

5. トランジスタ増幅回路

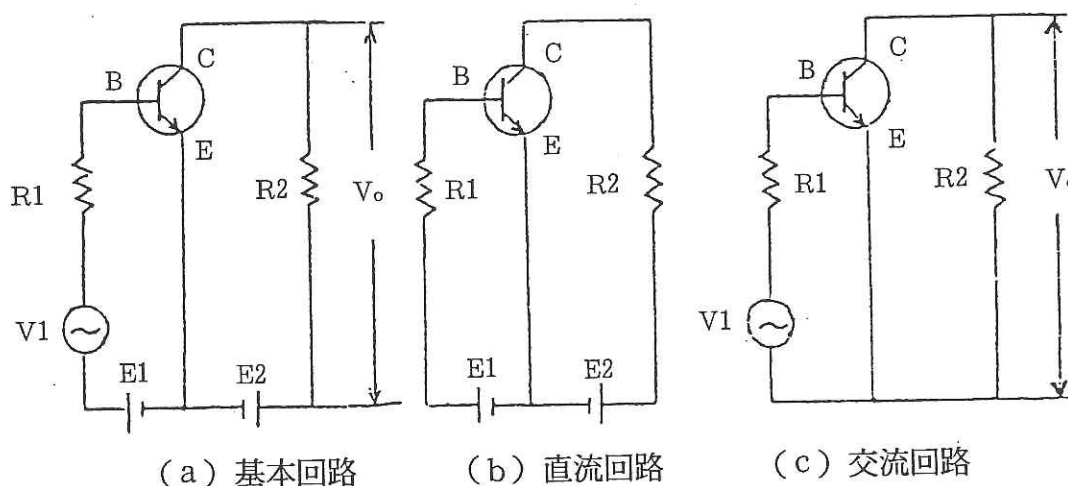
1. 目的

トランジスタによるCR結合形低周波電圧増幅回路の動作原理、および入出力・周波数特性の測定方法を修得する。

2. 理論

2-1) 基本回路とその動作

増幅回路は、直流電源の大きさによって決まる特性曲線上の一定の電圧・電流の値を中心にして、これを増幅しようとする交流信号が重っていると考える。従ってこのような増幅回路の働きを調べる場合、第1-1(b)図のように直流についての回路と図(c)のように増幅しようとする交流信号についての回路について分離して考えると解かりやすい。



第1-1図 増幅回路

2-2) バイアス回路

トランジスタに増幅作用をさせるために加える一定の直流電圧・電流をそれぞれバイアス電圧・電流という。これらは単にバイアスと呼ばれることもある。バイアス回路は温度の変化などによってコレクタ電流が変化しないことが望ましいが、一般にトランジスタは温度変化などにより I_{CBO} (コレクタしゃだん電流), V_{BE} , h_{FE} (エミッタ接地の直流電流増幅率) が変化し、それに対応して I_o も変化する。

a) I_{CBO} の変化

I_{CBO} はどのトランジスタでも接合部の温度が 10°C 上昇することにより約2倍に増加する。従って I_{CBO} の大きなゲルマニウム (Ge) トランジスタの場合に注意が必要

であるが、シリコン (Si) トランジスタでは I_{CBO} の値が小さいので無視できる場合が多い。

b) V_{BE} の変化

一定のベース電流を流すのに必要な V_{BE} は接合部の温度が 1°C 上昇する毎に約 2 mV 小さくなる。従って温度が上昇することによってコレクタ電流は増加する。Si トランジスタの特性の変化は、 I_{CBO} による影響は少ないが V_{BE} の変化によって影響を受ける。

c) h_{FE} の変化

h_{FE} は温度上昇と共に増加する。しかし、 I_{CBO} や V_{BE} の変化に比べると回路に与える影響は少ないので無視することが出来る。

2-3) バイアスの安定度

ある回路のバイアスが温度の変化に対して、どの程度安定であるかをその回路の安定度 S という量で判断する。一般に I_{CBO} 、 V_{BE} 、 h_{FE} の微小変化分 (ΔI_{CBO} 、 ΔV_{BE} 、 Δh_{FE}) に対するコレクタ電流 I_C の変化分 (ΔI_C) の割合を安定度 S といい、それぞれ次のように表す。

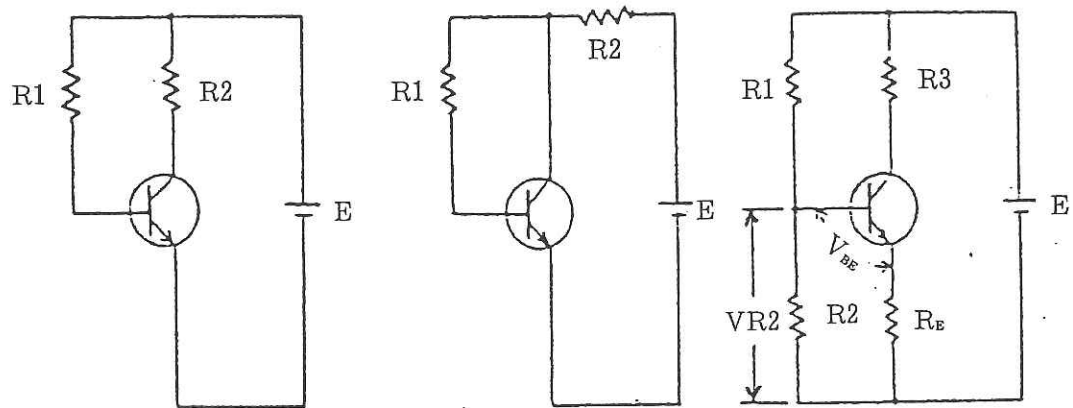
$$I_{CBO} \text{ に対する安定度} \quad S_1 = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CBO}}$$

$$V_{BE} \text{ に対する安定度} \quad S_2 = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}}$$

$$h_{FE} \text{ に対する安定度} \quad S_3 = \frac{\Delta I_C}{\Delta h_{FE}}$$

これから分かるように、 S が小さい程回路は安定である。また、Ge トランジスタの場合は I_{CBO} に対する安定度を、Si トランジスタの場合には V_{BE} に対する安定度を主に考える必要がある。

(2-2) 各種バイアス回路



(a) 固定バイアス回路 (b) 自己バイアス回路 (c) 電流帰還バイアス

第1-2図 各種バイアス回路

a) 固定バイアス回路

第1-2 (a) 図は固定バイアス回路といい、基本回路の二つの電源を一つの電源で共用したものである。

この回路では I_{CBO} が温度によって ΔI_{CBO} だけ変化すると、 I_C はおよそ、 $h_{FE} \cdot \Delta I_{CBO}$ だけ変動するために動作点の変動が大きく、ひずみが生じたり、熱暴走を生じることもある。その反面、回路が簡単であるので電源電圧の変動の影響が比較的小さいなどの利点がある。このため I_{CBO} の少ない Si トランジスタを使用する場合や、電源に電池を使用する場合などによく使われる。

b) 自己バイアス回路

第1-2 (b) 図は自己バイアス回路といい、固定バイアス回路に比べて比較的安定度の良好な回路である。

この回路で温度変化などによって、 I_C が増加するとコレクタ負荷抵抗 R_2 内の電圧効果が増加して、コレクタ電圧が低くなる。従ってベース電流が減少し、 I_C が増加するのを押える。

