

小型空中超音波フェーズドアレイ装置の開発 ～送信器の小型化と分解能の向上～

Development of small-sized airborne ultrasonic phased array device

～Miniaturization of the sender and improvement of resolution～

高橋洋一郎* , CANETE Luis* , 高橋隆行*

Yoichiro Takahashi* , Luis CANETE* , Takayuki Takahashi*

*福島大学

*Fukushima University

キーワード：超音波センサ (ultrasonic sensor) , フェーズドアレイ (phased array) ,
グレーティングローブ (grating lobe) , 指向性 (directivity)

連絡先：〒960-1296 福島県福島市金谷川1番地 福島大学 理工学群 共生システム理工学類 高橋研究室
高橋洋一郎, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: yoi@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒言

近年, 人間の生活の中で支援することを目的としたロボットの研究が盛んに行われている。本研究室でも Fig. 1 に示す人間支援ロボット I-PENTAR の開発を行っており¹⁾, 屋内における荷物運搬などといった仕事を想定して研究が進められている。想定した仕事を行うためには, 荷物や障害物といった物体の検知や周囲の環境を認識することが必要となる。

一般的に移動ロボットの物体の検知には, 非接触型センサが用いられており, 主に光学式のものや超音波式のものが採用されている。光学式センサは応答が高速, 且つ高分解能といった利点があるが鏡面や透明な物体の検知は難しく, さらに外乱光による影響を受けてしまう特徴が

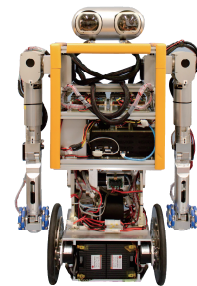


Fig.1 I-PENTAR

ある。一方で, 超音波式センサは応答速度が光学式のものに比べて遅く, 温度や風の影響を受けてしまうが, 鏡面や透明な物体の検知も行えるといった特徴がある。

これらの特徴から, ロボットの環境認識の際には, 光学式と超音波式の2つのセンサを同時

に用いることで各々の欠点を補い、より精度の高い環境認識が行えると考えられる。本研究では超音波式センサを用いた手法に着目する。

ここで、先行研究で用いていた超音波素子 (Murata Manufacturing Co., Ltd., MA40H4S) を Fig. 2 に示す。この素子は、単体での指向性は広いため、一度に広範囲の探査が可能であるが、角度分解能の低さゆえに周囲の障害物の位置を正確に認識することは困難となってしまう。これに対して、角度分解能が高い場合、一度に探査できる範囲が狭くなり、広範囲の探査が難しくなるという問題が発生してしまう。

そこで、高橋らは指向性を鋭くでき、且つ電子的な操作によって超音波ビームの向きを変えることが可能な Phased Array と呼ばれる手法で物体の探査を行うことを提案した²⁾。

Phased Array の概略図を Fig. 3 に示す。Fig. 3 のようにセンサ素子を平面上に並べて配置し、その各々の素子への入力信号に位相差を与えることで、生じる超音波ビームの照射方向を制御することが可能となる。



Fig.2 Ultrasonic device(MA40S4S)

Table 1 Specification of MA40S4S

Item	Value	Unit
Diameter	9.9	[mm]
Operating temperature range	-40 ~ 85	[]
Center frequency	40	[kHz]
Directivity	80	[deg]

Made by Murata Manufacturing Co., Ltd.

