

電圧伝送と電流伝送の話

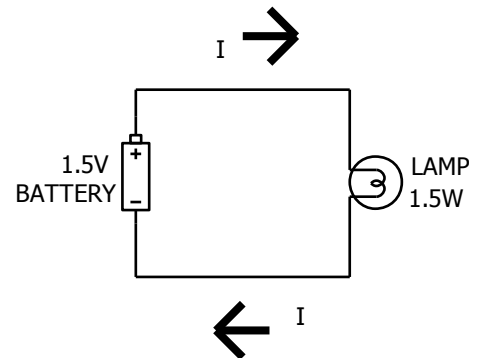
オーディオシステムの新しい展開

今日のオーディオシステムは、エレクトロニクスやコンピュータのさまざまな技術が採り入れられ、ますます多機能化、複雑化していますが、その基盤となる技術はすべて、電気回路の基本的な概念から出発しています。また、アナログ信号とデジタル信号の取り扱いや、それらを相互に変換する処理は、伝送・通信技術や情報工学の長年にわたる研究成果に基づいています。ひとたび立ち止まって、それらの基本から考え直すことで、さらによいものを生み出すことができるでしょう。

より効率的で損失の少ない方法で信号をやりとりするには、電圧の変化よりも電流の変化として扱うほうが原理的に優れていることが、計測機器や電気通信などの分野では古くから知られています。オーディオシステムにおいても、最近になってようやく電流伝送の優位性が認められるようになりつつあり、従来の電圧伝送という考え方では限界のあったさまざまな点が大きく改善されています。そこで、電圧と電流という電気回路の基本から掘り下げて、なぜ電流伝送がよいのか、そのためにどのようなしくみが必要なのかを理解していきます。

電圧・電流・抵抗

右図のように、乾電池 (1.5V) と豆電球 (1.5W) を用意して、それらを導線でつなぎます。すると、乾電池の+極から出た電流は豆電球を点灯させ、一極に再び戻ってきます。このような電流の一巡する経路を「回路」といいます。



たとえば、壁のコンセント (AC100V) からつないだ、机の上にある電気スタンドの電球 (100W) を点灯したとき、コードには 1A の電流が流れます。同じように、乾電池で発生した電力は 1.5W の豆電球で消費されると、結果として電圧が 1.5V から 0V に降下し、1A の電流が流れたと考えることができます。その際、電流が回路内を無制限に流れているわけではなく、この豆電球は導線に流れる電流をある程度制限する「電気抵抗」の役割を果たしていることがわかります。それでは、これらの電球の抵抗値はいくらになるのでしょうか？

オームの法則

1.5W とか 100W というのは「消費電力」といい、ワット[W]という単位で表します。このような電力を消費するものを電源にたいする「負荷」といい、その抵抗値はオーム[Ω]という単位で表します。電源の電圧 (起電力) を E、流れる電流を I とすると、消費電力 P は、

$$P = E \times I \quad \text{電力[W] = 電圧[V] \times 電流[A]}$$

となります。ここで電圧はボルト[V]、電流はアンペア[A]という単位で表します。負荷抵抗 R に電流 I を流すと、それに比例して電圧降下 E が生じます。これを「オームの法則」といい、

$$E = I \times R \text{ 電圧[V]} = \text{電流[A]} \times \text{抵抗[\Omega]}$$

という式で表されます。両方とも電流は 1A なのでそれぞれ計算すると、1.5W の豆電球は抵抗値が 1.5 Ω 、100W の電球は 100 Ω となります。

ここまでは、電気回路の入門書にいくらでも書かれていて、よくご存知のことだと思いますが、ひとつ重要なことに気がついたでしょうか？ 電源に負荷をつないだとき、電圧は 1.5V から 0V に降下していますが、電流は回路のどこでも一定値の I を保っています。つまり、電流は回路を一周しても、増えたり減ったりせず、+極から出る量と、-極に戻る量はつねに等しくなります。

オーディオシステムの場合は交流信号を伝送するので、乾電池と豆電球の場合のような直流と厳密には異なりますが、直流の場合と同様に考えればよいのです。たとえば、送り出し側の CD プレーヤーの D/A コンバータを交流電源（信号源）とし、アンプ側を負荷とすると、アンプの入力にふつうある実際の負荷であるボリュームに微弱な電流が流れて、その両端に電圧信号が生じ、それをアンプで増幅してスピーカーを駆動しているわけです。それでは、電圧や電流を伝送するというのは、いったいどういうことなのでしょう？

