

論 文

帶電油面-接地球電極間の放電現象

松原 美之*

(1990年4月2日受理)

Aspect of Discharges between Charged Kerosene
and Spherical Electrodes

Y. MATSUBARA

(Received April 2, 1990)

Using a tank of 330 mm diameter filled with charged kerosene, experiments were performed to observe electrical discharges which appeared when earthed spherical electrode approached to charged oil surface. Two different shapes of electrodes were used: spherical electrode of two different diameters (5 mm and 10 mm) and pointed rod. The surface potential was observed to be from -5 to -25 kV. The electric potential distribution in the tank was calculated numerically, and compared with the phenomena observed through the experiments. The results obtained are as follows; 1) Discharges with crackling were not observed for pointed electrode. 2) For an electrode of 5 mm in diameter, discharges with crackling appeared in the widest range of test conditions. 3) The range of test conditions, under which swellings of oil surface were observed, was the widest when 10 mm diameter electrode was used. 4) The numerically obtained results for electrostatic fields inside the tank seem to explain those experimental results.

1. 序 論

石油類をはじめとする引火性液体を取り扱う場所における火災・爆発事故の原因のひとつとして、帯電し電位の上昇した油面と接地導体との間で発生する静電気放電があげられる¹⁻⁴⁾。しかし、帯電油面と接地導体間の放電が可燃性混合気体を着火する能力をどの程度有しているかという問題については、これまでに行われたいくつかの研究^{1,5-9)}にもかかわらず、解決を要する点が未だ多く残されている。

これは帯電した油のような絶縁物と導体間で発生する放電では、エネルギーの放出が緩慢に行われること、蓄積されている電荷の一部しか放電により移動しないことなど、導体同士の間の火花放電に比べて複雑な要因があるためである。さらに、帯電した油と接地導体との間での放電が発生するような条件では、電気力により油が運動するという現象が生じてくることも、解決を困難にしている。

キーワード：静電気、放電、石油、災害

* 消防庁消防研究所 (181 三鷹市中原3丁目 14-1)
Fire Research Institute, Fire Defence Agency,
14-1, Nakahara 3-chome, Mitaka, 181 Japan

そこで、帯電した油と接地導体との間で発生する放電の着火能力を研究する目的で、放電の発生状況に与える油面電位及び電極形状などの影響を調べる実験を行い、さらに、油面近傍に形成される静電場を数値計算で求めた結果との比較を行った。実験は、強制的に帯電させた灯油を用いて実施し、電極の形状は2種類の直径の球及び円錐形とした。円錐形の電極は直径のきわめて小さな球電極にかわるものとして使用した。

その結果、放電形態に与える電極径の影響等、今後の研究を進めるうえで有益と思われるいくつかの事象について知ることができた。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概要を図1に示す。実験には、直径330 mm、高さ330 mmの円筒型のステンレス製タンクを使用した。タンクには内径16.1 mmのステンレス製配管を接続し、配管途中には、ポンプ、フィルタや流量計のほか強制帶電用の電荷注入電極を取り付けた。また、油面の挙動を観測する目的で、タンク側板の底から165 mmの相対する位置2個所に、直径50 mmの強化ガラス製の窓を取り付けた。

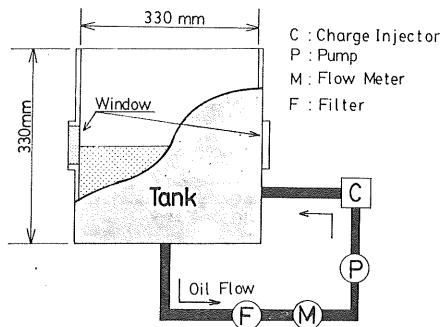


図 1 実験装置の概要

Fig. 1 Scheme of experimental apparatus.

