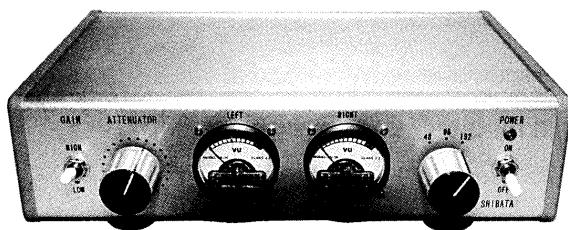


192kHz/24ビット A/Dコンバーター

柴田 由喜雄 SHIBATA Yukio



MJ2014年5月号でアンプ一体型ワンポイントマイクを紹介した。同マイクはアンプ筐体にマイクを取り付け、アンプ直近で大きな電圧信号とした後、ケーブルによってA/Dコンバーターに接続する。そして、マイクカプセル自身を除き、信号系を完全DCアンプとする試みである。同マイクの製作に引き続き、今回は完全DC構成の192kHz/24ビットのA/Dコンバーターを製作する。なお、本機の心臓部となるA/DコンバーターICには旭化成エレクトロニクスのAK5394Aを採用した。

はじめに

今年5月号で紹介したアンプ一体型ワンポイントマイクに、アンプを通してA/Dコンバーターに接続、マイクを除いて信号系を完全DCアンプとするためのDC構成192kHz/24ビットA/Dコンバーターを製作した。

CD(44.1kHz, 16ビット)が出現してから、「音の良さ」から音源がほとんどCDに変わり、現在では、一般の方の音源購入は、さらにMPEGなどネット購入に移行しつつある傾向にも見える。

もう、記事として掲載しても問題ないであろう。しかし、個人的なオーディオマニアの視点から見ると、もともとCDの44.1kHz, 16ビットではダイナミックレン

ジと方形波再現能力が著しく劣っていることは否めない。

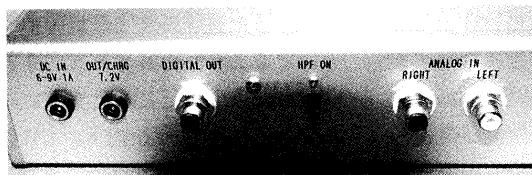
独断的ではあるが、現在ではCDドライブメカ部などもかなりよくなっているので、あえて特別高級なCDプレーヤーを用意する必要もないレベルとさえ思える。

アンプ製作マニア、特にトランジスター派は100kHzの方形波の再現性を重視するが、CDの44.1kHz, 16ビットでは方形波の再現性はまったく期待できない。トランジスターアンプ、あるいは真空管式アンプに比べると桁違いに方形波の再現性が悪い。方形波再現性は、恐らく一昔前のトランジスターラジオ並みといっても言い過ぎではないと思う。ノイズが気にならない場合、良品・良録音のレコード盤の外周側の1/4周程

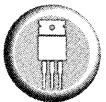
度とCDとを比較試聴すれば、細かな表現力においてレコード盤に軍配が上がる可能性もある。

もう少し考察してみる。まず、44.1kHzである。たとえば10kHzの波形を10等分して(10段階で)再現しようとすれば、シャノンの定理を参考にして、サンプリング周波数は最低限 $10000 \times 10 \times 2 = 200\text{kHz}$ 程度必要となる(一周波数の純サイン波のみの再現でなければ、必要なサンプリング周波数は20kHzである)。

次に、16ビットである。ダイナミックレンジは極限の1ビットまで使用できると極論すれば、 $20\log 2^{16} = 96\text{dB}$ とされるが、デジタル録音では大音量でクリップすると、クリップノイズとして破綻してしまうので、必ず10数dBの余裕が必要となる。したがって、たとえリハーサルの効く録音でも、実用ダイナミックレンジは80dB程度に下がると見る必要がある。それに比べ、レコード盤の基になるテープ録音の場合は、ノ



[写真1] 背面は、左から6~9V/1A DC IN, 7.2V OUT/CHRG, デジタル出力端子, HPFスイッチ, アナログ入力のR, L-ch端子



イズ的なクリップではなく、波形のなまりとして現れるので、テープ自体のダイナミックレンジがフルに使え、実際には0dBまで使用しても違和感はさほどない。結果的に、テープ録音とCDのダイナミックレンジはかなり縮まる。

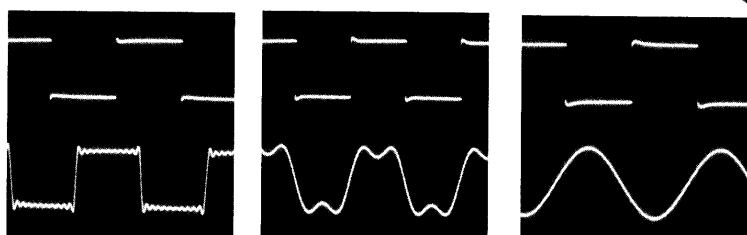
参考までに、方形波の再現性をオシロスコープで観察した写真を写真2~10に示す。

写真2~4はサンプリング周波数が48kHz (DATなどのサンプリング周波数), 写真5~7は同96kHz, 写真8~10は同192kHzであり、それぞれ、方形波の周波数を1, 5, 10kHzと変えた場合である。上側がA/D入力波形、下側がD/A後の出力波形である。

