

風洞実験による多数基マルチディフューザ風車の抗力特性と後流分布の測定

坂井, 亜玖瑠
九州大学大学院総合理工学府

渡邊, 康一
九州大学洋上風力研究教育センター

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所

<https://hdl.handle.net/2324/7432699>

出版情報 : Proceedings of Japan Wind Energy Symposium. 46, pp.362-365, 2024. 日本風力エネルギー学会
バージョン :
権利関係 : © 2024 JWEA



風洞実験による多数基マルチディフューザ風車の 抗力特性と後流分布の測定*

Wind Tunnel Experiments on Drag Characteristics and Wake Distributions of Shrouded Multi-rotor Arrays

坂井 亜玖瑠**
Aguru SAKAI

渡邊 康一***
Koichi WATANABE

内田 孝紀****
Takanori UCHIDA

1. 緒言

風車の大型化に伴う問題の解決策の1つとして、小型・中型の風車を同一平面上に複数配置することで受風面積を確保するマルチロータシステム（Multi-Rotor System：以下MRS）が提唱されている。Jamieson⁽¹⁾によると、 n 基の風車によって構成されるMRSは、発電出力が同等の大型風車と比較して、全体質量ならびに発電コストを $1/\sqrt{n}$ に抑えることができる。

本研究室では、このMRSに大屋らによって開発された高効率風車であるつば付きディフューザ風車⁽²⁾を適用した、マルチディフューザ風車の開発に取り組んでいる。先行研究では、7基まで基数を増加するにつれて出力性能が向上すること⁽³⁾や、2基のつば付きディフューザ風車の実験により、ブローケージではなく風車の近接効果により出力性能が向上していることが明らかにされている他、出力性能向上のメカニズムについても周辺流れからの考察が行われている⁽⁴⁾。本研究では、多数基マルチディフューザ風車の開発に向けて、適用する基数を増加させた際の抗力係数の増加傾向や後流分布の変化を調べることを目的とし、風洞実験にて、基数を100基まで増加させた場合の抗力係数と後流分布の計測を行った。

2. 実験方法

本風洞実験は、九州大学応用力学研究所が所有する大型境界層風洞にて実施した。測定部は幅3.6 m×高さ2.0 m×長さ15.0 mである。ブローケージの影響を小さくするために、測定部の風上側から4 m~10 mまでの側壁と天井を取り除いた。つば付きディフューザ風車の出力は近接効果で増大するが、その際抗力も同時に増加する傾向がある⁽²⁾ことから、出力性能の評価方法として抗力計測によるアプローチを採用した。多数基マルチディフューザ風車の実験において、風車模型の小型化は必要不可欠であるが、ロータモデルでは風速や回転数制御に制限があり、小型化には限界がある。そこで本研究では、ロータモデルをディスクモデルに置き換えることで小型化を実現した。図1に使用したつば付きディフューザ風車モデルを示す。風車モデルは文

献を参照し、最適周速比が $\lambda=5$ のロータに抗力係数が一致するように設計されたディスク形状ND1⁽⁵⁾を採用した。集風体はつば付きディフューザCiiB7.5タイプ⁽⁴⁾ ($h/D_{throat}=0.075$:つば高さ h , スロート直径 D_{throat})を使用した。

図2に示すように、個々の風車間隔 s は $0.2D_{brim}$ に固定して、つば付きディフューザ風車を矩形状に配置した。多数基配置する際の縦横の基数比をアスペクト比 r ($r=a/b$:縦横の基数 a, b)とし、多数基配置した風車群それぞれの風車基数を n , 風車群が複数存在する場合の風車群距離を l とした (図3参照)。

