# 卒業研究報告

題 目

# トランジスタを用いたミニ・パワーアンプ及び マルチバイブレータ回路の設計と製作

指導教員

綿森 道夫助教授

報告者

森 泰隆

平成 14 年 2 月 5 日

高知工科大学 電子・光システム工学科

## 目次

| 第一章 |       | 序論      | <b>•</b> | ••         | •          | •          | •          | •   | ••  | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | •   | 3  |
|-----|-------|---------|----------|------------|------------|------------|------------|-----|-----|-----|-----|----------|-----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|----|
| 第二章 |       | 研究      | 目的       | り・         | •          | •          | •          | •   | ••• | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | •   | 4  |
| 第三章 |       | トラ      | シ        | ジス         | . <b>9</b> |            |            |     |     |     |     |          |     |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |    |
|     | 3.1   |         | なt       | ヹト         | ラ          | ン          | ジフ         | くう  | ፆታ  | ۱.  | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | •   | 5  |
|     | 3.2   |         | 種類       | 湏・         | •          | •          | • •        | •   | •   | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | •   | 5  |
|     | 3.3   |         | 構道       | 告・         | •          | •          | • •        | •   | •   | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | •   | 6  |
| 第四章 |       | $B^2 S$ | Spic     | e•         | •          | •          | • •        | •   | •   | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | •   | 7  |
| 第五章 |       | プリ      | ン        | ト基         | 板          | 作          | 戓          |     |     |     |     |          |     |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |    |
|     | 5.1   |         | プリ       | リン         | 1          | 基          | 反・         | •   | •   | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | •   | 8  |
|     | 5.2   |         | PC       | BE         | •          | •          | ••         | •   | •   | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | •   | 13 |
| 第六章 | •     | マル      | チ        | バイ         | ブ          | レ          | - ?        | פֿע | コ路  | 各   |     |          |     |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |    |
|     | 6.1   | 厚       | 亰理       | •          | •••        | •          | •          | •   | •   | •   | •   | •        | • • | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • • | 1   | 4  |
|     | 6.1.  | 1       |          | マル         | レチ         | バ          | 1          | ブ   | レー  | - ^ | 5 6 | - 13     | t۰  | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | 1   | 4  |
|     | 6.1.2 | 2       | 1        | 発扔         | 豪条         | 件          | •          | •   | •   | • • | ••• | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | 1   | 4  |
|     | 6.1.  | 3       | 1        | 発扔         | 動          | 作          | •          | •   | •   | • • | ••• | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | 1   | 5  |
|     | 6.1.4 | 4       | 1        | 発扔         | 同          | 期          | •          | •   | •   | • • | ••• | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | 1   | 6  |
|     | 6.2   |         | 設言       | <b>+ •</b> | •          | •          | •••        | •   | •   | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | •   | 21 |
|     | 6.2.  | 1       |          | NP         | N          | 型回         | コ路         | ς.  | •   | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | •   | 21 |
|     | 6.2.2 | 2       |          | PN         | P₫         | 텓뎌         | 即路         | ·   | •   | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | • 2 | 25 |
|     | 6.2.3 | 3       |          | IΞ         | ミツ         | タ          | • ,        | バ・  | 17  | アフ  | て五  | <u>1</u> | ]路  | ζ. | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | 2   | 7  |
|     | 6.3   |         | 考察       | <u>ج</u> • | •          | •          | •••        | •   | •   | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | •   | 30 |
| 第七章 |       | B 級     | 2        | ンプ         | ۶IJ        | <b>メ</b> 〕 | ン?         | וק  | . ر | ラ   | 1ッ  | シ        | ъ   | プ  | ル | • | т | Ξ | ッ | タ | フ | オ |   | ア | 回   | 路   | ľ  |
|     | 7.1   | Ē       | 電力       | 増          | 副回         | 即路         | •          | •   | •   | •   | •   | • •      | • • | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • • | 3   | 1  |
|     | 7.1.  | 1       |          | 電          | 圧切         | 曽帕         | <u></u> 量と | :電  | 流   | 増   | 幅   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | • ; | 31 |
|     | 7.1.2 | 2       |          | 温          | 度          | 安定         | E度         | Ę•  | •   | •   | •   | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | • ; | 32 |
|     | 7.2   | Ē       | 设計       | •          | •••        | •          | •          | •   | •   | •   | •   | •        | • • | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • • | 3   | 4  |
|     | 7.2.  | 1       | i        | 電源         | 記          | Œ          | •          | •   | •   | • • | ••• | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | 3   | 4  |
|     | 7.2.2 | 2       | 1        | 動作         | F点         | į •        | •          | •   | •   | • • | ••  | •        | •   | •  | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •   | 3   | 5  |

| 7.2.3 | 3   | 増        | 幅 | 率 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 36  | 6 |
|-------|-----|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|---|
| 7.2.4 | 4   | т        | Ξ | ッ | タ | フ | オ | П | ア | の | バ | イ | ア | ス | 回 | 路 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 36  | 6 |
| 7.2.5 | 5   | т        | Ξ | ッ | タ | フ | オ | П | ア | 部 | の | 電 | 力 | 損 | 失 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 37  | 7 |
| 7.2.6 | 3   | 出        | 力 | 部 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 37  | 7 |
| 7.3   | 製作  | <b>•</b> | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • 3 | 8 |
| 7.4   | 測定  | Ξ•       | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • 3 | 9 |
| 7.5   | 考察  | रू •     | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • 5 | 1 |
| 第八章   | 結論・ | •        | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 5   | 2 |
|       | 参考文 | 献        | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 5   | 3 |
|       | 謝辞・ | •        | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 5   | 4 |

### 第一章 序論

近年、若い世代の理科離れが騒がれるように、自分でものを考え、そこから 何かを生み出すということが少なくなってきた。眼前で起こっている現象に魅 入られ、それについて観察する。そういったいわゆる知的好奇心的なものが欠 落してきているように思える。

電子回路の世界にも同じようなことが言えるのではないだろうか。

電子回路を構成する部品が IC や LSI に置き換わり、回路はブラック・ボック ス化してしまった。このように回路のブラック・ボックス化により、その中身 をさほど知ることなく電子回路を扱うことが出来る様になった。

しかし今回はトランジスタという最も低レベルな増幅素子の動作原理を理解 するとともに、増幅回路の設計を行い、また実際に設計した回路をプリント基 板で製作し、評価する。

回路動作チェックには電子回路シミュレータ「B<sup>2</sup> Spice」を用いる。これは回 路図の設計・動作チェックなどをパソコン上で確認ができるため、実際に製作 を行う前に現象や結果をある程度予測することができる。しかしこれらはあく まで予測の域であり、やはり実際に製作してみる必要がある。

そこで回路パターン作成ソフト「PCBE」を用いて回路パターンを作成するとともに、露光・現像・エッチングなどの工程を経てプリント基板を製作する。

そして素子をはんだ付けした後、オシロスコープで波形を観測し、また回路 によっては周波数特性・高調波ひずみ率(THD)・S/Nも測定する。

以上が本研究の大まかな流れである。これらを行うことにより電子回路に対 する知識が必ずや深まるはずである。また自ら考え、理解し、構成することに より、結果として'オリジナルなものを生み出すことができる力'を養うこと ができれば、これからの将来、大いに役立つはずである。

