

垂直軸風車のブレードピッチの可変機構に関する開発研究

Development on a vertical-axis wind turbine with straight blades whose pitches controlled

小出 輝明¹⁾

Teruaki Koide¹⁾

Abstract : Design and performance tests had been done on a vertical-axis wind turbine equipped with straight blades whose pitch angles were controlled. Straight blades of the windmill were passively controlled due to resultant wind directions. Present simple pitch angle control had improved self-start at low wind speed (about 4 m/s). As wind velocity were increased, variable pitches changed into constant pitch angles automatically, i.e. the windmill transformed into normal vertical-axis wind turbine. Also, installation of linkage between trailing edges of blades was introduced for further improvement of the windmill performance. Wind tunnel test was attempted for comparison of the present wind turbines with and without link work. Flow visualization around the windmill gave useful information for explaining improvements of the performance of present windmill. Flow separations around the blades were found to give unfavorable influence for achievement of high performance.

Keywords : Vertical axis wind turbine, Flow visualization, Wind power generation, Blade pitch angle control

1. 緒言

直線翼垂直軸風車は、増速器および発電装置を地上付近に設置して、重心を低くできる利点などから、小中型風力発電に多用されている。一方で水平軸風車と比べて自己起動性と効率で劣り、さらに強風下での過剰な回転速度の発生などが、問題点となっている[1-2]。

この垂直軸風車の欠点、特に自己起動性の悪さを改善する方策の一つとして、ブレードのピッチ角を方位角に合わせて変化させる機構が考案されている。この可変ピッチ機構を持つ直線翼垂直軸風車は、ジャイロミル風車と呼ばれ、風見（尾翼）を持ち、図1のように風車主軸から偏心したプーリに同期させたリンク機構によってブレードピッチが周期制御される風車である[2~5]。アジマス角に合わせて複雑に変化する相対風速に合わせて迎え角を最適化するため、上流部ではブレードのピッチ角が増加し、下流側ではピッチ角が負角へ減少する。

木綿ら[5]およびKiwata et al. [6]は、このリンク機構の可変ピッチ風車の起動性や出力特性に関する、定量的なデータを示している。この風車は固定ピッチの直線翼垂直軸風車と比較して効率が高く、良好な自己起動性が得られる。しかしながら図1のような機械損失を伴う複雑な機構のため、ジャイロミル風車は実用的風車としてあまり普及はしていない。小出ら[7]はこのピッチ機構を簡

素化するために、相対速度に対称翼ブレード(NACA0016)を追従させ、ピッチを受動的に制御する方式を考案した。この簡易な機構を持つ風車を製作して風洞実験を実施し、最大発電効率0.34および最大周速比1.44という一定の性能を得ている。

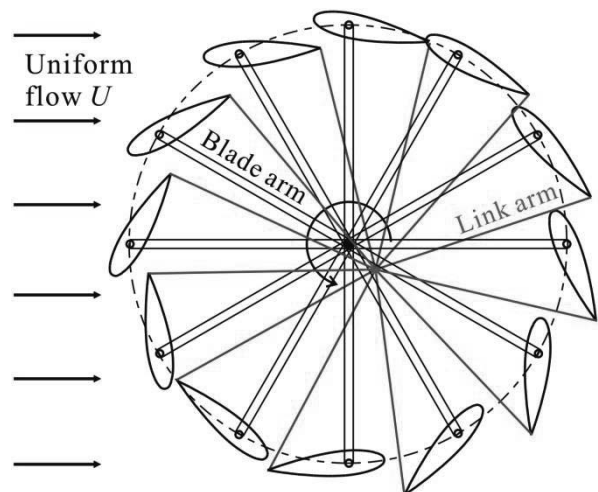


図.1 木綿ら[5,6]のリンク機構によるピッチコントロール

この小出らの実験では、ブレードピッチの自動調整により風速 $U=3\sim 4\text{m/s}$ では、揚力型風車と抗力型風車の特性が表れて起動を開始し、周速比 1.0 まで回転数が増加するとピッチ角が固定された垂直軸揚力型風車の特徴が現れ、実

¹⁾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

験での最大風速 $U=10\text{m/s}$ では過回転を抑制するために、ピッチ角が負の値に移行する結果となった。

本稿ではこの独自の簡易な対称翼ブレードピッチの変動機構をもつ風車の、さらなる改善を目指して可視化実験および風洞性能試験を実施し、その機構の有効性を検証する。とくに流れの画像計測により、トルク負荷や風速に合わせてピッチ制御のパターンが変化の様子と、ブレードまわりの流れを示し、流れと性能との関係を明らかにすることを目的とする。

2. 風車の可変ピッチ機構

2.1 ブレードピッチの制御機構

本実験で用いる風車の動作原理を図2に示す。アーム半径 R で固定した軸に、ブレードは自由に回転できるよう通されている。弾性を持つ索が、両翼端部の後縁と別のアームに結び付けられている。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 $\alpha \cong -10^\circ \sim 60^\circ$ の範囲で変化させる。ここで ω は角速度である。また周速比 $\lambda = \omega R / U$ を定義する。ブレード軸はモーメントが大きく得られるよう、前縁よりの翼弦長 c に対して 8.0% の位置とした。