放電を発生させるために油面電位を高める方法としては、油中に電極を配置し電圧を印加する方法も用いられている¹⁾。しかし、より現実に近い条件で放電を発生させるには、そうした方法ではなく、油中に分布した電荷により油面電位を上昇させることが必要である。そこで、配管中で油を強制的に帯電させ、タンク中に導く方法をとった。油を強制的に帯電させる目的には、注入電荷量の制御可能な有本らの電極¹⁰⁾を改良したものをポンプ下流に3個直列に並べて使用した。電荷注入電極の構造を図2に示す。この電極では、油が通過する際に、高電圧を印加された刃先から油中に向かって、電界放射により電荷が注入される。

タンクへの流入口及びタンクからの出口の取り付け位置は、タンク内部での電荷密度分布が均一となるよう配慮し、流入口をタンクの側板に、出口をタンク底板中央にそれぞれ配置した。ポンプを始動し油を流动させると油面が動搖するので、油の直線的なタンク内への流れ込みを避け油面の動搖を抑える目的で、タンクへの流入口に呼径1/2BのT字管（チーズ）を取り付けた。

電極は、球電極2種類と円錐形電極1種類の合計3種類を使用した。球電極としては、直径3mmのステンレス棒の先端に直径がそれぞれ5mm及び10mmのステンレス製の球をハンダ付けしたものを使用した。円錐形電極は、直径3mmのステンレス棒先端が高さ6mmの円錐形となるようにグラインダで削ったものを使用した。

油面と電極間の距離の設定は、タンク側板上に電極固定器具を取り付け、油が静止した条件で油面と電極先端の距離が所定の値となるように固定器具に電極を固定する方法で行った。実験には白灯油を用いた。実験期間中、直流零時間法で測定したその導電率は2.2~8 pS/mの範囲で変動したが、放電実験終了直後の導電率の値は、2.6~3.5 pS/mの範囲にとどまっていた。

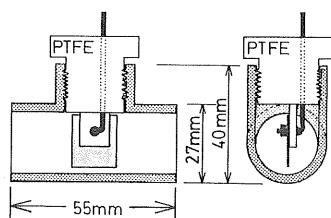


図2 電荷注入電極の構造

Fig. 2 Diagram of charge injector.

2.2 実験方法

油が静止した状態で、タンク側板上に置いた電極固定器具の底面から165mmの位置に油面高さを調節した。その後ポンプを始動し、タンク天井板中央に取り付けたセクタ型電界強度計（リオン社、EA 07型）で電界強度を連続的に計測しながら、電荷注入電極で強制的に帯電させた油を毎分15リットルの流量で流动させた。タンク内での油の流动状況は目視による油面の観察では流动開始後ただちに定常となった。そこで、天井面での電界強度の値が一定値に饱和するまで待ったのち、発生する放電現象の観察を行った。電極は、油が静止している状態で油面-電極間の距離が2.5mm, 5mm, 10mm, 15mmとなる位置に固定器具により順次固定して実験を行った。この際、油面は油の流入により動搖するため実験時の電極先端との距離は設定値とは異なったものとなるが、目視による観察によれば、2.5mmに設定した場合でも著しく距離が近くなるようなことはなかった。実験は、油面電位の値ごとに連続して実施した。この際、電極を油面に近づけ放電させたのちに、電荷中和によると思われる若干の油面電位低下が見られることがあったが、この場合には、油面の電位が回復するまで待って次の放電観察を行った。

なお、油面電位はタンク内部に接地電極が持ち込まれない条件での値であり、美寺、浅野らが求めている円筒型タンク内部の静電場に対する解析解^{11,12)}を用いて、天井面中央部分での電界強度の測定値から計算により求めた。図3は、今回の実験に用いたのと同型のタンクについて、油の充填率を種々に変化させた時の油面電位(V_{sur})と天井面での電界強度(E_{ceil})との比を計算で求めた結果を示している。

3. 実験結果

今回実験を行った条件の範囲では、一般の照明のもとで肉眼で火花が確認できる程度に明るい放電は見られなかった。しかし条件によっては、明瞭な破裂音と同心円状に拡がる波紋を伴う形態の放電が観察された。この種

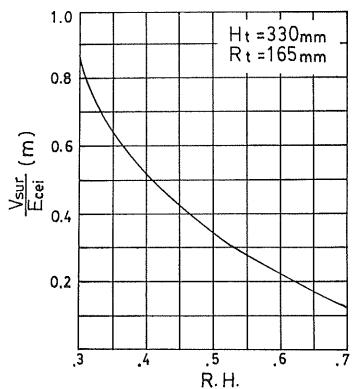


図3 天井面中央での電界強度 (E_{cei}) と油面電位 (V_{sur}) の換算係数

Fig. 3 Conversion coefficient between electrostatic field-strength at tank ceiling (E_{cei}) and surface voltage (V_{sur}).

