

# 気泡入りエナメル皮膜を適用した巻線の部分放電特性

## Partial Discharge Characteristics of Winding Wire Utilizing Micro Cellular Coating

武藤 大介<sup>\*1</sup>  
Daisuke Muto

池田 佳祐<sup>\*1</sup>  
Keisuke Ikeda

富澤 恵一<sup>\*1</sup>  
Keiichi Tomizawa

福田 秀雄<sup>\*2</sup>  
Hideo Fukuda

小迫 雅裕<sup>\*3</sup>  
Masahiro Kozako

匹田 政幸<sup>\*3</sup>  
Masayuki Hikita

### 〈概要〉

xEV(電動車)の動力性能や燃費向上を目的として搭載されるモータの小型化と高出力化が加速しており、これらモータに使用される巻線にはより高い絶縁性能を持つ皮膜が要求されている。当社では巻線の部分放電開始電圧(PDIV)の向上に取り組み、絶縁層に気泡を導入することでPDIVを飛躍的に向上させた低誘電率絶縁材料を開発した。本報では気泡入りエナメル皮膜を適用した巻線の部分放電特性に与える機械的ストレスと印加電圧波形の影響について検証した。その結果コイル加工を想定した伸張を与えた場合でもPDIVを良好に維持できることを明らかにした。またインパルス電圧を印加した場合には商用周波数の交流電圧と比べてPDIVが高くなることを確認し、この現象をVolume-Time理論により定量的に説明できることを示した。

### 1. はじめに

近年自動車の二酸化炭素排出量削減要求などの各国の環境規制を背景に、ハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)などの電動モータを搭載した車両が急速に普及している。モータは駆動源としてだけでなく減速時には発電機としてバッテリーの充電も行っており、モータの性能は動力や燃費性能に直結する非常に重要な要素である。モータには小型化、高効率化による出力密度の向上が求められており、また高トルク性能の要求を達成するために動作電圧が400Vを超える高電圧で使用されるケースも増加傾向にある。一般的に車載用モータには回転数を高精度で制御可能なインバータが用いられているが、インバータの高速スイッチングに伴い発生する立ち上がりが高電圧なサージ(インバータサージ)によってモータのコイル絶縁が損傷してしまうことが問題視されている。

当社は巻線業界の中でもいち早くインバータサージに起因する部分放電現象と絶縁劣化の研究に取り組み、そのメカニズムの解明と巻線皮膜のPDIVの向上に努めた結果、世界初の高耐電圧巻線HVWW<sup>®</sup>を開発した<sup>1)</sup>。また耐部分放電特性の更なる向上を目的として、絶縁皮膜中に微細な気泡を導入することでPDIVを飛躍的に向上させた低誘電率絶縁材料の開発に成功した<sup>2)</sup>。本報では気泡を導入したエナメル皮膜を適用した巻線の部分放電特性に与える機械的ストレスおよび印加電圧波形の影響について検証したので報告する<sup>3)~5)</sup>。

### 2. 気泡導入によるエナメル皮膜の低誘電率化

当社では耐部分放電特性向上を目的に、空気をエナメル樹脂中に導入することによる絶縁皮膜の低誘電率化に取り組み、当社独自の樹脂組成開発により微細な気泡を含むエナメル層が形成されたエナメル線(気泡巻線)の開発に成功した。図1に開発した気泡巻線の模式図を示す。この組成開発により従来までの汎用エナメル線と比較して絶縁皮膜の比誘電率を大幅に下げることが可能となり、さらに皮膜の厚膜化により極めて優れたPDIVを達成した。絶縁皮膜に対する気泡の体積比率を40%とした気泡巻線の25℃におけるPDIV測定結果を図2に示す。同図には比較として気泡を入れていない汎用エナメル線の測定結果を併記した。

