

[26]全国共同利用研究成果報告

<https://doi.org/10.15017/6796417>

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 26, 2023-03. Research Institute for Applied Mechanics,
Kyushu University

バージョン：

権利関係：



特定研究 4【新エネルギー力学分野】

日本型・洋上風力発電の導入に資するマルチスケール風況研究

A multi-scale atmospheric flow research that contributes to the
installation of Japanese-style offshore wind power generation

統括責任者：内田 孝紀（新エネルギー力学分野）

2050 年の脱炭素社会の実現に向け、特に切り札として期待されているのが洋上風力発電です。日本の過酷な環境に適した洋上風力発電を成功させるためには、広域から局所域におけるマルチスケールの非線形風況場を正確に理解し、それらを統合、将来予測する必要があります。

本特定研究では、大型流体実験設備(風洞/水槽)、数値シミュレーション、屋外計測から総合的にマルチスケールの様々な風況問題にアプローチし、得られた結果をデータサイエンス的アプローチ等を用いて統合化・普遍化することで新しい学理構築と産業界への貢献を目指します。

ウィンドファーム内の風特性が風車に及ぼす影響の基礎的研究

三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 前田 太佳夫

1. 目的

平均風速が高く、乱流強度が低い海上で運転する洋上風車は、陸上風車と比べて発電量が高く、出力の変動も小さくなる。一方、離岸距離が近い洋上風車は、風向によって風車への流入風の特性が変わる。例えば我が国の太平洋沿岸に洋上風車を建設した場合、南東風は太平洋上を吹送してくるため乱流強度が小さく、北西風は日本列島を通過してくるため地形の影響により乱流強度が大きくなる。

風特性は、風車の運転制御や寿命に影響を与える。とくに、洋上風車では、海象条件により、故障時のアクセスに課題があるため、風車の信頼性向上が陸上風車よりも一層求められる。したがって、風特性が異なる場合の風車挙動を把握することは、今後の洋上風車の導入促進において重要である。

本研究では、洋上風車の導入促進に資するため、風特性が風車に及ぼす影響を明らかにした。

2. 観測データ解析方法

本研究では、ウィンドファーム内に設置されたロータ直径 80 m の風車のナセル上部に設置されている風速計で観測された 1 秒データを解析した。1 秒データを利用した理由としては、本研究で注目している風車ブレードのピッチ角制御は常時行われているため、風力発電分野における一般的な平均化時間である 10 分ではピッチ角制御を考察できないためである。この観測風のデータを整理することにより、平均風速や乱れを計算し、ピッチ角制御との関係を考察した。

3. 数値解析方法

本研究では風車に流入する風の広範囲な分布などを調べるため、九州大学応用力学研究所開発の RIAM-COMPACT で解析を行った。

海風と陸風を風車に適切に流入させるため、計算領域は洋上から陸までの広い範囲を設定し、主流方向(x)、主流直交方向(y)、鉛直方向(z)にそれぞれ $55\text{ km} \times 10\text{ km} \times 3.984\text{ km}$ の空間を設定した。計算領域内の最大標高は 836.97 m 、最小標高は -0.89 m である。解析方位は 16 方位とした。地形標高データは、国土地理院発行の空間解像度 10 m の標高データを用いた。解析メッシュ数は、主流方向、主流直交方向、鉛直方向にそれぞれ $800 \times 200 \times 40$ であり、総メッシュ数は $6,400,000$ である。水平面内 (x 方向および y 方向) のメッシュ幅はウィンドファーム中心で密となる不等間隔であり、最小メッシュ幅を x 方向が 23.42 m 、 y 方向が 18.63 m とした。鉛直方向(z)のメッシュ幅は地面近傍が密となる不等間隔であり、最小メッシュ幅を 2.51 m とした。流入境界面にはべき法則に従う風速分布を与えた。本研究では、べき指数 α は、海風は地表面粗度区分Iに従う $\alpha=0.10$ 、陸風は地表面粗度区分IIに従う $\alpha=0.15$ を用いた。流入風速は本サイトの年間平均風速に近い 8.0 m/s を与えた。地表面には粘着条件、側方境界面と上部境界面には滑り条件、流出境界面には対流型流出条件を課した。ここで、代表長さスケールは解析領域内の最大標高と最小標高との標高差であり、本解析領域においては 837.86 m となる。また、代表風速スケールは流入境界面の最大標高位置における風速とした。

4. 結果と考察

本報告では、ウィンドファーム内の代表的な2基の風車 WT-A と WT-B の風特性について示す。実機データから、WT-A は陸風時のピッチ角制御と海風時のピッチ角制御の違いが大きいのに対して、WT-B は陸風時と海風時とでピッチ角制御の違いが小さい。このときの風特性をまとめると表1のようになる。本サイトでは、陸風の乱れが大きい風車は風向によるピッチ角制御の違いが大きくなり、海風の乱れが大きい風車は風向によるピッチ角制御の違いが小さくなると推察される。

