

令和 3 年 5 月 30 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05013

研究課題名(和文) 密集配置をした小形垂直軸風車のウインドファームに関する数値流体力学解析と風洞実験

研究課題名(英文) Computational fluid dynamics analysis and wind tunnel experiments on a wind farm consisting of closely spaced small vertical-axis wind turbines

研究代表者

原 豊 (Hara, Yutaka)

鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号：60242822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：主として、近接する2つの小形垂直軸風車の模型を使った風洞実験と数値流体力学解析(CFD)を実施し、風車ペアの特性に対する風向と風車間距離の影響を調べた。回転数挙動において、実験と数値解析で定性的に一致(平均回転数は互いに逆回転より同方向回転の方が高いなど)が見られたが、2次元数値解析に比べて、3次元の実験における風車後流が大きく偏向した。また、互いに逆回転する2風車間で位相同期現象を観測し、その原理を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小形垂直軸風車のウインドファームは、単位面積当りの出力において、大形風車のウインドファーム以上に高くなる可能性があり、そのベースとなる2風車間の相互作用を調べることは、重要である。本研究では、2つの風車間距離を風車直径程度に近接すると出力が最大で22%程度増加する結果が得られており、このような知見に基づき、最適配置が探索できれば、低発電コストの再生可能エネルギーの導入促進に貢献できると期待される。

研究成果の概要(英文)：To investigate mainly the effects of wind direction and distance between wind turbines on the performance of a wind turbine pair, wind tunnel experiments using two small vertical-axis wind turbine models closely installed and computational fluid dynamics (CFD) analysis had been conducted. Regarding the rotation speed behavior, qualitative agreement was found between the experiments and the numerical analysis, such as the finding that the average rotation speed of a turbine pair rotating in the same direction is higher than that in the opposite direction. However, the wake of a three-dimensional experimental wind turbine was deflected greater than that of a two-dimensional numerical turbine model. A phase synchronization phenomenon was observed in the cases of turbine pairs in which each turbine rotates mutually in opposite direction, and the principle was made clear in this study.

研究分野：風車工学，流体力学

キーワード：小形垂直軸風車 密集配置 風力発電 再生可能エネルギー 数値流体力学 風洞実験 剛体運動予測モデル 動的相互作用

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

風力発電は大形化するほど発電効率が増加して発電コストが減少する傾向を持つ。また、垂直軸風車と比べて、プロペラ式の水平軸風車は一般に効率が高いため、風力開発の主流は水平軸風車の大型化にある。しかしながら、風車によってエネルギーを奪われた空気の流れ、すなわち風車の後流（ウェーク）は、その流速が減少し、流速回復には距離が必要であるため、通常のウィンドファームでは風車間隔は風車直径の10倍程度に長く取る必要がある。また、風車の大型化は景観の問題などから立地条件が厳しく制限されることに繋がり、大形の翼やタワー部材の運搬・組み立てに大きなコストが必要となる。これに対して、小形風車は小さいゆえに運搬性や導入性において優れ分散型電源として期待は高いが、大型化による発電コスト低減とは逆方向にあるため、未だに発電コストは高く普及に至っていない。このような状況において、米国のダビリ[1],[2]は、魚の群れが間隔を狭めて泳ぐことで後流に発生する渦の相互作用をうまく利用して遊泳効率を上げている様子を模擬し、小形の垂直軸風車を市松模様様に密集させて配置することによって、大形の水平軸風車に比べて大幅にウィンドファームにおける単位面積当たりの発電出力 $[W/m^2]$ を向上させる可能性を示した。ダビリの研究グループが行った実証実験では、互いに逆向きに回転する垂直軸風車のペアを市松模様様に配置しており、その実験機は高さが9.1mあり（風車直径： $D=1.2\text{ m}$ 、風車高さ： $H=6.1\text{ m}$ ）、定格出力が1.2kWである市販風車を用いていた。彼らの研究結果によれば、水平方向から後流に回り込んで流入してくるエネルギーが、後流の上空から流入してくるエネルギーよりも5倍程度大きいことが報告されている[3]。ダビリらの実験結果は特定タイプの風車に対して得られたものであり、風車形状によって計測結果が変わる可能性があることも言及されていた。本研究では、特に風車のアスペクト比（縦横比： $H/D$ ）が変わった場合に、結果がどのように変わるのかに学術的「問い」を持った。一般的な垂直軸風車としては、アスペクト比は $H/D=1$ 前後が多く、後流回復の主要因として、上空からの乱流エネルギー流入がより重要になる可能性が推測されるためである。

