

[招待講演] 続・はじめての聴覚実験
—デジタルな世界に棲む人々に伝えたい、
音を鳴らし、測り、聴き比べるときのお約束—

平原 達也[†]

[†] 富山県立大学 工学部 〒939-0398 富山県射水市黒河 5180

E-mail: [†] hirahara@pu-toyama.ac.jp

あらまし 聴覚実験では信号波形をコンピュータ上でデジタル的に作成し、それを D/A 変換器でアナログ電圧信号に変換し、アナログ音響機器を用いてレベルを調整し、電気音響変換器を用いて音波に変換して被験者に聴かせる。「情報」化がすすむ昨今、アナログアンプやスピーカを作ったりした経験もなく、アナログ信号を扱うノウハウと理論を知らないまま、聴覚実験を行う「研究者」が増えている。その結果、あまり適切でない方法で音響機器や音信号が扱われることが増えつつあるように思う。本稿では、音を鳴らしたり、測ったり、聴き比べたりするときに配慮してほしい、アナログ信号を取り扱う上で注意すべきいくつかのことがらについて述べる。

キーワード 聴覚実験, アナログ信号, D/A 変換器, 増幅器, 電気音響変換器

Getting started in hearing experiment, part II
—Analogue knowledge of playing-back, measuring and
presenting sound stimuli for digital freaks—

Tatsuya HIRAHARA[†]

[†] Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University, 5180 Kurokawa, Imizu, Toyama 939-0398, Japan

E-mail: [†] hirahara@pu-toyama.ac.jp

Abstract Modern experimental system for psychological and physiological acoustics research includes a digital computer for generating stimuli signal waveform, a digital-to-analogue converter, analogue audio equipment for adjusting signal levels, and electro-acoustic transducers for presenting sound stimuli. In today's information-oriented society, most newcomers in psychological and physiological acoustics have little experience in building an audio amplifier or a speaker system at home and few opportunities of learning theories of analogue signal-handling equipment at college. As a result, improper handling of analogue signal and analogue equipment in conducting hearing experiments seems to be increasing. This article gives some key "analogue" knowledge of playing-back, measuring and presenting sound stimuli for digital freaks.

Keywords hearing experiment, analogue signal, DA converter, amplifier, electro-acoustic transducer

1. はじめに

コンパクトディスク(CD)が登場したのは1983年。10年後には国内のアナログレコード生産数は1983年の0.6%にまで減少し、アナログからデジタルへの世代交代が一気に進んだ。そのCDの生産数も近年は減少している。携帯型デジタルオーディオプレイヤーとインターネット配信が普及したからであろう。音楽だけではない。手紙も電話もカメラもビデオも、そしてテレビや本までもディジタル化されつつある。

このようなディジタル・メディア機器の実現は、コンピュータ技術とディジタル信号処理技術抜きには考えられず、それらについては学校でも十分に教えられている。曰く、コンピュータは万能である、ディジタ

ル信号処理は優れている、と。その一方で、ディジタル信号処理の対象となるアナログ信号の取り扱いについては一昔前ほど教えられる機会が少なくなり、また、気にされなくなりつつあるように思う。特に情報系の学科ではこの傾向が顕著であるように思う。その結果、あまり適切でない方法で音響機器や音信号が扱われることが増えつつあるように思う。ディジタル信号処理では、電圧や音圧といった物理量との対応関係に気をつかわなくても計算結果が出てくる。しかし、アナログ信号は物理現象に支配されているので、それを忘れると思わぬ落とし穴に陥る。

本稿は日本音響学会誌に執筆した「はじめての聴覚実験」^[1]の続編である。重複する部分も多々あるが、

ページ数制限により同解説で割愛した項目を加えて、音を鳴らしたり、測ったり、聴き比べたりするとき配慮してほしい、アナログ信号を取り扱う上で気をつけた方がよいことについて、しつこく述べる。

