

シミュレーションによる騒音推定技術

Simulation Technology for Acoustic Noise Prediction

金子 公寿 KANEKO, Kimihisa

大野 和彦 ONO, Kazuhiko

山本 勉 YAMAMOTO, Tsutomu

製品開発では、設計の初期段階でシミュレーションを活用して十分な検討を行うフロントローディングが有効であるが、低騒音化が求められる製品では、膨大な計算が必要なため十分には行われてこなかった。一方、近年では並列計算が可能な計算機や、ソフトウェアを使ったハイパフォーマンスコンピューティングにより、計算時間が短縮され、製品の開発設計プロセスに変革をもたらしている。今回、騒音推定におけるフロントローディングを行う上で必要なシミュレーション技術を開発し、構造の最適化によりトレードオフ関係にある流体騒音と温度上昇の低減効果が得られることを確認した。

In product development, it is effective to implement front loading, which proactively uses simulation to verify the design in early stages. However, this method has rarely been used for products required to be low noise because of the huge amount of calculations required. On the other hand, computers capable of parallel computing and software-based high performance computing have reduced computation times in recent years, transforming the product development and design process. In this respect, we have recently developed a simulation technology for front loading to estimate acoustic noise. We have thereby confirmed that optimal structures can reduce both aeroacoustics and temperature rise, which are in a trade-off relationship.

① まえがき

企業のビジネス環境の激しい変化に対応し、デジタル技術を活用して、製品やサービスに対して競争上の優位性をもたらす DX (デジタルトランスフォーメーション: Digital Transformation) が、今後の企業経営に必須となってきた。このような中、富士電機では開発・設計プロセスへのシミュレーション技術の強化を図ってきた。特に製品開発における試作プロセスは、開発期間のボトルネックになる要素が多い。このため、設計の初期段階でシミュレーションを活用して十分な検討を行うフロントローディング^(注1)が、このボトルネック解消には有効となる。しかし、低騒音化した製品への市場要求が高まっているが、騒音のメカニズムは複雑で、膨大な計算が必要となるため、フロントローディングが十分には行われてこなかった。

一方で近年は、複数の CPU を利用した並列計算を可能とする計算機やソフトウェアを使った HPC (ハイパフォーマンスコンピューティング: High Performance Computing) により計算時間の短縮が図られ、計算速度は 5 年で 10 ~ 100 倍速⁽¹⁾くなっている。これにより、数か月かかった計算が数日でできるようになり、HPC は製品の開発設計プロセスに変革をもたらしている⁽²⁾。

本稿では、製品の低騒音化を実現するための騒音推定を一例として取り上げて、フロントローディングを行う上で必要な、シミュレーションや HPC の活用に関わる技術開

発について述べる。

② 騒音発生原理

騒音推定では、図 1 に示すように音源から騒音観測点までの空間における音の伝播を考える必要がある。なお、ここで音源とは音の発生源である。また、音響とは音源から騒音観測点までの音の伝わる現象のことである。騒音源には、大きく分けて振動騒音源と流体騒音源がある。振動騒音源は、構造物の内外で生じた加振力が構造物の振動を起こし、音源となる。代表的なものとして、回転体の偏心による遠心力の変動、電磁力および磁歪 (じわい) の変動などが挙げられる [図 2 (a)]。一方、流体騒音源では、流れの乱れにより発生する流体空間中の密度変化が音源となる。代表的なものとして、冷却ファンからの騒音がある [図 2 (b)]。

