

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630260

研究課題名(和文)パラメトリックスピーカを用いた建築音響材料特性の計測法の開発

研究課題名(英文)Development of measurement method of material's acoustical properties by using a parametric loudspeaker

研究代表者

坂本 慎一 (SAKAMOTO, Shinichi)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：80282599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：自由音場を想定して行う壁面の反射特性や斜入射吸音率の測定では、試料端からの回折波が計測誤差に大きく影響して測定が困難になる。近年、実用化されるようになってきたパラメトリックスピーカを音源として用いれば、音波を測定試料中心の狭いエリアに集中させることができるため、試料端部からの回折波の問題を回避できる可能性がある。本研究では、建築音響計測法に対するパラメトリックスピーカの適用可能性を実験的に調べるため、建築音響測定に供する音源装置の作成、音源の基本特性の把握、実験室における壁面反射特性に対する適用性検討を行い、反射特性の計測に対してこの種のスピーカの応用が有効であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Edge diffraction seriously affects measurement results of sound reflection and absorption, and as a result, accuracy of the measurement is often deteriorated in an acoustical measurement assuming a free sound field. Such an edge diffraction can be avoided by using a parametric loudspeaker, which has acute directivity characteristics, because the incident sound is concentrated to a center area of the measurement specimen and the sound being incident on the edge area is restrained. In this study, at first, a parametric loudspeaker being used for architectural acoustic measurement was produced experimentally. After investigation on fundamental characteristics of the produced sound source, applicability of the parametric loudspeaker to reflection characteristics of diffusive walls was experimentally confirmed.

研究分野：工学

キーワード：計測法 音響材料 パラメトリックスピーカ

1. 研究開始当初の背景

建築の空間音響性能を評価し、設計に役立てるために、空間を構成する境界の音響特性を正確に測定することは非常に重要である。特に、室内音響伝搬性能には吸音率・音響インピーダンスおよび反射・散乱特性が深くかかわっている。それらの計測方法としては、音響管を用いて行う垂直入射吸音率およびノーマル音響インピーダンス計測法(ISO 10534-1,-2, JIS A 1405)、残響室を用いる残響室法吸音率測定法(ISO 354, JIS A 1409)が規格化されている。また、斜入射吸音率については無響室で行う計測法等が試みられているが、原理的に難しい計測であるため、標準的な測定法として確立されるには至っていない。一方、音響材料が実際に施工されている現場で、実使用条件下における性能を計測する現場測定法についても、2 マイクロホン法と pu センサを用いた手法や、音源としてアンビエントノイズを用いる手法等、先進的な方法が提案されている。

以上の音響材料特性測定法のうち、無響室における斜入射吸音率測定や半自由空間における音響インピーダンス測定では、スピーカ等の点音源からの球面波入射を、音源からの距離と波長との比に応じて平面波入射と等価とみなして吸音・反射特性が定式化されている。定式化においては無限大の大きさの試料が仮定されるため、反射波は一様で単純であるが、実際の計測では測定試料は必ず有限の大きさを持ち、入射音は音源点を中心としたあらゆる方向に伝搬するため、周波数によっては測定試料の端部からの回折波の影響が顕著となり誤差要因となる問題点がある。例えば無響室における斜入射吸音率測定は計測が困難であり、入射角度が 90 度に近づくにつれて計測誤差は大きくなる。この計測誤差は、音源からの入射球面波が測定試料の端部に到達することが原因であるので、指向性の鋭い音源を用いて試料端部に試験信号が到達しないように制限できれば計測誤差を低減することが可能となるはずである。しかしながら、従来の音源スピーカでは、そこまで鋭い指向性をもつトランスデューサが存在せず、精度の高い斜入射吸音測定等を行うことは困難であった。

近年、電子部品の高速度化や低価格化に伴い、空気中における強力超音波の非線形性を利用して、従来のスピーカでは実現不可能だった狭指向角をもつ音源装置(パラメトリックスピーカ)が実用に供してきた。この技術を援用すれば、これまでに不可能だった精度の高い斜入射吸音特性の測定や、現場における精度の高いインピーダンス測定が可能となると期待される。そこで、狭指向性音源(パラメトリックスピーカ)を用いる建築材料の反射・吸音特性の計測の可能性を探ることを目的として、実験的研究を計画した。

2. 研究の目的

本研究は、超音波のパラメトリックアレイ現象を利用した超指向性音源であるパラメトリックスピーカを音源として用い、音響材料の反射・吸音特性を精度よく計測する新たな建築音響測定法を開発することを目的とする。この目的のため、具体的には、

