



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



変圧器油-空気界面における沿面放電の研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-07-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 中尾, 好隆, 岡, 和喜男 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3751

変圧器油—空気界面における沿面放電の研究

中尾好隆・岡和喜男

Studies on Surface Discharge at the Interface between Transformer Oil and Air

Yoshitaka Nakao and Wakio Oka

Abstract

This paper describes a surface discharge at the interface between transformer oil and air in relation to the impulse breakdown on the surface of the water, the electric discharge in oil and the surface discharge in oil.

Experiments have been carried out using a point-plane electrode system above the transformer oil, a Schlieren optical system, an image converter camera, an image intensifier and a dust figure.

As a result, the several features on the development of the density change and the correspondences of the density change to a corona streamer and a dust figure have been found out.

1. ま え が き

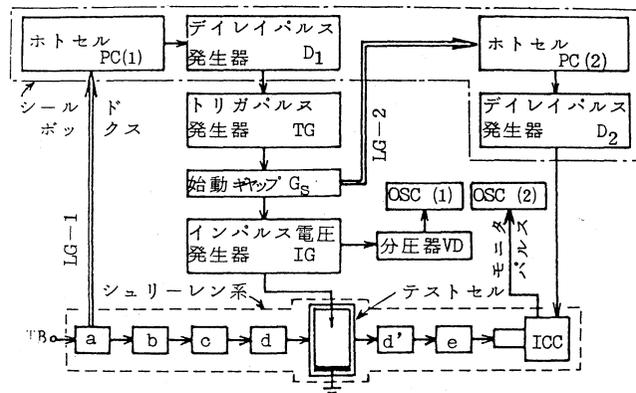
従来、絶縁油中にある固体絶縁物の表面で発生する油中沿面放電の研究は、超高压送電に使用される油入機器の内部絶縁設計との関係から工学上特に重要な問題と考えられており、多くの研究が行なわれてきている^{1)~3)}。しかしながら油中放電現象そのものが複雑である上、油中沿面放電にあってはさらに不平等電界中複合絶縁構成となるため、放電現象は一層複雑な様相を呈し、そのフラッシュオーバー機構についてはまだ不明の点も多い。

近年、液体誘電体の絶縁破壊現象を光学的に観測する研究が広く行なわれている⁴⁾。光学的観測方法には種々の手法が考えられてきているが、いずれも試料液体に直接接触することなく、従って電極ギャップ間を乱すことなく測定できるという点ですぐれている。一方、油中沿面放電に関しても同様の方法が取り入れられ、特にシュリーレン法は極めて微弱な発光しか伴わないような破壊初期の状態を屈折率の変化として捕えられる利点を持つため多く利用されている¹⁾。

筆者らは、これまで汚損湿潤がいしのごとき導電性を有する浴面をモデル化したテストセルを用い、水面上インパルス破壊の進展について種々検討してきた⁵⁾。本報告は、これらとの関係上および油中・油中浴面における放電現象に関連して、特に放電進展に着目し、シュリーレン装置、超高速撮影装置（イメージコンバータカメラ）、イメージインテンシファイヤおよび電荷図などを用いて、変圧器油—空気界面に配置した針対平板電極ギャップにインパルス電圧を印加し、それに伴って生ずる密度変化進展の極性効果・経時変化やコロナストリーマ・電荷図形との対応性など、密度変化進展の特徴について種々検討を行なったものである⁶⁾。

