

ポリマー絶縁材料表面を流れる漏れ電流の分析

堀井 洋介*・長谷川 誠一

The Analysis of Surface Leakage Current flowing on Polymer Insulating Materials

Yousuke HORII* and Sei-ichi HASEGAWA

(2002年11月29日受理)

The measurement of Leakage current flowing on polymer insulating materials is recognized as one of the main parameters needed to monitor the performance of insulator. This paper describes results of an experimental investigation into surface leakage currents under the tracking test of inclined plate (IEC587). The Leakage current is distortion wave which has high frequency components. The higher harmonics analysis is effective for evaluation the degree of degradation on the polymer surface.

1. はじめに

従来屋外電力機器絶縁体としては、絶縁能力が高く内部絶縁破壊を起こさないことや、絶縁性の自己回復などの優れた特性から磁器絶縁体が利用されてきた。しかしこの磁器絶縁体は送電電圧や容量の増大にともないがいし連が大きくなるため、重量が重くなってしまう等の理由から適用が困難になってきている。そこで軽量で加工もしやすく、取り扱いが容易であるポリマー絶縁体の利用が進められている。ポリマー絶縁体は撥水性が強く、汚損耐電圧特性にも優れているという特徴を持っている。しかし一方で、紫外線や降水など種々の環境的要因に曝されると化学的侵害を受けて劣化し、撥水性が低下して汚損されやすくなる。その結果、絶縁体表面に漏れ電流が流れ、ついで沿面放電が発生し、最終的に表面に炭化導電路を形成して短絡するトラッキング破壊に至る。¹⁾特に低温状態においては、耐トラッキング性が低下して、トラッキング破壊時間が短くなる傾向がある。²⁾ポリマー絶縁体のトラッキング破壊は磁器絶縁体のフラッシュオーバーと違って、自己回復が出来ない現象なのでポリマーが磁器絶縁体に完全に置き換わるまでに至っていない。

本研究は屋外電力機器のポリマー絶縁体が劣化していく過程を実験室内で模擬し、表面を流れる漏れ

電流を測定し、その変化から劣化の進行を判定することを試み検討したものである。その結果漏れ電流の高調波成分が劣化の進行度合いと関連していることを明らかにした。なお前述のようにトラッキング劣化が低温状態において進み易いことから、周囲温度の影響についても実験検討した。

2. 実験方法

2.1 耐トラッキング試験法

屋外電力機器の絶縁体に発生するトラッキングとはポリマー絶縁材料特有の絶縁劣化現象であり、本研究ではこの過程を実験室内で模擬するためIEC587耐トラッキング試験法（汚損液傾斜平板試験法）を用い、この試験中における漏れ電流を測定した。³⁾この試験法は、厳しい条件下で用いられる電気絶縁材料を想定した試験法で、試験条件が劣化させる効果を加速するように設定されているので一般的には加速試験と呼ばれている。この試験では幅50mm、長さ120mmの平板絶縁体を用い、上部と下部に電極を取り付けて高電圧を印加する。平板の上部から汚損液を流し、人工的に汚損状態を作り出して絶縁体表面に漏れ電流が流れるようにする。主な試験条件及び試験電圧を表1、表2に示す。本研究では試験電圧を4.5kVとし、試験終了判定には高電圧回路の電流が2秒間、60mAを超えて流れるときをもってトラッキング破壊したと判定した。また、

* 秋田高専専攻科学生

表 1 IEC587 試験条件

項目	試験条件
電極材質	ステンレス
試験周波数	48~62Hz
電極間隔	50±0.5mm
試験温度	23±2°C
汚損液 (重量%)	0.1%NH ₄ Cl及び 0.02%非イオン性界面活性剤
汚損液の抵抗	3.7~4.0Ω・m (23±2°C)
試料の傾斜角度	45°

表 2 IEC587 各実験電圧における汚染液流量と直列抵抗

試験電圧 (kV)	汚損液流量 (ml/min)	直列抵抗値 (kΩ)
2.00~2.75	0.15	10
3.00~3.75	0.30	22
4.00~4.75	0.60	33

