

交流電圧による霧の絶縁破壊実験

黒崎 孝一, 稲川 敦, 北村 岩雄, 池田 長康

§ 1. ま え が き

雲間放電に引き続いて起こる対地放電や、低層の雲や霧の中を通過する山岳地域の送電線における地絡事故は、人間社会を脅かす自然災害である。これらの災害は大停電を引き起こし社会活動を中断させてしまう可能性を持っており、絶対に避けなくてはならない。しかし、この雲間放電や霧中放電破壊に関する現象は、高電圧工学の分野では空気中の放電現象に比べ今まであまり研究がなされておらず、未知の部分が多く解決されなければならない問題の一つである。我々は、この現象が霧中においての絶縁破壊であることから、まずドライアイス・湯気などの霧を電極間に均一に充満させ、交流電圧による絶縁破壊を観察・測定し、このメカニズムの解明を試みた。本研究は、より一般的な一様非連続な媒質中における破壊現象の解明を目標としているが、まず霧の一定条件下での絶縁破壊電圧を測定し、絶縁破壊の形態を調べたので報告する。

§ 2. 実験装置及び実験方法

本研究における実験回路図を図1に示す。電極の形状は球を用い、電極部は床面から高さ0.8mの位置に水平に設置した。球電極の半径は1cm, 2.5cm, 5cmを用い、ギャップ間隔(d)は0.5cmおきに1~6cmで変化させた。

実験に用いた霧はそれぞれ1) ドライアイスにより発生させた霧, 2) 湯気, 3) 湿度の高い空気, 4) 噴霧器(フォガー)を用いた霧, の4種類である。これらの霧を各々の一定条件で均一に充満させ、破壊電圧を測定した。測定は各ギャップ長で5回ずつ行い、その平均値を測定値とした。

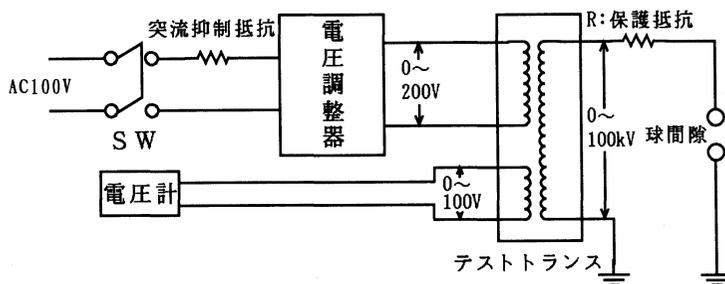


図 1

§ 3. 種々の方法で発生させた霧による絶縁破壊実験

4種類の霧の発生方法およびその実験結果を以下に示す。

3. 1 ドライアイスによる霧

図2のような装置を使用した。ステンレスの容器の中に水を2/3程度入れヒーターで70℃一定にさせた後、粉状に砕いたドライアイス100gを入れて霧を発生させた。この霧は発生する際に負電荷をもつため、容器および上部の板は接地してある。

このようにして発生させた霧を電極間に充満させ、放電形態の観察をしながら破壊電圧の測定を行った。

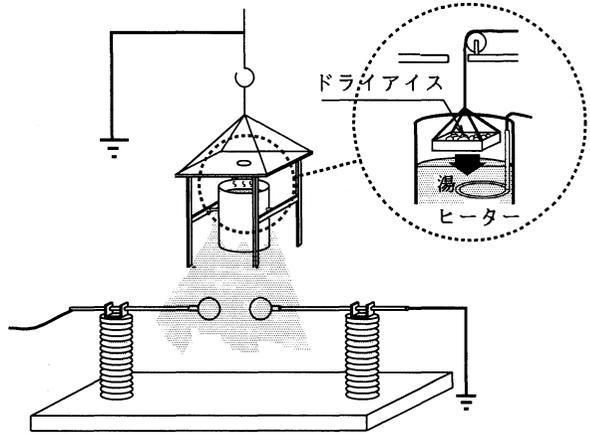


図2

3. 2 湯気による霧

図3のような装置を使用した。湯の入ったステンレスボール内にヒーターを置き水温を85℃一定にさせ、湯気を上方の電極間に充満させた状態での放電形態の観察と破壊電圧の測定を行った。



