針および線対金網電極系のコロナ放電特性 に及ぼす金網目開きの効果

正員 高 城 実 (西日本工大)
正員 大久保 利 一 (大 分 大)
正員 川 崎 元 之 (西日本工大)
正員 足 立 宜 良 (大 分 大)

1. ま え が き

電気集じん装置 (ESP と略記) の運転温度を上げると高抵抗ダストの抵抗率が減少するため、集じん作用にとって有害な逆電離の発生が防止できる。この高温 ESP⁽¹⁾と呼ばれる集じん装置の集じん電極には、熱膨張によるひずみを考慮して、金網電極が使用される場合がある⁽²⁾。また、実験装置の必要性から金網電極が用いられている。例えば、コロナ放電に関連した実験として平等電界中に単極性イオンを供給してイオン流場を形成し⁽³⁾、その中で、エアロゾル粒子の実験的観測⁽⁴⁾や直流送電線下のイオン流帯電現象の解明⁽⁵⁾などが挙げられる。更に、計測の必要性から平板電極の代わりに金網電極が使用されている例としてコロナ放電によって発生したイオンの移動度の測定⁽⁶⁾⁽⁷⁾やイオン風速の測定^{(8)~(10)}などがある。しかし、この場合には金網目開きをどの程度にすれば平板電極とコロナ電流の観点から等価的に取扱えるかについて系統的に調べられた詳細な基礎データは見あたらない。

そこで、本論文では金網目開きが負コロナ放電特性に及ぼす影響を ESP で使用される平均電界強度⁽¹¹⁾の

コロナ放電領域を考慮して、4~6 kV/cm 程度の常態空気負荷の場合について実験的に調べた。電極モデルとして、針対金網電極系ならびに線対金網電極系についてもその基礎特性を調べた。

針対金網電極系では、金網電極に流れるコロナ電流が針対平板電極の場合とほぼ同じになる金網目開きを明らかにした。また、金網を通り抜けるイオンの透過度に及ぼす金網目開きおよび電極の配置条件の影響を検討するため、金網電極の下に平板電極を設けた。更に、目開きが非常に大きくなった場合の、金網からの正コロナ放電の開始条件についても調べた。一方、線対金網電極系では接地した金網電極と平板電極の中間に線電極を配置した。この平板形 ESP の電極構成において、金網目開きを変えて接地側における電極のコロナ電流を測定した。そのコロナ電流特性の比較から金網のコロナ電流に及ぼす金網目開きの影響を定量化すると共に、平板電極と等価的なコロナ電流特性をもつ金網電極の目開きを明らかにした。

以上の実験結果から、コロナ放電下で用いる金網の実効的な電極面積に関する有益な基礎データが得られると共に、幾つかの知見が得られたので、その結果を報告する。

2. 電極系と実験方法

〈2.1〉 針対金網電極系の概要と実験方法

図 1 に針対金網形実験装置の概要を示す。針電極は先端削り角 30°, 先端曲率半径 0.3 mm, 針軸径 6 mm の黄銅製である。ESP を考慮して、負極性の直流高電圧 V を 0~25 kV の範囲で印加した。金網電極 (70×70 cm) は目開き M が 1.35~50 mm の 9 種類を使用し

Effects of Mesh Size on Corona Discharge Characteristics in Needle or Wire to Wire-Netting Electrode System. By Minoru Takajyo, Member (Department of Electrical Engineering, Nishinippon Institute of Technology), Toshikazu Ohkubo, Member (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Oita University), Motoyuki Kawasaki, Member (Department of Electrical Engineering, Nishinippon Institute of Technology) & Takayoshi Adachi, Member (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Oita University).

高城 実: 正員, 西日本工業大学電気工学科
大久保利一: 正員, 大分大学工学部電気工学科
川崎元之: 正員, 西日本工業大学電気工学科
足立宜良: 正員, 大分大学工学部電気工学科

M (mm)	1.35	4.0	6.4	10.2	12.9	15.8	20.0	25.0	50.0
d (mm)	0.27	0.56	0.97	1.00	0.79	0.69	0.56	0.68	0.68
開口率	0.81	0.86	0.88	0.90	0.94	0.96	0.97	0.97	0.99

図 1 針 - 金網形実験装置

Fig. 1. Schematic diagram of a needle to wire-netting electrode system.

