

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04963

研究課題名（和文）V形ダリウス風車のピッチ角制御手法の開発と風荷重・後流特性に関する研究

研究課題名（英文）Development of a Pitch Angle Control Method for V-type Darrieus Wind Turbines and Study of Wind Load and Wake Flow Characteristics

研究代表者

河野 孝昭（Kono, Takaaki）

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：90630921

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ピッチ角がV形垂直軸風車の出力特性に与える影響については、翼端付近の2次元CFD解析に基づき設定した取付角から2°ピッチ角を変化させるだけで、急激に出力係数が低下することを明らかにした。ピッチ角以外にも、翼枚数や翼形状、コーニング角が出力特性に与える影響を明らかにした。風車後流特性については、風速減衰が大きく乱流強度が高い特性が、翼枚数や翼形状によらず風車戻り側でより顕著となることを明らかにした。風荷重特性については、水平方向成分が鉛直方向成分に比べて顕著に大きくなり、アジマス角による翼のたわみ量の違いによって生じる遠心力の差が水平方向荷重に大きく寄与する可能性を指摘した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

V形垂直軸風車に関する研究はほとんど行われていないのが現状であり、本研究で得られた基本的な出力特性、後流特性、荷重特性は、学術的に非常に価値がある。特に、ピッチ角を少し変化させただけで出力係数が顕著に減少するという知見は、強風時の過回転防止対策として活用できる。また、風荷重や遠心力による翼のたわみが出力特性や荷重特性に大きな影響を与えているという知見は、浮体式洋上風力発電に適したV形垂直軸風車の最適設計を行う上で非常に重要である。風車後流特性の知見は、V形垂直軸風車のウィンドファームの最適設計に活用される。

研究成果の概要（英文）：As for the effect of pitch angle on the output characteristics of a V-type wind turbine, it was clarified that the power coefficient drops drastically when the pitch angle is changed by only 2° from the mounting angle set based on a two-dimensional CFD analysis near the blade tip. In addition to the pitch angle, the effects of the number of blades, blade shape, and coning angle on the output characteristics were also clarified. Regarding the turbine's wake characteristics, it was found that the wind velocity attenuation and turbulence intensity were more pronounced on the retreating side of the wind turbine, regardless of the number of blades or blade geometry. Regarding the wind loads on the turbine, the horizontal component was significantly larger than the vertical component, indicating that the difference in centrifugal force caused by the difference in blade deflection due to the difference in azimuth angle may contribute significantly to the horizontal load.

研究分野：風車工学

キーワード：垂直軸風車 V形ダリウス風車 出力特性 風荷重 後流 風洞 数値流体解析 ピッチ角

## 1 研究開始当初の背景

浮体式洋上風力発電の普及には、風車の低コスト化に加えて、浮体構造物の低コスト化が大きな課題である。水平軸風車を用いる場合の浮体構造物の低コスト化は、ロータに作用する風荷重がタワー上部にかかるため設計転倒モーメントがハブ高さに比例して大きくなるという難しさがある。一方、垂直軸風車は、発電機等の重量物が下方に設置され、さらにロータに作用する風荷重がシャフト高さ方向に広く分布するため設計転倒モーメントを小さくできることから、浮体式洋上風力発電の浮体構造物の低コスト化の上で利点がある。高効率な揚力型垂直軸風車であるダリウス風車のロータ形状として代表的なトロポスキ形は、ブレードのピッチ角制御による高効率化や強風時の対応が難しい。また、H形は、アームの空力抵抗によるトルク損失が大きいという欠点がある。研究事例は非常に限られているが、V形のロータ形状は、アームやシャフトを必要としないため、トロポスキ形やH形に比べて風車の低コスト化の上で利点があるとともに、ロータの重心が低くなるため設計転倒モーメントを小さくすることが可能となり浮体構造物の低コスト化の上でも利点を有する。また、アームによるトルク損失も発生せず、ピッチ角制御も可能であり、高効率化の余地が大きい。

## 2 研究の目的

V形ダリウス風車について、ピッチ角が風車出力特性に与える影響を明らかにし、風車出力を最大にする最適なピッチ角制御手法を開発する。さらに浮体構造物の設計で重要となる風荷重特性およびwindファームの設計で重要となる風車後流特性を明らかにする。

