

翼揺動量制御機構を有した可変ピッチ式 直線翼垂直軸風車の性能*

Performance of a Vertical-Axis Wind Turbine with Variable-Pitch Straight Blades
by a Pitch-Angle Control Mechanism

山田 達郎*¹
Tatsuro YAMADA

木綿 隆弘*²
Takahiro KIWATA

喜多 哲義*³
Tetsuyoshi KITA

北村 利博*³
Toshihiro KITAMURA

吉田 晋治*³
Shinji YOSHIDA

土田 博一*³
Hirokazu TSUCHIDA

小松 信義*⁴
Nobuyoshi KOMATSU

1. 緒言

現在実用化されている直線翼垂直軸風車は、固定ピッチ式である。しかし、このタイプの風車は、低周速比域において、風車翼の迎角が大きく変動するため、起動性も悪く、十分なトルクおよび出力が得られない。そこで著者らは、直線翼垂直軸風車の性能を向上させるために、図1に示すような、長さ l_m の第1リンク(OP_1 間)、長さ l_s の第2リンク(O_eP_2 間)、長さ l_c の翼部リンク(P_1P_2 間)、長さ l_e の偏心リンク(OO_e 間、以後、偏心量)で構成される4節リンク(両クランク)機構による可変ピッチ式直線翼垂直軸風車を開発した。本機構により、風車の回転力のみで翼が揺動でき、リンク長さや風向に対する点 O_e の位置を調整することで、比較的簡単に流入風向に合わせ

たピッチ角の制御が可能である。これまでの研究で、本風車が固定ピッチ式の風車よりも、起動性や出力係数が良い一方で、風向に対する指向性があることを示した¹⁾。また、これまでに開発した風車はリンク長さを固定していたため、高周速比域では、翼を大きく揺動させることとなり、逆に風車出力が低下した²⁾。全周速比域で出力を向上させるためには、風車の回転数に応じて翼の揺動量を変える必要がある。そこで、風車運転中においてもリアルタイムで翼の揺動量(偏心量)を制御できる機構(以後、翼揺動量制御機構)を開発した。本報告では、翼揺動量制御機構の概要と本機構を搭載した可変ピッチ式の直線翼垂直軸風車の性能を示す。

