

1 kW級可変ピッチ式H形ダリウス風車の開発

Development of the 1 kW Variable-Pitch H-type Darrieus Wind Turbine

山田 達郎^{*1} 木綿 隆弘^{*2} 喜多 哲義^{*3}
Tatsuro YAMADA Takahiro KIWATA Tetsuyoshi KITA

土田 博一^{*4} 小松 信義^{*5}
Hirokazu Tsuchida Nobuyoshi KOMATSU

^{*1} Mitsubishi Heavy Industry, Ltd. Machine Tool Division, Assembly shop No.2, Ritto, Shiga, 520-3080, Japan
E-mail: tatsuro_yamada@mhi.co.jp

^{*2} Professor, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192, Japan

^{*3} Corporate officer, Betsukawa Corporation, Urushijima-machi, Hakusan, 924-8560, Japan

^{*4} Betsukawa Corporation, Urushijima-machi, Hakusan, 924-8560, Japan

^{*5} Assistant Professor, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192, Japan

Abstract

This paper describes the performance of a 1kW H-type Darrieus wind turbine with variable-pitch blades. The variable-pitch mechanism consists of the four-bar linkage and the cylindrical cams. A feature of the mechanism is to be able to control the pitch angle of blades and the turbine direction to the wind direction for rotating. The performance of wind turbine was measured by the wind tunnel and field tests. The wind speed of the self-start of the wind turbine with variable-pitch blades is smaller than that with fixed pitch blades. The power coefficient of the wind turbine with variable-pitch blades showed an increase of 30 percent than that with fixed pitch blades in any tip speed ratio. At the strong wind, the variable-pitch mechanism is able to control the rotational speed and ceases of the wind turbine without mechanical break. According to result of the field test, the power coefficient of variable-pitch wind turbine with light blades of FRP is better than that with heavy blades of aluminum.

キーワード：垂直軸風車，可変ピッチ，四節リンク機構，カム機構，フィールドテスト

Key Words：Vertical-Axis Wind Turbine, Variable-Pitch, Four-bar Linkage, Cylindrical Cam Device, Field Test

1. 緒論

小形風力発電は建設および導入コストが低く抑えられ、立地条件の制約が少ないことなどの理由により、近年徐々に普及しつつある^{1)~4)}。小形風車の現在の主流は、プロペラ風車に代表される水平軸風車である。この風車は、常時強い風がある一定方向より吹く場所においては設備利用率が高い。しかし、都市部など風速・風向が一定しない場所では、出力が低下し^{5)~7)}、風車高速回転時に生じる風切り音⁸⁾が周囲に伝播するなどの騒音被害⁹⁾、希少な野鳥・渡り鳥などが回転する翼(ブレード)に衝突するバードストライク現象¹⁰⁾など、環境との調和をアピールするにはまだ多くの問

題がある。一方で、垂直軸風車の一つであるH形ダリウス風車は、直線翼に生じる揚力を駆動力とする高速風車である。本風車は、同出力の水平軸風車より低周速比(低回転数)で運転されるので、風切り音が小さく、風車翼の翼弦長が比較的大きく均一であるためバードストライク現象が起きにくいと考えられており¹¹⁾、環境と調和する風車として国内外から注目されている。さらに、H形ダリウス風車は、風向に対して指向性を持たないので、フィールド下で刻々と風向・風速が変化する自然風を捕らえやすいと言える。

現在、市販されているH形ダリウス風車は、固定翼(固定ピッチ翼)型である。しかし、ある1枚の翼から流れを見た場合、風車が1回転する間に流入する風の方向(迎角)が低周速比で大きく変動しているため、十分な風力エネルギーが取得できず、自己起動性も悪い。この問題を改善する方法の一つに翼のピッチ制御(可変ピッチ翼)がある^{12)~15)}。著者らはこれまでに、翼のピッチ制御を独立した動力源無しで行える四節リンク機構を用いた可変ピッチ式H形ダリウス風車を製作し

^{*1} 三菱重工業(株)工作機械事業本部 工作部 組立二課
(〒520-3080 滋賀県栗東市六地藏 130 番地)

E-mail: tatsuro_yamada@mhi.co.jp

^{*2} 金沢大学理工学域サステナブルエネルギー研究センター
教授

^{*3} 別川製作所(株) 執行役員

^{*4} 別川製作所(株)

^{*5} 金沢大学理工学域 助教

(原稿受付 2011 年 10 月 24 日)

た。そして、風洞実験によって、風車の起動性、出力係数について調べ、翼のピッチ制御の有効性を示した。また、開発した可変ピッチ式H形ダリウス風車が風向に対する指向性を持つ特性(偏心角特性)を回転数制御に応用できることを示した¹⁶⁾。そして、本可変ピッチ機構を有したH形ダリウス風車の実用化を目指し、風速と風向の変化に対応して翼のピッチ角と偏心角を制御できる1kWクラスの風車を新たに開発した。本風車は、2つの円筒カム機構を用いることで風車回転中においても翼のピッチ角と偏心角を任意の角度に変更できることが特長である。本報では、円筒カム機構を用いた可変ピッチ機構の原理、及び本機構を用いたH形ダリウス風車の自己起動や出力特性を風洞実験とフィールド実験により調べた結果について報告する。

2. 可変ピッチ角機構の概要

図1に3枚翼の可変ピッチ式H形ダリウス風車を上から見た概略図を示す。可変ピッチ角機構は、四節リンク機構(両クランク)機構とカム機構を組み合わせたものである¹⁷⁾。