の放電が発生する場合には、実験室を暗くすることにより、電極先端に微かな火花様の光が認められた。このことから、破裂音を伴った放電では、なんらかの火花放電が生じていると判断して良いものと思われる。

また、油面に電極が接近したときに油面が電極に向かって吸い上げられ、油面が周期的に上下に振動する現象が見られた。条件によっては油が断続的に電極にまで達し電極が油で濡れ、電極下端に円錐状に油が付着することもあった。さらに著しい場合には、電極が完全に油で包まれてしまうという現象も見られた。破裂音を伴う形態の放電は、電極が完全に油で包まれてしまう状況では観察されず、油面が周期的に電極に吸い寄せられ上下に振動をする状況のもとで観察された。

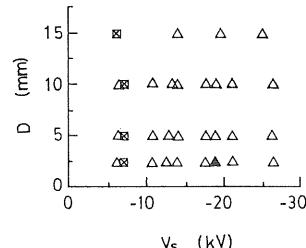
観察された現象を分類すると、

- ① 油面に特になんの変化も見られない状況。
- ② 電極から油面に向かってコロナ風が吹きつけているように、円形の範囲の油面が波立つ状況。
- ③ 油が電極に吸い寄せられ断続的に電極に達する等、油面が不安定となる状況。
- ④ 油が電極を包みこんでしまう状況。
- ⑤ 破裂音とともに同心円上の波紋が広がる放電が発生する状況。

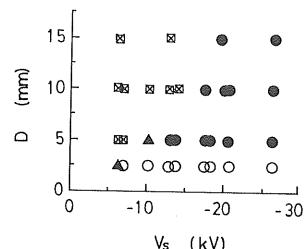
にわけることができた。

図4は電極の種類ごとに、油面電位及び電極-油面間距離と観察された放電の状況をまとめたものである。図中の□、△、▲、○、●の各記号は、上述の①～⑤の各状況に対応している。

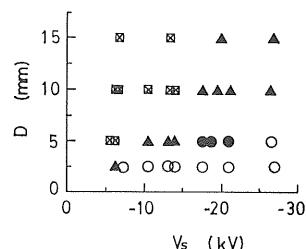
図4から分かるように、先端が円錐形に尖った電極では、破裂音を伴う放電が観察されなかった。また、破裂音を伴う放電の発生が観察された直径 10 mm の球電極



(a) Pointed electrode.



(b) Spherical electrode.
(Diameter = 5 mm)



(c) Spherical electrode.
(Diameter = 10 mm)

図4 各電極径、油面電位等における放電等の状況
(V_s : 油面電位, D : 油面-電極間距離)

Fig. 4 Observed phenomena for each experimental conditions.

(V_s : Surface-voltages, D : Distances between electrode and surface)

- : stable oil surface
- △ : ripples on the oil surface
- ▲ : intermittent swelling of oil surface
- : oil soaking electrode
- : discharge with crackling

と 5 mm の球電極との比較では、直径の大きな 10 mm 径の電極の方がより高い油面電位にならないと破裂音を伴う放電が発生しなかった。

今回実験に使用した3種類の電極を比較した場合、油面-電極間距離、油面電位のいずれについても、電極径 5 mm の球電極が最も広い条件範囲で破裂音を伴う放電が観察された。また、油が電極に吸い寄せられるという、油面の変形・動搖については、電極径 10 mm の球