耐トラッキング試験を6時間耐久した材料については、その時点で試験終了とした。

2.2 測定機器の構成

図1に本研究で用いた実験装置を示した。試験回路はIEC587耐トラッキング試験法に基づいたものである。本研究では低温環境の影響を検討するため、ポリマー絶縁体表面が凍結しそれが融解して漏れ電流が流れる過程を実験室的に再現するため、内容積140リットルのフリーザを用いた。庫内温度はファンの排気量の調節によって-20°C付近に保った。

漏れ電流はメモリハイコーダ HIOKI8835 およびデジタルオシロ TDS3052 によって測定し、波形観測、FFTなど種々の解析を行った。数kHz帯の周波数の放電成分については、NFマルチファンクションフィルタ3611を通して測定した。

2.3 試験材料

本研究では試料として市販のポリカーボネート

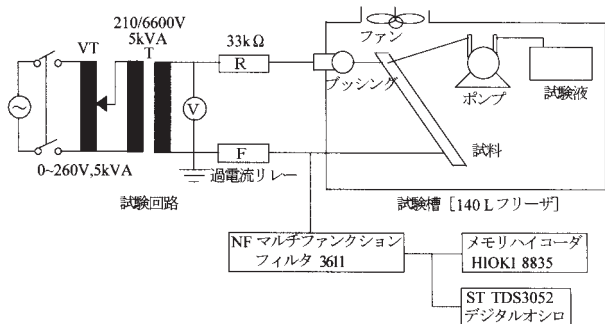


図1 実験装置

(PC)樹脂とシリコンゴム (SiR)の平板(厚さ3mm)を用いた。PCはプラスチック系、SiRはゴム系ポリマー絶縁材料の代表例として選択した。両試料の特徴を以下に述べる。

PCは機械的に強靱で、耐熱性、電気的特性にも優れている。成形時の応力が残留応力として残りやすいため、衝撃力が加わった場合亀裂が入りやすく、成形技術や適用上に注意を要する。

SiRは耐寒、耐熱に優れ-60°C~250°Cの範囲でも特性の変化が非常に小さい。耐候性に優れ、かなりの耐油性もある。電気絶縁特性に優れる。機械的性質、特に引裂き強さに劣る。

3. トラッキング破壊に至る過程における漏れ電流の特性

トラッキング破壊は次のような過程で進行する。まず、高電圧が印加された絶縁材料が汚損されて湿潤状態になると、その表面に漏れ電流が流れ、ジュール熱が発生する。この熱で表面が局部的に乾燥していわゆる乾燥帯ができる。このとき流れる電流は導電性電流である。乾燥帯の幅にはむらが生じて局部的に高い電界が加わり、狭い部分に放電が発生する。この放電には初期から発生するグロー放電、表面劣化が進むと発生するドライバンドアーク放電、そして終期に発生する強い発光をとまなうシンチレーション放電がある。この放電の電流成分はドライバンドアークの場合数百Hz帯、グロー放電の場合は数kHz帯である。このシンチレーション放電がもたらす熱により表面の一部が解離し炭化生成物が生じる。この炭化物は導電率が大きいので、この部分に電界が集中して周辺に炭化路が伸びる。そして最終的に短絡することにより、全路破壊して炭化導電路(トラック)が形成される。

3.1 劣化の進行におけるV-I特性の変化

トラッキング破壊までの過程において、絶縁体の劣化の進行における漏れ電流Iと電極間電圧Vの関係をV-I特性の点から検討した。試験開始後もない初期のグロー放電発生時、グロー放電とシンチレーション放電の中間時、トラッキング破壊間近のシンチレーション放電発生時という3つの放電状況に分けて測定を行い、各放電状況におけるV-I特性の特徴と、劣化の過程におけるV-I特性の変化について考察した。

