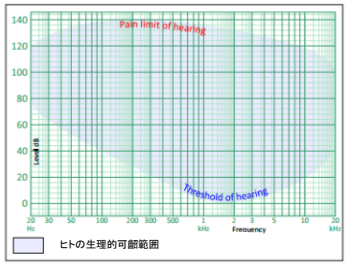
ヒトの生理的聴覚

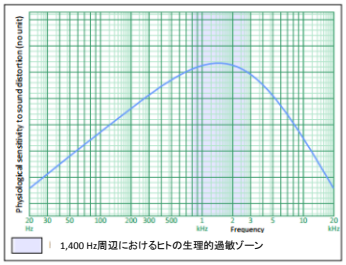
私たちの生理的可聴域は直線的に定義されることはありません。
その範囲は年齢によって様々ですが、（78～102デシベル（dB）において）概ね20 Hz～20 kHzとされております。
周波数を横軸にとると約1,400Hz前後で感度が最高となり、その前後2オクターブの周波数範囲、すなわち700～2,800 Hzは音の「聖域」とされます。

この「聖域」では音の再現におけるあらゆる種類のディストーション（音の歪み、減衰時間の広がり、指向誤差など）を抑えるための最も厳格な手法が必要とされるため、可能な限りミッドレンジのラウドスピーカーを中心とした音響デザインが求められます。

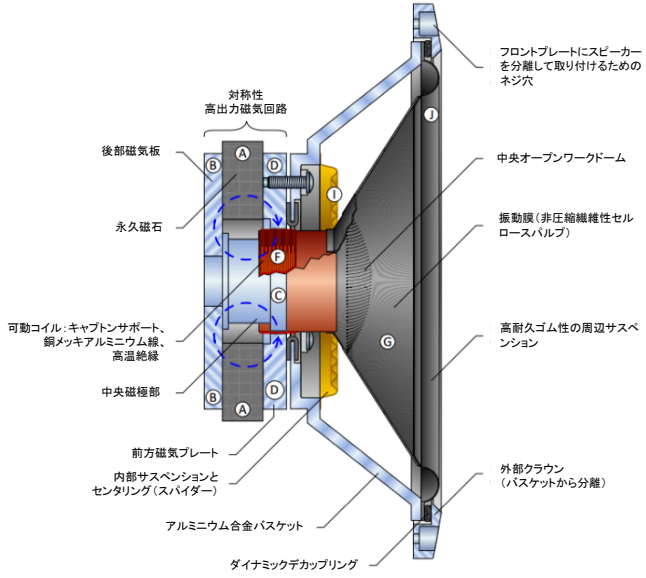
ミッドレンジのラウドスピーカー製作にはその2オクターブのみに周波数を可能な限り限局させることを考慮にいれた極めて精密な作業が必須であると私たちは考えます。

全体的なスペクトルでの音楽再生を完成させるためには、音響システムは低音周波数スピーカー（ウーファー）と高周波数スピーカー（ツィーター）で補われなければなりません。したがって、高性能音響エンクロージャー（スピーカーシステム）には、リアルなサウンド再生システムであるために、3つのスピーカを全て装備する必要があるのです。





ラウドスピーカーの主要構造



B245-5 woofer

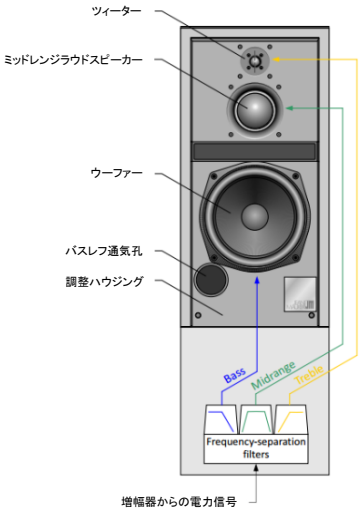
環状フェライトマグネットA、後方磁性板B、中心コアC、前方磁性板Dからなる磁気回路は、DとCとの間のエアギャップと呼ばれる幅の狭い円形スロットに非常に強い地場を発生させます。

