

電気電子工学特別講義Ⅱ
回路設計論 4.回路屋の身だしなみ

ザインエレクトロニクス株式会社
源代 裕治
yuji.gendai@gunma-u.ac.jp

第1章 基本回路達

カレントミラー、差動対、ソースフォロアー

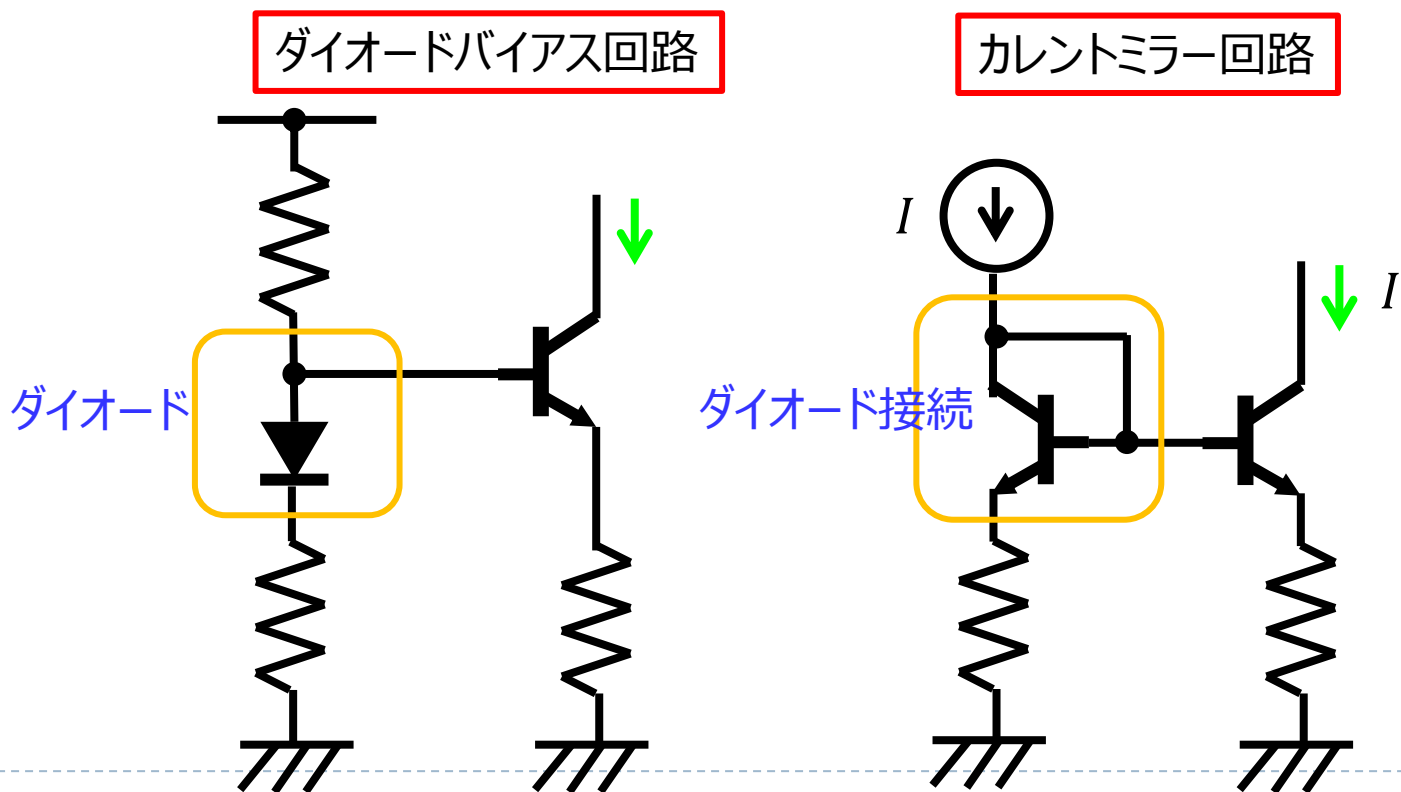
カレントミラーの登場

発明者不詳。古典的論文としては

Widlar, "Some Circuit Design Techniques for Linear Integrated Circuits," IEEE Tran. on Circuit Theory, Vol. CT-12, No. 4, pp. 586-590, December 1965

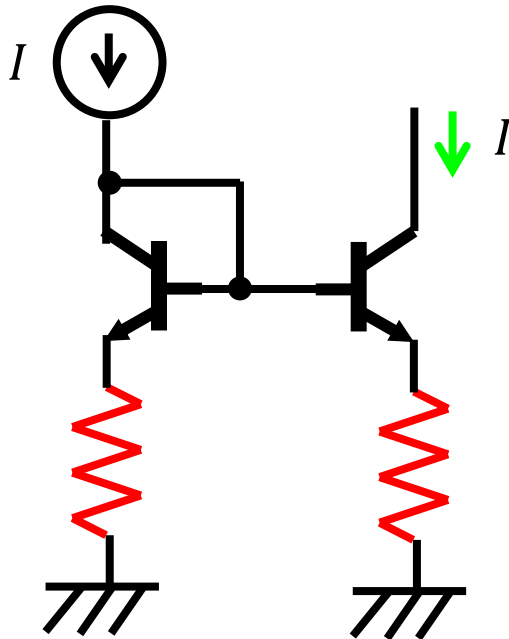
IC時代になってCやLがTrより相対的に高価になることで、段間を直結することが経済的に合理的になった。その一方で、トランジスタは温特が真空管よりずっと悪く、電流入力素子であることと相まって、動作点の安定には苦労していた。

温特を抑えるために工夫していたダイオードバイアスであるが、TrのCB間ショートがダイオードと同様の特性を持つことと、IC内で同じTrを用いると温度変化に同じ変化をすることで電流比が保たれることが分かってきた。カレントミラーの登場である。

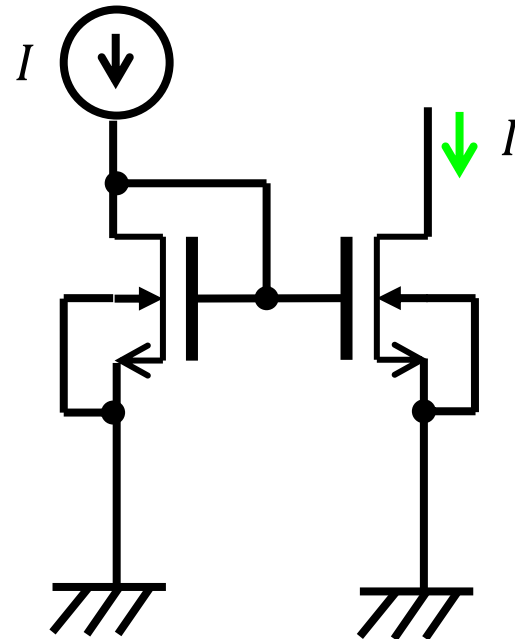


カレントミラー回路のBip/MOS比較

Bipolar Current Mirror



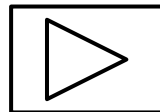
MOS Current Mirror



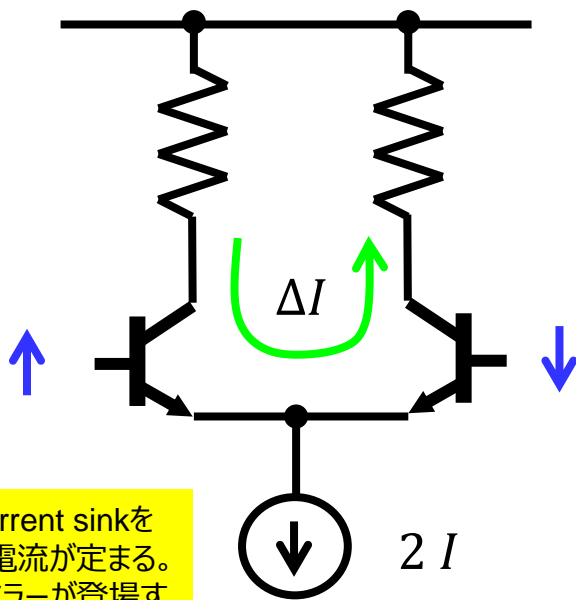
Bipolar ICからMOS ICに代わるときに、カレントソースから抵抗を無くすのが主流になった。この変化は、MOSの g_m がBip.より小さいため、抵抗無しでも電流バラつきが小さくなるためであろう。またレイアウトでMOSと抵抗の接続が、Bip.の時より面積が大きくなる傾向が強い。なお、バラつき対策にはMOS Tr.の W/L を小さくすることが有効であるが、同一電流に対しゲート電位を上げないといけないので、低電圧動作に対する制約となっている。

差動対の発明

Alan Blumlein GB482740, 1938



差動対は真空管時代から既に知られていたが、広く用いられるまでには至らなかった。回路を差動化すると、コモンモードノイズや電源揺れに強くなり、素子のペア比が取れば絶対バラつきに強くなることなど大きなメリットがある反面、真空管数が2倍必要というコスト増に見合わなかったのである。真空管は、抵抗やコンデンサに比べ、ひととき高価な部品だったのである。IC時代になって、コスト構造が一変する。素子の値段はざっくり面積比例。Trは抵抗と同等か、それ以下、キャパシタはかなり大きく、インダクタになると内蔵は非現実的になった。これらの状況変化で、差動対のメリットが活きてくるようになったのである。



差動対は、current sinkを与えると動作電流が定まる。ここにカレントミラーが登場するのである。

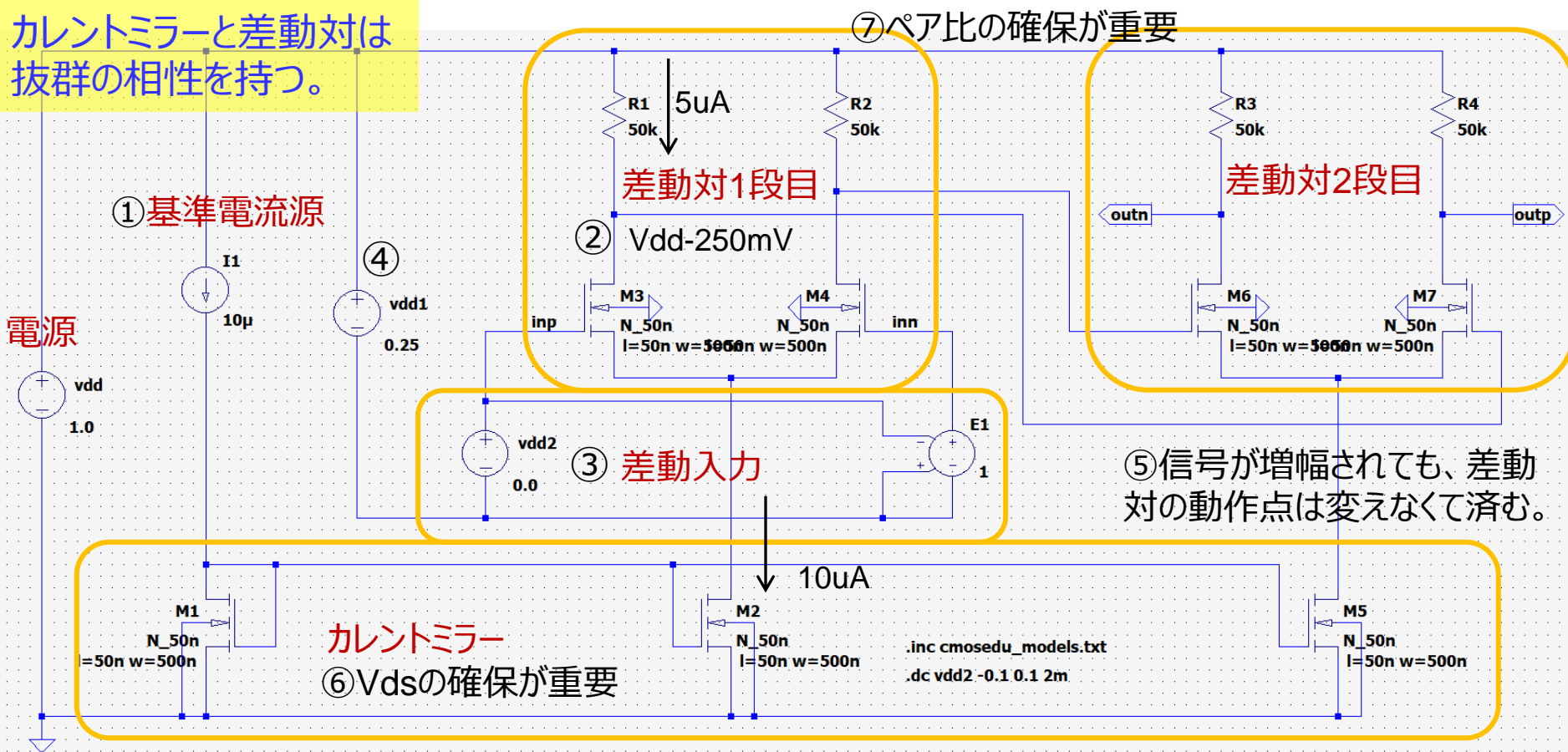
入力が同電位するとき、電流源の電流は等分され、各Trに同じ電流 I が流れる。左の入力が上がり、右の入力が同じだけ下がると、各Trは電流を増減させるが、電流源に流れる電流の総和は変わらないため、左のTrで増えた分は右のTrにそのまま流れることになる。

