

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760280
 研究課題名 (和文) 小規模アレイ音響波プローブによる空間情報モニタリングに関する研究
 研究課題名 (英文) RESEARCH ON SPATIAL INFORMATION MONITORING BY SMALL-SCALE ARRAY SOUND PROBE
 研究代表者
 増山 裕之 (MASUYAMA HIROYUKI)
 鳥羽商船高等専門学校・電子機械工学科・助教
 研究者番号：90334052

研究成果の概要：少数要素のアレイ状音源による新たな音響波イメージング・空間情報取得法の構成を目指した検討を実施した。無回折音響波ビームを放射する円環アレイ音源の素子形状に関する検討では、各要素の幅が精密に設定されずとも、所望の要素数と最外要素中心半径を満たせば、幅の鋭いビームが安定して形成されることが考えられる結果を得た。また、少数要素矩形音源アレイによる空間中の音響波反射点の探索法に関する検討では、単一の矩形音源による探索と比較して、探索結果が改善されたと考えられる結果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	390,000	3,490,000

研究分野：光・音響素子工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測工学、電子デバイス・機器、音響波デバイス、センサ、可視化

1. 研究開始当初の背景

(1) 矩形音源からの放射界解析において、観測点に設定した点と、音源との位置関係によって、音源面上に、異なった形状のインパルス応答を示す複雑な細領域が存在することが指摘されているが、個々の細領域に関する詳細な検討は行なわれておらず、その積極的利用には至っていない。

(2) 無回折音響波ビーム形成に関する研究において、要素毎の振幅制御が不要となる程の簡潔な構成の音源を使用した例は少なく、音

響情報デバイスとして実用に供された例はない。

(3) 音響波ビームをリニア走査させる手法としては、一次元アレイの各要素を順次駆動させる方法が一般的であるが、この方式では、幅を絞ったビームは放射されず、出力分解能の向上は望めない。また、複数要素を使用し、位相遅延によって走査・焦点形成を行うことも一般的であるが、位相制御が必要となる上、焦点となる領域も限定される。走査を実現しつつ、伝搬領域全体にわたって焦点となるビ

ームを形成するための有効な手法が検討されるべきである。

(4) 伝搬の途中で自在に走査量を変化させることが可能な音響波ビームは情報取得手段のみに留まらず、微小物体保持・移動等の手段としても有用であると考えられるが、当該研究課題による手法は、これを極めて簡潔に実現する可能性があり、それについても検討されるべきである。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、要素数として小規模なアレイ状音源を採用しながら、「1. 研究開始当初の背景」節で述べた問題を解決するとともに、極めて簡潔にして特徴的な性質を持つ音源を構築し、新たな音響波イメージング手法、空間情報取得法の構成を目指すことである。

(2) 矩形アレイ音源の構築に関しては、

① 従来のアレイ型音源と比較して、構成要素数が格段に少数であるにもかかわらず、音響波プローブとして利用した際に、従来の音源と遜色ない空間分解能を持ちうること

また、走査型アレイ音源の形成に関しては、

① 振幅分布を振幅強度非依存とし、要素ごとの複雑な振幅制御を不要とすること

② 極めて単純な偏心操作を適用することにより、ビームの伝搬区間全体が焦点たるビームを走査させること

③ 偏心要素の選択により、ビーム伝搬区間中の任意の位置において、自在にビームを走査させること

が可能な音源の形成が可能になることを目指す。

3. 研究の方法

(1) 空間中を回折しないで伝搬する音響波ビームを放射する、円環アレイ状音源について、個々の素子形状に関する検討を実施した。

① 本方式において使用される円環状要素は、その幅を第一種0次 Bessel 関数に従った値とすることにより、幅の鋭いビームを得ている。各要素幅は、理論上は無限に細かい精度を取ることが可能となるが、実際の音源の製作にあたっては、その精度は有限のものとならざるを得ない。

② また逆に、材料加工等の過程で、非常に細かい精度を要求しなくても構わないこととなれば、そのことは、音源の構築過程全体を通じての簡略化、効率化に寄与するものと考えられる。

