

ドローンによる大型商用風車のウェイク計測の試み

Wake Measurement of Utility-Scale Wind Turbine Wake Using Drone

内田 孝紀^{*1} 村本 幸央^{*2} 澁谷 光一郎^{*3} 荒屋 亮^{*4}
Takanori UCHIDA Yukio MURAMOTO Koichiro SHIBUYA Ryo ARAYA

^{*1} Professor, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM), Kyushu University, 6-1 Kasuga-kouen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan 6-1 Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka, 816-8580, Japan

^{*2} Mitsubishi Electric Corporation, 1-1-1 Imajuku-higashi, Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 819-0192, Japan

^{*3} Hitachi Zosen Corporation, 7-89 Nanko-kita 1-chome, Suminoe-ku, Osaka 559-8559, Japan

^{*4} Environmental GIS Laboratory Company Ltd Co., 3-15-25-316, Maidashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 812-0054, Japan

Abstract

In this study, we investigated a method of utilizing the drone itself as a wind speed sensor without mounting a special observation device on the drone. As a result, we constructed a calibration formula to convert the flight record data to an arbitrary wind speed. Next, we applied this method to the airflow measurement in the wake region for the large commercial wind turbine and succeeded in reproducing the airflow characteristics caused by the wind turbine wake phenomenon.

キーワード: 風車ウェイク, 翼先端渦, ドローン
Key Words: Wind turbine wakes, Tip vortex, Drone

1. はじめに

近年、小型無人航空機UAV (Unmanned Aerial Vehicle, 通称: ドローン)は急速な技術革新が進み、農業、運輸、測量などの種々の分野において活躍の幅を広げている。気象観測の分野においてもその活用が急速に進められている。既存の気象観測タワーやドップラーライダー(リモートセンシング技術)を用いた観測手法と比較して、移動が極めて容易であり、かつ地表面の被覆状況に依存せずに低コストで気象観測が実施可能であることがドローンの最大の強みであると言える。但し、これまでに報告された事例のほとんどは、ドローンに観測機器を搭載して行われている。

本研究では、特別な観測機器をドローンに搭載することなく、ドローン自身を風速センサとして活用する手法を試みる¹⁾。すなわち、ドローン自身に保存される飛行記録データを活用する。本研究では、最初に九州大学応用力学研究所が所有している大型風洞設備(測定胴: 高さ2m×幅3.6m×長さ15m)を用い、ドローンを風速センサとし

て活用するための校正試験を行った。次に実機スケールの大型商用風車を対象にしたウェイク領域内の気流計測を試みた^{2, 3)}。

2. ドローンを風速センサとして活用するための大型風洞設備を用いた校正試験の概要

本研究では、ドローンを常にホバリングさせ、その際に取得される飛行記録データから特徴変数を抽出し、それに基づいて風速を算出する手法を開発した。本研究では、4つのローターを有するクアッドコプター型ドローンを使用した。ドローンが空中でホバリングする際、ドローンはローター推力、風による空気抵抗、重力とバランスする (Fig. 1)。

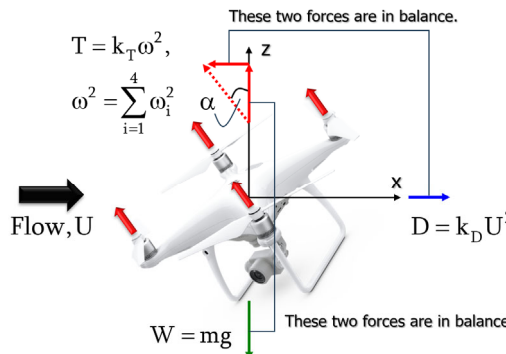


Fig.1 Balance of forces acting on the drone

*1 会員, 九州大学応用力学研究所 (〒816-8580春日市春日公園6-1, 連絡先: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp)

*2 非会員, 三菱電機株式会社

*3 会員, カナデビア株式会社

*4 非会員, 株式会社環境GIS研究所

(原稿受付: 2024年5月16日)

