

音の可視化を利用したバスレフ型スピーカの振る舞いの検討 A study of behavior of a bassreflex loudspeaker using visualization of sound

高澤誠¹ 高橋寛稔² 金田豊¹
Makoto Takazawa¹ Hirotooshi Takahashi² Yutaka Kaneda¹

¹東京電機大学大学院工学研究科 ²東京電機大学工学部
¹Graduate School of Engineering, Tokyo Denki University ²School of Engineering, Tokyo Denki University

内容概要 バスレフ型スピーカは再生や計測に広く利用されているが、その定性的な動作の理解には十分でない部分も残されている。そこで本研究ではスピーカ周囲の音場を可視化することでその振る舞いを検討した。その結果、以前から存在が確認できていた周波数応答の高域の谷について、ダクトの共鳴による逆相音源の出現が原因であることを確認した。また、低域におけるヘルムホルツの共振周波数付近の振る舞いについて、可視化を行うことでその動作を確認した。

1. はじめに

バスレフ型スピーカは低周波域の再生帯域を広げるといった特徴を持っており、オーディオ機器として、また、計測用途にも広く利用されている。このバスレフ型スピーカの動作に関しては、等価回路や理論式が示されている[1][2]。しかし、実際の特性は理論値とは必ずしも一致しなかったり、またその定性的な動作の理解が十分ではない部分も残されている。

本研究では、バスレフ型スピーカにおける 1) 周波数応答の高域の谷、および 2) 低域共振周波数付近の振る舞いについて、空間インパルス応答法による音場の可視化技術を用いて検討した結果を報告する。

2. バスレフ型スピーカ

2.1. バスレフ型スピーカの特徴

バスレフ型スピーカの一例を図 1 に示す。バスレフ型スピーカは、スピーカボックスにバスレフポートと呼ばれる穴が開いており、その内部はダクトと呼ばれる管を通してボックス内部に通じている。バスレフ型スピーカはダクト内部の空気質量とスピーカボックスの容量とで起きるヘルムホルツ共振を

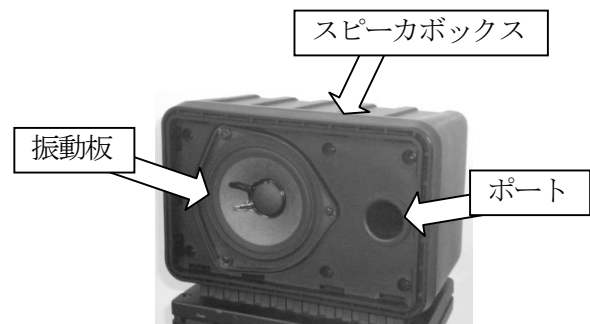


図 1 バスレフ型スピーカ BOSE 101MM

利用して低周波域を強調するスピーカである[3]。本研究では音響実験などでも多く利用されている BOSE 101MM を対象として検討を進めた。

2.2. 周波数応答の高域の谷

BOSE101MM の正面 1m の周波数応答を図 2 の実線に示す。この応答には 1470Hz 付近に深い谷が観測される。一方、図の破線はバスレフポートを粘土で閉じた場合の応答である。図より、応答の谷は無くなっており、この応答の谷はバスレフポートの影響であることは理解できる。しかし、その詳しい原因はこれまで明らかにはされていなかった。

