

1. 高電圧実験

1 目的

高電圧工学で扱う気体、液体、固体の絶縁破壊現象について実験を通じて理解を深める。気体、液体、固体の各物質の絶縁破壊電圧を測定して、その特性を考察する。更に、衝撃電圧（インパルス電圧）の放電特性について実験する。実験を通じて高電圧実験装置の安全な取り扱い方法についても学ぶ。

2 原理

本実験は、「気中直流火花放電特性」「液体および固体の絶縁破壊試験」「碍子のインパルス電圧特性」の3つのテーマから構成される。本章では、それらのテーマに共通する基本的な原理について述べる。各テーマの原理は、後述の3章の中で説明する。

絶縁体（誘電体）^{*1}における放電は極性の異なる2つの電極間で行われ、その特性は電極形状が作る電界分布の違いに依存する[2]。本実験の気体の絶縁破壊試験で使用する電極を図1に示す。電極間において、場所により電界が変化せず一様なものを平等電界と呼び、同図の(a)平板-平板電極（平行平板電極）、及び、(b)球-球電極がそれにあたる。一方、電界が場所により変化するものを不平等電界と呼び、同図の(c)針-針電極、及び、(d)針-平板電極がそれにあたる。高電圧工学においては、特に平等電界を形成する(a)や(b)が電極の基本となる。

平等電解における同一ギャップ長の絶縁体三態（気体、液体、固体）の模式的な電圧電流特性を図2に示す。三態の絶縁体に共通して電圧を徐々に上げると、初めのうちは微弱な電流（暗流）が流れる。更に電圧を上げていく

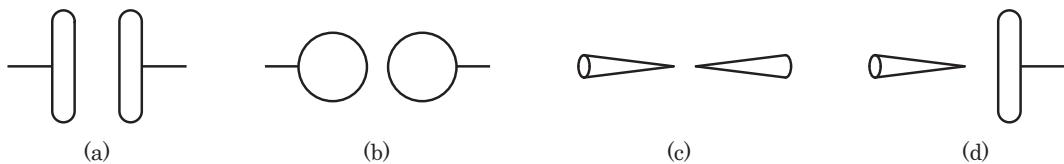


図1 本実験の気体の破壊試験で使用する電極。(a) 平板-平板電極, (b) 球-球電極, (c) 針-針電極, (d) 針-平板電極

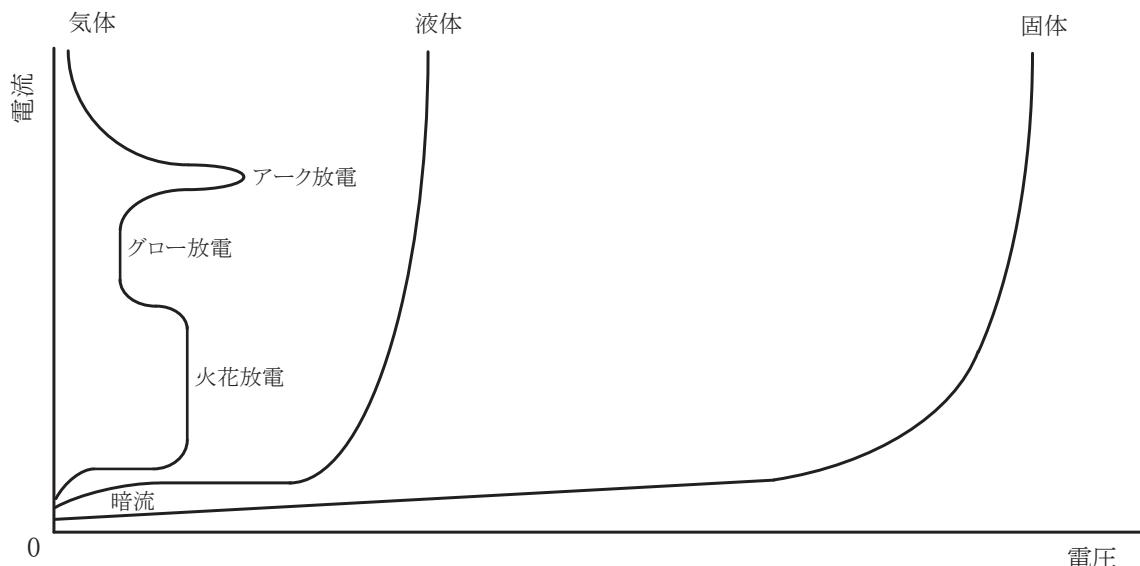


図2 平等電解における同一ギャップ長の絶縁体三態（気体、液体、固体）の電圧電流特性

^{*1} 絶縁体と誘電体は、厳密には異なるものとなるが、高電圧工学では同じ意味で使用される[1]。

と、急激に電流が流れようになり、ある電圧で2つの電極は短絡された状態となる。この状態における絶縁体は、絶縁物としての性質を失い、導電性をもった放電路で短絡（橋絡）されたことになる。このことを_____呼び、このときの電圧を_____（破壊電圧）と呼ぶ。

完全な絶縁破壊に至るまでの過程は物質毎に異なり、特に、気体は火花放電、グロー放電、アーク放電と呼ばれる複雑な過程を経て完全な絶縁破壊に到る。気体の破壊電圧を火花放電電圧（火花電圧）とした場合、絶縁体三態の破壊電圧の傾向は、_____, ____, ____の順となる。実際には試料の種類や状態、試験方法の違いといった様々な要因が重なり、一様な値をとることは少なく、気体、液体、固体の順で実験が難しくなる傾向にある。

