九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

風車の特性に及ぼす集風体の効果

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/10.15017/26838

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 133, pp.117-120, 2007-09. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

風車の特性に及ぼす集風体の効果

烏谷 隆*, 大屋 裕二*, 渡辺 公彦*

(2007年7月26日受理)

On the Effects of Augmentation Devices to Wind Turbine Properties

Takashi KARASUDANI, Yuji OHYA and Kimihiko WATANABE
E-mail of corresponding author: *karasu@ riam.kyushu-u.ac.jp*

Abstract

We study how an augmentation device, which consists of a diffuser and brim, affects wind turbine properties. An augmentation device enlarges wind speed, and the rotational speed of a blade put in it is increased. Tip speed ratio, which is defined by the wind speed at far upstream, becomes large. Equations, which relate the tip speed ratio and the power coefficient without the augmentation device to those with the augmentation device, are presented. The equations are experimentally examined. It is found that they give good prediction. A two-flow model is proposed for an augmentation device with short-length diffuser. The results of the two- flow model qualitatively agree with experiments.

Key words: *wind turbine, torque coefficient, power coefficient, response time, tip speed ratio*

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．このアイディ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[1,2]．

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[3,4]．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．

* 九州大学応用力学研究所

本稿では，集風体が風車に及ぼす影響を検討し，出力特性やトルク特性が集風体をつけていない時と比較してどのように変化するのかを調べる．第2章では集風効果が翼全体に一様に及ぶ場合について検討する．第3章では集風効果が集風体近傍の翼端領域に限定されている場合について考察する．第4章は実験結果に基づいて，第2，3章の結果を検証する．第5章にまとめを記す．

2. 一様に増速される時

集風体の効果は風車から離れた上流の風速である近寄り風速 U が κU($\kappa \geqq 1$：増速率)になった状態と等価であると仮定する．この仮定を元に，どのような影響が予測されるのかを検討する．

①周速比について

翼の特性は近寄り風速に対する翼先端の速さの比である周速比によって規定される．翼が最高の効率を発揮する最適周速比は，レイノルズ数効果を無視できるならば，風速に依存しない．

近寄り風速がκUになったとき最適周速比が変化しないためには，周速比の定義より，翼の角速度が集風体を付けていないときに最適な角速度ω_wから$\kappa\omega_w$にならねばならない．この状態（角速度が$\kappa\omega_w$）にあるとき，増速前の風速Uで表した周速比を$\tilde{\lambda}_w$とすると，

$$\tilde{\lambda}_w = \frac{R\kappa\omega_w}{U} = \kappa\lambda_w \qquad (1)$$

ここで，Rは翼半径，λ_wは集風体を付けていないときの最適周速比である．一般に，集風体を取り付けていないときの風車の周速比がλの時，集風体をつけることにより角速度がκ倍になり，近寄り風速Uで表した集風体つき風車の周速比もκ倍になると期待される．

増速率は風車にかかる負荷の状態により変化するため角速度に依存する．そのため，周速比により変化するが，我々の関心がある適当な負荷がかかっている効率の高い領域ではほぼ定数であると見なすことができるものと仮定し，κを定数として扱う．

②出力係数，トルク係数について

風車の性能は近寄り風が持っている運動エネルギーと風車出力の比である出力係数によって評価される．集風体つき風車の出力P'は，集風体を付けていないときの出力係数をC_wとすると，近寄り風速がκUになるので，

$$P' = C_w \frac{1}{2}\rho\pi R^2(\kappa U)^3 = \kappa^3 C_w \frac{1}{2}\rho\pi R^2 U^3 \equiv C'_w \frac{1}{2}\rho\pi R^2 U^3 \qquad (2)$$