回路を追うには、電圧を逆流している電流が見えるよう訓練すると良い。

差動対の多段接続

IC内でトランジスタの差動対は(容易に)直結できる。

カレントミラーと差動対は
抜群の相性を持つ。



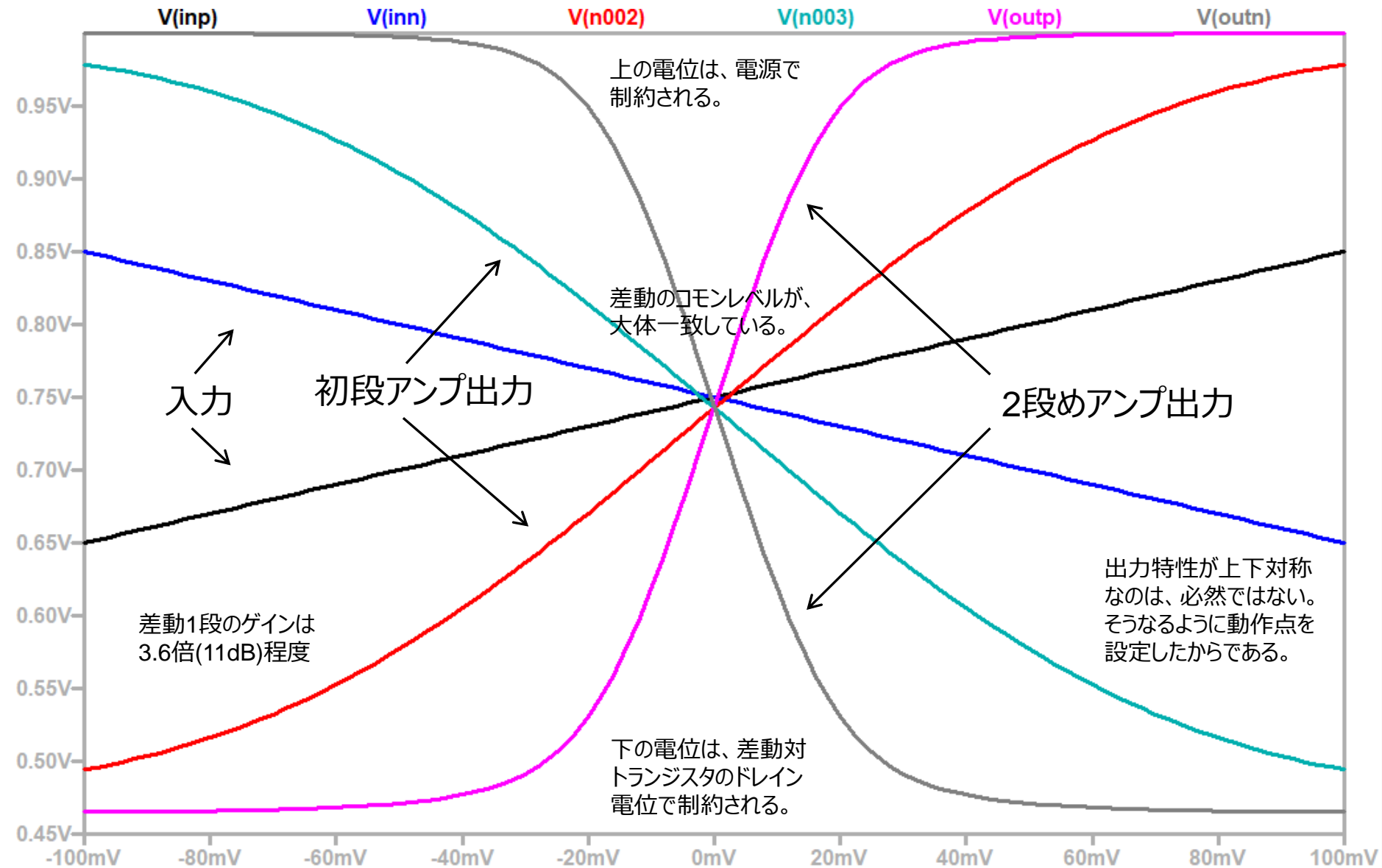
① 基準電流はband-gap reference回路から作ることが多い。DOI: 10.1109/MSSC.2016.2577978

② 差動対の動作点は、電流源(Current Sink)電流が二つに分かれ、それが抵抗に流れることにより決まる。

③ テストベンチで用いる差動入力の作り方の定番のひとつは、VCVSを用いる。

④ この差動対の信号は電源基準である(IC回路で抑えるべきポイントのひとつ)。そこで入力も電源基準で作る。

シミュレーション波形

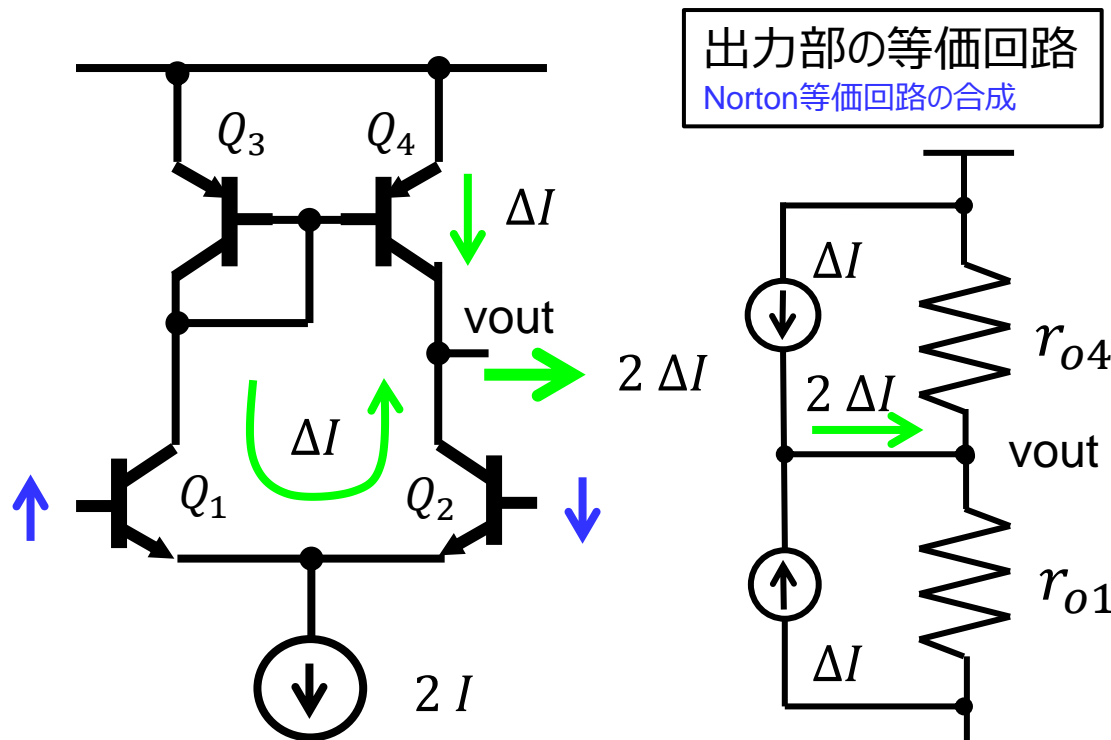


Active Load

差動1段で、もっとゲインを稼ぎたい

ということで工夫されたのが、

カレントミラーの発明から大分経って、負荷にカレントミラーを使う動きが出てきた。これを active load と言う。# おそらく発想自体は、カレントミラー発明からはそんなに遅れていない。



出力部の等価回路

Norton等価回路の合成

出力端子 v_{out} では Q_4 と Q_2 の出力抵抗が並列接続になる。その合成抵抗が抵抗素子を使うより大きいことを利用してゲインを稼いでいる。

抵抗負荷でゲインを大きくしようと抵抗値を大きくすると v_{out} の信号レベルが下がってしまうので、 r_{o4} よりは大分小さい値しか使用できない。

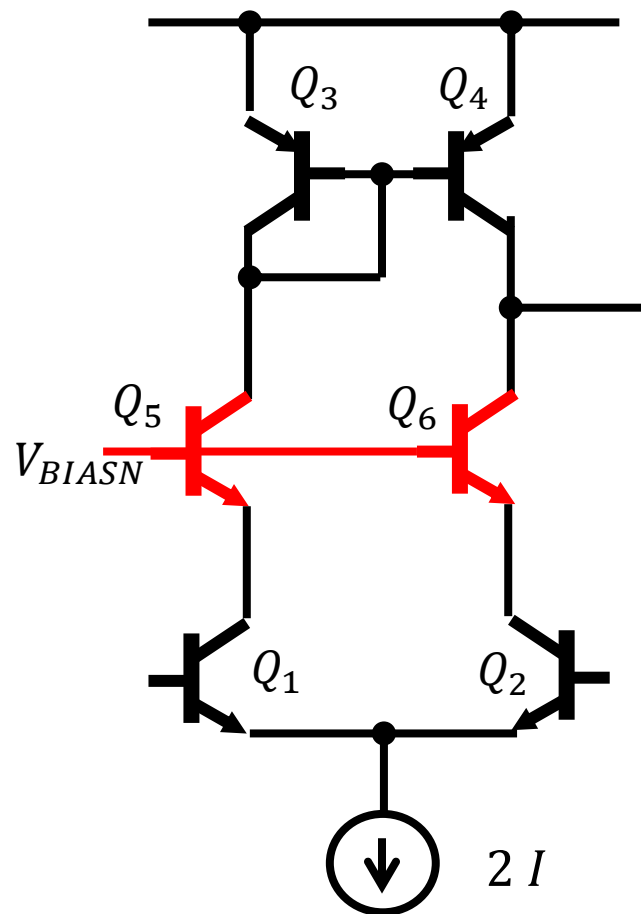
ただし v_{out} に低抵抗(低インピーダンス)の負荷がつながる(負荷が重い)と、この利点が享受できなくなる。