2.1 四節リンク機構 1枚の翼は、第1リンク(長さ l_m)で前縁側の節 P_1 と第1回転軸の節 O が連結され、さらに第2リンク(長さ l_s)によって後縁側の節 P_2 と第2回転軸の節 O_e が連結されている。そして、 $P_1 P_2$ 間

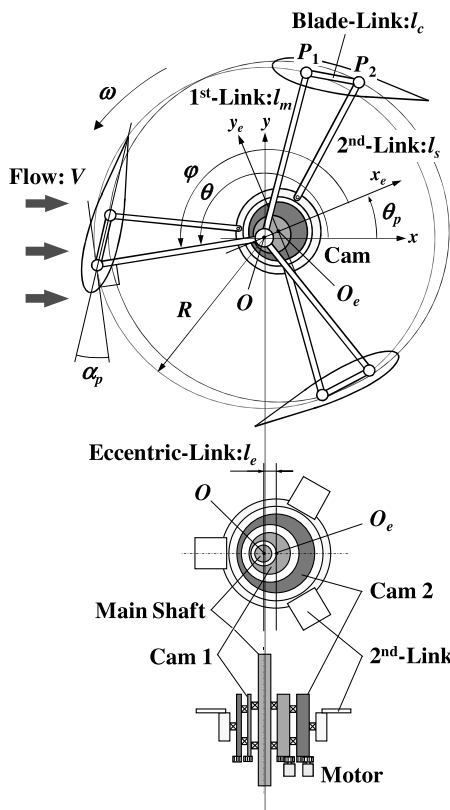


Fig.1 Schematic diagram of the variable-pitch angle mechanism

の翼部リンク(長さ l_c)、 OO_e 間の偏心リンク(長さ l_e)で四節リンク機構を形成する。リンク機構の回転角 $\varphi (= \theta - \theta_p)$ 、 θ : 風車の回転角度、 θ_p : 偏心角)は、偏心リンクと第1リンクが成す角とし、節 O を中心として反時計回りを正回転方向とする。第1リンクに繋がれている翼が節 O を中心として回転した場合、回転中心の異なる第2リンクと翼後縁部が繋がれているため、一回転する間に翼は揺動し、そのピッチ角 α_p が変化する。ここで、図2に示すように取付角 α_c と振れ角 α_w を定義すると、可変ピッチ翼のピッチ角は、 $\alpha_p(\varphi) = \alpha_c + \alpha_w(\varphi)$ という式で表される。固定ピッチ式の場合、 $\alpha_w = 0^\circ$ 、 $\alpha_p = \alpha_c$ となる。取付角 α_c と振れ角 α_w は、各リンク長さの組み合わせによって任意の角度に設定が可能であり、 α_c は第2リンク長さ l_s を、 α_w は偏心リンク長さ l_e または翼部リンク長さ l_c を変えて調節する¹⁶⁾。その一例として、図2に第2リンク長さ $l_s = 0.978 l_m$ 、翼部リンク長さ $l_c = 0.228 l_m$ 、偏心リンク長さ $l_e = 0.0685 l_m$ とした場合のリンクの回転角 φ におけるピッチ角 α_p の変化を示す。この組み合わせでは、取付角 $\alpha_c = 12.0^\circ$ となり、翼は点 P_1 を回転中心として振れ角 $\alpha_w = \pm 17.5^\circ$ で揺動す

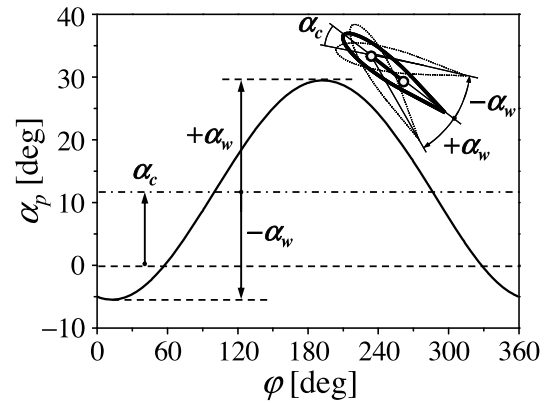


Fig.2 Variation of the blade pitch angle α_p by variable-pitch angle mechanism, and definition of blade offset pitch angle α_c and blade pitch angle amplitude α_w

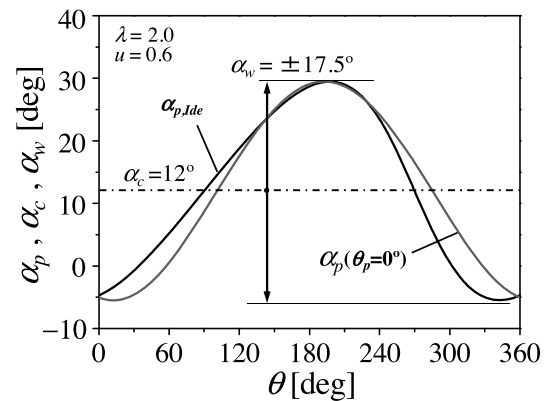


Fig.3 Ideal and actual variation of blade pitch angle by variable-pitch angle mechanism for $\lambda=2.0$, $a=0.4$

