

論 文

電解質水溶液面に進展する局部放電の スペクトル特性

山 下 敬 彦*, 池 田 良 司**, 松 尾 寿 夫*

(1990年4月20日受理)

Spectroscopic Studies of Local Discharge on an Electrolytic Surface

T. YAMASHITA,* R. IKEDA** and H. MATSUO*

(Received April 20, 1990)

This paper presents experimental studies on the emission spectra radiated from local discharge on an electrolytic surface with the point and plane electrode. The impulse voltages are applied to point and plane electrode. From measurements of the relative intensity of the emission spectra, gas temperatures in the tip of local discharge are estimated under various conditions. As a result, it is found that the gas temperatures are about 2,000 K. Furthermore, the distribution of the relative intensities of N_2 2nd positive band (0, 2) and N_2^+ 1st negative band (0, 0) along the local discharge is measured. The lines from atomic nitrogen (411.0 nm) and cathode material (Cu 324.7 nm) are found in the discharge after flashover. However, the line from atomic nitrogen is not found in the local discharge. The ratios of the relative intensity of N_2 2nd positive band (0, 2) to that of N_2^+ 1st negative band (0, 0) in the discharges are measured. The ratios are beyond 1 in the local discharge, while the ratios are below 1 in the discharge after flashover. From these results, it is deduced that the discharge mechanism in the local discharge on the electrolytic surface is similar to that in a glow discharge.

1. ま え が き

汚損湿潤がいし表面のフラッショーバーは、その表面に形成されるドライバンドで発生した局部放電が汚損湿潤面を進展してがいしを橋絡したときに生じる。このために、従来から汚損湿潤面に発生、進展する局部放電の特性についていろいろと研究されているが¹⁻⁵⁾、そのほとんどが直流あるいは交流電圧印加のもとでのように局部放電がゆっくりと進展する場合である。しかしながら、直流あるいは交流電圧印加の下でも、局部放電が汚損湿潤面を進展し、沿面フラッショーバーに至る直前では、局

部放電は雷インパルス電圧印加の場合と同様に速やかに進展する。また送電線では、雷インパルス電圧によりがいしの絶縁がおびやかされる機会が多い。

これらのことから、著者らは、これまで雷インパルス電圧印加によって局部放電が速やかに進展する場合のその進展機構を解明するために、汚損湿潤がいし表面を模擬した電解質水溶液面を使用して、その放電特性について研究してきた。その結果、針-液面における局部放電先端での電圧降下および電流密度の測定から、針-液面間の局部放電はグロー状の放電となっていること^{6,7)}、また液面を進展しつつある局部放電のスペクトル発光強度の観測から、局部放電幹部分の気体温度はおよそ1,500~2,000 Kで、幹部分では衝突電離が支配的であること⁸⁾を明らかにした。

本研究では、液面を進展しつつある局部放電の長さに沿ってのスペクトル発光強度の観測および局部放電先端部分の気体温度の測定を行った。また局部放電が液面を進展しつつあるときの局部放電の放電形態についても検討した。

キーワード：電解質水溶液面、沿面放電、スペクトル、気体温度

* 長崎大学工学部電気情報工学科 (852 長崎市文教町 1-14)
Department of Electrical Engineering and Computer Science, Faculty of Engineering, Nagasaki University, 1-14, Bunkyo-machi, Nagasaki, 852 Japan

** 長崎大学大学院工学研究科 (852 長崎市文教町 1-14)
Graduate Course, Division of Engineering, Nagasaki University, 1-14, Bunkyo-machi, Nagasaki, 852 Japan

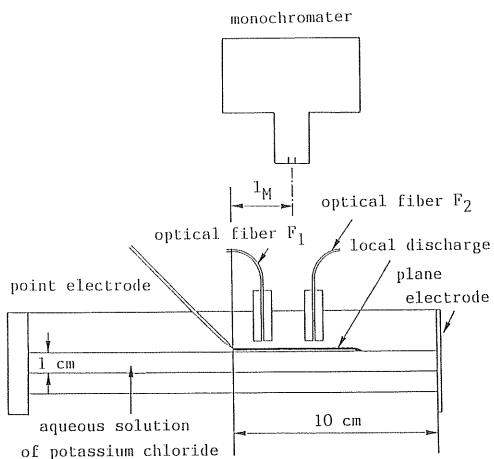


図 1(a) 電極系およびスペクトル測定系 [正面図]

