

特集

EV, HEVモータの高電圧絶縁に関する研究*
 - 車両環境を考慮した部分放電開始電圧への影響 -
 A Study on High Voltage Insulation of the Motor for EV and HEV
 - Influence on PDIV in Consideration of the Vehicle Environment -
 (PDIV: Partial Discharge Inception Voltage)

脇本 亨 Toru WAKIMOTO
 高橋 芳光 Yoshimitsu TAKAHASHI
 香田 請司 Shinji KODA
 滝澤 敬次 Keiji TAKIZAWA
 石田 岳志 Takeshi ISHIDA

Recently, increases in the motor driving voltage and inverter switching speed have been in strong demand in the motors and inverters in electric vehicles (EV) and hybrid electric vehicles (HEV) in order to make them smaller and more efficient. However, those increases raise the possibility of an insulation-breakdown failure (deterioration of reliability) of motors because of ringing overshoot voltage surges. Therefore, the securement of insulation performance of these motors is a key issue in EV and HEV development. In order to secure this insulation performance, we investigate the possible factors, which are likely to cause such a partial electric discharge phenomenon, such as a barometric pressure decrease, a temperature increase, and the presence of metal powder adhered to the motor winding. This article describes the study results of those factors that influence insulation performance of high voltage drive motors.

Key words : Electric vehicle, Hybrid electric vehicle, Electric motor, Enameled wire, PDIV, Vehicle environment

1. はじめに

近年、車両の低燃費化やCO₂排出削減への要求から、EV（電気自動車）、HEV（ハイブリッド自動車）といった電気車両の普及が急速に進んでいる。これらの電気車両の動力源は、Fig. 1に示すように、主にバッテリー、インバータ、モータで構成されているが、モータにおいては、車両の駆動や減速時のエネルギー回生を担うため、ドラビリや燃費向上の観点から小型軽量化と高出力化が同時に求められている。

モータ出力の向上には、駆動エネルギーの増加が必要であるが、電流を増加する場合は銅線径を太くする必要があるので体格が増大してしまう。これに対し、

電圧の上昇は体格の増大を抑制しつつ高出力化が可能であり、電気車両においては、バッテリー電圧で100V～400V程度、さらに一部車両では昇圧回路が搭載され最大で650Vもの高電圧でモータが駆動されている。

また、一般的に電気車両のモータは高精度制御が要求されるため、インバータによって駆動されている。インバータはFig. 2に示すように、高速にスイッチング動作を繰り返すことで、モータ駆動に必要な正弦波電流を作り出しているが、この時インバータの出力端子には、スイッチング動作の度にバッテリー電圧を超えるサージ電圧が発生する。そしてこのサージ電圧は、ケーブルを介しモータ内部にまで伝播するため、モー

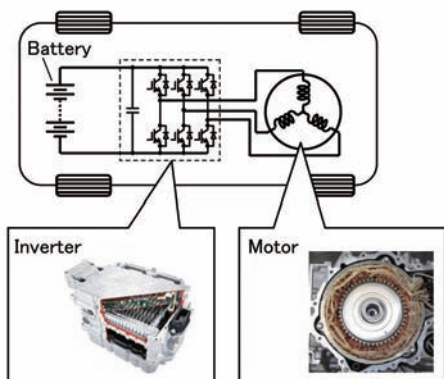


Fig. 1 Overview of motor-related parts in electric vehicles

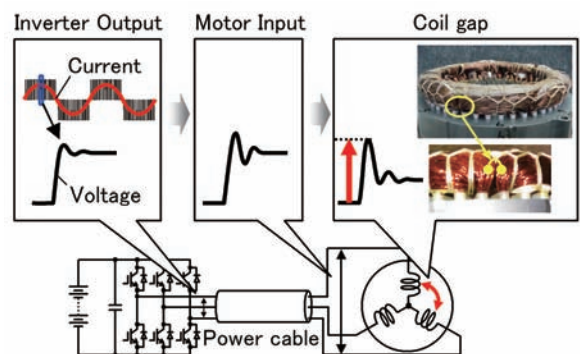


Fig. 2 Ringing overshoot surge voltage at the inverter and motor

*2011年8月27日 原稿受理

タ内のコイル間には、瞬間的に高電圧が加わることになる。コイル間に加わるサージ電圧は、インバータの駆動条件やケーブル長、モータ構造等によって変わるものの、場合によっては最大で駆動電圧の2倍程の大きな電圧が加わることがある。

コイル間に高い電圧が加わり、ある電圧を超えると、コイル皮膜の表面間で部分放電と呼ばれる微小な放電が発生することが知られている。この部分放電が発生し続けると、長い時間をかけて皮膜を浸食し、やがては絶縁破壊に至る。

