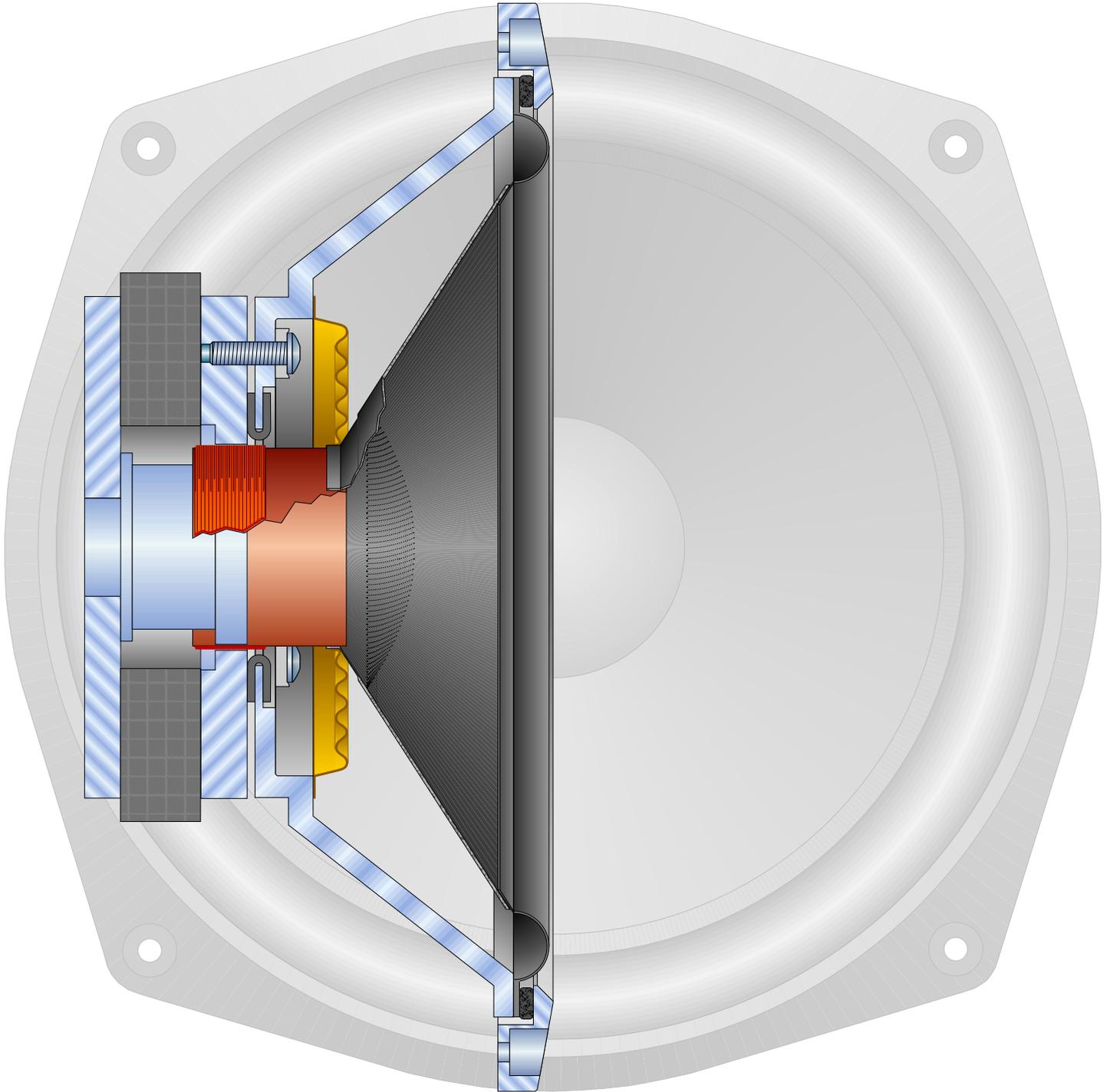


ラウドスピーカーとアコースティック・エンクロージャー

スピーカー・テクノロジーとそれに課された課題について、図解入りで簡単に説明する。



2026年1月

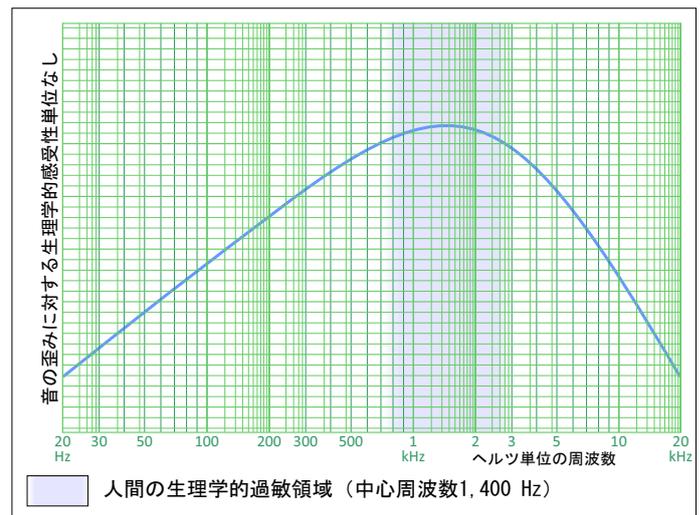
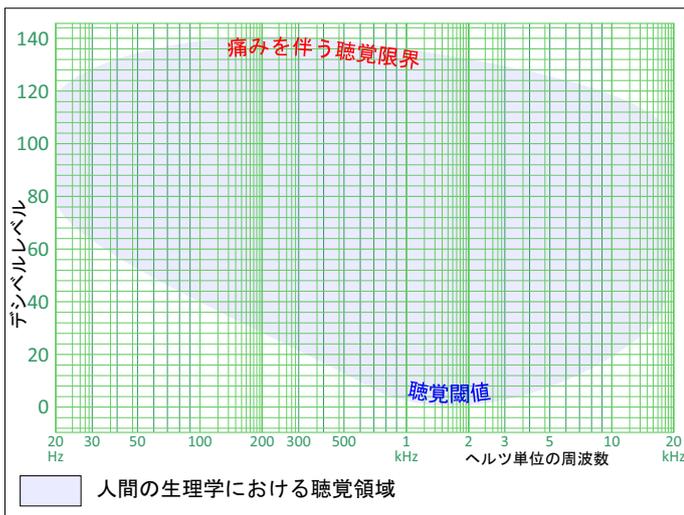
人間の生理的感受性

人間の生理的感度は、ハイファイ音楽再生におけるあらゆる制約の基礎となっています。この感度は、周波数においても振幅においても直線的ではありません。

78~102デシベル (dB) の間で、若い人間 (15~30歳) は20~20,000ヘルツ (Hz) の音響信号を感知します。年齢が上がるにつれて、耳は超高音域の感度を多少失います。60歳以上になると、12~14kHz以上の音は減衰しますが、完全に消失するわけではありません。

コンサートでは、60歳以上の音楽愛好家は、その年齢に応じた耳で音楽を認識します。しかし、その脳の音分析システムは、20代の大半の人々よりも高度な能力を備えています。聴力が低下しても、よりよく聴くことができるのは、文化的に習得した能力のおかげです。私たちは耳で聞き、脳で聴いていると言えるでしょう。

あるいは、耳は年月とともに老朽化するハードウェア (マイク) に例えられ、脳は絶えず更新され、年齢とともに洗練されるソフトウェア (文化的知識による分析) によって機能していると言えます。

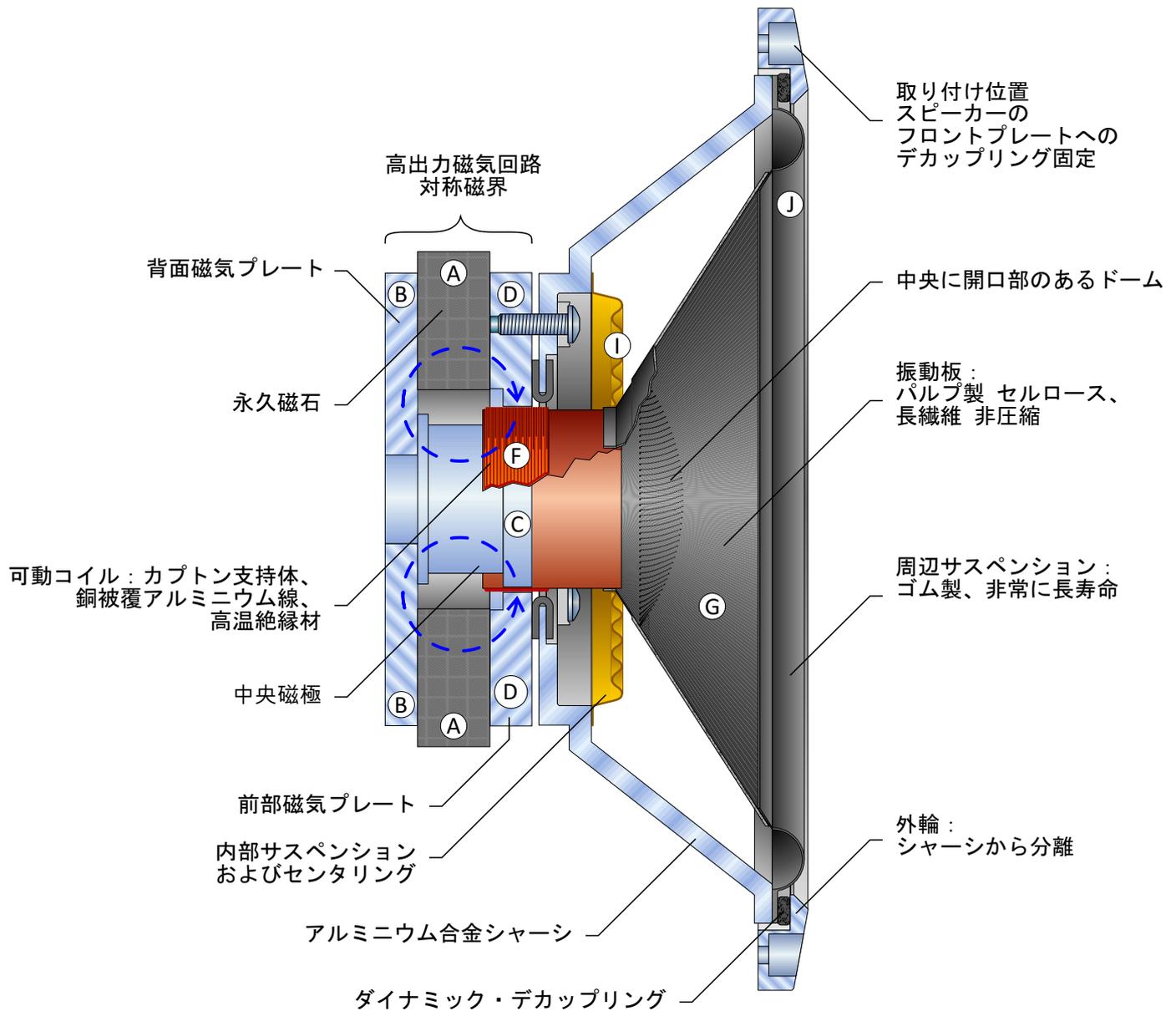


したがって、私たちの生理的感度は周波数においてまったく直線的ではありません。1400 Hz 付近には過敏領域 (人間の音声領域) が存在します。1400 Hz を中心とする 2 オクターブ、つまり 700 から 2800 Hz までのこの周波数帯域は「聖域」であり、音の再生におけるあらゆる歪み (歪み、残響、指向性の異常) を低減するために、最も厳格な対策が講じられるべき領域です。

