

PCL86 を使用した超三結真空管アンプの作製

2020. 11. 15

あかよろし（埼玉県在住）

1. はじめに

今回、初めて真空管アンプを作製しました。真空管アンプに興味をわき、情報収集をしたところ、パワーが小さいものなら数千円程度の真空管で作れることを知り、作ってみることにしました。プリアンプ機能は ONKYO の CD レシーバーにまかせることにし、LineOut 出力を増幅させるパワーアンプを作ることになりました。PCL84 という小さな真空管を 2 本使い、超三結というマニアックな回路方式で出力 1W 程度のシングルアンプを作ることになりました。また、幸運なことに ARITO's Audio Lab の素晴らしいトランスを製品モニターの形で使わせていただけることになり、モニター報告として製作記録を残すことになりました。

2. 部品選定と回路方式決定

(a) 真空管

最初に真空管を入手しました。ネットで情報を収集し、PCL86（別名 14GW8）[1]という球がヒーター電圧が 14.5V と特殊なので人気がない（安い）が、オーディオ用としての性能は優れているらしいことがわかりました。木村哲氏の著書「真空管アンプの素」[2]には、真空管時代の最後の一時期を飾ったオーディオ管、真空管製造技術の粋を極めた感じがする、などと紹介されています。ヤフオクで POLAMP 製の PLC86 が 4 本 4000 円で出品されていたので購入しました。2 本しか使用しない場合でも不良品や特性のばらつきがあるので多めに購入するのが良いそうです。図 1 に外観写真と回路図を示します。実物は親指ぐらいの太さで、イメージしていたよりもかなり小さかったです。小さなボディに三極管と五極管が内蔵されておりコンパクトなアンプにはぴったりです。

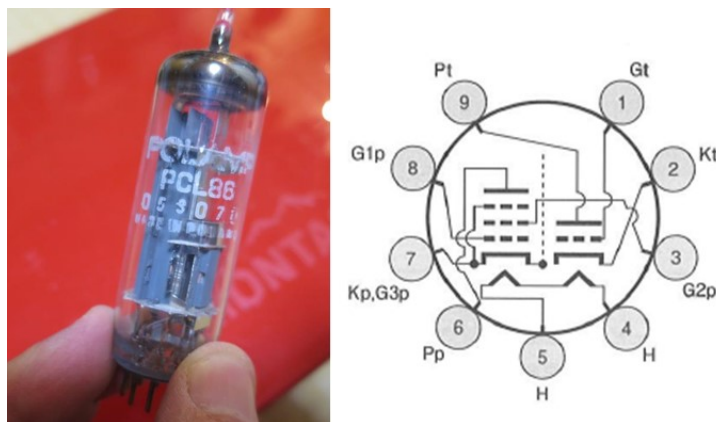


図 1 使用した真空管（POLAMP 製 PCL86）

(b)回路方式

次に、いろいろある回路方式の中から、超三結（超三極管接続）のシングルアンプを選定しました。すでに真空管回路が世の中から消えた 1990 年代に上条信一氏が発明した真空管アンプ回路[3, 4]で、比較的簡単な回路構成でありながら想像を超える音が出るとの報告がネット上で散見されます。整流回路も含めすべて真空管を使った構成から、初段は半導体で後段のみ真空管まで色々な作成例がありましたが、初めての作製であり、またハーフサイズ程度（幅 21cm ぐらい）のコンパクトサイズにしたかったので、初段は半導体で後段のみ真空管の方式にしました。初段は多くの方が使用している JFET の SK30A(Y)を使用しました。

(c)電源トランス

「真空管アンプの素」[2]でも詳しく紹介されていますが、春日電機から PCL86 に必要な 14.5V のヒータ電圧を供給できる電源トランスが販売されています。購入したのは KmB90F（6160 円）で出力 195V で DC50mA の仕様です。秋葉原の春日無線で 6160 円で購入。同時に平滑用のチョークトランスとして 4B50MA（1650 円）を購入しました。

(d)出力トランス

「真空管アンプの素」で紹介されていたイチカワの ITS-2.5WS あるいは東栄変成器の T-1200 あたりを候補に考え、ネットで情報収集しました。あるサイト[5]で T-1200 と ARITO さんのトランスの比較データが掲載されており、T-1200 では 50Hz@1W で原形をとどめないぐらい歪んでいるのに対して、ARITO さんのトランスではまったく波形が崩れていませんでした。さっそく、ARITO's Audio Lab の HP[6]に行ってみると、ガレージメーカーとして立ち上げたところで製品モニターを募集しているではありませんか。作製予定の内容を伝え、モニターに応募した結果、超三結の作製例がないということで真空管初心者であるにもかかわらず採用していただきました。機種はシングルアンプ用のトランス（SE-7K4W（シングルアンプ用 7k Ω UL 付））を使用することになりました。

(e)シャーシ（ケース）

出力トランス 2 個と電源トランスを横並びに配置し、手前に真空管を置けば横幅 20cm に収まるため、TAKACHI の薄型アルミケース YM-200(1400 円)を購入。フルサイズのオーディオ幅(470mm 程度)に ONKYO の CD レシーバー(CR-N765)と並べて配置することを考えて選定。

(f)その他の部品

表 1 に主な部品リストを示します。平滑化にはブロック電解コンデンサー(450V, 47+47 μ F)を選定しました。真空管が小さくシャーシの手前が寂しい感じでしたので、大きめのコンデンサーを立てることにしました。ボリューム用の可変抵抗は定番と思われるアルプス電機の RK27 ミニデントにしました。スイッチは緑の LED 付き丸形ロッカースイッチにしました。100V 入力プラグイン式のコンパクトなメガネ型コネクタ（2 芯）にしました。

