研 究

液中放電による圧力波の発生と伝ばに
関する研究 (第1報)*

——電極間に供給される電氣的エネルギー——

土屋八郎** 井上友一** 森 勇藏*** 井川直哉***

Study on Generation and Propagation of Pressure Wave by
Spark Discharge in Liquid (1st Report)

——Electrical Energy Supplied to Spark Channel——

Hachiro TSUCHIYA, Tomoichi INOUE, Yuzo MORI, Naoya IKAWA

In order to investigate the generation and propagation of pressure wave by spark discharge in liquid systematically, the voltage across the electrode gap and the discharge current are measured with an accuracy required in the above-mentioned analysis as the first step. Using the results, the resistance of the electrode gap and the electrical energy supplied to spark channel are discussed. The kinds of liquid used in the experiment are tap water, 0.1% and 1.0% NaCl solutions. The results obtained are as follows:

(1) Regardless of the kinds of liquid used, the resistance of the electrode gap decreases abruptly from the intrinsic resistance of the liquid to 0.1–0.3 ohms after the breakdown of the liquid. After that, it varies with the cyclic variation of the discharge current. Also it has a tendency to increase with an increase of the electrode gap distance in all kinds of liquids.

(2) Regardless of the kinds of liquid used, as the first minimum value increases in the cyclic variation of the resistance after the breakdown of the liquid, the electrical energy of a first-wave in the electric power wave becomes larger and the electrical energy supplied to spark channel is centered at the first-wave in the electric power wave.

Key words: underliquid spark discharge, pressure wave generation, pressure wave propagation, electrical energy, spark channel, gap voltage, discharge current, gap resistance, electric power wave, cyclic variation.

1. 緒 言

液中放電現象は、液中電極間への衝撃的な電 印加による液体の絶縁破壊、それにともなう衝撃大電流の発生、液体の急激な気化、気体の膨張による周囲液体への圧力波の発生・伝ばという電氣的・力学的要素の入り混じった複雑な過程をもつ現象であり、またエネルギー的に見れば、電氣的エネルギーの熱的・力学的エネルギーへの変換過程をもつ現象である。

それゆえ、液中放電現象を明らかにするためには、時々刻々投入される電氣的エネルギーとそれにともなう気泡の発生と膨張、気泡の膨張による圧力波の発生、さらに

はその伝ばの挙動を同一時空間内で解析しなければならぬ。

この一連の挙動についての従来の研究を見ると、液体の電氣的挙動は放電物理の分野において、液体の絶縁破壊^{1)~3)}、放電時の電極間抵抗⁴⁾⁵⁾などの研究があり、また一方力学的挙動は液中放電を金属の加工に利用しようとする分野において、圧力波の発生・伝ば^{6)~9)}についての研究がなされているが、それらは液体の電氣的挙動と力学的挙動を切り離して取扱われているだけでなく、電氣的・力学的諸量の測定精度や力学的取扱いに難点が見うけられる。

本研究では、電氣的エネルギーの測定および圧力波の測定を厳密に行うとともに、電氣的エネルギーの気泡の内部エネルギーへの変換、気泡の内部エネルギーの圧力波エネルギーへの変換、内部エネルギーのふく射による損失、圧力波の伝ばなどを相互的に関連づけ、エネルギー保存の立場から電氣的エネルギーが時々刻々圧力波 エネルギーに変換さ

* 原稿受付 昭和54年1月22日。精機学会昭和47年度関西地方定期学術講演会(昭和47年7月15日)および昭和47年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和47年10月30日)にて発表。

** 正 会 員 京都工芸繊維大学工学部(京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

*** 正 会 員 大阪大学工学部(吹田市字山田上)

図1 実験装置のダイアグラム

図2 放電槽および電極支持台

れ、伝ばしていく様子を明らかにしている。

本報は、液中電極間に供給される電気的エネルギーを上述の解析に必要な精度で測定することを目的としたもので、放電中の電圧、電流の変化の様子を明らかにするとともに、電極間抵抗および電力波形を測定している。

