

目次

0. はじめに	p. 3
第一章 ユニットの機能と役割	
1. スピーカーシステム形式の違い	p. 5
2. ユニットの機能	
2. 1 ユニットの基本構造	p. 9
2. 2 ルーツ	p. 12
2. 3. 駆動原理と磁気回路に発生する歪み その対処について	p. 13
2. 3. 1 ローレンツ力について	p. 13
2. 3. 2 不均一磁界による非線形歪	p. 15
2. 3. 3 F E Mについて	p. 17
2. 3. 4 自己誘導歪の発生原理	p. 18
ショートリング／ファラデーリングの役割	p. 18
磁力線のシミュレーション ダブルマグネットなど	p. 19
ブッシュアップル磁気回路 (B & W)	p. 20
2. 3. 5 磁性金属について	p. 21
2. 3. 6 磁石の種類	p. 21
2. 3. 7 アルニコ磁石にメリットあり?	p. 24
2. 3. 8 逆起電力の発生原理とそれに起因するタイムドメインでの非線形歪	p. 25
2. 3. 8. 1 発生原理	p. 25
2. 3. 8. 2 結果としての非線形歪	p. 28
2. 3. 9 ギャップ内の空気の流れ	p. 30
2. 3. 10 励磁方式について	p. 31
2. 3. 11 トッププレートの渦電流歪について	p. 32
2. 4. 振動板に要求される性能と技術トレンド	p. 33
2. 4. 1 相反する要求	p. 33
2. 4. 2 分割振動と共振モード	p. 34
2. 4. 3 インパルス応答	p. 35
2. 4. 4 技術トレンド	p. 36
<繊維系>	
2. 4. 4. 1 抄紙：2層抄紙 ラジアル抄紙	p. 36
2. 4. 4. 2 形状	p. 38
2. 4. 4. 3 補強	p. 39
2. 4. 4. 4 新素材 C N F (セルロースナノファイバー)	p. 39
2. 4. 4. 5 ウッドコーン オブリコーン	p. 41
<金属系>	
2. 4. 4. 6 マグネシウム	p. 42
2. 4. 4. 7 M A O P	p. 42
<多層構造 (樹脂複合材料) >	
2. 4. 4. 8 I M X A - O M F ロハセル マイクロバルーン	p. 43
2. 4. 4. 9 N C V (C S C N T) カーボンナノチューブ	p. 45
2. 4. 4. 10 スライドリングマテリアル	p. 46
2. 4. 4. 11 B & W ウォーブンケブラー & コンティニウム	p. 47
2. 4. 4. 12 ポリマークレイコンボジット	p. 47
2. 4. 4. 13 C F R P	p. 48
2. 4. 4. 14 有機ガラス	p. 48
2. 4. 4. 15 形状要素 前室効果	p. 49
2. 4. 5 振動板材料の物性	p. 50
2. 5. ボイスコイルボビンに求められるもの 材質毎の要求事項	p. 51
2. 5. 1 アルミニウム (渦電流の発生原理：制動)	p. 51
2. 5. 2 クラフト紙	p. 53
2. 5. 3 ノーメックス、カプトン、T I L、ケブラー、テクノーラなど	p. 53
2. 5. 4 チタン合金	p. 54
2. 5. 5 C N F (セルロースナノファイバー) と改質リグニン添加 FRP	p. 55
2. 5. 6 マグネットワイヤ	p. 56
2. 5. 7 コイル巻線構造の工夫	p. 57
2. 5. 8 メーカー情報	p. 58
2. 6. ダンパーについて	p. 59
2. 6. 1 蝶ダンパー	p. 59
2. 6. 2 ダンパーレス (磁性流体)	p. 59
2. 6. 3 形状による特性改善	p. 61
2. 6. 4 多点支持 (ダブルダンパー)	p. 62
2. 6. 5 メーカー情報	p. 62
2. 7. エッジについて	p. 63
2. 7. 1 エッジの目的	p. 63
2. 7. 1. 1 フィクストエッジ	p. 63
2. 7. 1. 2 ウレタンエッジ	p. 64
2. 7. 1. 3 布、ゴム (エラストマー) エッジ	p. 64
2. 7. 2 ロールエッジの挙動	p. 66
2. 7. 3 変形について	p. 66
2. 7. 4 特殊形状エッジ ～ エッジレス	p. 67

2. 7. 5 エッジ歪の改善	p. 68
2. 7. 6 エッジレス&ダンパーレス	p. 69
2. 8. 二種類の音響伝播	p. 71
2. 9. 相互接続要素	p. 72
2. 9. 1 3点接着について	p. 72
2. 9. 2 接着剤について	p. 73
2. 10. ハウジングについて	p. 76
2. 10. 1 励振エネルギーの処理方法	p. 77
2. 10. 2 改善アプローチ (開口率アップ)	p. 79
2. 10. 3 駆動に伴う歪の低減	p. 82
2. 10. 4 ユニットとキャビネットの関係 取り付け構造	p. 84
2. 11. 引き出し線について	p. 85
2. 12. ダストキャップについて	p. 87
2. 13. その他	p. 88
2. 14. 理想形状	p. 89
2. 15. アナロジー変換	p. 92
第二章 TSパラメータ	p. 96
1. 概要	p. 96
2. 各パラメータの内容	p. 96
2. 1 Revc VC有効DCR	p. 96
2. 2 Ze 等価インピーダンス	p. 96
2. 3 Fs 最低共振周波数	p. 96
2. 4 Sd 有効投影面積	p. 97
2. 5 Vas 相当気柱質量	p. 98
2. 6 Cms 機械系コンプライアンス	p. 99
2. 7 Mmd 振動板質量	p. 99
2. 8 Mms 振動系有効等価質量	p. 99
2. 9 Bl フォースファクタ	p. 99
2. 10 Rms 機械抵抗	p. 100
2. 11 Qms 機械系共振先鋭度	p. 101
2. 12 Qes 電気系共振先鋭度	p. 103
2. 13 Qts 総合共振先鋭度	p. 104
2. 14 Levvc VCインダクタンス	p. 104
2. 15 η_0 能率	p. 105
2. 16 SPL0 平均音圧	p. 105
2. 17 Power 耐入力	p. 106
2. 18 Xmax 最大リニア動作領域	p. 106
2. 19 Z0 最大インピーダンス	p. 107
2. 20 EBP 効率帯域積	p. 107
第三章 ユニットの組み立て	
1. フレームとTPの接合	p. 108
2. フレーム&TP Ass'yとマグネット、ヨークの接合	p. 109
3. 振動系の組み立て	p. 111
VC Ass'y	p. 112
3点接着	p. 115
4. 錦糸線の処理と振動板 Ass'yの実装	p. 116
5. ターミナルへの接続	p. 119
6. 防塵キャップの貼り付け	p. 119
7. 着磁	p. 120
8. チェック	p. 120
第四章 アンプ負荷としてのユニット	
1. ダンピングファクタとは?	p. 121
2. 実負荷に対するDF	p. 122
3. 逆起電力について	p. 124
4. 逆起電力と歪	p. 127
5. 逆起電力とトランジェント特性	p. 129
6. 逆起電力の影響分析	p. 131
7. MFBによる解決策	p. 132
第五章 アナロジー手法による電気系への変換とその解析について	
1. 機械系と電気系の類似 アナロジー	p. 135
2. キャビネットを含めた系への展開	
2.1 フックシエルフ	p. 139
2.2 テクニクス SB-G90	p. 142
2.3 デンソーデン ECLIPSE シリーズ	p. 143
2.4 AR-1	p. 146
2.5 吊りキャビネット NH-B1	p. 149
2.6 AR-1.5	p. 151
あとがき	p. 153

0. はじめに

この 10 年ほど、スピーカーユニットについて色々な資料を作ってホームページにアップしてきましたが、このあたりで一つにまとめてみることにしました。

「一つにすれば、すぐに関連情報にたどり着ける」と言えば聞こえが良いですが、ホームページに記事を書けるにあたって、いくつもの情報を探すのが面倒くさくなったというのが本音です。「この情報、どこに書いたかな？」と気になり、いくつもの PDF を開いてチェックするのは、時間と体力を使います。1 つの Word 文書内で検索（ナビゲーション）を利用できれば非常に便利なのも理由です。（アップしているのは PDF ですが、元ネタは Word なので・・・）

第一章では『**ユニットの機能と役割**』について記述しました。

販売店や展示会などに置いてあるスピーカーシステムの 7、8 割は**ブックシェルフ型**と呼ばれる直方体の箱にユニットが 1 つまたは複数個実装されたものですが、デザインもサイズもちょっとずつ違い、スタンドに載せる前提のものやデスクに載せることを想定したものもありますし、**フロア型**と呼ばれる床に直置きするタイプのものも含めると多種多様な箱とユニットの組み合わせがあり視聴してみると全て違う音がします。

どうしてこんなにバラエティに富んでいるのか、システムの中でユニットはどのような役割を持っているのか、そもそもどのようにしてユニットから音が出るのかといった基本的な疑問へのアンサーから入り、具体的な構成要素と役割を記述してみました。

もともと『理想のユニットとは？』という名称で Web 公開していたものを主体としているため、ボリュームがかなり大きくなっています。

第二章は、ユニットの性質を表わす**T S パラメータ**について記述しました。

数式もあったりして、ちょっと専門的で取っ付きにくいかもしれませんが、知っているとかキャビネットの設計には必ず役に立ちます。

第三章では**ユニットの生産方法**について図表中心に記述しています。

それぞれの構成要素が分かった上で、それがどのようにして作られているのかが分かると見えてくるものもあります。

と言っても、私の情報は 30 年以上前に設計していた頃のものなので最近は変わってきていると思いますが、基本的な流れは同じだと思いますので参考にしてください。

第四章は、駆動するアンプ側の要素である**ダンピングファクタ**とユニットの**逆起電力**について記述します。スピーカーが受動製品である以上、駆動するアンプとは切っても切れない関係にあるし、それぞれ単独では解決できないことがあります。例として M F B について簡単に記しています。

第五章は、**アナロジー**という手法を用いてスピーカーシステムを解析することで、設計する時にどこを攻めるべきなのかを明確にしていきます。

同時に、音が正しく再生されるためには何が重要なのかを力学的根拠から探ってみます。

この考え方をマスターすれば、「攻めどころ」が明確になりますので、音質向上の検討に役立つと思います。

ザックリ数えて両手の指の数に余る部品から作られているスピーカーユニットですが、それぞれが固有の性質（性能）を持っていて、これほど違う音色を再生するのは何故なのか・・・45 年近く前、高校生の頃に友人の家で聴いたスペンドール BC-II の音に魅了されて選んでしまったオーディオノートへの道。

当時、自作のカリスマだった長岡鉄男氏に影響を受け、資金力の無い大学生のころはバイト代で近くの材木屋から安く譲ってもらった合板を使って、使い回しのユニット（Fostex の FE-83 や FE-203）で作っては壊し、作っては壊しのキャビネット自作に明け暮れる日々を過ごしたのが懐かしく思い出されます。

希望通りオーディオ製品メーカーに就職したものの、当たり前ですが入社 1、2 年目の社員に「自分のやりたい検証」がすんなりと出来る訳もなく、**量産するための設計**に徹することを要求される中でノウハウや知識、特殊技術を吸収しながら、就業の合間にこっそり検証していたのも懐かしい限りです。（今や時効ですよ。当時は、それだけ自由な風土だったということです・・・言い訳ですが・・・）

入社 5 年もしないうちに世の^{すうせい}趨勢で CD 設計部隊に組み込まれ、20 年近くは CD/DVD 製品の設計に従事することになりました。その間、スピーカー設計から遠ざかっていたのですが、プライベートではライフワーク的に細々と検証を続けてきました。2011 年くらいにホームページを立ち上げてスピーカーなどの記事を書けるようになりましたが、ブログのような散文的情報では自己満足だけで何の役にも立たないと思いつつ、ダラダラと現在に至っています。

<http://www7b.biglobe.ne.jp/~gyouza-seijin/index.htm>

自作についてもホームページ立ち上げと機を同じくして復活させましたが、江川三郎氏の反作用打ち消し記事（1980 年代）がずっと頭から離れず、作用反作用に基づく構造（AR：Action-reaction の略）を追及し始めました。

タンデム構造の AR-1 を 2012 年に製作。それ以降、また仕事が忙しくなり自作から遠ざかっていたものの、オーディオのホームページだけは細々と続けてきました。

ユニットだけで 150 ページもある「まとまった資料」は、他にはあまりないと思います。偏った記述もありますが、参考にいただければ幸いです。

ギョウザ星人

第一章 ユニットの機能と役割

1. スピーカーシステム形式の違い

大型の量販店に行くと、ずらっとスピーカーシステムが並んでいて、自由に視聴ができるようになっているところもあり、新製品が出た時などには出向いて比較試聴などさせていただいています。

それぞれのシステムは外形やユニット構成が似ているものも似ていないものもありますが、どれも多かれ少なかれ個性があるように聴こえるのは何故なのでしょう？

ここでは音が異なる要因として、大まかにキャビネットの形状（形式）とスピーカーユニット（以降、ユニットと表記）を挙げて、まずはキャビネット形式から説明していきます。

スピーカーキャビネット（以降キャビネットと表記）の形式は、分類の仕方によりかなりの種類が挙げられますが、ここでは代表的なものだけを紹介しておきます。

店に置かれている7～8割のキャビネットは縦に長い直方体の形状をした『**ブックシェルフ型**』と呼ばれるもので、置台（スタンド）に載せたりテーブルの上に載せたりすることを想定しています。これと対を成すのが『**フロア型**』で、床置きが原則になります。

ブックシェルフの由来は以下ようになります。

60年以上前にはターンテーブル＆ラジオアンプ部分とキャビネット＆スピーカー部分がオールインワンの民製品（アンサンプルスステレオなどと呼ばれていた）が全盛でした。

良い音を求めて、徐々にスピーカー部分が分離されたモジュラーステレオに移行しますが、スピーカーキャビネットはアンプ部分の横に並べて置かれるのが常態（今で言うところのニアフィールド）で、分けて床の上に置く習慣はありませんでした。

それでも満足できない愛好家たちに向けて、外部スピーカーシステムを購入した際に邪魔にならないように本棚（ブックシェルフ）に押し込んで使えるような形状と寸法をメーカーが設定＆提案したことによりブックシェルフ型と命名されたそうです。

ぎっしり詰まった本棚の一部にスピーカーシステムを押し込んでやれば、平面バッフル（後述）と同じ効果で低音が豊かに聴こえることを期待したのかもしれませんが。

当初、ブックシェルフ型は『**密閉箱**』が主でしたが、サイズの制限から低音が物足りないということで考えられたのが『**バスレフレックス**（通称**バスレフ**）』方式になります。

今はあまり見かけなくなったビール瓶やコーラ瓶の口元に息を吹き込むと、瓶の大きさに応じて固有の音程で共鳴する（ポーっと音が出る）のを経験した方もいらっしゃると思います。この共鳴（**ヘルムホルツ共鳴**と言います）を利用したものがバスレフになります。

密閉箱で不足している低域にダクトの共振周波数を設定することで低域の音圧レベルを増やしてやろうという**目論見**ですが、具体的にはユニットの背面放射エネルギーを利用してダクト内の空気を共振させて外部に放射することで増強する仕組みになっています。

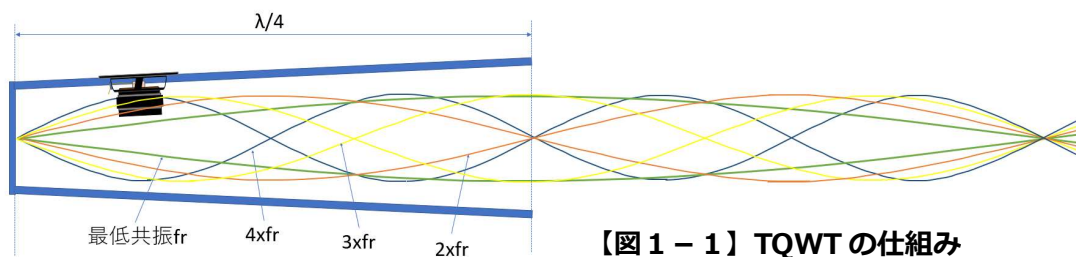
背面放射の位相は正面放射に対して反転していますが、その背面放射によるダクト内の

共振ピークはそれと逆位相になるため、正面放射と同相での合成が可能になるのですが、共振周波数の前後では急激な位相変化が伴うため、不自然な印象を持たれる場合もあります。

同様な共振の仕組みを持つものに『**トランスミッション・ライン**（TL：Transmission-Line）伝送管』方式と言うものがあり、バスレフがキャビネット内部の容積とダクト容積で決まるヘルムホルツ共鳴を利用するのに対し、キャビネット自体を共鳴管にしてしまうという発想に基づいたもの（縦笛や横笛と同じ）になります。一般的な形状としては、管の片端を閉鎖して（固定端）、もう片方を開放端にしたテーパー状共鳴管構造で、その一部壁面に発音源のユニットを取り付けたものになります。最長共鳴波長（1波長）は共鳴管の長さの4倍になります。（図1－1 緑色波形）

1/4 波長で共振する仕組みのため『**TQWT**：Tapered Quarter Wave Tube $\lambda/4$ 共鳴管』と呼ばれることが多く、世界中に自作例がたくさんあります。

（置きやすいように、実際には折り曲げて直方体に収めることが多い）



キャビネット自体が共鳴構造となるため共鳴レベルだけでなく共振先鋭度も高く、低音増強にはなりますが独特の音がします。

ホーンを音響負荷（ロード）として用いたものにフロントロードホーンとバックロードホーンがあります。ホーン型（プレッシャーホーン）の場合、ユニットは一度小さなキャビティに音響エネルギーを放射して、その音圧をスロート（断面積が小さくなった喉の部分）で一度絞り、そこから緩やかに断面積の増えるホーンロードを経て空間に開放します。バックロードホーンの多くは外形を収まりの良い直方体にするためにフォールデッド（折り返し）ホーン形状を採っています。もちろんフロントロードホーンでも折り返し構造とスロート絞りを持ったものがあり、50年以上前の製品になりますが、JBL のハーツフィールドやパラゴン、ALTEC にも数々の名器が存在しています。

ホーンというと断面曲線がストレートな円錐台形状のものはメガホンでおなじみですが、その他の形状にはエクスポネンシャル（指数関数）、ハイパーボリック（双曲線関数）などがあります。ホーンの効果などを詳しく綴った書物が世の中にはいっぱいありますので、ここではサラッと記述するだけにします。興味のある方は、そちらを参照してください。

原点に戻って、そもそもキャビネットの働きとは何なのでしょう。

ユニット単体をアンプにつないで音を出すと、低域成分が不足して玩具のような音が出るだけで、マトモな音楽再生には役不足なのが分かります。

キャビネット（エンクロージャとも呼ぶ）の導入はユニット表裏の音圧打ち消し（干渉）が起こらないよう隔壁を設けて低域での空振りを防ぐことが主目的であり、低音再生には不可欠の要素になります。そういった意味ではユニットとキャビネットは切っても切れない関係（ある意味では必要悪）にあると言えます。

この目的を实践する一番簡便な方法が『**平面バッフル（オープンバッフル）**』になります。

ユニットを取り付けるための穴を 1 枚の板（バッフル板）に開けただけのシンプルな構造になります。バッフル板で仕切られた空間（ 2π 空間）では、ない場合の空間（上記のユニット単体：全周囲 4π 空間）の倍の音圧が確保できますが、板の端では裏面放射波面の回り込みによる干渉が生じるため、急激に音圧が下がります。（板のサイズで決まる波長より低い周波数で打ち消しが生じる）

密閉箱の場合にはユニットを取り付けた面（バッフル板）の範囲では 2π 空間への放射になりますが、それを超えると干渉は無いものの 4π 空間放射（半分）になってしまいます。

このバッフルサイズで規定されるレベルダウンを**バッフル効果**と呼んでいます。前述のブックシェルフ型のキャビネットを本棚に押し込んだ場合には、平面バッフルに近付けることでバッフル効果を減じることができます。

このように、バッフルは理想的には無限大の大きさが必要になるのですが、部屋に収めるのに「便利なよう後方に折り曲げて工夫したものが『**後面開放型**』になります。

文字通り、密閉箱の裏板を外した形状を考えてください。

平面バッフルや後面開放はユニット前後空間が開放されているために音響負荷（ロード）がかからず、前後の空間条件（圧力）はほぼ同じになります。言い換えれば、密閉箱やほかのキャビネット方式ではユニット前後の空間条件が異なっているということです。

このことから、結果的に、ユニットの後方空間（キャビネットの内部空間）が何らかの形でユニットに影響を与えることが理解できると思います。

これについては、第二章 TS パラメータで説明します。

2. ユニットの機能

ユニットは『音響変成器』とも呼ばれ、音響情報に応じた電気入力信号を音響出力信号（音波）に変換するものです。 ※ Lorentz force : 電磁場中にある電流（電荷の移動）が受ける力

磁石を使った磁気回路と音声信号に応じた電流を流すボイスコイルの組み合わせによってローレンツ力[※]を得て、ボイスコイルに接続された振動板を駆動することで音響出力に変換するダイナミック型、直流高電圧をフィルムに印刷した電極に印加することで磁気回路を使わずに入力信号に応じた電荷の変化を音響出力に変換するコンデンサ型、ピエゾ効果（特定の材質に電圧を加えると伸び、止めると元に戻る）を利用する圧電型、電流に応じた高圧放電（アーク放電）を発生させることによる空気振動を利用したプラズマ型（ツィーターのみ）などがあります。

これらの派生も含めて音響変換できる仕組みはまだありますが、市場で購入できるものはダイナミック型が 99%以上だと思いますので、本編ではダイナミック型に限定した形を基本として記していきます。

前項で記したように同じユニットを使ってもキャビネット形式により音の再現性が変わりますし、形式が同じでも構造や容積などのファクタでも変わり、音響負荷としてのキャビネットとドライブするユニットとの相性というものも発生します。

その結果として、キャビネットによる音質的なデメリットも当然でできます。

たとえば、後面開放では後方より漏れた音圧による干渉の処理が難しくなりますし、バックロードホーンは構造上低域のF特が暴れますし、バスレフではダクト共鳴音と主放射音との干渉やダクトの位置によっては共鳴以外の音漏れが歪として認知されることも多いので背面配置や天面、底面配置も最近の製品では増えています。（ダクトから放射される音圧は、視聴位置がニアフィールドでなければ配置の影響をほとんど受けません）

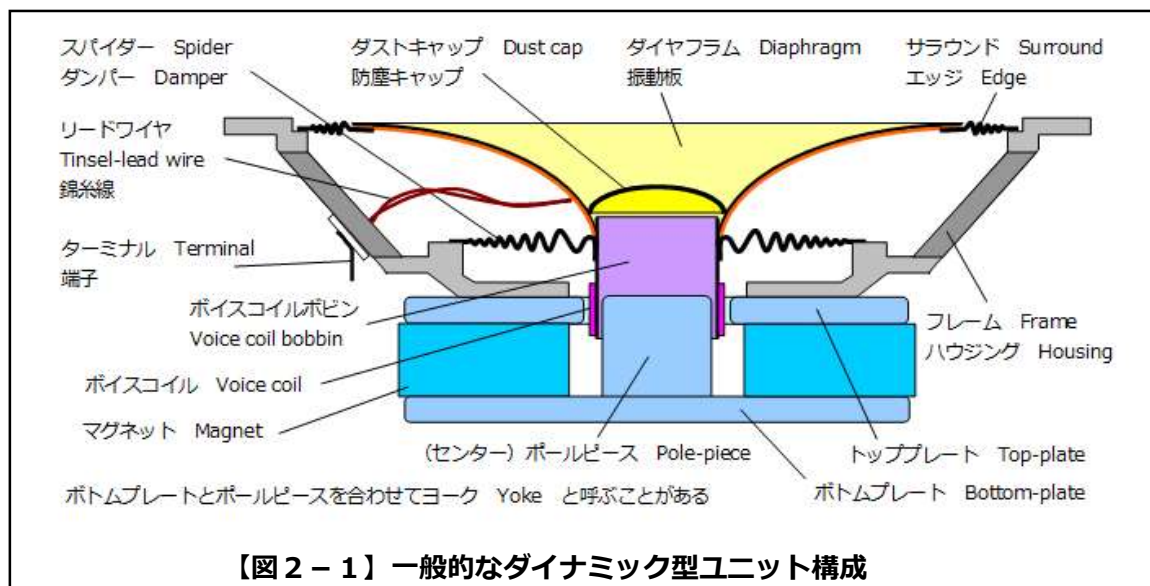
同じユニット、同じキャビネットを使っているとしても、吸音材の種類、量、配置などにより音質がかなり変わってしまいます。このようにユニット以外の要素で変化してしまうのを承知のうえで、あえてユニット単体としての理想形、およびそれを達成するための構成要素というものを考えてみようと思います。

2. 1 ユニットの基本構造

「スピーカーユニットに求められる基本機能は？」と問われれば、「音楽情報に応じた電流を音響エネルギーに出来る限り正確に変換する」ということになります。

これを実現するための機械的構成要素としては、① 磁気回路、② ボイスコイル&ボビン、③ 振動板、④ 振動支持系（エッジ、ダンパー）、⑤ 磁気回路と振動系の間を支えるハウジング、⑥ 給電用の編組線&端子、⑦ ホコリ避けのキャップなどになります。

まずは、それぞれを簡単に説明します。



① 磁気回路 (magnetic circuit)

現在市販されている多くのユニットでは（図2-1）のような『外磁型』と呼ばれる磁気回路の構造を採っており、安価で入手しやすいフェライト・マグネットと磁性金属製（ほとんどが純鉄系軟磁性鋼）のトッププレートおよびヨーク（ボトムプレート&ポールピース：一体鍛造が多い）より構成されています。

トッププレートとポールピースの間に『磁気ギャップ gap』を設けて、そこに強力な均一磁界を得ることが磁気回路の役割になります。

マグネットにアルニコ合金（アルミ・ニッケル・コバルトから成る合金）を使ったものは、この磁石特有の性質（後述しますが減磁という性質）から『内磁型』と呼ばれる構造をとらざるを得ず、（図3-13）のような壺型ヨークの場合には外から磁石が見えません。

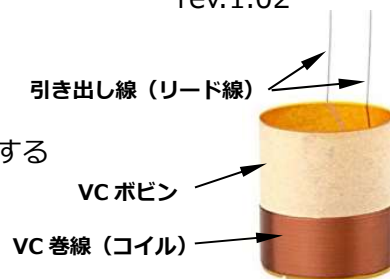
② ボイスコイル（コイル&ボビン：Voice-coil & VC-bobbin）

短冊状もしくは菱形状のボビン材を円筒形に丸め、円筒の一端に『マグネットワイヤ Magnetic Wire』と呼ばれる樹脂被覆線を巻いたものになります。

巻線部分を単に『コイル coil』と呼ぶこともあります。

本編では、以下、ボイスコイルを VC と省略表示します。

音声電流を磁気ギャップ内に位置させた VC に流すことで、後述する『ローレンツ力（振動系を駆動する力）』を生じる部分になります。



【写真 2 - 1】一般的な VC 構造

③ 振動板（ダイヤフラム：Diaphragm, Cone）

VC ボビンに振動板を接着することで、振動板が駆動されて音響出力（音波）を得ます。一部の高級ユニットでは、振動板と VC ボビンが一体になっているものもあります。

④ 振動板と VC を支える**支持系**（エッジおよびダンパー：surround & spider）

上記の②VC により ③振動板が駆動される訳ですが、VC がユニット前後方向に正しく駆動されないと磁気ギャップを構成するトッププレートとポールピースに干渉して異音を発生し、最悪の場合には破壊してしまいます。これを防ぐためには、駆動した時に VC をギャップ内の駆動中心(同心)位置に保持する構造部品が必要になります。VC をギャップと同心に保持する構造部品を**スパイダー**または**ダンパー (damper)** もしくは**リア・サスペンション (rear-suspension)**、振動板の外周を保持（結果的に中心保持と等価）する構造部品を**サラウンド**または**エッジ(edge)**もしくは**フロント・サスペンション (front-suspension)** と呼びます。アメリカではそれぞれ spider、surround と呼ぶことが多く、日本ではダンパー、エッジと呼ぶことが多いようです。ここでは日本式に後者に従うことにします。

②、③、④および後述の⑦ ホコリ避けキャップを含めて『**振動系 vibration system**』と呼びます。（厳密には⑥ 編組線の一部も含まれますが、ここでは除外します）

⑤ フレームまたはハウジング（Frame, Housing, Basket）

磁気回路のギャップと振動系の位置関係を維持するためには相互間に構造物が必要で、これをフレームまたはハウジングと呼びます。安いユニットは金属プレス品や樹脂成型品を使いますが、高価なユニットには亜鉛合金やアルミ・ダイキャスト製のものもあります。ここではハウジングと呼ぶことにします。

⑥ 給電用の**編組線（錦糸線：Tinsel-lead wire）** & **端子（端子板：Terminal post）**

音声電流を VC に伝えるための構造です。できる限り駆動の負荷にならないように柔らかく軽量で、且つ丈夫なことが求められ、ほぼ 99%が銅細線の編組構造を採っています。

通常、端子（板）はフレームに取り付けられ、振動系から引き出した錦糸線の端部を接続します。実効駆動範囲内で突っ張らないように端子との間にタルミが設けられています。

⑦ ホコリ避け**キャップ（ダストキャップ：Dust dome, Dust cap）**

機能上、VC ボビンとポールピースの間にある空間が開放されていても問題ありませんが、ホコリや砂鉄等の異物が進入しやすく、それが異音の原因になるため、通常は上記空間を覆うように防塵キャップを設置します。

アルミニウム合金やマグネシウム合金、チタン、ボロン（ほう素）などを添加した軽量 & 高伝導率合金もしくは冷間鍛造合金などの金属製やアルミ蒸着樹脂フィルムなどの硬質キャップをVCボビンに直接被せて接着することで積極的に高域音響出力用振動板とすることもあります。

目的を明確にするときは別にして、ここでは単純に**キャップ**と呼ぶことにします。

後述の（図 2.3-17）のように通気性のないキャップを被せることで上記空間が密閉されると、その閉空間が制動負荷(空気バネ要素)&ロス（減衰要素）になってしまうため、ストロークの長いウーファーやフルレンジの場合にはVCボビンにエア抜き孔を設けたり、磁気回路のポールピース中央部に貫通孔を開けてエア抜きを図ったりすることがあります。

メーカーによっては、キャップ自体に適度な通気性を持たせたり（メッシュやパンチングメタル）、FOSTEXのように中央に小さな孔を設けたりすることもあります。

以上が構成要素の概略になります。

要素の数からして、どう考えても複雑には成り得ないはずなのに、そして研究し尽くされていてもおかしくないはずなのに、未だに様々なユニットが作られ、それらが再生する音は個性を持って生まれてきます。

設計者として従事した経験から言えるのは、上記の構成要素を個別にどれだけ検証し、どれだけ追い込んだとしても、どこかで行き詰ることになるということです。それは、それぞれの要素が密な相互関連性を持っているからに他なりません。

第二章で説明する『**TSパラメータ**』は、ユニットの物理特性を客観的に現していてキャビネットの設計には必要不可欠ですが、個々のパラメータは上記①～⑦個々の要素から単独で導かれているわけではなく、周囲の空気を含めた相互関係から成り立っています。

TSパラメータ各々が、ユニットを構成する各部品（構成要素）と相関を持っていて切り分ける訳にはいかないとは言うものの、個々の構成要素の内容が分かってこそ相互関係が見えてくることも事実ですので、複合的な見方で記述を進める事にします。

2. 2 ルーツ

上記のように、現在流通している一般的なスピーカー（ダイナミック型：コーン状の振動板をV Cで駆動する形式）の構造や構成要素は（図 1-1）のように単純で両手の指が余るほどの要素しかないにもかかわらず、誕生してから約 90 年以上もの間、ほとんど変わっていません。

ところで、この形式のルーツはどこにあるのでしょうか？

ユニット設計に携わっていたわりには、こんな基本的なことも知らないのかと思われるかもしれませんが、「ルーツはベルの電話機」ということくらいしか知りませんでした。（汗）業務上の教科書は、**オルソン**^{あらわ}が著した『**音響工学**（上下巻：東工大・西巻教授訳）』でしたが、設計に関わる実践の部分で疑問が沸いた時くらいしか、この本を開かなかったので・・・完全に言い訳ですが、やたら厚くて重い書籍でした。（上巻だけで 392 ページ）

ルーツを調べてみたところ、日本音響学会の発行した資料※がありましたので、以下に要約します。

※ <http://asj-edcom.acoustics.jp/doc/loudspeaker.pdf>

「磁界中の電線に電流を流すと発生する力（ローレンツ力）により振動板を駆動して音波を作り出す仕組み」は電話機の発明者であるグラハム・ベルが 1876 年に始めて特許登録しましたが、糸電話の糸を電磁石で駆動するような形態で、とても音質を云々するレベルではなかったようです。（同じ原理を使った JAZZMAN の点駆動たわみ振動スピーカーというものがあります。140 年以上経っても基本原理は変わらず使えるということですね。閑話休題）

それを経ること 50 年、GE 社のライス & ケロッグ（Chester W. Rice、Edward W. Kellogg）が 1925 年に製作したものが真空管アンプで駆動したダイナミック型スピーカーの原型とされています。

その後、WE（ウェスタン・エレクトリック）社傘下のベル研究所やマグナボックス社（ともに米国）が競って開発を進めたため、音質がどんどん向上していきました。

因みにジェームズ・B・ランシングが設立したコンシューマー向けのスピーカー製造会社 JBL が生まれたのが 1946 年、その前身であるアルテック・ランシング社で「604」や「515」を開発したのが 1941 年ですから、第二次大戦前後には現在形状の原型が生まれていたということになります。（因みにジェームズ・B・ランシングが、劇場用のスピーカー開発に特化していた ^{はしよ}Lansing Manufacturing Inc. を設立したのは 1927 年だそうです）

かなり端折りましたが、歴史的な背景は以上にして、ダイナミック型の駆動原理に関わる要素から入りましょう。

2. 3 駆動原理と磁気回路に発生する非線形歪 その対処について

2. 3. 1 ローレンツ力について

小学校か中学校の理科の授業で、(図 2.3-1) のような磁石と電池を使ったブランコ実験を行ったのを憶えていらっしゃる方もおられると思います。

これは『ローレンツ力』を観察するためのものでした。

ローレンツ力 F は、

$$\vec{F} = \vec{I} \vec{B} l \quad \dots (式 2.3-1)$$

F : ローレンツ力、 I : 電流、 B : 磁束密度、 l : 電線の長さ

で示されます。(文字の上に傍点があるのはベクトルを表わします)

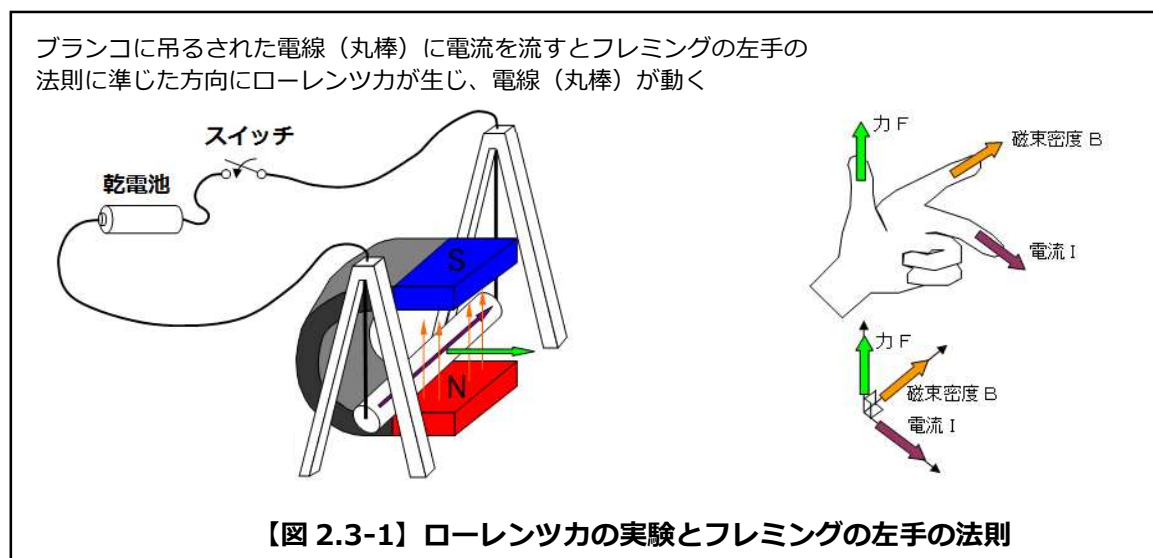
入力 I に対し F をリニアに保つためには、**均一直流磁界** (磁束 ϕ (磁束密度 B) が一定 : 磁束ベクトルの方向が揃っていて磁力線が等間隔) を発生する磁場が存在し、均一磁場中にある電線長さ l が一定 (均一磁場から電線が食み出ない) の 2 つが前提条件になります。
 $= B l$ (駆動力係数) 一定※

※ 実際には一定でなく、磁気回路の構造上、 $B l$ には位置依存性があります ⇒ (図 2.3-5) を参照

この環境であれば、電流 I に比例したローレンツ力 F が電流および磁界と直交した方向に生じることになります。

この関係を表すのに、『**フレミングの左手の法則**』というものがあります。

電流 I 、磁束密度 B 、ローレンツ力 F は共に方向を持つベクトル量であり、電流 (厳密には電荷の移動) で発生するローレンツ力の方向はフレミングの左手の法則に従います。



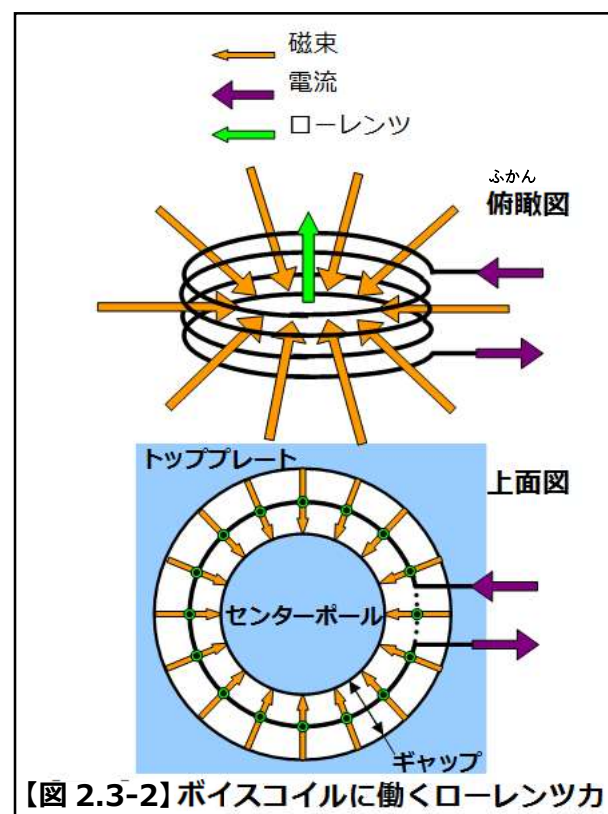
スピーカーユニットの場合には、電流を流すのがVCボビンに巻かれた**マグネットワイヤ**（巻かれたものを**巻線**または**コイル**と呼びます）であり、磁束の方向も磁気回路の半径方向に向かっている点が上記のブランコと異なるだけで、基本的な考え方は共通です。

スピーカーユニットの磁気ギャップ（図 2.3-2 の上面図参照）では磁束が半径方向に向いているため、図のように電流を流すと、VC には上向き（紙面手前方向）のローレンツ力が生じます。コイルの任意の 1 点を決めて、左手の法則を使って確認してみてください。どの点でも力は上向きになっているはずです。

（上面図の ● は紙面手前向き）

電流の方向を逆にすれば、ローレンツ力の方向も逆になります。

音声信号をこのコイルに流せば、VC がそれに応じて前後に動き、それに同期して振動板が動くことで音声信号（電流）に応じた音波（音響出力）を生成します。



【図 2.3-2】ボイスコイルに働くローレンツ力

これを**エントロピー**の観点から説明してみます。

右図のように均一磁界中で電流を流すと電流の大きさと方向に応じて電線の周りに生成された磁力線（磁界：薄紫矢印）によりギャップ内に磁力線の粗密が生じ、それをキャンセル（**均一化**）する方向（エントロピー増大の方向＝エネルギー的に安定＝自由度大）に電流の大きさに比例したローレンツ力が生じます。（粗密の大きさが電流と比例していると考えます）

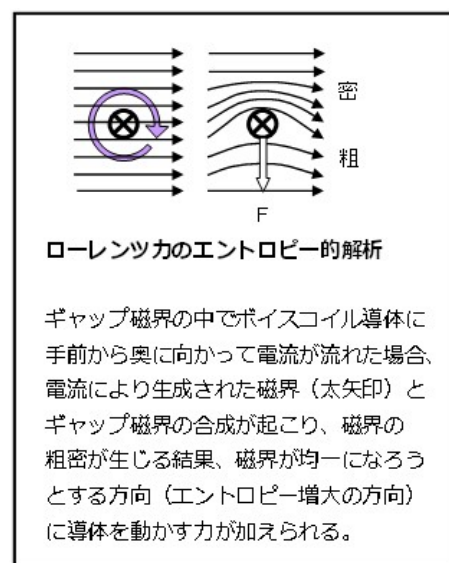
右図では 1 本の電線で示していますが、実際にはコイル全体に対してこの現象が起こります。これは、（図 2.3-1）で示したような DC（直流）でも AC（音声電流）でも発生します。

ところがコイル（実際には振動系全体）には実効質量（**慣性質量**）があり、一定のローレンツ力が加わってもコイルの速度は一定ではありません。

（図 2.3-1）では、最初加速して途中から減速し、重力とブランコの吊り紐が保持する力とローレンツ力がバランスした状態で停止します。（厳密には停止までに減衰振動します）

2.3-8 項で示すように、**駆動は入力に対し遅れ要素を持ちながら行われます**。

おまけに AC 駆動（音声電流による駆動）の場合には ①変化する電流と ②均一磁界からの離脱 の 2 つの要因による磁界変調も起こり、それに応じた逆起電力も生じますので、動的にはかなり複雑な挙動をします。



2. 3. 2 不均一磁界による非線形歪

(式 2.3-1) が成り立つのは「均一（磁束密度が一定）な磁界の存在」が条件のひとつであることは既に記しましたが、この「均一な磁場」の実現が、かなりの難問です。

ユニットに期待される駆動領域^{わた}全てに亘って常に均一となると、(図 2.3-3) に示したような単純な形状や構成ではなく、後述のように様々な磁気回路の工夫が必要になります。

廉価ユニットの場合には、磁束密度 B （模式図では磁力線の間隔に相当）は、(図 2.3-3) のようにギャップ内ではほぼ均一ですが、ギャップから離れるに従い磁束密度 B が低下し、磁力線の分布も上下非対称になります。薄紫色に着色した部分が VC コイルで、前方に駆動した場合と後方に駆動した場合とではコイルを貫通する磁力線の数に違いが生じます。

これは磁気回路の断面形状がギャップの内周（ポールピース）と外周（トッププレート）とで異なるのと、磁力線は、① **飽和しない限りは透磁率の高い部分を通り**、② **相互に排他的 (mutually exclusive : 同じ条件では相互間隔を均一にしようとする)** であり、且つ ③ **最短になる**性質があるためです。

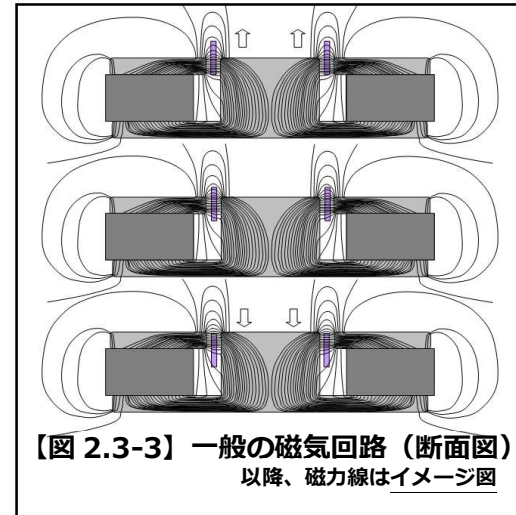
(図 2.3-3 などの断面図の磁力線イメージを参照)

これは、簡単に言うと、① 磁力線が空気中よりは金属の中を通りやすく（透磁率が高いほど磁力線の密が許容される）、金属でも通路が狭いと空気中に食み出るし、② お互いに避けているくせに ③ 自身は短くなりたがる性質がある（常にエントロピーが極大になる）ということです。

また、空中放電と同様に尖ったところ（形状の変化する境界部分：角など）から集中して放出&流入しやすくなります。

駆動方向に対し前後対称の磁束パターンに近付ける磁気回路の設計は専用のシミュレーションソフトを使って行いますが、決して単純な構造や形状にはならないため、製造に関しては熱間鍛造工程[※]だけでなく切削加工工程や複数部品の組み合わせも必要になり、それなりにコストがかかってしまいます。

※ 熱を加えて柔らかくして、数十～数百トン相当の強力なハンマーで叩いて（金型で挟んで）形を整える

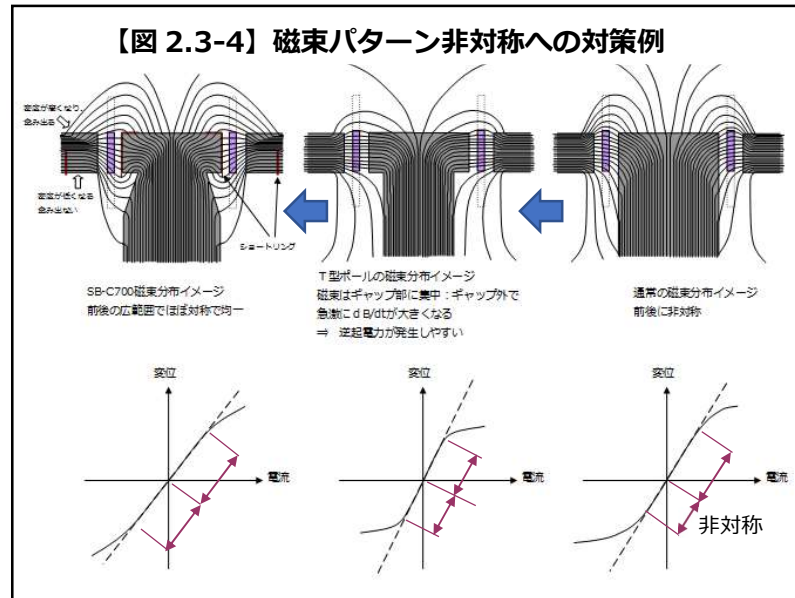


(図 2.3-4) にテクニクス SB-C700 の例を示します。(後述の銅ショートリングの効果も含まれたものになります。そして、あくまで想定です)

ギャップ部分内外周の相対する断面形状を揃える『**T型ポールピース**』と呼ばれる形状に属し、そのアレンジになります。

相対ギャップ面の材質が同じで双対断面絞込み形状を同じにすればギャップ以外への漏れが最小限になります。厳密には面積を等しくするのが透過磁束の最大効率になるためトッププレートを若干薄くします。

SB-C700 の場合、単純にT型ではなく側面にテーパ部分を設定しているのは漏れ磁束の**前後対称性を改善**するためで、ポールピースをテーパに絞り込むこと(断面積減少)でテーパ面からの磁力線リークを助長する(絞り込めば食み出る)ものです。



2. 3. 3 FEMについて

※三角形の頂点

このような設計は『有限要素法（解析）：FEM（FEA）』という手法を基にします。

構造物を含む有限空間領域が境界線で接する多数の三角形要素で構成されていると考え、それぞれ隣り合う要素同士の**相互関係**（双方の三角形が共有するグリッド※でのポテンシャル：応力歪や変位量、磁束密度や位置、温度分布や圧力分布など）を測定もしくは演算で求める（補間する）ことにより全体の動作をシミュレートすることが可能になります。

元々は、ダムなどの構造強度設計のために半世紀以上前に開発されたものですが、分割した三角形要素が増えるほど計算容量が大きくなるため、当時は大型 PC（ミニコンと呼ばれていました。日立の HITAC、富士通の FACOM などが有名）での運用が主で、単純変位の演算に数時間～数日を要しましたが、PC 性能の向上により今ではプライベート PC でも大掛かりなリアルタイムのシミュレーションが可能になりました。

発熱体周辺の温度分布や流体力学を利用した室内空調の設計、コンロッドやピストンリングなど自動車部品の強度解析、橋梁などのトラス構造体や高層ビルのラーメン構造体の振動解析、上記の磁気回路設計や後述する振動板のモード解析など多方面での利用が進んでいます。

FEM（Finite element method）と CAE（Computer aided Engineering：仮想モデルによるシミュレーション解析）については、<http://jikosoft.com/index.html>などに多くの情報があります。上記サイトではアプリケーション例として XFEM を使っています。

FEM による電磁石の設計例を以下に示します。
2次元だけでなく3次元での解析も可能な手法です。

出典：森北出版

「有限要素法による交直電磁石の設計と応用」1991 年第 1 版

ISBN4-627-74159-6

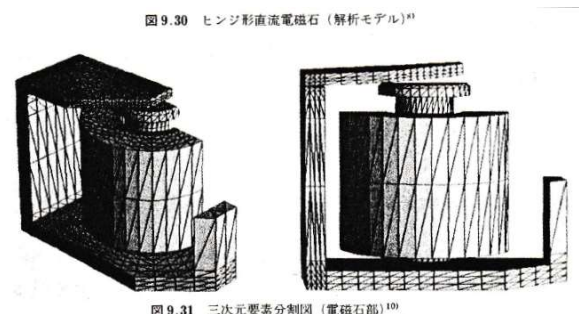
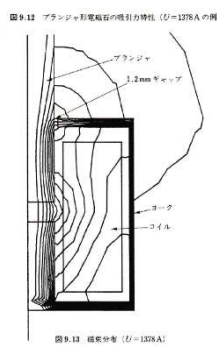
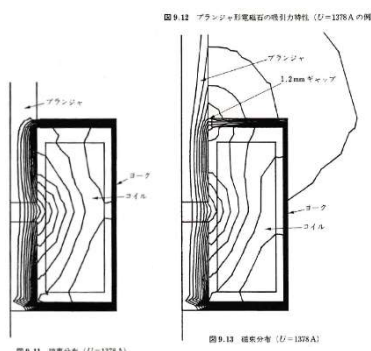
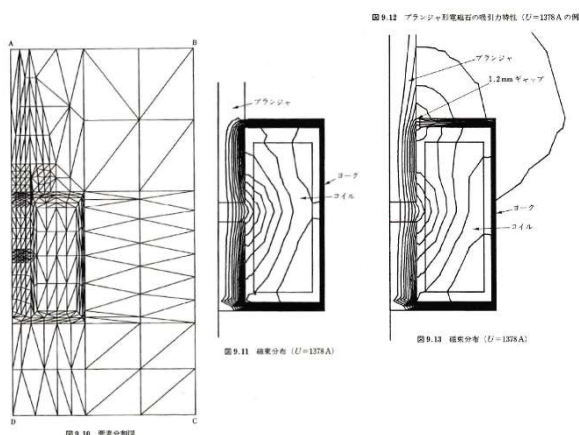


図 9.31 三次元要素分割図 (電磁石部)¹⁰⁾

2. 3. 4 自己誘導歪の発生原理 インダクタンスの不均一による非線形歪について

(図 2.3-5-1)にSB-G90 ウーファのストローク v s 駆動力係数 B/l グラフを掲載します。

±6mm まで、ほぼ前後対称で $8Tm^*$ を確保しているのはさすがです。(Max.10Tm)

※ Tm : テスラ・メートル 駆動力係数 B/l の単位。 $Tm = N/A$ 電流と掛け算するとローレンツ力が求められます。



磁気回路の物理的な磁力線の非対称性もさることながら、VC 巻線は元々 L 要素ですのでインピーダンス (インダクタンス分) が高音域に向かうにつれて上昇する (電流ロスが増える) こともフルレンジにとっては高域再生の面で障害になります。

コイルの自己インダクタンス M_s は、(式 2.3-2) に示すように VC 径が大きく、巻数が多くなるほど増加します。

$$M_s = \mu N^2 \cdot S / w \quad \dots (式 2.3-2)$$

μ : コイル内側にある媒体の透磁率、 N : 総巻き数、 S : コイル断面積、

w : コイル巻き幅

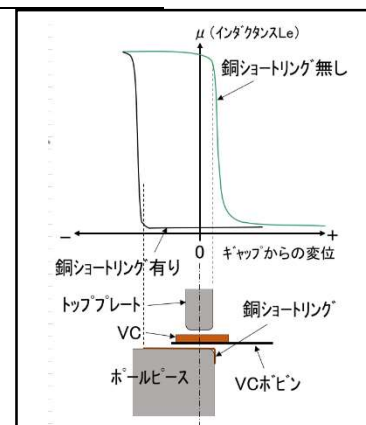
※純鉄ならば比透磁率 $\mu \approx 5000$ 、空気ならば $\mu \approx 1$

更に、低域では振幅が大きくなる (コイルの位置がギャップに対して大きく変位する) ため、前後駆動に伴ってポールピース※とコイルが重なっている部分が多いマイナス (後方向) 変位と、ポールピースから食み出して空芯コイル※となる部分が多いプラス (前方向) 変位の場合とでインダクタンスの非対称が生まれます。(図 2.3-6: 「銅ショートリング無し」の緑色曲線)

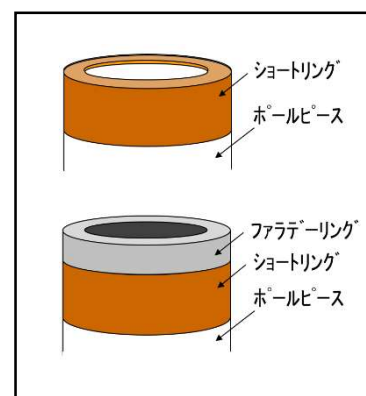
結果的に (式 2.3-2) の μ がコイルの変位範囲で非線形になります。

ポールピースのギャップ形成部分に銅 ($\mu \approx 0.999994$) のショートリングと呼ばれる薄板キャップ (図 2.3-7 上) を被せることで大幅な補正が可能になります。(図 2.3-6 グラフの黒色曲線)

更に細かい補正が必要な場合は、アルミニウム ($\mu \approx 1.00022$) などの補正パーツ (ファラデーリング Faraday ring) をポールピース上部やマグネット周辺などに設置します。(図 2.3-7 下、図 2.3-10)



【図 2.3-6】銅ショートリングの効果



【図 2.3-7】ショートリング形状

(図 2.3-8) は、銅ショートリングで補正した磁気回路に VC を実装した磁力線状況の想定イラストです。補正前 (図 2.3-3 : 再掲載) と比較してください。比透磁率 μ の低い (磁力線が通りにくい) 銅ショートリングを被せることで M_s が平坦化され、ギャップ部分の磁束密度が減り、磁力線が追い出されることでギャップから離れた部分での磁束密度の低下が抑えられ、広範囲で磁束密度の高位安定が望めます。これは急激な磁束密度の低下 ($-dB/dt$ の急激な上昇 = ノンリニア歪の増加) を減らすのと等価で、後述する『逆起電力』の発生も抑制します。

ショートリングの本来の動きは、ローレンツ力が理論通り働くための必要条件である直流均一磁界 (一定磁束密度) が、VC の変位に伴って発生した渦電流^{※1} による磁界 (磁束密度の変化 ΔB : 磁気歪み成分) によって変調されることを防ぐ (磁界変分を銅ショートリング表面での渦電流損として消費する) ことにあります。トランスのショートリングと同じ動きになります。

※1 渦電流については5. 1項参照

※2 防磁 (漏れ磁束防止) 用にボトムに貼り付けるものと同じ名称だが働きが異なる。

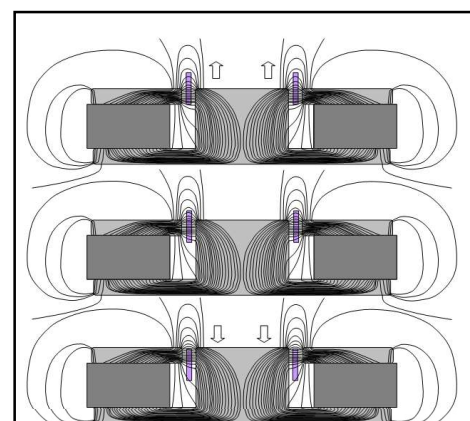
均一磁界を得るための手法である『ダブル・マグネット^{※2}』は、文字通りメインの磁石以外にポールピース上にもう一つのマグネットを置くものです。メリットとしては、磁束密度のアンバランスを駆動の広範囲で矯正できることです。

これは (図 2.3-3) の説明でも記しましたが、磁力線は① 飽和しない限りは透磁率の高い部分を通り、② 相互に排他的で、③ 最短になる性質があるため、空間の磁束密度を均一にしようとすることでギャップ周辺に膨らんで漏れる磁束を抑える効果があります。

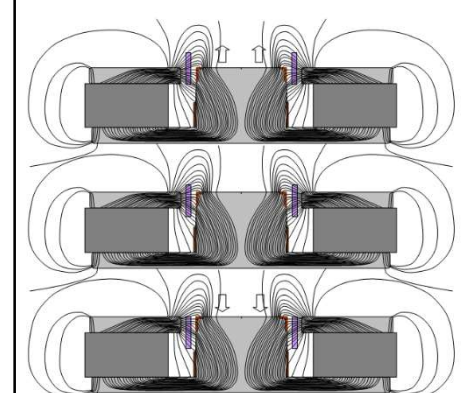
これもシミュレーションを行うことで最適化するのが常套手段になります。

デメリットは上手く設計しないと漏洩磁界が大きくなることでしょうか。(図 2.3-9 : 三菱 DS-4NB70 ウーファに使用例あり)

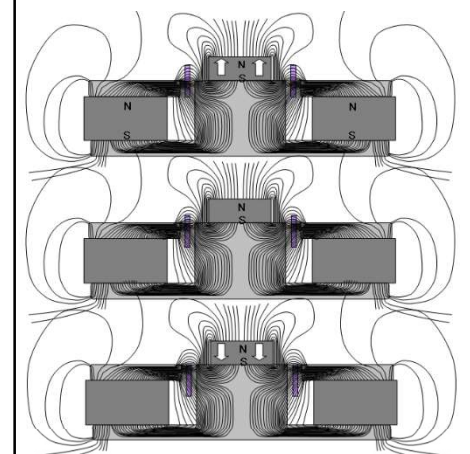
更に補正パーツであるファラデーリング^{※3} (銅 + AL 合金など : 図 2.3-10 中の赤紫色) を追加した場合には、漏洩磁界の微妙なコントロールが可能になります。



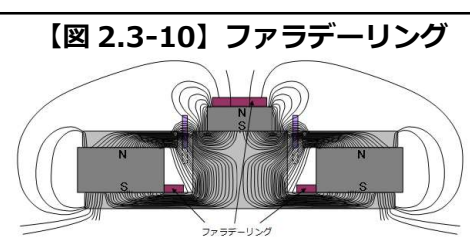
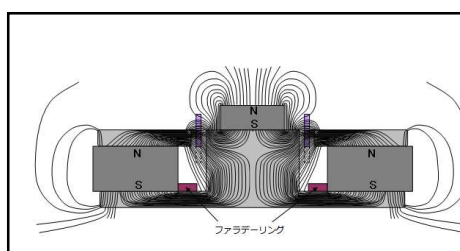
【図 2.3-3】一般的な磁気回路



【図 2.3-8】銅ショートリング付き

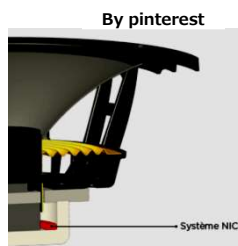


【図 2.3-9】ダブルマグネット



【図 2.3-10】ファラデーリング

※3 電磁誘導のファラデーコイルとは別物です



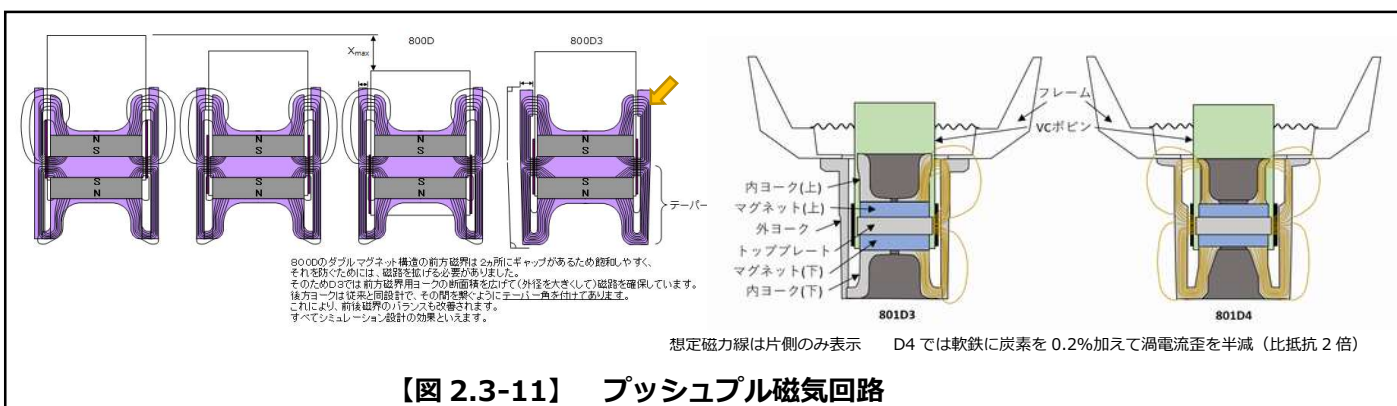
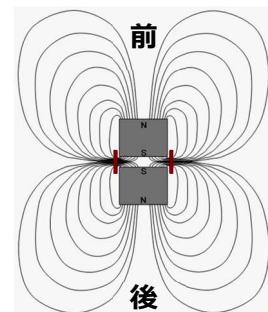
左図は FOCAL 製 Sopra のウーファに採用されたファラデーリング (NIC : NEUTRAL INDUCTANCE CIRCUIT) で、材質、位置、形状は PC シミュレーションされたものになります。

市販製品での例はありませんが、反発磁界を利用した開放磁気回路を使った実験を行っている方もいらっしゃいます。反発する 2 つの磁石の間に発生する磁力線を利用するものです。(右図：濃茶色が VC 巻線)

一見、前後対称ですし、比透磁率の高い磁性金属を使用しないので非線形歪が発生しないなど良いこと尽くめですが、無理にギャップを狭めると磁石側面からの漏洩が増え、思ったような磁束密度は得られないと思われます。

また開放磁界のため、コイル電流による磁界変調に弱く、ギャップ両端に磁性金属を配した通常のギャップに比し安定度がありません。VC が移動すると磁力線の軌跡が大きく変化するということです。例えばとして、大縄跳びの綱を相手方無しに一人で回す(綱の逆側が開放端=固定されずフラフラになる)のに似ていて、一方をどこかに固定するか、二人で回すときの安定度(軌跡が一定)とは比較にならないということです。

上記と似たものに B & W の『プッシュプル磁気回路』がありますが、きちんと磁路を形成することで前後対称型の磁界を作り、広範囲で均一な磁束密度領域を確保しています。



トッププレートと2つの対向したネオジウム磁石で挟み、前後にヨークを配して磁路を形成することでトッププレート端からヨークに向かう広範囲な均一磁束を得るものです。

初期型では前側のギャップ(図 2.3-11 橙色矢印)を考慮せず磁力線パターンが前後非対称になっていましたが、801D3 ではヨーク形状を再シミュレーション設計して改善しています。前方側のヨークを厚くして、且つ後方側のヨークをテーパー状にして滑らかに繋ぐことで、結果的に 10dB の歪低減を実現したそうです。D4 では渦電流歪にもメスを入れ、再シミュレーションにより均一性もアップしています。前後対称性を重視して前方側にもギャップを伴うヨークがあるため VC ボビンが長くなってしまうのでフルレンジには向きませんが、ウーファであれば駆動力係数 B_l を広範囲で均一に保持でき、結果的に逆起電力の発生を抑圧できるため理想的な磁気回路といえます。

