

電子機器ファンダクト系の空力騒音の数値解析

プロジェクト責任者

立原 昌義 キヤノン株式会社

著者

立原 昌義^{*1}、藪 修一^{*1}、勝俣 慎一^{*1}、村田 敏行^{*1}、加藤 千幸^{*2}、高山 糧^{*2}、上原 均^{*3}、
廣川 雄一^{*3}

*1 キヤノン株式会社

*2 東京大学 生産技術研究所

*3 独立行政法人海洋研究開発機構 計算システム計画・運用部

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成19年7月11日～平成20年3月31日

アブストラクト

電子機器において主に冷却の用途として実装されるファンは、高風圧化、小型化、高回転数化にと
もない、発生する騒音の問題がオフィス環境において顕在化している。このため、ファンの低騒音化
技術は、電子機器の開発において、重要な技術課題の一つである。

ファンから発生する騒音は、主に翼に作用する流体の変動に起因した空力騒音であり、これを支配
するのは、翼端や翼後縁からの渦放出および翼面に発達する乱流境界層などの複雑な非定常流れ現象
である。そこで、本研究では、冷却用の小型軸流ファンについて、翼面近傍の渦の挙動までを解像し
た大規模な乱流計算を実施し、ファン内部の複雑な流れ構造の挙動を捉える。

キーワード： 大規模シミュレーション、ファン、LES、空力騒音

1. はじめに

電子機器には、主に冷却の用途として複数のファンが実装されている。近年の電子機器の小型化、
高密度化にともない、小型の軸流ファンを高回転数、高風圧で駆動させなければならない状況も少な
くない。ファン騒音は、流体の変動に起因した空力騒音であり、代表流速の4乗から8乗に比例して
急激に増加する、また、作動点によっても発生騒音が変化することが知られている。さらに、電子機
器では、筐体内部に配置される熱源を冷却するために、ダクトなどで流路を構成し、ファンによって
空気を送風、あるいは排気する。そのため、ファン騒音は、ダクトを経由して、筐体外部へと放射さ
れ、ユーザの耳へと伝播していく。複写機などの事務機器は、ユーザに隣接して設置されることが多
いため、オフィス環境の向上のために低騒音化のニーズも高い。そのため、ファンの低騒音化技術は、
電子機器の開発において、重要な技術課題の一つとして挙げることができる。

ファンを含む回転機械、いわゆるターボ機械の騒音については、古くから研究が行われ、多くの文
献や書籍が公表されている。ファンから発生する騒音についても多種に分類され、それらの主原因ま

で整理されている¹⁾。従来、ファンの騒音対策としては、これらの経験的な知見を元に、主に実験的手法にたよっていた。しかしながら、ファン騒音の主原因とされる、翼端や翼後縁からの渦放出や、翼面に発達する乱流境界層などの複雑な非定常流れ現象については、実験によつての詳細な現象の理解は困難である。そこで、近年のコンピュータ技術の発展により、数値計算により事前にファンの騒音を予測する技術が注目されている。数値計算では、解析した流れ場の任意の情報を詳細に得ることができるため、実験では困難な、主要音源の特定や騒音発生メカニズムの解明が可能になると期待される。

ファンの内部流れの数値計算については、従来、Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation (RANS) と呼ばれる、時間平均に基づいた計算手法が用いられていた。しかしながら、時間平均を施す RANS では、乱流に起因する非定常現象を予測することは本質的にできない。一方、Large Eddy Simulation (LES) と呼ばれる、格子スケールの渦を直接解像する計算手法は、乱流に起因する変動を含めて非定常現象を高精度に予測することが可能である。しかしながら、流れにおける渦のスケールは、ファン翼面近傍では非常に小さくなるため、LES ではこの領域の渦の挙動を捉えるために計算コストが飛躍的に大きくなるという問題が生じてしまう。