可動コイルFと円すい膜Gは、サスペンションIとJとの間に保持され、コイルは側面に接触することなくエアギャップの中心に配置されます。

電流増幅器からの電流は可動コイルを通過し、エアギャップ内強い磁場の影響を受けて、電流の方向に応じて膜を前後に押し引きします。

電気信号の調律における前後の動き（録音中にマイクロホンによって捉えられる音の電気的イメージ）により、音楽はほぼ実際と変わらない忠実性をもって再現されます。

音響エンクロージャ（スピーカーシステム）の構造と電力負荷の分布



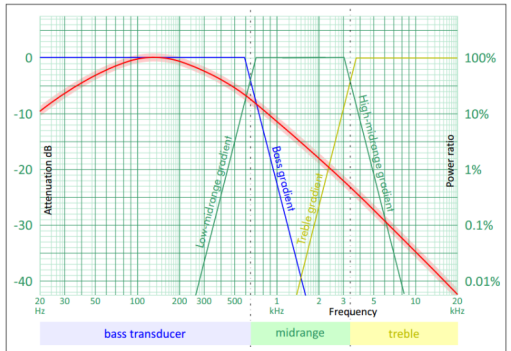
音響エンクロージャー（スピーカーシステム）は、全体的な高忠実度（hi-fi）性能のために同等に重要性をもつ3つの要素から構成されます。

-- アンプからの電気信号を物理振動に変えるスピーカーまたはトランスデューサ。

-- 信号の周波数成分に応じて、各スピーカーに電気信号を送るフィルター

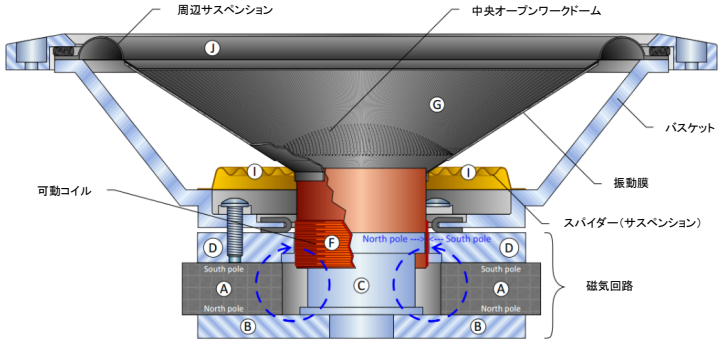
-- ハウジング、厳密には、各スピーカー背部の音響信号（振動膜により生み出されるスピーカー内部の音波）を処理するスピーカーシステムのハウジング）。これにより、後進波による直接音響信号への影響を確実に遮断される。

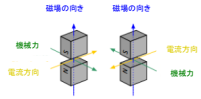
シンフォニーオーケストラについて記せば、音楽のエネルギーの大部分（約80%）は低音周波数スピーカーによって再生され、それにより音楽的イメージと器楽曲本体の奥深さが作り出されます。一方でミッドレンジトランスデューサーは音楽演奏の明瞭性を担い、最も忠実な音楽再生に貢献します。また高音周波数スピーカーは最速のリアクションで20kHzを優に超えた音の再現をも可能にし、音の空間（sonic space）を生み出します。



赤ライン：3つのラウドスピーカへのフィルタによって伝達されるエネルギに対する周波数応答関数としてのオーケストラルパワーの分布。

ラウドスピーカーの4つのパラメーター



Force-factor: B·ℓ	Mobile mass: m	Compliance: C	Surface: S
これは、この磁場に浸された可動コイルの巻線の長さを乗じたエアギャップ（CとDの間に位置する円形スロット）の磁場に相当	（一般にはMms）可動コイル（F）+膜（G）+サスペンションの一部（I + J）、（すなわち動くもの）の質量に相当	（一般にはCms）末梢懸架装置（J）+内部センタリング（I）の弾性の合計に相当	全表面積、すなわち振動膜（G）+末梢懸濁液（J）の一部の表面の面積合計に相当
			$S = \pi \cdot r^2$
Tesla·metre [T·m]	**gram [g]**	**millimetre/Newton [mm/N]**	**metre² [m²]**

