

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究 B

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22360094

研究課題名（和文） 超指向性を活かした環境適合型音響システムの創生

研究課題名（英文） Development of Environmental-adaptive Audio System Using Parametric Array Speaker

研究代表者

鎌倉 友男 (KAMAKURA TOMOO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：50109279

研究成果の概要（和文）：パラメトリックスピーカは、強い超音波を用いて可聴音を空間内に生成する音響機器で、超音波暴露の観点から、キャリア超音波の音圧レベルを極力下げる工夫が求められる。そこで、パラメトリックスピーカのエミッタの開口を多分割して、そこから互いに逆相のキャリア超音波を放射することで、超音波を相殺して受音領域におけるその音圧レベルを大幅に減らすことに成功した。また、より広い領域で音像定位を可能にし、またより高い臨場感を得るための音場再生装置を実現するために、2チャンネルのパラメトリックスピーカを利用して、音像定位の基礎実験を行った。

研究成果の概要（英文）：To reduce the carrier ultrasound of a parametric loudspeaker as much as possible, we first applied the phase-inversion technique to the loudspeaker and obtained good results on the reduction of carrier ultrasound pressures without deteriorating the acoustic characteristics of parametric sounds. We next focused on the realization of a new stereophonic audio system. To realize a new method of stereo reproduction that enables sound localization in a wider area and improves sound field reproduction for higher realistic sensation, we carried out sound localization tests using a two-channel parametric loudspeaker system. The main results show that sound images are localized in an area close to the center and are almost independent of the precedence effect.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2011 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2012 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	9,300,000	2,790,000	12,090,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：音響情報・制御，非線形音響

## 1. 研究開始当初の背景

日常生活での安全や快適さを高めたいという社会的要求は多く、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でのアナウンスは、乗客の利便性のため、また列車接近に対する注意喚起や歩

行安全のためになされる。しかし、ともすると過剰案内になり、時として駅に隣接して生活する住民に騒音をもたらし、静音化が求められる。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、触車や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必要である。入り組んだ地下道などの高残響場における高明瞭度の音声情報提供は、事故・災害時の適切な避難誘導において重要となる。更に、ATMでの音声案内にはプライバシー保護のための方策が望まれる。我々はこれらの問題の解決策として、必要な音声情報を必要な場所に的確に伝える、その場にふさわしい音響案内・情報提供システムを提案し、その実現のために、超音波の自己復調現象を利用して音声を超音波ビーム内に再生する超指向性音響システムの開発を目指し、この数年に亘り科学研究費補助金のもとで取り組んできた。開発中のパラメトリックスピーカは音の広がりが極めて少ない特長がある。この超指向性の特長を生かすべく、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基礎・応用研究を推進してきた。そして、歩行誘導において超指向性スピーカの使用は有効であることが判明した。しかし、まだ音声明瞭度や超音波暴露問題の課題が残されている。特にこのスピーカを近距離場で利用する場合、超音波の音圧レベルが労働安全衛生の観点からみたガイドライン値 110 dB（ただし、8 時間労働を前提）を瞬時にしる越えることがあり、超音波の音圧の低減化が望まれていた。申請者は、この問題に対して超音波エミッタを位相反転駆動することで、再生可聴音の勝れた音響特性は生かしたまま、高調波歪みを 10 dB以上低減し、更に超音波の音圧レベルもガイドライン値より 10~20 dB低減できることに着眼した。本研究は、まずはこの位相反転駆動技術を超指向性音響システムに実装し、その電気・音響特性を詳細に評価する。次に、快適な音環境の創

生に向けた超指向性音響システムのデザインに着手し、その基礎データを収集する。具体的には、心理音響の観点から、まずはパラメトリックスピーカの音響特性のうち、音像定位の問題を取り上げることにした。そして、従来のスピーカによる音像定位との相違点を明確にする。

