

## 可変ピッチ式直線翼ダリウス風車

金沢大学理工研究域 木綿 隆弘, 河野 孝昭

### 1. はじめに

直線翼ダリウス風車<sup>1)</sup>は、同出力のプロペラ風車より低周速比(低回転数)で運転されるので、風切り音が小さく<sup>2)</sup>、風向に対する指向性を持たないため、自然風を捕らえやすいと言える。しかし、プロペラ風車に比べて、出力係数がやや低い<sup>3)</sup>ため、出力を上げる工夫が必要とされる。本稿では、著者らが研究開発している図1に示すような出力を向上させるために四節リンクと円筒カムによる可変ピッチ機構を組み入れた直線翼ダリウス風車について紹介する。

### 2. 可変ピッチ機構の概要

#### 2.1 四節リンク機構

図2は直線翼ダリウス風車を真上から見た図である。固定ピッチ式(固定翼)の直線翼ダリウス風車は、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)が大きく変動するために性能があまり良くない。この問題を改善する方法の一つに翼を揺動させるピッチ制御(可変ピッチ翼)がある。開発した風車は、翼の可変ピッチ制御を動力源無しで行える四節リンク(両クランク)機構を組み入れ、さらに2つの円筒カム機構を用いることで風車回転中でも翼のピッチ角 $\alpha_p$ と偏角 $\theta_p$ を任意に変更できる特長がある。

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、 $P_1P_2$ 間の翼部リンク(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 $\varphi(=\theta-\theta_p, \theta$ : 風車の回転角度)は、偏心リンクと第1リンクが成す角とすると、風車

が回転する間に翼が節 $O$ を中心として、ピッチ角 $\alpha_p$ で揺動する。図2のように取付角を $\alpha_c$ と振れ角を $\alpha_w$ と定義すると、ピッチ角は、 $\alpha_p = \alpha_c + \alpha_w$ となる。取付角 $\alpha_c$ は第2リンク長さ $l_s$ を、振れ角 $\alpha_w$ 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<sup>3)</sup>。例えば、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 $l_e = 0.0483 l_m$ とした場合の回転角 $\varphi$ におけるピッチ角 $\alpha_p$ の変化を図3に示す。このリンク長さの組み合わせでは、 $\alpha_c = 11.9^\circ$ 、 $\alpha_w = \pm 12.2^\circ$ となる。図中には固定ピッチ翼の周速度 $\lambda = 1.5$ における迎角 $\alpha$ の変化を示すが、この変化と逆位相で翼を揺動させた可変ピッチ翼の場合の迎角変化は小さくなり、風車出力が向上する。なお、翼のピッチ運動とリンク長さの関係は、文献3を参照されたい。