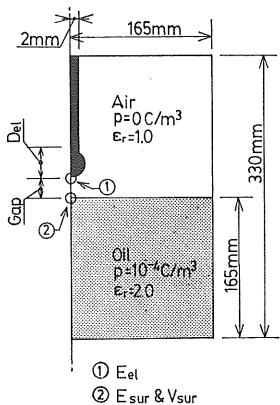


図5 静電場解析を行った計算条件

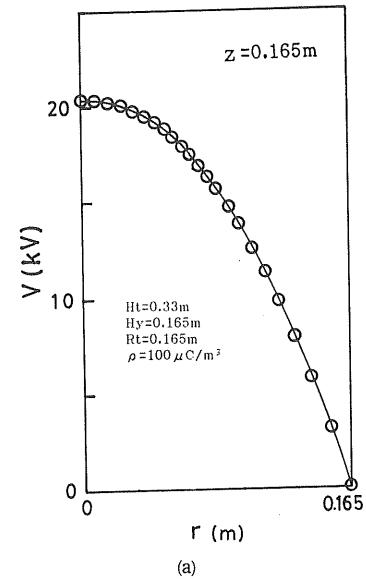
Fig. 5 Outline of conditions for calculation.

電極が最も広い条件範囲で観察され、円錐形の先端の尖った電極では、そうした油面の変形・動揺はほとんど観察されなかった。

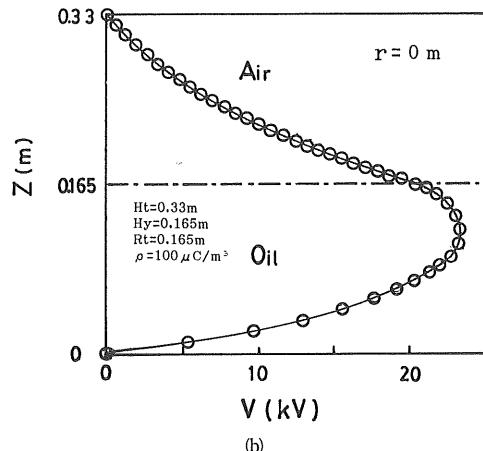
4. 結果に対する考察

電極径が小さい場合には、電極下端での電界強度が他の部分に比べて大きくなり、油面-電極間の電界強度の空間的な不均一さが増大することが予想される。また、電極の接近状況や形状によって油面電位が変動することも予測される。そこで、これらの点を検証し、観察された実験結果と静電場との関係を検討するために、電極が油面に接近した条件での静電場を有限差分法^{13,14)}により求めた。

境界条件等の計算を実施した条件を図5に示す。電荷は油中に $100 \mu\text{C}/\text{m}^3$ の密度で一様に分布していること、油面の変形がないということを計算にあたって仮定し、空気及び油の比誘電率はそれぞれ1及び2とした。図に示す領域を (71×181) のメッシュに分割した。電極近傍での計算精度を高めるためメッシュの大きさは、電極近傍の領域で細かくし、その外部では等比数列的に大きくなるような不均等メッシュとした。最小のメッシュサイズは $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ であった。図6は、内部に電極が存在しない条件のもとで、不均等メッシュによる差分法での各位置の電位の計算結果と、解析解による計算結果を比較したもので、精度良く計算されているのが分かる。差分法による静電場の計算においては、曲率半径の小さな尖端の近傍で計算精度を得ることが困難になり、特に、電界強度の計算において困難さが高まることが知られている^{13,14)}。そのため、今回の実験と類似の条件での静電場計算に関して、電極近傍での計算精度を高めるための工夫を行った計算も行われており¹⁵⁾、メッシュの



(a)



(b)

図6 タンク内各部の電位の差分法による計算と解析解による計算との結果の比較

Fig. 6 Comparison between numerical result and analytical one.

○: numerically obtained result
—: analytically obtained result

大きさに比べて計算精度を高められることが報告されている。今回は、こうした手法を採用するかわりに、メッシュの切り方などから電界強度の計算に困難があると予測される、円錐形に先端の尖った電極については計算を行わず、先端の形状が球形の場合についてのみ計算した。計算を行った電極直径 (D_{el}) は、5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm、油面-電極間の距離 (Gap) は、2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, 10 mm であった。

