

小型アクチュエータによるはく離流と発生音の能動制御

著者	菊地 聡
号	2226
発行年	1998
URL	http://hdl.handle.net/10097/7499

氏名	菊地 聡
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 11 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械知能工学専攻
学位論文題目	小型アクチュエータによるはく離流と発生音の能動制御
指導教官	東北大学教授 太田 照和
論文審査委員	主査 東北大学教授 太田 照和 東北大学教授 井上 督 東北大学教授 小濱 泰昭 東北大学助教授 福西 祐

論文内容要旨

第 1 章 緒論

笛の音や強風時の電線のうなり音のように固体の振動ではなく空気の流れの変動が原因で発生する音は一般に流体騒音と呼ばれている。流体騒音は空気の流れの変動が局所的に強い圧力変動を生じ、それが音源となって発生するものである。この流体騒音は様々な分野で問題化しつつある。身近な生活環境における例としてはダクト内を流れる空気の発生する音や、各種ファンからの周期的な騒音などが上げられる。乗用車においてもエンジンの静粛化に伴い風切り音の低減が次に解決すべき重要な課題になりつつある。また、流体騒音は速度の 6 乗または 8 乗に比例して大きくなることから高速輸送機関の高速化を妨げる極めて重大な要因にもなり得るが、騒音発生の詳細な構造が解明されておらず、その制御方法に関しても解決していない。

この流体騒音の予測に関する理論的研究は、Lighthill により連続式と運動量の式から波動方程式が導かれたことに始まる。その後、流れの中に物体が存在する場合へのこの Lighthill の方程式の適用が Curle により行われ、物体表面上に分布する圧力の変動は流速の 6 乗に比例して大きくなる 2 重極音源となり、流体中から発生する音が流速の 8 乗に比例して大きくなる 4 重極音源となることが明らかにされた。また、低速流では壁面の圧力変動が原因の 2 重極音源が支配的であり、高速流になると 4 重極音源が支配的となることも示された。このように低速流においては流体騒音の主な音源は壁面での圧力変動であることが明らかになっており、その壁面での圧力変動を作り出しているのは壁面付近の流体運動にほかならないことから、壁面付近での速度変動あるいは渦度変動に注目することで流体騒音発生原因の解明およびその制御方法の開発を進めることができるものと期待できる。

本研究は、流体騒音の低減を目的として、流体騒音の発生原因である速度変動（渦度変動）の制御を試みるものである。この研究では次のアイデアに基づき流体騒音の低減を試みる。

「はく離流の周期的な速度変動自身を押さえ込むことは困難であると考えられる。しかしその位相を制御し、スパン方向に異なる位相で流れが変動するようにすることができれば、流体騒音の直接の発生原因となっている壁面での圧力変動の位相もスパン方向に異なったものとなるはずである。そうすると、壁面に位相の異なる音源が並んだ状態となり、遠方においては発生音は互いに打ち消し合い、発生音が小さくなるものと予想される。」

この方法では位相のみを制御するため、はく離自体を押さえ込もうとするのと比較して弱い擾乱を作り出すだけで済む可能性があり、エネルギー的にも有利であることが期待できる。制御方法としては、エネルギーの観点からは音を使用し流れの外乱受容性を利用する方法が有利と考えられるが、音を使う方法ではスパン方向に制御の位相を変化させることが難しい。そのため、小型のアクチュエータを用いて受容性の高い部分で変動を流れに導入し、音を入れるのと同様の効果を獲得するとともに、スパン方向に制御の位相を変化させられる方法を用いて制御を試みる。まず、実際にスパン方向に位相の異なる速度変動が存在する流れ場を作り出すことを試み、その後、流れを制御することによる発生音の増減を測定し、流れ場と発生音の関係を調べる。