ここで、ローター回転数 ω_i を用いて、その二乗値 $\omega^2 = \sum_{i=1}^4 \omega_i^2$ を定義する。さらにこれがドローンの推力に比例すると仮定することで、ドローンに作用する力のバランスはFig. 1のように記述される。Fig. 1から、水平風速 U に関する以下の関係式が得られる。ここで、 α は傾斜角、 k_T と k_D は非線形の係数である。

$$U^2 = \frac{k_T}{k_D} \cdot \omega^2 \sin \alpha$$

以上から、求めたい風速の二乗値をドローンのローター一回転数と傾斜角から構成される変数と関連付けることができた。本研究では任意の $\omega^2 \sin \alpha$ に基づき、ドローンがホバリングしている際の風速を算出した。すなわち、ホバリングしているドローンで定点観測を行っているイメージである。本研究では、Fig. 2に示す市販のドローンであるDJI Phantom 4 Advanced(略称：P4A)とPhantom 4 Pro(略称：P4P)の2機種を使用した。

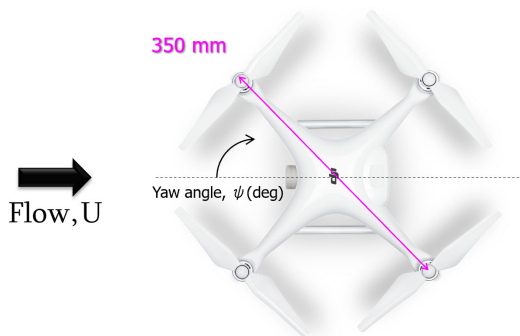


Fig. 2 Drone used in the present research (DJI Phantom 4 Advanced/Pro)

本研究で使用した二機種はほぼ同等の性能を有し、飛行記録データとして、飛行中の機体姿勢、モーターやバッテリーの情報、飛行している緯度・経度などの様々な数値情報が記録されている。本研究で使用したドローンは自律的に姿勢制御を行い、外力を受けても安定にホバリングする二種類の機能(屋内用/屋外用)を有している。風洞内ではGPS(Global Positioning System)信号の受信が難しいため、ビジョンポジショニングと呼ばれる屋内用の手法を用いた。本手法は機体内部に搭載された小型カメラセンサによる画像認識に基づいて安定的なホバリングを行う手法のことである。本研究では、安定したホバリングを可能にするために風洞床面に画像認識用マーカーを自作するとともに、ホバリングさせる際は機体の破損を防ぐため、機体と風洞床面をタコ糸で結び付けた

(Fig. 3)。また、ブロッケージ効果の影響を極力小さくするため、測定部の一部の左右側壁と上部天板を取り除き、そこにネットを設置した。校正時の風速範囲は $U = 0 \sim 10 \text{ m/s}$ である。ドローンのヨー角度に関して、風向に正対する場合を $\psi = 0^\circ$ とした(Fig. 2)。本研究では、ヨー角度の影響も検討するため、 $\psi = 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ の5ケースにおいて校正を実施し、その影響を検証した。一方、後述する実機スケールの大型商用風車を対象にしたウェイク計測では、GPS信号を用いることで安定したホバリングを実現した(詳細は後述する)。

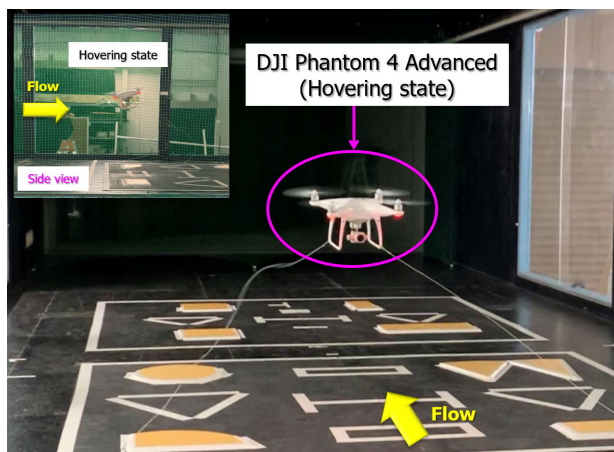


Fig. 3 Calibration of a drone using a large boundary layer wind tunnel ($U=10 \text{ m/s}$)

3. ドローンの校正試験の結果と考察

本研究では、Fig. 3に示すようにドローンを風洞測定部の中央部にホバリングさせ、風速を段階的に増加させて各データを取得した($U = 0 \sim 10 \text{ m/s}$)。Fig. 4には $\omega^2 \sin \alpha$ の時間変化を示す。本研究で用いたドローンは風速 10 m/s までは安定にホバリング可能であることが確認された。Fig. 4に基づいて各風速でホバリングした部分を抽出し、その時間帯の平均値を用いて新たにグラフ(横軸は風速の U^2 、縦軸は $\omega^2 \sin \alpha$)を作成し、 U^2 と $\omega^2 \sin \alpha$ の二変数のみから校正曲線を取得し、任意の $\omega^2 \sin \alpha$ に対応する風速 U を算出した(Fig. 5、注：比例定数 k_T と k_D は除外した)。

