油中正極性沿面放電の進展に及ぼす固体絶縁物の 厚さ・種類の影響

正員 中尾好隆 (室蘭工大)

学生員 成瀬雅史 (室蘭工大)

正員 伊藤秀範 (室蘭工大)

正員 鈴木好夫 (室蘭工大)

正員 酒井洋輔 (北海道大)

正員 田頭博昭 (北海道大)

Influence of a Sort and a Thickness of Solid Insulators on the Propagation of the Positive Creepage Discharge in Transformer Oil

Yoshitaka Nakao, Member, Masashi Naruse, Student Member, Hidenori Itoh, Member, Yoshio Suzuki, Member (Muroran Institute of Technology), Yosuke Sakai, Member, Hiroaki Tagashira, Member (Hokkaido University)

The propagation process of a creepage discharge under a positive impulse voltage application in transformer oil is investigated in detail by means of high speed Schlieren photography and a current measurement system using LED. In the present work, different sorts of insulating barriers with various thickness were placed between a point electrode and a plane electrode. The used voltage is an impulse voltage ($1.1/225\mu\text{s}$) of magnitude $V_m=+30\text{kV}$.

The main results obtained can be summarized as follows:

- (1) When a simple barrier was inserted between a point electrode and a plane electrode, the discharge figure revealed a barrier type dependence.
- (2) When barriers were piled up,
 - (i) the current duration, the charge quantity, and the streamer propagation length decreased with the increase of the number of barriers.
 - (ii) most attention should be paid to the barrier facing the point electrode.

キーワード：油中沿面放電，シュリーレン法，高速度写真法，絶縁物厚さ効果

1. まえがき

油入変圧器に代表される高電圧油入電気機器の内部絶縁構成は、絶縁油と固体絶縁物とによる複合絶縁構成となる場合が多い⁽¹⁾。したがって、油中沿面放電に関する研究は、高電圧油入電気機器の内部絶縁設計の最適化の立場から工学的に極めて重要と考えられ、従来から多くの研究が行われてきている^{(1)~(12)}。

しかしながら、油中沿面放電現象は、油中ギャップ放電に比較して、固体絶縁物の電気的特性及び表面状態によってより複雑となり、その進展機構についてはなお不明点が多い。

筆者らは、これまでイメージコンバータカメラ(ICC)と垂直

型シュリーレン光学系とを組み合わせた高速度写真法と、LEDを用いた電流測定法を同時に用いて油中沿面放電の進展特性について種々検討を行ってきた^(5, 6, 7, 11, 12)。

本論文は、前報⁽⁷⁾に引き続き、油中沿面放電進展に及ぼす固体絶縁物の厚さ効果、特に同種の固体絶縁物及び異種の固体絶縁物を組み合わせた場合について、種々検討を行ったものである。その一部はすでに発表したが⁽¹²⁾、ここではまとめて報告する。

2. 実験方法

図1は実験システムの構成を示す。実験方法は前報⁽⁷⁾とほぼ同様である。全ての実験は、インパルス発生装置IGのコンデンサを充電した後、トリガ用マニュアルボタンMBを

MB: トリガ用ボタン, XeF: キセノンフラッシュランプ, CL: コンデンサレンズ, PS: ピンホールスリット, KE: ナイフエッジ, ICC: イメージコンバータカメラ, LG: ライトガイド, PC: ホットセル, PA: パルスアンプ, DPG: 遅延パルス発生器, OSC: オシロスコープ, PM: ホットミラー, DM: デジタルメモリー, TPG: トリガパルスジェネレータ, VCD: 電圧さい断装置, VD: 分圧器, Cd: 放電電荷測定用コンデンサ(300pF, マイカコンデンサ), RE: 接地円環電極

図1 実験システム構成図

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

プッシュしてキセノンフラッシュランプXeFを発光させることによってスタートする。電流および電荷の測定は、それぞれ高電圧針電極に直列に接続したLED及び背後電極と接地間に接続したコンデンサCdによって行った。