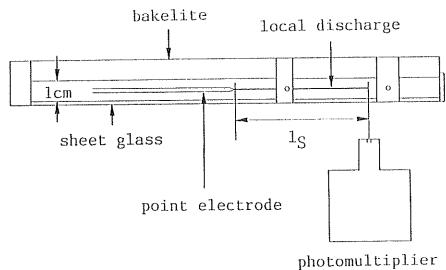
Fig. 1(a) Electrode system and measuring system.
[front view]

図 1(b) 電極系およびスペクトル測定系 [平面図]

Fig. 1(b) Electrode system and measuring system.
[top view]

2. 実験装置と実験方法

本実験においては、汚損湿润したがいし表面を模擬した導電性沿面として、前報⁸⁾と同じように図 1 に示すような、長さ 20 cm、幅 1 cm、深さ 3 cm のベークライト製の箱に塩化カリウム水溶液を 1 cm の深さまで入れ、針-平板電極を配置したものを使用した。針電極としては先端を鋭く尖らせた直径 1 mm のタンクステン棒を、平板電極としては厚さ 2 mm の銅板を使用した。針電極先端と液面との間の距離は 1 mm、針-平板電極間の距離は 10 cm とした。溶液の抵抗率 ρ は溶液の濃度を 0.01 N から 0.05 N まで変えることによって約 $160\Omega \cdot \text{cm}$ から $750\Omega \cdot \text{cm}$ の範囲で変化させたが、主に 0.02 N, $\rho=386\Omega \cdot \text{cm}$ のものを使用した。

図 1 に示すように、針-平板電極間への電圧印加により液面に進展する局部放電からの光を検出するために、電極系上方にモノクロメータ (リツー応用光学 MC-25 NP) と 2 組の光ファイバ F₁, F₂ を、電極系側面に幅

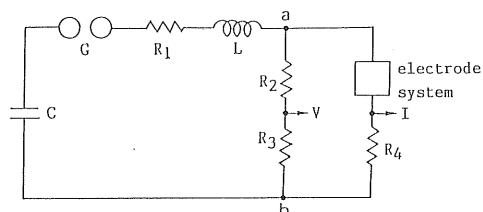
0.3 mm のスリットを備えた光電子増倍管 (東芝 MS9S) を置いた。針電極からモノクロメータによる液面上の観測位置までの距離 l_M および側面の光電子増倍管による観測位置までの距離 l_S は自由に調節することができる。

光ファイバ F₁, F₂ はどちらも直径 1 mm の 2 本の光ファイバを針-平板電極方向 (局部放電の進展方向) に対して直角に配置したもので、液面の中央部分 (幅 2 mm の部分) からの光を検出することができ、その位置も針-平板電極方向に自由に移動させることができる。

光ファイバ F₁, F₂ によって検出された光はそれぞれ独立に光電子増倍管 (東芝 MS9S) によって、モノクロメータによって検出された光は光電子増倍管 (浜松ホトニクス R1668) によって電気信号に変換し、デジタルメモリ (岩通 DM-902) およびデュアルビームシンクロスコープ (岩通 DS-6020) を用いて観測した。

本実験においては、同一の実験条件のもとでモノクロメータの観測波長および観測位置をいろいろと変えて液面に進展する局部放電のスペクトル発光強度を測定したが、この場合、どの観測波長および観測位置においても局部放電の進展状態は同一でなければならない。しかしながら同一の実験条件のもとで局部放電を進展させても、その進展状態は電圧印加ごとに (局部放電の進展ごとに) ばらつきを生じる。すなわち局部放電が液面上を通る場所も、その進展速度も電圧印加ごとに異なる。そこで、光ファイバ F₁, F₂ の出力波形を監視することによって、局部放電が液面上のほぼ中央部分を針電極から平板電極へ進展し、かつラッシュオーバ時間がほぼ一致する場合をモノクロメータの各波長あるいは各位置に対して探し出し、それらに対応するモノクロメータの出力波形を選択した。本実験では、このようにして得られた幾種類かの観測波長あるいは観測位置に対する一連のモノクロメータの出力波形において局部放電の進展状態を同一とみなした。

図 2 は実験に使用した $2/80\mu\text{s}$ の雷インパルス電圧発生回路を示す。印加電圧はすべて正極性として針電極に



$$C=1\mu\text{F}, L=87.1\mu\text{H}, R_1=14.7\Omega, R_2=93.7\Omega,$$

$$R_3=9.09\Omega, R_4=24.4\Omega$$

図 2 実験回路

Fig. 2 Experimental circuit.