サンプリング周波数が48kHzの場合、方形波の再現性は甘く見ても5kHz程度であろう。これらの事実は、すでにだいぶ以前からわかっていた。

では、なぜCDが「音がよい」ものとして受け入れられたのであろうか。音源を単にサイン波の集合と解釈するには位相面でかなりの無理がある。恐らく、レコード盤の傷や付着物によるチヂミノイズ、あるいは汚れによるノイズがないこと、針のトレース音がないこと、盤の大きさや汚れなどの面で扱いや管理が楽になったこと、盤の内周側で音質が悪くならないこと、そして、レコードメーカーが容易に加工できる(耳障りなノイズを除いたり、聴きやすく変えることができる)こと、などが主たる根拠であろう。

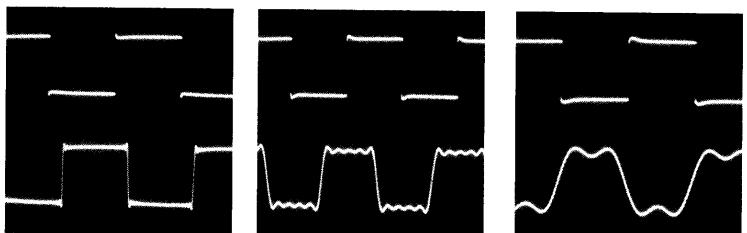
だが、いずれも収録した音源のニュアンスを忠実に再現するという観点から、その多くが多少ずれているように思える。CDは、確かに最初のうちはS/Nが著しく改善されたかに見えた。しかし、



[写真 2] 方形波再現波形
(サンプリング周波数48kHz,
 $f=1\text{kHz}$, 上:A/D入力, 下:
A/D出力)

[写真 3] 方形波再現波形
(サンプリング周波数48kHz,
 $f=5\text{kHz}$, 上:A/D入力, 下:
A/D出力)

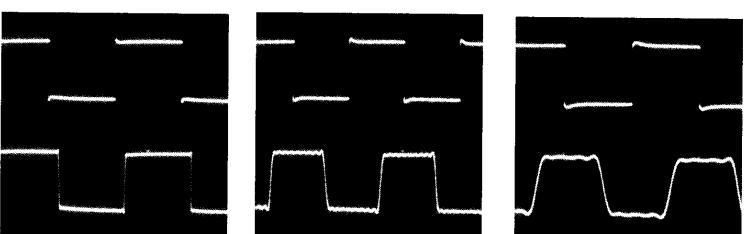
[写真 4] 方形波再現波形
(サンプリング周波数48kHz,
 $f=10\text{kHz}$, 上:A/D入力, 下:
A/D出力)



[写真 5] 方形波再現波形
(サンプリング周波数96kHz,
 $f=1\text{kHz}$, 上:A/D入力, 下:
A/D出力)

[写真 6] 方形波再現波形
(サンプリング周波数96kHz,
 $f=5\text{kHz}$, 上:A/D入力, 下:
A/D出力)

[写真 7] 方形波再現波形
(サンプリング周波数96kHz,
 $f=10\text{kHz}$, 上:A/D入力, 下:
A/D出力)



[写真 8] 方形波再現波形
(サンプリング周波数192
kHz, $f=1\text{kHz}$, 上:A/D
入力, 下:A/D出力)

[写真 9] 方形波再現波形
(サンプリング周波数192
kHz, $f=5\text{kHz}$, 上:A/D
入力, 下:A/D出力)

[写真 10] 方形波再現波形
(サンプリング周波数192
kHz, $f=10\text{kHz}$, 上:A/D
入力, 下:A/D出力)

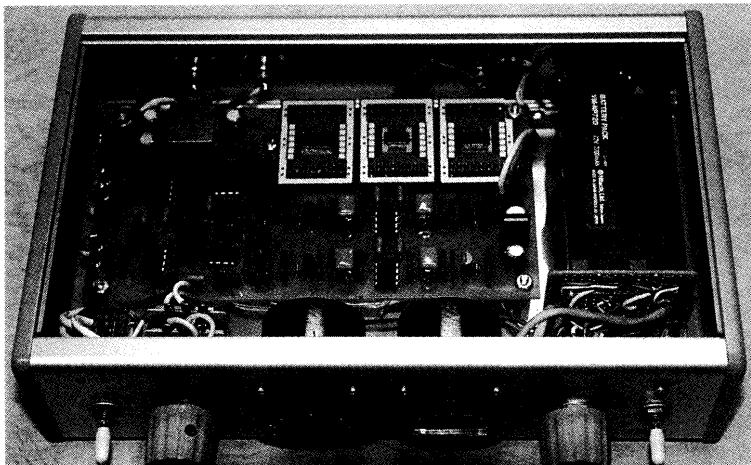
筆者は、CDのすべてではないが、CD特有の何か均質的な音質傾向に疑問を抱くようになってしまった。はっきりはわからないが、上記ダイナミックレンジ、サンプリング周波数、および音源の「加工」(スタジオミクシング)が1つの根源にあるのではないかと推測している。もともと、本機のような録音装置を製作しているのも、そういった背景による。

