

論 文

絶縁板上に置かれた線状粒子からの交流コロナ放電特性の
相対湿度依存性工藤 祐輔^{*1}, 杉本 俊之^{*}, 東山 禎夫^{*2}

(2004年9月7日受付; 2005年1月13日受理)

Humidity Dependence of AC Corona Discharge from
a Wire Particle placed on an Insulating SheetYusuke KUDO^{*1}, Toshiyuki SUGIMOTO^{*}, and Yoshio HIGASHIYAMA^{*2}

(Received September 7, 2004; Accepted January 13, 2005)

A particle with a floating potential in a strong electric field could cause corona discharge. To clarify the characteristics of corona discharge occurring along the surface of a polymer insulator used for outdoor insulating system, the influence of relative humidity on corona discharge from a wire particle placed on a silicone rubber sheet was investigated experimentally in an ac electric field. Corona onset and flashover voltages were measured under the conditions when a wire particle was placed on the silicone rubber sheet and when a wire particle was held between the parallel plate electrodes in air. Both corona onset and flashover voltages from the wire particle placed on the silicone rubber sheet were increased with relative humidity. In contrast, when the wire particle was held in the air gap, relative humidity affected little corona onset and flashover voltages.

1. はじめに

強い電界下におかれた粒子は1個の粒子自体で、あるいは粒子群となって放電を引き起こすものがある。このような浮動電位を持つ粒子によって引き起こされる放電はGIS内部の金属粒子¹⁻³⁾からの放電や、送電線近傍の雨滴⁴⁾からの放電などで現れ、装置の絶縁性能の低下や、電波障害などの問題を引き起こすことがある。一方、電力用がいしでは表面に水滴がある場合⁵⁻⁶⁾、汚損層⁷⁾やがいし表面に繁殖した藻⁸⁾が湿潤した場合には、接地側あるいは高圧側電極からだけでなく、これらの付着物からも放電が起こる。これらの放電が高分子がいし表面で起こると、がいし表面の撥水性が低下し⁹⁻¹¹⁾、がいしの絶縁性能の低下をもたらすことになる。

絶縁物表面に付着した浮動電位を持つ粒子からの放電現象として、SF₆ガス雰囲気中のGIS内スペーサ付近の金属粒

子について調べたものが多い¹²⁻¹⁴⁾。高分子がいし表面で起きる放電現象を明らかにするためには、高分子がいしに付着した導電性物質からの放電現象を大気中で調べる必要がある。コロナ放電の湿度依存性については古くから研究されており、空気中における開閉インパルスコロナ¹⁵⁾、直流コロナ¹⁶⁻¹⁸⁾、交流コロナ¹⁹⁾などについて報告されているが、絶縁物表面でのコロナ放電現象の湿度依存性について調べたものは少ない。

本研究では、大気中におかれたシリコンゴム表面に、導電性汚損物を模した線状粒子が付着した場合の交流コロナ放電特性および、その相対湿度依存性について調べた。また、電極間での線状粒子の位置を変化させたときの、コロナ開始電圧と火花放電電圧の相対湿度依存性を調べ、線状粒子を気中に固定した場合の特性と比較した。

キーワード: 交流コロナ放電, 相対湿度, 線状粒子, シリコンゴム, 浮動電位

^{*} 山形大学工学部電気電子工学科(992-8510 山形県米沢市城南4-3-16)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa, Yamagata,
992-8510, Japan

¹ g02650@dipfr.dip.yz.yamagata-u.ac.jp

² higashi@yz.yamagata-u.ac.jp

2. 実験装置および方法

2.1 電極系

使用した電極系を図1に示す。大きさ40 mm×60 mm、厚さ6 mmのシリコンゴム板を4つの真ちゅう製直方体電極で挟み、シリコンゴム板表面に平行な電界を形成した。直

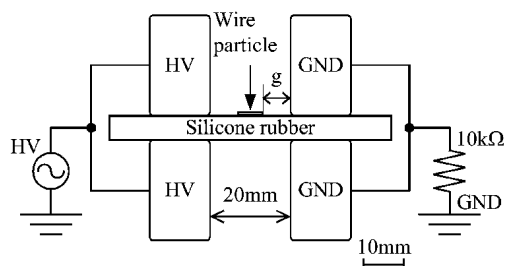


図 1 シリコンゴム上に置いた線状粒子からのコロナ放電を測定する電極系

Fig. 1 Electrodes system for measuring ac corona discharge from a wire particle placed on a silicone rubber sheet.

