

巻線の部分放電現象に関する研究

A Study on Partial Discharge Phenomena of Winding Wires

武藤 大介*
Daisuke Muto

大矢 真*
Makoto Oya

青井 恒夫*
Tsuneo Aoi

上野 孝弘*
Takahiro Ueno

〈概要〉

50 Hzの正弦波交流電圧における部分放電開始電圧(PDIV)を評価し、巻線の形状や環境条件が部分放電特性に与える影響とそのメカニズムを考察した。種々の絶縁材料を被覆した電線のツイストペアを用いてPDIV向上に対する絶縁層の厚膜化と低誘電率化の効果を示すとともに、モデル計算によるPDIV推定の妥当性を明らかにした。また、25～230℃におけるツイストペアのPDIVは温度上昇に伴い低下することを確認し、その支配的要因が空気の火花電圧と絶縁材料の誘電率の温度特性であることを示した。さらに、平角線を並行に配置した試験片のPDIVは相対湿度95%において大幅に低下し、これが電線表面に存在するイオン性汚損物が主要因の一つであることを検証した。

1. はじめに

近年、エネルギー資源の枯渇や環境問題を背景にハイブリッド自動車(HV)や電気自動車(EV)など電気モータを動力とした車両が急速に普及している。車両の動力性能や燃費向上の観点から搭載される駆動モータには出力密度の向上、すなわち高出力化と小型化が要求されている。これらの課題に対して電圧の上昇が効果的な対策であることから、500 Vを超える高電圧で運用されている車両もある。一般的にこれらのモータはインバータによって駆動され、細やかな制御や省電力化を達成している。一方、インバータの高速スイッチングに伴い発生するサージがモータのコイル絶縁に及ぼす影響が懸念されており、インバータサージに起因する部分放電現象と絶縁劣化、その評価技術や耐部分放電性を有する絶縁材料に関する研究が数多くなされている。

古河電工と古河マグネットワイヤはモータの高電圧化と部分放電に対するコイル絶縁の強化にいち早く取り組み、従来にない絶縁構造を有する厚膜平角線を開発した。当社の開発品は小型HVのモータステータコイルとして採用され、モータの小型軽量化、車両の燃費向上に貢献している¹⁾。

本報では、巻線の部分放電現象とそのメカニズムに関する筆者らの研究成果を報告し、さらに、巻線の部分放電特性の向上に対する当社の取り組みについて紹介する。

2. 巻線の部分放電現象

2.1 部分放電開始電圧(PDIV)の推定

部分放電はコイルの絶縁劣化に強く影響を及ぼすことから、

その発生メカニズムを明確にすることは重要である。特に部分放電開始電圧(Partial Discharge Inception Voltage: PDIV)を把握することは極めて重要である。一般的に巻線のPDIVは電界強度とパッシェン曲線を用いて推定される²⁾。例えば、有限要素法等の電界解析によりツイストペアの空気ギャップの電界強度とギャップ距離の関係を評価し、パッシェン曲線と電界強度が一致するときの印加電圧をPDIV推定値とする。また、Dakinらは、円柱電極で挟んだ絶縁体のPDIVが絶縁体の厚さと比誘電率の比の関数で近似できることを示している³⁾。筆者らは、これらの手法を参考に、従来の丸線および近年HVモータへの適用が進んでいる平角線のPDIVを推定した。

図1に、電界強度の2次元計算モデルを示す。丸線の電界計算には導体径1 mmのツイストペアモデルを用いた。空気ギャップの最短距離を1 μmに設定し、電線間に形成されるくさび状ギャップの距離と電界強度の関係を評価した。平角線の電界計算には平面部を合わせた平行平板モデルを用いた。電線間に10～250 μmの平行平板ギャップを与え、ギャップ距離と電界強度の関係を評価した。平角線では、コーナー部の電界偏歪の影響を受けないよう平面部の長さを十分に確保し、その中央付近の電界強度を求めた。電界強度の計算には高速表面電荷法を用いた。図2に示すように、空気ギャップの電界強度がパッシェン曲線と一致するときの導体間の電圧をPDIV推定値とした。

* 研究開発本部 高分子技術研究所

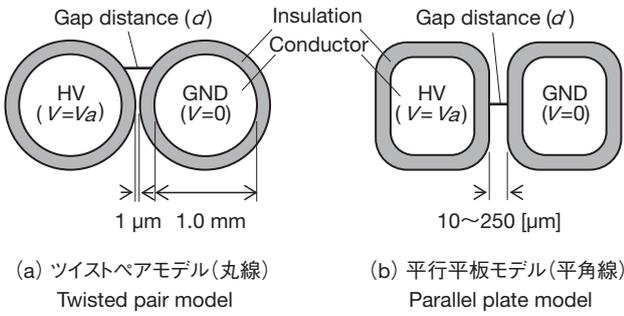


図1 電界強度の計算モデル
Analysis model for electric field calculation.

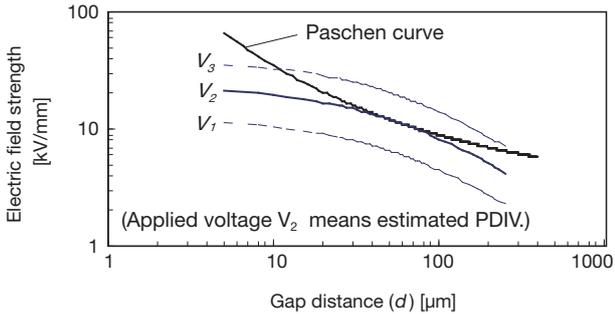


図2 電界強度とギャップ距離の関係
Electric field strength as a function of gap distance.

