

水中放電における気泡発生ならびにその影響

その他（別言語等） のタイトル	Generation of the Bubbles on Underwater Electric Discharge and it's Effect
著者	中尾 好隆, 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	9
号	1
ページ	343-352
発行年	1976-12-18
URL	http://hdl.handle.net/10258/3657

水中放電における気泡発生ならびにその影響

中尾好隆・松尾正孝・服部耐吉

Generation of the Bubbles on Underwater Electric Discharge and its Effect

Yoshitaka Nakao, Masataka Matsuo and Taekichi Hattori

Abstract

The researches on underwater discharge phenomena have been carried out since old times, from a point of electrical breakdown in dielectric liquid and its industrial applications (for example, underwater discharge forming, the source of shock wave and intense ultraviolet rays etc.). But the various characteristics of the discharge which have been obtained to this day are influenced by many factors of an applied voltage wave, a condition of gap and discharge circuit, a polarity of needle, a shape and an area of electrode, and conductivity of liquid. In addition, discharge phenomena themselves are extremely complicated.

In this paper, the effect of small bubbles produced by the application of impulse voltage to the gap in water is studied by the use of Schlieren Method, and further the effect of their bubbles on the characteristics in the underwater discharge is experimentally investigated with the special semi-sphere electrode.

1. まえがき

水中における火花放電現象に関しては液体の絶縁破壊現象研究の一環として⁽¹⁾,あるいはその工学的の面^{(2),(3)}(たとえば,水中放電成形法・衝撃波発生源・強力紫外線源など)から数多く研究が行われてきている。しかしながら,これまでに得られた種々の放電特性は印加電圧・ギャップ条件・放電回路条件・針端極性などのほか,電極の形状・面積および導電率など多くの因子により影響を受け,放電現象自体も極めて複雑で,なお不明の点も多い。

本研究は,水中ギャップ間現象,特にインパルス電圧印加に伴って発生する微小気泡に着目し,気泡の発生・進展状態におよぼす波尾長・波高値および水溶液濃度の影響をシュリーレン法により観測,さらに放電特性におよぼす微小気泡の影響を特殊半球電極を用いて実験的に検討したものである。

2. 実験装置および方法

図-1は実験回路の構成を示す。放電 chamber T (アクリル製, (10×14×12) [cm]) には直径 50 [mm] の気泡観測用窓 (ガラス製) が設けられており, マイクロフラッシュ MF (せん光時間: 3 [μ s]) の trigger は始動球ギャップ MG 上にセットした photo pick の信号で行なった。図中, VD および Rsh はそれぞれ分圧器 (分圧比 400:1, 最高入力電圧 15 [KV]) および

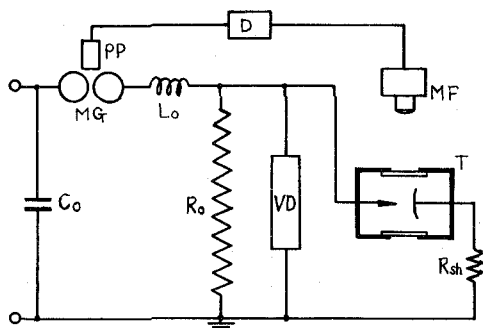


図-1 実験回路

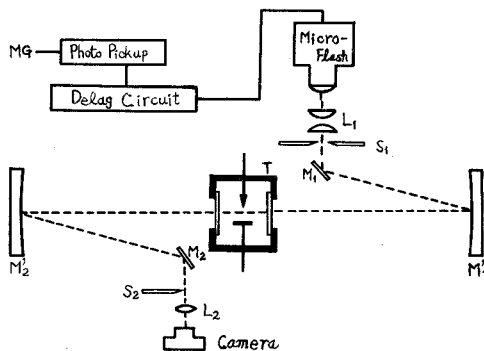
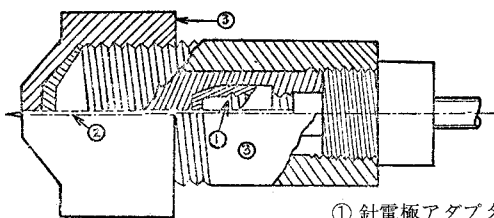
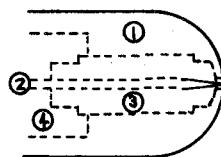


