

水中火花放電に関する研究：ストリーマ進展状態の観測について

その他（別言語等）のタイトル	Researches on Underwater Spark Discharge : About the observation of streamer's developing state
著者	中尾 好隆, 佐土 俊一
雑誌名	室蘭工業大学研究報告. 理工編
巻	7
号	1
ページ	27-35
発行年	1970-07-15
URL	http://hdl.handle.net/10258/3485

水中火花放電に関する研究

(ストリーマ進展状態の観測について)

中尾好隆・佐土俊一*

Researches on Underwater Spark Discharge

(About the observation of streamer's developing state)

Yoshitaka Nakao and Shunichi Sado

Abstract

It is well known for a fairly long time that a strong shock wave occurs when impulse breakdown is made between electrodes in liquid, mainly in water.

In the metal forming using this shock pressure caused by so-called "Underwater electric discharge", various complicated and interested phenomena are included over a wide field of engineering.

As the fundamental researches with regard to those, this paper has been described about the streamer's developing state by "Schlieren's Method" using a high speed camera.

I. ま え が き

液体中（主として水中）において衝撃的な火花放電を発生させると、それに基因して高温高圧力のガス体がギャップ間に生じ、爆発的な圧力波が発生する。この衝撃圧力を利用して金属材料を高速度に塑性変形させる、いわゆる放電圧力加工法（放電成形法）は高エネルギー・高速変形の一分野として各所で研究が進められてきている。この「放電成形法」には、たとえば放電溝の挙動・衝撃圧力波発生機構および測定法・金属の高速度塑性変形機構等工学の広い分野にわたって興味ある複雑な現象を数多く含んでいる。

数年前より筆者は「放電成形法」の基礎研究として「水中火花放電」について研究してきたが¹⁾、引き続き高速度カメラを用いてシュリーレン法による水中ストリーマの進展状態を観測し、種々検討したので報告する。

II. 実験装置および方法

図-1は測定系の schematic diagram を示す。図において、vacuum switch G_1 (pressure: $(1\sim 3)\times 10^{-5}$ (mmHg)) が trigger されると condenser bank No. 1 の放電により main gap G_1 に電圧が印加される。ここで用いられた電源コンデンサ容量 C および充電電圧 V の範囲はそ

* 工業技術院機械試験所

れぞれ $5\sim 50(\mu\text{F})$, $5\sim 15(\text{kV})$, 主放電回路のインダクタンスは $0.3(\mu\text{H})$ である。図-2 は電極をセットする放電槽 ($1.5\times 2.0\times 1.0(\text{m})$) を含む装置の一部で中央左下は air compressor を示す。exploding wire phenomena に関する研究はかなり以前からおこなわれており²⁾, その強烈な光出力は高速度現象撮影用光源としてしばしば利用される。本実験においても気中ギャップ G_2 を銅線 ($0.18(\text{mm}\phi)$, 長さ $29(\text{mm})$) で短絡し, vacuum switch G_2 を trigger することにより condenser bank No. 2 (静電容量: $14(\mu\text{F})$, 充電電圧: $10(\text{kV})$) を放電させ導線爆発による光出力を高速度カメラの光源とした。図-3 は導線爆発装置を示す。光はスリットを通して

