

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00662

研究課題名(和文)直線翼垂直軸風車の空力騒音の低減対策

研究課題名(英文)Countermeasure for reducing the aeroacoustic noise from vertical axis wind turbine

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、直線翼垂直軸風車の出力特性を著しくは損なわない空力騒音低減手法の開発を目指し、アームの断面形状とブレード後縁に取り付けた鋸歯状突起(セレーション)形状が、風車出力特性および騒音特性に与える影響を風洞実験と数値流体力学解析により調べた。アーム断面形状については、翼型のアームと比べて、出力特性を著しく損なわず、騒音レベルを顕著に低減する新たな形状を考案した。さらに、空力騒音の原因となる変動圧力の値が、風車翼とアームの接合部付近で高くなることを明らかにした。セレーションについては、セレーションをつけない場合に比べて出力特性は顕著に低下するが、騒音レベルも顕著に低下することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

垂直軸風車は、市街地空間への導入事例が増えてきているが、騒音の研究事例は非常に少なく、十分な騒音低減対策が施されていない。本研究では、空気抵抗の小さい翼型のアームに比べて、出力特性を著しく損なうことなく、騒音レベルを顕著に低減するアーム形状を考案した。さらに、風車翼とアームの接合部付近が顕著な騒音源となっている可能性が高いことを明らかにした。即ち、この接合部付近のアーム形状に本研究で考案した形状を適用することで、市街地空間に導入する垂直軸風車の低騒音化が進展するものと考えられる。セレーションについては、騒音レベルは低下するが、出力特性も顕著に低下するため、さらなる形状の検討が必要である。

研究成果の概要(英文)：We investigated the effects of the cross-sectional shape of the arms of a straight-bladed vertical axis wind turbine (VAWT) and the shape of the serrations attached to the trailing edge of the VAWT's blades on the characteristics of the power and aerodynamic noise of the VAWT. We developed a new cross-sectional shape of the VAWT's arms that significantly lowers the aerodynamic noise while not significantly worsening the power output characteristics. In addition, we clarified that the variation of the surface pressure, which is the source of the aerodynamic noise, over the arms near the blades is significantly high. Moreover, we clarified that the serrations significantly lower the aerodynamic noise, although the power output characteristics are also significantly worsened.

研究分野：流体力学

キーワード：垂直軸風車 空力騒音 出力特性 騒音低減 風洞実験 数値流体力学解析

1. 研究開始当初の背景

小形風車は、国内外において、市街地等の建造環境 (Built environment) への導入量が増加してきている。特に、垂直軸風車は、水平軸風車に比べて風向に対する指向性が低いため、設備利用率の面で建造環境での設置に水平軸風車よりも適しているという考えがあり、導入事例が増えてきている。建造環境に風車を導入する際には、騒音への配慮が重要となる。しかし、水平軸風車に比べて垂直軸風車を対象とした騒音研究の事例は非常に少なく、垂直軸風車の騒音発生メカニズムは解明されていない点が多い。その為、既存の垂直軸風車には、十分な騒音低減対策が施されておらず、今後予想される建造環境への大量導入に伴い、騒音問題の顕在化が懸念される。本研究では、先行研究として、直線翼垂直軸風車を対象に風洞実験を実施し、マイクロホンアレイを風車上方と側方に設置して、周速比やブレードの端部、ピッチ角の変化が騒音レベルの空間分布に与える影響を調べた。その結果、風車上方の騒音分布において、ブレードが風上側に進む側のブレードとシャフトの間で騒音レベルが高くなる傾向があることを確認した (引用文献①)。また、この騒音レベルが高い場所の近傍は、風上側のブレードから放出された渦が通過することを同様の設定で実施した風車まわりの流れの数値流体力学(CFD)解析 (引用文献②)により確認した。ブレードに流入する風の中に含まれる乱れとブレードの前縁部が干渉することで生じる流入風騒音は、ブレード前縁の曲率半径に大きく依存することが知られている (D. Bowdler and G. Leventhall, Wind Turbine Noise)。以上より、風上側のブレードから放出された渦とアームの干渉が垂直軸風車の顕著な騒音源になっている可能性が高く、ブレードから放出される渦を乱れと考えると、渦の性状を制御したり、アームの形状を最適化することで、アームから発生する空力騒音を大きく低減できるとの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、直線翼垂直軸風車のブレードとアームについて、風車の騒音特性と出力性能に与える影響を解明し、出力性能を著しく損なうことなく空力騒音を低減させる対策の提案を行うことを目的とする。具体的には、(1)アームの断面形状の影響、(2)ブレード後縁に取り付けた鋸歯状突起列 (セレーション) の影響、を風洞実験と CFD 解析により明らかにする。

