

はじめに

MetroNotes をお手にとっていただき誠にありがとうございます。

本誌「MetroNotes (メトロノーツ)」は、サークル「首都大オーディオ研究会」が日々の研究の成果を、自作オーディオファンや電子工作ファンの皆様に向けて発行する同人雑誌です。

今回のテーマは『オペアンプからの卒業! 簡単にできるディスクリート・ヘッドホンアンプ製作!!』になります。今日ではオペアンプ IC が完全に普及しており、今どきディスクリートでヘッドホンアンプを作るという電子工作はほとんど廃れてしまっているように思えます。しかし、オペアンプ IC は誰かが作った回路であるため、そのオペアンプを使ったヘッドホンアンプの音は、そのオペアンプ設計者の技術に委ねられてしまい、自分で音をどうこうするといったことはほとんどできません。

それと比べて、ディスクリート部品でヘッドホンアンプを作るという試みは、100 %自分の技術で一から自分の音を作りあげることになります。自分だけのオリジナルの音を聴いてみたい、そう思う自作オーディオファンの方はぜひ本書を参考にディスクリートのアンプを作ってみてください。きっと、オペアンプでアンプを作るよりも、はるかに楽しくてやりがいのある経験になると思います。

もしヘッドホンアンプ回路の内容が難しく、何を言っているのかさっぱりわからないという場合には、本誌後半の付録『例題でわかる! オリジナルアンプ設計 (基本編)』を一読してみてください。この付録は「MetroNotes2016 年冬号」に掲載した記事で、アナログ電子回路初心者に向けてトランジスタの基本動作をできる限り丁寧に説明したものとになっています。

最後になりましたが、ここで本誌作成において協力してくださった皆様に深く感謝を申し上げ、結びの言葉とさせていただきます。

首都大オーディオ研究会代表 Task

目次

はじめに	1
オペアンプからの卒業!簡単にできるディスクリート・ヘッドホンアンプ製作	5
第1章 製作前の準備	5
1.1 ヘッドホンアンプとは？	5
1.2 製作の流れ	5
1.3 アンプにつなぐ機器	6
第2章 ヘッドホンアンプ回路の構成と役割	7
2.1 回路の構成	7
2.2 全体の説明	7
2.3 初段の説明	10
2.4 励振段の説明	12
2.5 出力段の説明	13
第3章 ヘッドホンアンプ回路の設計	16
3.1 回路設計のやり方	16
3.2 使用するトランジスタ	16
3.3 電源電圧の設定	17
3.4 出力段の電流値設定	18
3.5 初段の電流値設定	19
3.6 励振段の電流値設定	20
3.7 出力段の電圧・抵抗値の設定	21
3.8 励振段の電圧・抵抗値の設定	22
3.9 初段の電圧・抵抗値の設定	23
3.10 コンデンサの値	24
第4章 ヘッドホンアンプ回路の解析	25
4.1 解析とは	25
4.2 初段の解析	25
4.3 励振段の解析	27
4.4 出力段の解析	29
4.5 全体の解析	32

4.6	負帰還回路の解析	32
第 5 章	位相補償のやり方	36
5.1	基本的な位相補償	36
5.2	超高域の発振を防ぐには	38
第 6 章	ヘッドホンアンプの完成	40
6.1	回路の調節	40
6.2	実装の注意点	40
6.3	ヘッドホンアンプ製作を終えて	41
参考文献		43
付録『例題でわかる！オリジナルアンプ設計 (基本編)』		45
第 7 章	トランジスタの動かし方	45
7.1	はじめに	45
7.2	トランジスタ回路の解析方法	45
7.3	ダイオードの動作	46
7.4	ダイオードの回路設計	47
7.5	トランジスタの動作	48
7.6	トランジスタの直流回路設計	51
第 8 章	交流の扱い方と基本増幅回路	53
8.1	交流の考え方	53
8.2	交流計算のためのツール	53
8.3	エミッタ接地回路の解析	55
8.4	エミッタ接地回路の設計	58
8.5	アンプ回路の性能の評価	62
8.6	コレクタ接地回路の解析	65
8.7	エミッタ接地回路 + コレクタ接地回路の設計	67
8.8	おわりに	72
8.9	参考文献	72
あとがき		74

