

演習問題解答

【2章】

- (1) いま、気体分子密度を n とすると、理想気体の状態方程式は式 (2.3) で表わせる。

式 (2.3) を変形すると、

$$n = \frac{p}{kT} = \frac{1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^3}{1.38062 \times 10^{-23} \times 273} = 2.69 \times 10^{25} \text{ 個/m}^3$$

平均速度 v は (2.6) 式から

$$v = 145.4 \sqrt{\frac{T}{M}} = 145.4 \sqrt{\frac{273.16}{44}} = 362.3$$

つぎに 2 個の CO_2 ガスの衝突断面積は、(2.8) 式であるから、衝突断面積の値は、

$$Q = 4\pi r^2 = 4\pi \times (2.32 \times 10^{-10})^2 = 6.73 \times 10^{-19}$$

またこのときの衝突頻度は、(2.10) 式から、

$$\nu = Q\sqrt{2}vn = 4.418 \times 10^{-19} \sqrt{2} \times 362.3 \times 2.69 \times 10^{25} = 9.27 \times 10^9$$

したがって、平均自由行程 λ は (2.15) 式から、

$$\lambda = \frac{362.3}{9.27 \times 10^9} = 3.91 \times 10^{-8} \text{ m}$$

- (2) 光または放射線は、その振動数が ν であると、 $h\nu$ というエネルギーを持つ光子から成り立っている。そのため、電離に必要なエネルギーは光の波長 λ_c との関係から

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda_c} \geq eV_i$$

の関係を満たす必要がある。

したがって

$$\begin{aligned}\lambda_c &\leq \frac{hc}{eV_i} = \frac{6.62619 \times 10^{-34} \times 2.997925 \times 10^8}{1.60219 \times 10^{-19} \times V_i} \\ &= \frac{1.24 \times 10^{-6}}{14.4} = 8.61 \times 10^{-8} \text{ m} = 86.1 \text{ nm}\end{aligned}$$

- (3) Xeの準安定励起電圧 V_m は 8.32 V, 第1電離電圧 V_i は 12.13 Vである。このように準安定状態の原子はすでにエネルギー準位が高い位置にあるため, 衝突電離に必要なエネルギーはその差分で良く,

$$\frac{1}{2}m_e v^2 \leq e(V_i - V_m)$$

ただし m_e は電子の質量, c は光速。したがって

$$v \leq \sqrt{\frac{2e(V_i - V_m)}{m_e}} = 1.16 \times 10^6 \text{ m/s}$$

- (4) 空間電荷によって生ずる電子なだれの先端を一様に電荷が分布している球と考えてその半径を r とするとき、ストリーマ先端における電界の強さ E_r は、

$$\begin{aligned}E_r &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{r}{3\epsilon_0} N_e = \frac{r}{3\epsilon_0} \frac{\alpha \exp(\alpha x)}{\pi r^2} \\ &= 5.27 \times 10^{-7} \frac{\alpha \exp(\alpha x)}{\sqrt{x/p}}\end{aligned}$$

で与えられる。いま, 球電極のギャップ間でストリーマによって橋絡したとき $E_r = E_s$ とすると,

$$E_s \sqrt{d/p} = 5.27 \times 10^{-7} \alpha \exp(\alpha d)$$

両辺を p で割ると

$$\frac{E_s}{p} \sqrt{d/p} = 5.27 \times 10^{-7} \frac{\alpha}{p} \exp\left(\alpha \frac{pd}{p}\right)$$

両辺に自然対数をとると

$$\frac{\alpha}{p} pd + \ln\left(\frac{\alpha}{p}\right) = 14.5 + \ln\left(\frac{E_s}{p}\right) + \frac{1}{2} \ln(pd) - \ln(p)$$

$d = 1 \text{ cm}$ を代入すると,

$$\begin{aligned}\alpha + \ln\left(\frac{\alpha}{p}\right) &= 14.5 + \ln\left(\frac{E_s}{p}\right) + \frac{1}{2} \ln(p) \\ \alpha + \ln(\alpha) &= 14.5 + \ln\left(\frac{E_s}{p}\right) + \frac{1}{2} \ln(p) \\ &= 14.5 \ln\left(\frac{E_s}{\sqrt{p}}\right)\end{aligned}$$