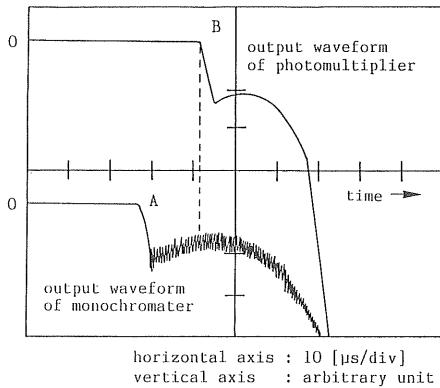


図3 モノクロメータの出力波形と光電子増倍管の出力波形の概略図

Fig. 3 Output waveforms of photomultiplier and monochromater.

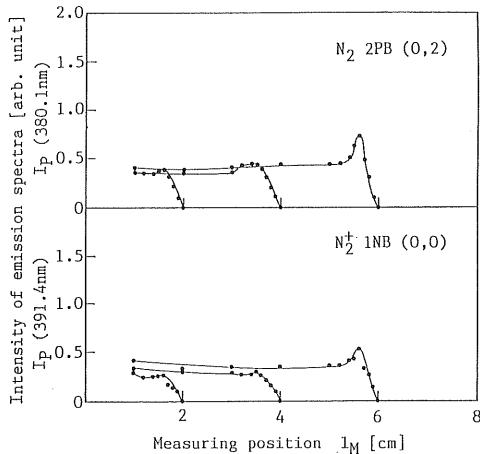


図4 局部放電各部分のスペクトル特性 ($V_a=15.6 \text{ kV}$)

Fig. 4 Intensity of emission spectra along the local discharge.

印加し、平板電極を抵抗 R_4 を通して接地した。

本実験では、主に比較的発光強度の強い N_2 2nd Positive (1, 3) Band (以後 N_2 2PB (1, 3) と略称する), N_2 2nd Positive (0, 2) Band (以後 N_2 2PB (0, 2) と略称する) および N_2^+ 1st Negative (0, 0) Band (以後 N_2^+ 1NB (0, 0) と略称する) の観測を行った。

3. 実験結果と検討

3.1 局部放電の長さに沿ってのスペクトル発光強度

図1の針-平板電極間に図2の実験回路により $2/80 \mu\text{s}$ の雷インパルス電圧を印加して、局部放電を塩化カリウム水溶液面に進展させる。

このときの電極系上方のモノクロメータと電極系側面の光電子増倍管の出力波形をデュアルビームシンクロス

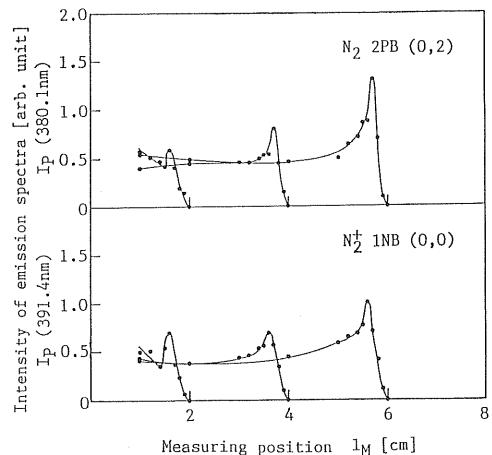


図5 局部放電各部分のスペクトル特性 ($V_a=18.8 \text{ kV}$)

Fig. 5 Intensity of emission spectra along the local discharge.