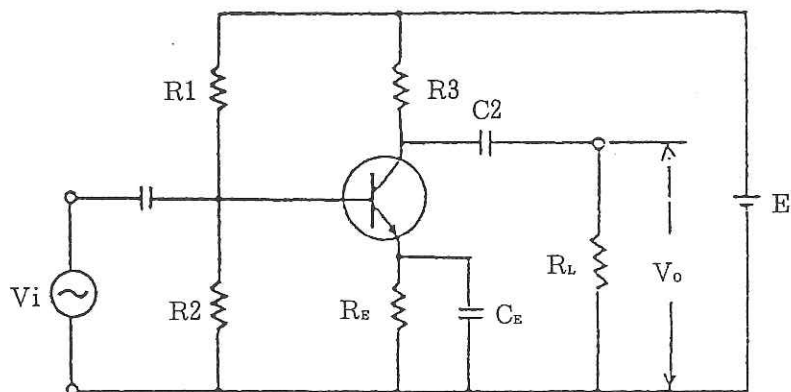
c) 電流帰還バイアス回路

第1-2 (c) 図は電流帰還バイアス回路といい実際に良く使われている回路である。 R_1 、 R_2 には I_B の10~100倍程度の電流を流し、 R_2 の両端の電圧 V_{R2} を一定に保ち、また、 I_E 、 R_E を V_{BE} の1~5倍の電圧になるようにすると

$$V_{BE} = V_{R2} - I_E \cdot R_E$$

であるから、 I_C が増加すると I_E 、 R_E も増加して V_{BE} が減少するので I_C の増加は押さえられる。この回路は、温度変化に対して安定な動作をすることができるが、むだな電力が消費される欠点がある。

3. CR 結合型増幅回路

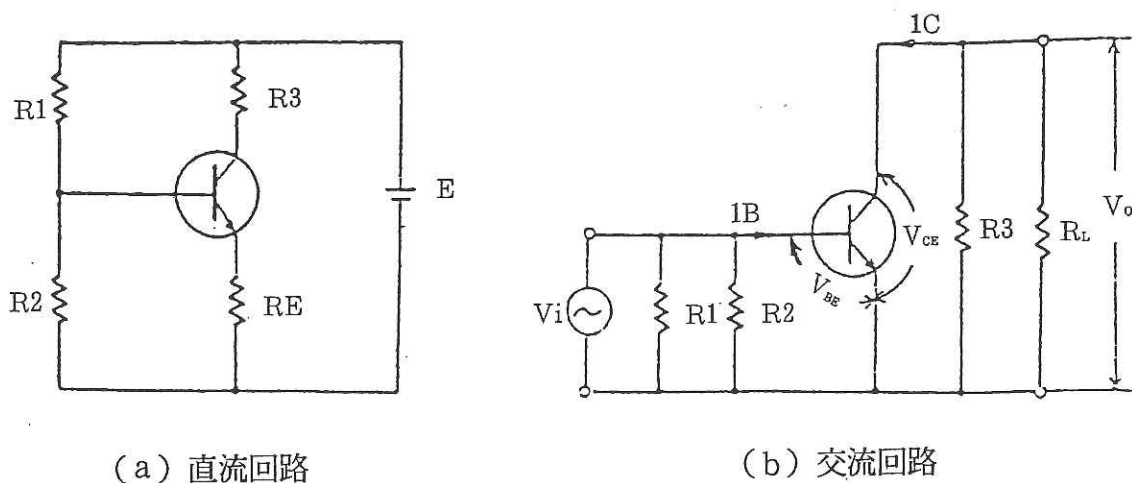


第1-3図 CR 結合型増幅回路

第1-3図はCR 結合形増幅回路である。この回路の動作や特性について調べてみよう。

3-1) 回路の動作

基本回路と同じように、直流回路（バイアス回路）と交流回路（信号回路）に分けて動作を考えてみよう。



(a) 直流回路

(b) 交流回路

第1-4図

1) 直流回路

第1-3図に於いて、直流についてだけの回路を考えると第1-4(a)図のようになる。これは電流帰還バイアス回路であるが、この回路によってバイアス値が決定される。尚、小振幅回路では雑音やひずみの関係から低電流の領域にバイアスを決定する。

b) 交流回路の動作

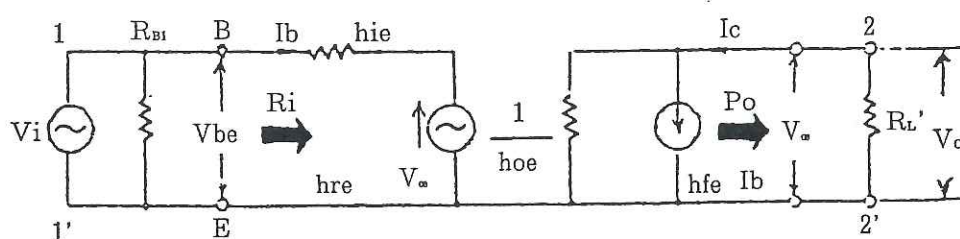
第1-3図の回路で、信号電流はC1を通りR1、R2とトランジスタのベースに分流する。このベースに流れ込んだ信号電流は、増幅されてコレクタ電流の大きな変化となり、R_E、C_E、R_L、R2、R3を流れる。この回路でC1、C2、C_Eは信号電流に対して十分小さいインピーダンスに成るように選ぶので、無視することができ、回路は第1-4(b)図のように簡単になる。

3-2) 等価回路による増幅度の計算

第1-4(b)図の増幅回路をトランジスタのhパラメータを用いて等価回路に書き直すと、第1-5図のようになる。但し、R_{B1}はR1とR2及びR_LはR_LとR3の並列合成抵抗である。この増幅回路の等価回路から、その増幅度を求めてみよう。入力電流I_b、入力電圧V_{be}、出力電流I_c、出力電圧V_{ce}の間には

$$V_{be} = h_{ie} I_b + h_{re} V_{ce}$$

$$I_c = h_{fe} I_b + h_{oe} V_{ce}$$



第1-5図 トランジスタ増幅回路

の関係があり、 $V_{ce} = -I_c R_L'$ であるから、上式はそれぞれ

$$V_{be} = h_{ie} I_b - h_{re} R_L' I_c$$

$$h_{fe} I_b = (1 + h_{oe} R_L') I_c$$

と表される。これより次式が導かれる。

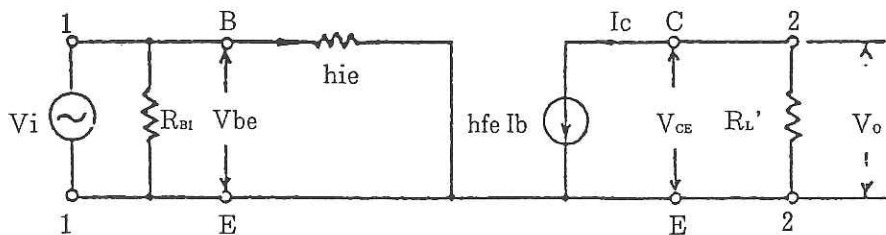
$$\text{電流増幅度 } A_i = \frac{I_c}{I_b} = \frac{h_{fe}}{h_{oe} R_L' + 1}$$

$$\text{電圧増幅度 } A_v = \frac{V_{ce}}{V_{be}} = \frac{h_{fe}}{h_{ie} \left(h_{oe} + \frac{1}{R_L'} \right) - h_{re}}$$