絶縁破壊後の絶縁体は、電圧を取り除くことにより再びほぼ元の絶縁性能を回復する自復性のものと、永久変化を起こして再び絶縁物として使用できない非自復性のものがある。気体は前者が多く、固体はほとんど後者であり、液体は場合によりそのいずれかとなる[10]。前述の通り、絶縁破壊現象の解明は物理的、構造的な点から、気体、液体、固体の順に難しくなるといわれている。このような背景から、本実験では絶縁破壊理論の基本となる気体の火花放電について重点的に扱う。

3 実験

2章で前述したように、本実験は3つのテーマから構成される。実験全体を通して測定項目が多いため、確認用の測定項目一覧を以下に示す。

【測定項目一覧】

3.1. 気中直流火花放電特性 (DCのみ、計50回)

- 1) 平板-平板 (実験式あり) {0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6cm × 2回 (計10回)}
- 2) 球-球 (実験式あり) {0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6cm × 2回 (計10回)}
- 3) 針-針 (実験式あり) {1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0cm × 2回 (計10回)}
- 4) 針(+) - 平板 {0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6cm × 2回 (計10回)}
- 5) 針(-) - 平板 {0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6cm × 2回 (計10回)}

※結果の整理で、1)~3)の結果を1つのグラフにまとめる。同様に4), 5)の結果も1つのグラフにまとめる。

3.2. 液体および固体の絶縁破壊試験 (計7回)

- 1) 絶縁油の破壊電圧 (DCのみ、5回)
- 2) 固体絶縁物の破壊電圧 (ACのみ、2回)

3.3. 碁子のインパルス電圧特性 (計30回から40回)

- 1) 放電率 (30回から40回、50% フラッシュオーバー電圧をグラフから補完法で求める)
- 2) インパルス電圧の波形 (フラッシュオーバーしていない波形を撮影して規格に基づく雷インパルスかを確認)

高電圧実験では、可能な限り条件を揃えて実験を行っても、破壊電圧にある程度のばらつきが生じるため、基本的に同一条件で複数回の測定を行い、その平均値を破壊電圧とする。同一の測定を繰り返すため、実験に慣れるに従って油断が生じやすいが、危険を伴う実験であるので最後まで注意して実験を行うこと。

3.1 気中直流火花放電特性

3.1.1 目的

代表的な気体絶縁材料として空気や六フッ化硫黄ガス (SF_6) 等が用いられる。本実験では、安価で優れた絶縁材料である空気の直流火花電圧を測定する。図1に示した各電極について、電極間隙（ギャップ長）と火花電圧との関係を測定して、実験式^{*2}との比較、及び、電極形状による違いについて考察する。

^{*2} 「実験式（経験式）」は「理論式」と異なる。実験結果の数値的取扱いから導き出された式を実験式と呼ぶ。これに対し、物理現象などの理論的考察より導き出された式を「理論式」と呼ぶ。

3.1.2 原理

前述の2章のように、平等電界と不平等電界では電極形状の違いにより、火花放電に至る過程や破壊電圧が異なる。更に、空気の破壊電圧は、気圧や気温の変化による相対空気密度の影響を受ける。本節では、それについて述べた後、電極形状ごとの破壊電圧の実験式について述べる。

(a) 平等電界の火花放電 [4]

平等電界の気体の絶縁破壊において、電流が急増して火花放電に至るまでの過渡現象の説明に二つの代表的な考え方がある。一つは、比較的低気圧電極（ギャップ）間隔が短い場合の実験に適するタウンゼントの理論で、もう一つは常温、長ギャップの場合に適するストリーマ理論である。更に、先の二つの理論と並び重要な経験則として _____ がある。パッシェンの法則は数cm～数十cmで成立し、火花電圧 V_s は比例定数 f 、気体の圧力 p とギャップ長 d の積 pd 積により次式で与えられる。

$$V_s = f(pd) \quad (1)$$

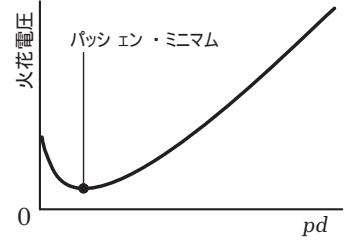


図3 pd 積と火花電圧（両対数グラフ）

pd 積と火花電圧との関係を図3に示す。パッシェンの法則において pd 積を非常に小さくすると、火花電圧がある点で極小値となってからは低下せずに逆に上昇する特性をもつ。この極小値をパッシェン・ミニマム^{*3}と呼ぶ。

(b) 不平等電界の火花放電 [5]

針-平板電極系のような _____ 電界では、火花放電までの過程が平等電界と異なる。不平等電界では、電界が針先端に集中して、この部分で局所的に絶縁破壊（放電）が生じる。このような現象を部分放電、またはコロナ放電と呼ぶ。コロナ放電は多数のストリーマの集合体で、電圧を維持している間継続して見られる。コロナ放電の中の1つのストリーマが対向電極に接近ないし到達すると、火花放電へ瞬時のうちに移行する。

