ポリエチレンチューブ内のアーク陽光柱の 電界の強さと放射パワー

准員 滝川 浩史 (豊橋技科大)

正員 榊 原 建 樹 (豊橋技科大)

正員 鬼 頭 幸 生 (名古屋大)

1. ま え が き

都市地中配電系統に普及してきている CV ケーブルにおいて、その故障点に発生するアークは、気中における故障点アークよりも間欠アークに成りやすい⁽¹⁾⁽²⁾。この原因の一つは、ケーブル故障点に発生するアークの様相が気中の故障点に発生するアークの様相とは異なることにあって考えられている⁽¹⁾。ケーブル絶縁層を貫通してアークが発生すると、その周囲の高分子絶縁材料がアークの熱によって容易に熱分解するため、アークはその周囲から噴出する多量の分解ガスにさらされることになる。

従来、電力系統で発生するアークの研究は、ガス中や金属蒸気混入時に関するものが多い。このうち、器壁安定化アークは最も単純化されたアークの形態であり、空気中や SF₆ ガス中におけるそれらの静特性および動特性に関して実験および理論面より詳細な研究が行われてきている⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。更に、電極材料から発生する金属蒸気がアークに及ぼす影響について検討するための金属蒸気混入アーク⁽⁷⁾⁽⁸⁾、あるいは、ガス吹付け遮断器に発生するアークを対象としたガス吹付け安定化空気アーク⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾に関して多くの研究がなされている。

しかしながら、冒頭で述べたような高分子有機材料を貫通するアークプラズマに関しては、高圧カットア

ウトヒューズの溶断時に発生するアークを対象とした電流遮断の観点からの研究⁽¹¹⁾⁽¹²⁾がなされているが、基礎的な観点からの研究は少なく⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、特に、本論文で対象としているポリエチレンを貫通するアークについての研究は見当たらない。

以上のような背景のもとに本研究はポリエチレンを貫通するアークプラズマ（以下、ポリエチレンアークと呼ぶ）の基礎的特性を明らかにするものである。すなわち、大気中に設置したポリエチレンチューブに直流アークを貫通させ、チューブ内のアーク陽光柱の電界の強さ - 電流特性を実験的に求め、器壁安定化空気アークのそれと比較する。次に、ポリエチレンチューブ端と電極間のアークの様相を観察すると同時に、透明材料であるアクリルチューブを用いて、チューブ内のアーク様相を観測して、高分子材料の熱分解ガスがアーク陽光柱に及ぼす影響について検討を行う。更に、フリーバーニングの状態におけるポリエチレンガス混入アークからの放射パワーを測定し、空気アークおよび銅蒸気混入アークのそれらと比較検討する。

2. ポリエチレンアークの電界の強さ

〈2・1〉 実験装置 実際のケーブル故障時に発生するアークは心線、外皮および絶縁体の形状により複雑な様相を呈するが、本研究で対象とするアークは幾何学的形状が最も単純である円筒状チューブ中を貫通するアークとした。その実験装置を図1に示す。大気中で上下に配置した銅電極間にポリエチレンチューブを配置し、電極接触法によりチューブ中を貫通するアークを点弧する。この実験装置はいわゆる器壁安定化アーク装置の器壁の箇所にポリエチレンを配置したものであり、従来の安定化アークの特性との比較が可能となる。なお、後述するようにこのようなアークの電

Electrical Field Strength and Radiation Power of the Arc Burning through a Cylindrical Polyethylene Tube. By Hirofumi Takikawa, Associate, Tateki Sakakibara, Member (Toyoashi University of Technology) & Yukio Kito, Member (Faculty of Engineering, Nagoya University).

滝川浩史：准員，豊橋技術科学大学大学院工学研究科修士課程（現在，名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程）
榊原建樹：正員，豊橋技術科学大学工学部電気・電子工学科
鬼頭幸生：正員，名古屋大学工学部電気学科

図 1 実験装置の断面図

Fig. 1. Longitudinal cross-section of experimental device.

