

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04010

研究課題名(和文) 超音波の非線形伝搬に伴う広帯域化を利用したマイクロホン簡易感度校正の実現

研究課題名(英文) Measurement of sound pressure sensitivity of high-frequency microphone using multiple harmonics in intense ultrasonic beams

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：強力な超音波ビームは媒質の非線形性に起因して伝搬とともに波形が歪み、ビーム内に多くの高調波が発生する。この高調波の音圧成分は非線形波動方程式(KZK方程式)を用いて正確に理論予測できるので、高周波マイクロホンの音圧校正が可能となる。測定に用いた音源は40kHzと63kHzの超音波を放射できる、口径118mmの超音波エミッタである。また、テスト対象とした高周波マイクロホンは圧電性のセルラーポリプロピレンフィルムを利用した試作品である。最大13次までの高調波(40kHzから567kHz)を利用して感度を求めた結果、400kHz以下で-70から-80dB re 1V/Paであることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

必然的に発生する超音波の非線形性という物理現象を積極的に利用して、特に数十kHz以上の高周波受信に特化した広帯域マイクロホンに適用可能な新しい音圧校正法を提案した。それと同時に、新圧電フィルムを用いて、高周波超音波の受信可能マイクロホンを試作した。そのマイクロホンの感度を得るために、提案の校正法を適用し、具体的な感度特性を紹介した。近年の非接触超音波検査法、すなわち超音波トランスデューサを検査体に直接接触せず、また音響カプラントを塗布することなく、内部構造を観測する技術の補助装置として、あるいは新技術として、本研究成果を利用する予定である。

研究成果の概要(英文)：Intense ultrasonic beams suffer progressive waveform distortion due to the nonlinearity of the air, causing numerous harmonics to be generated in the beam. Since these harmonic pressures can be theoretically predicted with sufficient accuracy by the Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov model, it is possible to obtain the pressure sensitivity of a microphone at high frequencies. To generate intense ultrasonic waves, a planar aperture source of 118 mm in diameter and with resonant frequencies of 40 and 63 kHz was used. A specialized microphone developed and tested for receiving high-frequency ultrasonic waves was fabricated from a single cellular polypropylene (CPP) sheet. Using at least the first nine harmonics, i.e., those in the range of 40 to 567 kHz, it was demonstrated in this study that the frequency response of the CPP microphone has a sensitivity of -70 to -80 dB re 1 V/Pa at frequencies below 400 kHz.

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 高調波 セルラーポリプロピレン 音圧校正 マイクロホン KZK方程式

1. 研究開始当初の背景

近年、高周波数の空中超音波を診断に用いることが医療診断や非破壊検査分野で盛んで、これらに対応する超音波技術がライフィノベーション、あるいは安全・安心社会の構築に欠かせない基盤技術として位置づけられてきている。そして、このような超音波検査・診断において、観測点における超音波の音圧を具体的に把握することが重要な課題となっている。また、一般の音響装置もその出力には可聴音だけでなく、高域周波数の超音波を放射している場合があり、超音波暴露の観点から音圧評価が求められている。

2. 研究の目的

1. の背景の観点から、本研究では高周波用のマイクロホンに対応できる音圧感度の計測、すなわち校正法を目的とした。この方法は音波の非線形伝搬に伴って必然的に発生する高調波を利用したもので、原理的には高調波が観測される周波数帯域まで校正可能である。現在、市販されている精密計測用コンデンサマイクロホンの感度は振動膜を利用している観点から周波数の上限としてせいぜい 150 kHz までであり、保証されるのはそれよりも低い 100 kHz ほどといわれている。今回提案する音圧校正は、超音波の非線形伝搬で必然的に生ずる高次高調波を利用する非線形高調波法で、原理的には高調波が観測されるまで音圧校正できる点が特長になり、150 kHz までという縛りはない。

本報告で感度校正の対象とするマイクロホンは、多孔性ポリプロピレン圧電エレクトレット (Cellular polypropylene electret, 以降、略してセルラーPP) 材を用いた試作品である。このセルラーPP マイクロホンは現行のコンデンサマイクロホンのような振動膜を利用しないことから、150 kHz を超える高周波まで受波可能と思われる。

