

タイトル：小形垂直軸風車の密集配置の研究

英文タイトル：Study on Closely Arranged Vertical Axis Wind Turbines

著者名：原 豊*1、上代良文*2

著者名(英文名)：Yutaka HARA、Yoshifumi JODAI

E-mail：hara@tottori-u.ac.jp, jodai@t.kagawa-nct.ac.jp

所属：*1 鳥取大学 工学部 機械物理系学科、*2 香川高等専門学校 機械工学科

1. はじめに

現在、世界においては大型風力タービンを利用した風力発電が主力電源となりつつあり、特に洋上風力発電は今後さらに伸びることが期待されている。商用の大型風力タービンのほとんどは水平軸風車(HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine)であり、その後流には、らせん状の渦系が形成され、速度欠損領域が風車直径の数倍に及ぶ。そのため、多くの風車を整然と並べる洋上ウインドファームに関して、全体の出力や効率を向上するための最適な風車配置や制御方法などの研究が最近盛んに行われている⁽¹⁾⁽²⁾。

一方、米国の Dabiri 教授は、アスペクト比の大きい小形垂直軸風車(VAWT: Vertical Axis Wind Turbine)を密集配置したウインドファームが、大型風力タービンのウインドファームよりも、単位設置面積当り出力において1桁程度優れるという予想を発表している⁽³⁾⁽⁴⁾。Fig. 1 に Dabiri 教授の研究における風車配置の1例を示すが、互いに逆回転する近接した垂直軸風車ペアが3×3の配置で並べられている。Dabiri 教授の予想以来、垂直軸型の風力タービンあるいは水力タービンを近接配置したロータ・ペアの特性に注目した研究が増えている^{(5)~(7)}。

鳥取大学では、小形垂直軸風車の低コスト化を目標に、これまでに過回転抑制機構を有したバタフライ風車(直径7m)を開発している⁽⁸⁾。現

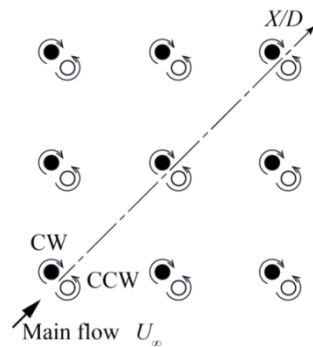


Fig. 1 An arrangement of VAWTs in Dabiri's study



Fig. 2 Conceptual image of "Wind Oasis".

This figure was processed and made from the photo of "field of breeding chickpea in ICARDA" of the following:
<https://www.flickr.com/photos/jircas/36555552042>

在、さらなる低コスト化のためにバタフライ風車の大型化の検討を行っているが、同時にバタフライ風車のウインドファームと乾燥地農業を組み合わせた "Wind Oasis" コンセプトも提案している(Fig. 2 参照)。このコンセプトでは、小

形風車でソーラーシェアリングを行い、発電した電力で揚水ポンプを動かして乾燥地で不足する水を確保し、同時に乾燥地に住む人々の生活用エネルギーの供給を行うことを想定している。国内においても、低コストの小形風車の実用化と土地を有効活用できる配置方法が明確になれば、景観等の問題から大形風車の建設ができない場所などへの小形垂直軸風車のウインドファーム導入が期待できると考えている。

垂直軸風車の回転軸は主流風向と垂直であるため、回転中心まわりの循環の影響は、水平軸風車が周囲流体に及ぼす影響とは異なったものになる。鳥取大学と香川高専は、数年前より協同し、いまだ十分に明らかになっていない複数の垂直軸風車間の相互作用を明らかにする研究および垂直軸風車の最適な密集配置を探索する研究に取り組んできた。本稿では、これまでに行ってきた研究の概要と知見の一部、および現在進行中の研究内容について紹介する。

2. 近接配置の模型風車による風洞実験

3D プリンタで製作した垂直軸型ミニチュア・バタフライ風車の実験用模型の模式図を Fig. 3 に示す。ロータ直径は $D = 50$ mm、高さは $H = 43.4$ mm である。翼弦長 $c = 20$ mm の対称翼型の翼 3 枚から構成される。模型風車のトルク特性は、鳥取大学において計測し、複数模型風車の製作と風洞実験は香川高専で実施している。Fig. 4 は風洞実験の様子を示す写真であり、2つの模型風車が 5 mm の間隔 ($gap = 5$ mm) で近接配置されている。各風車は、回転開始補助と発電機負荷の代わりとして使用する直流モータに取り付けてあり、モータの台座は、風車間距離と主流に対するペア風車の方位角(アジマス角)の両者に関して調整可能となっている。