第2章 振動プレートおよび振動ワイヤによるはく離流の制御

第2章では、前向きステップや後ろ向きステップを対象に、そこで発生するはく離流の位相の制御を試みる実験を行った。流体騒音減少を念頭においたはく離の制御として、スパン方向に反対の符号の速度変動が並ぶ流れ場を作り上げることを試みた。その様な流れ場を作り出すために、本章ではL字型のアルミプレートをその先端がステップの角からわずかに突き出すように平板内部に設置してそれを圧電素子により主流方向に振動させる振動プレート制御装置と、ステップの角に設置したエナメル線を電磁誘導により振動させる振動ワイヤ制御装置の2つの制御装置を考案した。

実験の結果、振動プレート制御装置を用いた場合、前向きステップにおいても後ろ向きステップにおいても、すべてのプレートを同じ位相で振動させる制御によりスパン方向に位相の揃った速度変動が存在する流れ場を作り出すことができた。また、隣り合うプレートを180°ずれた位相で振動させる制御によりスパン方向に符号の反転する速度変動が存在する流れ場を作り出すことも可能であることが示された。振動ワイヤ制御装置においても、前向きステップ、後ろ向きステップのどちらの場合もワイヤ可動部下流の速度変動の位相を制御できることが示された。しかし、振動プレート制御装置には圧電素子自体の発生音が大きいという問題、振動ワイヤ制御装置ではワイヤ固定部下流の速度変動の位相があいまいになるという問題があることも明らかとなり、どちらの制御装置も流体騒音低減のためのはく離流の制御には向かないことが示された。

第3章 圧電フィルムによる後ろ向きステップを過ぎる流れの制御

第3章では、印可電圧に応じて大きさが変化する圧電フィルムを用いた制御装置により後ろ向きステップを過ぎる流れの制御を行った。一般に後ろ向きステップモデルでは発生音が小さく、制御による発生音の変化を測定することは困難であるため、第3章では流れの測定のみを行った。圧電フィルムを用いる利点は、それ自体からの発生音が無い点と、圧電フィルムを平板上に貼り付け配線をするだけで良く、平板内の加工を必要とする第2章で用いたような制御装置に比べて設置が容易な点である。使用した圧電フィルムの形状は厚さが0.1mm、主流方向長さが50mmであり、スパン方向長さは15mm、20mm、25mm、30mm、60mmと異なる5種類のものを用いて比較した。スパン方向長さが15mmの圧電フィルムでは12枚、20mmでは6枚、25mm、30mmでは4枚、60mmでは2枚の圧電フィルムを隙間なく並べて設置した。その際、圧電フィルムは運動しやすいように上流部10mmだけが両面テープで平板表面に固定されており、下流側の辺がステップの角に揃うように設置した。圧電フィルムの下流端がステップの角になっているため、圧電フィルムの伸び縮みはステップの角の位置を主流方向前後に移動させることとなり、ステップの角の位

置から流れの中に変動が導入される。第2章と同様にスパン方向に導入する変動の位相を変えることを念頭に置いているので隣り合う圧電フィルムに別の位相の信号を印加し、スパン方向に異なる位相の速度変動を導入できるような構成としている。

この圧電フィルム制御装置で制御を行った結果、速度変動の位相をスパン方向に同じ位相にすることも、スパン方向に 180° ずれた位相にすることもできた。その制御可能な主流速度は 10m/s から今回の実験での最高流速である 27.5m/s までに渡っていた。また、圧電フィルムのスパン方向長さが短く、制御により作られる速度変動パターンのスパン方向規模が小さい場合には、ステップ近傍でのスパン方向に符号の反転する速度変動パターンが下流に流れるにしたがいスパン方向に同一符号の速度変動場へ変化してしまうことも明らかになった。

第4章 キャビティ上の流れと音の制御

第4章ではフィードバック機構により自然状態での流体騒音の大きいキャビティ（スパン方向の溝）上の流れの制御を行い、発生音の変化を調べた。使用した制御装置は第3章と同じ圧電フィルム制御装置であり、スパン方向長さが 60mm の圧電フィルムを2枚並べたものを使用した。