## 2. 研究の目的

上記で述べたように、本研究課題は二つの目的で推進する。一つは、超指向性音響システムに関する現時点での問題点を克服することにある。超音波を利用したこの音響システムは、超指向性という特長を有しているばかりでなく、非線形現象の数少ない応用として従来から学術的に興味を持たれていた。しかし、強い超音波を利用することから聴覚への悪影響が懸念され、また高調波歪みの発生で音声明瞭度に欠け、スピーカへの利用にいま一步という状況である。我々は、超音波エネルギーを一方向に集中させるのではなく、広い空間範囲に分散させることで受音位置でのその音圧レベルを大幅に減らし、超指向性という再生可聴音の勝れた長所は残したまま、歪み発生と超音波暴露の両方を同時に解決できる知見を得た。まずは、このためのエミッタに対する駆動の最適化設計である。次に、超指向性音響システムの新しい応用の取り組みとして、心理音響の分野から、従来のスピーカによる音像定位との違いを明確にする。このために、2 つのスピーカ駆動によるステレオ再生装置を試作し、従来のスピーカと開発中のパラメトリックスピーカとの音像定位領域がどのように異なるか、基礎的なデータを得る実験を行う。

## 3. 研究の方法

1. ここで提案する超音波キャリア低減化方式は多種多様な方法に拡張できるが、最もシンプルな方法を紹介する。すなわち、超音波を放射するエミッタの総開口を 2 等分割し、それらを互いに逆位相になるように位相反

転駆動することで、再生されるパラメトリック差音の音圧レベルは下げないで、超音波キャリアの音圧レベルを極力下げる。

この際に、分割された超音波エミッタ表面の音圧分布は、ここでは一様にする。他にエミッタの総放射面を3つ以上に分割し、それぞれの面上の音圧にある分布をもたせて、超音波の音圧を広い空間範囲でできる限り下げる最適な音源条件を設定できる。なお、音研究課題では、従来の一様分布駆動に際の再生可聴音および超音波キャリアの音圧レベルと比較して、前者は3 dB以内、後者は10 dB以上を一つの達成目標とした。

2. いままでの2チャンネルステレオにおいて、音場全域に広がる音の分布が、両耳間強度差・時間差の影響を顕著にし、より精度のよい音像定位に寄与していることが示唆されている。同時に広範囲に分布する音は音像の定位位置を不安定にさせる原因にもなっている可能性がある。ここでは、これらの問題を改善するため、指向性の優れた音場を生成できるパラメトリックスピーカに注目し、最良の受聴域とされるスイートスポット近傍にのみ音を届けることで、より広範囲で良好な音像定位を可能とするステレオ再生法について検討していく。

近年、ラインアレイスピーカなど鋭いビーム状の音場を用いた高臨場音場の生成に関する研究が増えるなかで、パラメトリックスピーカもまた高臨場音場の生成上で注目を集めている。しかしながら、パラメトリックスピーカのステレオ再生若しくは2チャンネル駆動に関しては、まだ研究が少なくよく分かっていないことも多い。本研究では、パラメトリックスピーカを2チャンネルで駆動したときの、良好な音像定位が得られる範囲および生成される音場の臨場感について聴取実験により調査する。また、従来の動電型スピーカについても同様に実験を行い、結果を比較検討する。被験者には20代の男女11名に協力をお願いし、実験はパラメトリックスピーカと動電型スピーカで異なる日時で行った。聴取位置は、中心軸より $\pm 0.5$  mを0.25

m間隔で区切った計5ヶ所とした。被験者には各位置で信号音を聴いてもらい、そのときの音像の位置を評価用パネル上にレーザーポインタを照射する方法で回答してもらった。その間、定位方向の誤りができる限り入らないようにするために、顔の向きを正面から左右スピーカの角度範囲に2~3回ゆっくり動かすことを義務付けた。

#### 4. 研究成果

超音波エミッタを開口全面を一様駆動する従来方式と比べて、可聴音の音響特性を損なうことなく（特に、音響レベルを低下させることなく）、超音波の音圧レベルを広い空間内で極力低減できる超音波エミッタの最適な形状を数値理論計算において求め、そして実験を行った。その結果、エミ