ペア風車の主要な配置としては、Fig. 5 に示す 5 つがある。本研究では、主流(風速: U_∞)に

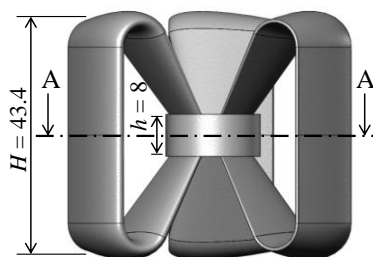
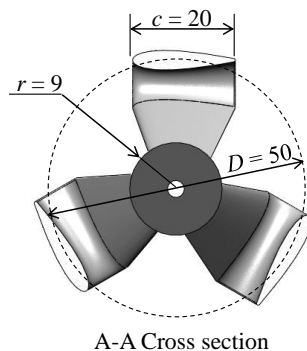


Fig. 3 Size of a VAWT model for experiments



Fig. 4 Experimental setup of a pair of 3-D-printed VAWT models with a 5-mm gap (viewed from downstream)

対して並列に配置した場合について、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)と定義している。また、主流に対して縦列配置(タンデム)とした場合は、2つの風車

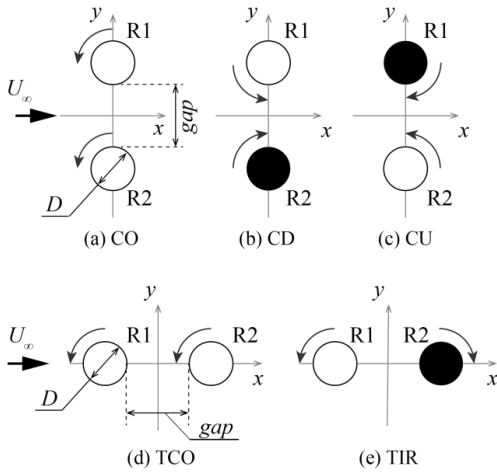


Fig. 5 Typical arrangements of a VAWT pair

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)と呼んでいる。

Fig. 6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)における各風車ロータの回転数の gap 依存性を示す実験結果である。

Fig. 6 中の一点鎖線は単独ロータに相当する回転数を示す。CO 配置では、各ロータの回転が生み出す循環による影響で、Fig. 5 に示すロータ 2 (R2) がロータ 1 (R1) よりも高い回転数となる。実験ロータ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 ロータの回転数には差が生じているが、2 ロータの平均でみると、CD 配置が CU 配置よりも高い回転数状態になることが実験結果として示されている。

Fig. 7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ロータの回転数の gap 依存性を示す。上流側ロータ 1 の回転数はほぼ一定であるが、下流側ロータ 2 はロータ 1 の後流に入っているため、 gap が小さい場合に大きな減速を生じている。 gap が大きくなると後流の回復によりロータ 2 の回転数は増加する

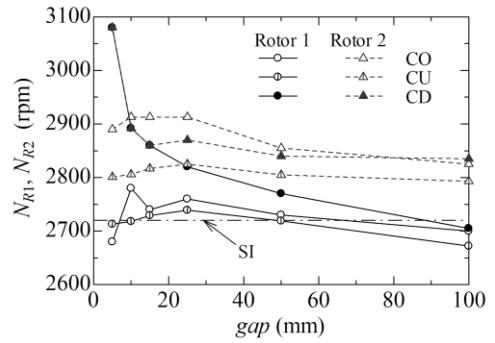


Fig. 6 Gap dependence of rotational speed in CO, CD, and CU arrangements ($U_\infty = 10 \text{ m/s}$)