## 2. 研究の目的

本研究では、ダビリらが使用したアスペクト比の大きな縦長風車とは異なり、アスペクト比が1以下の横長風車を仮定し、ミニチュア風車モデルを用いた風洞実験と数値流体力学解析(CFD)によって、小形垂直軸風車の密集配置の仕方による出力の違いと後流の挙動を調べる。特に後流回復の流体物理現象に着目し、最適な風車配置に関しての知見を得ること、および小形風車の密集配置の有効性を明らかにすることを目的とする。ダビリらは自然環境の中で実機の実測を行ったが、本研究では風洞実験と数値解析を行うことで、乱流強度などの流入条件を明確に設定した実験や解析を行う。ダビリらの研究グループは、ポテンシャル流理論（線形理論）をベースとした解析を行っているが、本研究では、より現実的な粘性と非定常を仮定したCFD解析、特に風車と流れ場の動的相互作用を考慮に入れた数値解析を実施する。

## 3. 研究の方法

風洞実験においては、図1に示す、3Dプリンタで製作した垂直軸型ミニチュア・バタフライ風車を用いた。風車直径は $D=50\text{ mm}$ 、高さは $H=43.4\text{ mm}$ である。翼弦長 $c=20\text{ mm}$ の対称翼型断面の翼3枚から構成される。図2は風車ペアの風洞実験の様子を示しており、2つの模型風車を5mmの間隔( $gap=5\text{ mm}$ )で近接配置した状態である。各風車には回転開始の補助と発電機負荷の代わりとして使用する直流モータを取付けてあり、モータ台座は風車間距離と主流に対する風車ペアの向き（別表現すれば風車ペアに対する風向）の両者に関して調整可能とした。

CFD解析における風車モデルは、実験模型風車の中央断面に相当する2次元ロータとし、中央部（ハブ）と斜翼部分を無視して3つの翼型断面のみで構成した。計算ソフトウェアは商用のSTAR-CCM+を使用した。流体と物体の相互作用を考慮する（流速変化に伴い風車回転数を変化させる）ため、STAR-CCM+が備えるDFBI(Dynamic Fluid/Body Interaction)モデルを使用し、乱流モデルとしてSST  $k-\omega$ を採用した。

風車ペアの主な配置としては、並列配置の場合、図3に示す3種類があり、2つの風車が同方向に回転する配置を(a) CO (co-rotation)、互いに逆回転し風車間で近接する翼が下流に移動する配置を(b) CD (counter-down)、(b)とは逆に近接する翼が上流に移動する配置を(c) CU (counter-up)と定義した。縦列配置（タンデム配置）としては図4に示す2種類があり、2つの風車が同方向回転する配置を(d) TCO (tandem co-rotation)、互いに逆方向回転する配置を(e) TIR (tandem inverse-rotation)と呼ぶことにした。風洞実験とCFD解析のそれぞれにおいて、これら5つの主要な配置を基本として、それ以外の風向（全16風向）についても実験および数値計算を実行し、風車特性（回転数やトルクなど）の風車間距離( $gap$ )依存性を調べた。3風車の場合（風車トリオ）についても風洞実験およびCFD解析を行っているが、本報告では省略する。

CFD解析では、主流風速を $U_\infty=10\text{ m/s}$ に固定したが、風洞実験では、風車がモータの摩擦抵抗などで止まる場合があったため、必要に応じて主流風速の大きさを変えて実験を実施した。