2. 翼揺動量制御機構の概要

図2に翼揺動量制御機構の概略図を示す。翼揺動量制御機構³⁾は、内径が異なる偏心した2つの円筒カム(第1カム・第2カム)の組合せから成っており、ロータ中心部

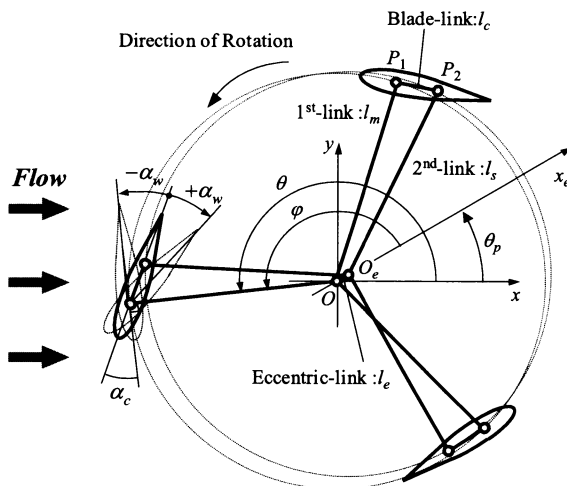


Fig.1 可変ピッチ角機構の概略図

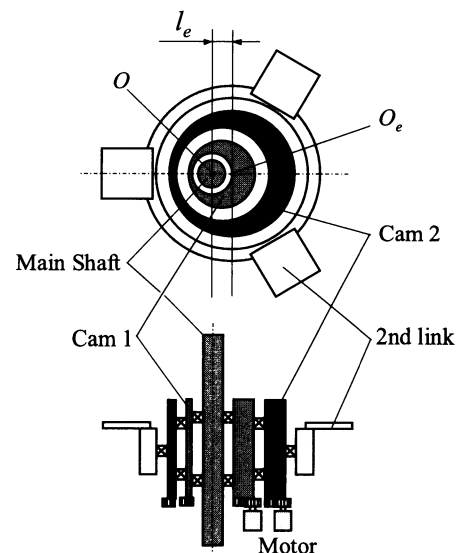


Fig.2 翼揺動量制御機構概略図

*平成20年11月28日第30回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

*1 会員 金沢大学大学院自然科学研究科(〒920-1192 石川県金沢市角間町) E-mail:yamada@ryuko.ms.t.kanazawa-u.ac.jp

*2 会員 *4 非会員 金沢大学理工研究域機械工学系

*3 法人会員 株式会社別川製作所(〒924-8560 石川県白山市漆島町1136)

に設置している。第1カムと第2カムには、ギアもしくはタイミングベルトを介して駆動用サーボモータが連結され、コンピュータ制御によって、独立した回転ができる。制御装置は、サーボモータにパルス信号を送るサーボドライバ、パルス演算を行うシーケンサ、各種電源装置などから構成されている。

翼の揺動量 α_w は偏心量 l_e に依存する¹⁾。偏心量 l_e は、第2カムを固定したまま第1カムを回転させることで任意に設定できる。図3にその際の偏心量 l_e の推移を示す。第1カムの回転角 $\theta_v = 0^\circ$ のとき、偏心量は最大の $l_{e,max}$ である。第1カムの回転に伴い偏心量は小さくなり、 $\theta_v = 120^\circ$ で半分、 $\theta_v = 180^\circ$ で $l_e = 0$ になる。この $\theta_v = 180^\circ$ のとき、本風車は固定ピッチ式風車になる。偏心量 l_e と回転角度 θ_v には次の関係式が成り立つ。式(1)中の $l_{e,max}$ は最大偏心量である。