以上のことから、モータの絶縁性能は、主に絶縁破壊に関係する部分放電の発生電圧とサージによって加わるコイル間の最大電圧によって決まる。このため、モータの絶縁を確保するためには、サージ電圧を低下するか部分放電の発生を抑制することが必要となるが、次に述べるようなモータやインバータの性能低下を招く。

①サージ電圧の低下（インバータスイッチング速度の低下）

インバータのスイッチング速度 (dV/dt) を遅くすると、インバータ出力部のサージ電圧を低下することができる。しかし、スイッチング速度の低下はスイッチング素子 (IGBT) の損失増加を招く。これは、素子内の電流と電圧変化に伴う面積分が損失となり、スイッ

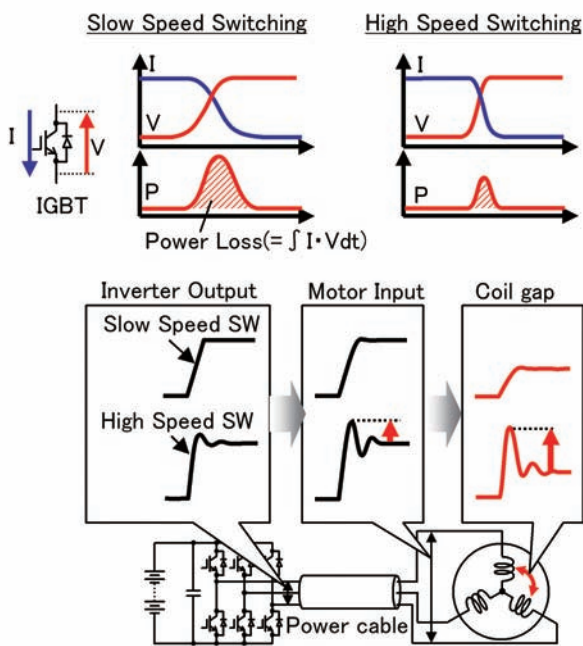


Fig. 3 Switching speed and surge voltage

チング速度の低下によってこの面積が大きくなるためである。(Fig. 3)

②部分放電の抑制（モータコイル皮膜厚の増加）

コイル線間の部分放電を抑制するためには、コイル皮膜を厚くすることが有効であるが、この場合、ステータコアのスロット面積を増加させる必要があり、この結果、占積率（スロット内面積に対する銅線面積の割合, Fig. 4）の低下によってモータ効率が低下してしまうといった問題がある。

以上のように、モータの絶縁性能とシステム性能はトレードオフの関係になることから、最終的には両者のバランスを考慮した最適設計が求められることになる。そのためには、部分放電が発生する条件を適切に把握することが必要であるが、部分放電の発生電圧は、電気車両特有の環境条件によって大きく変化するという問題がある。また、部分放電の発生挙動が変化した場合には、絶縁寿命に与える影響も併せて把握することが重要である。

そこで本研究では、車両環境を考慮した部分放電開始電圧への影響要因と絶縁破壊までの挙動について調査を行った。

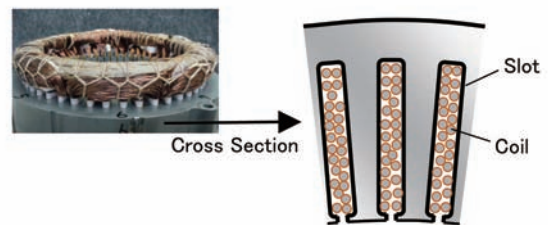


Fig. 4 Cross sectional view of the motor stator core slot

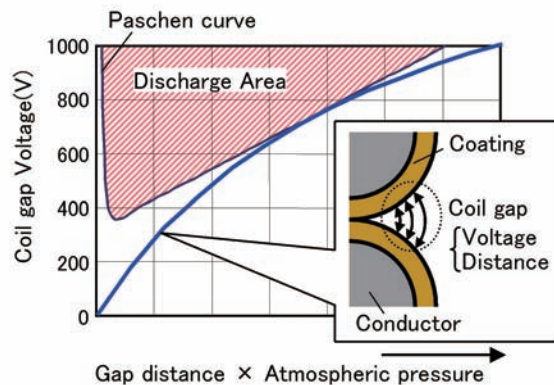


Fig. 5 Paschen curve

2. 評価要領

2.1 評価項目について

部分放電は、絶縁体表面の帯電電荷や空間放射線によって電離したイオンが、空間の高電界によって加速され気体分子に衝突し、これが繰り返される電子なだれ現象を引き起こすことで発生する。この現象は、ある空間の距離と気圧、電位差の関係が、次式に示すパッシェンの法則と呼ばれる一定条件を満たすことで発生することが知られている¹⁾。

$$V_s = \frac{B(Pd)}{\log(pd) + C} \quad (1)$$

V_s : 火花放電電圧 (V)
 p : 気圧 (mmHg)
 d : 電極間距離 (cm)
 B, C : 定数
 (空気: $B=126, C=0.22$)

