

ねじれ円弧翼型水平軸風車の開発*

Experimental Development of a Torsion Arc Blade Type Horizontal Axis Windmill

小島 昇^{*1}

Noboru KOJIMA

Abstract

The purpose of the present paper is to develop the latest style of horizontal axis windmill having the possibility of generating electricity by the wind power in cities. The first, the blade form, the torsion angle at blade element and the number of blades have been determined by the experiments used a windmill model built as a trial. Consequently, the design conditions suited for horizontal axis windmill are obtained as follows.

- 1) The center width of a blade is two times of the fixed end width.
- 2) The number of the blades is six.
- 3) The torsion angle is from 30 to 45 degree.

The second, the experiments on the wind power generation were made by natural wind for the small-sized windmill manufactured by considering the above conditions. As the results, it became clear that the developed windmill can be used to the wind power generation of a small scale in cities.

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

1. ま え が き

クリーンなエネルギー源としての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の利用（風力発電）は、風車の回転翼によって風の速度エネルギーを風車の回転に変換し、その回転力を動力源として発電することである。

風の速度エネルギーをより多く得るためには、風車の回転翼を大きくすると同時に風車を設置する塔をより高くする必要がある。そのために、広い場所と実用化のための大規模システムが要求されることから、地理的な制限を受けて風車の設置場所が限定され、かつ、風車製作費が高騰する原因となる。

本研究では、このような風車の設置場所の制限とか製作費の低減等を考慮した都市部などにおいても風力発電を可能とする小型風車の開発を目的として、

第1に、平板状の回転翼を円弧状に曲げ、回転軸に取り付けた2個のハブに回転翼の両端をそれぞれ固定した構造の風車で、回転翼の形状の違い、枚数及びねじれの度合い等の検討を模型実験によって行った。

また、第2に、この検討結果をもとに小型風車を製

作し、自然風による風車の回転及び発電実験を行い、本研究で開発した小型風車が小規模の風力発電に利用することが可能であることを検証した。

2. 風 車 模 型

試作した風車模型の概略図を図1に示す。

回転翼を回転軸へ固定するには軸の両端部に取り付けてある左右2個の正六角形状のハブを用い、1枚の回転翼を左右のハブのそれぞれ対応する1つの辺に固定し、最大6枚の回転翼を取り付けることができるようにしてある。

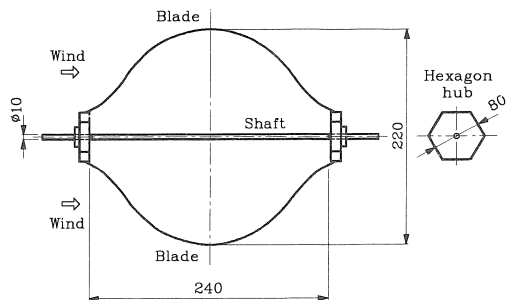


Fig.1 Schematic arrangement of horizontal axis windmill built as a trial

* 原稿受付 平成7年10月26日

*1 会員, 明治大学理工学部 (〒214-71 川崎市多摩区東三田1-1-1)

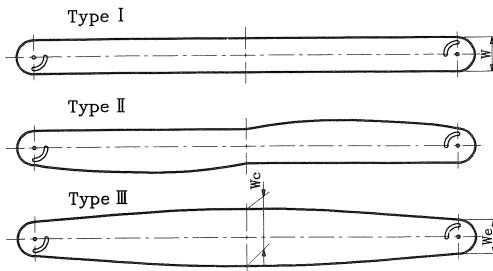


Fig.2 Three types of blade form

2.1 回転翼の形状

図1のような風車を考えた場合、いろいろな形状の回転翼を考えることができるが、回転翼の製作の容易さとか製作費などを考慮した場合、複雑な形状にすることは得策ではない。そこで、図2に示すような3種類の形状 (Type I ~ Type III) の回転翼を模型実験の対象とした。

Type I は回転翼の幅が一定であり、Type II は回転翼の中心で点対象であり、Type III は回転翼の中央の幅が固定端の幅の2倍となる長ダ円形である。

本研究における風車は軸方向の風に対し回転する構造を考えているので、軸に対し回転翼はねじれた状態でハブの各辺に固定する必要がある。そのために、回転翼両端の固定部は図2に示すような穴加工をし、軸に対し回転翼がねじれた状態で固定できるようにしてある。