+ **R edc**：可動コイル（F）の直流抵抗

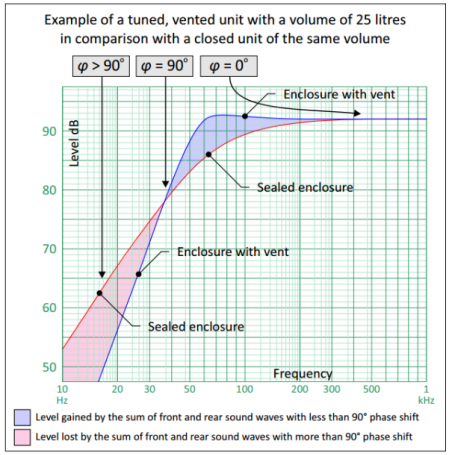
ラウドスピーカーの性能は右の通りの比例関係をもちます：

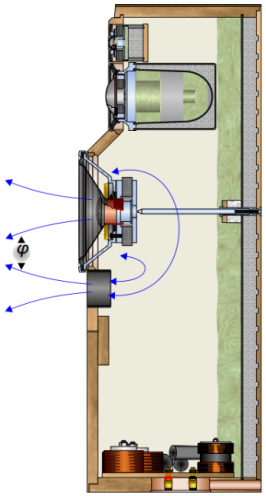
$$\eta \approx \frac{S \cdot (B \cdot \ell)^2}{m^2 \cdot R_{edc}}$$

この式では、コンプライアンスCmsは含まれません。

一方で、この式から、移動質量の変動はその変動値の2乗に反比例して性能に影響を及ぼすことがわかります。たとえば、B245-5スピーカーの場合、移動質量が33グラムの場合、スピーカーの可動部分の取り付け中に使用する接着剤が1グラムオーバーすれば、ラウドスピーカーの性能は6.15%、すなわち0.52dB減少します。

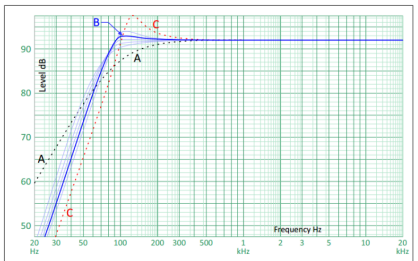
通気孔の使用によるハウジングの調律





極度に低い周波数では、通気孔はハウジングの内部から外部に多くの音エネルギーを伝達します。周波数が高くなるにつれて減少するこのエネルギーは、250Hzより上では事実上ゼロになります。

クローズなユニットと比較して、十分に計算された通気式バスレフユニットは、一定量のエネルギーをウーハーのリアウェーブより回収することができます。その結果、リスナーの部屋には（適切な位相関係で）それが回収され、ほとんど聞こえず、かつ、ラウドスピーカーに好ましくない位相関係にある有害な極度の低周波数帯は減衰される。したがって、このシステムは、低周波帯におけるレスポンスの線形近似を可能にします。



Family of curves, for various vent variants in a 25-litre unit:
A : closed unit (without vent)
B : ideally tuned vent
C : vent characteristic tuned to too high frequency = flattering, but very annoying in the long term

低周波数帯の再生の基本的な基準

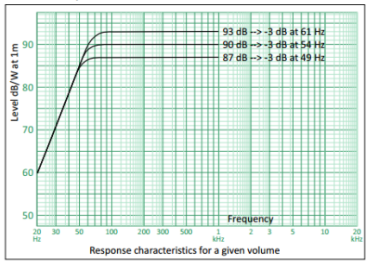
1 – 効率（dB /W at 1m）

2 – 容量（litres）と負荷のタイプ（閉鎖容量、換気システム、もしくは受動負荷）

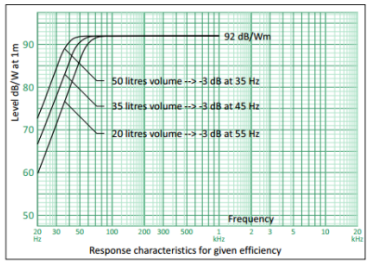
3 – 極度の低周波帯の帯域幅

これらの基準3つは、物理学の基本的な規則と矛盾しないでしょう。すなわち；

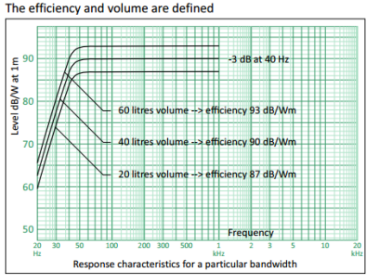
For a particular volume:
The efficiency and bandwidth are defined