先行研究では Phased Array を行う際、Grating Lobe(詳しくは後述) の発生を抑制するために、Fig. 4 に示す 10 素子音響管を用いていた。

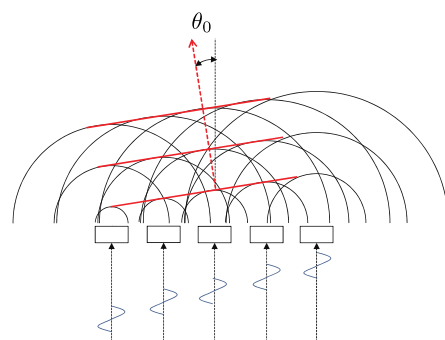


Fig.3 Phased array

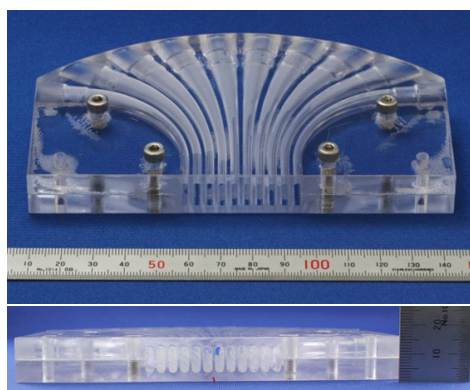


Fig.4 Acoustic tube (10 elements)

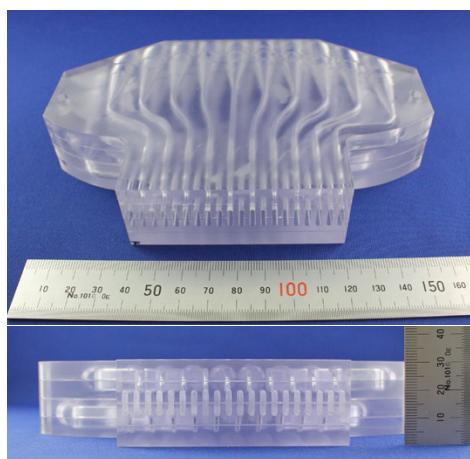


Fig.5 Acoustic tube (20 elements)

また、加藤らは素子数を増やした 20 素子音響管を作成し、更なる角度分解能の向上を実現させた³⁾。

しかし、先行研究での音響管は超音波素子単体に対して、体積比にして数千倍もの大きさがあることから、I-PENTAR のような小型ロボットに搭載するには大き過ぎる。超音波素子や音

響管等を小型にすることは、搭載スペースの削減や軽量化等といった利点が得られる。以上のことより、本稿では超音波フェーズドアレイ装置の小型化について検討する。

2. センサシステム

2.1 Phased Array

Phased Array とは、センサ素子を平面上に並べて配置し、各素子への入力信号に位相差を与えることで、超音波ビームの照射方向を制御する方法である。位相が一致し強め合う角度方向では、強い超音波ビームが発生するため、指向性を鋭くすることが可能である。

また、信号の位相差を制御することで超音波ビームの方向を容易に制御することができ、周囲環境のスキャン時に装置の向きを変えるような機械的な動作の必要がなく素早い探査が可能となる。

センサ素子を配置したアレイを作成し、構成する全ての素子が同じ指向性 $G(\theta)$ を持つと仮定すると、 θ_0 の方向に超音波ビームを発生させる場合のアレイ全体の指向性 $F(\theta)$ は以下のように得られる。

$$\begin{aligned} F(\theta) &= G(\theta) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jnkd(\sin\theta - \sin\theta_0)} \\ &= G(\theta)E(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 k は

$$k = \frac{2\pi f}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

また、各パラメータを Table2 に示す。

式 (1) において、 $E(\theta)$ は Array Factor と呼ばれ、照射角度及び素子の配置によって決まる指向性である。

2.2 Grating Lobe

Phased Array では素子の配置の仕方によっては超音波が数周期ずれて重なり合ってしまう角

Table 2 Phased Array variables

Symbol	Description
a_n	Array-amplitude taper
n	Element number
d	Distance between sensors
θ_0	Target direction
f	Operating frequency
v	Velocity of sound
λ	Wavelength

