

送電線遮断時における直流残留電荷の漏洩特性の検討

Investigation of Leakage Characteristics of Residual dc Charge from Detached Transmission Line

酒井 康裕† 村瀬 洋†† 依田 正之†† 澤 五郎††

Yasuhiro SAKAI, Hiroshi MURASE, Masayuki YODA, Goro SAWA

Abstract Authors once investigated residual dc charge decay time of a transmission line. The purpose of this investigation has two points. The first is estimation of reclosing surge of the circuit breaker. The second is estimation of dielectric strength of the gas insulation equipment connected to the transmission line. When transmission line is detached by a circuit breaker, a residual dc charge remains. This charge decays with a certain characteristic time. But this time has not been clarified yet how each weather condition, such as temperature and humidity, affects this decay time. It is known that charge leakage has two mechanisms. One through the air and the other along the surface of insulator. This paper is described the relationship between two leakage current and weather conditions. The result shows that the leakage current of clean insulator is affected by absolute humidity and that is polluted insulator is affected by relative humidity. On the other hand, dark current of air gap is affected by relative humidity.

1. はじめに

電力供給において、高度の安定性と信頼性が要求されることは、停電事故を想像することで容易にわかる。その点で、電気絶縁は重要かつ必須なものである。送配電においても、絶縁は非常に重要である。その一例として、送電線と鉄塔を絶縁する役割、鉄塔において送電線を支持する役割がいしが挙げられる。がいしには、ガラスやシリコンなどもあるが、日本では耐候性、価格の点からもつばら磁器がいしが使用される。その送電システムにおいて、接地・短絡故障が発生した場合、事故点の損壊を防止し、電源および需要家に与える影響を除去するため、故障点を電源から速やかに取り除くことが必要である。この目的のために使用される機器が遮断器である。この遮断器により両端を切り離された送電線には、商用周波電圧の波高値に相当する直流電荷が残留する。この残留直流電圧は、遮断器投入サージに大きな影響を与える。このサージは両端を切り離された送電線を系統に接続する瞬間に発生するものである。また、残留する直流電圧は、送電線を切り離した遮断器の極間や遮断器と送

電線の間設置されている各種機器に商用周波電圧とは異質の電圧を印加することになる^[1]。これらの評価のためにも直流残留電荷の減衰特性の把握は重要である。

著者の一人はかつて、直流残留電荷の減衰時間について調査したことがある^[2]。遮断器により切り離された送電線には直流電荷が残留し、ある時間をもって減衰する。しかし、この減衰時間は、ばらつきが大きく、気温や湿度といった気象条件とは関連付けられていない。この電荷漏洩には二つのメカニズムがあることが知られている。一つ目は、固体絶縁物表面、すなわちがいし表面を流れる電荷漏洩である。二つ目は、送電線から空気ギャップ中を伝わり大地へと逃げる電荷漏洩である。後者の電荷漏洩の減衰時間は、以前の研究により塵・埃、絶対湿度の影響を受けることがわかっている^{[2][3]}。

本稿は、二つのメカニズムを漏洩電流という観点に注目している。すなわち、がいし表面漏洩電流、空中ギャップ暗流、それぞれの漏洩電流と気象条件との相関性を明確にすることを目的としている。

2. 固体・気体の高電圧下における電気伝導の原理

本研究は、高電圧下における固体・気体の漏洩現象を取り扱っている。

† 愛知工業大学大学院 電気電子工学専攻

†† 愛知工業大学 工学部 電気学科

2・1 高電圧下における固体

絶縁体を流れる電流には、その経路により比較的表面を流れる表面電流と絶縁体内を流れる体積電流がある。

2・1・1 固体絶縁物表面の電気伝導

固体絶縁体表面は、周囲のふんい気の影響を受け、気体の吸着、微粒子固体などが付着し、複雑な界面を形成し、そこに生じる表面電気伝導も体積電気伝導とは異なった独特な様子を示す。しかし、最も一般的で影響が比較的大きいのは、表面における水蒸気の吸着である。

2・2・2 固体絶縁物中の電気伝導

理論的には固体絶縁体に電流の担い手は存在しないが、実際にはわずかであるが電流が流れる。固体中を流れる電流の担い手は電子、正孔および正負イオンである。印加電圧の低い領域では、オーム則に従い電流は電圧に比例する。印加電圧が上昇した領域では、オーム則からはずれて電流は急激に上昇する。さらに印加電圧を上昇させた領域では、電流は急激に上昇し絶縁破壊に至る。