### 第二章 研究目的

トランジスタを用いた電子回路として、'マルチバイブレータ回路'・'B級 コンプリメンタリ・プッシュプル・エミッタフォロア回路'の2種類をパソコ ン上でシミュレーション後、製作し、評価する。

本研究の目的は、これらを行うことにより電子回路への理解をさらに深めることである。

### 第三章 トランジスタ

3.1 なぜトランジスタか

第一章でも述べたように最近の電子回路は IC・LSI が主に用いられるよう になり、トランジスタの姿はあまり見受けられない。しかし IC や LSI の中身 はトランジスタ回路である。つまり IC・LSI の中身が理解できれば、より効 率的な回路が設計できる。

以上のことから、トランジスタを学ぶことにより、本研究の目的である'電 子回路に対する理解を深めること'についての達成の域を高めてくれるは ずである。

3.2 種類

トランジスタは大きく分けて 'バイポーラトランジスタ 'と '電界効果ト ランジスタ '(FET)の2タイプに分類される。本研究ではバイポーラトラン ジスタのみを用いる。トランジスタはさらに PNP 型と、NPN 型に分類され、 型名で区別できるように次のように定めている。

| 2SA * * * | <br>PNP 型の高周波用 |
|-----------|----------------|
| 2SB * * * | <br>PNP 型の低周波用 |
| 2SC * * * | <br>NPN 型の高周波用 |
| 2SD * * * | <br>NPN 型の低周波田 |

さらにトランジスタには、小信号用トランジスタ、、、パワー・トランジス タ、の区別があり、パワー・トランジスタはオーディオアンプ用に用いられ るため、本研究でも使用した。



写真 3-1 (左) 2SA1015 (右) 2SC1815



写真 3-2 (左) 2SB834 (右) 2SD880

写真 3-1 に小信号用トランジスタ、写真 3-2 にパワー・トランジスタを示す。

#### 3.3 構造

トランジスタはダイオードと同じように、P型半導体とN型半導体が3層 に組み合わされており、その組み合わせによりPNP型とNPN型とに分かれ る。名前が示すようにN型を真ん中にして、両端をP型にしているのがPNP 型。P型を真ん中にして、両側をN型にしているのがNPN型。

回路記号は次のようになる。



左が PNP 型で、右が NPN 型になる。

矢印の付いている電極はエミッタと呼ばれ、左の電極をベース、上の電極 がコレクタと呼ばれる。

PNP 型と NPN 型では、電流の流れる向きが逆なだけで、電極の用途は同じのため、呼び名が変わることはない。

### 第四章 B<sup>2</sup>Spice

B<sup>2</sup>Spice は B スクウェアードスパイス」と読み、開発元の Beige Bag Software 社 (ベージュバッグソフトウェア)の頭文字をとって B<sup>2</sup>を冠した SPICE シミ ュレータで、従来のシミュレータには無い特徴を持った製品である。

アナログ回路の設計において、実際に回路を組んで測定器を使用する従来の 方法に比べ、ソフトウェアによる回路シミュレータは簡単に結果が得られ、時 間・費用ともに大幅な節約ができる。

B<sup>2</sup>Spice に限らず、回路シミュレータを使って電子回路を設計・解析する場合、 次の手順で作業を進めていくことになる。

- 1. 回路図を作成する
- 2. 部品の特性を設定する
- 3. 解析の設定をする
- 4. 実際に回路を解析する
- 5. 解析結果を見て回路を修正する

これらを繰り返し、回路を設計していく。

解析にはいくつかの種類があり、本研究で行った解析は、トランジェント解 析、伝達関数・周波数特性(AC)解析、DC 解析の三つである。各解析の説明を以 下にまとめる。

・ トランジェント解析

時間の経過とともに出力がどのように変化するかを解析する。横軸 は時間、縦軸は求めようとするノードの電圧、電流などになる。オシ ロスコープと同じことである。

・ 伝達関数・周波数特性(AC)解析

横軸を周波数または角周波数として、出力信号の入力信号に対する 利得(ゲイン)や位相を解析する。

・ DC 解析

抵抗回路の解析や回路の直流的な動作状態を調べる。

### 第五章 プリント基板作成

#### 5.1 プリント基板

電子部品で回路を作成する場合、各部品のリード線を適切に接続することが 必要になる。また、各部品を固定する必要もある。プリント基板は部品間の配 線と部品の固定を行うために用いられる。

プリント基板を作成しなくとも、'ユニバーサル基板 'と呼ばれる、部品を取 り付ける穴が升目状に開けられている基板もあるが、今回は'何事も体験'的 な思想を本研究の念頭においているため、プリント基板作成を体験した。



以下にプリント基板作成の手順を挙げる。

写真 5-1 プリント基板作成道具

#### 露光

プリント基板を作成する方法として、ここではポジ感光基板(写真 5-2) を用いることにする。ポジ感光基板とはプリント基板に感光剤が塗布され ている基板である。プリント基板の銅箔には、紫外線を当てる(露光する) と性質が変化する材料も塗布されているため、透明なフィルムにマスクパ ターン(後の 5.2 節参照)を描き、それをポジ感光基板に重ねて紫外線に 当てると、紫外線のあたった部分が変質し、パターン部分のみが残る。(写 真 5-3)





写真 5-2 ポジ感光基板

#### 写真 5-3 露光の様子

現像

粉末状の現像剤をお湯に溶かし、現像液をつくる。この現像液により ポジ感光基板の銅箔を溶かしたい部分の感光剤(感光した部分)を溶か すことができる。

現像液の温度は 30~35 程度に保つようにする。 現像の様子を写真 5-4 に示す。



写真 5-4 現像の様子

エッチング

エッチング液と呼ばれる、塩化第二鉄(FeCl ・H O)の溶液を用いてプリント基板の不要な銅箔を溶かす。

塩化第二鉄液は法律で規制された毒物、劇物、危険物ではないが、エ ッチング液によりプリント基板の銅が溶け込んだ液は、廃液規制対象に なる。少量でも下水等に流してはいけない。必ずエッチング液に添付さ れている処理剤を使用する。

また、皮膚に付着した場合は洗い流せば問題ないが、衣服に付着した 場合は絶対に取れない。変色、変質してしまうので取り扱いには十分な 注意が必要である。

目に入った場合は、直ちに水で15分ほど洗い流す必要がある。

これらの事を念頭に置き、エッチング液をお湯に溶かし、40~43 を 保ちつつ液内でプリント基板を撹拌する。

作業の様子を写真 5-5 に示す。



#### 写真 5-5 エッチングの様子

再度 , の工程を繰り返すことにより写真 5-6 のような状態になる。 この時、断線箇所がないかよく調べておく。



写真 5-6 出来上がった基板

フラックス

感光剤を除去した後の銅箔はきれいになるが、むき出しの状態のため、す ぐに酸化してしまい、黒く変色してしまう。それを防ぐためにプリント基板 用のフラックスを塗布する必要がある。これを行うことで銅箔をきれいな状 態に保つことができ、はんだも付きやすくなる。



穴あけ

出来上がったプリント基板に部品を取 り付ける穴を開ける。

穴を開けるのは写真 5-6 の丸い点の部 分である。

今回は径 0.8mm の穴を電動ドリルを用 いて開けた。

穴あけの様子を写真 5-7 に示す。

写真 5-7 穴あけの様子

はんだ付け

美しいはんだ付けにはかなりの熟練が必要となる。 断線箇所が発見された場合は、ここで補強する。 はんだ付けの例を写真 5-8 に示す。



写真 5-8 はんだ付けの例



完成した回路の例を写真 5-9,10 に示す。





写真 5-9,10 完成した回路

#### **5.2 PCBE**

プリント基板を作成するためには、プリント基板の配線部分に銅箔を残す ために、マスクパターンと呼ばれるものを作成しなければならない。パター ンは光を遮り、ポジ感光基板の感光剤に紫外線が当たるのを防ぐ。