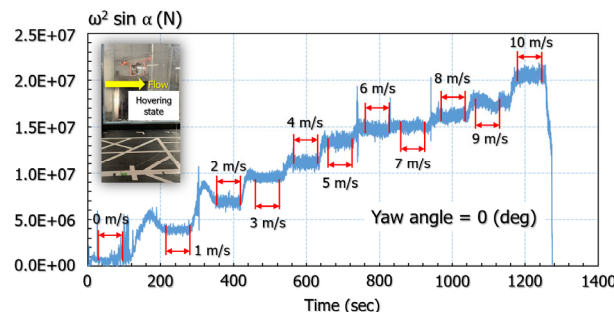


Fig. 4 Time variation of $\omega^2 \sin \alpha$

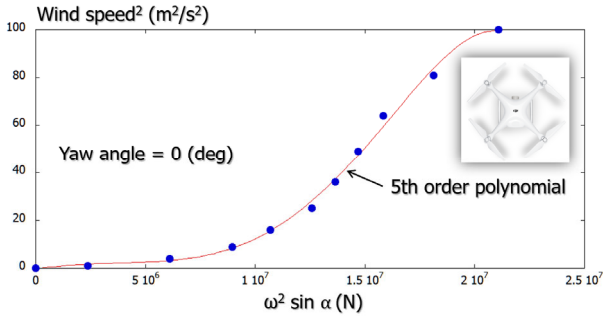


Fig. 5 Calibration curve obtained in the present study, DJI Phantom 4 Advanced

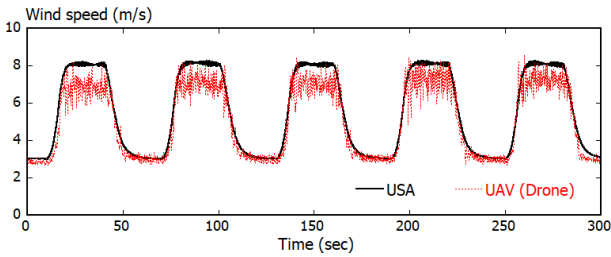


Fig. 6 Measurement result using a drone targeting pulsating flow

実機スケールでの大型商用風車を対象にしたウェイク計測を実施する前に、本研究では $U = 3 \sim 8 \text{ m/s}$ で周期的に変動する脈動流を風洞内に生成し、ドローンによる気流計測の有効性を検証した。得られた結果をFig. 6に示す。ドローンにより算出した風速値は、風洞内に設置した超音波流速計(Ultrasonic anemometer, USAと略記する)の結果と比較した。赤色の点線で示すドローンの計測結果は、黒色の実線で示すUSAによる計測結果を良好に再現していることが示された。ここで、強風時(8m/s)にはドローンの結果に細かな変動が生じている。これはオペレーターが風洞内でドローンの姿勢などを微調整した結果である。なお、脈動流の条件(風速範囲や風速増減の周期)を変更した場合についても良好な結果を得た。

4. 実機スケールの大型商用風車を対象にしたウェイク領域内の気流計測

本研究では、Fig. 7に示す響灘ウインドエネルギーリサーチパーク合同会社が所有する福岡県北九州市響灘地区の風力発電設備(ベスタス社製の3.3MW風車)を活用してドローンによるウェイク領域内の気流計測を試みた。Fig. 8には、本研究で実施した気流計測点を示す。ここで、 x 軸はナセルとともに変化することに注意頂きたい。Table. 1には、本研究で実施した気流計測の詳細を示す。実験を実施した日(2020. 12. 17および2020. 12. 25)は、平均7.0m/sの風(西風～北西風)が安定して吹いていた。

ここで特筆すべきは、二台のドローンを用いて風車へ流入している風速($x/D = -0.5$)を常にモニターしながら、風車を通るスパン中央断面($y = 0$)のTip ($x/D = +0.25$)およびWake ($x/D = +1.0$)の気流計測を行ったことである。ここで、 D は風車のローター直径(=112m)を意味する。ドローンによる気流計測は10分間であり、時間解像度は0.1sである。