2. 実験装置および方法

図一1は実験装置の構成を示す。トリガボタン TB によってキセノンフラッシュ（せん光時間：20, 50, 200 μ s）をせん光させ、その光をライトガイド LG-1（5 mm ϕ , 5 m）でシールドボックス内のホットセル PC(1) に導き、 $D_1 \cdot TG \cdot G_s$ を経て油面上 $d_o = 0.5$ mm にセットした針電極（タングステン線、曲率半径：50 μ m）にインパルス電圧（ (0.8×300) μ s）が印加される。 G_s の光は前記同様ライトガイド LG-2 でホットセル PC(2) に導き、 D_2 によってイメージコンバータカメラ ICC をトリガした。試料への電圧印加と ICC との同期はディレイパルス発生器 D_1, D_2 （遅延時間をそれぞれ τ_1, τ_2 とする）によって行ない、撮影結果は ICC のモニタパルス波形と常に比較されており、時間基準（ $t=0$ ）には G_s が放電した瞬間すなわち試料へ電圧が印加された瞬間を選んだ。図一2はテストセルおよび電極配置、図一3はその外観を示す。これらの図において、テストセルの上から下へ向って平行光線を透過させるため、その底部にはオプティカルウインドウ（130 \times 180 \times 3 mm）が取付けられている。使用した液体は変



a: キセノンフラッシュ (20, 50, 200 μ s), b: コリメータレンズ, c: ピンホールスリット, d, d': 凹面鏡 (150 mm ϕ , $f=1.5$ m), e: ナイフエッジ, TB: トリガボタン

図一1 実験回路構成図

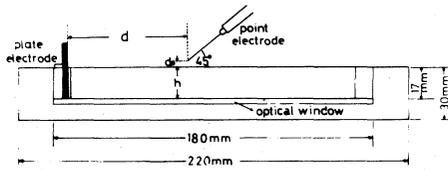


図-2 テストセル

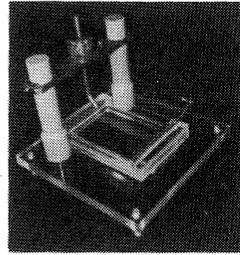


図-3 テストセルの外観

圧器油 (JIS 2号油) で未処理のものである。

なお、本実験はインパルス電圧波高値 $V_m = 18 \text{ kV}$ について行なったもので、同時にイメージンテンシファイヤ II (光利得: $3 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4$, 米国 VARO 社製) および電荷図を併用し、それらによって得られた図形と ICC による密度変化進展状態との比較も行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 密度変化進展の極性効果

図-4, 図-5 は、インパルス電圧 ($V_m = 18 \text{ kV}$) 印加時の典型的な密度変化進展状態を、針端正および負についてそれぞれ示したものである。

針端正の場合、密度変化の形状は針端を中心として放射状に進展する樹枝状を呈し、幾分平板電極側への伸びが大である。図-4 (a) から、密度変化は1こま目 (電圧印加後時間 $t = 5.1 \mu\text{s}$) においてまだ出現せず、2こま目 ($t = 15.1 \mu\text{s}$) でかすかに現われ、それ以後こまが進むにつれ、密度変化のコントラストの経時変化が明瞭に認められる。しかし、その形状および大きさの経時変化は認められない。図-4 (b)~(d) は τ_1 をそれぞれ $10.1, 70.1, 100.1 \mu\text{s}$ にセットした場合のこま撮り写真で、(b) では (a) における2こま目以降を示し、密度変化の経時変化など前記と同様の特徴が認められる。しかし、(c), (d) では密度変化の経時変化はほとんど見られないが、針端を中心とし放射状に進展した個々の樹枝状密度変化は太くなり、その先端が丸味を帯びている様子が認められる。

一方、針端負の場合、密度変化の形状は針端を中心とした円形木葉状を呈する。図-5 (a) から、密度変化は2こま目 ($t = 15.1 \mu\text{s}$) においてまだ出現せず、3こま目 ($t = 25.1 \mu\text{s}$) でかすかに現われ、その出現遅れは針端正に比べ大である。それ以後こまが進むにつれて、密度変化のコントラストの経時変化、形状および大きさなどに関し、針端正の場合と同様の特徴が認められる。図-5 (b)~(d) は τ_1 をそれぞれ $20.1 \mu\text{s}, 40.1 \mu\text{s}, 60.1 \mu\text{s}$ にセットした場合のこま撮り写真で、(b) では (a) における3こま目以降を示し、密度変化のコントラストの経時変