オペアンプからの卒業!
簡単にできる
ディスクリート・ヘッドホンアンプ製作

第1章

製作前の準備

1.1 ヘッドホンアンプとは？

●ヘッドホンアンプの必要性

一般的にアンプというスピーカーを駆動させるための増幅器というイメージが大きいですが、実はヘッドホンやイヤホンに対してもアンプをつなぐことによって、音質の改善に大きく役立ちます。

ウォークマンといった DAP(デジタルオーディオプレイヤー) に内蔵されているアンプは、小型・省エネ・コスト削減・デジタル部との干渉といったさまざまな理由により、音質があまり良くない場合が多いです。そこで DAP のライン出力からヘッドホンアンプの入力につながることで、質の悪い DAP 内蔵アンプを避け、音質の劣化を防ぐことができます。

●ヘッドホンアンプはスピーカーアンプより簡単！

スピーカーアンプは、部屋中に音を響き渡らせるための出力を稼ぐために、多量の電流を必要とします。そのため、スピーカーアンプを設計する場合は、大電流が流れるときに発生する熱の影響をよく考えなければなりません。

しかし、ヘッドホンは耳のすぐ近くで音を鳴らすため、スピーカーのように大出力の信号を必要とせず、大きな電流は流れません。そのおかげで、ヘッドホンアンプはスピーカーアンプと違ってたいした放熱がなく、その影響を考慮せずに作成することができます。

このように、ヘッドホンアンプは熱の影響を無視できるため、アンプ自作初心者でも簡単に作ることができます。もし、最終的にスピーカーアンプを作りたい人でも、手始めに何か一つヘッドホンアンプを作ってみることをおすすめします。

1.2 製作の流れ

アンプ製作には決まった流れというものはありません。アンプの自作は個人の趣味の領域ですから、それぞれが作りたいような道順をたどればよいし、どのような道順であったとしても音が鳴りさえすれば OK の世界です。

ここでいう製作の流れは、あくまで私個人の製作の流れです。最終的に完成すれば問題ないので、もしこの流れに気に入らないところがあれば順序を変えたりして、自分の好きなやり方でやってみてください。

(1) 回路の構成を考える

まず作りたい回路を頭の中で考えてみます。日頃から回路のことばかり考えているような熟練の技術者は簡単に頭に思い浮かぶと思いますが、アンプ自作を始めたばかりの人は、きっとこれに苦労するでしょう。

一から回路構成を考えるのは正直不可能なので、インターネットや本を漁って回路構成を模倣するのがよいでしょう。模倣といっても、アンプ全体の構成の数はかなり少なく、市販品を含めた回路はほとんど似たり寄ったりの模倣品なので気にする必要はありません。本書の差動2段回路も誰かが作った素晴らしい構成で、さまざまなアンプに使用されています。

(2) 回路を描く

構成をもとに、回路を紙に書いてみます。このとき、位相補償といった付加的な回路はまだ描かなくてよいですが、直流的にはきちんと動作するような回路まで細かく描くようにしてください。

(3) 直流電流を決める

各トランジスタ・ダイオードに流す電流を決めます。この電流値の設定は非常に重要で、アンプの性能を大きく左右するため、適当に決めてはいけません。

(4) 直流電位と抵抗値を決める

トランジスタ・ダイオードは電流値と電圧値が 1 対 1 で対応しているので、直流電流を決めてあげると勝手にその電圧値も決まります。そこで、トランジスタがきちんとその電圧になるように抵抗の値も決めてあげるといった作業をします。これで回路の設計は終わりです。