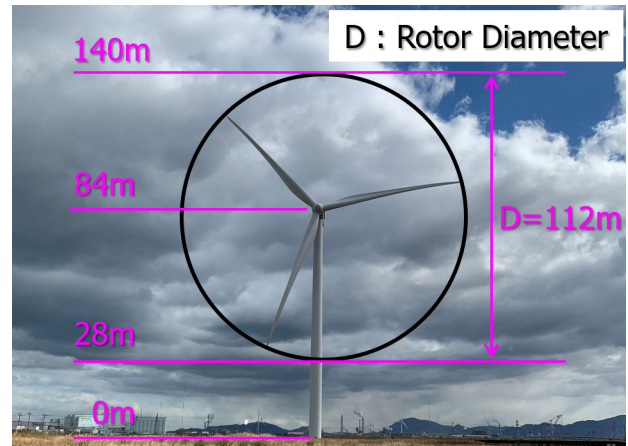


Fig. 7 Large commercial wind turbine used in this research, 3.3MW manufactured by Vestas

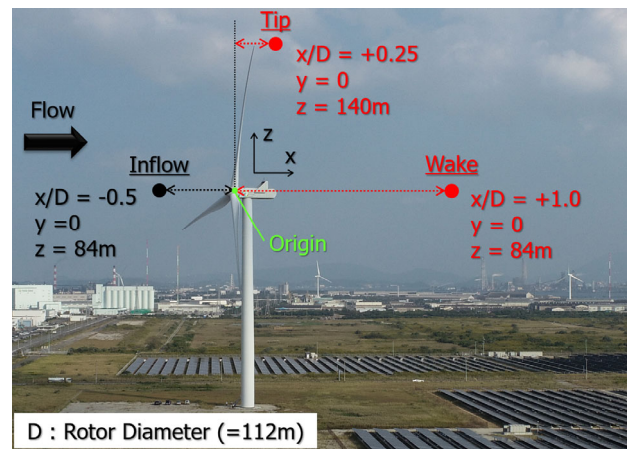


Fig. 8 Airflow measurement points in the present study

Table. 1 Airflow measurements conducted in the present study

	First drone	Second drone
<u>Run 1 (Wake)</u> 2020. 12. 17, 13:40~(JST)	$x/D = -0.5$ $y = 0$ $z = 84\text{m}$	$x/D = +1.0$ $y = 0$ $z = 84\text{m}$
<u>Run 2 (Tip)</u> 2020. 12. 25, 13:35~(JST)		$x/D = +0.25$ $y = 0$ $z = 140\text{m}$

Fig. 9には、Table. 1に示すRun 1(Wake)の実際の計測状況を示す。現場での目視と飛行記録データの両者から、ドローンが所定の位置(高度)で安定にホバリングしていることを確認した。

Fig. 10には、Run 1(Wake)においてドローンにより取得した風速の時間変化を示す。既に説明したように、ドローンの気流計測の時間解像度は先と同様(0.1s)である。本研究では、ドローン自身が気流センサとして活用可能であるかを判断すること、また、風車ブレードの回転に起因して形成されるウェイク領域内における低周波域の気流性状を把握することに主眼を置いているため、1.0sの移動平均操作を施してFig. 10を作成した。黒色の実線は風車の上流位置($x/D = -0.5$)の計測結果であり、10分間の平均風速は図中に示すように約7.2m/sであった。これに対し、赤色の実線がウェイク領域内($x/D = +1.0$)の計測結果である。10分間の平均風速は約3.0m/sとなり、風車上流位置の風速と比較して大幅に低下している結果が得られた。これにより、約7.2m/sの風を受けて運転している実機スケールの大型商用風車(3.3MW)の下流(near wake region)には、ウェイク現象が明確に存在していること、ドローンを用いた計測はウェイク現象を捉えることが可能であることが同時に示された。

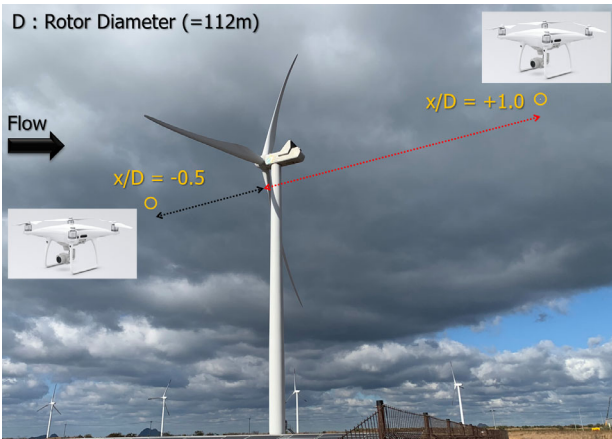


Fig. 9 Drone hovering upstream ($x/D = -0.5$) and downstream ($x/D = +1.0$) of the wind turbine, Run 1 (Wake)