電力増幅度

$$A_o = \frac{V_{ce} I_c}{V_{be} I_b} = A_i \cdot A_v = \frac{h_{fe}}{h_{oe} R_L' + 1} \times \frac{h_{fe}}{h_{ie} \left(h_{oe} + \frac{1}{R_L'} \right) - h_{re} h_{fe}}$$

また、一般に $h_{re} V_{CE}$ [V] は非常に小さく、 $1/h_{oe}$ [Ω] は非常に大きい値になるので、これらを省略すると近似的に第1-6図のようになる。これを簡易等価回路という。



第1-6図 簡易等価回路による増幅回路

この回路によって増幅度を求めると次式のようなになる。

$$\left[\begin{array}{l} A_i = h_{fe} \\ A_v = h_{fe} \cdot R_L' / h_{ie} \\ A_P = h_{fe}^2 \cdot R_L' / h_{ie} \end{array} \right]$$

但し、 R_L' は R_L と R_3 の並列合成抵抗

また、増幅回路は一般にはデジベル [dB] という単位が使用される。

A_i 、 A_v 、 A_P のデジベル単位は次のように表される。

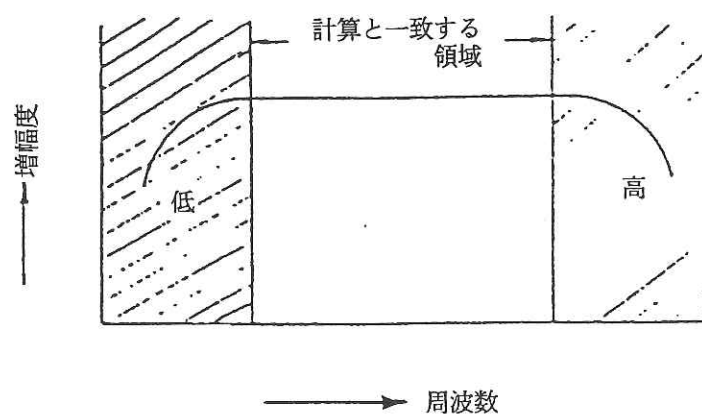
$$A_i = 20 \log_{10} A_i \text{ [dB]}$$

$$A_v = 20 \log_{10} A_v \text{ [dB]}$$

$$A_P = 10 \log_{10} A_P \text{ [dB]}$$

3-3 周波数による増幅度の変化

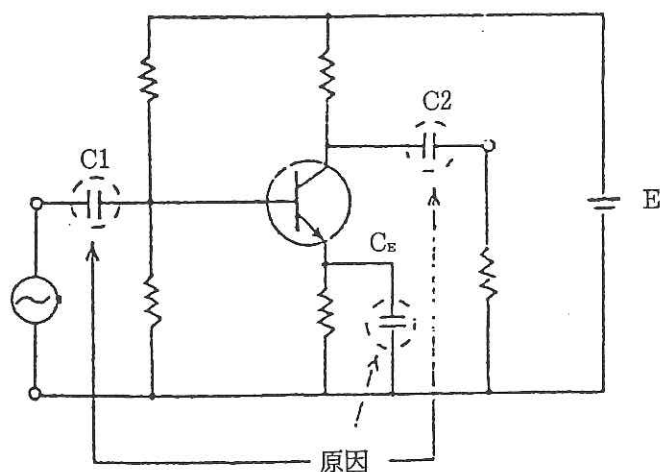
(3・3) のようにして求めた増幅度は周波数に無関係であるが、実際の増幅回路では、一般に第1-7図のように低い周波数で低下する。これは次のような理由による。



第1-7図 周波数による増幅度低下

a) 低い周波数での増幅度の低下

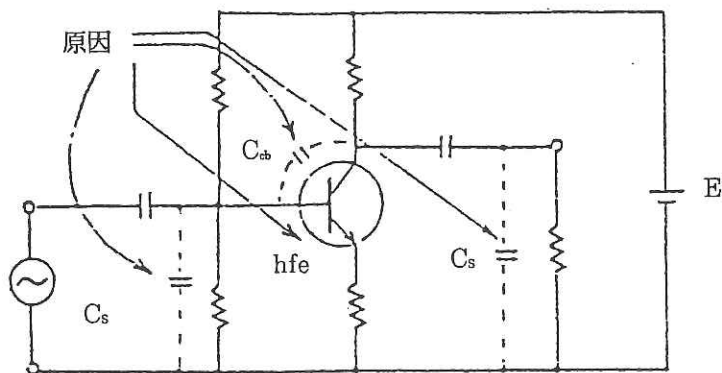
低い周波数における増幅度の低下は、第1-8 (b) 図に示すコンデンサのインピーダンスの増加によるものである。



第1-8 (a) 図 低い周波数での増幅度の低下

b) 高い周波数における増幅度の低下

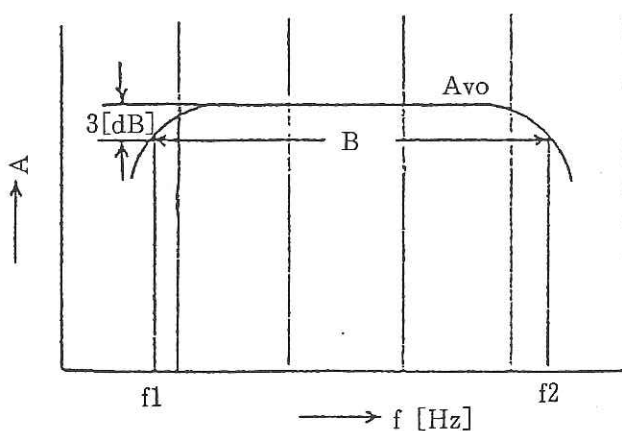
高い周波数における増幅度の低下は第1-8(b)図に示すように h_{fe} の周波数特性、コレクタ・ベース間接合容量 C_{cb} 、配線による漂遊容量 C_s などが原因である。



