

特集 車両空調用送風機の低騒音化*

Noise Reduction of the Fans for Automobile Air-conditioning System

酒井雅晴

Masaharu SAKAI

宮田 学

Manabu MIYATA

松永浩司

Koji MATSUNAGA

三石康志

Yasushi MITSUISHI

Recently, it has become more important for automobile components to not only have a reduced noise level, but also an overall reduction in size. For automobile air-conditioners, the multiblade fan which features a high pressure and large airflow volume has been widely used. However, this type of fan creates airflow turbulence due to separation between the blades and fluidic fluctuation in the scroll casing. As a result, turbulence noise is generated and this becomes the main sound- source of the multiblade fan.

To strike a balance between quietness and compactness via this fan, we have investigated the airflow behavior both inside the scroll casing and between the fan blades employing a flow visualization technique. It was discovered that the combination of longer fan blades and expanding scroll casing is effective with regard to specific noise reduction. Therefore, a 4dB(A) noise reduction was achieved by optimizing the scroll casing and fan blades while simultaneously reducing the size.

Key words : Air-conditioning, Blower / Multi blade fan, Blade, Specific noise level, Flow visualization

1. まえがき

車両空調装置は車室内に快適環境をもたらすとともに、窓曇り防止などの安全性にも貢献している。その空調装置の送風機能を担う送風機は、送風能力とともに車室内の静粛化に伴って低騒音化が強く望まれている。車両空調用に多く用いられている遠心式多翼送風機は、翼間で発生する騒音が送風機騒音の全体レベルを大きく左右することが知られており¹⁾、送風機騒音レベルを低減するためには、この翼間で発生する騒音をいかに低減できるかが重要な課題である。

また、車室内スペース拡大の要求から、送風機の小型化も重要である。多翼送風機の送風能力はファン径、翼形状、スクロールケーシングの広がり角などによって決まるが、送風機の小型化のためにはファンとスクロール形状の組合せが重要である。

そこで我々は、小型化と低騒音化の両立をめざした送風機を開発し、量産化させた。本報では、スクロール内部および翼間流れの可視化技術により、騒音と関連する流れを把握し、翼形状とスクロール形状の最適な組合せを見出したので報告する。

2. 車両空調用送風機の小型化

車両空調用送風機は一般にインパネ内部に搭載されるが、近年では熱交換器を内包するケーシングに対して、助手席側に送風機をオフセットしたレイアウトを採用する車両が多い。このようなレイアウトでは、助

手席の足元スペース拡大の観点から車両高さ方向の小型化が必要であると共に、車室内スペースの拡大のために車両前後方向の小型化が必要となる (Fig. 1)。

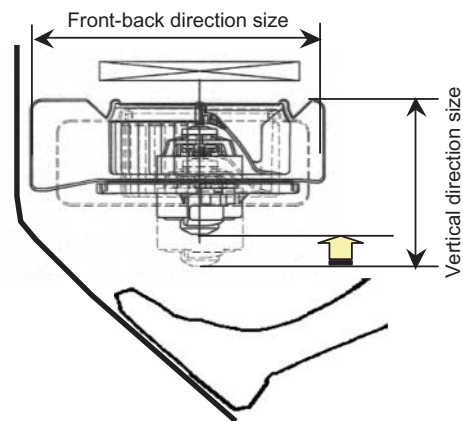


Fig. 1 Blower layout

車両高さ方向の小型化には、ファン高さの短縮およびモータの薄幅化が有効である。車両高さ方向の小型化とともに車両前後方向を小型化するためには、スクロール側壁の広がり率を小さくする必要がある。しかし、スクロール幅を維持して広がり率を小さくすると、スクロール流路面積が減少して風量低下につながる。そこで流路面積を維持するため、軸方向拡大スクロールを採用した。軸方向拡大スクロールはモータ側のスペースを流路として有効活用でき、風量を維持し

*2005年3月8日 原稿受理

たまま体格を小さくすることが可能である (Fig. 2).