- (1)パラメトリック音源装置の試作
 - (2)パラメトリック音波の物理特性の把握
 - (3)実験室における材料音響特性の計測法の検討
- を行う。

3. 研究の方法

(1)パラメトリック音源装置の試作

本研究で実験的に用いるパラメトリックスピーカを試作する。提案手法は非常に鋭い指向性で知られるパラメトリックスピーカを用い、対象となる壁面等に対して局所的に測定音を放射することにより周辺からの回折波の影響を受けずにその音響特性を測定しようというものである。一方、パラメトリックスピーカは何らかの方法で変調した超音波を放射し、空気伝搬中の非線形性を利用して可聴音を復調するという極めて特殊な再生原理に基づいている。また提案法では対象となる壁面に対して局所的かつ様々な入射角に対する音響特性を測定する必要がある。そこで以下のコンセプトに基づき音源装置を製作する。

- ・市販のパラメトリックスピーカでは変調部がブラックボックス化してしまうことから、変調部も含めて制御可能で、かつ測定実験に十分な精度の出力が可能であること
- ・測定対象範囲に対して正確かつ局所的に出力できること
- ・将来的な応用を考慮し、アレイ制御により出力方向を制御できること

(2)パラメトリック音波の物理特性の把握

狭指向性音源が発する復調可聴音波の距離一音圧強度特性、指向特性、およびそれらの特性と伝送周波数との関係等、狭指向性音源自体が有する基礎的な音響伝搬特性に関する実験的検討を行う。

(3)実験室における材料音響特性の計測法の検討

パラメトリックスピーカを応用する材料の音響特性の測定としては、反射特性(反射指向性)の測定と、吸音特性が考えられる。本研究では、室内音響で用いられる拡散体等の壁面の拡散性の測定に応用する実験を行う。測定試料として反射性の板材料を用い、試料中心から同心円状に測定点を配置して反射指向性を測定する(図1参照)ことにより、壁体の散乱性能の評価に応用する可能性を探る。基礎的検討として、不要な反射音を避けるために無響室において実験を行う。



図1 板材料からの反射特性の概念図

4. 研究成果

(1) パラメトリック音源装置の試作

前述のコンセプトに基づき音源装置の製作を行った。試作した音源装置を図2に示す。駆動信号に高速1bit方式を用い、汎用ロジックIC出力をD級出力と見なすことにより直径1cmの超音波素子576個に対してFPGAを用いて個別に制御するシステムを30cm四方の基板上に構成した。超音波領域に特化した $\Delta\Sigma$ 変調を用いて1bit符号化した信号で駆動することによりバッテリー駆動可能であるなど高効率かつ、信号側では100dB程度のS/Nである高精度な超音波信号を出力することができる。また、各素子を個別に制御できることから約 0.7° の精度で出力ビームの角度を調整することが可能であり、カメラからの画像情報と連動することにより実測値でも画面内で選択した距離2mの任意の箇所に対して5cm四方の精度で局所再生可能であることが確認された。



図2 音源装置

(2) パラメトリック音波の物理特性の把握

パラメトリックスピーカの基本的な特性を把握するため、指向特性及び距離減衰特性を測定した。測定は、Swept-sine法によるインパルス応答測定に基づいて行った。Swept-sine信号は、音源から放射する音圧の周波数が低周波数から高周波数まで連続的に変化する信号として作成する。本研究では音源から出力される超音波の差音周波数が可聴音波の周波数となるので、2つの超音波の差音周波数が連続的に変化するような信号を電氣的に生成した。図3(a)、(b)に、作成した音源信号の時間波形とスペクトログラムを示す。周波数40kHzを中心に、周波数が線形に上昇していく音波と線形に下降していく音波を合成している。

指向特性の測定 図4のように音源点にスピーカを設置し、そこから4m離れた場所に10cm間隔で11点の受音点を設定した。Swept-sine法により音源-受音点間のインパ

ルス応答を測定し、得られたインパルス応答から1/3オクターブバンド音圧レベルを算出した。測定結果を図5に示す。横軸は中心の受音点からの距離を示しているが、全周波数帯域において、中心から30cm離れて中心点との音圧レベル差10dB以上となっており、鋭い指向性となっていることが示される。

距離減衰測定 図6に測定結果を示す。横軸は音源-受音点間の距離、縦軸は音圧レベルの相対値を表し、参考のために球面波の距離減衰性状(-6dB/D.D)を太実線で示した。音源点と受音点の距離が2mを越えると音圧レベルが減衰しており、その減衰率は、高周波数帯域になるにつれ緩やかになる傾向が見られた。