この問題は2ページ先で解決する。

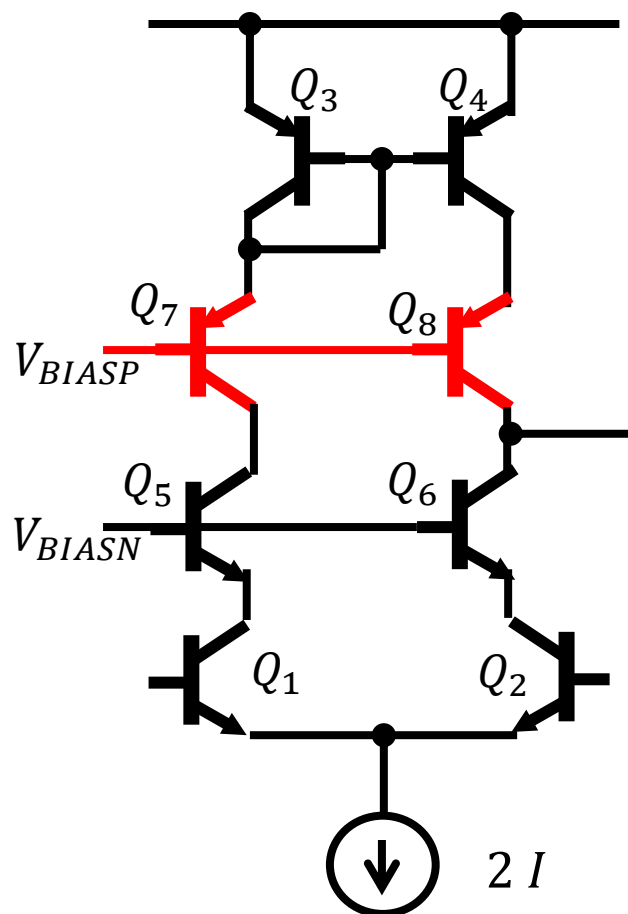
active loadではsingle出力になってしまう。

先人たちがこの問題をどうやって解決したかは、各自で調べると良い。

が、その前に自分で悩んでみるのも、良い修行になろう。



Q_6 のエミッタ電位はエミッタ電流にあまり依存せず決まるため Q_2 の r_o が見え難くなる。

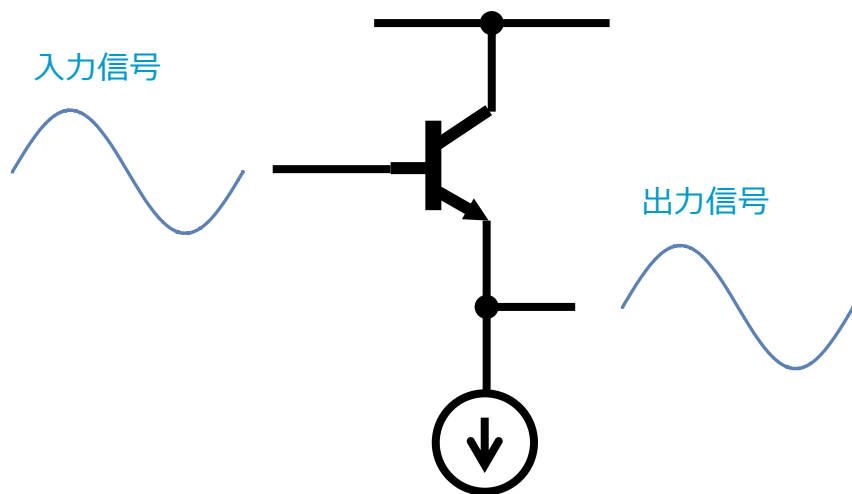


Q_8 も追加すると Q_4 の r_o も見え難くなる。

ゲインを稼げば稼ぐほど、ますます負荷駆動能力が減って来る。

Emitter(Source) Follower

EF もしくは SF と略記

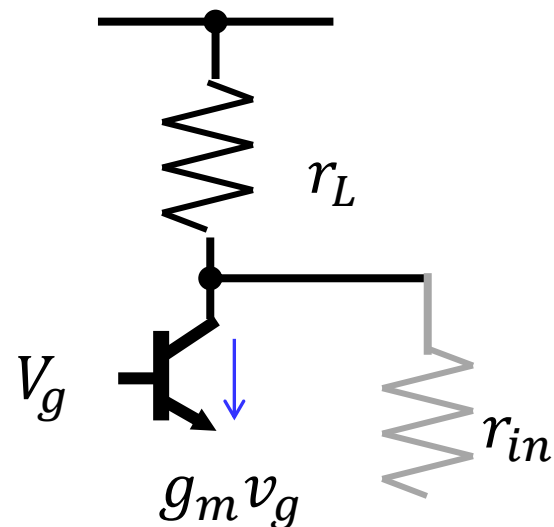


Emitter Followerは、Base電位の変化をほぼそのまま (実際には若干小さくなって) Emitterに伝える。MOS Trでは増幅率がさらに小さく、0.8倍程度になる (バックゲート効果など)。

ゲイン1以下のアンプが、何の役にたつのだろうか。

SFの入力は、そもそも電流が殆ど流れない。出力は、後段からの電流(キックバック)が少々変化しても電位があまり変わらない。

差動対の出力段

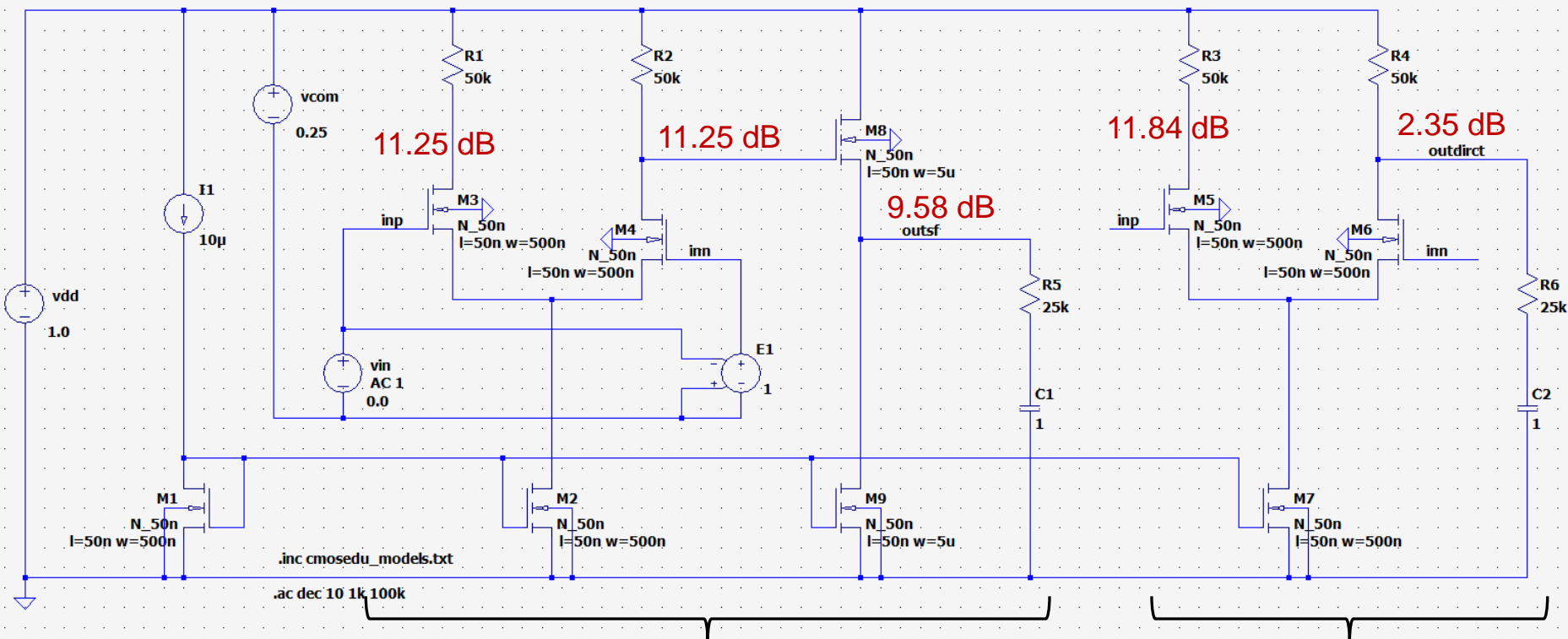


負荷 r_{in} (とコレクタ抵抗)がなければ、ゲインは $g_m r_L$ から $g_m (r_L \parallel r_{in})$ に落ちてしまう。

しかし出力と負荷の間にSFを挟むとアンプゲインが殆ど減らなくて済む。

SF有無によるゲイン比較

同一の差動対定数で、出力負荷 $25k\Omega$ を駆動した。
VGS分の電位の違いを無視できるように、直列に大容量(ここでは1F)を入れた。
そのため、DCゲインを見るのにAC解析が必要となった。



差動対にSFとload

駆動力を上げるため、SFには10倍の電流を流している。

差動対とload

SFがない以外は左の回路と同一

余談ながら、バイポーラとMOSのIV特性の違い

	Bipolar	MOS
微分形	$I_C = V_T \frac{dI_C}{dV_{BE}}$	$V_{GS} = \beta \frac{dI_D}{dV_{GS}}$
直接形	$V_{BE} = V_T \ln \frac{I_C}{I_S}$	$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2$

出力電流を入力電圧で微分したものが、Bipolarでは出力電流、MOSは入力電圧になる。その結果が、Bipolarにおいては指数特性、MOSにおいては自乗特性となっている。

何か理屈はあるのかもしれないが、寡聞にして知らず。

R. Wiegand, "Analysis and Synthesis of MOS Translinear Circuits," Springer, 1993.

ICで回路が変わったこと

特性

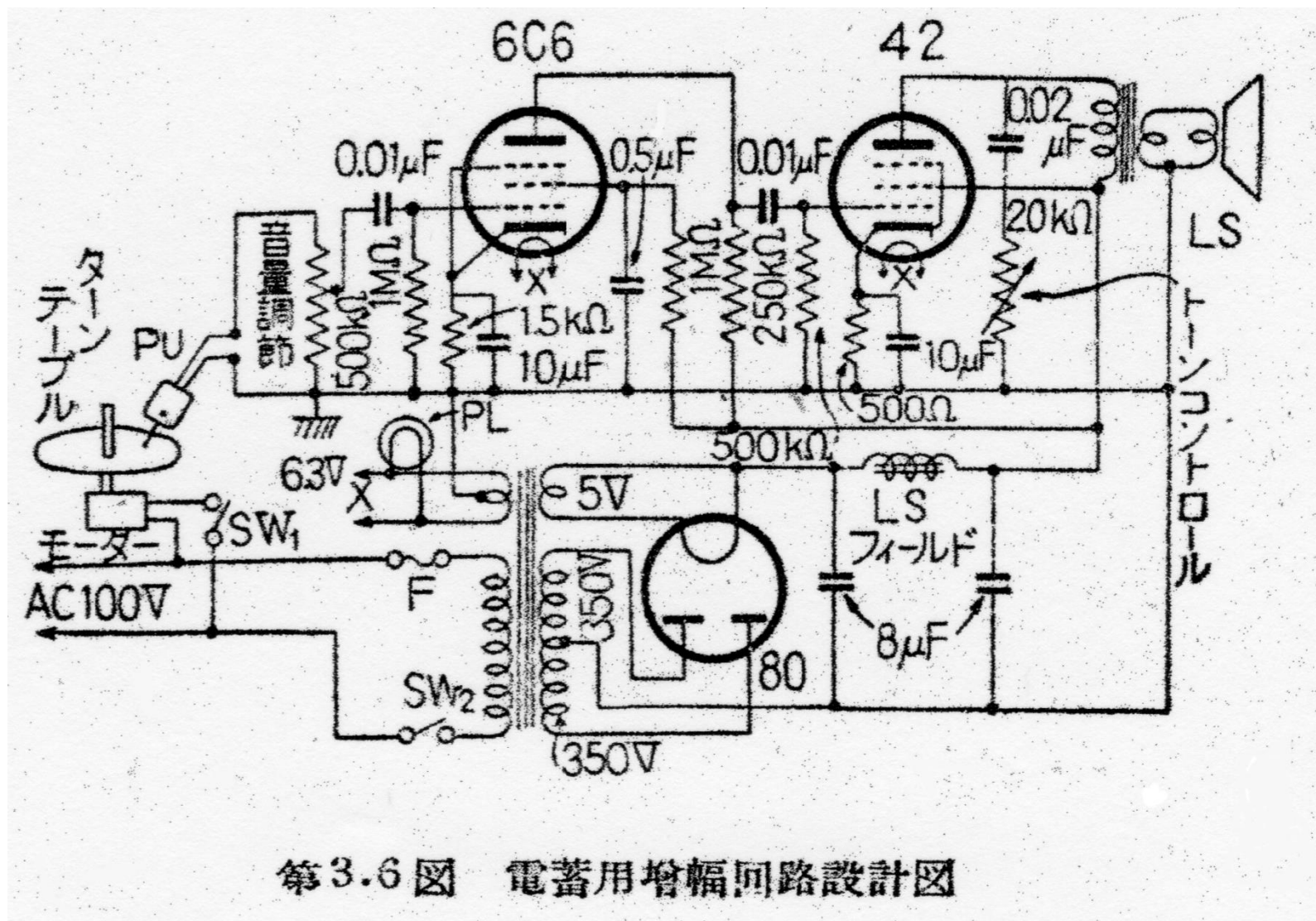
	ディスクリート	IC
素子の値段	$R < C < L < T, \text{Valve}, \text{Tr}$	$\text{Tr}, R < C \ll L$
		$\propto \text{Masks} * \text{Area} / \text{Yield}$
精度	単体は良い 組合せは別途ケア	ペア比は良い 絶対精度は $\pm 15\%$ 程度

回路上の変化

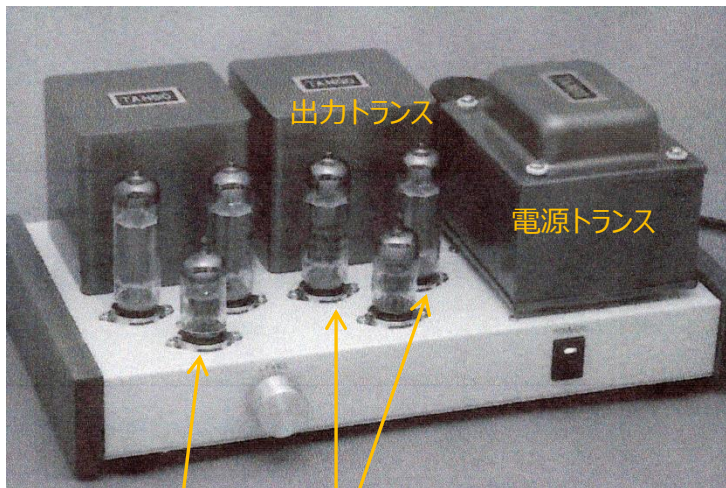
	ディスクリート	IC	コメント(IC観点)
ゲイン段構成	単体	差動対	直結でもバラつきに耐える。
バイアス	自己バイアス	カレントミラー(CM) バンドギャップリファレンス (Band Gap Reference)	差動対と相性が良い。 BGRを使うと電源や温度 のバラツキに強くなる。
出力IV変換	抵抗	アクティブロード(CM)	gmの低さを補う
段間接続	コンデンサ(orトランス)	直結	素子の値段比が劇的に変 わった。
インピーダンス変換	トランス	ソースフォロア	真空管と違いDCレベル変 動が0.7V以下で済むデバ イスである。