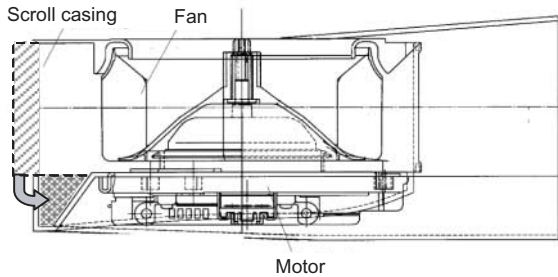


Fig. 2 Expanded scroll casing

ファンについては小径化による風量低下分を補うため、シロッコ翼を採用した。シロッコ翼は翼出口角が小さく、同じファン径では一回転あたりの風量がラジアルファンやターボファンに比べて大きいため、小径でも高風量を期待できる。

以上より、小型化の方向として軸方向拡大スクロールとシロッコ翼の組合せ (以下では小型送風機と呼ぶ) を前提として低騒音化を進めた。

3. 低騒音化の方向付け

送風機単体の騒音レベルの比較には比騒音 K_s が一般に用いられている。比騒音は送風機形状および作動点において固有の値であって、送風機そのものの良し悪しを判定できる。比騒音 K_s (dB(A)) は、

$$K_s = SPL - 10 \log(Q \cdot P^2 / 60) - 19.83$$

Q : 体積流量 (m³/h)

P : 全圧 (Pa)

SPL : 騒音レベル (dB(A))

で表される²⁾

まず小型送風機の低騒音化の方向付けをするため、小型送風機と従来送風機の騒音特性を比較した。送風特性および騒音レベルの測定はJIS B8330, B8346に準拠し、Fig. 3に示すベンチを用いた。ブロワモータを12Vにて定格運転させ、ベンチ出口の絞りを調整して通風抵抗を変化させ、各作動点で風量、全圧、騒音レベルを計測した。供試品の比騒音レベルの比較は各送風機の最高効率点で行った。本供試品では最高効率点で比騒音がmin値を示した。

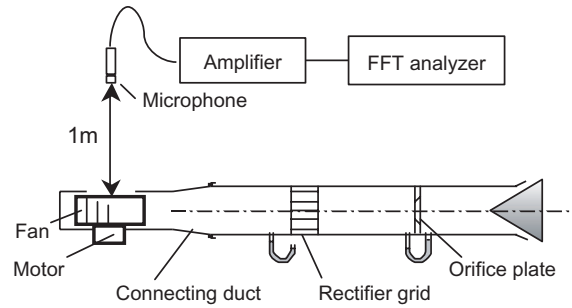


Fig. 3 Experimental apparatus for fan characteristics measurement

Fig. 4にスクロール形状と翼長の組合せが比騒音 \min 値に与える影響を示す。翼長 l がファン外径 D に対し大きいファン ($l/D \geq 0.12$) と軸方向拡大スクロールとの組合せが従来送風機 (ファン; $l/D < 0.12$, スクロール; 軸方向拡大なし) に対して比騒音が低減していることが分かる。一方、翼長の小さいファンと軸方向拡大スクロールとの組合せは、従来送風機より比騒音が上昇している。このように軸方向拡大スクロールは翼長の大きいファンとの組合せが比騒音低減に効果的であることが分かる。

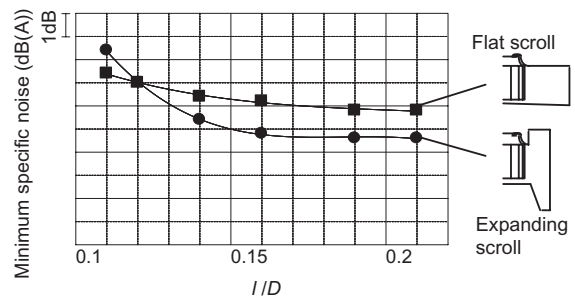


Fig. 4 Effect of l/D on specific noise level

Fig. 5は比騒音 \min 値をとる作動点において、翼長大小による小型送風機騒音の周波数分布を比較している。翼長大では翼長小に比べ、800Hz~2kHzの広帯域騒音が減少しており、これによって比騒音のオーバーオール値が低減している。回転音などの特徴的なピークもみられないことから、比騒音レベルの低減には乱流騒音発生を抑えることが有効であり、流れ中の不規則な乱れの低減を低騒音化の方向とした。