## 3 研究の方法

### (1) 供試風車

図1、図2及び表1に本研究で対象とするV形垂直軸風車の形状を示す。翼枚数は2枚の場合と3枚の場合を対象とする。翼スパン長さは0.35 mであり、翼先端部における翼弦長は0.07 m、翼下端部における翼弦長は0.10 mである。各高さにおける翼弦線の前縁から25%位置をつないだ直線を翼根回転軸、翼根回転軸と水平面のなす角度をコーニング角 $\beta$ と呼称する。翼弦線と回転円接線のなす角度である取り付け角 $\alpha$ (図3)は、 $\beta = 45^\circ$ のときに翼のすべての高さの水平断面において $\alpha = 4^\circ$ である。翼根回転軸周りに回転させる角度をピッチ角 $\alpha_p$ と呼称し、翼先端から見て時計回りを正方向と定義する(図3)。風車の直径 $D$ は、 $\beta = 45^\circ$ のときに $D = 0.8$  mであり、 $\beta = 40^\circ$ では約0.06 m増加し、 $\beta = 50^\circ$ では約0.07 m減少する。 $\beta = 45^\circ$ かつ $\alpha = 4^\circ$ かつ $\alpha_p = 0^\circ$ のとき、翼の水平断面の翼型は、翼先端から中間部にかけてはNACA0018、中間部から翼下端にかけては強度を高めるためにNACA0050へ滑らかにシフトしている。

### (2) 実験手法

図5に実験装置の概略を示す。実験にはノズル断面寸法が1250 mm×1250 mmであり、吹き出し口と長さ2000 mmの開放型測定部を有する回流型風洞を用いる。測定部内には、吹き出し口から $x = 1000$  mmの位置に供試風車を設置する。風洞では一様流を生成し、吹き出し口から $x = -4000$  mmの位置にある超音波風速計での基準風速が $U_\infty = 7$  m/sとなるように軸流ファンの回転数を制御する。風車の回転数 $n$ をDCモータ(オリエンタルモーター、BLVM640N-A)により制御し、各周速比 $\lambda (= D\omega / 2 U_\infty)$ におけるトルク $Q$ について $\omega$ が増加中の場合と減少中の場合でそれぞれ計2回計測する。ここで、 $\omega (= 2\pi n / 60)$ はロータ角速度である。風車の出力係数 $C_P (= Q\omega / 0.5\rho A U_\infty^3)$ の算出の際に用いる代表面積 $A$ は、上流側から見たロータ受風見つけ面積が最大となる $\beta = 45^\circ$ における値であり、 $(D - 0.35\cos\beta)(0.35\sin\beta) = 0.137$  m<sup>2</sup>である。ここで、 $\rho$ は空気密度である。また、 $C_P$ の算出においては、翼のみを取り外した状態で計測したベアリング等の機械損失を考慮する。風車後流風速の測定は、測定部を密閉型とした場合と開放型とした場合の両方におい

て、熱線流速計を用い、サンプリング周波数10000Hz、サンプリング時間5秒間で行う。風車にかかる荷重の測定は、6分力計(日章電機、LMC-6566A-100N)を用い、定格容量内に最大荷重が収まるように、 $U_0 = 5 \text{ m/s}$ で行う。測定値から、無風状態において風車を回転させた場合に風車にかかる荷重の測定値を差し引くことで風により風車にかかる荷重を評価する。

### (3) 数値解析手法

当初、翼素運動量理論に基づく二重多流管モデルを開発し、ピッチ角が出力特性に与える影響や最適なピッチ角の制御手法を評価することを予定していた。しかし、開発したプログラムは、実験結果の再現精度が非常に悪かったため、Navier-Stokes 方程式を有限体積法に基づいて離散化する数値流体解析ソフトウェアによりピッチ角が出力特性に与える影響を評価した。

翼枚数2枚、 $\beta = 45^\circ$ のV形垂直軸風車の3次元形状を解析対象とする。図6に解析に用いる解析格子とその境界条件を示す。解析格子は、静止領域と回転領域で構成されている。総セル数は約3000万である。流れ場は3次元、非定常、非圧縮、粘性と仮定し、作動流体は $15^\circ\text{C}$ の空気とする。支配方程式にはフィルター操作を施した連続の式とNavier-Stokes方程式、Large-Eddy SimulationのサブグリッドスケールモデルにはWALEモデルを用いる。数値解析ソフトウェアにはOpenFOAM5.0を使用する。境界条件には、流入境界に一様流速 $7.0 \text{ m/s}$ 、流出境界にゲージ圧 $0 \text{ Pa}$ 、上下左右の側面境界に対称境界条件を課し、風車の固体表面にはNo-slip条件を設定する。周速比は $\lambda = 3.8$ 、時間刻み幅はロータが $0.025^\circ$ 回転する時間である。

