

## プロペラファン内部流れの LES 解析と空力騒音源の予測

Large Eddy Simulation of Internal Flow of a Propeller Fan and Calculation of Its Aerodynamic Noise

藤 井 亮 輔\*・加 藤 千 幸\*\*・伊 藤 博 幸\*\*\*・坪 田 晴 弘\*\*\*

Ryosuke FUJII, Chisachi KATO, Hiroyuki ITO and Haruhiro TSUBOTA

## 1. は じ め に

プロペラファンは、エアコンの室外機、車両のラジエター、換気扇、コンピュータの冷却用などに幅広く使用されている。ファンの設置スペースの削減を図るためや除去すべき熱量の増加に対応するために、プロペラファンの回転数は高速化される傾向にあるが、それに伴い空気の流れから発生する騒音、すなわち、空力騒音の問題が顕在化しつつある。環境負荷の低減やオフィス環境の維持に対する要求は厳しくなる傾向にあり、プロペラファンに対してより一層の低騒音化が求められている。

一方、流体機械としてのファンにとって最も重要な性質は、同一の大きさ・回転数において、いかに多くの風を流せるかということであり、いくら発生する騒音が小さくともこれらの空力的な性能が悪くては意味がない。このような空力および騒音に対する要求性能を実現するために、従来は主として、羽根車出入口の平均流速や翼面に沿った流速変化に基づいたファンの設計が行われてきた。また、最近では、プロペラファンの内部流れに数値流体解析 (CFD) を適用し、性能向上や低騒音化を図ろうという研究も盛んに行われている。しかしながら、空力騒音は流れの渦の変動に起因して発生するため、従来行われてきた時間平均流れの解析を用いて空力騒音の発生を検討することには限界がある。

プロペラファンにおいて、各翼の先端には翼端渦が発達し<sup>1)</sup>、これがファンの空力性能ならびに騒音特性に大きな影響を与える。したがって、プロペラファンの空力・騒音特性を向上させるためには、翼端渦の非定常挙動と空力性能・騒音特性との因果関係を解明することが必須と考えられる。本稿では、流れの非定常変動が直接計算できる乱流解析手法である、Large Eddy Simulation (LES) をプロペラファンの流れ解析に適用し、車両のラジエター冷却用で使用されるプロペラファンを対象に、羽根車の外周に配置される仕切り板位置の変化が流れの渦構造や空力騒音源に及

ぼす影響を検討した結果を報告する。

## 2. 基 礎 方 程 式

本研究では、標準スマゴリンスキーモデル<sup>2)</sup>を用いた LES 計算により、プロペラファン内部流れを解析する。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_i = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\nu + \nu_{SGS}) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + f_i$$

$$\nu_{SGS} = (C_s f \Delta)^2 (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{0.5}; \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (1)$$

ここに  $\bar{u}_i$  は  $x_i$  方向の格子スケール流速成分、 $\bar{p}$  は同静圧であり、 $\rho$ ,  $\nu$  はそれぞれ流体の密度および動粘性係数である。 $f_i$  は解析に用いる座標系の運動に対する慣性力であり、回転座標系では遠心力ならびにコリオリ力を付加する。また、スマゴリンスキー定数  $C_s$  の値は、大規模な離乱流を想定し 0.15 とした。壁面近傍の渦動粘性係数  $\nu_{SGS}$  の値は、Van-Driest の減衰関数 (次式) を用いて減衰させる。

$$f = 1 - \exp \left( -\frac{y^+}{A^+} \right); A^+ = 25.0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

## 3. 数 値 解 析 手 法

数値解析手法の詳細は既報にて<sup>3,4)</sup> 報告済みであるので、その概要を簡単に説明する。本研究では、筆者の一人が開発した、並列処理移動格子法を用いて、静止部の流れと回転する羽根車内の流れを解析する。すなわち、回転する羽根車内の流れは回転座標系上の計算メッシュにより解析し、一方、静止流路内の流れは、静止座標系上の計算メッシュにより解析する。それぞれの計算メッシュはその上流あるいは下流に位置する計算メッシュと適切なオーバーラップ・マージンを以って重ね合わされ、各時間ステップにおいて、オーバーラップした部分の流速および圧力を上流あるいは下流の計算メッシュから内挿された値によりオー