第2章 実用回路たち

電蓄用増幅器回路図



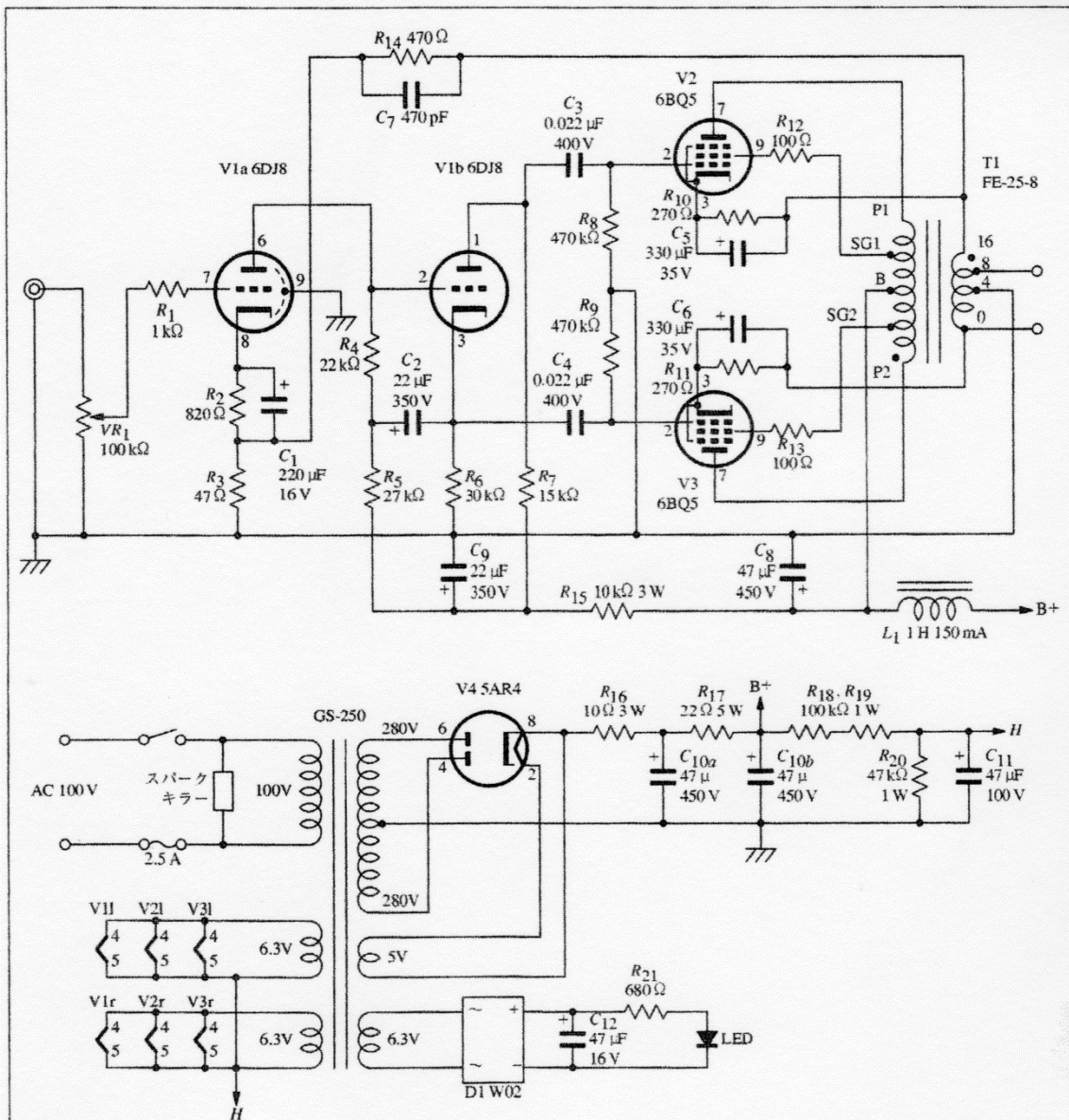
オーディオ用真空管アンプ回路図



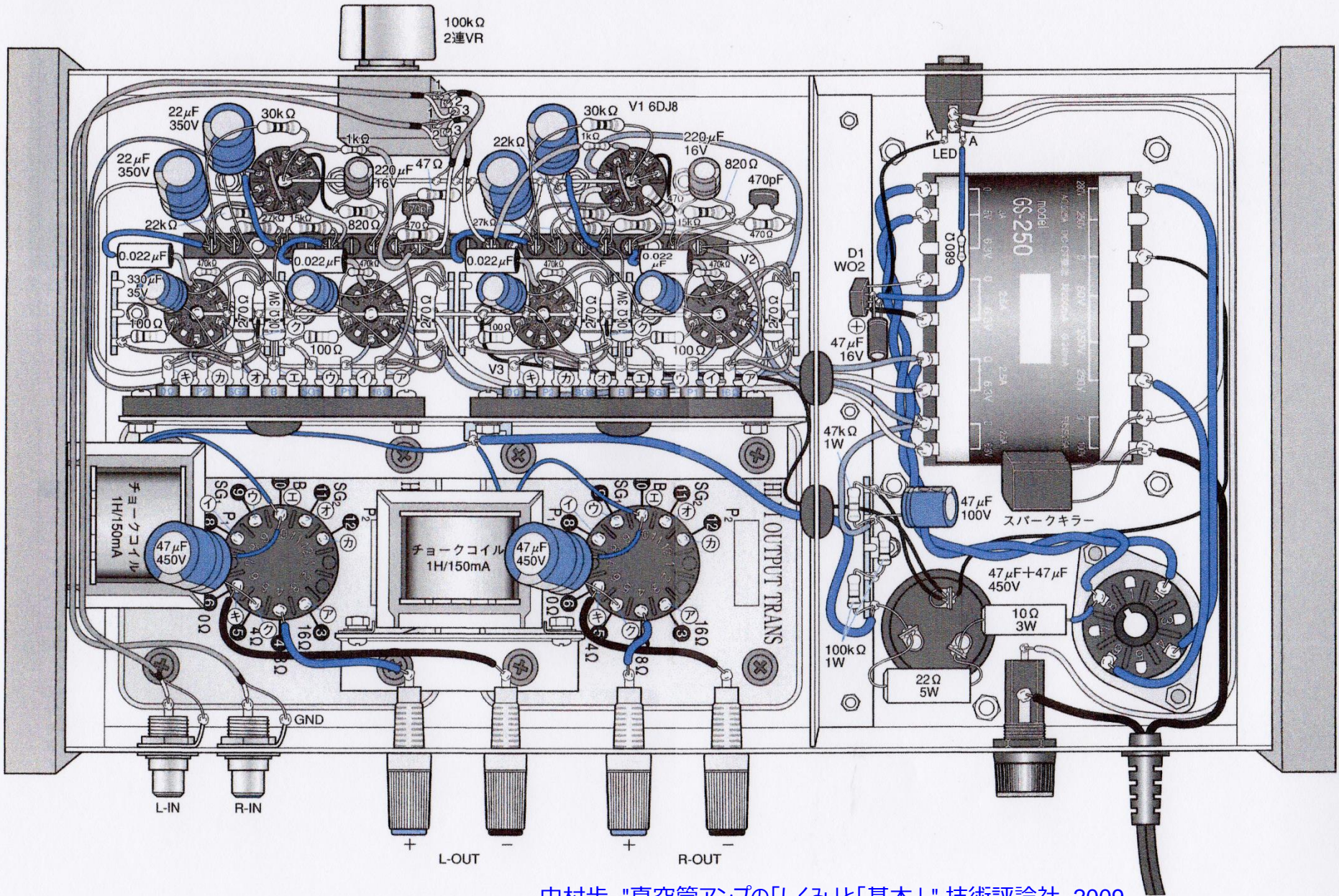
双3極管
6DJ8

プッシュプル
の5極管
6BQ5

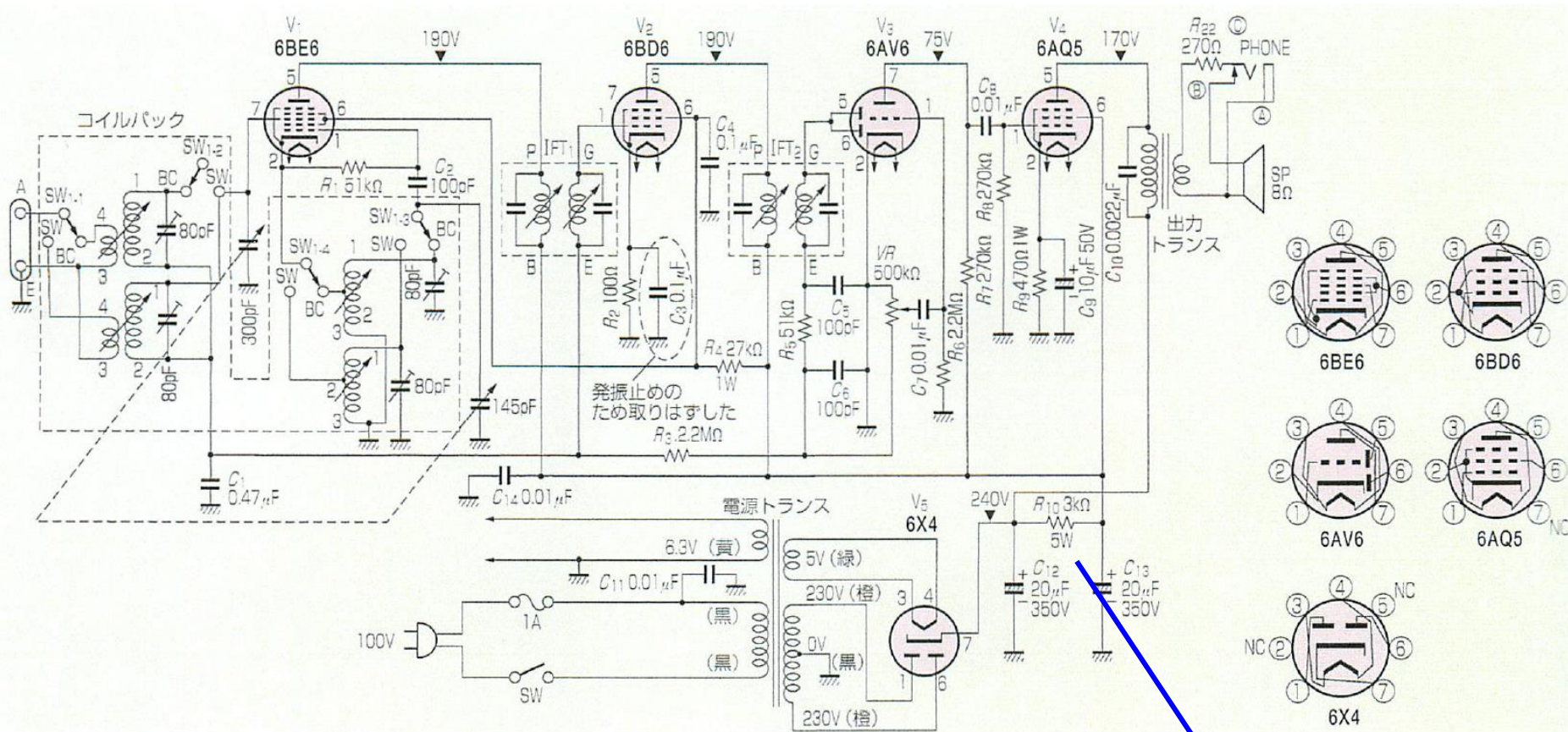
トランスの大きさを感じて欲しい。しかも重い。銅と鉄の塊なのである。音質に与えるトランスの影響は大きい。このアンプでは初段の3極管が直結されているが、真空管の時代には稀な構成であった。



