

## 水面上のインパルス破壊に関する光学的研究

その他（別言語等） のタイトル	Optical Study on Impulse Breakdown across the Water Surface
著者	中尾 好隆, 助原 正己, 松尾 正孝, 服部 耐吉
雑誌名	室蘭工業大学研究報告. 理工編
巻	10
号	2
ページ	197-207
発行年	1980-11-27
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/3710">http://hdl.handle.net/10258/3710</a>

# 水面上のインパルス破壊に関する光学的研究

中尾好隆・助原正己\*  
松尾正孝・服部耐吉

## Optical Study on Impulse Breakdown across the Water Surface

Yoshitaka Nakao, Masami Sukehara,  
Masataka Matsuo and Taikichi Hattori

### Abstract

When an impulse voltage is applied to the asymmetric gap which is consisted of a point electrode above the water surface and a plate electrode perpendicular to the water surface, an electric discharge propagates across the water surface from the point electrode.

The present paper describes the experimental work which has been carried out under various conditions by the use of a Color Schlieren method and a chopped-wave impulse voltage method to investigate the propagation aspects of the water surface discharge. Schlieren photographs have revealed the complex discharge structures and the significant differences in behaviour between positive and negative point discharge. Especially the various features which have not been observed by the Monochrome Schlieren images, are obtained by applying the Color Schlieren method to the present study.

### 1. ま え が き

屋外用高電圧機器の表面せん絡を避けるための技術の重要性は大きく、放電進展の物理的過程の解析と防止策を見出すために多くの研究がなされてきている<sup>(1)~(2)</sup>。しかし、そのせん絡現象がきわめて複雑なため、まだ完全な理論的解析はなされていない。

本研究では、これに関連して水面上の針電極対水溶液内の平板電極ギャップにインパルス電圧を印加し、放電進展状態について種々実験を行なった。これまで、絶縁油中や水中の針対平板ギャップにインパルス電圧を印加する場合、針端におけるインパルス破壊の進展に伴って密度変化の出現が報告されているが<sup>(3)~(5)</sup>、水面上のインパルス破壊進展においても同様に密度変化が生ずると考えられる。ここでは、主としてカラーシュリーレン法と電圧さい断法を用い、種々の条件における密度変化を水面に対し垂直および水平両方向から観測、同時にストリーマ進展状態の撮影結果と対比させながら、水面上のインパルス破壊進展過程について実験的に検討を行なった。

\* 現 東京芝浦電気株式会社府中工場

## 2. 実験装置および方法

図-1はインパルス電圧発生装置の回路構成を示す。発生電圧は $\pm(0.8 \times 200)$  [ $\mu\text{s}$ ]である。ギャップ $G_1$ で火花破壊するときが発生する光を photo pick PC で検出し、その電気信号は遅延装置 $D_1$ を経てトリガ電圧発生装置 $D_2$ へ入力され、これによって有孔球ギャップ $G_2$ を火花破壊しインパルス電圧がさい断される。図中、VDは分圧器(最高入力電圧: 15 [kV], 分圧比 400 対 1)である。

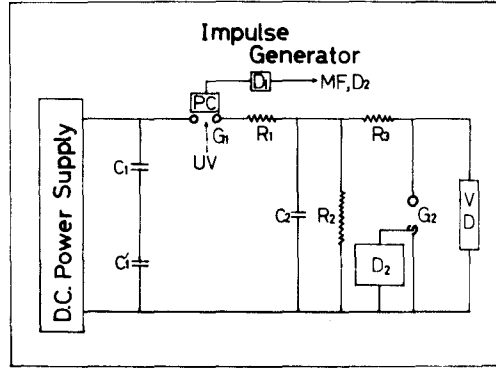


図-1 インパルス電圧発生回路

密度変化観測には図-2のカラーシュリーレン法光学系を用い、図-1の $D_1$ からの信号でマイクロフラッシュMFを発光させた。図中SPはカラーシュリーレン用分光装置(コリメータレンズ2個, 分散率可変プリズム)である。

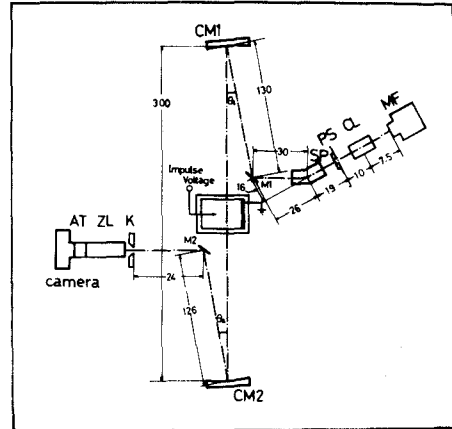


図-2 カラーシュリーレン光学系

図-3は電極配置図で、針電極にはタングステン針(曲率半径 $50\mu\text{m}$ ), 平板電極には銅板( $82 \times 85 \times 3.5\text{mm}$ )を用い、ギャップ長( $G.L.=65\text{mm}$ ), 針と水面とのなす角( $\theta=90^\circ$ )は一定とした。なお、放電セルの底面には垂直方向からの密度変化の観測を可能にするための観測用窓が設けられている。

