

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12294

研究課題名（和文）機械学習に基づく低圧ファンから発生する広帯域騒音の予測に関する研究

研究課題名（英文）Study of broadband noise prediction generated from a low-pressure fan based on machine learning

研究代表者

佐々木 壮一（Sasaki, Soichi）

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号：00304965

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）：低圧ファンから発生する空力騒音の中でも、広帯域騒音は流体力学の専門分野において重要な課題に位置付けられている。本研究において、無響室を有する低騒音風洞を開発し、広帯域騒音の予測における主要パラメータである圧力パワースペクトル密度（圧力PSD）を機械学習により生成した。この圧力PSDに基づいて、平板から発生する広帯域騒音を高精度に予測することができた。また、低圧ファンの試験装置で測定された空力騒音と機械学習による予測値との比較から、低圧ファンから発生する広帯域騒音がカルマン渦放出による圧力PSDによって発生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

厚生労働省の新型コロナウイルス感染症対策専門会議は、感染リスクのある空間として「換気の悪い密閉空間」を挙げている。その屋内換気のために常時稼働する換気用のファンには、排気性能だけでなく、静穏な環境を保つために低騒音であることも求められる。このファンから発生する広帯域騒音の解析的な予測では、その精度や計算コストが現実的な課題となっている。機械学習による広帯域騒音の予測では、流れの数値シミュレーションのように運動方程式や質量の保存則を満足しながら計算する必要がない。このため、低圧ファンの空力騒音を予測するための計算コストを大幅に低減することが可能になる。

研究成果の概要（英文）：Among the aerodynamic noises generated by low-pressure fans, broadband noise is considered an important issue in the field of fluid mechanics. In this study, we developed a low-noise wind tunnel with an anechoic room and used machine learning to generate pressure power spectral density (PSD), which is a key parameter for predicting broadband noise. Based on this pressure PSD, it is possible to predict the broadband noise generated from a flat plate with high accuracy. Moreover, from the comparison between the measured aerodynamic noise in the experimental apparatus of a low-pressure fan and the noise predicted by machine learning, we revealed that the broadband noise generated by the fan was caused by the pressure PSD of Karman vortex shedding.

研究分野：流体力学

キーワード：広帯域騒音 ファン 風洞 機械学習 圧力PSD

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2020年3月の新型コロナウイルスの世界的な感染拡大がパンデミックと形容され、私たちはこれまでに経験のない事態に直面した。厚生労働省の新型コロナウイルス感染症対策専門会議は、当時、感染リスクのある空間として「換気の悪い密閉空間」を挙げていた。その屋内換気のために常時稼働する換気用のファンには、排気性能だけでなく、静穏な環境を保つために低騒音であることも求められる。低圧ファンから発生する空力騒音の中でも、その主因となる広帯域騒音は流体力学の専門分野においても重要な課題に位置付けられている。R. K. Amiet⁽¹⁾は、平板の広帯域騒音の空力音源が後流に放出される乱流の擾乱によってその後縁近傍に形成されることを数学的にモデリングした。この予測式における主要パラメータは、放射積分と翼後縁の圧力パワースペクトル密度 (圧力 PSD) である。モデル解析による広帯域騒音の研究では、前者の放射積分には Schwarzchild⁽²⁾の解が用いられている。後者の圧力 PSD については、Yannick Rozenberg モデル⁽³⁾や流れの数値シミュレーションによる解析⁽⁴⁾によって決定する方法などが提案されている。しかし、低圧ファンから発生する広帯域騒音の解析的な予測では、その精度や計算コストが現実的な課題となっている。一方、機械学習では流れの数値シミュレーションのように運動方程式や質量の保存則を満足しながら計算する必要がないため、低圧ファンのような複雑な物体から発生する空力騒音を予測するための計算コストを大幅に低減することが可能になる。

2. 研究の目的

本研究では、実験流体力学と欧州で発達したモデル解析の融合を目的として、広帯域騒音の予測における主要パラメータである圧力 PSD を機械学習により生成する。また、低圧ファンの試験装置を実際に製作し、そのファンから発生する広帯域騒音のメカニズムを機械学習の分析に基づいて明らかにする。本研究で提案する機械学習の教師データには、風洞試験によって計測された実測値の実験データが用いられることに特徴がある。この機械学習によって生成された圧力 PSD に基づいて翼素から発生する後縁騒音を予測することが可能になれば、低圧ファンの設計条件と運転条件を満足しながらその空力騒音を低減させることが可能になる。

