

専門科目（午後）

1 4 大修

時間 午後 1 時 30 分～3 時 00 分

電気電子工学・電子物理工学

電気電子工学  
電子物理工学

注意事項

1. 次の 4 題の中から 1 題を選択して解答せよ。2 題以上解答した場合はすべて無効とする。
  2. 解答は 2 枚の解答用紙に記入せよ。問題 1（電力・エネルギー）を選択したものは、1.1), 1.2)a) の解答を別の指定された解答用紙に記入せよ。
  3. 各解答用紙に問題番号及び受験番号を記入せよ。
  4. 電子式卓上計算機等の使用は認めない。
-

1.

電力・エネルギー [注：設問 1)および 2) a)は専用の解答用紙を使用すること。]

- 1) 図 1.1 は遅れ力率の受動負荷を接続した単相二線式交流配電線路であり、 $R$ 、 $X$  は配電線の抵抗とリアクタンスを示す。電圧、電流は大きさと方向を持つフェーザ表示で表し、 $\dot{E}_s$ 、 $\dot{E}_r$  はそれぞれ送受電端電圧、 $\dot{I}$  は線路電流である。また、図 1.2 のフェーザ図は電圧電流の位相関係を示し、 $\theta$  は  $\dot{E}_s$  と  $\dot{E}_r$  の位相差、 $\phi$  は受電端の力率角である。以下の問いに答えよ。

- a) 回路の電圧電流の関係式を示せ。次に、配電線の抵抗とリアクタンスにおける電圧降下のフェーザ図を、受電端電圧  $\dot{E}_r$  を基準にして解答用紙の所定欄に書き加えよ。
- b) 上記設問 a)において、配電線による電圧降下の大きさ  $\Delta E$  を表す式を示せ。また、 $\Delta E$  を解答用紙所定欄に作図より求めよ。
- c) 上記設問 a)において負荷と並列にコンデンサを接続し、受電端の力率角を図 1.3 に示す角  $\phi'$  にした。また、受電端電圧  $\dot{E}_r$  を設問 a)と同じ値に維持するよう、送電端電圧を変化させて  $\dot{E}_s'$  とした。このとき、コンデンサを流れる電流  $\dot{I}_c$ 、線路電流  $\dot{I}'$ 、および送電端電圧  $\dot{E}_s'$  のフェーザ図を、受電端電圧  $\dot{E}_r$  を基準にして解答用紙所定欄に書き加えよ。
- d) 上記設問 c)における配電線での電圧降下の大きさ  $\Delta E'$  を作図より求め、コンデンサを接続する前の値  $\Delta E$  と比較せよ。次に、電力系統では一般にどのような目的で、負荷と並列にコンデンサを接続するかについて述べよ。

