

平成22年 4月 1日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760147
 研究課題名（和文） 超音波干渉に基づく仮想音源生成システムの開発と能動騒音制御への適用
 研究課題名（英文） Development of Virtual Sound Source System Based on Interference of Ultrasonic Waves and Application to Active Noise Control
 研究代表者
 小松崎 俊彦 (KOMATSUZAKI TOSHIHIKO)
 金沢大学・機械工学系・准教授
 研究者番号：80293372

研究成果の概要（和文）：本研究では、超音波の非線形干渉による可聴音生成原理に基づき、2つの独立な放射器から周波数の異なる超音波をそれぞれ放射し、互いの音軸を交差させることによって空間内の任意点に局在性可聴音波を生成するシステムの構築について検討した。超音波放射器の基本特性、及び2つの放射超音波の干渉によって空間内に形成される仮想音源領域の大きさと再生可聴音レベルについて、理論的予測および実験的計測を行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, a virtual sound production system is developed where the difference frequency component appears as the secondary audible sound at a point of interference locally by the nonlinear interaction of two independently radiated ultrasounds while they travel directionally and intersect each other. The design of high-directive ultrasonic radiator, followed by the investigation of virtual sound production performance has been done theoretically as well as experimentally.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：振動工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御、能動騒音制御、指向性、静音化、超音波

1. 研究開始当初の背景

能動騒音制御は、空気中を伝播する騒音に対して、騒音が目標点に到達する前に、それを相殺する逆位相の音を計算機でリアルタイムに予測・生成し、制御用スピーカから出力することで目標点において消音する技術

である。例えばダクト内伝播音のように、対象空間が限定的な場合には本技術が効果的であるが、3次元の自由空間において音は球面波状に広がるため、広い空間に渡る静音化が困難である。無指向性のスピーカを制御音源に使用する場合、目標点を含む幾つかの場所では音は相殺されるが、音が側方へ広がる

性質を有するために、逆に強め合う場所が現れる。この問題を解消するために、評価点を増やし、制御スピーカの数と配置を検討することで、ある広がりを持つ空間内の静音化が達成されるが、この場合にもやはり対象外の空間では逆に音の増大を招く可能性がある。

能動騒音制御に関する研究は国内外ともに多数報告されており、特に音波が1次元的に伝播する場合を対象としたものは、その取り扱いの容易さから理論・実験ともに非常に多くの研究報告がなされ、実用化も進んでいる。しかしながら、一般の自由空間を対象としたグローバル領域の静音化は、理論的な側面において幾つか検討がなされているものの、音波の物理的性質、装置類の設置条件やコスト面から、実現は依然困難な状況にある。

申請者はこれまでに、部分空間の静音化に着目した能動騒音制御に関する一連の研究に取り組み、閉空間内の能動騒音制御、および自由空間において目標点の移動に追従してその周辺を消音する手法等の開発に取り組んできた。ただし、既往の研究報告と同様に、周辺空間に音の増大を招く問題への対処が課題として残されていた。

一方、音の再生技術分野においては、スポットライトのごとく目的の場所のみに直線的に音を伝えることが可能な高指向性スピーカが開発された。これは、「パラメトリックアレイ効果」と呼ばれる音の非線形現象を利用しており、可聴音を超音波信号中に埋め込み、超音波の直進性を利用して単一放射面より照射し、伝播途中で可聴音成分を展開する。現状では局所的な音の伝達手段としての利用が主であるが、申請者は近年、本スピーカを用いた新たな能動騒音制御手法の開発に取り組み、対象外空間に音圧増大などの著しい影響を与えず、スポット的な消音が可能なことを示した。当該研究により、所期の目的はある程度達成されたものと考えているが、目標点を通る放射面前方の空間に直線分布する音場が形成されるため、周辺音場への影響が皆無とは言い切れない。

そこで、制御音の生成手段を「線状」から「点」へと発展させることは、局所空間の消音を考えるうえで自然な拡張と言える。周波数の異なる超音波を2つの独立なアクチュエータから放射することで「点」での干渉、および可聴音の生成が原理的に可能であり、真の意味で目標点以外の空間を乱さない局所的能動騒音制御が実現できると考え、本研究課題の着想に至ったものである。