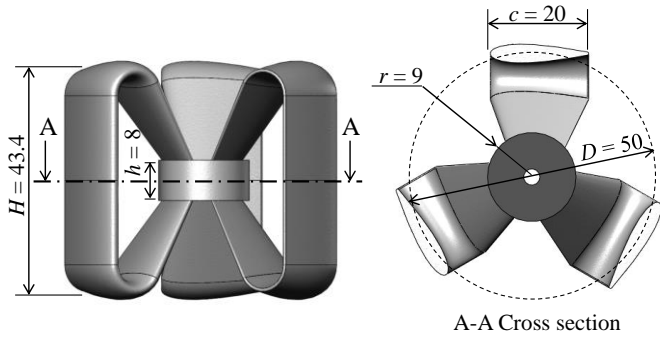


図1 実験用ミニチュア・バタフライ風車の形状



図2 風車ペアの風洞実験

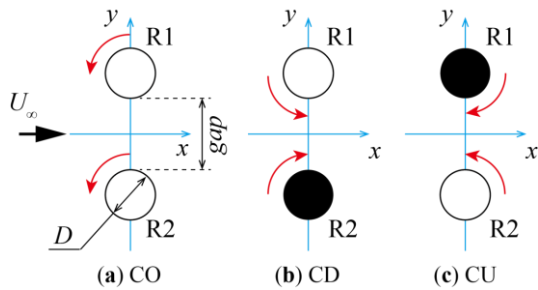


図3 並列配置

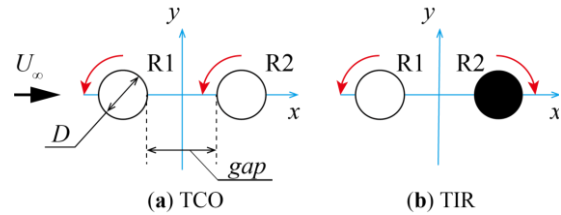


図4 縦列配置 (タンデム配置)

#### 4. 研究成果

##### (1) 風洞実験の主な結果

図5は、主流風速を  $U_\infty = 10 \text{ m/s}$  とした場合の並列配置(CO, CD, CU)における各風車の回転数の  $gap$  依存性を示す実験結果である。図5の一点鎖線は単独風車に相当する回転数を示す。CO配置では、各風車の回転が生み出す循環(回転流れ)による影響で、図3に示す風車2(R2)が風車1(R1)よりも高い回転数となる。実験風車およびモータには個体差があるため、主流に対して対称となるCDおよびCU配置においても2つの風車の回転数に差が生じているが、2つの風車の平均でみると、CD配置がCU配置よりも高い回転数状態になることが風洞実験の結果として示されている。CD配置の2つの風車の間隔( $gap$ )が短くなる時、両風車の回転数が一致し、回転数が急増している。この状態は位相的同期現象に相当しており、2つの風車の翼が位相を揃えて回転している状態であることを、高速度カメラを用いた可視化実験で確認した。CU配置においては、風車間距離が極端に短くなる場合の回転数増加は見られていないが、CD配置と同様の位相的同期現象が観測された。

図6は主流風速を  $U_\infty = 12 \text{ m/s}$  とした場合のTCO縦列配置における各風車の回転数の  $gap$  依存性を示す。上流側風車Rotor 1の回転数はほぼ一定であるが、下流側風車Rotor 2はRotor 1の後流に入るため、 $gap$  が小さい場合に回転数が大きく減少している。 $gap$  が大きくなると後流の流速回復によりRotor 2の回転数は増加するが、 $gap/D = 10$  に相当する風車間隔になっても、下流側風車の回転数は上流側風車の80%程度で頭打ちとなっている。

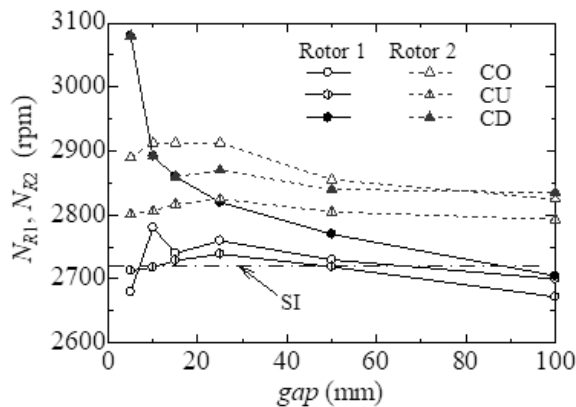


図5 並列配置の風洞実験 ( $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ )

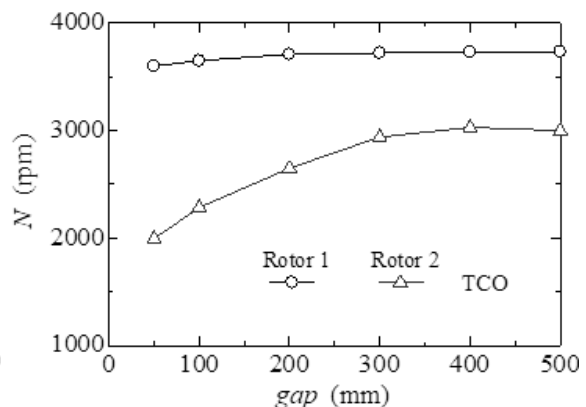


図6 TCO縦列配置の風洞実験 ( $U_\infty = 12 \text{ m/s}$ )

(2) CFD 解析の主な結果

DFBI モデルを用いた CFD 解析は、初めに、図 3 と図 4 に示した 5 つの主要な配置に対して、風車間距離を変えた場合について適用し、風洞実験の結果と定性的に一致する結果を得た。さらに風向条件（風向角度： $\theta$ ）を拡張し、16 風向に対する風車ペアの特性依存性を CFD 解析した。16 風向に対する風車ペアの特性依存性調査においては、2 つの風車が同方向に回転する場合を(a) CO (co-rotation)、互いに逆方向に回転する場合を(b) IR (inverse-rotation)と呼んで区別した。図 7 は 16 風向に対する CFD 解析の一例を示す。図 7 の例は IR 状態（R1 が反時計方向回転(CCW), R2 が時計方向回転(CW)）であり、 $gap = 50 \text{ mm}$  ( $gap/D = 1$ )、風向角度は  $\theta = 22.5^\circ$  である。図 8 に  $gap$  を 25, 50, 100 mm ( $gap/D = 0.5, 1, 2$ ) に変えた場合の風車ペアの平均出力の風向依存性を示す。平均出力は単独風車の出力で規格化してある。CO 状態では、平均出力分布は  $180^\circ$  の回転対称性をもっており、IR 状態では、 $\theta = 0^\circ$  と  $180^\circ$  を結ぶ線を基準とした線対称性を持っている。風車間距離が長い場合は CO と IR における分布の差は小さいが、短い場合は両者の違いが明瞭である。16 風向全ての平均出力の平均をとると、逆方向回転の IR 状態よりも同方向回転の CO 状態が高い出力を得ることが判明した。風洞実験においても 16 風向に対する風車ペアの回転数挙動を計測し、CFD 解析とほぼ一致する結果を得た。しかし、2 次元 CFD 解析に対して 3 次元の風洞実験では、風車の後流がより大きく偏向する傾向があることが明らかとなった。実験模型風車のアスペクト比 ( $H/D = 0.868$ ) が 2 次元の CFD 解析の場合 ( $H/D = \infty$ ) に比べて、小さいことが要因の 1 つと推測される。

なお、図 8 において、IR の  $\theta = 0^\circ$  の状態（CD 状態）は、そのほかの状態に比べて風車ペアの出力は大きくなっており、3 つの  $gap$  ケースの平均では単独風車よりも 22% 高い出力となっている。このことは、卓越風向に極度に偏る風向特性を示す場所では、卓越風向に対して並列配置で風車ペアを設置すれば、大きな出力向上が期待できることを示唆している。