第1-8(b)図 高い周波数での増幅度の低下

c) 周波数帯域幅

以上のことから、増幅回路の周波数特性は第1-9図のようになる。図において増幅度が3[dB]低下する点の周波数のうち、低い方を f_1 、高い方を f_2 とすれば、 $f_2 - f_1 = B$ を周波数帯域幅、または単に帯域幅、と呼び増幅回路を示す量の一つである。

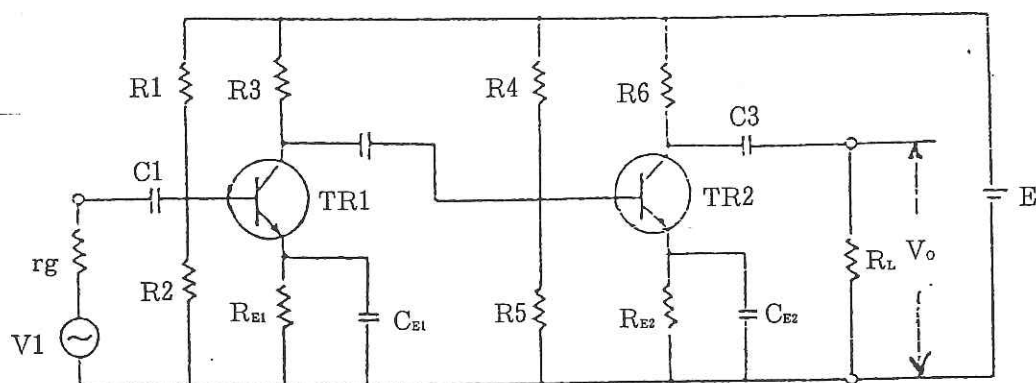


第1-9図 周波数帯域幅

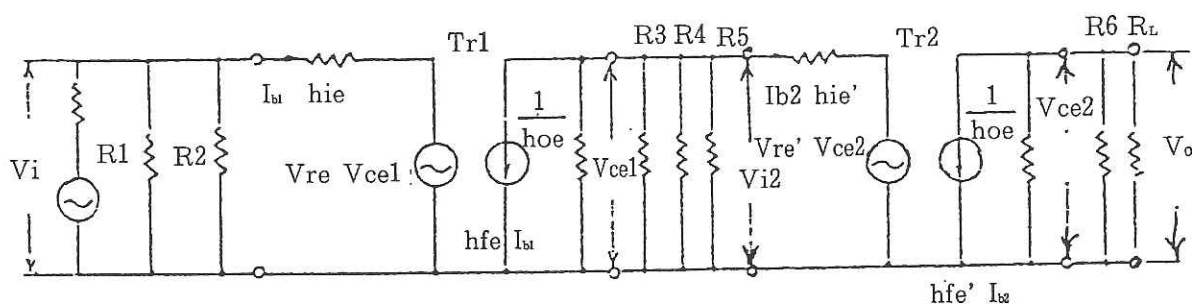
4. CR 結合型 2 段回路

第 1-10 図は CR 結合型 2 段増幅回路で第 1-11 図はその等価回路である。ここで、1 段目の h 定数は h_{ie} 、 h_{re} 、 h_{fe} 、 h_{oe} で示す。

(2 段目の h 定数は h_{ie}' 、 h_{re}' 、 h_{fe}' 、 h_{oe}' で表す。)



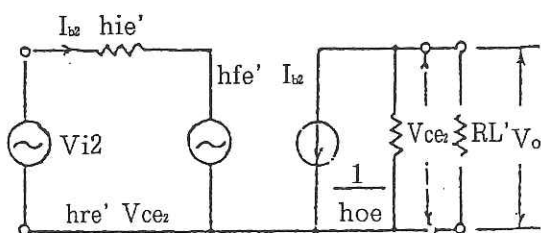
第 1-10 図 CR 結合型 2 段増幅回路



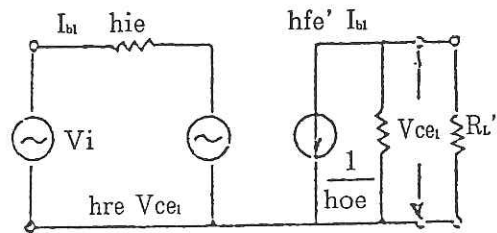
第 1-11 図 等価回路

4-1) 2 段目だけを書き出すと第 1-12 図のようになる。負荷抵抗 R_L' は R_L と R_6 の並列合成抵抗で、その増幅度は次式のようにになる。

$$A_{v2} = h_{fe}' \cdot R_L' / h_{ie}'$$



第 1-12 図 2 段目の等価回路



第 1-13 図 1 段目の等価回路

2). 1 段目の増幅度

1 段目の等価回路は第 1-13 図のようになる。1 段目の負荷抵抗 R_L' は R_3 、 R_4 、 R_5 および T_{r2} の入力抵抗 h_{ie} の並列合成抵抗で、 A_{v1} は次式である。

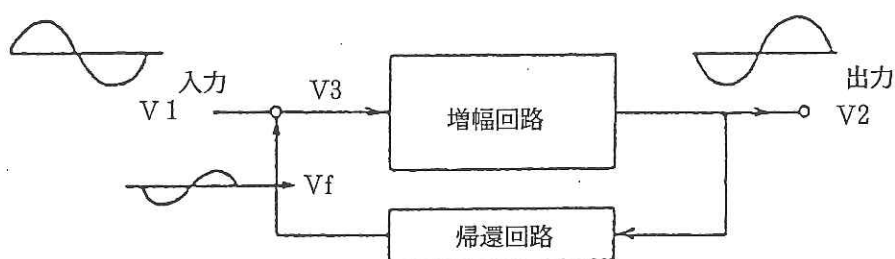
$$A_{v1} = h_{fe} \cdot R_L' / h_{ie}$$

かくして、全体の増幅度 A_v は上式 (1)、(2) で求めた増幅度から、次式のようになる。

$$A_v = A_{v1} \times A_{v2}$$

5. 不帰還増幅回路

第 1-14 図のように、出力電圧 V_2 の一部 V_f を入力電圧にもどすことを帰還といい、 V_f / V_2 の比を帰還率という。図において $V_3 = V_1 + V_f$ となるが、 $V_3 > V_1$ の場合を正帰還、 $V_3 < V_1$ の場合を負帰還という。低周波回路で負帰還を行うと、周波数特性を改善したり、増幅回路の内部で生じるひずみや雑音を少なくすることができる。