(5) 低周波解析で回路の基本的性能を調べる

設計したアンプ回路の低周波解析を行い、増幅度や入出力インピーダンスといった基本的な回路の性能を調べます。ここでもし、性能が足りないと思ったら回路を変更し、もう一度直流設計をしてください。

(6) 高周波解析で位相補償を施す

低周波解析が済んだら、次は高周波解析です。この高周波解析は回路の性能を調べるというよりも、発振しないようにきちんとした位相補償の値を決定するために行います。

本書では、この位相補償の決定は LTspice によるシミュレーションを用いて決めていきます。

(7) 実際に製作して完成！

設計→解析まで済んで、なにも問題がなかったら後は作るだけです。音が出れば完成！

1.3 アンプにつなぐ機器

●前段につなぐ機器

アンプの前には D/A コンバータやアナログ信号出力のある信号源をつなぎます。このとき留意しなければならないのは、この前段の機器の最大出力インピーダンスと最大出力電圧です。

DAC などの出力インピーダンスは、製品によって大きく異なり、オーディオ用では小さいもので数 Ω 、大きいものでは数百 Ω にもなります。つなげたい機器が既に決まっている場合はその値で計算すればよいですが、いろいろな機器につなげたりとアンプに汎用性を持たせたい場合は、つなぐであろう機器の最大の出力インピーダンスで回路計算してください。ここではつなぐ信号源の最大インピーダンス R_S は、

$$R_S = 600 \Omega \quad (1.1)$$

として計算を進めます。

次に最大出力電圧を調べます。携帯用のプレイヤーなどの最大出力電圧は実効値 1V、据え置き DAC は実効値 2V 以上が多いです。アンプに汎用性を持たせたい

場合は、つなぐ機器の最大出力電圧はできるだけ小さい値で計算してください。ここでは、信号源の最大出力電圧 v_s は

$$v_s = 1 \text{ V}_{\text{rms}} \quad (1.2)$$

として計算していきます。

●後段につなぐ機器

アンプの後段にはもちろんスピーカーやヘッドホンをつなぎます。ここで重要なのはそのインピーダンス値で、スピーカーは $4\Omega \sim 8\Omega$ と基本的に一定ですが、ヘッドホンは $8\Omega \sim 300\Omega$ と幅が広いです。このインピーダンス値が小さいと回路に悪影響がある場合が多いので、回路計算ではできるだけ小さなインピーダンス値で計算します。ここではヘッドホンの対応インピーダンスの最低値 R_L を

$$R_L = 16 \Omega \quad (1.3)$$

として計算していきます。

第2章

ヘッドホンアンプ回路の構成と役割

2.1 回路の構成

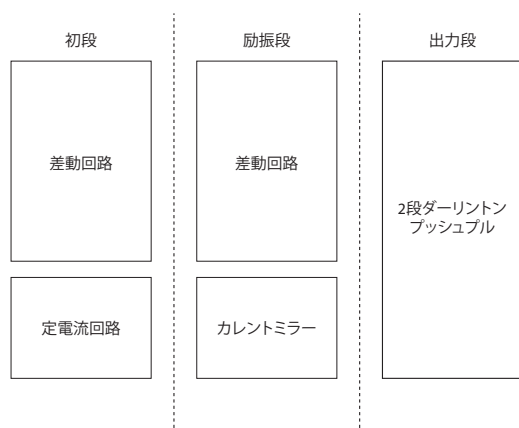


図 2.1 回路の構成図

今回の回路の構成図を図 2.1 に示します。アンプの設計は、基本的に初段・励振段・出力段の3段構成からなり、初段と励振段で電圧増幅を担い、出力段でアンプの出力インピーダンスを下げる役割を担います。

●基本構成は差動2段回路

今回のヘッドホンアンプの回路構成は「差動2段回路」と呼ばれる回路用います。差動2段回路は、初段と励振段の両方に差動回路を配置する構成で、自作アンプではよく使われる構成となっています。