る。図3に回転角 φ に対する理想的ピッチ角 $\alpha_{p, Ide}$ と実際のピッチ角 α_p の変化を示す。 $\alpha_{p, Ide}$ は、最適迎角(失速角) α_{opt} 、周速比 $\lambda [=R\omega/V]$ 、 R :風車ロータ半径、 ω :風車角速度($=2\pi N/60$)、 N :風車回転数、 V :遠方風速、遠方風速 V の減速の程度を示す誘導係数 a (<1)を用いて式(1)で算出した。

$$\alpha_{p, Ide} = \alpha_{opt} - \tan^{-1} \left(\frac{\cos \theta}{\sin \theta + \lambda / (1-a)} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_{opt}=12^\circ$ 、 $a=0.4$ (関らの実験結果より)¹²⁾、 $\varphi = \theta$ を仮定し、 $\lambda=2$ とした場合、本可変ピッチ角機構によって理想的ピッチ角変化をほぼ実現できており、高い出力が得られると期待できる。しかし、周速比(回転数)が増加すると、風が風車を通過しにくくなるので誘導係数 a が増加し、式(1)から分かるように風車が一回転する間の翼の迎角の変動が小さくなる。この状態で翼のピッチ角を大きく変化させると、質量を有する翼を強制的に揺動させるための動力が必要となり、風車の出力係数は低下する¹⁸⁾。この問題については、2.2節で述べる円筒カム機構で対応できる。

2.2 円筒カム機構 円筒カム機構は、風車ロータ中心部に位置し、内径が異なる2つの円筒カムの組合せから成る。Cam 1とCam 2は、ギアもしくはタイミングベルトを介して別々の駆動用サーボモータに連結され、独立して回転角度が制御できる。最も重要な特長は、風車回転中においてもカムの駆動ができることである。

(1) 振れ角の制御方法について Cam 1を回転、Cam 2をCam 1の回転角だけ逆回転させることで偏心リンク長さ l_e を任意の長さに設定でき、振れ角 α_w を制御できる。図4にカム機構動作の概略を示す。Cam 1の回転角 $\theta_v=0^\circ$ のとき、偏心リンク長さは最大の $l_{e, max}$ である。Cam 1の回転に伴い偏心リンク長さは短くなり、 $\theta_v=120^\circ$ で半分の長さになる。 $\theta_v=180^\circ$ で $l_e=0$ になり、本風車は固定ピッチ式風車になる。偏心リンク長さ l_e とCam 1の回転角 θ_v には次式の関係がある。

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

一例として、図5にCam 1の回転角 θ_v と偏心リンク長さ、翼の取付角 α_c 、振れ角 α_w の関係を示す。このときの各リンクの長さは、第2リンク長さ $l_s=0.987l_m$ 、翼部リンク長さ $l_c=0.0818l_m$ である。最大偏心リンク長さが $l_{e, max}=0.0182l_m$ ($\theta_v=0^\circ$)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 $\alpha_w=\pm 17.7^\circ$ で翼のピッチ角 α_p が変化し、回転角 θ_v を増加させると、偏心リンク長さ l_e が短くなるため、徐々に固定ピッチ翼に近づく。

一方で、翼の取付角 α_c は、第2リンク長さ l_s に依存するので、Cam 1の回転角 θ_v が変化しても、ほぼ一定値を示す。回転角 θ_v を制御することで、風車回転数に応じた理想的ピッチ角変化を実現できる。

(2) 偏心角の制御方法について 偏心角は、風向と偏心リンクの成す角であり、本風車に対する風の流入方向を意味する。風下を $\theta_p=0^\circ$ 、風上を $\theta_p=180^\circ$ とし反時計方向が正方向とする。本カム機構は、図6に示すように、Cam 1とCam 2を同時に同一方向に回転させることで風車の偏心角 θ_p を制御できる。

3. 実験装置と実験方法

3.1 風洞実験 表1に3種類の供試風車の仕様について示す。ロータ直径 $D=1670\text{mm}$ 、翼スパン長さ $h=2000\text{mm}$ の固定ピッチ式風車をFT1風車、可変ピッチ式風車をFT2風車とする。FT1風車の翼形の翼弦長 $c=265\text{mm}$ である。FT2風車の翼形は、可変ピッチ角機構により、全回転角で翼の最適迎角をほぼ維持できるこ

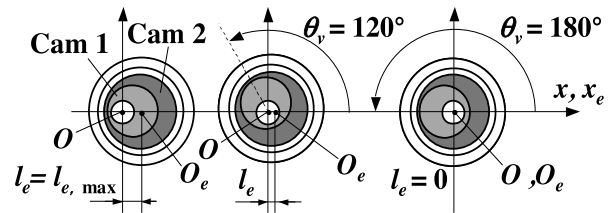


Fig.4 Variation of the eccentric-link length l_e with the cam 1 azimuth angle θ_v

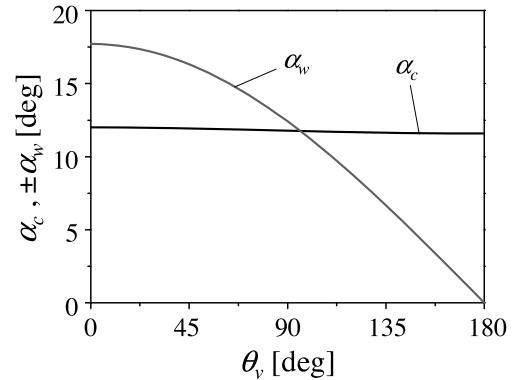


Fig.5 Variation of the blade offset pitch angle α_c and blade pitch angle amplitude α_w with the azimuth angle θ_v of Cam 1

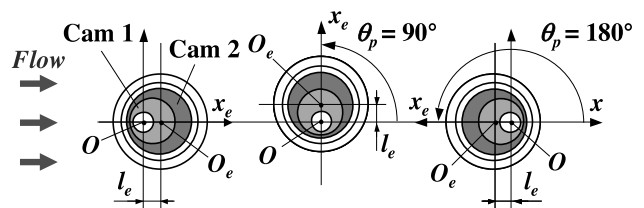



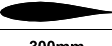


Fig.6 Variation of the eccentric-link length l_e with the azimuth angle θ_v of Cam 1