図2(a)(b)(c)は各放電状況における代表的な観測波形とそのV-I特性の結果である。正弦波形が電

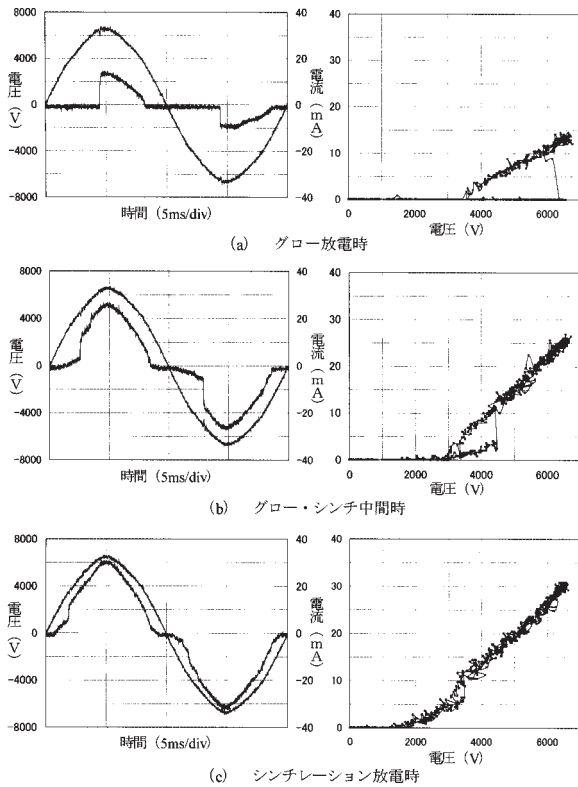


図2 劣化の進行におけるV-I特性

圧、歪み波形が電流である。図(a)は試験開始直後のグロー放電発生時の例である。グロー放電は放電開始電圧が高いので、電圧の波高値付近から電流が流れ出している。その後電圧が低下すると、放電は停止して電流は流れなくなる。V-I特性を見ると、負特性の部分があり、これは空間放電の特性である。図(b)はグロー・シンチレーション放電の中間時の例である。この状態では放電開始電圧はグロー放電の場合よりも低いので、放電の停止区間が短くなっている。この場合も放電開始直後に空間放電の負特性が見られる。図(c)はシンチレーション放電発生時の例である。この状態では、放電開始電圧が低くなっているので、低電圧時から電流が流れ始め、漏れ電流はかなり正弦波に近い形になる。V-I特性を見ると、低電圧時でも電圧に比例したような電流が流れ始めている。これは汚損液の中を電流が通り、これによって乾燥帯ができ、その放電がきっかけにシンチレーション放電に移行していることをあらわしている。

4. ドライバンドアーク放電成分の経時変化

絶縁体表面を流れる漏れ電流は、導電性電流と放

電電流が重畳された形で流れることは前述した。また、放電電流にはドライバンドアーク放電成分とグローコロナ放電成分があり、ともに導電性電流よりも高い周波数成分である。ここでは、ドライバンドアーク放電成分と劣化の程度との関連を考察する。⁴⁾

4.1 数百 Hz 帯での漏れ電流高調波成分の測定

ドライバンドアーク放電成分の経時変化を解析するため、数百 Hz 帯での漏れ電流高調波成分の経時変化を測定した。試験中試料表面を流れた漏れ電流を直接メモリハイコーダに入力しFFT解析を行った。漏れ電流のFFT解析はそれぞれ耐トラッキング試験中の3つの段階において行った。第1段階目は課電開始時でまだ撥水性が強く、放電がそれほど強くない段階、第2段階目はシンチレーション放電と呼ばれる微小なスポットに強い発光をともなった放電が始まった段階、第3段階目はシンチレーションが強まってトラックが伸びていき、まさに電極間表面が破壊に至る直前の段階においてそれぞれ測定を行った。また試験は常温状態と低温状態において行っており、低温状態においては庫内温度は -20°C 付近に保たれている。

4.2 数百 Hz 帯での漏れ電流高調波成分の経時変化

図3に耐トラッキング試験中に試料表面を流れた漏れ電流の高調波成分の3つの段階における代表的な測定結果を示した。図3は試料PCにおける常温状態、低温状態の結果である。それぞれ常温では80分、低温では30分でトラッキング破壊に至っている。課電開始時からの高調波成分の経時変化を見ると、課電開始時よりシンチレーション放電時の方が高調波成分が全体的に増加していることが分かる。さらに破壊直前にまで劣化が進行すると基本波成分が大きく増加するが、高調波成分は大きな変化を見せていない。これは試料表面の撥水性の低下により漏れ電流が流れやすくなり、導電性電流が大きく流れていると考えられる。常温状態と低温状態の場合を比較すると低温の場合、基本波・第3・第5次高調波成分が常温の場合よりも大きくなっていることが分かる。また、課電開始時から第9・第11・第13次高調波成分にかなり大きい値があらわれている。これは低温状態では課電開始時の初期段階から試料表面に濡れ状態が拡がり放電が活発に起きているためと考えられ、このことが低温状態のトラッキング破壊時間が短くなっている一つの要因となっていると考えられる。