コープによって観測した一例を図3に示す。この図は溶液の抵抗率 $\rho=386 \Omega \cdot \text{cm}$, 印加電圧 $V_a=15.6 \text{ kV}$ (50% フラッシュオーバ電圧 V_{50}), モノクロメータの観測波長 N_2 2PB (0, 2) の 380.1 nm, 針電極からモノクロメータによる観測位置までの距離 $l_M=2 \text{ cm}$, 光電子増倍管の観測位置までの距離 $l_s=4 \text{ cm}$ の場合である。局部放電は、まず電極系上方のモノクロメータによって検出され(図3のA点以後), さらに進展すると側面の光電子増倍管によって検出される(図3のB点以後)。それで、このB点と同一時間でのモノクロメータの出力波形の瞬時値が局部放電が針電極から 4 cm の点まで進展した瞬時の、針電極から 2 cm の点の局部放電のスペクトル発光強度を示すことがわかる。

したがって、光電子増倍管の観測位置 l_s を一定に保ち、モノクロメータによる観測位置 l_M を変えて(スペクトル発光強度の位置による変化が著しい局部放電の先端部分 1 cm では 1~2 mm ずつ動かし、残りの幹部分では 1 cm ずつ動かして)図3のようなオシログラムを得ることによって、局部放電が l_s の位置まで進展した瞬時の局部放電の長さに沿ってのスペクトル発光強度を測定した。その結果を図4, 図5, 図6に示す。図4, 図5, 図6はいずれも溶液の抵抗率 $\rho=386 \Omega \cdot \text{cm}$ の場合で、局部放電が針電極から 2 cm, 4 cm, 6 cm の位置まで進展した瞬時($l_s=2, 4, 6 \text{ cm}$)の局部放電の長さに沿ってのスペクトル発光強度を示す。また印加電圧は図4が 15.6 kV (50% フラッシュオーバ電圧 V_{50}), 図5が 18.8 kV (V_{50} の 1.2 倍), 図6が 21.8 kV (V_{50} の 1.4 倍) であり、各図中の(a)図がモノクロメータの観測波長 $\lambda=380.1 \text{ nm}$ (N_2 2PB (0, 2)), (b)図が $\lambda=391.4$

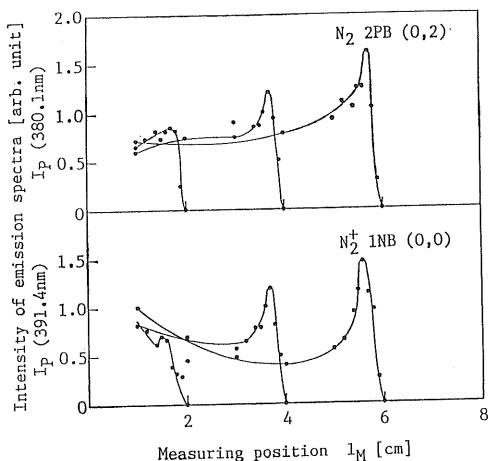
図6 局部放電各部分のスペクトル特性 ($V_a=21.8$ kV)

Fig. 6 Intensity of emission spectra along the local discharge.

nm (N_2^+ 1NB (0, 0)) の場合である。

これらの図から、 N_2 2PB (0, 2) および N_2^+ 1NB (0, 0) の両方とも、その発光強度は局部放電の先端部分約 1 cm を除いた幹部分ではほぼ一定となっているが、先端部分にピークがあることが判る。このピークは局部放電の長さが長くなるほど、印加電圧が高くなるほど高くなっている。またピークの位置は局部放電の先端からおよそ 3~5 mm のところである。

以上のことから、局部放電ではその長さ全体に亘って電離・励起作用が生じているが、その先端部分で特に盛んで、局部放電が進展するにつれて、また印加電圧が高くなるにつれて、その先端部分の電離・励起作用はますます盛んになるものと推測される。

3.2 局部放電先端部分の気体温度

これまでの報告にみられるように^{9,10)}、本実験においても回転温度を気体温度とみなした。Phillips¹¹⁾の装置関数を利用してモノクロメータを通った後の線スペクトルの広がり分布を表し、回転温度（気体温度）をパラメータとして波長に対するスペクトル発光強度の変化を計算することができる。このスペクトル発光強度の計算値と測定値とを比較することにより気体温度が求められる。

局部放電幹部分の気体温度の測定についてはすでに報告したので⁸⁾、ここでは局部放電の先端部分の気体温度を測定した。

図4~6 からもわかるように、先端部分の発光強度は場所的にも、時間的にも著しく変化する。そこで、先端部分の気体温度の分布を測定することは困難なので、本実験では先端の発光強度がピークとなる点の気体温度を