とから、若干キャンバ(反り)を持つ層流翼形の NACA63₄-221 翼¹⁹⁾ ($c=353\text{mm}$, アルミ製)を用いた。翼のピッチ制御が風車の自己起動性と出力係数に与える影響を見るために、FT1 風車とソリディティ σ の値を 0.202 に一致させ、FT2 風車翼のピッチ角を取付角 $\alpha_c=11.9^\circ$ 、振れ角 $\alpha_w=\pm 15.0^\circ$ の条件で変化させた。FT3 風車は、翼枚数 $n=3$ 、直径 $D=2200\text{mm}$ 、翼スパン長さ $h=2000\text{mm}$ の大きさである。翼弦長 $c=300\text{mm}$ の NACA63₄-221 翼を装着し、取付角 $\alpha_c=11.9^\circ$ 、振れ角 $\alpha_w=0^\circ\sim\pm 17.3^\circ$ の条件で揺動させ、振れ角、偏心角が風車性能に及ぼす影響を調べた。風車のソリディティは $\sigma=0.130$ で、定格出力は 900W (定格風速 12m/s, 定格回転数 210min⁻¹)である。風洞実験は、図 7 に示すような断面寸法 W6000mm×H3000mm 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、出力係数 $C_p=[P/\rho R h V^3]$ 、 P : 風車出力($=T_w\omega$)、 ρ : 空気密度]を算出した。また、風車の自己起動性などを評価するために、主軸とモータ

Table 1 Wind turbine specification

Name	FT1	FT2	FT3
Wind Turbine (Over View)			
Blade	Unknown	NACA63 ₄ -221	
Blade Chord Length c	265mm	353mm	300mm
Number of Blades n	4	3	3
Diameter $D \times$ Height h	1670 × 2000mm	1670 × 2000mm	2200 × 2000mm
Variable-Pitch or Fixed-Pitch ?	Fixed-Pitch	Variable-Pitch $\alpha_c=11.9^\circ$ $\alpha_w=\pm 15.0^\circ$	Variable-Pitch $\alpha_c=11.9^\circ$ $\alpha_w=0^\circ\sim\pm 17.3^\circ$
Solidity $\sigma (=nc/\pi D)$	0.202		0.130

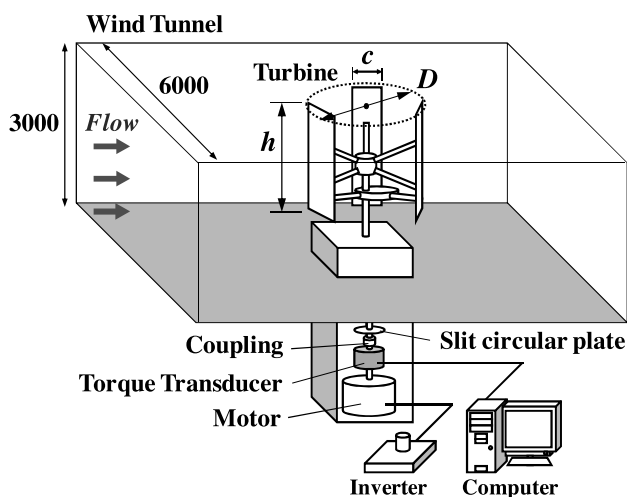


Fig.7 Experimental apparatus for wind tunnel test

のカップリングを外した無拘束運転の実験を行った。この無拘束運転では、風車の回転トルクがベアリングやリンク節での摩擦および風車の各部材で生じる空気抵抗とバランスした状態である。なお、風車回転数は、光センサとスリットを入れた円板を用いて測定した。

3.2 フィールド実験 図 8 に示すように、供試風車 FT3 を別川製作所株式会社本社工場の敷地内に設置し、フィールドテストを行った。風車の北側には 2 階建ての工場の建屋がある。風車の東西方向および南側は田畑が広がっており、背の高い建物や樹木類などは無い。図 9 に実験装置の外観写真を示す。風車ロータは地上から約 4000mm の位置に設置し、回転数計測用のスリット円板、クラッチを介して発電機(株式会社スカイ電子製 SKY-HG450)と連結している。風向風速計は、風車中心から約 3000mm の位置に設置し、風車回転数、風向、風車発電出力の 1 分間平均値を測定した。また、フィールド実験では、アルミ翼(質量 4.5kg)と実用化のため剛性・耐久性を考慮した FRP の翼(質量 3.5kg)を使用した。測定期間は、アルミ翼で 2009 年 12 月 30 日、FRP 翼で 2010 年 2 月 20 日～22 日である。

