

## 博士學位論文審査要旨

学位申請者氏名	小笠原 雄太
論文題目	開空間における任意の分布音源群を用いた音響パワーの最小化
審査委員 (職名・氏名・印)	
主査	教授 岩本 宏之
審査委員	教授 小川 隆申
	教授 弓削 康平
	教授 坂本 慎一
論文審査結果 (合 否)	合 格
論文審査の要旨	<p>低周波の騒音対策技術として、能動騒音制御 (ANC) がある。ANC は、騒音に制御音を干渉させる騒音抑制手法であり、その用途により音圧制御と音響パワー制御に大別される。前者は、マイクロホンで計測した音圧を最小化する手法のため、制御範囲が計測点であるマイクロホン周辺のみに限られる。広い領域で騒音を抑制するためには、多数のマイクロホンを設置する必要があるため、コスト面の問題から幅広い用途への応用が難しい。一方で、後者は音源群の音響パワーを最小化することによって、グローバルな騒音抑制を可能とする。この場合、それぞれの音源の音響パワーが計測されればよいので、音圧制御と比較して非常に簡素な制御系となる。</p> <p>開空間における音響パワーを ANC によって最小化すると、ゼロ制御パワー現象が発現することが明らかになっている。当該現象は、制御音源周辺における音響インテンシティの流入出が均衡し、制御音源から発する音響パワーの時間平均がゼロとなるものである。したがって、当該現象を積極的に発生させることによって、制御音源周辺の情報のみで音響パワー最小化を達成する手法の確立が期待できる。</p> <p>先行研究においては、騒音源および制御音源に様々な仮定・制約を与えた上で、開空間における音響パワー最小化およびゼロ制御パワー現象についての検討がなされてきた。これに対し、本研究では制御音源の形態・個数に制約を与えずに、ANC による音響パワー最小化手法の一般化を行うことを主目的としている。また、その理論展開の中で、先行研究において示されたゼロ制御パワー現象の発生条件が不十分であることを示している。さらに、任意の分布音源の特別な場合として、多重極子音源による音響パワー最小化制御系の特性を明らかにしている。</p> <p>本論文の構成は次のとおりである。まず第 1 章では、研究背景として、我が国の騒音問題の歴史とこれまでに提案された ANC について概説するとともに、本研究の目的を提示している。第 2 章では、ANC による音響パワー最小化とゼロ制御パワー現象の基礎について説明し、本論文を理解する上で必要な知識を記述している。第 3 章では、任意の分布音源群による音響パワー最小化手法を確立し、第 4 章はその特別なケースとして、騒音源と制御音源が多重極子音源である場合について</p>

## 論文審査の要旨（続）

検討している。第3章と第4章が本学位論文の中核であり、特に第3章は申請者が筆頭著者である査読付き学術論文の内容をまとめたものである。最後に、第6章では結論を述べている。以下に、緒論と結論以外の各章の具体的な内容を説明する。

第2章では、第3章以降の理論展開を容易に行うために、1個のモノポール騒音源と1個のモノポール制御音源における音響パワー最小化制御について説明している。まず、波動方程式をベースに、1個のモノポール音源から放射される球面波の基礎式を導出するとともに、音響インテンシティ（単位面積を単位時間あたりに通過する音響エネルギーを示すベクトル量）と、モノポール音源の音響パワー（音源が単位時間あたりに放射する音響エネルギーを示すスカラー量）の計算式を導出した。次に、騒音源と制御音源がいずれもモノポール音源の場合に全音響パワーを最小化すると、制御音源の音響パワーがゼロになるゼロ制御パワー現象が発生することを理論的に示した。また、数値シミュレーションにより、制御音源の音響パワーが負の場合は音響エネルギーが音源に吸い込まれ、音響パワーが正の場合は音響エネルギーが音源から噴き出す（放射される）ことを、音響インテンシティのベクトル分布により明らかにした。さらに、全音響パワー最小化時に発生するゼロ制御パワー現象においては、音響インテンシティのベクトルは制御音源近傍を通過するような分布になることを示した。

