

報告番号	※ 甲 第 10611 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 シロッコファンにおける騒音メカニズム解明に関する研究

氏 名 甲村 圭司

論 文 内 容 の 要 旨

本研究の目的は、シロッコファンにおける騒音発生メカニズムを解明することである。

シロッコファンは、送風機の中で、小型で高圧力を得やすい特徴があるため、自動車用HVACシステムをはじめとする様々な空調装置の送風機として利用されている。シロッコファンとは、多数の短い前向き羽根を有する遠心式多翼送風機のことである。

現在、環境問題や原油価格高騰のため、燃費の良い自動車が求められている。この低燃費のニーズに応えるため、電気自動車やアイドリングストップ車の普及が加速している。これにより、エンジン騒音が小さくなり、エンジン以外の送風機やエアコン吹出し等の騒音が相対的に目立つ原因となっている。

また、近年、空調装置の小型化によるファン回転数の増加やスクロール流路面積の低減による速度増加が結果として騒音や流動損失の増大につながっており、送風機の低騒音化や損失低減が重要な課題となっている。

シロッコファンのような遠心送風機から発生する騒音は、その音源特性から、空気力学的なもの、機械的なもの、電磁的なものが挙げられるが、通常の運転状態では空気力学的な騒音が支配的である。遠心送風機の空力騒音には、回転騒音に代表される離散周波数騒音と乱流騒音に代表される広帯域騒音に大別できる。

回転騒音の発生や騒音の低減方法については、これまで多くの研究成果が報告されており、製品開発においても一定の成果がでていいると考えられる。一方、乱流騒音は、騒音発生機構が複雑なため、メカニズム解明に至っていない。

また、自動車HVACシステムでは、車室内の外気循環と内気循環を切り替える流量調整版の開閉度や向きによって微小な隙間が生じ、その隙間を通過する気流から特定の周波数にピークを有する離散周波数騒音が発生することがある。

流体から発生する離散周波数騒音に関する研究は、これまで数多く行われてきた。しかしながら、その研究内容は、噴流自身や噴流が他の物体へ衝突する際の騒音に関する研究、

キャビティや物体上を流れが通過する際の騒音に関する研究が多く、隙間を通過する流れから発生する離散周波数騒音に関する研究は少ない。

さらに、騒音低減に加え、シロッコファンの性能を開発する上で重要な指標は、流動損失がある。小型化や軽量化した送風機でこれまで同等の風量を得ようとする、今まで以上に高回転になることから、翼間での離れの増加による損失やスクロールを沿う流れの増加による損失が懸念される。

一般的な流動損失の評価は、流入出の総圧差から算出される。しかしながら、設計の立場においては、シロッコファン内部の流動損失が、翼形状やスクロール形状のどこでどれだけ発生したのか、またそれはどのような流れ場から発生したのかを知ることが重要であるが、シロッコファン内部のどこにどれだけ流動損失が発生しているのか定量的に研究した事例は少ない。

そこで、本研究では、以下を目的とする。

- 1) シロッコファンにおいて速度変動と空力騒音発生との関係を明らかにする。
- 2) シロッコファンにおいて流動損失発生と流れ場の関係を明らかにする。

本論文は、以下のように構成される。

第1章では、研究の背景および目的を述べている。

第2章では、平板と楔に囲まれた基礎形状を用い、離散周波数騒音の発生と速度変動との関係を調査する。

第3章では、シロッコファン実機形状を用い、広帯域騒音の発生と速度変動との関係を調査する。

第4章では、流動損失の評価手法の詳細を述べ、シロッコファンの翼間流れおよびシロッコファン実機形状に適用し、流動損失の発生と流れ場の関係を調査する。

最後に第5章において、各章の結論をまとめ本研究の成果を述べる。

以下、第2章以降の要旨について示す。

第2章では、自動車用HVACシステムで使用される流量調整板での微小な隙間から発生する離散周波数騒音を想定し、平板と楔の間に形成される狭い隙間を模擬した基礎形状を用いて、騒音の発生と各形状パラメータとの関係や、噴流の流れ場の速度変動特性との関係について調べた。

実験では、圧力差 $\Delta P=368\text{Pa}$ で固定し、隙間高さ H と平板長さ L を変化させた場合の、離散周波数騒音発生の有無に関する領域を調べた。その結果、隙間高さ H と平板長さ L の組み合わせによって、騒音の発生の有無が決定することが分かった。

また、X型プローブ(0252R-T5, 日本カノマックス)を使った熱線流速計を用い、端の端部より3mm下流のせん断層部を測定したところ、離散周波数騒音発生時に、速度変動は同じピーク周波数を持っていることが分かった。更に、騒音発生時のピーク周波数は、噴流速度 U に比例し、平板長さ L に反比例することが分かった。