図3

3. 3 湿度の高い空気

300cm×180cm×250cmの大きさのビニルハウスを図4のように配置し、同様の実験を行った。

この実験は、電極部を囲む接地したビニルハウスの影響および、1～2℃の温度上昇および5～10%の湿度の上昇の影響が破壊電圧と放電形態にどのような変化をもたらすかを調べるために行ったものである。

3. 4 スプレー式フォガーによる霧

3. 3の実験と同じビニルハウスを使用し、霧の生成にはスプレー式フォガーを使用した。

このフォガーによる霧は粒子径約7.2μであり、粒子密度 1.26×10^5 個/cm³の霧を一様にビニルハウス内に充満させた。この状態での電極間の放電形態の観察、破壊電圧の測定を行った。

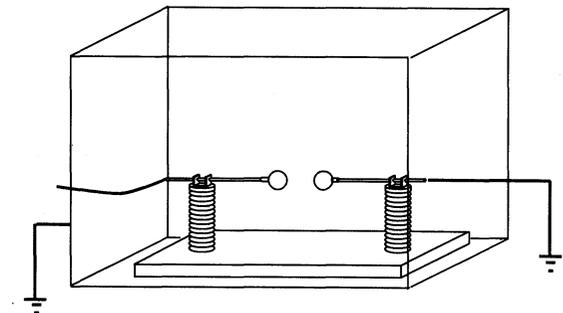


図4

3.5 実験結果

実験結果の一例として、電極間に充満させた媒質がドライアイスの霧の場合の破壊電圧を図5に示す。横軸は3種の電極による電界形状を一致させるため、ギャップ長(d)/球半径(r)をとってある。この図から分かるとおり破壊電圧は、このd/rの値の増大と共に大きくなるという結果が得られた。

またこれらの実験の際、放電形態の観察をビデオ等により詳細に行った。これらの観察より、放電プロセスが以下のように4つに分類出来ると考えられる。

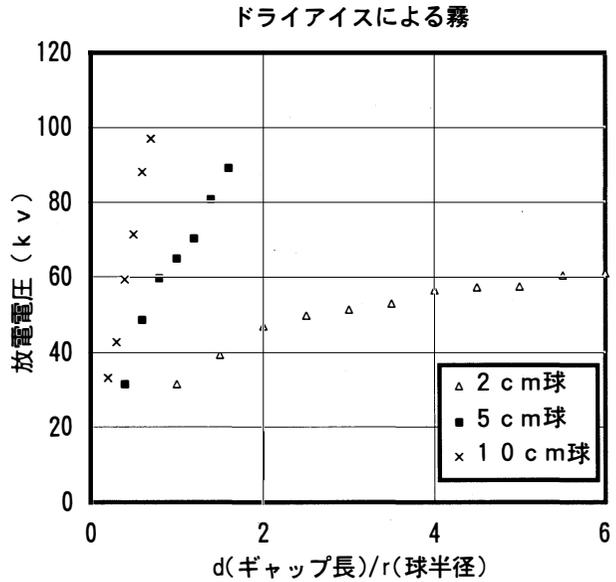
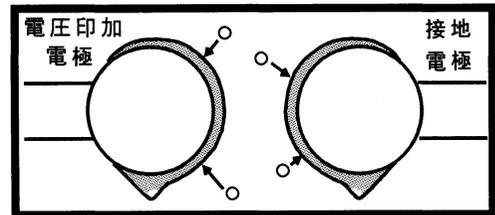


図5

第1段階

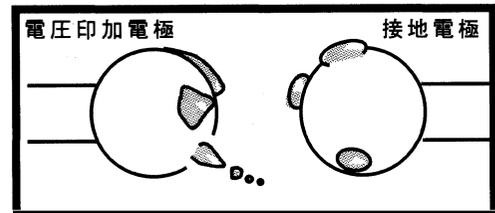
電圧を印加すると、図6(a)に模式的に示すように電極間に介在する水粒子が両電極に引き寄せられ表面に付着する。