2. 3. 5 磁性金属について

ここでトッププレートやヨークに使われている**磁性金属**について記述しておきます。

通常は**純鉄系軟磁性鋼 SUY**（電磁軟鉄 Fe：最大直流磁束密度 $B_{max} = 1.59T$ ）を使用します。純鉄であっても、極端に高価な改質である水素雰囲気中の還元焼鈍により $\sim 2.22T$ に到達させることができますが、価格の安い磁気焼鈍が一般的です。

パーメンジュール（代表的なものは、コバルト 49wt%、バナジウム 2wt%の鉄合金： $B_{max} = 2.16T \sim 2.45T$ ）を使うことがありますが、特性を生かして絞り込んだギャップ形状とすることで純鉄製より磁束密度を格段にアップすることができます。

ただし、あたりまえですが、どんなに形状を工夫しても素材の最大（飽和）磁束密度以上にはなりません。パーメンジュールは、ゴトーユニット製（SG-38WNS：ギャップ磁束密度：1.8T、SG-3880Ti：ギャップ磁束密度：2.4T）で採用されていますが、希土類のコバルトを大量に含むため、コストはとんでもなく跳ね上がってしまいます。

2. 3. 6 磁石の種類

磁石の種類ですが、廉価版を中心として市場にある殆どのユニットが**フェライト磁石**を使用しています。フェライト磁石に使われている主材料は酸化鉄の粉末（約 70～76 wt. % 前後）で、それに炭酸バリウム（Ba 系フェライト）や炭酸ストロンチウム（St 系フェライト）などを添加して仮焼⇒粉碎し、磁気特性を均一安定化させた上で再度焼結します。

具体的には、弱い磁界中で磁区を揃えながら成型し、約 1300 ～ 1350℃で焼結する**等方性磁石**がスピーカーユニット用としては主流です。ユニット組み立ての際には未着磁のものを使用し、組み立て後にパルス着磁器で着磁します。

磁石の製造工程に興味のある方は、以下の Web ページを確認してください。

http://www.neomag.jp/mag_navi/mames/mame_process.html

フェライト磁石の磁力エネルギー（最大 BH 積）は体積の割には大きくありませんが、型に詰めて焼結させるので金型があれば大量生産ができて、回転砥石やウォータージェットによる厚さのカットのみで、切削などの後加工が不要になります。材料は入手しやすく安価なのがメリットになり、磁石メーカーのリング形状既製品から選べば C/P は非常に高くなります。すでに酸化した鉄が原料なので錆びない反面、表面処理が為されないのが鋭利なカット断面の角が欠けやすいのが欠点です。

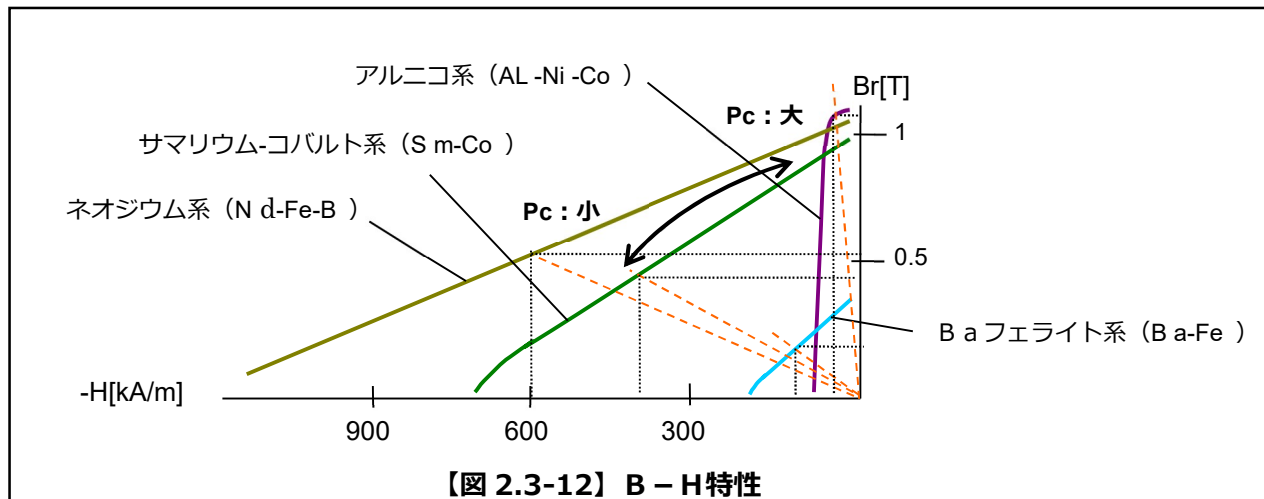
もう一つの特徴は、絶縁体という程ではありませんが、導電性がかなり低く（比抵抗が高い：100Ω・cm 以上）、物理的にフェライト磁石によって分離しているヨーク（ポールピース）とトッププレート間には容易に電位差が生じます。

形状については径が大きく（断面積 S が大きく）、高さ L が低いものがほとんどです。

フェライトのように保持力 H_s に比較して（残留）磁束密度 B_r が低い磁石の場合には、最大 BH 積を得る動作点では**パーミアンス係数 P_c (B_r/H_s)** が小さくなります。

パーミアンス係数 P_c は、形状依存のパラメータです。 P_c が小さい $\Rightarrow$ S/L 比が大きい (= 高さ L が小さい = 平べったい) 形状となります。

したがって、構造は必然的に外磁型（磁石形状は薄いドーナツ型）になります。



これに対して希土類金属であるコバルトとアルミニウム、ニッケルの合金を使用したのが**アルニコ磁石**（アルニコ 5 が主流）ですが、特徴としては、①BH 積がフェライトの 3 ～ 5 倍程度、②保持力が弱く残留磁束密度が高いためパーミアンス係数 P_c を大きくしないと**減磁してしまう**ため、 S/L 比が小さい（分極方向の高さ L が大きい） $\Rightarrow$ 円筒形状となるので内磁型が合理的といえる、③比抵抗がフェライトの 10^{-6} 程度 ($5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$: 導電性あり)、④耐熱性が高い（ 500°C 以上、キュリー温度 850°C ）となります。

組成はアルニコ 5 の場合、Fe (51wt.%)、Al (8wt.%)、Ni (14wt.%)、Co (24wt.%)、Cu (3wt.%) になります。

リコイル比透磁率 ($\mu_{\text{rec.}}$) というパラメータを説明しておきます。

通常の比透磁率と異なり、外部磁界による**磁化されやすさ**の目安 = **減磁しやすさ**（減磁履歴線 = リコイル線の傾き）を表します。フェライト、ネオジウム、サマリウム・コバルトなどは 1 ～ 1.1 であるのに対し、アルニコ 5 は 3.6 という高い値になっています。

http://www.neomag.jp/mag_navi/glossary/glossary_main.php?title_id=176

リコイル比透磁率が低いと磁石の分極面からだけ磁力線が出るようになりますが、高くなると側面からも漏洩する傾向がありますが、実際には比透磁率の高い純鉄製のポールピースとトッププレートとでギャップを形成するので、この差はあまり意味が無いと思われる。

サマリウム・コバルト磁石は、希土類金属の成分比が大きい（51%のコバルトと 26%のサマリウム）、コスト／パフォーマンスが低く、より強いネオジウム磁石が登場してから 200℃以上の高温環境など特殊な用途に限られるようになり、生産量が激減しました。（使用環境は 350℃程度まで）

より強い磁石としては**ネオジウム磁石**があり、エネルギーBH 積が極端に大きく（フェライトの 7 ～ 10 倍程度）、最近では流通量が格段に増えて価格もこなれてきているので、ツイーターを中心にスピーカーユニットへの利用が増えつつあります。

ネオジウム磁石は、Fe（電解鉄）、Nd（ネオジウム：27 ～ 30wt.%）、Dy（ディスプロシウム：2 ～ 8wt.%）、B（ホウ素：1 ～ 2wt.%）などを配合しますが、配合比によって各種特性が実現できます。現在、N52 が表面磁束密度の一番高い磁石になります。（N52 は B_r = 約 1.5T）

エネルギー積は N 値に因らずほぼ一定なので、N 値の高いものはその分、保磁力が低くなります。（N52 は H_c = 約 1000kA/m）

参考にネオジウム磁石 No. 1 企業：日立金属の N E O M A X[®] に関する H P を掲載しておきます。

http://www.hitachi-metals.co.jp/products/auto/el/p0_7.html

ネオジウム磁石の特徴としては、**錆びやすい**ので銅メッキ（銅下）の上にニッケルメッキ（Ni-Cu-Ni）やエポキシ樹脂コーティングしたものが標準であること、硬いが割れやすい（衝撃に脆い）こと、比抵抗はアルニコに近い（導電性がある）こと、キュリー温度が低いこと（約 300℃：使用温度は 200℃以下）などです。

磁性体の物性については、

http://www.neomag.jp/mag_navi/mames/mame_physics.html

を参考にしてください。

磁気回路については、前述したように専用のシミュレーションソフトがあるため、現在では種々の磁石特性を生かした設計が可能になっています。したがって、磁気回路に関しては磁石による優劣は基本的に無いと考えられます。内磁型構造にするならばパーミアンス係数を考慮してアルニコがベストですが、最適設計すれば、どの磁石を使っても諸歪を最低限に抑えることができるということです。もちろん Q C D（品質、コスト、供給）のバランス、V C や振動系とのバランスを考えることが、商品としてはより重要になります。

廉価ユニットの場合、コストを考えればフェライトの選択が妥当ですが、磁束密度が低くなる（駆動力係数 B_l が制限される）ため振動系を軽くするなどでバランスを取ります。

2. 3. 7 アルニコ磁石にメリットあり？

アルニコ磁石を使った場合の音質が高く評価されている記事を時々見かけます。同一条件で比較することができないので具体的な比較コメントは控えますが、良くできた「内磁つぼ型ヨーク」のアルニコ 5 磁気回路で以前実験したときには、同じ振動系という条件でフェライト磁石を使った磁気回路で組んだ時より音の抜けが良かった記憶があります。

内磁型（アルニコ+ **T 型**ポールピース）の磁気回路だったので、前後駆動に伴う自己インダクタンス M_s の非対称による非線形歪が少ない分、中域の抜けがよくなるのは当たり前ののですが・・・。（銅キャップは無し・・・だったと思います）

それ以外の相違は、背面の開口率がつぼ型ヨークのほうが良い、ポールピースと磁石、ヨークから作られるバックキャビティが大きいなどが挙げられます。（図 2.3-13 破線内）

実験時の VC ボビン材質やエア抜き穴の有無は全く記憶がないため、あくまで想像の域を出ませんが、エア抜き穴が無い場合には、キャップと VC ボビンで囲まれたエリアの空気がスチフネスの大きなバネ要素となるため、このエリアとギャップでつながっているバックキャビティの大きさは低域の音質にシビアに効いてくる可能性があります。

（図 2.3-13 のイエローグリーン破線内側）

低域の音質に関しては、ひとつにはこの部分のスチフネスの差の影響が大きいと考えられます。

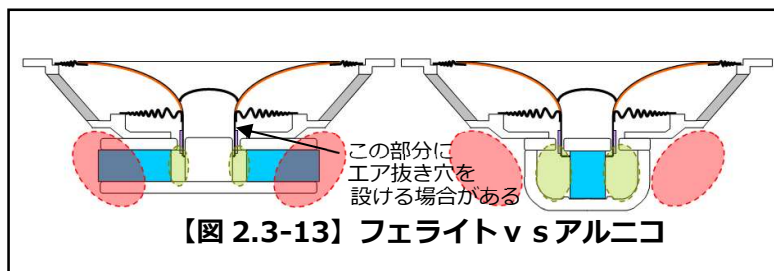
アルニコの場合は **T 型**ポールピースだったためギャップ部分以外はボビンが構造体

から離れているため内側空間が流動抵抗になりにくい（＝前後駆動で流動抵抗が変化しない）のに対し、フェライト磁気回路の場合には前方に駆動するほど流動抵抗が減り、逆に後方に駆動するほど VC とポールピースとの間に流動抵抗が増える（ボビン内面とポールピースの間に狭い空間が増える）ため自己インダクタンスと同様に非線形歪要素となります。

急に狭くなっている隙間構造（流動抵抗が発生する）を『オリフィス』と呼びますが、実験時、フェライト磁気回路の場合には T 型ポールピース構造ではなかったため、前後駆動によってオリフィスの長さが変化するため非線形歪が発生したということです。

たぶん、アルニコ神話が生まれたのは、こういった**磁石そのものの以外の要素（構造的な非線形による歪要因）**によるところが大きいのではないかと考えられます。磁石だけの違いを云々するのであれば、このような形状要素も出来る限り揃える必要があります。

相違点をもうひとつ。フェライトの比抵抗がアルニコのそれに比べて高く（フェライト： $100\Omega \cdot \text{cm}$ 以上、アルニコ： $5 \times 10^{-4}\Omega \cdot \text{cm}$ ）、アルニコはフェライトの 10^{-6} 程度になります。絶縁体に近いフェライトの場合には、ギャップにおける電界（ヨークとトッププレート間の電位差）の影響もあるかもしれません。ただし、渦電流も疑い、ヨークとトッププレートをアルミ箔で導通させた（磁気回路全体を包んだ）ことがありましたが、音質にも特性（高調波歪）にも大きな差はありませんでした。



【図 2.3-13】 フェライト v s アルニコ

2. 3. 8 逆起電力の発生原理とそれに起因するタイムドメインでの非線形歪

2. 3. 8. 1 発生原理

VCに発生したローレンツ力Fは振動系実効質量 M_m に対する駆動力となり、以下の運動方程式（ニュートンの第二法則）が成立します。

この式は、振動系質量が慣性質量（力を加えても直ぐには動かず、動き出すと直ぐには止まらない：遅れ系）であることも表しています。

$$\dot{\mathbf{F}} = \mathbf{M}_m \dot{\mathbf{a}} = \mathbf{M}_m d \dot{\mathbf{v}} / d t = \mathbf{M}_m d^2 \dot{\mathbf{x}} / d t^2 \quad \dots (式 2.3-3)$$

$\dot{\mathbf{a}}$: 加速度、 $\dot{\mathbf{v}}$: 速度、 $\dot{\mathbf{x}}$: 変位

振動系の一部であるコイルが動くことで、コイルを貫通する磁力線数が変化（ $dB/dt \neq 0$ ）と、ファラデーの右手の法則（レンツの法則 ※）に従ってコイルには駆動を打ち消す（磁力線数の変化を打ち消す）方向の電流が流れ、結果的に電圧（逆起電力：E）が誘起されます。逆に磁力線数が変化しなければ誘起されないということでもあります。

※ レンツの法則：電磁誘導では電磁場の変化を打ち消す方向に誘導電流が発生するというもの。

これはモーターが回転駆動と共に発電（回生ブレーキ）を行っていて、コイル分圧 iR と逆起電力 E とでバランスしているのと同様です。（ $iR = -E \Rightarrow iR + E = 0$ ）

モーターの駆動を OFF しても慣性で回転し続けることで逆起電力が残存するため、ブレーキを作動（発電）させることが出来ます。最近の電気自動車の CM ではありませんが、「（アクセルを）踏めば加速、離せばブレーキ」は車という慣性負荷を駆動するモーターの特性を表す表現として、そのものズバリの言葉です。

これは、モーターの構造上、一定磁界ではなくコイルを横切る磁界が常に変化して駆動力を得ていることに因ります。スピーカーユニットでは、電流変化 $\Rightarrow$ 運動エネルギーへの変換だけを生かし、磁界変化 $\Rightarrow$ 電流への変換を抑圧することを理想としているのが、モーターと一番異なるポイントになります。

逆起電力も作用・反作用や熱力学第二法則（放っておくと、お湯の温度が常温になる）と同じで、自然界の基本的な秩序であるエントロピーを極大にする動きに他なりません。

これは、排除は無理ということを意味します。

逆起電力 E は、磁束 Φ 、磁束密度 B とすると、以下のように表されます。

$$E = -N (d\Phi / dt) = -NS (dB / dt) \quad \dots (式 2.3-4)$$

N : コイルの総巻き数 [T (ターン)] 、 S : コイル断面積 [m^2]

（式 2.3-4）は、磁束変化を打ち消す方向（－符号）に逆起電力が生じることを表わしています。（電磁制動＝線形要素）

係数 NS はコイルの固有値になります。これ（巻き数と VC 径）を小さくすることが逆起電力の低減になります。

磁束密度 B の変化 dB/dt の発生には、次の 2 種類が考えられます。

一つ目は駆動電流の変化に起因して発生した変動磁界による均一磁界への変調によるもの（電流変動依存）、そしてもう一つは磁気回路が発生する磁界の非線形によるもの（位置依存）になります。

(a) 一つ目ですが、導線に流れる電流 I が一定だった場合、微小導線 dl から半径 r だけ離れた位置で電流 I によって生じる磁束密度 B は、ビオ・サバールの法則により、

$$dB = \{ (\mu_0 / 4\pi) / r^3 \} \cdot (dl \cdot r) \cdot I \quad (\text{実際の磁束密度 } B \text{ は } dl \text{ を積分して求めます})$$

dl : 微小長さ、 $\mu_0 = 1.256637 \times 10^{-6}$ [H/m]: 真空透磁率

1 ターンのコイルを周回する音声電流の変化を dI/dt とすると、 $l = \int_0^{2\pi} r d\theta = 2\pi r$
 n ターンのコイル中心位置での磁束密度変化 dB/dt は、

$$dB/dt = \mu_0 n \cdot dI/dt$$

(式 2.3-4) を時間微分したものに代入して

$$dE/dt = -NS (dB/dt) = -\mu_0 n NS \cdot dI/dt \cdots (\text{式 2.3-5})$$

$\therefore S = \pi r^2$ 空芯コイルの半径 r と総巻数 N はユニットの固有値になります。

また音声電流変化 dI/dt によるローレンツ力の変化 dF/dt は (式 2.3-1) より

$$dF/dt = B \cdot dI/dt \cdots (\text{式 2.3-6})$$

(式 2.3-5) と (式 2.3-6) は同時に起こる (電流に対して時間遅れ要素の無い) 現象です。

次に、空芯コイルでなく磁性体がコイル内部にある場合を考えます。

変動する駆動電流 dI_s の周りに発生する磁界変分 (自己誘導) $d\Phi_s$ は

$$d\Phi_s = dB_s \cdot S = \mu \cdot n \cdot dI_s \cdot S \cdots (\text{式 2.3-7})$$

B_s : 磁束密度 S : コイル断面積 = 磁束の貫く面積

n : 単位巻き幅あたりの巻数 μ : コイル内媒体の透磁率 [N/A^2]

この磁界が均一磁界を変調すると考えると、(式 2.3-4) を時間微分したものに代入して、

$$dE_s/dt = -\mu n NS \cdot dI_s/dt$$

↑ (式 2.3-5) と比較してください

ここで $n = N/w$ w : 巻き幅

$$\therefore dE_s/dt = -\mu (N^2/w) S dI_s/dt$$

$$\text{または } dE_s/dt = -\mu (n^2 w) S dI_s/dt$$

V C の巻線構成と内部環境による自己インダクタンス M_s は (式 2.3-2) (式 2.3-5) より

$$M_s = \mu n NS = \mu N^2/w \cdot S = \mu n^2 w \cdot S$$

$$\therefore dE_s/dt = -M_s \cdot dI_s/dt \cdots (\text{式 2.3-8})$$

これも符号はマイナスなので反力として働き、モーターの場合と同様にV Cのインピーダンス Z_L と直列に M_s が入っているのと等価になります。

2.3.4 項にも示しましたが、 M_s が一定であれば $\Delta E_s \propto dI_s / dt$ で問題はないのですが、駆動される領域内では M_s の要素である透磁率 μ の値が純鉄 ($\mu \approx 5000$: 磁気回路のギャップより内側部分) とギャップから外れた空芯コイルになる部分 (空気の $\mu \approx 1$) とで大きな差があり、これも非線形歪 (逆起電力の変動) の原因になります。(図 2.3-6 参照)

(b) 二つ目ですが、こちらは均一直流磁界を離れた (ギャップから離れた) 部分での現象になりますが、「ローレンツカによる駆動」の結果、コイルに発生した遅れ要素 (歪) であるということが重要です。コイルの移動 (均一磁界から食み出す) に伴いコイルを貫通する磁気回路による直流磁束密度に変化 (変調) が生じ、結果としてコイルに逆起電力が生じます。

これは位置依存の直流磁界が非線形 (均一直流磁界範囲が有限) であることに因ります。

細かく工程を追ってみると、① 音声入力 (電流) をコイルに印加 $\Rightarrow$ ② ローレンツカ発生 (式 2.3-1) $\Rightarrow$ ③ 振動系の慣性質量を駆動 (式 2.3-3) $\Rightarrow$ ④ 均一磁界 (B/l が一定) を食み出すとコイルを貫通する磁束が変化 $\Rightarrow$ ⑤ コイルに誘導電流発生 (レンツの法則) $\Rightarrow$ ⑥ 逆起電力発生 (式 2.3-4) というメカニズムです。

遅れの要因は慣性系にあり、(式 2.3-1) のように一定のローレンツカが発生した場合、慣性質量が大きいと加速度が小さくなり変位が遅れてしまう (式 2.3-3 に応じて所定の変位に達するまでに時間がかかる) ことになり、ローレンツカ発生から時間経過後に磁束密度変化 dB/dt が発生します。(エネルギー遷移の途中に遅れ系が入る)

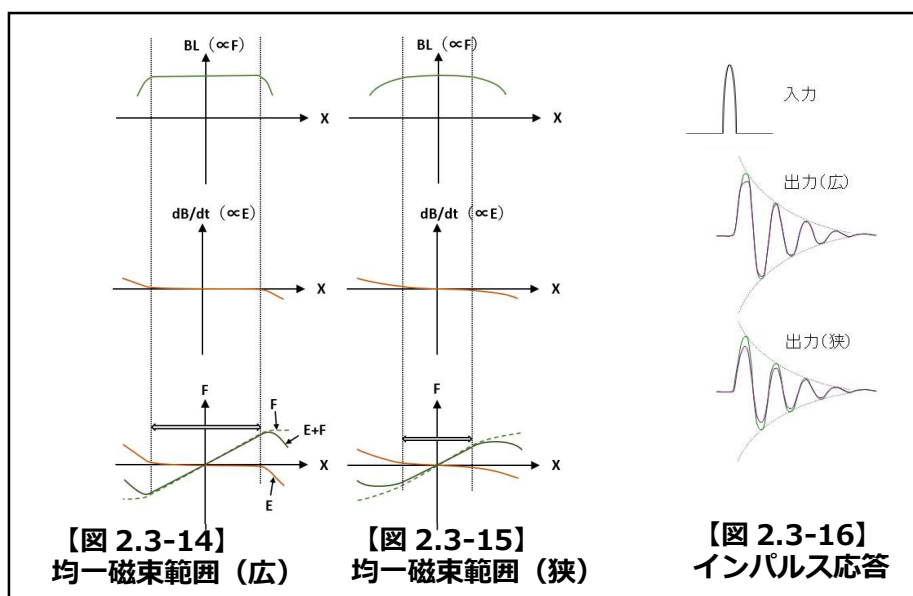
遅れ要素が大きいと低音の再現性 (特にタイムドメイン要素であるトランジェント) に影響が出ます。また、ウーファ用 VC の場合に放熱や駆動力を増強するために径を大きく (S 増加) して巻き数 N を増やすこと (式 2.3-1 の l を大きくすることに等価) が行われますが、これは (式 2.3-4) より逆起電力を増長することに他ならないことが分かります。

「逆起電力が大きいのは駆動に対する制動が大きいことなので過渡特性 (収束性) が良く、ダンピングが効いた音がする」と言われることがありますが、これは半分間違いで、ローレンツカが均一磁界中での駆動電流の変化に起因しているのに対し、二つ目の逆起電力は (式 2.3-3) に示す運動方程式にしたがい、VC が遅延して変位することで (式 2.3-4) に示す二次的に発生した磁束密度の変化に起因している (均一磁場では生じない = 均一磁界から食み出す = ノンリニアな磁場領域に入る) ことで発生することからも入力にリニアであるべきダンピングは一つ目の電磁制動 (線形) のみで、二つ目の逆起電力 (非線形) は歪そのものだと分かります。十羽ひとからげで考えるのは正しくないということです。

2. 3. 8. 2 結果としての非線形歪

慣性系に付き物の減衰振動は、次の 2.4 項「振動板・・・」で詳しく述べますが、(図 2.4-5) 過渡応答の出力 5 に描いたように臨海減衰に近い形（インパルス応答の半波 + α のみで収束）になるのが理想形ですが、現実はそのようにはならず、(図 2.4-5) の出力 1～4 に示すようにある収束時間を持った減衰振動の挙動になります。これは機械要素だけを考慮した場合の挙動で、以下に示すように逆起電力により「別の変化（変調）」も生じます。

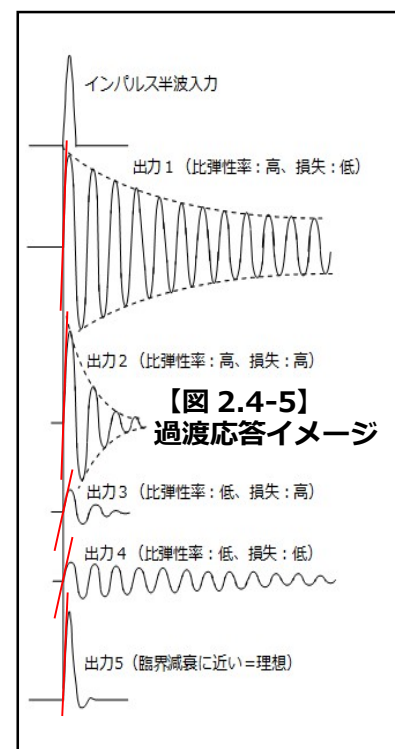
磁気回路を工夫して均一磁束範囲（磁場）を広くした場合（図 2.3-14）と未対策の場合（図 2.3-15）の駆動力係数 Bl 、磁束密度変化 dB/dt 、駆動力 F を例として示します。



(図 2.3-14) の場合は、均一範囲では dB/dt が小さくならぬ（逆起電力もほぼ 0）で、範囲を外れると dB/dt に比例して逆起電力も急激に大きくなります。結果、変位と駆動力の関係は一番下の緑色の曲線のように急激な変極点を持つものになります。

一方、(図 2.3-15) 未対策の場合には狭い均一磁場を外れても dB/dt が緩やかに増加（非線形逆起電力も増加）し、駆動力はローレンツ力とほぼ相似形（急激な変極点を持たない）になります。対策品、未対策品それぞれのインパルス（ステップ入力ではなく正弦波半波入力）応答をシミュレートしたのが (図 2.3-16) ですが、対作品（上）では大入力（大振幅）で歪が発生するのに対し、未対策（下）では逆起電力の発生する入力範囲は広くなりますが大きな変極点が無いので非直線歪の変化は緩やかです。当然、対策した磁気回路では、均一磁場の範囲で駆動すれば逆起電力の影響は小さくなります。

人間の聴覚は急激な非線形歪に敏感なため、大振幅では対策品の歪がクローズアップされることもあります。(実例を後述)



全てが同時に（時間遅れ無く一瞬に＝慣性質量の影響なく）、且つ、他の要素の影響無く起きている事象（例えば作用反作用や渦電流による電磁ブレーキなど遅れ系が入らない＝同時進行）は「（線形）制動」と言えます。（2.3.8.1 で示した一つ目(a)が相当）

逆起電力がベクトルとしては駆動と逆方向に作用するためにすべてがダンピング（制動＝エネルギーを同時進行で消費）と勘違いされる方が多いのだと思います。逆起電力は、消費ではなくローレンツ力に逆符号（逆方向＝エントロピー極大の方向）でベクトル加算されるという認識が正しく、2.3.8.1 項で示した二つ目(b)の遅れ系の場合には、時間軸で見ると（図 2.3-16）に示したように波形（非線形）歪でしかないことが分かります。

逆起電力の影響については、第四章『DF と逆起電力』に詳しく記述していますので、そちらを参照してください。

30 年くらい前、ゴトーユニット SG-38WNS（ギャップ磁束密度が 18000G＝1.8T くらいの超弩級ユニット：「磁性金属」の項で述べたパーメンジュールを磁路に使用）をウーファに使ったシステムを大音量で聞かせていただいた経験がありますが、低域のゴリゴリした迫力（制動された重低音）はあったものの、アタックの質（トランジェントの良い立ち上がり）と余韻の質（ミュートされたようなアタックの消え方）に違和感がありました。

たぶん、超弩級均一磁界（均一で大きな駆動力係数 B/l ）が実現できていてギャップ内では正確にピストンモーションする環境にあったけれど、振動系の実効質量が大きいためにリニア領域から慣性で食み出てしまい、ギャップから外れた部分での逆起電力の影響（タイムドメインで遅れて、急激に dB/dt が大きくなる⇒波形ピークが頭打ち）が払拭できなかったのだと思います。打楽器の低音のアタックだけがオーバーダンプ気味に詰まって（生では音離れが良いのに）遅れて出てくるように感じたのを憶えています。

昔、JBL ウーファの VC 径が $\phi 100$ くらいあってフォースファクタ B/l と放熱対策が単純に凄いな～と感嘆させられましたが、B&W の 800 シリーズをはじめとする最近のスピーカーシステムに使われているウーファユニットの VC 径がさほど大きくないのに気付かれた方もいらっしゃると思います。

これは、① PC シミュレーションにより磁気回路や放熱の最適化設計ができるようになったこと、② 比弾性率が高く適度な内部損失を持つ新素材複合振動板の開発で振動系慣性質量の軽量化が実現できて駆動加速度を落とさないことが可能になったためと思われます。慣性質量が大きいとトランジェント特性が悪化することが常識になったためでもあります。

上記の内容を整理すると、均一磁場の外で生じる逆起電力そのものは「悪」ではなく「必然」である。その影響を減らすためには、運動方程式（式 2.3-3）より、① 実効質量を小さくする、② 駆動加速度を十分に大きくする（＝駆動力係数 B/l を大きくする）、逆起電力を示す（式 2.3-4）より、③ 均一磁界範囲を広げる（ dB/dt を小さく抑える）ことをバランス良く追求することが、理想に近付けるために重要になってくるということです。

すなわち、駆動ストロークが必要な低音再生に関しては、どんなに磁気回路設計を工夫しても、はたまたロング VC にしても均一磁場から外れることを避けられず、どうしても dB/dt が変化して大きくなるため、逆起電力による（駆動に対し時間遅れと非線形変化のある）駆動と逆方向の力がノンリニアに加わります。これは**タイムドメイン歪**に他なりません。

VC 径を小さくして巻き数を減らすのは、駆動力や熱対策を優先するウーファの場合には難しい課題になります。

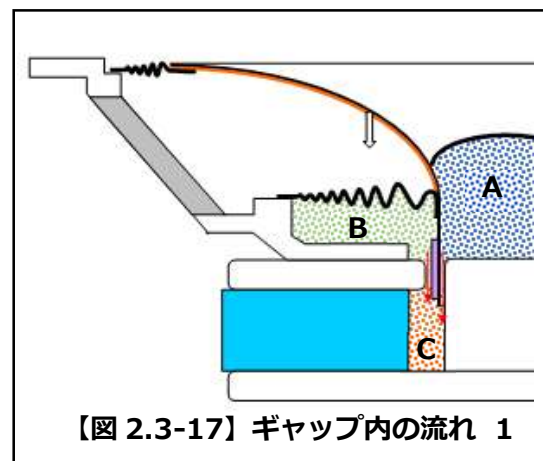
磁気回路が振動系に求める要求指標としては、駆動対象の**質量を小さくすること**（加速度最大）が主になります。ところが振動系において音質に大きな影響を与える分割振動（モード共振）を出来る限り排除するためには**強度が重要**で、それには**質量増加が避けられない状況**にあるといえます。「あちらを立てればこちらが立たず」になりますので、個別最適を求めず、どのあたりでバランスを取るかが重要な判断になるということです。

2. 3. 9 ギャップ内の空気の流れ

磁気ギャップには VC が挿入されていて前後に動くため、それぞれの構造物で区切られた空間には圧力差が生じます。

ダストキャップと振動板、VC ボビン、およびポールピースで囲まれた部分（閉空間 A：図 2.3-17 青色塗り潰し部分）は VC ボビン内壁とポールピースに囲われた狭い空間だけで磁気回路内の閉空間 C とつながっています。

また、ダンパーとハウジングで囲われた部分（閉空間 B：同図の緑色塗り潰し部分）も同様にボビン外壁とトッププレートに囲われた狭い空間だけで磁気回路内の閉空間 C とつながっています。



【図 2.3-17】ギャップ内の流れ 1

空気は粘性を持った流体であるため、振動板が高速で動く時には空間 B は**ほぼ閉空間として機能**し、結果的に VC ボビン内外の狭いギャップ空間にはオリフィス構造（2.7.4 項【エッジレス】で説明しています）が形成されます。

（図 2.3-17）は振動板が後方に動いた場合を示していますが、空間 A、B の圧力が共に高くなるので、VC ボビン内外のオリフィスには空間 C に向かって高速の流れ（赤矢印）が生じ、ボビンがトッププレートとポールピースに接することを防ぎます。ただし、密閉度は空間 $A > B$ のため、ボビンには圧力差により外周に向かう方向の力が加わります。

この時、VC の駆動方向とオリフィスの**流れの方向は同じ**になります。振動板が前方に動いた場合も現象は同様で、向きが逆になるだけです。

この現象は VC 駆動の安定には効果がありますが、スチフネスがリニアに変化するエアダンパーとしても機能するため、機械要素としては減衰要素になり Q （共振先鋭度）を小さくします。結果として、振動板の微小振動エネルギーは減衰要素により熱に変わってしまうので、再生音響出力の Dレンジが狭くなります。

これを抑えるために、(図 2.3-18) のようにポールピースに通気穴を開けることが一部の高級ユニット（特に中低域用の高耐入力を要求されるユニット）では行われます。

結果、空間 A はオープンエアに近付き、空間 B、C の関係は変わりませんが、A がオープンとなることで圧力は $C > A$ となりボビン内側のオリフィスには駆動と逆方向の流れが生じるため、ボビンの下部に渦が生じる可能性があります。

(図 2.10-4) にも示してありますが、空間 B をオープンエアにするために空間外周部（フレーム）にエア抜き穴を設ける対策を実施すると、ボビン内、外周のオリフィスの流れは共に駆動方向と逆になります。未対策と同様にオリフィスによる安定性は確保され、且つ振動系のオーバーダンプを防げます。

(図 2.3-19)

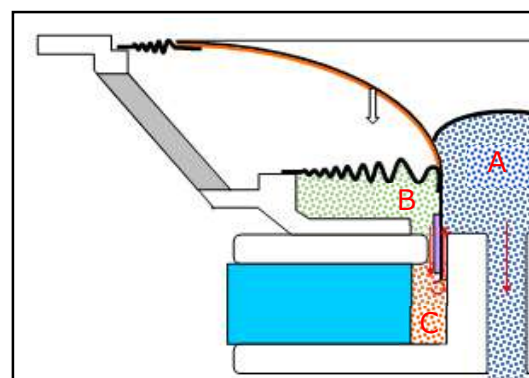
更に空間 C もオープンエアにするとオリフィスは殆ど機能しなくなる半面、振動系はストレスフリーになるため、共振での機械 Q が大きくなります。(図 2.3-20)

ただし、オリフィスによる安定性は期待できません。ここでオリフィスのメリットは機械的偏心や傾きに対して矯正方向に働くことなのでユニット構造自体に機械精度が求められることになります。

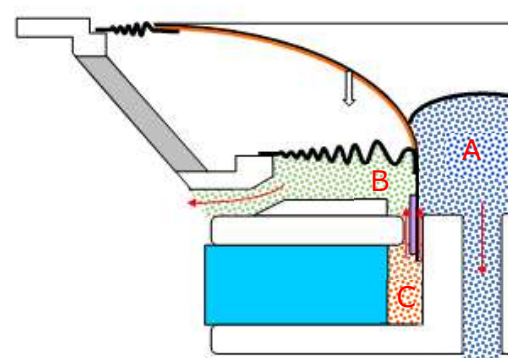
この方法に関しては、2.14 項に示した Raidho Acoustics 社製ウーファの実績があります。

本来は、閉空間によるスチフネス上昇は上記のように機械構造的に解消し、軸保持は振動系の支持構造でキチンとコントロールできるようにするのが正道と思いますが、コストや耐久性を勘案して妥協するメーカーがほとんどです。

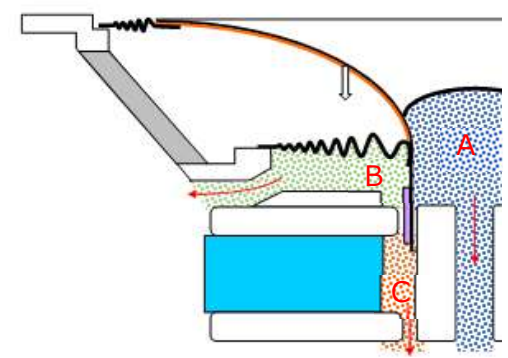
オリフィスが機能して、且つスチフネスの上昇を防げる(図 2.3-19) あたりが落としどころで、2.10.3 項に示したように、欧州系高級ユニットには、この構造が多くなっています。



【図 2.3-18】ギャップ内の流れ 2



【図 2.3-19】ギャップ内の流れ 3



【図 2.3-20】ギャップ内の流れ 4

2. 3. 1 0 励磁方式について

励磁方式は、永久磁石の代わりに電磁石を使うものです。

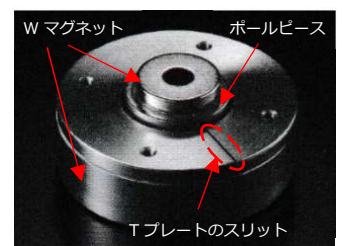
ポールピースに励磁コイル（フィールドコイル）を巻くことにより、磁気回路を構成します。したがって外部に直流電源が必要になります。磁束密度 B を電流で制御（電圧可変）できるので、電気 Q ファクタ Q_{es} のコントロールが可能です。

情報不足のため詳細は割愛します。国内では DEER（ローヤル産業）や Feastrex（アイビークーアイ）から製品が出されています。

2. 3. 1 1 トッププレートの渦電流歪について

渦電流（Eddy current）については 2.5.1 項で説明しますが、VC を流れる音声電流によって周囲に生成された交流磁界はトッププレートに渦電流を生じさせます。それにより、直流磁界の変調が起こります。

アルミ VC ボビンと同様、トッププレートの半径方向にスリットを入れることで、これを防ぐことができます。三菱 CS-4NB70 のウーファで実践例があり、低歪化に貢献しています。



By Pinterest

2. 4. 振動板に要求される性能と技術トレンド

2. 4. 1 相反する要求

振動板はローレンツ力^①で駆動されることで音響出力を直接放射する部分であり、① **比弾性率 E/ρ** が高く（軽くて強く）、且つ、② **内部損失**が大きい（余計な振動はしない＝低歪）という「相反する特性」が求められます。

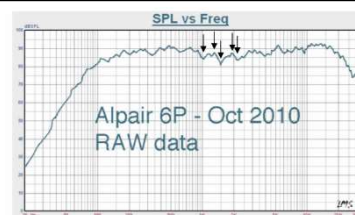
この特性を満たすために、基材の材質、カーブ形状、表面二次加工（改質、コーティング、金属スパッタ、樹脂含浸など）、補強（リブ、コルゲーションなど）、といった各種項目に関して継続的に開発が為されてきました。基材については、紙に始まり、純金属、各種合金、合成樹脂／繊維、新素材、およびそれらの組み合わせ（コンポジット材）など多岐に亘^{わた}っています。設計では、いかにこれらの要素をバランス良く取り込むかがポイントになりますし、それはひとえに設計者のセンス次第です。実際には理詰めが八割ですが、ひらめきや「瓢箪^{ひょうたん}から駒」のような常識では考えられないところから思わぬ解答が得られることもあります。

ホーレー（米国）やクルトミューラー（ドイツ）製の紙振動板がもてはやされた半世紀前に、21世紀には金属製の振動板がこんなに幅を利かせているなんて誰が考えたでしょうか。

弾性率 (elastic modulus) : 材料に外力（＝応力）が加えられたときに、その材料の変形しにくさ（歪まなさ）を表すもの。歪は無名数なので応力と同じ単位。弾性変形における応力／歪の比例係数。**弾性係数**とも呼ばれる。単位は $[N/m^2]$ $[Pa]$ 。引張力とせん断力に対するものがあるが、通常は引張力に対する**ヤング率 E** を指す。

比弾性率 (elastic modulus ratio) : 弾性率／比重 (E/ρ) を表す。振動板の単位質量あたりの強度にあたる。単位は $[Nm/kg]$ （比重は kg/m^3 ）。

内部損失 (internal loss) : 材料に外力が加えられたときに、そのエネルギーがどれだけ減衰するか（減衰比）を表すもの。無名数。



【図 2.4-1】分割振動 F 特



【写真 2.4-1】分割振動モード

合理的な設計と音質が評価されているマークオーディオのAlpairシリーズでは浅い形状の紙プレスコーンや金属コーンを採用することで、薄くて軽いのに剛性を得ることに成功していますが、中域以上の帯域ではどうしても**分割振動（モード共振）**が起きてしまい f 特（周波数特性）が暴れます。モード共振では、後述 2.4.2 項の様に振動板に逆相で振動する部分（次ページのモード（1,1）以降）が発生するため音圧が急激に低下する周波数がモード毎に存在します。（図 2.4-1 矢印部分）

FOSTEX の HP（双曲線放物面：金属系の項で後述）などのように振動板自身の形状を工夫したり、補強リブ形状などを工夫したり、コニカルドーム（後述）などを貼り付けることで多少は分散できますが限界があり、その共振周波数（（図 2.4-1 矢印部分）や（写真 2.4-1）のような分割振動（共振）モード※の発生する周波数 $f_{1 \sim n}$ ）を高域に押し上げるのはヤング率（または比弾性率）の大きさで、且つ、その Q を低く抑えるには内部損失があればこそ可能になります。（図 2.4-1、2 は転載禁止）

2. 4. 2 分割振動と共振モード

ここで、分割振動について説明しておきます。

(図 2.4-3) は、代表的な低次共振モードを模式化したものです。

(0,1) とあるのは、振動板全体が同相で共振する基本モードを表しています。**第一項**の「0」は半径方向に**節(振幅0)**が無いこと(=腹(振幅最大)が全て同相で動く)を表していて、「1」になると節が直径方向に1本入るため、半円面が**+変位**、もう一方の半円面が**-変位**(逆相: 腹の振幅方向が逆: (1,1) のグレイ塗りつぶし部分)になります。「2」になると、それぞれ隣り合う4分割面の変位が逆相になります。⇒ 図 2.4-3 の(2,1)

第二項の「1」は口元と外周だけが節となっている(腹が1ヶ所ある)ことを表し、「2」になると内周口元と外周との中間円周方向に節(同心円)が1つ(腹が2ヶ所)入ります。「3」になると同心円の節が2つ(腹が3ヶ所)入ります。

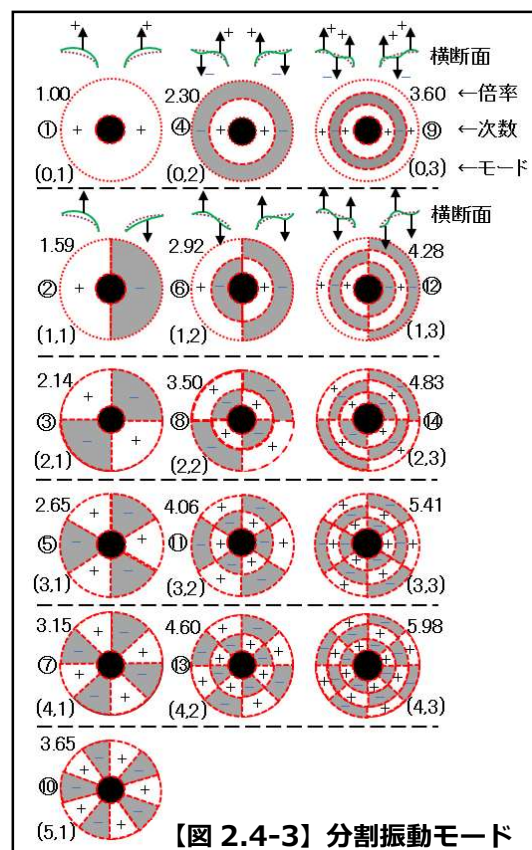
それぞれのモード共振周波数比(単純円盤とした場合)を(表 2.4-1)に表しました。(表の黄色塗りつぶし部分が図 2.4-3 の上半分に対応: 顕著な周波数ディップが生じる)

(図 2.4-4) では、振動板表面変位をちょっと大きめに描画していますが、ストロボスコープ※などで可視化すると、実際、このようにベコベコと波打って見えます。周波数倍率が変化するにしたがってモードもどんどん変化することが分かります。

分割振動を始めると、ピストン領域で考えていた挙動とは全く異なるものになるのが分かります。

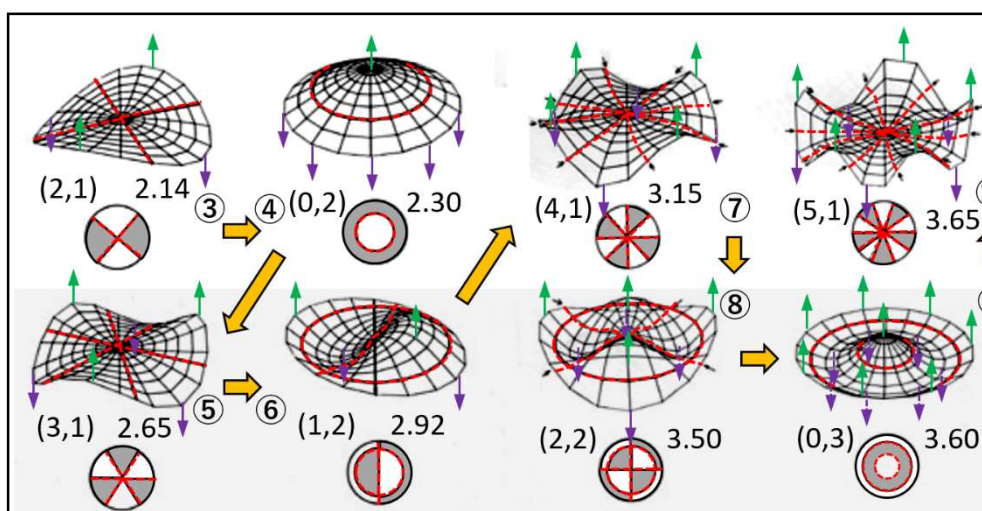
		第二項 同心円の数					
		1	2	3	4	5	6
第一項 節線の数	0	1	2.3	3.6	4.9	6.21	7.51
	1	1.59	2.92	4.28	5.45	6.85	8.16
	2	2.14	3.5	4.83	6.15	7.47	8.78
	3	2.65	4.06	5.41	6.75	8.07	9.39
	4	3.15	4.6	5.98	7.32	8.66	9.99
	5	3.65	5.13	6.53	7.89	9.24	10.57

【表 2.4-1】分割振動モード 倍率一覧



【図 2.4-3】分割振動モード

※ ストロボスコープ: 周波数に合わせてフラッシュ光を発する機器
同期すると止まって見える



【図 2.4-4】分割振動モードの遷移 ③ ~ ⑩

振動板がピストンモーションで駆動されれば周波数特性はフラットになるはずですが、モード共振により振動板表面に駆動方向と逆に変形する部分が生じるため、その面積や振幅によってモード共振周波数で周波数特性にピークディップが生じます。

(図 2.4-1) 参照

単純化のため、当図は中心駆動&外周開放円盤(エッジ無し)の振動モードを表示しています。

2. 4. 3 インパルス応答

次に、(図 2.4-5) のようにインパルス（矩形波ではなく正弦波の半波）入力に対する振動板 Assy の応答特性（過渡応答特性）を考えてみます。

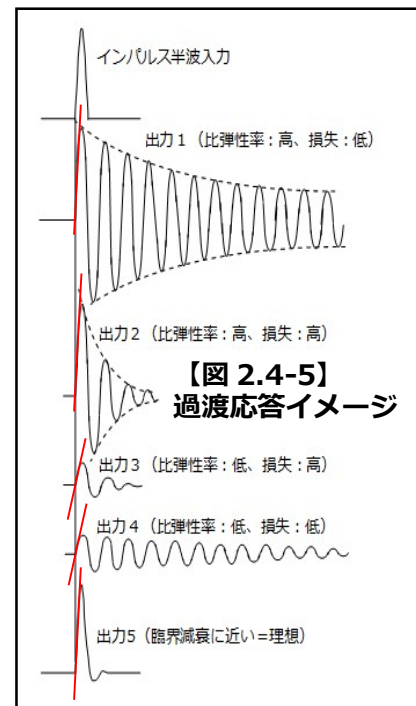
実際には、このようなインパルス波形というのは自然界では稀有なもので、質量がある以上、どんなものが音響出力を発生しても必ず減衰振動を起こします。ソースとして現実的ではありませんが、応答性（波形再現性）の評価方法としては（時間領域で扱えるため）最適といえます。

応答を材質毎にザックリ分けると、出力 1（高弾性率、低損失）は金属系、出力 3（低弾性率、高損失）は発泡 PP や軟質塩ビなどがあたります。

出力 5 のように臨界減衰に近いものが理想ですが実現には難しく、せめて出力 2 のような中庸・・・というより「出力 1 と 3 の良いところを兼ね備えたもの」を狙って色々な材料や形状が検討されてきました。

評価の仕方ですが、出力の立ち上がり（初期応答性：赤線の傾斜）は振動板の加速度に起因します。出力 3 や 4 のように立ち上がりの傾斜が緩やかだと波形再現性をスポイルします。これは $d^2x/dt^2 = dv/dt$ （伝達加速度）が低いということで、比弾性率が低い、振動系質量が大きいなどが主な要因になります。

また振幅が減衰せずに残る（収束性が悪い：出力 1 や 4 に相当）ということは、振動板内部での熱損失（振動エネルギーを熱エネルギーに変える）が少ないということで、振動板出力に「本来、入力に無い情報」が付加されてしまうということになります。



【図 2.4-5】過渡応答イメージ

減衰振動特性の対数減衰率 δ および減衰比 ζ (D-Factor) は、

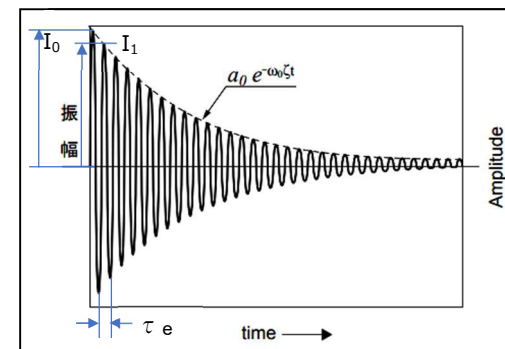
$$\delta = \log_e (I_0 / I_1) = \zeta \cdot \omega_0 \cdot \tau_e$$

$$\zeta = \delta / \omega_0 \cdot \tau_e = \delta / 2\pi$$

$$= 1 / 2Q \quad \dots (式 2.4-1)$$

I_0 : 初期ピーク I_1 : 次ピーク τ_e : 時定数 = 繰り返し周期

$\zeta = 0$: 減衰せず、 $\zeta = 1$: 臨界減衰 通常は $0 < \zeta < 1$ 、 $\zeta > 1$: 過減衰



【図 4-6】減衰波形と包絡線

(式 2.4-1) の Q はユニットの総合先鋭度 Q_{ts} に相当し、

$$Q_{ts} = (Q_{es} \cdot Q_{ms}) / (Q_{es} + Q_{ms}) \quad \text{の関係があります。}$$

ここで電気系先鋭度 Q_{es} 、および機械系先鋭度 Q_{ms} は

$$Q_{es} = \omega_0 \cdot M_{es} \cdot R_{es} / (B/I)^2 \quad \dots (式 2.4-2)$$

$$Q_{ms} = \omega_0 M_{ms} / R_{ms} \quad \dots (式 2.4-3)$$

(式 2.4-2) は、駆動力係数 B/I が大きくなると Q_{es} が抑えられることを表し、(式 2.4-3) は振動系の実効質量 M_{ms} に比較して内部損失（機械抵抗 R_{ms} ）が大きいと Q_{ms} が抑えられることを表します。

波形再現性の面では、比弾性率が高く（強度を保持したまま質量 M_{ms} を小さくでき）、且つ内部損失 R_{ms} が大きいことが有利であることが、これらの式から分かります。

2.4.4 技術トレンド

※ 改質：添加することなく本来持っている素材の性質を変えること

特に最近では、振動板の材質改善(改質※)に関しての話題に事欠きません。

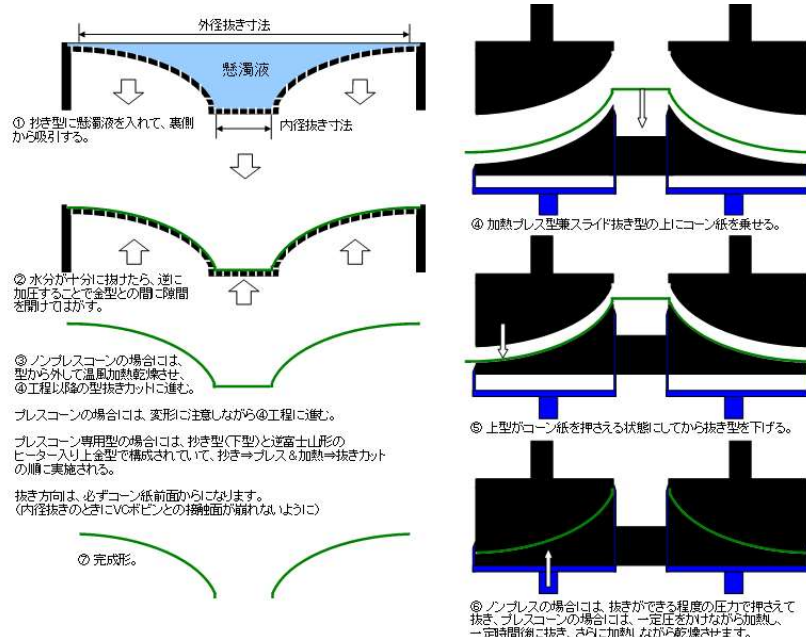
ここでは従来の振動板（繊維系＝紙ベース）で培われた手法を元に、それに関する技術トレンドについて述べていきます。

2.4.4.1 抄紙（繊維系）

抄紙と言うのは、天然繊維や合成繊維、種々の添加物、色素などを水に分散させたもの（懸濁液、叩解液、解繊維液などと呼ばれます）を型で抄く作業のことです。和紙の「手抄き」を想像されるかもしれませんが、ちょっと違います。抄紙金型は叩解液を溜めるために逆富士山のように凹型になっています。金型には水を抜く穴がいくつも開いていて、強制的に裏側から負圧力をかけて穴から水分を抜きます。手抄き型のようにメッシュ金型（細かい金網）の場合もありますが、密度を上げるために強制的に吸水するところは前出と同様です。

ノンプレスコーンの場合には、吸水後に型から外して温風で乾燥させます。この時、繊維密度は叩解度（繊維の砕き具合）と叩解液濃度、吸水圧力と吸水速度に関係します。

プレスコーンの場合には、抄き型から外してプレス型（こちらは作業性から金型は富士山型が多く、アイロンのように加熱されています）で上下から挟み込んで成形します。抄き型を下型にして上型を加熱してプレスする複合型もあります。密度はノンプレスの条件のほかにプレス圧と金型温度およびプレス時間が加わります。上下金型の形状を微妙に変えて、厚さと密度の分布をコントロールするものもあります。プレス、ノンプレスともに最後に抜き型（ビク型）で口元と外形を抜きます。スライド型を組み合わせたプレス／抜き同時金型もあります。以下に概略工程を示します。これらの工程をアレンジすることで理想的な物性に近付けようと各社が鎚を削ってきました。



【図 2.4-7】
抄紙～プレス工程

具体的な例として、まず、FOSTEX の Sol シリーズに使われている『**2層抄紙**』について記してみます。Sol では、厚さ 90 μ m (FE-83sol の場合) のうち基層の約 80 μ m まで長繊維（叩解度を浅くしたもの）を使ってノンプレス（吸引のみ）で抄紙し、表層 10 μ m くらいに叩解^{こうかい}※時間を長くして良く砕いた短繊維を重ねて抄いているようです。

※ 叩解：本項冒頭にあるように植物繊維を機械的な方法でほぐすこと。一般には解^{かい}繊とも呼ばれる

想定製法は、① 先に長繊維（基層）を抄き、② 次に短繊維（表層）を抄き、叩解液の量で層厚（実効質量）をある程度コントロールし、③ 抄紙後、軽く熱プレスして密度を上げる（表層側のみ加熱？：アイロン掛けの要領）が考えられますが、① 短繊維を抄いて熱プレス成形したものを富士山形の抄き型（厚さの均一化は穴の数と大きさで制御？）に載せ、② 改めて長繊維を抄き、③ ノンプレスで温風乾燥させる方法かもしれません。

このようにすると、基層はノンプレスなので内部損失が大きくなる一方、表層はプレスされて比弾性率が高い状況となるため、振動板に求められる ①軽く、②強靱で、③しなやか、④特定の周波数で共振しにくいなどの性能をかなり高いレベルで満たすことができます。（製法&工程はノウハウで、各メーカーの機密事項になるため詳細は**想定レベル**です）

①、②は比弾性率（弾性率／比重）、③、④は内部損失と積層による共振分散（異種金属の張合わせと同様の相互ダンピング効果：層間での熱エネルギー損失）が主要因子になります。

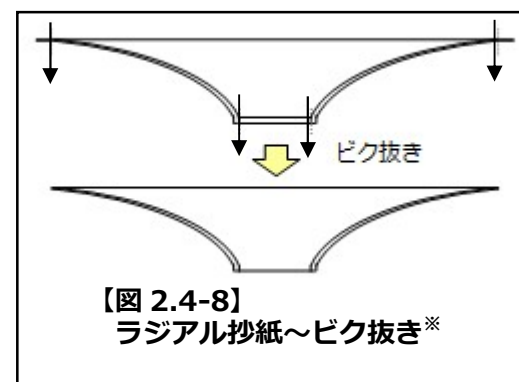
複数層の抄紙自体は特別新しい技術ではなく、私自身も 30 年以上前に岐阜特殊紙（現・株ギフトク <https://gifutoku.co.jp/>）に頼んで試作してもらったことがあります。

高域 F 特の暴れが減り、おとなしく素直な音だった記憶がありますが、工程が増えるのでバラツキが大きく手間がかかるため C/P が悪いので実際の製品には投入できませんでした。

通常は、吸水穴の数や径を場所によって変えて、どの部分もほとんど同じ厚さになるようにしている抄紙工程ですが、『**ラジアル抄紙**』といって中心を厚く、周囲に向かうにしたがって薄くする方法があります。中心部分の強度は確保し、どうせ分割振動する外周付近は質量軽減メリットを優先するという割り切り発想です。振動板全体に均一な強度を持たせようとするれば外周部ほど厚くなり、とてつもない質量になりますので発想としては尤もです。

抄紙は、逆富士山金型で等分に穴を開ければ（図 2.4-8）のよう傾向になりますが、中心部分の繊維量を増やすように、吸水穴の数や径を変えたり、吸水時間（叩解液を溜めておく時間）を制御したり、場合によっては、分割抄紙（複数回抄紙：1 回目は口元だけを抄き、2 回目に全体を抄く）により制御する方法もあります。 ※ 薄い板状の刃（ビク）で型抜きすること

いずれにしろ、管理に手間がかかりますので、コストアップになってしまいます。



紙系の振動板には、針葉樹系の木材チップ（最近では環境問題からケナフなどの促成植林材も使われます）と和紙の材料である楮^{こうそ}や三桠^{みつまた}、雁皮^{がんび}など**韌皮繊維**^{じんぴ}を混合して使用します。

楮は繊維が長く、和紙の強さを左右する材料で、栽培が容易な三桠と共に紙幣の材料としても使われています。雁皮の繊維は元々短く、粘りがある（ヘミセルロースが多い）ため和紙のツルンとした滑らかさを出しますが、暖かい地方でしか得られないため、岐阜や富山およびそれより西の地域の和紙に使われてきました。

抄紙に関しては、工場によって、それぞれノウハウがあります。

① 材料の配合比と② 叩解手順（材料毎に叩解してからブレンドするか、材料をブレンドしてから叩解するか）で変わり、さらに③ 叩解度合いは水質（硬／軟：軟水が向いている）、水量、水温、叩解器（ビーター）の構造で異なり、且つ、叩解時間、回転刃のスピードや形状、刃の新旧でも変わります。これらの要因により、繊維の長さ（繊維の主体であるセルロース、ヘミセルロースの残留割合も）が変わり、元々細胞間に存在して抄紙では繊維間の充填材（接着剤・クッション）の役目をしているリグニンの抽出量も変わります。（韌皮繊維ではリグニンの含有量は4%程度、一般の植物では10～20%）

叩解にはセルロースの表面積を増やす（ケバ立たせる）ことで水素結合数を多くして、強度をアップする効果もあります。模式的にはセルロースやヘミセルロースが比較的ストレートな形状で、リグニンが縮毛のような形状と考えると理解しやすいと思います。

参考情報ですが、リグニンは茶色なので白色洋紙の製造工程では**脱リグニン処理**と脱色（漂白）を行います。⇒ 白い紙は振動板に必要な内部損失や粘りが減少してしまいます。

^す抄き～成型工程では、**ノンプレス**（乾燥のみ）で済みますか、プレスも行うか、ノンプレスの場合には吸引力（圧力）と吸引スピード、それらの詳細要因である水抜き孔の大きさや形状、メッシュの粗さなど、プレス工程がある場合には金型温度、プレス圧、プレス型表面の粗さや突起（protrusion）やリブ（rib）を設ける場合にはその形状・・・かなりのパラメータが相互に関連しており、全てを管理するのは至難の業です。

反面、**多種のパラメータを使って物性を広範囲で変えることができるのが繊維系振動板の最大のメリット**と言えます。

2. 4. 4. 2 形状

振動板形状については古くからコーンの名称通り円錐状、富士山型が多いのですが、後述するFOSTEXのHR（Hyperbolic-Paraboloidal Rotation 双曲放物線回転体）などでは表面形状を工夫して強度と共振モードを管理することでピストンモーション領域を広げる工夫がなされています。軽く、且つ、高強度という「相反する要素」をバランスよく実現するためには材質だけでなく**形状要素が大きな比重を持つ**ことになります。音波面だけを考えれば、点音源を想定した**ドーム型が理想**かもしれませんが、平面波に近付けるためにはコーンを浅くする必要があり、強度とのバランスを考えなければなりません。

2.4.4.3 補強

表面にカップ状の補強（**コニカルドーム**または**ハンプ hump**）を複数個（奇数個）接着剤で貼り付けたものを20年くらい前まで見かけましたが、上手く設計しないと強度アップや振動モード分散より質量増加のデメリットが大きかったのが実情でした。元々はRCAビクターのアイデアでしたが、技術を引き継いだ日本ビクターが商品化していました。IK-38（後にIK-380）という口径38cmの3Dスーパーウーファ（オーディオ評論の草分けである池田圭さんとのコラボ）や名機SXシリーズのウーファにも連綿と使われ続けてきました。



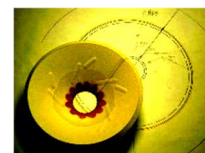
JVC / VICTOR BLA-80 with RCA LC1A



VICTOR SX-7



SX-10split



By Pinterest

非対称や複数の同心円（**コンセントリック**）リブを抄紙金型に盛り込むもの（右写真）、裏面に放射状のリブ構造を貼り付けて補強するものもありました。これらの補強は繊維系振動板が主でしたが、PP成形やカーボン繊維の成形品にも応用されていました。

最近では金属系も含めて一体成形技術が向上し、軽くて剛性が高く、前項のHRなどの特殊な形状も可能になり、高級品を中心に貼り付け補強は急激に減りました。

2.4.4.4 新素材（CNF）

VCボビンの項目で採り上げている**CNF（セルロースナノファイバ）**を混抄した振動板を使ったものが、2016年にPioneerからS-PMシリーズ（S-PM30/50）として製品化されています。ウーファ2本と受け持ち帯域の広いツイーターの2ウェイシステムでしたが、そのツイーター（φ50コーン型）に使われました。50nm（0.05μm）程度の太さのCNFと、その100倍以上の太さ（20μm～）の各種繊維とを単純に混抄するという方法がそのまま実現できるとは思えません（CNFがすり抜けてしまう）ので、CNFとPE樹脂などとのコンポジット繊維を混抄したものか、架橋剤（お互いを架橋させて繋ぐ添加物）を混ぜるか、シート状に加工したCNFをパルプと組み合わせてプレスしたものでしょうか。