$$l_e = l_{e,max} \cos \frac{\theta_v}{2} \quad (1)$$

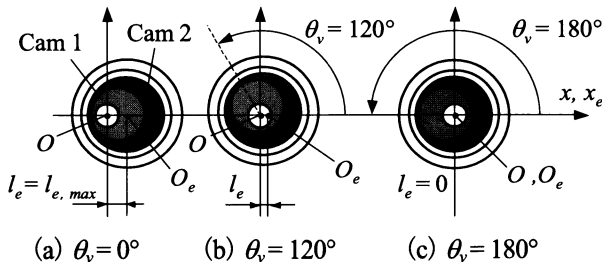


Fig.3 第1カムの回転による偏心量の推移

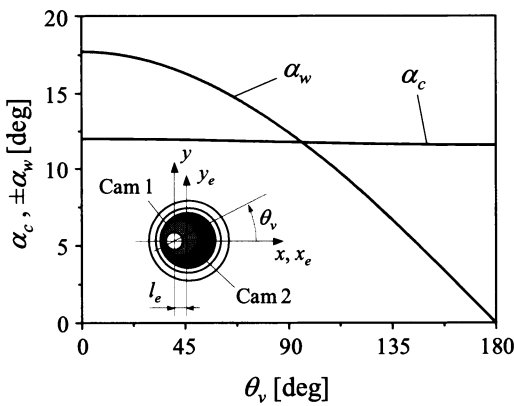


Fig.4 第1カムの回転角 θ_v と翼の取付角 α_c 、振れ角 α_w の関係

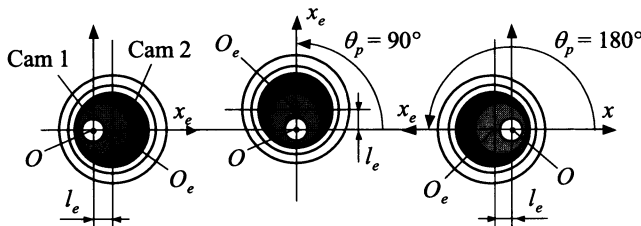


Fig.5 偏心角 θ_p と第1・2カムの位置関係

一例として、図4に第1カムの回転角 θ_v と翼の取付角 α_c 、振れ角 α_w の関係を示す。本風車の各リンクの長さは、第1リンク長さ $l_m = 1100\text{mm}$ 、第2リンク長さ $l_s = 1085.5\text{mm}$ 、翼部リンク長さ $l_c = 90\text{mm}$ であり、最大偏心量 $l_{e,max} = 20\text{mm}$ ($\theta_v = 0^\circ$)の場合には、風車が一回転する間に取付角 $\alpha_c = 11.7^\circ$ 、振れ角 $\alpha_w = 0^\circ \sim \pm 17.7^\circ$ で翼のピッチ角 $\alpha_p (= \alpha_c \pm \alpha_w)$ が変化する。翼の取付角 α_c は第2リンク長さ l_s に依存するので、第1カムの回転角 θ_v が変化してもほぼ一定値を示す。

偏心角 θ_p は、第1カムと第2カムを同時に同一方向に回転させることで制御できる。図5はその際の概要図である。本風車は偏心角により回転・停止するため¹⁾、偏心角を制御することで強風対策として利用できる。図6に強風対策システムのフローチャートを示す。本機構により翼揺動量制御と偏心角制御を同時に行い、全周速比域で高効率な運転が可能になる。さらに、強風時には偏心角を風車停止偏心角 $\theta_{p,stop}$ にして風車を停止させ、安全に運用できる風力発電システムとなっている。

3. 風洞実験装置と実験方法

供試風車は、翼枚数 $n = 3$ 、ロータ半径 $R = 1.1\text{m}$ 、翼スパン長さ $h = 2.0\text{m}$ の大きさで、翼弦長 $c = 0.3\text{m}$ のNACA63₄-221翼を装着し、取付角 $\alpha_c = 11.7^\circ$ 、振れ角 $\alpha_w = 0^\circ \sim \pm 17.7^\circ$ の条件で揺動させた。風車のソリディティは $\sigma (= nc/R) = 0.82$ で、定格出力は900Wである。風洞実験は、図7に示すような断面寸法W6.0m×H3.0mの測定部をもつ(株)IHIの大型大気乱流風洞で行った。乱れ強さは0.5%以内である。風車トルク T_w は、風速 V を一定とし、モータにつながれた風車の回転数 N をインバータで制御し、トルク計を用いて測定した。そして、出力係数 $C_p [= P/\rho$

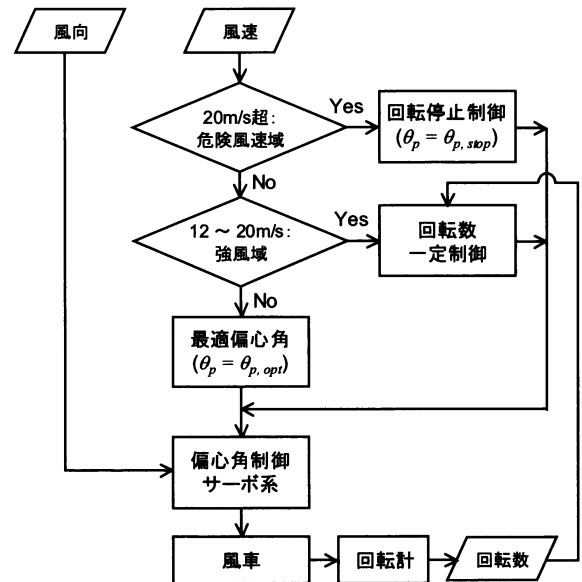


Fig.6 強風対策システムのフローチャート

RhV^3 , P : 風車出力, ω : 風車角速度($=2\pi N/60$), ρ : 空気密度, N : 風車回転数を算出した. また, 風車の起動性を見るため, また, 最適偏心角 $\theta_{p,opt}$, 風車停止偏心角 $\theta_{p,stop}$ を定めるために, 主軸とモータのカップリングを外した無拘束運転状態において実験を行った. 風車停止状態から風速を徐々に上げ, 風車が回転を始めたときの風速を起動風速 V_s とした. 風車回転数はデジタルタコメーターで測定した. 翼揺動量制御機構の第1・第2カムには, 原点サーチのためのリミットスイッチが取り付けられ, コンピュータによる遠隔制御により風車の偏心角 θ_p , 偏心量 l_e を任意の値に設定した.