2. 聴覚実験システムと測定器

基本的な聴覚実験システムは、図1に示すような信号発生器、増幅器、電気音響変換器から成る。信号発生器はPCとD/A変換器で、その出力はアナログ電気信号である。増幅器は普通のオーディオアンプで、入出力はともにアナログ電気信号である。そして、電気音響変換器はイヤホンやラウドスピーカで、アナログ電気信号を空気の微小な圧力変化である音に換える。これらに加えて、音圧を測る計測器があれば一応の聴覚実験は実施できる。この他、低周波発振器とオシロスコープと電子電圧計とアナログフィルタがあれば、いろいろな事柄を確認できる。

結論から言えば、使用する機器の諸特性をあらかじめ把握し、信号レベルを管理し、機器を適切に接続しさえすれば、実験システムのハードウェアはどのような機種を用いてもかまわない。一方、計測器類はそれなりの信頼性が必要である。計測した物理量に信頼がおけないと、何を測っているのか分からなくなる。

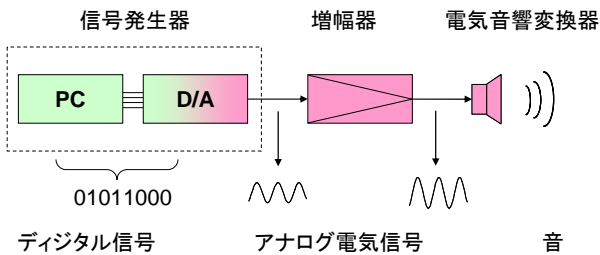


図1 基本的な聴覚実験システムの構成

3. コンピュータから音を出す

3.1. 信号波形をつくる

コンピュータ上で信号波形の離散数値データを作成することはデジタル領域の作業で、プログラムとサンプリング周波数(F_s)の設定さえ間違えなければよい。サンプリング定理は 信号に含まれる最も高い成分の周波数を F_{max} とすると、 $2 F_{max} < F_s$ を満たすサンプリング周波数を選べばよいと教えている。可聴音を対象とするのであれば $F_{max} = 20 \text{ kHz}$ とすればよいので、通常は $F_s = 44.1 \text{ kHz}$ あるいは 48 kHz を用いる。

図2は二つの F_s で作成した 16 kHz の正弦波信号波形である。 $F_s = 44.1$ および 48 kHz はとても正弦波とは思えない波形が描かれているが、これはサンプリングの仕業であり、見かけだけのものである。離散フーリエ変換 (DFT) してパワースペクトルを描くと当然 16

kHz だけに成分が認められる。デジタルの世界にひきこもっている場合はこれで何も問題は無い。

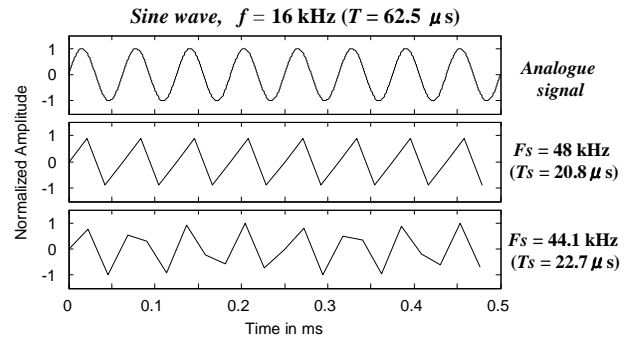


図2 サンプリング周波数による波形の違い

3.2. D/A 変換器

皆さんはどのような D/A 変換器をお使いだろうか。PC内蔵のオーディオ入出力デバイス? PCIオーディオボードや USB オーディオインターフェース?あるいは、計測用 D/A 変換器だろうか?

これらは何が違うのだろうか。基本的には大きな差異は無い。もちろん価格に応じて、使用している電子部品、つまり、D/A 変換 LSI、サンプリング・クロックの精度、オペアンプ、コンデンサ、抵抗等の電子部品、直流電源の精度などが異なっている。音楽を楽しむのであれば、何を使ってもよいと思う。しかし、これらを聴覚実験システムの D/A 変換器として用いる場合には、D/A 変換器に内蔵されているデジタル LPF の特性と、出力の周波数範囲には注意する必要がある。

