

カーエアコン用薄形コンデンサファンの開発

Development of Low Noise Condenser Cooling Fan for Automotive Air Conditioners

技術本部 近藤 文男^{*1} 谷口 雅巳^{*2}
 エアコン製作所 林 昌照^{*3} 伊藤 明広^{*3}

近年エンジンルーム内の狭あい化により、カーエアコン用コンデンサ冷却ファンに対して薄形化への要求が強まっている。これに対応するため、現行の風量・騒音を確保してファンの大幅な薄形化を検討した。その結果、大幅な前進翼化と羽根の反りを約40%大きくすることにより、ファンの奥行きを20%減少させても、騒音は現行対比5 dB(A)低減し、大幅な高効率化が可能となった。また、この新ファンの騒音をさらに低減するため、羽根後縁の乱れ抑制に着目し、後縁に適正な寸法のセレーションを施した結果、縦渦の発生による混合の促進により、騒音をさらに2 dB(A)低減できることを見いだした。この新ファンは新ディアマンテ用に実用化され、エアコンシステムの低騒音化に貢献している。

We investigated noise reduction with a thin condenser cooling fan for automotive air conditioners. A new type of fan having a forward skew and large camber was developed, and the noise level of the new fan was 5 dB(A) lower than our previous fan. The internal flow behavior of the fan was investigated by flow visualization in order to achieve further noise reduction of the new fan. It was found that turbulence near the trailing edge of a prototype of the new fan was high. Trailing edge serrations are provided on the new fan to suppress the turbulence and the noise level is 2 dB(A) lower than the base value. The trailing edge serrations are effective for noise reduction without any deterioration in fan performance.

1. 緒言

エンジン出力の増大と居住スペースの確保のためエンジンルーム内は狭あい化してきており、カーエアコン用コンデンサ冷却ファン（以下コンデンサファンと略す）は、従来以上の空力・騒音性能を確保しながらファンの薄形化が要求されるようになってきている。

カーエアコン用コンデンサ及びラジエータファンの研究は、騒音低減を主体としてこれまでなされているが、実験的なものが多い。流れの可視化及び翼面の圧力変動計測により、境界層のはく離箇所や翼面上に大きな圧力変動が生じ、それが騒音発生源になっていること、また翼の反りの適正化及び長弦化が騒音低減に有効であることを述べたもの⁽¹⁾、ファン上流の偏流の影響による回転騒音発生機構の解明及び迎え角に対する圧力分布変動の小さい翼形状とすることにより低騒音化を図ったもの⁽²⁾、熱交換器の前に設置される押込みファン（プッシュタイプ）では、吸込みベルマウスの形状の改善によりファン先端の乱れを抑え、騒音を大幅に低減させた例がある⁽³⁾。また、ファン周りの障害物の騒音に与える影響も分析されている⁽⁴⁾。

一方、一般の空調用プロペラファンの騒音低減の研究においても、従来実験的手法により低騒音化が検討されてきた⁽⁵⁾が、最近ファンの騒音の内部流動解析に基づく騒音予測⁽⁶⁾や三次元内部流動解析に基づく騒音低減手法⁽⁷⁾等の取り組みが始まってきており、実用的な騒音低減法としての確立が図られつつある。

一般の空調機用のプロペラファンは、コンデンサファンに比べて十分なファンの奥行きを確保できること、またその騒音は多くの場合NZ音などの回転騒音の発生は少なく、広帯域騒音が支配的であるため、騒音低減のためにできるだけ翼弦長を長くして翼負荷の低減・分散を図り、また前進翼化して翼面上の流れの後縁チップ付近への集中を少なくすることが行われている。この考えに基づき以前筆者らは、前進翼化することにより大幅に低騒音