交流信号の伝送

基本的には今でも変わりはありませんが、自然界のさまざまな値や、マイクロフォンで音を電気信号に変換した電流や電圧の変化、アンプでスピーカーを駆動する電気信号など、連続的に変化する情報をアナログ信号といいます。それにたいして、コンピュータの内部でやりとりするデータや、CD などの記録媒体を再生した 0 と 1 のパルス信号が流れるケーブル、インターネット回線を飛び交う情報は、デジタル信号といいます。

それでは、アナログ信号を伝送するには、どうすればよいのでしょうか？ 一般に、アナログ信号は次式のような正弦波（sine wave、sinusoidal wave）として表されます。

$$a(t) = A_m \sin 2\pi ft$$

$$A_m : \text{振幅 (電圧または電流)}, f : \text{周波数 [Hz]}$$

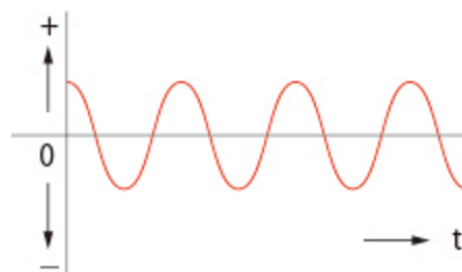
$$a(t) = A_m \sin (\omega t + \phi)$$

$$\omega = 2\pi f : \text{角周波数 [rad/s]}, \phi : \text{位相角 [rad]}$$

電圧または電流を変化させて情報を伝送するものを振幅変調（AM）といい、周波数を変化させるものを周波数変調（FM）、位相を変化させるものを位相変調（PM）といいます。アナログのオーディオケーブルで伝送しているのはたいてい、0V を基準として電圧が上下（+と-）に振れているわけです。

それに対して「電流伝送」は、電圧はほぼ一定（ふつうは 0V）でも、ケーブルに流れる電流が 0A を基準として上下（+と-）に振れている（電流を吸い込んだり吐き出したりする）ことを意味します。その際、直流バイアス電流がない方が扱いやすいです。これは乾電池の+極と-極を周期的に入れ替えたものと

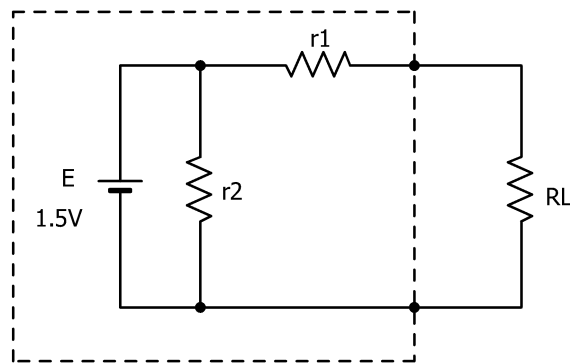
考えれば、容易に想像がつくと思います。その際、たとえある程度の抵抗をもつ伝送ケーブルでも、プラグの接触抵抗があったとしても、その入口と出口で、つまり送り出し側と受け側ではいつも同じ電流が流れます。ということは、電流伝送では信号伝達のロスが原理的に発生しないということです。それでは、オーディオシステムで電流伝送を実現するには、どのようなしくみが必要になるのでしょうか？



電源の内部抵抗

乾電池と豆電球の例に戻って考察してみます。乾電池に豆電球をつないでいる場合には問題ありませんが、もし仮に乾電池の+極と-極を直接つないだらどうなるのでしょうか？ いわゆる短絡(ショート)の状態です。オームの法則により $I = E/R$ であり、ショートすれば $R = 0\Omega$ だから、 I は無限大になる…、と答えた人は、いささか短絡的です。確かに導線はみるみる熱くなって触れないほどになり、乾電池はまたたく間に消耗します。ところが、無限大の電流が流れてものすごい磁界が発生し、周りの鉄をことごとく吸い込むブラックホールと化した様子はありません。実はそれには訳があるのです。乾電池にはそれ自体で電力を消費する負荷があり、それを内部損失あるいは内部抵抗といいます。その証拠に、ショートさせた乾電池は熱くなりますから、電力を消費して熱に変換しているわけです。この内部抵抗は、電池を頻繁に買わせようという電池メーカーの陰謀ではなく、電池内部の化学的組成によるもので、完全に 0Ω にすることはできません。一般に、大きな電流を扱える大きな電池ほど、その内部抵抗は小さくなります。自動車用の大きなバッテリーをショートさせると、恐ろしいことになるので、絶対にまねをしないでください。そういえば、飛行中に火災を起こしたジェット機がありました。原因はバッテリー周りの漏電ということでした。