3.1 低騒音効果の検証 (流れの可視化)

翼長の大きい小型送風機の比騒音低減効果の検証のため、比騒音 \min 値を示す作動点においてスクロール

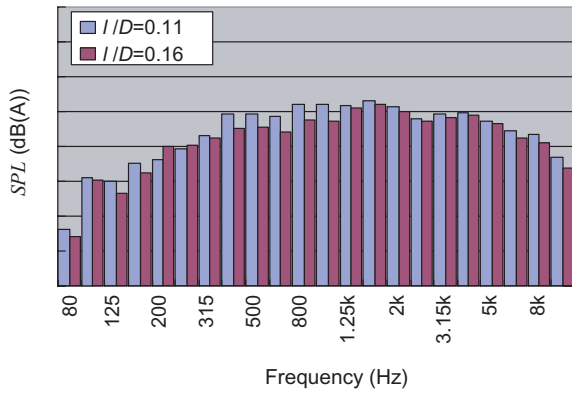


Fig. 5 Effect of I/D on 1/3 octave band level

内部流れを可視化して比較した。可視化手法はトレーサ法を用いた。³⁾ スクロール内の流れに微粒子を混入し、光を照射することで、照射面上の流れの挙動を把握できる。トレーサには平均粒径40 μ m（平均密度36kg/m³）のマイクロバルーンを用いた。

Fig. 6はスクロール内部の主流に垂直な断面での可視化結果を示している。翼長の小さい小型送風機では、ファンから吐出した流れが軸方向に急拡大した流路で剥離し、不安定な渦が生じていることが観察された。一方、翼長の大きい小型送風機では、軸方向拡大流路全域に安定した旋回流が形成されており、流れ場の安定化が騒音を低減している要因であると考えられる。また翼長の大きいファンから吐出する流れは、ファン吸込み口の反対側に偏っており、この偏った吐出風が軸方向拡大流路幅のほぼ中心部に流入していることが分かる。このことから、軸方向拡大流路は、ファン吐出風の流入する軸方向拡大流路幅の中心部を境界として、上部および下部に一对の旋回流が形成されるのに適した形状であることが分かる。

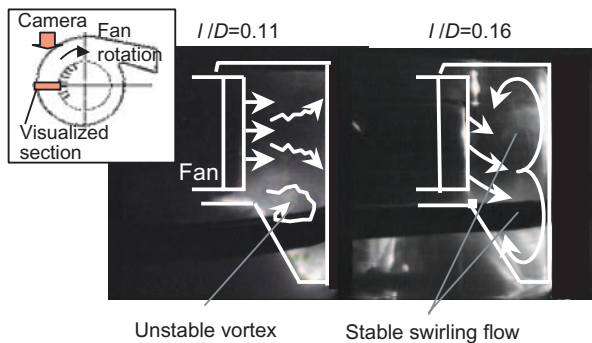


Fig. 6 Visualized flow in the expanding scroll casing

ここで、ファンからの吐出風が反吸込み側に偏るメ

カニズムを考える。ファンの吸込み口の軸方向風速を V_z 、ファン外周での半径方向風速を V_r とする (Fig. 7)。簡単のため、翼間において、翼の内径側上端部より流入した空気が外周側に到達するまでに流入速度を保つと仮定する。翼に流入した空気がファン外周から吐出するまでに軸方向に移動する量 h は、