2. 実験装置および実験方法

本研究に用いた実験装置のダイアグラムを図1に示す。図1において、コンデンサは衝撃大電流用のもので、電気容量は10 μF 、最高使用電圧は20 kVである。放電スイッチは、半径19 mmの半球状の銅でスパークギャップを作り、その間隙にベーク板を挿入する落球式のものである。放電槽は図2に示すように一辺500 mmの立方体鋼製で、電極にはすべて市販の縫針を用いた。なおコンデンサから放電スイッチ、放電槽への配線は、放電回路のインダクタンスをできるだけ小さくするため、衝撃大電流用同軸ケーブルを使用した。

すべての実験において、コンデンサ充電電圧は10 kV

一定とした。この場合のコンデンサ充電エネルギーは500 Jである。また放電槽内の媒液としては、水道水、0.1%および1%食塩水の3種類の媒液を用い、電極間距離は(放電可能な範囲で)2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mmと変えて実験を行った。

電極間電圧の測定は、図2に示す電圧測定端子間の電圧を高圧分圧器(周波数帯域DC~15 MHz, 最大入力電圧15 kV DC, 入出力比400:1)を介して測定した。なお図2の電圧測定端子と高圧分圧器との接続には、誘導電圧の影響をできるだけ少なくするため、同軸ケーブル(7C-2V)を用いた。

放電電流の測定は、抵抗値0.991 m Ω の同軸型分流器を用いて行った。なお電圧測定においても同様であるが、このように測定器を介して波形観測を行う場合、取扱う電圧および電流が非常に大きく、しかも時間がきわめて短いため、放電回路の接地点の取り方が波形そのものに大きな影響を及ぼす。たとえば、電流測定の場合、分流器の取付箇所が放電回路の接地点から遠く離れている時は、接地点からのインピーダンスにより分流器の電位が上昇し、その結果外部からの誘導を受け、正確な波形観測が困難となる。ここでは、このようなことを考慮して、図1に示すように分流器の接地端子を電極の低電位側に接続し、放電回路を接地した。

なお電圧、電流測定に用いたシンクロスコープの同期は、放電スイッチ付近に銅線をコイル状に巻いたものを設置してそこからトリガパルスを取り出す外部同期を採用した。またシンクロスコープは外乱を避けるため、図1に示すようにブリキ製のシールドボックス内に挿入して、波形観測を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 電極間電圧および放電電流

電極間を直接短絡した時の電流波形より求めた放電回路の抵抗 R (電極間抵抗は除く)は74.6 m Ω 、インダクタンス L は2.67 μH であった。

実験方法で述べたような測定精度上の問題点に留意して測定した結果、外乱の少ない、良好な電圧および電流波形が得られた。図3に水道水、0.1%食塩水、1%食塩水のそれぞれの媒液における電圧、電流波形の一例を示す。なお1%食塩水については、電極間距離が6 mm以上になると、すべて4 mmの場合と同じ傾向の波形を示すので、ここでは4 mmまでを論じることとする。

図3(a)の水道水の場合、電圧、電流波形において、電極間距離のいかにかわらず、電極間に電圧を印加してから主放電が起こるまで、すなわち電極間が絶縁破

壊するまで、ある一定の時間遅れが存在し、絶縁破壊が起こると急激な電圧降下とともに衝撃的な大電流が流れ出し、その後電圧、電流とも減衰振動している。電極間が絶縁破壊するまでの時間遅れ(以降火花遅れ¹⁰⁾と称す)は、電極間距離が長くなると長くなっている。また図からわかるように、火花遅れの間に若干の電圧降下が見られるが、これについても電極間距離が長くなるにつれて大きくなっている。

図3(b)の0.1%食塩水については、水道水の場合と傾向は同じであるが、火花遅れは水道水の場合に比べて短くなっている。しかし火花遅れの間の電圧降下は逆に大きく、電極間距離6mm以上になると火花遅れの過程において1kA前後の電流が流れている。また水道水の場合についても同じことが言えるが、電極間距離が長くなると、電圧、電流波形における振動数が減少している。