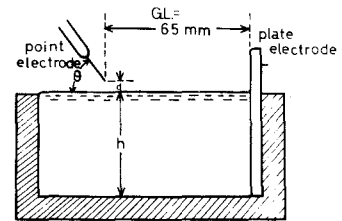


図-3 電極配置図

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 火花電圧特性

図-4は針一水面間距離 $d$ と最小火花せん絡電圧 $V_{min}$ の関係を示す。正針・負針共に $d$ が短い時 $d$ の変化による $V_{min}$ の変化は小さいが、 $d=5\text{mm}$ の場合と $d=10\text{mm}$ の場合の $V_{min}$ を比較するとその値は2倍程度となっている。さらに、それぞれの $d$ の値における $V_{min}$ と放電発生電圧 $V_0$ (放電が針一水面間で生ずる最低電圧)を表-1に示す。

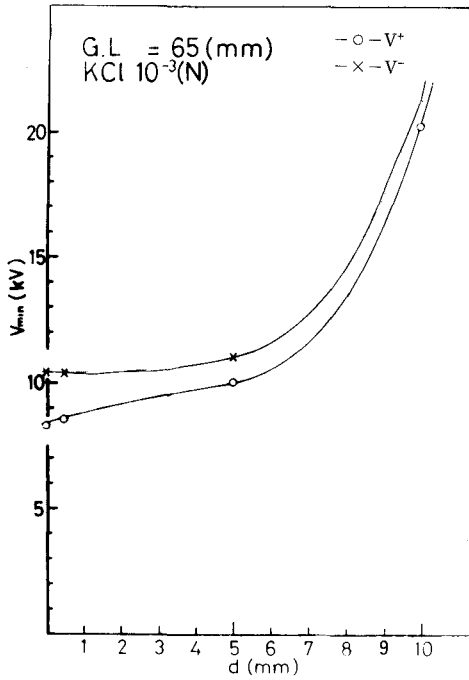


図-4  $V_{min}$  におよぼす  $d$  の影響

表-1  $V_{min}$  および  $V_o(10^{-3}[N]KCl)$

$d$ (mm)	正 針		負 針	
	$V_{min}[kV]$	$V_o[kV]$	$V_{min}[kV]$	$V_o[kV]$
0	8.3	—	10.4	—
0.5	8.6	9.9	10.4	5.0
5.0	10.0	9.8	11.0	10.2
10.0	20.2	20.2	21.3	21.3