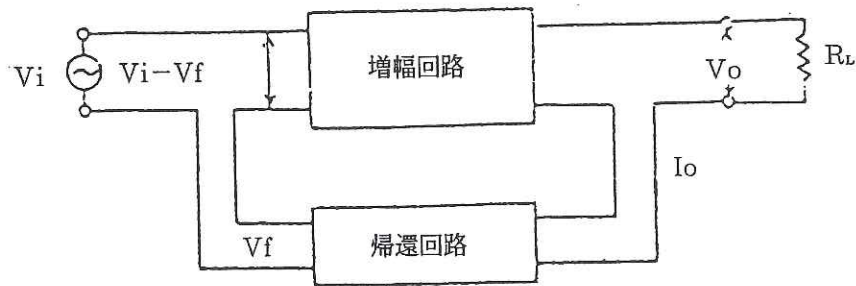
第 1-14 図

5-1) 負帰還方式

不帰還方式にはいろいろあるが、主に使用されているのは次のような方式である。

a) 直列帰還直列注入型

出力電圧に比例した電圧を取り出し、それを入力回路に加える方式で第 1-15 図に示す。

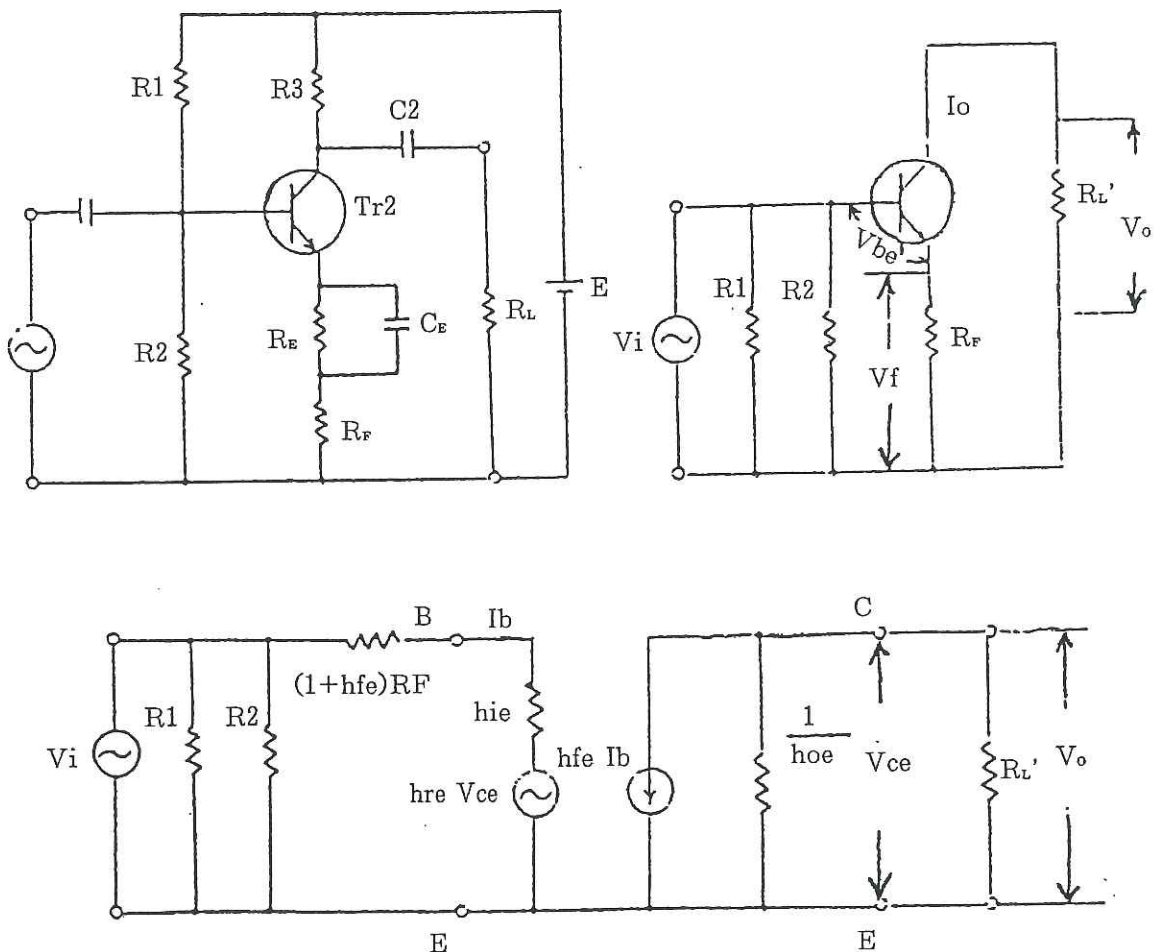


第1-15図 原理図

第1-16図は直列帰還直列注入が型のもので、実際回路で、エミッタ回路にバイパスコンデンサのない抵抗Rをつないで負帰還をかけるもので、図(b)においてRFに出力電流Ioが流れるとその両端に帰還電圧Vfが生じ、次式となる。

$$V_{be} = V_i + V_f$$

エミッタに入る抵抗Rfの影響は、 $(1 + h_{fe}) \cdot h_{fe}$ の抵抗がベースに入るのと同様であるから、等価回路は図(c)のようになる。



第1-16図 実際回路

したがって電圧増幅度

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = h_{fe} \frac{R'_L}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_f}$$

となり、ベースから見た入力抵抗 R_i は

$$R_i = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_f$$

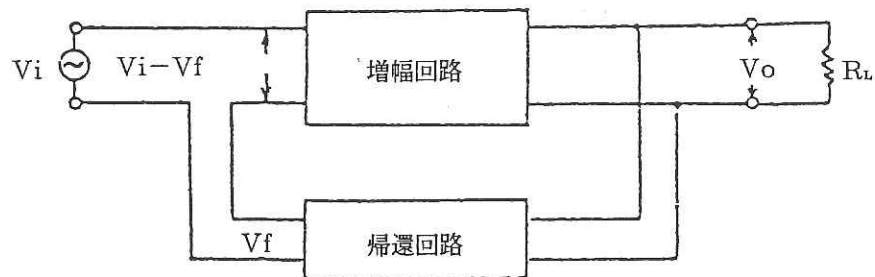
となる。また、入力抵抗 R_i は、 R_1 、 R_2 の並列合成抵抗が R_i に並列にはいるので