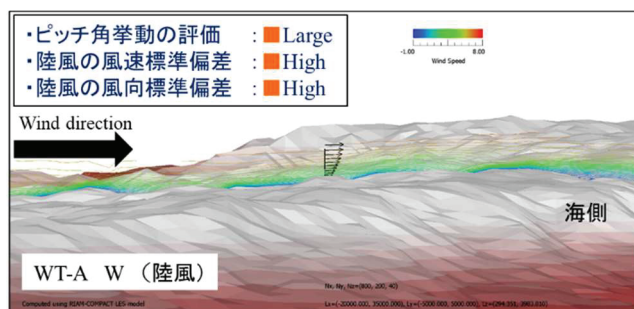
表1 2基の風車のピッチ角挙動と風特性の関係

	WT-A		WT-B	
	陸風	海風	陸風	海風
陸風と海風とのピッチ角制御の違い	大		小	
風速標準偏差	高	中	低	高
風向標準偏差	高	中	低	高

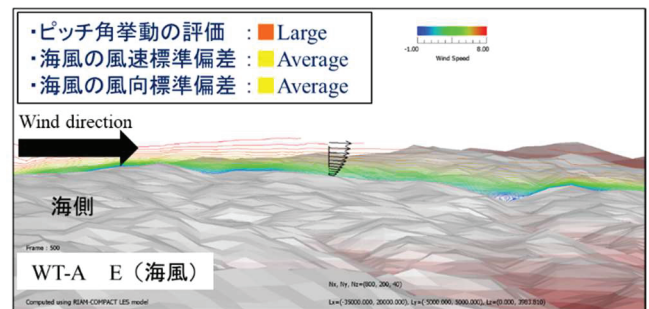
図1は陸風に対するWT-AとWT-Bの解析結果である。WT-Aの上流風は、WT-Bの上流風と比較して、等値線の間隔が狭く、速度勾配が急であることがわかる。また、表1の陸風の観測データからは、WT-Aの風はWT-Bの風と比較して乱れていることがわかる。これらのことから、陸風に対する解析結果は、観測結果と傾向が一致していることがわかる。

図2は海風に対するWT-AとWT-Bの解析結果である。WT-Bの上流風は、WT-Aの上流風と比較して、等値線の間隔が少し狭いため、速度勾配も少し急であることがわかる。また、表1の海風の観測データからは、WT-Bの風はWT-Aと比較して、少し乱れていることがわかる。これらのことから、海風に対する解析結果も、観測結果と傾向が一致していることがわかる。

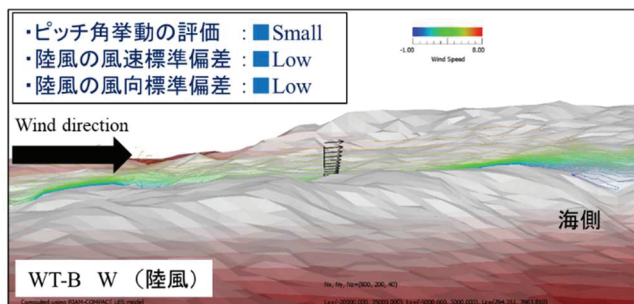
以上より観測値と解析結果から、風特性がピッチ角制御へ及ぼす影響について示すことができた。



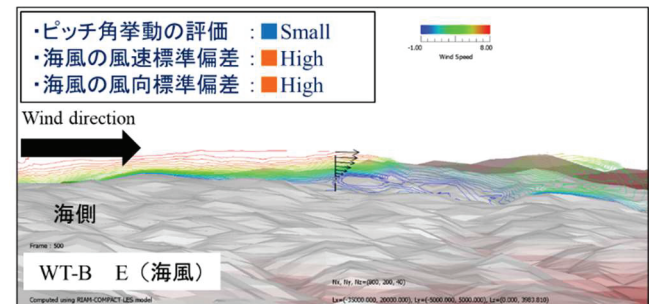
(a) WT-A に陸風が流入するとき



(b) WT-A に海風が流入するとき



(b) WT-B に陸風が流入するとき



(b) WT-B に海風が流入するとき

図1 陸風の解析結果

図2 海風の解析結果

ドローンによる風況場局所計測に向けた乱流時空間構造解析

日本大学生産工学部 佐々木真

背景と研究目標

地球温暖化に対応すべく、脱炭素のクリーンなエネルギーの開発は急務の課題である。プラズマによる核融合の長期的なエネルギー開発から、太陽電池・地熱・水力・風力発電等の開発等が行われている。これらのエネルギー開発において、しばしば乱流の時空間構造が鍵となる。

本研究では、特に風力発電で問題となる乱流時空間構造に着目し、その計測に向けた準備を行った。風力発電では、風車後方に発生するウェイク構造の発生によって、発電効率が低下してしまう問題があり、ウィンドファーム等の複数の風車を設置する際の大きな問題となっている。ウェイク構造やその形成過程の実測が求められる。

風車近傍には風力計を置く事ができないため、乱流場の直接計測は容易ではない。そこで、ドローンによる風計測手法の構築を行なっている[松浦、荒川：島根大修士論文 2022]。これまでにドローンの計測性能等が明らかになってきた。

