

製品の低騒音化を実現する流体騒音シミュレーション技術

Aerodynamic Noise Simulation Technology for Developing Low Noise Products

金子 公寿 KANEKO, Kimihisa

松本 悟史 MATSUMOTO, Satoshi

山本 勉 YAMAMOTO, Tsutomu

電気機器は、近年、小型化による発熱密度の上昇に伴い、冷却のための送風量が増加して流体騒音が問題となることがある。現象の解明や対策のための計測は困難なことが多く、シミュレーションによって多くの物理情報を得ることが課題の解決に有効である。機器の低騒音化を目指し、空冷機器の主要な騒音源となるファンに着目して流体騒音の発生メカニズムを解明するとともに、冷却構造の違いによる騒音の変化を推定した。その結果、音圧レベルやピーク周波数などにおいてシミュレーションと実測がおおむね一致した。今後、各種製品の低騒音化に向けたメカニズムの把握や構造設計への展開が可能である。

The size reduction trend of electric power equipment causes increased heat generation density along with an accompanying need for increased airflow for cooling. In this situation, aerodynamic noise can be the dominant noise source for air-cooled electric equipment. Grasping the noise generation mechanism and the noise reduction by measurements are often difficult, getting physical information through simulation can be an effective approach. In order to achieve noise reduction of equipment, we elucidated the aerodynamic noise generating mechanism by focusing the fan, the main source of noise in air cooling equipment, and estimated noise change caused by cooling structure differences. Simulated sound pressure level and peak frequencies are in good agreement with the measurement. This technology can be applied to understand the noise generation mechanism, and can also be used to structure design.

① まえがき

電気機器においては、製品の小型化により、発熱密度が増加する傾向となっている。放熱を促すために、空気冷却方式では、一般的に送風量を増やす対策が取られているが、風量の増加に伴い、冷却風から発生する流体騒音が問題となることがある。流体騒音は、流れの乱れにより生じる圧力変動が要因となっている。この現象の解明や対策のため、従来は主に計測による手法が用いられてきたが、計測対象が回転や移動をする場合、測定対象の空間が広い場合など、計測が困難なことも多い。この課題を解決するために、シミュレーションは、対象空間において多くの物理情報を得ることが可能であるため有効である。ただし、流体騒音シミュレーションには、乱流現象の高精度な再現が求められ、膨大な計算時間が必要となっていた。

これに対して近年、計算機速度の向上に加え、複数のCPUを利用した並列計算により計算時間の短縮が図られてきている。1秒間の浮動小数点演算を例にとると、“地球シミュレータ”が2002年に35兆回の計算(35 Tflops)を、“京”が2011年に1京回の計算(10 Pflops)を達成した。約10年間で100倍の計算速度を達成したことになる。これに追従するように、民間企業で保有する科学技術用の計算機の高速度化や一般利用が可能なクラウド環境の整備普及により、大規模な並列計算の実行が可能となってきており、研究開発にて実施する計算の実行速度も格段に向上してきている。

本稿では、空気冷却構造のパワーエレクトロニクス(パワエレ)機器を対象とした流体騒音シミュレーション技術について述べる。

② 製品と騒音

2.1 騒音の種類と関連製品

主な騒音源の種類と関連する富士電機の製品を図1に示す。騒音源は、機械振動によるもの、電磁振動によるものおよび流体の圧力変動によるものに大別される。機械振動による騒音は、主に回転機械など、機械構造物が回転・移動を伴う製品で生じる。電磁振動による騒音は、主に電磁力が作用する変圧器などの製品で生じる。流体の圧力変動による騒音は、主に空気冷却機器やパワエレ装置などの製品で生じる。特に、発熱部品をファンで冷却する製品は多いため、技術構築による製品への波及効果が期待される。

2.2 流体騒音の解析における課題

流れに起因する騒音を低減するためには、音源となる非定常乱流現象を把握した上で適切な対策を行う必要がある。このとき、流れ解析は、測定に比べて広範囲な流れの現象を捉えることができるため、有効なツールとなりつつある。

