

公益信託 エスペック地球環境研究・技術基金

2022年度 研究報告書

ブレードピッチ制御機構を持つ高効率の直線翼垂直軸風車の開発

2023年 10月

東京都立産業技術高等専門学校

ものづくり工学科 航空宇宙工学コース

小出 輝明

1. 研究目的

垂直軸風車の中で揚力型である直線翼型垂直軸風車は、水平軸風車に対して風向への指向性がなく、また重心を低くできる長所を持っている。一方、出力係数が低く、起動性が悪いという欠点があり、水平軸風車と比較して商業的に十分普及していない。ブレードピッチが固定されたダリウス風車では、ブレードに当たる相対速度に対する迎角が、周期的に大きく変動することから、十分に風からパワーを取り出せず、出力係数は0.15~0.20にとどまる。

これを改善するために、ブレードのピッチ角を周期的に変化させる研究が行われており、木綿ら(2008)、Kiwataら(2010)の可変ピッチ垂直軸風車は、風速8m/sにて周速比1.14で最大の出力係数0.22という性能を得て、Firdausら(2015)が8m/sにて周速比1.12で最大の出力係数0.25まで向上させている。小出ら(2018)はブレード前縁近傍に回転軸を通し、ブレード後縁と風車の両端円板をコイルばねで接続した簡易なピッチ可変機構で、風速8m/sにおける周速比1.0で最大の出力係数0.30を得ている。

本研究では過去のピッチ可変機構をさらに改善し、これらを超える性能を実現することを目指す。この可変ピッチの制御機構を理論的な振動解析を行った上で、ピッチ制御機構を搭載した風車の性能試験を実施し、可視化実験も合わせて研究を推進する。

2. 研究方法

本研究で提案する直線翼垂直軸風車のピッチ制御は、図1のようにブレード後縁と円板の縁を接続する弾性索の間に、一对のプーリを配置したものである。ブレード後縁側の弾性索は半円プーリに、両端円板側の弾性索はプーリと一体化したアームに掛けている。

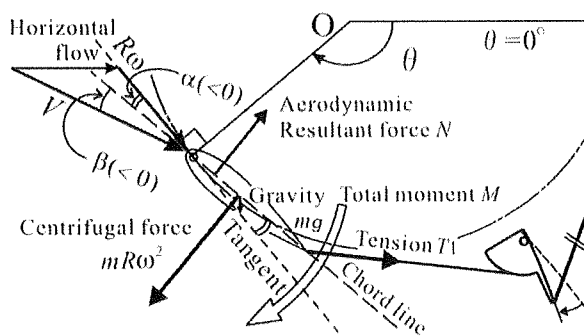


図1 ピッチ制御機構を搭載した風車

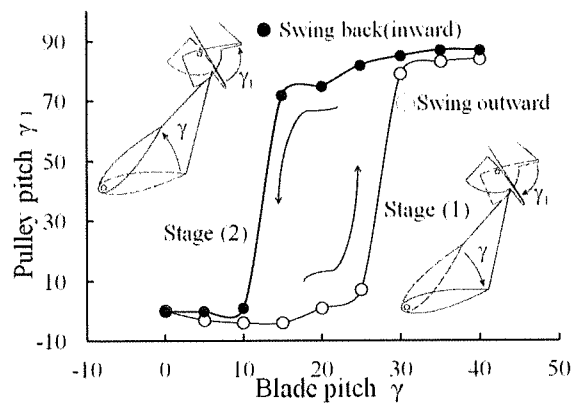


図2 風車静止時の静的ピッチ変化

小出ら(2018)はブレード後縁と風車両側円板をコイルばねで拘束する単純な機構でピッチ制御を行っている。これはブレードの流体振動が抑制されるよう、微妙な調整がなされれば、高い性能を発揮する。しかしこの1自由度強制振動の固有円振動数を小さくしてはく離を発生する強制振動を抑制するには、ブレード翼弦長を大きくすることが必要である。これはソリデティのような他のパラメータにも影響するので、それ以上の性能向上は難しい。

そこで本研究は、図1のような小出らのブレード後縁を拘束する弾性索の間に、半径比が変化する半円プーリ+アームを設けた。するとブレードの旋回にあわせて、図2のようにプー

一りとアームの旋回角の間に、ヒステリシスが現れる。これはブレードがいったん跳ね上がると、アームの復元モーメントは抑制され、風車下流側をはね上がったままブレードは周回できる。一方ブレードが跳ね上がるまでは、アームが大きな制動モーメントで、ブレードの跳ね上がりを抑制する。この動作が相対速度ベクトルに対して、最適なブレードピッチ変化サイクルを実現する。