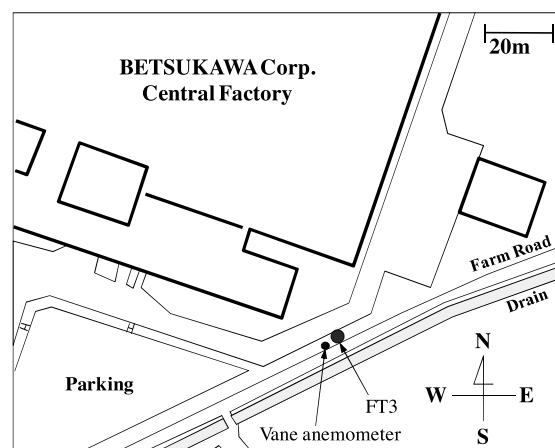


Fig.8 Location of the wind turbine

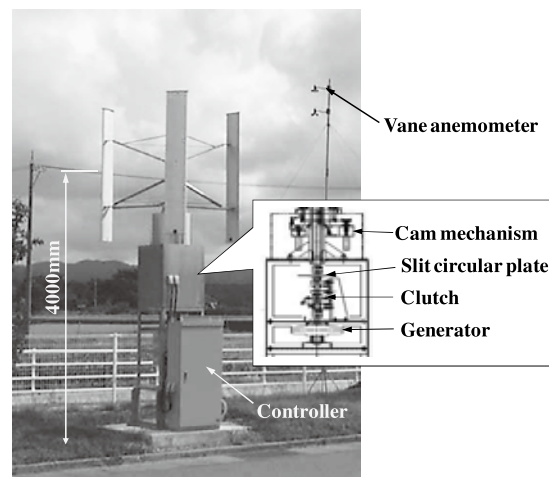


Fig.9 Experimental apparatus for field test

4. 実験結果および考察

4.1 無拘束運転特性

(1) 翼のピッチ制御の有効性 各風車の無拘束運転時における風速 V と周速比 λ の関係を図 10 に示す。可変ピッチ式風車である FT2 風車の方が固定ピッチ式風車の FT1 風車よりも低い風速で回転し、周速比の立ち上がりが早いことから、翼のピッチ制御が H 形ダリウス風車の自己起動性の向上に有効であることが示された。しかし、最大周速比は、FT1 風車の方が高くなった。これは、FT2 風車は可変ピッチ角機構を有しているため稼働部が多く、FT1 風車よりも機械摩擦などによる回転抵抗が大きくなり、回転数が上昇しなかったためであると考えられる。次に FT2 風車と FT3 風車を比較すると、FT3 風車の周速比の立ち上がりは FT2 風車と同等の結果になった。FT3 風車のソリディティ σ は、出力係数を FT2 風車よりも増加させる目的で、 $\sigma = 0.130$ と FT2 風車に対し 35.6% 小さく設定している。ソリディティが小さい風車は、低トルク・高回転型の

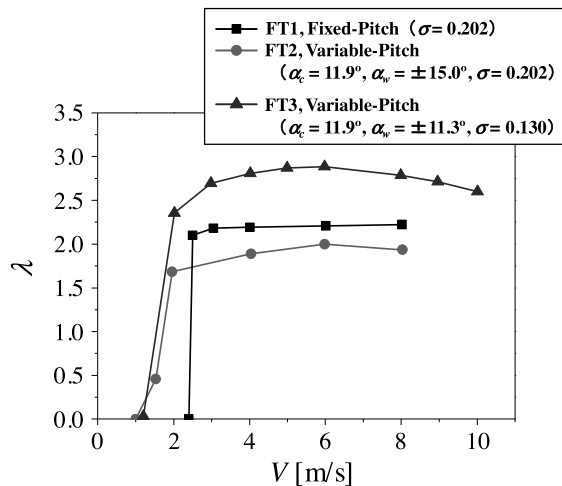


Fig.10 Tip speed ratio λ vs. wind velocity V for the H-type Darrieus wind turbine with fixed and variable-pitch blades ($\theta_p = 0^\circ$, zero-load condition)

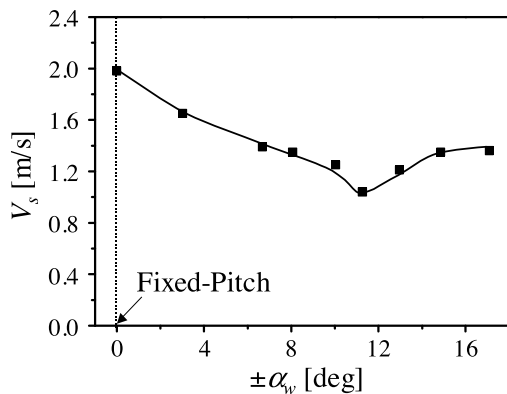


Fig.11 Blade pitch angle amplitude α_w vs. self-start wind velocity V_s (FT3, $\theta_p = 0^\circ$, zero-load condition)

風車であり、自己起動性は低い。しかし、本円筒カム機構を用いれば、ソリディティが小さくても、図 11 に示すように最適な振れ角 $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$ を設定することで、起動風速 $V_s \approx 1.04 \text{ m/s}$ の低風速で FT3 風車を自己起動させ、FT2 風車のように周速比の立ち上がりを早くすることができる。また、図 12 に各振れ角 α_w において風速 V 増加に伴う周速比 λ の変化を示す。 $\alpha_w = \pm 3.0^\circ$, $\pm 6.7^\circ$ のような小さな振れ角で最大周速比 $\lambda \approx 3.1$ を得た。一方で、振れ角が大きい $\alpha_w = \pm 17.3^\circ$ では、周速比の立ち上がりが早く $V = 1.36 \text{ m/s}$ で $\lambda = 1.44$ を得たが、最大周速比 $\lambda = 2.1$ 程度と周速比があまり増加しない。従って、風車起動時には $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$ 、風車回転時には $\alpha_w = \pm 6.7^\circ$ と円筒カム機構で風車回転中でも振れ角を変更することで、最適な運転ができる。

(2) 風車の回転数制御 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 FT3 風車の回転数を周速比 λ で表して円グラフにプロットしたものを図 13 に示す。風車回転数(周速比)は、 $\alpha_w = \pm 6.7^\circ, \pm 11.3^\circ$ の場

