

超音波干渉による仮想音源の生成に関する研究

著者	小松? 俊彦, 岩田 佳雄
雑誌名	日本機械学会論文集C編 / Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen / Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C
巻	78
号	786
ページ	420-430
発行年	2012-01-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/31410

doi: 10.1299/kikaic.78.420

超音波干渉による仮想音源の生成に関する研究*

小松崎 俊彦^{*1}, 岩田 佳雄^{*1}

Virtual Sound Source Reproduction based on Point-interference of Ultrasounds

Toshihiko KOMATSUZAKI^{*1} and Yoshio IWATA

^{*1} Institute of Science and Engineering, Kanazawa University
Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 920-1192 Japan

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. It is known from these investigations that the fairly local sound reproduction in free space is possible, yet the sound pressure level of the secondary field is small. The results have also shown that the generated virtual sound area is dependent on both the difference frequency and the intersection angle of two carrier waves emitted by two sound sources.

Key Words : Parametric Array, Ultrasound, Virtual Sound Source, Directivity

1. 緒 言

我々の周囲にある騒音は聴取妨害や身体などへの悪影響を及ぼすため、近年、その抑制がますます必要とされている。その解決策の一つとして能動騒音制御技術の開発が進められている。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、一般の自由空間を対象とする場合は、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、音波が球面波状に広がるという物理的性質⁽¹⁾、装置類の設置条件やコスト面等から、限られたセンサ・制御用スピーカ数で広い空間に渡る静音化を実現することは依然困難な状況にある。著者らはこれまでに、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や、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⁽²⁾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る。

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⁽³⁾。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、原理的には、周波数の異なる2つの超音波を単一放射面から空中に照射すると、音響的非線形効果によって、2つの超音波の差音に相当する成分が高い指向性を保ったまま伝播途中で可聴音として生成されるものである⁽³⁾⁽⁵⁾。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、著者らは近年、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ることを示した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。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、目標点を通過す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。

* 原稿受付 2011年08月15日

^{*1} 正員, 金沢大学理工研究域機械工学系(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: toshi@t.kanazawa-u.ac.jp

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られる。局所的な音の生成に関する研究はこれまでもいくつか見られ、例えば空中音源と称し、パラメトリックアレイによって生成した高指向性可聴音を回転放物面で反射させ、焦点位置に収束音場を生成する研究⁶⁾がある。この手法では局所音の生成は可能であるが、焦点は放物面の特性によって一意に決定されるため、任意点での生成には対応できない。また、物理的な反射面の存在無くしては実現不可能である。一方、対象空間外への余分な音を漏洩させることなく静粛性を確保しつつ、目的の場所のみに音響伝達を行うハイブリッド制御に関するもの⁹⁾があるが、本手法では原理上、任意点での音場生成や消音に対応できるものの、情報伝達と静粛性確保を両立させるためのスピーカやマイクの配置と数の検討を含めた複雑なシステム構築が必要と思われる。

本研究では、能動騒音制御への応用を念頭に置きながら、局所的に音を生成する手段として、周波数の異なる超音波を2つの独立な放射器から放射し干渉点で可聴音を再生する手法の検討を行う。干渉により差周波数を生成することは原理的に可能であることから、真の意味で目標点以外の空間を乱さない局所性仮想音源生成システムの構築を目的とする。異なる周波数の超音波が干渉すると、高調波や結合波が発生する。発生する多くの周波数成分のうち最も低い周波数成分は差周波数であり、この差周波数を可聴音域に設定するために放射周波数を決定する。その基礎的検討として、超音波を放出する放射器の製作、および指向性に関する理論的・実験的検討を行った。さらに、超音波干渉による仮想音生成領域及び生成音圧の大きさについて検討を行った。

2. パラメトリックアレイの理論

周波数の異なる2つの強力超音波(キャリア波)が媒質中に放射されると、音場の非線形効果によって2つの周波数の和および差成分が放射音場中に展開される⁴⁾。和の成分はその周波数が極端に高いことから急速に減衰するが、一方の差成分は空間中を伝播し、可聴音として知覚される。パラメトリックアレイは超音波の高指向性を利用しているため、展開される可聴音成分も同様の指向性を有する音波となる。この特徴により、周辺空間への影響を極力抑えながら、スポットライトのように局所的に音を伝達することが可能となる。実用的には、店舗や博物館内において、複数のエリアに個別の情報を伝達する場合などに利用されている。一般に、パラメトリックアレイの理論は2つの超音波が同一面から平行に放射されることを前提としているため、本研究で取り扱うように2つの独立な放射音が交差する場合の現象を直接的に説明するものではないが、期待する効果は同一のため、ここではWesterveltによるパラメトリックアレイの理論について述べる。

Westervelt⁴⁾は放射超音波の相互作用における2次的効果の非線形性を線形近似することで、可聴音となる2次波の音場に関する支配方程式を導出しており、Bellinらによる検討⁵⁾をはじめとして各種の実証実験がなされている。パラメトリックアレイ効果の理論モデルは次に示す式(1)および(2)によって表される。

$$\nabla^2 p_s - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p_s}{\partial t^2} = \rho_0 \frac{\partial q}{\partial t} \quad (1)$$

$$q(x, t) = \frac{1}{\rho_0^2 c_0^4} \left\{ 1 + \frac{\rho_0}{2c_0^2} \left(\frac{d^2 p_i}{d\rho^2} \right)_{\rho=\rho_0} \right\} \frac{\partial p_i^2}{\partial t} = \frac{\beta}{\rho_0^2 c_0^4} \frac{\partial p_i^2}{\partial t} \quad (2)$$

