UDC 621.3.015.53
537.528: 546.171

論 文
48-A 30

液体窒素中の表面放電

東京大学 千葉 政 邦
東京大学 河 野 照 哉
東京大学 鳳 誠三郎

1. ま え が き

高密度エネルギー伝送の方法として極低温送電方式が有望視され、これに関連して極低温における放電現象の研究が活発に行なわれるようになってきた。しかし、研究の対象は気体、液体中の放電や固体絶縁物に関するものであり、表面放電については皆無といつてよい現状である。本報告は液体窒素中の表面放電に関するものであるが、絶縁設計上重要な問題の一つであるとともに、極低温における放電機構の解明に有力な手段となると思われる。

表面放電の研究にとって、放電図形すなわちヒテンベルグ像の観測は有力な手法であるが、極低温下では写真乳剤の温度特性⁽¹⁾が問題になる。乳剤は極低温下でも感光することが知られている。しかし、銀粒子や潜像などの極低温下の特性についてはほとんどわかっていない。また、液化気体をその沸点温度で使用する場合には、放電によって容易に気泡が発生して影響を及ぼすであろう。今日まで、液体窒素中の放電図形については、写真フィルムによってそれが可能であると報告⁽²⁾されているに過ぎない。したがって、不明の点が多いので、得られた実験結果の検討には種々の条件のもとでの結果を総合的に考えることが必要である。

著者らは、写真乾板を用いて液体窒素中の表面放電を調べ、その放電図形全般の特性を明らかにするとともに、油中の場合とは異なったいくつかの現象を見いだしたので、以下に報告する。

2. 実験方法

液体窒素中で放電図形をとる場合に、フィルムと乾板はそれぞれ一長一短がある。フィルムは冷却に対して強いが、もしフィルムと下部の電極と絶縁板の間に液体や気泡が存在すると、フィルムは一般に薄いのでその表面の放電が影響されるであろう。乾板はこの逆である。本実験では、表面放電が他から受ける影響をできるだけ少なくするというこゝで、おもに乾板で行なった。使用した乾板は整色彩の分光分析用のものであり、ガラス基板の厚さ 1mm、乳剤層の厚さ 0.02 mm、波長 370~550nm の光に感光し、ASA 感度 1 である。

電極は 6mm 径で先端を 1mm の曲率で縁どりしてバフ研摩で仕上げた棒電極(ステンレス鋼)と、96 mm 径の平板電極(黄銅)である。両者の間に乾板を置いて、第 1 図のように液体窒素中にセットした。乾板は液面から 12 ± 0.5 cm の深さにあり、外圧は大気

第 1 図 電極と乾板の配置図

Fig. 1. Arrangement of electrodes and photographic plate.

Surface Discharge in Liquid Nitrogen. By M. CHIBA, Member, T. KOUNO, Member & S. HOH, Member (Faculty of Engineering, University of Tokyo).

千葉政邦: 正員, 東京大学工学部

河野照哉: 正員, 東京大学工学部

鳳 誠三郎: 正員, 東京大学工学部

圧である。また、液体窒素は市販のもので、2回の実験ごとに新しいものに取り換えた。

乾板を液体窒素中にセットするときに、熱的ひずみによるガラス基板の破壊と乳剤の損傷が問題となった。徐々に冷却することによってガラス基板の破壊は防止できるが、乳剤のはく離や割れは避けられない。また、その際にあまり時間をかけると、空気中の水分が液体窒素中に混入する恐れがあるので手早く行なう必要がある。そこで乾板の上にガラス板を置いて乳剤を保護して十分に冷却した後、ガラス板を取り除くという手順で行なった。さらに電圧印加後、室温にもどすときにも乳剤のはく離するので、乾板表面に水滴が付着しないようにして徐々に室温にもどし、現像処理をした。

電圧は波形が $420 \times 6, 500 \mu\text{s}$ の正負のインパルスを棒電極に印加した。さらに立上りの急しゅんな波形と非常にゆっくりした波形でも行なったが、波形の効果が少なかったので主に上記の波形で調べた。放電電流は抵抗 $10 \text{ k}\Omega$ とコンデンサ $1,000 \text{ pF}$ の並列回路で観測した。その他、いくつかの条件を変えて実験を行なったが、断わりがない限り上述の条件によるものである。

