

# 特集 車両空調用送風機の翼間内流れ実験解析\*

## Experimental Analysis on the Flow Pattern between Fan Blades of Car Air-Conditioning Systems

三石 康志

Yasushi MITSUISHI

宮田 学

Manabu MIYATA

酒井 雅晴

Masaharu SAKAI

The multiblade fan has been widely used for car air-conditioning systems. However the fan has problem with regard to the noise which is generated between the fan blades. It is difficult to visualize the flow between the fan blades which rotate at a high speed and to investigate the relationship between the flow and the noise. We made an *image-rotator* device which mainly consists of an image-rotation-prism and a high speed video camera to visualize the flow and correlation between the fan blades. We measured the pressure fluctuation on the blade surface and noise simultaneously, and investigated both. As a result, we established the mechanism of the flow and the noise level was successfully reduced.

**Key words** : Air-conditioning, Noise, Flow visualization, Blower/Multiblade fan, Blade

### 1. はじめに

車室内に快適環境をもたらすエアコンの風を送り出す送風機は、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、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。

近年コンピュータの処理能力の向上や数値解析の向上により、流れの数値シミュレーション技術が各段に進歩<sup>1)2)</sup>してきたが回転機械において十分な解析精度が得られるのは比較的限定された作動条件においてのみの場合が多く、作動条件が広範囲にわたることの多い実際の車両空調製品の開発において最適解を得ることや、数値流体解析技術で多翼ファンの発生騒音をシミュレーションすることは難しく報告例も少ない。また送風機以外の研究では、実験的に風洞中の翼型モデルにおける空力騒音と翼周りの流れに関する研究などが報告例されている<sup>3)</sup>。

そこで回転実機での実験的な計測解析が送風機の開発上、未だ非常に重要となっている。遠心式多翼送風機の翼間流れの実験解析として、翼間の流速分布を2重露光画像記録による手法を用いて可視化計測した報告例<sup>4)</sup>や、火花追跡法とイメージロータ法を組み合わせ、ドラムカメラによる連続画像の撮影を行った報告例<sup>5)</sup>などがある。しかしながら、両報告とも回転周方向位置での可視化位置はその都度限定されてしまううえ、流れの状態が鮮明に映像化されているわけで

はない。

今回、我々は車両空調用実機で用いられている送風機の翼間の流動状態をイメージロータ法の基本構成は報告例<sup>5)</sup>を踏襲し、光の照射方法や構成に工夫を加えることにより周方向回転位置にとらわれずに、詳細に翼間流れを連続的に可視化観察した。また翼面上の圧力変動を翼面上圧力測定<sup>6)</sup>を参考に小型半導体圧力センサにより計測し、発生騒音との相関を求め流れの可視化結果の検証をした。これにより、騒音と関連する翼間流れを明らかにし、翼の改良方向を示し騒音が低減できたので報告する。

### 2. 実験装置と実験方法

#### 2.1 供試ファン

車両用空調装置の構成は、おもに送風機・クーラ・ヒータで構成されている。送風機はモータにより多くのブレード(翼)を回転させることによって風量と圧力を稼ぎスクロールを介して後流へ導くものである。Fig. 1に供試品送風機の形状を示す。

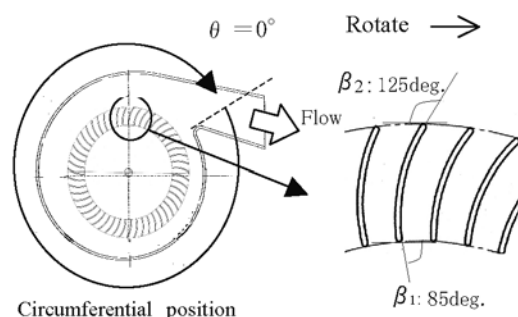


Fig. 1 Test blower and blade shape of type A

\* (社)自動車技術会の了解を得て、2002年秋季大会学術講演会前刷集No. 119-02, 222より一部加筆転載

### 2.2 イメージローテータ装置

高速回転するファンを擬似的に静止画像として捉えることができるイメージローテータの原理を簡単に説明する。像回転プリズム (Image rotation prism) を回転させると、そのプリズム像は2倍の速さで回転する。このことを利用してFig. 2に示すように、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。