図-2 シュリーレン法光学系



- ① 針電極アダプター
- ② 針電極
- ③ 絶縁物

図-3 針電極



- ① AP 電極
- ② AN 電極
- ③ 緑縁物
- ④ 空隙

図-4 特殊半球電極

分流器である。図-2は気泡観測に用いた光学系を示し，delay circuit Dによりインパルス電圧印加後任意時間 t [μs] における気泡を静止カメラで撮影した。図-3は本実験において主として用いた針電極，図-4は放電特性におよぼす微小気泡の影響を調べるために試作した特殊半球電極である。なお，平板電極にはステンレス製ロゴウスキー型電極を用いた。

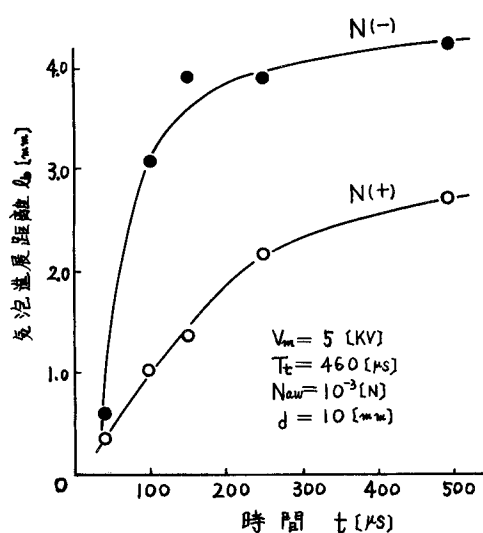
3. 実験結果および考察

3.1 微小気泡の発生・進展状態

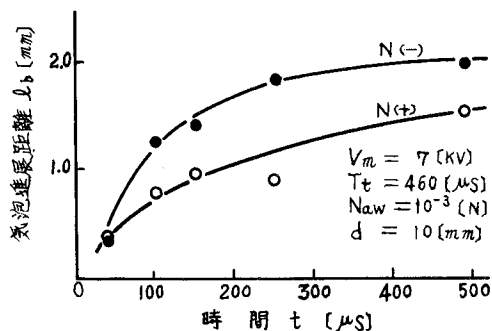
液体絶縁物に比べ導電率が極めて大きい水道水や電解質水溶液中ギャップにインパルス電圧を印加する時，火花に至らぬ低い電圧（コロナの発生伴わず）にもかかわらず，平等電界（半球対半球ギャップ）・不平等電界（針対平板ギャップ）いずれにおいてもギャップ間に微小気泡が発生し，また局部破壊が生ずる場合（針対平板ギャップ），ストリーマ進展路に沿って多数の微小気泡が生じていることを確認した。^{(2),(4)}ここでは，全路破壊以前に生ずる微小気泡の挙動について詳細に検討する。

3.1.1 気泡進展状態における極性効果

図-3の針電極を用い， 10^{-3} [N] KCl 水溶液中ギャップ（ギャップ長 $d = 10$ [mm]）にインパルス電圧（波尾長 $T_t = 460$ [μs]，波高値 V_m ）を印加する場合，電圧印加後 t [μs] にお



(a) 針対平板ギャップ



(b) 針対針ギャップ

図-5 気泡進展状態の極性効果 (I)

ける非接地側針端からの気泡進展距離 l_b (mm) を, (a)針対平板ギャップ ($V_m = 5$ [KV]) および(b)針対針ギャップ ($V_m = 7$ [KV]), について示すと図-5のようになる。

これらの結果より, 電圧印加後ごく短時間のうちに液体の密度変化が現われ, 時間が経過するとともに l_b は漸次増加し, 負針 (N (-)) のほうが正針 (N (+)) に比べ l_b 大となることがわかる。なお, N (\pm) いずれにおいても電圧減衰とともに l_b は次第に飽和する傾向を示す。

図-6は気泡の発生・進展状態を示す典型的写真で, その形状には針端極性により著しい特徴があり, N (-) の場合塊状, N (+) の場合木葉状を呈する。

以上の結果, 気泡の発生・進展状態には顕著な極性効果のあることが認められた。このことは針端におけるコロナの進展状態と密接な関係があると考えられる。

3.1.2 微小気泡進展状態におよぼす放電液濃度および印加電圧の影響

図-7はKCl水溶液中針対平板ギャップ ($d = 10$ [mm]) に正極性インパルス電圧を印加する場合, 気泡進展距離におよぼす放電液濃度 N_{aw} [N] および波高値 V_m^+ [KV] の影響を示す。(a)は $T_t = 220$ [μ s] 一定とし, N_{aw} および V_m^+ を変えた場合の $l_b - t$ 特性, (b)は(a)より求めた気泡の平均進展速度 $v_b - t$ 特性, (c)は $V_m^+ = 7$ [KV], $T_t = 460$ [μ s] における $l_b - t$ 特性である。