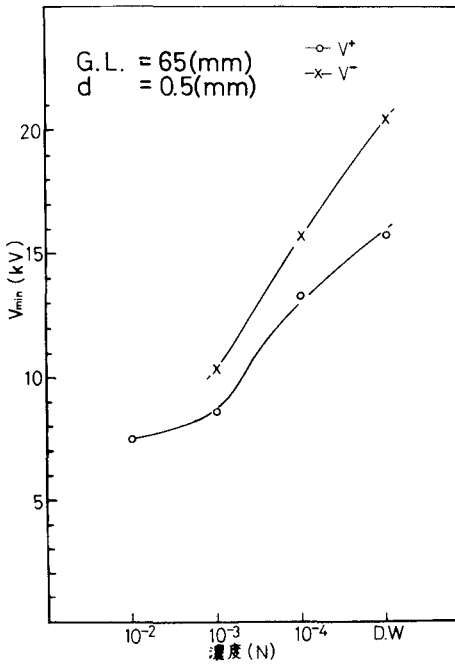


図-5  $V_{min}$  におよぼす濃度の影響

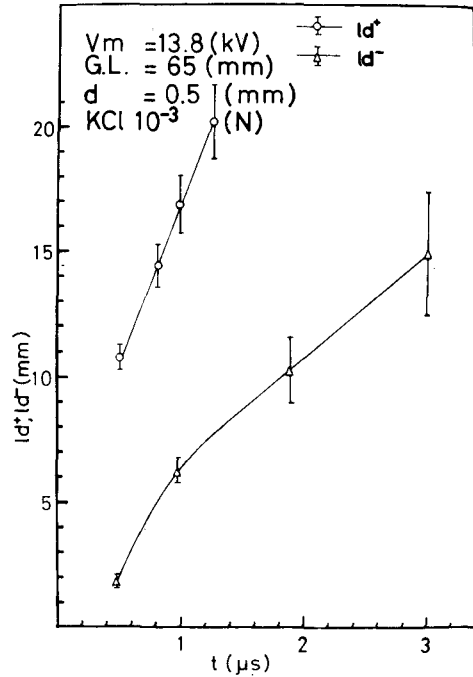
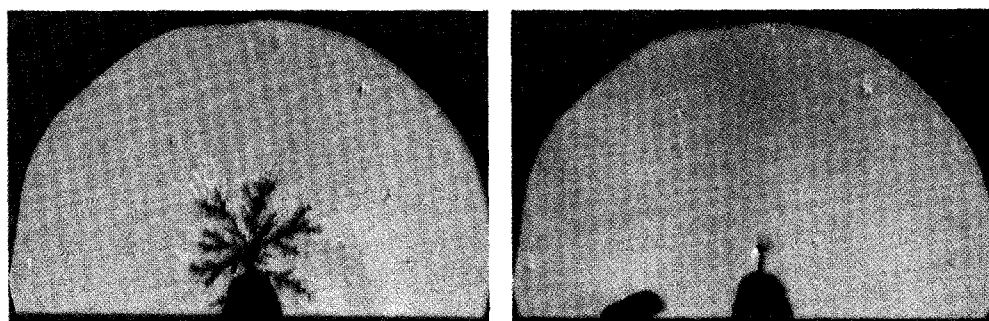
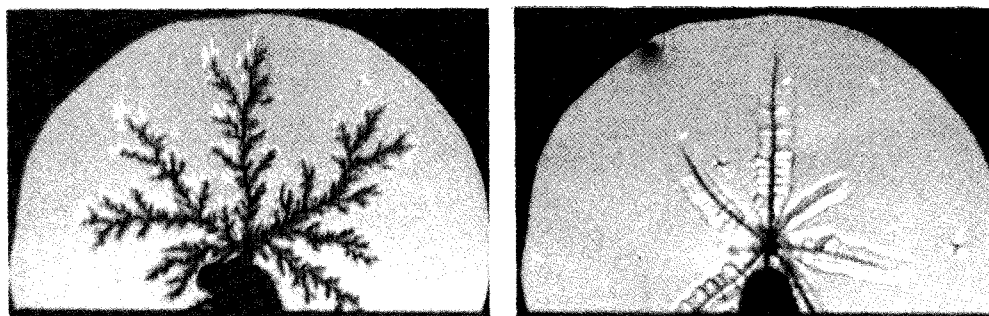


図-7  $l_d$  におよぼす  $t$  の影響



正針,  $t = 0.5\mu s$

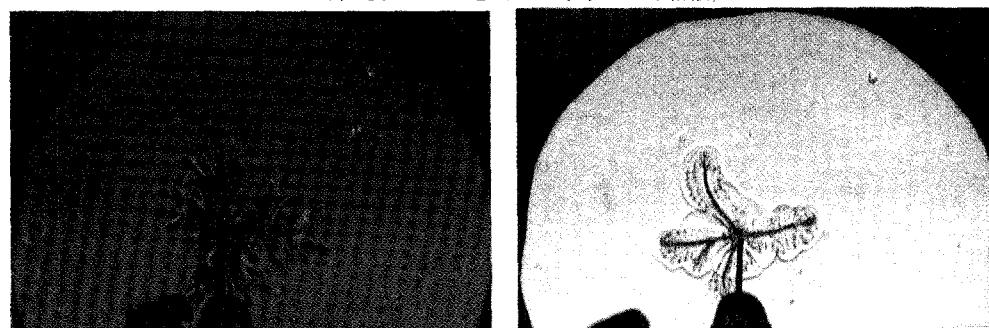
負針,  $t = 0.5\mu s$



正針,  $t = 1.4\mu s$

負針,  $t = 3.2\mu s$

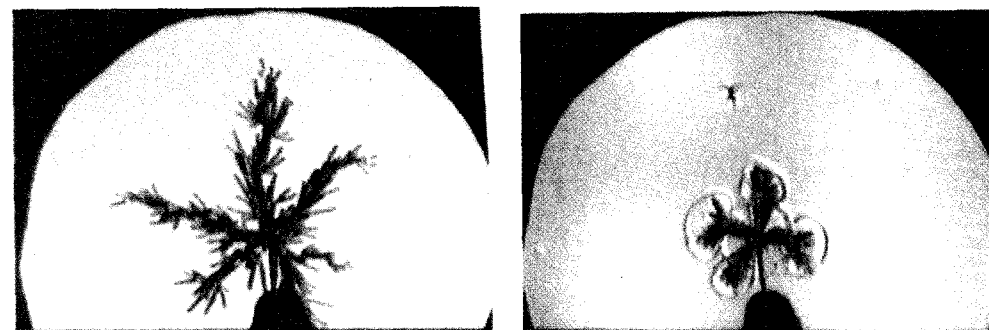
図-6 密度変化進展状態 ( $10^{-3}$  [N] KCl 水溶液)



正針,  $t = 0.6\mu s$

負針,  $t = 2.3\mu s$

図-8 密度変化進展状態 ( $10^{-4}$  [N] KCl 水溶液)



正針,  $t = 1.2\mu s$

図-9 密度変化進展状態 (蒸留水)