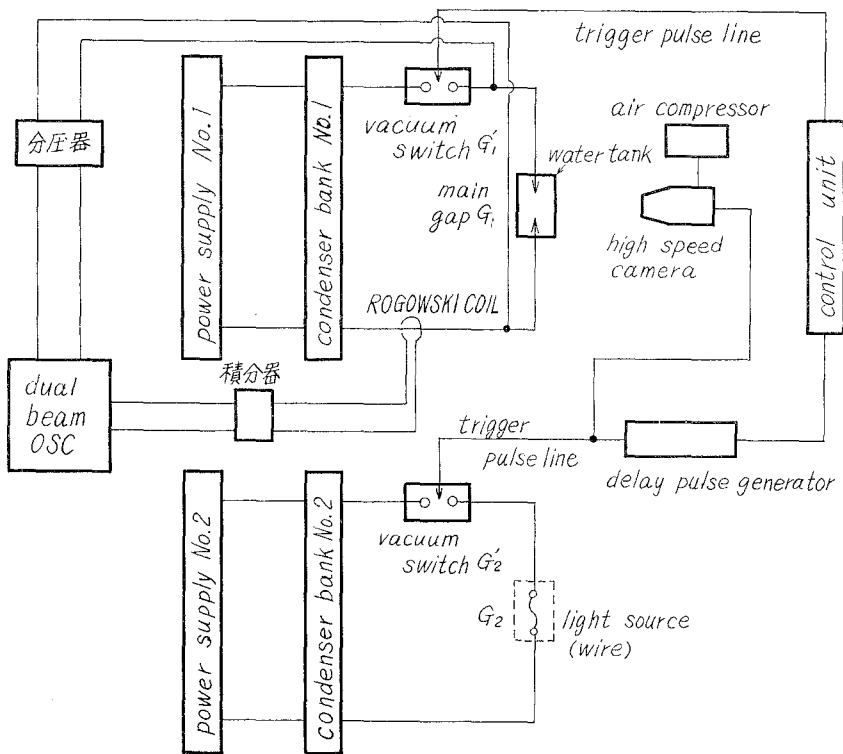


図-1 測定系の回路図

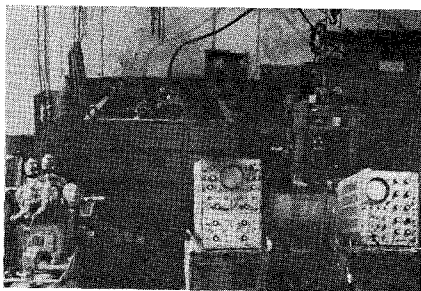


図-2 放電槽

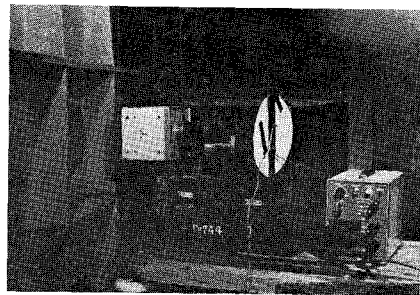


図-3 導線爆発装置

シュリーレン凹面鏡 (直径: 15 (cm), 図-4) に達し, 放電槽側面の観測窓を通して main gap G_1 を照射する。

シュリーレン法とは, 光の屈折を利用して屈折率のわずかの違いを見出す方法で Foucault の考えにより 1864 年 August Toepler によって流体の密度変化および電気火花に伴う圧縮波の観測にはじめて利用された。この原理のあらまは点光源またはスリットからの光をレンズ・凹面鏡等で一定方向に進行する光束とし, これが被検物を通過した後収斂させ, その焦点にナイフエッジを置き適当な明るさの視野に絞るとナイフエッジの辺に近づく方向に屈折された部分は暗く, 刃から遠ざかる部分は明るくなり, 被検物の密度分布が明暗のコントラストとして観察される。実験には溝尻光学工業所製装置を用いた。

図-5 は水中放電現象を観測するために用いられた Beckman & Whitley 社の高速度カメラ (Model 200 simultaneous streak & framing camera) とナイフエッジを示す。rotating mirror はガスタービン (pressure: 20 (psi.)) で駆動され, 最高撮影速度: 10^6 (frames/sec), 撮影コマ数: 12 (frames) である。

衝撃電圧による火花放電において, 一般に火花の遅れ τ (time lag) が問題となる。これは内容を異にする二つの部分, すなわち破壊のきっかけとなるべき初電子の出現に関する統計時間遅れ τ_s (statistical time lag) と火花確立までに要する形成時間遅れ τ_f (formative time lag) の和からなり, 多分に確率的要素を含み同条件で繰返し電圧を印加する時でさえ統計的ばらつきを持つ。水中火花放電の場合, その値はギャップ間に印加する電圧・電源コンデンサ容量・電極面積等に依存し数 100 (μ s) という大きい値に達する¹⁾。したがって, この time lag と光源とを適宜同期するように調整しないと現象をうまく撮影することは非常にむずかしい。ここで用いられた Model 70 operating control unit では G_2 へ trigger pulse を印加する時刻を調整することにより, condenser bank