本研究では、風車近傍の乱流シミュレーションデータにドローンの計測性能を考慮し、計測可能な時空間構造を明らかにし、計測の指針を得ることを目指す。

対象とするドローンの風計測性能

本研究ではドローンは DJI 社製の Mavic Mini を対象とした。本ドローンの時間変化を伴う応答測定をした実験が島根大学にて行われ、実験では、風洞から送られる風をプロペラシャッターの回転によって 0.2Hz から 10Hz の風速変調を与え、ドローンと超音波風速計での測定結果の比較がなされた。周波数が大きくなるにつれドローンは超音波風速計よりも振幅が小さくなる、一方で位相差は大きくなり誤差も大きくなった。約 10Hz の変調までは応答が確認できたが 10Hz より早い変調でははっきりとした応答は得られなかった。この結果により、ドローンの測定可能領域を 10Hz とし、10Hz 以上の高周波数成分を除去することで計測信号を模擬する。

風車乱流シミュレーションデータ

使用したデータは、Fig.3 のように直径 $D=88\text{m}$ の風車に 8m/s の風が当たった場合の乱流シミュレーションによって得られたデータである。各座標値は半径 $R=44\text{m}$ で規格化し、格子解像度は

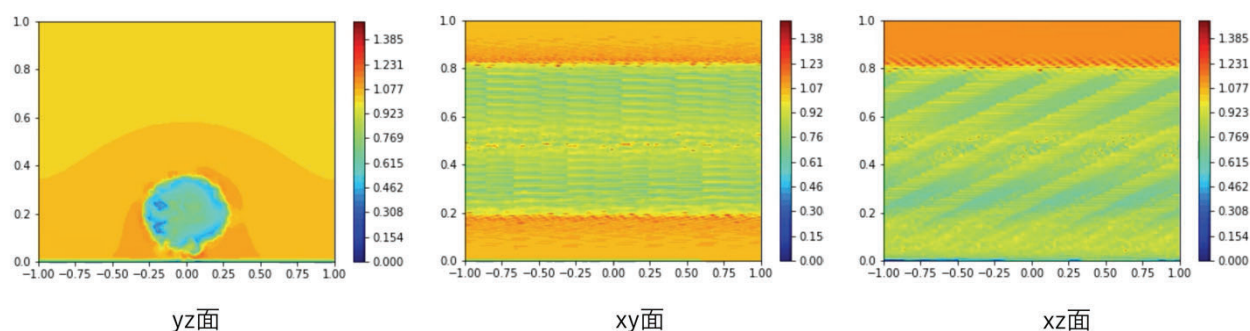


図 1: シミュレーションデータのスナップショット (内田博士提供)

0.44m である。X 方面は風車中心から下流に 440m の計算領域となる。また、風向きも北、東、上昇のそれぞれ三成分ある。図 1 にデータのスナップショットを示す。本データは内田博士(九大応研)よりご提供頂いたものである。

特異値分解による計測可能構造の抽出

シミュレーションデータに特異値分解を適用し、乱流の時間・空間構造をモード分解した。本モード分解は、一般行列の対角化に相当する数学的操作であり、乱流データを直交基底にて分解する事が可能である[e.g. 佐々木, プラズマ核融合学会 2021]。基底となる直交関数はデータ駆動的に得られるものであり、データを表現するに最適な基底が選ばれる。

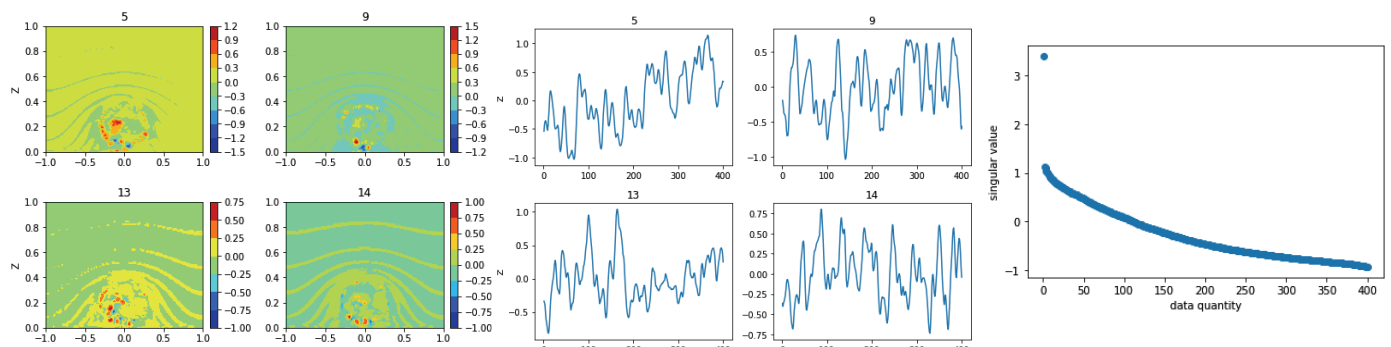


図 2: シミュレーションデータの特異値分解結果
(左図：空間構造、中央図：時間発展、右図：特異値スペクトル)

