

KRYNA 科学通信

この通信は KRYNA が提供するオーディオ技術とその背景をご紹介します。冊子です。

Written by Dr.Nishimura @ KRYNA INC. TEL 0120-924-422

email dr.nishimura.lab@gmail.com

超音波領域の雑音が可聴域に影響するメカニズム

前回、聞こえない音（超音波）の話をしました。聞こえない音ならオーディオには関係ないと思われるでしょう。しかし、最近のオーディオ機器は 100kHz あたりまで対応していて、超音波領域の雑音も増幅されますし、スピーカも 20kHz を超える領域まで再生可能になっています。ある研究では、超音波領域の音楽信号は聴覚では認識されないが、人体では感じているともいわれています。では、超音波領域の信号も大切にすることが出てきます。しかし、雑音は不要です。ここで、超音波領域の雑音が可聴域の再生音（信号）に影響を及ぼす過程を説明しましょう。普通のラジオ放送（中波帯 1000kHz 前後）は AM 波と呼ばれ、振幅変調された電波で送られてきます。これは、例えば、1000kHz のラジオ局の場合、電波の周波数が 1000kHz で、それに音声信号（20Hz～20kHz）を載せて届けるわけです。この時、音声信号と搬送波（1000kHz）の掛け算をして 1000kHz の電波の振幅（振れ幅）を音声信号となるようにして放射します。この電波を受け取って、ラジオで聞くわけです。実はこれと同じ原理のことが、アンプなどの増幅回路で起こっています。増幅回路は、音楽などの信号に増幅率をかけて送ります。例えばパワーアンプ。真空管のアンプを例にしますと、入力信号はおよそ 1V、最終段で 100V 程度まで増幅されます。通常、この増幅率は増幅回路の動作点の取り方で変わりますが、一定と考えられます。一定となるのは、動作点が揺らがない場合で、直流のバイアス電源が一定なら揺らぎません。ところが、通常、電源回路には抵抗成分があり、出力管やドライバー管に電力（つまり電流）を供給すると内部抵抗で電圧降下が起こり、真空管に供給される電圧が変動します。この変動により動作点が揺らぎ、増幅率が微小に変化します。多分この変動は小さすぎて聞いてもわからないでしょう。しかし、1/1000 (0.1%) の揺らぎがあったとしたら -60dB の影響が発生するわけです。

では、この揺らぎがどのように影響するかです。増幅率はアンプ内に存在する全周波数帯域の信号（雑音も含めて）に掛け算で効いてきます。この掛け算によって、超音波領域の雑音が可聴域に現れてくるわけです。ちょっと数式で説明しましょう。と言っても高校の数学で習う程度ですので、思い出していただければと思います。いま、増幅率を $m=M\sin(ft)$ 、増幅される信号（雑音まで含んで）を $a=$

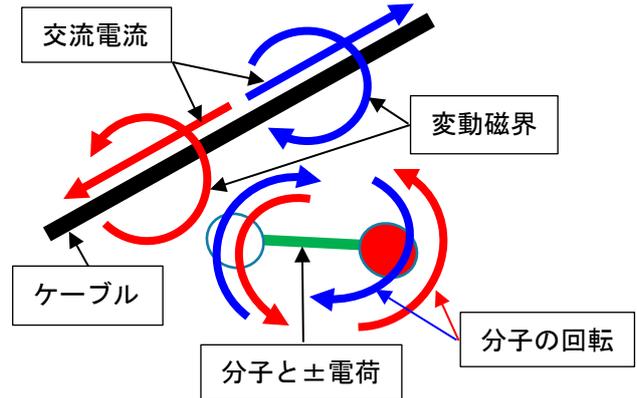
$A\sin(f_2t)$ とします。ここで、 f_1 は増幅率のゆらぎの(角)周波数で、 f_2 は増幅される信号の(角)周波数でアンプ入力に含まれる周波数です。この時、増幅された信号(出力) S は、

$$S = m \times a = M \sin(f_1t) A \sin(f_2t) = MA \sin(f_1t) \sin(f_2t) = MA/2 \{ \cos((f_1 - f_2)t) - \cos((f_1 + f_2)t) \}$$