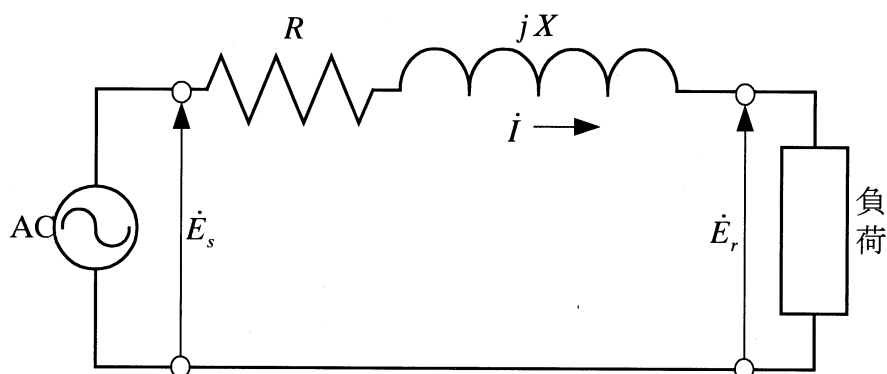


図 1.1

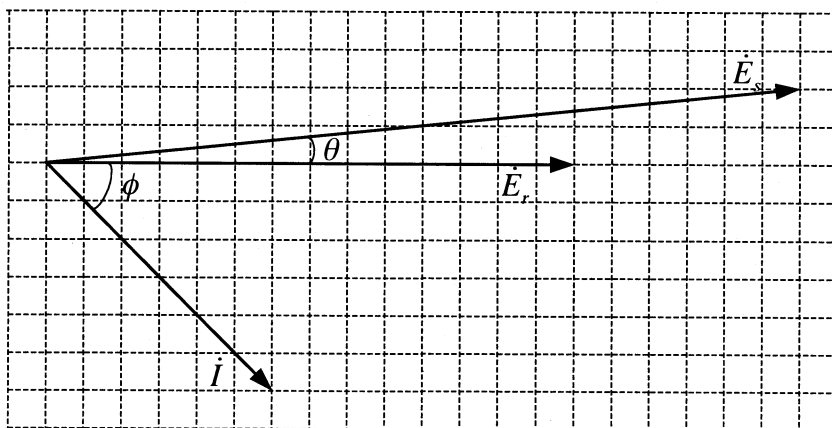


図 1.2

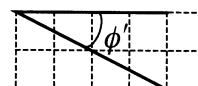


図 1.3

2) 図 1.4 の対称三相巻線を固定子とする三相誘導電動機に、図 1.5 の平衡三相交流電流を図 1.6 に示すように流した。

a) 各巻線により発生する起磁力とその合成ベクトルの時間変化を図示せよ。(解答用紙の図で指定した各時刻でよい) また、これにより発生する現象を説明せよ。

b) この電動機の同期速度[rpm]はいくらか。理由も示せ。

c) この電動機に負荷がかかった時に発生する現象を、{回転数, すべり, トルク}などの用語を用いて説明せよ。

d) 図 1.7 に示すように電源の b 相と c 相を入れ替えた時、回転方向はどう変わるか。理由も示せ。

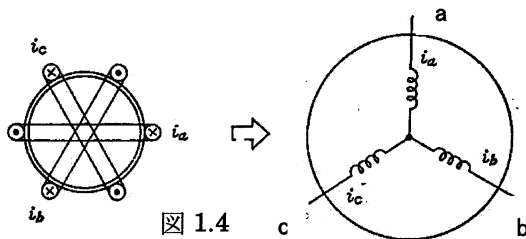


図 1.4

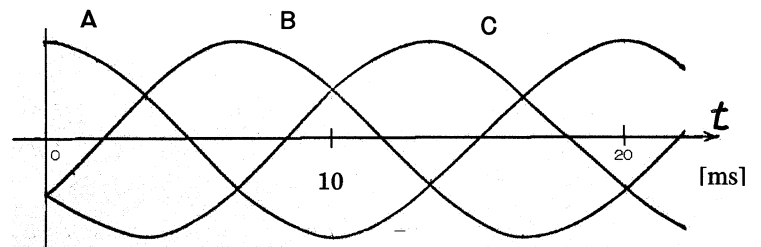


図 1.5

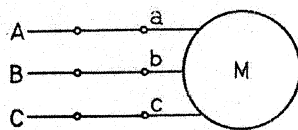


図 1.6

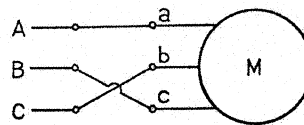


図 1.7

3) 図 1.8 は、速度サーボ機構である。指令ダイヤルにより速度指令を与えると、直流サーボモータにより出力軸の回転速度が指令に従う。各要素の伝達関係や値は、以下に示すとおりである。

指令ダイヤル： 入力角度  $\theta$  に対する出力電圧  $K_p \theta$

電圧増幅器のゲイン： 入力電圧に対する出力電圧の比  $K_a$

モータの電機子抵抗：  $R_a$

モータの発生トルク：  $K_m i_a$  (ただし  $i_a$  は電機子電流)

