

<歪みとエントロピー>

私も含めてですが、「熱力学第二法則とは？」と問われて簡単に答えられる方は少ないと思います。そこで調べてみると、色々な方が「熱に関する不可逆性を表す法則のことだ」と仰います。不可逆性とは、状態が変化して元に戻らない性質のことです。

もう少し第二法則の内容を見てみると、以下の3つから成っています。

- (1) **クラジウスの定理** : 閉じた系の熱量は温度の高い状態から低い状態に遷移する。
- (2) **トムソンの原理** : 熱エネルギーを全て力学エネルギーに変換することはできない。
⇒ 熱効率 100%は実現できない=永久機関は実現できないことを表しています。
- (3) **エントロピー増大の法則** : 断熱変化では常にエントロピーが増大する。
⇒ 「熱が常に不均一（不安定）な状態から均一（安定）な状態に遷移する」

1. エントロピーとは？

上記の「**エントロピー**」という数値概念は熱力学第二法則の不可逆性を表すために導入されたもので、閉じた系の中で熱エネルギーの状態がどのように推移するかを数値で表すためのものでしたが、「乱雑さ」を表す概念として熱以外の現象を表すことにも使われるようになり、現在では「状態が安定しているのか、それとも遷移しているのか」を評価する**指数**として広く認知されています。

簡単に言ってしまうと、エントロピーが大きくなればなるほど乱雑さ（自由度）が大きくなり、安定方向（平衡状態）に向かうことを示しています。

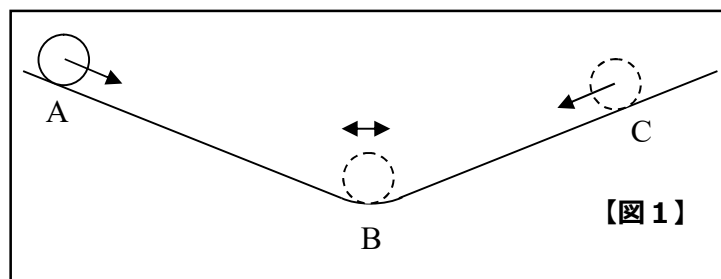
例えば、周囲（ある閉空間）の環境温度と、その中に放置された『ある物体』の温度に注目すると、物体の温度は常に周囲の温度と同じになるようにするために周囲との間で熱エネルギーの移動が行われ、最終的に**平衡状態（エントロピー極大=周囲と同じ温度）**で安定します。

この状態では、周囲温度変化に応じて物体の温度は高くも低くもなります。（エネルギーの流れは周囲の条件による・・・自由度が2の状態）

周囲温度の変化もさらに上の条件（気圧配置や太陽の位置など）によって対流が起こり、熱の移動が起こることに起因します。（風が吹くのは、エントロピーを極大にするため）

温度差がある状態（例えば周囲より物体の温度が高いと低くなる方向のみに遷移し、物体の温度が低いと高くなる方向に遷移する・・・自由度が1の状態）ではエネルギーの流れは一方向のみとなります。

もう一つの例として緩やかなV字状の坂道をボールが転がっている（図1）の状態を考えます。左端のA点から転がり始めたボールは徐々に加速して最下点B点を通過し、減速しながらC点まで到達します。



C点では全ての運動エネルギーが位置エネルギーに変換されるので一旦停止し、今度は逆方向に坂道を下り始めます。

このような往復運動を繰り返し、摩擦等による熱エネルギーロスで位置エネルギーを失いながら、最終的に最下点B点で止まります。

これは最下点のエントロピーが他の状態に比べて高い（極大・自由度2：右にも左にも動ける）状態であることを示しており、右にずれても左にずれても自由度が低い状態（自由度1：左の斜面にボールがあれば右に、右の斜面にあれば左に動くような力しか働かない）になるため、最終的に最下点で静止することになります。（位置エネルギーが極小、運動エネルギーがゼロ）

このように静止している物体は、**エントロピー極大（自由度極大）**の状態にあります。『極大』というのは、「(何らかの状況により) **閉じた系で最大になる**」という意味で、閉じた系の外の状態が変わって内部に影響があればそれに応じて変化します。