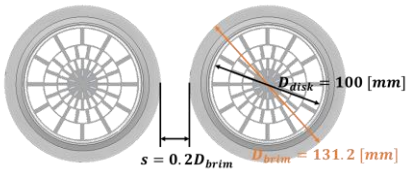


図1 つば付きディフューザ風車モデル

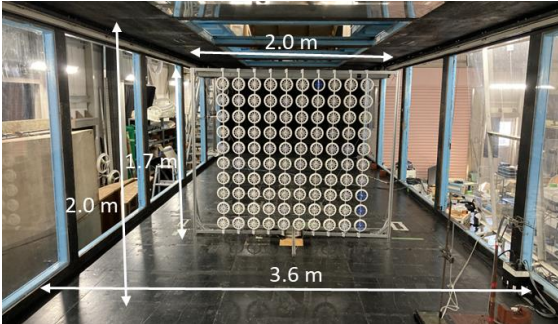


図2 多数基マルチディフューザ風車モデル

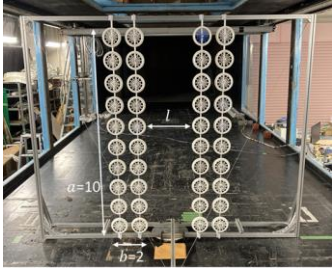


図3 複数の風車群を用いた実験例 ($r=5, l=2.6D_{brim}, n=20$) と各パラメータの定義

流入風速は $U_{in} = 10 \text{ m/s}$ とし、風車の基数や配置を様々に変化させた場合の抗力と後流の流速、静圧分布を計測した。抗力係数 Cd_{Abrim} は、風車模型にかかる風荷重 F_x' , 空気密度 ρ , 掃引面積 A_{Dbrim} ($A_{Dbrim} = \pi n D_{brim}^2/4$)

* 令和6年11月29日
第46回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演
** 会員 九州大学 大学院 総合理工学府
Email : sakai@riam.kyushu-u.ac.jp
*** 会員 九州大学 洋上風力研究教育センター
**** 会員 九州大学 応用力学研究所

を用いて式(1)によって定義した。抗力計測には、3分力計を使用し、サンプリング周波数を500 Hz、計測時間を30 secとした。

$$Cd_{Abrim} = \frac{F'_x}{\frac{1}{2}\rho U_{in}^2 A_{D_{brim}}} \quad (1)$$

熱線流速計(HW)と超音波流速計(USA)を用いて風車後方の流速を、静圧管と差圧計を用いて風車後方の静圧と風洞上流側との差圧を測定した。つば付きディフューザ出口を基準として $0.5D_{brim}$ 下流の位置で、水平方向に4 mmピッチでトラバースし、流速、及び圧力分布を同時に測定した。サンプリング周波数を500 Hz、1点あたりの計測時間を10 secとした。

3. 抗力計測試験結果

3-1 風車間隔の近接による抗力係数の増加

$n=10, r=10$ と $n=20, r=5$ のマルチディフューザ風車の抗力係数 Cd_{Abrim} を基準値としてそれぞれ近接させた際の Cd_{Abrim} の増加率を ΔCd とした。 $n=10, r=10$ と $n=20, r=5$ の風車群間隔 l/D_{brim} を変化させた際の ΔCd の変化を図4に示す。比較のため、2基の $D_{brim}=580$ のメル翼+Ciib7.5の風車間隔 s/D_{brim} を近接させた際の出力係数の増加率を図5に示す。