となります。これを見ると、右辺に $\cos((f_1 - f_2)t)$ や $\cos((f_1 + f_2)t)$ があり、周波数でいうと $(f_1 - f_2)$ や $(f_1 + f_2)$ が新たに作り出されます。この値が 20kHz より小さいと可聴域の雑音として聞こえてくる訳です。今、増幅される信号は音楽信号に限らず不要な雑音も含まれます。前回も話しましたが、デジタル音源には量子化ノイズやサンプリング周期のゆらぎによる雑音が載っています。また、電子回路に生じる雑音も含まれます。これらの雑音は、音楽などの信号に比べ、非常に小さいレベル(信号を 0dB とすると -100dB 以下程度)です。しかし、周波数帯域は全周波数帯域に広がっています(広帯域雑音)。一方、増幅率の変動は主に振幅が大きい音楽信号によって生じます。つまり、音楽信号に含まれる周波数成分が主になると考えられます。したがって、 f_1 は音楽信号に含まれる周波数、 f_2 は信号の周波数も含む広帯域の周波数となり、 $f_1 - f_2$ には種々の周波数が含まれ、それがアンプにより新しく生成される雑音になるわけです。この新しくオーディオシステムによって生成される雑音は、そうはいつでも非常に小さいレベル(信号より 60dB 以上小さい)ですので、無視できるといえば無視できます。なら対策は不要に思われますね。しかし、人間の聴覚を甘く見てはいけません。以前お話ししたかもしれませんが、聴覚は、最初に蝸牛で周波数分析をします。この時、音楽成分だろうと雑音成分だろうとすべての可聴音の大きさを瞬時検出します。つまり、どんなに小さな音でも検出するわけです。この情報を基に種々の処理の後、大脳に送られ意味の解析をしていきます。この時点で音楽や言葉などの意味の理解が発生します。この時、さらに、聴こうとする音楽以外の雑音を消去する作業をしているようです。多分経験があると思いますが、雑音が多い再生音を聞くとなんか耳(側頭葉)が疲れて長い時間効いていたくなくなりませんか? 一方で、雑音を減らして、透明感のある音(生音により近い音)で聴くと長時間聴いても疲れず聴き続けられますよね。ということで、非常に小さな雑音でも、無視せず、可能な限り小さくしてゆくことが大事だと思います。今少し踏み込んでみると、聴く音楽は大きな音で、小さな雑音は聞こえないと思われるかもしれませんが、しかし、聴覚はそんなに甘い器官ではありません。「マスキング効果」により、大きな音と同じ周波数の他の音は聞こえなくなります。しかし、それ以外の周波数の音は、先程の蝸牛のおかげで情報を取り込んで認識することが出来るわけです。ですから、音楽信号に対して 90dB 以上小さいから対策不要と思うのは間違いです。5dB でも 10dB でも今より雑音を下げることが出来るならその効果は如実に現れます。しかし、音楽信号は雑音に比べて非常に大きいので、対策による影響はほとんど受けないと考えてよいでしょう。面白い逸話がありますが、かの有名な指揮者 W. Furtwaengler はオーケストラの練習中、フォルテで演奏中にセカンドトランペットにもっと出せと指示したそうです。オーケストラのフォルテはかなり大きな音量で、100dB 以上?(最大音量で 130dB 以上と言われる)の中で、セカンドトランペットに指示を出すのだから相当な耳をしていたという話です。

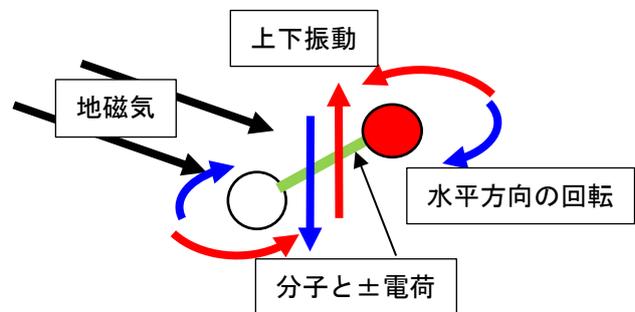
さて、こうした超音波領域からの雑音発生を抑制する手法を提案します。それは、超音波領域の雑音を低減することです。超音波領域の雑音は、デジタル信号や電源に含まれると考えてよいでしょう。したがって、デジタルケーブルや電源ケーブルから侵入してくる高周波雑音を抑制することが一つ効果的です。その効果を発揮するアイテムが、Helca でコイル状のチューブに D-Prop

