

三極真空管特性ハイブリッドアンプ

- はじめに
- 三極真空管特性ハイブリッドアンプの試作
- 初段アンプ回路の安定化
- 出力段の安定化
- ダンピングファクター切替回路
- 試作機の実験データ
- 参考資料



町田市 塩沢 潤一
お問合せ先: shiozawa@da2.so-net.ne.jp

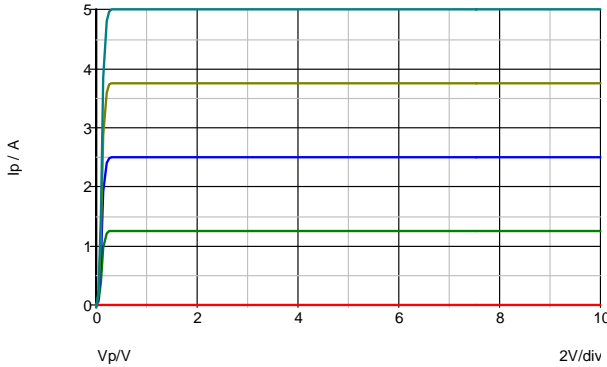
はじめに

真空管 OTL アンプの課題の一つに、消費電力の多さがある。

地球温暖化の問題に対応するためにも、アンプの消費電力を下げる必要性がある。

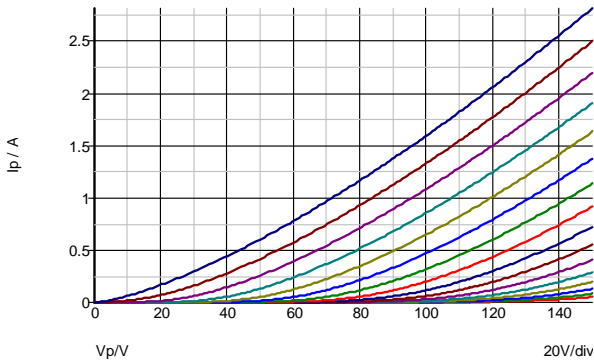
三極真空管を使用した OTL アンプの消費電力を下げる一つの方法として、トランジスタまたは FET を出力デバイスに使用したハイブリッド構成のアンプを検討した。

(図-1)トランジスタ 2SC5199 の出力特性シミュレーション結果



トランジスタや MOS FET の出力特性は、以下の図のように真空管の五極管の特性に良く似たいわゆる飽和特性を示す特性である。

(図-2)6C33C の出力特性シミュレーション

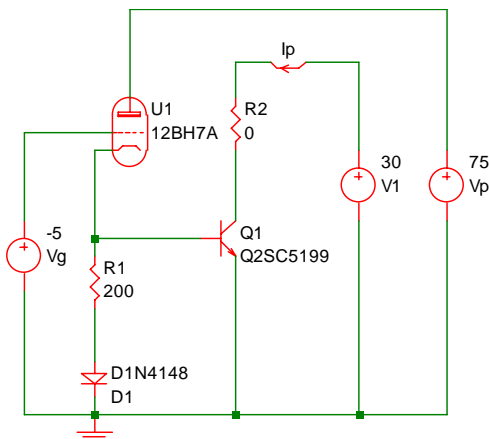


真空管アンプの音は使用する真空管の特性に左右されるのは言うまでもない。

三極真空管の出力特性に含まれる高調波歪成分が2次歪を主成分とした歪で、聞く人の耳に倍音として心地よく感じられるからといわれている。

トランジスタを使って三極真空管と同じような出力特性が出せないか検討してみた。

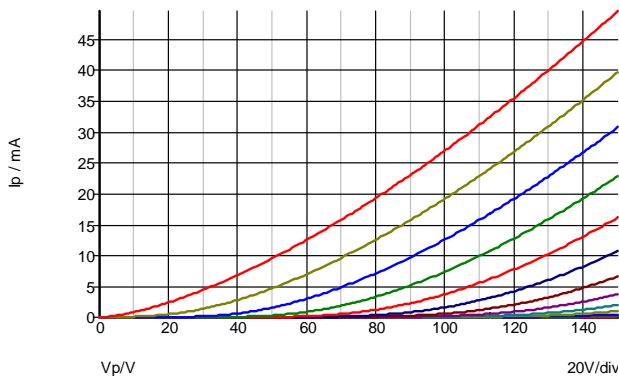
(図-3)三極管とトランジスタハイブリッド出力特性シミュレーション



半導体でも、特殊な V-FET 構造の静電界制御型の FET は、上図の三極真空管特性と同じような出力特性を示すが、現在はごく一部でしたか製造されておらず入手困難な状況である。