となる．この式の第4項の係数C_w'が集風体つき風車の出力係数となる．　近寄り風速が一定のとき，P'が最大となる周速比$\tilde{\lambda}_w$はC_wが最大となる周速比λ_wに対応している．一般に，周速比が$\tilde{\lambda}$の時，C_w'とC_wの関係は

$$C'_w(\tilde{\lambda}) = \kappa^3 C_w(\tilde{\lambda}/\kappa) \qquad (3)$$

で表すことができると期待される．同様に，集風体つき風車のトルク係数C_Q'と集風体をつけていないときのトルク係数C_Qの関係は，集風体つき風車のトルクをQ'とすると

$$Q' = C_Q \frac{1}{2}\rho\pi R^3(\kappa U)^2 = \kappa^2 C_Q \frac{1}{2}\rho\pi R^3 U^2 \equiv C'_Q \frac{1}{2}\rho\pi R^3 U^2 \qquad (4)$$

となる．これより，トルク係数間の関係は

$$C'_Q(\tilde{\lambda}) = \kappa^2 C_Q(\tilde{\lambda}/\kappa) \qquad (5)$$

となると期待される．

式(3)より，集風体を付けていないときの出力係数と集風体を付けたとき出力係数の関係を図示すると**Fig.1**のようになる．

③最適制御曲線の形状

風速が変化したとき負荷を適切に調整して周速比を最大の効率を示すλ_wに維持する制御がなされている．この最適制御は，負荷トルクが角速度の二乗に比例するので，オメガ二乗制御と呼ばれている．集風体つき風車の最大出力をP'^mとすると，

$$P'^m = C'_w(\tilde{\lambda}_w)\frac{1}{2}\rho\pi R^2 U^3 = \frac{C'_w(\tilde{\lambda}_w)}{\tilde{\lambda}_w^{\,3}}\frac{1}{2}\rho\pi R^5(\kappa\omega_w)^3 \qquad (6)$$

となる．

このときの負荷トルクは出力P'^mを集風体をつけたときの角速度$\kappa\omega_w$で割った値であるので，二乗曲線の係数α'

$$\alpha' = \frac{C'_w(\tilde{\lambda}_w)}{\tilde{\lambda}_w^{\,3}}\frac{1}{2}\rho\pi R^5 \qquad (7)$$

となる．α'は式（1），（3）を用いると，増速率に関係しない定数となり，集風体をつけていないときの係数と同じである．これは，“集風体の効果は近寄り風速をκ倍にする”と仮定したことから予想された結果である．

この結果，市販されている通常の風車に集風体を取り付けても制御器を変更する必要は無く，集風体により低風速時の出力の増大が期待される．一方，安全に運転できる最大風速がκ分の1に減少するので高風速時の安全性に関しては注意しなければならない．

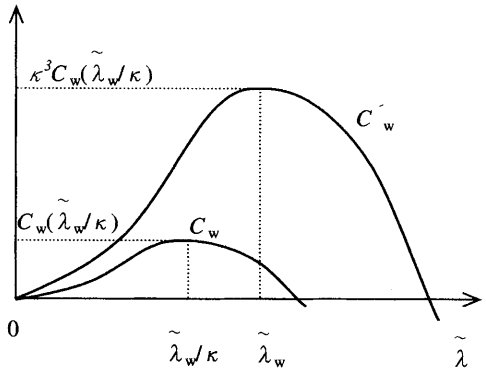

Fig.1. Drawing of power coefficients with or without an augumentation device as a function of modified tip-speed ratio $\tilde{\lambda}$.