騒音推定に対して、設計では騒音の原理に基づいた簡易計算式に加え、これまでに開発した製品における騒音値を基に重回帰分析などを用いている例がある。この手法では、

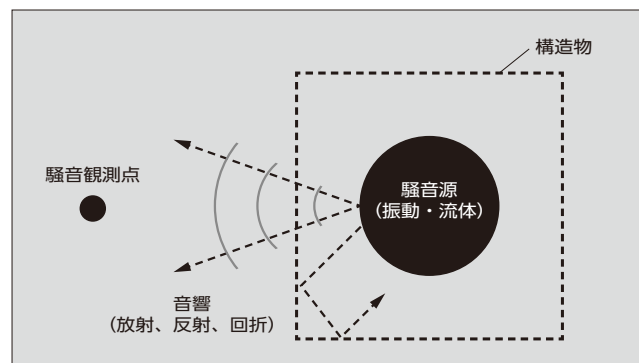


図 1 騒音推定に必要な技術範囲

〈注 1〉フロントローディング: 製品開発プロセスの初期工程である仕様検討や機能設計において、シミュレーションの活用などの負荷をかけることで、後工程の試作や試験での問題を減らし、手戻りを少なくする方法である。

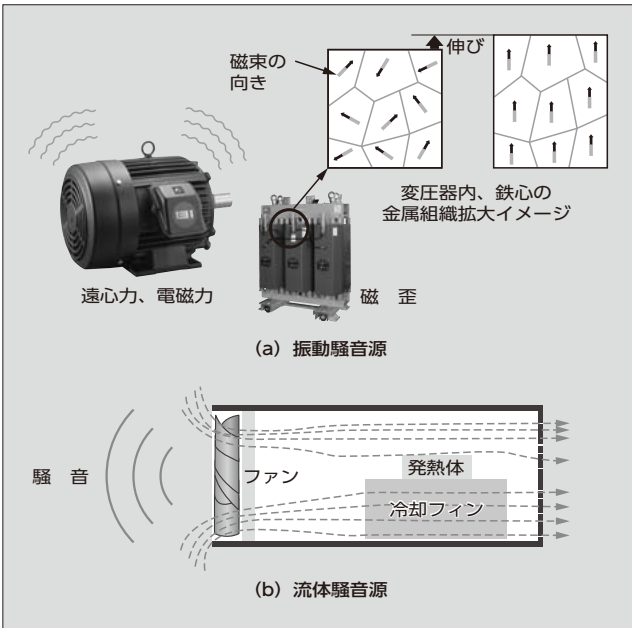


図2 騒音源の例

表1 製品と騒音源の種類

製品	主な騒音源	
	振動	流体
インバータ	リアクトル	冷却用ファン
モータ	鉄心・コイル	冷却用ファン
受変電設備	鉄心・コイル	冷却用ファン
電磁接触器	接点	—
タービン周辺機器	回転子	タービンブレード、ラビリンスシール部
燃料電池	—	冷却用ファン
自動販売機	圧縮機	冷却ユニットファン

短時間で計算できるメリットがある一方、設計変更などを含め新構造検討の際には、新たな設計変数の追加や設計変数値の範囲が変更されたりするなど、これまでと異なる重回帰式が必要となり、推定精度に問題が生じる。加えて、騒音に関する物理モデルが考慮されていない部分に関しては、設計空間内であっても、適切な推定値が得られにくい問題もある。例えば、構造の固有周波数と外力の周波数が近い値であると共振によって騒音が増加する場合や、ファンの回転速度が原因で流れに生じた周期的な圧力変動と音とに共振が生じて騒音が増加する場合などが挙げられる。

さらに、具体的な構造を設計する詳細検討段階では物理モデルに基づく検討が必要となる。また、表1に示すように、富士電機の代表的な製品における主な騒音源は製品ごとに異なるため、おのおのの現象に応じた騒音推定技術の構築が必要となる。