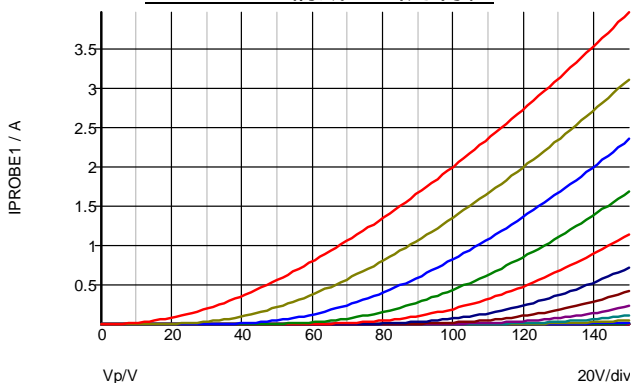
三極真空管とトランジスタを(図-3)のように組み合わせ、出力特性をシミュレーションすると、等価的に小電力の真空管で、大きな出力電流が流せるようになる。

(図-4) 12BH7A 単体の出力特性シミュレーション



(図-4)は、12BH7A 単体の V_p/I_p 特性のシミュレーション結果である。

(図-5) トランジスタと三極真空管のハイブリッド構成の出力特性

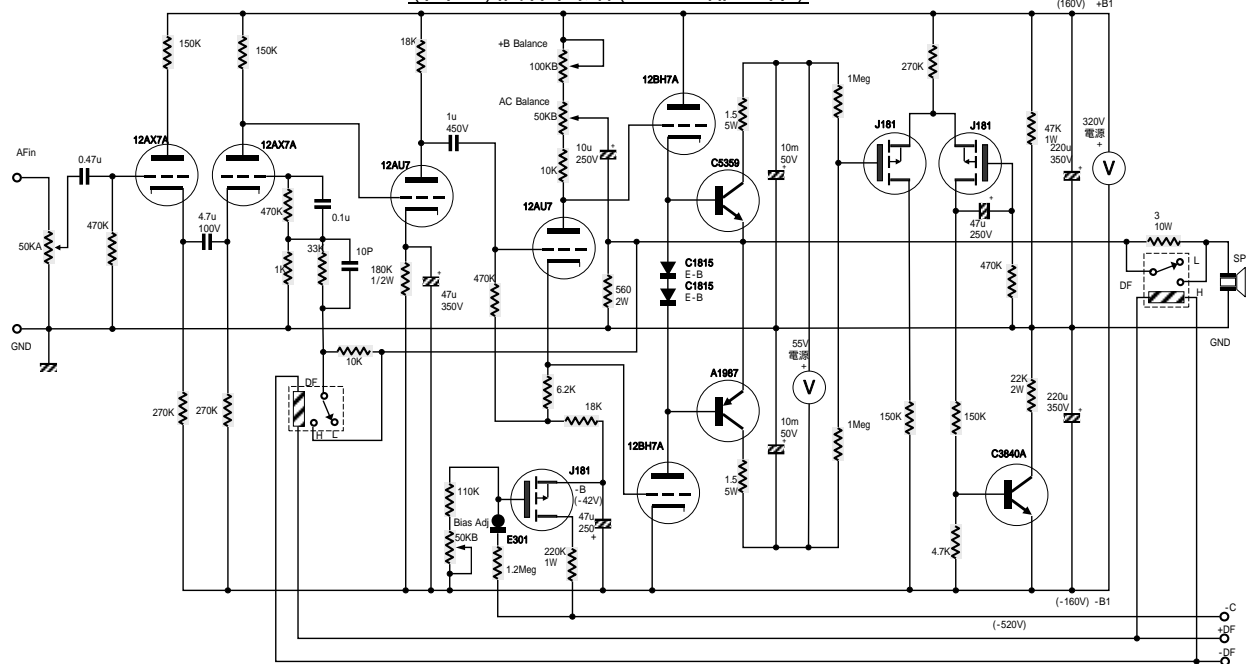


(図-5)は(図-3)の回路のシミュレーション結果である。

三極真空管特性ハイブリッドアンプの試作

シミュレーションベースで可能性を検討した結果を確認するために三極真空管とトランジスタを用いたハイブリッドアンプを試作してみた。

(図-6) 試作回路(アンプ部全体)



基本的な構成は、出力段は 12BH7A の SEPP 出力を、2SC5359 と 2SA1987 のコンプリメンタリーエミッターフォロアで受ける構成にした。

この出力段の構成により、電圧増幅は三極真空管の 12BH7A で行い、トランジスタはエミッタフォアとして動作し、電流増幅機能(電圧増幅度は約 1)を分担して低インピーダンスのスピーカーを駆動する。