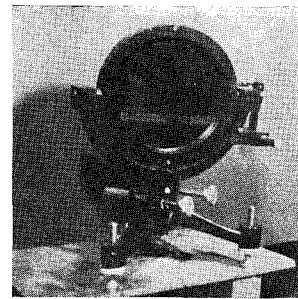


図-4 凹面鏡

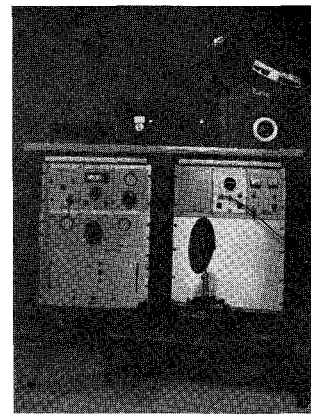


図-5 高速度カメラ

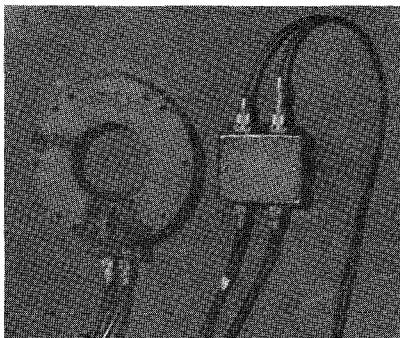


図-6 ロゴスキーコイル

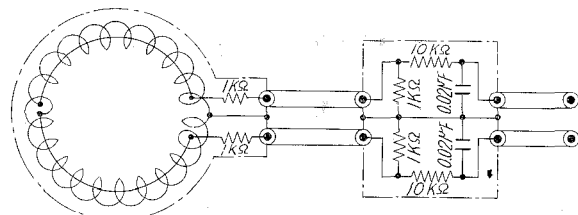


図-7 ロゴスキーコイル・積分器回路図

No. 2 放電回路の delay time を任意に設定することができる。

一方、衝撃電流の測定はログスキーコイル (図-6) を用いた。図-7 はその回路図である。この場合の電流変換式は次式で示され

$$i = 9.95 \times 10^3 E \quad (\text{A})$$

E : 積分器出力端子電圧 (V)

最大 150 (kA) まで測定することができる。

III. 実験結果および考察

1. 針対平板電極

使用した針電極は直径 0.84 (mm)、長さ 51.5 (mm) の縫針、平板電極は直径 50 (mm) ステンレス板である。水中放電では一般の液体絶縁物の場合と異なって火花放電特性におよぼす電極面積の影響が問題となり、本実験では特にストリーマの観測を容易にするため針先端および平板部分を除きすべて絶縁を施した。なお、ギャップ長はすべて 50 (mm) とし針電極をプラスとした。ここでは主として放電電圧以下の電圧を印加した場合のストリーマの進展状態を観測した。

A. V および C が一定の場合

図-8 は $V=5$ (kV)、 $C=5$ (μF) にて breakdown が生じない場合の電圧印加後のストリーマ進展状態を示す。(a)において、針端 (+) のみからかすかに衝撃コロナが発生³⁾、(c)、(e) と時間の経過と共にストリーマの成長する様子がわかる。

