

球形セラミックツイーターの開発とその技術

株式会社村田製作所 中村 武

1.はじめに

現在、オーディオの主流はCDを軸として構成されており、システムの高域再生周波数限界が20kHz前後であるのに対して、より自然音の再生を目指し高域再生周波数限界を100kHzまで拡大した次世代オーディオとしてSACD方式とDVD-Audio方式が注目されています。

この次世代オーディオの出現に伴い、手持ちのスピーカーシステムで対応するには不足の再生周波数帯域の20kHz～100kHzを補うスーパーツイーターが必要となります。

このたびは村田製作所は、球形圧電セラミックスを用いた独自のスーパーツイーター「ES103」を商品化しましたので、その概要について報告します。



写真1

2.圧電セラミックスとスピーカー

圧電セラミックスは電気信号を機械振動に変換できるデバイス用材料として古くから音響製品に使用されてきましたが、代表的な圧電セラミックス発音体であるブザーの用途が時計や電卓などの各種警報音に用いられていることから、電子騒音としていやなイメージを抱かれている向きもあり、ハイファイ用スピーカー市場には受け入れられませんでした。

本来、セラミックスの音は古くから水琴窟や風鈴

などで親しまれ、澄んだ音色で人に安らぎを与える素晴らしい音響材料なのです。DVD-AudioやSACDの次世代オーディオ時代の到来を期に「音質とは何か？」と音の原点に戻り、自然音の再生を目指したハイファイ用ツイーターの開発に着手しました。

3.自然音とスピーカー再生音

身近な自然音源として楽器があります。楽器はリズムやメロディーを奏でるものですが、楽器を奏でるには叩く、擦る、弾く、吹くなどの演奏テクニックが必要です。生演奏を身近で聞くと楽器の音以外に叩く、擦る、弾く、吹くなどのアタック音が聞こえますが、アタック音まで再生するスピーカーは少ないと言われております。

また、シンバルのような打楽器演奏ではアタック音と楽器特有の多くの倍音により、質感や拡がり感などが付加され、それにより豊かなステージ感が得られますが、生演奏と比較してスピーカー再生音にこのステージ感の再現に不満を持つ人が多いと思われれます。

4.スピーカーの特性評価と聴覚評価

スピーカーの特性は、主にマイクロフォン測定による周波数音圧特性などの物理量で評価されておりますが、ほぼ同じ周波数特性を持つスピーカーであっても音色には違いがあり、スピーカーの音色は聴覚による感性で評価されているのが現状です。

連続した正弦波によるマイクロフォン評価と聴覚による音色評価との違いについて考える上で、人間の五感によくみられる本能や学習能力による様々なマスキング現象が聴覚にもあると考えると、いくつかのことが説明がつくと考えています。

一例として、聴覚の方位識別能力について聴診器を用いた簡単な実験を試みた結果について述べますと、

左右の耳に音のレベル差、時間差のない音（打音の繰返し）を加えると頭の芯で音がしますが

左右の耳に打音の大きさがほぼ同じで、左・右音

に時間差を設けた音を加えると、先に到達した片方の音のみ認識し、遅れたもう片方の音は認識できず、その時間差識別分解能は約1/10,000秒（100 μ 秒）であったことから、時間差に対する人間の聴覚の感度は非常に高いことがわかりました。

このことから倍音を多く含む楽器の音色をスピーカーで再生する場合、入力信号に対してスピーカー振動板の追従性が周波数により異なると、再生音間に時間遅れや位相ずれを生じ、アタック音や倍音の一部が隠れ、質感や拡がり感を損なうのでは？と推測されます。