マスクパターンは黒いマジックのようなもので描いてもよいが、今回はパ ソコンを用いて作成した。その作成ソフトが PCBE である。

PCBE とは高戸谷 隆氏が作成した、プリント基板を製作する際のマスクパ ターンを作成するための回路エディタ(フリーソフト)であり、次のような 特徴を持っている。

- ・ プリンタで印刷し、版下を作成できる
- ・ ガーバーファイル、NC データを出力できる
  - ・ 主な操作コマンドはツールバーに配置
  - ・ステータスバーに現在できる操作を表示するので、簡単に覚えられる
  - ・操作コマンドは低価格のプリント基板 CAD 程度揃っている

作成したマスクパターンは OHP シートに印刷するが、このとき最高品質を 指定して印刷する。透けている状態ではプリント基板はうまく作成すること ができない。

写真 5-11 は PCBE で作成したマスクパターンを OHP シートに印刷した一例である。



写真 5-11 マスクパターン

### 第六章 マルチバイブレータ回路

6.1 原理

私自身が、とある実習のときにマルチバイブレータという回路について非 常に興味を持ったため本研究に取り入れた。

#### 6.1.1 マルチバイブレータとは

図 6-1 にマルチバイブレータの回路図を示す。



図 6-1 マルチバイブレータ回路

これはトランジスタを使用したマルチバイブレータ回路により、発光ダイ オード(LED)を点滅させる回路である。マルチバイブレータとは、トラン ジスタのハイレベル状態(H)とローレベル状態(L)を交互に繰り返す回路 である。

6.1.2 発振条件

コンデンサ $C_1$ 、 $C_2$ が無いとき  $Tr_1$ (Q2sc18150)、 $Tr_2$ (Q2sc1815)が飽和 することが発振条件である。 $Tr_1$ のコレクタ エミッタ間飽和電圧を $Vce_{(sat)}$ 、 ベース エミッタ間電圧を  $Vbe_1$ とすると、 $Tr_1$ のベース電流  $Ib_1$ は Ib<sub>1</sub>=(Vcc - Vbe<sub>1</sub>) / R<sub>3</sub>------(6-1) となる。また、Tr<sub>1</sub>が飽和しているときの Tr<sub>1</sub>のコレクタ電流 Ic<sub>1</sub>は

 $Ic_1 = (Vcc - Vce_{(sat)}) / R_1$ ------(6-2)

となる。Tr<sub>1</sub>が飽和するためには、ベース電流を多く流し

 $I_{b1} >= Ic_1 / h_{fe1}$ 

つまり

 $h_{fe1} \cdot I_{b1} >= Ic_1$ -----(6-3)

が成立しなければならない。(1)式、(2)式を(3)式に代入すると

 $h_{fe1}(Vcc - Vbe_1) / R_3 >= (Vcc - Vce_{1(sat)}) / R_1$ -----(6-4)

となる。ここで Vbe<sub>1</sub>~=Vce<sub>1(sat)</sub>~=0.6[V]なので

 $h_{fe1} / R_3 >= 1/R_1$ 

 $R_1 >= R_3 / h_{fe1}$ -----(6-5)

となり、同様にして Tr2 が飽和するためには

 $R_4 >= R_2 / h_{fe2}$ -----(6-6)

が成立しなければならない。(5)式、(6)式が同時に成立することが発振条件となる。

6.1.3 発振動作

次に、図 6-1 のようにコンデンサ C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>を入れると、変化が起こる。コ ンデンサ C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>が図とは逆に充電されていると、Tr<sub>1</sub>、Tr<sub>2</sub>とも導通するが、 普通はどちらか一方が導通し、他方は導通しない。 例えば図 6-1 において、 $Tr_1$ が導通したなら、コンデンサ  $C_1$ により逆バ イアスされるので、 $Tr_2$ は非導通となる。

しかし、このときコンデンサ C<sub>1</sub>は電源 Vcc より、抵抗 R<sub>2</sub>を通して充電 されていくので、Tr<sub>2</sub>のベース電位は徐々に上昇していく。ベース電位が Vbe に達すると急に Tr<sub>2</sub>が導通し、Tr<sub>1</sub>は非導通となって反転する。この様 な動作を繰り返して発振するわけである。

#### 6.1.4 発振周期

この様にマルチバイブレータの発振は、 $C_1$ 、 $C_2$ の充放電によって行われるので、発振周期は $C_1R_2$ 、 $C_2R_3$ の時定数に依存する。これからその発振周期を計算する。

そのためにまず、回路図から  $R_2$ 、 $C_1$ 、 $Tr_1$ を抜き出して過渡現象を考える。 抜き出した回路図を図 6-2 に示す。



図 6-2 マルチバイブレータ回路の過渡現象

初期条件はコンデンサ C<sub>1</sub> に図の極性の方向に (Vcc - Vbe<sub>2</sub>)の電圧が印加 されていることが条件である。このコンデンサに Tr<sub>1</sub>が導通して飽和すると、 電源 Vcc より抵抗 R<sub>2</sub>を通して徐々に充電される。ある瞬間、コンデンサ C<sub>1</sub> に図のような極性で Q[C]の電荷が蓄えられたとすれば、微分方程式

$$Vce_{1(sat)} - Q / C_1 + IR_2 = Vcc$$
-----(6-7)

が成立する。ただし、I はコンデンサ C<sub>1</sub>への充電電流である。コンデンサ C<sub>1</sub>に蓄えられている電荷 Q が減少していく割合が充電電流 I に等しいので

I = -dQ/dt-----(6-8)

となる。(6-8)式を(6-7)式に代入して

 $Vce_{1(sat)} - Q / C_1 - R_2 dQ / dt = Vcc$ -----(6-9)

 $Q / C_1 + R_2 dQ / dt = - (Vcc - Vce_{1(sat)}) - -----(6-10)$ 

となる。(6-10)式の微分方程式の解は(6-10)式の右辺を0とおいた過渡解Qt と定常項

 $Qs = -C_1(Vcc - Vce_{1(sat)})$ -----(6-11)

#### との和、つまり

Q = Qt + Qs-----(6-12)

となる。まず過渡解 Qt を求める。この微分方程式は

 $Qt/C_1 + R_2 dQt/dt = 0$ -----(6-13)

#### となり、変形すると

 $dQt/dt = -Qt/C_1R_2$ -----(6-14)

 $dQt/Qt = - dt/C_1R_2$ ------(6-15)

となり、両辺を積分して

 $dQt/Qt = -1/C_1R_2$  dt-----(6-16)

loge Qt =  $-t/C_1R_2+C$  (C:任意定数)-----(6-17)

 $Qt = e^{-t/C1R2} \cdot e^{C}$ -----(6-18)

e^C = A とおくと

 $Qt = A e^{-t/C1R2}$ -----(6-19)

となる。

(6-11)式、(6-19)式を(6-12)式に代入すると

 $Q = A e^{-t/C1R2} - C_1(Vcc - Vce_{1(sat)})$ ------(6-20)