2・2 高電圧下における気体

最初は電圧とともに電流が比例して増加する。ここでは、イオン密度はほぼ一定で、電界によるイオンの移動速度により制限された電流がオーム則に従って流れる。電圧上昇によりイオンの速度が増し、電極間で生成されたイオンが再結合することなく、すべての電極に到達すると飽和電流が流れる。この領域の大気中での飽和電流密度は 10^{-17}A/cm^2 ほどである。さらに電圧が上昇すると、電流の急増領域が現れ、その後、絶縁破壊に至る。ここでは、電界により加速された電子による中性分子の衝突電離が起り、電荷の急増が生じる。

3. がいし表面撥水性物質塗布による効果

がいしの汚損対策の一つとして、撥水性物質の塗布が挙げられる。ここでは、がいし表面にシリコンオイルを塗布したものを撥水性、何も塗布しないがいしを親水性とし二つを比較している。また、同時に測定した気象条件との相関性について検討を行なっている。

3・1 実験方法

図 1 に実験構成図を示す。今回、模擬送電線としてアルミ製パイプを使用している。アルミ製パイプの一端をエポキシ製絶縁物、他端をがいしで支持している。アルミ製パイプにがいしを接続し、がいしの一

端にコンデンサを接続し接地している。コンデンサの両端に同軸ケーブルを設置し、エレクトロメータへと接続している。この状態でアルミ製パイプに $\pm 30 \text{kV}$ の高電圧を印加し、コンデンサ端子電圧をエレクトロメータによって測定する。今回使用したコンデンサの容量は $0.253 \mu \text{F}$ 、エレクトロメータの入力インピーダンスは $10^{13} \Omega$ 以上である。したがって、CR 時定数は $2.53 \times 10^6 (702 \text{ 時間})$ となる。これより十分短い時間領域においてはコンデンサに蓄積される電荷を測定することができる。

コンデンサに蓄積される電荷、電流は、それぞれ次式で表される。

$$Q = CV$$

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \times \frac{dV}{dt}$$

よって、漏洩電流はコンデンサ端子電圧の傾きとコンデンサ容量の積で算出している。

また、相関係数は次式で算出する。

$$\text{相関係数} = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}}$$

$$\begin{cases} n : \text{データ数} \\ x : \text{相対湿度もしくは絶対湿度} \\ y : \text{漏洩電流} \end{cases}$$

がいしの上部と下部にはシールドリングを接続している。これにより、がいし端部の電界集中を緩和している。がいし下部のシールドリングにより、模擬送電線より空气中を伝わり下部電極へと流れる暗流を省き、がいし表面漏洩電流のみを測定している。使用したがいしは有効長 155mm、平均直径 58.5mm、漏れ距離 227mm である。

本研究目的は、送電線遮断時における直流残留電荷の漏洩特性調査である。従って、ここでの撥水性物質塗布は汚損対策目的ではなく、がいし表面電荷漏洩を比較するためのものである。

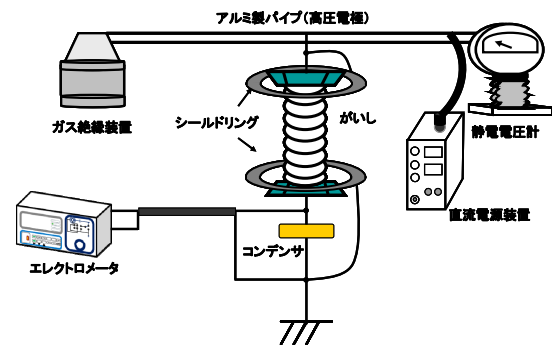


図 1 実験構成図

Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement.

送電線遮断時における直流残留電荷の漏洩特性の検討

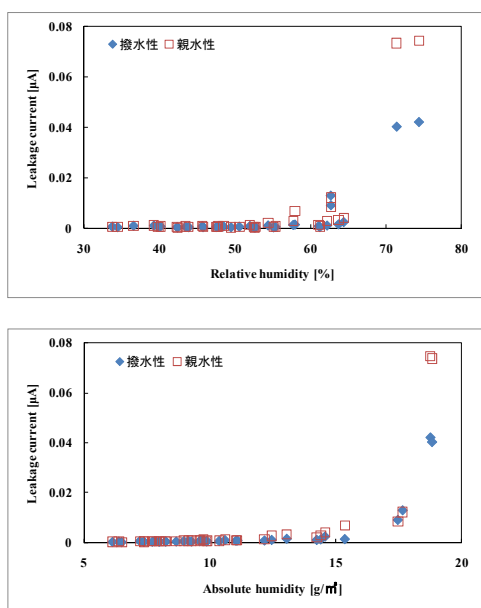


図2 漏洩電流と気象条件との相関性(正極性)

Fig. 2 The relationship between leakage current and weather conditions (Positive polarity).