想像で話をするのは危険ですが、2層抄紙のように伝播速度の速い樹脂コンポジット繊維（シート）を先に（荒い網のように）成形して、それに通常の紙繊維（内部損失大）を裏から抄いたら良いのではと考えてしまいました。

製品化はまだですが、短くカットした芳香族ポリアミド繊維とCNFを**熔融混練**^{※1}したもの（比弾性率E/pはパルプ繊維の約2倍、内部損失は約1.6倍）や、キチン質繊維に**架橋剤**^{※2}を添加しパルプと**3次元化混抄**^{※3}後に加熱整形したもの（E/pはパルプ繊維の約4倍、内部損失は約2倍）などが実験室レベルで実在します。（図2.4-13 物性分布表を参照）

※1 熔融混練：樹脂成形の場合に加熱してミキサー（粉碎機）やエクストルーダー（混合器）で混ぜること

※2 架橋剤：鎖状高分子のところどころを結合させるための添加剤

※3 3次元化混抄：文字通り立体的に架橋させた状態で抄くこと

富山県のスギノマシンは加工機器のメーカーですが、ウォータージェット切断機のノウハウを生かして CNF を試供しています。パルプの解繊[※]に高速高圧水流（ウォータージェット：噴射圧力～200MPa）を使い後述する ACC（カウンターコリジョン）法による CNF 製造を実現しています。同社の製品 BiNFi-s（ビンフィス）シリーズ 8 種のうち低解繊[※]・極長繊維（IMA：数十μm 長）を用いたものをカー用振動板材料としてフォスター電機（FOSTEX の親会社）に供給しています。（情報源にしたがい、叩解でなく、あえて「解繊」としました）

<http://www.sugino.com/site/biomass-nanofiber/lineup.html>

<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00454497>

前述の Pioneer のツィーターに使われた CNF は、同じ富山県に本社を置く製紙企業「中越パルプ工業」製になります。ご存知のように Pioneer と ONKYO は販社を統合（オンキヨー&パイオニアマーケティングジャパン）しており、S-PM シリーズは Pioneer ブランドのもので、ONKYO ブランドからはホーンツィーターとの組み合わせで有名な Scepter シリーズとして SC-3 が市場投入されています。こちらはウーファへの採用です。

中越パルプ工業では、上述のスギノマシンと同様に ACC 法（水中対向衝突法）を採用した nanoforest シリーズを商品化しています（というより、設備はスギノ、パルプ材料は中越のコラボでは？）。前工程で粗解繊を行って歩留まりを上げ、リーズナブルなコスト実現に努力し、鹿児島川内工場に専用設備を導入するなど、本気度が伺えます。

<http://www.chuetsu-pulp.co.jp/wordpress/wp-content/uploads/2018/10/nanoforest.pdf>

ウォータージェットの圧力（200MPa ⇒ 運動エネルギー：134kJ/mol）は、グルカン[※]シート（表面が疎水面となるポリマーが繋がったシート構造）間のファン・デル・ワールス力は開裂させられますが、シート内部の水素結合は開裂させることができないので、「疎水部分が露出した CNF」（叩解液の中で分散しやすい）の状態まで解繊^{ほぐ}することができます。

機械的に引きちぎるのではなく、弱い部分だけを選択して解すように、やさしく解繊するイメージです。疎水性を有するため、樹脂との親和性が高くなります。

※ グルカン：セルロースの基本分子β-グルコースが水素結合の一種であるグリコシド結合で繋がったポリマー。

スギノマシンでは、植物由来のセルロース以外にエビ、カニ、甲虫由来のキチン質やキトサン（キチンをアルカリ処理して酸溶液に溶けるようにしたもの）をベースにした CNF を試供しています。いままで捨てられていたこれらのバイオマスを活用する意味でも評価できますし、バイオセルロースと呼ばれるように生体適応性も高いため、医療分野での活用や食品添加物としても使うことができます。植物由来のセルロースでは中越パルプ工業との WIN&WIN を狙ったコラボを推進し、一種アンテナショップ的な役割を担っているのかもしれない。

2. 4. 4. 5 ウッドコーン オブリコーン

天然繊維系では紙のほか、木材の薄板を成形したもの（現・JVC ケンウッド）などもありますが、日本ビクターがまだ元気だった 20 年以上前に前橋工場の今村さんと桑波田さんが開発したものです。開発秘話として「成形時に割れてしまうのを日本酒で柔らかくして防いだ」というのはあまりにも有名です。

VC ボビンがクラフト紙の場合に相性が良さそうです。思い切ってボビンにも採用したら・・・ただし繊維の方向（年輪）があるので比弾性率が面の各所で均一ではないと思われます。それが定型振動パターンを生じさせないのであればメリットと言えるでしょう。

JVC といえば日本ビクターの時代から『**オブリコーン**』（合成語・・・Oblique：斜めに傾いた、偏った＋Cone：振動板）という偏心コーンを採用していて、カタログでは「同心である時に現れる定型振動パターン（モード）が生じない」というメリットを強調していました。

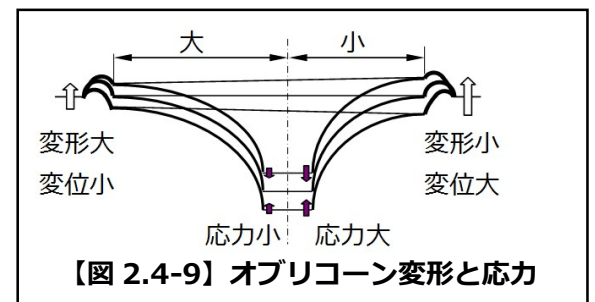
構造がアシンメトリーであれば分割振動に対称なパターンは生じないはずでメリットは大きいと思いますが、駆動中心からエッジの外周までの長さが場所により異なるため強度や振動モードに方向性が生じ、駆動時の変位量によって振動板の変形量が異なり、結果的に VC に加わる応力ベクトルが駆動に従い変化するデメリットはどうやって吸収しているのでしょうか？（図 2.4-9）

VC 部分で揺動（ローリング、ピッチング、ヨーイング）が少なからず起こることを想定し、抄紙やプレス成形金型設計の際に振動板の板厚分布や吸水穴分布を制御して強度分布を均一化したり、駆動時にオフセンターを許容するダンパーやエッジの形状をシミュレートしたりと言った対処をしてあるのでしょうか。これも形状に特徴を持った振動板のカテゴリーに入りますが特殊な管理が必要なため、採用するメーカーは非常に少ないです。

変化に対して融通（＝エントロピー極大[※]）であることを狙うのは安定した結果を提供しますが、オブリコーンのようにエントロピー鞍部（変曲点）でのバランス（偏った条件を上手く満たす）を狙う場合には上記のように職人芸的な不安定要素が伴う反面、途轍もなく良好な結果を提供することもあります。

※ エントロピー：ある閉じた系では 常に乱雑な状態（自由度増大）に推移するが、その指標量。大きいほど安定。

安定点（極大）、特異点（鞍部）のどちらを狙うかは設計者のセンスの問題でもあります。メーカー製の多くは量産性（歩留まり）、コスト（C/P）、安定性などを優先して安定を採ることになります。



2. 4. 4. 6 マグネシウム（金属系）

純金属の物性に向き合ったのが、FOSTEX の GX シリーズに採用されている『**純マグネシウム振動板**』です。元素としてのマグネシウム（Mg）はヤング率 E に関してはチタンなどより低いのですが、比重 ρ がアルミの約 6 割強、チタンの 4 割弱と**軽い**ことにより非弾性率 E/ρ としては、ほぼ横並びとなります。音の伝播速度もほぼ同等です。特筆すべきは**内部損失がチタンやアルミの約 2.3 倍**で、振動板材料として以前より有望視されてきました。

現在、マグネシウム合金は市場に^{あふ}溢れていますが、マグネシウムの特質である**内部損失の高さはマグネシウムの純度が高くないと出現しません**。純度を上げると成形加工性が極端に悪くなる上に、**耐食性が悪い**こともあって**表面処理が必要**なことから振動板への導入が実現していませんでした。

パイオニアなど数社が面積の小さなツイーターに採用したことがありましたが、FOSTEX ではウーファ化に果敢に取り組み、**チクソモールディング**（半熔融状態で気密射出成形）の条件を細かく設定し何回にも分けて温間プレスすることで双曲線と放物線を組み合わせる回転させた特殊な表面形状 **HR**（Hyperbolic-Paraboloidal Rotation）を実現させました。

この形状は特定の共振モードを回避する目的があり、結果としてピストン振動領域を広げることができます。 ※ 表面に十分な厚さの酸化被膜が無いと**腐食**する

純粋なマグネシウムは**酸化しやすい**※ので、防錆処理は**陽極酸化と薄膜電着塗装**の組み合わせで対応しています。（陽極酸化被膜の表面は褐色マットなので、表面に電着塗装を施す：下写真）

ONKYO ではヘッドフォンの振動板に応用していて、防錆処理も同様です。 <https://kakakumag.com/av-kaden/?id=3869&page=2>

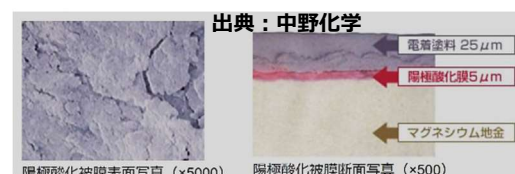


By Pinterest

2. 4. 4. 7 MAOP

一方で、金属単体や合金による物性改善だけに留まっている時代は終わろうとしていて、表面の『**改質**』により弾性率の高い金属振動板に**いかに適度な内部損失を持たせるか**が課題となってきたようです。

最近、Mark Audio が金属振動板に採用している『**MAOP (Micro-Ark Oxidation Process 微小アーク放電による陽極酸化皮膜生成法)**』ですが、基材はアルミニウムとマグネシウムの合金で、これを**アルカリ電解槽の溶液中で約 700V の電圧を長時間かけて陽極酸化皮膜形成処理を行ったとあります**。マークオーディオによると、全 5 層で（5 工程に分けて）形成されているとの事です。（**接着層 x 2 層**（**boding layer** が上手く訳せませんでした・・・）と酸化膜 20 μ m x 3 層から成るようです。たぶん①酸化膜生成、②接着層生成、更に酸化膜、接着層・・・という具合に積層し、最後に酸化膜を生成するということではないか：酸化膜が厚くなると生成速度が極端に下がるため、合金層に代わる接着層（**boding layer**）というものを形成し、酸化膜生成を続けるのだと思います。



通常、アルマイト（酸化皮膜）の生成には酸電解槽が使われますが、MAOP 場合にはアルカリ電解槽を用います。表面にはコロイド形成による**軟質多孔質膜**が生成します。

この際に、バリア層～コロイド凝集層間で高電圧印加による微小アーク放電が起こることが命名の由来と思われます。アルカリ電解槽で長時間かけて生成した多孔質の孔（**ポーラス** porous：連通気孔＝スポンジ状の孔）は大きく、且つ、疎であるため、目視では表面が白くなるとされます。アルマイト（酸電解槽での酸化皮膜形成）の場合には、ポーラスは小さく、且つ、密であるため光沢面もしくは半光沢面となります。

参考文献は以下の通り。

https://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj1970/20/4/20_4_164/pdf 近畿大学 吉村教授

FOSTEX の 2 層抄紙が表面に伝達速度が速い層を形成しているのに対し、MAOP の場合には表裏両面に軟質多孔質層を配し高速伝達は基質によって行うという考え方になります。

軟質多孔質（ポーラス）層とは言っても硬い酸化皮膜であるアルマイトの中では軟質ということであって、**植物繊維のように十分な内部損失が得られるわけではありません。**

どちらかと言うと、物性の異なる金属同士の貼り合わせによるダンブ効果に近いものを期待しているのではないのでしょうか。開発者の Dr. マーク・フェンロンは「コーンの表面に沿って伝わる『微小共振パターン』を分散させる効果がある」と述べています。

たぶん、ランダムな場所に発生している不定形孔が定在パターンでの共振を抑える（例えるなら舗装路を走るのではなくデコボコ路を走ると車の速度は微妙に変わり、一定ではなくなる＝進行波による定在波の Q を低くする～分割振動の周波数を分散させる）と言いたかったのではないのでしょうか。言葉でなく振動モード（モーダル解析図）や分割振動域の F 特比較、パワースペクトラムなど**視覚に訴えると説得性が上がる**と思います。そう言った面では B&W の解析力には目を見張るものがあり、社内では、振動板評価のための必須事項としてモーダル解析が実施されているようです。分割振動の挙動をシミュレートするには最適な手法だと思いますし、尺度の不明確な聴覚との相関根拠を何に求めるかを明確にすることは**企業ポリシーを示す意味でも重要なポイント**になります。

2. 4. 4. 8 IMX、A-OMF、Rohacell® 多層構造&樹脂系複合材

上記のように金属表面処理（改質）によって素材本来の物性以外に新たな性質を求めるものとは異なり、2 つ以上の材質を貼り合わせた多層構造での層間エネルギー消費（内部損失）による改善例を以下に記します。

単純に**低発泡 PP 樹脂**を成形しただけの振動板は、廉価版のカーオーディオやテレビ、ミニコンポ、AV サラウンド機器用以外はほとんど見かけなくなったような気がします。

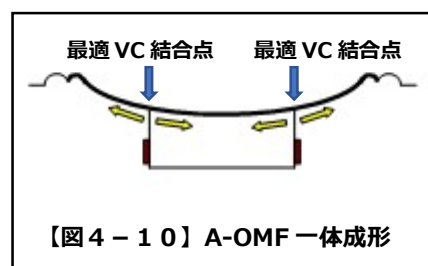
低発泡 PP 振動板の内部損失は十分とれるのですが、比弾性率が低すぎて微小音の再現性が悪くなり鈍くて大味な音になります。おまけに接着性が悪く、扱いにくい材料です。

昔は食いつきの悪い材料の接着は表面を紙やすりなどで荒らしてから行っていました（アンカー効果：2.7.8 項 接着剤を参照）ので、**プライマー**（接着補助剤）の使用は生産性アップに大いに寄与しましたが、吸湿により性能を発揮しなくなる「風邪ひき」が起こるため、開封後は冷暗室での保管がマストになります。

PIONEER 車載用 TS-Z171PRS では3層構造の『**IMXファイバーコーン**』を採用しています。「アラミド繊維とガラス繊維が混在したスキン材の間に発泡 PP と**アラミド**（芳香族ポリアミド：ケブラー®やテクノーラ®などが有名）樹脂素材との混合材を注入して一体化している」と説明にあります。表面に比弾性率の高い FRP 材料を、内層にはQが低く損失が期待できる発泡材料と表層との親和性を考えて同系樹脂を混合した材料を配した構造です。このように樹脂系振動板も各種複合材が主流になってきました。

ONKYO では、極細のアラミド繊維と帆布（綿、麻、^{あま}亜麻などで平織りにした厚手の布：ズック）を重ねて **PEN**（ポリエチレンナフタレート）樹脂を含浸し、中央のVC穴を廃し一体成形した **A-OMF**（Advanced Onkyo Micro Fiber）**モノコック振動板**を実用化しています。VC コイルとの接合はモード解析により最も共振モードの立ちにくい部分（分割振動開始周波数を高域に追いやる）の裏面に設定しているとのことです。（図 2.4-10）

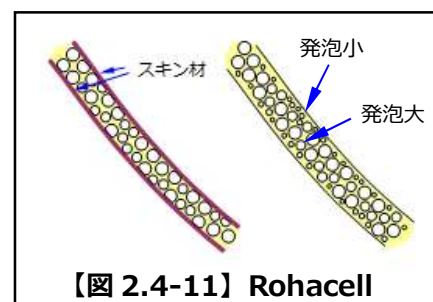
積層や含浸による1つの解だけではなく、さらに構造的な工夫をそれに重ねて複合解を求める典型です。1 + 1が1より十分大きければ正解。お互いが相殺することで1より小さくなることもあります。常に足し算になるというのは単なる幻想です。



【図 2.4-10】A-OMF 一体成形

『**Rohacell**®（PMI：ポリメタクリルイミドを主体とした硬質**独立気泡**発泡体）』は、ドイツ Rohm 社が開発した素材（社名頭（Roh）+単独（a）+セル（cell）が命名の根拠）で、航空機にも使われている材料になります。

金属のみと比較して強度を落とさず軽量化する目的のために（図 2.4-11 左）のように表裏両面を金属でサンドウィッチする構造（ヘリコプターのローターブレードなど：実際には金属中空物に注入して発泡させる）が主で、連続発泡ではスポンジのように発泡した空洞が連続するため強度劣化するのに対し、気泡が独立性を保つため発泡倍率に応じた強度を確保できます。



【図 2.4-11】Rohacell

フランス Cabasse 社製同軸3ウェイユニットのウーファ部とミッド部の振動板に使われているものは表面の気泡構造を後加工（内容不明、表面のみ冷却？）して密なスキンを形成させています。スキンは同一材料で気泡が小さい構造なので比弾性率が高く、内部は大きな独立気泡構造のために大きな内部損失を持つので、2層抄紙に近い物性になっているものと思われます。（図 2.4-11 右）

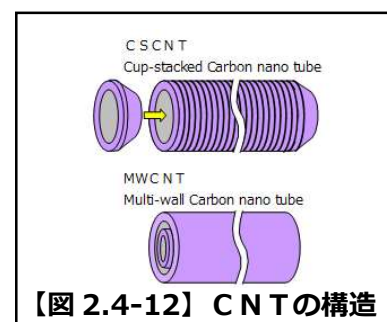
FOCAL 社では、ロハセルを挟むスキン材に金属ではなくグラスファイバーを使用したサンドウィッチ構造を採用しています。こちらは前述の I M X ファイバーコーンに近い物性になると思われます。

B&W 社の 800D3 では、旧製品 800D2 までのロハセルから**マイクロバルーン**を拡散した樹脂材料（syntactic foam **シンタクティックフォーム**）への変更を行っています。マイクロバルーンは、微細中空ガラス球、微細中空フェノール樹脂球のほか、**セノスフェア**（シリカとアルミナの微細球体に不活性ガスの入ったもの）が主流です。シンタクティックフォームは決して新しい素材ではなく、50 年以上前から潜水艦のボディや海洋ブイなどに使われていて、水に浮かぶほど軽量で且つ強度があり、ロハセルと異なり**気泡の大きさ（バルーン直径）を揃えることができる**メリットがあります。D3 のウーファで採用した厚さを径方向で変える（内周と外周の断面が薄いレンズ型：エアロfoil形状）振動板に応用する場合、ロハセルでは薄いほど気泡が小さくなる（ロスが小さく、比重が大きくなる）傾向があり、**均質とはならない**ため B & W はそれを嫌ったのだと思います。因みに表面材にはカーボンファイバークロスを採用しています。

2. 4. 4. 9 CNT（カーボンナノチューブ）

もうひとつのトレンドとして **CNT** を使った複合材があります。

ダイヤトーンでは、**NCV（Nano Carbonized high Velocity）** 振動板を 2016 年に発表しています。CNT を数種類の樹脂とコンポジットしたものを射出成形したものです。使用される CNT は、**MWCNT（多層 CNT）** のように細い CNT に何層かの CNT を多軸に重ねるような構造ではなく、浅いカップ形状の CNT を長手方向に積層することで中空チューブ構造を形成する **CSCNT（Cup-Stacked CNT）** で、コンポジット成型することで CNT 本来の強度が高く（伝達速度はチタンより速い約 5.6km/s：紙製は 2km/s 前後なので 3 倍弱）、且つしなやかな特性（MWCNT はチューブ形状なので半径方向に弾性があるが曲げ方向には硬く、CSCNT は上記構造により曲げに対するフレキシビリティも併せ持つ）を生かすことに成功しています。（図 2.4-12）



<http://www.jas-audio.or.jp/jas-cms/wp-content/uploads/2015/04/009-013.pdf>

<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news-data/2010/pdf/1025-a.pdf>

※Be：（原子番号 4）強度は鉄の 6 倍でアルミニウムより軽い

一部の MWCNT（直径 100nm 以下：MWCNT-7）では発がん性が認められ使用不可ですが、**アスベスト**と同じような理由（細長く尖った形状が肺組織に刺さって留まる）からで、それ以上のサイズについては問題ありません。毒性では、**ベリリウム**※が有名（切削加工時に発生した塵を吸い込むことでベリリウム肺症を引き起こす）ですが、毒性が認知される以前は、多数の企業でツイーターの振動板に使われていました。

2. 4. 4. 10 スライドリングマテリアル (Slide-ring materials)

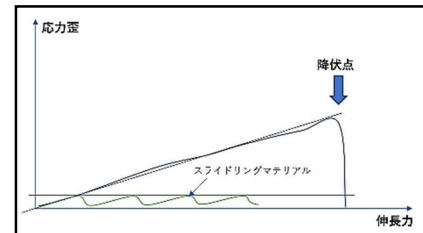
故中島平太郎さんが創設した NH ラボが開発した NH-B1(W1)という卵型スピーカーの振動板に『スライドリングマテリアル[®]』という聞き慣れない材料が塗布されています。

通称「分子ネックレス」と呼ばれる構造を持っていて、他の樹脂と架橋（ポリマー同士の接合点）を形成した場合に架橋点が滑車効果で自由に移動することを特徴としています。・・・と言っても、言葉で説明しても分かりにくいと思います。

<https://www.nanonet.go.jp/magazine/feature/10-9-innovation/72.html>

の図2、図5を見ていただくのが一番早く理解いただけると思います。

要は、外力が加わった場合に「スライディング効果」が起きて応力を溜めることなく変形（エントロピー弾性変形）し、外力が無くなると架橋している位置が元の状態に復帰します。



無理な力が架橋した構造に加わらないということで、通常のエラストマー（ゴムも含む）と異なり弾性構造ながら常に応力歪が小さく抑えられるメリットがあるということです。通常、外力が大きくなればなるほど歪（位置エネルギー）はそれに応じて大きくなりますが、スライディングが発生すると一定以上にはならないのです。塑性変形の範囲（可逆範囲）であれば、外力によって弾性体に与えられた運動エネルギーは応力歪という位置エネルギーとして蓄えられて徐々に熱エネルギーに変換されますが、スライドリングマテリアルの場合には位置エネルギーとして蓄えられずに架橋点の運動エネルギーとして消費されてしまうということです。イメージとしては、「暖簾に腕押し」が当たっていると思います。（右上にイメージ図）

ただし、スライディングは塑性変形するのではなく、弾性変形の範疇で元に戻ります。

非弾性率の高い金属の表面（または裏面）にスライドリングマテリアルと架橋した樹脂を塗布することにより、インパルスによる減衰振動のうち不要な2波以降のハンチングを極小に抑えることができます。（図 2.4-5）出力2のハンチングが抑えられ、出力5に近付くということです。塗布量をコントロールすることで、金属ベース材の非弾性率を下げずに最適な損失を得ることができるはずで、結果的に内部損失 $\tan\delta$ と Q の両方をコントロールすることができます。

参考：<https://www.asmi.jp/product/>

セルム エラストマー SH 2 4 0 0 P

スライドリングマテリアルの代表例としてポリロタキサンのモデリングを（図 2.4-13）に示します。



シクロデキストリン（黄色いリング部分）が他の樹脂と架橋（ポリマー同士の部分連結）して、ポリエチレングリコールに沿って移動すること（滑車効果）で応力歪を低減します。

相互に緩い結合にすることでロスを生むという意味では、次に記載する B&W の Woven Kevlar（和訳すると「編まれたケブラー」）の考え方と似ています。

2. 4. 4. 11 Woven Kevlar & Continuum

B&W のミッドレンジで最近使われている**コンティニウム**（連続体）コーンですが、かなり細い繊維の表面にコーティングを施したものを編み込んだ構造になっています。

以前はかなり太いケブラー繊維を編み込んだもの（**Woven Kevlar**）で強度重視でした。

コンティニウムも **Woven（編まれた）** 構造ですが、繊維が細くしなやかになっているのが特徴です。メーカー曰く、「立ち上がりより立下り（減衰）の特性が良く、**直ぐに収束**するので S/N が良い」「ダイヤモンド振動板トウイーターと同じ変化が起こった」そうです。

言葉の意味は、インパルス入力に対して立ち上がりをスポイルせずに臨界振動（＝減衰比 0.5＝理想の収束性）に近付けることができたということでしょう。

これも（図 2.4-5）の出力 2 を出力 5（理想）に近づける方法のひとつになります。

Woven Kevlar の特許が切れた 1990 年代後半からはケブラー繊維にエポキシ樹脂などを含浸して強度を上げて一体化させた FRP（**Rigid Woven Kevlar**）が他社から続々と発表されましたが、これらは**特許の内容を全く理解していないもの**になります。

Woven Kevlar の一番の特質は、**繊維相互を一体化させない**ところにあります。

固めて一体化すると**固有音**（共振音＝カラーレーション）が発生します。固めないで繊維が編み込みになった状態では、ミクロ的に繊維が相互に動くことによって**分割振動が分散される**（摩擦熱によるロスが生じて Q を低く抑えると共に振動板形状による固有振動モードが立ちにくい＝**応力集中しない**）ため、**共振の大きなピークがでにくい**ことを利用しているのです。前述のスライドリングマテリアル（架橋部分が移動して応力を吸収）に似た動作ですが、繊維方向に固有振動モードがしやすいのが Woven Kevlar のデメリットなので、柔軟なコンティニウムコーンに変更したのでしょう。

800D3 の場合には、音質的にも「スピード感」は落とさずに「柔らかい」「しなやか」「静粛」と表現できるものになっていて、分割振動の発生し始める（1 次共振モードが（1,1）になる）周波数 f_1 を高くすることと、振動板の共振 Q を低くすることに成功しています。

ミッドレンジが受け持つのは人間が歪を一番検出しやすい（感度が高い）帯域です。

この帯域に Q が低く減衰特性の良い振動板材料を使うことは正しい方向性と言えます。

2. 4. 4. 12 ポリマークレイコンポジット PCC (Polymer Clay Composite)

「クレイ」というのは「粘土」のことで、最近オープンで焼けるクラフト粘土が有名ですが、それらを含め、PCC は樹脂に粘土素材を添加したものを指します。

マイカ（雲母）、バーミキュライト（園芸用で使う多孔質の蛭石^{ひる}）、タルク（滑石^{かつせき}：含水珪酸 Mg）などの粘土素材をフィラーとして一定量を限度として樹脂に添加（一定以上添加すると成形性が極端に悪くなる）したもので、工業用としては「焼き上げる」ことで耐熱性やガスバリア性を向上させたフィルムや同じ目的の塗布材が市場に出回っています。

上記のように添加量を増やすと取扱いが難しくなるのですが、産総研では「どうせ成形性が悪くなるなら良い特徴を目一杯生かしてやろう」という発想の逆転から、これらの粘土素

材を主成分として樹脂を少量添加した膜「**クレスト**」の開発を進めていました。ただし、粘土成分は合成スクメタイトというもので、親水性の良い材料になります。

https://www.jstage.jst.go.jp/article/kinoushi/47/0/47_63/_pdf

https://www.jstage.jst.go.jp/article/cssj2/60/0/60_14/_pdf

特徴としては、上記の耐熱性、ガスバリア性、さらに低熱膨張率による高い寸法精度などが挙げられます。現在はフィルム状のものが主で、Egretta（オオアサ電子）のハイルドライバーTw 用振動板に採用されています。

それ以外の応用としては、ダイナミック型の VC ボビンと振動板の一体成型が考えられ、情報量が格段に増えるでしょう。その場合には専用の巻線機が必要になるでしょうが・・・。

2. 4. 4. 13 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic)

カーボン繊維を編み込んだ布に樹脂含浸して熱成形したものを一般に CFRP と呼びます。かなり以前からゴルフクラブのシャフトなどに使われてきた材料で、軽く、しなやかに反る（柔軟性があり反力が大きい）ことが特徴です。振動板に使った場合には、カーボンファイバーの比弾性率が高いことで良好な特性を示します。

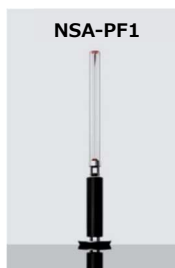
ここでは杉から抽出した改質リグニン（Lignin modifier：産総研が主導で開発）を添加した LM-CFRP 振動板を挙げておきます。（詳細は 2.5.5 項参照）

2. 4. 4. 14 有機ガラス ※ ガラス転移性を持つアモルファスプラスチック

10 年近く前ですが、SONY が『**有機ガラス**※』振動筒を複数の加振器（VC）で駆動するトゥイーターを採用したスピーカーシステム NSA-PF1 を発売しましたが、100 万円と高価であった（民生狙いではなかった）ため拡販には繋がりませんでした。トゥイーターはダイナミック駆動と言えるかどうか分かりませんが、直接放射（粗密波）ではなく 360°放射の「波動スピーカー（弦楽器の胴鳴きと同様の発音原理：『2.8.2 [音響出力](#)』の項を参照）」として機能するので、部屋の隅々まで音が届きました。現在は LSPX-S1 という小型で照明と組み合わせたものを販売しています。

<https://www.sony.jp/active-speaker/products/LSPX-S1/>

以上、最近のトレンドになっている振動板技術を中心に紹介しました。



By Pinterest

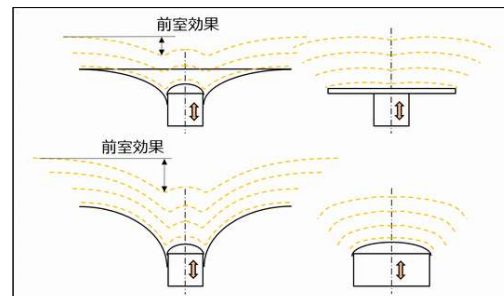


2. 4. 4. 15 形状要素 前室効果

これまで述べてきた材質要素以外に、振動板の形状に関わる要素があります。

通常、VC で駆動する振動板は強度保持の目的で円錐台形状もしくは法面（斜面）をカーブさせた（カーブドコーン）形状にする必要があります、発生波面が理想とする球面にならない欠点があります。（図 2.4-14）

右図の左側がその例ですが、波面が凹むことにより振動板の内周部分から発生する波面と外周部分から発生する波面とで耳に到達する時間差が生じることと、キャップ部分から発生する波面との干渉により相互変調（特に高域）が起こり、スペクトラムの変化も生じることになります。これを総じて**前室効果**と呼びます。



【図 2.4-14】前室効果と球面波

影響としては、球面波から乖離することにより聴覚の方向認知が曖昧になることと、スペクトラム変化により音が前に出て聴こえてしまうことが挙げられます。口の周りを手でメガホンのように覆って声を出すのを聴いたときに、音色が変わり遠近が感じにくくなる（距離感が曖昧になる）のはこのためです。同じ影響はキャビネットの「バツフル効果」にもあり、距離（遠近）や上下の認識には波面（位相）とスペクトラムが重要なことが分かります。

完全な球面波とするためには、点音源にすることが必要で、現実問題としては無理です。

したがって、理想に近づけるため振動板の形状は小口径で平面もしくは凸ドーム型に近いことが望まれます。（図 2.4-14 右側）

・平面振動板は構造的にたわみ（および振れ）変形しやすく分割振動の発生周波数も低くなるため、多くの場合、振動板には AL ハニカムに AL スキンを貼ったものが採用されますが、実効質量が大きくなるため強力な磁気回路が必要になり、且つ逆起電力によるデメリットも大きくなります。

・ドーム型は振動板がバツフルより突き出るため保護が必要になるのと、VC 径が大きくなり平面と同様に実効質量が大きくなるので、あまり見かけません。

Egretta TS-A200 ウーファの振動板素材は「杉」由来の改質リグニン+エポキシ樹脂を CFRP に含侵したもので、詳細は 2.5.5 項を参照してください。

・逆ドーム型も振動板強度が取れるため ELAC など採用していますが、接合部分が複雑になり実効質量が増加します。当然ながら球面波にはなりません。

結果的に凹コーン形状（図 2.4-14 左）がほとんどのユニットで採用されています。



SONY APM-8



Technics SB-M1
平面振動板の例

Egretta TS-A200 woofer



Peerless GBS-135F25AL02-04



メーカー不詳

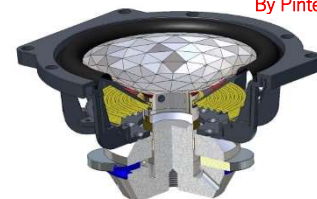


メーカー不詳



ELAC LLD システム

By Pinterest



ドーム型振動板の例

2. 4. 5 振動板材料の物性

振動板の物理特性について、もう少し掘り下げます。

この項の冒頭に、① 比弾性率 E/ρ が高く（軽くて強く）、 且つ ② 内部損失が大きい（余計な振動をしない） ことが相反する条件だという説明をしました。

元々、**ヤング率 E 【N/m²】** は線形弾性領域（不可逆な塑性変形に至る「**降伏点**」を越えない範囲）における引張り方向の印加応力 σ と歪（変形歪） ε の比を表したものです。

要は、可逆性領域で元に戻る時の応答性（または変形しにくさ）を表します。

$$E = \sigma / \varepsilon$$

したがって、比弾性率は

$$E/\rho = \sigma / \varepsilon \rho \quad [\text{Nm/kg}] \quad \dots (\text{式 2.4-3})$$

比弾性率が大きいということは、軽くて強靱な材料ということを示します。

一方、振動板の評価値として、分割振動が発生し始める周波数（**一次共振周波数 f_1** ）や**伝播速度 v_p & v_s** が取り上げられることがあります。

ヤング率には共振法という測定方法があり、

$$E = a \cdot V \cdot m \cdot f_1^2 \quad \dots (\text{式 2.4-4})$$

a は定数項 = 0.9467

V は形状要因 = $(l/h)^3 / W$ l : 長さ、 h : 厚さ（高さ）、 W : 幅

m は質量、 f_1 は一次共振周波数（振動板そのものの分割振動開始周波数）

この式からまず分かるのは、ヤング率は一次共振周波数の二乗に比例することです。

ヤング率が高ければピストンモーション領域が広がる（ f_1 が高くなる） ということです。

また、超音波法という測定方法では、

$$E = \rho \cdot v_s^2 \cdot (3 v_p^2 - 4 v_s^2) / (v_p^2 - v_s^2)$$

v_p : 縦波の伝播速度、 v_s : 横波の伝播速度 $v_p > v_s$

両辺を ρ で割ると、

$$E/\rho = v_s^2 \cdot (3 v_p^2 - 4 v_s^2) / (v_p^2 - v_s^2) \quad \dots (\text{式 2.4-5})$$

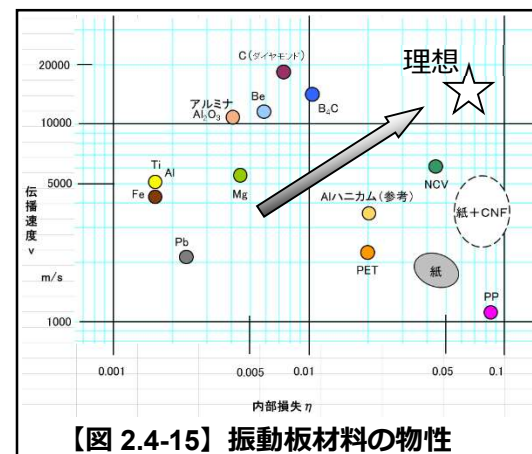
比弾性率は、伝播速度の関数で表されることが分かります。（単純な比例関係ではない）

上記（式 2.4-4 および 2.4-5）から分かるのは一次共振周波数や伝播速度とヤング率には密接な関係があるということです。

代表的な振動板材料の伝播速度 v_p と内部損失 η のグラフを（図 2.4-15）に示します。

2.4.4.4 項に記した NCV は紙（繊維）系と同等の内部損失を持ちつつ伝播速度は金属なみの材質ということが分かります。

PP の場合、比弾性率は紙系と大差ありませんが伝播速度は半分程度しかありません。そのためなのか、立ち上がりの速いアタックなどには応答性が悪く鈍い・・・潰れた音がします。



【図 2.4-15】 振動板材料の物性

2. 5 ボイスコイルボビンに求められるもの

振動板の次は、ローレンツ力を振動板に伝える VC ボビンについて記述します。

役割としては **VC 巻線（コイル）で発生したローレンツ力を① 効率よく、且つ、② 余計な情報（歪）を付加せずに振動板に伝える**ことです。

したがって、コイルと振動板が直結しているのが理想ですが、(図 2.1-1) に示したようにボビンに固定されたコイルがギャップ内で駆動され、且つ、ボビンはある程度のストロークで駆動されてもヨークやポールピースと干渉しないようにギャップ中央に常に保持されなければならないため、振動板とボビンの接合点はコイルからある程度の距離が必要になります。そうすると求められる特質としては、① **軽く**（実効質量を増やさない）、② 伝播速度が速く（ローレンツ力をキチンと伝えるために**弾性率が高く**）、且つ、③ 歪の原因となる**応力集中が無く**、④ 固有共振周波数の**Qが低い**・・・具体的な項目を挙げると振動板に求められるものと似ていますね。

材質は後述のクラフト紙、アルミニウム、カプトン、ノーメックス、ケブラー、テクノール、TIL などがほとんどで、耐熱性が高いチタン合金（Ti-6Al-4V：V=バナジウム）やセラミックなどが使われるようになったのが目新しいところですが、30 年前と比べてあまり増えていません。

2. 5. 1 アルミニウム 渦電流による制動

上記のうちアルミニウムとチタン以外は非金属（絶縁材）です。

アルミの電気伝導率は銅の 35%（チタンは 1%と比較的低い）、密度は銅の 8.93 に対し 2.8（チタンは 4.43）、線膨張係数は銅の 17 に対し 23.8（チタンは 8.8）、ヤング率は銅の約 7 割（チタンは銅と同等）、引張強さは銅と同等（チタンは 4 倍以上）となります。

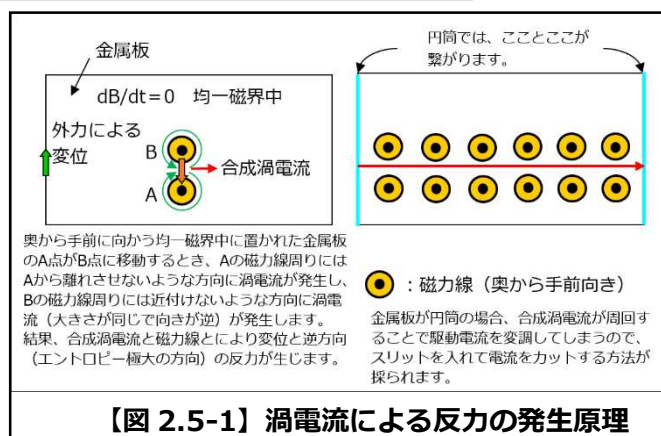
アルミニウムは熱伝導性が良く（銅の約 35%、鉄の 2 倍強、チタンの 18 倍強）、耐入力では有利になりますが、駆動に応じてボビンに**渦電流（Eddy current フーコー電流）**が生じます。渦電流は**磁力線が金属を貫通している磁界中で金属が移動して磁束密度が変化すると、それを変化させないように磁力線の周りに電流が生じる現象**です。（**レンツの法則＝逆起電力と同様、エントロピー極大の法則に従う**）

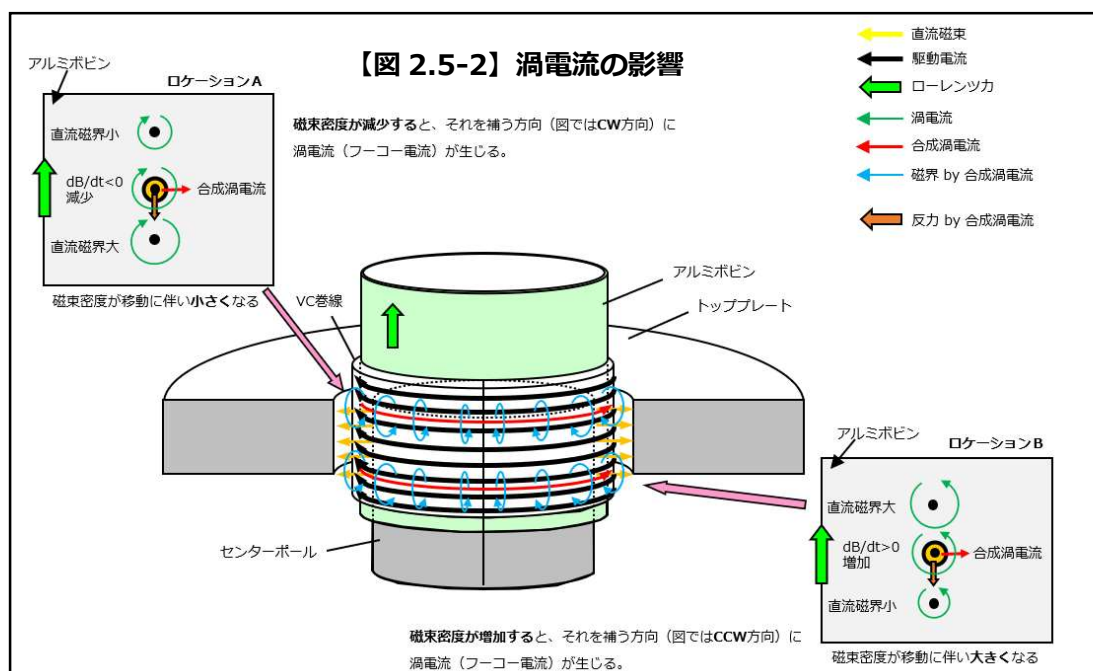
結果的に**金属を移動させない方向に反力（制動）が加わります**※。

※ 渦電流を使った電磁ブレーキとして応用されています。

発生した渦電流の一部は金属内部でジュール熱として消費されます。電流⇒仕事量変換（図 2.5-1）

コイルに生じる誘導電流に起因した逆起電力と異なるのは、**金属表面を貫通する磁力線の周り（表面）に電流が発生**することです。





（図 2.5-2）においてアルミボビンがローレンツ力により上方に変位した場合、磁束変化（ $dB/dt < 0$: 減少）の発生する「金属ボビン表面 A（ロケーション A）」ではボビンの移動（変位）に応じて渦電流（時計回り）が発生し、変位を打ち消すような磁界（直流磁界と逆方向：紙面奥向き⊗）が生じます。また、磁束変化（ $dB/dt > 0$: 増加）の発生する「金属ボビン表面 B（ロケーション B）」では変位に応じて渦電流（反時計回り）が発生し、同様に変位を打ち消すような磁界（直流磁界と逆方向：紙面奥向き⊗）が生じます。

結果、ロケーション A、B 共に変位を打ち消す方向に反力（橙色矢印）が加えられます。

同時に合成渦電流（上図の赤色矢印）の周りに磁界（青色）が生じ、直流磁界にロケーションに依存した変調が起こり、非線形歪となります。（均一磁界中では、制動は発生するが変調は発生しない）

アルミニウムボビンを使ったユニットには渦電流によるオーバードampingの傾向があり、逆起電力と相まって低域がやせてしまいやすいのでウーファに使う場合は要注意です。

対策として、スリットを入れて合成渦電流を切ります。ボビン強度の均一性を保持するため、短冊でなく菱形のアルミ板を巻いてボビンにすることもあります：右図）

また、導電性材料なので他の樹脂系フィルム製ボビンと異なりショート事故のリスクがあるため、ワイヤ直巻きはできません。アルミボビン材表面には絶縁性のあるアルマイト処理をしてありますが、短冊状にカット（抜き方向は表⇒裏：バリが巻線側にならないように管理）した端面には導通があるため、ボビン表面に保護紙（透けるほど薄いクラフト紙）を貼り付け、マグネットワイヤはその上に巻きます。ワニスによる端面絶縁処理後に直巻も例外的にあります。稀です。

実際の工程としては、① 事前にクラフト紙で巻いて絶縁成形したボビンを回転巻治具に固定し、② マグネットワイヤ※にワニス（エポキシ変成ポリエステルイミド樹脂など）を塗



写真転載不可

布しながら適度なテンションをかけて規定巻き数に従って巻く。③ 巻き始め巻き終わり端部（リード線の引き出し部）がほつれないようにクラフト紙を貼り付けて位置を固定する。

④ 乾燥後、加熱してワニスの溶剤をキュアする（cure：除外する）。相互融着が目的ですが皮膜およびボビンに対する応力歪を軽減するアニール効果や皮膜※のピンホールをワニスで埋めて減らす効果もあります。⑤ 治具から外す。

他のボビン材質の場合も巻線工程はほぼ同様です。

※ 被膜は PE：ポリエステル、UE：ポリウレタン、AI：ポリアミドイミドなど：2.5.6 マグネットワイヤの項を参照

2. 5. 2 クラフト紙

VC ボビンで使われる**クラフト紙**は、上記の補強（というより仮留めに近い）に使われる薄くてしなやかなものではなく、形を保持できる程度の厚さと硬さを持ったものになります。クラフト法（苛性ソーダを加えて木材チップを熱処理（連続蒸解）してできたクラフト・パルプをビーター（叩解器）で細かく叩いて解してから圧縮抄紙する方法）で作った密度の高い紙です。漂白していないものは薄茶色の封筒「クラフト封筒」などで馴染みがあると思います。VC ボビンで使われるものは、これとは若干異なります（叩解度を浅くして長い繊維のままにする）が、基本的には同じ種類のものです。

抄紙工程後の仕上がり強度（しなやかさ、粘り強さ）を得るためには木材パルプに含まれるリグニン（つなぎ成分）が有効ですが、通常の紙製品では白色にするために脱リグニン工程というものを入れます。VC ボビンに使うものはこの工程を飛ばした上で、合成樹脂である**ポリアクリルアミド**（昔、液体の白い洗濯糊（商品名：キーピングなど）として市販されていたものと同種の化生物）を添加したものが多く、最終工程でカレンダー処理（アイロン・ローラーで熱と圧力をかけて強度を上げる ⇒ 平滑性も上がる）をしてあります。これらの工程により、湿度による強度変化が少なくなり、且つワニスへの濡れ性も良くなり表面がテカテカ光ります。

接着性が良く、金属や合成樹脂より比重が小さい（軽い）材質なので、ヤング率は小さくても比弾性率としては中庸な材料になります。耐熱性の面では他の材料に比べて劣ります。

添加物や製造方法にも因りますが 140℃ あたりから徐々に炭化が始まります。

5. 3 ノーメックス、カプトン、T I L、ケブラー、テクノーラなど

・**ノーメックス®** は、DuPONT 社の開発したメタ系ポリアミド高耐熱樹脂フィルム（不透明白色）で、耐熱温度（約 240℃）を超えた場合に変形（層間膨れ：餅を焼いた時のように膨れる）が生じやすく、ポールピースやトッププレートと干渉して破壊することがあります。膨れ ⇒ 干渉による VC 停止 ⇒ 発熱によるワイヤ焼損 のパターンが多いです。

・**カプトン®** は、DuPONT 社の開発した芳香族アラミド（ポリイミド）高耐熱樹脂フィルム（透明濃黄色）で、炭化開始温度は 800℃にもなります。ボビンには低収縮の V タイプが良く使われます。確か JBL が使ったことから普及したような記憶があります。

・ **T I L[®]** は、東レが開発したガラス繊維に変性ポリイミド樹脂を含浸させた強化プラスチック (GFRP) で、VC に使ったのは耐熱 H 種 (180℃) だったと記憶しています。元々は FR-4 (エポキシ含浸難燃基材タイプ 4) に代わる積層基板材料として開発されたもので、強度、耐熱性を兼ね備えていました。当時はガラス布基材厚さが薄いものでも 0.5mm までしかなく、且つ比重が他の樹脂材に比べて大きいため質量が大きくなるというデメリットがあったのでウーファに使った記憶しかありません。今は薄いものもあると思われます。

・ **ケブラー[®]** は DuPONT 社が開発した単一パラ系ポリアミド高耐熱繊維 (ホモポリマー：不透明黄色) で、ノーメックスより高い耐熱性 (定格は 180℃だが実力は 250℃以上) と驚異的な剛性 (比弾性率) を持ちますが、フィルム化が難しいため織物状 (布状) のものしか無く、且つ 接着性が悪く、当時は紙やすりで表面を機械的に荒らすことで接着剤との食い付きを改善していた記憶があります。現在では東レが **ミクトロン[®]** の名称でフィルム化に成功していて、接着性もコロナ放電処理 (表面を荒らす) で改善できているようです。

・ **テクノーラ[®]** はケブラーと同じパラ系ポリアミド高耐熱繊維ですがコポリマー (単一ではなく共重合体) の構造を持ち、破断強度はケブラーより高く、比重は $1.39\text{g}/\text{cm}^3$ で、ケブラーの $1.44\text{g}/\text{cm}^3$ より小さく、軽くて強い有望な材料です。

これらボビン材の音質傾向は、振動板材質に比べて小さいものの、金属系 (アルミなど) では上記の渦電流による制動が効いているようで、タイトで締まった (下手をすると痩せた) 低音になりやすく、樹脂系は良くも悪くも中庸 (特徴がない) になります。あくまでも傾向ですし、接着剤も含めた他の構成物との組み合わせではコロコロ変わります。

フルレンジならばクラフト紙系が薦めで、f 特にピークが出やすい半面、軽いメリットが音質的にも生きてきます。第二推奨はアルミです。上手く使うと抜けが良くなりますが、樹脂系に比べてロスが少ないので硬い (カチツとした) 音になりやすいのが難点です。

小口径ウーファなら熱伝導率の高いアルミが第一で、第二は耐熱性と寸法安定性を併せ持つカプトンでしょうか。(音質より性能優先と言うことです)

2. 5. 4 チタン合金

チタン・バナジウム合金 (Ti-6Al-4V) ですが、使用した経験がないので 憶測として 別項で記しておきます。アルミニウムの項でも比較データを示しましたが、アルミの比重が銅の 1/3 に対し銅の約半分、ヤング率はアルミの約 1.5 倍で銅と同等 (比弾性率はアルミと同等)、引張強さは 4 倍、硬度はアルミの 5 倍以上、音の伝播速度はアルミと同等 (約 6000m/s)、熱伝導率はアルミの 1/18 くらい、電気伝導率は約 1/35 (渦電流が小さい)、アルミと同様に非磁性、融点はアルミの 660℃に対し 1650℃、銅 1084℃、鉄 1536℃・・・。

アルミほど軽くはないが剛性が高く、熱や電気は伝えにくいですが音はアルミと同じくらい伝えるし、融点は金属としては平均的。薄くしても強度がとれるので軽量化に向き、アルミに比べて 熱は極端に伝えにくいが耐熱性があるくらいしかメリットが見えません。

薄く出来るので磁気ギャップを狭く出来て、音のカラーリングが少なく（これこそ憶測ですが）、アルミと違い渦電流が起きにくいくらいがボビンに使うメリットでしょうか。

デメリットは、加工性が悪い、毒性が強いなどいくらでも出てくるのですが・・・。

2. 5. 5 CNF（セルロース ナノ ファイバー）と改質リグニン添加FRP

紙製振動板のところでも取り上げましたが、大まかに言うと植物繊維の構成物「セルロース」を化学的な方法で丁寧に叩解^{こうかい}してほどこいていくと得られるものが **CNF** になります。

ISO の定義では、径が $3\sim 100\text{nm}$ (10^{-9}m) $=0.003\sim 0.1\mu\text{m}$ （ミクロン）、長さ $100\mu\text{m}$ （ $=0.1\text{mm}$ ）以下、アスペクト比（長さ／径）が 10 以上とあります。

更に小さい構成単位として **CNC**（セルロース ナノ クリスタル：それぞれ径 $3\sim 50\text{nm}$ 、長さ $0.1\sim$ 数 μm 、アスペクト比 $5\sim 50$ ：比較的短い）がありますが、振動板やボビン、ハウジングの添加材となるのは CNF になります。

CNF の径 $3\sim 100\text{nm}$ がいかに小さいかですが、比較対象として特殊なマスク N95 でないと通過してしまう PM2.5 と呼ばれる塵物質が 2500nm 以下、インフルエンザウィルスが $80\sim 120\text{nm}$ 、小さいと言われる口蹄疫ウィルスでさえ $21\sim 24\text{nm}$ の直径になります。

振動板に使うクラフト紙の叩解液^{こうかい}（懸濁液^{けんたく}、解繊液^{かいせん}とも言う）は茶色がかった薄い乳白色もしくは乳白半透明のゲル状（ゼリー状）になります。それに対して CNF 叩解液の場合には繊維の太さが 100nm 以下、可視光の波長（ $380\sim 780\text{nm}$ 、 $3800\sim 7800\text{\AA}$ ）に対して十分に細いために光透過性が高い（すべての波長の可視光を通してしまう）ので、ほぼ透明です。

CNF の特徴としては、樹脂等とのコンポジット材（複合材：例えばフェノール樹脂との複合）を高圧縮して成形した場合、FRP やマグネシウム合金 AZ91 などより軽いのに曲げ強度が高くなります（高比弾性率）。ただし元々親水性の CNF を有機樹脂とコンポジットさせるためには疎水性にすることが条件になります。脱リグニンを行わないリグノ CNF の場合には疎水性なので樹脂への均一分散が可能です。（親水性だと水と油のように偏在する）

植物の細胞膜を形成していた大半の成分であるセルロースから生成されるため、見かけ上の材料費が安いこと（現状でカーボンナノチューブの 1/5）でも注目されていて、親和性をコントロール（上記のように合成樹脂に分散させるには疎水性が求められ、紙などに分散させるには親水性が必要）することでエンジニアリングプラスチックの分野での応用が加速しています。ただ、材料費としては安いのですが、今は生産工程が複雑且つ時間が必要ながコストネックになっていて、生産量がある値を超えれば、加速度的にコスト破壊が起きて普及するものと思われます。

まだ実験段階だそうですが、CNF 複合材料を VC ボビンに使った場合にはクラフト紙に比べて強度が高いのに薄く（軽く）することが期待できます。応力歪を小さく抑えられる（しなやかで強い＝曲げモーメント、せん断力の集中が起き難い）こともメリットとなります。

薄くできれば磁気回路のギャップを狭くできる（⇒均一磁界範囲が広がる＝高 B / & 平坦範囲の拡大）し、且つ実効質量を小さくできるため、駆動効率や応答性が上がり、逆起電力

の影響も減少させることができます。良いことづくめで実用化が待たれます。

また、金属と同等な剛性を持つことからハウジングへの応用も考えられます。

ゴム（エラストマー：架橋ゴム）との複合材も開発されており、ある程度の内部損失を期待できる材料も出現すると思われます。また複合する材料により熱膨張率もガラスの数十分の1にできるなど物性的にも応用度の高い材料として注目されています。

現時点での AV 業界での応用例としては、光透過性を有効利用して有機 EL を裏面に形成したフレキシブルな表示装置の実験をパイオニアが京都大学（矢野研究室）と産学協同で推進しています。

一方、**改質リグニン**は産総研が主導で開発したもので、140℃の PEG（ポリエチレングリコール：脂肪族アルコール）に杉パルプと少量の酸を加えて攪拌（叩解）することで、リグニン（疎水性繊維）と PEG が結合した形で抽出されます。改質リグニン+エポキシ溶媒を真空含浸させた GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）は、ヤング率が約 2 割も大きくなり、引張耐久性試験後の強度も改善される結果となり、上記リグニン CNF と同様に工業用材料としての利用が期待されます。右写真は CF（カーボン繊維）に改質リグニン（LM）+エポキシ溶媒を真空含浸した CFRP ドーム型振動板の例になります。

Egretta TS-A200 woofer



2. 5. 6 マグネットワイヤ

コイル巻線に使われる『マグネットワイヤ』は **PEW**（軟銅線+ポリエチレン樹脂コーティング）、**UEW**（軟銅線+ウレタン樹脂コーティング）の 2 種類が主流です。

導体は廉価版ユニットの場合には 99%高張力軟銅丸線です。

皮膜厚さにより 1 種～ 3 種が JIS で規定されています。

特殊なものとしては耐熱上限 400℃までの耐熱セラミック層を形成したものや線膨張係数が小さく耐熱 275℃にも達するポリアミドイミド PAI 皮覆線 **AIW** もあります。

<http://kikakurui.com/c3/C3202-2014-01.html>

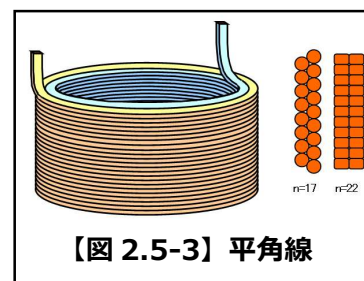
<http://www.swcc.co.jp/unimac/pdf/Super%20Heat%20Resistance%20Magnet%20Wire%20jp.pdf>

https://www.hitachi-metals.co.jp/products/auto/el/pdf/magnet_wire.pdf

通常、ワイヤ断面は円形ですが、断面を正方形や長方形にした『**平角線**』もあり、**エッジワイズ巻き**を実施するとコイルの断面占有率が向上してローレンツ力への変換効率が改善され、巻線同士の間隙が減るため熱伝導性も向上します。（図 2.5-3）では同断面積同巻幅比較で丸線 $n=17$ 、平角線 $n=22$ になりました。（対比約 1.3 倍） <http://www.goto-denshi.co.jp/product-mashikakusen-hikaku.html>

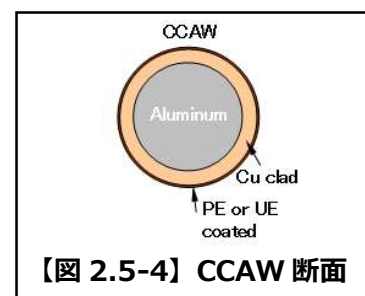
SONY や JBL の高級ウーファなどで実践例が多数あります。

特殊な巻線機が必要で、久原製作所（<http://www.kuhara-net.co.jp/jp>）などが有名です。



【図 2.5-3】平角線

導体は、銅線以外に軽量なアルミニウム線：ALW（Aluminum Wire）や銅クラッド・アルミ線：CCAW（Copper Clad Aluminum Wire）も使われます。CCAW は Alpair-6P などにも使われていますが、アルミニウムの芯に銅を被覆（clad）した導体の外周に PE または UE 樹脂コーティングしたもので、軽量かつ半田付け性も銅線と同様に良いものです。（図 2.5-4）



銅被覆率は断面積比 15% が標準になりますので、かなりの軽量化が実現できますし、ボビンにアルミニウムを使った場合には、熱膨張率がほぼ同じになるので、大入力時に応力変形が少なくなります。因みにアルミの電気抵抗率は銅の約 1.6 倍強で、表皮効果を考慮すれば銅線と大差ありません。

ALW があまり使われないのは、アルミニウムの半田付けが難しいのでカシメ処理になるためですが、カシメが甘いとイオン伝導度の高いアルミニウムの影響で銅に**ガルバニック電蝕**（電食）が起こることがあるのも敬遠される理由です。

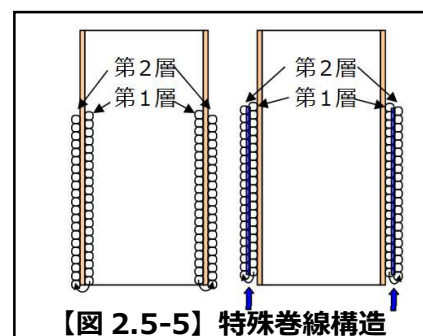
2.5.7 コイル構造の工夫 巻線の巻き方、サブ巻線による制御（Q ダンプ、MFB）

巻線部分（コイル）は通常、偶数層で構成されます。巻き始めと巻き終わりの引き出し部分がほぼ同じ位置にくるようにすることが出来るからです。奇数だと引き出し線が巻線部分を横切ります。

構造的な新しい取り組みとしては、巻線を VC ボビンの表面と裏面に分けて配置することで熱放散効率をアップするものが登場しました。

（B&W の 800D3 で採用されました。：図 2.5-5 左）

通常の巻線構造では、上下層が重なった部分（図の右青矢印部分）で発生した熱は逃げ場が無く、熱集中により内外層の線膨張率の差から層間に内部応力歪が発生して膨れたりマグネットワイヤ被覆が部分的に炭化したりします。



ボビン内側に第 1 層の巻線を配置した場合には、巻線がボビン（アルミ）に接した部分から熱が放散するため、熱集中が起こりにくくなります。

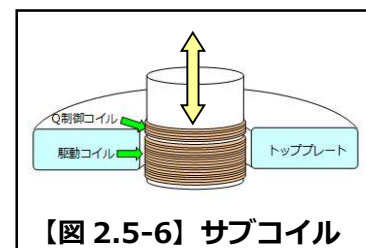
外側の巻線ではボビンに接した部分の温度が下がる（ワイヤの内側より外側が伸びる）ため応力変形は起きにくく、内側の巻線では同様のことが起こる（ワイヤの外側より内側が伸びる）と応力変形が起こりやすくなり、ボビンとワイヤの線膨張率が大きく異なっている場合には内層巻線が内側に変形してポールピースと干渉すると想定しましたが、防犯用の網入り強化ガラスは熱膨張率の違うガラスと鋼線の組合せで問題なく実用化されていますので、800D3 も構造的な最適設計ができていれば問題ないでしょう。

アルミボビンと銅巻線の組み合わせは、それぞれの熱膨張係数が 23.5 と $16.8 [\times 10^{-6} / K]$ とそれほど違わないし、発熱源である銅線側の温度が常に高いことから、内側巻線にはボビンに押し付ける方向の応力が加わりますが、接しているアルミは更に伸びるので杞憂だと思えます。

その他、VC の工夫例としては、ダンピングコントロールというものがあります。

メインコイルのほかにサブコイルを設けて、これを可変抵抗器に繋がります。(図 2.5-6)

可変抵抗器をショートする方向に変化させていくと VC 駆動により**レンツの法則**にしたがってサブコイルに電流が流れ、移動させないような方向に磁界が生じて VC が電磁制動されます。逆に可変抵抗器の抵抗値を大きくすると電流が減るため制動は小さくなります。結果的に励磁型の磁気回路に近い動作(低周波領域のダンピング制御)が可能になります。ただし、振動系の質量アップがデメリットになります。(FOCAL のシステムに実例あり)



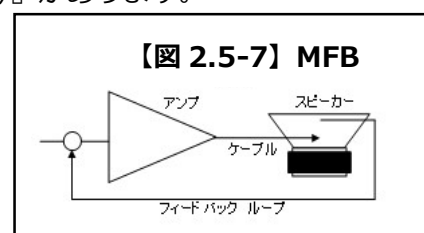
【図 2.5-6】サブコイル

積極的に VC の動作を制御するものとして『**MFB (Motional Feedback)**』があります。

詳細は第四章 7 項を確認いただくとして、ここでは概略を示します。

音響出力の電気的検出に上記サブコイルや VC に取り付けた加速度センサー(圧電素子など)を使い、振動系が入力信号に正確に従うように強制制御するものです。

これによりフィードバック経路に入っている全ての要素(スピーカーケーブルを含めて)を統合して制御することができます。逆起電力や振動系慣性質量による低域の遅れもある程度は制御できます。(遅れ系制御なので限界がありますが・・・)



5. 8 メーカー情報

VC のアッセンブリ企業は最近ではだいぶ減ってしまい、簡単に Web サーチした結果、見つかったのは以下の通りです。

1. 後藤電子(株) <http://www.goto-denshi.co.jp/index.html>

山形県寒川江にあるコイル製造会社で天童にある東北パイオニアとの結びつきがあります。平角線に満足せず真四角線を開発したメーカーでもあります。

2. 珠海進成電子 http://www.techno-group.com/company/group/jukai_company.html

広東省珠海市(マカオと中国の国境近く。経済特区)にある日中合資のスピーカー製造会社です。(香港テクノグループ資本) 小型スピーカーやヘッドフォン生産がメインですが、VC ass'y などの OEM も扱っているようです。

3. speakerpartsindia.com <http://www.speakerpartsindia.com/>

インドの部品&アッセンブリメーカーです。コーン紙から VC、磁気回路、フレーム、ダンパーなど個別部品も扱っています。(インドは高度成長期にあります)

4. 久原製作所 <http://www.kuhara-net.co.jp/jp>

前述のエッジワイズ巻線機を持っています。特殊用途にも対応可能と思われます。

2. 6. ダンパーについて

ダンパーの材質は絹布や木綿布が主ですが、中級以上のフルレンジやウーファユニットのダンパー（海外ではスパイダーと呼ばれます）は殆どが**コーネックス®**（帝人 TP 製メタ系アラミド繊維）を使っているようです。昔ながらの荒い織り目（縦密度と横密度：縦横デニールが同じもの）のコーネックス布にフェノール樹脂含浸してから熱成形&型抜きして作ります。含浸させる**フェノール樹脂は熱硬化性樹脂**なので、VCが発熱しても軟化して変形することはありません。ただし 200℃を超えると炭化が始まります。



By Pinterest

また、成成品なので駆動すれば応力歪みが発生しますし、どんなに目を荒くしても VC の大振幅駆動に伴って風切り音（実際にはダンパーとハウジングで囲まれた空間ができ、振動系の駆動によりその空間の圧力がダンパーにかかるためにダンパーの山谷が歪む音が・・・ファサファサ、パタパタという団扇で煽ぐような中低域の小さな音）が発生します。これが振動板を透過して可聴域歪として認知されます。不要なユニットのエッジと振動板を排除し、VC とダンパーだけにして周波数スイープ入力を加えると、この歪が理解していただけるはずです。

本来は、支持材料が音を出すことはおかしいこと（歪）で、2.10-3 項にこれを防ぐためのハウジング構造による対策を記しています。

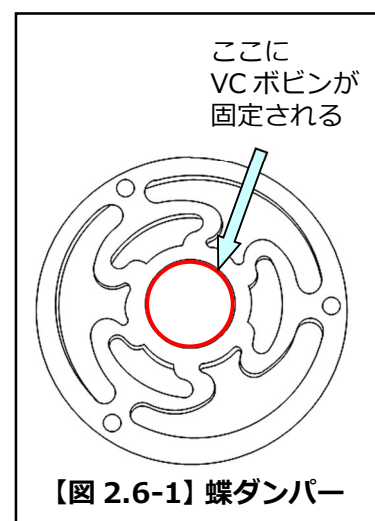
2. 6. 1 蝶ダンパー

上記のような繊維系成型ダンパーが一般的になる前は、『**蝶ダンパー**』と呼ばれる薄いベークライト（フェノール樹脂）製の板を打ち抜いたものが使われていました。根強い人気があり一部のユニットメーカーでは現在も使っています。（図 2.6-1）

ストロークは取れませんが、膜面で覆う構造でないため繊維系成型ダンパーのようにハウジングとの間に閉じた空間はできません。ただ、構造上**Qが高い**のが困りものです。樹脂板ですから内部損失がほとんど無いので共振した場合には制御が難しくなります。

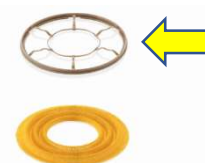
うまく設計できれば後述の糸ダンパーより優れた特性を示しますが、質量が大きいため振動系の実効質量が大きくなってしまいうデメリットがあります。

2.5.5 項の CNF フェノール複合材で作ると高性能なものになると思われます。



By Pinterest

B&W の 800D4 シリーズで複合生体模倣サスペンション（CMS : composite biomimetic suspension）が採用されました。蝶ダンパーのメリットを生かしつつ、クモヒトデの形状を 3 D 模倣することでストロークをそれなりに確保することが可能になりました。材質はスーパーエンブラを採用していますが、接着性が悪いいため接着部の形状と樹脂埋めで対応しています。



• 1. Spider Biomimetic Suspension
• 2. Fabric spider

And in the midrange and midbass, B&W used an entirely new suspension system - replacing traditional coil springs with what the company calls "composite biomimetic suspension." It looks a lot like the Millennium Falcon's cockpit controls, with an outer and inner ring connected by a series of six vertical bars. B&W claims that this new invention greatly reduces the unwanted air pressure (and therefore the sound) that a traditional fabric spider can create. The chamber operates with no noise effects and, according to the company, achieves "unprecedented transparency and realism in the mid range."