この気泡巻線をモータに採用することにより巻線間の空気ギャップの電界強調が弱まって、インバータサージによる部分放電の発生を抑制することが可能になる。

\*1 研究開発本部 自動車・エレクトロニクス研究所

\*2 古河マグネットワイヤ(株) 技術統括部

\*3 九州工業大学

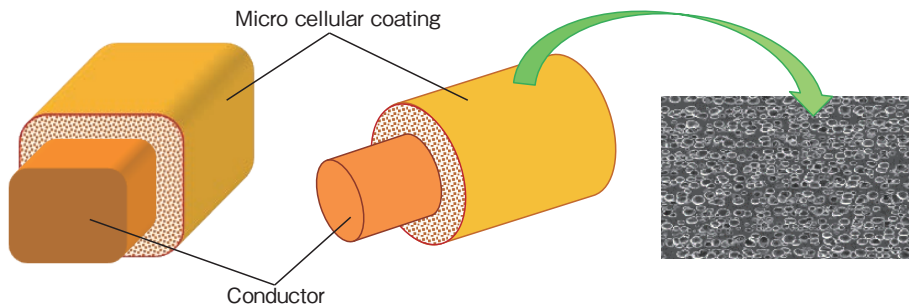


図1 開発した気泡巻線の模式図  
Schematic diagram of the developed winding wires coated with the micro cellular coating.

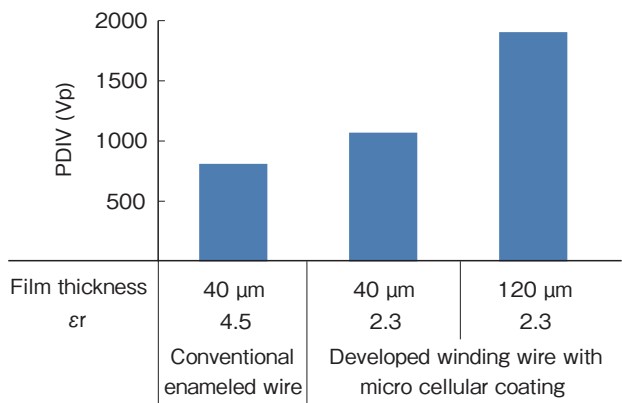


図2 汎用エナメル線と気泡巻線のPDIVの比較  
Comparison of PDIV between the conventional enameled wire and the developed micro cellular enameled winding wire.

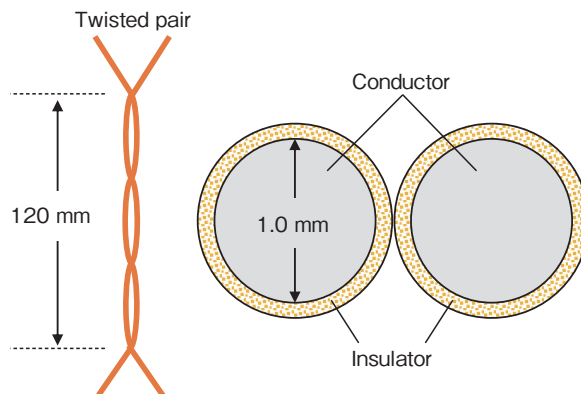


図3 試料構成  
Structure of specimen.

### 3. 気泡巻線のPDIVに与える機械的ストレスの影響

車載用モータの小型化に伴い、巻線にはより過酷な加工が施されるようになってきている。そのため伸張や曲げなど機械的ストレスが巻線の部分放電特性に与える影響を明確にすることが重要である。本節では伸張した気泡巻線のツイストペア試料を用いてPDIVを検証した結果について述べる<sup>3)</sup>。

#### 3.1 実験方法

##### 3.1.1 ツイストペア試料

実験に使用した試料はポリアミドイミド (polyamide imide: PAI) エナメル層に平均気泡径 2 μm の気泡を含む気泡巻線 (気泡線) であり、形状は図3に示すようなツイストペアである。比較としては気泡を含まないPAIエナメル線 (無気泡線) も用いた。気泡線および無気泡線の皮膜の比誘電率はそれぞれ2.7および4.2、皮膜の厚さはそれぞれ39 μm及び40 μmである。なお両試料の导体直径は1.0 mmである。機械的ストレスを模擬するためには電線を長手方向に一定の速度で引っ張り、伸張率が10%、20%および30%の電線を用いてツイストペア試料を製作した。伸張率φの式を下記の式(1)に示す。

$$\phi = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} \times 100 [\%] \quad (1)$$