昔はマルチビット型 D/A 変換器が用いられていたもので、アンチ・エイリアジングおよび信号の補間を行うための急峻な減衰特性を持つアナログ LPF を外部接続することが必須であった。一方、最近の D/A 変換器はほとんど $\Delta \Sigma$ 型の DA 変換 LSI を用いている。この LSI では、まず、デジタル信号をオーバーサンプリングして高い F_s の信号に変換するが、その際にデジタル LPF で補間処理が行われる。その後、高い F_s の信号を $\Delta \Sigma$ 変調器で 1 ビットのパルス密度変調信号に変換し、それをアナログ電圧信号に変換して、緩い減衰特性を持つアナログ LPF を通してアナログ信号を出力する。

アップサンプリング時の補間処理を行うデジタル LPF は、通過帯域の平坦性を確保するためにナイキスト周波数($F_s/2$) でもあまり減衰させていないものや、直線位相性を重視したものや、応答の因果性(立ち上がり)を重視したものなど、LSI によって異なる。これについては使用前に十分に確認する必要がある^[2]。また、フルビットのデジタル信号を出力すると、補間処理時に波形のピークがクリップすることもある^[3]。

計測用 D/A 変換器は直流 (DC) から $F_s/2$ までの周

波数成分を出力するのに対して、「オーディオ」入出力デバイスは数 Hz 以下の超低周波成分は出せない。例えば USB オーディオインタフェース (Edirol, UA-101) の D/A 変換 LSI と出力バッファアンプの間には、100 μ F の電解コンデンサ入っていて、このコンデンサとポストアンプの入力抵抗とで RC 微分回路を構成している。そのために、UA-101 で 1 Hz の方形波を出力すると、その D/A 変換 LSI の出力では 1 Hz の方形波電圧が観測されるが、出力端子にはその微分波形に相当する電圧が現れる (図 3)。

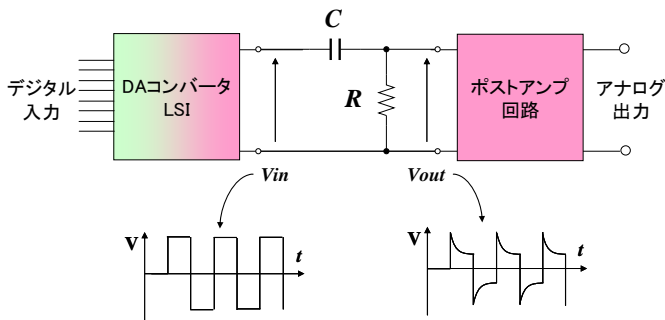


図 3 オーディオインタフェース装置の出力回路

3.3. 入出力インピーダンスと信号レベルにご用心

電気回路で学んだことと思うが、電力の伝送においては、インピーダンスの整合が伝送効率を上げるために必要である。しかし、電圧信号を伝える場合には、インピーダンス整合は必ずしも必要なく、送り (出力) はローインピーダンス、受け (入力) はハイインピーダンスが基本となる。

出力インピーダンスが低いということは大きな出力電流を取り出せるということ、出力インピーダンスが高いということは出力電流をあまり取り出せないということである。低い高いは相対的なものである。高出力インピーダンスの端子に低インピーダンスの負荷を接続すると、大きな電流が負荷に流れこもうとするため、余裕の無い出力アンプは内部抵抗による電圧降下によって出力電圧が低下するか、規定以上の電流が流れるとトランジスタが壊れる。

PC のオーディオ出力端子の出力インピーダンスは 10~20 k Ω 、「プロ仕様」のオーディオインタフェース装置では 600 Ω 、計測用 D/A 変換器では 75 Ω だったり 50 Ω だったりする。使用している機器の筐体を開けて入出力回路を探し出し、そこに接続している抵抗値を読めば、入出力インピーダンスは把握できる。

PC のオーディオ出力端子の出力電圧は、アンプが内蔵されたスピーカや民生用オーディオ機器に接続することを想定しているために、数百 mVrms 程度である。「プロ仕様」のオーディオインタフェース装置では数 Vrms、計測用 D/A 変換器では ± 2.56 Vp-p などである。