そこで、本研究では、電子機器に用いられる軸流ファンについて、翼端渦や乱流境界層を捉えるための大規模 LES 計算を、地球シミュレータを利用することで実現する。レイノルズ数 Re が $10^4 \sim 10^5$ 程度の小型の軸流ファンについて、このような解析を実施することは筆者らの知るかぎり初めての試みであり、本研究を足がかりに、空力騒音予測技術の確立を目指す。本稿では、得られた計算結果から、翼面近傍の詳細な流れ場を示し、ファン内部の流れ構造について述べる。

2. 解析対象

本研究で解析対象とするファンの概観、および解析領域全体を図 1 に示す。同様に、表 1 に仕様を示す。羽根外径 D を代表長さ、翼チップの周速 U_t を代表速度としたときのレイノルズ数は $Re = 6 \times 10^4$ である。

本ファンは回転数 3400 [rpm] の条件において、最大流量が約 1.1 [m³/min] であり、0.8 [m³/min] 程度からストールし始める。そこで、本研究では、ストールよりも高流量側 1.0 [m³/min] と低流量側 0.4 [m³/min] の特徴的な 2 ケースの流量について解析する。

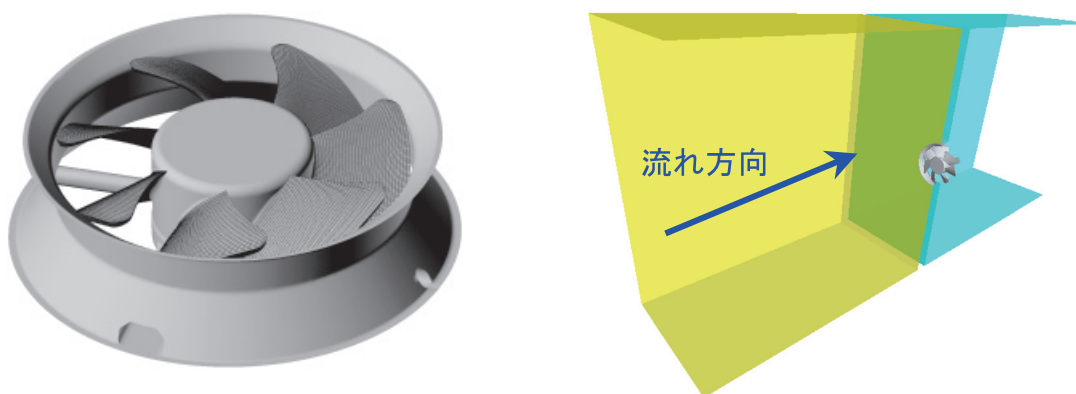


図 1 解析対象ファン（左：ファン概観、右：解析領域全体）

表1 ファンの仕様

ファンのタイプ	80mm 角 軸流ファン
羽根車外径 [mm]	74
回転数 [rpm]	3400
翼枚数	7
ストラット本数	4

3. 計算方法

3. 1 計算手法

本研究では、ファンの内部流れの計算に、文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」²⁾にて開発された FrontFlowBlue (FFB) を使用する。

本計算では、Dynamic Smagorinsky³⁾ モデルを用いた非圧縮 LES 解析を行い、時間進行法として、Crank-Nicolson 法と Newton-Raphson 法を組み合わせた陰解法を用いる。計算領域は、上流領域、ファン近傍領域、下流領域の3箇所にわけ、重なり合う領域においてオーバーセット法により情報を交換させる。なお、上流領域と下流領域は静止系、ファン近傍領域は回転系として扱う。

3. 2 計算格子および計算条件

表2に、解析領域のメッシュ解像度を示す。要素タイプは全て六面体で、要素数は合計約3200万要素である。翼1枚あたりの要素数は約450万要素であり、翼のごく近傍に発生する乱流を高精度に捉えるために、高品質の要素を翼近傍に集中して生成した。

