

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04967

研究課題名（和文）風力エネルギーを省エネに活用することで超高効率利用する煙突型排気システムの開発

研究課題名（英文）Development of a chimney-type exhaust system that uses wind energy with high efficiency for energy conservation

研究代表者

渡邊 康一（Watanabe, Koichi）

九州大学・洋上風力研究教育センター・学術研究員

研究者番号：30811799

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：野外の風力を用いて、排気用タワーに用いられる強制排気用のファンの消費電力を大幅に省エネすることを目的とし、効果的な排気タワーの形状を研究した。タワー内の排気風速が野外の上空風速と同程度以下の場合、タワーの出口形状や上空風速が省エネ性能に大きく影響し、スリットとガイド板をもつタワー出口形状とすることで、風向に依存せずに高い省エネ効果を発揮できることを発見した。一方、排気風速が上空風速より高い場合には、大きな省エネ効果を得るためにはタワー自体をディフューザ形にすることが必要で、高アスペクト比ディフューザ形状を採用することにより、ファンの消費パワーを最大で70%程度削減可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工場の煙突や地下道路の換気塔などの排気用タワーには、しばしば強制排気用のファンが設置され、大きなものは数メガワットの電力を常時消費している。再生可能エネルギーである風力や、流れの流体力学的な性質を活用すると、ファンの消費電力を削減でき、排気システムの運用コストを抑えながら、環境保全にもつなげることができる。本研究で得られた成果は、上空の風向に依存せずに風力を用いながら、ファン消費パワーを最大70%削減可能なタワー形状を提案したこと、及びその際の流体現象を明らかにしたことである。これにより大きな省エネ効果と、創エネだけでなく省エネ利用で風力を利用するという新たな視点、研究分野の広がりを提供する。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to use wind power for significant energy savings in the power consumption of the fans used in the exhaust towers. Effective exhaust tower shapes were examined experimentally, numerically, and analytically. In the case the exhaust wind speed in the tower was lower than the ambient wind speed, the tower outlet shape and the ambient wind speed had a significant impact on the energy-saving performance. Then, the tower exit shape with slits and guide plates provided high energy-saving effects independent of wind direction. On the other hand, in the case the exhaust air velocity was higher than the ambient air velocity, the tower had to be entirely diffuser-shaped in order to obtain a large energy-saving effect. We showed that a tower with a high aspect ratio diffuser shape reduced fan power consumption by 70% at maximum.

研究分野：流体工学

キーワード：風力 省エネ 煙突排気

1. 研究開始当初の背景

工場の煙突や地下道路の換気塔などの排気用タワーには、しばしば強制排気用のファンが設置されている。これらのファンは大きなものでは常に数メガワットもの電力を消費している。もし、再生可能エネルギーである“風力”を用いて、流体力学的な原理を用いて煙突内部に風を生み出すことができれば、排気ファンが風を生み出す際のロスも含めて消費パワーを削減でき、それらの消費電力を大幅に削減できる。しかし、実現のためには以下の課題が存在した。

- 既存の煙突にあとから追加するだけで強い風を生じさせる構造体形状の発見
 - 風向変動の影響を受けず、なるべく小さな構造体で強い風を生じさせる技術の確立
- 上記の課題を克服することで、小さな投資で大きな省エネ効果を生み出す方法を社会に提案し、創エネだけでなく省エネ利用で風力の利用効率を高められることの実証を目指した。

2. 研究の目的

排気用タワーに用いられる強制排気用のファンの消費電力を、野外の風力を用いて大幅に省エネするために、「小さくて高効率」、かつ「風向に影響を受けない」創風構造体の形状を「発見」し「実証」することを本研究の目的とした。具体的には、風力エネルギーの140%の相当する電気エネルギーを節約することを目標とし、風洞実験、数値シミュレーションなどによって、効果的なタワー形状を探索し、省エネ性能の予測、実証を行うことを目指した。

3. 研究の方法

大型風洞を用いた排気用タワーシステムのモデル試験、及び、タワーまわりの流れの数値シミュレーションを行った。同時に、理論解析による省エネ性能の予測と、野外実験による検証を実施した。