乱流現象の流れ解析に一般的に用いられているRANS(Reynolds Averaged Navier Stokes)モデルは、特定の流れの条件を対象に統計的に時間平均された流れを基本にしているため、流体解析手法として十分に現象を再現できているとは言えない。一方、流れの時間変動の原因となる渦の挙動を直接解くことが可能なLES(Large Eddy Simulation)がある。ただし、LESはRANSに比べて100倍以上の計算時間が必要であり、計算時間の短縮が課題となっていた。しかしながら、最近のCPUの計算機速度の向上に加え、数百から数千のCPUを使った大規模並列計算によって、LESの計算も実用可能な段階となつてきている。^{(1)~(5)}

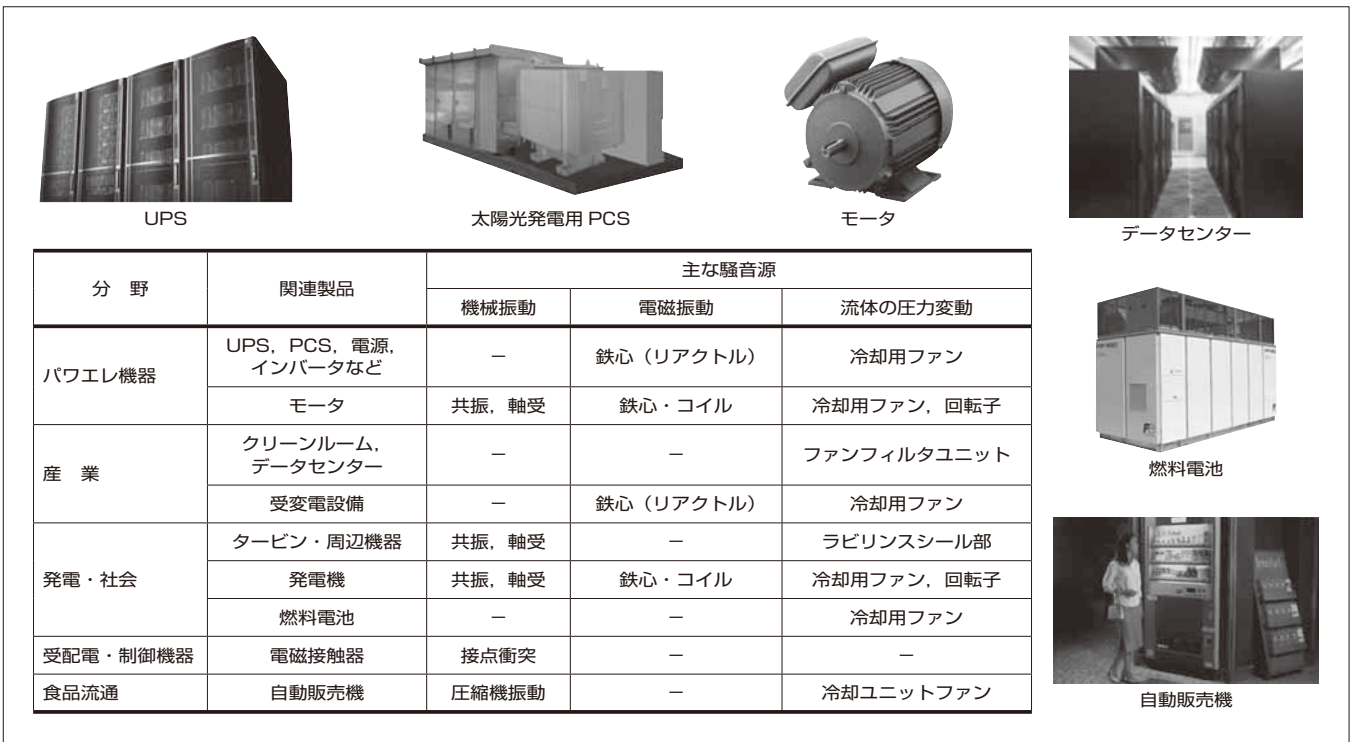


図1 騒音発生源の種類と関連製品

3 流体騒音解析技術の適用

3.1 流体騒音の発生原理

円柱を例とした流体騒音の発生の仕組みを図2に示す。流体騒音は二つの音源から観測点に伝播(でんぱ)する。一つは渦によって発生した固体表面の圧力変動が音源となるものであり、もう一つは空間中の乱流渦(カルマン渦)による運動量の変動が音源となるものである。前者の騒音の大きさは流速の6乗に比例し、後者は8乗に比例する。流速の低い低マッハ数領域では、前者が支配的になる⁽⁶⁾。本稿で対象としている空冷用のファンによる流速は20~30m/s程度の低マッハ数流れであり、固体表面の圧力変動による騒音が支配的となる。

3.2 解析手法

流体騒音の解析手法は、直接解法と分離解法に大別され

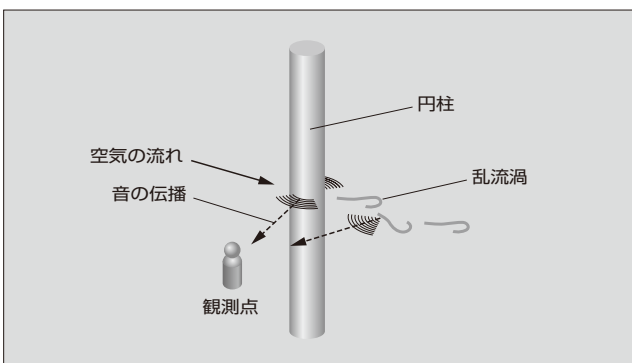


図2 円柱を例とした騒音の発生の仕組み

る。両手法の主な特徴を表1に示す。計算時間や得られる情報に違いがあり、目的に応じて手法を選定することとなる。