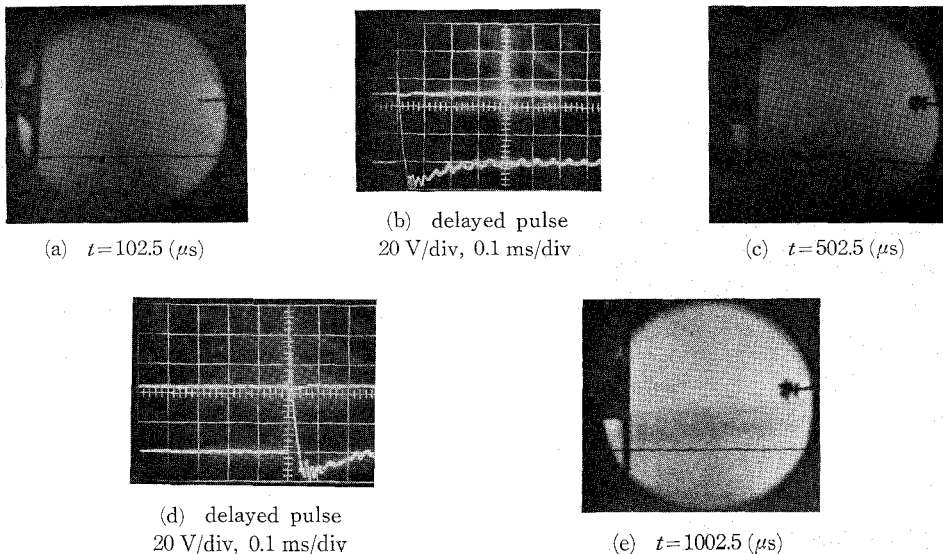


図-8 電圧印加後 t (μs) におけるストリーマ進展状態

B. C を変化させた場合

図-9 は $V=5$ (kV) に一定とし、 C を変化させた場合で (a), (b), (c) の如く C の増加と共に次第にストリーマは樹枝状に伸びている。(d) は $V=10$ (kV) の場合で (c) に比較して一層樹枝状ストリーマが進展している様子がわかる。

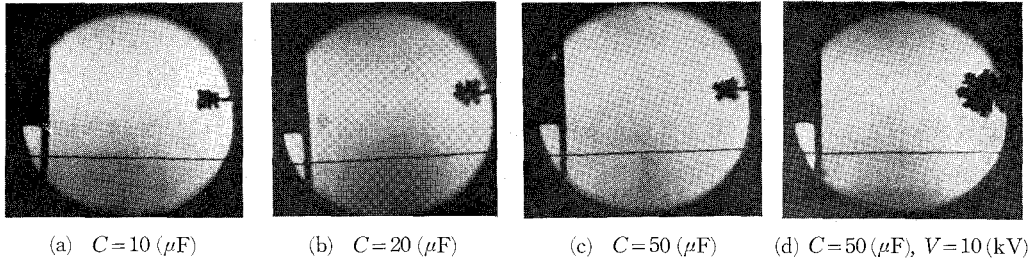


図-9 C を変化させた場合、電圧印加後 1002.5 (μ s) におけるストリーマ進展状態

2. 針対針電極

針電極は直径 8 (mm) 黄銅丸棒を先端開き角度 90 度にしたものである。ここでは充電電圧 $V=10$ (kV), 電源コンデンサ容量 $C=10$ (μ F), ギャップ長 $d=5$ (mm) なる条件における breakdown 前および後のギャップ間放電状態を観測した。