一方、モータコイルにおいては、コイル導体間に高電圧が加わった際に、コイル皮膜自体に電圧が加わると同時に、コイルギャップ部の空間にも電位差が生じる。いま、ある皮膜（厚さ、誘電率）を有するコイルにおいて、コイルギャップ部の電圧と距離をこのパッシェン条件のグラフ上にプロットすると、あるコイル間電圧になった時点でパッシェン曲線と接する（Fig. 5）。部分放電は、この接触点で発生し始めることとなり、

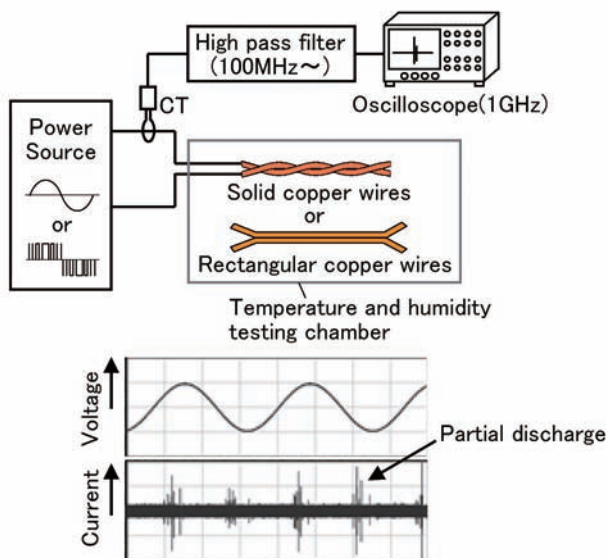


Fig. 6 Measurement system

この時のコイル間電圧が部分放電開始電圧（PDIV：Partial Discharge Inception Voltage）と呼ばれる。

この関係からわかる様に、コイル間のPDIVは、コイル皮膜間の電位差や気体の圧力によって変化し、さらに気体の温度や組成変化によってもパッシェン曲線自体が変化し影響を受ける。

電気車両においては、モータの高出力作動によってコイルが高温となり、環境温度も上昇する。さらに、高地への移動による大気圧の低下や、金属粉の付着によるコイル皮膜間の電界変化といった影響も懸念される。その他にも、皮膜自体の吸湿や印加波形の影響などが考えられるが、今回は、部分放電に影響を及ぼす要因として、大気圧、環境温度、金属粉の影響に着目し調査を行った。

また、最終的な車両の絶縁確保のためには、部分放電と絶縁破壊の関係を把握することが重要である。そこで今回、部分放電が発生した際の皮膜浸食量と残存耐電圧の関係を調べ、さらに金属粉が付着した際の放電の継続性についても併せて調査を行った。

2.2 部分放電測定システム

部分放電の測定システムをFig. 6に示す。試料にはコイル線（AI/EI皮膜，29.5 μ m）をより合わせたツイストペアを用い、線間に高電圧を印加した際のPDIVを測定した。

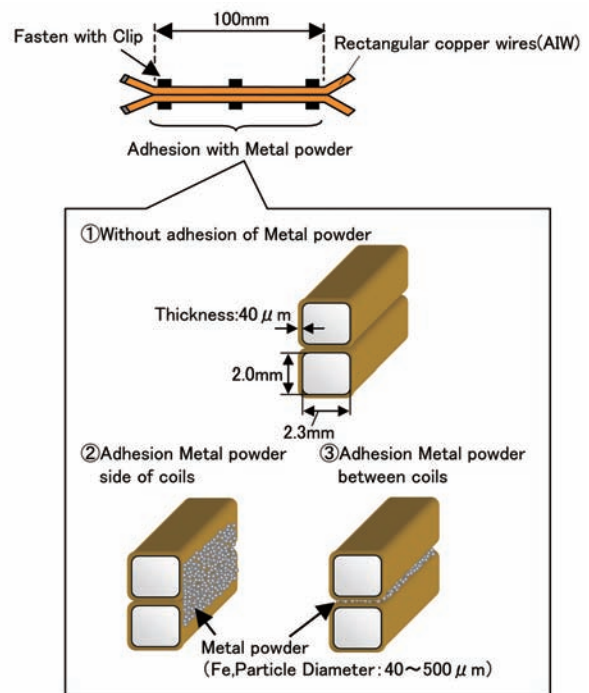


Fig. 7 Overview of measurement samples of metal powder adhesion

部分放電の測定は、電流センサ（高周波CT）によって検出した電流を100MHzのハイパスフィルタを介し電源ノイズを除去することで放電パルスを抽出し、別途あらかじめ測定した放電パルスピーク値と放電量の校正線から放電量に換算することで行った。PDIVの判定は、測定した放電量が100pCを超える時の印加電圧とした。