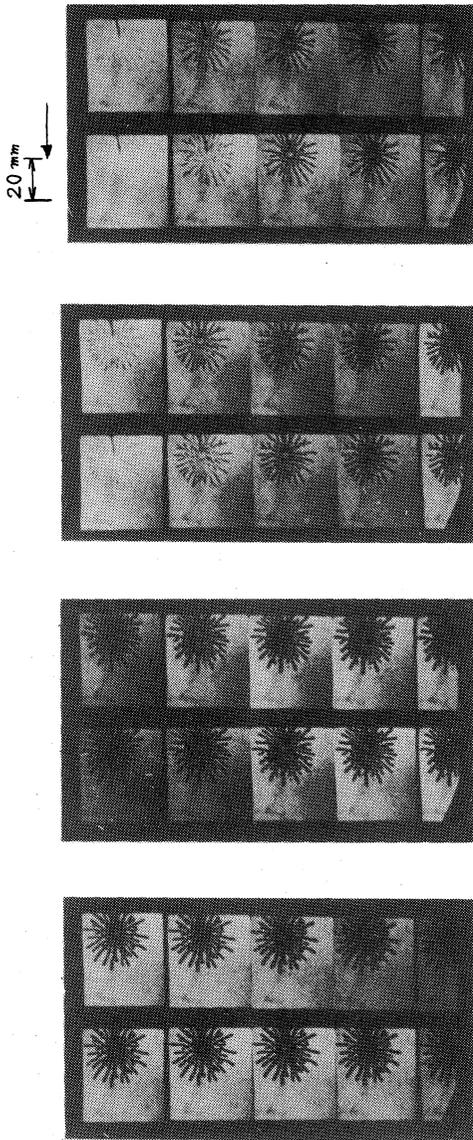


図-4 正インパルス電圧印加時密度変化のこま撮り写真 ($V_m = +18\text{kV}$, 1×10^5 こま/秒)

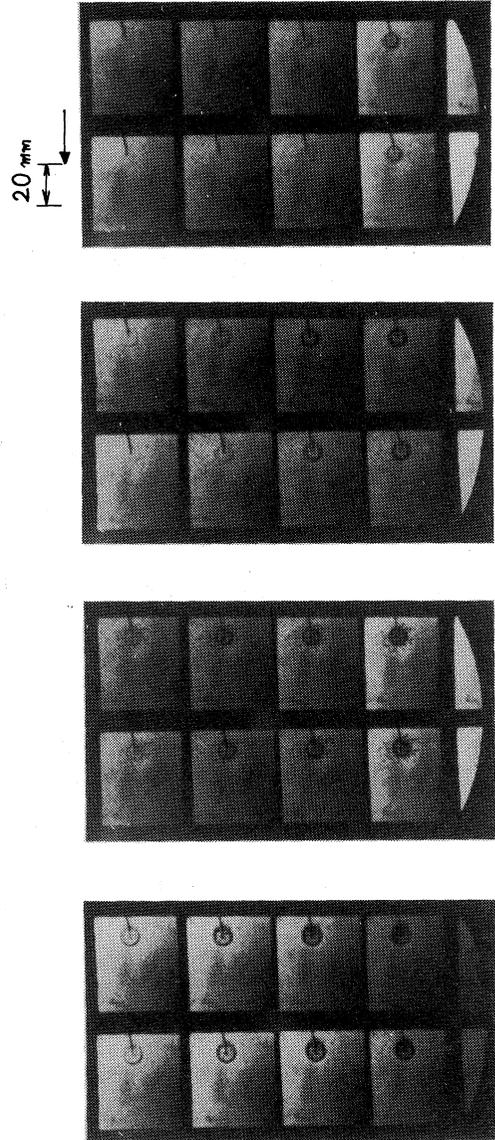
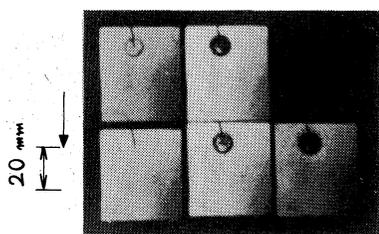