オーディオインタフェース装置や計測用 D/A 変換器を用いる場合、かなり大きな信号電圧が出力されていることは意識すべきである。

UA-101 とオーディオアンプを接続して、最小可聴閾を測るシステムを組んでいたときのことである。正弦波信号を D/A 変換した信号をアンプに入力したところ出力音が歪んでしまい、学生らが困り果てていた。オシロスコープでアンプのヘッドホン端子に現れる信号の電圧を観測してみると、波形の山がつぶれて平坦になっていた。フルビットの正弦波信号に対しては、UA-101 の出力端子には 2.3 Vrms (6.6 Vp-p) もの正弦波信号電圧が出力される。この電圧は当該アンプにとっては大きすぎ、クリップしていたのである。

3.4. さまざまな信号レベル表示

電圧の単位は V であるが、交流電圧ではその実効値 Vrms を表している。rms は二乗平均 (root mean square) の略号である。一方、p-p は peak-to-peak の略号で、信号波形の尖頭値 (せんとうち) を意味する。正弦波信号に対しては $Vp-p = 2\sqrt{2} \times Vrms$ 、ガウスノイズに対しては $Vp-p = 6.6 \times Vrms$ である。

音響信号を扱う場合、0.775 Vrms を基準にした dBu (あるいは dBv) や、1 Vrms を基準とした dBV (あるいは dBs) という信号レベルの単位もよく用いられる。これらの dB は負荷インピーダンスが規定されていない。これに対して、dBm は 600 Ω の負荷に 1 mW を消費する電力を基準とした単位である。600 Ω はアナログ電話回線のインピーダンスである。負荷が 600 Ω の場合に限られるが、電圧に換算すると 0 dBm = 0.775 Vrms = 0 dBu である。なお、高周波な人々が dBm と言った場合は 50 Ω の負荷に対する 1 mW の電力を基準としているので注意が必要である。また、dB μ は 75 Ω を負荷とした場合である。プロ用音響機器の信号レベルモニターとして用いられる VU (volume unit) は、0 VU = +4 dBm とした dB 値である。VU メータはアナログ電話ラインの信号レベルをモニターするために開発されたものである。これらを表 1 にまとめて示す。

表 1 交流信号レベルを表すさまざまな記号

単位	基準量	Z	補足
dBV	1 Vrms	規定無し	
dBs	1 Vrms	規定無し	dBV と全く同じ
dBu	0.775 Vrms	規定無し	Z=47 k Ω 等
dBv	0.775 Vrms	規定無し	dBu と全く同じ
dBm	1 mW	600 Ω	0 dBm= 0.775 Vrms
VU	+4 dBm	600 Ω	0 VU = +4 dBm
dBm	1 mW	50 Ω	高周波系の場合
dB μ	1 μ W	75 Ω	高周波系の場合

3.5. 音響信号増幅器(オーディオアンプ)

D/A 変換器から出力されたアナログ信号電圧は増幅器によって電力増幅する。ラウドスピーカを鳴らす場合は、ボイスコイルに電流を流して動かさねばならないため電力が必要である。もっとも、よほどの低能率スピーカで無い限り、数 W もあれば 90 dB 以上の音圧が出る。一方、イヤホンは 1 mW も入力すれば 90 dB 以上の音圧が出るので、ヘッドホンアンプで十分である。

音響信号の増幅器は増幅素子の直線領域に動作点を置いた A 級増幅器に限る、と確信している。問題は発熱である。なお、市販アンプではボリュームのバックラッシュと左右チャンネルの利得差が気になる。ただ、最近の $\Delta\Sigma$ 方式の 1bit デジタルアンプと呼ばれる D 級増幅器も捨てたものではないかもしれない。

図 4 はパワーオペアンプ (TEA2025L) を使用したヘッドホンアンプ(audiotechnica, AT-HA20)とデジタルアンプ(SONY, TA-F501)の、左右チャンネルの利得差を調べた結果の一例である。同図より、AT-HA20 を用いて両耳聴の実験をする場合には左右のレベル補正が必要な場合もあることがわかる。

図 5 は低歪み発振器 (Kenwood, AG-204D) から 100 mV (-20 dBV) の 1 kHz の正弦波信号電圧を AT-HA2 と TA-F501 に入力したときのイヤホン端子での出力信号スペクトルをオーディオアナライザ(Brüel & Kjær, 3560C)で測定した結果である。増幅器の電圧利得はいずれも 0 dB とした。