2.2 送風機による回転試験

3種類の形状の回転翼のうち水平軸風車に適した形状と枚数を決定するために、それぞれ、同一形状の回転翼に対し、回転翼の数が3枚と6枚のときの同一風速に対する風車の回転数とトルクを模型実験によりそれぞれ測定した。

風車の回転数の測定にはデジタルタコメータを用いた。また、小型の模型風車による実験であることか

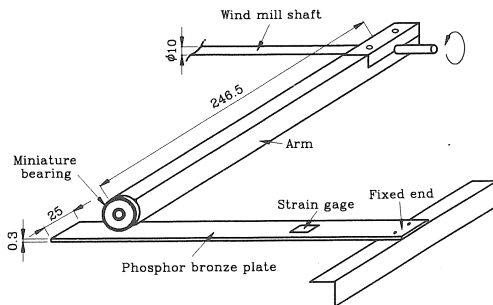


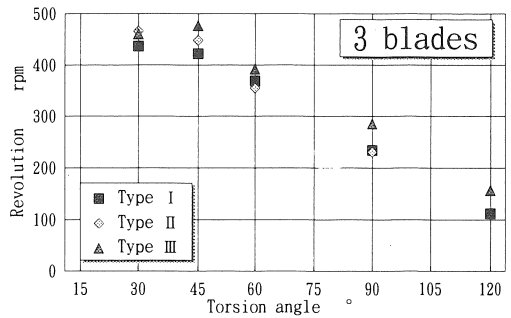
Fig.3 Schematic arrangement of torque measurement apparatus

ら、測定すべきトルクが微小であるため、市販のトルク計を利用することができないので、トルクの測定には、風車回転軸に付けたアーム先端の向きに作用する力をリン青銅板を用いた片持はりに接着したストレインゲージのひずみ測定による出力電圧との関係から算出し、この力にアームの長さに乗じてトルクを求める原理を利用した図3に示すようなトルク測定装置を製作して行った。

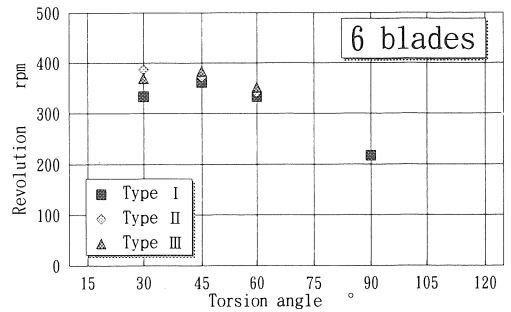
回転数及びトルクの測定結果をそれぞれ図4及び図5に示す。

図4より、同一風速に対し、どのねじれ角においても、回転翼の数が6枚より3枚の方が、高い回転数を示しているが、回転翼の形状の違いに対しては大きな差が現れていない。さらに、ねじれ角が30° ~ 45°の範囲でそれぞれ最大の回転数を示している。

図5より、同一風速に対し、回転翼の数が3枚の場合、どの回転翼形状においても、ねじれ角の違いによる風車の出力トルクの差は顕著ではない。一方、回転翼の数が6枚の場合、Type II 及び Type III の回転翼形状では、明らかにねじれ角が30° のとき最大出力

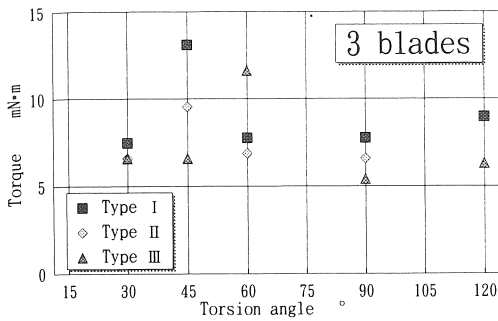


(a) 3 blades windmill

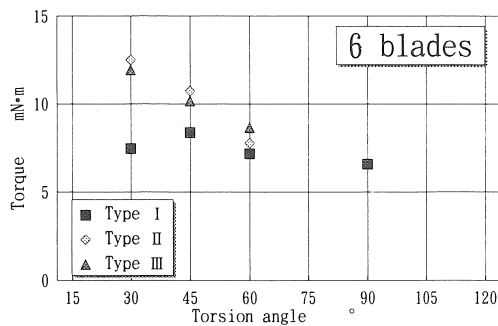


(b) 6 blades windmill

Fig.4 Relationship between the revolution and the torsion angle on the blade forms in the wind speed 4.2 m/s



