

プロペラファンの翼先端相対流れ場と 周期的な空力騒音に関する研究

佐々木壮一*・日高央也**

Study of Relative Flow Field in the Blade Tip and Periodical Aerodynamic Noise of a Propeller Fan

by

Soichi SASAKI* and Hisanari HIDAKA**

In order to clarify the main factor of the periodical aerodynamic noise in the off-design point of the propeller fan, the relative flow field in the blade tip is measured by the hot-wire anemometer with the phase-lock method. In particular, we discuss the influence of the rotational speed of the impeller experimentally for clarifying the relationship between the relative flow field and the periodical aerodynamic noise. When the propeller fan is operated at the off-design point, the periodical aerodynamic noise is generated in the lower frequency domain than that of the blade passing frequency. The energy of the velocity fluctuation in the leading edge of the blade tip became large at the same frequency band of the periodical aerodynamic noise. We indicated experimentally that the leakage flow at the leading edge in the relative flow did not interfere to the next blade. These experimental results indicate the periodical aerodynamic noise was generated because the pressure fluctuation due to the leakage flow became strong.

Key words: *Fan, Turbomachinery, Tip Vortex, Aerodynamic Noise, Wake, Velocity Distribution*

1. はじめに

プロペラファンは JIS 規格において「ケーシング及び案内羽根がない軸流ファン」と定義されている⁽¹⁾。産業機械や自動車のエンジン冷却ファンもプロペラファンの一種である。これらの用途のファンは狭隘なスペースに取付けられるために、ハブ側から翼先端まで流れ方向の羽根幅が短く設計される。この羽根車の形状はこの点で空調機器の室外機で採用されている凝縮器のプロペラファンと異なる。また、これらのファンは被冷却装置であるエンジンそのものが流動抵抗となるために非設計点で運転されることが多い。このため、翼先端の流れ場は三次元的な流動様相になる。この複

雑な流れ場とファン性能の関係について、これまで数多くの研究成果が報告されている。

深野ら^(2,3)は、1990 年にプロペラファンの騒音特性に及ぼす設計パラメータの影響について議論している。同研究では、プロペラファンの軸方向相対位置がファン性能に及ぼす影響について詳しく調査されており、この研究成果が半開放形プロペラファンの性能に関する研究の礎となっている⁽⁴⁾。日立製作所の袴家ら⁽⁵⁾は、1999 年に逆流に伴い翼に流入するじょう乱の強さが変化することに着目し、じょう乱に伴う変動揚力を Sears らの解析から求めた。同研究グループは、その時間微分が音になるとして Curle の理論から失速点を含

平成27年6月10日受理

* システム科学部門 (System Science Division)

** 総合工学専攻 (Department of Advanced Engineering)

む広い風量範囲でのプロペラファンの発生音を解析している。Jang ら⁽⁶⁾は、2003年に、LESによって計算されたプロペラファンの動翼上の変動圧力を wavelet 変換によって解析し、ファン騒音の実験結果と比較した。同研究によれば、動翼上の高い圧力変動は主に渦流れと隣接する動翼との干渉により発生すること、負圧面のはく離泡による変動周波数は渦流れの周波数よりも高周波であること、などが明らかにされている。三菱電機の中島ら⁽⁷⁾は、2010年に半開放型プロペラファンの後流とケーシング壁面圧力変動を計測し、異なる動作点での翼端渦の挙動と空力騒音との関係について調査した。同研究では、低風量域の非設計点でその空力騒音に及ぼす翼端渦の影響が強くなることが示されている。塩見ら⁽⁸⁾は、2011年に半開放型プロペラファンの速度変動の流動現象に伴う変化および変動場に含まれる動翼位相とは同期しない周期変動の変化を明らかにした。2012年には、同ファンの動翼出口の三次元流れ場を明らかにするとともに、渦の流量変化に伴う変化を明らかにしている⁽⁹⁾。著者らの研究グループは、主に、プロペラファンから発生する空力騒音の研究に取り組んでおり、2012年にプロペラファンから発生する擬似的な動静翼干渉騒音⁽¹⁰⁾、2013年には後流渦音に関する研究事例を報告している⁽¹¹⁾。2014年には、非設計点で運転されるプロペラファンからは翼通過周波数よりも低い帯域に中心周波数をもつ周期的な空力騒音が発生することを実験的に明らかにした⁽¹²⁾。この周期的な空力騒音についての研究事例については、深野ら⁽¹³⁾の低流量域における軸流ファンの翼先端近傍の相対流れ場と空力騒音に関する解析がある。同研究では、設計点よりも低流量域で翼端漏れ渦と隣接翼の干渉が生じると、隣接翼圧力面近傍で大きな圧力変動が生じ、音圧レベルを上昇させる原因になることが指摘されている。この研究成果の貢献によって、軸流ファンの翼端渦によって発生する空力騒音は隣接翼干渉によるものであるとの見解が定着した。しかし、プロペラファンのようにケーシングがない軸流ファンの騒音については必ずしもダクトケーシングを有する軸流ファンと同じ議論ができない。特に、プロペラファンの非設計点において騒音の支配的因子となる周期的な騒音の性質が実測値の翼先端相対流れ場の挙動に基づいて詳しく議論された先行研究は少ない。