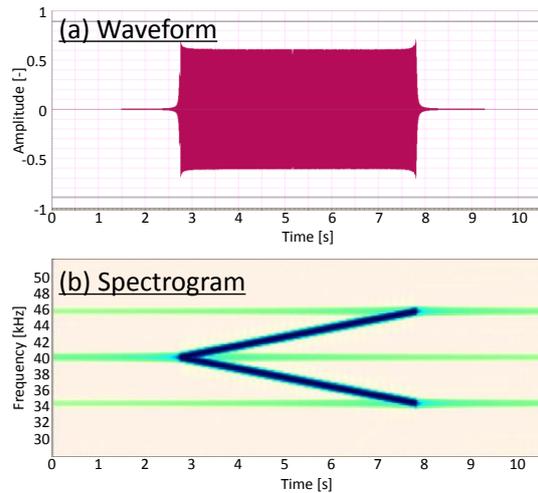


図3 測定で用いた Swept-sine 信号

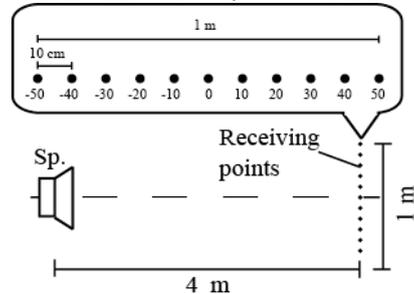


図4 音源-受音点配置

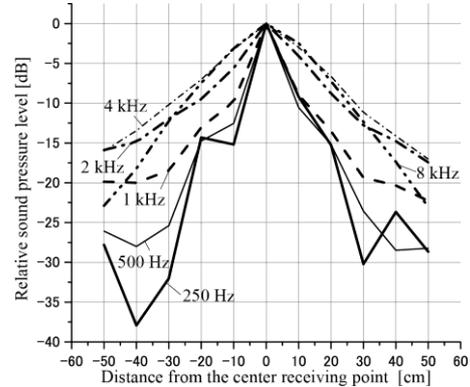


図5 指向性の測定結果

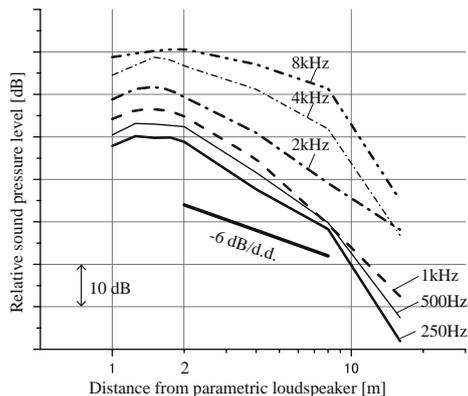


図6 距離減衰の測定結果

(3) 実験室における反射特性の計測法の検討
 板の反射指向性の測定に対するパラメトリックスピーカの応用可能性を調べるため、音源としてパラメトリックスピーカを用いた場合と、従来用いられてきたラウドスピーカを用いた場合における反射指向性の実験を行い、両者を比較した。この実験は、不要な反射を避けるために無響室で行った。反射板と音源点及び受音点の位置関係を図7に示す。音源の壁面に対する入射角度は 45° 、音源と試料中心までの距離 D は 3.4 m 、受音点と試料中心までの距離 R は 3 m 、受音点数は 37 (5° おきに $0^\circ \sim 180^\circ$) である。どちらの音源の場合も Swept-sine 法によるインパルス応答測定を行ったが、ラウドスピーカ (Mixcube, Avantone) を用いた場合は継続時間 2.73 秒 (サンプリング周波数 48 kHz , point 数 2^{17}) の Swept-sine 信号を用いた。測定対象としたのは、図8に示す3種類の拡散板である。音源-受音点間のインパルス応答を計測し、得られたインパルス応答から切り出した反射音のエネルギーを $1/3$ オクターブバンドごとに算出し、その最大値で基準化した。結果を図9に示す。

すべての実験条件で、周波数が高くなるにつれ、両音源による結果が近づく傾向が見られた。音源がラウドスピーカの場合、反射指向性はブロードであるが、パラメトリックスピーカの場合には Case 2 および 3 で低周波数帯域 (250 Hz , 500 Hz) で正反射方向に鋭い指向性となった。周波数が低い (波長が長い) ほど測定試料の有限性による影響が顕著になり、回折の影響が大きくなるため、指向性の鋭いパラメトリックスピーカによる結果が低周波数帯域でラウドスピーカの結果と異なるのは妥当であると考えられる。