3. 研究の方法

(1)アーム断面形状の影響

Hara et al.(引用文献③)は、直線翼垂直軸風車のアーム断面形状を変化させて CFD 解析を行い、翼型のアームが矩形型、円形のアームより高い出力を維持できるという結果を報告した。しかし、翼型アームは後縁部の厚みが薄いため、後縁部の製造や強度の確保が比較的難しい。また、翼型の後縁は、翼面上で発達した境界層との干渉や、渦の放出などが騒音源となることが知られている。そこで、直線翼垂直軸風車のアーム断面形状として、翼型の前縁部形状を長方形の短辺に接合した形状 (以降、楕円型と称する) を考案した。この楕円型アームが風車の出力、騒音特性に与える影響を解明することを目的とし、風洞実験及び 3 次元 CFD 解析を実施した。

①実験方法

図 1 に実験装置の概略を示す。風洞は回流型で、吹き出し口と吸い込み口は、吸音材で覆われた無響室内にある。吹き出し口の寸法は 1.15 m × 1.15 m、無響室の寸法は 3.2 m × 3.5 m × 3.4 m である。供試風車は 3 枚翼で、翼型は NACA0021 であり、翼弦長は 0.15 m、翼スパン長さは 0.80 m である。風車直径は 0.88 m である。供試風車の主軸は、吹き出し口から 0.85 m 下流にある。

図 2 に本研究で用いた供試風車のアーム断面形状を示す。楕円型は、左端と右端それぞれから 0.027 m の部分が翼型の前縁部形状となっている。断面寸法は、翼型(NACA0021)の場合、翼弦長が 0.09 m、最大翼厚が 0.0189 m であり、矩形型と楕円型の場合は、横寸法を翼弦長に、縦寸法を最大翼厚に合わせている。これらのアームは、カバー形式となっており、横寸法 0.03 m、縦寸法 0.01 m のアルミ製の矩形型アームにかぶせたものである。

図 3 に風車上方に設置したマイクロホンの位置を示す。アジマス角は $\theta = 0^\circ$ において、主流とその翼に接続したアームが直交するよう定義している。マイクロホンは 16 個 (4 ×

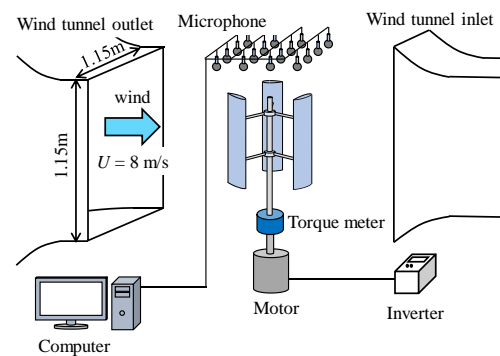


図 1 実験装置

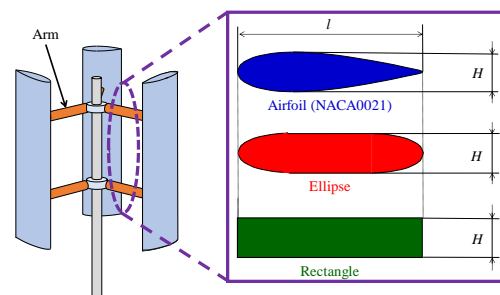


図 2 アーム断面形状

4) 設置しており、マイクロホン同士の間隔は 0.3 m である。また、マイクロホンは風車上方から 0.44 m (= $D/2$) の距離にあり、風洞吹き出し口より高い場所に設置されている。音圧を 15 秒間計測し、同時に 1/3, 及び 1/12 オクターブバンド分析を行う。