本モード分解を行なった結果を図 2 に示す。モード毎に空間構造とそれに対応する時間発展、及びそのモードの振幅に対応する特異値が得られる。時空間データとそのモードの特異値をかけ、そのデータをフーリエ変換し、遮断周波数を 10Hz として

高周波成分を除去した。フィルタリングをしたデータと元データ比較し、誤差率 50%以下のもの測定対象とする。ここで、誤差は以下の式により評価した。

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\int (y_{\alpha}(t) - x_{\alpha}(t))^2 dt}{\int y_{\alpha}^2(t) dt}$$

ここで α は特異値モード番号であり、 y_{α} は模擬信号、 x_{α} はシミュレーションデータである。誤差率 0.5 以下の空間構造から、ドローンで計測可能な低周波の空間構造を得た。ドローンで計測可能な乱流構造は風車の近くに局在している事がわかった。

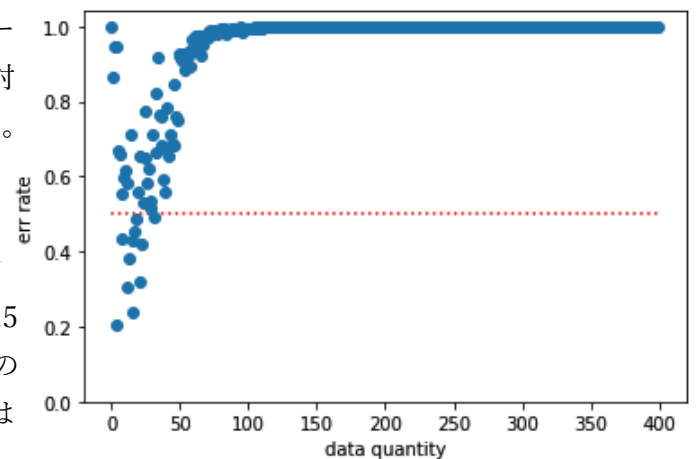


図 3: 特異値モード毎の計測誤差分布

まとめ

風車近傍における乱流シミュレーションデータをもとに、ドローンで計測可能な乱流構造の同定を行った。特異値分解を用いて、時空間構造の分解を行い、分解された時間発展から低周波が支配的な乱流構造を同定した。計測可能な構造は、風車の縁近くに局在しており、これらの流れは測定が数 10%程度の誤差範囲での計測が可能である。

揺動受風を考慮した垂直軸風車の空力特性に関する研究

弘前大学・地域戦略研究所 久保田 健

目的

我々の研究グループでは、図1に示す形状特徴を有する垂直軸風車について空力性能観点での風車仕様の検討、ならびに実装に向けたシステム化とその性能検証や長期実証実験を行っている。この風車は8枚の直線翼から構成された抗力式風車で大きなソリディティを有しており、揚力式垂直軸風車のダリウス型や直線翼型と比べると最大パワー係数はかなり小さい。一方、低周速比域で大きなトルク係数を示し低風速でも始動・回転できることから、揚力型風車では不適とされるような風況地帯でも利用できる可能性がある。

今回、青森県沿岸域の養殖生簀に環境モニタリング用のマイクロ電源システムの給電デバイスとして、この垂直軸風車を波浪の影響を著しく受ける小型浮体に設置したと仮定、揺動させた際の風車性能を実験的に調査した。

実験方法

風洞実験は地球大気動態シミュレーション実験棟にて行い、基本設定風速は7m/sとした。風車は直径 Φ 、スパン長ともに300mmで上下の天板は $\Phi 310\text{mm}$ 、板厚は1mm（材質：A5052）であって、図2に示すように回転軸は片持ちで支持している。トルクと回転速度はロータリーエンコーダ付きのトルクメータ（ユニパルス社製UTMII-1NmR）で計測し、電磁ブレーキ（小倉クラッチ社製ヒステリシスブレーキHB-10）で周速比を調整しながらデータロガー（グラフテック社製GL-900）で記録した。

