

Computational study on prediction and reduction of aerodynamic noise from fans

LIM, Tae-Gyun / 林, 泰均

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

154

(発行年 / Year)

2018-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675乙第229号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2018-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014768>

博士学位論文
論文内容の要旨および審査結果の要旨

氏名	林 泰均
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	第 229 号
学位授与の日付	2018 年 3 月 24 日
学位授与の要件	法政大学学位規則第 5 条第 1 項第 2 号該当者（乙）
論文審査委員	主査 教授 御法川 学 副査 教授 塚本 英明 副査 教授 林 茂

Computational study on prediction and reduction of aerodynamic noise from fans

1. 論文内容の要旨

近年の IT 技術の普及は、ノート PC や大型 TV、プロジェクタといったパーソナルな情報機器を一層身近なものにしている。また、IoT、AI、クラウドサービスといったネットワークインフラが急速に拡大し、データセンターに設置されるサーバーマシンの需要も爆発的に高まっている。これら情報機器はデバイスの高性能化、要素部品の高密度実装化を加速し、またそれらの冷却が重要な設計課題となっている。一般に高性能な情報機器においては小型ファンによる強制空冷が行われるが、上記に伴い小型ファンにも小型化、高性能化の要求とともに静音化が強く求められている。パーソナルな情報機器は騒音レベルが小さくても受音点（耳位置）が近いために耳障りであり、いっぽうサーバーマシンの設置環境では多数のファンが稼働するために防音措置をしないと労働安全上の問題が生じるほど大きい騒音レベルとなっている。さて、小型ファンから発生する騒音は、流れの非定常な変動から生じる空力騒音であり、音源を囲うことができず、音源の根本的な対策を講じる必要がある。ファン空力騒音は古くからその発生原理や静音設計法が提案されてきたが、小型ファンに関しては十分な研究が成されてこなかった。最近、コンピュータの計算コストが下がり、ファン内部の流動を数値流体シミュレーション（CFD）で詳細に解析して高性能化を図ることが一般的になり、さらには空力騒音の発生理論を定式化し、CFD の計算結果を利用して空力騒音を予測する数値流体音響シミュレーション（CAA）が実用段階に入ってきた。この手法は CFD の計算精度が重要であることは言うまでもなく、ファン周辺の空力音源計算手法にノウハウを有する。この計算結果を観察することで、ファン内部の空力騒音の発生源を明らかにすることが可能となり、ファン静音設計の指針を得ることが可能である。本論文では、市販の汎用 CFD コードを用いて羽根車直径 32mm から 170mm 程度の各種小型ファンの内部流動に関して非定常計算を行い、独自の音源計算法を用いて空力騒音を正確に予測したものである。すなわち、一般的な音源計算アルゴリズムは音源を波長に対してコンパクトとみなして平均化するが、本手法では計算要素全ての変動を音源として捉え、予測精度を向上させた。またファン内部の空力騒音の音源分布の可視化に関して、空力音

源項を新たに定義し可視化した結果、ファンの空力騒音の発生メカニズムが明らかになり、静音設計の指針を容易に得られることになったものである。

本論文は、全7章から構成されている。

第1章では本研究の動機、背景、目的について触れ、空力騒音とりわけファン騒音の数値シミュレーションによる予測に関する従来研究について概説している。

第2章ではファンのようなターボ機械から自由空間に放射される騒音の数値シミュレーションの方法について述べている。その騒音は、Lighthill 方程式を基礎とした Lowson の式により、静止物体と回転物体の効果を分類して記述している。第一に回転物体である羽根車による空力騒音を計算するにあたり、羽根車周辺の流体の時間的な変動を数値的に得る必要がある。この計算が妥当かどうか、音響カメラと呼ばれるビームフォーミング法による音源可視化を実験的に行って確認している。

第3章ではファン空力騒音予測のための手法、すなわち CFD から CAA に至る計算条件の確立のための手順を説明している。高精度な騒音予測結果を得るためのフローとして、①解析メッシュや境界層要素等の設定、②スタートアップのための定常解析、③非定常現象を準定常化させるための非定常計算、④現象抽出のための非定常計算、⑤放射音の計算についての各最適条件を提案している。