極は、ポリエチレンチューブ端から噴出する激しいプラズマジェットにさらされるため、電極の消耗が著しい。そこで、冷却壁と電極との接触面積をできるだけ広くし、しかも、冷却水が通過するパイプ系統を太くすることにより冷却効果を高め、電極消耗を抑制するようにした。

(2・2) 測定 アーク電源には直流 1,000 V, 30 kVA の電源を用い、アークと直列に抵抗を接続してアーク電流 1~18 A の範囲で実験を行った。

ポリエチレンアークのチューブ内陽光柱の電界の強さの求め方は、文献(3)で用いられている手法に従った。すなわち、まず、チューブ孔径およびチューブ長を一定とした場合の点弧直後のアーク電圧-アーク電流特性を測定する。次に、チューブ長を変えて同様な測定を行うことにより、チューブ長をパラメータとした電圧-電流特性を得る。一例として、チューブ孔径 6 mmφ の場合のこの特性を図 2 に示す。一度使用したチューブは孔径が変わってしまうので、チューブは測定のために新しいものと交換した。

次に、実測した電圧-電流特性すなわち図 2 をアーク電流をパラメータとした電圧-アーク長特性に書き換えるとその結果は図 3 のようになる。図 1 に示すようにチューブ上端と陽極間およびチューブ下端と陰極間のギャップを 2 mm ずつに設定しているため、アーク長はチューブ長に 4 mm を加えた値である。図 3 から、アーク電流が一定の場合、アーク電圧はアーク長に対して直線的に増加していることがわかる。従って、このよう配をもって電極降下の影響およびチューブ端と電極間の電圧降下の影響を除いたチューブ内陽光柱の電界の強さとしてとることができる。従来の器壁安定化アークでは軸方向への対流がないため電圧-アーク

図 2 ポリエチレンアークの電圧-電流特性 (チューブ孔径: 6 mmφ)

Fig. 2. Voltage-current characteristics of polyethylene arc (tube diameter: 6 mmφ).

図 3 ポリエチレンアークの電圧-アーク長特性 (チューブ孔径: 6 mmφ)

Fig. 3. Voltage-arc length characteristics of polyethylene arc (tube diameter: 6 mmφ).

ク長特性は直線となるのが当然とされていたが、ポリエチレンアークでは、軸方向への対流が顕著であるため、当初、電圧-アーク長特性は直線にはならないと予想した。しかしながら、実測結果は図 3 に示すように直線となった。従って、少なくともチューブ長が 30 mm 以内の範囲にあるならば電界の強さは軸方向に関して一定であるとしてよい。

以上の操作を 2, 3, 4, 6, 9 mmφ のチューブ孔径について繰り返し実験を行い、電界の強さを求めた結果を図 4 に上方の三つのカーブで示す。

(2・3) セラミックアークとの比較 図 4 に示した結果より、今回の実験範囲においてはポリエチレンアークの電界の強さは電流の増加につれて減少し続ける傾向を呈していることが見いだされる。また、各

図 4 ポリエチレンおよびセラミックアークの
電界の強さ-電流特性

Fig. 4. Field strength-current characteristics of polyethylene and ceramics arc.

孔径について電界の強さを比較してみると、孔径 4, 6, 9 mmφ の場合では電界の強さ-電流特性には差異が認められないが、孔径が更に 3 mmφ, 2 mmφ と細くなるに従い特性曲線は上昇していることがわかる。

器壁からの熱分解ガスの発生がないと思われるセラミックチューブを用いて同様に電界の強さを求めた結果を図 4 中の下方に示す。セラミックチューブを貫通するアークをセラミックアークと呼ぶことにするが、これはこれまで報告されている器壁安定化空気アークの電界の強さ-電流特性⁽³⁾と完全に一致している。