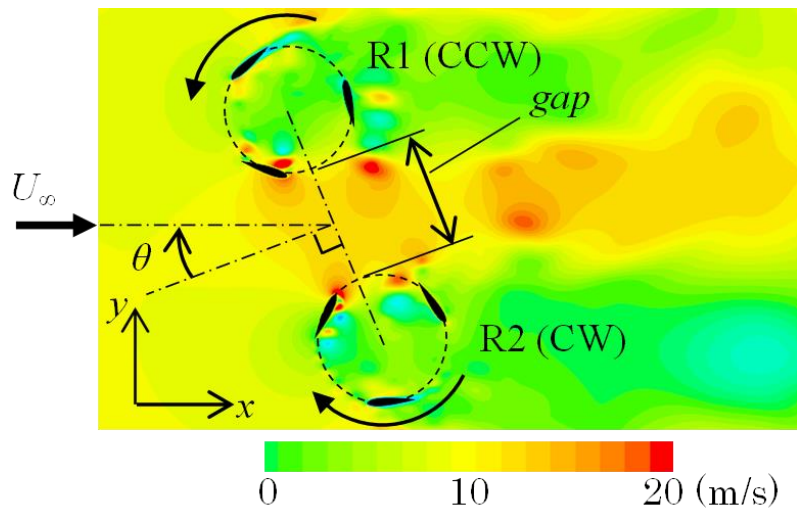


図 7 CFD 解析の例. 流速の  $x$  方向成分の分布(IR:  $\theta = 22.5^\circ$ ,  $gap = 50 \text{ mm}$ ,  $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ )

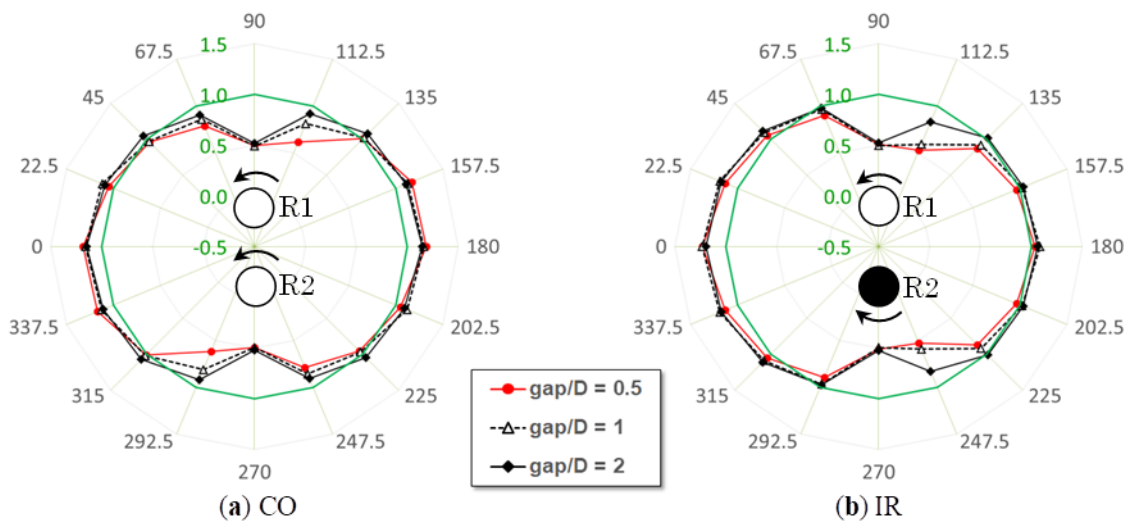


図 8 CFD 解析の結果. 風車ペアの平均出力の風向分布.

### (3) 位相的同期現象の CFD 解析による再現と数理解析

本研究では、風車ペアの風洞実験で観測された位相的同期現象を CFD 解析で初めて再現した。図 9 は風速  $U_\infty = 10 \text{ m/s}$  の仮定の下で、 $gap = 10 \text{ mm}$  ( $gap/D = 0.2$ ) の CD 配置について実施した CFD 解析によって得られた流速分布 ( $x$  成分) を示している。図 9 から 2 つの風車の間では、流速が増加 (赤色の領域) していることがわかる。図 10 は 2 つの風車の角速度の時間変化であり、角速度の初期値をわざと異なる値にして計算を行っている。時刻  $t = 2.0 \text{ s}$  を過ぎた辺りから、風車 R1 と R2 の角速度  $\omega_1$  と  $\omega_2$  はほぼ同じ値となり、角速度の大小関係が交互に入れ替わり、ほぼ一定の周期で変動する。このとき、図 9 に示されるように、2 つの風車の翼は接近し、位相がそろった状態となる。