図7は、計算で求めた電極周辺の静電場の様子を等電

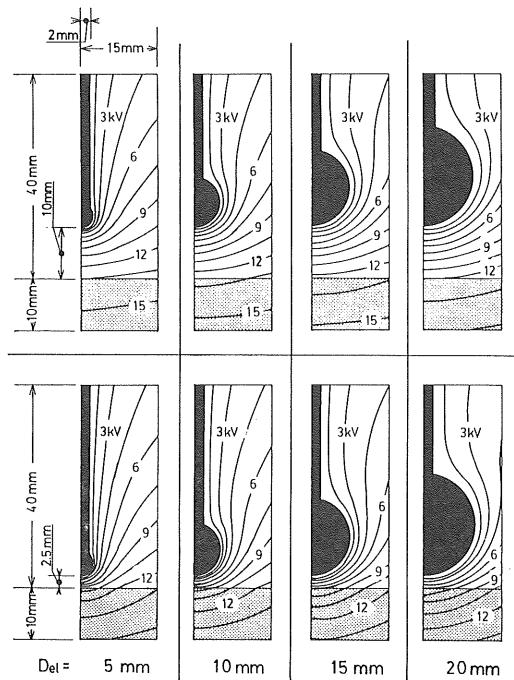


図 7 球電極近傍の静电場

Fig. 7 Electrostatic potential distribution around electrode.

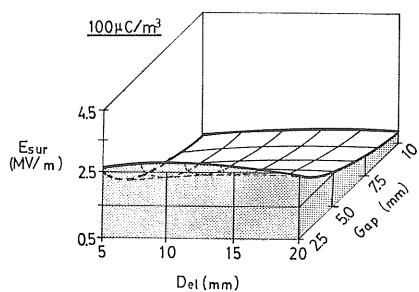
図 8 電極直下の油面での電界強度 (E_{surf}) と電極径等との関係

Fig. 8 Electrostatic field-strength on oil surface just bellow the electrode.

位線で示したものである。図中、等電位線上に記載した数字はその位置での電位(単位 kV)である。この図から、電極直径が大きなほど油面と電極との間の電界強度が一様となる、電極直径が小さくなると電極近傍で電界強度は強くなるが油面付近での電界強度は逆に弱くなるなどの傾向が読み取れる。また、油面-電極間の距離が小さくなるに従って、この間の空間の電界強度が強まるが、一方では油面電位が低下していくこともこの図から読み取れる。

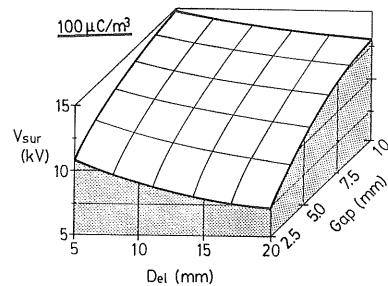
図 9 電極直下の油面電位 (V_{surf}) と電極径等との関係

Fig. 9 Electrostatic potential on oil surface just bellow the electrode.

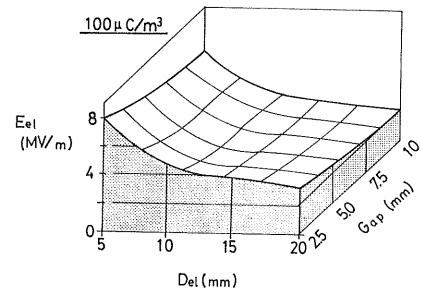
図 10 電極下端での電界強度 (E_{el}) と電極径等との関係

Fig. 10 Electrostatic field-strength at bottom of the electrode.

図 8 は、電極直下の油面上での電界強度の計算結果を、電極及び油面-電極間距離との関係で整理したものである。油面上での電界強度と油面-電極間距離との関係を見ると、どの電極径の場合でも距離が小さくなるに従って単調に電界強度が増加する傾向がみられる。しかし、電極径と電界強度との関係には、油面上での電界強度は電極径が 10 mm 前後の時に最大値をとるという特徴が現れる。

図 9 は、電極直下の油面上での電位の計算結果と電極径及び油面-電極間距離との関係を示したものである。電極が油面に近づくほど油面の電位が低下するが、それだけではなく、電極径の増大によっても油面電位が低下することが分かる。油面-電極間の距離が小さく、この間の電界が均一に近づいた場合には、電極直下の油面上での電界強度は、油面電位を油面-電極間距離で割った値に近づくことを考えると、電極径の増大に伴う油面電位低下は油面での電界強度を低下させることになる。このことが、図 8において、ある程度以上大きな電極径について油面上での電界強度が低下する結果となった原因であると考えられる。