オーディオ用真空管アンプ実体図



2バンド5級スーパーラジオ回路図

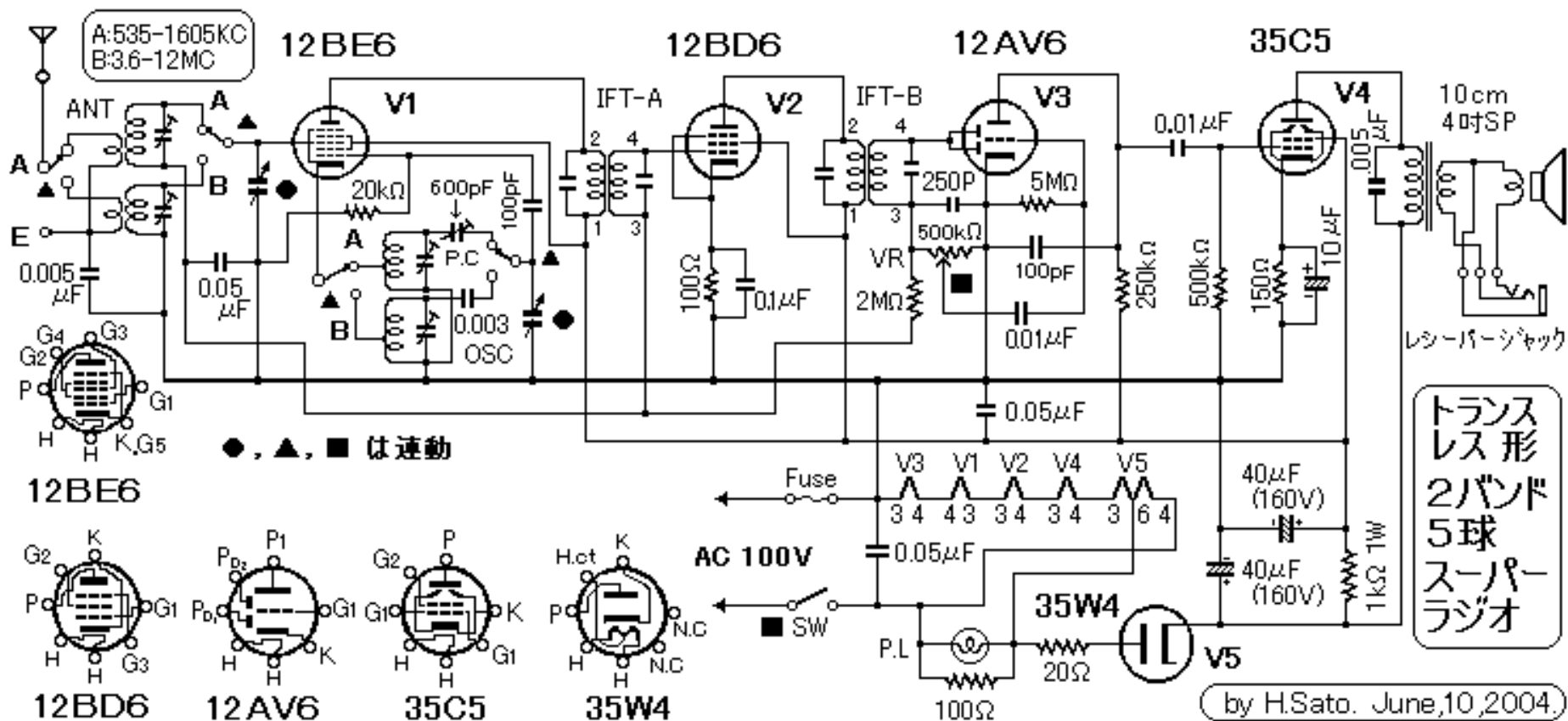


【図1】本機の全回路
 昭和20年代後半、MT管が使用されるようになったころのままの回路構成。この後、真空管ラジオはトランスレスが主流になった（メーカー添付の回路図を一部変更している）

オームの法則から、
 $P=V^2/R=19.2W$
 ではないのか？

藤本伸一, "2バンド5級スーパーの製作," ラジオ少年の時代, 誠文堂新光社, 2002.

トランスレス5級スーパーラジオ回路図



高価で重い電源トランスを省くため、真空管のヒーターを直列にする構成が、低価格ラジオの主流になった。(昭和28年頃から盛んに生産された)

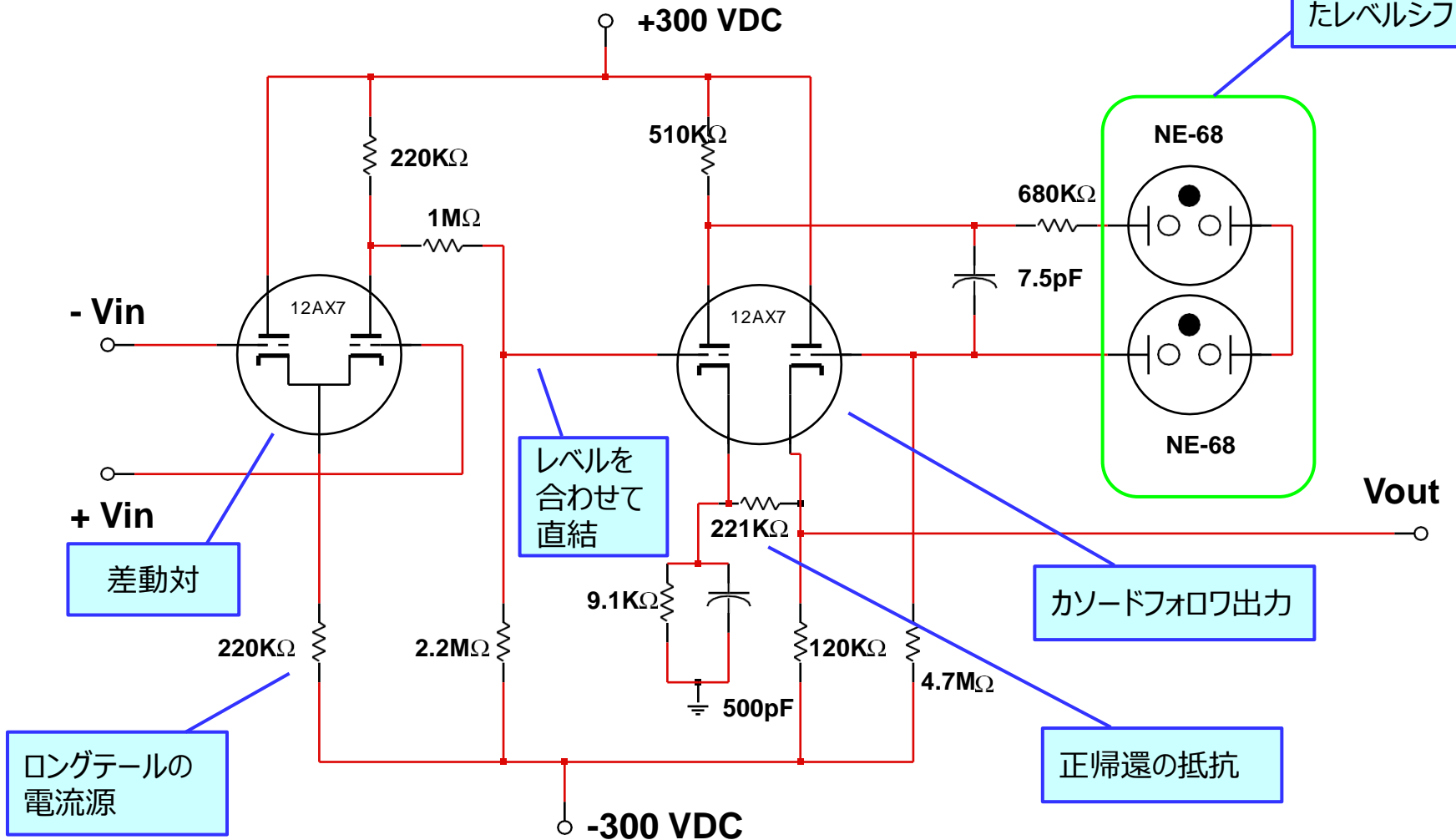
そのためシャーシアースだと感電する危険がある。(フローティングアースなら、地面から絶縁されているので感電しない。)

<http://ja7bal.la.cocan.jp/5super.htm>

The First "Real" OpAmp: The K2-W

1952年

ネオン管を用いたレベルシフト





K2-XA

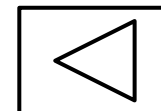


EE122, Stanford University, Prof. Greg Kovacs

The K2-W Tube OpAmp

- Invented by Julie Loebe and George Philbrick (early 1950's)
- The first "mass production" OpAmp...
- Cost (in 1950's) approximately \$22.00...
- Basic specifications comparison to 741 and LT1037...

Parameters	K2-W OpAmp	741 OpAmp	LT1037 OpAmp
Power Supplies	+/- 300 VDC, 6.3 VAC (filaments)	+/- 15V	+/- 15V
Open-Loop Gain	1.5×10^4	5×10^4	30×10^6
Vout Swing	+/- 50V	+/- 12V	+/- 13.5 V
Iout	+/- 1 mA	25 mA	25 mA
Idrain	5 mA (no load)	1.7 mA	2.7 mA
RL(min)	50 K Ω	none (SC protect)	none (SC protect)
Slew Rate	+/- 12 V/ μ Sec	+/- 0.5 V/ μ S	15 V/ μ S



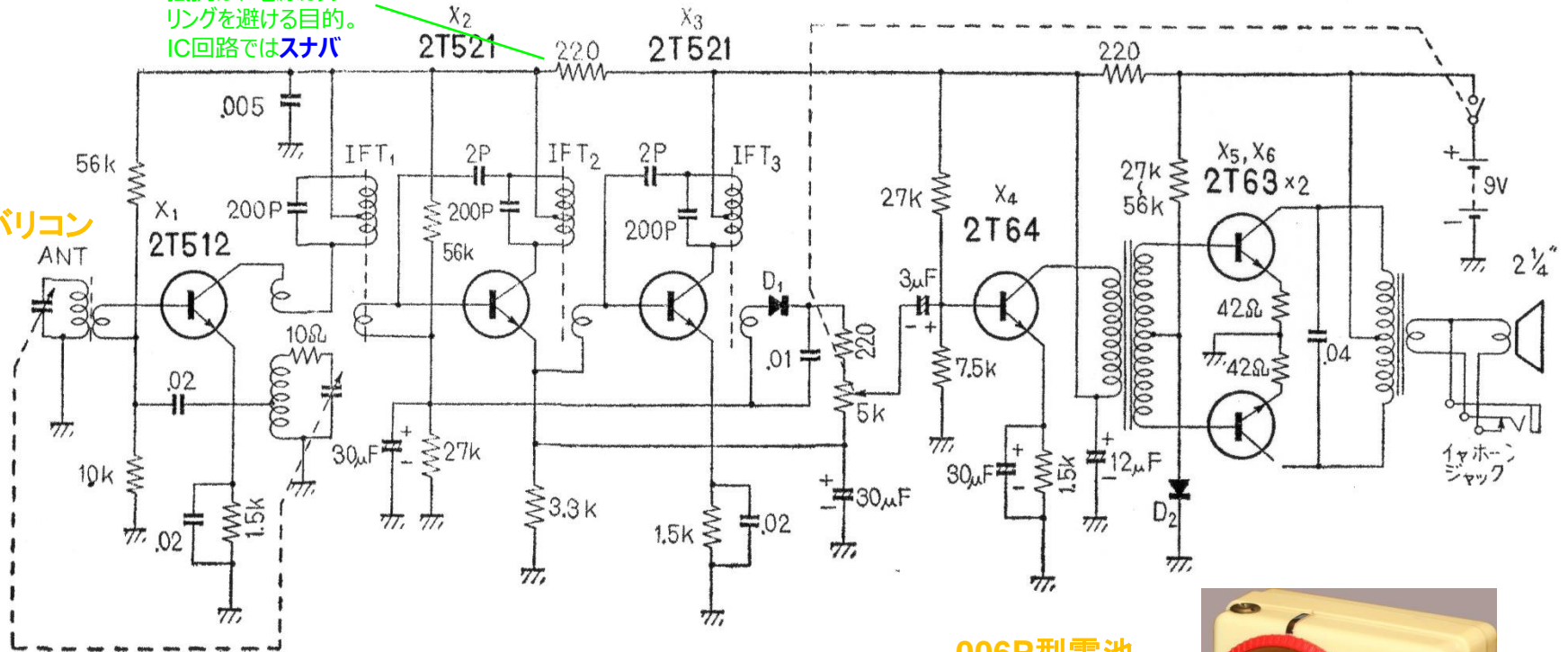
Sony TR-63

6石スーパー(Super Heterodyne方式)