これらの結果から, N_{aw} および $V_m^+ \rightarrow$ 大とともに $l_b \rightarrow$ 大, すなわち気泡が進展しやすいことがわかる。また, 気泡発生初期に濃度効果も顕著に現われてくる。さらに, (a), (c)を比較することにより T_t の影響を知ることができ, l_b 飽和の傾向は T_t 小のほうが早く T_t 大の場合なお l_b は時間とともに漸次増加する。

以上の実験結果, $N_{aw} \cdot T_t \cdot V_m^+ \rightarrow$ 大にすると気泡が発生・進展しやすいことが認められた。

3.2 水溶液中における火花電圧特性

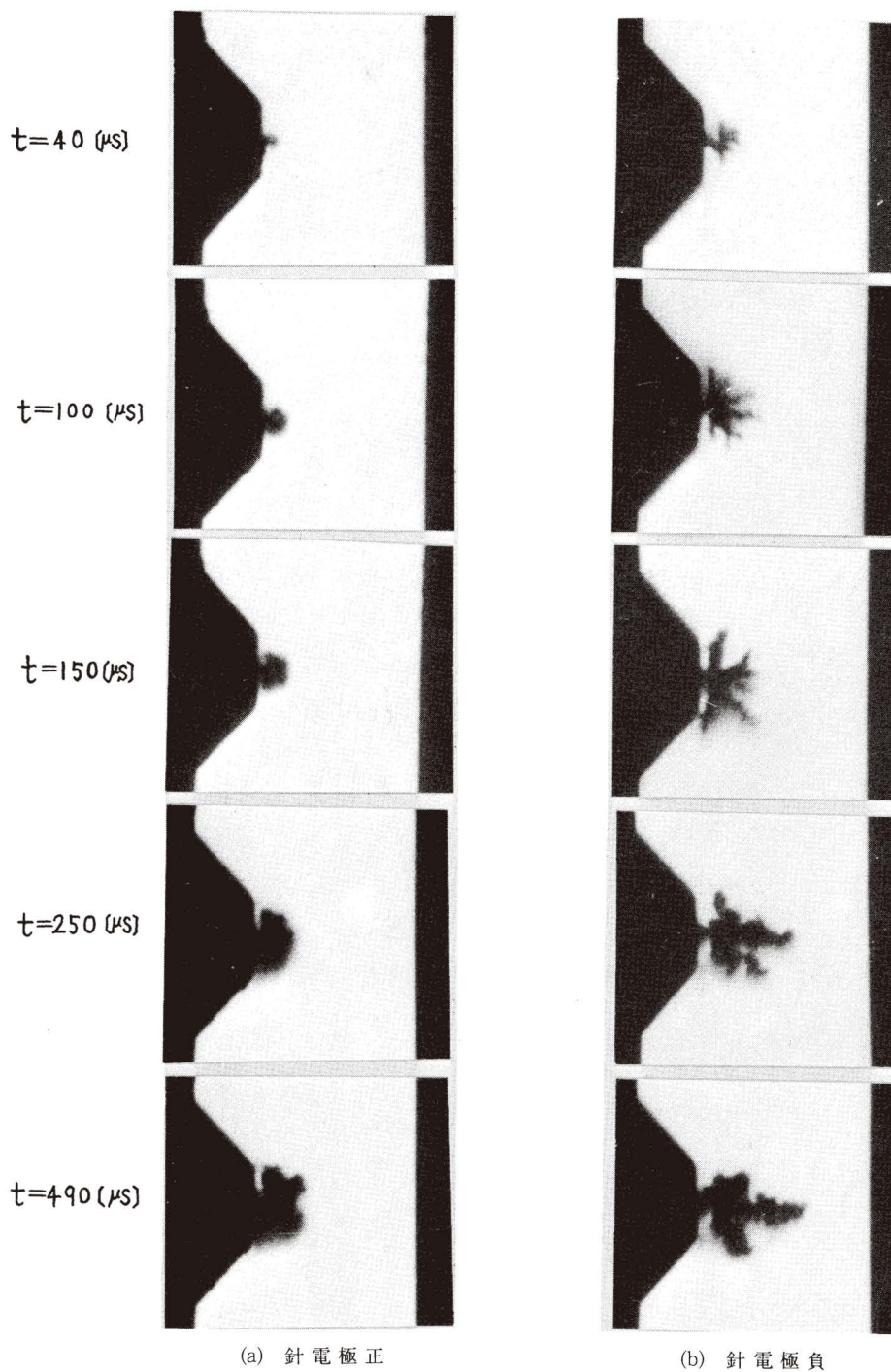


図-6 気泡進展状態の極性効果 (II)