③ これらの考えを踏まえ、音源要素の幅に関

して精度を低下させた円環アレイ音源を設定し、精度を低下させたことによる、放射ビームの形状への影響について、解析的に検討を行った。

④ 検討を行うにあたり、音源要素の幅について精度を低下させるための方法として、要素幅の刻みに制限を設ける、rounding 処理を適用した。

(2) 少数の矩形トランスデューサをアレイ状に配置した音源を用いて、空間中における音響波の反射点を探索する手法に関する検討を実施した。

① 矩形トランスデューサは、四つの頂点と四つの辺を持つことより、その空間インパルス応答は、音響波の観測点の位置によって非常に複雑に変化し、実際に音源を駆動して取得される波形の形状においても、観測点の位置に依存した変化が見られる。

② 反射点の探索においては、点反射体からの反射波に関して、反射点の位置に依存する反射波形の形状の変化を利用する。実際の測定波形と、音源への入力信号と音源の空間インパルス応答から形成した反射波形との相関を、計算上の観測点位置を変化させながら順次取得・比較を行うことにより、反射点の位置を推定する。

③ 音源として、5個の矩形要素を十字状に配置したアレイを設定し、そのうちの3要素ずつを同時に駆動することにより、幾何学的配置の異なる2種類の矩形音源を形成し、各々の音源における探索結果を重ね合わせることによって、単一の矩形音源を用いた手法からの探索結果の改善を図った。

4. 研究成果

(1) まず、「3. 研究の方法」(1) で述べた、円環アレイ状音源の素子形状に関する検討の結果について述べる。

円環アレイ音源の設計法を図 1(a)に示す。

図 1(a)上部に示された第一種0次 Bessel 関数 J_0 によって、各アレイ要素の位置と幅が決定される。円盤状の中心要素は J_0 関数の中心の極値である $r = 0$ に配置され、中心から n 番目の円環要素の中心半径は、係数 α によって圧縮された J_0 関数 $J_0(\alpha r)$ の n 番目の極値 r_n に配置される。各要素の幅は、 J_0 関数と r 軸によって囲まれた領域 S_n によって、まず相対的に決定される。それらは、中心の円盤要素と、隣接する円環要素が隙間無く接する場合、最大値をとる。その場合の、中心の円盤要素の半径を D とすると、実際の円盤要素の半径 d は、 K を各要素の幅の絶対値を決定する係数として、 $d = KD$ ($0 < K \leq 1$) として表される。その他の円環要素の幅も、 d に対して相対的に決定され、円環アレイが形成され

