

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05857

研究課題名(和文) 高特性な超指向性音響システムの実現と応用

研究課題名(英文) Realization and applications of highly directional acoustic system

研究代表者

鎌倉 友男 (Kamakura, Tomoo)

電気通信大学・産学官連携センター・客員教授

研究者番号：50109279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：パラメトリックスピーカの実用化において、電気から音響へのパワー変換効率を改善する必要がある。パラメトリック音は超音波キャリアの周波数を下げることで増加するという事実に沿って、長距離音響アラートシステムの実現のため、25kHzの超音波エミッタを試作し、効率改善を試みた。また、パラメトリックスピーカを駆動する際の信号の流れは、超音波への変調プロセス、超音波エミッタの駆動プロセス、そして超音波の自己復調プロセスに分けられる。本研究では、これら3プロセスのモデリングを通して信号の流れを96kHzのサンプリング、16ビットの量子化で数値シミュレーションし、特性改善が期待できる開発システムを構築した。

研究成果の概要(英文)：This study introduces theoretical and experimental attempts for the improvement of conversion efficiency from electric to acoustic power in driving parametric loudspeakers. In line with the fact that parametric sound pressure is generally increased by decreasing primary frequencies, a 25-kHz ultrasonic emitter is fabricated in order to realize a long distance acoustic alert system. Incidentally, audio signals pass through three processes when parametric loudspeaker is driven. These are the amplitude-modulation process, emitting process of ultrasound waves, and self-demodulation process. To find clues to improve the features of parametric loudspeaker, the study demonstrates that the above three processes are mathematically modeled and are successfully connected via computer simulation of using high resolution source signals with 96 kHz sampling frequency and 16-bit quantization.

研究分野：音響エレクトロニクス

キーワード：超音波 非線形音響 パラメトリックスピーカ ハイレゾリューション

## 1. 研究開始当初の背景

超音波のさまざまな非線形現象のなかでも自己復調作用を巧みに利用したパラメトリックスピーカは、小口径でありながら指向性の鋭さに特長をもつ。したがって、従来のスピーカとは異なった利用価値がある。例えば、特定の領域にいる人のみに音情報が提供できるので、プライバシーを重要視するような音環境の創生に有望な音響機器として位置づけられる。しかし、パラメトリックスピーカで再生される音（以降、「パラメトリック音」という）は、超音波から可聴音への変換効率が低いことや、パラメトリック音に歪み成分が多いことで明瞭度に欠けるなどの短所がある。このような短所を少しでも克服し改善することが、パラメトリックスピーカの実用化において重要な課題となっている。

## 2. 研究の目的

音環境の改善に有望なパラメトリックスピーカの実用化に向けて改善すべき点として、超音波からパラメトリック音への変換効率の向上や、パラメトリック音の歪み低減化を目的としたキャリア変調方式の簡素化を取り上げる。そして、本研究の中心課題として位置づけ、それらの課題に取り組んだ結果を報告する。

## 3. 研究の方法

### 3.1 変換効率の改善

#### (1) 周波数低減比

キャリア超音波から差音への音圧の変換効率、すなわちパラメトリック利得は、媒質の物理量や1次波の音源条件に依存する。特に、キャリア超音波の周波数 $f_c$ と差音の周波数 $f$ との比 $f_c/f$ によって利得は大きく変わる。この比を周波数低減比と言うが、比が小さいほど、すなわち差周波数が一定とすれば、キャリア周波数を低くするほどアレイ長は長くなり、パラメトリック利得は上昇する。パラメトリック現象をスピーカとして利用する場合、キャリア周波数が可聴帯域に含まれることは好ましくなく、自ずと周波数低減比を高くする。しかし、この場合、パラメトリック利得は下がり、同時にパラメトリックアレイ特有の指向性も鈍くなる。

#### (2) 反射波の利用

電気信号からパラメトリック音への変換、いわゆるパラメトリック利得について、一考察を行った。この利得は周波数や超音波の音圧に依存して変わるが、伝搬媒質（ここでは空気）の非線形性が弱いことに起因して一般に1%程度であり、この低さは避けられない欠点である。超音波のキャリア周波数を低くすればパラメトリック変換効率は上がり数%から十数%に達する。1次周波数を下げ過ぎると可聴帯域に高音圧の1次波成分が含まれることになり、実用化における超音波曝露の点から課題が残る。ただ、この場合、可聴帯域