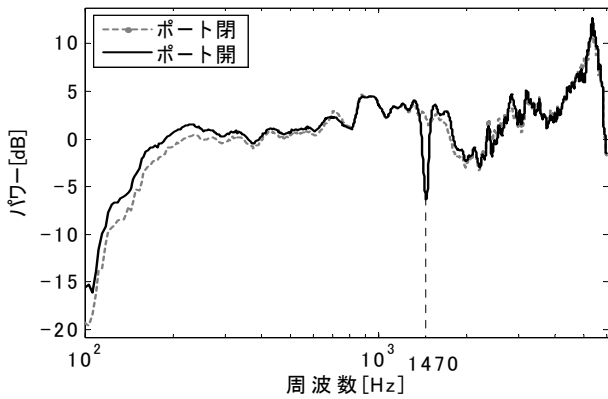


図2 周波数応答と高域の谷

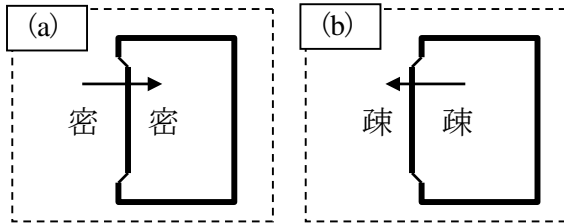


図3 密閉型スピーカの振る舞い

2.3. 低域の動作

バスレフ型スピーカの低周波域における動作に関してはバスレフダクトとスピーカボックスのヘルムホルツ共振が影響していることは示されていたが、スピーカ内外の音圧の振る舞いについて、明確には示されていない。

一方、密閉型スピーカに関しては、振動板の動作にともなって、スピーカボックス内外の音圧が同相に変化することが指摘されている[4]。すなわち、図3 (a)に示すように、スピーカの振動板がスピーカボックス内部に引き込まれた時は、ボックス内部および振動板外部ともに音圧が高くなり、振動板が押し出された時(図3 (b))はともに低くなる。しかし、スピーカボックス内部の空気の出出口となるバスレフポートを設けた場合、密閉型と同様の振る舞いとなるかは、明らかにされていない。

本報告では、以上のようなバスレフ型スピーカの高域、低域の特徴的な現象について理解を深めるため音場の可視化による検討を進めた。

3. 可視化の方法

3.1. 空間インパルス応答法による音の可視化

空間インパルス応答法とは、音源から空間の各点までのインパルス応答を計測し、音場を可視化する手法である。この方法を用いると、インパルス音の空間伝播の時間経過を可視化できるので、反射音の様子を調べたり、波面合成結果の分析などに利用がされている[5][6]。

また、インパルス応答法は、1回の測定結果を利用して任意の信号音に対する音場を可視化することができる。本研究では、この特徴を利用することでバスレフ型スピーカの注目した周波数における動作解析を行っていく。

3.2. インパルス応答測定条件

対象とする可視化範囲全体にマイクロホンを配置してインパルス応答を測定すれば、可視化は可能となるが、範囲が広い場合にはマイクロホンの数が膨大となる。

そこで本研究では、装置の制約数である15個の無指向性マイクロホンを直線上等間隔(3.5 cm)に配置してアレーを作成した。そして図4に示すように、それを6 cm刻みで手動により可視化範囲(6 cm間隔、33測定点、約200 cm)×(3.5 cm間隔、29測定点、約100 cm)を移動させながら、スピーカから各マイクロホンまでのインパルス応答をTSP信号[7]を利用して測定した(スピーカと重なる部分は除いた)。今回は可視化の上限周波数を2500 Hzに設定しており、空間サンプリング定理を満たすため、その半波長7 cm以下の間隔で測定を行った。

また、スピーカ内部に関しては図5に示した8つの位置にマイクロホンを設置して測定を行った。なお、測定は無響室で行い、マイクロホンはSONY ECM-C115を用いた。各マイクロホンの特性のバラツキは事前に測定した値で補正を行った。