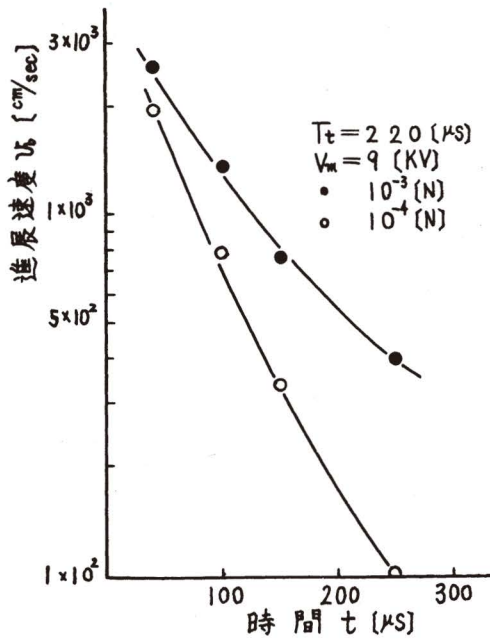
3.2.1 火花電圧におよぼす N_{aw} および T_t の影響

図-7の結果、気泡の発生・進展状態と $N_{aw} \cdot T_t$ との間に対応関係のあることが見出された。ここでは、火花電圧におよぼす微小気泡の影響を調べるため、 $N_{aw} \cdot T_t$ を種々変えた時の V_s を測定した。

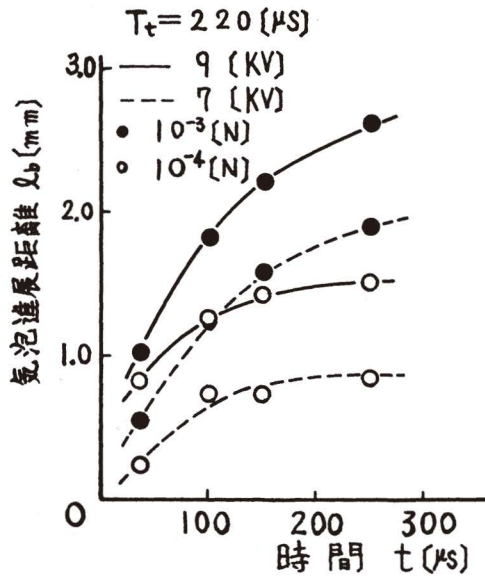
図-8はKCl水溶液中針(先端開き角度:14度)対平板ギャップ($d=1.0$ [mm])における火花電圧特性を示し、(a)は標準インパルス電圧($T_t=40$ [μs])印加時の V_s-N_{aw} 特性、(b)は $N_{aw}=10^{-3}$ [N]における V_s-T_t 特性である。

これより、 N_{aw} および $T_t \rightarrow$ 小とともに火花電圧 V_s は次第に大となり、さらに負針に比べ正針のほうが V_s 高く極性効果が現われてくる。

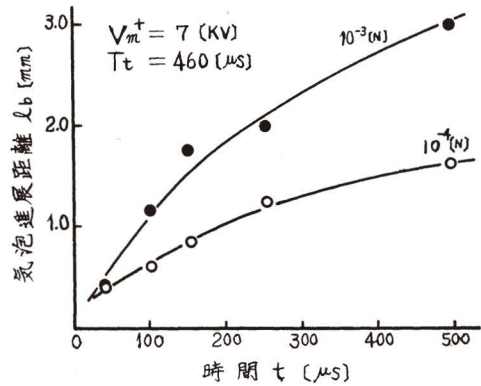
しかし、 N_{aw} および T_t がある程度以上になると(この場合、 $N_{aw}=10^{-2}$ [N], $T_t=460$ [μs]), 極性効果が消失する傾向が認められる。これらを3.1.2の結果と比較することにより、 N_{aw} および T_t 大、すなわち気泡が発生しやすい条件では火花電圧は低下する、という対応関係が見出される。



(b)



(a)



(c)

図-7 気泡進展状態におよぼす $N_{aw} \cdot T_t$ の影響

3.2.2 破壊機構に関する一考察

以上の結果から、液体絶縁物に比べ導電率の極めて大きい水道水や電解質水溶液中ギャップにインパルス電圧を印加する場合、ギャップ間に多量の微小気泡が認められ、その発生・進展状態および火花電圧は N_{aw} や T_t により影響を受けて、著しい極性効果が現われることを知った。この微小気泡の発生原因については、(a)水自身の電氣的破壊、(b)伝導電流による熱的破壊、(c)電気・熱的（混存）破壊、などいくつか考えられるが、ここでは主として(b)について検討を行なった。