差動2段回路の特徴は、差動回路を2段つなげることによってアンプの CMRR(同相信号除去比) が大きく向上することです。CMRR の高い回路は、オフセットといった余計な成分が出にくくなり、理想的なオペアンプ動作に近づけることができます。

また差動回路は、エミッタ接地増幅回路より熱の変動を受けにくいので、アンプは安定に動作してくれます。

●回路図を描いてみる

構成図をもとに、図 2.2 に回路を描いてみました。アナログ回路に慣れていないと、かなり複雑な回路のように思えますが、実は大まかに見ると簡単な小さな回路の集合体であり、それを意識することで回路がだんだん見えるようになっていきます。

ではさっそく回路の全体像と各部の役割をみていきましょう。

2.2 全体の説明

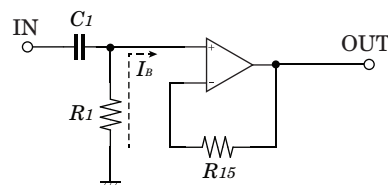


図 2.3 全体回路をオペアンプを用いて描いた等価回路

●オペアンプで描くとボルテージフォロワ

オーディオアンプは所詮オペアンプ回路と同じですので、全体の回路はオペアンプを用いて図 2.3 のように描くことができます。

よく注意してこの等価回路をみると、OUT 端子の出力電圧は R_{15} を介して全帰還されています。つまり、この構成は増幅率1倍のボルテージフォロワということがわかります。

ヘッドホンアンプは、スピーカーと違って電圧増幅の必要がない場合が多いため、このようなボルテージフォロワの構成をとっています。無駄に増幅率をかけても、結局ボリュームを絞った状態で聞くことになってしまうので、ノイズが増加してしまい、音をきれいに出すというアンプの本質を欠いてしまうことになります。

