討すべき課題も明らかにされた。強風対策として羽根を分離する風速や回転速度は、可変ピッチ風車の風車特性と構造強度が基本となるので、そうした要因から設定、設計される。可変ピッチの方式による出力特性向上とマグネットによる強風対策が、ともに極めて簡単な原理で実現できることは、この風車がいろいろの用途に

利用できることを示している。

### 4. 結論

可変ピッチ式帆布羽根垂直軸風車を用いて、その特性と強風対策について実験的に検討した結果、これらの有効性が示された。得られた結果をまとめると、以下の通りである。

(i) 供試した「可変ピッチ式帆布羽根垂直軸風車」は、小型の抗力型風車であるが、単純な仕組みでピッチ角を回転制御し、出力特性の向上を図る設計となっている。

(ii) 垂直軸風車の宿命である風上方向に回転する位置では、羽根を風向と平行にして（フェザリングして）トルク抵抗を減少させることを実現した。風下方向への回転する位置では、羽根を風向に正対してトルクを獲得する。

(iii) 羽根材料には帆布を用いて、羽根面が撓み（湾曲）し、そり（キャンバー）が付くなどから、揚力も発生するなど、価格や補修等の面でもメリットがある。

(iv) 強風対策としてマグネットを用い、その吸着力を超える風速や回転速度において羽根が分離する方式を導入し、その効果、有効性が示された。なお、この方式では、風速が減少した場合には、吸着・復元する。

(v) 本報の仕様では、羽根が分離する回転速度は180rpmであるが、磁石の種類や個数、設置位置などの条件を変えて、その値を調整・設計できる。

(vi) 可変ピッチ式帆布羽根垂直軸風車は、強風対策を施して、サイズを大きくしkW級の発電風車にも拡大できる。

(vii) (ii)を可変ピッチ式と呼んでいるが可変ピッチ機構およびマグネット式強風対策は、原理が簡単でその効果を作り出すことができるので、教材として学校教育にも適用できる風車である。

### 参考文献

- (1) 白相国：千葉大学修士論文「中国・内モンゴル向けマイクロ垂直軸風車の回転特性の向上と強風対策」、(2011)。
- (2) 西沢良史・田口智之・小野寺孝好・牛山泉：「垂直軸セイルウィング型可変パドル風車の特性に関する実験的研究」、動力・エネルギー技術の最前線講演論文集、2009(14)、43-44、2009-06-28、日本機械学会。
- (3) 関和希・牛山泉：『さらなる風を求めて垂直軸風車』、パワー社、2008年。