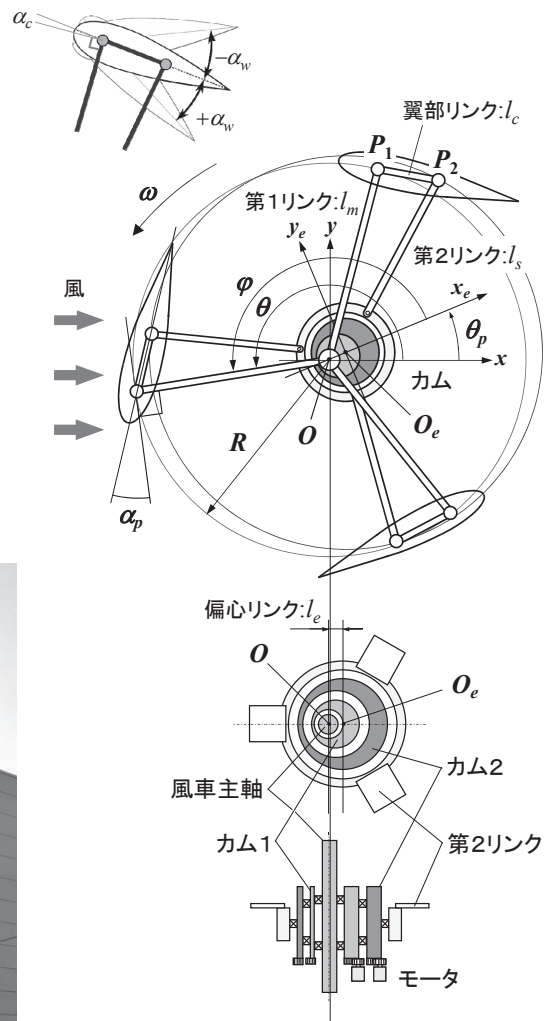


図2 直線翼ダリウス風車の四節リンク機構と円筒カム機構の概略図



図1 可変ピッチ式直線翼ダリウス風車

## 2.2 円筒カム機構

円筒カム機構<sup>4)</sup>と風向風速計からの信号により、振れ角 $\alpha_w$ と偏心角 $\theta_p$ を風車運転中において最適な角度に制御可能である。図4に円筒カム機構の動作を示す。本機構は、内径が異なる2つの円筒カムCam1とCam2から成り、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で制御される。翼の振れ角 $\alpha_w$ を制御するには、図4(a)のようにCam1を回転、Cam2をCam1の回転角だけ逆回転させることで $OO_e$ 間の偏心リンク長さ $l_e$ を変えて振れ角 $\alpha_w$ を変更する。つまり、Cam1の回転角 $\theta_v = 0^\circ$ で偏心リンク長さ $l_e$ は最大、 $\theta_v = 120^\circ$ で半分、 $\theta_v = 180^\circ$ で $l_e = 0$ になり、本風車は固定ピッチ式風車にもなる。また、偏心角 $\theta_p$ を制御するには、図4(b)のようにCam1とCam2を同時に同一方向に回転させることで風車の偏心角 $\theta_p$ を変えて、風の流入方向に追従させることができる。

## 3. 可変ピッチ式風車の性能

### 3.1 供試風車

表1に3種類の供試風車FT1, FT2, FT3の仕様を示す。いずれの風車も翼スパン長さは $h=2000\text{mm}$ である。FT2, FT3風車の翼形は、若干キャンバを持つNACA63<sub>4</sub>-221翼である。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。

### 3.2 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 $V$ と回転数 $N$ を周速比 $\lambda$ として表したものを図5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早い。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風車よりも機構の機械摩擦や空気抵抗が大きくなり、回転数が低くなった。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は、 $\sigma = nc/\pi D$ 、 $n$ :羽根枚数、 $c$ :翼弦長 $=0.130$ とFT2風車よりも小さく設計した。ソリディティが小さい風車は、低トルク・高回転型の風車であり、自己起動性は良くない。しかし、本機構を用いれば、ソリディティが小さくても、振れ角 $\alpha_w = \pm 11.3^\circ$ で起動風速 $V_s \approx 1.04\text{m/s}$ の低風速からFT3風車を回転させ、FT2風車のように回転数の増加を早くできる。

### 3.3 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 $\theta_p$ に対する風車の回転数を周速比 $\lambda$ で表して円グラフにしたものを図6に示す。風車回転数(周速比)は、 $\alpha_w = \pm 6.7^\circ, \pm 11.3^\circ$ の場合、 $\theta_p = 30^\circ$ 付近で周速比が最大になり、 $\theta_p = 135^\circ$ 付近で周速比が0になる。つまり、可変ピッチ式風車は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。

この特性を利用して風速 $V$ を上昇させた時に、風車の回転数が制御可能かを試した結果を図7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 $250\text{min}^{-1}$ 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 $\theta_p$ を風速に応じて制御す

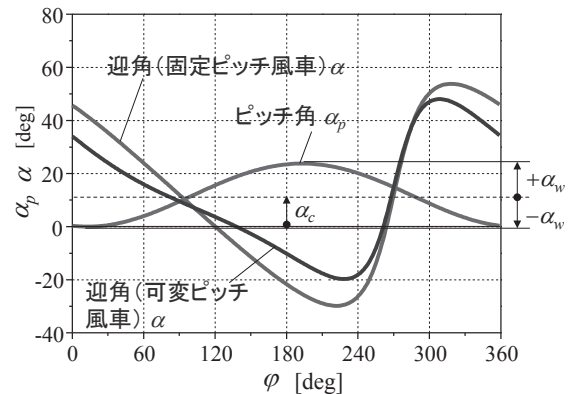


図3 ピッチ角と迎角の変化 ( $\lambda = 1.5$ )