L<sub>0</sub>は標点間距離、L<sub>f</sub>は伸張後の標点間距離である。以後気泡および無気泡線ツイストペア試料を気泡試料および無気泡試料と略す。

##### 3.1.2 部分放電開始電圧 (PDIV)

図4に測定回路を示す。昇圧速度50 V/sの交流電圧 (60 Hz) を試料に印加し、同調式部分放電測定器 (日本計測器製造所 CD-6) を用いて検出感度を2.3 pCとしてPDIVを測定した。印加電圧の波高値をPDIV値とし、一つの試料に対しPDIVを12回繰り返し測定し、そのうち最大値・最小値を除いた10回の平均値で評価した。各試料数Nは3とした。

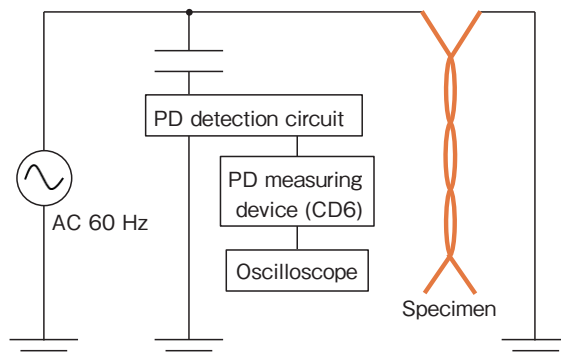


図4 交流電圧下における部分放電の測定回路  
Measurement circuit of the partial discharge under alternate current voltage.

### 3.1.3 比誘電率

気泡線および無気泡線の皮膜表面に導電塗料を塗布し、LCRメータを用いて皮膜全体の静電容量 $C$ を測定した。同軸円筒の静電容量を示す式(2)を用いて測定結果より皮膜全体の比誘電率 $\epsilon_r$ を算出した。測定周波数は100 Hz、測定温度は25℃とした。式(2)において $l$ は電極長さ、 $a$ および $b$ は同軸円筒の内径および外径である。

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_rl}{\ln\frac{b}{a}} \quad (2)$$

## 3.2 実験結果および考察

### 3.2.1 伸張したツイストペア試料の部分放電試験結果

図5に伸張率0%から30%のツイストペア試料のPDIV測定結果を示す。いずれの試料でも伸張率の増加に伴いPDIVが低下する傾向を示した。この傾向は式(3)に示すDakinのPDIV推定式より膜厚 $t$ の減少および比誘電率 $\epsilon_r$ の上昇によってPDIVが低下したと考えられる。

$$V = 163 \left( \frac{t}{\epsilon_r} \right)^{0.46} \quad (3)$$

また伸張率10%から30%において気泡試料は無気泡試料よりもPDIV値が18%から26%高い結果が得られた。このことから30%の伸張を与えても気泡線の低誘電率は維持されているものと考えられる。そこで3.2.2節と3.2.3節では伸張によるPDIV低下の理由について膜厚 $t$ と比誘電率 $\epsilon_r$ より考察した。

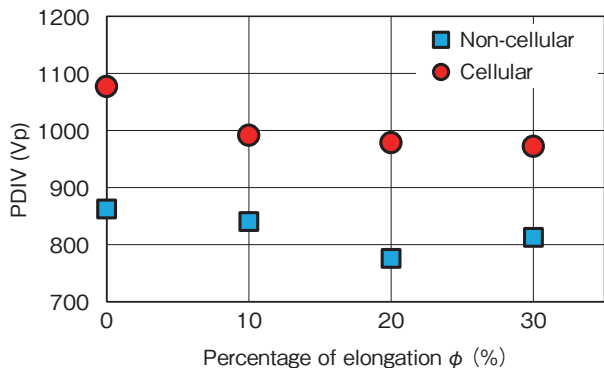


図5 PDIVと伸張率 $\phi$ の関係の測定結果  
The relationship between the PDIV and elongation rates.

