

ウェイクの影響を考慮した洋上ウィンドファームの 最適設計・制御に関する研究

鞭馬, 宏太
九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/6788205>

出版情報：九州大学，2022，修士，修士
バージョン：
権利関係：



ウェイクの影響を考慮した 洋上ウィンドファームの最適設計・制御に関する研究

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻 風工学研究室
鞭馬 宏太

1. 緒言

現在、地球温暖化に伴うCO2排出量抑制等の観点から、世界中で再生可能エネルギーへの注目が高まっている。特に風力発電は成熟した発電方法の一つである。特に近年、陸上での風力発電適地の減少が進んでいること、一般に洋上の風が強勢で乱れが少ないことなどから、洋上風力発電への期待が高まっている。しかし、上流風車の後流が下流風車に影響することで生じる発電量の低下や風車部品の疲労の増大が問題となっている。そのため、洋上ウィンドファームにおいては後流の正確な理解とその対策が必要となる。こうした風車後流問題の解決策として、ウェイクステアリングと呼ばれる風車後流を制御する手法が提案されている。しかし未だ不明な点が多い。そこで本研究では、大型風洞設備内に精密な風車模型を2基設置し、上流側の風車のヨー角度を変動させた際の下流側風車における風荷重、発電性能の計測を行い、ウェイクステアリングの有効性を検証した。また、下流側の風車の回転数を風速に応じて制御し、最適な制御の検討も行った。

2. 風洞実験に用いた風車模型

本研究では2種の風車模型を下流側に配置して実験を行った。発電性能の計測時はTypeAを用い、荷重の計測時にはTypeBを用いた。なお、上流側には、常にTypeBの風車模型を用いた。それぞれの風車模型の模式図を図1に示す。

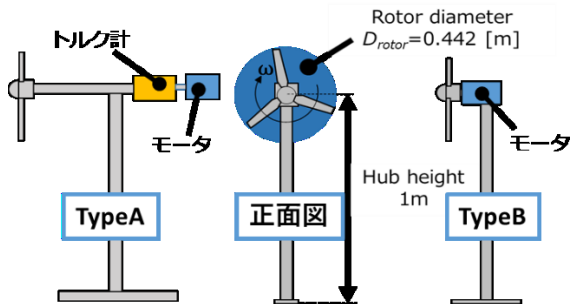


図1 実験に用いた風車模型

3. 単基風車後流計測試験

風洞実験は九州大学応用力学研究所が所有する長さ15.0[m]×幅3.6[m]×高さ2.0[m]の大型境界層風洞を用いた。まず、単基風車を対象とし、流入風に対するヨー角度と風車特性の関係を正確に把握するため、ヨー角度を周期的に動かした際の後流計測を行った。図2に単基風車を対象とした後流計測の模式図を示す。

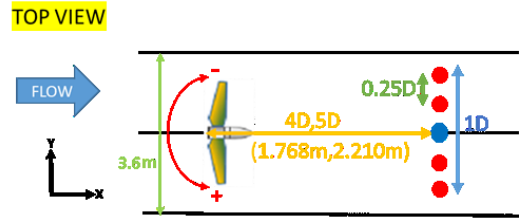


図2 単基風車の後流計測の配置、Dはロータ直径

表1には、単基風車を対象とした後流計測の実験条件を示す。なお、風車模型のヨー角度は、回転テーブルをタワー下に設置しているため、タワー中心を回転中心とし、上から見て反時計回りを正とした(図2参照)。

表1 単基風車後流計測試験の実験条件

Wind speed U_{∞} [m/s]	8
Tip speed ratio [-]	4.25
Blade rotation speed [rpm]	1,469
Yaw angle [deg]	-30~30
Sampling time [s]	60
Sampling frequency [Hz]	500
Cutoff frequency [Hz]	100
Reynolds number [-]	1.9×10^5

図3に、図2の青丸位置の5D(ここで、Dはロータ直径)後流での風速の時間変化を示す。オレンジの線が風車のヨー角度を示し、青色の線がヨー角度を周期的に変化させた際の風速の時間変化を示している。また、比較のため、ヨー角度を0°で固定した状態の風速の時間変化を緑色の線で示している。図3を観察すると、風車のヨー角度を0°に固定した場合と比較して、風車のヨー角度を周期的に変化させた場合、ヨー角度の変化に伴い風速が増減していることが見て取れる。特に、ヨー角度が±30°の場合、風速が流入風速と同じ8m/s になっており、風速が完全に回復していることが明らかになった。

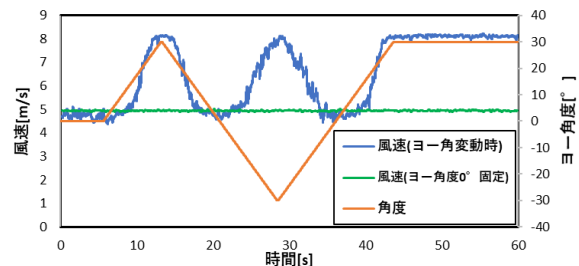


図3 図2の青点における風速の時間変化、5D後流の結果

4. 二基風車を対象とした風洞実験

単基風車を対象とした後流計測の結果を踏まえ、風車を前後に2基直線的に配置した際の風車特性についても実験を行った。ここで、便宜上、上流側に設置した風車模型をWT1、下流側に設置した風車模型をWT2と称する。具体的な実験内容としては、回転テーブルに搭載したWT1をヨー回転させ、下流側のWT2に加わる風荷重、発電性能の計測を行った。一般的に商用大型風車では、ナセルの上の風向・風速センサーの数値情報に基づいてヨー制御やピッチ制御、ブレード回転数制御などが行われている。これを本風洞実験でも模擬する工夫を行った。具体的には、WT2のすぐ直前の1D(ここで、Dはロータ直径)位置に熱線流速計を配置し(図4を参照)、ここで計測された風速(Um)に基づいてWT2の最適なブレード回転数を算出し、これをWT2のブレード回転数として与えた。一連の制御は自作のプログラムを用いて行った。本制御プログラムにおけるパラメータについては後述する。図4には、2基風車を用いた場合の配置図、表2には実験条件を示す。

