

## 集風体風車に関する小考

烏谷, 隆  
九州大学応用力学研究所

大屋, 裕二  
九州大学応用力学研究所

渡辺, 公彦  
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/14173>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 134, pp.13-16, 2008-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

# 集風体風車に関する小考

鳥谷 隆\*, 大屋 裕二\*, 渡辺 公彦\*

(2008年1月31日受理)

## Some Notes on a Wind Augmented Wind Turbine

Takashi KARASUDANI, Yuji OHYA and Kimihiko WATANABE

E-mail of corresponding author: karasu@riam.kyushu-u.ac.jp

### Abstract

We study whether a wind augmented wind turbine is effective for improving the efficiency of wind turbines or not. An augmentation device increases mass flow rate through a wind turbine, and the power of a wind augmented wind turbine becomes large. On the other hand, the augmentation device makes the size of a wind turbine increase. So, improving the efficiency depends on the rate of increased power and size. Some conditions on improving the efficiency are given. In order to make an augmentation device short, we propose a two-flow model for a wind augmented wind turbine. Experimental results for the wind turbine with a short augmentation device, which is called Wind Lens Wind Turbine, show that the wind augmented wind turbine is effective for improving the efficiency.

**Key words:** wind turbine, diffuser augmented wind turbine, increase speed, power coefficient, response time

### 1. はじめに

近年、風力・波力・太陽光など再生可能な自然エネルギーを利用することが求められており、風のエネルギーを風車によって電気に変換する風力発電は急速に普及し始めた。風力発電においては発電量が風速の3乗に比例するため、発電量を上げるために風速を増加させることが効果的である。また、風の弱い時あるいは地域においても風を集めて高風速を作り出すことにより、風力を利用できるようになり、発電可能日数が増えることが期待できる。このアイデアを具体化するため、集風効果により風車の出力を上げる研究がなされてきた<sup>1, 2, 3)</sup>。

筆者らのグループは、各種の中空構造体の内部あるいは周辺流れを研究し、渦による取り込み、強い低圧域の生成など種々の流れ特性を利用して、局所的に風を集めて増速させる集風装置（つば付きディフューザ）を考案した<sup>4)</sup>。ディフューザの開き角・入り口形状・翼の形状・ハブの径などを調整することにより、最大の効率を得る風車を追求してきた。

本稿では、これらの集風体付き風車は集風体をつけていない風車と比較してどのような利点があるのだろうか？あるいは無いのだろうか？我々が研究してきた、風レンズ風車（つば付きディフューザ風車）を念頭に検討する。

### 2. 高効率化の条件

集風体を備えた風車の最大の目的は、増速した風を利用することで、風車の効率を改善し出力の増大を図ることである。何よりも最初に検討しなければならないことは、そもそも集風体により効率を上げることは可能なのだろうか？風車の出力  $P$  は次式で表される。

$$P = C_w \frac{1}{2} \rho U^3 \pi R^2 \quad (1)$$

$C_w$  : 出力係数

$\rho$  : 空気密度

$U$  : 近寄り風速

$R$  : 翼半径

\* 九州大学応用力学研究所

(1)式からわかるように, 風車の出力は風速の3乗に比例し, 翼径の2乗に比例することが特徴である.

集風体により効率を改善できるかどうか検討するため, 集風体風車の出力と通常風車の出力を比較する. 集風体による風速の増加率を  $\kappa (\geq 1)$ , 集風体による風車径の拡大率 (もとの翼径に対する比) を  $\eta (\geq 1)$  とする. 集風体風車の出力  $P_A$  は, 出力に対する式より,

$$P_A = C_w \frac{1}{2} \rho (\kappa U)^3 \pi R^2 \quad (2)$$

となる. 比較対象となる集風体風車と同じ径の通常風車の出力  $P_o$  は, 翼の効率 (出力係数  $C_w$ ) は同じであると仮定すると,

$$P_o = C_w \frac{1}{2} \rho U^3 \pi (\eta R)^2 \quad (3)$$

となる. 式 (2), (3) より, 集風体風車が通常風車より高効率になるためには  $\kappa^3 > \eta^2$  とならねばならない. すなわち, 集風体により風車径が  $\eta$  倍になっても, 集風体による風速の増速率が  $\eta^{2/3}$  倍以上になるならば, 同じ径の通常風車より大きな出力を得ることができる. この時, 集風体断面積で規定した出力係数は集風体により  $C_w$  の  $\kappa^3/\eta^2$  倍になる.