平等電界ギャップ中単位体積につき熱伝導を考え、Wien 効果を見無視すると、次式のごとく印

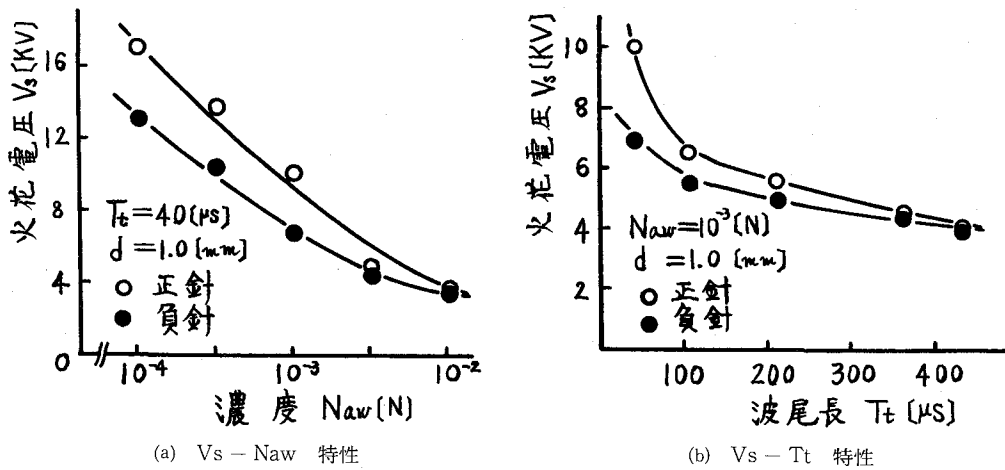


図-8 火花電圧におよぼす N_{aw} および T_t の影響 (I)

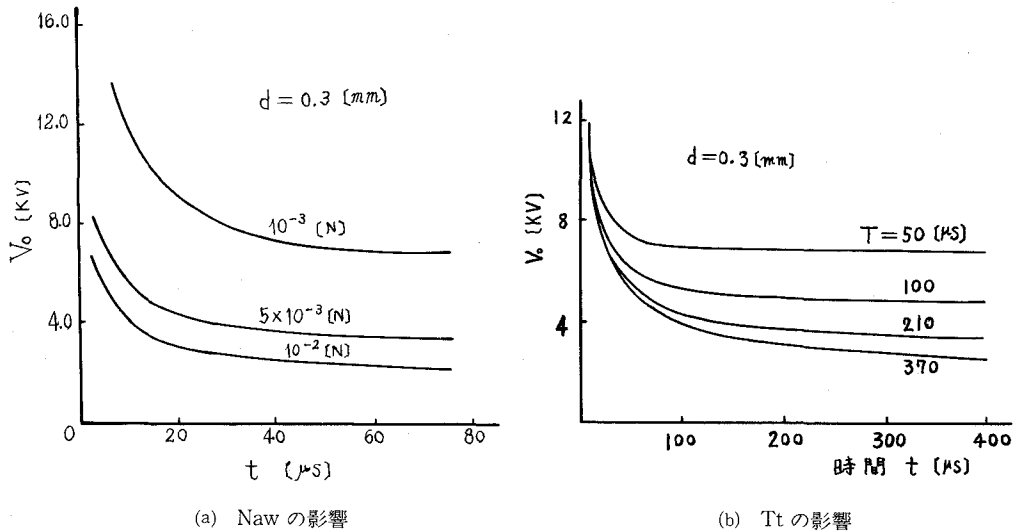


図-9 $V-t$ 曲線

加電圧と温度上昇との関係が求められている。(5)

$$V_0 = \left\{ \frac{(1 - \exp(-\alpha(\theta - \theta_0)))}{(1 - \exp(-2t/T))} \cdot 2c\rho d^2 / \alpha\sigma_0 T \right\}^{1/2} \quad \dots(1)$$

ただし、印加インパルス電圧 $V = V_0 \exp(-t/T)$ 、導電率 $\sigma = \sigma_0 \exp(\alpha\theta)$ 、 c, ρ, θ, d はそれぞれ比熱、密度、温度およびギャップ長である。

表-1のごとき定数を用いて、(1)式より計算した半球対半球ギャップ ($d = 0.3$ [mm]) における $V-t$ 曲線を図-9に示す。(ただし、 $N_{aw} = 10^{-2}$ [N] の場合、印加電圧波形が若干変化する) 図-10は、 $\theta = 100$ (°C) を熱的破壊の