図3に、ツイストペアモデルと平行平板モデルのPDIV推定値と絶縁厚さの関係を示す。絶縁層の比誘電率は4とした。図中にはDakinらが提唱した式(1)による計算値も併記した。

$$V = 163 (t/\epsilon_r)^{0.46} \dots \dots (1)$$

V : 部分放電開始電圧 [V_{rms}] ϵ_r : 絶縁層の比誘電率
 t : 絶縁層の厚さ [μm]

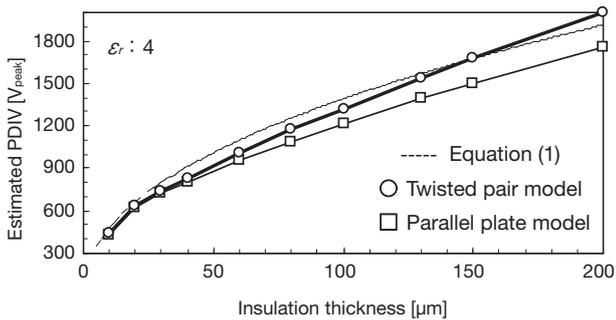


図3 PDIV推定値と絶縁厚さの関係
Estimated PDIV as a function of insulation thickness.

いずれの推定においても絶縁層が厚いほどPDIVが増大する結果が得られた。これは経験的な部分放電現象に定性的に一致する。式(1)の計算値は絶縁厚さ30 μm以下の領域でツイストペアモデルの推定値とよく一致した。このことは、エナメル線のツイストペアにおいて観測されたPDIVが式(1)の計算値と概ね一致するとした実験結果⁴⁾に符合する。一方、ツイストペ

アモデルと平行平板モデルを比較した場合、絶縁厚さが40 μmを越えると両者の推定値に差が現れた。絶縁層が厚いほどその差が拡大し、平行平板モデルから得られる推定値の方が低い結果となった。これは、絶縁層が厚い場合には両者の電界分布に差異が生じることに起因する。図4に、絶縁厚さによる空気ギャップの電界分布の違いを示す。絶縁厚さが30 μmの場合には両モデルのギャップ距離と電界強度の関係はよく一致するが、100 μmの場合にはわずかに異なり、パッシェン曲線と接する電界強度は平行平板モデルの方が大きい。これが平行平板モデルのPDIV推定値がツイストペアモデルより小さく見積もられた理由である。この結果について、電線間の最短ギャップ距離を d' と定義し、 d' とPDIVの関係に基づき補足説明する。

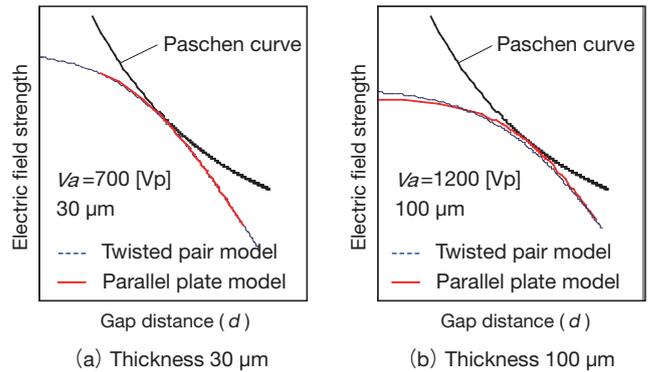


図4 絶縁厚さによる電界分布の違い
Difference of electric field distribution due to insulation thickness.

図5に、ツイストペアモデルと平行平板モデルのPDIV推定値と d' の関係を示す。 d' は1~120 μm、絶縁層の厚さは30 μmおよび100 μm、比誘電率は4とした。同図から、PDIVは d' に依存して変化し、あるギャップ距離において極小値(V_{min})を取ることがわかる。また、絶縁層が厚いほど V_{min} が得られるギャップ距離(d'_{min})は大きくなる。具体的には、絶縁厚さ30 μmの場合は $d'_{min} = 25 \mu\text{m}$ において $V_{min} = 720 \text{ V}$ 、100 μmの場合は $d'_{min} = 50 \mu\text{m}$ において $V_{min} = 1210 \text{ V}$ である。これらの数値はツイストペアモデルと平行平板モデルで等しく、本検討の範囲において導体形状に依存しない。つまり、絶縁層の厚さと誘電率が同じであれば、推定されるPDIVの最小値は一致する。これは、ツイストペアモデルの d'_{min} におけるギャップ電界がほぼ平等電界であることが理由である。

