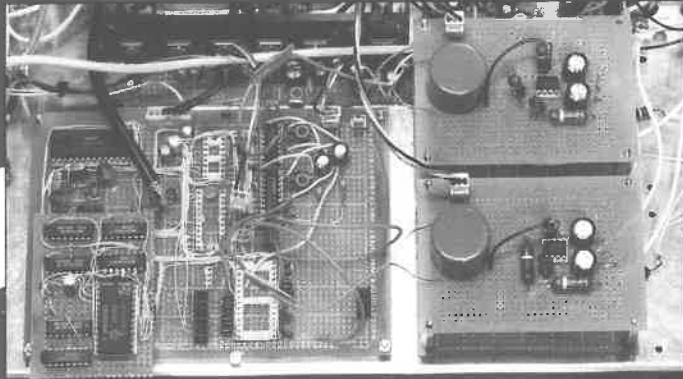


「なぜI/Vコンバータを使わなければならないのか」の答を出す…

# トランス式I/Vコンバータと オペアンプ式I/Vコンバータの実験



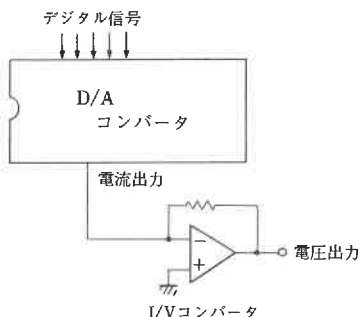
別府俊幸

## はじめに

そもそも今回の実験を思いついたのは、D/A アンプ<sup>1)</sup>を作る前、「なぜ I/V コンバータを使わなければならないのか」疑問に思ったからです (第1図)。

I/V コンバータなどと大それた名前が付いていますが、オペアンプ1個で構成できますし、動作原理とか安定性とか製作困難とかの不安はありませんでした。しかし、それまでの「アナログ」オーディオでは見たこともない回路です。果して「音」がどうか、特性が良くても、音の悪いアンプも山ほどあります。いきなり未知の回路は使いたくありません。通常の電圧増幅回路でうまく動作しないのでしょうか？

そうこう考えているうちに、「D/A の出力電流をトランスで昇圧してもよ



〈第1図〉 D/A コンバータの電流出力は I/V コンバータによって電圧に変換される。

いだろう」と思いつきました。ちょうど MC トランスと同じ方法です。CD プレーヤの出力に、トランスを入れると良いとの話もあります。それなら、D/A の出力に使えばさらによいのでは。それに D/A の出力をトランスで受けられれば、デジタルとアナログの電気的な分離も可能になるのではないかと、トランスによるハイカットフィルタも期待できるのでは、などメリットもありそうです。

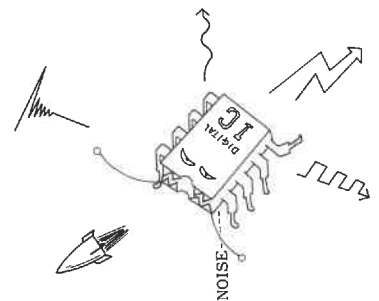
などと考えてはいたのですが、その後いろいろやっているうちに I/V は優れた方法に思えてきましたし、トランスによる電気的な分離も完全ではないことがわかってきました。結局、実験を始めるまでに1年半が経過したのですが、いざ実験してみると意外な方向に話が進んでしまいました。それでは、後半、話がとんでもない方向へと進んでしまいますが、私が考えた軌跡をたどって話を進めましょう。

## デジタルとアナログの分離

トランスを使用すると、デジタルとアナログの電気的な分離が可能になりそうです。ただ、CD プレーヤの出力にトランスを積んだだけで、D と A が分離されるわけではありません。CD の

中にもアナログ回路は存在しています。

確かに、デジタル回路は凶悪なノイズ源です。そして、スイッチング動作の高速化と素子数の増加にともない、ノイズは広帯域化、ノイズ・レベルもまた増大しています。デジタル IC は、スイッチングして信号ラインにパルスが発生すると同時に、電源、GND ライン、そして空中にもノイズを放出します。水晶発振子は常に発振動作を続け、



〈第2図〉 デジタル回路はノイズ源である。

その動きに同期して多くの IC がノイズをばらまきます。そして、これらのノイズがアナログ系に影響を及ぼし、音質を損ねていることは十分予想されます (第2図)。

アナログとデジタルを分離できれば、デジタル系のノイズをアナログ系に伝えないことが可能では、とはだれしも考えることでしょう。コンピュータエンジニア達は (オーディオエンジ

ニアが苦しめられる以前から), アナログ回路をノイズから守ろうと(コンピュータの中にも D/A, A/D は存在する), あらゆる手だてを試みてきました。A/D, D/A に別電源を用意したり, フォトカプラを介したり, 遠くに配置したり, シールドしたりと。

### 本当に分離できるのか

それでは, デジタルとアナログの分離は本当に可能なのでしょうか。

分離方法としては,

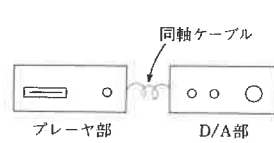
- (a) プレーヤ部と D/A 部を別々のケースに納める。
- (b) その間を光ファイバで結ぶ。
- (c) ケースの中でシールドする。
- (d) アナログ系とデジタル系の GND をフォトカプラで切り離す。

などの方法が考えられ, 実施され, 宣伝されています(第3図)。

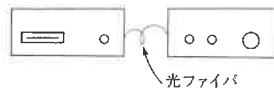
しかし, (a)の方法が全くの見かけ倒しであることは, 実際に D/A アンプを組み立ててみれば明らかです。D/A 部にもデジタル回路が共存しているのですから, また, (b)法も同様の理由で D と A は分離されてはいません。「光ファイバは, 同軸ケーブルが空中に輻射するノイズがなくなるだけ有利だ」との反論もあるかと思いますが, それでしたら「ケーブルに銅箔テープを巻き, 銅管の中にでも入れれば良くなるでしょう」と言い返しておきます。

(c)法のように, ケースの中をブロックに分け, シールド板で囲ってしまえばデジタルノイズの放出を抑えられそうにも思います。ただし, そのための条件としてデジタル系とアナログ系が完全に分けられていること, 電源系も別であり, GND も別であることが必要です。もっとも, シールド板一枚でも, 空中を飛ぶノイズを減らすだけの効果はあります。

