

2次元 Porous-Disk モデルと実測データを使った実機風車のウエイクシミュレーション

WAKE SIMULATION OF FULL-SCALE WIND TURBINE USING TWO-DIMENSIONAL POROUS-DISK MODEL AND MEASURED DATA

澁谷 光一郎^{1), 2)} 吉田 忠相¹⁾ 乾 真規¹⁾ 馬詰 佳亮¹⁾ 内田 孝紀³⁾

Koichiro SHIBUYA^{1), 2)}, Tadasuke YOSHIDA¹⁾, Masaki INUI¹⁾, Keisuke UMAZUME¹⁾ and Takanori UCHIDA³⁾

ABSTRACT

Wind speed and wind direction data collected from an actual site were used to investigate the behavior of wind turbine wakes under real wind conditions. In the simulation, a two-dimensional Porous-Disk model was used, and one-second data of wind turbines were utilized as boundary conditions for the calculation to replicate the wind turbine wakes in a real wind field. Although the calculated results showed time deviations from the observed results, they agreed very well when the deviations were corrected. In the actual wind field, the wake of the wind turbines changed significantly due to fluctuations in wind speed and direction, resulting in frequent switching of the time period during which the wakes affected the downstream wind turbines.

Key Words: Wind turbine wake, Full-scale wind turbine, Porous-Disk model, CFD

1. はじめに

我が国では、2050年までに正味の温室効果ガス排出量をゼロにするカーボンニュートラルの達成を掲げている。カーボンニュートラルの達成には、二酸化炭素をはじめとした温室効果ガス排出量の削減が必要不可欠で、化石燃料に代わり風力や太陽光などのクリーンエネルギーを活用した発電方法の導入が進められている。特に沖合の強勢な風を利用できる洋上風力発電は大規模な発電が期待でき、広大な経済水域を有する我が国にとって、カーボンニュートラルの達成に非常に有用な手段の一つである。

大規模な風力発電所では、複数の風車から構成されるウインドファームという方式がとられる。これにより建設コストや運営コストを抑えることができるが、ウインドファームでは風車間の距離が小さく設定されるために風車のウエイクが問題となる。ウエイクは風車の背後に形成される流れ領域で、風車が風の運動エネルギーを電力に変換することから流入風に比べて風速が低下する。またウエイクは風速の低下以外に、ロータの回転によって乱流強度が増加するという特徴があり、風下に位置する風車の発電量の低下や疲労増大の原因となることが知られている。ウインドファームで十分に風力エネルギーを活用するために、風車ウエイクを正確に予測する技術が求められる。

風車ウエイクの予測研究は、風洞実験^[1]や数値シミュレーション^[2]、ウエイクの風速分布を数式で表現する工学モデル^[3]など、世界中で盛んに進められている。近年ではリモートセンシング技術を活用した実機風車のウエイク観測も

¹⁾ カナデビア株式会社 (※旧 日立造船株式会社 〒559-8559 大阪市住之江区南港北1-7-89)

²⁾ 九州大学大学院総合理工学府 大学院生 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

³⁾ 九州大学応用力学研究所 教授 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

行われるようになった^[4]。しかしながら実際の風環境における風車のウエイクは、実験やシミュレーション結果から大きく逸脱することがある。これは風車周囲の風環境が起因していると考えられ、風環境を考慮した風車ウエイクの予測が重要である。特に風向の変化を伴う流れ場においては、風車ウエイクが風によって移流することで流れ場が劇的に変わることが Uchida らの研究^[5]で指摘され、Bao らが実施したドローンによる実機ウエイクの観測^[6]でも、同様に風向変化の効果でウエイクによる影響度が異なることが言及されている。工学モデルを時間発展的に使用することで、風に追従するウエイクの挙動を表現する手法が提案されている^[7]が、工学モデルでは数式でウエイクを表現するために風速の分布形状を仮定する必要がある、風に追従するウエイクを表現するのは困難である。

本研究では、実際の風環境における風車のウエイク挙動解明と、工学モデルに依らない実用的な風車ウエイク予測手法を確立することを目標とした。風力発電所で観測されたデータを詳細に分析することで実際の風環境における風車ウエイクの特徴を解明し、また実機風車のウエイク挙動を再現するための2次元の数値流体シミュレーションを実施して観測データとの比較を行った。

2. 実サイトで観測された風車データの分析

2.1 雄物川風力発電所

実機風車のウエイク挙動を解明するため、カナデビア(株)が保有する雄物川風力発電所の観測データを活用した。雄物川風力発電所は秋田市の雄物川河口付近にある風力発電所で、図1と図2に示すように2基のダウンウィンド風車が平坦な海岸沿いに建設されている。雄物川風力発電所にある2基の風車は風軸上に並んでおり、1号機(以下WT1)と2号機(以下WT2)の離隔距離は277mで、ロータ直径 $D=86$ mのWT2基準で約 $3.2D$ である。特に冬季にはWT2が海風を受けて運転し、WT2のウエイクをWT1が受ける状況が多く見られる。