2. 6. 2 ダンパーレスへのトライアル

ダンパーレスが実現できれば問題解決ですが、現在販売されているのは**磁性流体**をギャップに注入した SONY・SRS シリーズと Mark audio 社の Alpair-5 などになります。

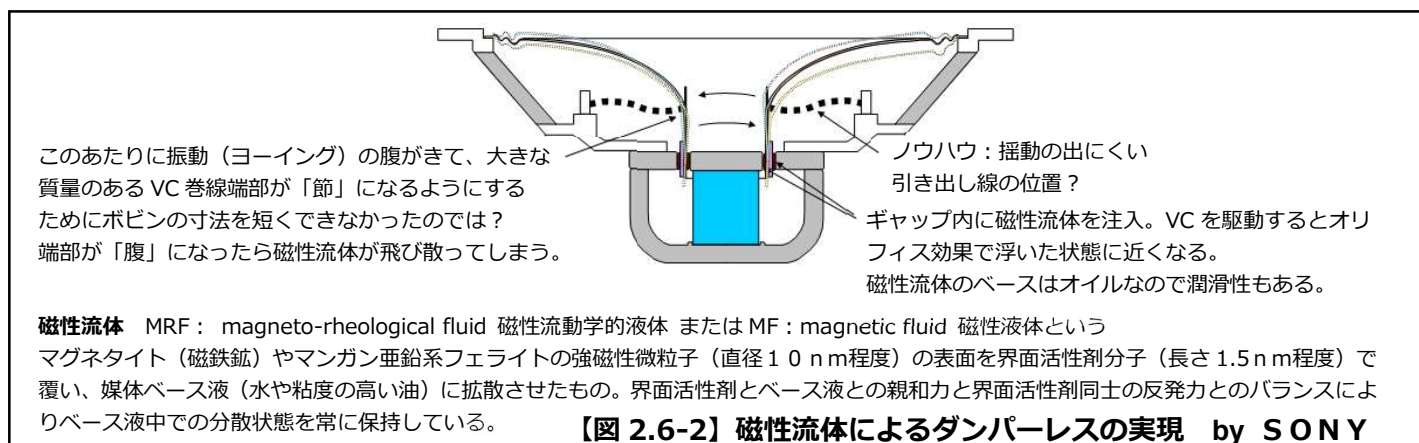
SRS シリーズを店頭で聞いたところ、ラジカセ（死語か・・・）に近い形状にしては低域がボテッとせず中低域がスッキリして音像が明確になる印象でした。

Alpair-5 を実装したバスレフシステムではトランジェントと S/N の良さを感じました。

ダンパーレスの場合には、VC の支持を目的としたダンパーが無いわけですから「**駆動される VC をギャップ内で擦らないようにどうやって保持するか**」が課題になります。

解決方法として SONY はギャップに入れた**磁性流体**の中に浮かせることを選びました。

VC と振動板を支えているのはエッジのみで振動系のもう一方の端（VC ボビン）は開放端になっていて、そこには質量の大きな VC ワイヤが存在するわけで、この部分がどれだけ揺動するか想像できると思います。ストロークの小さなツイーターでは **Q ダンプ効果**や放



熱効果がある磁性流体ですが、開放端を磁性流体で保持しようというのですから実用化の課題もこの部分に集約され、何度もトライアンドエラーを繰り返し磁性流体の飛び散った惨状を目にしながら最適解を探ったことでしょう。錦糸線の引き出し形状にもノウハウがありそうです。モーメントを考えると VC ボビンを短くして振動板の根元に持っていくのが常套手段ですが、ストロークと振動モードの関係で出来なかったのだと思います。

Alpair-5 の場合には、極端に浅いコーンやマグネットワイヤに CCAW を使うなど、実効振動質量を極限まで小さくし、重心を振動板側に近付けることで慣性モーメントのバランスを上手く取っているのだと思います。2018 年に大口径ダンパーレスの Alpair-7MS と 11MS が登場しました。試聴しましたが非常に情報量が多くストレスの無い鳴り方をしていましたが大入力で振幅を大きくするのは NG になります。



話が逸れますが、試作品ユニットをチェックするときにスイープ信号でチェックします。

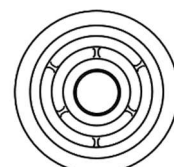
このときにビビリ音が出ると試作 NG で、作り直しや原因部分を特定して改修することになります。工場ライン生産品のチェックも基本的には同じです。

2. 6. 3 形状による特性改善

前述のように、通常は布材にフェノール樹脂（賦型材：形を保持する添加物）^{ふけい}を含浸させて金型でプレスして熱成形します。フェノール樹脂の含浸量によって共振周波数や Q をコントロールするのですが、フェノール樹脂は繊維自体の濡れ性により含浸しやすさが変わります。綿などとは親和性が高いのですが、コーネックスなどとは親和性が問題になります。Panasonic は 1999 年に繊維側の濡れ性改善のために表面処理工程を設け、硬いが脆いというフェノール樹脂の欠点を払拭するために硬化条件をスポイルしない可撓性付加剤^{かどう}を添加することで大入力耐性をアップしました。

<https://www.dempa.co.jp/productnews/kobetu/050131/nr050131.pdf>

variable pitch damper



radiated rib

このように製造工程での改善が進み性能がアップしてきていますが、^{ほとんど}殆どのダンパーは金型を作りやすく、且つ離型も比較的容易な浅い波型（ピッチ一定）を採用しています。

結果として定在波（共振モード）が乗りやすく、共振の Q が大きくなってしまいます。

外周ピッチを大きく（山谷を深く）して内周ピッチを小さく（山谷を浅く）することで特定の共振が生じにくくする改善（variable pitch damper）や、単純な同心円ではなく内周と外周は円だが途中を楕円にしたり（elliptical modified damper）、同心円に奇数本の放射状リブ（radiated rib）を部分的に追加したりすることで単純な振動モードが乗りにくく悪環境でも形状の崩れが発生しない（歪まない）ようにする対策がなされています。

FOSTEX にはプロユース技術由来のタンジェンシャルダンパーがあります。

これは、駆動ストロークを抑えるために VC ボビン周囲の接線方向にリブを設け、小入力ではリニアで振幅が徐々に増えると接線方向にリブが突っ張り、級数的にスチフネスが増えるようノンリニア特性にしたものです。

通常の同心円ダンパーに数個の穴（面積にして約 1/4）を開けてみたところ、ダンパーレスのメリットに近い効果（情報量増加）が得られたのを思い出しました。デメリットとしては特定周波数の風切り音が出やすくなるのと、穴の大きさや数によっては強度的な問題も発生します。おまけに f_0 が下がり、 Q_0 と振幅が大きくなりますので、基本設計からやり直しになります。市販品としてはリスクが大きいのので採用しませんでした。

同様に、デニール（単位面積質量）値を変えずに極端に粗い布（餅網のように繊維のピッチが 5mm くらいで繊維の太いもの）に含浸を浅くして成形したものは情報量改善効果が高かったのですが、繊維を太くすることで繊維が潰れてプレス後の編み目が不均一になり、型崩れなどによる歩留まり悪化が発生するなど安定性に欠けるため採用は見送られました。

空気が通らなくても自動車のエアサスのようにスチフネスが高くなって問題だし、粗くして空気が通ることで風切り音や安定性が問題になる・・・ダンパーは思った以上に奥の深い部品になります。ダンパーはあまり弄らずシンプル^{いじ}にしておき、ハウジングにダンパー下部の通気構造を持たせるほうが合理的と言えます。（詳細は、ハウジングの項を参照）

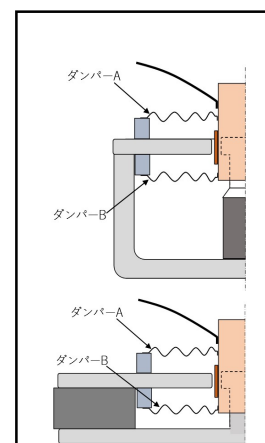
2. 6. 4 多点支持（ダブルダンパー）

プッシュプル・ダンパーと呼ばれるものは、通常位置に 1 枚、コイルの下部に 1 枚を配置することで保持スパンを広げて、ギャップ精度を向上させることを可能にしたものです。（右図および写真赤い太矢印）

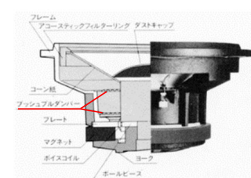
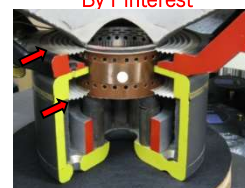
ダンパー形状を上下で対称になるようにして駆動リニアリティを上げていますが、外磁型の場合、トッププレート～下側ダンパー間では磁石内径がダンパー外周まで追い出されるため内磁型にしか採用されませんし、内磁型にしても組立方法に工夫が必要になります。（磁気回路内のダンパーの貼り方、軸芯の出し方）

通常位置に間隔を空けてダンパーを 2 枚重ねたものもありますが、ストロークリニアリティ改善になっても上のように揺動を防止してギャップ精度を上げられる訳でないため、上手く設計しないとデメリットのほうが大きくなります。エッジレス構造のユニットにも採用例（SLE-34W の断面模式図）がありますが、単純にダンパーのスチフネスが 2 倍になってしまうので、1 枚あたりのスチフネスを下げておく必要があります。組立精度や品質信頼性を担保するのが難しくなります。

この場合には機械系 Q_{ms} と実効質量 M_{ms} が大きくなるので、強力な磁気回路と最適化した VC の組み合わせでフォースファクタ Bl を大きくして電気系 Q_{es} を小さく抑えることで、総合 Q_{ts} を使いやすい値に持っていく設計が必要になります。



By Pinterest



SLE-34W

2. 6. 5 メーカー情報

ダンパーの供給元ですが、国産で探すとほとんど無く、振動板の項で紹介した(株)ギフトクが 2005 年からダンパーも作り始めたようです。昔は東京コーン紙（TOPTONE）や横山電機（廃業）が作っていたのですが・・・。Web 検索でも台湾の Lucent Electronics、上海の昆山騰光電有限公司 Kunshan Deck Electronic I/E、インドの speakerpartsindia.com などしかヒットしませんでした。

2. 7. エッジについて

2. 7. 1 エッジの目的

エッジの目的は、① 振動板の保持と ② 表裏の通気（音漏れ）防止になります。

エッジの内周部分は振動板外周と共に動き、エッジの外周部分はハウジングのフレームに固定されるので、① 振動板の運動エネルギーをハウジングまで伝えずに吸収し、且つ ② 貼り合わせ部分や外周（ハウジングへの固定部）が振動の節にならない（反射を発生させない）ことが求められます。

2. 7. 1. 1 フィクストエッジ

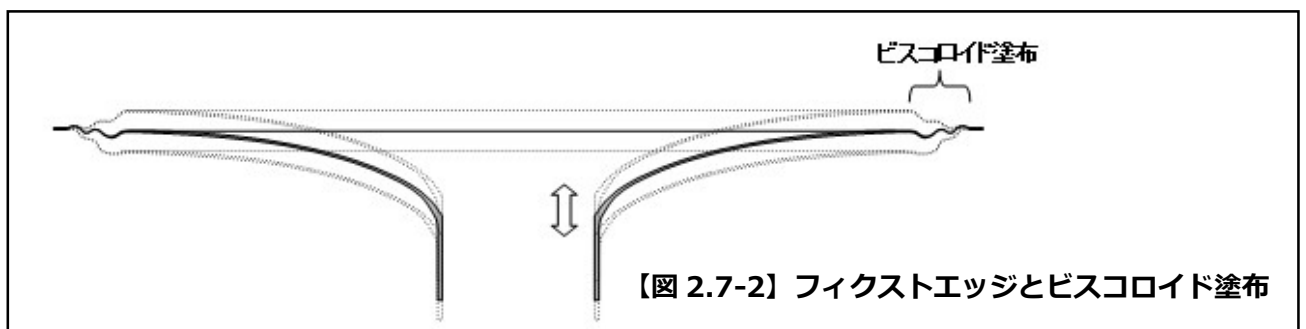
上記の目的を達成するためには、振動板との境界（貼り合せ）部分での反射を防ぐことが第一条件で、その意味では振動板の物性に近いものが境界を作らないためには有利となります。

40 年くらい前の廉価版ユニットではエッジ部分までを 1 つの金型で抄紙&成形したもの

- ① エッジ内周（貼り合せ部分）での反射が少く
② エッジの内側損失でエネルギーを消費して
③ エッジ外周（ハウジングに固定）は振動しないのが理想



【図 2.7-1】エッジの理想



【図 2.7-2】フィクストエッジとビスコロイド塗布

が結構ありました。（図 2.7-2）

初期のアルテック 604、604B や JBL 初期型 130A などがそうですが、『**フィクストエッジ**』と呼ばれ、抄紙&成形の制限から深い山谷ができないため、ストロークは取れませんが、材質の異なるエッジを貼り合わせないので境界での反射が少ないことがメリットになり、温故知新、見直しても良い構造かもしれません。

（ただし、 f_0 など物理特性のバラツキ管理が難しくなります）

フィクストエッジや布エッジにはモーエン®などの**ビスコロイド**（ニトロセルロース=別名ピロキシリンをエタノールとジエチルエーテルに溶かしたもの:『サカムケア』の成分と同じ透明でゲル状のもの）を塗布してエッジ部分の紙繊維が軋むカサカサ音やバタつき音の防止（歪低減）や**エア漏れ防止**をするものもありました。

ビスコロイドを塗布するとエッジ部分の Q がかなり低くなるのもメリットです。

上記の境界（塗布した部分としていない部分の境界）での反射は、塗布量にも因りますが塗布ムラや濡れムラが逆に特定振動モードが立ちにくい状況を作る場合もあります。

ホコリが付いたり気泡が入ったり、ある程度乾くまでに指で触れば指紋が残ったり見栄えが悪くなるのが欠点で、当時、塗布作業にかなり神経を使ったのを憶えています。

By Pinterest



JBL 130A (上)
Altec 604 (下)

懐かしい限りですが、現実問題としてモーエン®は1年程度で劣化が始まり、数年経過すると乾燥してボロボロになり、最終的には剥がれてしまうのが分かっているので、定期的なメンテナンスを想定しない限りビスコロイドは選択肢としてはNGと思われます。

2. 7. 1. 2 ウレタンエッジ

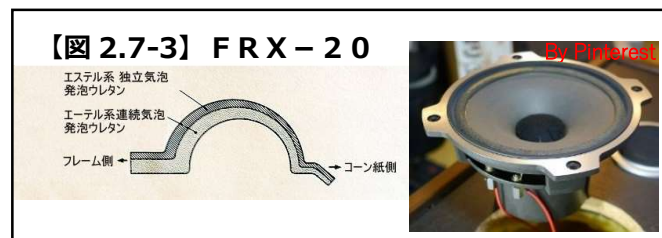
1970年代あたりから好んで使われるようになり、今でも主流の**発泡ウレタン製**のエッジは、大きなアール（シングルロール形状）が形成できるのでリニアリティが十分に取れ、振動板と別材質なのでコンプライアンスと機械抵抗（内部損失）を大きくできるためフィクストエッジで発生するエッジ鳴きや音色のカラーレーションを少なくできる材料になります。

主原料であるポリオールの高分子鎖がエステル結合かエーテル結合かで大きく2種類に分類できます。エステル系はエーテル系に比べて機械的強度が高く、耐熱、耐溶剤性、吸音性が高いのですが、デメリットとして経年変化で**加水分解**してぼろぼろに劣化することが挙げられます。（湿度の低いアメリカでは良い材料なのでしょうが、蒸し暑い夏や梅雨のある日本では・・・）

今から40年以上前にONKYOから発売されたユニットFRX-20は表層にエステル系単独発泡ウレタン、裏層にエーテル系連続発泡ウレタンを3：5の比率で貼り合せた**ロールエッジ**を使用していました

が、4～5年もするとエッジの表層（エステル系）がボロボロになりました。（左右で日光が当たる側が酷かったのでUV（紫外線）にやられたのかもしれませんが）

これを防ぐには、酸化防止剤（AO）や光安定剤（UVAやHALS）を添加しますが、特性が変化するため積極的には使われていません。



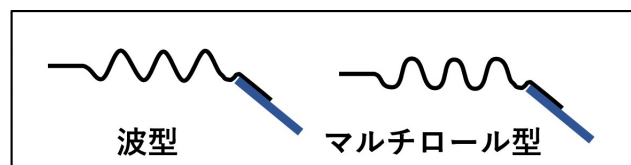
2. 7. 1. 3 布エッジ、ゴムエッジ

そうすると、選択肢はゴムか布。

布の場合には上記のフィクストエッジと同様にエア漏れ防止兼形状保持のためにコーティング剤を塗布する必要があります。具体的には樹脂またはエラストマー（ゴム状弾性物）をコーティングもしくは含浸した布を熱成型する方法があります。音質的なカラーレーションが少ないメリットがありますし、発泡ウレタン同様にある程度大きなアール形状も取れるため振動吸収性も良いし、経年変化も緩やかなのですが、製造上のバラつき（ f_0 、 Q_0 ）が大きく歩留まりが悪くなることや、成形時に異臭が発生するためメーカー（特に国内）が減っていることなどがネックになり、使われなくなってきています。

おまけに基材である布自体に伸縮性がほとんど無いため、突っ張る**限界ストローク近く**では歪が**急激に増大**するので、聴感で突っ張るのがはっきり分かります。

FOSTEX の FE-208sol では、これを補った**コルゲーション型**（波型）布エッジを採用しています。半円断面のロールよりスチフネスは大きく（硬く）なり、ストロークも制限されますが、歪は急激に変わるのではなく徐々に増えるようになり、人間の聴覚では認知しにくくなります。



【図 2.7-4】コルゲーションエッジ形状

結果的に、薄いゴム素材のロール形状が経年変化もそこそこで、且つ、ストロークも取れてコンプライアンスも大きくできるため、現時点での最良選択肢になると思われます。

通常、エッジに使われるゴムには、正式名を **IIR**（イソブチレン・イソプレン・ゴム）と呼ばれる汎用性のあるブチルゴム（ガラス窓枠のシール材やタイヤのインナーチューブなどに使われる）を筆頭に、天然ゴム **NR**、Oリングなどに使われるニトリルブタジエンゴム **NBR**、発泡構造を取り入れることが多い **EPM**（エチレン・プロピレン・ゴム）、車のバンパーに使われる **EPDM**（エチレン・プロピレン・ジエン・ゴム）、特殊なものになりますが **U**（ウレタン・ゴム）、シリコン系の **MQ**（メチル・シリコン・ゴム）、**VMQ**（ビニル・メチル・シリコン・ゴム）、**PMQ**（フェニル・メチル・シリコン・ゴム）などがあります。接着性は悪いのですが、化学的に安定していて経年変化の少ないシリコンゴム系（分類記号：Q）は個人的には面白い材料だと思います。

因みに最後のアルファベット M や R、Q などは ASTM（米国試験材料協会）の定めた記号で、**M** はポリメチレン（またはシクラン、シクロパラフィン） C_nH_{2n} 飽和主鎖を持つタイプ、**R** は不飽和炭素結合（共重合体）を含むタイプ、**Q** はシリコン系のゴムになります。

お分かりのように **R** はラバーの頭文字ではありません。

ゴムが伸び縮みする仕組みですが、ゴム分子の一部がお互いに接続した状態（**架橋**）になっていて、漁網のような構造を呈していることに因ります。外力が加わると架橋部分以外が動いて変形しますが、架橋部分が元に戻ろうとすることで**弾性**が生じます。

ゴムの物性ですが、金属バネが弾性成分だけなのに対して粘性を併せ持ちます。急激な外力が加わると大きな（粘性）抵抗を示しますが、ゆっくり外力が加わると弾性変形します。

また、架橋が弱い場合にはソルボセインやアルファゲルのように反発力を吸収します。

40 年ほど前、なめし皮（スエード：豚革の裏側をバフ起毛）をエッジに使っていたユニットを見かけました。弾性体ではないので**復元性は弱い**のですが、柔らかく、ロスが多く、通気しないし耐久性がありそうな材料です。ユニット修理の業界では鹿セーム皮を使う例がけっこう見られます。ロスが多く伸縮性も多少あるし、経年変化も少ないので良い材料とは思いますが、振幅（ストローク幅）を考えるとロール成形がしたくなります。

現実問題、豚革にしろ、鹿革にしろ天然素材なので、方向性が少なく均一で薄くて良質のものを手に入れるのは難しいと思います。補修用と考えたほうが良さそうです。

2.7.2 ロールエッジの挙動

上記のように波型（マルチロール）形状は少なく、金型が単純になるハーフロール（断面が半円形）がほとんどです。静止時には半円形状断面をしています駆動すると弾性変形します。

振動板と同様に特定周波数でモード共振が起こりますが、（図 2.7-5）上段はその模式です。共振形状は周波数により変化し、共振周波数以外では弾性変形だけになります。

厚さは図上段のように均一なものが多いのですが、駆動時の変形を考慮して径方向で変化させているものもあります。

振動板側を厚くすると内周での弾性変形が減りエッジ変位のリニアリティが向上しますが、振動板とエッジの境界での反射が大きくなります。

振動板側を薄くすると境界部分の反射が減るので本来の役割である「保持機能」を満たしますが、^たる変形が大きくなるので変位のリニアリティ改善は望めません。製品具体例として、前述 2.7.1.2 項の FRX-20 があります。（図 2.7-3）

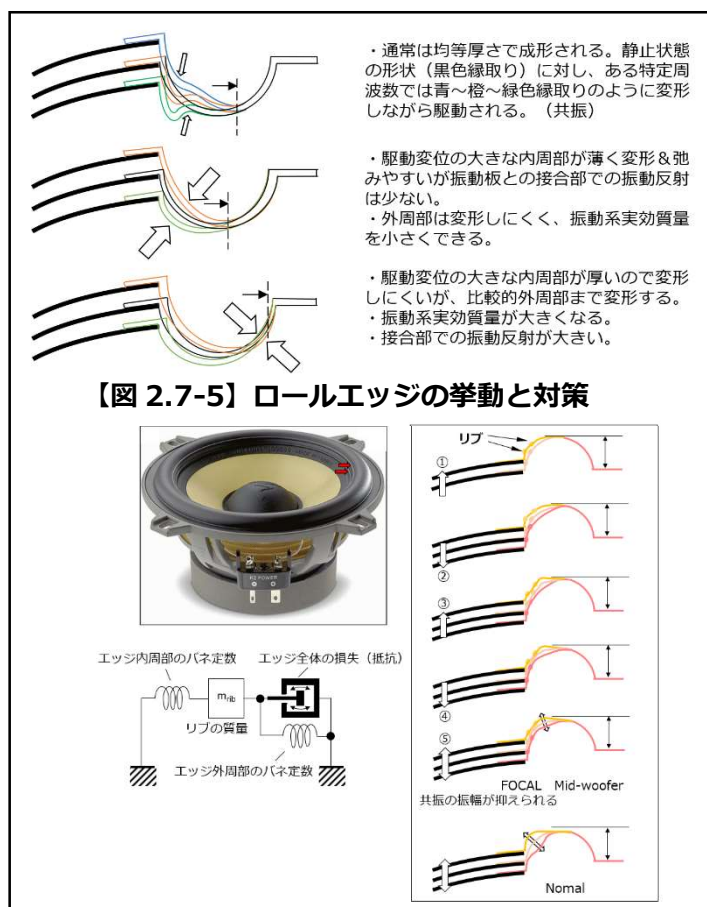
FOCAL 社では（図 2.7-5）下半分のようにエッジ内側円周方向にリング状のリブを二条設け（赤色矢印 TMD[※]）、その慣性質量を巧みに生かすことで振動板との境界側の弛み変形量を抑えます。

この対策にしても特定の共振周波数ではリブ部分が振動板と逆相の動きを助長することになり、未対策よりは良いということです。FOCAL 社では振動解析用アプリケーション・ソフトによるシミュレーション設計済みで、リブの位置や質量などを最適化して M 字変形（図の一番上の緑色形状）を最小限にしています。それでも特定周波数（対策前とは違う周波数）でモード共振するのは多かれ少なかれ仕方ありません。いかに共振周波数を高域に分散させて、それぞれの Q（共振先鋭度）を低くするかが設計ポイントになります。

※ TMD（Tuned Mass Damper）：構造体の共振を抑制するために慣性質量とバネ定数が共振を打ち消すような設定値に調整して付加すること。またはその構造そのもの。建築、土木、機械工業分野では普通に使われている技術。

2.7.3 変形について

ものが変形するのは外力が加わるからですが、これには 2 種類あります。加えた力を除くと元の状態に戻る弾性変形と、元に戻らない^{そせい}塑性変形です。力が小さいうちは分子配列が歪むだけで力がなくなれば元に戻りますが、その材質＆形状の降伏点を越えて塑性領域に入ると部分的に配列が壊れて元に戻らなくなります。更に力を加えると破壊に至ります。



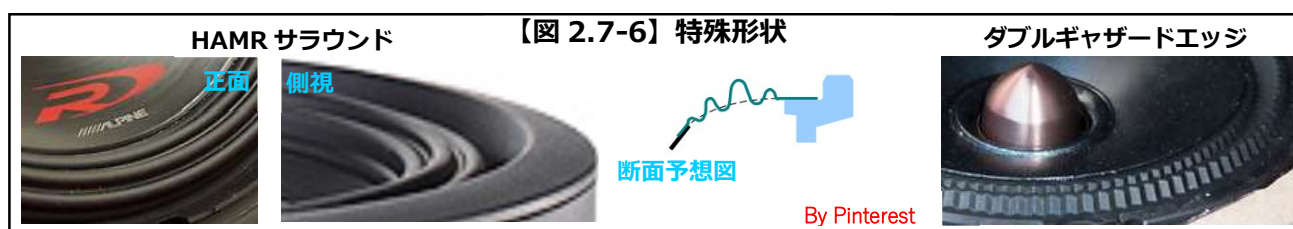
エッジの変形は弾性領域での挙動を想定していて、降伏点に至る前までいかにリニアに動くかを設計に求めています。それもスタティックなシミュレーションだけでなくダイナミックな振動環境下での挙動も含めてです。(ダンパーも同様ですが・・・)

樹脂(エラストマー)引き布エッジのユニットに対し、40℃/90% などの高温高湿度環境下で連続入力耐久試験(ランニング試験と呼んでいました)を実施すると、破壊に至らないまでも塑性変形を起こした例(表面にエクスボが生じる)をかなりの確率で経験しました。

私たちが試聴する日常環境(室内での使用)では、弾性変形しかしないと考えてよいと思いますが、車載用ユニットの場合は厳しい環境下での性能が求められる(60℃/90% などのランニング試験を実施する)ので、塑性変形も考慮することが必要になります。

7. 4 特殊形状エッジ ～ エッジレス

シミュレーション設計した「複合Rによるマルチロール形状(凹凸に波打っているのでコルゲート形状とも呼ぶ: 図 2.7-4)」であれば、振幅に対するリニアリティや変形による歪発生についても十分に考慮することが可能ですが、金型が複雑になることや、成形後の型離れが悪くなるために生産性が落ちるので、大方のエッジメーカーは作りたがりません。



アルパインの10インチ(25cm)径車載用サブウーファユニットSWR-10D2には、三菱ケミカル製の**サンプルン®**という軟質塩化ビニル樹脂系熱可塑性エラストマーを使用した「**HAMR (High-Amplitude Multi Roll)** サラウンド」と呼ばれる各々山の高さが異なる3山コルゲートエッジが使われていて、エッジ幅を抑えつつX max=21mmのストロークを許容しています。(図 2.7-6)

<https://www.alpine.co.uk/p/Products/SingleView/SWR-10D2>

特殊なものとしては、日立 Lo-D のL-200 等で採用された『**ギャザードエッジ**』やアルパインのDLX-Z25SWなどに採用された**ダブルギャザードエッジ**があります。

折り畳んだ部分の冗長性から変形方向を分散できるのでリニア振幅域は広がりますが、構造的に複雑になり、目づつ、振動系実効質量と機械抵抗がそれなりに増えるので特性のバラつきや経年変化が大きくなります。(折り目で破れたユニット修理が多いと聞いています)

FOSTEX では上位ウーファに『**タンジェンシャルエッジ**』と呼ばれる特殊形状を採用しています。(右写真) 振動板の前後変位に応じて接線方向に応力を分散することで振幅を確保していますが、複雑な形状ゆえにスチフネス vs 変位特性は前後非対称で非線形になります。(ダンパーも同形状の使用がベター: 2.6.3 項参照)



By Pinterest

エッジはダンパーと同様に歪の発生源であり、エッジレスという選択肢もあります。

エッジレスについては、メーカーでの製品化例（パイオニアの S-C05 や FOSTEX のユニット SLE34W/20W など）がありますが、実効質量が大きくなり、内磁型でダブルダンパーを使用しないと安定した動作が難しくなり、一般化していません。（右下写真は SLE-20W：磁気回路側にもダンパー）

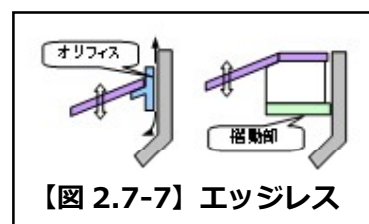
パイオニア C05 の場合、FOSTEX と同様に空気が流体であることを利用したオリフィス構造※でのフローティングでした。（図 2.7-7 左）

※ 急に狭くなった空間を流体が移動する構造。流速が上がると押し広げようとする力が働く。

駆動している時にはオリフィスが機能しますが、支持構造が弱いもしくは一点支持だと静止状態や小信号では振動板が重力によって垂れ下がってしまいます。ユニットが上向きもしくは下向きであれば成立するのでしょうか・・・。

これにより保持系は ① ダブルダンパーにして、② 磁気ギャップを広くしないと安定動作が望めず、結果として振動系スチフネスが高くなり（動きにくい振動系）、均一磁界範囲も弱く狭くなります。（ギャップが広いのでストローク X vs 駆動力係数 B/l の特性が低くピーキーになる：図 3-5-2 を参考にされたし）

C05 の改良型と称した LH5 ではピストンリングのようなフレームに接した摺動部を設けていますが、これはもはやエッジレスではありません。（図 2.7-7 右）



2.7.5 エッジ歪の改善・・・エッジ以外からのアプローチ

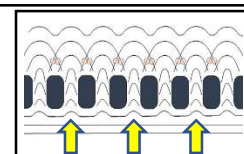
「エッジの変形による歪が視聴者にダイレクトに届かないようにすれば良い」という考え方を採用したのが、英国 Mission 社 QX シリーズのウーファになります。

エッジ部分は楕状のスリットの入ったリングで覆われていて、「エッジ共振による中域の歪をフィルタリングする」と QX シリーズのカタログにあります。（図 2.7-8 左）

完全にエッジをリングで覆ってしまうと閉空間のスチフネスが UP し、同時に駆動の途中で閉空間の体積変化と開口部の変形による閉空間内外での急激な空気の流動が発生します。（図 2.7-8 右）

副次的にスチフネスのノンリニア歪も発生するので、ガス抜き役目もスリットに持たせています。

「フィルタ」については、右図の整流器（細いスリットを通過した波面どうしが干渉して打ち消す）のことと思われます。スリット出口・赤丸印の部分で山谷の干渉による打ち消しが生じます。特に高い周波数で打ち消しが大きくなるので LPF として機能します。



2. 7. 6 エッジレス&ダンパーレス

エッジレス且つダンパーレスのスピーカーシステムとしては、VIV lab.社の evanui signature シリーズの名が浮かびます。

SONY がダンパーレスを発表する以前に、既に磁性流体による振動系の完全フローティングを採用していました。

http://www.vivaudiolab.com/evanui_signature-j.html

これは、2.6.2 項「SONY のダンパーレス」と同様に、磁気ギャップ中に**磁性流体**（界面活性化した強磁性微粒子を油媒質に拡散）を入れることでフローティングするものと想像します。強力な磁石（N52）を用いてトッププレート^ひを厚目にし、且つ多層ロングストロークVCとすることで微小信号でも変位が大きくなるように設計すれば、磁性流体が磁場によりギャップ内に留まる力と潤滑性により、7.4 項に示した小信号時の VC 軸心位置が偏心してしまう問題点（オリフィスを利用したパイオニアの例）も改善できると思われます。

（静止時も磁性流体がギャップに留まるのと、油媒質の潤滑性による）

初代、二代目は Al-Mg 合金振動板+コンセントリック（同心）VC による内外周ツイン駆動と説明がありますが、同軸ツイン駆動は内外周で負担質量が異なるため加速度同調が難しいと思われます。

したがって三代目はアルミニウム製振動板の外周部を後ろ側に折り曲げてもう一つのギャップに満たされた磁性流体に浮く構造にしているのではと想像します。（外周ギャップも磁界で保持された磁性流体の油膜で満たされていて、振動板の折り曲げ構造が接触摺動^{しゅうどう}にならないようなギャップ幅を設定している？のでは・・・。結果的に油膜部分がオリフィスを形成して外周による軸心保持も兼務できる？）

磁性流体により磁気回路の内側は密閉され、駆動に対してエアダンパーを形成します。

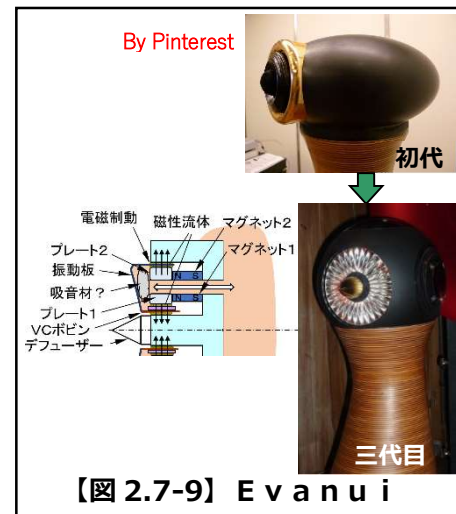
ギャップが狭いので磁性流体内に気泡等は生じないと想像します。（図 7 - 8 断面想定）

上記振動板外周の部分では振動板がアルミ製であることから渦電流による電磁制動（ブレーキ）が働くと思われます。超オーバーダンブにはなりますが、非常に優れた構造です。

振動板裏側から磁気回路後方に向けて気道（図の薄茶色部分に白矢印）を設け、振動板裏側空間のスチフネス上昇を防ぎ、背面放射の音圧によりロードをかけることができる構造と思われます。（発表されていないため、**図も含めすべて想像ですが・・・**）

同じコンセプトで既に三代目になりますが、現在は 0.1mm 厚アルミニウムに「折り紙」のように手で折り目を付けた 15cm 径の平面状振動板になっています。写真を見ると半径方向に放射状にリブが入りキラキラと輝いています。折り曲げることにより薄い振動板の強度を増し、且つ特定の分割振動パターンが発生しないようにしているのでしょうか？

延^ひいてはピストン振動領域の拡大を期待する・・・物理特性的には正しい方向性だとは思いますが、複雑になればなるほど再現性は失われますし、バラツキが大きくなります。



【図 2.7-9】Evanui

私自身、素晴らしいものが出来ても二度と同じユニットが作れないというジレンマを何度も経験してきました。

バラツキは複数のユニットから選別するにしても、特性の良いユニットが再現性の良いユニットとは限りません。人間の左右の耳の周波数特性の差（測定すると、びっくりするほど差が大きい）を考えればフリケンシードメインのユニット周波数特性差は参考程度と考えてよいと考えます。

人間は、生まれつきの左右偏差を「適応の習得」という仕組み（銃の照準を合わせるように脳の中で補正值を記憶している）で補ってしまうのです。ユニットに特性表が付いていて『わざわざ選別して揃えたもの』だとなると、思わず欲しくなるのが人情ですが、あまり意味がないということです。横道に逸れました。閑話休題。

8cm AL-Mg 合金振動板に^{うるし}漆コーティングした初代、二代目とは全く違う音質傾向になったという記事が Web 上にありましたが、三代目は技術先行で^{てら}気を配ったものでなく、音楽をニュートラルに再生できる方向に変わっていて欲しいですね・・・構造は、基本的にシンブルイズベストです。

キャビネット構造は、長岡鉄男さんのスワン（小さな密閉バックキャビティ+ショートバックロードホーン）と同様になります。私は、残念ながら実際の音を聴いたことが無いので（VIV lab.のある鎌倉には趣味の写真撮影で良く行くのに・・・）コメントできませんが、独創的な発想の製品なので注目しています。良い技術はどんどん広がって欲しいです。

40 年以上前にガレージメーカー的に市場投入された「イノウエ K I スピーカー」というものを急に思い出しました。evanui 三代目のピカピカユニットと見た目が似ていたためでしょうか。

振動板の材質はメラミン樹脂をガラス繊維で強化した GFRP で、表面には無電解メッキを施してあり、放射状のラインが入っていました。（右写真）

メラミンは引張強度や硬度が高く、加熱で縮重合する熱硬化性樹脂です。

エッジは布製で、Mission 社 Q X シリーズと同様にエッジから発生する歪を防ぐためにエッジを覆うようにメッキしたカバーが配置されていたため、見た目は鏡面飾り（メタリック・オーナメント）のようで、全く SP ユニットらしくありませんでした。

「分割振動させない」「内部からの音漏れ歪を防ぐ」が主たるコンセプトで、キャビネットが直方体なのに内面はラウンド形状にすることで定在波を防止しており、吸音材が木炭という部分もメーカー的な発想から外れてユニークなものでした。販売期間が短かったこともあって、熱狂的な信奉者がいらっしゃることで有名です。紙系振動板の項で「ラジアル抄紙」を取り上げましたが、このピカピカ振動板も同様のコンセプトで外周ほど薄くなっています。分割振動させないことと実効質量増加のはざままで井上さんが苦しんだ結果と思われる。 閑話休題



2. 8 2種類の音響伝播

ここで、「**音響出力**（空間への放射）」を整理しておきます。

音響出力はピストンモーション（振動板の前後駆動）による「直接放射（**粗密波**：時間要素）」と「分割振動（**共振**：周波数要素）」の2種類があり、どちらも縦波です。（横波は弾性体または固体内だけ）

直接放射は媒体の粗密（圧力変化）による進行波（**縦波**：分子や粒子同士の押しくら饅頭・・・位置エネルギー⇒運動エネルギー変換）であるのに対し、分割振動は進行波によって二次的にロケーション毎に媒体が加振されて出来る**共振波**（**縦波**：分子や粒子同士のバケツリレー・・・分子や粒子の位置エネルギーは変化しない）になります。

図 2.8-1 の上および下を比較参照してください。

直接放射は放射空間（点音源の場合は 4π 空間：全周）に対する圧力変化によるエネルギー伝播（粒子間距離の変化：粗密波）になるので距離が離れるほど運動⇒熱エネルギー変換による損失比率が多くなり減衰しますが、共振現象の場合には、その媒体の状況（損失要因）に応じた減衰になります※。 ※ 減衰の少ない媒体では遠くまで減衰せずに伝播します。

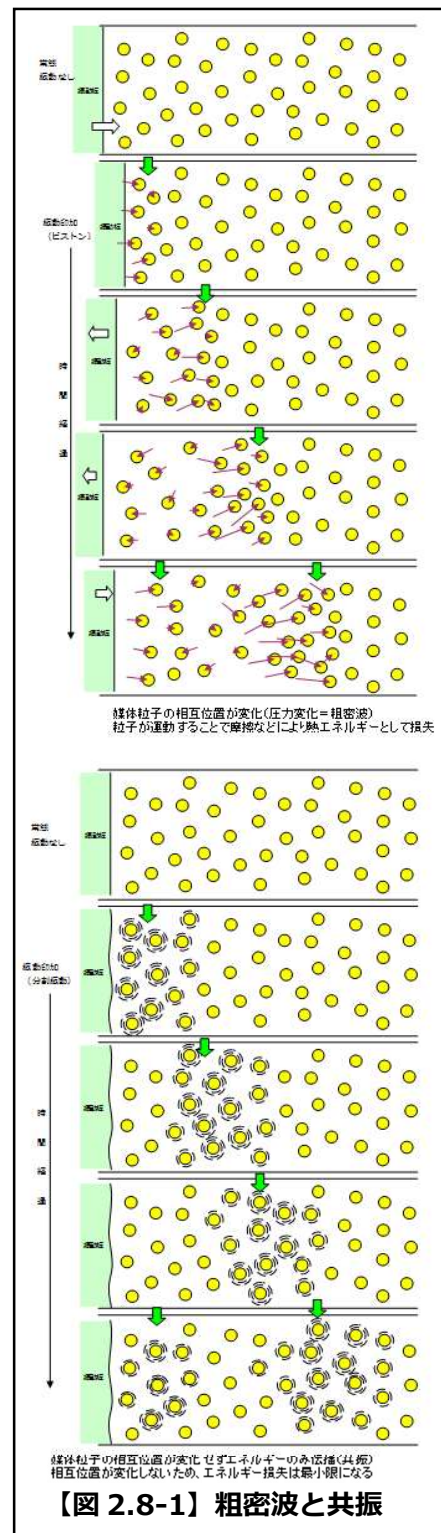
（粒子の相互位置が変わらないため位置 E⇒熱 E 変換が起きない）

厳密に言うと、分割振動は振動板が一定の共振モードで振動したことにより周囲の媒体（空気）が二次的に振動（共振）することによって生じます。弦楽器の胴鳴きなどがこれに相当します。弦楽器の場合には、弦そのものから伝わる直接波（粗密波）より胴鳴きによって生じる間接波のほうが、楽器から離れるほどエネルギー量として相対的に大きくなるので、間接波（高調波共振：胴鳴き）が音色を決定するようになります。楽器が**固有の音色**を持つ主要因です。

音色を決定するのは、分割振動による（高調波）共振レベルの構成比（スペクトラム）になります。（これにより波形が決まる）

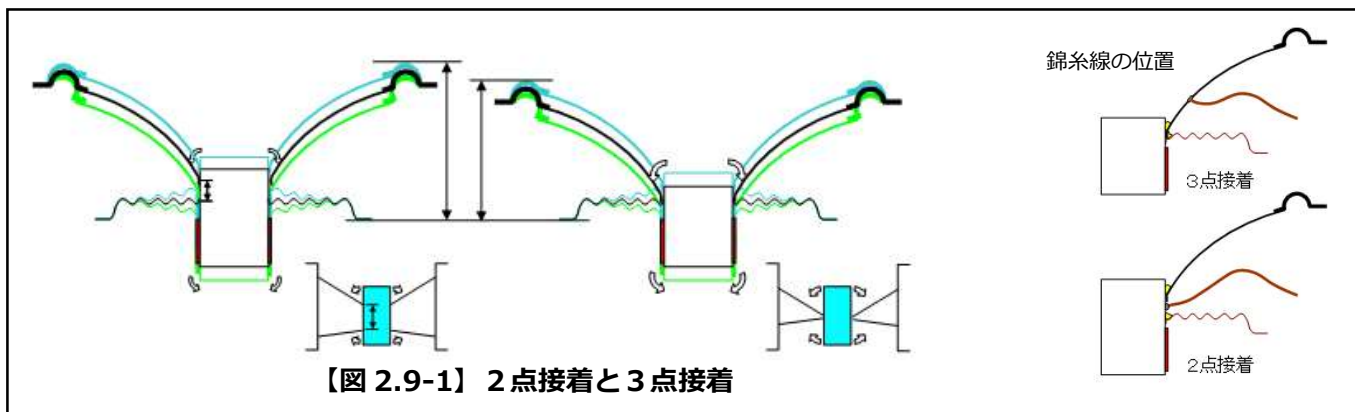
弦楽器の例を挙げましたが、現在のフルレンジユニットが上記の双方（粗密波と共振）を同時に利用している『妥協の産物』であることは否定できません。「スピーカーは音響変換機である」という命題から固有の音色を発生させること（カラーレーション）は「悪」ということになり、出来る限り分割振動を防いだ結果が専用帯域を分けた『マルチウェイ』であることも事実です。（分けたことによる弊害は数え切れません）

分割振動を積極的に放射（二次放射素材そのものの音色が出る）しようとする寺垣武さん考案の『**波動スピーカー**（M'sSystem で商品化）』や JAZZMAN から発売されている点駆動システム J-01X（<http://day-planet.com/>）は楽器の考え方（粗密波ではなく共振・共鳴音を主に放射する）に近く、スピーカーのマルチウェイとは真逆にあるものです。



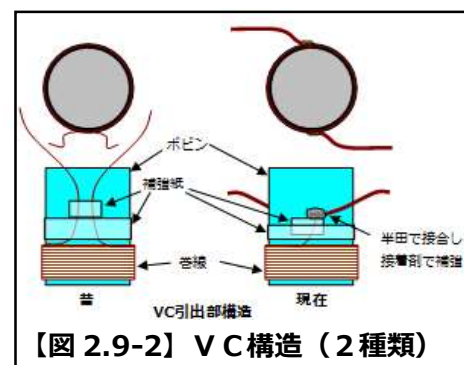
2. 9. 相互接続要素

2. 9. 1 3点接着について



3点接着は、VC 巻線（力点）、ダンパー（支点）、振動板（作用点）の接着位置を出来る限り近づけることでコイルと振動板を直結に近い状態にするための手法です。ダンパーと振動板が直近になることで実効質量が減り、且つ VC ボビンが短くなるのでボビンの音質影響が少なくなることが主なメリットになります。

VC ボビン表面から錦糸線を直接引き出すタイプ（図 2.9-2 右）では、組み立て構造上、引き出し位置がダンパーと振動板の間になってしまうため、3点接着は構造的に実現が難しくなります。ダンパーに箔状の電線をミシンで縫い合わせた『導電ダンパー』（ギフトクの HP 参照）であれば可能になりますが、駆動に伴う弾性歪に方向性が出てしまうのは防ぎようがありませんし実効質量も増えます。



作り込みの面で多少ラフに作っても揺動（ローリング、ピッチング、ヨーイング）が発生しにくいという2点接着のメリットもありますので、一長一短であることを忘れてはなりません。また、（図 2.9-1）に示すように、VC 周辺の全高は3点接着のほうが低くなりますので設計上 VC ボビンを短く出来るため、実効質量を減らすことが出来ます。

3点接着は、最近では FOSTEX の FE-208Sol など採用されています。

3点接着については第三章「ユニットの組み立て方」に詳しく記載しています。

2. 9. 2 接着剤について

接着剤の話をちょっとだけ。(VC ボビンと振動板の接着剤を中心にした話になります)
ユニットを自作される場合には参考になるかもしれません。

まず、「接着」の定義について説明します。接着というのは「2つの物体の間に接着剤を入れて位置関係を固定（結合）すること」になります。

これには3種類あって、① 機械的結合(アンカー効果)、② 物理的相互作用（ファン・デル・ワールスカ：電気双極子同士による相互作用）に起因する二次結合、③ 化学的結合（原子間結合：化学反応）による一次結合になります。(図 2.9-3 参照)

① 機械的結合（アンカー効果）は、2つの物体の表面粗さを利用して、その粗さの隙間に接着剤が入り込んで硬化することで接着剤の機械的強度（形状保持力）により結合させるものです。

② 二次結合の要因となるファン・デル・ワールスカは分子同士の相互距離が5 Å（オングストローム： $\times 10^{-10}$ m）以下になると双極子に分極して引き合う力のことです。接着剤が被接着材の表面を濡らす（表面張力の低い状態にする）ことで成立する結合です。油に近い分子構造を持つ PP やシリコンなどは表面張力が高い（親和性または濡れ性が低い）ので接着しにくくなります。

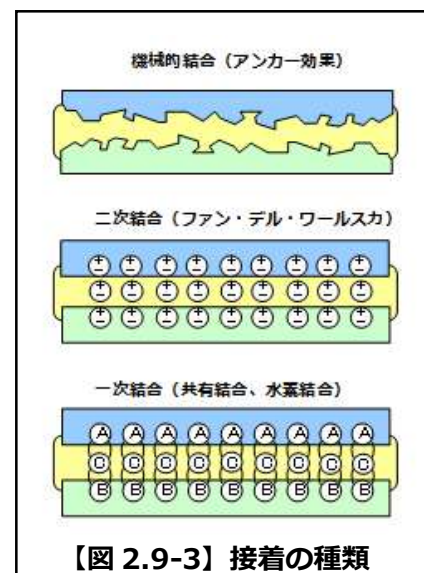
③ 一番強い結合が化学結合（原子間結合）になります。それぞれの分子や原子の間に共有結合や水素結合など化学結合が働く（それぞれが持つ「腕（価標）」で繋がるように表記）ものです。

これらの仕組みを知っていると、どうすれば強固な結合が望めるかが分かってきます。アンカー効果を高めるには表面をザラザラにするほうが良いのですが、二次結合のためには出来る限り表面張力を小さく（親和性を高く：ツルツルに）して分子間相互距離を小さくすることが条件になります。⇒ 通常、①と②は排他になります。

PP などの場合、アンカー効果を期待して表面をヤスリや薬剤で荒らして接着する方法と、介在物（プライマー）を表面に塗布＆乾燥させて濡れ性を改善する方法とがあります。

プライマー（Primer）というのは、表面改質のための下地処理剤全般を表す名称で、塗装の場合にはシーラー（Sealer：フィラーFiller（充填剤）とも呼ばれ、目地を埋めて塗料の染み込みを防止するもの：半固形物が多く、厚く塗る）とサーフェーサー（Surfacer：目的は一緒だが二次結合を利用するため薄く塗る）があります。

PP 用プライマーはサーフェーサーになります。活性基（親和性を改善する化学基）を溶剤に分散させたもので、PP の表面に薄く塗布（コート）して乾燥させることで PP 表面と活性基が結びつき、塗布面を濡れ性が高い状態にします。水面に浮かぶ玉状の油に洗剤（界面活性剤）を落とすと油の表面張力が落ちて弾ける（＝水と親和する）のと同じです。



【図 2.9-3】 接着の種類

こうすることで、接着剤との二次結合力が大きくなります。欠点は、活性基が水分と結びつくと親和性改善効果が落ちていくことです。（瞬間接着剤と同様に「風邪ひき」と呼ばれます。「冷暗所に保存して短期間で使い切ること」と注意書きがあるのはこのためです）

次は各論です。現在主流になっているエポキシ系や変性アクリル系、昔ながらのゴム系など、それぞれ特質が異なり、その物性から音質面でも多少の傾向があります。

・エポキシ系の場合には用途が広範囲に^{わた}亘っていることもあって、極端に硬度の高いものから柔軟性を持ったものまで多種多様、一液性/二液性、硬化時間もさまざまです。

・変性アクリル系はアクリル樹脂と変性オリゴマー（ゴム質）とで出来ているので総じて耐衝撃性が高いのが特徴です。両者とも経年変化（変質）しにくいメリットがあります。

エポキシ系では ALTECO の耐衝撃性に優れた ES-148 シリーズ、短時間で硬化する F-05 シリーズ、変性アクリレート系では DENKA のハードロックが有名です。意外とモッタリ系の音になりますが、アルミボビンとの組合せでバランスが取れます。

・ゴム系（クロロプレン系）エラストマーは硬化に伴って溶剤が蒸発（キュア）するので目減り（体積減少）しますが、架橋網目構造による内部損失が期待できるメリットがあります。

クラフトボビン+紙の振動板であれば、溶剤中に分散したエラストマー分子が相互の組織中に浸透することで境界が曖昧になるため接着剤部分での不整合が起こりにくく、ゴム系の特性が生きてきます。但し、目減りするので振動板の中心孔内面と VC 外面との隙間が十分に小さいことが必要条件になります。

接着剤の種類に因らず、出来る限り接着剤を介さないこと = 機械結合を優先させて接着剤は補助的に機能させることが良い音を再生する条件です。ガバガバで接着剤を大量に塗布しないと接続できないようでは接着剤による音色のカラーレーションがモロに出ますし、塗布量も多くなり実効質量が大きくなります。VC リード線をハトメ+錦糸線で引き出す昔ながらの構造でなく、VC 外周面から錦糸線を直接引き出す構造であれば、この部分の隙間を最小に出来るため、音質向上に貢献しています。（VC ボビンの 2.5.1 項に VC 構造の写真があるので参照願います。図 2.9-2 も参照願います）

ゴム系は、エージング（自然キュアもしくは加熱加硫）をすることで体積減少すると同時に若干軽くなり、結果的に比弾性率も上がります。自然硬化では数ヶ月かかることもありますが、熱による炭化も音の変化を生みます。経験上、多少炭化していたほうがヌケ良くカラーレーションの少ない音の傾向になります。（炭化により構造が変化＝比弾性率がアップし、内部損失が減少する＝VC との結合部分は伝達率が高く、物性差が少ないほうが良い）

国内製ではダイヤボンド（DB）の 1600 系か、固形分が多く音質メリットのある**セメダインの CS4503F** あたりがお勧めです。どちらもクロロプレンゴム+溶剤の構成です。

CS4503F の作業時は、溶剤（MEK[※]）で中毒を起こすので換気には十分に注意！

※ MEK：メチルエチルケトン：劇毒物扱い。アセトンやシンナーより注意を要する。一部の樹脂も溶融する。

☆ 2液性のエポキシ系や変性アクリレート系の場合に注意を要するのは、① 混合比を厳密に守り、② 確実に攪拌することです。2液性のエポキシ接着剤は主剤のエポキシ樹脂と硬化剤のポリアミドアミン類とを等量（同じモル数）で混合・攪拌することにより、それぞれが順次結びつくことで硬化（滑性水素による付加重合）する仕組みになっています。

変性アクリレート系はメタアクリル酸エステルとメチルペンテンのラジカル共重合により硬化するため、接触した部分から反応が進んでいきますのでエポキシほど攪拌に神経質にならなくてもOKです。

いずれも等量がキーワードになります。（化学的には等 mol = 等分子数が正しい）

もし、どちらかが多い場合には、結合する相手が無くなる為、硬化しない部分が出てしまい、強度不足による層剥離や表面がベタベタするなどの不具合が発生します。

もうひとつ注意しなければならないのは、攪拌する容器の問題です。繰り返し同じ容器を使っている場合には、異物、特に油分の混入があると硬化不良を起こします。また、硬化した残留樹脂の隙間に溜まりができることがあり、攪拌不良を起こす原因になります。

できる限り PET などの使い捨て容器（コップ）を使って攪拌することをお奨めします。

紙コップの場合には漏水防止のためにワックスなどを表面コートしてあるものもあり、これも不適です。

少量を使う場合には上記のようなことは起こりませんが、短時間硬化型を多量に使う場合には手早く確実に攪拌することが必要になります。攪拌不足を防ぐため、A 液、B 液それぞれ、もしくは一方に色素を入れ、攪拌が不十分だと色が残る工夫をした接着剤もあります。

等 mol で確実に攪拌作業が出来ていれば色が消えます。

また、充填用などで長時間硬化型を大量に攪拌した場合（200g 以上）には、急激に反応熱が発生しますので、やけどに注意が必要です。

2. 10. ハウジングについて

ハウジング(フレーム)というのは、① 磁気回路 および ② 振動系の固定場所であり、且つ、通常は ③ キャビネットへ固定するための構造になっていますが、振動系が音質の最重要検討対象としてモテはやされる中、ほとんど手を入れられていないのが実情です。

意外と知られていないのは、この部分が音質に思いのほか影響を与えることです。

考えてみれば、振動板の真後ろにあって、その音圧にダイレクトに晒されているのですから、振動しにくい材料で作るべきところなのですが、殆どの廉価版ユニットは、薄い鋼板を打ち抜いてプレス成形しただけのものを使っています。叩くとカンカンと威勢よく鳴ることからも気付いている皆さんもいて、この部分にプチルゴムなどを貼られている方もいらっしゃるようですが、振動エネルギーを押さえ込むのは至難の業ですし、貼れば貼ったで材質のクセが出てしまったり、ダンプリ過ぎで音が死んでしまったり、満足な結果を得られている方は少ないと思います。

一度、以下の方法で音を聴かれることをお奨めします。

まず割り箸を用意します。これは鉛筆などでもOKです。これをハウジングの表面と顔の肉の薄い部分(アゴか頬の骨ばった部分、^{ひたい}額などが良いです)との間に突っ張り棒のように入れた状態でユニットに音声信号を入力すると、骨伝導により音が聴こえます。

ユニットから出る音のレベルと骨伝導で認識できる音のレベルを比べると骨伝導のレベルの大きさに驚かれると思います。それも特定の周波数で強調されているのに気付かれるでしょう。このことから分かるように、ハウジングが電波の受信アンテナのように特定周波数の背音圧で共振しているのです。したがって、固定先であるキャビネット(バッフル板)にはハウジング共振で変調された振動エネルギーが伝播することになります。それも骨伝導と同じように「それなりのレベル」で伝播するため、キャビネット(特にハウジングを直接固定するバッフル板)の構造が弱いと『たわみ振動(モード共振)』を引き起こします。

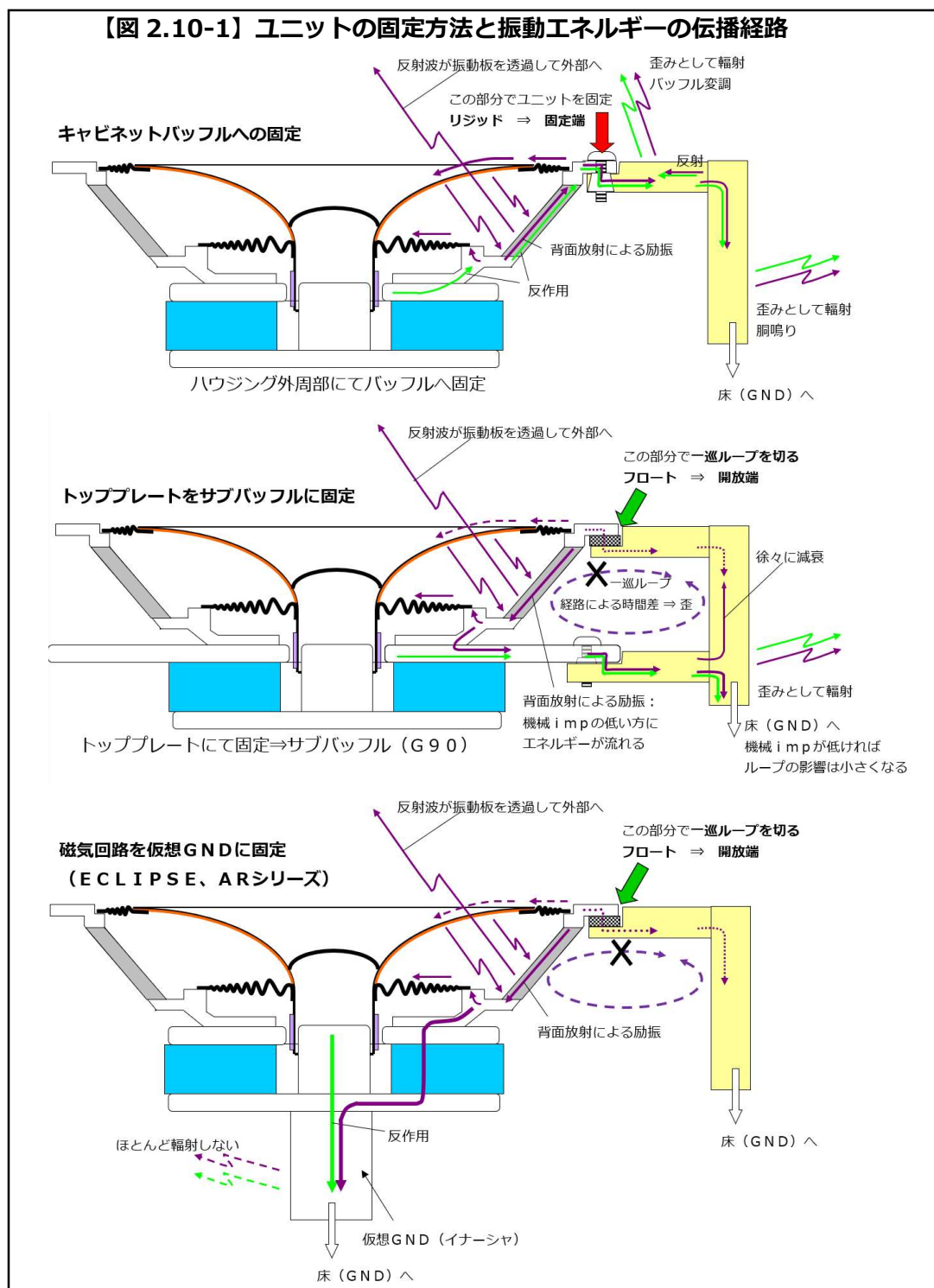
また、ハウジングにはエッジやダンパーが固定されているという事実を考えると、バッフル板のたわみ振動によりハウジングが更なる(二次的な時間遅れを伴う)混変調歪を発生することで、エッジやダンパーが自家中毒の経路(振動板へ、ひいてはVCボビンへの変調フィードバックの経路)になってしまうことが分かります。

