

低ひずみ率トランジスタ増幅器

Low Distortion Transistor Amplifier

山 本 節 雄*
Setsuo Yamamoto

要 旨

今日、経済面において数多くの利点をもつ半導体素子を利用した増幅器が各方面の機器に応用されている。ここでは主として構成価格対性能という測度により日進月歩するトランジスタの一断面をとらえ、また社会的要求を満足する商品を開発するに当たって、どのような考え方によりステレオ増幅器を設計し、製品化しているかについて述べる。

まず、増幅器の基本的能動素子として、一般には真空管およびトランジスタが考えられるが、線形増幅素子として真空管に比べ性能上幾多の欠点を保有するトランジスタが、半導体産業の発達にともない、真空管を駆逐し、ステレオセットなどに組み込まれ商品化されてきたことに関して説明し、次いでより低価格のトランジスタを使用し、またより簡単な電源部を用いて、目標とする低価格高性能の増幅器を設計しているかという点に主眼を置き記述する。つまりゲルマニウムトランジスタを用いて直流的な負帰還と交流的な負帰還を同時に印加し、B級増幅器の欠点である無信号時と出力時の電流変動がおよぼす増幅器への影響を排除し、低価格の電源回路による設計を可能にした。また大出力増幅器を構成するに当たりブリッジ形の出力回路を採用することにより電源部より混入するハム雑音その他の影響をなくし、低電圧で大出力を得ることに成功した。

1. 緒 言

一般にステレオ増幅器の回路構成は図1に示すように、レコードみぞの音を電気信号として取り出すカートリッジの出力を電氣的に増幅し、スピーカをじゅうぶん駆動するに足る電氣的信号を得るようになっている。カートリッジの出力は2 mV～10 mV程度の小信号であり、広く使用されているムービングマグネット形のカートリッジはマグネットの機械的振動をコイルに感応させて電圧を発生させる機構になっているため、カートリッジの出力インピーダンスは誘導的であって、周波数によって出力インピーダンスが変動する。したがって第1の電圧増幅器として、入力インピーダンスは50 k Ω ～100 k Ω 必要となる。また現在多く用いられているスピーカの入力として8 W程度は必要だから、スピーカインピーダンスを8 Ω とし、カートリッジ出力を4 mVとすれば8 Wの出力を供給するには66 dB (2,000倍)の電圧利得が要求される。

また、前述のムービングマグネット形のカートリッジの性質とレコードの録音特性の関係から図1の電圧増幅器②の周波数特性は図2のように低域のブーストされた積分形の増幅器になる。これは1 kHzのレベルに対して50 Hzの利得が18 dB程度大きいことが必要である。言い換えれば、50 Hz近辺の信号の大きさは約0.2 mVで、これを84 dB (1万倍以上)増幅しなければならない。以上の条件を考慮するとカートリッジの出力をまず増幅する回路は1/f雑音が小さく、ノイズ特性の良好な素子を使用されねばならない。

以上のことから明らかなように、ステレオの増幅器として、とくに問題になるのは、小信号を増幅する低雑音増幅回路と、スピーカに電力をひずみ少なく供給する電力増幅回路が設計上の焦点となる。従来、真空管を使用して低雑音増幅器を構成していたが、ヒータを必要としないトランジスタの進歩により現在では、大部分トランジスタに置き換えられている。しかし、真空管を直流点火し、ハム雑音を除去するとき、性能的にはやはり真空管式のものがすぐれていると考えられるが、初段にFET(電界効果形トランジスタ、以後FETと書く)を使用し、じゅうぶん配慮した設計を行なえば、トランジスタの場合でも実用上差異のない製品を作ることができる。