少し前置きが長くなつたが、現状では、やはりデジタル録音は192kHz、24ビット以上が適当であろうということである。それに、表面上ではあるが波形再

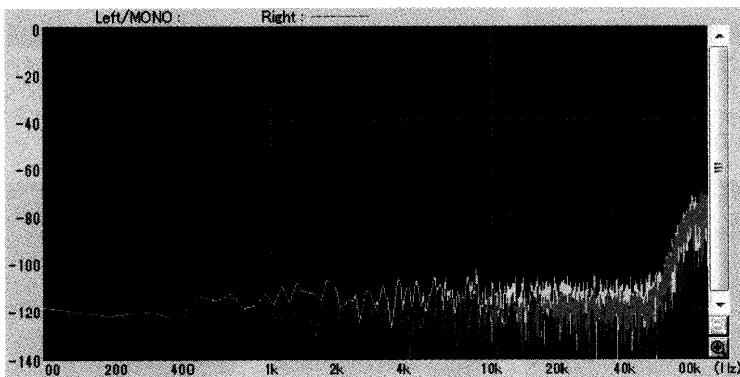
現能力やダイナミックレンジがかなり改善される。ただし、最後に述べるが、192kHzではA/Dコンバーターに使用するICのノイズフロア(信号がない状態でのノイズ)が実測-120dB程度であるという限界(実力)はある。また、ファイルサイズがCDの6~7倍に増大する。

AK5394Aの採用

A/Dコンバーターの心臓部となるA/D変換ICには旭化成エレクトロニクスのAK5394Aを採用した。初期段階ではTI(旧バー・ブラウン)製のPCM1804を使用



[写真 11] 初期に製作したA/D コンバーターの内部



[写真 12] インターネット製ソフトウェア Sound it で見たPCM1804周波数特性(24ビット/192kHz)

していた。PCM1804はサンプリング周波数が44.1, 48, 96kHzまではまったく問題ではなく、ひとまずタカチ電機工業のケースに文字彫刻を施した筐体収納まで完成させた(写真11)。

しかし、その後、サンプリング周波数192kHzにおいて、無音にもかかわらず、接続したR-44のメーターが最小になりきっていないことに気が付いた。音出しでは気が付かなかったものである。パソコンの周波数アナライザ機能(本稿では(株)インターネット製のソフトウェアSound itを用いた)で見てみると、 $f_s/2=96\text{kHz}$ に向かってノイズフロアが著しく増大していることが判明した(写

真12)。ちょっとしたアースの取り回しが悪いのであろうと勘ぐって、いろいろとアース関連を変更したが直らない。そこで、ネットではかのA/D 変換ICの公開技術資料を見ているうちに、ノイズフロアがサンプリング周波数/2に向かって、程度の差はあるが増大しているものが多いことがわかった。この理由はまだわからないが、とりあえずIC内部のレイアウト(飛び付き)か、あるいは、A/D 変換ロジック的なことによるものであろうと結論づけた。

PCM1804は96kHzまではきわめて優れているが、192kHzを主とする今回はあきらめ、新たに公開技術資料で、最もノイズフ

ロアの増大傾向が少ないとと思われる旭化成エレクトロニクスのAK5394Aを採用して再製作することにした。

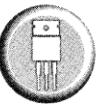
AK5394Aは製作結果でもノイズフロアの増大傾向はなく、優秀なICであることがわかった。ただ、AK5394Aは大手企業向けにしか販売されておらず、筆者も旭化成エレクトロニクスに問い合わせたが、少量の販売は困難との回答をもらった。やむを得ず、今回はいわゆる市場流通品(メーカーの在庫処理品など)を業者から入手して製作した。

最近のICはパッケージも一回り小さくなった(短ピッチの)ICが多い。それにもかかわらず、大パッケージのAK5394Aは24ビットではあるものの健在で、際立った存在にも見える。すでに発売からだいぶ経っていることもあるので、ぜひとも市販を考えていたいものである。

オペアンプICの使用

A/D コンバーターのRCAアンバランス入力～AK5394Aバランス入力変換(反転)にはオペアンプICを用いた。旧来、筆者などアンプ製作マニアはオペアンプICの使用は躊躇するものの、デジタル処理に伴うということで、今回は許容することにした。最近では、超高級といわれるアンプでさえ、オペアンプICやチップ部品を採用しつつある。量産品では廃品種の相次ぐディスクリート部品の大量の継続的な仕入れが困難となつたのであろう。