気圧、環境温度は、試料をそれぞれ負圧容器内または恒温恒湿槽に入れることで変更した。なお、負圧試験時の温湿度は、標準大気圧（1013hPa）時の温湿度25°C/50%RHから成りゆきで評価を行った。また、金属粉付着の試験については、Fig. 7に示すように、平角線（AIW皮膜、40μm）を背合わせで固定した試料を用い、粒径40μm~500μmのFe切削粉を側面または線間にふりかけて行った。

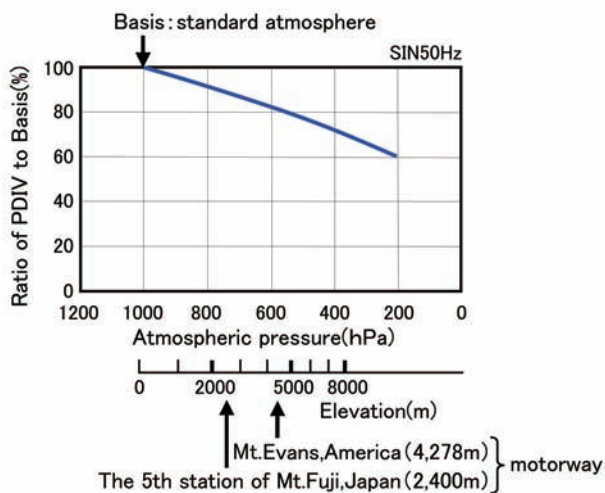


Fig. 8 Influence on PDIV ratio of atmospheric pressure decrease

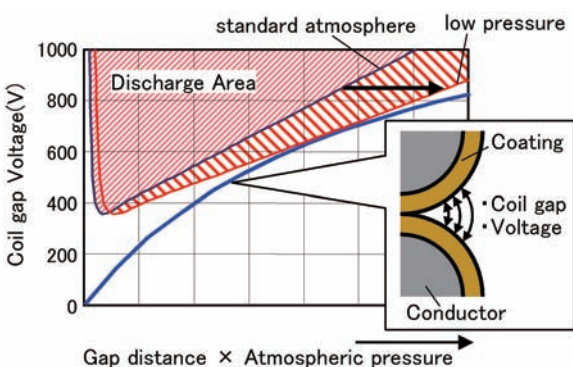


Fig. 9 Change in discharge area caused by atmospheric pressure decrease

3. 試験結果および考察

3.1 PDIVへの影響

3.1.1 気圧の影響

気圧を低下した際のPDIV測定結果をFig. 8に示す。このグラフは、測定値から求めた近似曲線を標準大気圧（1013hPa）の値を100%とした際の比率で示している。

気圧が低下すると、PDIVは低下する。自動車用の道路としては、日本の富士山5合目を見たと標高2400m、さらにアメリカコロラド州などでは標高4000mを越える舗装道路が存在する。このような低気圧下では、PDIVが20%程度低下するといえる。なお、気圧の低下によってPDIVが低下するのは、空気密度が低下することでパッシェン曲線領域がより低圧側（Fig. 9, グラフ右側）にシフトし、コイルギャップ部の電位差がより低い条件で接するためと考えられる。

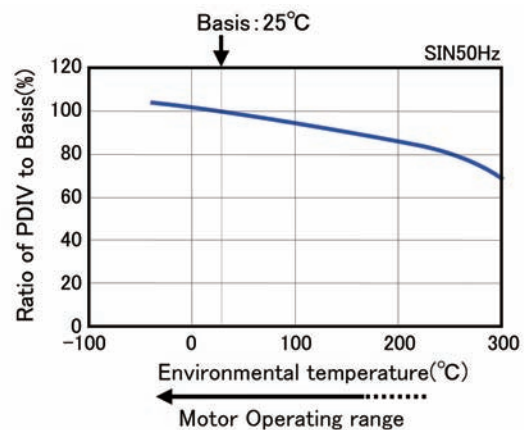


Fig. 10 Influence of temperature increase

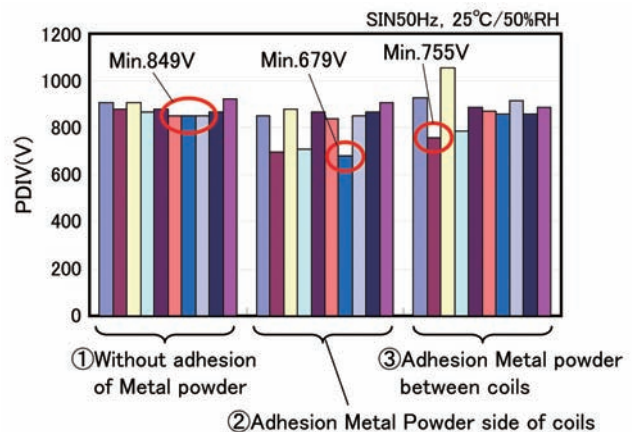


Fig. 11 Influence of metal powder adhesion

3.1.2 環境温度の影響

同様に環境温度を上昇した時のPDIVについて測定した結果をFig. 10に示す。このグラフは、環境温度25℃におけるPDIV測定値（近似曲線値）を100%とした比率を示す。