(a) 3 blades windmill



(b) 6 blades windmill

Fig.5 Relationship between the torque and the torsion angle on the blade form in the wind speed 4.2 m/s

トルクを示しており、かつ、両者ともほぼ等しい値を示している。

2.3 模型実験結果

風車の動力を発電機に伝達するには、風車と発電機とを直結して伝えるか、あるいは、歯車等を用いて風車回転数を増速して発電機に伝えるかであるが、定格出力を得るための発電機回転数は通常約 2000~3000 rpm であり、本研究で開発した風車では上記回転数まで回転を上げることは困難であるので、風車と発電機とを直結するのではなく、風車回転数を増速して発電機に動力を伝える方法を採用する必要がある。

この場合、多少の回転数を犠牲にしても、風車の出力トルクを高くすることを考えた方が有利となるので、模型実験の結果から、本研究で開発目的とした水平軸風車に対して適当であると判断される風車構造を次のようにする。

- 1) 風車回転数は回転翼の数が3枚の方が高い値を示すが、安定した出力トルクを得るために、回転翼の数は6枚とする。
- 2) 高出力トルクが得られ、かつ、回転翼の製作の容

易さから、回転翼形状は Type III とする。

- 3) より高い出力トルクと回転数とを得るために、回転翼のねじれ角は 30° とする。

3. 試験風車

前項 2.3 における模型実験の結果を考慮して、自然風による風力発電試験用として風力発電用小型水平軸風車を製作した。

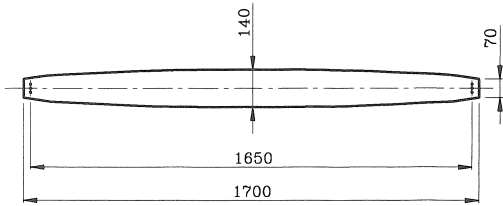


Fig.6 Blade form

回転翼は図6に示すように、翼形状が Type III の形状の全長 1700 mm、翼中央部の最大幅 140 mm、固定部翼幅 70 mm の大きさで、板厚 0.6 mm のステンレス板より切り出したものを6枚用いる。

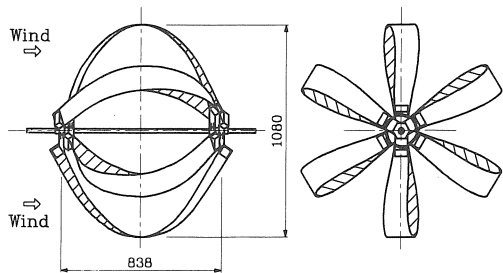


Fig.7 Schematic arrangement of the torsion arc blade type horizontal axis windmill

図7に試験用に製作した風力発電用小型水平軸風車の概略図を示す。風車の外観は円弧状回転翼の最大回転半径が 540 mm で、水平軸長さが 838 mm である。

回転翼は風車回転軸に対し円弧状になるように回転翼の両端で固定され、かつ、回転軸に対してねじれた状態になるように回転軸に取り付けたハブに固定される。

模型の場合、回転軸に固定してある両端の2個のハブを互いに反対方向に回転させることにより任意に回転翼のねじれ角を設定することができるが、試験用に製作した風車では、回転翼はそれなりに大きくなるので、前述のような方法でねじれ角を設定することは困