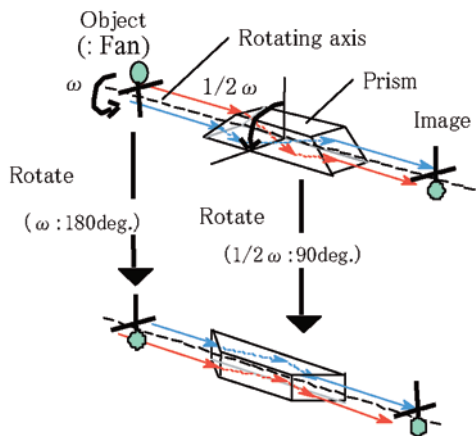


Fig. 2 Image-rotation prism

我々は、実機ファンの翼間流れを可視化する装置として、Fig. 3に示す装置を作製した。像回転プリズムは市販のタブプリズムを使用し、プリズムの端面の大きさを45mmのものを用い、観察加点物との距離を1000mmとすることにより、最大220mmの視野を確保した。また静止像のゆらぎや歪みを最小限に小さくするため、回転軸あわせの精度は、 $\pm 0.01\text{mm}$ 、軸の傾き精度 $\pm 0.05^\circ$ の精度で調整した。

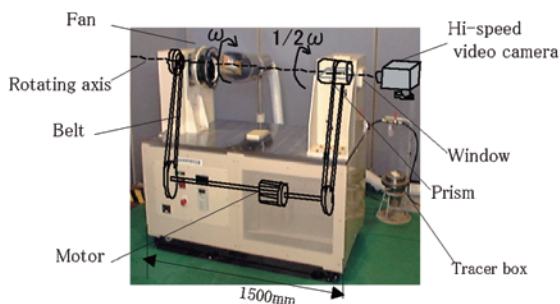


Fig. 3 Image-rotator device

### 2.3 可視化手法

流れを動画にて詳細に観察するため、可視化方法は注入トレーサ法<sup>7)</sup>を採用し、可視化トレーサとして、

白色発砲樹脂 (平均粒径 $40\mu\text{m}$ ) を用い、光源にはメタルハライドランプ250Wをスリット状 (幅3mm) にし翼へ照射した。光の照射方法はファン外周面、すなわちケース側面から照射させる方法を試みたが、ケース内を通過するトレーサ粒子の影響により光量やスリット形状が乱れるうえ、さらに湾曲したノーズ形状部から光を照射させることは容易ではないことなどから $360^\circ$  範囲に渡る鮮明な可視化画像を得ることが難しかった。そこで、これらを解決する手段として以下の三つの方法をとった。

まず1番目は、光をファンの内側から照射させて、拡大する観察翼のみに光を照射、ファイバの端部において光を非接触で転送させた。具体的に記述すると、ファン内側から光を照射させる場合に、光源 (ランプ、電源等) を同時に回転させるのは困難であるため、ライトガイドによる光ファイバの端部 (コア径: 10mm) 同士を非接触で光を転送する方法をとった。その際、ファン側のファイバ端部 (回転) と光源側のファイバ端部 (固定) との隙間は1mm以下としたため、非接触転送による光の漏れ損失はほとんど無しであった。ファンの回転中心部付近にスリット状に切りかきを設け、そこから照射させて、外面に透明フィルムで覆いをした。また高さ方向での観察ができるように、スリット光位置を可変できるようにした。

2番目の解決手段としてファン側ライトガイドはプリズムを用いてファン内部に収納できるよう体格を小型にし、シリンダリカルレンズによりスリット形状に集光させ観察翼へ照射した。

3番目の解決手段としては、観察翼付近にトレーサを観察翼に同期回転させ注入させたことである。トレーサ粒子を供給する際に全体にトレーサを注入すると観察翼間内でトレーサの量が足りず、鮮明な可視化画像を得ることが困難であったため、追従注入させることにより可視化観察できうる十分な濃淡に保ち続けることが可能となった。以上の構成をFig. 4に示す。