図 10 は、電極下端での電界強度の計算結果を同じく

電極径及び油面-電極間距離で整理したものである。電極径が小さくなるにつれて、また、電極が油面に接近するにつれて、電極下端での電界強度の値が増加する傾向を示す。図にみられるように、この電界強度の増加傾向に与える影響は、油面-電極間の距離よりは電極径の方がはるかに顕著である。従って、電極先端が尖っている場合にはそうでない場合に比べ電極の下端での電界強度は急激に高くなる。

図 8 から図 10 までを比較すると、電極直下の油面上での電界強度、油面電位、電極下端での電界強度の中で最も電極径の影響を強く受けるのは、電極下端での電界強度であることが分かる。

図 4 から、電極径 5 mm の電極について 5 mm, 10 mm, 15 mm の各油面-電極間距離で、破裂音を伴う放電が発生する最低の油面電位を読みとると、13 kV, 18 kV, 20 kV となる。この油面電位の値と図 6 の計算結果から、その時の油中電荷密度の値を求めることができ、さらに図 10 から、それぞれの条件での電極下端の電界強度に換算することができる。すなわち、各条件での電荷密度は $65 \mu\text{C}/\text{m}^3$, $90 \mu\text{C}/\text{m}^3$, $100 \mu\text{C}/\text{m}^3$ 、またそのときの電極下端電界強度は、 $5.4 \text{ MV}/\text{m}$, $6.4 \text{ MV}/\text{m}$, $6.5 \text{ MV}/\text{m}$ となる。電極径 10 mm の場合には油面-電極間距離が 5 mm の場合のみではあるが、同様の計算が可能であり、破裂音を伴う放電が発生するときの電極下端の電界強度は $3.6 \text{ MV}/\text{m}$ となる。電極径が 10 mm のときの破裂音を伴う放電発生時の電極下端電界強度の値は空気中での絶縁破壊強度にきわめて近い値となつていて、一方で、電極径が 5 mm のときには、破裂音を伴う放電が発生するときの値は約 2 倍の $6 \text{ MV}/\text{m}$ となっている。

各条件について、油面が動搖を始める油面電位における電極直下の油面上での電界強度を、同様の方法で求めることができる。直径 5 mm の電極については 5 mm, 10 mm, 15 mm の各油面-電極間距離についてこの値はそれぞれ $0.75 \text{ MV}/\text{m}$, $0.64 \text{ MV}/\text{m}$, $0.5 \text{ MV}/\text{m}$ となる。直径 10 mm の電極の場合には、それぞれ $0.85 \text{ MV}/\text{m}$, $0.67 \text{ MV}/\text{m}$, $0.57 \text{ MV}/\text{m}$ の電界強度で油面の動搖が始まったことになる。油面-電極間距離が 5 mm と小さな場合には、油面の微小な動搖によっても、静電場が大きく影響を受けることが考えられることから、この場合を除くと、いずれの電極径の場合にも $0.5 \sim 0.7 \text{ MV}/\text{m}$ の電界強度になったときに油面の動搖が始まると考えられる。

以上の考察から、静電場の計算結果と実験で観察された現象との間に次のような対応を付けた。

油面の動搖は油面上での電界強度が大きなほど、発生

しやすい現象であると考えられる。従って、同一の電荷密度に対して、電極直下の油面での電界強度が大きくなる電極径で最も油面が動搖する現象が観察されやすい。一方、計算によれば、電極径が 10 mm 前後の時に油面での電界強度が最も強くなる。このことは、3 種類の電極の中で直径が 10 mm の球電極を使用した実験で最も広い条件の範囲で油面の動搖が観察されたことと一致する。