なお一樣流 U は風車に接近するにつれ、図2中の平行速度成分のように大きく減速する[7]。たとえば $U = 4.0\text{m/s}$ では周速比 $\lambda = 0.5 \sim 1.0$ で、平行流は U の約 50% まで減速する。したがってピッチ角の最適な変化が、図2以降の概略図で分かりやすいよう、図中に平行流の減速を考慮して描き入れた。

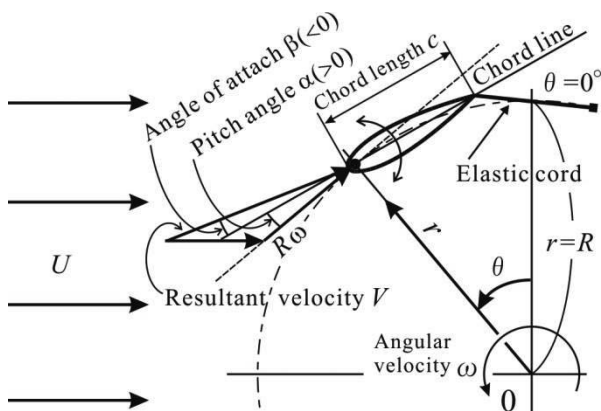
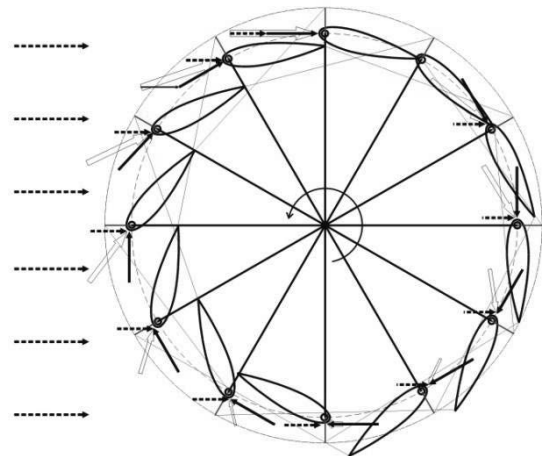


図.2 相対速度 V を受けて変化するブレードピッチ
(平行流は風車正面で約 50% 減速)

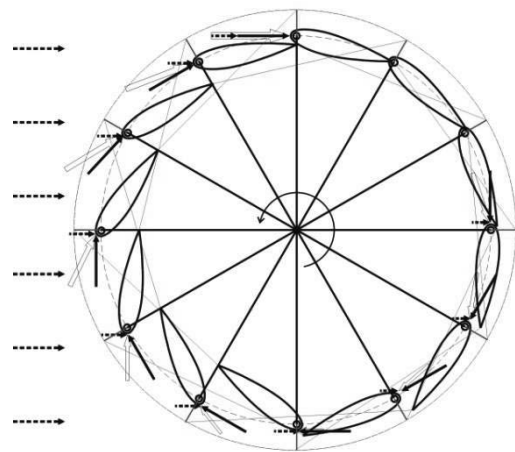
図3にブレードに作用する相対速度によって、ブレードピッチが自動的に調整される、本風車の基本動作を示す。風速が低い、あるいは負荷トルクが大きく、周速比 λ が小さい場合や風車が起動した状態 ($U \cong 3 \sim 4\text{m/s}$) では図3(a)の模式図のように、上流部すなわちアジマス角

$\theta \cong 90^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で、平行流は追い風となってブレードに当たる。そのため図2のブレード迎え角 β は負となる場合があり、揚力は中心軸側に向けて作用し風車駆動を阻害する。

このため弾性索がこの上流側で大きなピッチ角 $0^\circ < \alpha < 60^\circ$ をなし、なるべく迎え角 $\beta < 0$ となるアジマス角 θ の範囲を狭くするよう、自動的に α を調整する。また $\theta \cong 180^\circ$ でブレードは、相対風速 V にあわせてピッチ角 α を正から負に急に転換し、下流側でのほく離を起きにくくする。この α の周期的変動により、風車は性能面で揚力抗力風車の特徴を示す。



(a) $\lambda = 0.75$ におけるブレードピッチ変化パターン



(b) $\lambda = 1.0$ におけるブレードピッチ変化パターン

図.3 λ によって変化するブレードピッチ変化パターン
(.....▶ : 平行流, —▶ : $R\omega$, ⇨ : V)

周速比 λ が増加していくと、図3(b)のようにブレードは回転中、通常の直線翼垂直軸風車に近い動作に移行していく。しかし常に上流部の相対速度 V は、図中に示すように $\beta < 0$ となりやすく、揚力は外周面側を向きにくく風車回転を妨げる傾向がある。本研究ではこの点の改善に注目して取り組んだ。

弾性索は模型飛行機用動力ゴム (FAI社 TANI) 厚さ 1.0 mm×幅 1.6 mm を用いた。この動力ゴムのばね定数 k を、ブレードのピッチ制御に用いられる伸び $\Delta l=0\sim 45$ mm で、図 4 の $k-\Delta l$ 曲線のように示した。

ブレードとの弾性索の接続については、弾性索 1 組を自然長 $l=150$ mm, もう 1 組を自然長 $l=160$ mm とし、ブレード後縁と補助アームとに結び付け、1 組は常に引張力が生じるように、もう 1 組はたるませて $\Delta l > 10$ mm から張力が働くようにして、ばね定数を低下しにくくした。