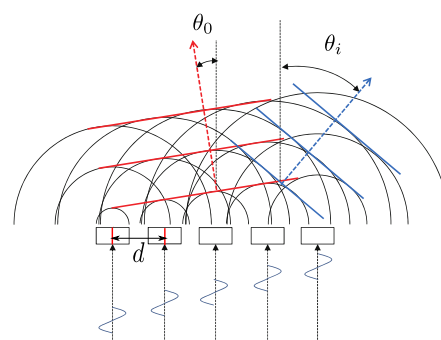


Fig.6 Grating Lobe

度ができてしまう。それによって Fig. 6 に示すような照射したい角度 θ_0 とは別の角度に Grating Lobe と呼ばれる強い超音波ビームが発生する場合がある。Grating Lobe が発生する角度 θ_i は以下のように得られる。

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\sin\theta_0 \pm n \frac{\lambda}{d} \right) \quad (3)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$-90^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ, \quad -90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$$

式 (3) より Grating Lobe の発生しないための条件として、以下の式が得られる。

$$1 < \left| \sin\theta_0 \pm n \frac{\lambda}{d} \right| \quad (4)$$

また、 $-90^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ$ であることに注意すると、さらに以下の式が得られる。

$$d < \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

3. Grating Lobe の抑制手法

3.1 小型素子の採用

装置の小型化を検討するにあたり、従来用いられていた素子よりも小型の素子を採用した。

新たに採用した超音波素子の外観及び特性を Fig. 7 及び Table 3 に示す。

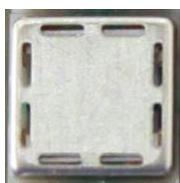


Fig.7 Ultrasonic sensor(MA40H1S-R)

Table 3 Specification of MA40H1S-R

Item	Value	Unit
Height(Width)	5.2	[mm]
Depth	1.15	[mm]
Operating temperature range	-20 ~ 60	[]
Center frequency	40	[kHz]
Directivity	80	[deg]

Made by Murata Manufacturing Co., Ltd.

従来の素子が直径 9.9[mm] なのに対して、本素子は縦・横 5.2[mm] であるため、素子自体の大きさを小さくすることはできた。

しかし、気温 25[], 40[kHz] の条件下での空中音波の波長は約 8.7[mm] であるため、素子を隙間無く並べても式 (5) を満たせず、Grating Lobe が発生してしまう。

3.2 スイープ角度の制限と配置パターン

第 3.1 節で示した MA40H1S-R では、式 (5) を満たすことができなかった。そのため、本節では音響管とは別の Grating Lobe 抑制手法を 2 つ述べる。

3.2.1 スイープ角度の制限

まずはじめに、式 (4) における照射角度 θ_0 に着目する。式 (4) において、照射角度 θ_0 は $-90 \sim 90[\text{deg}]$ 内での任意の角度として扱われており、その上で式 (5) が導き出されていた。

ここで、超音波ビームで空間をスキャンする際のスイープ角度に制限を設け、 θ_0 はある制限された範囲内での角度であると仮定する。すると、素子間隔が式 (5) を満たさずとも、Grating Lobe を回避できる。

3.2.2 超音波素子の配置パターン

次に、同式内の d に着目した手法について述べる。本論文で提案する手法では素子をずらして配置することで、素子間隔が式 (5) を満たすようにする。これにより、素子間隔を一直線上に配置した場合よりも短くできるため、Grating Lobe の抑制が期待できる。

次節以降はこちらの配置パターンによる Grating Lobe 抑制手法について検討し、素子をずらすことによる指向性への影響も調査していく。

3.3 作成したアレイ

第 3.1 節で採用した素子を用いてアレイを作成した。作成したアレイを Fig. 8 に示す。素子間隔がより小さくなるように素子の配置パターンには、千鳥模様を採用した。