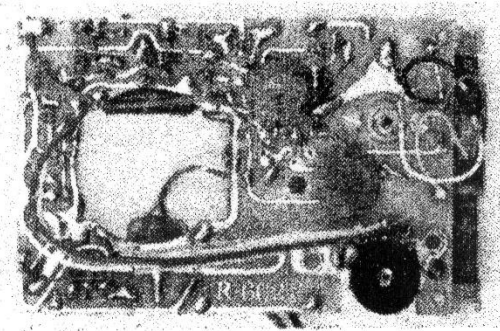
1957年発売

電源に直列に入る
抵抗は、電源カップ
リングを避ける目的。
IC回路ではスナバ

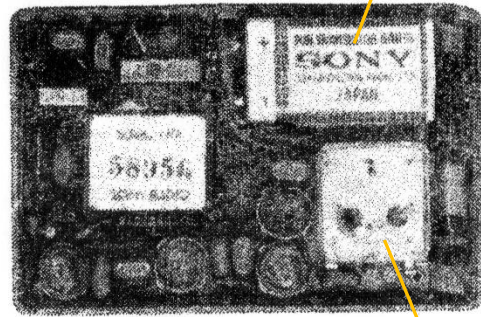
ポリバリコン



プリント基板と配線



部品マウント図



外観写真

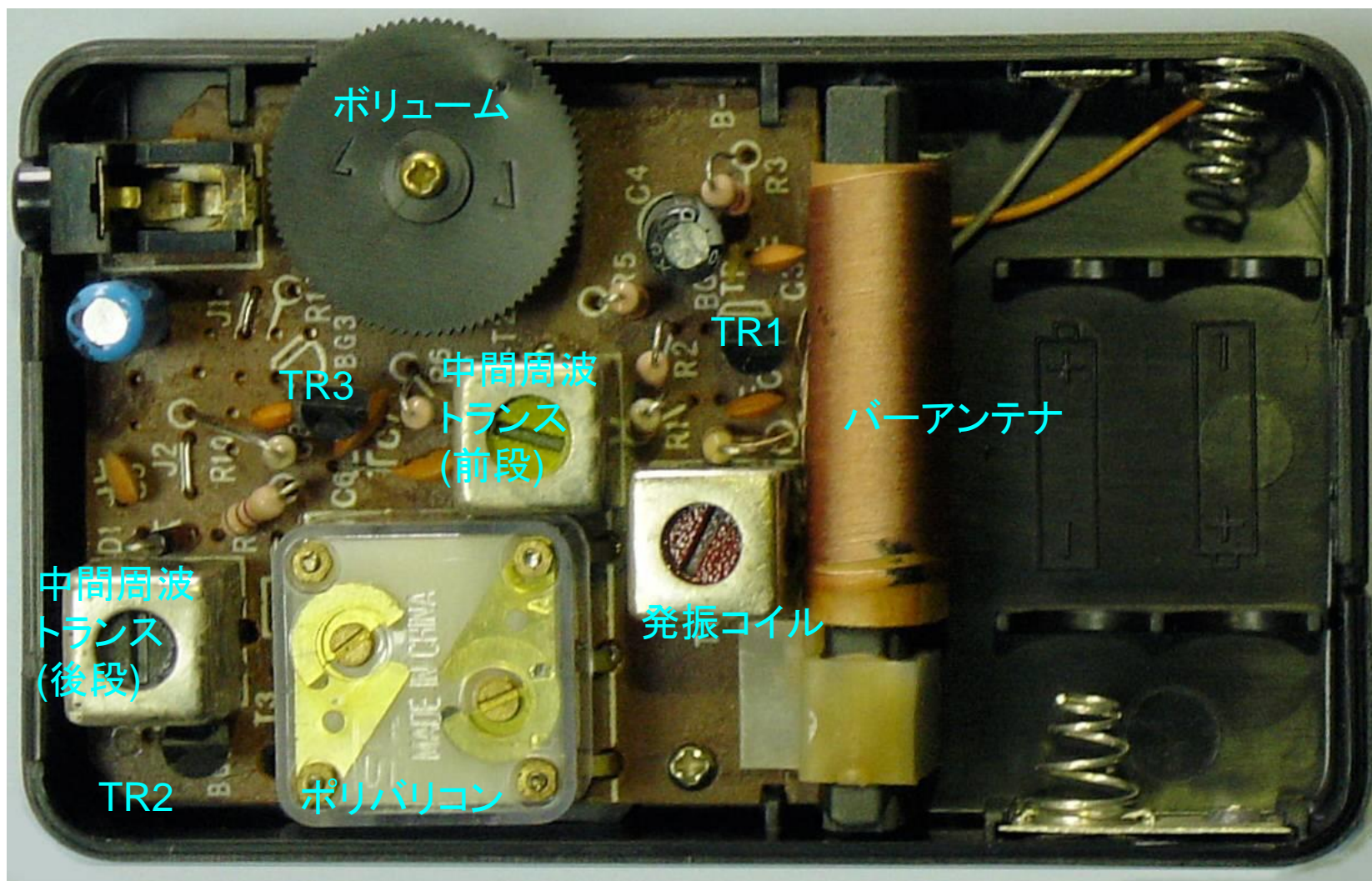


006P型電池

ポリバリコン

ダイソー100円AMラジオ

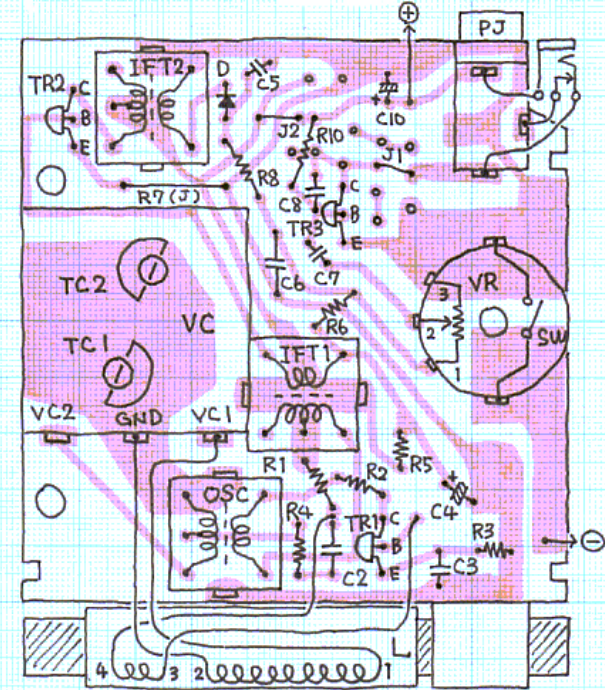
2000年頃?



