

平成21年5月8日現在

研究種目： 基盤研究 (B)

研究期間： 2007～2008

課題番号： 19310105

研究課題名 (和文) 超指向性の特長を生かした高明瞭度音響案内システムの実現

研究課題名 (英文) Realization of Audio Guide System with High Articulation Using Super-directivity.

研究代表者

鎌倉 友男 (KAMAKURA TOMOO)

電気通信大学・電気通信学部・教授

研究者番号：50109279

研究成果の概要：本研究では、必要な音声情報を必要な場所にだけ的確に伝える高明瞭度音響案内・誘導システムの実現を目指した。ここでは、超音波を音声信号で変調して空間内に送波し、超音波の自己復調現象を利用して音声を空間内に再生する、超指向性音響システムの開発を行った。いままでの研究成果を踏まえて、本研究期間では、特に超音波の音圧レベルの低減化を目指し、超音波エミッタの適切な駆動方式を検討した。すなわち、本システムは強力な超音波を使用するために、これが聴取者の聴覚器官に何らかの悪影響を及ぼすことが危惧される。従って、超指向性音響システムを有効に利用するためには、可聴音の音圧レベルは下げず、また超指向性という特長を生かしたまま、できる限り超音波の音圧レベルを下げる必要がある。この目的のために、ここでは超音波エミッタを偶数個の開口に分割して、それぞれの開口のエミッタを互いに逆位相を駆動し、空間内で超音波を打ち消し合う、空間位相反転方式を提案し、超音波の音圧の低減化を図った。開口の数にも依るが、2個の開口に分割したとき、従来の駆動方式に比べて、音軸上でおよそ10～20 dBの超音波の音圧レベルの低減化が実現された。これと同時に、従来から問題になっていた、再生可聴音の高調波歪みも10 dB以上低減できた。この歪み低減は音声明瞭度に直接関わり、高明瞭度な超指向性音響システムの実現に大きな前進となった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2008年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
年度			
年度			
年度			
総計	8,400,000	2,520,000	10,920,000

研究分野： 音響エレクトロニクス

科研費の分科・細目：

キーワード：パラメトリックスピーカ，超音波，指向性，位相反転駆動，歪み低減，明瞭度

1. 研究開始当初の背景

日常生活での安全やアメニティを高めたいという社会的要求は多いが、音環境の改善もその一つである。例えば、鉄道各駅におけるホームアナウンスは、乗客の利便性のため、列車接近に対する注意喚起、ひいては歩行安全のためになされているが、ともすると放送過多や過剰案内になり兼ねない。ときとして、駅に隣接して生活する住民に騒音をもたらすことから、音環境の整備が必要になる。また、福祉面において、駅ホーム上で視覚障害者と晴眼者に分け隔てることなく適切な情報案内を行い、触車、転落などの事故を未然に防ぐ安全対策や交通・歩行バリアフリーが望まれる。入り組んだ地下道やトンネル内の高残響場における高明瞭度の音声情報伝達は、事故・災害時の適切な避難誘導において重要となる。これらの事例はほんの一部に過ぎないが、必要な音声情報を必要な場所にだけ的確に伝える音響案内・誘導システムが実現すれば解決できる問題が多い。社会的に関心の高いこれらの問題を解決する一方策として、超音波を音声信号で変調して空間内に送波し、超音波の自己復調現象を積極的に利用して、音声を空間内に再生する超指向性音響システムの開発を、科学研究費の補助金のもとで取り組み、限定エリアへの的確・明瞭な案内情報の提供と、歩行の安全誘導・確保を実現するための一連の研究を推進してきた。この課題に対して過去4つの項目に分け、それぞれの項目について個別に研究開発を進め、以下の結論に至っている。

(1) 超音波エミッタの開発：この超指向性スピーカ（専門分野では、パラメトリックスピーカという）を実現するためには、大きな振幅の超音波を空中に放射する必要がある。市販の空中用超音波素子では10 Vrmsの耐圧であったが、アルミ材の代わりにマグネシウム円形コーンを採用す

ることで16 Vrmsの高電圧入力に耐えうる構造とした。この改良によって再生音が大きくなり、また過大入力に対しても破壊しなくなった。

(2) デジタル変調回路：スピーカを駆動するためには、オーディオ信号から超音波信号へ変換する変調器が必要である。この変調器として、再生した可聴音の音質を悪化させることなく放射超音波パワーを抑えて消費電力を下げるSSBデジタル変調器を試作した。従来の変調器と比べて、可聴音の音圧レベルが6 dB増加した。