発振器の出力には 60 Hz と 180 Hz のハムノイズ成分 (黒↓) と、2 kHz と 3 kHz の高調波成分 (赤↓) とが含まれているが、ハムノイズのレベルは-120 dBV 以下、高調波のレベルは基本波の-70 dB 以下で十分低い。AT-HA20 の出力には 120 Hz のハムノイズ成分が出現しているが、全体的にノイズフロアは-120 dBV 程度と低い。TA-F501 の出力にはハムノイズ成分は皆無だが、ノイズフロアは-110 dBV 程度で、20 kHz 辺りのノイズレベルがやや高い。いずれのアンプもヘッドホン(HDA200)で聴いた限り、極めて静かであった。

3.6. 抵抗減衰器(アッテネータ)

最近はあまり使用されることがなくなったが、アッテネータは信号レベルを増減するとき便利な装置である。アンプについているボリューム (variable-ohm) はその名のとおり可変抵抗器を用いて連続的に信号レベルを変化させるものだが、アッテネータは減衰量をステップ状 (デジタル的) に変えるものである。

アッテネータには高周波用のものと低周波用のものがある。回路としては π 型か T 型の抵抗ネットワークと同じである。何が違うかという、高周波用アッテネータはシールドを厳重にして浮遊容量による信号の通り抜けを少なくしているとともに、入出力インピ

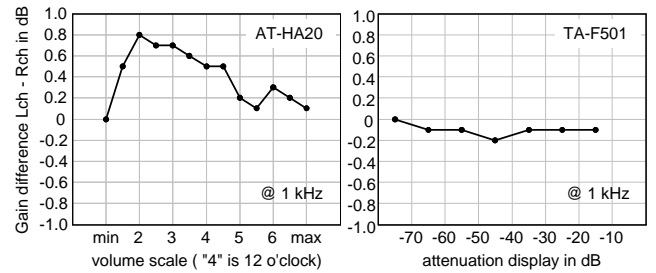


図 4 2 種のアンプの LR チャンネルの電圧利得差 L/R [dB]。AT-HA20 の横軸は音量調整ボリュームの目盛り、TA-F501 の横軸は表示された減衰量 [dB]。

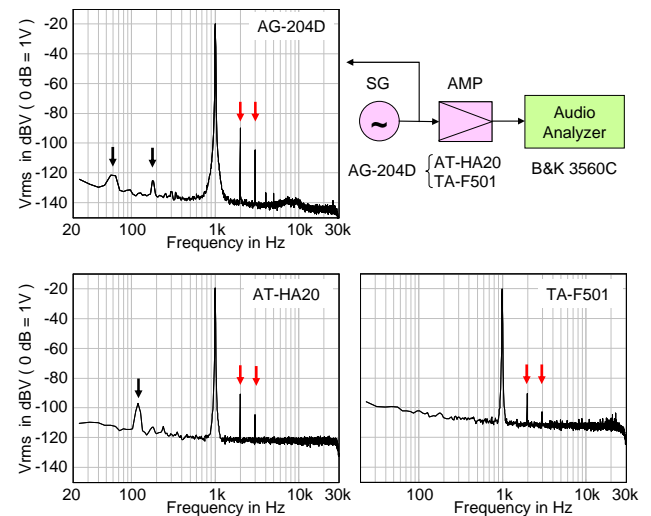


図 5 低周波発振器(AG-204D)から 1 kHz の信号(左上)を入力したときの 2 種のアンプのイヤホン端子における出力信号のスペクトル。縦軸は電圧値 dBV。

ーダンスが 50 Ω あるいは 75 Ω に設定されていることである。低周波用のものは入出力インピーダンスが 600 Ω である。50/75 Ω は同軸ケーブルのインピーダンスである。ちなみに、50 Ω は芯線と円筒状の外部導体の間に挟む誘電体としてポリエチレンを用いた場合に同軸ケーブルが最低損失になるインピーダンス、75 Ω は空気絶縁の同軸ケーブルが最低損失になるインピーダンスである。

