単発放電により細隙に発生した
気泡の挙動について 第1報

池 田 光 知*

The movement of a bubble in the gap depending on the
single electrical discharge I

Mitsutomo IKEDA

The growth of a bubble in the gap are few in spite of the many photographs of the bubble on the free expansion of the electrical discharge.

The condition of the electrical discharge in the gap, for example, we have changed inductance L , gap G , and voltage V , etc in the circuit of the R, L, C electrical discharge. And we have taken photographs of the bubble in the gap.

Our photographs showed the velocity of expansion on the growth of the bubble in the gap and the oscillation of an impulse for the bubble.

We examined this movement by the Analog Computer.

From this result we could obtain the transfer function for the movement of a bubble in the gap.

* 長岡工業高等専門学校

1. 緒 言

放電加工や放電成形等では放電点に発生した気泡の挙動の解明は大切であって、これまでもいろいろと研究発表もあり、^{1) ~ 10)} 筆者も先に発表している。^{11), 12)}

しかし細隙に発生した気泡の挙動に関する発表は少いように思う。¹³⁾ 本論は単発放電によって発生した気泡が細隙においてどのような挙動を示すかを、種々の条件で写真撮影し、その結果を気泡における入力とその伝達系の応答の関係でとらえることにより気泡運動に関する近似式を求めたものである。

2. 気泡写真撮影装置の概要

写真撮影は図1の線図で示される如く、RLC挿入の単発放電回路によって放電され、発生した気泡は平行な直径50φの2枚のガラス板によって構成された細隙を膨張成長する。ガラス板の細隙はすきまゲージを挿入し種々のギャップに設定出来る。又気泡写真は所謂背光法により、リターダーによって遅延時間を与えてストロボ装置のキセノン管を閃光せしめ、この光を集光して撮影した。閃光時間は3μsである。

図1 ブロックダイアグラム

電極は直径1φの銀タンを使用し、平行ガラス円板の中央に図2の如く配置されている。

このガラス円板全体は内径100φの塩化ビニール管製の白灯油入りの油槽に定置されており、油槽の底にはガラス板が接着されている。

尚リターダーは菅原研究所のRE-103G型を、ストロボスコープは内田洋行のTO-25Sを、カウンターは岩崎通信機のUC-6131型を使用した。

3. 写真撮影の諸条件

写真撮影にあたり放電回路のCを100μFで一定とし、インダクタンス $L = 0, 1.4, 3.8, 10, 30, 50, 70 \mu\text{H}$ の7種に、充電電圧 $V = 60, 80, 100, 120, 140 \text{ V}$ の5種に、ギャップ $g = 0.05, 0.07, 0.1, 0.15, 0.20 \text{ mm}$ の5種に変化し、遅延時間は25~50μs間隔で設定した。

尚0~70μHのLの挿入により回路の挿入抵抗 R は0.04~0.117Ωの値をとり、抵抗に若干の差を生ずるが本論では単にLの挿入の影響をみるに止め、 $\frac{4L}{CR^2}$ の値の気泡に及ぼす影響などについては第2

図2 放電部分拡大図

報以降で検討したいと思っている。

4. 実験の結果について

写真撮影の例としてギャップの小さい $g = 0.05 \text{ mm}$, $V = 100 \text{ V}$, $L = 3.8 \mu\text{H}$ を写真1 (①〜②④) で、電圧の高い例として $V = 140 \text{ V}$, $L = 3.8 \mu\text{H}$, $g = 0.1 \text{ mm}$ を写真2 (①〜②④) に示した。このような写真撮影の結果を図3より図7に表わした。これらの図より次のことが云えよう。

(1) C , V , g の等しいとき気泡半径 r の最大は L の小さいほど大きく、その到達時間は L の小さいほど小さく、従って気泡膨張平均速度 v は L の小さいほど大きくなる。これは球状に自由膨張する気泡の場合と同様の傾向をもち、⁵⁾ L が増すと時定数が増し、回路の抵抗成分を増加し蓄積電量は時間をかけて放出される。その結果電極の表面温度は低下し気泡成長配分の輻射エネルギーが小さくなることが主因と思われる¹²⁾。

(2) C , L , g を等しく充電電圧 V を変化すると、 V の大きいほど気泡半径 r は大きく、その最大値に到達する時間は大差がない。従って気泡の膨張の際の平均速度 v は V の大きいほど大きい。