### 3.2.2 膜厚

図6に伸張に伴う膜厚の変化を示す。図6より伸張率の増加に伴い気泡および無気泡試料は膜厚が減少し、30%の伸長によりそれぞれ8.8%および11%薄膜化する結果が得られた。

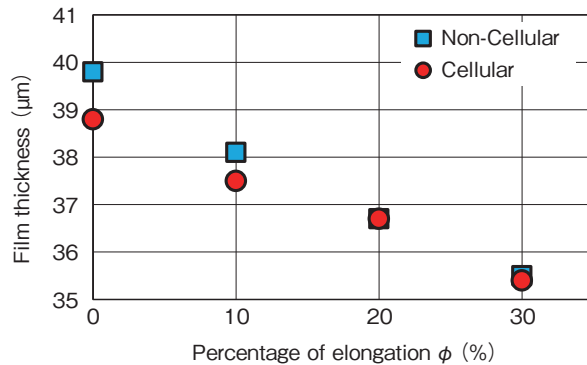


図6 伸張率の変化に伴う膜厚  
The relationship between the thickness and the elongation rate.

### 3.2.3 比誘電率

図7に伸張率変化に伴う比誘電率の測定結果を示す。無気泡試料は皮膜が薄膜しても比誘電率は一定であるのに対し、気泡試料は皮膜の薄膜化に伴い比誘電率が3%低下する結果が得られた。これは薄膜化に伴い気泡の形状変化によって皮膜全体の静電容量が低下したためと推測する<sup>3)</sup>。

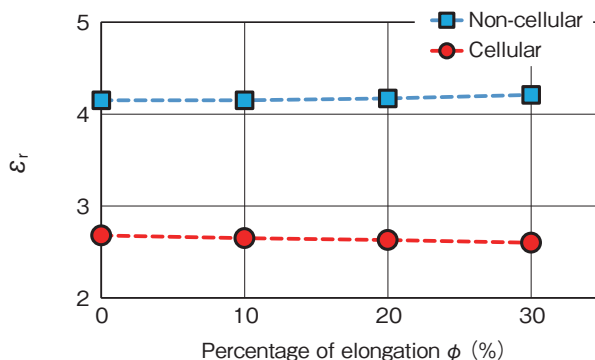


図7 伸張率の変化に伴う比誘電率  
The relationship between the relative permittivity and the elongation rate.

以上より伸張率の増加に伴うPDIV低下の要因は皮膜の薄膜化による影響であることがわかった。

### 3.2.4 電界計算とパッシェンの法則によるPDIV推定

交流電圧印加時において気泡試料巻線間の楔ギャップで部分放電が発生する場合のPDIVをツイストペア撚線部が形成する楔ギャップの電界分布計算とパッシェンの法則により推定した。数値電界解析ソフトElectro (Integrated Engineering Software Inc.製)を用いて図8のようなツイストペア解析モデルを作成し、エナメル巻線に所定の電位 $V_a$ を巻線間に与え、楔ギャップの各ギャップ長さ $d$ に対する電界 $E$ を電界解析によって求め、プロットした。そして $V_a$ を変化させた場合の $E-d$ 曲線が大気圧における空气中パッシェン曲線と接するとき(図9)の $V_a$ を試料のPDIVとした。図9における $V_a$ はピーク値0.94 kVである。電界解析に用いた気泡試料の比誘電率と膜厚には実測値を用いた。また無気泡試料についても同様にPDIVの推定を行った。

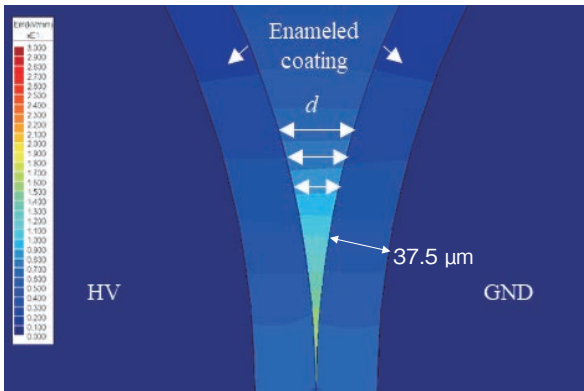


図8 ツイストペア楔ギャップ部分の電界解析結果  
Electric field strength analysis result of the twisted pair wedge.