環境温度を上昇すると、PDIVは低下した。モータは出力が上がるとコイルが発熱し、コイル付近の気体温度も上昇すると考えられるが、コイル温度が上昇し過ぎると皮膜が損傷するため、一定温度を超えない制御が必要である。この温度は皮膜の種類によって異なるが、高耐熱の皮膜を用い高温域まで使用する場合は、それに伴ってPDIVも低下するといえる。なお、温度上昇によってPDIVが低下するのも、気圧低下と同様に気体の密度が低下することに起因すると考えられる。

3.1.3 金属粉附着の影響

次に平角線を合わせた試料に金属粉を附着させた時のPDIV測定結果をFig. 11に示す。

金属粉附着が無い場合のPDIVミニマム値は849Vであったのに対し、側面に附着した場合は679V（▲20%）、コイル間に附着した場合は755V（▲14%）にそれぞれ低下した。

コイル間のPDIVが低下する要因としては、ギャップ空間における気体状態（温湿度、気圧、組成）の変化、またはギャップ電界強度の上昇が考えられるが、金属粉附着の場合においては、ギャップ電界強度の上昇と考えられる。そこで、この影響について電界シミュレーションにより検証を行った。

検証モデルは、Fig. 12に示すように、金属粉の高さを150μmに固定し、先端幅、附着幅を変更した。なお、金属粉は領域全てが金属で埋まっているものと仮定し、金属部領域の比誘電率を10⁵と、皮膜や空気の比誘電率に対して十分大きく設定することで、金属部の電界計算を等価的に再現した。評価はコイル導体間に1000Vの電位差を与えたときの電界を計算し、金属粉先端部と皮膜間ギャップの電界強度について求めた。

ベース形状、およびベース形状から先端幅10倍、附着幅30倍に変更した際の電界計算結果をFig. 13に示す。側面、コイル間附着ともに、金属粉附着時は金属粉先端と皮膜間の電界強度が最も高くなる。この金属粉先端と皮膜間の電界強度について、ベース形状（先端幅：5μm、附着幅：50μm）を基準に、先端幅、附着幅を変更した時の計算結果をFig. 14に示す。

金属粉の先端幅が小さくなると、金属粉自体の電位が低下し、金属粉先端部の電界強度は上昇する。また、附着幅については、広いほど金属粉自体の電位が低下し、金属粉先端部の電界強度は上昇する。附着箇所については、コイル間よりも側面に附着した時の方が上昇量が大きかった。これは、側面に附着した場合、より低電位の部分に金属粉が位置することで、金属粉自体の電位が低下するためと考えられる。なお、今回計算した電界強度が最大となる条件（先端幅：最小、附着幅：最大、17.4V/μm）では、金属粉附着が無い場合（13.2V/μm）に対し、32%の上昇であった。

以上のように、先端が鋭く、附着面積が広がるほど金属粉の電位が下がり、金属粉とのギャップ電界強度は大きくなるといえる。

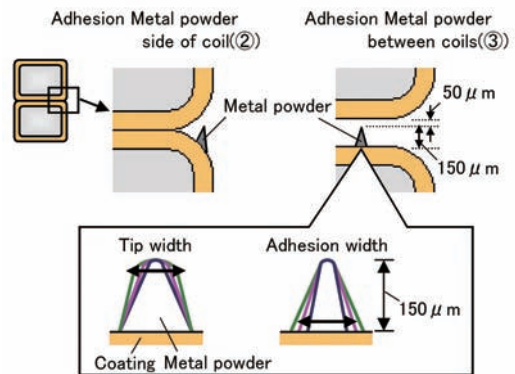


Fig. 12 Calculation model of electric field

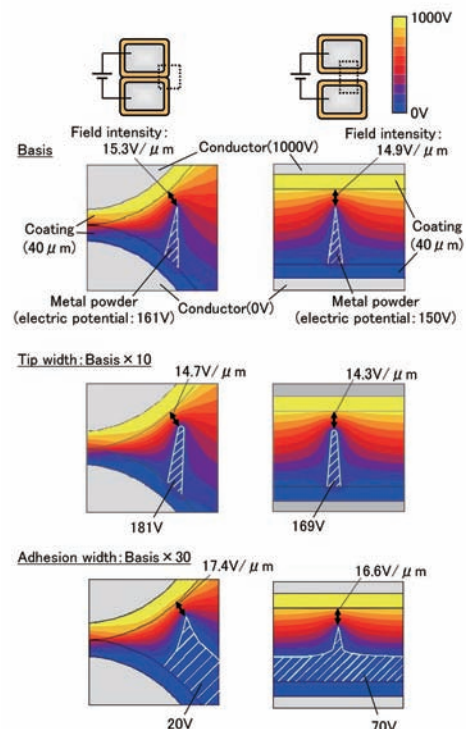


Fig. 13 Calculation result of electric field

次に、金属粉付着時のPDIVを計算する。Fig. 15は、標準大気圧におけるパッシェン曲線と、電界計算から求めた値をプロットした結果を示す。なお、このグラフは、パッシェン曲線の縦軸を電界強度で示している。電界強度の計算結果から、各ギャップ長における電界強度がパッシェン曲線と交わる線間電圧の最低値をPDIVとして求める。