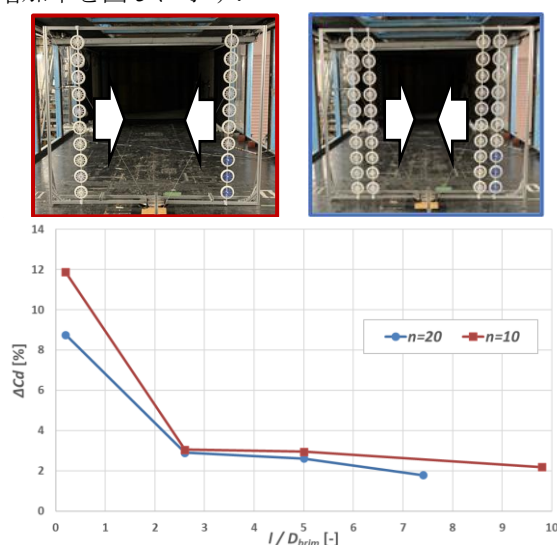


図4 風車群間隔 l/D_{brim} と抗力係数の関係

図4から、 $n=10, 20$ の両方の場合において $l/D_{brim}=2.6$ 以上では ΔCd は小さく横ばいの傾向であるが、近接させた $l/D_{brim}=0.2$ では ΔCd が10%近く増加していることが分かる。よって、ブロケージ効果ではなく近接の効果によって抗力が増加していることが分かる。このことは、過去の研究結果とも一致しており、風車群の近接によるウェイク干渉と風車下流の圧力低下を示唆している⁽⁴⁾。

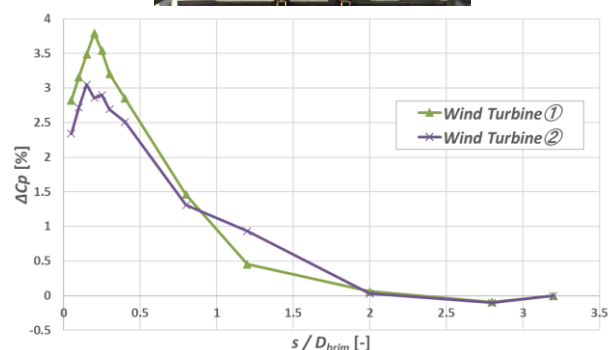


図5 風車間隔 s/D_{brim} と出力係数の関係⁽⁶⁾

3-2 基数増加に伴う抗力係数の増加

単基のつば付きディフューザ風車モデルの Cd_{Abrim} を基準値として基数を増加した場合の Cd_{Abrim} の増加率を ΔCd_{Abrim} とした。

まずは1次元的に基数を増加させた際の抗力増加について調べるため、1列に並べる基数を10基まで増加させた。分力計の測定レンジの制約により、基数が少ない場合は計測の信頼性が低下するため、4列配置とすることで十分な基数を確保した。1列に並べるつば付きディフューザ風車の基数を増加した際の ΔCd_{Abrim} の変化を図6に示す。図6から、1列に並べる基数の増加とともに ΔCd_{Abrim} が増加していることが分かる。このことから、基数が増加するにつれてウェイク干渉による風車後方の圧力低下や低圧領域拡大が生じていることが予想される。特に4基までの増加が顕著であるが、1基から2基への ΔCd_{Abrim} の増加幅が大きい要因として、ウェイクの干渉効果や隙間流れの発生によるつばから生じる渦の強化による圧力低下や低圧領域拡大が考えられる⁽⁴⁾。2基から4基への ΔCd_{Abrim} の増加幅が大きい要因としては、両端に風車を有する内側風車の存在が考えられる。両端に風車が配置された場合の内側の風車は、両側の風車とのウェイク干渉が生じるだけでなく、隙間流れによるつばから生じる渦の強化が両端で生じていると考えられる。これらの現象から、内側風車の後方圧力がより大きく低下し、大きな抗力が生じていると考えられる。また、4基以上では ΔCd_{Abrim} が線形増加していることが分かる。これは4基以上の場合の流れが、風車が並ぶ方向に一樣、又は周期的であることを予想させる。

次にさらに大きく基数を増加させた際の抗力の変化について調べるため、アスペクト比を $r=1$ に固定し100

基まで基数を増加させた．図7に $r=1$ で基数を増加させた際の ΔCd_{Abrim} を示す．図6の1列配置のプロットを $b=1$ として重ねて表示した．図7から，100基まで n を増加させた場合においても ΔCd_{Abrim} が増加し続ける傾向が見られ， ΔCd_{Abrim} の値が30%~45%と非常に大きな増加率となっている．この際の ΔCd_{Abrim} の増加要因として，上下左右に風車を配置された風車の存在が挙げられる．これらの風車は，上下左右の風車とのウェイク干渉が生じるだけでなく，つばの全周が隙間流れの影響を受けていると考えられる．また， $b=1$ における4基以上の場合の線形増加に比べて $r=1$ の抗力増加が緩やかであることが分かる．これは， $b=1$ は水平方向に広がる配置により2次元的な渦構造が支配的となる一方で， $r=1$ では3次元的な渦構造が支配的となることから，発生する渦の強度に違いが生じていることを示唆する．