表 1 主な使用部品

部品名	仕様型番	単価	個数	合計	購入先
真空管	PCL86(POLAMP製)	1000	4	4000	ヤフオク
真空管ソケット	MT真空管ソケット9ピン	320	2	640	三英電波
ソケット用プレート	MT9P用真空管サブシャーシ	385	2	770	若松通商
電源トランス	KmB90F	6160	1	6160	春日
チョーク・トランス	4B-50MA	1650	1	1650	春日
出力トランス	SE-7K4W	無償モニター			Arito's Audio Labo
トランジスタ	2SK30A(Y)	160	2	320	若松
整流ダイオード	S4VB60(600V4A)	150	1	150	サンエレクトロ
電源用電解コンデンサ	47 μ F450Vx2	1426	1	1426	若松通商
スパークキラー	スパークキラー・0.2 μ F \pm 20%	150	1	150	瀬田無線
VRI(ボリュウム用)	アルプスRK27ミニデント(50k、Aカーブ)	880	1	880	瀬田無線
ヒューズケース					手持ち
LED付きSW	円形、グリーンLED	252	1	252	山本無線
ケース	タカチ、YM-200(W200xD150xH40)	1400	1	1400	秋月
ラグ板	6極				
RCAジャック	RCA絶縁、金メッキ	210	2	420	三英電波
ACインレット	ブタバナタイプ	100	1	100	三英電波

3. 真空管の選別

事前に PCL86 と 2SK30A(Y) の特性を測定し選別を行いました。図 2 に実測した三極管のプレート電流(I_{pT})のプレート電圧(V_{pT})依存性です。グリッド電圧(V_{gT})を 0 から -3.5V までは 0.5V 刻みで測定しました。No. 1~No. 4 まで 4 本の PCL86 の特性を異なる色で表しています。三極管の動作に対応した曲線が得られており正常動作していることが確認できますが、 $\pm 10\%$ 程度のばらつきがありました。図の黒点は Philips のデータシート[1]の値 (\blacktriangle : $V_{gT}=-1V$ 、 \bullet : $V_{gT}=-2V$) をプロットしたものです。特性に近い No1. と No. 2 はデータシートに近い値になっていました。