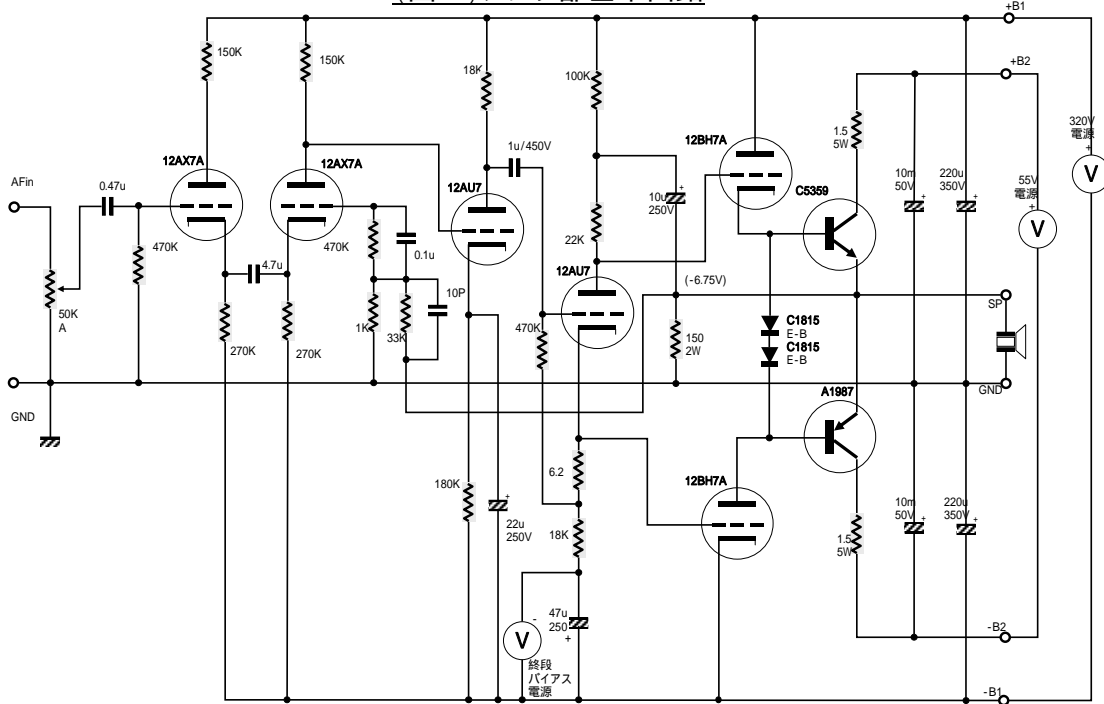
ドライブ回路は、12AU7 の半分のユニットを使用した P-K 分割の出力段直結の位相反転回路である。

入力増幅部は、12AX7A の交流差動入力と 12AU7 の半分のユニットを使用して必要な利得を得ている。

(図-6)の回路は、アンプ部全体の回路で真空管やトランジスタのデバイスパラメーターのばらつきの影響を吸収する回路及びダンピングファクター切替回路も含んだ回路図である。

全体回路図では、回路機能が分かりづらいので、増幅回路機能の等価回路を抜き出して、以下に示す。

(図-7) アンプ部基本回路



(図-7)のアンプ部の基本回路は、真空管 DC バイアスの補正や出力トランジスタの h_{FE} のバラツキによる中点電位の変動を防止する回路などを削除した、音声信号増幅の基本回路である。

初段アンプ回路の安定化

真空管の特性変動が回路特性への影響を受けないように回路構成を工夫する必要がある。

このアンプでは、初段増幅部の DC バイアスについて、真空管の代表的なデバイスパラメーターとして g_m が変動しても、初段の差動増幅部の DC バランスの平衡度への影響を抑えるような回路構成を採用している。

(図-8a) 回路 01

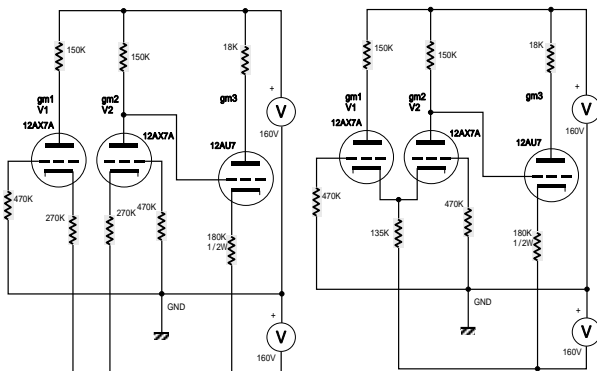
(図-8b) 回路 02

(図-8a) (図-8b) は初段増幅部の直流等価回路を示している。

(図-8a) は直流的には自己バイス回路である。

(図-8b) は直流的には差動増幅回路である。

真空管の g_m のバラツキによる初段の真空管のプレート電圧のバランスを評価した。



(表-1) gm 変動評価組合せ表(L4 直交表)