式(1)および(2)において、 p_i は2周波数成分を含むキャリア音圧を表し、 p_s は展開される2次音圧を表す。式(1)は波動方程式を表し、式(2)は2つの音波の相互作用の結果として生じる等価な2次音源の強さを表現している。 ρ_0 と c_0 はそれぞれ媒体の密度と音速である。また、 β は非線形パラメータと呼ばれ、断熱膨張過程のもとでは次のように一定値となる¹⁰⁾。

$$\beta = \frac{\gamma + 1}{2} \quad (3)$$

ただし、 γ は比熱比を表し、空気では $\gamma = 1.4$ である。

音軸上に、強さ q の仮想音源がアレイ状に形成され、2 周波成分の包絡が波形歪みを起こすことにより、差成分音圧が生成される。音源強さはキャリア音波の二乗の時間微分 $\partial p_i^2 / \partial t$ に比例し、2 つのキャリア周波数 ω_1, ω_2 の和および差成分を放射音場内に作り出す。この現象を確認するために、以下のようにキャリア音圧を仮定する。

$$p_i = P_1 \exp(-\alpha_1 x) \cos(\omega_1 t - k_1 x) + P_2 \exp(-\alpha_2 x) \cos(\omega_2 t - k_2 x) \quad (4)$$

ここで、 α_1 及び α_2 は音波の吸収係数、 P_1 及び P_2 はキャリア音波の振幅を表す。式(4)を二乗すると、次の式が得られる。

$$p_i^2 = \frac{1}{2} P_1^2 \exp(-2\alpha_1 x) + \frac{1}{2} P_2^2 \exp(-2\alpha_2 x) + \frac{1}{2} P_1^2 \exp(-2\alpha_1 x) \cos 2(\omega_1 t - k_1 x) + \frac{1}{2} P_2^2 \exp(-2\alpha_2 x) \cos 2(\omega_2 t - k_2 x) + P_1 P_2 \exp\{-(\alpha_1 + \alpha_2)x\} \cos\{(\omega_1 + \omega_2)t - (k_1 + k_2)x\} + P_1 P_2 \exp\{-(\alpha_1 + \alpha_2)x\} \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t - (k_1 - k_2)x\} \quad (5)$$

式(5)より、主要周波数 ω_1 および ω_2 の和 $(\omega_1 + \omega_2)$ および差成分 $(\omega_1 - \omega_2)$ が 2 次波として変調されることがわかる。式(5)を式(1)に代入した場合、キャリア音圧の二乗は式(1)右辺において時間 2 階微分されるため、それぞれの周波数成分の振幅は周波数の二乗に比例することになる。従ってこの理論モデルにおいては 2 次波の生成効率率は周波数に強く依存する。

3. 放射器に関する音場の数値的検討

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する必要がある。そこで、局所性可聴音を生成するシステムの構築にあたり、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指向特性を理論的に予測し、放射器の製作と実験的評価を行った。

3・1 数値計算モデル

まずは数値計算モデルを用いて、直線音場生成のための検証を行った。簡便かつ均質に超音波を放射可能な手段として、超音波エミッタ素子を複数組み合わせ、図 1 に示すように素子が互いに接するようハニカム状に配置することを前提に放射器を構成する。各々を点音源とみなした場合、 i 番目の点音源から自由空間に放射される音圧は次式で表される。

$$p_i = j\omega\rho \frac{U}{4\pi r_i} e^{-jkr_i} \quad (6)$$

ここで U は点音源の体積速度、 ω は角周波数、 c は音速、 ρ は空気の密度、 r_i は各々の点音源と自由空間内観測点との距離である。全ての点音源の周波数及び体積速度は一定とし、時間的な位相差はないものとする、 N 個の点音源からの放射音圧は次式となる。

$$p = \sum_{i=1}^N j\omega\rho \frac{U}{4\pi r_i} e^{-jkr_i} \quad (7)$$

式(7)を用いて自由空間内音圧分布に関する数値計算を行い、素子径及び素子数が指向特性に及ぼす影響について考察した。計算対象領域は、放射面の音軸を含む、幅 1.0m×長さ 2.0m の x - y 水平面とした。