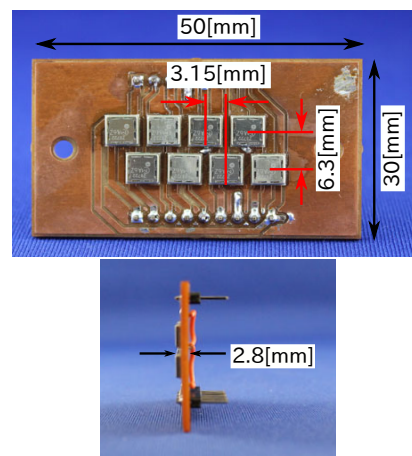


Fig.8 Sender device in staggered array

4. アレイの指向性

4.1 測定方法

作成したアレイの指向性を測定する実験を行った。実験装置を Fig. 9 に示す。送信器を $-90 \sim 90[\text{deg}]$ の範囲 ($5[\text{deg}]$ 刻み) で回転させ、受信器ではマイクロフォンの電圧値をオシロスコープで読み取る。以上の試行を 3 回繰り返し、その平均値で指向性を算出した。

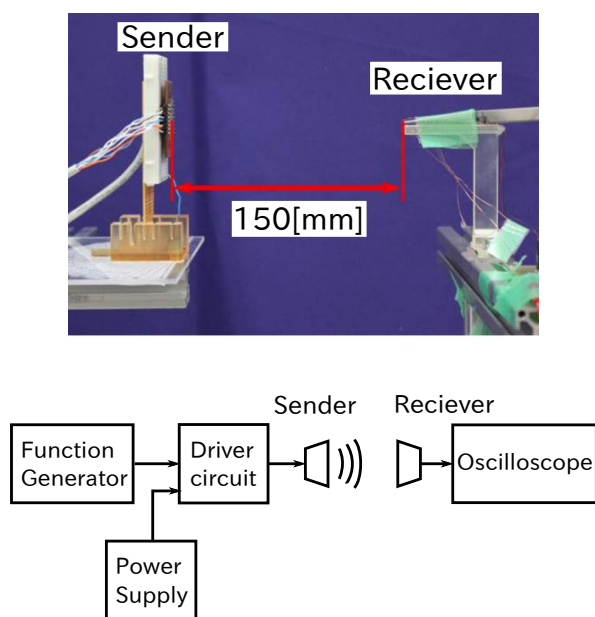


Fig.9 Experimental setup

また、送信素子の駆動電圧は $6.6[\text{V}_{\text{p-p}}]$, $40[\text{kHz}]$ の矩形波のバースト波とした (Fig. 10)。

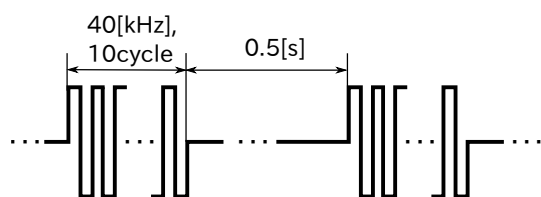


Fig.10 Burst wave

4.2 横方向及び縦方向の指向性

千鳥配置アレイの横方向及び縦方向の指向性の測定結果をそれぞれ Fig. 11 , Fig. 12 に示す。

なお、理論値は式 (1) を用いて算出し、各定数は Table 4 に示す値を用いた。

Table 4 Condition of theoretical values

Symbol	Horizontal		Vertical	
	Value	Unit	Value	Unit
n	8	[mm]	2	[mm]
d	3.15	[mm]	6.3	[mm]