モータの回転子と負荷をあわせた慣性：  $J$

出力軸の回転の角速度：  $\omega$

モータの電機子に発生する逆起電力：  $K_m \omega$

速度センサの出力電圧：  $K_t \omega$

a) この系のブロック線図を描け。

b) 速度指令入力から出力軸の回転速度までの伝達関数を求めよ。

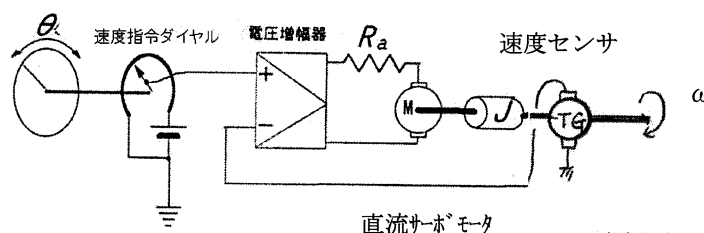


図 1.8

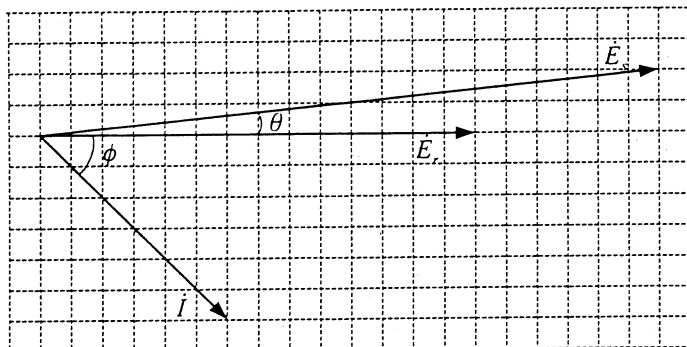
電力・エネルギーの、設問 1)および 2) a) 専用の解答用紙です。その他の問題の解答は記入しないこと。無効になります。

試験科目名	受験番号
電力・エネルギー	

採点欄					

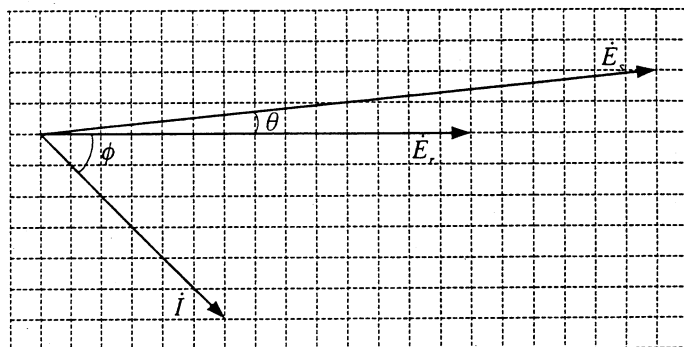
1. 1) a)

式：

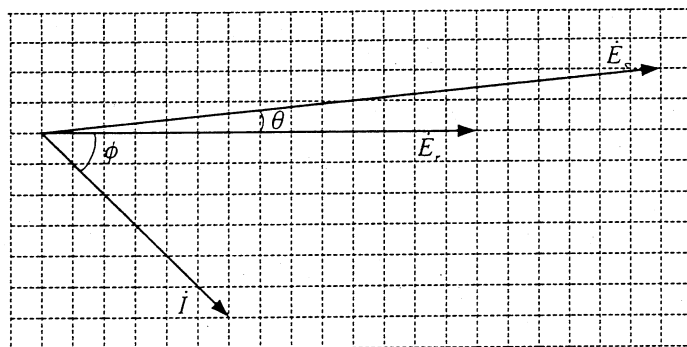
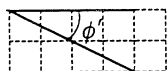


1.1) b)

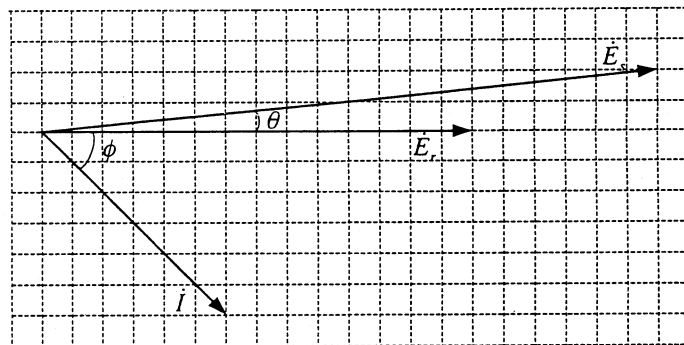
式：



1. 1) c)



1. 1) d)