図-5 負インパルス電圧印加時密度変化のこま撮り写真(1) ($V_m = -18\text{kV}$, 1×10^5 こま/秒)



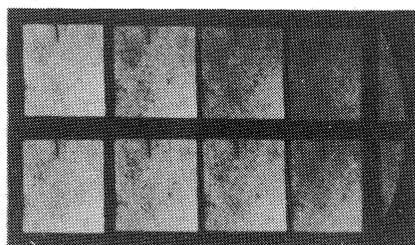
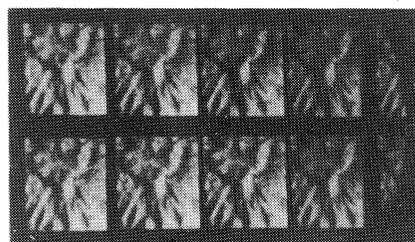
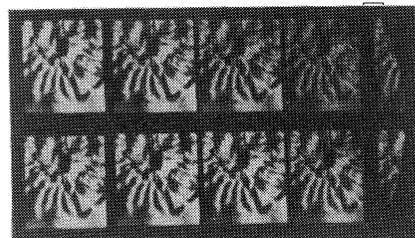
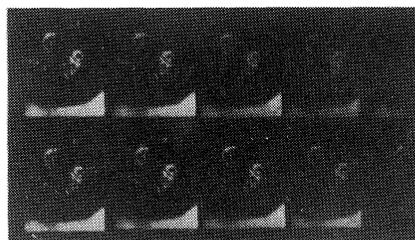
図—6 負インパルス電圧印加時密度変化のこま撮り写真(2)
 $(V_m = -18\text{kV}, 2.5 \times 10^4 \text{ こま/秒}, \tau_1 = 0.1 \mu\text{s})$

化など前記と同様の特徴が認められる。(c), (d) においてもまだ密度変化のコントラストの経時変化が見られ、さらに円形木葉状密度変化の周辺から放射状に進展する密度変化とその内部で樹枝状に進展する密度変化およびこれらの経時変化が明瞭に認められる。図—6は図—5と同条件においてこま撮り速度を 2.5×10^4 こま/秒にし、電圧印加後約 200 μs までの密度変化の経時変化を示したもので、これから針端負における前記特徴の他、円形木葉状密度変化の周辺領域の拡がりも認められる。

これらの結果から、(1) 針端極性によって密度変化の出現遅れ、形状および大きさに関し著しい極性効果が認められる。(2) 針端両極性において密度変化のコントラストに経時変化が認められるが、その形状・大きさにはほとんど見られないところから、それらは電圧印加直後初期の段階で決定されてしま

うのではないかと考えられる。これら密度変化の解釈についてはまとめて後述することとする。

図—7はインパルス電圧印加時の油面状況を示す。これは引き続いて電圧を印加する場合にどの位間隔を取る必要があるかを調べたものである。(a)~(d)はそれぞれ電圧印加後 $t=1.2 \text{ sec}, 5.0 \text{ sec}, 10.0 \text{ sec}, 70.0 \text{ sec}$ においてフラッシュをせん光させた場合で、(d)ではほぼ電圧印加前の状態に回復していることがわかる。従って、本実験では少なくとも3分以上間隔をあ



図—7 インパルス電圧印加後の油面じょう乱状況
 $(V_m = +18\text{kV}, 1 \times 10^5 \text{ こま/秒}, \tau_1 = 0.1 \mu\text{s}, N(+))$

けた。

3.2 密度変化とコロナストリーマとの比較

筆者らは、前報⁷⁾で本実験とほぼ同様の方法を用いて、水面上インパルス破壊の進展過程について検討、密度変化とストリーマの対応性について報告した。一方、本実験実施の過程で暗室中肉眼で観察したり、静止カメラによる近接撮影、(フィルム：トライーX，増感現象 ASA 1600 相当)を行なったが、明瞭に放電光を認めることはできなかった。しかし、大気中アクリル樹脂板の沿面放電に関する研究報告⁸⁾から変圧器油表面においても同様にコロナストリーマが発生しているのではないかと考えられる。