本機では、ディスクリート部品で組むと筐体が大きくなり、機動性(持ち運び)が著しく低下するといった理由からもオペアンプICを用いることにした。



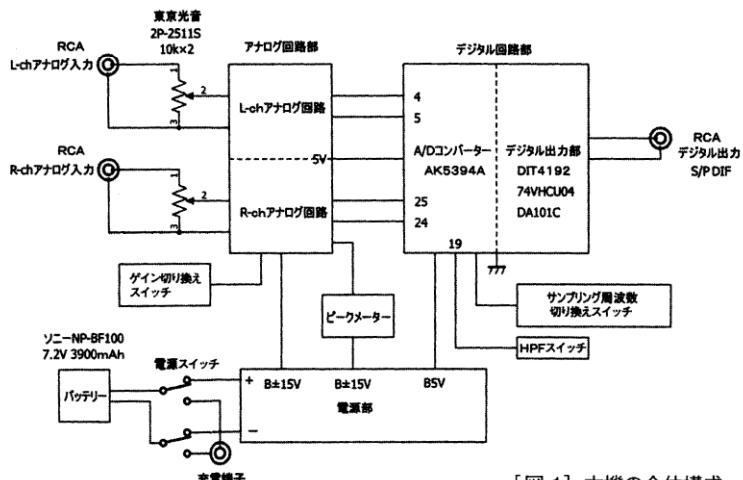
AK5394Aのメーカー発表回路例ではNJM5534が使用されているが、筆者はFET入力のOPA134およびOPA2134を用いた。カタログ上は、OPA134およびOPA2134は、入力オフセット電圧が $\pm 2\mu V/^\circ C$ と非常に小さいものである。ただし、あくまでも「完全DCアンプ」の一環なので、カップリングコンデンサーは用いない回路構成とした。

基本となる回路は、AK5394A発表回路に記載があるように、一般的な入力信号を2つのルートに分け、一方を反転するものである。おおむねの回路定数などは、PCM1804およびAK5394Aの公開技術資料をネットでダウンロードすれば、特別な説明は必要ないであろう。ただし、AK5394Aの発表回路では、恐らくカタログスペック上のS/Nを上げるために、回路定数がやや低めのインピーダンスになっており、NJM5534への負担がやや大きいようにも思われる。

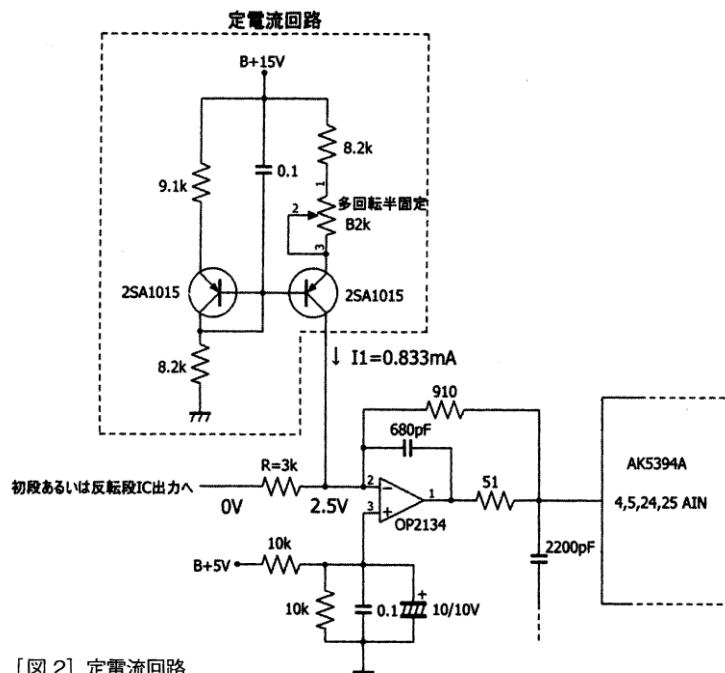
本機の回路構成

図1に全体構成を示す。本機で特徴的のは、アナログ回路部にてAK5394Aの差動入力(4, 5, 24, 25番ピン)の電圧を基準電圧2.5V(=電源電圧5V/2)までシフトするために、図2に示す定電流回路と昇電圧用抵抗 $R=3k\Omega$ を計4か所に用いている点である。 $I_1 \times R = 2.5V$ 。こうすることによって、RCAアナログ入力からデジタル出力まで「完全DC化」が達成できる。定電流回路に使用したトランジスターは汎用の2SA1015である。