境界条件として、設定流量 (1.0 [m³/min] と 0.4 [m³/min]) から算出した流入速度を、速度一定の流入条件として入り口に与えた。出口境界には、圧力0および Traction-free の境界条件を与えた。また、本解析対象に代表されるように、電子機器で用いるような小型の軸流ファンは、一般に、翼およびモータを保持するためのストラットが翼の近傍に位置している。本解析では、翼下流のオーバーセット領域は翼とストラットの間でセットし、回転系に3400 [rpm] に相当する回転力を与え、時間進行にともなってメッシュを回転させ、翼の回転によるストラットとの干渉を考慮できる計算を実施した。

表2 メッシュ解像度 (要素数)

上流部	ファン部	下流部
約 57 万	約 2795 万	約 430 万

4. 計算結果

翼周り円筒断面上の渦度スパン方向成分の瞬時分布について、高流量 1.0 [m³/min] の場合を図2に、低流量 0.4 [m³/min] の場合を図3に示す。翼前縁に剥離領域が見られるが、その特徴は流量によって異なる。高流量の場合、翼根元では負圧面上でわずかな前縁剥離が見られるのに対し、翼先端では圧力面上で前縁剥離しており、いわゆるネガティブインシデンスの状態となっている。これは、翼が周方向へ前進した形状であること、および翼前縁の端部が鋭く尖っていることによる。また、翼周りの流れは隣接翼にほとんど干渉せず、下流へ流れ去っている。一方、低流量の場合、翼根元・翼先端ともに負圧面上で前縁剥離が生じている。また、翼先端では失速セルと思われる大規模な乱れが断続的に翼間を反回転方向へ伝播している。

図4は、高流量 $1.0 \text{ [m}^3/\text{min]}$ と低流量 $0.4 \text{ [m}^3/\text{min]}$ における、渦構造の瞬時分布を示す。ここで、渦構造を抽出するにあたり、空間中における速度勾配テンソルの第二不変量 Q の等値面を用いた。高流量では、目立った渦構造は翼端渦のみである。一方、低流量では、翼端渦に加え、翼前縁から発生した二次元的な剥離渦が三次元的に崩壊し、縦渦を形成する様子が見られる。本ファンの条件では、翼のコード長から求まる Re 数が3万程度であり、翼への流れの進入角によっては必ずしも乱流が発達しない可能性も十分考えられる。

なお、ファン仕事による圧力上昇は、いずれのケースも実測値に対して10%以下の誤差で予測できていることを確認している。

ちなみに、本解析における計算コストは、ファンの1回転の計算に、地球シミュレータ48ノードで6時間であった。このような大規模な乱流計算であっても、現実的な時間で解析を行うことが十分に可能であるといえる。