②計算方法

CFD 解析は、翼型アームと楕円型アームの場合についてのみ行う。CFD 解析には汎用熱流体解析ソフトウェア ANSYS FLUENT 17.2 を使用する。図 4 に本解析で用いた計算格子を示す。計算領域は、風車直径を $D = 0.88$ m、風車翼スパン長さを $h = 0.8$ m として、 $20D \times 30D \times 4h$ の大きさを持ち、風車を含む回転領域とその外側の非回転領域からなる。総格子数は約 3000 万である。翼表面には層状の境界層メッシュを配置し、翼とアーム表面上の法線方向の第一層格子幅は 10^{-6} m であり、壁面 y^+ は最大で 0.15 程度である。境界条件は、流入境界に一樣流速 $U = 8$ m/s、流出境界に Pressure Outlet $p = 0$ Pa、側面境界に Symmetry、風車翼、アーム、及び回転軸の表面に Non-slip 条件を課す。流れ場を 3 次元、非定常、粘性、非圧縮と仮定し、基礎方程式には連続の式と、Filtered Navier-Stokes 方程式を用いる。Large Eddy Simulation のサブグリッドスケールモデルには Dynamic Smagorinsky-Lilly モデルを用いる。支配方程式の空間離散化は、移流項には有界中心差分法、その他の項には 2 次精度中心差分法を用い、時間積分は 2 次精度陰解法により行う。圧力と速度のカップリングには PISO 法を用いる。時間刻み幅は風車が 0.5 度ずつ回転するように、約 3.0×10^{-4} s に設定する。

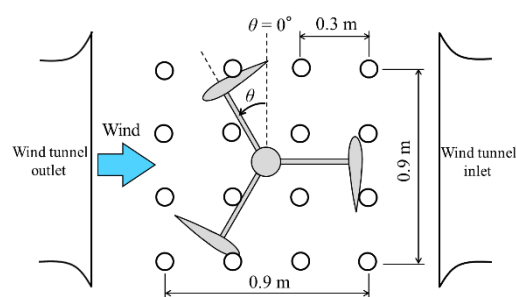


図 3 マイクロホン設置位置

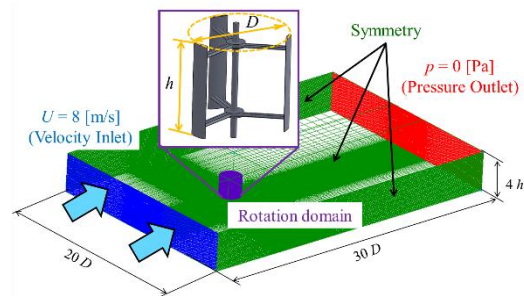


図 4 計算格子

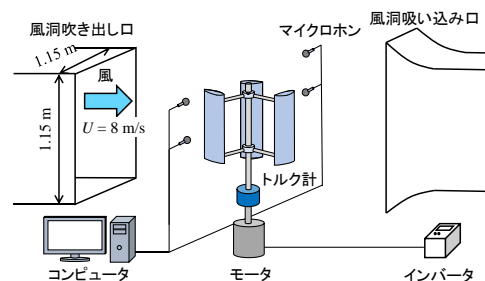


図 5 風洞実験設定

(2)セレーションの影響

Chong ら (引用文献④) は、一樣流中に置かれた NACA0012 単独翼の後縁に鋸歯状の突起列 (セレーション) を付加して風洞実験を行った結果、空力騒音が低減したことを報告した。セレーションを付加することで空力騒音の低減が期待できるが、直線翼垂直軸風車の翼に付加し、出力・空力騒音特性を調べた研究事例はほとんど存在しない。本研究では、翼後縁に付加したセレーションが直線翼垂直軸の出力特性や空力騒音特性に与える影響を解明することを目的として、風洞実験を実施した。