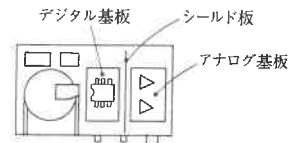
(d)法も, 単独での効果はほとんど望めないでしょう。某氏の実験では, 単にフォトカプラを追加しただけでは, 音は全く変わらないとのこと。やはり電源の分離, シールドなどの方法



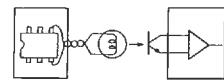
(a) プレーヤ部と D/A 部が別々の箱に収められている



(b) ケース間を光ファイバで結ぶ

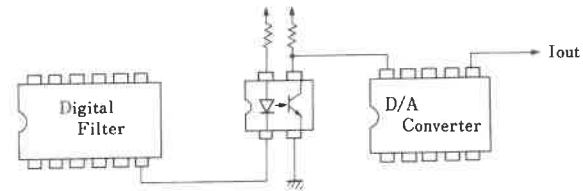


(c) シールドする



(d) 光カプラを使用する

〈第3図〉 デジタルとアナログの分離。本当に分離されているのか?



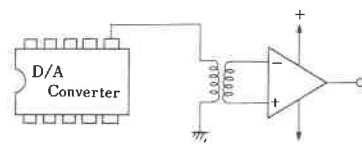
〈第4図〉 デジタルフィルタ出力と D/A コンバータの間をフォトカプラで分離する? と併用しない限り, メリットは得られないのでしょうか。

では本題です。デジタルとアナログを完全に分離することは可能でしょうか。

しかし, この命題を考える前に, どこまでがデジタルでどこからがアナログなのかをはっきりさせなければなりません。(ここでの「デジタル信号」とは, デジタル IC によって扱われる 2 値化されたコードと限定します)。

### どこまでがデジタルでどこからがアナログか

第4図は, 前述の (d) 法です。ここではデジタルフィルタの出力をフォトカプラに通し, D/A コンバータ(ICチップのこと)に供給しています。フォトカプラの前と後を別々の電源で供給すれば, 電気的には D&A の分離が実現できているように思えます。しかし フォトカプラの出力は, 未だデジタル信号です。デジタル信号をアナログ信



〈第5図〉 D/A コンバータの出力と I/V コンバータの間をトランスで分離する?

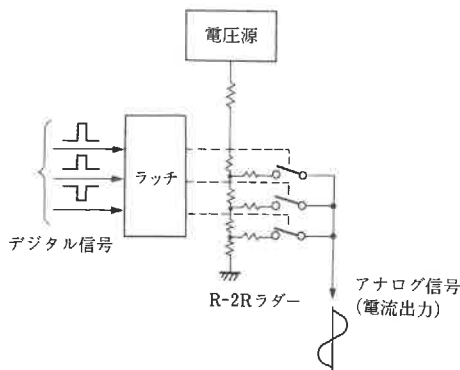
号に変換するパーツが D/A でしょうか?

では第5図です。ここでは D/A の出力をトランスを用いて電氣的に絶縁し, 後続のアンプに伝えています。しかし, この方法も, トランスに入力される信号が既にアナログである以上, D&A 分離は実現されているとは言えません。

それでは D と A の接点はどこにあるのでしょうか。第6図を考えてみましょう。第6図は D/A コンバータのブロックダイアグラムです。確かに入力される信号はデジタルです。そして出力された電流はアナログに違いありません。この中のどこかで, デジタルがアナログへと変身を遂げているのです。

それでは R-2R ラダーネットワークを流れる電流はアナログでしょうかデジタルでしょうか。

ラダーネットワークの基準電源は, 一定の電流を供給し続けるだけですが, ここにノイズが乗ればアナログ電流の出力も汚染され, また実際に, 基準電源そのものが音に影響を与えることもわかっています。つまり「アナログ(的性質を持つ)」と考えられます。同様に R-2R ラダーの中を流れる電流も, 2 値化されてはいますが, ラダー抵抗で



〈第6図〉D/Aコンバータのブロックダイアグラム。どこまでがデジタルで、どこからがアナログだろうか。

発生する雑音は出力にそのまま現れる事など、「アナログ」と見なせます。

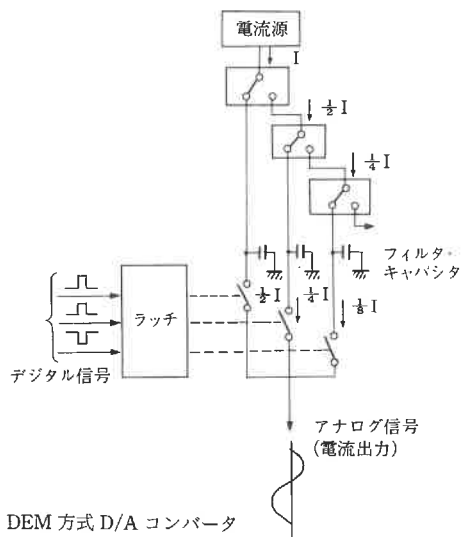
一方、D/Aに入力されたデジタル信号は、石の中でシリアル-パラレル変換されようとラッチされようと「デジタル」に間違いありません。なぜならこの信号が0Vであろうと、0.1Vであろうと、「L」レベルである限り、アナログ出力の大きさには影響ないからです。こう考えると、ラダーネットワークのスイッチを切り換える直前までが「デジタル」です。そして、そのスイッチを流れる電流以降が「アナログ」となります。以上のように、ラダーネットワークの切り換えスイッチこそがD/Aの接点と言えます。

同様にDEM方式も(第7図)、電流合成のスイッチを駆動する側までが「デジタル」であり、基準電流、DEMディバイダ、スイッチを流れる電流などは恐ろしいことに「アナログ」となります。そう考えれば、TDA 1541 AのDEMフィルタ用のキャパシタを交換すると音が変わることも納得できます。

けれども、もしもこう考えれば、基準電源だけでなく、電流スイッチの性状、R-2Rラダー抵抗、DEMディバイダのクロック周波数、DEMフィルタの抵抗、全てが音に影響してしまっではありませんか! とすると……。