3. 実験結果と考察

〈3・1〉 放電図形の半径と印加電圧の関係 第2図は印加電圧に対する放電図形の最大半径をプロットしたものである。ただし、後述の線条の放電跡は除いてある。非常にばらつきが大きい上に、放電開始電圧にもばらつきがあり、また電圧が高くなると乾板が貫通破壊するために、両者の関係を十分に明らかにするには至らなかった。この範囲では正極性のほうが負極性よりも少し大きい。ばらつきの原因として、電極の形状も関係しているであろう。正、負極性の場合とも放電は放射状に一樣に伸びずに、電極の数点から出

第2図 放電図形の最大半径と印加電圧の関係

Fig. 2. Relation between maximum radius of Lichtenberg figure and applied voltage.

発しており、そのうちのいくつかが特に長く伸び出している。乾板の貫通破壊電圧は正極性で約 32 kV 、負極性で約 29 kV であった。

〈3・2〉 放電図形と放電電流 正、負極性の放電図形の共通の特徴として、ステップ現象、線条の放電跡が観察される。そのほかに、飛び離れた点から始まっている放電跡もみられる。これは放電が途中から表面放電に移ったものと考えられる。

(1) 正極性 第3図に正極性の放電図形と印加電圧および放電電流波形を示す。正極性の図形は全体的には枝分れの多い樹枝状となっているが、拡大してみると(b)図のように小さな樹枝状のものと、斑点状のものからなっている。棒電極の近傍は常に樹枝状であり、ある程度(約 5 mm)以上伸びている幹の部分には常に斑点状である。その斑点の大きさは $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ である。枝の部分は斑点状のものと小さな樹枝状のものがあるが、長く伸びている枝は必ず斑点状となっている。このように斑点状になることは、気中や油中の表面放電には観察されないことである。この原因として、偽写真効果⁽³⁾ 放電自身による現象が考えられるが、これらについては後述する。

第3図 正極性の放電図形と印加電圧、放電電流波形(電圧 29 kV)

Fig. 3. Lichtenberg figures of positive polarity and wave forms of applied voltage and discharge current.

第 4 図 負極性の放電図形と印加電圧、放電電流波形（電圧 28kV）

Fig. 4. Lichtenberg figures of negative polarity and wave forms of applied voltage and discharge current.

放電電流はパルス性であり、パルス 1 発の電荷量は 10^{-8} C 以下である。まれに定常電流も含まれることがある。

(2) 負極性 第 4 図は負極性の放電図形と印加電圧、電流波形である。負極性ではブッシュ状をなしており、図形の根もとは正極性より太く、急に先細りになっている。そして拡大写真からもわかるように、部分的な濃淡が著しいのが特徴である。放電電流の波形は定常分にパルスが重畳されており、その電荷量は正極性と同程度である。

〈3・3〉 ステップ現象 正極性の樹枝状の放電や負極性の放電が棒電極の近傍に整然と発生した場合には、そこに油中の場合と同じような同心円状の濃淡のステップが観察される。そのステップの長さは約 1 mm である。第 5 図は正極性の写真であるが、負極性も同様である。しかし、多くの場合は〈3・1〉節で述べたような図形となって、同心円状のステップが見られるのはまれである。ところが、負極性の濃淡の間隔がだいたい 1mm であるので、これは同心円状になっていないが部分的なステップ現象と考えられる。正極性の斑点状の部分には、濃淡のステップが全く見られない。

〈3・4〉 線条の放電跡 正、負極性の場合とも、上述の放電（以下、主放電という）図形のほかに光の弱い線条の放電跡が存在する。第 6 図は正極性の場合の写真であるが、負極性の場合も同じ形をしている。しかし、光が弱く増感現像をしてもその形はあまり明らかでない。この線条の放電跡はおもに主放電の先端部分から伸び出していて、枝分れも有している。この放電が主放電に先行していたものか、または主放電によって生じた気ほう中の表面放電なのか興味ある問題である。

〈3・5〉 乾板表面のみぞの効果 乾板の乳剤を保

第 5 図 液体窒素中の表面放電のステップ

Fig. 5. Steps of surface discharge in liquid nitrogen.

第 6 図 線条の放電跡（正極性）

Fig. 6. Tracks of filamentary discharges.