次に出力増幅回路であるが、真空管の場合、経時変化の問題お

* 日立製作所豊川工場

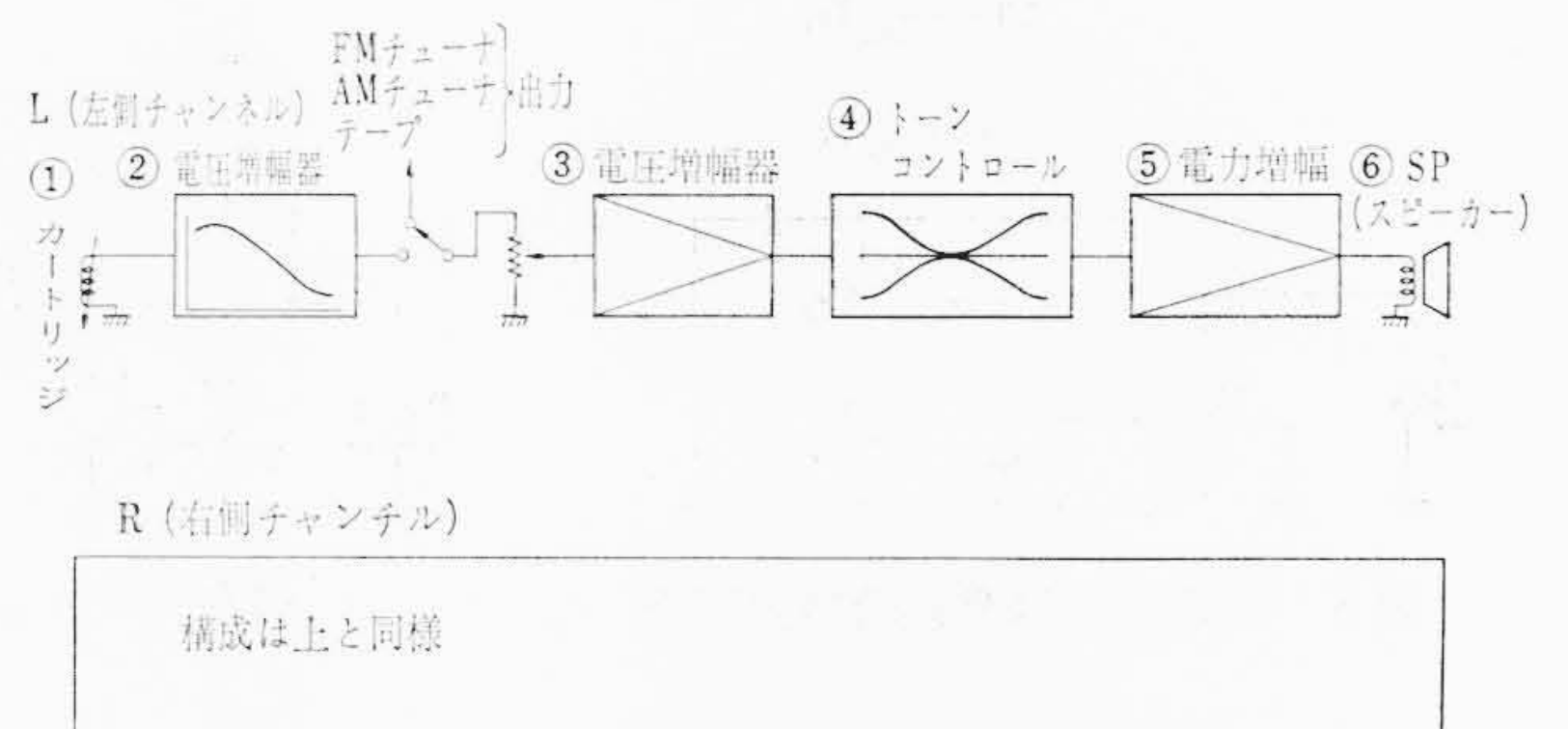


図1 ステレオ増幅器のブロックダイアグラム

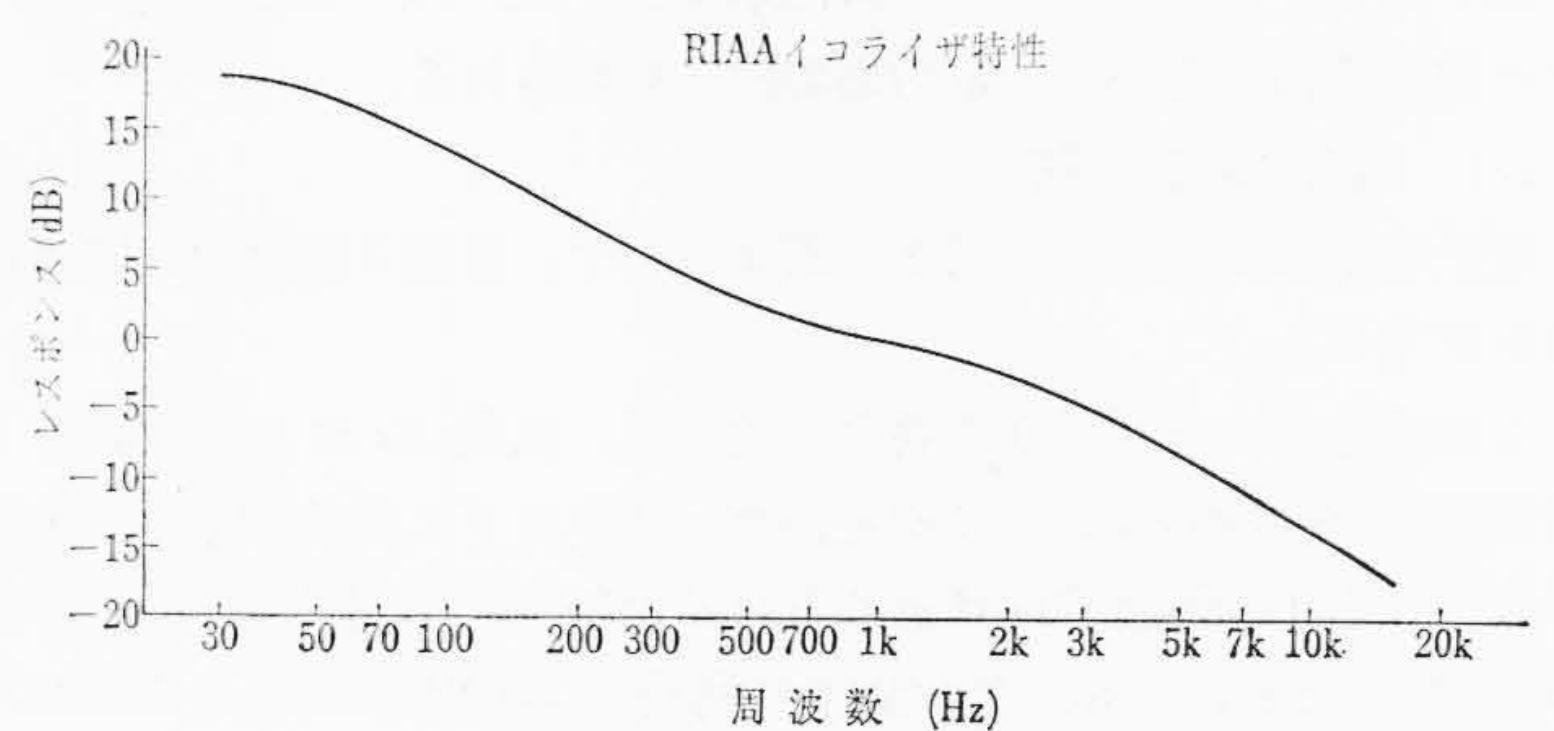


図2 増幅器に要求される周波数特性

よび大容量の出力トランスが必要なことなどから、現在周波数特性の改善された出力トランジスタを使用することが可能になり、目的とする性能を得るのにすでにトランジスタのほうが、より経済的である。しかしながらトランジスタの場合、電流増幅率の直線性および周波数特性上の難点があり、またB級あるいはAB級として動作させることと、低電圧で大きな電流を取り扱う関係上レギュレーションのよいDC電源が要求される。レギュレーションのよい電源は非常に高価であるため、ここでは出力を出した場合、DC電源の電圧変動があってもひずみが極力抑圧される回路方式を検討すると同時に電源に使用する平滑コンデンサの耐圧を極力下げたほうが、経済的であること、および使用トランジスタの耐圧についてもより低いほうが有利なことを考慮し、電圧の利用率および高調波ひずみに主眼をおいて設計を行なった。