3. 研究の方法

図1は本研究で製作された風洞試験設備全体の構成を示したものである。無響室の大きさは $2.3\text{m} \times 3.6\text{m} \times 2.1\text{m}$ である。無響室の側壁は厚さ 90mm の空気層を有する遮音壁で覆われている。天井と全ての壁に吸音材が貼り付けられている。平板の翼弦長は 40mm 、スパン長さは 100mm 、翼厚は 2mm である。平板の前縁はノズル出口の 100mm 後方に取り付けられる。1/2 インチマイクロホンが翼の後縁から 500mm 離れた位置に設置される。騒音計からの信号は FFT アナライザへ入力され、その空力騒音の周波数応答特性が解析される。

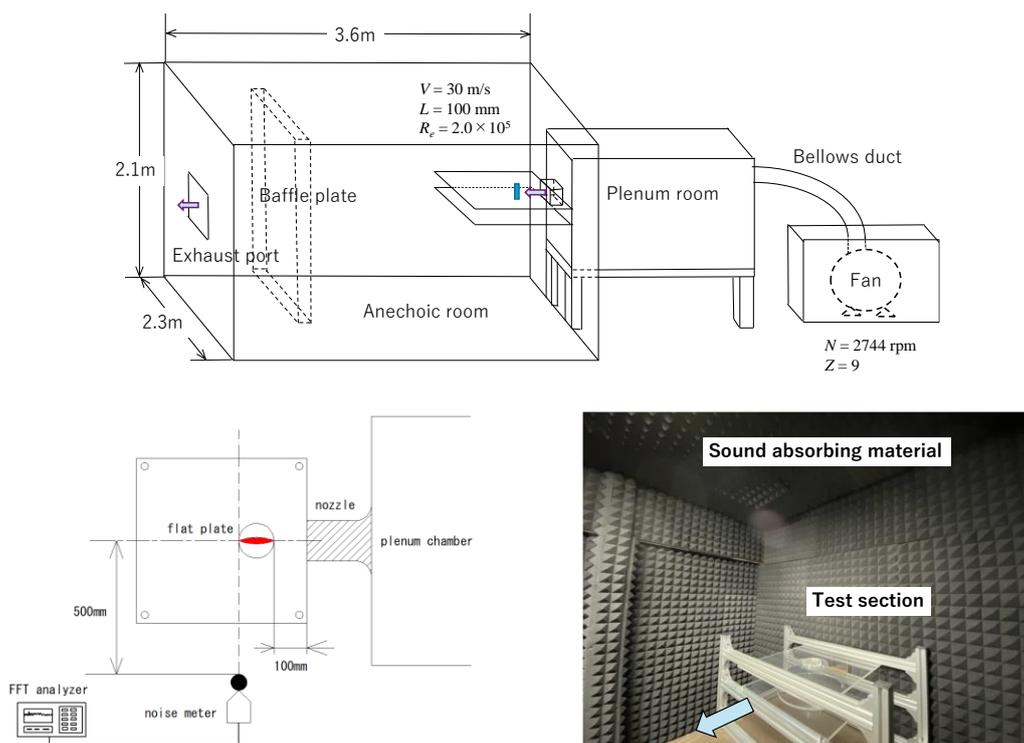


Fig. 1 Experimental setup of wind tunnel with an anechoic room

Amiet は、平板から発生する遠方音場の音圧パワースペクトル密度を式(1)として与えている。

$$S_{pp}(x, 0, z, \omega) = \left(\frac{\omega b z}{2 \pi a_0 \sigma^2} \right)^2 l_y(\omega) d |I|^2 S_{qq}(\omega, 0) \quad (1)$$