表-1 (1)式の定数
 $\alpha = 0.02$
 $c\rho = 4.2$ [Jdeg⁻¹]

KCl濃度[N]	σ_0 [(Ωcm)]	T [μs]
10^{-2}	1.2×10^{-3}	35
10^{-3}	1.2×10^{-4}	50
10^{-4}	1.2×10^{-5}	50

一つの目安とし、図-9における飽和値すなわち $t \rightarrow \infty$ における V_0 を最小火花電圧 V_s と考え、 $N_{aw}^{-1/2}$ および T に対してプロットし、実験値と比較したものである。

図-11は、非破壊電圧 ($V_0 = 1$ [KV], $T = 60$ [μs]) を印加する場合、電圧・電流波形から図式積分することにより求めた水中ギャップ消費エネルギー $E_w = \int e i dt$ の濃度効果を示したものである。

これらの結果より、 N_{aw} および $T_t \rightarrow$ 大とともに水中ギャップに注入されるエネルギーは次第に大となり、局部的加熱により微小気泡が発生し、 V_s の低下が考えられ、(1)式による計算値とほぼ一致する領域が認められる。しかし、 N_{aw} が 10^{-3} [N] 程度以下および極端に小さい T ($T_t < 40$ [μs]) においては、計算値と実験値との差が大きくなる傾向を示し、これらを境にして破壊機構が異なってくると考えられる。

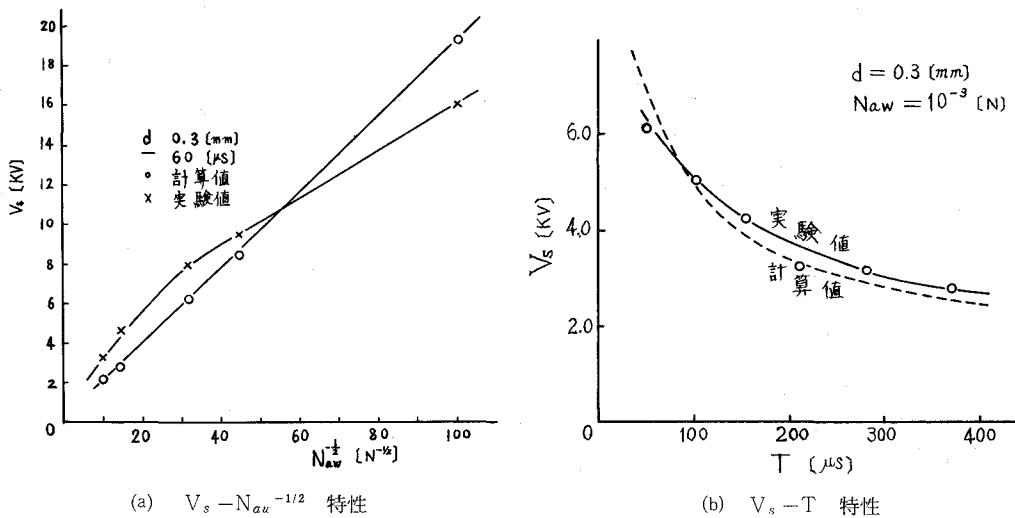


図-10 火花電圧におよぼす $N_{aw} \cdot T$ の影響 (II)