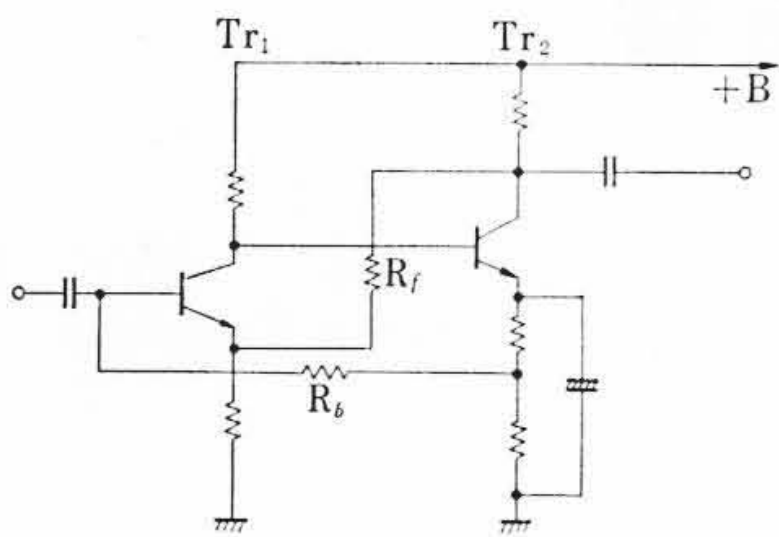


図3 直結2段のNPNトランジスタを使った増幅回路

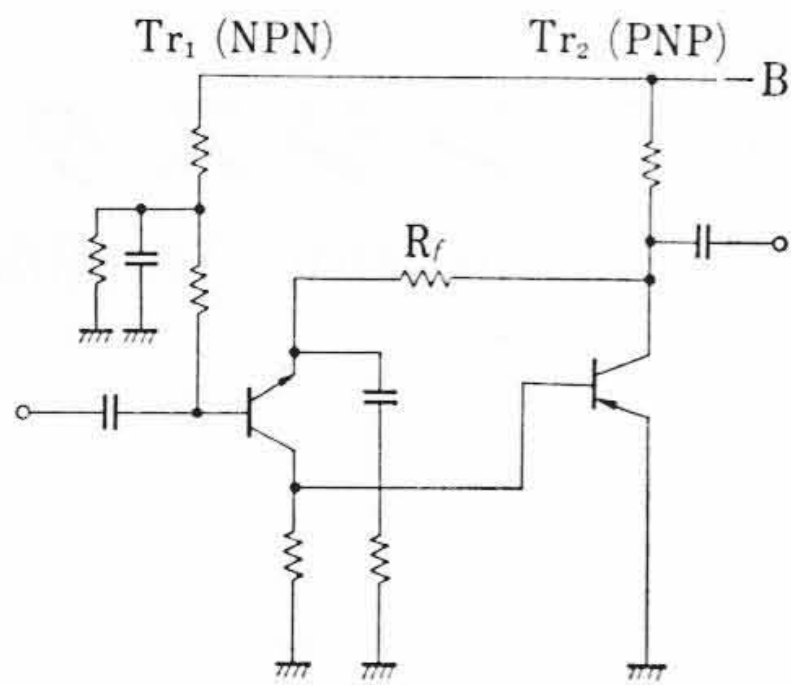


図4 直結2段のNPNトランジスタとPNPトランジスタを使用した増幅回路

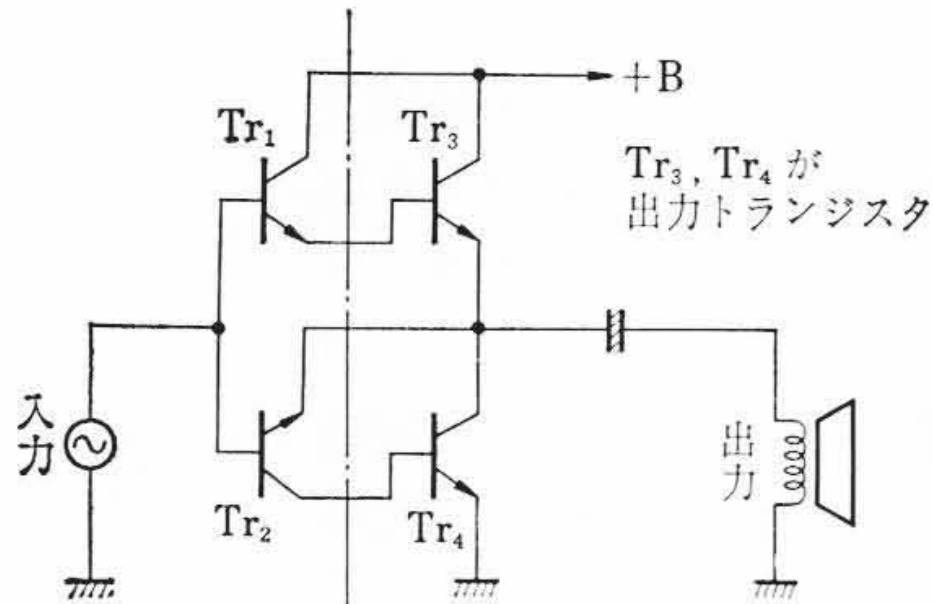


図6 一般のSEPP回路

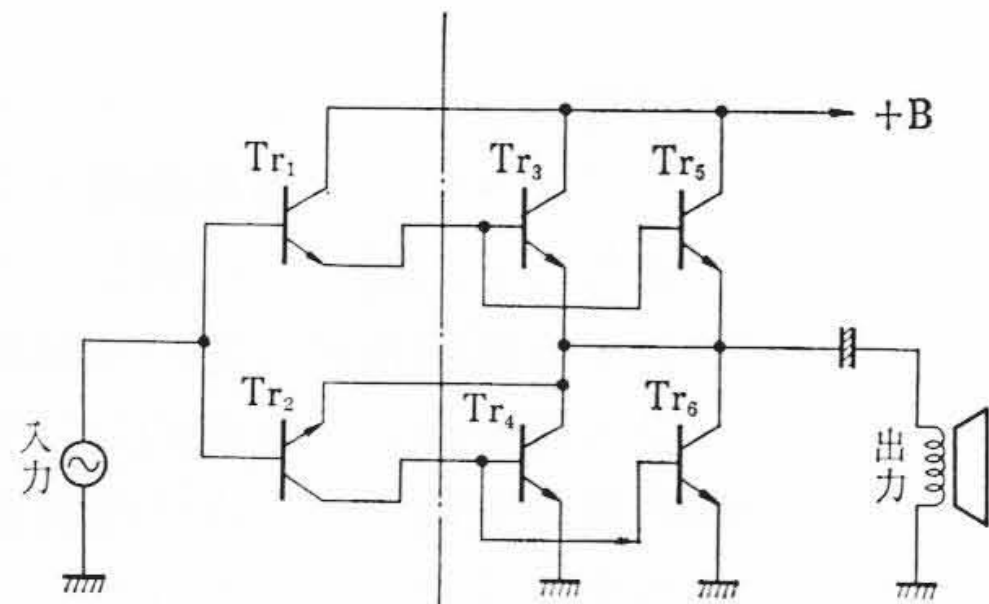


図7 パラプッシュ出力回路

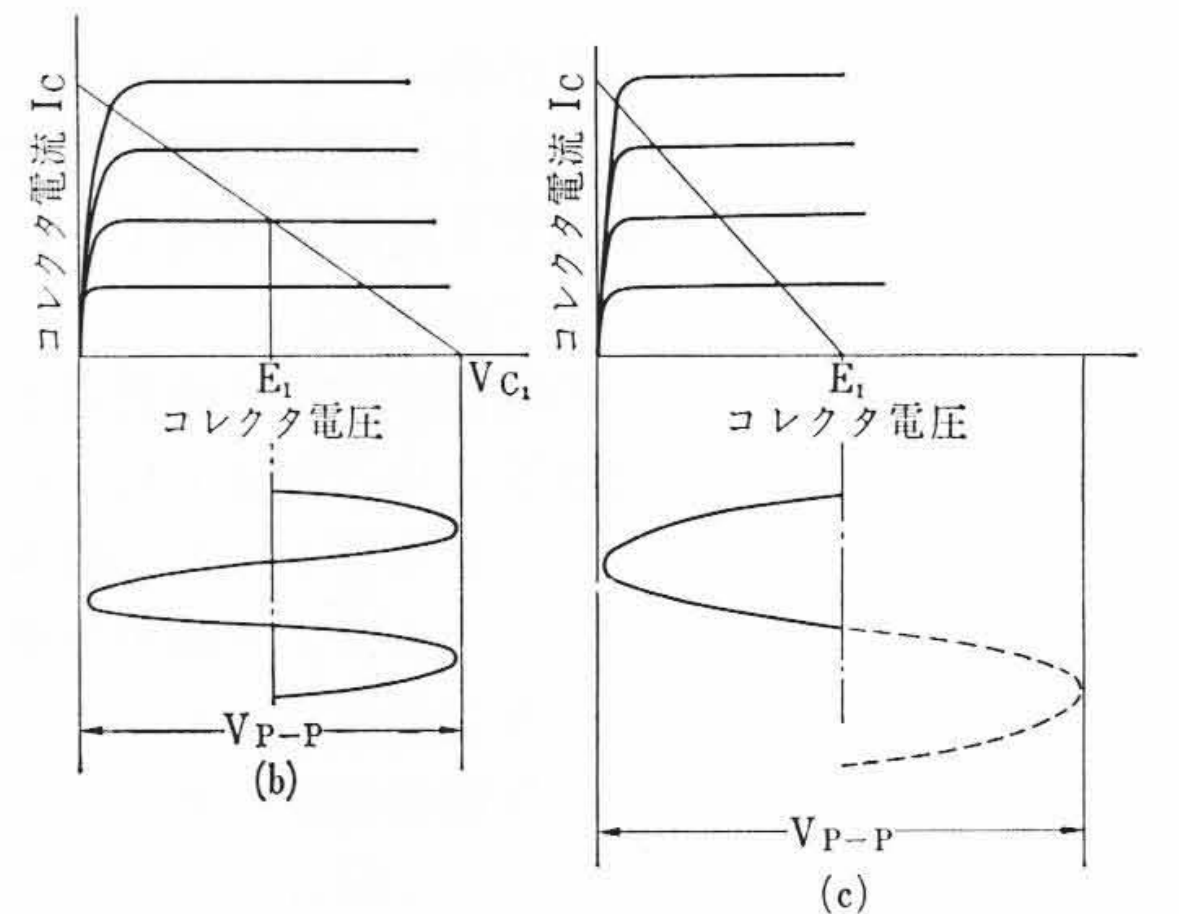
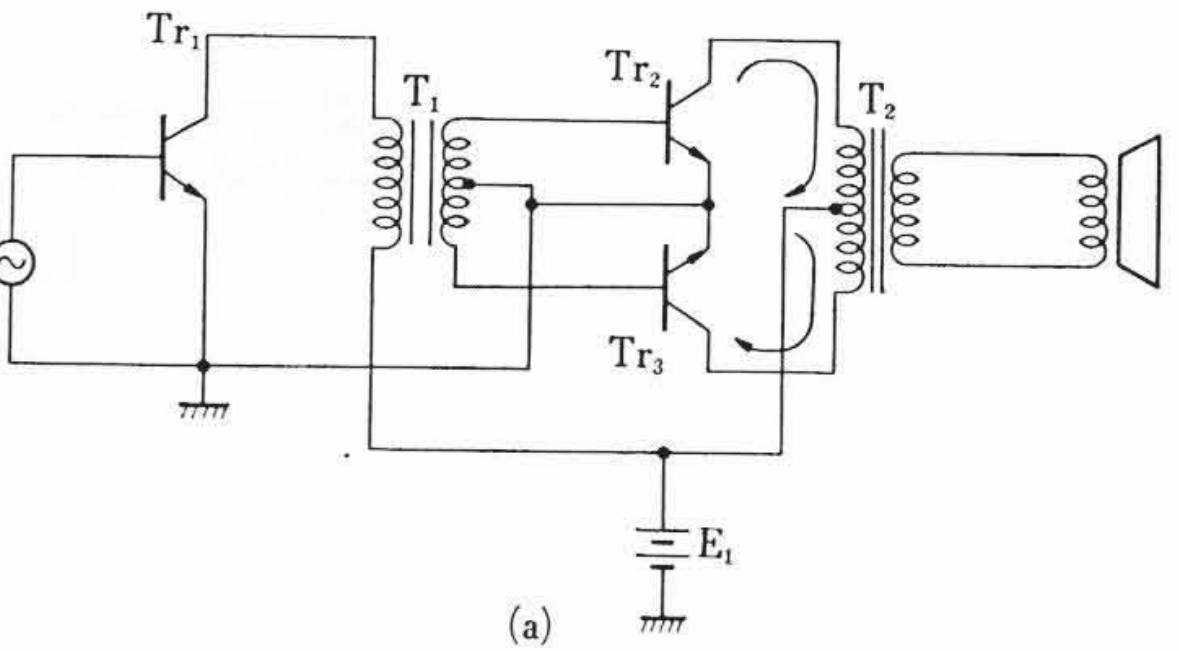