図1 実験に用いた超音波エミッタ

ッタから4 mの位置で、音軸 $\pm 20$  cmほどの範囲内において、 $-8 \sim 10$  dBの超音波音圧を低減できた。この場合、可聴音の音圧低下は3 dBほどの低下に抑えることができた。この結果は、強い超音波を放射する本音響システムにおいて、人の聴覚に与える超音波曝露の観点から、本手法の有効性が確認できた。

図1は実験に使用した超音波エミッタである。周波数40 kHzの超音波素子を10列のアレイに並べて、内側の7列と残りの3列に分けて、それぞれを互いに逆位相で駆動する。エミッタの径はおよそ20 cmである。

図2は、当初の予測を裏付ける実験データおよび理論データである。ここでは、キャ

リア成分のみ取り上げる。黒色のシンボルは位相反転のときの実験データ、赤色のシンボルは同じ放射音響パワーで得た一様分布駆動のときのデータである。また、実線はそれぞれの条件に対するKZK方程式を用いた理論データである。また、受音点は、

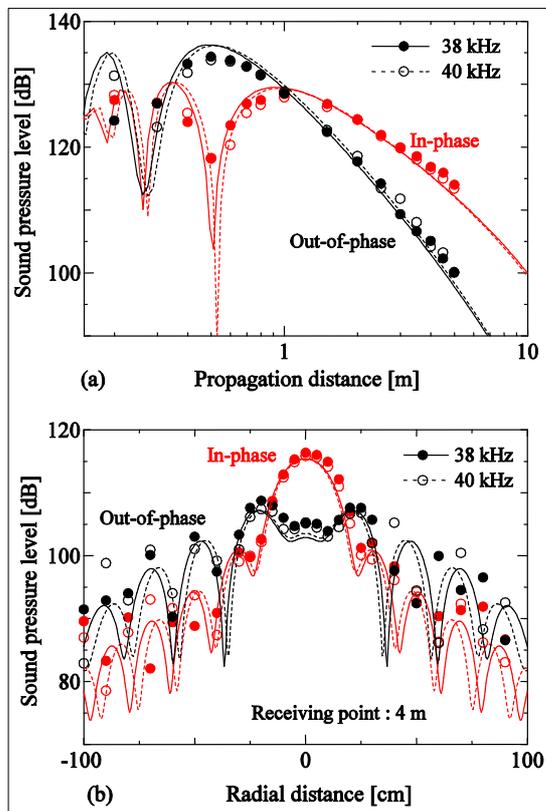


図2 一様駆動および位相反転駆動の場合の超音波キャリア成分

エミッタから4 mの位置である。明らかに、位相反転駆動を行うことで、音軸領域でキャリア超音波の音圧レベルが10 dBほど低下しており、初期の目的は達せられたことが分かる。

次に、実際にパラメトリックスピーカを2チャンネルで駆動し、そのときの音像定位を聴取実験により調べた。その結果、ダイナミックスピーカを2チャンネルで駆動したときと比べて、水平方向の音像は比較的内側に定位し、先行音効果の影響も受けにくいことが示された。鉛直方向に関しては、図3に示すように、全体的に0.2 m程上側に定位することも分かった。また、聴き取り具合に関して

は、多くの被験者からヘッドホンにも似た頭内定位を感じたという報告があった。結果として、パラメトリックスピーカの2チャンネル駆動では従来の動電型スピーカの2チャンネルステレオに比べて、より広範囲で良好な音像定位が得られ、また、聴こえ方に関しては立体音響等への応用の可能性が示唆された。

