

# 安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第2報）

## － 超音波フェーズドアレイソナー －

田畑 克彦      平湯 秀和      久富 茂樹

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Wheelchair (2<sup>nd</sup> Report)

### - An Ultrasonic Phased-Array Sonar -

Katsuhiko TABATA    Hidekazu HIRAYU    Shigeki KUDOMI

**あらまし** 電動車いすは高齢者の生活を支えるツールとして広く利用されているが、加齢による認識力の低下による操作ミスの原因とする障害物、歩行者または車との接触などの事故が多発している。本研究では、事故の危険を検知するための安全装置のセンサとして、障害物の有無や接近を広域に検出するソナーを開発する。通常の障害物検知用のソナーよりも検知距離を拡大するため、フェーズドアレイ技術を用いて任意の方向へ強い超音波を送信し、検出対象である障害物からの反射信号の信号対雑音比を大きくする。本年度は、超音波ビームの強度と形状を変えて障害物からの反射波形を観測し、障害物を効率よく検出するための設計指標を得た。この設計指標に基づき、超音波導波管アレイを開発し、所望の超音波ビームが形成されていることを確認した。

**キーワード** 電動車いす, 安全装置, 障害物検出, 超音波, フェーズドアレイ

### 1. はじめに

高齢者が活動的な生活を送る上で、有用なツールとして利用されている電動車いすであるが、障害物との衝突、歩行者や車との接触などの事故が後をたたない。我々は、電動車いすの運転中に、障害物の接近や危険箇所をセンサで検知し、安全な走行を実現するための安全装置を開発している。この安全装置は、将来的に共同研究先である県内企業の電動車いすへ搭載し、安全装置付きの電動車いすとしての普及を目指している<sup>[1],[2]</sup>。なお、開発する安全装置付きの電動車いすを電動ビークルと記述する。

本稿では安全装置のためのセンサとして、超音波を使用した障害物検出センサ（以降、「超音波ソナー」と記す）の研究開発について報告する。一般的な超音波ソナーは、送信素子と受信素子の組合せ、または1つの素子で送受信を兼ねた構成であり、送信素子から超音波を送信後、障害物からの反射を受信素子で検出することで、伝播領域内にある障害物の有無と距離を検出する。現在はFA用途や自動車の後方にある障害物を検出する製品が市販されており、その有用性は明らかである。

本電動ビークルでは、ショッピングモールや公共施設などの屋内走行も想定している<sup>[3]</sup>。このため、超音波ソナーは、カメラなどの光センサでは検出困難なガラス製の自動扉やショーウィンドウなどの透明な障害物も検出でき、さらに屋外走行時も昼夜を問わず安定した検出が可能であるため、安全装置の一つとなりえる。本ビークルのような移動装置に搭載する超音波ソナーでは、障

害物の検出可能距離が長いほど好ましく、現状では3m程度に設定している。しかしながら、超音波は空気中での伝播減衰が大きいために、市販されている通常のソナーでは障害物を検出できる距離が1.5m程度と短い。また、電動ビークルが屋内を走行するシーンでは、比較的高い頻度で移動方向が大きく変化することが想定されるので、どの方向に障害物があるのかを広範囲に検出する必要がある。さらに、電動ビークルは自動車よりも小型なため、コンパクトにする必要がある。

これらの要求を解決するために、本研究ではフェーズドアレイ技術を用いた超音波フェーズドアレイソナーを開発する。フェーズドアレイ技術とは、複数の送受信素子の位相を制御することで、特定の方向に強い合成送受信波を形成できる技術である<sup>[3]</sup>。これにより、高いSN比と方位方向の分解能を得ることができるので、上述の課題を解決できる見込みがある。なお、フェーズドアレイ技術は送受信時に適用されることが多いが、本研究ではシステムをできるだけ簡略化するため、送信時のみに本技術を適用し、強い信号送信から高いSN比の反射信号を得ることを課題解決のアプローチとする。本年度はこれまでに開発した超音波フェーズドアレイ測位システム<sup>[3~6]</sup>のモジュールを用いて障害物検出実験を行った。この実験により、超音波ビーム強度と形状を変えて障害物からの反射信号を観測した結果、障害物を効率よく検出するための設計指標を得た。この設計指標を満たすために、超音波導波管アレイを開発し、所望の超音波ビームが得られていることを確認したので報告する。



