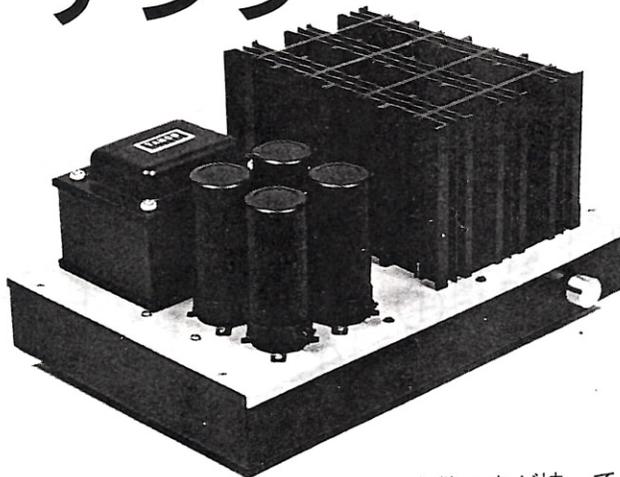


リファインシリーズ (3)
純A級 100W/4Ω

MOS-FET終段NO-NFB モノラルパワーアンプ

窪田登司



昨年12月号でお約束しましたとおり、終段を MOS-FET にした純 A 級 100W/4Ω NO-NFB パワーアンプの報告をします。

前回のトランジスター式と対決したヒアリング結果は後述することにして、じつは本機に使用した MOS-FET、ソニー 2SK722/2SJ131 には異議ありともいえる結果になりました。というのは東芝 2SK405/2SJ115 は秋葉原でも在庫がなく、それに代わるものとして 2SK722/2SJ131 を使用したのですが、バイアスは大体同じで使えるものの、ゲートが弱いせいか購入した何組もに不良品があり、バラツキも大きく、いくつも取り替えてやっと鳴るようになりました。一度ハンダ付けしたので不良品を取り替えてくれともいえず、気分的にはよくないアンプになってしまいました。

まえおきはこのくらいにして、今回のアンプは12月号の回路と

同一で終段のみ MOS-FET に変更し、それに伴いバイアス回路の定数を変更しただけです。以下簡単に説明しておきましょう。

回路構成

DC アンプ構成

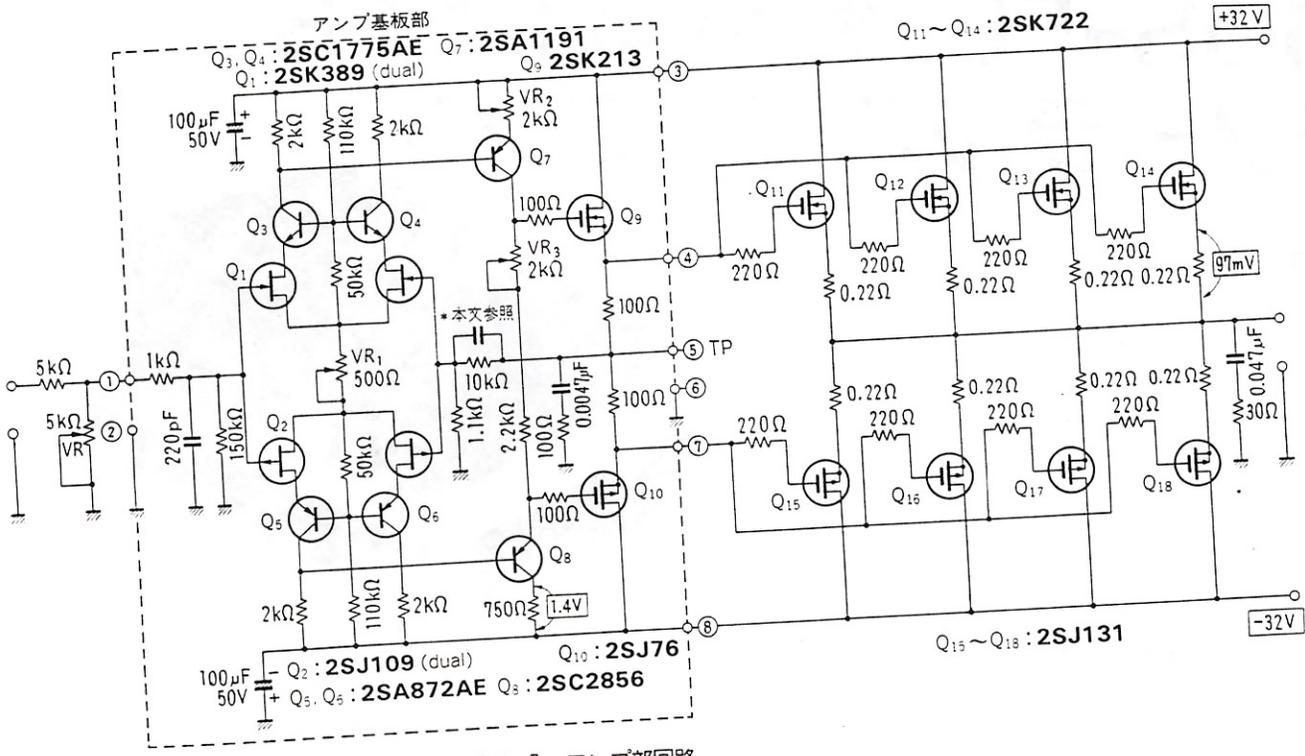
図1にアンプ部回路、図2に電源部回路を示します。回路を見てオヤツと思われる読者が多いことでしょう。そう、完全 DC アンプになっています。

じつは2か月ほど前、ある読者から手紙がきまして、その内容は「なぜ AC アンプなのですか？ 以前から帰還回路には 1000μF が入っていたし、多重帰還形もしょせんは AC アンプです。最近発表されているアンプもコンデンサーによる NFB 回路になっているし、どうも AC アンプであるのが気になります。DC アンプにすると何か不都合でもあるのですか？」というものでした。