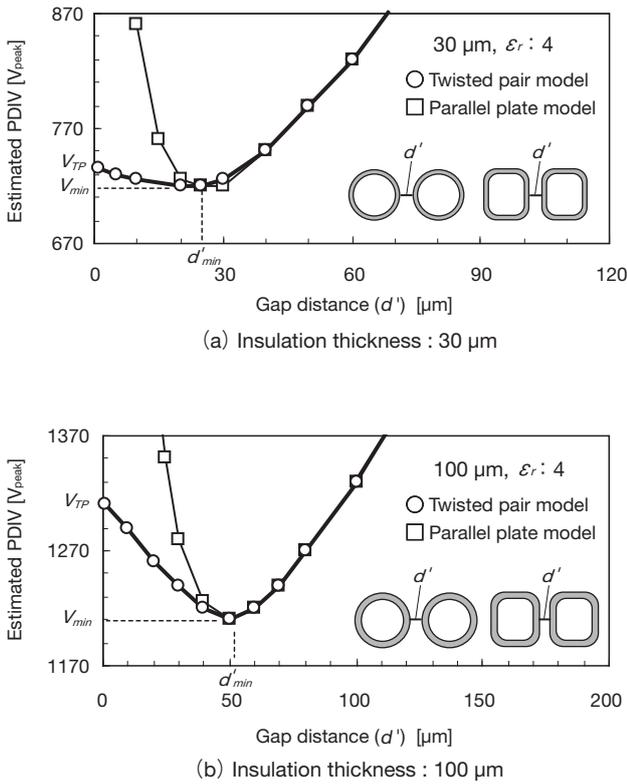


図5 PDIV推定値とギャップ距離の関係
Estimated PDIV as a function of gap distance.

ここで、前述した2つのモデルのPDIV推定値の差異を再考する。ツイストペアモデルは、図5のd' = 1の場合に該当する。このときのPDIV推定値をV_{TP}とする。平行平板モデルのPDIV推定値はV_{min}に等しい。表1にV_{TP}とV_{min}を比較する。PDIV推定値の差(ΔV = V_{TP} - V_{min})は、絶縁厚さが30 μmの場合に15 V、100 μmの場合に100 Vとなった。つまり、絶縁層が厚いほどΔVが大きくなる。このことは、図3に示したツイストペアモデルと平行平板モデルにおけるPDIV推定値の相違を説明している。同時にこの結果は、電線同士が接するように配置されたツイストペアで観測されるPDIVは、絶縁層の厚さと誘電率から想定されるPDIVの最小値とは必ずしも一致しない可能性があることを示唆する。実用上重要となるPDIVの最小値の推定や評価においては電線間のギャップ距離の考慮が重要である。

表1 PDIV推定値の差異
Difference of estimated PDIV.

Insulation Thickness [μm]	Estimated PDIV [V _{peak}]		ΔV (=V _{TP} - V _{min})
	V _{TP} (PDIV of twisted pair)	V _{min} (Minimum PDIV)	
30	735	720	15
100	1310	1210	100

本節では、数値計算を用いてツイストペアモデルと平行平板モデルのPDIVを推定し、絶縁層の厚さが40 μmを越えた場合に両者のPDIV推定値に差異が生じた。その理由が電界分布の違いであることを示し、PDIVの推定に際しては電線間のギャップ距離を考慮することの重要性を述べた。本検討で得られた知見は、とりわけPDIV向上を目的とした厚膜巻線の絶縁設計や部分放電の評価を行う上で有益な情報を与えるものと考えられる。

2.2 PDIVの絶縁厚さ・誘電率依存性

前節で述べたようにPDIVは絶縁層の厚さと誘電率に依存する。筆者らは、種々の絶縁材料を被覆した電線のツイストペアを用いて、これらの関係を調査した。

表2に実験に用いたサンプルを示す。導体の直径は1 mm、絶縁層の厚さ(t)は29 ~ 107 μm、比誘電率(ε_r)は2.9 ~ 4.5である。絶縁層の材料には、ポリアミドイミド(PAI)、ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)、ポリフェニレンサルファイド(PPS)およびポリエチレンテレフタレート(PET)樹脂を用いた。Sample 1はワニス化したPAI樹脂を導体上に焼き付けて絶縁層を形成したエナメル線である。その他は、樹脂を導体上に押し出して絶縁層を形成した押し出被覆電線である。Sample 5は、PEEKとPPSを均等の厚さに積層した。比誘電率は、100 Hzにおける電線の静電容量から算出した。静電容量の測定には3531 Z HiTester(日置電機製)を用いた。PDIVの測定にはツイストペアを試験片として用い、次の方法で実施した。温度25℃、相対湿度50%に制御された恒温恒湿槽に試験片を設置し、導体間に50 Hzの正弦波交流電圧を50 V/sの昇圧速度で印加し、放電電荷量が10 pCを超えたときの印加電圧をPDIVとした。部分放電の検出にはKPD2050(菊水電子工業製)を用いた。1回の実験で繰り返し5回測定し、そのうちの2~5回目のデータを採用してN = 3(3回の実験)の平均値ならびに最小値と最大値を求めた。

表2 テストサンプル
Test sample.

sample	Conductor diameter	Insulation thickness (t) [μm]	Relative permittivity (ε _r)	Insulating material
1	Φ 1 mm	36	4.5	PAI
2		29	2.9	PEEK
3		36	3.1	PEEK
4		46	3.2	PPS
5		72	3.2	PEEK/PPS
6		107	3.6	PET

表3および図6に実験結果を示す。これらには、パッシェン曲線および式(1)から得られるPDIV推定値も併記した。図中に示したエラーバーは測定値の最大値と最小値を表す。なお、図の横軸には絶縁厚さの2倍(導体離隔距離)を比誘電率で除した値を取った。この実験により、絶縁層が厚いほど、また誘電率が小さいほどPDIVが上昇する結果が得られた。具体的には、例えばsample 4とsample 5の比較により絶縁層が厚いほど

