

帯電液体と接地導体間の着火性放電とその抑制*

児玉 勉**, 田畠 泰幸**

Suppression of Incendiary Electrostatic Discharges between Charged Liquid and Grounded Conductor*

by Tsutomu KODAMA** and Yasuyuki TABATA**

Abstract: In a flammable liquid storage tank, equipment that protrude from the top mounting wall such as cleaning nozzles or high level probes may encourage the initiation of incendiary discharge to the approaching liquid surface and cause explosion or fire if the liquid being loaded is highly insulating and electrified. To prevent such a dangerous situation from happening, the authors have developed a new type of discharge suppression device consisting a PTFE (Teflon) disc and a metallic rod which can be attached to the equipment. The device was found to work as well as using an earthed wire linking both the equipment and the bottom of the tank. Experiments on the device were conducted using a small-scale plastic tank containing kerosene charged by using a DC corona ionizer. In the experiments charge transfer, peak value of discharge current and electrode distance were measured whenever a spike discharge occurs between the kerosene and a metallic electrode which was initially brought into the kerosene and then pulled vertically up at a constant speed. The surface potential was controlled in the range 10 to 60 kV. For the electrode, either sphere, cone or rod tip-shape electrodes, a metallic column with a wire attached and a high level probe-tip with the safety device attached were used. Discharge incendiarity was evaluated by analysing both charge transfer and peak current.

The experimental results were as follows:

- (1) In the case of using the sphere, cone and rod electrodes the incendiary discharges generated in a surface potential range between 30 – 40 kV corresponded to a charge density range between 12 – 16 $\mu\text{C}/\text{m}^3$, respectively. The positions of the electrode tips were just above the kerosene surface.
- (2) The safety devices consisting Teflon disks of 60 – 80 mm in diameter and 20 – 30 mm in thickness and metallic rods of 16 – 20 mm in diameter and 35 – 55 mm in length suppressed incendiary discharges up to a surface potential of 50 kV which corresponded to a charge density of 20 $\mu\text{C}/\text{m}^3$.

Keywords; Static electricity, Electrostatic discharge, Flammable liquid, Electrostatic hazard, Discharge suppression, Incendiary discharge

1. 緒 言

石油、有機溶剤など可燃性液体のうち絶縁性の高いものを貯蔵したり取り扱うタンクでは、配管輸送や攪拌

時の流動によって液体に静電気が発生し帯電する。高速での取り扱いなどによって可燃性液体の帯電量が大きくなり、かつ、液面近くにタンク支柱や攪拌軸のような接地された金属物体があると、液体表面と金属物体間で静電気放電が発生し、その放電火花が可燃性液体蒸気の点火源となり、爆発・火災を誘発する危険性がある。静電気の放電が可燃性液体の蒸気と空気から

*平成7年10月3日、第19回静電気学会全国大会で一部発表した。

**物理工学安全研究部 Physical Engineering Safety Research Division

なる爆発性混合気の点火源となりうるか否かは、静電気放電の強さが、着火エネルギーが最小となる濃度条件の爆発性混合気を点火させるに十分か否かによって判断される。この点火源となりうる放電を着火性放電と呼んでいる。

帯電液体と接地導体間の放電の着火性に関する研究は、実験が困難なこともあり多くは行われておらず、着火性放電の発生限界についてもいくつかの提案があるものの定説とされるものはない¹⁾。なお、過去の実験はほとんど接地導体として球形の金属導体を用い、これらが液面より上部にある場合について行われており、接地導体球の直径及び液面電位と放電特性の関係が測定され^{2)~4)}、また着火性放電が一部実験的に検証されている^{5)~8)}。

実際に液面近くにある接地導体としては、タンクの支柱や攪拌軸のように気相空間から垂直に液中に達する棒状のもの、あるいは高液面警報装置のようにタンク天井から下方に突出して設けられた複雑な形状の突起物などがある。前者の棒状導体については、静電気放電の発生条件が電極表面の電界強度に依存することから、棒状導体の直径が着火性放電の発生限界に影響することが予想され、これについて実験的に検討する必要がある。一方、後者の突起物については、液面上昇などにより突起物と液面間の距離が広範囲に変化するので、液体の帯電量が大きい場合、突起物の大きさや形状を変えることによって、着火性放電を防止することは困難であると予想され、これについては突起物の先端に着火性放電の抑制装置を取り付ける方法などについて検討する必要がある。

そこで、本研究では、可燃性液体のタンク内における静電気による爆発・火災を防止するため、帯電液体と各種接地導体間の着火性放電の発生条件の定量化及び着火性放電の抑制方法の開発を目的として、モデル装置による実験を行った。なお、後者については、具体的には突起物の先端に PTFE(テフロン) 製円板を取り付ける放電抑制方法の効果などについて検討した。

2. 着火性放電の評価

帯電した金属導体から接地された金属導体へ静電気放電が起こる場合は、一般に火花放電となり、放電エネルギーが可燃性物質の最小着火エネルギー以上であると着火性放電となるが、帯電した絶縁性物体からの放電は、一般にコロナ放電又はブラシ放電となり、この場合の着火性放電の発生限界は単純ではない。帯電量が大きいプラスチックフィルムから発生するブラシ放電の着火性については、いくつかの研究報告^{9)~11)}があり、これらによると、ブラシ放電の放電エネルギー

を次式のように近似して、着火性との関連を検討している。

$$W_d \doteq \frac{1}{2} Q_t V_s \quad (1)$$

ここで、 W_d は放電エネルギー、 Q_t は放電電荷、 V_s は帯電物体の表面電位である。ブラシ放電では、放電エネルギーの空間的及び時間的な密度が金属導体間で起こる火花放電に比べて低いので、(1)式から求めた放電エネルギーが最小着火エネルギーに達しても着火は起こらず、通常最小着火エネルギーの10~20倍に達したときに着火が起こる結果となっている。

帯電した絶縁性液体表面からの放電の場合も、着火性放電の放電形態はブラシ放電に近いので、液面電位及び放電電荷を(1)式に当てはめて着火性放電の放電エネルギーが算出されている^{5)~8)}。これらの結果の例を挙げると、小型装置による実験では液面電位が25 kV、放電電荷が250 nCのときに着火性放電の限界条件となっている⁵⁾。(1)式から算出した放電エネルギーは3.1 mJであり、これは炭化水素系可燃性液体の最小着火エネルギーを0.2 mJとすると、その16倍である。一方、タンクローリへの燃料の積み込みを考慮した実規模実験では、液面電位が58 kV、放電電荷が約100 nC、すなわち放電エネルギーが2.9 mJのとき着火性放電の限界条件となっている⁷⁾。小規模実験と大規模実験による着火性放電の発生限界を比較すると、液面電位及び放電電荷は異なるが、放電エネルギーはほぼ等しい結果となっている。放電電荷が異なった原因としては、放電電極近傍における電界分布の違い、これに関連して液面の静電容量の違いが挙げられ、結論として、実規模装置における着火性放電の発生限界は、液面電位が60 kV、放電電荷が80 nCと提案されている¹⁾。そのときの放電エネルギーは2.4 mJである。

したがって、本研究では、着火性放電の発生限界として、(1)式で算出された放電エネルギーが、可燃性液体蒸気の最小着火エネルギーの12倍である2.4 mJを採用した。これを(1)式から放電電荷に換算すると、液面電位が30 kV、40 kV、50 kV及び60 kVでは、それぞれ160 nC、120 nC、96 nC及び80 nCである。ただし、電極の直径又は極率半径が小さい場合は、コロナ放電となることがあり、この場合は放電電荷が大きくても着火性放電にはならない。コロナ放電であるかどうかは電流波形から判別されるので、ここでは電流波形から求めた放電電流ピーク値が1A以上であることを着火性放電のもう一つの条件とした。

