

PIV によるつば付きディフューザ風車周りの流れ場計測

A PIV Investigation of a Wind Turbine with Brimmed Diffuser

正 利光和彦 (松江高専) 学 西川弘太郎 (松江高専) 大屋裕二 (九大)

Kazuhiko TOSHIMITSU, Matsue College of Technology, 14-4 Nishi-ikuma, Matsue, Shimane 690-8518
Koutarou NISHIKAWA, Matsue College of Technology, 14-4 Nishi-ikuma, Matsue, Shimane 690-8518
Yuji OHYA, Kyushu University, 6-1 Kasugakouen, kasugashi, Fukuoka 816-8580

The paper presents the instantaneous flow velocity measurements of a wind turbine with brimmed diffuser by a particle image velocimetry (PIV). The PIV is used to show the velocity vectors of the inner and downstream flow fields of the model at $Re = 100000$ under turbine blades rotating (3700 rpm) and no turbine blades. Furthermore the cases of the flow fields between with and without the turbine blades are compared. When the turbine blades are rotating, the flow disturbances in the brimmed diffuser are suppressed. And there are two large vortices at downstream region of the diffuser. These two vortices act as suck in wind to the diffuser and raise the inlet flow velocity. While in the case of no rotor, there is one vortex only. Consequently the wind turbine with brimmed diffuser would be operated stable with the turbine blades rotating and be useful in the area with unsettled wind or disturbed flow as Japan.

Key Words: PIV, Wind Turbine, Velocity Distribution, Brimmed Diffuser, Flow Visualization

1. 緒言

COP3 (地球温暖化防止京都議定書, 1997 年 12 月) に代表されるように, 二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギー資源の確保は急務の工学的課題である。その有力な手段の一つとして, 風力発電があげられる。特に, 長年の実績をもつ風力発電に対する期待は大きく, 諸外国では, 2001 年時点で環境保全の進むデンマークが 241 万 kW (国の電力需要の 7%), ドイツが 875 万 kW (国の電力需要の 1%), アメリカが 426 万 kW, スペイン 333 万 kW である。また, ヨーロッパ風力エネルギー協会は, 2030 年に向けて EC 諸国の電力需要の 10% を風力でまかなうことを展望としている¹⁾。ところが, 日本での風力発電量の現状は約 30 万 kW とまだ少なく, 2010 年には 10 倍の 300 万 kW の発電が目標とされている。

このような, 時代の要請に答える形で, 九州大学では, 桜井, 井上, 大屋ら (風レンズ研究会) によってディフューザ内に風車を設置した高効率な風車の開発が精力的に進められ, 実用機の段階を迎えている。

一方, 1980 年代から流れの二次元平面内速度分布や三次元分布を計測する手法として画像粒子流速測定法 (Particle Image Velocimetry, PIV) が急速に発達してきた。

本研究は, 大屋・鳥谷ら^{2), 3)}によって考案された「小型つば付きディフューザ風車」周りの流れ場の速度分布を, 実用試験機の 1/3 スケールモデルを用いて PIV によって定量的に可視化計測する。特に, 著者らによって試験的に行った前報⁴⁾の結果をふまえ, 大屋らによる定性的な流れ場の可視化計測結果と西田ら (九大) によって行われている局所の詳細な流れ場計測の補間データを提供, CFD 計算値の検証, つば付きディフューザ風車の流れ場の解明, 高効率小型風車の開発に寄与することを目的とする。

2. 実験装置と実験条件

図 1 に本実験装置の全体図を示す。まず, PIV 計測システムは, 光源にダブルパルス Nd-YAG レーザ [Spectra Physics 社製 (PIV-400-10), 400mJ/pulse], 画像撮影に 1 メガ画素の解像度をもつノンインターレース CCD カメラ (Kodak Megaplug ES1.0) を用いる。画像は, レーザと CCD カメラをパルスジェネレータ (スタンフォードリサーチ社製 DG535) のトリガで同期させ Double Triggered Exposure モードで撮影する。これは, 任意のレーザパルス間隔で 1 フレーム