た。これらの目開き M と素線径 d を同図中に示す。目開き M は図 1 のようにピッチ $M = a + d$ を用いたが、金網の開口率 (素線間距離 a で決まる正方形の面積 / 素線中心間 M で決まる正方形の面積) も同図中に示した。針電極と金網電極の間隔 S は 5~15 cm の範囲で変化した。

実験は負コロナ放電特性に及ぼす金網目開きの効果を調べると共に、金網電極を通り抜けるイオンの透過度が金網目開きおよび電極の配置条件によって受ける影響を調べた。この場合には、平板電極 (アルミ板, 70×70 cm) を金網電極の下側に間隔 D だけ離し、電流計を通して接地した。そして、そのときの金網電極に流入する電流 (以下、金網電流と略記) および平板電極に流入する電流 (以下、平板電流と略記) をそれぞれ測定した。実験はすべて静止大気圧空気中で行った。

〈2・2〉線対金網電極系の概要と実験方法 図 2 に実験装置の概要を示す。線対金網電極系の負コロナ放電特性に及ぼす目開きの効果を検討するため、接地した金網電極と平板電極の中間に線電極を配置して平板形 ESP の電極構成とした。このような電極配置にすると、平板電流は後述のように金網目開き変化の影響を無視できるので、線対平板電極系と線対金網電極系のコロナ放電特性を同時に測定でき、その比較検討が容易になる。これより、金網目開きを変えた場合のコロナ放電特性の相違から、金網のコロナ電流の大きさに及ぼす目開きの効果を定量化することができる。平板電極は 30×50 cm で、金網電極は同図中のものを使用した。線電極 (直径 0.5 mm, 有効長 30 cm) はステンレス鋼線を使用し、これに負極性の直流

M (mm)	3.0	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0
d (mm)	0.53	0.66	0.77	0.66	0.77	0.66	0.77
開口率	0.82	0.87	0.89	0.93	0.95	0.97	0.97

図 2 線 - 金網形実験装置

Fig. 2. Schematic diagram of single wire to wire-netting electrode system.

高電圧 V を 0~50 kV の範囲で印加した。

実験は電極間距離 S を 5~15 cm の範囲内で、金網の目開きを変えた場合、金網電流 I_n および平板電流 I_p をそれぞれ測定し、両電極におけるコロナ開始電圧およびコロナ放電特性の相違を検討した。更に、コロナ放電特性から見た金網電極と平板電極の等価性を異なる角度から検討するため、片側の平板電極はそのまま、金網電極だけを線電極側に最高 S の 60% まで平行移動させた。このとき、金網に流れるコロナ電流が平板に流れるコロナ電流と等しくなる金網電極の移動距離 L (mm) を各目開きについて実測し、そのときの見掛けの平均電界強度の変化 ΔE_{ave} を調べた。

3. 結果と考察

〈3・1〉針対金網電極系におけるコロナ放電特性

図 3 は針対金網電極系でのコロナ放電特性を示す。 $S = 5$ cm 一定下における金網電流 I_{M1} の平方根と V の関係をそれぞれの M に対して示した。 M が 1.35~20.0 mm に対する $\sqrt{I_{M1}}-V$ 特性は M の変化による差異が見られず、針対平板電極系と同様なコロナ放電特性を示す。一方、 $M > 20$ mm 以上の M になると、図 3 に示されるようにコロナ放電特性に目開きの影響が現われる。以上より $1.35 \leq M \leq 20$ mm では M の増大に伴う金網電極の形状の変化に関係なく、同一印加電圧に対するコロナ電流値は変わらない。従って、このときの金網電極は、等価的に平板電極と見なせることを示している。目開きの影響が現われない理由として、金網を通り抜けたイオンが回り込むようにして金

図 3 針対金網および平板電極系におけるコロナ放電特性

Fig. 3. Corona current-voltage characteristics for a needle to wire-netting electrode and plate electrode.

