

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第5報）

ー 超音波フェーズドアレイソナー ー

田畑 克彦 平湯 秀和 久富 茂樹

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Senior Vehicles (5th Report) - An Ultrasonic Phased-Array Sonar -

Katsuhiko TABATA Hidekazu HIRAYU Shigeki KUDOMI

あらまし 高齢者の生活を支えるツールの一つである電動車いすに対して、事故の危険を検知するための安全装置を開発している。その中の一つのセンサとして、本研究では障害物の有無や接近を広域に検出する超音波フェーズドアレイソナーを開発している。昨年度は、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。さらに、この設計指標を達成するための超音波導波管アレイを開発した。本年度はこの導波管アレイを含む、超音波ビーム走査から障害物検知までを行う一連のシステムを構築し、障害物の検知能力を確認した。この結果、超音波ビームの送信出力の不足が判明したため、導波管アレイの改良を行い、目標とした従来の2倍の信号強度を得ることができた。

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。そのため我々は、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。なお、開発する安全装置付きの電動車いすを特に電動ビークルと記述する。

現在、安全装置に搭載する複数のセンサを開発しているが、この中の一つとして、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)の研究開発を行っている^[1]。一般的な超音波ソナーは、送信素子と受信素子の組合せ、または一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用途や自動車後方の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が、超音波は空気中での伝播減衰が大きいため、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。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いため、現状では3m程度に設定している。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。さらには、電動ビークルは自動車よりも小型なため、センサーサイズは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(以降、“超音波PAソナー”と記す)を開発している^[1]。昨年度は、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。また、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。

本年度は、昨年度開発した導波管アレイを使用して、超音波ビームの走査から反射信号の受信を行い、障害物を検出するまでの一連の動作を実現する二次試作機を開発し、障害物検知実験を行った。しかしながら、子供のように、形状が小さく音波を吸収する服に包まれた対象の場合、反射信号が小さいため、目標の範囲内であっても検出できないことが判明した。このため、昨年度製作した導波管アレイを改良し、目標値に設定した昨年度比で2倍の信号強度を達成したので報告する。

2. 超音波PAソナーの試作

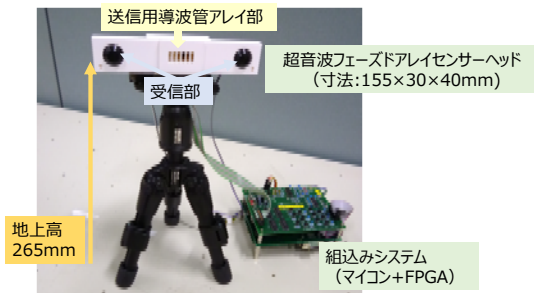


図1 超音波PAセンサー二次試作機

表1 送信部仕様

導波管アレイ:	
スリット開口サイズ	幅3mm×縦10mm
スリット間隔 (Center to Center)	4mm
スリット数	6
超音波素子数	6
超音波素子:	
中心周波数	40kHz
波長 (at 20℃)	8.6mm
送信用素子 (開放型)	日本セラミックス株式会社 T4008A1 (φ8×6mm)

表2 受信部仕様

実装仕様:	
素子サイズ	Φ18mm
素子間隔 (Center to Center)	120mm
素子数	2
超音波素子:	
超音波中心周波数	40kHz
波長 (at 20℃)	8.6mm
送信用素子 (防滴型)	日本セラミックス株式会社 PR40-18 (φ18×12mm)

昨年度開発した超音波導波管アレイ^[2]を使用して、フェーズドアレイによる超音波ビーム走査とその反射信号を受信し、障害物の位置を検出するまでの一連の動作を実現する二次試作機を開発した。図1に二次試作機の外観を示す。表1と表2は、それぞれ送信部と受信部の主な仕様である。

動作の概要を図2に示す。ノイズフロアを計測したのち、導波管アレイの奥に取り付けた超音波素子を0.4msの間、12Vの40kHzの矩形信号で励振する。この励振により発生したパルス幅0.4msの超音波パルスは導波管を通過してスリット開口部から送出される。各スリットに超音波素子が一個ずつ実装されているため、6個の超音波素子を使用しており、各素子の励振タイミングは送信方向に応じて制御する。そして、音波が5m往復する時間だけ受信素子にて反射信号の観測を行う。そして、ノイズフロアから0.1V以上大きい信号を障害物からの反射として、超音波ビームの送信方向と距離から位置を計測し、シリアル通信で障害物の位置と反射強度を通知する。その後、送信方向を変更して同様の処理を繰り返す。なお、送信方向は-60degから60degまでの10degステップで切り替えている。