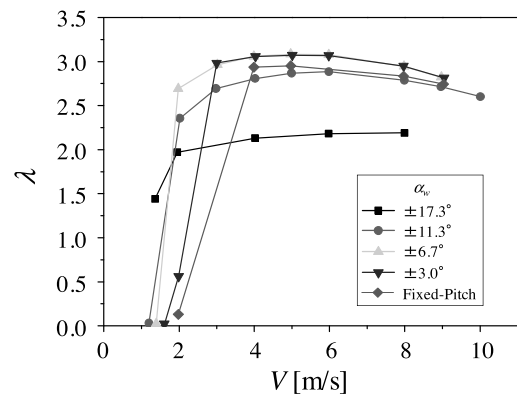


Fig.12 Effect of blade pitch angle amplitude α_w on the tip speed ratio λ ($\theta_p = 0^\circ$, zero-load condition)

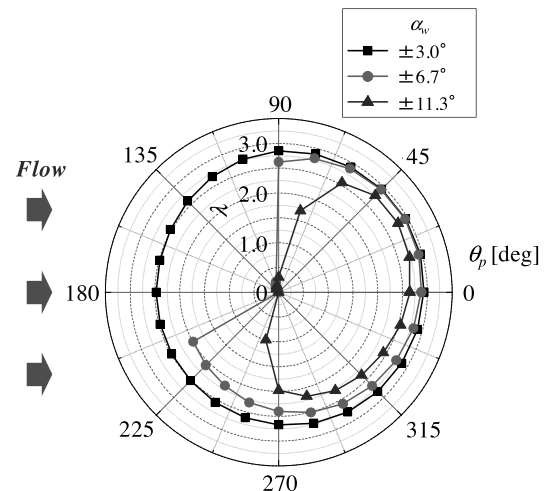


Fig.13 Effect of the inflow angle θ_p blade pitch angle amplitude α_w on the tip speed ratio λ (FT3, $V = 8 \text{ m/s}$, zero-load condition)

合、偏心角 θ_p に依存して風車が回転・停止するのでプロットの分布は扇形になる。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、FT3風車の最適偏心角は $\theta_p = 30^\circ$ であるといえる。また、 $\alpha_w = \pm 6.7^\circ, \pm 11.3^\circ$ 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 $\theta_p > 90^\circ$ であるといえる。偏心角は、可変ピッチ式風車に対する風の流入方向を示すので、図13の結果は、可変ピッチ式風車がプロペラ風車と同様に、風向に対する指向性を持つことを意味する。この特性を風車の回転数制御に応用できると考えられるので、無拘束運転において風速 V を上昇させて回転数制御を試みた結果を図14に示す。■印のプロットは、 $V \leq 10\text{m/s}$ でFT3風車が最も回転しやすい最適偏心角 $\theta_p = 30^\circ$ に設定した場合のデータであり、風速 V に比例して風車の回転数は増加し、 $V \geq 12\text{m/s}$ で 250min^{-1} を超える。そのため、▲印のプロットが示すように、本機構により偏心角 θ_p を風速に応じて制御することで、 250min^{-1} の一定回転で運転でき、

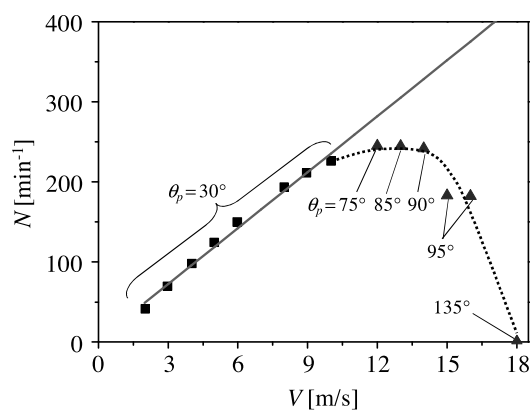


Fig.14 Rotational speed control by inflow angle θ_p (FT3, $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$, zero-load condition)

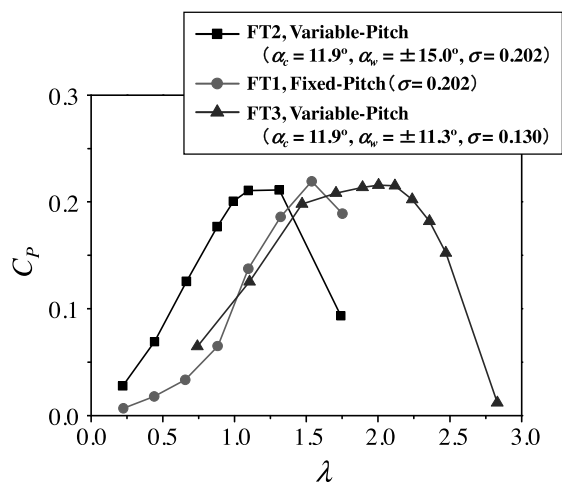


Fig.15 Tip speed ratio λ vs. power coefficient C_p for the H-type Darrieus wind turbine with fixed and variable -pitch blades ($V=6\text{m/s}$, $\theta_p = 0^\circ$)

回転数の上昇を抑えることができる。さらに、 $V=18\text{m/s}$ では偏心角を $\theta_p = 135^\circ$ にすることで風車が機械的なブレーキなしでも回転を停止できることを確認した。以上のことから、本機構が強風時にも可変ピッチ式H形ダリウス風車を一定回転させ、カットアウト風速で回転を停止させる強風対策が可能であるシステムであることが実証された。