図2は固体絶縁物の構成を示す。固体絶縁物として厚さ3mmの硬質ガラスHGと厚さ3mmのソーダ石灰ガラスSGを用意し、ガラス片面に酸化インジウムの蒸着膜(厚さ2000Å、光透過率80~90%)が有るものと無いものの2種類を組み合わせ用いた。蒸着膜は接地円環電極RE(図1参照)に軽く接触させ、背後電極BE(図2参照)とした。針電極は先端曲率半径10μmのタングステン線(0.5mmφ)である。絶縁油(JIS2号油)は、G4ガラスフィルタでろ過され、体積抵抗率が 10^{15} Ωcm(DC1000V, 10分値)以上であることを確認した後使用した。電極配置は、図1と図2から概略理解されるが、その詳細については前報⁽⁷⁾と同様なのでここでは省略する。

なお、ガラスを2枚重ねる場合、各々のガラスを実験で使用する絶縁油でとも洗い、ガラス面間には極めて薄い油膜が構成されている。また、本文中に示されている高速シュリーレンこま撮り写真の撮影速度は、すべて 2×10^5 こま/秒、こま間隔5μs、露出時間1μs/こままで、実験は大気圧、室温の下で行った。印加電圧は、波高値 $V_m = +30$ kV、波形1.1/225μsのインパルス電圧で、針電極に印加した。

3. 実験結果および考察

<3.1> 同種の固体絶縁物を重ねた場合の厚さ効果

図3は固体絶縁物として硬質ガラス一枚を用い(図2(a))、

図2 絶縁物構成図

Fig.2 Schematic diagram of insulator construction

針電極に正極性インパルス電圧を印加した場合の典型的な一例を示す。(a)はシュリーレンこま撮り写真、(b)、(c)は、それぞれ同時に得られた電流波形、電荷波形である。

(a)のシュリーレンこま撮り写真において、上下の数字は電圧印加後の時間 t 、○付きの数字はコマの進む順序を示す。(a)の1こま目($t=1.1\mu s$)において、針端にわずかに密度変化が認められ、以後針端を中心に円形にショック波が広がり、そのすぐ内側を比較的コントラストの弱いストリーマ状密度変化が、5こま目($t=21.1\mu s$)まで放射状に進展しているのが見られる。また、ストリーマ進展に伴って生じる、針端に中心をもたないショック波も認められる。密度変化が進展を停止し始める5こま目以降では、針端近傍にコントラストの強い数本の枝を残して、先端に向かって徐々に密度変化のコントラストが弱くなっていく様子が認められる。この場合のストリーマ状密度変化の平均進展速度 $V_{s,a}$ は 1.29×10^5 cm/sで、最終進展長 $l_{s,a}$ は19.4mmである。(b)において電圧印加後約1μsの間急峻な充電電流が流れ、その後約 $t=20.0\mu s$ まで不規則なパルス成分を含む放電電流が流れる。電流が0になる時刻は、(a)における密度変化進展停止時刻とほぼ一致する。(c)において電圧印加後約1μsの急峻な部分は充電電流に対応し、その後約 $t=20\mu s$ でピークに達するまでの部分は電流波形における放電電流持続時間 t_{dc} に対応している。電流波形と電荷波形のこの対応は、以下に示される図4~図8においても同様である。この場合の放電電荷量 q_a は約120nCである。

図4は印加電圧が同じで厚さ3mmの硬質ガラスを2枚重ねにした場合(図2(b))の一例を示す。硬質ガラスが1枚の

場合と比較して、(a)から $t=15.9\mu\text{s}$ の4こま目で放電は進展を停止しており、 l_{sa} も18.1mmと短く、ストリーマ状密度変化の枝数も少ない。また、(b)、(c)からこれらに対応して、 t_{ic} は約6 μs 短く、 q_a は約半分に減少している。これに対して V_{sa} は $1.22\times 10^5\text{cm/s}$ であり、若干減少する傾向が見られるが、顕著な差異は認められなかった。

一方、図5は、固体絶縁物として厚さ3mmのソーダ石灰ガラス1枚を用い(図2(c))、針電極に正極性インパルス電圧を印加した場合の典型的な一例を示す。

図3(硬質ガラス)の場合と比較して、全体的な進展の特徴はほぼ同様と見られるが、ショック波は同心円状には進展せず、又ショック波の内側を比較的コントラストの弱い

ストリーマ状密度変化が、少し不規則に放射状に進展する様子が認められる。この場合の V_{sa} は $1.22\times 10^5\text{cm/s}$ 、 l_{sa} は20.5mm、 q_a は約175nCである。以上の進展の様子から硬質ガラス1枚の場合(図2(a))と比較して、 t_{ic} および q_a が大きくなることが知れる。