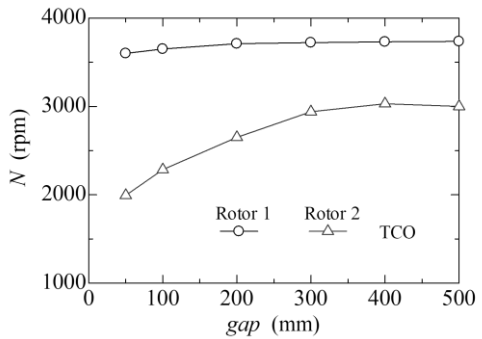


Fig. 7 Gap dependence of rotational speed in TCO arrangement ($U_\infty = 12 \text{ m/s}$)

が、 $gap/D = 10$ に相当する風車間隔になっても、下流側ロータの回転数は上流側ロータの80%程度で頭打ちとなっている。

主流風速を $U_\infty = 2 \text{ m/s}$ として実施したペア風車まわりの流れの可視化の一例を Fig. 8 に示す。この例は、風車間距離 $gap = 10 \text{ mm}$ の CU 配置であり、スモークワイヤ法によって主にロータ前方の流脈線を可視化している (流れは左から右向き)。Fig. 8 中に示す 2 つの白色の丸印は、回転円柱における前方よどみ点に相当する点を示している。可視化実験の結果、CU 配置におけるよどみ点相当の位置が、他の配置 (CO, CD) に比べて中央線側に近づき、CU 相当の回転円柱⁹⁾と類似する結果が得られている。

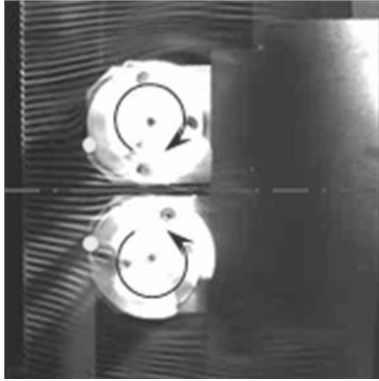


Fig. 8 Photograph of smoke flow past two rotating turbines in CU arrangement with a $gap = 10\text{ mm}$ ($U_\infty = 2\text{ m/s}$)

3. 同期現象

前節で述べたミニチュア風車の風洞実験では、風車間距離が短い CD 配置において、2つの風車の回転数がほぼ同じ値になり、回転数も急増するという特異な現象が観測された (Fig. 6 参照)。可視化の結果、この状態では2つの風車の翼の位相が同期していることが確認された。

この位相的同期現象の詳細を明らかにするために、数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)解析を実施した⁽¹⁰⁾。CFD 解析における風車モデルは、実験模型風車の赤道面に相当する2次元ロータであり、中央のハブを無視して3つの翼型のみが存在する (Fig. 3 参照)。計算ソルバーは商用の STAR-CCM+を用いており、流体と物体の相互作用を考慮する (流速の変化に伴い回転数を変化させる) ため、STAR-CCM+が備える DFBI(Dynamic Fluid/Body Interaction)モデルを乱流モデル(SST $k-\omega$)とともに使用した。

$U_\infty = 10\text{ m/s}$ を仮定して CFD 解析された、 $gap = 10\text{ mm}$ ($gap/D = 0.2$) の CD 配置における流速の x 成分の分布を Fig. 9 に示す。Fig. 9 からロータ間で増速していることがわかる。Fig. 10 は、2つのロータの角速度の時間変化であり、初期値はわざと異なる値を設定してあるが、時刻 $t =$

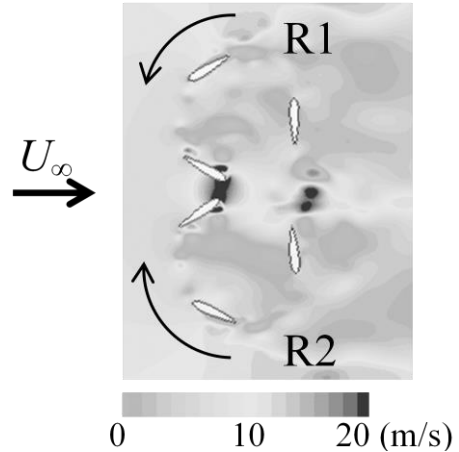


Fig. 9 Distribution of x -component of flow velocity simulated by CFD in CD arrangement ($U_\infty = 10\text{ m/s}$)