図3にこのピッチ制御をモデル化したものを示す。これは2自由度系の振動モデルとみなせるが、実際の動作は図2に準じて、ブレードとプーリは別個に振動する。そのためブレードとプーリが同時に連成して、複雑な振動パターンとなることを阻止している。

このピッチ制御の振動モデルを示すことで、風洞実験での風車供試体の実験から、実機の風車ための一般的な設計に拡張できることを目指す。

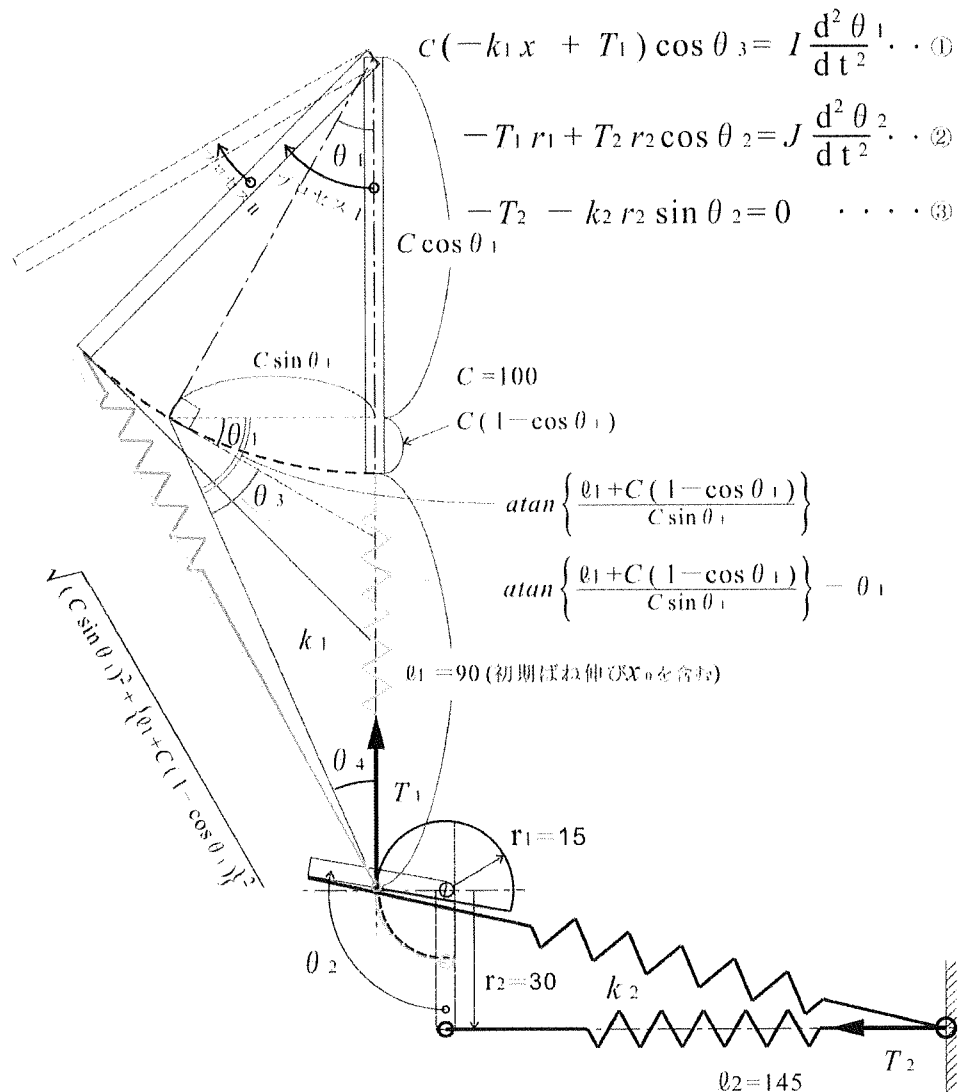


図3 ピッチ制御モデル

図3のピッチ制御装置を搭載した風車での、ブレードピッチの変化パターンを図4に示す。上流側 ($\theta = 180^\circ$ 側) ではブレードは風車内側に折りたたむようにして周回し、下流側 ($\theta = 0^\circ$ 側) ではブレードは外周方向にはね上がる。このピッチパターンは、風の相対速度ベクトルによく最適化された迎え角を得られるものである。そのため下流側でのブレード表面上のはく離失速が起きにくい。