セラミックアークの電界の強さは、チューブ孔径 3~9 mmφ の範囲で、孔径が細くなるに従い電界の強さが上昇しているが、ポリエチレンアークの電界の強さをセラミックアークのそれと比較すると、どの孔径の場合にも、前者の電界の強さが後者よりも著しく高い。例えば、電流 5 A で両者の電界の強さを比較すると、セラミックアークでは孔径 3 mmφ の場合に 80 V/cm であるのに対し、ポリエチレンアークでは孔径 4~9 mmφ の場合で 150 V/cm となり前者の約 2 倍にもなる。

3. 高分子材料を貫通するアークの様相

〈3・1〉 ポリエチレンアークの様相 ポリエチレンアークの電界の強さが、従来のアークのそれに比べて高い原因として次のような現象が挙げられる。アークの高温によってチューブ内壁の固体ポリエチレンが溶発・熱分解し、その結果、アークの雰囲気は空気を含まない純粋なポリエチレン熱分解ガスで充満される。また、点弧瞬時から持続的に発生するこの熱分解ガスはチューブの出口から噴出せざるを得なく、その

図 5 露出を変えた場合のポリエチレンアークの
写真 (チューブ孔径: 4 mmφ)

Fig. 5. Photographs of polyethylene arc taken with different exposure (tube diameter: 4 mmφ).

ためチューブ内のアークにおいては軸方向への対流が発生している。

このようにポリエチレンアークにおいては、ポリエチレンの熱分解ガスの振舞いとその特性に支配的な影響をもたらすと考えられる。そこで、そのようなポリエチレンの熱分解ガスの様相を視覚的にとらえるために、ポリエチレンアークの写真撮影を行った。そのときの実験装置は、図 1 に示したそれと同一であるが、チューブの上・下端と陽・陰極間のギャップをそれぞれ 2 mm から 10 mm に広げた。その理由は、ポリエチレンチューブは不透明であるためチューブ内のアークは観察できなく、その代わりチューブの出口付近の

(a) チューブ孔径: 6mm
フィルタ: (ND8)×3
+(ND2)
電流: 11.4A

(b) チューブ孔径: 2mm
フィルタ: (ND8)×3
電流: 12.1A

図 6 チューブ孔径を変えた場合のポリエチレンアークの写真

Fig. 6. Photographs of polyethylene arc burned in different tube diameter.

状況を詳細に把握しようとしたからである。

撮影結果の一例を、図5および図6に示す。撮影はISO 100のカラーフィルムを使用し、シャッタ速度 1/500 s, 絞り 22 で行い、適当な ND フィルタを使用した。

図5の2枚の写真は、孔径 4mmφ のポリエチレンアークの様相を示すものであり、ND フィルタの濃度がそれぞれ異なっている。同図(a)は主にアークの外炎部分の様相をとらえるために、多少露光オーバー気味に撮影したものである。中央に位置するポリエチレンチューブの上下に光っている部分を外炎と見なすならば、外炎は出口付近では細く、出口から少し離れると太くなり、上下の電極に向かってその太さは徐々に増し、電極に到達している。図5(b)はアークの弧心の状況をとりえることを目的とし、多少露光不足気味に撮影したものである。この写真に写っている部分を弧心と見なすならば、弧心は二つの層から成り立っていることがとらえられている。すなわち、橙色に写っている外側の層と青色に写っている内側の層が観測される。

図5は孔径 4mmφ のときのアークの様相であったが、図6は孔径を変えた場合のアークの様相を示している。同図(a)は孔径 6mmφ と太めの場合、(b)は孔径 2mmφ と細めの場合である。それぞれ陽光柱の内部の様相が観察できるように ND フィルタにより露光を調整した。孔径 6mmφ の場合にはチューブ端から発する橙色を帯びた境界線は電極の方向に広がりながら延びており、内側にかすかに見える青色

(a) チューブ孔径: 6.3mm
フィルタ: (ND8)
+(ND2)
電流: 11.9A

(b) チューブ孔径: 2mm
フィルタ: (ND8)×2
+(ND4)
電流: 12.2A

図 7 アクリルアークの写真

Fig. 7. Photographs of polymethylmethacrylate arc.