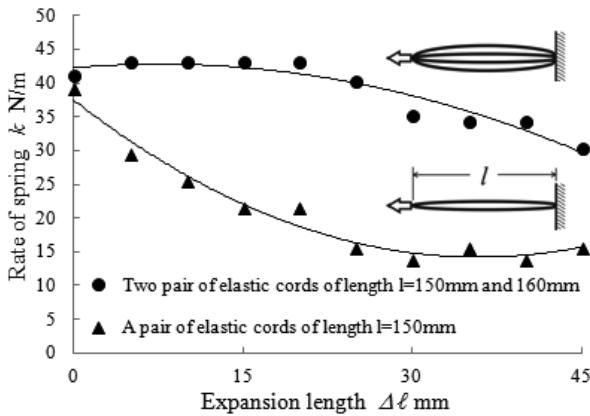


図 4 風車に用いた弾性索のばね定数

2.2 ブレード軸まわりのモーメントの釣り合い

ブレードピッチを弾性索のみで制御する場合、図 5 のように周速比 $\lambda \approx 1$ として、相対速度ベクトル V は上流側のアジマス角 $\theta=50^\circ$ において、迎え角 β が負となるため揚力と抗力の合力である空気力 F は中心軸側を向き、風車を回転させるモーメントと逆向きのモーメントを発生する。相対速度が一番大きい上流付近に限って、揚力が大きな割合を占める空気力を有効に活用できなければ、当然効率も減少する。

このため上流側を通過するブレードのピッチ角 α を、大きくとるような改善策を検討した。ブレード軸まわりのモーメントの釣り合いを式(1)に示した。ここで重力加速度 g およびブレード 1 枚の質量を m とする。

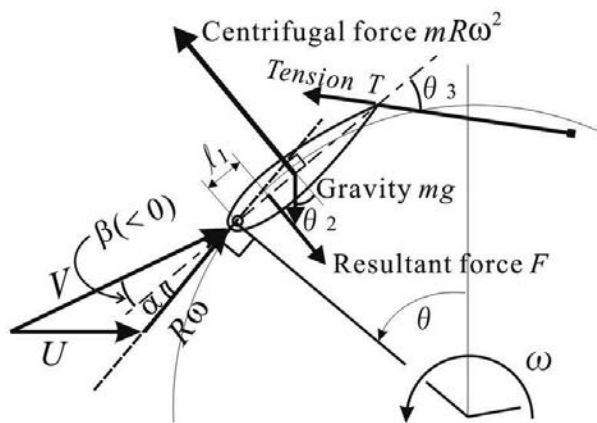


図 5 ブレード軸まわりのモーメントの釣り合い

式(1)の左辺第 1 項の F が中心軸側を向いているために、時計回りのモーメントを生じると、風車の反時計まわりの駆動を減殺してしまう。

$$F l_1 \sin \theta_1 + m l_1 / 2 (R \omega^2 + g \sin \theta_2) = T \cdot C \cos \theta_3 \quad (1)$$

2.3 ブレード間リンクの付加によるピッチ制御の改善

2.2 節のピッチ制御に付加する機構として、図 6 のように各ブレードの後縁どうしを直径 1.5mm のポリウレタン製のテグスでリンクさせ、上流側を通過するブレードのピッチ角 α を大きくさせることで、迎え角 β が正の値となるアジマス角 θ の範囲を大きくする機構を考案した。

$\theta \approx 180^\circ$ 付近のブレードが図 3 のように後縁を外周方向へ大きく跳ね上げると、上流側のブレードの後縁を引っ張り、 α より大きくさせる。

モーメント釣り合い式(1)に対して、リンクによる新たな張力が現れるが、この力はリンク索のなす三角形でつり合って閉じるため、風車全体の回転力には影響しないものと考えた。

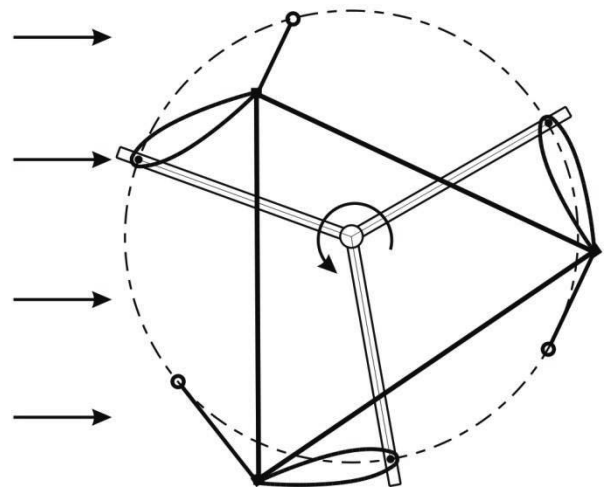


図 6 後縁リンクを追加したブレードピッチ制御

3. 供試体、試験装置および試験方法

3.1 風車供試体

図 7 および図 8 のように、3 枚羽根または 4 枚羽根風車の主軸方向長さは 420 mm である。ブレードはアルミチャンネル材のアームの、半径 $R=175$ mm の位置に固定された、直径 5.0 mm のアルミパイプの軸に通されている。翼弦長 $c=120$ mm, 翼幅 400 mm のブレードの断面形状は、対称翼型 NACA0016 である。ブレード支持用の主アームと、さらに弾性索固定用の補助アームを骨として、傘状に厚さ 0.1 mm のビニール膜を張り、両端板とした。揚力抗力の利用では、この両端板が有効に作用すると考えた。ソリディティ σ は $\sigma=3c/2\pi R$ で定義され、本風車は $\sigma=0.313$ である。