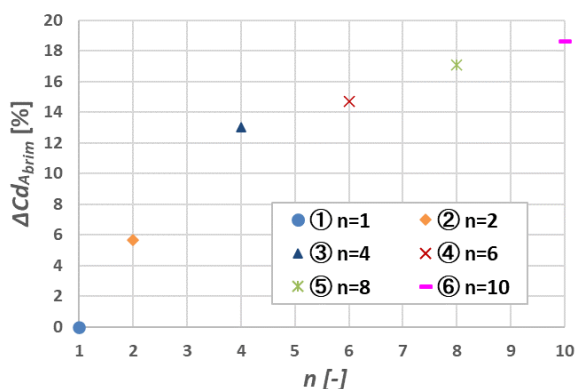
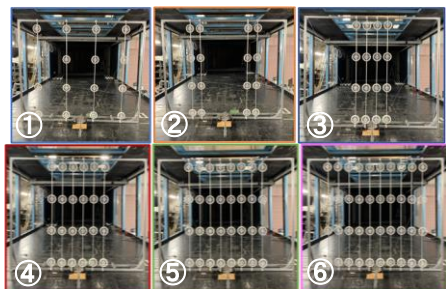


図6 1列の基数増加による抗力係数の変化

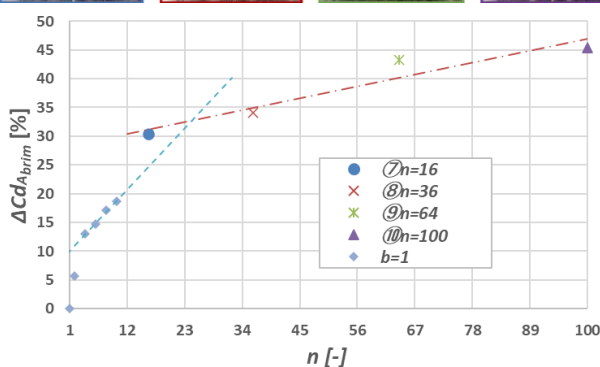
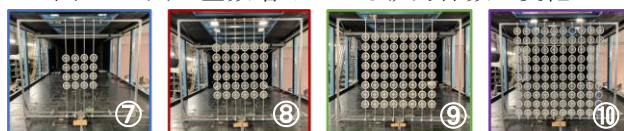


図7 $r=1$ での基数増加に対する抗力係数の変化

3-3 同じ基数においてアスペクト比が抗力係数に与える影響

同じ基数においてアスペクト比が抗力係数に影響するかどうかを調査した． $n=16, 36$ において r を変化させた場合の ΔCd_{Abrim} の変化を図8に示す．図8から，基数が同じ場合にアスペクト比を変化させても ΔCd_{Abrim} に大きな変化は見られない．しかし，図7に示されるように， $n=16, 36$ は， $b=1$ における増加傾向と $r=1$ の増加傾向が丁度交わるあたりの基数であったため，今後さらなる検証が必要である．