図3はビーム送信方向を0deg, 30degおよび60degに制御した場合のビームパターンの実測値である。利得は単素子を同条件で励振した場合において、最も音圧が

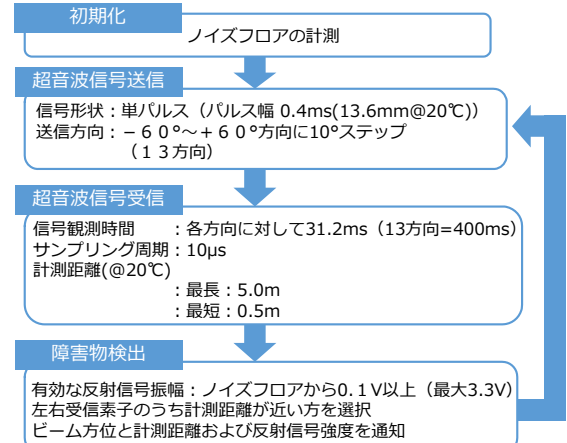


図2 二次試作機の動作フローチャート

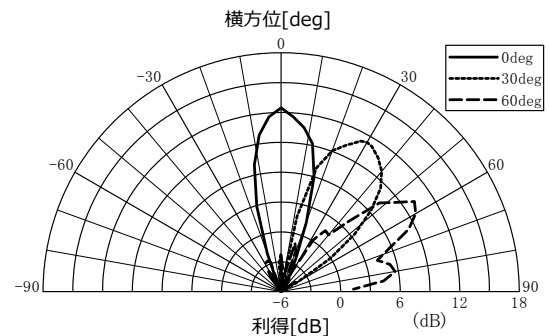


図3 超音波ビームパターン(実測)

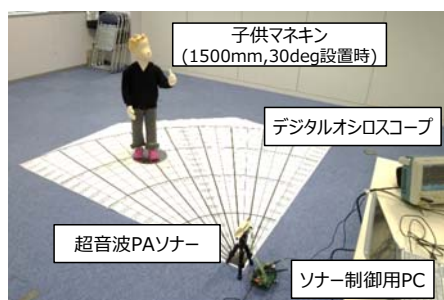
高い正面 (0deg) 方向の信号強度を基準としている。ここで、スリットから観測点までの距離は300mm一定としている。同図から、現状では所望の方向に超音波を送信できており、単素子の4倍(12dB, 0deg送信時)～3倍(9.7dB, 60deg送信時)の音圧が得られていることが確認できる。

3. 障害物検出実験

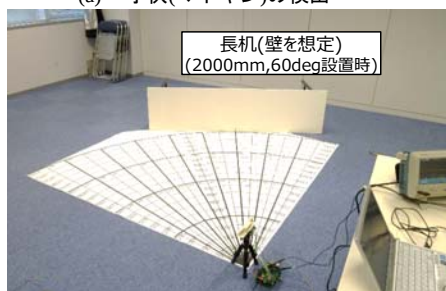
開発した二次試作機を用いて障害物検出実験を行った。障害物は図4に示すように3歳児の大きさの子供のマネキンと、壁などを想定した長机を横向きに置いたものの2種類を用いて、検出目標である距離3000mm以内、方位60deg以内の位置に設置し、検出可否を確認した。なお、超音波PAセンサーヘッドの地上高は、昨年度得られた知見である地上高300mm以下の265mmとした。

本実験では、受信波形を把握しなかったため、増幅後の受信信号をデジタルオシロスコープで取得した。なお、検出条件は図2の二次試作機と同じとした。

実験結果を表3に示す。長机はほぼ目標領域の検出ができていたが、子供マネキンは方位角が60degでは1000mmまで、0degでも2000mmまでしか検出できなかった。これは、マネキンが服を着ているために超音波を吸収してしまい、十分な反射強度が得られていないためである。この対策としては、送信する超音波信号