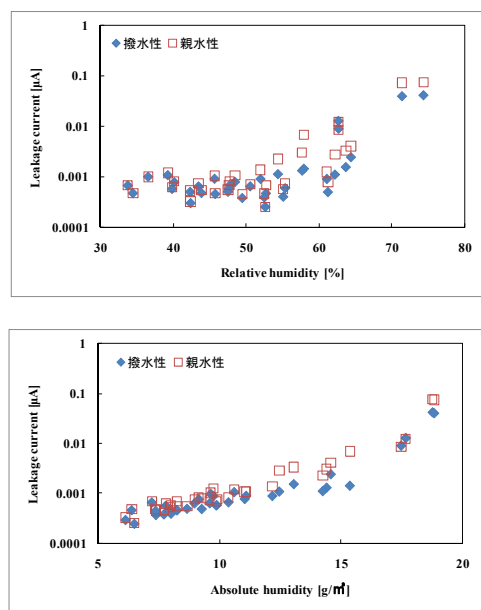


図3 対数目盛を用いた漏洩電流と気象条件との相関性(正極性)

Fig. 3 Re-plotted data of Fig. 2 into logarithmic scale vertical axis (Positive polarity).

表1 各漏洩電流と気象条件の相関係数

Table 1 Correlation coefficient between each leakage current and weather conditions.

	親水性	撥水性
相対湿度	0.59	0.60
絶対湿度	0.65	0.69

3・1 結果・考察

図2に、測定したコンデンサ端子電圧の傾きから算出した漏洩電流と気象条件(相対湿度・絶対湿度)との相関性(正極)の一例を示す。図3は、図2の縦軸を対数目盛に変換したグラフである。表1に各漏洩電流と気象条件との相関係数を示す。

図2の相対湿度、絶対湿度を比較する。相対湿度ではばらつきが見られるが絶対湿度ではばらつきがなくなり相関性が見られる。これは、清浄状態時のがいし表面漏洩電流は空気中の水分量に影響するのではないかと考えられる。絶対湿度 18g/m^3 付近において、漏洩電流が急激に上昇していることが確認できる。この絶対湿度値付近より空気中の水蒸気ががいし表面に連続的に水滴を形成したためと考えられる。そのため、がいし表面の導電性が良好になり漏洩電流値が上昇したと思われる。負極性においても同様の傾向が見られた。

図3において、相対湿度、絶対湿度を比較する。相対湿度ではばらつきが大きいことが確認できる。一方、絶対湿度ではばらつきがなくなり、一本の曲線状にデータポイントが集中しており、相対湿度よりも強い相関性を示していることが確認できる。また、撥水性、親水性を比較すると親水性よりも撥水性がいしの漏洩電流値が低いことがわかる。シリコンオイルを塗布することでがいし表面に連続的な水滴が形成し難かったと考える。これより、撥水性物質を塗布したがいしでは、減衰時間が親水性がいしよりも長くなることがわかる。また、表1より、相関係数からも撥水性、親水性がいしともに絶対湿度に相関性が強いことがわかる。負極性においても同様の傾向が見られた。

4. 汚損・清浄がいしの比較

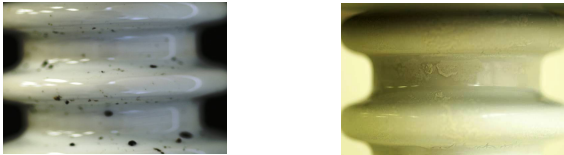
実送電線におけるがいしは、自然条件下にさらされているため汚損による影響を受ける。今回、がいし表面を自然、人工汚損させたがいしと清浄ながいしを比較し、気象条件との相関性について研究を行った。