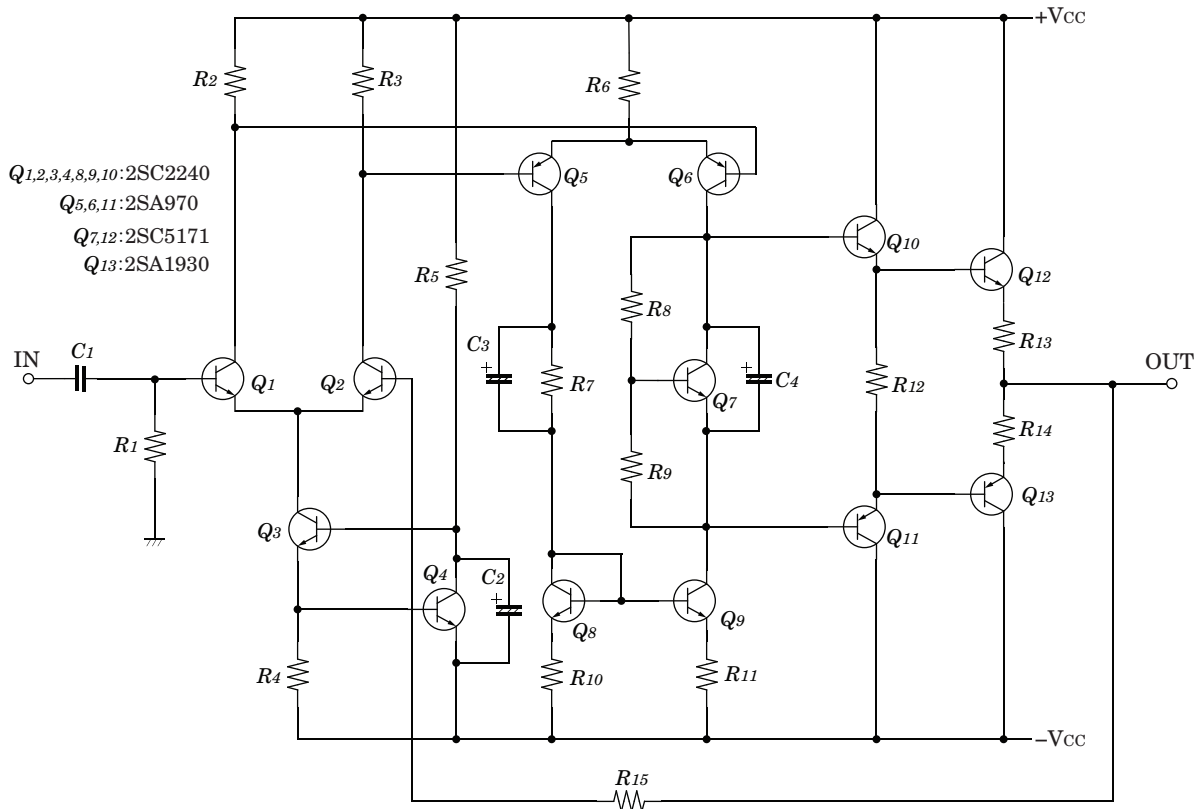


図 2.2 全体の回路図 (位相補償などはなし)

●入力抵抗・コンデンサの役割

C_1 は直流を排除する結合コンデンサで、今回のようなバイポーラトランジスタ入力のアンプでは必要不可欠です。もしこのコンデンサがないと、 Q_1 のベース直流電流 I_B がボリュームや信号源機器に流れてしまい、それらを壊してしまう恐れがあります。

しかし、+端子にコンデンサを直列に入れてしまうとベース電流 I_B を供給できないので増幅器は動作しません。そこで図のように並列に R_1 を入れてあげることで、GND から R_1 を通ってベース電流 I_B を供給することができます。

●入力インピーダンスの決定

R_1 はベース電流を供給するだけでなく、アンプの入力インピーダンスの値にもなってしまいます。なぜなら、オペアンプは負帰還の効能で入力インピーダンスはほぼ無限大となり、入力端子から見た抵抗は R_1 のみに見えるからです。

入力インピーダンスの値は $1k\Omega$ と小さいと、信号は

減衰して目標の電圧が得られませんし、 $100k\Omega$ と大きすぎてもノイズの影響を受けやすくなります。また、この R_1 の値は後述する R_{15} にも大きく左右されるのであまり大きくできません。そこで、ここでは

$$R_1 = 10\text{ k}\Omega \quad (2.1)$$

と設定することにします。

●ハイパスフィルタの形成

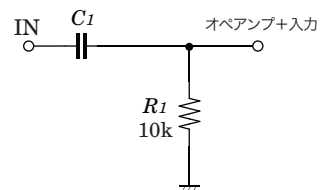


図 2.4 入力ハイパスフィルタになる

入力端子をよく見ると、結合コンデンサ C_1 と抵抗 R_1 でハイパスフィルタが形成されており、低周波帯がカットされてしまうことがわかります。

可聴領域の 20Hz～20kHz でカットされると音質に大きな影響をもたらすため、カットオフ周波数 f_c は 20Hz 以下に設定すればよく、

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \leq 20 \text{ Hz} \quad (2.2)$$

という式が立てられます。

上式を C_1 について解くと、 $C_1 \geq 0.80\mu\text{F}$ となります。これより、 C_1 を

$$C_1 = 1 \mu\text{F} \quad (2.3)$$

と設定します。すると、逆にこのときのカットオフ周波数は 16Hz となります。

実際のところ、 C_1 の値は 20Hz 以下のカットオフ周波数とこだわらず、自分の音質の好みで決めて良いと思います。例えば、低音より高音を気持ちよく聴きたい人はカットオフ周波数を 100Hz といった高めの値に設定することによって自分好みに仕上げることができます。

さらに低域までカットオフ周波数を低くしたいからといって、 C_1 に電解コンデンサを使うのは避けたほうがよいでしょう。信号に直列に電解コンデンサが入ると、音質は大きく落ちてしまい、オーディオ的にはあまり好ましくありません。