この位相的同期現象の原理を、本研究では次のように考えた。理想流体の流線に沿って成り立つベルヌーイの定理を適用すれば、風車の間で観測された増速領域では圧力が相対的に減少する。そのため、近接した 2 つの翼の間では、平均的に互いに引き寄せあう力が作用すると考えられ、これが位相的同期の要因と推測した。この状況を図 11 に模式的に示す。この位相的同期現象に関する学会発表を契機として興味をもった鳥取大学の古川勝教授の協力により、位相的同期現象の数理解析モデルが構築され、図 10 に示される位相的同期現象が発生している際の角速度の変動周期が 2 つの風車の相互作用の強さに依存することが明らかとなった。

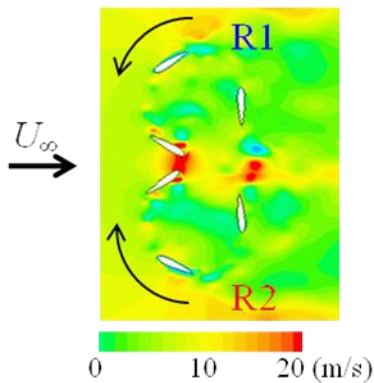


図 9 位相的同期状態

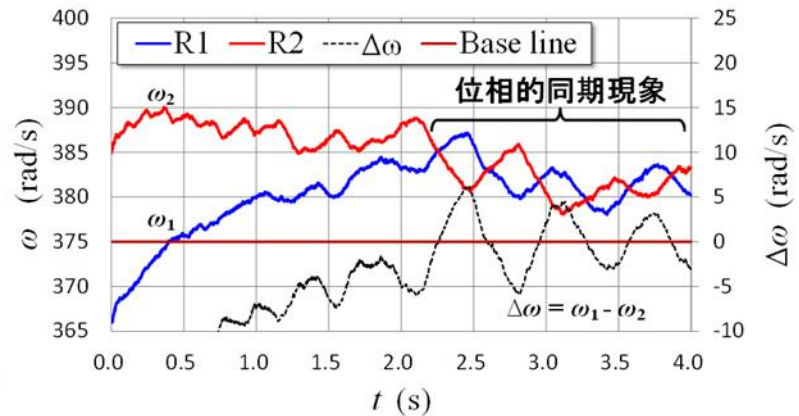


図 10 位相的同期現象における角速度の時系列データ

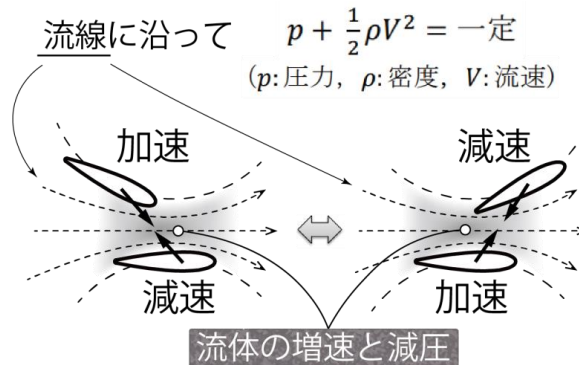


図 11 位相的同期現象の原理

### (4) 最適密集配置の探索

本研究の目標の 1 つである最適配置の探索のため、簡易モデルの構築を試み、その過程において、CFD 解析で得られた単独風車周りの流れ場 ( $x$  方向速度成分) を再現するための新しい後流速度分布モデルとして、Ultra-Super-Gaussian モデルと名付けた関数の提案を行った。  $y$  方向速度成分に関しても、ガウス関数を用いた独自の流速分布モデルを考案している。しかし、現状では、風車ペアや多数の風車に適用するまでには至っておらず、今後も研究を継続していく必要がある。