内であっても周波数が高ければ距離減衰は大きいので、スピーカから離れた位置で受聴する場合に、この問題は避けられる。変換効率の向上への工夫として、音の放射領域を制限することによって差音の音圧レベルが増加することを、実験結果を示しながら紹介する。

ところで、スピーカを自由空間内で使用することはほとんどない。多くの場合、例えば室内であれば壁や床、また屋外であっては路面や地面からの反射の影響を受ける音環境で使用される。パラメトリックスピーカにおいても然りである。ただ、差音は超音波の非線形伝搬で発生することから、その超音波の音圧が高い領域で反射が生ずるような場合、直接波と反射波の相互作用で発生する差音の音場形成に与える影響を考慮する複雑さがある。

### 3.2 変調・復調過程のシミュレータ

変調方式の簡素化については、入力音声信号を超音波周波数帯域に変換する、いわゆるアップコンバート過程、被変調信号をパワー増幅して超音波エミッタから超音波として放射する過程、そして変調され空中に放射された超音波から可聴信号を生成するダウンコンバート過程に分け、それぞれ3つのプロセスを定式化してコンピュータでパラメトリック音の再生過程をシミュレーションする。パラメトリックスピーカの変調キャリア周波数は多くの場合40 kHzが利用されるので、数値シミュレーションにおけるサンプリング周波数を96 kHzのハイレゾリューション音源として取り扱い、量子化16ビットでC言語プログラムにコーディングする。そして、入力信号からパラメトリック音までの信号の流れをすべてコンピュータでシミュレーションできる環境、すなわちソフトウェアに基づくシミュレータを構築する。この構築によって、パラメトリックスピーカのシステム化において、ハードウェアとしての物理的変調器が不要となり、その代わりに小型化や利便性に特長をもつソフトウェアで達成でき、システムの簡素化が可能となる。

## 4. 研究成果

図1は、半径20 cmの円形開口から、2周波の1次波を放射したときの、音軸上に沿った2 kHz差音の音圧の伝搬特性で、理論計算結果である。2周波の中心周波数は15 kHz、25 kHz、そして40 kHzに変えており、周波数低減比はそれぞれ7.5、12.5、20に相当する。音源面上の1次波音圧振幅は、2周波成分ともに50 Pa（音圧レベルで125 dB）に設定している。これは、言い換えれば、超音波の音響パワーを変えないという条件になる。また、音波吸収係数に関係する気温は20℃、相対湿度50%に統一している。

この計算結果から、例えば1次波が40 kHzの場合、開口から10 mの位置で差音の音圧

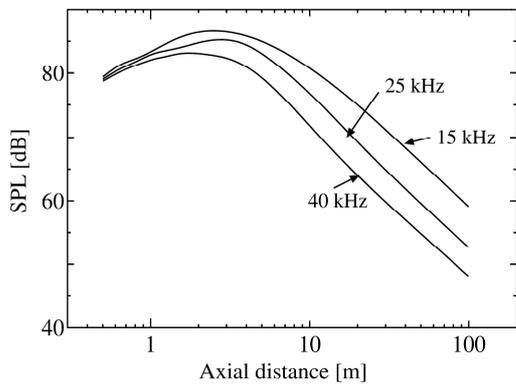


図1 パラメトリック利得 (2つの超音波の初期音圧が125 dB)

レベルは71 dBであるが、25 kHzでは77 dB、15 kHzでは81 dBと上昇する。この結果を踏まえて、パラメトリックスピーカに通常利用されている40 kHz超音波トランスデューサの代わりに25 kHzのトランスデューサ555個で超音波エミッタを構成し、それを用いた差音の音場特性を測定した。

このエミッタから放射される差音の長距離伝搬特性を知るために、以下の実験を行った。まず、道路路面から垂直方向およそ2 mの位置に、超音波ビームがその路面に並行に進行するように超音波エミッタを置いた。そして、25 kHzと27.5 kHzの正弦波を加算してトーンバースト信号を発生させ、エミッタを駆動した。同時に、道路上1.5 mの高さにおける2.5 kHzの差音の音圧レベルをA特性に設定したサウンドレベルメータで測定した。測定領域は、路面に沿う音の放射方向(z軸)はエミッタから20~70 m、また、路面に沿いz軸に直角な方向(x軸)は12.5 m幅である。また、音圧の測定間隔は、z方向に5 m、x方向に2.5 mとしている。この実験で得た音圧分布の一例を図2に示す。