不平等電界では、コロナの様子や火花電圧に極性による違いが見られ、これを極性効果と呼ぶ。針端電極が正である場合を正極性コロナ、負である場合を負極性コロナといい、正極性コロナの方が進展し易く火花放電に移行し易い。また、平等電界と不平等電界とでは火花電圧が大きく異なる。同じギャップ長でも不平等電界の火花電圧は平等電界の火花電圧に比べて数分の一まで低下する。

(c) 相対空気密度 [6]

相対空気密度は標準状態（20°C, 1013 hPa）の空気密度を1としたときの空気密度である。測定時の気圧を $p[\text{hPa}]^{*4}$ 、測定時の温度を $t[\text{C}]$ としたとき、相対空気密度 δ は次式で与えられる。

$$\delta = \frac{p}{1013} \times \frac{273 + 20}{273 + t} = 0.289 \times \frac{p}{273 + t} \quad (2)$$

標準状態の火花電圧 V_n から測定時の火花電圧 V_s を計算する場合は、次式を用いる。

$$V_s = V_n \times \delta \quad (3)$$

(d) 平板-平板電極系 [7],[8]

平板-平板電極は均一な電界を作るのに最も適した電極であるが、平板は有限の大きさであることから平板端で電界の集中（端効果）が生じる。この端効果を防ぐため、電極端を丸めた電極が用いられており、この電極をロゴウスキー電極と呼ぶ。実際のロゴウスキー電極は製作が非常に困難であるため、近似ロゴウスキー（平板-平板）電極が用いられる。ギャップ長を $d[\text{cm}]$ としたとき、この電極の火花電圧の実験式は次式で与えられる。

$$V_s = 23.85 \delta \left(1 + \frac{0.329}{\sqrt{\delta d}}\right) \times d \quad [\text{kV}] \quad (4)$$

^{*3} パッシェン・ミニマムは、気体の種類が空気の場合で $pd = 5.5[\text{mmHg} \cdot \text{mm}]$ となる。この pd 積について考えると、標準状態の気圧 1013hpa でギャップ長は $7.23\mu\text{m}$ となる。本実験の最短のギャップ長 0.4cm の気圧は 18.3hpa となり、これは約 5.2 万 m の標高（中間圏）の気圧に相当する。これらは、非常に短いギャップ長または非常に低い気圧のため、本実験では確認できない。

^{*4} 試験室の気圧計の単位は mbar（ミリバール）であるが、mbar の値をそのまま hPa（ヘクトパスカル）として扱うことができる。

(e) 球-球電極系 [9],[10]

近似ロゴウスキ-電極は工作が難しく、電極の平行性を厳密に保つことも難しい。それに比べて、球-球の電極系は簡単に平等電界を得ることができるために、実用的によく用いられる。ギャップ長を $d[\text{cm}]$ 、球半径を $r[\text{cm}]$ としたとき、火花電圧の実験式は次式で与えられる。

$$V_s = 27.9\delta \left(1 + \frac{0.533}{\sqrt{\delta r}}\right) \times \frac{d}{f} [\text{kV}] \quad (5)$$

ここで、 f は接地状態の影響による補正係数である。本実験の電極は、一球接地でギャップ長と球半径の関係が $d/r < 1$ となるため、その補正係数 f は次式で与えられる。

$$f \cong 1 + \frac{1}{3} \frac{d}{r} + \frac{1}{45} \left(\frac{d}{r}\right)^2 + \frac{73}{53760} \left(\frac{d}{r}\right)^3 + \dots \quad (6)$$

(f) 針-針電極系 [11]

針-針ギャップは不平等電界を形成する代表的なギャップであり、必ずコロナ放電を経てから火花放電が発生する。針-針ギャップの火花電圧の実験式は、ギャップ長 $d[\text{cm}]$ が比較的大きい範囲 (30 ~ 300cm) でほぼ直線的となり、次式で与えられる。ただし、この式は気温 25 °C、気圧 1013hPa、水蒸気量 15g/m³ を前提とする⁵。

$$V_s = 18.4 + 5.01 \times d[\text{kV}] \quad (7)$$

(g) 針-平板電極系 [12]

針-平板ギャップも針-針ギャップと同様、代表的な不平等電界ギャップであり、必ずコロナ放電を経て火花放電が発生する。図 4 に針-平板電極の火花電圧特性を示す。針が負の場合にコロナは発生しやすいが、コロナの発達は針が正の場合の方がしやすいため、明確な極性効果を生じる。ギャップ長が 0.4cm 程度より短い場合は、コロナ開始電圧の影響が大きく針が負の方が火花電圧が低いが、ギャップ長がそれより長くなると、針が正の方が火花電圧が低くなる。

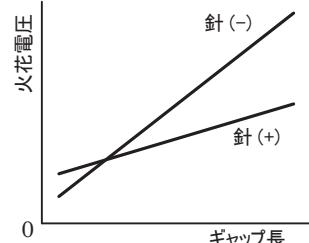


図 4 針-平板電極の火花電圧

3.1.3 実験方法

図 5 に示す直流火花電圧測定回路を用いて、2 章の図 1 の各ギャップ (平板:半径 5cm、球:半径 5cm) の火花電圧を測定する。本実験で使用する直流高電圧発生装置は、IGBT を使用した PWM 方式の最大出力 50kV の電源装置である。電圧の極性は負極性とし、針-平板ギャップは極性を交換した場合の火花電圧も測定する。平板-平板電極、及び、(b) 球-球電極のギャップ長は 0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6cm、針-針ギャップのギャップ長は 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0cm で測定する。火花電圧は不揃いなため、同一ギャップに対して 2 回測定し、その平均値を測定値とする。