となる。コンデンサ C<sub>1</sub>の両端の電圧 Vc は

 $Vc = Q/C_1 = A/C_1 e^{-t/C1R2} - (Vcc - Vce_{1(sat)})$ 

 $= K e^{-t/C1R2} - (Vcc - Vce_{1(sat)})$ -----(6-2 1)

となる。ここで係数 K を決めるために初期条件を代入する。初期条件は t = 0 で Vc = Vcc - Vbe<sub>2</sub> であるから

 $Vcc - Vbe_2 = K - (Vcc - Vce_{1(sat)})$ 

 $K = 2Vcc - Vce_{1(sat)} - Vbe_{2}$ -----(6-22)

(6-22)式を(6-21)式に代入すると

$$Vc = (2Vcc - V_{ce1(sat)} - V_{be2}) e^{-t/C1R2} - (Vcc - Vce_{1(sat)})$$
-----(6-23)

となる。Tr2 のベース - エミッタ間電圧 V<sub>be2</sub>は

$$V_{be2} = -Vc + V_{ce(sat)}$$

= - 
$$(2Vcc - Vce_{1(sat)} - V_{be2}) e^{-t/C1R2} + Vcc$$
-----(6-24)

となる。この  $V_{be2}$ の過渡的なようすはグラフを見るとわかる。 それをグラフ 6-1 に示す。

グラフからわかるようにコンデンサ  $C_1$  が充電されていき、 $V_{be2}$  が約 0.6V  $(V_{be20})$ に達すると、 $Tr_2$ が導通になるので  $Tr_2$ のコレクタ - エミッタ間電圧  $V_{ce2}$  は下がり( $V_{ce2} = V_{ce2(sat)}$ )となる。



グラフ 6-1 マルチバイブレータ回路

Tr<sub>1</sub>が導通している間の時間 T<sub>1</sub>を求める。(6-24)式において V<sub>be2</sub> = V<sub>be20</sub>とすると

$$V_{be20} = -(2Vcc - V_{ce1(sat)} - V_{be20}) e^{-T1/C1R2} + Vcc$$

 $(2Vcc - V_{ce1(sat)} - V_{be20}) e^{-T1/C1R2} = Vcc - V_{be20}$ 

$$e^{-T1/C1R^2} = (Vcc - V_{be20}) / (2Vcc - V_{ce1(sat)} - V_{be20})$$
  
-  $T_1/C_1R_2 = loge ((Vcc - V_{be20}) / (2Vcc - V_{ce1(sat)} - V_{be20}))$   
 $T_1 = C_1R_2 loge((2Vcc - V_{ce1(sat)} - V_{be20}) / (Vcc - V_{be20}))$ ------(6-25)  
となる。ここで Vcc>>V\_{be20}、 Vcc>>V\_{ce1(sat)} と考えると

$$T_1 \sim = C_1 R_2 \log 2$$
  
= 0.693C<sub>1</sub>R<sub>2</sub>

 $\sim = 0.7C_1R_2$ -----(6-26)

となる。同様にして Tr2 が導通している時間 T2 は

$$T_2 \sim = 0.7C_2R_3$$
-----(6-27)

となる。したがって発振周期 T は

 $T = T_1 + T_2$ = 0.7C\_1R\_2 + 0.7C\_2R\_3 = 0.7(C\_1R\_2 + C\_2R\_3)-----(6-28)

となる。ここで、 $C_1 = C_2 = C$ 、 $R_2 = R3 = R$ とすると(6-28)式は

T = 1.4CR-----(6-29)

となる。

6.2 設計

本研究では3種類のマルチバイブレータ回路を製作した。まず、バイポーラ・ トランジスタの2種類、NPN型、PNP型、それぞれについての回路。そして、 NPN型を用いた'エミッタ・バイアス型'の3種類である。ここからは3種類 それぞれの回路について設計手順を述べていく。

#### 6.2.1 NPN 型回路

6.1 節にて示した図 6-1 は、2SC1815 を用いて実際に設計した NPN 型マルチ バイブレータ回路である。以下にこの回路の設計仕様を示す。

| NPN 型マルチバイブ | レータ回路設計仕様   |
|-------------|-------------|
| 電源電圧        | 3 [V]       |
| トランジスタ      | 2SC1815     |
| 発振周期        | T = 1 [sec] |
|             |             |

今回の設計におけるポイントは、電源電圧を3[V]とした点である。参考文献 を見る限り、電源電圧を3[V]で設計している回路は見受けられない。3[V]とし た点には二つの根拠があり、一つは'LED を動作するのに必要な電圧が2[V] である'という点、もう一つは'単三乾電池二つで動作させることができる'の 二点である。

図 6-1 では二つの LED をそれぞれ、抵抗 R<sub>1</sub>、R<sub>4</sub> との合成抵抗としている。 実際の回路と同じく、LED を接続した形の回路図は図 6-3 になる。



図 6-3 NPN 型マルチバイブレータ回路 まず、R<sub>1</sub>、R<sub>4</sub>の値は、電源電圧が 3 [V]、コレクタ電流を 20 [mA]とすると

$$R = 3 / 20 \times 10^{-3}$$

となる。

ここで図 6-1 に対し、図 6-3 の R<sub>1</sub>、R₄が 50 [ ]である理由は、'LED は 2 [V] の電圧がかかったとき 20 [mA]の電流が流れることによって動作する'という特性より、

LED のインピーダンス =  $2/20 \times 10^{-3}$ 

= 100 [ ]

となるからである。 次に R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>は、(6-5)式より

 $R(150) >= R_3 / h_{fe}$   $R_3 <= R \times h_{fe}$   $= 150 \times 192$  = 28.8 [k]

となる。この値に一番近い E - 24 シリーズの抵抗は 27 [k]である。 コンデンサの値は設計仕様の発振周期 T = 1 [S]より、(6-29)式を用いて

T = 1.4CR

#### C = T/1.4R

$$= 1/(1.4 \times 27 \times 10^3)$$

$$= 26.46 \, [\mu F]$$

ゆえに、この値に近いものとして 33 [µF]を使用した。

以上のようにして設計を行い、製作した回路が写真 6-1、2 である。実物では

左右の写真を交互に見る形となる。



(左)写真 6-1 NPN 型マルチバイブレータ回路(赤 LED 点灯時)
 (右)写真 6-2 " (緑 LED 点灯時)

オシロスコープで測定した波形を写真 6-3 に示す。ただし、図 6-3 の回路のま までは周波数が低く、

f = 1/T

#### = 1 [Hz]

となってしまうため、オシロスコープでのトリガーがかからない。 このような場合は、コンデンサの値を小さくすればよい。今回は、0.033[µF] とした。

コンデンサの値を 1000 分の 1 に変更したため、周波数も約 1000 倍になって いるのがわかる。このようにすればトリガーも非常にかかりやすくなり、波形 が観測しやすくなる。

グラフ 6-2 はこの回路のシミュレーション波形であるが、周期が 0.9[ms]と、 実際の波形では 1.2[ms]なのに対し、少しずれていることがわかる。また、トラ ンジスタが OFF から ON になり、電圧が下がった状態から、少し上がった点の 電圧も 0.5[V]ほどの誤差を生じている。



グラフ 6-2 NPN 型マルチバイブレータ回路のシミュレーション波形



写真 6-3 NPN 型マルチバイブレータ回路の波形

6.2.2 PNP 型回路

普通、マルチバイブレータ回路は、先に示したとおり NPN 型で設計・製作される。しかし、原理を理解していれば、同じバイポーラ・トランジスタである PNP 型でも設計・製作が可能ではないかと考えた。