③ シミュレーション技術構築のための検証

3.1 パワエレ機器の製品設計の騒音における課題

パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器では、電気部

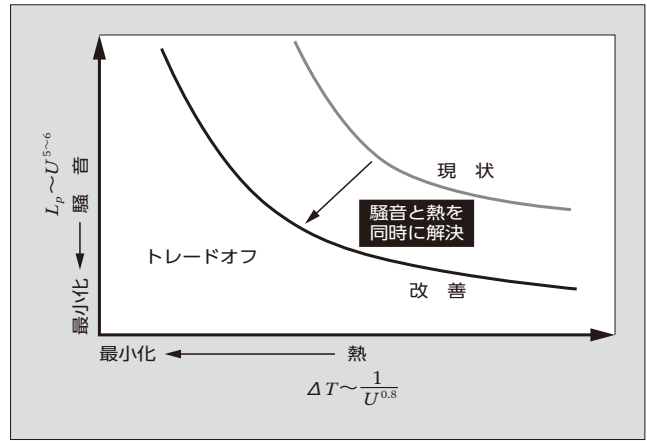


図3 製品設計における流体騒音と温度の関係

品が、電氣的損失により発熱するので、空気冷却する際にファンを利用することが多い。このファンは、流体騒音源および振動騒音源となる。装置の小型化に伴い、ファン径も小さくなり、冷却風量を確保するため高速回転で使用すると、流体騒音が支配的となる。一方、騒音と熱には図3に示すようにトレードオフの関係がある。騒音（ここでは音圧レベル^(注2) L_p ）は一般に速度 U の5～6乗に比例し、乱流熱伝達率 h を想定した温度上昇 ΔT は U の約0.8乗に反比例する。このため、騒音を下げる目的で、単純にファンの回転速度だけで下げようとするすると風量が減少し、部品の温度が上昇する結果となってしまふ。このことから、製品設計において、トレードオフ関係にある流体騒音と熱を同時に解決していく必要がある。

3.2 シミュレーション手法

シミュレーションによる騒音と熱の推定に加え、現状に比べてさらに良い構造を探索するため、遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化を行った。

騒音推定には二つの手法を用いた。一つは計算時間の短縮が見込める乱流の運動をモデル化したRANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) を非圧縮性定常解析にて求める簡易騒音推定モデルとした。このモデルは、定常解析で得られる壁面に作用するせん断応力と音源となる圧力時間変動との相関を利用したものである。短時間で推定できる一方、絶対値の確保が困難なため、相対比較として多目的最適化と併用した。もう一つは、RANSよりも高精度な騒音推定が期待できる方法で、乱流の大きな渦構造は直接解き、小さい渦構造はモデル化するLES

〈注2〉音圧レベル：基準音圧に対する相対値のことをいう。次の式で定義される。

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2}$$

L_p ：音圧レベル (dB)

p ：音圧実効値 (Pa)

p_0 ：基準音圧 (20×10^{-6} Pa)

(Large Eddy Simulation) を圧縮性非定常解析にて求める高精度騒音推定モデルを用いた。高精度騒音推定モデルは、長時間の計算が必要というデメリットが生じる。そこで、多目的最適化にて抽出した構造に対し、騒音の定量推定に用いる。加えて、大規模な並列計算が可能な HPC を利用することにより、計算時間の短縮を図り、このデメリットを解消した。

熱の推定には、発熱による固体内部の熱伝導および空気の対流の影響を考慮し、騒音の簡易推定と同時に解析した。

3.3 シミュレーション手法の検証

(1) 構造検討

シミュレーションの推定精度を検証するため、パワエレ機器の中で低騒音化のニーズが高いモータを対象とした。評価に使用した模擬モータは、図 4 に示す構造をしている。模擬モータのフレーム外部に取り付けたファン駆動用モータを使ってファンを回転させ、ファンカバーの外部から吸気した冷却風は、放熱フィン間を通過して、フレームカバー外に排気される。また、モータの発熱を模擬するため、フレーム内部にヒータを設けた。

模擬モータでは従来の製品に近い構造を初期構造とし、騒音と熱に影響する五つの設計変数（翼形状やフィン形状）を抽出し、騒音と熱の最小化を目的関数とする多目的最適化を行い、構造を検討した。ここでの騒音は簡易騒音推定値とし、熱はヒートシンクの表面温度上昇とした。その結果を図 5 に示す。おのおのの目的関数の値が最小となるパレート解が確認できる。製品設計では目標設定した性能やコストなどの複数の要因を総合的に評価した上で、設計者が設計変数値を決めることになる。本検討では、温度上昇は初期構造温度と同レベルとしつつ、騒音を最小化することに着目して設計変数値を抽出し、最適構造を決定した。