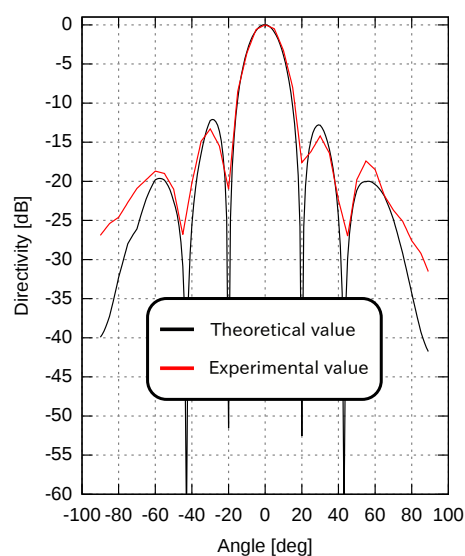


Fig.11 Directivity of the horizontal direction

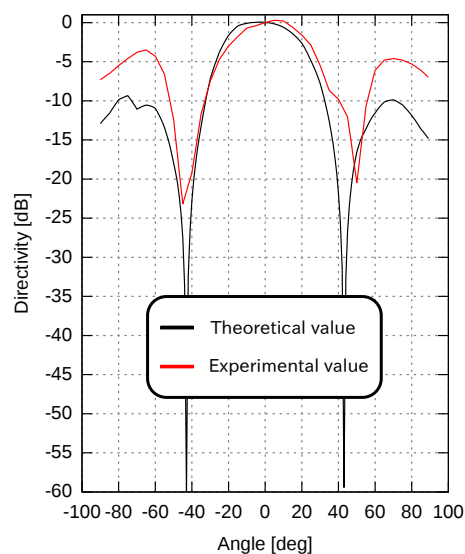


Fig.12 Directivity of the vertical direction

4.3 考察

横方向及び縦方向の指向性は理論値とほぼ一致する結果となった。このことから、横方向に関しては素子間隔 3.15[mm] で一直線上に 8 素子を並べたアレイに、縦方向に関しては素子間隔 6.3[mm] で一直線上に 2 素子を並べたアレイにみなせることが分かる。

また、縦方向の指向性に関して、 $\pm 40[\text{deg}]$ 付近にノッチが見られた。照射できる超音波が小さくなってしまふ角度方向がある場合、その角度方向における探査が困難になる可能性が生じる。したがって、 $\pm 40[\text{deg}]$ 付近でも探査が可能となるように指向性の改善させる。

5. 指向性の改善

5.1 音響キャップ

アレイの縦方向の指向性を改善させるために音響キャップを作成した (Fig. 13)。出口穴の形状及び幅は、先行研究において用いられていた寸法を採用した⁵⁾。

また、音響キャップの断面図を Fig. 14 に示す。

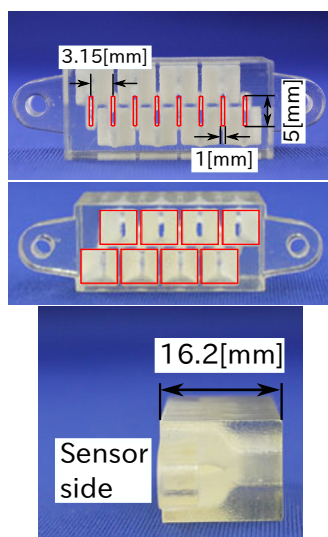


Fig.13 Acoustic cap

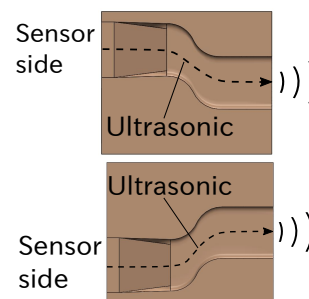


Fig.14 Cross sectional view of acoustic cap

5.2 改善後の指向性

第 5.1 節において作成した音響キャップを Fig. 15 のようにアレイに装着し、横方向及び縦方向の指向性を測定した。なお、送信器と受信器の距離は第 4 章と同じ 150[mm] である。

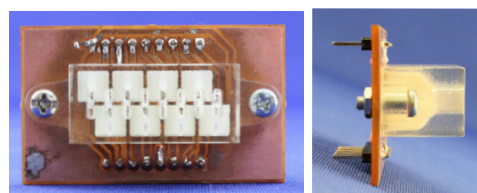


Fig.15 Sensor array with acoustic cap

測定結果をそれぞれ Fig. 16, Fig. 17 に示す。さらに、音響キャップの装着前後を比較したグラフを Fig. 18 及び Fig. 19 に示す。

横方向に関しては、音響キャップの装着前後でどちらも理論値とほぼ一致し、装着による変化がほぼ見られなかった。また、縦方向に関しては、 $\pm 40[\text{deg}]$ におけるノッチが無くなり、全角度方向に強い超音波が出るように改善された。