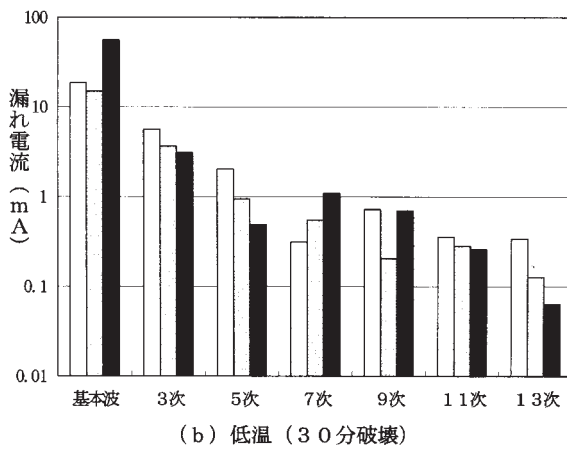
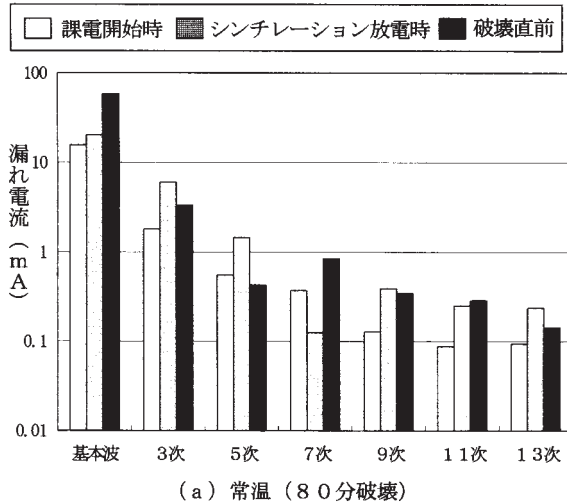


図3 漏れ電流高調波の経時変化 (PC)

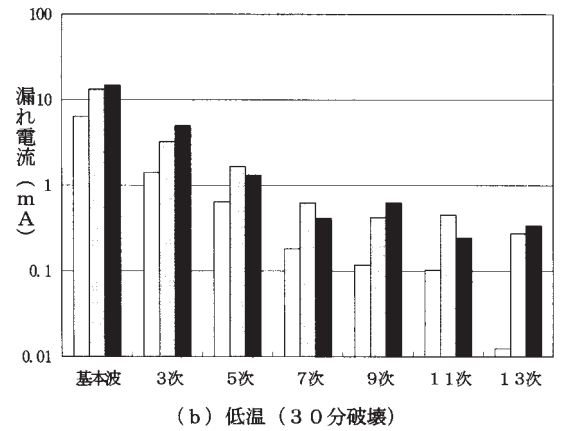
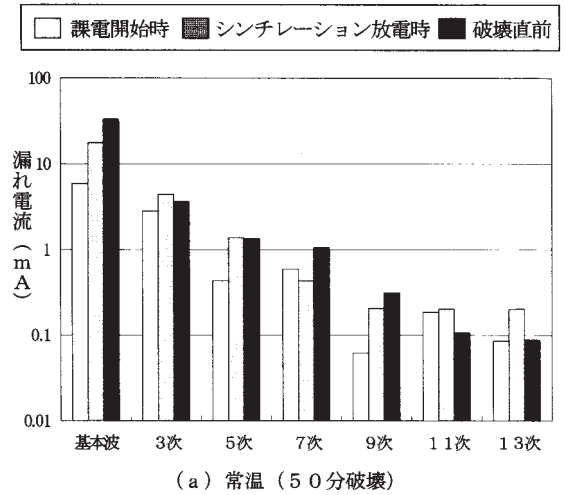


図4 漏れ電流高調波の経時変化 (SiR)