したがって、この周波数帯域では、可能な限り、ミッドレンジスピーカーを基に音響エンクロージャーを構築することが求められます。このスピーカーには、2オクターブという限られた活動範囲のみに専念しながら、精巧な作業が求められます。スペクトル全体の再生を完成させるために、低音用スピーカー (ウーファー) と高音用スピーカー (ツイーター) が追加されます。

したがって、高性能なスピーカーは、真のミッドレンジを含む、3つのスピーカーを装備する必要があります。

スピーカーの動作原理



低音用トランスデューサー B245-5

スピーカーの動作原理

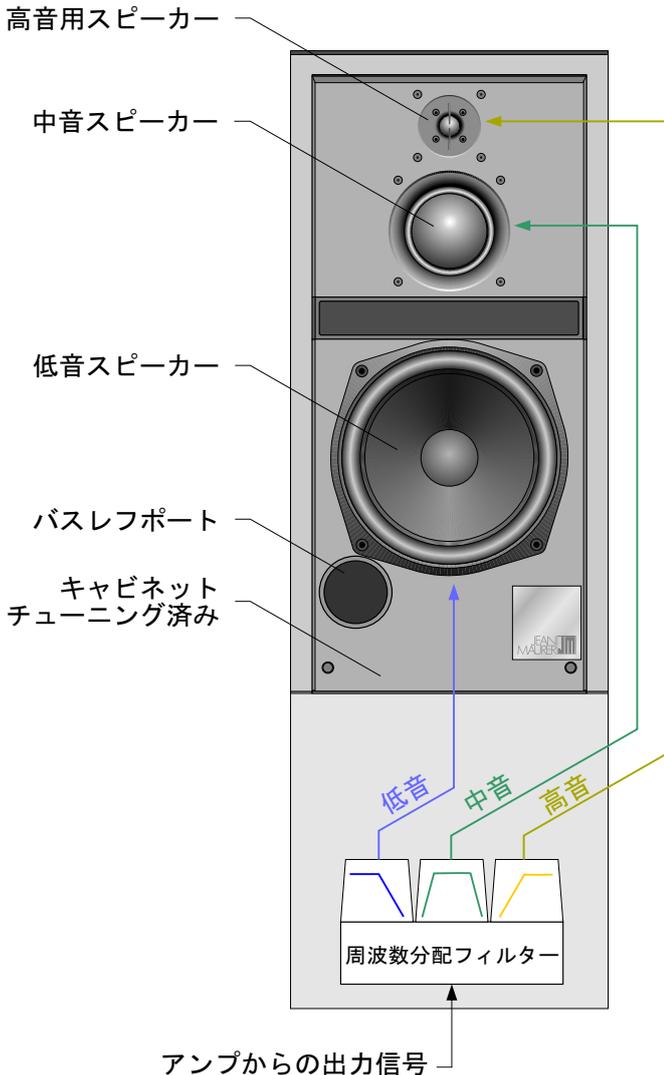
円形のフェライト磁石A、後極板B、中心コアC、前極板Dで構成される磁気回路は、DとCの間に位置する狭い円形の隙間（エアギャップ）に非常に強い磁場を生成します。

可動コイルFと円錐形の振動板Gは、サスペンションIおよびJによって吊り下げられており、このコイルはエアギャップの中心に位置しながら、エアギャップには接触していません。

アンプからの電流は可動コイルを流れ、エアギャップの強力な磁場の作用により、電流の方向に応じて振動板を前方に押すか、後方に引っ張ります。

電気信号（マイクが録音時に捉えた音像）のリズムに合わせてこのように前後に動くことで、音楽がほぼ忠実に再現されるんだ。

スピーカーシステムの構成 および電力負荷の分配



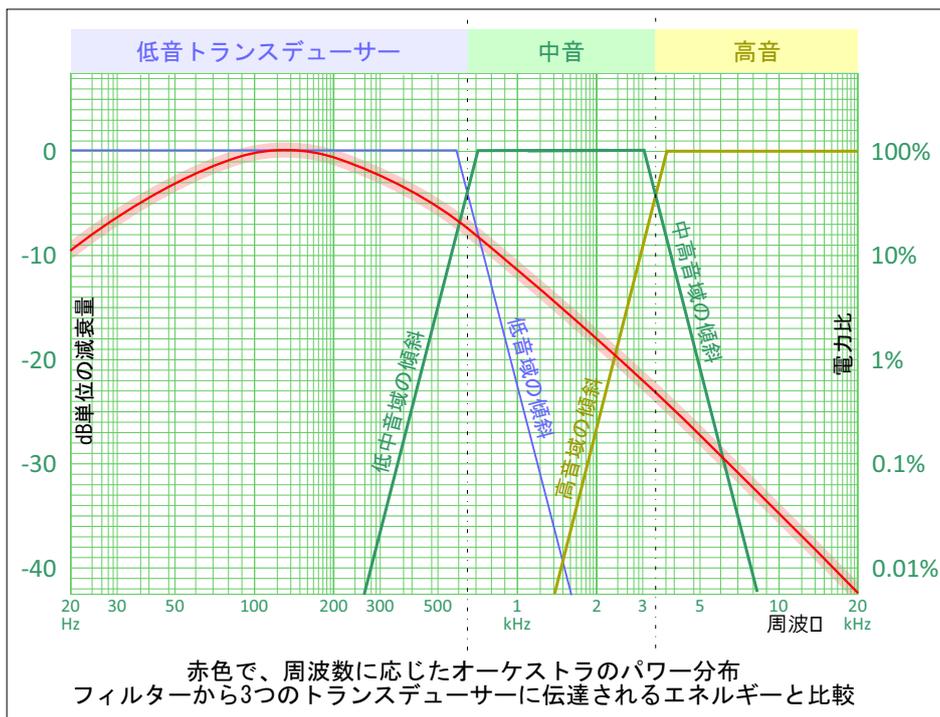
スピーカーシステムは、忠実度の総合的な性能において同等の重要性を持つ3つの要素群で構成されています。すなわち：

- 各スピーカー、またはトランスデューサーは、アンプからの電気信号を機械的な動きに変換し、さらに音に変換します。
- 周波数成分に応じて、この電気信号を各スピーカーに振り分けるフィルター。
- 膜の後方から発生する音響波を処理する各スピーカーのキャビネット（各スピーカーはキャビネットを必要とします）。これは、この後方波が直接音信号を妨害するのを防ぐためです。

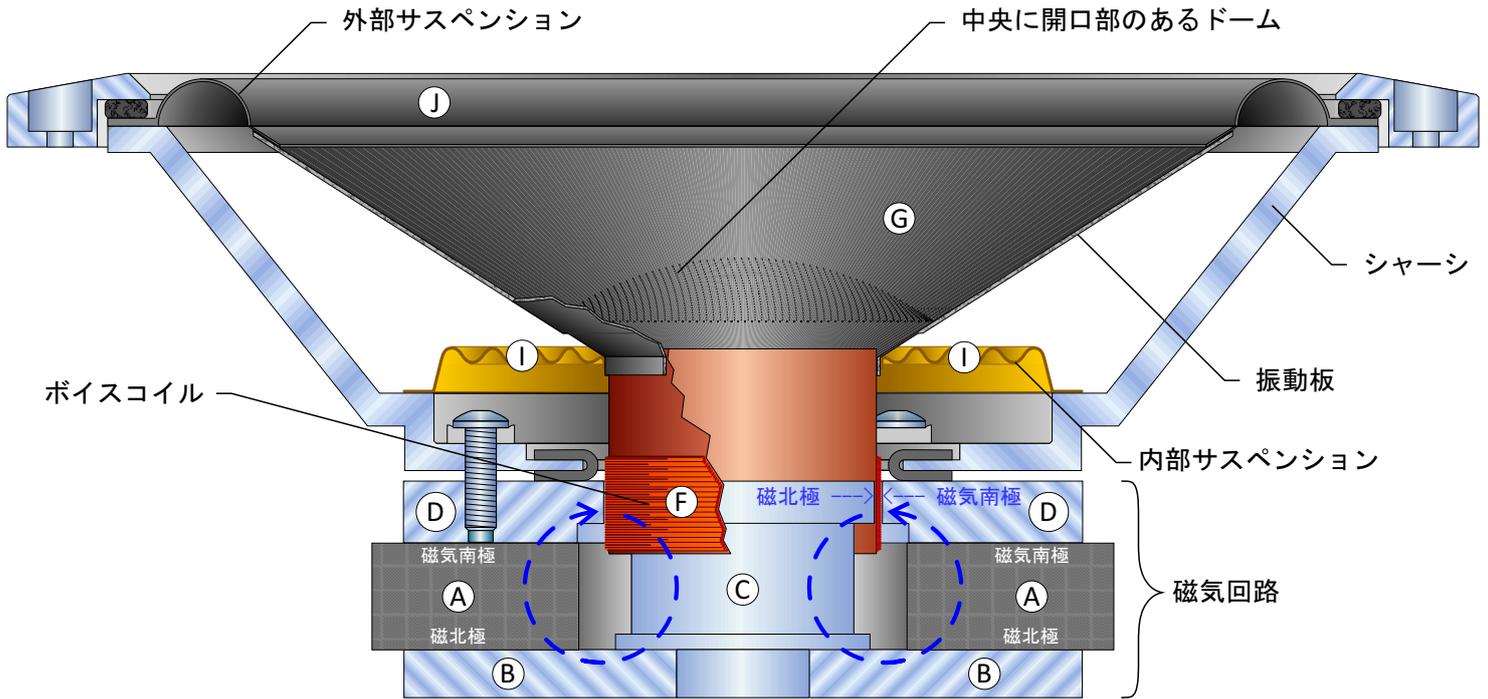
交響楽団の場合、エネルギーの大部分（約80%）は低音スピーカーによって再生され、音楽の深みと楽器の厚みを担っています。

中音域トランスデューサーは、音楽の明瞭さを担っています。その性能レベルは極めて重要です。

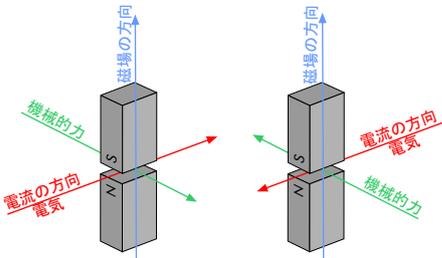
音楽空間は、20kHzをはるかに超える信号を再生するために非常に高速な応答時間を必要とする高音スピーカーによってもたらされます。



スピーカーの4つの主要なパラメータ



力率 : $B \cdot l$
 これは、エアギャップ (GとDの間に位置する円形のスリット) 内の磁界に、この磁界に浸漬された可動コイルのワイヤの長さを乗じた値に相当します。



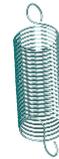
テスラ*メートル
(T·m)

可動質量 : m
 可動コイル (F) + 振動板 (G) + サスペンションの一部 (I+J) すなわち可動部分の質量の合計に相当する



グラム
(g)

コンプライアンス : C
 2つのサスペンションの弾性に相当します。周辺部 (J) + 内部センタリング (I)



ミリメートル/ニュートン
(mm/N)

表面積 : S
 これは、総放射面積、すなわち 振動板 (G) の面積 + 周辺サスペンション (J) の一部に相当します。



$$S = \pi \cdot r^2$$

平方メートル
(m^2)