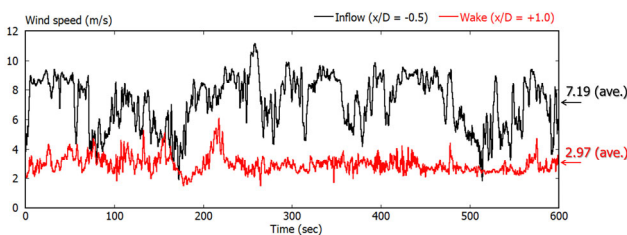


Fig. 10 Temporal change in wind speed obtained by drone, results of Run 1 (Wake)

ドローンで取得したウェイク領域内($x/D = +1.0$)の風速値の妥当性を確認するため、エンジニアリング・ウェイクモデルの一つであるParkモデル⁴⁾の結果と比較した(Fig. 11)。ウェイク領域の風速を流入風速で正規化すると、本ドローン計測では2.97/7.19=0.41となる。一方、Parkモデルでは0.53となり、概ね良好な一致を得た。

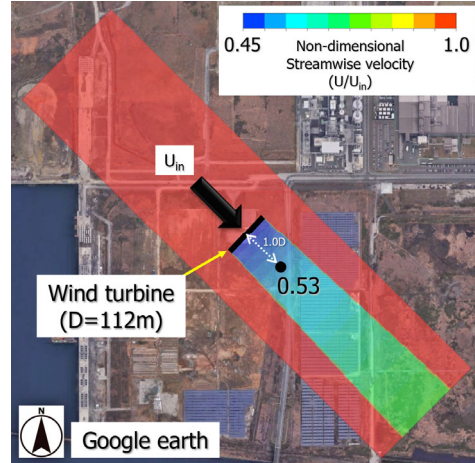


Fig. 11 Wind turbine wake region reproduced by Park model (thrust coefficient 0.8, diffusion coefficient 0.04)

Fig. 12には、Fig. 10に示す風速の時間変化に対してスペクトル解析(FFT)を行った結果を示す。黒色の実線で示す風車上流位置の結果に注目する。移動平均操作(1.0s)を施しているため、0.5Hz以上の高周波域での考察はできないものの、1Hz付近に注目すると、2/3乗則と同様な傾きが得られていること明らかになった。一方、赤色で示すウェイク領域内($x/D = +1.0$, near wake region)の結果は、風車上流位置の結果とは異なり、より大きなパワースペクトル分布が得られた。

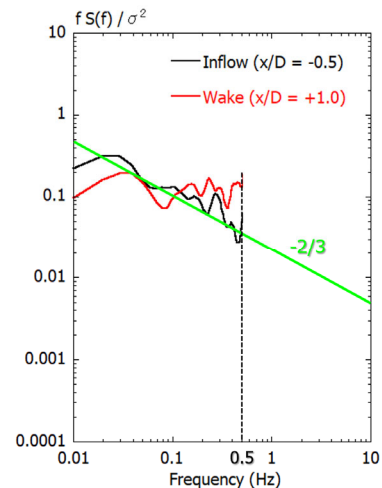


Fig. 12 Results of spectral analysis (FFT) on the temporal change in wind speed shown in Fig. 10