その昔、インピーダンス 50 Ω の高周波用アッテネータを D/A 変換器用 LPF とオーディオアンプの間に挿入したところ、表示されたとおりの減衰量が得られなくて往生したことがある。抵抗を π 型あるいは T 型に接続したアッテネータ回路は、出力に公称インピーダンスの負荷が接続されたときに所定の減衰量が得られるようになっている。例えば、50 Ω で設計された -3 dB の π 型アッテネータに出力インピーダンス 10 k Ω の機器を接続すると、その減衰量は 0.5 dB に下がる(図 6)。

聴覚実験システムを提供している Tucker-Davis Technologies (TDT) 社の PA5 というアッテネータは、デジタル・ポテンショメータと呼ばれる可変抵抗 LSI

(AD7376) を利用している。そして、入出力にはオペアンプ(OPA134UA)によるバッファアンプが入っており、入力インピーダンスは 10 kΩ、出力インピーダンスは 10 Ω に設定されている (図 7)。そのため、このアッテネータは概ねオーディオ機器と同じような使い方ができる。しかしながら、過去の失敗がトラウマとして残る筆者は、機器に表示された減衰量を信じない。アッテネータを利用する場合には使用する機器を接続した状態での減衰量を必ず確認することになっている。

3.7. 不平衡伝送と平衡伝送

不平衡 (アンバランス) 伝送は二線式の伝送方式で、オーディオ機器の接続に標準的に用いられている。不平衡伝送では信号伝送ラインの片側 (COLD) を接地 (GND) するため、外来ノイズはノルマル・モードとして HOT ラインとアース間に生じる (図 8)。強力な電磁雑音源が近くに無い場合、数 m の距離を結ぶのであれば、シールド線による不平衡伝送で全く問題ない。

一方、平衡 (バランス) 伝送は三線式の伝送方式で、長い距離ケーブルを引き回すときに誘導ノイズが信号ラインに載ることを防げるため、放送や PA (Public Address) 業界では標準的に利用されている。もっとも、最近は音響機器間を光ケーブルや LAN ケーブルで結んでデジタル伝送する場合が増えてきたと聞く。

平衡伝送の原理は単純である。送信側で正逆ふたつの位相の信号を作り、それらをふたつ (HOT と COLD) の信号ラインで送り、受信側で片側を位相反転して加算して元の信号を再現する。両信号ラインは共通のアースライン (GND) を用いるので三線となる。外来ノイズは二つの信号ラインとアース間にそれぞれ生じるので (コモン・モード)、受信側で片側を位相反転して加算することによりノイズ成分は無くなる (図 8)。

不平衡ライン用のコネクタとしては、ミニジャック、TS フォーンジャック (モノラル標準ジャック)、RCA ピンコネクタ、BNC コネクタなどが用いられる。一方、平衡ライン用のコネクタとしては、XLR コネクタ (キャノンコネクタ) や TRS フォーンジャックが用いられる (図 9)。なお、T は tip、S は sleeve、R は ring の頭文字、RCA は Radio Corporation of America という今は無き電気機器メーカー名、BNC は Baby Neill Connector の略である。Neil はこの小型の高周波用コネクタを開発した AT&T ベル研究所の Paul Neil 氏に由来する。

同じ形状のコネクタがついているケーブルでないと接続してはいけないのではないかと不安がる人も少なくない。しかし、音響信号は 20 kHz 以下の低周波信号なので、何も気にすることは無い。信号ラインを電気的につなげばよいだけである。また、平衡入出力端子に不平衡ケーブルを接続することも可能である。平衡入力端子では、XLR コネクタの 1 番 (COLD) と