半球状の容器にボールが入ったもの（= 容器が閉じた系になります）をバスの床に置いた場合を考えましょう。

バスが静止している場合には、ボールが容器の中央部で静止している状態が安定状態（極大）になりますが、バスが走り出すと加速度や床の振動に合わせて容器の中をボールが揺れる状態の刹那々々がエントロピー極大に遷移する、もしくは維持することになります。

これを静止させようとする（自由度を低く抑えようとする=外部からエネルギーを与えて不安定にする）と、逆に物体から周囲に向かってエネルギーの流れが発生します。

例えば、ボールをガムなどで容器の底面に留めようとするするとボールからガムに応力が加わり、バスの揺れに応じてガムは変形します。（実際にはガムから容器に対しても応力が加えられ、容器がバスの床を移動してエントロピー極大に移行することもあります）

これは作用・反作用の法則に外なりません。すなわち、**エントロピー極大に遷移しようとする力が働くことが作用・反作用の法則をも満たしている**と言えます。

結果的に、常に自由度を大きくしよう（乱雑な状態にしよう）とする動きがガムの変形（歪）を引き起こします。

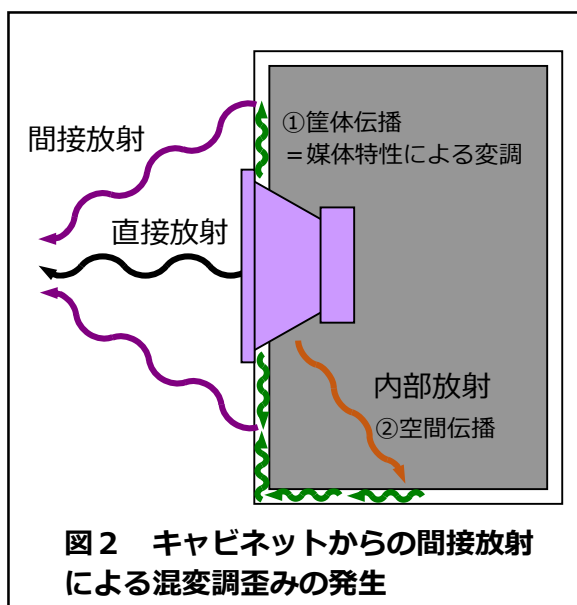
上記のようにエントロピーは自由度と密接な関係があり、**自由度を制限することで極大点を変化させることができます。**

コップに入れた熱湯を放置すると短時間で周囲の温度と同じになりますが、魔法瓶（ポット）という「閉じた系」に入れることで熱伝導を制御し、極大点（平衡状態）に至る時間経過を遅くすることができるのがその一例です。

音響機器の場合にも、この考え方を適用すると、振動の伝達経路を断つことで『歪み』や『エネルギーロス』を減らすことができます。

2. 振動とエントロピー

スピーカーシステムの構造に展開して考えてみます。



振動系から放射された音響エネルギーは、本来であれば振動板正面の空気を振動させる（粗密波を生成することだけに費やされるのが理想ですが、実際には① 振動系～エッジ/ダンパー～ハウジングを介したキャビネットへの伝播、および磁気回路～ハウジングを介したキャビネットへの伝播（振動系の反作用）、② 振動板から後面に放射された逆位相の音波がキャビネット内の空気を介してキャビネットに伝播する経路の2つが考えられ、それぞれの振動エネルギーがキャビネットを励振し、キャビネットから振動エネルギーとして再放射（一部は熱エネルギーなどにかたちを変えて消費）されます。（②は小さい）

これは物体の温度や転がるボールの位置と同じようにエントロピーが増大する不可逆変化であり、元

は戻せません。

このようにしてキャビネットに伝播したエネルギーは、そのキャビネット自体の特性に因って時間遅延していたり、共鳴してパワースペクトラムが異なっていたりで、**本来の放射エネルギーとは異質なもの**となっています。

それがキャビネットから再放射（間接放射）されることで本来の放射エネルギーに**重畳される**ため、測定器や聴取者には『^{ひずみ}歪』として知覚されることとなります。（図2）

空気を伝播してくる音を耳で聞くより**骨伝導**で音を感じる方のレベルが高いのと同様、背面放射からキャビネットに伝わるエネルギーよりフレームからキャビネットに伝わるエネルギーの絶対量のほうが遥かに大きいと考えられます。

