

ねじれ円弧翼型水平軸風車に関する研究

Study on Torsion Arc Blade Type Horizontal Axis Windmill

小島 昇^{*1}
Noboru KOJIMA

岸村 互平^{*2}
Kohei KISHIMURA

Abstract

This paper describes the theoretical analysis and the experimental results about the torque and the output characteristics of a torsion arc blade type horizontal axis windmill. The number of the windmill blades to have used for the analysis is six blades and the blade form is elliptical and rectangular. It has been cleared that the theoretical analysis agreed with the experimental results well by considering an influence in the part behind the blade to the turn of the windmill and introducing a shape coefficient into the analyzing results. In case of the elliptical blade, the rate that the part behind the blade participates in the turn of the windmill is approximately 50% of the part in front of the blade and in case of the rectangular blade, it is 60%. However, in the identical wind speed, the windmill output used the elliptical blade is more excellent than it used the rectangular blade. Especially, when generating electricity by increasing the number of revolution of the electric generator, the elliptical blade windmill that the torque coefficient is high is more favorable than the rectangular blade windmill.

Key Words : Wind power generation, Horizontal axis windmill, Torsion arc blade, TABT windmill, RTABT windmill

1. はじめに

太陽エネルギーの一つの利用形態である風力エネルギーを利用する風車に関し、前報¹⁾において、比較的小型で、かつ、構造が簡単であることから風車の製作が容易であり、さらに、都市部におけるビル風を利用した発電も可能である「ねじれ円弧翼型水平軸風車」(以下、TABT 水平軸風車と呼ぶ)について技術報告をしたが、本研究では、TABT 水平軸風車の回転翼形状が楕円の場合と矩形的の場合について、風車の回転に及ぼす後翼部の影響を考慮に入れて、風車の諸特性を理論的に解析し、模型実験による結果と比較検討した。その結果、理論式は実験に対して特性傾向が一致する結果を得たので報告する。

2. 理論解析

2.1 風車構造

図1に試験用 TABT 水平軸風車の概略図を示す。回転翼の数は6枚で、回転翼固定ハブ間の距離と最

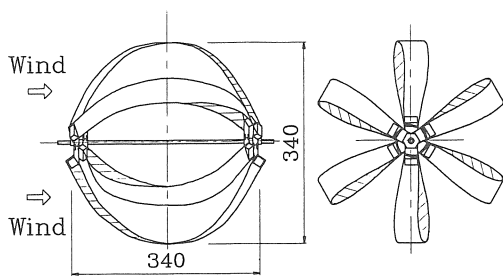


Fig.1 TABT horizontal axis windmill

大回転半径はほぼ等しくなるように、かつ、それぞれの回転翼は円弧状になるようにハブに固定してある。

回転翼を円弧状にすることにより、風車が回転したときに、外観上、球形となり、回転翼の軸方向の揺れを極力抑えることができる構造になっている。

この TABT 水平軸風車の回転翼両端固定部のねじれ角は図2(a)に示すように同一方向に設定されている。また、図2(b)に示すように回転翼両端固定部のねじれ角を逆に設定した場合を「逆ねじれ円弧翼型水平軸風車」(以下、RTABT 水平軸風車と呼ぶ)と呼ぶことにする。

2.2 回転翼

本研究で対象とした回転翼の形状は矩形及び楕円の

* 原稿受付 平成8年12月20日

*1 明治大学理工学部 (〒214-71 川崎市多摩区東三田 1-1-1)

*2 明治大学 大学院 (〒214-71 川崎市多摩区東三田 1-1-1)

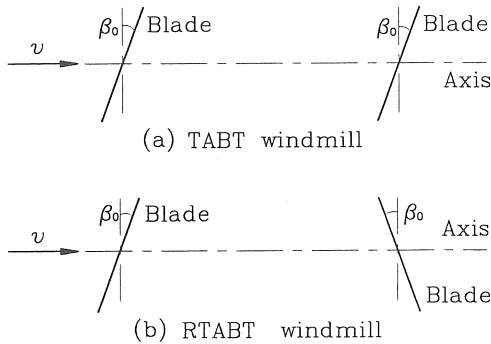
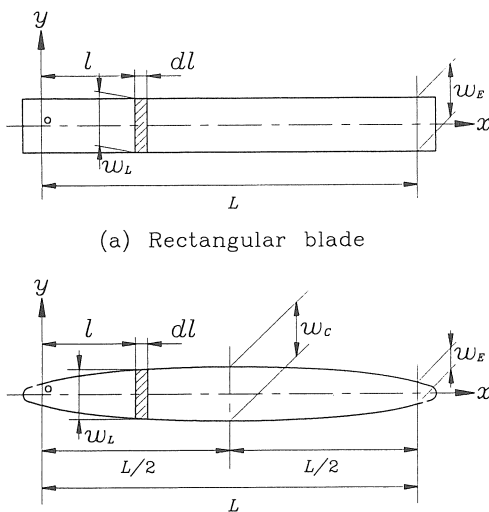