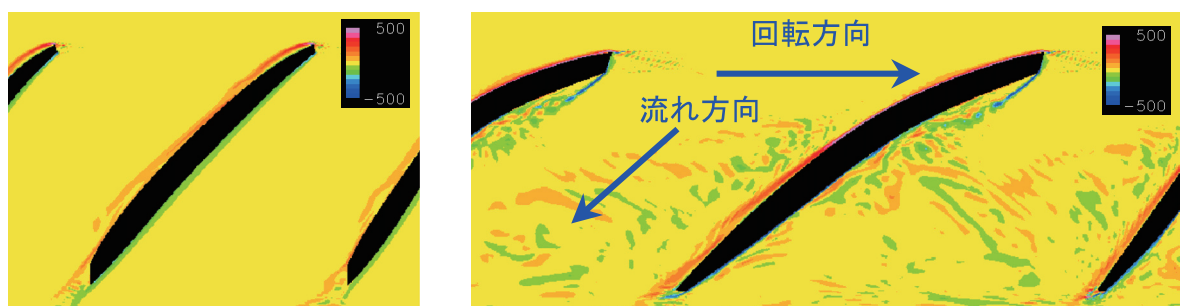


図2 翼周り円筒断面の渦度スパン方向成分（高流量） 左：翼根元側、右：翼先端側

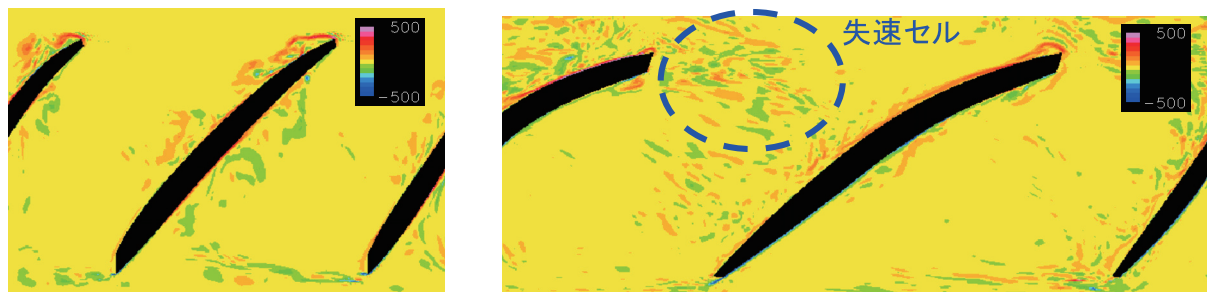


図3 翼周り円筒断面の渦度スパン方向成分（低流量） 左：翼根元側、右：翼先端側

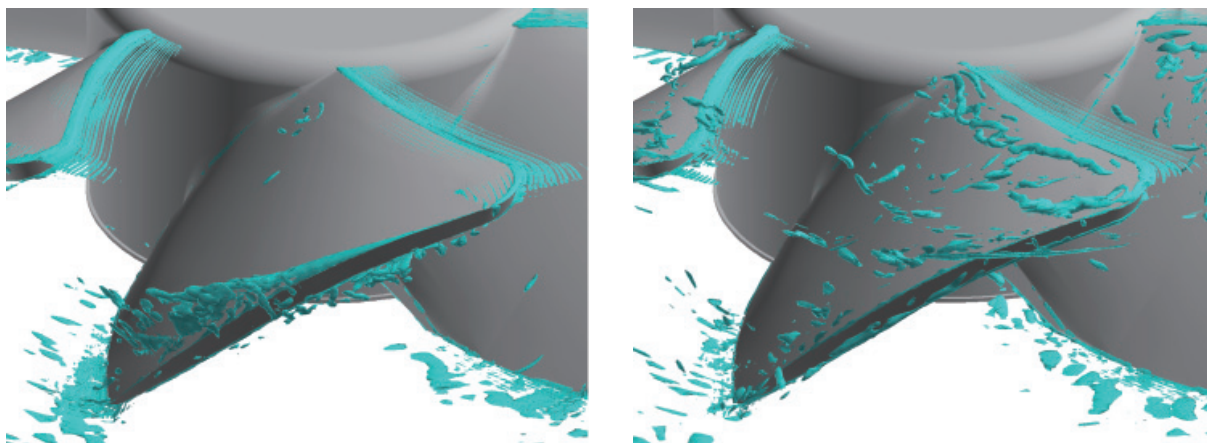


図4 翼周りの渦構造 $Q=10000$ (左：高流量、右：低流量)

5. まとめ

電子機器に用いられる小型の軸流ファンについて、地球シミュレータを用いて、翼面近傍の渦の挙動までを解像した大規模な乱流計算を実施し、ファン内部の詳細な流れ構造を解析した。ストール前後の動作流量における翼近傍の流れ場を比較し、それぞれの流れの特徴について明らかにした。

今後、実験との比較により、数値計算の詳細な検証を実施していく。さらに、空力騒音の予測へと研究を進めていくとともに、主要音源や騒音発生メカニズムを明らかにしていくことで、ファン騒音の低騒音化技術の開発へとつなげていくことができると考える。

謝 辞

本研究にあたり、地球シミュレータ利用に関してのご協力およびご助言をいただきました独立行政法人海洋研究開発機構 計算システム計画・運用部の関係者各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 鈴木昭次, “電子機器設計のためのファンモータと騒音・熱対策”, 工業調査会, (2001)
- 2) 文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発, 「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」第1回シンポジウム公演集, (2005)
- 3) Germano, M., et al, Phys. Fluids, A3-7, pp.1760-1765, (1991)