そこで本研究では、プロペラファンの非設計点における周期的な空力騒音の特性に及ぼす主要な因子を検討するために、動翼の回転信号に基づいて位相固定された翼先端の相対流れ場を熱線流速計によって測定する。特に、この周期的な空力騒音が動翼周りの流れ場

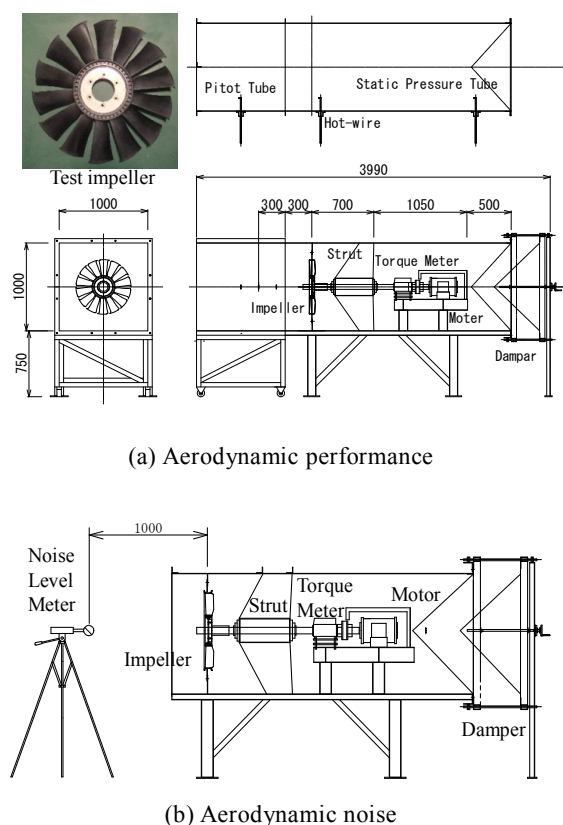


Fig. 1 Experimental apparatus for measurement of the characteristics

に関係することを明らかにするために、ファン性能に及ぼす動翼回転数の影響を実験的に調査する。これらの実測値の計測に基づいて、非設計点で運転されるプロペラファンから発生する周期的な空力騒音の発生機構について考察する。

2. 実験装置および測定方法

Fig. 1には、ファン性能の試験装置の概略図が示されている。羽根車の直径は613 mm、ハブ比は0.424である。測定胴の断面は1m×1mであり、その全長は約3.5mである。羽根車の回転速度は800rpmから1400rpmまで100rpmずつ変化させた。空力特性の測定方法については、紙面の都合上、既報を参照されたい⁽¹⁰⁻¹²⁾。ファン騒音は羽根車の回転軸上1.0m上流側の点で、精密騒音計（小野測器；LA4350）に取り付けられた1/2インチマイクロホンによって測定される。精密騒音計からの出力信号はFFTアナライザ（小野測器；CF5210）へ入力され、周波数分析された騒音スペクトルが得られる。