こう考えると、ハウジングは最も振動して欲しくない部分だということが分かると思います。ユニットの構成部品の中で、もっとコストをかけて剛性や制振に気を遣うべき部分であり、材料や形状に工夫をこらして良い部分なのです。

かといってアルミや垂鉛ダイキャスト製の肉厚で強固な構造にし過ぎると、磁気回路からの振動(反作用)をロスなくバッフルに伝えてしまうことになります。また、後方の開口率が下がるため、振動板背面に放射された音響出力が反射して振動板に変調を与えたり、軽量で薄い繊維系振動板の場合には音響出力が通過して外部に漏れたりします。

2. 10. 1 励振エネルギーの処理方法

通常のシステムでは、ユニットのハウジング外周部分をキャビネットのバッフル板にスクリューなどで固定します。(図 2.10-1) 上段



廉価版ユニットなどは、強度の十分取れていない鉄板打ち抜きプレス成形ハウジングを採用しているので、振動板駆動に伴って磁気回路に発生した反作用力はハウジングを介してバッフルへと伝えられることになり、ハウジングによる歪も伝わってしまいます。

解決策の一つは、十分な強度の取れている磁気回路のトッププレート部分を**仮想 GND**（それなりの質量を持つ構造体＝通常はキャビネットが相当）に固定する方法です。

こうすることで磁気回路はキャビネットと直結され、間に脆弱なハウジングが入らないことになります。（図 2.10-1）中段。

テクニクスが 2017 年 3 月に発表した SB-G90 は、この構造を採用しています。

トッププレートをキャビネットに固定した状態でハウジング外周部もフロントバッフルに固定してしまうと、磁気回路（トッププレート）⇒ キャビネット ⇒ フロントバッフル ⇒ ハウジング ⇒ 磁気回路（トッププレート）という一巡ループ（紫色破線）ができてしまうため、ハウジングとフロントバッフルを分離することで振動エネルギー伝達経路を切っています。

バッフルとハウジングが分離されることでハウジング外周部は「振動系の固定場所（エッジ座）」という役割だけになります。したがって、強度に関しては駆動方向である前後方向のみ確保すれば良く、振動系による加振部分に相当するエッジ座とダンパー座が磁気回路に対してリジッドであるという条件だけで設計すれば良いことになります。

振動エネルギーは機械インピーダンスの低い方向に流れるという大原則があります。

これは**エントロピー極大（自由度増大）**の方向に他ならず、自然界の必然になります。

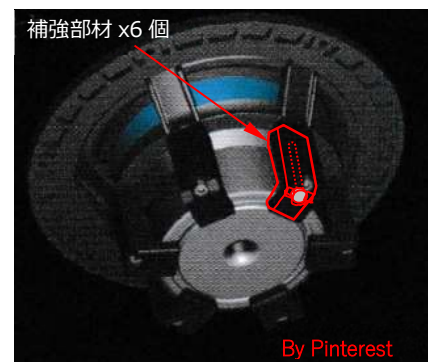
ハウジングのエッジ座部分は質量の大きな磁気回路を基底とすると開放端（どこにも繋がらずエネルギーの逃げ場がない＝機械 IMP. 高）になり、背面放射によってハウジングが励振されて発生した振動エネルギーは結合されている磁気回路のトッププレート側（質量大：機械 IMP. 低）に流れて吸収されます。

ところが、エッジ座部分（外周部）をキャビネットに固定すると機械 IMP. の低いキャビネット側に励振エネルギーが流れ出てしまいます。（図 2.10-1 上段：紫色矢印）

同時に磁気回路に発生した反作用のエネルギー（同：緑色矢印）も流れ出すため、これと干渉してバッフル板に歪が発生してしまいます。

質量の大きな磁気回路とハウジング間の結合方法は、通常はスポット溶接やスクリュー締め付けによりますが、仕上がり精度が甘いと**結合による応力でハウジングが歪む**ことが多く、音質にも影響を与えます。

これを補強する（二者を均一結合する）ため、ハウジング後部と磁気回路のボトム部分を結合させる追加部材（右図の三菱 DS-4NB70 では 6 か所）とボルトを使って締め込むことがあります。マグネットがフェライトの場合には、電気伝導材を使うことで渦電流の影響を防ぐ効果もあ



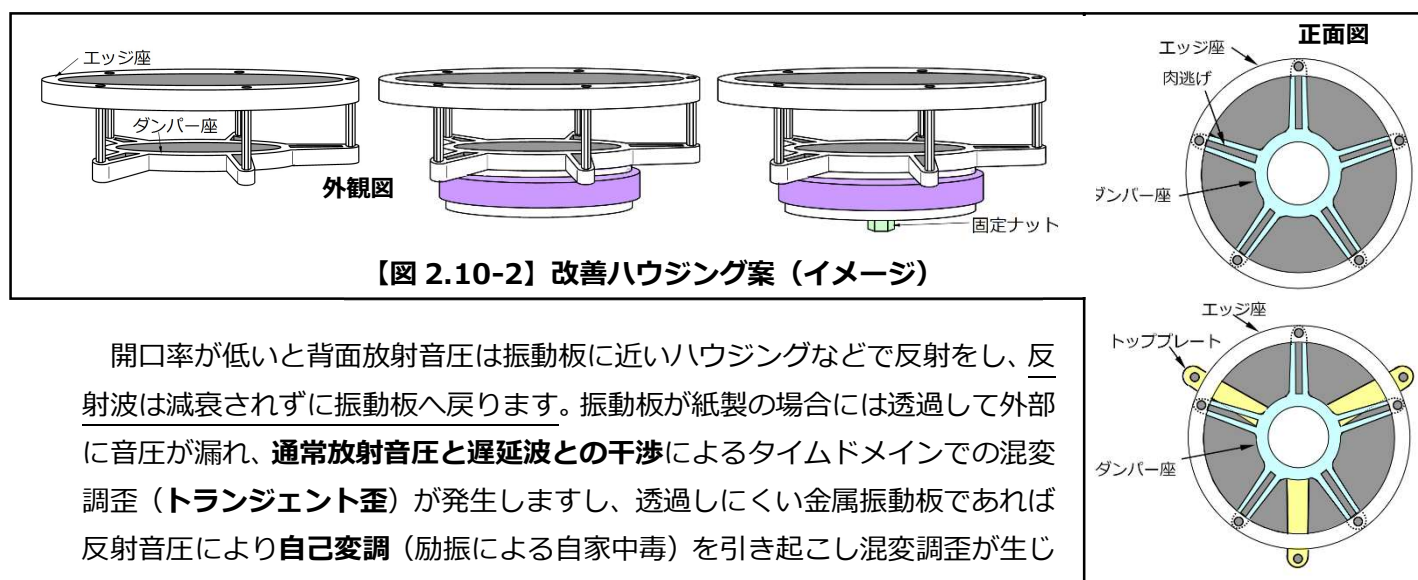
ります。多点で締め込むことで機械インピーダンスを均一＆十分に低くすることにもなり、フレームと磁気回路を一体として扱う（フレームの影響を減らす）のが目的になります。

バッフル板の強度が十分に高ければ良いのですが、プアな場合にはさらに音質に影響を与えやすくなります。（弱い部分の影響が音質に対して顕著に出る）

キャビネットの強度や質量が十分大きければ（機械インピーダンスが十分に低く仮想 GND と見做せれば）、磁気回路に発生する反作用は、結合部材を経由してすべてキャビネットの質量に吸収されることになります。

2. 10. 2 改善アプローチ 開口率アップ

前述のように振動板の背面放射音圧によるハウジング励振の影響は大きく、**後面開口率**はユニットにとって意外と重要なファクタになります。



開口率が低いと背面放射音圧は振動板に近いハウジングなどで反射をし、反射波は減衰されずに振動板へ戻ります。振動板が紙製の場合には透過して外部に音圧が漏れ、通常放射音圧と遅延波との干渉によるタイムドメインでの混変調歪（トランジェント歪）が発生しますし、透過しにくい金属振動板であれば反射音圧により自己変調（励振による自家中毒）を引き起こし混変調歪が生じます。

反射を減らす＝後面開口率を改善するハウジング構造案を（図 2.10-2）に示します。

この案では、右上図（正面図）のグレイに塗り潰した部分が後方開口になり、開口率をかなり高くできます。右下図のように G90 に倣^{なら}ってトッププレートの延長部分（ユニット固定に使うためのフィン：薄黄色）を付けても、多少影響を受けるだけで開口率は十分に高く維持できます。

実際の SB-G90（図 2.3-5-1 写真）では、図のような 3 本フィンではなく角度をずらした 4 本です。強度を考慮して 5 本にすれば、さらに開口率は下がります。

ダンパー座とエッジ座（共に肉逃げして、空隙にソルボセインや制振樹脂を充填してダンブ）との間を六角スペーサー（六角スタッド）で前後に単純結合しようとする、径の大きなエッジ座との間の結合用にダンパー座から別のフィン（提案図 2.10-2 の正面図では薄水色の 5 本）を張り出させることが必要になります。

この構造ならば、深さが異なる振動板を実装したい場合には、前後を結合する六角スペーサーの長さで寸法調整が可能になるので合理的です。(後述のようにデンマークの Audio Technology 社が既に製品化していました。汗・・・)

連結用フィン本数により定在波の状況が変わります。全波（スタッド～スタッド間で1周期：図 2.10-3 黒線）では偶数/奇数とも共振パターンが整合しますが、奇数の場合には半波（同、半周期：赤線）では同相定在波が乗らないので共振周波数を引き上げることができます。

強度が十分に確保できるならば、フィン形状を車のアルミホイールのように裏側を肉逃げした上で、表面に R を付けたりすることで振動板の背面放射を出来る限り妨げないような形にして（図 2.10-4）、且つ（図 2.10-2）のように前後方向に厚みを増やして強度を確保するのが合理的でしょう。

この部分には、金属ではなく 2.5 項「ボビン材質」で紹介した CNF（セルローズナノファイバー）とプラスチック樹脂の複合材を使ってみたいものです。

強度と内部損失を程よく兼ね備えた材質には食指が動きます。

現在、中級機のハウジングは、ガラス・フィラーなどとのコンポジット成形品（通常樹脂より引張強度が高く、粘りがある：弾性変形領域が広い）が多いのですが、将来的には脱石油の観点から有機樹脂（石油系）の配合量の少ない CNF 複合材がほとんどのユニットのハウジングだけでなく様々な部分に採用されるような気がします。

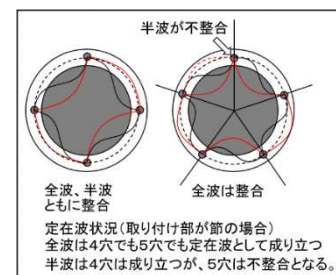
前述テクニクス G90 のようにサブキャビネットにユニットを固定する固定用フィンは、强度的にはトッププレートと一体がベストですが、磁性体を避けるためトッププレートの外輪に非磁性材料の別体パーツ（アルミなど）を接着 or ねじ止めしても成立します。

AR シリーズや ECLIPSE のような構造（図 2.10-1 下段）の場合には背面放射を妨げる上記 G90 の「固定用フィン」が不要で、ボトムプレート背面中央にネジ孔もしくはナット構造を設けてやれば**仮想 GND**（大きな質量：ECLIPSE ではグラウンド・アンカー 後述）や支持棒などの構造物を連結することが可能です。（図 2.10-2 外観図の一番右側を参照）

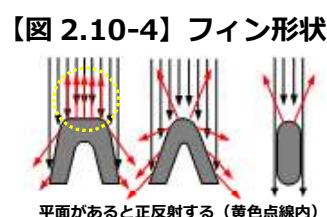
G90、ECLIPSE、AR シリーズいずれの場合も、励振エネルギーの一巡ループを切るためにエッジ座（ハウジング外周）にはエア漏れ防止構造のみでバッフルへの固定構造は設けません。これにはバッフルへの固定による共振モードの複雑化を防ぐ効果もあります。

ELAC の LLD ウーファのヨーク底面にはネジ条（右図の黄色矢印）が切っており、介在物（突っ張り棒）でキャビネットバックパネルに固定することを想定しています。

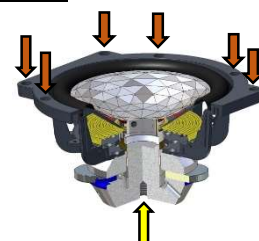
ただし、ハウジングフレームにはバッフル固定用の穴（橙色矢印）が設けてあり、ループを切る構造を想定していません。（突っ張らせる構造：複雑な多点アースを想定）



【図 2.10-3】共振モード



【図 2.10-4】フィン形状



ハウジングをバッフルから外して再固定する際に、音が変化してしまったのを実感された方もいらっしゃると思います。これは、固定の際の（多点スクリュー）締め付けトルクが変化してしまい、共振モードが変わってしまったことが要因と思われます。

市販製品にも、この部分にメスを入れたものがあります。Victor ブランド「EX シリーズ」のスピーカーでは4箇所を取り付けネジのトルク管理だけではなく1本だけ材質を変える対応を採っています。キャビネット構造が非対称であり、取り付けを均等にしても機械インピーダンスが均等にならないため、振動モードを最適化する苦肉の策だと思われます。

2. 10. 3 駆動に伴う歪の低減

ダンパーとハウジングに囲まれた空間は、ダンパーに通気性があるため開放空間と思われるのですが、実際にはダンパーが高速で動くためダンパー周辺の空気は流体というより**固体（粘弾性体）に近いもの**になります。したがって、この空間は小容積の高スチフネス負荷と考えられる動作をすることになり、更にダンパーの駆動加速度によって通気性がノンリニアに変わるため、結果的に非線形スチフネスによる歪（奇数次高調波に相当）が発生してしまいます。人間の聴覚は非線形歪に対して高い感度を持つため対策が必要です。

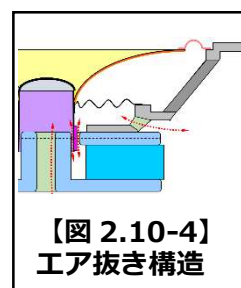
通常は、① この空間を出来る限り大きくする、② ダンパー布のデニール（単位面積あたりの質量）を小さく（繊維の太さを変えずに編み密度を荒く）する、③ フェノール樹脂の含浸量を減らす（変形して圧力を吸収できるよう柔らかくする）といった対処療法を施す場合がありますが、それとて限界がありますし、設計の最適化とは言えません。

特に ②③ は、ダンパーのへたり要因になります。

ハウジングでの改善項目としては、① 上記空間の壁面（側面）部をリブ構造としてダンパー以外の部分で開放通路を設ける方法や、② 短いスタッドをハウジングとトッププレートの上に挟む方法（結果として VC ボビンが長くなる）などが考えられます。

（図 2.10-4）は ① の例です。

プレス成形による安型ハウジングでは強度不足や鳴きが問題となるため難しいのですが、CNF コンポジット樹脂や耐熱フィラー混成樹脂（HP-FRP）成形品、鋳造用アルミニウム（AC2A など）やアルミニウム＆マグネシウム合金（A5083 など）、亜鉛合金製ダイキャスト（zamak3 など：耐衝撃性が高く振動減衰性が良好）であれば、この構造が可能でしょう。



他社ユニットで、このような構造にしているものを探しましたが、最初に FOCAL 社 Sopra シリーズのウーファユニットを見つけました。

ダンパーとハウジングの間に作られる空間を半径方向に開口したフィン状のリブ構造により開放しています。

（図 2.10-5 黄色矢印部分：図 2.10-4 と同様の方法）

更に、Audio Consequence 社の同軸ユニット（残念ながら発売未定）や Excel Audio 社の Extreme1、Seas 社の C18EN001、Audio Technology 社の Flexunits シリーズなどを見つけました。（図 2.10-6）

Flexunits は通気性連続発泡樹脂（スポンジ状発泡体）の異物進入防止リング（図 2.10-6 黄色矢印：短い丸棒スタッドの奥）を設けていますので、開口していることが写真では分かりにくいかもしれません。



All drivers are naturally generously ventilated, under the spider, from voice coil gap and not least through the pole piece, allowing the whole moving system to travel fast and freely, without any compression. ⇒ スポンジはスチフネスに影響ないようです。



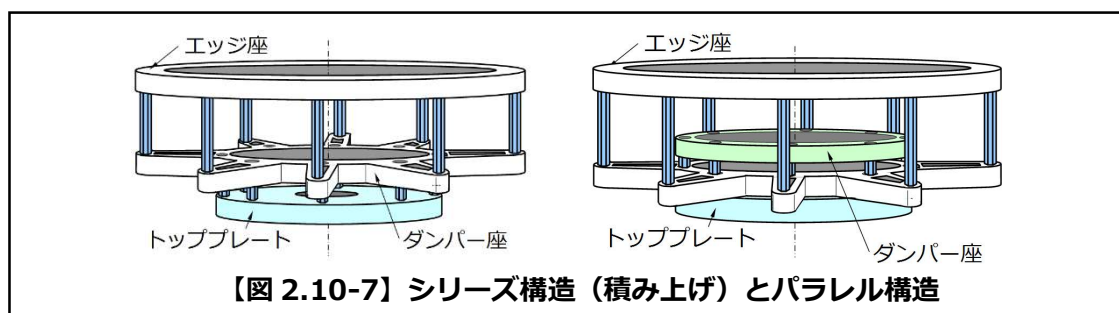
このような構造は、海外製の高級ユニットではマイナーではないようです。

そう考えると、日本勢ユニットのハウジングに対する考え方は本当に保守的^{コンサバ}ですね。

因みに Seas はノルウェー、Excel Audio は米国、Audio Technology はデンマークのメーカーです。特に Audio Consequence 社の同軸ユニットと Seas 社の C18EN001/002 は、ネオジウム磁石による磁気回路を使っていて、振動板開口率とダンパー後部開放率が非常に高いです。

Audio Technology には、磁気回路基準でスタッドを介してダンパー座、更にスタッドを介してエッジ座という直列積み上げ構造（Flexunits）と、磁気回路のトッププレート外周にスタッド受け構造を設け、そこからスタッドを介してダンパー座およびエッジ座を固定する並列構造（ADS 310px）があります。（図 2.10-7）

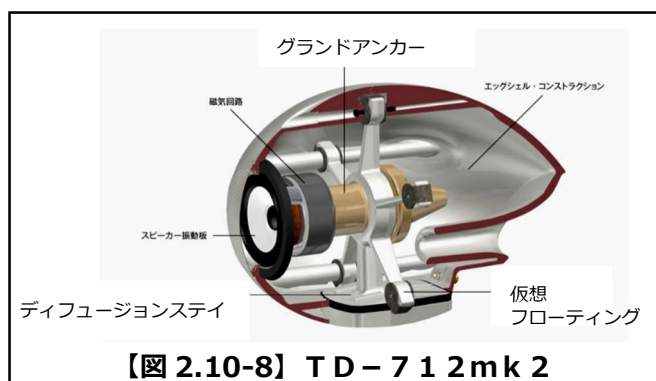
部品点数は多くなりますが、共通インピーダンスを持たせない（相互変調^{かな}なし）という意味からは後者のほうが理に適っています。使用する振動板形状やコイルの位置などへの対応はスタッドの長さでコントロール可能です。



2. 10. 4 ユニットとキャビネットの関係 取り付け構造

前項のようにハウジングはキャビネットとの関係が深いので、ちょっと話がユニットからズレますが、ユニットの取り付け構造について記述しておきます。

富士通テンの ECLIPSE シリーズは、テクニクスとは違う考え方の製品です。



磁気回路+グランドアンカー（仮想 GND）をディフュージョンステイという 5 本足の構造物を介してキャビネットにバランス良く固定しているように見えますが、実際には 5 本足の先端には緩衝構造を設けてキャビネットのほうを浮かしています。富士通テンでは『**仮想フローティング**』と呼んでいます。

（図 2.10-8 は転載禁止）

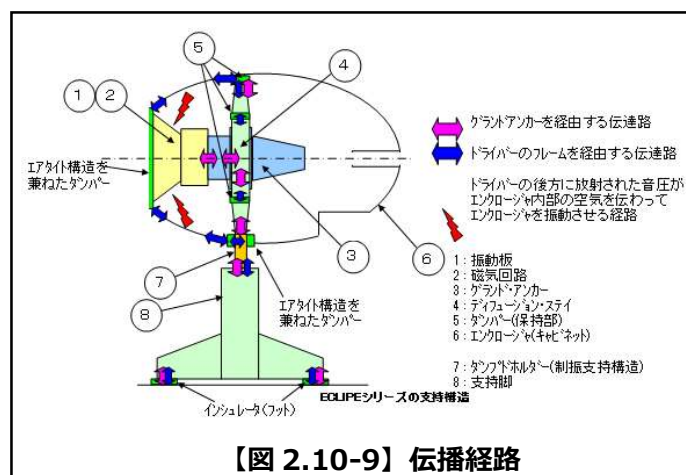
通常のシステムでは、ユニットのハウジング外周部分が質量の大きなキャビネットに強固に取り付けられるのですが、ECLIPSE のハウジング外周部分はエア漏れしない程度の強さでキャビネットに密着するシール構造（エアタイト）になっています。この部分はテクニクス G90 や拙作 AR シリーズと共通です。

ECLIPSE シリーズでは、キャビネットはあくまで『外殻（文字通りユニットの負荷容積を決める囲い）』であって、質量の大きな『メカニカル GND』ではないので緩衝材を介して中空に位置させるべきという考え方です。したがって、キャビネットは振動しにくい軽量な樹脂製になっています。

仮想 GND（磁気回路+グランドアンカー）はディフュージョンステイの下部中央にある 6 本目の足を介してピラー・スタンド上部にあるダンブドホルダー（制振支持構造部分）に固定され、ダンブドホルダーはピラー・スタンドを経て床（GND と想定）の上に置かれています。ダンブドホルダーはキャビネットとの間に制振材（シール材）を入れてあり、相互にインシュレートされています。（仰角が調整できる機構も組み込まれています）

前述のようにディフュージョンステイ先端とキャビネット間にも制振材が入っていて、キャビネットは床からフローティングされた状態になります。

仮想 GND は床に直結させるべきという考え方は、床が無量大質量であるという前提に基^{もとづ}いていて、拙作 AR シリーズの根幹にある考え方です。



いずれにしても、**ハウジングを支持構造物にしない**という考え方は富士通テン ECLIPSE、テクニクス SB-G90、拙作 AR システムに共通したコンセプトになります。

ハウジングを介してキャビネットに固定した場合にキャビネットから混変調歪が発生することは、(図 2.10-1) だけでは、すんなりと理解できないと思いますが、機械要素を電機要素に置き換えることで、その理解がしやすくなります。第五章で詳細説明をします。

2. 1 1. 引き出し線について

引き出し線(錦糸線)には通常、可撓軟銅撚線または屈曲性の良い編組線を使います。

引き出し線は VC の上下動に出来る限りストレスを加えないような構造である必要があります。ストロークが大きい場合、縄跳び現象防止のため、細い線を多数撚ったもの(例えば $\Phi 0.05\text{mm} \times 50$ 本撚りを更に 3 本撚り : 0.3sq) の選択より多少太めの線を緩く撚ったもの(例えば $\Phi 0.1\text{mm} \times 17$ 本を更に 3 本撚り : 0.4sq) の選択を耐久性の面からも推奨します。

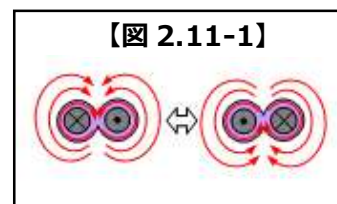
http://www.meiko-futaba.co.jp/katou-yorisen_speclist/

特殊な菱形断面を持つ「ダイヤモンド錦糸線」というものを後藤電子(株)で扱っていますが、サブウーファなどストロークの大きなユニット向けに開発したとのこと。通常の錦糸線より太さに比して単位長さ当たりの抵抗値が高いのがちょっと気になります。

ミッドレンジは微妙ですが、トゥイーターでは振動板の可動域が 1mm 以下なので、あまり考えずに細い線を選んでも大丈夫です。マグネットワイヤを入力端子に直接ハンダ付けしている製品もあります。可動域の広いウーファでもコイルから端子板までマグネットワイヤだけで直接引っ張る方法が「音質が良い」と主張される方もいらっしゃいます。編組であれば数本切れても導通の問題はありませんが、単線は切れたらそれまでです。可動線や被覆線の耐久試験に「繰り返し屈曲試験」というものがありますが、単線の場合、屈曲による応力ストレスは一箇所に集中しやすく、そのストレスにより破断が開始します。メーカー製のユニット(振幅の小さなツイータ以外)にはこのような構造のものはありません。リスクは絶対に冒さないのが鉄則です。

それに共振のリスクならば、構造的にシンプルな単線のほうが高くなります。

私には、こんなに短い単芯と編組の音質差を聴き分ける自信はありませんし、それを言うならば周辺の環境の違いにモロに晒される長いスピーカーケーブルの影響のほうが余程大きいと思います。(図 2.11-1) のように平行線の場合には電流の方向が変わると回りにできる磁界(赤矢印)の方向も交番します。近くに磁性体があれば相互電磁誘導により影響を受けるのは一目瞭然です。交番電流の流れている銅線同士は近付いたり離れたりする方向の力を受けます。厳密に言うと相互に振動するのですが、必要以上に線間を広げると、そのループを貫通する外来磁力線や外来電界による影響が大きくなります。4 線キャプタイヤでスターカッド配置を採用するの



は、このループを小さくできるからです。(右図)

ケーブルメーカーが色々な材質や構造のものを販売していますので、交換 & 比較を楽しまれるのも良いでしょう。上記スターカッドのようにできる限りシンプルなものをお薦めします。



品質管理で「パレート図」というものを使いますが、課題は**影響度の高いものから順番に**
対処していくのが原則です。大きな影響が消えれば、マスキングされて判断できなかった細
かい影響が見えてきます。逆に言うと、**大きな影響を排除しなければ、小さな影響はマスキ**
ングされて判別できないのです。したがって思い込みなども影響して、音質評価にもプラセ
ボ効果（本当は効果がないのに、効いていると思い込んでしまう・・・偽薬効果）が生じ易
くなり、見た目やうたい文句で、なんとなく違う・・・そのうち、だんだん良いような気がし
てしまいます。**自己暗示**と言えるかもしれません。それで満足できるならば、それでも良い
のかもしれませんが、その場合には必ずと言ってよいほど「より良いもの」が次々と出てき
ます。何故ならば**実は満足していない**からです。上記のマスキングしている大きな影響を取
り除けば、プラセボなどに頼らずに明確に判断できる状況が整います。

余談をもうひとつ。人間の感覚には**歪を好む要素もある**という話です。

歪には耐えられない、もしくは不快と感じる種類の歪と、刺激＝快感となる要素を持つ歪
とがあります。また、この感じ方には個人差があり、A君は「迫力のある音」と感じるけれ
ど、B君は「うるさく不快な雑音」としか感じないなどということもあります。逆にB君が
「心地よい」と感じるのに、A君は「生ぬるく面白みの無い音」と感じるかもしれません。

これは**個人の好みの問題**になります。

入力信号に正確な（相似な）出力を得ることが本来の原音探求だと思いますが、完璧な再
生（再現）は現状では無理で、どこかで妥協することになります。

それであれば、入力信号に無かったものを付加することで、視聴者の好みを満たすことも
一つの方法になります。「楽しく聴ければそれで良い」というのも一理あります。

カメラレンズの場合、口径による分解能の限界というものがあり、限界の見え方（感じ方）
をアパーチャ補正という手法により変えることが出来ます。これにもシャープな方向に補
正するのが好きな方とソフトにして粗さを目立たなくするのが好きな方が居るのです。

こう言ってしまうと身も蓋もありませんが、この場合、パレート図の大きな課題を取り除
くことは、レンズの口径を大きくする（情報量を増やす）ことに等しく、そうすることで見
えなかったものが見えてきて、もう一段細かい解像度を得られるのです。

かなり脱線してしまいましたが、要は、影響度の高いものから潰すという**パレート図の発
想が重要**であるということを知っていただきたかったのです。

12. ダストキャップについて

私が設計していた頃は、通気性がある程度確保されたフェルト製や綿メッシュの熱成形品が多かった記憶があります。名称通り異物混入防止だけの目的であれば、通気性のあるキャップを使うほうがVC ボビンに通気用の孔を開けるより合理的だという発想でした。

VC ボビンに放熱&通気孔を開ければコストが上がり、強度が下がるからです。廉価版ウーファの場合には、放熱を兼ねた通気の良いこの形が多かったと記憶しています。高級ウーファユニットの場合には、ポールピースの中央に空気抜き穴を設けて、キャップには振動板と同じ材質を使用するか、アルミ製が多かったと思います。もちろん、当時からフルレンジの場合にはVC ボビン頭部にアルミキャップやPE 成型キャップに無電解メッキ（ホットスタンピングや蒸着もあり）したものを被せて高域を補う設計もしていました。

この場合、接着剤は大きな音質ファクタになります。ゴム系の損失を持ったもので接着すると大きなピークが無くダラダラ下がりになり高域は暴れにくくなりますが、本来の高域補強にはちょっと不満がありました。また、ギュッと押し付けて浮かないように接着した時と軽く乗せた時とではf 特も微妙に変わるし、聴感も変わります。作業バラツキが特性に反映する顕著な例です。前者のほうがf 特は暴れましたが、聴感上の高域はすっきりと伸びました。量産時には接着剤を自動定量塗布して、キャップは作業者が乗せていましたが、最近では装着も含めてほとんどが自動だと思います。キャップの自重で接着剤に埋まる（浮く）形になり接着剤の音質影響は残るものの、バラツキは減っていると思います。

当時の試作では、少量のシアノアクリレート（瞬間接着剤）で成形フィルムキャップをVC ボビンに直接固定した時がf 特有的な補強と言う意味では一番効果がありましたが、材料に起因したピークディップが大きく、聴感上は「ウルサイ」が第一印象でした。

その時には、キャップの裏に肉厚の両面テープを×字状や四角に切り抜いたものを貼り付ける対策をすると、聴感上もf 特もかなり良い結果が得られたのですが、剥がれる危険があるので信頼性の面から却下しました。薄いスポンジをゴム系ボンドで接着補強したものは実用化していましたが、要素が増えるため性能のバラツキが大きくなりました。

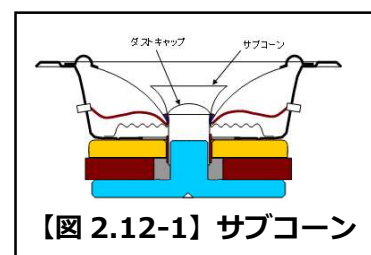
当時（30 年以上前）、市場には瞬間接着剤は東亜合成のアロンアルファしかなかったような記憶があります。それも最近のように用途別のものがあるわけではなく量は1 g 固定で高価でしたし、冷暗所に保存しないと「風邪をひいて」すぐに使えなくなるし、何と云っても衝撃に弱いのが却下の一番の理由でした。

話が逸れますが、元々、瞬間接着剤はインスタント・カメラで有名なイーストマン・コダック社が開発し、ベトナム戦争で使用された医療用接着剤だったのをご存知でしょうか。

戦場の最前線、手術による縫合ができる専門医の居ない状況下で、痛み止めのプロカインや消毒用のサルファ剤を傷口にぶちまけて化膿しないようにして、とりあえず傷口を閉じる時に使われたそうです。かなり乱暴な話ですが、シアノアクリレートは吸湿して固まる性質があるので、傷口を閉じて感染を防ぐには都合がよかったようです。 閑話休題。

キャップと併用で VC ボビン先端に朝顔状のサブコーンを付けて、積極的に音響放射を補うものもあります。(図 2.12-1)

最近では、前出の FOSTEX 製 FE-208Sol での実例がありますし、FOSTEX 製 8 インチ・フルレンジユニットの代名詞にもなっています。



【図 2.12-1】サブコーン

フルレンジでは帯域拡大のためにキャップの材質に金属の中では比重の小さいアルミニウムやその合金 (Al+Mg など) が使われることが多いのですが、カーボンファイバークロス + 樹脂やチタン合金など比弾性率の高い材料を成型したものも使われています。

2. 13. ターミナル

上記以外に外部接続を目的とした錦糸線のハウジング側固定用ターミナルがあります。

ターミナルはネジ型のもの端子型ものがあり、ネジ型はキャビネット内部配線 (スピーカーケーブルと同様の被覆撚り線) を端末加工無しもしくは Y ラグ端子で行うことを想定しています。端子 (タブ端子) 型の場合には、ファストン端末加工した被覆撚り線により簡単に挿入接続できることを優先させています。(タブ端子にカラゲ半田付けも可能)

代表的なファストン端子には、サイズ別に下表の 4 種があり、それぞれのレセプタクルに合致するタブ端子の横幅寸法は、2.8mm、4.75mm、5.2mm、6.35mm になります。

【図 2.13-1】ファストン端子

仕様	110シリーズ (JIS 2.8mm)	187シリーズ (JIS 4.8mm)	205シリーズ	250シリーズ (JIS 6.3mm)
タブ JIS C 2809 タブ端子側面形状				



レセプタクルはタブに対して多数のポイントで接触するような構造になっていますが、点もしくは線接触の部分が多いので、金メッキを施して接触を改善する製品も販売されています。(写真はオヤイデ電気製)

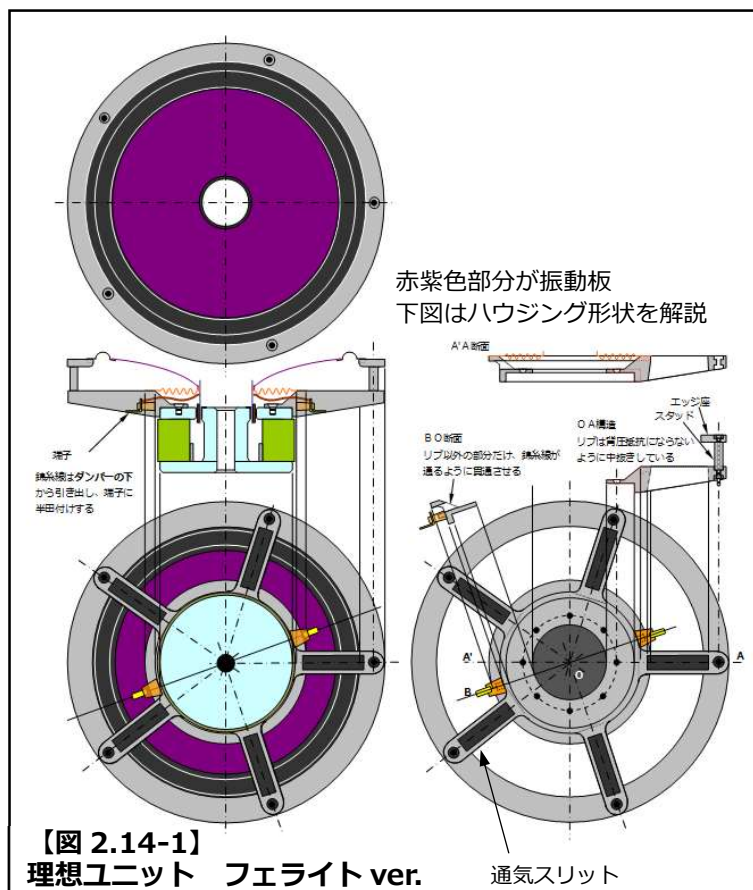
実際問題、ここに緩みやガタがあると接触抵抗が増えたり接触不良になったりします。

経年変化を考えると、タブ端子に銅線を直接半田付けして確実に接触させるのがベストと私は考えます。**金属同士を接触させておいて**、その接触を維持するために半田付けするという考え方で作業すれば電流は殆ど半田層を通らない(電気的には直列ではなく並列接続: 電導度は銅線のほうが高い)ので、皆さんの気にする**カラーレーション**も問題ありません。

私には半田の違いによる音質の変化を認識する自信はありませんし、金属同士の接触状況の差 (**濡れ状況**の差: いも半田など) のほうが接触抵抗からしても余程音質に影響があると思います。そちらの音質の差も私には認識できないかもしれません・・・錦糸線の項で**パレート図**をからめて説明したように、もっと大きな音質差を生む要因がいっぱいあり、大きな要因に埋もれて、これらに起因した差を認識することができないからです。

2. 14. 理想形状

理想のユニットと表題しながら、それぞれの部品情報を細かく示してきましたが、最後に私の考える理想のユニットを示してみます。(キャップに関しては言及せず)

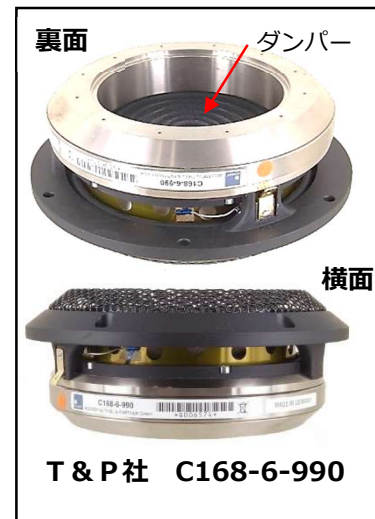


構造的には、

- ① 振動板の後方開口率を高くする
- ② 3点接着とするが、錦糸線は VC から直接引き出す
- ③ 振動板の形状は浅く、軽くする
- ④ VC ボビンは短く、軽くする

を満たすようにして、フレームの項で提示した形状案を採用したのになります。開口率が高いのは後方からの図でも分かりますが、側面の遮蔽物はスタッドだけになります。

錦糸線はダンパーの下側から引き出します。こうすれば 3 点接着が可能になります。

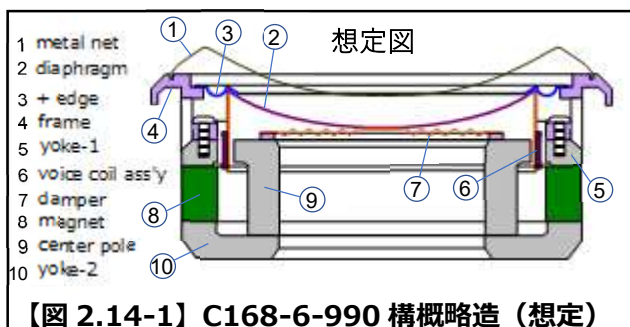


上記は正攻法

(オーソドクスな発想) から生まれたもので、発想を転換すればドイツ Thiel&Partner 社の ACCUTION ブランドのうち、C168-6-990 (7 インチ・ミッドレンジ) などのようにセラミック振動板+大口径 VC+背面圧を確実に逃がす磁気回路形状という構造もあり得ます。(右写真)

4D (ダイレクト・ドライブ・ドーム・デザイン) と呼ばれるコンセプトを採用し、セラミック・ドーム外周は VC 巻線と最短で直結 (ダンパーが VC ボビンと接続しないのでボビンを 15mm 短くできる) して、ゴムエッジが VC とドームの接合点外周を保持し、磁気回路中央にある大きな開口部に位置するダンパー (写真上では黒褐色) がドームを中央に保持する構造になっています。ドーム型トウイーター構造に近く VC 巻線と振動板の距離は、オーソドクスな構造では為し得ないものですが、ミッドレンジにも関わらず、実効質量 M_{ms} は 16.1g と、かなり重くなってしまいます。

C168-6-990 は外観しか知り得ないため、内部構造を想定しました。



というのも強度や振動モード管理の面からもメリットになります。振動板基材にトウイーターと同様のセラミックを使用したり、合金基材にダイヤモンドスパッタ加工したものを採用したりすることで分割振動領域を広げることが出来れば、ロスの少ない駆動と相まってフラットな広帯域再生が期待できるということです。

ただし、ミッドレンジで振幅が小さいとしても、前述のように実効質量が大きくなるため、磁気回路を強力に（ B/l を大きく）しなければ遅れ要素になってしまい、正しい駆動が成立しません。何を優先させるかによって合理的な形も変わってくるということです。

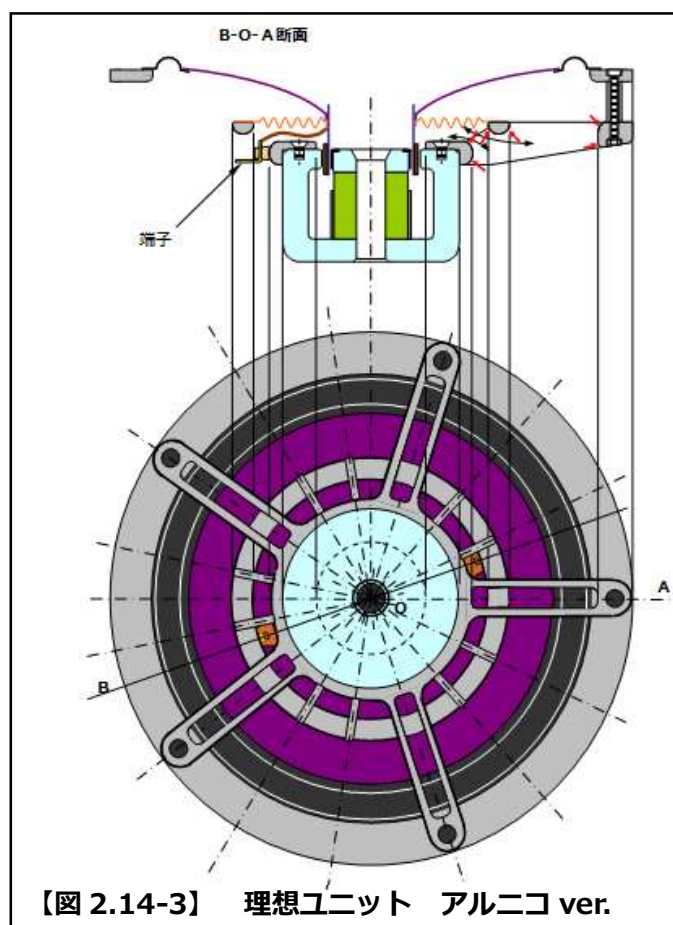
(図 2.14-1) のオーソドックスな構造を踏襲しながらアルニコ磁石を使った内磁型磁気

回路とすることで、更に開口率を高めたものを(図 2.14-3) に示します。

内磁構造を採用することで磁気回路の小型化と磁気歪の低減を実現できるうえ、開口率がアップすることでスチフネス悪化を防ぎ、且つ、後方放射する波面の乱れを最小限にすることができます。もちろん、10.3 項に掲載した SEAS 社のユニットのように内磁型でなくともネオジウム磁石を使えば磁気回路は小型化できます。

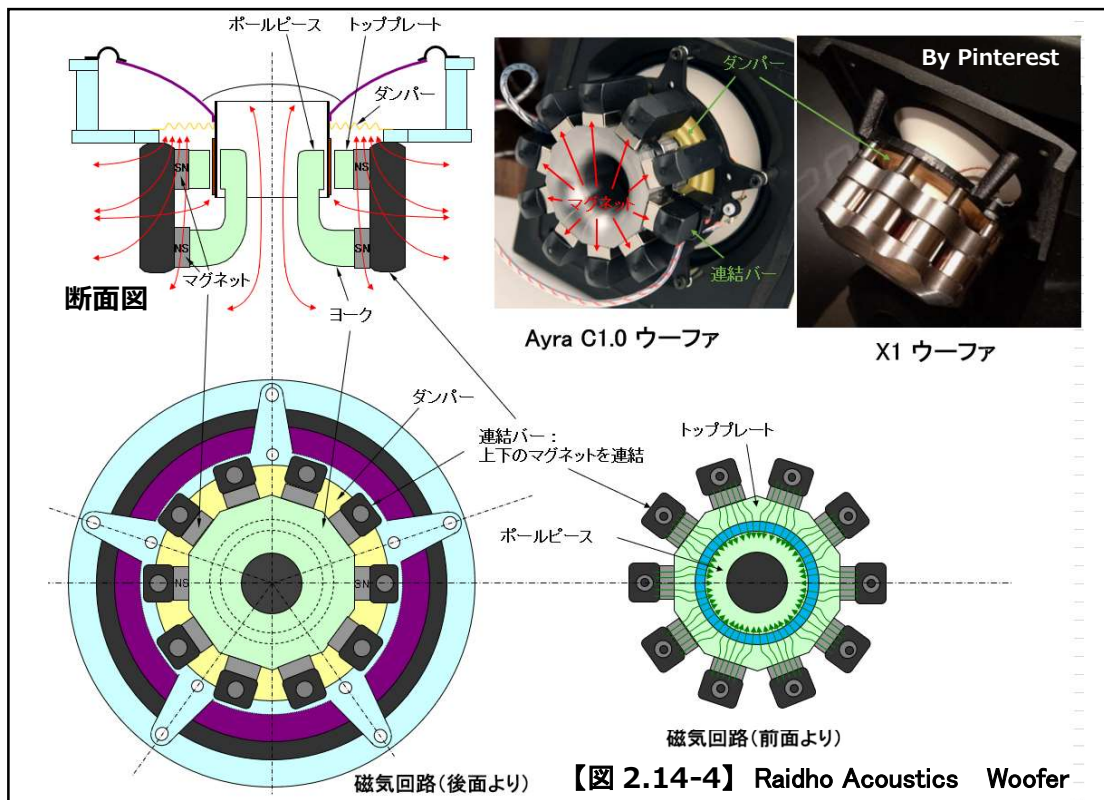
振動板の背面放射への抵抗要素を減らす一方、ダンパー背面空間の開口部の抵抗要素を減らすようフレーム角部分を丸く落としています。(赤色の矢印部分: 黒矢印は流路)

高速の流体では、このようなちょっとした出っ張りが大きな空気抵抗になることは、F1 フォーミュラカーのボディを見るまでも無く、民生車にも取り入れられているのでお分かりと思います。



磁気回路にネオジウム磁石を使い、上記と同様に背面放射への抵抗要素を減らしているユニットにデンマーク Raidho Acoustics 社の Ayra C1.0 というシステムのウーファがあります。（設計主幹：マイケル・ボールセン氏 2008 年日本発売 当時で 164 万円/ペア）

システム自体は2ウェイのブックシェルフで、スタンドデザインが目を引くくらいの認識でしたが、最近、ユニットの写真を Pinterest で見つけ、思わず膝^{ひざ}を打ちました。



リング状や円柱状の磁石でないと均一磁界が得られないという固定概念を打ち破ったものになっていて、36° 毎に磁路を形成するための 1 対の直方体ネオジウム磁石と連結バーを配置し、さらにトッププレートとヨークの外形は正十角柱になっていて、それぞれの面上記のネオジウム磁石+連結バーの対が配置された構造です。（図 2.14-4 参照）

磁路はポールピース+ヨーク ⇒ マグネット（後）⇒ 連結バー ⇒ マグネット（前）⇒ トッププレートの順に流れていて、マグネット（後）⇒ 連結バー ⇒ マグネット（前）間は磁束（磁路）が 10 分割され、トッププレートで再び集まり、最終的にギャップを形成します。磁気回路（前面より）の細い緑色矢印は磁力線のモードで、磁力線の排他的な性質によりトッププレート内でギャップに至るまでに均等になり、**ギャップ部分（水色部分）では均等磁界を形成**します。このような構造にすることで、従来のリング形状磁気回路が振動系の背面抵抗や音波反射物になっていたのに対し、10 分割することで抵抗や反射を軽減することができます。（断面図赤い矢印と写真のように空気の流通経路があるため）

開口率が低いのが残念ですが、合理的にダンパー後方の空気の流れを外部に導いて、「目から鱗」の構造です。

2. 15 アナロジー変換

ここでは概要だけ示します。詳細は、第五章『アナロジー手法による電気系への変換とその解析について』に記しましたので参照願います。

機械系の挙動を解析する場合、『機械要素』に分解して行うことがしばしば行われます。

機械要素というのは、①慣性質量、②弾性（ばね）、③減衰（機械抵抗）の3要素のことで、それぞれ①運動エネルギーとして蓄積する、②振動／位置エネルギーとして蓄積する、③熱エネルギーとして消費するという機能を持っています。そして、この3要素を使うことで全ての機械構造の振動挙動を等価的に表すことができます。

また、それぞれの機械要素に対して受動電気要素（C キャパシタ、L インダクタ、R 抵抗）との類似性（アナロジー）が見られることから、電気回路としての解析が可能になります。

ここでは、ユニットについて適用してみます。

要素としては、あまり細かい部分まで考えず、① 磁気回路、② ハウジング、③ ボイスコイル Assy、④ ダンパー、⑤ 振動板、⑥ エッジのみとします。

単純化するために、ここでは「磁気回路は動かない（速度 $v = 0$ ）」を前提とすると、磁気回路は機械系の GND に相当することになります。

また、振動系（支持系含む）について、それぞれの要素の速度 v が同じ（一体で動く）という前提とします。

基本的な機械要素は（図 2.15-1）に示すように質量 m 、弾性係数 k 、機械抵抗（損失：粘性係数） μ で表され、運動方程式は、

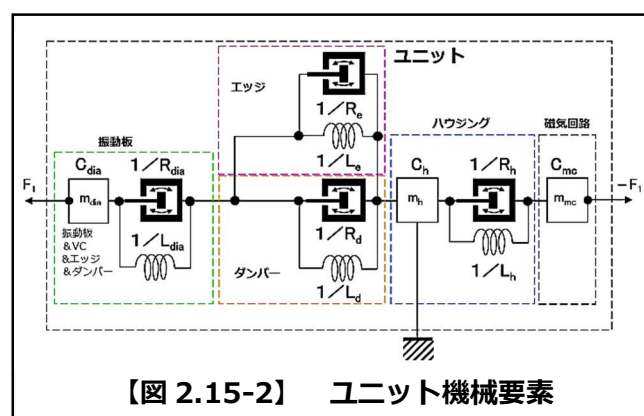
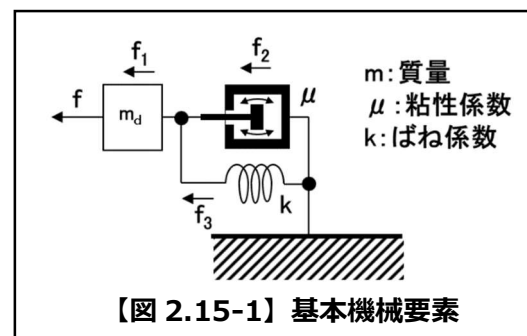
$$f = f_1 + f_2 + f_3$$

$$f = m \cdot dv/dt + \mu \cdot v + k \cdot \int v dt$$

第一項は運動(仕事)、二項は減衰(消費)、三項は弾性(移動)

ここでは、① 磁気回路：質量のみ、② VC は振動板と直結一体、ダンパー質量は VC との接合部に集約、エッジ質量は振動板外周に集約することとして振動系質量を m_{dia} に統合し、③ ダンパー、エッジ、振動板については弾性、損失要素がそれぞれに存在することとします。したがって振動板とハウジングの間にエッジとダンパー要素が並列に入ります。

また、④ ハウジングは3要素をすべて持つと考えます。（図 2.15-2）



理屈は、第五章『アナロジー手法による電気系への変換とその解析について』を読んでいただくとして、『**力-電流アナロジー (F-i アナロジー)**』により等価回路は (図 2.15-3) のようになります。質量は C、弾性要素は $1/L$ 、減衰要素は $1/R$ で表されます。

VC の駆動力 $F_1 \rightarrow i$ 、その反作用 F_2 は $-i_R$ 、振動板弾性 & 損失要素とエッジとダンパーの弾性 & 損失要素 (それぞれ並列) は、振動板とハウジングとの間に直列に入り、磁気回路の質量 C_{mc} に対して反作用 $-i_R$ が加わっています。

$$i = i_1 + i_2 + i_3 \dots$$

$$i = \sum (C \cdot dV/dt + R^{-1} \cdot V + L^{-1} \cdot \int V dt)$$

更に F-V アナロジーを適用すると、(図 2.15-4) のようになります。 $F_1 \rightarrow V$ 、その反作用 F_2 は $-V_R$ 、それぞれ質量は L 、弾性要素は $1/C$ 、減衰要素は R で表されます。

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \dots$$

$$V = \sum (L \cdot di/dt + R \cdot i + C^{-1} \cdot \int i dt)$$

前提条件で「磁気回路は動かない=接地」としましたが、等価回路 (図 2.15-4) から分かるように磁気回路質量 L_{mc} が十分に大きければ反作用 $-V_R$ の大部分は質量 L_{mc} に吸収されます。(相対的に i_R が小さくなります)

(図 2.15-4) では、① 振動板→エッジ→ハウジングのエッジ座、② 振動板→ダンパー→ハウジングのダンパー座、という2つの経路でハウジングに振動エネルギーが伝わっていきますが、その先は磁気回路に伝わり GND へと逃げています。

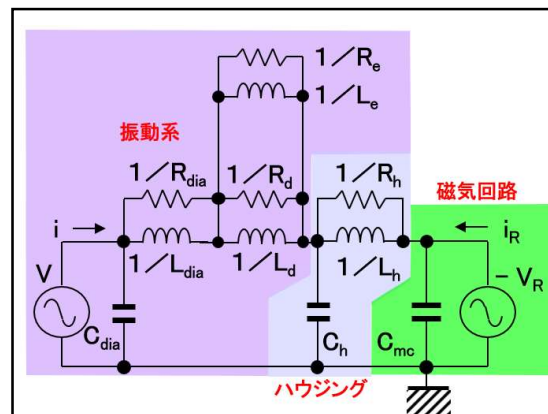
(図 2.15-4) はハウジングの外周が浮いた状態を表していますが、ハウジング外周部をバッフル板 (キャビネットの前面板) に固定すると (図 2.15-5) の赤丸部分と GND の間にキャビネットの質量、弾性、損失要素が入ってきます。(図 2.15-5)

その場合には、キャビネットの各要素を経由して GND に向かう経路が追加されます。

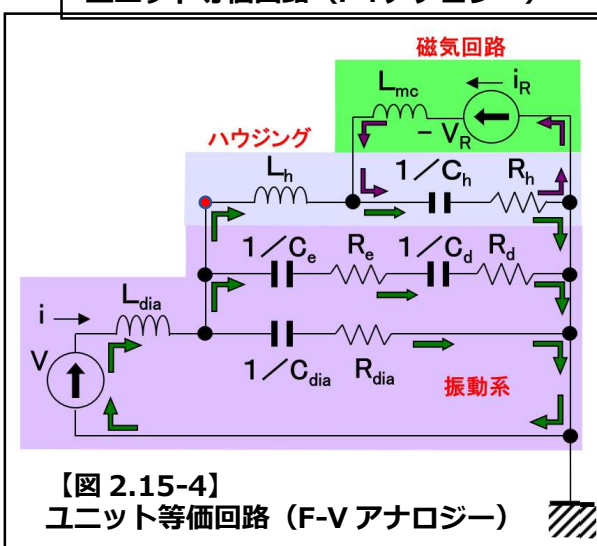
$$L_{cab} > L_{mc} > L_h \gg L_{dia}$$

結果としてより機械インピーダンスの低いキャビネット側にほとんどのエネルギーが流入します。

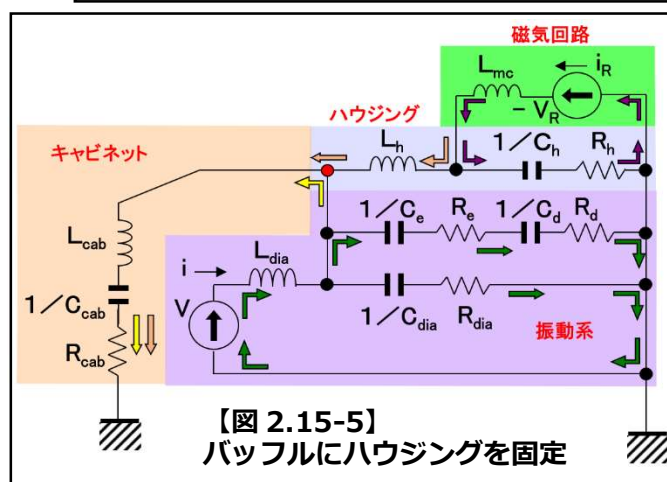
(図 2.15-5 黄色矢印は振動系から、橙色矢印は磁気回路系からの流入)



【図 2.15-3】
ユニット等価回路 (F-i アナロジー)



【図 2.15-4】
ユニット等価回路 (F-V アナロジー)



【図 2.15-5】
バッフルにハウジングを固定

ハウジングの項で説明したテクニクス SB-G90 や富士通テンの ECLIPSE シリーズ、拙作 AR シリーズなどは、ハウジングを直接キャビネットに取り付けることなく、磁気回路を出来る限り質量の大きな「仮想 GND（イマジナリーグラウンド：G90 ではサブバッフル、ECLIPSE ではグラウンド・アンカー）」に接続するようにしてあり、磁気回路の質量 L_{mc} に対し仮想 GND に相当する質量 L_{ig} がシリーズに入る（加算される）ので振動の基準がより明確になり（これを**アンカー効果**[※]と呼ぶ）、ユニット単体の性能が出しやすくなります。

※ 運動方程式 $F=ma$ で力 F が一定ならば質量 m が大きいほど加速度 $a = dv/dt = d^2x/dt^2$ が小さくなり、移動しなくなる

逆に、ユニットが正しい方向性で設計されていないければ、その悪さがそのまま出てしまうということにもなります。

G90 は第五章『アナロジー手法・・・』でも取り上げていますが、磁気回路のトッププレートから伸びたフィンを固定されたサブバッフルがキャビネットと組み構造（ほぼ一体＝共通インピーダンスの発生）になっているので、「仮想 GND が速度 0 になる」を満たすような十分なアンカー効果が得られていないのが残念です。掲載した等価回路では 3 要素で構成されたサブバッフルとキャビネットが直列に入っているの、床（GND）の上にキャビネット、その上にサブバッフルを介して磁気回路という構成になります。

電気回路でももちろんシリーズ接続になりますから共通インピーダンスが影響して、キャビネットに変化があれば、サブバッフルがその影響で揺^{しか}すられてしまいます。サブバッフルに固定されたユニットも（子ガメ孫ガメの如く）然りです。したがって、通常のシステムと同様に（あるいはそれ以上に）**キャビネットの置き方で音質傾向がコロコロ変わります**。

これを防ぎたければサブバッフルをキャビネットから独立させて床と直結させる（共通インピーダンスを排除する）構造とすることです。それとサブバッフルの機能をシンプルにする（「質量のみ」に近付ける＝材質を厚い鉄板のようなものにして、床に直で接する構造にする）ことです。

第二章 TS パラメータ

1. 概要

TSパラメータについて簡単に説明しておきます。

TSとは、Thiele（ティール）と Small（スモール）という技術者の頭文字を採ったものです。60年代に Thiele が提案し、70年代に Small がほぼ完成させたスピーカースystem（キャビネット）設計用パラメータのことです。

パラメータには概略以下のものがあり、大部分は小信号入力に対しての静的パラメータになります。（局所的に直線性が成り立つ領域での値ということです）

TSパラメータ (Thiele/Small parameter) **赤字**は重要パラメータ

表 2.1 (数値例はMark Audioのフルレンジスピーカユニット:Al pair-6Pの場合)

1	VC有効DCR（直流抵抗値）	R_{eVC}	3.8	(Ω または ohm) オーム
2	等価インピーダンス	Z_e	5.8	(Ω または ohm) オーム
3	振動系最低共振周波数	F_s	74.308	(Hz) ヘルツ
4	振動系有効投影面積	S_d	36.32	(cm^2) 平方センチメートル
5	振動系相当気柱容量	V_{as}	3.696	(Ltr) リットル
6	機械系コンプライアンス	C_{ms}	1.973	(m/N) メートル/ニュートン
7	振動板質量	M_{md}	2.199	(g) グラム
8	振動系等価質量	M_{ms}	2.325	(g) グラム
9	駆動力係数（フォースファクタ）	B_l	2.679	(T · m or N/A) テスラ · メートル
10	機械抵抗	R_{ms}	0.32623	(kg / s) キログラム/秒
11	機械Qファクタ	Q_{ms}	1.783	—
12	電気Qファクタ	Q_{es}	0.575	—
13	総合Qファクタ	Q_{ts}	0.435	—
14	VCのインダクタンス分	L_{eVC}	6.939	(μH) at 1kHz マイクロヘンリー
15	基準能率	η_0	0.255	(%) パーセント
16	平均音圧	SPL_0	86.65	(dB) デシベル
17	最大インピーダンス	Z_0		(Ω または ohm) オーム
18	効率帯域積	EBP		—
19	耐入力（最大入力）	大信号パラメータ	Power	15 (Watts Nom) ワット
20	最大リニア動作可能域	大信号パラメータ	$X_{\text{-max}}$	3.3 (mm) 1 way ミリメートル

2. 各パラメータの内容

それでは、それぞれの項目について見ていきましょう。(赤字は重要パラメータ)

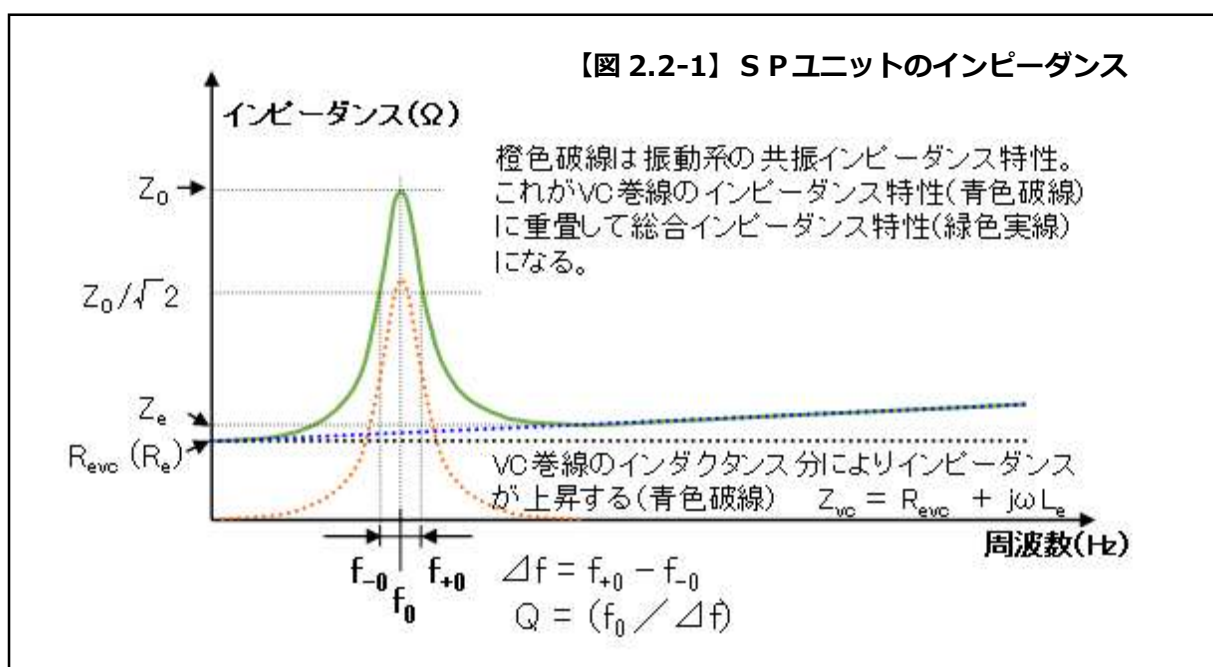
2. 1 R_{evc} または R_e : VC有効DCR $[\Omega (\text{o h m})]$ サフィックスeは電気の意味
VC巻線の直流抵抗値になります。 以下、[] 内は単位

2. 2 Z_e : 等価インピーダンス $[\Omega (\text{o h m})]$

Z_e は(図 2.2-1) に示したように、 f_0 以上で一番低くなるインピーダンスのことです。

周波数の上昇に伴いVC巻線のL成分 L_e によりインダクタンス分が上昇するため(青色破線)、ユニットの総合インピーダンス特性は(緑色実線) のようになります。

$$Z_{vc} = R_{evc} + j \omega L_e$$



2. 3 F_s : 振動系最低共振周波数 $[\text{H z (ヘルツ)}]$

f_0 、 F_0 (エフゼロ) と呼ばれる。

因みに f_1 は分割振動開始周波数。

この周波数で振動系駆動速度(単位時間当たりの振幅 dx/dt) が最大となります。

$$f_0 = (1 / 2 \pi) \{ 1 / (C_{ms} \cdot M_{ms}) \}^{1/2} \quad \dots (式 2.3-1)$$

$$\therefore \omega_0 = 2 \pi f_0 = \{ 1 / (C_{ms} \cdot M_{ms}) \}^{1/2}$$

$$\omega_0^2 = 1 / (C_{ms} \cdot M_{ms})$$

ω は角周波数 アプリ表記制限から $\sqrt{\quad}$ は $()^{1/2}$ で表記します

上式から、振動系コンプライアンス C_{ms} が大きい(振動系の保持が柔らかい)ほど、あるいは振動系等価質量 M_{ms} が大きいほど、共振周波数 F_s は低くなります。