PDIVが高く、sample 1とsample 2あるいはsample 3の比較により誘電率が小さいほどPDIVが高いことがわかる。観測されたPDIVはパッシェン曲線から得た推定値や式(1)から求めた計算値とよく一致し、前節で述べたPDIV推定の妥当性が示された。より厳密には、パッシェン曲線による推定値は観測されたPDIVの最小値に近いと言える。これについては初期電子の供給不足などに起因してPDIVが高めに観測された場合があるものと推測される。式(1)も測定結果をよく近似していることから簡易的なPDIVの推定に有効であると言える。ただし、巻線の絶縁設計においてはPDIVの最小値を把握することの重要性が高いことから、パッシェン曲線を用いた推定がより適切であると考えられる。

表3 試験結果
Test result.

sample	$2t/\epsilon_r$	Measured PDIV [V _{peak}]		Estimated PDIV [V _{peak}]	
		Average	Minimum	Paschen curve	Equation (1)
1	16.0	775	728	750	823
2	20.0	830	788	830	912
3	23.2	902	849	860	977
4	28.8	1055	994	990	1078
5	45.0	1330	1245	1220	1325
6	58.8	1501	1445	1430	1506

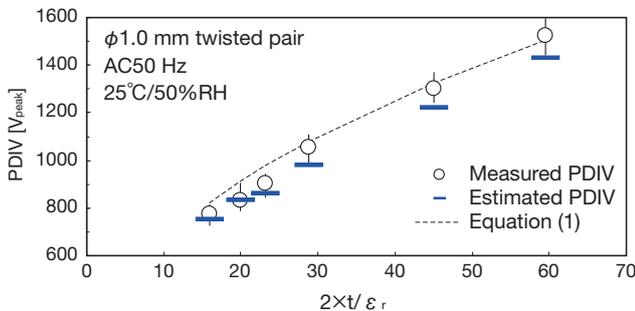


図6 PDIVの絶縁厚さ・誘電率依存性
Thickness and relative permittivity dependence of PDIV.

本節では、種々の絶縁材料を被覆した電線のツイストペアを用いた50 Hz交流電圧におけるPDIVの測定結果を示した。PDIV向上に対する絶縁層の厚膜化と低誘電率化の効果が確認され、さらに観測されたPDIVはパッシェン曲線と空気ギャップ電界から見積もられた推定値とよく一致した。これにより数値計算によるPDIV推定の妥当性を明らかにした。

2.3 環境の影響

巻線は過酷環境下で用いられることから、環境が部分放電現象に与える影響とその発生メカニズムを明確にすることは実用上重要である⁵⁾。本節では、温度と湿度がPDIVに与える影響に関する筆者らの知見を述べる。

2.3.1 PDIVの温度依存性

種々の絶縁材料を被覆した電線のツイストペアを用いて、PDIVの温度依存性を調査した。試験には、絶縁材料が異なる3種類の電線(Sample A～C)を用いた。Sample Aは誘電特性を改良したPAI、Sample BはPAI、Sample CはPEEKである。導体の直径は1 mm、絶縁層の厚さは30 μmである。PDIVの測定にはツイストペアを試験片として用い、次の方法で実施した。温度が制御された恒温槽に試験片を設置し、導体間に50 Hzの正弦波交流電圧を50 V/sの昇圧速度で印加し、放電電荷量が10 pCを超えたときの印加電圧をPDIVとした。部分放電の検出にはKPD2050(菊水電子工業製)を用いた。測定温度は25～230℃とし、所定の温度に到達後、速やかに測定した。各温度において繰り返し5回測定し、そのうちの2～5回目のデータを採用してN=3(3回の実験)の平均値を求めた。

図7に、PDIVの温度依存性を示す。図には、それぞれのサンプルの25℃におけるPDIVを基準(100%)とした場合の保持率を示した。この結果から、温度上昇に伴いPDIVは低下する傾向を示し、その低下率は絶縁材料によって異なることがわかる。PDIVの温度依存性については、空気密度の変化に起因する火花電圧の低下が影響すると考えられる。例えば、CIGRE Method-II電極を用いた絶縁シート間の空気ギャップにおけるPDIVの室温から80℃の温度特性が主に相対空気密度によって説明できるとした実験結果⁶⁾がある。そこで、本実験で観測された25～230℃における温度依存性を、空気の火花電圧と絶縁材料の誘電率の温度依存性の観点から考察した。

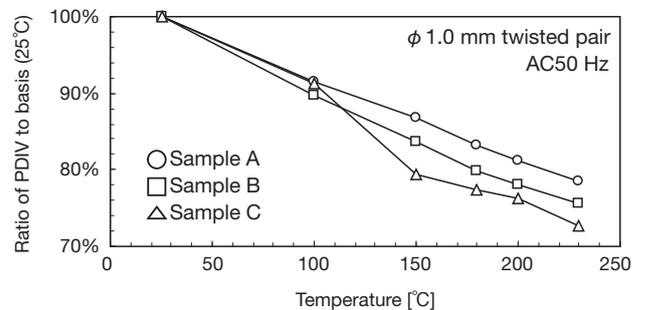


図7 PDIVの温度依存性
Temperature dependence of PDIV.