### 完全な分離は不可能だ

それではスイッチ部分で電氣的に分離することは、実際問題として、可能

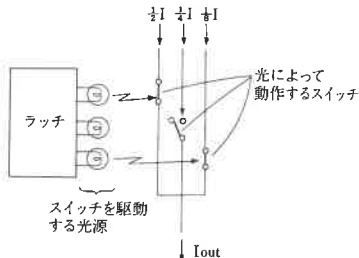


〈第7図〉DEM方式D/Aコンバータ

なのでしょう。

唯一可能なのは、第8図のようにフォトスイッチによってラダーを切り換える方法でしょう。機械式接点は応答速度の点で無理でしょうから、光が接点(TrもしくはFET)をドライブするものとします。フォトスイッチであれば、光源と受光側が別々のシリコン基板にあるとか、十分な距離が保たれているとかの条件はつきますが、分離は可能となるでしょう。しかし、フォトスイッチの応答速度、フォトリジスタのon抵抗とoff抵抗値および値のばらつき、温度特性など、現在の技術水準では16ビットの精度を実現することは不可能でしょう。

もちろんメーカーがこのような構造のD/Aコンバータに取り組むとは思えませんし、アマチュアがディスクリットで構成することも、私としては思いとどまるよう説得するつもりです。



〈第8図〉本物のデジタルとアナログの分離。これ以外の方法による、デジタルとアナログの分離は偽物である。

つまり、受動的な結果としてですが電氣的に完全な分離は不可能と考えています。D/Aの入口のフォトカプラも、D/Aの出力のトランスも、あくまでも疑似的な分離にしか過ぎません。

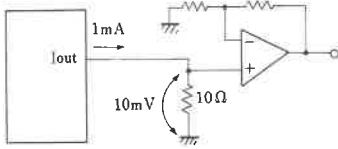
でも、デジタルとアナログの分離は、本当に必要なのでしょうか?

### I/Vコンバータと電圧増幅回路

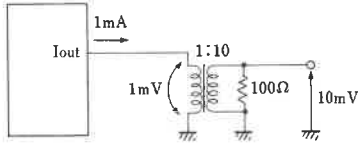
次にI/Vコンバータについて考えてみます。一般に、オーディオで用いられるアンプは、入力電圧を増幅し、電圧を出力する電圧増幅器です。しかし、D/Aコンバータ(いわゆる1ビットは除く)の出力は電流であり、なんらかの方法で電圧に変換しなければなりません。

しかし、なにもI/Vを用いなくても、小さな抵抗や、昇圧トランスでも電流電圧は変換できそうです(第9図)。いまPCM56Pを用いれば、最大出力電流は $\pm 1\text{ mA}$ で、出力インピーダンスは約 $1.2\text{ k}\Omega$ です。これを $10\Omega$ で終端すれば $\pm 10\text{ mV}$ 、約 $7\text{ mVrms}$ 、MMカートリッジ並の電圧が発生します。アンプのゲインが $43\text{ dB}$ あれば出力は $1\text{ Vrms}$ 、 $53\text{ dB}$ で $3\text{ Vrms}$ です。また、これを1:10のトランスで昇圧すれば $70\text{ mVrms}$ 、回路のゲインも $-20\text{ dB}$ でき、楽にアンプを組めそうです。心配なのはD/A側

D/Aコンバータ



(a) 小抵抗で終端する



(b) トランスで受ける

<第9図> D/Aの電流出力を抵抗やトランスで受けても動作する

の動作です。PCM 56 Pはコンプライアンス電圧（精度を維持したまま電流出力端に許容できる最大電圧）が規定されていませんが、10 mV 位の電圧変動であれば問題ないでしょう。

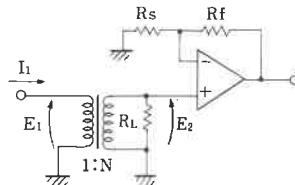
トランスのパワーレベルは、約-23 dBm となりますから、余裕を見て、-10 dBm クラスで、巻線比の大きな物を探してみました。タムラのインプットトランス THS-30 (1 : 10) です(第10図)。2次側の負荷抵抗が2.4 kΩ としていますので、1次側は24Ω、1次側の電圧は24 mV<sub>0-p</sub>、2次側の240 mV<sub>0-p</sub>をオペアンプで増幅して3.17 V<sub>0-p</sub>を得る予定です。

さて、第10図の回路でOK だろうと思っていたのですが、第11図をご覧下さい。トランスの巻線比N、負荷抵抗R<sub>L</sub>、入力電圧E<sub>1</sub>、トランスの2次側電圧E<sub>2</sub>を一般化して考えると、

$$E_2 = E_1 \times N \quad (1)$$

入力電流I<sub>1</sub>は、入力インピーダンスZ<sub>1</sub>が小さければ一定ですから

$$E_1 = I_1 \times Z_1 \quad (2)$$



$$E_2 = E_1 \times N$$

$$Z_1 = \frac{R_L}{N^2} = \frac{E_1}{I_1}$$

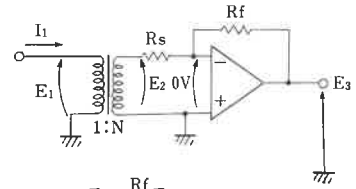
ただしI<sub>1</sub>は一定であり、

$$E_1 = \frac{R_L}{N^2} \cdot I_1$$

$$E_2 = \frac{R_L}{N} \cdot I_1$$

となり、Nが小さいほうが、E<sub>2</sub>は大きくなる。

(a) 非反転増幅器の場合



$$E_3 = \frac{R_f}{R_s} E_2$$

$$= \frac{R_f}{R_s} \cdot \frac{R_s}{N} I_1$$

$$= \frac{R_f}{N} \cdot I_1$$

となり、Nが小さいほうがE<sub>3</sub>は大きくなる。また、R<sub>s</sub>はゲインに関係しない。

(b) 反転増幅器の場合

<第11図> トランス式I/V回路を一般化して考えれば

また、Z<sub>1</sub>は負荷抵抗によって決まり、

$$Z_1 = \frac{R_L}{N^2} \quad (3)$$

(1), (2), (3)より

$$E_1 = \frac{R_L}{N^2} I_1 \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{R_L}{N} I_1 \quad (5)$$