放電は最大電界強度が大きなほど発生しやすく、電界強度が空間的に均一であるほど火花放電となりやすい。逆に不均一であるほど部分的な絶縁破壊となりコロナ放電となりやすい。静電場の計算結果では、空間内で最高の電界強度である電極下端の電界強度は、電極径が大きくなるに従って低下する。このことは、直径 5 mm の電極の方が 10 mm の電極よりも広い条件範囲で破裂音を伴う放電が観察されたことと対応する。先端が円錐形に尖った電極に対しては静電場計算を行っていないが、小さな電極径での結果からの類推では、実験を行った 3 種類の電極のうちでは最も電極下端の電界強度が強く、また、電界強度の不均一さも大きく、一方油面での電界強度は小さいと予測される。このことは、円錐形の電極を使用した場合に破裂音を伴う放電が観察されず、また、油面の変形も見られなかったことに対応する。

5. まとめ

帶電油面からの放電による着火の可能性について検討するための研究の第一歩として、電極形状・油面電位等条件を変化させて発生する放電の特徴を観察した。実験を行った油面電位の範囲は、 -5 kV から -25 kV であり、電極は先端が円錐形、直径 5 mm の球、直径 10 mm の球の 3 種類の接地球電極であった。帶電油面への接地球電極の接近に伴って観察された現象は、油面が波立つ、電極に向かって油が吸い寄せられる、電極を油が包み込んでしまう、間欠的に破裂音を伴う放電が発生するなど、何も変化がない場合を含めて大きく 5 種類に分類することができた。破裂音を伴う放電は、周囲を暗くした状態で観察すると、音とともに光芒が見受けられた。

破裂音を伴う放電及び油が吸い寄せられることによる油面の変形は球形電極でのみ観察され、先端が尖った電極では見られなかった。破裂音を伴う放電の発生した油面電位、油面-電極間距離等の条件の範囲は、直径 5 mm の球電極の場合が最も広く、一方油が電極に吸い寄せられる現象は直径 10 mm の電極で最も広い条件の範囲で観察された。さらに、これらの実験結果と比較し、現象の機構を考察する目的で、実験の幾何学的条件での静電場を差分法による数値計算により求めた。この計算によ

り、電極直下の油面での電界強度の値は、電極径が小さな場合には電界の不均一さのため、大きな場合には油面の電位の低下のため、いずれも値が小さくなり、計算したタンクの大きさ、油面高さに対しては電極直径が 10 mm 近傍で最大値を示す傾向が得られた。また、電極の下端の電界強度及び電界の不均一さのいずれについても、電極径の減少に伴い急激に増大することも示された。

数値計算の結果と実験結果との比較から、油面の変形の発生は油面での電界強度の大小と対応付けることができ、油面の変形が観察される場合の電界強度は 0.5~0.7 MV/m であったことが示された。同様に、破裂音を伴う放電の発生については、油面-電極間の電界の均一さ及び電極下端の電界強度の大小と対応付けられることが分かり、破裂音を伴う放電が観察された場合の電界強度は電極径 5 mm の場合には約 6 MV/m、電極径 10 mm の場合には約 3.6 MV/m であったことが示された。

参考文献

- 1) 加藤 勇: 安全工学, 3 (1964) 111
- 2) 川崎正士: 静電気学会誌, 7 (1983) 415
- 3) 萩原隆一: 静電気学会誌, 12 (1988) 31
- 4) 松原美之: 静電気学会誌, 12 (1988) 292
- 5) N. Gibson and F.C. Lloyd: Br. J. Appl. Phys., 16 (1965) 1619
- 6) I.G. Haig and A.W. Bright: *Proceeding of 3rd International Congress on Static Electricity*, p. 139, Grenoble (1977)
- 7) J.K. Johnson: J. Electrostatics, 4 (1977) 53
- 8) K. Asano and H. Krämer: J. Electrostatics, 6 (1979) 361
- 9) 児玉 勉, 田畠泰幸: 静電気学会講演論文集, p. 379 静電気学会 (1986)
- 10) 有本匡男, 上田 実: 電気学会論文誌A, 102 (1982) 651
- 11) 美寺久光, 鳥取孝太郎: 電気学会雑誌, 89 (1969) 1970
- 12) K. Asano: Proc. IEE, 124 (1977) 1277
- 13) 河野照哉, 宅間 葦: 数値電界計算法, コロナ社 (1980)
- 14) 松原美之: 消研報, 39 (1985) 31
- 15) 浅野和俊, H. Krämer, G. Schön: 静電気学会誌, 1 (1977) 114