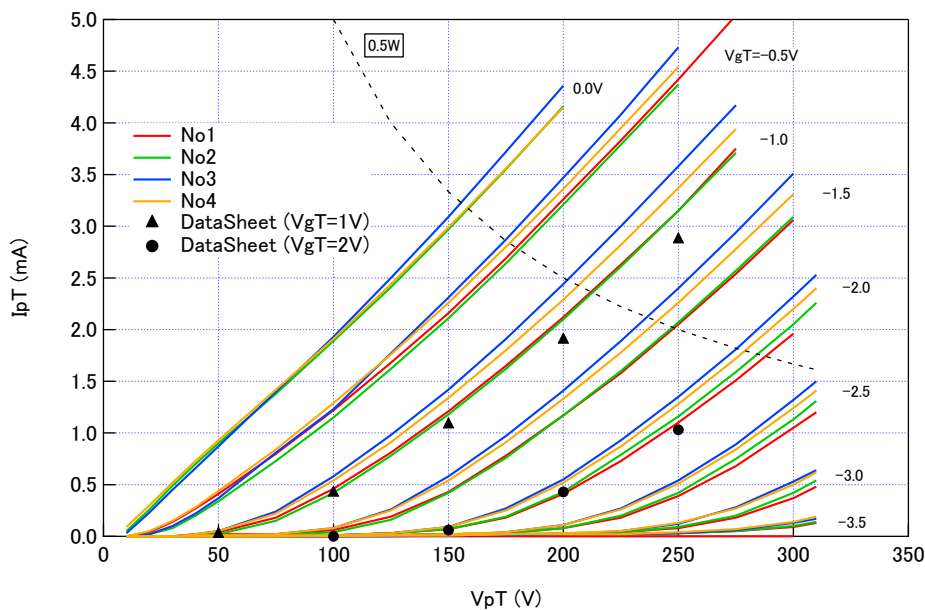


図 2 実測した三極管の特性

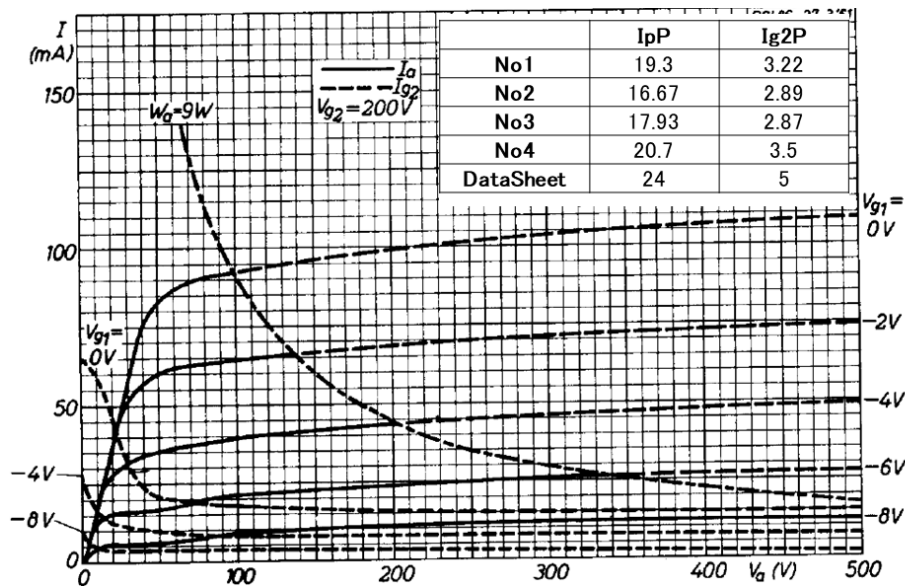


図3 五極管の特性図（ Philips のデータシート[1]を引用）

図3に Philips のデータシート[1]に掲載されている五極管の特性図を示します。第2グリッド電圧 V_{g2} を 200V に設定したときのプレート電流および第二グリッド電流のプレート電圧依存性が表示されています。独立した第2グリッド用の電源を用意できなかったため、プレートと第2グリッドを同じ電源に接続し、200V の電圧をかけたときのプレート電流 (I_{pP}) と第二グリッド電流 (I_{g2P}) を測定しました。グリッド電圧 -6V の時の結果を図3の右上の表に示します。データシートから読み取った値よりも3割程度低い値になっており、また、 $\pm 10\%$ 程度ばらついていました。五極管の特性の差がどの程度影響するかわかりませんが、三極管の特性がほぼ等しい No1 と No.2 の真空管を使用することにしました。

4. 回路

図4に回路図を示します。トランスの AC100V 側にはスパークキラー、ヒューズ、スイッチ (LED 付き) が付いています。ヒーター出力 (14.5V) 側には 1Ω (3W) の保護抵抗をつけて二本の PCL86 のヒータを並列で接続しています。ヒーター電源も整流して直流にした方がハム雑音が少なくなりそうですが、簡便な交流点火としました。また、ヒーター出力確認用に LED をつけました。将来、LED でライトアップする意図が含まれています。

B 電源は 195V のトランス出力をブリッジダイオードで全波整流し、ブロック電解コンデンサーとチョークトランスで平滑化しています。コンデンサー放電用に $200k\Omega$ の抵抗でバイパスしています。整流出力電圧の理論値 (交流電圧 $\times \sqrt{2}$ - ダイオードの順電圧 (約 1V) $\times 2$) は 273V ですが、「真空管アンプの素」[2]に掲載されている実測データでは 50mA 出力時で 260V 程度まで電圧が下がるようです。チョークトランスと出力トランスでの電圧降下を考慮し、プレートの電位 (三極管、五極管とも同じ) は 250V と想定しました。

The diagram illustrates a Class B push-pull amplifier circuit. It consists of two main sections: the R-ch (Right channel) at the top and the L-ch (Left channel) at the bottom, both sharing a common ground line.

R-ch (Right channel) Details:

- Input Stage:** An input signal enters through a terminal labeled "入力 (R-ch)". It passes through a variable resistor VR1 (50k) and a fixed resistor R2 (1M) to the gate of a JFET driver stage.
- JFET Driver Stage:** The JFET's source is connected to ground via VR2 (5k). Its drain is connected to a load capacitor C2 (100uF, 25V) and a resistor R3 (6.8k). The gate voltage is denoted as V_{gT} .
- MOSFET Output Stage:** The JFET's drain is also connected to the gate of a MOSFET (E7). The MOSFET's source is connected to ground via R5 (2.7k, 3W). Its gate voltage is denoted as V_{gP} . The MOSFET's drain is connected to a load capacitor C3 (100uF, 50V) and a resistor R4 (1.0k). The drain current is denoted as I_{dP} .
- Output Transformer:** The MOSFET's drain is connected to one primary terminal of a transformer with a 7kΩ primary impedance. The secondary terminal is connected to a speaker labeled "スピーカー".

L-ch (Left channel) Details:

- The L-ch is a mirror image of the R-ch, with its own set of components (VR1, R2, JFET, VR2, C2, R3, MOSFET E8, R5, C3, R4) and a shared ground connection.

Power Supply Section:

- An AC100V input is connected to a fuse (250V1A).
- The power is stepped down by a transformer (Kmb90F) and rectified by a bridge rectifier (S4VB60, 600V 4A).
- The rectifier output is filtered by two electrolytic capacitors, C1(1/2) and C1(2/2), each rated at 47uF and 450V.
- A Zener diode (4B-50MA) is used for regulation, connected to a resistor R1 (100k, 3W) and another resistor (100k, 3W) to ground.
- A heater (ヒーター (4,5)) is connected across the output terminals.

使用した真空管 PCL86 は三極管と五極管の複合管となっています。上條氏によって開発された「超三極管接続」は、三極管を電圧帰還素子として用いることにより、電力増幅段が五極管でも、その帰還に用いた三極管の特性を再現させることで三極管の音質を得ると共に、深い PG 帰還によって三極管のような低いプレート内部抵抗を得ることができる回路とのことです[3, 4, 8]。電力増幅用の三極管は 300A など高価な真空管になりますが、「超三極管接続」により PCL86 が低内部抵抗の三極管として機能することになるようです。

5

三カ所になります。設計方法はかつさんのホームページ[8]を参考にしました。

VR2 を調整することで五極管のカソード電位 E5（5 番ピンの電圧の意味）を調整できます。電圧測定点と記号は回路図に丸枠で表示しています。最初の設計では R5 を $2.7\text{k}\Omega$ とし、E5=50V に調整することでカソード電流 18.5mA にしました。トランスの定格が 50mA なので片側で 20mA ぐらいが妥当と考えました。プレートの電位 (250V) - 50V の 200V が五極管のカソードプレート間電圧になるので、図 3 に示す Philips のデータシートからこの時のグリッド電圧を見積もると -7V 程度です。すでに電源電圧とプレート電流の上限が決まっているので、設計の自由度はあまりありません。-7V のグリッド電圧からグラウンドから見た五極管のグリッド電位 (E8) は 43V になります。