網に捕捉されていることが考えられる。

$M > 20$ mm の目開きでは、 M が大きくなるにつれ、金網電極近傍の電界分布の不均一性が増すようになり、金網の実効的な電極面積が減少するため、同一 V に対する I_{M1} も次第に減少する。この場合、金網を通り抜けるイオンも存在すると考えられるが、針対金網電極系におけるイオン風の挙動⁽⁸⁾から、針電極直下に多く分布しているものと考えられる。

(1) 金網電極を通り抜けるイオン量の検討

〈3.1〉節で考察した $M < 20$ mm と $M > 20$ mm のコロナ放電特性の相違を検討するために、金網電極の下に平板電極を設けて(図1参照)、そのときの金網電流 I_{M2} および平板電流 I_p をそれぞれ測定した。ただし、平板電極がない場合の金網電流を I_{M1} としている。 M が 20 mm 以下で針電極と金網電極の距離 S が一定の場合、金網電流 I_{M1} と平板電極を配置したときの金網電流 I_{M2} および平板電流 I_p の和は次の関係を満足する。

$$I_{M1} = I_{M2} + I_p \quad \dots\dots\dots (1)$$

(1) 式より目開きが 20 mm 以下ではイオンは一度金網を通り抜けても再び金網に捕捉されることがわかる。このとき、目開きが大きいほど I_{M1} に対する I_{M2} の割合は小さくなる。一方、 $M > 20$ mm の場合は(1)式は成立せず、次のような不等式になる。

$$I_{M1} < I_{M2} + I_p \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式は目開きが 20 mm より大きくなった場合、金網を通り抜けて捕捉されずに飛びさっていくイオンが存在することを示唆している。

図4は $V = 25$ kV で、平板と金網の間隔 D が 5 mm の場合の $\sqrt{I_p}$ - M 特性を S をパラメータとして示した。 M が約 4 mm 以上では $\sqrt{I_p}$ は M に比例し、金網を通り抜けるイオン量は M の増大および S の減少に伴って増加することがわかる。目開き M が

図 4 $\sqrt{I_p}$ - M 特性

Fig. 4. Square root of current flowing to the plate electrode as a function of mesh size.

20 mm 以下では $I_{M2} > I_p$ となるが、これらの電流の比 I_p/I_{M2} は金網を通り抜けるイオン量の目安を与える。以下では、この割合をイオンの透過度と呼ぶことにする。イオンの透過度は V, M, S および D の変化によって影響を受けるので、以下にどのパラメータの影響が大きいのかその検討を行った。

図5(a)はイオンの透過度に及ぼす V の影響を示す。イオンの透過度は S および D が一定の下では、金網目開き M による影響が大きくなるが、 V の変化による影響はほとんどない。この特徴ある傾向は S と D に依存しない。

次に、 $D = 5$ mm の場合のイオンの透過度と目開き M の関係を S をパラメータとして示したのが、図5(b)である。ここで重要なことは、 D と M が一定であれば、イオンの透過度に及ぼす S 変化の影響は小さいことがわかる。また、同図には示されていないが、 $M = 20$ mm、 $D = 2.5$ mm の場合のイオンの透過度は約 1.0 となり、それぞれの電極に流れるコロナ電流はほぼ等しくなる。

$S = 10$ cm 一定で D を変えた場合、イオンの透過度がどのように変化するかを代表的な M について示したのが図5(c)である。平板電極を金網電極に近づけていくと、イオンの透過度が指数関数的に増加することから、金網を通り抜けたイオンの密度は金網の近傍で高く、金網から離れるに従ってその密度は顕著に減少していると考えられる。

(3) 金網からの正コロナ放電の開始条件 針対金網電極系において、 M が大きく印加電圧が高くなると、金網電極側から正コロナ放電が起り、コロナ放電特性上に変化が生じると考えられる。そこで、 M が非常に大きくなった場合について、針対線電極系におけるコロナ放電特性を素線径 d の異なる 6 種類の線電極を用いて調べた。

(a) $\sqrt{I_p/I_{M2}} - V$ 特性 (b) $\sqrt{I_p/I_{M2}} - M$ 特性 (c) $\sqrt{I_p/I_{M2}} - D$ 特性

図5 平板電極と金網電極へのコロナ電流に及ぼす印加電圧、目開きおよび電極間距離の影響

Fig. 5. Ratio of corona currents flowing to plate and wire-netting electrodes as functions of applied voltage, mesh size and space distance.