材質や形状にも因りますが、スペックに対するばらつきは通常 $\pm 10\%$ 程度です。

2. 4 S_d : 振動系有効投影面積 $[m^2]$ サフィックス d はダイヤフラムの意味

コーンやダイヤフラムの有効投影面積。

(便宜上 cm^2 とする時には単位を明記する決まりがあります)

この面積はエッジの形状に大きく依存します。

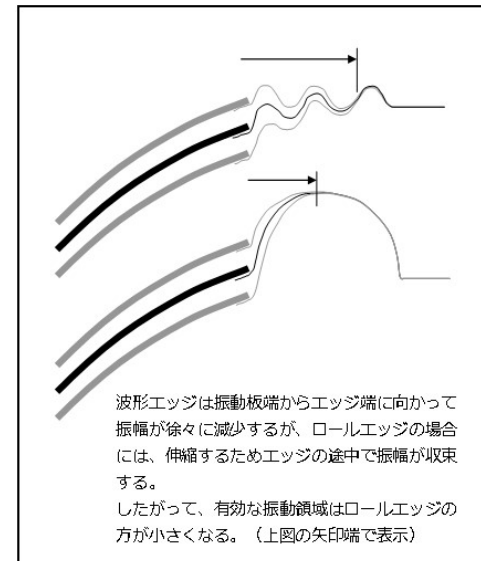
一般的には、振動板+エッジ幅の $1/3 \sim 2/3$ を加えた領域の投影面積を S_d とみなします。

フレームの直径が同じユニットの場合、コルゲेटッド（波形）エッジに比べ、ロール（半円状）エッジのほうが S_d は小さくなります。（図 2.4-1：ロールの場合は $1/2$ 設定が多い）

その代わり、ロールエッジではフレームに至るまでに振動が十分に収束しますし、振幅に対するマージンを取りやすくなります。

また、コンプライアンスの高い（柔らかい）エッジから放射される音圧は大振幅時の低音域だけと考えられ、変形を伴う変位のため厳密には振幅のリニアリティは確保されず、歪成分となります。

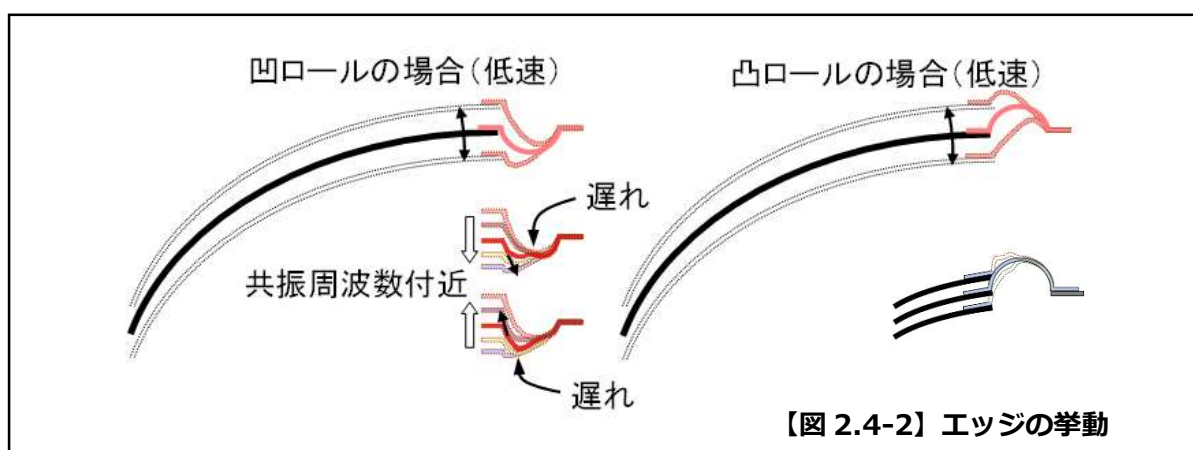
歪を想定すると、放射面積の少ないロールエッジのほうが有利と言えます。



【図 2.4-1】エッジの振動範囲

(参考)

振動が低速（質量依存領域）では、同相で且つ応力最小限（エントロピー極大を保った遷移状態）の前後方向ほぼ対称の変形になりますが、共振周波数に近付くと位相がズレて（遅れて）変位する部分が生じることにより、ヒステリシス（振動板の前方および後方の移動に伴うエッジ変形が異なる）が様々なパターンで生じます。（図 2.4-2 に一例を示します）



【図 2.4-2】エッジの挙動

2. 5 V_{as} : 振動系相当気柱容量 [m³]

平面バッフル（後方を密閉しない＝制圧要素の無い状態）にユニットを装着して測定した振動系のスティフネス（動きにくさ：ばね定数）に相当する**気柱容量**になります。

推奨容量と勘違いされる方がいらっしゃいますが別物です。

S_d と同じ断面積を持つ気柱ピストンを想定し、気柱ピストンのバネ定数＝スティフネス（コンプライアンスの逆数）がユニットの振動系によるスティフネス（バネの硬さ）と等価になる（バランスする）**気柱体積**を表しています。

例えば、小さな袋に入れた空気を圧縮しても凹みません（硬い＝スティフネスが大きい）が、大きな袋に入れた空気を圧縮すると凹む（柔らかい＝スティフネスが小さい）のと同じです。

すなわち、同じ口径であれば、この体積（容量）が大きいほどユニット全体の振動系スティフネスは小さく（柔らかく）なります。逆数のコンプライアンスは大きくなります。

念のためですが、口径が違うと単純比較はできません。

V_{as} は以下のように表されます。

$$V_{as} = \rho_0 \cdot c^2 \cdot S_d^2 \cdot C_{ms} \quad \dots \text{ (式 2.5-1)}$$

（S I 単位系を使った場合、計算結果は「m³」になりますが、扱いやすいようリットルで表示することが多い）

ρ_0 : 空気密度 1.184 [kg/m³] at 25°C 、1.293 [kg/m³] ntp (0°C、1atm)

c : 音速 346.1m/s at 25°C 、 $t[^\circ\text{C}]$ での空気中の音速 $(331.5 + 0.61t)$ m/s
25°C での定数項 $\rho_0 \cdot c^2$ は約 $1.42 \times 10^5 \text{ kg/ms}^2$

上式のように、 V_{as} は S_d^2 と次項で説明する機械コンプライアンス C_{ms} に比例します。（他は定数項）

V_{as} のスペックに対するばらつきは、 $\pm 20 \sim 30\%$ 程度になります。

参考までに、密閉箱の場合に**平坦特性**（盛り上がりせず -12 dB 降下）となる容積は、

$$V_f = V_{as} / \{ (F_{0c} / F_0)^{1/2} - 1 \} = V_{as} / \{ (0.707 / Q_{tc})^{1/2} - 1 \}$$

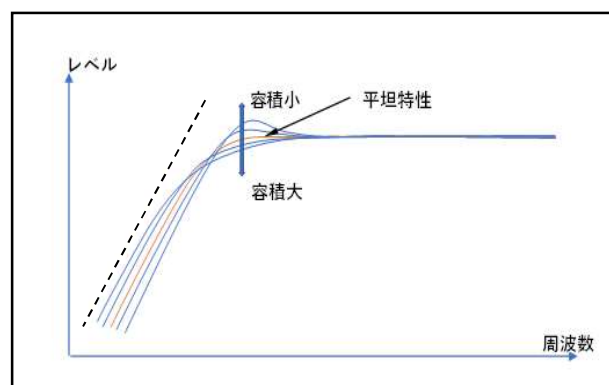
F_{0c} : キャビネットに入れた場合の F_0 Q_{tc} : F_{0c} での先鋭度

$\therefore F_{0c} / F_0 = Q_{tc} / Q_{ts}$ Q_{tc} が0.707ならば平坦になる

因みに Alpair-6P では、 V_{as} 約 3.7L に対し、平坦特性容積は約 13.5L となります。この容積より小さい場合には F_{0c} 近辺での音圧が盛り上がります。

大きい場合にはダラ下がりになりますが、 F_{0c} より低域の音圧は容積が小さい場合に比べて高くなります。

この傾向を音作りに利用できます。



2. 6 C_{ms} : 振動系機械コンプライアンス [mm/N] サフィックス m は機械系の意味 振動系を保持する部分の機械コンプライアンス (ばね定数スチフネスの逆数)。

単位から分かるように、一定の力を与えたときにどれだけ移動するかを表わします。

これは動きやすさ (柔らかさ) を意味します。

逆数のスチフネスの単位は N/mm で一定の距離を移動するために必要な力を表わし、バネとしてとらえた時には動きにくさ (硬さ) を意味するので馴染みやすいと思います。

$$1\text{N} = 0.102\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad 9.8\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = \text{kg} \cdot \text{f}$$

2. 7 M_{md} : 振動板質量 [kg, g] (S I 単位系は kg。扱いにくいので g で表示することが多い) 振動板の質量。

設計上、重要なパラメータである M_{ms} に含まれるため、参考値程度に考えます。

2. 8 M_{ms} : 振動系可動部等価質量 [kg, g]

可動部分 (= 振動系) の等価 (実効) 質量。

振動板、V C & V C ボビン、キャップ、およびダンパーやエッジ、錦糸線の一部からなる可動部品の実効質量に加えて、さらに厳密に言えば振動系が動く事により一緒に動かされる空気による音響負荷相当質量を含めたもの※になります。 ※ 通常は無視する。

2. 9 $B l$ または $B l$: 駆動力係数 (Force factor)

[T · m (テスラ · メートル)] または [N/A (ニュートン/アンペア)]

V C ギャップでの磁場の強さ (磁束密度: B) と、磁場内にある巻線の長さ l の積。

V C ボビンの円筒表面に導線を巻いた形状の V C の場合には

$$l = 2\pi r_s \cdot N \quad \dots \text{(式 2.9-1)}$$

r_s : 平均巻き線半径 N : 総巻き数 (ターン数)

フレミングの左手の法則に従い、均一磁界の中で長さ l の電線に電流が流れるとローレンツ力 $\mathbf{F}$ が生じます。

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} l \cdot \mathbf{I} \sin \theta$$

ここで磁界 B と電流 I は直交しているので $\theta = 90^\circ$

したがって、

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} l \cdot \mathbf{I} \quad \dots \text{(式 2.9-2)}$$

式から分かるように、電流 I と $B l$ の積がローレンツ力になります。

第一章に記載しましたが、くどいようですが $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{I}$ は方向を持つベクトル量です。

ここで注意しなければならないのは、磁束密度が均一なのはギャップ内およびその周辺だけであり、その領域から食み出した巻線部分では極端に磁束密度 B が小さくなり、コイルを流れる電流はローレンツ力に変換されず、熱エネルギーに変換されるようになります。

したがって、大きな振動板ストロークが要求されるウーファなどで、ロングストロークVC（コイル巻き幅の広いVC）が使われる場合には、熱設計が重要となります。

（参考）

同時に考えなければならないこととして第一章 2.3.8 項に示した逆起電力の発生があります。ローレンツ力が加わってVCが移動して均一磁界からはみ出すと、『レンツの法則』に従って逆起電力 E （ローレンツ力を打ち消す方向の力を引き起こす）が加わります。

逆起電力 E は、タイムドメインでは遅れ系要素となるため、単純な制動ではなく波形歪みとして現れます。

対処方法には 磁気ギャップの最適設計および透磁率 μ の平坦化と渦電流損を狙った「銅ショートリング」や「ファラデーリング（電磁誘導実験で使うものとは別物）」がありますが、それらについては第一章に記してありますので参照願います。

ここでは透磁率の比較表を参考として示しておきます。

比透磁率は、空気に対してどれだけ磁力線が通りやすいかの目安と考えると分かりやすいと思います。

材質	透磁率 μ [H/m]	比透磁率 μ / μ_0
真空	1.257×10^{-6}	1
空気	$1.25663753 \times 10^{-6}$	1.00000037
アルミニウム	1.256665×10^{-6}	1.000022
銅	1.256629×10^{-6}	0.999994
鉄 (99.8% 純鉄)	6.3×10^{-3}	5000
パーマロイ	1.0×10^{-2}	8000

2. 10 R_{ms} : 機械抵抗 [kg/s]

振動系のダンパーやエッジにある減衰要素（繊維同士の摩擦や分子相互接続の伸縮による）が単位時間にどれだけエネルギー（運動量）を消費するかを示します。

運動 E 、位置 $E \Rightarrow$ 熱 E のエネルギー変換効率とも言えます。

スピーカーで「ロス」と言った場合には、機械抵抗を表わす場合が多いです。

振動板の内部損失も同じ単位を使いますが、ダンパーやエッジの機械抵抗と比べて十分に小さいため埋没します。

エッジやダンパーはフレーム（ハウジング）に固定されるため、バネ定数（スチフネス：コンプライアンスの逆数）のリニアリティと機械抵抗が十分に大きいこと（フレームに達するまでにエネルギーを消費すること）が求められます。

2. 1.1 Q_{ms} : 機械系共振先鋭度 無単位数

F_s (f_0) における機械的共振先鋭度。

振動系の支持構造であるエッジやスパイダーのスチフネスと振動板 & VC などの実効質量によって決まる F_s における共振ピークの鋭さ（共振しやすさ）を意味しています。コンプライアンスが F_s 以上の周波数帯（弾性領域と言います）での振動しやすさを表すのに対し、共振先鋭度は共振周波数近辺での機械的な振動しやすさを表します。（図 2.2-1: Q の説明式を参照）

先鋭度の名の通り、特性グラフがどれだけ尖っているかを表します。

電気系ファクタを排除するため、VC は開放状態（オープン）として測定します。ショートすると電磁誘導による回生ブレーキ（Q を低くする）が働いてしまいます。

振動系の支持構造であるエッジやスパイダーではエネルギー損失（駆動エネルギーが熱エネルギーに変換される）が起こります。エネルギーを消費する機械抵抗 R_{ms} （前項参照：電気系では R）、等価質量 M_{ms} （電気系では L）により共振が起こり、その先鋭度 Q は、

$$Q_{ms} = \omega_0 M_{ms} / R_{ms} = 2\pi f_0 M_{ms} / R_{ms} \quad \dots \quad (\text{式 2.11-1})$$

となります。

振動系の構成要素は（図 2.11-1）のようになります。

変位 X の加振が等価質量 M_{ms} に加えられた場合、機械系のコンプライアンス C_{ms} と上記の機械抵抗 R_{ms} 、それと並列に電気系コンプライアンス C_{es} と直流抵抗 R_{es} が動作基準（GND）との間に入る構成となります。

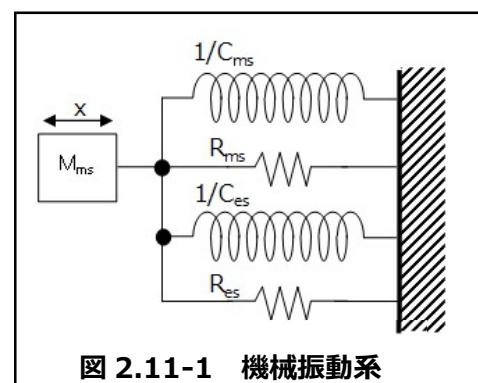


図 2.11-1 機械振動系

以下に、機械構造を一般的な直列等価回路で表した場合について検証してみます。

機械系インピーダンスの関係式は、質量、コンプライアンス、機械抵抗それぞれの要素に対しての力の和で現されるため、 v （速度）に関して、一般的に以下ようになります。

$$F = M_{ms} \cdot dv/dt + 1/C_{ms} \cdot \int v dt + R_{ms} \cdot v \quad \dots \quad (\text{式 2.11-2})$$

『力-電圧アナロジー』[※]により電気系に変換した場合、力 F は電圧 V 、質量 M_{ms} はインダクタンス L_s 、コンプライアンス C_{ms} はキャパシタンス C_s 、機械抵抗 R_{ms} は電気抵抗 R_s 、速度 v は電流 i に置き換えられるので、

$$V = L_s \cdot di/dt + (1/C_s) \cdot \int i dt + R_s \cdot i \quad \dots (式 2.11-3)$$

(それぞれ質量項+弾性項+減衰項)

『力-電流アナロジー』※では各要素が並列になるため、電流 i は、

※ これらの詳細は第五章『アナロジー手法による電気系への変換とその解析』を参照願います。

$$i = C_s \cdot dV/dt + (1/L_s) \cdot \int V dt + (1/R_s) \cdot V \quad \dots (式 2.11-4)$$

ここで質量 M_{ms} はキャパシタンス C_s 、コンプライアンス C_{ms} はインダクタンス L_s 、機械抵抗 R_{ms} は電気抵抗 R_s の逆数（コンダクタンス）、速度 v は電流 i に置き換えられます。

また、(式 2.11-4) より

$$i = V / \{1 / (j\omega C_s) + j\omega L_s + R_s\} \quad \dots (式 2.11-5)$$

上式の分母、分子に $-\omega C_s$ をかけて整理すると、

$$i = -\omega C_s V / \{j(1 - \omega^2 C_s \cdot L_s) - \omega C_s \cdot R_s\}$$

ゆえに

$$\therefore |i| = \omega C_s V / \{(1 - \omega^2 C_s \cdot L_s)^2 + (\omega C_s \cdot R_s)^2\}^{1/2}$$

これは

$$\omega_0 = 1 / (L_s \cdot C_s)^{1/2}$$

でピークを持ち、そのときの値は

$$|i_0| = V / R_s$$

になります。

ω_1 と ω_2 では、 $|i|$ が $|i_0|$ の $1/\sqrt{2}$ (0.707・・・半値：エネルギーが半分 -3dB) になるので ω_1 と ω_2 は以下の方程式の解となります。(図 2.11-2 参照)

$$C_s V / \{(\omega C_s \cdot R_s)^2 + (1 - \omega^2 C_s \cdot L_s)^2\}^{1/2} = (1/\sqrt{2}) \cdot V / R_s \quad \dots (式 2.11-6)$$

上式の両辺を 2 乗して整理すれば、

$$\pm C_s \cdot R_s \omega = 1 - \omega^2 C_s \cdot L_s$$

となり、両辺を C_s で割って整理すると、以下のように ω に関する 2 次方程式になります。

$$L_s \omega^2 \pm R_s \omega - 1 / C_s = 0 \quad (\text{複号許可}) \quad \dots (式 2.11-7)$$

2 次方程式の解の公式により、

$$\omega = \{ \pm R_s \pm (R_s^2 + 4 L_s / C_s)^{1/2} \} / 2 L_s$$

$\omega > 0$ より

$$\omega_1 = \{ R_s + (R_s^2 + 4 L_s / C_s)^{1/2} \} / 2 L_s$$

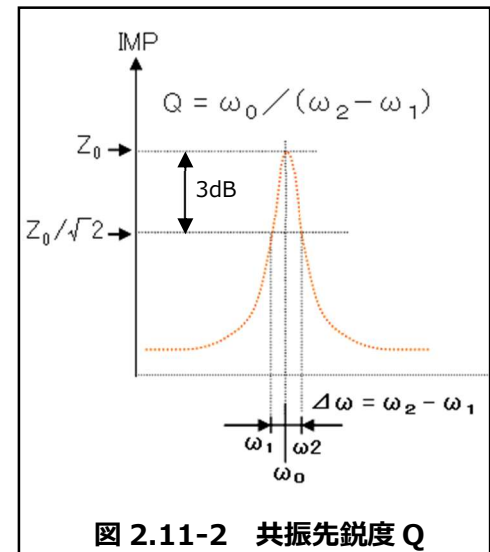
$$\omega_2 = \{ -R_s + (R_s^2 + 4 L_s / C_s)^{1/2} \} / 2 L_s$$

したがって、

$$\Delta \omega = \omega_1 - \omega_2 = 2 R_s / 2 L_s = R_s / L_s$$

$$\begin{aligned} Q &= \omega_0 / \Delta \omega = \omega_0 \cdot L_s / R_s \\ &= 2 \pi f_0 \cdot L_s / R_s \quad \dots (式 2.11-7) \end{aligned}$$

(半値幅：ハーフパワー法による解)



(式 2.11-1) 式を電気系に変換した式と等価となります。

ちなみに電気系で並列となる場合には、

$$Z = V / I = 1 / \{ 1 / R_s + 1 / (j \omega L_s) + j \omega C_s \}$$

分母、分子に $-j \omega L_s \cdot R_s$ をかけて整理すると、

$$Z = \omega L_s \cdot R_s / \{ -\omega L_s + j (1 - \omega^2 L_s \cdot C_s) R_s \}$$

途中計算は割愛しますが、結果的に以下ようになります。

$$\begin{aligned} Q &= \omega_0 / \Delta \omega = \omega_0 \cdot (C_s \cdot R_s) \\ &= 2 \pi f_0 \cdot (C_s \cdot R_s) \quad \dots (式 2.11-8) \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta \omega = \omega_1 - \omega_2 = 1 / (C_s \cdot R_s)$$

2. 12 Q_{es} : 電気系共振先鋭度 無単位数 サフィックス e は電気の意味

F_s (f_0) における電気系共振先鋭度。

負荷対象の V C に対し、駆動側が理想電源 (インピーダンス $\doteq 0$) として求めている。

$$\begin{aligned} Q_{es} &= \omega_0 \cdot M_{ms} \cdot R_{ms} / (B I)^2 \\ &= 2 \pi f_0 \cdot M_{ms} \cdot R_{ms} / (B I)^2 \quad \dots (式 2.11-9) \end{aligned}$$

(式 2.11-9) から分かるように、駆動力係数 $B I$ (フォースファクタ) が大きければ電氣的なダンピングが十分に期待できますし、過渡応答係数 ($1 / Q_{es}$) も大きくなります。

ただし、この式は微小変位では成り立ちますが、振幅が大きくなると $B I$ がノンリニアとなるため、あくまで目安として考えるべきでしょう。

2. 13. Q_{ts} : 総合共振先鋭度 無単位数 サフィックス t は総合の意味

$F_s(f_0)$ におけるユニットとしての共振先鋭度

対数減衰率 δ 、減衰比（ダンピングファクタ） ζ との関係は、

$$Q_{ts} = 1/2\zeta = \pi/\delta \quad \therefore \delta = 2\pi\zeta$$

減衰振動 $0 < \zeta < 1$ 、臨海減衰 $\zeta = 1$ 、過減衰 $1 < \zeta$

よって、臨海減衰 $Q_{ts} = 0.5$ ($\zeta = 1$)、過減衰 $Q_{ts} < 0.5$

・設計は臨海減衰に近い Q 値になるようにしている場合が多い

Q_{ts} は F_s 近辺での振動しやすさと考えられ、与えられた電気エネルギーがどれだけ共振に寄与するかの変換効率と考えられます。

したがって損失係数 η は

$$\eta = 1/Q_{ts}$$

(図 2.11-1) のように等価的に電気系と機械系が並列に接続されていると見做せるため、

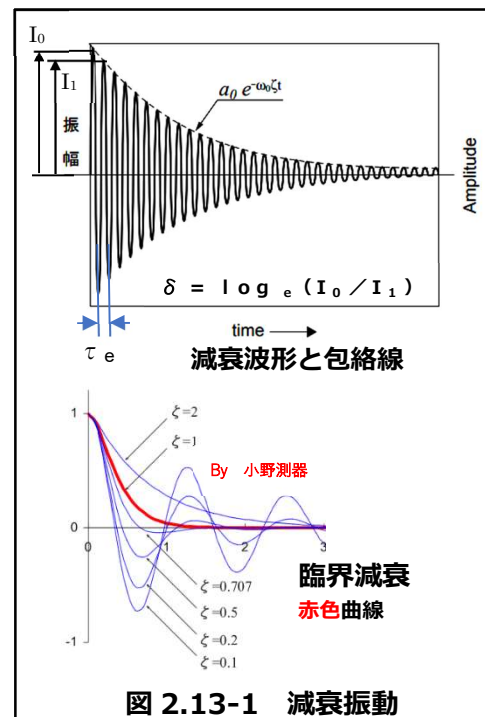


図 2.13-1 減衰振動

$$Q_{ts} = (Q_{es} \cdot Q_{ms}) / (Q_{es} + Q_{ms}) \quad \dots \quad (\text{式 2.13-1})$$

の関係が成り立ちます。

どれか2つが分かっているならば、あとの1つは計算で求められることになります。例えば、 Q_{ms} が不明な場合および Q_{es} が不明な場合は以下ようになります。

$$Q_{ms} = (Q_{es} \cdot Q_{ts}) / (Q_{es} - Q_{ts})$$

$$Q_{es} = (Q_{ms} \cdot Q_{ts}) / (Q_{ms} - Q_{ts})$$

2. 14. $L_{evc}(L_e)$: VCインダクタンス [μH (マイクロヘンリー)]

VCのインダクタンス成分。

したがってインピーダンスは、以下のように表される。

$$|Z_L| = R_e + \omega L_{evc} + 1 / (\omega C_{es}) \quad \dots \quad (\text{式 2.13-1})$$

$$\approx R_e + \omega L_{evc} \quad \therefore \gg 1 / \omega C_{es} \sim 0$$

(図 2.2-1) において F_s 共振周波数以上では周波数上昇に伴いインピーダンスカーブが緩やかに上昇しているのはこのインダクタンス成分に因ります。

ダイナミックな挙動（大振幅応答）としては、VC 巻線と磁気回路の相関に因る自己インダクタンス M_s のノンリニアな影響が加わります。(第一章 2.3.8 項を参照)

2. 15 η_0 : 標準能率 [%]

基準入力におけるユニットの能率を%で表したものの。

$$\begin{aligned}\eta_0 &= \{ \rho_0 (B/l)^2 \cdot S_d^2 \} / (2 \pi c \cdot M_{ms}^2 \cdot R_{ms}) \\ &= (\rho_0 / 2 \pi c) \cdot \{ (B/l)^2 \cdot S_d^2 \} / (M_{ms}^2 \cdot R_{ms}) \\ &\dots \quad (\text{式 2.15-1})\end{aligned}$$

有効投影面積 S_d が大きく、実効質量 M_{ms} が小さいか駆動力係数 B/l が大きいと、能率がアップします。

(式 2.11-9) より

$$f_0 / Q_{es} = (B/l)^2 / 2 \pi M_{ms} \cdot R_{ms}$$

(式 2.15-1) に代入して

$$\begin{aligned}\eta_0 &= f_0 \cdot \rho_0 \cdot S_d^2 / (c \cdot M_{ms} Q_{es}) \\ &= (\rho_0 / c) \cdot f_0 \cdot S_d^2 / M_{ms} Q_{es} \\ &= 5.445 \times 10^{-4} \cdot f_0 \cdot S_d^2 / M_{ms} Q_{es} \quad \dots \quad (\text{式 2.15-2})\end{aligned}$$

2. 16 SPL_0 : 平均音圧 (Sound Pressure Level) [dB/W 1mSPL]

入力 1 W の音声電力に対し、ユニットを J I S 箱[※] (J I S で規定された密閉箱) に装着した状態で測定します。軸上 1 m の距離でどれだけの音圧が得られるかを表します。

無響室が小さい場合には 1 m では特性が暴れるため、50 cm で測定したものを -6 dB 補正した数値を 1 m での数値として使うことが許されています。

表示は、x x d B/W (at 1m) S P L となります。

※ 縦 1240mm、横 940mm、奥行 540mm、内容積 600 リットルの密閉箱

因みに J I S 箱は、それ自体の反射を防ぐため、表面を吸音材で覆ってある場合が多いですが、測定した f 特には、箱エッジでの回折効果 (バップルステップ) で 150 ~ 200 Hz あたりの山と 500 Hz あたりの谷が生じます。

以上のパラメータが小信号領域でリニアなものであるのに対し、以下は大信号パラメータで**限界値**を示すものになります。

2. 17 Power : 耐入力 [W]

瞬間最大入力（ピークパワー）を表す場合と、**定格最大入力**を表す場合があります。

瞬間最大入力はその名の通り、**一瞬の印加であれば破壊することが無い入力**のことで、0.5秒～数秒の印加で破壊に至ります。表記に peak または MAX が併記されます。

定格最大入力は、連続動作で耐えられる入力のことです。測定には正弦波入力を印加しますが、実効値（RMS）なので表記に RMS や NOM (nominal) が併記されます。

電流からローレンツ力への変換効率は低く、ほとんどが熱エネルギーに変換してしまうため、VCの巻線部の温度上昇が耐熱温度を超えると被覆が劣化して断線（レアショート）が起こり破壊します。また、熱膨張によりVC巻線が膨らみますが、これを抑える巻線の接着剤（ウレタンワニス系がメイン）が炭化して破壊することもあります。

定格入力を加えて暫くするとVCの温度が平衡（発熱と放熱がバランスする）しますが、その時にVC構成材料全てが耐熱温度以下であることが定格入力表示の条件になります。

ウーファやフルレンジの場合には、放熱を考慮してアルミ製VCボビンを使うことが多いのですが、アルミは熱伝導性が良いためコイル発熱が伝達され、振動板やスパイダーとの接合部の接着剤、ひいては振動板やスパイダーそのものが熱劣化して破壊に至ることがあるため、各メーカーではパイロット生産品（量産品と同じ仕様）に対し高温高湿ランニング試験と称して定格入力での長時間耐久加速試験（48h～168h程度）を実施しています。

設計上、次項の X_{max} が定格入力時に範囲内に入っていることが理想です。

2. 18. X_{max} : 最大リニア動作領域 [mm] : SI単位では m だが通常 mm 表示

リニアと謳っていますが、実際には機械寸法で他の構成物と極度に干渉しない、もしくはコンプライアンスがノンリニアにゼロに近付く（**突っ張る**）**限界寸法**を表示している場合が多いです。ショート VC の場合にはギャップから外れると急激に駆動力が小さくなりますが、ロング VC の場合には駆動力が落ちないので VC の底当たり破壊を防ぐ方法、例えば VC の当たるボトム内面位置にクッション（アレスタと呼ぶ）を設置するなどが必要になります。

振動系が軽く、変換効率が良ければ、リニア領域が広いほど歪の発生が抑制できます。

メーカーの考え方が現れやすい項目で、スパイダーやエッジのコンプライアンスを小さく（硬く）してリミッターとして使う（PAなどに多い）か、振動系のコンプライアンスを大きく（柔らかく）して振動系等価質量を軽くすることで変換効率を稼ぎ、スパイダーやエッジを突っ張らせず、上記アレスタを入れて非常時にリミットをかける方法があります。ホールや野外PA用ではなく、室内で満足できる試聴音圧を想定したコンシューマー用であれば、後者を選択すべきと思います。

その他、表記されることが少ないですが、以下のようなパラメータもあります。

2. 19 Z_0 : 最大インピーダンス $[\Omega \text{ (ohm)}]$

F_s (f_0) でのインピーダンス最大値 (尖頭値) です。

Q_{es} 、 Q_{ms} が既知の場合には、以下のように求めることができます。

$$Z_0 = R_{evc} \cdot (Q_{es} + Q_{ms}) / Q_{es} \quad \dots \quad (\text{式 2.19-1})$$

2. 20 EBP : 効率帯域積 (Efficiency Bandwidth Product)

振動系最低共振周波数 F_s と過渡応答係数 $1/Q_{es}$ との積になります。

バスレフやホーンロードなどの低域の増強にユニットが向いているかをざっくりと判断する時に使います。EBP が小さい場合 (～50) には密閉箱が、それより大きい場合にはバスレフが、さらに大きい場合 (130～) にはバックロードホーンなどが向いています。何故かという、ユニットが駆動する空気負荷 (ロード : load) はバスレフより小さなキャビネットに連なるホーン負荷があるバックロードホーンのほうが通常は大きいので駆動力と制動力が求められるからです。

$$EBP = F_s / Q_{es} \quad \dots \quad (\text{式 2.20-1})$$

(式 2.11-9) を見ていただくと、駆動力係数 Bl (フォースファクタ) が大きければ、実効質量 M_{ms} がそれなりに大きくても Q_{es} は小さくなります。

実効質量が軽くてフォースファクタが大きい (磁気回路が強力か VC 巻線長が長い) ことがバックロードホーン向けのユニットの必要条件になります。

逆に磁気回路がプアで実効質量が大きいユニットの場合には、空気のスチフネスで振動板の動きを抑えられる小型密閉箱が無難だということになります。

以上が主要 TS パラメータになります。

それぞれのパラメータは他のパラメータと密接な関係があり、最低限のパラメータさえ得られれば相互の演算によって求めることができます。

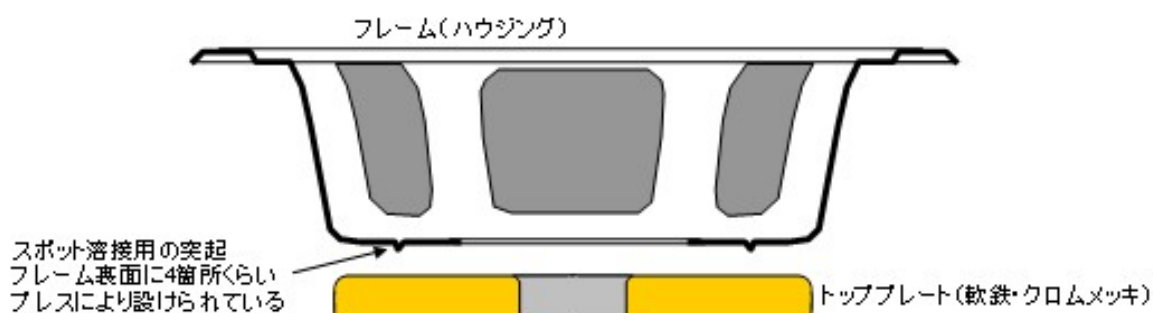
一覧表で赤字表記した M_{ms} 、 V_{as} 、 C_{ms} 、 Bl 、 Q_{ms} 、 Q_{ts} 、 S_d 、 F_s などが求められればキャビネット設計が可能になるということです。

第三章 ユニットの組み立て方・・・製造工程とノウハウ

1. フレーム（ハウジング）とトッププレートの接合

廉価ユニットの場合、**フレーム**のほとんどが板金をプレス打ち抜きしたものか樹脂を射出成形したものになります。高級なユニットではアルミ合金や亜鉛合金製ダイキャストが使われることもあります。

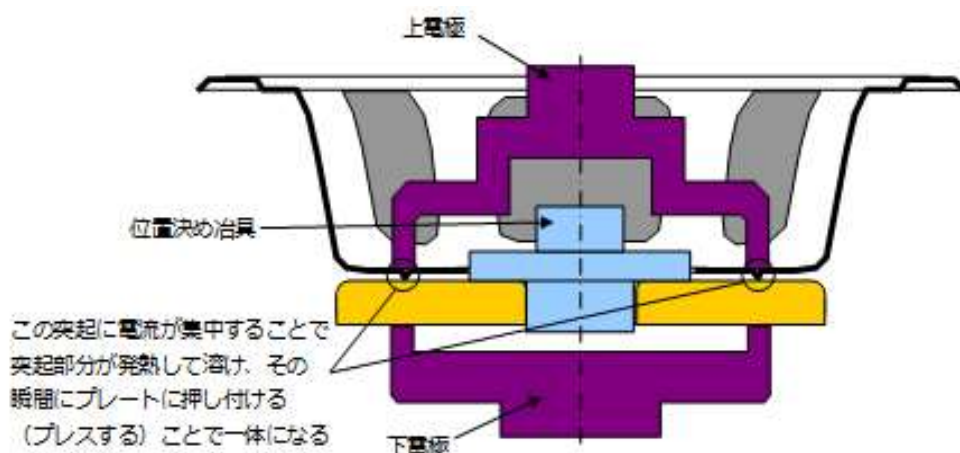
板金プレスのフレームと**トッププレート**（以降、T Pと省略）との接合は、30 年前はスポット溶接（電着溶接）が主でしたが、機械接合（嵌め込み）＋接着剤やカシメ、スクリュー固定もあります。ここではスポット溶接の場合を取り上げます。



【図 1-1】 板金フレームとトッププレートの形状特徴

（図 1-1）にスポット溶接用の突起を示します。

両者の位置決めは、（図 1-2）のように内径合わせ治具（フレーム打ち抜き穴と T P の内径の芯を合わせる）を用いて行い、上下から電極で挟んだ状態で溶接と同時に加圧プレスを行います。

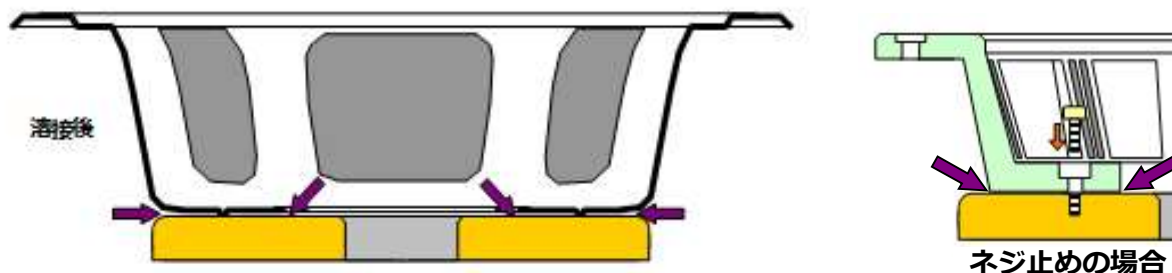


【図 1-2】 位置決め治具と溶接用電極

溶接とプレスのタイミングが重要で、溶接で溶けているうちにプレスします。

プレスのタイミングが早い場合には密着しなかったり、突起周辺にリーク電流による焼けが出たりします。

溶接後に(図 1-3)の矢印部分にゴム系接着剤を一周塗布して「ビビリ防止」を行います。



【図 1-3】 フレーム&TPアッセンブリ

これでフレーム&TPアッセンブリ（以下アッセンブリを Ass'y と略します）の完成です。

樹脂製やダイキャストフレームの場合には、スポット溶接ではなくネジによる結合になります。TPにはネジに合わせてタップ穴を切ったものを使います。樹脂は負けてTPに馴染みますが、この場合もビビリ防止に弾性のある接着剤（樹脂を侵さない）を併用することが多いです。（図 1-3 右図矢印部）

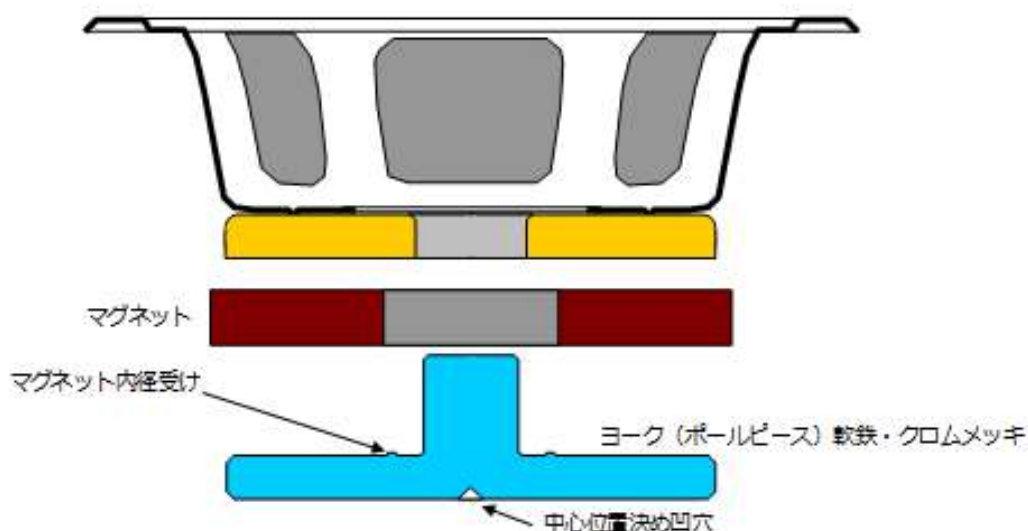
2. フレーム&TP Ass'y とマグネットおよびヨークの接合

マグネットは、廉価ユニットの場合、ほとんどがフェライト製になります。

ヨークは軟鉄※から熱間鍛造により作られています。

※ 軟鉄：炭素を殆ど含まない鉄。展延性が良い（熱間鍛造に向いている）。

マグネットの位置合わせ用に内径受けの突起リングと、回転台に乗せるときに中心軸位置を出すためのテーパ状凹穴を底に設けているものが多いと思います。（使い方は後述）

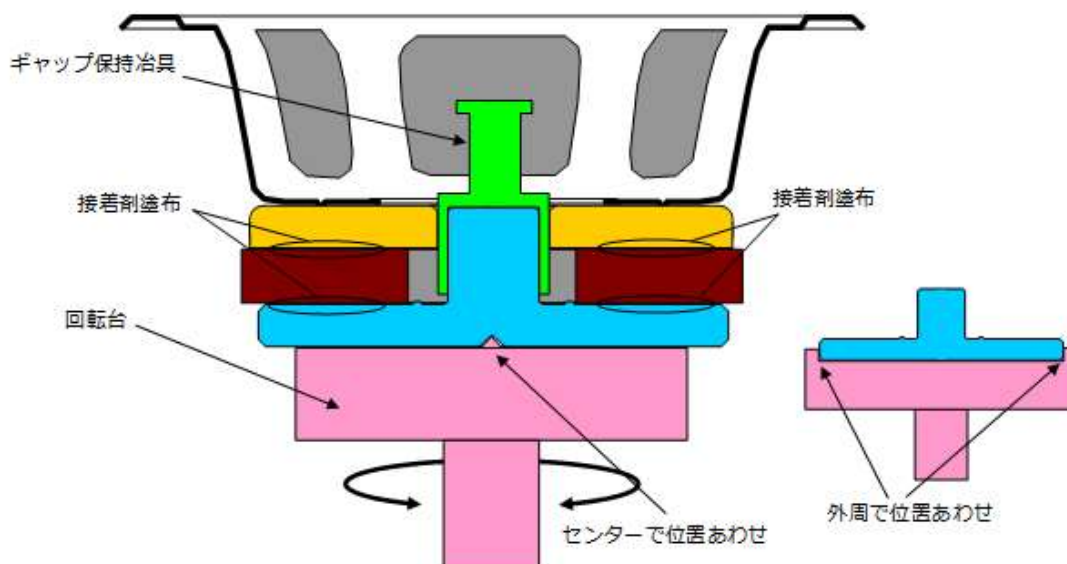


【図 2-1】 磁気回路アッセンブリの構成要素

TPやヨークの表面は、殆どが黄色っぽい六価クロムメッキ仕上げです。（最近のものは環境に配慮した三価クロムメッキが多くなっている）

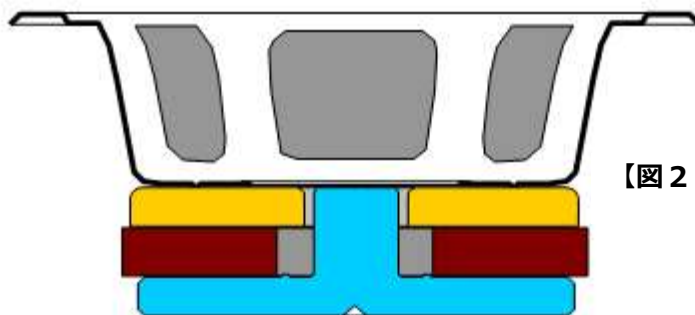
工程としては、

- ① 回転台中央の突起にヨークの位置決め穴を合わせて載せる。穴の無いヨークの場合は外径を合わせて芯を出すような回転台（図 2-2 右）を使います。
- ② センターポール部分に**ギャップ保持治具**（図 2-2 の緑色に塗った治具）を挿入します。
芯出し治具は VC 実装でも使いますが、このギャップ治具は設計ギャップ幅より 0.1～0.2 mm 薄い肉厚にすることで容易に挿入できて硬化後に容易に抜き取れるようになっています。
材質は寸法精度が良く滑りやすいジュラコン®（デルリン®）が多く使われます。
メーカーによっては精度を出すために型ではなく削り出しで作っている場合もあります。
- ③ 回転台を回転させながらマグネットが載るヨークの平面部分に接着剤（変性アクリル系：ハードロックなど）を塗布し、マグネットを載せて押し付けながら馴染ませます。



【図 2-2】 磁気回路アセンブリの接着工程（断面図）

- ④ 同様に回転させながら接着剤をマグネット上に塗布し、フレーム & T P Ass'y を治具に合わせて載せ、押し付けながら馴染ませます。更に、相互に回転させて接着剤を均等に馴染ませます。寸法精度を出すために接着剤の層を出来る限り薄くするという狙いもあります。
- ⑤ 接着剤が硬化するまで放置して、ギャップ保持治具を抜けば完成です。（図 2-3）



【図 2 - 3】 磁気回路アセンブリ

工程上、この状態でサブ Ass'y として一時保管する場合がありますが、その場合には異物がギャップに入らないようにギャップ保持治具を挿入したままさかさまに伏せて置くか、養生テープなどでギャップを覆って保管します。

ハウジング～TP 間がスクリュー固定の場合には先にヨーク（ボトムプレート）＋マグネット＋TP をサブ Ass'y しておき、ハウジングをこの段階で取り付けるメーカーもあります。

3. 振動系の組み立て

第一章で記したように、『振動系』と呼ばれるものは、**振動板**、**エッジ**（サラウンド）、**ボイスコイル**（以下 VC と略します）、**ダンパー**（スパイダー）、**錦糸線**などから成っています。

このうち、組込を実施する以前にサブ Ass'y として用意しておくものが振動板＋エッジの『**振動板 Ass'y**（通称「コーンアッシー」と呼ばれている）』になります。

エッジは、その機能ゆえ柔らかく、それ自体では形を保てないものが結構あります。

したがって、きちんとした治具を使って貼り合わせないと精度が出ません。おまけに振動板と張り合わせるための接着剤塗布量が不均一だと質量バランスが取れなくなるため、均一さに重点を置いたアッセンブリになっています。（外観部品でもありますので、接着剤の食み出しにも注意します）

外周部分もスペーサーに貼り付けて形状保持する場合もあります。

このサブ Ass'y の形で製造、販売しているメーカーが昔はいっぱいありました。

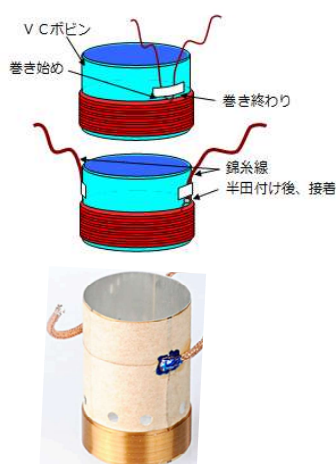
たとえば、ドイツのクルトミューラー社、アメリカのホーレー社、国内だと東京コーン社、静岡のプラス産業社、日本理化製紙社、ギフトク（旧・岐阜特殊製紙）社などです。

特に岐阜県^{いたどりがわ}の板取川流域には代表的な和紙である『美濃紙』を作るメーカーが集中していた関係から、副業としてスピーカー用の振動板を作るところも多かったのです。

エッジは、半世紀以上前は**フィクストエッジ**といって振動板と同じ紙製でエッジの部分だけを薄くプレス成形することで動き易くしたものが主流でしたが、薄いのがゆえに通気性があるためビスコロイド（ゲル状透明）などを塗布する必要があったりストロークが小さかったりしたことから、絹や綿などの織物に樹脂含浸して熱成形したものが徐々に主流になり、更にリニアリティ要求から発泡ウレタン製に変わりましたが、紫外線や吸湿による経年劣化の問題がクローズアップされました。今では経年変化の少ない**エラストマー**（ゴム）系が主流になってきています。

これらのエッジを上記の振動板メーカーが専門メーカーに発注して、振動板との貼り合わせを自社で行って出荷していました。コーティング布を購入して抜きカットを行い、振動板との熱による貼り合わせとエッジ成形を同時に行っていたメーカーもありました。

【図 3-1】
V C Ass'y 概要



もうひとつ、サブ Ass'y になるのが **V C Ass'y** になります。

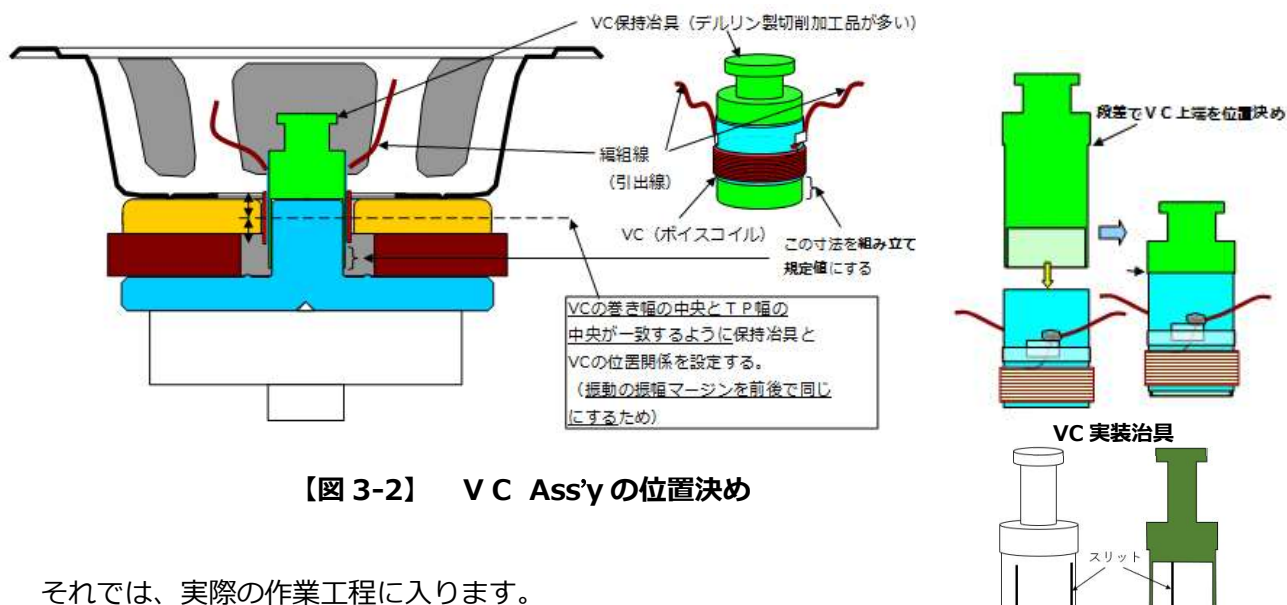
V C 巻線の形を保ち、且つダンパーや振動板と接合するために必要な**ボビン**（円筒）に、通称**マグネットワイヤ**（P E または U E 被覆線：P V F 被覆のフォルマル線はほとんど使われません）を巻き付けた構造になります。

巻き始めと巻き終わりは、小さくカットした薄いクラフト紙をワニスでボビンに貼り付けて固定します。（図 3-1 上）

⇒ ボビン材の特質などは、第一章 2.5 項を参照。

最近では、マグネットワイヤ端部（リード線と呼びます）をそのまま引き出すのではなく、リード線の巻き始めと巻き終わりに近い部分で**銅糸線**に半田付けしてボビンに固定してしまうものが増えています。半田付け部分は接着剤で補強します。（図 3-1 下側）

この構造を採ることで、これから記す振動板 Ass'y の**質量バランスを改善**する方法になりますし、**ボビンと振動板口元のクリアランスを狭く**することにも役立っています。



【図 3-2】 V C Ass'y の位置決め

それでは、実際の作業工程に入ります。

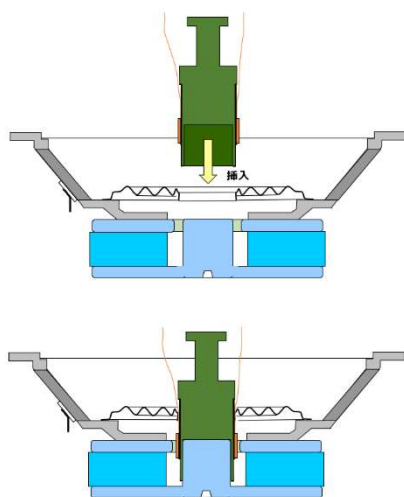
実装には、V C と磁気回路との位置関係を正しい状態にし、且つ V C 巻線がギャップを擦らないように軸心を保持する治具が必要になります。磁気回路組立治具と同様にデルリン®やジュラコン®樹脂（ポリアセタール POM）を切削加工※した**V C 保持治具**または**V C 挿入治具**と呼ばれるものです。（図 3-2 右下の緑色部分など） ※肉厚が薄いため

V C ボビン内径と治具外径がゼロゼロ寸法（余裕無し）で設計しており、挿入しやすく、且つ少し力を加えれば V C ボビンの上下位置が変えられるようにスリットを入れて弾性を持たせてあります。特定の V C 用に専用治具として作られた治具は、ボビン上端で確実に位置決めできるようになっています。（図 3.2 右側）

(図 3-2) 内に示した「組み立て規定値」は、V C 保持治具をヨークのポールピースに奥まで挿入した状態で前後の可動域をそろえるため V C 巻幅の寸法中心がトッププレート幅

の中央 (ギャップセンター) に合致するための寸法で、V C と磁気回路それぞれの組み合わせ毎に決めてあります。

(治具下端からボビン下端までの寸法で規定)



【図 3-3】 ダンパーの挿入

① まず、ライン投入前に仮組をして部品の相互位置を確認することがキーポイントになります。ただし、量産品すべてに対して実施する訳ではなく、パイロット・ランで 1～2 台確認するのが普通です。

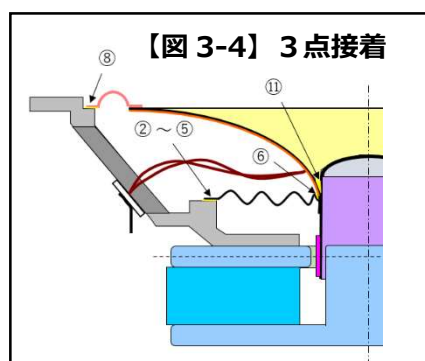
② VC ボビンと磁気回路の位置関係 (挿入治具への VC ボビンの装着状況)、③ ダンパーと VC ボビンの位置関係、④ 振動板とエッジを組み立てたもの (これを「振動板 Ass'y」または単に コーン紙と呼ぶ) と VC ボビンの位置関係の 3 つが設計通りであることを確認するためです。第一の目的は上記の VC 巻線と

ギャップとの位置関係をベストにするためで、確実に目視確認すべきは VC 実装治具に実装

された VC ボビンの位置 (規定値) になります。この設定が違っていると、設計通りの性能が出せません。

3 点接着の場合にはエッジ外周部がハウジングのエッジ座に正しく位置した時に振動板内径が所定の位置 (ダンパー口元の接着剤に埋まる位置) に配置されることを確認します。(図 3-4)

以下工程では、**赤字部分**が 3 点接着の追加項目になります。



【図 3-4】 3点接着

② リード線端部を上方に伸ばし、V C 治具とボビンをズレない

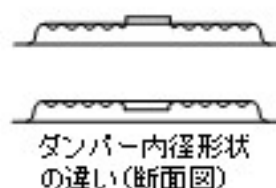
ように一緒に持ち、ダンパー口元に挿入します。(図 3-3)

注意しなければならないのは、**ダンパーの口元形状には 2 種類あって立ち上がりの向きが異なる**ことです。(図 3-4)

したがって、治具 + V C Ass'y をダンパーの上からスムーズに挿入できないことがあり (図 3-4 の上側の形状)、その場合には、治具 + V C Ass'y を事前にダンパーの下部から挿入したものを用意することになります。

V C 治具からボビンがズレないように注意しながら作業するのは (図 3-4) 上側の形状でも下側の形状でも同様です。(最近、**ほとんどが下の形状**のようです)

(図 3-4) いずれの形状でもダンパーは荒い網目の繊維にフェノール樹脂を含浸させて可熱プレスしたものが多いため、他の部品に比較して柔軟で変形しやすいものになります。

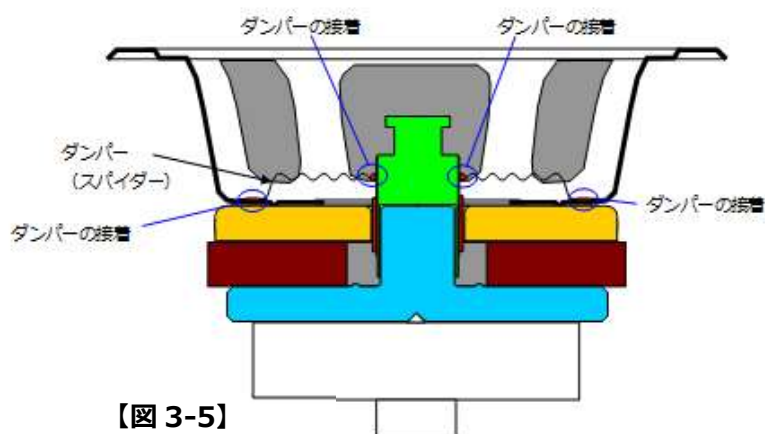


【図 3-4】 ダンパー口元形状

- ③ 回転台を回転させながらダンパー座（ハウジング底の平面）に接着剤を塗布します。

以下は、（図 3-5）を参照してください。

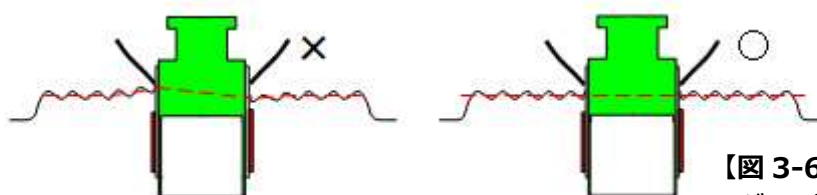
- ④ ダンパーを嵌めた状態で V C 治具を磁気回路 Ass'y のギャップに挿入します。



【図 3-5】
ダンパー接着

ダンパーはメッシュ状なので特殊なもの以外は直ぐに接着剤と馴染みます。

- ⑤ V C ボビンの上下位置がズレないように注意して V C 治具を回転させます。ダンパー口元はボビン外径に対してマイナス寸法に（きつく）なっているので、口元の変形が起り易くなっています。（図 3-6 左）



【図 3-6】
ダンパーと VC ボビンの嵌合

V C 治具を指で回転させることでダンパー変形を修正し、ダンパーに応力が残らない状態にします。（図 3-6 右）

この変形は前後にリニアな動作をさせるためには致命的です。

したがって、挿入後に変形していないのを確認することが重要な作業になります。

VC 治具を回転させながら、リード線引き出し部分とハウジングに実装されている端子板との位置関係を正しくします。

（図 3-1）下側の錦糸線出しタイプでも同様に端子板との位置関係を正しくします。

- ⑥ 回転台を回しながらダンパー口元に接着剤を 1 周以上塗布します。（図 3-5）

- ⑦ 放置して接着剤を硬化させます。※

※ 3 点接着では硬化する前に次工程に進む

ダンパー座およびダンパー口元の接着剤ですが、昔は音質優先でゴム系のものを使っていましたが、最近は磁気回路と同様の変性アクリル系二液接着剤を使っているものが多いようです。

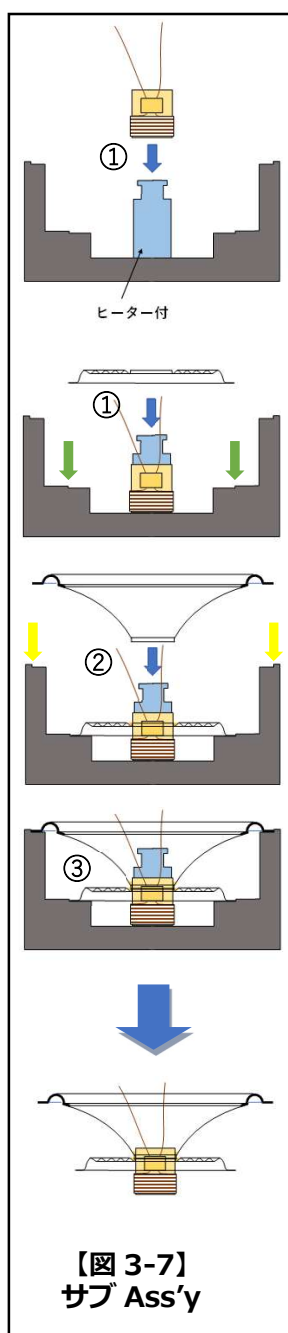
⑧ 振動板 Ass'y のエッジ外周部が接着される部分(エッジ座:ハウジング外周の平面部分)に回転させながら接着剤を塗布する。

⑨ 振動板 Ass'y を VC ボビンに沿って載せ、エッジ外周部を接着剤と馴染ませる。

⑩ 振動板に傾きや偏芯がないことを確認。

⑪ 振動板口元がダンパー口元の接着剤に埋まるようにしてから、ボビンと振動板内周の隙間に接着剤を塗布する。(2点接着の場合には、赤字下線部分の作業は不要)

3点接着の場合には、ダンパー口元と振動板 Ass'y 口元の接着剤種類は同じになります。



以下は、JBL などが採用している方法ですが、組み立て工程以前に正しい位置関係で3点接着を実施したサブ Ass'y を以下の手順で作っておきます。(図 3-7)

① ヒーターの入ったボビン治具に VC-Assy を所定位置に実装して過熱(約 80℃くらいか?)しておき、ダンパーを所定位置まで挿入して(ダンパー外周位置決めは治具段差にて行う: 図の緑色矢印)、VC-Assy を治具ごと回転させてダンパーとの嵌合を馴染ませて変形歪を取り除いてから、口元を接着。

② 硬化する前に振動板を載せて口元を接着。(エッジ外周位置決めは治具段差にて行う: 図の黄色矢印)

③ 実用硬化※するまで加熱放置する。※完全硬化ではなく固着している状態
このサブ Ass'y 工程では、ダンパー外周部とエッジ外周部は位置決め治具に載せるだけ(それぞれの外周接着面を高さガイドとして使い、載せるだけで同芯が取れる)で、接着しないことがポイントになります。(次に示す4項のハトメ+錦糸線工程も実施しておく)

実装時には、まず、フレームのダンパー外周座とエッジ外周座部分に同時に接着剤を塗布します。

端子とリード線の位置関係に注意しながら、サブ Ass'y の VC ボビンに実装治具を挿入したものをポールピースに挿入し、エッジ外周とダンパー外周を接着剤に馴染ませます。

3点接着部分とダンパー外周/エッジ外周部分との位置関係が一度で決まるため、通常工程では避けられない「相互位置のズレで各所に散在する応力歪み(三次高調波歪)」が減り、揺動(ローリング、ピッチング、ヨーイング)が起こってもギャップ内でのアバレが減るメリットがありますが、事前の手間がかかるため高価なユニットにしか使われない方法になります。

前ページの記述（3点接着によるモーメント上のデメリット）と異なるように思えますが、揺動の主要因である相互位置のズレによる**応力歪**をサブ工程で減らすことは、十分な効果があるということ（構造上、応力がバランスしていれば揺動は起きにくいということ）です。

音質に影響を与える最大要素は振動板ですが、VC ボビンは駆動力を振動板に伝える重要な役割があるので、その材質も影響要因になりますし、ボビンと振動板の間を接合する接着剤ももちろん影響要因になります。

前述したゴム系接着剤はエラストマー（ゴム弾性を持つ材料：三次元架橋構造を持つ）を有機溶剤で希釈した（分散させた）もので有機溶剤が蒸発（キュア：be cured）して固化します。したがってキュア後、固形物だけが残るため体積減少しますが、架橋構造が残るため内部損失が適度に存在します。