この測定結果から、90 dB近くの音圧がスピーカから40 m付近まで、その距離を超えると徐々に音圧が下がり、70 mでは70 dB台までに低下している。また、30 mの位置の手前で一旦音圧が下がり、それを超えるとまた音圧が上昇する傾向にある。この音圧の増減は、路面からの音の反射の影響と思われる。

一方、x軸方向への差音の広がりを見ると、パラメトリックスピーカ特有の指向性の鋭さから、道路幅およそ12 m内に抑えられている。なお、キャリア周波数が40 kHzのとき

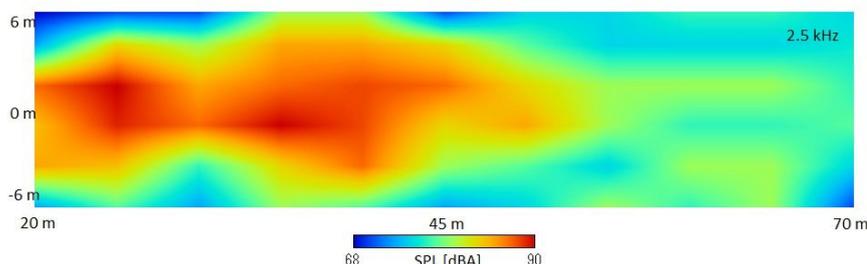


図2 パラメトリック音の音圧分布 (キャリア超音波の周波数: 25 kHz)

と比べて、同じ音源条件のもと超音波から可聴音への変換効率は上昇していると思われるが、最終的には電気から可聴音への総合的な効率に注目する必要がある。

超音波の放射音響パワーが同じであっても、反射を有効に利用することで、パラメトリック差音の音圧が自由空間内よりも大きくなる場合がある。一例として、図3のように超音波エミッタの開口面(26 cm×13 cm)が床面に対して垂直になるように立てて置き、エミッタを駆動する。このとき、エミッタから放射される超音波のみならず、その超音波の非線形伝搬で発生する差音も床で反射する。エミッタを自由空間に置いたときに比べて、このような環境では放射領域が半分になることから、差音の音圧レベル上昇が期待できる。



図3 床に垂直に置いた40 kHz超音波エミッタ

図4は、図3の矩形開口エミッタを38 kHzと40 kHzの正弦波で駆動したときの差音2 kHz成分のデータで、黒丸が実験値を、実線が理論値を示している。ここで、エミッタ開口の音圧振幅を2つの1次波ともに128 dBに設定成分している。(a)の伝搬特性の実験値は、マイクロホンとエミッタとの距離を変えながら、マイクロホンを床面に置いて求めている。また、音場の理論値は、KZK方程式の3次元非線形伝搬問題と捉え、イメージ法を適用して求めている。すなわち、1次波の非線形伝搬で発生する多くの周波数成分が床で完全反射し、床の垂直方向の粒子成分が0になることを想定した境界条件で解析している。図中に、参考として、壁や床の反射が無視できるような自由空間内にエミッタを置き、駆動周波数、駆動電圧を変えないで得た超音波40 kHz及び差音2 kHzの伝搬特性を、実験値は白丸で、また理論値は破線で併示している。

本実験結果から、自由空間内に超音波エミッタを置いたときに比べて、40 kHzの音圧は全体的に3 dB、また差音は5~6 dBほど上昇していることが分かる。本来ならば、理論値の誘導において、エミッタからの直接1次波と床での反射1次波が交差することで生ずる差