負針,  $t = 9.0\mu s$

正針・負針共に、 $d=0.5\text{ mm}$  においては  $V_{min}$  は  $V_0$  の 2 倍程度の値であるが、 $d=5\text{ mm}$  になると両者の値は近くなり、 $d=10\text{ mm}$  の場合には全く同一の値となっている。このことから  $d$  が大きくなると針—水面間で放電が発生すれば必ず水面せん絡することが知られ、この結果は松尾氏らの報告<sup>(1)</sup>と一致する。また、 $V_{min}$  と  $V_0$  の正針と負針における値を比較すると、共に負針の方が高い値を示し、極性効果のあることがわかる。

図-5 は  $d=0.5\text{ mm}$  における水溶液濃度による  $V_{min}$  の変化を示す。濃度が高くなれば  $V_{min}$  の値が低下していることがわかる。

以上の結果、 $d \rightarrow$  小、濃度  $\rightarrow$  大になるとせん絡しやすいこと、著しい極性効果のあることが認められた。

### 3. 2 水面から垂直な方向から観測した密度変化および対応するストリーマ進展状態

#### 3.2.1 密度変化進展状態の形状および極性効果

図-6 は  $10^{-3}[\text{N}]$  KCl 水溶液面上  $d=0.5\text{ mm}$  とした針対平板ギャップにインパルス電圧(波高値  $V_m=13.8\text{ kV}$ ) を印加する場合、電圧印加後  $t$  [ $\mu\text{s}$ ] における針端から平板方向への密度変化進展状態を示すカラーシュリーレン像である。正針の場合その形状は中心の黒い密度変化と周縁の白色針状密度変化に分かれ、負針の場合中心の密度変化とそれを包む密度変化に分かれ、密度変化が複雑な構造を呈することがわかる。また、 $t$  の変化に関して調べてみると、正針の場合  $t$  が大きくなるにつれて針状密度変化の長さが短くなり、一方負針の場合  $t=0.5\mu\text{s}$  の時の密度変化は点状を呈している。

図-7 は密度変化進展距離  $l_d$  におよぼす  $t$  の影響を示す。電圧印加後ごく短時間のうちに密度変化が現われ<sup>(3)</sup>、時間が経過するとともに  $l_d$  は漸次増加し、正針 ( $l_d^+$ ) の方が負針 ( $l_d^-$ ) に比べ、 $l_d^+ > l_d^-$  となる。

#### 3.2.2 密度変化進展状態におよぼす濃度および波高値の影響

図-8 は  $V_m=13.8\text{ kV}$ 、 $d=0.5\text{ mm}$  とした時の  $10^{-4}[\text{N}]$  KCl 水溶液における密度変化を、同じく図-9 は蒸留水における密度変化を示すカラーシュリーレン像である。

図-8 から、正針においては  $10^{-3}[\text{N}]$  KCl 水溶液と同様の形状を呈し、負針では中心の密度変化が羽毛状を呈しており、それを包絡する密度変化も存在することがわかる。

図-9 から、正針では顕著ではないが  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}[\text{N}]$  と同様の特徴が見られ、負針では中心の密度変化とこれを包絡する円状の密度変化の重なった形状が認められる。

これらの結果から密度変化の形状は濃度よりはむしろ針端極性によって大きく左右されることが知られる。

図-10 は  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}[\text{N}]$  KCl 水溶液および蒸留水における時間  $t$  に対する密度変化進展距離  $l_d$  を示したものである。実験範囲内において正針・負針に対し、 $l_d^+ > l_d'^+ > l_d''^+$  および  $l_d^- > l_d''^-$  の関係が得られる。これらの結果から濃度  $\rightarrow$  大とともに  $l_d \rightarrow$  大、すなわち密度変化