3. 実験方法

実験装置の概要は Fig. 1 に示すとおりであり、容量

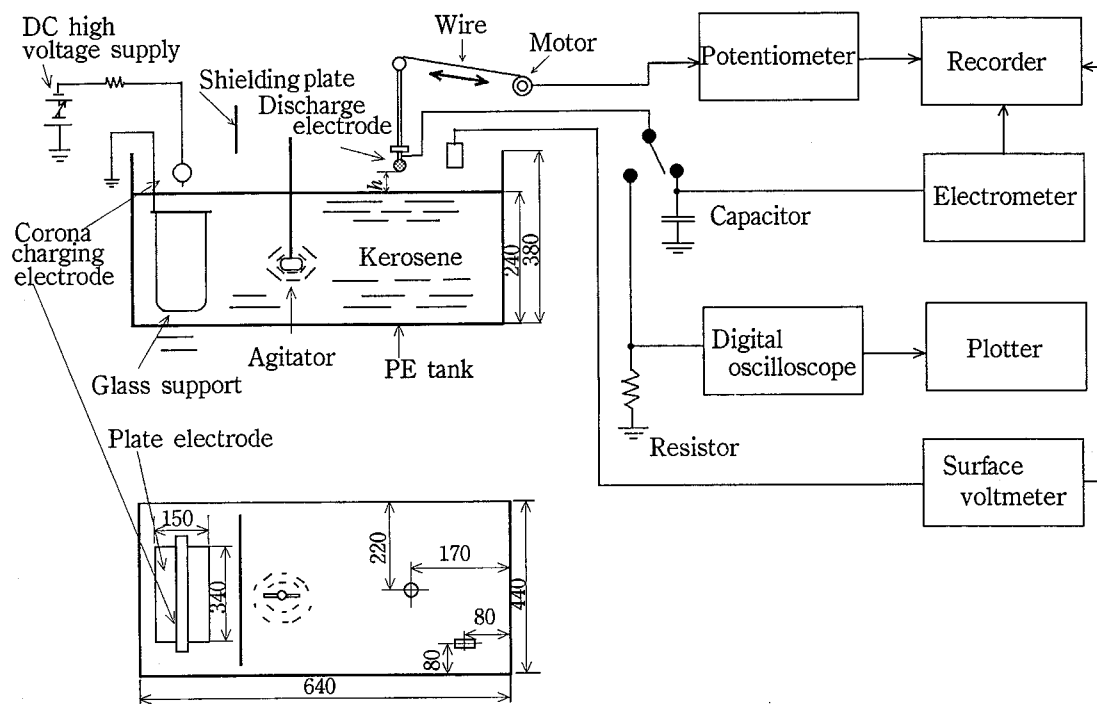


Fig. 1 Experimental setup.
実験装置の概要

約 100ℓの角形ポリエチレン製タンク (W640 mm×D440 mm×H380 mm) に試験液体である灯油を約 70ℓ入れ、電荷分布をできるだけ均一にするため攪拌させながら、コロナ荷電装置の印加電圧を調整して液体の帯電量を可変した。ここで、コロナ荷電装置は、針電極が一行に並んだバー型電極とこれに対向して液中に水平に置かれた接地金属平板から構成されるもので、針電極に負極性の直流高電圧を印加してコロナ放電を起こさせ、生成した負極性イオンを液体に導いてこれを負極性に帯電させた。

最初に、放電電極となる試験電極を液面から 30 cm 以上遠ざけた状態で液面電位が所定の値を維持するようにした後、試験電極を一定速度 (約 1mm/s) で液面上約 20 cm から液面下約 15 cm まで下降させ、その後再び上昇させて、この間のパルス状の放電発生時の電極距離 (電極先端と液面との距離をいう。) と、放電 1 回当たりの放電電荷又は放電電流ピーク値 (以下、ピーク電流と記す。) を測定した。液面電位は、静電気測定器 (春日電機, KS2-588 型) を使用して測定した。電極距離は、放電電極を上下させるモーターと連動するポテンショメータの記録結果から読み取った。放電電荷 (Q_t) は、試験電極とアース間に接続したコンデンサの端子電圧をエレクトロメータ (ケースレイ, 614 型) で測定し、放電発生時のステップ状の電圧変化 (V_c) を記録結果から読み取り、 $Q_t = C \cdot V_c$ により求めた。ただし、 C はコンデンサの静電容量 (0.1μF) である。ピー

ク電流 (I_p) は、コンデンサの代わりに試験電極とアース間に接続した無誘導抵抗の端子電圧波形をデジタルオシロスコープ (テクトロニクス, 2430A 型) で観測し、同一電極距離での数個の放電波形のうちピーク値がほぼ最大のものから $I_p = V_w/R$ により求めた。ただし、 R は無誘導抵抗の抵抗値 (50Ω), V_w は放電パルスのピーク電圧である。

試験電極はいずれも金属 (鋼又はアルミニウム) 製であり、Fig. 2 に示すような①球電極、②円錐電極、③棒電極、④ワイヤー付き電極、及び Fig. 3 に示すような⑤放電抑制装置付き電極を使用した。球電極は Table 1 に寸法を示す 6 種類である。円錐電極は円錐角 θ が 60 度、90 度及び 180 度 (円柱) の 3 種類である。棒電極は Fig. 2 に示す直径が 5 mm, 10 mm 及び 13 mm の 3 種類のほかに、Fig. 3 に示す直径 8 mm の高液面計プローブ、並びに直径 20 mm, 長さ 55 mm 及び直径 16 mm, 長さ 55 mm の 2 種類の円柱を用いた。ワイヤー付き電極はワイヤーを円柱電極の円周上に溶接したものである。放電抑制装置付き電極は、鋼製固定具を用いて高液面計プローブ電極に放電抑制装置を取り付けたものである。放電抑制装置は Table 2 に寸法を示す 6 種類の金属円柱と 4 種類のテフロンディスクを組み合わせたものである。なお、Fig. 2 及び Fig. 3 中の $h = 0$ の線は、この位置に液面があるときに電極距離が 0 であることを示す。

液体の電荷密度は、Fig. 4 に測定装置の概要を示す

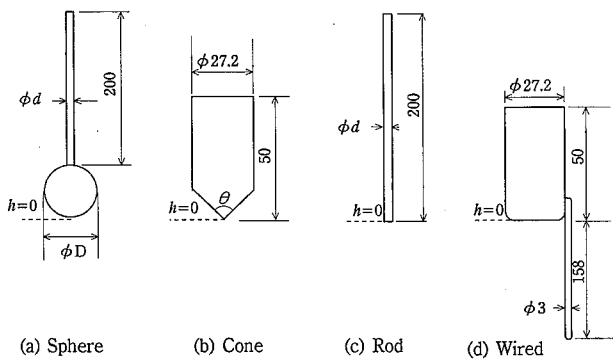


Fig. 2 Shape of discharge electrodes; h = electrode distance: distance between electrode tip and kerosene surface.
各種放電電極の形状

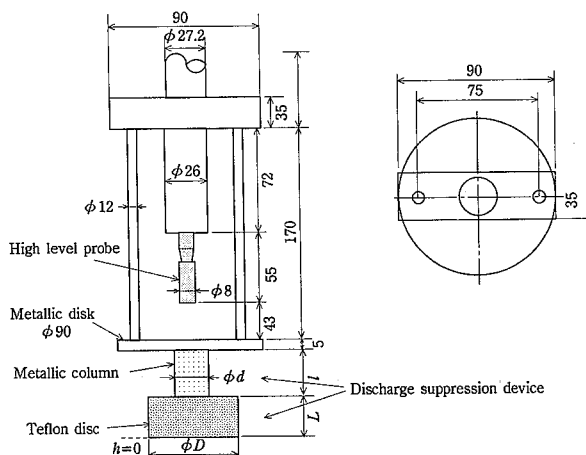


Fig. 3 High level probe electrode with discharge suppression device; h = electrode distance: distance between Teflon disc tip and kerosene surface.
放電抑制装置付き高液面計プローブ電極