3. 翼端部が強く増速される時

集風体つき風車は，集風体が大きな風荷重を生じる原因となっている．また，重くなる原因でもある．風車の重量と風車にかかる風荷重を減少させるためには集風体を小さくする必要がある．一方，小さくすることは集風効果を減少させることになる．集風効果の減少による出力の低下を抑えるため，集風体の大きさと翼の大きさや特性との調整を図る必要がある．集風体に対し翼が相対的に大きくなり，集風体による増速効果は翼全体に行き渡りにくくなる．Fig.2は異なる長さを持つ二つの集風体中の風速分布である．

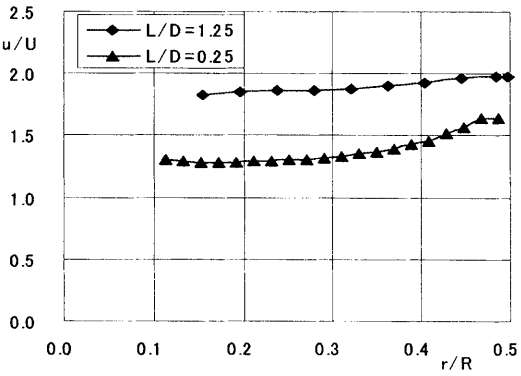

Fig.2 Radial distribution of wind speed for two augmentation devices. The ratios of length to diameter are L/D=1.25, and 0.25 respectively.

この図では，翼を設置する位置における半径方向分布を，近寄り風速に対する加速の割合で示している．集風体(Diffuser)の長さLは翼直径Dのそれぞれ1.25倍と0.25倍である．1.25倍のときは，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．0.25倍のときは1.25倍と比較して全体的に増速率は小さいが，翼端付近は大きく増速されている．

集風体による増速は集風体の周辺部に限られるが，風車の出力は主に翼端部分から得られていることから，翼端近傍である周辺部のみの増速によっても大きな出力の増加が望める．増速が翼端領域に限られたとき，風車特性にどのような影響があるかについて検討する．

Fig.3に示しているような二流速モデルを考える．近寄り風速は翼の中心軸から半径γRまでは増速されることはなくUのままであり，$\gamma R \sim R$の間はκUになるものとする($0 \leqq \gamma \leqq 1$)．

集風体つき風車の出力係数C_w'は，出力はR^2に比例するため，

$$C_w' = \frac{\int_0^{\gamma R} C_w \rho \pi r U^3 dr + \int_{\gamma R}^{R} C_w \rho \pi r (\kappa U)^3 dr}{\frac{1}{2}\rho \pi R^2 U^3}$$

$$= \{\gamma^2 + (1-\gamma^2)\kappa^3\} C_w \qquad (8)$$

となる．

トルク係数C_Q'は，トルクはR^3に比例するため，

$$C_Q' = \frac{\int_0^{\gamma R} C_Q \frac{3}{2}\rho \pi r^2 U^2 dr + \int_{\gamma R}^{R} C_Q \frac{3}{2}\rho \pi r^2 (\kappa U)^2 dr}{\frac{1}{2}\rho \pi R^3 U^2}$$

$$= \{\gamma^3 + (1-\gamma^3)\kappa^2\} C_Q \qquad (9)$$

となる．

周速比は，出力係数とトルク係数の比として，集風体がついていないときの周速比と次式で関係づけることができる．

$$\tilde{\lambda} = \frac{C_w'}{C_Q'}$$

$$= \frac{\{\gamma^2 + (1-\gamma^2)\kappa^3\} C_w}{\{\gamma^3 + (1-\gamma^3)\kappa^2\} C_Q}$$

$$= \frac{\{\gamma^2 + (1-\gamma^2)\kappa^3\}}{\{\gamma^3 + (1-\gamma^3)\kappa^2\}} \lambda \qquad (10)$$

式(8)，(9)，(10)はγ=0の時，第1章の一様増速になる．また，γ=1の時は集風体がついていないときになっている．

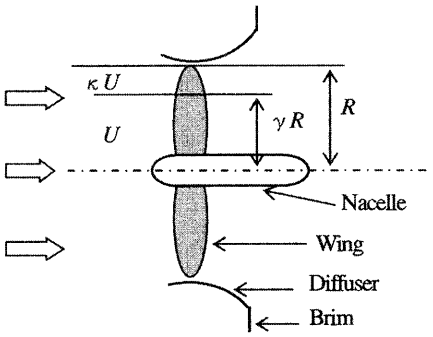

Fig.3 The two-flow model of a wind turbine with a diffuser attached with brim. Wind speed near the diffuser is increased from U to κU.