2. 1 キャビネットに起因した歪について

スピーカーシステムを構成するにはドライバーユニットとキャビネットが不可欠です。

音源としてはドライバーユニットだけで良いと考えてしまうかもしれませんが、現実には背面から発生する逆位相の音波が前面に回り込むことにより発生する**干渉相殺**を防ぐためにキャビネットや平面バッフルが必要不可欠になります。キャビネットは前述のように歪を生みだす元凶になりますが、必要悪とも言えるものです。

2. 1. 1 キャビネット内部に放射される音響エネルギー

密閉タイプのキャビネットの場合には、内部に放射された音波がすべて無効音響エネルギーとして消費されて外部に出てこなければ、歪として知覚されることはありません。

このことだけを考えて場合、キャビネットは ① 定在波の立たない内部形状で、② それ自体が十分に大きな質量を持ち（振動エネルギーを質量で吸収する）、且つ ③ 振動しにくい（ロスが大きい=減衰要素の大きい）材質であることが望ましく、内部には振動（波動）エネルギーを消費するためのグラスウールなどを入れる構造がベストと言えます。

キャビネットがベストの状態だったとしても、キャビネット以外の漏洩経路としてユニットの振動板やエッジが考えられます。

内部より振動板を通過して伝播される（漏れてくる）、もしくは振動板を変調させる音響エネルギーを制御するのは、振動板自体の材質（=薄くて軽い）を考えると非常に難しいことになります。

これを防ぐには、① キャビネット内部の空気スチフネスを下げ、振動板へのプレッシャーを抑え、② 内部反射などによる振動板へのフィードバック伝播を抑制することが有効になります。

①②ともに、できる限り平面バッフルに近い音響構造とすることで対処できますが、前出の干渉相殺の問題が出てきます。

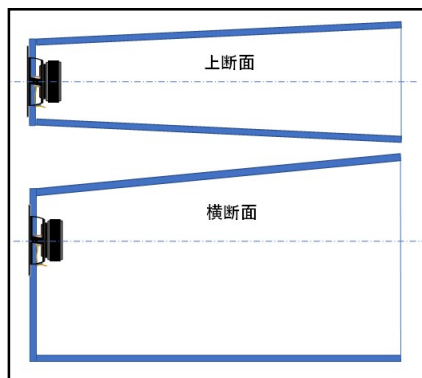
密閉箱とした場合には、容積が小さければキャビネット内壁で反射して振動板に戻ってくる波動エネルギーはほとんど減衰しないので、①②を満たすために容積を大きく（奥行を長く）することがまず考えられますが、安易に実施するとユニットとのマッチングが難しくなります。（システムとして低域がダラ下がりになるので、低域不足になる）

容積をあまり大きくしなくても、単純に奥行きを長くすれば空気との摩擦（空気分子を移動させる運動エネルギー損）による減衰が期待できます（特に高周波数）が、反射して戻ってきたときの遅延が大きくなるので、歪として知覚される確度は上がります。

直方体形状のキャビネットでは、内部寸法に応じて特定の『**定在波（共鳴）**』が発生しますが、状態が安定しているという意味では共鳴現象も**エントロピー極大**に他なりません。