ほぼ同じ周波数特性を持つスピーカーであってもスピーカー振動板の追従性が異なると、スピーカーの音色を大きく左右するものと思われます。

5.スピーカー振動板の追従性と f_0

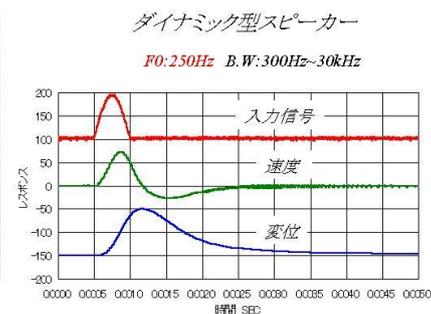
スピーカーには駆動系を含む振動体の共振周波数（ f_0 ）があります。一般にダイナミック型スピーカーの共振周波数は低く、再生帯域はこの共振周波数の上側に設定されております。スピーカーの共振周波数と振動板の追従性に着目し、入力信号に対する振動板の追従性を測定しました。

スピーカー振動板の追従性を空気を介してマイクロフォンで測定すると、空気による微分作用やマイクロフォン自体の追従性不足により正確に測定することは困難と思われます。

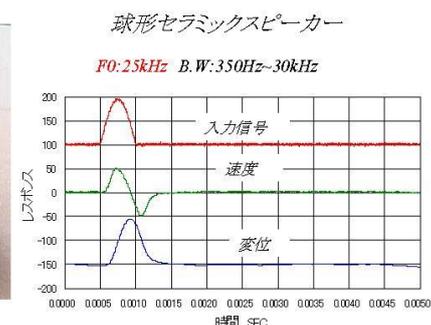
そこで、レーザー光を振動板に照射し、反射光から振動板の追従性を測定する方法を用い、ほぼ同じ再生周波数帯域（300Hz～30kHz）を持つ

①セラミック振動板を用いたダイナミック型スピーカー（ $f_0=250\text{Hz}$ ）と

②球形セラミックスピーカー（ $f_0=25\text{kHz}$ ）の2種類のスピーカーについて、入力信号に1kHzの正弦半波を用い、信号印加時における両振動板の追従性を実測した結果、**第1図**、**第2図**に示すように、入力信号より共振周波数を高く設定した振動板の追従性が高いことが確認できました。



第1図 ダイナミック型スピーカー追従性実測値



第2図 球形セラミックスピーカーの追従性実測値

6.ハイファイ用ツイーター開発とその技術

音色を左右すると思われるスピーカー振動板の高追従性に重点をおいたハイファイ用ツイーターの開発にあたり

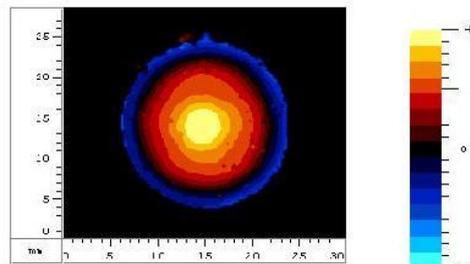
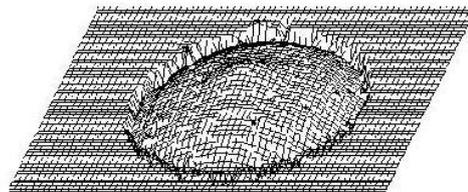
- ① ツイーターの共振周波数を再生帯域の上限（100kHz以上）に設ける。
- ② 振動板は空気抵抗の影響を避けるため高剛性材料を用いる。
- ③ 振動板と駆動源は一体化し、振動板への伝達遅れをなくす。
- ④ 信号遅延の可能性のあるネットワーク回路を避け、発音体自体にネットワーク機能を持たせる。
- ⑤ 空気による非線型現象を避けるため指向性を広くする。

上記の条件を満足させるために剛性が高く、振動板と駆動源を兼ねられる圧電セラミックスを採用し、球面波による広い指向性と高い共振周波数が得られ、不要な分割振動の生じにくい半球形状（ $f_0=103\text{kHz}$ 、直径=20mm、厚さ=0.5mm）を採用しました。また、共振周波数より低い再生帯域のエネルギー低下をホーンで補うとともに、ホーンの特性を