揺動機構はラック&ピニオン（オリエンタルモータ社製

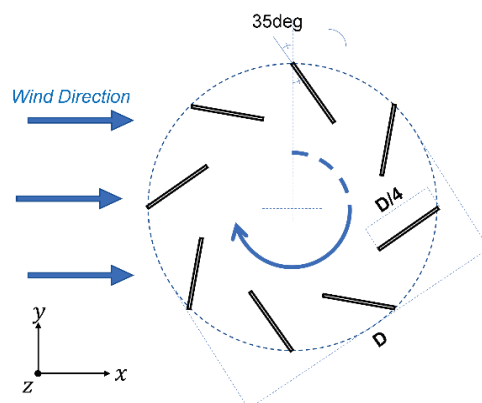


図1 垂直軸風車（8枚翼）の基本形状の断面図と各部位の仕様。



図2 上流側に18deg傾斜固定時の実験システムの外観。

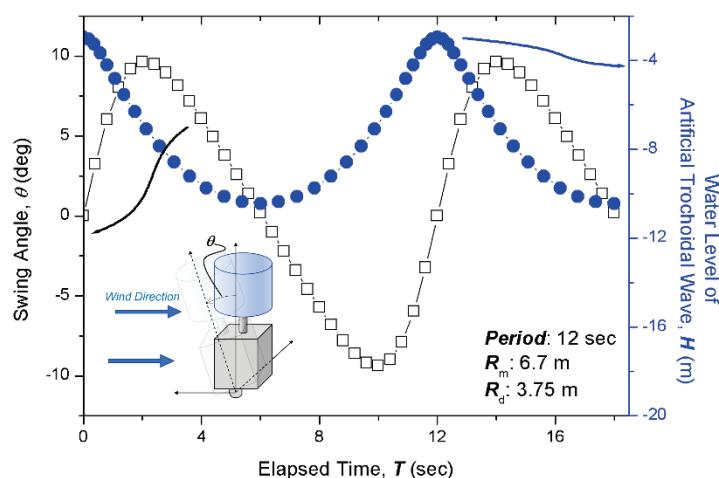


図3 トロコイド波揺動時における風車システム傾斜角の時間変化、ならびにモデル波形（波高7.5m）。

LM4F40AZMC-4）を用いて組上げ、揺動パターンは1周期12secおよび24sec、揺動角は最大で18degとした正弦波ならびにトロコイド波相当の動きを与える昇降運動を、スライダ・リンク機構を介して風車架台を動かすことで行った。ただし、これら揺動パターンは1周期を30区間に分割（周期12secであれば0.4sec/区間）し、都度変化する定速度昇降運動を連結した近似的なパターンで構成され、図3に例示する周期12secトロコイド波のような揺動角の

時間依存性をとる。揺動開始点は揺動角 $\theta=0\text{deg}$ であって、まず上流方向へ傾倒、最大傾斜角に到達後の復元時に始点の 0deg を経由して後流側最大傾斜角（図3の極小値）を経て再び 0deg に還り1周する。実験では3周期の連続運転を計測した。なお、設定波浪周期 12sec は、青森県津軽半島北部における30年確率波を参考に、波高はシステムの最大傾斜角が 18deg となるように設計した形式的な波である。

結果と考察

図4には傾斜角を $\pm 18\text{deg}$ 、 $\pm 8\text{deg}$ 、 0deg と5条件で固定した際の風車のパワー係数について周速比別にまとめた図を示す。ここで、傾斜角 $\pm 8\text{deg}$ ならびに $\pm 18\text{deg}$ は、風車に対して流入する風の水平風速成分がそれぞれ99%、95%に減ずる設定角であって、エネルギー換算ではおよそ97%、86%に相当する。この風車は基本姿勢(0deg)であれば周速比0.35付近にて極大値 $C_p=0.083$ が得られる。図から、周速比に対するパワー係数変化については基本姿勢とおおよそ同等の傾向が見てとれるが、後流側にわずかに傾斜した場合にパワー係数が極大点を示す傾向が現れている。

固定された風車に流入する水平風速成分は、幾何学的には $\pm 8\text{deg}$ あるいは $\pm 18\text{deg}$ で符号によらず同様であるものの、流れに対しての前方/後方傾斜で性能が異なる点は三次元的な風の流れ（スパン方向の変化）を受けたと推察するが、実証実験に先駆けて興味深い知見が得られたと認識でき、かつ、後流側に若干傾斜した状態で高い空力性能が得られる点は抗力式風車の利用において、受風時に常に後方傾斜する姿勢制御に有用な知見といえる。