ように、タンク内の液体の一部を電氣的にシールドした吸引パイプ（二重パイプの内部パイプであり、外部パイプを接地した。）により真空吸引し、ファラデーペール内のメスシリンダーに導き、吸引量と電荷量から算出した。ここで、電荷量 (Q) は、ファラデーペール内部導体と接地間に接続されたコンデンサの電圧変化 (V) から $Q = CV$ により算出した。ただし、C はコンデンサの静電容量 (52 nF) である。なお、吸引パイプは、ファラデーペールの内部導体と電氣的に接続することによりファラデーペールの一部とみなした。すなわち、測定値は吸引パイプの吸引口での液体の電荷密度を表す。

試験液体の導電率は、帯電していない状態の実験タンク中の液体を液体用電極に採取して測定した。実験は大別して2期に分けて行った。第1期実験は一般空調の実験室で実施したため、液面電位は最大 30 kV で

Table 1 Size of sphere electrodes.
球電極の寸法

Type	D (mm)	d (mm)
Sphere- 5	5	2.0
Sphere- 6	6	1.0
Sphere-10	10	1.6
Sphere-16	16	3.0
Sphere-21	21	2.0
Sphere-30	30	3.0

Refer to Fig.2(a).

Table 2 Size of discharge suppression devices.
放電抑制装置の寸法

Type	Diameter (mm)	Length (mm)
Metallic column-A	16	35
Metallic column-B	16	45
Metallic column-C	16	55
Metallic column-D	20	35
Metallic column-E	20	45
Metallic column-F	20	55
Teflon disc-1	60	20
Teflon disc-2	60	30
Teflon disc-3	80	20
Teflon disc-4	80	30

Refer to Fig.3.

あった。試験電極は主として球電極、円錐電極及びワイヤー付き電極を用い、着火性放電の発生特性を調べた。第1期実験期間中の実験室内温度及び相対湿度の変動範囲はそれぞれ $15 \pm 3^\circ\text{C}$ (平均値 \pm 標準偏差, 以下同じ。) 及び $40 \pm 8\%$ で、液温の変動範囲は $13 \pm 1^\circ\text{C}$ であった。一方、第2期実験は試験液体を取り替えて除湿装置のある実験室で実施し、液面電位は 40 kV から 60 kV まで変化させた。試験電極は主として棒電極、ワイヤー付き電極及び放電抑制装置付き電極を使用して、放電抑制効果について調べた。第2期実験期間中の実験室内温度及び相対湿度の変動範囲はそれぞれ $24 \pm 1^\circ\text{C}$ 及び $34 \pm 7\%$ で、液温の変動範囲は $22 \pm 1^\circ\text{C}$ であった。

4. 実験結果及び考察

4.1 液体の電荷密度

液体の電荷密度の測定結果を Fig. 5 に示す。同図には第1期実験及び第2期実験における測定結果が示されており、両者ともバラツキはあるものの、電荷密度

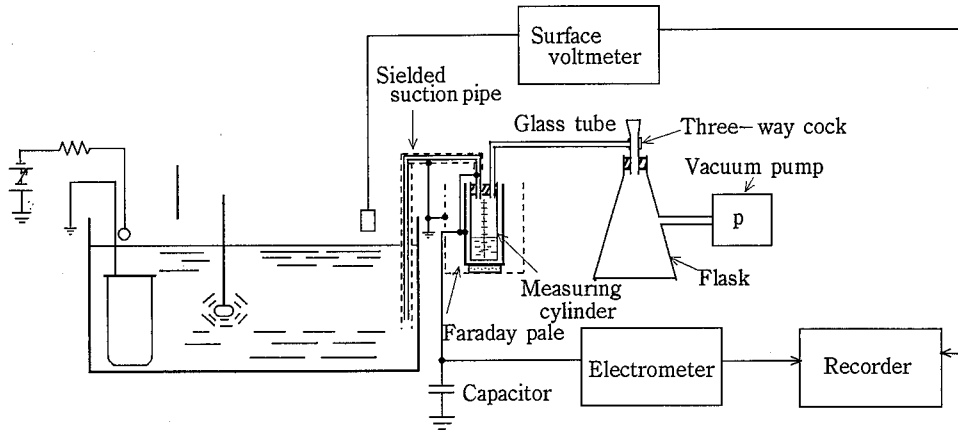


Fig. 4 Measurement equipment for charge density.
電荷密度測定装置の概要

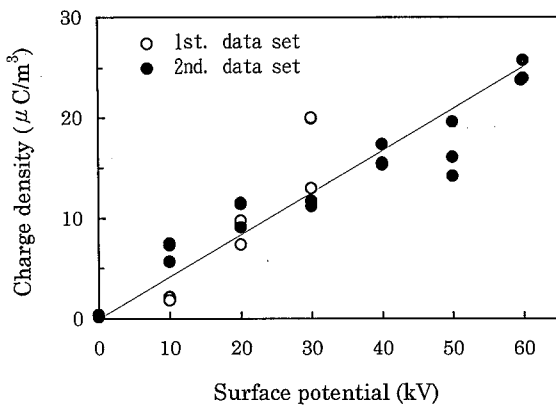


Fig. 5 Relationship between charge density and surface potential of kerosene.
電荷密度と液面電位の関係

が液面電位にほぼ正比例する結果となっている。これより、実験範囲ではタンク内の液体の帯電分布はほぼ一様であったといえる。その主な理由は、液体の導電率が低いことであり、試験液体の導電率の測定結果は、第1期実験終了後が 5.5×10^{-13} S/m、第2期実験後が 1.6×10^{-13} S/m と極めて低いものであった。

なお、液体の帯電極性は負であり、以下の液面電位、放電電荷及びピーク電流は特に断らない限り負極性である。

4.2 球電極の放電特性

液面電位が 30 kV のとき、直径が 5 mm、16 mm 及び 30 mm の球電極をそれぞれ帯電液体に接近させて、パルス状の放電（以下、単に放電と記す。）が発生したときの電極距離と放電電荷及びピーク電流を測定した結果を Fig. 6 に示す。なお、ピーク電流の測定は、放電電荷の測定とは日を変えて、比較的大きなピーク電

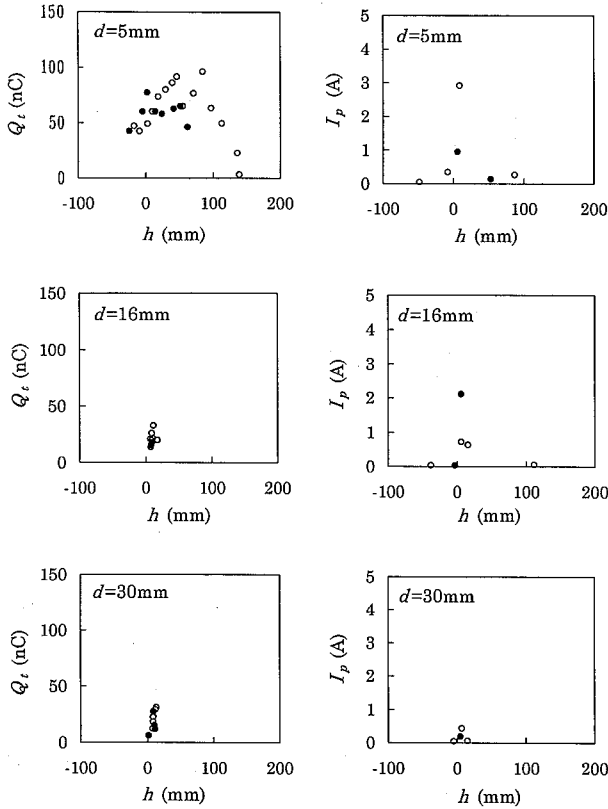
流を観測するために行ったので、測定数は放電電荷に比べて少ない。図中の白丸は、電極を下降させたときの測定結果で、黒丸はその後電極を上昇させたときの測定結果である。電極距離の負符号は電極下端が液面より下にあることを示す。（以下、Fig. 10, Fig. 12, Fig. 15 及び Fig. 16 について同じ。）