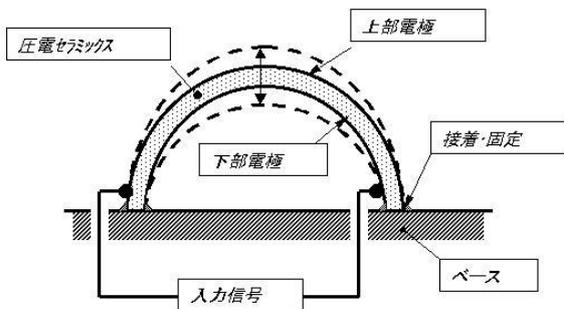
利用したメカニカルなネットワーク機能を持たせ、カットオフ周波数はツイーターのセルフチェックを考慮して可聴周波数上限の15kHzとしました。圧電セラミックスは一種のコンデンサであり、効率よく音響出力に変換するために整合インダクタンスを用いて入力インピーダンスを8Ωとしました。

7.球形セラミックツイーターの構造と諸特性

球形セラミック振動板形状を第3図に、そのインピーダンス特性を第4図に示します。共振周波数は103kHzと高く、レーザー光による振動モード観測をした結果、第5図に示すように呼吸振動していることが判ります。



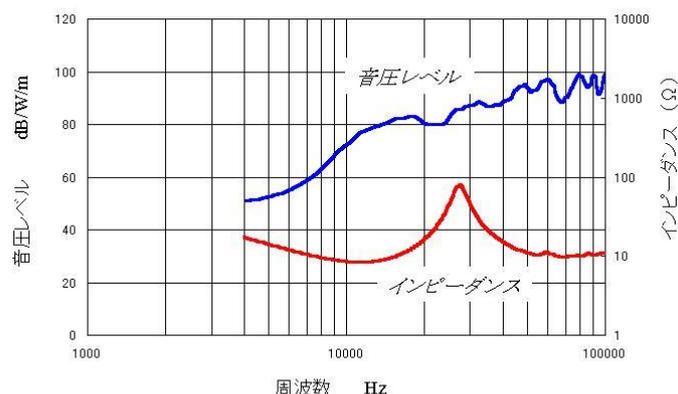
第5図 振動モード観測



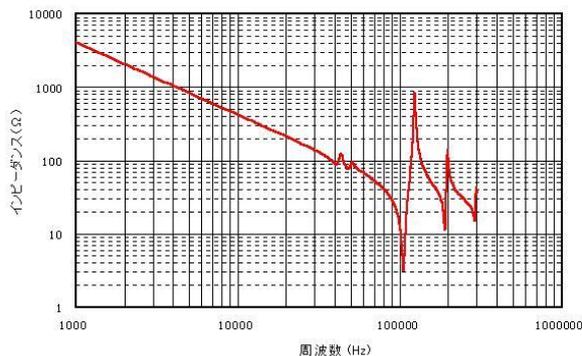
材料 : PZT系
比誘電率 : 3000
Q_m : 30
電気機械結合係数 : 60%

第3図 半球セラミックス構造

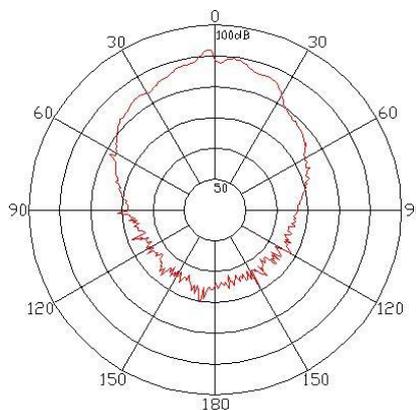
周波数特性を第6図に、指向特性を第7図に示します。



第6図 周波数特性



第4図 球形セラミック振動体のインピーダンス特性



第7図 指向特性

球形セラミックツイーターの仕様

再生周波数：15kHz~100kHz

平均音圧：90dB/w/m

指向特性：±45DEG

最大許容入力：50w

定格インピーダンス：8Ω

8. 試聴評価

球形セラミックツイーターと市販のスピーカーシステムとしてB&W・Nautilus801（～30kHz／91dB）、B&W・Matrix801（87dB）、JBL・4344（～20kHz／93dB）、JBL・4344M k II（～22kHz／95dB）などの能率や周波数特性の異なるスピーカーシステムを特に調整することなく組合せ、多くの方々に試聴評価をいただいたところ、球形セラミックツイーター追加による繊細なアタック音、質感、余韻や拡がり感、奥行き感に加え、楽器の位置表現など臨場感やステージ感の豊かさに高い評価をいただき、意図したスーパーツイーターに仕上げる事ができたと思います。