以下に本回路の設計仕様を示す。

| PNP 型マルチバイブ | レータ回路設計仕様 |
|-------------|-----------|
| 電源電圧        | 3V        |
| トランジスタ      | 2SA1015   |
| 発振周期        | 1 [sec]   |
|             |           |

第三章でも述べたとおり、PNP 型と NPN 型では、電流の流れる向きが逆な だけで、電極の用途は同じのため、電流の流れる向きさえ間違えることなく設 計できれば、PNP 型でも発振するはずである。

図 6-4 に PNP 型マルチバイブレータ回路の回路図を示す。



図 6-4 PNP 型マルチバイブレータ回路

図 6-1 と比較すると、素子の並びが上下逆になっていることがわかる。これ は前述したとおり、電流の流れる向きが逆になったためである。しかし原理は NPN 型となんら変わりは無く、まったく同じである。したがって、抵抗、コン デンサの値もまったく同じである。LED については、NPN 型と同様、R1、R2 との合成抵抗としている。

NPN 型と少し違っているのは、トランジスタが ON になるときのベース電位 が 2.4V であるという点である。PNP 型ではエミッタのほうが電位が高くなる からである。製作した回路を写真 6-4、5 に示す。



(左)写真 6-4 PNP 型マルチバイブレータ回路(赤 LED 点灯時)
(右)写真 6-5 " (緑 LED 点灯時)

次に、この回路のシミュレーション波形と、オシロスコープで測定した波形 を示す。





写真 6-6 PNP 型マルチバイブレータ回路のオシロスコープ波形

オシロスコープの波形は、シミュレーション波形でいえば、青色の波形(つまりコレクタ電圧の波形)にあたり、ほとんど同じ波形といってよい。(ただし C<sub>1</sub>,C<sub>2</sub>=0.033 µ F を利用したので、周期は 1000 分の 1 になっている)。

#### 6.3.3 エミッタ・バイアス回路

3 つ目のマルチバイブレータとして、エミッタ・バイアス型を上げる。エミ ッタ・バイアス型とは、エミッタ接地増幅回路の原理を用いたものであり、 見た目には抵抗の数が2つ増えた形となる。

| エミッタ・バイアン | ス回路設計仕様 |
|-----------|---------|
| 電源電圧      | 3 [V]   |
| トランジスタ    | 2SC1815 |
| 発振周期      | 50[ms]  |
|           |         |

回路図を図 6-5、シミュレーション波形をグラフ 6-4 に示す。

これまでの2つの回路はベースにかかる電圧を1つの抵抗で作ってきたの に対し、このエミッタ・バイアス型は2つで分圧して作っている。これまで の回路との違いはこの点だけであり、動作はNPN型と同じになる。



図 6-5 エミッタ・バイアス型マルチバイブレータ回路



シミュレーションによるグラフ

下は実際に測定を行ったオシロスコープの波形であるが、シミュレーションの周期が約40[mS]なのに対し、設計どおりの約50[mS]となっている。 しかし、波形の形だけ見れば、ものの見事に一致していることがわかる。



写真 6-7 エミッタ・バイアス型マルチバイブレータ回路 オシロスコープによる波形

また、製作した回路を写真 6-8 に示す。



写真 6-8 製作したエミッタ・バイアス型マルチバイブレータ回路

#### 6.3 考察

この第六章では、マルチバイブレータについて学んだ。

マルチバイブレータは、身近なものでは車のウインカーに使用されており、 回路の規模に比べ、動作原理に微分方程式を用いるなど、理解が難しい。しか し、いったん原理を理解すれば発振周期を思いのままにすることができ、製作 時にいろいろと試してみることができた。その際に、シミュレータと実測との 間に多少の誤差があることを発見した。特に周期においては誤差が目立った。 しかしこれは、個々のトランジスタ定数による違いだと考えている。

波形についてはほぼ一致しているため、やはりシミュレーションを用いることは大事だと思った。

また、既存の NPN 型だけではなく、PNP 型、エミッタ・バイアス型など、 オリジナルなものを製作できたことには正直感動している。

### 第七章 B 級コンプリメンタリ・プッシュプル・

### エミッタフォロア回路

#### 7.1 電力増幅回路

スピーカをならすためのオーディオ用パワーアンプを製作する場合、最近で は出力電力が 100[W]程度までならば、1 パッケージの IC として簡単に入手す ることができる。

パワーアンプは大出力に伴って発熱するため、その IC 内部では電気的な性能 はもちろんだが、温度(発熱)による安定度をどのように確保するかに注意が払わ れて設計される。

したがって、電力増幅回路を個別のトランジスタで組もうとすれば、やはり 同じように温度安定度の問題を避けて通ることはできない。

ここではエミッタ接地増幅回路と、エミッタフォロア回路を組み合わせた電 力増幅回路として、ウォークマンの出力でスピーカを鳴らすためのパワーアン プを設計・製作する。

#### 7.1.1 電圧増幅と電流増幅

図 7-1 に電力増幅回路のブロック図を示す。



図 7-1 電力増幅回路のブロック図

入力信号を必要な出力をえられるまで電圧増幅した後、スピーカなどの低イ ンピーダンス負荷を駆動するために電流増幅する。

電圧増幅段には、エミッタ接地などの電圧利得のある回路が用いられるが、 これらの増幅回路は電圧的な増幅を行うのみであるため、回路電流は小さく発 熱も無い。

ところが電流増幅段は、電圧増幅段で増幅した電圧レベルの信号をそのまま

扱う。このため、電源電圧が電圧増幅段と同じで、かつ電流増幅を行うことに よって大きな電流が流れるため、トランジスタの発熱は避けられない。

電流増幅段にはエミッタフォロア回路などが用いられ、素子の発熱が大きい 場合は回路のアイドリング電流(無信号時に流れるコレクタ電流)の温度安定度 が問題になる。まずこの点を解決することが大事である。

#### 7.1.2 温度安定度

図 7-2 にエミッタフォロアのバイアス方法を示す。



(a)単純なプッシュプル (b)スイッチングひずみを (c)熱暴走を防ぐ ダイオードで補正

図 7-2 エミッタフォロアのバイアス方法

このうち(a)は無信号時にTr<sub>1</sub>とTr<sub>2</sub>がカットオフによりアイドリング電流が流れない。そのため温度安定度はまったく考える必要が無い回路である。

しかしこの回路はスイッチングひずみが大きいため、オーディオ用電力増幅 回路には用いられない。

(b)はトランジスタのベース - エミッタ間電圧 V<sub>BE</sub> をダイオードの順方向電圧 降下 V<sub>F</sub>で相殺し、スイッチングひずみをなくした回路である。

トランジスタの V<sub>BE</sub> は温度が高くなると値が小さくなるという負の温度係数 (-2.5mV/)を持っている。したがって、このような回路から負荷電流を多 く取り出して Tr<sub>1</sub>と Tr<sub>2</sub>の温度が高くなると、V<sub>BE</sub>の値が小さくなってしまう。

ところが  $Tr_1 \ge Tr_2 温度が高くなっても、ダイオード <math>D_1$ 、 $D_2$ に流れる電流は あまり変わらないため、その順方向電圧降下  $V_F$ はほぼ一定値である。つまり  $V_F$ ~=  $V_{BE}$ の関係は崩れ、 $V_F > V_{BE}$ となってしまう。