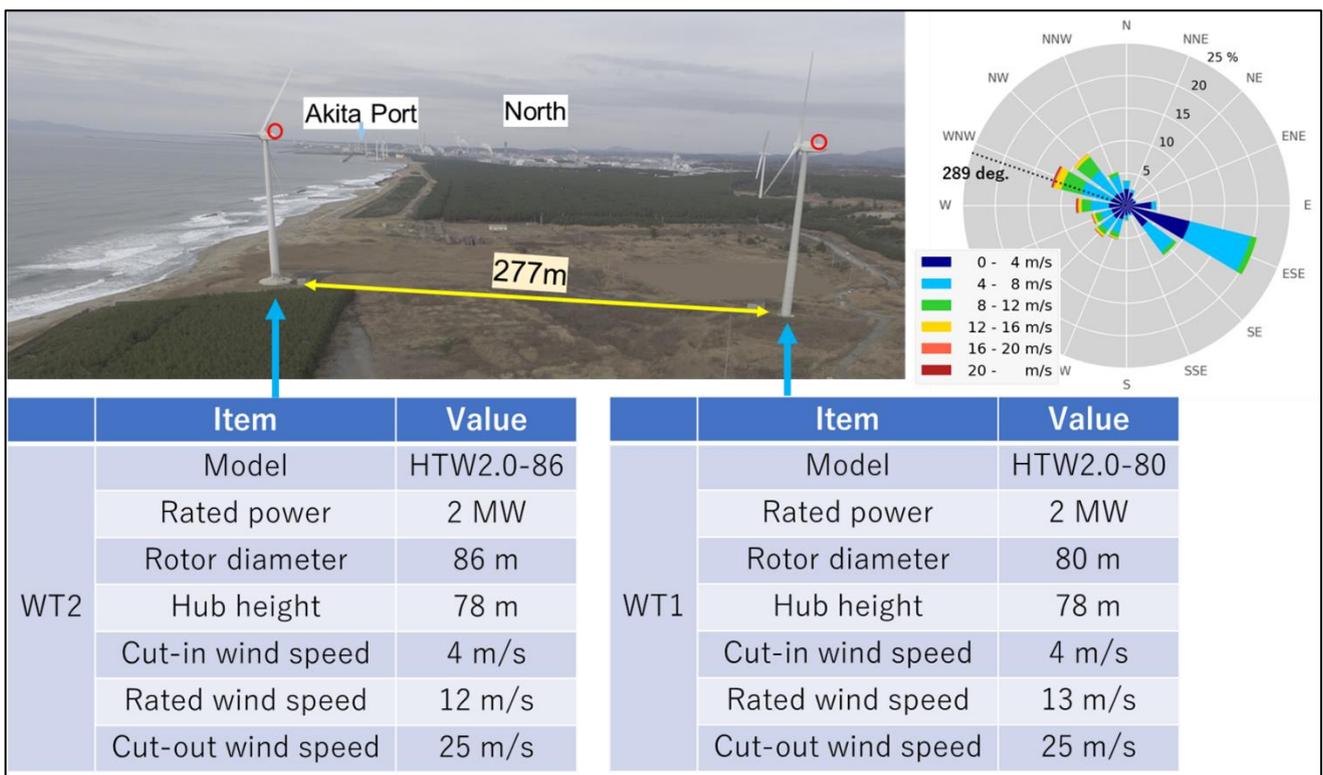


図1 雄物川風力発電所の諸元(右上の風配図はWT2の風速計と風向計の2018年1年間のデータから作図)

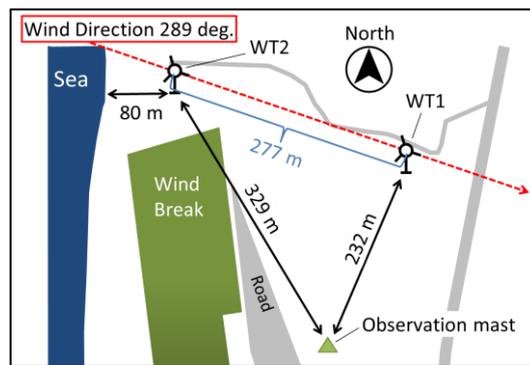


図 2 風車と風況観測塔の位置関係

2.2 実機風車の 10 分データの分析

WT1 と WT2 のナセル上部(図 1 に赤丸で示す箇所)に取り付けられたカップ式風速計および矢羽根式風向計の 10 分間の平均データから、実機風車で形成されるウエイクを分析した。風車運転時には風車のブロッキングにより風速計に流入する風速が低下するため^[8]、本研究では風車停止時の風速データを、サイトに流入する風況と同等であるとみなし、風車近くの風況観測塔の風速データを参照して風車運転時の風速データを風車停止時相当の値に補正した。風況観測塔の風速計の設置高度は地上 50 m で、風速と風向計はそれぞれカップ式と矢羽根式である。ここで、風車停止時とは風車の発電待機シグナルが 10 分間すべてで停止となっている状態を指し、ロータの回転が意図的に止められている状態を指す。図 3 は、(a)風車運転時と風況観測塔、(b)風況観測塔と風車停止時の風速の相関を表したグラフで、横軸が補正されるパラメータを示している。風速の補正では、風車運転時の風速を(a)の補正式より風況観測塔の風速に変換し、それを(b)の補正式により風車停止時の風速に変換した。(a)の運転時では、風速 10 m/s 前後で補正式の傾きが変化しているが、10 m/s 以上の風速で定格出力を超えないよう風車が制御されて風を逃がし始めることで、風車のブロッキング作用が抑制されるためである。そこで(a)での補正に際しては、運転中の WT2 の風速に対応する補正式を採用した。なお、補正に使うデータは風車や地形の影響を受けない風向のデータを選定し、WT1 には 250~310 deg.のデータを、WT2 には 220~310 deg.のデータを使用した。補正に使用したデータは、WT1 と WT2 それぞれに対して、2014 年 12 月 12 日~2015 年 3 月 31 日、2016 年 3 月 8 日~2017 年 6 月 5 日の期間であり、WT1 の補正用データには WT2 建設前のものを使用している。以降は、WT1 と WT2 の風速を上記の方法で補正して使用した。なお、風向に関してはブロッキングの影響を受けず、風車運転時と停止時で風況観測塔との差が同程度であるため、補正は施していない。