風速の増速率に関しては一般に次のようなことが言える. 集風体は集風体風車の断面積  $\pi(\eta R)^2$  を通過する流体を集風し, 断面積  $\pi R^2$  を通過するようにすることにより風速を増加させる. このことより, 理想的に集風増速されるならば, 増速率と拡大率の関係は  $\kappa = \eta^2$  となる. Fig. 1 に示しているように, この曲線は集風体風車の効率と通常風車の効率が一致する条件  $\kappa = \eta^{2/3}$  の曲線より上にあるため, 集風体により効率を改善することは実現可能であると言える.

風力発電では抵抗体となる翼車を通すしなければならないため, 増速率に関する別の制限が出てくる. いかなる風車の効率も 0.59 を超えないというベッツの理論を考慮するならば, 次式の増速率に関する制限が導かれる.

$$C_w \kappa^3 < 0.59 \eta^2 \quad (4)$$

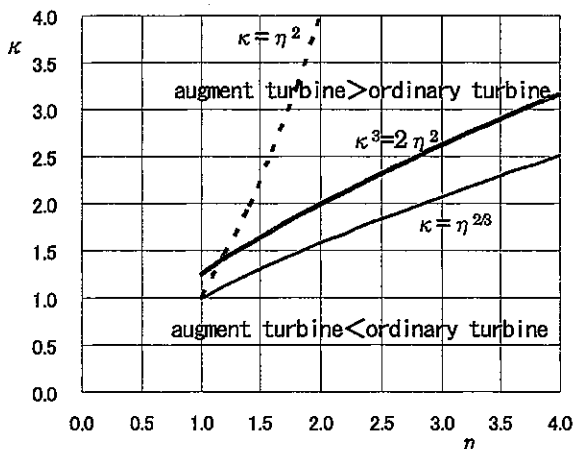


Fig.1 Relation between  $\kappa$  and  $\eta$ . When  $\kappa > \eta^{2/3}$ , an augment device can make the efficiency of a wind turbine better.

この式は可能な増速率は翼の出力係数に依存していることを示している. Fig.1 の  $\kappa^3 = 2\eta^2$  は, 通常的小型風車の出力係数の代表的な値 0.3 をとった時の制限曲線である. この曲線も  $\kappa = \eta^{2/3}$  の曲線より上にあるため, 集風体による効率の改善は可能であると言える.  $\eta^{2/3}$  倍以上の増速率を得ることができる集風体を構成できるかどうか, 集風体風車が有効であるかどうかの分岐点である.

風車の翼全体に渡って風速を増加させるためには大きな集風体が必要となる. しかしながら, 風車の出力は翼が掃過する面積に比例することを考慮すると, 大きな集風体により, 翼に当たる風の風速を中心部まで一様に増速させることは必ずしも得策ではない. 小さな集風体により, 翼の先端付近に当たる風のみであつても, その領域の風速を大きく増速できるならば, 効率を改善することは可能であると予想される. 以下では, この可能性について検討する.

Fig.2 に示しているような翼端付近のみが増速されるモデルを考える.

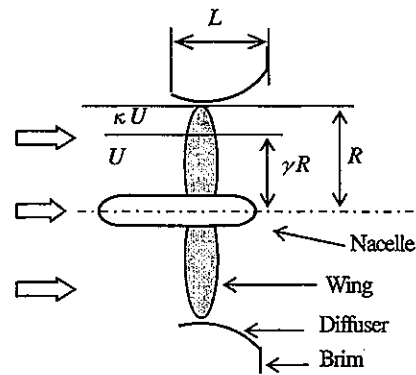


Fig.2 A two-flow model of a wind turbine with a diffuser attached with brim. Wind speed near the diffuser is increased from  $U$  to  $\kappa U$ .

この風車の出力係数  $C'_w$  は次のようになる.

$$C'_w = \frac{\int_0^R C_w \rho \pi U^3 dr + \int_R^{\eta R} C_w \rho \pi (\kappa U)^3 dr}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3} = \{\gamma^2 + (1-\gamma^2)\kappa^3\} C_w \quad (5)$$

出力係数が同サイズの通常風車より大きくなるためには

$$\{\gamma^2 + (1-\gamma^2)\kappa^3\} > \eta^2 \quad (6)$$

の関係式が成り立つ必要がある.  $\gamma = 0$  の時はすでに導いた関係式になる. 翼端部領域の程度を表す  $\gamma$  が 0.5, 0.6, 0.7 の時, 効率を改善するために必要な増速率を Fig.3 に示す.