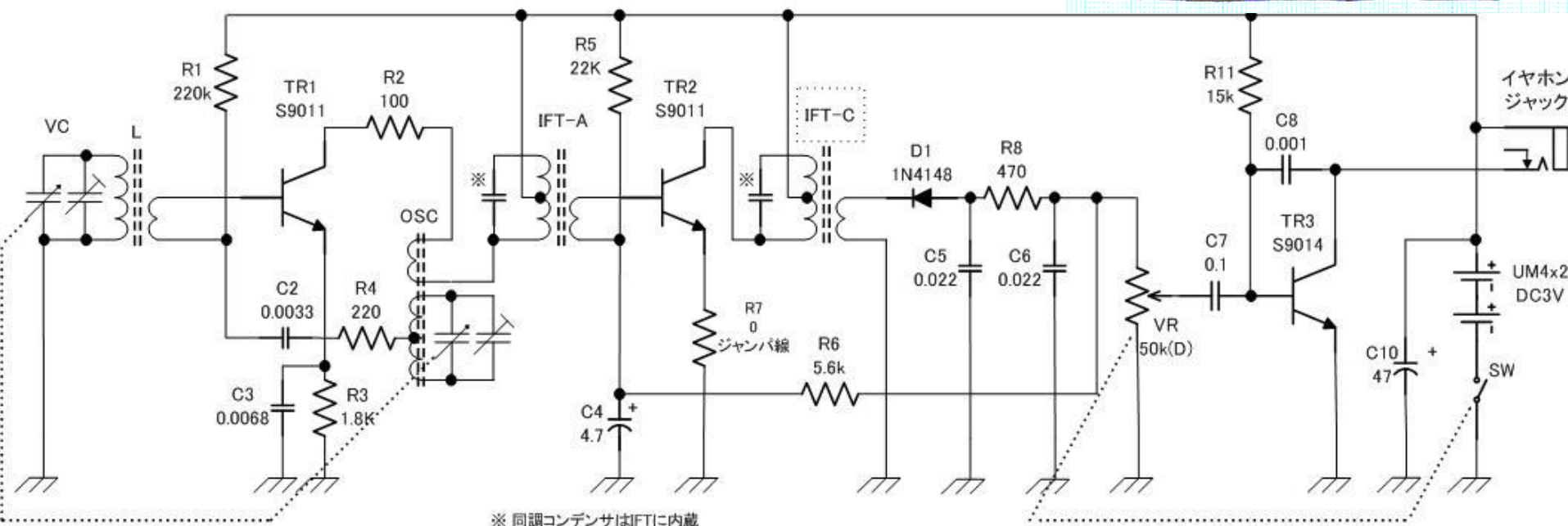
100円ラジオ回路図と実体図

<http://bbradio.sakura.ne.jp/100am/100am.html>

標準的な3石スーパーである。無駄がない。
設計もレイアウトも素晴らしい。かなりの技術力である。
TR-63からの進化を感じる。しかし製造は雑である。



ダイソー100円ラジオ回路図

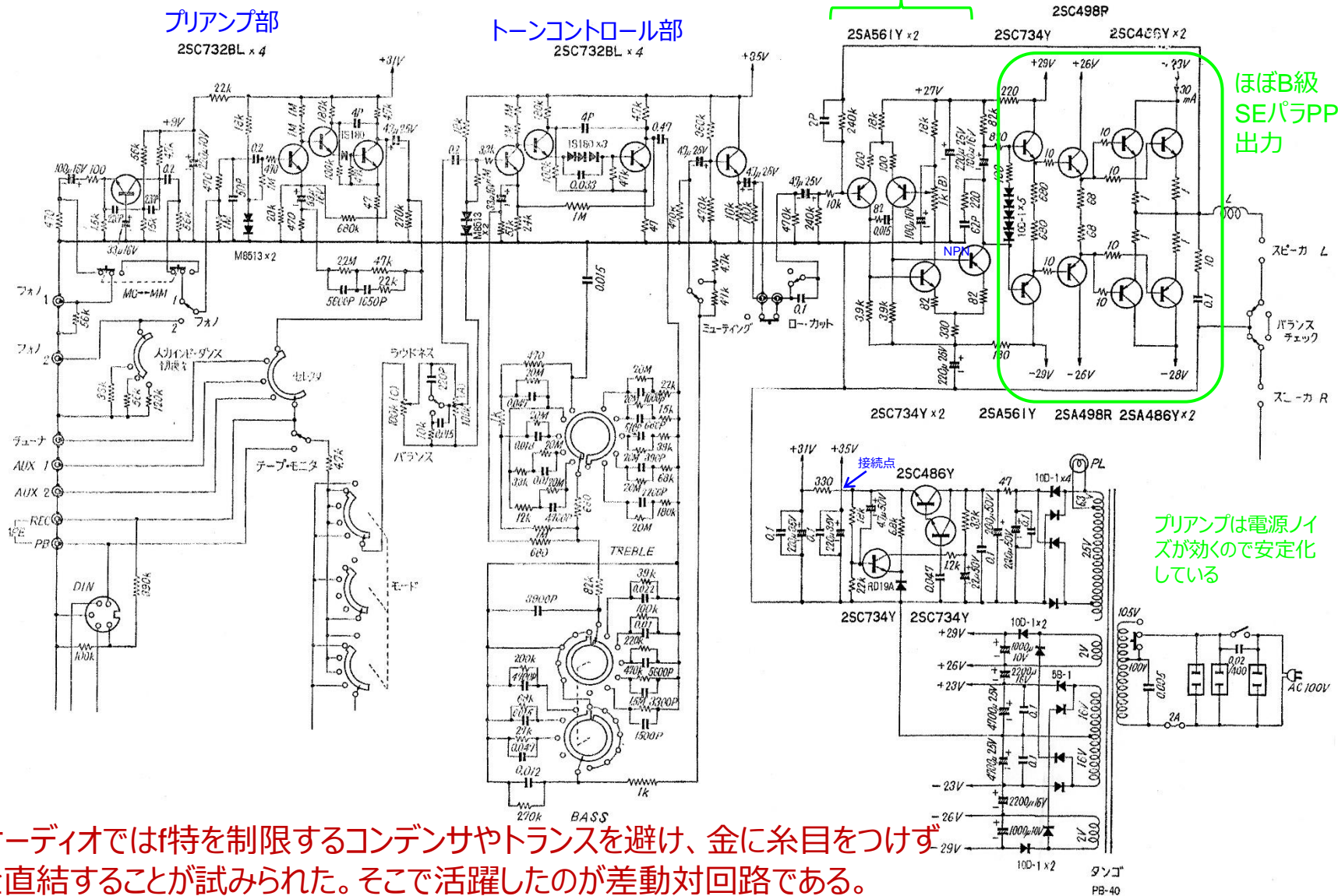


オーディオ用Trアンプ

メインアンプ部は全段直結OCL

1971年

コンプリメンタリの差動対



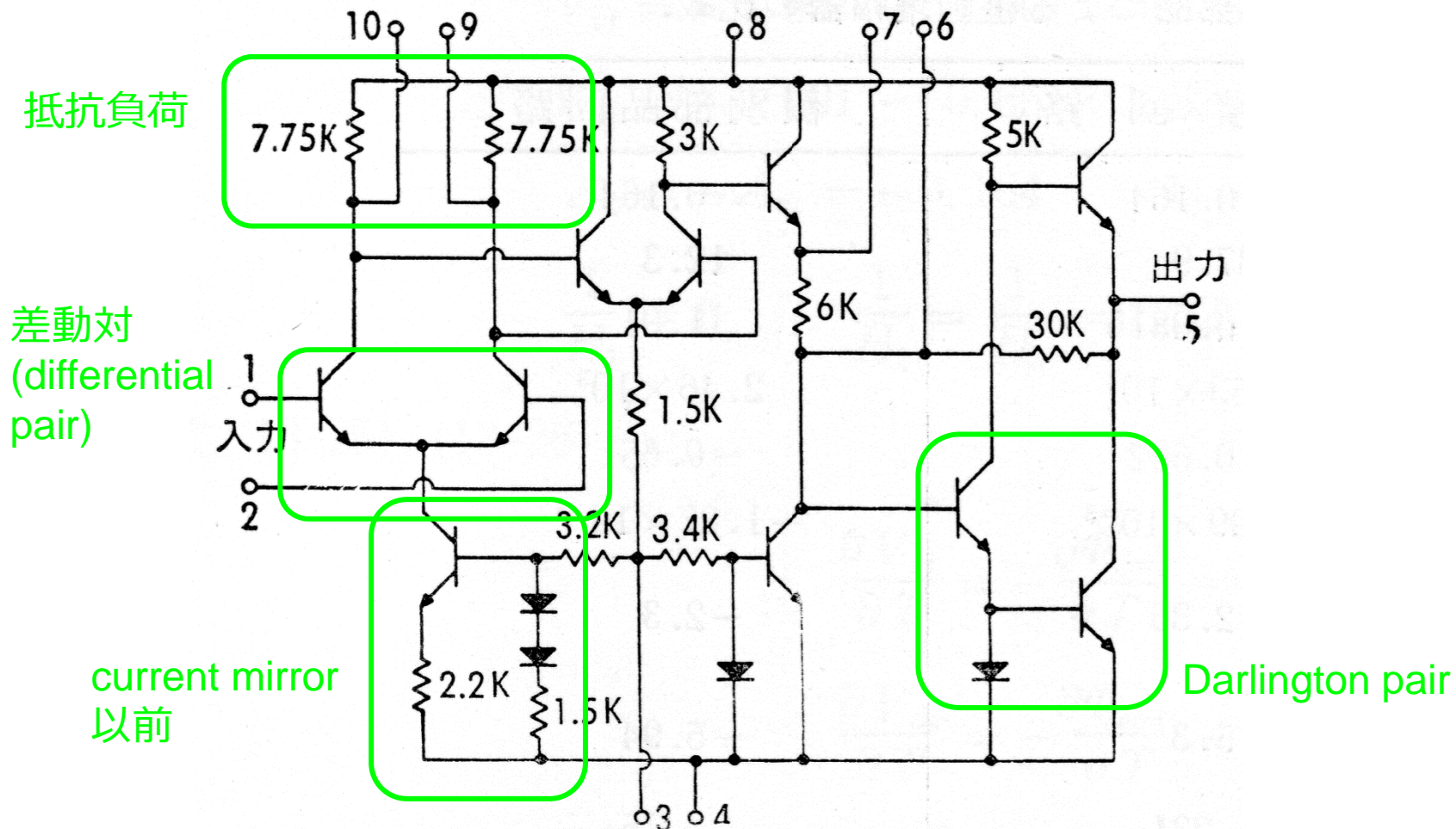
ほぼB級
SEパラPP
出力

プリアンプは電源ノイズが効くので安定化している

高級オーディオでは特を制限するコンデンサやトランスを避け、金に糸目をつけず各段を直結することが試みられた。そこで活躍したのが差動対回路である。

最初期のIC OPAMP

すでに全段直結で、キャパシターは内蔵されていない。
当初PNPも作り辛かったので、NPNだけで何とかする工夫がなされた。

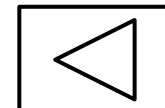
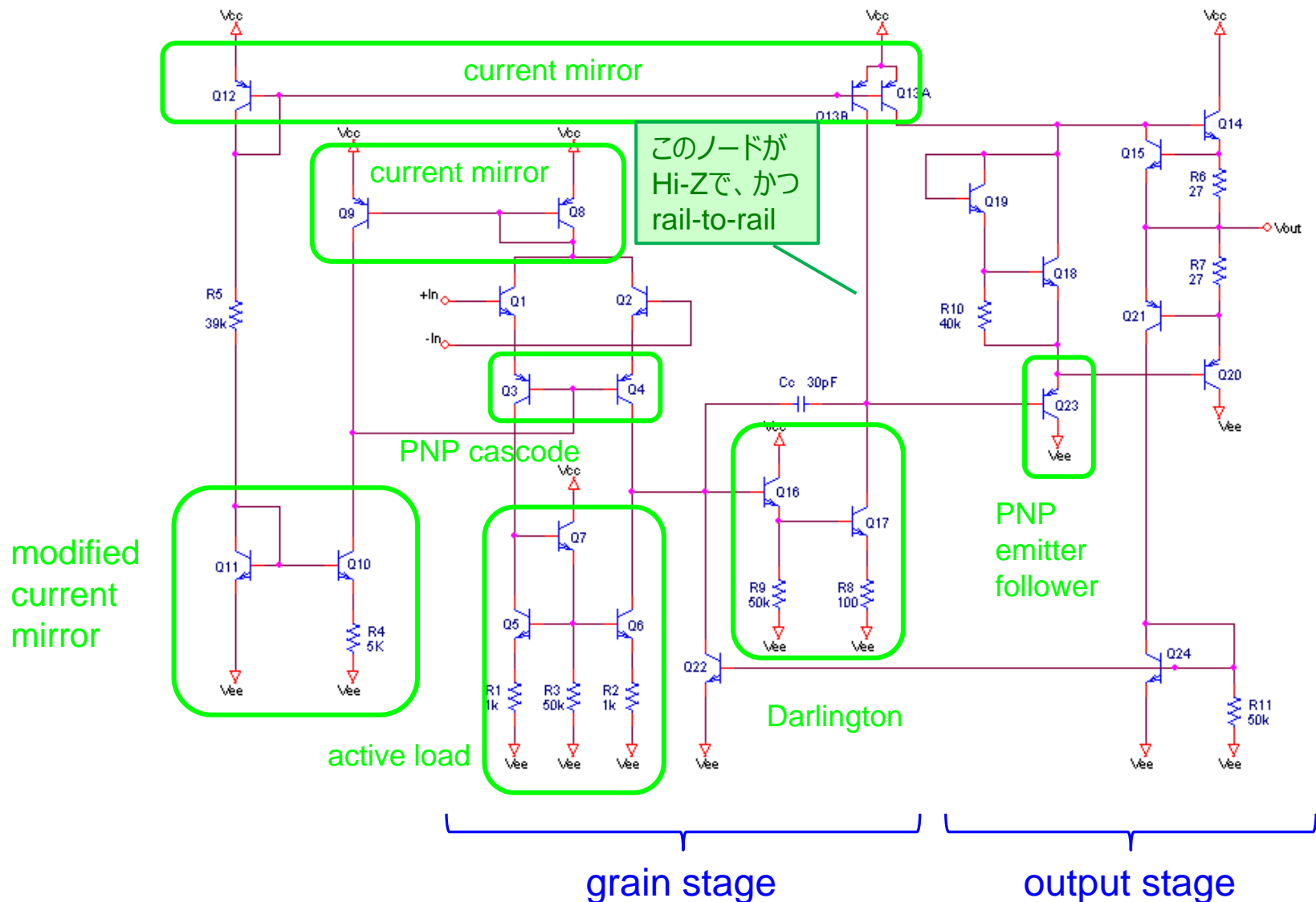