次に三極管側です。五極管のグリッドと三極管のカソードは $1\text{k}\Omega$ の抵抗 (R4) で接続されていますが、グリッドには電流が流れないため抵抗による電圧降下はなく、三極管のカソード電位 (E2) は五極管のグリッド電位 (E8) の 43V と同じになります。三極管のプレートの電位 (E9) は 250V ですので、カソードプレート間の電位差は 207V になります。最後に三極管のグリッド電位 (E1) を決めることになります。三極管のプレート電流は JFET を流れる電流に等しくなります。JFET の動作点を I_{DSS} の 1/5 程度として 0.4mA としました。図 2 の三極管特性図から、207V で 0.4mA だと三極管のグリッド電圧は -2.2V 程度になりますので、グリッド抵抗 (R3) は $5.5\text{k}\Omega$ となります。

実際の作製では、R3= $6.8\text{k}\Omega$ 、R5= $2.7\text{k}\Omega$ 、VR2= $5\text{k}\Omega$ の組み合わせで作製し、電圧分布を見ながら調整することにしました。R3 を大きめにしたのは、後で並列に抵抗を追加することで抵抗値を下げる方向に微調整できるからです。

5. 製作課程

図 5 に製作中の写真を示します。シャーシの加工にはボール盤とリーマー、やすりを使用しました。写真(a)はこうしたシャーシの写真です。左後ろの四角い穴は電源トランス用で、その右側の 2 つの大きな丸穴は出力トランス用です。左右対称ではなく電源は左側、信号は右側に分けています。手前側の 3 つの大きな丸穴はブロックコンデンサ（左側）と 2 つの真空管用です。天板の奥側の目立たない位置に直径 5mm の排熱用穴を 1 値列に並べて配置しています。

写真(b)は電源回路を作製した段階の写真です。トランスの 100V 入力部にスパークキラーを直接半田付けしました。ブリッジダイオードは放熱のためシャーシにネジ止めしてます。チョークトランスとブロックコンデンサは固定用ねじ穴の間隔が同じでしたので、同じネジを使ってブロックコンデンサの真下にチョークトランスを固定しました。真空管ソケットはサブシャーシ（写真(c)）を使用して 5mm 程度天板よりも内側に固定されています。サブシャーシを使用することでシャーシに放熱用の小穴を多数開ける手間を省くことができました。

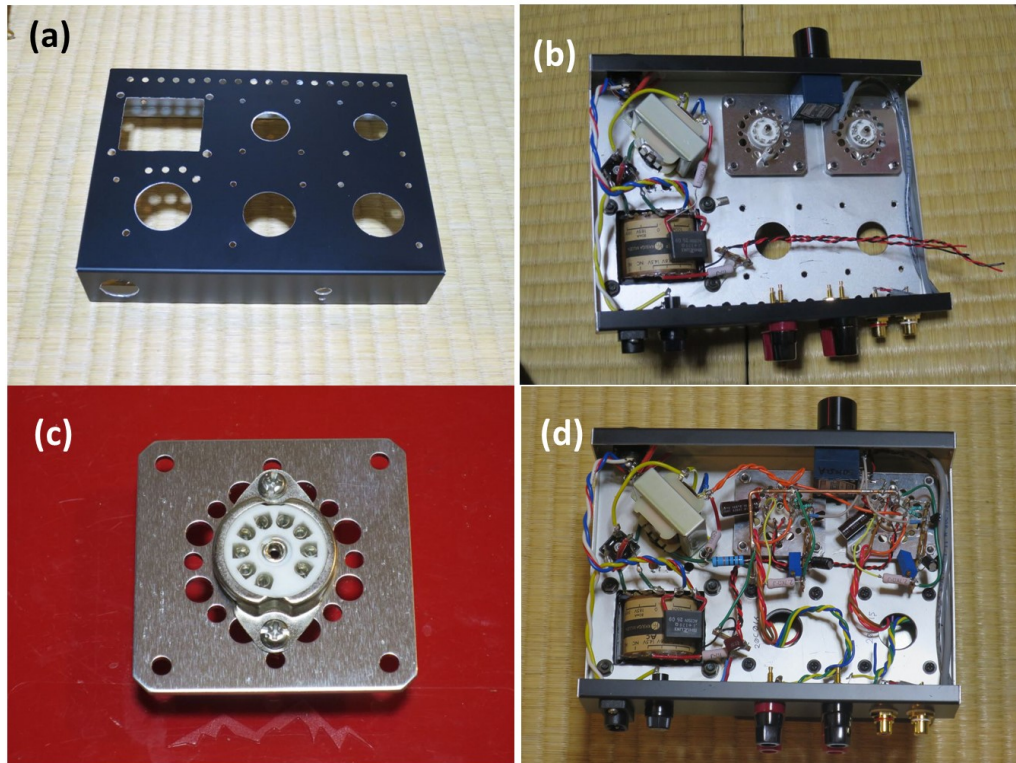


図5 作製中の写真

(a) シャーシ、(b) 電源回路、(c) サブシャーシ、(d) 完成回路部

写真(d)に完成した回路を示します。縦型のラグ板（6極）をサブシャーシの固定用のネジに取り付け、真空管ソケットに端子とラグ板端子に部品を空中配線で固定しました。ラグ板端子には JFET、VR2、C2 が実装されています。また、 $\phi 2\text{mm}$ 銅線をアースラインとしてシャーシのねじ穴（やすりでアルマイトを除去し、圧着端子に半田付け）から取り出し真空管ソケットの上に引き回しました。ブリッジダイオードのマイナス端子とブロックコンデンサのマイナス端子も同じねじ穴に接続しました。