図6は $d=0.45$ mmの場合の線電流 I_w の平方根と V の関係を示した。これより、電極間距離 S の大きさにかかわらず特性上に折れ点が生じ、正コロナ放電はこの折れ点付近で線電極から発光することが観測された。更に、図6のような電流急増点は針対球電極系においても特性上の折れ点付近で球電極側から正コロナ放電が起り、イオン風の吹き返しが生じることが報告されている⁽¹²⁾。

図6 針対線電極系でのコロナ放電性

Fig. 6. Corona current-voltage characteristics for a needle to single wire electrode.

図7 正コロナ開始平均電界強度 E_b と S の関係
Fig. 7. Positive corona onset average electric field strength E_b as a function of space distance S .

そこで、コロナ放電特性上の折れ点を正コロナ放電の開始平均電界強度 E_b (印加電圧 V /電極間距離 S)と定義した。図7に E_b と S の関係を示した。これより、線電極が細くなるほど正コロナ放電が発生しやすくなることが確認できる。 S が大きくなると相対的に線電極の直径が小さくなるため、放電空間の不等性が強まり E_b も低下している。しかしながら、前述の針対金網電極系においてはこのような現象は見られなかった。従って、本実験における印加電圧25 kV程度までは、金網からの正コロナ放電は発生しないと言える。

〈3・2〉線対金網電極系におけるコロナ放電特性

線電極と対称な位置に金網電極と平板電極を配置して平板形ESPの電極構成とした。このような配置にすると、既に述べたように線対金網電極と線対平板電極のコロナ放電特性の相連を同時に測定できるため、金網電流に及ぼす目開きの影響が定量的に把握される。

図8(a)は M が3 mmの場合のコロナ放電特性で、破線と実線はそれぞれ金網電流 I_n と平板電流 I_p を示す。 $M=3$ mmでは、同一条件下のコロナ電流値

(a) $M = 3.0 \text{ mm}$ (b) $M = 28.0 \text{ mm}$

図 8 線対金網および平板電極系におけるコロナ放電特性

Fig. 8. Corona current-voltage characteristics for a wire-netting electrode (mesh size $M=3 \text{ mm}$ and $M=28 \text{ mm}$) and plate electrode.

の違いは両電極の電流の差が最も大きい $S=5 \text{ cm}$ の場合でも、約 1% の違いしかない。更に、 S が大きくなるにつれて両電極のコロナ放電特性は良く一致するので、実質的に平板電極と見なせる。また、コロナ開始電圧 V_c も各 S について両電極ともにほぼ同じであった。コロナ放電が旺盛となる可視コロナ領域では、針対金網電極系の場合と同様にコロナ電流の平方根と印加電圧の関係は直線関係を示す。次に、 M が 28 mm の場合におけるコロナ放電特性を図 8(b) に示す。この場合も、 V_c は両電極ともに良く一致するが、 I_p と I_n の差は $M=3 \text{ mm}$ の場合に比べて顕著に現われる。また、線対金網電極系では M が 20 mm 以下の場合でも、 V が増加するにつれてコロナ電流の差は増加する。しかも、この傾向は S が小さくなるほど強くなる。これは、コロナ輝点の発生状態や空間電荷の密度分布⁽¹³⁾ などが針対金網電極系とは違うため、金網へのイオンの流入状態および金網を通り抜けるイオンの量などが異なるものと考えられる。これらを説明するには、金網電極近傍のイオンの振舞を検討する必要がある。定性的には、 M の増大に伴って金網電極

図 9 コロナ電流の差 $I_p - I_n$ と目開き M の関係

Fig. 9. Relation between corona current difference $I_p - I_n$ and mesh size M .

図 10 目開き M が金網電流 I_n に及ぼす影響

Fig. 10. Effects of mesh size M to wire-netting current I_n .