4・1 実験方法

実験構成図、実験方法については第3項と同様のため、ここでは省略とする。

比較するがいしは三種類とする。一つ目のがいしは、約二ヵ月間、屋外に放置し自然汚損がいしとする。二つ目のがいしは、とのこと食塩の混合液に浸漬させ人工汚損がいしとする。JEC-0201により、平均直径 250mm 以下、がいし配置を屋外、垂直、塩分付着密度を 0.1mg/cm^2 とした場合に、食塩量 $=32\text{g/l}$ と目安にするこ

とができる。また、とのこ量=40g/l(一定)である^[4]。三つ目のがいしは、何も施さずに清浄がいしとする。図 4 に汚損がいしの表面状態を示す。(a)は自然汚損がいし表面で、屋外に放置したことにより塵・埃などにより黒い塊が付着している。(b)は人工汚損がいし表面で、とのこと食塩の混合液に浸漬させたことにより、白い固形が付着している。



(a) Natural pollution. (b) Artificial pollution.

図 4 汚損がいし表面状態

Fig. 4 Surface conditions of polluted insulators.

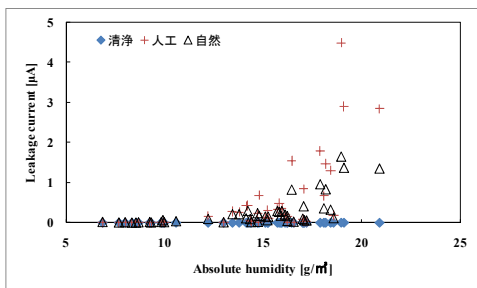
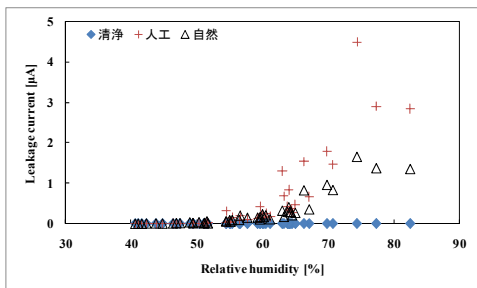


図 5 漏洩電流と気象条件との相関性(正極性)

Fig.5 The relationship between leakage current and weather conditions (Positive polarity).

4・2 結果・考察

図 5 にコンデンサ端子電圧の傾きより、漏洩電流値を算出し、気象条件との相関性についてまとめたもので、正極を一例として示す。図 6 は、図 5 の縦軸を対数目盛に変換したグラフである。表 2 に各漏洩電流と気象条件との相関係数を示す。

図 5 において、相対湿度、絶対湿度を比較する。自然、人工汚損がいしに注目すると、若干ではあるが絶対湿度よりも相対湿度に相関性が見られる。また、人工汚損がいしにおいて、相対湿度 75%付近より漏洩電流値が急激

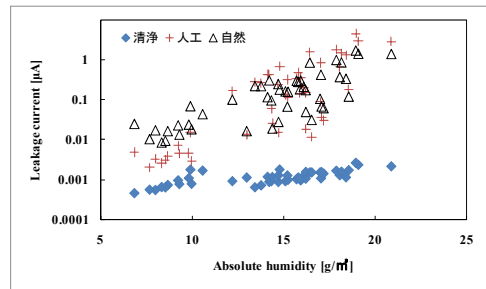
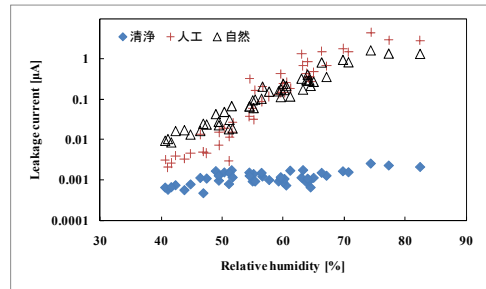


図 6 対数目盛を用いた漏洩電流と気象条件との相関性(正極性)

Fig.6 Re-plotted data of Fig.5 into logarithmic scale vertical axis (Positive polarity).

表 2 各漏洩電流と気象条件の相関係数

Table 2 correlation coefficient between each leakage current and weather conditions.