(a) 子供(マネキン)の検出



(b) 長机(壁を想定)の検出

図4 障害物検出実験のようす

表3 障害物検出実験の結果

距離[mm]	障害物 子供マネキン			障害物 長机(壁を想定)		
	横方位角 [deg]			横方位角 [deg]		
	0	30	60	0	30	60
500	○	○	○	○	○	○
1000	○	○	○	○	○	○
1500	○	○	×	○	○	○
2000	○	×	×	○	○	○
3000	×	×	×	○	○	×

○検出可能

×検出できず

の強度を高めるか、信号処理を工夫することで低レベルの反射信号を強調することが考えられる。そこで、本年度はまず導波管アレイを改良し、信号強度を高めることを試みた。

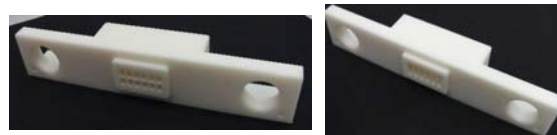
4. 超音波導波管アレイの改良

先行研究の実験によれば^[2]、フェーズドアレイで生成された超音波信号強度はほぼ距離に反比例していた。よって、子供マネキンに対して目標を達成するためには表3より現状の約2倍の検出距離が必要なため、送信強度の目標値を二次試作機で用いた音響導波管アレイの2倍に設定する。超音波導波管アレイの送信強度を向上させるには、単純に送信素子数を増やし、適切に励振タイミングを制御することで達成される。このように超音波ビームのカスタマイズが容易な点は、フェーズドアレイ技術の利点でもある。なお、今回目標として設定した出力では横方位角60deg、距離3000mmの障害物を検出できない可能性もあるが、素子数があまりに多くなると複雑化してコストアップにつながるため、これ以上の改良は信号処理等に対応する予定である。

4. 1 モデルケースによる比較

表4 超音波導波管アレイのモデルケースの主な仕様

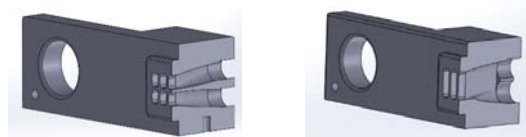
導波管タイプ	分離型	マージ型
スリット開口サイズ	幅3mm×縦4.5mm	幅3mm×縦10mm
スリット間隔 (Center to Center)	横4mm×縦5.5mm	横4mm
スリット数	12	6
超音波素子数	12	12



(a)スリット側(前方)

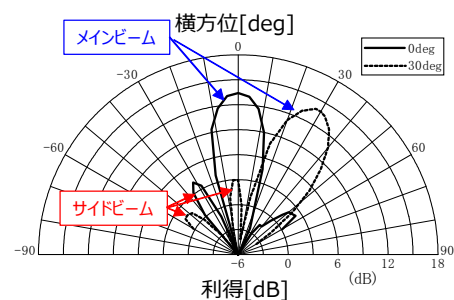


(b)超音波センサ取り付け側(後方)

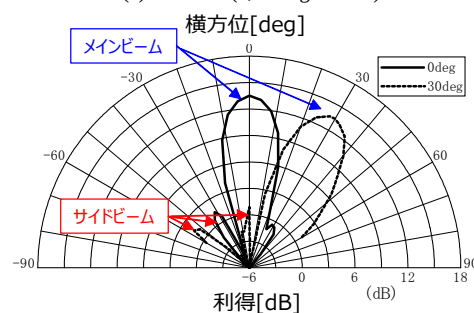


(c)導波管断面(3Dモデル)

図5 試作した導波管アレイ(左:分離型、右:マージ型)



(a) 分離型 (0, 30deg制御時)



(b) マージ型(0, 30deg制御時)

図6 モデルケースの2Dビームパターン(実測)

表4と図5に示す2つのモデルケースを考案し、ビームパターンの傾向を把握した。モデルケースでは、従来の送信強度を2倍にするために送信素子数を2倍にする。このため、上下に素子を実装し、この2個の素子は同相制御を行う。つまり励振するタイミングは同時であるので、励振信号線を並列接続する。また、スリット開口の寸法は二次試作機の導波管アレイと同程度とする。導波管は上下2つの素子で別々の導波管を使用する分離型と一つの導波管を共有するマージ型の2種類とした。マージ型をモデルケースにした理由は、導波管内の空間が広いために、超音波が導波管から抜け易く信