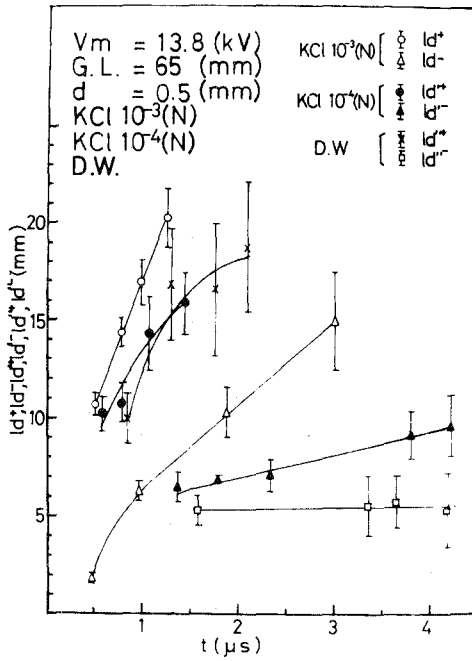
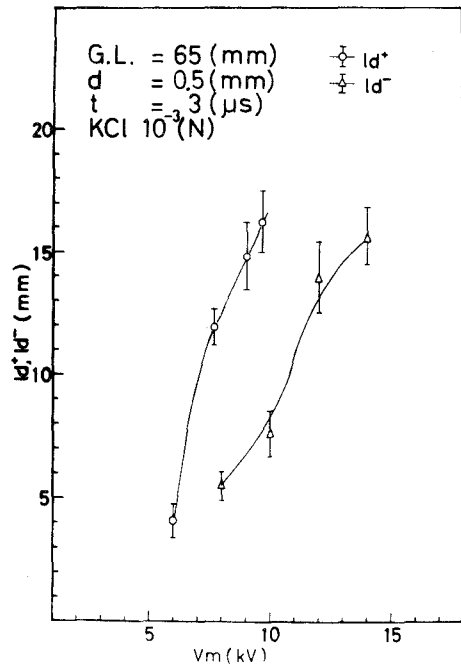
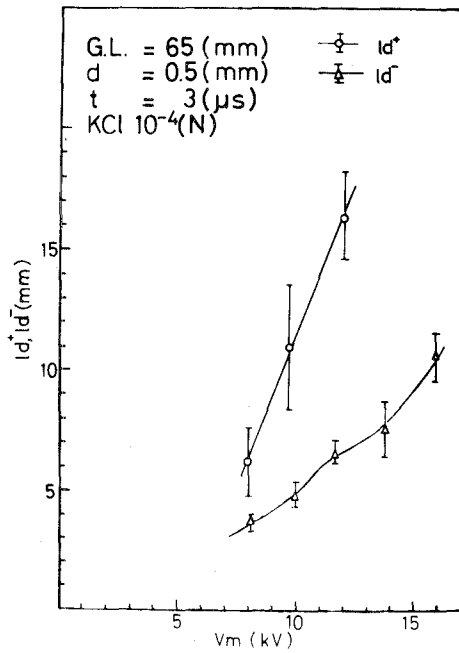


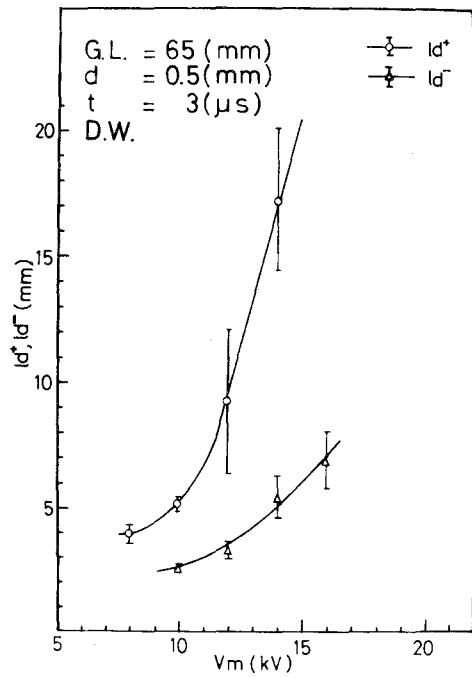
図-10  $l_a$  におよぼす濃度の影響



(a)  $10^{-3}$  [N] KCl 水溶液



(b)  $10^{-4}$  [N] KCl 水溶液



(c) 蒸留水

図-11  $l_a$  におよぼす  $V_m$  の影響

が進展しやすいことがわかる。

図-11は  $t = 3 [\mu s]$  における波高値  $V_m$  に対する密度変化進展距離  $l_d$  の変化を示す。(a) は  $10^{-3} [N]$  KCl 水溶液の場合で、 $V_m$  が大きくなるにつれて  $l_d$ 、 $l_a$  共に次第に大きくなっている。正針の場合、 $V_m = 6 \sim 8 \text{ kV}$  における  $l_d$  の増加量は  $V_m = 8 \sim 10 \text{ kV}$  における増加量よりも大きい。負針の場合、 $V_m = 10 \sim 12 \text{ kV}$  で急激に  $l_d$  が増加していること、それ以上の  $V_m$  では増加の割合が小さくなっていることがわかる。(b) は  $10^{-4} [N]$  KCl 水溶液の場合、(c) は蒸留水の場合で、共に  $V_m \rightarrow$  大とともに  $l_d \rightarrow$  大となっている。

3.2.3 密度変化進展状態におよぼす液厚の影響

図-12は  $10^{-3} [N]$  KCl 水溶液、 $V_m = 13.8 \text{ kV}$  の時の  $t = 5 [\mu s]$  における密度変化進展距離  $l_d$  におよぼす液厚  $h$  の影響を示す。 $h \rightarrow$  大とともに  $l_d \rightarrow$  大すなわち密度変化が進展しやすいことがわかる。

3.2.4 密度変化進展状態に関する一考察

以上の結果から形状については次のようなことがわかる。正針の場合中心の密度変化とその周縁の針状密度変化からなり、濃度に関係なくこれらの密度変化が存在し、中心の密度変化はストリーマに対応すると考えられる。また、電圧印加後の時間  $t$  が経過するにつれて針状密度変化の長さが短くなっていることがわかる。負針の場合、中心の密度変化とそれを包絡する密度変化が存在する。濃度に関係なく包絡密度変化は見られるが、これは中心の密度変化形状の変化に対応して変化している。このように正針と負針の密度変化形状が異なるのは明らかに進展機構の違いによるものと考えられる。