ム 1 画像の連続した 2 画面が撮影でき, 得られた画像から相互相関 PIV 解析が可能である。光学系は, 平面鏡とシリンドリカルレンズから成り, レーザ光を約 2mm 厚のシート光に広げることで, 上方向からの入射 (a) もしくは, 風車後ろからの入射 (b) によりディフューザ内部の 2 次元平面の速度分布を可視化計測できる。

なお, 風洞の出口断面は $500 \times 500 \text{ mm}$ であり, 平均流速は約 8m/s である。

次に, 図 2, 3 に製作した風車の概略図, 外観写真を示す。

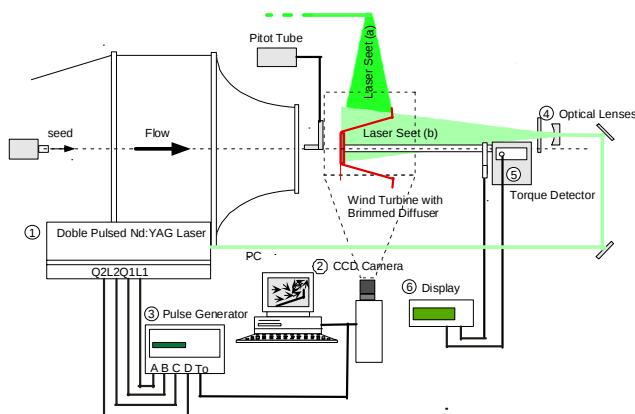


Fig.1 Experimental facility.

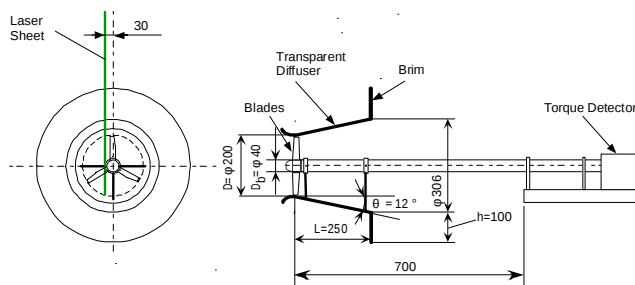


Fig.2 Schematic of wind turbine with brimmed diffuser.



Fig.3 Photograph of the wind turbine

Table 1 Critical dimensions of the wind turbine.

Diffuser Angle	θ	12 degrees
Diffuser Length	L/D	1.25
Brim	h/D	0.5
Tip Clearance	h_t	3mm ($h_t/D=1.5\%$)
Hub to Tip Ratio		0.2
Flow Velocity	U_0	8 m/s
Rynolds Number (based on D)	Re	1.0×10^5

D=200mm (diameter of diffuser at rotor)

つば付きディフューザ風車の設計代表値を表 1 にまとめる．なお，無次元量の基準長さは風車入口直径 $D=200\text{mm}$ とした．風車に用いた翼は，NACA63218 (翼根) ~ NACA63212(翼端)であり，その外観写真を図 4 に，設計条件と実験条件を表 2 に示す．



Fig.4 Photograph of the turbine blades.

Table 2 Design and experimental conditions of the turbine blades.

		Design Cond.	Exp. Cond.
Peripheral Speed Ratio	$k = \frac{\omega r_t}{U_0}$	5	4.8
Rotor Radius	r_t	200 mm	100 mm
Rotational Speed		2000 rpm	3700 rpm

3．実験結果と考察

一般に風車は，無風状態と定常作動状態の間で繰り返し運転されるので，無風からの始動特性（カットイン），定常作動特性，強風時のカットオフが重要となる．本研究では，翼車の回転がつば付きディフューザ風車の流れ場に及ぼす影響を把握するため，翼車有りの定常作動状態と翼車無しの二つの異なる場合について PIV 計測を行い，流れ場を比較することで，翼車の回転効果や定常運転時の流れ場の把握を行うことにする．

実験は，図 2 に示すように，中心より 30 mm ずれた流れ方向平面速度分布を計測した．翼車の有無，計測位置を表 3 と図 5 にまとめる．なお，以下に示す図 6 ~ 14 は紙面右から左

Table 3 Areas images, conditions and figures by PIV.