図1 超音波フェーズドアレイソナー実験機

表1 センサ素子と素子アレイの仕様

超音波センサ素子		素子アレイ部	
製造者	日本セラミック株式会社	素子寸法	Φ9.95×7.0mm
型番	AT40-10PB3	送信部	
中心周波数	40kHz±1.0kHz	素子数	9 (3行3列)
送信音圧レベル	116 dB* Min. at 40.0kHz**	素子間隔	10.2mm
受信感度	-66.5 dB*** Min.	受信部	
指向性 (-6dB 全角)	±50°	素子数	2 (左右各1)
		素子間隔	101.6mm

\*0dB = 10V/Pa, \*\*入力電圧 = 10Vrms, \*\*\*実測値

## 2. 障害物検出実験

超音波フェーズドアレイ（以降、フェーズドアレイをPAと記す）ソナーの開発にあたり、効果的に障害物を検出するための傾向を障害物検出実験により把握し、そこから明らかとなる設計指標をもとに開発する。そこで、これまでに超音波PA測位システムで開発したソナーシステム<sup>4-6)</sup>を実験機として実験に用いて、障害物からの反射信号の傾向を把握した。

### 2.1 実験機の概要

図1は実験機の外観である。本実験機は、中央の送信素子アレイとその両側の受信素子から構成される。使用した送受信素子は日本セラミック株式会社の型式AT40-10PB3で、一般的な空中超音波素子である。表1は使用した素子と素子アレイ部の主な仕様である。

超音波PA送信を行う超音波素子アレイは、図1のように3行3列の送信素子で構成し、駆動する超音波素子数を1, 3, 9個に変更することによって、超音波信号の強度とビーム形状を変更することができる。表2は駆動素子数と信号強度ならびに3Dのビーム形状の関係である。また、ビームの照射方向は隣り合う素子間の駆動タイミングを制御することで変更できる<sup>4,5)</sup>。本実験では±60°以内の横方位方向の領域を検出するために、1回の障害物の検出につき、表3に示す7つのビーム形状による走査を行う。図2は表3におけるNumber0および2において実測により得られた横方位方向のビーム形状である。同図の駆動素子数Dは9であり、表3のメインビームとサイドビームが出現する横方位角の理論値とほぼ一致している。また、Number0の形状は、表2の数値シミュレーションによる3Dビーム形状を横方位の平面で切断した際の断面形状

表2 駆動素子数Dと超音波ビーム形状との関係

駆動素子数D	1	3	9	備考
駆動素子位置				○ 駆動する素子 ● 駆動しない素子
信号強度	弱(1.0倍)	中(2.8倍)	強(6.3倍)	( ) 内は開放素子1個に対する最大利得
ビーム形状	広い	縦長	狭い	
正面照射時の3Dビーム形状				

表3 ビーム形状(D=3および9)

Number	メインビーム	サイドビーム
0	0°	-60°, 60°
1	10°	-40°
2	20°	-30°
3	30°	-20°
4	40°	-10°
5	50°	-5°, -68°
6	-50°	5°, 69°

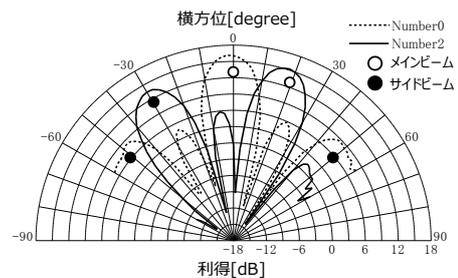


図2 Number0とNumber2の2Dビーム形状(D=9)