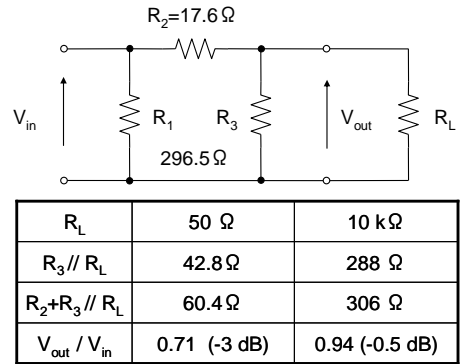


図 6 インピーダンス 50 Ω で設計された π 形アッテネータを 50 Ω および 10 kΩ で終端した場合の減衰量



図 7 TDT 社のアッテネータ (PA5) の構成

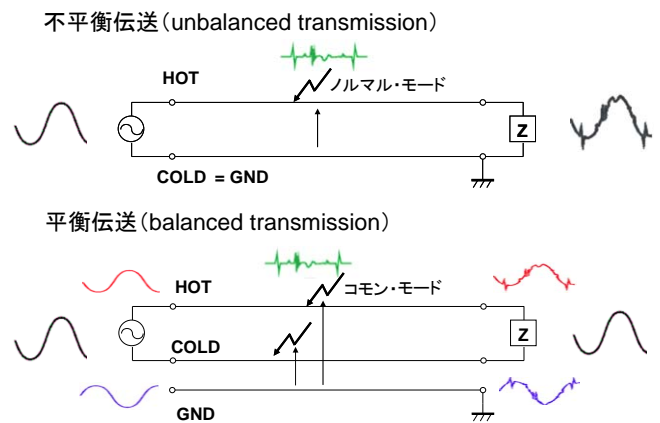


図 8 平衡 / 不平衡伝送線路に混入するノイズ

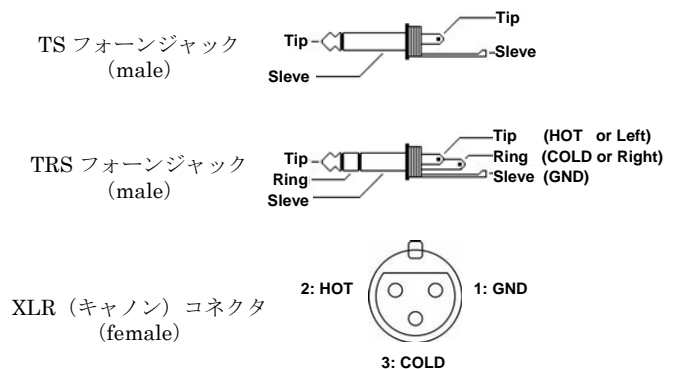


図 9 TS/TRS フォーンジャックと XLR コネクタ

3 番 (GND) を接続し、それと 2 番 (HOT) との間に不平衡信号を入れればよい。一方、平衡出力端子に不平衡ラインを接続することは、内部の電子回路によっては問題が生じる場合があるので、ケース・バイ・ケースである。

3.8. たかがノイズ、されどノイズ

聴覚実験で問題となるノイズは二種類ある。一つは広帯域ノイズで、アンプのゲインを上げるとシャーという音として聴こえる。これは系のノイズフロアの問題であり、静かな音響機器を用いればよい。もう一つはハムノイズ(hum noise)で、ブーンという低周波音として聴こえる。これは機器に電源を供給している商用交流電源周波数である 50/60 Hz の第二高調波(100/120 Hz)、第三高調波(150/180 Hz)などの成分が信号ラインに混入しているためである。このハムノイズの有無は聴けばすぐに分る。もっとも、常にブーンと鳴っている実験系を使っている場合、おかしい状態であることに全く気づかない(某所で現実にありました)。

ハムノイズの成因はさまざまで、その対処方法もケース・バイ・ケースである。例えば、電源プラグのホット側とアース側を区別して挿す、複数機器の金属筐体の間を接続する、あるいは外す、コネクタ部分の接触を確認する、高インピーダンスの小信号ラインを電源ケーブルや AC アダプタから離す、などによって解決することもある。UA-101 の電源プラグを差し替えると魔法のようにハムノイズが消えたことがある。

私たちが使用している単相三線式の商用交流電源回路を図 10 に示す。正しく結線されている電源コンセントでは、少し長めの細長い差しこみ口がアース側である。なお、電源コンセントのアースはあくまでも感電防止の保安アースで、第一種アース等ではない。