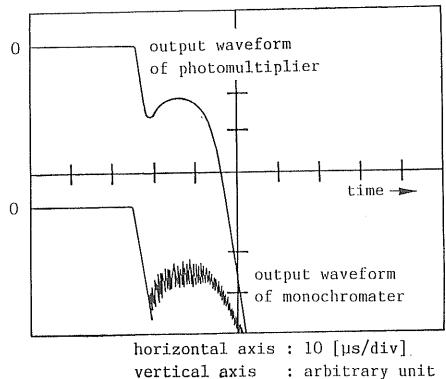


図7 モノクロメータの出力波形と光電子増倍管の出力波形の概略図

Fig. 7 Output waveforms of photomultiplier and monochromator.

測定した。

図1において、電極系上方のモノクロメータの観測位置と電極系側面の光電子増倍管の観測位置は同一の位置 ($l_M=l_s$) とした。

このとき観測されるオシログラムの一例を図7に示す。これは $\rho=386\Omega\cdot\text{cm}$, $V_a=21.4$ kV, モノクロメータの観測波長 $\lambda=380.1$ nm, $l_M=l_s=5$ cm の場合である。

図7から、モノクロメータと光電子増倍管の出力波形のピークの位置は一致していることがわかる。このような傾向はモノクロメータの観測波長にかかわらずみられる。このことは、スペクトル発光強度はどの波長も局部放電先端部分の同じ位置でピークとなることを示す。

のことから、このピークの位置のスペクトル発光強度を観測することによって局部放電先端部分の気体温度を測定した。

前報⁸⁾と同様に、比較的発光強度の強い N_2 2PB (0, 2) の系列と N_2 2PB (1, 3) の系列（主に N_2 2PB (0, 2) の系列）を使用した。

図8にスペクトル発光強度の測定値と計算値との比較の一例を示す。これは $\rho=386\Omega\cdot\text{cm}$, $V_a=21.4$ kV, $l_M=l_s=5$ cm, 観測スペクトルは N_2 2PB (0, 2) の系列である。図中、実線が計算値、●印が測定値でいずれも波長 $\lambda=378.5$ nm のスペクトル発光強度を1とした相対値で表している。計算値は気体温度をパラメータとして表しているが、2,000 K の曲線Cが測定値とほぼ一致することから、図8の場合の気体温度はおよそ 2,000 K であると推測される。

このようにして、測定値と計算値との比較から気体温度を求めた。その結果を表1、表2、表3に示す。¹²⁾

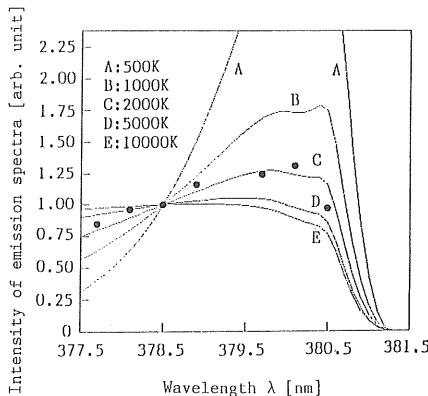


図8 スペクトル発光強度の測定値と計算値との比較
($\rho=386 \Omega \cdot \text{cm}$, $l_M=5 \text{ cm}$, $V_a=21.4 \text{ kV}$)

Fig. 8 Relative intensity of the emission spectra.

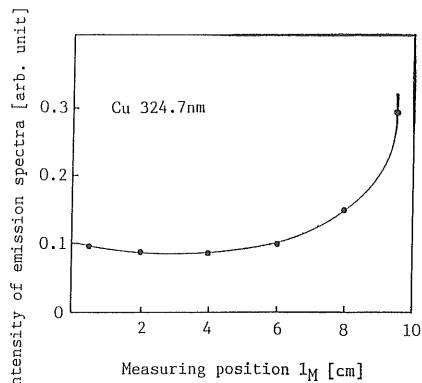


図9 フラッシュオーバー後の放電各部分におけるスペクトル特性
($\rho=386 \Omega \cdot \text{cm}$, $V_a=17.3 \text{ kV}$)

Fig. 9 Intensity of emission spectra along the discharge after flashover.