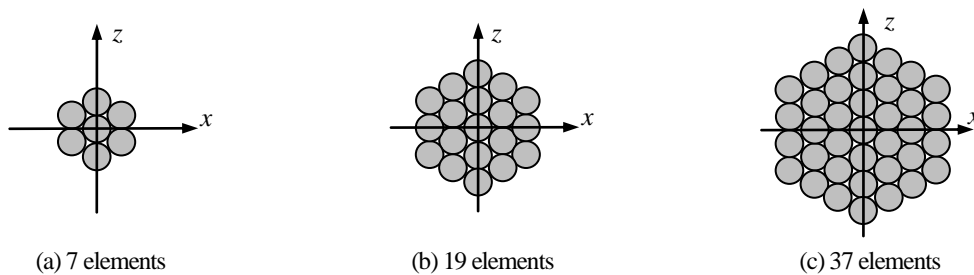


Fig.1 Arrangement of ultrasonic transducers

3・2 素子間隔に関する検討

隣り合う点音源間の距離を 6.0mm, 9.8mm, 16.2mm, 18.0mm の 4 通りに設定し, x - z 平面内に点音源 19 個から構成される音源を設置して x - y 水平面内の音圧分布を計算した. 素子は円形で最密構造に従い並べられていると仮定しているため, これらの中心間距離は素子 1 個あたりの直径に一致する. また, 音源周波数は 40kHz とした. 放射音場の数値計算結果を図 2 に示す. これより, 素子径が小さく間隔が密なほど, 放射器前面に直線状の音場が生成可能であることがわかる. また, 素子間隔が大きくなるほどサイドローブが発生しやすいことが計算結果より示されている. よって, 素子間隔は小さいほど直線状の音場を生成するのに都合がよいと考えられる.

3・3 素子数に関する検討

次に, 放射面を構成する音源の数を 7, 19, 37 個の 3 通りに設定して, それぞれ音場の数値計算を行った. 隣り合う素子間の距離を 9.8mm に固定した場合についての計算結果を図 3 に示す. これより, 音源数が増えても音の広がりには大きな変化は見られないため, 指向性は維持されると考えられる. また, 素子数が増えるほど放射される音圧が強くなることがわかる. ただし, 目的の放射方向とほぼ直角方向へのサイドローブも同様に強くなっている. これは音源間の位相調整や振幅への重みづけ等により抑制することが可能であるが, 装置を可能な限り単純に構成したいこと, 及び狙いとする干渉音生成領域には影響しないことから, 無視することとした.

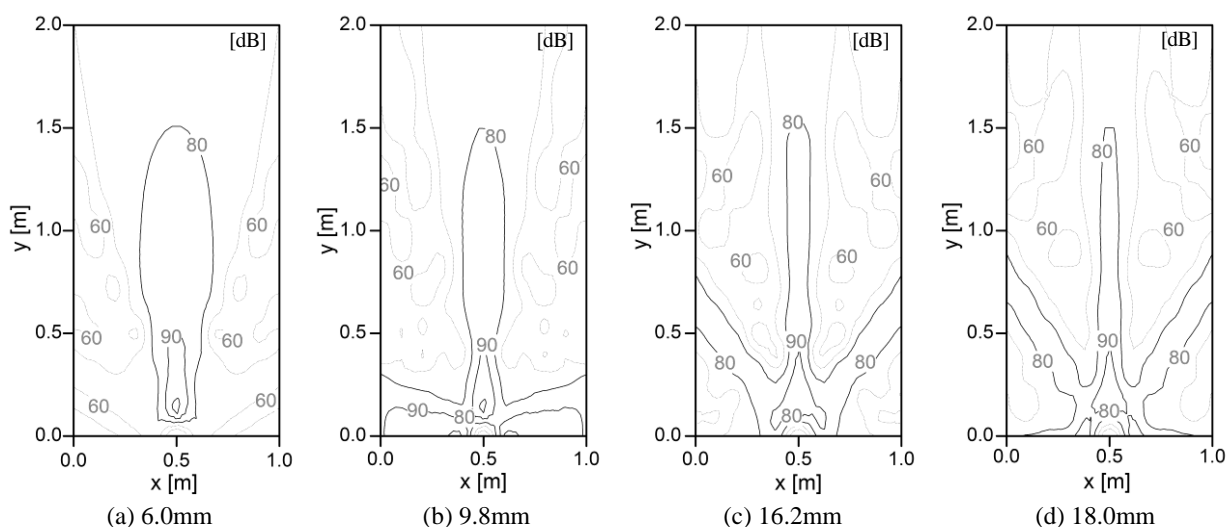


Fig. 2 Comparison of sound fields by different element diameter where the number of elements is fixed at 19 (simulation)

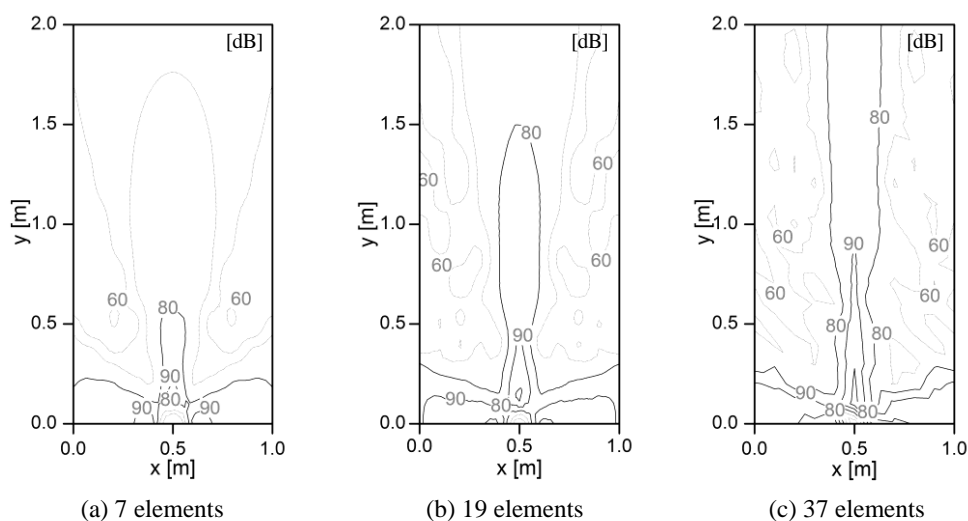


Fig. 3 Comparison of sound fields by the number of elements where the element diameter is fixed at ϕ 9.8mm (simulation)