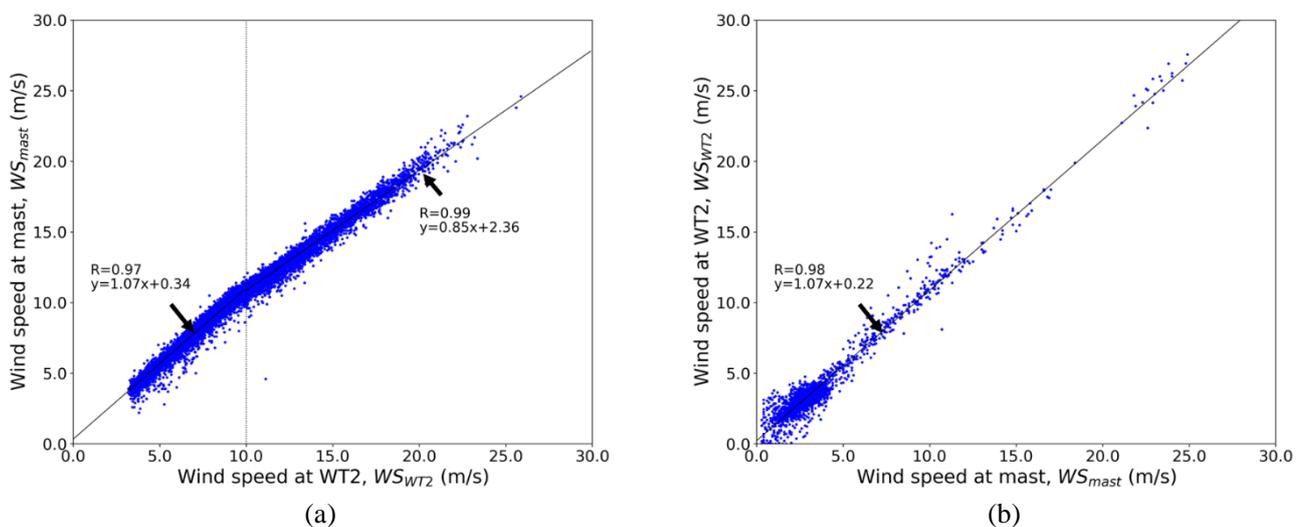


図 3 WT2 のナセル風速計と風況観測塔の相関関係 (WT1 も同様):(a)風車運転時、(b)風車停止時

図 4 は、WT2 が形成するウエイクの影響範囲を示したグラフである。WT2 で観測された風向から、WT1 と WT2 が一列に重なる風向である 289 deg.を引いた相対値 θ を横軸に、WT1 の風速を WT2 の風速で除して無次元化した値 WS^* を縦軸に表した。カラープロットは WT2 での風速 WS_{WT2} の大きさを示している。風上に位置する WT2 の風速を流れ場への流入風速とみなせば、図に示す WS^* はウエイクの風速を流入風速で無次元化したことになる。分析に使用したデータ期間は 2018 年 6 月 17 日～2023 年 12 月 31 日である。図 4 より、WT1 と WT2 が一列に重なる風向 $\theta=0$ deg.を中心として風速比 WS^* が低下しており、WT1 が WT2 のウエイク影響を受けていることが分かる。流入風速が高風速のときには風速比 WS^* が大きくなるが、これは前述した通り、定格出力を超えないよう風車が制御されて風を逃がすことで、ウエイク影響が弱まるためだと考えられる。

より詳細にウエイクの影響を評価するため、10 分間のデータから流入風の条件を絞ってグラフを描画した。風上側の WT2 の風速が 6~10 m/s、また風向の変動を示す風向の標準偏差が(a)10 deg.未満、(b)10 deg.以上となる条件で同様に描画すると、風速比は図 5 のようになった。風速階級 6~10 m/s は、風車の出力係数が最大かつスラスト係数が一定となる風速階級で、風車ウエイクが最も活発的に形成される状況である。(a)は風向の変動が小さく直線的に風が流入する風環境であり、(b)は風向の変動が大きく流入風にばらつきがある風環境である。風速と、風向の変動値によりデータをフィルタリングすることで、図 4 よりも詳細にウエイクによる風速の低下を評価することができた。(a)の風向変動が小さい場合には WT2 のウエイクを受けて風速が大きく低下した。図中の一点鎖線は風向 4 deg.幅で移動平均した風速比であるが、その最小値は $WS^*=0.65$ となり、Chamorro らの実験結果¹⁾と近い値をとることが明らかとなった。一方で(b)の風向変動が大きい場合は WS^* の最小値が増加し、ウエイクが影響する風向範囲が拡大した。

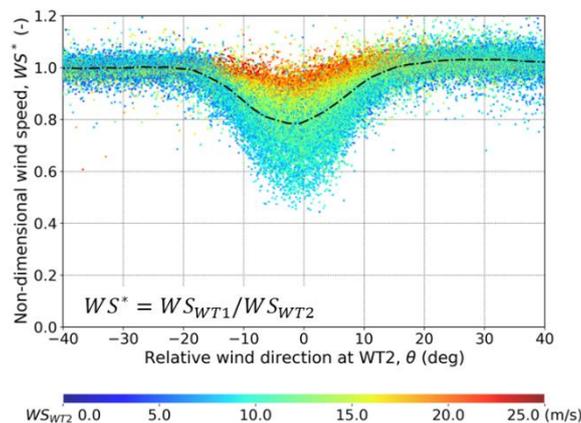


図 4 全風速階級における WT2 のウエイクの影響範囲(図中の一点鎖線は風向 4 deg.幅で移動平均した値)

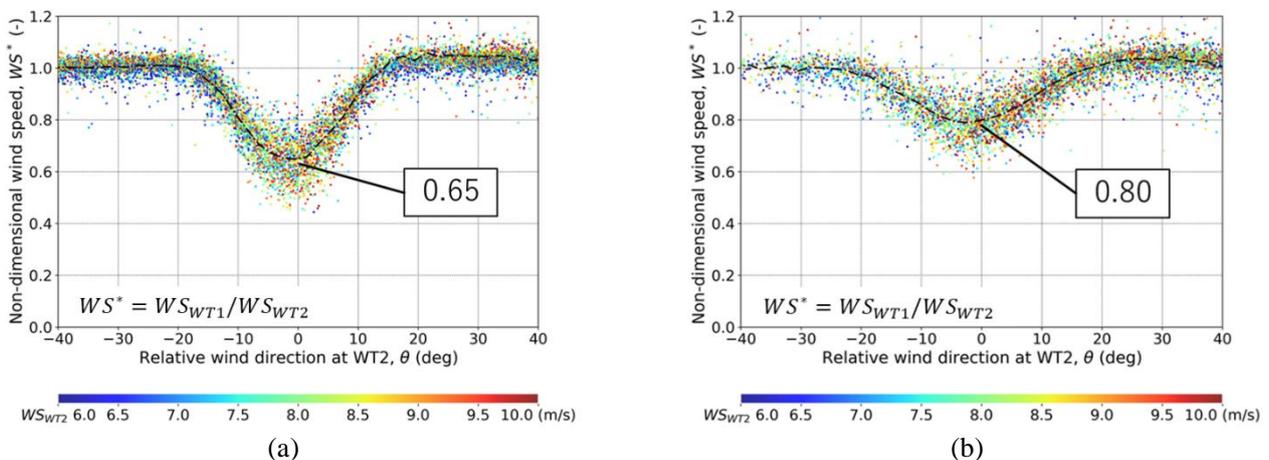


図 5 風速階級 6~10 m/s における WT2 ウエイクの影響範囲(図中の一点鎖線は風向 4 deg.幅で移動平均した値): (a)風向の標準偏差が 10 未満, (b)風向の標準偏差が 10 以上

3. 実風車ウエイクの再現計算

3.1 計算スキーム

風力発電所の観測データを分析した結果、実機風車のウエイクでは周囲の風環境の違いによって風下の風車への影響が異なることが確認された。本章では、数値流体シミュレーションを用いて風環境の異なる条件で風車ウエイクの挙動を比較する。Uchida ら^[9]は、シングル GPU を用いた 2 次元の数値流体シミュレーションにより、Alpha Ventus Offshore Wind Farm の 25 基の風車のウエイクを再現することに成功しており、2 次元計算によって実用的な計算時間の範囲でウエイクを予測することが可能であることを示している。そこで本研究でも直交座標系に基づく有限差分法を採用した、2 次元の数値流体シミュレーションを実施した。舞台となる雄物川風力発電所において、風車のハブ高さの水平断面を対象とした 2 次元計算を実施するにあたり、以下にシミュレーションの仮定を示す。

