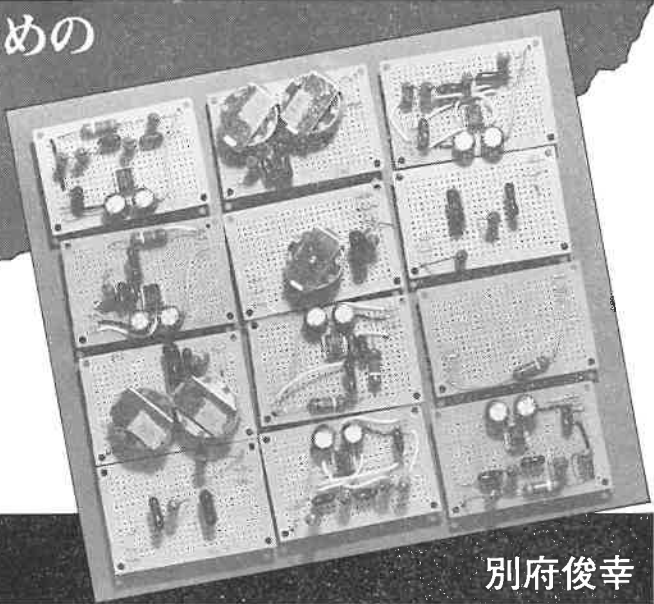


デジタルオーディオのための アナログフィルタの検討



〔前編〕

回路方式の比較

別府俊幸

プロローグ——あるオーディオ・マニアの物語2——

「感動を生み出すのは音楽であって装置ではない」

ある夜、コンサートからの帰り道、彼はふと思った。どんなに素晴らしいHi-Fi装置があったとしても、それを鳴らすレコードがなければただの箱である。

「では、なぜ装置を改善しているのだろうか」

彼は考え続けた。

「レコードから出てくる音がよくなったとしても（それはそれで嬉しいことだけれども）、決して感動が深まるものでもない。逆に、どんなに優れた録音でも演奏が悪ければ二度と聴く気はしない」

「たとえ装置がよくなって、いままで聴こえなかった（と思っていた）音が聴こえるようになったとしても、いままで以上に感動できるわけではない」

「それではなぜ」

彼は考え続けた。信号を渡り、地下鉄の階段を下りてもまだ……

ふと、何かがはじけたような気がした。

「そうだ、本当の音楽を伝えるものは生なんだ。録音なんかではない。音

楽の真の姿は演奏されているその瞬間にあり、録音された媒体の中に閉じこめられたりはしていないんだ」

「僕はきっと、演奏の真の姿をとり出そうとしてもがいているんだ。一体どれだけの音楽が、レコードの中に入っているかはわからない。けれども、再生装置からは得られない、コンサートホールあの雰囲気、あの空気感を味わうために、もがき、あがいているんだ」

はじめに

アナログ・フィルタといえば、われわれオーディオ・マニアにもなじみの深い領域にも感じられます。スピーカ・ネットワーク、イコライザ・アンプなど、デジタルが発生する以前から、われわれは種々のアナログ・フィルタとつき合ってきました。

しかし、デジタル・オーディオに用いるフィルタは、従来のものとは若干毛色が違っています。アナログでは、スピーカの帯域分割、録音再生のためのイコライジングと、カットオフ周波数が可聴帯域内にあり、複数のフィルタがペアとなった、どちらかといえば異端的(?)な使われ方が主でした。これに対してデジタルでは、雑音の除去とフィルタ本来の目的(?)に近いもの

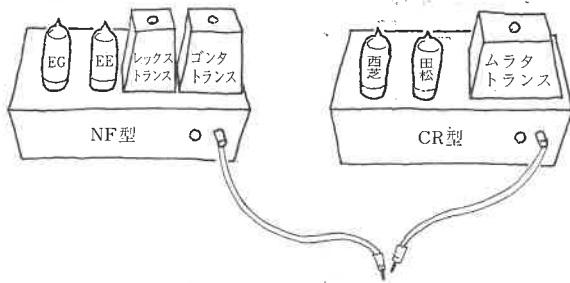
となっています。

さて、デジタルでは、折返し雑音を除去することが最大の目的と考えられていますから、イコールできるだけ大きな遮断量と考えられているようです。加えて、デジタル・オーディオの規格から、カットオフ周波数も可聴帯域外に設定できます。そのためか、パワースペクトル特性とかベッセル特性、NF式かCR式かなど、微に入り細に入りこだわっていた知識階層のマニアも、デジタルでのフィルタには、あまりうるさくないようです。

しかし、いくら可聴帯域外にカットオフがあるといっても、カートリッジの高域共振は、その違いが音に表れます。アンプのカップリング周波数も10Hz程度では音に出てきます。経験的にはカットオフ周波数の $\frac{1}{10}$ 、あるいは10倍位までは影響がありそうです。