アナログ回路を図3に示す。10k Ω ボリューム(東京光音電波製2P-2511Sアッテネーター、秋



[図1] 本機の全体構成



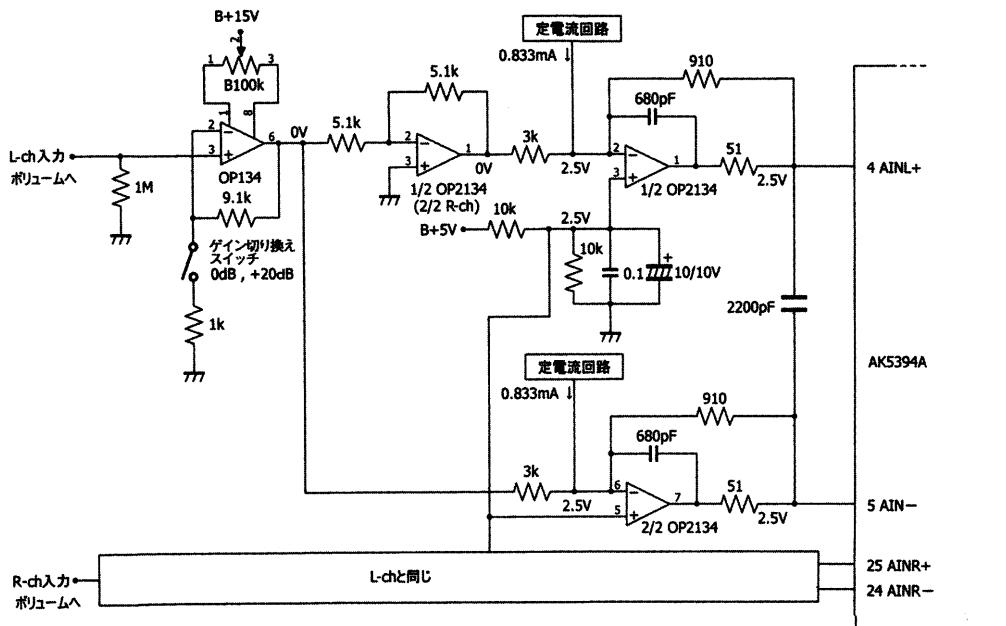
[図2] 定電流回路

葉原の三栄電波で入手)からの入力をOP134に入れる。入力部に2回路のOP134ではなく、1回路のOP134を用いたのは、上記定電流回路の電流調整(2k Ω (B))とともに、特に+20dBゲイン(スイッチで切り換える)の際の、本機全回路の最終DCオフセットを多回転半固定抵抗100k Ω (B)によって厳密に0Vに調整するためである。

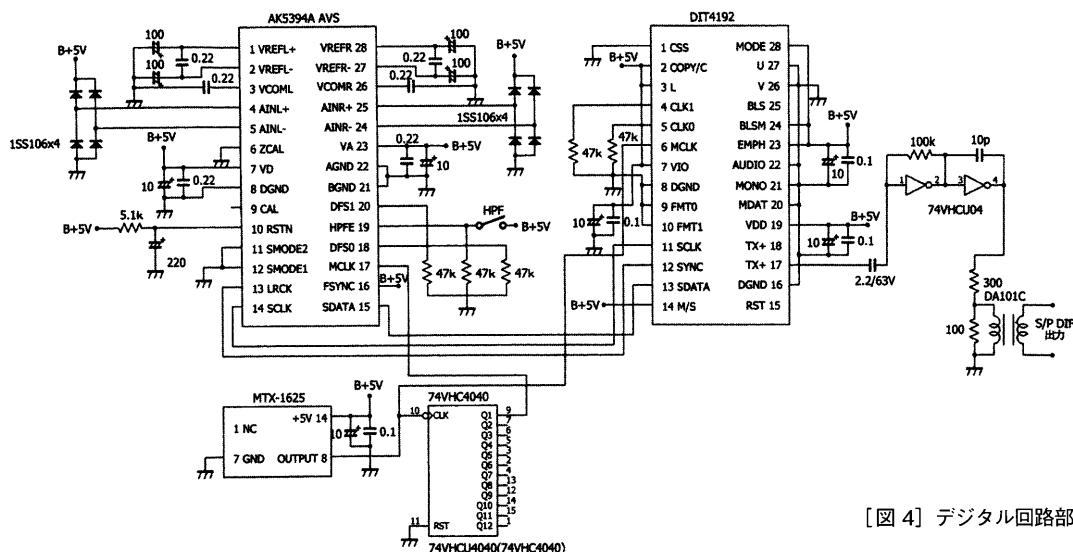
OP134の出力は2系統に分か

れ、一方の系統が1/2 OP2134によって反転される(ほかの1/2 OP2134は他チャンネルの反転に使用される)。分岐された反転しない出力と反転した出力の2つの出力は、それぞれ次段のOP2134によって、不要な高域成分(おおむね250kHz以上の成分)をカットして、A/DコンバーターAK5394Aに差動入力(バランス入力)として入力する。

アンプ部の高域をカットするた



[図3]
アナログ回路部



[図4] デジタル回路部

めの諸コンデンサーはディップマイカを用い、アンプ部および後述のデジタル部における抵抗はニッコーム RP-24C, 0.数 μF 程度の小容量コンデンサーはニッセイ電機のメタライズドポリエスチルフィルム、電解コンデンサーはOSコンを用いている。小容量コンデンサーは安価な積層セラミックコンデンサーでも代替可能である。また、小容量コンデンサーを並列にしていれば、OSコンも通常の