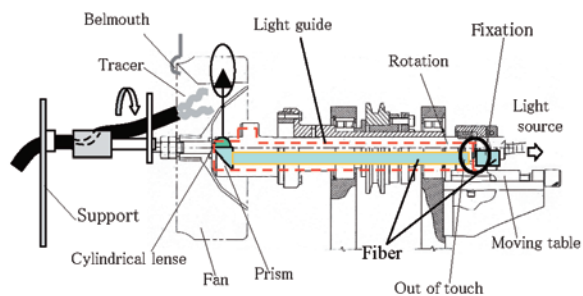


Fig. 4 Experimental apparatus for visualization

上記方法により、ファン回転周方向位置にこだわらず、鮮明な可視化画像を連続的に得ることができた。観察翼をズームレンズで拡大し高速度カメラにて翼間流れ状態を観察した。その他、ペルマウス（鐘に似た断面をもつ吸い込み形状のこ）を透明色で製作し、翼全体の流れを把握できるようにし、回転角位置の情報については、トレーサ供給用の支柱1本（画像上、一瞬陰になる箇所）を基点に、ケースに反射シールを貼り光を照射させたマーカーを90°ごとに設置した。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 翼間流れ結果と数値シミュレーションとの比較検証

今回製作した装置を用いて、翼間の流れ状態を観察したところ、鮮明に可視化することができ、かつ回転周方向位置にとらわれず連続的な映像を得ることができた。まず、これら可視化で得られた流れ場と数値シミュレーションとの比較を流れ形態について簡単に検証してみた。作動条件や測定箇所などの諸条件は、計算、可視化とも同条件になるようにした。

Fig. 5にその結果を示す。数値計算では翼間入口付近で小さな渦流ができるが翼出口付近では均一な流れ場に近くなっている。一方、本装置による可視化では翼間でははっきりと渦が確認でき、翼出口に向かいその渦が少しずつ大きくなっており、翼背面に最付着している様子を確認することができる。

以上、本装置による動画観察は流れ場を明確に知ることができる。今回は流れ形態のみを比較したのみだが、物理量など、より詳細に検証していくことによりシミュレーション技術の精度向上が期待できると考える。

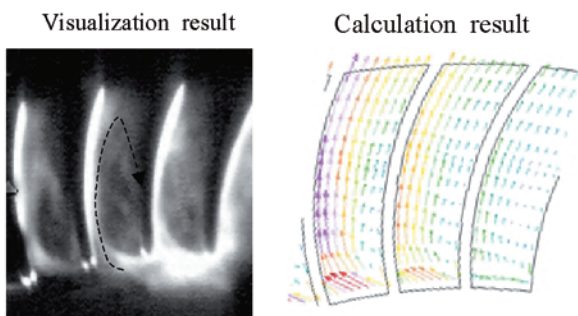


Fig. 5 Comparative study of the flow between the fan

#### 3.2 可視化結果

今回観察を行った試験条件は、通風抵抗が大きい（FOOT-mode.DEF-mode相当）流量係数 0.18の場合

と、0.38の通風抵抗が小さいとき（FACE-mode相当）の2条件について計測し、高速度ビデオカメラ（4500コマ/秒）にて撮影した。ファンの回転数は2000rpm固定とした。高さ方向は光の位置を上下させて、ファン高さ方向、上中下の位置の流れを観察した。高さ方向に関しては、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た。代表的にファン中間部での翼間流れ結果をFig. 6示す。また回転角 = 0 ~ 120°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うえ、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。（Fig. 7参照）また、渦一回転の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 ~ 2.0ms（500 ~ 2500Hz）であることも確認した。

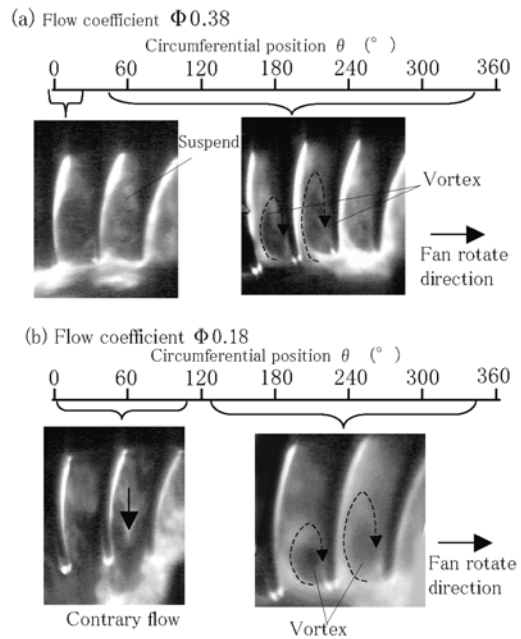


Fig. 6 Visualization between blade of circumferential position (X/L=0.35 Y/H=0.39)