Fig.2 Blade setting condition



(b) Elliptical blade

Fig.3 Blade form

2種類であり、その概略図を図3(a)及び図3(b)に示す。

両回転翼とも図4に示すように円弧状になるように回転翼固定用ハブに固定される。そこで、回転翼端面の一方を原点とすると、原点から距離 l における回転翼の幅 w_L はそれぞれ(1)式及び(2)式のようになる。

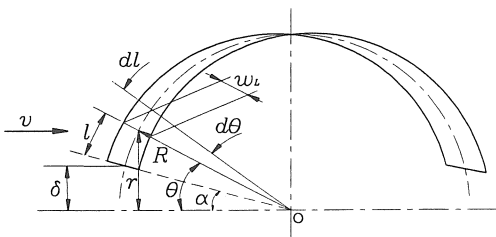


Fig.4 Arc blade

(a) 矩形翼の場合

$$w_L = w_E = \text{const} \quad (1)$$

ここに、 w_E : 回転翼固定端の幅 (22 mm)

(b) 楕円形翼の場合

$$w_L = \frac{w_c}{2L} \sqrt{4L^2 - 3\{2R(\theta - \alpha) - L\}^2} \quad (2)$$

ここに、 L : 回転翼の長さ (474 mm)

R : 回転翼の円弧の半径 (170 mm)

w_c : 回転翼中央の幅 (44 mm)

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\delta}{R}\right)$$

δ : 回転翼固定ハブの高さ

θ : 回転翼円弧の中心角

2.3 回転翼ねじれ角

回転翼の中心角 θ とねじれ角 β との関係は

$$\beta \propto \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

のように仮定すると、回転翼の中心角 θ が α (固定部) のとき、ねじれ角 β が β_0 で、中心角 θ が $\pi/2$ (回転翼中央部) のとき、 β は零であることから、 β と θ との関係は次式のようになる。

$$\beta = \beta_0 \frac{\pi - 2\theta}{\pi - 2\alpha}$$

2.4 風車回転力

風によって風車を回転させる力は風車回転翼に当たる風の垂直成分によって発生する²⁾と考えられることから、中心角 θ における風速 v の回転翼面に垂直な方向の速度成分 v_1 は図5に示す関係から(3)式のように表すことができる。

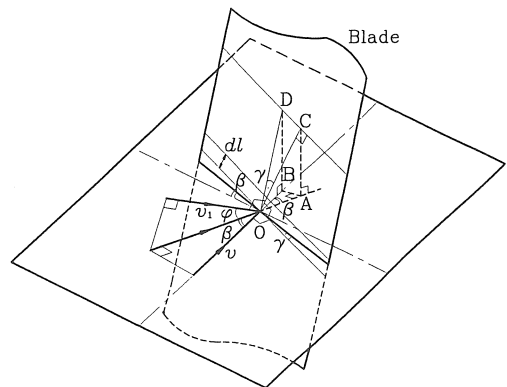


Fig.5 Relation between the wind speed and a blade

$$v_1 = v \cos \beta \cos \varphi \quad (3)$$

ここに、 β : 中心角 θ における回転翼のねじれ角

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\cos \beta \tan \theta} \right)$$

また、 v_1 に垂直な回転翼面上の微小面積 dS は(4)式のようになる。

$$dS = dl \frac{wL}{\cos \gamma} = \frac{RwL}{\cos \gamma} d\theta \quad (4)$$

$$\text{ここに、} \gamma = \tan^{-1}(\sin \varphi \tan \beta)$$

よって、(3)式及び(4)式を用いて、 v_1 による dS 面に垂直に作用する力 dF_1 を求めると、(5)式のように求められる。

$$\begin{aligned} dF_1 &= \frac{1}{2} \rho v_1^2 dS \\ &= \frac{1}{2} \rho (v \cos \beta \cos \varphi)^2 \frac{RwL}{\cos \gamma} d\theta \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 ρ : 空気の密度