第3章では、従来のANCによる音響パワー最小化手法の一般化を志向し、1個の任意分布騒音源と複数の任意分布制御音源群が無限大バッフルに埋め込まれている場合における全音響パワー最小化手法を提案するとともに、ゼロ制御パワー現象の発生条件を検討している。先行研究においては、音源の速度分布（モノポール音源の場合は体積速度）と音響インピーダンスを用いて音響パワーを記述していた。しかし、制御系設計の観点からすると、操作量は音源を駆動する信号となるべきである。そこで、本論文では、音源を駆動する力によって音響パワーを記述した。この場合、音響インピーダンスにかわる新たな物理量が現れる。当該物理量はある2つの音源  $a$  と  $b$  の間において定義されるもので、音源  $a$  のモビリティの複素共役・音源  $a$  と音源  $b$  の任意点間の音響インピーダンス・音源  $a$  のモビリティの積を、それぞれの音源の領域で面積分したものになる。これを本研究では音源間モビリティと呼称している。次に、全音響パワーを最小化する音源の駆動力と制御音源の音響パワーを導出したが、この段階では、分布音源に仮定・制約を与えていないため、必ずしもゼロ制御パワー現象が発現するとは限らない。ここで、音源間モビリティの相反性を仮定したところ、ゼロ制御パワー現象が発現することが明らかになった。音源間モビリティの相反性は、音響インピーダンスの相反性が成立する場合には、音源  $a$  のモビリティの複素共役・音源  $b$  のモビリティの積と音源  $a$  のモビリティ・音源  $b$  のモビリティの複素共役の積が等しいことを表す。これは、音源の任意点間の位相関係が同相あるいは逆相になることを意味している。したがって、例えば、騒音源と制御音源群がピストン音源や非減衰の柔軟構造物であれば、全音響パワー最小化時にゼロ制御パワー現象が発生する。分布音源を用いた先行研究においては、音響インピーダンスの相反性のみがゼロ制御パワー現象の発生条件であるとの主張がなされていたが、本研究によって、これは不十分であることが明らかとなった。

次に、騒音源をモノポール音源、制御音源を3つの円形ピストン音源として数値シミュレーションを行い、全音響パワー最小化制御系の特性を検証した。まず、騒音源を中心とする円上に円形ピ

論文審査の要旨（続）

ストン音源の重心を拘束する条件を与えた場合において、制御音源の配置と制御効果の関係を調べた。その結果、3つのピストン音源が正三角形の頂点に位置する配置が最適であることが明らかになった。また、当該最適配置条件の下で、制御音源周辺の音響インテンシティのベクトル分布を確認したところ、個々のピストン音源においてはゼロ制御パワー現象が発現するが、ピストン音源を構成する微小要素（モノポール音源として近似）ではゼロ制御パワー現象が発現しないことが明らかになった。さらに、音源間距離と円形ピストンの半径が制御効果に及ぼす影響を計算し、音源間距離が小さくなるほど制御効果は上昇するが、円形ピストンの半径の大小は制御効果にほとんど影響を与えないことが明らかになった。

第4章では、騒音源と制御音源が多重極子音源である場合の全音響パワーの最小化手法について検討している。多重極子音源のような音源を想定するケースとしては回転翼から発せられる、いわゆる風切音とよばれる空力騒音が代表的である。この場合、音源の形態は流速によってモノポール、ダイポール、クアドラポールの3種類に変化する。そこで、本研究ではこの3種類に限定して検討をおこなっている。なお、多重極子音源は分布音源の特別なケースであるので、第3章において明らかにした理論を修正したものを使用した。まず、騒音源と制御音源が多重極子音源の場合は、音源の角度（姿勢）によって、全音響パワーの抑制効果が大きく変化することを明らかにし、個々のケースにおける最適な角度を明らかにした。次に、最適な角度を設定したうえで、騒音源と制御音源の種類が異なることで、全音響パワーの抑制効果がどのように変化するかを検討した。その結果、騒音源の次数よりも制御音源の次数が大きくなると、十分な制御効果が得られないことが明らかになった。つまり、例えば、騒音源がクアドラポールで制御音源がダイポールの場合、全音響パワーはほとんど抑制されないが、騒音源がダイポールで制御音源がクアドラポールの場合は十分な抑制効果が得られる。このような、音源の種類による全音響パワー抑制効果の非対称性は、ANCによる空力騒音制御系の設計に一つの指針を与えるものである。

以上、本論文は従来のANCによる音響パワー最小化手法を一般化するとともに、その特別なケースとして、騒音源と制御音源が多重極子音源の場合における制御系の特性を明らかにしたものである。これらの成果は、低周波騒音の抑制技術分野において新たな道を拓くものであり、工学上および工業上、その貢献は大である。よって、本論文の内容は博士（工学）の学位を授与するに値するものと認める。

（以 上）