Fig. 6 に示すように、直径が 5 mm の球電極では電極下降時には電極距離が $-20 \sim 120$ mm、上昇時には $-20 \sim 70$ mm の広い範囲で放電が発生するが、大きなピーク電流は電極距離が数 mm のときのみ観察される。一方、直径が 16 mm 及び 30 mm の球電極では、電極距離が数 mm 付近でのみ放電が発生する。

球電極直径と放電電荷の最大値及びピーク電流の最大値との関係をそれぞれ Fig. 7 及び Fig. 8 に示す。ここで、直径が 5 及び 6 mm の場合を除いて、放電電荷及びピーク電流の最大値はともに電極下端が液面付近にあるときに発生しており、最大値はともに電極直径が小さいほど大きくなる傾向を示す。すなわち、電極直径が小さいと電極下端付近の電界強度が高くなるので、電気力によって帯電した液体が電極に向かって盛り上がる現象が起き、その力学的不安定性に伴ってほぼ周期的に強い放電が観察される。液面電位が同じであると、電界強度は電極直径に反比例するので、液体の盛り上がり現象及びそれに伴う放電の強さも電極直径にほぼ反比例した傾向を示す。

放電電荷の最大値と液面電位の関係を Fig. 9 に示す。電極での電界強度は液面電位すなわち帯電電荷密度に比例するので、放電電荷は液面電位にほぼ比例して増大する傾向となる。

以下、第2章で検討した着火性放電の発生限界に基づいて、各種放電条件における放電の着火能力について検討する。



(a) Charge transfer (b) Peak current

Fig. 6(a) Relationship between charge transfer (Q_t) and electrode distance (h) of sphere electrode at a surface potential of 30 kV; d = sphere electrode diameter.

球電極の放電電荷と電極距離との関係 (液面電位 = 30 kV)

Fig. 6(b) Relationship between peak current (I_p) and electrode distance (h) of sphere electrode at a surface potential of 30 kV; d = sphere electrode diameter.

球電極のピーク電流と電極距離との関係 (液面電位 = 30 kV)

Key for Figs. 6, 10, 12, 15, 16 = electrode direction in which discharge occurred:

- = approaching kerosene
- = leaving kerosene

上述のように、球電極では球の下端が液面付近にあるときに、液面が電極に向かって盛り上がる現象が起き、これに伴って着火性放電が発生する傾向がある。具体的には、液面電位が 30 kV (電荷密度 $12 \mu\text{C}/\text{m}^3$) でも、球電極の直径が 5~6 mm であると、放電電荷が 80 nC 程度、ピーク電流が 2~4A の着火性放電に近い放電が発生

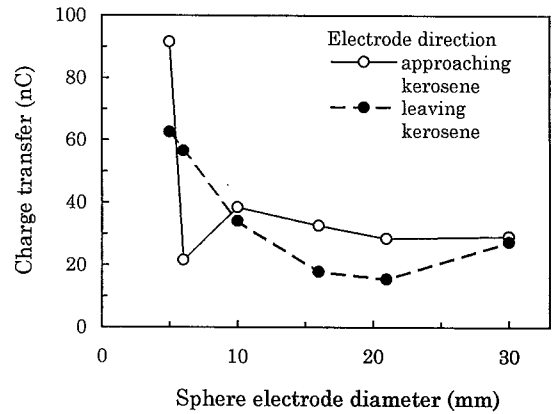


Fig. 7 Relationship between maximum charge transfer and sphere electrode diameter at a surface potential of 30 kV.

放電電荷最大値と球電極直径との関係 (液面電位 = 30 kV)

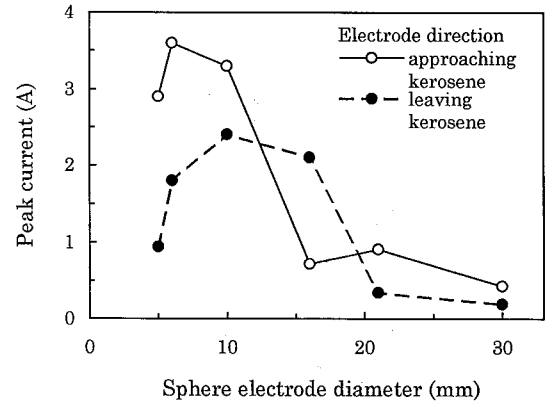


Fig. 8 Relationship between maximum peak current and sphere electrode diameter at a surface potential of 30 kV.

ピーク電流最大値と球電極直径との関係 (液面電位 = 30 kV)

する。球電極の直径が 10~16 mm であると、ピーク電流は 2~3A と大きいものの、放電電荷は 40 nC 以下であるので、着火性放電にはならない。球電極の直径が 20 mm 以上であると、ピーク電流は 1A 以下、放電電荷は 40 nC 以下であるので、これも着火性放電にはならない。液面電位が 20 kV 以下 (電荷密度が $8 \mu\text{C}/\text{m}^3$ 以下) では、球電極の直径が 6 mm でも放電電荷が 50 nC 以下であることから着火性放電は発生しない。一方、液面電位が 40 kV 以上 (電荷密度が $16 \mu\text{C}/\text{m}^3$ 以上) になると、球電極の直径が 10 mm 以上であっても放電電荷が 100 nC に達し、ピーク電流も増大することから、着火性放電が発生する可能性が高い。

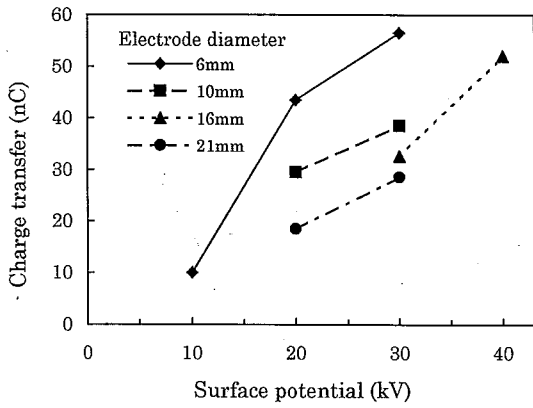


Fig. 9 Relationship between maximum charge transfer and surface potential using sphere electrodes.
球電極の放電電荷最大値と液面電位との関係