①実験方法

図 5 に実験装置の概略を示す。風車は図 1 と同じであり、風洞吹き出し口から 0.85 m 風下側に設置する。翼が風下側から風上側に向かって回転する領域を進み側 (Advancing side)、風上側から風下側に向かって回転する領域を戻り側 (Retreating side) と定義する。

図 6 にセレーションの形状を示す。セレーションは翼後縁に付加する。全幅は L であり、長さ h [mm] と角度 ε [°] を変えた 5 種類のセレーションを使用する。

図 7 にマイクロホンの設置位置を示す。マイクロホンは風洞吹き出し口から 0.85 m 風下の進み側、戻り側にそれぞれ 2 個ずつ設置し、A1、A2、R1、R2 の番号を与える。マイクロホンは風車主軸との距離が D であり、流路外にある。

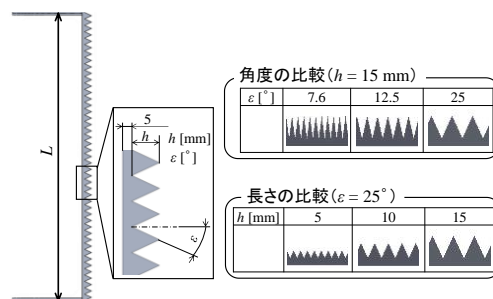


図 6 セレーション形状

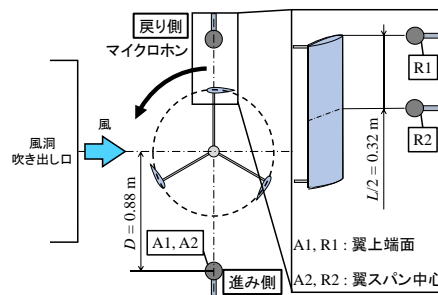


図 7 マイクロホン設置位置

4. 研究成果

(1)アーム断面形状の影響

①出力特性

図8に、出力係数 $C_p [= P / 0.5\rho U^3 Dh]$ 、 P : 出力、 ρ : 空気密度、 U : 風速]と周速比 $\lambda [= R\omega / U]$ 、 R : 回転半径、 ω : 角速度]の関係を示す。図中の値は、アームの寄与のみを考慮した C_p であり、アームによる風車の出力減少量を示している。風速は 8 m/s、出力 P は風車を 50 回転させた平均値である。翼型アームでの出力減少量が最小となっている。これは、それぞれの断面形状の抗力係数の中で、翼型の抗力係数が最も小さいためであると考えられる。また、楕円型アームの出力減少量は翼型アームよりも大きい。CFD 解析の結果は実験値と良く致している。

②騒音特性

図9に、各マイクロホンで測定された 1/3 オクターブバンド分析による $\lambda = 1.6$ での風車上方の騒音レベルのオーバーオール値 (OASPL [dB(A)]) の水平分布を示す。図中の実線と破線は、それぞれ風車主軸の位置と翼の回転軌道である。翼型アームの場合で騒音レベルが最も高く、矩形型アームの場合で最も騒音レベルが低い。楕円型アームの場合、翼型アームの場合に比べて最大で約 1 dB 騒音レベルが低く、矩形型アームの場合より最大で約 1.9 dB 高い。1/3 オクターブバンド分析は上限周波数が 20000 Hz であるが、上限周波数が 5500 Hz である 1/12 オクターブバンド分析でもこの傾向は確認された。