一方、図4は試料SiRにおける代表的な試験結果である。常温では50分、低温では30分でそれぞれトラッキング破壊に至っている。PCと同じく低温状態の方が早くトラッキング破壊に至っている。高調波成分の経時変化を見ると、課電開始時からシンチレーション放電時と劣化が進むにつれて各高調波成分ともに増加していく傾向が見られる。また、常温状態と低温状態の場合を比較すると、課電開始時においては影響はあまり見られないがシンチレーション放電時や破壊直前の第9・第11・第13次高調波成分を見ると低温状態の方がやや大きくなる傾向が見られる。しかしPCのように大きな変化は見られなかった。

5. グローコロナ放電成分の経時変化

前述した実験結果から低温状態においては漏れ電流に高い周波数成分が大きくなる傾向が見られた。そこでハイパスフィルタを用いてより高い周波数帯

の電流を測定した。図5は漏れ電流をカットオフ周波数1kHzに設定したハイパスフィルタに通した波形と、それにFFT解析を行った結果を示している。上の図がフィルタを通した漏れ電流波形の図で100msの時間、測定したものである。下の図はそれにFFT解析を行ったもので、4kHzまでの周波数成分を表している。図5(a)は試料PCにおける常温状態における代表的な結果である。FFTの結果を見ると1kHz付近の狭い周波数帯の範囲に大きなピーク

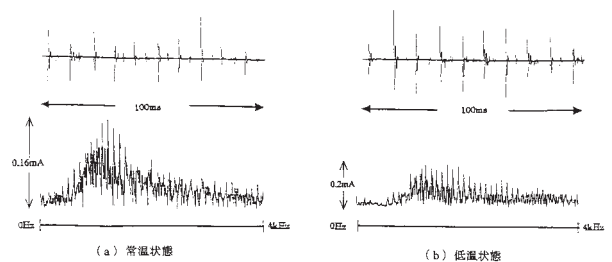


図5 漏れ電流高調波成分の分布 (PC)

クが見られる。一方、図5(b)は試料PCにおいての低温状態における代表的な結果である。低温状態の高調波成分は最大で約0.2mAで常温状態より大きい。また、高調波成分の分布を見ると常温状態に比べて比較的なだらかな分布になっている。これはより高い周波数成分も大きくあらわれていることを示している。これより低温状態において劣化が早まってトラッキング破壊時間が短くなるのは、このより高い周波数成分の放電が影響しているものと考えられる。一方、試料SiRの場合は常温状態、低温状態ともに放電電流の高調波成分は1kHz~4kHzにかけて広範囲にわたっている。この点は試料PCと異なっていて、試料SiRにおける破壊の進行が炭化導回路形成だけでなく侵食という形態をとることと関係しているものと考えられる。

5.1 パルス性放電電流の測定

低温状態において試験中流れる漏れ電流には様々な高調波成分が含まれており、1kHz以上の高い周波数パルス性放電電流が顕著にあらわれていることが分かった。そこで1kHz以上のパルス性放電電流について検討するため、漏れ電流をハイパスフィルタに通して測定し、そのパルス性放電電流の発生頻度と大きさを電圧位相と対比して表した。また、そのフィルタを通した漏れ電流をサンプリングレート10kHzで1秒間測定し、蓄積電荷量としたものの変化を表した。⁵⁾

5.2 パルス性放電電流の発生状態

図6, 7はパルス性放電電流を10サイクルの波形について累積したものを電圧位相と対比したものを示している。図は実効値4500Vの電極間電圧が印加された時のパルスの発生位相・頻度・大きさを表している。正弦波形が電極間電圧、パルス状の波形がパルス性放電電流を表している。初期は開始数分のもの、終期は破壊に至る少し前のもので、中期はその中間の時間帯の観測結果である。図6は試料PCにおいての代表的な試験結果である。常温状態の場合を見ると、初期・中期にかけては電圧の立ち上がり部分、波高値付近にパルスが分布しているが、劣化が進み終期になってくると電圧のまだ低い位相でのパルスが発生し、分布は比較的広範囲となる。一方低温状態の場合は、初期の段階から電圧がまだ低い位相でのパルスが見られる。そして劣化が進むと電圧の立ち下がり部分にもパルスが発生していることが分かる。しかし、常温状態に比べて全体的に大きさとしては小さくなる傾向が見られた。また、