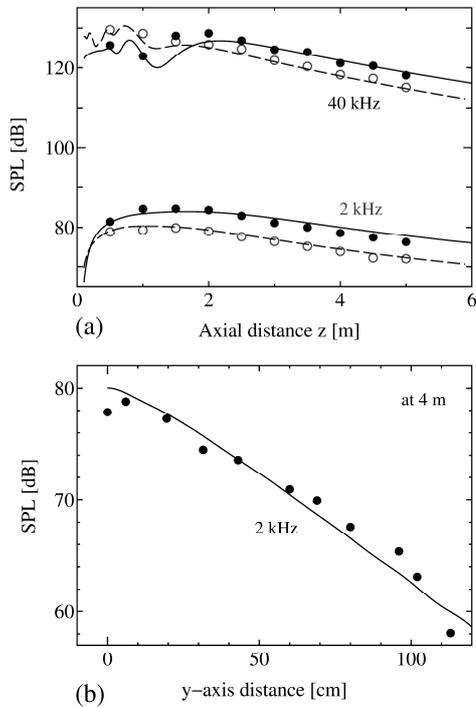


図4 伝搬特性(a)と指向特性(b). 白丸は自由空間,黒丸は床に置いたとき. 実線,破線は理論

音をモデル式に含めて計算する必要があるが,計算の簡便のためにKZK方程式を利用している.このような近似にも拘わらず,全体的に理論と実験はよく一致している.同図(b)は,エミッタから4 m離れた位置で,床に対して垂直方向に測定した2 kHz 差音のビームパターン特性である.理論と実験に若干ずれがあるが,この場合も大まかに両者はよく一致している.

ところで,パラメトリックスピーカを駆動する際に,オーディオ信号の入力から出力までの流れを眺めてみると,次の3つのプロセスに分けることができる.最初は,送りたいオーディオ信号を,オーディオ周波数範囲を超えたいわゆる超音波帯のキャリア信号に乗せるプロセスである.この乗せる操作は通信方式における振幅変調で,変調器によって行われる.すなわち,周波数領域で言えばベースバンドの入力信号を超音波領域にアップコンバートする.したがって,被変調信号の周波数帯域は超音波領域にあり,たとえこの信号を直接聞いたところで入力信号は聞こえない.

次は,被変調信号をパワー増幅して超音波エミッタを駆動するプロセスである.エミッ

タは,通常,キャリア周波数付近に共振をもつ超音波素子で構成され,このエミッタの共振特性を含んだ高音圧の超音波が空中に放射される.最後のプロセスは,キャリア超音波の非線形伝搬に伴う自己復調プロセスである.キャリア周波数の両側にサイドバンドをもつ両側波帯方式であっても,一方のみの側波帯をもつ単側波帯方式であっても,キャリアとサイドバンドの高音圧の超音波は空間で非線形相互作用を引き起こし,入力信号の情報をもつ仮想音源が空間に分布する.すなわち,アップコンバートされた超音波のエネルギーの一部が,ベースバンドの入力信号の生成に使われる.この復調プロセスは通信における2乗検波であり,空気非線形性がこの検波の働きを担っている.

本研究では,上記の一連のオーディオ信号の流れをプロセスごとに定式化によるモデリングを行い,コンピュータシミュレータを通して最終的な所望のオーディオ信号の品質,すなわち歪み特性,入出力特性等の特性改善をソフト上で行える環境作りを目的とした.この目的を達成することで,ハードウェア,特にアナログ機器の整合性の問題に悩まされることなく,またフィールド実験を通すことなく,パラメトリックスピーカの特性改善,例えば歪み低減などの指針が得られることになる.更に,変調器という物理的なハードウェアをなくすることも意図としている.