図-8は変圧器油-空気界面におけるコロナストリーマをイメージインテンシファイヤIIによって撮影した一例を示し、

左上部から中央へ伸びているのは電極ホルダ、 $N(-)$ で中央の細長い像は基準となるスケールを示す。図-8(a)は針端正($N(+)$)の場合で、針端を中心とし放射状に進展するコロナストリーマが明瞭に認められ、その形状・大きさは同条件の密度変化(図-4)とほぼ同様と見られる。しかし、密度変化の先端は太く丸味を帯び、そのコントラストが先端程大であるの比べ、コロナストリーマの先端は細く光強度が小さいという点で対照的である。図-8(b)は針端負($N(-)$)の場合で、大きさは $N(+)$ に比べ小さく、その形状は針端を中心とする円形を呈し、密度変化の結果(図-5)と同様と見られる。

これらを含めた多くの結果から、密度変化とコロナストリーマとは形状・大きさにおいて対応性が見られ、密接な関係のあることが確かめられた。

3.3 密度変化と電荷図との比較

前節までに得られた密度変化は形状において既報^{5,6)}の水面上インパルス破壊で見られたものとは著しく相異し、これらは従来の電荷図法で得られる図形と非常に類似していることが知れる。

本節ではそれらの対応性を調べるため次のような実験を行なった。すなわち、変圧器油面上針対平板電極ギャップと並列に透明アクリル樹枝板表面上針対平板電極ギャップを油の場合と同位置にセットし、これらに $V_m=18\text{ kV}$ のインパルス電圧を印加、ICCによる密度変化のこま撮り撮影と同時に電荷図も求めた。

図-9はこれらの典型的な一例を示し、(a)(d)は針端正、(b)(c)(e)は針端負の場合である。ここで、密度変化(a)($N(+)$)および(b)(c)($N(-)$)はそれぞれ図-4、図-5の特