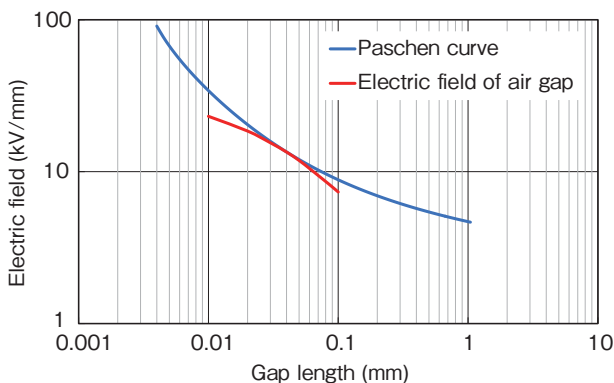


図9 パッシェンカーブと気泡試料線ツイストペアにおける楔ギャップの電界解析結果 ( $V_a=0.94$  kV)  
Paschen curve and electric field strength of the wedge gap at 0.94 kV of  $V_a$  for the cellular coating twisted pair specimen.

図10にPDIVの実測値と推定値を示す。図10よりPDIVの実測値と推定値は同様な傾向を示していることがわかる。このことから伸張に伴うPDIVの低下は気泡の形状変化に伴う比誘電率の低下よりも薄膜化の影響が支配的であるといえる。

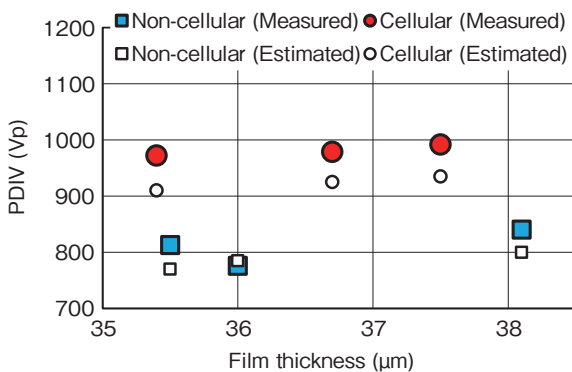


図10 PDIVの実測値と推定値の比較  
Comparison between the measured value and the estimated value for PDIV.

#### 4. 気泡巻線のPDIVに与える印加電圧波形の影響

xEVに搭載されるインバータ駆動モータでは高速なスイッチングにより駆動電圧にサージ電圧が重畳する。このサージ電圧は一般にインバータサージと呼ばれ、駆動モータの巻線間に部分放電を発生させて巻線の絶縁皮膜を損傷する恐れがある。よってインバータサージ下における巻線の部分放電特性を理論的に解明することが重要である。本節ではインバータサージを模擬した立ち上がり急峻なインパルス電圧を繰り返し印加した場合の気泡入りエナメル皮膜の部分放電特性についてツイストペア試料を用いたPDIV評価結果およびVolume-Time理論<sup>6)~9)</sup>による考察を述べる<sup>4),5)</sup>。

##### 4.1 実験方法

##### 4.1.1 ツイストペア試料

実験に使用する試料はポリアミドイミド (polyamide imide: PAI) に平均気泡径  $3 \mu\text{m}$  の気泡を多数混入させた気泡巻線であり、形状は図3に示したツイストペアである。気泡皮膜全体の比誘電率は2.5である。比較として気泡を含まないPAIの無気泡皮膜線ツイストペアを用意した。なお両試料とも導体直径は  $1.0 \text{ mm}$ 、皮膜の厚さは  $37 \mu\text{m}$  である。