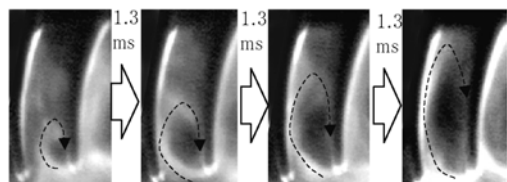


Fig. 7 Path line of vortex  
Flow coefficient 0.18,  
Circumferential position 240  
(X/L=0.35 Y/H=0.39)

3.3 翼面圧力測定と騒音の関連付け

イメージローテータによる翼間流れ状態を詳細に可視化観察できた。どの流れ形態が翼間で発生する騒音と関連があるのかを検証するため、翼面の圧力を計測し、騒音との相関を求めることとした。翼面の各所における正圧面、負圧面の圧力を測定した。実機翼に直接センサ測定孔を設けるのは容易ではないので、あらかじめ測定孔を設け光造形で作製した翼の一部を別で製作し組み込んで、超小型圧力センサ（エンデブコ社製：8507-C2：測定範囲0～13.6kPa）により計測した。センサが非常に小型のため、圧力測定面に対しての流れや騒音への影響はほとんど無視できることを事前に確認しておいた。測定しない測定孔はテープで塞いで使用した。また圧力電気信号について回転系から静止系への変換は水銀スリップリングを用いた。圧力測定用ファンの様子をFig. 8に示す。

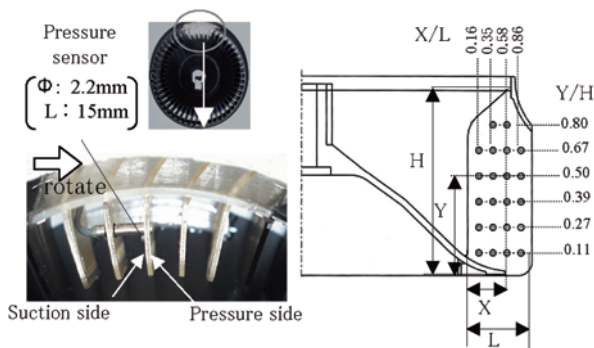


Fig. 8 Measurement of blade pressure

圧力センサからの翼面圧力信号の時間変化（ファン1回転分）の圧力波形とそれを周波数分析した結果の代表例をFig. 9に示す。翼間で発生する流れ成分は0～3000Hzまでの周波数成分が多いことが分かる。通風抵抗大（0.18）において、回転角 = 0～120° 付近の箇所では0～3000Hzまでの周波数成分が少ないことが分かる。この周波数域は可視化結果では逆流風が翼内に進入していた回転角域とほぼ一致し、このことから本テスト品では逆流風は全体騒音への関与が低いことが示唆できる。次に、騒音との関連付けを行うため、送風機から1m離れた位置で測定したマイクロホンで計測した音（Sound Pressure Level）との相関をとり、翼のどの箇所でも騒音との関連が高いか確認した。式(1)に示すコヒーレンス関数指標（0～1）を用い、相関値が1に近いほど騒音との相関が高いことを示す指標を用いた。

$$\begin{aligned}
 &= W_{XY} \cdot W^*_{XY} / W_{XX} \cdot W_{YY} \\
 &= |W_{XY}|^2 / W_{XX} \cdot W_{YY} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$W_{XY}$ : クロススペクトル  
 $W_{XX}, W_{YY}$ : パワースペクトル

解析は周波数別に相関をとった。3000Hz以下の傾向はどれも同じであった。代表的に2.1kHz, 1.6kHz, 1.2kHzについてファン高さ中位置（Y/H = 0.39）での結果をFig. 10に示す。どの周波数でも相関の大小の傾向は似ている。正圧面より負圧面のほうが騒音との関連が大きい。特に通風抵抗小時 0.38においての翼負圧面の箇所X/L = 0.35, また通風抵抗大時 0.18でも翼負圧面の箇所X/L = 0.35～0.86が大きいことが分かった。