および R_{dc} 、これは可動コイル (F) の直流抵抗である

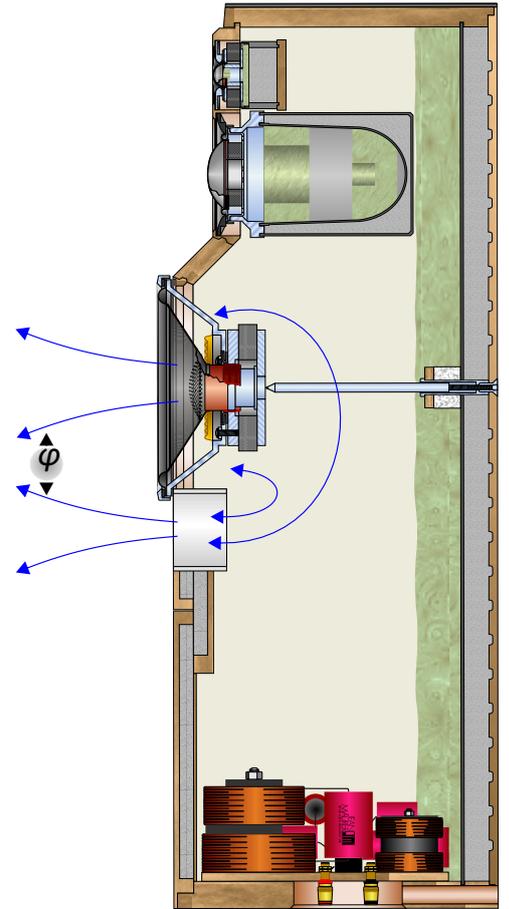
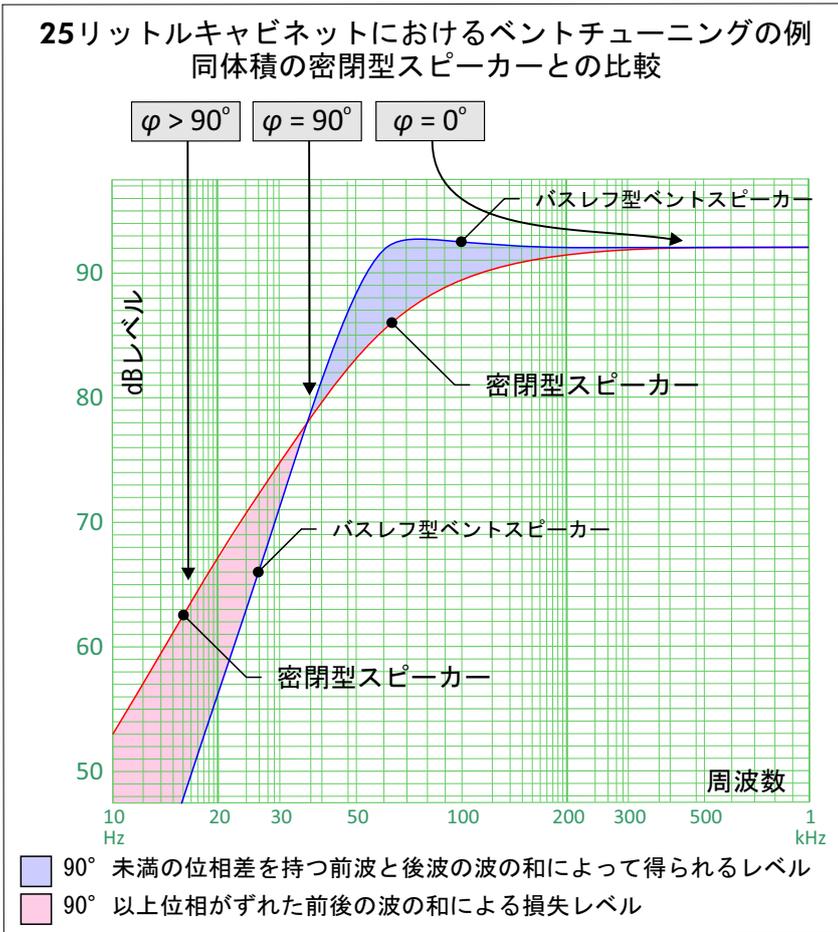
スピーカーの効率、以下に比例します :

$$\eta \approx \frac{S \cdot (B \cdot l)^2}{m^2 \cdot R_{dc}}$$

この式では、コンプライアンス C_{ms} は考慮されていません。

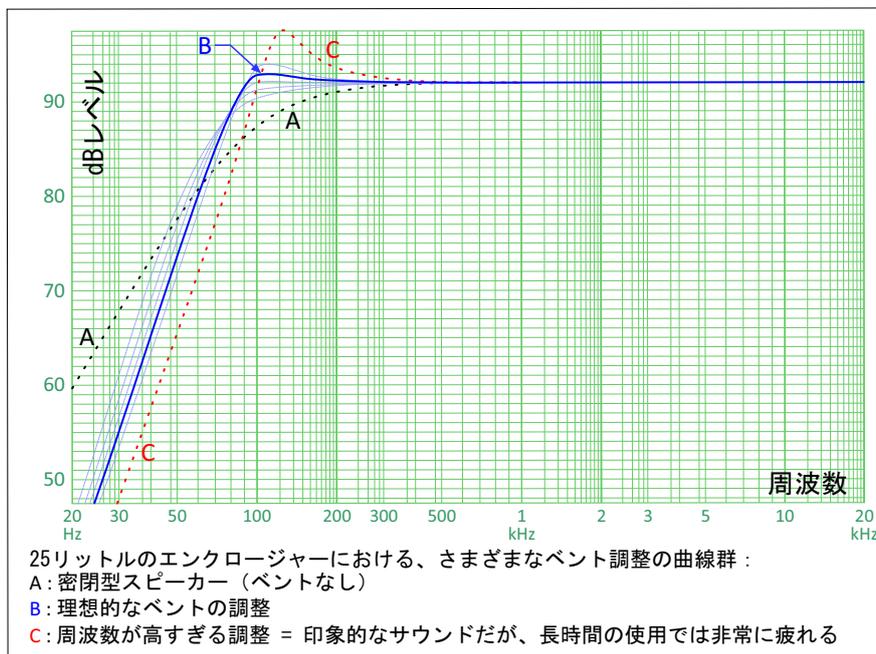
この式から、可動質量はその値の2乗で作用することがわかります。たとえば、可動質量が 33 グラムの B245-5 スピーカーの場合、可動部品の製造で 1 グラムの接着剤が無駄になると、効率が 6.15% (つまり 0.52dB) 低下します。

バスレフ式ベント付きチューニングキャビネット



非常に低い周波数では、ベントはキャビネットの内部から外部へ多くの空気（音）エネルギーを伝達します。このエネルギーは周波数の増加とともに減少し、250Hz以上では実質的にゼロになります。

密閉型エンクロージャーと比較して、適切に計算されたバスレフポートを備えたエンクロージャーは、ウーファの背面波から一定のエネルギーを回収してリスニングルームに（好ましい位相関係で）戻し、ほとんど聞こえずスピーカーに有害な極低周波数（好ましくない位相関係）を低減することができます。このシステムにより、低音域の周波数応答を直線化することができます。

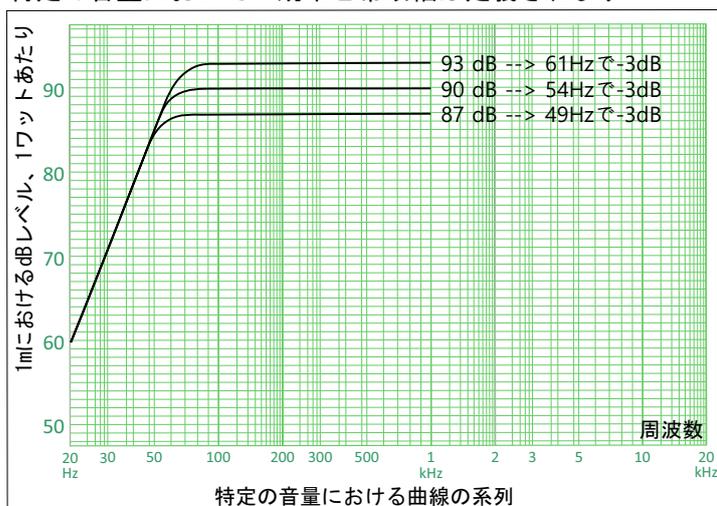


低周波数帯域の基本基準

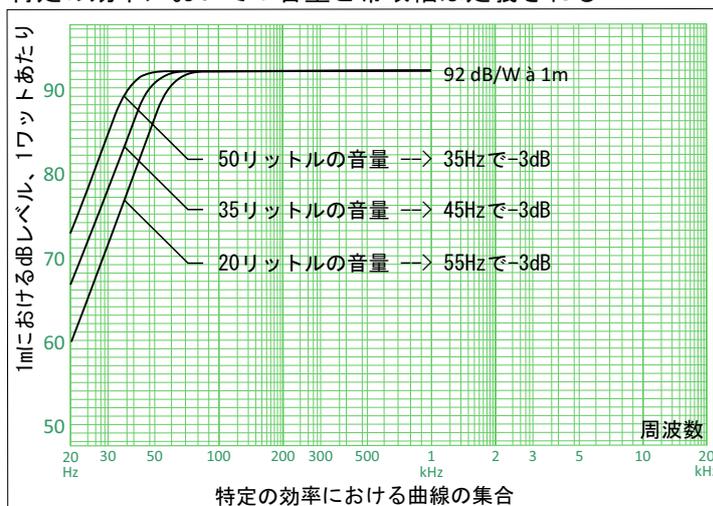
- 1- 効率 (dB/W at 1m) 、俗に「利得」とも呼ばれる
- 2- 容積 (リットル) は、負荷の種類 (密閉型、ベント型、またはパッシブ負荷) である
- 3- 超低音再生における帯域幅