PDIVはパッシェン曲線で示される気体の火花電圧と空気ギャップの電界強度の関係で定まると考えられる。平等電界における気体の火花電圧 V_s は、気圧 p [Torr]とギャップ距離 d [m]との積の関数で表される。ここで、気圧 p は気体の密度 ρ [kg/m³]に置き換えて考えることができる。

$$V_s = f(pd) = f(\rho d) \dots\dots (2)$$

また、気体の状態方程式から気圧一定の下では密度 ρ は絶対温度 T [K]に反比例する。

$$\rho T = \text{const.} \dots\dots\dots (3)$$

これらの関係から、高温では気体密度の変化により V_s が低下すると考えられる。そこで、温度上昇に伴う V_s の変化を推算し、これを考慮したPDIVを電界解析により推定した。図8に、 V_s の温度依存性を推定した結果を示す。気圧は一定とし、

図中にはツイストペアにおけるギャップ間電圧の計算例を併記した。 V_s の最小値よりも右側の領域、すなわち実質的にPDIVに影響するギャップ距離においては、高温ほど V_s が小さい結果が得られた。

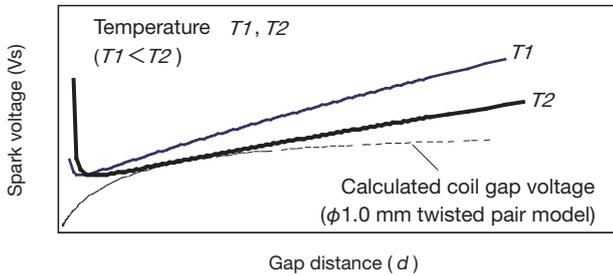


図8 火花電圧の温度依存性の推定
Estimated spark voltage as a function of temperature.

図9に、 V_s の温度依存性を考慮したPDIVの推定結果を示す。この推定では、絶縁層の厚さと誘電率は温度依存性がないと仮定した。図中にはSample A～Cの実測値を併記した。 V_s の温度依存性を考慮したPDIV推定値は高温ほど低下する傾向を示し、定性的には実測値と同じ傾向を示した。しかしながら、厳密には150℃以上においては両者に乖離がみられ、推定値は実測値よりも大きく見積もられた。特にSample BやSample Cと比較した場合に差が顕著に表れている。つまり、 V_s の温度依存性の考慮だけではPDIVの温度依存性における絶縁材料間の差異を説明できない。

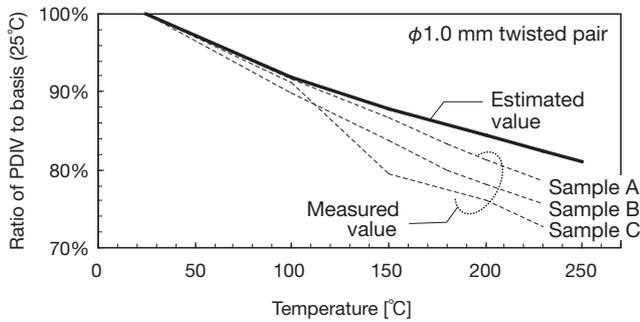


図9 V_s の温度依存性を考慮したPDIVの推定
Estimated PDIV based on temperature dependence of V_s .

次に、絶縁材料による差異を誘電率の温度依存性の観点から考察した。図10に、各絶縁材料の比誘電率(ϵ_r)の温度特性を示す。比誘電率は100 Hzにおける電線の静電容量から求めた。同図より、それぞれの絶縁材料が異なる温度特性を有することがわかる。25℃における値を基準にすると、Sample Aは150℃以上で微増、Sample Bは単調に増大、Sample Cは150℃以上で急増した。一般的に、絶縁層の誘電率が大きいほど空気ギャップの分担電圧が増大するためPDIVは低下すると考えられる。つまり、観測された高温下のPDIVは、前述した V_s の低下に加えて、 ϵ_r の増大の影響を受けることが予想される。

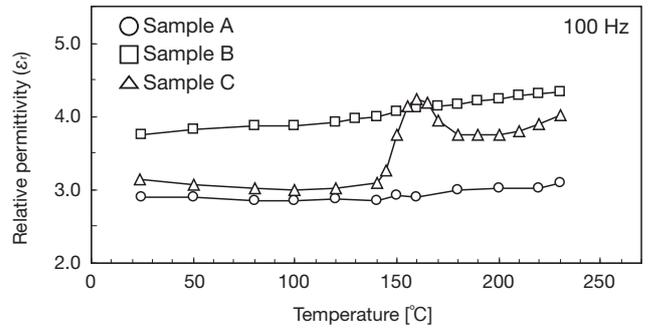


図10 誘電率の温度依存性
Temperature dependence of permittivity.

図11に、 V_s と ϵ_r の温度依存性を考慮したPDIVの推定結果を示す。いずれのサンプルにおいても推定値と測定値がよく一致し、両者の差は3%以下に収まった。以上の結果から、観測されたPDIVの温度依存性を特徴付ける支配的要因が、空気火花電圧と絶縁材料の誘電率の温度依存性であることが示された。

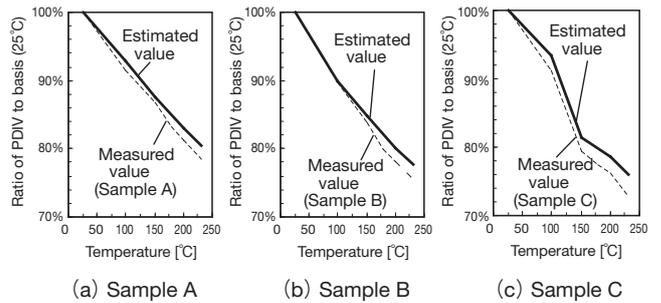


図11 V_s と ϵ_r の温度依存性を考慮したPDIVの推定
Estimated PDIV based on temperature dependence of V_s and ϵ_r .