4. 超音波放射器の製作と評価

4.1 超音波放射器の構成

数値的な検討を踏まえ、直線状の超音波を照射可能な放射器を作製した。簡易に超音波を発生できることから、放射器はセンサ用の超音波エミッタ素子を放射面内に複数組み込んだ構成とし、素子は入手可能な市販品のうち、素子径 $\phi 16.2\text{mm}$ のもの、及び $\phi 9.8\text{mm}$ のものを採用した。表1に素子の仕様を示す。これらの素子は単体でも指向性を有し、音軸を基準に $\pm 50^\circ$ の方向に対して約6dB音圧が低下する。また、周波数特性に関しては共振周波数40kHzでの生成音圧を最大として $\pm 5\text{kHz}$ の範囲を超えると音圧が10~20dB低下する。これらの素子を可能な限り密に組み込むことで強力な超音波を発生できると考え、同一径の素子をハニカム状に配置した。さらに、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た。数値計算と同様、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実験的に評価した。図4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=0.5m, y=0.0m)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。各格子点間の移動に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。

Table 1 Specification of ultrasonic transducers

Pattern number	T4016	T4010
Diameter	16.2mm	9.8mm
Center frequency	40kHz	40kHz
Allowable input voltage	20V	20V

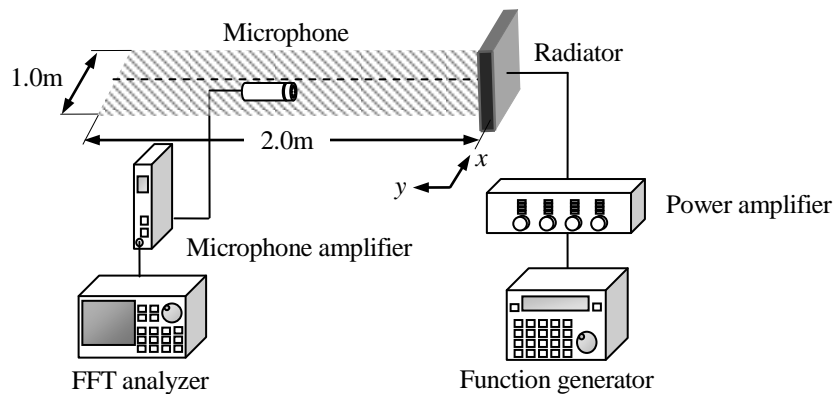


Fig.4 Experimental setup for sound field measurement

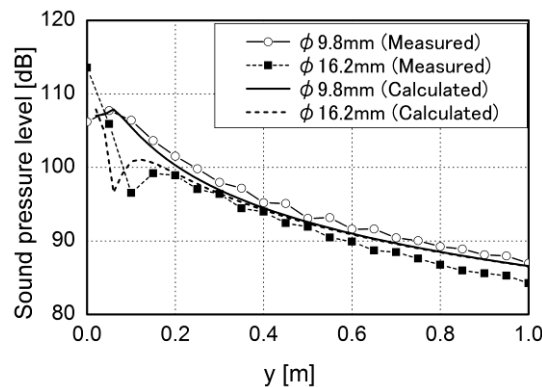


Fig.5 On-axis sound pressure distribution compared by two different element diameters where the number of elements is fixed at 19

4・2 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。放射面前方の音軸上にて計測した音圧レベル分布を、数値計算結果と併せて図5に示す。放射面から0.2m以遠においては、図2の計算結果からもわかるように音軸上音圧は素子間隔に依らずほぼ同様に分布している。また、素子径 $\phi 16.2\text{mm}$ の場合、放射面前方0.1m付近において音圧の谷が生じるようすなど、いずれの素子径についても実験および計算結果はよく一致している。さらに、水平面内の音圧分布計測結果を図6に示す。計測結果から、素子間隔が小さい $\phi 9.8\text{mm}$ の方が、放射器前方に音圧が直線状に分布しており、一方の $\phi 16.2\text{mm}$ の素子で構成される放射器による放射音では数値的な予測と同様、斜め方向にサイドローブが発生している。数値計算においては素子を点音源としてモデル化しており、実験で用いた素子は単体で指向性

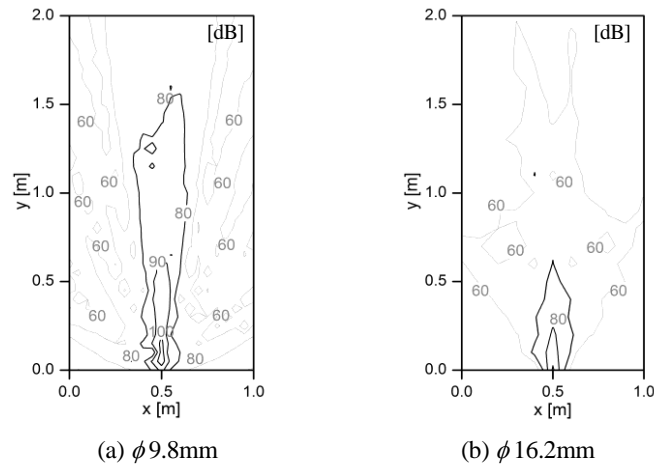


Fig. 6 Sound pressure distribution compared by two different element diameters where the number of elements is fixed at 19 (experiment)