直方体内面の寸法が可変だとするならば、それに応じて定在波の周波数が変化します。

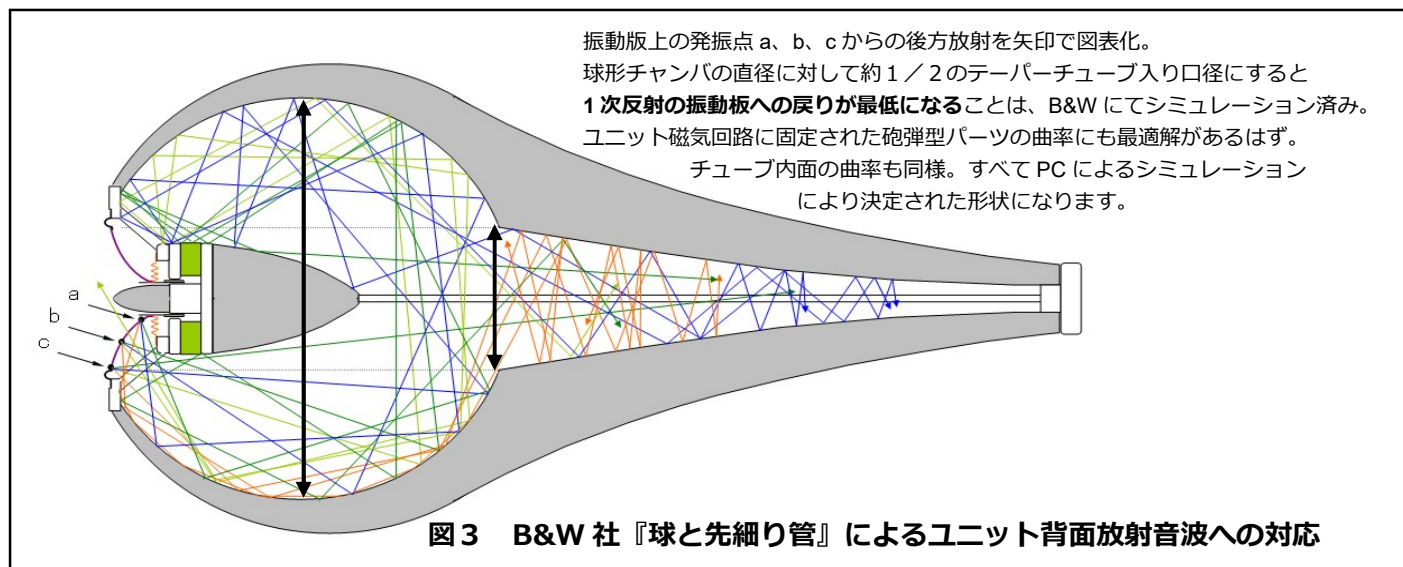
最悪はキューブ（正立方体）で、縦、横、高さの寸法がすべて同じなので、強烈な定在波が発生します。（球体も同じです）



この定在波を避けるために**後面開放箱**という形状もあり、奥行を長くして、且つキャビネット対向面を平行にしないことで、上記①②の回答にすることもあります。

ホーン形状によるバックロードがかからないように（回り込みが発生しないように）内部には吸音材を十分に入れて適当なスチフネスを持たせることが必要になります。構造が簡単なわりに音質的には優れたものがあります。

「ユニットへの戻り」に対してキャビネットの内部形状で解答を得た例が、B&W 社 800 シリーズの高級モデルに採用された**球と先細りの管**を組み合わせたもの（**Sphere and tapering tube**）になります。（図3）



この構造は、**定在波を発生（滞留）させない（= 極大点を設けない）**ようにして、反射により音波が徐々に減衰して音響エネルギーの無い状態に推移する（エントロピー増大を促す）ことを積極的に利用したもので非常に巧妙な仕組みです。