ここで、 S_{pp} は音圧 PSD、 l_y はスパン方向相関長さ、 d はスパン長さ、 I は放射積分、 $S_{qq}(\omega, y)$ は翼面上の圧力 PSD である。機械学習による広帯域騒音の予測では、決定木が回帰モデルに採用されている。回帰モデルの特徴量はその目標変数の変化に寄与するパラメータである。本研究では、迎角、主流速度、周波数を特徴量とした。また、目標変数は予測の対象となる圧力 PSD である。決定木には、分岐ごとに特徴量の条件が定められており、その条件に従って目的変数のツリーが形成される。決定木の予測値は、この分類された領域の平均値である。

図 2 は解析の対象となる軸流ファンを示したものである。試験の対象となる軸流ファンは直流モーターによって駆動される縦横 120mm の IoT 機器における熱排気用の軸流ファンである。このファンの定格回転数は 12000rpm である。5 枚の動翼の直後には、旋回流を整流するための 13 枚の静翼が設置されている。図 3 には、本研究で製作された軸流ファンの性能試験装置が示されている。ファン性能の試験装置は JIS B8330 の押し込み送風機の規格に準じて製作されたものである。送風機の静圧はファンの出口から 80mm 後方に取り付けられた静圧孔によって測定される。ファンの効率は理論動力と消費電力の比によって評価されたものである。ファンの回転数は定格回転数となるように直流電源で調整される。流量はプレナム室の十分下流側に取り付けられたオリフィスによって測定される。ファンの流量は補助ファンとダンパーによって調整される。ファン騒音はファン吸い込み口 1.0m 上流側に設置された精密騒音計によって測定される。騒音計からの信号は FFT アナライザへ入力され騒音の周波数応答が解析される。流れの数値シミュレーションの解析モデルの要素数は、パラメータスタディを通して約 600 万に設定されている。翼面近傍では最小格子幅が $y^+ < 5$ となるように設定されている。乱流モデルには SST $k-\omega$ モデルが適用されている。