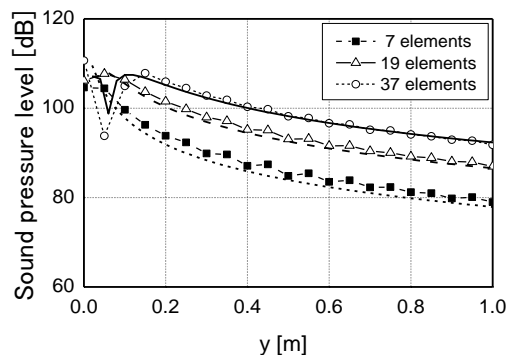


Fig. 7 On-axis sound pressure distribution compared by the number of elements where the element diameter is fixed at $\phi 9.8\text{mm}$

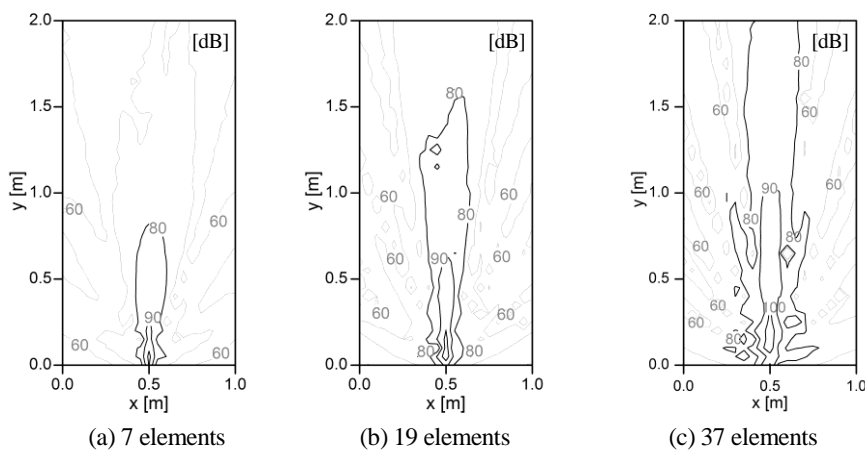


Fig. 8 Sound pressure distribution compared by the number of elements where the element diameter is fixed at $\phi 9.8\text{mm}$ (experiment)

を有するが、両者の結果は全般的に良く一致しており、素子の有する指向性がこの程度であれば点音源とみなしても差し支えないと言える。これらの結果より、以後の評価には素子径 $\phi 9.8\text{mm}$ のものを採用することとする。

4・3 素子数に関する検討

$\phi 9.8\text{mm}$ の素子を組み込んだ放射器について、数値計算と同様に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、おのおの40kHzの超音波を出力した場合の音圧分布を計測した。まずは実験及び数値計算によって得られた軸上音圧レベル分布を図7に示す。図3の数値解析結果からも予測されるとおり、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る。続いて、水平面内の音圧分布計測結果を図8に示す。図3と同様に、素子数の増加に伴い放射面前方への音圧レベル値は増大するが、指向性そのものに大きな変化は無いことがわかった。また、数値計算結果で予測された、放射方向とほぼ直角な方向へのサイドローブはほとんど生じなかった。

5. 干渉空間での可聴音生成に関する検討

本節では、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。前節での検討結果を踏まえて、超音波素子は素子径 $\phi 9.8\text{mm}$ のものを採用し、素子数が放射音の指向性に影響しないことを考慮しつつ、寸法55mm×98mmの市販品の基板を使用する都合から、放射器を構成する素子数を放射器一つにつき50個とした。

5・1 数値計算による音場予測方法

二方向から音波を放射し、目標点で干渉させて差音の生成領域を予測する数値計算を試みた。厳密には、非線形波動方程式を解いて音場を予測する必要があるが、ここでは差音が生成される領域の大きさのみを簡便に予測することを目的として、放射器の指向特性を検討する際に用いた点音源のモデルを利用する。互いに離れた2つの放射器を模擬して、それぞれ周波数の異なる超音波を直線的に放射し、それら2つの周波数が空間内にて共存する領域を抽出することにより干渉領域の大きさを予測する。干渉点での差周波数や放射角度の変化が干渉領域の大きさに与える影響を考察した。干渉点での差周波数は500Hzから2kHzまで500Hz刻みに4通り設定し、各放射器からの超音波周波数 ω_1 及び ω_2 は表2のように設定した。実際の放射器の周波数特性を考慮し、一方の放射器からの超音波周波数は38.5kHzに固定した。また、放射角度は図9に示すように15、30及び45度の3通りとした。音場の計算対象領域は0.5m×0.5mの水平面とした。

Table 2 Difference frequency settings in simulations

Difference frequency [Hz]	ω_1 [kHz]	ω_2 [kHz]
500	38.5	39.0
1000	38.5	39.5
1500	38.5	40.0
2000	38.5	40.5