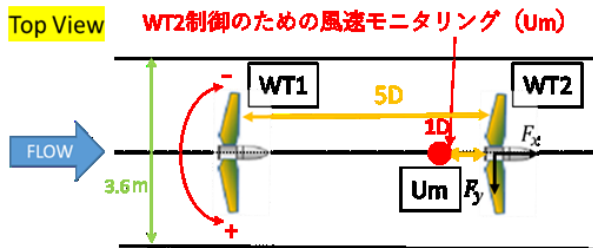


図4 2基の風車模型を用いた実験の模式図

表2 2基の風車用いた実験の実験条件

Wind speed U_∞ [m/s]	8
Tip speed ratio [-]	4.25
Blade rotation speed of WT1 [rpm]	1,469
Yaw angle of WT1 [deg]	-30~30
Yaw rotation speed of WT1 [deg/s]	1, 2, 3, 4
Sampling time [s]	70~250
Sampling frequency [Hz]	500
Cutoff frequency [Hz]	100
Reynolds number [-]	1.9×10^5

2基の風車模型を用いた風洞実験では、下流側風車WT2の回転数制御を行いながらWT2の発電性能と荷重の計測を行った。紙面の都合上ここでは発電性能の結果のみを報告する。Umで計測された風速とそれに基づいて指示したWT2のブレード回転数の応答性を示したグラフを図5に、回転数制御の有無による発電性能の比較結果を図6に示す。図5に示すオレンジ色の線はWT2のブレード回転数、青色の線はUmの風速を示しており、ここでの上流側風車WT1のヨー角度の回転速度は4[deg/s]に設定した結果である。この結果から、WT2の回転数はUmで計測された風速を追随しており、相関係数も0.98と高い一致を示した。このことから、風速に応じた最適な制御が行われていることが確

認された。また図6を観察すると、制御ありの場合は、制御なしの場合と比較して約1.7倍の発電性能を示しており、制御を行うことの有効性が示唆された。

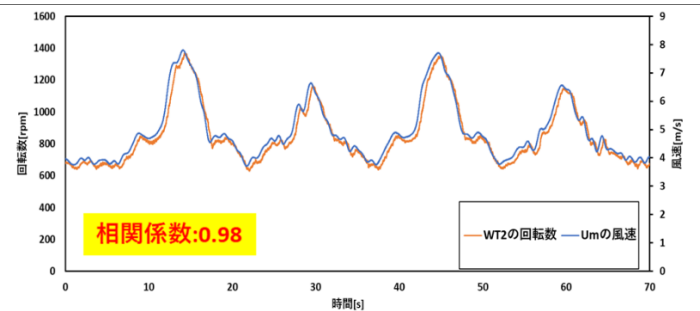


図5 回転数制御を行った際のWT2の回転数とUmの風速

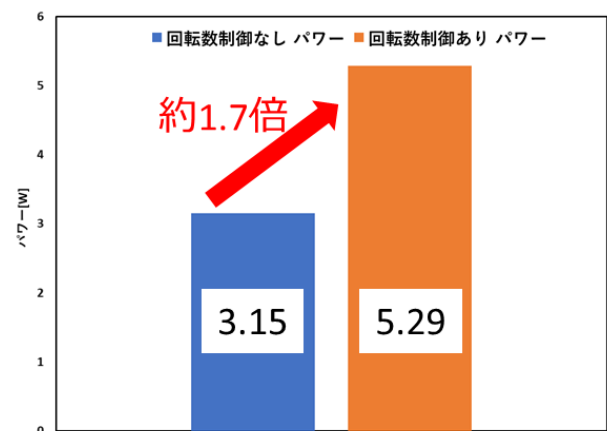


図6 回転数制御の有無によるWT2の発電性能の比較

5. 結言

大型風洞設備を用いた風洞実験を実施し、風車ヨー角度を変化させたときの回転数制御の有無による発電性能と風荷重を計測し、それらを比較することにより、ウェイクステアリングの有効性や制御方法を検証した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 風車のヨー角度の変化に伴い、後流が偏向する。ヨー角度が $\pm 30^\circ$ になった場合、5D後流位置では、風速はほぼ回復していることが明らかになった。
- 上流風車のヨー角度の変動に伴い、下流風車の流入風速に顕著な変化が現れた。
- 回転数制御ありの場合は、回転数制御なしの場合と比較して約1.7倍の発電性能が得られることが明らかになった。
- 上流風車のヨー角度により、下流風車に作用する主流方向荷重に変化が生じるものの、回転数制御の有無による有意な差は見られなかった。

研究発表実績

- 日本流体力学会年会2022, 口頭発表1件
- 日本風力エネルギー学会 第44回風力エネルギー利用シンポジウム, 口頭発表1件