4.2 出力特性 各風車の出力係数を図15に示す。まず、FT1風車とFT2風車を比較すると、 $\lambda \leq 1.0$ の低周速比域では、迎角の変動が大きくなるので、可変ピッチ式風車であるFT2風車の出力係数の方が高い。また、図10においてFT2風車の無拘束運転下における周速比(回転数)がFT1風車よりも低いことから判断できるように、高周速比域の出力係数はFT2風車の方が低くなる。次に、FT2風車とFT3風車を比較すると、FT3風車のソリディティがFT2風車に対して小さいので、出力係数がピークとなる周速比が1.0から2.0に増加している。

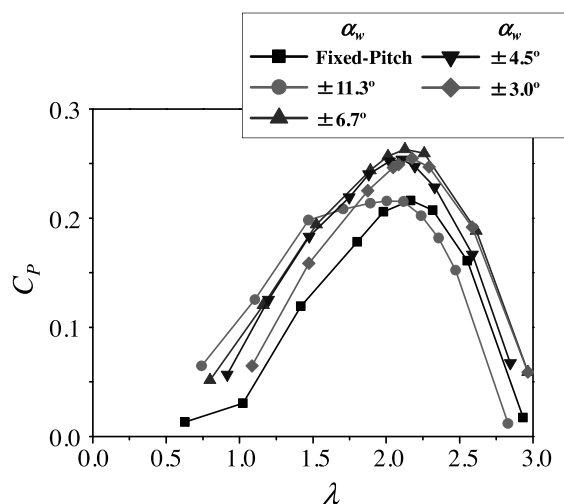


Fig.16 Effect of blade pitch angle amplitude α_w on the power coefficient C_p

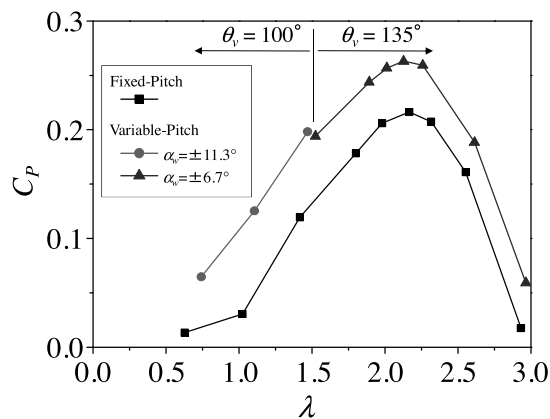


Fig.17 Effect of the azimuth angle θ_v of Cam 1 on the power coefficient C_p

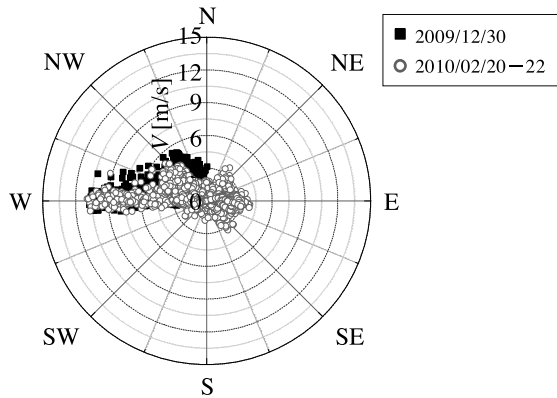


Fig.18 Wind direction and wind speed

次に、FT3 風車において、振れ角 α_w が出力係数に与える影響を図 16 に示す。 $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$ のように振れ角が大きいと、 $\lambda < 1.5$ の低周速比域における出力係数が高くなるが、高周速比域では出力係数が頭打ちとなり、固定ピッチ翼の出力係数よりも低くなった。周速比が増加すると迎角の変動が小さくなるため、本機構により、振れ角を $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$ から $\pm 6.7^\circ$ に小さくすることで、高周速比域においても固定ピッチ翼より高い出力係数が得られることが確認できた。以上のことから、翼のピッチ角度を周速比変化に応じて最適に制御することは、様々な周速比において H 形ダリウス風車の高い出力係数を維持することに繋がるといえる。図 17 に FT3 風車において Cam 1 の回転角 θ_c を風車運転中に変化させた場合の出力係数 C_p への影響を示す。固定ピッチ翼 ($\theta_c = 180^\circ$ に設定した場合) のデータに対して、風車起動時および $\lambda < 1.5$ の低周速比域で振れ角を $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$ 、 $\lambda > 1.5$ の高周速比域で振れ角を $\alpha_w = \pm 6.7^\circ$ となるように θ_c を 100° から 135° へ制御することで、全周速比での出力係数が良い運転が可能になる。このように、本機構を採用した可変ピッチ翼は固定ピッチ翼より、出力係数が 30% 以上向上する結果を得た。

4.3 フィールド実験結果 図 18 にフィールド実験実施時の風向風速分布を示す。実験中は主に西風が吹いており、風向は安定していた。カットイン風速は 2.0 m/s である。図 19 に風速 V と風車発電量 P の関係を示す。風洞実験時の発電量比べるとフィールド実験時の発電量は、約 3 割程度低くなっている。これは、風洞実験の流れは乱れの少ない一様な流れとなっているのに対して、フィールド実験では工場建物の影響など流れの乱れも少なからず入っているため、風車の回転が風速の変動に十分追従できず、風洞実験結果との間に差が生じたと考えられる。Al 翼(質量 4.5 kg)においては高風速域での計測結果が多く得られていないが、7 m/s 以上の高風速域で FRP 翼(質量 3.5 kg)の発電量の方が若干大きくなっている。著者らの先行研究¹⁸⁾にお