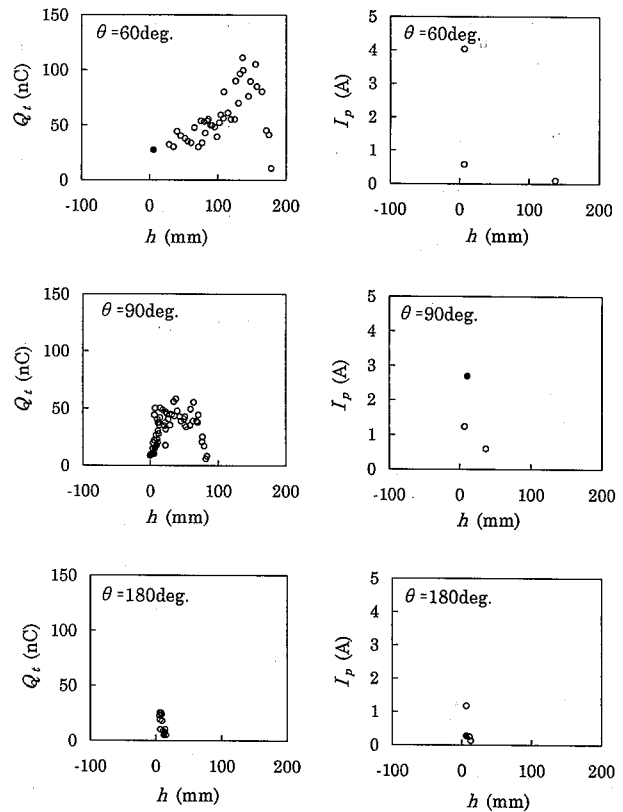
4.3 円錐電極の放電特性

液面電位が 30kV のとき、Fig. 2 に寸法を示したような先端角度が 60 度、90 度及び 180 度 (円柱) の円錐電極について、放電が発生したときの電極距離と放電電荷及びピーク電流を測定した結果を Fig. 10 に示す。

Fig. 10 に示すように、先端角度が 60 度の円錐電極では、電極距離が 0~180 mm の広い範囲で放電が発生するが、大きなピーク電流は電極距離が数 mm のときだけに観察される。この傾向は Fig. 6 に示した直径が 5 mm の球電極の場合と類似している。先端角度が 90 度の円錐電極では、放電の起こる電極距離範囲が 0~80 mm と狭まり、放電が多数発生するが、大きなピーク電流は電極距離が数 mm のときだけ観察される。一方、先端角度が 180 度の円柱電極では、電極距離が数 mm のときのみ放電が発生し、この傾向は直径が 30 mm の球電極と類似している。

放電電荷の最大値と液面電位の関係は Fig. 11 に示すとおりであり、球電極の場合と同様に放電電荷は液面電位に比例して増大する傾向を示す。放電電荷の最大値は電極の先端角度が小さいほど大きくなる。すなわち、先端角度が小さいと、直径の小さな球電極の場合と同様に、電極下端の電界強度が高くなり、液面が電極に向かって盛り上がる現象が起き、その不安定性に伴ってほぼ周期的に強い放電が発生する。電極先端の電界強度は先端角度に反比例するので、放電の強さも先端角度にはほぼ反比例した傾向を示す結果となる。

以上のように円錐電極も、球電極の場合と同様に電極の下端が液面付近にあるときに、液面が電極に向かって盛り上げる現象が起き、これに伴って着火性放電が発生する可能性がある。具体的には、液面電位が 30 kV



(a) Charge transfer (b) Peak current

Fig. 10(a) Relationship between charge transfer (Q_t) and electrode distance (h) of cone electrode at a surface potential of 30 kV; θ = cone angle.

円錐電極の放電電荷と電極距離との関係 (液面電位 = 30 kV)

Fig. 10(b) Relationship between peak current (I_p) and electrode distance (h) of cone electrode at a surface potential of 30 kV; θ = cone angle.

円錐電極のピーク電流と電極距離との関係 (液面電位 = 30 kV)

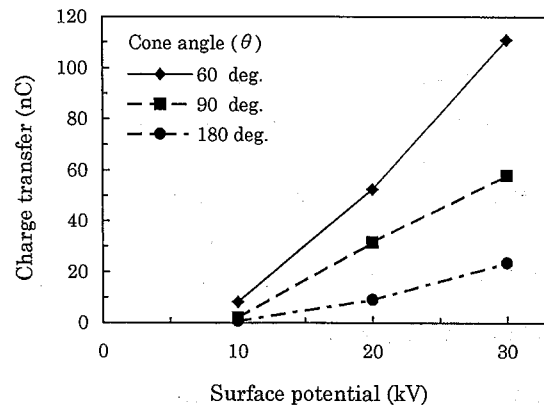
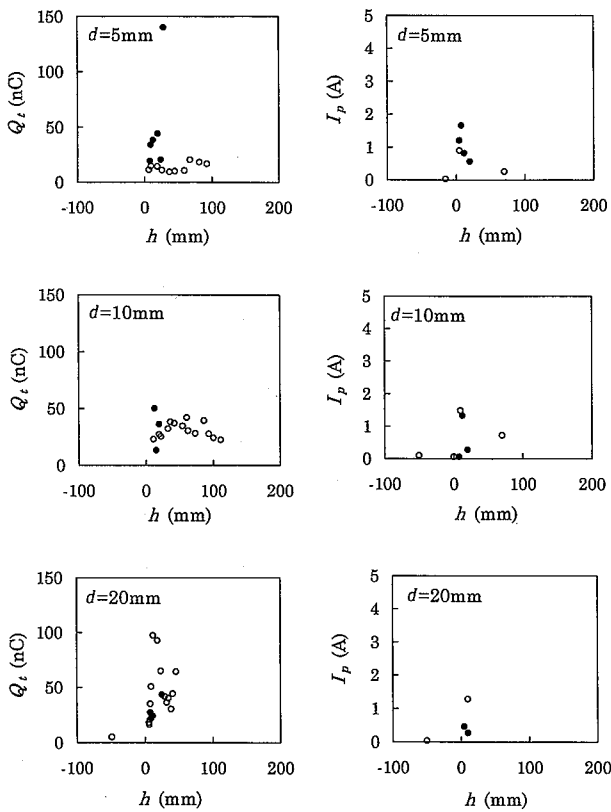


Fig. 11 Relationship between maximum charge transfer and surface potential using cone electrodes.
円錐電極の放電電荷最大値と液面電位との関係



(a) Charge transfer (b) Peak current

Fig. 12(a) Relationship between charge transfer (Q_t) and electrode distance (h) of rod electrode at a surface potential of 40 kV; d = rod electrode diameter.

棒電極の放電電荷と電極距離との関係 (液面電位 = 40 kV)

Fig. 12(b) Relationship between peak current (I_p) and electrode distance (h) of rod electrode at a surface potential of 40 kV; d = rod electrode diameter.

棒電極のピーク電流と電極距離との関係 (液面電位 = 40 kV)

では、円錐電極の先端角度が 60~90 度であると、ピーク電流が 3~4A であるが、放電電荷が 30~50 nC であり、着火性放電には至らない。しかし、液面電位が 30 kV を越えると、着火性放電が発生する可能性がある。なお、先端角度は小さいほど着火性が増大し、反対に先端角度が大きくなると着火性は低下する傾向がある。

4.4 棒電極の放電特性

液面電位が 40 kV のとき、直径が 5 mm, 10 mm 及び 20 mm の各丸形棒電極について、放電が発生したときの電極距離と放電電荷及びピーク電流を測定した結果を Fig. 12 に示す。

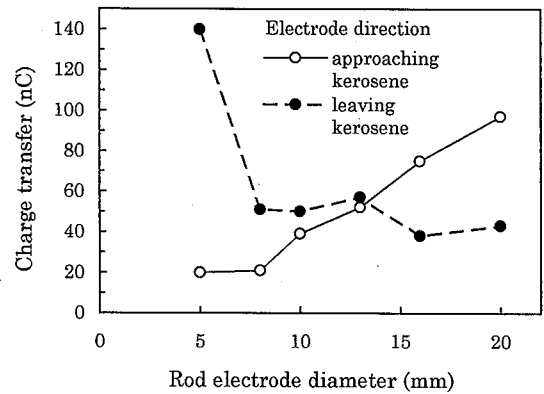


Fig. 13 Relationship between maximum charge transfer and rod electrode diameter at a surface potential of 40 kV.