試料SiRにも同様の実験を行い、図7はそのときの観測結果を示している。常温状態の場合、初期は比較的波高値付近にパルスが集中しているが、時間経過とともに電圧がまだ低い位相でのパルスが大きくあらわれるようになっていく。そして低温状態の場合は、試料PCと同じく初期段階からややパルスの分布が広範囲で、特に中期状態には電圧の立ち下がり部分にかけても広範囲にパルスの分布が広がっている。

5.3 パルス性放電電流の蓄積電荷量

図8は試験中流れた1kHz以上のパルス性放電電流を1秒間測定し、蓄積電荷量として表したものの

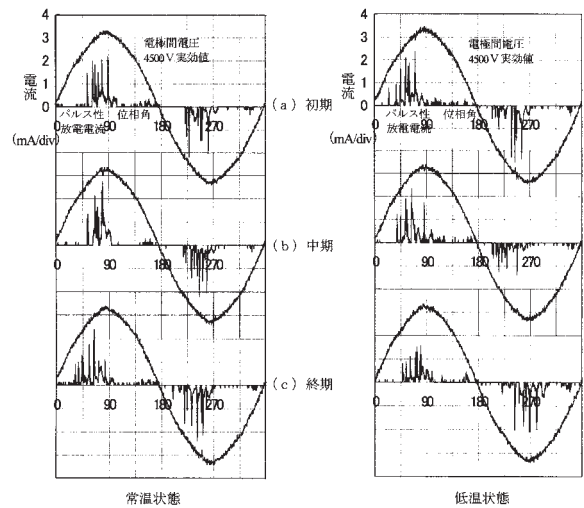


図6 パルス性放電電流の発生状態(PC)

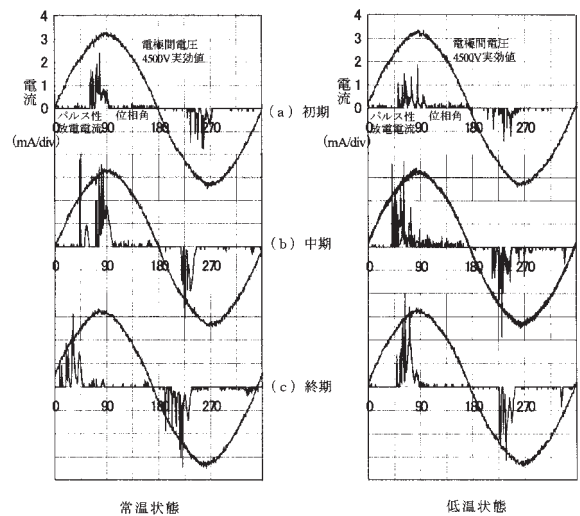


図7 パルス性放電電流の発生状態(SiR)

試験開始からトラッキング破壊までの経時変化を示している。BDはトラッキング破壊に至ったことを表しており、低温状態においてトラッキング破壊時間が短縮されていることが分かる。図8(a)は試料PCにおいての代表的な観測結果である。全体的に時間経過とともに増加する傾向が見られるが、常温の場合変動がやや大きく見られる。また、低温状態では常温状態に比べて蓄積電荷量が小さいという傾向が見られる。一方、図8(b)は試料SiRにおいての代表的な観測結果である。PCと同じく時間経過とともに増加する傾向が見られる。また、大きさを見ても、低温状態では常温状態に比べて蓄積電荷量が小さくなる傾向が見られる。結果として、低温状態においてはトラッキング破壊時間が短縮されるが、パルス性放電電流の蓄積電荷量は低温状態の方が小

よって観測したものである。ここで、漏れ電流実効値は液膜を流れる導電性電流、ドライバンドアーク放電成分とグローコロナ放電成分を含む放電電流、全てを含むものである。

図9, 10は試験中試料表面を流れた漏れ電流の実効値を1分毎に測定した結果を示している。図9は試料PCにおいての代表的な測定結果である。やや変動も見られるが、全体的に時間経過とともに増加傾向にあることが分かる。また、低温状態の方が常温状態よりも漏れ電流実効値が小さいという傾