図6に完成品の外観写真を示します。正面の左側の緑の LED が点灯しているのが電源スイッチ、右寄りにあるのがボリュームのつまみ（sansui のアンプから流用）です。真空管の後ろのある四角いケースに入っているのが Arito's Audio Lab 製の出力トランスです。裏側には左から入力端子、スピーカー端子、ヒューズケース、メガネ型 AC ソケットが並んでいます。入力端子もスピーカー端子もシャーシとは絶縁されています。出力トランスからは 4Ω 用と 8Ω 用の出力ケーブルが出ていますが、接続予定のスピーカーのインピーダンスが 4Ω なので 4Ω 用出力を接続しています。 8Ω 用の出力配線はいつでも取り出せるようにシャーシ内部に固定しています。将来は切り替えスイッチで出力インピーダンスを切り替え可能にする予定です。シャーシの底板には吸気用の穴を適当に開けましたが、足りなかった気もするのでいずれ追加しようと思っています。指が入るような大穴は感電の危

険があるので小さい穴を多数開ける方が良さそうです。

配線完了後、真空管を取り付ける前に電源電圧などの確認を行いました。危険な高電圧になりますので作業は感電防止のため手袋をつけ、調整用のドライバーはセラミック製の絶縁ドライバーを使用しました。電源関係に問題がないことが確認できてから真空管を装着し、試運転開始です。設定パラメータは暫定的に $R3=6.8k\Omega$ 、 $R5=2.7k\Omega$ 、 $E5=50V$ としました。あらかじめ VR2 を 0Ω 側に回しておきます。電源を投入し、ヒーターが点灯することを確認し、しばらく異臭や異音がないことを確認しました。続いて電源電圧などを確認します。VR2 が 0Ω では五極管のカソード電圧 E7 はゼロです。VR2 を回しても電圧がなかなか上がらず焦りましたが、数回転させると電圧が出るようになりました。所望のカソード電圧になったところで各点の電圧を測定し、極端におかしい電圧ではないことを確認しました。さっそく、スピーカー (ONKYO D-102AX (4Ω , 89dB/W/m, 45Hz-35kHz)) を接続して、プリアンプ (オンキヨーCD レシーバーの OUTPUT) の信号を入力して音出しを行いました。

ボリュームを上げていくときれいな音がスピーカから出てきました。10 分程度動作させて異常がないことを確認しました。とりあえず、ひと安心です。

6. 調整

設定パラメータを最適化するために、 $R3$ を $5.1k\Omega$ 、 $5.6k\Omega$ あるいは $6.8k\Omega$ 、 $R5$ を $2.2k\Omega$ 、 $2.7k\Omega$ 、あるいは $3.3k\Omega$ に交換しながら、五極管のカソード電圧 E7 を変化させたときの電圧を測定し、 $R3$ 、 $R5$ 、VR2 などのパラメータと動作点などとの因果関係を調べました。L チャンネルのみパラメータを変えており、R チャンネルは $R3=6.8k\Omega$ 、 $R5=2.7k\Omega$ 、 $E5=50V$



図6 完成品の外観写真

の暫定値から変えていません。

表 2 は R3=5.6k Ω 、E7=60V で R5 を変化させた場合の各点の電圧、電流の一覧表です。E7 を 60V に設定しているので R5 を下げると五極管のプレート電流 I_{pP} ($E5/R5$) が増加しますが、JFET の電流 (VR2 の電流=三極管のプレート電流) が減少する傾向にありました。なお、 I_{pP} は R5 を流れる電流として見積もっていますので、正確にはプレート電流だけでなく第 2 グリッド電流も含まれています。VR2 にかかる電圧は若干増加していますが、VR2 の値が大きくなっており、結果として JFET の電流は減少しています。五極管のプレート電流は電源容量 (25mA/チャンネル) の制約があり、妥当な値に収まっています。五極管の定格損失 9W に対して 4~5W のプレート損失 ($I_{pP} \cdot V_{pP}$) になっています。一方、三極管のプレート電流は 0.3mA 程度で若干少ない気がします。

表 2 R5 を変化させた場合の各点の電圧、電流

#	R3	R5	VR2	V _{VR2}	I _d	E7	(E1)	E2=E8	E3	E6=E9	I _{pP}	V _{pT}	V _{gT}	V _{pP}	V _{gP}
	Ω	Ω	Ω	mV	mA	V	V	V	V	V	mA	V	V	V	V
1	5600	2200	2650	903	0.341	60	51.6	55.4	260.7	247	27.27	191.6	-1.908	187	-4.6
2	5600	2700	2530	891	0.352	60	50	54.5	263	251.8	22.22	197.3	-1.972	191.8	-5.5
3	5600	3300	2200	859	0.390	60	44.9	47.5	274.9	273.3	18.18	225.8	-2.187	213.3	-12.5

表 3 は R5=2.7k Ω 、E7=60V で R3 を変化させた場合の各点の電圧、電流の一覧表です。R5 と E7 が一定ですので五極管のプレート電流は 22.2mA で一定ですが、R3 を下げると JFET の電流 I_d (=VR2 の電流=三極管のプレート電流) は増加しています。R3 を下げると VR2 にかかる電圧は減少していますが、VR2 の値が小さくなっており、結果的に JFET の電流が増加しています。