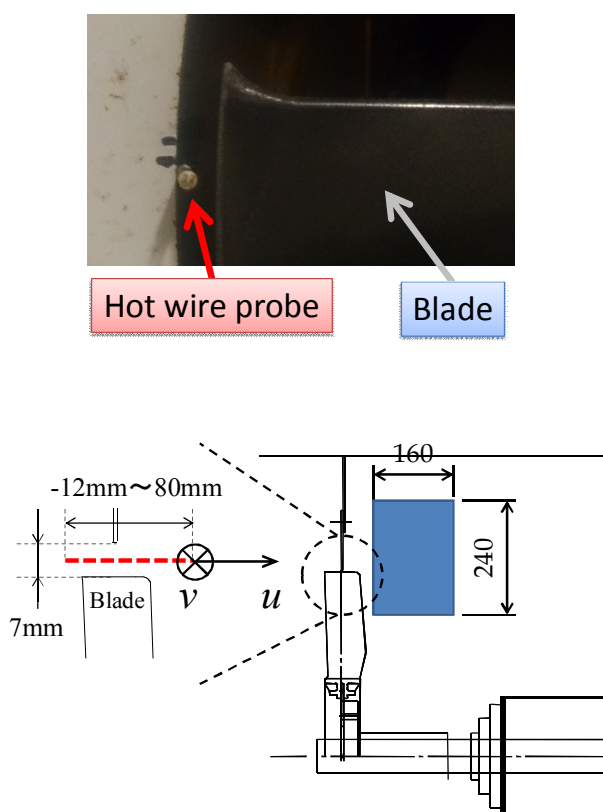


Fig. 2 Measurement method of the flow around the impeller

Fig. 2 には、羽根車周りの流れの測定方法が示されている。羽根車周りの流れ場は X 型熱線プローブ (KANOMAX, 0249R-T5) によって測定される。熱線プローブはトラバース装置に取り付けられており、ステッピングモーターを制御することによって任意の断面における流れを測定することができる。羽根車後流の子午面の流れ場は、羽根車の翼後縁 10mm の後方、回転軸中心から 210mm の位置を基準として、主流方向に 160mm、半径方向に 240mm の範囲で測定されている。羽根車の翼先端と仕切板との間隔は 7mm である。翼先端近傍の流れ場を、翼の前縁を基準として、-12mm から 80mm の範囲を 4mm の間隔で測定した。このとき、三次元速度成分が X 型プローブを 90° 回転させることによって測定されている。

Fig. 3 には翼先端の相対流れ場を測定するための位相固定の方法が示されている。主軸の回転に同期した信号が光電式回転検出器 (小野測器; MP-911) によって検出され、その信号を FFT アナライザへトリガー信号として入力する。この翼先端の流れの測定信号はこの回転数に同期した信号によって FFT アナライザで位

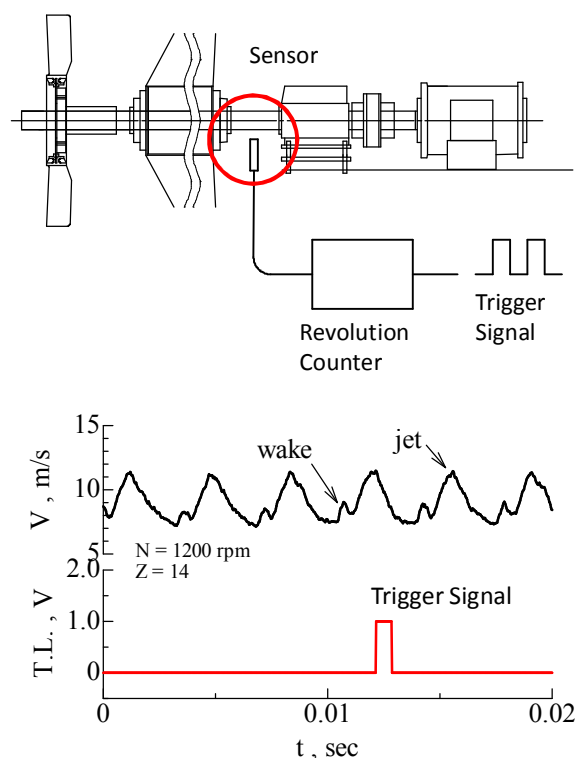


Fig. 3 Phase-lock method for the measurement of relative flow field

相が固定される。このとき、翼先端の周速度が時間波形に乗じられると翼先端の空間的な相対流れ場を絶対座標系から測定することが可能になる。

3. 結果および考察

Fig. 4 には、ファン騒音の流量特性が示されている。設計点近傍では、羽根車の回転数が高いほど、音圧レベルが大きくなる。それぞれの回転数における音圧レベルの流量による変化は小さい。一方、いずれの回転数においても非設計点近傍では、流量係数が低くなると、その音圧レベルが大きくなる。Fig. 5 では、ファン騒音のスペクトル分布が比較されている。N = 1000rpm の設計点近傍のファンからは翼通過周波数に同期した離散周波数騒音が発生しており、これが設計点における騒音の主因子になる。非設計点ではいずれも翼通過周波数より低周波側で周期的な狭帯域の騒音が発生している。N = 1000rpm の翼通過周波数が 233Hz であるのに対して、狭帯域騒音の中心周波数は約 175Hz であった。回転数が大きくなると、その中心周波数は高くなり、その周波数は羽根車の回転数に依存性がある。