録音系では信号レベルが低く高入力インピーダンスで高ゲインのマイクアンプを利用するので、さまざまな雑音が混入しやすい条件が整っている。場合によっては、全ての機器を電池駆動にするなど本質的な対策が必要なこともある。現在、筆者の研究室では、ある高級マイクプリアンプを実験室内に設置するとノイズが混入して困っている。電磁誘導性のノイズのようで、磁気方式のモーションセンサの送信機の傍に持っていたときも同様のノイズが混入する。音響測定を含めた音響信号録音系の諸問題については稿を改めたい。

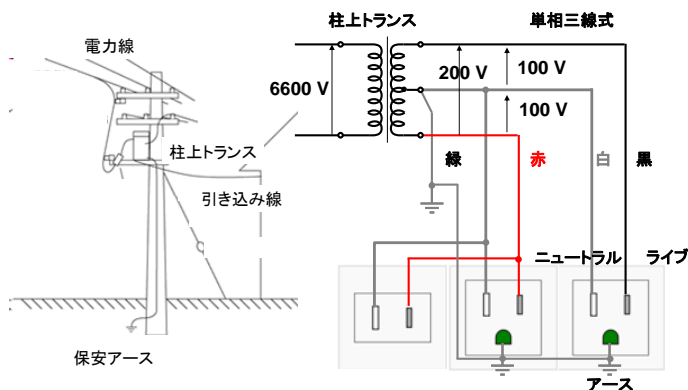


図 10 日本の単相三線式商用電源回路の一例

4. 電気音響変換器

D/A 変換器や増幅器は電子回路をベースとする機器であるのに対して、電気音響変換器には機械的な可動部分があり、聴覚実験系のボトルネックである。

閉空間に音圧を発生させるイヤホンやヘッドホンは、実耳への装着状態によってその周波数特性が大きく変わる。その結果、広帯域の刺激音を扱う場合、デジタル信号の波形やスペクトルと実耳に呈示した音の波形やスペクトルとが同じになることは稀である。このことを承知の上で実験をデザインすることが重要であるし、使用するイヤホンやヘッドホンの実耳特性をあらかじめ把握しておくことは必須と考える。イヤホンの較正に利用される IEC60711 カップラの適用周波数は 100~8 kHz で、これを組みこんだ HATS (Brüel & Kjaer, 4128C)ではイヤホンの形式によらず 6~10 kHz のカップラ応答は実耳応答より最大 10 dB も大きい^[4]。

5. おわりに

筆者が工学部電子工学科 3 年生のとき、同級生の半数以上がアンプすら作った経験が無かった。その事実を知った電子計測を講義していた若手教授は仰天し、翌週の講義は一石トランジスタアンプ製作実習になった。30 余年を経た今、状況はさらに深刻化している。

音を扱う聴覚実験を行っているといろいろな問題に出会う。問題の原因の多くはたわいも無いことなので解決は容易である。しかし、デジタル機器に満ち溢れる世界で育ってきた学生諸君らにとっては、必ずしもそうでもないようである。アナログ系に問題があることに気づかないまま、あるいは、問題があることに気づいてもそれを無視して実験を進めたり、問題解決の糸口すらつかめずに困り果ててしまう。

問題を無視したまま、あるいは、問題に気がつかずに実験を進められたり、困り果てて実験を投げ出されたりすると後始末が大変なので、アナログ（アナクロ？）な筆者は、マメに実験室に足を運んでアナログ信号が適切に扱われているかどうかを見守ろうと思う。

文 献

- [1] 平原達也, “はじめての聴覚実験 — デジタルな世界に棲む人々に伝えたい、音を鳴らし、測り、聴き比べるときのお約束 —,” 音響学会誌 65(2), 81-86, (2009).
- [2] 金田豊, “はじめての音響信号処理—デジタル録音と補間の話—,” 音響学会誌 65(10), 531-536, (2009).
- [3] 志賀正徳, 金田豊, “オーディオ・インタフェースの DA 変換器におけるクリッピング歪について,” 音響学会講演論文集, 653-654, (2010.09).
- [4] 平原達也, 青山裕樹, 大谷真, “イヤホンの音響特性と IEC60711 カップラの問題点,” 音響学会誌 66(2), 45-55, (2010).