密度変化進展距離について考察すると、濃度および液厚  $\rightarrow$  大とともに  $l_d \rightarrow$  大となるが、これは密度変化進展端と平板間の水溶液抵抗が大きな影響を与えていると考えられる<sup>(6)</sup>。しかし、 $t$  が小さい範囲では導電率の影響はあまり見られないところから、この範囲では針-水面間で放電が生じたことによりある程度密度変化が進展するものと思われる。

3.2.5 密度変化およびストリーマ進展状態についての対応性

図-13は3.2.1における密度変化進展距離  $l_d$  と対応するストリーマ進展距離  $l_c$  を示す。

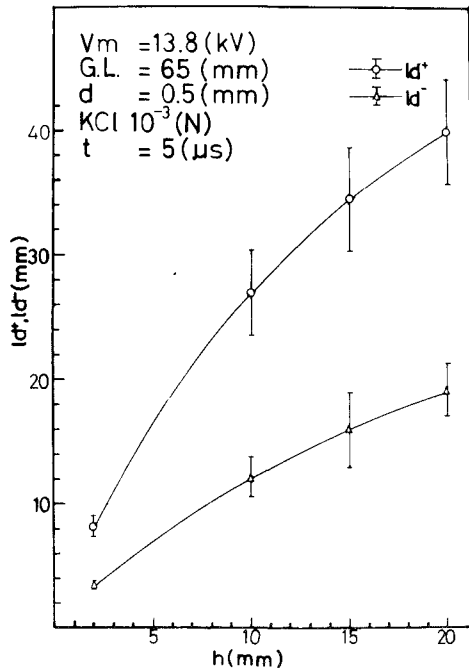


図-12  $l_d$  におよぼす  $h$  の影響



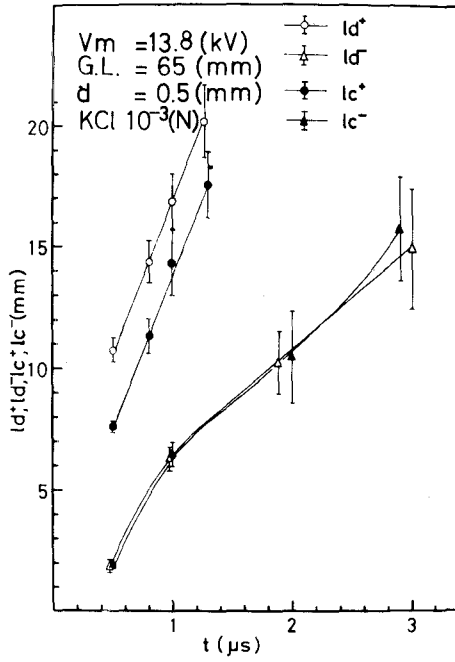
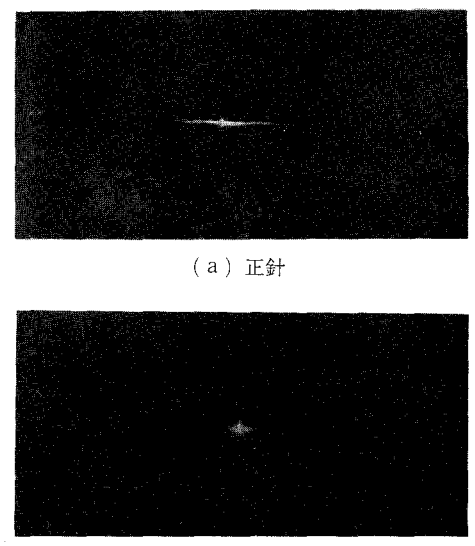


図-13  $l_d$ と $l_c$ の対応性



(a) 正針

(b) 負針

図-14 ストリーマ進展状態 ( $t=0.5 [\mu s]$ )

正針，負針共  $l_d$ と $l_c$ に対応性が見られ，特に負針において顕著である。

図-14はストリーマ進展状態である。これは水面に対して水平方向からストリーマを直接撮影したもので，水面に対して垂直方向から撮影した密度変化と撮影方向が異なるため形状の一致は見られない。