9. 考察

スピーカーの音色に対するマイクロフォン評価と聴覚評価の違いから、聴覚のマスクング現象に着目し、スピーカー振動板の追従性を高めた球形セラミックツイーターを商品化しました。市販のダイナミック型スピーカーシステムと組合せた試聴評価において、スピーカーの再生音に艶や余韻など音色の表現力と、音の広がりや奥行きなど臨場感が増し、また繊細な音まで豊かな表現力が得られたことから、スピーカー振動板の高追従性による効果が確認できました。

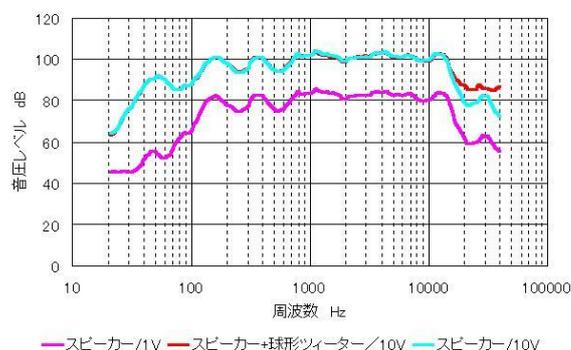
球形セラミックツイーター追加によりSACDやDVD-Audioのみならず球形セラミックツイーターの再生周波数帯域がほとんど寄与しない～20kHzのCDソース再生においても同様の効果が得られると評価をいただいておりますが、そのメカニズムについては詳細に解明できておらず、推測の域を脱しません

仮説1として

聴覚には音に対するAGCのようなマスクング現象があると思われ、無音から立ち上がる波形の忠実な再現が特に音の輪郭や方位・距離などに重要な影響を与えると考えると、立ち上がりの鋭い変化に対応する20kHz近傍の信号成分に対する球形セラミックツイーターの高追従性が寄与しているのでは？と考えられます。

仮説2として

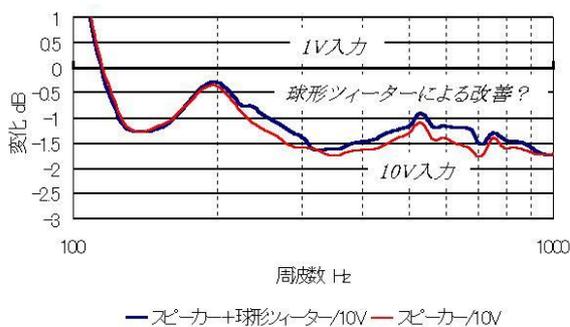
スピーカーの高域再生限界は振動板の変位速度で決まり、変位速度と周波数について考察することはよく行われますが、ここでは同じ周波数であっても振動板の振幅が増すと変位速度は高まることに着目してみます。第8図に一般的なダイナミック型スピーカー単独と、それに球形セラミックツイーターを併用した時の入力電圧V.S周波数音圧特性の実測値を示します。中・低音域（ピストンモード領域）の1V入力の時を基準値（0dB）とした10V入力時の周波数特性変化は第9図のようになり、入力振幅増加に伴う変位速度限界によると思える特性変化が見られます。負荷条件を変えずに球形セラミックツイーター音を加えると若干ながら周波数特性の改善が見られます。