護せずに液体窒素中にセットした場合、乳剤層の割れめに沿って進行したと思われる放電跡が、特に負極性にしばしば観察された。それで乳剤層に小さなみぞを作った乾板で実験をした。その結果を第 7 図に示す。図中の細い線がみぞであり、その幅は約 0.05mm、深さは乳剤層の厚さ 0.02mm 程度のものである。

正極性の場合には斑点状の部分はみぞに全く影響されないが、樹枝状の部分はみぞを飛びこえているものと、みぞの中を伸びているものの両方がある。みぞの中を伸びることは比較的少ないのであるが、まれに相

(a) 正極性

(b) 負極性

第 7 図 乾板表面のみぞの影響

Fig. 7. Effect of cracks on the surface of photographic plate.

当に長く伸びる場合がある。負極性の場合のみぞに突き当たるとその中にはいり、再び外に出るものと、その中を非常に長く伸びているものがある。その長さは健全な乾板の図形に比較して 2~3 倍にも達しており、写真のような放電図形となる。

このようなみぞの効果について、油中の場合には負極性の放電はみぞを容易に渡ることができないと報告⁽⁴⁾されているが、本実験のみぞは非常に小さいので、放電がその中にはいることはできる。しかし、その後容易に外に出られずみぞの中を進行するのか、みぞの中のほうが進行しやすい条件（たとえば、乳剤がない）になっているのかは明らかでない。いずれにせよ、液体窒素中の表面放電も絶縁体の表面状態に著しく影響されるといえる。

〈3・6〉 乳剤の相違による効果 正極性の斑点状の放電跡が偽写真効果、すなわち、一度光によって乳剤中に形成された替像が、再び光が当ることによって異なった像になったり、黒化した銀粒子が集合した結果によるかどうかを確かめる必要がある。それで乳剤の感光特性の異なる乾板、フィルムで試みた。ただしフィルムの場合はフィルムと平板電極の間に乾板の乳剤を除去した厚さ 1mm のガラス板をそう入した。

長波長領域にも感度を有する全色形の分光分析用乾板 (ASA 感度 12) と市販の SS フィルム (全色色、

第 8 図 X線フィルムによる正極性の放電図形

Fig. 8. Positive figure with X-ray film.

ASA 100) では、全体的に感度が少し良くなるだけで図形には全く変化がなかった。ところが、両面に乳剤が塗布されている医用の X 線フィルムは液体窒素中でも感度が良く、放電図形の細かい点まで観察できた。第 8 図に X 線フィルムによる正極性の幹の部分の拡大写真を示す。これから斑点状に見える部分は、非常に小さな樹枝状のものが不連続にならんでいることがわかる。その大きさは約 0.3mm であり、他の乳剤のものより大きい。他の乳剤では斑点にしか見えないのは感度が低くてその樹枝状の一部しか記録されないためであろう。その他の部分には感度、コントラストの相違による多少の差がみられただけである。

〈3・7〉 その他の条件による効果 さらに検討を加えるために、条件を変えて実験した結果を簡単に述べる。

(1) 印加電圧波形 420 μ s 波のほかに 10 $\times$ 500 μ s, 4.2 $\times$ 1.4ms 波の電圧で試みた。結果は 420 μ s 波の図形と同じで、有意差はみられなかった。ただし、放電開始は 10 μ s 波では波高部で始まり、420 μ s 波と 4.2ms 波では波頭部で始まる。波形の効果が出ないのは、10 μ s 波で立上りのゆっくりした波高部分で始まるためであろう。

(2) 絶縁板の厚さ 乾板 (厚さ 1mm) の下にさらに 2mm 厚のガラス板をそう入した結果、印加電圧も高く大きな放電図形が得られる。その形は乾板のみの場合の図形で長く伸びている部分をさらに長く伸ばしたものとなる。その他の特性には変化が認められなかった。

(3) 極低温窒素ガス中 極低温下で乳剤が変化しないか、線条の放電跡が極低温気体中の放電のそれに類似していないかを確かめるために、大気圧で温度が約 -180 $^{\circ}$ C の窒素ガス中の放電図形を観測した。ただし、実験装置は第 1 図と異なる。正極性の図形は常温