(a)

第2段階

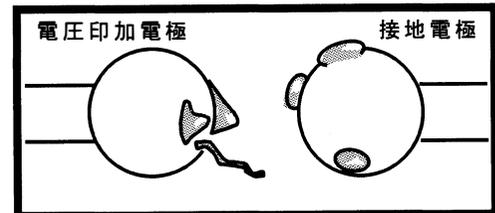
序々に電圧を上げていくと、同図(b)に示すように電圧印加側電極に付着した水粒子が幾つかに集まり接地側に引き寄せられ隆起する。



(b)

第3段階

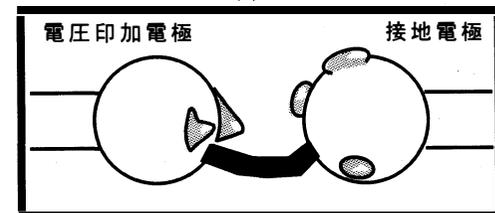
更に電圧を上げ放電閃絡直前になると、同図(c)のように隆起した水粒子が接地側電極方向に細長く伸びた突起物となる。



(c)

第4段階

閃絡時には、この水滴の柱状の突起物の先端を伝って青く細い炎を伴い放電を行う。



(d)

放電状態の観察により、以上のような放電プロセスが見られた。

このドライアイスを用いた霧以外の湯気、湿度の高い空気、フォグによる霧の場合でも測定結果から得られた破壊電圧はほぼ同様であり、放電形態も同様なプロセスを経ていた。

§ 4. 実験結果の検討

§ 3の測定結果から得られた破壊電圧を検討し、以下のように解析を行った。

§ 4. 1 種々の霧と乾燥空気との破壊電圧の比較

ここでは、霧の破壊電圧を乾燥空気の破壊電圧で割ったものを電圧比として各々算出した。下に示す図7から図10は、ギャップ長/球半径に対してこの電圧比を表したものである。これらの図は各媒質においての破壊電圧の変化が示されている。ギャップ長/球半径を横軸にとったために範囲は半径1 cm球が1から6、半径2 cmの球が0.4から1.6、半径5 cm球が0.2から0.7となっている。

これらの図を見るとどの媒質においても電圧比はそれぞれある周期をもつ波形となった。各媒質によって3つの波形は大きさの差はあるが非常に似ていることから、この波形は各々の媒質で固有の周期特性をもつものと考えられる。