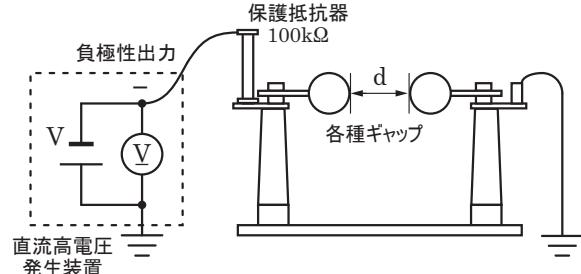


図 5 直流火花電圧測定回路

実験上の注意

- 1) 安全に配慮して、実験装置は試験室のドアが開いているときに電圧が印加されない仕様となっている。試験室内で作業をする際は、必ず試験室のドアを開けた状態としておくこと。
- 2) 電極や電圧の極性を変更する場合など、ギャップ等に触れる際は必ず電源装置の電源を切り、触れる箇所にアース棒を接触させた状態で作業を行うこと。
- 3) 電極の設定を変更した直後は電極の周囲の空気が安定していないため、本来の実験では予備放電を 1 回以上行った後で測定を行うが、今回は時間の都合上、予備放電を省略する

⁵ (7) 式は相対空気密度の影響を考慮していない。後述の資料 1 を参考に、測定時の火花電圧 V'_s は、 $V'_s = V_s \times \delta'$ を計算する。ただし、式 7 の基準時の気温は 25 °C なので、そのときの空気密度を 1 としたときの相対空気密度 δ' は、 $\delta' = (p/1013) \times (273+25)/(273+t) = 0.294 \times p/(273+t)$ で計算する。なお、完全な不平等電界の場合、ギャップ長 1cm あたりの火花電圧の傾きは、約 5kV/cm となる。

4) 火花電圧は電圧上昇率によって変化するので、ほぼ一定の上昇率となるようにボリュームを上げること。

3.1.4 実験結果の整理

- 1) 各種ギャップの火花電圧（針一平板電極は除く）を実験式から計算して、測定結果と比較する表を作成せよ。
- 2) 上記 1) で作成した表をもとに、平板一平板電極、球一球電極、針一針電極について、ギャップ長と火花電圧の関係を 1 枚にまとめたグラフを作成せよ。グラフは、各種ギャップごとに実験式と測定結果の両方をプロットして、1 枚のグラフに 6 種類のデータがあるものとせよ。
- 3) 上記 1) で作成した表をもとに、針(+)一平板、及び、針(-)一平板ギャップについて、ギャップ長と火花電圧の関係（極性効果）が比較できるグラフを作成せよ。グラフは、1 枚のグラフに 2 種類のデータがあるものとせよ。

3.1.5 報告事項

- 1) 実験結果の整理 2) で作成したグラフについて、以下の点に着目して 400 字程度で考察を論じよ。
 - ・ 原理（平等電界か不平等電界など）の特性が、各種ギャップの測定値に表れているか
 - ・ 実験式と測定値の比較
- 2) 実験結果の整理 3) で作成したグラフについて、極性の違いに着目して 150 字程度で考察を論じよ。

3.2 液体および固体の絶縁破壊試験

3.2.1 目的

本実験では、絶縁油の破壊試験、及び、固体絶縁体の破壊試験を行う。試験方法を学び測定結果を検証する。

3.2.2 原理

本節では、液体の絶縁破壊、及び、固体の絶縁破壊について、実験で扱う内容を述べる。液体の破壊試験は、日本工業規格（JIS）で定められている絶縁油の破壊試験に準じた試験を行うため、それについて述べる。

(a) 液体の絶縁破壊 [13]

液体絶縁体には様々なものがあるが、実用的に使用されているものは絶縁油である。絶縁油は、工業的に特別に原油から精製して、変圧器、遮断機、電力ケーブル等に使われる鉱油と、化学合成によって作られるアルキルベンゼン、シリコン油等の合成油がある^{*6}。特に、鉱油は絶縁耐力および絶縁抵抗が非常に______ことに加えて、科学的に安定で不純物の含有量が少なく引火点が高い特長がある。

実際の液体の破壊電圧は、1) ギャップ長、2) 液体中の気泡、水分、繊維、微粒子等の不純物、3) 面積効果・体積効果^{*7}、4) 圧力、温度、5) 電圧波形、6) 印加時間など、様々な要因に依存する。これらの要因の中、ギャップ長と破壊電圧は、図 6 のようにギャップ長に比例して破壊電圧が大きくならない飽和特性を持つ。ギャップ長 d 、破壊電圧 V としたとき、次式の関係となる。ここで、定数 A 、 n は、絶縁体の材料、電極構造、測定方法などに依存する値で、 n は 0.5~0.7 の間をとる。

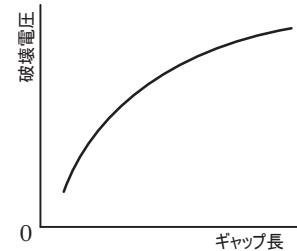


図 6 絶縁油のギャップ長と破壊電圧の関係

(b) 固体の絶縁破壊 [14]

固体絶縁体は、マイカ（雲母）、磁器、ガラスなどの無機材料と、ゴム、プラスチック、繊維などの有機材料がある。固体絶縁体も、他の絶縁体と同様に材料によって絶縁耐力が異なり、その実例を表 1 に示す。