となり、巻線比Nが小さい方が出力電圧を大きくできることがわかります。

さらに、2次側のオペアンプを反転増幅器として使用しますと、入力抵抗R<sub>s</sub>が同時にトランスの負荷抵抗R<sub>L</sub>となりますから、アンプ回路の出力電圧をE<sub>3</sub>とすると、

$$E_3 = \frac{R_f}{R_s} E_1 \cdot N \quad (6)$$

(1)を代入して、

$$E_3 = \frac{R_f}{N} I_1 \quad (7)$$

$$Z_1 = \frac{R_s}{N^2} \quad (8)$$

となり、やはり出力電圧はN=1で最大となります。また同時に、R<sub>s</sub>=0としたI/Vコンバータ接続が、入力インピーダンスを最小にできる点で最も有

利であることがわかります。

「これは失敗した。最初から一般化して考えていれば、トランスを2個余分に買わずにすんだものを」と悔やみながら設計した回路が第12図です。トランスはタムラのTHS-10 (1 : 1) です。

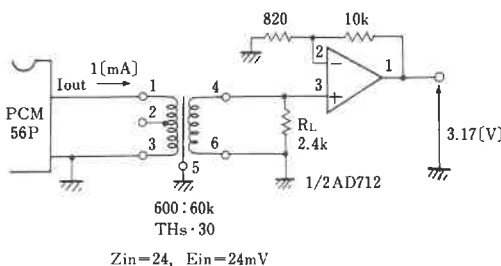
しかし、第12図を見れば一目瞭然、これはトランスがあってもなくても同じ動作となります。つまりトランスを挿入によるフィルタ効果+トランスの1次側と2次側のGND分離効果、それに対する損失+音質劣化が明確に比較できることとなります。実験としてはこの方が面白くなりそうです。

第13図に試作した基板と、テスト状態を示します。

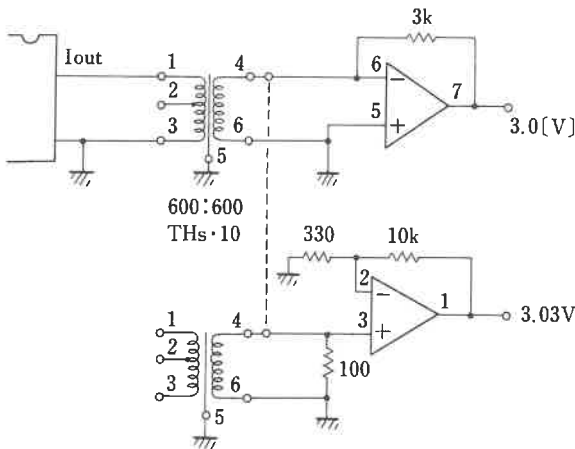
### 試聴結果

まずはTHS-10、ノンインバータ回路でのトランスありとなしです。使用したDFはSAA 7220 PB、D/AはPCM 56 PK (TDA 1541 Aは常にオフセット電流が流れるため、使用できません)、試聴したCDは、アルゲリッチ/アバドのラヴェルのピアノ協奏曲(DG 423 665-2)です。

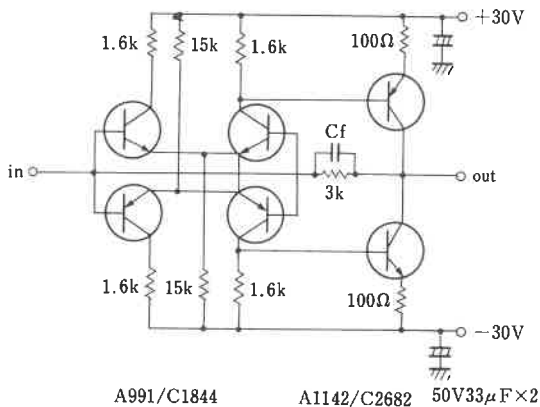
冒頭のむちの音は、何度聞き返してもトランスありの方が立ち上がりが鋭く感じられます。が、その後のピッコロは奥に下がります。全体的に、とくに高域はトランスありのほうがマイルドになると言うか、よく抑えられていると言うか、下がり気味に感じられま



<第10図> トランス式I/Vコンバータ回路



〈第12図〉トランス式 I/V 回路。オペアンプの接続を反転、非反転どちらも使用できる（同時には使えない）。



〈第14図〉ディスクリート I/V 回路

す。低域もトランスを入れると帯域が僅かに狭まったように感じられますが、大差ありません。この条件ではトランスありの方がきれいな音に感じられます。

次にトランスを使用した状態でのノンインバータと I/V です。

I/V のほうが、左右に広がり、なめらか、艶があるように聞こえる。が、これも、僅かの差です。オペアンプを交換した時のほうが、ずっと大きな差が感じられるでしょう。

それでは I/V 回路でのトランスの有無です。

トランスを入れると帯域が狭くなると言うか、音像が off になるような傾向はノンインバータの時と同じです。しかしどちらがよいかとなると…、ほんの少しの差ですし…、トランス無しの時の明るさも捨て難い…。本質的なクオリティの差はないようで

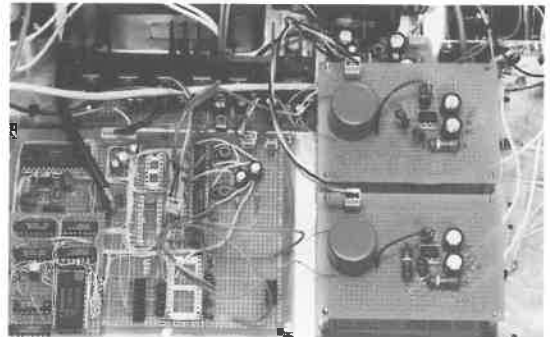
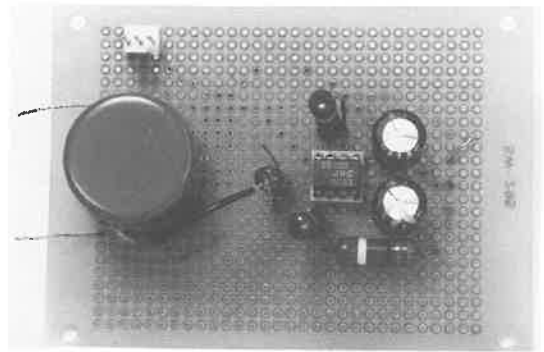
す。

次は 2 種のトランスの比較です。

THs-30 (1:10) は、“トランスの音” がします。一言で言えば、丸みを帯びた、立ち上がりの悪い、帯域の狭い音です。やはり巻線比の大きなトランスは仕方ないのでしょうか。(1:1) にはかないません。