	自然汚損	人工汚損	清浄
相対湿度	0.83	0.75	0.58
絶対湿度	0.67	0.56	0.55

に上昇していることが確認できる。これは、浸漬した混合液に含まれる食塩の影響と考えられる。食塩の吸湿作用が相対湿度 75[%]付近より急激に働いたと考える^[5]。負極性においても同様の傾向が見られた。また、自然汚損がいしにおいても、相対湿度 75[%]付近より漏洩電流値が上昇している。こちらががいし表面に付着した塵・埃などの吸湿作用が働いたと考えられる。しかし、漏洩電流値を比較すると、人工汚損がいしの方が大きいことがわかる。よって、吸湿現象に大きく影響を及ぼす物質は塵・埃のような非水溶性物質よりも食塩のような水溶性強電解質であると考ええる。

次に、図 6 において、相対湿度、絶対湿度を比較する。ここで、自然、人工汚損に注目すると、絶対湿度では、ばらつきが大きいことが見てわかる。一方、相対湿度においてはばらつきがなくなり、一本の曲線を成していることが確認できる。これより、汚損がいしは相対湿度の影響を大きく受けることがわかる。これは、汚損物質の吸湿作用が絶対湿度よりも相対湿度に依存しているから

送電線遮断時における直流残留電荷の漏洩特性の検討

と考える。

表2の相関係数からも汚損がいしは相対湿度との相関性が強いことがわかる。

以上より、汚損がいしにおける減衰時間は相対湿度の影響を受けることが確認できた。

清浄がいしにおいては、ここでは明確な相違は見られなかった。負極性においても、同様の傾向が見られた。

5. 空中ギャップ暗流と清浄がいし表面漏洩電流の比較

送電線遮断時における電荷漏洩には二つのメカニズムがある。前項までは固体絶縁物表面電荷漏洩についての検討である。今回、二つ目のメカニズム、つまり空気ギャップ中を流れる漏洩電流(暗流)と気象条件との相関性について研究を行った。同時に、清浄がいしの表面漏洩電流を測定し、比較を行った。

5.1 実験方法

図7に実験構成図を示す。模擬送電線からギャップ120mmを設けて円盤電極を設置する。円盤電極にコンデンサを接続し、接地している。この状態で、模擬送電線に±30kVの高電圧を印加し、コンデンサ端子電圧をエレクトロメータにて計測する。

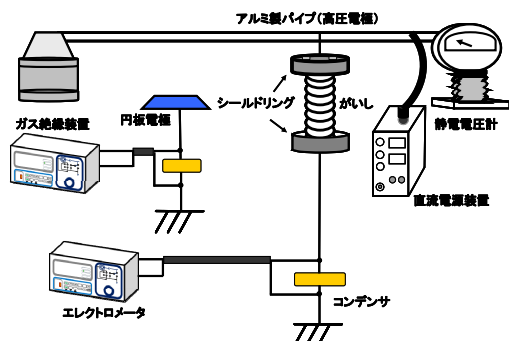


図7 実験構成図

Fig. 7 Schematic diagram of experimental arrangement.

5.2 結果・考察

図8は、測定したコンデンサ端子電圧の傾きから算出した漏洩電流と気象条件との相関性を示したものである。正極を一例として示す。図9は、図8の縦軸を対数目盛に変換したものである。また、表3に各漏洩電流と気象条件との相関係数を示す。

図8において、相対湿度、絶対湿度を比較する。暗流は絶対湿度よりも相対湿度に比較的相関性が見られる。電流密度に着眼すると、正極性は $1.16 \times 10^{-13} \sim 4.98 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ 、負極性は $-1.89 \times 10^{-13} \sim 7.65 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ の

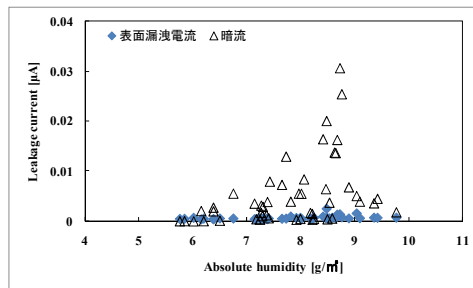
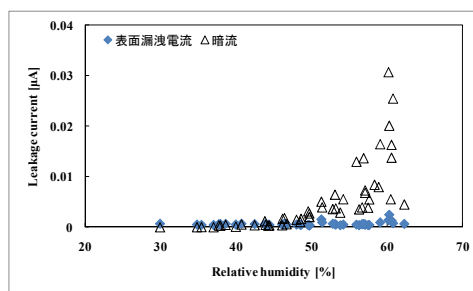


図8 漏洩電流と気象条件との相関性(正極性)

Fig.8 The relationship between leakage current and weather conditions (Positive polarity).