1%食塩水については、電極間距離が2mmの場合、水道水、0.1%食塩水の場合と傾向は同じであるが、電極間距離4mmになるともはや放電は起こらず、その時の電圧、電流波形は図3(c)に示すような非振動的な波形になっている。このことは電極間を含む形での回路の電気的定数、すなわち抵抗 R_L 、インダクタンス L 、静電容量 C の間において、過渡現象における非振動条件 $R_L \geq 2\sqrt{L/C}$ ¹¹⁾が成立するためと考えられる。

3.2 電極間抵抗と電極間供給エネルギー

電極間抵抗および電極間に供給される電気的エネルギーは、電極間に発生する圧力、温度とともに放電現象を考察する上において重要な要素となる。従来これらについて取扱った研究⁴⁾⁵⁾は数件あるが、そのいずれも電圧、電流が振動しない、いわゆる第1半波のみで減衰するような場合に限られており、本研究のような電圧、電流波形が減衰振動する場合の電極間抵抗および電極間供給エネルギーを取扱ったものは、あまり見当たらないよ

(a) 水道水

(b) 0.1%食塩水

(c) 1%食塩水

図3 電極間電圧および放電電流

うである。ここでは、測定した電圧および電流波形より各時間における電圧、電流を求め、オームの法則を用いて電極間抵抗を、一方ジュールの法則を用いて電極間に供給される電氣的エネルギーを求め、それらについて考察する。

図4に水道水、0.1%食塩水、1%食塩水の主たる電極間距離における電極間抵抗および電極間供給電力の変化を電流の変化と対比して示す。なお図4での時間軸の零点は、水道水の場合、図3に示すように火花遅れ時間中での電圧降下も小さく、またその間の電流もほとんど観測されないで、電極間が絶縁破壊した時点を取り、一方0.1%、1%食塩水では、図3からわかるように水道水の場合と違って火花遅れ時間中での電圧降下も大きく、またその間の電流も大きいので、電極間に電圧が印加された時点をそれぞれ取った。

水道水における電極間抵抗は、図4(a),(b)に示すように、電極間距離のいかんにかかわらず、電極間が絶縁破壊すると、水道水のもつ固有抵抗から急激に降下し、その後は電流の増大とともに小さくなり、電流の極大値をわずかに通り過ぎた時点で極小となり、その値は約0.1~0.3Ωである。次に電流が極大値を過ぎて減少すると、逆に電極間抵抗は大きくなり、電流が零点をわずかに通り過ぎた時点で極大になっている。そしてその後は電流波形の振動数に対応して極小、極大を繰返している。またこれら極小値および極大値は、電流の振動減衰につれて逆に大きくなっており、放電が終了すると、電極間抵抗はまたもとの水道水の固有抵抗にもどると考えられる。

0.1%食塩水については、図4(c),(d)に示すように、電極間距離2mmと短い場合、水道水の場合と同じように電流の変化と対応しながら周期的な変化を示し、その間における抵抗値もまた水道水の場合と同じような値になっている。次に電極間距離10mmと長くなると、火花遅れが存在し、図からわかるようにその間における抵抗変化の様子は、電極間距離が短い場合と異なるが、絶縁破壊が起こると、抵抗変化は水道水および電極間距離が短い場合と全く同じ傾向を示し、抵抗値もほとんど同じである。なお水道水および0.1%食塩水のいずれの媒液においても、絶縁破壊後の抵抗値は電極間距離が長くなるにつれて大きくなっている。

1%食塩水については、電極間距離2mmの場合、ここでは省略しているが、水道水および0.1%食塩水の電極間距離が短い場合と同じような抵抗変化および抵抗値を示す。しかし電極間距離4mmとなると、図4(e)からわかるように電流の変化と対応した形で変化はしているが、抵抗値は水道水および0.1%食塩水の場合よりも