方電極の寸法は高さ 25 mm, 幅 15 mm, 奥行き 140 mm であり, 電極の角には不要な放電を防ぐために曲率半径 1 mm の丸みをつけてある. 高圧および接地電極間の距離を 20 mm 一定とした状態で, シリコンゴム板上に直径 0.25 mm, 長さ 6 mm の銅線粒子を置いた. 電極間の粒子の位置 g は接地電極表面からの距離で表している. 使用する線状粒子は, 端部形状のコロナ放電に及ぼす効果をできるだけ除くために, 粒子両端を半球状に研磨したものをを用いた.

電極系周囲の雰囲気湿度を一定に保つために, 図 2 に示すように電極系を恒湿度容器の中に置いた. シリコンゴム板上の粒子を介して確実に放電を起こすために, 高圧側電極と接地電極をそれぞれ別のアクリル樹脂板に乗せ, さらにそれらを独立した磁器がいしに乗せた. エアポンプ((株)柴田科学器械工業, IP-10S)によって吸い上げた恒湿度容器内の空気を, 乾燥剤(シリカゲル)あるいは水の入った容器に送った後に, 再び恒湿度容器内に戻すことで容器内の空気の除湿あるいは加湿を行った. 除湿操作と加湿操作は三方弁によって切り替えた. 容器内の相対湿度を 25, 50, 70 % に調整し, 容器内の空気の循環を停止し, 電極系を 10 分間一定湿度下に置いた後に電圧を印加し, 粒子を介した放電特性を調べた.

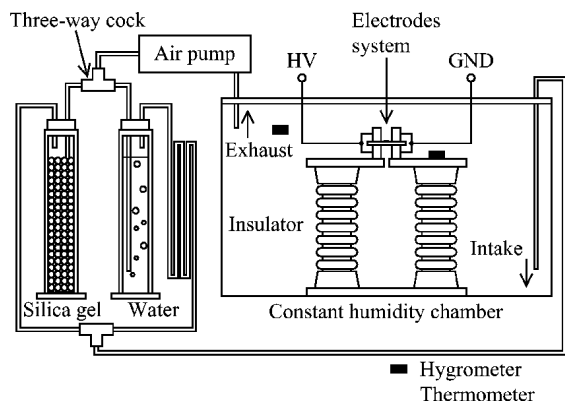


図 2 一定湿度を保つための容器

Fig. 2 Humidity-controlled chamber.

循環を停止して 10 分後の相対湿度の変化は 1 % 以下であった. また, 20 分間放電を起こし続けた後の恒湿度容器内の相対湿度の変化は 3 % 以下に収まっていた.

2.2 コロナ放電電流の時間的推移

線状粒子を介して流れるコロナ放電電流の時間的推移を求める場合には, 線状粒子を電極間の中央に置いた状態, すなわち $g=7$ mm に設定し, 実効値 10 kV あるいは 13 kV の交流高電圧を高圧側電極に最大で 20 分間印加した. コロナ放電電流の大きさは 10 kΩ の検出抵抗の端子電圧としてとらえ, 電流の変化をデジタルオシロレコーダ(NEC 三栄, RT3600)で連続的に記録した. 記録した電流の大きさはレコーダのピーク検出機能により, 5 μs でサンプリングした電流データから 0.6 秒毎に最大値を取り出したものである.