まず、金属粉の付着が無い場合は、コイル間電圧が800Vのときにパッシェン曲線と交わることから、PDIVは800Vとみなせる。これに対し、金属粉が側面に付着した場合は、電界強度が最大32%上昇するため、コイル間電圧が680Vでパッシェン曲線と交わることとなり、付着が無いときに比べ、PDIVは120V（15%）低下する。以上の結果から、金属粉付着によって、PDIVは15%程度低下するといえる。

Fig. 16に金属粉が付着した時のPDIVについて、実測値と計算値を比較した結果を示す。実測値、計算値共に、側面に付着した時のPDIV低下率は約15%であるのに対し、コイル間付着時は約4%の低下となり、両者の低下量はおおむね一致した。このことから、金属粉付着によるPDIVの低下は、金属粉自体の電位変化によるギャップ部の電界強度上昇と考えられる。

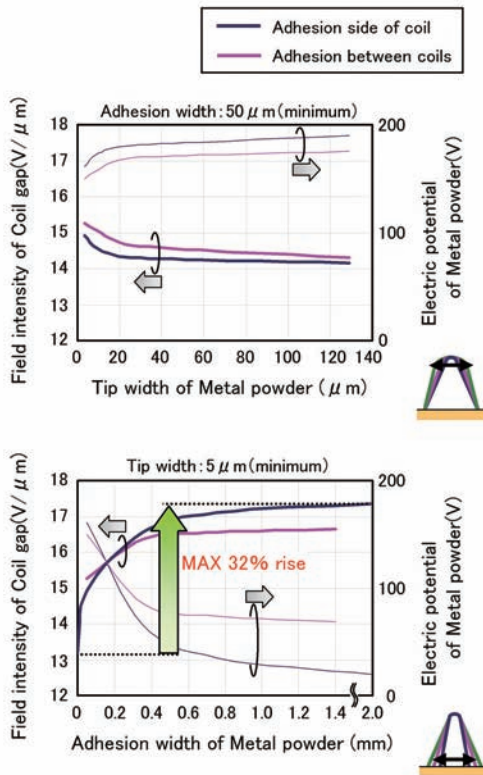


Fig. 14 Influence of the shape of adhered metal particles

3.2 絶縁破壊への影響

3.2.1 部分放電発生時の絶縁破壊挙動

コイル間に部分放電が発生し続けた際の、絶縁破壊までの皮膜浸食量を調査した。評価は、サージ電源により実際のモータコイル間に加わる電圧波形を模擬した電圧を試料に印加し、試験中の放電量、絶縁破壊直前の皮膜厚、耐電圧（BDV：Break Down Voltage）について測定を行った。なお、試験波形に実機模擬波形を用いたのは、皮膜浸食の挙動（電圧の印加波形によって、放電量や放電数、皮膜の浸食箇所が変化）を実機に近づけるためである。試料はエナメル線ツイストペア（丸線，AIW，29.5μm）を用い、ピーク電圧2.2kV、繰り返し周波数10kHzの両極性電圧波形を印加した。

Fig. 17に電圧波形と部分放電の検出波形を示す。本試験では、部分放電は電圧が印加される度に発生し、さらに電圧極性が反転するタイミングでは多くの放電が発生した。極性反転時に多くの放電が発生するのは、コイル間ギャップ部で発生した放電電荷が皮膜表面に帯電し、極性反転時にこの帯電によってギャップ電圧が強められるためと考えられる。

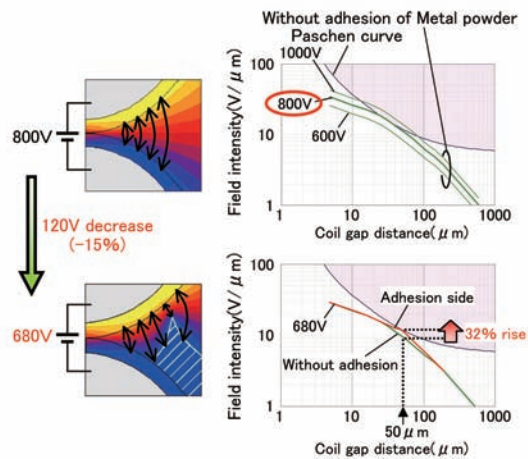


Fig. 15 Comparison between the Paschen curve and the calculated electric field value