For a particular efficiency:
The volume and bandwidth are defined



For a particular bandwidth:
The efficiency and volume are defined

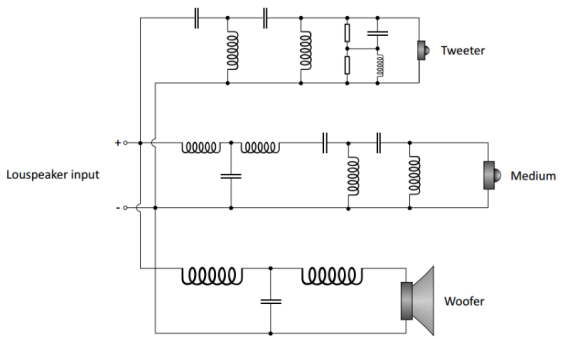


4 –デシベル（dB）の最大許容レベル

5 –その他の音楽パフォーマンス要因（歪み、減衰時間の拡がり 等）

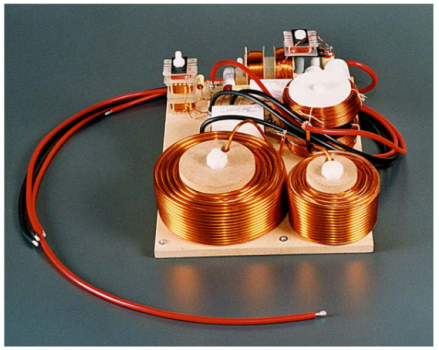
6 – 確実性（負荷制限とエイジング）

伝統のLCフィルター

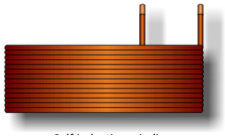


バンドパスフィルタは、その周波数成分に応じて、アンプからの信号を各スピーカに送信します。
急峻な減衰勾配を持つ高性能パッシブフィルタは、他のシステムと比較して決定的なアバンテージをもたらします。磁心を有することなく大きな銅断面をもつ自己誘導コイル、および、ポリプロピレンコンデンサで構成されているこのネットワークは、飽和することなく高い直線性と群を抜く長い耐用年数を誇ります。

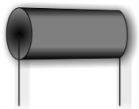
パッシブフィルタのコンポーネントとその構造



バンドパスフィルター
ケミカルコンデンサやコイル中央の磁気コアをもたず、
急峻な減衰勾配と高い直線性を実現する。
コンポーネント質量 6.5kg

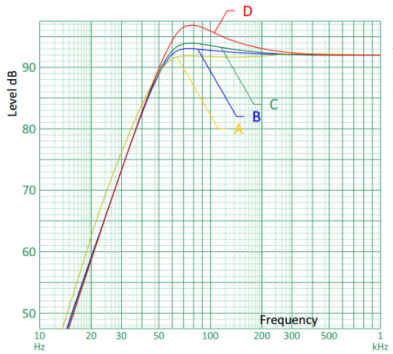


自己誘導コイル
中央の磁気コアをもたず、断面が非常に大きい。
1.68 mH - 0.11Ω - 3 kg



高い安定性をもつポリプロピレンコンデンサ
12.7μF~3% - tgδ<0.06%

バンドパスフィルタの抵抗損失とその影響



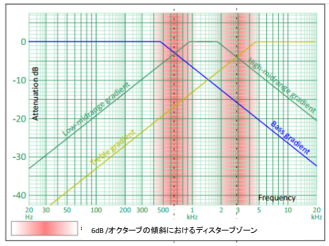
たえまない連続的なオペレーションモードにより、アンプとラウドスピーカー間の直列抵抗は低音レスポンスに重要な変化をもたらします。

A：0Ω（理論値の場合）
B：0.5Ω（理想的な場合）
C：1Ω（正しい）
D：3Ω（悪いが、残念ながら非常に頻繁に見受けられる）

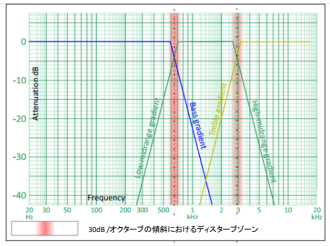
遷移する領域（音楽）では、これらの直列損失は、50～300Hz区間で減衰時間の広がり/前縁の広がりを作ってしまい、音楽メッセージの明瞭度を（さらに）低下させる。