大型風洞を用いたモデル試験では、様々な形状のタワー縮尺模型を製作して風洞内に設置し(図1)、その出口部に水平方向から風を当てた際の、タワー内の創風効果を検証した。流速計で測定したタワー内部の流速を指標とし、タワー形状ごとの創風性能の高さや風向依存性を検証した。次に、タワー内に強制排気用のファンを設置し、実際に消費電力が削減されるかを検証した(図2)。

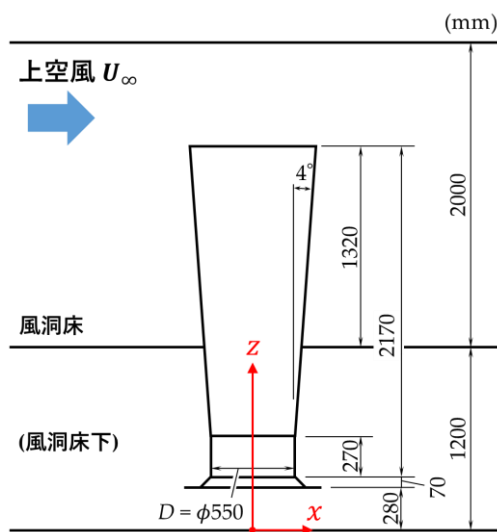


図1 風洞実験の概要図(タワー形状は一例)

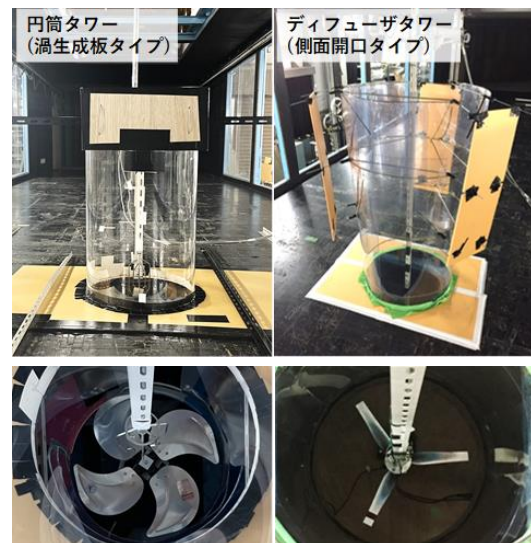


図2 風洞実験に用いたタワーやファンの例

数値シミュレーションでは、有限差分法を用いた構造格子での非圧縮流体シミュレーションを行い、風洞実験にて優れた風向依存性を発揮した出口形状を持つモデルに対する流れ場の解析を行った。

理論解析では、風車の性能予測に用いられる翼素運動量理論を応用して排気タワーに適用し(図3)、ファンの省エネ性能予測を行った。

野外実験では、九州大学応用力学研究所に設置された高さ約12mのウインドソーラータワーを用いて野外測定を行い、野外の風に対するタワー内の創風性能を検証した。

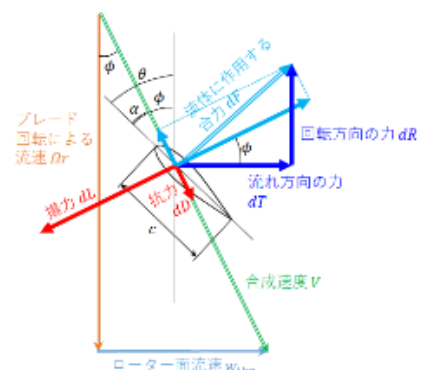


図3 排気ファン翼素に作用する空気力

4. 研究成果

(1) 風洞実験結果

単純な円筒形状のタワーとディフューザ形状のタワー、及び積極的に低圧領域を生成する出口形状としたタワーの創風効果をそれぞれ比較検討した(図4)。その結果、以下のことが明らかとなった(図5)。