減衰を加速するために、チューブ内部に吸音材を詰めて音響エネルギーを熱エネルギーに変換しています。（吸音材が音波で振動することで熱エネルギーとして消費される）

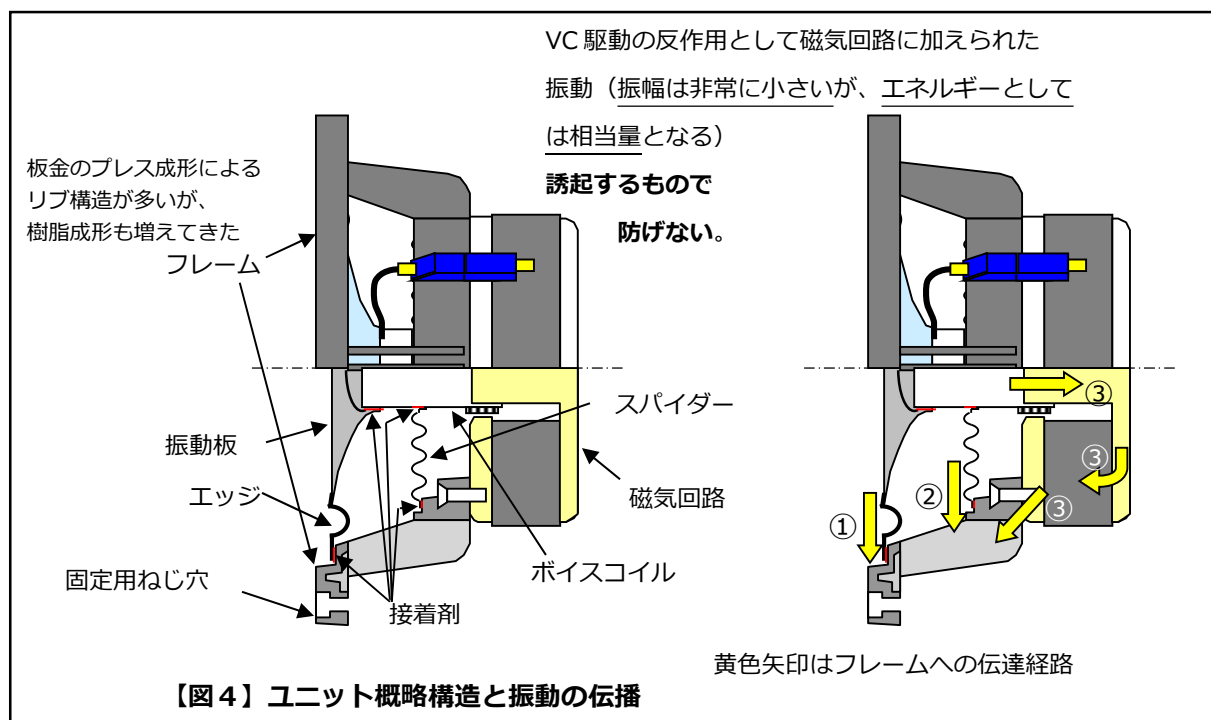
2. 1. 2 フレーム経由でキャビネットに伝達される音響エネルギー

【図4】のように振動板の外周位置を保持するための構造物であるエッジはドライバーのフレーム（ハウジングとも呼ぶ）に固定され、振動板と一体になった駆動源であるボイスコイルはスパイダー（ダンパー）を介して同様にフレームに固定されています。

また、振動系と力学的反作用関係にある磁気回路もフレームに固定されているため、フレームはこれらの振動が複合されたモードで励振されることとなります。これはフレーム自体が ① エッジ経由、② スパイダー経由、③ 磁気回路経由で伝わってくる振動エネルギーによって混変調されたモードで振動しているということと等価です。（図4の右図）

従って、ドライバーがフレームを介してキャビネットに固定される構造（これが大半ですが・・・）では、この複雑に変調された振動がキャビネットに伝達され、上記2. 1項の内部音波（定在波や背面放射）によるキャビネット励振と相まって、更に複雑な振動モードを作り出します。（これがキャビネット外部空間に音波として二次放射されます）

いわゆる混変調歪の顕在化に他なりません。



フレームがキャビネットに固定されている場合（何度も言いますが、大半の製品がこのようになっています）、フレーム外周は振動の節（振幅がゼロ）となり、理論的に「もう一つの節」である磁気回路との中間点に振幅の最大点（腹）が生じると考えられます。

⇒ フレームの固有振動周波数もしくはその逡倍周波数での共振 = 定在波

上記のいずれかの形で励振された場合、この周波数および逡倍でフレームが共振することです。

共振による振動エネルギーは、励振されたハウジングのフレーム部分からエッジやダンパーを介して振動板に戻り、振動板自体の振動モードにも混交調が生じる可能性が出てきます。(フレームの振動モードにより音質が変わることもあるということです)

実際には振動系の機械インピーダンスが高いユニットが多いため、自家中毒は少ない(ゼロではない)と思われます。したがってフレーム共振による振動エネルギーのほとんどは、機械インピーダンスの低いキャビネット側に流れます。

キャビネットの構造が弱い場合には、励振によるキャビネットからの二次放射レベルが大きくなり、音質的な影響も大きくなります。

構造的に実現が難しいのですが、**フレームの外周を固定しない(開放端になる)**場合には、外周部が節になることによるフレーム定在波は減少すると考えられます。(富士通テンのECLIPSE、テクニクスのSB-G90がその例)

勘違いしてはならないのは、フレームの固有振動周波数が無くなる訳ではなく、キャビネットに流入しないというメリットがあるということです。(振動エネルギーは大部分が磁気回路側に吸収される)