ギャップエネルギーと気泡膨張エネルギーや気泡半径との関係については元木先生等の発表があり、筆者も発表したことがある。^{11), 12)} しかし細隙における気泡の挙動については資料不足もあり、その解析は十分でなかったように思う。今後更に研究を進めたい。

(3) C , L , R , V を等しくし、ギャップ g を変化すると g の小さいほど気泡半径 r は大きくその最大値に到達する時間は 0.05 mm の $300 \mu\text{s}$ 以外は大体 $400 \mu\text{s}$ から $450 \mu\text{s}$ にあり従って気泡の膨張平均速度は g の小さいほど大きいと云える。

電圧 = 100 V , $C = 100 \mu\text{F}$,
gap = 0.15 mm

図3 インダクタンス L の変化に対する気泡の挙動

$L = 3.8 \mu\text{H}$, $C = 100 \mu\text{F}$,
 $R = 0.058 \Omega$, gap = 0.1 mm

図4 電圧の変化に対する気泡の挙動

(7) 342 μ s

(8) 404 μ s

(9) 426 μ s

(4) 229 μ s

(5) 281 μ s

(6) 300 μ s

(1) 41 μ s

(2) 92 μ s

(3) 151 μ s

気泡写真1 ($g = 0.05 \text{ mm}$, $V = 100 \text{ V}$, $L = 3.8 \mu\text{H}$, $C = 100 \mu\text{F}$, $R = 0.058 \Omega$)

(16) 649 μ s

(17) 674 μ s

(18) 690 μ s

(13) 576 μ s

(14) 601 μ s

(15) 626 μ s

気泡写真 1

(10) 443 μ s

(11) 503 μ s

(12) 555 μ s

(19) 728 μ s

(22) 903 μ s

(20) 803 μ s

(23) 951 μ s

(21) 851 μ s

(24) 1071 μ s

気泡写真 1

又ギャップの小さいほどはげしく振動しつつ或る半径に収束する傾向をもつと思われるが、ギャップが大きくなってくると次第に球状膨張の際に見られるような傾向をもってくると云える。実際の写真は連続写真でないので相当にばらつくこともあり振動の様子を定めにくい場合もあった。

(1) 49 μ s

(2) 99 μ s

(3) 149 μ s

(4) 200 μ s

(5) 250 μ s

(6) 301 μ s

(7) 398 μ s

(8) 350 μ s

(9) 450 μ s

気泡写真 2 (gap = 0.1mm, $V = 140$ V, $L = 3.8$ μ H, $C = 100$ μ F, $R = 0.058$ Ω)

(16) 799 μ s

(17) 848 μ s

(18) 901 μ s

(13) 651 μ s

(14) 702 μ s

(15) 750 μ s

气泡写真 2

(10) 501 μ s

(11) 552 μ s

(12) 602 μ s

(19) 949 μ s

(22) 1207 μ s

(20) 1000 μ s

(23) 1293 μ s

(21) 1098 μ s

(24) 1401 μ s

気泡写真2

電圧 = 100 V, $L = 3.8 \mu$ H
 $C = 100 \mu$ F, $R = 0.058 \Omega$

図5 gap の変化に対する気泡の挙動

図6 インダクタンス，電圧，gap などの
変化と気泡膨張平均速度（時定数まで）
の関係

図7 インダクタンス，電圧，gap
と気泡が最大となる時間との
関係

5. 気泡挙動の近似式について

気泡膨張振動に関係する強制外力を主として気泡内に保有される圧力とし，その圧力は実験結果などから衝撃的力に関するM. E. Vallier の次の式で近似されるものとする。

$$f(t) = f_0 \frac{t}{t_1} e^{1 - \frac{t}{t_1}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで f_0 は最高圧力を， t_1 はその圧力に到達するまでの時間， t は放電後の経過時間とする。

実際の気泡はこの圧力を入力として強制振動をしながら或る一定変位の状態に収束すると考えられる。この状態を解明するためにアナログ計算機東京芝浦電気製TOSAC-400を用いた。まずステップ状入力 f_1 よりインディシャル応答 f_2 を求める。

$$f_1 = 1, \quad f_2 = f(t) = f_0 \frac{t}{t_1} e^{1 - \frac{t}{t_1}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

これをラプラス変換すれば

$$F_1 = \frac{1}{s}, \quad F_2 = f_0 \frac{e}{t_1} \cdot \frac{1}{(s + \frac{1}{t_1})^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで

$$\frac{f_0}{t_1} \cdot e = K, \quad t_1 = T, \quad A = KT^2 = f_0 e t_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