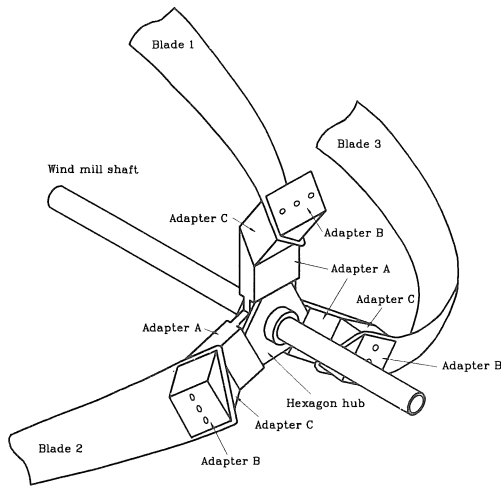


Fig. 8 Fixed part of the blades

難である。

それゆえ、製作した風車の回転翼固定部は図8に示すように、ねじれを設定できるように加工したブロック3個（アダプタA、B、C）を組み合わせて正六角形状のハブに回転翼を固定する。製作した風車ではねじれ角が30°になるようにブロックを加工してある。

図8に示したように、1個の六角形状ハブに回転翼は3枚固定できる構造になっているので、本研究で提案している6枚翼の風車とする場合は、回転翼両端の固定部にはそれぞれ2個の六角形状ハブを互いに60°回転した状態にして、総計4個の六角形状ハブを用いる。

以下、この開発した風車をねじれ円弧翼型水平軸風車 (Torsion Arc Blade Type Horizontal Axis Windmill)、略して、TAB型風車と呼ぶ。

このTAB型風車は独自に開発したものであるが、結果的に、CRBT風車¹⁾と類似している部分がある。

両者の類似点は、風車型式が水平軸型であり、さら

Table 1 Comparison with TAB type and Darrieus type windmill

Item	TAB type	Darrieus type
Rotation shaft	Horizontal	Vertical
Wind direction	Parallel to shaft	Right angle to shaft
Shaft support system	Both ends support	Under end support
Blade form	$W_c = 2 \times W_e$	$W = \text{const}$
Blade cross section	Rectangle	Wing section
Blade condition	Torsional blade	Nontorsional blade
Blade number	6	2 ~ 3

に、回転翼が平板であり、かつ、翼の両端部をハブに固定していることである。

また、両者の相違点は、前者では、回転翼の平面形状が長楕円形で、回転翼をハブに固定したときの回転翼の形状が円弧形（回転軸方向の回転翼の揺れを極力抑え、繰り返し応力による固定部の破断に対する耐久性を上げることが出来る）である。

後者では、回転翼の平面形状が矩形で、回転翼をハブに固定したときの回転翼の形状が懸垂形である。

また、回転翼の数は、前者の場合、6枚で、後者の場合、3枚である。

なお、外観上、TAB型風車はダリウス型風車²⁾に類似しているが、両者を比較した場合、各諸元は表1に示すようになり、基本的には異なっている。

4. 実験装置及び方法

本研究において開発したTAB型風車の基本特性を得るために、風速、風車回転数及び発電電圧をマイクロコンピュータとデータアキュイジションコントローラ（DC 0~10 V入力）とを組み合わせて構築した図9に示すようなデータ収集システムにより自動計測できるようにした。

風速計は風車型指示風速計（1 ~ 30 m/s）を用い、回転計は小型発電機を利用し、風力発電用発電機は鷹羽科学工業（株）製・高効率発電機トクノダイナモ（3相 AC 150 W/3 000 rpm）を用いた。

風速計に用いられている小型発電機、回転計用小型発電機及び風力発電用発電機は全て交流出力であるので、図10に示すようなAC/DC変換回路をそれぞれ用い交流電圧を直流電圧に変換している。さらに、発電機の発電電圧がDC 10 V以上で、データアキュイジ