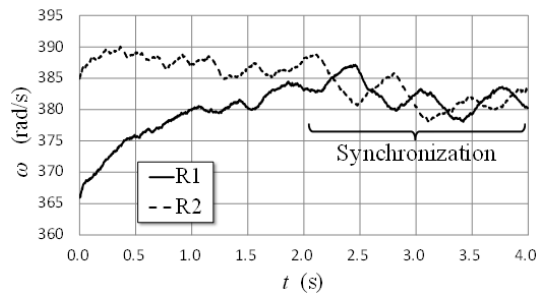


Fig. 10 Variation in angular velocity of each rotor in CD arrangement with a $gap = 10\text{ mm}$ ($U_\infty = 10\text{ m/s}$)

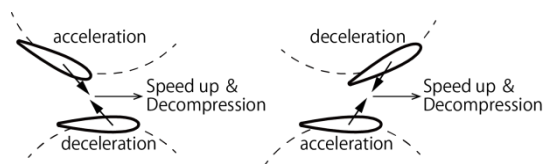


Fig. 11 Schematic diagram of the mechanism of synchronization in phase of two rotor blades

2.0 s を過ぎた辺りから回転数がほぼ同じ値となり、また R1 と R2 の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、Fig. 9 でも示されているように、可視化実験と同様に翼の位相的同期現象が確認できた。

ベルヌーイの定理を適用すれば、翼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される。この状況を Fig. 11 に模式的に示す。

なお、CD 配置だけでなく、CU 配置においても、ロータ間距離が短い場合には位相的同期が生じることが可視化実験および CFD 解析のいずれにおいても確認できている。現在は、新しい研究協力者を得て、位相的同期の際に CFD で観測された周期的変動の再現と周期が何に依存するのかを説明をするための数理的解析モデルの構築を進めている⁽¹¹⁾。

4. 16方位風向への依存性

前節で述べた DFBI モデルを用いた CFD 解析は、Fig. 5 で示した5つの主要な配置におけるロータ間距離を変えた場合についても適用され、風洞実験結果と定性的に一致する結果を得ている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。さらに風向条件を拡張し、16方位風向に対するペア風車の特性依存性を CFD で解析した⁽¹⁴⁾。Fig. 12 は16方位の定義を示している。本研究では、左から主流が流入する場合を方位角(アジマス)の基準とした。16方位依存性に関しては、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)と呼んでいる。

Fig. 13 は16方位の CFD 解析における流れ場の解析結果の一例を示す。この例は IR の状態であり、 $gap = 50 \text{ mm}$ ($gap/D = 1.0$)、アジマス角は $\theta = 22.5^\circ$ である。CFD 解析においては、主流方向は左から右向きに固定し、2つの風車の位置をロータ間の中心位置まわりに回転させて任意のアジマス角状態を模擬している。