と類似している。ここで、サイドビームとは、メインビーム以外の方向に対しても素子間の位相が1周期ずれることによって、極大値を示すビームであり、波長よりもアレイ間隔が長い場合に発生する<sup>3)</sup>。気温20℃における周波数40kHzの超音波の波長は8.6mmであり、本実験機の素子間隔10.2mmが波長よりも長いことが起因して発生している。現状ではこのサイドビームがある状態で障害物検出を試みる。

障害物で反射した信号は、左右受信素子で受信した後にはオペアンプで増幅され、包絡線検波などの信号処理が行われる。そして信号処理後の信号をデジタルオシロスコープで観測する。なお、送信する超音波信号は搬送周波数40kHzでパルス幅1.6msで振幅変調された単パルス信号を用いている。

### 2.2 障害物検出実験

図3(a)は実験機の設置図である。実験機は床面より高さ600mm、水平方向から35°下向きに設置した。下向きに設置した理由は、床面の段差を検出することを想定したためである。使用した障害物は、壁を想定した寸法1800×450mmの長机と、子供を想定したφ210×1200mmの円柱ポールを使用した。図3(b)および(c)はそれぞれの実験の

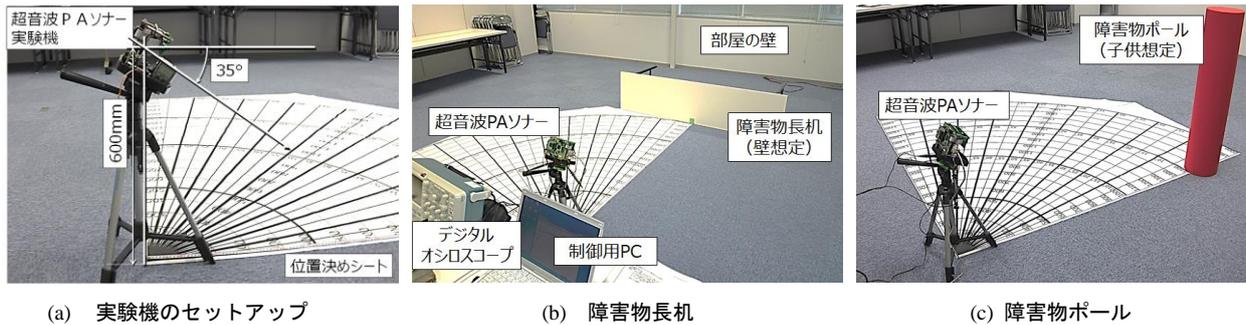


図3 障害物検出実験

ようすである。各障害物の位置は、共同研究者と協議した初期段階の目標条件である距離1500mm以内、方位角 $\pm 60^\circ$ 以内に存在する壁または子供を検出することを前提とし、距離を500mmから2000mmまで500mm刻み、方位を0deg, -30deg, -60degとした。

### 2. 3 実験結果

#### 2. 3. 1 反射信号波形の観測と考察

図4は障害物の位置をソナーから1500mmの正面に設置した時に、表2における駆動素子数 $D=3$ で超音波ビームを照射した時の左右受信素子の受信信号である。デジタルオシロスコープを使用しているため、横軸は通常は経過時間となるが、計測時間内での短時間の音速は一定であることから、経過時間が障害物から反射される信号の往復時間と考えると、以下の式によって距離 $l$ に変換できる。