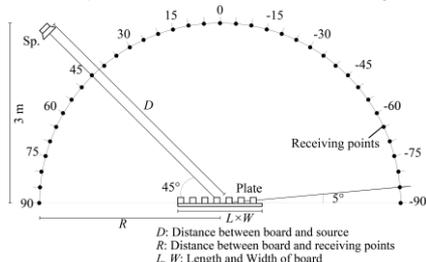


図7 音源, 測定試料, 受音点の配置

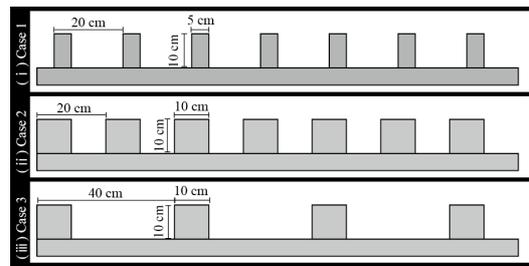
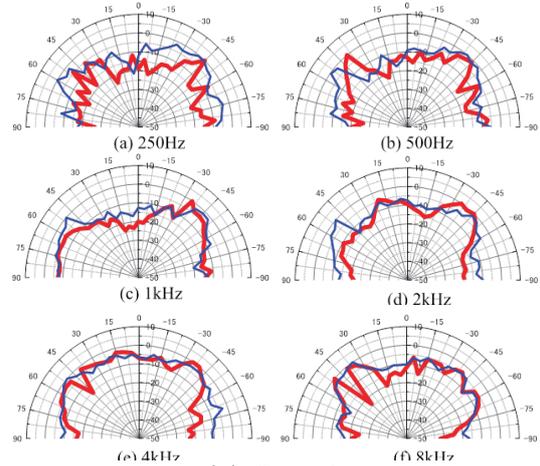
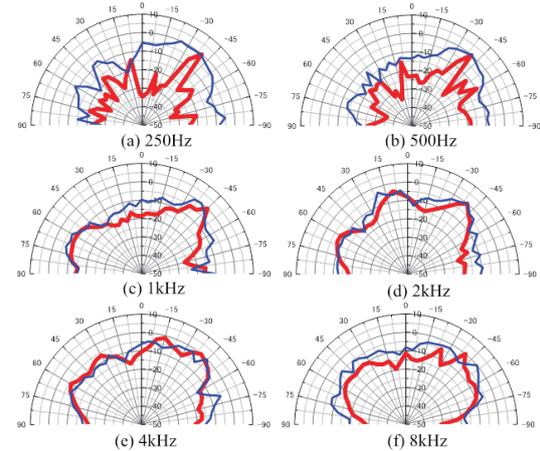


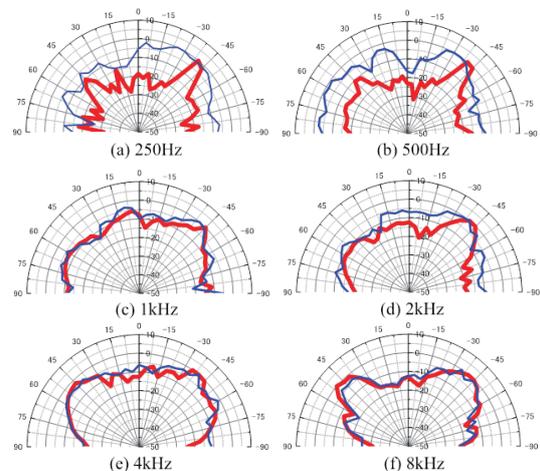
図8 測定対象とした拡散壁



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

— Parametric Loudspeaker — Loud Speaker

図9 拡散板からの反射指向性の測定結果

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計5件)

- ① 武岡成人, ”画像情報と指向性制御型パラメトリックスピーカを利用した局所再生” 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会講演論文集, 873-874, 2014.9
- ② 河合雅支, 武岡成人, 坂本慎一, ”指向性制御型パラメトリックスピーカを用いたバイノーラル再生,” 日本音響学会 2015 年春季研究発表会講演論文集, 647-648, 2015.3
- ③ 武岡成人, ”進行方向と異なる再生波面を持つパラメトリックスピーカ出力” 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会講演論文集, 527-528, 2015.9
- ④ 趙静, 李孝珍, 坂本慎一, ”Finite-Difference Time-Domain analysis on sound fields treated with porous materials using Z-transform,” 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, 223-226, 2015.9
- ⑤ 菅原 彬子, 坂本 慎一, 李 孝珍, 武岡 成人, ”パラメトリックスピーカを用いた板の反射特性計測の試み,” 日本音響学会 2016 年春季研究発表会講演論文集, 1077-1080, 2016.3

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 慎一 (SAKAMOTO, Shinichi)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：80282599

(2) 研究分担者

武岡 成人 (TAKEOKA, Shigeto)
静岡理工科大学・理工学部・講師
研究者番号：30514468