D. K. Lynn, et.al. "Analysis and Design of Integrated Circuits," Motorola, 1967

往年のベストセラーOPAMP

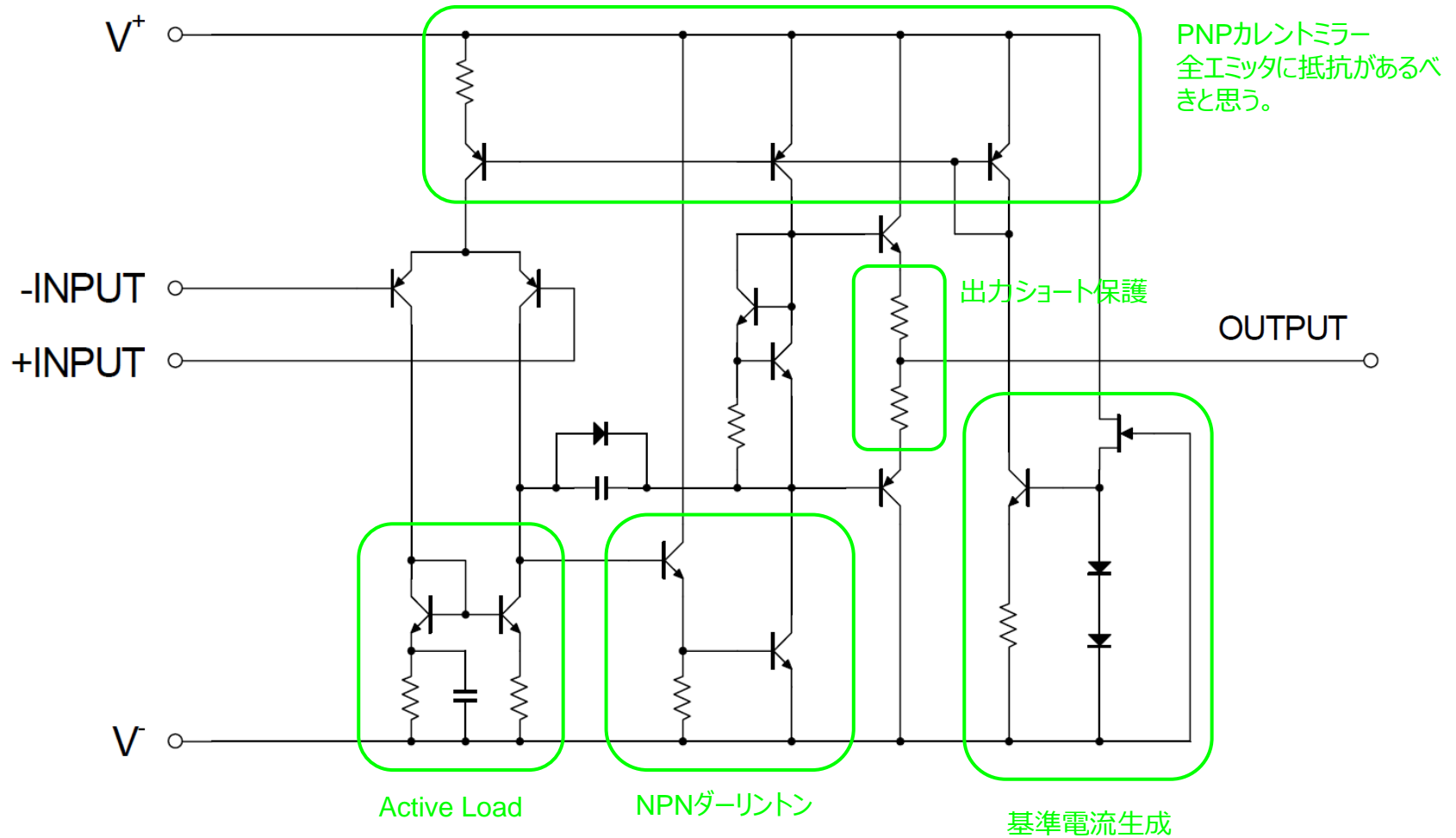
Fairchild uA741, 1968

PNP/NPNを自在に使えるcomplementary process

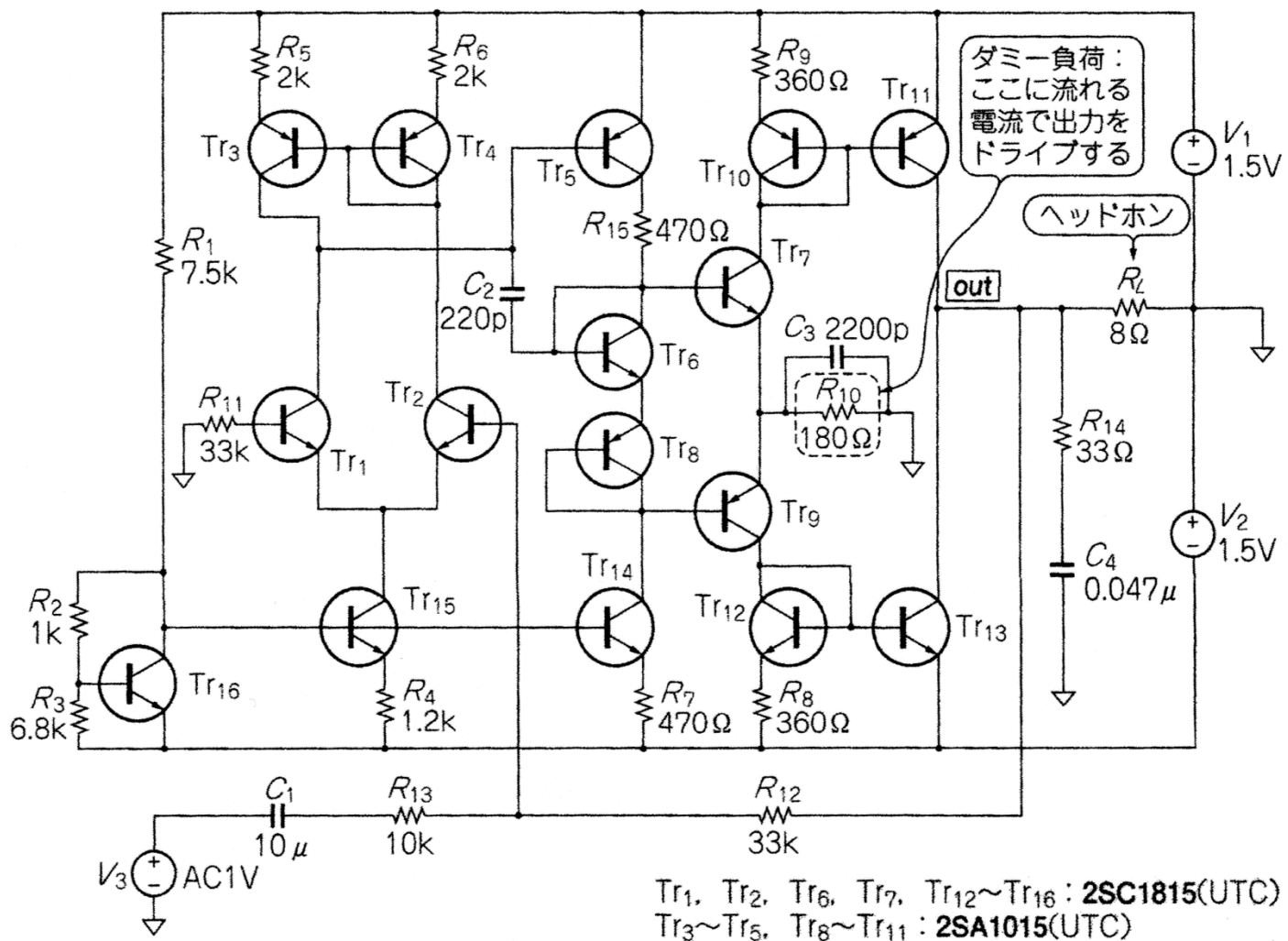


現行のシンプルなBipolar OPAMP

新日本無線 NJM4580



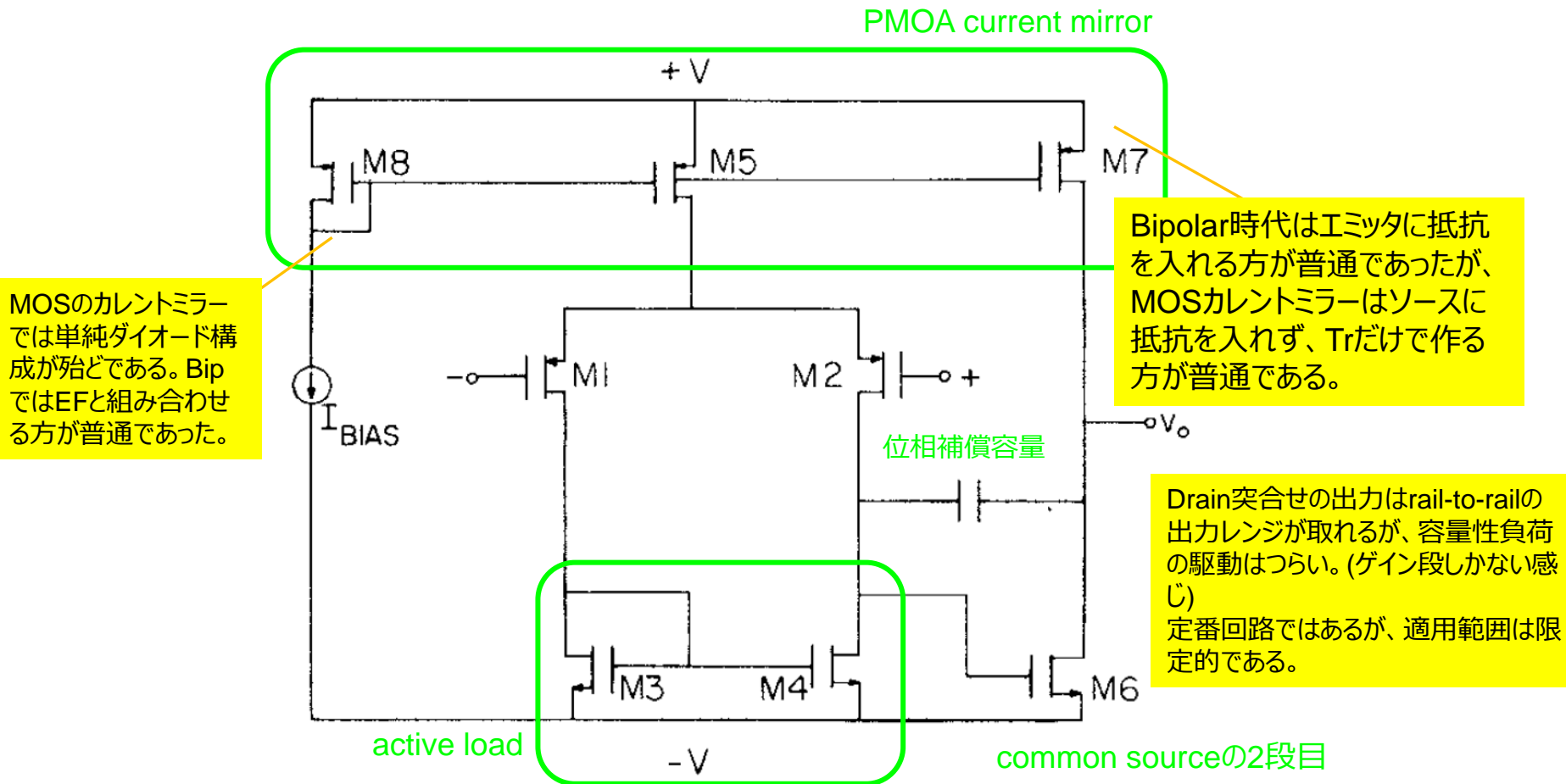
スピーカーも鳴らせるヘッドホンアンプ



加藤 大, トランジスタ技術 2018年10月号 図12

CMOS OPAMPの定番回路

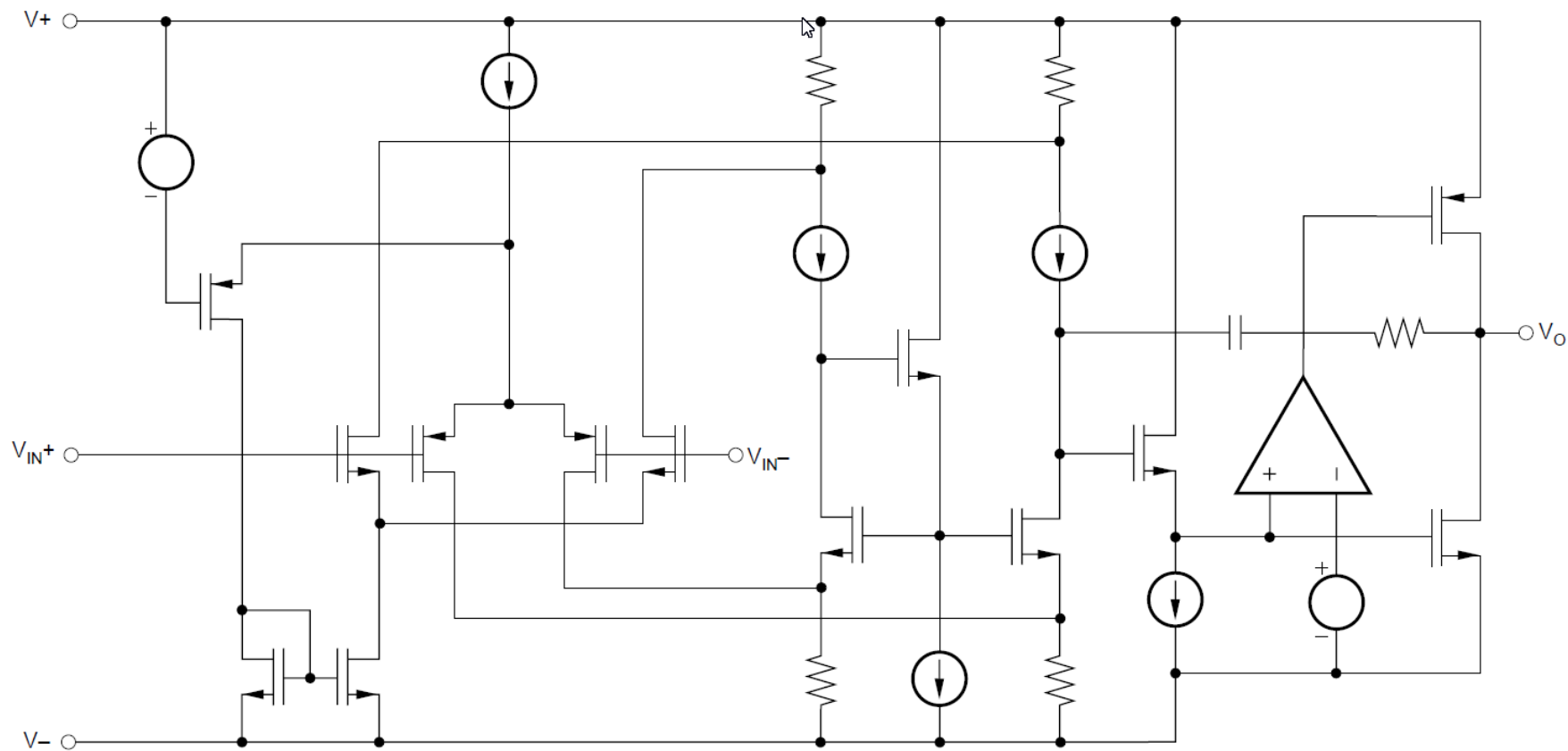
MOSも当初はNMOSだけで無理やり感があったが、じきにcomplementary processが使えるようになった。プロセス屋さんの執念であろう。



P. Gray, R. Mayer, "MOS operational amplifier design-a tutorial overview," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. SC-7, No. 6, pp. 969-982, December 1982.

入出力Rail-to-RailのOPAMP回路

Burr-Brown OPA704 from Texas Instruments



参考文献

- ▶ RCA Manufacturing Company, Inc. "Vacuum Tube Design," Harrison, 1940.
- ▶ 原島修, "真空管," 岩波全書, 1956.
- ▶ 川上正光, "電子回路I" 共立全書, 1953. ~Vまで、全5巻のシリーズ
- ▶ 黒川達夫, "デジタル時代の真空管アンプ," 誠文堂新光社, 1989.
- ▶ 中村歩, "真空管アンプの「しくみ」と基本," 技術評論社, 2009.
- ▶ Ayumi's Lab., <http://ayumi.cava.jp/>
- ▶ 阿部豊比古 訳, Richard F. Shea, "トランジスタ増幅器の設計," 無線従事者教育協会, 1955.
- ▶ 安田順一, "設計・応用 トランジスタ回路," 電波技術社, 1959.
- ▶ グレイ 他, "システムLSIのためのアナログ集積回路設計技術," 培風館, 2003.
- ▶ Behzad Razavi, "アナログCMOS集積回路の設計," 丸善, 2003. 基礎編と応用編の2分冊、原書は1巻
- ▶ Behzad Razavi, "A Circuit for All Seasons," IEEE Solid-State Circuit Magazine, 連載中.