(3) デジタルアンプの開発：スピーカを駆動するためのアンプである。従来のアナログアンプに比べ、デジタルアンプは消費電力が少なく、本スピーカを駆動するのに好都合と判明した。しかし、超音波エミッタの負荷インピーダンスが周波数によって複雑に変化することから、デジタルアンプの本来の機能を十分発揮できない現状である。適切な負帰還回路の付加で解決するとの知見を得たが、もう少し検討する必要がある。ようやく、様々な問題点が分かり始めたところである。

(4) 応用（特に、視覚障害者の誘導）：歩行バリアフリーの一環として、横断歩道での的確な音響誘導を実現するために、兵庫県立福祉まちづくり工学研究所の協力のもとで、特に視覚障害者を対象として、従来型スピーカとパラメトリックスピーカとによる歩行追跡実験を行った。現在多くの横断歩道用音響式信号機で使われている同種同時音響方式では、全歩行回数36と少ないものの、歩行に際して横断歩道の幅員からのはみ出し回数は、パラメトリックスピーカで2回、従来型スピーカでは7回となった。パラメトリックスピーカが的確な歩行誘導に有効という仮説のもとにt検定を行い、危険率を20%を得た。つまり、危険率20%で本スピーカ

一方のほうが従来型スピーカより有効という仮説が生きた。

2. 研究の目的

上記の 4 つの項目で最も成果の遅れているデジタルアンプの開発については、前述したように、そのアンプが超音波エミッタとの整合性がよくないことに起因する。本研究期間では、まずはパラメトリックスピーカ用パワーアンプの開発を進める。従来の市販のアナログアンプ使用において消費電力 88.2 W であったものが、試作品のデジタルアンプの使用で 17.4 W で済んだ、つまり、電力をおよそ 20 %に低減できたことを予備実験で確認している。そこで、実務経験の豊富な回路設計企業の協力を得て、本格的なパワーアンプの試作を進める。

次に、強力な超音波の使用による超音波曝露の問題がある。超指向性音響システムを使用するには避けて通ることができない課題であり、しかも最も厄介な問題である。周波数や使用目的および使用条件によって異なるが、労働衛生の観点から、8 時間の曝露において、20 kHz 以上の超音波音圧は 115 dB 以下にすることが国内外で推奨されている。ここで開発を進めている本音響システムでは、スピーカから距離にも依存するが、瞬時に 120 dB を超える場合があり、聴覚機能への悪影響を懸念しなければならず、極力使用する超音波音圧の低減を工夫しなければならない。

3. 研究の方法

平成 19 年度は、主にパラメトリックスピーカ駆動用のパワーアンプの試作を行う。デジタルアンプは電気パワーから負荷に供給する変換効率が通常 80 %前後と、アナログアンプに比べて倍以上高いことが知られている。我々はいままで予備実験で、パラメトリックスピーカに対してもデジタルアンプが利用でき、パワー変換効率からいえば、アナログアンプのおよそ 1/5 の消費電力で済むことを確認している。

このことは、超指向性音響システムを実用化するうえで重要な研究課題となる。すなわち、例えば、横断歩道の音響案内装置にパラメトリックスピーカを応用するにしても、消費電力の低減化が問題となるからである。

次に、人は加齢とともに高い周波数の聴力が低下する。一方、パラメトリックスピーカは、その狭指向性のみならず、高い周波数成分が強調して放射するという特長を有する。このことか、加齢に伴う高周波の聴力低下を補償するスピーカとして適用できると考えられる。しかし、研究の目的でも述べたように、強力な超音波音圧の使用による超音波曝露の懸念が残る。この問題は、パラメトリックスピーカの使用において、避けて通ることができない重要な課題である。そこで、パラメトリック可聴音の勝れた音響特性を失うことなく、聴音波音圧を極力低減する工夫を行うことにした。その方法のひとつとして、超音波エミッタ（超音波放射器）を 2 つに分け、それぞれを互いに逆位相で駆動して超音波を空間的に打ち消す手法を提案する。この手法の有効性を、いままでに開発してきた超音波エミッタ、変調器、そして音場測定ノウハウを使って実証する。