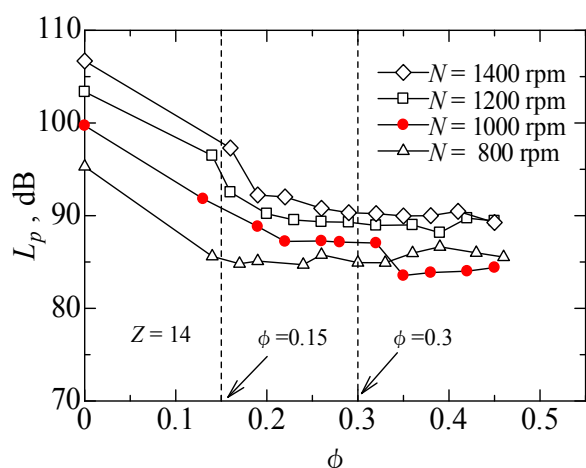


Fig. 4 Noise characteristics

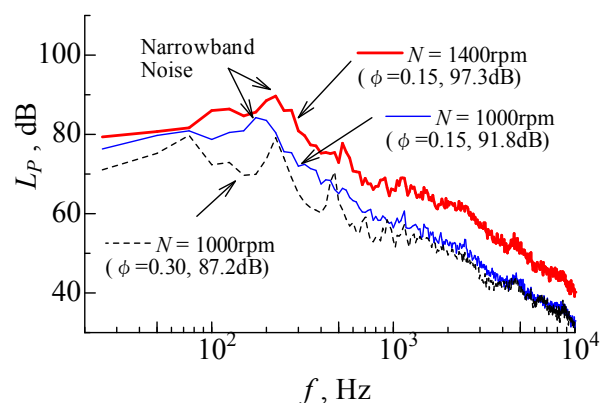


Fig. 5 Comparison of the noise spectra

Fig. 6 は羽根車後流の子午面における軸方向速度の速度変動量の分布を示したものである。その速度変動量の分布は、翼先端近傍で強く変動する。この翼端近傍の強い速度変動が空力騒音の音源になると考えられる。Fig. 7 は絶対速度の周方向速度成分の速度変動量を動圧換算したエネルギースペクトルを示したものである。 p_0 は最小可聴音圧 ($20\mu\text{Pa}$) である。測定位置は前縁後方の $x = 24\text{mm}$ 、仕切板後方の $x = 35\text{mm}$ 、後縁近傍の $x = 72\text{mm}$ の三箇所である (Fig. 6 参照)。前縁後方では、 174Hz の周期的な速度変動が測定された。仕切板後方と後縁近傍では、この 174Hz の周期的な変動は消失し、翼通過周波数に同期したエネルギーだけが生成される。

Fig. 8 には、翼先端における絶対速度の周方向速度成分の分布が示されている。Fig. (a) が設計点における速度分布であり、Fig. (b) が非設計点の分布である。周方向速度が正の符号のとき、流れの方向は紙面に向かって右側になる。前縁付近では、流れは圧力面から