Fig. 14 に gap を 25, 50, 100 mm に変えた場合のペア風車の平均出力の風向依存性を示す。出

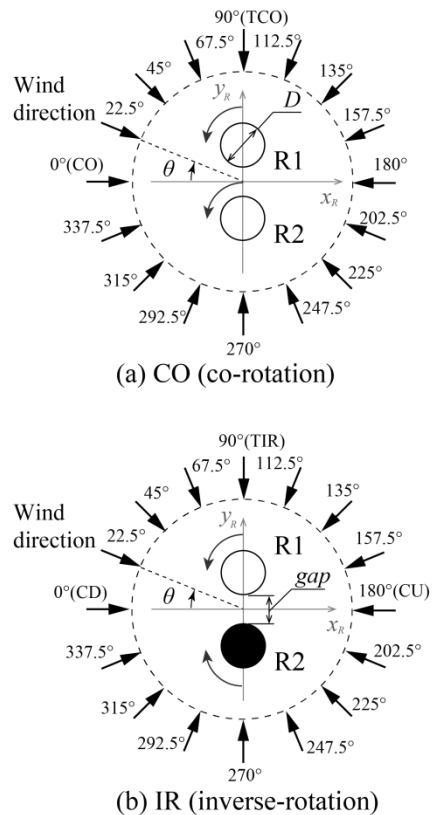


Fig. 12 Definition of wind direction in two rotor arrangements CO and IR

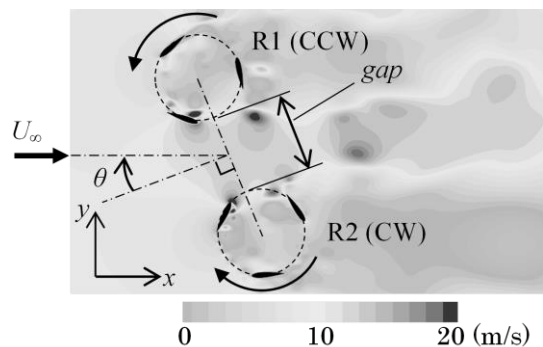


Fig. 13 Distribution of x -component of flow velocity simulated by CFD in the case of $\theta = 22.5^\circ$ and $gap = 50 \text{ mm}$ ($U_\infty = 10 \text{ m/s}$)

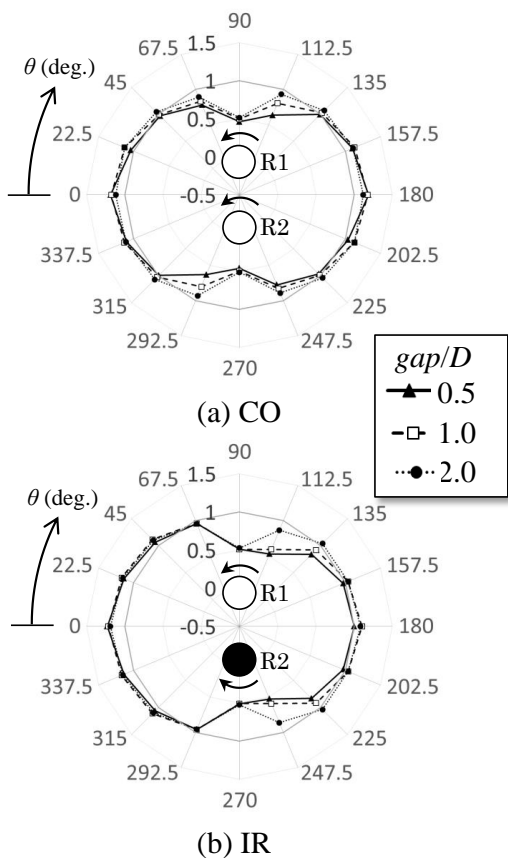


Fig. 14 Wind direction dependence of the power of a VAWT pair in $gap/D = 0.5, 1.0, \text{ and } 2.0$

力は単独風車の出力で規格化されている。CO状態では、出力分布は 180° の回転対称性を持っており、IR状態では、 $\theta = 0^\circ$ と 180° を結ぶ線を基準とした線対称性を持っている。ロータ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。一部に相違点があるが、風洞実験においても、CFD解析とほぼ一致する結果を得ている⁽¹⁴⁾。

5. 簡易モデルによるVAWTウインドファームのシミュレーション解析手法の開発

本研究では、最終的に、多数の垂直軸風車を並べたウインドファームの最適配置を見出すこ

と、および密集配置の有効性を示すことを目的としている。そのためには対象とするロータの数を増やし配置も様々に変える必要がある。しかし、多数のロータを対象とする場合、風洞実験やCFD解析は、大幅な経費と時間的コストの増加が予想される。そこで短い時間で計算が可能な簡易モデルによる予測手法の開発に取り組んでいる。現在取り組んでいる手法は、Dabiri教授らが採用した解析⁽³⁾をベースとし、ポテンシャル流れに後流モデルを追加する方法を考えている⁽¹⁵⁾。ポテンシャル流れ $u_p(x, y)$ は、各ロータの循環 Γ_k とブロッキングの効果を表す双極子 μ_k の大きさがわかれば、容易に短時間で計算が可能である。ただし、ポテンシャル流れでは損失が考慮されないため、単独ロータにおけるCFD解析の結果を用いて、後流の速度欠損を含んだ流速分布を予め模擬可能な後流モデル du_k を作成しておき、式(1)でウインドファームにおける流れ場 $u_w(x, y)$ を計算する。

$$u_w(x, y) = \{1 - \sum_{k=1}^N du_k\} u_p(x, y) \quad (1)$$

ここで N はウインドファームに含まれる風車ロータの全基数であり、 k はその指定パラメータである。Fig. 15に提案する手法の概要図を示す。

水平軸風車の後流の速度分布として、トップハット形状からガウス形状に変化するスーパー・ガウス関数 (Super-Gaussian function) をShapiroら⁽¹⁶⁾が提案している。しかし、垂直軸風車の後流においては、ロータ近傍領域で速度欠損の両側に流速の増速域が見られた。本研究では、その増速域を模擬するために、スーパー・ガウス関数を修正したウルトラ・スーパー・ガウス関数 (Ultra-Super-Gaussian function) を提案した⁽¹⁵⁾。