このように考えてみると、われわれは、アナログ・フィルタでさえも十分な情報を持っているとはいえません。本当に遮断量だけが重要なのでしょうか。カットオフ周波数が20kHz以上であれば問題ないのでしょうか。

仮に遮断量に注目するとしても、いったい何dB必要なのでしょうか。もしかすると遮断量(除去量)よりも、位相特性が重要かも知れません。あるいは



＜第1図＞ 本人はNF型とCB型を比較しているつもりでも……

は、ただたんに、可聴帯域内でのフィルタの音質だけが影響しているのかも知れません。音質よりも遮断特性が重要だと判断できる根拠がどこにあるのでしょうか。

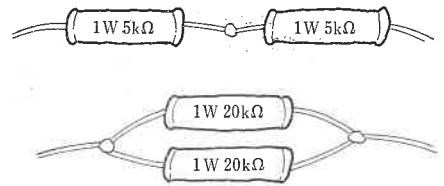
さあ、これもわからないことだらけです。シミュレーションで得られたフィルタ特性を眺めていても音は出てきません。回路図とにらめっこして考えていても音質はわかりません。今回も、考えられる限りを試してみましょう。聴いてみなければ判らないのですから。

音に影響する 要因はなんだろうか

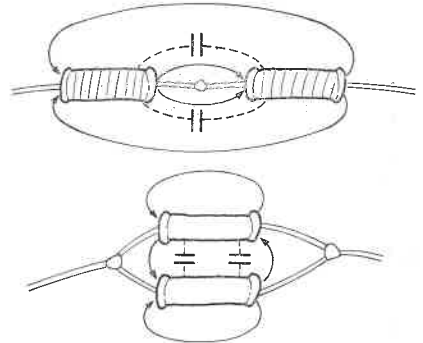
アナログ回路では（デジタルもだが）、多くの要因が絡み合って、アンプの音に影響を与えています。たとえば、GNDの配線方法、基板の配置、基板上の部品配置、部品個々の音、電源の方式、トランスの数、ケースの材質、配線の材質、アンプの回路、TRのアイドリング、入出力の接点、回路の設計、周囲の温度湿度、アンプの設置方向……。順不同に数え上げてもまだまだ思いつきます。

アナログ・フィルタについてもこれらの多くの要因があてはまり、その上にフィルタの方式（パワース、ベッセルなど）、遮断特性（位相特性）、カットオフ周波数、次数、遮断量、回路方式など、フィルタ固有のパラメータが付加わってきます。

さて、デジタルに適したフィルタを探そうと思ったのですが、事はそう簡単ではなさそうです。おのおののパラメータがどの程度音に表れるのか、表れないのかを知る必要があるのです



(a) 同じ銘柄の抵抗であれば同じ音がするか？



(b) 抵抗器以外の（目に見えない）要素が存在しない理由はない。

＜第2図(a)＞
同じ銘柄の抵抗であれば、抵抗値が異なっても同じ音がするか？

＜第2図(b)＞
抵抗器以外の（目に見えない）理由が存在しない理由はない

が、パラメータ単独で比較することはまず不可能です。2台のCDプレーヤを並べて、D/Aの音の違いを探ろうとする試みは、まったく検討外れなものだとお判りと思います。しかし、CR型イコライザとNF型イコライザを比較するといっておきながら、おのおののアンプに使用しているタマが異なっていたり、抵抗が別の銘柄であったり、トランスの大きさが違っていたりする話も見ることがあります。このように、複数のパラメータを同時に変更しておいて、その結果を1点に結びつけて考えることは、はっきりいって無理です（第1図）。

無論、完璧に一つのパラメータだけを抜きだしてテストすることはほとんど不可能です。たとえば、フラット・アンプのNF抵抗を交換して音が変わったとします。もちろん抵抗は同じ銘柄です。場合によっては向きも揃えます。そして音が変わったとします。とすれば、音が変わった原因をNF回路に流れる電流が原因と決定できるでしょうか。