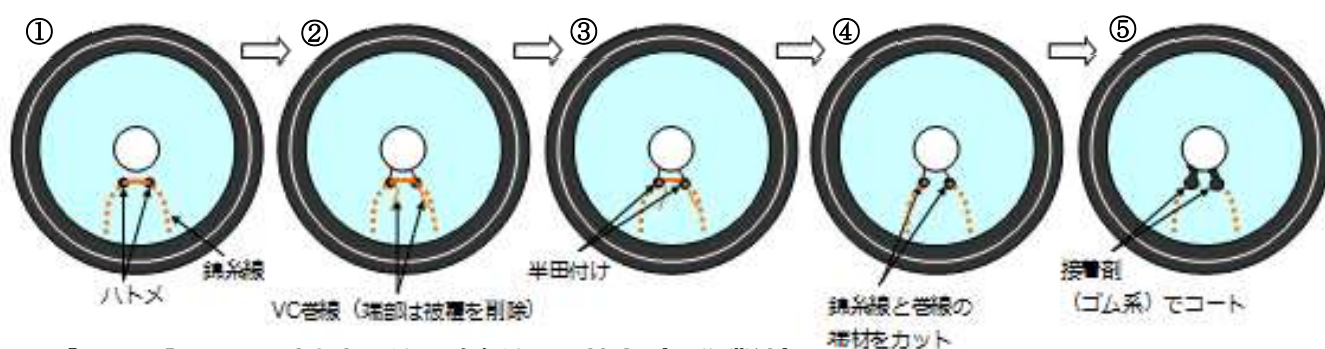
昔は、接着剤はオILERを使っての塗布作業だったので塗布量精度が低く、ダンパーを透過してタレが起こるのを防ぐためには、この接着剤選択がベストでした。

今では、精度の高いディスペンサー（定量塗布器）が当たり前になりましたので、粘度や硬化時間以外は接着剤への制約は基本的になくなりました。

4. 錦糸線の処理と振動板 Ass'y の実装

（図 3-1）上側のタイプ（リード線を直接出したまま）の V C Ass'y を使う場合（旧作業法と名付けます）の錦糸線処理は、（図 4-1）に示した手順で進めます。

旧作業法の場合、事前作業として錦糸線との接合用にハトメ x 2 個を振動板の所定位置に打っておきます。（図 4-1 ①の要領）



【図 4-1】 V C 引き出し線と錦糸線との接合（旧作業法）

ハトメの役割は、リード線（マグネットワイヤの引き出し部分：絶縁被覆を溶剤で剥いてある）と錦糸線を半田付けするための中継端子になります。

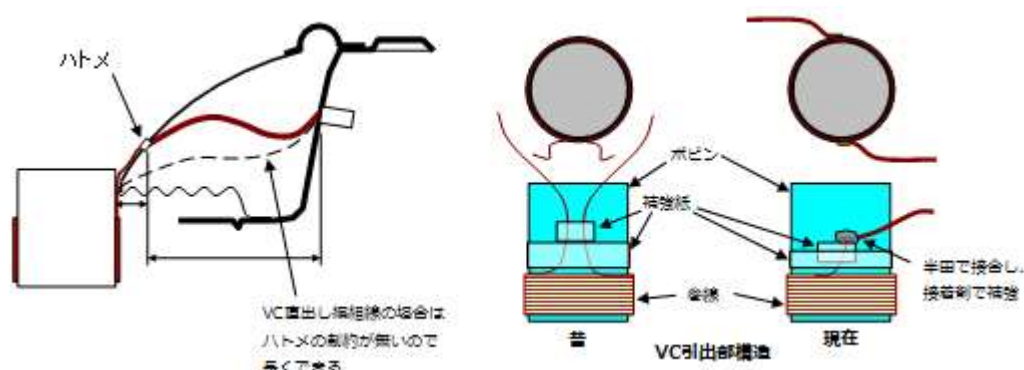
ハトメは錦糸線が通る大きさのものを 사용합니다。事前に錦糸線の太さ、長さ、ハトメ位置のそれぞれを変えたいいくつかの試作ユニットで耐久試験を実施して、「最大定格駆動 + 10 %」でも問題の起きないハトメの位置と錦糸線の仕様を求めています。（最近では PC シミュレーションで事足りるのかもしれませんが・・・）

量産工程では作業の利便性を考えた結果、①ハトメを打ち、指定の錦糸線をハトメに通し、

錦糸線を均等振り分けにした上で、ハトメと錦糸線の接合部に予備半田しておきます。

これを使って振動板の実装を行います。

この工程を改めて考えてみると、ハトメを打つまではサブ工程でも良いとして、錦糸線をあらかじめ通しておくとコーン紙を実装する際に錦糸線が質量負荷となり、傾き等の原因になるのが分かります。そうかと言って、振動板実装後にハトメに錦糸線を通すのは合理的ではありません。



【図 4-2】 VC引き出し処理の新旧と特質

(図 4-1) ②以降の作業はコーン紙を貼り付けて固定した後の工程になります。

②～③予備半田した部分とリード線を半田付けして、④ハトメ間の錦糸線と余分なリード線をカットし、⑤リード線を振動板に沿わせたうえで、黒色のボンドで覆ってビビリ防止をします。

また、リード線の処理については、コーン紙の口元の付近までVCボビンにクラフト紙で貼り付けてあるべき(図 4-2 の補強紙が相当)で、この構造がないと浮いているリード線が駆動に応じて共振してしまい、ビビリ音が発生します。

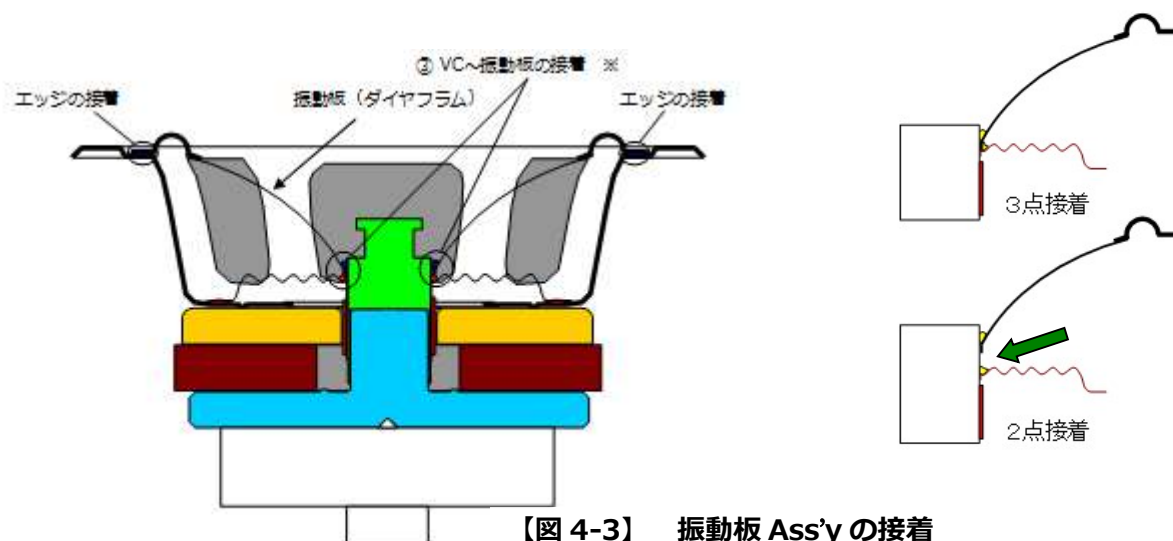
旧作業法の場合、VC引き出し線は振動板の口元を通すため、VCボビンと振動板の口元との隙間がある程度必要になります。これにより接着剤の漏れも発生し易くなるし、ボビンと振動板の間に介在する接着剤が多くなるので、駆動情報の欠損や音質的なカラーリングが起きます。また、錦糸線の引き出し位置が偏るため、揺動(ピッチング)が生じやすくなります。(ハトメ位置を振動板の対角位置にすれば防げますが、端子への半田付け作業性はスポイルされます)

新作業法(錦糸線をVC表面から直接引き出す方法: 図 4-2 で「現在」と表記)では、VCボビンの対向部分から引き出しているためモーメントバランスが良く、駆動に対して揺動が生じにくいメリットがあります。(端子への半田付け作業性は悪くなりますが・・・)

また、ハトメ部分から錦糸線を引き出した場合に比べて錦糸線が長くなるため、駆動に対する余裕が生じます。(図 4-2) 左側断面図

この構造を取り入れることでV Cサブ Ass'y に錦糸線まで実装されるので、組み込み時の作業難易度が下がります。人件費の安さから2000年以前に中国で生産していた日本企業は、国内と違い作業者のスキルが低かった（というより難しい作業を習得した作業者が定着しない仕組み・・・ジョブホッピングが当たり前だった）ため、改善方法として、こぞってこの方法を取り入れました。そのナゴリが今でもあるということです。

新作業法が揺動に強く、作業性をアップさせるメリットは認めますが、その代わりに引き出し部分がダンパーとコーン紙の間に存在することになり、完全な3点接着は構造的に不可能になります。



【図 4-3】 振動板 Ass'y の接着

以下の作業は、2点接着（ダンパー口元と振動板の口元が離れている）の場合にはダンパーの口元の接着剤が乾燥した後に実施しますが、3点接着の場合にはダンパーの口元接着剤塗布後すぐに実施します。

⑫ フレームのエッジ座部分に回転台を回しながら接着剤を塗布する。

⑬ 振動板 Ass'y（コーン紙）を VC 治具に沿わせて落とし込む。

その際、V C 巻線の引き出し部分を持ち上げて振動板の口元に通しておく。

また同時にエッジ座部分の接着剤にエッジ外周部を馴染ませるようにする。

この時点で軸芯が出ていないとエッジに歪（変形）が残り、リニアリティの悪化を引き起こします。

3点接着の場合には、ダンパー口元の接着剤に振動板の口元が載る（潜り込む）形になるので、正しい位置になるように成形して埋め込みます。（図 4-3 右上）

押し過ぎるとダンパー位置にまで影響が出るので注意！

⑭ 振動板の口元に回転台を回しながら接着剤を塗布する。（V C 巻線の引き出し部分が塗布オイラーの邪魔をしないようにV C 治具の頸部に巻き付けておく）

新作業法のV C Ass'yの場合には、ダンパー口元と振動板口元との間（障害物がない：図4-3 2点接着の緑矢印部分）から錦糸線を引き出す形になります。したがって（図4-1）の引き出し線処理は不要となります。（^{わずら}煩わしい作業の削減が出来ます）

5. 錦糸線端のターミナルへの接続

⑮ 回転台から一度ユニットを外し、裏返して机に置き（凸エッジの場合には潰れないような治具を当てる）、錦糸線に^{たる}弛みと整形（耐久試験でOKになった弛み形状）を実施しながら端子板（もしくは単独端子）の半田付け指定部分に半田付けします。

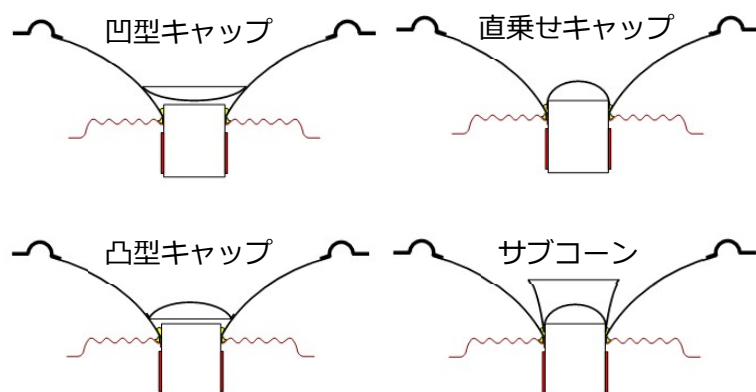
6. 防塵キャップの貼り付け

リード線のビビリ防止処理（図4-1）⑤ が完了した後にV C保持治具を引き抜きます。

再度、回転台に載せ、回転させながら振動板の表面に防塵キャップ径に合わせて接着剤を塗布し、キャップを載せます。

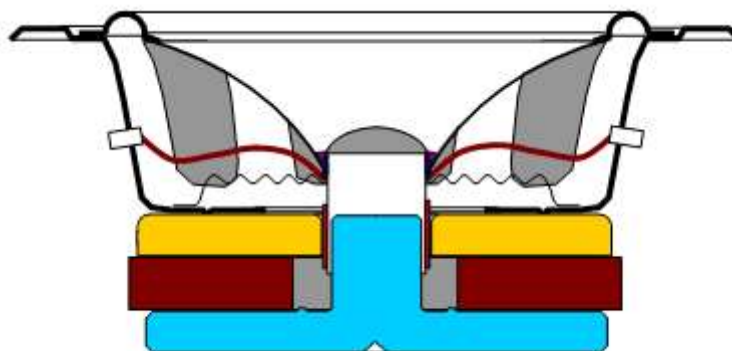
製品によってはV Cボビンの上端にキャップを被せて接着するものがありますが、高域用振動板として積極的に機能させる目的があります。

サブコーン一体のキャップもあります。これも同じ目的です。



【図 6-1】 キャップ種類

これで組み立ては完了になります。

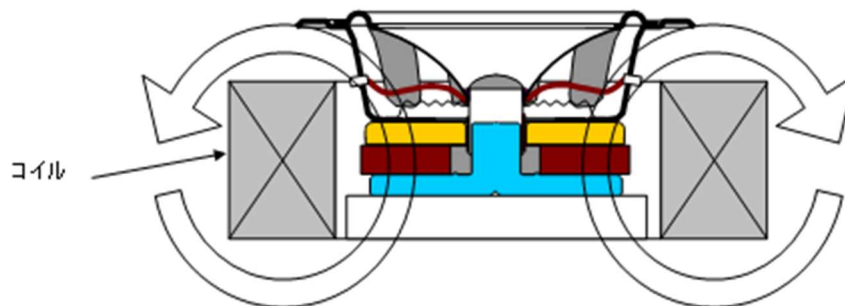


【図 6-1】 組み立て完了

7. 着磁

以上 6 項までで外形は完成しましたが、このままではスピーカーユニットとしての機能を果たしません。

電源（巨大なコンデンサが内蔵されています）と巨大空芯コイルを組み合わせた**着磁器**というものを使ってマグネットに磁力を持たせます。チャージした直流電荷を一瞬でコイルに流すことで強力な磁場を作ってマグネットを磁化する仕組みです。



【図 7-1】 着磁

8. チェック

ユニットとして機能するようになったら、最後に周波数スイープ信号を入力してビビリ音や異物混入が無いかのチェックを行います。

メーカーによっては、キャップを実装する前に着磁～チェックを実施してリペアが簡便になるようにしていますが、不良率が低ければ上記の工程でまったく問題ありません。

第四章 アンプ負荷としてのユニット

1. ダンピングファクタとは？

まず**ダンピングファクタ**（以下**D F**）の定義を以下に示します。

アンプの出力にスピーカーの代わりにダミー抵抗 R_L を負荷インピーダンスとしてつないだ場合に、この**負荷インピーダンスとアンプ内部インピーダンス r_e との比**を **D F** と呼びます。

$$D F = R_L / r_e \quad \dots (式 1-1)$$

R_L : 負荷インピーダンス

r_e : 内部（出力）インピーダンス

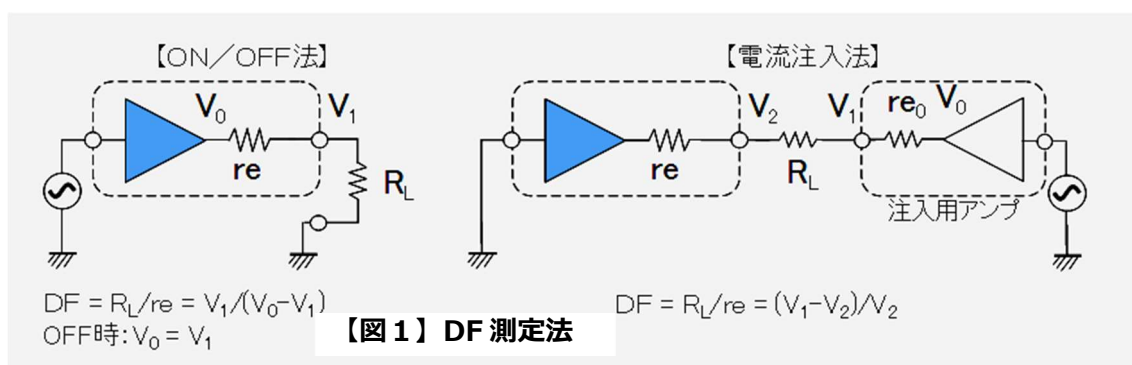
したがって、アンプの内部インピーダンスが小さいほど **D F** は大きくなります。（図 1）
内部インピーダンスという言葉に馴染みがなければ「出力インピーダンス」も狭義では同じものになります。

ダミー抵抗の周波数特性はオーディオ機器の帯域（可聴帯域を超える 100kHz あたりまで）では十分にフラットであるため、もし **D F** が周波数依存性を持つならば、それはアンプ要因（**N F B** 素子など）と言えます。

D F の測定方法としては、ダミー抵抗を **O N / O F F** した時の出力端子での電圧を測定し、演算により内部インピーダンスを求める方法が簡単で一般的です。（図 1 左）

この方法では、スピーカーケーブルのインピーダンスも含めて負荷となるため、抵抗を出力端子に最短で接続することは言うまでもありません。

（図 1 の青色で着色した三角が被測定アンプ）



ダミー抵抗を **O F F** したときには電流が流れないので、

$$V_1 = V_0$$

抵抗を **O N** したときには、

$$V_1 = V_0 \cdot R_L / (R_L + r_e)$$

$$r_e = R_L (V_0 - V_1) / V_1$$

$$\therefore D F = R_L / r_e = V_1 / (V_0 - V_1) \quad \dots (式 1-2)$$

例として、出力開放（ダミー抵抗OFF）時の $V_0 = V_1 = 5V$ 、ダミー抵抗 $R_L = 8\Omega$ に設定すると、ダミー抵抗接続時に $V_1 = 4.8V$ が測定されたら、

$$r_e = 8 \times (5 - 4.8) / 4.8 \approx 0.333 \quad [\Omega]$$

$$DF = 8 / 0.333 \approx 24$$

となります。

ただ、最近の半導体アンプでは内部インピーダンスが数十mΩと極端に低いことから、メーカーでは、より精度の高い『**注入法**』を使って測定しているとのこと。

注入法は、被測定アンプとは別に負荷抵抗と直列に出力インピーダンスの極端に低いアンプを接続し、被測定アンプ入力をショートした状態で注入用アンプから正弦波信号を注入して測定します。（図1右）

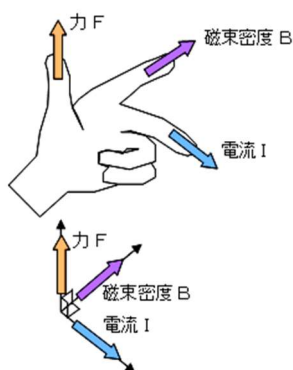
$$DF = R_L / r_e = (V_1 - V_2) / V_2 \quad \dots (式 1-3)$$

被測定アンプでの分圧 V_2 が小さいため、 V_1 を出来る限り大きくして、 V_2 の測定精度を上げます。

2. 実負荷に対するダンピングファクタ

スピーカーは第一章で示したように磁界の中で電流を流すとローレンツ力が生じる原理を使って振動板を動かし、結果として音圧（音響エネルギー）を得る変成器になります。

中学？高校？の物理で「フレミングの左手の法則」というものを習ったと思いますが、電流 I 、磁界（磁束） B 、力 F それぞれのベクトル方向を3本の指に当てはめて憶えたの思い出の方も多いと思います。



ローレンツ力 F は第一章 2.3 項でも示したように

$$F = B l I \quad \dots (式 2-1)$$

B : 磁束密度、 l : 磁束を横切るコイル線長、 $B l$: フォースファクタ、 I : 電流で表現されます。

回りくどいようですが、要は「スピーカーは**電流駆動**するもの」であることを言いたかった訳です。

したがってオーディオアンプには「音声信号に応じた電流を、いかにして忠実にスピーカーで変声させるか」が期待されるということです。そのためにはアンプに求められる性能として「電流によるロス（スピーカー以外の電圧降下）がゼロ＝内部インピー

【図2】フレミングの左手の法則

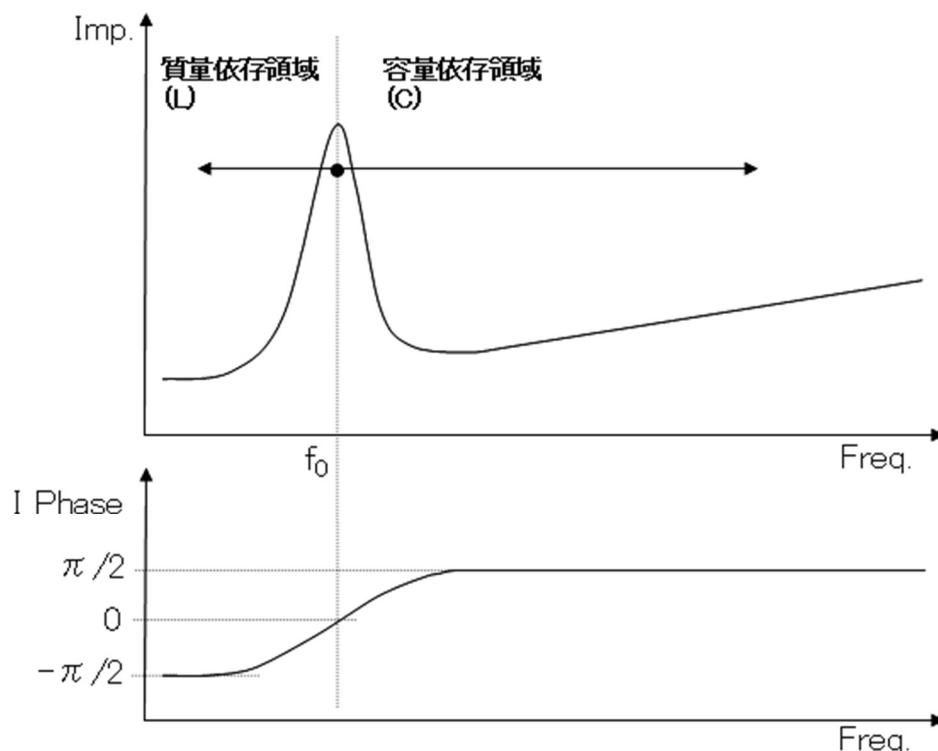
ダンスゼロ」が理想となります。

もちろんS Pケーブルの抵抗値もゼロに近いことが望めます。(実際のS Pケーブルは抵抗以外にインダクタンスやキャパシタンスとの複合分布定数回路網になりますが・・・)

そのようなことから、D F 神話「**D Fは大きければ大きいほど良い**」が生まれたのだと思います。

ここで、D Fが「純抵抗」を負荷として定義されていることを思い出してください。

実際のスピーカーは純抵抗ではなく、低域に機械共振周波数 f_0 を持つ負荷であるため、周波数に対してインピーダンスが一定ではありません。(図 2-1)



【図 2-1】スピーカーユニットのインピーダンスおよび位相特性

したがって、アンプのD Fをいかにフラットにしたところで、 f_0 近辺の周波数でユニット負荷インピーダンスが急激に大きくなることからダイナミックD F（勝手に銘々しました 汗 ;）はフラットにはならず、数値も大きくなります。

また、 f_0 近辺では L 負荷（質量領域）から C 負荷（弾性領域）に変化するため、位相が180度回りますので純抵抗と同じように考えるのには無理があります。（虚数無効分を考慮する必要があります）

3. 逆起電力について

もうひとつ、ユニットには困った問題があります。

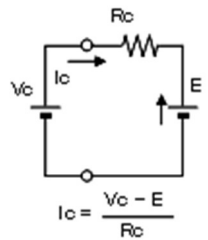
フレミングの左手の法則に対して「**右手の法則（レンツの法則）**」があるのをご存知と思います。これは磁界内の導体が移動する（導体が磁束を横切る = **コイルを貫く磁束密度（単位面積当たりの磁力線の数）が変化する**）と電磁誘導により移動を阻止する方向に電流が生じることを示すものです。

モーターが駆動用としても発電機としても機能するのは、この法則に因ります。

モーターの場合には磁界の均一性はファクタとして重要ではなく、実際には**フレミングの左手の法則によるローレンツ力**と**右手の法則（レンツの法則）による逆起電力**が共存して、**バランスを取っています**。具体的には、駆動電圧 V_c をモーターに加えると、コイルの抵抗値 R_c に応じた駆動電流が流れると共に磁界の変化に応じた駆動電流と逆向きの電流が生じ、インダクタンス値に応じた電圧（逆起電力 E ）を生じます。

モーターに流れる電流 I_c はこれらがバランスした値となります。（図 3-1）

$$I_c = (V_c - E) / R_c \quad \dots (式 3-1)$$



【図 3-1】
モーター
等価回路

$|V_c| < |E|$ になると回生電流が逆方向に流れて駆動軸に対して電磁ブレーキが発生し、回生電力が V_c にチャージされます。

スピーカーを駆動する場合には、ちょっと状況が異なります。

逆起電力を発生させる磁束密度の変化要因としては3つあります。

- ① 駆動電流によって導線周囲に変動磁界が発生し、磁気回路の直流磁界を変調すること。
- ② 磁気ギャップ（均一磁界）から離れることにより定常的に磁界が弱くなっていること。
- ③ 構造的に比誘電率 μ がノンリニアに変化すること。

① は、ビオ・サバールの法則により駆動通電しているコイル周囲に発生した磁界が磁気回路の固定磁界に変調を起こさせるもので、合成磁界が不均一になるため、均一になるように（エントロピーが極大になるように）導体に電流が誘起します。結果としてローレンツ力を発生させる駆動電流と反対方向に電流が発生します。現象として作用・反作用と同様にローレンツ力と対になっているもの（レンツの法則による）なので、均一磁界内ではリニアに作用します。均一磁界外でもコイル周囲に発生した磁界は入力電流に対してリニア（電流依存性）になりますが、② に示したようにギャップ外では磁気回路による磁束密度が減少するため、結果的にノンリニアになります。

② は（式 2-1）の定数項である B_l が位置依存性を持つ（ギャップを離れると磁束密度が急激に小さくなる）ことが要因です。位置依存性を持つということは、駆動結果に応じた二次作用（遅れ系）ということで、コイルの変位量との相関が発生します。

③ は、センターポールとトッププレートでギャップが構成されていることで、前方に駆動する時と後方に駆動する時で機構的に非対称、且つコイルの内側の媒体がセンターポール（金属）と空気で異なることにより比透磁率 μ が急激に変化し自己インダクタンス M_s が変位に対してノンリニアになることで逆起電力もノンリニアになります。

コイルに接続した振動系が慣性質量を持つため、②、③ は遅れ系を形成し、**タイムドメイン歪（トランジェント歪）**を発生します。

逆起電力と磁界の関係について以下に説明します。

（式 3-2）に示すように、レンツの法則（電磁誘導：フレミングの右手の法則）にしたがって、ボイスコイルに磁束変化分 $d\phi / dt$ に応じた逆起電力 E がローレンツ力を打ち消す方向に生じます。（符号－は「逆方向」の意味）

$$E = -N \cdot d\phi / dt = -NS \cdot dB / dt \quad \dots (式 3-2)$$

N : VC総巻線数 [回]

B : 磁束密度 [Wb/m^2 、 $N/A \cdot m$]

S : コイル断面積 = 磁束の貫く面積 [m^2]

また、磁束 ϕ は、以下のようにも表されます。

$$\phi = BS = \mu n I \cdot S$$

$$\therefore d\phi / dt = S \cdot dB / dt = \mu n S \cdot dI / dt \quad \dots (式 3-3)$$

n : 単位長さあたりの巻数

μ : 透磁率

純鉄の場合は $\mu = 6.3$ [mH/m]

真空 $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-3}$ [mH/m]

空芯コイル（空気）の μ はほぼ真空と同じ

（式 3-3）から分かるように、右辺の $\mu n S$ はスピーカユニット固有の数値であり、その数値が変動することでノンリニアになります。透磁率 μ 以外は構造に起因した固定値になりますので、ノンリニア要因は μ になります。

（式 3-3）を（式 3-2）に代入して

$$\begin{aligned} E &= -NS \cdot dB / dt \\ &= -N \cdot \mu n S \cdot dI / dt \\ &= - (N^2 / w) \cdot \mu S \cdot dI / dt \\ &= - (n^2 w) \cdot \mu S \cdot dI / dt \end{aligned}$$

S : コイル断面積 = 磁束の貫く面積 [m^2]

n : 単位長さあたりの巻数

w : コイル巻線幅 $\therefore N = nw$

μ : 透磁率

純鉄の場合は $\mu = 6.3$ [mH/m]

ここで自己インダクタンス M_s （自己誘導係数）は、

$$M_s = \mu N^2 S / w = \mu n^2 w S \quad [H]$$

となるので、

$$E = -M_s \cdot dI / dt = - (\mu N^2 S / w) \cdot dI / dt \quad \dots (式 3-4)$$

逆起電力の名前とおり、ローレンツ力を起こす駆動電流を打ち消す方向（動きを抑圧する方向）に磁束密度の変化に応じた電流変化 $-dI/dt$ が生じ、結果的に負荷である（コイル）インダクタンス成分 M_s の両端に電圧 E が生じます。コイルの抵抗と直列に M_s がつながっているように考えるのが妥当です。（式 3-4）より、自己インダクタンスが大きいユニットは逆起電力が大きくなる要素を持っていることが分かります。

ここで逆起電力 E が大きくなる要因を検証してみます。

自己インピーダンス M_s を構成する要素についてですが、**透磁率 μ** はほとんどのヨーク & トッププレートが純鉄の表面に錆止め用の銅下を施し六価クロメートメッキ仕上げするので固定値（ 6.3mH/m 、比透磁率：約 5000）と考えて良いのですが、飽和磁束密度の高い**パーメンジュール**や透磁率の高い**パーマロイ**などの材料を使うと数倍～数十倍に跳ね上がります。

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/magprop.html#c2>

③ の駆動変位で μ がノンリニアになるのは構造的な理由です。

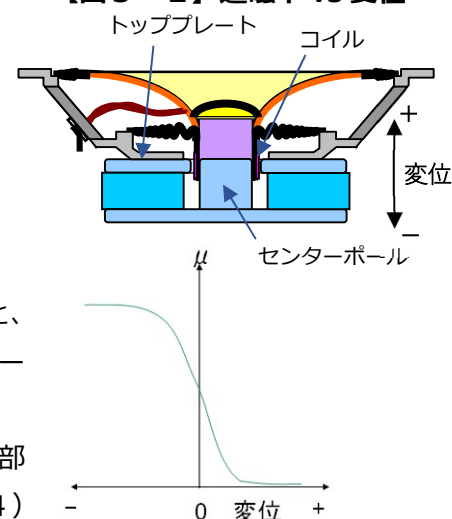
右図で磁気ギャップを構成しているのはセンターポールとトッププレートですが、入力電流ゼロ＝変位ゼロの場合にはギャップの中央にコイルが位置しています。

電流が印加されてコイルが後方（右グラフの変位－）に駆動されると、コイル内側のほとんどがセンターポールで占められるためセンターポールの透磁率（純鉄： $\mu/\mu_0 \approx 5000$ ）が式（3-4）に適用されます。

コイルが前方（右グラフの変位＋）に駆動されると空芯コイルになる部分が増えるため、比透磁率 $\mu/\mu_0 \approx 1$ に近くなり、この数値が式（3-4）に適用されます。

このノンリニアを是正するには、センターポールに薄い銅キャップを被せたり、リング状のアルミニウム（ファラデーリング）などをギャップ近くに配置させたりします。

【図 3-2】透磁率 vs 変位



材質	透磁率 μ [H/m]	比透磁率 μ/μ_0
真空	1.257×10^{-6}	1
空気	$1.25663753 \times 10^{-6}$	1.00000037
アルミニウム	1.256665×10^{-6}	1.000022
銅	1.256629×10^{-6}	0.999994
鉄 (99.8% 純鉄)	6.3×10^{-3}	5000
パーマロイ	1.0×10^{-2}	8000

巻き数 N は、同じボビン径を使うと対入力を上げるために太いワイヤ（単位長さあたりの抵抗値が小さい）を使うことになり、負荷としてのインピーダンス規格を満たすために N は必然的に多くなりますし、駆動ストロークを増やすために層数を $4 \Rightarrow 2$ に減らしてロングボイスコイルにすれば巻き線幅 w が大きくなり（ $w = N/n$ ）、且つ、磁界から食み出した部分での発熱に対する放熱面積を考慮すると、巻き径の大きなボイスコイルにしなければならなくなり、結果的に磁束が貫く断面積 S が大きくなります。

(式 3-2) より変化分 $d\phi / dt$ または dB / dt を大きくすることが逆起電力 E 増加の要素になることは容易に分かります。駆動力アップのために強力な磁石を使ってむやみにギャップ磁束密度 B を集中的に上げることは逆起電力 E の増加と同義になります。

なぜならばギャップに磁束を集中させたためにギャップから少し離れた部分では磁力線がまばらになり、 dB / dt が極端に大きくなるためです。駆動範囲のすべてにおいて均一な磁界の実現は限りなく不可能に近い命題になります。**均一な磁界範囲を食み出したら、逆起電力が発生する**と考えてください。

均一磁界の中で M_s を小さく、 B を大きくする方向性は正しいとは思いますが・・・。

もうお分かりと思いますが、駆動ストロークの大きいウーファやフルレンジなどでの駆動力や耐入力のパフォーマンスアップを実施すること (BI を大きくしたり、巻き数 N を多くしたり、放熱性能アップのために VC 径を大きく $= S$ を大きくしたりすること $\Rightarrow M_s$ を大きくすること) で結果的に**逆起電力が大きくなる**という皮肉なことになっています。

4. 逆起電力と歪

ここで「逆起電力がトランジェント歪である」と断定する理由ですが、第一章にも記述しましたが、原因は**振動系の実効質量**にあります。

質量があるものを運動させる場合、**慣性質量**として考えなければなりません。なかなか動き出さないし、動き出すと急には止まらないのは、この慣性質量のためです。

駆動電流によりボイスコイルにローレンツ力 F が生じますが、この時には以下の運動方程式 (ニュートンの第二法則) が成り立ちます。

$$F = M_m a = M_m dv / dt = M_m d^2 x / dt^2 \cdots (式 4-1)$$

M_m : 慣性質量、 a : 加速度、 v : 速度、 x : 変位

振動系の質量 M_m は、① 発生したローレンツ力により加速度 a で変位 (時間経過に従って加速) しますが、② ギャップを離れるに従い BI が減少するので徐々にローレンツ力が小さくなります。③ BI が減少するに従って dB / dt が増加するため逆起電力が大きくなっていきます。慣性質量である振動板の変位には時間が必要で、ギャップを外れて dB / dt が増加することにより逆起電力が発生するのは駆動電流が加わり始めてからある時間遅れてからになるということです。① のあとに②が起こり、②の結果で③が起こる・・・二次遅れ系動作になります。

系がリニアで単純に遅れるだけの場合には、過渡応答的にはインパルス入力に対して、単純な重ね合わせ (エコーと考えてください) として出力が得られることにはなりますが、ギャップから離れたエリアでのローレンツ力による駆動がノンリニアに変化することに起因して二次的に発生する逆起電力にもノンリニア要素があるため、出力には**遅延したノンリニア歪が重畳される**ことになります。

磁気回路偏重主義（ギャップの最大磁束密度だけに注力）は危険です。諸刃の剣です。

ギャップ部分では強力な均一磁界が確保できるとしても、ギャップから離れると急激に小さく（＝ $d B / d t$ が急激に大きく）なり、それが逆起電力の発生に結びつきます。

もちろん、駆動範囲全域で最大磁束密度が維持できるほどの磁気回路であれば問題ありませんが・・・それを目指したのがB & Wの**プッシュプル磁気回路**になりますが、ウーファでは良くてもフルレンジでは弊害が色々出てきます。

聴覚には急激なノンリニア現象に敏感だという特徴があり、 $d B / d t$ の急増に起因した遅れ現象は、ほとんどの場合音質の悪化を引き起こします。却って磁束を集中させないノーマルな構造のほうが、大入力でギャップを食み出した時の音質に関しては好感を以て受け入れられることになります。

ものごとには表の部分と裏の部分があり、常に一体となっている良い例です。なにごとにもバランスが大事ですし、ユニット設計者の力量にかかってくる部分になります。

逆起電力に関する一連の現象を整理します。

アンプの駆動電流 I によって、

$$F = I B l \quad \dots (式 2-1)$$

B : 磁束密度 l : コイル線長

のローレンツ力がコイルに加えられ、結果として振動系の慣性質量 M_m に対して

$$F = M_m a \quad \dots (式 4-1)$$

運動方程式に応じた加速度 a （＝ $d^2 x / d t^2 = d v / d t$ ）が生じます。

コイル変位 x に応じてギャップから離れることにより磁束変化 $d \phi / d t$ が大きくなり、コイルには遅延した逆起電力 E が発生します。**（コイル変位は加速度に応じた遅れ現象になります）**

結果的に加えた電流と逆方向の遅延電流変化 $-d I / d t$ ($\propto d \phi / d t$) が重畳され、言わば「**自家中毒**」とも言える現象になります。

ここで注意したいのは、磁束密度 B を大きくするとフォースファクタ $B l$ が大きくなり、結果として F が大きくなりますが、ウーファのように慣性質量（実効振動質量） M_m が大きい場合には（4 - 1）式より**加速度はそれほど大きくならない＝遅れる**ということです。

加速度（速度の変化分）が十分に大きければ遅延に伴う歪はそれほど影響ありませんが、振動系の質量が大きいのに磁気回路が弱いと加速度が小さくなり、遅延が大きくなります。

磁気回路は強過ぎても弱過ぎてもダメということです。強過ぎればギャップから食み出たところで $d B / d t$ が急激に大きくなるし、弱過ぎればローレンツ力が弱くなり加速度が小さくなります。**要はバランス**です。

振動系には、常に軽くて強靱であることが求められます。トランジェントを考えた場合、ウーファであっても重くて良いということは絶対にありません。

5. 逆起電力とトランジェント特性

質量が一定（前提条件）で加速度を大きくするには（式 4-1）より、ローレンツ力を大きくする必要があり、強力な磁気回路と磁界内の電線長が長い（ Bl が大きい）ことが有利になります。 l が長いとインダクタンスの影響が大きくなりますので、高域再生という意味ではフルレンジだと問題ですが、ウーファであれば問題にはなりません。

そのときの電気系先鋭度 Q_{es} は

$$Q_{es} = \omega_0 \cdot M_{es} \cdot R_{es} / (Bl)^2 \quad \dots (式 5-1)$$

で表されるため、電気的には **Bl が大きければ振動系の電気制動（振動収束）が可能**で、トランジェント特性の収束も良くなるように見えます。

一方、機械系先鋭度 Q_{ms} は

$$Q_{ms} = \omega_0 M_{ms} / R_{ms} = 2\pi f_0 M_{ms} / R_{ms} \quad \dots (式 5-2)$$

となり、これは**振動系の実効質量に比例し、機械抵抗（損失要素）に反比例**します。

式（5-2）は最低共振周波数での先鋭度を表していますが、式要素から分かるように最低共振周波数 f_0 以上の弾性領域（容量性負荷領域）では周波数が高くなるに従い Q_{ms} は大きくなりますが、損失が大きければ Q_{ms} は低く抑えられることが分かります。

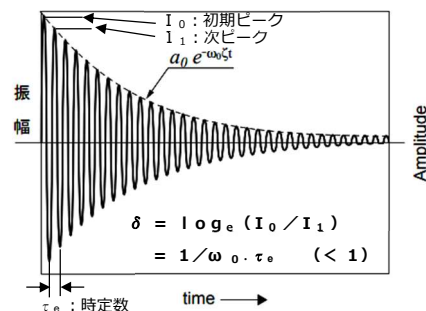
f_0 で振動エネルギーが熱エネルギーとして消費される量が増える（実効抵抗値が増加する）ので、 f_0 以下の低域（質量性負荷領域）では Q_{ms} が更に低くなります。

総合先鋭度 Q_{ts} は

$$\begin{aligned} Q_{ts} &= (Q_{es} \cdot Q_{ms}) / (Q_{es} + Q_{ms}) \\ &= Q_{ms} / (1 + Q_{ms}/Q_{es}) \\ &= \{Q_{ms} / (1 + Q_{ms})\} \times Q_{es} \quad \dots (式 5-3) \end{aligned}$$

（式 5-1～5-3）が表しているのは、常に $Q_{ts} < Q_{ms}$ で、 Q_{es} が小さくなれば、機械系より電気系への依存度が高くなる（電気制動ができる）ということで、 Bl が大きければ Q_{ts} が低くなるということです。

逆に Bl が小さくても、 Q_{ms} が小さければ機械系への依存度が高くなり、実効質量（慣性質量）および機械抵抗（ロス）の影響が大きくなるということで、実効質量 M_{ms} が小さく、損失 R_{ms} が大きければ総合先鋭度 Q_{ts} を低く抑えられます。



【図 5-1】減衰波形と包絡線

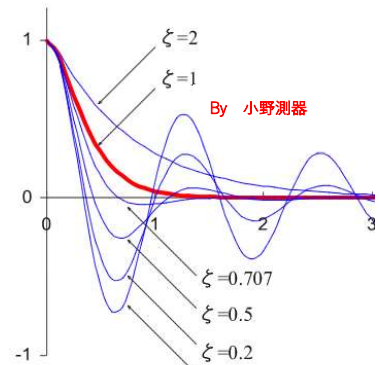
総合先鋭度 Q_{ts} とトランジェント特性の**対数減衰率 δ 、減衰比 ζ** の関係は、

$$\begin{aligned} Q_{ts} &= 1/2\zeta = \pi/\delta \\ \therefore \delta &= 2\pi\zeta \end{aligned} \quad \dots (式 5-4)$$

(式 5-4) の意味は Q_{ts} が小さくなれば結果的に収束性も良くなるということです。

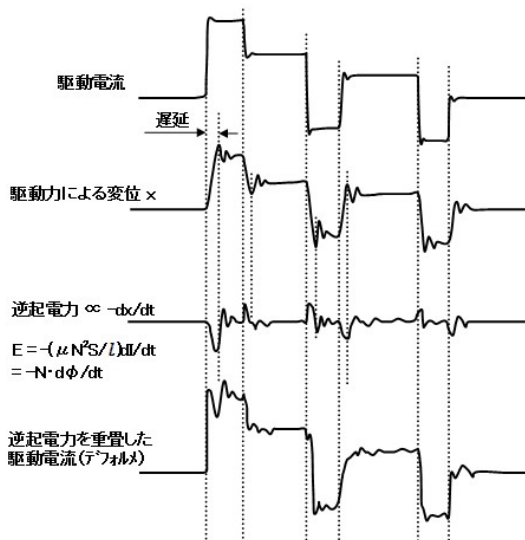
(図 5-2) に減衰比と波形の関係を示しますが、
減衰振動 $0 < \zeta < 1$ 、臨海減衰 $\zeta = 1$ 、過減衰 $1 < \zeta$
となり、 Q_{ts} に関して整理すると、
臨海減衰 $Q_{ts} = 0.5$ ($\zeta = 1$)、過減衰 $Q_{ts} < 0.5$

最近、市場に出回っているユニットを調べてみると、臨界減衰を一つの指標にしていることが分かります。



【図 5-2】減衰比と過渡波形

理想は、① 振動系の実効質量 M_{ms} が小さく、且つ② Q_{ts} が低く、
結果的に磁気回路が強力でなくても加速度が十分大きく、遅延や減衰振動が起こらないこととです。



【図 5-3】逆起電力による駆動電流の変調

問題にはならないのですが、スピーカーの機械系（振動系）にはかならず慣性質量による遅れ系要素が存在しますので、トランジェント歪（タイムドメイン）が発生してしまいます。

これはアンプの問題ではなく、スピーカー駆動の原理原則によるものであり、防ぎようがないものです。ユニットを容量依存領域（弾性領域： f_0 より周波数の高い領域）だけで使うなどで軽減はできますが……。その意味では、容量依存領域（弾性領域）だけで駆動できるようにしたマルチアンプ方式はアンプの負荷としてはメリットがあると言えます（ f_0 帯域を駆動するアンプだけでは負担がかかりますが……）。

電気系のQは磁気回路で制御できますが、機械系のQはエッジやダンパーなどの支持系によりますし、キャビネットの容量にもよりますが、逆起電力を考慮したスピーカー設計が為されていることが重要だということです。

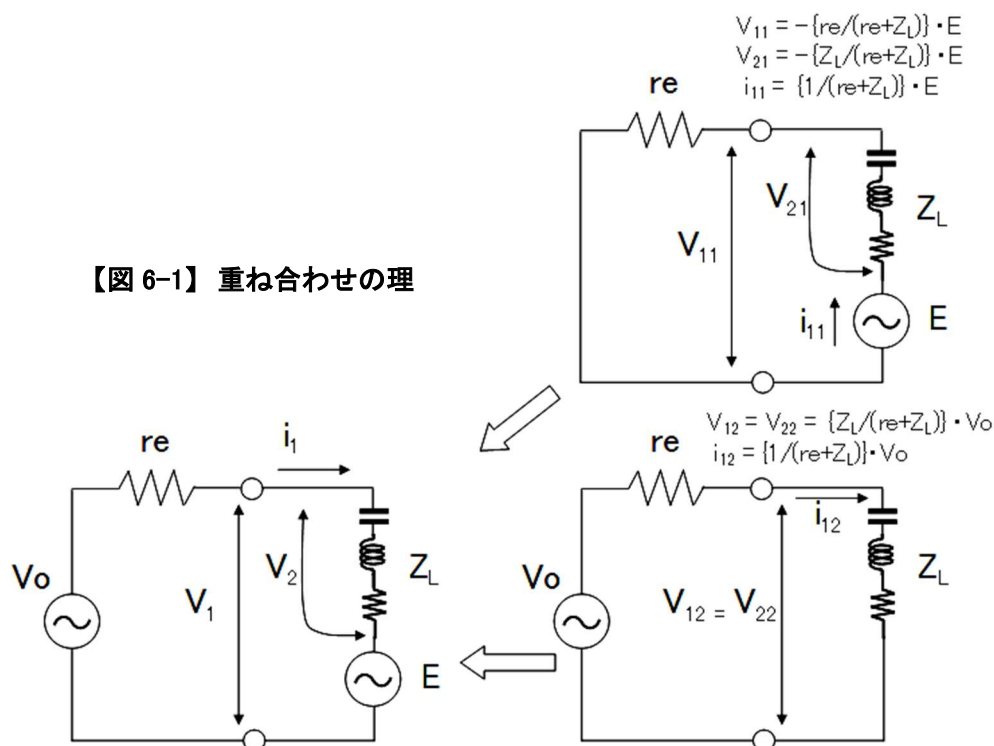
楽音は実際には（図 5-3）のような矩形波ではないのですが、逆起電力がどれだけ悪さをするか分かりやすくするために矩形波で考えてみました。（減衰振動の影響のほうが大きく見えてしまいましたが……）

スピーカー振動系に慣性質量による過渡要素がない（減衰振動と時間遅れがない）のであれば、駆動電流と逆起電力による電流は相似（向きは逆）であり、単に足し引きされる（レベルが変わる）だけで波形再現に対しては大きな

6. 重ね合わせの理による逆起電力の影響分析

電気回路の解析方法に、「**重ね合わせの理** (Principle of superposition)」というものがあります。

現象を単純化して分析し、それを重ね合わせることで複雑な挙動を理解するには非常に便利な原理です。



(図 6-1) は、それを使って内部インピーダンス re と逆起電力 E の間にどのような関係があるのかを調べたものです。実際の等価回路は左図ですが、右の 2 つの回路図に分けて考えて、それを重ね合わせることで、実際の回路の動向が分かります。

逆起電力 E だけを考えてした場合 (右上図)、アンプの出力端子間電圧 V_{11} は、

$$V_{11} = -\{re/(re+Z_L)\} \cdot E \quad \dots (式 6-1)$$

アンプだけを考えてした場合 (右下図)、アンプの出力端子間電圧 V_{12} は、

$$V_{12} = V_{22} = \{Z_L/(re+Z_L)\} \cdot V_o \quad \dots (式 6-2)$$

(式 6-1) と (式 6-2) を重ね合わせると、

$$\begin{aligned}
 V_1 &= V_{11} + V_{12} \\
 &= -\{re/(re+Z_L)\} \cdot E + \{Z_L/(re+Z_L)\} \cdot V_o \\
 &\quad \dots (式 6-3)
 \end{aligned}$$

$V_1 \doteq V_o$ になるための条件は、 $re \Rightarrow 0$ であれば良いということになります。

どのような負荷がつながれるか分からないアンプからすると、可能なのは出力端子で波形保証する (逆起電力の影響を小さくする) ことであり、そのためには D F を小さくする (r e を小さくする) ことが有効なのに分かります。

一方、スピーカー側から考えると、

逆起電力だけの場合 (右上図)、スピーカーの端子間電圧 V_{21} は、

$$V_{21} = - \{ Z_L / (r_e + Z_L) \} \cdot E \quad \dots (式 6-4)$$

アンプだけの場合 (右下図)、スピーカーの端子間電圧 V_{22} は、

$$V_{22} = \{ Z_L / (r_e + Z_L) \} \cdot V_0 \quad \dots (式 6-5)$$

(式 6-4) (式 6-5) を重ね合わせると、

$$\begin{aligned} V_2 &= V_{21} + V_{22} \\ &= - \{ Z_L / (r_e + Z_L) \} \cdot E + \{ Z_L / (r_e + Z_L) \} \cdot V_0 \\ &= \{ Z_L / (r_e + Z_L) \} (V_0 - E) \quad \dots (式 6-6) \end{aligned}$$

$V_2 \doteq V_0$ になるための条件は、① r_e が小さく且つ ② E の項がゼロに近ければ良いとなりますが、D F がどれだけ大きくなっても ($r_e \doteq 0$ となっても)

$$V_2 = V_0 - E \quad \dots (式 6-7)$$

にしかありません。

これにより逆起電力 E の影響を小さくする (アンプの駆動波形を出来る限り正しく再現する) 事に関して アンプの D F を大きくすることは役立たない ことが分かります。

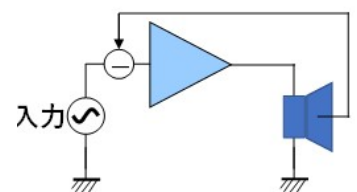
このように、アンプとスピーカー、それぞれ設計する立場が異なってしまうと、追求できる限界が生じてしまいます。

7. MFBによる解決策

解決策のひとつとしては、**MFB** (Motional Feedback) があります。技術的手法としては60年以上も前からあり、かなり古いものです。

振動板の速度または位置検出を行い、それをアンプにフィードバックすることで振動板も制御系に組み込んでしまおうという考え方です。

V C 部分で逆起電力 E に比例する dx/dt (または dv/dt) をセンサーで検出して dI/dt (または dV/dt) を アンプにフィードバックすることで逆起電力 E をキャンセルする手法です。



【図6】MFB

速度帰還するため、スピーカー・インピーダンスのQが小さくなったような挙動（オーバーダンピング）を示します。

センサーには、駆動用巻線とは別にV Cボビンにセンサーコイルを巻く方法や、圧電素子を利用する方法、V Cボビンとヨーク（センターポール）それぞれに箔を貼り付けて相互箔間の容量変化をセンシングする方法などのユニット構造に付加するものと、コンデンサマイクをユニット前面に取り付けてセンサーとする後付けによる方法などがありますが、前者にはユニット自体が構造的に複雑になることやコイル相互誘導の影響があるなどの問題があり、且つ、センシングライン（またはF Bループ）を短くしてやらないと元々の検出レベルが低いためにノイズ的に問題が生じるので、ユニット直近にアンプを装着したアクティブスピーカーであることがマストになります。（帰還ゲインが高いので、S/N 改善がキーになります）

このように、アンプとスピーカーを一体で考えれば対応できることもまだまだあるのですが・・・。

市販品では廃版ですがSONY社製のSA-S1、現行ではFOSTEX社製のスーパーウーファCW-250C（私は250Aを所有）、マニアックなどではリニアテクノロジー社のWS-122や日本オーディオ社のMFBアダプターなどが製品例になります。

帰還ゲインが高いためハムノイズが大きくS/Nが稼げないという問題がありますが、その代わりバスドラムのアタックの遅れなどはかなり改善され、この音を聴いた後に通常ユニットの2ウェイや3ウェイバスレフの低音を聴くと、低域だけ数十msのディレイをかけているかのようで音像（低音だけ）が奥まってしまうバスドラムの前に障害物があって回り道をして低音が出てくる感じの違和感を覚えます。MFB効果、恐るべしです。

最適設計されたMFBスピーカーであれば、どのような音を聴かせてくれるのでしょうか・・・。やはりアンプメーカーが本気になってアクティブスピーカーとして設計しないと上手くいきません。そのような企業が出てくることを期待したいと思います。テクニクスの小川さん（ジャズピアニストで女性役員です）やらないかなあ・・・。

ただ、MFBと^{いえど}雖も出力で起きたこと（逆起電力を含めて）を入力側にフィードバックして制御するものであり、厳密に言えば、その時間遅れを完全に抑え込める訳ではないですし、F B発振させないためには帯域制限（位相管理）も必要ですので、まだまだ妥協の産物です。

以下は**空想の話**ですが、アンプとスピーカーが決まっていれば、ユニットの直前でエレクトレットコンデンサマイクにより音圧を検出し、あらゆる印加信号に対するスピーカー応答性を事前に解析し、得られたパラメータを記録しておき、そのパラメータに則って入力信号を変調した信号でスピーカーを駆動することでMFBのような追いかけて制御をかけなくても遅れ系さえも補償した駆動（フィードフォワード制御：先回り制御）ができるはずです。

ソースがライブではなくデジタル記録媒体（タイムスタンプに則った固定データ）である

ならば、時間を遡って補正をかけることも出来るはずです。

畑違いの測定器のことで恐縮ですが、ネットワークアナライザなどの測定前の作業として「測定系の一巡特性を補正してフラットにしておく」ことを実施しますが、それに相当することをオーディオ再生系にも取り入れるということです。

ただし、これらのリアルタイム処理を大規模 F P G A に組み込むにしてもパラメータ・テーブルは膨大なものになるでしょうし、そうしたとしてもユニットの経年変化には対応できません。さらに進めて、ノイズキャンセル・ヘッドフォンと同じような機能を重畳するならば、試聴位置でのパラメータを記録しておき、再生中にはリアルタイムでの外来ノイズキャンセルができるかもしれません。(現在の技術では、まだまだ玩具レベルですが・・・) そうなれば、理想の試聴条件が整うのでしょうか。50年後くらいには実現できているでしょうか・・・？

話が逸れましたが、以下に第四章のポイントを整理しておきます。

- ① **D F はアンプだけの評価項目**である。(純抵抗を負荷とした場合の評価数値である)
- ② **D F は高いほど負荷抵抗の制御能力が高い**ことになるが、負荷がスピーカーの場合には f_0 近傍のインピーダンス (位相) 変動があるため、挙動制御には参考にならない。
- ③ タイムドメイン歪となる**逆起電力 E は D F がどんなに大きくても制御できない**。(逆起電力の制御はアンプ D F の問題ではない)
- ④ 遅延歪となる逆起電力 E を小さくしたいならば、スピーカーユニットの自己インダクタンスを小さく抑えるか、磁気回路を必要以上に強力にせず振動系の軽量化のほうを優先させるべき。(加速度を大きく保つ：フォースファクタ $B l$ と実効質量とのバランス)
最大磁束密度が低くても均一磁界範囲が広いことは、逆起電力 E を発生させないための第一条件である。(食み出した場合の逆起電力 E が大きくなるが・・・)
- ⑤ M F B はスピーカー負荷に対する D F フラット化 (駆動の一巡ループ制御) に効果的だが、アンプ設計者とスピーカー設計者の相互協調があればもっと良いものが作れる。

ものごとを一方向から、もしくはミクロ的にしか見ず、その範囲で「これはこうでなければならぬ」と断定してしまう世の中の常識とは、いったい何なのだろうと、改めて考えてしまいます。

範囲を広げれば、^{おの}自ずと解決策が見えてくることもあるはずなのに、守備範囲を限定してしまうのはもったいない限りです。

第五章 アナロジー手法による電気系への変換と解析

1. 機械系と電気系の類似（アナロジー） 基本的な考え方

機械系の挙動を解析する場合、『機械要素』に分解して行うことがしばしば行われます。

機械要素というのは、①慣性質量、②弾性／復元（ばね）、③減衰（機械抵抗）の3要素のことで、それぞれ①運動エネルギーとして蓄積する、②振動／位置エネルギーとして蓄積する、③熱／摩擦エネルギーとして消費するという機能を持っています。そして、この**3要素を使うことで全ての機械構造を表現することができます**。（そのように仮定するということです）

また、後述するようにそれぞれの機械要素に対して受動電気要素（キャパシタ、インダクタ、抵抗）との**類似性（アナロジー）**が見られることから、電気回路に置き換えての解析やシミュレーションが可能になります。

機械要素で表す例として、ユニットの振動系とハウジングの関係を（図1）に示します。

単純化するために、ここでは「ユニットのハウジングは動かない（速度 $v = 0$ ）」を前提とすると、ハウジングは機械系のGNDに相当することになります。

また、振動系（支持系含む）については、それぞれの要素の速度 v が同じ（一体で動く）という前提とします。これは**前提条件**であり、**実際そうであるということではありません**。

※ 一般的な名称として「ダンパー」と表記しましたが、これには複数種類の要素が存在し、ユニットの場合には、振動板自身の内部損失や、エッジ、ダンパーでの損失要素（機械抵抗）がこれに相当します。状況や場合により、摩擦係数や粘性係数で表されることもあります。

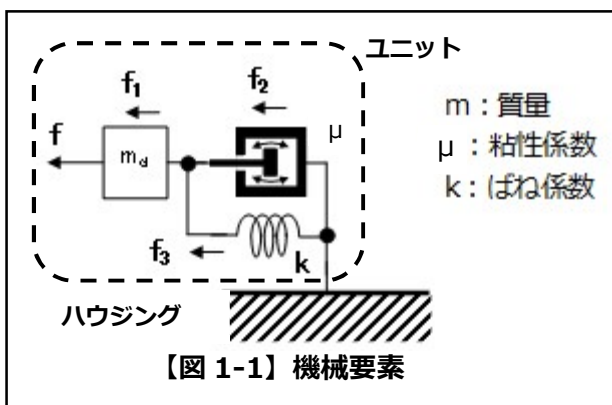
ユニット振動系の慣性質量を m 、減衰要素（ダンパー※）を μ 、弾性要素（ばね）を k 、それぞれの要素にかかる力を f_1 （慣性力）、 f_2 （減衰力）、 f_3 （復元力）、外力を f 、振動系の速度を v とすると、力の平衡から、

$$f = f_1 + f_2 + f_3 \quad \dots (式 1-1)$$

$$f = m \cdot dv/dt + \mu \cdot v + k \cdot \int v dt \quad \dots (式 1-2)$$

または、 $f = m \cdot d^2x/dt^2 + \mu \cdot dx/dt + k \cdot x$

（式 1-2）は**運動方程式**そのものです。（それぞれ **質量項 + 減衰項 + 弾性項**）



「 dv/dt 」は加速度 a 、

「 $\int v dt$ 」は移動距離 x に相当します。

それぞれの要素に加わる力は変化しますが、**速度は共通（一体で動く）**です。

どこかで見たような式だと思われる方もいらっしゃると思いますが、

$f \Rightarrow i$ 、 $v \Rightarrow V$ 、 $m \Rightarrow C$ 、 $\mu \Rightarrow 1/R$ 、 $k \Rightarrow 1/L$ と置き換えると、

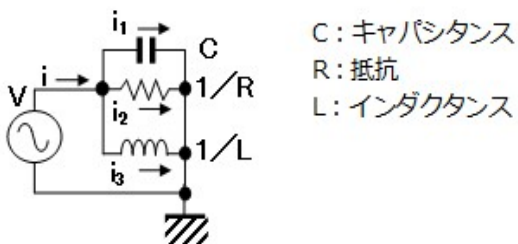
$$i = i_1 + i_2 + i_3 \quad \dots (式 1-3)$$

$$i = C \cdot dV/dt + (1/R) V + (1/L) \int V dt \quad \dots (式 1-4)$$

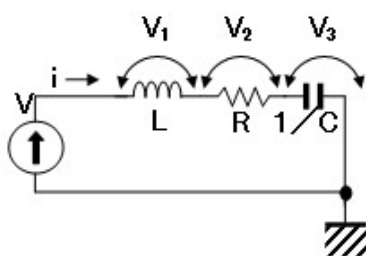
となり、これは（図 1-1）に示すような並列回路における『キルヒホッフの法則』の適用に他なりません。

力を電流で置き換えることを『**力-電流アナロジー（F-i アナロジー）**』と呼びます。

電流アナロジーでは力（運動量） f を電流 i に対応させると、慣性質量 M の加速度 dv/dt に対する挙動がキャパシタ C の電圧変化 dV/dt に対する挙動に、熱エネルギー変換（損失）については粘性係数や摩擦係数 μ の速度 v に対する挙動が抵抗の逆数 $1/R$ の電圧 V に対する挙動に、ばね定数 k の変位 $\int v dt$ に対する挙動がインダクタの逆数 $1/L$ の $\int V dt$ に対する挙動に類似性があることを利用しています。



【図 1-2】電気要素（力-電流アナロジー）



【図 1-3】電気要素（力-電圧アナロジー）

アナロジー（analogy） というのは日本語で「類似性」「類推」「類比」などと訳されるものです。

要は「機械系と電気系は似ているので同じように考えよう」ということです。

ここで並列回路（図 1-2）と直列回路（図 1-3）の間には**双対性（duality）**というものがあるため、以下の関係が成り立ちます。

（式 1-3）（式 1-4）と後述の（式 1-5）（式 1-6）がどちらも同じように成り立つという意味です。

光が波動としても粒子としても扱える（=相補関係にある）のと同じです。

力を電圧で置き換えることを『**力-電圧アナロジー (F-V アナロジー)**』と呼びます。

ここで注意しなければならないのは、双対性により

$f \Rightarrow V$ 、 $v \Rightarrow i$ 、 $m \Rightarrow L$ 、 $\mu \Rightarrow R$ 、 $k \Rightarrow 1/C$ になるということです。

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad \dots (式 1-5)$$

$$V = L \cdot di/dt + R \cdot i + (1/C) \cdot \int i dt \quad \dots (式 1-6)$$

(それぞれ **質量項** + **減衰項** + **弾性項**に対応)

電圧アナロジーでは力（運動量）**f**を電圧**V**に対応させると、慣性質量**M**の加速度**dv/dt**に対する挙動がインダクタ**L**の電流変化**di/dt**に対する挙動に、熱エネルギー変換（損失）については粘性係数や摩擦係数**μ**の速度**v**に対する挙動が抵抗**R**の電流**i**に対する挙動に、ばね定数**k**の変位 **$\int v dt$** に対する挙動がキャパシタの逆数**1/C**の **$\int i dt$** に対する挙動に類似性があることを利用しています。