## 4 研究成果

### (1) 出力特性

図7に、各翼枚数において $\beta = 45^\circ$ で固定し、 $\alpha_p$ を変化させた場合の $C_p-\lambda$ 曲線を示す。いずれの翼枚数においても $\alpha_p = 0^\circ$ で出力係数が最大となっている。 $\alpha_p$ の絶対値を増加させると $C_p$ が低下する傾向が確認できる。図8に、各翼枚数において $\alpha_p = 0^\circ$ で固定し、 $\beta$ を変化させた場合の $C_p-\lambda$ 曲線を示す。2枚翼では $\beta = 50^\circ$ で $C_p$ が最大値を示している。これは、ロータの回転に伴う遠心力により、翼がロータ半径外側方向へしなり、ロータ受風面積が最大値に近づくとともに、翼の水平断面形状が高い揚力を発生するNACA0018翼型に近づいていることが要因として考えられる。図9に示すように、 $\lambda = 3.39$ の時に $\beta = 50^\circ$ の翼がしなり、 $\lambda = 0$ における $\beta = 45^\circ$ の形状に近づいていることを、高速度カメラで撮影して確認している。

図8においては、いずれの翼枚数においても、 $\beta$ が大きくなると最適周速比が小さくなる傾向がある。図7、8で、同じ $\alpha_p$ と $\beta$ の時の翼枚数による違いを比較すると、3枚翼の最適周速比が2枚翼に比べて低下する傾向も確認できる。

### (2) 後流特性

図10、11に風車後流 $1D$ 、 $2D$ における主流方向風速の時間平均値の水平分布を風車翼下端高さ、中央高さ、75%高さについて示す。ここで、実験結果は $\beta = 50^\circ$ の場合であり、周速比は最適周速比である。CFD解析結果は、実験において $\beta = 50^\circ$ のロータが最適周速比で $\beta = 45^\circ$ の形状に近づくことから、 $\beta = 45^\circ$ の場合である。実験結果、CFD解析結果ともに、各風車後流位置において、風車翼下端高さで最も風速減衰が大きく、高い位置ほど風速減衰が小さい傾向を示している。測定部を密閉型とした場合と開放型とした場合の測定値を比較すると、特に $2D$ 後流位置において密閉型とした場合の風速減衰が大きくCFD解析結果に近い値を示している。これは、 $2D$ 後流位置は風洞吸い込み口よりも下流側にあり、開放型では周囲からの空気の吸い込みにより風速回復が助長されていたが、密閉型ではその影響がなくなったためだと考えられる。CFD解析結果は、実験結果より風速減衰を大きく評価しているが、風車の進み側( $180 \leq \theta \leq 360$ )よりも戻り側( $0 \leq \theta \leq 180$ )で、風速減

衰が大きい傾向にあることを両者が示している。ここでは示さないが、CFD 解析結果は各高さにおいて、風車の戻り側のアジマス角で翼後流の風速減衰が大きくなっており、これが風車後流の戻り側で風速減衰が大きいことの要因となっていると考えられる。また、戻り側ではアジマス角毎に翼後流の風速減衰量が大きく変動している。このため、図 12、13 の風車後流  $1D$ 、 $2D$  における風車翼下端高さ、中央高さ、75%高さの乱流強度が、風車の戻り側で高くなっていると考えられる。