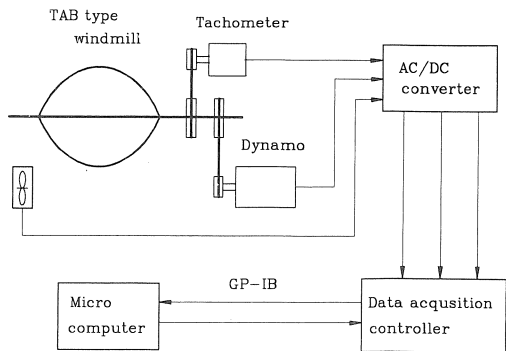


Fig. 9 Automatic measurement system for the data collection

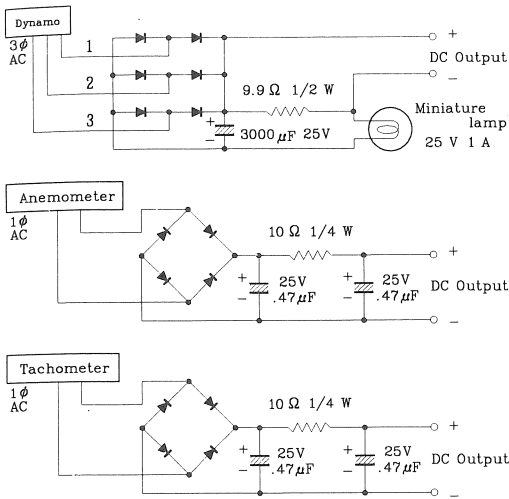


Fig. 10 AC/DC conversion circuits

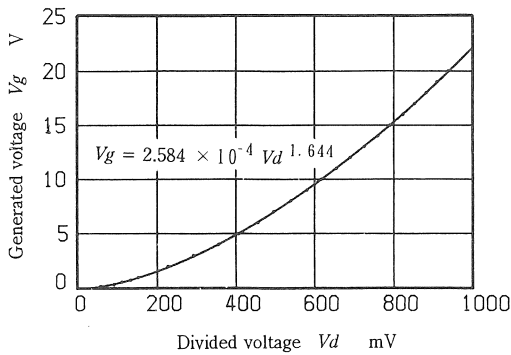


Fig. 11 Calibration curve of generated voltage

コンローラの許容入力電圧が DC 10 V 以下であるので、発電機の負荷抵抗として整流回路に抵抗値の異なる 2 つの抵抗 (9.9 Ω の固定抵抗と耐圧 24 V、直流抵抗約 20 Ω の豆電球) を直列に入れ、固定抵抗に分圧された電圧 (10 V 以下) を測定して、発電機の全発電電圧を求める。分圧された電圧と全発電電圧との校正結果を図 11 に示す。

使用した風速計及び回転計用小型発電機のそれぞれ直流出力電圧に対する風速及び直流出力電圧に対する回転数の校正結果は図 12 及び図 13 に示す。

出力トルクは、発電機用発電機の負荷を風車の負荷として、ひずみゲージ式トルク計を用いて校正した結果から風車回転数に対する出力トルクとして求める。この校正結果を図 14 に示す。さらに、風車回転数と回転トルクより風車動力を算出する。

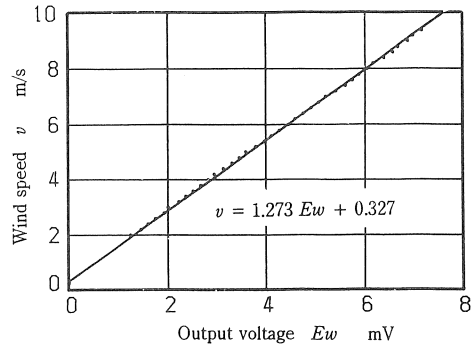


Fig. 12 Calibration curve of an anemometer

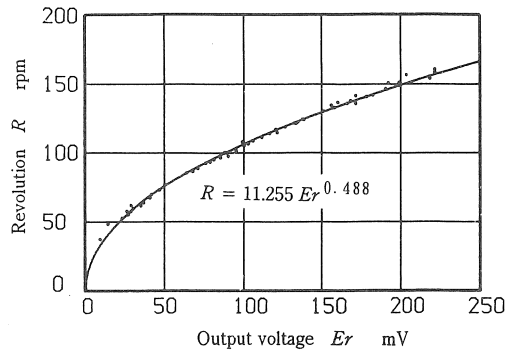


Fig. 13 Calibration curve of a tachometer

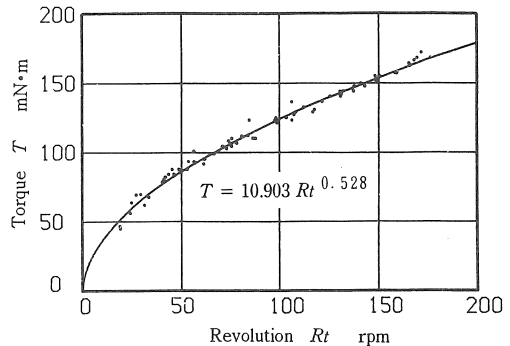


Fig. 14 Calibration curve of a torque meter

5. 実験結果と考察

5.1 回転数・トルク・動力

図 15 に自然風による風速に対する風車回転数及び図 16 に風速に対する出力トルクの測定結果を示す。また、図 17 に図 15 及び図 16 の結果を用いて計算によって求めた風速に対する風車動力の関係を示す。