低音の明瞭度に対する増幅器とウーファー間の抵抗損失の影響

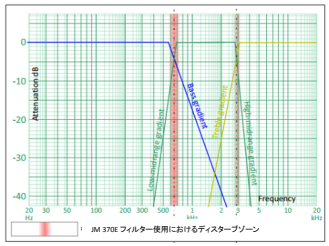
フィルタの減衰勾配



6dB /オクターブの傾斜におけるディスターブゾーン



30dB /オクターブの傾斜におけるディスターブゾーン



JM 370E フィルター使用におけるディスターブゾーン

フィルタの勾配により、ラウドスピーカのオペレーション共有領域が決定されます。これらの領域は、物理的にも配置的も全く異にする複数のラウドスピーカ同士の干渉により、明らかに大きく乱されます。フィルタの勾配が急であればあるほど、重なり合う領域は小さくなります。したがって、特定のラウドスピーカ膜によって放出される音響再生は、より正確になります。

ラウドスピーカーと音響エンクロージャのインピーダンス：非常に複雑な負荷であり、アンプの大きな課題

抵抗は、発熱体のように、シンプルな負荷です。そこを流れる電流はそこの電圧に依存し、完全に消費されて熱に変換されます。これは、その電圧形式に関係なく成り立っている認識です。
交流電流用のモーターやスピーカは、システム損失に応じてある効率で電気エネルギーを運動に変換します。エネルギーの損失分は熱に変わります。運動に変換されたエネルギーは、抵抗性ではなく反応性の負荷を電圧源に向けて提示します。理由が非常に複雑なため本稿での説明は差し控えますが、これは、モーター、あるいはスピーカーが実際の消費電流以上の電流を要求し、過剰分のエネルギーを電圧源に戻すことを意味します。この返されたエネルギーを、逆起電力（emcf）と呼びます。

スピーカーによりますが、電流の需要は振動膜を動かすのに必要なエネルギーの7倍を超え得ます。過剰なエネルギーは、クロスオーバ・フィルターとラウドスピーカのケーブルを介しアンプに戻る必要があります。その過剰電流の割合は、電気的音楽信号のコンテンツ（各瞬間における周波数および振幅の変動）に依存します。ここでは"ダイナミックコサインピ"（cosφ）について言及します。

アンプのディメンショニングの際、スピーカーロードには2つの課題があります。
--十分な電流供給能力の提供を決定すること：ワット（W）ではなくアンペア（A）。この機能により、ラウドスピーカーエンクロージャーから求められる大電流のダイナミックピークのクリッピング回避をアンプにもたらします。クリッピングはリスナーにとって非常に不快なだけでなく、スピーカー自体にも有害です。
--スピーカーの逆起電力（emcf）に対し、良好な吸収能力を持つこと。これが当てはまらない場合、スピーカーの方向への電流のリバウンドは、とても有害なエコー効果により立体音響を乱すことになります。これらの強弱のディップは、このエネルギーのリバウンドによって掻き消されてしまい、音楽的なディテールは非常に不快な残響で満たされ、疲れさえ感じさせます。そしてアンプ/スピーカーシステムによって創り出されるダイナミクスは減弱します。

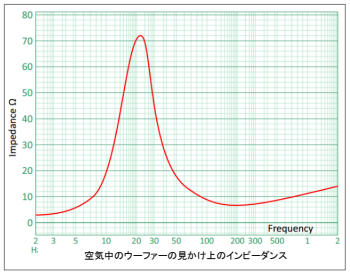
特定のトランジスタ増幅器は、多くの電流を供給することができます。この点から観れば、例えば2オームまたはそれ以下の抵抗負荷を受け入れることができる能力は、魅力的な特徴です。4オーム以下の負荷で駆動できないトランジスタ増幅器は、その設計者が実際にスピーカー負荷の演じどころを解釈していないと捉え、除去されるべきです。

一方で、逆起電力（emcf）の吸収は、直接トランジスタ増幅器の出力、すなわち出力変圧器を備えない増幅器の出力に多くの問題を引き起こし、エネルギーの再吸収はほとんど制御されぬまま、上述のあらゆる結果を招きます。