- タワーにアプローチする上空風の風向によらず、ディフューザ形状のタワーで高い創風性能が得られる。
- タワー出口形状に関しては、タワーにアプローチする上空風の風向を基準として、タワー出口の風上側に渦生成板を設置した場合に最も高い創風性能が得られるが、風向依存性が大きい。
- タワー側面にスリットを設けることでも創風性能が向上するが、スリットを設けただけでは風向依存性が大きく、スリットの外側にガイド板を追加してやることで、上空風の風向に依存せずに高い創風性能を得ることができる。

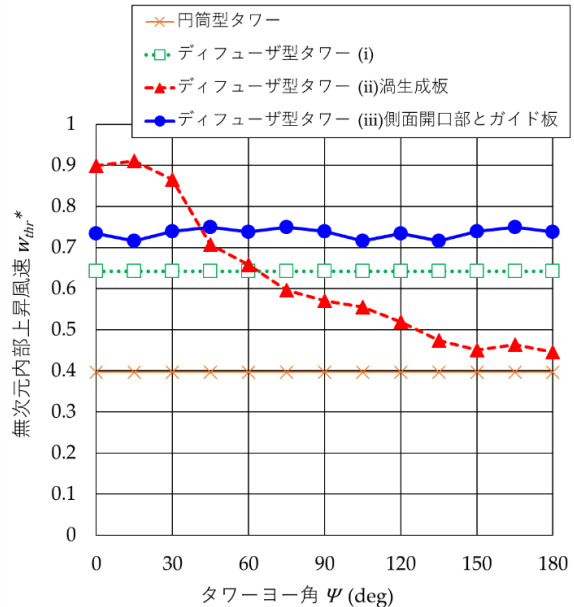
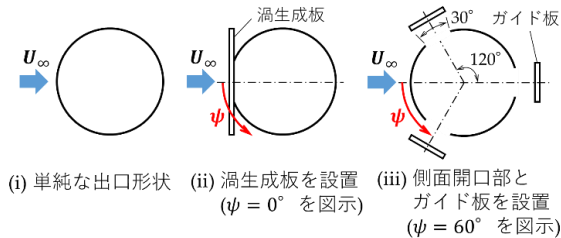


図4 検証したタワーモデルの出口形状

図5 各タワーモデルの ψ に対する w_{thr}^* の分布

タワー内に排気用のファンを設置して消費パワーを測定した結果を、図6、図7に示す。タワーに横から風をあてた場合には実際に省エネ効果が得られ、上空風の風速が高くなるほど、大きな省エネ効果が得られることを実証した。また、ディフューザ形状のタワーがより効果的であることも実証された。

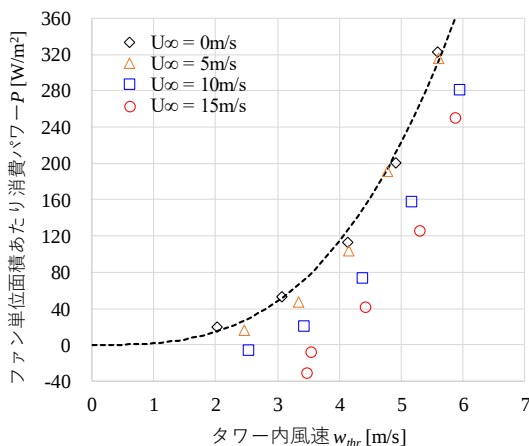


図6 円筒タワーの w_{thr} に対する P の分布

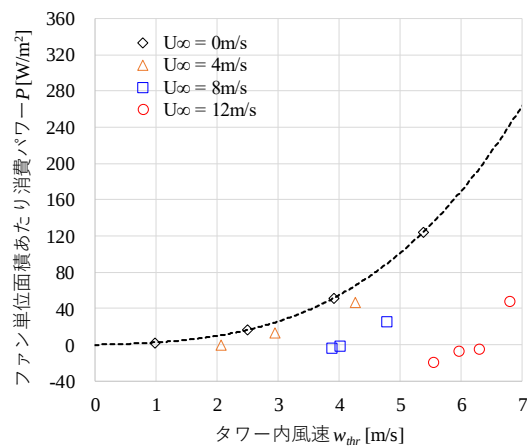


図7 ディフューザタワーの w_{thr} に対する P の分布

(2) 数値シミュレーション結果

図8から図11に数値シミュレーションで得られた、タワー側面にスリットをもつタワーまわりの流れ場を示す。まず、流線と主流方向の流速分布(図8、図9)から、スリットのみでは創風性能が低下してしまう上空風向の場合であっても、ガイド板があるタワーの場合は、ガイド板が上空風のタワー内への侵入を効果的に防ぐことが分かった。これによって、排気を阻害するタワー内部の圧力上昇を防ぐことができる(図10、図11)。このメカニズムにより、ガイド板を