$$h = \text{軸方向風速} \times \text{翼間滞在時間} \\ = V_z \times (l / V_r)$$

そのため、

$$h \propto l$$

となり、翼長 l が大きい方が翼間での軸方向移動量が大きくなり、結果としてファンからの吐出風が反吸込み側に偏ることになる。

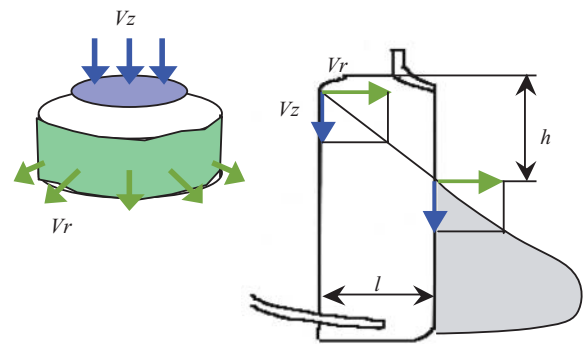


Fig. 7 Relation between the blade length l and the drift distance h

この検証として、翼長の大きいファンと小さいファンにおいて、ファン吐出風速分布をLDV（レーザドップラー流速計）による計測により求めた。Fig. 8に結果を示す。翼長の小さいファンでは吐出風速分布は軸方向にほぼ均一となっているのに対し、翼長の大きいファンでは反吸込み側の流速が速く、偏った風速分布を持つことが確認できる。

3.2 スクロールによる低騒音化

翼長の大きいファンとの組合せにおいて、比騒音低減のために、ファン外径に対する翼長の比 $I/D=0.16$ のファンとの組合せにおいて、軸方向拡大スクロールの形状パラメータを最適化した。形状パラメータとして、スクロール側壁の広がり角およびスクロール下

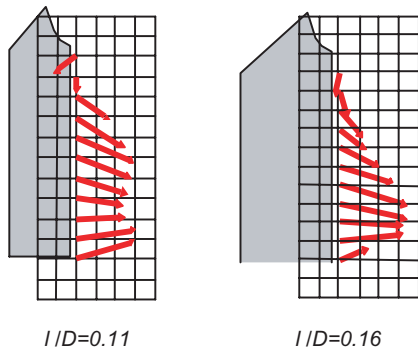


Fig. 8 Result of the mean velocity measurement in the flow discharged from fan

面の軸方向拡大率を次のように定義した。

$$\text{スクロール側壁広がり角}(\theta) : N = \frac{180}{\pi\theta} \ln \frac{r(\theta)}{r(0)}$$

$$\text{スクロール軸方向拡大率} : \frac{H}{H_0}$$

- ここで、 θ : スクロールノーズからの角度 (radian)
- $r(\theta)$: 回転中心とスクロール側壁の距離
- H : スクロール巻き終わりでの幅
- H_0 : スクロール巻き始めでの幅

Fig. 9はスクロール流路断面積が同一条件のときのスクロール広がり角と軸方向拡大率が比騒音min値へ与える影響を示している。広がり角4°と軸方向拡大率1.5が最も比騒音min値低減に効果があることが分かる。

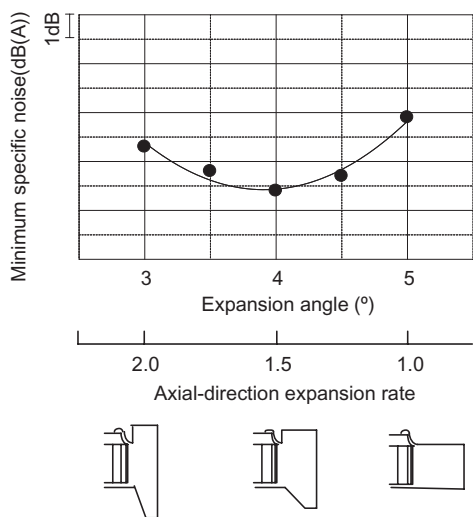


Fig. 9 Effect of the scroll shape and the blade length on specific noise level ($l/D=0.16$)