ここで $E_s = 30700 \text{ V}$, $p = 760 \text{ mmHg}$ を代入すると,

$$\alpha + \ln(\alpha) = 14.5 + \ln\left(\frac{30700}{\sqrt{760}}\right) = 14.5 + 7.015 = 21.525$$

$$\alpha = 18.6$$

また, 陽極に到達したときの電子数は (2.22) 式より,

$$n = n_0 \exp(\alpha x)$$

であるから,

$$n = n_0 \exp(\alpha d) = 1 \times \exp(18.6) = 1.196 \times 10^8 \text{ 個}$$

【3章】

(1) (1),(5)

全酸価とは, 試料 1 g 中に含まれている全酸性成分を中和するために必要な水酸化カリウムのミリグラム (mg) 数で, 酸化の程度を知るために用いられる。絶縁油は酸化していない油が望ましいため, 全酸価は小さいことが必要である。

冷却作用を高くするために, 粘度が低く流動性が高い性質も必要である。また, 流動点とは液体の流動性がなくなる点の温度のことを言い, この値も低いことが重要となる。

(2) 印加速度が速いほど破壊電圧は高くなり, 印加速度が遅いほど破壊時間が低くなる。

イギリス人物理学者で英国電気研究協会 (E.R.A.) の研究所長を務めていたホワイトヘッド (Stanley Whitehead) は電圧印加時間と絶縁破壊電圧について実験を実施した。その結果, 印加時間が長くなるほど低い電圧

で絶縁破壊することを示している。

そのため、絶縁油の試験では一定の電圧上昇速度で破壊電圧を上昇することが規格に規定されている。例えば日本産業規格 JIS C 2101:1999 では 22 項 絶縁破壊試験において、次のように規定されている。

22.1 電極間ギャップを 2.5mm に調整した直径 12.5mm の相対する球電極を使い毎秒約 3kV の割合で電圧を上昇させ、試料油の商用周波数における絶縁破壊電圧を測定する。

(3) (2)

空気の絶縁破壊電圧は約 3 kV/mm であるが、絶縁油の絶縁破壊電圧はそれよりはるかに高く、湿度や不純物の影響を受けますが約 50 kV/mm になる。また、誘電正接は空気よりも大きい。

さらに電力用機器の絶縁油としては古くから鉱物油が用いられてきた。これは電力機器に用いる絶縁材料の条件である絶縁耐力の高さ、粘度の低さ、熱膨張率の低さ、誘電正接の低さなどによるが、誘電率や引火点の問題などからこれを改善した重合炭化水素油が用いられるようになっていく。シリコン油はコンデンサや航空機用電気機器に用いられている。さらには、環境に配慮する目的で植物性絶縁油が用いられることがある。

【4章】

(1) (5)

固体絶縁体が劣化する原因には、上記設問にあるように機械的な外力によるひずみや電氣的、環境的な要因があって、これらが単体でまたは複数が関連している場合がある。また、熱や電圧など加わるエネルギーの大きさと劣化の進度が変化する。水も劣化の原因となるが、水トリーは絶縁体中に含浸した水分とほりなどの異物やボイドなどの絶縁物の変形部に印加された高電界によって形成される樹枝状の欠陥部分である。この部分は固体絶縁物の内部で生成進行されるため (5) が間違いとなる。

【5章】

- (1) 電氣的要因…電子の衝突電離，電子なだれ，ストリーマ等
熱的要因…熱励起電子電流，熱活性化イオン電流等

- (2) トラッキング現象は、絶縁体表面を変質するような放電現象をいう。絶縁体表面が吸湿していたり、塩塵などにより絶縁体表面が汚れていた場合

に、表面部に電流が流れることがある。この電流により発生したジュール熱が絶縁体表面を乾かして電気抵抗を高くする。これによって電圧を印加した際に発生する電界分布が不均一となって局所的に微小発光を起こす。この発光によって生じた熱によって絶縁物の一部が分解されて炭化するが、それによってさらに電界が集中して炭化部は広がってゆく。この炭化部は最終的には電極間を短絡して全路破壊を生ずる。これをトラッキング現象と呼ぶ。