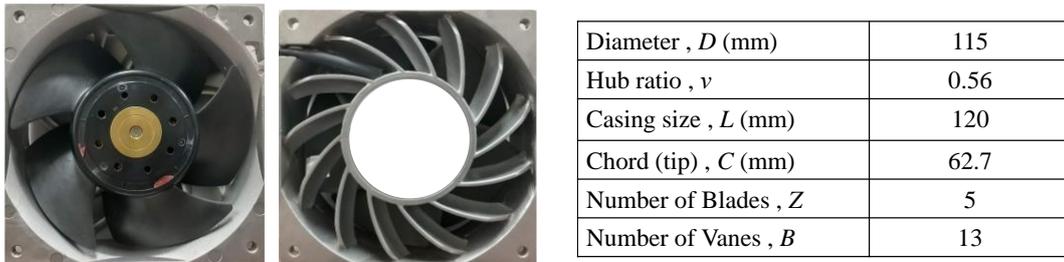


Fig.2 Axial flow fan and its main dimensions

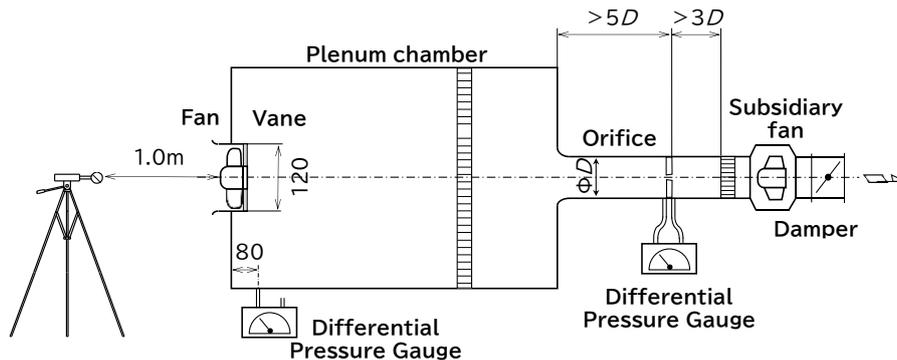


Fig.3 Experimental apparatus for the measurement of the fan performance

4. 研究成果

図 4 には、平板の実測値の広帯域騒音と予測値が合わせて示されている。以下の説明では、W. W. Willmarth - F. W. Roos⁽⁵⁾、P. Gliube⁽⁶⁾および B. D. Mugridge⁽⁷⁾によって提案された圧力 PSD の解析モデルを WR モデル、G モデルおよび M モデルと呼ぶことにする。(a)がこれらの圧力 PSD のモデル解析によって予測された平板の広帯域騒音である。主流速度が 25m/s、迎角が 12°である。後縁に集中した波長の短い後縁騒音には、高周波音の特徴がある。三つのモデルを比較した範囲では、G モデルが高周波の帯域における実測値の傾向を表すことができた。M モデルは原著の予測と同様に 200Hz から 1000Hz 近傍の低周波の領域で実測値と同程度になった。一方、WR モデルの予測値のスペクトルは全ての周波数の帯域で実測値よりも小さくなった。しかし、これら三つの圧力 PSD に基づく予測の範囲では、実測値の広帯域騒音を一つの関数で表すことができなかった。(b)は機械学習によって予測された平板の騒音スペクトルを示したものである。主流

速度が 25m/s、迎角が 0°である。機械学習による予測は実測値の全帯域騒音レベルを高精度に予測することができた。実際の風洞試験では迎角 0°付近では 2500 Hz 付近の離散周波数騒音（以下、DFN）がカルマン渦の放出によって発生する。従来の圧力 PSD によるモデル解析ではこの DFN を予測することができなかった。一方、機械学習による予測では、広帯域騒音だけでなく、このカルマン渦による DFN を予測することができた。図 5 は各周波数における実測値の平板の騒音レベルと機械学習による予測値を比較したものである。表には予測モデルに学習させるデータの組み合わせが示されている。これらの組み合わせに基づいて、教師データの学習量による予測精度を調べた。主流速度が 25 m/s の場合、教師データの少ない case.1 が過大に予測された。しかし、その他の教師データを与えた機械学習による予測では、実測値の騒音をおよそ±5 dB の誤差範囲で予測することができた。

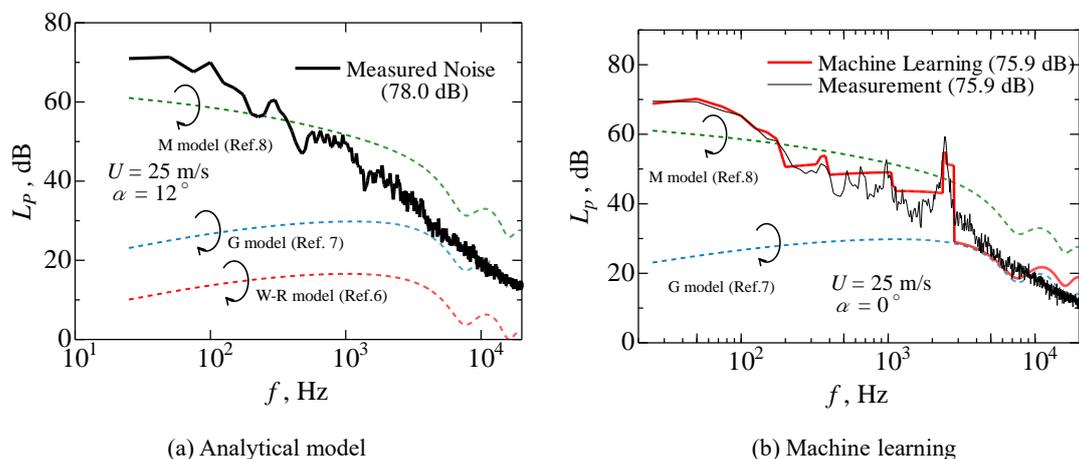


Fig.4 Comparison on the measured broadband noise and the prediction by pressure PSD models