2.3 コロナ開始および火花放電電圧特性

線状粒子からのコロナ開始電圧と粒子を介した火花放電電圧を測定する場合には, ギャップ長 g を線状粒子が接地電極に接触している状態から, 線状粒子が高圧側電極に接触する状態まで変化させた. 接地電極に接触しているときのギャップ長は $g=0$ mm(電極端部を丸めているので, 厳密には $g=-0.4$ mm), 高圧側電極に接触しているときのギャップ長は $g=14$ mm(厳密には $g=14.4$ mm)となる. 高圧側電極に印加する交流高電圧を徐々に上昇させていき, デジタルオシロスコープ(Tektronix, TDS3012B, 2.5 GS/s, 300 MHz)で観察した電流波形に, 放電によるパルスが現れたときの交流電圧実効値を便宜上, コロナ開始電圧とした.

2.4 固定粒子を介した気中コロナ放電特性

線状粒子がシリコンゴム板上に置かれている場合のコロナ放電特性を, 気中のコロナ放電特性と比較するために, 図 3 に示すような平行平板電極系を使用した. 平板電極は表面を鏡面仕上げにした直径 80 mm, 厚さ 20 mm の真ちゅう製円盤電極であり, 電極間隔は 20 mm である. 線状粒子を直径 1 mm のアクリル樹脂棒の先端に貼り付け, 電極の中央部に

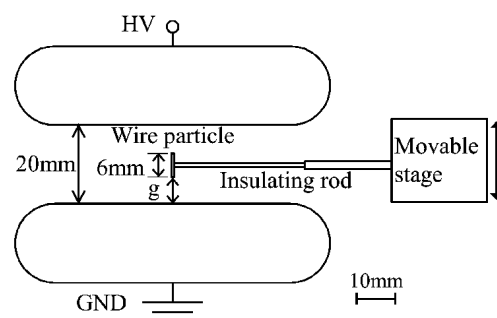


図 3 気中に固定された線状粒子からのコロナ放電を測定する平行平板電極

Fig. 3 Parallel plate electrodes for measuring ac corona discharge from a wire particle held between electrodes.

挿入した。線状粒子の位置を絶縁棒を取り付けた可動ステージによって調整し、粒子下端と接地電極間の距離 g を下部電極に接触している $g=0$ mm から、高压側電極に接触する $g=14$ mm まで変えて、コロナ開始および火花放電電圧を測定した。特に接地および高压側電極までの距離が 1 mm 以下の領域では、移動幅 0.2 mm で線状粒子を動かした。コロナ開始電圧は 2.3 節と同様にデジタルオシロスコープ上の電流波形に放電によるパルスが現れた交流電圧実効値とした。

3. シリコンゴム板上の線状粒子の放電特性

3.1 コロナ放電電流の時間的推移

相対湿度が 25, 50, および 70 % の状態で、実効値 10 kV および 13 kV の電圧を印加したときの、電極間の中心部に置かれた線状粒子を介して起きるコロナ放電電流最大値の 0.6 秒毎の時間的変化をそれぞれ図 4 および図 5 に示す。相対湿度によって放電パルスの発生頻度が大きく異なり、また、そのときのコロナ放電電流の最大値も変化する。

図 4 に示すように、印加電圧 10 kV では、相対湿度が 25 % と低い場合に、最大値が 150 μ A 程度のコロナ放電が安定して発生する。相対湿度が 50 % になるとコロナ放電の発生が断続的になり、コロナ放電の最大値は約 200 μ A と、相対湿度が 25 % の場合に比べて大きくなる。また、コロナ放電によるパルスがみられない期間も現れるようになる。相対湿度が 70 % まで高くなると、電圧印加直後の約 3 分間に最大値が約 80 μ A の放電パルスが現れたものの、時間が経過すると放電

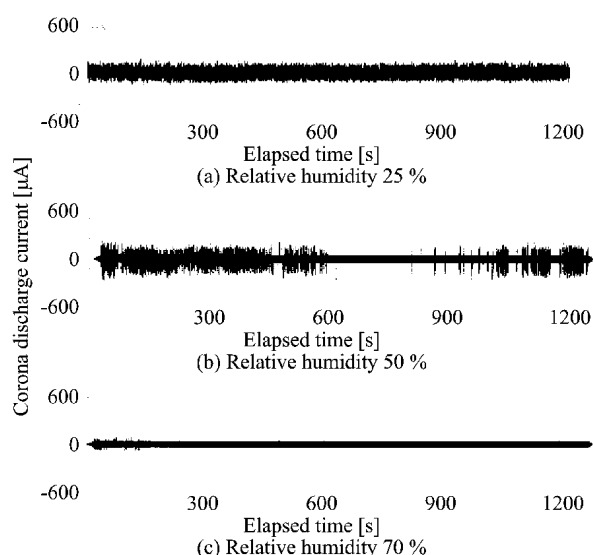


図 4 シリコンゴム板上の電極間中央に置かれた線状粒子を介したコロナ放電電流(印加電圧 10 kV)