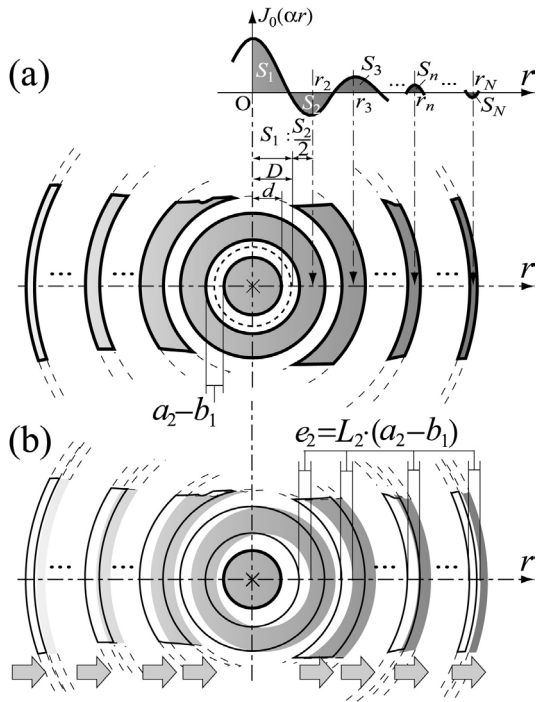


図1 偏心円環トランスデューサアレイの設計手順: (a) 同心円環アレイの形成、(b) アレイ要素の偏心

る。このアレイにおいて、隣り合う各要素が、互いに逆位相の同一振幅で駆動されることで、幅の細い放射ビームが得られる。

アレイ要素の偏心の手順を図1(b)に示す。隣り合うアレイ要素間に存在する空隙は、アレイ要素の内径 a_n と外径 b_n を用いて表現され、 $n-1$ 番目の要素と n 番目の要素の間の空隙の幅は $a_n - b_{n-1}$ となる。これが、 n 番目の円環要素に関して偏心可能な最大値であり、実際の偏心量は、 L_n を、 $0 \leq L_n \leq 1$ の範囲で任意に決定される係数として、 $e_n = L_n \cdot (a_n - b_{n-1})$ ($n > 2$) で与えられる。

上記の手法によって構築される円環アレイ音源が、単一周波数の連続波によって駆動された場合の、放射音圧分布の解析例を図2に示す。音源の駆動周波数は1 MHzとし、音速 c を1500 m/s とする。アレイ要素数は10とし、最外要素の中心半径 R は15 mm (10λ)、係数 K は0.6としており、各計算点 z における最大振幅のプロットとしてのビームのプロファイルを示している。要素幅の刻みに、rounding 処理によって異なる制限 w [mm] を加えたアレイを設定し、解析を実施した。各々の制限と、その下でとり得る要素幅を図3に示す。ここで、×印は、要素幅としてとり得る値に制限が加えられた結果、要素の内径と外径が一致し、要素たりえなくなった箇所を表している。図2より、制限が加えられたことによって所望の要素数と最外要素の中心半径を満たすことが出来なくなる、(vi)、(vii) の場合は、形成されるビームの形状に非常に大きい乱れが見受けられる。しかしなが

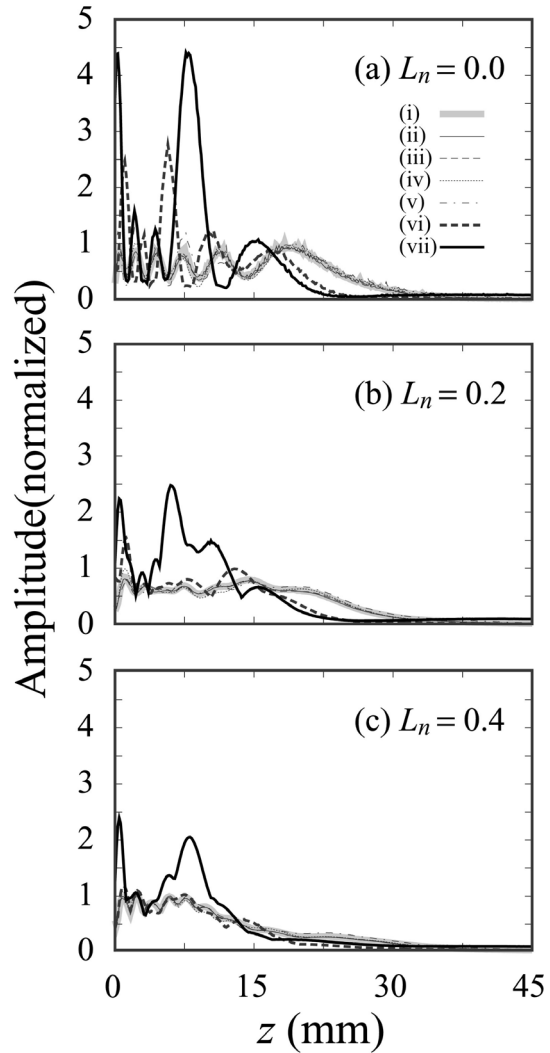


図2 放射音圧分布の解析結果 (各計算点 z における最大値のプロット) : (a) $L_n = 0.0$, (b) $L_n = 0.2$, (c) $L_n = 0.4$; (i) no rounding, (ii) $w = 0.01$, (iii) $w = 0.025$, (iv) $w = 0.05$, (v) $w = 0.1$, (vi) $w = 0.25$, and (vii) $w = 0.5$