表 3 R3 を変化させた場合の各点の電圧、電流

#	R3	R5	VR2	V _{VR2}	I _d	E7	E1	E2=E8	E3	E6=E9	I _{pP}	V _{pT}	V _{gT}	V _{pP}	V _{gP}
	Ω	Ω	Ω	mV	mA	V	V	V	V	V	mA	V	V	V	V
4	6800	2700	3168	943	0.298	60	49.7	53.8	261.2	249.7	22.22	195.9	-2.024	189.7	-6.2
5	5600	2700	2530	891	0.352	60	50	54.5	263	251.8	22.22	197.3	-1.972	191.8	-5.5
6	5100	2700	2230	861	0.386	60	50.1	54.2	264.2	253.1	22.22	198.9	-1.969	193.1	-5.8

表 4 は R3=5.1k Ω 、R5=2.7k Ω で E7 を変化させた場合の各点の電圧、電流の一覧表です。E5 に比例して五極管のプレート電流は増加しますが、JFET の電流 (VR2 の電流=三極管のプレート電流) は減少する傾向となっています。

表 4 E7 を変化させた場合の各点の電圧、電流

#	R3	R5	VR2	V _{VR2}	I _d	E7	E1	E2=E8	E3	E6=E9	I _{pP}	V _{pT}	V _{gT}	V _{pP}	V _{gP}
	Ω	Ω	Ω	mV	mA	V	V	V	V	V	mA	V	V	V	V
7	5100	2700	1780	799	0.454	30	17.6	20.6	268.1	262	11.11	241.4	-2.315	232	-9.4
8	5100	2700	1896	820	0.432	40	29.4	32.3	266.9	258.7	14.81	226.4	-2.206	218.7	-7.7
9	5100	2700	1910	821 (836)	0.430 (0.410)	45	34.7 (34.1)	37.8 (37.8)	270.6 (270.9)	261.7 (362.2)	16.67 (16.67)	223.9 (224.4)	-2.192 (-2.09)	216.7 (217.2)	-7.2
10	5100	2700	2070	842	0.407	50	39.4	42.5	264	254.5	18.52	212	-2.074	204.5	-7.5
11	5100	2700	2230	861	0.386	60	50.1	54.2	264.2	253.1	22.22	198.9	-1.969	193.1	-5.8

以上の結果からわかることは、五極管のプレート電流は R5 や E7 の設定で調整できるが、三極管のプレート電流（JFET の電流）は R3 や R5 で多少変化する程度で大きく調整することはできないということです。

最終的に、表 4 に黄色で示した R3=5.1k Ω 、R5=2.7k Ω の設定で E7 を 45V の条件にすることにしました。() 内の値は R チャンネルのデータです。ほぼ同じ値になっています。50V より 5V 下げることによって電源容量の余裕を大きくし、三極管のプレート電流を少し増やそうと考えました。回路全体の発熱も抑えることができているはずです。

7. 評価

図 7 に 1kHz の正弦波信号 (V_{in}) を入力し、スピーカー端子に接続した 4 Ω のダミー抵抗の両端電圧 (V_{out}) を測定して得られた入出力特性を示します。電圧はデジタルオシロスコープの計測機能を利用して実効値(RMS 値)を測定しました。縦軸の出力電圧の実効値を横軸の入力電圧の実効値に対して両対数グラフにプロットしたものです。4 Ω 負荷なので出力電圧 2V で 0.5A になるため、2V \times 0.5A=1W の出力に対応しています。1W 付近まで直線的な応答が得られています。

図 8 は入出力特性のデータから求めたゲイン (V_{in}/V_{out}) の出力パワー依存性を示しています。左右のチャンネルでゲインが若干異なっていました。0.01W 以下の

低信号レベルでのゲイン低下はオシロスコープのノイズ振幅が重畳したため V_{in} が過大評価され、ゲインが小さく見積もられた可能性があります。また、1W 以上で若干ゲインが低下する傾向がありますが、信号が歪み始めていることを示唆しています。4 Ω のダミー抵抗を取り外した状態（端子部オープン）でも同様の測定を行い、いわゆる on-off 法[9]でアンプの内部抵抗とダンピングファクター(DF)を求めました。出力 0.1W での内部抵抗は 0.242 Ω (0.155 Ω)、DF は 16.5 (25.8)、出力 1W での内部抵抗は 0.260 Ω (0.135 Ω)、DF は 15.4 (29.7) となりました（()内は R チャンネル）。超三結回路の特徴である低い内部抵抗が実