電池の内部抵抗を図式化すると、以下のようになります。

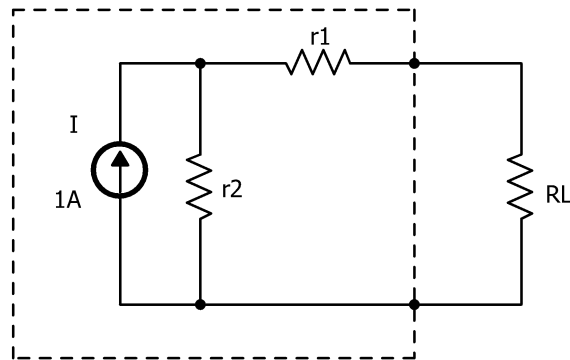


図の R_L は負荷抵抗で、それ以外の点線の内側が乾電池だと思ってください。E は純粋な起電力(電圧の源)で、 r_1 や r_2 を内部抵抗といいます。ここで r_2 は起電力と並列な内部抵抗(自家消費)で、電池を使わないときでも微弱な電流が流れており、長らく放置した電池はやがて消耗し、しまいにはゲロを吐いて死んでしまいます。起電力と直列なもう一方の内部抵抗 r_1 は、電池を使うとだんだん大きくなり、電圧が下がってくる原因で、内部の化学的組成の変化(劣化)からくるものです。仮にこの内部抵抗を 1Ω とすると、電池の両極をショートしても $1.5A$ しか電流が流れません。

電圧源と電流源

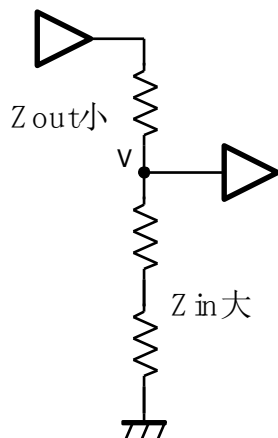
電圧源というのは、電池のように起電力と内部抵抗をもった電源のことで、負荷となる抵抗値が変わって電流が変化しても、端子電圧がほぼ一定のままの電源をいいます。とくに r_1 が 0Ω 、 r_2 が無限大の電圧源を「理想電圧源」といいます。従来のオーディオシステムの場合、ロー出しハイ受けと言われてるように、内部抵抗(出力インピーダンス)の小さな信号源から送り出し、大きな抵抗値の負荷(入力インピーダンス)で受けると、効率よく「電圧」を伝送できます。

それにたいして電流源というのは、乾電池のように近くのコンビニで買えるわけではないので、ちょっと理解しにくいですが、電気回路では基本となる重要な概念のひとつです。定義として電流源とは、負荷となる抵抗値が変わっても、両極間を出入りする電流がほぼ一定のままの電源をいいます。

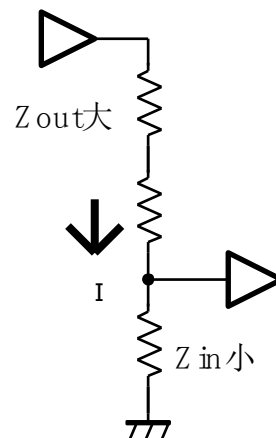


図のように、矢印を丸で囲んだ記号が電流源で、点線の内側は内部抵抗も含めた構成です。電圧源とは逆に r_1 が無限大、 r_2 が仮想的に 0Ω の場合を「理想電流源」といいます。つまり、どんなに大きな負荷抵抗をつないでも一定の電流が流れるので、いくらでも負荷の両端に発生する電圧（電位差）を大きくできます。実際にそのような理想電流源は存在しませんが、概念として理解してください。理想的ではない電流源をショートした場合でも、内部抵抗 r_1 が非常に大きいため、負荷抵抗が変わっても一定の電流 I が流れ続けようとしています。