Fig. 4 Time variation of corona discharge current from a wire particle located between the electrodes on the silicone rubber sheet under an applied voltage of 10 kV.

によるパルスはほとんど現れなくなった。

印加電圧 13 kV では、図 5 に示すように、相対湿度が 25 % と低い場合に約 300 μ A のコロナ放電が安定して発生するのに対し、相対湿度が高くなると放電の最大値がばらつくようになる。相対湿度 50 および 70 % の場合には、最大値が 600 μ A を越える放電が持続するようになった後、シリコンゴム板上の線状粒子を介して火花放電が発生した。

3.2 コロナ開始電圧

高压側電極に印加する電圧を徐々に増加させたときの、シリコンゴム板上に置かれた線状粒子を介して起きるコロナ開始電圧を図 6 に示す。図中のプロットは 3 回の測定値の平均値を示している。線状粒子が接地電極あるいは高压側電極に接触している場合には、線状粒子の電位は接触した電極と等しくなり、粒子先端の電界強度は最も強くなる。そのため、湿度によらず線状粒子が電極に接触している場合に、コロナ開始電圧は最も低い値を示す。

線状粒子が電極から 0.5 mm 離れて、粒子が浮動電位を持つと、コロナ開始電圧は相対湿度 25 % の場合には約 7.8 kV、相対湿度 50 % の場合には約 8.5 kV でほぼ一定値を保つ。これに対し、相対湿度 70 % の場合には、電極近傍ではコロナ開始電圧は約 9 kV であるのに対し、粒子が電極間中央付近に置かれたときにはコロナ開始電圧は約 11.5 kV となり、それ以外の場所の値と比べて約 30 % 高い値を示し、相対湿度が 25 および 50 % の場合と大きく異なる特性を示す。特に、線状粒子が電極間中央に置かれた場合に注目すると、コロナ開

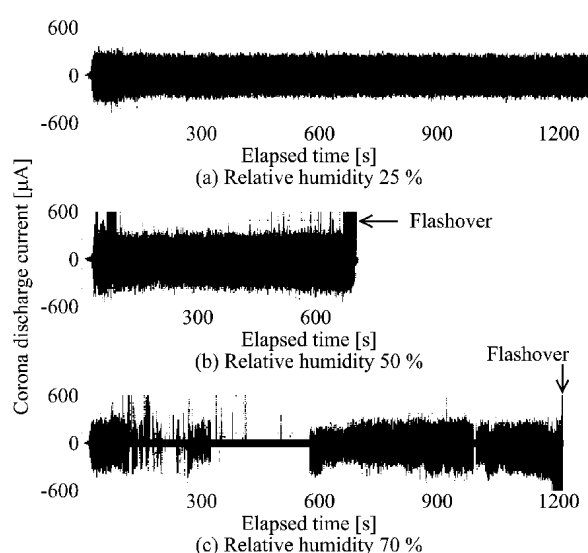


図 5 シリコンゴム板上の電極間中央に置かれた線状粒子を介したコロナ放電電流(印加電圧 13 kV)

Fig. 5 Time variation of corona discharge current from a wire particle located between the electrodes on the silicone rubber sheet under an applied voltage of 13 kV.