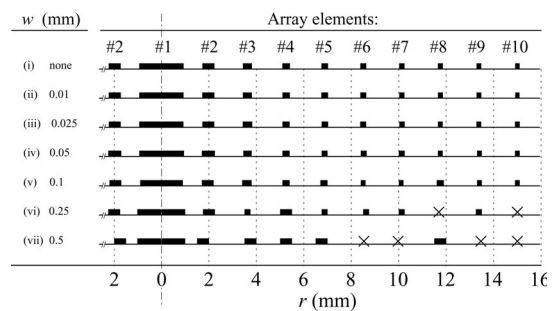


図3 各々のアレイ要素に対する rounding 値 w と rounding 処理後の実際の要素幅

ら、それ以外の、所望の要素数と最外要素の中心半径を満たすことが出来る場合には、ビーム強度の変動に若干の差が見られるものの、おおむね要素幅の刻みに制限が加えられない、(i) の場合と同様の形状のビームが形成されると考えられる結果が得られた。

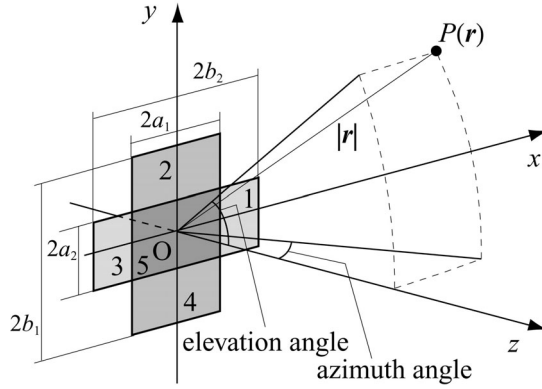


図4 矩形トランスデューサアレイによる音源と、点反射体 $P(\mathbf{r})$ を含んだ座標系

(2) 次に、「3. 研究の方法」(2) で述べた、少数要素矩形トランスデューサアレイ音源による、空間中における音響波の反射点探索手法に関する検討の結果について述べる。

図4は、矩形トランスデューサアレイによる音源と点反射体を含んだ座標系を示している。音源として、矩形トランスデューサが5要素、 z 軸に垂直な平面に十字状に配置されており、また、中央の要素の中心と座標軸の原点が一致するように配置される。要素の寸法は、 $(b_2 - a_1) \times 2a_2$ (要素1, 3), $2a_1 \times (b_1 - a_2)$ (要素2, 4), $2a_1 \times 2a_2$ (要素5) とする。また、反射点は $P(\mathbf{r})$ に設定し、解析結果を示す際には、音源中心からの距離 $|\mathbf{r}|$ 、方位角 azim. 、仰角 elev. によって表現するものとする。

音源を一様速度 $v(t)$ で駆動したとき、 P による反射によって音源で受信される出力 $e(\mathbf{r}, t)$ は、 k を比例定数、 ρ を音波の伝搬媒質の密度、 A を反射点の反射に寄与する面積、 $h(\mathbf{r}, t)$ を音源の空間インパルス応答、 $*$ をコンボリューションとして、

$$e(\mathbf{r}, t) = -\frac{k\rho A}{2c} v(t) * \frac{\partial}{\partial t} h(\mathbf{r}, t) * \frac{\partial}{\partial t} h(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

の形で表現することができる。ここで、 $v(t)$ は既知であり、また、測定可能である反射波の立ち上がり時刻をもとに、 $|\mathbf{r}|$ の値として取り得る範囲を推定することは可能である。反射波の立ち上がり時刻を T 、音速を c とすると、音源面の任意の部分と P との距離は、 $cT/2$ となる。これを音源中心からの距離 $|\mathbf{r}|$ に当てはめると、 $|\mathbf{r}|$ の取り得る範囲は、

$$\frac{cT}{2} \leq |\mathbf{r}| \leq \max\left(\frac{cT}{2} + \sqrt{a_1^2 + b_1^2}, \frac{cT}{2} + \sqrt{a_2^2 + b_2^2}\right), \quad (2)$$