のすじが電極に向かってまっすぐに延びている。孔径 2mmφ の場合には、アークは細い状態を維持したまま電極まで到達しており、詳細にみると、青い層で囲まれる陽光柱の真中に橙色の一本のすじが通っていることがとらえられている。

〈3・2〉 アクリルアークの様相 チューブ内部のアークの様相を観察するために、アクリルチューブを貫通するアーク（以後、アクリルアークと呼ぶ）の撮影を行った。アクリルは透明材料であるためチューブ内部のアークの様相を観察できるという利点がある。また、アクリルはポリエチレンと同様に高分子有機材料でありアークの高温によって容易に熱分解ガスが発生するため、チューブ内でのアークの挙動はアクリルの場合もポリエチレンの場合と同様であると考えられる。

結果を図7に示す。同図(a)は孔径が 6.3mmφ のときで露光オーバー気味に撮影したものである。チューブ端と電極間に形成されるアーク像は、ポリエチレンの場合の図5と全く同様であることがわかる。また、同図より、チューブ内のアーク陽光柱はほぼ円筒対称の形状を呈していると言ってよく、その陽光柱の直径はチューブ孔径（図7(a)において灰色で示される部分の直径）よりかなり細くなっていることが見いだされる。ちなみに、器壁安定化空気アークの場合、同程度の電流においても、アーク直径は器壁孔径よりも細く、発光温度を 5,000 K とすると⁽¹⁵⁾ アーク直径は器壁の 75% 程度である⁽⁶⁾。これに対し、図7(a)の場合にはアーク直径はチューブ孔径の 55% 程度である。このことは、チューブの内壁から多量に発生する熱分

解ガスが、アーク陽光柱を周辺から中心に向かって狭めていることを示唆している。

図7(b)はアクリルの孔径が2mmφの場合で、陽光柱内部の様相が観察できるようにフィルタの枚数を調節した。同図から、チューブ内に形成されたアークとチューブ外のアークは同様な様相を呈していることがわかる。チューブ出口においてアーク形状は連続しており、従ってチューブ出口のアークの直径はチューブ内のアークの直径と見なしてよい。ポリエチレンアークに関しても同様なことが推察される。

4. ポリエチレンアークからの放射パワー

〈4.1〉放射パワーの測定方法 前章においてポリエチレンアークの写真撮影を行った際、空気アークの場合と比べてその露光を著しく抑えなければならなかった。このことより、ポリエチレンアークからの放射がかなり強烈なものであることが予想された。そこで、光パワーメータを用いてポリエチレンアークからの放射パワーを定量的に把握し、空気アークおよび銅蒸気混入アークの放射パワーと比較した。

測定に用いた光パワーメータはサーモパイル形のセンサを内蔵しており、精度： $\pm 5\%$ /s、感応波長範囲：300 nm～30 μ m、有効センサ面積：2.54 cm²のものである。図8に示すように、この光パワーメータを電極間中心より水平方向に24.75 cm離れたところに配置し、レンズを用いてアーク像を光パワーメータのセンサ面上に結像させて測定を行った。

〈4.2〉ポリエチレン熱分解ガスおよび銅蒸気混入アーク発生装置 ポリエチレンは、不透明であるため、ポリエチレンチューブ内の放射パワーを直接測定することは困難である。そこで、大気中においてポリエチレン熱分解ガスが十分混入しているアーク（以後、

図8 放射パワー測定装置の配置図

Fig. 8. Arrangement of measurement instruments for radiation power from free burning arcs.

図9 各種フリーバーニングアークの発生装置

Fig. 9. Electrode structures for making various types of free burning arcs.

ポリエチレンガス混入アークと呼ぶ) 状態を作り、それに対して測定を行った。図9(a)に、ポリエチレンガス混入アークの発生装置を示す。電極間ギャップを30 mmとし、陰極上に孔径6 mmφ、長さ5 mmのポリエチレンチューブを載せ、このチューブを貫通するようにアークを点弧することにより、ポリエチレンガス混入アークを得た。孔径6 mmφのチューブからは多量の熱分解ガスが噴出するので、陽光柱に十分な熱分解ガスをアーク内に混入させることができた。

図9(b)に、銅蒸気混入フリーバーニングアークの発生装置を示す。下部電極に3 mmφのタングステン棒を埋め込み、そのタングステン棒の上端部を厚さ約1 mmの銅キャップで覆ったものを陰極とした。タン

図10 各種フリーバーニングアークからの放射パワー

Fig. 10. Radiation power from various types of free burning arcs.