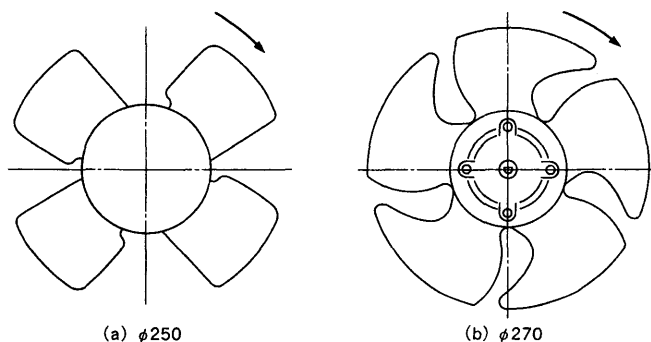


図1 従来ファン 従来タイプφ250及び前進翼タイプのφ270ファン形状を示す。
 Conventional and forward skewed type fan

化できるファンを開発した⁽⁸⁾ [図1(b)]。今回、ファンの大幅な薄形化を検討するに当たっては、上記考え方をベースにしながら、薄形化特有の問題について流れの分析に基づいたファンの低騒音を図ったので報告する。

2. 現行ファンの分析

ファンの薄形化を検討するため、現行ファンの流れの分析を行い、問題点の抽出及び参考となる点を洗い出した。また、コンデンサファンは熱交換器に非常に接近して置かれるため、熱交換器との相互干渉も生じると考えられたので、熱交換器の有無による分析も平行して実施した。

2.1 現行ファン性能

現行ファンシステムの羽根車及びシュラウドを用いて、ファン単体性能（空力・騒音）を測定した（羽根車外径φ320、羽根車軸方向奥行き360 mm、羽根枚数 $Z=5$ 、若干の前進翼羽根）。測定は、従来と同じようにし⁽⁸⁾、空力性能は回転数を1800 rpm一定とし、騒音はファン吸込み正面1 m位置で測定した。

*1 名古屋研究所機械物理研究室主務

*2 名古屋研究所機械物理研究室

*3 技術部カーエアコン1グループ

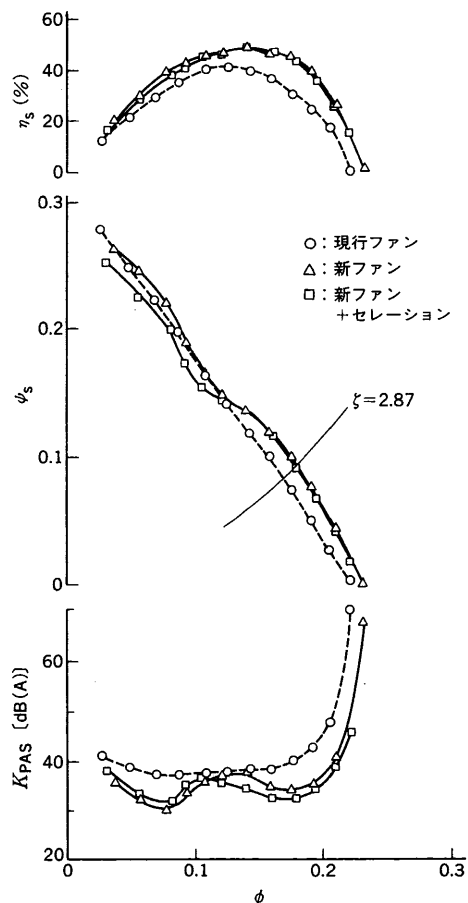


図2 ファン性能曲線 新ファンは現行ファンに比べて大幅に低騒音化でき、セレージョンによりさらに2 dB(A)低減する。
Comparison new fan with former fan performance curve

ファンの性能は次式により整理した。

$$\phi = \frac{Q/60}{(\pi/4) D_t^2 (1-\nu^2) u_t} \quad (1)$$

$$\phi_s = \frac{\Delta P_s}{(\gamma/2) u_t^2} \quad (2)$$

$$\eta_s = \frac{Q \cdot \Delta p_s}{6.118 w g} \quad (3)$$

$$K_{pas} = L_{pa} - 10 \log \{ Q \cdot (\Delta p_s / g)^2 \} \quad (4)$$

ここに

Q : 流量 (m³/min)

D_t : 羽根車外径 (m)

ν : ハブ比

u_t : チップ周速 (m/s)

Δp : 静圧上昇 (Pa)

γ : 空気比重 (kg/m³)

w : 軸動力 (W)

g : 重力加速度 (m/s²)