$$\frac{1}{R_L} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

となる。

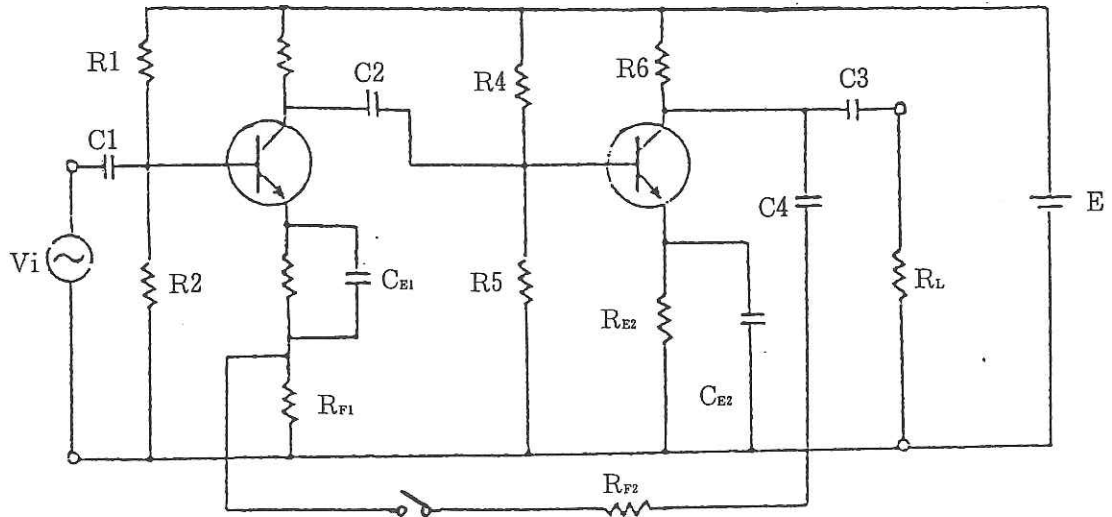
5-2) 並列帰還直列注入型

出力電圧に比例して電圧を取り出す、それを入力回路に直列に加える方式で第1-17図に示す。

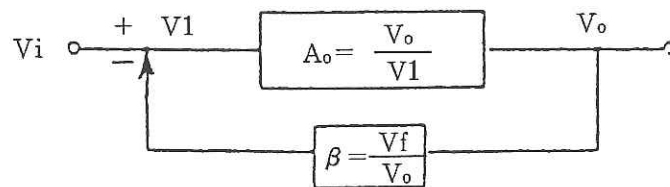


第1-17図

第1-18図は並列帰還直列注入型の実際回路で出力電圧が R_{F1} と R_{F2} によって分割されて、 R_{F1} の両端に帰還電圧が生じる。この帰還電圧は V_i とは逆位相になるため負帰還となる（同時に（1）で述べた R_{F1} だけによる帰還もかかっている。）。いま、 R_{F2} をとり除いたときの回路の増幅度を A_o 、帰還される電圧と電力電圧の比を β （帰還率）とすれば、負帰還増幅回路第1-19図のように表すことができる。



第1-18図 実際回路



第1-19図

この図より負帰還をかけた場合の増幅率をAとすると

$$A = \frac{V_o}{V_i}, \quad A_o = \frac{V_o}{V_1}, \quad \beta = \frac{V_f}{V_o}, \quad V_1 = V_i - \beta V_o.$$

の関係式から次式が得られる。

$$A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_1 + \beta V_o} = \frac{V_o/V_1}{1 + \beta(V_o/V_1)} = \frac{A_o}{1 + \beta A_o}$$

したがって

$$\beta = \frac{R_{F1}}{R_{F1} + R_{F2}} \quad A_v = \frac{A_{vo}}{1 + \beta A_{vo}}$$

となる。そして A_{vo} が十分多きとき ($A_{vo} \gg 1$) は次式のようなになる。

$$A_v = \frac{A_{vo}}{1 + \beta A_{vo}} = \frac{1}{1/A_{vo} + \beta} \approx \frac{1}{\beta}$$

6. 使用機器

- 1). CR 結合形低周波電圧増幅パネル
- 2). 電源回路 (DC 12V)
- 3). 2 現象オシロスコープ
- 4). 直流電流計 (max 100 μ A max 30 mA)
- 5). 直流電圧計 (max 3 V)
- 6). 電子電圧計 (ミリバル (交流) 2 台)
- 7). 低周波発振器

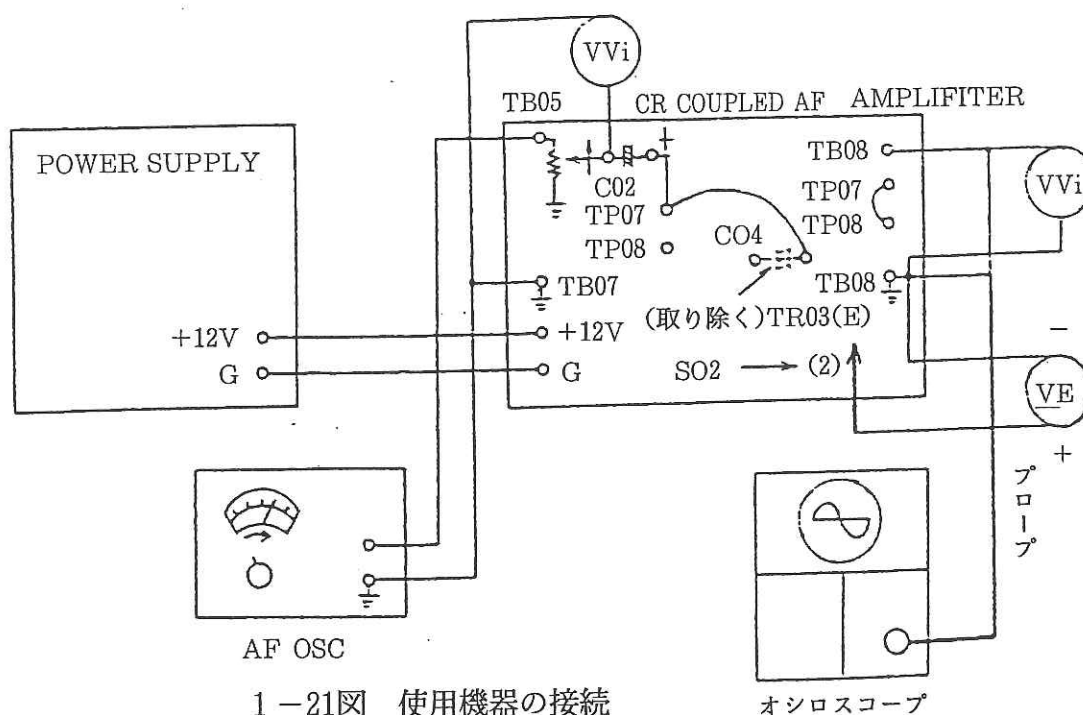
注意事項

※ 電解コンデンサの値を変更して実習を行う場合は極性に注意すること。

7. 実験方法

CR 結合形 1 段増幅回路

7-1) 入出力特性 (負荷抵抗 R_L を変えた場合)



実際回路図 1-3 図 (32ページ)

$R_1=22K\Omega$, $R_2=10K\Omega$, $R_3=5.1K\Omega$, $R_E=1K\Omega$, $R_L=1,3,5K\Omega$
 $C_1=4.7\mu F$, $C_2=4.7\mu F$, $C_E=100\mu F$