実験の結果、キャビティ流れではフィードバック機構により自然状態においてスパン方向に位相の揃った強い速度変動が存在するため、後ろ向きステップと比較してスパン方向に符号の反転する速度変動を作り出すことが難しいことがわかった。しかし、主流速度とキャビティ幅の条件によってはスパン方向に符号の反転する速度変動が並ぶ流れ場を作り出すことに成功した。また、そのようなスパン方向に符号の反転する速度変動が並ぶ流れ場では発生音が低減され、その最大減少量は本実験条件の範囲では 5.1dB にもぼり、その場合には、制御によりほぼ暗騒音に近いレベルまで発生音を減らすことができていることが明らかとなった。また、自然状態で速度変動に同程度の強さのスペクトルピークが2つ存在する場合に、どちらかのピーク周波数で制御を行うと、制御周波数にエネルギーが集中することが示された。その影響で、制御周波数と同じ周波数の発生音のピークは、2枚の圧電フィルムを同じ位相で振動させる制御では強くなり、2枚の圧電フィルムを 180° ずれた位相で振動させる制御ではほとんど変化しない傾向が見られた。一方、制御周波数と異なる周波数の方の発生音のピークは制御モードに依らず大幅に弱くなることが明らかになった。

第5章 結 論

風洞実験を通して、はく離流のスパン方向の位相を制御し、そのはく離流からの流体騒音を減少させる研究を行った結果、振動プレート制御装置および振動ワイヤ制御装置により、前向きステップ、後ろ向きステップ双方のはく離流とも制御可能であることを明らかにした。しかし、いずれの制御装置も流体騒音低減を目的としたはく離流の制御には適さないこともわかった。さらに、圧電フィルム制御装置を用いても後ろ向きステップ後方のはく離流、キャビティ内のはく離流の位相の制御が可能であることを示した。この際、反対の符号を持つ速度変動がスパン方向に並ぶ流れ場を作り出すことにより、キャビティからの流体騒音を減少可能させることに成功した。

本論文で試みた、スパン方向に変動の位相をずらすことで流体騒音を減少させるというアイデアは、少なくとも実験室レベルにおいては正しいことが示された。今後、実用化へ向けたより大規模な実験が必要となるものと考えられる。

審査結果の要旨

低速流における流体騒音は壁面の圧力変動すなわち壁面近傍の速度変動によって生じる。この流体騒音は流速の6乗から8乗に比例して大きくなることから高速輸送機関の高速化を妨げる極めて重大な要因であるが、騒音発生の構造のみならず、その制御方法についても不明な点が数多い。

本論文は、はく離流の速度変動をスパン方向に異なる位相とすることにより、流れのはく離に伴う流体騒音を減少させる制御方法を風洞実験により明らかにした研究成果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、前向きステップおよび後ろ向きステップまわりのはく離流に、圧電素子を用いた振動プレート制御装置と電磁誘導を用いた振動ワイヤ制御装置によってステップの角部にスパン方向に異なる位相の変動を導入することにより、はく離流の速度変動の位相を制御できることを明らかにしている。

第3章では、圧電フィルムを用いた制御装置により、後ろ向きステップまわりのはく離流の速度変動の位相を制御できることを示しており、その制御可能な主流速度は10m/sから27.5m/sと広範囲に渡ることを明らかにしている。また、速度変動パターンのスパン方向規模が小さい場合には、ステップ近傍でのスパン方向に符号の反転する速度変動パターンが下流に流れるにしたがいスパン方向に同一符号の速度変動場へ変化することも明らかにしている。これらは、はく離流の新しい制御方法の提案であり、有用な知見である。

第4章では、圧電フィルム制御装置によりキャビティ内のはく離流の速度変動の位相制御を行い、スパン方向に符号の反転する速度変動の流れ場を実現している。また、そのような流れ場では発生音の低減が実現し、その最大減少量は5.1dBであることを見出している。このようにほぼ暗騒音に近いレベルまで発生音を減少することができるのはく離流の制御方法を開発・実証し、流体騒音制御の新しい可能性を提示している。これらは工学的に有用な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、速度変動の位相を制御することにより流体騒音を減少させることに成功し、流体騒音制御の新たな可能性を実験的に明らかにしたもので、流体工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。