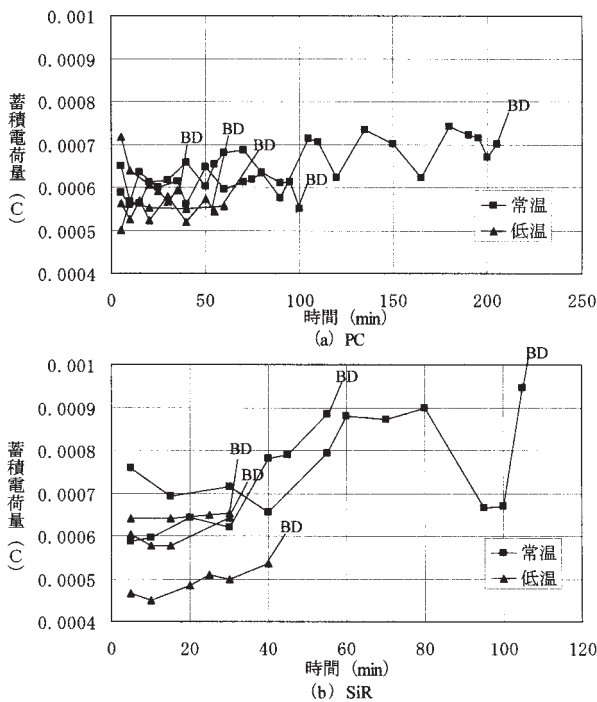


図8 パルス性放電電流の蓄積電荷量

さくなるということが分かった。

6. 漏れ電流全体の経時変化

前述のように劣化の進行度合いがドライバンドアーク放電、グローコロナ放電の大きさや頻度に関係していることは分かったが、より簡便に漏れ電流が時間経過とともにどのように変化するのか実験検討した。

漏れ電流実効値の経時変化はメモリハイコーダに

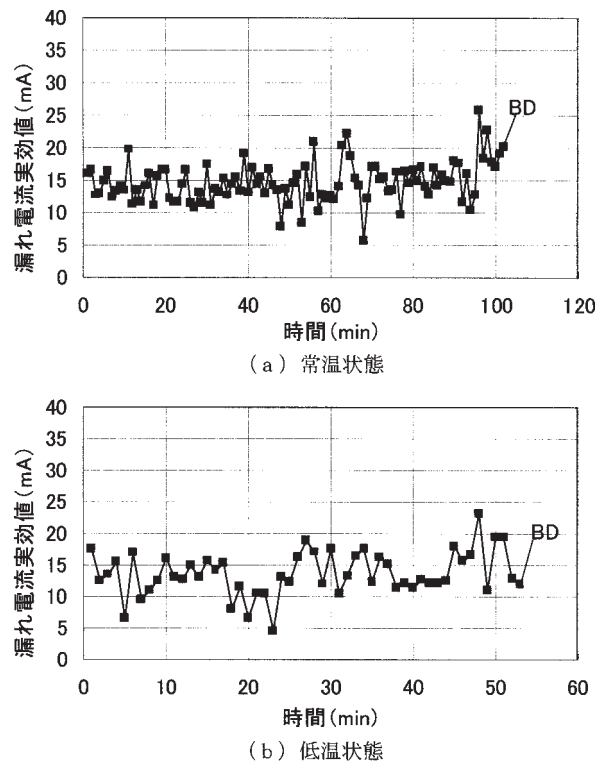


図8 パルス性放電電流の蓄積電荷量

向も見られた。

次に図10は試料SiRにおいての代表的な測定結果である。SiRの場合は、時間経過とともに増加傾向が見られるが、電流の推移を見ていくと、大きく変動している。所々に電流が小さくなる部分がある。常温状態と低温状態を比較してみると、常温状態には電流が全く零になる区間が見られるが、低温にはあまり見られず、小さくはなっているものの零には至らない部分が多く見られる。これは放電が休止していることに対応したものである。また、常温状態において比較は短時間に破壊する例と長時間にわたる例を示しているが、これは放電または劣化の形態による差が顕著にあらわれた結果である。SiRでは