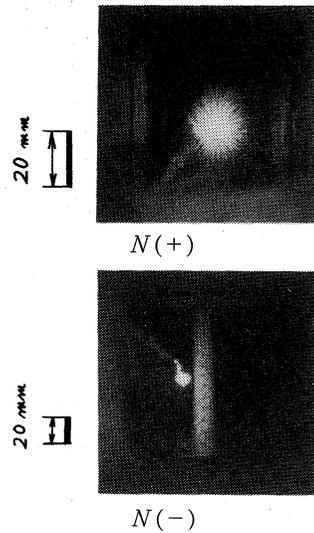


図-8 IIによる変圧器油表面上コロナストリーマ

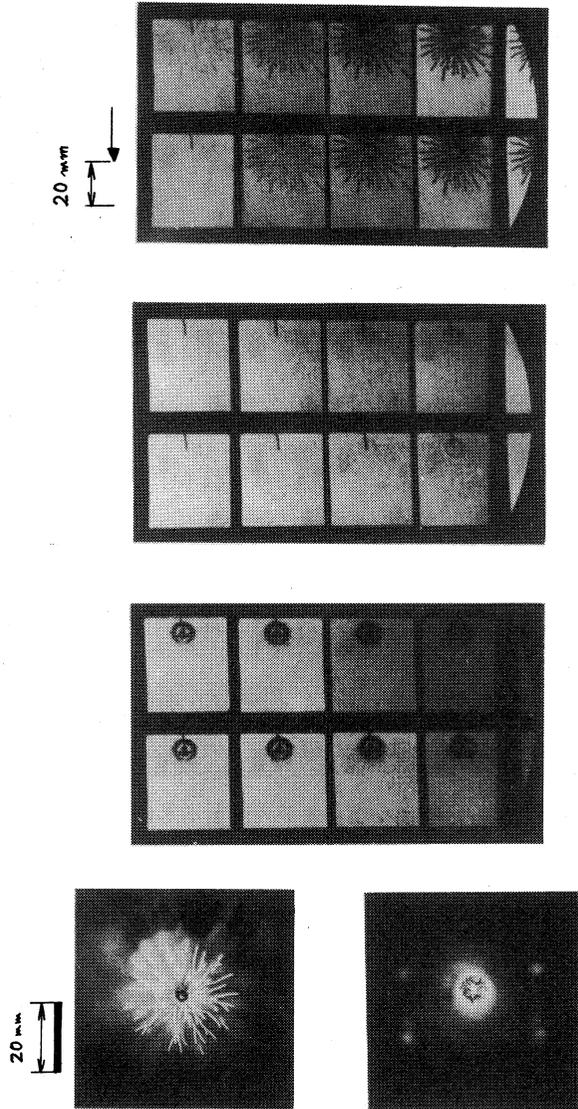


図-9 ICCによる密度変化のこま撮り写真と電荷図との比較 ($V_m = 18\text{kV}$)

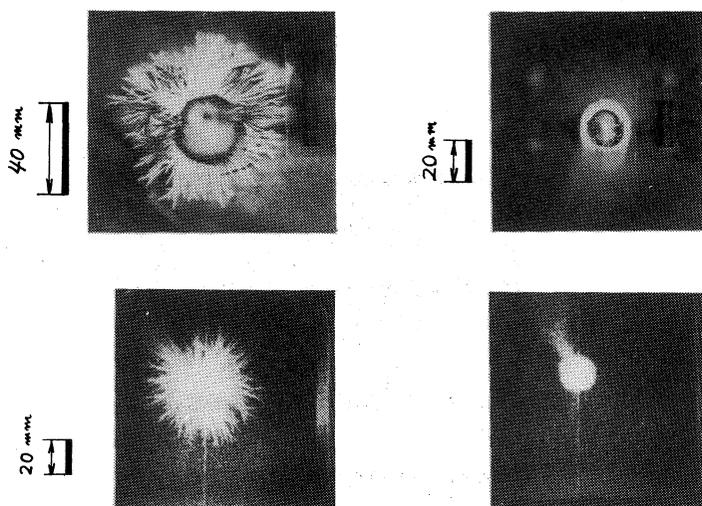


図-10 電荷図とコロナストリーマとの比較 ($V_m = 18\text{kV}$)

徴と同様と見られる。電荷図 (d) および (e) はそれぞれ (a) および (b) (c) と対応し、針端正の場合放射状に進展する樹枝状、針端負の場合円形木葉状を呈する。また、針端負の電荷図において円形木葉状図形の内部およびその周辺のかすみ図形は (c) の密度変化と比較すると良く対応すると見られ、従って、電荷図形は ICC による撮影で τ_1 を充分大の場合に得られる密度変化に対応するものと考えられる。

3.4 透明アクリル樹枝板表面における電荷図とコロナストリーマの比較

以上の結果から、変圧器油面上における ICC による密度変化進展状態と II によるコロナストリーマあるいは透明アクリル樹枝板を用いた電荷図形などの間に、相互に対応性のあることが理解された。一層これらの対応性を確かめるため、2 で述べたシュリーレンシステムを用い、大気中において透明アクリル樹枝板表面における密度変化の ICC による撮影を試みたが、何ら認められなかった¹⁾。

本節では、さらに引き続いて電荷図とコロナストリーマの同時観測を試みた。図-10はその典型的な一例を示し、(a) (b) は針端正、(c) (d) は針端負の場合である。針端極性によるこれら図形の形状・大きさなどの特徴は変圧器油面上における場合と同様良く対応すると見られる。

4. む す び

本報告は、変圧器油-空気界面に配置した針対平板電極ギャップにインパルス電圧を印加し、シュリーレンシステムおよびイメージコンバータカメラなどを用いて変圧器油表面における沿