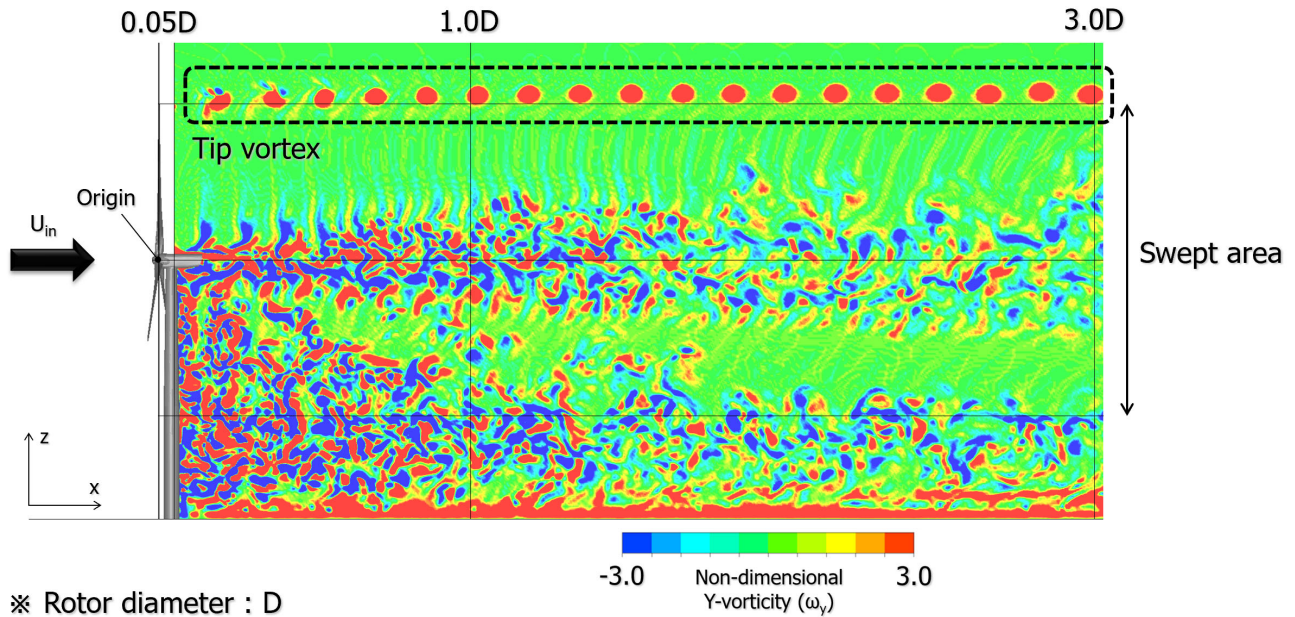


Fig. 13 Tip vortex reproduced by LES using actuator line model

ここからは、Table. 1に示すRun 2(Tip)の計測結果に基づいて風車ブレード先端付近の流動特性について考察を進めていく。

一般的に、風車ブレードが定格回転している際には、Fig. 13に示すように風車ブレードの先端付近から翼先端渦(Tip vortex)と呼ばれる縦渦が風車下流側に周期的に放出されて流下することが知られている^{2, 3, 5)}。本研究では、対象とした実機スケールの大型商用風車においても一連の翼先端渦は存在するのか、また存在する場合にはドローンを活用した気流計測でそれを捉えることが可能であるかを検証した。この目的に対し、風車ブレードの先端付近において、Fig. 14に示す風速の時系列データを取得した(Table. 1に示すRun 2)。先と同様に、気流計測の時間解像度は0.1sであり、移動平均操作(1.0s)を施した。その後、スペクトル解析(FFT)を適用し(Fig. 15)、ブレード通過周波数(Blade Passing Frequency : BPF)を評価した。ここで、 $BPF = (\text{翼枚数}) \times (\text{風車ブレード回転数 Hz})$ で評価される。また、風速の時系列データに対して移動平均操作(1.0s)を施しているため、高周波域の議論は出来ないことに注意頂きたい。

ドローン計測時の風車ブレード回転数は13.6rpmであった。よって、 $BPF = 3 \times (13.6/60) = 0.68\text{Hz}$ となる。これはFig. 15に示す基本周波数0.65Hzとほぼ一致する。以上の結果から、本研究で対象とした実機スケールの大型商用風車においても翼先端渦は明確に存在し、かつドローンを活用した気流計測でそれを捉えることが可能であることが示された。

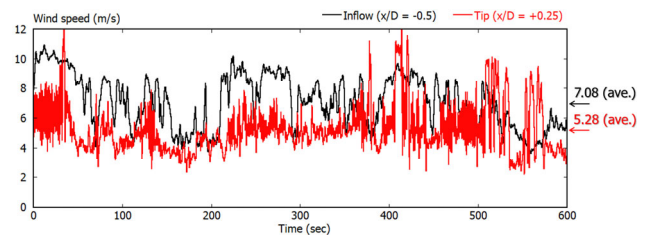


Fig. 14 Temporal change in wind speed obtained by drone, results of Run 2 (Tip)