とおけば，このときの伝達関数 $G_1(s)$ は

$$G_1(s) = \frac{F_2}{F_1} = \frac{f_0 \frac{e}{t_1} \cdot S}{(s + \frac{1}{t_1})^2} = \frac{K T^2 S}{(1 + s T)^2} = \frac{A S}{(1 + s T)^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

これより $(1 + 2 T S + T^2 S^2) F_2 = A S F_1$

ここでスケール変換 $\tau = \alpha t$ とおき、逆変換すれば

$$\frac{d^2 f_2^2}{d \tau^2} = -\frac{2}{\alpha T} \cdot \frac{d f_2}{d \tau} + \frac{A}{\alpha T^2} \cdot \frac{d f_1}{d t} - f_2$$

これをラプラス変換すればスケール変換した関係式で

$$F_2 = \frac{A \alpha S}{(1 + \alpha T S)^2} F_1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$= \frac{A/T}{(1 + \alpha T S)} \left\{ 1 - \frac{1}{(1 + \alpha T S)} \right\} F_1 \quad \dots\dots\dots (7)$$

を得る。

これをブロック線図で示せば図8の如くなる。

この関係で求めたインディシャル応答波形を図11(a)で示した。

次にこの F_2 を入力波形としたときの出力波形と、その伝達関数を求めてみる。この出力波形が気泡の挙動と対応することになる。

今気泡は最終的にある半径状態に収束するような挙動であるとするれば、積分要素を含んで居るから次のように伝達関数を仮定してみる。

$$G_2(s) = \frac{Q}{s(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで Q , T_1 , T_2 は定数である。

この(8)式を分解しブロック線図の書けるように変形するに

$$F_2 \cdot G_2(s) = X(s) \quad \dots\dots\dots (9)$$

であるから(8), (9)より

図8 結線図その1

$$(S + T_2 S^2 + T_1 S^2 + T_1 T_2 S^3) \times (S) = Q F_2$$

$\tau = \alpha t$ のスケール変換を考慮しながら逆変換すれば

$$\frac{d^3 x}{d \tau^3} = -\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \cdot \frac{d^2 x}{d \tau^2} - \frac{1}{T_1 T_2} \cdot \frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{d x}{d \tau} + \frac{1}{T_1 T_2} \cdot \frac{1}{\alpha^3} \cdot Q f_2 \dots (10)$$

又ラプラス変換して(6)を代入すれば

$$X(S) = \frac{1}{\alpha \cdot S(1 + \alpha T_1 S)(1 + \alpha T_2 S)} \cdot Q F_2$$

$$= \frac{A Q}{(1 + \alpha T S)^2 (1 + \alpha T_1 S)(1 + \alpha T_2 S)} \cdot F_1 \dots (11)$$

(9)式の形で結線図をつくると図9の如くなるが、誤差が積分され不安定であるので(11)式の形で図10の如く結線した。この線図で求めた出力波形の例を図11(1),(2),(3)で示した。

最大変位 $x_{\max}$ は入力 f の最大値 f_0 の到達時間 t_1 の略10〜15倍附近にあり、本実験では気泡の t_1 は(20〜30) μs と推定され、気泡の最大半径となる時間は(300〜400) μs であったから本実験で得られた資料に割合近い場合を表わしていると思われるが気泡圧力 f_0 や時間 t_1 の正確な測定が未だ十分でなかったので本論ではその波形を求める過程を述べるに止めた。種々のギャップ

についての波形はアナログ計算機のPotの定数

$A, T, \frac{1}{T_1 T_2}, \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2}$ の変更で、より近似化

されて求められよう。

次に(5), (8), (9)より

$$X(S) = \frac{A Q}{(1 + S T)^2 (1 + T_1 S)(1 + T_2 S)} \cdot F_1$$

..... (12)

を得る。

図9 結線図 その2

図10 結線図 その3

図11 アナログ計算機による入出力波形

(12)の逆変換するに留数 B_i は

$$\begin{aligned}
 B_1 &= A Q \\
 B_2 &= \frac{-T_1 A Q}{\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \left(1 - \frac{T}{T_1}\right)^2} \\
 B_3 &= \frac{-T_2 A Q}{\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \left(1 - \frac{T}{T_2}\right)^2} \\
 B_4 &= \frac{-T A Q}{\left(1 - \frac{T_1}{T}\right) \left(1 - \frac{T_2}{T}\right)} \\
 B_5 &= \frac{-A Q T \left\{ 1 - 2 \cdot \frac{T_1 + T_2}{T} + 3 T_1 T_2 \cdot \frac{1}{T^2} \right\}}{\left(1 - \frac{T_1}{T}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T}\right)^2}
 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