#### <引用文献>

- [1] 木村龍治訳 (ジョン・ダビリ) : 風力発電の発電効率を上げる魚群の流体力学, パリティ, 30 巻 8 号, 2015 年 8 月号, pp. 49-51.
- [2] Dabiri, J. O., Greer, J. R., Koseff, J. R., Moin, P., Peng, J. : A new approach to wind energy: opportunities and challenges, AIP Conference Proceedings, 1625, 51 (2015); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4916168>
- [3] Kinzel, M., Mulligan, Q., Dabiri, J. O., : Energy exchange in an array of vertical-axis wind turbines, Journal of Turbulence, Vol. 13, No. 38, (2012), pp. 1-13.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hara Yutaka, Jodai Yoshifumi, Okinaga Tomoyuki, Furukawa Masaru	4. 巻 14
2. 論文標題 Numerical Analysis of the Dynamic Interaction between Two Closely Spaced Vertical-Axis Wind Turbines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 2286 ~ 2286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en14082286	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 原豊, 上代良文	4. 巻 49
2. 論文標題 小形垂直軸風車の密集配置の研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 13 ~ 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 原豊	4. 巻 4
2. 論文標題 小形垂直軸風車の最適密集配置の研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 1087 ~ 1090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 ブラナロ ジラロ, 原豊, 上代良文
2. 発表標題 2次元垂直軸風車周りの速度分布を正確に模擬するモデルの構築
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部第59期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 十川侑樹, 上代良文, 原豊, 木渡路太樹, 翁長 智幸
2. 発表標題 16方位風向分布に対する垂直軸風車ペアの回転数変化の風洞実験
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部第59期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村中大輝, 原豊, 翁長 智幸, 上代 良文
2. 発表標題 近接配置した3つの垂直軸風車の相互作用に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木渡路太樹, 上代良文, 原豊
2. 発表標題 近接配置した3つの垂直軸風車の相互作用に関する風洞実験
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原豊, 古川勝, 上代良文, 翁長智幸, 十川侑樹
2. 発表標題 近接した2つの垂直軸風車の同期現象とその数理的解析
3. 学会等名 日本機械学会第98期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ブラナロ ジラロ, 原豊, 上代良文
2. 発表標題 2次元垂直軸風車の後流速度分布を模擬するモデルの提案
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 翁長智幸, 原豊, 上代良文
2. 発表標題 16方位風向分布に対する垂直軸風車ペアの平均出力解析
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原豊, 上代良文, 翁長智幸, 十川侑樹, 木渡路太樹, 丸笹憲志
2. 発表標題 近接した2つの垂直軸風車における同期現象
3. 学会等名 第25回 日本流体力学会 中四国・九州支部講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 翁長智幸, 原豊, 上代良文
2. 発表標題 垂直軸風車ペアの風向依存性に関する数値解析
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 十川侑樹, 上代良文, 原豊
2. 発表標題 2つの垂直軸風車のタンデム配置に関する風洞実験
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原豊, 上代良文, 山本柊, 翁長智幸
2. 発表標題 2つの垂直軸風車のタンデム配置に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上代良文, 原豊
2. 発表標題 並列配置ロータペア周りの流れの可視化
3. 学会等名 第10回流体研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上代良文, 原豊, 十川侑樹, 丸笹憲志, 翁長智幸
2. 発表標題 近接配置した2つの垂直軸風車の相互作用に関する風洞実験
3. 学会等名 第23回日本流体力学会 中四国・九州支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 柊, 原 豊, 上代良文
2. 発表標題 近接した2つの垂直軸風車の動的相互作用に関する数値解析
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部第57期総会・講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

小形風車の最適な密集配置の研究 <a href="http://www.damp.tottori-u.ac.jp/~lab6/research_04.html">http://www.damp.tottori-u.ac.jp/~lab6/research_04.html</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	上代 良文  (Jodai Yoshifumi)  (10321499)	香川高等専門学校・機械工学科・教授    (56203)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------