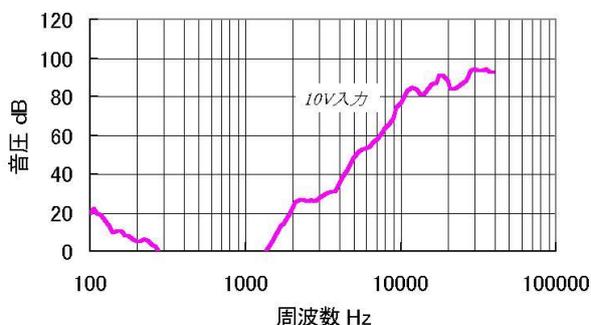
第8図 入力電圧V.S周波数特性

100dBの音圧を球形セラミックツイーターにより0.3dB持ち上げるには少なくとも70dB程度の音圧が合成されたこととなりますが、第10図に示す球形セラミックツイーターの周波数特性からのレ

ベルアップとは考えられず、単に周波数特性の云々ではなく、組合せたスピーカーの可聴周波数域の変位速度限界部分に球形セラミックツイーターの高追従性が寄与したことにより、音色の違いとして聞えるのではないかと考えられます。



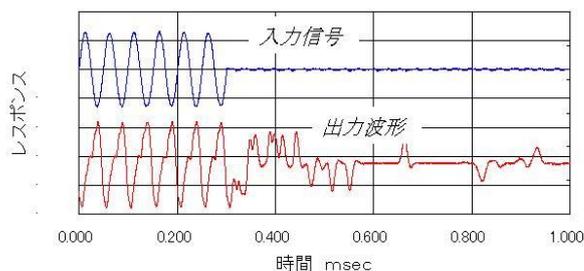
第9図 入力電圧による周波数特性変化



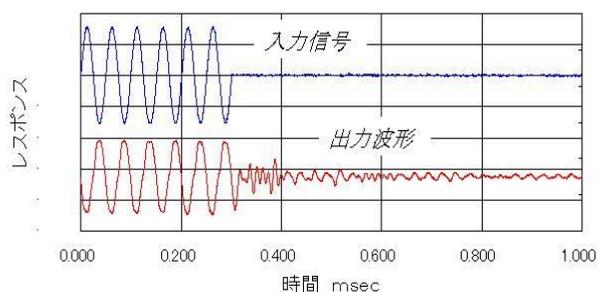
第10図 球形セラミックツイーターの周波数特性

次にダイナミック型スーパーツイーター単体で音楽再生を試みると、ネットワークで可聴周波数帯域をカットしているにもかかわらず、ダイナミック型ツイーターから再生音楽の一部が聞こえることについて考察します。

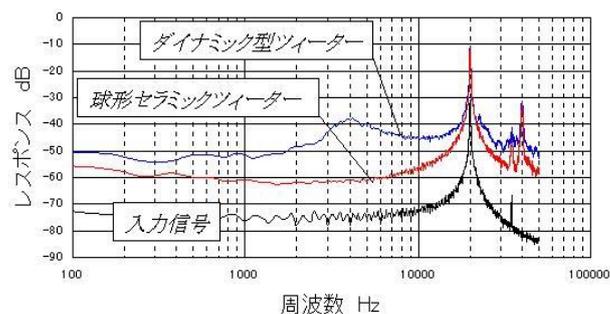
一般にスピーカーをバースト信号で駆動すると、過度特性により入力信号とは無関係な共振周波数の振動を誘発します。ダイナミック型スーパーツイーターの共振周波数が3~4kHzと可聴周波数帯域にあることから過度特性によりスーパーツイーター特有の音が聞え、機種間により聞こえ方が違うことから、スーパーツイーターの音の好みが変わる原因と思われます。20kHzのバースト特性を第11図、第12図に、周波数スペクトラムを第13図に示します。



第11図 ダイナミック型ツイーターのバースト特性



第12図 球形セラミックツイーターのバースト特性



第13図 FFTによる周波数分析

球形セラミックツイーターもダイナミック型ツイーターと同様に共振周波数を誘発しますが、共振周波数が100kHz以上と高く、球形セラミックツイーター特有の音が聞こえないこともご評価いただいている要因の1つと考えております。

10.終わりに

今後は 球形セラミックツイーターの開発で培った高追従性の技術をベースとして「音を造るのではなく、音に戻す」を基本理念に更なる商品開発に取り組み、オーディオファンの皆さんに喜んでいただける商品造りと、オーディオ界の発展に貢献できればと考えております。