4. 研究成果

4.1 パワーアンプの試作

デジタルアンプの試作を行ったが、最終的には超音波エミッタとの整合性が未だ順調に進まず、小型で高性能なアナログパワーアンプの試作に取り替えた。すなわち、トランジスタのコレクタ電流を極力抑え、まだ不要なアイドル電流を抑えた回路を、企業の協力で試作し、まずはその電気的特性を求めた。

試作したトランジスタパワーアンプの周波数特性については、比較の対象とした市販製品 (Victor PS-2000A) と遜色なく、100 kHz までの帯域が確認された。また、問題となる

消費電力であるが、条件として、40 kHz の超音波エミッタの負荷を接続し、その端子電圧が 10Vp-p で、デューティー比が 0.25, 0.5, 0.75 の矩形波信号を入力して、パワーアンプによる消費電力を測定した。結果を図 1 に示す。全体として、市販のアンプよりも 50 % 前後の消費電力で済むことが分かった。

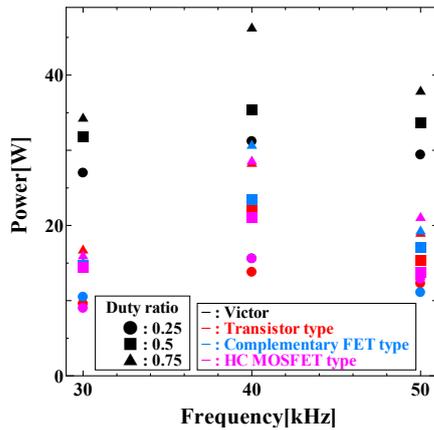


図 1. 試作したパワーアンプの消費電力. 比較の対象としたアンプは、市販の Victor PS-2000A.

4.2 超音波曝露の低減化

実用化が進んでいるパラメトリックスピーカであるが、いくつか改善しなければならない課題を抱えている。パラメトリックスピーカは指向性が鋭いものの、電気パワーから音響パワーへの変換効率が低い、高音圧の超音波キャリアを使用するため超音波曝露の懸念や、媒質の非線形性を利用するため、再生音において歪が多い、などである。これらの問題点のうち、我々は新しい超音波キャリア変調方式を提案して消費電力や歪みの低減化を検討し、特にWeaver方式を採用したダイナミックSSB変調の実用化を行ってきた。しかし、上記のうち、依然として超音波曝露の課題が残る。本研究は、超音波曝露の課題を克服する方法として、超音波キャリア信号 (1 次波) の位相を空間的に変化させることにより、パラメトリック再生音の特長をなるべく損なわないで超音波音圧を低減化することを目的とする。

実験は、直径およそ 10 mmの空中用超音

波センサを半径9.6 cmの円形開口に271個並べ、38 kHz と40 kHzを 1 次波として駆動し、周波数 2 kHzの差音の音響特性に注目する。この実験によって得られた 1 次波や差音、そして差音の高調波の音圧を精密に測定する。更に、KZK (Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov) の式を数値的に解くことによって得られる理論値と比較し、音場評価を行う。

超音波エミッタは中心から 10 列の円状アレイで構成され、中心から 7 列のすべての超音波センサの入力端子を並列に接続してディスク放射器とし、また残りの 3 列すべてのセンサの入力端子もまた並列に接続してリング放射器としている。

同じ位相で駆動する場合を同相駆動、位相を反転、すなわち 180°変化させて駆動する場合を逆相駆動とする。すなわち、2 つの 1 次波音圧 p_1 と p_2 の周波数を $f_1, f_2 (f_1 < f_2)$ 、エミッタの面上音圧振幅を P_1, P_2 としたとき、境界条件を次式で与える。