No	1	2	3
1	GH	GH	---
2	GH	GL	---
3	GL	GH	---
4	GL	GL	---

GH:定格 gm の 130%

GL:定格 gm の 80%

初段の 12AX7A の gm を定格値の 80%、130%変動させて、12AX7A のプレート電圧(V1、V2)の差の電圧を特性値として評価してみた。

評価をする際の gm 値の組合せは、(表-1)のように組み合わせ、4 種類の条件でシミュレーションを行った。

(表-2) gm の変動のシミュレーション結果

回路 01				回路 02			
	V1-V2	V1	V2		V1-V2	V1	V2
実験 1	0.000	70.9177	70.9179	実験 1	0.000	70.9178	70.9178
実験 2	-0.089	70.9177	71.0069	実験 2	-11.575	65.1731	76.7476
実験 3	0.094	71.0067	70.9127	実験 3	11.574	76.7476	65.1732
実験 4	0.000	71.0067	71.0069	実験 4	0.000	71.0068	71.0068

0.075

9.450

(表-2)のシミュレーション結果から、gm の変動に対して、回路 01 と回路 02 を比較するとプレート電圧の差の電圧の変動は、標準偏差で 9.45 0.075 になることがわかる。

出力段の安定化

出力段は 2SC5359/2SA1987 によるコンプリメンタリーエミッタフォロアで構成されているが、スピーカーに直流電圧が印加されないように電源は非接地である。

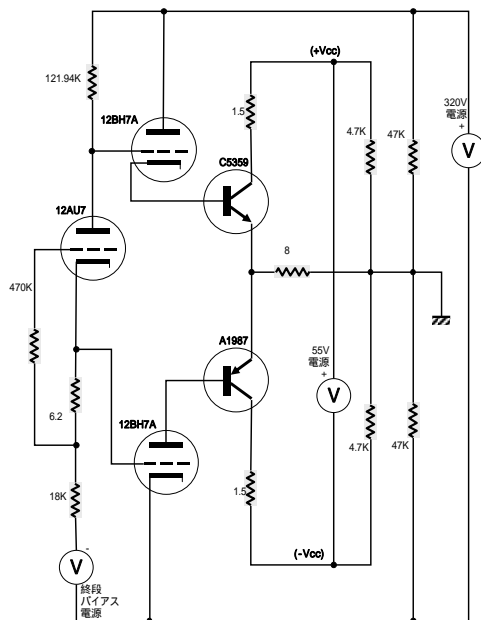
出力段のトランジスタの電力消費量を均等にし且つ最大出力時のクリップをプラス側とマイナス側で対称にするためにプラス側電源電圧とマイナス側電源電圧を等しくする必要があり。