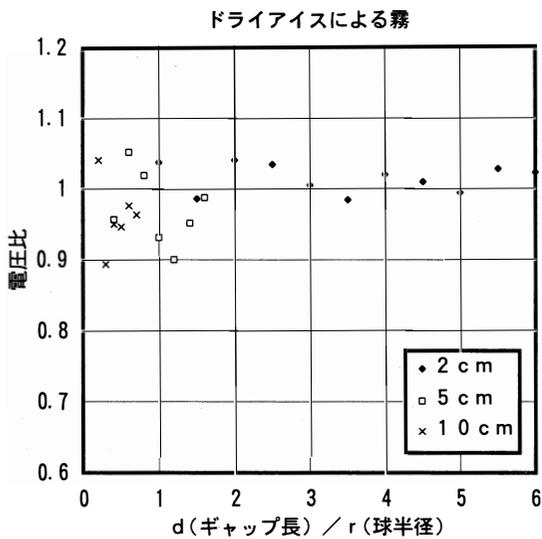


図7

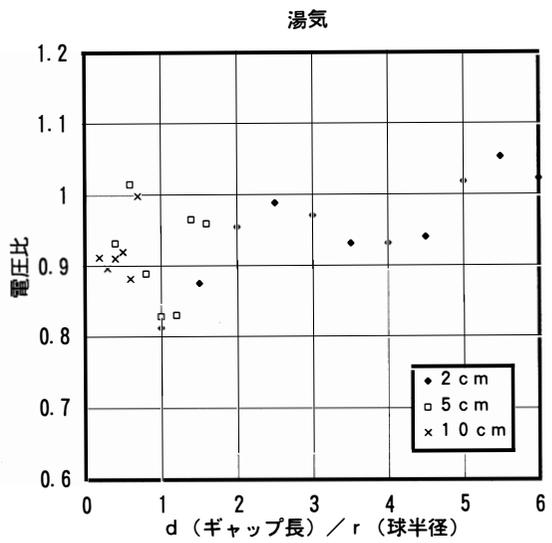


図8

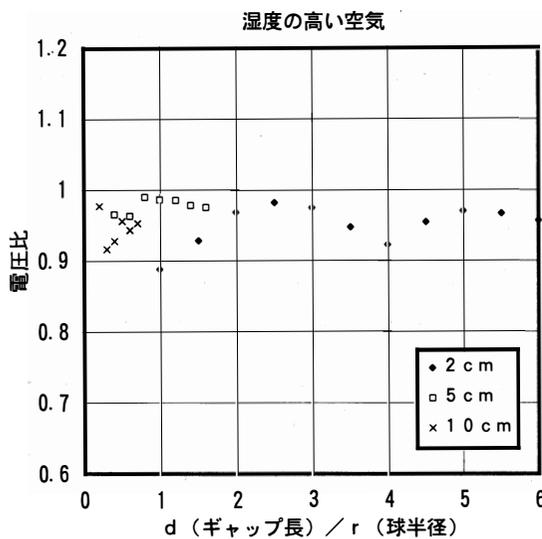


図9

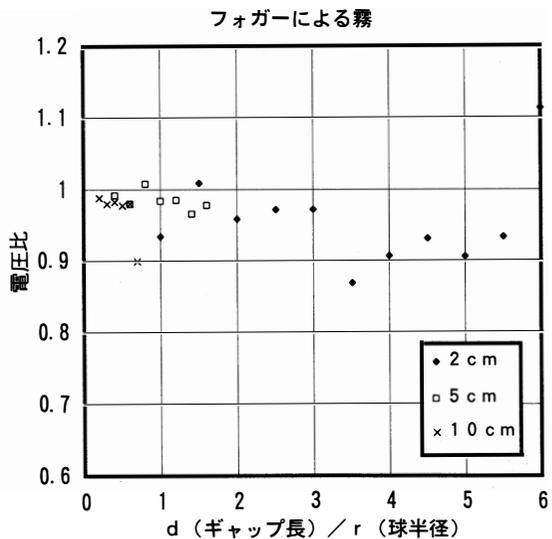


図10

§ 4. 2 ある比例定数による実験結果のまとめ

前の § 4. 1 で得られた結果は各々の媒質における 3 種類の波形が非常に似ており、各媒質ごとに固有の周期特性が見られた。ここで、各波形において極大・極小値をとる横軸の値 (d/r) を比較し、横軸の値にある一定の値 a を掛けることによって 3 種類の曲線が一本にまとめられるのではないかと考えた。図11は、各媒質で一本の曲線にしたものを一つのグラフ上で表したものである。

このように電圧比を示す波形はほぼ一つの帯状波形にまとめることが出来る。各媒質で電圧比の波形を見てもこの帯状波形に近い形となっていることから、どの霧の場合も破壊はある特有の物理的過程で行われる現象であると考えられる。

ここで、電極表面に付着する水粒子が絶縁破壊電圧の低下にどれだけ影響するかを見るために、図12のようにあらかじめ電極表面に水膜を張った状態での空气の破壊電圧を測定する補足実験を行った。この実験結果を図11の結果と重ねて簡略化したものが図13である。この図13より、電極表面に付着する水粒子が破壊電圧低下に非常に影響をおよぼすということが分かる。電極間に霧を充満させた場合でも電極表面に水粒子が付着するため、この影響と電極間に介在する水粒子の影響が相互に作用し、図11のような波形を形成するものと思われる。