説明文：

---

---

---

---

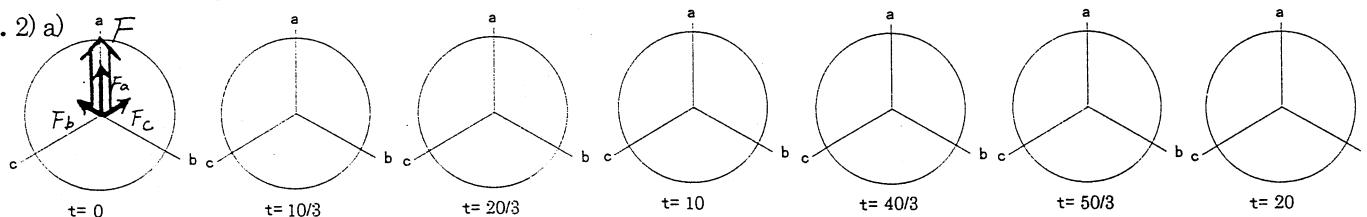
---

---

---

---

1. 2) a)



2. 波動・通信に関する以下の設問 1) および 2) (次ページ) に答えよ。

1) 波源のない自由空間における電界  $\mathbf{E}$  および磁界  $\mathbf{H}$  は以下の関係を満足する。

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} \quad (1) \quad \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (2)$$

ここで、時間変化は角周波数  $\omega$  の単振動とし、複素表記  $e^{j\omega t}$  で表している。また真空の誘電率を  $\epsilon$ 、透磁率を  $\mu$  とする。なお、一般にベクトル  $\mathbf{A}$  の直角座標における回転は、 $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ ,  $\hat{z}$  をそれぞれ  $x, y, z$  方向の単位ベクトルとして、次式で表される。

$$\nabla \times \mathbf{A} = \hat{x} \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \hat{y} \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \hat{z} \left( \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \quad (3)$$

さらに、電界  $\mathbf{E}$  は  $x$  成分のみを有し  $-z$  方向から到来し  $+z$  方向へ進行し、場所、時間に依らぬ定数  $a, k$  を用いて次式で与えられるものとする。

$$\mathbf{E} = \hat{x} a e^{j\omega t - jkz} \quad (4)$$

以下の a) ~ e) の間に答えよ。

- アンペアの法則の積分表現から、(1) 式を導出せよ。(導出には「ストークスの定理」を利用し、「伝導電流」、「変位電流」、「電束密度」、「磁束密度」などの用語を用いて説明を加えよ。)
- 磁界  $\mathbf{H}$  を求めよ。
- (1)(2) 式が零でない解を有するために定数  $k$  が満たすべき条件を求めよ。
- この電磁界が  $+z$  方向へ進む位相速度を求めよ。
- 原点 ( $z = 0$ ) における、電界  $\mathbf{E}$ 、磁界  $\mathbf{H}$ 、進行方向  $\hat{z}$  のベクトルの向きや大きさなどの関係を分かりやすく図を用いて示せ。

次に、 $z \geq 0$  の領域が、完全導体であるときを想定する。この場合、 $z < 0$  の領域には入射波 (4) に加え、次式の反射波  $\mathbf{E}''$  が生じる。

$$\mathbf{E}'' = -\hat{x} a e^{j\omega t + jkz} \quad (5)$$

次の f) の間に答えよ。

- $z < 0$  の領域における、合成電界 (定在波) を導出せよ。またその包絡線を  $z$  の関数として図に示せ。腹や節の位置や大きさなどを図 2.1 にならい詳しく説明せよ。