Location of areas images	Turbine blades	
	with	no
A	Fig.6	Fig.7
B	Fig.9	Fig.10
C	Fig.13	Fig.14
D	Fig.11	Fig.12

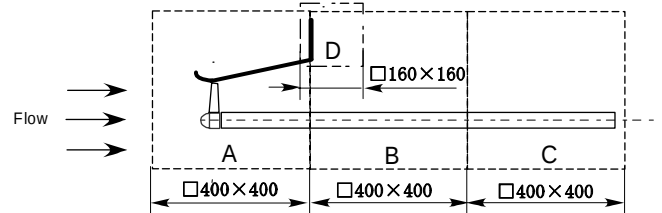


Fig. 5 Schematic of the areas imaged by PIV.

に風が流れている．また，PIV 解析ソフトとして AEA 社 VISIFLOW を用いた．

まず初めに，図 6, 7 に示すディフューザ内部[A]の計測について，翼車有りと無しの場合を述べる．ディフューザ入口より上流では両者に大きな違いは見られず，ほぼ一様流で，8m/s である．ディフューザ内部では，翼車有りの場合，流れがディフューザに入ると，ディフューザ入口から出口まで全体的にディフューザ内壁面に沿って整流されながら流れる．一方，翼車無しの場合，流れがディフューザ入口で増速され，乱れながら減速されてディフューザ出口に到る．さらに翼車無しでは，流れはディフューザ内壁から部分的に剥離する．この状態を明確に示すために，図 8 に速度（絶対値）分布の比較を併せて示す．

翼車の回転効果は，旋回流の効果によって生じると考えられ，ディフューザ内で，比較的乱れが少なくディフューザに沿うような速度分布となるように作用する．これは，大屋らによって，「翼車回転無しの場合はディフューザ内部で流れがディフューザ内壁から剥離するが，回転有りの場合は，流れがディフューザ内壁に沿って流れる」ことが報告されていることに一致している．

続いて，図 9, 10 に示すディフューザ後部[B]の計測について述べる．翼車無しの場合，つば付近及び後方に目立った渦は見られない．ディフューザ出口に注目すると，翼車有りに比べて乱れ成分が比較的少なく，ディフューザ内部の流れがそのまま排出された様な流れになって，やがて外側に広がる．一方，翼車有りの場合は，ディフューザ出口からすぐに流れが外側へ向かって広がる．

さらに，つば後部付近の流れを詳しく見るために，つば付近を拡大して計測した場合[D]を図 11, 12 に示す．翼車有りの場合，つばより約 90 mm 後方に渦中心をもつ右巻きの渦がはっきりと確認できる．一方，翼車無しの場合は，つば付近及び後方に明確に渦は見られず，その部分は，死水領域に近い状態となっていることが分かる．

最後に，ディフューザ下流[C]の計測について述べる．翼車有りと無しの場合をそれぞれ図 13, 14 に示す．翼車有りの場合，画面中央部にいくつかの渦からなる部分が確認でき，RANS 計算のような時間平均では全体として大きな左巻きの渦になる可能性がある．一方，翼車無しの場合は，画面中央よりやや右側に左巻きの渦が確認できる．この渦は速度ベクトルの大きさから，翼車有りの場合より弱いものであると考えられる．

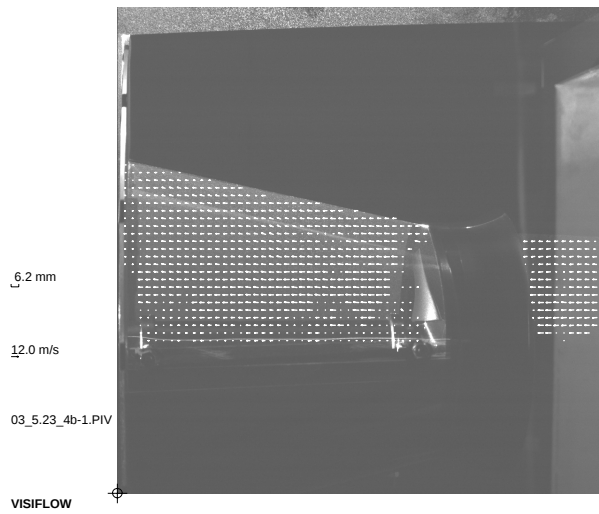


Fig.6 Overlaid PIV image and analysis [A] (with turbine).