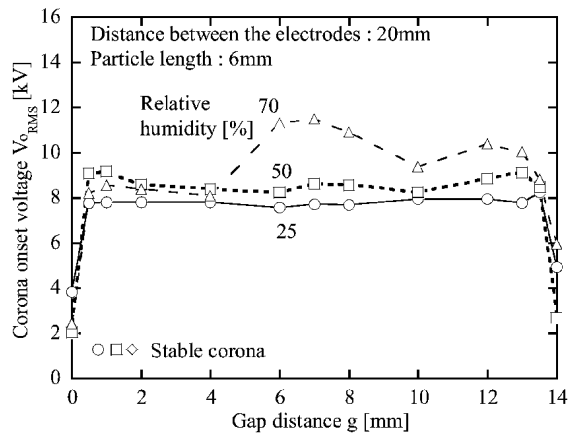


図 6 シリコーンゴム板上に置かれた線状粒子からのコロナ開始電圧

Fig. 6 AC corona onset voltage from a wire particle placed on the surface of a silicone rubber sheet.

始電圧は相対湿度と共に大きくなる傾向があり、空気中あるいはシリコーンゴム板上の水分子が粒子からの放電の発生を妨げていることが推測できる。相対湿度 70% の場合に、その傾向が顕著に現れ、コロナ開始電圧は電極中央部で最も高くなった。

図 4(c) に示したように、線状粒子が電極中央にあり、相対湿度が 70% の場合にコロナ放電がほとんど起きないのは、印加電圧が 10 kV ではコロナ開始電圧に達しないためである。印加電圧が 13 kV になると、相対湿度が 25% から 70% の範囲ではコロナ開始電圧よりも印加電圧が十分に高くなるため、図 5(c) 示すように相対湿度が高い場合でもコロナ放電によるパルスが現れる。

3.3 火花放電電圧

シリコーンゴム板上に置かれた線状粒子を介して起きる火花放電電圧の粒子の位置による違いを図 7 に示す。コロナ開始電圧と同様に、火花放電電圧も相対湿度によらず線状粒子がどちらかの電極に接触している場合に低い値を示す。線状粒子が電極から離れると、どの相対湿度の場合でも線状粒子が電極間中央に近づくにしたがって火花放電電圧は高くなり、 $g=7$ mm で線状粒子が電極間中央にある場合に最も高くなる。火花放電電圧は粒子と電極との距離に強く依存し、特に、粒子が正極性側の電極から離れるにつれて火花放電電圧が大きくなる²⁰⁾。線状粒子が電極中央に置かれた場合が粒子と正極性側の電極との距離が最も大きく、火花放電電圧はこのとき最も高くなる。線状粒子が電極間の中央付近にある場合には、相対湿度が高いほうが火花放電電圧は高くなる傾向が見られた。

図 4, 図 5 に示したように、相対湿度 50 および 70% の場

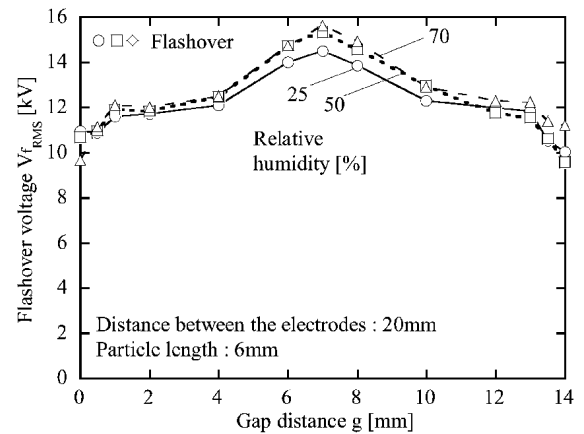


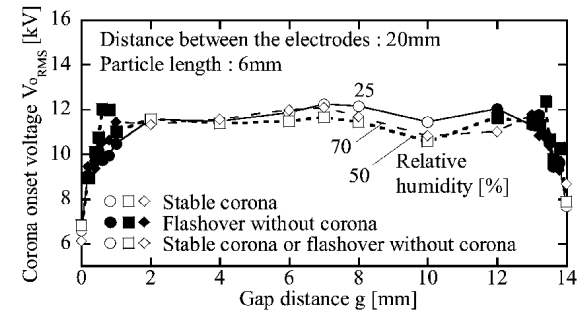
図 7 シリコーンゴム板上に置かれた線状粒子からの火花放電電圧

Fig. 7 AC flashover voltage via a wire particle placed on the surface of a silicone rubber sheet.