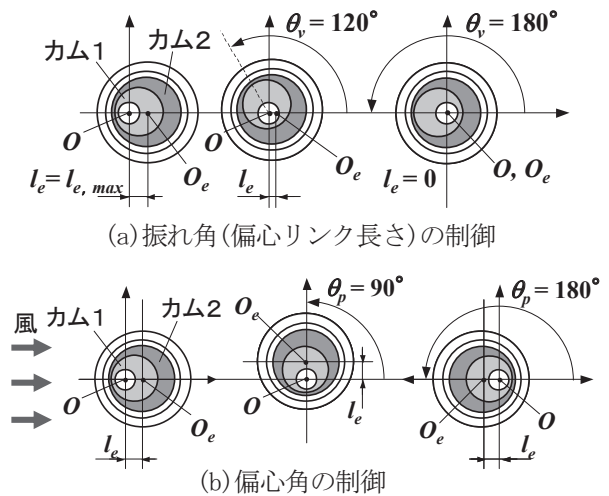


図4 円筒カム機構による角度制御

表1 供試風車の仕様

風車名称	FT1	FT2	FT3
風車外観			
翼形	不明	NACA63 <sub>4</sub> -221	
翼弦長 $c$	265mm	353mm	300mm
翼枚数 $n$	4	3	3
直径 $D \times$ 高さ $h$	1670 × 2000mm	1670 × 2000mm	2200 × 2000mm
固定ピッチor可変ピッチ (取付角, 振れ角)	固定ピッチ	可変ピッチ $\alpha_c = 11.9^\circ$ $\alpha_w = \pm 15.0^\circ$	可変ピッチ $\alpha_c = 11.9^\circ$ $\alpha_w = 0^\circ \sim \pm 17.3^\circ$
ソリディティ $\sigma (=nc/\pi D)$		0.202	0.130

ること、 $250\text{min}^{-1}$  の一定回転で運転でき、回転数の上昇を抑えられる。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。このように本機構が強風時にも可変ピッチ式により直線翼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なシステムであると言える。

### 3.4 出力特性

FT3 風車において、振れ角 $\alpha_w$  が出力係数に与える影響を図8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。このように、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、広範囲の周速比において直線翼ダリウス風車の出力係数を高く維持できる。なお、翼を揺動させるために費やす動力は、回転数の3乗に

比例して増加して風車出力が低下するため<sup>5)</sup>、本風車の実用化には、軽くて剛性が高い翼を開発すること課題である。

### 参考文献

- 1) 関和市・牛山泉, さらなる風を求めて 垂直軸風車 基礎・設計から応用まで, パワー社, 2008.
- 2) 河野孝昭・東大輝・木綿隆弘・木村繁男・小松信義, 直線翼垂直軸風車の空力騒音に関する風洞実験, 日本機械学会論文集(B編), Vol.79, No.808, 2013, pp.2577-2581.
- 3) 木綿隆弘・喜多哲義・山田達郎・高田真映・小松信義・木村繁男, 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.
- 4) 山田達郎・木綿隆弘・喜多哲義・土田博一・小松信義, 1kW級可変ピッチ式H形ダリウス風車の開発, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.36, No.1, 2012, pp.1-8.
- 5) 山田達郎・木綿隆弘・喜多哲義・小松信義, 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.