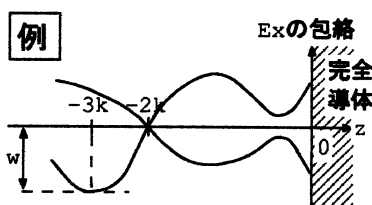


図 2.1

2) 振幅変調方式および周波数変調方式に関する以下の問に答えよ。

- a) 正弦波信号で振幅変調された AM 送信機の実出力電圧  $e(t) = e_0(1 + m \sin \omega_s t) \sin \omega_c t$  が純抵抗負荷  $R$  に供給されている。図 2.2 に  $e(t)$  を時間  $t$  の関数として示す。変調指数  $m = 2/3$  として、 $e_0[\text{V}]$  を求めよ。また、負荷抵抗  $R = 75\Omega$  として、出力の尖頭電力  $P_{\text{peak}}[\text{W}]$ 、平均電力  $P_{\text{ave}}[\text{W}]$ 、搬送波電力  $P_c[\text{W}]$  を求めよ。ただし、尖頭電力とは、瞬時電力の最大値を表すものとする。
- b) a) の  $e(t)$  における搬送波成分を除去した場合の、同じ負荷における尖頭電力  $P'_{\text{peak}}[\text{W}]$ 、平均電力  $P'_{\text{ave}}[\text{W}]$  を求めよ。
- c) 図 2.3 のように、搬送波角周波数  $\omega_c$  の FM 送信機に、変調信号  $v_s(t) = v_0 \cos \omega_s t$  を入力した。このときの送信機の実出力電圧が  $e(t) = e_0 \sin(\omega_c t + \beta \sin \omega_s t)$  で表される。ここで、変調指数  $\beta$  は、 $K$  を定数として  $\beta = K v_0 / \omega_s$  で与えられる。出力電圧  $e(t)$  の瞬時角周波数を  $\omega_c, v_s(t)$  を含む式で表せ。
- d) c) において、 $v_0$  を 0 から徐々に増やしながら、スペクトル・アナライザで  $e(t)$  のスペクトルを観察したところ、角周波数  $\omega_c$  における値（搬送波成分）が  $v_0 = 0.8\text{V}$  のときに初めて消滅した。さらに  $v_0$  を増やしていくとき、再び搬送波成分が消滅するのは  $v_0$  がいくらのときか。ただし、図 2.4 のグラフおよび公式  $\sin(\omega_c t + \beta \sin \omega_s t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \sin\{(\omega_c + n\omega_s)t\}$  を用いてよい。

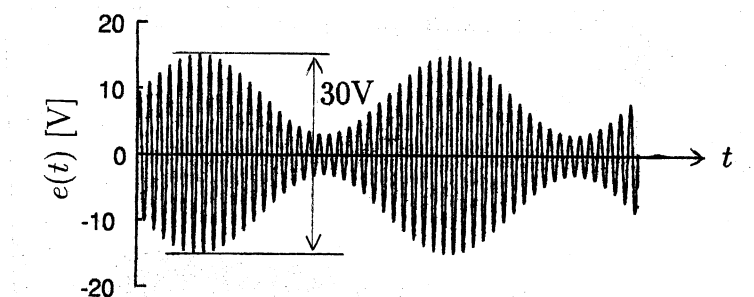


図 2.2

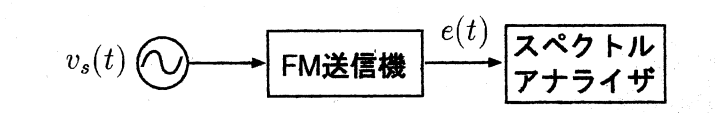


図 2.3

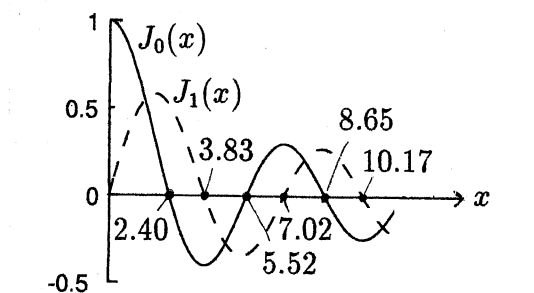


図 2.4

- 1) 1次元のn型半導体に電界  $E$  が加わったとき、電子ドリフト電流密度  $J_n$  は、電子電荷  $q$ 、電子濃度  $n$ 、電子移動度  $\mu$  を用いて、

$$J_n = \boxed{\phantom{q n E}} \quad (3.1)$$

で与えられる。

半導体中のドナー不純物濃度が  $x$  方向に対して一様でないとき、 $x$  方向には電子拡散電流密度

$$J_d = \boxed{\phantom{q n E}} \quad (3.2)$$

が流れる。ただし  $D_n$  は拡散係数である。

熱平衡状態では電子ドリフト電流と電子拡散電流がつりあっている。

また、電子濃度  $n$  は、真性電子濃度  $n_i$ 、フェルミエネルギー  $E_F$ 、真性フェルミエネルギー  $E_i$ 、ボルツマン定数  $k$ 、絶対温度  $T$  を用いて以下のように表される。

$$n = n_i \exp \{ (E_F - E_i) / kT \} \quad (3.3)$$

電子移動度  $\mu$  と拡散係数  $D_n$  の間には、

$$D_n / \mu = \boxed{\phantom{q n E}} \quad (3.4)$$

という関係（アインシュタインの関係）がある。

- a) (3.1), (3.2), (3.4) 式を書きなさい。また(3.1), (3.2)式より(3.4)式を導きなさい。  
 b) 図3. 1は、電子移動度の温度依存性を示している。この図から、電子移動度を支配する因子は少なくとも2種類あることが分かる。その2つについて説明し、図のような温度依存性を示す理由を述べよ。  
 c) 図3. 2はキャリアドリフト速度の電界依存性を示す。この図に示す実験結果から考察できることがらを3つあげてその現象を生じる理由を述べよ。