棒電極の放電電荷最大値と電極直径との関係 (液面電位 = 40 kV)

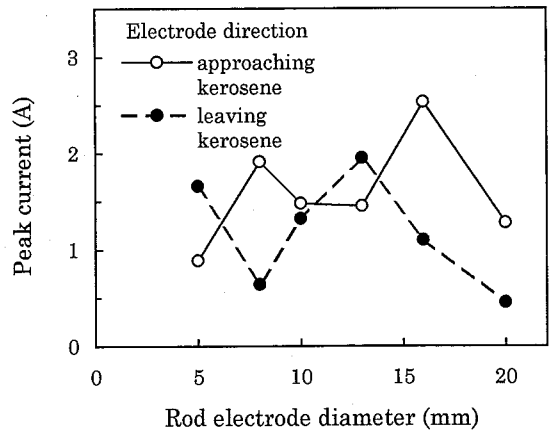


Fig. 14 Relationship between maximum peak current and rod electrode diameter at a surface potential of 40 kV.

棒電極のピーク電流最大値と電極直径との関係 (液面電位 = 40 kV)

Fig. 12 に示すように、直径が 5 mm の棒電極では、電極距離が 0~100 mm の広い範囲で放電が発生するが、放電電荷の大きな放電は電極を上昇させるとき、電極距離が 0~30 mm の範囲で発生し、そのときのピーク電流も大きい。直径が 10 mm の棒電極では、直径が 5 mm の場合とほぼ同様の放電特性を示すが、放電電荷は小さくなる。直径が 20 mm の棒電極では、電極距離が 0~50 mm の範囲で放電が多数発生するが、直径 5 mm 及び 10 mm の場合と異なり、放電電荷の大きな放電は電極が下降するとき発生し、そのときのピーク電流も大きい。

棒電極直径と放電電荷の最大値及びピーク電流の最大値との関係をそれぞれ Fig. 13 及び Fig. 14 に示す。

電極が下降するときの放電電荷は電極直径に比例して増加するが、このときの電極距離は電極直径に反比例する傾向がある。すなわち、電極先端での電界強度は電極直径に反比例するため、電極直径が小さいときは、電極距離が遠い位置から放電電荷の小さな放電を開始し、電極距離が接近しても同様の放電を頻発する。電極直径が大きくなると、電極が液面に近づいたときに放電を開始し、この場合の放電電荷は電極直径に比例した大ききとなる。

電極を上昇させるときの放電電荷は電極下端が液面上 30 mm 以内にあるとき、主として濡れた電極から液が落ちるときに放電電荷が最大となり、この場合の放電電荷は直径が 5 mm の場合を除いて電極直径には依らない。電極直径が 5 mm の場合は、電極下端での電界集中が大きいため、直径の小さな球電極の場合と同様に液面が電極に向かって盛り上がる現象が起き、その不安定性に伴って放電電荷が極めて大きな放電が発生する。

ピーク電流は、電極上昇時及び下降時ともに、電極直径によらず電極下端が液面上 10 mm 以内にある濡れた電極から液滴が落下するとき最大となるので、その大きさも電極直径にほとんど依存しない。

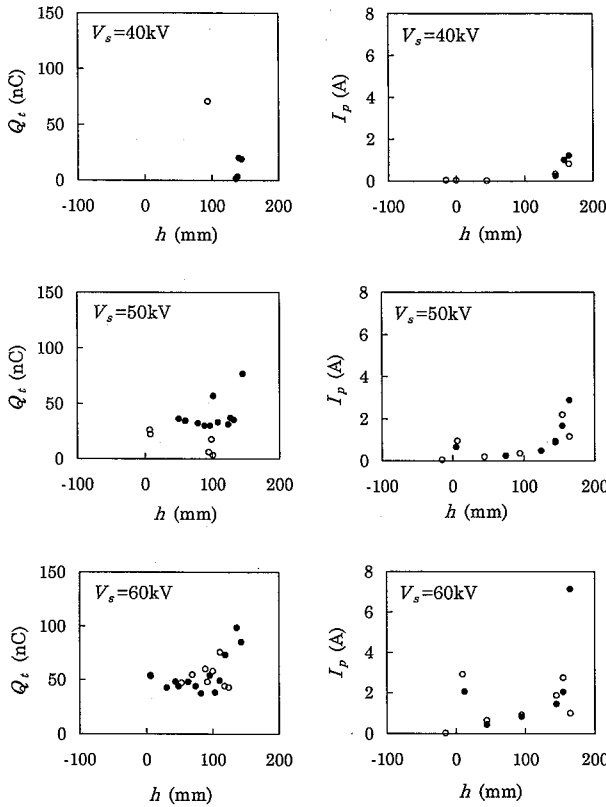
電極の先端が液面下にある場合は、液体の帯電に起因する電界の多くは液中の電極に向かうので、結果的に液面及び液面上部空間における電界強度が弱まり、電極からは強い放電が起きにくくなる。なお、この場合は電極の直径が大きいくほど電界強度が低いため放電も起きにくい。実験からは、次節のワイヤ付き電極の結果も考慮に入れると、線径 5 mm 以上の丸型棒電極は、液面電位が 60 kV 以下では電極先端が液面下にある場合は着火性放電は発生しないと推定される。

棒電極も球電極及び円錐電極と同様に、これが液面付近にあるときに、放電電荷及びピーク電流がともに大きい着火性放電が発生する可能性がある。特に、線径が 5 mm の電極では液面電位が 40 kV のとき、液面の盛り上がり現象に伴って放電電荷が 140 nC、ピーク電流が 2A に達する着火性放電となる。ただし、一般的には棒電極では放電電荷は電極の直径に比例する傾向があり、電極が大きいくほど着火性放電が発生しやすい。液面電位が 40 kV では、直径が 16~20 mm のとき、放電電荷が 80~100 nC に達し、このときのピーク電流は 1~2.5A の着火性放電に極めて近い放電となる。電極直径が 8~13 mm では、放電電荷が 50~60 nC、ピーク電流が 1~2A の着火性放電に近い放電となる。なお、液面電位の大ききに応じて放電の着火性が異なるのは、既に他の電極の場合に論じたとおりである。

4.5 ワイヤ付き電極の放電抑制効果

Fig. 2(d) に示したワイヤ付き円柱電極について、液面電位がそれぞれ 40 kV、50 kV 及び 60 kV のとき、放電が発生したときの電極距離と放電電荷及びピーク電流を測定した結果を Fig. 15 に示す。