A. prebreakdown

図-10 は水中ギャップに放電電圧 $V=10$ (kV) を印加した場合の breakdown 以前における

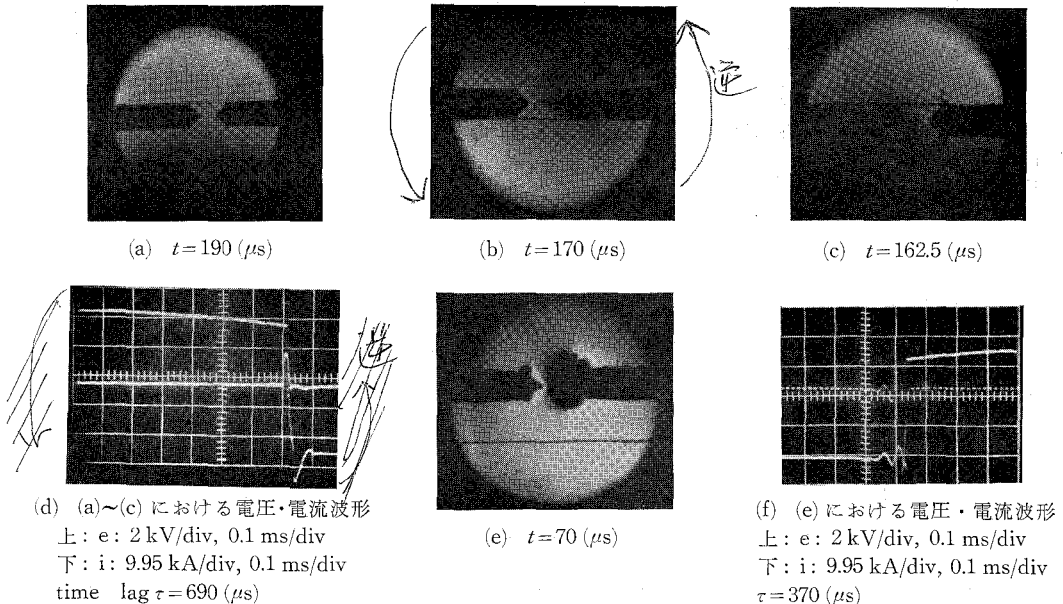


図-10 breakdown 前 t (μ s) における放電状態

ストリーマ進展状態を示す。(a)においてはまだ衝撃コロナは発生していない。(b),(c)と breakdown 時へと時間が経過するにつれ, (+) 針電極からストリーマが現われはじめ電極自体微光を発している。(e)は breakdown 前 70(μs)の状態では (+) 針電極からのストリーマは相当成長し, 同時に (-) 針電極からもストリーマが伸びはじめている。

B. afterbreakdown

図-11 は breakdown 以後の放電状態を示す。(a)は breakdown 後 65(μs)における放電溝とガス体の状態を示し, 中心部では放電が持続していることがわかる。(b)は(a)よりわずかに放電溝が膨張している。(c),(d)と時間が経過するにつれ, 逆に放電溝は次第に収縮し, 一方ガス体は次第に膨張することが確認される。(f)は breakdown 後 185(μs)における状態で放電は完全に終了し, ガス体はほぼ球形を呈して運動しつづける。

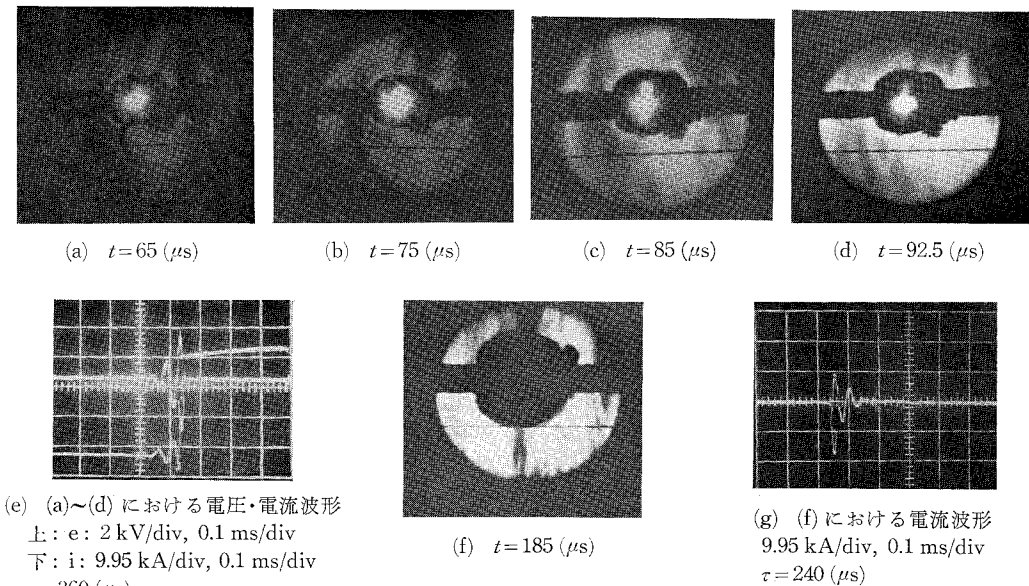


図-11 breakdown 後 $t(\mu\text{s})$ における放電状態

3. 針対針電極

針電極は直径 0.84 (mm), 長さ 51.5 mm) の縫針を用い, 充電電圧 $V=12(\text{kV})$, 電源コンデンサ容量 $C=10(\mu\text{F})$, ギャップ長 $d=20(\text{mm})$ なる条件で実験をおこなった。

A. prebreakdown

図-12 はストリーマの進展状態を一層はっきり観測するため極端に不平等電界にした場合である。(a)は breakdown 前 60(μs)における状態で (+) と (-) 両針端よりストリーマが進展しており, positive streamer の長さの方が大きい。さらに (b), (d), (e) と時間の経過と共に (breakdown に近づくにつれ) 両針端からのストリーマはますます接近し, 結局電極間で結ば