図5 電圧利用率の説明図

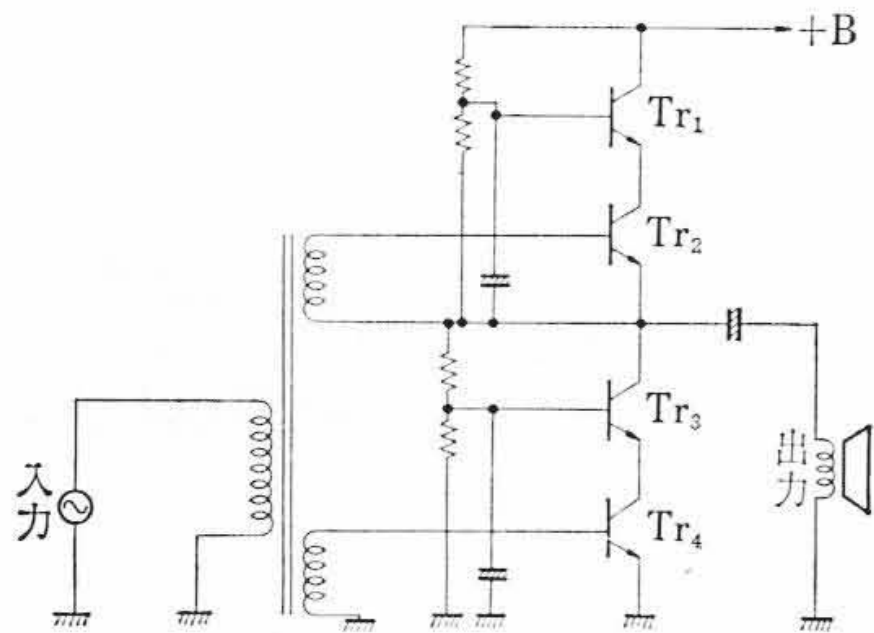


図8 高出力形直列接続出力回路

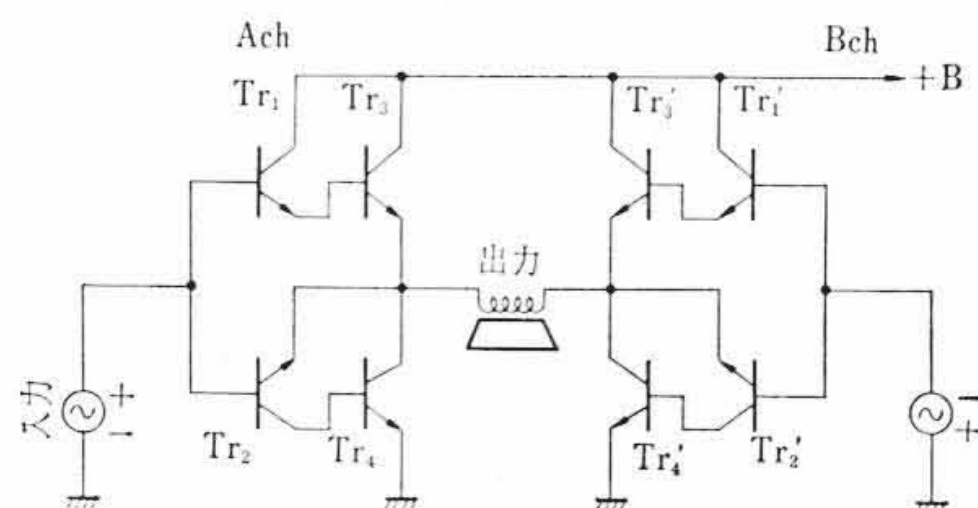


図9 ブリッジ形出力回路

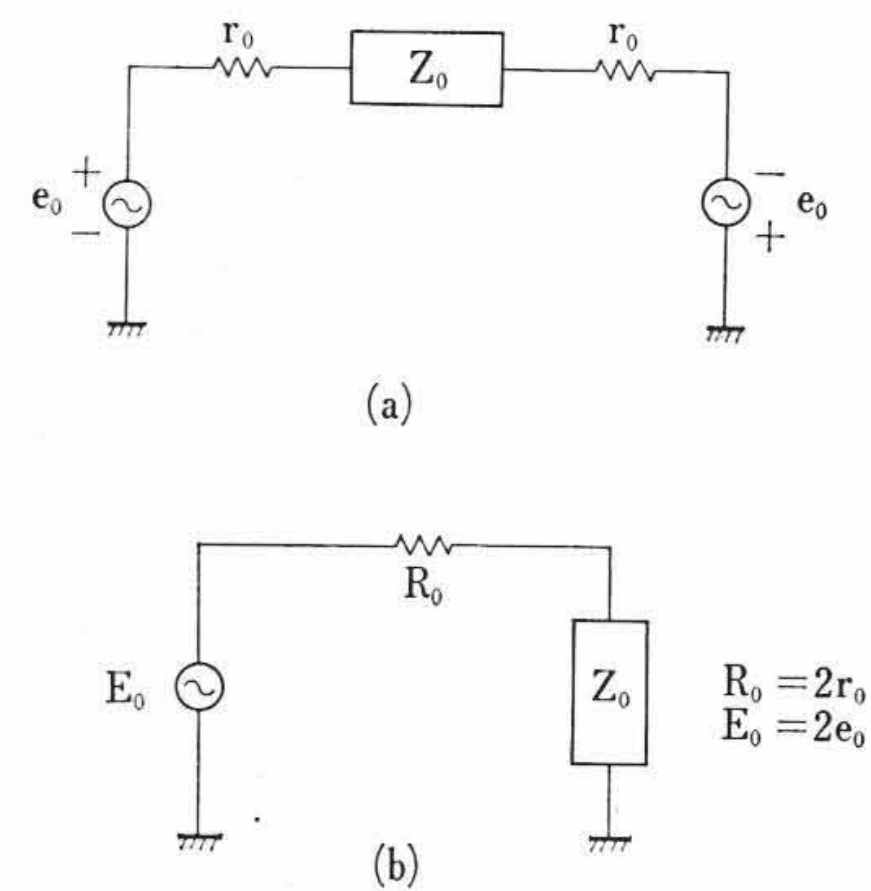


図10 ブリッジ出力回路の等価回路

2. 増幅回路の構成方法

図1のブロックダイアグラムに示すように、ステレオの構成は二つの電圧増幅器と一つの電力増幅器に分類される。

2.1 電圧増幅回路

電圧増幅回路としては図3、図4に示す。直結2段増幅式基本回路を使用する。

この特色は、まず図3の場合、負帰還、抵抗 R_f および直流的負帰還抵抗 R_b の両者により、安定指数 S は2以下に設定できる。また2段での電圧利得は60 dB 近くとれるため、 R_f により負帰還を30 dB 印加したとしても、なお全体の利得は30 dB 程度となるため、 R_f に周波数特性を持たして設計すれば、マグネチックカートリッジの場合の周波数特性の補正を容易に行なうことができる。

この回路では、ひずみについては負帰還量が大きいため、0.1% 以下となり全く問題ないが、初段に使用するトランジスタには、低雑音トランジスタを使い、かつ、ノイズについて最良になるようにコレクタ電流を0.1 mA 近く選ばねばならない。

なお、図4についても同様であって R_f が交直両用の帰還抵抗となり、供給電源電圧が一定ならば、電圧利用率としてはエミッタのバイアスが不用となり、とくに図3に比較して有利であって、ダイナミックレンジを大きく取ることができる。

2.2 電力増幅回路

ひずみを抑圧した大出力回路を構成するのに、ここではまず電圧の利用率について述べる。

図5はトランジスタを使用した回路であるが、各トランジスタの負荷はインピーダンスロードになっているため、コレクタへの供給

電圧 E_1 に対し、出力電圧の最大振幅 V_{P-P} は

$$V_{P-P} = 2E_1 \dots\dots\dots (1)$$

となり、電圧の利用率としては有効であるが、トランジスタのコレクタの耐圧は V_{C1} だけ必要となることと、トランスが必要となり、ひずみおよびコストの面で不利である。トランジスタ式の場合、一般的に多く用いられる出力回路として、図6のSEPP回路がある。この場合の電圧利用率は供給電圧が V_{P-P} に相当する。

さらに高出力を出す場合、コレクタ損失を分担するため、図7のパラプッシュプル回路、図8の直列プッシュプル回路が考えられる。さらに進んで図9のブリッジ形出力回路を検討してみると、その等価回路は図10(a)のようになる。ここに、 r_0 は片側のシングルエンデッド、プッシュプル回路の出力インピーダンスであり、 Z_0 はスピーカのインピーダンス、また、 e_0 はその出力である。したがって、図10(b)のように、出力 E_0 は $2e_0$ となり、出力電力 P_0 は

$$P_0 = \frac{E_0^2}{Z_0} = \frac{4e_0^2}{Z_0} \dots\dots\dots (2)$$

(r_0 は0.1 Ω 程度であり、 $Z_0 = 8 \Omega$ だから
 $R_0 \ll Z_0$ を適用する

であって、出力としては4倍になる。このブリッジ形出力回路は供給電源電圧も低く、大出力を発生させることが可能であるため有利である。

以上一般に考えられる回路方式を検討し、比較表にまとめたのが表1である。

表1 回路方式による特徴の比較表

出力回路方式	使用トランジスタの条件	電源電圧 (ブリッジ形の 時 E_1 とする)	その他の特徴	回路図
1 SEPP	BV_{CE} を大きくし、許容コレクタ損失を大きくする	$2E_1$	① 回路が簡単 ② トランジスタの特性が悪くなる	図6
2 パラプッシュ SEPP	BV_{CE} を大きくする	$2E_1$	① 4本のトランジスタのアンバランスがひずみおよび出力に影響する	図7
3 シリウス ブッシュ SEPP	I_C の許容値を検討する必要あり	$2E_1$	① 直結形の回路構成が困難	図8
4 ブリッジ ブッシュ	トランジスタのグレードアップの必要なし	E_1	① 出力がフルに出せる ② ダービングファクタが小さくなる	図9