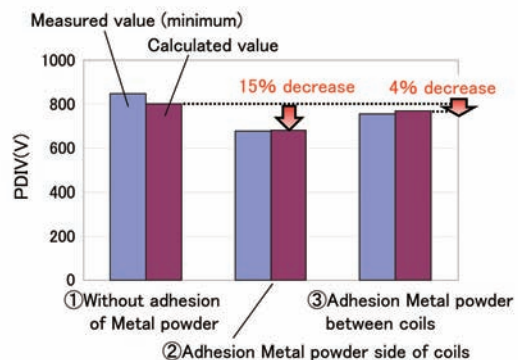


Fig. 16 Comparison between the measured and calculated values of PDIV

試験の結果、絶縁破壊した試料において、破壊部以外の断面を観察した様子をFig. 18に、またこの観察映像から皮膜の最薄部を調べた結果をFig. 19に示す。皮膜厚は、初期の29.5 μm から平均で17.8 μm に低下しており、このときのばらつきは $\pm 2\mu\text{m}$ と少ない範囲で集中していた。なお、別途イメージインテンシファイアを用いた放電観察により、部分放電はツイストペア全体に発生していることを確認している。これらのことから、部分放電による浸食は試料一様に発生・浸食し、ある膜厚を残した時点で絶縁破壊に至ると考えられる。

試料の絶縁破壊は、最終的に浸食劣化した皮膜のBDVが低下することで発生すると考えられる。これを確認するため、Fig. 20に示すように、絶縁破壊した試料を単線にばらし、破壊部以外の場所をAuスパッタリングにてコーティングし、このコーティング部を電極としてコイル導体間に直流電圧を印加することでBDVを評価した。この測定法は、Au付着範囲で皮膜が最も薄い箇所のBDVをPDの影響を排除して測定することができると考えられる。

測定結果をFig. 21に示す。このグラフは、横軸に皮膜厚、縦軸にBDVを示している。破壊直前となる17.8

μm におけるBDVは、新品の約14kVから32%程度減少し、約9kVであった。これは膜厚16 μm の新品を計測した結果と同程度であったことから、破壊直前のBDVは、残存膜厚分相当のBDVを残しているといえる。この破壊直前のBDV(約9kV)は、劣化試験におけるサージ電圧2.2kVよりも十分に高く、またBDVのばらつきも新品と同程度であり、局所的な薄膜箇所もないと推定されることから、絶縁破壊には、皮膜厚低下以外の要因があると考えられる。その他の要因としては、部分放電の発生に起因した、瞬間的な皮膜温度の上昇や皮膜内部への空間電荷の蓄積による、皮膜自体の耐電圧低下などが考えられる^{2) 3)}。