れる時全路破壊に達すると考えられる。(f)では一見両ストリーマが結ばれているかのように見えるが、これはストリーマ自体直線的に進展せず樹枝状に発達するため、真横から見ると重なって見えるか、ストリーマに沿って発生する bubble が重なっているためと考えられる。このようなストリーマ進展状態の不規則性は time lag と密接な関係を持ち、それがばらつきをもつ原因の一つと思われる^り。

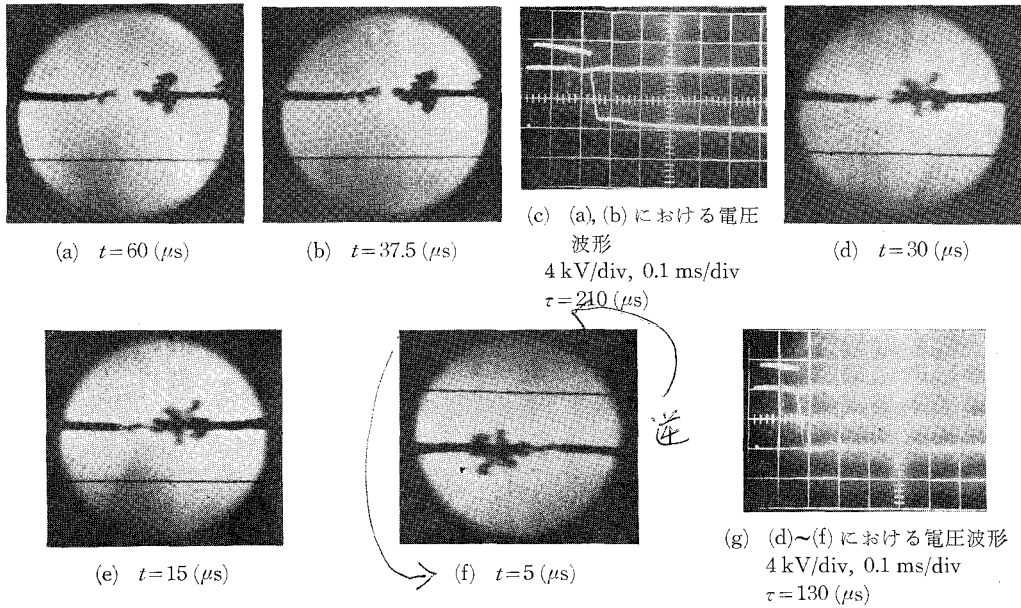


図-12 breakdown 前 $t(\mu s)$ における放電状態

B. afterbreakdown

図-13は breakdown 後 $125(\mu s)$ におけるガス体の状態を示し、まだ卵形をしているが時間の経過と共に次第に球状になるものと思われる。

図-14は 図-12 とは条件は異なるが、電圧印加後 (a) $20(\mu s)$, (b) $122.5(\mu s)$ におけるストリーマの進展状態を示す。これから明らかになごとく、(+) 針電極からのみ樹枝状ストリーマが

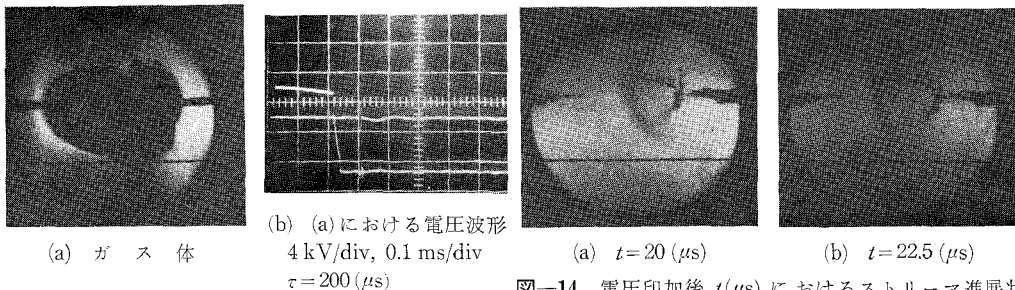


図-13 breakdown 後 $125(\mu s)$ における状態

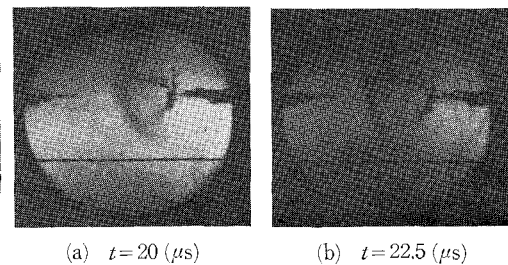


図-14 電圧印加後 $t(\mu s)$ におけるストリーマ進展状態 ($V=15(kV)$, $C=10(\mu F)$, $d=29(mm)$)