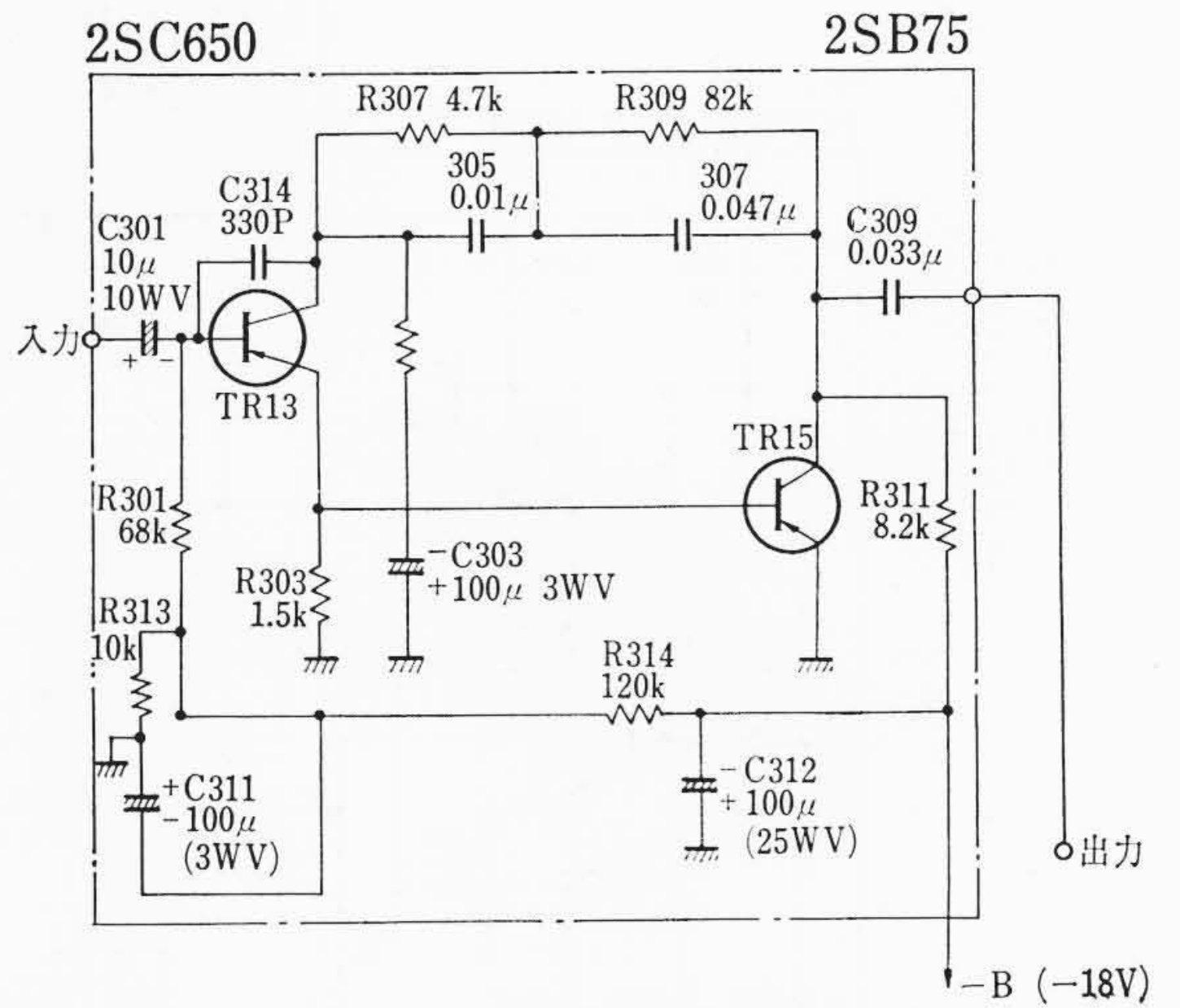


図11 イコライザの実際回路

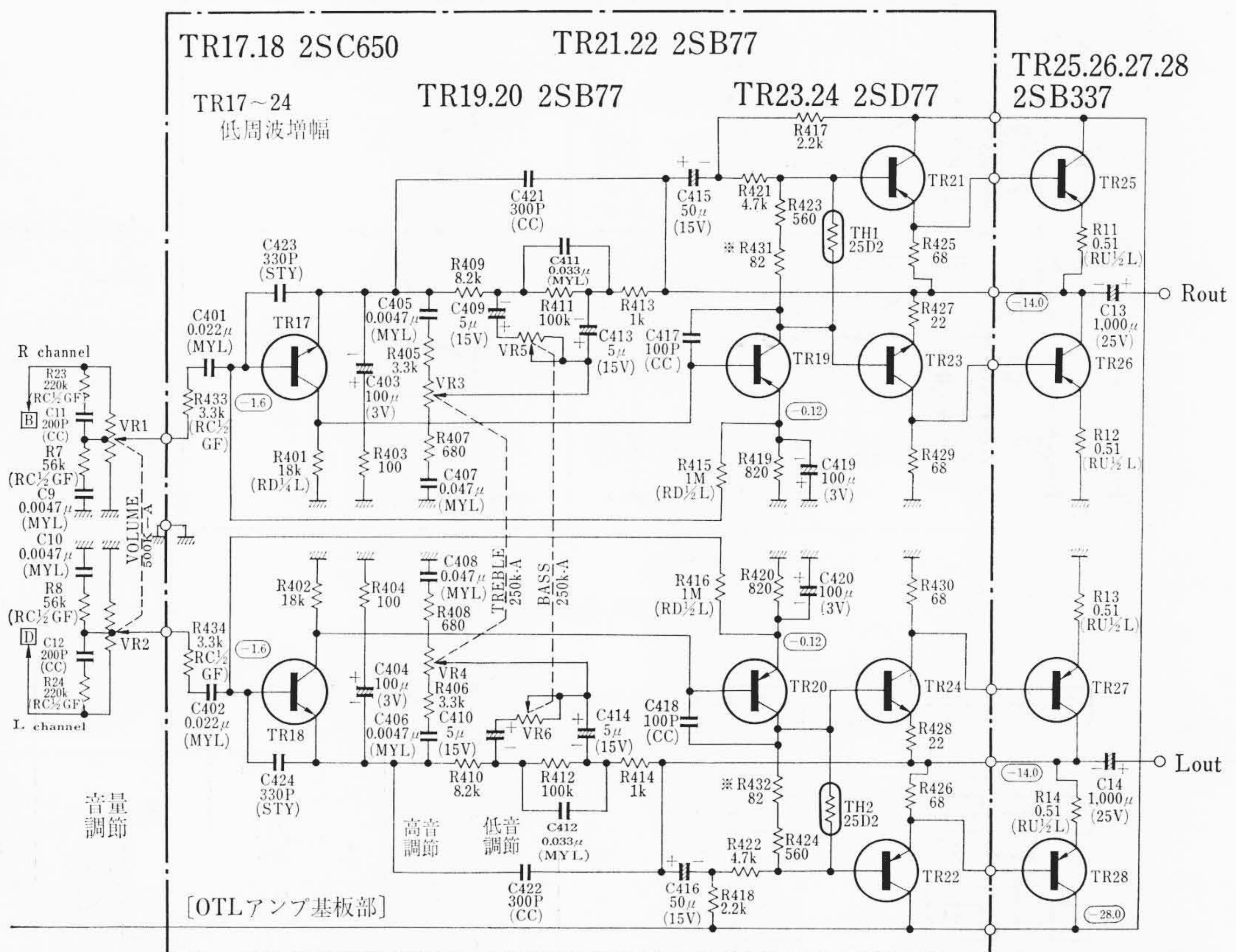


図12 ゲルマニウムトランジスタを使用した中出力回路

3. 実用回路の構成とそのデータ

ここでは低雑音増幅回路について簡単にふれて置く。図11は初段にLTP形 (Low Temperature Passivation) トランジスタ 2SC-650を使用し、動作点としてコレクタ電流を0.1mAに設定し、1kHzの利得を26dBに設計したイコライザである。ひずみは0.1%(1kHz)でダイナミックレンジも4V以上のノンクリップ出力を得ることができる。