本節では、50 Hzの正弦波交流電圧を用いたツイストペアのPDIV温度依存性の測定結果を示した。PDIVは温度上昇に伴い低下することを確認し、その支配的要因が空気火花電圧と絶縁材料の誘電率の温度特性であると結論づけた。本検討で示した知見は、特にHVモータなど高温環境での使用が想定される巻線の部分放電現象の理解や絶縁設計に役立つものと考えられる。

2.3.2 PDIVの湿度依存性

筆者らは、平角線を用いて50 Hzの交流電圧におけるPDIVの湿度依存性を評価した。図12に試験片と実験方法を示す。2本の平角線のフラット面同士を並行に配置して樹脂製クリップで固定したものを試験片とした。厚さ50 μm の絶縁性スペーサを挟むことで電線間に平行平板状の空気ギャップを形成した。試験片の有効長は約100 mmである。絶縁層の厚さは40 μm 、材料はポリアミドイミド(PAI)およびポリフェニレンサルファイド(PPS)である。PDIVの測定には、PDIVの測定は次の方法で実施した。温度と湿度が制御された恒温恒湿槽に試験片を設置し、正弦波の交流電圧を印加し放電電荷量が10 pC

を超えたときの電圧をPDIVとした。電圧の周波数は50 Hz、昇圧速度は50 V/sである。部分放電の検出にはKPD2050（菊水電子工業製）を用いた。測定温度は25℃、相対湿度は50～95%とし、所定の条件に安定した後、速やかに測定した。各湿度において繰り返し5回測定し、そのうちの2～5回目のデータを採用してN = 3（3回の実験）の平均値を求めた。

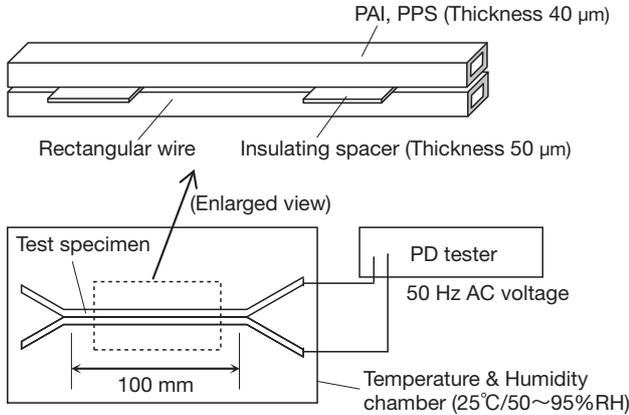


図12 試験片と実験方法
Specimen and test setup configuration.

図13に、平角線を用いたPDIVの湿度依存性を示す。図には、25℃/50% RHにおけるPDIVを基準（100%）とした場合の保持率を示した。いずれもPDIVの湿度依存性が確認され、相対湿度95%において大きく低下した。PDIV保持率は、相対湿度95%においてPPSが80%、PAIが74%となった。図14に、相対湿度による部分放電の挙動の違いを示す。部分放電開始時の放電電荷量は、相対湿度50%において約100 pCに対し、相対湿度95%では約10 pCであった。高湿度のPDIV低下に加えて、PD発生時の放電電荷量が小さいことが特徴的である。

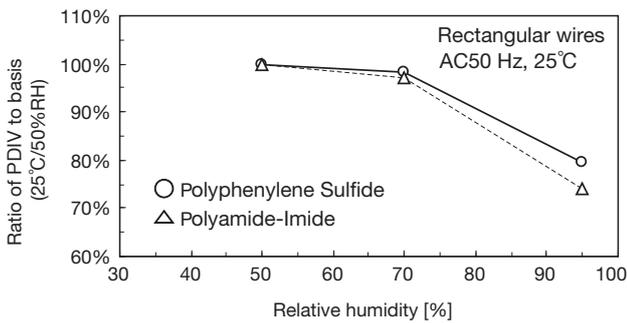


図13 PDIVの湿度依存性
Relative humidity dependence of PDIV.

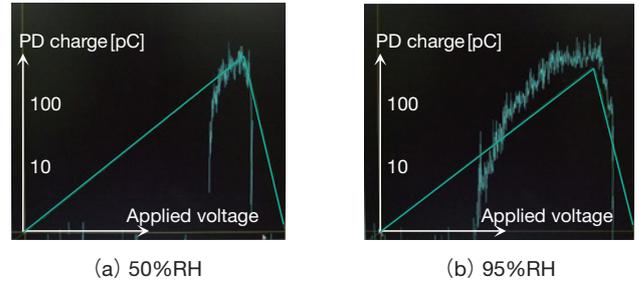


図14 相対湿度によるPD挙動の違い
Difference of PD behavior due to relative humidity.