中のものに類似しており、非常に細かい多数の枝分れを有している樹枝状である。斑点状になることはない。これから斑点状のものは極低温下における乳剤の性質によるものでないといえる。負極性の図形は常温中で見られる扇状のものが観測されず、樹枝状に伸びている。これはおそらく乳剤の感度が低下したためであろう。また正、負極性の場合とも、液体中のように主放電、線条の放電と区別できるような図形でなく、放電光の強さも乳剤の黒化の程度から両者の中間位と推定された。それで線条の放電が液体中か、気体中かの判定はできなかった。

(4) 乾板表面の霜 (水滴) 乾板を液体窒素中にセットするときに、肉眼では観察できないような小さい水滴が付着して、それが正極性の斑点状の放電に影響していると考えられた。そこで多量の霜が付着した乾板と多量の水滴が混入した窒素中で試みたが、表面の霜は窒素に洗い流されて、結果に差がみられなかった。

次に、本実験の放電図形と直接関係ないが、放電させた後の絶縁板を液体窒素中から取り出すと表面に霜が発生する。その形は放電した部分と他の部分がはっきり区別でき、いわゆる霜の放電図形が得られる。これは極低温下の表面放電の測定に簡便な方法として利用できる。

〈3・8〉 考察 まず、正極性において斑点状になることについて述べる。負極性の場合や極低温ガス中では生じないこと、特性の異なる乳剤でも生じること、特にX線フィルムでは小さな樹枝状になることを考え合わせると、写真効果によるものでなく、放電の跡が飛び飛びになっていたといえる。しかし放電自身が不連続であるとは考えられないので、その原因として次のように考えられる。

放電が乳剤中を進行して部分的に表面に出たか、あるいは表面を離れて上のほうを進行して部分的に表面に衝突したかのどちらかである。前者の場合だと、負極性のほうがみぞや割れめにはいりやすいので、負極性にも生じるであろう。また、乳剤中に侵入した放電も記録されるはずである。したがって、前者は否定される。放電は乾板を離れて進行して、その枝の部分が表面に当たり、小樹枝状の表面放電となって斑点状に観測されることが考えられる。それで、この放電がみぞの影響を全く受けないのも説明がつく。なぜ正極性の放電のみが乾板の表面を離れて進行するかについては、電子に対する印加電界や乾板と窒素の誘電率の差による効果と考えられる。

油中の場合には、液体中の放電とそれによって生じる気ほう中の放電⁽⁵⁾が存在する。液体窒素ではさらに容易に気ほうが発生するので、その存在も考えねばならない。しかし、それを確かめる実験 (たとえば、圧力を変える) を行っていないので明らかでないが、線条の放電は光の強さと発生位置を考えると液体中の放電であって、それによって生じた気ほう中を主放電が進行したと考えられる。

4. む す び

本研究は、液体窒素中の表面放電の全般的な観測の段階であるが、得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 液体窒素中でも写真乳剤を用いて放電図形が得られる。X線用の乳剤は極低温においても感度が大である。

(2) 正極性と負極性に差がある。正極性では表面放電による樹枝状の跡と、放電が乾板の上方を進行した結果による斑点状の跡が存在する。負極性では部分的なステップによると考えられる濃淡のある図形となる。

(3) さらに両極性において、線条の放電跡と同心円状の濃淡のステップが観察される。

液体中の表面放電において気ほうの発生状態も検討しなければならない重要な点である。しかし、本研究では気ほうの観測を行っていないので、その作用については推定しかできない。これらは今後の課題である。

また、液体窒素は分子構造が簡単であり、高純度のものが比較的容易に得られるので、一般の液体中の表面放電の機構の解明にとっても有力な手段となろう。

終わりに、本研究を行なうにあたって、有力なご検討をいただいた中央大学の高橋雄造講師に深く感謝します。さらに、ご協力をいただいた本学学生河津博幸君 (現、関西電力株式会社)、本学鳳、河野研究室の諸氏にも感謝の意を表します。

(昭和47年8月9日受付)

文 献

- (1) Mees & James: The Theory of the Photographic Process. (1966) Macmillan Co.
- (2) 高橋: 電気学会論文誌 92-A, 497 (昭 47-11)
- (3) 菊地: 写真化学, 共立出版
- (4) 岸田・佐藤・島山: 電気学会論文誌 92-A, 246 (昭 47-5)
- (5) Y. Toriyama, T. Sato & H. Mitsui: Brit. J. Appl. Phys. 15, 2, 203 (1964)