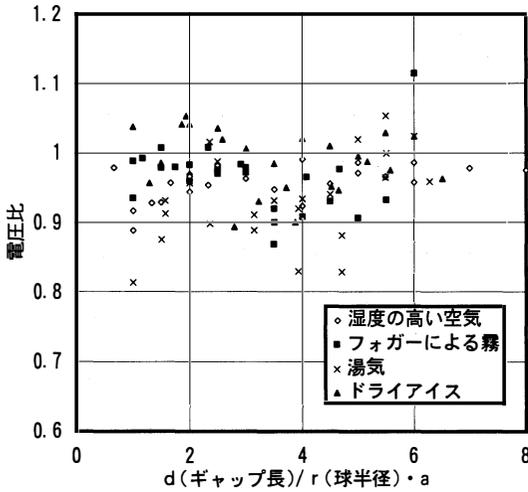


図11

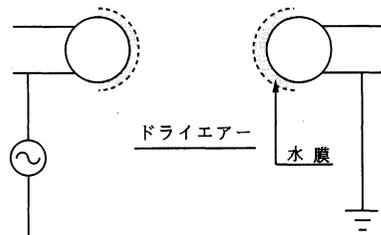


図12

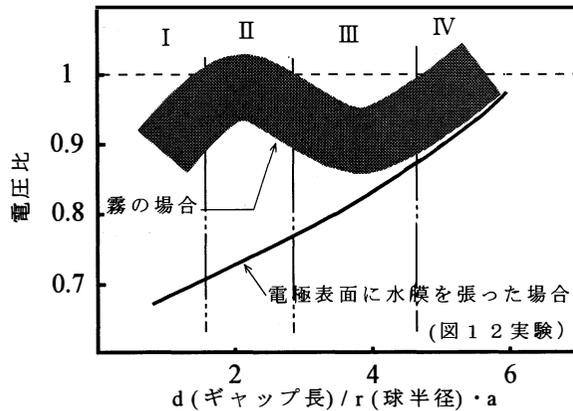


図13

§ 4. 3 電極をもつ霧の絶縁破壊現象の物理像

以上の検討により図13に示すように、ギャップ間隔の大小で図14に示す領域Ⅰから領域Ⅳまでの4領域に分け、電極により電圧を印加された霧の絶縁破壊電圧の電極間距離による変化を、以下のように解析した。

領域Ⅰ：電圧印加と共に電極間の霧粒子がすべて電極表面に付着し、その結果電極間は乾燥状態となる。そこで、水膜の厚さだけギャップ間隔が狭くなり破壊電圧が低下する。

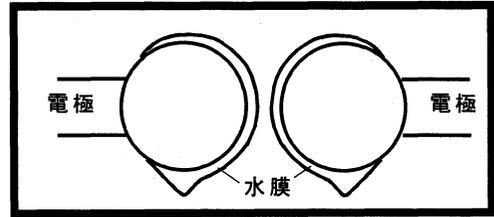
領域Ⅱ：電極間に介在する霧は電極に吸着し、電極間は変わらず乾燥状態のままギャップ間隔が水の膜圧に対して大きくなるので、空気の破壊電圧に近づく。

領域Ⅲ：ギャップ間は更に大きくなるため霧が電極間に入り込み、電極表面に付着する水膜が厚くなる。と共に、ギャップ間にも霧が多少存在するが、電圧印加電極表面の水滴は盛り上がり、水滴を放出するような状態で閃絡する。それ故、再び破壊電圧は低下する。

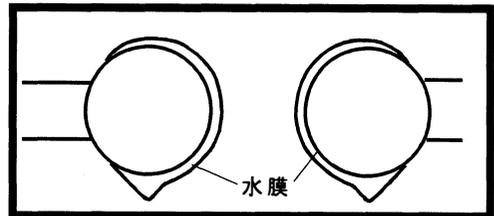
領域Ⅳ：更にギャップ間が大きくなり、電極表面の水膜の影響は少なくなる。また、電極表面の水滴の盛り上がりも少なく、乾燥空気の破壊電圧に近づいていく。しかし、閃絡直前には領域Ⅲと同じ状態を経て、放電が行われる。