2. 研究の目的

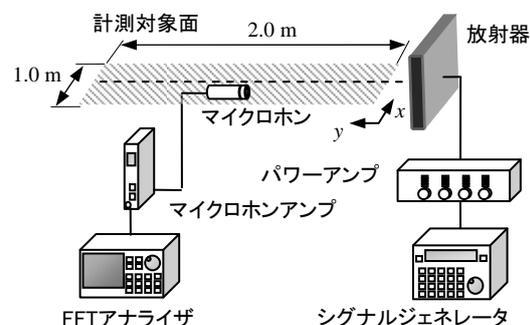
本研究では騒音の存在する自由空間において、超音波の非線形干渉に基づく可聴音生成原理に基づき空間内任意点において局在

性制御音を生成し、周辺空間を乱すことなく局所的に静音化を実現する新しい能動騒音制御システムの実現を目的とする。具体的には、局所性仮想音源生成システムを開発し、さらに局所的な能動騒音制御への適用を念頭に置きながら、仮想音生成領域及び生成音圧の大きさについて基礎的検討を行った。

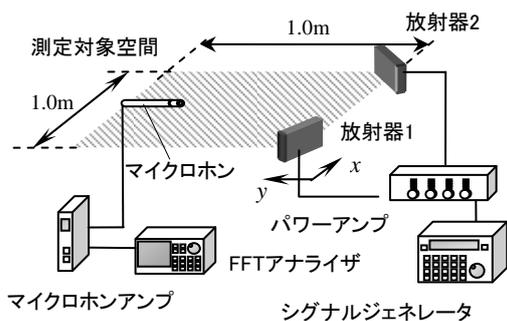
3. 研究の方法

本研究課題の目標である「点」での能動騒音制御を実現するにあたり、その手順として、まずは単一周波数の超音波を直線的に放射可能な放射器の設計と製作を行い、理論的予測及び実験的評価を行った。超音波の非線形干渉の結果として生成される可聴音の大きさは非常に小さいと予測され、放射器には強力な超音波を放射できる能力が求められる。また、点での干渉を実現するには、2つの放射器からはそれぞれ直線的な音波を発生させる必要がある。そこで、比較的簡易に超音波を発生でき、入手可能な市販の素子としてセンサ用の超音波素子を利用することを考え、素子径 16.2mm のもの、及び 9.8mm のものを採用した。素子単体では非常に小さなレベルの超音波しか放射できないが、多数の素子を放射面内に密に配置することで強力超音波を生成可能と考えた。素子を 7 個、19 個、37 個組み込んだ放射器をそれぞれの素子径について製作し、配置形態は三角格子状として密に並べ、素子径及び素子数が放射超音波の大きさと指向性に及ぼす影響を数値的及び実験的に評価した。

図 1 に音場計測システムの概略図を示す。音圧の測定対象は、放射器音軸を含む前方の水平面 (x 方向: 1.0m, y 方向: 2.0m) を、0.05m ごとに区切った各格子点とした。また、放射器は測定平面 x 方向の中心 ($x = 0.5\text{m}$, $y = 0.0\text{m}$) に設置し、測定はマイクロホンを用いて無響室内で行った。各格子点間の移動は自動トラバース装置を利用した。超音波は、シグナルジェネレータで素子の中心周波数である 40kHz の正弦波信号を生成し、パワーアンプにより増幅させて放射器から出力した。



(図 1)



(図 2)

続いて、独立した2つの放射器からそれぞれ異なる周波数の超音波を放射し、互いの音軸を交差させた場合における干渉点での仮想音源生成領域と音圧の大きさについて、数値的及び実験的に評価を行った。音源周波数は、干渉の結果生じる差音の周波数が500~2kHzとなるように設定し、それぞれの放射器から供給される直線状音波の交差角度は30、45及び90度の3種類に設定した。