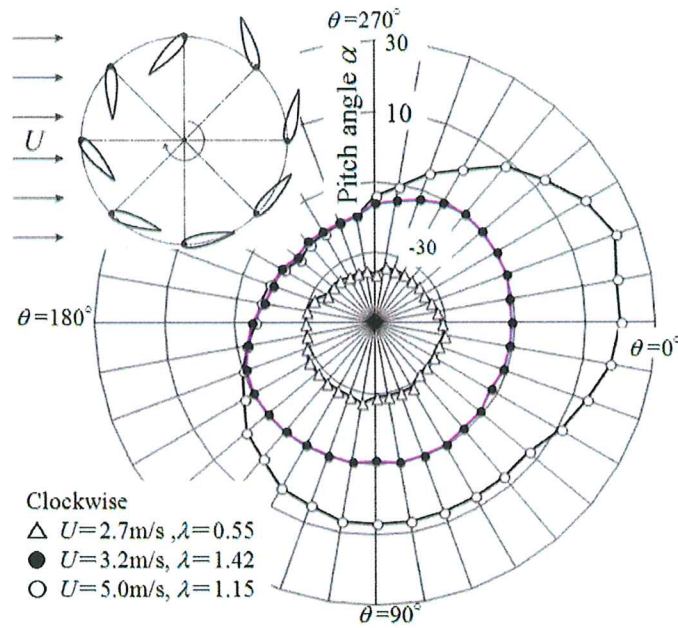


図4 無負荷試験のピッチ変化分布

このように風速 U と回転速度 $R\omega$ との合成速度ベクトルである相対速度 V を受けて、ブレードはピッチ角 $\alpha \approx -10 \sim 60^\circ$ の範囲で変化させる。ここで ω は角速度、周速比 $\lambda = \omega R / U$ である。出力係数 C_p は以下のように流体のパワーで風車の発電電力 P_W を割ったものである。

$$C_p = P / \left(\frac{1}{2} \rho A U^3 \right)$$

3. 試験方法

図5のように、3枚羽根風車の主軸方向長さは両端円板を含めて400 mm、風車半径 $R=175$ mmまた両端円板直径 $D = \phi 400$ mmである。ブレードについて、寸法は翼弦長 $c=120$ mm、翼幅392 mmである。風洞試験として流路寸法 高さ650 mm×幅550 mmの回流式風洞にて、試験を行う。ピッチ変化状況を観察しやすいよう、風車は横置きにして主軸両端を支持した。

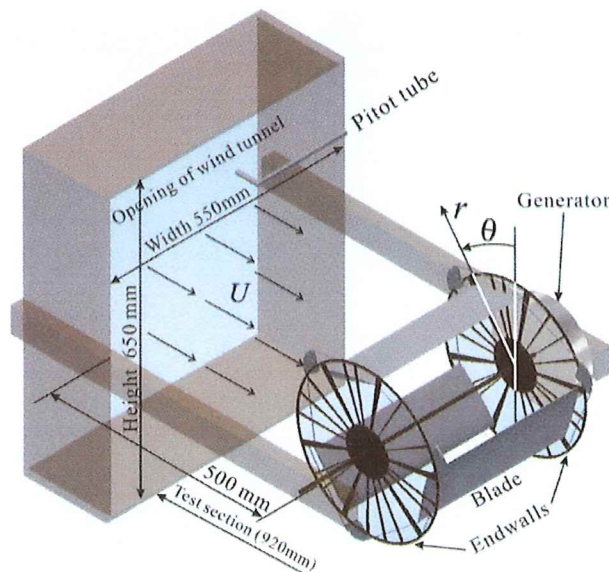


図5 性能試験装置

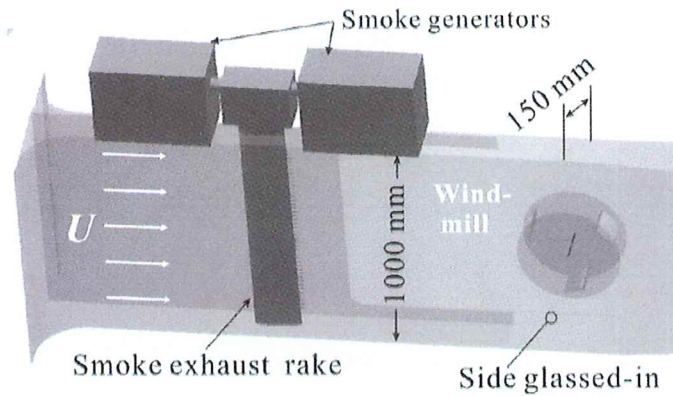


図6 可視化試験

図6のようにブレードピッチの動作状況と風車まわりの流れを観察するために、流れの可視化を行う。両端円板は透明で風車内部の流れを観察できる。風車模型の上流から、油煙を流脈線として流出させた。流路の上下面のシート状の可視光で、風車まわりの流れを照射する。

