

超音波 Phased Array 装置のための音響管の改良 ～ 音響管の形状の検討 ～

Improvement of acoustic tube for ultrasonic phased array device ～ Study of the geometry of acoustic tube ～

古宮佐希子, CANETE Luis, 高橋隆行

Sakiko Komiya, 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), 音響管 (acoustic tube), 指向性 (Directionality)

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
古宮佐希子, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: komiya@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒言

近年, 人間生活を支援するためのロボットについて多くの研究が行われている。当研究室では人間共存型ロボット I-PENTAR の研究を行っており, 屋内での荷物運搬などの仕事を想定している。荷物や障害物を検出したり, 周囲の環境を認識したりするためには位置センサが必要である。

想定しているような障害物探査では一般的に非接触型の位置センサが用いられており, 主に光学式や超音波式等が挙げられる。光学式は高速, 高分解能といった利点があるが鏡面や透明な物体の検出は難しく, また光の影響を受けやすい。一方超音波式は応答速度が遅く温度や風の影響を受けるが, 鏡面や透明な物体の検出も行える。したがって, 光学式と超音波式を同時に認識に用いることで各センサの欠点を補い, 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を用いた手法に着目する。本研究で用いている超音波センサを Fig. 1 に示す。このセンサは指向性が低いため広範囲を探查できるが, 周囲の状況や障害物の位置を正確に認識するためには角度分解能が高いことが求められる。しかし, 指向性が高くなると探查範囲が狭くなり, 広範囲の探查が難しくなる。

そこで, 広範囲を高い角度分解能で探查するために, 高橋らは指向性を高くでき, かつ電子的な操作によって超音波の向きを変えることができる Phased Array と呼ばれる手法を用いて探查を行うことを提案した¹⁾。Fig. 2 に Phased Array の概略を示す。Fig. 2 のように複数のセンサ素子で位相をずらした信号を入力することにより任意の方向に指向性が高い超音波ビームを発生させることができる。先行研究では Phased Array を行うために, Fig. 3 のような 10 素子音

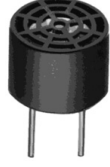


Fig. 1: Ultrasonic sensor

Table 1: Description of ultrasonic sensor

Model number	MA40S4R , MA40S4S
Diameter	9.9[mm]
Operating temperature range	-40 ~ 85[]
Center frequency	40[kHz]
Directionality	80[deg]

響管を用いていた。探査において角度分解能や左右対称性等を向上させるため、センサ素子の数や素子個体差等の検討を行ってきた^{2, 3)}。しかし、音響管形状については検討が行われていなかった。まず、音響管形状の検討するにあたり、出口形状について着目するために単素子音響管を作成した。本稿では出口形状決定のための予備実験について述べる。

2. センサシステム

2.1 Phased Array

Phased Array とは前章で述べたようにセンサ素子を平面上に複数個並べて配置し、個々のセンサ素子への入力に位相のずれを与えることにより発生させる超音波の指向性を制御する手法である。位相が一致する方向では強い超音波ビームが発生し、指向性を鋭くすることが可能である。また、位相差を制御することによりビームの方向を変えられるため、機械的な動作が不要なく素早い探査が可能となる。