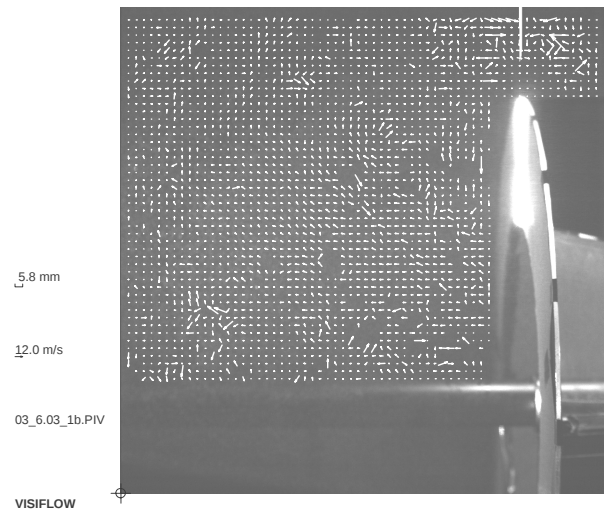


Fig.9 Overlaid PIV image and analysis [B] (with turbine).

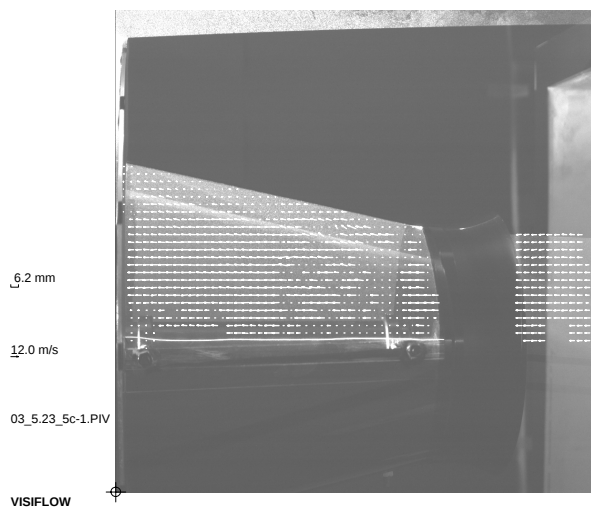


Fig.7 Overlaid PIV image and analysis [A] (no turbine).

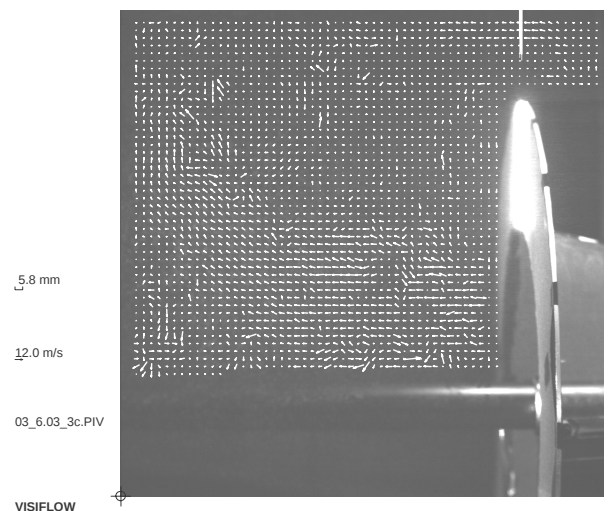


Fig.10 Overlaid PIV image and analysis [B] (no turbine).