交流信号の場合も、直流と同じように考えることができます。たとえば信号源となる D/A コンバータはデジタル信号の値に比例した電流を出力するものが多いですが、それをいったん数 $k\Omega$ の抵抗で受けて $1\sim 2V_{rms}$ の電圧信号に変換し、さらにコンデンサで直流成分をカットして送り出します。すると、ケーブルに微弱な電流（せいぜい $10\sim 100\mu A$ ほど）が流れ、途中の損失分を差し引いた電圧信号として再び受け側に発生します。これを「電圧伝送」といいます。かなり回りくどくて、しかも貧弱なことをやっているわけです。電圧のまま伝送しているように見えますが、実は途中で微弱な電流に変換してこっそりと送っているのです。このように、電圧伝送には根本的な問題があります。



ロー出しハイ受けの電圧伝送



ハイ出しロー受けの電流伝送

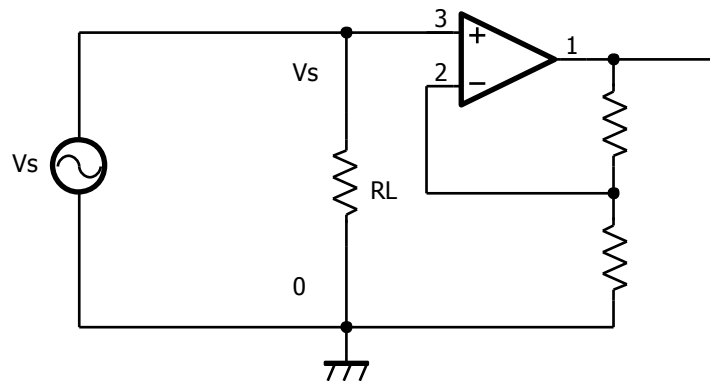
いっぽう、理想電流源とみなせる信号源から送り出された電流信号（ $1\sim 10mA$ ほど）を 0Ω の負荷（入力インピーダンス）につないだ場合、もちろん 0Ω なので受け側に電圧は発生しませんが、それでも電流は正確に伝送することができます。それは豆電球の $0V$ 側から乾電池への帰路と同じ理由です。これを「電流伝送」といいます。電圧伝送とは逆に、電流伝送ではハイ出しロー受けとなり、その場合には受け側に「電圧」は伝送されませんが、「電流」は伝送されます。つまり、電圧伝送と電流伝送の違いは、たんに送り出し側と受け側のインピーダンスが高いか低いかの違い、言い換えれば伝送される電流量の大小の違いにすぎません。理想電流源から豪快に電流信号を送り出して、入力インピーダンス 0Ω の電流入力アンプでそれを受ければ、ノイズに強い立派な電流伝送を実現できます。それを考えた

だけでも、よりよいオーディオシステムができる気がします。

入力インピーダンスが 0Ω のアンプ！？

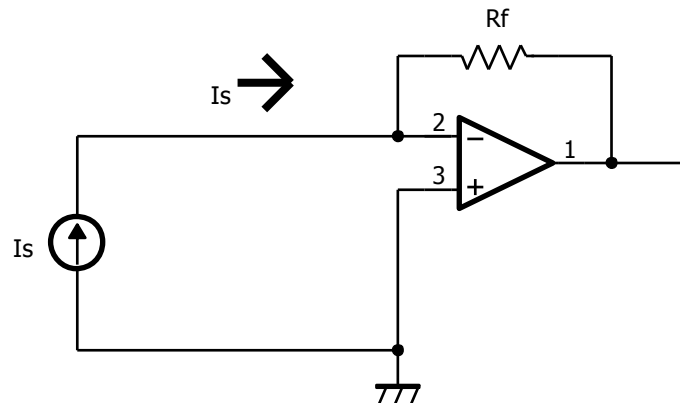
いよいよ問題の核心に迫ってきました。はたしてこのような入力インピーダンス 0Ω の電流入力アンプは存在するのでしょうか？