以上のことから、音響キャップを装着することによって、横方向の指向性を変化させることなく、縦方向の指向性を一度に広範囲に超音波を照射できるように改善させることができた。

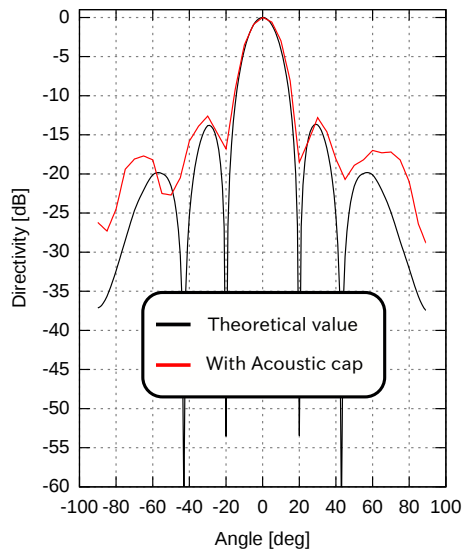


Fig.16 Directivity of the horizontal direction with acoustic cap

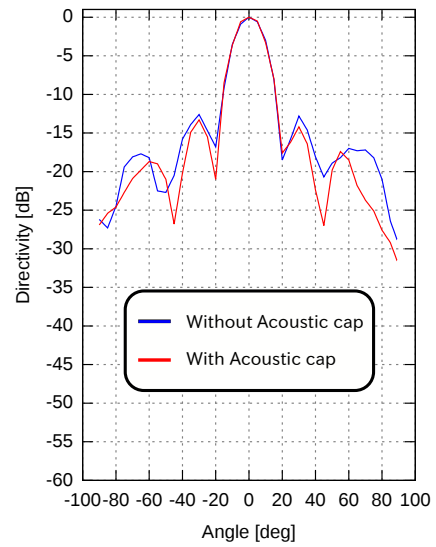


Fig.18 Comparison in the horizontal direction

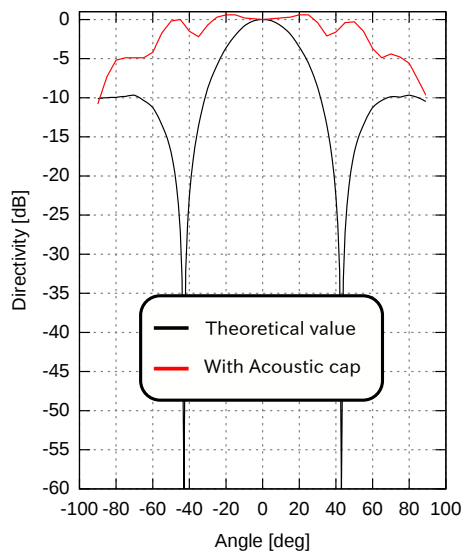


Fig.17 Directivity of the vertical direction with acoustic cap

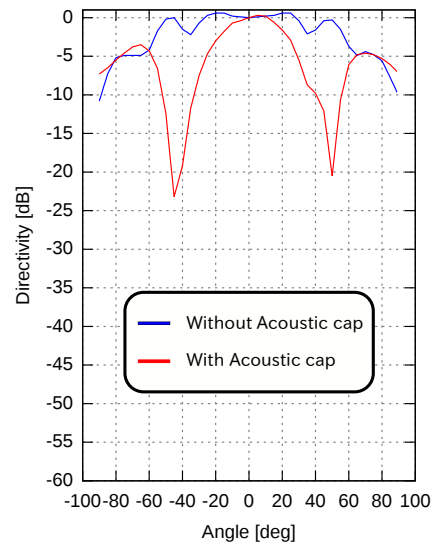


Fig.19 Comparison in the vertical direction

6. Grating Lobe 抑制の検証実験

本研究で作成したアレイでは Grating Lobe の発生を抑制するために、素子の配置パターンを千鳥配置とした。

本章では、理論通りに Grating Lobe が抑制されるかを検証した。

6.1 実験装置と実験方法

実際にアレイからの超音波ビームを 10, 20, 60, 90[deg] 方向にスイープさせ、Grating Lobe が発生しないかを測定した。また、音響キャップを装着した場合での測定も同様の条件で行った。