号強度が得られると推測されるが、導波管内における複数の音波の干渉が及ぼす影響を確認するためである。

図6は図3と同様の方法で、分離型とマージ型の超音波ビームパターンを実測した結果である。双方ともにメインビームが0degと30deg方向となるようにタイミングを制御している。図3の結果と比較すると図6ではメインビームの利得は12dBから13.5dB程度に改善されているに過ぎないことがわかる。このように素子数を2倍にしても出力が2倍とならない大きな原因として、図5(c)の音響管断面に示すように、スリット出口に向かうにしたがって音響管が細くなる、いわゆるホーンの逆の形状となっているため、音が抜けづらくなっていると考えられる。また、分離型とマージ型の結果を比較すると、メインビームの利得は同程度であり、マージ型の利得が大きくなるという予想とは異なっていた。しかしながら、誤検知の原因となるサイドビームを比較すると、分離型が最大4.2dB(1.6倍)であるのにマージ型は最大1.5dB(1.2倍)に抑制できていることが確認できる。サイドビームは波長(20℃時8.6mm)以上離れた音源の干渉によって発生するので^[1]、3つ以上離れたスリットから送出される超音波の干渉により発生する。分離型は上下に音源となるスリットがありその数が倍であるため、離れた音源の超音波が干渉しサイドビームレベルが上がってしまっていると考えられる。よって、サイドビームレベルの低いマージ型の方が望ましい結果が得られることがわかった。

4. 2 改良導波管アレイ

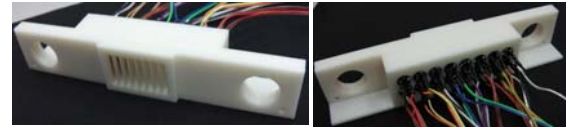
導波管は縦方向にはホーン形状となるようにして出力の増大を図ること、マージ型とすることでサイドローブを抑えること、などを知見として得ることができた。得られた知見に従い、スリット開口と素子数を変えてビームパターンを把握するシミュレーションと実験を繰り返した結果、表5と図7に示す改良型導波管アレイを開発した。図8は改良導波管アレイに超音波センサ素子を取付け、メインビームを0deg, 30degおよび60degの方向に送信制御したときのビームパターンである。図3の従来の信号強度に対して、目標であった約2倍(6dB増)の信号強度が0degから60degにわたって得られていることが確認できた。

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す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、昨年度に開発した超音波導波管アレイを用いて、超音波ビーム走査から障害物検出までの一連の動作を行う二次試作機を開発した。また、本試作機による障害物の検出能力を把握する実験を行い、送信信号強度については現状の2倍以上必要であることを示した。そこで、素子数を増

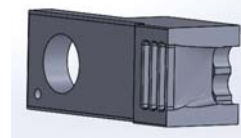
表5 改良導波管アレイの仕様

導波管タイプ	マージ型
スリット開口サイズ	幅3mm×縦20mm
スリット間隔 (Center to Center)	横4mm
スリット数	8
超音波素子数	16



(a)スリット側(前方)

(b)センサ取付け側(後方)



(c)導波管断面(3Dモデル)

図7 改良導波管アレイ

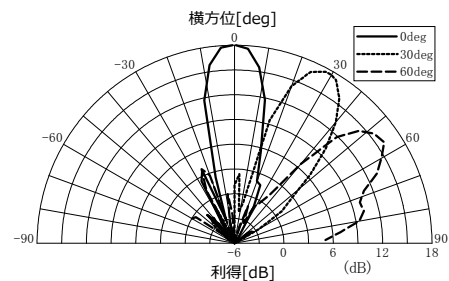


図8 改良導波管の2Dビームパターン(実測)

やすことを前提に、2つの導波管アレイのモデルケースを考案し、その傾向を実験的に把握した。さらに得られた結果をもとに改良を重ね、目標であった従来の約2倍の信号強度を得ることができた。

今後は、改良導波管アレイの検出能力を確認するとともに、雑音に強い受信信号処理についても検討し、検出能力とロバスト性向上のために、さらなる改良を加える予定である。

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] 田畑克彦, 平湯秀和, 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2報)ー超音波フェーズドアレイソナー”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.16, pp.15-20, 2015.
- [2] 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.