オペアンプには「バーチャル・ショート (virtual short)」という特性があります。これは、正常に動いているオペアンプの+入力と-入力は、つねに同じ電位になるというものです。これはいわゆるオペアンプ IC に限ったことではなく、フィードバックのかかったアンプでも同様です。これはオペアンプを理解するためにとっても重要な特性ですが、紙面の関係で詳しい説明は専門書を参考にしてください。一般的な電圧伝送のアンプを図式化すると、以下のようになります。



この図で、交流電圧源 V_s から送り出され負荷抵抗 R_L で生じた電圧信号は、オペアンプの+入力に接続されており、-入力にはフィードバックされた電圧が加えられています。これにより、フィードバック量に応じた増幅度のアンプができます。

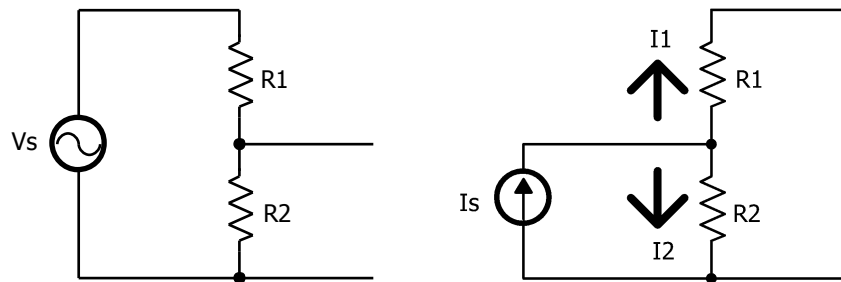
いっぽう、電流伝送を実現するには、アンプを下図のような構成にします。



交流電流源 I_s から送り出された電流信号は、-入力に直接加えられます。+入力側はグラウンドに接続されているので、バーチャル・ショートにより、-入力側も仮想的にグラウンドに落ちていて、アンプの入力インピーダンスはつねに 0Ω になります。このとき、アンプの増幅度は R_f だけで決まり、出力電圧は $-I_s \times R_f$ で得られます（-符号は反転の意味）。このようなアンプ (transimpedance amplifier) は、とくに電流・電圧変換器 (I-V converter) と呼ばれており、センサーの微弱な電流出力を電圧に変換するなど、計測機器などで多用されています。16ビット NOS-DAC、TDA1543 のデータシートにも記載（電流出力の箇所）されています。このような構成をオーディオシステム全般に応用しないのは、実にもったいないことです。なぜなら、電流伝送では信号のロスが原理的に発生せず、後述するローパスフィルタで説明するように、ケーブルの電気抵抗や静電容量による高域の減衰も起こらないからです。

ボリューム

オーディオシステムでは、音量調節をする機能がどこかにないと困ります。電圧伝送では、 R_1 と R_2 の抵抗による電圧分割（分圧）によって電圧信号の減衰量を決めます（左図）。受け側のアンプの入力にあるいわゆるボリュームのしくみは、このようになっています。



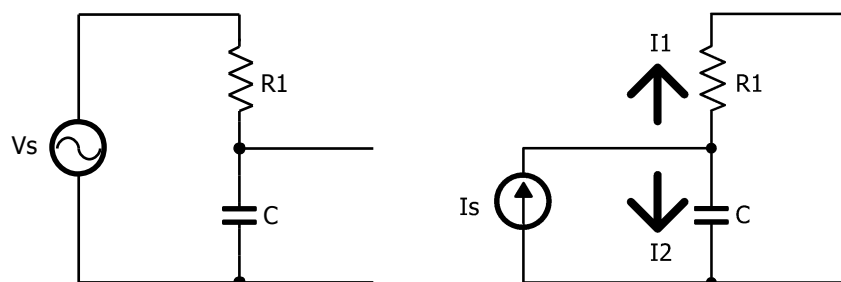
いっぽう電流伝送では、電流信号を送り出し側の電流源 I_s から受け側のアンプに送る電流 I_1 とグラウンド側に捨てる電流 I_2 に分岐させることで、音量調節をすることができます。右図の点線部分がバーチャル・ショートのため事実上 0Ω なので、電流源にたいして R_1 と R_2 が並列になります。これにより電流伝送では、これらの抵抗による電流分割（分流）によって電流信号の減衰量を決めます（右図）。この場合、正確に電流を分流しさえすればよいので、ボリューム接点の接触抵抗よりも十分に大きければ、 $50\sim 100\Omega$ ほどの可変抵抗でも正常に動作します。ある理由により、対数カーブ（Aタイプ）ではなく、直線カーブ（Bタイプ）でも十分に実用になります。ただし、2連ボリュームとなると、あまり低い抵抗値のものがなく、 $500\sim 1k\Omega$ のものを選ばばよいでしょう。「分圧」と「分流」では、ボリュームの接続が互いに逆になるのは、興味深いものがあります。