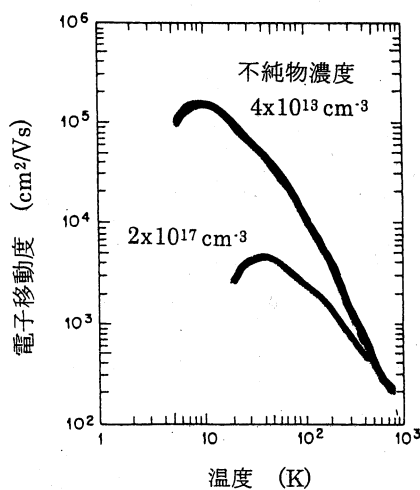


図3. 1

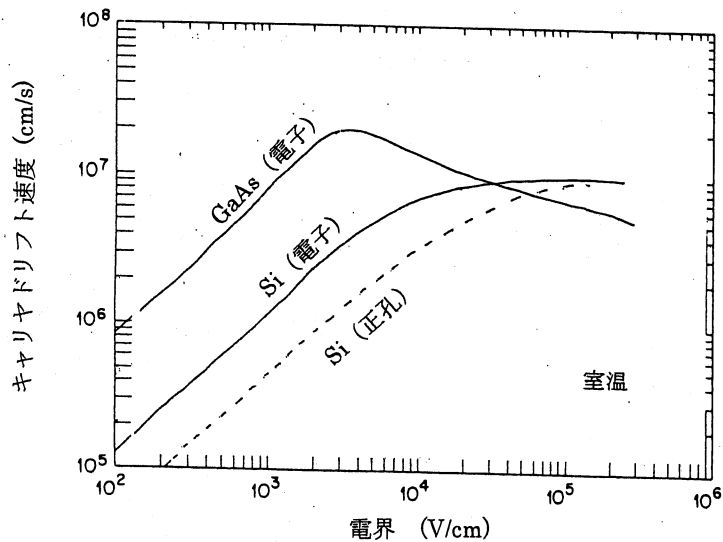


図3. 2

(裏面に続く)

【電気物性】(続き)

2) 誘電体に関して下記の問に答えよ。(但し、 $\epsilon_0$ を真空の誘電率とする)  
(単位は [MKSA] 単位系 ([SI] 単位系) を用いるのが好ましい)

- a) 誘電体に外部より電界  $E$  を印加した場合、誘電体中の 1 個の原子 (あるいは分子) が電気双極子モーメント  $\mu$  を誘起する。この場合
- 1 個の原子 (あるいは分子) が感じる内部電界 (局所電界)  $E_i$  は、外部印加電界  $E$  とは異なると考えられる。この理由を記せ。
  - 1 個の原子 (あるいは分子) の分極率  $\alpha$  を  $\mu = \alpha E_i$  で定義する。誘電体の単位体積あたりの双極子モーメントの数を  $N$  とすると、分極  $P$  は  $P = N\mu$  で表される。 $\alpha$  と比誘電率  $\epsilon_r$  の関係を内部電界  $E_i = E + \frac{P}{3\epsilon_0}$  を仮定して求めよ。

- b) 誘電体中の 1 個の原子を、固定された 1 点に集中した  $+Q$  (ただし  $Q > 0$ ) の電荷を持つ原子核と、 $-Q$  の全電荷を持つ電子を半径  $r$  の球内に一様に分布させた電子雲でモデル化する。原子に内部電界  $E_i$  が加わったとき、電子雲の重心が  $-x$  に変位する (図 3.3 参照) ものとして、以下の問いに答えよ。ただし誘電体中の単位体積あたりの原子数を  $N$  とする。

- 電子が原子核中心より  $x$  だけ変位した場合に受ける復元力  $F$  は  $F = -kx$  で表される。定数  $k$  を求めよ。
- $E_i$  が加わったときの電子の変位  $x$  を求めよ。