3.3. 再生音場の可視化方法

目的とする再生信号を測定した各地点のインパルス応答と畳み込むと、二次元平面(可視化範囲)上の各測定点における各時刻の音圧を得ることができる。

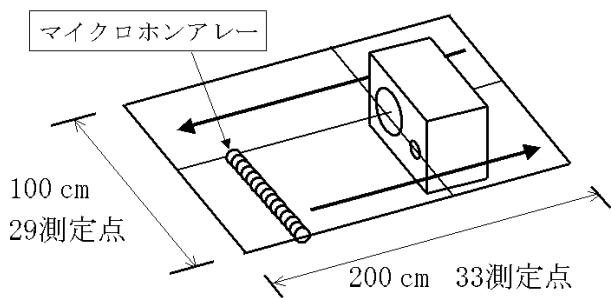


図4 測定配置図

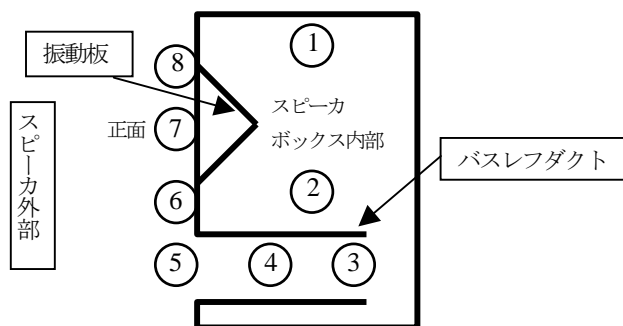


図5 スピーカ内部の測定位置

その後、測定点間を4倍の二次元スプライン補間を行った後、カラー画像表示による可視化を行った。

4. 測定結果

4.1. 高域の可視化(定常状態)

2.2 項で述べた周波数応答の高域の谷の原因を調べるために谷となっている周波数 1470 Hz の正弦波音波の可視化を行った。図6はポートを粘土でふさいで密閉型スピーカとした場合の測定結果である。図中の四角枠はスピーカボックスを表し、また三角形は振動板を表しており、左を向いている。

図より、三角形で表された振動板より放射された音が球面波としてひろがっていることが見える。なおスピーカボックス内部の構造上、高域に対して空間サンプリング定理を満たす適切なマイクロホン配置が困難であったので、ボックス内部音圧は表示していない。

一方、図7はポートを開いてバスレフ型スピーカとして動作させた場合の測定結果である。図より

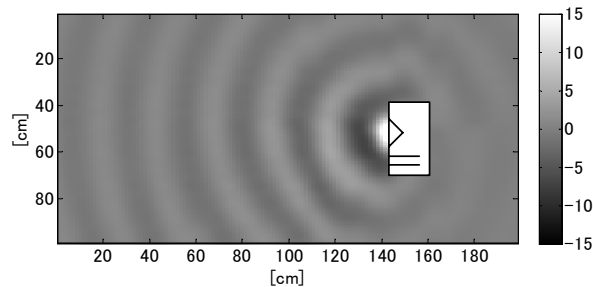


図6 1470 Hz の振る舞い(ポート閉)

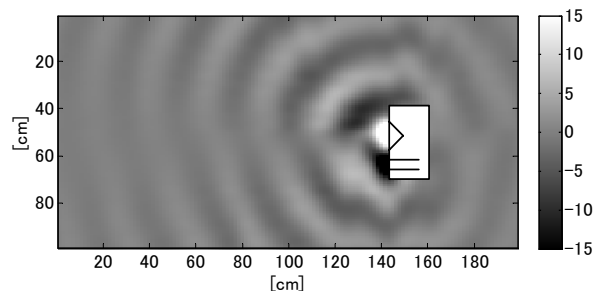


図7 1470 Hz の振る舞い(ポート開)

ユニットから正音圧(白)、バスレフポートから負音圧(黒)が放射されており、正負2重音源となることが分かる。そして、この正負の音がスピーカ正面方向では打ち消しあって、その結果として音圧が小さく(灰)なり周波数応答の谷となっていることが理解できる。

4.2. ポートからの逆相音の原因考察

図8に示すように、このスピーカのダクトは長さ約 10 cm の円筒である。この 10 cm という長さは 1470 Hz の波の半波長より少し短いぐらいであり、開口端補正を考慮すれば 1470 Hz 付近の成分がこの管で共鳴して強調されていることが考えられる。そして、強調された音がポートから再放射されると考えられる。

この時、振動板の中心とポート中心の距離は約 11 cm で、振動板から出た音がポートの前で位相がほぼ反転する。その結果、ダクト内部では振動板から到達した逆位相の音が共振し強調され、ポートから再放射されることで、正負二重音源となり、振動板とポートを結ぶ線の垂直二等分面で、1470 Hz 付近の音が低下する、と考えられる。