$$l = c \cdot t_{osc} / 2 \quad (1)$$

ここで $c$ は音速[m/s]、 $t_{osc}$ は送信パルスの立ち上がりからの経過時間[s]である。本変換により、反射源までの距離の把握が容易となる。

図4の反射信号について考察する。最初に送信素子からの信号がそのまま回り込んで受信素子に到達する送信パルスが検出される。注目している障害物による反射信号は設置距離である1500mm付近に現れる。反射信号の形状は2つの極大値を示すが、最初の極大値が反射源からの直接反射成分であり、そのあとに続く極大値が床と障害物から構成されるコーナー部からの反射成分であると考えられる。図4(b)の障害物がボールである場合の直接反射成分が図4(a)の長机よりも強い理由は、表2のように超音波ビームが縦長であることに加え、ボールのような縦長形状であると反射面積が大きくなり反射効率が高くなるためと考えられる。縦長形状の障害物は人や木などの自然物をはじめ、電柱や街灯などの人工物も環境に多く存在することから、縦長形状のビームが有効である。次の極大値は床と障害物のコーナー部による2回反射により、超音波信号の入射方向に反射成分が戻る再帰性反射に近い現象により発生していると考えている。この性質は光学機器においてコーナーキューブまたはレトロリフレクターなどに応用されている。この反射

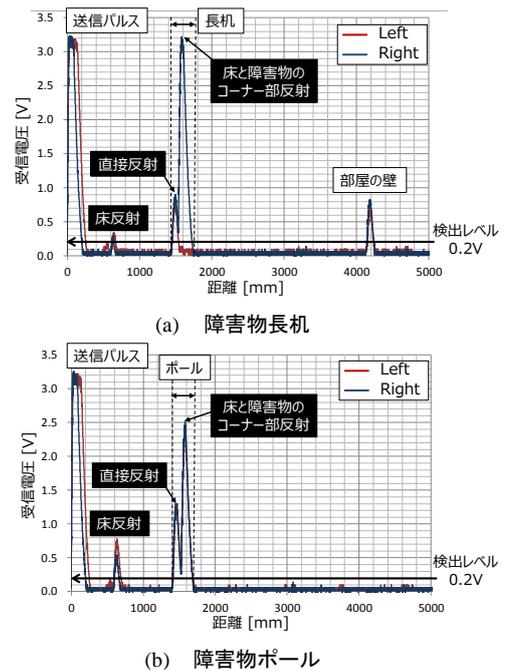


図4 観測波形(障害物位置1500mm正面)

成分が直接反射成分よりも安定してかつ強く、床面付近の近傍から遠方のどこかにある障害物のコーナー部からの反射成分を確実に捉えることから、縦長の形状のビームが有効である。

その他の反射源として、600mm程度の距離に検出されている。これは同図(a)(b)ともに観察され、障害物の位置を変えても出現している。この反射源はソナーの設置高さからも推測されるように、床面である。この事実は仮に600mm前方に障害物があったとしても同様の波形となるため、床(路)面からの反射と区別することは難しい。また、縦長形状のビームを使用することを考えると床面からの信号反射を抑えることは困難である。そこで、床反射成分は最初のパルス送信時間内に到達させることで、この問題を解消する。すなわち、ソナーの取付け高さをパルス幅内の床(路面)から300mm以内とし、300mm以上離れた距離にある障害物を検出することとする。

最後の反射源は図4(a)の長机の場合に検出され、4200mm程度の距離に存在する。この反射源は、図3(b)の実験部屋の壁である。したがって、建物の壁などの大きな構造物はかなり遠距離から検出可能である。図4(b)の

ようにポールのような縦長の障害物が部屋の壁の手前にあると、ポールに遮られて超音波が部屋の壁まで到達できないため、反射源として検出されていない。しかし、最も近い障害物が検出できれば良いので、これは問題にはならない。

2. 3. 2 障害物の検出結果

障害物を2.2項に述べた位置に配置し、表2のように駆動送信素子数Dを変更して、検出を判定した結果が表4である。判定方法は、障害物の各位置に対して表3に示した7つのビーム形状の超音波信号を送信(走査)し、図4の反射信号の観測データを取得し、0.2V以上の反射信号が得られた場合に障害物として検出しているとした。表中の”○”が左右受信素子ともに検出可,”△”がいずれかの一方の受信素子が検出可,”×”が両素子とも検出不可である。