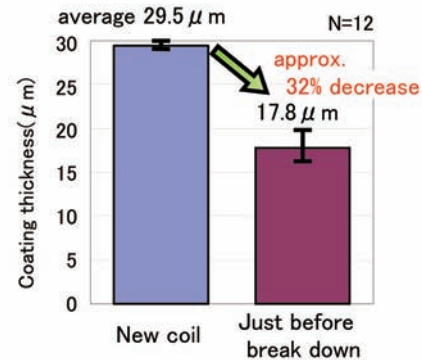


Fig. 19 Transition of the coating insulation layer thickness

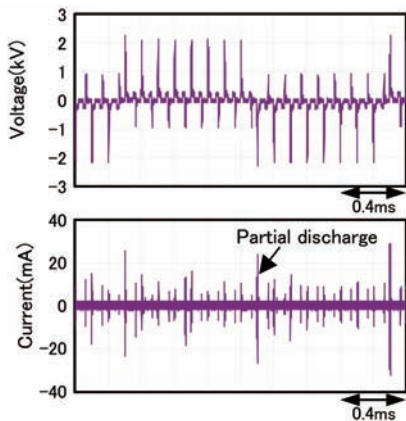


Fig. 17 Waveform chart of applied voltage and partial discharge

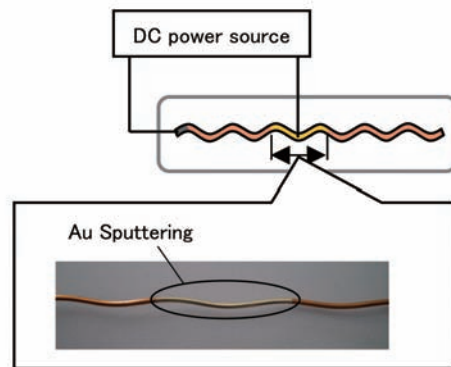


Fig. 20 Measurement method of BDV

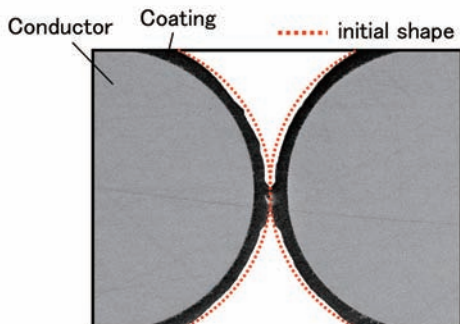


Fig. 18 Cross sectional view of the coil

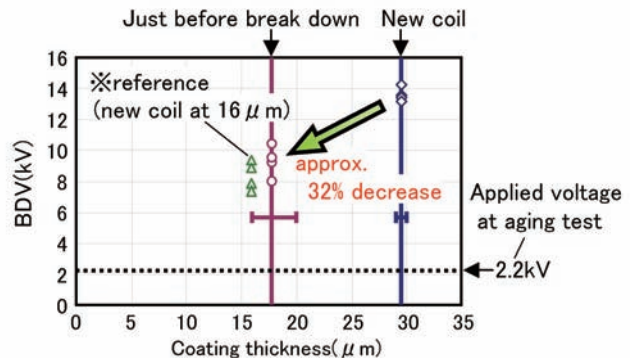


Fig. 21 Measurement result of BDV

3.2.2 金属粉付着時の部分放電挙動

最後に、金属粉が付着しPDIVが低下した場合について、放電の継続性を調査した。Fig. 22は、金属粉の付着によってPDIVが低下した際に、PDIVと同等の電圧を印加し続けたときの部分放電の経時変化を示す。

金属粉が付着しないときは、放電が発生し続けやがては絶縁破壊に至るのに対し、金属粉が付着した際はいずれも途中で放電が消滅した。これは、放電の発生によって金属粉の先端部が変形し、ギャップ電界が緩和されたためと考えられる。このことから、金属粉の付着は、直ちに絶縁破壊に結びつかないと考えられる。

4. まとめ

モータコイル間に高電圧が印加された際に発生する部分放電の発生電圧 (PDIV) について、車両環境の影響を調査した。PDIVは、大気圧の低下や環境温度の上昇、さらには金属粉の付着によってそれぞれ20%程度低下することを明らかにした。各要因が複合した場合にはさらにPDIVは低下すると考えられる。また、部分放電が発生し続けると皮膜が浸食し、ある膜厚に低下した時点で絶縁破壊に至るが、金属粉が付着した条件などの様に、PDIVは低下するものの放電が継続せず絶縁破壊に至らない場合も存在することを確認した。

5. おわりに

本稿では、電気車両用駆動モータの絶縁に関する研究について述べた。モータ絶縁に影響する要因は、今回調査した項目以外にも、環境湿度やオイル付着、材料劣化などといった項目が存在する。これらの影響は、使用するモータの仕様や駆動条件によっても変わると考えられる。電気車両システムのパフォーマンスを最大限発揮するためには、システム毎の絶縁性能の見極めと最適な絶縁設計が重要と考える。

<参考文献>

- 1) 大木正路：高電圧工学，楳書店，P.57
- 2) 家田正之：誘電体現象論，電気学会，P.322～P.339
- 3) 電気学会技術報告：繰り返しインパルスにおける部分放電計測とインバータサージ絶縁，P.39～P.40

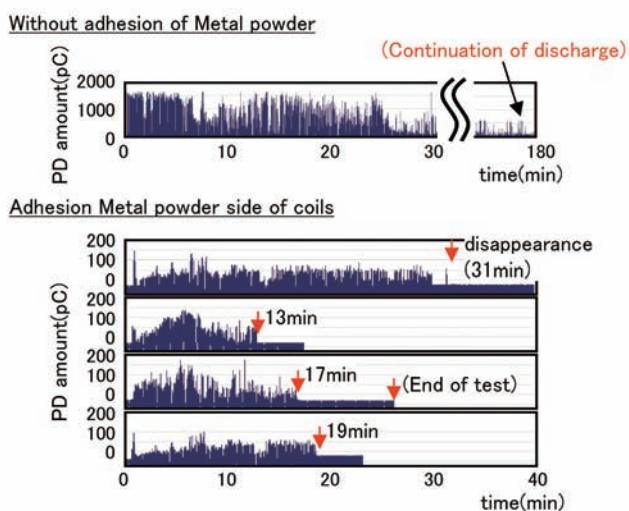


Fig. 22 Transition of the partial discharge frequency

<著 者>



脇本 亨
(わきもと とおる)
(株)日本自動車部品総合研究所
HV機器関連の高電圧現象解析,
絶縁技術開発に従事



高橋 芳光
(たかはし よしみつ)
(株)日本自動車部品総合研究所
HV機器関連の高電圧現象解析,
絶縁技術開発に従事



香田 請司
(こうだ しんじ)
電機技術2部
HV用モータの開発に従事



滝澤 敬次
(たきざわ けいじ)
トヨタ自動車(株)
HV先行開発部
HV用モータの開発に従事



石田 岳志
(いしだ たけし)
トヨタ自動車(株)
HV先行開発部
HV用モータの開発に従事