(3) (3)

絶縁体の劣化の原因については、直射日光などの紫外線、高温、高電界などがある。また水分によって水トリーが生じ、絶縁劣化に結びつく。したがって(3)が解答となる。

(4) (1)

台風が海上を通過すると海水を巻き上げて送電線等のがいしに塩分を付着することがある。塩水は電気を通すためがいし表面に漏れ電流が流れる。これを防ぐため送電線の経路は慎重に選定されているが、塩害の多い地区では定期的がいし洗浄が行われたり、撥水性塗料をがいしの表面に塗布する対策が取られる。また絶縁距離をのばすために接続するがいし数を増やしたり耐塩がいし・長幹がいしなどを用いたりしている。そのため(1)が解答となる。

【6章】

(1) 開閉インパルス電圧の波形は(8.7)式で表すことができる。

これを最小二乗近似を用いて係数 α と β を求め、波高値 V_p を算出する。次に波頭における $0.3V_p$ および $0.9V_p$ さらに、波尾における $0.5V_p$ を求め、その電圧における時間 t_{30}, t_{90}, t_{50} を求める。これらから T_1 および T_2 を求めることで本問を解くことができる。

まず、標準開閉インパルス電圧の(8.7)式における係数 α と β は、最小二乗近似を用いて $\alpha = 290$ および $\beta = 16500$ が得られる。次にこのときの、30%波高点に達する時間 t_{30} は、 $19.0 \mu\text{s}$ で90%波高点に達する時間 t_{90} は、 $117.0 \mu\text{s}$ が得られる。同様に波尾の50%波高点に達する時間 t_{50} は、 $2450 \mu\text{s}$ が得られ、これらから $T_1 = 163.3 \mu\text{s}$ および $T_2 = 2480 \mu\text{s}$ が得られる。

- (2) [1] リ [2] ホ [3] ニ [4] ツ [5] ハ [6] タ [7] ヨ [8] ネ [9] カ

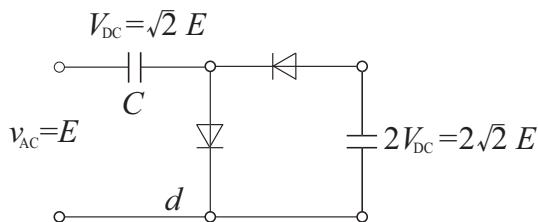
雷過電圧であることから(ニ)誘導雷か(リ)直撃雷が候補にあがる。遮へい失敗による電力線への落雷は直撃雷である。また静電誘導によって送電線に雷雲と逆極性の電圧が誘起され(ツ)進行波として線路上を伝搬する現象を誘導雷という。

また、鉄塔などに生じる過電圧は(ホ)逆フラッシュオーバ、(ヘ)地絡サージ、(ル)コロナ放電、(ワ)開閉サージが候補にあがる。鉄塔と電力線との電位差で生じる過電圧は逆フラッシュオーバという。

JEC規格では2023年からJEC-0202にかわってJEC-0204が用いられている。両規格とも(ハ)雷インパルス耐電圧の定義に変更はない。波形パラメータの定義に関する用語としては、(ロ)波高点、(ト)波頭しゅん度、(チ)制限電圧、(ヨ)波尾長、(タ)波頭長等があげられる。波形パラメータはインパルス電圧発生回路を調整することによって決定することができるが、インパルス電圧発生回路を構成するものは(カ)放電抵抗、(ソ)放電ギャップ、(ネ)制動抵抗である。放電抵抗は回路に並列に接続して波尾長を調整する素子であり、制動抵抗は回路に直列に接続する抵抗で、回路の振動防止及び波頭長の調整に用いる。また放電ギャップは回路に直列または並列に接続されるもので、直列に接続されているものは放電スイッチとして、並列に接続されているものは裁断ギャップとして用いられる。