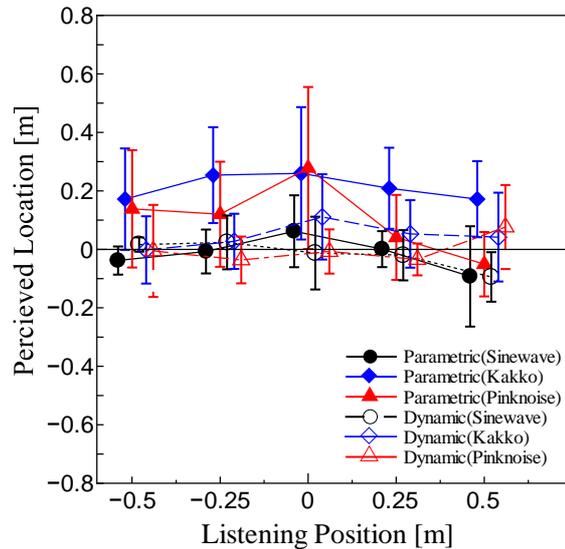


図3 垂直方向の音像定位

## 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8件)

1. T. Kamakura, H. Nomura, and G. T. Clement, "Application of split-step Pade approach to nonlinear field predictions," *Ultrasonics*, **53**, 432-438 (2013). 査読有 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras2012.08.008>
2. T. Kamakura and N. Sugimoto, Editors, "Nonlinear Acoustics - State-of-the-Art and Perspectives," ISNA19 Conference Proceedings, ISBN 978-0-7354-1082-4 (2012).
3. 青木, 鎌倉, "解説記事: 超音波領域から見た多孔質材料の音響特性と音響管測定," *音響学会誌*, **68**, 486-491 (2012), 査読無.

4. W-S. Gan, J. Yang, and T. Kamakura, "A review on the parametric acoustic array," *Appl. Acoust.*, **73**, 1211-1219 (2012). 査読有 <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust2012.04.001>

5. H. Nomura, C. M. Hedberg, and T. Kamakura, "Numerical simulation of parametric sound generation and its application to length-limited sound beam," *Appl. Acoust.*, **73**, 1231-1238 (2012). 査読有, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust2012.02.016>

6. 鎌倉, 伊藤, 野村, "解説記事: 超音波暴露の調査—パラメトリックスピーカを話題にして—, 音響学会誌, **67**, 200-203 (2011), 査読無.

7. G. T. Clement, H. Nomura, and T. Kamakura, "The feasibility of pulse compression by nonlinear effective bandwidth extension," *J. Acoust. Soc. Am.*, **130**, 1810-1819 (2011). 査読有, DOI : 10.1121/1.3625236

8. T. Kamakura, H. Nomura, M. Akiyama, and C. M. Hedberg, "Parametric sound fields formed by phase-inversion excitation of primary waves," *acta acustica with Acustica*, **97**, 209-218 (2011). 査読有, Doi : 10.3813/AAA.918400

[学会発表] (計 26 件)

1. 野村, 安達, 鎌倉, G. Clement, "パラメトリック差音へのパルス圧縮技術適用の実験的検討," 超音波研究会, US2012-98 (2013 年 1 月), 同志社大学.

2. W. Kongrattanasert, H. Nomura, T. Kamakura, K. Ueda, T. Tanizaki, and J. Usami, "Discrimination of winter and summer tires using road surface vibration caused by passing vehicles," 4th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference, (2012 年 12 月) Bangkok (Thailand).

3. 野村, 安達, 鎌倉, G. Clement, "チャーブ

信号によるパラメトリック超音波のパルス圧縮," 超音波研究会, US2012-79 (2012 年 11 月), 静岡大学.

4. 眞城, 鎌倉, 野村, "パラメトリックスピーカの 2 チャンネル駆動による音像定位," 超音波研究会, US2012-78 (2012 年 11 月), 静岡大学.

5. 鎌倉, 野村, G. Clement, "音源面音圧のランダム分布が非線形場の形成に与える影響," 超音波研究会, US2012-58 (2012 年 9 月), 秋田大学.

6. H. Nomura, T. Kamakura, G. T. Clement, and C. M. Hedberg, "Visualization of parametric sound generation process based on wave number filtering using numerical simulation," The 19th ICSV, (2012.8), Vilnius (Lithuania).

7. 鎌倉, 野村, G. Clement, "Split-step Pade 近似の非線形音場解析への応用," 超音波研究会, US2011-88 (2012 年 1 月), 関西大学.

8. 野村, 鎌倉, G. Clement, C. Hedberg, "パラメトリックアレイの時間領域シミュレーションと差音ビーム生成の可視化," 超音波研究会, US2011-91 (2012 年 1 月), 関西大学.