振動板の強度や質量と比較すればフレームのそれは十分に大きいため、振動系に対してフレーム外周は一応固定端と見做せますが、キャビネットと比べれば質量が小さいため**反射係数**(高周波伝送路のSWR: Standing Wave Ratioに相当)は小さくなる(1に近づく)はずです。

フレームの影響を排除するためにエッジ外周を開放端にした例(エッジレス)がありますが、それはそれで別の問題(音漏れ、本来の目的である振動板の保持ができないなど)が発生します。

上記の説明では分かりにくいと思いますので、簡単な例を示します。

大縄跳びの回し手になったことがあれば分かりますが、もう一人の回し手が自分と同期しないで勝手な回し方をすると、それに応じた反動が伝わってきます。

相手がいなくても、大縄を柱などに結びつけて不規則に回してみると、柱からの反射があることで同様な結果となります。(電気的には他端に仮想GNDもしくは大きなL成分がある状態: ショート状態と等価)

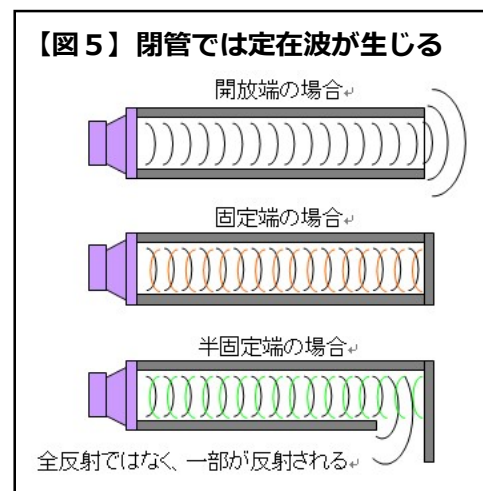
ところが、もう一人の回し手が手を離してしまった状態では、回し手(自分)が盲滅法に回そうとしても反動は返ってきません。(他端が解放された状態)

(図5)は、ユニットを管の一端に取り付けた構造です。

(Transmission Line と呼びます)

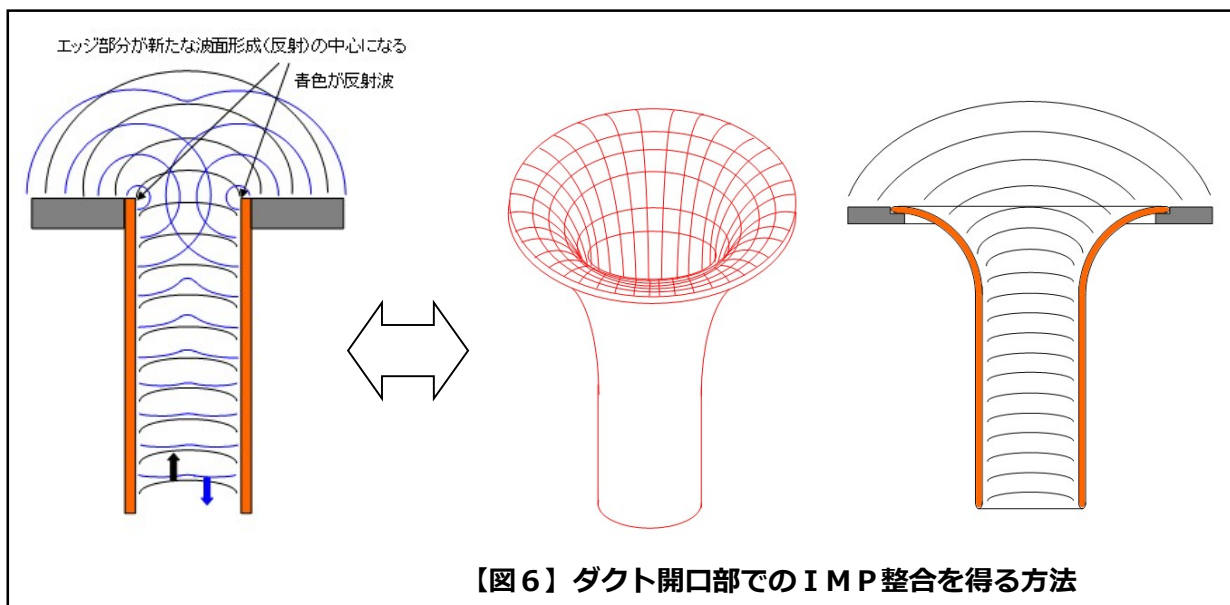
当たり前ですが、ユニットの逆に位置する端部が閉じた管では反射が発生しますが、開いた管では反射はありません。

