

氏 名	宇佐川 毅
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和63年1月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和58年3月 東北大学大学院工学研究科情報工学専攻 前期2年の課程修了
学位論文題目	騒音の遠隔計測および制御に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 城戸 健一      東北大学教授 木村 正行 東北大学教授 高木 相

## 論 文 内 容 要 旨

本論文は、騒音を遠隔計測、遠隔制御するという立場から、近接した定常な騒音源を詳細に解析する手法および騒音源が移動することによる非定常性を有する場合について騒音源同定のための手法の開発と共に、遠隔地点から音場を制御するための能動制御を理論的に解析することを目的として行った研究成果をまとめたものである。

定常な騒音源の計測技術は、近年のデジタル技術の進歩を背景に急速に発展してきており、特に音源の遠隔計測に関しては、数多くの研究がなされている。しかしながら、従来の計測手法では音源の分解能が、観測される音波の波長による制約を受けていた。このため、遠隔計測により音源位置及びその強度を高精度・高分解能で同定する手法が必要である。この時、従来の方法が音波を音圧の変化として捉えていたのに対して、音波を大きさと向きをもつベクトル量として捉えることのできる音響インテンシティは有用な情報をもたらす、これを音源推定に用いることが考えられる。

一方、非定常な音源については、未だ十分な解析がなされていないのが現状である。特に音源が本質的に非定常な場合その解析は極めて困難であるが、音源自体が定常であっても移動しているために非定常となっている様な騒音源は、自動車等の交通騒音など数多くあり、このような移動する音源の解析も大きな課題である。これらの音源には、一般に多くの音源が含まれると共に各音源を個別に計測することの不可能な場合が多く、遠隔計測による音源解析手法の開発が必要である。

さらに、騒音の制御については、従来から騒音源の直接対策や音源全体を囲むなど、音源の直接

または近接した状況での制御がなされてきた。一方、騒音の遠隔制御とも言える、音場において制御する騒音の能動制御も提案されていた。これは、“逆位相音波によって騒音を打ち消す”という発想に基づくもので、近年大きな関心を集めている。しかしながら、制御系の統一的な解析は十分にされていないのが現状であり、今後実用化に向けて、より適切な制御系を設計するためや設計した系の適用限界等を評価するためにも、音響系・機械系・電気系を統一的に取り扱った理論的な解明が必要である。

以上の様な背景の基に、騒音の遠隔計測・制御の立場から、定常な騒音源に対する高精度・高分解能な音源の分離同定法の開発、複数音源の分離同定を含めた移動する音源の軌跡および放射音波のスペクトルの推定手法の開発、さらに一次元音場と見なせるダクト内騒音の能動制御系のインピーダンスによる統一的な解析を行った。

第1章は序論であり、本研究の目的について述べ、研究の歴史、研究の方法および論文構成の概要を示した。

第2章では、複数の定常音源からなる音場において、音響インテンシティによる各騒音源の位置および強度の推定法を提案し、実験的にその有効性を確かめた。

単一音源の位置及び強度は二つの音響インテンシティベクトルにより幾何学的関係と距離減衰より推定できる。この単一音源の推定法を、多点観測された音響インテンシティの集合から複数点音源を逐次的に同時推定する方法に拡張した。提案した方法は、観測された音響インテンシティと仮定した音源群によって得られる音響インテンシティの差を用いて、音源群を音源強度・位置のみならず、その数をも順次修正するものである。図1に、モデル実験の結果を示す。実験には、500Hzの正弦波を放射する三つの点音源を6cmの間隔において直線上に配置したものをを用い、平行な二平面に於て計182点の音響インテンシティを測定した。上図は観測面に平行な平面、下図は測定平面に垂直な平面を示しており、 $\circ$ が音源位置を、 $\times$ が推定値を示している。図のように、波長の10分の1以下の間隔の音源を分離同定可能であることが実験的に確かめられた。