さて、それではオペアンプ I/V (トランス無し) とディスクリート回路(第14図)の比較です。何も言うことはありません。ダイナミックレンジが違います。表現力が違います。音が違います。今までの 4 つの比較の差を 1~2 dB とすると 30 dB の差です。一通り聴いた後、他の CD も使用して試聴する予定だったので、やる気が失せてしまいました。

気を取りなおして、トランス (1:1) + I/V でのアナログとデジタルの GND 分離です (第15図)。電源は予



〈第13図〉実験基板とテスト状態

め別々に供給していますので、デジタル GND とアナログ GND を外せば、DC 的には絶縁状態となります。

が、これはしかし、聴感上は全く変わりません。CD を交換しても、日を改めて試みても差は感じられません。(私は試みませんが) フォトカブラの追加だけでは効果なかったとの話も聞きましたので、やはり、電気的に離すだけでは効果はなさそうです。ただ、オシロスコープで見ると、アナログ回路のノイズレベル低下は確認されます。

## 測定結果

第16図に測定時のブロックダイアグラムを示します。測定は試聴の後で行なっていますが、これは表向き、試聴の際の先入観になるものをできるだけ入れないためと称していますが、とにかく先に音を聞いてみたいマニア根性の現れとしたほうが正しいでしょう。

発振器はケンウッドの AG 203、交流電圧計は VT-121 です。なお、発振器には出力抵抗 600Ω が内蔵されていますから、I/V 接続の場合は電流源と見なすことができます。

第17図に各I/VのF特を示します(1MHzで-4dBとなっていますのは、発振器の出力変動によるものです)。

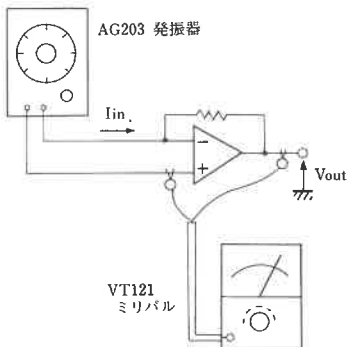
トランス付I/V(○)以外の回路では300kHzまでフラット。また、トランス付I/Vも100kHzで-2.5dB、1MHzで-12dBとフィルタとしての効果はほとんどないことがわかります。これは、第20図のトランス有り(○)無し(□)の差を比べても同様となっています。なお、トランス付の入力レベル(●)が高いのは、直流抵抗(約163Ω)によるものです。

AD712(■)、PCM56P内蔵オペアンプ(★)の入力電圧が、周波数に比例して上列していますが、これはオペアンプのゲインの低下によるものです。

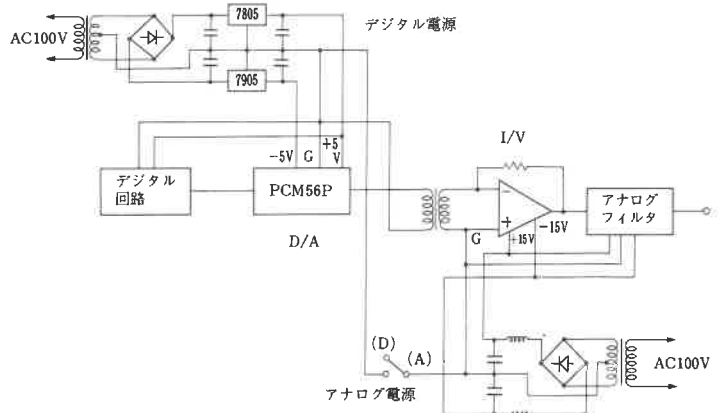
第18図にI/Vコンバータの動作原理を示しますが、入力には、出力V0をオペアンプのゲインAvで割った電圧が発生することがわかります。出力V0の偏差は、Av=100でも0.1dB以下と小さいのですが、入力には案外大きな電圧(出力1Vならば10mV)が発生します。

オペアンプに比べ、ディスクリートの回路では、入力(▲)が80kHz以下で-62dBフラットとなっています。これは回路のオープンループゲインがそのまま現れたものと思います。

オペアンプの(-)入力端子に発生する電圧から考えますと、理想としては20kHzまではオープンループ



<第16図>周波数特性の測定方法。I/V接続の場合は、発振器の出力抵抗(600Ω)があるため、電流出力と見なすことができる。

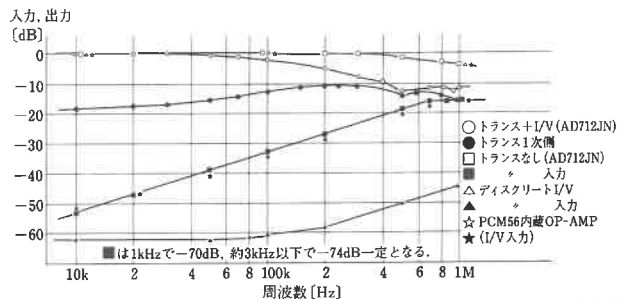


<第15図> デジタルGNDとアナログGND分離実験の方法。D/Aの出力にトランスを用い、トランス以前と以降を別々の電源で供給する。そして、それぞれのGNDを結んでいる1本の線を外して分離する。

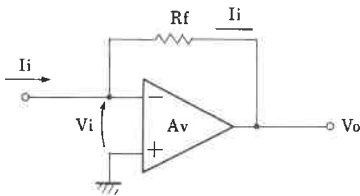
ゲインがフラットで、しかもできるだけ大きなアンプが望まれます(第19図)。けれどもどの程度の裸ゲインが必要なのか、また、可聴帯域内にポールを持たないこととどちらが重要なかわかりません。ディスクリートの音が良かった理由をオープンループゲインに結びつけるのは、ちょっと短絡的すぎるでしょう。

第20図は非反転接続とした場合のF特です。AD712単体(□)、THs10使用(○)、THs30使用(△)の順に高周波の減衰量が大きくなっています。20kHzまでは特性上、ほとんど違いはありません。しかし、聴感上は大きく違っていました。