- ▶ 雄物川風力発電所は海岸の平坦地形に建設されていることから、地形および地表面粗度の影響は無視する
- ▶ 流入する風は空間的に一様とする
- ▶ 大気安定度による影響は無視し、中立な大気状態での計算を仮定する
- ▶ 翼端渦や旋回流、またナセル・タワーからの剥離流れによる、ウエイク中の 3 次元流動現象は無視する

計算はロータ直径 D を代表長、流入風速の時間平均値 \overline{WS}_{in} を代表風速とした無次元パラメータを使用して実行した。以下、無次元化された文字の右上に*を表記する。本シミュレーションで解く流れ場の支配方程式は、テンソル形式 ($i, j = 1, 2$) で表示された非圧縮性流体に対する連続式(式(1))と Navier-Stokes 方程式(式(2))を基礎とし、速度場と圧力場は、オイラー陽解法を基礎とした部分段階法^[9]によりカップリングした。圧力に関するポアソン方程式は SOR 法により緩和計算して求めた。式(2)の対流項の離散化には 3 次精度風上差分を用い、対流項の離散化で生じる 4 次精度中心差分には梶島の補間法^[10]を用いた。一般に 3 次精度風上差分の数値粘性項の重みは河村・桑原スキーム^[11]の 3.0 が用いられるが、本研究ではその影響を十分に小さくするために 0.5 に設定した。その他の空間項には 2 次精度の中心差分を適用した。

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^* \partial x_j^*} + f_i^* \quad (2)$$

ここで、 $x_i^* = x_i/D$ 、 $u_i^* = u_i/\overline{WS}_{in}$ 、 $t^* = u_i/D \cdot t$ 、 $p^* = p/(\rho \overline{WS}_{in}^2)$ 、 $Re = (\overline{WS}_{in} \cdot D)/\nu$ である。また ρ 、 ν はそれぞれ空気の密度および動粘性係数である。

3.2 CFD Porous-Disk モデル

風車により形成されるウエイクの表現には、Uchida らによって開発された Porous-Disk モデル^[12]を採用した。このモデルでは、式(3)で示されるように唯一のモデルパラメータ(抵抗係数) C_{RC} と、空間補正関数 F を併用し、式(2)の外力項 f_i として、抵抗を風車受風面内に連続的に分布させて風車ウエイクを表現する。抵抗係数のみでウエイクを表現できるため、翼素理論に基づく Actuator モデル^[14]とは異なり、翼弦長や揚力係数、抗力係数などのブレードの詳細なパラメータを必要とせずに風車ウエイクを計算できることがこのモデルの利点である。抵抗係数は $C_{RC} = 13.0$ を適用し、Porous-Disk モデルを適用する範囲 L_y を風車のロータ直径の 1.5 倍 ($L_y = 1.5$) に設定して計算を実施した。モデルの適用範囲の拡大は、ブロックageによるウエイクの初期幅を表現するために施される。抵抗係数およびモデルの適用範囲は Qian ら^[13]の工学モデルの結果を再現するように実施された、事前計算^[9]により決定された値である。

$$f_i^* = -C_{RC} \cdot F(y^*) \cdot u_i^* \cdot V^* \quad (3)$$

y^* : Spanwise distance from rotor center

$$V^* = \sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \tag{4}$$

$$F(y^*) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(2\pi \frac{y^*}{L_y} \right) \right) & \text{for } |y^*| \leq L_y \\ 0 & \text{for } |y^*| > L_y \end{cases} \tag{5}$$

3.3 風速・風向の変化に対するウエイクの挙動

まず風速および風向の変化に対するウエイクの挙動を観察する。図 6 に示す計算領域の 4 つの境界すべてに、時間変化する風速・風向の値をディリクレ条件として付与して計算した。流入面だけでなく側面にもディリクレ条件を課すことで、流入面で付与した風速・風向の変動が風下で減衰することなく、計算領域内の流れ場が流入条件に従って変動する状況でのウエイク挙動が計算できるようになる。境界に与える風速・風向は式(6)で表され、変動周期を意味するストローハル数 $St (=D/(\overline{WS}_{in} \cdot T))$ は、風速と風向の双方で $St_{WS} = St_{\theta} = 0.067$ (これは、ロータ直径 $D=86$ m の実機風車に風速 $\overline{WS}_{in} = 8$ m/s が流入する条件での周期 $T=160$ s の変動に等しい) とし、変動振幅 A に関して、風速には $A_{WS} = 0.5$ 、風向には $A_{\theta} = 10$ deg. の変動を設定した。圧力の境界条件にはすべてノイマン条件を与えた。計算格子は主流方向 $20D$ の領域サイズに対し 1001 点、主流直交方向 $10D$ の領域サイズに対し 501 点の解像度で、格子はすべて等間隔に設定した。無次元時間刻み $dt^* = 0.001$ 、レイノルズ数を $Re = 1000$ とした。図 7 に(a)定常流を流入させた計算結果を、および(b)風速と(c)風向それぞれ一方のみを変動させて計算した結果を示す。表示した流れ場は、無次元時間 $t^* = 29.8 \sim 74.4$ (変動の 3 周期分) で時間平均した。また図 8 と図 9 に、風速・風向それぞれの無次元時間 $t^* = 29.8$ と $t^* = 37.2$ における瞬時場を示す。瞬時場は、各ステップの流入風速 $WS_{in}^*(t^*)$ で除して表示した。

$$\begin{cases} WS_{in}^*(t^*) = 1 + A_{WS} \cdot \sin(2\pi \cdot St_{WS} \cdot t^*) \\ \theta_{in}(t^*) = A_{\theta} \cdot \sin(2\pi \cdot St_{\theta} \cdot t^*) \end{cases} \tag{6}$$

図 7 より、WT2 の背後において風速が減衰して風車のウエイクが形成されていることが確認できる。(a)に定常流が流入する場合には WT2 の背後に一樣なウエイクが形成され、(b)の風速が変動する状況では、ウエイクの風速分布がまばらとなった。そして、(c)の風向が変動する状況ではウエイクの影響範囲が広がった。図 8、図 9 の瞬時場を見ると、風速が変動する状況ではウエイクが脈動し、風向が変動する状況ではウエイクが大きく蛇行していることが分かる。その結果として、風速・風向の変動が存在する状況下では、それぞれ特徴的な平均場が形成されたことが理解できる。

