出力インピーダンス・
入力インピーダンス
(ロー出し・ハイ受け)

●出力インピーダンス・入力インピーダンス

▶はじめに

「出力インピーダンス」及び「入力インピーダンス」の関係性を解説をしつつ「ロー出しハイ受け」の解説をします。

▶入力インピーダンス

「出力インピーダンス」は第二章の「テブナンの定理」で説明済みですが「入力インピーダンス」は説明していないのでここで説明します。入力インピーダンスは回路の入力部の端部を開放してその端部から見た回路のインピーダンスを測定または計算することで得られます。通常、信号を受ける側の回路に電圧電源も電流電源も存在しないので、これらの接続や開放といったことは考えなくて良いです。

▶回路の接続

A、B という 2 つの回路があります。回路 A は信号を発生させて回路 B に送り、回路 B は送られてきた信号を加工するものとします。

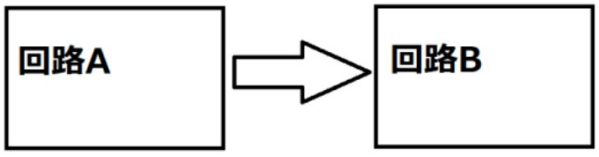

図 1: 回路 A 及び回路 B

回路 B が回路 A から信号を受け取る際、その信号は回路 A の出力インピーダンスと回路 B の入力インピーダンスの相互的な影響を受けるので、回路 A 及び回路 B を一体的に捉える必要があります。これは解析・設計の際などで大変な手間です。

▶ロー出しハイ受け

図 2 は出力インピーダンスが Z_A で送信信号電圧が S_A の回路 A と入力インピーダンスが Z_B の回路 B を接続したものです。B の受信信号電圧を S_B とすると、次の式(1)が成立します。

$$S_B=\frac{Z_B}{Z_A+Z_B}\times S_A \cdots(1)$$

Z_A:回路 A の出力インピーダンス、
Z_B: 回路 B の入力インピーダンス、
S_A:回路 A の送信信号電圧
S_B:回路 B の受信信号電圧

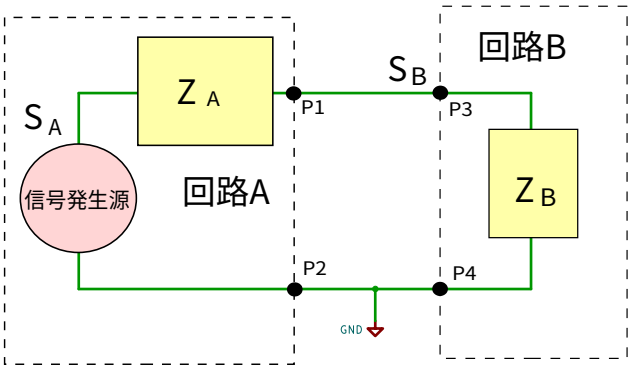

図 2: 回路 A 及び回路 B の詳細

ある特定の周波数のとき、回路 A の出力インピーダンスが z_A で、回路 B の入力インピーダンスが z_B であったとします。そして z_B の大きさ($=\sqrt{z_B\text{の実部}^2+z_B\text{の虚部}^2}$)が z_A の大きさ($=\sqrt{z_A\text{の実部}^2+z_A\text{の虚部}^2}$)よりも十分に大きいとすると、$z_A$ の影響は z_B に比べて十分に小さくなるので $z_A+z_B \fallingdotseq z_B$ と考え

てよいです。すると、その特定の周波数では、(1)式は次のようになります。

$$S_B=\frac{Z_B}{Z_A+Z_B}\times S_A \fallingdotseq \frac{Z_B}{Z_B}\times S_A = S_A$$

つまり、その周波数では $S_B \fallingdotseq S_A$ です。結果的に、その周波数では z_A 及び z_B の影響を受けない上に、回路 B は送信信号電圧 S_A をほぼそのまま受け取ることができて、信号電圧の伝達効率が非常に良いです。

さらに、使用する周波数領域全体に渡り、Z_B の大きさを Z_A の大きさよりも十分に大きくなるように設計できれば、インピーダンス Z_A と Z_B の相互関係を考慮しなくて良い上に、その周波数領域全体で信号電圧を効率よく伝えることができます。このように設計することを「ロー出しハイ受け」といいます。

「ロー出しハイ受け」は上述のような回路 A-B 間だけでなく、回路内の隣り合うオペアンプやトランジスタどうしの間などでも頻繁に用いられています。

複雑でわかりにくい回路でも「ロー出しハイ受け」の視点で見てみると実は単純な回路ということがよくあります。

回路を読むのが苦手な人は「ロー出しハイ受け」の視点で回路を眺めてみて下さい。

▶オーディオ機器の場合

エフェクターなどのオーディオ機器の場合、人間の可聴周波数 20～20kHz で前述の「ロー出しハイ受け」を実施していることが多いです。可聴範囲で出力インピーダンスを相対的に小さくし、入力インピーダンスを相対的に大きくすると機器の独立性が保たれ、信号電圧の伝達効率が向上し、解析や設計も楽になります。

▶高周波数回路の場合

前述の「ロー出しハイ受け」は周波数が高周波数の場合は、まず使われません(ちなみにエフェクターなどのオーディオ機器が扱う周波数は、低周波数に分類されています。)。

▶インピーダンス整合

音響機器には「インピーダンス整合(インピーダンス・マッチング)」というものがあります。出力インピーダンスと入力インピーダンスをほぼ揃(そろ)えてエネルギー効率を大きくしようというものです(だいたい 600～700Ω で整合をとります。)。エネルギー効率が重視された時代は大事な考え方でした。しかし、現在ではあまり意味のない考え方です。現在の音響機器では、前述の通り「ロー出しハイ受け」が主流です。