第1表にテストCDを用いて測定



<第17図>各I/Vコンバータの周波数特性。発振器はケンウッドAG203、電圧計はケンウッドVT121を使用。1kHzでの回路の出力を0dBとした。(□△☆)共に300kHz以上で下降しているが、これは発振器の出力レベル低下のためである。トランス付の入力レベル(●)が高いのは、トランスの直流抵抗によると思われる。また、トランスによるハイカットフィルタ効果は殆んどないことがわかる。AD712(■)、PCM56P内蔵オペアンプ(★)の入力電圧が、周波数に比例して上昇しているのは、オペアンプのゲインが減少しているためである。なおオペアンプ(■★)は、約3kHz以下で-74dBとなった(ノイズのためこれ以下にはならない)。ディスクリートの入力(▲)が80kHz以下、-62dBでフラットなのは、オープンループゲインを表している。



OP-AMPのGainをAvとすると

$$V_o = -V_i \cdot A_v \quad (1)$$

$$V_o + R_f \cdot I_i = V_i \quad (2)$$

より、

$$V_o = -(V_o + R_f \cdot I_i) A_v$$

$$V_o(1 + A_v) = -R_f \cdot I_i \cdot A_v$$

$$\therefore V_o = \frac{-A_v}{1 + A_v} R_f \cdot I_i$$

Avが非常に大きければ

$$V_o = -R_f \cdot I_i \quad (3)$$

となる。

しかし、Avが十分に大きくなければ、

$$V_i = -\frac{V_o}{A_v}$$

の電圧が残る。かりにAv=60dB=10<sup>3</sup>

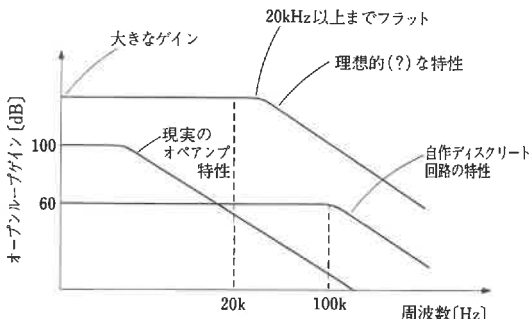
$$V_o = 3Vとすれば$$

$$V_i = \frac{3}{10^3} = 3mV$$

である。

〈第18図〉I/Vコンバータの動作原理  
クタンズによるものと考えられますが、  
気分的には良くありません。トランス  
の負荷を変えても、2次側のオペア  
ンプの接続を変えても、変化は見られ  
ません。けれども、オペアンプ出力波  
形にオーバーシュートはありませんから、  
問題はないのかも知れません。

が、これは、考えようによっては、  
D/Aの電流出力のインピーダンスが  
高い(約1.2kΩ)ため、トランスを電  
流ドライブしているとも言えます。と  
すれば、D/Aが負荷に発生する逆起電  
力に打ち勝って電流を流そうとしてい  
る分だけ、波形の応答が改善されるに  
違いありません。そうしてみると、



〈第19図〉I/Vコンバータに要求されるオープンループ特性。理想特性としては、大きなゲインが20kHz以上までフラットであって欲しい。(しかし本当にこのような特性が必要なのだろうか)。実現できる特性としては、周波数特性とDCゲインとどちらが重要なのだろうか。

	周波数 [Hz]	Vrms [V]	ひずみ率 [%]
THS-10 (inv)	100	3.8	0.0061
	1k	3.8	0.0028
	10k	3.6	0.10
THS-10 (non-inv)	100	3.6	0.0096
	1k	3.6	0.0051
	10k	3.45	0.088
non-inv	100	4.6	0.006 *
	1k	4.6	0.0034
	10k	4.4	0.086
inv	100	4.8	0.006 *
	1k	4.8	0.0027
	10k	4.7	0.095
THS-30 (non-inv)	100	4.4	0.0033
	1k	4.4	0.0024
	10k	4.2	0.056

\*: 指示値が安定しない(周期的に変動)

〈第1表〉トランス付I/V回路のひずみ率。(JAS CD-1テストCD, SAA 7220, PCM 56 Pk 使用, アナログフィルタは使用していない)

オペアンプの出力波形の立ち上がりは  
鋭く、そしてスムーズに落ち着いてい  
ます。出力波形からは、良くできたフ  
ィルタとも言えるでしょう。

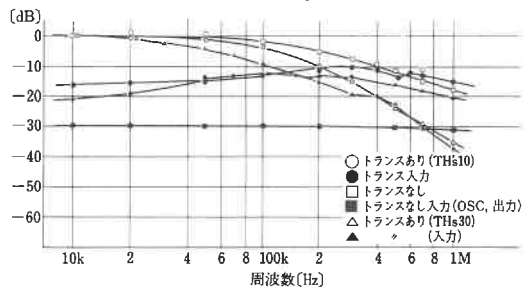
さて、問題は次です。第22図(a)は  
AD712JNを、トランスを使用しない  
通常のI/Vとした場合の入出力です。  
電流のステップ変化に呼応して、オペ  
アンプ入力にグリッチが発生していま  
す(とりあえずこの向きのスパイクを  
“逆方向”と呼びます)。グリッチは、  
NF抵抗(3kΩ)に2200pFパラ(カ  
ットオフ24kHz)にしてもまだわずか  
に観測されます(第22図(b))。

それではとオペアンプを  
NJM 5532 Dに交換した結果が第23  
図(a)です。第22図(a)と比べると  
わかりますように、NJM 5532ではス  
パイクが上下両方向に発生しています

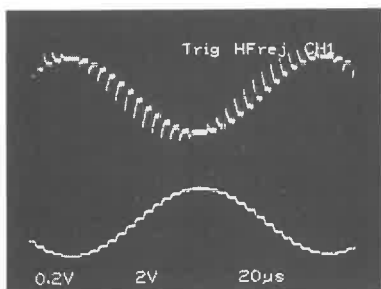
(“逆方向”スパイクのレベルはAD712  
よりも若干低くなっています)。

この、“順方向”スパイクはオペア  
ンプのF特上のピークによって発生し  
ます。方形波テスト時に、オーバーシ  
ュートを発生するアンプと同じです。  
現に、第23図(a)の出力波形の立ち  
上がりにもオーバーシュートが見られ  
ます。これはNF抵抗への若干のC  
(27pF)のパラ付けによって消すこと  
ができます(第23図(b))。しかし(b)  
の状態でも、“逆方向”スパイクは残っ  
ています。第23図(c)は2200pFパ  
ラの場合で、“逆方向”スパイクも完全  
に消失しています。