$$p_1 = P_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1)$$

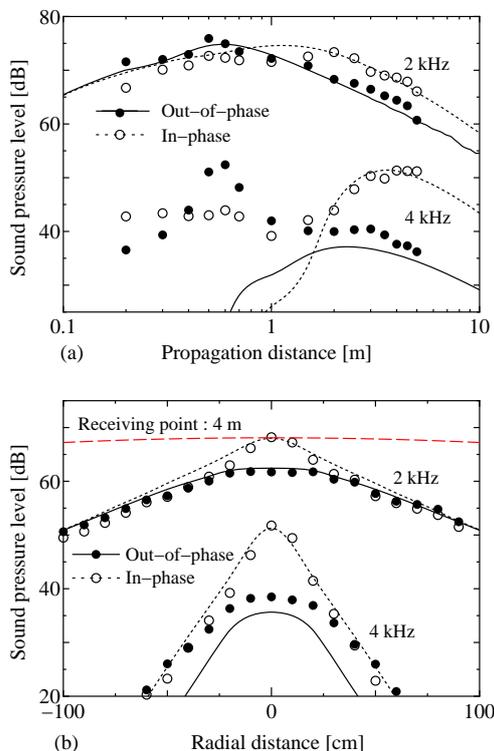
$$p_2 = P_2 \sin(\omega_2 t + \theta_2)$$

ここで、 $\omega_1=2\pi f_1$, $\omega_2=2\pi f_2$, また θ_1, θ_2 は初期位相となる。 θ_1, θ_2 を変えることによって、同相駆動、逆相駆動が実現できる。

発振器から $f_1=38$ kHz, $f_2=40$ kHzの正弦波信号を出力し、2 つの信号を電的に加算したのちにゲート回路に通してトーンバーストとした。加算後の信号を 2 分割し、一方はそのままパワー増幅して外側のリング放射器に入力した。もう一方もそのままパワー増幅して内側のディスク放射器に入力すれば、同相駆動、すなわち上式で $\theta_1=\theta_2=0$ となる。また、インバータを介してからパワー増幅し、ディスク放射器に入力すれば位相反転することができる。これは、上式で $\theta_1=\theta_2=180^\circ$ を実現したことになる。この位相反転は、超音波センサの入力端子の極性を変えるだけで容易に実現できるが、今回は同相駆動との切換をスイッチで実現するためにインバータを用いた。

2 kHzの差音とその第2高調波、すなわち4 kHz成分の音軸上伝搬特性を図2(a)に示す。1次波の場合と同様に、実験値と理論予測値は全体的によく一致している。エミッタからの距離が1 m以内の近距離場では、音軸上の差音のレベルは駆動方法に関係なくほぼ同じであるが、1 m以遠になると逆相駆動のほうが4 dBほど低くなる。また興味深いことに、逆相駆動において、第2高調波の4 kHz成分は遠方で15 dB以上低くなる。なお、理論上、第2次高調波の生成は近距離場において少ないはずであるが、実験で顕著に現れている。これは、高電圧駆動による超音波センサの非線形振動が高調波の生成が起因しているためと考えられる。また、本受波システムはダイナミックレンジがおよそ90 dBであり、特に近距離場においては1次波と2次波とのレベル差が大きく、4 kHz成分を十分な精度で取り出させなかったものと思われる。

図2. 2 kHzおよび4 kHzの2次波の音軸上音圧特性(a)と超音波エミッタから4 mの位置におけるビームパターン特性(b). シンボルは実験データ、ラインはKZKの式に基づく理論結果。理論においては、エミッタ面上の音圧を125 dBとしている。



ームパターン特性(b). シンボルは実験データ、ラインはKZKの式に基づく理論結果。理論においては、エミッタ面上の音圧を125 dBとしている。

エミッタからの距離が4 m地点でのビームパターンを図2(b)に示す。同相駆動と逆相駆動の音圧差は音軸付近で最も顕著に現れ、同相駆動に比べて逆相駆動の音圧レベルは4 dB程低下し、音軸から±50 cm以上離れた領域ではほぼ同じレベルになっている。超音波の音圧レベルの低下に伴って、このように差音のビームは若干広がるが、それでも破線で示した同じ径でピストン駆動放射した線形音波に比べて、ビームはかなり鋭く、パラメトリックアレイの特長が失われていない。

本研究では、円形開口の超音波エミッタを用いていたが、超音波エミッタの開口形状によって、得られる特性が変化する。例えば、矩形開口の超音波エミッタを用いることで、音軸上での1次波超音波の音圧が円形開口のエミッタに比べ、大幅に減少することを確認している。これについては、下記の研究業績リストの②～⑤, ⑦, ⑧, ⑩, ⑪で報告している。

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1件)

①酒井新一, 鎌倉友男, 野村英之, 吉田俊治, “パラメトリックスピーカ用ダイナミックSSB変調器,” 電子情報通信学会論文誌A, J91, 1166-1173 (2008).