固体絶縁体の絶縁耐力は非常に______く、空気中で破壊試験を行った場合、試料である固体絶縁体が絶縁破壊を起こす前に試料の表面に沿った空気で放電（沿面放電）が生じて、試料の破壊電圧を測定することができない。そこ

^{*6} 灯油、ガソリン、動植物油（食用油）なども絶縁体である。また、純度の高い純水は絶縁体である（水道水などの一般的な水は導体）。

^{*7} 電極と液体が接する表面積や電界が加わる液体の体積が大きくなると、液体の破壊電圧が低下する特性。

表 1 固体絶縁体の絶縁耐力の例

材料	絶縁耐力 [kV/mm]
白マイカ	25 ~ 70
ソーダ石灰ガラス	5 ~ 20
アルミナ磁器	10 ~ 16
ブチルゴム	20 ~ 30
低密度ポリエチレン	17 ~ 40
ポリメチルメタクリレート（アクリル樹脂）	15 ~ 22

で、固体絶縁体（試料）を絶縁油中に入れて破壊試験を行う。絶縁油の絶縁耐力は空気の絶縁耐力よりも大きいため、こうすることで、より高い電圧を試料に印加することが可能になる。この試験方法を油中破壊試験と呼ぶ。

固体絶縁体の破壊電圧も、液体絶縁体と同様に様々な要因に依存する。1) ギャップ長、2) 媒質効果⁸、3) 圧力、温度、4) 電極構造、5) 電圧波形、6) 印加時間などが、それにあたる。これらの要因の中、ギャップ長 d に対する破壊電圧 V の関係は、液体の場合と同様に次式となる。ここで、定数 A 、 n は、絶縁体の材料、電極構造、測定方法などに依存する値で、 n は 0.5~0.7 の間をとる。

$$V = Ad^n \quad (A, n \text{ は定数}) \quad (9)$$

(c) 絶縁油の破壊試験 [15],[16]

変圧器や油入遮断器（OCB）などに使用している絶縁油は、機器の使用の有無に関わらず時間とともに劣化する。そのため、定期的に絶縁油の絶縁耐圧試験を行い、その性能を把握する必要がある。日本工業規格（JIS）の JIS C 2101（1999）に試験方法が、JIS C 2320（1999）に絶縁油の特性が定められている。

試験方法は直径 12.5mm の球電極を 2 個使用し、2.5mm のギャップ長で商用周波数（50Hz または 60Hz）の交流電圧（電圧上昇率 3 kV/s）を 15~35 °C の試験油に印加する。測定回数は同一試験油から 2 個の試料をとり、各試料ごとに 5 回ずつ測定を行う。絶縁破壊電圧は 5 回測定したそれぞれ始めの値を除いた合計 8 個の測定値を用いて、次式により計算する。ここで、絶縁破壊電圧を V 、1 個目の試料の 2~5 回目の測定値を $V_2 \sim V_5$ 、2 個目の試料の 2~5 回目の測定値を $V'_2 \sim V'_5$ とする。この試料の破壊電圧 V が 30kV 以上であれば合格となる。

$$V = \frac{(V_2 + V_3 + V_4 + V_5) + (V'_2 + V'_3 + V'_4 + V'_5)}{8} \quad (10)$$

3.2.3 実験方法

液体絶縁物、及び、固体絶縁物の破壊試験を行う。液体絶縁物については、JIS に準じた絶縁油の破壊試験を行い、固体絶縁物については、ベークライト板（フェノール樹脂）の油中破壊試験を行う。

(a) 絶縁油の破壊試験

図 7 に絶縁油の絶縁破壊試験回路を示す。試料となる絶縁油は JIS C 2320 の 1 種 2 号にあたる。JIS の試験法に準じ絶縁油試験装置の電極には直径 12.5mm の球ギャップを用い、ギャップ間隔を 2.5mm に設定し電極の上端が油面下 20mm となるように絶縁油を入れ破壊電圧を測定する。なお、実験装置の仕様のため、印加電圧は JIS と異なる直流電圧を印加する。測定は、1 個の試料で 5 回行い、2~5 回目の測定値を平均して破壊電圧とする。

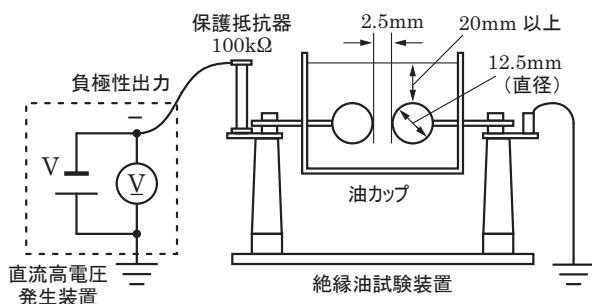


図 7 絶縁油の破壊試験回路

⁸ 固体絶縁体の破壊試験において貫通破壊を確実に行うため、試料の破壊を行いたい箇所の厚みを薄くする場合がある。電極形状もその凹部に合わせて凸部とするが、完全に形状が一致せず僅かな隙間が生じる。その隙間で生じる部分放電が破壊電圧に影響を及ぼすことを媒質効果と呼ぶ。