回転翼の風上側 ($\theta = \alpha \sim \pi/2$) 及び風下側 ($\theta = \pi/2 \sim \pi - \alpha$) をそれぞれ前翼部及び後翼部とした場合、風によって風車が発生する全トルクは、前翼部と後翼部とがそれぞれ発生するトルクに分けることができる。

前翼部を通過した風は回転翼内で乱れ、かつ、前翼部で風の持つエネルギーがある程度吸収されるので、後翼部が発生するトルクは前翼部が発生するトルクと等しくならない。

前翼部が発生するトルクを T_F 、後翼部が発生するトルクを T_R とすると、TABT 水平軸風車の出力係数 C_{PT} は、前翼部及び後翼部とも同一回転方向のトルクを発生するので、次式のように表すことができる。

$$C_{PT} = \frac{2\pi n(T_F + T_R)}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} \quad (6)$$

ここに、 A : 風車受風面積

n : 風車回転数

一方、RTABT 水平軸風車の出力係数 C_{PRT} は、前翼部と後翼部とでは逆の回転方向のトルクを発生するので、次式のように表される。

$$C_{PRT} = \frac{2\pi n(T_F - T_R)}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} \quad (7)$$

(6)式及び(7)式において、 $n/\rho v^3$ が等しいとすると、両式の比から後翼部が発生するトルクは次式のように導かれる。

$$T_R = \frac{1 - \frac{C_{PRT}}{C_{PT}}}{1 + \frac{C_{PRT}}{C_{PT}}} \cdot T_F$$

TABT 水平軸風車及び RTABT 水平軸風車が発生する全トルクを T_{TABT} 及び T_{RTABT} とすると、上式を利用して、それぞれ次式のように求められる。

$$T_{TABT} = T_F + T_R = \frac{2}{1 + \frac{C_{PRT}}{C_{PT}}} \cdot T_F \quad (8)$$

$$T_{RTABT} = T_F - T_R = \frac{2 \frac{C_{PRT}}{C_{PT}}}{1 + \frac{C_{PRT}}{C_{PT}}} \cdot T_F \quad (9)$$

(8)式及び(9)式は、TABT 水平軸風車及び RTABT 水平軸風車の出力係数の比を用いることにより、風車が発生する全トルクを、後翼部が発生するトルクを考慮に入れて、前翼部が発生するトルクで表すことができることを示している。

よって、このときの前翼部が発生するトルクに乗じる倍率を m とすると、TABT 水平軸風車及び RTABT 水平軸風車について、 m はそれぞれ次式のように表すことができる。

TABT 水平軸風車では

$$m = \frac{2}{1 + \frac{C_{PRT}}{C_{PT}}} \quad (10)$$

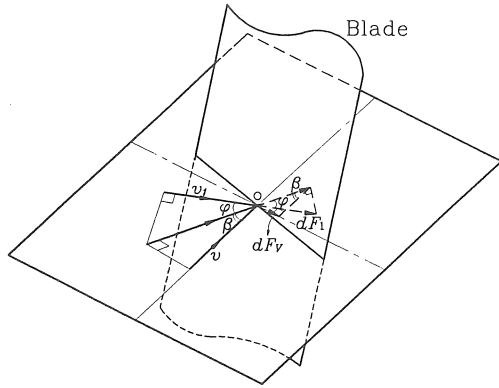
RTABT 水平軸風車では

$$m = \frac{2 \frac{C_{PRT}}{C_{PT}}}{1 + \frac{C_{PRT}}{C_{PT}}} \quad (11)$$

よって、回転翼の枚数が同じで、同一翼形状である TABT 水平軸風車及び RTABT 水平軸風車の出力係数を前もって測定しておけば、(10)式及び(11)式を用いることにより、その回転翼の枚数における倍率 m を決定することができる。

この倍率は風によって風車が発生する回転力（回転力とトルクは比例関係にあるので）にも適応できることから、図6に示す関係から、力 dF_1 によって1枚の回転翼を回転させる方向の力 dF_v は(5)式を用いて次式のように導かれる。

$$dF_v = m dF_1 \cos \varphi \sin \beta \quad (12)$$


 Fig. 6 Relation between dF_v and dF_1

2.5 回転による空気抵抗

風車が風によって回転しているとき、回転翼の周速（風車の回転による回転翼の横方向の見かけ上の風速）によって生じる空気抵抗により、回転速度を減少させる方向の力が回転翼に作用する。

