

温度影響を考慮したポーラスディスクモデルによる 風車ウエイク流動現象の再現に関する実験的研究

Experimental Study on Reproducing Wind Turbine Wake Flows Using Porous Disk Models under Unstable Thermal Stratification

藤本 信義*¹
Nobuyoshi FUJIMOTO

*¹Graduate Student, Kyushu University, 6-1, Kasugakoen, Kasuga City, Fukuoka, Japan
E-mail: fujimoto.n@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

Wake effects generated by offshore wind farms not only reduce power output within a farm but also influence neighboring farms and the surrounding atmosphere, making their assessment increasingly important. However, reproducing such effects in wind-tunnel experiments requires many rotating turbine models, and miniaturization makes it difficult to match the thrust coefficient of real turbines. This study therefore focuses on porous disks, whose porosity allows adjustable thrust, to identify an effective substitute for rotating models. Using this model, a wind-farm array was constructed to experimentally examine how layout conditions affect wake characteristics, while wake behavior under four thermal-stratification conditions was also observed. Wind-tunnel experiments using two porous-disk types were conducted to evaluate velocity distributions and flow structures. The results identified a porous-disk model capable of reproducing turbine-wake features and suggested that shorter row spacing with more units may reduce velocity deficits. Furthermore, wake structures were found to vary significantly with stratification and boundary-layer conditions, establishing an experimental basis for evaluating thermal effects on turbine wakes.

キーワード：ポーラスディスク，ウエイク，ウィンドファーム，不安定成層，流れの可視化
Key Words : Porous disk, Wake, Wind farm, Unstable stratification, Flow visualization

1. 緒言

大規模な洋上ウィンドファームにより形成されるウエイクは、ファーム内部の発電効率低下だけでなく、近接する他ファームへの影響や周辺大気環境の変化を引き起こすことが指摘されており、その評価は社会的にも重要性を増している。この課題解決に対して、風洞実験内にウィンドファームを再現する場合、多数の風車模型を配置する必要があり、当然ながら模型の小型化が不可欠となる。本研究では、実機風車と同程度のスラスト係数を再現するため、ポーラスディスクに着目した。ポーラスディスクは、ディスクの空隙率によりスラスト係数を決定することができ、回転を伴うことなく風車のウエイク特性を簡便に再現できるモデルである。

本研究の目的は、回転風車模型の代替として有効なモデル形状を明らかにすること、ならびに、そのモデルを用いてウィンドファームを構築し、ファーム内の配置条件がウエイク特性に及ぼす影響を実験的に明ら

かにすることである。さらに、温度成層の影響を把握するため、4種類の成層条件下での流れ場および単独ディスクのウエイク挙動の可視化を行うことを目的とした。

実験方法として、2種類のポーラスディスクおよびソリッドディスクを用いた風洞実験を行った。ポーラスディスクは単基配置および複数配置とし、それぞれの配置条件におけるウエイク領域内の速度分布を、熱線流速計および熱球流速計を用いて測定した。また、いくつかの実験条件においては、過去に実施した回転風車模型(周速比4)による速度分布との比較を行った。

2. 実験方法

本研究では、ソリディティの異なる3種類のディスク (ND1¹⁾, ND2²⁾, RD) を用意した (Fig. 1)。各ディスクの外径 D は 0.1 [m]、厚さは 0.003 [m] であり、それぞれの仕様を Table. 1 に示す。

本実験は、九州大学応用力学研究所が所有する、測定部寸法 13.5 [m] × 1.5 [m] × 1.17 [m] (長さ × 幅 × 高さ) の単回路吸い込み式温度成層風洞を用いて実施した。すべての実験条件において、流入風速 U_0 は 1

*1 九州大学総合理工学府大学院生 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1) E-mail: fujimoto.n@riam.kyushu-u.ac.jp