Fig. 16に提案モデルとCFD解析の両者で得られた、単独ロータの後流における流速の x 方

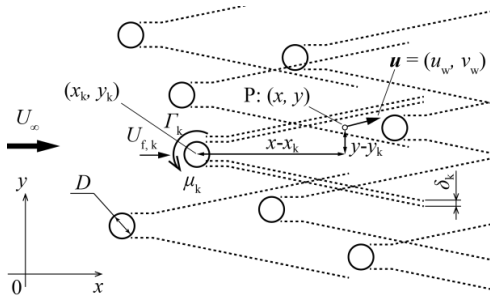
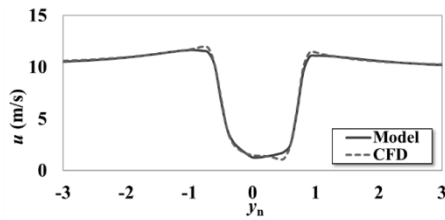
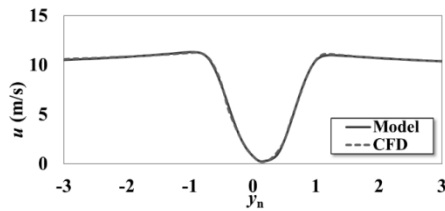


Fig. 15 Schematic diagram of the model for a VAWT wind farm



(a) $x_n = (x - x_k)/D = 0.75$



(b) $x_n = (x - x_k)/D = 2.0$

Fig. 16 Wake profiles of an isolated single VAWT simulated by CFD and the proposed model

向成分の y 方向分布の比較を示す。なお、垂直軸風車では循環に起因する後流の y 方向シフト δ_k も生じるため、提案した後流モデルには、後流シフトの修正も含まれている。

$U_\infty = 10 \text{ m/s}$ を仮定して提案モデルによって予測した、 $gap = 50 \text{ mm}$ の CO 状態 ($\theta = 22.5^\circ$) における流速の x 成分の分布を Fig. 17 に示す。Fig. 18 は、同じ風速条件で 16 方位の風速に対して予測した CO 状態にあるペア風車の規格化出力の風向依存性を示す。比較のため、CFD の

解析結果 (Fig. 14(a), $gap/D = 1.0$) も破線で示してある。特定の角度 ($\theta = 45^\circ, 112.5^\circ, 225^\circ, 292.5^\circ$) において、簡易モデルの計算結果は CFD の結果と差が大きいが、それ以外では、7%以下の誤差で一致している。現状では x 方向の速度成分のみを考慮しており、 y 方向速度成分は考慮していない。今後、 y 方向成分も考慮するなどして改良を行う予定である。条件にも依るが、1つの条件に対して、CFD 解析が計算に数日要するのに対して、提案モデルでは、約9秒以内で計算が終了する。精度と計算速度を向上することが今後の課題である。

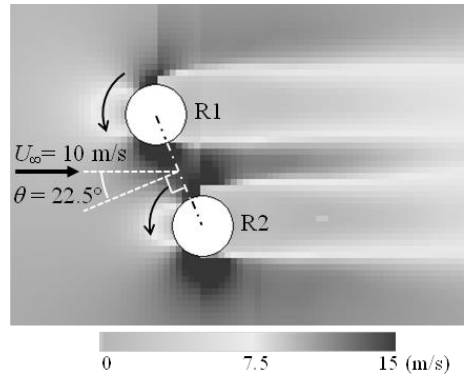


Fig. 17 Distribution of x -component of flow velocity predicted by the proposed model in the case of CO condition with $\theta = 22.5^\circ$ and a $gap = 50 \text{ mm}$ ($U_\infty = 10 \text{ m/s}$)