【7章】

- (1) 図の回路で1次側電圧を214 V印加すれば-300 kVの直流電圧を発生することができる。



- (2) 求める段数 n は、単純に計算しても $10000/1000 = 10$ 段以上必要となる。ここで最大出力電圧 V_{\max} の (7.14) 式を n について微分し 0 とおいたときの解

$$n_0 = 2\sqrt{\frac{V_p f C}{i}} \quad (1)$$

から必要な段数が求められる。仮に C を 1000 pF とするとき、 $V_p = \sqrt{2} \times 1000 = 1414 \text{ V}$ であるから、これらを代入すると $n_0 = 7.52$ となるため、8 段以上が必要となる。そこで $n = 10$ とする。

また 5% 以下のリップル率であることから、 $\Delta V_r \leq 500 \text{ V}$ であり、(7.12) 式から、必要なキャパシタンスの値は $C = 3000 \text{ pF}$ であることがわかる。このキャパシタンスを用いたときの最大電圧 V_{\max} は (7.14) 式に代入して $V_{\max} = 11364 \text{ V}$ となる。

このときの電圧降下 ΔV_d は、(7.13) 式から 2778 V となり、出力電圧の平均値 V_{DC} は、 $V_{DC} = 2V_p - \Delta V_d - \frac{\Delta V_r}{2} = 11114.36 \text{ V}$ となる。

これらより段数は 10 段、キャパシタンス容量は 3000 pF が得られる。

【8章】

- (1) 本文中の微分方程式を解いて回路定数を求める方法や、JEC 規格 (JEC-0202-1994 参考 3) を用いる方法などがあるが、ここではより簡便に回路シミュレータを用いておおよその回路定数を求める。キャパシタンスの値は指定されているため、指定された値 $C = 0.01 \mu\text{F}$ 、 $C_o = 500 \text{ pF}$ を用いる。波頭長の大きさは C_o に依存する。そのため、標準波形である $1.2 \mu\text{s}$ に近い R_s を決めるために $1.2 = 1/C_o R_s$ が成立する R_s を仮決めして $2.4 \text{ k}\Omega$ を得る。同様に波尾長の大きさは C に依存する。そのため、標準波形である $50 \mu\text{s}$ に近い R_o を決めるために $50 = 1/CR_o$ が成立する R_o を仮決めして $5 \text{ k}\Omega$ を得る。この条件で下の QR コードからダウンロードできるエクセルファイルのタブ"IVG"を用いて波形パラメータを計算すると、波形パラメータは $2.3/52 \text{ impulse}$ となる。

実際の回路を構築する場合には残留インダクタンスや対地容量など他の要因が加わるため、ここではあまり詳細に計算をする必要はない。波頭を約半分にするために、 $R_s = 1.3 \text{ k}\Omega$ として再計算すると波形パラメータは $1.5/44 \text{ impulse}$ になるが、波頭をさらに減じるために $R_s = 1.0 \text{ k}\Omega$

として再計算すると波形パラメータは 1.2/42 impulse が得られる。つぎに波尾を 15% 増やすために $R_o = 5.8 \text{ k}\Omega$ として再計算すると波形パラメータは 1.2/48 impulse になる。これを繰り返して $R_s = 980 \Omega$ および $R_o = 6.1 \text{ k}\Omega$ のとき、ほぼ標準波形が得られる。

- (2) この問題も微分方程式を解く方法、JEC 規格を用いる方法などあるが、ここでも回路シミュレータを使用して波形パラメータを算出してみよう。同じエクセルのタブ"ICG"を用いると波形パラメータは 8/20 impulse current の標準波形が発生することがわかる。

※計算結果をコピーしてタブ"spice"のセル A1 にペーストする。すると列 A には時間、列 B には電圧のデータがコピーされ、それらの値から波形パラメータの概略値が算出される。

※このエクセルシートは波形パラメータの概略値を算出するもので、精密な波形パラメータを算出するものではない。正確に波形パラメータを算出するためには 12 章のようなプログラムを用いる必要がある。