楕円型アームの場合で翼型アームの場合より騒音レベルが低くなった原因を CFD 解析結果から考察する。図10に、翼型アームと楕円型アームそれぞれの場合の上から見た風車表面の変動圧力分布を示す。翼型アームの場合は楕円型アームの場合と比べて、風車翼とアームの接合部付近において、広い範囲で圧力変動が大きくなっている。図11に、 $\theta = 90^\circ$ における、図10中の破線で示したアーム断面周りの相対速度ベクトル分布 (回転座標系基準) を示す。翼型アームの場合には、アーム表面上でより規模の大きい流れの剥離や再付着が確認できる。このような傾向は、 $0^\circ < \theta < 180^\circ$ で確認された。そのため、風車翼とアームの接合部付近において、翼型アームの場合で楕円型アームの場合より圧力変動が広い範囲で大きくなり、結果として翼型アームの方が約 400Hz 以上の広帯域で、高い騒音レベルを示したと考えられる。

③まとめ

- 楕円型アームの出力減少量は翼型アームの次に小さく、矩形型アームとの差異は顕著である。
- 楕円型アームの OASPL は翼型アームよりも低い。矩形型アームの場合より高くなる。
- 楕円型アームの場合、翼型アームの場合と比べて風車翼とアームの接合部付近の、アーム表面上での流れの剥離が抑制されるため、翼型アームの場合よりも騒音レベルが低減したと考えられる。

(2)セレーションの影響

①出力特性

図12に翼の寄与のみを考慮した出力係数を示す。セレーションを付加した場合、いずれの形状でも $\lambda = 1.2$ 以下の低周速比で風車の出力係数が増加するが、最大出力係数は低下する。また、 h 、 ε の値が大きいほど、低周速比で出力係数が増加し、高周速比で出力係数が減少する。これは、セレーションを付加したことにより翼性能が変化したことが主な原因であると考えられるが、セレーションから発生する縦渦の影響や、セレーション分のソリディティが増加することも原因として考えられる。

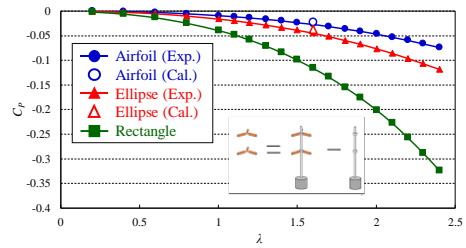


図8 出力係数に対するアームの寄与

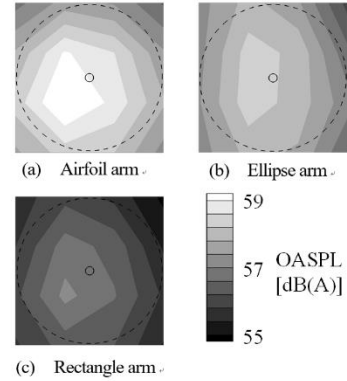


図9 風車上方の OASPL [dB(A)]