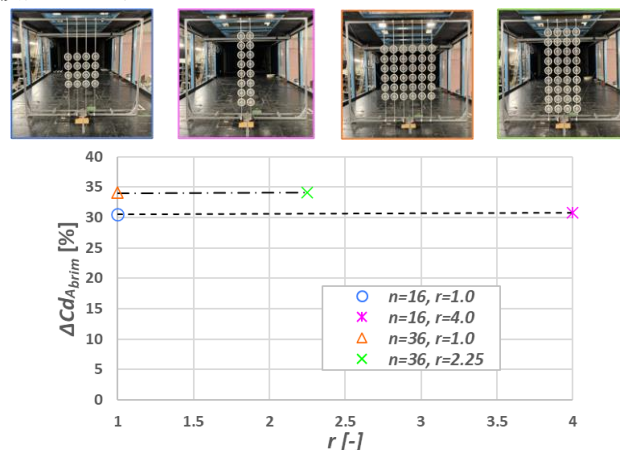


図8 同じ基数において r を変化させた際の抗力係数

4. 後流計測結果

基数増加に伴う抗力増加の要因を探るため，基数とアスペクト比が大きく異なる $n=100, r=1$ と $n=10, r=10$ の2つのケースにおいて後流計測を行った． $n=100, r=1$ と $n=10, r=10$ の下段から6段目のディスク中心高さにおける水平方向圧力分布を図9に示す．図9の100基の分布に着目すると，中心に近づくにつれてマルチディフューザ風車モデル後方の圧力が低下していることが分かる．これは基数の増加に伴いウェイク干渉効果が積み重なっているためと考えられる．この圧力分布から，基数の増加とともに中心付近の風車の抗力係数が特に増大することで多数基マルチディフューザ風車全体の抗力係数が増加していることが分かる．また，1列($b=1$)の10基に比べて100基の後方圧力は非常に大きく低下していることが分かる．

図9と同条件で計測した流速分布を図10に示す． $n=100$ におけるHWの分布に注目すると，隙間流れが主流の30%程度加速していることが分かる．この隙間流れの加速により，つばから生じる渦が強化され，風車後方の圧力低下が促進されていると考えられる．また， $n=100$ の両端の流速についても $n=10$ の両端に比べて大きく加速していることから，100基のマルチディフューザ風車を避けるような大きな流れが生じていることが見てとれる．図9,10の結果は，100基のマルチ