設置したスリットをもつタワーは、上空風向によらず高い創風性能を発揮できることが明らかとなった。

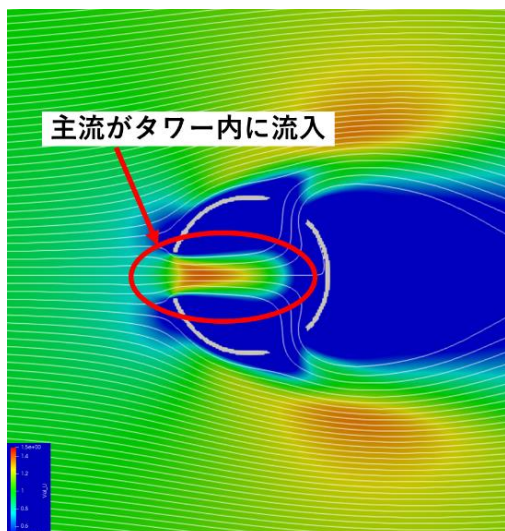


図 8 流線と主流方向流速分布(スリットのみ)

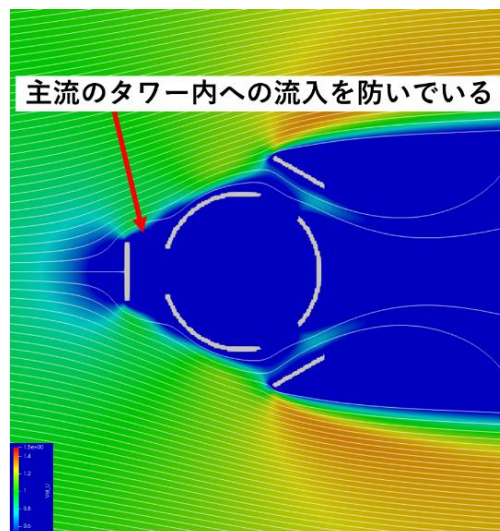


図 9 流線と主流方向流速分布(ガイド板あり)

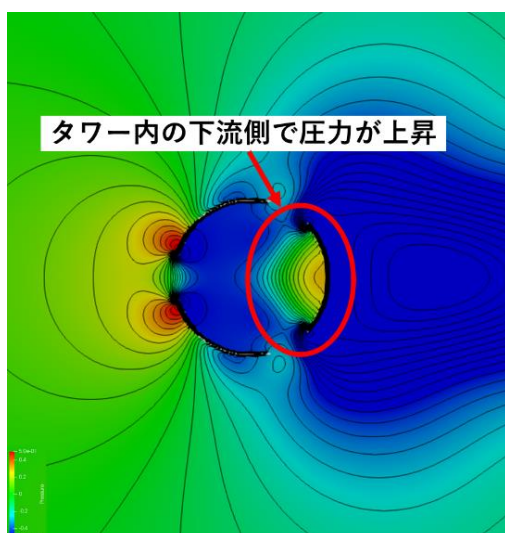


図 10 時間平均圧力分布(スリットのみ)

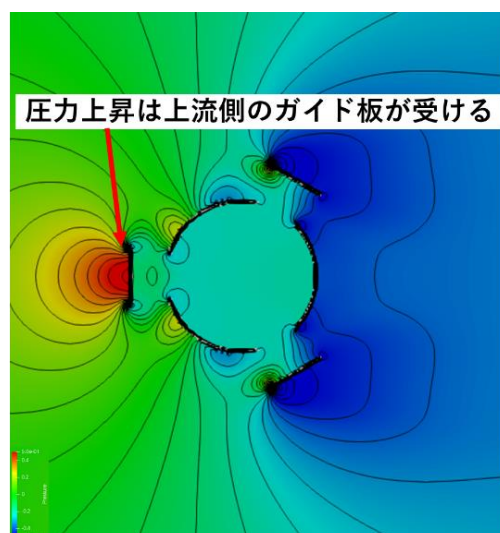


図 11 時間平均圧力分布(ガイド板あり)