ファン作動点は、 $\xi = \psi_s / \phi^2 = 2.87$ を主対象とした。現行 $\phi 320$ ファン性能を図2に中に破線で示す。

2.2 ファン内部流れの分析

現有のファンで最も低騒音のファンである $\phi 270$ の前進翼ファンは、羽根車奥行きが46 mmあるのに対し、開発する $\phi 320$ 新ファンは、奥行きを29 mmとする必要がある。このため、 $\phi 270$ を比例的に大きくすることは許されない。大幅な薄形化を

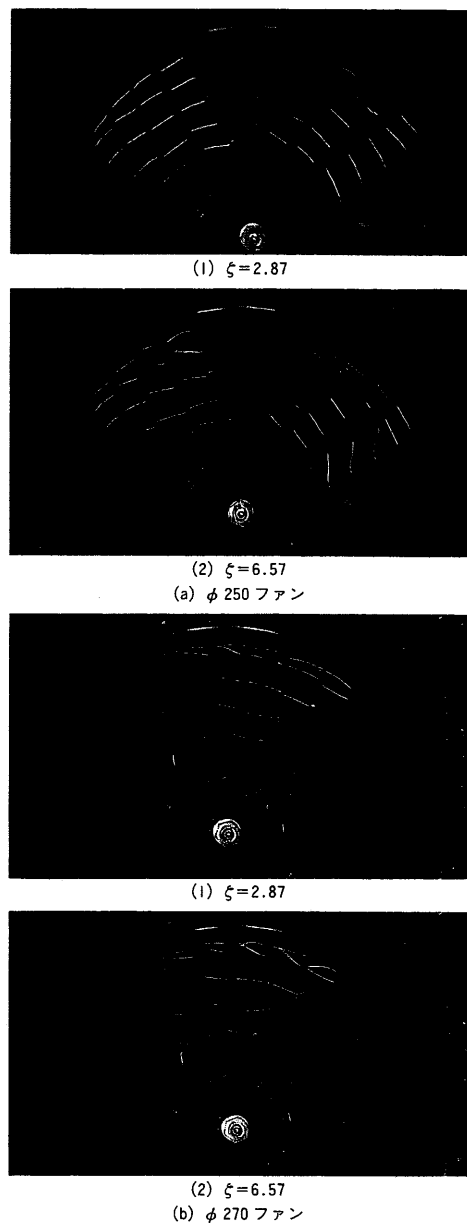


図3 従来タイプ $\phi 250$, $\phi 270$ の流れの可視化結果 高静圧側では、不等ピッチの間隔の広い方の流れが悪化する。流れは前進翼の方が良い。
Flow visualization of conventional fan

行うため、従来ファン2種類(図1)の内部流れの分析を行い、問題点及び改善点について検討した。

流れの可視化法としては、翼面上にタフトを張り付け、その挙動を分析する方法を試みた。一般に空気中で上記タフトを付けて羽根車を回転させるとタフトに遠心力がかかり、タフトはすべて半径方向を向いてしまう不具合を生じる。このため、ファンを水中で回転させ、流れの可視化を実施した。流れの可視化装置は通常のファン性能試験装置を大きな水槽に入れたもので、ファン作動点を変えて水中で羽根車内の流れ挙動を調べることができる。各ファンの $\xi = 2.87$ と 6.57 の測定結果を図3に示す。

$\phi 250$ ファンの負圧面上の流れ [図3(a)] は、 $\xi = 2.87$ では離れもなくほぼ円周方向の流れとなっているが、失速点に近い $\xi = 6.57$ では不等ピッチの狭いピッチの方はあまり変化しないが、広い方で前縁はく離を生じる。これは、翼負荷が大きくなると翼間流れを制御できなくなるため、NZ 音対策で有効と考えられ