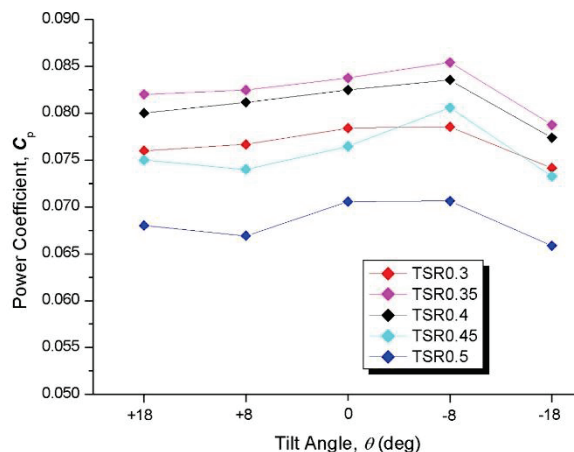


図4 傾斜角固定時のパワー係数の変化挙動。

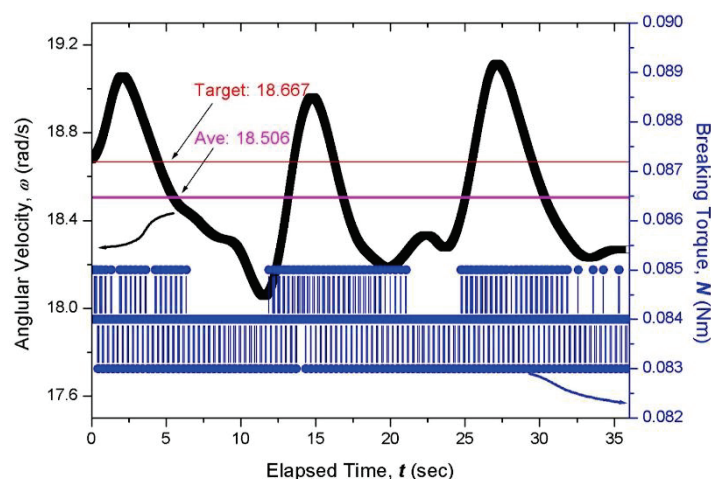


図5 揺動周期 12sec 、最大傾斜角 9.5deg 時の角速度変化と制御ブレーキトルクの経時変化。

図5には、実験データの一例として揺動周期 12sec 、最大傾斜角 9.5deg 時の風車回転角速度とブレーキトルクの経時変化を示す（初期設定周速比： $0.4=18.667\text{rad/sec}$ ）。ここからまず、電磁ブレーキは相対風速が変化する中でほぼ一定値として機能していることがわかる。角速度については、1周目は過度状態にあると考えられるが、慣性モーメントの影響を受けつつもおおよそ相対風速に追従した挙動を示し、上流に傾斜した際は増速、下流で減速が見てとれる。2~3周目の区間平均周速比は 0.397 であった。揺動影響でわずかに周速比が低下する傾向は 24sec 周期のトロコイド波ならびに正弦波でも確認されており、時間応答性等について今後詳細に解析を進める。

まとめ

抗力型垂直軸式のマイクロ風車を小型浮体に搭載した際の性能確認として、風車を傾斜ならびに揺動させた際の空力性能を実験的に調査、抗力で流れ後方に僅かに傾斜した姿勢で良好な空力性能が得られるとの知見を得た。

謝辞

本実験の遂行に際し、弘前大学技術職員の葛西 昭治氏、ならびに九州大学応用力学研究所技術職員の松島 啓二氏には格別なるご助力を賜りました。この場を借りて感謝申し上げます。

我が国の洋上風力発電におけるリスクと対策に関する研究

弘前大学 地域戦略研究所 本田明弘、理工学研究科 笹沼菜々子

目的

今後予想される風車の動向から我が国で予想されるリスク要因のうち、風車後流の発電量および安全性の両面から検討を加える。

実験方法

複雑地形に立地する陸上風車 2 基を研究対象とし、観測データおよび CFD モデルを用い風下風車のウェイク影響を定量的に検討した。

実験結果

1) 実測値における風速比

対象とした観測データは 2015 年 9 月から 2017 年 12 月の 2 年 4 か月分の 10 分平均毎の風データとした。後流の有無による対象風向での風速比の比較をすると、後流での 35% 低減が判明した。

2) CFD モデルを用いた検討

九州大学応用力学研究所が開発した流体力学 CFD モデルを用いた風況 simulation のリアム・コンパクトを用いた。Fig1 には、風車①に後流モデルのポーラスディスクモデル¹⁾を入れて計算した対象風車 2 基とその風車間の瞬間場の風速プロファイルを示す。図の左側に 1~6 の観測地を配置し、1 の地点は風車②、2 は風車①に対応する。また、3 と 4 は風車①と風車②の間を其々 1/3, 2/3 した位置に配置した。6 は風車①の流入風を確かめるため、配置した。Fig1 の右図は、No.1,2,6 の風速の鉛直プロファイルを示す。

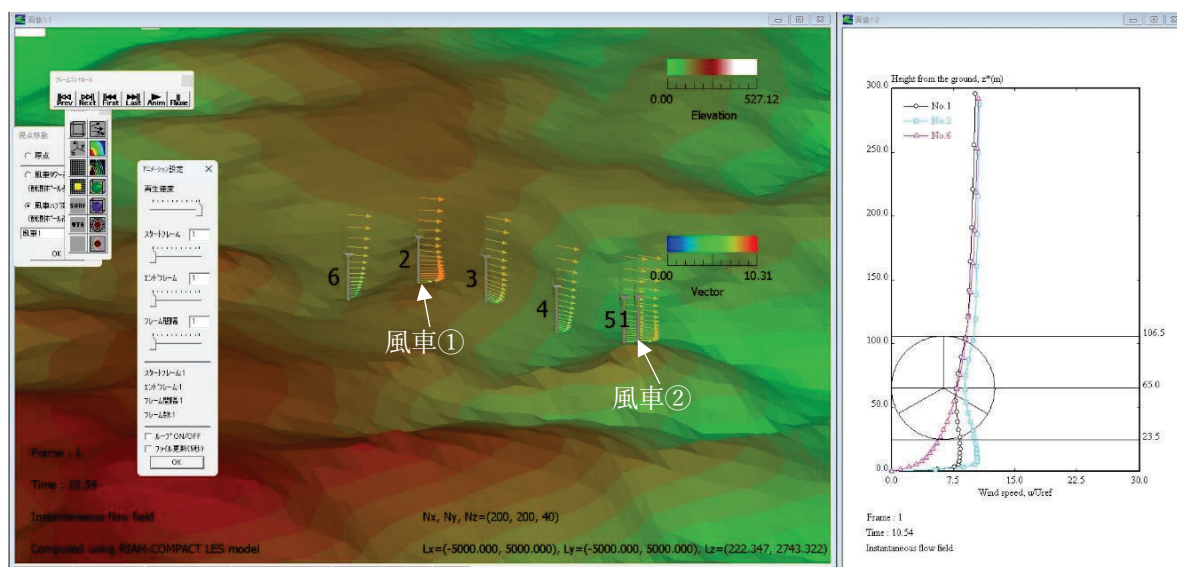


Fig. 1 Vertical wind flow of 風車① and 風車② when it is considered turbine wake
(Left: Vertical wind flow vector and surroundings, right: Vertical wind flow of two wind turbines and inflow)