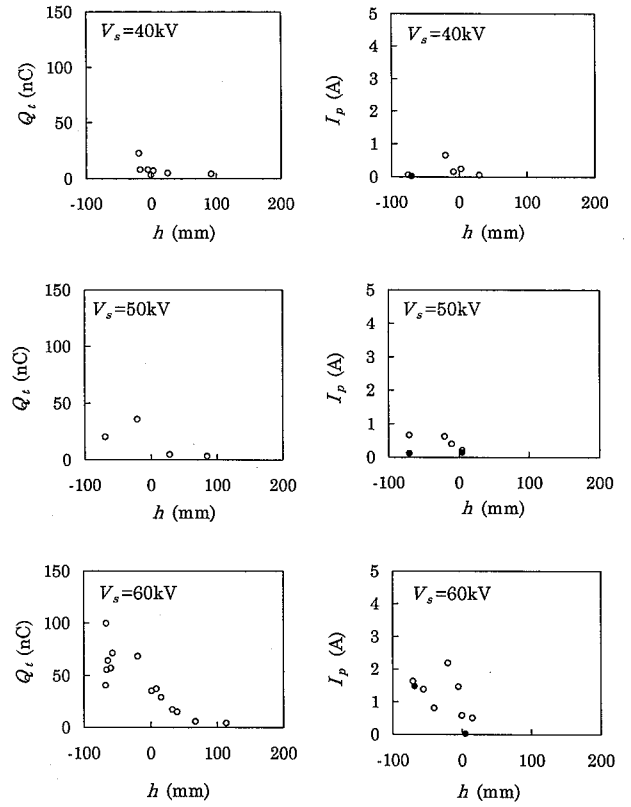
Fig. 15 に示すように、液面電位が 40 kV では、電極距離が 100 mm 付近のとき放電電荷が 70 nC の比較的大きな放電が発生するが、この電極距離では 100mA 以下の弱いピーク電流のみが観察されているので、着火性放電ではない。この電極距離はワイヤの約 1/3 が液中に没した位置であり、ワイヤの線径が 3 mm と細いので液面と接する付近のワイヤ外周の電界強度が高まり、液面放電が発生したものである。この放電は液面電位の増加につれて強まる傾向があり、50 kV ではまだ着火性放電にはならないものの、60 kV では放電電荷が 80 nC、ピーク電流が 1A 程度に達するため、着火性放電となる。したがって、ワイヤ電極の線径は 3 mm より大きいことが望まれる。また、液面電位が高まると、電極距離が数 mm の位置で比較強い放電が発生する。液面電位が 40 kV では放電電荷が 30 nC、ピーク電流が 1A 程度に過ぎないが、液面電位が 60 kV では放電電荷が 60 nC、ピーク電流が 3A 程度に達し、着火性放電に極めて近い放電となる。ただし、ワイヤのない円柱電極（棒電極とみなせる。）では、前節の棒電極の結果で触れたように、直径が 16~20 mm の場合は液面電位が 40 kV であっても着火性放電に極めて近い放電となっていることと比較すると、ワイヤによる放電抑制効果が働いたことは明らかである。このことは、前節で述べたと同様に、帯電液体による電界の多くがワイヤの方に向かうため、円柱電極付近の電界強度が弱まり、放電が抑制されると説明できる。一方、電極距離が 170 mm 付近、すなわちワイヤの先端が液面上付近にあるときに、液面電位が 40 kV では放電電荷が 30 nC、ピーク電流が 1A 程度の着火性放電には至らないが、比較強い放電が発生し、液面電位が 50 kV では放電電荷が 80 nC、ピーク電流が 3A の着火性放電に極めて近い放電が発生し、液面電位が 60 kV では放電電荷が 100 nC、ピーク電流が 7A の着火性放電が発生する。これは、前節の棒電極のうち直径が小さい電極先端が液面付近にあるときと同様の条件であるので、液面電位が 40 kV 以上では着火性放電が発生する可能性があると評価される。このことは、ワイヤが万一切断されて、その先端が丁度液面付近にあると、着火性放電が容易に発生することを意味するので、安全上注意する必要がある。



(a) Charge transfer (b) Peak current

Fig. 15(a) Relationship between charge transfer (Q_t) and electrode distance (h) of column electrode with a wire; V_s = surface potential.
ワイヤー付き円柱電極の放電電荷と電極距離との関係

Fig. 15(b) Relationship between peak current (I_p) and electrode distance (h) of column electrode with a wire; V_s = surface potential.
ワイヤー付き円柱電極のピーク電流と電極距離との関係



(a) Charge transfer (b) Peak current

Fig. 16(a) Relationship between charge transfer (Q_t) and electrode distance (h) of high level probe electrode with discharge suppression device (F-3); V_s = surface potential.
放電抑制装置 (F-3) 付き高液面計プローブ電極の放電電荷と電極距離との関係

Fig. 16(b) Relationship between peak current (I_p) and electrode distance (h) of high level probe electrode with discharge suppression device (F-3); V_s = surface potential.
放電抑制装置 (F-3) 付き高液面計プローブ電極のピーク電流と電極距離との関係

4.6 放電抑制装置付き電極の放電抑制効果

Fig. 3 に示した放電抑制装置付き電極について、液面電位がそれぞれ 40 kV, 50 kV 及び 60 kV のとき、放電が発生したときの電極距離と放電電荷及びピーク電流を測定した結果を Fig. 16 に示す。同図は、放電抑制装置として、直径が 20 mm, 長さが 55 mm の金属円柱 (Table 2 の記号 F) と直径が 80 mm, 厚さが 20 mm のテフロン円板 (Table 2 の番号 3) とを組み合わせたもの (F-3 と呼ぶ。) を用いた結果である。なお、ここでの電極距離は、テフロン円板下端と液面からの距離である。

Fig. 16 に示すように、液面電位が 40 kV では、

電極距離が -20 mm 付近のとき放電電荷が 25 nC, ピーク電流が 0.8A の放電が発生するほかは、ほとんど放電が発生しない。この電極距離は液面が丁度放電抑制装置のテフロン円板上面、すなわち金属円柱の下端にある位置で、テフロン表面に沿う形で液から金属円柱に向かって放電が発生する。この種の放電は液面電位が 50 kV までは着火性放電にならないが、液面電位が 60 kV では、放電電荷が 70 nC, ピーク電流が 2.2A に達し、着火性放電に極めて近い放電となる。なお、棒電極の場合に述べたように、この種の放電は金属円柱の直径が大きいくほど起きにくくなる。

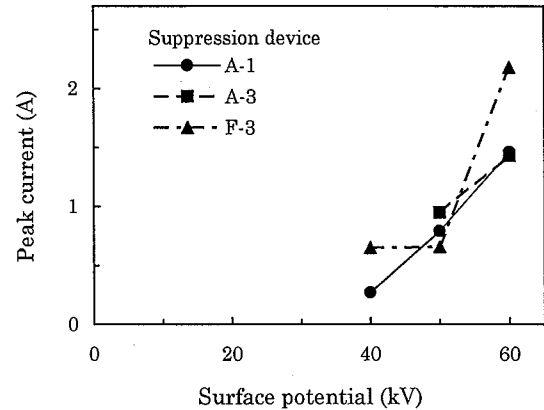
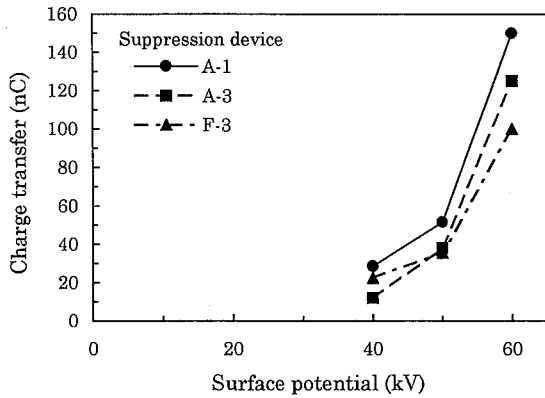


Fig. 17 Relationship between maximum charge transfer and surface potential using high level probe electrodes with different discharge suppression devices.
 放電抑制装置付き高液面計プローブ電極の放電電荷最大値と液面電位との関係

Fig. 18 Relationship between maximum peak current and surface potential using high level probe electrodes with different discharge suppression devices.
 放電抑制装置付き高液面計プローブ電極のピーク電流最大値と液面電位との関係

Table 3 Maximum charge transfer (Q_t) to high level probe electrode with different discharge suppression devices consisting various sizes of Teflon discs and metallic rods; surface potential = 40 kV.
 各種放電抑制装置付き高液面計プローブ電極の放電電荷最大値 (液面電位 = 40 kV)

Metallic rod [d = diameter (mm), l = length (mm)]		Teflon disc [D = diameter (mm), L = thickness (mm)]				Average of Q_t (nC)
		1	2	3	4	
		$D = 60, L = 20$	$D = 60, L = 30$	$D = 80, L = 20$	$D = 80, L = 30$	
A	$d = 16, l = 35$	29	14	12	16	18
B	$d = 16, l = 45$	13	17	10	34	19
C	$d = 16, l = 55$	18	13	21	4.5	14
D	$d = 20, l = 35$	25	24	25	10	21
E	$d = 20, l = 45$	22	14	7	18	15
F	$d = 20, l = 55$	16	11	23	10	15
Average of Q_t (nC)		21	16	16	15	17

Refer to Fig.3.