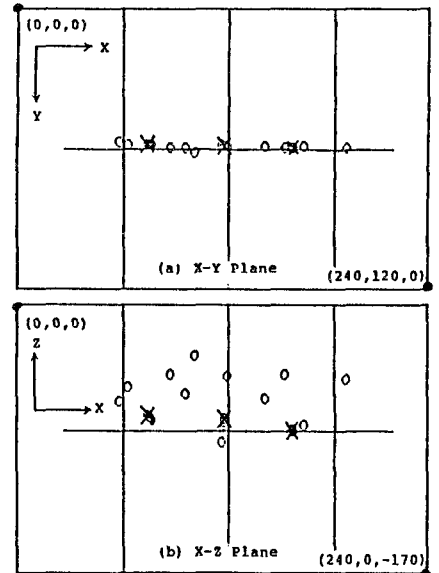


図1 音源の推定結果（三音源）  
 $\circ$ ：音源位置， $\times$ ：推定値

第3章では、移動する音源を、3本の固定したマイクロホンによって観測される非定常な信号のみから、その音源の軌跡およびスペクトルを推定する手法を明らかにした。さらに、複数の音源が同時に移動する場合に、各音源の分離同定の可能性を示すとともに、提案した各手法の有効性を実

験的に確かめた。

直線配列した3本のマイクロホンによって、移動する音源の放射した音を観測する場合、音源からの信号の伝搬遅延の差から、幾何学的に音源の位置を算出できる。この伝搬遅延の差は、観測信号間の相互相関関数のピークを与えるラグとして求めることができるが、これから直接得られる音源位置には大きな誤差が含まれる。このため、得られた位置情報をカルマンフィルタを用いて平滑することにより、観測誤差の低減と推定の安定化を図った。さらに、音源が複数存在する場合など、特定の音源に対応するピークを追跡する必要があるが、これをカルマンフィルタから出力された音源位置の推定値をピーク検出にフィードバックすることにより実現している。

通常、移動する音源から放射された音はドプラー効果によって周波数シフトが観察される。このドプラー効果は、音源とマイクロホン間の距離変化、即ち伝搬遅延の変化に起因し、観測された信号は本来の音波が伸縮したものとなり周波数シフトを受ける。この伸縮が伝搬遅延の変化に起因することから、先に求めた音源の位置情報に基づき、観測信号の時間軸を変化させることによりドプラー効果を補償することができる。

マイクロホンから3 mの距離において時速30 kmで等速直線運動する音源を観測した場合の位置情報の推定結果が図2であり、上からX軸方向の位置、速度、Y方向の位置である。実線がカルマンフィルタの出力であり、観測誤差が大幅に低減されている。図3に、観測信号のパワースペクトルおよびスペクトルのピーク周波数の時間的変化を示す。観測信号を直接分析した上図において観察されたピーク周波数の変化が、ドプラー効果を補償した下図

においてはほぼ完全に補償されており、提案した音源位置の推定法並びにドプラー効果の補償法の有効性が示された。

さらに、複数の音源が同一速度で移動する場合、ドプラー効果を補償した音源からの信号成分は定常となるが、他の信号成分は定常性が失われ両者の分離が可能となる。図4は、500 Hzと600 Hzの正弦波を放射する二つの音源が、2 mの間隔において同一速度で移動