大きくなっている。このことは電極間距離4mmでは、もはや放電は起こらず、電極間の絶縁が破壊していないためと思われる。

電極間に供給される電氣的エネルギーは、図4に示す電力波形を時間で積分すれば、実験的に求められるが、放電回路の電氣的定数がわかれば、過渡現象における電流*i*の満足すべき微分方程式

$$L \cdot \frac{di}{dt} + (R+r)i + \frac{1}{C} \int i dt = 0 \quad (1)$$

から理論的に求めることもできるので、ここでは3.1節で示した放電回路の電氣的定数（電極間抵抗は除く）ならびに図4に示す電極間抵抗の値を使って電氣的エネルギーを理論的に求め、実験値ならびに理論値の両面から電極間に供給される電氣的エネルギーを考察する。式(1)において*L*, *R*, *C*はそれぞれ放電回路のインダクタンス、抵抗（電極間抵抗を除く）、静電容量であり、*r*は電極間抵抗である。なお電極間の電氣的定数については、図3の電圧、電流波形の変化からわかるように、電圧、電流が同相であるので、電極間は抵抗成分だけから成り立っていると考える。

式(1)において、本研究のように振動減衰する場合の電流は

$$i = \frac{2Q\varepsilon^{-\alpha t}}{\sqrt{4LC - (R+r)^2 C^2}} \cdot \sin \beta t \quad (2)^{11)}$$

で与えられ、その時の電極間に供給される電氣的エネルギーは

$$\int_0^t i^2 \cdot r dt = \frac{4Q^2 \varepsilon^{-2\alpha t}}{4LC - (R+r)^2 C^2} \cdot \sin^2 \beta t dt \quad (3)$$

で与えられる。ここで*Q*はコンデンサに蓄えられる電氣量、 $\alpha = (R+r)/2L$, $\beta = \sqrt{1/LC - \{(R+r)/2L\}^2}$ である。

式(3)を用いて電氣的エネルギーを求める場合、電極間抵抗以外の放電回路の電氣的定数は3.1節に示すとおりであるが、電極間抵抗*r*は図4に示すように、周期的変化をしており、その変化の様子を解析的に表すことは困難であるので、ここでは絶縁破壊後の抵抗変化における最初の極小値を電極間抵抗*r*（たとえば図4より水道水、電極間距離2mmでは、 $r=0.1\Omega$ 、10mmでは $r=0.3\Omega$ ）として電氣的エネルギーを概算する。

いま水道水、電極間距離2mm、10mmを例にとり、式(3)を用いて電力波形の第1半波のもつエネルギーならびに電極間に供給される全エネルギーを求めると、電極間距離2mmの場合それぞれ186J、296J、電極間距離10mmの場合それぞれ365J、400Jとなる。一方、図4に示す電力波形を用いて同様にそれぞれのエネルギーを求めると、電極間距離2mmの場合210J、340J、電極間距

図4 放電電流、電極間抵抗および電極間供給電力の変化

離 10 mm の場合 370 J, 410 J であり, これら理論値と実験値の間には若干の差はあるが, このことは理論計算において, 電極間抵抗の値を変化する抵抗の最初の極小値で代表させたためであり, この程度の差ではむしろかなりの一致を見たと言える。

以上の結果から, 絶縁破壊後の電極間抵抗変化の最初の極小値がわかれば, 電力波形の第 1 半波のもつエネルギーならびに電極間に供給される全エネルギーを近似的に把握できるとともに, 著者らの電氣的エネルギーの測定がかなり高い精度でなされたと言える。またこれらの結果ならびに図 4 の電力波形から, 絶縁破壊後の電極間抵抗変化における最初の極小値が大きくなると, 電力波形における第 1 半波のもつ電氣的エネルギーおよび電極間に供給される全エネルギーは大きく, そして電力波形の振動数は少なくなることがわかるとともに, 電極間に供給されるエネルギーは電力波形の第 1 半波に集中されることがわかる。