近傍の等電位面が波打つと共に、金網電極の下にもぐり込む分布⁽⁸⁾ となる。イオンは電気力線に沿って移動するので、一度金網を通り抜けたイオンの一部は再び金網に回り込んで捕捉されることは十分考えられる。

図 9 は $V=30 \text{ kV}$ 一定下における I_p と I_n の差と目開きの関係を示した。 S が小さくなるほど目開きの効果が顕著となる。これは、 S が減少するにつれて相対的に M が大きくなる結果、実効的な電極面積が減少するためである。

(1) 金網電流に及ぼす目開きの影響 金網の M が金網電流 I_n に及ぼす影響を平均電界強度 E_{ave} (印加電圧 V /電極間距離 S) が 3 kV/cm および 5 kV/cm の場合について検討した。

図 10 には I_n の平方根と M の関係を示した。 I_n は M の増大に伴って直線的に低下することがわかる。この場合の I_n の減少率は、 E_{ave} の増加と共に大きくなるが、 S による影響は小さい。図中の I_n と M の関係を示す実験式は次式で示される。

$$I_n = (AM + B)^2 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、(3) 式を満足する範囲は $M \leq 28 \text{ mm}$, $5 \leq S \leq 15 \text{ cm}$ である。実験定数 A は電極系の幾何学的寸

図 11 金網電極を平行移動させた場合のコロナ電流特性

Fig. 11. Effect of moved distance of wire-netting electrode towards single wire electrode on corona current characteristics.

法に依存する定数である。 B は平板電流 I_p である。 A は S にかかわらずほぼ一定値となり、 E_{ave} が 3 kV/cm では、目開き 1 mm あたり $4.96 \times 10^{-2} (\mu\text{A/m})^{0.5}$ の減少となる。 E_{ave} が 4 および 5 kV/cm になると、 A はそれぞれ 1.7 および 2.5 倍大きくなり、金網目開きの変化によるコロナ電流の減少割合が把握できる。

(2) コロナ放電特性から見た金網電極と平板電極の等価性 コロナ電流の観点から見た金網電極と平板電極の等価性を異なる角度から検討するため、平板電極のほうは S を一定に保ち、金網電極だけを線電極側に平行移動して、金網へのコロナ電流が平板電極へのコロナ電流と等しくなる金網の移動距離 L (mm) を求めた。

図 11 は E_{ave} が 3 kV/cm および 5 kV/cm 一定の下で、 S が 10 cm の場合の金網電極の移動に伴う I_n の変化と、そのときの I_p を $M=3, 14$ および 28 mm について示した。同図中の I_n と I_p の交点は金網の実効電極面積が平板電極と見なせる条件を示す。ただし、金網電極の最初の設定位置 ($S=10\text{ cm}$) を基準位置 ($L=0\text{ mm}$) とした。 I_n は次第に大きくなるが、 I_p は金網の移動には影響されず一定値を保つことがわかる。以上述べた傾向は他の S の条件に対しても全く同様であった。

図 11 を基にして L と M の関係を示したのが図 12 である。いずれの S においても L は 20 mm 付近までは M に比例するが、 $M > 20\text{ mm}$ では次第に飽和する。これは、金網電極近傍での電位変化が大きくなり、電界が強められるためと考えられる。ここで、 $M=3\text{ mm}$ の場合に注目すると、コロナ放電が比較的活発な場合でも、 2 mm 以下の平行移動で実質的に平板電極として取扱えることを示している。金網電極の

図 12 平板電極とみなせる金網電極の移動距離

Fig. 12. Moved distance of the wire-netting electrode equivalent to plate electrode from the viewpoint of corona current characteristics.

図 13 ΔE_{ave} と目開き M の関係

Fig. 13. Relation between increase in average electric field strength ΔE_{ave} and mesh size M .