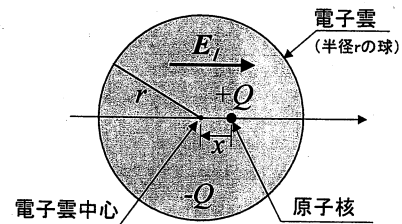


図 3.3

- 変位  $x$  による電気双極子モーメント  $\mu$  を求め、分極率  $\alpha$  を求めよ。
- 電子の質量を  $m$  として、電界  $E_i$  が印加された場合の電子の運動方程式を書け。ただし、速度に比例する制動項は加えなくてよい。
- 変位  $x$  による分極  $P$  を考え、(a)-(ii)の内部電界を仮定して(iv)の運動方程式を分極  $P$  と外部印加電界  $E$  による方程式に変換せよ。
- 外部より交流電界  $E$  を加えた場合、上記(v)の条件での分極  $P$  の共振周波数  $\omega_0$  を求めよ。
- 実際には(iv)あるいは(v)の運動方程式には制動項が加わり(vi)の共振条件で損失が最大となる。この制動項の要因として考えられる物理現象はどのようなものが考えられるか。



#### 4. npn バイポーラトランジスタ及びそれを用いた回路に関する以下の問に答えよ。

- 1) npn トランジスタは pn 接合ダイオードを背中合わせに付けた構造をしているが、トランジスタが能動活性領域 (ベース・エミッタ接合に順バイアスの、コレクタ・ベース接合に逆バイアスの電圧が印加) にあると考えるとコレクタ側のダイオードは無視して単なる電流源に置き換えることができる。そこで、エミッタ側のダイオードを残した等価回路として図 4.1 の様に表すことができる。ここで、 $r_b$  はベース抵抗、 $V_{B'E}$  は真のベース・エミッタ電圧、 $I_S$  はベース・エミッタ接合の逆方向飽和電流、 $\alpha_0$  は順方向電流伝送率である。一方、室温 (300K) での交流 (小信号) 等価回路は図 4.2 の様に表せる。
  - a) 図 4.1 の  $\alpha_0$  と図 4.2 のエミッタ接地電流増幅率  $\beta$  の間に成り立つ関係式を示せ。
  - b) 図 4.2 のエミッタ抵抗  $r_e$  の式をどの様に求めたかを説明し、温度が 150K まで下がるとエミッタ抵抗の値はどうかを示せ。
  - c) 能動活性領域にある npn トランジスタのバンド図を描け。エミッタ・ベース間の空乏層とベース・コレクタ間の空乏層がどの領域かとフェルミ準位を書き入れること。描画は定性的でよい。
  - d) エミッタ層の n 形のキャリア濃度を大きくしたら、 $\beta$  が大きくなった。どうしてそうなったかを説明せよ。(エミッタの層厚や拡散長などには変化が無かったとする。)
  - e) このバイポーラトランジスタでは、コレクタ・エミッタ電圧を大きくし過ぎると、突き抜け (パンチスルー) を起こし、ベース電流でコレクタ電流が制御できなくなった。この突き抜け効果がどうして起こるかを説明し、突き抜けを起こさない電圧域を大きくするためには、コレクタ層のキャリア濃度をどの様にすべきか説明せよ。

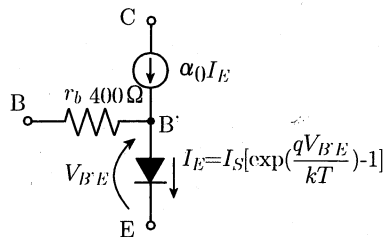


図 4.1: トランジスタの直流 (大信号) 等価回路 (1)

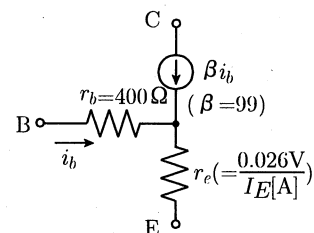


図 4.2: トランジスタの交流 (小信号) 等価回路

2) 図 4.3 から図 4.5 に示す回路について以下の問に答えよ。ただし、有効数字は 2 桁とし、図 4.3 から図 4.5 において電源電圧  $V_{CC}$ 、 $V_{EE}$  はともに 1.5V、 $V_{Bias}$  は 0.80V、抵抗  $R_L$  は  $4.0k\Omega$ 、 $R_{E1}$  は  $1.0k\Omega$  であり、npn トランジスタの直流 (大信号) 等価回路として図 4.6 またはその等価表現である図 4.7 のいずれかを用い、交流 (小信号) 等価回路として図 4.2 を用いよ。また、容量  $C_1$  のインピーダンスは十分低いものとする。