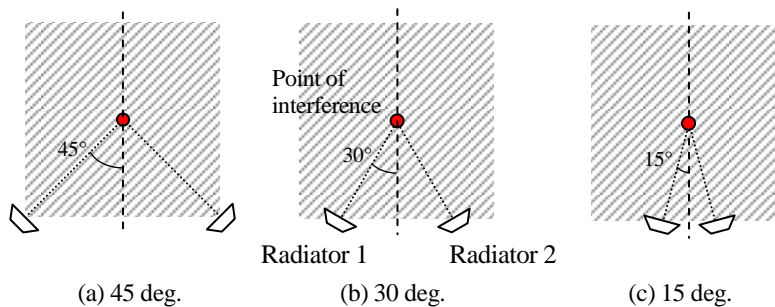


Fig. 9 Arrangement of ultrasound radiators

5・2 数値計算結果

放射器相互の音軸が直交し(放射角 45 度), 超音波干渉点が観測平面の中心点(x, y)=(0.5, 0.5)に位置するように点音源を配置した場合の例として, 差周波数 500Hz, 1kHz 及び 2kHz に対する音場予測結果を図 10 に示す. 図中に示されている値は, 干渉音圧の実効値を音圧レベルに直したものである. これより, 自由空間における音波干渉領域の大きさは周波数によらずほぼ一定であることがわかり, 各々の放射器から出力されるキャリア超音波のわずかな周波数の違いでは, 音響ビーム幅がさほど変わらないためと考えられる. また, 放射器から干渉点に至る経路に干渉音が現れているが, これは各々の放射器からわずかにサイドローブが生じており, 数値計算上は 2つの周波数成分がこの領域にて検出されるためである. さらに, 3通りの異なる放射角度を設定した場合に生成される干渉領域の大きさを予測した結果を図 11 に示す. 放射角 45 度では, ほぼ干渉点付近のみで干渉音が生成されたのに対し, 放射角が 30 度, 15 度になると干渉点の後方へ伸びるように干渉音波が生成されている. これより, 放射角度が小さくなると, パラメトリックアレイスピーカを用いた場合と同じ放射音場が形成され, 再生可聴音の音圧レベルも高くなると予想される.

5・3 干渉音場の生成と計測

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, 数値計算と同様に実験的評価を行った. 音場計測システムの概要を図 12 に示す. 音波干渉及び計測は無響室内にて行い, 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. 音源周波数は, 干渉の結果生じる差音の周波数が 500~2kHz となるよう表 3 のように設定し, それぞれの放射器から供給される直線状音波の放射角度は 15, 30 及び 45 度の 3 種類に設定した. なお, 数値計算の場合と違い, 表 3 では一方の放射器のキャリア周波数 (ω_1) を固定していないが, これは素子の Q 値が比較的高いうえ, 共振周波数付近の特性が使用環境に応じて微妙に変化することから, 同じ信号入力レベルで最も高い再生音圧を得ようと手調整したためである.

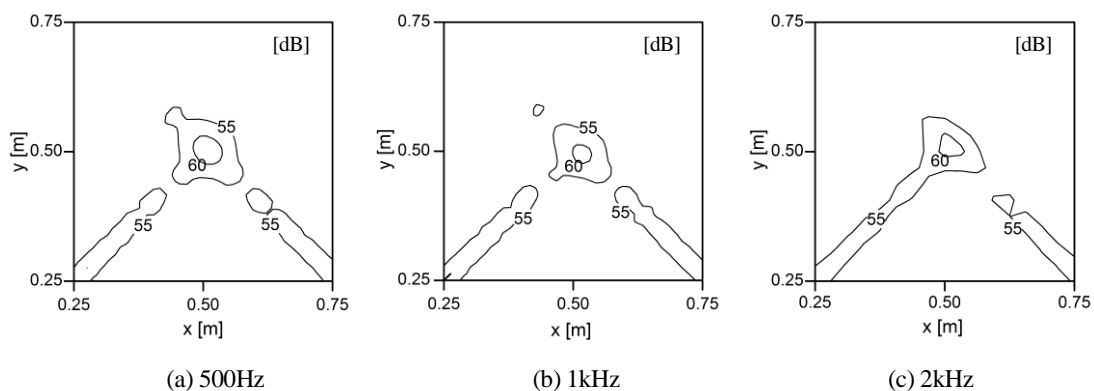


Fig.10 Predicted sound field of difference frequency component at radiation angle 45 deg. (calculation)

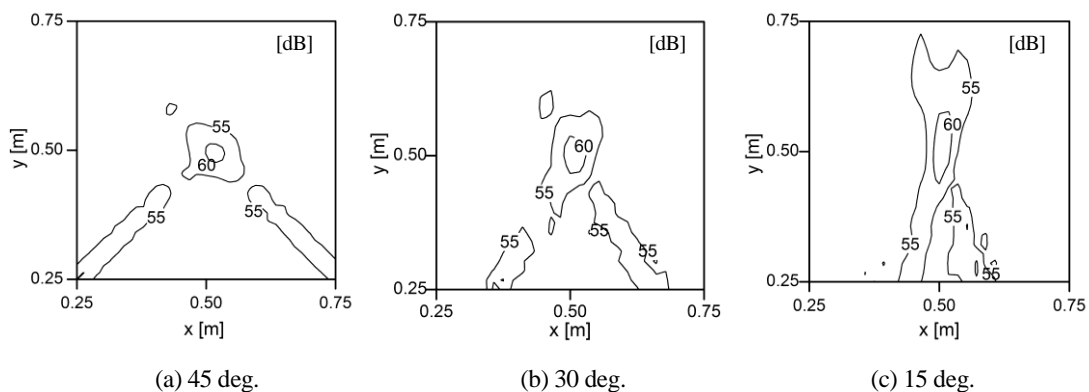


Fig. 11 Interfered sound field compared by radiation angle at difference frequency 1kHz (calculation)

