

高電圧実験レポート

1 目的

本実験は、気体、液体、固体の三態における絶縁体の絶縁破壊特性を試験し、高電圧工学に関する基礎的な知見と理解を深めることを目的とする。具体的には、気体絶縁体（空気）における絶縁距離と破壊電圧の関係、液体（絶縁油）および固体（ベークライト）の絶縁破壊特性を測定し、三態の絶縁耐力を比較検討する。さらに、碍子への雷インパルス電圧印加試験を通じて、碍子表面における空気の破壊電圧特性を調査する。

2 実験結果と報告事項

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つの課題で構成される。気中直流火花放電特性と液体絶縁破壊試験では直流電圧を、固体絶縁破壊試験では交流電圧を印加した。実験全体で共通する使用機器を表1に、実験時の気象条件を表2に示す。表2には、実験式の補正に用いた相対空気密度も併記する。以下、3つの課題それぞれについて結果と報告事項を詳述する。

2.1 気中直流火花放電特性

本節では、気体絶縁体である空気の絶縁破壊試験の結果を報告する。形状の異なる電極構成におけるギャップ長と破壊電圧の関係、および針-平板電極における極性効果について検証する。

表 1 使用機器

機器名	メーカー名	型番	シリアル
高電圧試験装置	パルス電子技術株式会社	CR-200F-32	5477
試験用変圧器	同上	TT-50K6U	5477
直流接地装置	同上	DDC-50K	5477
標準球ギャップ	同上	G-100H	5477
気中/油中試験装置	同上	ZSK-50W	5477
インパルス電圧発生装置	同上	IVG-200AS	5477
懸垂がいし	同上	A-S-1527AB JIS 記号: 180EP	
高電圧プローブ	同上	EP-100K	
オシロスコープ	Tektronix	TDS 3032	B012774
デジタルテスタ	オーム電機	TST-KJ380	

表 2 気象条件

気温 [°C]	気圧 [hPa]	相対空気密度	相対空気密度 (針-針)
24	986	0.959	0.976

2.1.1 形状が異なる電極のギャップ長と破壊電圧

■a) 実験結果 平板-平板電極の結果を表 3 に、球-球電極 (球半径 5 cm) の結果を表 4 に、針-針電極の結果を表 5 に示す。更に、これら 3 つの電極の特性を比較するため、結果をまとめたグラフを図 1 に示す。

■b) 考察および報告事項 図 1 に示される電極形状と破壊電圧の関係について考察する。平等電界を形成する平板-平板電極および球-球電極では、実測値と実験式による計算値が極めて良好に一致し、破壊電圧とギャップ長が比例関係にあることが確認できる。これは、電界がギャップ全体で均一であるため、放電現象が安定し、予測性の高い絶縁破壊が生じたためと考察される。

一方、不平等電界を形成する針-針電極では、ギャップ長が長くなるにつれて破壊電圧が上昇する傾向は共通しているものの、実測値と実験式の値には大きな乖離が見られる。この乖離の主な原因として、実験式が 30 cm 以上の長ギャップを想定しているのに対し、本実験が短ギャップ領域 (1 cm～5 cm) で行われたことが挙げられる。短ギャップ領域では、コロナ放電の発生・進展メカニズムや、それによって形成される空間電荷効果の影響が長ギャップの場合と異なり、実験式的前提条件から外れるため、このようなズレが生じたと示唆される。

全体を比較すると、同一ギャップ長において、平等電界ギャップ (平板-平板, 球-球) の破壊電圧は、不平等電界ギャップ (針-針) のそれを数倍上回っている。これは不平等電界では、針電極の先端に電界が集中し、低い印加電圧でも局所的に絶縁破壊が開始するためである。対照的に、平等電界ではギャップ全体が均等に電圧を分担するため、ギャップ全体としての絶縁耐力が高くなる。以上の結果は、高電圧工学における電界緩和の重要性を示すものであり、実験は原理に即した妥当な結果が得

られたと判断できる。

表3 平板-平板電極におけるギャップ長と破壊電圧

ギャップ長 [cm]	破壊電圧 [kV]			
	実験式	実測値		
		1 回目	2 回目	平均値
0.4	14.0	13.3	13.3	13.3
0.7	22.4	21.7	21.9	21.8
1.0	30.6	30.9	31.0	31.0
1.3	38.5	38.3	37.9	38.1
1.6	46.3	46.7	46.1	46.4