高湿度下でPDIVが低下した要因を考察する。PDIVの湿度依存性については、多くの実験結果やそれを説明するモデルが報告されている。例えば、吸水による絶縁層の誘電率の増大⁷⁾、水分量増加による空気の絶縁性の低下や絶縁体表面の水滴による電界の強調⁸⁾、付着物の影響⁹⁾などがある。このうち、吸水による絶縁層の誘電率の増大の可能性について、PPS平角線で調査した結果、水中に24時間浸漬した後のPPSの誘電率の変化は室温放置と比較して約3%の増加に止まった。この誘電率の変化に起因するPDIVの低下は1～2%と推定され、観測された実験結果を説明できない。そこで、これまでの報告事例を参考に絶縁層の表面状態に着目し、とくに電気特性に影響を及ぼすことが予想される表面汚損の影響を調べた。まず、PDIVの測定に用いた電線の表面に付着した物質をEPMAにより同定した結果、Na, K, Clが検出された。これらは、サンプリング時など電線に素手で触れた際に付着したものと考えられる。これらが絶縁物の表面に付着した場合、湿潤状態においては表面の電気伝導に影響を及ぼすことが知られている。例えば、高圧電線用碍子の海塩汚損環境下における絶縁性に関する報告事例¹⁰⁾は数多くある。そこで、素手で触ることによる表面の汚損(Na, K, Clなどの付着)が高湿度環境のPDIVに影響すると仮説を立て、表面を洗浄し付着物質を除去した電線と、洗浄後に再度表面を満遍なく素手で触れた電線を用いてPDIVの湿度依存性を評価し、仮説を検証した。洗浄は、電線を純水に浸した後に清潔なウェスで水分を拭き取ることにより行った。なお、洗浄後に前記の汚損物質が除去されていることをEPMAにより確認した。

図15に、電線表面を純水で洗浄した場合と洗浄後に再度素手で触れた場合のPDIV湿度依存性を示す。絶縁層はPPS樹脂である。表面を純水で洗浄した場合には明確な湿度依存性は認められず、PDIVはほぼ一定となった。一方、洗浄後に素手で触れた場合には再び湿度依存性を示し、PDIVが低下した。これらの結果から、電線表面の汚損、おそらくNa, K, Clを含む物質の存在が、PDIVの湿度依存性に強くに影響を及ぼしたと考えられる。高湿度環境でPDIVが低下するメカニズムは、前記のイオン性汚損物による電線表面の電気伝導性の上昇に起因する空気ギャップ電界の増大が考えられる。なお、電線表面を洗浄したことでPDIVの低下が認められなかったことから、空気中の水分量増加による火花電圧の変化の影響は明確には現れなかったと言える。

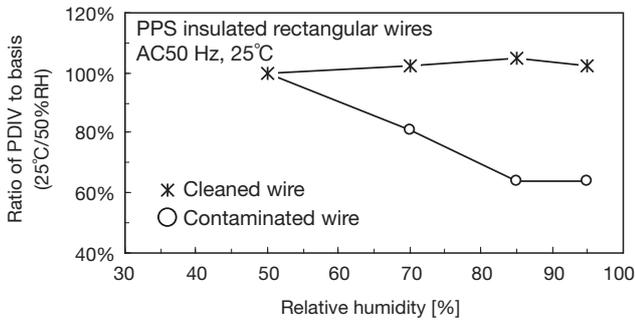


図15 表面汚損がPDIVの湿度依存性に及ぼす影響
Influence of surface contamination on humidity dependence of PDIV.

本節では、2本の平角線を、図12に示すように並行に配置した試験片を用いて50 Hz交流電圧におけるPDIVの湿度依存性の測定結果を述べ、観測された高湿度下におけるPDIVの低下が電線表面に存在するイオン性汚損物に起因する可能性が高いことを示した。前述のように、PDIVの湿度依存性については様々な影響要因が考えられ、現象の解明にはより詳細な検討を要すると考える。

3. 巻線の高PDIV化への取り組み

ハイブリッド自動車(HV)や電気自動車(EV)が急速に普及する中、当社はこれらの駆動モータの高電圧化と部分放電に対するコイル絶縁の強化にいち早く取り組み、従来にない絶縁構造を有する平角巻線を開発した。

図16にHV駆動モータ用の平角巻線の構造を示す。平角導体を採用し占積率の向上を実現するとともに、絶縁層の厚膜化によって高いPDIVを確保した。絶縁層はエナメル層とその外周に設けた熱可塑性樹脂層との二層構造を有し、従来のエナメル線では困難であった絶縁層の厚膜化を高い品質で達成した。熱可塑性樹脂の適用においては、巻線加工や車載時の使用環境に十分配慮し、機械特性、耐熱性ならびに耐オイル性等に優れた材料を選定した。開発した平角巻線の優れたPDIVと巻線加工性は相間絶縁紙の廃止やコイルエンドの縮小化といったモータステータの技術革新を支え、モータの小型軽量化および車両の燃費向上に貢献している。

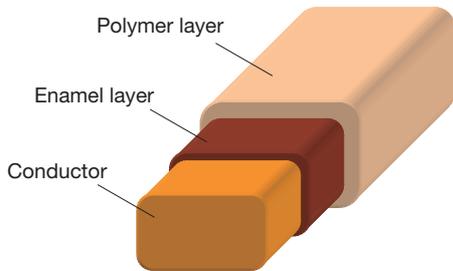


図16 開発した平角巻線の構造
Structure of developed Winding Wires.