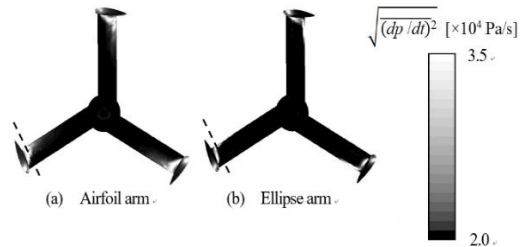


図10 表面圧力の時間微分の RMS 値分布

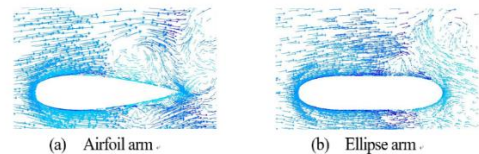


図11 アーム周りの相対速度ベクトル分布

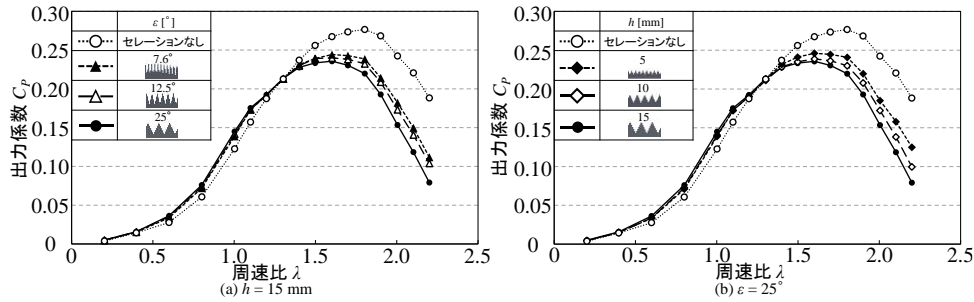


図 12 翼の寄与のみを考慮した出力係数

②騒音特性

図 13 にセレーションを付加した際の最適周速比近傍である $\lambda = 1.6$ における各マイクロホンで測定された騒音レベル SPL [dB(A)] のオーバーオール値 OASPL [dB(A)] を示す。いずれの形状でも SPL が低減しており、特に風車翼への相対流入風速が大きくなる戻り側でより顕著である。図 14 に低減量が最大となったマイクロホン R2 における SPL の周波数スペクトルを示す。セレーションを付加した場合、 h, ϵ の値が大きいほど、Chong らの単独翼では 1000~5000 Hz の広帯域における SPL が顕著に低下したが、本研究の風車では 100~1000 Hz の広帯域における SPL の低下が顕著となっている。この周波数帯における SPL の低下が OASPL の低減に寄与したと考えられる。100 Hz 以下の広帯域においてはセレーションを付加した場合に SPL が上昇しているが、この原因として、図 15 の進み側において同様の傾向が確認できないことから、セレーションにより翼後縁から発生する渦の強度が増加し、その渦と後続の翼等との干渉により生じる乱流流入騒音が増大したことが考えられる。

③まとめ

- ・セレーションを付加すると、風車の最大出力係数が低下する。
- ・セレーションの長さ h 、角度 ϵ の値が大きいほど、風車の最大出力係数が低下する。
- ・セレーションを付加すると、100~1000 Hz の広帯域において顕著に SPL が低下し、OASPL が低減される。
- ・セレーションの h, ϵ の値が大きいほど、100~1000 Hz の広帯域における SPL の低減量が大きくなる。

<引用文献>

- ① 河野孝昭, 他 4 名, 直線翼垂直軸風車の空力騒音に関する風洞実験, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 79, No. 808, pp. 2577-2581, 2013.
- ② Firdaus, R. et al., Numerical and Experimental Studies of a Small Vertical-Axis Wind Turbine with Variable-Pitch Straight Blades, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 10, No. 1, Paper No. 14-00273, pp. 1-15, 2015.
- ③ Hara Y. et al., Numerical analysis of effects of arms with different cross-sections on straight-bladed vertical axis wind turbine, Energies, 12, 2106, 2019.
- ④ TP Chong et al., An experimental study of airfoil instability tonal noise with trailing edge serrations, Journal of Sound and Vibration, 332, pp 6335-6358, 2013.