また、アレイの信号入力に用いた駆動回路を Fig. 20 に示す。シフトレジスタ (74AC164) を用いることによって、入力信号における位相差を制御した。

ここで、シフトレジスタの動作について説明する。シフトレジスタはクロックパルスの周波数に応じた時間差で、入力信号を隣の端子へと順々に出力していく素子である。なお、CLR 端子をグランドに接続することで端子からの出力信号を初期化できる。

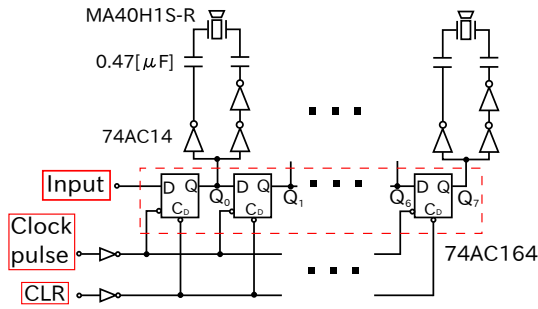


Fig.20 Phased signal generator for the sender

ここで、入力信号の位相差を ϕ とすると、 f_0 を 40[kHz] としてクロックパルスの周波数 f_c は式 (6) で与えられる。

$$f_c = \frac{2\pi}{\phi} f_0 \quad (6)$$

位相差 ϕ と照射角度 θ_0 が、 $\phi = \theta_0$ の関係であることに注意する。したがって、Fig. 6 中の Input 端子には Fig. 10 のパルス波を入力し、Clock pulse 端子には、式 (6) で与えられる f_c を入力する。

6.2 測定結果と考察

実験結果を以下に示す。音響キャップを装着しない場合の結果が Fig. 21、装着した場合の結果が Fig. 22 である。なお、両図において 90[deg] 方向にスイープさせた際の理論値及び測定値がそれぞれ 90[deg] で最大値を取っていない。この理由としては、緑線で示した素子単体の指向性を基準として、式 (1) よりアレイの Array Factor と素子単体の指向性との積がアレイ全体の指向性となるためである。

音響キャップを装着した場合としない場合のどちらの場合も、Grating Lobe は発生しなかつ

た。また、スイープさせた場合も指向性の概形が理論値とほぼ一致した。

以上より、アレイを千鳥配置にすることで Grating Lobe を抑制することができた。このことから、素子をずらして配置することは Grating Lobe の抑制に有効である可能性がある。

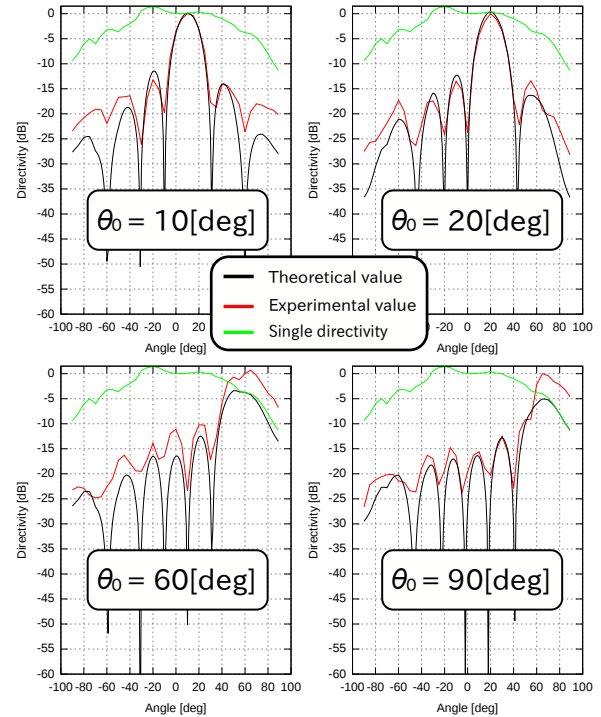


Fig.21 Directivity with phased signal (without acoustic cap)