表4 球-球電極におけるギャップ長と破壊電圧

ギャップ長 [cm]	破壊電圧 [kV]				実験式における 補正係数
	実験式	実測値			
		1 回目	2 回目	平均値	
0.4	13.0	13.9	13.7	13.8	1.03
0.7	22.2	22.6	22.5	22.6	1.05
1.0	31.2	32.4	32.4	32.4	1.07
1.3	39.8	41.0	41.0	41.0	1.09
1.6	48.0	48.2	48.2	48.2	1.11

表5 針-針電極におけるギャップ長と破壊電圧

ギャップ長 [cm]	破壊電圧 [kV]			
	実験式	実測値		
		1 回目	2 回目	平均値
1.0	22.8	8.8	8.6	8.7
2.0	27.7	21.9	21.7	21.8
3.0	32.6	31.4	31.4	31.4
4.0	37.5	40.8	41.0	40.9
5.0	42.4	48.4	48.4	48.4

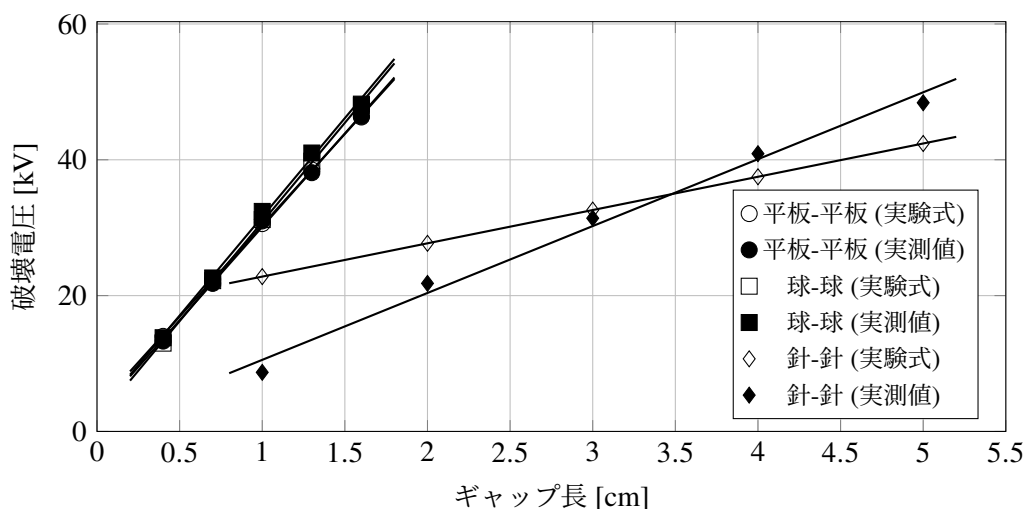


図1 各電極構成におけるギャップ長と破壊電圧の関係

2.1.2 針-平板電極を用いた極性効果

■a) 実験結果 針-平板電極における極性の違いによる破壊電圧の変化を測定した。結果を表6に、また、極性効果を視覚的に確認するため、同表の平均値をプロットしたグラフを図2に示す。

■b) 考察および報告事項 図2の結果は、不平等電界における「極性効果」を明瞭に示している。全てのギャップ長において、針電極が負極性（針(-)）の場合の破壊電圧が、正極性（針(+)）の場合を上回っている。この現象は、放電の進展メカニズムに起因する。針が負極性の場合、針先端から放出された電子が負コロナを形成する。この負イオンの空間電荷が針先端の電界集中を緩和する効果を持つため、ギャップ全体の絶縁破壊に至るにはより高い電圧が必要となる。一方、針が正極性の場合、空間の電子が針先端に引き寄せられて正イオンが生成され、ストリーマ放電が進展しやすくなるため、比較的低い電圧で破壊に至る。

また、近似直線からは、ギャップ長が極めて短い領域（本実験では $d \approx 0.25$ cm 付近）で破壊電圧の関係が逆転する可能性が示唆される。これは、極短ギャップでは空間電荷形成の効果が薄れ、電極表面の状態や電子放出過程そのものが破壊電圧を決定する支配的な要因となるためと考えられる。以上の考察から、本実験では原理通りの極性効果が確認できたといえる。

表6 針-平板電極におけるギャップ長と破壊電圧

ギャップ長 [cm]	破壊電圧 [kV]					
	針 (+)			針 (-)		
	1 回目	2 回目	平均値	1 回目	2 回目	平均値
0.4	5.5	5.6	5.6	7.3	7.3	7.3
0.7	9.0	9.1	9.1	12.2	12.2	12.2
1.0	11.9	11.9	11.9	18.7	18.7	18.7
1.3	14.6	15.0	14.8	25.5	25.5	25.5
1.6	18.5	18.5	18.5	31.7	31.5	31.6