本結果より、駆動送信素子数D=9の信号強度であれば、壁およびポールともに当初の目標である距離1500mm, 横方位角±60° 以内の障害物を検知できることがわかった。なお、検出が最も厳しい1500mm, -60° にある障害物を検出できたビーム形状は、表3のNumber0と6であり、この時の-60° 方向の最大信号強度は、実測値で開放素子の2.3倍程度であった。このため、今後の開発ではこの強度を目安にする。

2. 3. 3 方位角計測についての考察

前述の検出結果では反射信号の強度から存在の有無を判定したに過ぎない。実際には、超音波ビームは広がりを持つので、前述のように複数のビーム形状で反射信号が検出される場合がある。そこで、障害物の横方位角を計算するため、一般的に用いられる左右受信素子が受信する時間差dtを計測して、方位角を求めた。図5のように受信素子RとLが距離ℓ<sub>RL</sub>だけ離れている場合において、十分遠方にある障害物からの反射波と仮定すると、図5のような平面波としてとらえることができる。この時の横方位角θは以下の式によって求めることができる。

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \theta' = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}\left(\frac{d\ell}{\ell_{RL}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{d\ell}{\ell_{RL}}\right) \quad (2)$$

ここで、dℓは受信素子LとRの行路差であり、両受信素子の受信時間差dtとは以下の関係がある。

$$d\ell = c \cdot dt \quad (3)$$

図6は距離1500mm, 横方位角-30° に設置したポール位置を、観測データをもとに(2)式の横方位角θと2.3.1項の距離から、プロットした結果の一例である。ポール位置は実際よりも右に存在し、正面に存在すべき部屋の壁は左よりに計測されている。他の観測データからも、かなり計測位置がばらついていた結果となった。これは、反射源の形状と素材により、左右受信素子に到達する反射信号の振幅が異なってしまい、(3)式の受信タイミング差のばらつきが位置計測のばらつきとなって現れているためである。このことは、表4において、一方の受信素子だけが検出されることから確認できる。よって、安

表4 障害物検出結果

駆動素子数D	距離[mm]	障害物 壁			障害物 ポール		
		横方位角 [degree]			横方位角 [degree]		
		0	-30	-60	0	-30	-60
9	500	○	○	○	○	○	○
	1000	○	○	○	○	○	○
	1500	○	○	○	○	○	○
	2000	○	○	△	○	○	△
3	500	○	○	○	○	○	○
	1000	○	○	○	○	○	○
	1500	○	○	○	○	○	×
	2000	○	○	×	○	○	×
1	500	○	○	○	○	○	○
	1000	○	○	△	○	○	×
	1500	△	○	×	○	×	×
	2000	×	×	×	○	×	×

○左右受信素子検出可、△片方受信素子検出可、×検出できず

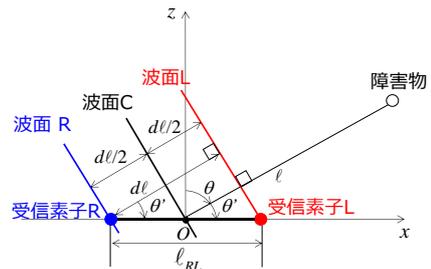


図5 横方位角の計算モデル

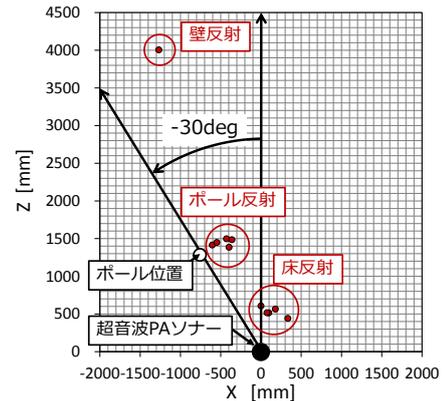
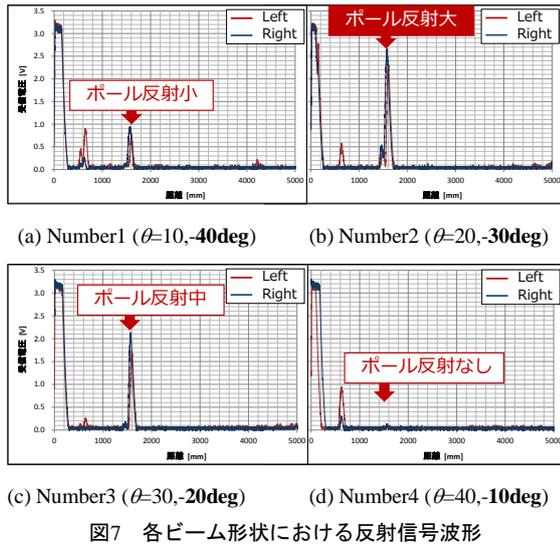