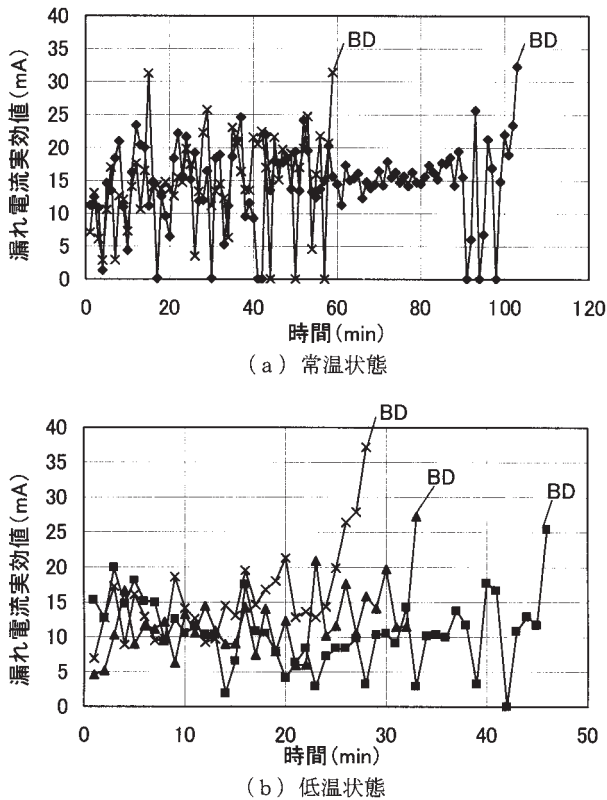


図8 パルス性放電電流の蓄積電荷量

放電が激しくなるとその熱によりシリコンが析出し、残渣が表面に形成される。トラックが進展して一気に電極間を絶縁破壊する場合は影響はないが、破壊に至らず残渣が残された状態になると放電が残渣との間で起き、破壊に至りにくくなる。これによって破壊時間に大きな差があらわれる結果になったと考えられる。そして、SiRの場合もPCと同じく全体的に低温状態の方が漏れ電流実効値が小さい傾向が見られた。

7. 結論

ポリマー絶縁体の劣化は漏れ電流高調波成分の変化としてあらわれるが、温度など周囲環境の影響も受けるので、材料・周囲環境にあわせた漏れ電流分析が必要になる。また、ポリマー絶縁体の撥水性が低下し、劣化していく過程で漏れ電流分析による劣化診断を行う場合、どの部分に注目すればよいかの重要性になる。本研究の結果から次のようなことが分かった。

- 1) 試料 PC において第 9, 第11, 第13次の数百 Hz 付近の比較的低い周波数帯の高調波成分の大きさと発生頻度がドライバードアーク放電の発生

に依存するので、これによって劣化の進行度合いを判断できる。

特に、低温状態において耐トラッキング性が低下してトラッキング破壊時間が著しく短くなる場合については、数百 Hz 帯の高調波成分だけでなくより高い 1~4kHz 帯の高調波成分があらわれる頻度が高くなる。これはドライバードアーク放電に至る前のグローコロナ放電が強く発生するためである。さらに劣化が進んで、トラックが電極間を短絡する直前になると導電性電流が増大し、基本波成分の急増という形であられ、これが破壊の前兆となる。

- 2) 試料 SiR において長時間の耐トラッキング試験に耐える場合、これは材料表面に侵食が発生し、残渣が析出して炭化導電路の伸びが妨げられているためであるが、漏れ電流の実効値測定をすると、電流の休止という形ではっきりあらわれる。したがって、漏れ電流実効値測定は試料 SiR の侵食劣化の診断に有効である。

8. 参考文献

- 1) 吉村昇, 西田眞, 能登文敏: 有機絶縁材料の耐トラッキング性, 静電気学会誌 Vol.6 No.2 PP.72~79 (1982)
- 2) 長谷川誠一: 積雪寒冷環境における有機絶縁材料の劣化現象, 秋田高専寒冷センター 年報 No.11 PP.19~24 (1997)
- 3) International Electrical Commission Standard Publication 587 Second Edition: Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion of electrical insulating materials used under severe ambient conditions, Bureau Central de la Commission Electrotechnique International (1984)
- 4) 堀井洋介, 長谷川誠一: 低温環境におけるポリマー絶縁体漏れ電流の基礎的研究, 平成14年電気学会全国大会講演論文集[2] 2-006 PP.6
- 5) 堀井洋介, 長谷川誠一: 寒冷環境におけるポリマー絶縁体の放電劣化現象の研究, 平成14年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集[2] 2C9 PP.96