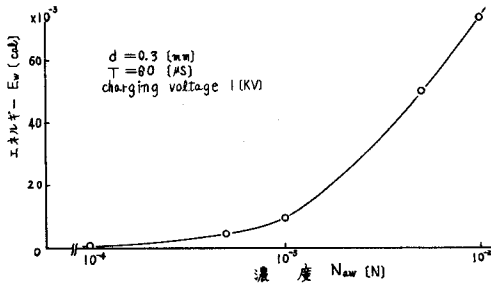


図-11 Ew - Naw 特性

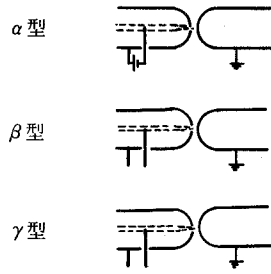
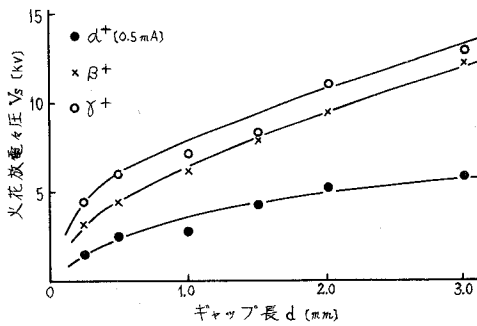
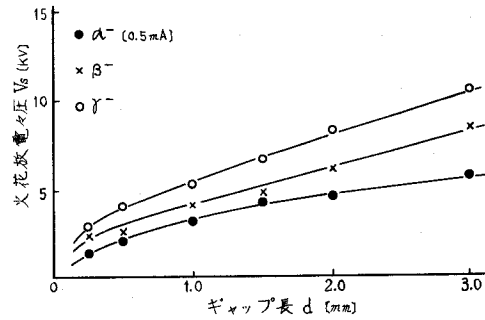


図-12 半球電極組合せ



(a) 正極性



(b) 負極性

図-13 連続気泡供給時の Vs - b 特性

3.3 連続気泡供給時の火花電圧特性

3.1 および 3.2 の実験結果から、水中ギャップにおけるインパルス電圧印加に伴い発生する微小気泡の進展状態と火花電圧との対応関係が見出された。ここでは以上の実験事実に基づき、水中ギャップ間にあらかじめ連続的に気泡を供給する場合の火花電圧について検討する。

図-12 は図-4 のとき特殊半球電極対半球電極 (直径: 10 [mm]) の組み合わせ種類を示し、α型は AP-AN 間に直流電圧を印加、AN 先端で気泡を発生させる方式、β型および γ型は AP-AN 間をそれぞれ短絡 (突起付半球電極)、開放する方式である。なお、放電液は水道水である。

図-13 は AP-AN 間電流 $I = 0.5$ [mA] における連続気泡供給時の $V_s - d$ 特性を示し、特殊半球電極に正極性(a)および負極性(b)インパルス電圧を印加した場合である。正極性の場合、気泡を供給する α型の V_s が最も低く、突起付半球電極に相当する β型および γ型の順に V_s はかなり高くなっている。また、負極性の場合、正極性に比べ全体的に V_s は若干低くなっている。

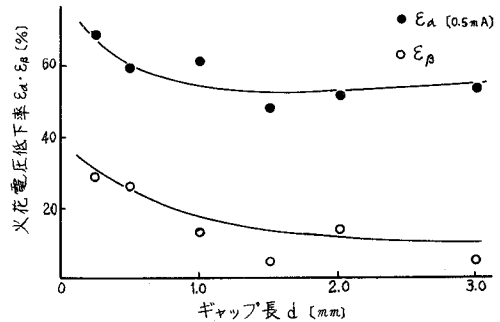


図-14 火花電圧低下率

(α 型はそれ程顕著でないが、 β 型および γ 型には相違が認められる)

図-14は γ 型における火花電圧 V_{sr} に対する α 型および β 型 (それぞれ火花電圧を V_{sa} , $V_{s\beta}$ とする) の火花電圧の低下率を示し、気泡を供給することにより 50~70 [%] の低下が見られる。これは、図-8における気泡の発生しやすい条件における V_s の低下と一致するところである。なお、低下率は次式より計算した。

$$\begin{aligned} \varepsilon_a &= \{(V_{sr} - V_{sa}) / V_{sr}\} \times 100 \text{ [%]} \\ \varepsilon_\beta &= \{(V_{sr} - V_{s\beta}) / V_{sr}\} \times 100 \text{ [%]} \end{aligned} \quad \dots(2)$$

図-15は α 型において、 $I = 0.05$ [mA] および 0.5 [mA] とし、気泡供給量を変えた場合の $V_s - d$ 特性を示す。これより、気泡供給量の大小が極性効果に影響をおよぼすことがわかり、3.2.1の結果と一致する。