低音域の再生に関するこれら3つの基準は、物理学の法則から逸脱することはできません。すなわち

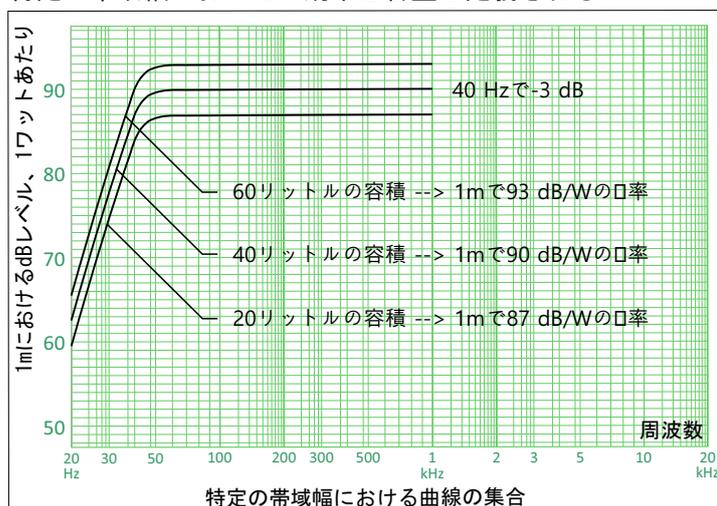
特定の音量において：効率と帯域幅は定義されます



特定の効率において：音量と帯域幅は定義される



特定の帯域幅において：効率と音量は定義される



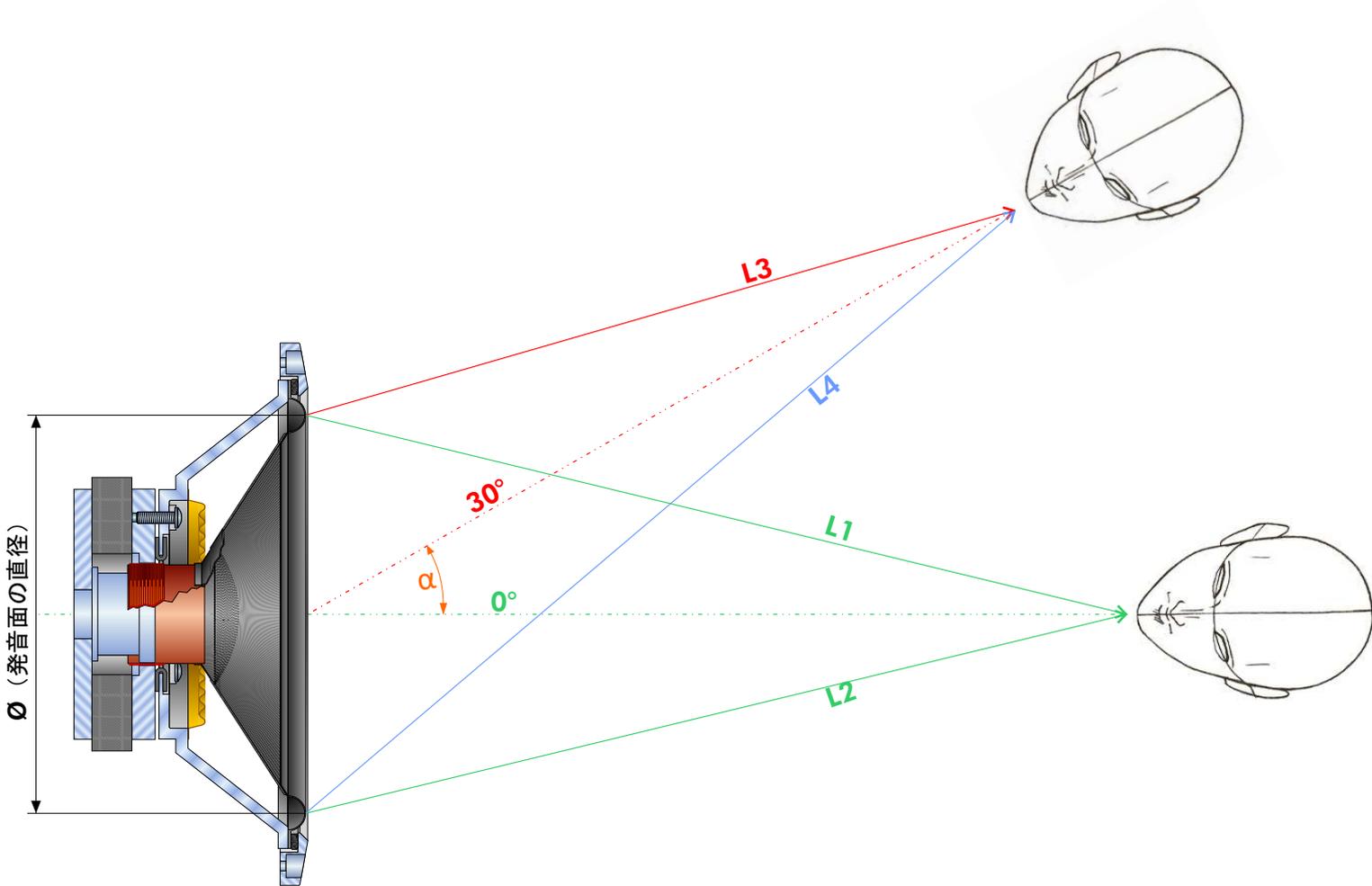
- 4- デシベル (dB) 単位での最大許容音圧レベル
- 5- その他の音楽的性能 (歪み、遅延など)
- 6- 信頼性 (負荷限界および経年劣化時)

スピーカーの指向性の起源

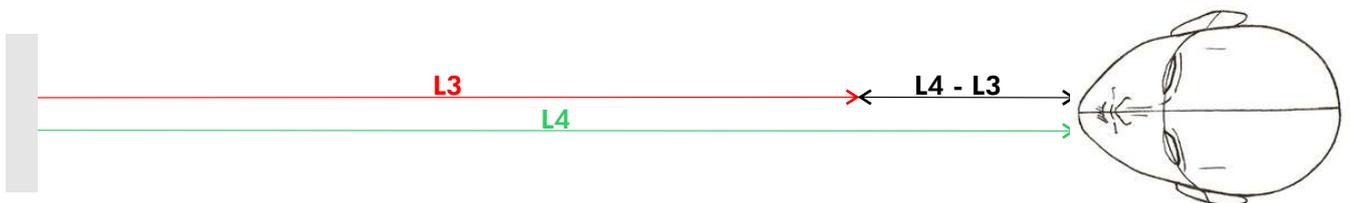
スピーカーの指向性は、3つのパラメータに関連しています：

- 1- 振動板（より正確には発音部）の寸法、すなわちその直径 \emptyset （メートル単位）
- 2- 対象とする周波数 F (Hz)
- 3- スピーカー軸に対するリスナーの位置角度： α （度）

空気中での音の伝播速度（ $V_{air}=344m/s$ ）も、この現象を考慮に入れる必要があります。



指向性は、振動板のさまざまな発音部分からリスナーまで音の伝播距離に差があることに起因しています。



指向性の詳細

リスナーがスピーカーの軸上に位置する場合、距離 $L1$ と $L2$ は等しくなります。振動板の全部から発せられた音は、同時にリスナーに到達します。

図のように、角度 $\alpha = 30^\circ$ の位置にリスナーがいる場合、距離 $L3$ と $L4$ は同じではありません。距離の差 ($L4 - L3$) は、より長い距離 ($L4$) を伝播した音響信号が、 $L3$ から発せられた信号よりも遅れて到達することを意味します。

ここでは、直径 20cm の振動板と 30° の角度の場合：

$$L4 - L3 = \frac{\varnothing \cdot \cos 30^\circ}{2} + \frac{\varnothing \cdot \sin 60^\circ}{2} = 0,1 \text{ m}$$

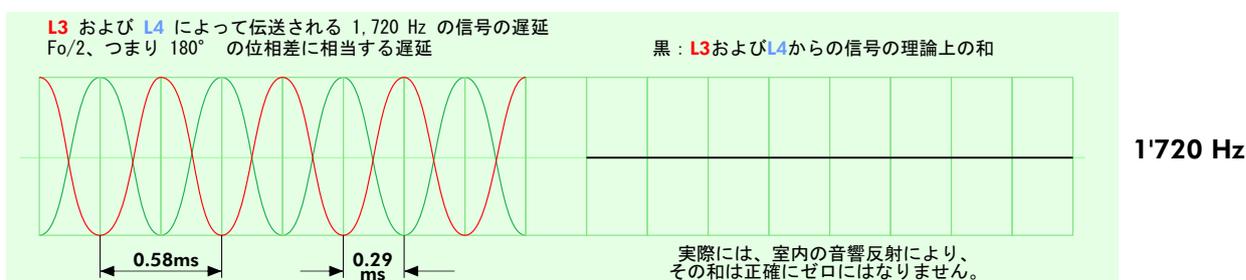
0.1m の距離差による遅延 T は、次の式で計算されます。

$$T \text{ (s)} = \frac{L4 - L3 \text{ (m)}}{V_{\text{air}} \text{ (m/s)}} \quad \text{soit :} \quad T = \frac{0,1}{344} = 0,29 \text{ ms}$$

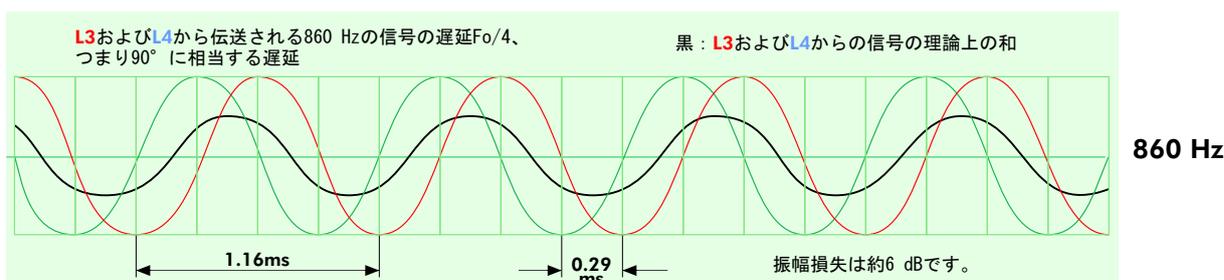
この 0.1m の波長に対応する周波数は、次の式で求められます：

$$F_0 \text{ (Hz)} = \frac{V_{\text{air}} \text{ (m/s)}}{L4 - L3 \text{ (m)}} \quad \text{soit :} \quad F_0 = \frac{344}{0,1} = 3'440 \text{ Hz}$$

1,720 Hz (すなわち $F_0/2$) の周波数を再生する場合、 $L3$ からの信号は $L4$ からの信号によって 180° の位相差により打ち消される。

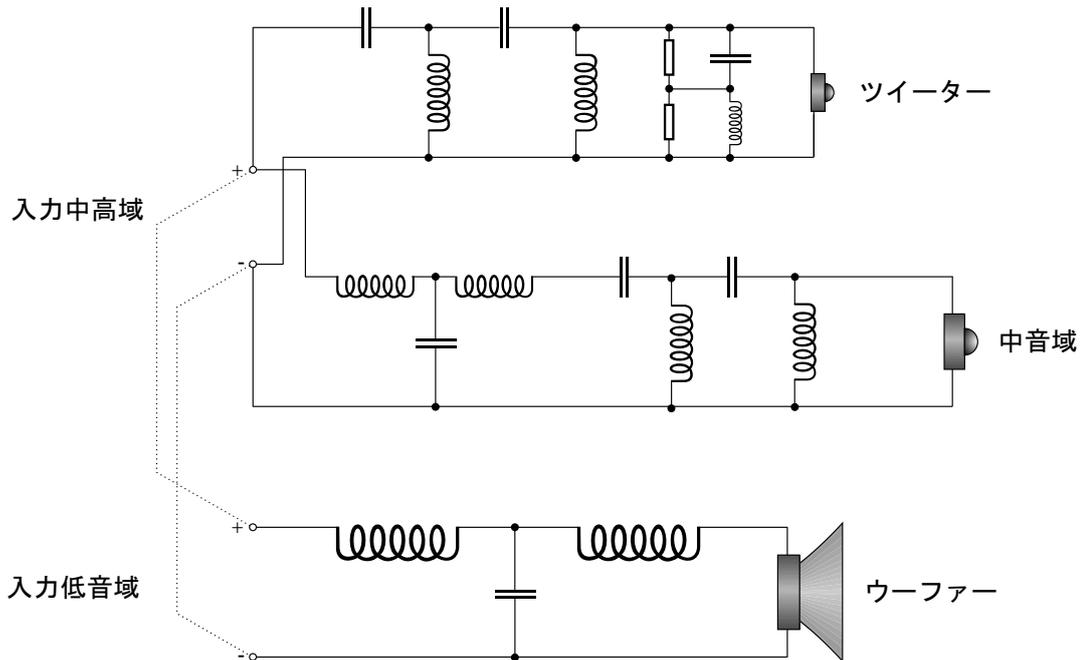


実際には、 $F_0/4$ (この例では 860Hz) に相当する周波数では、減衰が顕著になります。20cm の振動板と 30° の角度の場合、860Hz 以上では指向性がすでに無視できないレベルになります。