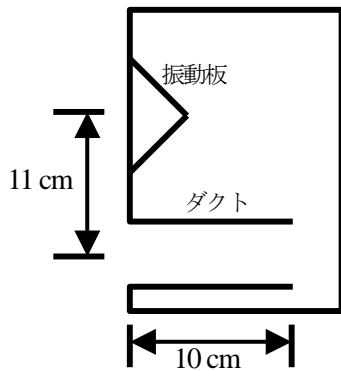


図8 スピーカ寸法

一方、第二の考え方としては、振動板がボックス内の空気を圧縮した結果、振動板裏面→ボックス→ダクトと伝わってポートから放射されたとも考えることができる。

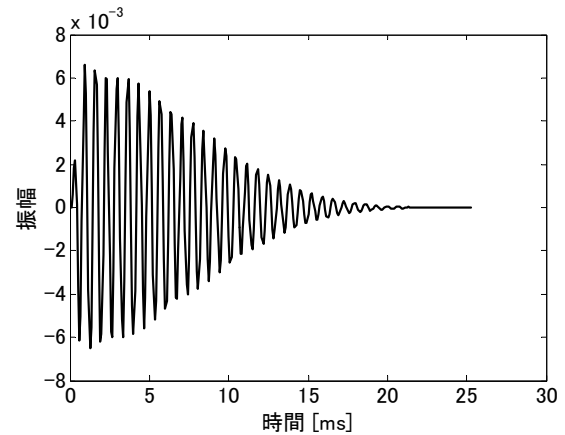
4.3. 高域の可視化(過渡状態)

そこで次に、この考察結果を検証するために、音の立ち上がり部分に注目した可視化を行った。ここでは、その目的のために立ち上がりの急峻な 1470 Hz 中心の狭帯域信号を合成して、インパルス応答との畳み込みを行った。狭帯域信号の波形を図9 (a) に、そのスペクトルを (b) に示した。

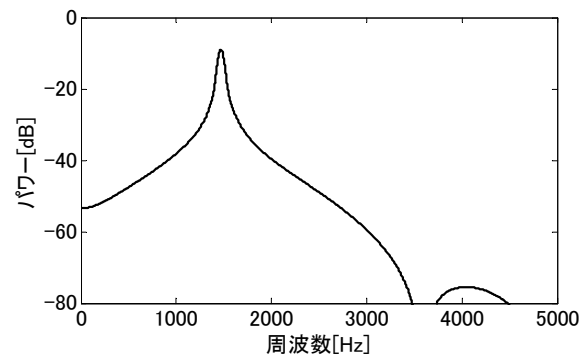
測定結果を図10に示す。図10 (a)~(f)は、 T を 1470 Hz の周期として、それぞれ音圧発生後 0.5 T 、1 T 、2 T 、6 T 、9 T 、13 T 後の波面を示している。図より、時刻 2 T までは、振動板のみから音が発生していることが分かる。

振動板裏面からダクト出口(ポート)までの距離を音が進む時間は 1.5 T 程度なので、もし、上記第二の考え方が正しいならこの時点で、ポートから大きな音圧が放射されている必要があるが、その現象は確認できない。

一方、図10 (b) (c) で分かるように振動板から出る音と、ポート前の音圧は正負(白黒)逆となっており、振動板とは逆相の音がポートに供給されていることがわかる。図(d)~(f)からダクトの共振の結果、次第にポート放射音圧が大きくなり、最終的に正負二重音圧のような動作(図(f))となっていることが