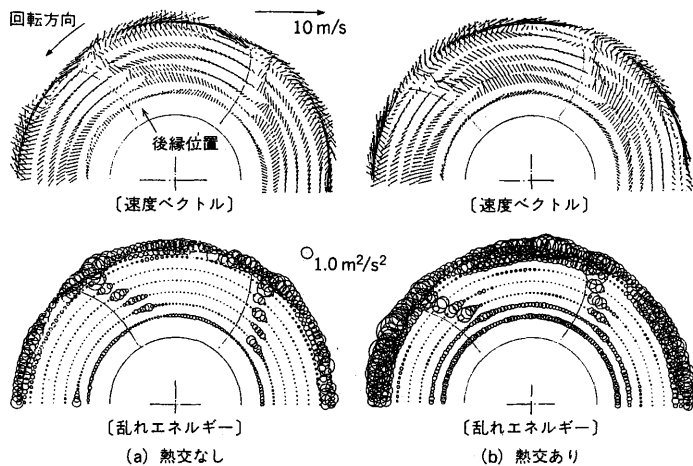


図4 従来タイプφ270の翼間二次流れ 一般空調用より渦は小さく、熱交換器によりチップ部での乱れが大きくなる。
Secondary flow in fan

ている不等ピッチ化は、羽根枚数が少ない場合には見直す必要があると考えられる。モータ支持桁との干渉であれば、支持桁を不等ピッチ化の方が有効と考えられる。φ270の前進翼[図3(b)]は、 $\xi=6.57$ でもチップ部付近を除いてほぼ円周方向のパターンを示しており、特に問題はない。

熱交換器のファン翼間二次流れに与える影響を定量的に分析するため、φ270ファンを用いて羽根出口5mmの位置での流れをLDVで測定した⁽⁹⁾。ファン作動点は $\xi=2.87$ であり、乱れエネルギー k は、各方向の乱れを u_i' とし、次式により定義した。

$$k = \sum (\overline{u_i'^2}) / 2 \quad (5)$$

測定結果を図4に示す。熱交換器がない場合、ファン作動点が $\xi=2.87$ での流れは、空調用のファンとフローパターンはあまり変わらないが、チップ渦は相対的に小さくなっている⁽¹⁰⁾。これは、ファンプロジェクション⁽⁵⁾が少ないため翼端渦の発生が抑えられているためであると考えられる。熱交換器がある場合、見掛け上ファンの作動点が同じでも、熱交換器のフィンの影響によりファン吸込み流れが規制されるため、熱交換器がない場合に比べ半径方向成分が大きくなっている。またチップ付近の乱れの増大は、フィンなどの後流乱れのある流れ（上流乱れ）をファンが吸込むためであると考えられる。

3. 新ファンの検討

ここでは、2章の分析結果を参考に新ファンの検討を行う。

2章の従来ファンの内部流動分析結果から、前進翼の方が幅広いファン作動点でも翼面上の流れが安定していること、また不等ピッチ化は幅広いファン作動点に対応しようとする場合、性能面であり好ましくないことが予想される。

以上のことより、新ファンとして前進翼及び等ピッチを基本とし、内部流動解析により弦長・反り・前進角等をパラメータにしてファン形状の絞込みを行った。その新ファンの形状を図5に示す。新ファンは、大幅な前進翼化しても弦長はほぼ同じとしたが、羽根の反りを約40%大きくした結果、羽根奥行き及び羽根枚数も低減($Z=5 \rightarrow 4$)・軽量化も図れた。

シュラウド形状については、シュラウド丸みを大きくしてチップ部での乱れが低減できるようにした。また前進翼の特性を生かせるように図5に示す吸込み方向のプロジェクション P_1 (羽根車軸方向奥行きに対するシュラウド端面からの羽根の突出し量の