3. 研究の方法

3.1 マイクロホン校正に対する基本概念

進行波場であろうが定在波場であろうが、計測したい任意の点での音圧が精度よく計測できること、これが理想である。すなわち、マイクロホンの出力電圧 V から、マイクロホンを置く位置におけるそのマイクロホンを置かないときの音圧 P を求めることになる。これらの値からマイクロホンの音圧感度 (Sensitivity) $K = V/P$ が定義される。この K を求めるのが本研究の最終目的になる。

ところで、音場特性は使用する送波音源の寸法や周波数といった音源条件、そして温度や湿度、気圧の気象条件に依存する。そのような条件が事前に分かれば、音場は波動方程式を基礎とした理論モデル式をもって正確に知ることができる。剛体平面バッフル内のピストン音源を例にとると、そのピストンの振動速度が予め知ることができ、上記の条件が定めればレイリーの積分式を利用して音圧予測値が求められる。しかも、点としての音圧 P が得られることから、マイクロホンを音場に置くことでたとえ場が乱れても (平面波入射を仮定)、そのときのマイクロホンの出力電圧 V が P を反映している。したがって、この考えを拡張すれば、どんなに高い周波数であってもマイクロホンからの出力信号が観測される限り、点としての感度、したがって音圧が求められる。

以上のアイデアを更に拡張し、超音波の非線形伝搬に伴う高調波を利用して感度校正の周波数範囲を広げる。すなわち、KZK (Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov) の非線形波動モデル方程式を利用して伝搬に伴う高調波の音圧成分を理論予測する。そして、この理論データと実験データを対等させることで、基本波成分のみならず高調波成分に対する音圧感度を求める。

3.2 実験方法

今回の「非線形高調波法」の手順を説明する。

(i) 正確にしかも精度よく音圧校正された高周波標準マイクロホン A を、40 kHz の超音波音源の音軸上の位置 Q (距離 z) に置き、音源から放射された超音波の音圧波形を観測する。なお、観測点 Q で多くの高調波を発生させるように、高音圧の超音波を音源から放射する。

(ii) 観測した波形のフーリエ解析とマイクロホン A のデータシートおよび自由音場補正值から、基本波および高調波の音圧 P_n (n は第 n 次高調波) を算出する。この際、低い周波数ほどマイクロホンの感度校正および自由音場補正の精度が高いという前提のもと、目安として 100 kHz 以下の周波数成分を理論値との比較に利用する。具体的には、40 kHz の基本波 P_1 、80 kHz の第 2 高調波 P_2 を理論と実験の比較対象成分とする。

(iii) KZK 方程式を数値解析して、位置 Q での理論音圧値を求める。すなわち、音源開口面の音圧 p_0 は一様分布 (音場は音軸に関して回転対称) とし、 p_0 を変えながら(ii)で得られた P_1 と P_2 とフィッティングして音源音圧 p_0 を決定する。音源音圧 p_0 が決まれば、第 3 高調波以上の高次高調波成分に対する理論値 P_n が同時に得られる。

(iv) マイクロホン A と今回の試験用セルラーPP マイクロホンを、設置位置 Q を変えないで交換する。そして、(i)と同じ音源条件 (周波数や駆動電圧が同じ値) のもと、試験用マイクロホンか

らの出力電圧信号を観測する。その信号をフーリエ解析して高調波成分 V_n を求める。

(v) (iii) で得られた理論値 P_n と, (iv) で得られたマイクロホンからの実験値 V_n から感度 $K_n = V_n/P_n$ を決定する。これが対象 (テスト) マイクロホンの感度となる。

3.3 セルラーPP マイクロホン

非線形高調波法の妥当性を実証するために、高周波域まで音圧応答が期待できる新圧電材の多孔性ポリプロピレン圧電 (Cellular polypropylene, 略してセルラーPP) フィルムを使用したマイクロホンを試作した。セルラーPP とは、ポリプロピレン材料内部に偏平状のポイド (空孔) を持たせるように2軸延伸してフィルム状にした材料であり、内部に多くのポイド部分を持つ。このフィルムにコロナ放電を行うと、ポイドを挟んで対になった電荷が固定配置し、ポイド部分に多数の双極子群すなわち分極が生じ、フィルムの表面近傍において、表面に終端する分極電荷を中和する極性の電荷が誘起される。フィルムに力が加わると帯電電荷、すなわち分極電荷間の距離が減少し、分極値が低減する。一方、誘起電荷は強く束縛された電荷であり容易には変化しないので、差分の電荷が浮遊電荷として電極上に焦出される。この電荷を取り出せば、これがフィルムに使用する力に応じて変化するので、マイクロホンとして利用できる。ポイド部分は容易に帯電電荷間距離を変化でき、したがって圧電フィルム PZT や PVDF と異なり、大きな圧電 d 定数と圧電 g 定数を示す理由となっている。