スクロール形状の比騒音低減効果の検証のため、スクロール内部流れを可視化した結果をFig.10に示す。スクロール広がり角4°・軸方向拡大率1.5に対し、スクロール広がり角3°・軸方向拡大率2.0では軸方向拡大部の流れが滞っており、流れにくくなっている様子が観察できる。

以上より、翼長の大きいファンに対してスクロール広がり角と軸方向拡大率には最適値が存在し、従来送風機に対し、2.5dB(A)の比騒音低減効果があることを確認した。



Fig. 10 Visualized flow in the various type of expanding scroll casing ($l/D=0.16$)

4. ファンによる低騒音化

スクロール形状最適化に続いて、ファン翼形状の改良によりさらなる低騒音化を図った。

4.1 翼間流れの把握

ファン翼形状改良方向の導出のため、まず翼間流れをイメージローテータの原理を用いた可視化手法により解析した (Fig. 11)。像回転プリズムを回転させると、そのプリズム像は2倍の角速度で回転する。このことを利用して、回転対象物に対し1/2の回転数でプリズムを回転させればそのプリズム像は常に同じ姿勢(擬似的静止状態)を保つことができる。

この手法を送風機に適用し、Fig. 12に示す可視化装置を用いて翼間流れを可視化した。可視化位置は、翼間流れの多いファン下面より30mmの位置とした。試験条件は、通風抵抗が大きい場合 (FOOT-mode相当、流量係数 $\phi=0.18$) と、通風抵抗が小さい場合 (FACE-mode相当、 $\phi=0.38$) の2条件とし、それぞれ高速度ビデオカメラにて撮影した (フレームレートは4500コマ/秒)。ファンの回転数は2000r/min固定とした。

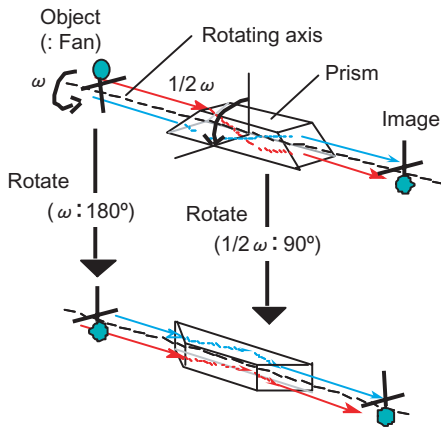


Fig. 11 Image-rotation prism

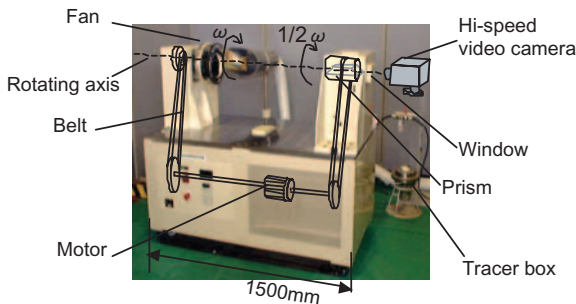


Fig. 12 Image-rotator device

可視化結果より、ファン上部に比べ、中間部、下部で勢い良くケース内部へと吐出している様子が観察された。代表的にファン中間部での翼間流れの可視化結果をFig. 13に示す。またスクロールノーズからの角度 $\theta=0^\circ\sim 120^\circ$ ではケース内の吹き戻り風が翼内へ逆流している様子を観察することができる。その他の回転周方向の角度領域において翼間流れは、翼入口の剥離渦の発生による死水域が大きい。剥離渦は乱れながら出口方向に移動し拡散・吐出をしている (Fig.14)。また、渦回転周期について調査したところ、渦一回転の周期がおおよそ $0.4\sim 2.0\text{ms}$ ($500\sim 2500\text{Hz}$) であることを確認した。