グステンの熱伝導率は銅の 1/3 と低く、しかも細くしてあるのでタングステン上端部の銅キャップ陰極は冷却されにくく、そのため高温となり、銅蒸気が盛んに発生する。この銅蒸気発生装置によって、単に銅電極を用いたアークよりもかなりの量の銅蒸気を定常的にアーク内に混入させることを可能にした。

なお、空気フリーバーニングアークには十分に冷却を施した銅-銅電極を用い、電極間ギャップを 25 mm とした。銅電極を用いてはいるものの、18 A 以下の低電流範囲では、点弧直後数秒間は銅スペクトルは観測されず、銅蒸気の混入のない空気アークを実現できた。

〈4.3〉 実験結果および検討 放射パワーの値として、点弧後約 3 秒間における光パワーメータの指示値の平均値を採用した。この点弧時間内であれば、それぞれのフリーバーニングアークは、それぞれの条件を満たし安定に点弧し続けた。測定結果を図 10 に示す。電流の増加に伴い空気アークの放射パワーは増大しているが、ポリエチレンガス混入アークの場合には、電流の増加に対して放射パワーはほとんど変化していない。ポリエチレンガス混入アークの放射パワーの値は、空気アークのそれと比較してみると、10 A では約 450 倍もの値を呈している。放射パワーの測定結果に基づいて、近似的に放射パワーを算定し、その値を陽光柱の長さで割ることにより、アーク陽光柱 1 cm 当りの放射損失を求めることができる。10 A の場合を例にとれば、ポリエチレンガス混入アークの放射損失は約 630 W/cm となり、空気アークのそれは約 1.4 W/cm となる。

次に、これらの放射損失がアーク入力は何%であるかを算定するために、ポリエチレンガス混入アーク、銅蒸気混入および空気アークの電界の強さ-電流特性を測定した。その結果を図 11 に示す。なお、電界の強さは〈1.2〉節と同様な手法を用いて求めた。この図

より、ポリエチレンガス混入アークの電界の強さは空気アークと比較して 2.4~5.6 倍高いことがわかる。アーク入力に換算すれば、10 A の場合、ポリエチレンガス混入アークでは 700 W/cm、空気アークでは 200 W/cm となる。

以上の結果より、10 A の場合、ポリエチレンガス混入アークの入力に対する放射損失の割合は約 90%、空気アークのそれは約 0.7% となる。本実験の範囲内では、他の電流値においてもこの割合はほぼ同程度である。

なお、銅蒸気混入アークの放射パワーは、空気アークのそれより 1 桁弱いが、ポリエチレンガス混入アークと比較すると 1~2 桁低いことが判明した。また、これまで報告されているように⁽⁸⁾、銅蒸気混入アークの電界の強さは、空気アークのそれよりも 20~50% 低いことも確認された。これらの結果より、10 A の場合の入力に対する放射損失の割合を算定したところ 7% となった。

5. む す び

高分子材料を貫通するアークプラズマの一つであるポリエチレンアーク陽光柱の電界の強さを実験的に求めた。次に、ポリエチレンおよびアクリルアークの様相を観察するため写真撮影を行った。最後に、ポリエチレンガス混入アークからの放射パワーを測定し、空気アーク、および銅蒸気混入アークのそれらと比較した。

これらの結果から、高分子有機材料であるポリエチレンを貫通するアークプラズマは、以下のように、空気アークおよび銅蒸気混入アークとは非常に異なった特性を呈することが判明した。