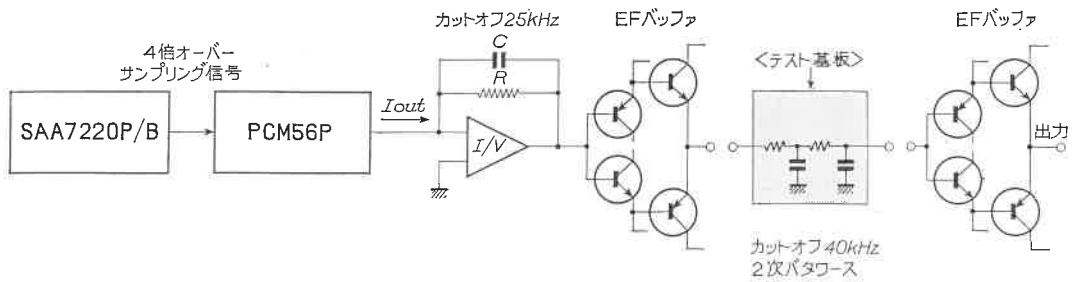
残念ながら、難しいでしょう。たとえばこの変更によって、回路のクロー

ズドグループ・ゲインも大きくなります。とすれば、比較の際には当然音量を等しく保たなければなりませんから、VRの位置も変わってしまいます。また、同じ銘柄の抵抗としても、抵抗値によって音は変わります。嘘だと思っ方は、第2図(a)の実験を行なってみてください。ただし、この実験で音が変わるのですが、これでも単純に抵抗値による音の差を表しているとは結論できません。第2図(b)に示すように抵抗間のストレー・キャパシティや相互インダクタンスが影響していない保証はありません。

このように考えてみると、どんなパラメータでもそれ1つを単独で変更することは、たいへんに困難であることがわかります。しかも、われわれにとって未知の要素が隠れていない保証さえ、そしてその未知の要素がわかっていない範囲よりも大きな影響を及ぼさない保証さえ、どこにもありません。

検討するパラメータ

だからといって、何もしないでいては結局何もできません。できる限りの範囲で、比較検討を進めたいと思いま



＜第3図＞ テスト回路のブロック・ダイアグラム。フィルタ基板を交換して比較する。また、I/Vコンバータ回路をカットオフ25kHzの1次フィルタとして使用する。

す。

では、フィルタ回路に限って考えてみます。音に影響を与えそうなパラメータは、

- (1)回路方式
- (2)フィルタ特性
 - ㊸遮断量
 - ㊹カットオフ周波数
 - ㊺遮断特性
 - ㊻次数

などが考えられます。

また、デジタル・オーディオにおけるフィルタでは

- (ア)不要帯域除去による効果
- (イ)フィルタ挿入による音質劣化が絡み合っ、最終的な音質を決めると考えられます。

今回は、私の独断に基づいて、もっとも影響のありそうなパラメータ、回路方式についての比較を行いません。

フィルタの回路方式

アナログフィルタと一口に言いまし

ても種々の回路があります。パッシブとアクティブ、アクティブの中には多重帰還型、GIC型、状態変数型、電圧ソース(VCVS)型などの回路方式があります。今回は、回路方式による音の差を探るため、フィルタ特性をカットオフ40kHz、2次のパワース特性に揃え、パッシブ2種(CR型、LC型)、アクティブ2種(電圧ソース型、GIC型)を比較します。ただしGIC型は、次数を増やしても音質劣化が少ないといい伝えもありますから、3次のフィルタも同時に比較します。計5種類の比較検討です。

DFは、私が試した中でもっともよかったSAA7220Bを用います。4倍のオーバーサンプリングDFですが、倍数がどうこうではなく、音質の理由から、このDFを使用します。

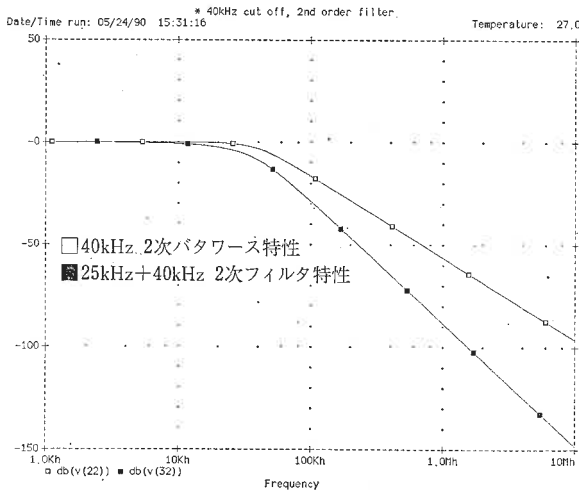
D/Aは、PCM56Pです。これは出力がバイポーラであるからです。また、I/Vコンバータでは、余分な回路を付加する事なくキャパシタ1個で

フィルタを構成できますから、積極的に利用します(第3図)。カットオフ25kHzの1段を加え、実際の構成は1+2次となります。

フィルタの理論上の特性を第4図に示します。4倍デジタル・フィルタを併用していますから、88.2kHzの上下の折返し雑音は除去されているとみなせません。したがって、156kHzの上の折返しを、どの程度除去できるかが問題となります。比較回路では、第4図に示すとおり、減衰量-40dBとなり、十分でないような気もしますが、この点については目をつぶりましょう。

第5図におのおののフィルタ回路を示します。個々のフィルタの設計方法について説明すると、ただでさえ長いといわれているのに、さらに何ページかプラスされてしまいますし、私のいい加減な説明を読まれたところで、あまり参考とはならないでしょうし、その説明でさえもアンチョコの受け売りですから、私が種本としたウィリアムズ著、「電子フィルタ」¹⁾をお勧めします。高価な本ですが、やたら理論にかたよらず、かといって定数の計算式だけが載っているペラペラの本でもなく、実用的な設計書です。