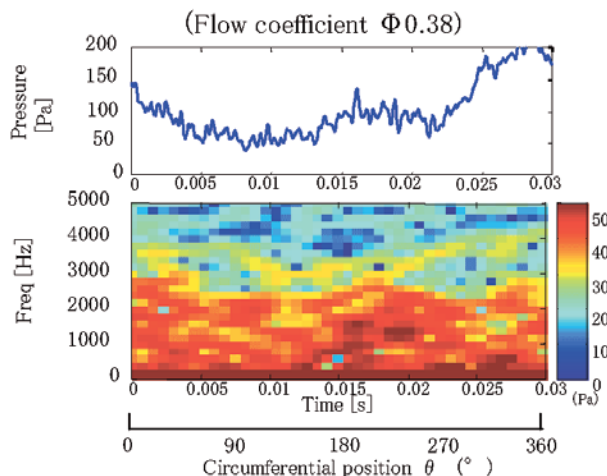


Fig. 9 (a) Time-Frequency analysing results Pressure side, X/L=0.35 Y/H=0.39

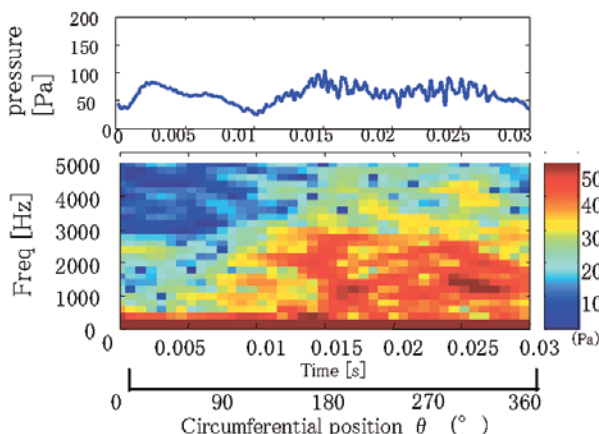


Fig. 9 (b) Time-Frequency analysing results Pressure side, X/L=0.35 Y/H=0.39

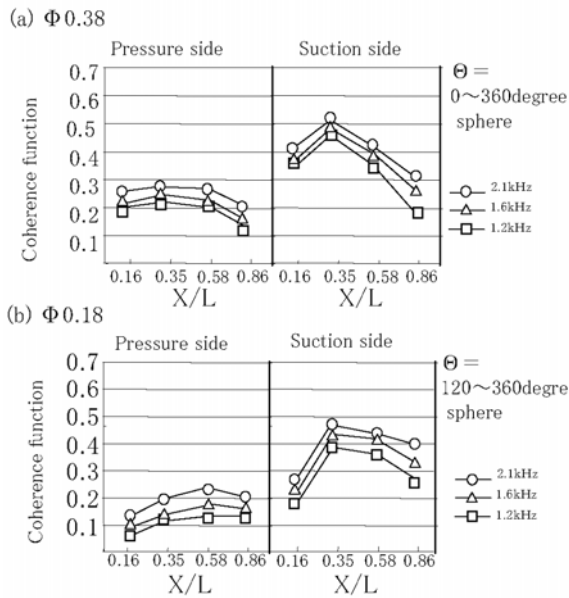


Fig. 10 Coherence results (Y/H=0.39)

以上、翼面圧力と騒音との相関大の箇所の結果と、流れの可視化結果を統合すると、剥離渦の発生箇所と翼負圧面への再付着点、渦発生による死水域の大きさなどが騒音と関連が大きいことがいえる。また周方向回転位置では逆流風が発生している領域を除いて、ほぼ全域で全体騒音にかかわる翼間騒音が発生しているということが分かった

#### 4. 解析結果に基づく改良方向

これまでの結果から、翼間での騒音を低減させるためには、剥離渦と再付着点の発生位置や大きさに着目すればよいことが分かった。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。以上に基づき、流れ形態の狙いとしては、翼流入部でただちに剥離渦を発生、翼流入部に渦を固定、とし、騒音の原因のひとつである渦発生による死水域の縮小化、及び剥離渦が吐出方向へ移動しないこととした。具体的には、入口角を小さくし、入口部で積極的に渦を形成させるよう設計した。また翼入口部の翼円弧を小さくとり、強制的に渦を発生させた。その翼形状をFig. 11に示す。タイプB(改良翼)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、騒音レベルをタイプAに比べタイプBは、1.5dBA低減できた。(Fig. 12参照)タイプBは翼間流れもイメージローテータによ

り可視化したところ流れの設計どおり、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。また、小型圧力センサにて騒音との相関を確認し、従来の供試品よりも相関値が下がっている結果が得られた。(Fig. 13, Fig. 14参照)これらの結果から、タイプBにおいては翼間での改善効果が全体騒音の低減に寄与しているものと考えられる。