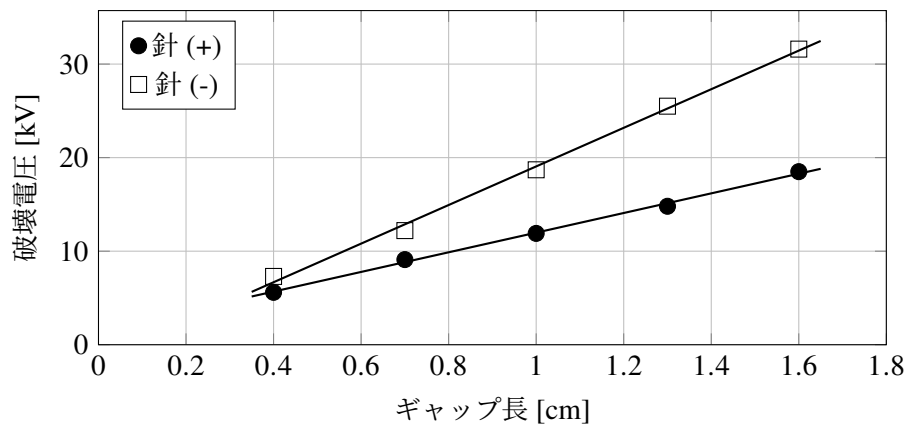


図2 針-平板電極における極性効果

2.2 液体および固体の絶縁破壊試験

本節では、液体絶縁体（絶縁油）および固体絶縁体（ベークライト）の破壊試験の結果を報告する。さらに、前節の気体絶縁体（空気）を含め、三態の絶縁体の破壊電圧を比較検討する。

2.2.1 液体絶縁体の破壊試験の結果

液体絶縁体である絶縁油 (JIS C 2320 1 種 2 号) の破壊試験の結果を表 7 に示す。アスタリスク (*) を付した 1 回目と 3 回目の測定では、実験装置の最大出力である 50.1 kV を印加しても絶縁破壊には至らなかった。しかし、他の試行では 50.1 kV 以下で破壊していることから、これら 2 回の破壊電圧は 50.1 kV をわずかに上回る値であると推測される。JIS C2101 (1999) の規格に基づき、平均値が合格基準の 30 kV を上回っているため、試験結果は合格と判断した。

2.2.2 固体絶縁体の破壊試験の結果

固体絶縁体である厚さ 1 mm のベークライト板の破壊試験結果を表 8 に示す。2 回の測定値の平均を求め、印加電圧が交流であるため、その実効値から波高値 ($\sqrt{2}$ 倍) を算出し、これを破壊電圧とした。試料の厚さが 1 mm であるため、この破壊電圧値がそのまま絶縁耐力となり、 62.4 kV mm^{-1} と求められた。

2.2.3 気体・液体・固体絶縁体の破壊電圧の比較

本実験で扱った三態の絶縁体について、ギャップ長を 1 cm に統一した場合の破壊電圧を比較する。絶縁油とベークライトについては、実験結果から 1 cm ギャップにおける破壊電圧を推定計算し、比較を行う。

表 7 絶縁油の破壊電圧 (ギャップ長 0.25 cm, *は 50.1 kV 以上を示す)

1 回目 [kV]	2 回目 [kV]	3 回目 [kV]	4 回目 [kV]	5 回目 [kV]	2～5 回目平均値 [kV]
50.1*	46.4	50.1*	46.9	44.8	46.1

表 8 ベークライト板の破壊電圧 (ギャップ長 0.1 cm)

1 回目	2 回目	平均値	波高値 ($\sqrt{2} \times$ 平均値)
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
42.8	45.4	44.1	62.4

■a) 絶縁油のギャップ長 1 cm における破壊電圧の推定 絶縁油の破壊電圧 V とギャップ長 d の関係は $V = Ad^n$ で近似できる。表 7 より、ギャップ長 0.25 cm での破壊電圧を 46.1 kV とし、定数 $n = 0.5$ と仮定して係数 A を求めると、

$$A = \frac{V}{d^n} = \frac{46.1}{0.25^{0.5}} = 92.2 \quad (1)$$

となる。この係数 A を用いてギャップ長 1 cm における破壊電圧 V を計算すると、

$$V = A \times d^n = 92.2 \times 1^{0.5} = 92.2 \text{ [kV]} \quad (2)$$

と推定される。

■b) ベークライトのギャップ長 1 cm における破壊電圧の推定 同様に、ベークライトの破壊電圧を推定する。表 8 より、ギャップ長 0.1 cm での破壊電圧を 62.4 kV とし、定数 $n = 0.6$ と仮定して係数 A を求めると、