図6は印加電圧が同じで厚さ3mmのソーダ石灰ガラスを2枚重ねにした場合(図2(d))の一例を示す。硬質ガラスの場合と同様に、ソーダ石灰ガラスが1枚の場合と比較して、(a)から $t=16\mu\text{s}$ の4こま目で放電は進展を停止しており、 l_{sa} も17.3mmと短く、ストリーマ状密度変化の枝数は著しく減少している。また、(b)、(c)から t_{ic} および q_a についても、硬質ガラスの場合とほぼ同様の特性が得られた。

図3 ストリーマ状密度変化の進展(1)
Fig3. Propagation of streamer-like density changes(1)

図4 ストリーマ状密度変化の進展(2)
Fig4. Propagation of streamer-like density changes(2)

図5 ストリーマ状密度変化の進展(3)
Fig5. Propagation of streamer-like density changes(3)

3.2 異なる固体絶縁物を重ねた場合の厚さ効果

図7は固体絶縁物として針電極側に蒸着膜のない厚さ3mmの硬質ガラスと接地円環電極側に蒸着膜のある厚さ3mmのソーダ石灰ガラスの2種類のガラスを重ね(図2(e))、針電極に正極性インパルス電圧を印加した場合の典型的な一例を示す。

(a)はストリーマ状密度変化の進展状態、(b)、(c)は同時に得られた電流波形、電荷波形を示し、全体的な進展の特徴はこれまで示された例とほぼ同様と見られ、この場合の V_{sa} は 1.20×10^5 cm/s、 $l_{sa}=16.5$ mm、 $t_{ic}=12.2$ μ s、 $q_d=70$ nCである。以上の進展の様子から、同一厚さのソーダ石灰ガラス2枚重ねの場合(図6)と比較し、 t_{ic} および q_d は減少しており、針電極側の絶縁物である硬質ガラスの特性が見られる。

図8は印加電圧が同じで、針電極側の固体絶縁物として蒸着膜のない厚さ3mmのソーダ石灰ガラスと接地円環電極側に蒸着膜のある厚さ3mmの硬質ガラスの2種類のガラスを重ねた場合(図2(f))の典型的な一例を示す。

ソーダ石灰ガラス2枚重ね(図6)の場合と比較すると、 l_{sa} 、 t_{ic} 、 q_d および V_{sa} 等について明瞭な差異は認められず、接地側側の絶縁物の影響は見られない。また、硬質ガラス2枚重ねの場合(図4)と比較すると、 t_{ic} および q_d が大きいたことが認められ、同様に、針電極側の絶縁物の特性が見られる。

表1は、油中沿面放電の進展に及ぼす固体絶縁物の厚さ・種類の影響をまとめたものである。なお、表に示した数値は約10個のデータの平均値であり、ばらつきはほぼ $\pm 7\%$ 以内である。針-平板電極間に複数の固体絶縁物を重ねて

図6 ストリーマ状密度変化の進展(4)
Fig6. Propagation of streamer-like density changes(4)

図7 ストリーマ状密度変化の進展(5)
Fig7. Propagation of streamer-like density changes(5)

図8 ストリーマ状密度変化の進展(6)
Fig8. Propagation of streamer-like density changes(6)

表1 油中沿面放電の進展に及ぼす絶縁物の種類・厚さの影響

Table.1 Influence of sort and thickness on the propagation of creepage discharge in transformer oil ($V_m=+30\text{kV}$, $1.1/225\mu\text{s}$)

印加電圧 波高値 $V_m(\text{kV})$	バリア 絶縁構成	電流 持続時間 $t_{ic}(\mu\text{s})$	放電 電荷量 $q_d(\text{nC})$	ストリーマ状密度変化	
				平均進展速度 $v_{sa}(\text{cm/s})$	最終進展長 $l_{sa}(\text{mm})$
+ 30	(SG3)	21.0	156.2	1.20×10^5	22.6
	(HG3)	17.6	122.2	1.32×10^5	22.2
	HG3+(HG3)	13.8	63.8	1.19×10^5	16.3
	HG3+(SG3)	13.4	70.3	1.25×10^5	15.7
	SG3+(HG3)	15.4	72.6	0.94×10^5	15.9
	SG3+(SG3)	16.8	73.5	1.04×10^5	15.8