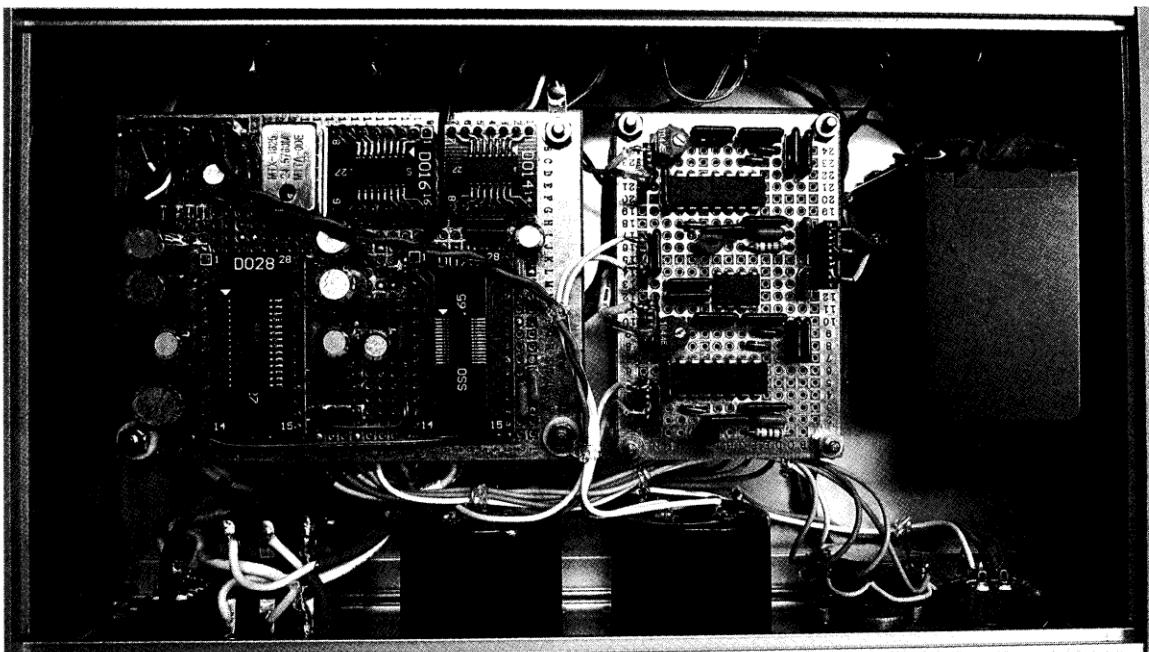
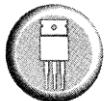
電解コンデンサーで代替可能と思われる。要は高周波特性のよい小容量コンデンサーをICのピン直近に配置することである。

デジタル回路部を図4に示す。デジタル回路部は主にA/Dコンバーター AK5394A, 24.5760 MHz の水晶発振器MTX-1625と周波数ダウンのための74VHC4040, トランスマッターのDIT4192 (TI), 波形成形のための74VHCU04, およびパルスト

ランスDA101Cからなる。

AK5394AおよびDIT4192は小型の変換基板ダイセンD028に実装している。74VHC4040および74VHCU04は変換基板ダイセンD014に実装している(いずれの変換基板も千石電商にて入手した)。

水晶発振器MTX-1625はAK5394Aの評価ボード技術資料に記載のあるように、74VHCU04による一般的な発振器でも使用可



[写真 13] 左上部のユニバーサル基板はアナログ部基板を下に(写真では裏からなので見えない)、その上にデジタル部基板(写真は裏からなので見えている)を2段重ねして配置した。その基板の間には、同種の基板を単にシールドとして挟んでいる。

能である。なお筆者は、24.5760 MHzの三田電波の水晶発振器 MTX-1625を秋葉原の東京ラジオデパートで入手したが、いろいろな店がない場合は特注が必要になるかもしれない。

AK5394Aおよびトランスマッター **DIT4192**に関する解説は、ネットで技術資料が入手できるので、それを忍耐強く読んでいただきたい。うまく動作しない場合は、必ず読まなければならないものである。

サンプリング周波数 f_s と **AK5394A** の18番ピン DFS_0 、20番ピン DSF_1 、**DIT4192** の5番ピン CLK_0 、4番ピン CLK_1 のH-L関係(5-0V関係)を表1に示す。サンプリング周波数 f_s の切り換えは4回路3接点のロータリースイッチで行う。本機では44.1kHzは省略し、48、96、192kHzとした。トランスマッター **DIT4192** の出力は波形整形の目的で **74VHCU04**を入れているが、結果

[表1] サンプリング周波数とH-Lレベル ($H=5V$, $L=0V$)

f_s [kHz]	AK5394A		DIT4192	
	DFS_0	DSF_1	CLK_0	CLK_1
48	L	L	H	H
96	H	L	H	L
192	L	H	L	L

的になくても問題ない。

S/P DIF出力は米国Murata Power SolutionsのパルストランスDA101C(秋葉原の海神無線で入手)を用いて、デジタル同軸出力をグラウンドから浮かしている。これもノイズの少ない環境では省略できるであろう。

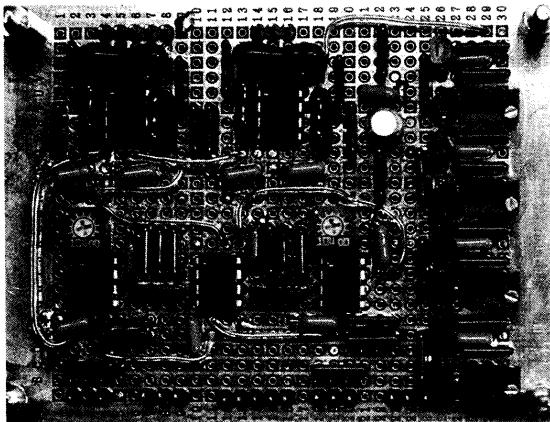
すなわち、トランスマッター **DIT4192**の出力(5V_{p-p})を300Ωと100Ωの抵抗で分割して、直接S/P DIF出力として特別な問題はないであろう(筆者は、予期できないノイズを嫌ってパルストランスを入れたが、むしろこのダイレクト出力のパルス波形が最もきれいであった)。