径 4 mm で長さ 3 mm の真鍮製円筒バッキング材に厚さ 50 μm のセルラーPP フィルムを貼り付け、マイクロホンを試作した。また、内蔵 IC として高入力インピーダンスのオペアンプを利用した。これらの部品を外形 6 mm、長さ 12 mm の円筒ハウジングに納めた。

3.4 セルラーPP マイクロホンの感度の一例

セルラーPP マイクロホンの音圧感度に対する計測結果の一例を図 1 に示す。節 3.2 の手順に従って、超音波音源の 1 次共振および 2 次共振周波数に対応する 40 kHz、および 63 kHz の正弦波バースト信号を加えたときに発生するそれぞれの高調波成分を対象に、マイクロホンの音圧感度を求めた結果である。図中の黒丸と白丸はそれぞれ 40 kHz と 63 kHz それぞれの高調波を利用したときの結果である。

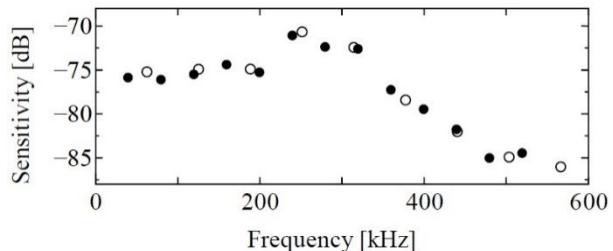


図 1 試作したセルラーPP マイクロホンの感度特性。黒丸は 40 kHz、白丸は 63 kHz の高調波を利用してのデータ

4. 研究成果

主要な成果

図 1 に見られるように、試作したセルラーPP マイクロホンの感度帯域は 400 kHz ほどで市販の 1/8 インチ (およそ 3 mm 径) コンデンサマイクロホンの帯域 150 kHz に比べて倍以上あることが分かる。一方で、感度はせいぜい -70 dB re 1 V/Pa で、市販の同径の 1/4 インチマイクロホンがおよそ -50 dB なので 20 dB 低い。マイクロホンの感度は最終的に SN 比との兼ね合いが重要であるが、その値が大きいほどよい。この意味では感度の向上が重要である。なお、250 ~ 300 kHz 付近の感度のピークはセルラーPP フィルム内のポイドを含む材料の厚み共振に起因すると思われるが、更なる要因究明が必要である。

図 1 の感度特性で特に注目したい点は、40 kHz 超音波の第 8 高調波 (周波数 320 kHz) と 63 kHz 超音波の第 5 高調波 (315 kHz) における感度は -72 dB re 1 V/Pa とほぼ一致している点である。この場合、周波数の差 5 kHz は 300 kHz に比べてわずかであって、この差程度ではマイクロホンの感度が大きく変わらないと仮定すれば、図 1 の取得データの信頼性が高いと言える 1 つの根拠になる。

カートリッジ型への拡張

セルラーPP マイクロホン使用の汎用性を高めるために、カートリッジ型とした。これは、音場精密計測として利用されている市販のマイクロホンカートリッジの振動膜をセルラーPP フィルムに置き換え、そのフィルムをカートリッジの背極に直付けしたものである。こうすることで、市販のプリアンプとパワーモジュールが有効に利用でき、広帯域のマイクロホンセットが構成可能となる。ここでは、1/4 インチカートリッジを測定対象とし、その感度特性を図 2 に示