回転翼の中心角 θ における周速 v_A は次式のように表すことができる。

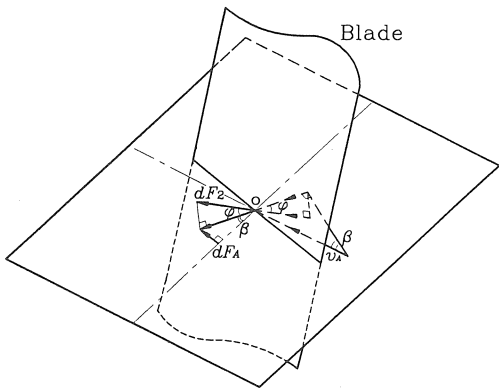
$$v_A = 2\pi n R \sin \theta \sin \beta \cos \varphi \quad (13)$$

ここに、 n ：風車回転数

微小面積 dS に作用する力 dF_2 は、同一回転速度であるから、前翼部と後翼部とでは等しい力を受けるので、前翼部（ $\theta = \alpha \sim \pi/2$ ）が受ける力を2倍すればよいことになるので、次式のように表すことができる。

$$dF_2 = 2 \times \frac{1}{2} \rho v_A^2 dS = \rho v_A^2 dS \quad (14)$$

よって、力 dF_2 によって回転翼の回転速度を減少させる方向に働く力 dF_A は、図7の関係から、次式のよ


 Fig. 7 Relation between dF_A and dF_2

うに求められる。

$$dF_A = dF_2 \cos \varphi \sin \beta \quad (15)$$

2.6 トルク係数・出力係数

風速 v によって回転翼1枚に発生するトルク T は、軸方向の風の風速によって発生するトルクから空気抵抗によって生じるトルクを減ずればよいので、(12)式及び(15)式を用いて、次式のように表すことができる。

$$T = \int_{\alpha}^{\pi/2} R \sin \theta dF_v - \int_{\alpha}^{\pi/2} R \sin \theta dF_A$$

上式に、(5)式、(12)式、(13)式、(14)式及び(15)式を代入すると、回転翼1枚が発生するトルクは次式のように求められる。

$$T = \int_{\alpha}^{\pi/2} \frac{m}{2} \rho v^2 R^2 w_L \sin \beta \cos^2 \beta \sin \theta \cos^3 \varphi \frac{1}{\cos \gamma} d\theta - \int_{\alpha}^{\pi/2} \rho R^4 w_L (2\pi n)^2 \sin^3 \beta \sin^3 \theta \cos^3 \varphi \frac{1}{\cos \gamma} d\theta$$

上式を用いて、トルク係数 C_T 及び出力係数 C_P を求めると以下ようになる。

(a) 楕円翼では

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho v^2 \pi R^3} = \frac{N w_c}{\pi L R} \left\{ \frac{m}{2} \int_{\alpha}^{\pi/2} f_v(\theta) d\theta - T S R^2 \int_{\alpha}^{\pi/2} f_A(\theta) d\theta \right\}$$

ここに、

N ：回転翼の枚数

$$f_v(\theta) = \sqrt{4L^2 - 3\{2R(\theta - \alpha) - L\}^2} \times \frac{\sin \beta \cos^2 \beta \sin \theta \sin^3 \left(\tan^{-1} \frac{1}{\cos \beta \tan \theta} \right)}{\cos \left[\tan^{-1} \left\{ \cos \left(\tan^{-1} \frac{1}{\cos \beta \tan \theta} \right) \tan \beta \right\} \right]}$$

$$f_A(\theta) = \sqrt{4L^2 - 3\{2R(\theta - \alpha) - L\}^2} \times \frac{\sin^3 \beta \sin^3 \theta \sin^3 \left(\tan^{-1} \frac{1}{\cos \beta \tan \theta} \right)}{\cos \left[\tan^{-1} \left\{ \cos \left(\tan^{-1} \frac{1}{\cos \beta \tan \theta} \right) \tan \beta \right\} \right]}$$

$$C_P = \frac{2\pi n T}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} = \frac{2\pi n R}{v} \frac{T}{\frac{1}{2} \rho v^2 \pi R^3} = T S R \times C_T$$