この疑問は多数の方が持っていたかも知れません。答えは、「直流安定度を上げるため」としかいいようがないのですが、今までにも何度か記事中に書いたように、私のアンプは即 DC アンプになります。帰還回路を抵抗で構成するだけで何ら不都合のない DC アンプになります。

帰還量を減らして増幅度を上げるとそれだけ直流安定度は落ちるので、多重帰還型や 1000μF による 100% 直流帰還型、つまり AC アンプにしていたのであって、本機のように電圧増幅段の増幅度が約 10 倍という、大量の NFB を掛けたアンプでは、抵抗だけの構成で DC アンプにして何ら問題はありせん。

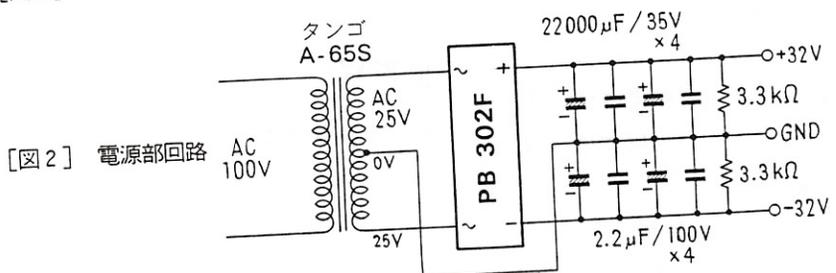
そこで前回のアンプも、図3のように帰還回路の 1200pF、0.01μF、33MΩ を取外し、本機と同じ 1.1kΩ と 10kΩ にしてヒアリングしています。特性面でもヒアリングでも DC アンプの方



[図1] アンプ部回路

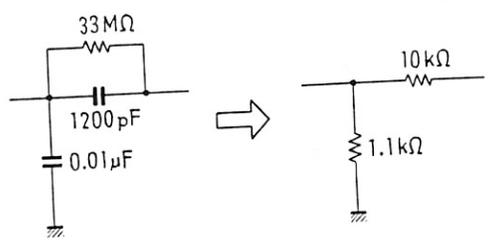
が良い結果です。

ただし、先に述べたように100倍など大きな増幅度にする時は、帰還回路の抵抗が1kΩと100kΩのような値になるので、DCアンプ構成では直流の帰還量が少なくなり安定度の点で不利です。1000μF程度を入れたACアンプ構成にするか、DCサーボを掛けるようにしなければなりません。何が何でもDCアンプの方が良いのだということではないので、ケースバイケースであることを肝に命じるべきです。