多層絶縁構成とする場合、絶縁物の厚さを大きくすることによって放電電流持続時間、放電電荷量および最終進展長が減少することが知れる。

固体絶縁物の種類による影響について、厚さ3mmの硬質ガラスとソーダ石灰ガラスを比較すると、後者の方が放電電荷量、電流持続時間共に大きく、また、針電極側がソーダ石灰ガラスの場合、硬質ガラスの場合に比較してストリーマ状密度変化は針端から若干不規則な形状で進展する傾向を示し、その枝数にもばらつきが見られた。

しかし、異なる固体絶縁物を重ねた場合の厚さ効果について、ソーダガラスに硬質ガラスを重ねる場合(図2(e))と硬質ガラスを2枚重ねる場合(図2(b))の放電進展特性に大きな差異は見られない。また、針電極側のバリアを硬質ガラスとした場合(図2(b),(e))、針電極側をソーダガラスとした場合(図2(d),(f))に比較して、放電電流持続時間および放電電荷量が減少する。

ここで、固体絶縁物の差異による進展特性について、固体絶縁物の単位面積当たりの静電容量を用いて考察してみる。今、複数の固体絶縁物からなる平行平板コンデンサを考える。固体絶縁物の単位面積当たりの静電容量 C_0 は次式で与えられる。

$$C_0 = \frac{\epsilon_0}{d_1/\epsilon_1 + d_2/\epsilon_2 + d_3/\epsilon_3 \dots} \quad (\text{F/m}^2) \quad (1)$$

ただし、 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 、 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots$ および $d_1, d_2, d_3, \dots$ はそれぞれ多層絶縁構成における各絶縁物の比誘電率および厚さである。

接地電極側が厚さ3mmのソーダ石灰ガラスで、針電極側が厚さ3mmのソーダ石灰ガラスの場合、 C_0 は約 12nF/m^2 、厚さ3mmの硬質ガラスの場合 C_0 は約 9.8nF/m^2 である。また、接地電極側が厚さ3mmの硬質ガラスで、針電極側が厚さ3mmのソーダ石灰ガラスの場合、 C_0 は約 9.8nF/m^2 、硬質ガラスの場合 C_0 は 8.7nF/m^2 である。従って、多層絶縁構成の場合 C_0 は、高誘電率のバリア、この場合ソーダ石灰ガラスの構成比率⁽²⁾(電極間に占める各々の固体絶縁物の幾何学的な構成比率)が大であるほど大きい。この C_0 が大であるほど、背後電極とストリーマとの間の静電容量は大となり、ストリー

マの進展に伴う充電電荷も多く必要になると考えられる。従って、 C_0 が大であるほど、ストリーマ内部の電流が増大し、ストリーマが伸び易くなり、放電電荷量、放電電流持続時間、が増加すると考えられる⁽⁹⁾。ただし、バリア厚さ d および C_0 が同じであっても針電極側の絶縁物の種類が異なる場合、すなわち針-平板電極間の絶縁構成として厚さ3mmの硬質ガラスと厚さ3mmのソーダ石灰ガラスを用いた場合、針電極側をソーダ石灰ガラスとした方が、針電極側を硬質ガラスとした場合に比較して、電流持続時間が大となる。この差異について、ソーダ石灰ガラスと硬質ガラスの表面抵抗率 ρ_s の違いが考えられる。すなわち、ソーダ石灰ガラスの ρ_s は $(0.8 \sim 2.8) \times 10^{14} \Omega(20^\circ\text{C})$ ⁽⁵⁾、一方硬質ガラスの ρ_s は $(1.1 \sim 7.5) \times 10^{10} \Omega(20^\circ\text{C})$ ⁽⁵⁾であるため、表面抵抗率小であるソーダ石灰ガラスの方が放電電流大になるものと考えられる。従って、沿面放電進展特性において針電極側の絶縁物の特性が極めて重要なファクターになると考えられる。

4. むすび

得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1)固体絶縁物が1枚の場合、固体絶縁物の種類の違いにより、放電進展特性に差異が見られる。

(2)針-平板電極間の絶縁物構成が、複数の固体絶縁物を重ねた多層絶縁構成となる場合、放電電流持続時間、放電電荷量、ストリーマ状密度変化最終進展長および枝数は、多層絶縁で用いた各絶縁物の厚さの総和が大であるほど減少する。