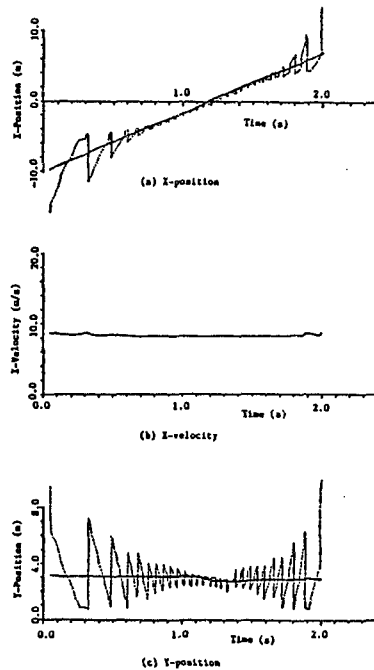


図2 軌跡推定の結果

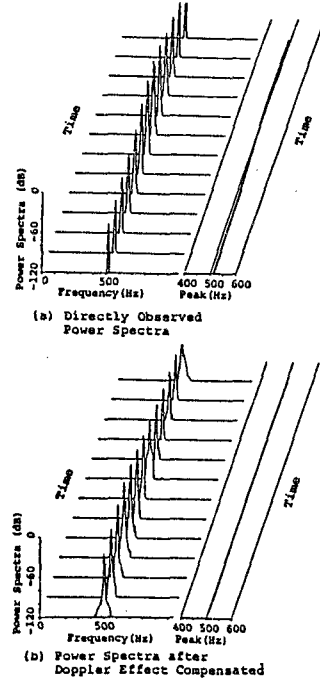


図3 パワースペクトルおよびピーク周波数の時間変化

した場合について解析した結果である。図中×が音源位置を示しており、500Hzの等パワ・コンタ図(上図)においては音源位置に明確なピークが観察できる。一方、600Hz(下図)については、虚ピークが存在するなど明確とは言えないものの、音源の存在する位置のレベルが周囲に比べ高くなっており、音源分離の可能性が示唆された。

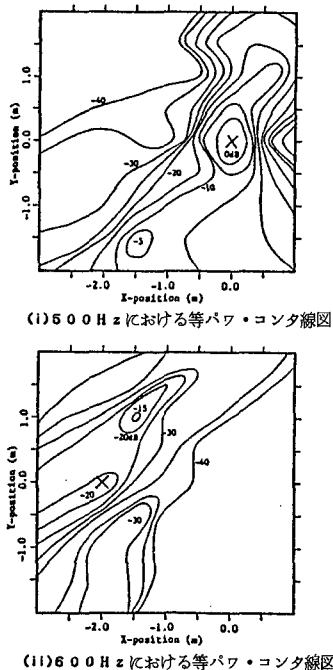


図4 音源座標系の等パワ・コンタ図 (×: 音源位置)

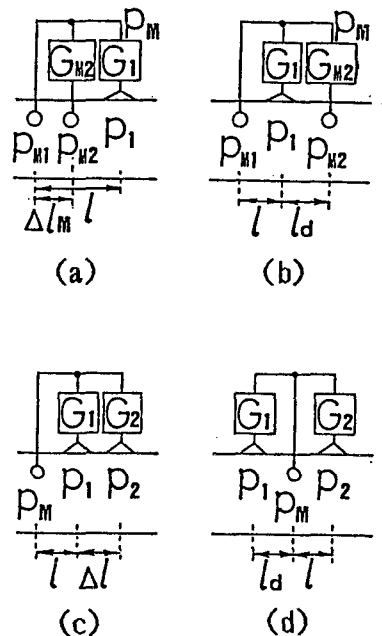


図5 制御系の構成

第4章では、騒音の能動制御をインピーダンスの立場から統一的に解析し、複数マイクロホン複数スピーカによる能動制御系の一般式を導出すると共に、制御系として必要十分な構成を明らかにした。また、制御系の回路特性を求めると共に、電気的帰還によっても音響帰還が補償できることを示した。これらの結果をもとに、独立なマイクロホンが不用で構成が極めて簡単であるモーショナル・フィードバック・スピーカ(MFBスピーカ)を用いたダクト内騒音の能動制御系を構成し、実験的にその有効性を確かめた。