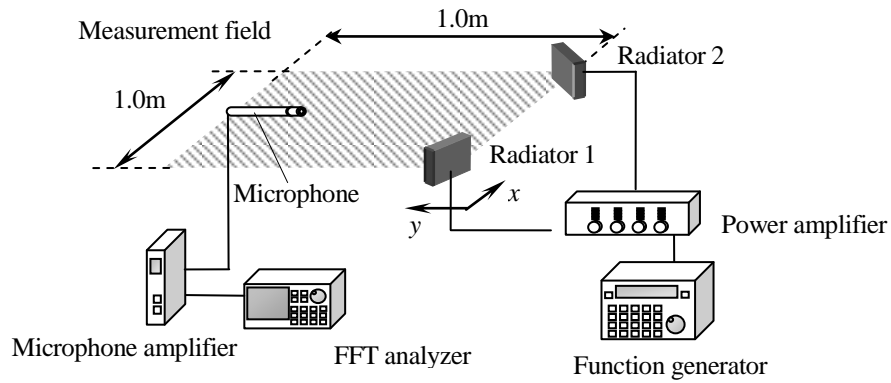


Fig. 12 Experimental setup for interfered sound field measurement

Table 3 Difference frequency settings in experiment

Difference frequency [Hz]	ω_1 [kHz]	ω_2 [kHz]
500	39.2	39.7
1000	39.4	40.4
1500	39.2	40.7
2000	38.9	40.9

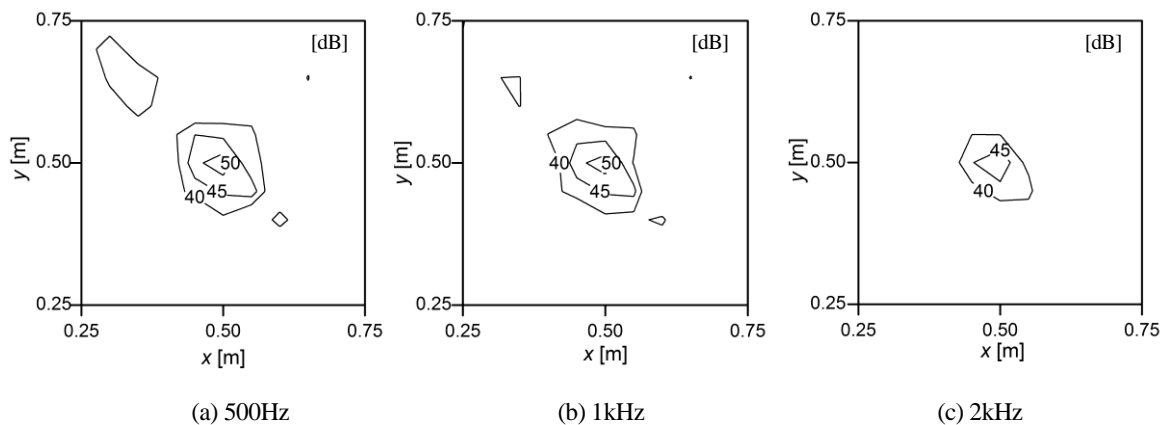


Fig. 13 Measured sound field of difference frequency component at radiation angle 45 deg. (experiment)

5・4 干渉音場計測結果

設定した差音の周波数 500Hz, 1kHz 及び 2kHz について, 空間内音圧分布をマイクロホンにて測定し, これらの周波数成分のみ抽出した結果を図 13 に示す. ここで, 放射角度は 45 度に固定している. 放射面直前における超音波の音圧レベルは 100dB 強であるにも関わらず, 再生される差音圧の大きさは小さい⁽³⁾. 差音圧生成領域の幅については, 1 次波としての放射超音波が音軸上を基準に 10dB 程度低下する幅とほぼ対応している. ただし, 数値計算では差音生成領域の大きさに関する周波数依存性を予測することができなかったが, 実験ではそれが現れており, 差周波数が高いほど差音生成領域は小さくなっている. 周波数が高いほど波長が短くなることに関係すると思われる.

次に, 干渉点での差周波数を 1kHz に固定し, 放射角度を 15, 30 及び 45 度の 3 通りに設定して, 放射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. この場合の実験結果を図 14 に示す. 放射角 45 度の場合の仮想音源生成領域を基準に考えると, 数値計算で予測されたように, 角度が小さくなるとともに y 軸方向へ広がりをもつ音場領域となることがわかる. 特に, 放射角 15 度では干渉後に直線状の高い音圧が生成されてい