でおなじみのスティッキー溶液が封入されています。スティッキー溶液には長さが長く重い分子（図の緑の線）が含まれ、その両端にプラスとマイナスの電荷（赤玉と白玉）がついている電気双極子の構造になっています。この分子が、ケーブルの周辺にあると、ケーブル（図の黒い線）を流れる電流（交流電流（図の赤と青の矢印））によってつくられる変動磁界（電線を中心に周りに円周状に作られ、電流と同じ周波数で電流の向きが入れ替わると同時に磁界の向きも入れ替わり、青い電流による磁界は青い矢印方向、赤い電流による磁界は赤の矢印方向）により回転させられます。つまり、ケーブルを流れる電流がこの分子を動かす仕事をし、エネルギーを費やします。この仕事により伝送されるエネルギーが消耗され、伝わり難くなるわけです。しかも、この分子の運動特性が超音波領域に設定してあるので、音楽信号にはあまり影響せず、超音波領域の雑音電流の侵入を防ぐことが出来るようになっていきます。このように、Helca は高周波の雑音伝播を防ぐ効果があると考えられます。



では、D-Prop に封入されているスティッキー溶液はどんな働きをするのでしょうか？実は先ほどと同じような働きなのですが、原因が入れ替わっています。D-Prop での原因は振動（右の図で上下方向の振動）です。D-Prop に伝えられた振動によって分子が上下に振動させられます。また、地球上ですので、地磁気があります。磁界中

を電荷が動くと同様、運動の方向と地磁気の方角の両方に対して垂直な方向に電荷が動かされます。プラスとマイナスの電荷はそれぞれ反対方向に動きますので、分子は回転します（下方向の動きでは赤いプラス電荷は地磁気に垂直に図上右から左に、白いマイナス電荷は左から右に移動し、結果、上下方向を回転軸として回転運動（時計方向）する）。この回転が上下方向の振動エネルギーを吸収するわけです。（要するに、分子の両端にある電荷周りの磁界変動が、交流電流によってつくられるか、地磁気に垂直な方向の振動によってつくられるかの違いです。）効果があるからなんとなく使っている Helca や D-Prop なども、少し掘り下げてみると科学的に根拠を見ることが出来ます。ただ、音が変わったから良くなったとは限りませんので、どのような方向性で変化しているかの見極めが必要です。そのためには、再生音がどうあるべきかを知っておく必要があります。その指針の一つが、HGS です。



HGSについてはブログの方である程度お話しさせていただいていますが、次の話題「最終兵器」が終わってからふれたいと思います。



Tea Break

前回に続いてアニメの面白さをお話しさせていただきます。と言っても、アニメの評論家のようなことは言えませんし、主にラブコメを見ているので、そちらからの情報に偏ってしまいますが、HGSでよりリアルに聞ける音としては、意外と面白いと思います。スピーカの外側迄（場合によっては真横にまで）音の空間が広がっており、部屋全体がアニメの世界になっているかようになります。手っ取り早い例で行きますと、オープニングやエンディングのテーマでも横方向まで（あくまで、2chステレオでの話ですよ）広がりを出しています。例えば、「歴史に残る悪女になるぞ（水曜午前0:30～）」エンディングでは、始まってすぐ右から左へ点々点と音が動いてゆきます（スピーカの遙か外側から反対の外側迄）。「魔王様 2099（日曜午前0:00～）」のオープニングでは最初から上下左右に音が散りばめられており、しかも、左右スピーカの外側に迄点在します。

アニメ内の場面で見ると、ラブコメなど動きの少ないアニメでも、自動車の音は右や左に行き交い、列車も通り過ぎて行き、飛行機は空を飛ぶ（上側に）。花火は打ちあがるし、鳥は木の上で啼く。画面を見ず、目をつむっていても情景が浮かび上がる、そんな音作りがされています。

例えば、前回ご紹介した「君は冥土様」第1話は、のっけから踏切のシーンですが、列車が右側からやってきて目の前を通り過ぎる。まさに、日常の生活で出くわす情景そのものが、音としても再現されています。まさに踏切の前に立っているような迫力とリアル感です。また、背景音、風の音、水の流れる音、雨の音など、メインの音ではなく省略しても何の問題もないような音がきちんと入れてあります。例えば風の音では、「ループ7回目の悪役令嬢は・・・」の第8話16分経過あたりの城門でのシーンで、風が吹くシューというかサァーツというか、建物の間や屋上などに立っていると聞こえる音が背景に流れているのですが、真横からも聞こえてきて部屋全体に広がって風が吹いているように聞こえます。部屋の外の音が聞こえているのかと思っていたら、シーンが変わると無くなってしまい、その時にやっと、アニメの中で背景音として使われていたのだと分かります。かすかな音でアニメとは関係ない生活音と思っていたら、アニメの効果音だったということはしばしばです。また、今期のアニメでは、横から音が聞こえるシーンが結構あり、例えば、「魔王様 2099」の第5話では、ほぼ開始早々の戦闘シーンで魔法陣を張るときの効果音が左右側面（前面の横でなく自分の横方向）迄広がっており、かなり音の作り込みが進化しているように思いました。2chのステレオ再生で（サラウンドかと思えるような）、こんな音の空間をつくれるのが楽しくて、好きなプラモづくりやヴァイオリンそっちのけで、音を聞いている毎日です。