4.2 解析結果に基づく改良方向

翼間流れの可視化結果から、翼間での騒音を低減させるための改良方向として、剥離渦と再付着点の発生位置や大きさに着目した。改良の方向としては、渦の発生による死水域をできるだけ小さくして、騒音と関連のある箇所を縮小させれば翼間で発生する騒音も低減できると考えた。渦の発生による死水域が大きくなるのは、翼入口角と流入角のずれ角が大きいためである。

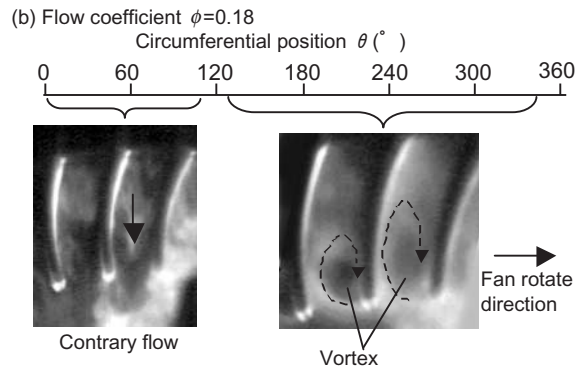
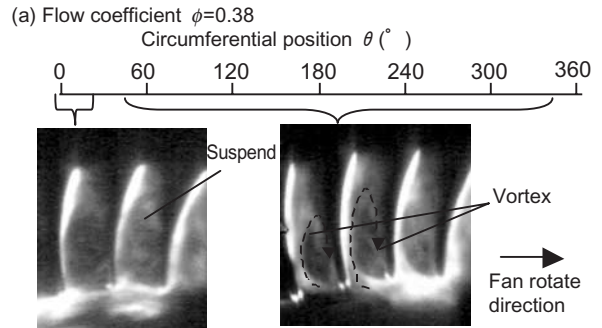


Fig. 13 Visualization between blades of circumferential position

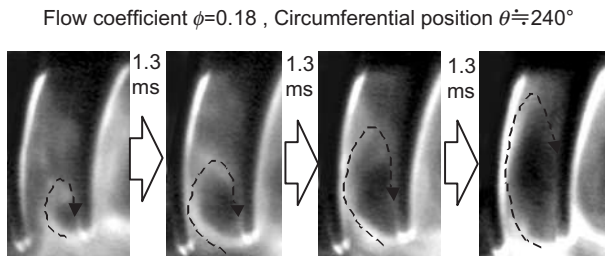


Fig. 14 Path line of vortex

るので、翼入口角を理論流入角に近づけてずれ角を小さくすれば死水域を小さくできると考えられる。しかしシロッコ翼のような前進翼は翼入口角を小さくしすぎると、翼面の曲率が大きくなり、通風抵抗が大きい作動点では翼出口背面で剥離して著しい性能低下と騒音増大を招く。そこで(1)流入側で剥離を発生させるが、領域は小さくする、(2)出口側では剥離を防止する、ことを狙い、以下の改良をした。

- (1) プロト品よりも入口角を小さくし、翼流入直後の翼面と流入風とのずれ角を小さくする。
- (2) 翼流入後、剥離した流れの速やかな再付着を促進するため、翼入口での翼面曲率を大きくする。翼出口では剥離を防止するために翼面曲率を小さくする。

4.3 改良効果の確認

Fig. 15に改良翼の形状と翼間流れの改良効果を示す。タイプAに比べ、改良後のタイプBは翼間流れも流れの設計どおり、翼入口付近で死水域の小さな渦が発生していることを確認した。タイプBの送風性能を確認したところ、広い作動領域においても十分な性能が得られるうえ、比騒音min値をタイプAに比べタイプBは、1.5dB(A)低減できた (Fig. 16参照)。