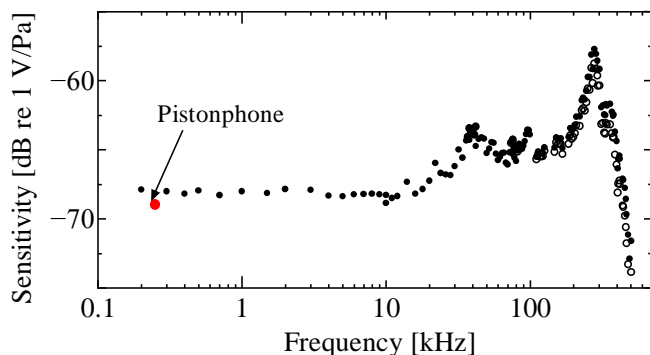


図 2 200 Hz から 504 kHz までのカートリッジ型セルラーPP マイクロホンの感度特性。赤丸はピストンホンを利用した感度

す。マイクロホンの径がほぼ等しい図 1 のデータと比較して、40 kHz 以上の高周波帯域で全体的に 10 dB ほど感度が上昇していることが分かる。この感度上昇の理由は、カートリッジと次段のプリアンプとの回路としての整合性がよいことに起因するものであろう。なお、200 Hz から 100 kHz までは、スピーカとツイータを用いた置換法に基づいて感度を求めている。また、図中の赤丸はピストンホンで校正した結果で、置換法の値とほぼ一致している。

感度の経時変化

マイクロホンの観点から議論すると、時間が経過したとしても感度特性が変わらないほうがよい。すなわち、経時変化の少ないマイクロホンが望まれる。

図 3 はセルラーPP マイクロホンを対象に、1 年間に 3 回、非線形高調波法を利用して感度を求めた結果である。ここで、特に湿気対策をせず、常温で対象マイクロホンを保管した。この感度データを見る限り、全体的に大きな差異は生じていない。ただ、特に 300 kHz 以上の高周波側で 2~3 dB の相違が見られる。この相違がセルラーPP 材や IC を含めた回路上の経時変化に起因するものか、あるいは本提案の非線形高調波法の測定誤差に起因するものかは現時点はっきりしない。

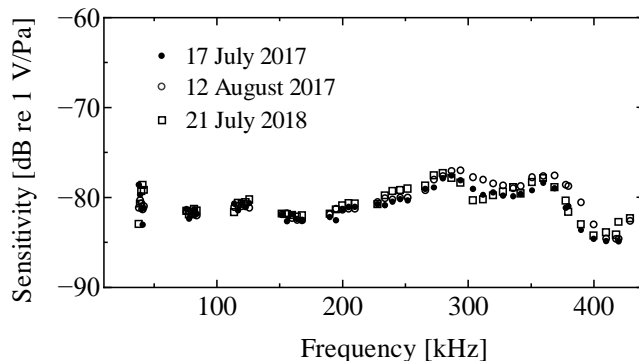


図 3 感度の経時変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tomoo Kamakura, Hideo Hayashi, Yoshinobu Yasuno, and Hideyuki Nomura	4. 巻 -
2. 論文標題 Measurement of sound pressure sensitivity of high-frequency microphone using multiple harmonics in intense ultrasonic beams	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Accepted for publication in Acoust. Sci. & Tech.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鎌倉友男	4. 巻 76
2. 論文標題 空中超音波の波動としての側面	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本音響学会誌	6. 最初と最後の頁 279-284
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20697/jasj.76.5_279	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shokichi Tanaka, Hideyuki Nomura, and Tomoo.Kamakura	4. 巻 93
2. 論文標題 Doppler shift equation and measurement errors affected by spatial variation of the speed of sound in sea water	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 65-73
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ultras.2018.12.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鎌倉友男, 酒井新一
2. 発表標題 空中超音波トランスデューサの第1および第2共振を用いた高周波音源
3. 学会等名 電子情報通信学会 超音波研究会 US2021-1
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鎌倉友男, 林 栄男, 安達日出夫
2. 発表標題 1/8インチカートリッジ型セルラポリプロピレンマイクロホン
3. 学会等名 電子情報通信学会 超音波研究会 US2019-94
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中正吉, 野村英之, 鎌倉友男
2. 発表標題 ドップラーシフトを利用したリモート水温計の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会 超音波研究会 US2019-39
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鎌倉友男, 酒井新一
2. 発表標題 いまさらパラメトリックアレイ, されどパラメトリックアレイ
3. 学会等名 日本音響学会 秋季研究発表会 2-11-7 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鎌倉友男, 林 栄男, 安達日出夫, 野村英之
2. 発表標題 高周波マイクロホン用音圧校正システムの構築 ~ 非線形高調波の利用 ~
3. 学会等名 電子情報通信学会 超音波研究会 US2018-66
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鎌倉友男, 林 栄男, 安達日出夫, 安野功修, 野村英之
2. 発表標題 カートリッジ型セルラポリプロピレンマイクロホンの実現
3. 学会等名 電子情報通信学会 超音波研究会 US2018-10
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関