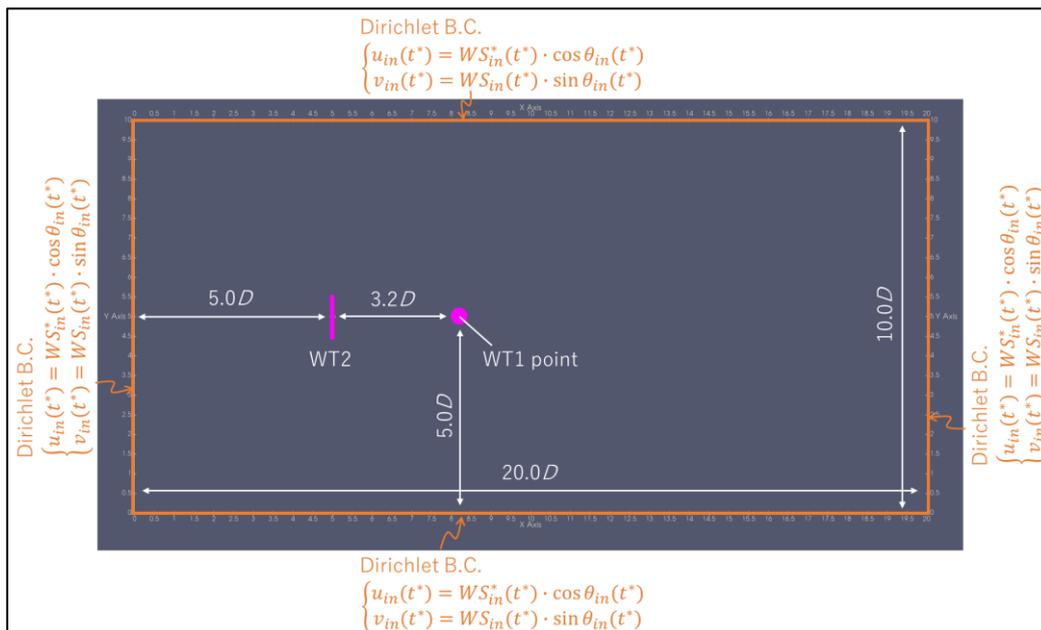


図 6 設定した計算領域と境界条件

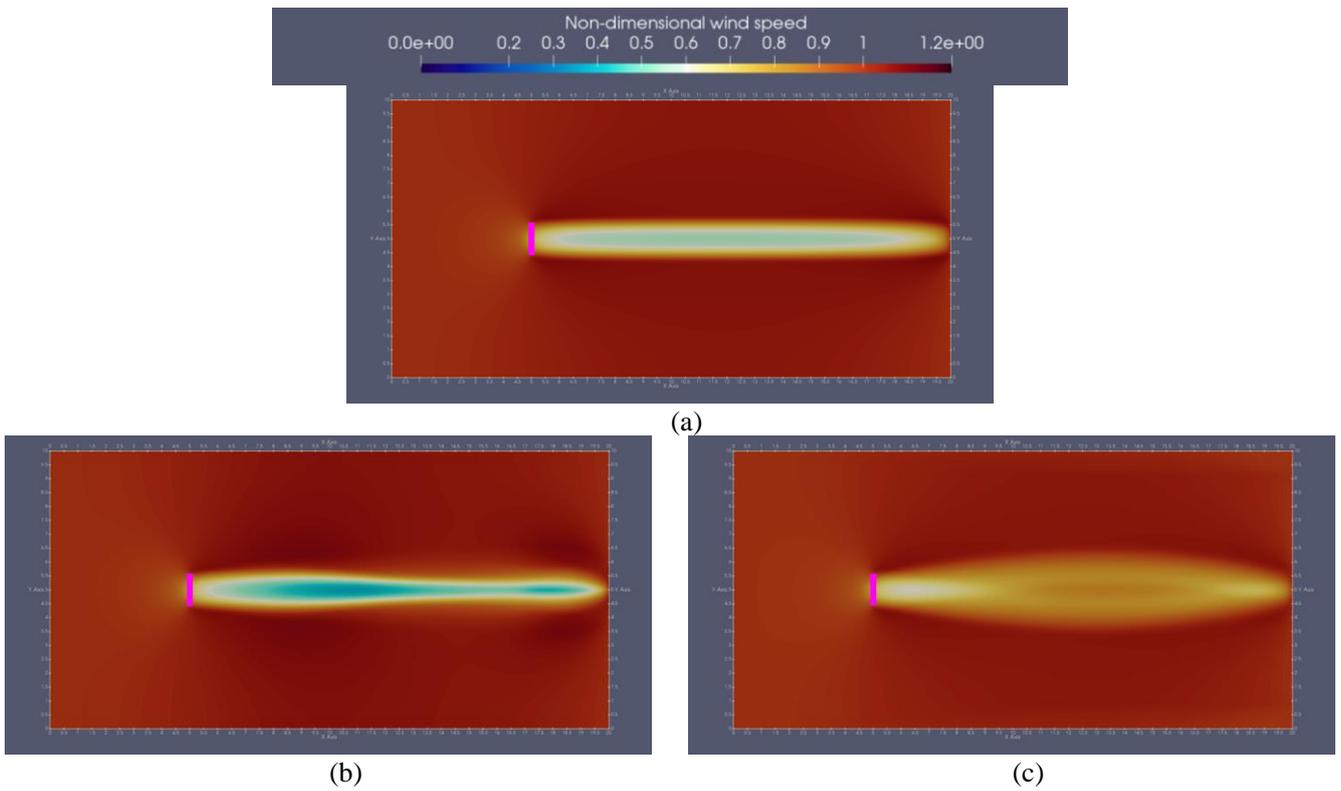


図 7 時間平均した流れ場の可視化結果:(a)定常流を流入, (b)流入風速のみ変動, (c)流入風向のみ変動

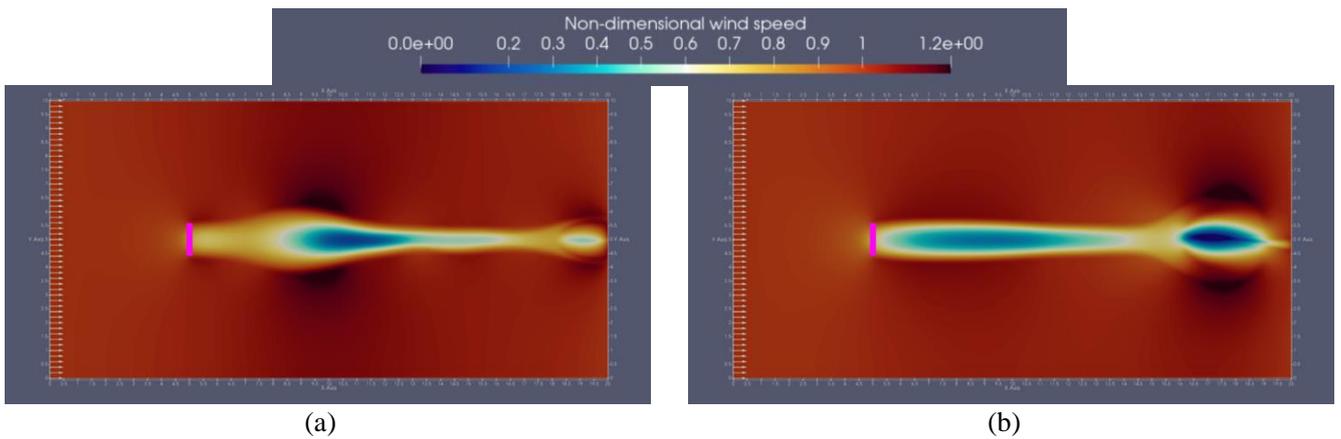


図 8 流入風速のみを変動させた流れ場の可視化結果:(a)無次元時間 $t^*=29.8$, (b)無次元時間 $t^*=37.2$

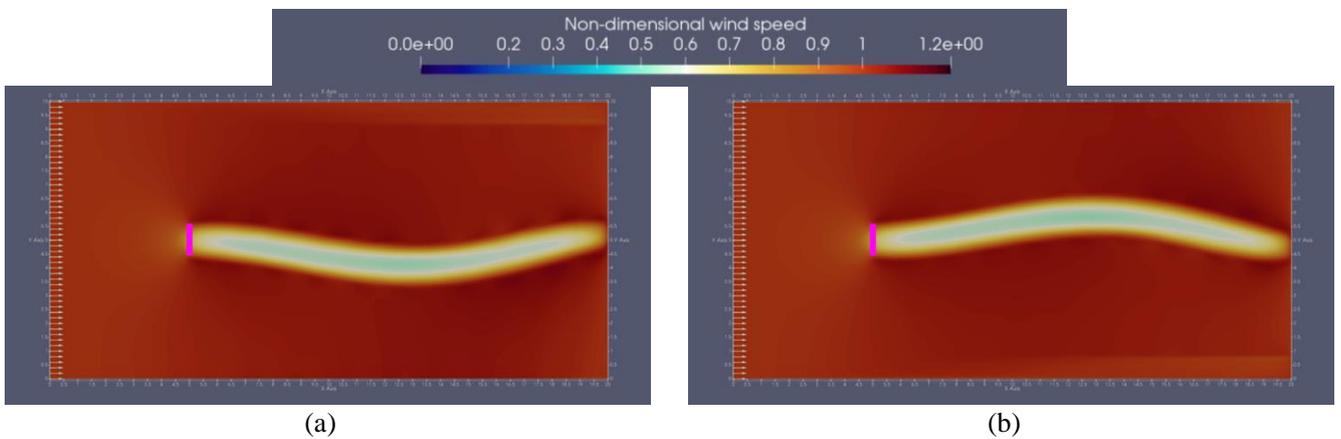


図 9 流入風向のみを変動させた流れ場の可視化結果:(a)無次元時間 $t^*=29.8$, (b)無次元時間 $t^*=37.2$

3.4 実際の風環境におけるウエイクの挙動

前節より、風速・風向が変動する状況では、ウエイクがそれぞれで特徴的な時間的な変化を示すことが確認された。そこで本節では、雄物川風力発電所の WT2 で観測された風速および風向の 1 秒データを計算領域の境界条件に課すことで、実際の風環境における風車ウエイクの挙動を観察した。シミュレーションの時間刻みと合うように WT2 の 1 秒データに線形補間を施し、計算領域の 4 つの境界すべてにディリクレ条件として与えた。