正針・負針共に針先端である中央部の点状部分から水面に沿ってストリーマが進展している状態が見られる。

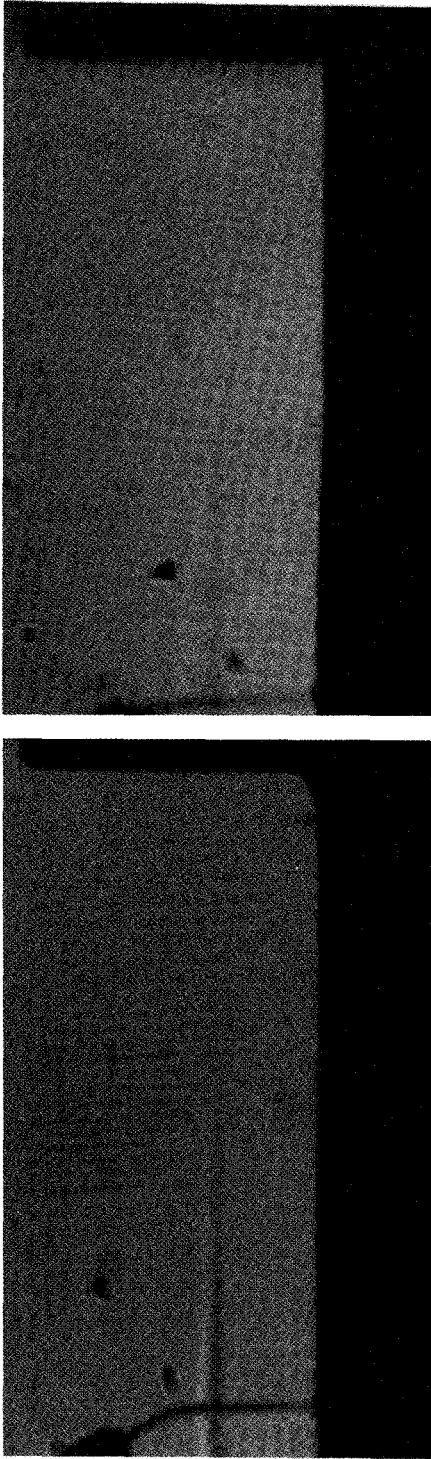
### 3. 3 水平方向から観測した密度変化進展状態および対応するストリーマ進展状態

#### 3.3.1 密度変化進展状態

図-15は $d=0.5 \text{ mm}$ とした $10^{-3} [\text{N}] \text{ KCl}$ 水溶液に $V_m=13.8 \text{ kV}$ のインパルス電圧を印加したときの密度変化進展状態をカラーシュリーレン法によって撮影したものである。正針・負針共に気中部分に水面に平行な直線状密度変化と水面に沿う密度変化が見られ，図-16との比較から水面に沿う密度変化はストリーマと一致している。

#### 3.3.2 ストリーマ進展状態

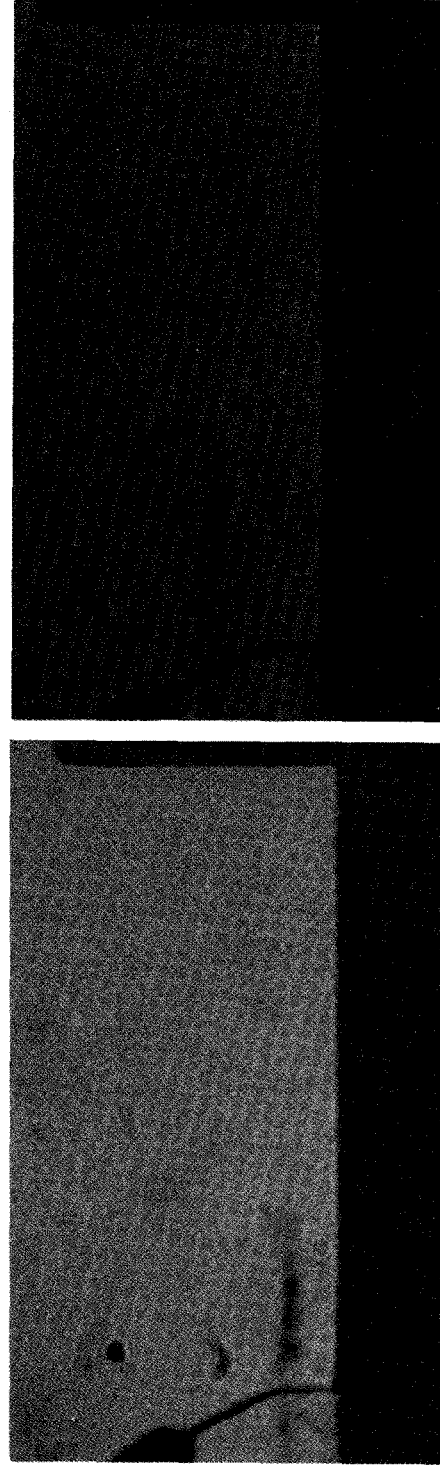
図-16は図-15に対応するストリーマ進展状態を示す。正針の場合，小刻みに曲がり，枝分かれも多い。負針の場合，小刻みな曲がりはなく，枝分かれも正針に比べて少ない。



(a) 正針,  $t = 2.7\mu s$

図-15 水平方向から観測した密度変化進展状態 ( $10^{-3}$  (N) KCl 水溶液)

(b) 負針,  $t = 4.3\mu s$



(a)  $tr = 2.3\mu s$

(b)  $tr = 20.3\mu s$

図-17 上方への密度変化進展状態 ( $10^{-3}$  (N) KCl 水溶液,  $V_m = 13.8kV$ )