直接解法では、流れと音の伝播を同時に求める。流体の密度が圧力により変化する圧縮性を考慮することで、音の圧力変動も同時に解析できる。この手法では、音源近傍の流れ場で乱流渦を再現するためのメッシュに加え、観測点までの音の波長を解析するためのメッシュが必要である。このため、メッシュの数が多くなり計算時間のかかる手法である。

分離解法では、流れと音を独立して求める。流れの解析で固体壁面での圧力変動を求めた後、観測点における音を推定する。流体の圧縮性を考慮する必要はなく、音源となる乱流渦を再現できるメッシュに着目すればよく、直接解法よりも計算時間を短縮できる手法である。

表1 流体騒音解析手法の主な特徴

項目	直接解法	分離解法
計算手法	○圧縮+非定常 ○直接音圧を計算	○非圧縮+非定常 ○壁面圧力から音響計算
流体解析	圧縮性の非定常 LES 解析	非圧縮性の非定常 LES 乱流解析
騒音解析		FW-H, Curle の式* など
手法の利点	○厳密な手法であり高精度 ○物体と音場の干渉も再現可能	○比較的扱いが容易。精度も良い ○実用に手の届く計算時間(既存マシンで数日レベル)
課題	高い空間分解能を要し、超大規模計算になる	反射や吸音の考慮には音場解析との連成が必要

* FW-H, Curle の式: 固体表面の圧力変動から観測点までの距離を考慮した騒音推定の代表的な計算手法

流れの解析では、時間とともに変化する乱流渦の再現が重要である。現時点では、この再現に LES を用いることが最も有効である。今回の検証対象において、LES の計算を数日で完了させるために数百から数千の並列計算を社内の計算機設備を使って行うのは現実的ではない。そこで、スーパーコンピュータ“京”を利用して計算を行った。今回、冷却ファン単体からの騒音および冷却構造を想定した冷却ファンと障害物の騒音について検討した。

冷却ファン単体では、回転翼およびケーシング表面に作用する流体の圧力変動が音源となり、観測点に直接到達することが考えられる。このため、比較的取扱いが簡単な分離解法で検討した。一方、冷却ファンと障害物のある構造では、冷却ファンと障害物からの音源およびその干渉が考えられる。このため、直接解法で検討した。