以上のように、霧の絶縁破壊電圧の距離による変化は電極表面の影響が大きいが、これらの定性的にまとめた結果から分かる。

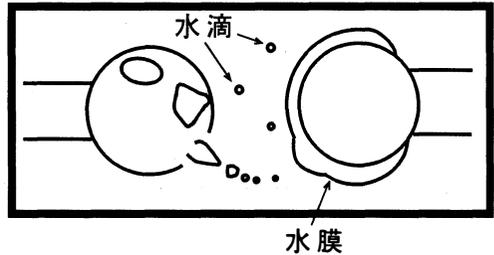
Ⅰ 領域



Ⅱ 領域



Ⅲ 領域



Ⅳ 領域

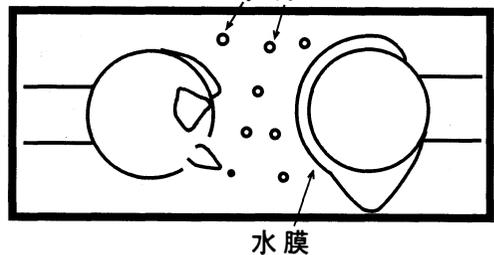


図14

§ 5. ま と め

(1) 実験結果より、霧の乾燥空気破壊電圧に対する電圧比を表した結果は物理的には意味の不明確な各定数を掛けることにより、ほぼ帯状の波形となる。この波形をギャップ間隔の大小で4領域に分け、放電形態を考慮した上で検討した結果、電圧印加電極をもつ霧のような一様非連続媒質での放電メカニズムを定性的に解明することができた。

- 1) 領域Ⅰでの破壊電圧は、電極間の霧が電圧印加と共に電極表面に付着し、この水粒子の影響が大きい。
- 2) 領域Ⅱでは、電極間はやや大きくなるが電極間の霧はほぼ無くなり、乾燥空気での破壊電圧と見なすことが出来る。
- 3) 領域Ⅲでは電極間は更に大きくなるが、電極間の霧および電極間の水膜の盛り上がりにより、破壊電圧は低下する。
- 4) 領域Ⅳでは、電極間は大きく霧の濃度の低い状態となって、霧の影響は小さく乾燥空気の破壊電圧に近づく。

(2) 今後の課題として、

- 1) 物理的意味が不明確な定数の意味の解明
- 2) 非連続媒質の誘電率が絶縁破壊におよぼす影響
- 3) 媒質粒子が電極に付着しない場合の破壊電圧特性
- 4) 無電極放電による一様非連続媒質の絶縁破壊特性などがある。

Breakdown experiments on fog with the alternative current voltage

Kouichi Kurosaki, Atsushi Inakawa,
Iwao Kitamura, Nagayasu Ikeda

It is important to examine the discharge phenomena on the breakdown in the inner thundercloud for learning the mechanism of lightning at the initial stage. However, it is difficult to study directly the breakdown at the inner part of real cloud. Inspire of a cloud, the breakdown experiments with four kinds of fogs uniformly filled between the electrodes are carried with AC voltage. It is found from the experiments that the breakdown voltage are effected strongly by the electrode surface conditions and the discharge mechanism could be divided into 4 region with the distance of the electrodes, from the behaviour of water at the surface of electrodes.

〔英文和訳〕

交流電圧による霧の絶縁破壊実験

黒崎 孝一, 稲川 敦, 北村 岩雄, 池田 長康

雷放電メカニズムの初期段階を学ぶために、雷雲内の絶縁破壊現象を調べることは重要である。しかし、実際の雷雲を用いて絶縁破壊を調べることは、非常に困難である。そこで、雲の代わりに4種類の霧を電極間に一様に充填させ、交流電圧による絶縁破壊実験を行った。この結果、絶縁破壊電圧は電極表面の状態に強く影響するということが分かり、電極表面に付着する水滴を検討し電極間距離により放電メカニズムを4領域に分類することができた。