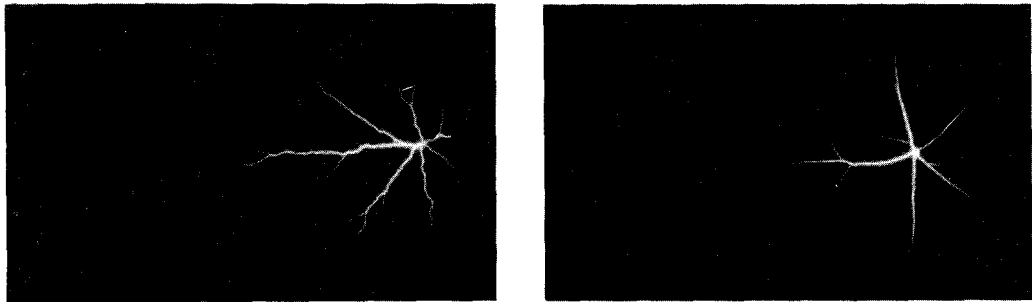
(a) 正針,  $t = 2.7\mu\text{s}$ (b) 負針,  $t = 4.3\mu\text{s}$ 

図-16 ストリーマ進展状態

### 3.3.3 直線状密度変化に関する考察

図-14 のストリーマ進展状態の結果から直線状密度変化に対応するストリーマは存在しない。したがって、この部分はストリーマ進展に付随して生ずるものと考えられるので、MFの発光時間を変えて実験を試みた。

図-17 はカラーシュリーレン法による密度変化進展状態を示す。直線状密度変化が上方へ移動していることがわかる。ここで、 $t_r$  は電圧印加後のMF発光時間を示す。

図-18 は直線状密度変化の上方への進展距離 $H_s$ と時間 $t$ の関係を示す。平均の上昇速度は、正針の場合 362 m/s, 負針の場合 363 m/s で、本実験における平均温度 20°C における音速以上の速度を示し、衝撃波であると思われる。

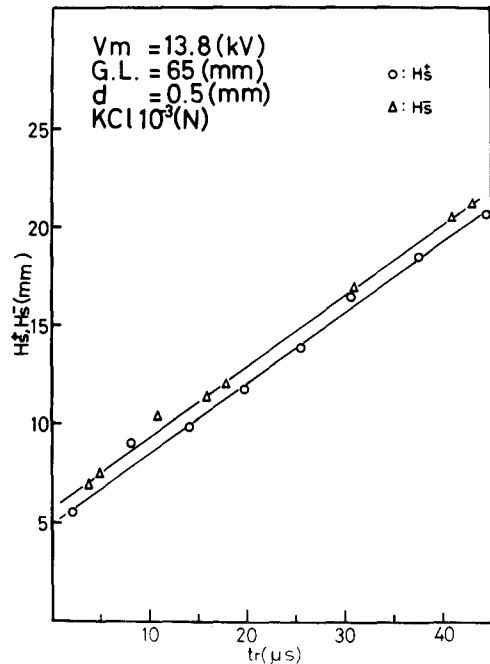


図-18 上方への密度変化進展状態

## 4. ま と め

水面上に配置した針対平板ギャップにインパルス電圧を印加した場合の放電進展状態について、カラーシュリーレン法と電圧さい断法を用いて、種々の条件下で実験を行なった。得られた結果を要約すると次の通りである。

(1) 水面上のインパルス破壊現象の研究にカラーシュリーレン法を導入することによって、通常のモノクロームシュリーレン法では得られない密度変化の内部状態について考察すること

ができた。

(2) 垂直方向からの密度変化の観測結果から、その形状において、正針の場合は中心の密度変化と針状密度変化、負針の場合は中心の密度変化とそれを包絡する密度変化が存在する。

(3) 水平方向からの密度変化の観測結果から、その形状において、正針・負針共に気中部分に水面に平行な直線状密度変化と水面に沿う密度変化が存在する。前者は水面に沿うストリーマの進展に伴って発生し、上昇して行く衝撃波と考えられる。

(4) 密度変化進展距離  $l_d$  は濃度、 $V_m$  および  $h$  によって影響をうけ、濃度  $\cdot V_m \cdot h \rightarrow$  大と共に  $l_d \rightarrow$  大となる。

(5) 密度変化およびストリーマの進展には著しい極性効果があり、またそれらの間には対応性がある。

(昭和 55 年 5 月 21 日受理)

#### 参 考 文 献

- (1) 松尾・大重・柚木・三田：電学論，89-9，1727 (1969)
- (2) F. D. A. Boylett and I. G. Maclean : Proc. R. Soc. Lond., A324, 469 (1971)
- (3) 森川：電学論，92-A，27 (1972)
- (4) 大垣：放電研究会資料，ED-77-7 (1977)
- (5) 中尾：放電研究会資料，ED-76-7 (1976)
- (6) 松尾：電学論，97-A，23 (1977)