- 1). 第1-21図のように接続して POWER SUPPLY 実習パネルの電源スイッチを ON にする。
- 2). 低周波発振器を 1 KHz、出力目盛りをほぼ中央、また本パネル R01 目盛り → 0 にして低周波発振器の電源スイッチを ON にする。
- 3). R01 のツマミにより入力電圧 V_{Vi} を 0 V から上昇させていき、これに対する出力電圧 V_{Vo} を記録する。また、その時のエミッタ直流電圧の指示を記録する。
- 4). 入力電圧がある値以上になると、入力電圧と出力電圧が比例しなくなる。その時の出力は波形をオシロスコープで観察し図に描く。
- 5). 負荷抵抗 R24 (3 K Ω) を 1 K Ω 、5.1 K Ω に変え 2), 3) の操作を繰り返す。
- 6.) 次式によりエミッタ電流 I_E 、電圧増幅度 A_v を算出する。

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} \text{ [mA]} \quad A_v = 20 \log_{10} \frac{V_{Vo}}{V_{Vi}} \text{ [dB]}$$

R_E はエミッタ抵抗

結果の整理

供試トランジスタ (種類・規格など) _____

測定周波数 f _____ Hz、 エミッタ電流 _____ mA

負荷抵抗 $R_L(\Omega)$	入力電圧 $V_{Vi}(V)$	出力電圧 $V_{Vo}(V)$	電圧増幅度 $A_v(\text{dB})$	備 考

7-2) 周波数特性 (結合コンデンサー、バイパスコンデンサーを変化した場合)

- 1). 負荷抵抗を R24, 元の値 (3 K Ω) にし、(1-21) 図と同様にし POWER SUPPLY 実習パネルの電源を ON にする。
- 2). 入出力特性より、入力電圧と出力電圧が比例する範囲内の適当な入力電圧を選ぶ。入力電圧 VVi を常に一定に保ちながら、低周波発振器の周波数を 10Hz $\sim$ 100KHz に変化させ、これに対する出力電圧 VVo の指示を記録する。(各測定周波数は対数表示スケールの点で測定せよ)。
- 3). 負荷抵抗 R24=3 K Ω 一定の下に、結合コンデンサー CO2、CO5 $\rightarrow$ 1 μ F に変えて、上記の 2)、3) の操作を繰り返す。
- 4). 負荷抵抗一定の下に、CO2、CO5 $\rightarrow$ 4.7 μ F に戻し、バイパスコンデンサー CO7 $\rightarrow$ 10 μ F に変えて上記 2)、3) の操作を繰り返す。

結果の整理

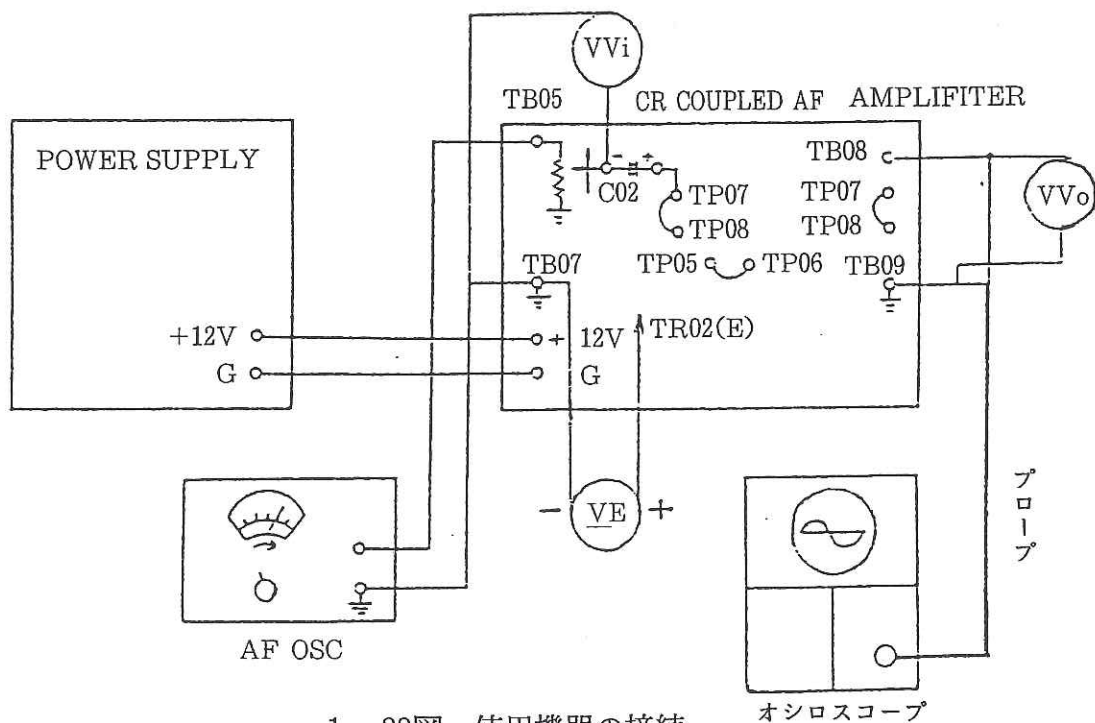
供試トランジスタ (種類・規格など) _____

入力電圧 VVi _____ (V)

結合コン デンサー CO2,CO5 (μ F)	バイパスコ ンデンサー CO7 (μ F)	周波数 f (Hz)	出力電圧 VVo (V)	電圧増幅度 Av (dB)	備考

8. CR 結合形 2 段増幅回路

8-1) 入出力回路



1-22図 使用機器の接続

$R_1=51K\Omega$, $R_2=39K\Omega$, $R_3=15K\Omega$, $R_{E1}=3.9K\Omega$, $R_{F1}=0.1K\Omega$

実際回路図 $C_1=4.7\mu F$, $C_2=4.7\mu F$, $C_{E1}=100\mu F$

1-18図(41ページ) $R_4=22K\Omega$, $R_5=10K\Omega$, $R_6=5.1K\Omega$, $R_{E2}=1K\Omega$, $R_L=3K\Omega$

$C_3=4.7\mu F$, $C_4=4.7\mu F$, $C_{E2}=100\mu F$, $R_{F2}=51K\Omega$,

- 1). パネル上の $CO_2 \cdot CO_4 \cdot CO_5 \rightarrow 4.7\mu F$ 、 $CO_7 \rightarrow 100\mu F$ に戻して第 1-22 図のように接続し、POWER SUPPLY ON にする。
- 2). $SO_2 \rightarrow (2)$ にして 7-1) の 2) ~ 4) および 6) と同様な実験を行う。
また、 Tr_1 のエミッタ直流電圧の指示を記録する。
- 3). $SO_2 \rightarrow (1)$ (負帰還) に切り替えて 7-1) の 2) ~ 4) および 6) と同様な実習を繰り返す。