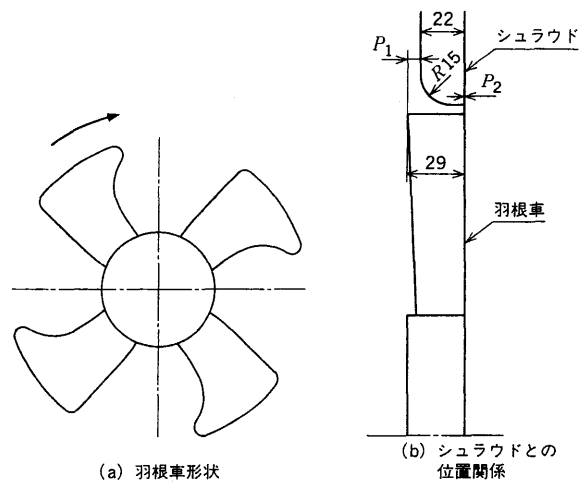


図5 新ファン形状 新ファン形状の特徴は、大幅な前進翼化である。
Shape of new fans



(a) 羽根負圧面



(b) 羽根圧力面

図6 新ファンの流れの可視化結果 翼後縁で乱れが大きい。
Flow visualization of new fan

割合⁽⁵⁾を24%、出口プロジェクション P_2 は0とした。新ファン性能を図2中に示す。ファン作動点 $\xi=2.87$ での比較から、新ファンは現行φ320に比べて騒音約5dB(A)、効率30%向上することが確かめられた。

さらにファン性能の向上、特に騒音低減を図るため、再度新ファンの翼面上の流れの可視化を行った。翼負圧面の可視化写真を図6に示すが、翼面上の流れは後縁部を除いてほとんど問題ないが、後縁での流れの乱れが存在することが分かった。

4. 後縁乱れの低減

新ファンの流れの可視化結果から、羽根後縁での乱れが大きく騒音増大が懸念された。これは、新ファンは従来のものに比べ翼負荷が大きいので翼両面の速度差も大きくなり、合流点である後

縁付近で乱れが大きくなっているためである。また翼負圧・圧力面の流れの方向が若干異なることから随伴渦の発生があるとも考えられる。このため空力・騒音両面から後縁での流れの混合をより促進させることにより改善が図れる可能性があると考えられた。

後縁に近い後流域でスムーズな混合促進を図る方法として縦渦を発生させるものを考える。容易に考えられる方法として翼面上に渦発生器等を設置する⁽¹¹⁾ものがあるが、渦発生器による騒音の増大が懸念される。ここでは後縁をのこ歯状（後縁セレーション）にし、翼両面の圧力差を利用して縦渦を発生させる方法を検討する。この方法では、上記の作用とともにぬれ縁の増加による混合の緩和も期待できると考えられる。

後縁セレーションを翼後縁に設け騒音低減について行った研究は見当たらない。ただし、翼面上にセレーション形状を持つ薄いテープを張って境界層を遷移させて共鳴騒音を低減させた Longhouse の研究⁽¹²⁾、前縁付近の下面に薄板状のセレーションを付加して渦放出音を大幅に改善した Hersh ら⁽¹³⁾の研究があるが、今考えている対策とは内容的に異なると考えられた。このため、後縁セレーション形状の翼発生騒音に与える影響を調べるため、二次元翼素を用いた騒音実験を行ってセレーション形状の絞り込みを行った。その結果、後縁セレーションの寸法がピッチ k 及び切込み深さとともに 7.5 mm の場合が最も騒音低減に効果があることが見いだされた。これを実際の翼後縁に加工してファンにおける効果を確認した。その形状を図 7 に示す。新ファンにセレーションを付加したときのファン性能を図 2 中に示すが、ファン作動点において、後縁セレーションにより 2 dB(A) 騒音が低減することが確認できた。この結果、新ファンの低減と合わせると現行ファン対比 7 dB(A) の騒音低減が得られたことになる。セレーションを付加した場合の圧力の漏れによる空力性能への影響は、ファン静圧の高い失速点より少流量側でわずかに出ているが、通常ファン作動点ではほとんどなく、後縁セレーションはほとんど空力性能を変えずに騒音を低減するのに有効であることが分かった。

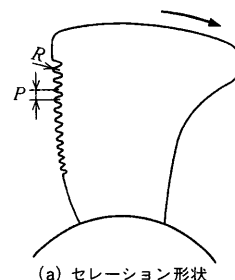
以上で得られた後縁セレーションは、鋭利なのこ歯状になっているため、成形上及び安全上の観点から、先端に丸み R 形状を付ける（図 7）ことを検討し、空力・騒音性能に与える影響を調べた。セレーション先端丸み R を変えたときの各丸みに対するファン作動点での騒音の比較を図 7 に示す。ファン径を D_2 とすると、 $R/D_2=0.6\%$ 付近まで大きな騒音低減効果が期待できることが分かった。このため、ファンへの後縁セレーションの適用に当たっては、 $R/D_2=0.6\%$ を採用した。