図12はアロイ形ゲルマニウムトランジスタ 2SB337を出力段に使用した中出力回路である。この回路の特長は最終段の出力端子から初段のトランジスタ 2SC-650のエミッタに交直両用の負帰還が印加され、この負帰還回路に帰還形トーンコントロール回路がそう入れられ、低音と高音の調整が容易にできることである。

なお、本実用回路はノンクリッピング出力として7W/チャンネルであり、ひずみ率は0.2%(1kHz, 7W)以下で、キャスルシリーズの第2弾に使用し、好評を得て現行の機種にもまだ使用されている回路である。上記回路ではDC電源電圧が-28Vから-22Vまでその出力に応じて変動するがひずみとしては非常に小さな値となる。

最後に高級形プリメインアンプとして発売している1A-1200の出力回路は図13に示すように二つの増幅器が1チャンネルを構成している。また図14の説明図は、図13の回路をどのようにして結合、または切換を行なって、4チャンネルアンプまたはセンターウーファース方式 (3Dシステム) を構成しているかを示したもので、スピーカの結線方法として図15のような多用途性アンプを構成することが可能であり、実用面およびセールスフィーチャに貢献している。

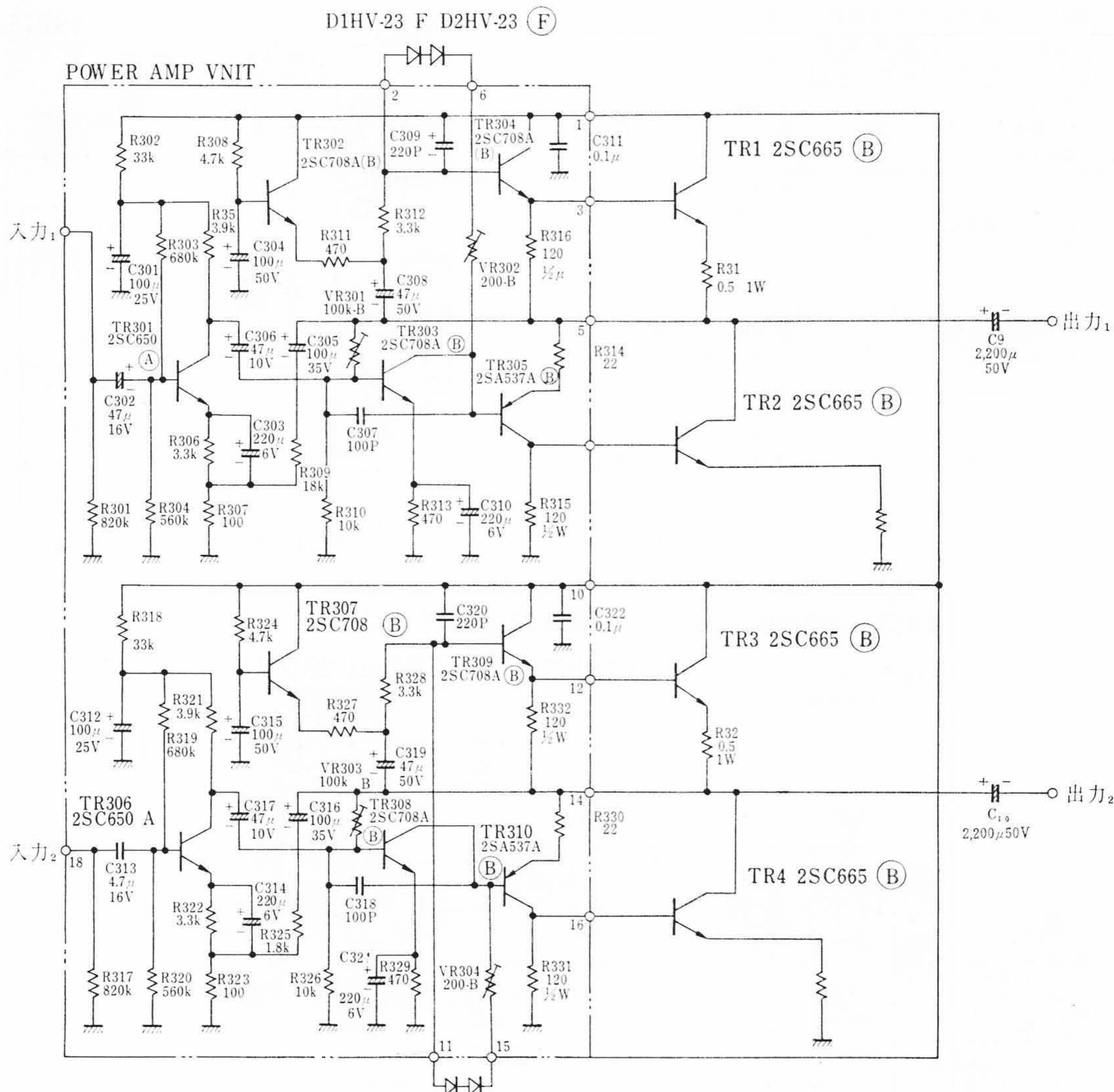


図13 IA-1200の基本出力回路

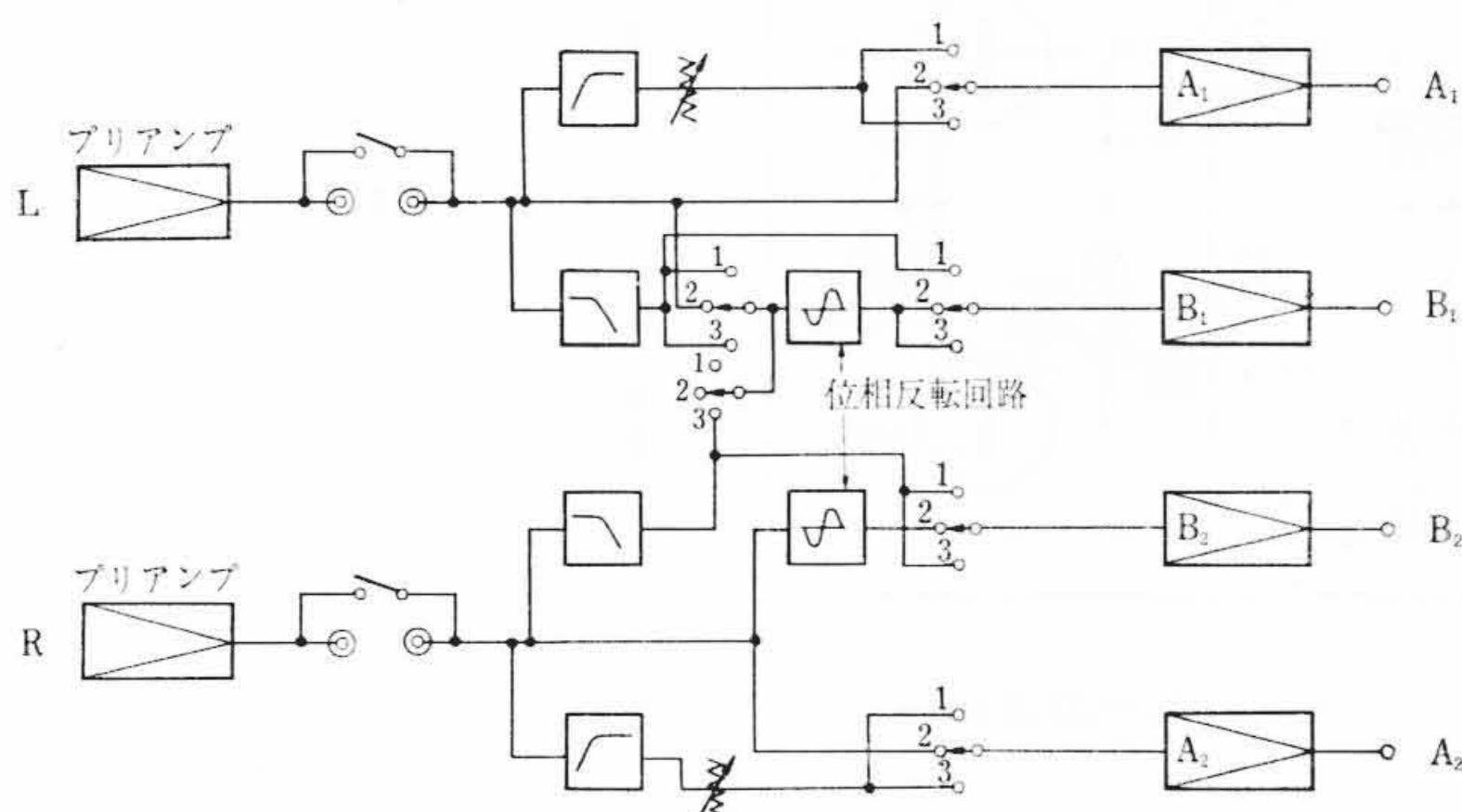


図14 チャンネルセクタスイッチによる機能変更説明図

チャネルセクタの位置 出力端子	セパレートレンジ 1	フルレンジ 2	3Dシステム 3
A ₁	高音用 A ₁ SP 30W	A ₁	中, 高音 A ₁ SP 30W
B ₁	低音用 B ₁ SP 30W	B ₁	低音専用 SP 60W
B ₂	低音用 R SP 30W	B ₂	60W
A ₂	高音用 A ₂ SP 30W	A ₂	中高音 A ₂ SP 30W