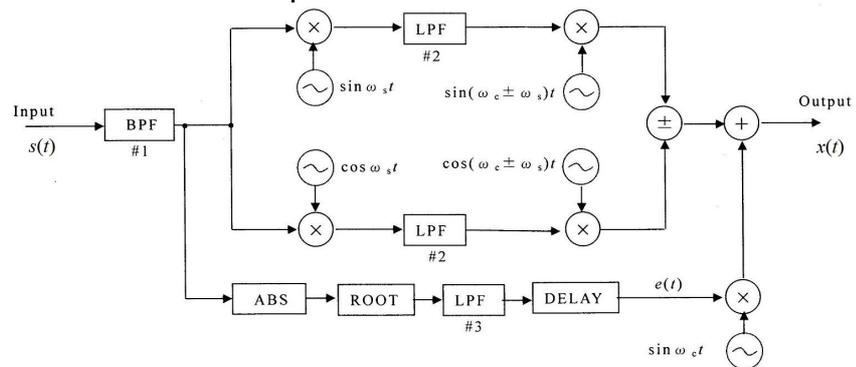


図5 変調シミュレーションのブロック

図5はWeaver方式に基づくダイナミックSSB変調方式のブロック図である.オーディオ信号  $s(t)$  はwav形式で入力され,サブキャリア周波数4.1 kHzとしている.最終的に,加算+すると上側波帯信号(USB),また減算-すると下側波帯信号(LSB)を得る.一方,40 kHzのキャリア信号の振幅は入力信号の振幅に応じて決定され,それにSSB信号が加算される.以上の信号の流れにおいて,各種フィルタはすべてKaiser型FIRで構成した.以上のダイナミックSSB変調シミュレータは,最終的にwav形式のハイレゾ音源信号  $x(t)$  として出力することができる.よって,物理的な変調器を必要とせず,ハイレゾ音源対応のデジタルパワーアンプを介して超音波エミ

ッタを駆動することできるので、本変調シミュレータ単独での利用価値がある。

超音波エミッタの機械共振で超音波が放射される。その共振付近は、通常、コイル(質量)、コンデンサ(ばね)、そして抵抗(機械抵抗)の直列回路と等価である。そして、超音波はその回路に流れる電流に比例して放射されるとモデル化でき、エミッタのインパルスレスポンス  $h(t)$  を求め、被変調信号とのたたみ込み積分で、エミッタからの超音波出力信号が模擬される。

パラメトリック音は、被変調波の超音波信号の自己復調プロセスの結果として発生する。そのプロセスの簡単な Berklay のモデル式である。このモデル式において、パラメトリック音の大きさは超音波の包絡情報をもつ関数の2階の時間微分で与えられ、シミュレーションにおいてはデジタル微分(差分)で置き換えることができる。

以上の一連のプロセスにおいて、入力から自己復調までの信号の流れをソフトウェアで実現した。アナログ回路のようなブロックごとの、例えば回路で重要となる整合性に配慮する必要がない。これは、本提案シミュレータの特長である。

信号の流れはすべてサンプリング周波数 96 kHz、量子化 16 bit で統一し、入力ファイルと出力ファイルはともに音声データ形式の wav として、パソコンや携帯プレーヤで記録・再生できる状態にした。今回のシミュレータにおいて、自己復調プロセスは Berklay の式に従って表示したが、キャリア音圧の適用範囲に自由度が高い Merklinger の式も同様に行うことができる。なお、時間微分は7次のデジタル微分に置き換えている。

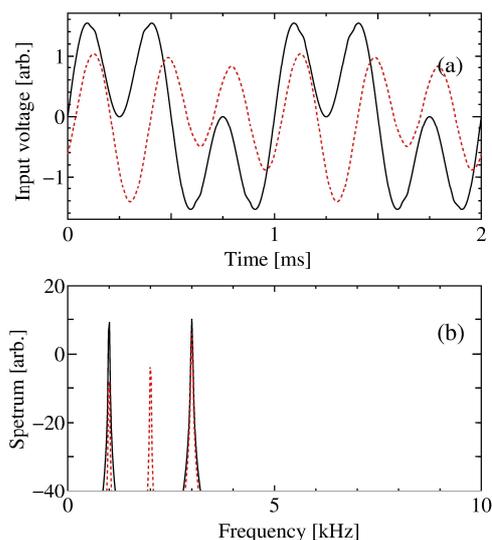


図6 1kHzと3kHzの加算信号に対するパラメトリック音のシミュレーション結果。(a)は時間波形、(b)はその周波数スペクトル

一例として、等振幅の1kHzと3kHzの正弦波を加算したオーディオ信号を準備し、その信号を変調プロセスに入力した。この際の

入力オーディオ信号が図6の実線で、その復調信号が点線である。ここでは、変調後の超音波キャリア40kHz、LSBの37kHz、39kHz成分の振幅はすべて等しいとして超音波エミッタに入力している。

周波数スペクトルの同図(b)を見て明らかに、自己復調プロセスの時間微分に起因して、3kHzの高周波成分が強調されている。また、37kHzと39kHzの超音波信号の相互作用から、2kHzの混変調歪み成分の発生が理解できよう。したがって、この歪みは入力側にそれを打ち消すような信号を予め加算することで最終的に歪みを低減化できる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

上田浩次, 宮田康史, 神取祐次, 谷寄徹也, 鎌倉友男, “準ミリ波を利用した路面上の水と氷の識別方法”, 計測自動制御学会論文集, **54**, 331-339 (2018). [査読有]

鎌倉友男, “非線形音響の研究紹介”, 日本機械学会誌, **119** (1167), 68-71 (2016). [査読無]

鎌倉友男, 谷寄徹也, 上田浩次, “冬タイヤ用音響同定システムの開発”, IEICE Fundamentals Review, **9**, 84-91 (2015). [査読無]

[学会発表](計16件)

鎌倉友男, 酒井新一, “パラメトリックスピーカの変復調過程に関するシミュレータ”, 超音波研究会, **US2017-105** (2018年1月).