数値解析は、2次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式の直接数値解法とし、対流項の離散化には3次精度のMUSCL法を、時間発展にはLU-SGS法を用いた。これにより、騒音発

生のメカニズムを下記のように考察した。

- 1) 楔の端部から発生したせん断層の巻き上がり渦が噴流の流れに運ばれる
- 2) その渦が平板端部を通過する際に、平板端部から発生した自由せん断層の渦と干渉することで、音波を発生させる。
- 3) その圧力波が上流へ伝わり、噴流流れのせん断層を刺激し、再びせん断層の巻き上がり渦を発生させる。
- 4) 上記を繰り返すことで、特定周期を持つ渦放出と音発生が行なわれる。

第3章では、自動車用 HVAC システムで使用されるシロッコファン実機形状を用い、シロッコファンの広帯域騒音の発生メカニズムを調査するため、流れ場の速度変動特性と騒音発生の関係について調べた。

実験では、JIS 8330-2000 による実験装置を用い、無響室内に設置した。ファンシュラウドのケース面から外側に 10mm は流れ位置での騒音レベルを、1/8 インチのマイクロフォン (Pressure-Field Microphone Type 4138) によって測定した。その結果、ファンシュラウド舌部付近での騒音レベルが、他の測定点と比べ 5dB 以上大きいことが分かった。

次に、ファン翼出口の圧力変動を同じマイクロフォンで測定し、その特性を調べた。その結果、翼の下端を $z=0\text{mm}$ とした時の、翼の上側 $z=40\text{mm}$ での圧力変動特性が、ケース外側の騒音レベル特性の傾向と良く一致していることが分かった。これらの結果より、シロッコファンの翼がシュラウド舌部を通過した際、翼の上部で発生した圧力変動がシュラウドの外側へ伝達したと考えられる。更に、ファン翼出口の速度変動特性を熱線流速計で測定したところ、圧力変動特性と同様、翼の上側 $z=40\text{mm}$ での速度変動特性が騒音レベル特性の傾向と良く一致していることを確認した。

そこで、騒音発生メカニズムを考察するため、数値解析を行って、ファンシュラウド舌部付近の速度変動や圧力変動を可視化することを考えた。

数値解析は、3次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式の直接解法とし、前章と同様に、対流項の離散化には3次精度の MUSCL 法を、時間発展には LU-SGS 法を用いた。計算格子は構造格子を使用し、全体の格子数は約 810 万点とした。その結果、ファンシュラウド舌部付近では、以下の流れの特徴があることが分かった。

- 1) シュラウド舌部付近では、流れが二分されるため、淀み点が存在する。
- 2) 淀み部で高圧になることで、ファン翼出口の流れが舌部付近で大きく減速される。
- 3) この舌部付近での速度の減少は、翼の上側 ($z=40\text{mm}$) の方が大きく現れる。

更に、速度の変化が大きかった $z=40\text{mm}$ の断面とした2次元数値解析を実施した。数値解法は前節と同様にして、翼間で発生する速度せん断層や後流および壁面近傍の速度境界層を捕らえるために、計算格子はせん断層の垂直方向に約 30 分割とした。全体の格子数を約 3,400 万点とした。

これにより、騒音発生メカニズムを以下のように考察した。

- 1) ファン翼の前縁ではなく離や後縁の後流のせん断層から渦が生成される。
- 2) 渦がシュラウド舌部を通過した際、淀み部で高圧になることで、流れがせき止められる。
- 3) その際、渦が拡散することで、広帯域の速度変動および圧力変動が発生する。

第4章では、シロッコファン流れの流動損失の発生メカニズムを解明するために、エネルギー散逸量を利用して、損失評価値を定量的に調べる方法を開発した。この評価手法をシロッコファンの翼間流れおよびシロッコファン実機形状へ適用し、以下のことが分かった。

1) シロッコファンの翼間流れでは、翼前縁のはく離による損失と翼後縁の後流による損失が全体の9割を占めている。

2) 翼の厚みを小さくすると損失が低減した理由は、はく離損失が10%増加したにも関わらず、後流損失が50%低減したことが大きな要因である。これは、翼出口でのせん断層が弱まり、平均運動エネルギーが熱や乱れのエネルギーに散逸する量が減少したことが原因と考えられる。

3) シロッコファン全体の流れでは、ファン翼間とスクロール表面の損失が全体の7割を占めている。

4) ファンシュラウド舌部付近の損失は全体の約1割を占めている。

第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

以上のように、シロッコファン流れの複雑な騒音発生および流動損失の発生メカニズムを解明することができた。また、設計ツールとして、複雑な製品形状での流れから発生する流動損失を定量的に評価できる手法を開発することができた。

今後は、本研究成果をシロッコファン以外の送風機や様々な空調機器に適用することにより、種々の空力騒音の発生現象を解明できるものと期待される。