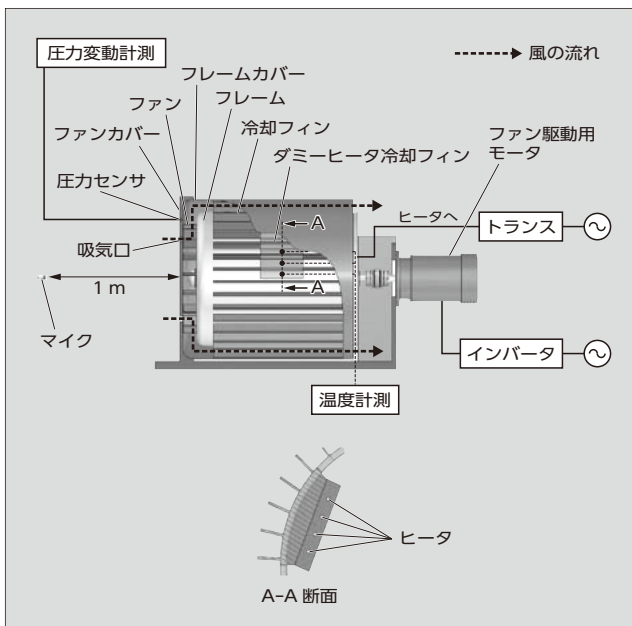


図 4 模擬モータの構造

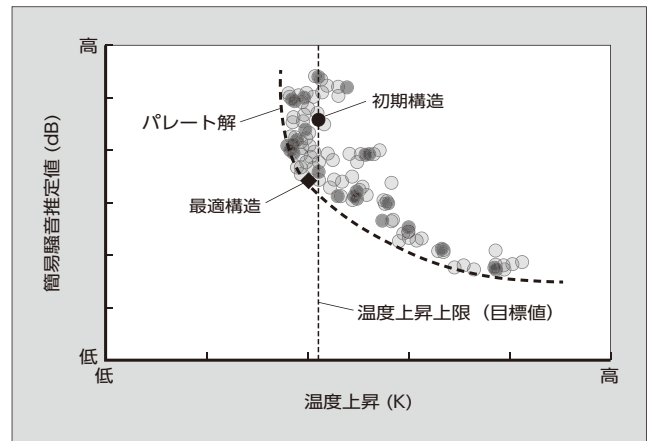


図 5 多目的最適化による検討結果

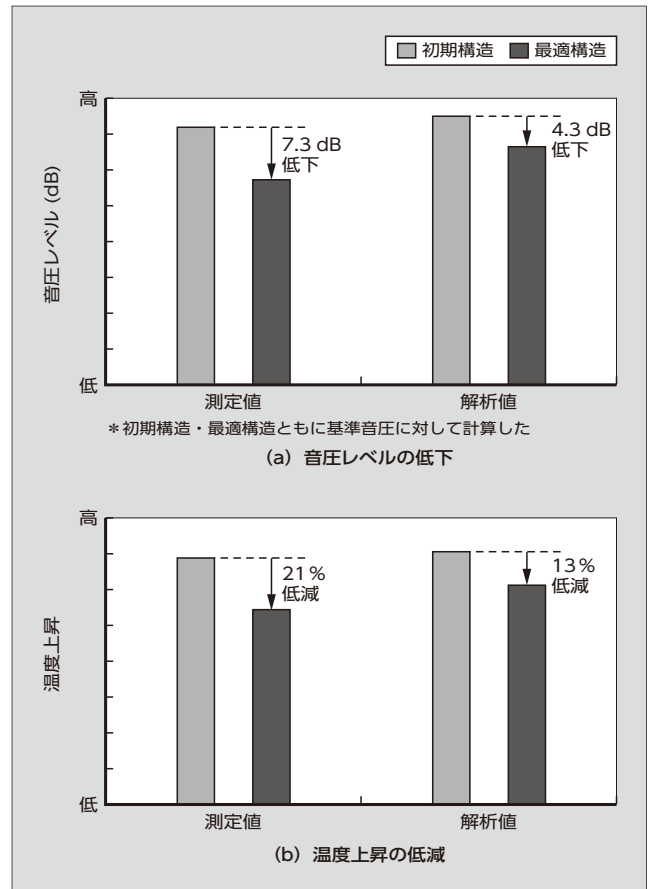


図 6 多目的最適化実施前後の騒音と熱

最適構造の主な特徴は、初期構造と比べて翼弦長を短くし、風量減少に伴う乱流を抑制することで騒音低減を狙うとともに、放熱フィンの熱通過断面積と表面積を増やすことで温度上昇の低減を狙ったものである。