4. 実験結果と考察

4.1. 偏心角・翼揺動量制御の影響

風速 $V=8\text{m/s}$ において, 無拘束運転時での偏心角 θ_p に対する風車回転数を周速比 $\lambda (=R\omega/V)$ で表して円グラフにプロットしたものを図8に示す. 風車回転数(周速比)は, 偏心角 θ_p によって, 風車が回転・停止したりする. いずれの振れ角 α_w において, $\theta_p=30^\circ$ 付近で周速比が最大になることから, 本風車の最適偏心角は $\theta_{p,opt}=30^\circ$ であるといえる. また, $\alpha_w = \pm 6.68^\circ, \pm 11.3^\circ$ において $\theta_p=135^\circ$ 付近で周速比が0になっていることから風車停止偏心角は

$\theta_{p,stop}=135^\circ$ であるといえる. $\alpha_w = \pm 3.02^\circ$ のように振れ角が小さくなると, 回転数(周速比)が減少する範囲がほとんどなくなる. この場合, 本風車が固定ピッチ式風車に近づくため偏心角の影響を受けにくくなる. したがって, 図6に示したような強風対策システムを実現するためには, $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$ のような大きな振れ角で偏心角の制御を行う必要がある.

最適偏心角 $\theta_{p,opt}=30^\circ$ として無拘束運転時における振れ角 α_w を変えた場合の風速 V と周速比 λ の関係を図9に示す. 振れ角が小さいと周速比の立ち上がりは鈍いが, 高風速域で高い周速比を得る傾向が見られる. しかし, 固定ピッチ角の振れ角 $\alpha_w = \pm 0^\circ$ では周速比が立ち上がる風速が増加している. 風車が起動する風速 V_s を振れ角 α_w に対してプロットしたものを図10に示す. なお図は偏心角 $\theta_p=0^\circ$, 取付角 $\alpha_c=11.7^\circ$ の結果である. 振れ角 α_w をある程度増加させると, 起動風速 V_s が小さくなり, 最適な振れ角があることが分かった. 本風車の起動時における最適振れ角は $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$ 程度で, 始動風速は $V_s \approx 1.04\text{m/s}$ であった.

4.2. 回転数制御

図11に無拘束運転における風速 V と風車回転数 N の関係を示す. なお, ■印のプロットは偏心角を $\theta_p = (\theta_{p,opt}) =$