風車①の風速プロファイルがハブ中心に行くに従い風速が減速していることが判る。これは、右図でも確認でき、特に風車②で S 字の風速分布が表れている。

考察

実測値とシミュレーション結果より、風車①の後流により風車②の風速低減が確認できた。これを時刻歴の風速比（風車①/風車②）を地形のみ（後流モデルなし）と後流モデル有で計算した結果を下図に示す。平均値を確認すると、後流有りは地形のみに比べ、約 22% 風速が減少し、実測値に比べると風速の低減率がやや小さい。より定量的に比較するため、シミュレーション結果から時刻歴の風速変動を確認した。Fig2 に時刻歴の風速比（風車①/風車②）を地形のみ（後流モデルなし）と後流モデル有で計算した結果を其々プロットしたものを示す。それぞれの平均値を確認すると、地形のみで 7.2m/s、後流有りで 5.6m/s であった。後流有りは地形のみに比べ、約 22% 風速が減少した。実測値の減少率に比べ、約 37% 過小評価している。要因として考えられることとして、対象範囲があげられる。実測値では 32 分割した際の 1 方向を対象としているが、シミュレーションでは 16 分割と広範囲での結果となり、後流の影響を過小評価している可能性がある。また、現地の環境は樹木に覆われ起伏が激しいものであり、シミュレーション内でその地形の複雑度を正確に再現できていないと考えられる。解決策としては、対象範囲のメッシュをより細かくし、実際の地形に近い環境に近づけることである。また、地形による風速変動を把握し、後流による風速低減を評価する必要がある。

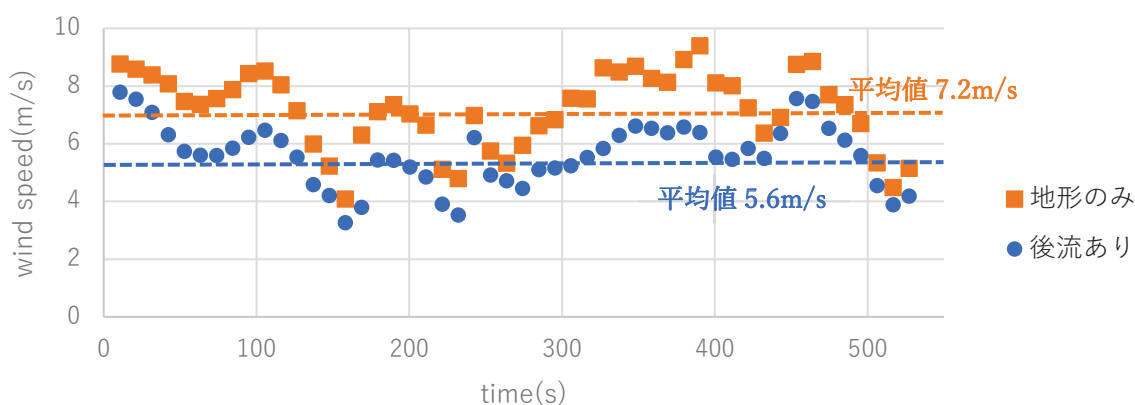


Fig. 2 Comparison of wind speed ratio(風車② / 風車①) between when it's considered wake and without

研究成果報告

参考論文

1) Takanori Uchida *et.al*, *Doppler Lidar Investigations of Wind Turbine Near-Wakes and LES Modeling with New Porous Disc Approach*, Energies. 14(2021)

研究組織

- ・九州大学 応用力学研究所
- ・弘前大学 地域戦略研究所

産業用ドローンによる気象観測システムの構築

海上保安大学校基礎教育講座 近藤文義

1. 実験目的

本研究では様々な地表面における内部境界層の発達状況を明らかにするため、地表面から高さ 150 m までの一般気象要素（風速・風向・気温・湿度・気圧）の鉛直分布を計測することのできるドローンによる気象観測システムの構築を目的とした。選定した産業用ドローンは、多くのユーザーが利用できるよう国内において圧倒的なシェアを占めており高性能で安全性の確認実績が多数ある DJI 社製の Matrice 300 RTK とし、図 1 のように風速・風向・気温・湿度・気圧を計測する小型気象観測システム（Gill 社, MaxiMet GMX500）をドローンの上部に、CO₂ と H₂O 濃度を計測する NDIR ガス分析計（LI-COR 社, LI-840）とデータロガー（Campbell 社, CR800）を下部にそれぞれ固定、任意の地点における一般気象要素を計測することができる観測システムを構築した。本研究では、GMX500 による風速と風向の計測値が、構造物としてのドローン自体によってどのように影響を及ぼされるのか、またドローン飛行時にプロペラの回転により生じる風の影響を明らかにするための評価実験を実施した。