本研究で得られた後縁セレーション付き新ファンは、新ディーマンテに搭載されエアコンシステム、車両騒音の低騒音化に寄与している。また、この手法は 8 冷年業務用空調機室外用プロペラファンにも適用され、ユニット騒音低減に貢献している。

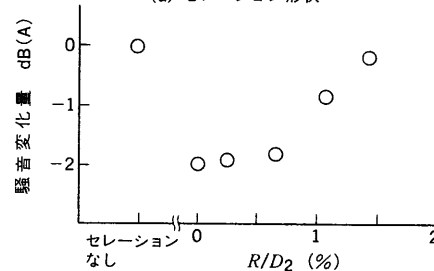
5. 結 論

φ 320 薄形コンデンサ冷却ファンの開発を行い、以下の結果を得た。

- (1) 現行に対し騒音低減を図るため大幅な前進翼化を図り、さらに羽根枚数 Z を現行の 5 から 4 に減らすため、羽根の反りを約 40 % 大きくした新ファンは、羽根車軸方向高さを 36 mm から 29 mm と 20 % 減少させても、現行対比空力性能が同等で騒音 5 dB(A) 低減が得られた。
- (2) 新ファンの後縁乱れ低減のために後縁にセレーションを施し



(a) セレーション形状



(b) セレーション丸み R の騒音に与える影響

図 7 セレーション先端丸み形状の性能に与える影響 性能丸みは 2 mm 以下であれば悪影響はない。
Effects on fan performance due to serration edge radius

た結果、騒音がさらに 2 dB(A) 低減し、ファンの改善と合わせると、現行ファン対比 7 dB(A) 低減を得た。セレーションによる空力性能の低下は失速点より少流量側で認められるが、通常の使用域ではほとんどない。

- (3) セレーションの先端丸みは、 $R/D_2 \leq 0.6\%$ であれば、大きな騒音低減効果が期待でき、空力性能低下もほとんどない。

参 考 文 献

- (1) 川口ほか、低騒音ファンの研究、日本機械学会論文集 Vol. 58 No.554 (1992) p.3 115
- (2) 川口ほか、自動車用低騒音ファンの研究、日本機械学会論文集 Vol.58 No.554 (1992) p.3 108
- (3) 赤池、菊山、カーエアコン用コンデンサ冷却ファンの低騒音化、日本機械学会論文集 Vol.57 No.541 (1991) p.3 009
- (4) 知名ほか、冷却ファンの騒音に及ぼす諸因子の影響、自動車技術 Vol.43 No.12 (1989) p.98
- (5) 近藤ほか、空調用プロペラファンの騒音低減、ターボ機械 Vol.19 No.6 (1991) p.333
- (6) 近藤ほか、プロペラファンの騒音予測法に関する研究、三菱重工技報 Vol.29 No.6 (1992) p.548
- (7) 近藤ほか、内部流動解析による空調用プロペラファンの低騒音化、三菱重工技報 Vol.31 No.5 (1994) p.345
- (8) 青木ほか、カーエアコン用コンデンサ冷却ファンの低騒音化、三菱重工技報 Vol.24 No.2 (1987) p.161
- (9) 近藤ほか、空調用ターボファンの低騒音化、三菱重工技報 Vol.26 No.2 (1989) p.149
- (10) 近藤、加藤、プロペラファン内の流動特性とその予測、日本機械学会講演論文集 No.933-1 (1993) p.166
- (11) Chang, P. K., Control of Flow Separation, Hemisphere (1976)
- (12) Longhouse, R. E., Vortex Shedding Noise of Low Tip Speed Axial Flow Fans, J. Sound Vib. Vol.53 No.1 (1977) p.1
- (13) Hersh, A. S. et al., Investigation of Accoustic Effects of Leading Edge Serration of Airfoils, J. Aircraft Vol.11 No.4 (1974) p.197