3.3 解析結果

図 3 に示すように、冷却ファン単体の場合とファンを冷却ユニットに組み込んだ場合の 2 種類の構成について、発生する騒音を検討した。

JIS B 8330 に準拠した風洞にてファン単体による騒音の測定と同時にファン特性（流量と圧力差、流量と騒音）を取得した。流れを阻害する電子部品や冷却体をブロックに模擬した障害物として流路に設置し、冷却ユニットを組み

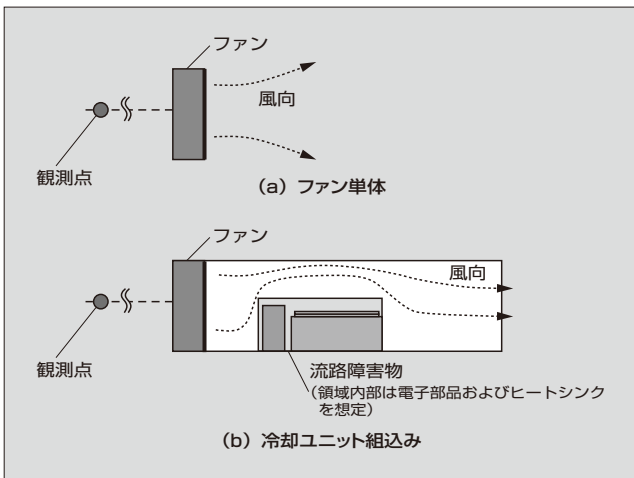


図 3 検討対象構造

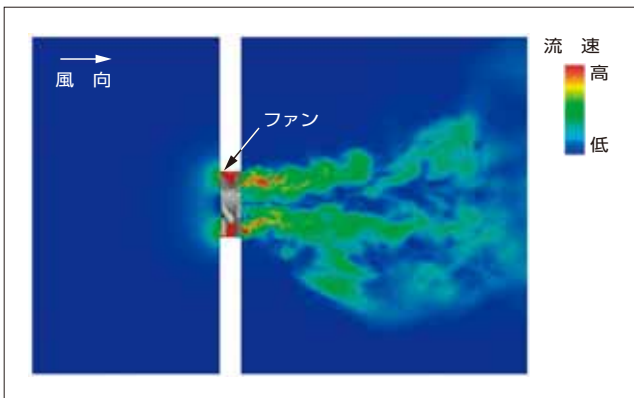


図 4 最大効率点における LES による流速分布（瞬時値）

込んだ実機に近いモデル構造を用いた。

(1) ファン単体

分離解法を用いて、騒音を測定したときと同一の配置と条件で計算を行った。図 4 に最大効率点における LES による流速分布を示す。従来の RANS での解析では再現が不可能であったファン後流部の渦変動の細部まで再現できるようになった。

観測点での音圧スペクトルの解析結果と実験結果を図 5 に示す。横軸は周波数を、縦軸は音圧レベルを示す。観測されたスペクトルは、ピーク音と広帯域音からなることが分かる。ピーク音は、翼回転周波数を N としたとき、ケーシングの形状に起因する $4N$ 、翼枚数（5 枚）に起因する翼通過周波数（BPF : Blade Passing Frequency） $5N$ 、およびそれらの高調波成分から成る。ピーク音でない部分は、乱流に起因し、広帯域音と呼ばれている。解析では、ピーク周波数のうち、基本波となる $4N$ と BPF のピーク音および広帯域音が再現できている。加えて、解析結果と実測結果とのオーバーオール値（各周波数の音圧レベルを合計した音圧の全体値）の差異は 5 dB 以下であった。周波数の低い領域（約 300 Hz 以下）で実測値のレベルの方が高いのは、測定風洞の音響的な影響が原因であり、解析対象に風洞構造を含めることでより精度よく再現できると考える。