[m/s]とした。また、熱線流速計 (KANOMAX 社製 I 型プローブを同社製 Smart CTA MODEL 7250 に接続して使用) での測定では、サンプリング周波数は 1000 [Hz]、サンプリング時間は 60 [s] とし、熱球流速計 (本田工業社製風速風温プローブを同社製 GeY-40DA に接続して使用) では、サンプリング周波数は 100 [Hz]、サンプリング時間は 60 [s] とした。

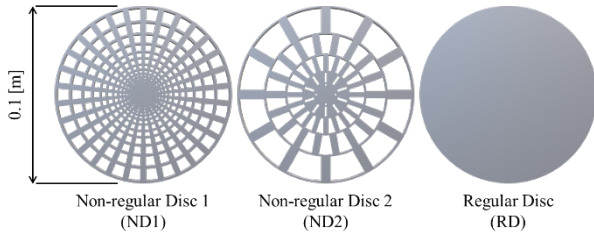


Fig. 1 ポーラスディスク (左と中央) とソリッドディスク (右) の模式図

Table. 1 ポーラスディスクの仕様

Disc name	Solidity [%]	Drag coefficient
ND1	57	0.33~0.51 ¹⁾
ND2	42	0.76 ²⁾
RD	100	1.1

2.1 ウェイクの気流測定

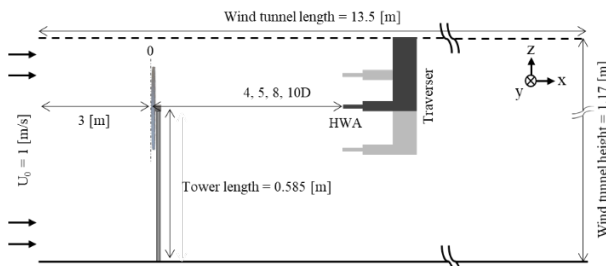


Fig. 2 1パターン実験条件スケッチ

本研究で行った実験条件は、大きく分けて 3 パターンに分類される。1 パターン目の実験条件の模式図を Fig. 2 に示す。本条件では、タワー高さを 0.585 [m] とし、ND1, ND2, および RD の 3 種類のディスクをそれぞれ単基配置として用いた。ディスクは、風流入口から下流方向に 3 [m]、かつ風洞中央に設置した。速度測定には熱線流速計を用いた。原点はディスクの中心点とし、測定位置は、ディスク下流の $x/D=4, 5, 8, 10$ とし、水平方向の速度分布を $y/D=-1.5 \sim 1.5$ の範囲で測定を行った。

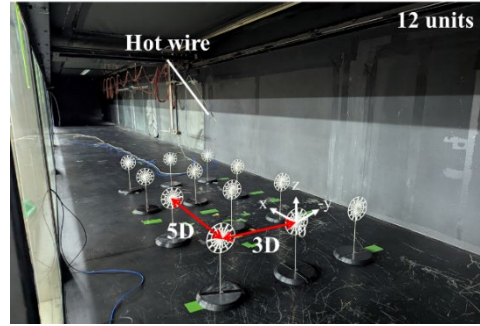


Fig. 3 12基の実験セットアップ

2 パターン目では、タワー高さを 0.2 [m] とした ND2 のみを用い、1 基、3 基、 3×2 配置の 6 基、および 3×4 配置の 12 基のレギュラー配置条件で実験を行った。原点は、1 基実験でのディスク中心点とし、その設置位置は風流入口から下流方向に 2.5 [m]、かつ風洞中央とした。風車間隔の詳細(実験写真)を Fig. 3 に示す。速度測定には熱線流速計を用いた。測定位置は、1 基および 3 基配置では原点から下流方向に $x/D=1 \sim 65$ 、6 基および 12 基配置では $x/D=16 \sim 65$ の範囲で測定を行った。