ここに、 A ：風車の受風面積

TSR : 周速比

(b) 矩形翼では

この場合、回転翼の幅は一定であるので、

$$w_L = w_E$$

となり、 v_i に垂直な微小面積は次式のようになる。

$$dS = \frac{R w_E}{\cos \gamma} d\theta$$

以下、楕円翼の場合と同様に考えることができるので、トルク係数 C_T 及び出力係数 C_P は次式のように求められる。

$$C_T = \frac{N w_E}{\pi R} \left\{ m \int_{\alpha}^{\pi/2} f_{RV}(\theta) d\theta - 2 \times TSR^2 \int_{\alpha}^{\pi/2} f_{RA}(\theta) d\theta \right\}$$

ここに、

$$f_{RV}(\theta) = \frac{\sin \beta \cos^2 \beta \sin \theta \sin^3 \left(\tan^{-1} \frac{1}{\cos \beta \tan \theta} \right)}{\cos \left[\tan^{-1} \left\{ \cos \left(\tan^{-1} \frac{1}{\cos \beta \tan \theta} \right) \tan \beta \right\} \right]}$$

$$f_{RA}(\theta) = \frac{\sin^3 \beta \sin^3 \theta \sin^3 \left(\tan^{-1} \frac{1}{\cos \beta \tan \theta} \right)}{\cos \left[\tan^{-1} \left\{ \cos \left(\tan^{-1} \frac{1}{\cos \beta \tan \theta} \right) \tan \beta \right\} \right]}$$

$$C_P = TSR \times C_T$$

3. 実験装置および方法

図8に実験装置の概略図を示す。

試験用風車 (図1・ $\beta_0 = \pi/4.5$, $\delta = 30$ mm) は風洞出口より約 150 mm の位置に風速方向と風車回転軸が平行になるように設置されており、風速はハイブリッド風速計で、風車回転数はデジタル回転計で、風車出力トルクはバネばかりと固体摩擦抵抗を利用したトルク計でそれぞれ測定する。

実験は、風速を一定にして固体摩擦抵抗を変化させる場合と、固体摩擦抵抗を一定にして風速を変化させる場合とについて行い、各場合とも、回転数が安定したときにそれぞれ風速、トルク及び回転数を同時に測定して、トルク係数及び出力係数の実験値を算出する。

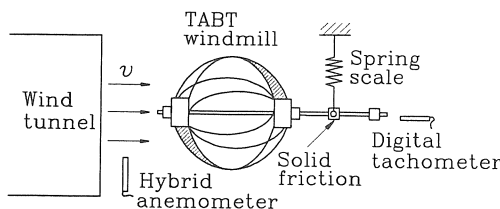


Fig.8 Schematic arrangement of experimental apparatus

4. 実験結果と考察

図9及び図10は楕円翼の TABT 水平軸風車、図11及び図12は楕円翼の RTABT 水平軸風車のそれぞれ C_P 値及び C_T 値を示す。

図13及び図14は矩形翼の TABT 水平軸風車、図15及び図16は矩形翼の RTABT 水平軸風車のそれぞれ C_P 値及び C_T 値を示す。

各図中の白丸点は実験値を示す。

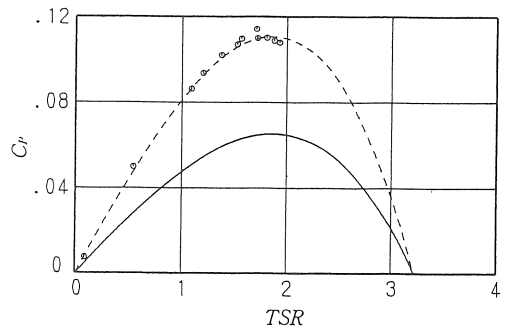


Fig.9 C_P vs. TSR (TABT · ellipse)

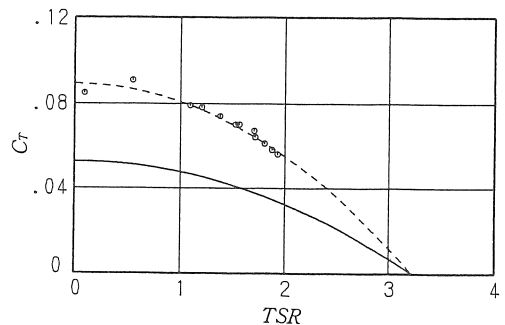


Fig.10 C_T vs. TSR (TABT · ellipse)