(3) 理論解析結果

理論解析では、つば付きディフューザ風車の簡易理論を構築し、さらに翼素運動量理論を用いて、タワー内部に設置された排気ファンの消費電力を定式化(式(1)、式(2))することで、その削減量を予測・評価した。

$$\sigma \cdot \sqrt{1 + \lambda^2} (C_L \lambda - C_D) = C_b \left(\frac{u_\infty}{w_{thr}} \right)^2 + (1 + \xi - C_d) \quad \dots(1)$$

$$dP = \frac{1}{2} \rho dA_{rot} w_{thr}^3 \cdot \sigma \cdot \lambda \sqrt{1 + \lambda^2} (C_L + C_D \lambda) \quad \dots(2)$$

その結果、タワー内風速が 6m/s 程度までの場合、タワー出口形状や野外の風速が省エネ性能に大きく影響すること(図 12、図 13)、より高い風速ではディフューザが大きな効果を発揮すること(図 14)が示され、特にディフューザの圧力回復係数が 0.8 程度得られる場合は、ファンの消費パワーを約 70%も削減する省エネ効果を得ることが示された。そこで、高アスペクト比のディフューザモデルを製作して風洞実験を追試し(図 15)、実現性を検証したところ、開き角が小さいアスペクト比 30 以上のタワーでは、実際に 0.8 以上の圧力回復係数が得られ(図 16)、ディフューザ型のタワーの採用によって、排気ファンの消費パワーが大幅に削減される可能性を確認することができた。

(4) 野外実験結果

野外実験で野外風による創風効果を検証したが、12m 程度のタワー高さでは、広い集熱部吸気口への風の流入による悪影響があり、創風性能が阻害されることが分かった。しかしながら、流入口形状の試行錯誤を通してそのメカニズムは特定できたため、より高さのあるタワーや、吸気側にもファンを持つ実際のシステムにおいては、この悪影響は低減可能なことが示唆された。

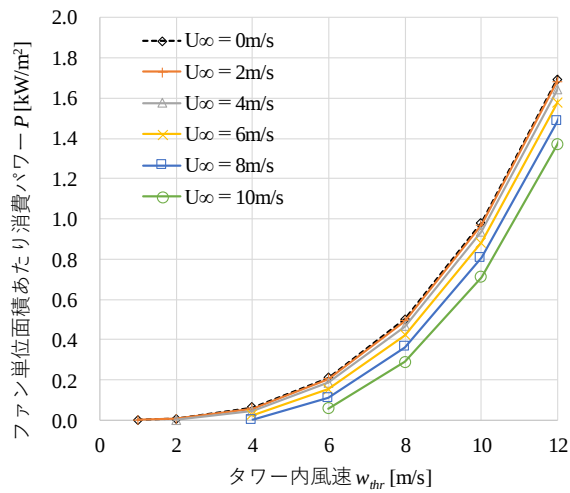


図 1 2 上空風速 U_{∞} が P に与える影響



図 1 5 高アスペクト比ディフューザ($AS = 60$)