液面電位が 50 kV 以上では、電極距離が 75 mm 付近、すなわち放電抑制装置を取り付けた直径が 90 mm、厚さが 10 mm の金属円板に液面が達する位置で、この金属円板に対して放電が発生する。この電極距離での放電は、液面電位が 50 kV では放電電荷が 20 nC、ピーク電流が 0.8A に過ぎず着火性放電にならないが、液面電位が 60 kV では、放電電荷が 100 nC、ピーク電流が 1.8A に達し、着火性放電となる。ただし、放電抑制装置のない高液面計プローブ（直径 8 mm の棒電極）の場合は、液面電位が 40 kV で着火性放電に近い放電が発生したと比べると、放電抑制効果が明らかである。

そのほかに、液面電位が 60 kV になると、電極距離が 0~10 mm 付近でテフロン円板下端と帯電液体間で

放電が発生するが、この場合の放電電荷は 40 nC、ピーク電流が 0.5A に過ぎず着火性放電にはならない。

放電抑制装置のうち、Table 2 に示した三つの組み合わせ、A-1、A-3 及び F-3 について、放電電荷及びピーク電流の最大値と液面電位の関係を求めた結果をそれぞれ Fig. 17 及び Fig. 18 に示す。

三つの放電抑制装置とも液面電位の増加につれて放電電荷及びピーク電流がともに増大し、抑制装置の組み合わせによって差はあるものの、液面電位が 50 kV では放電電荷が 30~50 nC、ピーク電流が 0.5~0.8A に過ぎず着火性放電は発生せず、液面電位が 60 kV では放電電荷が 100~150 nC、ピーク電流が 1.5~2A に達し着火性放電が発生する。

Fig. 17 及び Fig. 18 から明らかなように三つの放電

抑制装置の放電抑制効果を比較すると、F-3、A-3、A-1の順序で放電抑制効果が高い。Table 3は、Table 2に示したテフロン円板4種と金属円柱6種のすべての組み合わせについて実験を行い、液面電位が40 kVの場合のそれぞれの放電電荷の最大値を示したものである。これらの結果から、テフロン円板については直径及び厚みが大きいほど、また金属円柱については直径及び長さが大きいほど、放電抑制効果が高い傾向が明らかとなった。

5. 結 言

帯電液体と各種形状の接地金属導体間の放電特性を測定したモデル実験から、着火性放電の発生特性及び着火性放電の抑制について以下のことが明らかとなった。

- 1) 球電極の場合は、電極下端が液面付近にあるときに液面が電極に向かって盛り上がる現象とともに強い放電が発生し、電極直径が小さいほど着火性放電になりやすい。具体的には、液面電位が20 kV以下では着火性放電は発生せず、液面電位が30 kV以上では電極直径が5~6 mmであると着火性放電に近い放電が発生し、液面電位が40 kV以上では電極直径が10 mm以上でも着火性放電が発生する。
- 2) 先端の尖った円錐電極の場合も、電極下端が液面付近にあるときに強い放電が発生し、先端角度が60~90度であるとき、液面電位が30 kV以下では着火性放電は発生しないが、液面電位が30 kVを越えると着火性放電が発生する。
- 3) 丸棒電極の場合は、先端が液中にあるときは電極直径が5 mm以上であると、液面電位が60 kVまでは着火性放電は発生しない。しかし、電極先端が液面上付近にあるときには強い放電が発生し、液面電位が40 kVでは電極直径が5 mm及び16~20 mmであると着火性放電又はこれに極めて近い放電が発生し、電極直径が8~13 mmでも着火性放電に近い放電が発生する。
- 4) ワイヤ付き電極の場合は、直径3 mmのワイヤの先端が液中にある場合は、液面電位が50 kVまでは着火性放電を発生せず、液面電位が60 kVになると、ワイヤ及び電極に対して着火性放電又はこれに極めて近い放電が発生する。一方、ワイヤの先端が液面上付近にあるときは、液面電位が50 kV以上で着火性放電が発生する。したがって、接地ワイヤは、液面電位が50 kVまでは放電抑制効果が認められるが、ワイヤが切断すると極めて危険である。
- 5) 先端にテフロン円板の付いた放電抑制装置付き電極の場合は、液面電位が50 kVまでは着火性放電を発生せず、液面電位が60 kVになると、金属部分

に対して着火性放電又はこれに極めて近い放電が発生する。したがって、この放電抑制装置は接地ワイヤと同様に液面電位が50 kVまでは放電抑制効果が認められる。なお、テフロン円板の直径と厚みが大きいほど、またテフロン円板を取り付ける金属円柱の直径と長さが大きいほど放電抑制効果は大きくなる。

以上のように、形状にほとんど関わらず、接地された金属導体が帯電液体の表面に接近するとき、液面電位が20 kV（電荷密度が $8\mu\text{ C/m}^3$ ）以下では着火性放電が発生しないが、液面電位が30~40 kV（電荷密度が $12\sim 16\mu\text{ C/m}^3$ ）になると、着火性放電が発生する可能性がある。このような金属導体に接地ワイヤを取り付けたり、放電抑制装置を取り付けることにより、液面電位が50 kV（電荷密度が $20\mu\text{ C/m}^3$ ）までは、着火性放電を抑制できる可能性が高い。ただし、接地ワイヤの場合は、断線すると危険であるので注意する必要がある。

謝 辞

本研究は、東京計装株式会社の協力を得て行った。実験を手伝っていただいた井上隆弘氏、星真一郎氏及び後藤淳司氏、また研究に関する助言、放電抑制装置の試作等をしていただいた杉時夫氏及び渡辺建太郎氏に深謝します。

参 考 文 献

- 1) Walmsley H.L., Threshold potentials and discharge charge transfers for the evaluation of electrostatic hazards in road-tanker loading, *Journal of Electrostatics*, 26, 157~173 (1991).
- 2) 児玉 勉, 田島泰幸, 帯電液面と接地導体間の放電現象, 静電気学会講演論文集'86, 379~382 (1986).
- 3) 松原美之, 帯電油面-接地導体球間の放電現象, 静電気学会誌, 14, 480~486 (1990).
- 4) Leonard J.T. and Carhart H.W., Electrical discharges from a fuel surface, *Static Electrification 1967*, 100~110, Institute of Physics, London (1967).
- 5) Britton L.G. and Williams T.J., Some characteristics of liquid-to-metal discharges involving a charged "low risk" oil, *Journal of Electrostatics*, 13, 185~207 (1982).
- 6) Rees W.D., Static hazards during the top loading of road tankers with highly insulating liquids: flow rate limitation proposals to minimize risk, *Journal of Electrostatics*, 11, 13~25 (1981).
- 7) Krämer H. and Asano K., Incendivity of sparks from

- surfaces of electrostatically charged liquids, *Journal of Electrostatics*, 6, 361~371 (1979).
- 8) Johnson J.K., The ignition of vapour and droplets by liquid-to-metal sparks, *Journal of Electrostatics*, 4, 53~65 (1977/8).
- 9) Gibson N. and Lloyd F.C., Incendivity of discharges from electrostatically charged plastics, *British Journal of Applied Physics*, 16, 1619~1631 (1965).
- 10) Heidelberg E., Zündung explosibler Gemische durch statische Elektrizität, *Advances in Static Electricity, 1st International Conference on Static Electricity*, 351~359, Vienna (May 1970).
- 11) Tabata.Y. and Masuda S., Minimum potential of charged insulator to cause incendiary discharges, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, IA-20, 1206~1211 (1984).

(平成 8 年 4 月 30 日受理)