(a) 時間波形



(b) 周波数特性

図9 狭帯域信号フィルタ

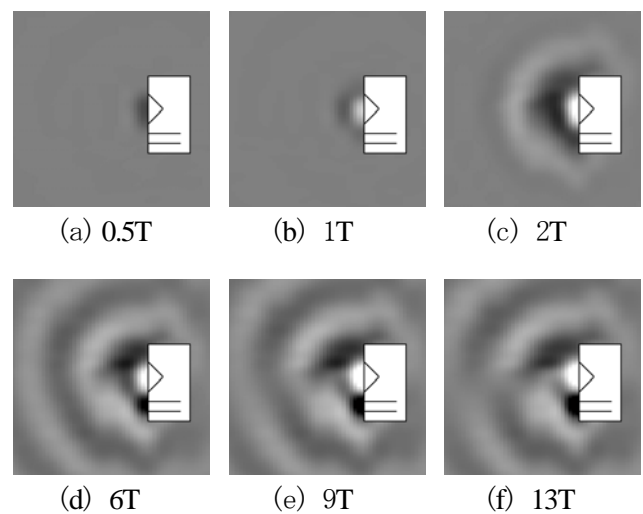


図10 1470 Hz 信号の過渡状態の可視化

わかる。このことから、振動板から出た音が逆相でダクトに供給され、共振によって強調された音が振動板からの音とは逆相で再放射されていることが確認できた。

最後にダクト内部の音圧と位相を測定した結果、ダクト中央で音圧が非常に高く、ダクト前後の音圧が低くなっており、位相関係は同相であることからダクト内部で管共鳴が確認できた。

4.4. 低域の可視化

図 1 1 に図 5 で示した①④⑤⑦点の音圧周波数応答を示す。図より振動板直前の応答⑦は 200 Hz より高域側 1 kHz 付近まではほぼ平坦であるが、200 Hz を境に低域側では低下していることが分かる。

一方、ポート出口の応答⑤は高域より 55 Hz 程度まではほぼ平坦となっている。この応答は 200 Hz 以下では①④の応答と相似形となっており、ボックス内部の音圧を反映していることがわかる。

図 1 2 は①⑤⑦の位相特性を示したものである。図より 100~500 Hz ではほぼ同相となっている。すなわち、低域では振動板の内、外、ポート出口における音圧はほぼ同位相となっていることが分かる。

図 1 3 に 200 Hz におけるスピーカボックス内外の音圧の様子を示した。この図よりスピーカボックス前面と内部の音圧が同色であることから、それらが同相であることが確認できる。よって、バスレフ型スピーカの 100~500 Hz の低域での振る舞いは密閉型スピーカと似ていると考えられる。

以上のことより、バスレフポートは振動板と同相音圧を発生していることが分かり、また図 1 1 より 120 Hz 付近以上では振動板からの音が 120 Hz 以下ではポートからの音が大きくなることを示されたが、このことを可視化で確認した。

結果を図 1 4 (a)~(f) に示す。図はそれぞれ 200 Hz、120 Hz、70 Hz においてポートを閉じた場合と開けた場合のスピーカボックス周囲の様子である。信号はそれぞれの周波数の正弦波を畳み込み、スピーカボックスの直前の音圧がピークになる時間の様子を表したものである。ただし、図を見やすいよう