なお、「インピーダンス整合」は音響機器と高周波機器で少し意味が違うので注意してください(高周波機器では現在でも意味のある言葉です。)。

▶ギターの場合

第二章の「テブナンの定理」の具体例のところでギターの出力インピーダンスについて触れました。そこでのグラフを図 3 に再掲します。図はストラトキャスターのリア・ピックアップを選択したときのインピーダンスの大きさを示します(大きさは $\sqrt{実部^2+虚部^2}$ で求められます。)。

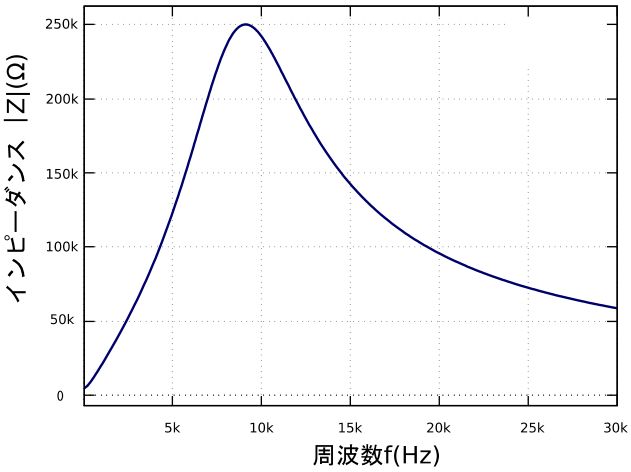

図 3: ギターの出力インピーダンスの大きさ

インピーダンスの大きさ|Z|は人間の可聴周波数の最小値 20Hz 付近で 5000Ω(=5kΩ)程

度なのに、9kHz 付近で 250000Ω(=250kΩ)近くです。前述の式(1)を見るに

$$S_B=\frac{Z_B}{Z_A+Z_B}\times S_A \cdots(1)$$

なので出力インピーダス Z_A の大きさが増大するほどに受信信号電圧 S_B の値は減少します(通常、Z_B の大きさは可聴周波数領域で一定になるように設計されています。)。エレキ・ギターの音階はおおよそ 80Hz～1.3kHz の範囲にあり、この範囲内でインピーダンスは常に右肩上がりです。つまり、エレキ・ギターでは音が高くなるほど伝わる信号が弱くなるということです。これを「ハイ落ち」といいます。

ギターの出力インピーダンスの不均等さの影響を小さくしハイ落ちを防ぐためにエフェクターやアンプの入力インピーダンスは、大きくする必要があります。実際にエレキ・ギターに対応しているエフェクターやアンプは、入力インピーダンスの大きさがおおよそ 500kΩ 以上もあります(もちろん、例外もあります。)。

なお、アクティブ・ギターの出力インピーダンスは低いので、あまりエフェクターやアンプの入力インピーダンスを大きくする必要はないです。

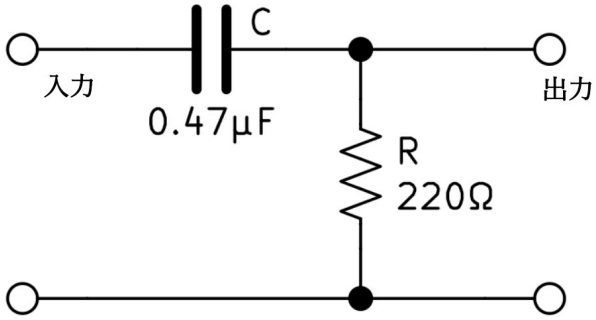

図 4: 回路の例

▶暗黙のルール

以下余談になるのですが、出力インピーダンス及び入力インピーダンスにおける「暗黙のルール」について少し書きます。

周波数応答を求める問題などでよく見かける図 4 のような回路においては、入力端子側の回路の出力インピーダンスをあらゆる周波数で極限まで小さくして 0Ω と見なすこと及び出力端子側の回路の入力インピーダンスをあらゆる周波数で極限まで大きくして∞(無限大)Ω と見なすことが暗黙のルールです(入力側や出力側の回路のインピーダンスを特に示していない場合です。)。

図 5 が、図 4 における暗黙ルールも含めて表したものです。出力端子側にある相手回路の入力インピーダンスが∞Ω なので、そちらの回路に電流は流れません。また入力端子側にある相手回路の出力インピーダンスが 0Ω なので、電源の電圧は全く減ずることなく図 4 の回路にかかります。

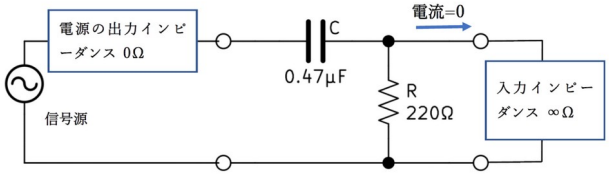

図 5: 例の詳細

ご存知の方がほとんどでしょうが念の為。

▶補足:受信信号電圧 S_B は内部の半導体が受け取る信号と同じか？

図 2 の回路 B が受け取る受信信号電圧 S_B はあくまでも回路 B の入口での信号電圧に過ぎず、回路 B 内のオペアンプやトランジスタなどの半導体が受け取る信号と同じとはいえません。受信信号電圧 S_B は回路 B 内で少なくともカップリング・キャパシタを通過するので周波数によっては位相や振幅が変化することもありますし、その他諸々の処理をされて半導体に届くこともあります。

ご質問がありましたので、それに答える意味で補足しました。

By 荻窪のおっちゃん

公開日：2023 年 10 月 19 日
最新更新日：2024 年 08 月 22 日

「エフェクターの設計要点」に行く

「ホーム」に行く