●オフセットをなくすには

学校の電子回路の教科書には、ボルテージフォロワ回路は出力端子からそのまま導線で－端子につながますが、この方法は入力にほとんど電流が流れない FET 入力のとき有効です。今回の入力である Q_1 と Q_2 はバイポーラトランジスタですので、ボルテージフォロワであっても R_{15} の帰還抵抗は必須であり、これがないと出力に大きなオフセット電圧が出てしまいます。

ではきちんとオフセットをなくすには R_{15} の値はどうすればよいのかというと、オペアンプの＋端子から見た直流インピーダンスと－端子から見た直流インピーダンスを等しくすればよいです。

この回路では、＋端子から見たインピーダンスは R_1 、－端子から見たインピーダンスは R_{15} ですので、オフセットをなくすには、

$$R_{15} = R_1 = 10 \text{ k}\Omega \quad (2.4)$$

とすればよいです。

あまり R_{15} の値が大きすぎると、 R_{15} から発生する熱雑音が回路の S/N を大きく減少させてしまいます。正

直なところ、10k Ω でも熱雑音が結構影響してしましますが入力インピーダンスの設定との兼ね合いでこのくらいが妥当でしょう。

●出力ワット数

電圧増幅なしのボルテージフォロワで本当にヘッドホンが駆動できるのかを調べてみましょう。

前章より入力信号は $v_s = 1V_{\text{rms}}$ としましたので、ボルテージフォロワより出力電圧 v_o も $1V_{\text{rms}}$ となります。そして、ヘッドホンの負荷を $R_L = 16\Omega$ とすると、出力ワット数 P_o は、

$$P_o = \frac{v_o^2}{R_L} = \frac{1^2}{16} = 62.5 \text{ mW} \quad (2.5)$$

と導出できます。

ヘッドホンの感度にもよりますが、20mW で音楽を聴くと難聴になると言われているので、62.5mW は 16 Ω のヘッドホンを駆動するのに十分な出力と言えます。64 Ω では 16mW の出力ですので、これより大きいインピーダンスのヘッドホンを駆動する場合には、回路の増幅率を上げるか、信号源電圧が 1V より大きい機器に取り替える必要があります。

●増幅率を出したいとき

信号源電圧が小さかったり、ヘッドホンのインピーダンスが大きい場合はボルテージフォロワでなく、アンプに電圧増幅率をもたせる必要があります。そのときは図 2.5 のように、帰還回路に R_{16} と C_5 を付け足します。