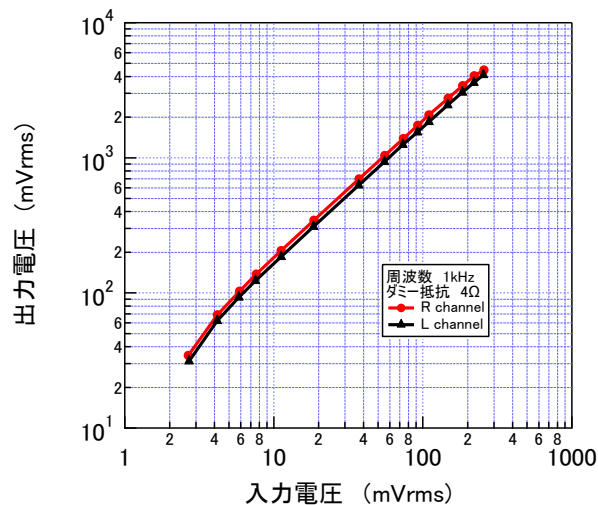


図 7 入出力特性

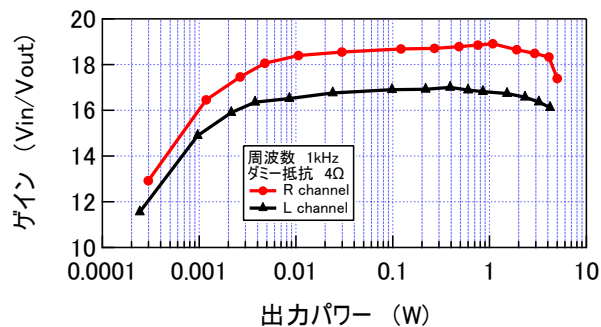


図 8 ゲインの出力パワー依存性

現されており、大きな DF が得られていることを確認できました。しかし、左右のチャンネルでかなり値が異なっていました。

図 9 に周波数特性（10Hz～1MHz）を示します。1kHz での出力信号が 0.01W、0.1W、1W となる入力信号に対して、信号周波数を変えて測定しました。1W 出力では 30Hz 以下の低域で減衰していますが、0.1W、0.01W では殆ど減衰せずに 20Hz 付近で小さく膨らんでいるような特性でした。高周波側は可聴域である 20kHz 付近まで帯域が伸びており十分な特性でした。R チャンネルと L チャンネルで可聴域の特性は殆ど一致していました。可聴域よりの高周波側の 300kHz 付近にピークを示しました。図 10 はモニターとして支給していただいた出力トランスの周波数特性（1Hz～1MHz）です。Arito' s Audio Labo の HP では出荷したすべてのトランスの特性が開示されています。L チャンネルに 20C015、R チャンネルに 20C016 を使用しています。3 本の周波数特性の一番下が使用した 4 Ω のタップの特性に該当します。可聴域でフラットな特性を持っている素晴らしいトランス特性です。可聴域の特性はアンプの特性と殆ど一致していますが、300kHz 付近にピークはなく、これはアンプ側の特性と考えられます。

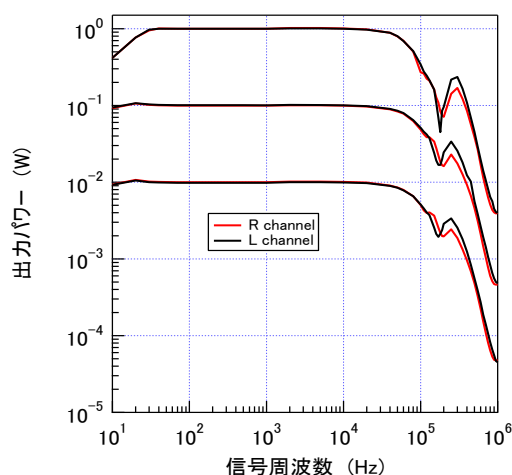


図 9 試作アンプの周波数特性

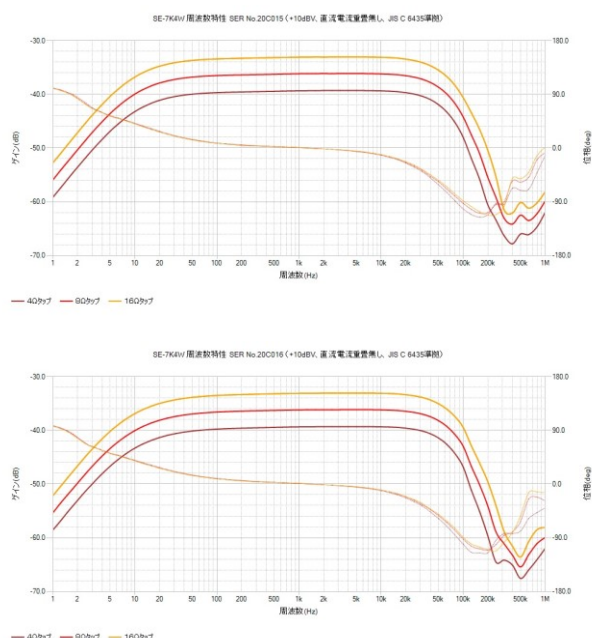


図 10 出力トランスの周波数特性
(上 : L チャンネル、下 : R チャンネル)

8. 負帰還による特性改善

試作アンプを Arito' s Audio Labo の前川有人氏に評価していただいたところ、利得が余っており負帰還に振り分けることで特性改善が見込めるとのことで、回路の手直しをしていただくことになりました。

負帰還あり（位相補償なし）、改良後（負帰還あり、位相補償あり）の3つの特性がプロットされています。改良前は 22.5dB 程度あったゲインの一部を負帰還に振り分けた結果、ゲインが 7.5dB に下がりっています。高周波側の特性は負帰還により改善されており、位相補償なしでは 100kHz に生じたピークを、1000pF の位相補償コンデンサを追加することでほぼフラットな特性が得られています。また、改良前は左右のチャンネルでゲインに差がありましたが、改良後はほぼ同じゲインになっています。

図 13 に 1Vrms の注入法で測定していただいた出力インピーダンス特性を示します。左右のチャンネルで特性はきれいに一致しており、20Hz から 5kHz までのフラットな領域での出力インピーダンスは 0.12Ω 程度でした。ダンピングファクター (DF) が出力インピーダンスと不可インピーダンスの比で表されるとすると、 4Ω 負荷に対しての DF は 33 程度となります。