図15 チャンネルセクタとスピーカ端子の接続法

図13の回路は二つの基本的な出力回路から成立っている。今その一つの基本回路について、基本データを列挙すると図16~18のようになる。

次に上記基本回路を2チャンネル使用した図13のブリッジ回路について入、出力特性を取ったのが図19であって、出力として一応100W近くが得られ、(2)式の理論値よりは少ないが、60V程度のDC供給電圧により、非常に大きな出力が得られることを示している。

また図20は出力対ひずみ特性であるが、30Wの基本出力回路よりもひずみが少なく實際上、3倍の出力が得られている。

4. 結 言

まず、アロイ形ゲルマニウム出力トランジスタを使用した4段直結アンプにおいて、動作点補正のための直流帰還とひずみ改善のための交流帰還を同時印加し、カットオフ周波数が5kHz程度のロ

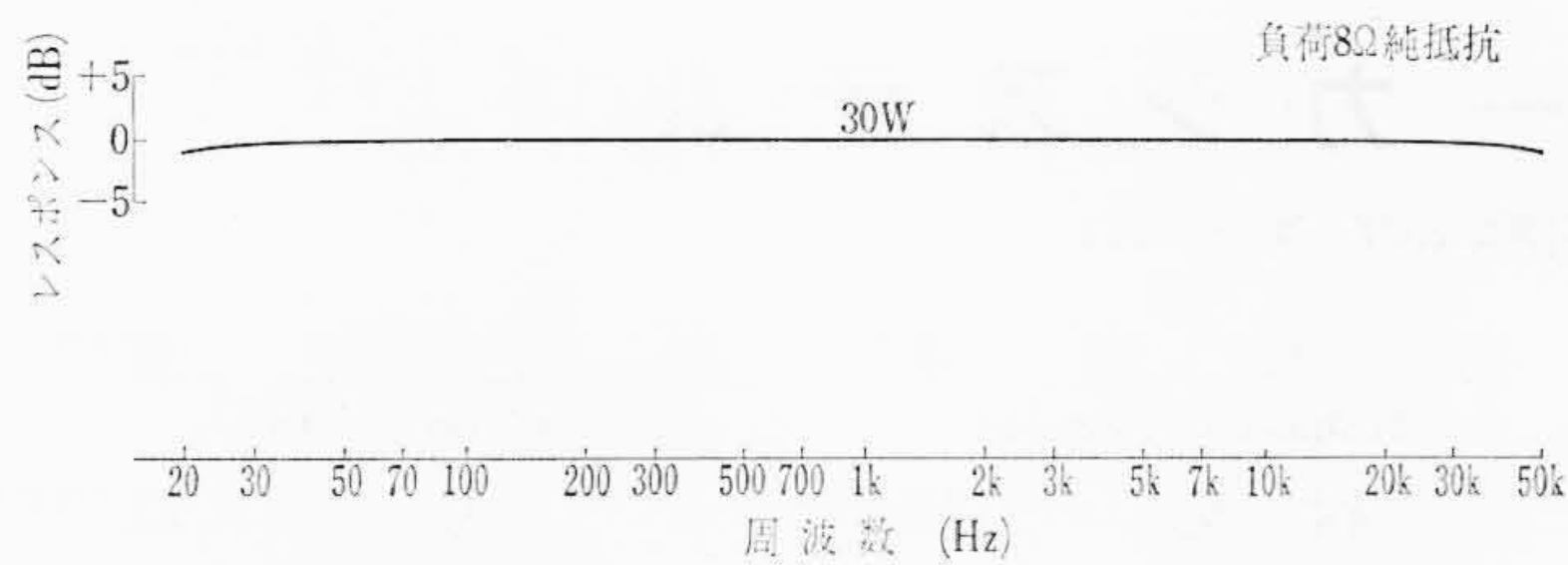


図16 パワーアンプ部周波数特性

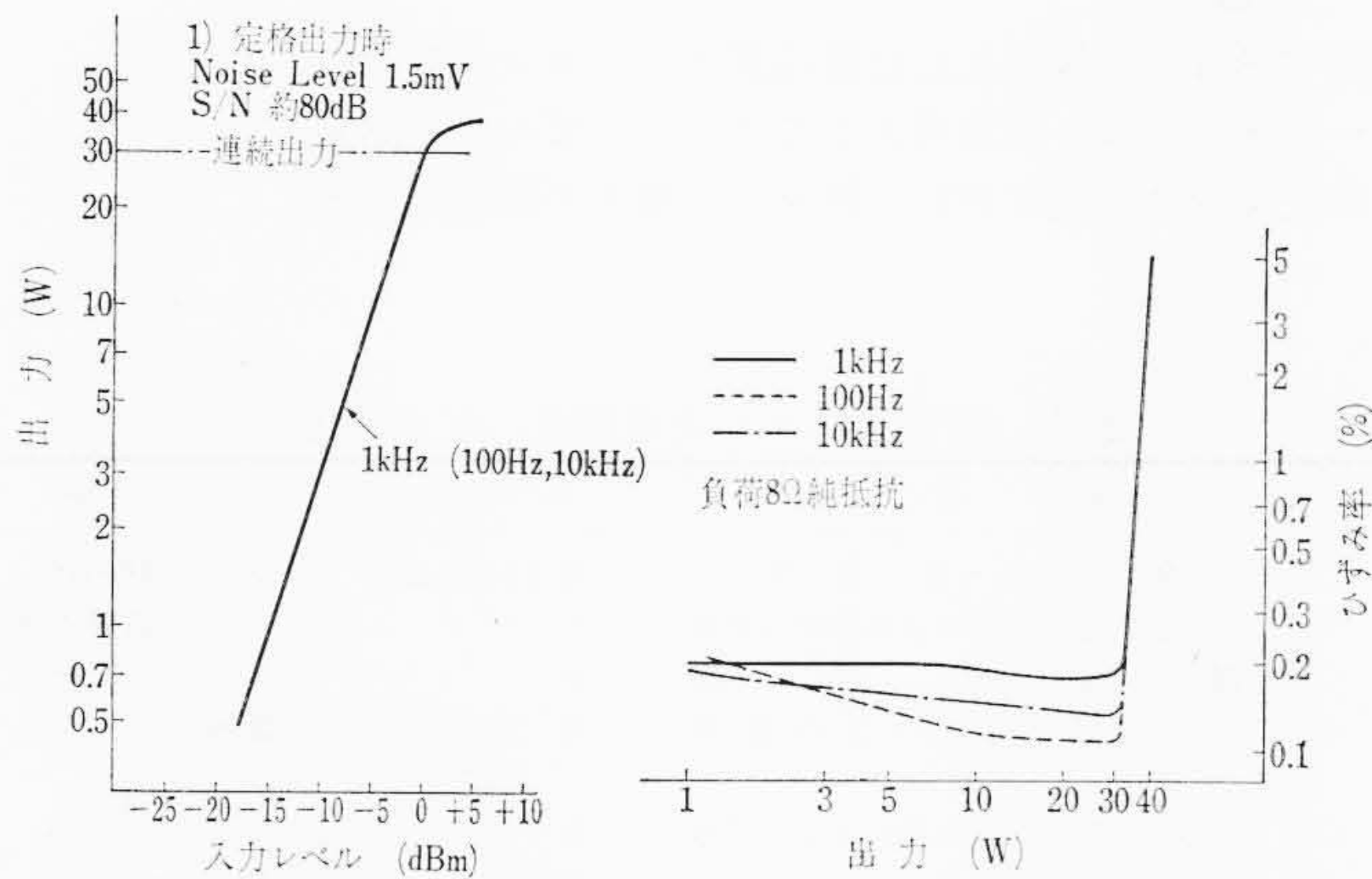


図17 入力対出力特性

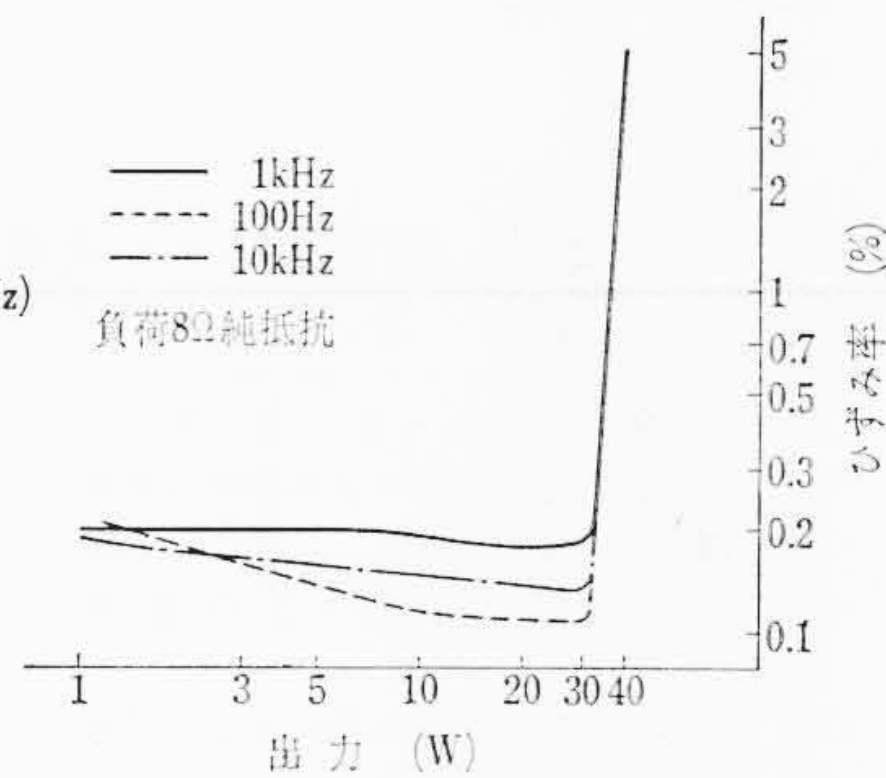


図18 出力対高調波ひずみ率特性

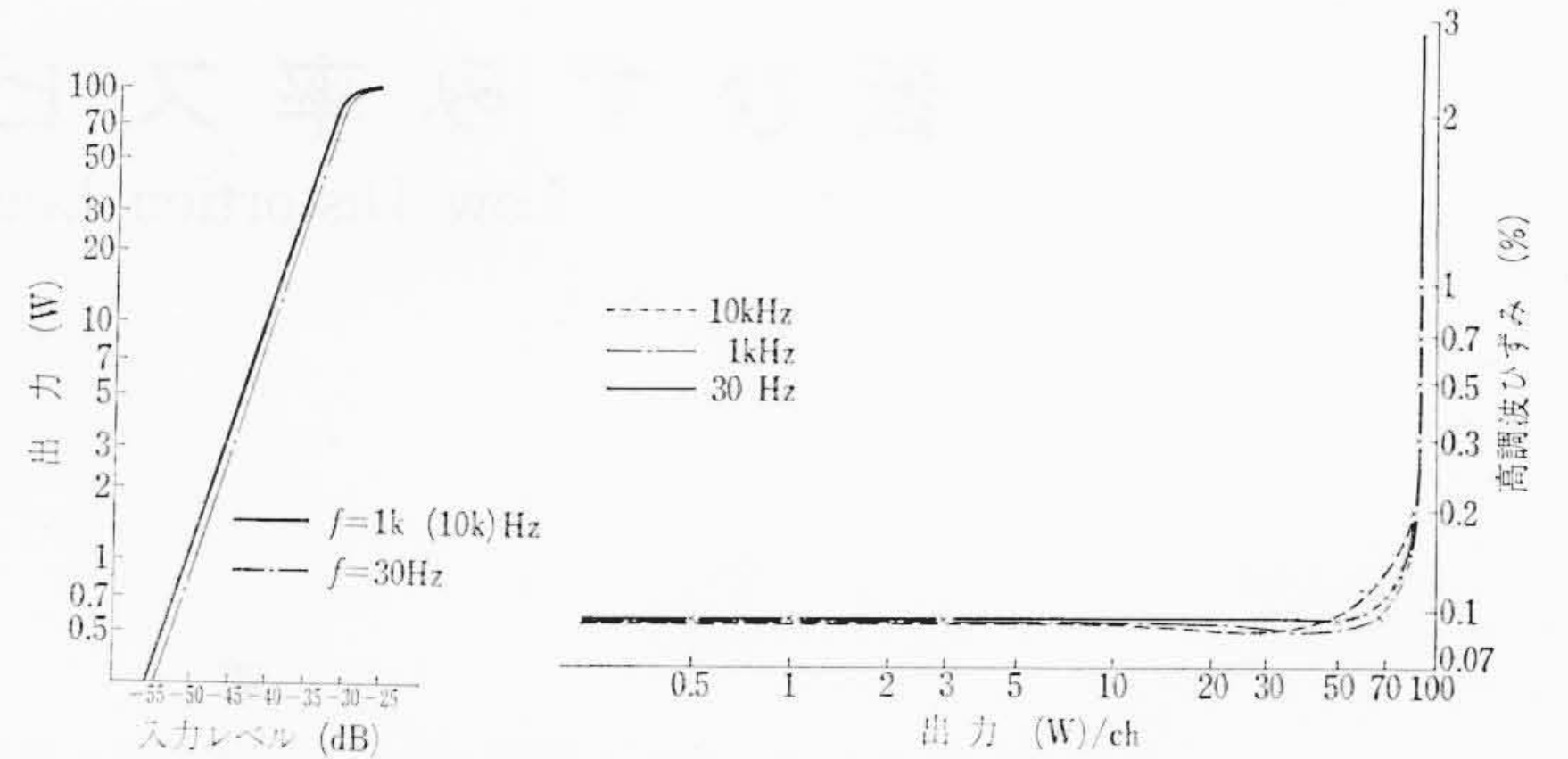


図19 IA-1200 入出力特性

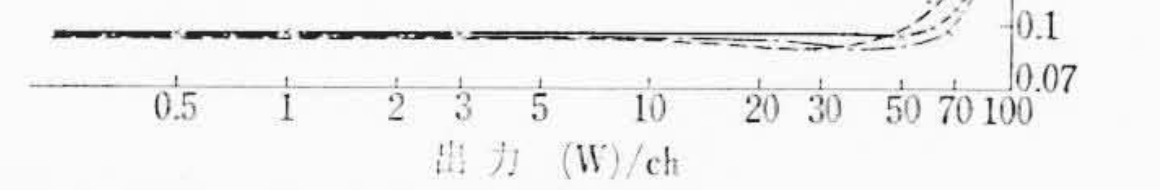


図20 IA-1200 出力対ひずみ率特性