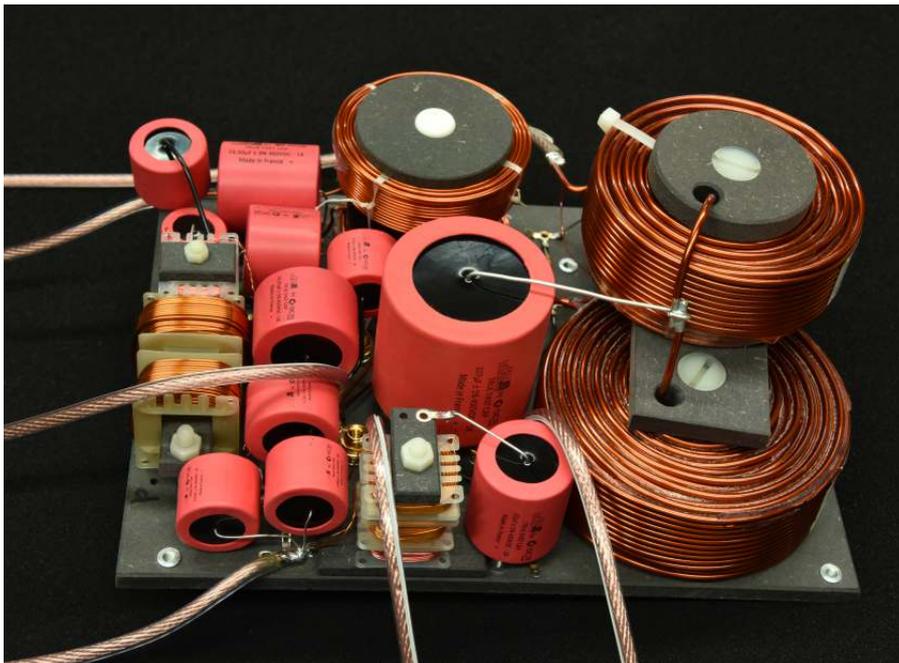
スピーカーの指向性ダイアグラムは、その音楽的品質ではなく、振動板のサイズに関係しています。振動板が大きいほど、該当する周波数帯域で指向性が高くなります。

従来のLC分配フィルター

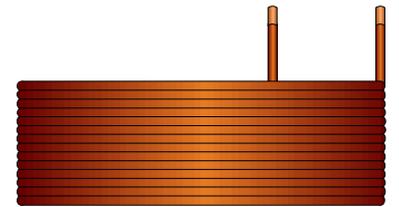


分岐フィルターは、増幅器からの信号を、その周波数成分に応じて各スピーカーに振り分けます。高性能で急峻な減衰特性を備えたパッシブフィルターは、他のいかなるシステムよりも決定的な利点を持っています。太い銅線を使用した磁気コアのないインダクタコイルとポリプロピレンコンデンサで構成されているため、このようなフィルターは飽和せず、高い直線性と卓越した耐久性を備えています。

パッシブフィルターの構造と構成部品



高い減衰勾配と低い直列損失を備えた分配フィルター、化学コンデンサを使用せず。磁気コアのないコイル： 6.5 kg の構成部品。

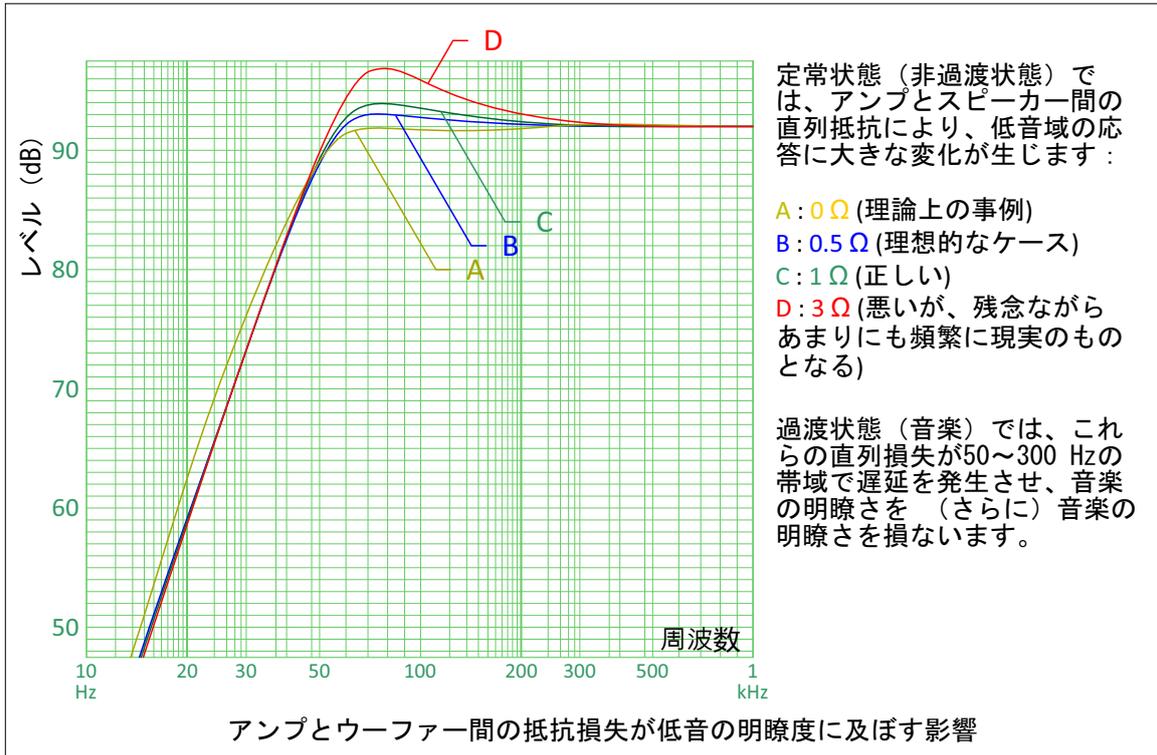


磁気誘導コイル
コアなし非常に太い断面：
1.68 mH - 0.11 W - 3 Kg

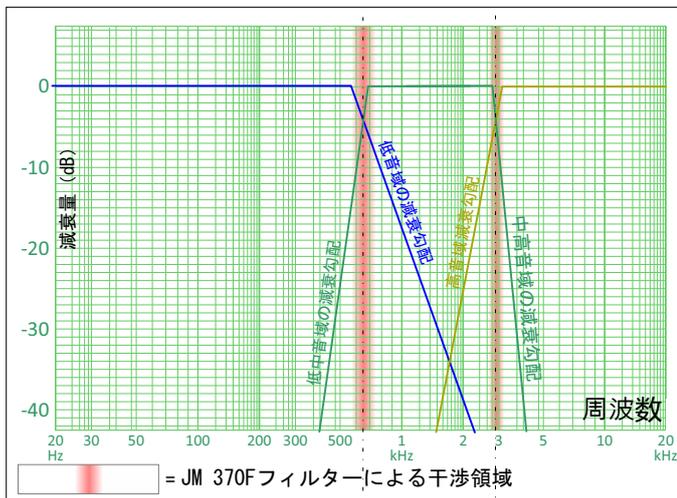
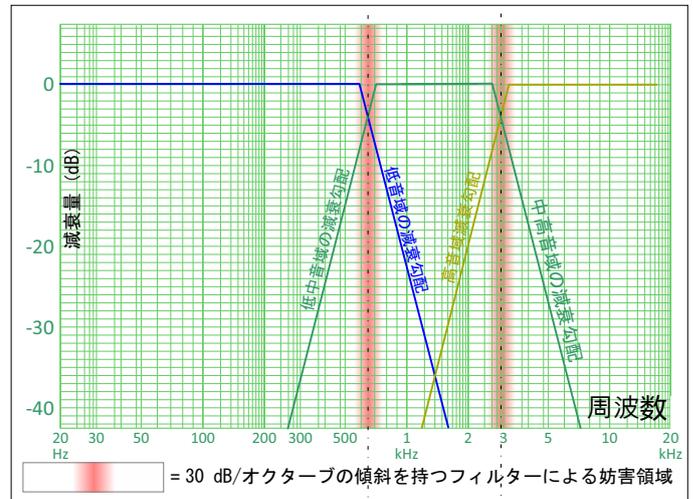
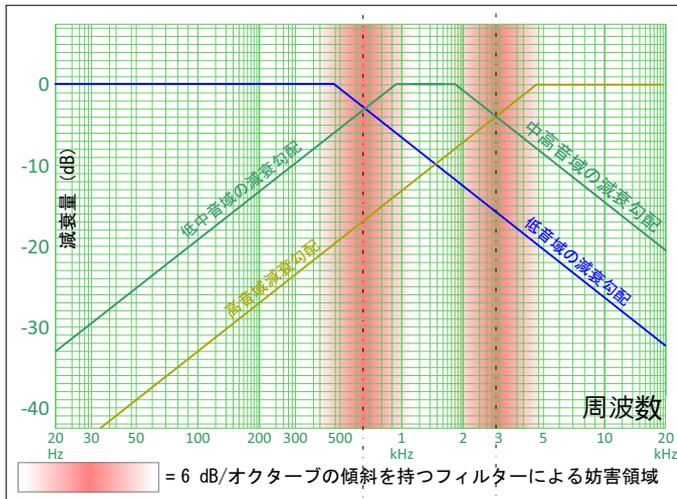


ポリプロピレンコンデンサ
高い安定性と
非常に速いインパルス応答：
12.7mF - 3% - tgδ<0.06%

分配フィルターの抵抗損失およびその影響



フィルターの減衰勾配



フィルターの傾斜は、スピーカーの共通動作領域を決定します。

これらの領域は、幾何学的にオフセットされ、物理的に異なるトランスデューサーが互いに干渉することで、明らかに妨害されます。フィルターの傾斜が急であるほど、これらの重なり合う領域は小さくなります。

単一の振動板から得られる再生範囲は、明らかにクリーンになります。

スピーカーと音響エンクロージャーのインピーダンス：非常に複雑な負荷であり、アンプにとって大きな課題です。

抵抗器は、ヒーターのように単純な負荷です。抵抗器が要求する電流は、印加される電圧に依存します。この電流は完全に消費され、熱に変換されます。これは、印加される電圧の形態に関係なく当てはまります。

交流電動機、すなわちスピーカーは、電気エネルギーを運動エネルギーに変換しますが、システム損失により一定の効率しか得られません。損失したエネルギーの一部は熱に変換されます。運動に変換されたエネルギーの一部は、電圧源に対して非抵抗性ではなく反応性の負荷となります。これは、このモーターまたはスピーカーが、消費する以上の電流を受け取り、その差分を電圧源に返すことを意味します。この返されるエネルギーは、起電力 (fcem) と呼ばれます。

スピーカーによっては、電流需要が振動板の移動に必要なエネルギーの 7 倍以上に達する場合があります。この余剰エネルギーは、分岐フィルターとスピーカーケーブルを再び通過して、アンプに回収される必要があります。余剰エネルギーの割合は、電気信号の内容（各時点における周波数と振幅の変動）によって異なります。これは、動的コサイン・ファイ (cos f) と呼ぶことができます。

アンプにとって、スピーカーの負荷は 2 つの大きな課題をもたらします。

1- 十分な電流供給能力、つまりワット (W) ではなくアンペア (A) での供給能力を持つこと。この能力により、スピーカーからの大きな電流要求があるたびに、アンプがダイナミックピークをクリッピングしないようになります。クリッピングは、聴覚的に非常に不快であるだけでなく、スピーカー自体の健康にも危険です。

2- スピーカーからのエネルギー (fcem) を吸収する能力に優れていること。これができない場合、スピーカーへの電流の跳ね返りが、非常に有害なエコー効果によって音楽の立体感を損ないます。ダイナミックレンジの谷は、このエネルギーの反射に埋もれてしまい、音楽の細部は非常に不快な共鳴で満たされてしまいます。アンプ/スピーカーシステムによって再現されるダイナミクスは、悪くなってしまう。

トランジスタ式アンプの中には、大量の電流を供給できるものもあります。たとえば、2オーム以下の抵抗負荷に対応できる能力は、この点において優れた性能の証です。4オーム以下に対応できないトランジスタ増幅器は、設計者がスピーカーの負荷の重要性を理解していないため、排除すべきです。