となる。その範囲内の適切な間隔で $|\mathbf{r}|$, azim. , elev. を設定して $h(\mathbf{r}, t)$ を求め、順次、(1)式を計算し、先に取得された波形との相関をとる。これにより、反射点の位置 \mathbf{r} を推定することが可能となる。

図5は、上述の手法による探索が可能であるかを、解析的に確認した結果である。予め

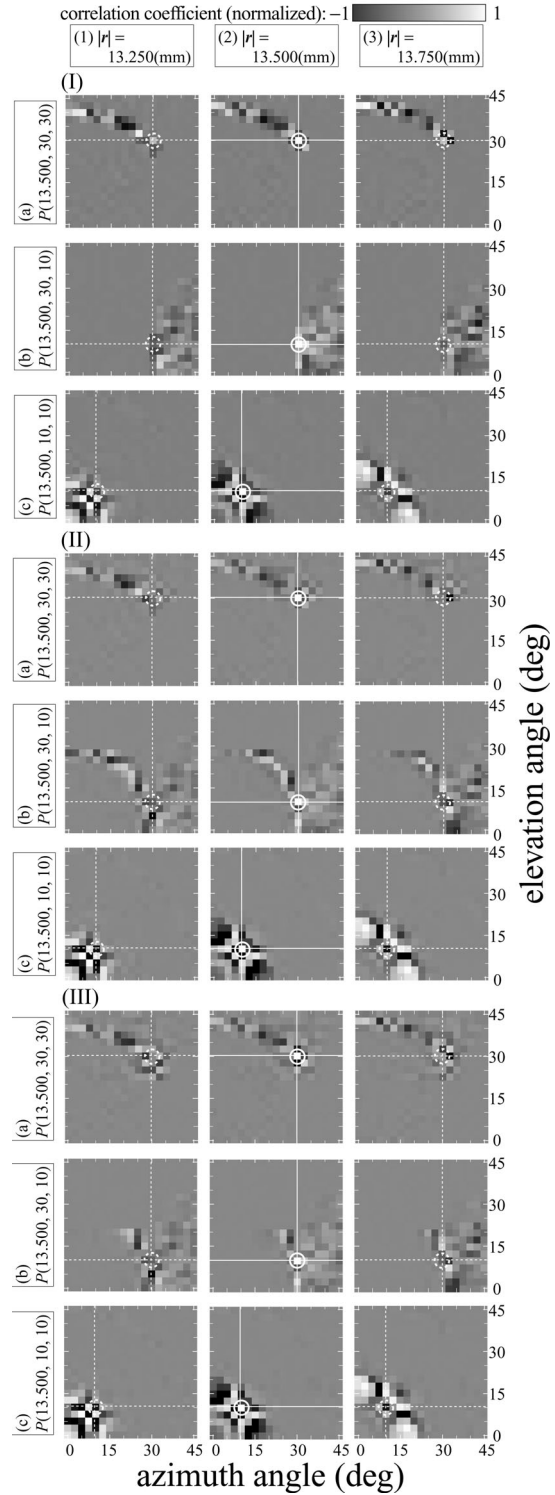


図5 3種の音源による、相互相関係数の解析結果:
(I) 単一矩形音源、 $a_1 = 6.45$ mm, $b_1 = 10.05$ mm, (II) アレイ音源、 $a_1 = a_2 = 6.45$ mm, $b_1 = b_2 = 10.05$ mm, (III) アレイ音源、 $a_1 = 6.45$ mm, $b_1 = 10.05$ mm, $a_2 = 4.85$ mm, $b_2 = 9.95$ mm

設定した反射点及びその周辺に関して、(1)式の $v(t) * (\partial/\partial t)h(\mathbf{r}, t) * (\partial/\partial t)h(\mathbf{r}, t)$ を計算し、反射点における解析結果との、時刻0における相互相関係数を求めている。図4に示す要素