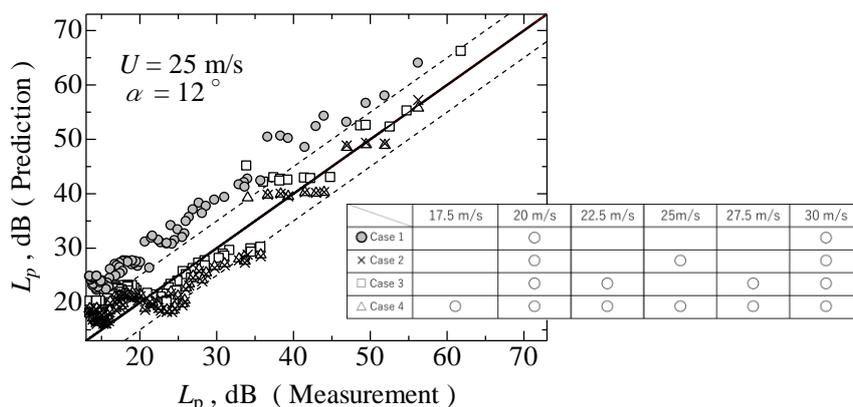


Fig.5 Comparison on the measured noise levels and the prediction at each frequency

図 6 は、小型軸流ファンの実測値の静圧特性を数値シミュレーションの静圧と比較したものである。ファンの最高効率率は 6m³/min 近傍で 48.7%であった。最高効率点近傍では、実測値を基準とした数値シミュレーションの静圧の誤差は 5.2%であった。数値シミュレーションによって解析された最高効率点よりも高風量側の静圧は実測値を表すことができた。図 7 には、実測値の無次元化されたファンの音圧の特性が整理されている。羽根車の回転数は 6000rpm から 12000rpm である。流量は式(2)によって無次元化されている。

$$\varphi = \frac{4Q}{\pi(1-\nu^2)D^2U^*} \quad (2)$$

ここで、 Q は流量、 ν はハブ比、 D は羽根車外径、 U^* は翼先端周速度である。6000rpm の無次元音圧 PSD はその他の回転数の騒音よりも大きく、この回転数における音圧には相似性がない。一方、8000rpm 以上の回転数では、このファンの音圧には相似性があることがわかった。

図 8 は異なる流量におけるファン騒音のスペクトル分布を比較したものである。(a)が実測値の騒音スペクトル分布であり、(b)が機械学習による予測値である。ここでは、便宜上、6m³/min を低風量、8m³/min を高風量と呼ぶ。羽根車の回転数は 12000rpm である。このとき、翼先端の周速度は 73.2m/s であり、この速度は風洞試験で測定された教師データの最大速度 (32.0m/s) の 2 倍以上である。この場合、実測値の教師データが機械学習モデルにそのまま与えられると、予

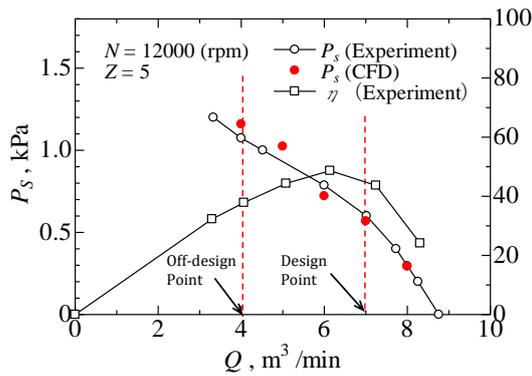


Fig.6 Aerodynamic characteristics

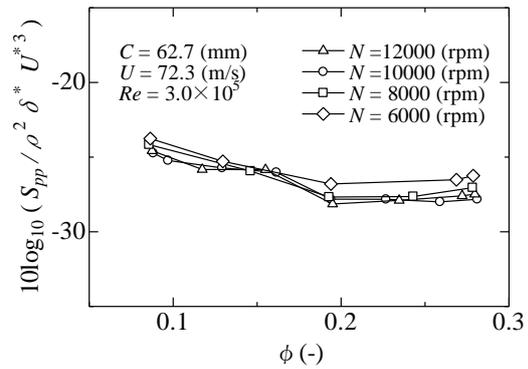


Fig.7 Normalized noise characteristics

測値のファン騒音が過小評価される課題があった。この課題を克服するために、この広帯域騒音の予測では特徴量の圧力 PSD が式(3)のように無次元化され、機械学習モデルが構築されている。

$$\varphi_{pp}(\omega, 0) = \frac{S_{qq}(\omega, 0)}{\rho^2 \delta^* U^{*3}} \quad (3)$$