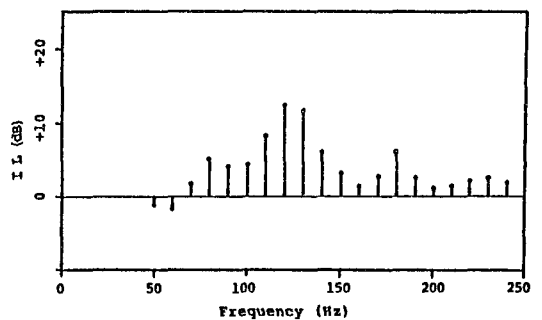


図6 MFBスピーカ制御系による挿入損失

ダクト内騒音の能動制御を実用化する場合、スピーカよりマイクロホンへの音響帰還による発振が大きな問題となり、この対策として複数のスピーカやマイクロホンを用いた種々の方法が提案されている。これら各種の制御系に対応できるように、複数マイクロホン複数スピーカによる制御系について解析を行った結果、現実的な制御系の構成としては、図5に示す4種類であることが明らかとなった。この内、二つのスピーカの特性を揃えるよりも、二つのマイクロホンの特性を揃えることが容易であることを考えれば、図(a)(b)二つの構成が有利であると考えられる。また、スピーカからマイクロホンへの音響帰還を、電気的に補償することも可能であり、一組のスピーカ・マイクロ

ホンで制御可能となる。さらに、ダクト内を高温の気体や、粉塵等の多い気体を通してなど過酷な使用状況を想定した場合、マイクロホンが不用となるMFBスピーカの利用が考えられる。このMFBスピーカによる能動制御系を構成し、模擬ダクトに取り付け制御実験を行った結果が図6であり、70Hzから240Hzの範囲で最大16.7 dBの挿入損失が得られた。

第5章は、本論文の結論である。

本研究により、騒音源を遠隔計測するための2つの新しい方法が開発され、騒音を音場において制御するための能動制御系が統一的に解析された。本研究で開発した方法により、従来その解析が困難であった近接した複数の音源や移動する音源の分離同定が可能となった。さらに、音場での騒音の能動制御のインピーダンスによる統一的な解析に基づきより適切な制御系の設計が可能となった。

## 審査結果の要旨

産業の発達と生活水準の向上により、騒音問題の社会的重要性は近年ますます大きくなってきているが、制御技術には未だに多くの問題が残されている。最も効果的な騒音制御の方法は、騒音源における制御であるが、騒音源に接近して測定および制御を行うことが不可能な場合が多く、遠隔地点からの正確な測定と制御が強く望まれている。本論文の著者は、この点に注目して騒音の遠隔計測と制御に関する研究を行った。本論文はその成果をまとめたもので、全文5章よりなる。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。

第2章では、音響インテンシティの測定を基にして複数個の騒音源の位置とスペクトルを同時に測定する方法を提案し、検討している。ここでは、複数のインテンシティベクトルから音源の位置と強さを測定できることを示し、その具体的な方法と測定精度について詳細に検討している。本章で提案し有効性を確かめた2平面での音響インテンシティ計測に基づく近接した定常音源の分離計測法は、騒音源同定に新しい手法を加えたものとして高く評価される。

第3章では、移動する騒音源を対象として、3マイクロホンの出力の相互相関関数から得られた情報に、カルマンフィルタによる動的フィルタリングを施すことにより、音源の移動軌跡を推定し、それを基にして、移動のために周波数が変化している複数音源のスペクトルを分離して測定する手法を提案している。また、その有効性を計算機シミュレーションと屋外実験によって確認している。

第4章では、音源に触れることなく音場において騒音を制御することを目的として、能動制御を取り上げ、インピーダンスの立場から統一的に解析し、制御系として必要十分な4種の構成を示し、それぞれの無帰還完全制御の条件を明らかにしている。また、以上の結果をもとに、モーショナルフィードバックスピーカによる制御系を提案し、その有効性をダクト騒音に関する実験によって確かめている。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、騒音の計測と制御を騒音源に接近することなく行うことを目的として、騒音源の遠隔計測の新しい方法を開発するとともに、能動制御系の統一的解析手法を与えたもので、音響工学並びに情報工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。