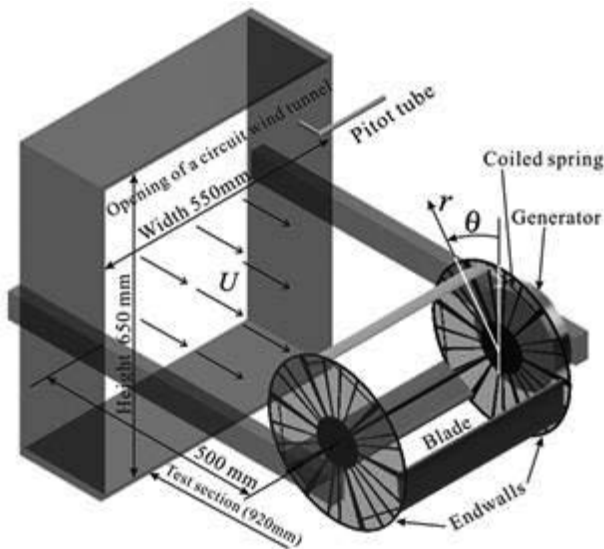


図. 7 性能試験用の風車供試体の風洞設置状況

3.2 可視化実験

相対速度 V によってブレードピッチが自動的に調整される本風車の動作機構を確認し、さらに性能と風車まわりの流れとを関連づけるために、流れの可視化を行った。

図 7 での風車に対し、 $r-\theta$ 面に関して縮尺 1:1.2、主軸方向長さ 148 mm の縮小風車を製作した。直径 360 mm × 厚さ 1.5 mm の透明アクリルの円板を、両端板とアームを兼ねた部材とし、直接ブレード軸を固定した。低風速下で可視化実験を行うため、ブレードに作用するモーメントは小さい。そのため弾性索はブレード後縁の片側のみ、流れの観察を妨げない奥側に取り付けられた。

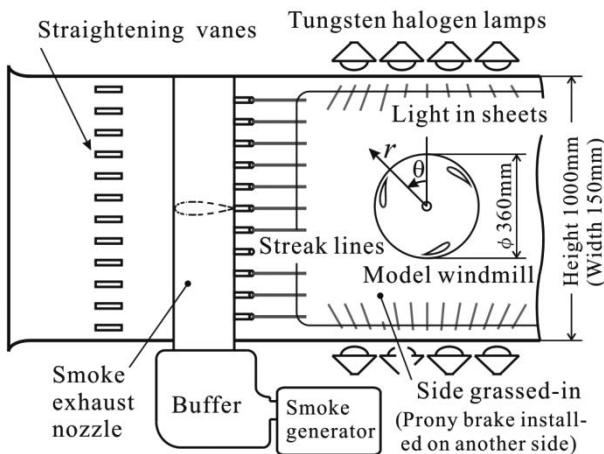


図. 8 可視化実験用の風車供試体の風洞設置状況

図 8 の可視化用風洞は、流路幅（奥行）150 mm × 高さ 1000 mm である。風洞の試験領域の部分は、手前側の側面がガラス張りとなっている。その反対の奥側の側面上の試験領域の中央部に、可視化用風車の主軸を軸受を介

して取り付けられた。また風洞奥側の側面より外部に突き出た主軸に、摩擦トルクを調節できる機構を備えた。

風車模型の上流から、油煙を流脈線として流出させた。流路の上下面の幅 6 mm のスリットを通してシート光が、流路中央部での風車まわりの流れを照射する。

この流れをデジタルビデオカメラにより撮影し、画像処理による速度分布の計測を行った。動画をフレームレート 960 frames/s で撮影した。撮影条件はピクセル数 709 × 404、シャッター速度 1/250 s、35 mm フィルム換算時の焦点距離 25 mm、絞り値 3.5 である。

この可視化動画から、輝度差累積の逐次棄却法を用いた濃度パターン追跡アルゴリズム [11] により、速度ベクトル分布を得た。これに用いた画像解析ソフトは Flow-PIV ver.5.4 [(株)ライブラリー] である。

この輝度差累積の逐次棄却法での追跡パラメータとして、ベクトルを計測する点の画素間隔は 9 × 9、計測点の移動先を探索する画素範囲は 31 × 31、濃度むらパターンを比較し計測点を中心に追跡する画素サイズは 11 × 11 に設定して、画像解析を行った。

3.3 風洞試験

供試風車を図 7 のように流路高さ 650 mm × 幅 550 mm の回流式風洞の、長さ 920 mm の流路開放部に設置して、試験を行った。ブレードの動作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。

風車性能として、回転主軸に直結した発電機の電力を測定し、発電効率を求めた。発電機はアウターローター形コアレス構造 3 相発電機 [(株)スカイ電子製 SKY-HR160] である。本研究では発電機効率を含む、式(2)のような風車発電効率 η を求めた。