[図2] 電源部回路

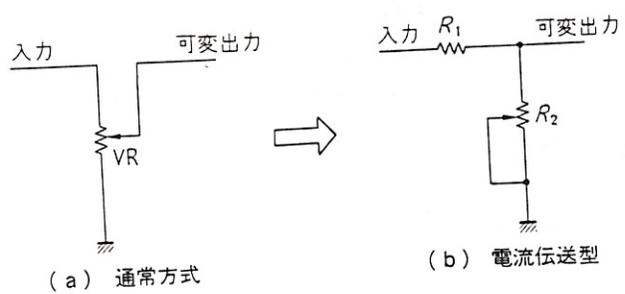
[図3] 帰還回路を変更しDCアンプとする

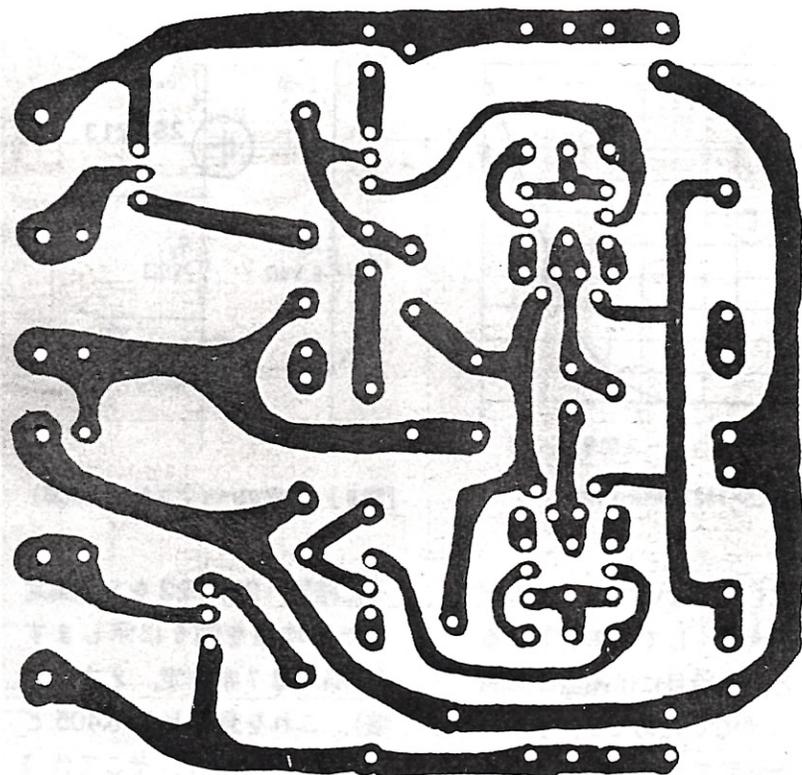


入力回路にボリュームを装備

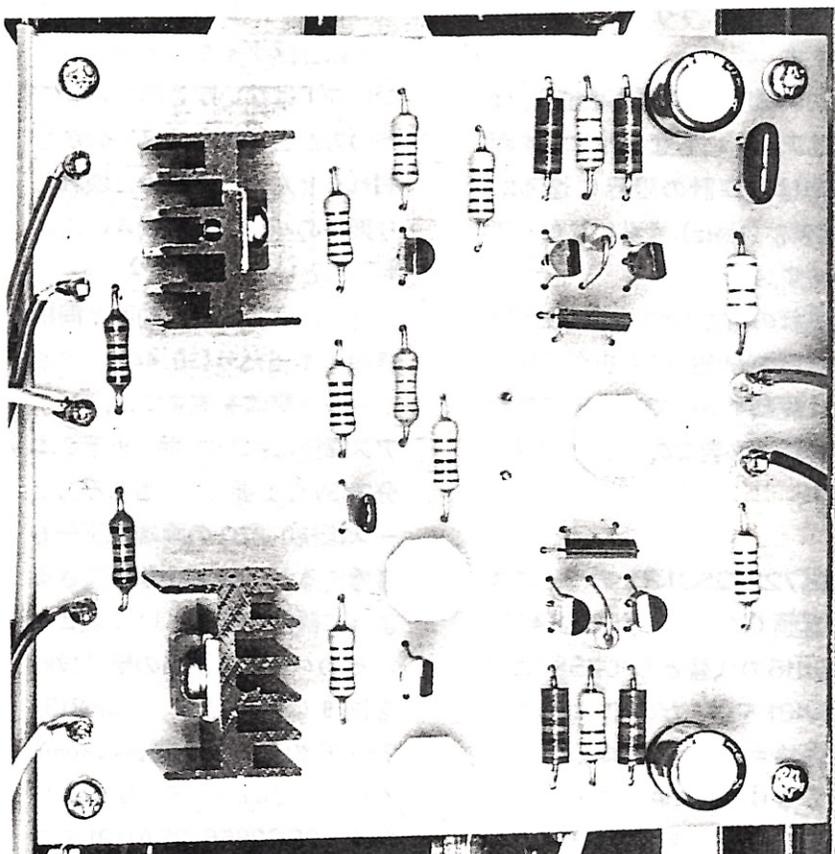
CDプレーヤーなどをダイレクト接続できるように、ボリュームコントロールを追加しました (前回のアンプも同様に変

[図4] 入力のレベルコントロール





プリント基板パターン面



部品実装の状態

更). 通常は図4(a)のように定電圧信号を電圧分圧してコントロールしますが、本機では(b)の電流伝送形の構成にしています。回路は信号源抵抗を R_1 によって大きくして定電流化し、 R_2 によってレベル可変します。摺動接点 が常にアースされているので S/N 的には有利です。

デメリットもあります。それは CD プレーヤーなりプリアンプなり、接続する機器側にとっては、ボリュームを回すことによって負荷の値が変わることです。同図(b)を見てわかるように、レベルを最大にした時に入力インピーダンスは最大となります。ボリュームを絞り込んだ時には機器の負荷は R_1 だけになります。

このように R_1 の値は重要なファクターとなり、あまり小さい値にはできません。最近の CD プレーヤーの出力インピーダンスは 100Ω 程度とかなり小さめになっているので安心ですが、それでも中には 600Ω とか $1k\Omega$ などの大きな値もあります。そういう機器では $R_1 = 1k\Omega$ などとすると、プレーヤーにとって過負荷になり低歪み動作をしなくなる恐れがあります。また出力コンデンサー付きの場合、低域周波数特性の劣化も招きます。

したがって R_1 の値は前段にどういう機器が接続されるかがわかっていないと安易に決められるものではありません。基本的には小さい方が S/N も周波

数特性も良好になりますが、前段にとっての負荷は重くなり危険、反対に大きくすると前段の負荷は軽くなり有利ですが、周波数特性は悪化します（本機の入力の220pFを取ったとしてもゲート入力容量その他の影響が出ます）。

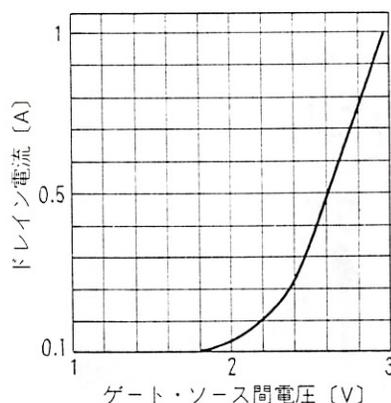
以上から考えると、大抵のCDプレーヤーやプリアンプにとって安全であるには5k Ω 以上、20k Ω 以下という線が妥当といえます。

それからもう一点、デメリットとはいえないかも知れませんが、信号レベルが原理的に低下することです。本機はR₁とR₂に5k Ω を使用しているので、最大ボリューム時でも信号電圧は半分になっています。つまりアンプ本体の増幅度は約10倍ですが、結果的に約5倍くらいになってしまいます。

初段と電圧増幅部

初段のデュアルFETは東芝の最新ローノイズ接合型2SK389/2SJ109です（前回、'94年12月号掲載の伝送特性は2SK386と誤植されているので2SK389と訂正します）。本機使用のランクはGRですが、BLでもかまいません。その場合はドレイン電流を若干多めの1.5mAくらいにします。本機のGRでは1mAに設定しています。

カスコード接続はトランジスタによるもので、2段目もトランジスタを採用しオール



[図5] 2SK722実測伝送特性

FETにしていけないのは、裸のゲインを大きくして歪率を下げるためと、2段目には適当な高耐圧FETがないためです。中出力電圧増幅用のMOS-FETもあるようなので、試用して良い結果が得られるようならいずれ紹介します。

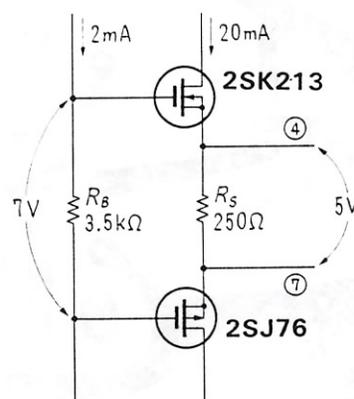
この電圧増幅部(基板部分)はプリアンプにもなるわけですが、歪率は歪率計の限界に迫る0.0002% (1kHz) くらいになっています。