(図-6)の MOS FET J181 による差動増幅回路を用いて、出力トランジスタの電源電圧が常にプラス側とマイナス側で等しくなるように制御している。

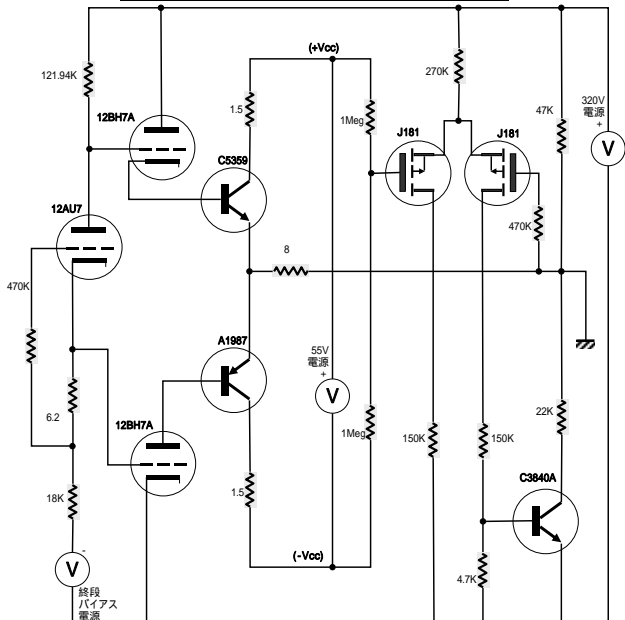
(図-9a)に、バランスの補正をしない場合の直流等価回路を示す。

(図-9b)に、上下のユニットにかかる電圧のバランスを自動補正する直流等価回路を示す。

(図-9a)出力 Balance 補正なし



(図-9b)出力 Balance 補正あり



この等価回路を用いて、バランスの自動補正効果についてシミュレーションを行い評価した。

真空管 12AU7、12BH7A の gm を定格値の 80%、100%、130%と 2SC5359 と 2SA1987 の h_{FE} を定格値の 80%、100%、120%の各々3水準を L18 直交表に割り付けて(+Vcc) (-Vcc)のバランスを評価した。

割付表を(表-3)に、バランスの評価結果を(表-4)に示す。

(表-3)L18 直交表への割付

割付表				12AU7 gm	12BH7A_1 gm	12BH7A_2 gm	2SC5359 hfe	2SA1987 hfe
No	1	2	3	4	5	6	7	8
1	---	---	---	GL	GL	GL	80	80
2	---	---	---	G	G	G	100	100
3	---	---	---	GH	GH	GH	120	120
4	---	---	---	GL	G	G	120	120
5	---	---	---	G	GH	GH	80	80
6	---	---	---	GH	GL	GL	100	100
7	---	---	---	G	GL	GH	100	120
8	---	---	---	GH	G	GL	120	80
9	---	---	---	GL	GH	G	80	100
10	---	---	---	GH	GH	G	100	80
11	---	---	---	GL	GL	GH	120	100
12	---	---	---	G	G	GL	80	120
13	---	---	---	G	GH	GL	120	100
14	---	---	---	GH	GL	G	80	120
15	---	---	---	GL	G	GH	100	80
16	---	---	---	GH	G	GH	80	100
17	---	---	---	GL	GH	GL	100	120
18	---	---	---	G	GL	G	120	80

gm の水準値
 GL: gm 定格値の 80%
 G: gm 定格値の 100%
 GH: gm 定格値の 130%

(表-4) gm と hfe の変動のシミュレーション結果

バランス補正なし

	V1+V2	V1	V2
実験_1	-54.034	0.483	-54.517
実験_2	0.006	27.503	-27.497
実験_3	53.496	54.248	-0.752
実験_4	-53.964	0.518	-54.482
実験_5	0.034	27.517	-27.483
実験_6	53.814	54.407	-0.593
実験_7	54.076	54.538	-0.462
実験_8	-54.053	0.471	-54.523
実験_9	54.086	54.543	-0.457
実験_10	-53.916	0.542	-54.458
実験_11	-54.208	0.396	-54.604
実験_12	54.154	54.577	-0.423
実験_13	-53.910	0.545	-54.455
実験_14	54.176	54.588	-0.412
実験_15	-54.214	0.393	-54.607
実験_16	54.048	54.524	-0.476
実験_17	53.984	54.492	-0.508
実験_18	-54.220	0.390	-54.610

52.409

バランス補正あり

	V1+V2	V1	V2
実験_1	-0.054	27.473	-27.527
実験_2	-0.056	27.472	-27.528
実験_3	-0.058	27.471	-27.529
実験_4	-0.054	27.473	-27.527
実験_5	-0.056	27.472	-27.528
実験_6	-0.058	27.471	-27.529
実験_7	-0.058	27.471	-27.529
実験_8	-0.066	27.467	-27.533
実験_9	-0.048	27.475	-27.523
実験_10	-0.064	27.468	-27.532
実験_11	-0.054	27.473	-27.527
実験_12	-0.048	27.476	-27.524
実験_13	-0.060	27.470	-27.530
実験_14	-0.050	27.475	-27.525
実験_15	-0.056	27.472	-27.528
実験_16	-0.052	27.474	-27.526
実験_17	-0.050	27.475	-27.525
実験_18	-0.060	27.470	-27.530

0.005

上記の結果から、真空管の gm とトランジスタの hfe のばらつきに対してバランス補正をすることにより標準偏差で相対的に比較すると約 10,000 倍の改善になる。