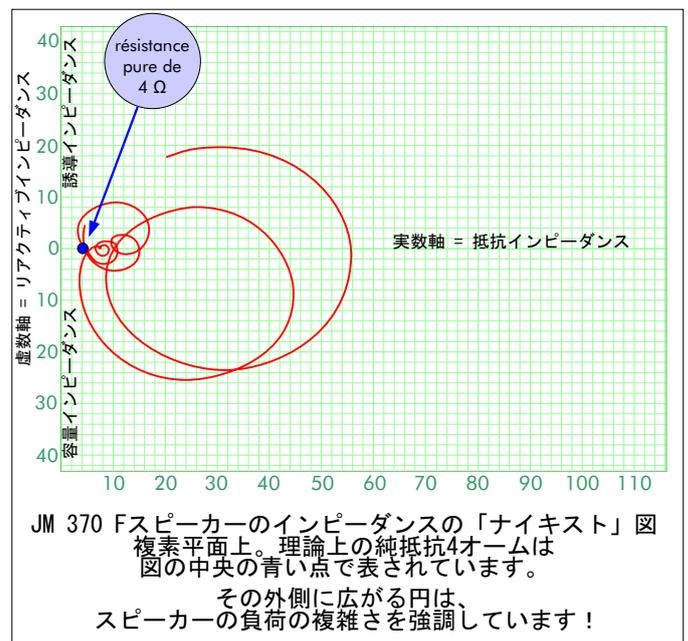
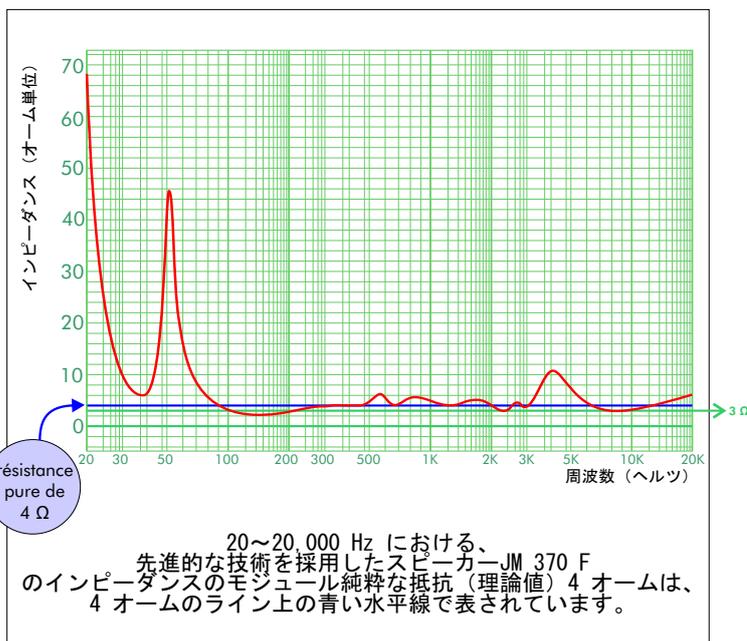
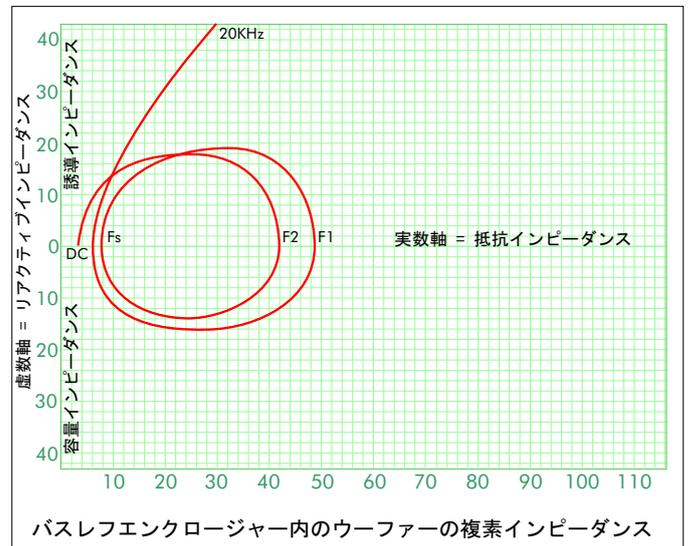
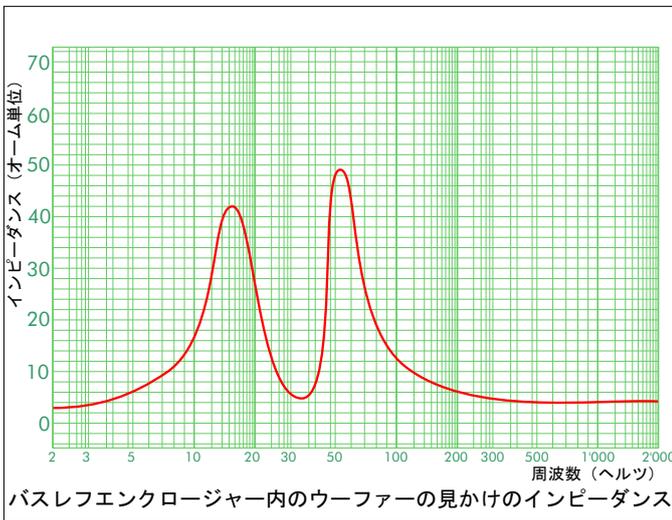
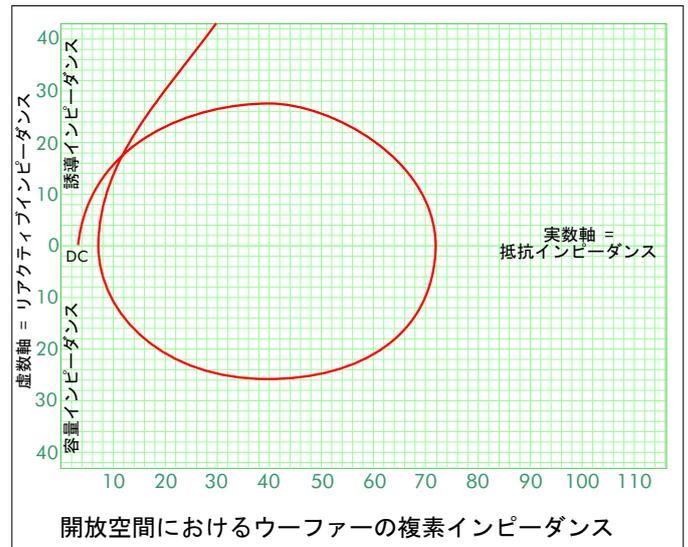
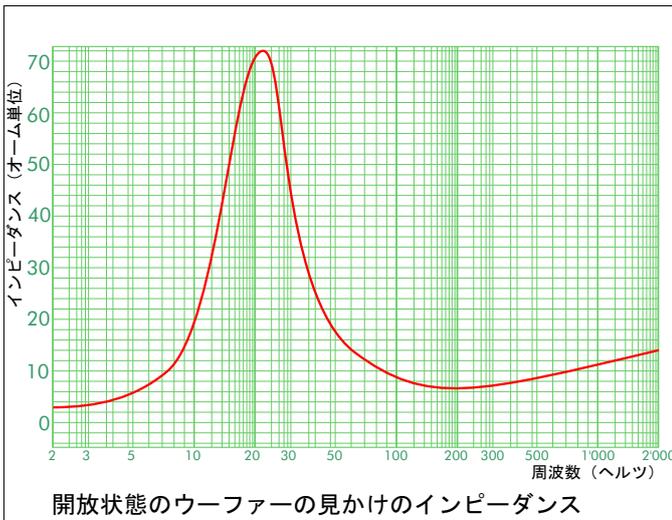
一方、逆電流 (fcem) は、出力トランスを使用しないダイレクトトランジスタ増幅器の出力において多くの問題を引き起こします。このエネルギーの再吸収は十分に制御されておらず、前述のような結果をもたらします。

真空管アンプの技術では、真空管の動作インピーダンスをスピーカーのインピーダンスに適合させるために出力トランスが必要です。これは、優れた性能を引き出すためには、大きく、重く、高価で、開発も製造も難しい部品です。しかし、非常に注意深く設計すれば、スピーカーにとってまさに天の恵みとなる部品です。

スピーカーは必要な電流をすべて受け取り、出力トランスによって非常に高い効率で短絡される fcem を返します。フィルターやスピーカーケーブルの直列抵抗が低いことも、アンプへのエネルギーの戻りを容易にします。

ごく一部のトランジスタ式アンプには出力トランスが搭載されており、その品質は優れた真空管式アンプに近づくことがあります。

スピーカーおよび音響エンクロージャーのインピーダンス



スピーカーのリアクトルエネルギー、 ダイナミクスを破壊する

音楽のダイナミクスは、変調のピークと谷の間の振幅の差によって定義されます。このダイナミクスはデシベル (dB) で表されます。

ダイナミクスのピークを再現するのは比較的容易ですが、その後には必ず続く谷を再現するのはまったく別問題です。なぜなら、振動の残留（機械的および電氣的）が、振幅の小さい音楽信号を埋もれさせてしまう傾向があるからです。例えば、交響楽団の録音では、60 dB のダイナミクス、つまり 1 対 1,000,000 のパワー比が容易に発生します。このパワーの差は、ほんの一瞬のうちに再現されます。

強い音量の後には、必ず残留ノイズ（筐体の振動、電氣的エコー、不十分な減衰の膜など）が発生します。一方、その瞬間には、沈黙や非常に弱い音量（あるいは単にダイナミクスの谷間）が再現されるべきです。また、こうした不適切に長引く信号は「残響効果」とも呼ばれます。この問題の核心は、「沈黙の尊重」と呼ばれるものにあります。

スピーカーでは、残響には主に 3 つの原因があります。

1- 各スピーカーの逆起電力 (f_{cem}) は、アンプからの電氣的な音楽信号とは逆の寄生電流だ。これはアンプで可能な限り再吸収されなければならない。この吸収がうまく行かないと、山で岩壁に向かって叫んだときに聞こえるようなエコー効果が生じます。この残響によって、元の音声は聞き取りにくくなります。しかし、トランジスタはこのエネルギーをうまく取り戻すことができず、その結果、エネルギーはスピーカーに跳ね返り、ダイナミックレンジのすべての谷間を埋めてしまいます。真空管アンプに非常に優れた出力トランスが搭載されている場合、その二次巻線がこの逆電流を効率的に短絡します。