オメガ二乗制御の係数は

$$\alpha' = \frac{C_w'}{\tilde{\lambda}_w^3}\frac{1}{2}\rho \pi R^5$$

$$= \frac{\{\gamma^3 + (1-\gamma^3)\kappa^2\}^3}{\{\gamma^2 + (1-\gamma^2)\kappa^3\}^2}\frac{C_w}{\lambda_w^3}\frac{1}{2}\rho \pi R^5 \qquad (11)$$

となる．この場合，集風体を付けることにより，最適制御の係数は元の値より若干変更される．

4. 風洞試験との比較

いくつかの翼と集風体を組み合わせた風洞試験の結果を示す．Fig.4は形状の異なった翼について増速率がおよそ1.7の集風体を付け時の出力係数の様子を示している．用いた翼は，平板を捻った翼（Twisted Wing），支柱棒の先に平板を付けた翼（Paddle Wing），市販の風車の翼を切断した翼（SWWP Wing）の3種類である．中抜きの記号で表されている凡例の"Cal.—"は集風体を付けていないときのC_wをもとに式(3)により計算した結果である．この計算では，式(1)より，κはC_wが最大となる周速比とC_w'が最大となる周速比の比とした．Fig.4は翼の種類によらず，集風体を付けたときの出力係数と集風体を付けていないときの出力係数の間に(3)式の関係があることを示している．しかしながら，このときのκは1.2～1.4であり，翼を設置していないときの増速比の80%程度である．翼の負荷のため増速効果が減少したものと思われる．

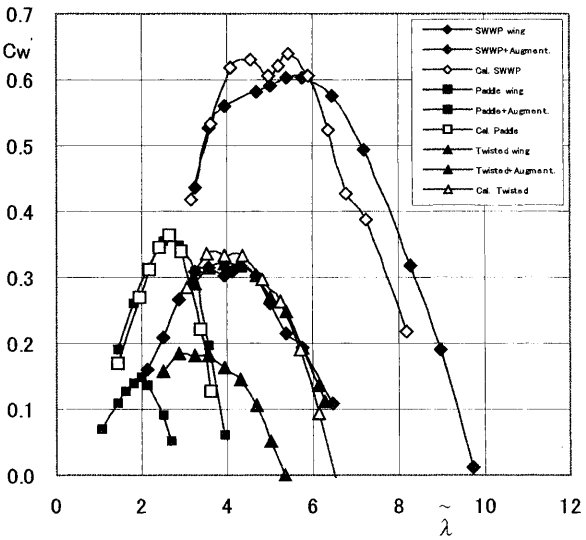

Fig.4 Relation between C_w' and C_w for several kinds of wings and the augmentation device.

Fig.5は同一の翼について集風体を変化させたときの出力係数の変化を示した図である．集風体はDiffuserのみ，DiffuserとBrimを組み合わせたものについて調べた．中抜き凡例の"Cal.—"は式(3)により計算した結果である．測定結果と計算結果は概ね合っており，この場合にも(3)式が成り立つことが確かめられた．

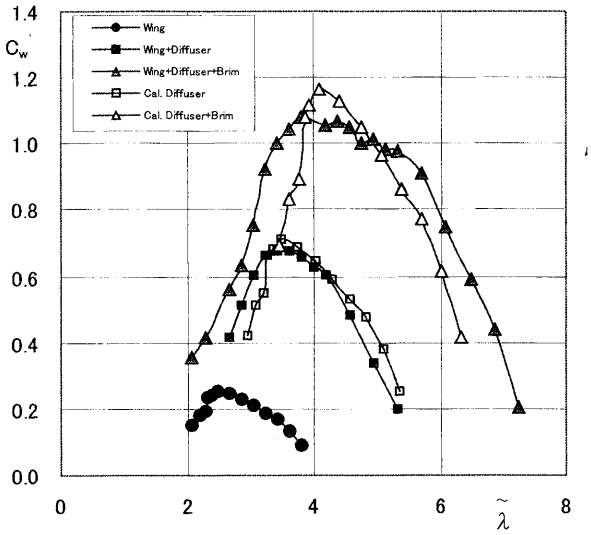

Fig.5 Relation between C_w' and C_w for two kinds of augmentation devices.