\*東京大学大学院工学系研究科

\*\*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

\*\*\* (株) コマツ

パーセットする。このことにより静止部と回転部の流れの干渉が考慮される。また、数値離散化手法としては、二次精度の上流化有限要素法<sup>5)</sup>を用いている。

4. 解 析 結 果

計算対象としたのは、図1に示すようなプロペラファンであり、チップ径  $D_t = 850$  mm、ハブ径  $D_h = 280$  mm (ハブ比  $\nu = D_h/D_t = 0.33$ ) の6枚のブレードから構成される。ブレードの最大コード長は  $l = 329$  mm であり、この半径位置における弦節比は  $\sigma = l/t = 0.74$  である。設計回転数  $N = 1560$  rpm における羽根車チップの周速度は  $u_2 = \pi D_t N / 60 = 69.4$  m/s であり、この速度を基準とした流量係数、静圧係数はそれぞれ  $\phi = 4Q/\pi D_t^2 (1 - \nu^2) u_2 = 0.183$ ,  $\psi = 2\Delta P_s/\rho u_2^2 = 0.183$  である。今回の解析では、図2に示すような計算メッシュを用いて LES 解析を実施した。解析領域全体は3つの領域から構成されており、その要素数は合計約400万であるが、そのうち約300万をファン部に集中させている。このファンに対し、図2の下図に示すような仕切り板が設置されている。この仕切り板の軸方向位置を、標準的なケース (a) と比較して30 mm 上流側に移動させたケース (b) の解析を行い、その影響を検討した。

翼後縁から羽根車外径の約5%下流の断面における軸流速度および絶対流れの旋回速度の分布を周方向に平均した

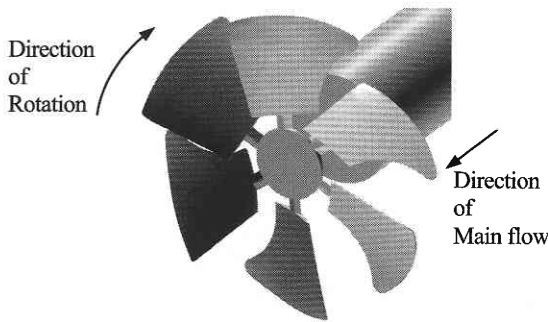


図1 Test Propeller Fan with 6 Blades

結果を図3に示す。ケース (a) と比較して、ケース (b) は、動翼先端付近の軸流速度ならびに旋回速度ともに減少している。図3から推定されるように、本プロペラファンでは、ほとんどの仕事が翼先端付近でなされているため、前記の流速の減少は羽根車仕事の減少を意味する。仕切り板を移動させた場合、羽根車の静圧上昇の予測値は、標準的な場合と比較して数割も減少しており、別途実施した実験においてもこのことは確認されている。

図4に動翼先端近傍の渦構造や動翼表面の静圧変動の分布などを示す。同図上から (1) 乱流の第2不変量の等値面、(2) 静圧変動の等値面、(3) 動翼負圧面の限界流線と静圧変動分布、(4) 同圧力面の限界流線と静圧変動分布、である。全て羽根車10回転の間の時間平均値である。