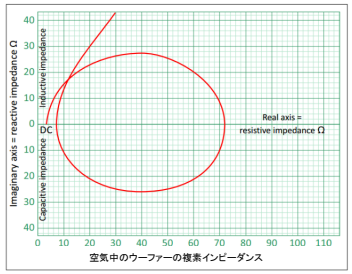
管駆動増幅器の技術は、管の動作インピーダンスをスピーカのインピーダンスに適合させる出力変圧器を必要とします。変圧器は、大きく、重く、高価で、優れた性能が求められるほど製造が難しいとされるコンポーネントです。しかし設計が叶えば、それはスピーカーへの真の贈り物であり、必要なすべての電流を受け取れるだけでなく、極めて良い効率で返すことができます。この逆起電力（emcf）は変圧器の二次ワインディングによって短絡され、同時に、ラウドスピーカのフィルタとケーブルの直列抵抗が小さいため、アンプへエネルギーを戻しやすくなります。

いくつかのトランジスタアンプには出力トランスが付属しており、その品質は、より質の高いチューブアンプへと近づきます。

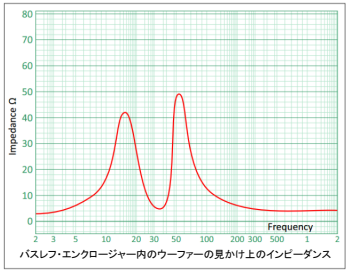
スピーカーと音響エンクロージャーのインピーダンス



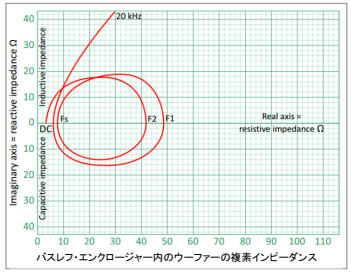
空気中のウーファーの見かけ上のインピーダンス



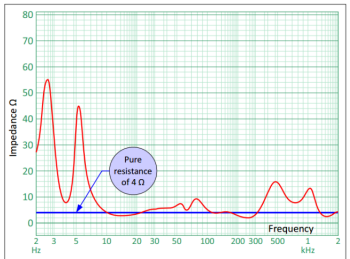
空気中のウーファーの複素インピーダンス



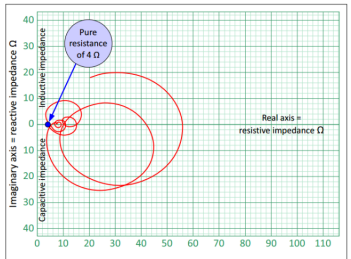
バスレフ・エンクロージャー内のウーファーの見かけ上のインピーダンス



バスレフ・エンクロージャー内のウーファーの複素インピーダンス



高度な技術のスピーカーシステムの20～20,000Hzのインピーダンスモジュール：JM 370E 4オームの理論上の純抵抗は、青色の水平線で表されます。



複素平面におけるJM 370Eエンクロージャの "ナイキスト"ダイアグラム。理論上の4オームの純抵抗は、図の中心にある青い点で表されます。青い点に由来する円は、音響エンクロージャの実際の負荷の複雑さを強調しています。

ラウドスピーカのリアクティブエネルギー
ダイナミクスキラー

音楽の強弱は、変調曲線のピークとディップ間の振幅差によって決まります。正確には、これはデシベル（dB）で表記されるダイナミクスを指します。

ダイナミックピークを再現するのは極めて容易です。一方、機械的もしくは電気的性質に基づく残振動は、低振幅の音楽信号を掻き消す傾向があるため、これに続く強弱ドロップを再現することははるかに困難となります。たとえば、シンフォニックオーケストラの録音では、60 dBの強弱変化、言い換えれば1:1,000,000の出力比が容易に生じます。この出力差が、数分の1秒で再現されなければなりません。

このような寄生残響（スピーカーボックス内の振動、電気的エコー、劣悪に減衰した振動膜など）は、フォルテシモから非常に弱い、時には静寂に近い演奏、あるいは単に強弱ドロップにつながる瞬間にも明瞭に生ずるものであり、実際このドロップは、精密かつ正確なタイミングでの再現が求められます。これらの信号は粗放に引き延ばされた「減衰時間の拡大効果」と称されていますが、この問題の最も重要な点は、いわゆる「沈黙の尊重」にあるとされます。