基板の出力(ピン④および⑦)で終段のMOS-FETをダイレクトに駆動するので、バイアスがどの程度必要なのか次に検討します。

2SK722/2SJ131のバイアス

冒頭で述べたように2SK405/2SJ115の代替として2SK722/2SJ131を選んだので、はじめに伝送特性を調べてみました。

かなりバラツキがあり、1個1個で随分と特性に開きがあります。どれを掲載しようかと迷

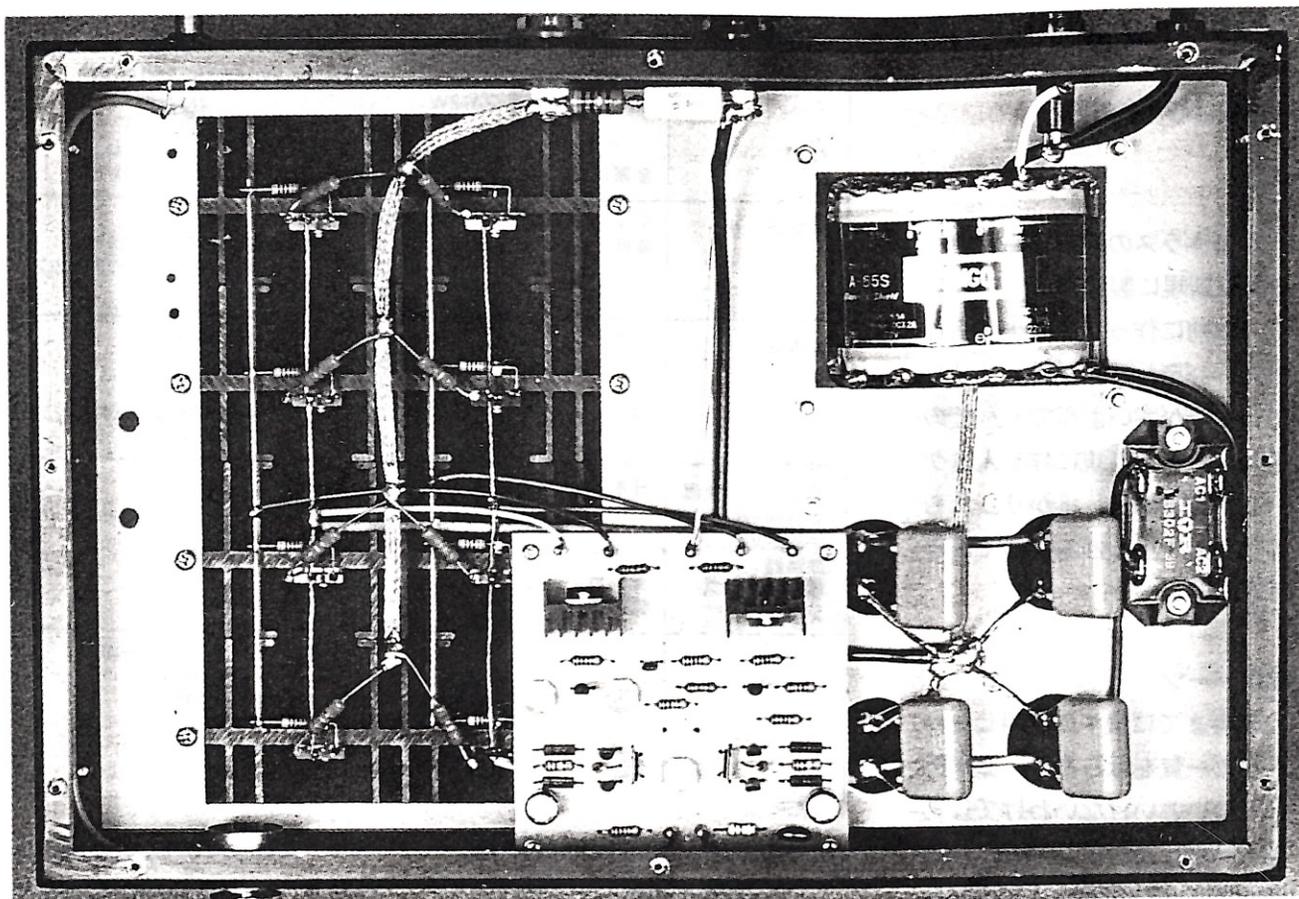


[図6] 終段のバイアス計算(概算)

った結果、2SK722を5本測定した平均値を図5に示します（実際には7本測定、2本は破壊）。これを見ると2SK405と大体合っています。そこで代替品とか相当品といわれているのでしょうか、私の勘では多分ゲートに保護ダイオードが入っていないのではないかと思います。その方が音質的には良いのかも知れませんが、測定中に壊れたり素子のバラツキが大きいのはちょっといただけません。

それはさておき、前回と同様、終段1本当たりには0.44Aのアイドリング電流を流すには、バイアス電圧は約2.6V弱、上下2本分で5V位必要です。もちろんソース抵抗0.22 Ω の両端電圧分も考慮すると、5V以上調整できるように設計しないといけません。

そのバイアス回路の概算設計を図6に示します。2SK213/2SJ76のドレイン電流は20mAくらい、そのバイアス電圧は1V前後、2SC2856/2SA1191のコレクター電流は2mAくらいと



前作 Tr バージョンから放熱器と基板の配置を変更したが、基本的なワイヤリングは同じ

して概算しています。

そうすると R_s は 250Ω となるので $125\Omega + 125\Omega$ ですが、若干ドレイン電流を多めにすべく $100\Omega + 100\Omega$ とします。また R_B は可変にして調整するため、固定抵抗 $2.2k\Omega$ と可変抵抗 $2k\Omega$ を直列にします。

このようにすると大幅に可変できるので、終段の MOS-FET に東芝の 2SK1530/2SJ201 (足は左から G ゲート / D ドレイン / S ソース、ソニーと同じ) も使用できます。推薦は日立の 2SK1056/2SJ160 (またはこのシリーズ、足は左から G ゲート

/ S ソース / D ドレイン) ですが、その場合はバイアスが大きくなり過ぎるので固定抵抗を $1k\Omega$ 位にします。

なお 2 段目 $Q_7 - Q_8$ に流れるコレクター電流は、今回はバリスター STV-3H の動作電流も加味して約 $3.2mA$ に設定していましたが、本機は一層のローノイズ化、低歪み化のため最終的には約 $1.87mA$ になっています。