本研究助成では、この流れの可視化の改善を中心に組み組んだ。ブレードまわりの流れの情報、しかも実験の可視化流れは、性能向上のために重要である。しかし従来、風洞試験での風速8m/sよりはるかに小さい風速4m/sの下でしか実施できなかった。これは油煙が拡散され、可視化と画像計測が困難になるためである。そこで本研究費助成により、油煙発生装置を購入し、既存の装置と並列で油煙を楕円ノズルに注入することで、まずは風速5m/sで明瞭な可視化画像を得ることを目論んだ。

4. 現時点までの実験状況と申請に係る問題点

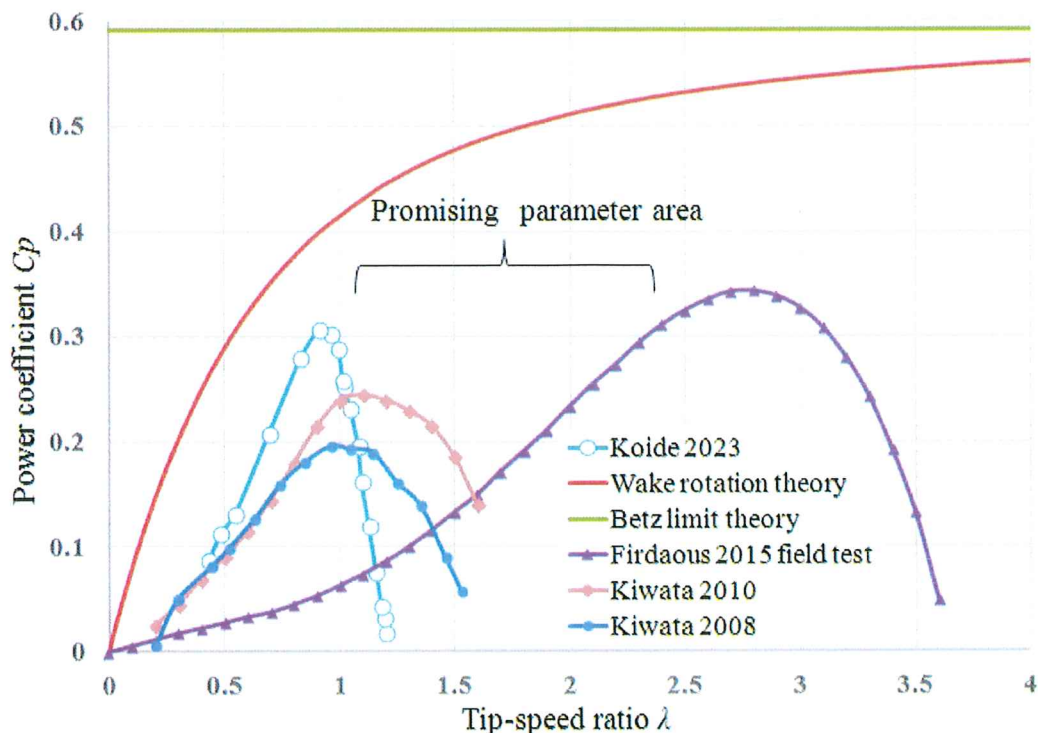


図7 現時点での性能試験結果

揚力型垂直軸型風車でブレードピッチを可変とした、高性能の風車をピックアップして図7に性能値の分布を示す。縦軸は風車性能値として代表的な出力係数 C_p であり、横軸は周速比 $\lambda = \text{周速度}R\omega / \text{風速}U$ である。本研究の最新2023年の成果である Koide 2023をプロット○で示す。これはすでに可変ピッチ風車の代表的な実績である、Kiwata 2008, 2010を上回っている。

今後の研究では、性能曲線の最高性能点での周速比 λ を増加させるよう、ソリデティ $\sigma = 3c / \pi D$ を減少させれば、図中の理論値、Wake rotation theoryに沿って、実験値も増加できると考えた。Firdaous 2015による野外試験では、非常に大きな $\lambda = 2.8$ で $C_p = 0.29 - 0.34$ を発揮している。本研究が $\lambda = 0.95$ で $C_p = 0.31$ に到達していることから、 $\lambda = 1.0 \sim 2.3$ の範囲に最高点をおくように設計することで、さらなる国際的にも最高水準の性能を達成するため、引き続き研究を継続している。