図6 反射源の位置計測結果(距離1500mm,横方位角-30° )

定した横方位角の計測のためには、他の手法を用いる必要がある。

図7は、図6と同じポール位置において、ビーム形状をNumber1からNumber4まで変更した場合の反射信号の観測波形である。同図のキャプションの括弧内のθが表3中のメインビームまたはサイドビームの方向である。ポールが存在する-30° 方向に超音波ビームを照射しているNumber2において、ポールからの反射強度が最大となっていることが確認できる。よって、超音波ビームの照射方向と反射信号の強度から障害物の横方位角を判定する方法が、障害物の形状等によらず、より安定した計測ができると考える。しかしながら、例えばNumber2のビーム形状は図2からも確認できるように、20° 方向にもビームが照射されており、実際にはポールが-30° 方向にあるのか、20° 方向にあるのか判断できない。この判断のためには、サイドビームを抑制し、メインビームのみのビーム形状にする必要がある。



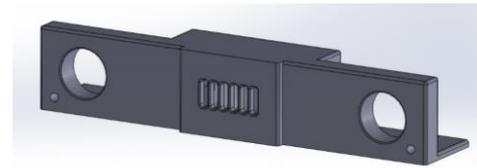
### 3. 超音波導波管アレイの開発

前章では、その結果からメインビームのみによるビーム形状とする必要について触れた。前述したようにサイドビームを抑制するためには、送信素子アレイの間隔を波長未満にする必要がある。しかし、素子寸法が約10mmであるために、波長の8.6mmを上回ってしまい、通常の方法ではサイドビームを抑制できない。そこで、導波管アレイにより、音源の間隔を波長以下にすることによって、サイドビームの抑制を図る。これまでに同様の目的で音響管チューブによる導波管アレイを適用し、良好な結果が得られた研究が報告<sup>7)</sup>されており、実現性は高い。また、導波管アレイを開発することにより、既存の素子が使用できるのでコストも低減でき、また導波管構造により防水機能を付加できる利点もある。

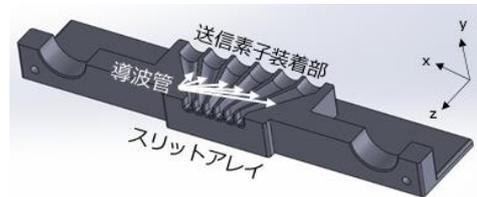
#### 3. 1 設計と試作

本開発において、数値シミュレーターとしてMathworks社のMATLABおよびPhased Array System Tool Boxを使用して、図8に示す導波管アレイの設計を行った。これまでの研究開発により、送信開口の中心点に音源があると仮定した場合でも良好なビーム形状の予測結果が得られていることから、今回も導波管出口のスリット開口中央部に音源があるとして設計を行った。

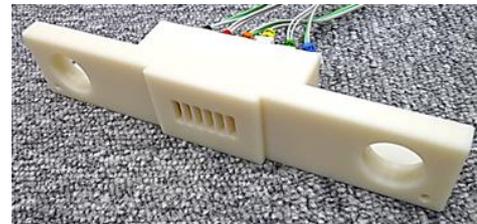
導波管アレイはABS樹脂を構造材とする三次元造形機(Stratasys社製 FORTUS 360mc-L)で作成した。造形可能な寸法となるよう、スリット間隔は波長の半分以下の4mmとした。また、送信素子は従来よりも小型のものを選定した。これは、大きな素子を使用すると音源の間隔が広い状態から急激に狭くなるので導波管が大きく屈曲し、この屈曲部で超音波が大きく減衰し、効率の低下を引き起こすことを防ぐためである。図8が最終的に試作した設計モデルと造形モデルである。また表5は設計した導波管アレイの基本仕様である。スリットを1列とした理由は、波長よりも素子アレイ長（開口長）が長い場合に