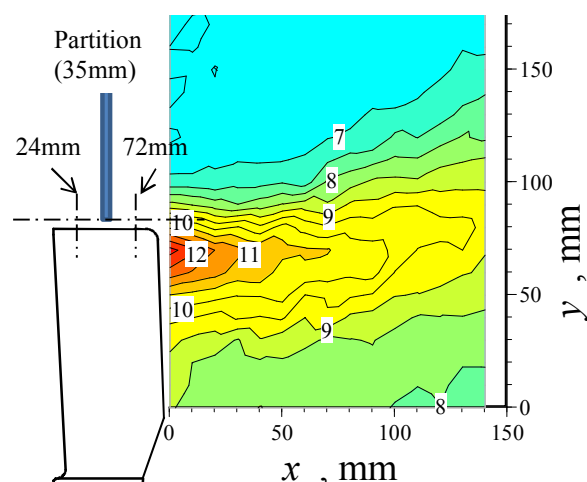


Fig. 6 Distribution of velocity fluctuation

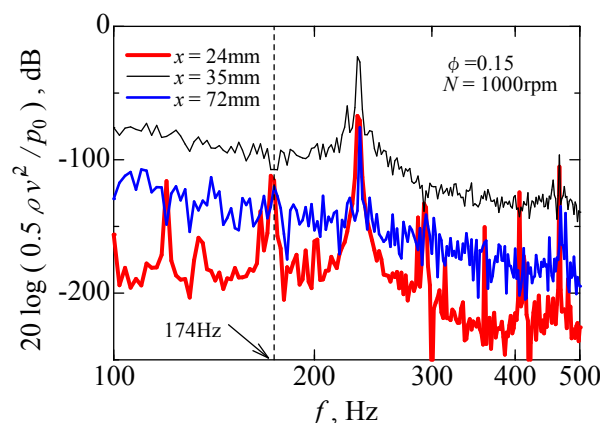


Fig. 7 Comparison of the energy spectra in each points

負圧面へ漏れることがわかる。また、前縁近傍の速度成分は翼間で一旦無くなることから、前縁側の流れは隣接翼に到達しない。前述の速度変動のエネルギースペクトルでは、後縁近傍では 174Hz の周期的な変動流れの現象が消失していた。以上のことから、 174Hz に中心周波数をもつ周期的な流れの現象は翼の前縁近傍で形成されると考えられる。

Fig. 9 は設計点と非設計点のファン騒音のスペクトル分布を比較したものである。 174Hz 近傍の非設計点におけるファン騒音の音圧レベルは設計点のものよりも 14.2dB 大きくなった。図中の表には、 174Hz における非設計点と設計点のエネルギースペクトルの差が整理されている。非設計点における全ての速度成分のエネルギーの上昇量は設計点のよりも十分に大きいことがわかる。以上のことから、非設計点における前近傍の漏れ流れによって誘起される強いエネルギー変動によって 174Hz 近傍の空力騒音が発生すると考えられる。

プロペラファンの翼先端相対流れ場と周期的な空力騒音に関する研究

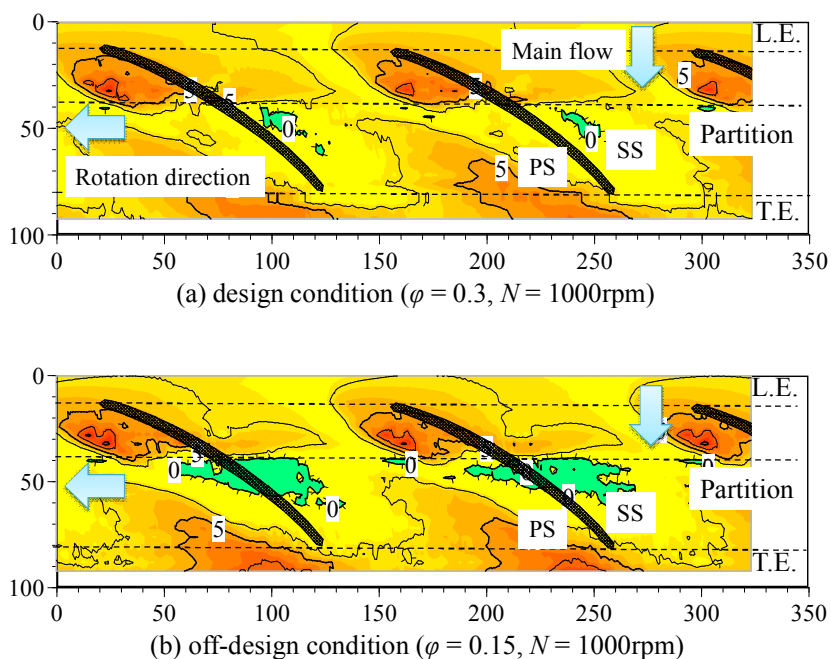


Fig. 8 Velocity distribution of the circumferential component in the relative flow field