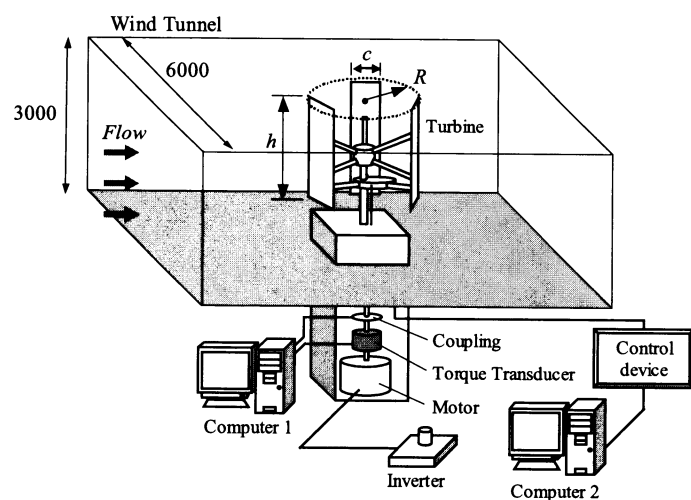


Fig.7 実験装置概略図

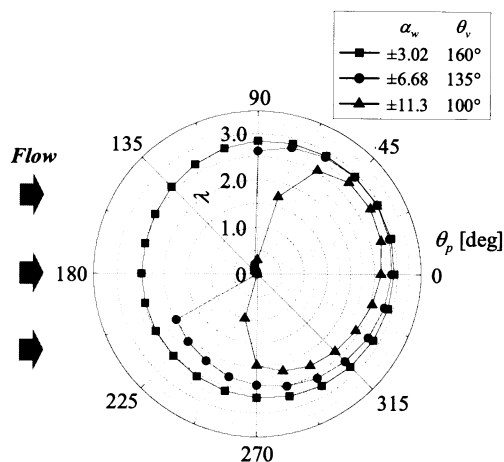


Fig.8 偏心角と翼揺動量制御による周速比 λ の変化($V=8\text{m/s}$, $\alpha_c \approx 11.7^\circ$)

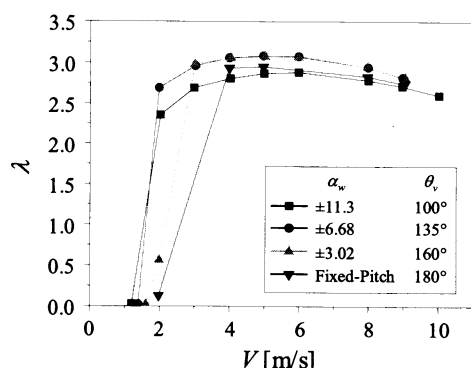


Fig.9 各振れ角 α_w における風速 V と周速比 λ の関係

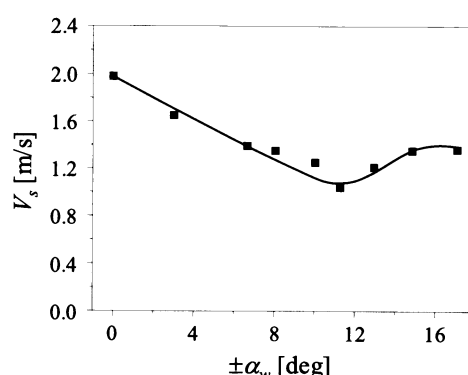


Fig.10 振れ角 α_w と起動風速 V_s の関係

30°にした場合のデータで、実線はデータの近似線である。風速に比例して風車の回転数は増加し、 $V \geq 12\text{m/s}$ で250rpmを越える。しかし、▲印のプロットが示すように、偏心角を風速に応じて制御することで、回転数の上昇が抑えられている。 $V=18\text{m/s}$ では偏心角を $\theta_p = (\theta_{p,stop}) = 135^\circ$

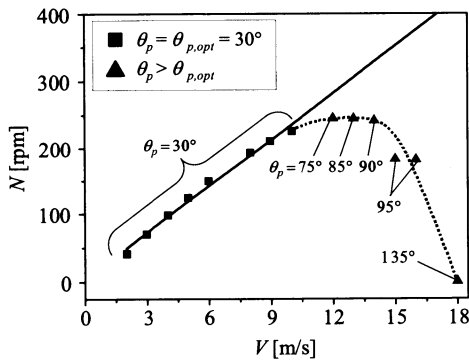


Fig.11 偏心角制御を行った場合の風速と風車回転数の関係 ($\alpha_c \approx 11.7^\circ$, $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$)