ディフューザ風車が流れの中で1つの大きな後流を形成していることを示唆する。

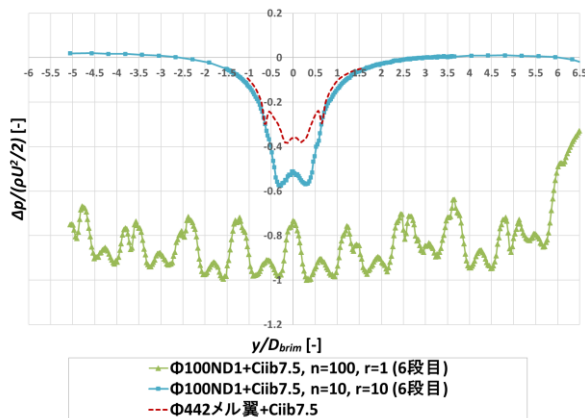


図9 風車モデル下流側の圧力分布の比較

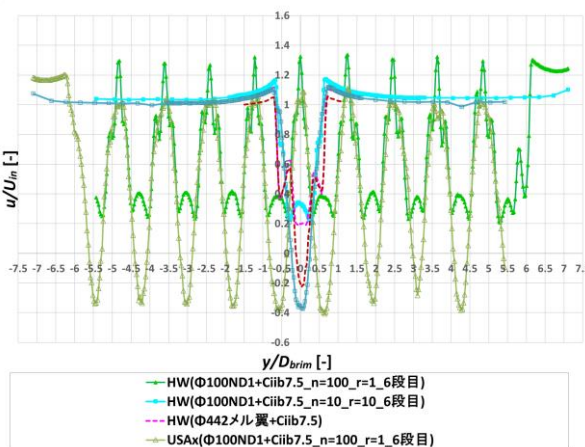


図10 風車モデル下流側の流速分布の比較

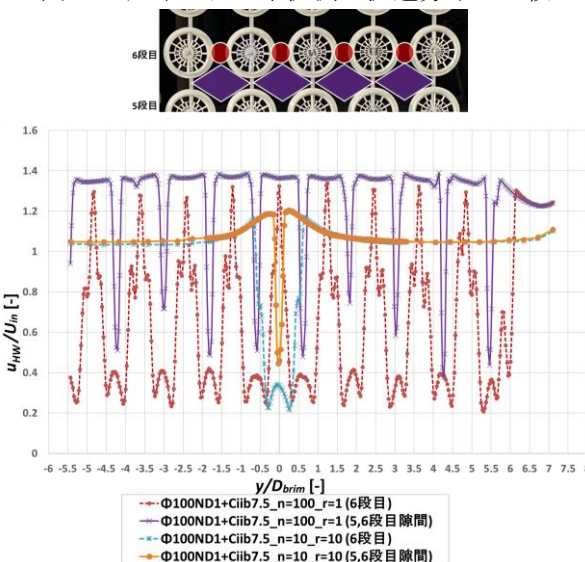


図11 風車モデル下流側の隙間流れの加速

図11にHWで計測した下段から5, 6段目の隙間流れの水平流速分布を示す。比較のために、図10の6段目のディスク中心高さの流速分布を重ねた。図11の $n=100$ に注目すると、 $r=1$ の矩形配置では隣り合う風車間の隙間流れより4基間のひし形空間の隙間流れの流速が速い

ことが分かる。そのため、スタガード配置などを適用し、すべての隙間が均等な配置にすることでさらなる抗力増加が得られる可能性がある。 $n=10$ に注目すると、隙間付近の流れは20%程度加速しているが、 $n=100$ に比べて増速は小さいことが分かる。

5. 結言

本研究では、風洞実験にて、多数基マルチディフューザ風車モデルの基数 n などを変化させた場合の抗力と後流について計測し、以下のような知見を得た。

＜抗力特性＞

- 1列配置の基数を増加させるにつれて $\Delta C_{dA_{brim}}$ が増加する。特に、4基までは $\Delta C_{dA_{brim}}$ の増加幅が大きく、4基以上では線形増加となる。
- $r=1$ において $n=16\sim100$ で基数増加させると、 $\Delta C_{dA_{brim}}$ の値が30%~45%の範囲で増加し続ける傾向が見られた。
- アスペクト比の違いによる渦構造の違いが $\Delta C_{dA_{brim}}$ の増加傾向に影響を与えていると考えられる。

＜後流分布＞

- 多数基配置の中心に近づくにつれて風車後方の圧力が低下し、中心付近の風車の抗力係数が特に増大している。
- $n=100$ において隣り合う風車間の隙間流れが30%程度加速しており、つばから生じる渦の強化及び風車後方の圧力低下が促進されることが示唆される。
- $n=100$ の両端の流速が $n=10$ の両端に比べて大きく加速していることから、100基のマルチディフューザ風車が流れの中で1つの大きな後流を形成していることが示唆される。

参考文献

- (1) Peter Jamieson: Innovation in Wind Turbine Design, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd (2018).
- (2) Yuji Ohya, Koichi Watanabe: “A New Approach Toward Power Output Enhancement Using Multirotor Systems With Shrouded Wind Turbines”, Volume 141, Issue 5. *J. Energy Resour. Technol.* (2019).
- (3) David Carrillo-Cañizalez, “Power Output Enhancement of Diffuser-Augmented Wind Turbines Using a Multi-Rotor System”, 九州大学修士論文 (2021).
- (4) Aguru Sakai et al., “Effects of Proximity of Two Shrouded Wind Turbines with Brimmed Diffusers on Output Performance and Wake Structure”, In Proceedings of APCOW2024 (2024).
- (5) John W. Kurelek, Alexander Piqué, Marcus Hultmark, “Performance of the porous disk wind turbine model at a high Reynolds number: Solidity distribution and length scales effects.”, Volume 273, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* (2023).
- (6) 戸越 将太, “マルチロータ化した2基レンズ風車の風車間隔の近接による出力向上及び後流干渉に関する研究”, 九州大学修士論文 (2023).