(2) 検証結果

代表回転数における騒音と熱の関係を図 6 に示す。騒音に関しては、高精度騒音推定モデルにて計算した結果である。検証機において最適構造の騒音および温度上昇は、初期構造に対して低減しており、多目的最適化検討の効果が得られている。本シミュレーションは、実測と比較して絶対値においても設計検討に必要な精度が得られている。加

えて、構造変更に伴う音圧レベルや温度上昇の変化量においても十分な精度を確保できていることを確認した。

本検討でのシミュレーション精度および多目的最適化前後の構造による騒音の違いを明らかにするため、渦の運動量変化が起因して流体中の音を発生させることから乱流の渦構造に着目した。乱流の渦構造の可視化結果を図7に示す。最適構造は、初期構造と比較してファンとファンカバーの隙間部分やフレーム表面近傍において渦が少ないことが確認できる。加えてファンにより発生する流れの乱れを解析でも再現できているかを確認するため、ファン下流領域での壁面に作用する圧力変動の測定も行った。初期構造および最適構造での圧力変動スペクトル密度を図8に示す。シミュレーションで求めた圧力変動スペクトル密度は、実測とよく一致しており、最適構造では圧力変動も小さくなっている。この圧力変動スペクトル密度には二つの特

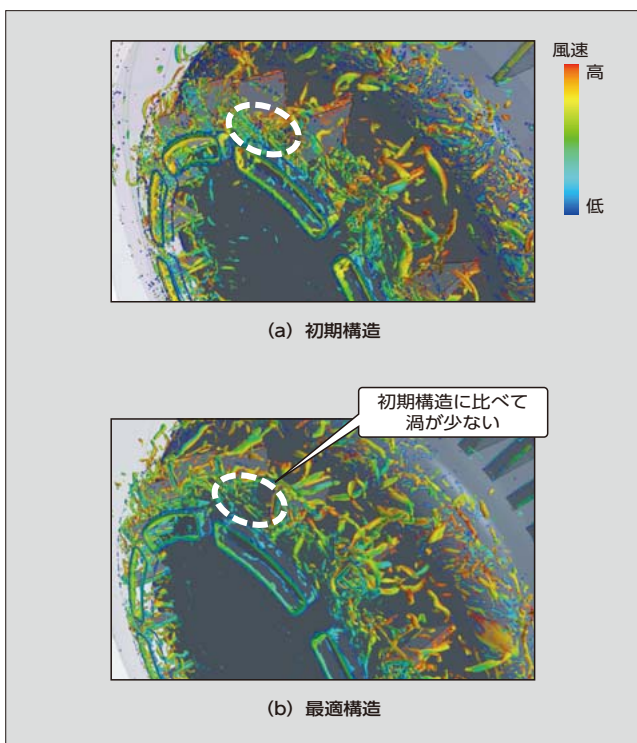


図7 乱流の渦構造の可視化結果

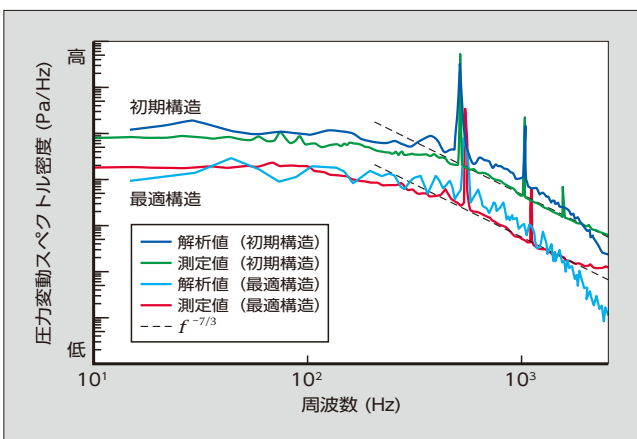


図8 ファンの下流の壁面に作用する圧力変動スペクトル

徴がある。一つ目の特徴は、翼通過周波数（BPF：Blade Passing Frequency）で圧力のピークを持つ。BPFは回転周波数×翼枚数であり、この周波数を基本としてその整数倍の周波数でピークが生じる。もう一つの特徴は、圧力の減衰傾向である。乱流の特徴となる慣性小領域で、乱流の流れ場によらない普遍性のあるスペクトルの減衰傾向（慣性小領域の $-7/3$ 乗則、図8中の点線）が知られている⁽⁴⁾。本検証において、約2kHzまでの乱流現象のシミュレーションによる再現ができることを確認した。

4 あとがき

競争優位を実現するDXの一環として、市場要求に応じたタイムリーな製品開発要求に対応すべく、製品の開発期間の短縮を目的にシミュレーションを活用した開発・設計プロセスの変革を目指している。

本稿では、シミュレーションによる騒音推定技術について述べた。今後はシミュレーションを活用したフロントローディングはさらに進展することが予想される。また、HPCの活用によりシミュレーションの適用領域が拡大しており、メカニズム解明や推定精度向上を中心とした利用、製品性能の改善や品質向上に向けた利用などが予想される⁽⁵⁾。

今後とも製品開発に貢献すべく、ニーズにマッチしたシミュレーション技術開発を行っていく所存である。