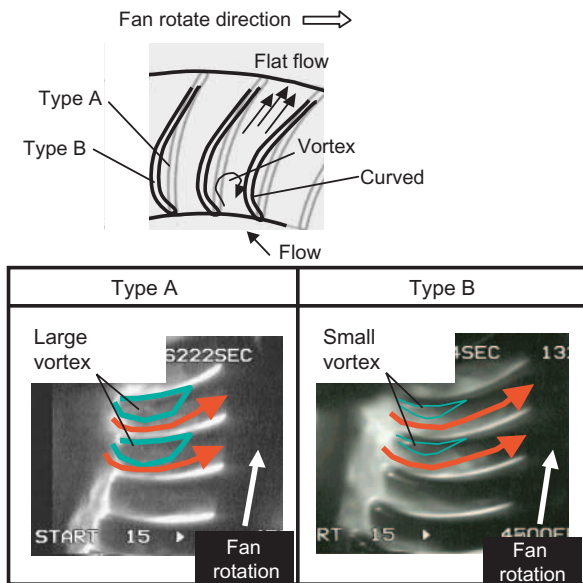


Fig. 15 Blade shape of Type B and visualization between blades

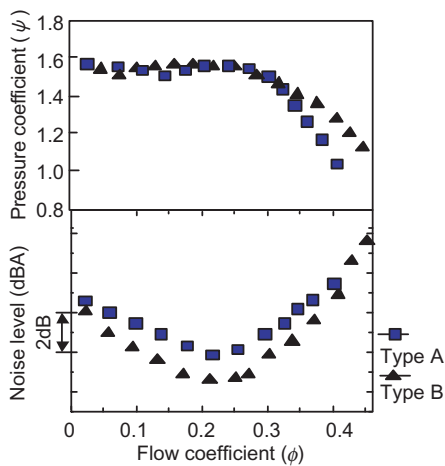


Fig. 16 Performance curve

5. むすび

モータスペースを有効活用した軸方向拡大スクロールを採用した小型送風機について、軸方向拡大スクロール内部流れを可視化した結果、翼長の大きいファンとの組合せでは流路内に安定な旋回流が形成されており、比騒音低減に効果的であることを見出した。ファン外径に対する翼長の比 $l/D=0.16$ に対しスクロール形状の最適化をし、スクロール側壁の広がり角 4° ・軸方向拡大率1.5により、従来より比騒音レベルを2.5dB(A)低減させることができた。

また、翼形状の最適化のため、イメージローテータ装置により送風機翼間での流れを回転周方向位置 360° にわたり時間連続的に可視化した結果、(1)翼入口の剥離渦の発生による死水域が大きく、剥離渦は乱れながら出口方向に移動しながら拡散・吐出をしている、(2)剥離渦回転周期はおよそ $0.4\sim 2.0\text{ms}$ ($500\sim 2500\text{Hz}$) であり、ファン騒音の主音源である広帯域騒音と関係していることを示唆した。

上記結果に基づいて翼の形状を変更し、翼間流れの改良を行ったところ、従来同等の送風性能を維持しつつ、比騒音レベルをさらに1.5dB(A)低減させることができた。

以上より、ファン&スクロールの改良によって従来より比騒音レベルを4dB(A)低減させることができた。

<参考文献>

- 1) 森主：日本機学会誌, Vol.57, No543(1991), p.197.
- 2) 生井, 井上：ターボ送風機と圧縮機, コロナ社 (1988), p.730.
- 3) 流れの可視化学会編, 流れの可視化ハンドブック, 第5章注入トレーサ法, pp.157-206.



<著 者>



酒井 雅晴
(さかい まさはる)
冷暖房開発1部
工学博士
車両空調用送風機の開発に従事



宮田 学
(みやた まなぶ)
技術企画部
工学博士
全社の技術企画に関する業務に従事



松永 浩司
(まつなが こうじ)
冷暖房技術3部
カーエアコンの設計業務に従事



三石 康志
(みついし やすし)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究2部
流体、騒音の研究開発業務に従事