(a) 設計モデル (全体)



(b) 設計モデル (x-z 平面断面)



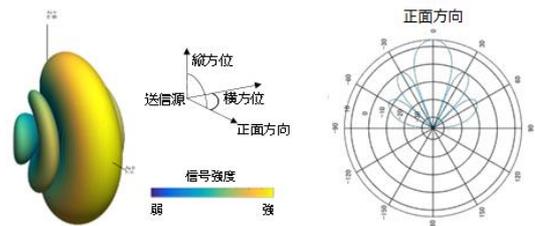
(c) 造形モデル

図8 導波管アレイ試作機

表5 導波管アレイ試作機の仕様

送信素子		導波管アレイ部	
製造者	日本セラミック株式会社	使用素子数	6
型番	T4008A1	スリット数	6
中心周波数	40kHz $\pm$ 1.0kHz	スリット間隔	4mm***
送信音圧レベル	117 dB <sup>*</sup> Min. at 40.0kHz <sup>**</sup>	スリット開口寸法	3(W) $\times$ 10(H)mm
素子寸法	$\Phi$ 7.95 $\times$ 6.0mm	アレイ部寸法	60(W) $\times$ 30(H) $\times$ 27(D)mm
指向性 (-6dB 全角)	$\pm$ 50 $^\circ$		

\*0dB = 10V/Pa, \*\*入力電圧 = 10Vrms, \*\*\* Center to Center



(a) 3Dビーム形状

(b) 2Dビーム形状

図9 試作機の正面方向照射時のビーム形状 (数値シミュレーション)

はビーム幅が狭くなり、逆に短い場合には広くなる性質<sup>13)</sup>を利用し、縦長のビーム形状を形成させるためである。図9はこのモデルにおいて、正面に超音波ビームを送信制御した場合の数値シミュレーターによって得られたビーム形状である。表2におけるD=3の縦長ビーム形状と比較すると、同様の縦長ビーム形状が形成され、さらにサイドビームが抑制されていることがわかる。

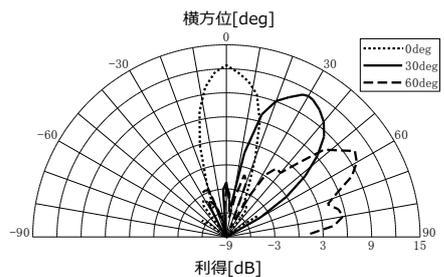
#### 3. 2 導波管アレイのビーム形状

図8(c)の造形モデルに送信素子、ビーム制御用の組込

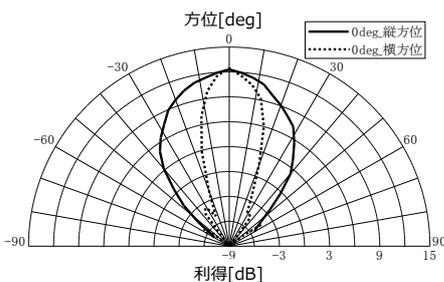
み基板およびドライバ基板を接続し、フェーズドアレイにより任意の方向に超音波合成ビームを生成し、ビーム形状を測定した。合成ビームの照射方向は各スリット出口における位相を制御することで変更できる。このため、スリット位置と送信素子からスリット出口までの行路長を考慮し、励振タイミングをFPGAで並列制御した。