第6図に回路のシミュレーション結果を示します。試作した回路を実測すれば、シミュレーションなど必要はないのですが、計算されたフィルタ定数に間違いがないか、計算値をE24系列の抵抗、キャパシタで近似しても特性に問題が生じないか。そして、実際に組み立てたフィルタの特性が正しいのかを検証するために活用しています。回路シミュレーションにはPSpice 4.0を、同図(c, d, e)のオペアンプのモ



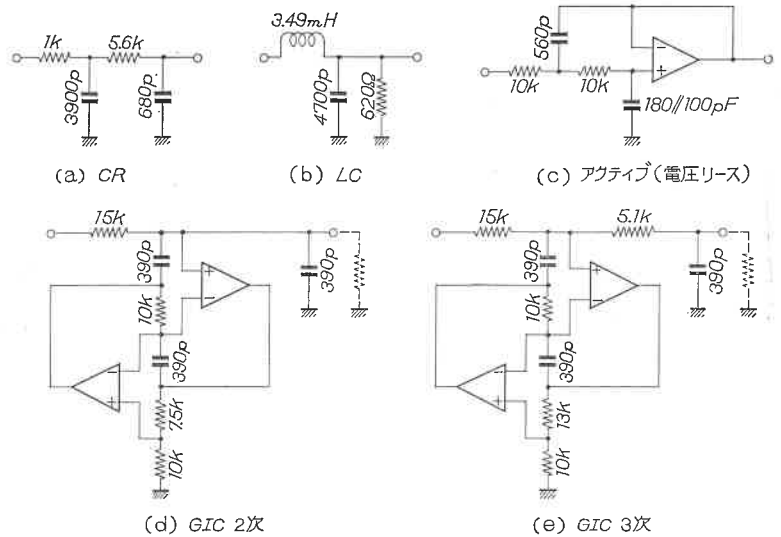
＜第4図＞ 理論上のフィルタ特性の場合、156kHzでの減衰量は-40dBとなる。

デルはN J M5532を用いています。

第7図に実測した周波数特性を示します。位相、遅延特性は面倒なので省略しています。が、周波数特性はシミュレーション結果とほぼ一致していますから、位相、遅延特性も一致していると考えてよいでしょう。LCフィルタのピーク、ギャップは巻線の線間容量のためと思います。

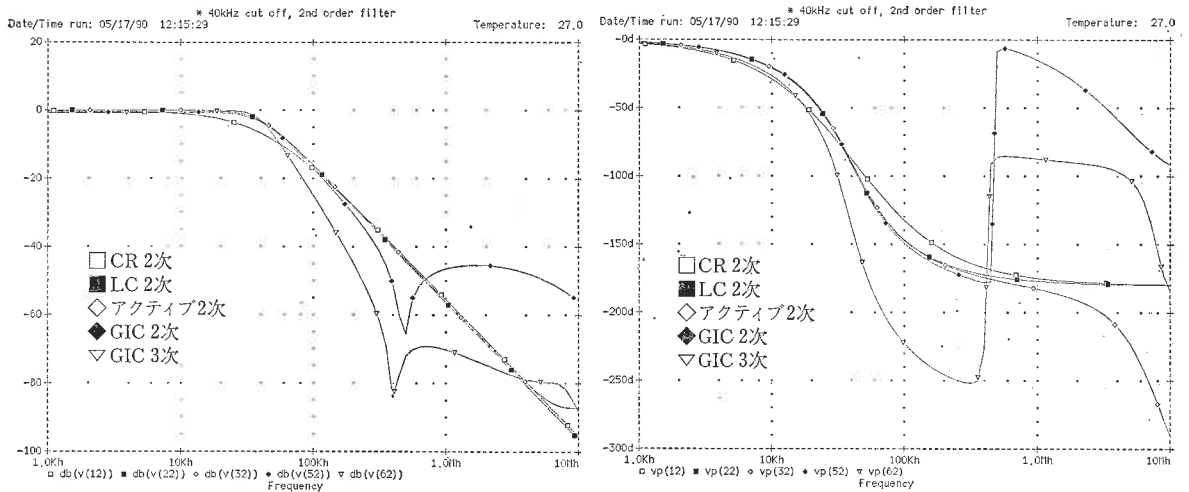
それでは各フィルタです。

第5図(a)はCR 2段フィルタです。2段と言っても本当は1+1段ですから、特性的には他のフィルタと異なってしまいます。また、カットオフ周波数も-3dB点という定義に戻れば22kHzとなりますが、156kHzでの遮断量が同じになるということで、他のフィルタと同列に扱います。