ここで、 S_{qq} は翼面上の圧力 PSD、 ρ は密度、 δ^* は境界層排除厚さである。ファン騒音の予測では、数値シミュレーションによって解析された羽根車後流の相対速度と出口偏差角がこの無次元圧力 PSD の機械学習モデルに与えられている。(a)の実測値では、1000Hz から 10000kHz に分布する低風量の広帯域騒音が大きくなる。(b)の機械学習に基づく予測では、およそ 1000Hz 以上の広帯域騒音が風洞の暗騒音の影響を受けない空力騒音である。この予測値の低風量における 4000Hz 近傍の狭帯域騒音はカルマン渦の放出に伴う空力騒音である。この渦放出周波数近傍の予測値の騒音レベルは実測値と同程度になった。これらの結果は実機のファンから発生する可聴域近傍の広帯域騒音が、翼素から放出されるカルマン渦によって生成される圧力変動によって発生することを示すものである。機械学習による予測では、低風量の広帯域騒音が高風量の騒音よりも大きくなることを表すことができた。しかし、渦放出周波数近傍の広帯域騒音はいずれの風量でも実測値よりも低く、教師データを適切に与えることが今後の課題となる。

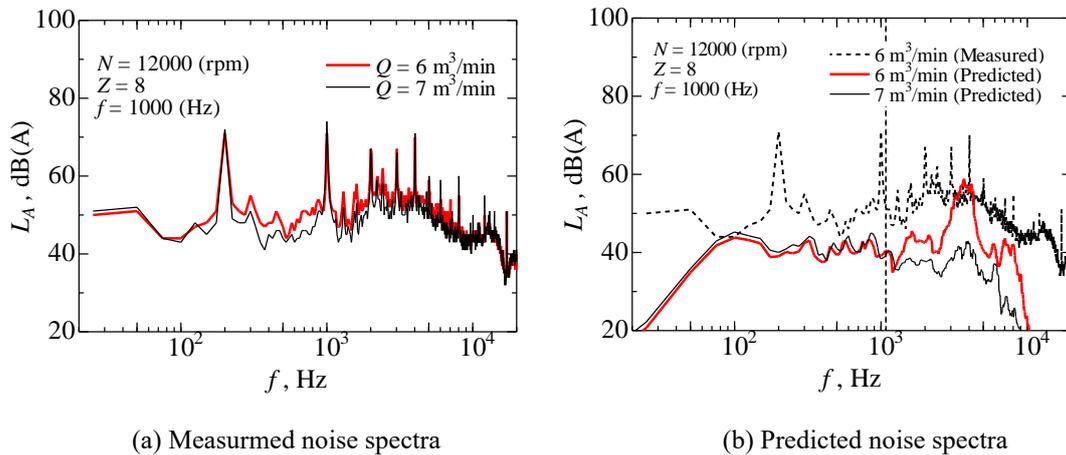


Fig.8 Comparison on the noise spectra in the different flow rate

参考文献

- (1) R. K. Amiet, *Journal of Sound and Vibration*, 47 (1976), 387-393.
- (2) K. Schwarzschild, *Mathematische Annalen*, 55(1902), 177-247.
- (3) Yannick Rozenberg, et al., *AIAA Journal*, 48(2010), 951-962.
- (4) Gabriele Grasso, et al., *Proc. 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf.*, AIAA 2015-2669 (2015), 15 pages.
- (5) W. W. Willmarth, F. W. Roos, *Journal of Fluid Mechanics*, 22(1965), 81-94.
- (6) P. Glibe, et al., *NASA Technical Repots Server*, NASA/CR-2000-210244 (2000), 110-111.
- (7) B. D. Mugridge, *Journal of Sound and Vibration*, 16-4 (1971), 593-614.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 佐々木壮一, 菅沼隼人, 荒巻太樹	4. 巻 53 (101)
2. 論文標題 低騒音風洞の開発と機械学習に基づく平板から発生する広帯域騒音の予測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 長崎大学大学院工学研究科研究報告	6. 最初と最後の頁 1-7
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 佐々木壮一	4. 巻 51(9)
2. 論文標題 多翼ファンから発生する空力騒音の予測とその機械学習の展望	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 523-531
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 Soichi Sasaki	4. 巻 70(6)
2. 論文標題 Prediction of broadband noise generated from low-pressure fan based on experimental pressure power spectrum density	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Noise Control Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 540-551
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3397/1/377047	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 Kodai Tanaka, Soichi Sasaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Study of Broadband Noise Generated from a Low-pressure Fan Based on Pressure Power Spectrum Density of a Flat Plate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 7th International Conference on Jets Wakes and Separated Flows	6. 最初と最後の頁 1-8
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 Soichi Sasaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Prediction Methodology of Broadband Noise Generated from a Horizontal Axis Wind Turbine Based on Blade Element Momentum Theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 7th International Conference on Jets Wakes and Separated Flows	6. 最初と最後の頁 1-7