パルストランスDA101Cはきわめて優秀な1:1の伝送特性を

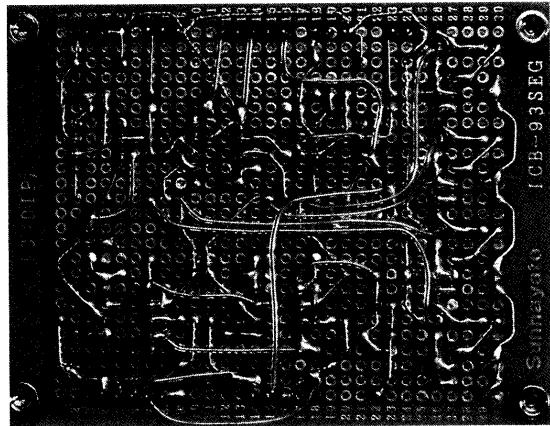
有する(たとえば、MJ2011年10月号の柴崎功氏記事参照)が、大きな電流を流すと、特性が極端に落ちる小型のパルストランスなので、DA101Cの後に300Ωと100Ωを配置して、5V_{p-p}の電圧を下げることはできない。参考までに、S/P DIF仕様は75Ω±20%の出力インピーダンスで出力電圧が0.5V_{p-p}±20%である(出力電圧は、本機につながるケーブル終端抵抗75Ωを考慮する必要がある)。

内部構成

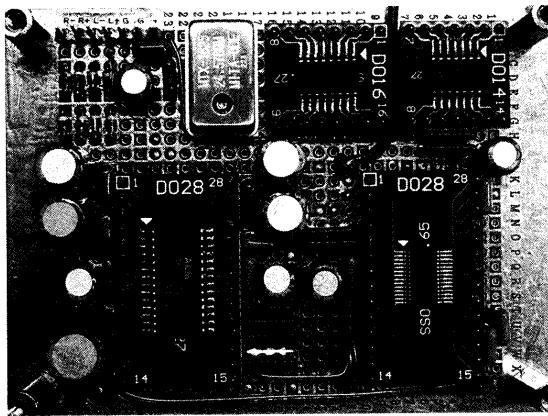
製作した内部構造を写真13に示す。筐体にはタカチ電機工業のCH6-22-14を用いた。このケースは天板がアセンブリー状態でビ



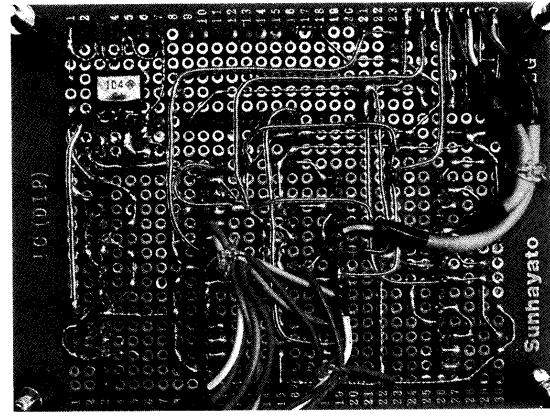
[写真 14] アナログ部基板の表面



[写真 15] アナログ部基板の裏面



[写真 16] デジタル部基板の表面



[写真 17] デジタル部基板の裏面

どる欠点があるので、天板を手でわずか上面を凸にしならせて(曲げて)からサイド側から差し込むようにするとよい。文字の彫刻は秋葉原の奥澤1号店にお願いした。

ユニバーサル基板によって作成した、基板の表裏の部品配置・配線を写真14、15に示す。筐体の左方に、サンハヤトのユニバーサル基板ICB-93SEGを用いたアンプ部(写真14、15)を下に配置し、その上にデジタル部(写真16、17)を2段重ねして配置している。

アンプ部とデジタル部の間には、上記と同種のユニバーサル基板を単にシールド(ダミー)として挟んでいる。筐体の右側では、サンハヤトのユニバーサル基板ICB-

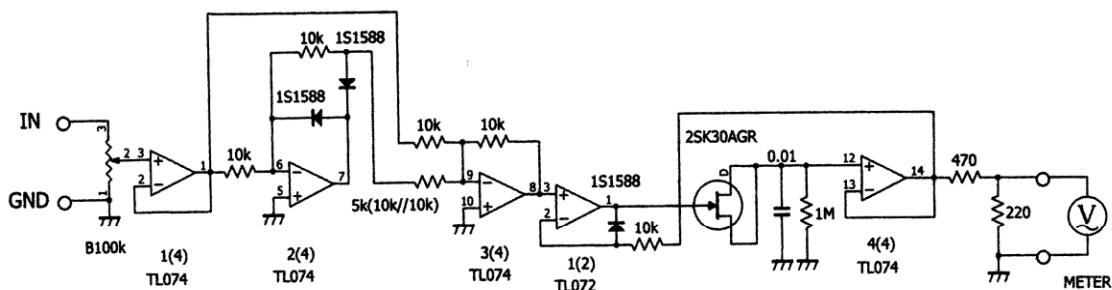
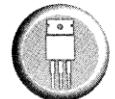
88SEGを用いた電源部を下に配置して、その上にピークメーター回路を2段重ねして配置している。