アンプ基板

多数の希望者がありましたので、プリント基板を 1 枚 ¥1,500 で頒布することになりました。

希望者は往復はがきで「MJ 編集部・窪田アンプ基板係」まで申し込んで下さい。

基板は本機の回路が基本推奨回路です。誠文堂新光社から近刊予定の拙著『アンプ設計製作のノウハウ』にも採用した安定度の高いアンプです。ヘッドフォンアンプにもなるし、プリアンプも構成できるし、パワーアンプの電圧増幅段にもなる等、応用は計り知れません。

ただしオール FET 回路用基板ではないので注意してください。トランジスターの部分に FET にする場合は足の順序が違って

[表1] 使用パーツ一覧 (モノラル2台分)

くるので、ショートしないように工夫して足を交差させ接続しなければなりません。

製作

このクラスのアンプを製作する方は新規に製作するのではなく、以前に作ったものを改造したり、バラして作り直したりしている人が多いようです。その意味からも、新規に作る人はケースや電源部はしっかりしたものを購入することを勧めておきます。

使用パーツ

参考までに表1に使用したパーツの一覧を示します。必ず同じでないといけないうけではありません。私のアンプは動作範囲が広くかつ安定で、応用範囲のフレキシビリティがあるので、それを詳しく説明しておきます。

入力抵抗の5k Ω は20k Ω 位まで任意。これが入カインピーダンスの最小値となります。レベルボリューム5k Ω は10k Ω または20k Ω でもOK。高価なボリュームでなくても汎用で可です。ただしカーブはB型で、密閉型が望ましいところです。

アンプ基板内のゲート直列抵抗1k Ω は100~1k Ω の範囲内、220pFは100~220pFの範囲内のいくらかでもよく、150k Ω は100k~470k Ω でも可です。

電源ラインのインピーダンスを下げるデカップリングコンデンサー100 μ F/50Vは47 μ F程

部品	種別/メーカー	数値/型番/個数
抵抗	カーボン皮膜 ローノイズタイプ1/2W	100 Ω (10),220 Ω (16),750 Ω (2) 1k Ω (2),1.1k Ω (2),2k Ω (8) 2.2k Ω (2),5k Ω (2),10k Ω (2) 50k Ω (4),110k Ω (4),150k Ω (2)
	金属皮膜3W	0.22 Ω (4),30 Ω (2),3.3k Ω (4)
コンデンサー	ディップマイカ	220PF(2)
	電解 フィルム	100 μ F/50V(4),22000 μ F/35V(8) 0.0047 μ F/50V(2),0.047 μ F/250V(2) 2.2 μ F/100V(8)
半導体	FET	2SK389(2)/2SJ109(2) 2SK213(2)/2SJ76(2) 2SK722(8)/2SJ131(8)
	TR	2SC1775AE(4)/2SA872AE(4) 2SC2856(2)/2SA1191(2)
ブリッジ整流器 レベルVR 半固定VR 放熱器 電源トランス シャーシ	日本インター タンゴ 鈴蘭堂	PB-302F(2) 5k Ω B単連(2),ツマミ(2) 500 Ω (2),2k Ω (4) フレックスTF1312A-2(8) A-65S(2) SL-10(2)
その他		アンプ基板(2), スペーサー(8) 入力ピンジャック1P(2) スピーカー端子LR2組 ACコードプラグ付き(2) ヒューズ8A入りホルダー(2) 配線材

度でも良いし、電源ラインが長くない場合は省略してもかまいません。

初段の負荷抵抗2k Ω は流す電流の大きさによって若干変更可能です。1~2mAの時は2k Ω 、Q₁とQ₂にランクBLを使用し、さらにQ₃~Q₆にもFET(BLランク)を使用した場合は3mA程度の電流を流すこともあるので、その時は負荷抵抗を1~1.5k Ω にします。

カスコード分圧用の抵抗110k Ω +50k Ω は比率を同じにして、もっと大きくても良く、220k Ω +100k Ω としても好結果が得られました。以前は定電流ダイオードとツェナーダイオードの組合せにしたこともありましたが、ツェナーダイオードから発生す

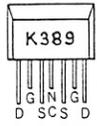
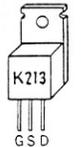
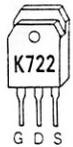
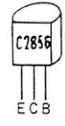
るノイズによりS/N,安定度の面からも、また高CMRRを得る目的からも抵抗分圧の方が良いようです。

筆者考案の共通ソース抵抗VR_iは500 Ω 半固定ボリュームとしておけば、かなりの範囲で調整可能となるので、これを勧めます。

帰還回路の10k Ω と1.1k Ω はNFB量と仕上がりゲインを決めます。前回のようにコンデンサー構成にしても良いのですが、音質的にはDCアンプに分があるようです。ゲインは $1 + (10 / 1.1) = 10$ 倍。10k Ω を5k Ω にすれば約5.5倍になるし、20k Ω にすれば約19倍と、任意に組み合わせられます。

ただし、増幅度を小さくする

[表2] 使用半導体の主な規格とピン接続

<p>Q₁: 2SK389GR Q₂: 2SJ109GR $V_{GS} = 50V$ $P_D = 200mA$ $g_m = 20mS$ $C_{is} = 25pF$</p> 	<p>Q₉: 2SK213 Q₁₀: 2SJ76 $V_{DSS} = 140V$ $I_D = 500mA$ $P_D = 1.75W$ $g_m = 40mS$ $C_{is} = 90pF$</p> 
<p>Q₃, Q₄: 2SC1775AE Q₅, Q₆: 2SA872AE $V_{CBO} = 90V$ $I_C = 50mA$ $P_C = 300mW$ $h_{FE} = 380$ $f_T = 200MHz$ $C_{ob} = 1.6pF$</p> 	<p>Q₁₁~Q₁₄: 2SK722 Q₁₅~Q₁₈: 2SJ131 $V_{DSS} = 170V$ $I_D = 10A$ $P_D = 100W$ $g_m = 2S$ $C_{is} = 650pF$</p> 
<p>Q₇: 2SA1191 Q₈: 2SC2856 $V_{CBO} = 120V$ $I_C = 100mA$ $P_C = 400mW$ $h_{FE} = 400$ $f_T = 310MHz$ $C_{ob} = 3pF$</p> 	