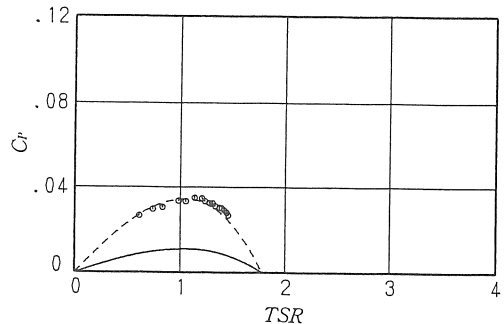
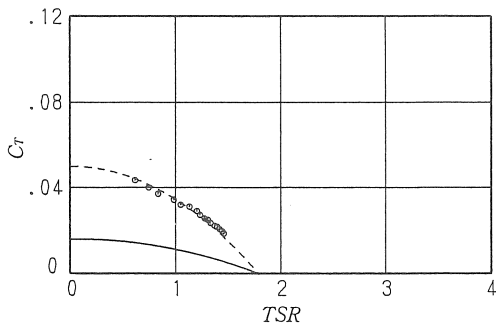
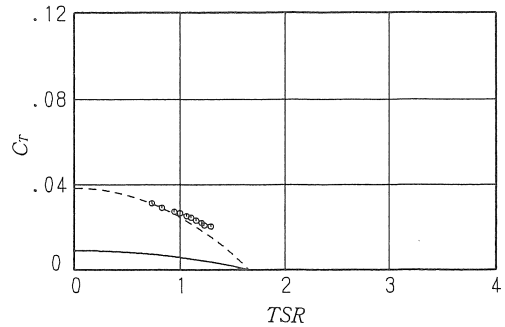
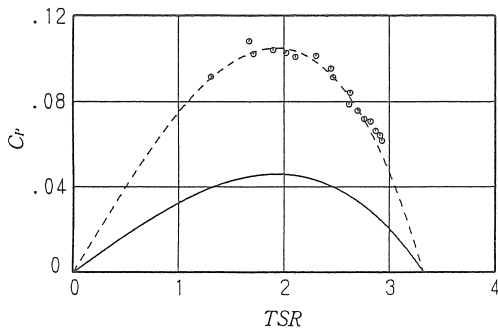
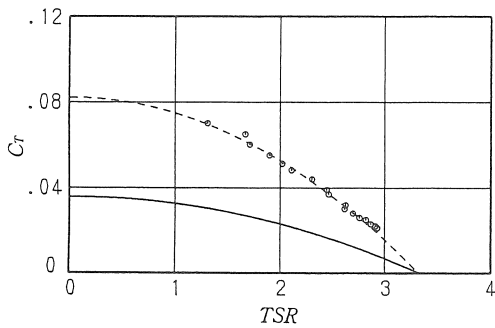
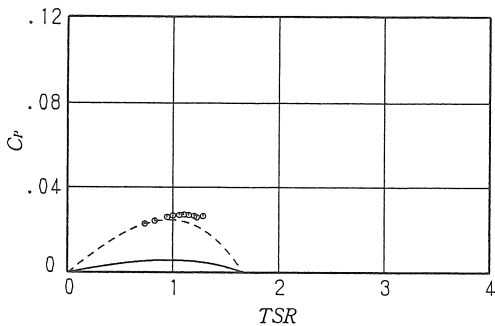


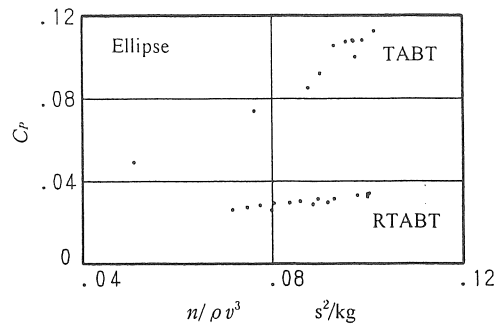
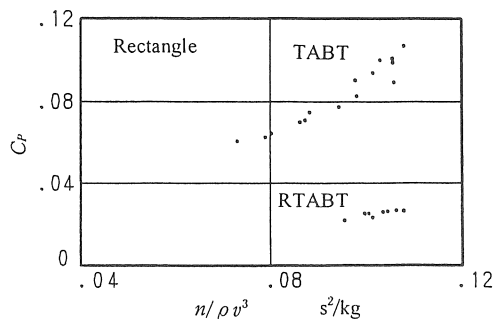
Fig.11 C_P vs. TSR (RTABT · ellipse)