それでは天下のバーブラウンはどう  
でしょう。第24図(a)はPCM 56 P  
内蔵I/Vを使用した時の波形です。こ  
れも見事に“逆方向”スパイクを発生  
しています。



〈第20図〉各非反転増幅器の周波数特性。THs 10 (○), THs 30 (△) 共に、オペアンプ単独 (□) の場合よりはレベルが下がっているが、聴感上はF特よりもさらに帯域が狭まったように聞こえる。トランスのハイカットフィルタとしての効果は余り望めないことがわかる。



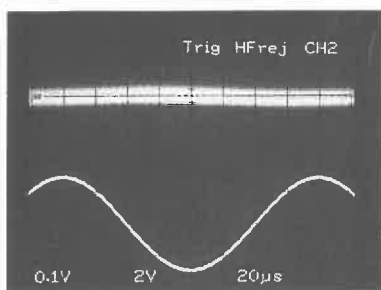
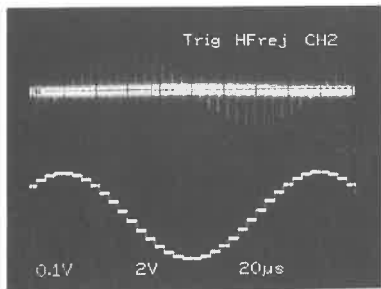
〈第 21 図〉 PCM 56 P の出力をトランス (THs 10) で受けた場合、上がトランスの 1 次側、下がオペアンプの出力波形である。トランスの 1 次側波形は、オペアンプの接続を反転/非反転、またオペアンプを交換してもほとんど変わらない。オーバーシュートは、巻線のインダクタンスによるものであろう。また、サイン波の電圧波形が見えるが、これは巻線の直流抵抗 (163Ω) に相当する。しかし、オペアンプの出力にはオーバーシュートは見られない。

(第 24 図では他の写真と比べ、基線が太く写っていますが、これはデジタル回路からのノイズの輻射によるものです。バラック状態のためノイズレベルは増加してしまいました)。

第 25 図は、ディスクリット回路での観測結果です。残留ノイズ以外には何も見えません。(ただし“逆方向”スパイクを全く発生していないわけではなく、ノイズレベルより低くなっているだけだと思います)。この回路は NF 抵抗に若干の C をパラにしなければ、1 MHz 以上でピークを生じることがわかっていますので、27 pF を使用しています。実際に、C なしでは若干の“順方向”スパイクが観測されます。

さて、“逆方向”スパイクですが、このグリッチは、I/V コンバータ (オペアンプ) が D/A の出力電流の変化に追従できないために発生します。D/A から出力される電流は、きわめて高速に変化します (スイッチを切ったり入れたりするだけですから)。しかし、オペアンプはこのスピードについて行けず、変化の瞬間に I/V 変換が間に合わなくなってしまいます。その間に入力端子に電圧が発生します。

もっとも、NF にキャパシターを入れればスパイクレベルは下がります。ある程度大きな容量とすれば、観測限界以下になります。見えなければ、そ



〈第 22 図〉 AD 712 を用いた I/V コンバータの観測波形。

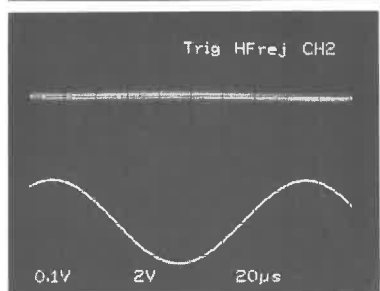
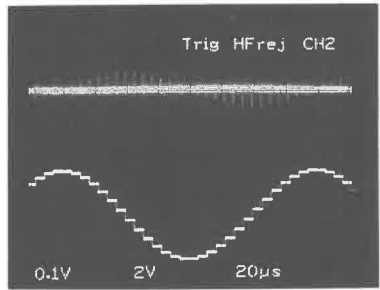
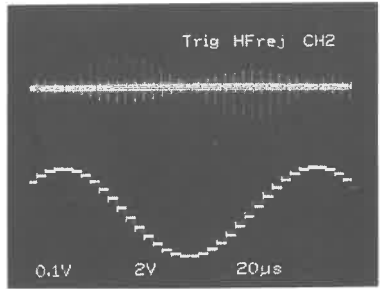
(a) 上、I/V 入力 (上) は、電圧は観測されないが、D/A 出力の切り替わりに同期した“逆方向”スパイク (グリッチ) が観測される。オペアンプの出力 (下) ではスパイクは見られない。

(b) 下、NF 抵抗に 2200 pF をパラにしてみるが、僅かにスパイクの名残が見える。

れでよいとの考え方もあるのでしょう。が、それでもアンプが、電流の変化に追従できていないことには変わりはありません。そして大きな C を使えば使うほど、追従できない時間が長びいても考えられます。

“逆方向”スパイクをできるだけ小さくするためには、優れた高周波特性、特に高周波領域での高いゲインが必要と考えています。スルーレートなどの特性は、AD 712 の方が NJM 5532 よりも優れているにもかかわらず、“逆方向”スパイクレベルが高くなっていましたが、これは高周波でのゲインが小さいためでしょう。(例えば 200 kHz でのゲインで比較すれば、AD 712 は 30 dB 弱に対して NJM 5532 は 40 dB 近い)。もちろん、周波数特性が優れているだけでもダメで、それに見合うだけの大きなスルーレート、短いセトリングタイムが必要です。

ちなみに、ディスクリット回路のスルーレートは、手持ちの発振器の限界 (4 V/μsec) を上回っているために正



〈第 23 図〉 NJM 5532 を用いた I/V コンバータの観測波形。

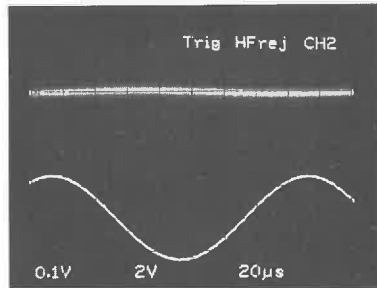
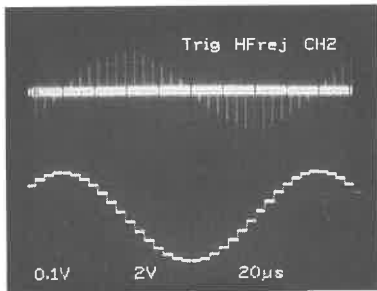
(a) 上、5532 の入力 (上) では、上下方向にグリッチが発生している。AD 712 と同方向のスパイクを“逆方向”、反対方向のものを“順方向”とすると、順方向”スパイクは F 特上のピークに起因している。5532 の出力 (下) では、階段波形の立ち上がりにはリンキングがある。