※回路シミュレータには OrCAD, LTSpice, Qucs など多くの種類のソフトウェアが発表されている。

※エクセルシートはここからダウンロード可能である。

- (3) 全波雷インパルス電圧が発生している際、接地電位にある物体が過電圧の近くにあるとき、インパルス電圧は接地物体との間で絶縁破壊を起こす。絶縁距離が短い場合には、波頭部分で絶縁破壊し、比較的長い場合には、波尾部分で絶縁破壊を起こす。前者を波頭裁断波、また後者を波尾裁断波と呼ぶ。これらの裁断波は裁断によって電圧変化が急峻であり周波数帯域が高いため、変圧器などの電力機器の絶縁耐力を別途検証する必要がある。これを検証する試験のために裁断波雷インパルス電圧が用いられる。

【9章】

- (1) 式 (9.3) を変形して $i = 2\pi fCV_1$

これに値を代入すると $i = 2\pi \times 100 \times 100 \times 10^{-12} \times 100 \times 10^3 = 6.28 \text{ mA}$

- (2) この波形は平均値が 25.0 V で、リップルの最大値が 25.8 V、そして最小値が 24.2 V と測定されている。(9.23) 式にこれらの値を代入すると、

$$f_R = \frac{1.6/\sqrt{2}}{25.0} = 4.5\%$$

【10章】

- (1) 以下のような点に注意すべきである。
- 汎用オシロスコープの多くは定格入力電圧が 100 V である。そのため、分圧器のスケールファクタを 5000 よりも大きくする必要がある。また、オシロスコープのフルスケールの 60% よりも大きく測定するためには、8000 程度のスケールファクタが必要になる。
 - オシロスコープにノイズ対策やシールド対策を施す必要がある。
 - 測定ケーブルのインピーダンス整合を行う。
 - 適切な応答特性を持つ分圧器を使用する。(11 章参照)
- (2) 表 9.3 において $\phi = 50$ cm で $S = 3.5$ cm の値を読むと、99.0 kV である。つぎに大気補正係数 δ を求めると、

$$\delta = \frac{b}{1013} \times \frac{293}{273 + 28} = \frac{293}{301} = 0.973$$

したがってこのときの電圧 V は

$$V = \frac{V_{50}}{0.973} = 101.74 \text{ kV}$$

【11章】

- (1) 表 11.4 におけるスケールファクタの比 F_i の平均値は 0.99399 であることから、指定スケールファクタは $10000 \times 0.99399 = 9939.9$ となる。
- (2) 測定システムの応答波形を図 1 に示す。