(b) 固体絶縁物の破壊試験

図 8 に固体絶縁物の絶縁破壊試験回路(油中試験)を示す。試料に交流上昇電圧(電圧上昇率 500 V/s)を印加して、交流絶縁破壊電圧を測定する。実験装置の仕様のため、最大電圧は 50kV とする。試料には厚さ 1mm のベークライト板を用いる。測定回数は 2 回とし、その平均値を測定値とする。

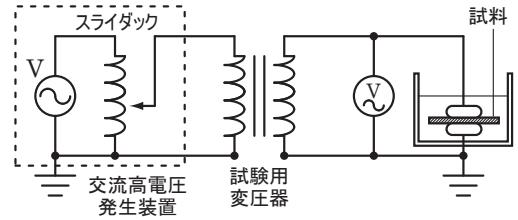


図 8 固体絶縁物の絶縁破壊試験回路

3.2.4 実験結果の整理

- 1) 絶縁油の破壊試験の 4 回の測定結果から平均値を求めよ(5 回の測定の 2~5 回目を平均する)。この平均値を JIS の合格基準 30kV と比較して、合否の判定をせよ。
- 2) 固体絶縁物の破壊試験の 2 回の測定結果から平均値 V_a を求めよ。この平均値から波高値 $V_s = \sqrt{2}V_a$ [kV] を計算せよ。更に、波高値を材料の厚さで割って絶縁破壊の強さ(絶縁耐力) [kV/mm] を計算せよ。

3.2.5 報告事項

- 1) 絶縁油の破壊試験で測定した絶縁油のギャップ長 1cm の破壊電圧について、式(8)から計算せよ。ここで、 n の値は 0.5 とせよ。
- 2) 固体絶縁物の破壊試験で測定したベークライト板の厚さ 1cm の破壊電圧について、式(9)から計算せよ。ここで、 n の値はとりうる範囲の中央の値の 0.6 とせよ。
- 3) 本実験で得られた気体、液体、及び固体のギャップ長 1cm の破壊電圧の比較をせよ。気体の破壊電圧は前章の平等電界のギャップ長 1cm の値、液体の破壊電圧は前述の考察 1) の値、固体の破壊電圧は前述の考察 2) の値を用いよ。破壊電圧が昇順となるよう物質を並べて、それらの破壊電圧の比を求めて、考察を述べよ。

3.3 碍子(がいし)のインパルス電圧特性

3.3.1 目的

インパルス電圧による碍子の 50% フラッショーバ電圧を測定する。また、インパルス(衝撃)電圧発生装置の回路構成について学び、その操作方法を修得する。

3.3.2 原理

(a) インパルス電圧 [17],[18]

インパルス電圧は、落雷時や電力系統の開閉時に発生する過電圧を模擬した電圧である。インパルス電圧の波形は千差万別で様々であるが、試験を行う場合などで波形を統一するため、標準的な規格が定められている。電気学会(The Japanese Electrotechnical Committee)が発行する電気規格調査会標準規格(JEC)の JEC0202(1994)で規定されている標準波形を図 9 に示す。

波形の特徴を表す重要な数値は、波高値 P、(規約) 波頭長 T_1 、(規約) 波尾長 T_2 であり、一般的な波形の表記

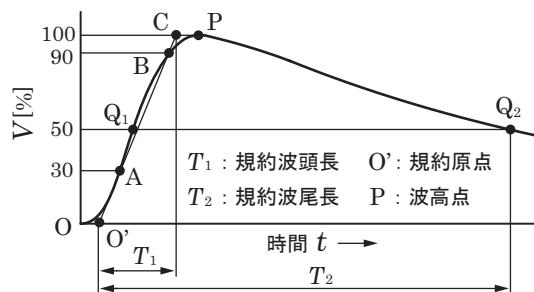


図 9 標準波形の詳細 ($T_1/T_2[\mu s]$)

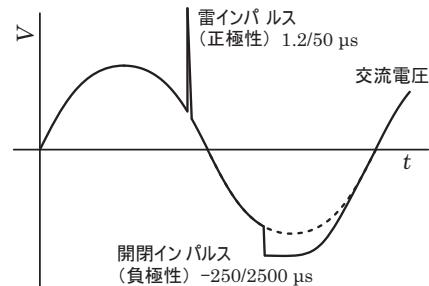


図 10 雷インパルス電圧と開閉インパルス電圧

は $T_1/T_2[\mu\text{s}]$ のようになる。正負の極性を記す場合は $\pm T_1/T_2[\mu\text{s}]$ のように、最初に正負の符号を記す。

インパルス電圧は、その発生原因に由来して雷インパルス電圧と開閉インパルス電圧に分類される。前者は数十 μs 、後者は数 ms 程度継続するパルス状の電圧である。これら 2 つのインパルス電圧が交流電圧に重畠された様子を図 10 に示す。同図の 2 つのインパルス電圧は、ともに日本における標準波形で、雷インパルス電圧は $1.2/50\mu\text{s}$ 、開閉インパルス電圧は $250/2500\mu\text{s}$ である。

(b) 多段式インパルス電圧発生回路 [19],[20]

インパルス電圧発生器は、コンデンサに充電された電荷を目的の回路に放電してインパルス電圧を発生する装置である。通常、1 つのコンデンサで高いインパルス電圧を発生させることは難しく、複数のコンデンサで構成される多段式インパルス電圧発生回路が用いられる。