### (3) 風荷重特性

図 14 に風車にかかる荷重の三方向成分 ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) を基準風速  $U_\infty$  と  $\beta = 45^\circ$  におけるロータ受風見つけ面積  $A$  で基準化した空力係数 ( $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_z$ ) のアジマス角  $\theta$  に対する依存性を示す。座標は図 4 に示す通りで紙面手前側が正の  $z$  方向である。実験結果において  $C_x$ ,  $C_y$  は  $C_z$  に比べて変動幅が顕著に大きくなっている。また、 $C_z$  の変動幅は実験結果と CFD 解析結果が同程度となっているが、 $C_x$ ,  $C_y$  の変動幅は実験結果が CFD 解析結果に比べて顕著に大きくなっている。 $C_x$ ,  $C_y$  の実験結果の変動幅が顕著に大きくなる原因としては、アジマス角によって翼にはたらく空力荷重が変化することで翼のたわみ量が変化し、各アジマス角の翼と  $180^\circ$  異なるアジマス角の翼の回転軸からの距離に差異が生じることで、遠心力の影響が生じている可能性が考えられる。しかし、この考察だけでは、 $C_x$  が  $\theta = 135^\circ$  付近で負の値になる原因等を説明できないため、今後、翼一枚あたりに加わる荷重のアジマス角依存性について、風洞実験により調べる予定である。

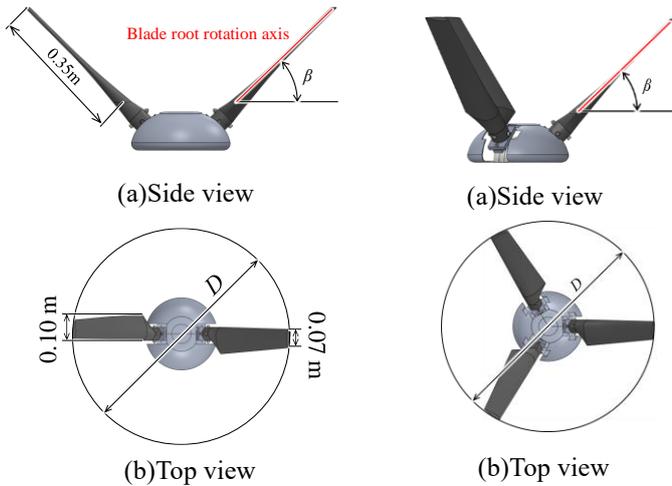


Fig. 1 Designed model of V-VAWT with 2 blades

Fig. 2 Designed model of V-VAWT with 3 blades

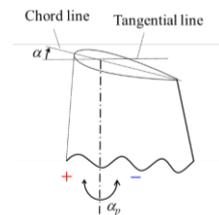


Fig. 3 Definition of blade's setting angle  $\alpha$  and pitch angle  $\alpha_p$

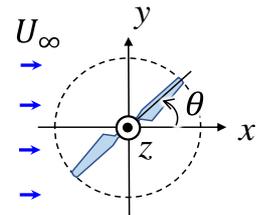


Fig. 4 xyz coordinates and azimuth angle  $\theta$  (Top view)