アレイ (センサ素子の配列) を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

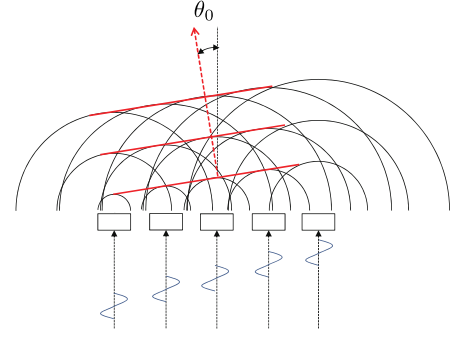


Fig. 2: Phased array

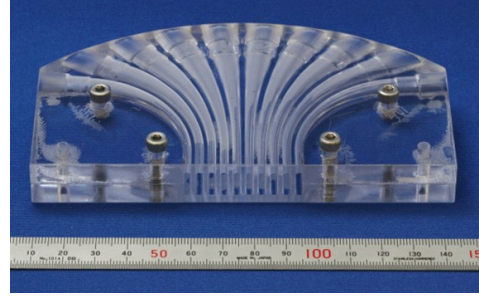


Fig. 3: 10 elements acoustic tube

イ全体の指向性 $F(\theta)$ は、

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

となる。ここで、

$$k = \frac{2\pi f}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{2}$$

Table 2: Phased Array

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

である。式 (1) において $E(\theta)$ は Array Factor と呼ばれ、素子の配置で決まる指向性である。

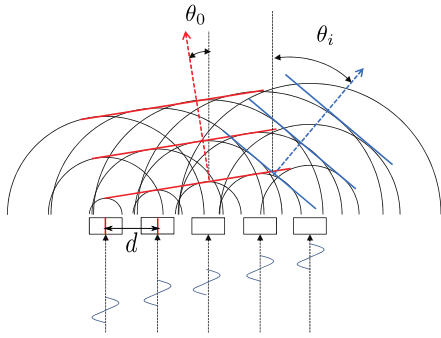


Fig. 4: Grating lobe

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い, Fig. 4 に示すように, 目標角度 θ_0 と別の角度に Grating Lobe と呼ばれる強い超音波ビームが発生する場合があります。Grating Lobe が発生する方位 θ_i は,

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

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

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

であり, ここから Grating Lobe が発生しないための条件として,

$$d < \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

となることがわかる。Phased Array を探査に用いる場合, Grating Lobe は誤検出の原因となるので, 式 (4) を満たす必要がある。

2.3 音響管

現在用いているセンサ素子の場合, 波長 λ は気温 20[] のとき約 8.6[mm] である。したがって, 現在用いているセンサ素子では式 (4) を満たすように配置するのは困難である。そこで, センサ素子を並べるだけでなく, 隣り合う出口の間隔を式 (4) の条件を満たすように音響管を用いる。

3. 音響管形状の検討

音響管形状検討において, 音響管の特性は出口形状の影響を受ける可能性があるが, 今までは検討されていなかった。そこで, 本章では出口形状検討のための予備実験について述べる。

3.1 音響管出口形状決定のための予備実験

本節では音響管の出口形状を検討するために単素子音響管を作成し, 出口形状決定に有用であるか検証した結果を述べる。検証方法として, Phased Array を用いて指向性を測定した結果と Array Factor ならびに Fig. 3 に示す 10 素子音響管との比較を行う。

Phased Array を用いて指向性を確認するためには, 2 つ以上の素子を使用しなければならない。しかし, 2 つ以上の素子を用いると出口ごとに素子個体差があるため, 出口単体の指向性がそれぞれ異なったり, 出口の形による内管の形状が変わったりするため比較検討を行うことが難しい。そこで, 1 つの素子を用いた Phased Array を構成可能か確かめるため, 単素子音響管を設計し実験を行った。

3.1.1 単素子音響管

Fig. 5 に設計した単素子音響管を示す。用いるのは 1 つのセンサ素子であるが, 超音波は 2 つの出口から射出されるので超音波センサを 2 つ用いた Phased Array と同様な特性を得られると考えられる。単素子音響管が Phased Array と同様な特性を得ているか確認するために, 出口間隔としてグレーティングローブが発生しない半波長以下となる 4[mm] と比較のために半波長以上となる 12[mm] の 2 種類の出口部を作成した。また出口部はあらゆる出口形状を検証できるように, 取り外し可能とした。内管の長さ, 出口形状と面積は比較のために現在ある 10 素子音響管 (Fig. 3) と同様に設計した。また, Fig. 6

に示す 2 種類の内管形状の音響管を作成し比較した。1 つ目は Fig. 6 (a) のように円柱状である。2 つ目は Fig. 6 (b) のように超音波の直径から出口部に向かって広がっている形状である。本稿では前者を円柱型，後者をロフト型と呼ぶ。

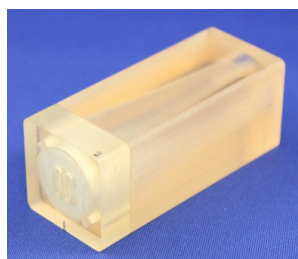
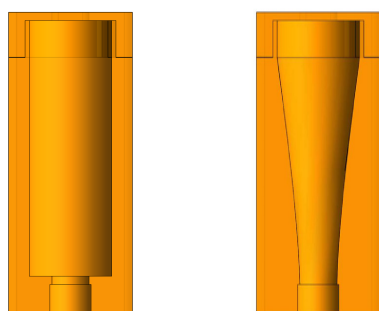