さらに、再生音がリアルかそうでないかを判断するに使える音源は、やはり自然や生活の中での音源ですね。日ごろからよく聞いている音や聞き覚えのある音は、再生音の評価に使えますね。かなり以前NHKのBSで、日本の四季の音を放送していました。自然音から生活音までさまざま、氷が解けて流れ出す音、風邪の音、鳥の声、小川のせせらぎ、鍛冶屋の音、雨の降る音、鳥が小魚を加えて医師にたたきつける音、虫の音、雷鳴、焚火の音、雪が降り積もる音などなど。雪が降るとき音がするとは思っていたのですが、積もった雪の上に落ちてくる雪の音があるんですね。いろいろ聴いていて面白い番組でした。

今月の音楽

東京一の軽業師（夢のはじまり）

須山久美子



Yume no ha ji ma ri
Suyama Kumiko

昭和初期？活気のある市（通り）にぽんと放り込まれた感じです。大道芸のフィールドレコーディングなのか、はたまたそれ風に制作されたサウンドなのかは不明ですが臨場感、空気感が👍アルバム「夢のはじまり」の中でもこの感じはこの一曲だけですが、アルバム全体としてもハマる要素満載です。

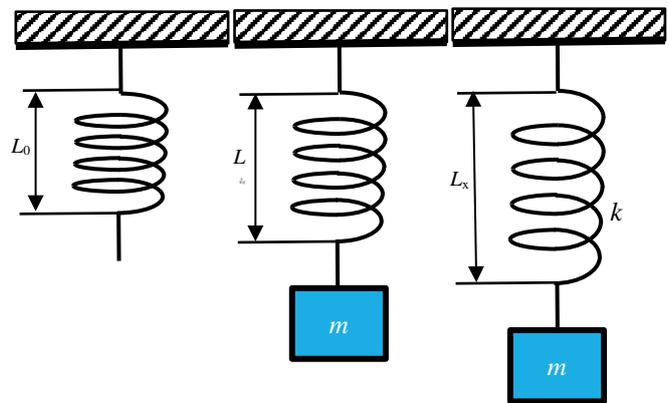


オーディオと物理

第9回 運動の法則(2)

ニュートンの運動法則：物体（質量）に力を加えると比例定数を質量とする加速度が生じる

ニュートンの運動法則をもう少し見てゆきましょう。第2法則は、運動の状態が変わる場合の話です。今回は、重力場での運動を見てみました。摩擦や空気の抵抗は無視して、重力加速度が物体に作用する場合でした。しかも、重力加速度は一定でした。今回は、物体に作用する力が変化する場合を考えてみましょう。地上から地球の重力圏外にまで及ぶ運動もそうですが、簡単な例として、図のよ