図 15 及び図 16 は、発電機に接続される負荷抵抗

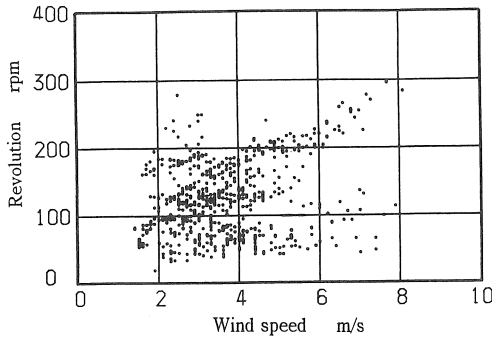


Fig.15 Revolution vs. wind speed

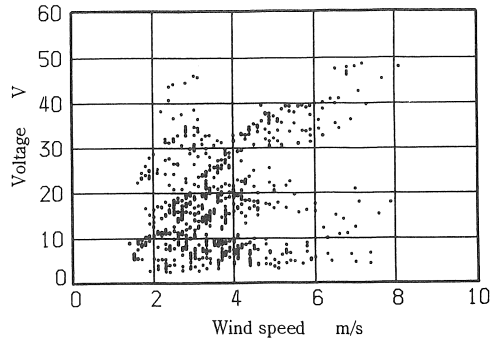


Fig.18 Generated voltage vs. wind speed

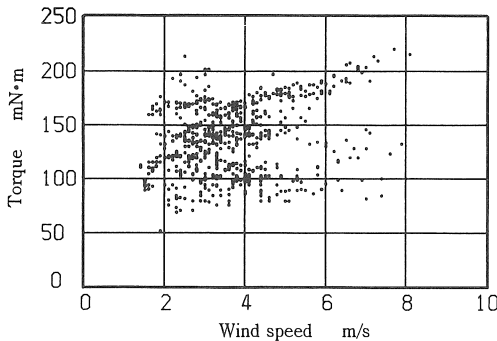


Fig.16 Torque vs. wind speed

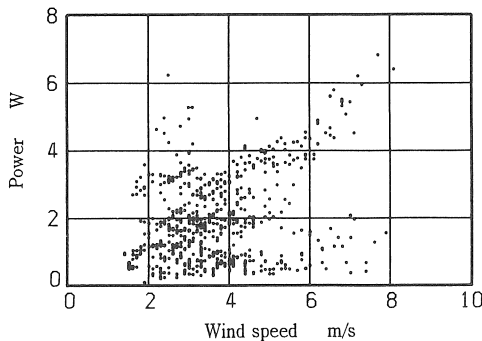


Fig.17 Power calculated with the revolution and the torque vs. wind speed

が直流抵抗で約 30 Ω と低く、そのため発電機の回転トルクが比較的高い状態で風車に負荷トルクが負荷されているときの測定結果であるが、図 17 に示すように風速 8 m/s で約 7 W の風車動力が得られている。

本研究で開発した T A B 型風車は板厚 0.6 mm のステンレス板を図 6 のような長楕円形状に切り出した回転翼を 6 枚使用したことにより、風車の回転バランス

を 10 mN·m 以下に容易に調整することができた。その結果、風速 2 m/s 弱から回転可能であり、比較的始動性が良く、かつ、安定した回転を得ることが可能である。

また、今回の自然風での発電実験では、風速は最大 8 m/s であったが、このときの風車の回転数は約 300 rpm であり、概算による風車の危険速度が約 800 rpm であることから、危険速度より常に、かつ、十分に低い回転数で発電が可能である。

5.2 発電電圧

図 18 は風速に対する発電機出力の測定結果である。本風車で設定した風車回転数と発電機回転数との回転比は 1 : 6 となっており、今回の実験では風速が最大 8 m/s で発電機回転数はおおよそ 1800 rpm ぐらいになっており、このときの出力電圧は直流に変換した後約 50 V、このとき回路に流れた電流は約 160 mA であった。