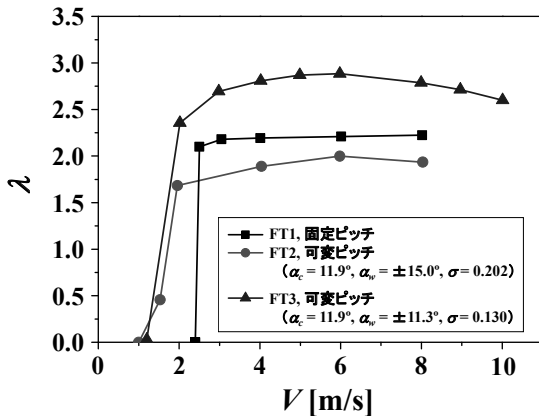


図5 風速  $V$  の増加に伴う周速比 $\lambda$ (回転数  $N$ ) の変化 ( $\theta_p=0^\circ$ , 無拘束運転)

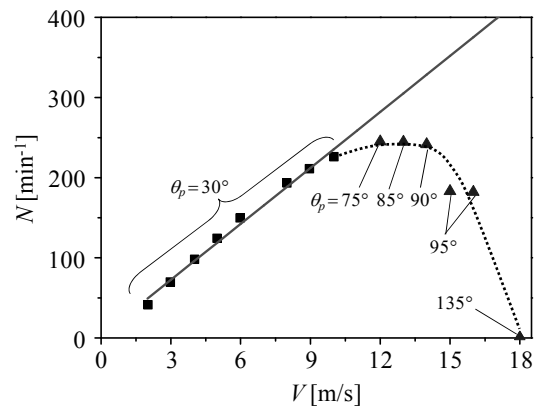


図7 偏心角度 $\theta_p$  変化による回転数  $N$  制御 (FT3,  $\alpha_w=\pm 11.3^\circ$ , 無拘束運転)

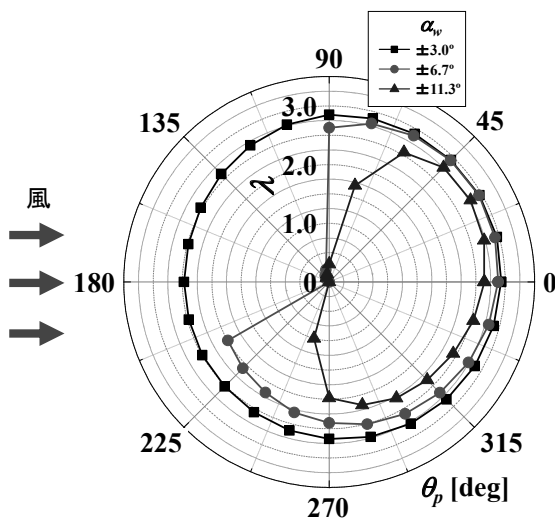


図6 偏心角度  $\theta_p$  に対する周速比 $\lambda$ (回転数  $N$ ) の変化 (FT3,  $V=8\text{m/s}$ ,  $\alpha_w=\pm 3.0^\circ \sim \pm 11.3^\circ$ , 無拘束運転)

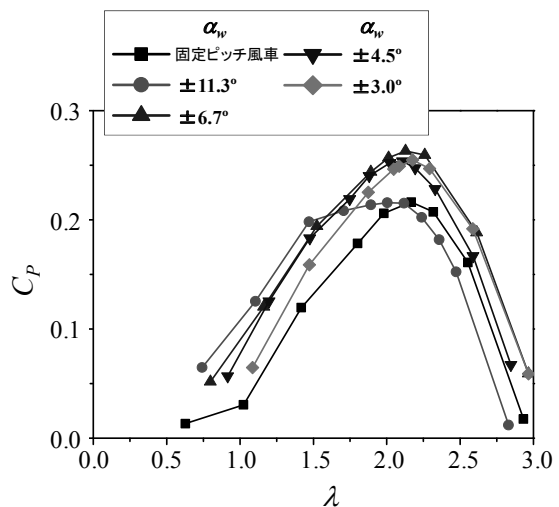


図8 出力係数  $C_p$  に及ぼす振れ角  $\alpha_w$  影響 (FT3,  $V=8\text{m/s}$ ,  $\alpha_w=\pm 0^\circ \sim \pm 11.3^\circ$ )