相補関係にある（式 1-4）と（式 1-6）の違いを確認してください。

逆起電力を考える場合には都合が良いので、私の場合には『力-電圧アナロジー』を利用することが多いです。

ただし、機械要素から電気要素に置き換える時には電流アナロジーのほうが分かりやすいので、機械要素 $\Rightarrow$ 電流アナロジー (node) $\Rightarrow$ 電圧アナロジー (loop) の手順で変換します。

node は「分岐点」、**loop** は「一巡経路」のことです。

変換方法

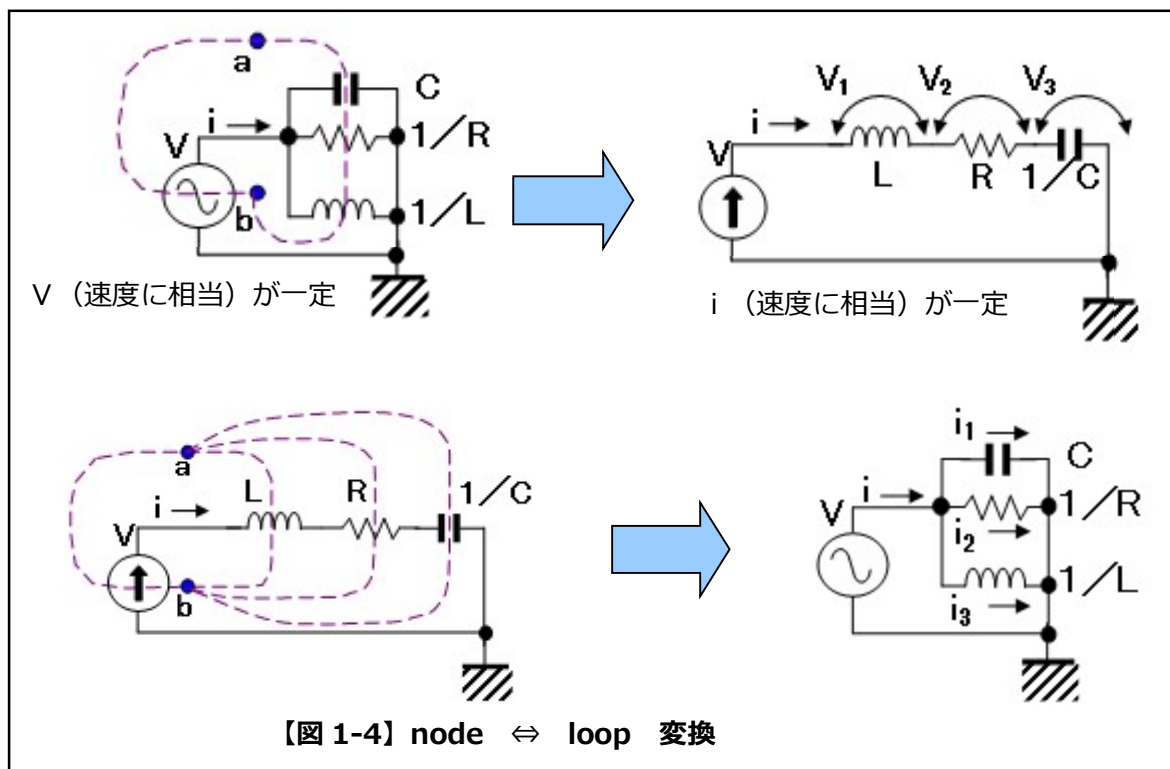
node (F-V) $\Rightarrow$ loop (F-i) 変換には以下のような方法を用います。(図 1-4 参照)

- ① (図 1-4) 上段左のように回路の中と外に点 a、b を設定します。
- ② 点 a、b を通り要素接続線(電線)を横切らないように一筆書きで要素を結びます。
(ピンク色の破線)
立体交差する場合には接続線を 1 回だけ横切っても OK です。
重なっている部分は分けて考えて、**重ね合わせの理**で合体すれば良いのです。
- ③ 結んだ破線と要素を並べ直します。
- ④ $i \Rightarrow V$ 、 $C \Rightarrow L$ 、 $R^{-1} \Rightarrow R$ 、 $L^{-1} \Rightarrow C^{-1}$ に置き換えます。

今回は使いませんが、loop (F-i) $\Rightarrow$ node (F-V) 変換では同様に、

- ① 図 4 下段左のように回路の中と外に点 a、b を設定します。
- ② 要素接続線を横切らないように a、b を結ぶ複数の経路を結びます。
- ③ 結んだ線と要素を並べ直します。
- ④ $V \Rightarrow i$ 、 $L \Rightarrow C$ 、 $R \Rightarrow R^{-1}$ 、 $C^{-1} \Rightarrow L^{-1}$ に置き換えます。

の手順で実行します。

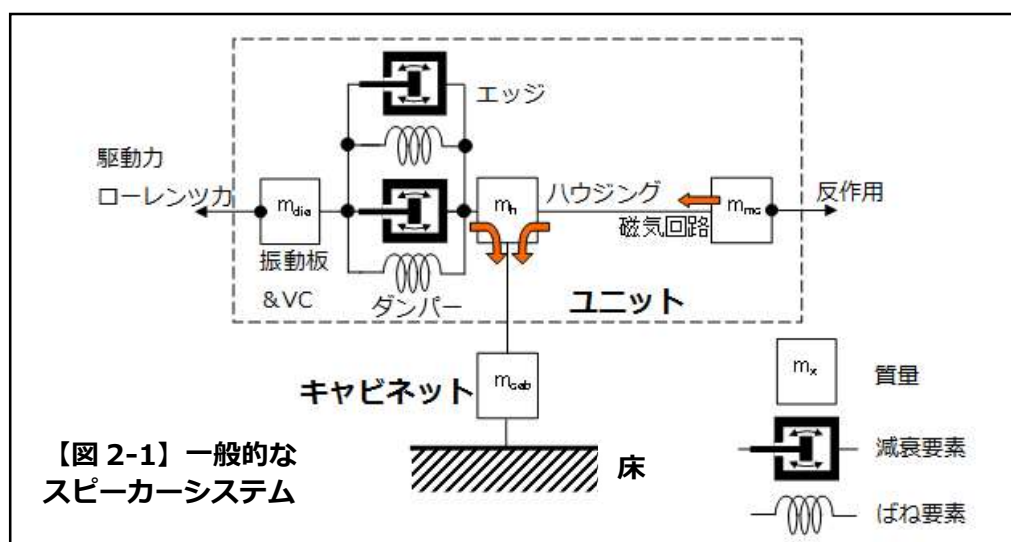


2. キャビネットを含めた系への展開

2. 1 ブックシェルフタイプの場合

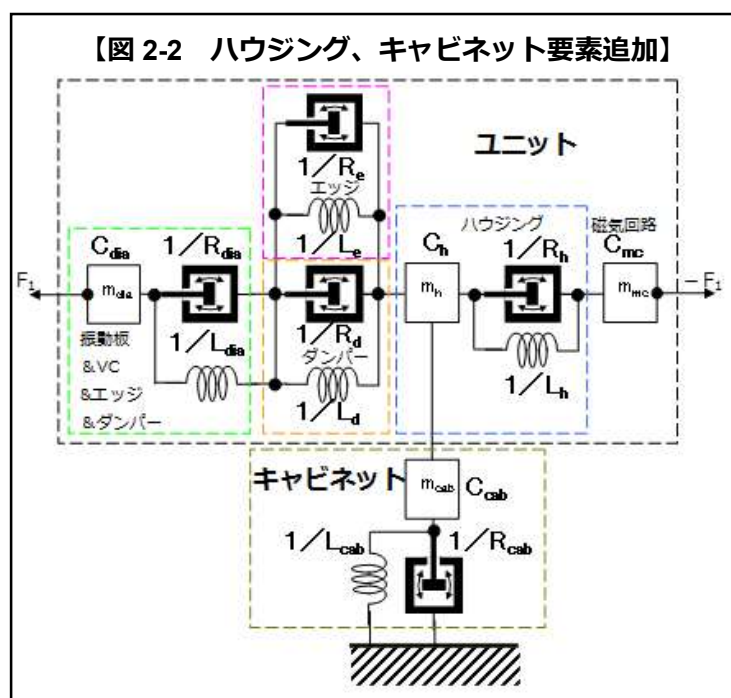
1 では、ハウジングは床（大地：GND）との相対速度を0としましたが、実際には床との間には様々な機械要素が入り、**ハウジングはインピーダンス的に浮いた状態であって、相対速度は0ではありません。**（1項と前提条件が異なるということです）

例えば、一般的なブックシェルフタイプのキャビネットの場合、機械要素図は（図 2-1）のようになります。ユニットはハウジング部分でキャビネットに取り付けられています。



【図 2-1】一般的なスピーカーシステム

ここで、VCは振動板と密に接合していて構造的に強度が十分（エネルギー伝達のためのみ）と見做して、質量のみを考慮し減衰要素や弾性要素は考慮しないことにします。



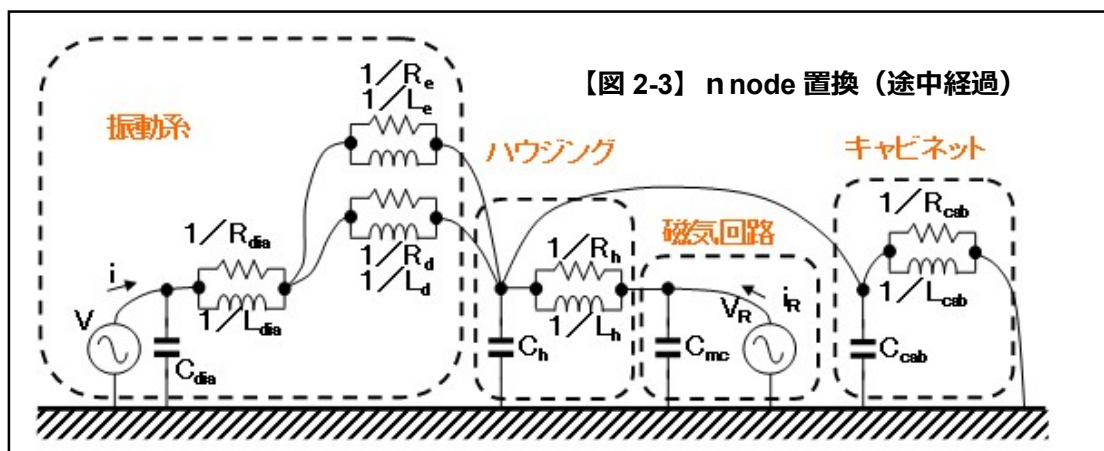
【図 2-2 ハウジング、キャビネット要素追加】

また、振動系（振動板、エッジ、VC、ダンパーが一体構造として振動する）として考えた場合には、エッジ、ダンパーともに保持要素なので減衰要素や弾性要素が主となるため、エッジの質量要素は振動板外周に、ダンパー質量はVCボビンとの接合部に集中していると考えます。

結果として、振動系質量は振動板そのものとVC、エッジ、ダンパーを合わせたものとして扱います。同様に、磁気回路は質量のみとして考えます。

ハウジングとキャビネットには、3要素のすべてを考慮するので、それを加えると（図 2-2）のようになります。

これを電圧 node に置き換えると（図 2-4）になります。



（図 2-2）から（図 2-4）に展開する手順ですが、途中工程を（図 2-3）に示します。

① 質量要素（F – i 電気系では**キャパシタ**）を片端が GND に接地した状態でそれぞれ配置します。これは質量が大地（地球：GND）を基準に扱う要素であるためです。

質量要素のもう一方の端子には node（黒丸・）を配置しておきます。

② それぞれの node 間につながる電気要素を配置していきます。

③ 回路図として整理します。（図 2-4 を作成）

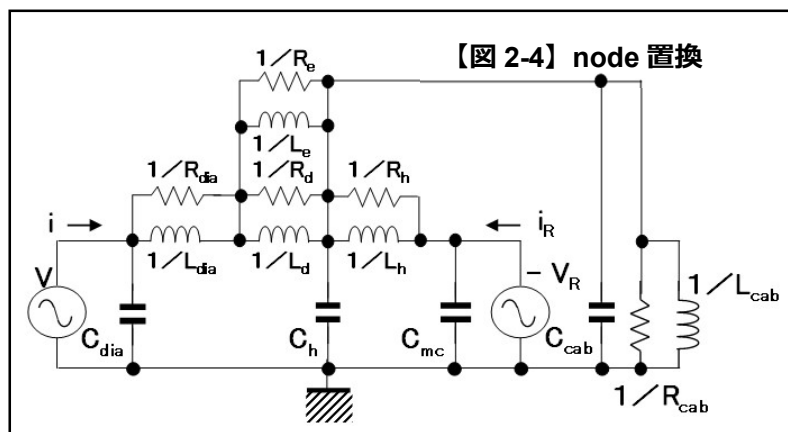
（図 2-2）に示したように磁気回路には振動系に生じたローレンツ力 F_1 に対応する**反作用** $-F_1$ が加わっているので、（図 2-3）の C_{mc} には**並列に電圧源がつながる形**になります。

（**電流の向きに注意** $i = -i_R$ ）

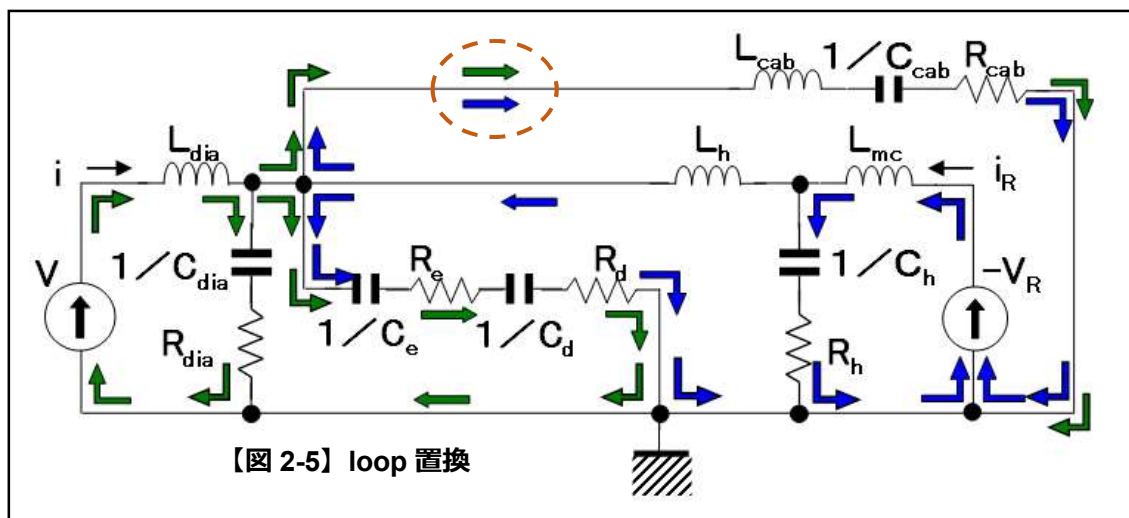
ハウジングは、質量の大きな磁気回路 C_{mc} と接合しているのですが、金型で抜いてプレス成形しただけの構造的に弱いものが多いため、ばね要素 $1/L_h$ と減衰要素 $1/R_h$ の並列接続を慣性質量要素 $C_h \sim C_{mc}$ の間に入れていきます。

たとえハウジングの強度を上げたとしても、振動板の後方は音波の通過路になるために開放しなければならず、後方放射による共振が多かれ少なかれ発生するため、これらの要素を考慮せねばなりません。

したがって、後述のハウジング要素は、これに倣います。



node $\Rightarrow$ loop 変換を実施すると、(図 2-5) のようになります。



「反作用による電流 i_R 」がどこを流れるかを知ることは、混変調が起きる可能性のある箇所を特定することにつながります。特に振動系に流入することは、音響出力の発生源を汚染（歪が発生）することにつながるため、きちんと管理しておくべきです。

L_{cab} （キャビネット質量）の入っているループインピーダンスが低ければ（質量が大きく剛性が高ければ）、 i 、 i_R ともにキャビネット側に流れる条件が整いますが、 L_h （ハウジング質量）が小さく、且つばね性もロスも小さい（ $1/C_h$ 、 R_h が小さい）鉄板製ハウジングの場合には、反作用電流の多くは $1/C_h \sim R_h$ のループを流れてハウジングの中で消費されます（ハウジング鳴きが発生しやすい）。

最近、磁力の強いネオジウム磁石を採用するユニットが増えてきましたが、デメリットとして磁気回路の質量が軽くなることがあり、結果的に反作用による変位が大きくなります。小さく軽いキャビネットに取り付けた場合にはキャビネット鳴きが問題になる可能性があります。

ハウジングの質量 L_h が大きい（インピーダンスが低い：エネルギーを溜めやすい）場合には磁気回路要素からハウジング要素に電流が流れやすくなり、上記のように L_{cab} が大きければキャビネット側に流れこむのですが、キャビネットが軽い（インピーダンスが高い）と振動系への流入が増えて振動系での混変調歪が発生してしまいます。

振動板の駆動エネルギー（作用電流 i ：本来の音響出力に相当）も振動系の閉じたループだけでなく、インピーダンスの低い L_{cab} を含むループにも流れます。

どんなにキャビネットが軽くても通常は、 $L_h < L_{cab}$ なので、ハウジング鳴きのエネルギーがキャビネットに流れ込んで、何らかの混変調が起こります。（赤色破線）

要は、ハウジングだけを強くしてもキャビネット（というよりバツフル板）の質量と強度を大きくしないと意味が無いということです。

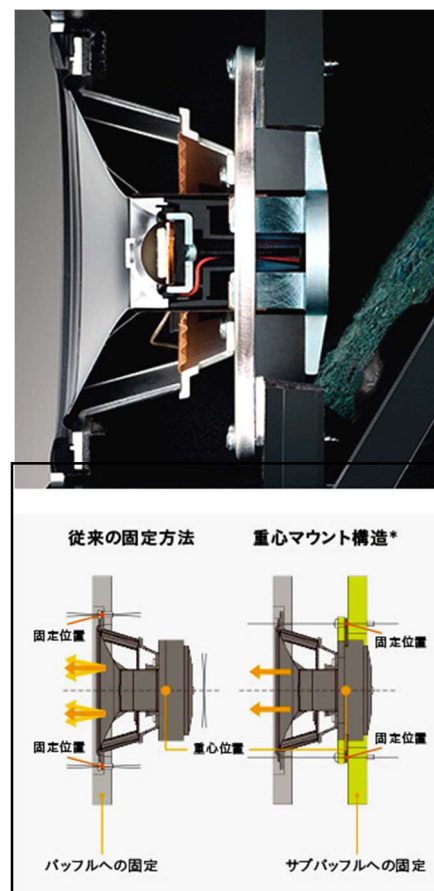
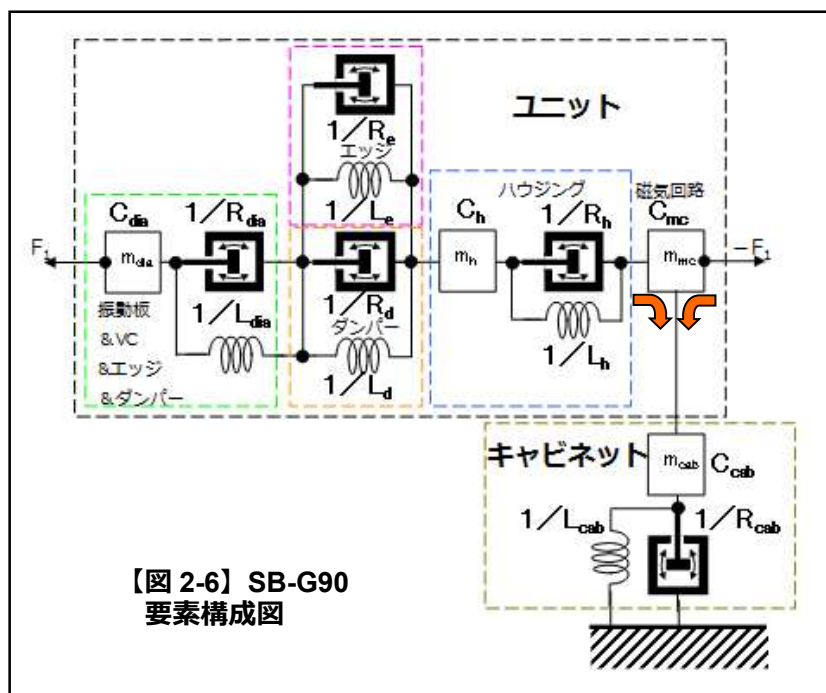
電流の流れを考える場合には、インピーダンスの高いほうより低い方に、よりエネルギー貯蔵量の大きい方（ L が大きい方）へと流れやすいので、どの部分の質量が大きいかということが重要なファクタになります。

最近の海外製システムでは、キャビネットを金属製や強度の高い材料で補強したりしているため必然的に L_{cab} が大きくなり、キャビネットでエネルギーを受け止めることになります。このような構成であれば、ハウジングの強度と質量を大きくして、磁気回路で発生した反作用をキャビネットに流し込んで吸収してしまうのが合理的です。

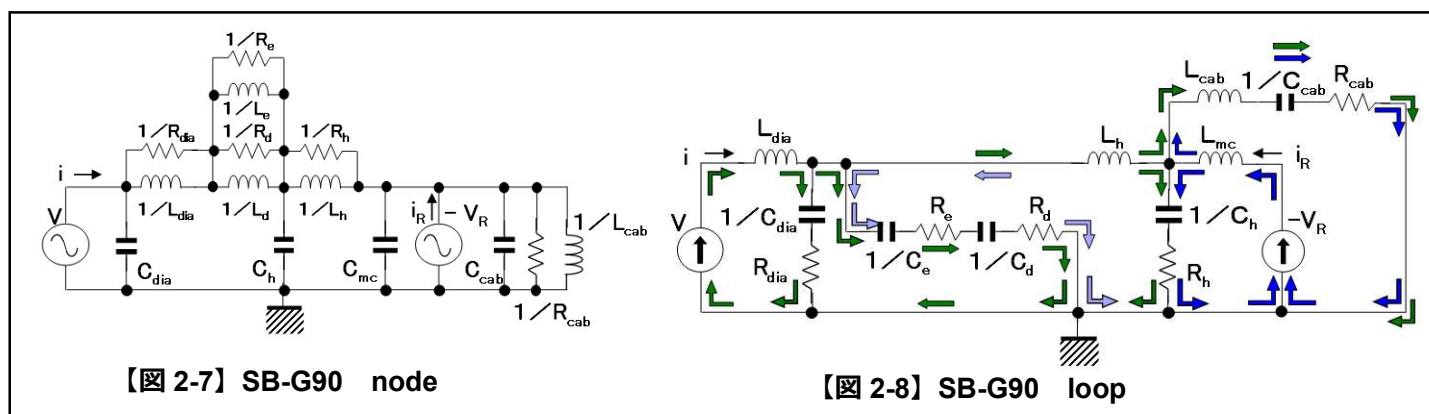
キャビネットには振動系からの流れ（作用電流）とハウジングからの流れ（反作用電流）が混在することになりますが、質量が大きければ吸収（貯蔵）されます。

2.2 テクニクス SB-G90

テクニクス SB-G90 の場合にはハウジングではなく磁気回路がサブキャビネットに固定されるので、(図 2-6) ~ (図 2-8) のようになります。



Technics HP より 転載禁止



(図 2-6) の場合、(図 2-2) と大きく異なるのは、磁気回路が直接キャビネットに固定されるため、薄青色で示したハウジングを流れていた逆起電力ループ電流 i_R がインピーダンスの低いサブキャビネット+キャビネット要素 L_{cab} (質量) に吸収され、ハウジングには振動系駆動に起因したエネルギー (作用電流: 緑色矢印) しか流れなくなることです。

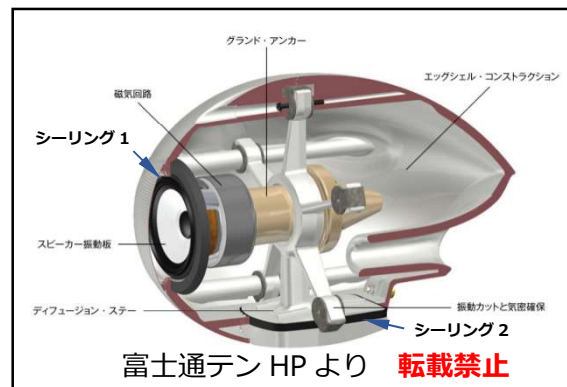
結果、逆起電力はサブキャビネットを経由して最終的にはキャビネットに伝わるので、キャビネットを床面に置く方法が音質に影響を及ぼします。

2.3 ECLIPSEの場合

富士通テン ECLIPSE シリーズは、第一章にも簡単な説明を記しましたが、他のスピーカーシステムとは異なる考え方で設計されています。

要素構成図は、(図 2-9) のようになります。

ユニットの磁気回路ボトム部分にグラウンド・アンカーと呼ばれる質量の大きな部品が接続されていて、これが**仮想グラウンド**として機能します。グラウンド・アンカーには**緩衝材**を介してタマゴ形のキャビネットを保持する5本の腕を持つディフュージョン・ステイが固定されていて、ディフュージョン・ステイは可動でリジッドな支持構造+制振スタンドを経て床に至る構造につながります。

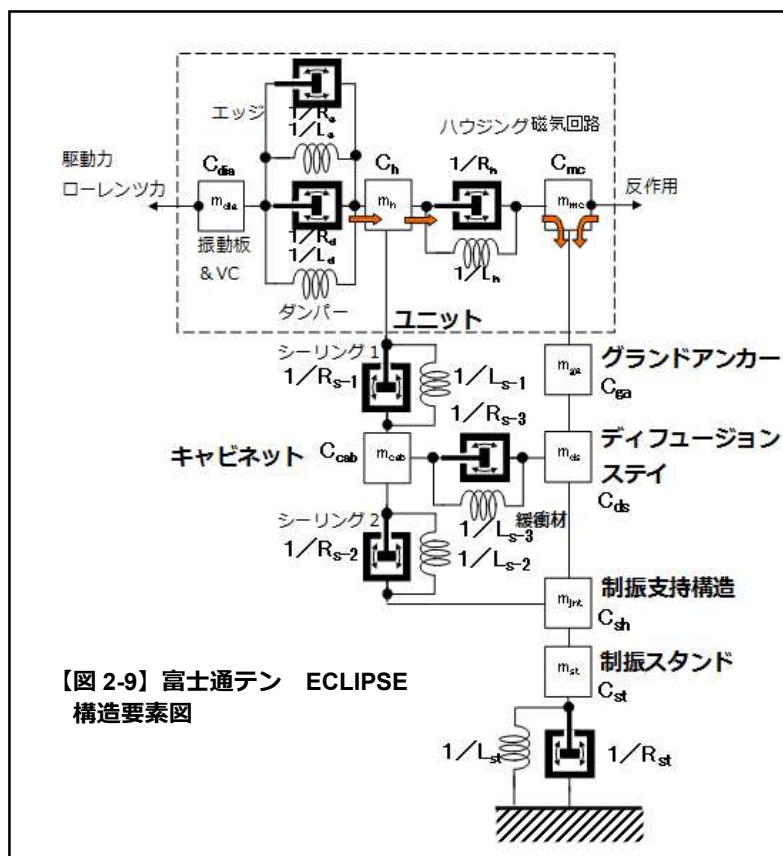


キャビネット保持構造は「仮想フローティング」と呼ばれていて、キャビネットは、これらの構造体から特殊インシュレートされるようになっています。要は、キャビネットはユニットを固定する構造物ではなく、ユニットの後方放射された音圧に対する音響負荷としてのチャンバー（容積を決定する囲い）でしかない（=キャビネットは主構造に関与しない）という考え方です。

具体的には(図 2-9)に示すように、キャビネットの開口部とユニットのハウジング外周部の間にはシーリング 1が入っていて、位置を決める程度に接触（緩衝）しながらエア漏れを防ぎます。

また、ディフュージョン・ステイの5本腕の先では、特殊な構造と緩衝材（エラストマー）とを使ってキャビネットをフローティングさせています。

同様に、ディフュージョン・ステイと制振スタンドとの間にある制振支持構造とハウジングとの間にもシーリング 2が入っていて、緩衝しながらエア漏れを防いでいます。これらのシーリングと緩衝材は構造物として機能しにくい（=機械抵抗が十分大きく、形状が定まらない）ので、考慮する必要はありません。（厳密には、緩衝材は口の大きな減衰要素として考えねばなりません）

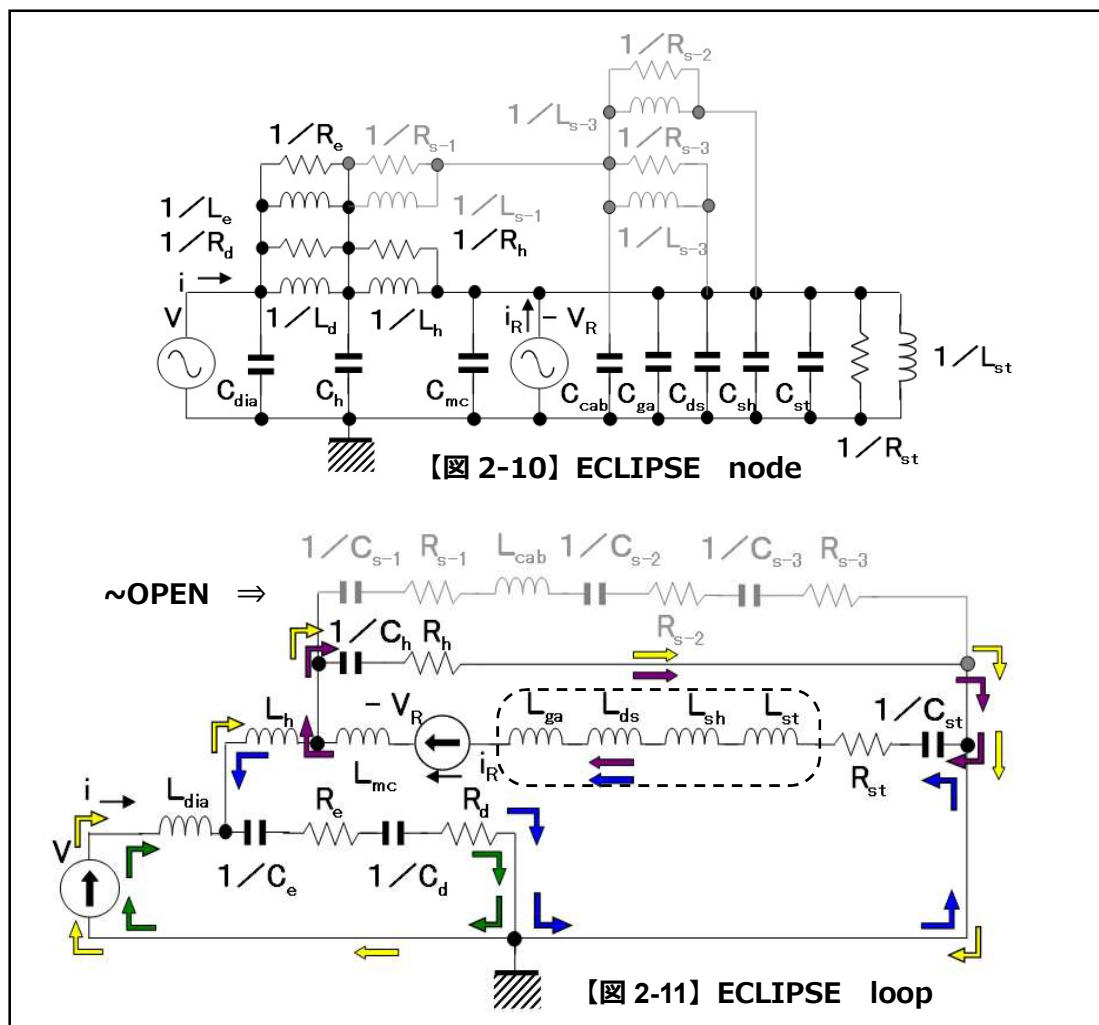


【図 2-9】 富士通テン ECLIPSE 構造要素図

node および loop は(図 2-10) (図 2-11) のようになります。

構造が複雑になっているので loop の数は増えますが、基本的には SB-G90 と同じであることが分かります。(混変調要因は L_h のみ)

シーリングと緩衝材をグレー色で記載していますが、 C_{cab} が機能していないのが分かりますと思います。



loop では以下の (式 2-1) が成り立つのは、すでに説明したとおりです。

$$V = L \cdot di/dt + R \cdot i + C^{-1} \cdot \int i dt \quad \dots (式 2-1)$$

(それぞれ 質量項 + 減衰項 + 弾性項)

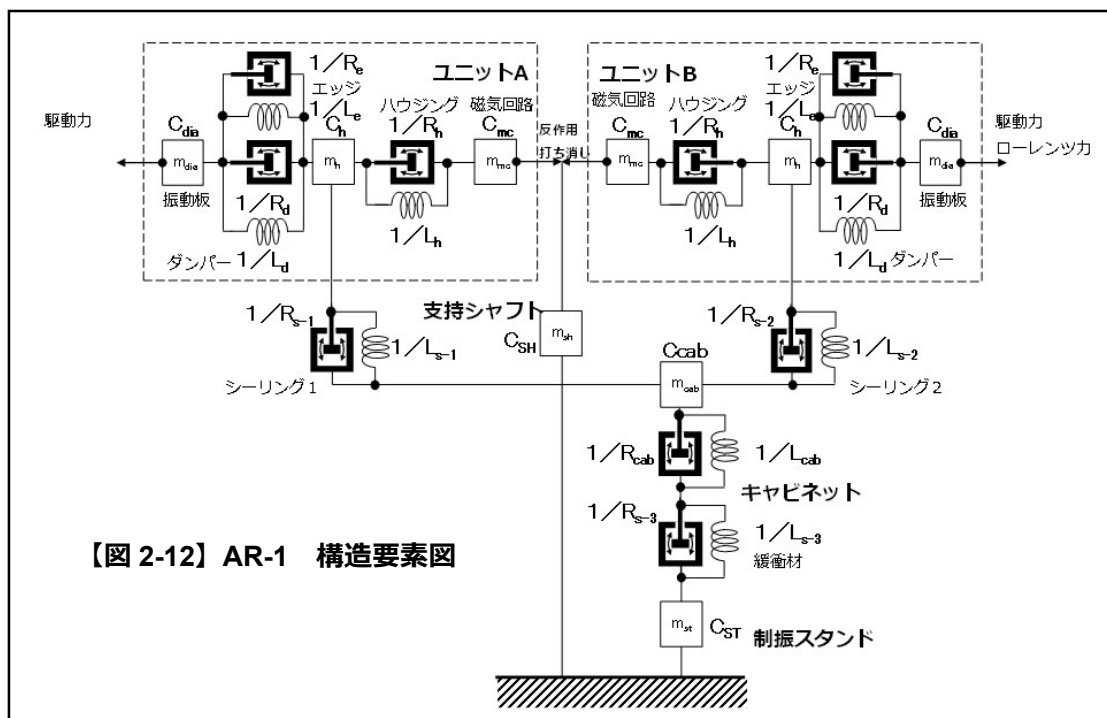
第 1 項が運動エネルギーの保存項 ($m \cdot dv/dt$ に相当) になります。

外力 (ローレンツ力) により与えられたエネルギー総和は変化しないので、ECLIPSE のようにユニット磁気回路 L_{mc} とシリーズに入った $L_{ga} + L_{ds} + L_{sh} + L_{st}$ を合計したインダクタンス分 (慣性質量) が大きければ di/dt が小さくなり、エネルギー吸収に寄与することになります。

2. 4 ARシリーズの場合

AR-1について変換を実施してみます。

まず構造要素図を（図 2-12）に示します。

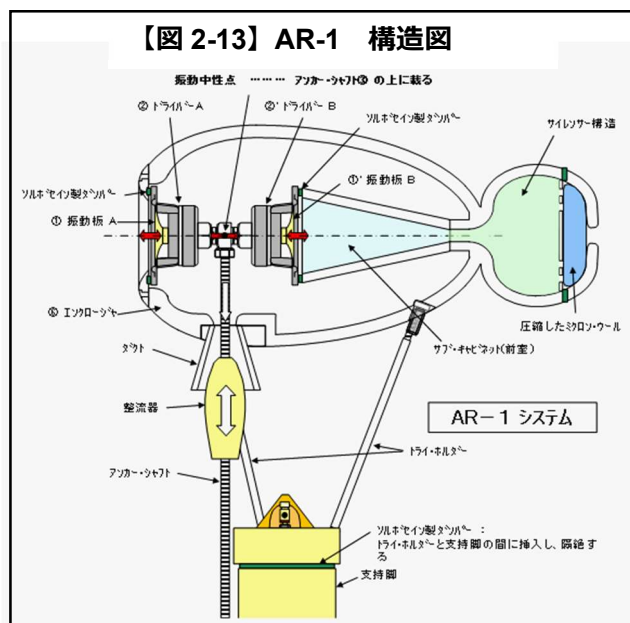


2つのユニットの尾部を付き合わせた構造（タンデム）になっていますので、構造は複雑になります。他のスピーカーシステムと大きく異なるポイントは、磁気回路に生じた反作用力がタンデム部分で相互に打消されることです。言い換えれば、反作用のエネルギーが無視できるということです。この反作用力は駆動力と大きさが等しく方向が逆のベクトル量になります。

駆動対象は振動板とボイスコイル、そしてダンパーやエッジの一部ですから、わずか十数グラム～数十グラムの質量を大きくても数mm移動させるだけの駆動力になり、その反作用たるや、数百グラム～数キログラムの磁気回路の移動距離は数十ミクロンとなり、磁気回路に触ったとしても振動は微々たるものです。

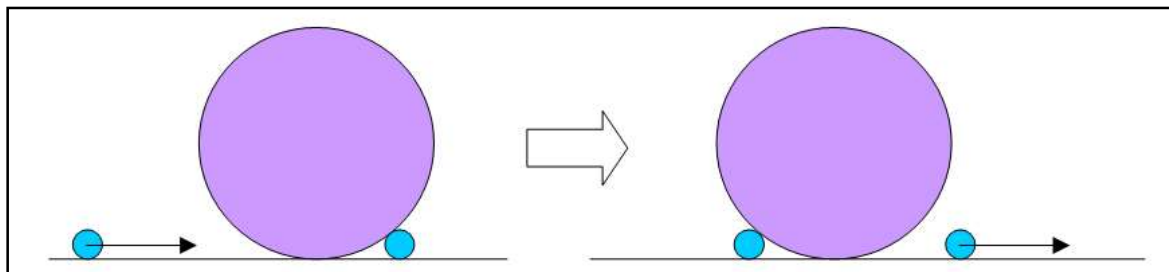
しかし、反作用は方向こそ逆ですが総エネルギー量は駆動力と変わらないため、この反作用が質量の小さなものに伝播すれば加速度が大きくなります。

ひいては移動距離（変位：方向が変われば振動振幅になる ⇒ ハウジングの共振など）も大きくなるため、音圧への影響も出てきます。



力と移動距離や速度（加速度）の関係は、イメージとして捉えにくいかもしれません。

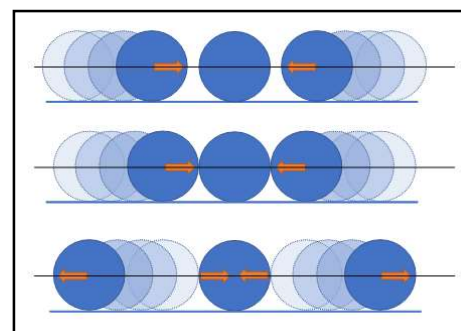
下図のように小質量球が大質量球に密着している時、別の小質量球が衝突すると、大質量球を介して小質量同士の運動エネルギー授受が過不足なく行われ、密着していた小質量球



が勢いよく弾き出されるのを経験した方は多いと思います。（エネルギー保存則）

それぞれの運動ベクトル方向はユニットとは異なりますが、衝突する小質量を「振動系」、大質量を「磁気回路」、別の小質量を「ハウジング」と読み替えれば、運動エネルギーの伝播が理解できると思います。

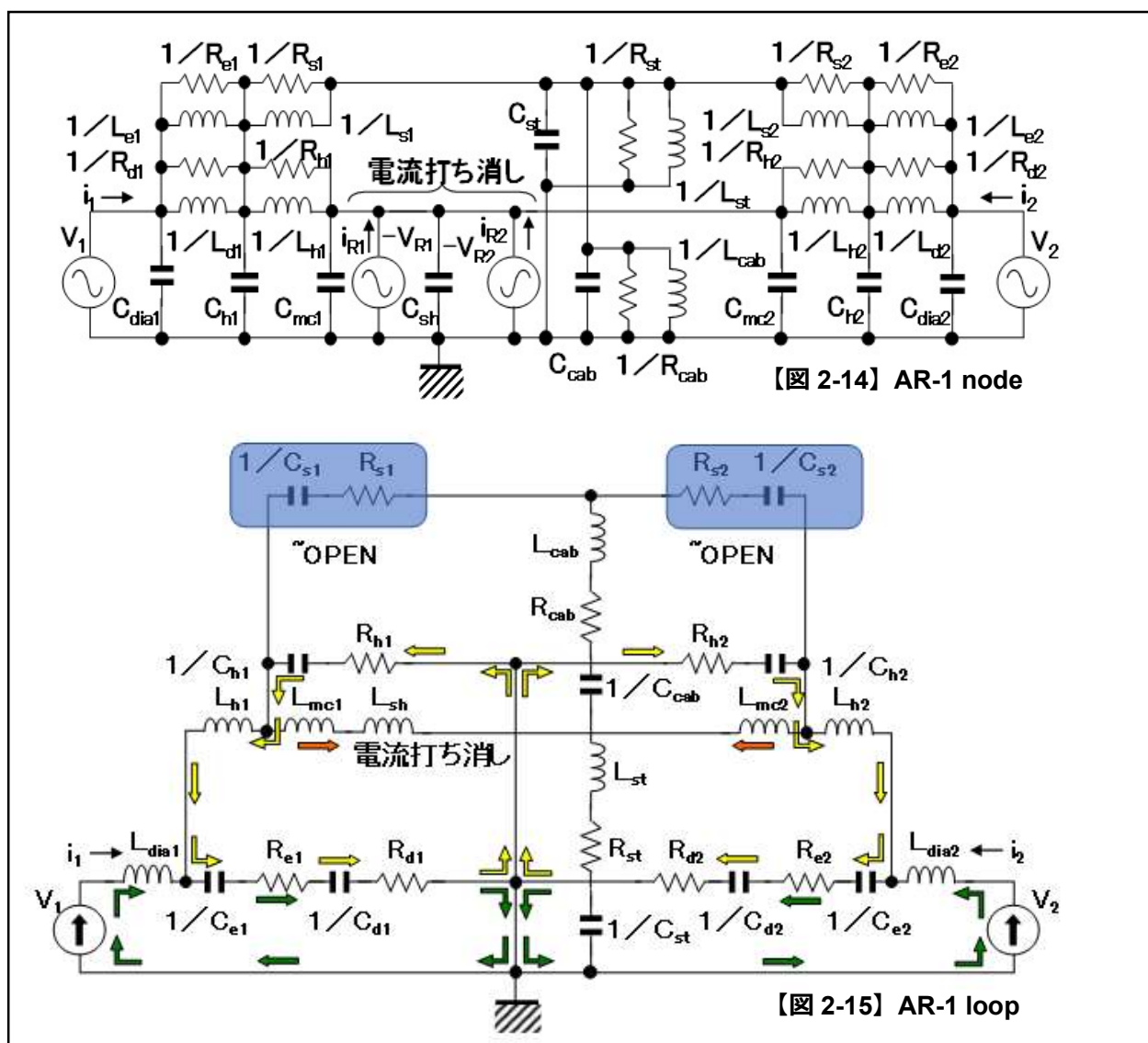
同様に、左右から同質量の球が同速度（同じスカラー量でベクトルの方向が逆）で近付いて、同時にもう一つの球に衝突した場合、その球を介して左右の球が運動エネルギーを交換しあって等速で左右に離れていく一方、衝突された球は位置をまったく変えない・・・この球ではエネルギーの授受が見かけ上「打ち消された」ということです。実際には、エネルギーは相互に干渉することなく「**すれ違った**」ということです。これがA Rシステムの基本原理になります。



左右の球は（図 2-13）の同相で駆動された2組のユニットの磁気回路、振動中性点が移動しない球に相当します。

あくまで見かけ上ですので、外力が加わったりすると、この関係が崩れ、打ち消しは存在しなくなります。そうは言うものの、うまくバランスを取れば、反作用を考えずに駆動力が純粹に取り出せます。

AR-1 に関して、(図 2-14) に node、(図 2-15) に loop を示します。



ユニット 1 と 2 の駆動力が逆方向であるため、それぞれの反作用も逆方向になり打ち消されるため電源が形成されず、**磁気回路を含むループには反作用に起因した電流が流れません**。結果的に、**駆動力による電流だけを考慮すればよい**ということです。即ち、**反作用による電流をノイズと捉えれば、驚異的な S/N が得られる**ということです。

ただし、これには、 $i_1 = -i_2$ であること（**同じ駆動力を持つ同モデルのユニットを 2 つ使うこと**）が最低条件になります。

この場合、ハウジングを経由する電流（黄色矢印）は小さく、且つ、一方向にしか流れず、ハウジング内部やキャビネットの質量で吸収されます。言い換えれば、振動系のループが駆動力のほとんどを消費するということで、混変調歪としてはハウジングでの駆動力と反作用との直接干渉によるものは考えなくて良いということです。

振動系だけが検討対象の要素になるということは、**ユニットの設計がしっかりしているものは、それなりの結果が得られる（ユニットの性能が出る）**という事になります。

これは、あくまでユニット 1 と 2 の周囲を含むバランスが完全に取れているという条件のもとでのことですが・・・。

現実問題としては、**ユニット 2 の正面放射音圧は不要**なものですので、外部空間に出さないようにする工夫が必要なために振動系～支持系の実装時負荷インピーダンスがユニット 1 と 2 とではアンバランスになってしまいます。（正面を閉空間で覆われているユニット 2 のスチフネスが上昇して f_0 も上昇）

それでも単独ユニットの場合に比べれば、**反作用の影響が小さくなるメリット（S/N改善）**のほうが勝ります。ただし、不要な音圧の処理は難問です。

$$|i_1| \gg |i_1 - i_2| \quad \therefore i_2 \approx i_1$$

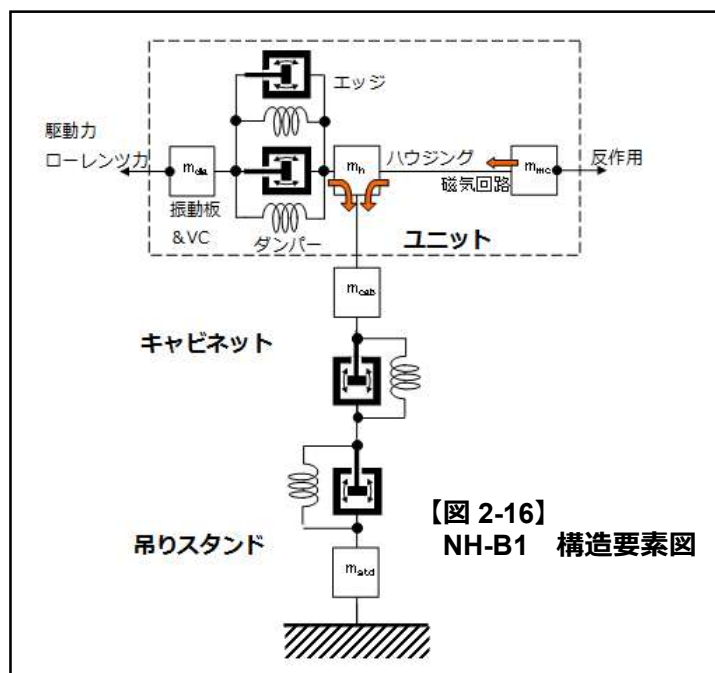
2. 5 糸や紐で吊ったキャビネットの場合

シンプルなキャビネットを床に置かずに革紐や糸で宙吊りにした場合を考えてみます。

まず構造要素図を（図 2-16）に示します。

故中島平太郎さんが経営していた NH ラボの「たまご型スピーカー NH-B1」は革紐でスタンドから吊り下げの方法を提唱しています。

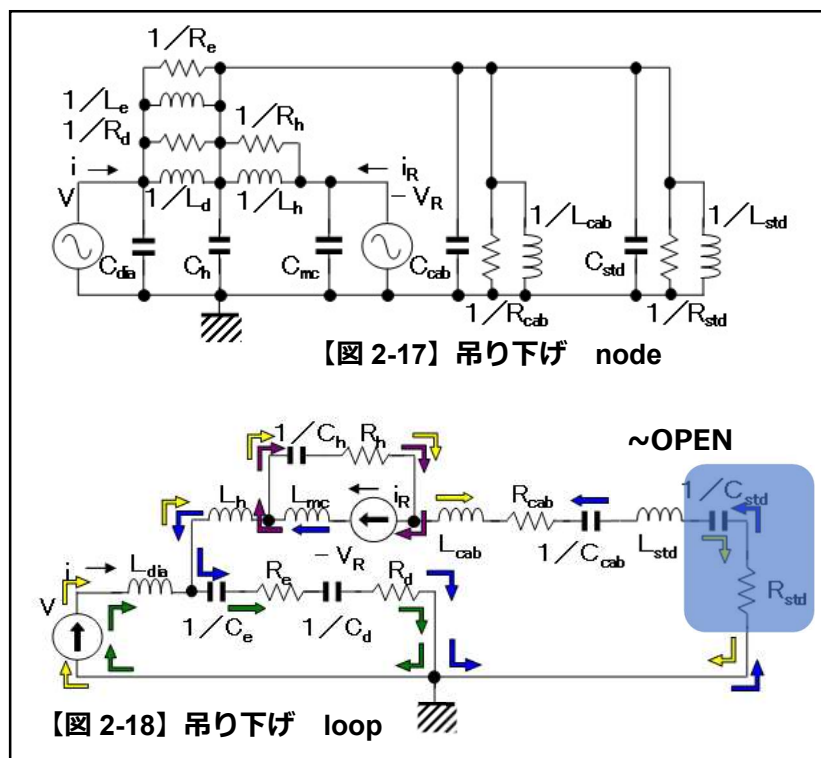
構造要素としては、吊りスタンド（木製スタンド+革紐）がキャビネットと床の間に入ります。



この場合、吊革紐はキャビネット+ユニットを中空に保持する役割で、キャビネットと床の間に緩衝材を入れた場合と等価ですが、キャビネット自体は吊り要素でダンブされることはなく、吊り要素はキャビネットの自由度を高さ方向以外には制約しません。

電気系に変換すると、node は（図 2-17）、loop は（図 2-18）になります。

loop について記述を進めます。



反作用による電流 i_R はキャビネットとスタンドの間に入っている弾性要素と減衰要素が大きいために L_{cab} 、 L_{std} を含む経路（青色と黄色矢印）には流れにくくなります。したがって、（図 2-18）の赤紫色で示したループで反作用が消費されます。

キャビネットの質量 L_{cab} は床とスタンドの質量から浮いている（インピーダンスで隔離されている）ことになり、ユニットの反作用でのハウジング励振が大きくなることが予想されます。

これはキャビネットが仮想 GND にはならないことを示して

いて、キャビネットに対する反作用の影響は、キャビネットに支点が無くなる（床に対するインピーダンスが上がりフローティングになる）為に減少する ⇒ キャビネットでの混交調は減ると思われます。床からの影響も減ります。

良いことだけではなく、床からのフローティングによりユニットの駆動基準点が不明確になりますので、NH-B1 を聴かれた方の音質評価は「音場が奥に広がる」というものが多く、意図的に前に位置するようミクシングしたソフトでも奥に定位してしまいます。

圧迫感が無いので、イージーリスニング（死語？）には最適です。

ここで、キャビネット構造が軽く振動しやすい平面バッフルで吊り構造だった場合を考えます。軽い平面バッフルは反作用と同相（ユニットのフレームと同相）で駆動されると思われます。これだと振動板からの放射と逆相になるので低域の音圧が低下すると考えていましたが、このように吊り構造にした平面バッフル（振動しやすいようにバッフル材質を紙製ハニカム板にした）にユニットを取り付けたものを視聴する機会がありました。

歪感が増えて S/N が悪くなりますが、質は別にしても中低域の増強効果および中域（数百 Hz～数 kHz：一番人間の聴覚感度が高い帯域）の音質変化が認められました。

吊りバッフルの f_0 付近では位相が反転するため同相であることが十分に有り得ますので、若干の音圧アップがあるのかもしれませんが。（未測定）

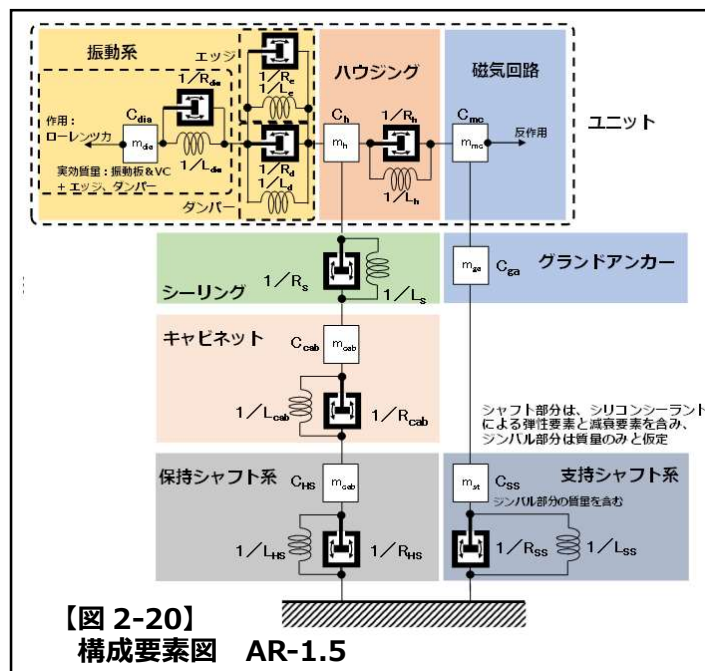
中域に関しては、聴き方によっては豊かに感じるのですが、どのような仕組みで変化しているのかは分かりません。（音像が膨らむので、私の求める方向ではありませんが・・・）

平面バッフルの吊り構造では、今まで経験したことのない不思議な現象が起こります。

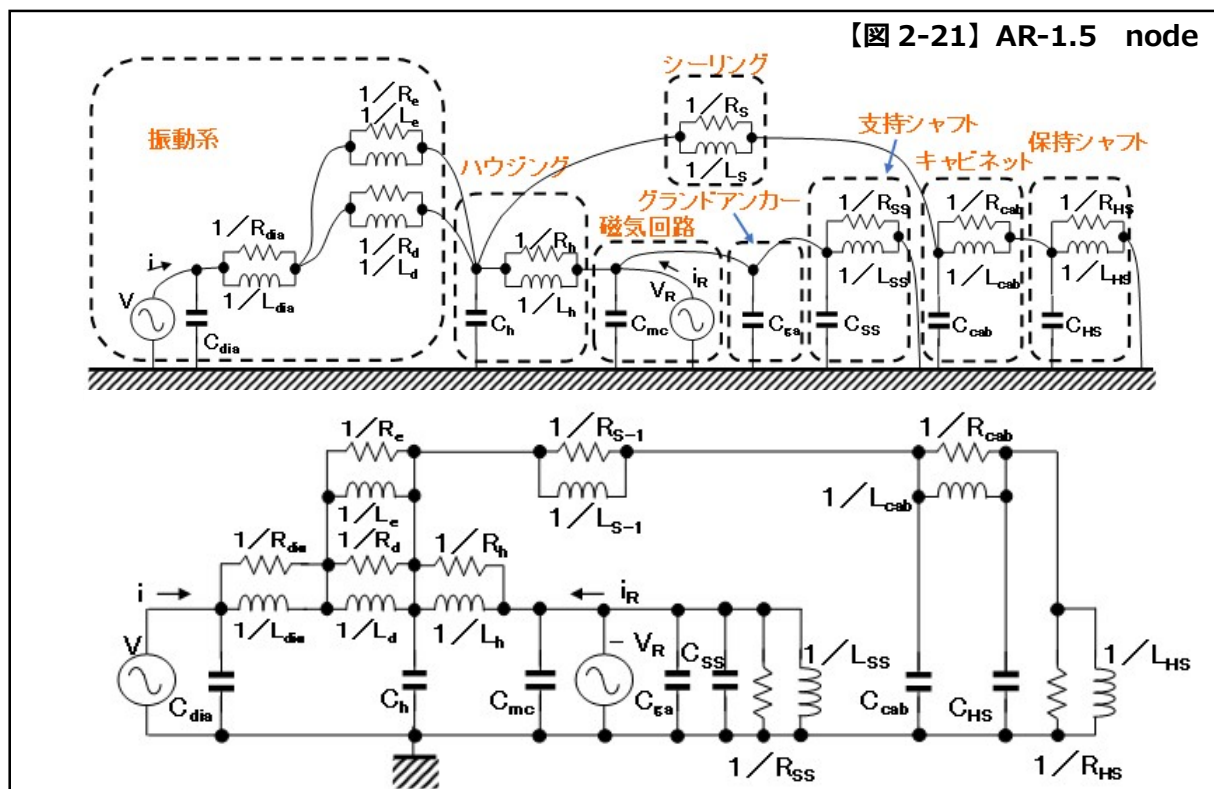
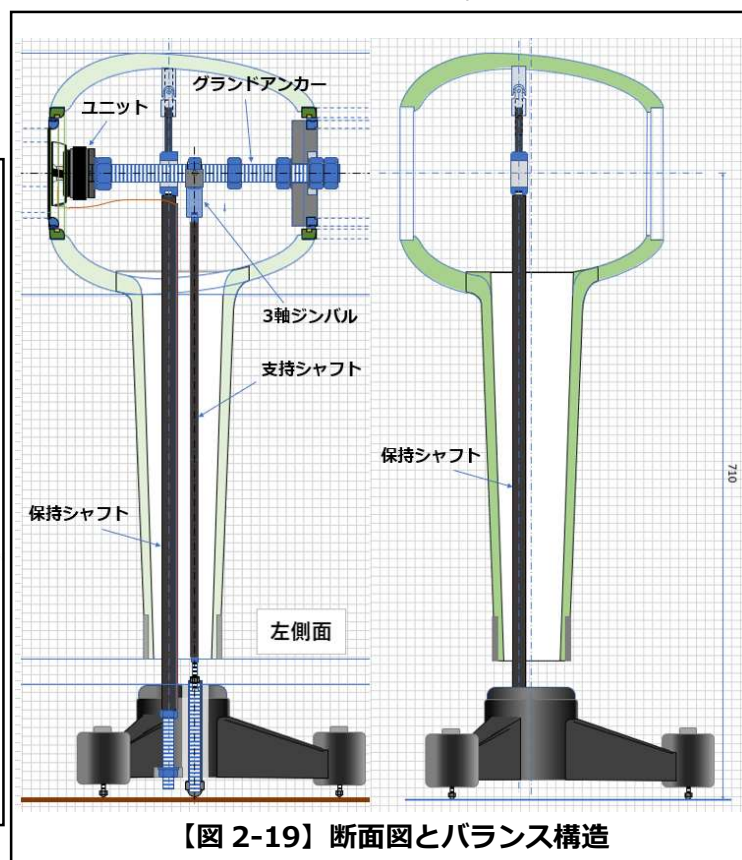
2. 6 AR-1.5 検証機の場合

キャビネットとエンジン部分の完全分離を目指した AR-2 の検証実験機 AR-1.5 を作成しました。

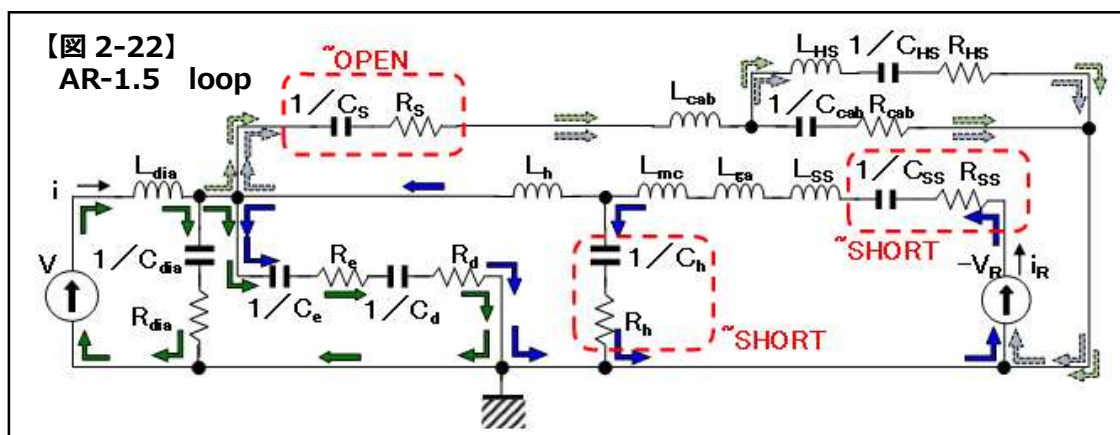
構造は、(図 2-19) 断面図で確認いただくとして、その要素構成図 (2-20) を示します。



ノードに書き換えると、

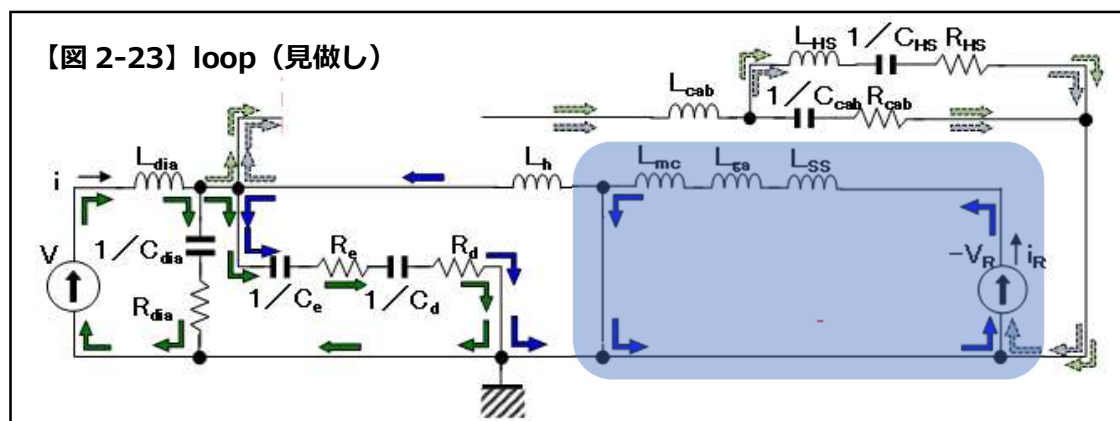


更にループに変換すると、



赤破線枠は、「見做し」を意味していて、~OPEN はインピーダンスが高いため開放と見做せて、~SHORT はインピーダンスが低い（効果が無い=分圧が低い）ので短絡と見做せることを意味します。

これを採用すると、以下ようになります。破線矢印は見做しにより流れなくなったことを示しています。



薄い青色で塗りつぶしたループで反作用の電流 i_R のほとんどが流れ（エネルギーが保存され）、比較的インピーダンスの高いハウジング～エッジ／ダンパーのループにはあまり流れないこととなります。

見做しにより、キャビネットと保持シャフト系要素には電流が流れないこととなりますが、組み精度が悪くてエンジンの芯が出ていなければ、オープンではなく、それなりのインピーダンスになることから、① キャビネットにも振動（反作用）が伝播することになり、② ハウジングにも電流が流れエッジやダンパーを介して振動系の主電流を変調します。

このように、どの部分に最も注意しなければならないかがループ図を作ることによって明確になります。

あとがき

今まで作った資料の中から5つのファイルをそれぞれ章として一つにまとめただけの形ですが、読み直してみると分かりにくい部分がいっぱいあるのに驚きました。

編集するにあたって「重複した部分がかかなりあるだろうな～」という予想はありましたが、それをすべて除いてしまうと分かりにくくなってしまう部分もあって、どうするかけっこう悩みました。

どちらの記述もボリュームがあるところは、ほとんど重複している部分を一つにまとめて、一方を簡略化するようにしました。

それだけでなく「こんな回りくどい言い回しだと理解できない・・・」という部分もいっぱいありましたので、「文章を書くのが専門ではないから・・・」と自分に言い訳をしながらの修正作業が続きました。

この際なので、文字フォントやルビ、図の大きさや配置を見直し、通し図番も振り直し、式の記述見直しをかけ、ページ体裁を良くしたつもりです。

読み直してみると、現役時代にはルーチンのようにやっていたのに「あれ、何ていうのだったかな」「ここはどうやっていたのだろう」「メーカー名や型番は何だっけ？」と、忘れてしまって記載できていないこともいっぱいあって、「あれ」が出てくるようじゃ歳だな～と感じてしまい、現時点でやって良かったというのが実感です。一部には急に思い出して追記したところもありますが、記憶は正確さが無くなり、消えていく一方です。

自分のための備忘録としてスタートした資料作成ですが、こんなにボリュームが大きくなるとは思いませんでした。

一昨年（2019年）より、月刊 STEREO 誌のスピーカー自作コンテストに応募するようになり、自分の作った作品が評価されることが励みになりました。

「音が良い」というのは「好き嫌い」と同じ主観的なものであることは否定できませんが、理論に裏打ちされたものは「ある音質水準をクリアしている」ことは確かなようです。

また、失敗したと自覚している部分は、必ず音に反映してくるのも事実で、それが自作をやめられない理由にもなっています。

これからも体力の続く限り検証を続けて、その結果を情報反映していくつもりです。

ギョウザ星人

変更履歴

Rev.1.02	磁気回路に B&W の 801D4 のプッシュプル磁気回路の説明図を追加 B&W のバイオメディックダンパー追加	'21.12.23
----------	---	-----------