Table 1 Coning angle and diameter of V-VAWT

$\beta$	$40^\circ$	$45^\circ$	$50^\circ$
$D$	0.86m	0.8m	0.73m

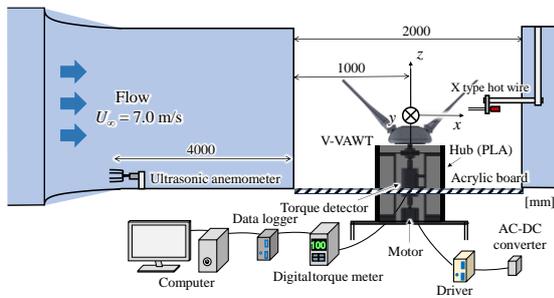


Fig. 5 Experimental setup

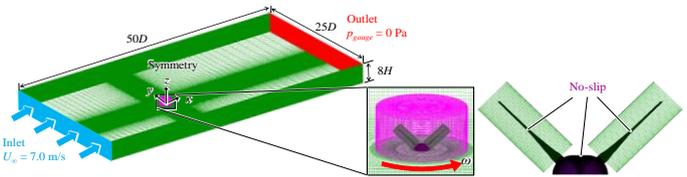
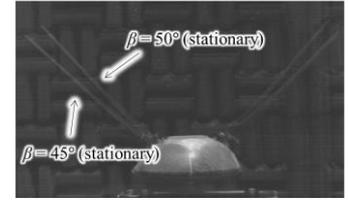
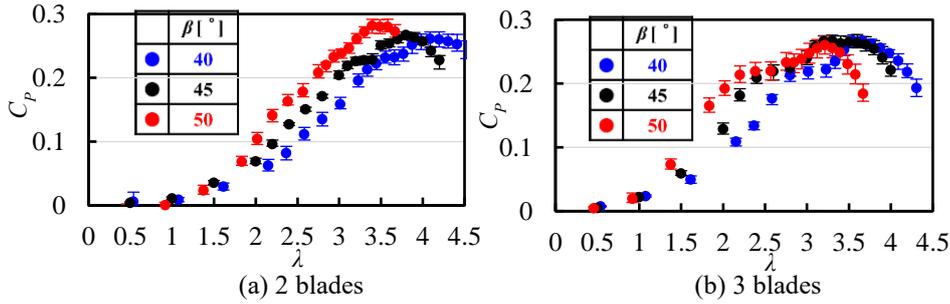
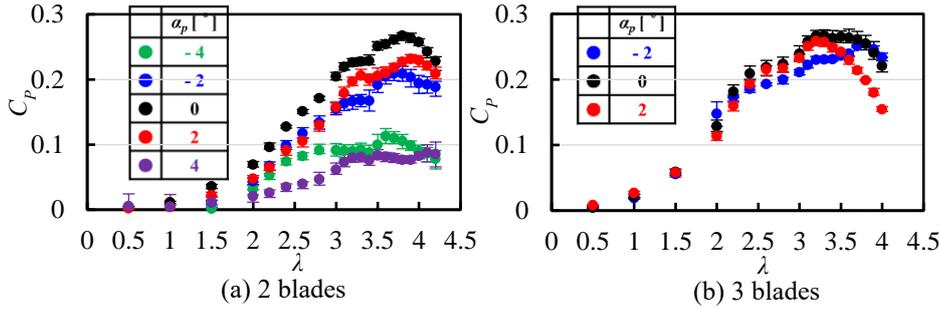
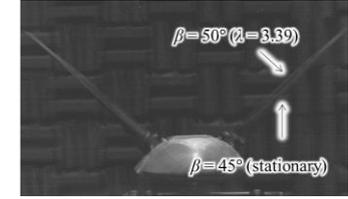


Fig. 6 Computational domain and boundary conditions



(a)  $\beta = 45^\circ$  (stationary) and  $\beta = 50^\circ$  (stationary)



(b)  $\beta = 45^\circ$  (stationary) and  $\beta = 50^\circ$  ( $\lambda = 3.39$ )

Fig. 9 Photos of V-VAWT with 2 blades when blade root rotation axes are parallel to the stream-wise direction

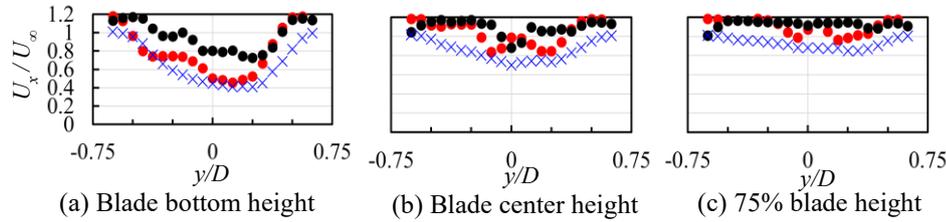
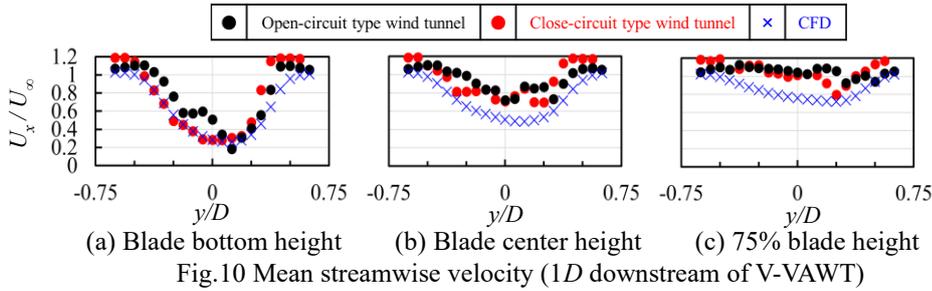


Fig. 11 Mean streamwise velocity (2D downstream of V-VAWT)