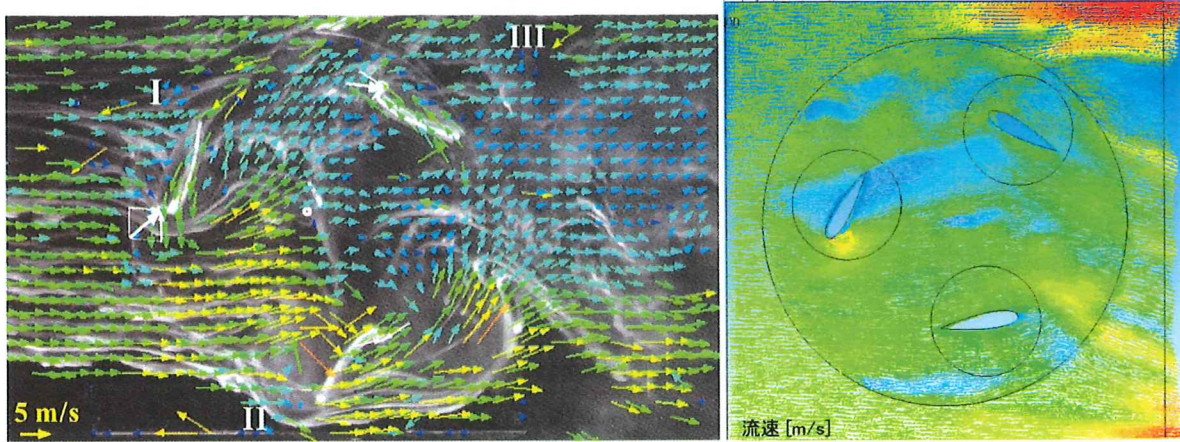


図8 風車まわりの流れの可視化, $U=5\text{m/s}$, $\lambda=1.0$ 図9 数値計算結果

図8のような可視化結果は、図7の性能特性と図4のピッチ変化分布との関連性を示すために、不可欠な情報である。従来、風車が可視化トレーサ（水+グレコロースの気化煙）をかき乱し、明瞭な流れの可視化撮影を困難にさせていたが、本研究助成により、可視化トレーサの発生装置を2台設置し、並行してノズルにトレーサを注入することで、図8のような良好な流れの可視化が可能となった。この仕組みは優れており、今後、さらに大きな風速6m/sで撮影にもチャレンジしていく。

さらに流れの数値計算を行い、各ブレードが1周する間に、アジマス角に関して発生トルクがどのように変化するかを、定量的に把握できれば、風車性能とブレードピッチの変化サイクルとの関係を明確に示すことができる。そのためCradle社Scflowを用いた数値計算を行い、実験結果と定性的に良好に一致する結果が得られるようになっている。

5. まとめと今後の見通し

今後はWake rotation theoryの理論にしたがって、風車のソリデティを0.26から0.24へ小さくし、すなわちブレード翼弦長110mmから100mmに小さくして、性能試験の結果向上を図っていく。本報告書執筆時点で、風速8m/sにおける周速比1.0あまりで最大の出力係数0.32を得るなど、さらなる性能向上の更新に成功している。また当初の計画では示していなかった、風車まわりの流れの数値シミュレーションが、可視化実験による流れと定性的によく一致する

ようになり、今後はブレードの発生トルク、揚力など、風車性能の向上のために、有用な物理量が豊富に得られる見通しが立った。さらに風車まわりの流れの可視化を、当初計画の風速5m/sを達成したことはもちろん、さらに風速6m/sに増加させ、実施する見込みも立った。

直線翼垂直軸風車は、1で述べた特性から陸上部での小中型風力発電に向いている。一方で水平軸風車と比べて自己起動性と出力性能で劣り、プロペラ型風車のように広く利用されていない。この垂直軸風車の欠点を改善するために簡易な可変ピッチ機構を持たせ、さらに風車設計を容易にするための振動解析を行うことで、一般的な普及に貢献することを目指す。

研究実績

小出, ブレードピッチの可変機構を備えた垂直軸風車の開発研究, 第44回風力エネルギー利用シンポジウム, 一般研究発表講演論文集p. 272-275, 科学技術館, 2022年 12月 2日