また、絶縁材料の低誘電率化に向けて気泡を含むエナメル樹脂の開発にも取り組んでいる。この技術によって絶縁層の誘電率を大幅に下げることが可能になる。図17に、気泡を含むPAIを絶縁層としたエナメル線の誘電率と空隙率の関係を示す。絶縁層の空隙率を高くするほど誘電率を低くすることができる。この技術は巻線のみならず他用途への応用展開が期待できる。

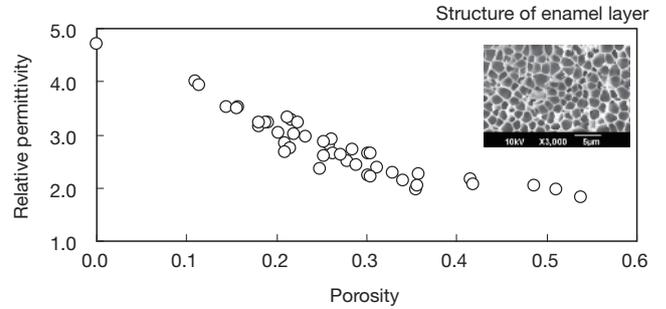


図17 PAIの比誘電率と空隙率の関係
Relative permittivity of PAI as a function of porosity.

4. まとめ

部分放電開始電圧(PDIV)の数値計算と実測により、巻線の構造や環境条件が部分放電特性に与える影響を調査し、そのメカニズムを考察した。まず、パッシェン曲線と空気ギャップ電界の数値計算によりツイストペアモデルと平行平板モデルのPDIVを推定した結果、絶縁層が40 µmを越えた場合に両者のPDIV推定値に差異が生じ、これが空気ギャップの電界分布の違いに起因することを示した。電線同士が接するように配置されたツイストペアで観測されるPDIVは、絶縁層の厚さと誘電率から想定されるPDIVの最小値とは必ずしも一致しない可能性があることが示唆され、実用上重要となるPDIVの最小値の推定や評価に際しては電線間ギャップ距離の考慮が重要であることを述べた。次に、種々の絶縁材料を被覆した電線のツイストペアを用いて50 Hzの交流電圧におけるPDIVを測定した結果、推定値と測定値がよく一致することを確認した。これにより数値計算によるPDIV推定の妥当性と絶縁層の厚膜化と低誘電率化の効果を定量的に示した。さらに、温度と湿度の環境条件が50 Hzの交流電圧を印加した場合のPDIVに与える影響を調査した。25～230℃におけるツイストペアのPDIVは明確な温度依存性を示し、高温ほど低下した。この温度依存性を特徴づける支配的要因が、空気の火花電圧と絶縁材料の誘電率の温度特性であることを示した。また、平角線を合わせた試験片のPDIVは相対湿度95%において大幅に低下し、これが電線表面に存在するイオン性汚損物が主要因の一つであることを示した。おわりに、巻線の部分放電特性の向上に対する当社の取り組みについて、HV駆動モータ用平角巻線とエナメル線の低誘電率化技術を紹介した。

5. おわりに

本報では、巻線の部分放電現象とそのメカニズムに関する筆者らの研究成果を数値解析や実験結果を中心に報告した。得られた知見は、高電圧かつ過酷環境下で用いられる巻線、特にHVやEVの駆動モータ用巻線の部分放電の評価や現象の理解、ならびに絶縁設計を行う上で有益な情報を提供するものと考えらる。

参考文献

- 1) 高崎, 神谷, 水谷, 金岩, 加藤, 梅田: “小型ハイブリッド車のモータステータの開発”, 2012 JSAE Annual Congress (Spring) EV, HEV System III -①, (2012), 5.
- 2) Hitoshi Okubo, Yonghu Lu and Naoki Hayakawa: “Partial discharge characteristics of inverter-fed motor coil samples under ac and surge voltage conditions”, 2003 Annual Report. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, (2003), 589.
- 3) T. W. Dakin, H. M. Philofsky and W. C. Divens: “Effect of Electric Discharges on the Breakdown of Solid Insulation”, AIEE Part I: Communication and Electronics, 73 (1954), 155.
- 4) 島本: “電子機器・部品の複合加速試験と信頼性評価技術”, (1998), 143.
- 5) 脇本, 高橋, 香田, 滝澤, 石田: “EV, HEVモータの高電圧絶縁に関する一車両環境を考慮した部分放電開始電圧への影響”, デンソーテクニカルレビュー, 16 (2011), 68.
- 6) 小山, 栗本, 村上, 長尾: “絶縁シートを用いたCIGRE Method - II電極における部分放電開始電圧の温度・湿度依存性”, 平成24年電気学会全国大会講演論文集 2-061, (2012), 72.
- 7) Y. Kikuchi, T. Murata, Y. Uozumi, N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Wakimoto, T. Yoshimitsu: “Effects of Ambient Humidity and Temperature on Partial Discharge Characteristics of Conventional and Nanocomposite Enameled Magnet Wires”, IEEE Trans. Diel. Elec. Insul., 15 (2008), 1617.
- 8) M. Fenger, G.C. Stone: “Investigation of the effect of humidity on partial discharge activity in stator windings”, Proc. of 7th International Conference on Properties and Applications on Dielectric Materials, 3 (2003), 1080.
- 9) 小山, 横見, 栗本, 村上, 長尾: “CIGRE Method - II電極系の部分放電開始電圧に湿度および付着異物が及ぼす影響” 電気学会誘電・絶縁材料研究会資料 DEI-13-045, (2013), 27.
- 10) 小林, 松崎, 新子谷, 木股: “架空送電線用複合がいしの開発(その2)” 古河電工時報, 第108号, (2001), 55.