発電電力 P [W] を、風車に流入する密度 ρ [kg/m³] の流体の持つパワーで割り算出される。 P [W] は発電電力、 ρ [kg/m³] は空気密度、 A [m²] は風車投影面積である。別の試験で発電機単体の効率 η_1 を、トルクメータ [(株)小野測器 SS-050] と、電力計による測定で求めた。その上で、式(3)のように同じ負荷抵抗および同回転数における η の値を η_1 で除し、パワー係数 C_p を求めた。

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

$$C_p = \eta / \eta_1 \quad (3)$$

4. 実験結果

4.1 可視化結果

4.1.1 画像計測から得られる定量的な流れ場の挙動

小出ら[7]は2.2節のリンクなしの弾性索を用いた可変ピッチ風車について、油煙が拡散せず画像処理が容易な $U=4.0$ m/s について可視化を図9のように行っている。その流れ場に関する議論は、ブレードまわりの流れのはく離などの定性的な流れの把握にとどまっている。

本稿では定量的な流れが得られている利点を生かし、第2章で記したさまざまなアジマス角における、ブレードに作用する相対速度ベクトルの大きさと向きを定量的に示し、リンク付きおよびリンクなしのピッチ可変機構の有効性を議論する。

図9は $U=4.0$ m/s および $\lambda=1.21$ での流れであるが、平行流成分について注目すると、図9左はじの風車上流に平行流れが接近している時点で、すでに U に対して約55%まで減速している。高い周速比でケースであるため、風車内部に流入した流れは、さらに約20%にまで減速する。相対速度 V を見積もるには、一定である周速度 $R\omega$ に対し、平行速度成分が大きく変化することを考慮せねばならない。

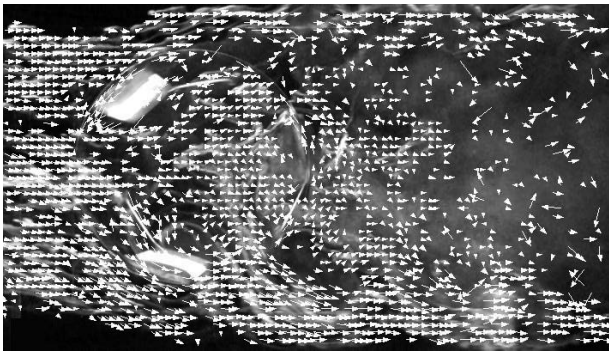


図.9 画像計測で得られた風車まわりの速度分布 ($U=4.0$ m/s, $\lambda=1.21$)

4.1.2 リンクなし風車まわりの流れ場の挙動

リンクなしの可変ピッチ機構について、 $U=4.0$ m/s に関する低周速比 $\lambda=0.61$ および高周速比 $\lambda=1.21$ の流れを、あらかじめ画像計測を施し、ブレード前縁付近の速度ベクトルから相対速度 V を見積もった結果を、図10および図11に示す。 V などの速度ベクトルが見やすいように、全体のベクトル分布は示さない。

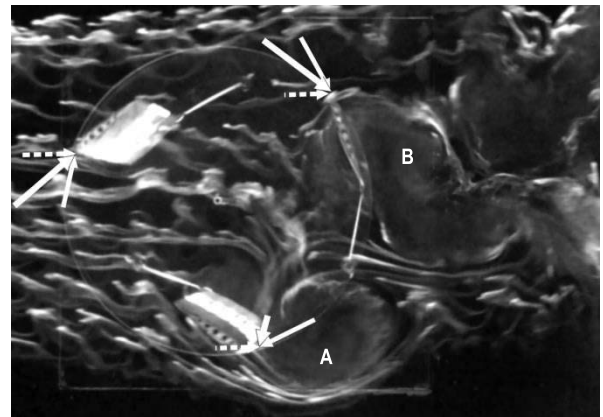
λ の値はブローニーブレーキにより、風車主軸に与える負荷トルクを調整することで設定した。流路幅にわたって横置きにした風車中央部に、トレーサ油煙を流すので2次元流れである。

まず低い周速比 $\lambda=0.61$ での流れを図10に示す。図10(a)ではまず図中下のアジマス角 $\theta \approx 180^\circ$ のブレード付近から風車外部へ吹き出す、大きな再循環領域 A が目を引くが、定量的には追い風の平行流により相対速度 V はきわめて小さい。この図では下流側の $\theta \approx 300^\circ$ のブレード

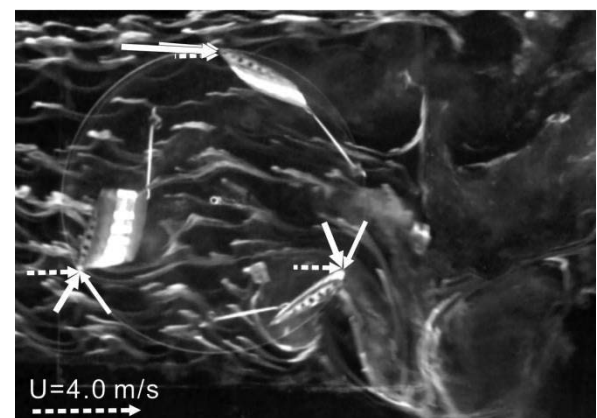
ド外周面に大きなはく離 B を発生していることが重要である。

大きな負荷が主軸に作用することにより、周速度が $R\omega$ が低下すれば V に対する迎え角 β が大きすぎて失速し、風車の駆動力が低下する。はく離渦 B の発生を回避するには、弾性索の張力を弱く設定しピッチ角 α を小さくすればよいが、一方上流側 $\theta \approx 60^\circ$ のブレードに着目すると、弾性索がブレードを引っ張り、ピッチ角 α を大きくとらせることで、迎え角 β が負に転じることを抑えている。