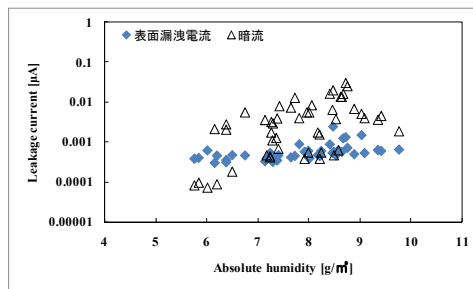
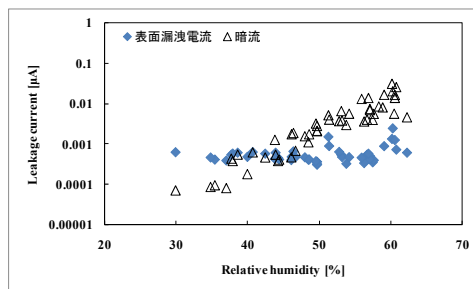


図9 対数目盛を用いた漏洩電流と気象条件との相関性(正極性)

Fig.9 Re-plotted data of Fig.8 into logarithmic scale vertical axis (Positive polarity).

表3 各漏洩電流と気象条件との相関係数

Table 3 correlation coefficient between each leakage current and weather conditions.

	暗流	表面漏洩電流
相対湿度	0.69	0.31
絶対湿度	0.41	0.42

範囲内である。この値は、高電圧下における気体の飽和電流密度 10^{-17}A/cm^2 よりも大きな値である。これは、直流電圧を印加したことにより、交流による暗流発生メカニズムとは異なるためであると考えられる。直流電圧印加時において、イオン帯電流による電流増加も考えられる。しかし、直流電圧印加時においてはコロナ放電が先行して現れるため今回のケースには、はてはまらない。そこで、電荷を運ぶキャリアとして空気中の塵・埃が考えられる。塵・埃の運ぶ電荷量により、この差が生じたと考えられる。

図 9 において、比較を行う。暗流は、絶対湿度ではばらつきが大きいことが見てわかる。一方、相対湿度ではばらつきがなくなり、より強い相関性があることが明確に確認できる。これは、空気中の塵・埃の吸湿作用が相対湿度に影響を受けるためであると考えられる。また、表 3 からも暗流が相対湿度に影響を受けることが見てわかる。清浄がいしの表面漏洩電流においては、明確な違いは見られなかった。負極性においても、同様の傾向が見られた。

以上より、送電線からの電荷漏洩減衰時間は相対湿度の影響を受けることが考えられる。

清浄がいし、暗流を比較すると、相対湿度が上昇するにつれ、暗流がより大きな漏洩電流地を示すことが確認できる。

6. むすび

送電線遮断時の直流残留電荷の漏洩特性について、実験室内にて研究を行った。この電荷漏洩の二つのメカニズム、すなわちがいし表面漏洩電流と空気ギャップ中暗流それぞれと気象条件との相関性について検討を行なった。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 清浄状態がいし表面漏洩電流は、絶対湿度により強い相関性を示した。しかし、再現性という点において今後も検討していく必要があると考えられる。
- (2) 汚損がいし表面漏洩電流は、相対湿度により強い相関性を示すことを確認した。
- (3) 気中ギャップ暗流は、相対湿度に強い相関性を示すことを確認した。

実送電線においては、降雨、ばい煙などにより汚損の影響を受ける。そのため、がいし、気中ギャップ中は汚損物の影響が予想される。よって、本研究結果より実送電線遮断時における直流残留電荷の減衰時間は、より相対湿度の影響を受けると考えられる。

参考文献

- [1] 小林、村瀬、西脇、小阪田；「500kV 送電線の電荷減衰時定数」、平成 14 年度電気学会論文誌 B 122 巻 5 号
- [2] 村瀬、依田、澤；「送電線の直流残留電荷の減衰時間と漏洩機構の検討」、愛知工業大学研究報告第 41 号 B(平成 18 年)
- [3] 村瀬、依田、澤、金子；「晴天乾燥時における送電線の直流残留電荷漏洩機構の検討」、電気学会論文誌 B、Vol.125-B、No.10、pp.1000-1006(2005)
- [4] JEC-0201-1998 交流電圧絶縁試験
- [5] 河村、伊坂；「がいし表面の吸湿密度、漏れ電流およびフラッシュオーバー電圧の温度依存性」、電気学会論文誌 B、Vol.93-B、No.9、pp50-57(1973)

(受理 平成 21 年 3 月 19 日)