面放電の進展状況を観測，その進展の特徴について種々検討したものである。さらに，その結果はイメージインテンシファイヤを装着した静止カメラや電荷図法によって得られた図形とも比較されている。

本実験は $V_m=18\text{ kV}$ ， $d=65\text{ mm}$ ， $d_0=0.5\text{ mm}$ ， $h=3\text{ mm}$ という限られた条件下で行なわれたものであるが，密度変化の形状，大きさ，コントラストの経時変化やコロナストリーマとの対応性などについて種々の特徴が見出された。得られた結果を要約すると次の通りである。

- (1) インパルス電圧印加後進展する密度変化に関し著しい極性効果が見られ，(a) 密度変化出現遅れは針端正の方が針端負に比べて小である。(b) 密度変化の形状は針端を中心とし，針端正で放射状に進展する樹枝状，針端負で円形木葉状を呈する。さらに，針端正の場合個々の樹枝状密度変化はその前進端で丸味を帯び，コントラストも大である。一方，針端負の場合円形木葉状密度変化においてその内部には針端から進展する樹枝状，またその周囲には多数の細い放射状に進展する密度変化が認められる。(c) 密度変化の大きさは針端負に比べ針端正において大きい。
- (2) 針端極性に関係なく，密度変化の形状・大きさは出現直後に決定され，以後変化なく，そのコントラストの経時変化のみが明瞭に認められる。
- (3) 密度変化をコロナストリーマとの比較から，形状および大きさにおいて対応性がある。この場合密度変化の形状・大きさに経時変化が見られないことから，後者は前者に先行するか，少なくとも同時に進行すると見られる。従って，本実験で得られた密度変化は変圧器油—空気界面において，電子による気体および液体分子の解離・励起・電離・再結合などにに基づき生ずると考えられる。
- (4) 密度変化と電荷図との比較から，形状および大きさに関して (1) (a)，(b) の特徴が見られ，対応性があると考えられる。従来，電荷図法においてその図形の大きさはインパルス電圧波高値 V_m と関係づけられており，さらに (3) を考慮して密度変化の形状・大きさはインパルス電圧の波頭で決定されると考えられる。その後の密度変化のコントラストの経時変化は (3) と同様解離・励起・電離・再結合の程度によって進行し，その後インパルス電圧が減衰し終る時点では結局電荷図形に対応すると考えられる。
- (5) II によるコロナストリーマを電荷図との比較から，これらの形状・大きさの特徴は (3) と同様，対応性があると考えられる。

最後に，卒業研究として実験にご協力頂いた玉木伸明（現（株）明電舎），佐藤 毅（日立エンジニアリングサービス（株）），武内英世，山本章寿（II部電気）の諸君に対して感謝の意を表します。

（昭和58年5月20日 受理）

参 考 文 献

- 1) 大垣：「変圧器油中沿面放電のシュリーレン法による観測」，電気学会放電研資，ED-77-7（昭52）。
- 2) 岸田・佐藤・鳥山：「油中沿面放電における極性効果」，電気学会放電研資，ED-78-33（昭53）。
- 3) 大久保・池田・本多：「油中沿面放電」，昭56電気学会全大，S. 2-5。
- 4) 山下：「液体中の伝導・破壊現象の光学的観測」，放電，No. 86（昭56-6）。
- 5) 宮城・中尾・服部：「水面上インパルス破壊の進展過程」，電気学会放電研資，ED-82-5（昭57）。
- 6) 中尾・岡・服部：「変圧器油-空気界面における沿面放電のシュリーレン法による観測」，昭和57年電気四学会道支連大49。
- 7) 中尾・助原・松尾・服部：「水面上のインパルス破壊に関する光学的研究」，室工大研報，10, 2, 197（昭55-11）。
- 8) 嶋崎・常安・赤崎：「正および負インパルス電圧印加時の沿面放電の進展過程」，電学論 A, 99, 527（昭54-11）。