図 10 に、WT1 と WT2 で観測された、2018 年 11 月 30 日の 19:00~19:10 における風況データの時系列グラフを示す。ウエイクが確実に形成されるよう、データはブレードピッチ角が変化していない時間帯を選定した。左側の縦軸は風速で、右側の縦軸は SCADA の風向およびナセル方位角と 289 deg. の風向の相対値である。ナセル方位角の相対値は対象とする風向に対して -8~12 deg. の偏差があり、シミュレーションでナセル方位角を考慮するにはスライドメッシュを使用したり抵抗値を付与する格子点を工夫したりする必要があるが、本研究では簡略化のためナセル方位角の相対値を 0 deg. で設定した。図 10 から、風速と風向は 10 分の間で一定ではなく、常に変化していることが分かる。風速は WT1 の方が WT2 に比べて小さくなり、風向は WT1 においてその変動が大きくなった。これは WT2 のウエイクを WT1 が受けている証拠である。グラフを詳細に眺めると、 $t \approx 310$ s のときに WT2 で観測された瞬間的な風速の増加（以下、風速変動の波と呼称する）が、 $t \approx 360$ s のときに再び WT1 で観測されていることが分かる。一般的にニアウエイクの風速減衰が約 60% となるため、流入風速が約 10 m/s のとき波は離隔距離 277 m を約 6 m/s で進むことになり、WT1 に到達するまでに約 50 s を要する。すなわち、流入風速が約 10 m/s であるにもかかわらず、WT1 に到達するまでの 277 m に約 50 s を要しているのは、風速変動の波が WT2 のウエイクに連行されたことが主たる原因であると考えられる。