アンプ部とデジタル部ではベタアース方式を採用しているが、本機ではアナログ部表面はアナロググラウンドの配線にも使用し、デジタル部表面は単なるシールド面として用いている。デジタル部表面をルーターでA/D部、発振器部、トランスマッター部の境界を削り取ってグラウンドを分割して配線することも試みたが、本機以上のものは見出せなかつたので、別の機会での宿題とした。ただし、裏面ではA/D部にてL、R-chが極力対称的になるように、またA/D部、発振器部、トランスミ

ッター部からのグラウンドを1点アースに近い形で配線している。写真13あるいは写真16で、右上から上方に伸びている太めの線は、1点アースから伸び、基板右上の六角スペーサーのポイントで実装時に筐体にアースされている(筐体へのアースはこの1点のみ)。

完全DCマイクアンプの場合と同様に、配線の短い部分は部品のリードなどを利用し、長い部分は撲り線をハンダメッキしたものを使用し、ジャンパー線はフッ素樹脂被覆金メッキ導線(アムトランス)を多用している。

ピークメーター回路は一般的な回路(図5)としている。ピークメーターの指示はメカ式の小型



[図 5] ピークメーター回路

VU メーター（秋葉原若松通商で入手、色違いが三栄電波に在庫あり）を用いているので、パルス信号に対しては相応（3dB 程度）の誤差が出る。実際の使用時には R-44 の液晶メーターをレベル監視に用いている。ピークメーター回路の入力はアナログ回路部初段 OP 134 の出力部分に接続している。

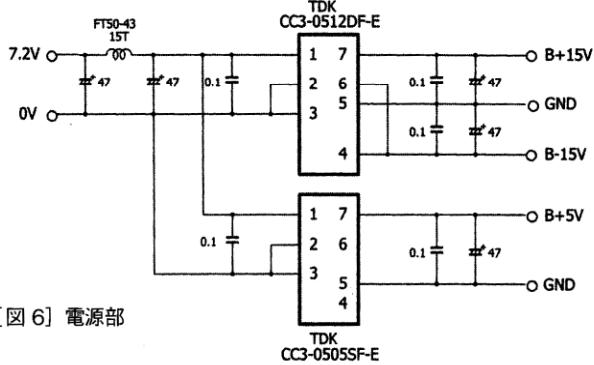
電源部は完全DCマイクアンプと同様にスイッチング電源を用いている。デジタル部用の5V 電源（TDK 製 CC3-0505SF-E）とオペアンプ用の±15V 電源（TDK 製 CC3-0512DF-E）である（図6）。

バッテリーはソニーのリチウムイオン電池NP-FV100（容量3900mAh）である。電池への配線取り付けは、まず金メッキした適度の厚みの板部品（たとえば金メッキワッシャー）を適度な大きさに切断し、配線をその板部品の端にハンダ付けした後、電池の電極部に差し込む。配線をエポキシ系接着材などで電池に固定し、電極部を絶縁テープなどで保護しておく。

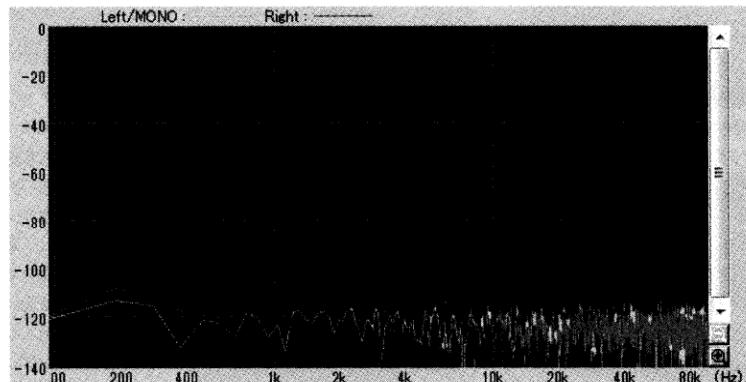
電池の充電に関しては、完全DCマイクアンプの場合と同様にして行う。

本機の特性

A/D コンバーターなので、D/A コンバーターと組み合わせては



[図 6] 電源部



[写真 18] AK5394A 周波数特性 (24 ビット / 192kHz)

じめて諸特性が成り立つ。ここでは、完全DCマイクアンプおよびR-44と組み合わせて、実使用を何回か行ってもまったく問題がなかったと述べるにとどめる。

参考までに、パソコン周波数アナライザで観測した本機の192kHz時の無音時ノイズフロア表示結果を写真18に示す。-120 dB レベルであり、サンプリング周波数/2へ向かって増大傾向もまったくない文句ない特性である。なお、同時に48kHzや96kHzのノイズフロアも観察した。その結

果、サンプリング周波数の増大とともに、無音時の全周波数にわたってノイズフロア全体が著しく増大する傾向にある。48kHzや96kHzでは無視できるレベルではあるが、現状ではデジタル化のメリットを勘案すると、192kHzが限界のようにも感じられる。

完全DCマイクアンプと完全DCのA/Dコンバーターの完成で、しばらく本機と完全DCマイクアンプによる収録は1つの期待と楽しみ（あるいは収録失敗の落胆）になっている。