

## ドローンを用いた大気流速場の局所計測

山田琢磨<sup>A</sup>、杉田暁<sup>B</sup>、佐々木真<sup>C</sup>、荒川弘之<sup>D</sup>、稲垣滋<sup>E</sup><sup>A</sup>九州大学基幹教育院、<sup>B</sup>中部大学中部高等学術研究所 国際 GIS センター、<sup>C</sup>日本大学生産工学部、<sup>D</sup>九州大学医学研究院、<sup>E</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

近年、地球温暖化等の諸問題を解決するための手段として、再生可能エネルギーに注目が集まっている。その中でも日本で太陽光発電に次いで着目されている風力発電は、自然への影響を最小限に抑えることができ、また太陽光発電が期待できない高緯度地域でも活用が期待される。

ところが風力発電で用いる風車は、ブレードが回転することでその後方に風速の低下や風の乱れが大きくなる「風車ウェイク」と呼ばれる構造が形成される。そのため、多数の風車でウィンドファームと呼ばれる風車群を形成した場合、風車ウェイクによって下流側の風車の発電効率が落ちてしまうことが問題視されている。図1はデンマークの Horns Rev 1 ウィンドファームの写真で、霧が発生しているため、風車がより下流側の風車に与える、乱れた風による悪影響が視覚的に分かりやすくなっている。



図1. 風車がより下流側の風車に与える影響  
(デンマークの Horns Rev 1 ウィンドファーム)

風車近傍には通常風力計が設置されているものの、風車の大きさに相当する上空 100 m、幅 100 m 近くに渡って細かく風速の空間分布を常に計測できるわけではない。そのため、風車ウェイクの研究は今までシミュレーションによる数値解析が主体となっていた。もし風車近傍で実際にウェイク構造の詳細を計測することができれば、シミュレーション研究と結果を相互に検証し、風車ウェイクの研究を大いに前進させることができ、風力発電の高効率化につながる。

風車近傍には通常風力計が設置されているものの、風車の大きさに相当する上空 100 m、幅 100 m 近くに渡って細かく風速の空間分布を常に計測できるわけではない。そのため、風車ウェイクの研究は今までシミュレーションによる数値解析が主体となっていた。もし風車近傍で実際にウェイク構造の詳細を計測することができれば、シミュレーション研究と結果を相互に検証し、風車ウェイクの研究を大いに前進させることができ、風力発電の高効率化につながる。

## 2. 方法

本研究では、近年大気中の風速を計測するための有効な手段として注目されているドローンを用いて、風車近傍の風速分布を細かく、広範囲にわたって計測した。ドローンには飛行に必要な様々なセンサーが積んであり、そのログを記録する機能が備わっている。特に、ドローンが空気中に静止してその状態を維持しようとするホバリング機能を利用すると、ドローンのモーターの回転数と傾き角度から、その位置での 3 次元的な風速を測定することができる。

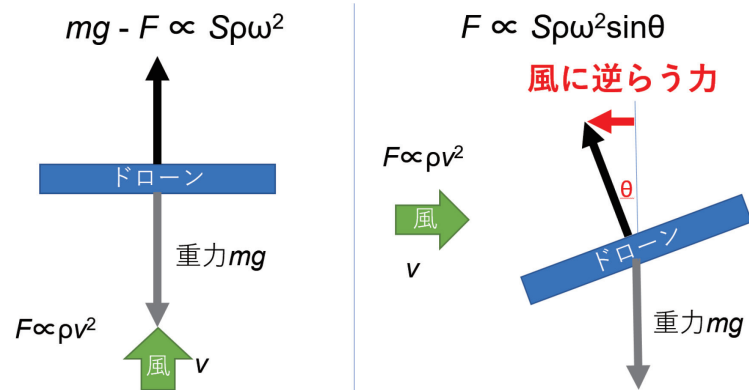


図2. ドローンのモーター回転数と傾き角度から風速が求まる

具体的には、ドローンはプロペラが回転することで重力により落下することを防いでいるため、鉛直方向の風が吹いた場合はプロペラの回転数が増減する。風がドローンを押す力  $F$  は空気密度  $\rho$  と風速の 2 乗  $v^2$  に比例し、ドローンを上昇させる力は空気の密度  $\rho$  とモーター回転数の 2 乗  $\omega^2$  に比例するので、図2左のような関係式からモーターの回転数の 2 乗が上昇しようとする力に比例するので、上下方向の風速の変化はモーターの回転数の変化から導出することができる。また、水平方向からの風に対してはドローンが風の上流に向かって傾き、プロペラの回転数を増加させることで空間位置を維持しようとする。そのため、図2右のようにドローンの垂直軸からの傾きを  $\theta$  とすると、ドローンの上昇力に  $\sin \theta$  をかけたものが水平からの風に逆ら