実験では、干渉音場における差周波数の音圧分布を測定する。音場計測システムの概要を図2に示す。無響室内にて、干渉空間を $x=1.0\text{m}$, $y=1.0\text{m}$ とし、その領域内の $x=0.25\text{m}\sim 0.75\text{m}$, $y=0.25\text{m}\sim 0.75\text{m}$ を測定範囲とした。この範囲内を0.05mごとに区切り、合計100個の格子点上音圧を測定した。

4. 研究成果

(1) 放射器の特性に関する検討

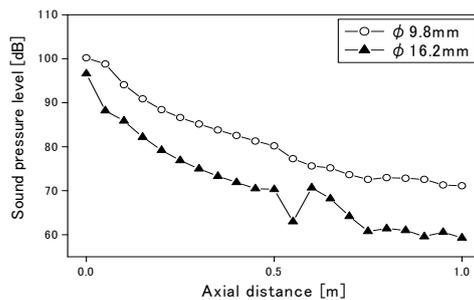
超音波放射器を構成するエミッタ素子径及び素子数が放射超音波の大きさと指向性に及ぼす影響について、数値的及び実験的に評価した。ここでは実験結果のみを示す。

① 素子間隔に関する検討

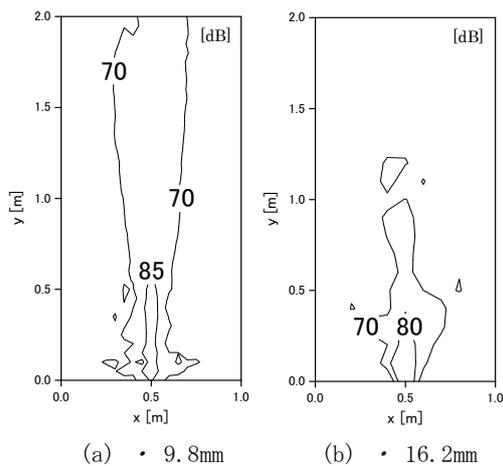
径の異なる2種類の素子を用いて試作した放射器について指向性に関する比較を行った。放射器は2種類の素子径ともに19個で構成したものを用いた。図3に軸上音圧レベル分布を示す。素子間隔が小さいほうが高い音圧レベルを維持していることがわかる。また、音圧分布計測結果を図4に示す。計測結果から、素子間隔が小さい $\cdot\cdot 9.8\text{mm}$ の方が、放射器前方に音圧が直線状に分布していることがわかる。よって、以後の評価には素子径 $\cdot\cdot 9.8\text{mm}$ のものを採用することとする。

② 素子数に関する検討

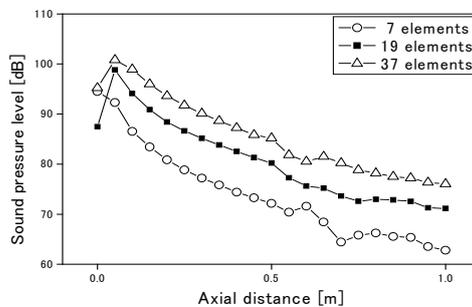
$\cdot\cdot 9.8\text{mm}$ の素子を組み込んだ放射器について、素子数による音圧分布の違いについて実験を行った。素子数7個、19個、37個で構成される3つの放射器について、音圧分布を計測した。軸上音圧レベル分布を図5に示す。これより素子数が多いほど高い音圧レベルを維持していることがわかった。



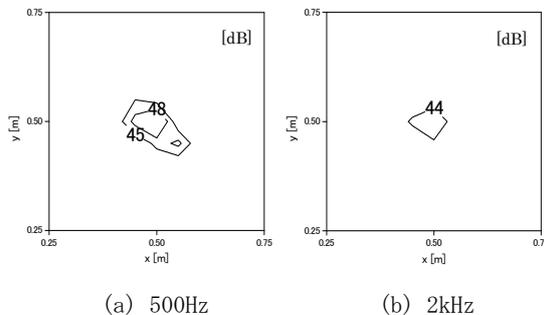
(図 3)