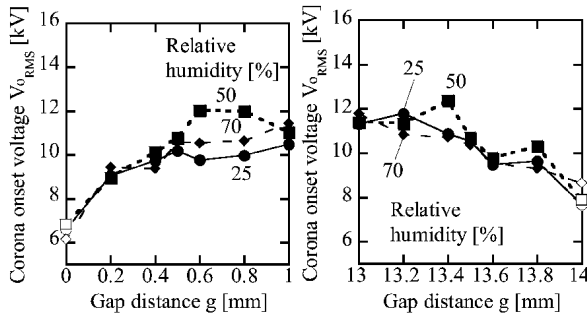
合には、コロナ放電電流は時間的に大きく変化し、コロナ放電の発生が断続的になるだけでなく、大きな最大値を持つ放電電流が流れ、火花放電へと移行する傾向にある。相対湿度が高い場合には、粒子周囲の空気中に多くの水分子が存在するだけでなく、シリコーンゴム板表面にも水分子が付着している²¹⁾。この状態でコロナ放電電流が流れると、線状粒子先端部付近の空気やシリコーンゴム表面が加熱され、局部的に相対湿度が変化する。結果としてコロナ開始電圧と火花放電電圧が変化するため、コロナ放電の発生が不安定になり、さらに火花放電に至ったものだと考えられる。

4. 気中の線状粒子の特性との比較

相対湿度によりコロナ放電特性が変化する機構を調べるために、図 3 に示す線状粒子が気中に固定されている電極系を用いてコロナ放電特性を調べた。気中に固定された線状粒子を介して起きるコロナ開始電圧を図 8 に示す。 $g=0\sim 14$ mm の電極間の全領域を図 8(a) に示し、粒子位置を細かく変えて測定した $g=0\sim 1$ mm の接地電極近傍の領域および $g=13\sim 14$ mm の高圧側電極近傍の領域をそれぞれ同図(b)と(c)に示している。線状粒子がシリコーンゴム板上に置かれている場合とは異なり、気中に固定されている場合には、線状粒子の位置によっては安定したコロナ放電が発生せず、火花放電が発生することがある。図中の白抜きのプロットは放電開始時に常に安定したコロナ放電が起きたことを示しており、黒塗りのはプロットはコロナ放電を経ずに常に火花放電が起きたことを示している。また、灰色のプロットは測定時にそのどちらかの現象が起きたことを示している。



(a) 電極間の全領域



(b) 接地電極近傍

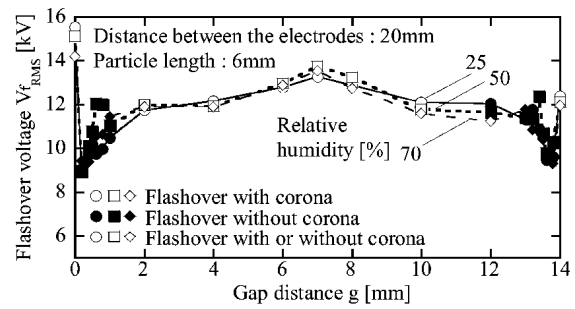
(c) 高圧側電極近傍

図8 気中の平行平板電極間に固定された線状粒子からのコロナ開始電圧

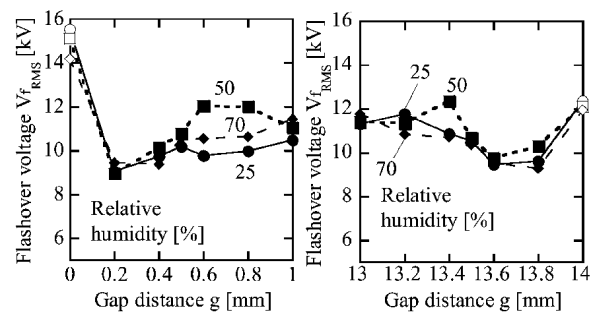
Fig. 8 Corona onset voltage from a wire particle held between the parallel plate electrodes in air.