 Fig.12 C_T vs. TSR (RTABT · ellipse)

 Fig.16 C_T vs. TSR (RTABT · rectangle)

 Fig.13 C_P vs. TSR (TABT · rectangle)

 Fig.14 C_T vs. TSR (TABT · rectangle)

 Fig.15 C_P vs. TSR (RTABT · rectangle)

実験値を比較した場合、いずれも、回転翼形状の違いに関わらず、RTABT 水平軸風車より TABT 水平軸風車の方が大きな値を示していることから、後翼部が風車の回転に大きく関与していると考えられる。

また、楕円翼と矩形翼とを比較すると、出力係数及びトルク係数とも楕円翼の方が大きな値を示している。

図17及び図18は $n/\rho v^3$ に対する出力係数 C_P の実験結果を TABT 水平軸風車及び RTABT 水平軸風車についてそれぞれ表したもので、両風車とも同一回転翼形状においては、最大 C_T 値のところが、 $n/\rho v^3$ の最大値になっており、かつ、それぞれの回転翼形状では、 $n/\rho v^3$ の最大値はほぼ等しい。


 Fig.17 C_P vs. $n/\rho v^3$ (ellipse)

 Fig.18 C_P vs. $n/\rho v^3$ (rectangle)

そこで、(10)式及び(11)式を用いて倍率 m を算出する場合には、両式が成立する条件として $n/\rho v^3$ が等しくなければならないので、実験によって求めた $n/\rho v^3$ がほぼ等しいところの最大 C_P 値を使用すればよいことになる。

本研究に用いた TABT 水平軸風車及び RTABT 水平軸風車において、楕円翼及び矩形翼について、図 9 及び図 11 または図 13 及び図 15 からそれぞれの回転翼に対し最大 C_P 値の比を算出すると、次のようになる。

楕円翼では

$$\frac{C_{PRT}}{C_{PT}} = 0.304$$

矩形翼では

$$\frac{C_{PRT}}{C_{PT}} = 0.248$$

これらの値を(10)式及び(11)式に代入して、倍率 m を求めると下記のようになる。

	楕円翼	矩形翼
TABT 水平軸風車	1.5	1.6
RTABT 水平軸風車	0.5	0.4

図 9 から図 16 における実線は上記の値を用いて求めた理論曲線である。

実験値と理論曲線は一致していないが、このことは、回転翼固定ハブの形状とか回転翼の円弧度等の形状による影響があると思われることと、理論解析においてソリディティを考慮に入れていないことなどによるものと考えられる。

そこで、本研究では、この違いを補正するために形状係数 K を導入し、理論曲線を K 倍して理論曲線を補正すると、形状係数 K は次のような値になる。

	楕円翼	矩形翼
TABT 水平軸風車	1.7	2.3
RTABT 水平軸風車	3.1	4.3

図 9 から図 16 における破線は上記の値を用いて補正した補正曲線である。

この結果、後翼部の影響を考慮した倍率 m を用いて前翼部で発生するトルクで風車が発生する全トルクを表し、かつ、理論式の補正のための形状係数を導入すると、実験値とよく合致することから、理論式は実験に対して特性傾向が一致する結果が得られた。

なお、今後の課題として、本研究では考慮しなかったソリディティに関する項を理論解析に導入することが必要であると考えている。

5. おわりに

TABT 水平軸風車及び RTABT 水平軸風車の諸特性を楕円翼と矩形翼について理論解析とモデル実験から導いた結果、以下の諸点が明らかになった。

- (1) 風車の回転に及ぼす後翼部の影響を考慮することにより、理論式は実験に対して特性傾向が一致する結果が得られた。
- (2) 6 枚翼 TABT 水平軸風車の場合、回転翼後翼部が回転に参与する割合は、楕円翼で前翼部の 5 割前後及び矩形翼で前翼部の 6 割前後である。
- (3) 楕円翼と矩形翼とでは、同一風速に対し、風車出力は楕円翼の方が有意であると考えられる。
- (4) 特に、発電機を増速して使用する場合には、トルク係数が大きい楕円翼の方が有利である。

参考文献

- 1) 小島昇：ねじれ円弧翼型水平軸風車の開発，太陽エネルギー，Vol.22, No.3, pp.25 - 31(1996)
- 2) 笠原英司：例題演習・水力学，pp.194 - 197，産業図書(1980)