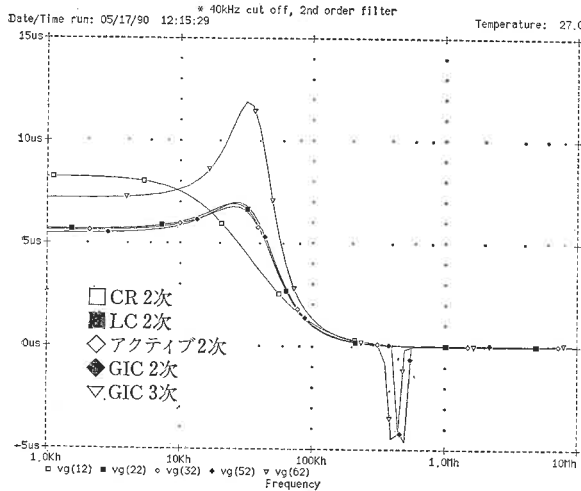
＜第5図＞ テストに使用したフィルタ回路

ほとんど部品の質によって音が決ってしまいそうな回路ですが、裏を返せ

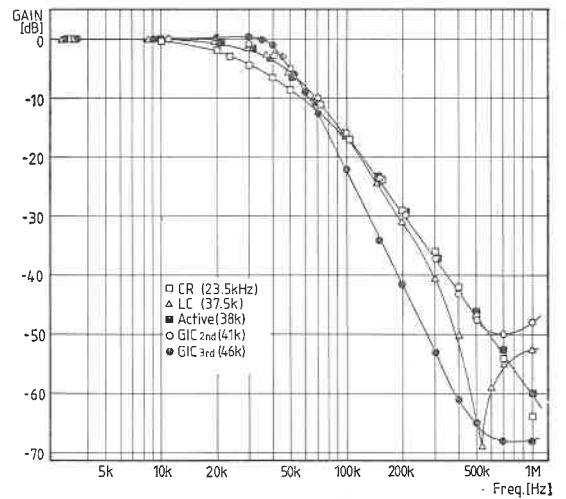


＜第6図＞ シミュレーションによるフィルタ特性 (a)周波数特性

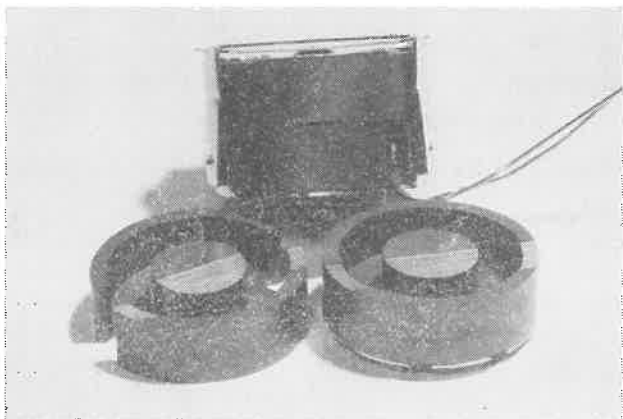
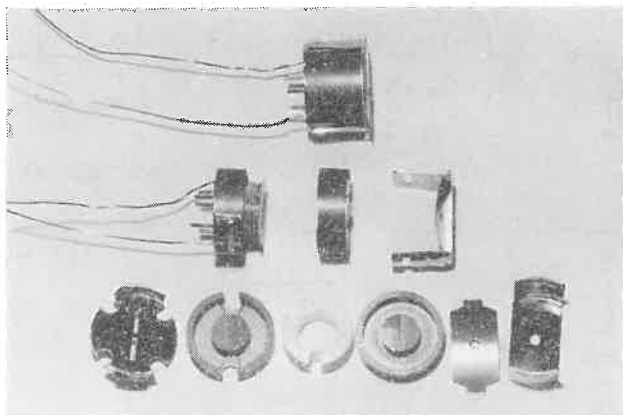
(b)位相特性



(c)群遅延特性



＜第7図＞ 実測した周波数特性 ()内はカットオフ周波数



●材質標準特性表●

材 質			H5A
使用周波数	MHz		<0.2
初透磁率	μ_{iac}		$3300 \pm 40\%$
損失係数	$\tan \delta / \mu_{iac} \times 10^{-6}$		<2.5 (100kHz) <10 (100kHz)
温度係数	$\alpha_{\mu r}$	$\times 10^{-6}$	-0.5 to 2.0
	-30 to 20°C		
	0 to 20°C		
	20 to 40°C		
	20 to 70°C		-0.5 to 2.0
キュリー温度	Tc	°C	>130
※飽和磁束密度	Bms	mT	410
H=1194A/m (15Oe)		gauss	4100
※残留磁束密度	Br	mT	100
		gauss	1000
※保磁力	Hc	A/m	8.0
		oersted	0.1
ヒステリシス係数	γ_B	$\frac{10^{-6}}{mT}$	<0.8
(1.5~3mT)	h ₁₀		<40 (10kHz)
DF係数(1~10分)	D.F	$\times 10^{-6}$	<3
※固有抵抗	ρ	$\Omega \cdot m$	1
※密 度	σ	kg/m ³	4.8×10^3
カラーコード	白・赤		