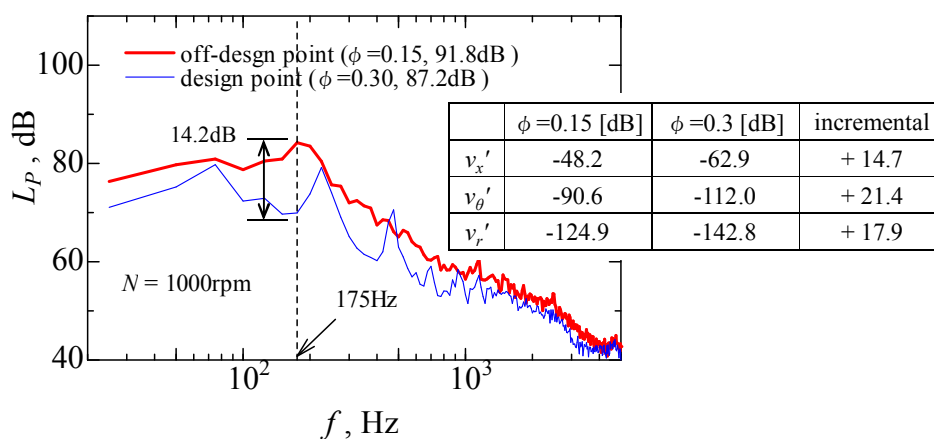


Fig. 9 Comparison of the noise spectra between the design and off-design condition

4. おわりに

プロペラファンが非設計点で運転されると、周期的な騒音が翼通過周波数よりも低周波側で発生した。非設計点におけるファン騒音の特性はこの低周波の周期性騒音によって決定される。翼先端の前縁付近における速度変動のエネルギーは、周期的な空力騒音の中心周波数と同じ帯域で大きくなった。翼先端の前縁近傍では、圧力面から負圧面への漏れ流れが設計点および非設計点いずれの作動点においても形成される。このとき、前縁側の漏れ流れによる相対流れは隣接翼と干

渉しないことを示した。非設計点における翼先端近傍では、圧力面から負圧面への漏れ流れによる変動が強くなるため、周期的な空力騒音が発生すると考えられる。

参考文献

- (1) 日本規格協会, 送風機・圧縮機用語 (JISB0132-1984), JIS ハンドブック ポンプ, p.428.
- (2) 深野徹, 他 4 名, プロペラファンの騒音低減化に関する実験的研究: 第 1 報, 空力特性, 日本機械学会論文集(B), 56(531), 1990.11, pp. 3378-3382.

- (3) 深野徹, 他 4 名, プロペラファンの騒音低減化に関する実験的研究 : 第 2 報, 騒音特性, 日本機械学会論文集(B), 56(531), 1990.11, pp. 3383-3388.
- (4) 草野和也, 他 2 名, 半開放形プロペラファンにおける翼端渦の三次元構造, 日本機械学会論文集(B), 80(810), 2014
- (5) 袴家伸祐, 他 2 名, 空調用プロペラファンの騒音発生モデルの検討, 日本機械学会論文集(B), 65(640), 1999, pp. 4015-020.
- (6) Jang Choon-Man, et al., Frequency Characteristics of Fluctuating Pressure on Rotor Blade in a Propeller Fan, JSME Int. J. Ser. B, 46(1), 2003.02, pp. 163-172.
- (7) 中島誠治, 他 2 名, プロペラファン周りの流れ場と騒音の関係に関する実験的研究 : 動作点による翼端流れ挙動の違いと騒音の関係について, 日本機械学会論文集(B), 76(767), 2010.07, pp. 1042-1047.
- (8) 塩見憲正, 他 2 名, 半開放型プロペラファンの低流量域入口流れ : 翼先端外側の速度変動場, ターボ機械, 39(4), 2011.04, 238-248.
- (9) 塩見憲正, 他 2 名, 半開放型プロペラファンの動翼出口三次元流れ場, ターボ機械, 40(4), 2012.04, pp. 218-225.
- (10) 佐々木壮一, 他 3 名, プロペラファンの擬似的な動静翼干渉によって発生する離散周波数騒音, ターボ機械, 40(10), 2012.10, pp.612-619.
- (11) 佐々木壮一, 他 2 名, 最高効率点および非設計点のプロペラファンから発生する空力騒音, ターボ機械, 41(12), 2013.12, pp. 754-761.
- (12) 佐々木壮一, 他 2 名, プロペラファンの翼端渦による周期的な空力騒音に関する研究, ターボ機械, 42(12), 2014.12, pp. 785-792.
- (13) 深野徹, 他 2 名, 軸流ファンの翼端漏れ流れと隣接翼の干渉により発生する騒音, 日本機械学会論文集(B), 69(685), 2003, pp. 2010-2016.