(2) 冷却ユニット組み込み

パワーエレ機器の実機を想定し、騒音を検討した。流路内の障害物をブロックとしてモデル化して、直接解法で騒音を解析した。

直接解法では、流れと同時に音圧の非定常変動も解くことが可能である。図 6 に最大効率における LES による圧力分布を示す。音源となるファンを中心に風上の空間へ圧力が伝播していく様子が見られる。翼による回転方向の圧力変化により、圧力等値面も三次元的な構造となる。このとき、観測点における圧力変動が音になる。図 7 に解析と実測の音圧スペクトルを示す。解析では BPF などのピーク周波数、乱流による広帯域周波数に分散する広帯域騒音および数百 Hz の幅でピークを持つ共鳴騒音などの特徴をおおむね再現できている。一部、200 Hz 以下で解析値が過大に評価された結果となるのは、構造物壁面での音の減

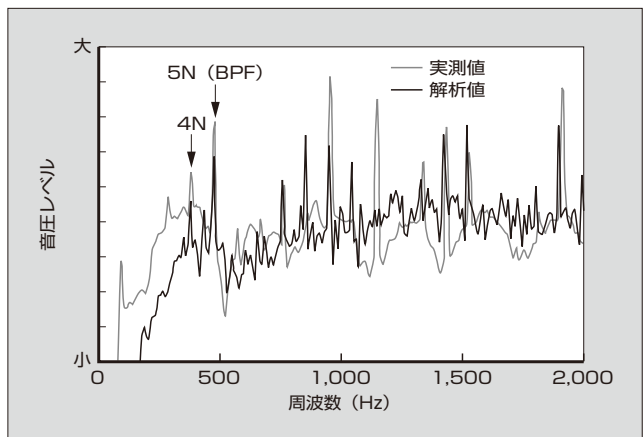


図 5 ファン単体における音圧スペクトル

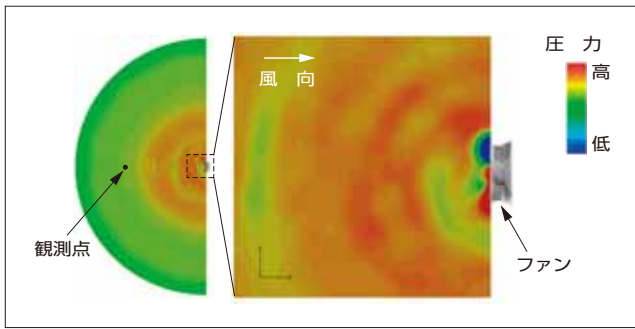


図6 最大効率点における圧力分布（瞬時値）

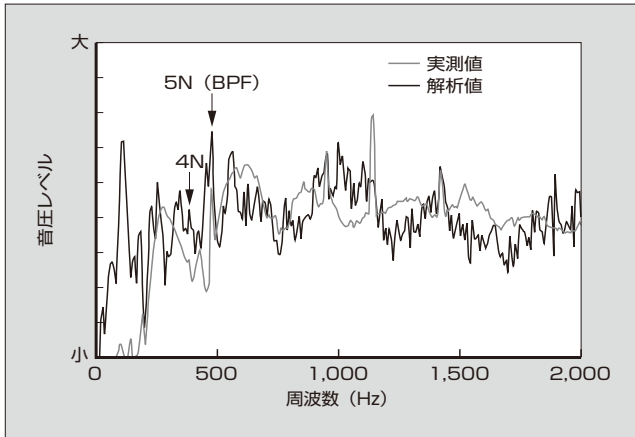


図7 冷却ユニット組込みにおける音圧スペクトル

衰などの影響が考慮されていないことが要因の一つと考えられる。

製品の冷却構造を検討する際、図3(b)に示すファンと障害物との距離が低騒音化する上で重要な設計因子の一つとなる。そこで、本手法を用いて、この距離を変化させたときの音圧レベルの変化を検証した(図8)。距離の増加に伴い、音圧レベルが低くなる。これは、ファン出口の流れが障害物に衝突することで生じる圧力変動が減少した結果と考えられる。