本研究の一部は、HPCIシステム利用研究課題（課題番号：hp200233）を通じて、スーパーコンピュータ^(注3)「富岳」の計算資源の提供を受け実施した。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) “Performance Development”. TOP500. <https://www.top500.org/statistics/perflevel/>. (参照2021-07-15).
- (2) 文部科学省.「富岳」成果創出加速プログラム.「富岳」を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発. 第1回「富岳」流体予測革新プロジェクトシンポジウム. 2021-3-10.
- (3) Kaneko, K.; Yamamoto, T. “Predicting Cooling Fan Noise of Electric Motor Using Compressible Large Eddy Simulation”. ASME Conference Proceedings. AJKFluids2019. 2019.
- (4) 辻義之. “乱流の普遍則とその解明を支える実験技術”. ながれ. 日本流体力学会誌. 2018, vol.37, no.3, p.245-254.
- (5) 金子公寿. “「富岳」による構造最適設計に向けた試行計

〈注3〉スーパーコンピュータ「富岳」：スーパーコンピュータ「京」の後継機として国立研究開発法人 理化学研究所に設置された計算機である。2020年6月から2021年6月にかけてスパコンランキング4部門で1位を3期連続で獲得するなど、世界トップの性能を持つ。2021年3月9日に本格運用を開始した。

算”。HPCIシステム利用研究課題 利用報告書. 一般財団法人
高度情報科学技術研究機構. [http://www.hpci-office.jp/
output/hp200233/outcome.pdf](http://www.hpci-office.jp/output/hp200233/outcome.pdf) (参照2021-07-09).



金子 公寿

パワエレ機器関連の熱・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デジタルイノベ
ーション研究所デジタルプラットフォームセン
ターデジタルエンジニアリング部主査。技術士
(機械部門)。日本機械学会会員、日本技術士会会員。



大野 和彦

重電機器関連の強度・振動解析技術に従事。現在、
富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベ
ーション研究所デジタルプラットフォームセン
ターデジタルエンジニアリング部主査。日本振動技術
協会会員。



山本 勉

シミュレーション技術の研究開発に従事。現在、
富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベ
ーション研究所デジタルプラットフォームセン
ターデジタルエンジニアリング部長。日本機械学会
会員、日本伝熱学会会員。





*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。