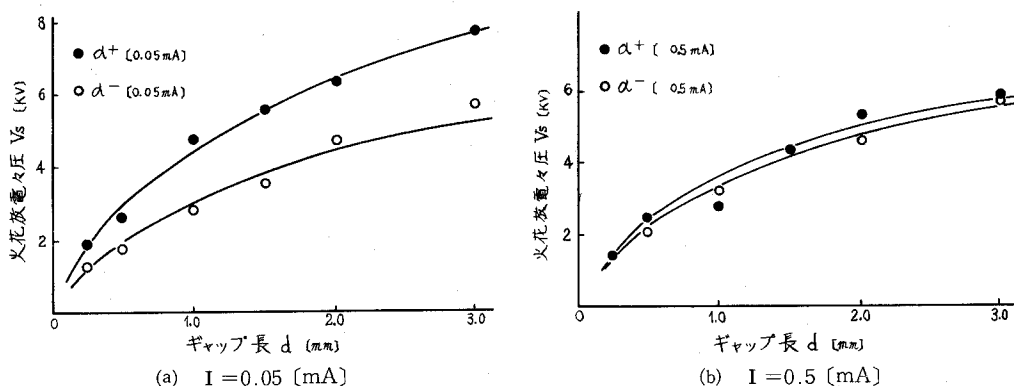


図-15 連続気泡供給時火花電圧の極性効果

4. むすび

本報告は液体絶縁物に比べ導電率の極めて大きい水道水および電解質水溶液中ギャップにインパルス電圧を印加する場合に生ずる微小気泡をシュリーレン法で観測し、それらと火花電圧との対応関係について検討したものである。得られた結果を要約すると次のごとくである。

- (1) 電圧印加後、極く短時間のうちに液体の密度変化が現われる。
- (2) 気泡の発生・進展状態には著しい極性効果が存在し、その形状はN(-)の場合は塊状、N(+)の場合は木葉状を呈する。また、気泡進展距離 l_b は時間の経過とともに次第に増加し、N(+)に比べてN(-)の時のほうが l_b 大となる。
- (3) 気泡進展距離 l_b は $N_{aw} \cdot T_t$ および V_m により著しく影響を受け、 $N_{aw} \cdot T_t \cdot V_m \rightarrow$ 大とともに l_b 大となる。
- (4) 気泡の発生・進展状態と火花電圧 V_s との間には対応関係があり、気泡が発生しやすい条件 ($N_{aw} \cdot T_t \rightarrow$ 大) であれば V_s は著しく低下することが見出された。さらに、そのような条件では、極性効果が消失する傾向を示す。

(5)熱的破壊説に基づいて検討した結果、 $N_{aw}=10^{-3}$ [N] 程度より大の場合、実験値は計算値とほぼ一致するが、 $N_{aw}<10^{-3}$ [N] および T_t が極めて小の場合、計算値から次第にずれる傾向が見出された。それらの領域においては他の破壊機構が関与してくると考えられる。

(6)水中ギャップに連続的に気泡を供給する場合、50~70 [%] 程度の火花電圧の低下が認められた。これは(4)と一致するものと考えられる。

(1)については放電条件は異なるが、絶縁油中において電圧印加後 0.5~1.5 [μ s] に液体の密度変化が現われるという報告⁽⁶⁾があり、本実験では測定装置の関係上 40 [μ s] 以前の状態は未確認であるが、実験条件によってはかなり初期より密度変化が生ずるものと考えられる。また、気泡進展状態および火花電圧特性について、図-6・図-8に見られるように、N (-) のほうが、大で、 V_s も低い値を示しているが、これは $d=10$ [mm] 程度までの短ギャップにおける結果であって、数 10 [mm] 以上の長ギャップにおいては N (+) のほうがストリーマは進展しやすく、 V_s も低い値を示すことより、極性効果はあるギャップ長で逆転することが推測される。

一般に、液体の絶縁破壊機構については種々の提案があり⁽⁷⁾、ギャップ条件および回路条件などによりそれぞれ考慮されるべきことが多い。ここに述べられた実験条件の場合、ギャップ間に生ずる微小気泡が如何なる機構によって生ずるかを検討することは破壊機構を考える上で極めて重要であると思われる。本報告では熱的破壊について考察を行なったが、さらに、ストリーマの進展状態および分光学的な面などから、電氣的破壊について検討を要すると思われる。

終りに、日頃御指導いただいている北海道大学工学部坂本三郎教授ならびに本学電気工学科教官各位、資料整理にご協力いただいた岡和喜男技官、実験を担当した桑原敏彦・岡野芳郎・石塚正義の諸君に深く感謝致します。なお、実験装置の一部は機械工学科実習工場で作成していただいた。関係者各位にお礼申し上げます。

(昭和 51 年 5 月 22 日受理)

参 考 文 献

- (1) 鳥山・篠原・市村：電学誌，57，593 (昭 12-12)
- (2) 中尾・坂本：電学誌，87，974 (昭 42-5)
- (3) James W. Robison, Mooyoung Ham and Ammon N. Balaster : J. Appl. Phys., 40, 10 (1974)
- (4) 桑原・中尾・服部：電気学会道支連大，38 (昭 47-10)
- (5) 宮地：電学誌，77，820 (昭 32-1)
- (6) 森川：電気学会 論文誌，92-A, No. 1 (昭 47-1)
- (7) 芹沢・井上：電気学会放電研究会資料，ED-73-1 (昭 48-2)