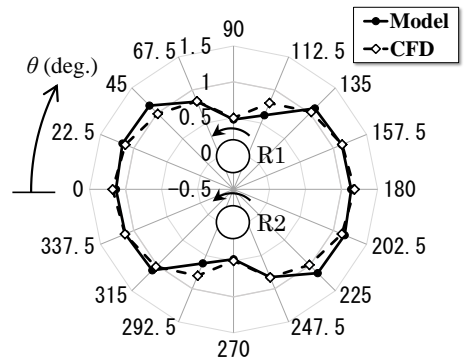


Fig. 18 Wind direction dependence of the power of a VAWT pair in CO condition ($gap/D = 1.0$)

6. おわりに

本稿では、小形垂直軸風車の密集配置に関する風洞実験、CFD 解析、簡易モデルによる計算について紹介をした。また、近接した翼間の位相的同期現象の発見とその考察についても述べた。本稿で述べた研究はまだ途上である。垂直軸風車は、水平軸風車に比べて実用化されている事例が少ないが、本研究の成果が、将来の小形垂直軸風車のウインドファーム実現に少しでも役立つことを期待したい。

【謝辞】

本稿で解説した研究は JSPS 科研費 JP18K05013 および鳥取大学国際乾燥地研究教育機構(IPDRE)の研究プロジェクトとして実施している。

〈参考文献〉

- (1) Göçmen, T. ・他 5 名, Wind Turbine Wake Models Developed at the Technical University of Denmark: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60 (2016), 752.
- (2) Kanev, S., On the Robustness of Active Wake Control to Wind Turbine Downtime, *Energies*, Vol. 12 (2019), 3152.
- (3) Whittlesey, R. W., Liska, S., Dabiri, J. O., Fish Schooling as a Basis for Vertical Axis Wind Turbine Farm Design, *Bioinsp. Biomim*, Vol. 5(2010), 035005.
- (4) Dabiri, J. O., Potential Order-of-Magnitude Enhancement of Wind Farm Power Density via Counter-Rotating Vertical-Axis Wind Turbine Arrays, *J. Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 3(2011), 043104.
- (5) Zanforlin, S., Nishino, T., Fluid Dynamic Mechanisms of Enhanced Power Generation by Closely Spaced Vertical Axis Wind Turbines, *Renewable Energy*, Vol. 99(2016), 1213.
- (6) De Tavemier, D. ・他 4 名, Towards the Understanding of Vertical-Axis Wind Turbine in Double-Rotor Configuration, *J. Physics: Conf. Series*, Vol. 1037(2018), 022015.
- (7) Ma, Y. ・他 5 名, Hydrodynamics Performance Analysis of the Vertical Axis Twin-Rotor Tidal Current Turbine, *Water*, Vol. 10(2018), 1694.
- (8) Hara, Y. ・他 12 名, Development of a Butterfly Wind Turbine with Mechanical Over-Speed Control System, *Designs*, Vol. 2(2018), 17.
- (9) Yoon H. S. ・他 3 名, Flow Characteristics of Two Rotating Side-by-Side Circular Cylinder, *Computers & Fluids*, Vol. 38(2009), 466.
- (10) 原 ・他 5 名, 近接した 2 つの垂直軸風車における同期現象, 第 25 回日本流体力学会中四国・九州支部講演会, (2020), No. 3.
- (11) 原 ・他 4 名, 近接した 2 つの垂直軸風車の同期現象とその数理解析, 日本機械学会第 98 期流体工学部門講演会, (2020), ●●●.
- (12) 山本 ・原 ・上代, 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, 日本機械学会中国四国支部第 57 期総会 ・講演会, (2019), 604.
- (13) 原 ・他 3 名, 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, 日本機械学会 2019 年度年次大会, (2019), J05325.
- (14) 翁長 ・原 ・上代, 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, 日本機械学会 2020 年度年次大会, (2020), J05309.
- (15) ブラナロ ・原 ・上代, 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, 日本流体力学会年会 2020, (2020), ●●●.
- (16) Shapiro, C. R. ・他 3 名, A Wake Modeling Paradigm for Wind Farm Design and Control, *Energies*, Vol. 12(2019), 2956.