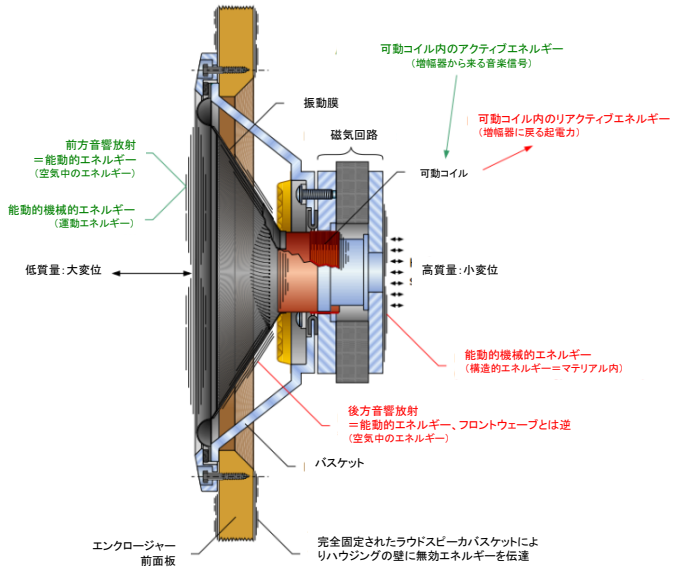
ラウドスピーカーにおいて、減衰時間の拡がりには3つの主な原因があります：

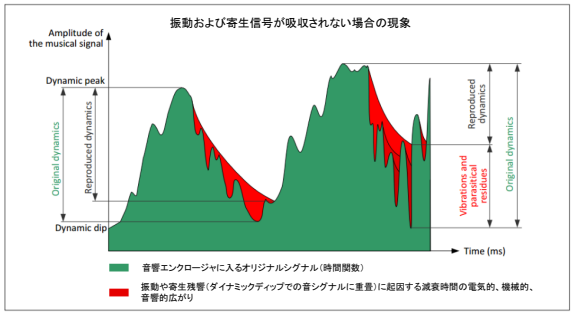
1. 各ラウドスピーカの逆起電力（emcf）は、アンプからの電気音楽信号に対する逆の寄生電流であり可能な限りアンプに再吸収される必要があります。この吸収がうまくいかないと、山の中で岩の壁に面したときに起るようなエコー効果が生じます。この残響によって元の音声信号が判読不能になります。すると、アンプのトランジスタはこの戻りエネルギーをうまく吸収することができず、スピーカーに戻って反射され、ダイナミクスが損なわれます。チューブアンプに非常に優れた出力トランスが装備されている場合、トランスの2次コイルはこれらの寄生電流を非常に効率的にかわします。

2. ラウドスピーカーのコンポーネント（コイルおよび振動膜）の動き、および、その周りの空気によって引き起こされる反応性の機械的エネルギーは、一種の寄生残響を引き起こします。これらは、ラウドスピーカ自体によって生まれる機械的振動です。これを回避するために、これらの振動はラウドスピーカーのバスケットのフレームによってエンクロージャに転送され、遅延とかなりのゆがみを伴う様々なサーフェスを引き起こします。Jean Maurerのスピーカーエンクロージャーでは、これらの様々な残響は石英砂に吸収されます。特に、ウーファードライブを背面の砂入り二重層に力学的に接続させる高強度ネジピンは大い功を奏し、非常に低い共振周波数の維持が実現します。さらに、ラウドスピーカのバスケットは、ハウジングの前面から動的に隔離されています。くわえてミッドレンジと高音域のラウドスピーカーにおいても、二重層に満たされた砂がこの効果をもたらします。