善されると同時に、その堅牢(けんろう)さは、一般市場に発売する製品として有利な条件である。またセールスフィーチャ的にはITL-OTLとして市場にアピールする効果が大きかった。

次いで多用途性プリメインアンプとして、製品化した、ブリッジ形出力回路は、62Vの低い供給電圧で連続出力、90W(1%ひずみ)を可能にし、また切換方式によりチャンネルアンプ、および3D方式をも可能にし、業界の注目をあびることになった。しかるに、半導体素子の進歩が非常に早い今日、オーディオ用のFET、または高直線性を誇るパワートランジスタなどの開発量産化が行なわれようとしている現状では、さらに回路的な検討を加え、出力用トランジスタの平衡を取ると同時に、出力用結合コンデンサの除去により低域性能の改善を図ることが必要となろう。これには出力回路構成上の信頼性向上の研究が要求される。

ーコストトランジスタをHi-Fiセットに使用可能にし、これを製品化した。なお、アロイ形トランジスタの欠点は上記手法により、改

Vol. 30

日立造船技報

No. 1

目次

■論文

- ・放射形平火炎重油バーナの試作実験
- ・ミナス原油の凝固過程
- ・四サイクルディーゼル機関における過給機の汚れと燃焼室壁温度

- ・負重合のあるサーボ弁とシリンダ系の特性
- ・ダム放水路のゲートの振動に関する水理実験
- ・新淀川橋りょう支承部の応力解析
- ・低Cr-Mo 鋳鋼の熱処理と機械的性質
- ・14Cr-13Ni-2W ステンレス鋼の高温疲労破壊

………本誌に関する照会は下記に願います………

日立造船株式会社技術研究所
大阪市此花区桜島北之町60 郵便番号554