と NFB 量が増加することになるので、若干の位相補正をしなければ発振することがあります。上述した例、ゲイン約5倍のアンプにした場合は図1*印の位相補正に2~10pFのセラミックコンデンサーを付けると良いでしょう。本機10倍のアンプでは*印の位相補正は無くても発振しません。

2段目の設計は素子に何をを使用するか、および終段のバイアスをいくらにするかでかなり定数設定が変わります。今回のアンプではVR₂, VR₃とも2kΩ半固定ボリューム、固定抵抗は2.2kΩ, 750Ωとします。

Q₉, Q₁₀のゲートに挿入した100Ωは発振防止およびゲート保護用で47~220Ω位まで任意。0.0047μF+100Ωは発振防止用

ですが、音質に影響が出ない良い方法です。ただしQ₉, Q₁₀の負荷になるので、コンデンサーをあまり大きな値にしたり抵抗をあまり小さな値にはしてはいけません。ちなみに0.0022μF+200Ωでも良い結果が得られます。

Q₉, Q₁₀のソース抵抗100Ωはアンプの目的によっていろいろ変えられます。ヘッドフォンアンプの場合は4.7Ω~10Ω程度、終段をトランジスタにした場合のドライブやプリアンプでは33~47Ω程度、日立のMOS-FETをドライブするときは47~100Ω、本機や東芝のMOS-FETをドライブする時は100~150Ωとします。

終段のMOS-FETのゲートに挿入した220Ωも発振防止およびゲート保護用です。100~470

Ω位が目安となります。大きいほど良いのですが、あまり大きくするとゲート入力容量との間で積分回路が形成され、高域周波数特性が悪化します。

SP出力回路の0.047μF+30Ωも積分型位相補正回路で、発振防止にはなくてはならない存在です。0.033μF+10Ω程度でも問題ありません。

半導体の足接続は表2に示しておきました。半導体関係では2SK389/2SJ109は、

2SK146/2SJ73

2SK147/2SJ72

2SK170/2SJ74

と互換性があり、基板への挿入もD, G, Sの順番が同じでそのまま挿入できます。

2SC1775AE/2SA872AE, 2SC2856/2SA1191についても、これらと同等のローノイズ小信号用トランジスタならいろいろあるので、特に限定しません。2SK213/2SJ76は、

2SK214/2SJ77

2SK215/2SJ78

2SK216/2SJ79

など、高耐圧のものと同じ特性です。

終段のMOS-FET 2SK722/2SJ131については、むしろ東芝の2SK1529/2SJ200を勧めます。または日立の2SK1056/2SJ160, 2SK1057/2SJ161, 2SK1058/2SJ162がよいでしょう(前述したように足の順序が異なるので注意)。あるいは大きな放熱器を使用して東芝の2SK1530/2SJ201を2パラ使

用して、1本当たりのアイドリングを0.88Aにするのも良い方法です。

電源トランスはタンゴのA-65Sを勧めます。整流器はブリッジ型ではなく単体4本をブリッジ接続する方法もあります。近々ショットキーバリアダイオード ERC-84-009 を使用した製作記事を予定しています。

電解コンデンサーは松下のX-Pro またはエルナーのフォーオーディオを勧めます。

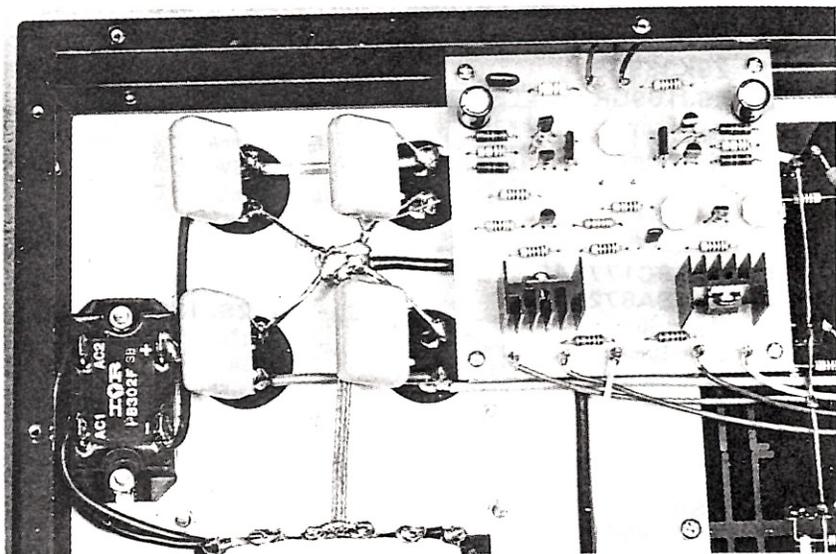
製作と調整の手順

プリント基板は写真を参考にしてください。基板の表(部品面)から見ると回路図とほぼ同じ部品配置になっています。

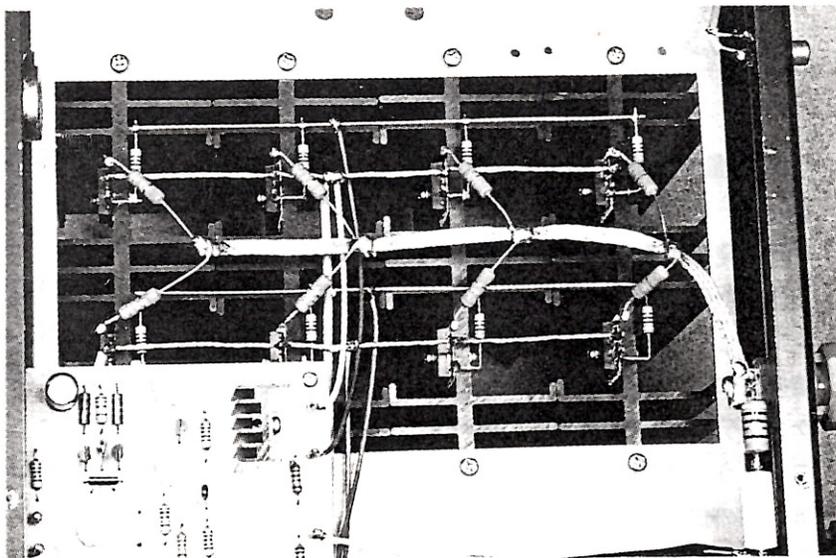
2SK389/2SJ109は真中のNCピンを切り捨てます。そしてやや足を広げ気味にすれば挿入できますが、力任せに入れないように注意。

