

## 直接計算によるファン空力騒音予測技術の開発

豊橋技術科学大学 飯田明由

### 1. 諸言

プロペラファンの空力騒音の予測には、非圧縮乱流解析と音響アナロジーを用いた解析（分離解法）が用いられることが多いが、分離解法では回転するファンの音響特性を正確に表すことが難しいという問題がある。一方、低マッハ数流れ場において圧縮性乱流解析を行う場合、音波の伝播まで計算するには、高精度コンパクトスキームを用いて高精度な解析を行う必要がある<sup>(1)</sup>。しかし、高精度コンパクトスキームの解析精度を維持したまま複雑形状物体やファンのような回転体に適用することが難しいため、低マッハ数のファンの空力騒音の直接解析に関する研究はそれほど多くない。そこで本研究では、この問題を解決するため、埋め込み境界法<sup>(2)</sup>の一種である Volume Penalization 法 (VP 法)<sup>(3)</sup>を用いて、複雑形状、移動物体から放射される低マッハ数流れ場における空力騒音を解析技術の開発を行った。開発したコードを小型ファンに適用し、ファン騒音の予測を試み、実験及び分離解法との比較を行い、直接解法を用いて小型ファンから放射される空力騒音を予測できることを確認した。

### 2. 解析手法

VP 法は、流体の支配方程式(1)に対し仮想外力項を加えることで物体境界を再現する方法であり、直交格子上で複雑な形状や移動・変形する物体を再現する手法である。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(E - E_v) + \frac{\partial}{\partial y}(F - F_v) + \frac{\partial}{\partial z}(G - G_v) = V \quad (1)$$

ここで、 $Q$  は保存量ベクトルを、 $E$ 、 $F$  および  $G$  は非粘性流束ベクトルを、 $E_v$ 、 $F_v$  および  $G_v$  は粘性流束ベクトルをそれぞれ表す。外力項  $V$  は物体の内部で 1、流体部でゼロとなるマスク関数  $\chi$  と運動量及び壁面の空隙率の積である。図 1 にマスク関数による物体領域の離散化の模式図を示す。一般的な VP 法では、マスク関数は物体内部で 1、流体中でゼロに設定するが、移動物体の解析の場合、物体が移動した際にマスク関数が 0 から 1 に離散的に変化すると、その変化（外力項の急激な変化）によって人工的な圧力波が発生する可能性がある。このため、本研究では、マスク関数を物体の表面からの距離  $d$  と、流体領域と物体領域との境界付近の計算格子幅  $\Delta y$  との比を用いて連続的に変化させ、物体が移動する場合に、流体領域と物体領域の境界を滑らかに変化させた。図 2 にファンケーシングと解析格子、マスク関数の分布を示す。

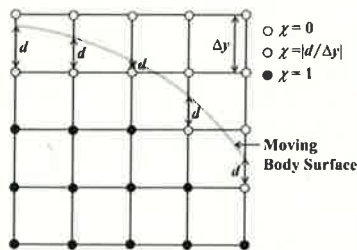


図 1 VP 法の模式図

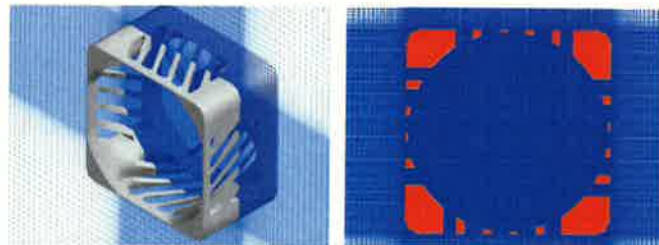


図 2 解析したファンのケーシングとマスク関数分布 (赤い部分)

この方法の利点は解析格子（直交格子）を固定した状態で物体の移動が表現できるため、高精度コンパクトスキームの体系を維持したまま移動物体の解析が行えることである。本手法をファンの解析に適用するため、以下のようない前処理を行った。まず、ファンの CAD データからファン形状データを取り出し、回転軸を中心として半径方向にファンを領域分割する。得られた子午面上の形状データをテトラメッシュ等で分割し、動翼の断面形状をデータベース化する。これらの処理には市販の格子生成ソフトを利用した。このデータをスプライン関数で補間し、各子午面における翼形状の基本関数を生成する。解析時はファンの回転角度に合わせてスプライン関数の座標を移動させる。スプライン関数の内部点は翼内部に相当することから、このデータと格子点の位置関係を書く時間ステップで算出し、マスク関数を設定する。この手法であれば、ファンの一座位標の検出等が不要となるため、移動物体を簡単に表現することが可能である。

### 3. 解析結果

図 3 に解析対象としたファンおよびケーシングを示す。ファン直径  $D = 40$  mm、動翼の羽枚数  $Z_0 = 5$ 、ストラット本数は 4 本である。流量は最大流量点付近  $Q = 0.11$  m<sup>3</sup>/min とし、回転数  $n = 3024$  rpm で解析を行った。翼端速度  $V_{tip}$  と翼端でのコード長  $C$  を基準としたレイノルズ数  $Re = 9343$  であり、予備実験において、BPF である  $nZ_0$  およびこれにストラット本数をかけた  $4nZ_0$  の周波数において強い音が発生することが確認された。