9. 原, 堀野, 野村, 鎌倉, "パラメトリックスピーカにおけるキャリア超音波低減法," 超音波研究会, US2011-75 (2011 年 11 月), 東海大学.

10. 伊藤, 野村, 鎌倉, "超音波呈示における高周波聴力検査," 超音波研究会, US2011-61 (2011 年 10 月), 山梨大学.

11. 安武, 吉田, 酒井, 鎌倉, "パラメトリックスピーカの指向特性検討," 音響学会講演論文集, 1-R-32 (2011 年 9 月), 島根大学.

12. 原, 堀野, 安野, 野村, 鎌倉, "多孔性ポリプロピレンフィルムを用いたパラメトリック音源の検討," 音響学会講演論文集, 1-R-7 (2011 年 9 月), 島根大学

13. 野村, C. Hedberg, 鎌倉, "パラメトリック

ク差音生成の時間領域シミュレーション,” 音響学会講演論文集, 1-2-14 (2011年9月), 島根大学.

14. H. Nomura, C. Hedberg, and T. Kamakura, “Estimation of parametric sound field controlled by source amplitudes and phases using numerical simulation,” 19th ISNA19 (2012. 5), Tokyo (Japan).

15. G. Clement, H. Nomura, and T. Kamakura, “Effective bandwidth extension by combined harmonics,” 19th ISNA (2012. 5), Tokyo (Japan).

16. M. Yamamoto, A. Hashimoto, T. Takahashi, T. Kamakura, and T. Sakai, “Numerical simulation for sonic boom propagation through an inhomogeneous atmosphere with winds,” 19th ISNA (2012.5), Tokyo (Japan).

17. H. Nomura, C. Hedberg, and T. Kamakura, “Numerical simulation of length limited parametric sound beam,” ICU2011 (2011.7), Gdansk (Poland).

18. M. Maezawa, H. Nomura, and T. Kamakura, “Liquid mixing using frequency-modulated ultrasound beams radiated from SAW devices,” 20th ICA (2010.8), Sydney (Australia).

19. W. Kongrattanaprasert, H. Nomura, T. Kamakura, and K. Ueda, “Automatic detection of road surface states from tire noise using neural network analysis,” 20th ICA (2010.8), Sydney (Australia).

20. 野村, C. Hedberg, 鎌倉, “数値シミュレーションによるパラメトリックアレイの音場評価 - Self-silenced sound beam への適用 - 超音波研究会, US2011-2 (2011年4月), 電気通信大学.

21. 狩野, 長尾, 鎌倉, “超指向性音響システムの電気音響特性の評価,” 音響学会講演論文集, 1-9-12 (2011年3月), 早稲田大学.

22. 鎌倉, 野村, “不均質な媒質内を非線形伝搬する超音波ビーム,” 超音波研究会, US2010-83 (2010年11月), 産総研中部センター.

23. 原, 前川, 野村, 鎌倉, “キャリア超音波の低減を目的としたパラメトリック音源,” 音響学会講演論文集, 3-10-9 (2010年9月), 関西大学.

24. 伊藤, 鎌倉, 野村, “招待講演: 生理指標による評価を用いた超音波暴露の基礎研究,” 音響学会講演論文集, 2-5-6 (2010年9月), 関西大学.

25. G. Clement, 野村, 鎌倉, “パルス圧縮に対する非線形帯域拡張法,” 超音波研究会, US2010-51 (2010年9月), 東北大学.

26. 原, 前川, 野村, 鎌倉, “キャリア超音波の低減を目的としたパラメトリックスピーカの駆動方法,” US2010-1 (2010年4月), 電気通信大学.

[産業財産権]

○取得状況 (計1件)

名称: 変調器及び超指向性音響装置  
発明者: 酒井新一, 吉田俊治, 鎌倉友男  
権利者: 三菱電機エンジニアリング, 電気通信大学

種類: 特許

番号: 4799303

取得年月日: 2011年8月12日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鎌倉 友男 (KAMAKURA TOMOO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号: 50109279

(2) 研究分担者

野村 英之 (NOMURA HIDEYUKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 90334763