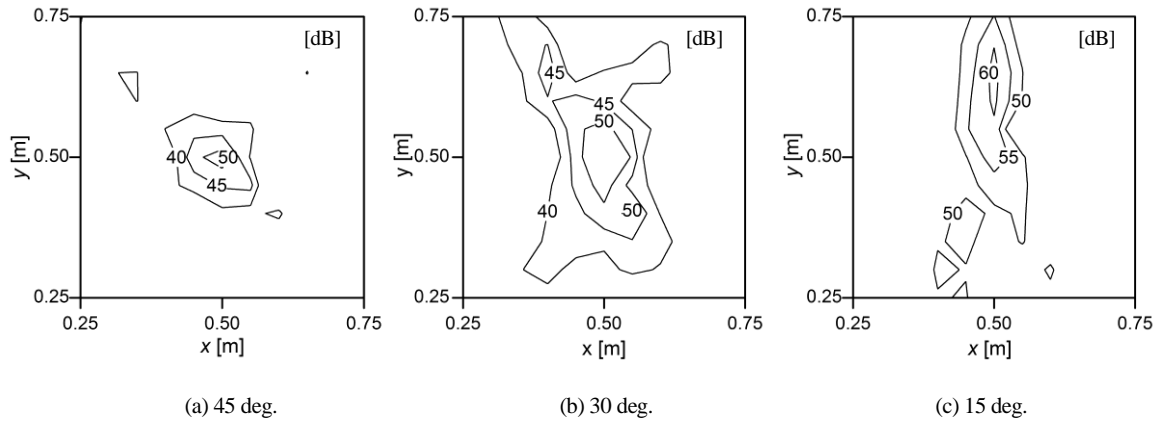


Fig. 14 Interfered sound field compared by radiation angle at difference frequency 1kHz (experiment)

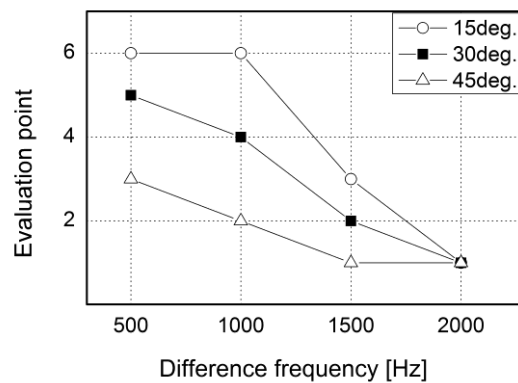


Fig.15 Locality evaluation of produced difference sound

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アレイ効果によるものと考えられる。

5・5 局所性の評価

局所性の評価を行うために、ピーク音圧レベルとの差が6dB以内となる格子点を調べ、その範囲を差周波数の局所性の指標とした。放射超音波間の差周波数は500Hzから2kHzまでを500Hz刻みに変え、干渉点での差音のピーク音圧は全ての計測で同じになるよう調整した。なお、ここで言う格子点とは図12に示す音場計測システムによる計測点を意味し、格子点の間隔は0.05mである。実験結果から得られた差周波数と格子点数の関係を図15に示す。差周波数が高くなるほど6dB以内の格子点数が少なくなり、干渉点周りの局所性が高くなることがわかる。また、直線状音波の交差角度が小さくなるにつれて局所性が低くなることも確認できる。さらに、xy方向別に見れば、図14に示したように放射角45度では2方向へほぼ均等に広がる差音圧が生成されるが、放射角度が小さいほどx方向の広がり小さい一方、y方向へは広がりを持った音場が形成される。

6. 結 言

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、直線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。さらに、差周波数が大きいほ

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。また、差音を生成するためには著しく高いレベルの超音波を放射する必要があるが、その人体への影響も未検討課題として残されている。

これらの問題を解決することにより、空間内の任意点において、極めて局所性の高い仮想音源の生成が可能となり、本研究で意図する局所的能動騒音制御への応用のみならず、秘匿性の高い情報伝達手段としての利用や、直接的に加振が困難な構造体に対して非接触で加振あるいは制振するシステムへの適用も可能と考えられる。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金（若手研究(B)、課題番号 20760147）の交付を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) 三井田惇郎, 音響工学 (1987), 昭晃堂.
- (2) 小松崎俊彦, 佐藤秀紀, 岩田佳雄, 小川孝吉, “3次元空間における目標点移動に追従した能動騒音制御”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 718 (2006), pp. 1723-1729.
- (3) 鎌倉友男, 酒井新一, “パラメトリックスピーカの実用化”, 日本音響学会誌, Vol. 62, No. 11 (2006), pp. 791-797.
- (4) Westervelt, P. J., “Parametric Acoustic Array”, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 35, No. 4, 1962, pp. 535-537.
- (5) Bellin, J. L. S. and Beyer, R. T., “Experimental Investigation of an End-Fire Array”, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 34, No. 8 (1962), pp. 1051-1054.
- (6) 小松崎俊彦, 畑中健介, 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: 音場特性に関する実験的検討”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 737 (2008), pp. 75-82.
- (7) 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: 数値計算モデルの構築と干渉音場の検討”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 761 (2010), pp. 177-184.
- (8) 矢田淳也, 北川和則, 米沢義道, 伊藤一典, 橋本昌巳, “パラメトリックアレイビームによる空中音源”, 電子情報通信学会技術研究報告, EA94-37 (1994), pp. 25-30.
- (9) 田中信雄, 前田奈巳, 宮田真行, “仮想音源および静粛化領域生成のハイブリッド制御”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 722 (2006), pp. 255-262.
- (10) Morse, P. M. and Ingard, K. U., *Theoretical Acoustics* (1986), Princeton University Press.