本実験で使用する多段式インパルス電圧発生回路を図 11 に示す。この装置は、充電時にコンデンサを下から上への順で充電して、放電時に 4 つの球ギャップを短絡させて、4 つのコンデンサを直列接続してインパルス電圧を発生する。同図において、太線の回路が放電回路となる。充電電圧を V_i としたときのインパルス電圧 V_o は、損失があるため V_i の 4 倍にならず、次式となる。

$$V_o = 4V_i \times k[\text{kV}] \quad k : 0.846 \quad (\text{利用率} = V_o \text{の波高値}/(V_i \text{の充電電圧} \times 4)) \quad (11)$$

(c) 補間法（内挿法）[21],[22]

放電率が 20~80% の範囲内では、放電率とインパルス電圧がほぼ比例する関係にある。この関係を使って 50% フラッシオーバ電圧を求める手法を補間法と呼ぶ。補間法では、ある同一のインパルス電圧を試料に 10 回以上印加して、そのときの放電率が $20 < m < 50\%$ となる印加電圧 V_m と、 $50 < n < 80\%$ となる印加電圧 V_n を求める。更に、図 12 のグラフのようにこれらの 2 つの値を直線で結び、そこから 50% フラッシオーバ電圧を求める。

3.3.3 実験方法

JIS 記号 180EP の懸垂碍子（直径 180mm、高さ 140mm、表面漏れ距離 170mm、耐雷インパルス電圧 75kV/個）に、インパルス電圧発生装置で発生させた負極性インパルス電圧を印加して放電率を測定せよ。表 2 の記録例のように同一の充電電圧でインパルス電圧 10 回印加し、フラッシオーバの有無を記録する [23]。フラッシオーバ

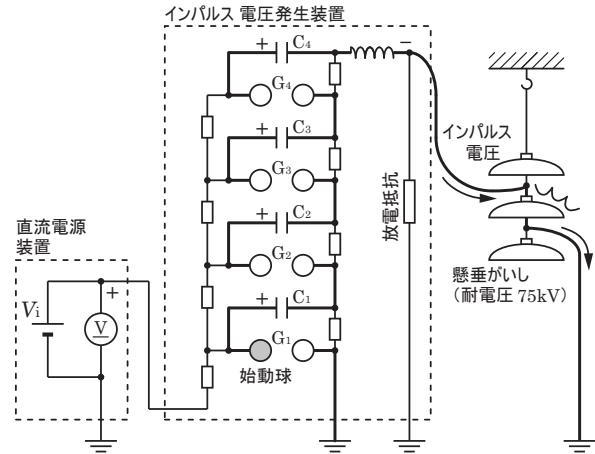


図 11 多段式インパルス電圧発生回路

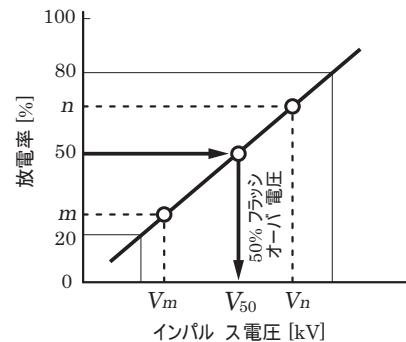


図 12 補間法のグラフ

表 2 「碍子に印加したインパルス電圧と放電率」の記録例

インパルス電圧 V_o [kV]	充電電圧 V_i [kV]	フラッシオーバの有無（有: ○、無: ×）										放電率 [%]
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 回目	
27.0		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0
27.4		×	○	×	×	○	×	○	×	×	×	30
27.8		○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	80
28.2		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100

した場合には、30秒以上放電の間隔を空ける。また、フラッシュオーバしていないインパルス電圧の波形をオシロスコープで観測し、デジカメ等で撮影せよ（同じ波形を $t = 10\mu s/div$, $t = 1\mu s/div$ で記録、オシロスコープの波形輝度を100%にすると見やすい）。なお、波形の振幅は、高圧プローブにより1/20000に減衰される。

3.3.4 実験結果の整理

補間法のグラフより、実験で用いた碍子の50% フラッシュオーバ電圧を求めよ。更に、この碍子について、50% フラッシュオーバ電圧と、耐雷インパルス電圧値 75kV/個を比較して考察せよ。また、撮影したインパルス電圧の波形の波頭長および波尾長から、規格に基づく雷インパルスであることを確認せよ。

3.3.5 報告事項

- 1) 人体に電流が流れ障害を起こすことを感電と呼ぶ。約10mA程度の感電であれば、自分の意志で充電部から離れることができ、その値を可随電流または離脱電流という。離脱電流は個人差があり、男性、女性、子どもの平均的な値を表3に示す[24]。ここで、実験で測定した50% フラッシュオーバ電圧と同じ電圧に感電した場合の自分の安全性について考察せよ。自分の抵抗値をデジタルテスタで測定し、自分の人体に流れ電流を計算し、離脱電流と比較せよ。なお、人体の抵抗値は接触電圧が10倍大きくなると約1/2倍になる性質があり、高電圧に感電した場合の人体の抵抗値は本来の値より低くなるが、今回の実験ではおよその値で考察できればよいので、各自の両手間の抵抗値を感電時の抵抗値とする。

表3 人体に対する電流の限界値（商用周波数）

限界の種類	人数 (%)	離脱電流 [mA] (手一手)		
		男性	女性	子ども
安全電流	99.5% の人が自力で離脱できる	9.00	6.03	4.50
離脱限界電流	50% の人が自力で離脱できる	15.87	10.63	7.94
危険電流	0.5% の人が自力で離脱できる	22.70	15.20	11.35