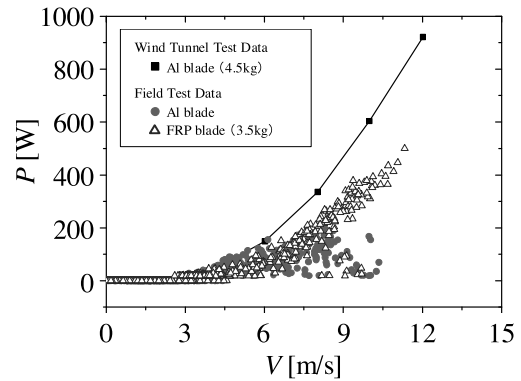


Fig.19 Power generation vs. wind speed

いて、重い翼を用いた場合、翼を用いた場合よりも翼を揺動させるために費やす動力が大きくなり、回転数の 3 乗に比例して風車出力が低下することを明らかにした。今回、Al 翼での発電量が FRP 翼よりも低下したのはこの理由のためである。高回転時には軽量の FRP 翼の方が有利である。今後、本風車の実用化にあたり、製造コストが安く、軽くて剛性が高い翼を開発することが課題である。また、翼の揺動による慣性力が変動荷重として可変ピッチ角機構の各部に作用するため、機構の耐久性も確保する必要がある。

5. 結論

四節リンク機構と円筒カム機構を組み合わせた可変ピッチ角機構を有する 1kW 級の H 形ダリウス風車の性能を風洞実験により調べ、以下の結果を得た。

- (1) 翼のピッチ制御を行うことで、固定ピッチ翼の場合よりも風車の自己起動性と出力係数が向上することを示した。
- (2) 本機構を用いることで風車運転中においてもピッチ角を変えることが可能であり、偏心角と翼の振れ角を風向風速に応じて最適に制御することで風車の回転数の上限を抑えることができ、強風時においてもブレーキなしで風車を停止させることが可能であることを示した。
- (3) FT3 風車の特性において振れ角 α_w と偏心角 θ_p に対する影響を調べ、本機構により、偏心角 $\theta_p = 30^\circ$ で、起動時および $\lambda < 1.5$ の低周速比域で振れ角を $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$ 、 $\lambda > 1.5$ の高周速比域で振れ角を $\alpha_w = \pm 6.7^\circ$ と Cam 1 の回転角 θ_c を制御することで、固定ピッチ翼よりも 30% 以上高出力な運転が可能であることを示した。
- (4) フィールドテストにおいて、軽量の FRP 翼を用いた場合の方が風速 7 m/s 以上の領域で、可変ピッチ風車の出力特性が良くなることを示した。

謝辞

本研究の一部は NEDO の大学発事業創出実用化研究開発費および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。さらに、実験データの取得において、株式会社 IHI、株式会社 IHI 検査計測、当時金沢大学工学部 4 年生の富岡裕之氏、平居聖朗氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 伊藤, 小型風車の国際展望, *ターボ機械*, Vol.32, (2004), pp.740-745.
- 2) AWEA, *The U.S. Small Wind Turbine Industry ROADMAP*.
- 3) 伊藤, 小型風車の性能限界に挑む (特集 旺盛な小形風力発電の開発と市場展開), *Wind energy* 34(2), (2010), pp.38-42.
- 4) 和地, 小型風車の動向および将来展望 (特集 最近の風力発電の進歩), *日本風工学会誌* 36(1), (2011), pp.39-42.
- 5) 小野 他 6 名, 自然風況下における小型風車のヨーエラー特性に関する実験的研究, *第26 回風力エネルギー利用シンポジウム講演予稿集*, (2007), pp.350-353.
- 6) 今村 他 4 名, パネル法による水平軸風車ロータ周りの非定常解析 (斜め流入風の影響と三次元流れ場における迎え角の考察), *日本機械学会論文集 (B 編)*, 71 巻, 701 号, No.04-0446, (2005), pp.154-161.
- 7) 田中, 川口, 富岡, 風況測定と小型ダリウス型風車の

年間発電量に関する研究, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 73 巻, 735 号, No.07-0510, (2007), pp.111-117.

- 8) George, A.R. and Chou, S.T., *NASA CR3739*, 1984.
- 9) 小野寺, 佐藤, 小型風車の騒音低減に関する研究, *日本風力エネルギー協会誌*, Vol.30, No.4 (2006), pp.79-87.
- 10) 島田, 松田, 風力発電事業における鳥類衝突リスク管理モデル, *保全生態学研究*, 12-2, (2007), pp.126-142.
- 11) 阿部, 宮脇, 三浦市の風力発電施設におけるトビのバードストライク事例, *日本野鳥の会神奈川支部研究年報*, Vol.13, (2006), pp.61-63.
- 12) 関, 牛山, さらなる風を求めて *垂直軸風車 基礎・設計から応用まで*, (2008), パワー社.
- 13) Spera, D.A., *Wind Turbine Technology*, (1998), ASME Press.
- 14) Noll, R.B. and Zvara, J., High-Reliability Vertical-Axis Wind Turbine, *Proc. of Small Wind Turbine Systems 1981*, (1981), pp.17-28.
- 15) Anderson, J., The 40kW Giromill, *Proc. of Small Wind Turbine Systems 1981*, (1981), pp.93-105.
- 16) 木綿 他 5 名, リンク機構による可変ピッチ式直線翼垂直軸風車の性能に関する研究, *日本機械学会論文集 (B 編)*, Vol.74, No.748, (2008), pp.2543-2551.
- 17) 風力発電装置, 株式会社別川製作所, 特願 2008-61256.
- 18) 山田 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, *風力エネルギー*, Vol.32, No.2 (2008), pp.129-134.