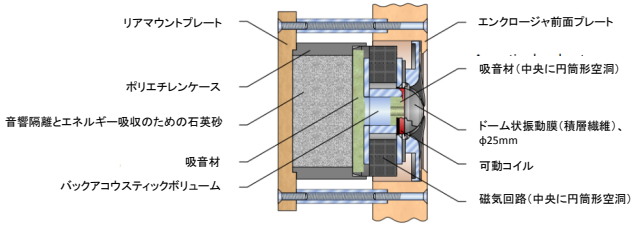
3. ラウドスピーカの振動膜の動きは、音の前方放出と後方への逆方向放出を生じさせます。誰からも望まれない唯一の信号であるこのバック・ウェーブは、ミネラルウールによって吸収されます。この信号の一部は、低周波数域でのレスポンスを直線化するためバスレフ・ベントによって取り込まれます。前述2つのリアクティブエネルギーにおいては、沈黙の尊重に対する制御の問題を最小限に留めるといった特徴があります。もしスピーカーのエンクロージャの反応がとても鈍く、すなわち残響が少なければ、再生される音楽は良い立体感を得ることができます。そのユニットの二重層に満たされた石英砂は、この中立性を提供する上で重要な役割を果たしています。

ラウドスピーカーの有効および無効エネルギー





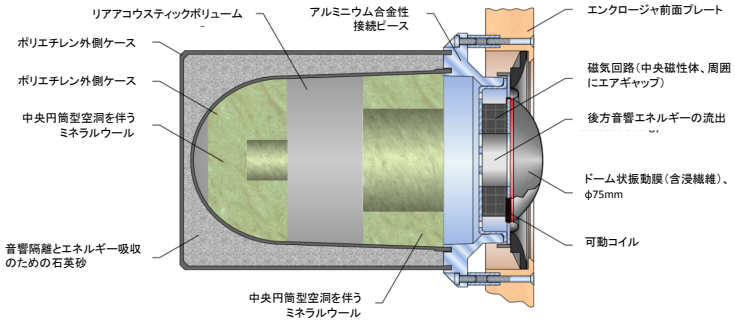
中域と高域のトランスデューサ：
ウーファーエンクロージャーに内蔵された2つのエンクロージャー



高音域エンクロージャー（TD 25-4 トランスデューサー）

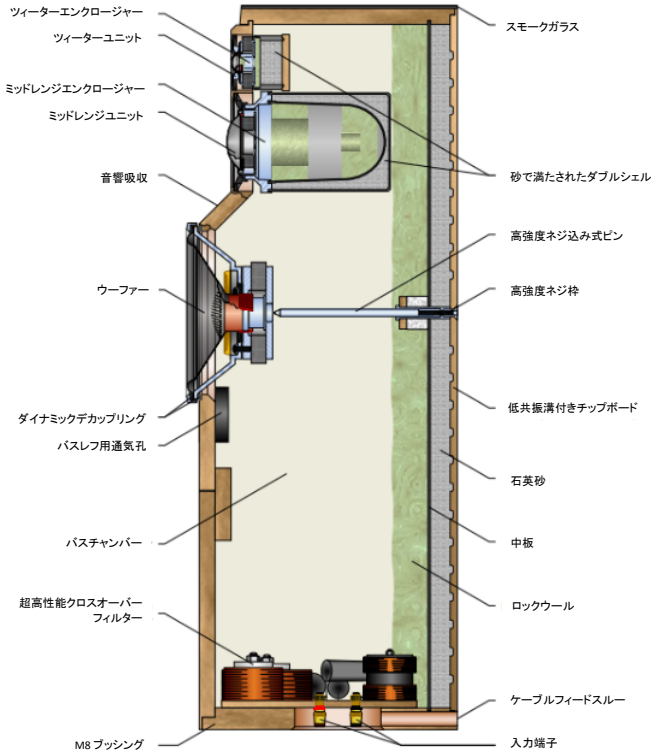
各ラウドスピーカまたはトランスデューサは、アコースティックフロントウェーブおよびリアウェーブを生成します。スピーカーのリアエネルギーは、隣の膜の動作を著しく乱して音の汚染を引き起こす危険性が容認されないため、スピーカーのリアエネルギーを他のスピーカーのリアエネルギーと混同してはいけません。ミッドレンジまたは高音域トランスデューサーの可動部が低音で機械的に破壊される危険性もあります。

これらの2つのユニット（ミッドレンジと高音域）の反応エネルギーもまた慎重に扱わなければなりません。これらの両ケースでは、低音域スピーカーの背面にある砂と同様、石英砂がそれらを安定させます。



中音域エンクロージャー（MD 75-3 トランスデューサー）

エネルギー吸収による音響エンクロージャの構築



JM 370E 音響エンクロージャー断面図