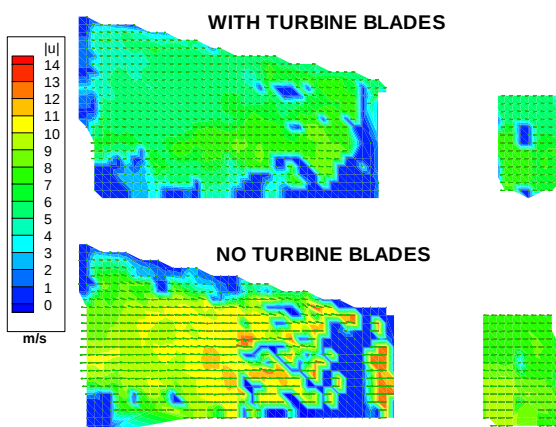


Fig.8 Comparison of absolute velocity distribution.

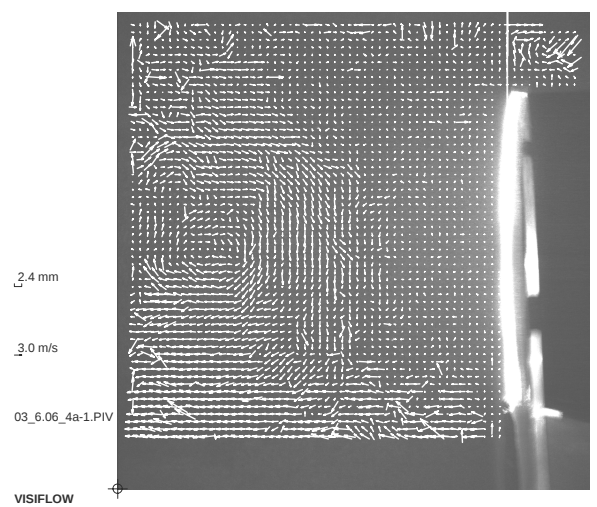


Fig.11 Overlaid PIV image and analysis [D] (with turbine).

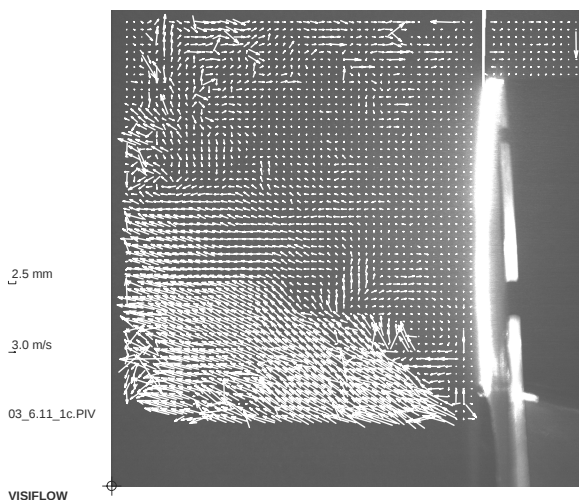


Fig.12 Overlaid PIV image and analysis [D] (no turbine).

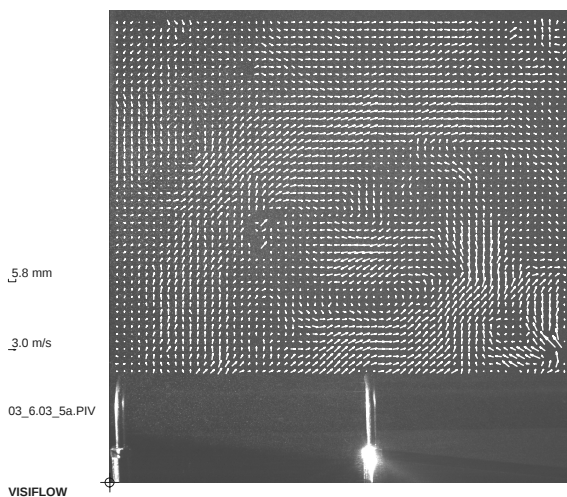


Fig.13 Overlaid PIV image and analysis [C] (with turbine).