Fig.6 に Diffuser の長さが翼直径の 0.25 倍である時の結果を示す．集風体として Diffuser のみと Diffuser に Brim をつけたときの結果を示す．この長さの集風体では，Fig.2 の風速分布図で示されているように，集風効果は翼中心部より翼の周辺部に強く作用する．パラメータ γ は風速分布図より 0.8 程度に取り，C_w' のピークが実験値と一致するようにパラメータ κ を定めた．γ については両方の集風体で同一に取った．

二流速モデルに基づく式(8)(9)により，定性的な振る舞いはうまく再現できているが，ピーク値を取る周速比は実験値よりおよそ 20%小さな値になっている．これは二流速モデルで仮定しているほど，翼根付近と翼の周辺部における増速に急激な差が生じていないことによるものと思われる．

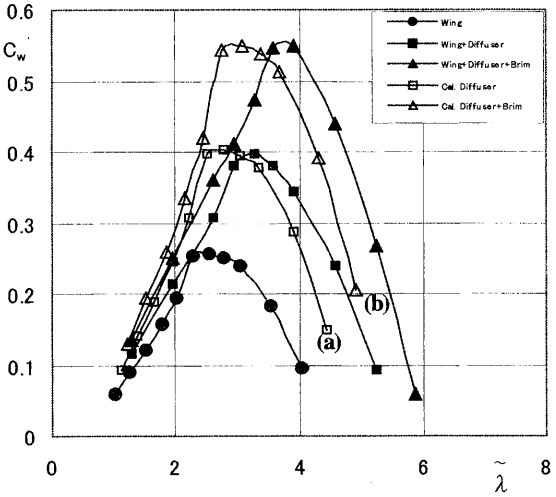

Fig.6 Relation between C_w' and C_w by the tow-flow model for (a) γ=0.82, κ=1.40 (b) γ=0.82, κ=1.65.

5. まとめ

集風体が風車に及ぼす影響を検討し，出力特性やトルク特性が集風体をつけていない時と比較してどのように変化するのかを調べた．集風体の効果を近寄り風速を増加させると仮定した．増加率をパラメータとして集風体を付けていないときの出力・トルク係数と付けているときの係数間の関係を導いた．導いた関係が３種類の翼に対してよく成り立つことが風洞実験より示された．また，異なる集風体に対しても成り立つことが示された．

集風体の長さが翼の直径の数十パーセント程度以下であるときには，風速は翼端領域が大きく増速される．この状況をモデル化するため，増速された周辺部と増速されていない翼中央部の２つの領域に分けた．この二流速モデルに基づき，係数に対する関係式を拡張した．拡張された出力係数に対する関係式は定性的には実験結果を再現できたが，最大出力値を示す周速比はおよそ 20%実験値より小さな値となった．

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)　Gilbert, B. L. and Forman, K. M.: Trans. ASME, J. Energy Resources Technology, 105 (1983), pp. 46-53.

(2)　永井實，伊良部邦夫：日本機械学会論文集B，53，489 (1987)，pp. 1543-1547.

(3)　烏谷隆，宮尾圭一，茶木田浩，深町信尊，渡辺公彦，大屋裕二：九州大学応用力学研究所所報，122，(2001) pp. 67-71.

(4)　大屋裕二，烏谷隆，桜井晃，井上雅弘：第23回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集，(2001)，pp. 76-79.