う力に相当するので、傾き  $\theta$  も計測することで水平方向の風向と風速も求めることができる（文献：1）。

### 3. 結果

2023年11月に中部電力に許可をいただき、中部電力御前崎風力発電所10号機風車の近傍で、2機のドローン（DJI Mavic 3 Enterprise）を用いて風速計測を行った。図3は実際に風車近傍でドローンを飛ばした時の様子である。1機は参照用として風車の前方80m、高さ80mの位置で固定して計測し、もう1機は風車後方の各地点を探索して広範囲の風速の計測を行った（風車後方80m、120m、160mの地点で、地上から10m～135mを5m程度の間隔で）。図4は風車後方80mの位置で風強度の高さ分布を測定し、風車前方の風で規格化した結果である。青線が九州大学応用力学研究所内田研究室より提供された数値計算結果（文献：2）、赤が実験結果である。結果として、数値計算で予測された風車後方で風速の減速が観測され、定性的に同じ傾向を示した。特に40m～120mの風車ブレード領域内で、数値計算で予測されたように風速が大きく減衰し、風車領域よりも低高度でも減速が観測されている。



図3. 実験に用いた風車とドローン

### 4. 考察

実験により風車後方で風速の減速が計測され、数値計算と定性的に同じ傾向を示したが、定量的に一致するまでには至らなかった。原因の一つとして、風速の高さ依存を考えていなかったことが挙げられる。すなわち、風車前方の参照用ドローンも測定に合わせて高度を調整すれば、より正確な風速の減速が測定できる。

また、風車ウェイクによる乱流の解析も初期結果が出たところではあるが、詳しい評価は未着手である。問題点として、数値計算と異なり元々の風車前方の風が乱流成分を含んでいることを考慮する必要性が挙げられる。初期結果より乱流が発生する周波数帯を検証し、データ解析や追加実験を行えば、今後風車ウェイクによる乱流の発生を実験的に評価できることが期待できる。

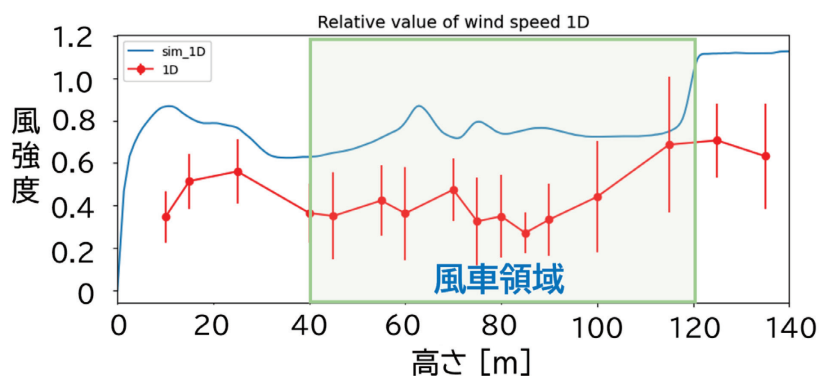


図4. 風車前方の風で規格化した、風車後方の風強度の高さ分布（青：数値計算、赤：実測値）

### 5. まとめ

ドローンを2機用いて中部電力御前崎風力発電所の風車の前方および後方で風速を計測し、風車による風車後方の風速の減速を実測した。結果は数値計算と定性的に同じ傾向を示した。今後は風速の減速の定量的評価や、風車ウェイクにより発生する乱流の解析も行う。

### 6. 謝辞

本研究の一部は、中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究 IDEAS202331 の助成を受けたものです。また、中部電力および九州大学内田研究室にご協力いただいたことを感謝いたします。

### 参考文献・データ

1. P. Neumann and M. Bartholmai, Sens. Actuators A **235**, 300–310 (2015).
2. T. Uchida and Y. Gagnon, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. **220**, 104869 (2022).