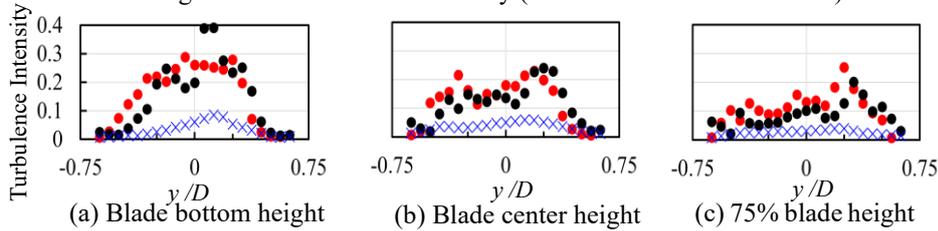


Fig. 12 Turbulence intensity (1D downstream of V-VAWT)

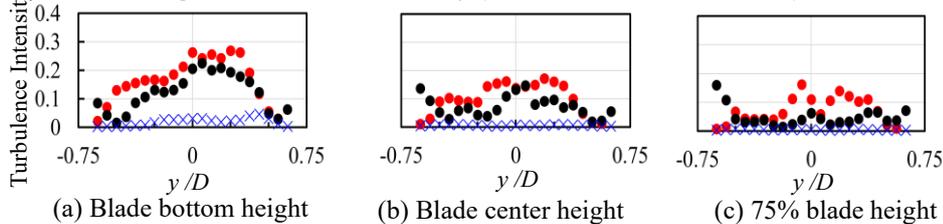


Fig. 13 Turbulence intensity (2D downstream of V-VAWT)

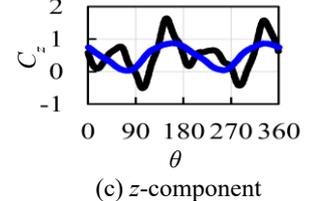
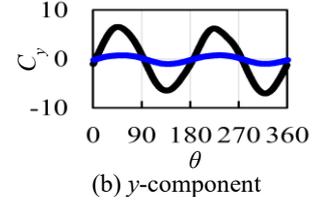
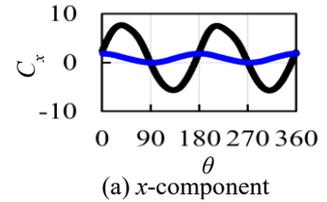
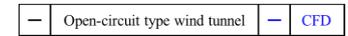


Fig. 14 Aerodynamic force coefficient of V-VAWT vs. azimuth angle

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 定池 隆宏、河野 孝昭、木綿 隆弘、小松 信義	4. 巻 46
2. 論文標題 リンク機構を用いた可変ピッチ式直線翼ダリウス風車の偏心リンク長さの制御効果に関する数値的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 風力エネルギー学会論文集	6. 最初と最後の頁 29～37
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11333/jwearonbun.46.4_29	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 木綿隆弘、河野孝昭	4. 巻 148
2. 論文標題 金沢大学における小形風力発電用技術の研究開発	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 風力エネルギー	6. 最初と最後の頁 618-621
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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Sakurai,H., Kono,T., Kiwata,T., Komatsu,N., Oi,S.
2. 発表標題 Experimental study on output characteristics of V-type vertical axis wind turbine
3. 学会等名 Grand Renewable Energy 2022 International Conference（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部 頌, 河野 孝昭, 木綿 隆弘, 小松 信義, 小野寺 康紀
2. 発表標題 V形垂直軸風車の出力に流入風の乱流特性が与える影響
3. 学会等名 第44回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 少路拓洋, 河野孝昭, 木綿隆弘, 小松 信義
2. 発表標題 V型垂直軸風車の出力及び後流特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2022 年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 櫻井洋貴, 大井翔生, 河野孝昭, 木綿隆弘, 小松信義
2. 発表標題 V形垂直軸風車の出力特性に関する研究
3. 学会等名 第27回動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大井翔生, 河野孝昭, 木綿隆弘, 小松信義, 櫻井洋貴
2. 発表標題 V形垂直軸風車の出力特性
3. 学会等名 第45回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 櫻井洋貴, 大井翔生, 河野孝昭, 木綿隆弘, 小松信義
2. 発表標題 V形垂直軸風車の諸特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2024年合同講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 河野孝昭
2. 発表標題 金沢大学における環境・生成可能エネルギー教育と風力エネルギー研究
3. 学会等名 令和5年度北陸信越工学教育協会年次シンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

金沢大学流体工学研究室 <a href="http://www.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/~fluid/">http://www.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/~fluid/</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	木綿 隆弘  (Kiwata Takahiro)  (40225107)	金沢大学・機械工学系・教授    (13301)	

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
---------	---------