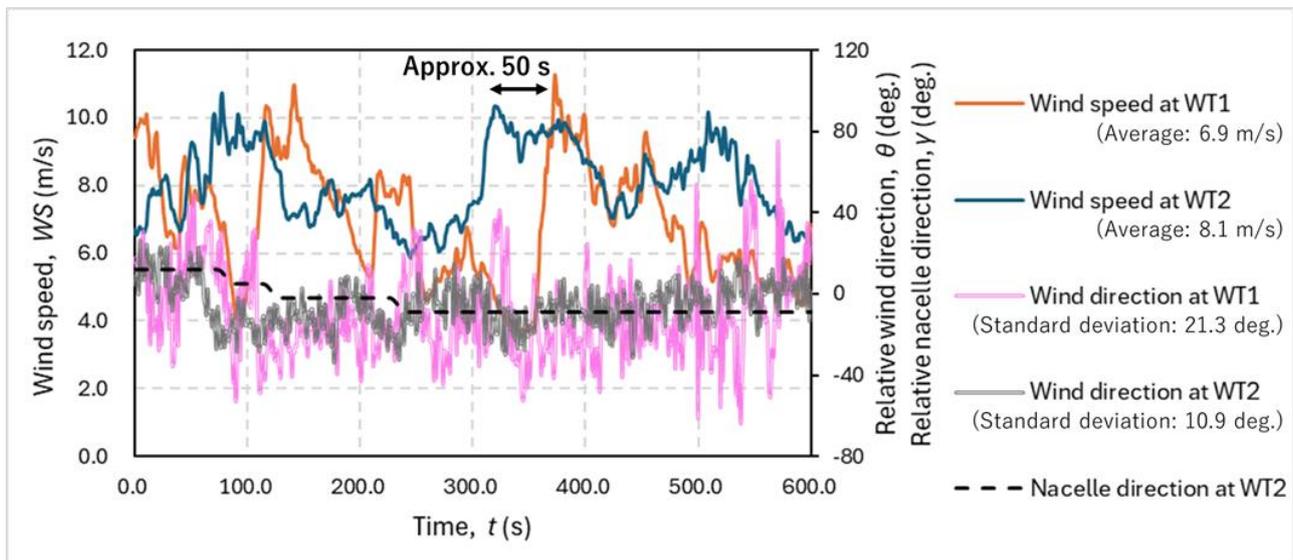


図 10 2018 年 11 月 30 日の 19:00~19:10 に風車ナセルで観測された 1 秒データの時系列グラフ

図 10 の風速・風向データを計算の境界条件に付与して計算する際、計算の発散を防ぐために無次元時間 $t^* = 10$ までは一様流を与え、また観測データに無次元時間で 1000 ステップ分を平均窓の幅とした移動平均を施した。図 11 は、計算結果と観測値を比較した時系列グラフである。図 11 (a) は時間の補正をしない場合で、計算結果をそのまま描画した。(a) では計算結果と観測結果に乖離があるが、よく見ると計算結果は流入風の変動に対して即時に変化しており、図 10 で観察されたような、風速変動の波が到達するまでの位相差が確認できない。これは、計算の境界条件をすべてディリクレ条件で設定していることが原因であると考えられる。つまり、境界に流入風の値を直接課したことで流れ場全体の変化が強制されることとなり、流れ場全体が流入風と同時に変動するため、計算結果には風速変動の波が到達するまでの位相差が現れないものと推察される。そこで恣意的ではあるが、図 11 (b) のように、計算結果

に対して無次元時間 $t^*=4.7$ (有次元時間で、約 50 s に相当) の時間のずれを与えた。結果として図 11(b)では、流れ場が発達してからの時間 $t^*>20.0$ において、WT1 の風速をよく再現できていることが確認できた。一方で $t^*=56.0$ で計算結果は観測値に比べて WT1 の風速を過小に予測する結果となっている。これはナセル方位角変化の影響や、2 次元計算において影響が無視されている、大気安定度や地形・地表面粗度、流入風のシア・ピアなどの 3 次元的な要素が影響した可能性がある。

図 12 には、数値計算から得られた風速場に関して、無次元時間 $t^*=42.0$ と $t^*=65.0$ の瞬間場を示す。流れ場は各ステップの流入風速で無次元化して表示した。図 12 を見ると、(a)の $t^*=42.0$ には WT2 から形成されたウエイクは WT1 には直接的に影響していない。これに対し、(b)の $t^*=65.0$ では WT1 は WT2 からのウエイクの影響を強く受けていることが見て取れる。このように実際の風環境では、常に風速と風向の変化があることで、対象とする WT に対してウエイク影響がある瞬間とない瞬間が存在し、その結果として WT1 に流入する風速が大きく変動したと考えられる。