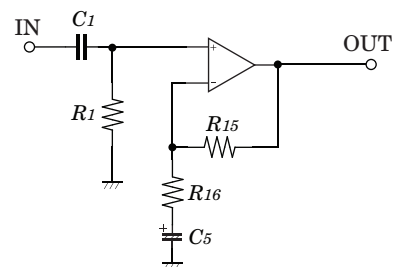


図 2.5 非反転増幅器とする場合のオペアンプ等価回路

この回路はオペアンプの非反転増幅回路ですので、増幅率 A は

$$A = 1 + \frac{R_{15}}{R_{16}} \quad (2.6)$$

で決定されます。

C_5 があるおかげで、この回路は直流的にみるとボルテージフォロワとなります。つまり、オフセットをゼロ

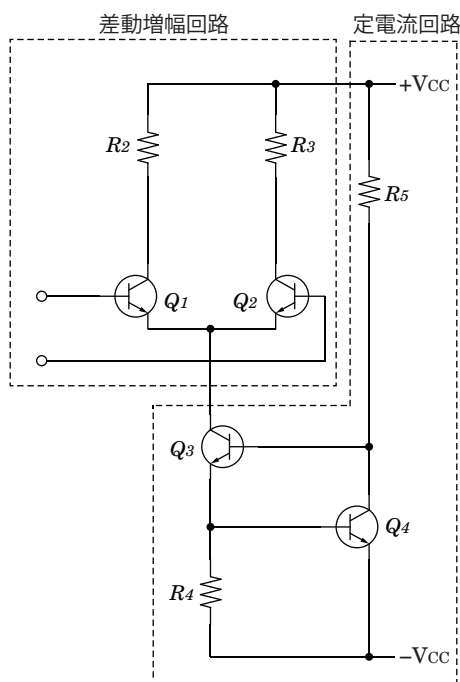


図 2.6 初段の回路図

にするためには式 (2.4) がそのまま使うことができ、比較的大きな入力インピーダンスをもたせることができます。ただし、周波数特性を考えると C_5 の値は比較的大きな値にする必要があり、選択するコンデンサは必然的に電解コンデンサとなってしまいます。

帰還回路に電解コンデンサが入って音質が落ちるのが嫌だという人は、 C_5 を取り払って R_{16} の下端をそのまま接地しても構いません。しかし、このとき $-$ 端子から見たインピーダンスは R_{15} と R_{16} の並列になるので、オフセットをゼロにするために R_1 は

$$R_1 = R_{15} // R_{16} \quad (2.7)$$

とする必要があります。上式より、入力インピーダンスである R_1 の値はコンデンサ C_5 を入れたときよりも小さくなってしまいます。

2.3 初段の説明

●初段の構成

初段の回路だけを抜き出すと、図 2.6 のようになります。 C_2 は交流のみを短絡させる役割を持ちますが、回路の理解の上ではあまり意味を持たないので今回は無視しています。

上側の Q_1 , Q_2 のトランジスタが向かい合っている回

路が差動増幅回路で、下側の Q_3 , Q_4 で構成されている回路が定電流回路です。

初段は一応電圧増幅の役割を担いますが、それ以上に負帰還を理想的にかけられるような「引き算」の演算ができることが重要です。そして、図のように差動共通エミッタ部に定電流回路を挿入することによって、差動回路の本質である「引き算」を誤差なく理想的に演算することができるようになります。

●差動増幅回路の大信号特性

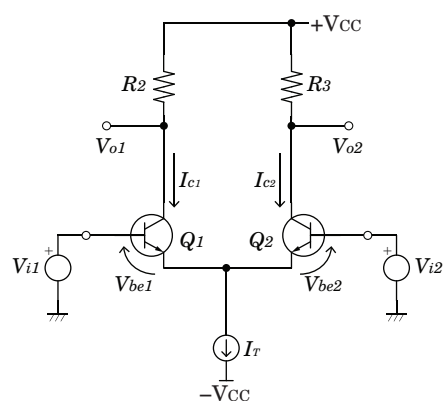


図 2.7 初段の回路図

ここでは、基本中の基本回路である差動回路がどのような伝達特性を持つのかを考えていきます。

図 2.7 のように、定電流回路は定電流記号に簡略化でき、そこに電流 I_T を流すものとします。また、 Q_1 , Q_2 のベース端子にそれぞれ電圧源 V_{i1} , V_{i2} を挿入します。

図より、共通エミッタ部の電圧は

$$V_{i1} - V_{be1} = V_{i2} - V_{be2} \quad (2.8)$$

と書けます。ここで入力間の電圧を、 $V_{id} = V_{i1} - V_{i2}$ とおくと、式 (2.8) より V_{id} は

$$V_{id} = V_{be1} - V_{be2} \quad (2.9)$$

とも書けます。

そして、 Q_1 , Q_2 のコレクタ電流 I_{c1} , I_{c2} はトランジスタの特性式より、

$$\begin{cases} I_{c1} = I_{S1} e^{\frac{V_{be1}}{V_T}} \\ I_{c2} = I_{S2} e^{\frac{V_{be2}}{V_T}} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$(2.11)$$

となりますね。ここで、 I_{S1} と I_{S2} は Q_1 , Q_2 の飽和電流、 V_T は熱電圧を表します。