Fig.3 より, 例えば風車の径が 40% 大きくなる集風体 ( $\eta = 1.4$ ) により周辺部 30% ( $\gamma = 0.7$ ) の風速を, ベッツ条件による制限を考慮して, 実現可能と思われる 1.5 倍以上増速させることができるならば効率を改善することが可能であることが分かる.

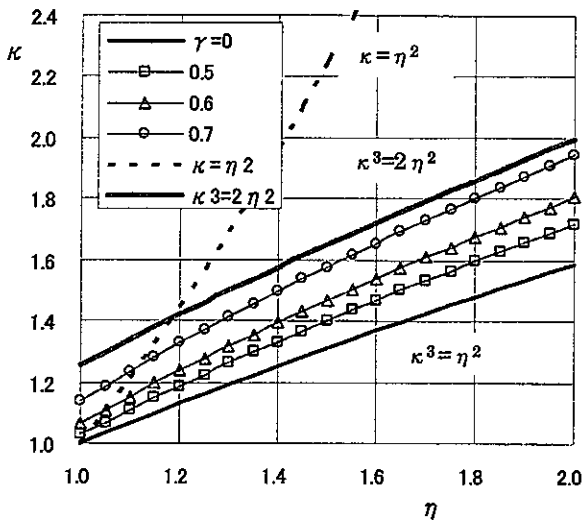


Fig.3 Relation between  $\kappa$  and  $\eta$  for the two flow model at  $\gamma=0, 0.5, 0.6, 0.7$ .

### 3. 集風体による風速の増速状況

Fig.4 に異なる大きさ (長さ) を持つ二つの集風体中の風速分布を示す。長い方の集風体の長さ  $L$  は翼直径  $D$  ( $=2R$ ) の  $L/D=1.47$ , 拡大率  $\eta=2.50$  である。短い方の集風体は  $L/D=0.25$ ,  $\eta=1.37$  である。この図では、翼を設置する位置における風速の半径方向分布を、近寄り風速に対する比で示している。 $L/D=1.47$  の集風体では、翼全域に渡ってほぼ一様に増速されていることが分かる。 $L/D=0.25$  のときは、全体的な増速率は小さいが、翼端付近は大きく増速されている。

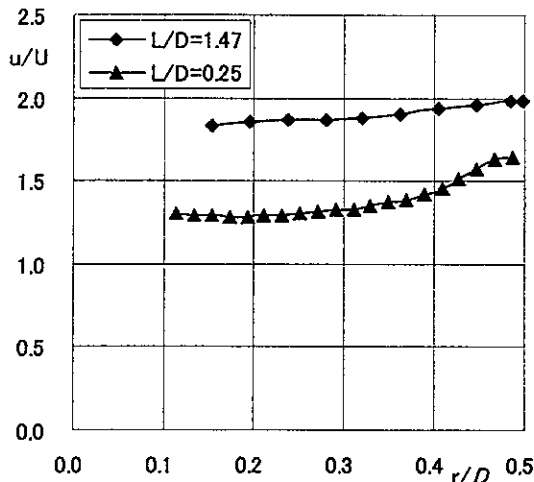


Fig.4 Radial distribution of wind speed for two augmentation devices. The ratios of length to diameter are  $L/D=1.47$ , and  $0.25$  respectively.

$L/D=1.47$  の集風体により効率が改善されるために必要な増速率は  $\eta^{2.8}=1.84$  以上でなければならない。Fig.4 より、平均的な増速率は 1.85 程度と見積もれ、効率が改善されるかどうか疑問である。

$L/D=0.25$  の集風体では  $0 \sim \gamma R$  までの増速率  $\kappa'$  も考慮に入ると、条件式 (6) は次のように拡張される。

$$\left\{ \gamma^2 \kappa^3 + (1 - \gamma^2) \kappa'^3 \right\} > \eta^2 \quad (7)$$