こうなると $Tr_1$ と $Tr_2$ には $V_F$ と $V_{BE}$ の電圧差に応じたベース電流が流れ、そ

のベース電流の $h_{FE}$ 倍のコレクタ電流がアイドリング電流として流れてしまう。 しかも、コレクタ電流は負荷に流れるのではなく、 $Tr_1 \ge Tr_2$ を通して電源 GND 間に流れる。

このようにして、さらに増加したコレクタ電流によってトランジスタの温度 はより高くなり、 $V_F$ と $V_{BE}$ 電圧差が大きくなって、コレクタ電流はより大きく なる。

これを繰り返すことにより起こるのが、'トランジスタの熱暴走'である。

(c)は(b)の回路にエミッタ抵抗を挿入して、 $V_F \ge V_{BE}$ の電圧差を吸収し、コレクタ電流を制限した回路である。アイドリング電流は( $V_F - V_{BE}$ ) / R に制限されている。

この回路は(b)よりも安全だが、アイドリング電流を小さくしようとすれば、 Rの値ある程度大きくしなければならない。

そうなると、この回路の出力インピーダンス  $Z_0$ はエミッタフォロア自体の出 カインピーダンスをゼロとしても、 $Z_0 = 10$ []になる。

このようなエミッタ抵抗によるロスが大きい電流出力回路では、スピーカの ような低インピーダンス負荷を十分に駆動することができない。

また、この回路は温度による電圧差を抵抗で吸収しているに過ぎず、温度安 定度の問題を解決しているとはいえない。



図 7-3 温度安定度の良い

バイアス回路

図 7-3 はエミッタフォロアのトランジス タとバイアス回路に使用しているトラン ジスタとを熱結合し、温度変化に応じてバ イアス電圧を変化させることにより、アイ ドリング電流の温度変動を解決した回路 である。

この回路において、 $Tr_1 \ge \neg \neg$ アス回路  $R_A$ 、 $R_B$ に流れる電流 i は  $Tr_1$ のベ ース - エミッタ間電圧を  $V_{BE1}$ とすれば、

$$i = V_{BE1} / R_B$$
-----(7-1)

となる。

一方、 $Tr_1$ のコレクタ - エミッタ間電圧  $V_B$  ( $=TR_2$ と  $TR_3$ のバイアス電圧)は、

$$V_{\rm B} = R_{\rm A} \cdot \mathbf{i} + R_{\rm B} \cdot \mathbf{i}$$
$$= (R_{\rm A} + R_{\rm B})\mathbf{i} - \dots - (7-2)$$

となり、(7-1)式を(7-2)式に代入すると

$$V_{\rm B} = (R_{\rm A} + R_{\rm B}) / R_{\rm B} \cdot V_{\rm BE1}$$
-----(7-3)

となる。つまり  $R_A$  と  $R_B$  の比を変えることにより、 $V_B$ を  $V_{BE1}$ の何倍かに設定することが可能となる。

Tr<sub>2</sub>とTr<sub>3</sub>のベース - ベース間電圧はトランジスタ二つ分の V<sub>BE</sub>となり、した がって、R<sub>A</sub> = R<sub>B</sub>とすれば V<sub>B</sub> = 2V<sub>BE1</sub>となり、電圧的な平衡がとれる。

さらに、3 つの Tr はヒートシンクにより熱結合をしているため温度変化によ る問題も解決している。

#### 7.2 設計

以下に本回路の設計仕様を示す。

| B 級コンプリメンタ | ヲリ・プッシュプル・        |
|------------|-------------------|
| エミッタフォロ    | コア回路設計仕様          |
| 電圧利得       | 10 倍(20dB)        |
| 出力電圧       | 0.5 [W]           |
| 周波数特性      | 20[Hz] ~ 20 [kHz] |
|            |                   |

図 7-4 に本回路の回路図を示す。

全体の回路構成としては、入力信号をエミッタ接地増幅回路で電圧増幅し、 エミッタ接地のコレクタに挿入したバイアス回路で、エミッタフォロアのベー スバイアス電圧を発生させ、プッシュプル・エミッタフォロアで電流増幅する 回路である。

#### 7.2.1 電源電圧

電源電圧は出力電力から決定する。 最大出力電力は 0.5[W]であるから、そのときの出力電圧は

$$Vo = Po \cdot Z$$

 $= 0.5 \times 8$ = 2 [Vrms]

となり、この値は実行値のため、入力信号を正弦波とすれば、出力波形のピーク・トゥ・ピーク値は 5.7[V] (~= 2Vrms × 2×2)となる。

ゆえに、この値より大きな値として、Vcc = 9[V]とする。また、9[V]にした理 由はほかにもあり、一つは電池で駆動できるようにするため、もう一つとして、 参考文献には15[V]での設計例が記載されていたため、それとは異なる値で設計 をしていきたかったからである。



図 7-4 B 級コンプリメンタリ・プッシュプル・エミッタフォロア回路

#### 7.2.2 動作点

負荷に対して 0.5[W]を出力しているときの出力電圧は 2[Vrms]であるから、 ピーク値は 2.8[V]となる。また、そのときの負荷電流は 350[mA]( 2.8[V] / 8[ ]) となる。(ピーク値) エミッタフォロアに使用するトランジスタの  $h_{FE}$  が 100 であるから、そのベース電流は 3.5[mA]となる。

ゆえに、エミッタ接地のコレクタ電流はそれより十分大きい 20[mA]とした。 Tr<sub>1</sub>のエミッタ電圧は大きくしすぎると、コレクタの振幅がとれなくなり、小 さすぎるとコレクタ電流の温度変化が大きくなるので、1.5[V]とした。そのため エミッタと GND 間の合成抵抗は 75[ ]となる。

#### 7.2.3 増幅率

Tr<sub>2</sub>のコレクタ電位を 5[V]になるように設定すれば最大振幅を得ることができる。コレクタ電位を 5[V]に設定するには、R<sub>3</sub>の電圧降下を 4[V]とすればよい。

$$R_3 = 4 [V] / 20[mA]$$

= 200[ ]

また、 $R_6$ 、 $R_7$ をそれぞれ  $R_6=10[$ ]、 $R_7=62[$ ]とし、 $R_6$ を  $C_2$ で接地していることより、電圧増幅率は

 $Av = R_3 / R_7$ = 200 / 10

= 20倍(~=26dB)

増幅度の設定は、実際の増幅度が計算で求めた値より小さくなるため、設計 仕様より大きめに設定した。

また、 $C_2$ は  $R_7$ をバイパスして、増幅度を上げると同時に、 $R_6$ 、 $R_7$ とでハイパス・フィルタを形成している。値は設計仕様の周波数特性を満足するために2200[µF]とした。 $R_8$ と  $R_9$ はベース電位決定用で、エミッタ電位を 1.5[V]にするためにベース電位を 2.1[V]にする。ここでは  $R_8$ 、 $R_9$ に流す電流を 0.5[mA]とするため、 $R_8$ =15[k]、 $R_9$ =5.6[k]とした。したがって、この回路の入力インピーダンスは  $R_8/R_9$ となる。

#### 7.2.4 エミッタフォロアのパイアス回路

図 7-4 に示したように、エミッタフォロアのバイアス回路は、カップリング コンデンサなどを省くため、エミッタ接地のトランジスタ Tr<sub>1</sub>のコレクタと負荷 抵抗 R<sub>3</sub>の間に挿入する。