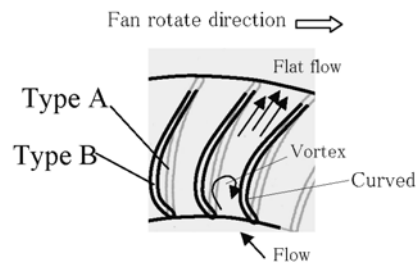


Fig. 11 Blade shape of Type B

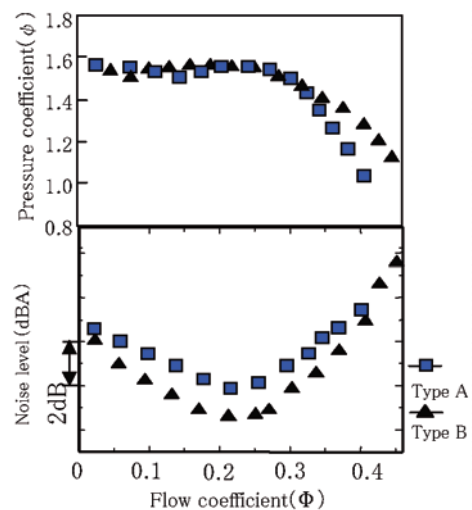


Fig. 12 Performance curve

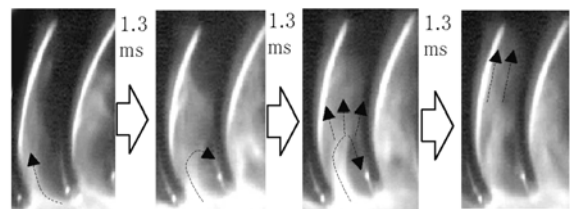


Fig. 13 Visualization of between blade Flow coefficient 0.18, Circumferential position 240 (X/L=0.35 Y/H=0.39)

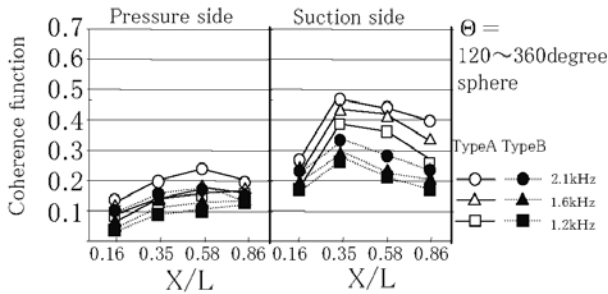


Fig. 14 Coherence results  
Flow coefficient 0.18, Y/H=0.39

### 5. おわりに

イメージローテータ装置を製作し、トレーサ法と組み合わせることにより、送風機翼間での流れを回転周方向位置360°にわたり連続的に鮮明な流れの可視化をすることができた。

詳細な翼面の圧力計測により、騒音と関連する箇所を特定し、その結果に基づいた翼間流れの改良を行ったところ、従来と変わらぬ送風性能を維持しつつ騒音をテスト品より1.5dBA低減させることができた。

### <参考文献>

- 1) 後藤, TURBO design による三次元翼の最適設計, ターボ機械第28巻第12号(2000-12) pp. 49-52.
- 2) 澤他2名, 準3次元ターボ機械翼形状最適設計システム FINE/Design, 日本機械学会第13回計算力学講演会論文集(2000-11)
- 3) 中野他2名, 送風機翼から発生する空力騒音と翼周りの流れに関する研究, 日本機械学会(No. 27-1)(2002)北陸信越支部 第39期総会・講演会論文集
- 4) 山本他4名, 多翼ファン翼間流れの流速分布可視化計測, ターボ機械第23巻第10号(1995), pp. 46-51.
- 5) 門田他4名, 多翼ファン低騒音化の研究, 日本機械学会60巻570号(1994-2) No. 93-0739
- 6) 門田他4名, ファン翼間流れと圧力変動, 日本機械学会60巻570号(1994-2) No. 93-0740
- 7) 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>



三石 康志  
(みついいし やすし)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
第6研究室  
流体機械に関する研究開発に従事



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



酒井 雅晴  
(さかい まさはる)  
冷暖房開発3部  
工学博士  
カーエアコン用送風機の開発業務に従事