また、次式によって帰還率 β を求める。
$$\beta = \frac{R_{F1}}{R_{F1} + R_{F2}}$$

結果の整理

供試トランジスタ（種類・規格など） _____

測定周波数 f _____ Hz エミッタ電流 I_{E1} _____ mA

エミッタ電流 I_{E2} _____ mA

帰還率 β	入力電圧 V_{Vi} (V)	出力電圧 V_{Vo} (V)	電圧増幅度 A_{vo} (dB)	備考

8-2) 周波数特性

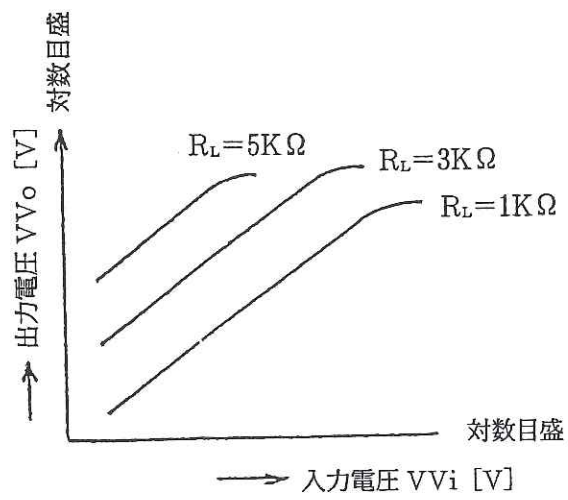
- 1). (1-22) と同様に接続し SO2 → (2) に切り替えて 7-2 の 1)、2) と同様な実習を行う。
- 2). SO2 → (1) (負帰還) に切り替えて 7-2) の 1)、2) と同様な実習を行う。

結果の整理

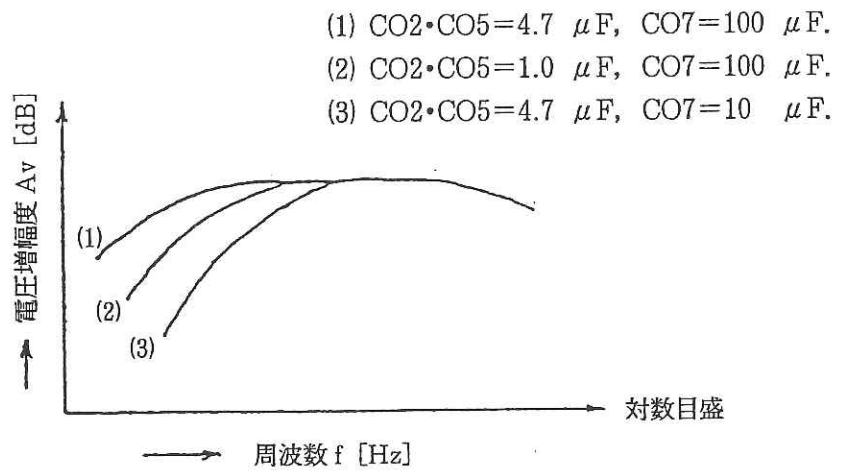
供試トランジスタ（種類・規格など） _____

入力電圧 V_{Vi} _____ (V)

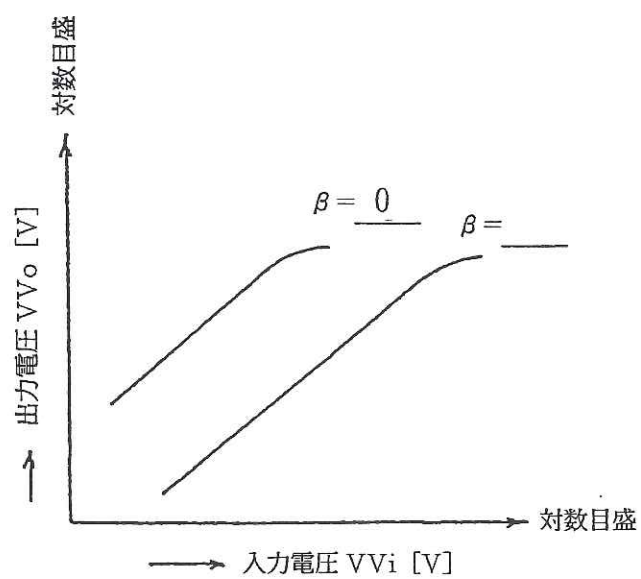
帰還率 β	周波数 f (Hz)	出力電圧 V_{Vo} (V)	電圧増幅度 A_{vo} (dB)	備考



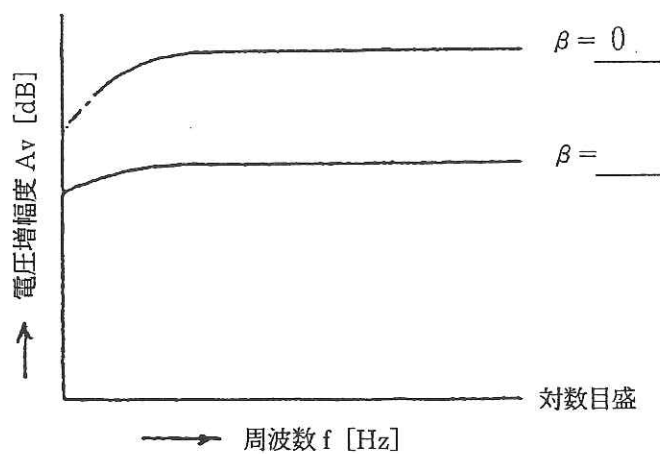
第1-24図 CR結合1段入出力特性



第1-25図 CR結合1段周波数特性



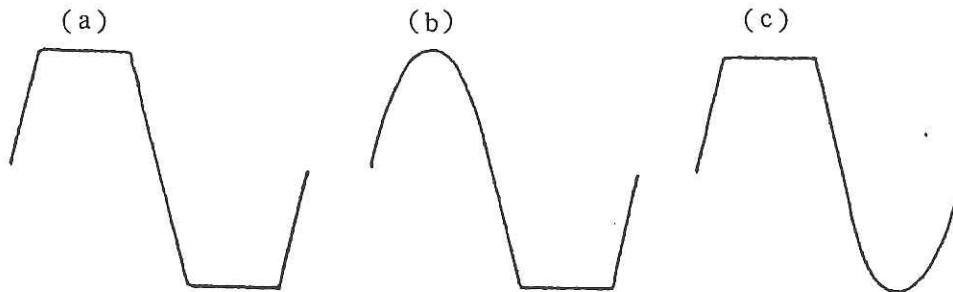
第1-26図 CR 結合2段入出力特性



第1-27図 CR 結合2段周波数特性

9. 考察

1). 下図のようにトランジスタの出力波形がひずむ原因について述べよ。



- 2). 次のページのトランジスタの h パラメータ定数を用いて、本装置の CR 結合形 1 段増幅回路を簡易等価回路で表し、電流増幅度・電圧増幅度・電力増幅度を求め実習結果と比較せよ。
- 3). CR 結合型 2 段増幅回路において、負帰還 (※) なし ($\beta = 0$) の場合の電圧増幅度を考察 2) と同様にして求め実習結果と比較せよ。
- 4). CR 結合型 2 段増幅回路において、負帰還あり (※) ($\beta =$) の場合の電圧増幅度を計算によってもとめ実習結果と比較せよ。