ダンピングファクター切替回路

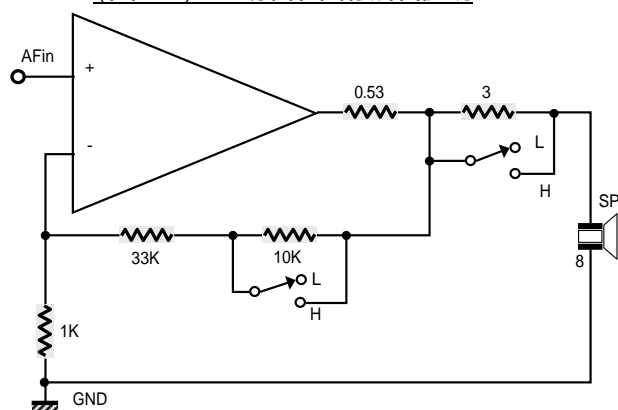
アンプの出カインピーダンスによってスピーカーから出る音が変化する。

スピーカーのボイスコイルに発生する逆起電力やスピーカーボックスの音響負荷特性や設置条件によってスピーカーのアンプから見た負荷特性が変わる。

アンプの出カインピーダンスによって、スピーカーの負荷特性の変化が音への影響の度合いが異なる。

今回検討したアンプでは、アンプの出カインピーダンス(ダンピングファクター、DF)を切替える回路を設け、ダンピングファクターを約 15 と約 2.5 に切り替えられるようにした。

(図-10) DF 切替回路動作説明



ダンピングファクター切替スイッチの L ポジションでは、スピーカーに 3.53 の抵抗が直列に接続され、DF 2.3 になる。

スピーカーに直列に 3.53 の抵抗が入ることで約 2.8db の増幅利得が減少する。

増幅利得の減少を補うために、負帰還量を約 2.3db 減らしている。

切替スイッチの H ポジションでは、スピーカーに 0.53 (アンプの内部抵抗) が直列に接続され、DF 15 になる。

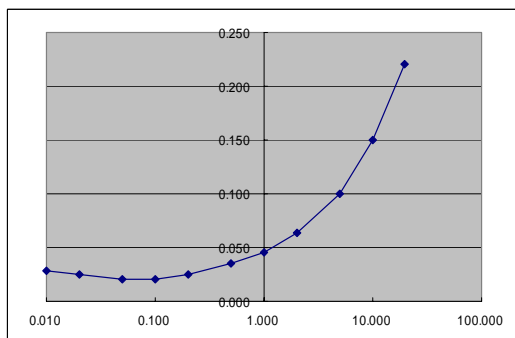
試作機の実験データ

アンプゲイン:

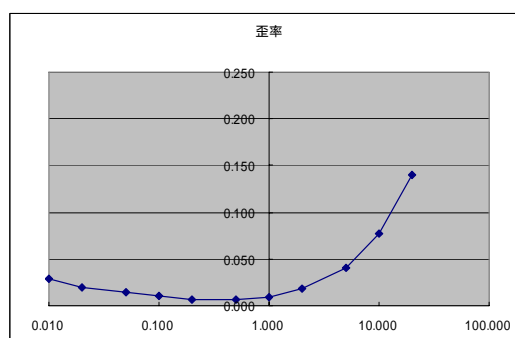
L CH	29.3	db
R CH	29.3	db

歪率特性:

左チャンネル

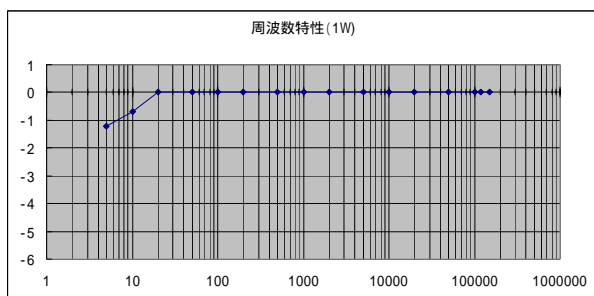


右チャンネル

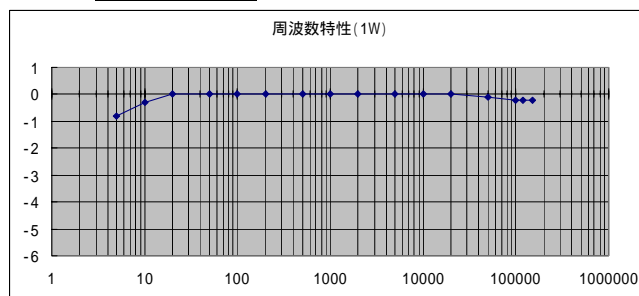


周波数特性:

左チャンネル

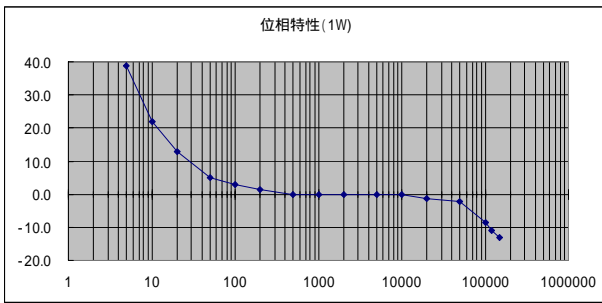


右チャンネル

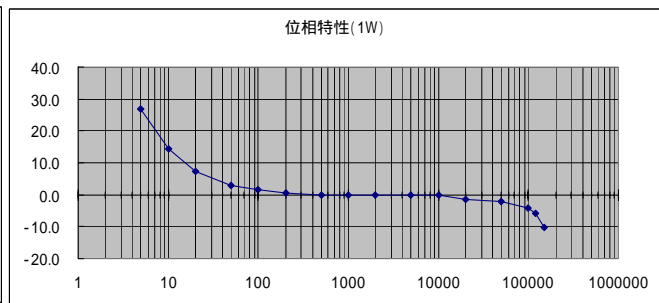


位相特性：

左チャンネル



右チャンネル



残留ノイズ：

LCH	0.13	mV
RCH	0.1	mV

Music Power：

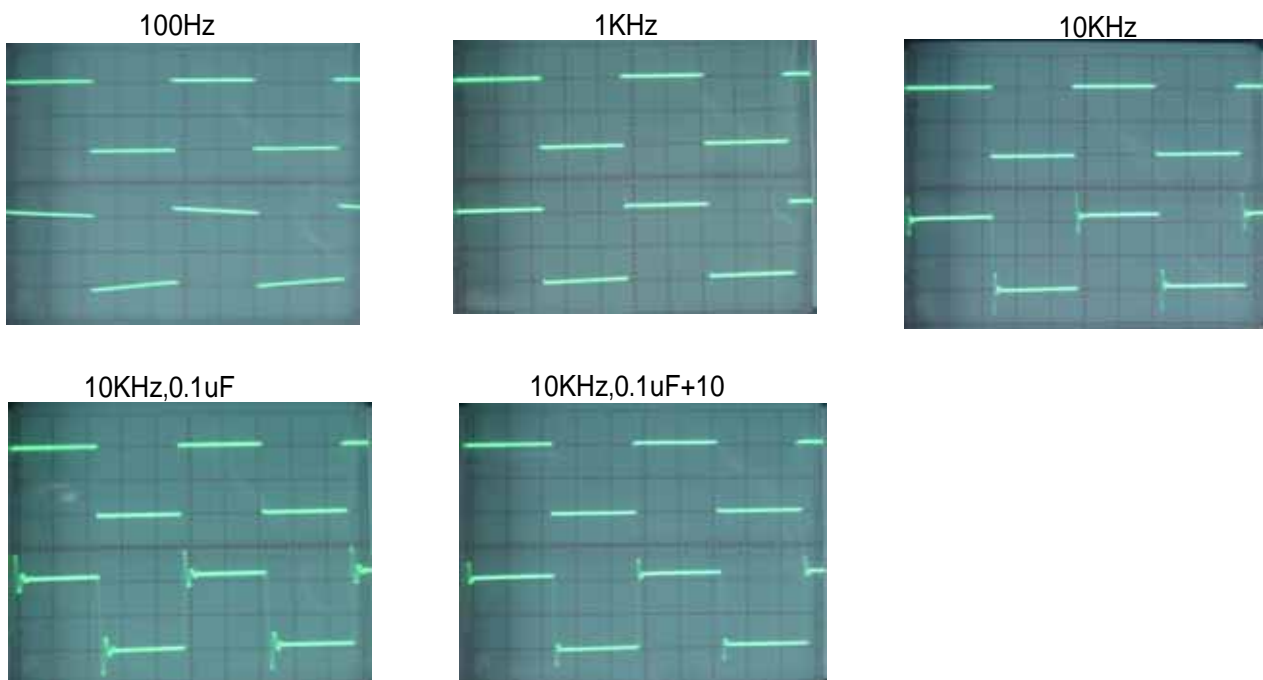
L出力	20	Vp	25.1	W
R出力	20	Vp	25.1	W

ダンピングファクター：

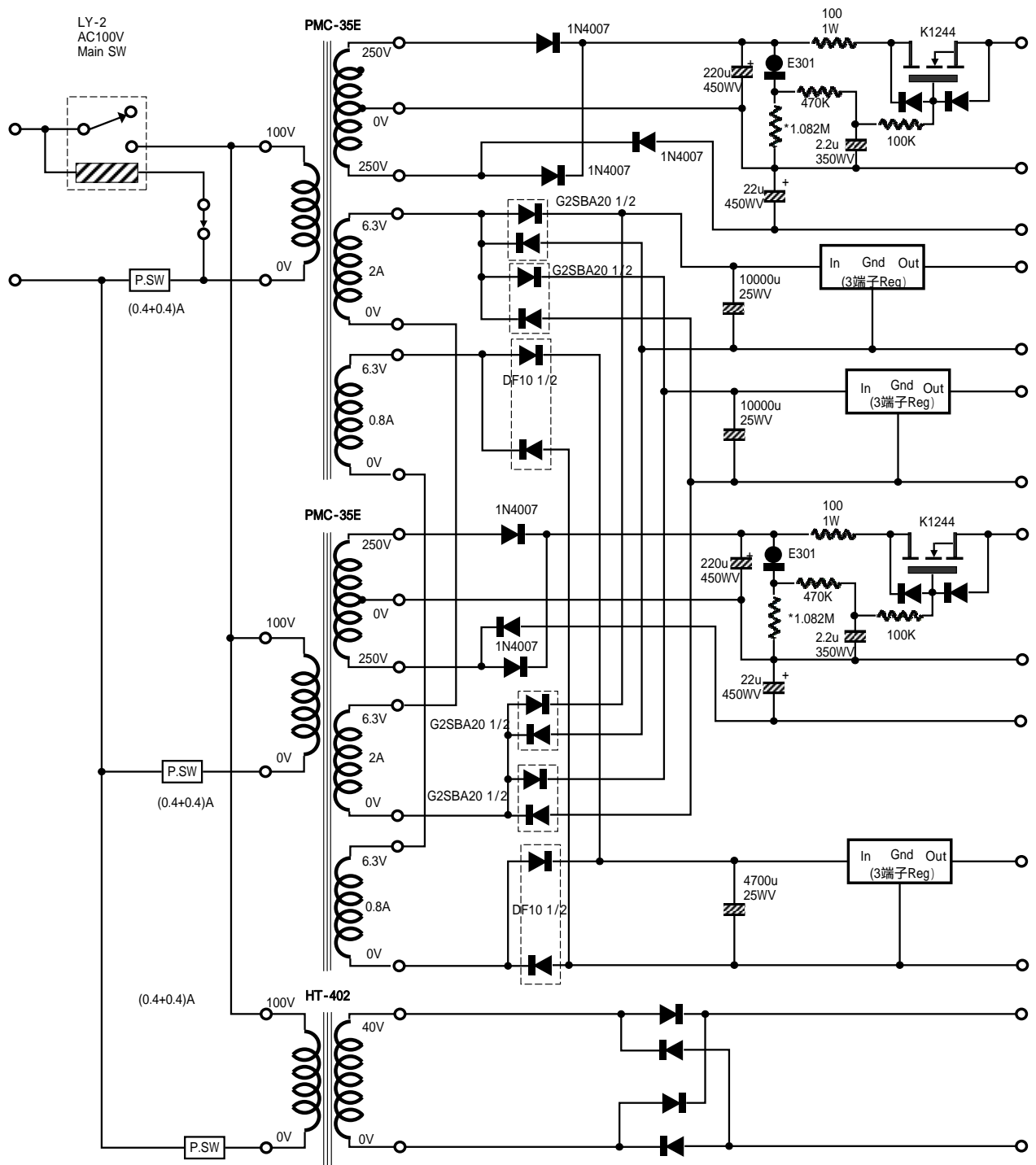
L CH	周波数	1W			10W		
		V _O	V _R	DF	V _O	V _R	DF
	10Hz	3.3	2.8	5.6	10.4	8.9	5.9
	100Hz	3.04	2.8	11.7	9.6	8.9	12.7
	1KHz	3.02	2.8	12.7	9.6	8.9	12.7
	10KHz	3.02	2.8	12.7	9.6	8.9	12.7
	100KHz	3.02	2.8	12.7	9.6	8.9	12.7

R CH	周波数	1W			10W		
		V _O	V _R	DF	V _O	V _R	DF
	10Hz	3.1	2.8	9.3	9.8	8.9	9.9
	100Hz	2.97	2.8	16.5	9.4	8.9	17.8
	1KHz	2.97	2.8	16.5	9.4	8.9	17.8
	10KHz	2.98	2.8	15.6	9.4	8.9	17.8
	100KHz	3.1	2.8	9.3	9.8	8.9	9.9

波形写真(上段:入力波形、下段:出力波形、8 負荷)



電源回路



タイマー及び保護回路