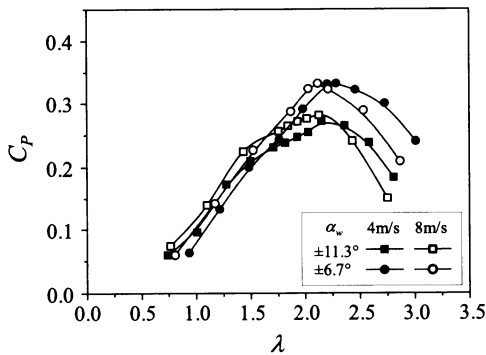


Fig.12 振れ角 α_w が出力係数 C_p に与える影響

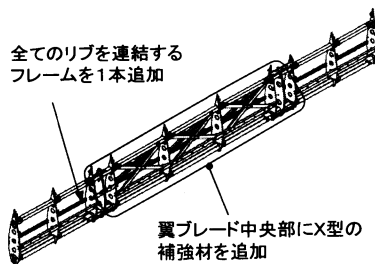


Fig.13 翼の内部構造の改良

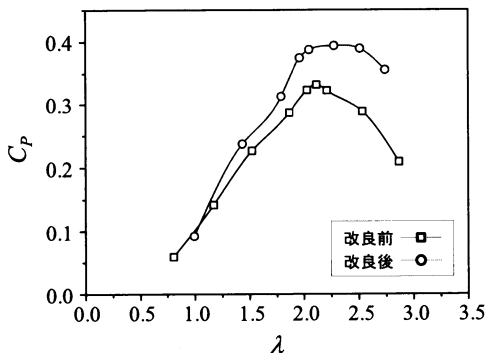


Fig.14 翼内部構造の改良後の出力係数 ($V=8\text{m/s}$, $\alpha_c \approx 11.7^\circ$, $\alpha_w = \pm 6.7^\circ$)

にすることで風車が回転しないことを確認した。以上のことから、本機構により強風時に風車を一定回転させることが可能であり、カットアウト風速で回転を停止させる強風対策システムの有効性が実証された。

4.3. 出力特性

最適偏心角 $\theta_p = 30^\circ$ 、風速 $V = 4, 8\text{m/s}$ 、取付角 $\alpha_c \approx 11.7^\circ$ における、振れ角 α_w ごとの出力係数を図12に示す。なお、出力係数は翼などを取り外した状態で風車を回転させて計測したベアリングなどで生じる機械摩擦損失分を考慮してある。 $V=4\text{m/s}$ の低風速でも効率 $C_p \approx 0.25$ と高い。また、振れ角 α_w が大きくなると、 $\lambda < 1.5$ の低周速比域における出力係数が高くなり、振れ角 α_w が小さくなると高周速比域における出力係数が高くなる傾向が見られた。起動性の場合と同様に、風速に応じて揺動量を変化させることで、低周速比域のみならず高周速域でも高い効率を得られるといえる。一方で、風車回転数が高くなる $V=8\text{m/s}$ の高風速では翼の変形が確認された。そこで、図13に示すようなフレーム構造に、部材を追加する改良を施し、翼の剛性を高めて再測定を行った。図14に $V=8\text{m/s}$, $\alpha_w = \pm 6.7^\circ$ での出力係数測定結果を示す。改良後の出力係数の方が高くなっており、剛性アップにより翼が変形しなくなったためと考えられる。

5. 結言

翼揺動量制御機構を有した可変ピッチ式直線翼垂直軸風車の性能を風洞実験によって調べ、以下の結果を得た。

- (1) 翼揺動量制御機構により、偏心角と翼の揺動量を制御することで空力的に風車の回転数が制御でき、強風時においても風車を停止させることが出来た。
- (2) 起動時に大きな振れ角にすることで本風車の起動性が向上することを示した。
- (3) $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$ のような大きな振れ角では低周速比域での効率が向上し、 $\alpha_w = \pm 6.7^\circ$ のような小さな振れ角では高周速比域での効率が向上することを示した。

本研究は中部経済産業局地域新生コンソーシアム研究開発事業の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Kiwata.T., et al., Performance of a Vertical-Axis Wind Turbine with Variable-Pitch Straight Blades, Proc. of 18th International Symposium on Transport Phenomena (Daejeon, Korea), ISTP-316, pp.1834-1839, (2007).
- 2) 山田達郎 他3名, 可変ピッチ式直線翼垂直軸風車における翼の揺動による動力損失, 日本風力エネルギー協会誌 通巻86, Vol.32, No.2, pp.129-134, (2008).
- 3) 風力発電装置, 株式会社別川製作所, 特願2008-61256.