製作の順序としては、

- (1) まず基板を完成させます。半固定VRはすべてほぼ中央にしておきます。
- (2) 次に電源部(トランスの1次側, 2次側, 整流器, 電解コンデンサーなど)を完成させます。
- (3) 電源を入れて、 $\pm 32V$ が出ていることを確かめます。この時点では無負荷なので $\pm 35V$ 位あるでしょう。
- (4) いったん電源を切って放電を確認したのち、基板のピン③を $+32V$, ピン⑧を $-32V$, ピン⑥を $0V$ (アース)の各ラインに接続し電源を入れます。



電源トランスのセンタータップから4本のケミコンの midpoint へ結線, その間近でシャーシに1点アースしている



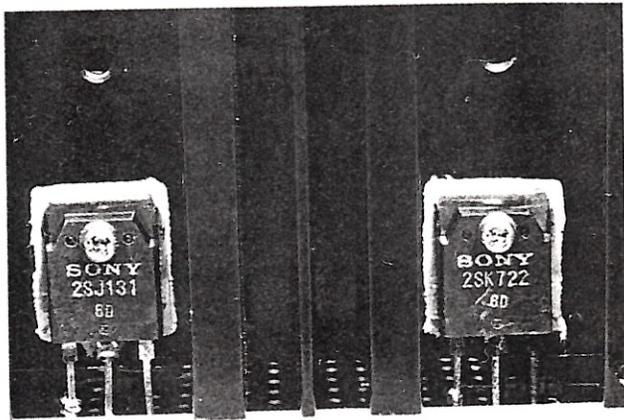
錫メッキ線と撚り線でMOS-FETをバラ接続し, ソース抵抗をハンダ付けする。今回はSP出力とアースラインの一部にローインピーダンスの平編組線を使用してみた

- (5) テスターで Q_3 のエミッター抵抗 570Ω の両端電圧が $1.4V$ になるように VR_1 を調整します。
- (6) 次にピン④-⑦間にテスターを当て、 VR_3 を回して $5V$ 前後まで可変できることを確認します。これが終段のバイアスになるので、非常に重要なチェックです。本機は約 $2.5V$ から $6V$ 近

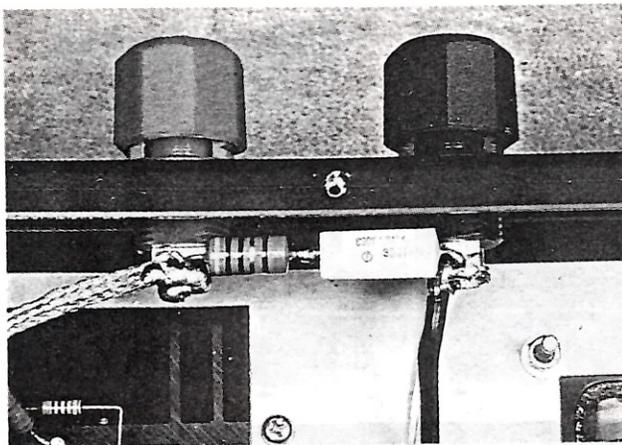
くまで可変できました。

以上ができないようでは終段部の配線にはほど遠いことを覚悟してください。間違いなく基板ができて電源部も完成していれば、必ずうまく動作するはずです。

- (7) OKならば、ピン④-⑦間電圧は最小に調整しておきます。



終段 MOS-FET は絶縁と熱伝導に注意して放熱器に固定する



SP 出力の積分型位相補正回路は出力端子に取り付ける

終段用バイアス電圧は VR_1 でも動きますが、あくまで VR_1 は 2 段目の電流設定用ですから（もちろん初段の電流設定も自動的に行なっている）、 VR_3 で調整します。

なお、ついでですが VR_2 は最終的にスピーカー出力端子を 0V に調整するもので、現時点ではほぼ中央にしておきます。

(8) 以上、基板チェックが終了したら電源を切り、ひとまず休憩、あとは放熱器に MOS-FET を取り付けて（雲母かデンカシートなど絶縁板を介することを

忘れないように！）シャシー内に固定し、ゲート回路、ソース回路、ドレイン回路などを接続し、基板との接続を完了させます。

(9) VR_1 で Q_3 のエミッター抵抗 750Ω の両端電圧を $1.4V$ に、 VR_3 で終段のソース抵抗 0.22Ω の両端電圧を $97mV$ に、そして VR_2 でスピーカー端子を 0V に調整します。半固定ボリュームは相互に影響し合うので、何回か繰り返して調整します。ちなみに 0.22Ω の両端電圧は $97mV$ といっても、かなりバラツキがあるので、一番大きな電流が流れる

デバイスで $97mV$ にセットしておきます。本機は最小 $52mV$ からいろいろでした。

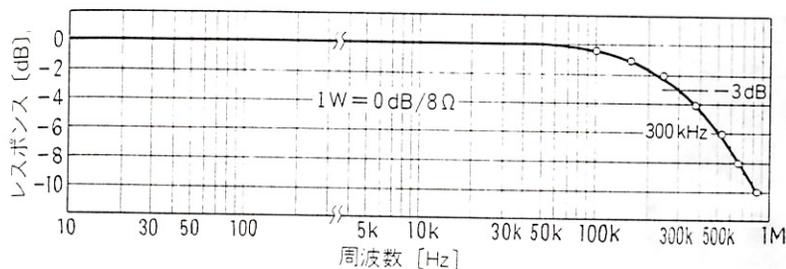
以上間違いなく配線されていれば、必ず正常動作します、といったところですが、残念ながら今回のアンプは MOS-FET に不良や大きなバラツキがあり、片チャンネル 4 パラ合計 8 本中 3 本が全く動作してなくて（もう片チャンネルは 1 本だけ）、それを取り替える手間がかかりました。不良 FET を調べてみるとゲートがオープンになっていました。だから全くドレイン電流が流れてくれなかったわけです。