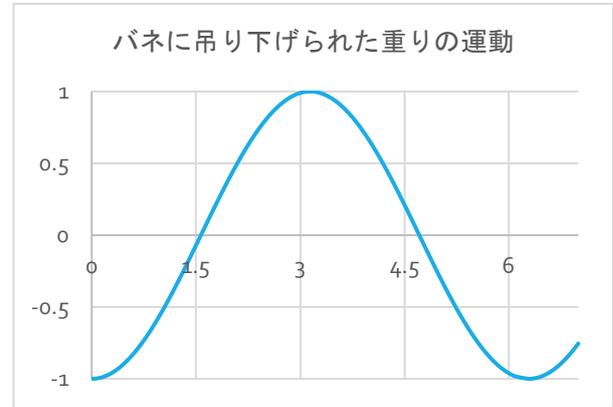


a)自然長 b)静止時（釣合） c)運動（変位 x ）

うに、バネにぶら下げられた質量に働く力を考えてみましょう。バネは質量が無視できばね定数を k 、吊り下げる質量を m とします。質量には大きさが無い（質点）とし、バネの自然長（なにもぶら下げていないとき(a)の長さ)を L_0 、質量をぶら下げて静止しているとき(b)のばねの長さを L 、質量が上下に運動しているとき(c)のある時刻で位置が x の時のばねの長さを L_x とします。A)に対しb)は $(L-L_0)$ ほどバネが伸びていますので、これにバネ定数 k をかけた値が m の荷重 mg に相当します。つまり、 $mg=k(L-L_0)$ となります。次に、c)の状態は、 m が運動して静止状態からずれています。このとき m の変位は x で、速度と加速度が生じています。運動は力のつり合いを保って行われますので、静止状態より下側に変位 (x 正の値) しているとすると、 m はバネによって引き上げられる力 $-kx$ を受けています。運動法則を当てはめると、 $-kx=ma$ となり、これから $a=-(k/m)x$ となり、上向きの加速度が生じていることが分かります。加速度 a は変位 x の時間での二階微分 $a=d^2x/dt^2$ ですので、これから運動時の力のつり合いを表す微分方程式 $md^2x/dt^2+kx=0$ が導かれるわけです。高校では、微分概念を使わずに説明しますので、微分方程式ではなく、微小時間と微小距離で説明されます。

今回は、無謀にもこの微分方程式を解いてみます。これは二階の微分方程式で、時間で二回微分された現象 x (質量の位置) の時間的変化の関係式であり、これを解きます。いろいろな解き方がありますが、微分方程式は解 x に関する条件が2回分緩められ (不明になって) ています (例えば、 $y=ax^2+bx+c$ を x で2回微分すると $y''=c$ となり、条件 a と b が不明になります。その分不確定な要素が増え、解は唯一とは限らなくなります)。そこで、 x の解を仮定してそれが微分方程式を満たせば、解の一つとして採用できます。

二階微分方程式の解は指数関数になりますので、 $x=\exp(\lambda t)$ と仮定します。これを微分方程式に代入すると、 $(\lambda^2+k/m)\exp(\lambda t)=0$ が得られ、 $\exp(\lambda t)$ は恒常的には0ではないので、この条件を満たすためには、 $(\lambda^2+k/m)=0$ 。つまり、 $\lambda^2=-$



k/m ならば $x=\exp(\lambda t)$ は解の一つとなるわけです。つまり、 $\lambda=\pm j(k/m)^{0.5}$ で (ただし $j=(-1)^{0.5}$: 虚数単位で、 i も使われる) すので、 $x=A\exp\{j(k/m)^{0.5}t\}+B\exp\{-j(k/m)^{0.5}t\}$ となります。ここで、条件が2個無くなっているので、不定の定数 A と B が入っており、この解は形だけを与えるものになります。そこで、初期条件を設定する必要があります。時間で二回微分していますので、ある時刻 (通常 $t=0$) での変位と速度を与えます ($y=ax^2+bx+c$ の例でいうと微分しないときに a 、1回微分して b が消えているので)。例えば、(c)の状態、 x_0 ほど下に引っ張って静止させた後離す場合を考えると、時刻0での変位は $x(0)=x_0$ 、速度は $dx(0)/dt=0$ になります。得られた解にこの条件を当てはめると、 $x(0)=A\exp\{j(k/m)^{0.5}\}+B\exp\{-j(k/m)^{0.5}\}=A+B=x_0$ 、 $dx(0)/dt=j(k/m)^{0.5}[A\exp\{j(k/m)^{0.5}\}-B\exp\{-j(k/m)^{0.5}\}]=j(k/m)^{0.5}(A-B)=0$ 、となり、この二つの式を連立して A と B を求めます。結果として、 $A=B=x_0/2$ となり、時刻 t での質量の位置は $x(t)=(x_0/2)[\exp\{j(k/m)^{0.5}t\}+\exp\{-j(k/m)^{0.5}t\}]=x_0\cos((k/m)^{0.5}t)$ となり、振幅 x_0 の余弦運動となります。この周期は $T=2\pi/(k/m)^{0.5}$ で、周波数は $f=(k/m)^{0.5}/2\pi$ となります。二階の微分方程式で表される現象は多くの場合、周期現象になります。具体的に値を入れてみますと、バネ定数 $k=1\text{N/m}$ 、質量 $m=1\text{kg}$ 、初期変位 $x_0=1\text{m}$ 、初期速度 $v_0=0\text{m/s}$ とした場合、右のような振動となります。ただし、横軸は時刻で、時間の経過による質量の位置を表します。

☆西村博士の物理ラボ 活動情報はこちらから

◆西村博士連載ブログ https://kryna.jp/report/nishimura_blog/



◆西村博士の物理ラボ X アカウント https://twitter.com/dr_nishimlab



◆法人向けコンサルティング https://kryna.jp/biz_consulting/