Fig. 5: Single sensor acoustic tube test apparatus



(a) Cylinder type (b) Loft type

Fig. 6: Cross section of single sensor acoustic tube test apparatus

3.1.2 実験方法

まず，実験装置を Fig. 7 に示す。送信側を $-90[\text{deg}]$ から $90[\text{deg}]$ の範囲を $5[\text{deg}]$ ごとに回転させ，受信側の電圧値を読み取った。これを 3 回ずつ測定した。また，周波数 $40[\text{kHz}]$ ，デューティ比 5 % のパルス波を入力信号としている。

3.2 予備実験結果

ロフト型と円柱型を用いて測定した電圧値とその指向性を Fig. 8，Fig. 9 に示す。Fig. 8 からロフト型よりも円柱型の方が電圧値が高いことがわかった。Fig. 9 から，円柱型の方が指向

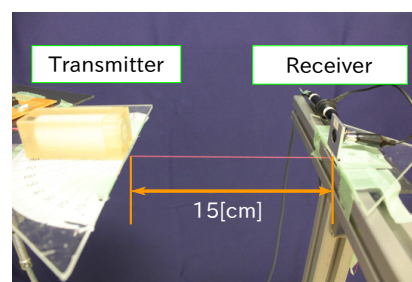


Fig. 7: Measurement system

性は左右対称的であった。したがって出口形状実験を行うためにはロフト型よりも円柱型が適当であると考えられる。また，グレーティングローブの抑制が確認できた。しかし，ロフト型と円柱型のどちらの場合においても $0[\text{deg}]$ において超音波の強度が低くなる現象が現れた。本来なら $0[\text{deg}]$ において最も強度が高くなるはずである。

次に円柱型を使用し，出口間隔が $12[\text{mm}]$ の出口部品を用いて測定したところ Fig. 10 に示す結果が得られ，予想通り $0[\text{deg}]$ 以外の角度にも強い超音波ビームが発生していた。したがって，単素子音響管は 2 つの素子を用いた Phased Array と同様な特性を得ていることを確認できた。

3.3 考察

$4[\text{mm}]$ の出口間隔において $0[\text{deg}]$ の時に超音波の強度が下がった原因として以下のことが考えられる。

- 出口部の厚さが薄い (現在 $2[\text{mm}]$) ために超音波が射出される範囲が大きくなってしまっている
- 内管内の反射の影響により超音波があらゆる角度で射出している

Fig. 11 に示すように，出口部の厚さが薄いほど反射した超音波が広範囲に射出される。したがって，出口部の厚さを厚くするもしくは，内

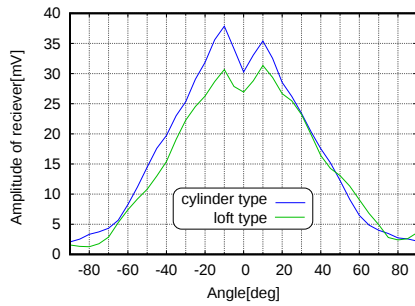


Fig. 8: Amplitude of receiver(cylinder and loft type)

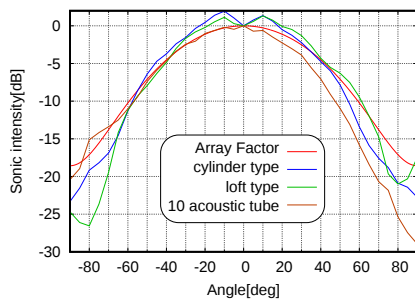


Fig. 9: Directionality (4mm distance between exits)

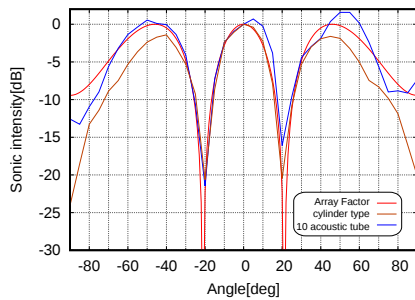


Fig. 10: Directionality (12mm distance between exits)