- 2) 雷は“落ちる”と表現される。しかし、稻妻（雷放電）は一瞬で、人間の視覚が稻妻の過程を正確に捉えることはほぼ不可能であるため、“落ちる”という表現が科学的に正しいかは不明である。そこで、雷放電の過程について文献で調べて、稻妻が“落ちる”だけなのかについて報告せよ。

4 レポートのまとめ方

本実験のレポートは作成および採点の手間を省くため、下記の内容で可とします。但し、ここで述べていることは、本来のレポートの書き方でないことを認識しておいて下さい。

1) 構成について

始めに実験全体の「目的」を1章として記して下さい。「原理」の章は不要です。次に、2章のタイトルを「実験」として、実験日の気象条件、使用機器を記して下さい。その後に続けて、「2.1 気中直流火花放電特性」、「2.2 液体および固体の絶縁破壊試験」、「2.3 碾子のインパルス電圧特性」の3つの節を設けて、各節ごとに「実験結果」「報告事項」を記して下さい。各節の「目的」「原理」「実験方法」は不要です。レポート全体の最後にレポート作成に使った参考文献のみを記して下さい。参考文献の章のタイトルは、章番号を付けずに「文献」として下さい。

2) グラフについて

グラフ作成ソフト等でグラフを作成する場合は、見やすいグラフとなるように設定を適切に変えて下さい。ほぼデフォルト設定の見づらいグラフは、大きく減点します。

3) ワープロか手書きか

全てワープロ書きでOKです。

4) 提出は紙か PDF か

提出は紙に印刷して提出して下さい。

指導者用メモ

- オシロは入力の端子 (CH1) が繋がっていないことがある。高圧プローブは操作盤のアースに繋ぐ。
- オシロの “Single SEQ” を押して左のランプが点いた状態にする。画面の右上に “Trig?” と表示されるようにして、操作盤の “Discharge” を押す前に波形は出でていないことを確認する。レンジは 1V または 2V, 時間は $10\mu s$ または $400ns$ とする。
- レポートの提出期限は、時期や行事の有無による影響を減らすため、3 実験日後までとする (2024 年度)。

参考文献

- [1] 小崎正光：“高電圧・絶縁工学（インターユニバーシティ）”，オーム社, p.19, (1997).
- [2] 日高邦彦：“高電圧工学（新・電気システム工学）”数理工学社, p.44, (2009).
- [3] 大木正路：“高電圧工学（大学電気電子工学シリーズ）” 権書店, p.167, (1982).
- [4] 日高, 前掲, pp.42-43.
- [5] 同上, pp.46-47.
- [6] パルス電子技術株式会社：“高電圧試験装置 HVS 実習資料 Ver2.4”, pp.1-2, (2008).
- [7] 今西周蔵・鷺見篤：“高電圧工学（新編電気工学講座 29）”コロナ社, pp.19-20, (1979).
- [8] 河村達雄・河野照哉・柳父悟：“高電圧工学 [3 版改訂]（電気学会大学講座）”電気学会, p.29, (2003).
- [9] 凰誠三郎・木原登喜夫：“高電圧工学”, pp.9-12, (1960).
- [10] 大木正路：“高電圧工学（大学電気電子工学シリーズ）” 権書店, p.85, (1982).
- [11] 河村, 前掲, p.33.
- [12] 河野照哉：“高電圧工学（電気工学基礎講座 17）”朝倉書店, pp.37-38, (1982).
- [13] 日高, 前掲, pp.96-99.
- [14] 日高, 前掲, pp.102-103.
- [15] 日本規格協会：“JIS ハンドブック 25 石油”, pp.59-71, (2006).
- [16] パルス電子技術株式会社, 文献 [6], pp.14-17.
- [17] 日高, 前掲, pp.48-49.
- [18] 河村, 前掲, pp.226-227.
- [19] パルス電子技術株式会社：“雷インパルス・50% 放電電圧の求め方 Ver1.0R2.0”, p.5, (2008).
- [20] パルス電子技術株式会社：“インパルス電圧発生装置 IVG-200AS 試験成績書”, p.3, (2008).
- [21] 河村, 前掲, pp.230-231.
- [22] パルス電子技術株式会社, 文献 [19], p.9.
- [23] パルス電子技術株式会社, 文献 [6], pp.26-27.
- [24] 速水敏幸：“電線のスズメはなぜ感電しない—電気&絶縁の初步（ブルーバックス）”講談社, pp.250-253, (1991).

「原理」の空欄の解答

絶縁破壊, 絶縁破壊電圧, 気体, 液体, 固体, パッシェンの法則, 不平等, 高い (大きい), 高 (大き)

使用機器

- 1) 高電圧試験装置 パルス電子技術株式会社 CR-200F-32 5477
- 2) 試験用変圧器 同上 TT-50K6U 5477
- 3) 直流接地装置 同上 DDC-50K 5477
- 4) 標準球ギャップ 同上 G-100H 5477
- 5) 気中／油中試験装置 同上 ZSK-50W 5477
- 6) インパルス電圧発生装置 同上 IVG-200AS 5477
- 7) 懸垂がいし 同上 A-S-1527AB JIS 記号：180EP
- 8) 高電圧プローブ 同上 EP-100K
- 9) オシロスコープ Tektronix TDS 3032 B012774