となるから

$$\begin{aligned}
 x(t) = A Q \left\{ 1 - \frac{e^{-\frac{t}{T_1}}}{\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \left(1 - \frac{T}{T_1}\right)^2} - \frac{e^{-\frac{t}{T_2}}}{\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \left(1 - \frac{T}{T_2}\right)^2} - \frac{t \cdot e^{-\frac{t}{T}}}{\left(1 - \frac{T_1}{T}\right) \left(1 - \frac{T_2}{T}\right) \cdot T} \right. \\
 \left. - \frac{\left\{ 1 - 2 \left(\frac{T_1 + T_2}{T} \right) \frac{1}{T} + 3 T_1 T_2 \frac{1}{T^2} \right\}}{\left(1 - \frac{T_1}{T}\right)^2 \left(1 - \frac{T_2}{T}\right)^2} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \right\} \dots\dots\dots (14)
 \end{aligned}$$

となり、波形の近似式が求められる。

5. 結 言

$R L C$ 挿入の単発放電によって発生する気泡の細隙における挙動を背光で写真撮影し、その変化を調べると、衝撃的入力を受けて強制振動をし、エネルギーを失ってある変位状態に収束する出力波形としてとらえ得る。気泡の挙動は伝達関数 $G(s)$ を有する伝達系の入力、出力の関係で考えられるのでこれをアナログ

計算機を用いて解析を試み、細隙における気泡の挙動の近似式を求めた。

しかしギャップに発生した気泡の圧力 f_0 やそれに到達する時間 t_1 などの資料が十分でなかったので出力波形を求めるやり方の説明に止めた。アナログ計算機で得られた波形より逆に f_0 や t_1 を予想することも考えられよう。

尙本研究にあたり助言を賜りました元木幹雄先生始め文献を御提供下さいました諸先生方、実験に助力された本校斉藤俊郎先生、卒業生松原亨、田中稔の両君等に厚く御礼を申し上げます。

(1972. 3. 30 受付)

参 考 文 献

- 1) 木本保夫：放電加工における衝撃力について
電気学会誌 36, 147, 19611, 11
- 2) 前田禎三：放電加工圧力の測定 精密機械29(10) 1963
- 3) 井上 潔：放電圧力加工の諸問題 機械と工具 1961, 12~1962, 4
- 4) 元木幹雄, 橋口清人, 後藤保正：液中過渡アーク放電による気泡の膨張
第45回放電加工研究会資料(その1) 1966, 9
第46回 " (その2) 1967, 1
第47回電気加工研究会資料(その2) 1967, 4
- 5) 橋口清人, 山本武久：液中過渡アーク放電による気泡の膨張と収縮
第48回電気加工研究会資料(その1) 1967, 7
第50回 " (その2) 1968, 1
第53回 " (その2) 1969, 1
第55回 " (その1) 1969, 7
- 6) 元木幹雄, 藤田一郎, 中尾隆太郎：液中過渡アーク放電の気泡
第54, 55回電気加工研究会資料(その2) 1969, 7
第56回 " (その2) 1969, 11
第57, 58回 " (その2) 1970, 4
- 7) 西山卯二郎, 井上卓, 千田豊満：放電成形に関する研究
第17回塑性加工連合講演会 1966, 11
- 8) 藤村 勉：間隙消費エネルギーと圧力効果について, 第46回放電加工研究会資料 1967, 1

- 9) 藤村 勉：液中衝撃放電に基づく気泡の挙動，被変形材，の挙動および圧力波について
第57回 電気加工研究会資料（その1） 1970, 1
- 10) 尾上 誠：液中放電圧力現象の一考察，放電加工技術37, 1972
- 11) 池田光知：細隙における気泡の挙動について，第54回電気加工研究会資料（その1）1969, 5
- 12) 池田光知：気泡の成長と放電エネルギーの配分，電気加工学会誌 Vol.4 No.7
- 13) TERRY, O. HOCKENBERRY AND EVERARD M. WILLIAMS : Dynamic
Evolution of Events Accompanying the Low-voltage Discharges
Employed in EDM
IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY AND GENERAL
APPLICATIONS VOL IGA-3, No. 4
- 14) 神保泰雄：線形振動 誠文堂新光社