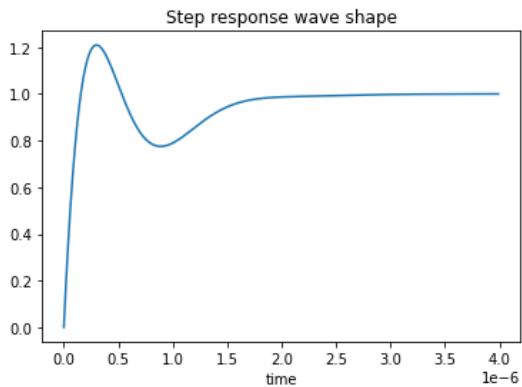


図 1 ステップレスポンス波形

続いて、測定原波形を図 2 に示す。

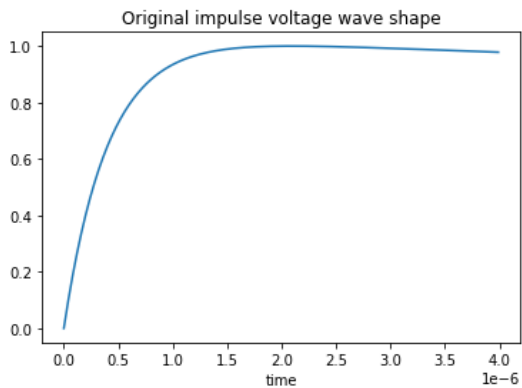


図 2 測定原波形

両波形をコンボリューションすることにより、測定波形は図 3 のように歪む。

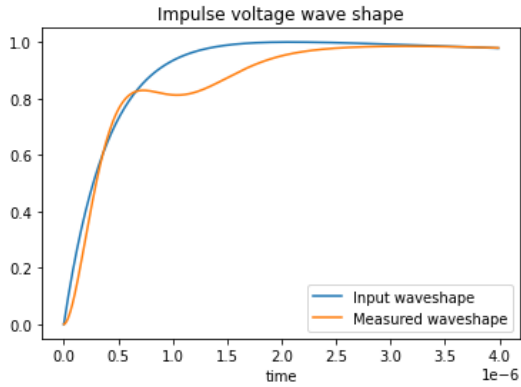
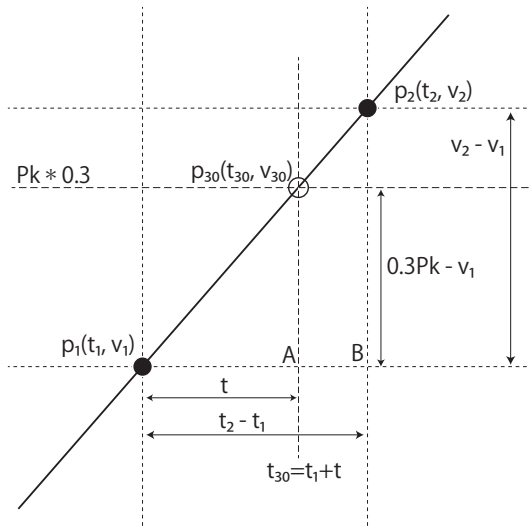


図 3 測定波形

なお、コンボリューションのプログラムはここから入手可能である。

【1 2 章】

- (1) 図のように 30% 波高点直前の測定点の座標を $p_1(t_1, v_1)$ 、直後の測定点の座標を $p_2(t_2, v_2)$ とするとき、両座標間の時間間隔は $t_2 - t_1$ 、電位差は $v_2 - v_1$ で表される。



また、30%波高点に達する時間 t_{30} は $t_1 + t$ で、さらに座標 p_1 と 30%波高点間の電位差は $0.3p_k - v_1$ から求めることができる。ここで、三角形 p_1Ap_{30} および三角形 p_1Bp_2 は相似形であることから、

$$t_{30} = t_1 + \frac{(v_2 - v_1)(t_2 - t_1)}{0.3P_k - v_1}$$

で求められる。

- (2) 12.3.3 で示すプログラムの 51 行目から 69 行目が IIR フィルタの実行部分である。本文中に示すようにカットオフ周波数は 55 行目に示すように 20 MHz としている。この値から計算される Kf, X, および a1, b0 がフィルタ係数である。

【13章】

- (1) 倍率器を流れる電流の大きさ i を求めると、

$$\begin{aligned} i &= \frac{50 \times 10^3}{500 \times 10^6} \\ &= 0.1 \times 10^{-3} = 100 \mu\text{A} \end{aligned}$$

- (2) (13.1) 式に代入して

$$\begin{aligned} V_{50} &= \frac{V_m(50 - n) + V_n(m - 50)}{m - n} \\ &= \frac{301(50 - 23.3) + 297(74.1 - 50)}{74.1 - 23.3} \\ &= 299.1 \end{aligned}$$

これは、表 10.2 で実施した昇降法の結果と同一の結果となる。

- (3) (1)

(1) の SF_6 ガスは、もともとはオゾン層を破壊するフロンに代わって開発された気体である。同圧力の空気と比較すると絶縁耐力、消弧能力とも高く、安定した不燃性ガスであるため電力機器に多く用いられている。しかし地球温暖化係数 (GWP100) が 23900 と非常に高い温室効果ガスに指定されており、大気中に排出されると地球温暖化に影響を与える。また (4) のがいしについて、我が国では磁器がいしが主に使われているが、軽量性や耐衝撃性などの観点から徐々にポリマがいしも利用されるようになっていく。