このように弾性索のみでピッチ角を制御するのは、全周の θ にわたって有効ではないことが分かる。図10(b)において図上部の $\theta \approx 0^\circ$ のブレードのみに、揚力が良好に発生し、上流部のブレードは $\theta \approx 90^\circ$ を通過すると、 β が負の値に転じ、揚力は中心軸方向へと向くため風車の駆動を妨げる。最下流側のブレードは $\theta \approx 180^\circ$ で急激に α を正から負に転じ、 V に対応しようとしているが、 λ が小さすぎてはく離している。



(a) 速度分布から得たブレードにあたる相対速度ベクトル (.....: 平行流, —: $R\omega$, —: V)



(b) 0.059s 後

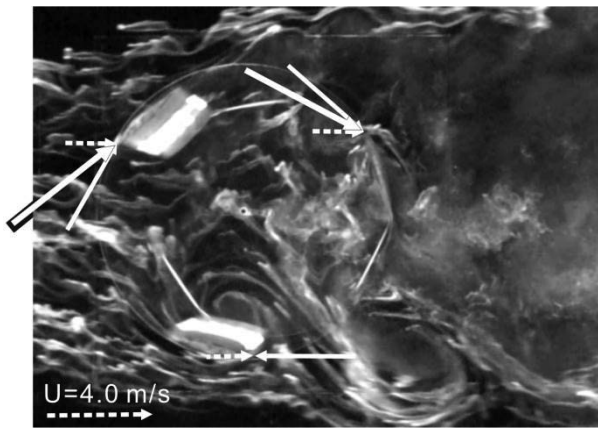
図.10 リンクなし風車でのブレードに作用する相対速度 ($U=4.0$ m/s, $\lambda=0.61$)

ここで図中の速度ベクトルは、ブレードの周速度 $R\omega$ が画像計測のベクトルと風車回転数の計測値から求められる $R\omega$ とで関係づけることで、 U の大きさを割り出した。

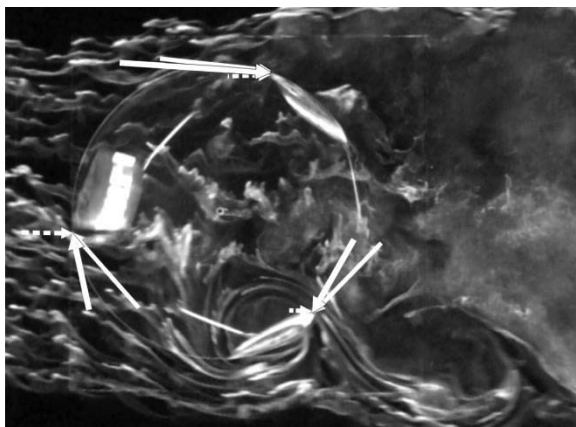
また画像中の平行流は、すでに風車に接近しており小さい λ でも U の約 50% まで減速する。しかし $\lambda=0.61$ では風車の内部でも下流へ排出されるまでは、平行流はほとんど減速しない。

つぎに図 11 では風車主軸にかかる摩擦トルクを小さくして、 λ を大きくして $\lambda=1.21$ としている。このため V が上流側また下流側においても、ブレードに好ましい β で当たり、 $\theta \approx 100^\circ \sim 150^\circ$ を除いてはく離しにくい。

このように $\lambda=1.21$ ではく離が起きにくく、ピッチ制御がうまく機能しているように見える。しかし図 10 のとおり発電による負荷トルクが作用している条件下で、風車の回転に寄与するように本機構が作動しなければ意味がない。そこで λ が小さくなったときにも、リンク機構が対応できるか、図 12 の可視化実験を実施した。



(a) 速度分布から得たブレードにあたる相対速度ベクトル (.....▶ : 平行流, —▶ : $R\omega$, —▶ : V)



(b) 0.022s 後

図. 11 リンクなし風車でのブレードに作用する相対速度 ($U=4.0 \text{ m/s}$, $\lambda=1.21$)

4.1.3 リンクつき風車まわりの流れ場の挙動

小出ら[7]の実験では性能が最大となる $U=10.0 \text{ m/s}$ に対し、可視化は低風速 $U=4.0 \text{ m/s}$ で行っている。本稿ではこれら風速の大きさの差異を小さくして、把握した流れ場と性能との関係を、より正確に把握するために、リンク機構については $U=5.0 \text{ m/s}$ での可視化を試みた。

$U=5.0 \text{ m/s}$ での可視化計測では流脈線の拡散が、3枚ブレードでの可視化を妨げ、とくに風車内部から下流へ排出される再循環領域が、最も注目している下流側ブレードの外周面ではく離の発生を不明瞭にした。そこで4枚ブレードの風車で実験を試みたところ、明瞭とは言い難もののこの現象を把握できたので、その結果を示す。

$U=5.0 \text{ m/s}$ で風車主軸に負荷をかけて $\lambda=0.68$ とした図 12 では、図中いちばん下の $\theta \approx 160^\circ$ でのブレードが、 $\theta \approx 180^\circ$ 付近を通過するとき急激に α を正から負に転じるが、このとき最上流側 $\theta \approx 90^\circ$ 付近を通過するブレードの後縁をひっぱり、 β を負に転じるのを遅らせる機能を持つ。