第4章で羽根外径 166mm の軸流ファンを取り上げ、無響室内でファン空力騒音を実験的に測定するとともに、CAA による予測結果を示している。CFD における解析領域は通常ファン周辺のみを対象とするが、流れの非定常性を全体的に再現すべく解析領域を無響室全体とし、CFD においては約 1800 万要素の計算格子によって大規模非定常計算を実施し、音源の計算を実施している。その結果、シミュレーションでは騒音の卓越周波数成分を再現し、周波数 2kHz 以下の広帯域騒音のレベルが定性的に一致したことを示している。また、ファン表面上の音源強度分布や渦度分布の観察により、羽根翼端前縁から放出された渦および翼端部の流れのはく離が音源になっていることを突き止め、卓越周波数成分との関係を明らかにしている。これらの要因として、ケーシング入口のはく離流れが羽根車に流入していることが想定されたため、ケーシング入口部に丸みを付けて同様のシミュレーションを実施した結果、流れのはく離に伴う渦を抑制し、音源強度を低下させていることを確認し、騒音スペクトルにおいても広帯域音が低減することを示している。

第5章ではサーバー冷却等に応用する羽根外径 66mm の軸流ファンについての検証である。無響室内にファンを設置した場合について実験とシミュレーションによる騒音の比較を行っている。前章と同様のシミュレーションを行った結果、3kHz 以下の卓越音と広帯域音を十分な精度で予測することに成功している。またファン表面の音源強度の可視化により、ファンケーシングのわずかな非対称性による流れのはく離が音源として寄与していることが明らかになり、静音化への指針を得ている。

第6章ではノート PC など薄型の情報機器に応用する羽根外径 32mm の遠心ファンについての検証である。このファンは両側に筐体が極めて近接して使用されるため、実験、解析に

においても吸込み，吐出し条件を同様に設定し，このような非対称性の強い流れ場における本手法の妥当性について検討している．その結果，10kHz 以下の範囲で卓越音と広帯域音の定性的な予測に成功している．内部の流れ場や音源強度についても詳細に観察し，狭い流路を渦が 3 次元的に移動していく様子を捉え，ケーシング舌部付近の強い音源を明らかにしている．このような狭小なファンにおいては静音化対策が困難であるが，羽根外周を斜めにカットした効果について，性能と騒音の両方を一元評価する比騒音レベルによって効果検証している．

第 7 章は第 1 章から第 6 章までのまとめを述べたうえで，本研究で提案した CFD と CAA による空力騒音予測手法が小型ファン騒音の騒音予測並びに静音設計に活用できるとして結論付けている．

2. 審査結果の要旨

本論文は、主として情報機器冷却用の小型ファンの騒音予測ならびに静音設計指針を得るためのシミュレーション手法の提案に関するものである。具体的には、市販の汎用 CFD コードを用いて小型ファンの内部流動に関して非定常計算を行い、独自の音源計算法を用いて空力騒音を高精度に予測したものである。一般的な音源計算アルゴリズムは音源を波長に対してコンパクトとみなして平均化するが、本手法では計算要素全ての変動を音源として捉え、予測精度を向上させている。またファン内部の空力騒音の音源分布の可視化に関して、空力音源項を新たに定義し可視化した結果、ファンの空力騒音の発生メカニズムが明らかになり、静音設計の指針を容易に得られるようになっている。

なお、論文題目は、当初、「Study on prediction and reduction of aerodynamic noise from fan by CFD and CAA (CFD と CAA によるファン空力騒音の予測と低減に関する研究)」であったが、審査の結果、数値解析による各種ファンの事例を取り上げていることから、「Computational study on prediction and reduction of aerodynamic noise from fans (ファンから生じる空力騒音の予測と低減に関する研究)」に変更した。

以上、本論文で提案されたファン空力騒音の音源評価手法による騒音予測と低減は、ファン本体の設計のみならず、情報機器全般の静音設計に適用できるため、工学に資するところ大である。よって、本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士（工学）の学位に値するとの結論に達した。