衝撃的に発達しており、また針先端を中心にストリーマを包絡するように水の移動する影が確認される。なお(b)に見られるようにストリーマの周囲に小さい bubble が多数発生し、シュリーレン法の原理に基づきこれが影となって現われ、ストリーマの太さが(a)の場合より太くなって、図-12のごとき形に変化するものと思われる。

水中におけるストリーマの発生機構については従来種々論じられてきている。それらの共通的、基本的特徴は長間隙気中放電現象と非常に類似しているということである。すなわち、positive leader (streamer) の形成は electron emission によって説明することはできず、その進展状態から cathode emission がストリーマの成長する基本的 mechanism ではないと考えられる。

leader の先端における電界強度は、印加電圧が 10^4 (V) の場合、約 1.6×10^7 (V/cm) にも達し電離作用が十分考えられる⁴⁾。今、針端電極付近に局部的に電界が集中される場合、ionization が recombination にうちかつならば前者は累積的に進行し、ストリーマは急速に進展するだろう。電子と (+) イオンが再結合する場合、negative streamer 周囲の space charge は (-) イオンからなる。一方、positive streamer は反対符号のイオンにとりかこまれ、これは ionization zone の電界を一層強くし、水分子は連続的にイオン化され、結局 total potential gradient は positive electrode から (+) イオン先端へ移動して positive streamer は樹枝状を呈しつつ negative electrode へ伸びていく。negative streamer の場合も同様 total potential gradient は (-) イオン先端に移動するが前者より小さく従って伸び方も小さい (図-8, 図-12)。これら両ストリーマ共 (+) イオンと (-) イオンからなり、conductive で両者が結合する時放電溝が形成され、その後大電流の通過により線状から円筒状さらには球状へと膨張し、ある時間経過すると収縮しはじめ遂に放電が終了する過程をたどる (図-11)。この間周囲の水は気化し、ガス体は運動エネルギーを得て膨張し続ける。

IV. む す び

本報告は水中火花放電特性、特にその放電進展過程を高速度カメラにより観測し、従来考えられている現象を確認すると共に種々検討したものである。なお、本実験ではシュリーレン法によったため、その原理上ストリーマに伴って発生する多数の小さい bubble が黒い影となって現われ、放電溝自体の様子を十分とらえることができなかつた。そのためにはたとえば image converter camera 等を用いる必要がある様に思われる。又、time lag のばらつきのため火花放電現象と光源用導線爆発の同期関係の設定が非常に面倒であった。今後、trigatron type の電極⁷⁾とか放射性物質等を使用してこの time lag をある程度制御できるようにする必要がある。

終わりに日ごろ御指導いただいている北大工学部坂本三郎教授に謝意を表します。又、本実験は流動研究員として昭和44年8月1日より1カ月間機械試験所にておこなったもので期間中いろいろ御配慮いただいた当所長窪田雅男氏、前材料工学部長中村虔一氏、第二課長加賀広氏並びに関係各位、いろいろ御援助いただいた本学電気工学科服部耐吉教授および教官各位に感謝の意を表します。

(昭和45年5月20日受理)

文 献

- 1) 中尾・坂本：電学誌, 87, 974 (1967).
- 2) W. G. Chace and H. K. Moore: Exploding Wires, **1** (1959).
- 3) 鳥山・篠原：電学誌 (1933, Feb.).
- 4) V. S. Komel'kov: Soviet Phys.—Technical Phys., **6** (8), (1962).
- 5) I. E. Balygin: Soviet Physics JETP, **3** (1956).
- 6) I. S. Stekol'nikov and V. Ya. Ushakov: Soviet Phys.—Technical Phys, **10** (1969).
- 7) I. I. Aksenov, V. K. Bocharov and S. A. Smirnov: Soviet Phys.—Technical Phys., **10** (1969).