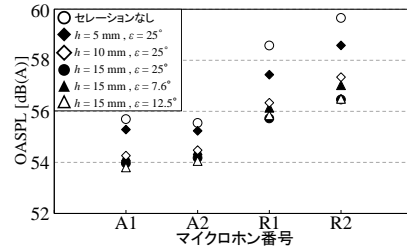


図 13 各マイクロホンの OASPL [dB(A)]

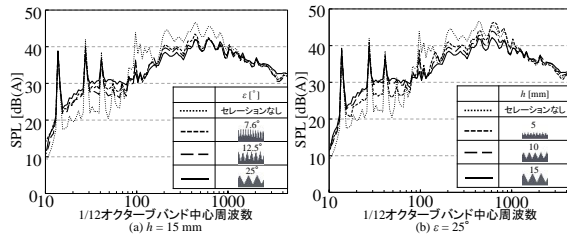


図 14 R2 での SPL [dB(A)] の周波数スペクトル

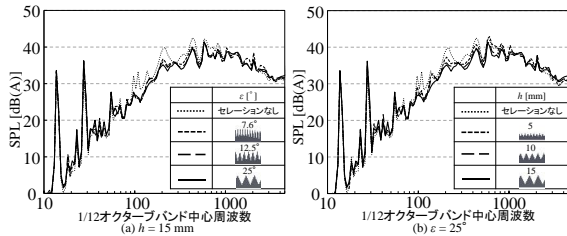


図 15 A2 での SPL [dB(A)] の周波数スペクトル

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Elkhoury M., Kiwata T., Nagao K., Kono T., ElHajj F.	4. 巻 129
2. 論文標題 Wind tunnel experiments and Delayed Detached Eddy Simulation of a three-bladed micro vertical axis wind turbine	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Renewable Energy	6. 最初と最後の頁 63 ~ 74
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.096	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 該当する

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 安田進之介, 濱田健太郎, 河野孝昭, 木綿隆弘, 小松信義
2. 発表標題 アーム断面形状が直線翼ダリウス風車の出力特性及び空力騒音特性に与える影響
3. 学会等名 第41回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安田進之介, 河野孝昭, 木綿隆弘, 小松信義
2. 発表標題 アーム断面形状がH型ダリウス風車の出力特性及び空力騒音特性に与える影響
3. 学会等名 流体工学シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hamada K., Yasuda S., Kono T., Kiwata T., Komatsu N.
2. 発表標題 Study on the Characteristic of the Aeroacoustic Noise of a Straight-bladed Vertical-axis Wind Turbine
3. 学会等名 Grand Renewable Energy 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hamada K., Yasuda S., Kono T., Kiwata T., Komatsu N.
2. 発表標題 Effects of the Arm's Cross-sectional Shape on the Aeroacoustic Noise of a Straight-bladed Darrieus Wind Turbine
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱田健太郎, 河野孝昭, 木綿隆弘, 小松信義
2. 発表標題 直線翼垂直軸風車の出力と空力騒音に関する研究
3. 学会等名 第4回RSET主催市民向けセミナー
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱田健太郎, 河野孝昭, 木綿隆弘, 小松信義
2. 発表標題 直線翼ダリウス風車の翼表面に取付けたトリップワイヤが出力・空力騒音に与える影響
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第56期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hamada,K. Saito,Y. Kono,T. Kiwata,T. Komatsu,N.
2. 発表標題 Effects of the arm's cross-sectional shape on the aeroacoustic noise of a straight-bladed vertical-axis wind turbine
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 濱田健太郎, 齋藤佳輝, 河野孝昭, 木綿隆弘, 小松信義
2. 発表標題 直線翼垂直軸風車のアーム断面形状が空力騒音に与える影響
3. 学会等名 第39回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 濱田健太郎, 齋藤佳輝, 河野孝昭, 木綿隆弘, 小松信義
2. 発表標題 直線翼垂直軸風車のアーム断面形状が空力騒音に与える影響
3. 学会等名 第4回サステナブルエネルギー研究センター公開シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 濱田健太郎, 齋藤佳輝, 河野孝昭, 木綿隆弘, 小松信義
2. 発表標題 直線翼垂直軸風車の翼弦長が空力騒音に与える影響
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第55期総会
4. 発表年 2018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
<http://www.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/~fluid/>

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
連携 研究者	木綿 隆弘 (Kiwata Takahiro) (40225107)	金沢大学・機械工学系・教授 (13301)	