0.1% 食塩水についても水道水の場合の上述の結果と同様のことが言えるが, 電極間距離が長くなると, 図 4 に示すように, 火花遅れの間でのエネルギー消費がかなりあるため, 電極間に供給される電氣的エネルギーが電力波形の第 1 半波に集中される度合は, 水道水の場合に比べて低くなっている。

1% 食塩水については, 電極間距離 2 mm の場合, 電極間に供給される電氣的エネルギーは, 水道水および 0.1% 食塩水の電極間距離 2 mm の場合とほぼ同じ傾向にあるが, 電極間距離 4 mm となると, 水道水および 0.1% 食塩水のいずれの電極間距離の場合より, 電極間供給エネルギーは大きくなっているが, 実際には放電は起こっていないので, 水道水および 0.1% 食塩水の場合のエネルギー消費形態とは少し異なるものと思われる。

4. 結 論

水道水, 0.1%, 1% 食塩水の 3 種類の媒液中での放電電流および電極間電圧を測定し, それらの結果をもとに電極間抵抗および電極間に供給される電氣的エネルギーを考察した結果, 次のことが明らかとなった。

- (1) 電極間抵抗は媒液のいかんにかかわらず, 電極間が絶縁破壊すると, それぞれの媒液のもつ固有抵抗から 0.1~0.3 Ω まで急激に小さくなり, その後は電流波形と対応した形で周期的な変化をする。なお

電極間抵抗の変化と電流変化の間には, わずかな時間のずれが存在する。また電極間抵抗は媒液のいかんにかかわらず, 電極間距離が長くなるにつれて大きくなる傾向にある。

- (2) いずれの媒液においても, 絶縁破壊後の電極間抵抗変化における最初の極小値が大きくなると, 電力波形における第 1 半波のもつ電氣的エネルギーは大きく, 電極間に供給される電氣的エネルギーは電力波形の第 1 半波に集中される。しかしながら, 0.1% 食塩水の電極間距離が長い場合のように, 火花遅れの間でのエネルギー消費がかなりある場合は, 電氣的エネルギーが電力波形の第 1 半波に集中する度合は低くなる。

終わりに, 種々御教示を賜った大阪大学工学部・津和秀夫教授, 京都工芸繊維大学・大森正己助教授に深甚なる謝意を表します。また実験に協力された京都工芸繊維大学・宮崎真技官ならびに当時の学生・岡田晋氏, 森治氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) V. S. Komel'kov: Development of a Pulse Discharge in Liquids, Sov. Phys. Tech. Phys., **6**, 8, (1962) 691.
- 2) I. S. Stekol'nikov and V. Ya. Ushakov: Discharge Phenomena in Liquids, Sov. Phys. Tech. Phys., **10**, 9, (1966) 1307.
- 3) A. P. Alkhimov et al.: The Development of Electrical Discharge in Water, Sov. Phys. Doklady, **15**, 10, (1971) 959.
- 4) E. B. Кривичкий, В. Л. Апостол и А. П. Сорочинский: Проводимость канала подводного искрового разряда, Электронная обработка материалов, **6** (24), (1968) 34.
- 5) K. Möller: Ein Beitrag zur experimentellen Überprüfung der Funkengesetze von Toepler, Rompe-Weizel und Bragiuskii, ETZ-A, **92**, 1, (1971) 37.
- 6) S. Hyodo and K. Takahasi: Adiabatic Expansion of Vapor Bubbles Produced by Underliquid Sparks, 応用物理, **30**, 12 (1961) 871.
- 7) Yu. V. Skovortsov et al.: Expansion of a Spark Channel in a Liquid, Sov. Phys. Tech. Phys., **5**, 10, (1961) 1100.
- 8) I. Z. Okun': Generation of Compression Waves by a Pulsed Discharge in Water, Sov. Phys. Tech. Phys., **16**, 2, (1971) 219.
- 9) 北島一徳ほか: 金属導線の放電による衝撃波の発生機構, 塑性と加工, **8**, 74 (1967) 111.
- 10) 尾本義一: 電離気体論, 電気学会 (1969) 98.
- 11) 尾本義一: 過渡現象論, 電気学会 (1969) 28.