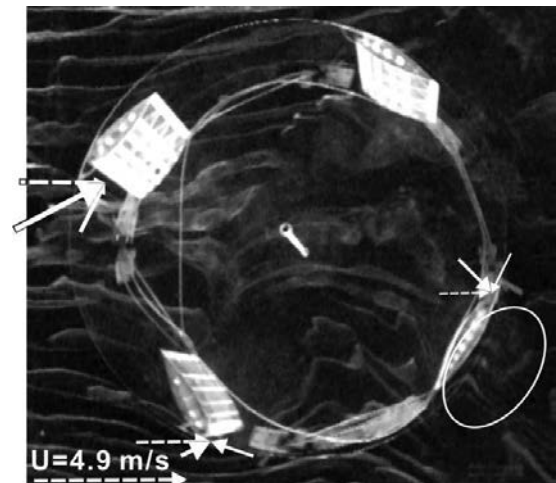


図. 12 ブレード間リンクを持つ風車でのブレードに作用する相対速度 ($U=5.0 \text{ m/s}$, $\lambda=0.68$)

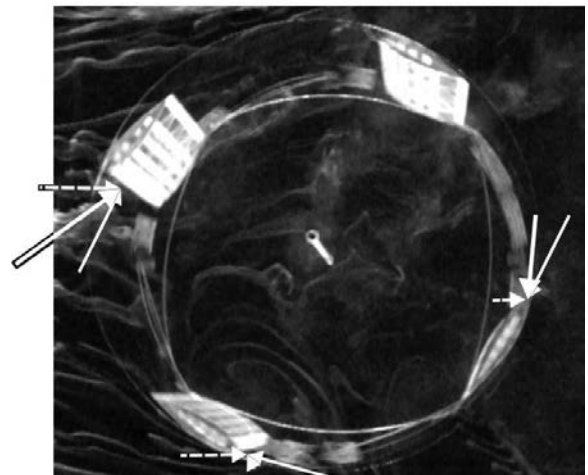


図. 13 ブレード間リンクを持つ風車でのブレードに作用する相対速度 ($U=5.0 \text{ m/s}$, $\lambda=0.98$)

このように $\theta \approx 180^\circ$ 付近でブレードが α を大きく変えるためのモーメントを、上流側ブレードのピッチ制御に分配することで、 V がもっとも大きくなる上流での迎え角の最適化に貢献している。しかし図 12 では上流側ブレードにモーメントを分配しすぎたブレードが、下流側 $\theta = 250^\circ$ にまわったときに、十分に α を負にできずに外周方向に外周面にはく離を生じており、負荷トルクが作用している状況下でのピッチ制御はやはり難しい。

図 13 ではトルクを小さくして $\lambda = 0.98$ としているので、 θ 全域にわたって、ブレードまわりの流れがきれいに剥がれずに通過している。これらの可視化結果を踏まえて、リンク機構の効果をリンク機構なしの場合とを次節の性能評価で比較し明らかにする。

4.2 風洞試験結果

図 14 のように風速 $U = 4.0 \sim 8.0$ m/s までの、周速比 λ および式(2), (3)より求められるパワー係数 C_p の分布をまとめた。リンク機構つきの場合をプロットで、リンクなしの場合を線種を変えて記載し、比較した性能曲線として図 14 にまとめた。なおすべて 3 枚羽根での結果である。

リンク機構つきの風車では、最大 $C_p = 0.21$ 、最大 $\lambda = 1.53$ と、リンクなしの場合では最大 $C_p = 0.21$ 、最大 $\lambda = 1.27$ となった。パワー係数 C_p の値はほぼ同等で、木城らの性能試験結果である $U = 8.0$ m/s で最大 $C_p = 0.20$ と同じである。しかしリンク機構付き風車が描く性能曲線の分布は、非常に特徴的なものとなっている。

リンクなし風車では $U = 4.0$ m/s から U とともに C_p 値を増加させて、 $U = 8.0$ m/s で最大 C_p 値となり、そこでの λ は小さくなっていく。弾性索のみのピッチ制御では、負荷トルクの増加に伴って下流側のブレード上ではく離を発生するので、性能曲線は急勾配であり、最大 C_p 値からわずかに最適トルクを超えると急激に性能が低下する。逆に λ が最適値から増加しても、上流側でのブレードの揚力の向きが好ましくない方向に転じるので、やはり性能は急低下する。これは垂直軸風車での一般的な特徴と同じである[5, 6]。

一方、リンクつき風車ではまず周速比が大きな値の範囲で分布している。木城らの可変ピッチ風車[5, 6]と同じで、垂直軸風車にピッチ可変機構を搭載したジャイロミル風車では、揚力抗力利用風車としての特徴を示すので、最大 C_p となる λ の値は、固定ピッチの垂直軸風車と比べてとても小さい。しかしブレード間をリンクさせただけで、 λ の値の範囲は広くなり、また性能曲線の勾配がゆるやかになり、ブレードまわりの失速が起きにくくなっていることが分かる。