(3)接地背後電極側の固体絶縁物として硬質ガラス、針電極側をソーダ石灰ガラスとした場合、硬質ガラスを2枚重ねた場合に比べ放電電流持続時間および放電電荷量は大となる。このことから複数の固体絶縁物が重なる構造の場合、油中沿面放電進展特性において針電極に接する固体絶縁物の特性が極めて重要であると考えられる。

(平成 7年11月13日受付, 平成 8年 5月27日再受付)

文 献

- (1) 「不平等電界沿面特性」, 電学技法 (II 部), No. 184 (昭60-2)
- (2) 宮尾・加茂・鎌田: 「油浸変圧器絶縁における低誘電率絶縁紙適用の検討」, 電学論A, 112, 669 (平4)
- (3) 岸田・佐藤・島山: 「油中電荷図形と沿面放電に対する細溝の効果」, 同上A, 92, 246 (昭47-5)
- (4) 大垣・角田: 「油中正極性沿面放電の進展特性」, 同上A, 103, 601 (昭58-11)
- (5) 中尾・伊藤・岡・吉田・酒井・田頭: 「変圧器油中固体絶縁物表面におけるインパルス沿面放電の進展に関する研究」, 同上A, 108, 313 (昭63-8)
- (6) 中尾・伊藤・岡・空・酒井・田頭: 「油中インパルス沿面放電の進展に伴う密度変化と粉像」, 同上A, 109, 189 (平元-5)
- (7) 中尾・伊藤・岡・山形・酒井・田頭: 「緩波頭インパルス電圧印加時の油中沿面放電の進展」, 同上A, 110, 874 (平2-12)
- (8) Y. Murooka, Y. Toriyama: "The Study of Surface Discharge Phenomena Using Ring-Type Electrodes", Brit. J. Appl. Phys., 18, 1607 (1967)
- (9) 井関・倉橋・松浦: 「油中沿面放電」, 富士時報, 37, 663 (昭39-9)
- (10) 土手・河野・尾崎 編: 「電気工学大百科事典 第4巻、プラズマ放電・高電圧」, 電気書院 (昭58)
- (11) 空・水上・岡・伊藤・中尾・酒井・田頭: 「変圧器油中固体絶縁物表面における沿面放電とバックディスチャージ」, 電気学会放電研資, ED-88-65 (昭63)
- (12) 村上・伊藤・中尾・酒井・田頭: 「油中沿面放電の進展に及ぼす固体絶縁物の厚さ・種類の影響」, 電気学会放電研資, ED-92-118 (平4)

中尾 好隆 (正員) 昭和12年7月15日生。37年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。38年5月同大学工業教員養成所勤務。43年4月室蘭工業大学勤務, 現在に至る。工学博士。照明学会, 放電研究グループ会員。

成瀬 雅史 (学生員)

昭和47年4月29日生。平成7年3月室蘭工業大学電気電子工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程入学, 現在に至る。

伊藤 秀範 (正員) 昭和26年10月26日生。50年北海道大学工学部電気工学科卒業。55年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年4月徳島大学工業短期大学部勤務。59年4月室蘭工業大学勤務, 現在に至る。平成5年オーム技術賞。工学博士。応用物理学会 (プラズマエレクトロニクス分科会), 日本物理学会, 放電研究グループ会員。

鈴木 好夫 (正員) 昭和21年10月9日生。45年3月北海道教育大学札幌卒業。同年室蘭工業大学勤務, 現在に至る。工学博士。日本産業技術教育学会, 教育システム情報学会会員。

酒井 洋輔 (正員) 昭和19年7月28日生。48年3月北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。同年北海道大学工学部勤務。59年4月北海道大学医療技術短期大学部勤務。62年5月北海道大学工学部勤務, 現在に至る。工学博士。照明学会, 日本物理学会, 応用物理学会, 放電研究グループ会員。

田頭 博昭 (正員) 昭和8年1月13日生。33年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。36年同大学大学院博士課程中退。同年北海道大学工学部勤務, 現在に至る。平成3年照明学会論文賞。Ph. D (英国リバプール大学)。工学博士。照明学会, 日本物理学会, 応用物理学会 (プラズマエレクトロニクス分科会), プラズマ核融合学会, 溶接学会, 放電研究グループ会員。