線状粒子が気中に固定されている場合では、コロナ開始電圧は相対湿度によらずほとんど同じ特性を示す。線状粒子が高圧側電極または接地電極に接触していると、常に安定したコロナ放電が発生し、コロナ開始電圧は6~8.5 kVと低い値を示す。線状粒子が電極から0.2 mm 離れるだけで、放電開始時にコロナ放電を経ずに火花放電が発生するようになる。線状粒子と電極との距離が1~2 mm 以上になると、放電開始時に安定したコロナ放電が起きるようになり、このときのコロナ開始電圧はほぼ一定となった。この特性は同電極構成の直流電界中で線状粒子が正極性側の電極に近づいたときにコロナ放電を経ずに火花放電が発生する特性と一致する²²⁾。

気中に固定された線状粒子を介して起きる火花放電電圧を図9に示す。火花放電電圧はコロナ開始電圧と同様に、相対湿度によらずほとんど同じ特性を示す。ただし、コロナ開始電圧の特性とは異なり、線状粒子が電極に接触しているときに火花放電電圧は高い値を示す。これは、低い電圧でコロナ放電が開始して電極間に定常的な空間電荷を形成するためであると考えられる。線状粒子が電極から離れ、線状粒子と電極との距離が0.2 mm となると、火花放電電圧は急激に低下する。線状粒子と電極との距離が広がり、線状粒子が電



(a) 電極間の全領域



(b) 接地電極近傍

(c) 高圧側電極近傍

図9 気中の平行平板電極間に固定された線状粒子からの火花放電電圧

Fig. 9 Flashover voltage from a wire particle held between the parallel plate electrodes in air.

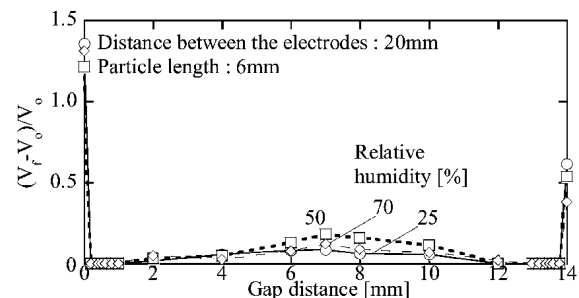


図10 線状粒子が気中に固定された場合のコロナ開始電圧に対する火花放電電圧の増加率

Fig. 10 A rate of increase of flashover voltage to ac corona onset voltage when a wire particle was held between the parallel plate electrodes.

極間中央に近づくにしたがって、火花放電電圧は徐々に高くなる。

コロナ開始電圧に対する火花放電電圧 V_f の増加割合を $(V_f - V_o)/V_o$ で表したものを図10に示す。線状粒子を平行平板電極間に固定した場合には、火花放電電圧はコロナ開始電圧に対して8%~18%増加するにすぎない。一方、線状粒子がシリコンゴム上に置かれた場合に、図6および図7から同様に増加割合を求めると35%~90%増加している。シリコン

ゴム表面で火花放電電圧が増加するのは、表面の帯電により粒子先端の電界が緩和される効果であると考えられる。

線状粒子が気中に固定されている場合には、相対湿度を変化させても、コロナ開始電圧、火花放電電圧ともに特性に大きな違いは現れなかった。これから、線状粒子がシリコンゴム板上中央に置かれている場合には相対湿度によってコロナ放電特性が大きく変化したが、この変化には雰囲気中の水分子はあまり影響していないことがわかる。したがって、相対湿度が高い場合には、シリコンゴム上に付着している水分子が放電特性に影響を与えていることが考えられる。

シリコンゴム上の水分がコロナ放電特性に与える影響として考えられるものに、シリコンゴム表面の抵抗率の変化による帯電量の変化などがある。しかし、このシリコンゴム上の水分がコロナ放電特性に与える影響については、今後の検討を必要とする。

5. まとめ

シリコンゴム板上に置かれた線状粒子を介して起きる交流コロナ放電電流の時間的推移、コロナ開始電圧、そして火花放電電圧の相対湿度依存性を調べた。また、同じ電極間隔を持つ平行平板電極間に浮遊した状態で固定した線状粒子から起きる交流コロナ放電の開始電圧と火花放電電圧の相対湿度依存性から、線状粒子がシリコンゴム板上にある場合の特性を考察した。本研究から得られた知見は以下のとおりである。