$$A = \frac{V}{d^n} = \frac{62.4}{0.1^{0.6}} \approx 248.3 \quad (3)$$

となる。この係数 A を用いてギャップ長 1 cm における破壊電圧 V を計算すると、

$$V = A \times d^n = 248.3 \times 1^{0.6} \approx 248.3 \text{ [kV]} \quad (4)$$

と推定される。

■c) 三態の絶縁体の破壊電圧の比較 ギャップ長 1 cm における三態の絶縁体の破壊電圧の比較を表 9 に示す。気体（空気）は 2.1.1 節の平板-平板電極における実測平均値、液体（絶縁油）と固体（ベークライト）は上記で算出した推定値を用いた。破壊電圧を昇順に並べると、気体 (31.0 kV)、液体 (92.2 kV)、固体 (248.3 kV) の順となった。気体の絶縁耐力を 1 とした場合の比は約 1:3:8 となり、物質の密度が高いほど絶縁耐力も高くなるという一般的な傾向と一致する結果が得られた。液体は気体の約 3 倍、固体は液体の約 2.7 倍の絶縁耐力を有することが確認できた。

表 9 ギャップ長 1 cm における気体・液体・固体絶縁物の破壊電圧の比較

	気体 (空気)	液体 (絶縁油)	固体 (ベークライト)
破壊電圧 [kV]	31.0	92.2	248.3
気体に対する比	1.00	2.97	8.01

2.3 碍子のインパルス電圧特性

本節では、碍子の 50% フラッシュオーバー電圧に関する実験結果と考察を述べる。

■a) 実験結果 耐雷インパルス電圧 75 kV/個の懸垂碍子に対する放電率測定結果を表 10 に、印加した雷インパルス電圧の代表的な波形を図 3 に示す。印加電圧は負極性であるため、オシロスコープ画面では下側のピークが波高点となる。表 10 のデータから作成した放電率とインパルス電圧の関係を図 4 に示す。同図には、後述する内挿法によって求めた 50% フラッシュオーバー電圧も示している。

まず、印加波形の確認を行う。図 3(a) より、波頭長は 1 グリッドあたり $0.4\mu\text{s}$ の時間スケールで約 3 グリッドを要しているため、約 $1.2\mu\text{s}$ となる。次に図 3(b) より、波尾長は 1 グリッドあたり $10\mu\text{s}$ のスケールで、ピーク到達後、波高値の 50% に減衰するまで約 5 グリッドを要しているため、約 $50\mu\text{s}$ となる。以上から、印加波形は標準雷インパルス電圧波形 ($-1.2/50\mu\text{s}$) の規定に準拠していることが確認できた。

次に、50% フラッシュオーバー電圧 V_{50} を求める。表 10 より、放電率が 30% のときの電圧 $V_m = 92.7\text{ kV}$ と、60% のときの電圧 $V_n = 93.4\text{ kV}$ の 2 点を用いて直線補間（内挿法）を行うと、 V_{50} は 93.2 kV と算出された。

表 10 碍子のインパルス電圧と放電率

充電電圧 V_i [kV]	インパルス電圧 V_o [kV]	フラッシュオーバーの有無 (有: ○, 無: ×)										放電率 p [%]
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
27.2	92.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0
27.4	92.7	×	×	○	×	×	○	×	×	×	○	30
27.6	93.4	○	×	×	○	○	○	○	×	×	○	60