<第8図> ポットコア外観例 (使用したコアはH5A, P26/16, T-32H) <第1表> H5Aフェライトの特性 (TDKカタログより)

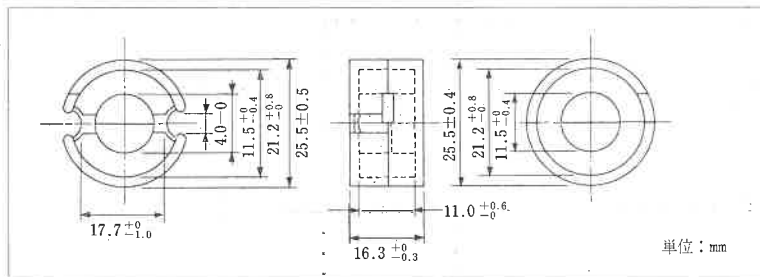
ば、フィルタの生の特性がはっきりと表れるかも知れません。なお、部品による影響もできるだけ少なくするため、すべての回路について、オペアンプはNJM5532, Rは東京光音RD1/2W, Cは日通工のディップ・マイカ、基板は安売りにしていた紙エポキシで統一しています。

第5図(b)はLCフィルタです。これもLの品質が、音に大きく影響するに違いありません。もちろん、厳密に考えれば回路による音の比較など不可能です。良質のLを用いたLCフィルタと、劣悪なRを用いたCRフィルタを比較して得られた結果と、最悪のLと、最高のRを用いて得られた結果とが同じになるでしょうか。たとえば、1種類のTRとFETを比較してTRは音が悪いと結論できるでしょうか。また、そのような条件下での比較に興味があるのでしょうか。

それでも私があえて比較に臨んでい

るのは、回路による影響が部品による影響よりも大きいのか否かを探りたいた

●P26/16の形状●



重量≒22.0g/組(1形, 2形, 3形)
 定数 コア係数 $\sum l/A = 3.61 \text{cm}^{-1}$ 実効断面積 $A_e = 1.25 \text{cm}^2$
 実効磁路長 $l_e = 4.52 \text{cm}$ 実効体積 $V_e = 5.65 \text{cm}^3$

品 名	品 番	AL-value		実効透磁率 μ_e	ギャップ mm	可変範囲	温度係数 ppm/°C	備考※
		nH/N ²	公差					
3形	H5B P26/16 R-32H	0114051233	280	—	80	0.3	30~130	
	H5B P26/16 T-32H	0114051235	540	—	155	0.14	±5~±15%	A
	H5B P26/16 V-32H	0114052237	840	—	241	-0.07	140~340	
形	H5A P26/16 R-32H	0114050133	280	—	80	0.31	-50~200	
	H5A P26/16 T-32H	0114050135	560	—	161	0.15	±5~±20%	B
	H5A P26/16 V-32H	0114050137	840	—	241	0.08	-150~600	

※温度範囲: A0~20~40°C, B-30~20~70°C
 測定条件: コイルφ0.40, 2UJEW100Ts, 周波数1kHz, 電流0.5mA

<第2表> P26/16コアの特性 (TDKカタログより)

めと、回路によって良質な部品を使えるまたは劣悪な部品を排除できるのならば、それもまた回路方式の優劣のうちであると考えからず。

Rの値の620Ωは適当です。小さいとバッファ・アンプの負荷が重くなりますし、大きいとLが大きくなります。Lは、市場ではロクなものが入りできませんので、自分で巻きます。間違ってもアキバで売っているマイクロインダクタなどを用いてはなりません。もっとも、周波数特性さえ同じなら音も同じだと信じておられるのなら、信念にしたがってください。

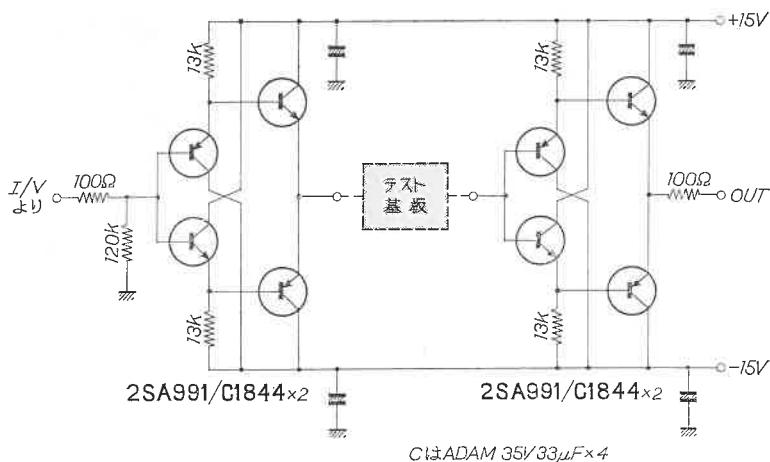
第8図に使用したTDKポットコアを示します。ポットコアは構造上、自分自分をシールドするため、巻線の影響を受け難く、高いQと良好な温度特性が得られ、さらに他のインダクタとの結合も殆ど心配ない、優れた磁心材料です。実際にブリッジで計りながら他のコイルを近づけてみても、インダクタンスの変化は見られません。