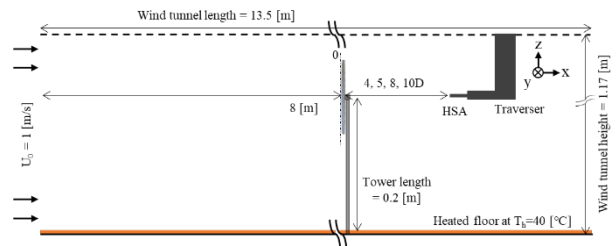


Fig. 4 不安定成層条件

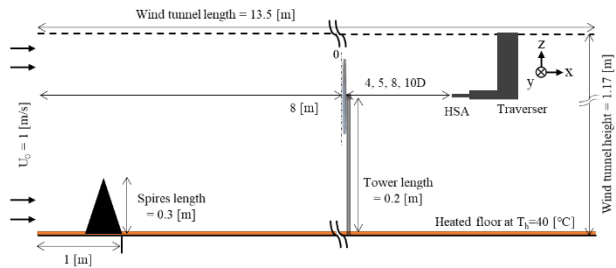


Fig. 5 不安定成層条件下で境界層を発達させた条件

3 パターン目では、タワー高さを 0.2 [m] とした ND2 のみを用い、不安定成層条件および不安定成層条件下で境界層を発達させた条件 (タワー高さでのバルクリチャードソン数 $Ri_b=0.2$ 、中程度の不安定成層) において、単基配置の実験を行った。本条件の実験条件を Fig. 4, 5 に示す。ディスクは、風流入口から下流方向に 8 [m]、かつ風洞中央に設置した。速度測定には熱球流速計を用いた。原点はディスクの中心点とし、測定位置は、ディスク下流の $x/D=4, 5, 8$ および 10 とし、

水平方向の速度分布を $y/D=-1.5\sim 0$ の範囲で測定を行った。なお、不安定成層条件における床面温度は $40\text{ [}^\circ\text{C]}$ に加熱した。

2.2 流れの可視化実験

Fig. 6 に、流れの可視化実験のセットアップを示す。可視化実験は、2.1 に示したパターン1、パターン3 の条件に加え、ディスクを設置しない不安定成層条件、不安定成層条件下で境界層を発達させた条件で実施した。なお、パターン1 の条件については、撮影環境を構築するため、ディスクを風流入口から下流方向に 3.3 [m] 、かつ風洞中央から -0.25 [m] の位置に設置し、ND1 および ND2 を対象として行った。可視化手法には、スモークワイヤー法を採用した。スモーク材には鉄粉を混合した流動パラフィンを用い、光源には PIV 用半導体レーザー KLD-III-U (カトウ光研社製) を用いた。

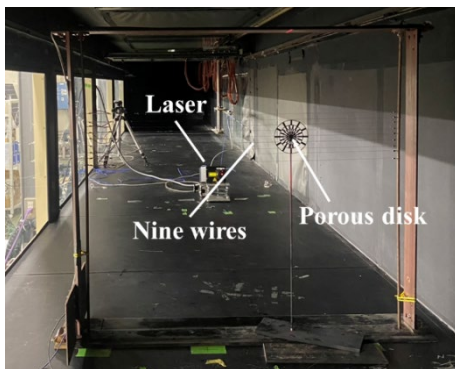


Fig. 6 流れの可視化実験のセットアップ

3. 実験結果と考察

3.1 ND1, ND2, RD, 回転風車模型との比較

Fig. 7 に測定位置ごとの水平方向の時間平均速度分布を示す。まず、最大速度欠損量に着目すると、 $x/D=10$ において、すべてのディスクにおいて回転風車模型との差が最も小さくなる傾向が確認された。次に、ウエイク幅に着目すると、ND2 では、 $x/D=4\sim 10$ の全測定位置において、他のディスクと比較して最も回転風車模型に近い値を示した。