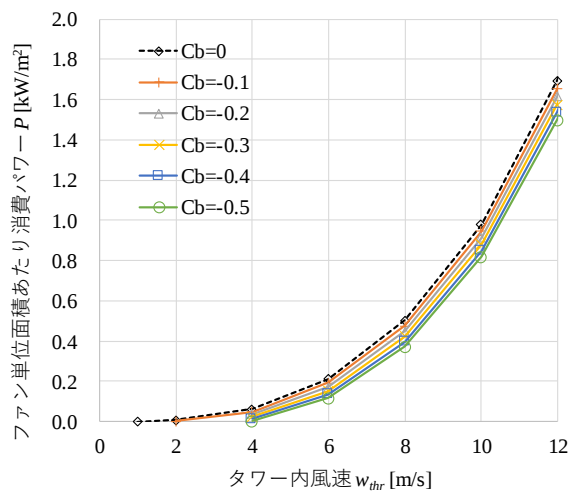


図 1 3 タワー出口の圧力係数 C_b が P に与える影響

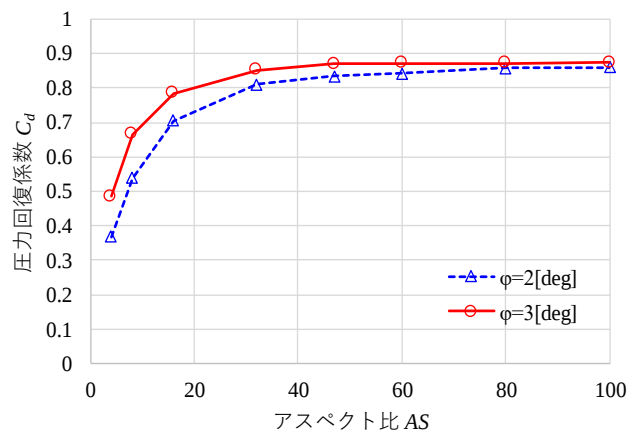


図 1 6 アスペクト比に対する圧力回復係数 C_d の関係

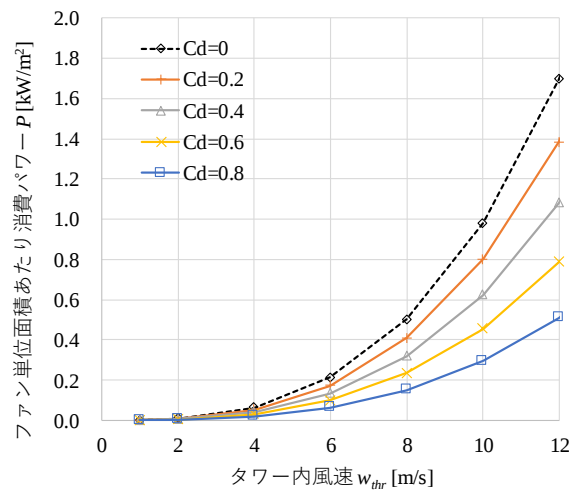


図 1 4 ディフューザ圧力回復係数 C_d が P に与える影響

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 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Watanabe Koichi、Ohya Yuji	4. 巻 14
2. 論文標題 A Simple Theory and Performance Prediction for a Shrouded Wind Turbine with a Brimmed Diffuser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 3661～3661
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en14123661	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 渡邊康一、柳川泰我、内田孝紀
2. 発表標題 風力による排気塔ファン消費電力の省エネルギー化
3. 学会等名 風工学会 2023年度 年次研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林昇吾、渡邊康一、内田孝紀
2. 発表標題 ウィンドソーラータワーの発電性能の向上に向けた高アスペクト比ディフューザの性能評価
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 渡邊康一、林昇吾、内田孝紀
2. 発表標題 風力による圧力差を活用した排気塔ファンの省エネルギー化
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 渡邊康一、柳川泰我、大屋裕二、内田孝紀
2．発表標題 風力を排気ファンの省エネに活用する試みとその可能性
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 柳川泰我、渡邊康一、大屋裕二、内田孝紀
2．発表標題 タワー出口形状の改良によるウインドソーラータワーの発電性能向上
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 Taiga Yanagawa, Koichi Watanabe, Yuji Ohya and Takanori Uchida
2．発表標題 Improvement of Power Output of Wind Solar Tower by Utilizing Wind Energy at Tower Exit
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 渡邊康一、柳川泰我、大屋裕二、内田孝紀
2．発表標題 全方位からの風力エネルギーを活用し煙突の排気効果を高める煙突出口形状
3．学会等名 第43回風力エネルギー利用シンポジウム
4．発表年 2021年

1. 発表者名 柳川泰我、渡邊康一、大屋裕二、内田孝紀
2. 発表標題 タワー側面の開口によるウィンドソーラータワーの集風性能の向上
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2021)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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