乱流の第2不変量の等値面 (1) は渦構造を表すが、こ

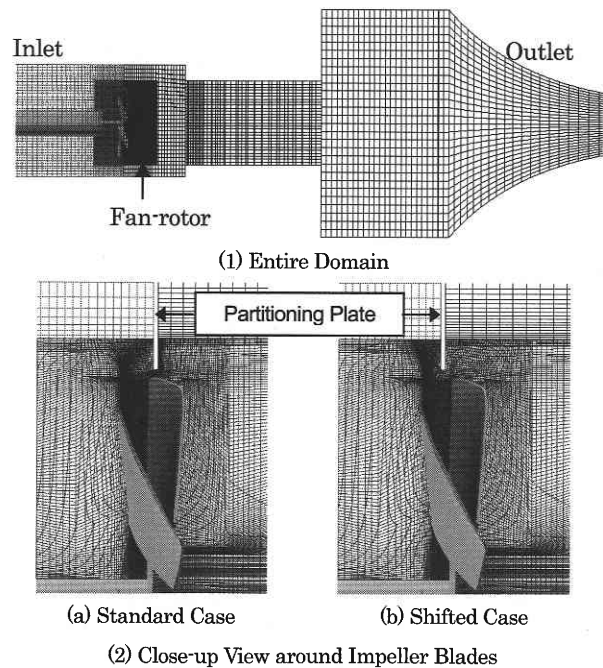
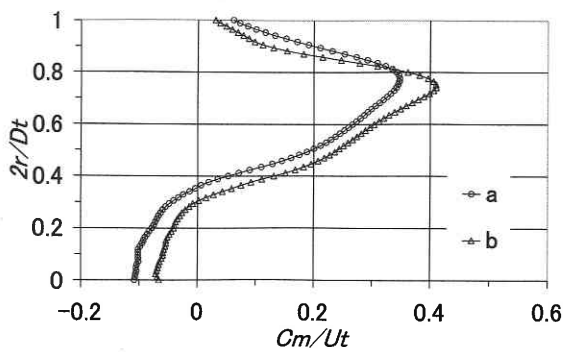
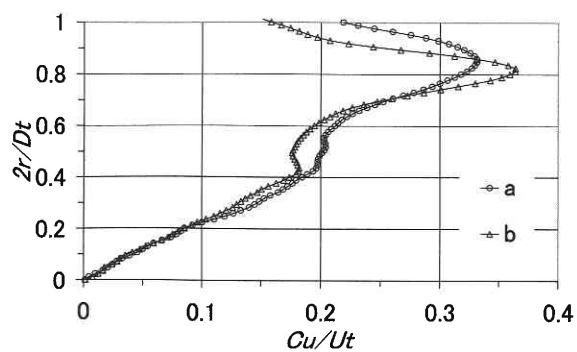


図2 Computational Mesh



(1) Axial Velocity



(2) Tangential Velocity

図3 Pitch- and Time-average Distributions of Absolute Velocities at Impeller's Exit Plane

研 究 速 報

の分布は静圧変動の等値面 (2) の分布と高い相関を持っていることがわかり、このことから動翼先端に発達する翼端渦は強い非定常変動を伴っていると言える。

ケース (a) では、前縁から動翼に沿って発達した翼端渦が仕切り板位置において仕切り板と干渉することにより周方向に転向している。周方向に転向させられた翼端渦は次の動翼の圧力面と干渉し、そこに大きな静圧変動を生じさせている。このことは、(4) に示した動翼圧力面の静圧変動分布において、動翼コード後半部の翼端近傍の静圧変動が非常に高くなっていることから確認される。一方、ケース (b) では、動翼負圧面の翼端近傍における静圧変動がほぼ仕切り板の位置までには非常に小さくなっている

ことから、仕切り板の位置まで翼端渦の発達が抑えられているのが分かる。仕切り板位置からは翼端渦が発達を開始するが、前縁近傍と比べて翼負荷が小さいこともあり、翼端渦の強度は弱く、隣接翼とも干渉することなく、翼間を通過している。なお、何れの場合においても、限界流線からは動翼負圧面に弱い前縁はく離が認められるが、静圧変動分布を見る限り、このはく離は空力騒音の発生に大きな寄与をしているとは考えられない。これらの解析結果から、このプロペラファンでは動翼先端近傍が主音源となっているものと推定される。