3.2 ND1, ND2 のウエイク流れの可視化

Fig. 8 に ND1, Fig. 9 に ND2 のウエイク流れの可視化結果を示す。まず、ND1 に着目すると、ウエイクの蛇行が確認された。次に、ND2 に着目する。ウエイクの蛇行が小さく、ウエイクはほとんど拡散せずに流下している様子が確認された。この挙動は、回転風車模型において観察される、翼端渦の存在によりウエイクの蛇行が抑制されるウエイク挙動と類似している。3.1, 3.2

の結果から、本実験では ND2 が回転風車模型を最も良好に再現できていると結論づけた。

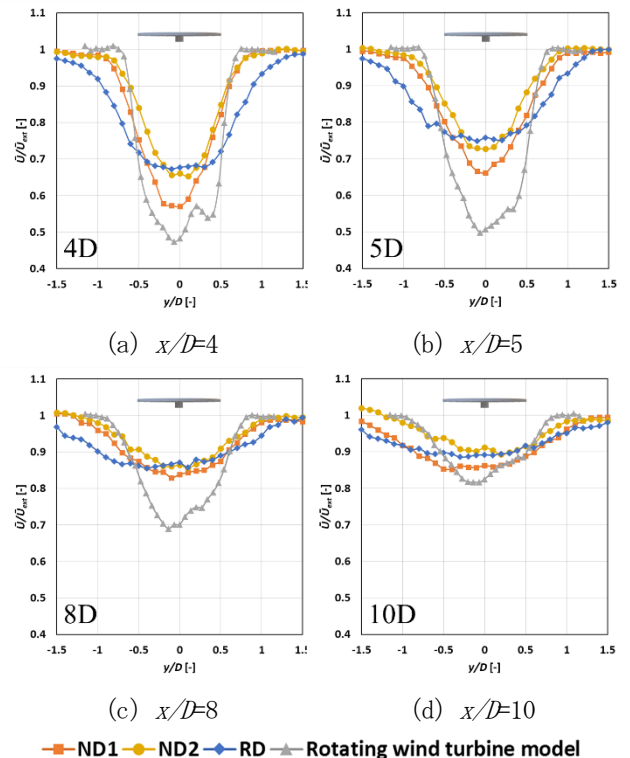


Fig. 7 ND1, ND2, RD, 回転風車模型の速度分布

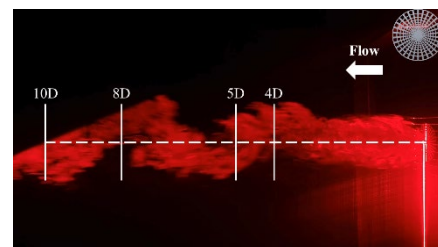


Fig. 8 ND1 のウエイク流れの可視化

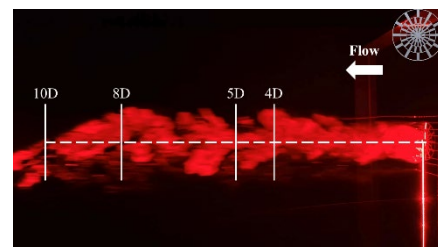


Fig. 9 ND2 のウエイク流れの可視化

3.3 ウィンドファームを再現した場合の検討

Fig. 10 に下流方向の時間平均速度分布を示す。1 基配置と 3 基配置を比較すると、3 基配置の方が速度欠損が大きいことが確認された。次に、6 基配置と 12 基配置を比較すると、6 基配置の方が速度欠損が大きいことが確認された。また、下流方向に進むほど 6 基配