図 3 雷インパルス電圧の波形 (負極性),(a) 波頭長,(b) 波尾長

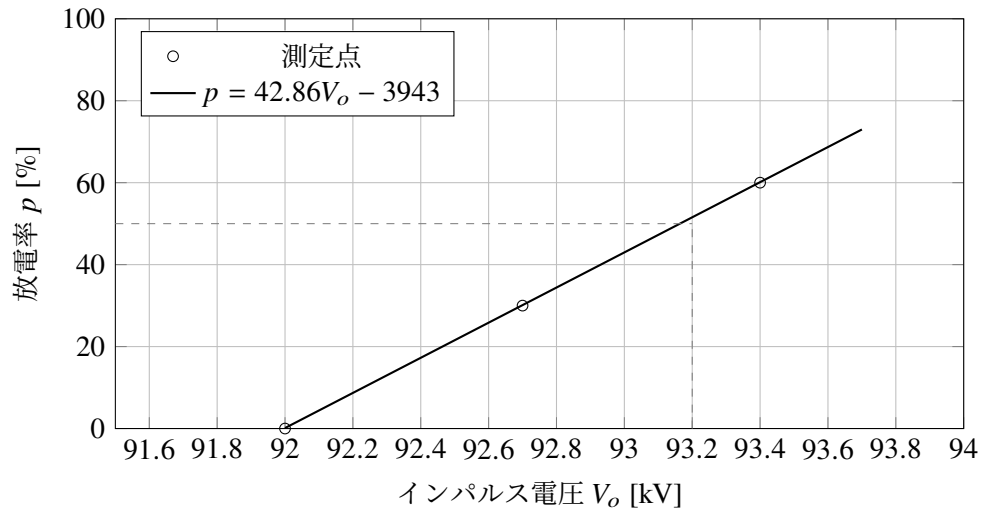


図4 放電率とインパルス電圧の関係

最後に、碍子が確実に絶縁破壊しない耐電圧（withstand voltage）の目安となる、フラッシュオーバー確率 0% の電圧 V_0 を推定する。 V_m, V_n の 2 点を通る直線の傾き a と切片 b は、

$$a = \frac{p_n - p_m}{V_n - V_m} = \frac{60 - 30}{93.4 - 92.7} \approx 42.86 \quad (5)$$

$$b = p_m - a \times V_m = 30 - 42.86 \times 92.7 \approx -3943 \quad (6)$$

となり、放電率と電圧の関係式は $p = 42.86V_o - 3943$ と表せる。この式で $p = 0$ となる電圧 V_0 を求めると、

$$V_0 = \frac{0 + 3943}{42.86} \approx 92.0 \text{ [kV]} \quad (7)$$

となる。この値は実験時の気象条件に依存するため、標準状態（20°C, 1013hPa）における耐電圧 V_{on} に換算すると、

$$V_{on} = \frac{V_0}{\delta} = \frac{92.0}{0.959} \approx 95.9 \text{ [kV]} \quad (8)$$

が得られる。フラッシュオーバーは確率的な現象であるため、この電圧で確率が厳密に 0% になるとは断定できないが、絶縁破壊しない限界に近い値と言える。この V_{on} と碍子の仕様値である耐雷インパルス電圧 75 kV を比較すると、実力値が仕様値を約 28% 上回っている。これは、実際の使用環境における気温・気圧・湿度の変動や、碍子表面の汚損による絶縁性能の低下を考慮し、十分な安全裕度（マージン）が確保されていることを示している。

■b) 報告事項

(1) 本実験の 50% フラッシュオーバー電圧に感電した場合について 自身の抵抗値をデジタルテスタで測定したところ、 $R = 374 \text{ k}\Omega$ であった。本実験で求めた 50% フラッシュオーバー電圧 $V_{50} = 93.2 \text{ kV}$ に感電した際に体内を流れる電流 I をオームの法則で計算すると、

$$I = \frac{V_{50}}{R} = \frac{93.2 \times 10^3}{374 \times 10^3} \approx 0.249 \text{ [A]} = 249 \text{ [mA]} \quad (9)$$

となる。ここで、成人男性の離脱電流（自力で電路から離脱できる限界電流）が約 22.70 mA であることを考慮すると、この電流値はその 10 倍以上に達する。人体は高電圧に感電するほど内部抵抗が

低下する傾向があるため、実際にはさらに大きな電流が流れる可能性が高い。このような大電流が人体、特に心臓を通過した場合、心室細動を引き起こす危険性が極めて高く、即座に生命の危機に瀕する。従って、自力での離脱は不可能であり、極めて危険な状況であると結論付けられる。

(2) **雷は落ちているのかについて** 文献 [1] によると、雷放電は大きく分けて 2 つの段階で進展する。第一段階として、雷雲から地面に向かって「ステップトリーダ（段階的先行放電）」と呼ばれる微弱な放電が、進んでは止まるという動作を繰り返しながら進展し、放電路を形成する。第二段階として、このステップトリーダが地面に到達した瞬間、地面から雷雲に向かって、形成された放電路を逆に辿る形で「リターンストローク（主雷撃）」と呼ばれる非常に明るく強力な放電が発生する。我々が「稲妻」として目視しているのは、主にこのリターンストロークの強力な発光である。したがって、放電の通り道は上から下へと形成されるが、目に見える強い光（稲妻）は下から上へと進展しているため、「稲妻は下から上へ登っていく」と表現することができる。

参考文献

参考文献

[1] 日高邦彦: “高電圧工学 (新・電気システム工学)”, 数理工学社, pp.55-56, (2009).