図5に、動翼における翼面圧力のサンプリングデータから Ffowcs Williams-Hawkings の式<sup>6)</sup> を用い求めた、羽根車

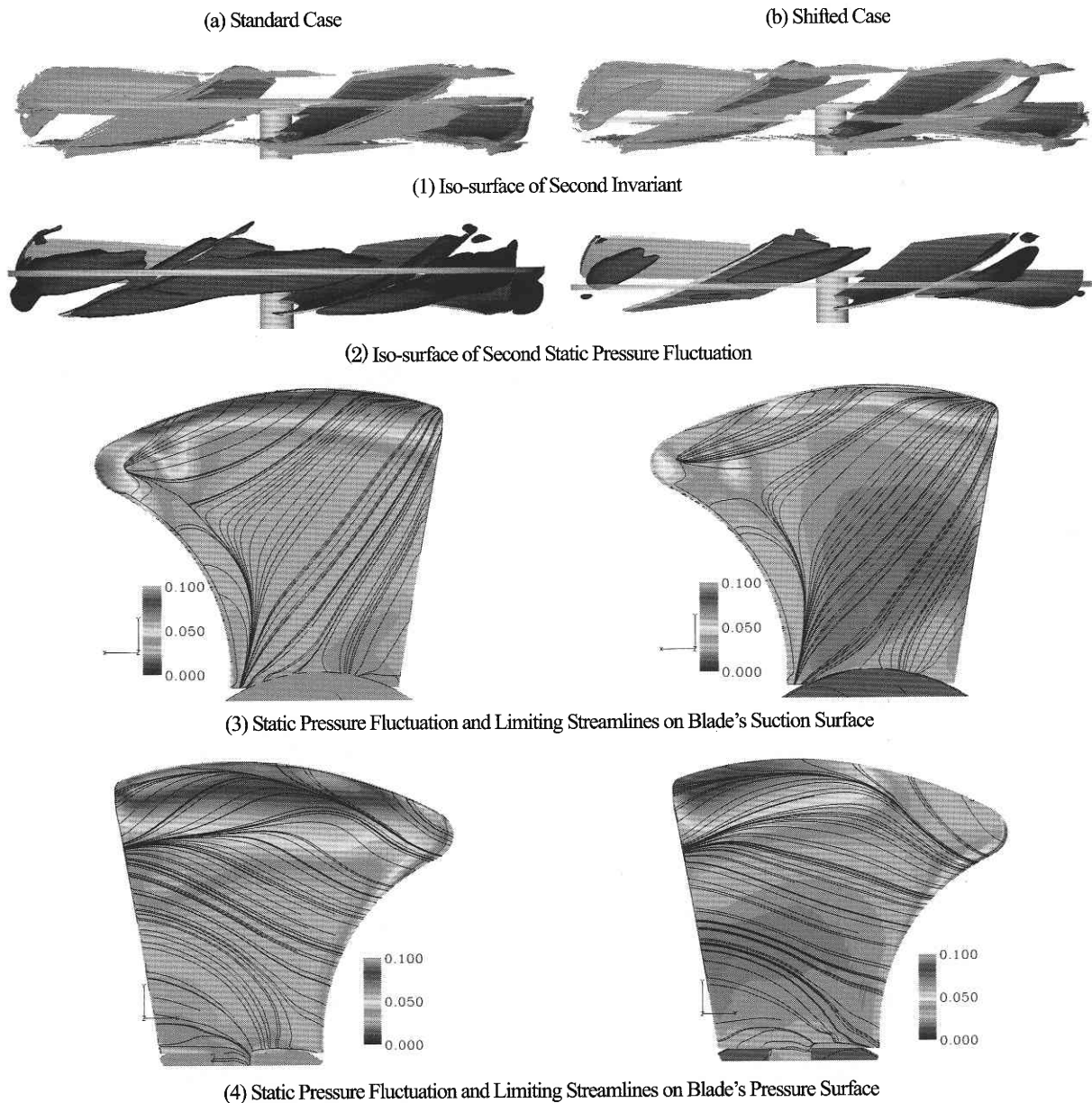


図4 Comparisons of Aerodynamic Source Distributions

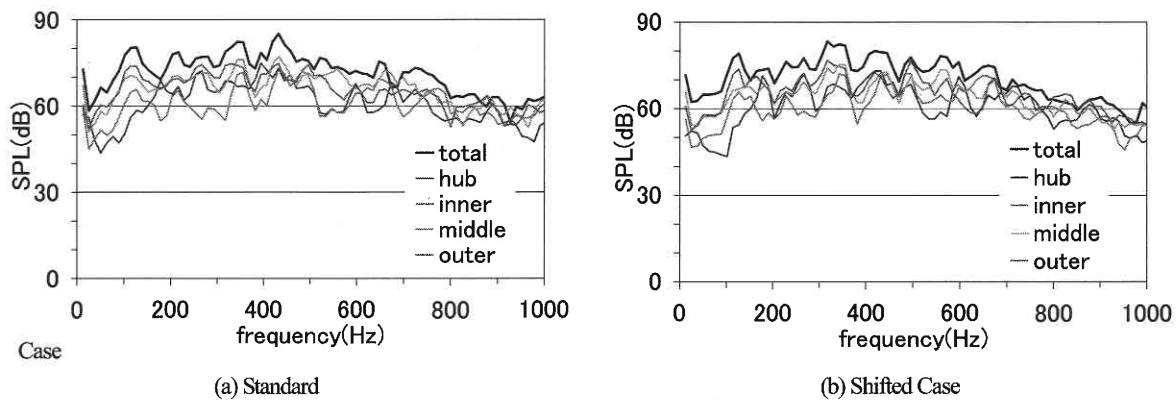


図5 Comparisons of Sound Pressure Levels at the same point

より  $1.2D_t$  下流の回転軸上の点における音圧レベルを示す。ここでは、羽根車のハブ・動翼の内側・中心部・翼端側それぞれの部分の寄与によるスペクトルも併せて示す。これによっても、翼端側の騒音に対する寄与が大きいことが予測される。また (a) のオーバーオール音圧レベルは 95.0 dB, (b) のは 94.4 dB となった。

#### 4. おわりに

車両用ラジエターに用いられるプロペラファンを対象に、羽根車外周部に設置される仕切り板位置の変化が、ファンの空力性能や空力騒音源に与える影響を数値解析により検討した。ファンの空力性能に関しては、LES 解析による予測値は実測値と良好な一致を示したが、今後、羽根車出口の平均流速分布や変動速度分布などに関して、実験値と詳細な比較を行うことにより LES 解析の精度を検証していく必要がある。現状の非定常数値解析は、乱流騒音の予測に対して解決すべき多くの課題を残しており、プロペラファンから発生する空力騒音のスペクトルを定量的に予測できるレベルには至っていない<sup>7)</sup>。しかしながら、将来的にはこのような予測も可能になるものと考えられる。空力騒音スペクトルの定量的予測が可能になれば、予測された音圧変動と流れ場の変動との相関を解析することにより、各周波数帯域の騒音の発生に特に寄与している渦構造を特定することができるようになる。このような解析が可能になれば、空力性能の向上と空力騒音の低減とを同時に

実現できるような、プロペラファンの新たな設計指針を示すことができるものと期待される。

本研究で使用した計算機リソースの一部は、文部科学省 IT プログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクトにより提供されたものである。ここに記して謝意を表する。

(2003年11月25日受理)

#### 参考文献

- 1) Jang, C.-M., Furukawa, M. and Inoue, M.: Analysis of Vortical Flow Field in a Propeller Fan by LDV Measurements and LES-Part II: Unsteady Nature of Vortical Flow Structures due to Tip Vortex Breakdown, *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. **123** (2001), pp. 755-761.
- 2) Smagorinsky, J.: General Circulation Experiments with Primitive Equations, *Mon. Weath. Rev.*, Vol. **91**, No. 3, (1963), pp. 99-164.
- 3) 加藤, 他 3 名, 生産研究, 53-1, pp. 37-40 (2001).
- 4) Kato, C., et al., ASME FEDSM 99-7802, (1999).
- 5) 加藤, 他 2 名, 機論, 58-552, B, pp. 2624-2631 (1992).
- 6) Ffowcs Williams, J., E., Hawkings, D., L., "Sound Generation by Turbulence and Surface in Arbitrary Motion", *Philosophical Transactions of the Royal Society, Series A*, 264-1511 (1969), 321-342.
- 7) Algermissen, G., Siegert, R., and Spindler, T.: Numerical simulation of Aeroacoustics Sound Generated by Fans under Installation Conditions, AIAA Paper 2001-2174 (2001).