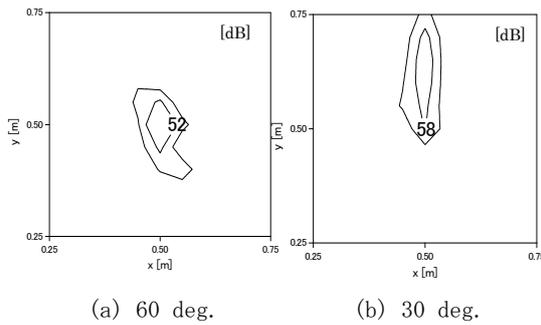
(図 4)



(図 5)



(図 6)



(図 7)

(2) 仮想音源生成に関する検討

独立した2つの放射器からそれぞれ異なる周波数の超音波を放射し、互いの音軸を交差させた場合における干渉点での差音生成領域と音圧の大きさについて、数値的及び実験的に評価を行った。ここでも同様に、実験結果のみについて示す。

① 生成音の周波数が局所性に及ぼす影響

干渉点における差音の周波数500Hzと2kHzについて、音圧分布を測定した結果を図6に示す。ここで、放射音軸のなす角度は90度に設定している。これより、差周波数が高いほど、干渉空間での差音生成領域は小さくなるのがわかり、数値計算による音場予測と一致する結果が得られた。

② 放射角度が局所性に及ぼす影響

2つの放射超音波音軸がなす角度を30、60及び90度に設定し、角度が仮想音源生成領域に与える影響について実験的に考察した。ここでは干渉点での差周波数は1kHzとし、放射角60度と30度を比較した実験結果を図7に示す。図6に示した放射角90度での仮想音場領域と比較すると、ともにy軸方向へ広がりをもつ音場領域となることがわかった。とくに、放射角30度では干渉後に直線状の高い音圧が生成されていることがわかる。これは干渉点後方に、2つの高レベル周波数の差周波数成分が媒質の非線形効果により直進性の高い音波が生成されるパラメトリック効果によるものと考えられる。

(3) まとめ

本研究では、超音波干渉に基づく点での仮想音源生成システムの試作と、干渉空間における生成音圧の数値的予測および実験的評価を行った。その結果、放射面内の素子間隔を小さく密に配置することで、直進性の高い音場が形成可能であること、及び素子数が多いほど音圧レベルは大きくなるが、指向特性には影響しないことがわかった。また、干渉点での可聴音生成実験では、音軸の交差角度が小さいほど干渉点後方に縦へ広がりをもった干渉域が形成され、反対に角度が大きくなるほど局所性が高まることが確認された。また、差周波数が高いほど干渉域は小さい

傾向が見出された。ただし可聴音の再生音圧レベルは1次超音波に比べ著しく小さく、能動騒音制御へ適用するためにはより効率的な生成方法を考える必要があり、今後引き続き検討する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1. 小松崎俊彦, 岩田佳雄, パラメトリックスピーカを用いた能動騒音制御, 日本機械学会論文集C編, 第76巻, 第761号(2010), 177-184, 査読有

〔学会発表〕(計4件)

1. 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 高指向性パラメトリックスピーカによる能動騒音制御, 日本機械学会北陸信越支部第47期総会・講演会, 2010年3月10日, 新潟大学工学部(新潟市)
2. Komatsuzaki, T. and Iwata, Y., Active Noise Control using High-directional Parametric Array Source, 13th Asia Pacific Vibration Conference, 2009.11.23, University of Canterbury (New Zealand) (査読有)
3. 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 黒田順也, パラメトリック音源による高指向性波を用いた能動的音響制御, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2009, 2009年8月7日, 北海道大学(札幌市)
4. 黒田順也, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 超音波干渉を用いた仮想音源生成に関する研究, 日本設計工学会北陸支部平成21年度研究発表講演会, 2009年6月27日, 金沢工業大学(金沢市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小松崎 俊彦 (KOMATSUZAKI TOSHIHIKO)
 金沢大学・機械工学系・准教授
 研究者番号: 80293372