$\gamma$  を 0.9,  $\kappa$  を 1.7,  $\kappa'$  を 1.3 と見積もると、(7) 式の左辺は 2.71, 右辺は 1.88 となるので、 $L/D=0.25$  の集風体により効率の改善が期待される。

### 4. 試作機の結果

開発した風レンズ風車の仕様は次のようなものである。翼直径は 2.50m, 集風体の最大直径は 3.42m, 長さは 0.59m である。拡大率  $\eta$  は 1.37 となる。定格出力は 4.6kW (風速 12m/s), 翼径を規準にとった出力係数  $C_w$  は 0.90 であり, 最大風車径を基準にとった出力係数  $C_w^*$  は 0.48 である。

使用した翼の出力係数は 0.36 であるが, 比較対象とする通常風車の出力係数は小型風車では良い値である 0.40 と仮定すると, 集風体により 20% の効率改善がなされたと言える。通常風車では 4.6kW の定格出力を得るためには翼直径は 3.47m になるので, 集風体により翼径はおおよそ 28% 短縮されたことになる。最大径で比較しても, 約 8% 風レンズ風車の方が小さい。

### 5. 風レンズ風車の利点と欠点

翼の周囲に集風体を備えている風車と翼のみの通常の風車とを比較したとき, 利点となること欠点となることについて検討する。

#### 風レンズ風車の利点

効率の改善の他に, 集風体があることにより良くなると考えられることや付加的な利点を以下で示す。

- ・騒音の源である翼端渦を集風体により抑制し騒音を抑える
- ・風速の変動に対する応答速度を改善する<sup>注1</sup>
- ・翼径が短いので回転数が高くなるので発電機を効率の高い領域で使える<sup>注2</sup>
- ・翼に作用する遠心力が通常風車より小さい<sup>注2</sup>
- ・集風体によりヨートルクを発生させる<sup>注3</sup>
- ・翼が破損したとき翼の飛散を防ぐ
- ・避雷針として働き風車本体や翼への落雷を避ける
- ・風車の存在を際立たせることになり, 鳥が翼に巻き込まれることを抑制する
- ・集風体の前後にネットを張れば翼の飛散や鳥と翼との衝突を防ぐ

#### 注1 応答速度に関して

応答速度を速めることは, 大きな風速変動が頻繁に生じる市街地での利用を考えたとき, 風車の性能を十分に発揮させるために重要な改善点である。風速の変動に対する応答時間  $\Delta t_U$  は次式で表される<sup>5)</sup>。

$$\Delta t_U = \frac{I \lambda_w^2}{(3/2) \rho \pi R^4 C_w (\lambda_w) U}$$

上式の出力係数  $C_w$  は翼径が規準である。  $\lambda_w$  は動作点の周速比 ( $\lambda = R\omega/U$ ) である。  $I$  は慣性モーメントであり、構成要素としては翼と発電機がある。翼の慣性モーメントは発電機の慣性モーメントの10倍程度あるため、風車としては翼の慣性モーメントが支配的である。翼の慣性モーメントは翼の質量 (翼径  $R$  の3乗に比例する) と重心までの距離の2乗の積であるため  $R^5$  に比例する。この結果  $\Delta t_0$  は  $R$  に比例し  $C_w$  に反比例することになる。試作機の例では、 $R$  は通常風車の7割程度  $C_w$  は2倍程度であるため、応答時間は通常風車の半分以下になる。集風体風車では翼が短くなり慣性モーメントが減少すること、出力係数が大きくなる二つの効果のため、応答時間が通常風車より短くなる

#### 注2 回転数に関して

同じ出力で比較したとき、通常風車より翼径が短くなる。通常、風車の出力係数が最大となる周速比は5~7程度に設計される。この値は、通常風車も風レンズ風車も同様である。出力が最大となる周速比が同じならば翼径の短い風レンズ風車の翼は通常風車より角速度が大きくなる。