図 4 にファン特性の解析結果を示す。ファン特性の計算結果が実験と良く一致すること確認された。図 5 に騒音解析結

果を示す。直接計算によりファン騒音を精度良く予測することができることがわかる。解析では翼通過周波数(BPF ( $nZ_b$ ))及びその4倍のピークが観察される。BPF音は翼騒音の代表的なものであり、その成分が精度良く再現できていることがわかる。また、4BPF ( $nZ_b$ )はストラット(4本)とファンの干渉によるものなり、この成分が精度良く解析できていることが確認された。

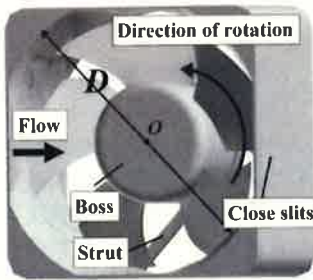


図3 解析対象としたファン

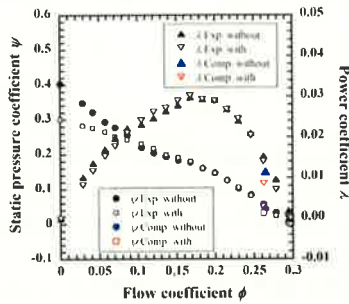


図4 ファン特性解析結果

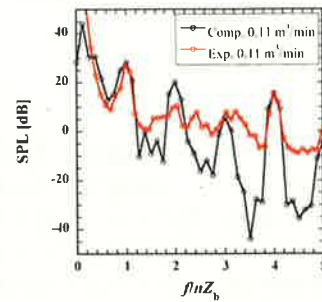


図5 騒音スペクトル予測結果

図6にBPF ( $nZ_b$ ) 1周期 (1/5回転) におけるダクト内の変動圧力分布の時間変化を示す。図より、ファンから圧縮波と膨張波が放射されていることがわかる。また、図の両端はファン中心からBPFの1波長分  $34D$  となっており、各波の波長を推定すると4次のBPFによる変動圧力が発生していると考えられる。また、その中の4回に1回強い変動圧力が観測され、これがBPFで発生した強い音と考えられる。

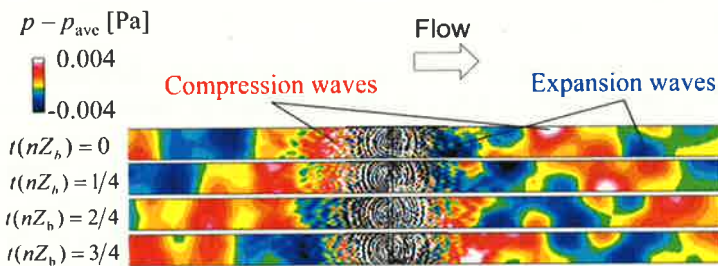


図6 ファン周りの変動圧力場の分布

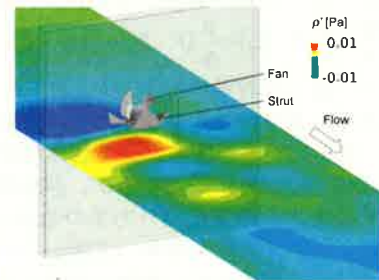


図7 位相平均圧力場

図6における圧力変動には渦構造による圧力変動も含まれ、必ずしもファン近傍の音の発生部における音波の挙動は明らかでなかった。そこで、得られた圧力変動場にガウシアンフィルタを施し、細かい波数を有する流体成分を除去し、音波成分を抽出し、さらにそのデータをBPFの周期で位相平均した結果を示す。放射音の分布が千鳥状になっており、これは、動翼は5枚であり、スパンの正方向と負方向で翼後流とストラットの干渉により音波の発生するタイミングが逆相となるためと考えられる。このように直接解析を行うことによりファンから放射される空力騒音の特性を明らかにすることが可能となると考えられる。

## 6. 結言

小型のプロペラファンなどの低マッハ数の回転体流れから放射される空力騒音を直接解析により求める方法について検討を行った。高精度コンパクトスキームを用いた空力騒音の直接解析をファン解析に適用する場合の問題点について検討し、埋め込み境界法とCADデータのマッピングを行うことによりファン騒音の直接解析が行えるシステムの開発を行い、以下の知見を得た。

- (1) 提案した計算手法により、低マッハ数流れ場における移動物体(回転体)の空力騒音を直接解析によって求めることが可能であるとの見通しを得た。
- (2) 提案した手法を小型ファンの解析に適用し、スリットの有無が流れ場及び音場に及ぼす影響を検討し、スリットを有する場合、スリットから流入する流れと翼まわりの流れが干渉により、ファン周りの渦構造が活発となることがわかった。その結果、翼後流の拡散が進み、翼後流とストラットとの周期的な干渉が弱まることで発生音が弱まることが明らかになった。このような知見は流れと音を同時に解析する直接解法ならではの結果であり、分離解法に比べて有利な点である。

## 参考文献

- (1) S. K. Lele, Compact finite difference schemes with spectral-like resolution, *J. Comput. Phys.*, 103 (1992), pp. 16-42.
- (2) R. Mittal and G. Iaccarino, Immersed boundary methods, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 37 (2005), pp. 239-261.
- (3) Q. Liu, and O. V. Vasilyev, A Brinkman penalization method for compressible flows in complex geometries, *J. Comp. Phys.*, 227 (2007), pp. 946-966.