[学会発表] (計17件)

①山本和樹, 鎌倉友男, 野村英之, “パラメトリックスピーカを用いた水平方向の音源定位,” 音響学会春季研究発表会, 2009年3月19日 (東京工業大学).

②近藤正義, 野村英之, 鎌倉友男, “パラメトリックスピーカ用位相反転駆動,” 機械学会関東支部総会講演会, 2009年3月7日 (茨城大学).

③近藤正義, 深川大輔, 野村英之, 鎌倉友男, “パラメトリックスピーカ用位相反転駆動—超音波音圧の低減と頭部モデルへの適用—,” 電子情報通信学会超音波研究会, 2009年1月19日 (同志社大学).

④D. Fukagawa, H. Nomura, and T. Kamakura, “Formation of parametric sound by phase cancellation of primary waves,” International Workshop on Modern Science and Technology, 30 November, 2008 (Harbin).

⑤菊地哲, 愛甲英寿, 鎌倉友男, 野村英之, 酒井新一, “キャリア超音波の音圧低減を目的としたパラメトリックスピーカ用位相反転駆動,” 電子情報通信学会超音波研究会, 2008年11月27日(東海大学).

⑥山本和樹, 鎌倉友男, 野村英之, “パラメトリックスピーカを用いた前後方向の音源定位,” 音響学会秋季研究発表会, 2008年9月12日(九州大学).

⑦近藤正義, 深川大輔, 野村英之, 鎌倉友男, “パラメトリックスピーカ用位相反転駆動—頭部球体モデルによる音圧測定,” 音響学会秋季研究発表会, 2008年9月10日(九州大学).

⑧菊地哲, 愛甲英寿, 鎌倉友男, 野村英之, 酒井新一, “パラメトリックスピーカ用位相反転駆動—キャリア音圧の低減化—,” 音響学会秋季研究発表会, 2008年9月10日(九州大学).

⑨S. Sakai and T. Kamakura, “Dynamic single sideband modulation for realizing parametric loudspeaker,” 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, July 7, 2008 (Stockholm).

⑩M. Akiyama, T. Kamakura, and C. Hedberg, “Parametric sound fields by phase-cancellation excitation of primary waves,” 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, July 7, 2008 (Stockholm).

⑪T. Kamakura, S. Sakai, H. Nomura, and M. Akiyama, “Parametric audio sounds by phase-cancellation excitation of primary waves,” ASA and EAA Joint Meeting 08, July 3, 2008 (Paris).

⑫鎌倉友男, 野村英之, 酒井新一, 近藤正義, “超音波に対する聴覚閾値—パラメトリックスピーカを話題に—,” 音響学会春季研究発表会, 2008年3月18日(千葉工業大学).

⑬愛甲英寿, 野村建太, 青木健一, 鎌倉友男, 酒井新一, Vincent Joly, 電子情報通信学会超音波研究会, 2008年1月29日(関西

大学).

⑭深川大輔, 伊藤琢真, 青木健一, 鎌倉友男, “頭部球体モデルを用いた鼓膜位置での超音波音圧の推定,” 音響学会秋季研究発表会, 2007年9月21日(山梨大学).

⑮愛甲英寿, 野村建太, 鎌倉友男, 青木健一, 酒井新一, “パラメトリックスピーカ用ダイナミックSSB変調器の基本特性,” 音響学会秋季研究発表会, 2007年9月20日(山梨大学).

⑯酒井新一, 愛甲英寿, 野村建太, 鎌倉友男, 青木健一, 吉田俊治, “パラメトリックスピーカ駆動用ダイナミックSSB変調方式の一考察,” 電子情報通信学会応用音響研究会, 2007年11月16日(熊本大学).

⑰青木健一, 鎌倉友男, “多孔質材料における空気伝搬超音波の音速と吸音特性,” 電子情報通信学会超音波研究会, 2007年5月30日(電気通信大学).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

鎌倉友男, 安達日出夫, 「音響振動子」特願2008-283462, 平成20年11月4日出願

○取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鎌倉友男 (KAMAKURA TOMOO)

研究者番号 50109279

電気通信大学・電気通信学部・教授

(2) 研究分担者

青木健一 (AOKI KENICHI)

研究者番号 30017412

電気通信大学・電気通信学部・助教 (平成19年度のみ)

(3) 連携研究者

なし