7. まとめと今後の予定

本稿では、まず Phased Array の概要及び Grating Lobe の抑制手法を取り入れた小型の超音波アレイを作成した。その指向性を測定した結果、横方向及び縦方向の指向性はそれぞれ理論値とほぼ一致した。しかし、縦方向の指向性は ± 40 [deg] 付近にノッチが見られた。

そこで、縦方向の指向性を改善させるために音響キャップを作成した。音響キャップを装着することで、横方向の指向性を変化させることなく、縦方向の指向性を改善させることができた。

また、超音波ビームをスイープさせ、実際に

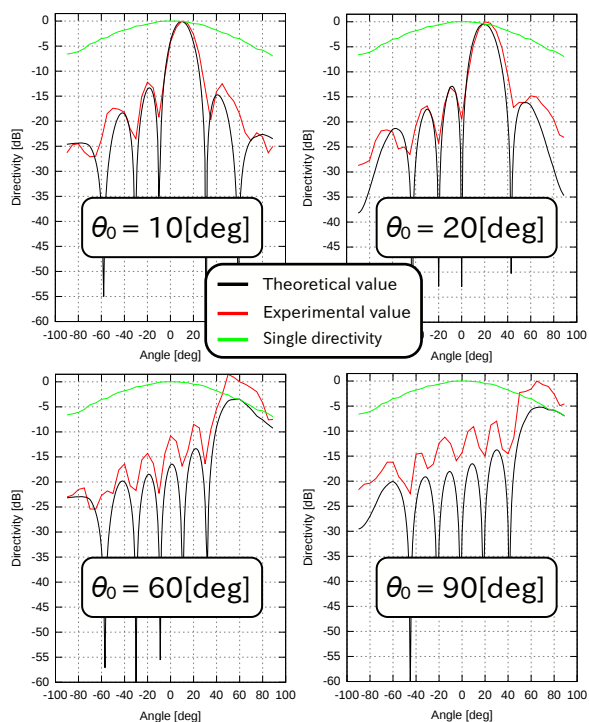


Fig.22 Directivity with phased signal (with acoustic cap)

Grating Lobe が抑制されているかを検証した。測定の結果，Grating Lobe は抑制され，指向性も理論値とほぼ概形が一致した。このことから，素子をずらして配置することは Grating Lobe の抑制に有効である可能性があることが分かった。

今後の予定としては，千鳥配置とは別の配置パターンである Zigzag 配置のアレイの指向性についての検討を行う。また，音響キャップの内部形状や出口形状等の特性について調査していく。

参考文献

- 1) 近藤修平, Luis CANETE, 高橋隆行: マニピュレータを搭載した車輪型倒立振り子ロボットの制御 拡張状態オブザーバを用いたマニピュレータによる物体受け渡し制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 1P2-G03(2015)
- 2) 高橋隆行, 高橋亮介, 鄭聖熹: 超音波アレイセンサによる屋内環境障害物検知システム, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 1E36(2006)
- 3) 加藤正稔: 超音波センサによるフェーズドアレイのための 20 素子用音響管の基本特性, 福島大学卒業論文 (2012)

- 4) 陳華駿, 高橋隆行: 音響管を用いた超音波 Phased Array 装置の特性と改良, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 3P2-W05(2014)
- 5) 古宮佐希子, カニエテ ルイス, 高橋隆行: 超音波フェーズドアレイ装置のための音響管形状の改良-角度分解能向上のための検討-, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, A2A - M09(2017)