(図5)の中央にあるように、固定端の場合には定在波(固定



振動パターン)が生じてしまいますが、開放端であれば端部での振幅が規制されないため、定在波は生じません。ただし厳密に言うと、開放端であっても媒体の密度に急激な変化がある場合（内外温度差）や沿面に反射要素がある場合（切りっぱなしの管など）には、反射はゼロではありません。

これを防ぐには開口部をホーン形状にします。各メーカーがダクトの開口部にこのような形状を使っているのは、**機械インピーダンスの整合**を得るためです。（図6）



空間伝播で発生した定在波による励振はさておき、直接伝播した振動によるキャビネットからの二次放射を低減させる具体的な方法としては、

- ① 何らかのインシュレート構造でフレームとキャビネットを機械構造的に分離すること
- ② キャビネットの強度と質量を大きくすること
- ③ キャビネットを振動しにくい（ダンピングされた）材質とすることが有効となります。

これらは全て「すばやくエントロピーを増大させる」方法になります。

①は減衰要素を介在させて振動エネルギーを消費したり物理的に伝送経路を絶ったりする方法で、完全な効果を期待できるようにするには複雑で（構成する部品が多い＝**安定した性能が出しにくい**）、且つ、コストのかかる場合が多いため、メーカー各社は①を製品に取り入れるのは企画段階で無理と判断することが多いのが実情です。

したがって、②質量による運動エネルギーの吸収、③減衰要素（内部損失や機械抵抗（吸音材やクッション）により熱エネルギーとして消費）に設計の比重を大きく持たせているようです。ただ、ユニットの性能をきちんと出しておかないと、これらの方法を実践することで、「音が死んでしまう」という現象を起こしてしまうことになります。

混変調歪によりマスキングされていたものが、それが無くなった結果、本来のユニット素性が出てしまっただけなのですが、逆説的に上記の対応が悪いように言われているのを

ときどきwebで見かけたりします。ユニットは素晴らしく（無罪で）、それを生かせないキャビネットなどの設計が悪いという短絡的な判断です。このような書き込みを見るたびに残念な思いでいっぱいになります。本来は『お互い様』なのです。

毎年、特定のユニットを使って設計したシステムを競うイベントがありますが、実施するのであれば主催者がユニットの素性を判断して音質に関する判断基準を作るべきです。例えば、定寸の平面バッフルやメーカー推奨のキャビネット実装を基準にするなどです。残念ながら素性の悪いユニットからチャンピオンシステムを作る魔法はありません。

そういった観点から良質なユニットを探してみると、メーカーとしてはMARK AUDIOがダントツです。① キャビネット（フレーム）の音質に与える影響を考慮して損失のある特殊樹脂フレームを採用、② 振動板形状を浅くして剛性を高め、且つ、軽量化してプアな磁気回路とのバランスを取る手法、③ 磁気回路はコスト配分（C/P）の原理から割り切るなど、ユニットの特性を十分に理解して出来る限り安価に高性能のユニットをユーザーに提供しようという姿勢がうかがえます。次いでPARK AUDIO（国内）でしょうか・・・閑話休題。

ここまで述べてきてエントロピーから話が逸れているように感じる方もいらっしゃるかもしれませんが、全ての現象はエントロピー増大の法則に支配されていて、いかに極大点（安定点：エネルギーが保存される状態）をコントロールするかということが、良い意味での「合理的な設計の基礎」になっていることを、ずっと説明してきたつもりです。

エントロピー増大の法則を念頭に置いた設計とは、「何かを変化させる要因が発生したときに、それに応じて二次的に発生した『問題となるもの（歪み）』が排除できないのであれば、それを含んだ系もしくは近傍でそのエネルギーを消費させる（無視できるようにする）」ものだということを忘れない事に他なりません。**伝えてしまったエネルギーは不可逆的に歪へと変換されます。**

川上（発生源の近く）であれば問題対処が簡単であっても、川下に行くと色々な要素が絡み合い、簡単には処理できなくなることが多いということがキモになります。