ローパスフィルタ

ローパスフィルタとは、低い周波数の信号をよく通し、高い周波数ほど信号が減衰するようなフィルタで、カットオフ周波数 f （低域の -3dB ）は

$$f = 1 / 2\pi CR$$

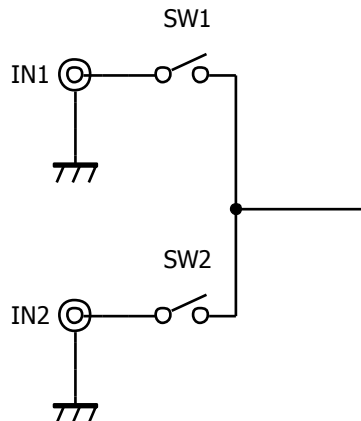
で求めることができます。電圧伝送の場合と電流伝送の場合とでは、 C と R のつながり方が異なりますが、間違いではありません。ボリュームのところでも述べたように、「分圧」と「分流」で説明することができます。 R_2 をそれぞれ C に置き換えると、 C は周波数が高いほどインピーダンスが下がりますから、結果としてローパスフィルタになります。



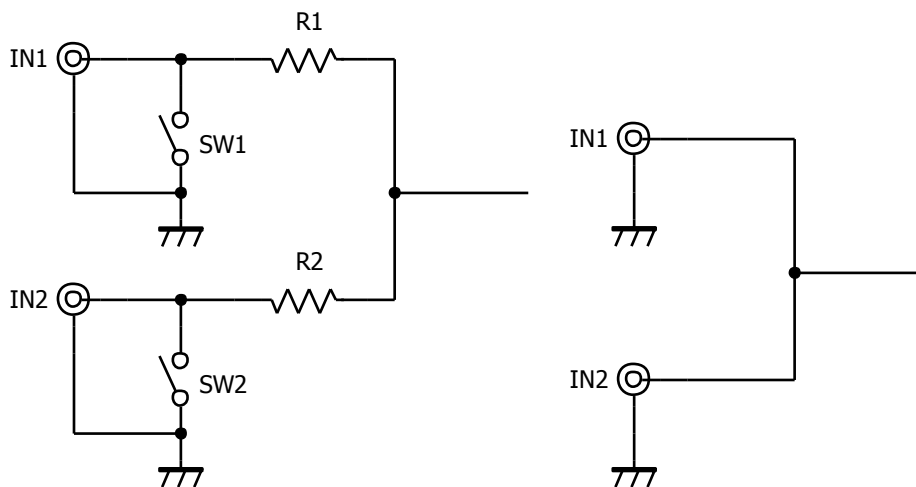
前に述べたバーチャル・ショートの状態により、電流伝送ではケーブルのホット側とコールド側に電位差がありません。そのためケーブルの静電容量を充放電することがないため、その影響を受けなくなります。また、ケーブルのインピーダンスが仮想的に 0Ω であるがゆえに、外部からの電磁気的な影響も受けにくくなります。実際にこのような電流伝送のシステムで際立っているのは、非常に静かなことで、CD に録音されたかすかな雑音すらも聴き取れてしまいます。

入力切り換え

オーディオシステムでは、とくにプリアンプなどで必要になるのが、入力切り換えをするためのいわゆる「セレクト」です。電圧伝送では、スイッチなどで信号経路をオン・オフするのが普通です。



いっぽう電流伝送では、分流の考え方で、使わない入力をグラウンドに落とすだけで可能です。その際、分流が正しくおこなわれるために、 R_1 や R_2 はスイッチのオン抵抗（数 $m\Omega$ ）にたいして十分に大きい抵抗を入れます（左図）。50~100 Ω でもいちおう動作しますが、その場合はグラウンドにつないでミュートした側のスイッチ（ SW_2 ）を通じて、選択している側の入力（ IN_1 ）が漏れ出るため、抵抗値をあまり小さくできません。かといって、抵抗値をあまり大きくすると、入力インピーダンスも大きくなって、アンプの利得が低下します。