これに関連して、翼に作用する遠心力について検討する。回転数が高くなることは発電機にとってはよいことであるが、翼に働く遠心力は  $\omega^2$  乗に比例するため、翼を取り付けるときに必要な強度が通常風車とは変わってくる。翼の回転軸から見た翼に作用する遠心力  $F_c$  は

$$F_c = Mr_c \omega^2$$

である。ここで、 $M$  は翼の質量、 $r_c$  は回転軸から翼の重心までの距離である。 $M$  は  $R$  の3乗に比例して大きくなる。また、 $r_c$  は  $R$  の1乗に比例して大きくなる。一方、 $\omega$  は  $R$  の1乗に比例して小さくなる。このため、

$$F_c \propto R^2$$

となり、回転は速くなるが翼径が通常風車より短い風レンズ風車の方が翼に作用する遠心力は小さくなる。

#### 注3 ヨートルクに関して

翼を支柱より下流側に配置する風車(ダウンウインド型風車)では、翼がヨートルクを発生するため、ヨートルクを得るための尾翼などを備えること無く風向の変化に追従する。風レンズ風車はダウンウインド型風車であるので、ヨートルクを翼が発生する。また、集風体が支柱より下流側に有るため集風体によってもヨートルクが発生する。むしろ集風体によるヨートルクの方が翼によるヨートルクよりも大きい。両者によるヨートルクの結果、風向変化に対する追従性は非常に良くなっている。

#### 風レンズ風車の欠点

風レンズ風車の欠点としては次の事項が考えられる。

- ・集風体による風抗力が増加する<sup>※4</sup>
- ・支持するための追加機構が必要である
- ・付帯物による重量の増加する

#### 注4 風抗力に関して

風抗力は次のように見積もることができる。定常運転時の風レ

ンズ風車の抗力係数  $C_D$  はおよそ1.0、通常風車ではおよそ0.8である。抗力係数は風レンズ風車の方が約30%大きい。しかし、試作機の例では、風レンズ風車は風車径が8%ほど通常風車より小さいため、風荷重としては通常風車より10%ほど増加する。定常運転時の風荷重については通常風車と同程度である。

強風時は運転を停止し風荷重を抑えて倒壊を避けなければならない。翼の回転を止めた時の  $C_D$  は風レンズ風車で0.6、通常風車で0.2程度であり、約3倍の差がある。風車径が8%小さいことを考慮しても風荷重は通常風車の2.5倍になる。耐風速として定格風速の5倍(60m/s)をとることにして、必要な強度を比較する。通常風車では定格時の風荷重の6倍の荷重に耐えなければならないのに比べ、風レンズ風車では定格時の15倍の風荷重に耐えなければならない。この大きな風荷重に耐えなければならないために、風車をさえる支柱の径を太くしなければならない。停止時の風荷重が通常風車のおよそ2.5倍にもなることが風レンズ風車の大きな欠点である。

#### 6. まとめ

風車の効率を上げることは風車に常に求められており、翼形状の改良や集風体による高効率化の研究が行われてきた。本研究では、集風体を利用して風車の効率を改善することが可能であることを示し、そのための条件について検討した。また、効率の改善には翼の周辺領域の風速を増加させることが効果的であり、小さな集風体により周辺領域のみを増速することによっても、効率を改善できることを示した。集風体を利用して効率を改善する試みとして、ディフューザと鏑を有する“風レンズ風車”を試作した。試作した風車の出力係数は0.48であり、小型風車として非常に良い値を示した。

#### 謝辞

一連の研究は、経済産業省大学発事業創出実用化研究開発事業、日本学術振興会科学研究費、吉田学術教育振興会、住友財団環境助成研究、原田記念財団流体機械自然科学研究、(株)九州電力、九州大学P&P研究プロジェクトの支援のもとに行われて来ました。ここに記して深く感謝いたします。

#### 参考文献

- (1) Betz, A.: Energieumsetzungen in Venturidusen, Naturwissenschaften Vol.10, No.3 (1929), pp.160-164.
- (2) Igra, O.: Shrouds for Aerogenerator, Rep. No.2, Dep. Of Mech. Engng., Ben Gurion University of Negev March (1975).
- (3) Forman, K. M. and Gilbert, B. L.: Technical Development of the Diffuser Augmented Wind Turbine (DAWT) Concept, Wind Engineering Vol.3, No.3 (1979), pp.153-166.
- (4) 鳥谷 隆, 大屋裕二, 深町信尊, 渡辺公彦: 中空構造体による集風効果, 日本流体力学会誌, 22, 4, (2003), pp. 337-343.
- (5) 鳥谷隆, 大屋裕二, 渡辺公彦: 小型風車の風速および負荷の変動に対する応答について, 風力エネルギー学会誌, 31, No.2, (2007), pp.120-123.