鎌倉友男, 林 栄男, 安達日出夫, 野村英之, “マイクロホンの広帯域校正 超音波の非線形伝搬の利用”, 超音波研究会, **US2017-67** (2017年11月).

酒井新一, 鎌倉友男, “パラメトリックスピーカ用変調シミュレータの構築”, 日本音響学会秋季研究発表会, **2-12-4** (2017年9月).

鎌倉友男, 林 栄男, 安達日出夫, 野村英之, “高周波用マイクロホンに対する音圧校正法の提案 - 非線形高調波の利用 -”, 日本音響学会秋季研究発表会, **1-2-1** (2017年9月).

鎌倉友男, 酒井新一, 小沢 誠, 梅森洋, “パラメトリックスピーカの変換効率改善”, 超音波研究会, **US2016-113** (2017年1月).

鎌倉友男, 安達日出夫, 林 栄男, “非線形高調波を利用した高周波マイクロホンの音圧校正”, 超音波研究会, **US2016-52** (2016年11月).

鎌倉友男, 安達日出夫, 林 栄男, クレメント T. グレゴリー, “高周波領域におけるマイクロホンの音圧校正-非線形高調波の応用”, 日本音響学会秋季研究発表会, **1-1-2** (2016年9月).

田中正吉, 野村英之, 鎌倉友男, “音速と流速が場所で変化しているときのドップラー効果その2～ドップラーシフト改善計算式の実証実験結果報告～”, 超音波研究会, US2016-28 (2016年6月).

田口光輔, 野村英之, 鎌倉友男, “パラメトリックスピーカにおける両耳間強度差及び時間差～剛体球による人の頭部のモデル化～”, 超音波研究会, US2015-108 (2016年2月).

長島龍登, 野村英之, 鎌倉友男, “カード型パラメトリックスピーカの試作と性能評価”, 超音波研究会, US2015-92 (2016年1月).

趙 翔, 鎌倉友男, 野村英之, “パラメトリックスピーカから生成されたオーディオ信号の予測”, 超音波研究会 US2015 -91 (2016年1月).

戸田祐輔, 鎌倉友男, 安達日出夫, 野村英之, 林 栄男, 安野功修, “超音波用セルラーポリプロピレンマイクロホンの試作と特性”, 超音波研究会, US2015-81 (2015年12月).

本多孝如, 野村英之, 安達日出夫, 鎌倉友男, “パルス圧縮パラメトリック超音波のSNR改善の検討”, 超音波研究会, US2015-69 (2015年11月).

鎌倉友男, “超音波の非線形伝搬に伴う音圧飽和”, 超音波研究会, US2015-68 (2015年11月).

野村英之, 安達日出夫, 鎌倉友男, “パルス圧縮パラメトリック音源を用いた低周波超音波イメージングの実現”, 超音波研究会, US2015-54 (2015年9月).

鎌倉友男, 野村英之, グレゴリー T. クレメント, “高集束空中超音波ビーム内で発生する2次効果”, 超音波研究会 US2015-1 (2015年4月).

〔特許関連〕(計2件)

“パラメトリックスピーカ, 超音波エミッタのシミュレータ及びパラメトリックスピーカの開発システム”, 鎌倉友男, 酒井新一, 菅原利典, 長島裕太, 株式会社スマートエーイーと三愛電子工業株式会社, 特願 2018 -043671 (2018年3月10日), 国内.

“超音波マイクロフォン装置及び超音波マイクロフォンの出力信号を電気単位のボルトから音響単位のデシベルに変換する方法”, 鎌倉友男, 林 栄男, 安野功修, 安達日出夫, 株式会社検査技術研究所, 特願 2015-248084 (2015年12月19日), 国内.

6. 研究組織

研究代表者

鎌倉友男 (KAMAKURA, Tomoo)

電気通信大学・産学官連携センター

・客員教授