コアとしてのフェライトの特性を第1表²⁾に示します。コアのサイズは26/16と呼ばれるもので、その名のとおり直径26mm、高さ16mmです。第2表にP26/16コアの特性を示します²⁾。このコアを用いてインダクタンスLを得るために必要なターン数Nは、コアのインダクタンス係数ALより

$$N = \sqrt{\frac{L}{AL}} = \sqrt{\frac{3.488 \times 10^{-3}}{560 \times 10^{-9}}} = 78.9$$

約79ターンと求められます。しかし、使用したT-32Hコアはギャップがあり、上下のコアの角度によってインダクタンスが大幅に変わる、いえ、調整可能ですから、LCRブリッジを用いて確認する必要があります。

巻線にはLC-OFC φ0.6ポリウレタン線を使用しました。これは押し入れの中に眠っていただけで、とくに選んだ訳ではありません。個人的にLC-OFCの音は好みではありません。P26/16サイズのコアは、φ0.6を使用すると80ターンで、ぎりぎりの大きさです。電流量から考えると、線径はその1/2以下で間に合います。線材はオ



＜第9図＞ 入出力バッファ・アンプ

マイズ電気で、ポットコアはラジオエレクトロニクス1Fのアイコー電子で購入しました。

第5図(c)に電圧ソース型フィルタを示します。多くの(全部の?)メーカー製CDプレーヤの中で見かけるポピュラーな回路です。

CRフィルタでは、急峻な肩特性を得ることができません。また、LCフィルタでは、価格的にも形状的にも不利なインダクタを使用しなければなりません。これに対して、オペアンプを用いたアクティブ・フィルタは、インダクタを使用することなしに、LCフィルタと同等の特性を実現でき、さらに損失も小さくすることが可能です。しかし反面、数100kHz以上の周波数ではオペアンプのゲインが小さくなり、十分な特性を得ることができなくなります。が、40kHz程度では問題ありません。第7図に示すとおり、今回設計した回路も1MHzまで12dB/octで降下しています。

第5図(d)にGIC型フィルタを示します(GICは不思議な回路で、負性抵抗(FDNR)を構成し、LCフィルタのLとCを、RとFDNRに置き換えるものです)。GIC回路の利点は、高次のフィルタ構成に際しても設計どおりの特性が容易に得られることです。それを敢えて2次で使用します。

GIC回路も、オペアンプの特性が理想的でないためなのですが、ゲインの落ちてくる高周波領域ではFDNR

動作が理論通りにいかなくなり、フィルタ特性が乱れます。しかも単純なアクティブ回路よりも、FDNR素子そのものが動作しなくなるため、特性の乱れも大きくなります。第6図のシミュレーションでの300kHz以上の特性の乱れは、オペアンプのゲインが低下したためです。しかし、実測第7図では、それほど顕著には表れていません。