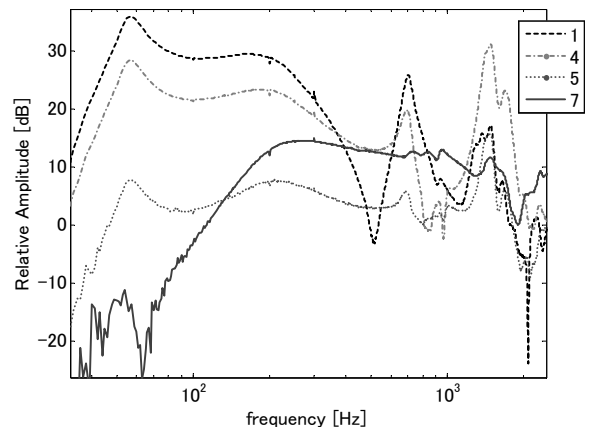


図 1 1 音圧周波数応答

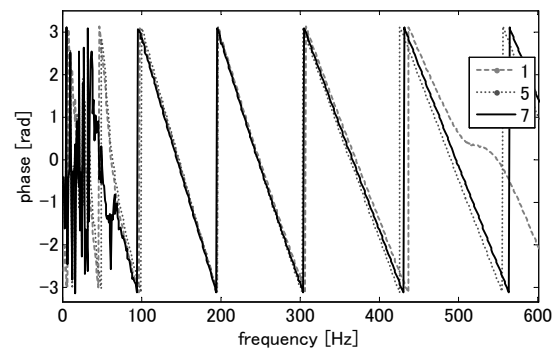


図 1 2 位相特性

周波数ごとに色の濃さを調整している。図(a) (b) (c)より、ポートを閉じた場合はどの周波数でも振動板より音が放射されていることが分かる。また図(d) (e) (f)より、200 Hz では振動板からの放射が大きく、120 Hz では振動板とポート直前の音圧がほぼ同じ、70 Hz では振動板からの放射は無くなりポート直前の音圧が高くなっていることが分かる。また図(c) (f)を比較するとポートの開閉の違いにより振動板の振る舞いが大きく変わっていることが確認できる。これはポートを開けた状態でヘルムホルツ共振が発生し振動板の動きが抑圧されたためだと考えられる。

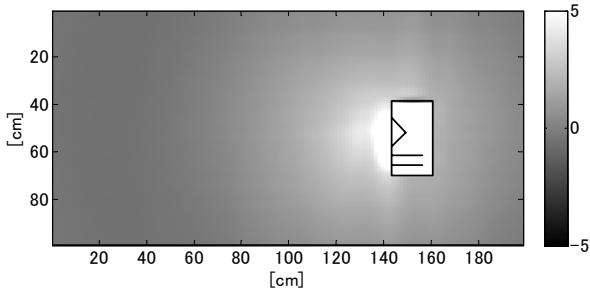
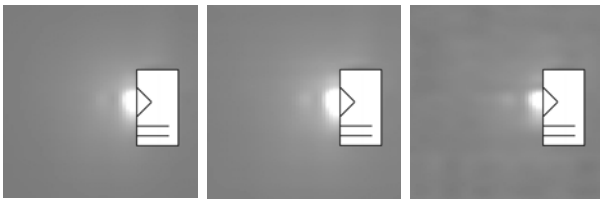
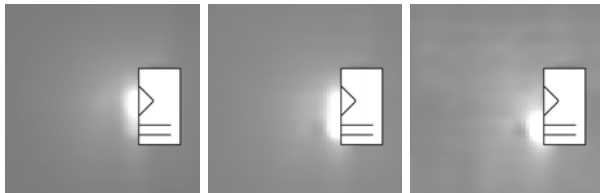


図 1.3 200 Hz のスピーカー内外の振る舞い



(a)200 Hz ポート閉 (b)120 Hz ポート閉 (c)70 Hz ポート閉



(d)200 Hz ポート開 (e)120 Hz ポート開 (f)70 Hz ポート開

図 1.4 低域の振る舞い

5. まとめ

バスレフ型スピーカーの周囲及び内部を空間インパルス応答法を用いて可視化をおこなった。その結果、1470 Hz 付近に存在する周波数特性上の谷について、ダクトが管の共鳴を起こし振動板と逆相の音源として働くことで、振動板とポートが正負二重音源となり負の干渉が起こる正面方向で音圧が弱くなっている様子が確認できた。また、低域においてスピーカーボックス内外の音圧が密閉型スピーカーと同じように同相で変化する様子や、ヘルムホルツ共振により振動板からの音の放射が抑圧され、ポート放射音が振動板放射音よりも優位になっている様子が確認できた。

参考文献

[1] 日本音響学会編、応用電気音響、pp58-61、コロナ社、1979.

[2] 川村雅恭、電気音響工学概論、pp.220-221、昭晃堂、1971.

[3] 佐伯多門、新版スピーカー&エンクロージャー百科、pp119、誠文堂新光社、1999.

[4] 平田能睦、MJ 無線と実験 9 月号、pp.126-132、誠文堂新光社、2006.

[5] 鈴木久晴、日本音響学会誌、Vol.64、pp399-404、2008.

[6] 森勢将雅、河原英紀、音響学会春季講演論文、3-P-19、pp.633-634、2004.

[7] Y.Suzuki, F.Asano, H.Kim and T.Sone, "An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses," J. Acoust. Soc. Am., 97, 1119-1123 (1995).