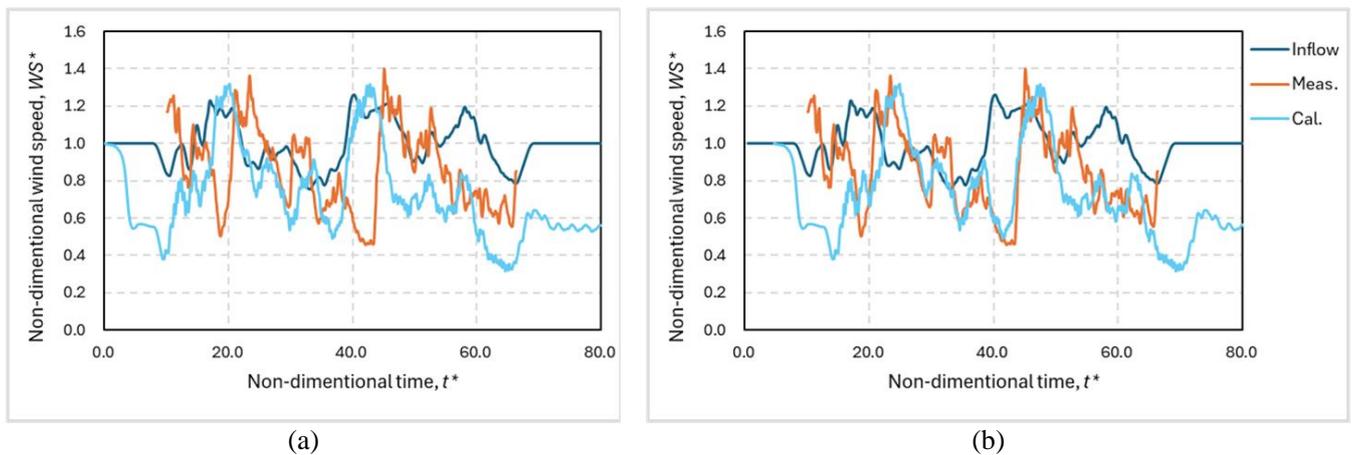


図 11 計算結果と観測結果の比較:(a)時刻補正なし, (b)無次元時間 $t^*=4.7$ の時刻補正あり

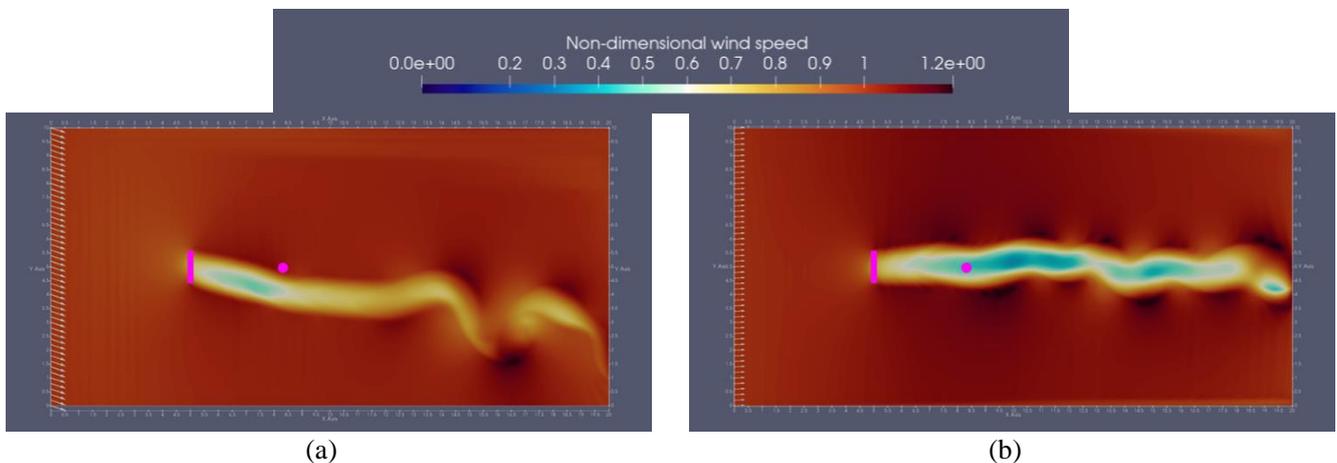


図 12 観測データを流入条件とした流れ場の可視化結果:(a)無次元時間 $t^*=42.0$, (b)無次元時間 $t^*=65.0$

4. おわりに

本研究では、最初に実サイトの風速・風向データを使用し、実際の風環境における風車ウエイクの分析を実施した。風車で観測された 10 分データの分析では、実際に風車ウエイクが生じていることを確認し、実測データから、ウエイクの影響が風向の標準偏差の大きさで変化することを明らかにした。風向の標準偏差が小さい場合には風上風車のウエイクを受けて風速が大きく低下した。風上と風下の 2 基風車で観測された風速比の最小値は $WS^*=0.65$ となり、Chamorro らの実験結果¹¹⁾と近い値となることが明らかとなった。逆に風向の標準偏差が大きい場合には風速比の最小値が増加した。ウエイクが影響する風向範囲が拡大する結果となり、実機風車のウエイクでは風環境の違いによ

て風下の風車への影響が異なることが確認された。

次に、実際の風環境における風車ウエイクの時間的挙動を解明するため、Porous-Disk モデルを風車のモデルに採用し、正弦波関数で変動する風速・風向を流入させた 2 次元の数値シミュレーションを行った。風速のみが変動する場合には、ウエイクは風車の背後において時間的に脈動したウエイクが形成され、時間平均した流れ場はウエイク中の風速がまばらとなった。一方、風向のみが変動する場合には、ウエイクが風車の後方で時間的に蛇行し、時間平均した流れ場ではウエイクが拡散した様相を示した。

最後に風車で観測された 1 秒データの分析を行い、1 秒データをシミュレーションの境界条件に与えて、より現実に近い計算を実施した。計算結果は流れ場全体が流入風の変動に対して同時に変化し、計算結果と観測結果に乖離が生じる原因となった。そこで計算結果に観測値と同等の時間のずれを与えると、計算結果は観測結果とよく一致し、海岸の平坦地形に建設されたウインドファームにおいて本計算手法の有用性が示される結果となった。実際の風環境を模擬した計算により、風速・風向の変動で実際の風環境では風車のウエイクが著しく変化する様子が観察された。その結果、風下側の風車にウエイクが影響する時間帯が頻繁に入れ替わって発生することが明らかとなった。

参考文献

- [1] Chamorro, L.P. and Porté-Agel, F.: Effects of Thermal Stability and Incoming Boundary-Layer Flow Characteristics on Wind-Turbine Wakes: A Wind-Tunnel Study, *Boundary-Layer Meteorology*, vol.136, pp.515-533, 2010
- [2] Wu, Y.T. and Porté-Agel, F.: Evaluation of Turbine Parametrisations, *Boundary-Layer Meteorology*, vol.138, pp.345-366, 2011
- [3] Qian, G.W., Ishihara, T.: A New Analytical Wake Model for Yawed Wind Turbines, *energies*, vol.11, 2018
- [4] Herges, T.G., Berg, J.C., Bryant, J.T., White, J.R., Paquette, J.A. and Naughton, B.T.: Detailed analysis of a waked turbine using a high-resolution scanning lidar, *J. Phys. Conference Series*, vol.1037, 2018
- [5] Uchida, T. and Gagnon, Y.: Effects of continuously changing inlet wind direction on near-to-far wake characteristics behind wind turbines over flat terrain, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol.220, 2022
- [6] Bao, T., Li, Z., Li, Y., Pan, Y., Chan, W.K.R., Pu, O., Huang, B., Tan, K., Pen, B. and Wu, H.: Wake measurement of wind turbine under yawed conditions using UAV anemometry system, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol.249, 2024
- [7] Foloppe, B., Munters, W., Buckingham, S., Vandeveld, L., van Beeck, J.: Development of a dynamic wake model accounting for wake advection delays and mesoscale wind transients, *J. Physics*, vol.2265, 2022
- [8] Medici, D., Ivanell, S., Dahlborg, J.A. and Alfredsson, P.H.: The upstream flow of a wind turbine: blockage effect, *Wind Energ.*, vol.14, pp.691-697, 2011
- [9] 内田孝紀, 澁谷光一郎, 2次元版 CFD Porous Disk Wake Model の開発と GPU シミュレーション - ドイツ Alpha Ventus 洋上風力発電所の実測データの再現性について -, 第 45 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.133-136, 2023
- [10] Kim, J. and Moin, P.: Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations, *J. Comput. Phys.*, Vol.59, pp.308-323, 1985
- [11] 梶島岳夫, 非圧縮流れのための上流補間法, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.60, pp.97-104, 1994
- [12] T. Kawamura, H. Takami and K. Kuwahara: Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, *Fluid Dyn. Res.*, Vol.1, pp.145-162, 1986
- [13] Uchida, T., Taniyama, Y., Fukatani, Y., Nakano, M., Bai, Z.R., Yoshida, T. and Inui, M.: A New Wind Turbine CFD Modeling Method Based on a Porous Disk Approach for Practical Wind Farm Design, *Energies*, vol.13, 2020
- [14] Sørensen, J.N. and Shen, W.Z.: Numerical modeling of wind turbine wakes, *J. Fluid Eng.*, vol. 124, pp.393-399, 2002