図 14 に測定していただいた全高調波歪率特性を示します。出力が 0.5W を超えると歪率が急増しており、このアンプの最大出力は 0.5W 程度となります。歪率の値は出力 0.1W では 0.3% 程度、0.5W でも 0.7% 以下となっており真空管アンプとしては十分な特性が得られていると思われます。

最後に視聴した結果ですが、私の耳では ONKYO の CD レシーバーと聞き比べてははっきりとした違いがわかりませんでした。今後エージングが進む？と変わってくるのかもしれませんが。しかしながら、親指ぐらいの小さなガラス管に入った金属部品が電子回路として動作し、きれいな音が出していることは太

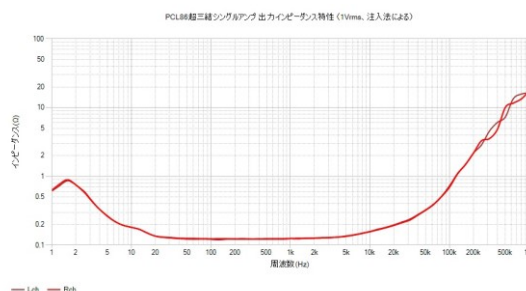


図 13 改良後の周波数特性

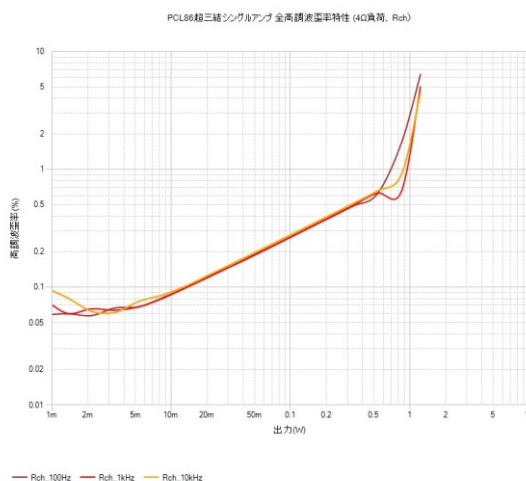
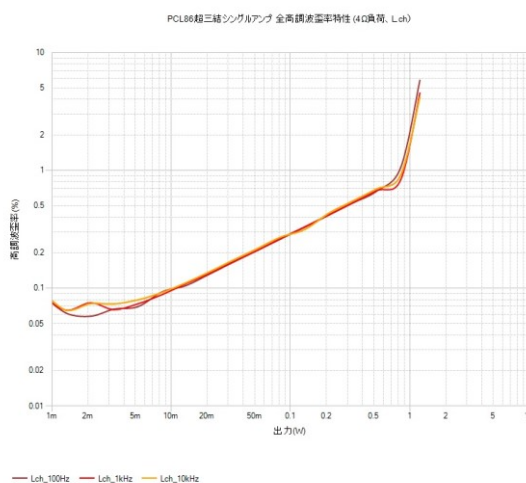


図 14 改良後の周波数特性

(上 : L チャンネル、下 : R チャンネル)

古の技術を復活させたような感動があります。自分で作ったアンプから、しかも驚くほど単純な回路で、メーカー市販品と比べても全く遜色のない音が出ており十分満足できています。

9. まとめ

今回初めて真空管アンプを作製しましたが、大変楽しい時を過ごすことができました。回路設計は今ひとつ理解し切れていませんが、情報収集や部品の購入、レイアウト、シャーシ加工、製作と動作テストとどれも良い経験になりました。なにより充実した楽しい時間を過ごせました。試作アンプに関しては、三極管の電流をもう少し上げたい、左右のゲインが一致するように調整するなど、やることが残っていますがしばらく今の状態で使う予定です。また、いずれはプッシュプルアンプなどもう少し回路規模が大きなアンプを手がけてみたいと思っています。この報告書がこれから真空管アンプを作る方に少しは役に立ち、モニター提供していただいた Arito's Audio Lab 製トランスの宣伝に貢献できれば幸いです。

参考文献

- [1] http://park21.wakwak.com/~eyp/jk1eyp/amp/PCL86main/PCL86_DATA/PCL86data.htm
- [2] 木村 哲、”真空管アンプの素”、技術評論社（2011/10/6）
- [3] 上條信一、進化するパワーアンプ
<http://www.ne.jp/asahi/evo/amp/stchara/report.htm>
- [4] 伊勢幸一、第九研究室だより
<http://blog.livedoor.jp/koichiise/archives/1520707.html>
- [5] 6BQ5三結シングルアンプの直流磁化打消し実験レポート II
(http://www.asahi-net.or.jp/~cn3h-kkc/claf/6bq5T_wide2.htm)
- [6] 前川有人, ARITO's Audio Lab (<http://www.aritos-audio-lab.com/>)
- [7] ペア選別 (hfe、IDSS、Vth) <https://ecaps.exblog.jp/28752956/>
- [8] 超三極管接続の考え方と設計指針
(http://www.gem.hi-ho.ne.jp/katsu-san/audio/what_STC.html)
- [9] 情熱の真空管, ダンピングファクタの測定法
(<http://www.op316.com/tubes/mi-audio/df.htm>)

免責事項・注意事項

本報告を参考にアンプ自作をされる場合は自己責任でお願いいたします。不測の事故や機材の破損などあらゆる損害に関して一切の責任を負いかねますのでご了承ください。

真空管アンプは高電圧回路ですので感電には十分ご注意ください。

また、アンプの発熱が大きいので火傷や発火、火災のリスクに対してもご注意ください。