置と 12 基配置の差は顕著になることが確認された。

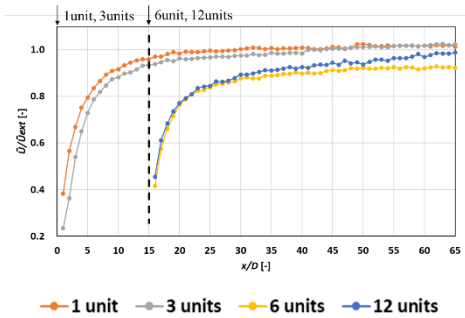
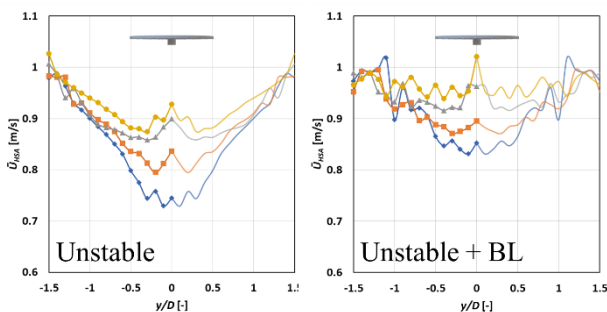


Fig. 10 ウィンドファームの下流方向の速度分布

3.4 不安定成層条件下での実験

Fig. 11 に不安定成層条件下および不安定成層条件下+境界層を模擬した場合に関して、時間平均速度分布を示す。すべての下流測定位置において、不安定成層条件+境界層模擬の方がウエイクの速度欠損が小さいことが明らかになった。

Fig12, 13 に不安定成層条件下, Fig14, 15 に不安定成層条件下+境界層の流れの可視化結果を示す。不安定成層条件下に着目すると、正の浮力に起因した大規模な上昇流構造（サーマルプルーム）が確認される。一方、不安定成層条件下+境界層模擬の場合に、大規模な塊状の上昇流構造を有する気流がディスクを周期的に通過していることが明らかになった。



(a) 不安定成層条件 (b) 不安定成層条件+境界層

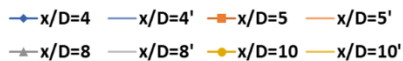


Fig. 11 不安定成層条件下での速度分布



Fig. 12 不安定成層条件（ディスク無）

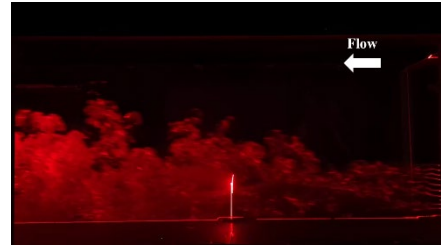


Fig. 13 不安定成層条件の場合におけるディスク近傍の流れパターン

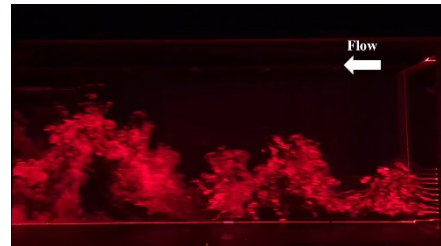


Fig. 14 不安定成層条件+境界層模擬（ディスク無）



Fig. 15 不安定成層条件+境界層模擬の場合におけるディスク近傍の流れパターン

4. 結言

本研究では、ポーラスディスク ND2 がウエイクの気流特性を良好に再現できる形状であることを明らかにした。さらに、複数の ND2 モデルに基づいて洋上ウィンドファームを風洞内に再現した場合、列間距離を狭くし、かつ基数を増加させた配置の方が、下流域での速度回復が早いことが示唆された。

さらに、不安定成層条件を考慮し、かつ乱流境界層の生成の有無によってディスク近傍の気流構造が劇的に変化することが示された。これにより、風車ウエイクに対する温度成層の影響を評価するための実験的基盤を構築することに成功した。

- 1) Camp, E. H. and Cal, R. B., Mean kinetic energy transport and event classification in a model wind turbine array versus an array of porous disks: Energy budget and octant analysis, *Physical Review Fluids*, 1, 2016, 044404.
- 2) Kurelek, J. W., Piqué, A. and Hultmark, M., Performance of the porous disk wind turbine model at a high Reynolds number: Solidity distribution and length scales effects, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol.237, 2023, 105377.