線状粒子がシリコンゴム板上に置かれている場合、電極間中央部では、コロナ放電電流の大きさは相対湿度に大きく依存する。相対湿度が低い場合にはコロナ放電が安定して発生するのに対し、相対湿度が高い場合にはコロナ放電の発生は断続的になり、コロナ放電による電流パルスの最大値もばらつく。これは、線状粒子が電極間中央でシリコンゴム板上に置かれている場合には、相対湿度が高くなるとコロナ開始電圧、火花放電電圧ともに高くなるためであることがわかった。

線状粒子を気中に固定した場合には、相対湿度を変化させても、コロナ開始電圧、火花放電電圧ともにほとんど変化しなかった。この結果から、線状粒子を介した交流コロナ放電特性には、相対湿度よりもむしろシリコンゴム板上の水分

が大きく影響することが示唆された。

相対湿度によって、交流コロナ放電特性が変化する原因を明らかにするために、今後、シリコンゴム板上の水分量と交流コロナ放電特性の関係についてさらに詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) Alan H. Cookson and Owen Farish: IEEE Trans. PAS, **92** (1973) 871
- 2) T. Hattori, M. Honda, H. Aoyagi, N. Kobayashi and K. Terasaka: IEEE Trans. PD, **3** (1988) 197
- 3) 鶴信一郎, 吉住和洋, 久富木護, 今坂公宣, 原雅則: 電気学会論文誌, **116** (1996) 1080
- 4) 赤崎正則, 原雅則: 電気学会雑誌, **90** (1970) 1611
- 5) A. J. Phillips, D. J. Childs and H. M. Schneider: IEEE Trans. PD, **14** (1999) 258
- 6) V. M. Moreno, R. S. Gorur and A. Kroese: IEEE Trans. DEI, **10** (2003) 80
- 7) G. G. Karady: IEEE Trans. DEI, **6** (1999) 718
- 8) M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski: IEEE Trans. PD, **15** (2000) 355
- 9) J. Kim, M. K. Chaudhury and M. J. Owen: IEEE Trans. DEI, **6** (1999) 695
- 10) J. P. Reynders, I. R. Jandrell and S. M. Reynders: IEEE Trans. DEI, **6** (1999) 620
- 11) N. Yoshimura, S. Kumagai, and S. Nishimura: IEEE Trans. DEI, **6** (1999) 632
- 12) F. Endo, T. Yamagiwa, T. Ishikawa, and M. Hosokawa: IEEE Trans. PD, **1** (1986) 58
- 13) T. Yamagiwa, T. Ishikawa, and F. Endo: IEEE Trans. PD, **3** (1988) 954
- 14) B. Mazurek, J. D. Cross and R. G. van Heeswijk: IEEE Trans. EI, **28** (1986) 219
- 15) N. L. Allen, M. Boutlondj: IEE Proc. A, **138** (1991) 37
- 16) Leonard B. Loeb: *ELECTRICAL CORONAS, Their Basic Physical Mechanisms*, p. 98, University of California Press, Berkeley and Los Angeles (1965)
- 17) C. T. Phelps and R. F. Griffiths: J. Appl. Phys., **47** (1976) 2929
- 18) MAZEN ABDEL-SALAM: IEEE Trans. Ind. Appl., **21** (1985) 35
- 19) J. M. K. MacAlpine and C. H. Zhang: IEEE Trans. DEI, **10** (2003) 506
- 20) Y. Kudo, and Y. Higashiyama: Proc. IEJ-ESA Joint Symp. Electrostatics, p. 201, Tokyo (2004)
- 21) 武祐一郎: 材料と水分ハンドブック - 吸湿・防湿・調湿・感想 -, 高分子学会高分子と吸湿委員会編, pp. 600-606, 共立出版株式会社, (1968)
- 22) 工藤祐輔, 杉本俊之, 東山禎夫: 平成 14 年度電気関係学会東北支部連合大会公演論文集, p. 263 (2002)