1, 3, 5、および要素 2, 4, 5 を用いて、配置の異なる 2 種の矩形音源を形成し、個々の音源による探索結果の平均を取っている。解析に用いる要素の寸法は、比較のために用いた、単一矩形音源を含めて、以下の通りである。

(I) 単一矩形音源、

$$a_1 = 6.45 \text{ mm}, b_1 = 10.05 \text{ mm},$$

(II) アレイ音源、

$$a_1 = a_2 = 6.45 \text{ mm}, b_1 = b_2 = 10.05 \text{ mm},$$

(III) アレイ音源、

$$a_1 = 6.45 \text{ mm}, b_1 = 10.05 \text{ mm},$$

$$a_2 = 4.85 \text{ mm}, b_2 = 9.95 \text{ mm}$$

反射点位置 P が (13.500, 30, 30) である図 5(a) においては、単一要素の音源を用いた場合 [図 5(a)(I)] に見られた、反射点の位置 (図中の実線白○印) 以外における相関係数の大きい箇所が、アレイ音源を用いた場合 [図 5(a)(II)、図 5(a)(III)] では目立たなくなり、探索結果が改善されていると思われる。反射点位置 P が (13.500, 30, 10) である図 5(b) においては、単一要素音源を用いた場合にも探索がなされている箇所であり、アレイ音源を用いた場合においても、反射点の位置が探索されている様子が見られる。一方、反射点位置 P が (13.500, 10, 10) である図 5(c) においては、反射点位置以外における相関係数の大きい箇所が変わらず存在し、探索結果が改善されていない様子が見られる。

これらの結果より、設定した反射点の位置によっては、単一の矩形音源による探索で見られた、反射点の位置以外における相関の強い箇所が目立たなくなり、探索結果が改善されたと考えられる一定の結果が得られたが、更に探索結果を改善するべく、検討を実施することが必要であると考えられる。

(3) 本研究の成果を踏まえ、今後の展望として期待される領域としては、工業計測、環境計測、通信、医療診断など、音響波の計測的応用技術の分野における、簡潔な機構による音響波プローブの構築、ならびに新たな音場測定システムの可能性や、微小物体保持・操作など、音響波の動力的応用技術の分野における音源としての適用の可能性、これらを通じた、新たな波動応用技術の展開への可能性等が考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Hiroyuki Masuyama and Koichi Mizutani, Reflection Point Search Using Rectangular Sound Source Improved by Introduction of Array with Small Number of Element,

Japanese Journal of Applied Physics, 48, (in press), 2009 (査読有)

- ② Hiroyuki Masuyama and Koichi Mizutani, Direction-Variable Beam by Decentered Annular Array Sound Source with Rounded Width of Elements, Japanese Journal of Applied Physics, 47, 3964-3966, 2008 (査読有)

[学会発表] (計 4 件)

- ① Hiroyuki Masuyama and Koichi Mizutani, Improvement of Reflection Point Search by Rectangular Sound Source through Introducing Array with Small Number of Element, The 29th Symposium on Ultrasonic Electronics, Sendai City Silver Center (Japan), 2008.11.12
- ② 増山裕之, 水谷孝一, 少数要素矩形音源アレイによる反射点位置探索, 日本音響学会 2008 年秋季研究発表会, 九州大学, 2008.9.11
- ③ Hiroyuki Masuyama and Koichi Mizutani, Direction-Variable Beam by Decentered Annular Array Sound Source with Rounded Width of Elements, The 28th Symposium on Ultrasonic Electronics, Tsukuba International Congress Center (Japan), 2007.11.16
- ④ 増山裕之, 水谷孝一, 要素幅が制約された円環アレイにおける放射ビーム形状への影響, 日本音響学会 2007 年秋季研究発表会, 山梨大学, 2007.9.20

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増山 裕之 (MASUYAMA HIROYUKI)

鳥羽商船高等専門学校・電子機械工学科・助教

研究者番号 : 90334052