本研究で用いた風車は風力発電の実用化の可能性を検証するための試験的に製作した風車で小型であるが、これよりサイズを大きくして風車回転数と発電機回転数との回転比を大きくすれば、風力発電の実用化も可能である。

5.3 出力係数

模型風車で回転翼のねじれ角が 30° の場合、周速比がおおよそ 1.0 で出力係数が 0.27 となった。しかし、模型風車の実験は風車を風洞内に入れた状態で行ったものであることから、風洞外で一定風速を風車に当てたときの出力係数より大きな値を示していると思われる。

また、試験風車では自然風で行った実験の結果、一定の風速を定常的に得ることが出来ず、風車の慣性力の影響により出力係数に相当のばらつきが出ているが、比較的風速が定常的であるところで、周速比が 1 から

2の範囲で出力係数は0.1前後に集中した値が得られた。

このようなことから、本研究で開発したTAB型風車の実用機での予想出力係数は最大で0.1前後の値になるものと思われる。

6. ま と め

本研究で開発した風車は、図8に示すように、長ダ円形の回転翼をアダプタで風車の回転軸に対して30°にねじりをかけて円弧状にするという、非常に簡単な構造であるうえに、かつ、回転翼の枚数を6枚にすることにより、回転バランスが良く、始動性の良い風車を比較的簡単に製作することができる。

さらに、風車を設置する高い塔を建設する必要がな

いことなどから、従来の風車で用いられているプロペラ型風車等に比べて風車の製作費を大幅に低減することができる。

また、小型風車として都市部におけるビル風を利用した補助電力用の都市型風力発電の可能性がある。

最後に、本研究は明治大学科学技術研究所重点研究として行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) M.A.Kotb, et al : Aerodynamic Performance of Catenary ribbon blade Turbines(CRBT) and Comparison with Experiment, Wind Engineering, Vol.16, No.3, 181-194(1992)
- 2) 西 亮 : 4MW 世界最大ダリウス型風車の見学, 風力エネルギー, Vol.13, No.2, 9-11(1989)

◎ 平成7年4月19日 原稿受理

関連会議・行事案内

【 】内=案内掲載号, 太字は本号に掲載.

国 内

- ・第8回固体薄膜・表面国際会議 【Vol. 21, No. 6】
平成 8年 7月 1日(月)~5日(金)
- ・第6回 ソーラーエネルギーフェスティバル 【Vol. 22, No. 2】
平成 8年 7月28日(日)〈雨天延期: 8月4日〉
- ・'96浜名湖ソーラー&尽力ボートレース 【Vol. 22, No. 1】
平成 8年 7月中旬~8月上旬の土・日 2日間
- ・'96ワールド・ソーラーカー・ラリー・イン・アキタ 【Vol. 22, No. 1】
平成 8年 7月20日(土)~28日(日)
- ・'96 柳川ソーラーボート大会 【Vol. 22, No. 1】
平成 8年 8月 3日(土)~4日(日)
- ・国際シンポジウム「閉鎖生態系における植物生産」 【Vol. 21, No. 3】
平成 8年 8月26日(月)~30日(金)
- ・96 住宅設備展-Japan Home Show 96 【Vol. 22, No. 1】

平成 8年10月22日(火)~25日(金)

- ・第9回太陽光発電国際会議 (PVSEC-9) 【Vol. 21, No. 2】
平成 8年11月11日(月)~15日(金)
- ・第14回PLEA国際会議 (通称: PLEA'97釧路国際会議) 【Vol. 21, No. 5】
平成 9年 1月 6日~12日

海 外

- ・World Renewable Energy Congress IV
1996年 6月15~21日 【Vol. 21, No. 6】
- ・3rd International Renewable Energy Asia Pacific '96
1996年10月 7~9日 【Vol. 22, No. 3】
- ・1996 Fuel Cell Seminar 【Vol. 22, No. 1】
1996年12月17~20日
- ・3rd International Conference on Solar Cookers 【Vol. 21, No. 5】
1997年 1月 6~10日
- ・1997 World Congress of The International Solar Energy Society 【Vol. 21, No. 6】
1997年 8月24~29日