表1は $\rho=386 \Omega \cdot \text{cm}$, $V_a=23.3 \text{ kV}$ として、局部放電の長さの局部放電先端部分の気体温度に対する影響を調べた結果である。局部放電先端の発光強度がピークとなる位置が針電極から 3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm の場合について測定しているが、いずれの場合も先端部分の気体温度はおよそ 2,000 K と推測される。

表2は局部放電先端部分の気体温度に対する印加電圧 V_a の影響を調べた結果である。 V_a を 21.4 kV から 24.8 kV まで変えているがその気体温度に対する影響はみられず、印加電圧値にかかわらず先端部分の気体温度はおよそ 2,000 K となっている。

表3は局部放電先端部分の気体温度に対する溶液の抵抗率 ρ の影響を調べた結果である。 ρ を $161 \Omega \cdot \text{cm}$ から $750 \Omega \cdot \text{cm}$ まで変えているが、気体温度に対する溶液の

表1 局部放電路の長さによる温度特性
($\rho=386 \Omega \cdot \text{cm}$, $V_a=23.3 \text{ kV}$)

Table 1 Variation of gas temperature in local discharge.

Measuring position	Gas temperature (K)	
	N ₂ 2PB(0, 2)	N ₂ 2PB(1, 3)
3	1,800	2,200
4	2,100	2,000
5	2,000	2,300
6	2,200	2,200

表2 印加電圧波高値による温度特性
($\rho=386 \Omega \cdot \text{cm}$, $l_M=5 \text{ cm}$)

Table 2 Effect of peak value of applied voltage.

Peak value of applied voltage $V_a(\text{kV})$	Gas temperature (K)
21.4	1,900
23.3	2,000
24.8	2,000

表3 溶液の抵抗率による温度特性
($V_a=V_{50} \times 1.3$)

Table 3 Effect of resistivity of electrolyte.

Resistivity of electrolyte $\rho(\Omega \cdot \text{cm})$	Measuring position $l_M(\text{cm})$	Gas temperature (K)
161	5	2,100
386	6	1,900
750	6	2,000

抵抗率の影響はみられず、 ρ の値にかかわらず先端部分の気体温度はおよそ 2,000 K となっている。

3.3 局部放電の放電形態

局部放電が液面上を進展しつつあるときの局部放電の放電形態について検討した。

図9にフラッシュオーバー後（局部放電が平板電極に到達した後）の針-平板電極間で観測される Cu スペクトル強度 (324.7 nm) を示す。この場合の印加電圧は 17.3 kV (V_{50} の 1.7 倍) である。平板電極から遠ざかるにつれて Cu スペクトル強度は低下している。このように陰極材料である Cu のスペクトルが観測されることから、フラッシュオーバー後の放電形態はアーケ放電と考えられる。アーケ放電では N の原子スペクトルが観測されるといわれているが¹²⁾、そのスペクトル (411.0 nm) も確認することができた。また針-平板電極間が局部放電で橋絡された後（フラッシュオーバー後）の N₂ 2PB (0, 2) と

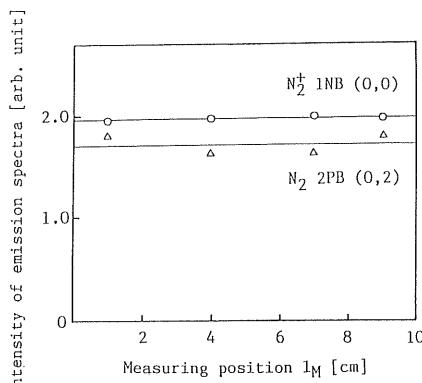


図 10 フラッシュオーバー後の放電各部分におけるスペクトル特性
($\rho=386\Omega\cdot\text{cm}$, $V_a=15.6\text{ kV}$)

Fig. 10 Intensity of emission spectra along the discharge after flashover.