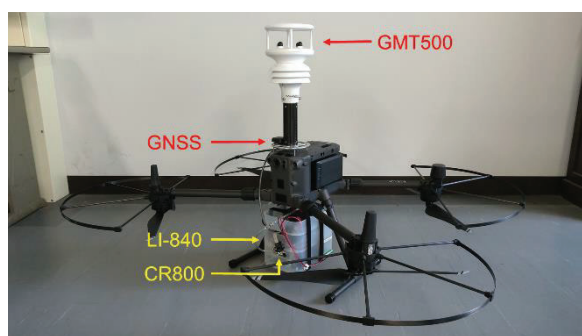


図1 構築したドローン気象観測システム

2. 実験方法

本実験では、任意の風速場を発生させることができる大型境界層風洞を用いて、風速・風向を定量的に評価した。風速は 1 m/s から最大 10 m/s までの範囲で 1 or 2 m/s ずつ変化させ、風向はドローンの姿勢（Yaw 角）を 45° ずつ変えることで全水平方向に対して評価した。風速の測定高度による影響を受けないようホバリング時に GMX500 の風速測定部が風洞の床から高さ 1.50m となるように維持した。



図2 境界層風洞による実験の様子

3. 実験結果

図3はドローンの姿勢（Yaw）角を0～360°まで45°ずつ、また風速を2～10 m/sまで2 m/sずつ変化させた時の風洞内の風速に対するドローンを床に置いた状態で風速計が計測した風速値の相関図を示す。実験結果、ドローンの姿勢角によってドローンが計測する風速に有意な差は認められなかった。またドローンの姿勢角を0°とし、風速計を取り付けたパイプの長さを0.2、0.4、0.8 mとした時にはパイプが長いほど計測される風速値は大きくなったが、風速計の計測精度（±3%）の範囲内であった（ドローンの姿勢角を変えたとしても同様の傾向であった）。

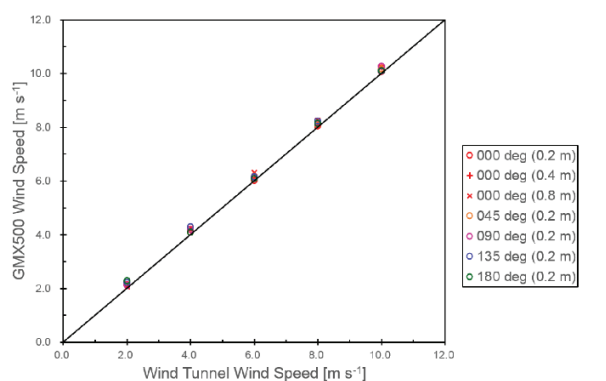


図3 風洞内の風速に対するドローンを床に置いた状態で風速計が計測した風速の相関図

図4はドローンの姿勢（Yaw）角を0～360°まで45°ずつ、また風速を1～10 m/sまで1 m/sずつ変化させた時の風洞内の風速に対するドローンを風洞内でホバリングさせた状態で風速計が計測した風速値の相関図を示す。実験結果、ホバリング時のドローンが計測する風速は風洞内での風速より過大評価した。この原因は、ホバリング時にプロペラが回転することによって生じる風の影響を受けたことによるものである。ドローンの姿勢角（風向）に対して有意な差はみられなかったものの、風速が増加するにつれてばらつきが小さくなり、特に、4 m/sまで大きくばらついている。これは5 m/s以上ではドローンの位置が水平・鉛直ともに安定していたことが原因と考えられる。また、プロペラが回転することによって生じる風が床面により乱れをつくり、風速毎のばらつきを生じさせた可能性があるため、測定高度毎による影響を今後確認する必要があると考えられる。

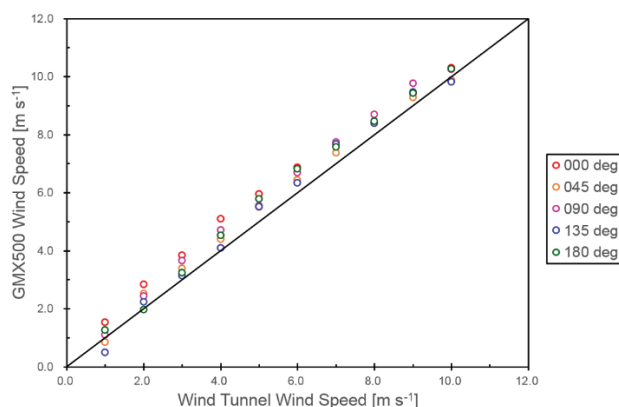


図4 風洞内の風速に対するドローンをホバリングさせた状態で風速計が計測した風速の相関図

4. 研究組織

研究代表者・近藤文義（海上保安大学校）／ 研究世話人・内田孝紀（九州大学）