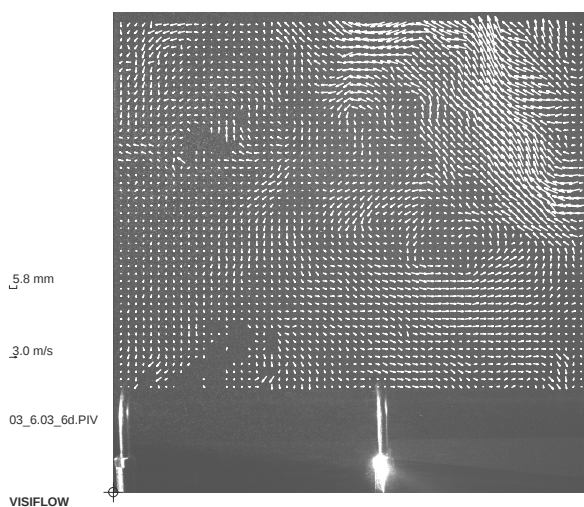


Fig.14 Overlaid PIV image and analysis [C] (no turbine).

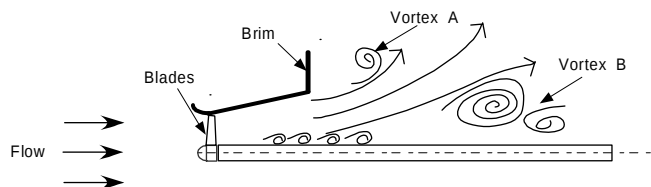


Fig.15 Schematic of flow (with turbine).

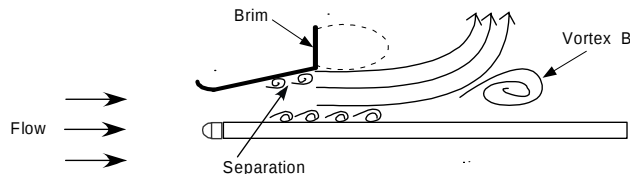


Fig.16 Schematic of flow (no turbine).

以上の考察から、図 15、16 に翼車有りとなしの場合の流れの様子を模式的に示す。翼車有りの場合、つば後部付近の渦 A と下流部渦 B の 2 箇所に渦の存在が確認された。一方、翼車無しの場合は、渦 A は存在せず、渦 B も翼車有りの場合に比べて弱いものである。渦 A や B がディフューザの吸引効果を助長すると考えられるので、翼車の回転効果は風車の性能を良くする働きがあり、つば付きディフューザ風車は翼車の回転によって、回転していない場合に比べて安定に作動すると考えられる。

4. 結言

本報は、試験風車の 1/3 スケールモデルを製作し、つば付きディフューザ風車の流れ方向 2 次元平面の速度分布を PIV により計測した。特に、翼車の有無による流れに対する違いを検討し、翼車回転がある定常作動状態の場合、ディフューザ内部の流れが整流され、剥離を抑制していることが確認された。また、翼車によって発生したタービン後方の旋回流や翼端渦の作用により、ディフューザ後方及びディフューザ下流に発生する渦の生成が助長されている可能性があることが示された。その結果として、定常運転時ではディフューザに沿って風が流れ、安定に運転できるので、小型つば付きディフューザ風車は、山岳地形で風が変わりやすく乱れが多い日本向きであると考えられる。

次の計画として、(1)速度分布を他者データと比較する(2)流れに垂直な面での速度分布(旋回成分)を計測することを予定している。

謝辞

本研究にあたり、九州大学、井上雅弘先生、古川雅人先生より風車ブレードの設計形状設計データを提供して頂きました。また、平成 15 年度九州大学 P&P、経済産業省大学発事業創出実用化研究開発事業より支援を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松宮、ここまでの風力発電、工業調査会(1998)。
- 2) 大屋 他、風レンズ効果(風エネルギーの集中)による風力発電の高出力化、第 23 回風力エネルギー利用シンポジウム講演集(2001)、pp.76-79。
- 3) 鳥谷 他、連行効果による拡大管中の風速加速現象、日本流体力学会年会 2001 年講演論文集(2001)、pp.587-588。
- 4) 利光、西川、つば付きディフューザ風車まわりの PIV 計測、日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集(2002)、pp.31-34。