特性およびヒアリング

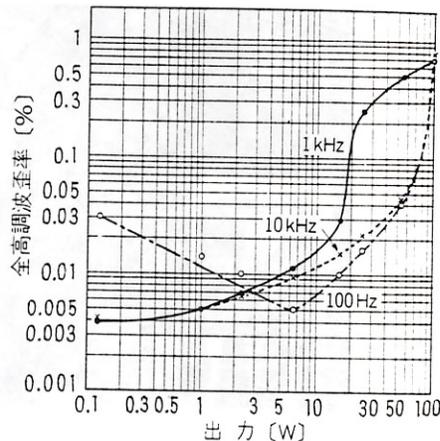
本機の特性を測定した結果を簡単に記しておきます。

残留ノイズは入力ショートもオープンも変わらず、約 $0.4mV$ （フラット）、 $0.1mV$ （IHF-A カーブ）です。周波数特性は図 7、 $-3dB$ ポイントは約 $300kHz$ です。ダンピングファクターは $10Hz \sim 100kHz$ までフラットで約 50 となりました。20kHz 方形波による容量負荷チェックでも問題なく、発振など起こしません。全高調波歪率は図 8 に示します（日本オーディオ UA-1S 使用）。

さてヒアリングですが、MOS-FET にもいろいろある、というのが実感です。日立のキャンタイプ 2SK134/2SJ49 をモールド型 2SK1056/2SJ160 に変えたとき、音が非常にクリアで清



[図7] 周波数特性



[図8] 歪率特性 (4Ω 負荷)

楚な感じになったのを思い出しますが、それと同じで、本機の音は以前の東芝の2SK405/2SJ115よりも一層落ち着いた清楚な美しい音に感じられます。

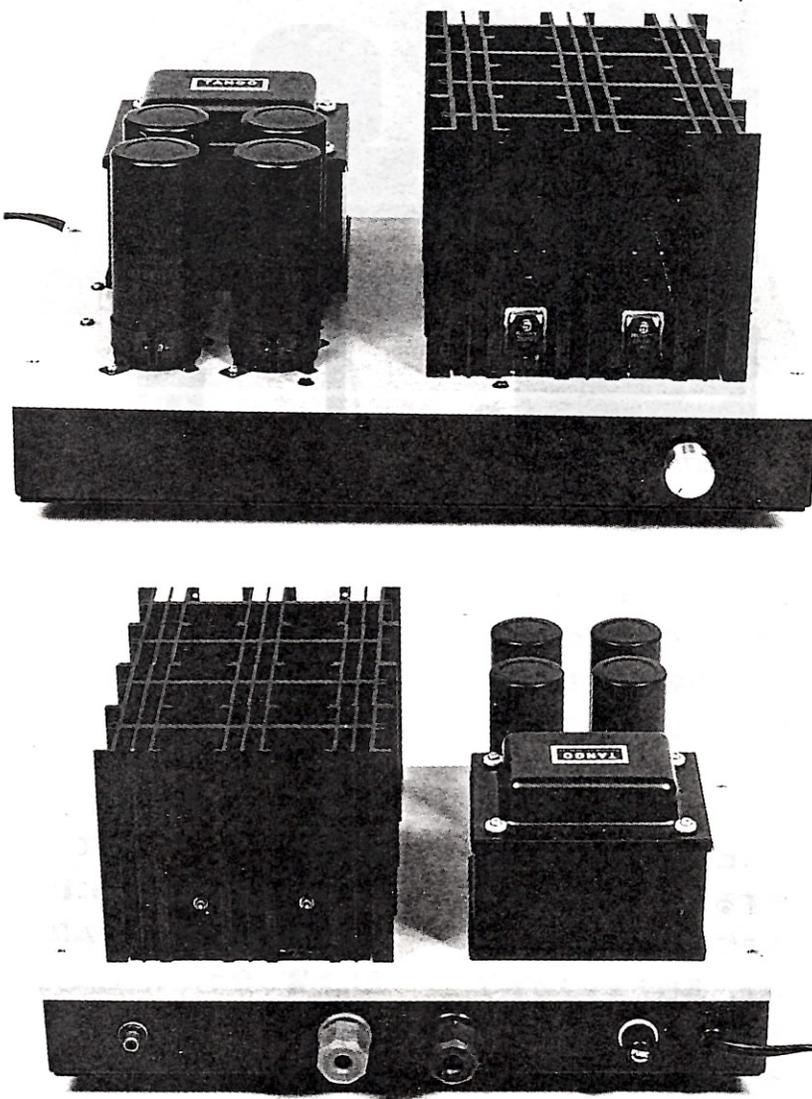
前作のトランジスターによる終段 NO-NFB アンプとの対比では、本機は FET でありながらトランジスターの音に近い印象を持ちました。うっかりするとどちらがどうといえないほど似ています。これでは対決になりませんが、終段を NO-NFB にした特徴の方が強いという結果でもありましょう。

次回は終段 NO-NFB 0dB パワーアンプとそれを駆動するプリアンプを発表します。プリアンプが超低歪みで、使用するボリュームの歪みがもろに出るので、いろいろなボリュームの歪みも測ってみます。ご期待ください。

*12月号124頁の計算式

$$V_c = 2R_L P_o = 28.3V \text{ は}$$

$V_c = \sqrt{2R_L P_o} = 28.3V$ の誤植です。お詫びのうえ訂正いたします。 (編)



シャーシを新調してきれいにまとまった本機。MOS-FET の不良に戸惑わされたが、終段 NO-NFBらしい清楚な美しい音質が楽しめた