- 図 4.3 の直流節点電位  $V_{B1}$  が  $V_{Bias}$  に等しいことに注意して他の直流節点電位  $V_{E1}$  及び  $V_{C1}$  を求めよ。また、図 4.3 の npn トランジスタのエミッタ抵抗  $r_e$  の値はいくらか。
- 図 4.3 の増幅回路の電圧利得  $A_v = \frac{v_2}{v_1}$  を求めよ。
- 図 4.4 の差動増幅回路の差動利得  $A_d = \frac{v_5 - v_6}{v_3 - v_4}$  が図 4.3 の電圧利得  $A_v$  に等しくなるように抵抗  $R_{E2}$  を定め、さらに図 4.4 の直流節点電位  $V_{C2}$  が図 4.3 の直流節点電位  $V_{C1}$  に等しくなるように抵抗  $R_{E3}$  の値を定めよ。また、このとき図 4.4 の差動増幅回路の同相利得  $A_c = \frac{v_5 + v_6}{v_3 + v_4}$  はいくらか。
- 図 4.6 (または図 4.7) の  $V_{B'E}$  が温度の変化により 50mV 減少した。図 4.4 の回路において c) で求めた素子値を用いた場合、この温度変化から生じた  $V_{B'E}$  の変化によるコレクタ端子の直流節点電位の偏差を図 4.3 の回路と比較し、違いが生じる理由を述べよ。
- 図 4.6 (または図 4.7) の  $V_{B'E}$  が 0.70V のとき、差動利得を高めるために、図 4.5 に示す図 4.4 と同じ素子値を有する差動増幅回路の端子 C と図 4.4 の端子 A を接続し、さらに図 4.5 の端子 D と図 4.4 の端子 B を接続して縦続接続型の増幅回路を構成したが、増幅回路として正常に動作しなかった。理由を述べよ。

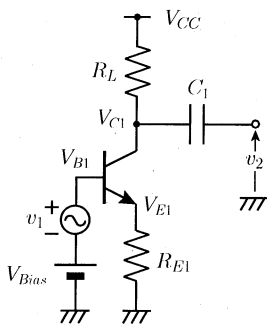


図 4.3: 増幅回路

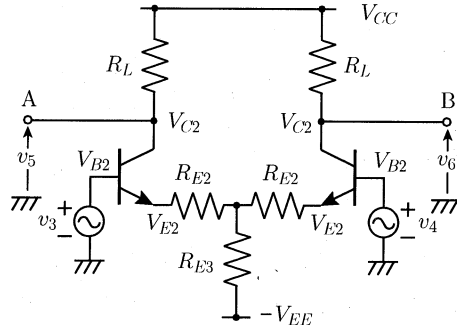


図 4.4: 差動増幅回路 (1)

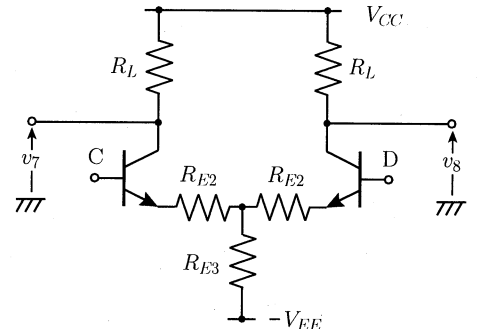


図 4.5: 差動増幅回路 (2)

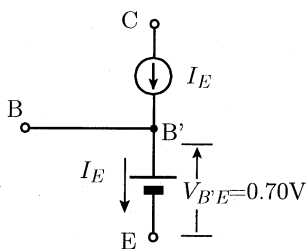


図 4.6: トランジスタの直流 (大信号) 等価回路 (2)

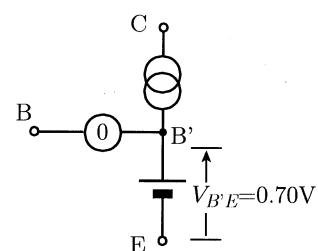


図 4.7: トランジスタの直流 (大信号) 等価回路 (3)