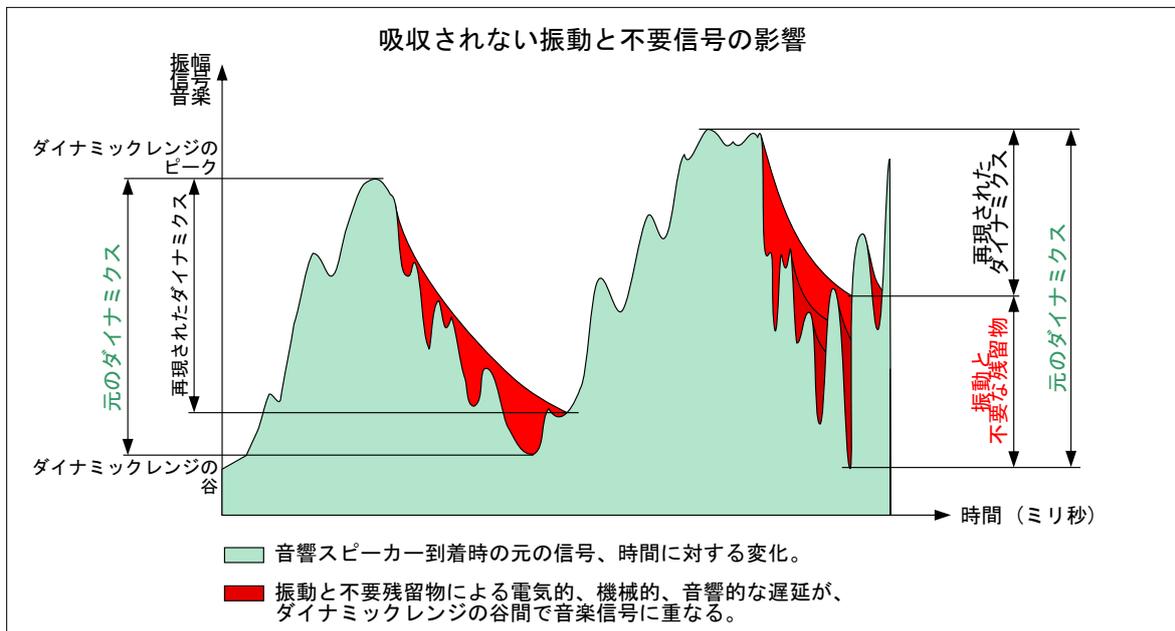
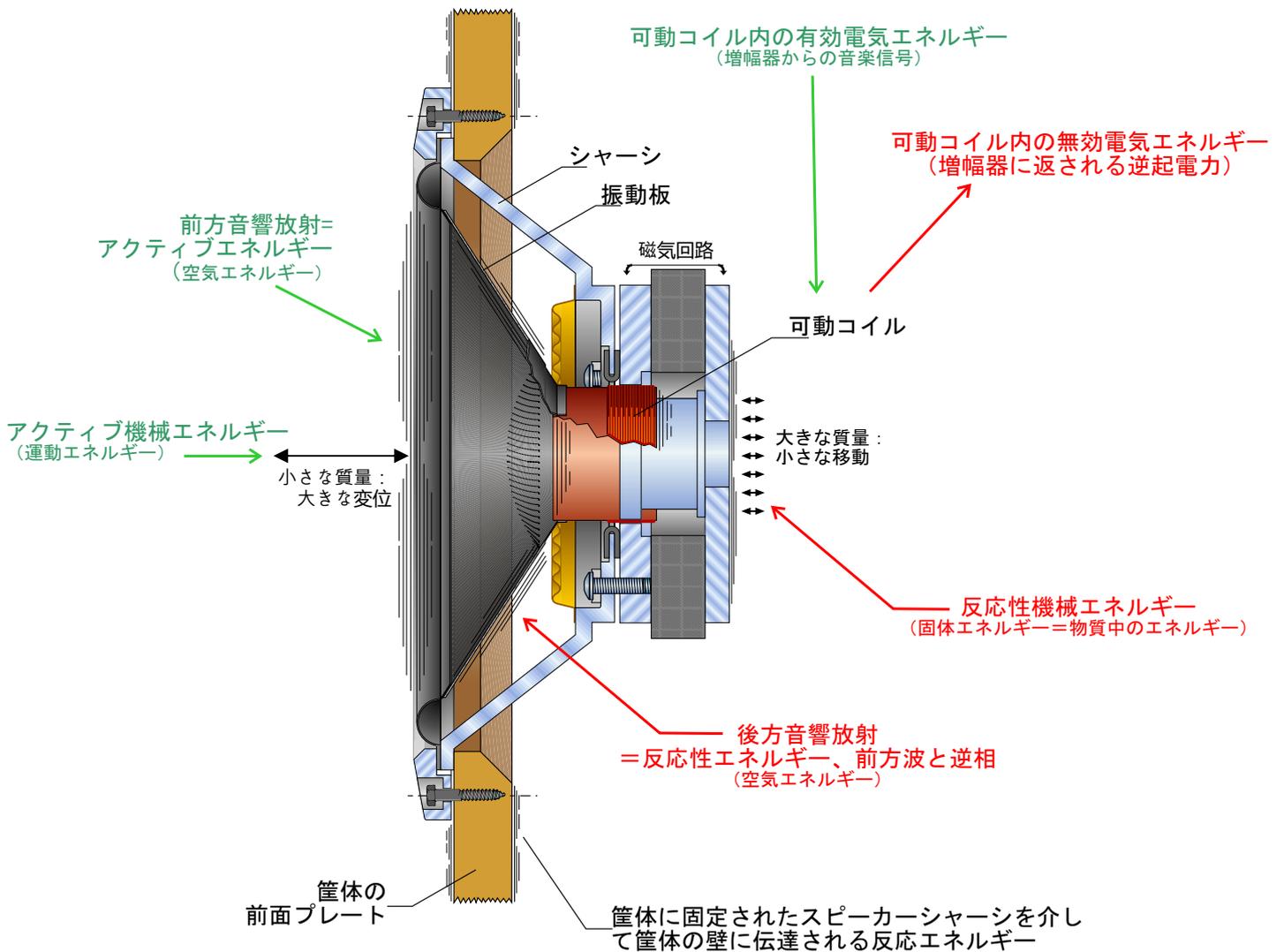
ダイナミクスのピーク

2- 可動部品（ボイスコイルと振動板）の動きと、その近くの空気の質量によって生じる機械的反動エネルギーは、一種の残留ノイズを生み出します。これは、スピーカー自体が作り出す機械的振動です。この振動は、スピーカーのシャーシの枝からスピーカーボックスに伝わり、遅延と大きな歪み効果とともにスピーカーの各面を振動させます。

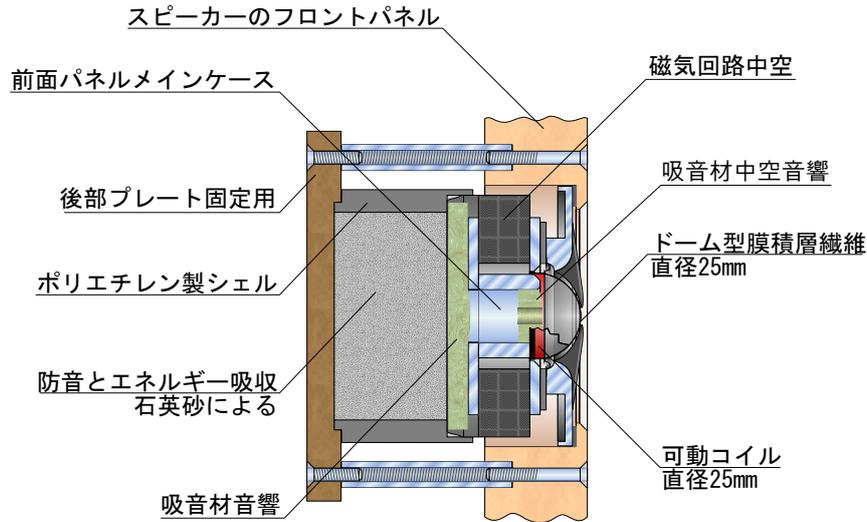
Jean Maurer のスピーカーでは、これらのさまざまな残留物は、特に、ウーファーのモーターを非常に低い共振周波数の二重サンドバックに動的に接続するプレストレスロッドのおかげで、石英砂によって吸収されます。また、シャーシはキャビネットのフロントプレートからも動的に分離されています。ミッドレンジおよびツイータースピーカーについては、ダブルシェルに充填された砂がこの役割を果たしています。

3- スピーカーの振動板の動きは、前方への音の放出と、逆方向の後方への音の放出を生み出します。後方への音響波は、誰もが話題にする唯一の望ましくない信号であり、ミネラルウールによって吸収されます。この信号の一部は、低周波数での応答を直線化するために、バスレフポートによって取り込まれます。前述の 2 種類の反応エネルギーと比較すると、静寂の維持という点で、このエネルギーは最も制御が容易です。スピーカーのキャビネットが非常に不活性、つまり共振が少ない場合、再現される音楽の立体感は良好になります。キャビネットの二重背面に封入された石英砂、および JM 370F モデルでは側面と 2 つの前面部分に封入された石英砂が、この結果に大きく貢献しています。

スピーカーの能動エネルギーと反応エネルギー



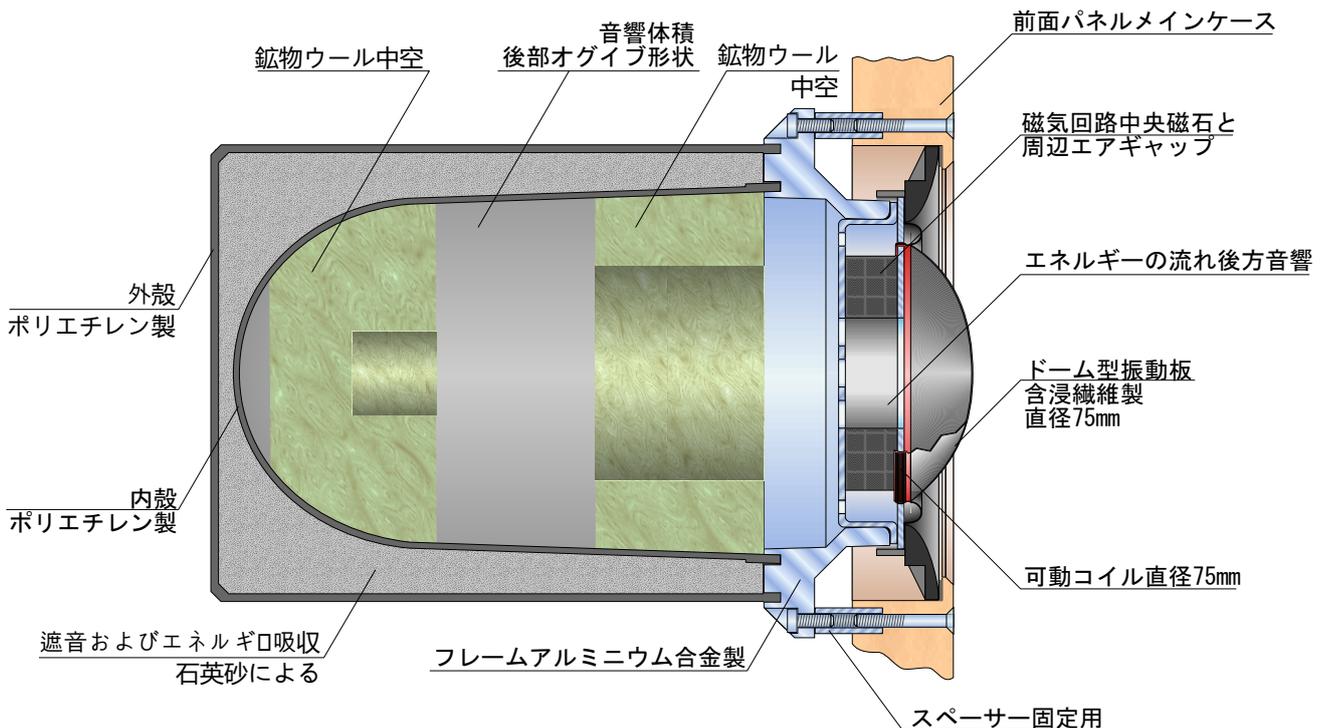
中音域および高音域用トランスデューサー： 低音用スピーカーに組み込まれた2つのスピーカー