観での超音波の反射を抑制すれば 0[deg] の特性を改善できると考えられる。

3.4 再実験結果

3.3 で述べた改善策を踏まえて再実験を行った。まず、4[mm] と 10[mm] の出口部品を作成し検証した。Fig. 13 に出口部の厚さを変えて実験を行った結果を示す Fig. 13 より、出口部を厚くしたことにより 0[deg] の角度において強度が下がっている現象が改善された。次に Fig. 12 のように単素子音響管内部の壁面にフェルトを

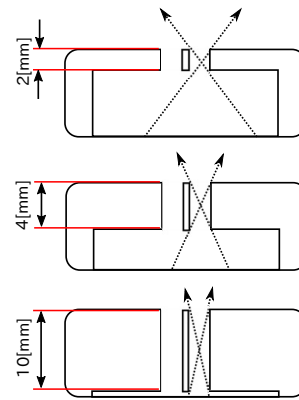


Fig. 11: Different exit wall thicknesses

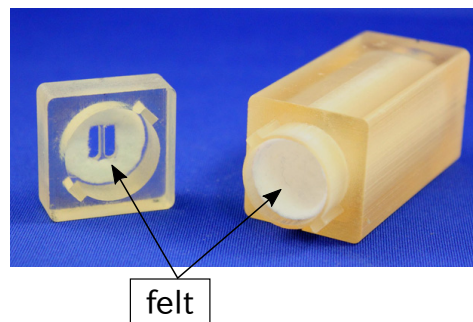


Fig. 12: Tube lined with felt

取り付けした単素子音響管で実験を行う。Fig. 14 に実験を行った結果を示す。フェルトをつけることにより指向性が改善されたことを確認できた。

次にフェルトの有無による結果を厚さごとに比較したグラフを Fig. 15 に示す。Fig. 15(a) に示している通り、厚さの変化のみの場合よりフェルトを取り付けた場合の方が指向性が Array Factor に近いことがわかる。したがって、内管での反射を防止できれば、目標とする Array Factor に近い結果を得られることが確認できた。

4. 結言

本稿では、Phased Array の概要と出口形状決定のために単素子音響管を作成し、出口の厚さおよび内管での反射の影響について述べた。予備実験の結果、今後の出口形状決定において単素子音響管の出口部を厚くする、あるいは内部

の反射を抑えることにより、単素子音響管を用いて出口形状を検討できる可能性を示した。また、単素子音響管にフェルトを取り付けたことにより指向性の改善が見られたことから、内管での反射を抑えることで10素子音響管においても指向性が改善する可能性があると考えられる。

今後は作成した単素子音響管を用いて出口形状の検討を行う。また、反射を抑えるため吸音加工の検討も行い、全体的な音響管形状の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 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)

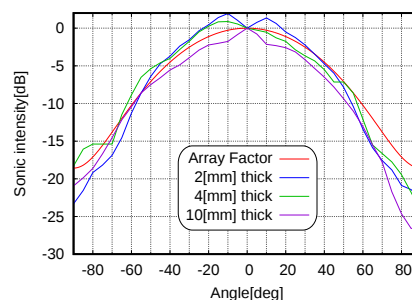


Fig. 13: Directionality (different exit wall thicknesses)

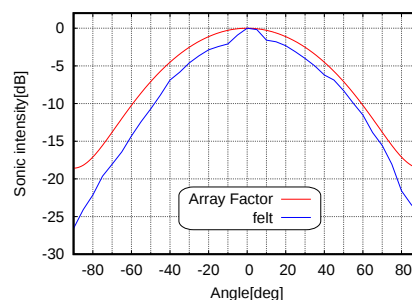
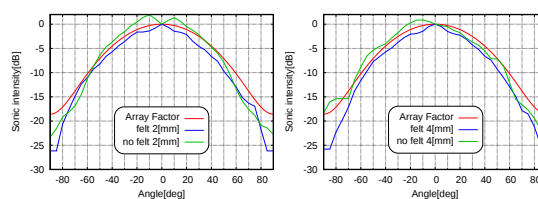
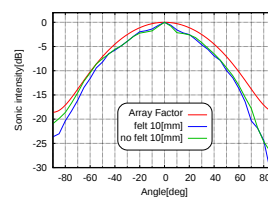


Fig. 14: Directionality (tube lined with felt)



(a) 2[mm] thickness (b) 4[mm] thickness



(c) 10[mm] thickness

Fig. 15: Comparison of directionalities