(1) ポリエチレンチューブ内のアーク 陽光柱の電界の強さ-電流特性はチューブ孔径 4 mmφ から 9 mmφ の範囲では孔径にほとんど依存しないが、孔径 4 mmφ 以下では孔径が細いほど電界の強さは高くなる。

(2) ポリエチレンアークの電界の強さは器壁安定化空気アークのそれと比較して 1.5~6 倍程度高い。

(3) チューブ内のアークは円筒状に軸方向に一様に形成され、アーク陽光柱の直径はチューブ孔径よりもかなり細く絞られる。

(4) ポリエチレンおよびアクリルアーク陽光柱の周辺および内部には、橙色や青色を呈する円筒状の層が形成されている。

(5) ポリエチレンガス混入アークからの放射パワーは、空気アークおよび銅蒸気混入アークと比較する

図 11 各種フリーバーニングアークの電界の強さ
Fig. 11. Field strength-current characteristics of various types of free burnig arcs.

と 50~1,000 倍と著しく高い。

(6) アーク電流 10 A について, 実験値から放射損失の割合を算定したところ, 空気アークでは 0.7%, 銅蒸気混入アークでは 7% となったのに対し, ポリエチレングス混入アークでは 90% となった。このことから, ポリエチレンアークでは, 放射損失がアークのエネルギーバランスを解析するうえで重要であると考えられる。

(昭和 60 年 11 月 25 日受付, 同 61 年 8 月 7 日再受付)

文 献

- (1) 榊原・吉井・鬼頭: 「6.6kV CV ケーブル系統の故障時における間欠アークと異常電圧」, 電学誌 B, **103**, 387 (昭 58-6)
- (2) 浦野, 他: 「配電用 6.6kV CVT ケーブル間欠地絡時のアーク抵抗, 絶縁破壊電圧の測定」, 電気学会電力技術研究会, PE-85-110 (昭 60-7)
- (3) 鬼頭・宮地・足立: 「器壁安定化空気アーク陽光柱の電界の強さ」, 電学誌 A, **96**, 280 (昭 51-6)
- (4) H. Edel & F.H. Felone: "Theory of a Field-tube Thermal Arc Column", *Brit. J. Appl. Phys.*, **16**, 219 (1965)
- (5) 榊原・鬼頭・宮地・池田: 「放射のある安定化空気アークの陽光柱の電界の強さ」, 電学誌 A, **99**, 592 (昭 54-12)
- (6) 松村・鬼頭・宮地: 「過渡空気アーク時定数の器壁断面積および中心温度依存性」, 同上 A, **99**, 503 (昭 55-11)
- (7) 作田・鬼頭・宮地: 「銅蒸気混入による高温空気中の電子密度の増大」, 同上 A, **98**, 209 (昭 53-4)
- (8) 同上: 「銅蒸気混入による器壁安定化アークの電界の強さの低下」, 同上 A, **100**, 181 (昭 55-4)
- (9) 松村・鬼頭: 「軸方向強制対流を伴う安定化空気アークモデル」, 同上 A, **104**, 241 (昭 59-5)
- (10) 同上: 「軸方向強制対流を伴う安定化空気アークのエネルギー損失」, 同上 A, **105**, 445 (昭 60-8)
- (11) 電気学会編: 我が国の高圧カットアウト, 電気学会技術報告, (II 部) 第 102 号 (昭 55-10)
- (12) 荒井・河野・高谷: 「有機物チューブ内のアーク特性と電流遮断後の絶縁耐力回復特性」, 電気学会研究会資料, 開閉保護装置研究会, SPD-84-31, 43 (昭 59-11)
- (13) E. Z. Ibrahim: "The Ablation Dominated Polymethylmetacrylate Arc", *J. Phys. D (Appl. Phys.)*, **13**, 2045 (1980)
- (14) L. Niemeyer: "Evaporation Dominated High Current Arcs in Narrow Channels", *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, **PAS-97**, 950 (1978)
- (15) 林・作田・鬼頭: 「空気アークに混入した銅原子からの放射特性」, 昭 55 電気関係学会東海支大, No. 19