(b) 中、NF 抵抗に 27 pF をパラした場合、“順方向”スパイクは消失している。また、“逆方向”スパイクも低くなっている。

(c) 下、2200 pF をパラにした場合、スパイク波形はノイズレベル以下になっている。

確な値はわかりません。シミュレーションでは、17 V/μsec となっていますので、AD 712 (25 V/μsec) のほうが大きいと思われます。また、オープンループゲインは 100 kHz までは 64 dB でフラット、1 MHz でも 45 dB はありますから、汎用オペアンプよりは相当大きくなっています。(オペアンプでこれ以上のゲインを持つものは、数えるほどしかありませんし、コスト的にも大変高価なものとなってしま





〈第 24 図〉 PCM 56 P の内蔵オペアンプを用いた場合。

(a)上、やはり“逆方向”スパイク(グリッチ)が観測される。けれども問題は、この  $1\mu\text{sec}$  以下のパルスが、どの程度音質に影響するかである。

(b)下、 $2200\text{pF}$  では、スパイクは見られない。

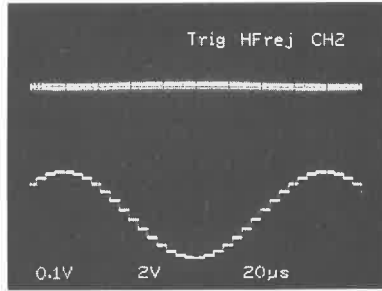
ます)。

一般に、D/A の変換速度は、内部でのスイッチ動作ではなく (D/A はグリッチレスと称している!)、I/V コンバータの応答速度によって制限されると言われています。例えば PCM 56 P の場合も、電圧出力でのセトリングタイムは  $1\mu\text{sec}$  と、電流出力の約 10 倍です。高速のアンプを用いる必要があるのではないのでしょうか。

## まとめ

D/A の電流出力を、I/V の代わりにトランスで受ける方法は、今回試した限りでは、それほど効果はなさそうです。それでも CD プレーヤの出力にトランスを用いるよりは、合理的な方法だと思いますので、音が良く、可聴帯域外は大きく減衰しているトランスを作れば、それなりの効果はあるかも知れません。D/A のチップは、トランスを負荷としても問題はなさそうです。(ちなみに D/A は、電流出力と GND をショートしても壊れません)。

しかし、トランスにアナログフィル



〈第 25 図〉 ディスクリット回路の場合。F 特補正のため  $27\text{pF}$  パラとしているが、スパイク(グリッチ)は見られない。

タとしての効果を期待することは難しくそうです。可聴帯域をフラットにするためには、それだけ超音波領域もまっすぐ伸ばさなければなりませんから。

また、トランスを用いたデジタル回路とアナログ回路の(疑似的)分離は、音質上の改善はありませんでした。けれども、オシロスコープ上では、若干のノイズレベルの低下が観測されたので、シールドを併用するなど、もっと徹底的な分離実験を試みれば効果が現れるかもしれません。ただし、単に切り離すだけではダメです。

しかし、本当に分離する必要があるのでしょうか。それよりも、発生するノイズ自体を減らす手を打つべきではないのでしょうか。

さて、I/V コンバータです。I/V には多くの問題点が隠されているようです。I/V に使用するアンプ回路の裸ゲインはどうあるべきでしょうか。Tr アンプ(オペアンプ)の考え方からは、可聴帯域内にポールがあっても NF をかけて安定に動作すれば OK です。が、個人的にはオープンループゲインもフラットであるべきだと考えています。また、“逆方向”スパイクを発生させないためにも、オープンループゲインは、できるだけフラットに高い周波数まで伸ばす必要があります。

なお、“逆方向”スパイク(グリッチ)ですが、PCM 56 P を用いた CD プレーヤは、例外なく内蔵オペアンプを使用していますし、PCM 58 P や TDA 1541 A の電流出力も、NJM 5532 クラスの石が電圧変換しているのが一般的です。つまり、普及

機から高級機まで、ほとんど全ての CD プレーヤに使用されているオペアンプでは、高周波ゲインが不足していると思われます。

が、これもまた例外なく、I/V コンバータは 1 次のフィルタとして使用されています。NF 抵抗にキャパシタをパラれば、スパイクレベルは確実に下がります。が、その瞬間 I/V が応答できていないことには変わりはありません。オシロスコープで見えなければ OK と考えるべきでしょうか。それともやはり音質に悪影響があり、なんらかの対策を施さなければならないのでしょうか。いえ、そもそもこのような短時間のスパイクが発生したところで、音への影響はあるのでしょうか(気分的にはあると思うのですが)。これもまたわかりません。

ついでに当り前の事ですが、I/V コンバータも再生音に大きな影響を与えます。高周波特性の優れた、できるだけ良質なアンプを用いることが肝要です。ただ、勤どころはフラットアンプとほとんど同じです。従来のアナログで良かった方法は、まず良い方向に結びつきそうです。オペアンプなど使わずにディスクリットで組むべきだと…(注 1)

いままで一部メーカーの呼称をまねて「デジタルプロセッサ」と称していましたが、今後「D/A アンプ」と呼ぶことにします。当初、名称に対してはいろいろと考えたのですが、オーディオ界でしばしば使われる「D/A コンバータ」は用いたくありませんでした。なぜなら、D/A のチップと区別がつかまじし、普通の電気系並びにコンピュータ系の人々は、チップの事を示す言葉として使用しているからです。そこでやむを得ず「プロセッサ」を用いていたのですが、この名は、語源から考えても適当ではありません。加えて、コンピュータ屋としては別の概念をもっているため、違和感がつきまわっていました。また、簡単に「デジタルアンプ」とも思ったのですが、(いったい何が対応しているのかわからない)「デジタル対応アンプ」と粉らわしいので面白くありません。

まことに直接的表現ですが、今後は「D/A アンプ」と呼び表したいと思います。