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 佐々木壮一, 田中康大	4. 巻 52(98)
2. 論文標題 低圧ファンから発生する後縁騒音の予測に関する方法論的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 長崎大学大学院工学研究科研究報告	6. 最初と最後の頁 8-15
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 佐々木壮一, 田中康大	4. 巻 51(97)
2. 論文標題 低圧ファンから発生する後縁騒音に及ぼす圧力パワースペクトル密度の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 長崎大学大学院工学研究科研究報告	6. 最初と最後の頁 8-13
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	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 2件)

1. 発表者名 佐々木壮一, 荒巻太樹
2. 発表標題 小型軸流ファンから発生する離散周波数騒音の発生機構に関する実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第77期総会・講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Soichi Sasaki
2. 発表標題 Prediction of Aerodynamic Broadband Noise Generated from a Low Pressure Fan based on Machine Learning
3. 学会等名 The 8th Korea-Japan Joint Workshop on Fans and Compressors (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Soichi Sasaki, Kodai Tanaka, Daiki Aramaki
2. 発表標題 Prediction of Aerodynamic Broadband Noise Generated from a Flat Plate based on Machine Learning
3. 学会等名 Inter-Noise 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木壮一, 荒巻太樹
2. 発表標題 小型軸流ファンから発生する干渉騒音に関する実験的研究
3. 学会等名 ターボ機械協会 第89回創立50周年記念学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木壮一, 菅沼隼人, 日高優一, 細井琢瑠
2. 発表標題 機械学習に基づく水平軸風車から発生する広帯域騒音の予測
3. 学会等名 日本機械学会 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 佐々木壮一, 荒巻太樹
2. 発表標題 小型軸流ファンから発生する干渉騒音に関する実験的研究
3. 学会等名 ターボ機械協会 第89回創立50周年記念学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木壮一, 菅沼隼人
2. 発表標題 機械学習に基づく平板から発生する広帯域層の予測
3. 学会等名 第31回日本流体力学会 中四国・九州支部講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 荒巻太樹, 佐々木壮一
2. 発表標題 実験的圧力PSDの機械学習に基づく低圧軸流ファンから発生する広帯域騒音の予測
3. 学会等名 ターボ機械協会第88回総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菅沼隼人, 佐々木壮一
2. 発表標題 水平軸風車のストール制御とその出力性能に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会第26回動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅沼隼人, 佐々木壮一
2. 発表標題 キャンバー翼と対称翼の組み合わせによる水平軸風車のストール制御に関する検討
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木壮一
2. 発表標題 水平軸風車のストール制御に関する研究
3. 学会等名 第30回 日本流体力学会 中四国・九州支部講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木壮一, 田中康大
2. 発表標題 Amietの音響学的アナロジーに基づく低圧ファンから発生する後縁騒音の予測
3. 学会等名 第85回ターボ機械協会総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木壮一, 田中康大
2. 発表標題 低圧ファンから発生する広帯域騒音の予測に関する方法論的研究
3. 学会等名 第28回日本流体力学会中四国・九州支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中康大, 佐々木壮一
2. 発表標題 平板の圧力スペクトル密度に基づく低圧ファンから発生する広帯域騒音の予測
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 佐々木壮一 (分担執筆)	4. 発行年 2024年
2. 出版社 日本工業出版	5. 総ページ数 511
3. 書名 ターボ機械50年の系譜と将来の展望	

〔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
---------	---------