この部分に使用するトランジスタ Tr<sub>2</sub>(図 7-4 では Q2SC1815)は、最大コレ クタ電流が 20[mA]以上、コレクタ - ベース間と、コレクタ - エミッタ間の最大 定格がそれぞれ 1.2[V]以上の素子ならばかまわない。そこで今回は、普段から よく使用している 2SC1815 を使用した。

 $Tr_2$ のベース側に流す電流は、 $R_5$ によって決まる。ここでは 300[]としたため、ベースに流れる電流は 2[mA] (=0.6[V] / 300[])となる。

 $Tr_2$ のコレクタ - エミッタ間電圧を  $2V_{BE}$ に設定するには、(7-3)式より  $R_5 = R_4$ とすればよいので、それに当てはまる半固定抵抗として RVR2 = 500[]を選ん だ。これは 0 から 500[]まで可変でき、300[]付近に設定する。

#### 7.2.5 エミッタフォロア部の電力損失

この回路は電源電圧を 9[V]、 $Tr_2$ のコレクタ電位を 5[V]に設定した。したがって、エミッタフォロアの出力も  $Tr_2$ によるバイアス電圧を無視すれば、ピーク電圧が 4[V]の信号を出力することができる。

この出力信号が 8[ ]負荷を駆動したとき、約 500[mA](=4[V] / 8[ ])のピー ク電流がコレクタ電流として Tr<sub>3</sub>、Tr<sub>4</sub>に流れる。

出力波形を正弦波とすれば、回路の最大出力電力は実行値で 2.83[Vrms](4[V]/ 2)であるから、最大出力電力は 1[W](2.83<sup>2</sup> [V]/ 8[ ])となり、Tr<sub>3</sub>と Tr<sub>4</sub>の Pc の最大値はその 1/5 の 0.2[W]となる。

これらの条件を満たすトランジスタとして、'2SB834'と、それとコンプリ メンタリな'2SD880'を使用した。

#### 7.2.6 出力部

 $Tr_3 \ge Tr_4$ のエミッタ抵抗  $R_1$ 、  $R_0$  は出力電流を制限し、 $Tr_3 \ge Tr_4$ の  $V_{BE}$ の温度変化を吸収する働きがある。ただし、0.5[]抵抗は入手できなかったため、1[]を並列接続した。

C<sub>4</sub>は直流成分をカットするためのコンデンサであるが、このコンデンサがス ピーカのインピーダンスとのハイパス・フィルタのカットオフとなる。

#### 7.3 製作

7.2 節で述べたことをふまえて設計した回路を、第五章に記述した順序に沿って、製作していく。

以下に、マスクパターン、完成したプリント基板、完成した回路、の順に写 真を示す。



写真 7-1 B級コンプリメンタリ・プッシュプル・エミッタフォロア回路 のマスクパターン



写真 7-2 完成したプリント基板



#### 写真 7-3 完成した回路

#### 7.4 測定

完成した回路について、以下のことを測定する。 それぞれ、入力電圧の変化に対する

・オシロスコープによる波形

- ・出力電圧
- ・出力電力
- ・ひずみ率(THD)
- S/N
- ・周波数特性

また、アンプICとして有名な「380アンプ」、「386アンプ」についても同様の測定を行い、製作した回路と比較する。

まず、製作した回路についての、オシロスコープの波形を写真 7-4,5,6,7 に示 す。

その次に、出力電圧、出力電力、THD、S/N の測定値を表にまとめたものを 表 7-1 に示す。



写真 7-4 入力波形



写真 7-5 出力波形

位相は逆相、電圧増幅率は11.97 倍と、設計仕様の10 倍を満たしている。 写真7-6 は下側の波形がクリップした波形であり、写真7-7 は上下ともにクリ ップしたものである。この回路は下側が先にクリップし始めた。その理由は、 バイアス点の取り方が設計の4.5[V]よりもわずかに下回ったためであると考え られる。



写真 7-6 下側がクリップした波形 (IN<sub>Vpp</sub>=0.427[V]、OUT<sub>Vpp</sub>=4.80[V])



写真 7-7 上下ともクリップした波形 (IN<sub>Vpp</sub>=0.536[V]、OUT<sub>Vpp</sub>=5.34[V])

| 入力電圧    | 出力電圧[V] | 出力電力[W] | THD[%] | S/N[dB] |
|---------|---------|---------|--------|---------|
| [mV]    |         |         |        |         |
| 10.000  | 0.13170 | 0.0     | 0.3500 | 56.1    |
| 2.0000  | 0.25410 | 0.01    | 0.5400 | 60.4    |
| 30.648  | 0.39800 | 0.02    | 0.5700 | 65.6    |
| 40.080  | 0.52010 | 0.03    | 0.4800 | 66.0    |
| 49.340  | 0.65360 | 0.05    | 0.4000 | 69.0    |
| 60.750  | 0.79950 | 0.08    | 1.450  | 70.3    |
| 70.060  | 0.91010 | 0.10    | 2.920  | 73.0    |
| 80.270  | 1.0362  | 0.13    | 4.380  | 74.0    |
| 90.000  | 1.1540  | 0.17    | 5.690  | 75.0    |
| 100.70  | 1.2901  | 0.21    | 7.190  | 75.0    |
| 109.44  | 1.3851  | 0.24    | 7.930  | 76.4    |
| 120.01  | 1.5085  | 0.28    | 8.850  | 76.7    |
| 130.38  | 1.6191  | 0.33    | 9.610  | 78.0    |
| 140.41  | 1.7212  | 0.37    | 10.27  | 78.0    |
| 150.540 | 1.8197  | 0.41    | 10.86  | 78.0    |

表 7-1 B級コンプリメンタリ・プッシュプル・エミッタフォロア回路特性

この表より解ることとして、オシロスコープで観測したとおり、電圧増幅率 は約12倍(性格には11.97倍)になっている。

次に、周波数特性を測定する。

周波数特性とは、低域、高域それぞれ - 3[dB]下がったときの周波数を、それ ぞれのカットオフ周波数といい、低域のカットオフ周波数から、高域のカット オフ周波数までの範囲ならば安定した増幅を得ることができる、という特性の ことである。

表 7-1 より、THD が一番小さいのは、入力電圧が 49.34[mV]のときである。

表 7-2 を見ると低域のカットオフ周波数は 13[Hz]、高域のカットオフ周波数 は今回使用した機器での限界(110[kHz])を超えているため、測定不能であっ た。しかし、シミュレーションでの測定結果として、11.3[Hz]から、320[kHz] という結果を得ている。

| 周波数[Hz] | 増幅率-定領域からの変動[dB] |
|---------|------------------|
| 5.00    | -11.2            |
| 7.00    | -7.30            |

| 10.0  | -4.40  |
|-------|--------|
| 11.0  | -3.80  |
| 12.0  | -3.30  |
| 13.0  | -2.90  |
| 14.0  | -2.60  |
| 15.0  | -2.30  |
| 20.0  | -1.50  |
| 30.0  | -0.700 |
| 40.0  | -0.300 |
| 50.0  | -0.200 |
| 100   | -0.100 |
| 500   | 0.00   |
| 1.00k | 0.00   |
| 10.0k | 0.00   |
| 50.0k | -0.300 |
| 80.0k | -0.800 |
| 100k  | -1.10  |
| 110k  | -1.30  |