高音用スピーカー、TD25-4トランスデューサー搭載

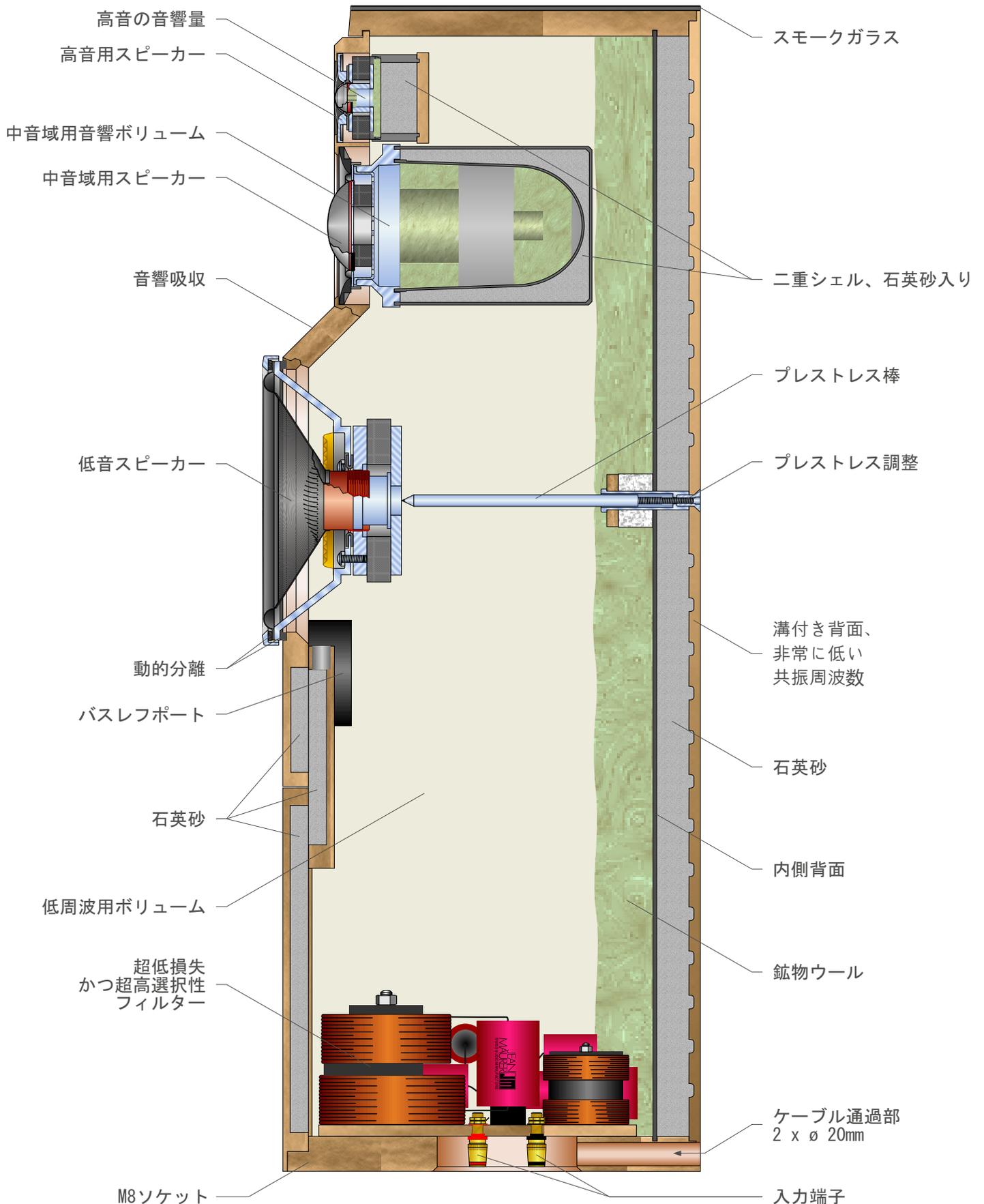
各スピーカー、またはトランスデューサーは、前方と後方に音響波を発生させます。スピーカーの後方エネルギーは、いかなる場合でも他のスピーカーの後方エネルギーと混ざってはなりません。混ざると、隣接するスピーカーの振動板の動作に深刻な悪影響を与え、許容できない騒音公害を引き起こす危険があります。また、低音エネルギーによって、中音域または高音域のトランスデューサーの可動部品が機械的に破壊される危険性も現実的に存在します。

これら2つの帯域（中音域と高音域）の反応エネルギーも、真剣に扱う必要があります。どちらの場合も、低音帯域のサンドバックと同様に、石英砂の塊によって安定化されます。

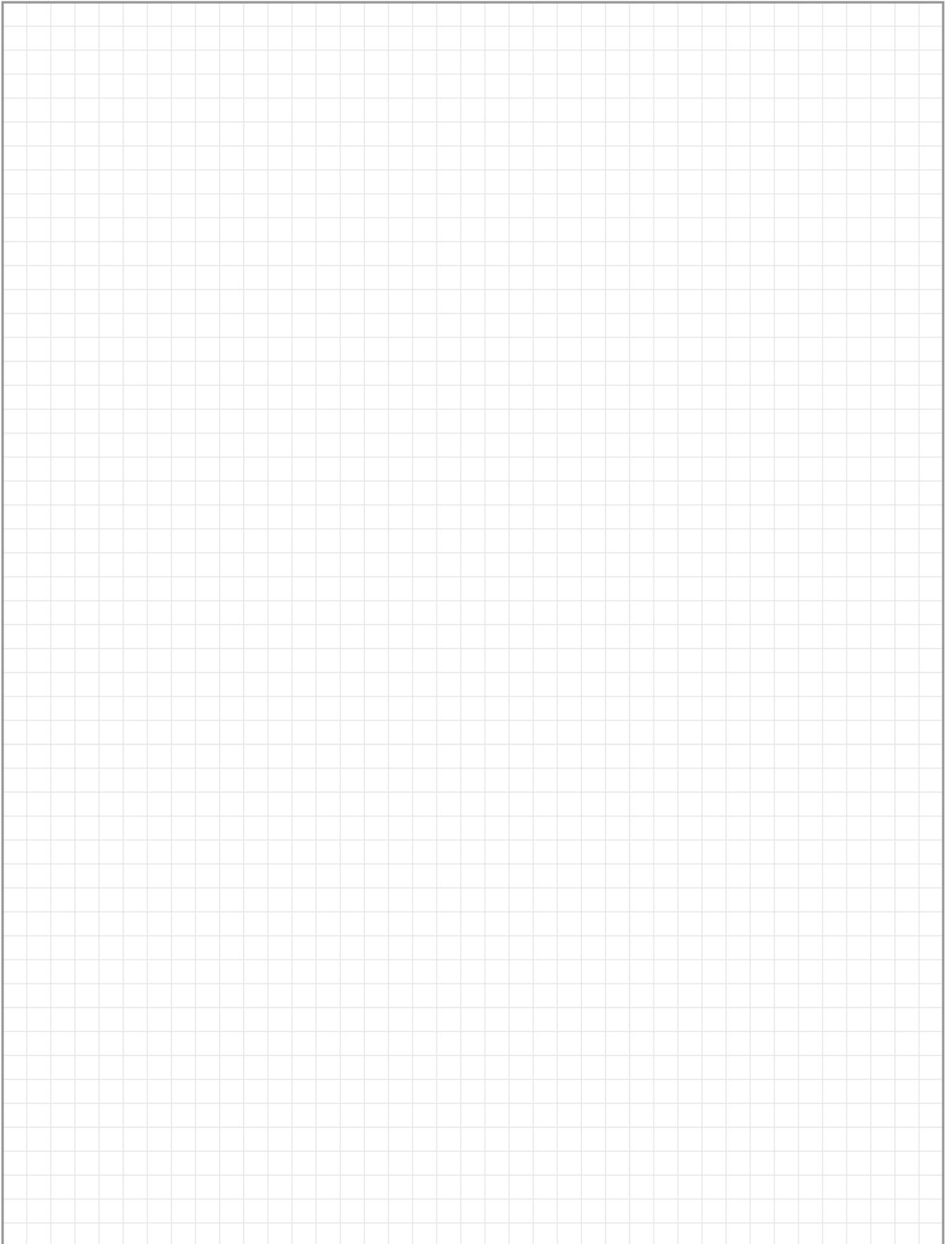


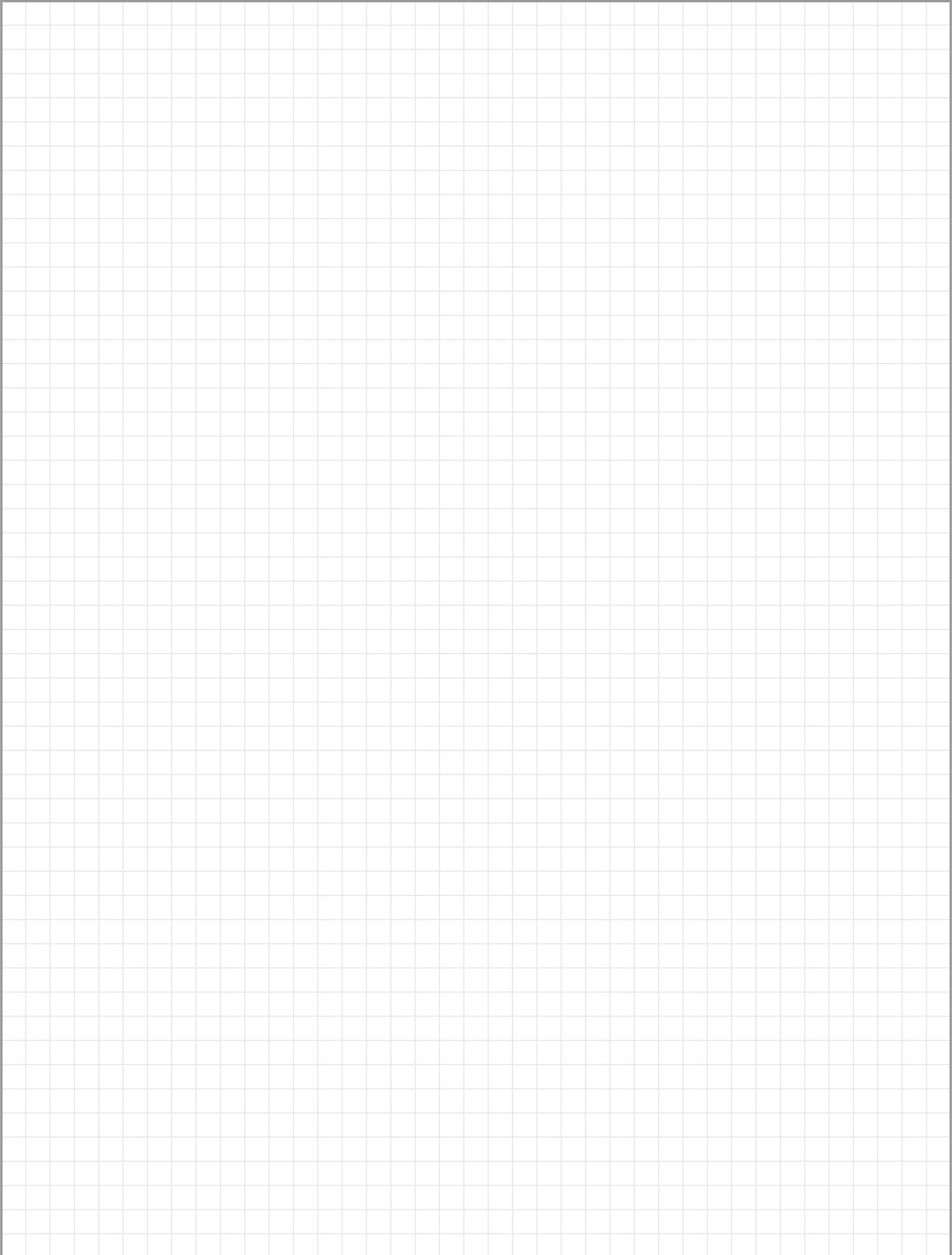
中音域スピーカー、MD75-3トランスデューサー搭載

エネルギー吸収型音響スピーカー筐体



Jean Maurer JM 370F 音響スピーカーの断面図





スイスのメーカー
卓越したスピーカーと
真空管アンプの製造

www.jeanmaurer.ch

Jean Maurer Swiss Audio Manufacture SA
Rue du Chêne 17
CH-1170 Aubonne

+41 21 808 50 60 | info@jeanmaurer.ch | www.jeanmaurer.ch