(3) 解析結果の展開

ファン単体および冷却ユニットの検討で得られた知見を基に、無停電電源装置やパワーコンディショナなどの電力

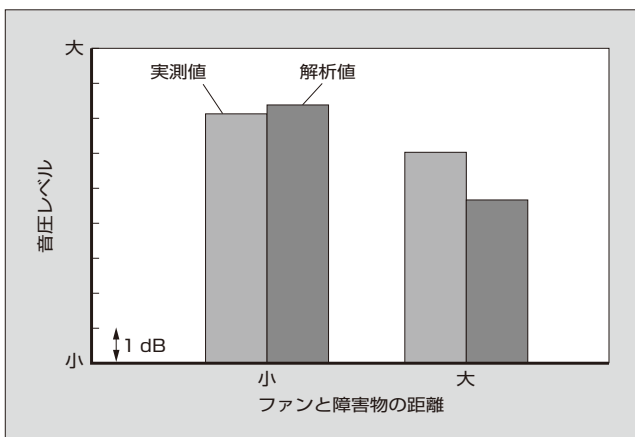


図8 ファンと障害物の距離と音圧レベル

変換装置の構造設計に、流体騒音解析の展開を順次進めている。

4 あとがき

本稿では、製品の低騒音化を実現する流体騒音シミュレーション技術について述べた。

流体騒音のシミュレーションにより、騒音源となる流れや圧力の変化の可視化が可能となり、低騒音化に向けたメカニズムの把握や構造設計への展開が可能となった。今後、これまでの製品性能の向上に加え、環境面も考慮した製品開発に貢献する所存である。

本論文の結果の一部は、次に示す各機関の協力により得られたものである。関係各位に謝意を表す。

計算の実行においては、国立研究開発法人 理化学研究所のスーパーコンピュータ“京”の産業利用(課題番号: hp140072, hp150143)にて実施した。

ファン単体の解析は、一部、一般社団法人 ターボ機械協会“ターボ機械 HPC プロジェクト ファン性能と騒音の予測 WG3”の下で行われた。

WG3には、国立大学法人 東京大学、学校法人 早稲田大学、株式会社 日立製作所、株式会社 電業社機械製作所、株式会社 荏原製作所、みずほ情報総研 株式会社、株式会社 先端力学シミュレーションの各機関が参加している。

参考文献

- (1) Kato, C. et al. “An overset finite-element large-eddy simulation method with application to turbomachinery and aeroacoustics”, Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics, 70 (2003), p. 32-43.
- (2) Takayama, T.; Kato, C. “Numerical Prediction of Aerodynamic Noise Radiated from Propeller Fan”, Institute of Industrial Science The University of Tokyo. 2011, vol.63, no.1, p.61-64.
- (3) Iwase, T. et al. “Prediction of aerodynamic noise for centrifugal fan of air-conditioner”, FAN 2015, Lyon (France), 15-17 April 2015.
- (4) 岩瀬拓. ファンの性能と騒音の予測. ターボ機械. 2015, vol.43 (9).
- (5) Kaneko, K. et al. The 13th Asian International Conference on Fluid Machinery (AICFM13), 2015, AICFM13-097.
- (6) Curle, N. “The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound”, Proceedings of the Royal Society, Series A, 231 (1955), 504.
- (7) Powell, A. “The Theory of Vortex Sound”, J. of Acoust. Soc. Am., 33, (1964).
- (8) Howe, M. S. “The Generation of Sound by Aerodynamic Sources in an Inhomogeneous Steady Flow”, J. Fluid Mech., 67-3 (1975), p. 597-610.



金子 公寿

パワーエレクトロニクス関連の熱・流体解析技術評価に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター熱応用システム研究部主査。技術士（機械部門）。日本機械学会会員、日本技術士会会員。



山本 勉

熱流体解析技術の開発、装置の冷却設計に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター熱応用システム研究部主査。日本機械学会会員、日本伝熱学会会員。



松本 悟史

熱流体数値解析業務に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター熱応用システム研究部。工学博士。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。