表 7-2 周波数特性

表の 0[dB]とは、「増幅率一定領域」つまり、21.56[dB](11.97 倍)のことである。

次に、表より各パラメータをグラフ化する。グラフ化するのは

- 周波数特性
- ・入力電圧 出力電圧
- ・ 出力電圧 THD
- ・ 出力電圧 S/N
- ・ 出力電力 THD

の5つである。









次に、380アンプについても同様の事を行う。

しかし、周波数特性については、今回使用した機器の範囲内においてはまった くひずみがなかったため、その点については表・グラフともに作成していない。 増幅率は約20倍に設定してある。

| 入力電圧[mV] | 出力電圧[V] | 出力電力[W] | THD[%]  | S/N[dB] |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| 9.9750   | 0.18590 | 0.0     | 0.06660 | 32.1    |
| 20.000   | 0.36950 | 0.020   | 0.04520 | 38.2    |
| 30.197   | 0.55710 | 0.040   | 0.03880 | 41.6    |
| 40.140   | 0.73990 | 0.070   | 0.09480 | 44.3    |
| 50.480   | 0.92700 | 0.11    | 0.1548  | 46.2    |
| 60.190   | 1.0970  | 0.15    | 0.1449  | 47.6    |
| 70.200   | 1.2782  | 0.20    | 0.1295  | 48.8    |
| 80.490   | 1.4714  | 0.27    | 0.1796  | 50.1    |
| 90.000   | 1.6492  | 0.34    | 0.2071  | 51.1    |
| 99.770   | 1.8297  | 0.42    | 0.2422  | 52.0    |
| 109.45   | 2.0217  | 0.51    | 0.6471  | 52.8    |
| 119.46   | 2.1392  | 0.57    | 3.976   | 53.3    |
| 129.58   | 2.2197  | 0.62    | 7.332   | 53.5    |
| 140.45   | 2.2856  | 0.65    | 10.45   | 53.7    |
| 150.52   | 2.3359  | 0.68    | 12.96   | 54.1    |

表 7-3 380 アンプ特性





続いて、386 アンプについても行った。これも 380 アンプと同じく、周波数特性は機器の限界のため測定不可能であった。増幅率は約 20 倍に設定してある。

| 入力電圧[mV] | 出力電圧[V] | 出力電力[W] | THD[%] | S/N[dB] |
|----------|---------|---------|--------|---------|
| 10.000   | 0.21330 | 0.0100  | 1.460  | 40.2    |
| 19.980   | 0.42050 | 0.020   | 1.149  | 46.7    |
| 30.170   | 0.63550 | 0.050   | 1.041  | 50.2    |
| 40.110   | 0.82680 | 0.090   | 0.9989 | 53.0    |
| 50.430   | 1.0381  | 0.13    | 0.9541 | 54.4    |
| 60.110   | 1.2246  | 0.19    | 0.9113 | 55.2    |
| 69.930   | 1.4200  | 0.25    | 0.8546 | 57.0    |
| 80.410   | 1.6236  | 0.33    | 0.7917 | 58.1    |
| 89.910   | 1.8185  | 0.41    | 0.7220 | 59.0    |
| 100.94   | 2.0484  | 0.52    | 0.6551 | 60.5    |
| 110.62   | 2.2299  | 0.62    | 1.384  | 61.0    |
| 119.32   | 2.3309  | 0.68    | 4.344  | 61.3    |
| 129.43   | 2.4123  | 0.73    | 7.819  | 61.7    |
| 140.29   | 2.4771  | 0.77    | 11.39  | 62.1    |
| 150.37   | 2.5256  | 0.80    | 13.83  | 62.3    |

表 7-4 386 アンプ特性









7.5 考察

今回、自ら製作したアンプと、市販のアンプを測定、グラフ化することにより比較してみたが、出力・周波数特性では劣るものの、THD では 386 アンプより、S/N では両アンプを凌駕していた。

これらのことより、やはり本実験を行った意味があり、トランジスタでも IC に遜色ない程のアンプを製作できることが解った。



### 写真 7-8 実際に音が出ている様子

### 第八章 結論

本研究では、トランジスタという、電子回路においては最も基本となる素子 を用いて、その役目である増幅回路、スイッチング回路の両方を製作した。

マルチバイブレータでは、ある時その原理に魅了され、ついには自ら発振周 期を自在に変化させることができるようにまでなった。また、既存の NPN 型だ けではなく、少なくとも参考文献には掲載されていない PNP 型や、エミッタ・ バイアス型など、オリジナルなものを作成できたのはうれしく思う。

プリント基板を製作するにあたり、ものづくりの面白さ、そして完成したと きの喜びを実感できたことは、何か大きな自信につながっていった。

そして、B級コンプリメンタリ・プッシュプル・エミッタフォロア回路では、 まず、今まで自分の興味のなかった「アンプ」という世界に興味を持ち始め、 そして音が出たあの瞬間の感動は忘れられないものとなった。

本研究の中で、やはり「自分でものを考え、そして何かを生み出す」ことの 大切さ、そしてそれが達成されたときの感動を改めて見出せたことを忘れずに これからをすごしていきたい。

### 参考文献

- ・鈴木雅臣 著 「定本トランジスタ回路の設計」(CQ出版)
- ・井上誠一 著 「作って遊ぶ電子回路工作入門」(総合電子出版)
- ・岡山努 著 「アナログ電子回路設計入門」(コロナ社)
- ・加銅鉄平 著 「オーディオの基礎知識」(オーム社)
- ・黒田徹 著 「はじめてのトランジスタ回路設計」(CQ出版)
- ・白土義男 著 「やさしいアナログ回路の実験」(東京電機大学出版局)

・トランジスタ技術編集部 編 「わかる電子回路部品完全図鑑」 (CQ出版)

- ・昨年の卒業論文
  - ・長谷川和也氏
  - 「MicroCap5/CQを用いたA級エミッタフォロワ回路の設計と製作」
  - ・島真秀氏
  - 「MicroCap5/CQを用いたオペアンプの設計と製作」
  - ・梅村佳克氏
  - 「MicroCap5/CQ を用いたプッシュプルエミッタフォロア回路の設計 と製作」
  - ・久保各致氏
  - 「MicroCap5/CQを用いたアクティブフィルターの設計と製作」

### 謝辞

本研究と論文の作成にあたり、終始懇切丁寧なご指導、ご指示を賜りました 高知工科大学電子・光システム工学科 綿森道夫助教授に心より最大級の感謝の 意を表します。

また、本研究の遂行にあたり、親切にご指導下さった河津哲教授に深い感謝 の意を表します。

高知工科大学電子・光システム工学科在学中にご指導を賜った原央学科長に 感謝いたします。

最後に高知工科大学電子・光システム工学科在学中、本研究の実験遂行、各 過程で終止ご厚意、ご協力をいただいた高知工科大学電子・光システム工学科 矢野政顕教授、神戸宏教授、平木明夫教授、成沢忠教授、畠中兼司教授、河東 田隆教授、西本俊彦教授、山本哲也教授、野中弘二助教授、橘昌良助教授、八 田章光助教授、井上昌昭助教授、関口晃司助教授、笠原泰講師、武田光由実験 講師、西田謙助手の方々には重ねて感謝の意を述べさせていただきます。

また、本研究を遂行するにあたり細部にわたり実験にご協力いただいた大学 院生 久保格致氏、新田敏弘氏、吉村紘明氏、A255 教室にて苦しいときも支え あった仲間に感謝いたします。