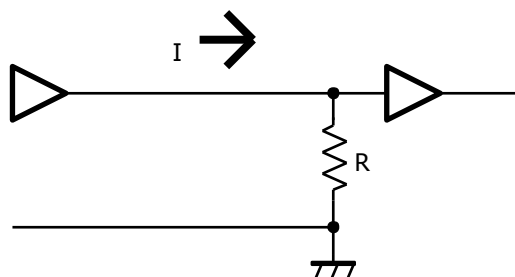
また、複数の信号源から同時に出力するのでなければ、電流源の出力インピーダンスが非常に大きいため、並列につないでおくだけでも互いに干渉しません（右図）。スイッチのオン抵抗さえ容認すれば、セレクトは電圧伝送と同じように信号経路をオン・オフするのが一番確実かもしれません。

電圧伝送と電流伝送の相互変換

新しいオーディオシステムである電流伝送方式の機器は、インタフェースの異なる従来の電圧伝送方式の機器と直接つなぐことができません。理想的にはすべての機器を電流伝送することが望ましいのですが、過渡的に両者の混在したシステムを組む場合は、次のような変換アダプタが必要です。といってもこれらは簡単なくみなので、自作も容易です。

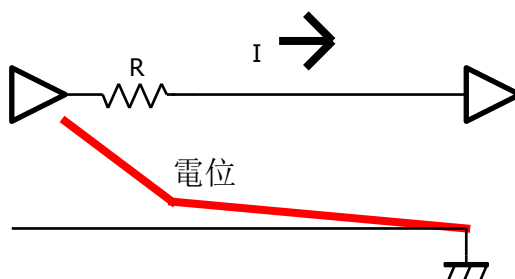
(1) 電流信号を電圧信号に変換するアダプタ

オームの法則により、抵抗に電流を流すと、その両端に電圧が発生します。そこで、電流伝送された電流信号を電圧入力 of 機器につなぐ場合は、受け側に近いところに、入力端子と並列に抵抗 R をつなぎます。送り出し側の出力電流にもよりますが、抵抗値は 470~2.2kΩ ほどです。受け側にプリアンプをつなぐとして、最大の電流信号で 1~2Vrms くらいの交流電圧が発生すれば、電圧伝送の場合と同じように使えます。これは実験的に決めるとよいでしょう。



(2) 電圧信号を電流信号に変換するアダプタ

乾電池と豆電球の例で見たように、負荷抵抗に電圧信号を加えた場合、抵抗のグラウンド側に至ると電圧降下により 0V になりますが、電流はどこでも同じです。そこで、電圧信号を電流入力の機器につなぐ場合は、送り出し側に近いところに、出力と直列に抵抗を挿入します。するとそこからうしろは、インピーダンスがほぼ 0Ω、電位もほぼ 0V になります。ケーブルやコネクタの電気抵抗があるため、完全に 0Ω にはできませんが、電流はロスしません。送り出し側の出力インピーダンスにもよりますが、やはり抵抗値 R は 470~2.2kΩ ほどです。これも実験的に決めるとよいでしょう。つなぐ相手の入力インピーダンスが 0Ω ですから、R をあまり小さくすると、送り出し側にとって重い負荷になります。一般にロー出しハイ受けのシステムでは、たいてい R = 600Ω でも駆動できるようになっています。出力インピーダンスと等しい抵抗値にすれば、最大の電力を伝送できます。また、機器によってはショートしても壊れないように、出力に低抵抗が入っている場合もあります。



あとがき

音楽信号をやりとりする上で原理的に優れた電流伝送を採り入れることで、従来のオーディオシステムから飛躍的に進歩しつつあります。複雑な機器がより簡素化するおかげで、音楽信号の純度が格段に向上しています。弊社でもすでにいろいろな機器を試作していますが、確かに電流伝送の音はいいです。もう元には戻れません。このようなシステムをお届けできるのも、そう遠くはありません。

【追記】有線の「電流伝送」を英語にすると、直訳では“current transmission”となりますが、無線通信と混同するため、“current-mode signaling” または “current-mode interconnection” という用語がよく使われています。あるいはたんに、“current modulation” (電流変調) とするのも一案です。