さらに U の増加とともに $U = 6.0$ m/s で最大 C_p をとるが、それ以上 U を増加させても C_p は低下してしまう。

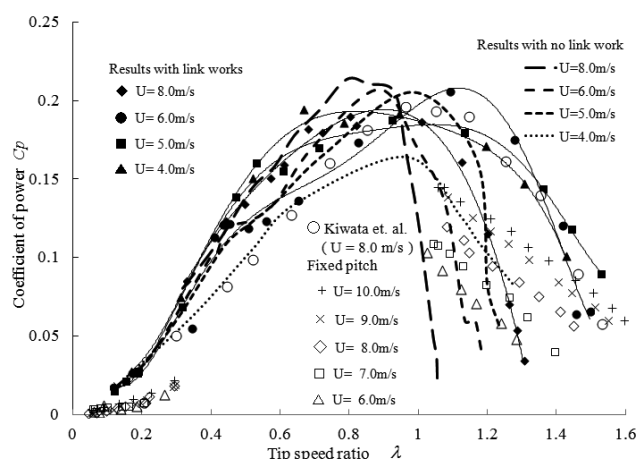


図. 14 ブレード間リンクありおよびリンクなし風車の性能試験結果

表 1. 各風車の性能試験結果まとめ

	可変ピッチ (リンクなし)	可変ピッチ (リンクあり)	固定ピッチ	木綿ら [5,6] の結果
最大周速比 λ max	1.06	1.53	1.60	1.53
最大パワー C_p max	0.21 ($U=8\text{m/s}$, $\lambda=0.79$)	0.21 ($U=6\text{m/s}$, $\lambda=1.09$)	0.15 ($U=10\text{m/s}$, $\lambda=1.07$)	0.2 ($U=8\text{m/s}$, $\lambda=0.96$)

本稿では可視化での U の値と性能曲線での値を近づけるために、弾性索やリンク索の調整において高い性能値の達成は重視せずに弾性索の張力は小さく設定した。それでも木城らの $U = 8.0$ m/s で最大 $C_p = 0.20$ に対して、同じ C_p 値がわずかに $U = 6.0$ m/s で得ることができた。今後、弾性索張力の調整等により、性能面での有効性を示す方向で開発を目指す余地があり、ある最適風速の値に達してさらに U が増加しても、過回転を抑制するという機能をも期待できる。

5. まとめ

垂直軸風車の弾性索による簡便なピッチ可変機構の開発を行い、さらにリンク機構による下流側ではく離失速と、上流側での迎え角の負への転換を抑制する機能を考察し、以下の成果と所感を得た。

- (1) 可視化画像計測により、ブレードに作用する相対速度を見積もった。これにより下流側ではく離失速と、上流側での迎え角の負への抑制の両立を目指すことが、垂直軸風車の性能向上への目指すべき方策であることが確認できた。
- (2) (1)を実現する機構を考案することは容易ではないが、これを目指したリンクつき風車が、風速 6.0m/s で過去の文献での最大パワー係数を超える性能を発揮する、今後の発展が期待できる結果を得ることができた。

- (3) (1)および(2)の成果の一方、PIVによる画像計測が風速5.0m/sでも流脈線の拡散により困難になってくることが分かり、今後の実験方法改善の課題となった。

参考文献

- [1] 関和市・牛山泉, 垂直軸風車, (2008), 40-68, パワー社
- [2] 松本文雄・牛山泉・西沢良史, 垂直軸風車製作ガイドブック, (2011), 21-60, パワー社
- [3] 松本文雄, 複雑な機構の垂直軸風車の製作, 風力エネルギー, Vol. 31, No. 1 (2007), p.99-102.
- [4] 松本文雄, ジャイロミル型風車モデルの製作, 風力エネルギー, Vol. 31, No. 2 (2007), p.144-147.
- [5] 木綿隆弘ほか: リンク機構による可変ピッチ式直線翼型垂直軸風車の性能に関する研究, 機論 B 編, Vol.74, No.748(2008), 125-133.
- [6] Takahiro Kiwata et al., Performance of a vertical axis wind turbine with variable-pitch straight blades utilizing a linkage mechanism, Journal of Environment and Engineering, Vol. 5, No.1(2010), 213-225.
- [7] 小出輝明・山田裕一, 簡素なブレードピッチ制御機構を持つ直線翼垂直軸風車の開発, ながれ Vol. 37 (2018), p.291-299.
- [8] 渡邊康一・大屋裕二・鳥谷隆, 垂直軸型風車の駆動原理の解明と集風装置の適用による高出力化, 第 21 回風工学シンポジウム論文集 CD-ROM (2010)講演番号 41.
- [9] 堀内健司・相良啓太・関和市, 垂直軸風車の性能予測と流れの可視化に関する研究(4), 第 33 回風力エネルギー利用シンポジウム (2011)p.268-271.
- [10] 李慶安ほか, 直線翼垂直軸風車周りの流れに及ぼす翼枚数の影響, 機論, Vol.80, No.816(2014), p. FE0223.
- [11] 加賀昭和・井上義雄・山口克人, 気流分布の画像計測のためのパターン追跡アルゴリズム, 可視化情報学会 Vol. 14 No.53(1994), p.38-45.
- [12] Bose Sumantraa R. et. al., “Numerical Analysis of Effect of Pitch Angle on a Small Scale Vertical Axis Wind Turbine”, International journal of renewable energy research, Vol. 4, No.4(2014), p. 929-935.