図10(a)は、フェーズドアレイにより横方位角 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、ならびに $60^\circ$ に位相制御した場合の2Dビーム形状である。横軸はこれまでの利得と比較するため、図2で使用した開放素子の出力を基準とした利得としている。図9(b)の数値シミュレーション結果と同様にサイドビームが抑制されたビームが形成され、そのビーム幅は、半減全角で $\pm 15^\circ$ であった。なお、図9(b)のシミュレーション結果のサイドビームの強度が図10よりも大きい。この理由は、図9における利得は、アレイ素子の指向性が等方的であると仮定し、これを基準値として算出したdBiであり、基準対象が異なるためである。図10(a)のビーム制御角が $0^\circ$ における最大利得は12.0dB(4.2倍)であり、図2のD=9時の16.1dB(6.3倍)よりも小さい。しかし、横方位角が $30^\circ$ 以下の場合では、表4に示すようにD=3の最大2.8倍程度の利得でも2000mm先の障害物が検出可能であることから今回の目標値は達成している。さらに、 $60^\circ$ における最大利得は9.7dB(3.0倍)であり、2.3.2節において信号強度の目安とした2.3倍よりも大きく、広角での検出能力は向上している。

図10(b)は、横方位 $0^\circ$ にビーム制御した時の縦方位のビーム形状である。比較のため、その時の横方位のビーム形状も示している。縦方位方向のビーム幅は、半減全角で $\pm 30^\circ$  ( $60^\circ$ )で、横方位の2倍に広がっており、所望の縦長ビームが形成されていることを確認した。



(a) 横方位 (0, 30, 60deg制御時)



(b) 縦方位と横方位の比較(0deg制御時)

図10 試作機の2Dビーム形状(実測)

以上により、障害物検出実験により設計指針を明らかにし、その指針に沿ったビーム形状が実現できた。

#### 4. まとめ

本稿では、高齢者用電動ビークルの安全装置として、広域に障害物を検出できる超音波フェーズドアレイソナーの開発について述べた。本年度は、初期目標である距離1500mm、横方位 $\pm 60^\circ$ 以内の障害物を検出しやすいソナーの検討を行い、設置高さ300mm以下の縦長ビーム形状が有効であること、方位方向の計測については左右受信素子の計測時間差よりも、ビーム照射方向とその時の反射強度から判定する方法が確実であることなどの設計指針を得ることができた。また、縦長ビーム形状と方位方向の計測指針を実現するために導波管アレイを開発し、サイドビームを抑制できることを確認した。

今後は、本導波管アレイによる障害物検出実験を行い、検出能力の検証と改良を行う予定である。

#### 謝 辞

本研究で試作した部品の一部は、公益財団法人JKAの補助事業で導入した三次元造形機で製作しました。

#### 文 献

- [1] 平湯秀和, 田畑克彦, 久富茂樹, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第1報)ーカメラセンサー”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.16, pp.9-14, 2015.
- [2] 久富茂樹, 平湯秀和, 田畑克彦, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第3報)ー音センサー”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.16, pp.21-24, 2015.
- [3] 吉田孝監修, ”4.5 電子走査アンテナ”, 改訂 レーダ技術, 電子情報通信学会, pp.119-137, 1996.
- [4] 田畑克彦, 西田佳史, 飯田佳弘, 岩井俊昭, “超音波センサアレイを用いた新しいナビゲーションシステム”, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.1, pp.11-19, 2012.
- [5] 田畑克彦, 岩井俊昭, 久富茂樹, 遠藤善道, 西田佳史, “長遅延応答型超音波トランスポンダー”, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.12, pp.1086-1091, 2013.
- [6] 田畑克彦, ”空中超音波フェーズドアレイ測位システム=無人搬送車誘導用途としての開発=”, 超音波テクノ, 日本工業出版, Vol.26, No.6, pp.76-82, 2014.
- [7] 高橋亮介, 鄭聖熹, 高橋隆行, “超音波アレイセンサによる視覚障がい者のための障害物検出手法”, 計測自動制御学会東北支部 第226回研究集会, 資料版番号226/1, 2005.