$N_2^+ 1NB\ (0,0)$ のスペクトル発光強度を測定した結果を図 10 に示す。この場合の印加電圧は 15.6 kV (50% フラッシュオーバー電圧 V_{50}) である。観測位置 (放電路中の位置) にかかわらず $N_2^+ 1NB\ (0,0)$ の方が $N_2\ 2PB\ (0,2)$ よりも大きくなっている。

つぎに、局部放電が液面上を進展しつつあるときの $N_2^+ 1NB\ (0,0)$ と $N_2\ 2PB\ (0,2)$ の強度を図 4 ~ 図 6 から比べてみると、局部放電中の位置にかかわらず $N_2\ 2PB\ (0,2)$ の方が $N_2^+ 1NB\ (0,0)$ より大きい。これは上に述べたアーケ放電の状態とは逆の関係になっている。また液面上を進展しつつある局部放電からは、N の原子スペクトル (411.0 nm) も観測されなかった。これらのことから、液面上を進展しつつあるときの局部放電と平板電極に到達した後 (フラッシュオーバー後) とでは放電形態が異なることがわかる。すなわち、液面上を進展しつつある局部放電の放電形態はアーケ状ではなくて針-液面間放電と同様グロー状になっているものと推測される。

4. む す び

インパルス電圧印加のもとで、電解質水溶液面を進展しつつある局部放電の長さに沿ってのスペクトル発光強度および局部放電先端部分の気体温度の測定を行った。また、局部放電が液面を進展しつつあるときの局部放電の放電形態についても検討した。本研究により得られた結果を要約すると以下になる。

(1) $N_2\ 2PB\ (0,2)$ および $N_2^+ 1NB\ (0,0)$ の両方とも、その発光強度は、局部放電の先端部分にピークがあり、その先端部分約 1 cm を除いた幹部分ではほぼ一定

となる。

(2) 局部放電先端部分にある発光強度のピークの高さは局部放電の長さが長くなるほど、印加電圧が高くなるほど高くなる。

(3) 局部放電先端部分の気体温度は、局部放電の長さ、印加電圧波高値および溶液の抵抗率にかかわらずおよそ $2,000\text{ K}$ となっている。

(4) 局部放電が平板電極に到達し、フラッシュオーバー状態になると、陰極材料である Cu のスペクトルおよび N の原子スペクトルが観測されることから、フラッシュオーバー後の放電はアーケ放電とみられる。

(5) 局部放電が進展しつつあるとき、N の原子スペクトルは観測されない。

(6) $N_2\ 2PB\ (0,2)$ と $N_2^+ 1NB\ (0,0)$ のスペクトル強度比は、フラッシュオーバー後は 1 以下であるが、局部放電が液面上を進展しつつあるときは、1 以上となる。

上に述べた(4), (5), (6)より、液面上を進展しつつあるときの局部放電は平板電極に到達した後 (フラッシュオーバー後) とは、その放電形態が異なる。すなわち、液面上を進展しつつある局部放電はアーケ状ではなく、むしろ針-液面間放電と同様にグロー状になっているものと推測されるが、これについては今後更に詳しく検討する必要がある。

終わりに、本研究をすすめるに当たって協力していたいた長崎大学山口和彦技官および卒研生佐藤純一君、菅弘史郎君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) L.L. Alston and S. Zoledzowski : Proc. Inst. Elect. Eng., 110 (1963) 1260
- 2) B.F. Hampton : ibid., 111 (1964) 985
- 3) R. Wilkins and A.A.J. Al-Baghdadi : ibid., 118 (1971) 1886
- 4) G. Peyregne, A.M. Rahal and C. Huraux : IEEE Trans. Elect. Insul., EI-17 (1982) 10
- 5) S. Gopal and Y.N. Rao : IEE Proc., 131, Pt. C (1984) 140
- 6) T. Yamashita, H. Matsuo, H. Fujiyama and T. Oshige : IEEE Trans. Elect. Insul., EI-23 (1988) 979
- 7) 奥野喜裕, 山下敬彦, 松尾寿夫, 大重 力: 電気学会放電研究会資料, ED-88-37 (1988)
- 8) 池田良司, 山下敬彦, 松尾寿夫, 大重 力: 電気学会放電研究会資料, ED-89-80 (1989)
- 9) 八木重典, 田畠則一: 電気学会論文誌, 96-B (1976) 569
- 10) 大坪昌久, 松根卓樹, 賀田 寛: 電気学会論文誌, 107-A (1987) 387
- 11) D.M. Phillips : J. Phys. D, Appl. Phys., 9 (1969) 507
- 12) 西嶋喜代人: 福岡大学研究所報, 48 (1980) 111