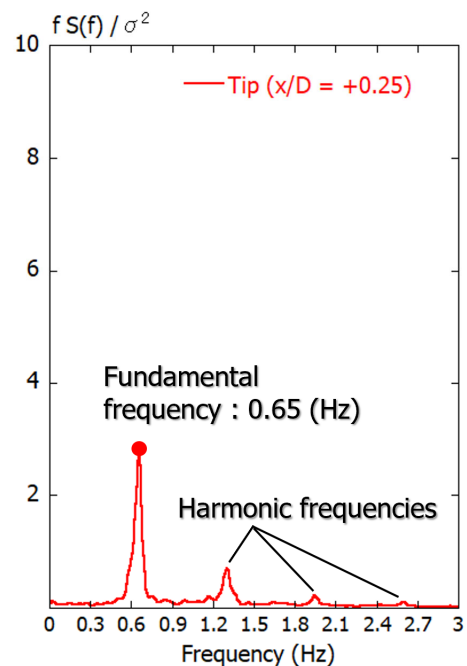


Fig. 15 Spectral analysis (FFT) on the temporal change in wind speed shown in Fig. 14

5. おわりに

本研究では、特別な観測機器をドローンに搭載することなく、ドローン自身を風速センサとして活用する手法を検討し、以下に示す知見を得た。

- 九州大学応用力学研究所が所有する大型風洞設備(測定胴:高さ2m×幅3.6m×長さ15m)を用い、ビジョンポジショニング機能に基づいて風速10m/sまでドローンを安定にホバリングさせることが可能であること、その際に取得した飛行記録データから任意の風速に変換する校正式を構築することに成功した。
- 風速が3~8m/sで周期的に変動する脈動流を風洞内に生成し、ドローンによる気流計測の有効性を検証した。その結果、ドローンによる計測結果は超音波流速計(USA)による計測結果を良好に再現可能であることが示された。なお、脈動流の条件(風速範囲や風速増減の周期)を変更した場合についても良好な結果を得た。
- 響灘ウインドエナジーリサーチパーク合同会社が所有する福岡県北九州市響灘地区の風力発電設備(ベスタス社製の3.3MW風車)を活用し、GPS信号によりホバリングしたドローンデータに基づいてウェイク領域内の気流計測を評価した。その結果、風車への流入風速と比較し、風車下流(near wake region, $x/D=+1.0$, D はローター直径)では、明確な風速低下を確認することができた。その値は、エンジニアリング・ウエイクモデルの一つであるParkモデル⁴⁾の結果と良好な一致を示した。さらに、実機スケールの大型商用風車から形成される翼先端渦の検出も可能であることが示された。
- 以上より、本研究で提案したドローンを活用した気流計測手法は、風車ウェイク領域内の気流計測を実施する上で非常に有効な手段の一つであることが示された。なお、ドローンのホバリングの性能(位置精度および位置変化)に起因する風速測定誤差の把握と定量化は、観測マストや鉛直ライダーなどを用いて継続的に実施していく予定である。これと平行して、複数のドローンを活用した面的な計測も試みる予定である。

謝辞

実機風車のウェイク計測に関しては、ENEOSリニューアブル・エナジー株式会社(ERE)の協力を得た。また、本研究を実施するに際し、京都大学エネルギー理工学研究所の稲垣 滋先生、九州大学医学研究院の荒川 弘之先生には多くのアドバイスを頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Palomaki, R. T., Rose, N. T., van den Bossche, M., Sherman, T. J., & De Wekker, S. F. J., Wind Estimation in the Lower Atmosphere Using Multirotor Aircraft, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(5), pp.1183-1191, 2017
- 2) Akihiro Honda, Takeshi Kubota, Nanako Sasanuma, Ellena Otsuki, Flow visualization around an actual wind turbine using snow, *Proceedings of Grand Renewable Energy 2022 International Conference*, 71-74, 2022.12
- 3) Hong, J., Toloui, M., Chamorro, L. et al., Natural snowfall reveals large-scale flow structures in the wake of a 2.5-MW wind turbine. *Nat Commun* 5, 4216, 2014
- 4) Jensen, N.O., A Note on Wind Generator Interaction; Technical Report Risoe-M-2411(EN); Risø National Laboratory: Roskilde, Denmark, 1983
- 5) Takanori Uchida and Yves Gagnon, Effects of continuously changing inlet wind direction on near-to-far wake characteristics behind wind turbines over flat terrain, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 220, January 2022, 104869