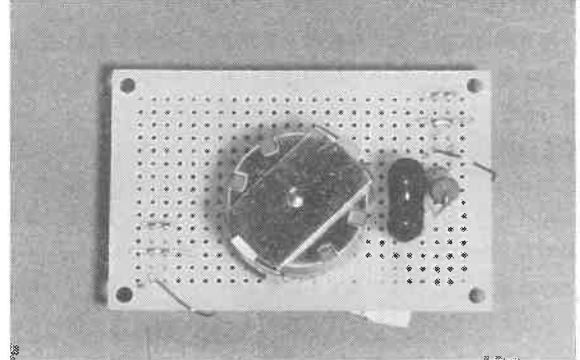
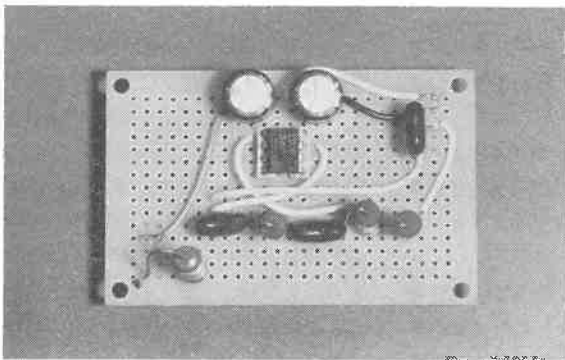
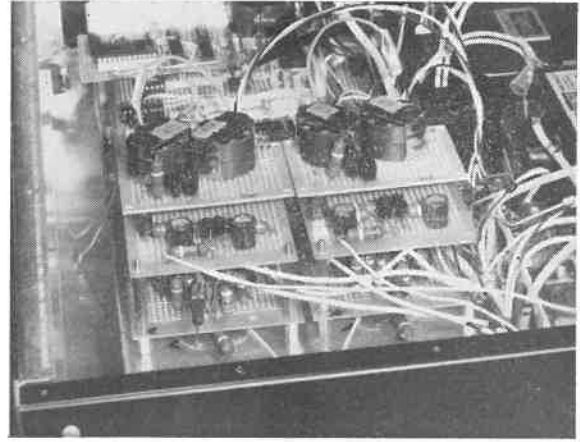
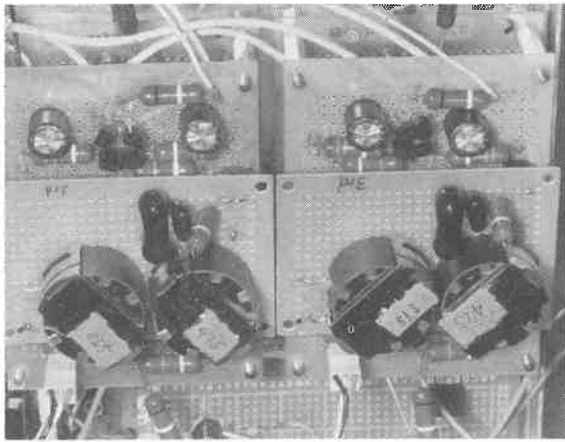
第5図(e)は、3次のGICフィルタです。

第9図にバッファ回路を、第10図にテスト基板の写真を示します。バッファは、A991/C1844によるコンプリ・EFです。テスト基板の入力と出力にそれぞれバッファを使用し、外部の影響を少なくします。

試聴結果

それでは試聴に入ります。使用したCDは、プロコフィエフ：古典交響曲——ヤルヴィ指揮 SNO (Chandos CHAN8400)、オリビヤ・ニュートン・ジョン：Warm and Tender (Mercury—日本フォノグラムPPD-9001)です。

LCとCRの2次同士です。この両者には、際だった違いはありません。LCが、弦の柔らかさに優れるというか、なまめかしいような感じがしますが、回路方式による音の差よりも、東京光音のRと、TDKコアを用いた自作コイルの音の差といった方が正しいようです。Rを各種交換比較したとき



＜第10図＞ 実験基板と実験中風景

の方が、もっともっと大きな差があったように記憶しています。オリビアでは、LCのほうが落ち着きのあるとでも表現するのでしょうか。ヴォーカルの定位がよいように感じられます。クオリティの差はないようです。この音色をどう感じるかでしょう。私はLCを採用します。

次はCRとアクティブです。やはりここでもオペアンプの音がします。明るいけれども、乾ききったような、伸びのない音です。といっても、オーケストラでは、それほど悪くはありません。1対1で比較しなければ、気にならないでしょう。しかしヴォーカルでは、冒頭から音が濁って感じられ、はっきりと優劣がついてしまいます。トーン・バランス的にも、パッシブの低域安定感がベターです。

パッシブの出力にはバッファ・アンプが必要ですが、アクティブではオペアンプがバッファの代役もしますから、出力バッファは必ずしも必要では

ありません。とすると、バッファ対オペアンプの戦いとも考えられます。確かに、バッファを使用しただけでも音質劣化があります。ですが、バッファ・アンプのほうが、ディスクリート構成のためか劣化は少ないようです。

それでは、CR対GIC2次です。が、GICもまた、オペアンプの音を強く感じてしまいます。しかも、アクティブの時には気付かなかった分解能の悪さが気になります。それではと、アクティブ回路と比較してみたのですが、やはりGICはよくありません。音色的には、GICは、さらにカラカラとした干上がった感じが強くなります。

2次と3次のGICは、相対的に3次の透明感、聴き心地のよさに軍配を上げたくくなります。再度CRと比較しても、3次のGICは、やはりオペアンプの音はつきまとうのですが、よりクリアな感じです。オーケストラでも、ヴォーカルでも同じ向傾です。フ

ィルタの帯域外雑音の除去効果でしょうか。折返し雑音の存在は、156kHzよりも上のはずです。が、実際にアナログ・フィルタなしで聴いてみると、濁ったようなひずみ感が強くなります。折返し雑音の除去量について試聴する必要があります。 (つづく)

＜参考文献＞

- 1) ウィリアムズ (加藤康雄監訳), 電子フィルタ回路設計ハンドブック, マグロウヒルブック (原題は Electronic Filter Design Handbook. すでに第2版が出版されているが, 邦訳はまだである).
- 2) TDK, 通信機用フェライト・コア・ダストコア・データブック

×
× ×
×