移動に伴う平均電界強度の増加分 ΔE_{ave} は $LV/\{S(S-L)\}$ となる。この E_{ave} の増加分と M の関係を図 13 に示した。 E_{ave} 一定の下では、 S が小さくなるにつれ ΔE_{ave} は大きくなる。 $M=3\text{ mm}$ ではほとんど S に関係なく 0.1 kV/cm 以下の変化しかないと確認できた。

4. ま と め

針対金網電極系および線対金網電極系を用いて、金網電極の目開きが負コロナ放電特性に及ぼす影響を常態空気負荷の場合について調べた。その結果を要約すると次のようである。

(1) 針と金網電極の間隔が $5 \sim 15\text{ cm}$ の針対金網電極系において金網目開きが 20 mm 以下では、コロナ放電特性に及ぼす目開きの影響はなく、針対平板電極系とはほぼ同様な特性になる。

(2) 平板電流 I_p と金網電流 I_{M2} の比 I_p/I_{M2} は金網を通り抜けるイオンの透過度を示す目安となる。この透過度は印加電圧ならびに針と金網電極の間隔の変化の影響はほとんど受けず、金網目開きと金網と平板電極の間隔の変化に対して強く影響を受ける。

(3) 針対線電極において、線電極から正コロナ放電が開始する平均電界強度は電極間距離の増加に伴って低下する。また、素線径が小さくなるほど正コロナ放電が起こりやすくなる。一方、本実験範囲における針対金網電極では正コロナ放電は発生しない。

(4) 平均電界強度が一定下における金網電流の平方根は金網目開きに反比例する。このときの金網電流の減少率は、平均電界強度の増加に伴って大きくなるが、電極間距離の影響は小さくほぼ一定となる。

(5) 電極間距離が 5~15 cm の線対金網電極系において、実質的に平板電極と見なせる金網目開きは 3 mm であることがわかった。また、コロナ放電が活発な領域において、線電極方向に 2mm 以下の平行移動で平板電極と等価となる。この場合の平均電界強度の増加分は 0.1 kV/cm 以下である。

本研究の指針を電気学会放電研究会にて御教示いただいた名古屋工業大学名誉教授 三好保憲氏、日ごろより御指導ならびに御支援をいただく九州大学大学院総合理工学研究科 赤崎正則教授、同工学部 村上昭年教授、原 雅則教授ならびに西日本工業大学元教授 橋本清隆氏に深く謝意を表します。

(昭和 61 年 2 月 3 日受付, 同 61 年 5 月 29 日再受付)

文 献

- (1) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, p. 521 (昭 56) オーム社
- (2) 橋本・足立: 静電気とその工業への応用, p. 100 (昭 50) 東京電機大学出版局
- (3) M. Misakian: "Generation and Measurement of D.C. Electric Fields with Space Charge", *J. Appl. Phys.*, **52**, 3135 (1981)
- (4) R.S. Withers, J.R. Melche & J.W. Richmann: "Charging, Migration and Electrohydrodynamic Transport of Aerosols", *J. Electrostatics*, **5**, 228 (1978)
- (5) 原・赤崎・林: 「平等電界中に置かれた物体のイオン流による帯電特性の測定」, 電学論 A, **100**, 191 (昭 55-4)
- (6) N. Fujioka, Y. Tunoda, A. Sugimura & K. Arai: "Influence of Humidity on Variation of Ion Mobility", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-102**, 911 (1983)
- (7) 須永: 「コロナ放電によって発生するイオンの移動度」, 電力中央研究所技研報告, No. 178047 (昭 54-6)
- (8) 川崎・赤崎: 「針対金網電極系におけるイオン風反動力の実験的検討」, 電学論 A, **104**, 428 (昭 59-8)
- (9) 高城・川崎・足立: 「平等電界中におけるイオン風速の特性」, 静電学誌, **7**, 408 (昭 58-6)
- (10) M. Robinson: "Movement of Air in the Electric Wind of the Corona Discharge", *Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs.*, **80**, 143 (1961)
- (11) H.J. White: Industrial Electrostatic Precipitation, p. 235, (1963) Addison-Wesley Pub.
- (12) 橋本・川崎・中野: 「イオン風の挙動からみたコロナ放電特性の考察」, 昭 49 電気学会全大 (6), 717
- (13) 大久保・村上・足立: 「線対平行平板電極型電気集じん装置における流れ場の解析と実験」, 電学論 A, **106**, 377 (昭 61-8)
- (14) 高城・大久保・川崎・足立: 「針及び線対金網電極におけるコロナ放電特性」, 電気学会放電研資, ED-84-22, 85 (昭 59)