##### 4.1.2 部分放電開始電圧 (PDIV)

図11に示す測定回路にて繰り返しインパルス電圧を試料に印加してPDIVを評価した (インパルス試験)。インパルス試験では図11に示すように暗箱の中に試料を置き、両極性インパルス電圧印加にて発生する部分放電の発光 (PD発光) と電磁波を光電子増倍管 (PMT) (浜松ホトニクス製, H10721-210) とループセンサを用いてPMT信号にトリガをかけて取得した。このときPMTおよびループセンサは試料から  $15 \text{ cm}$  離れた距離に設置した。またPMTから見て試料の裏側で発生するPD発光も取得できるように暗箱内に鏡を設置した。インパルス試験では立ち上がり時間  $200 \text{ ns}$ 、パルス幅  $1 \mu\text{s}$ 、繰り返し周波数  $500 \text{ Hz}$ 、昇圧速度  $500 \text{ V/min}$  の両極性インパルス電圧をインバータパルス電源 (パルス電子技術製, PG-W5KE) によって発生させた。交流電圧を用いた測定方法は3.1.2節と同様である。交流およびインパルス試験ともに両試料の試験点数を5とし、各試料のPDIV測定回数を10回とした。本試験において交流および繰り返しインパルス電圧に対するPDIVは波高値にて評価した。

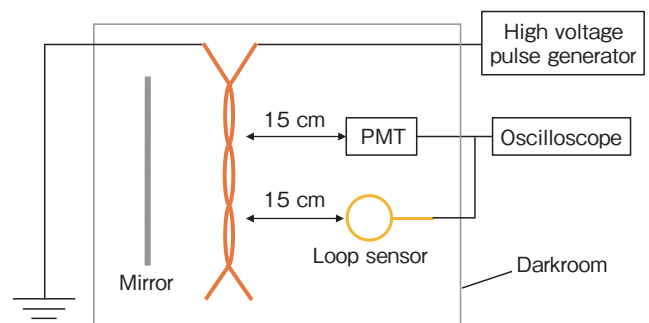


図11 繰り返しインパルス電圧下における部分放電の測定回路  
Measurement circuit of partial discharge under repetitive bipolar impulse voltage.

4.2 実験結果および考察

4.2.1 交流および繰り返しインパルス部分放電試験結果

図12にインパルス試験における気泡試料の部分放電信号の波形の一例としてPMT信号、印加したインパルス電圧波形、ループセンサの検出信号をそれぞれ示している。インパルス電圧印加時にPMTとループセンサは印加電圧のピーク平坦部で部分放電を検出していることがわかる。一方でインパルス電圧立ち上がり時におけるPMTの信号はインパルス電源のスイッチングノイズである。図13に交流およびインパルス試験における両試料のPDIV測定結果を示す。結果より皮膜を気泡化させた場合、交流および繰り返しインパルス電圧下におけるPDIVは無気泡試料に比べて約20%向上することがわかる。また交流電圧のPDIVに対する繰り返しインパルス電圧のPDIVの比を表すインパルス比は無気泡試料では1.15、気泡試料では1.14となる。

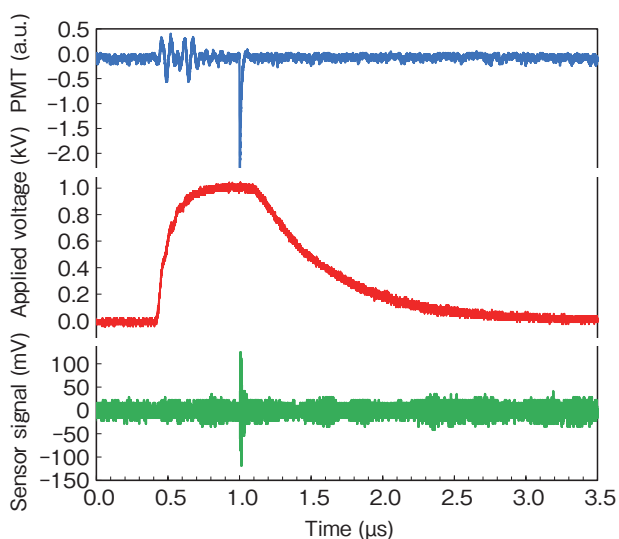


図12 インパルス電圧下における部分放電信号の波形  
The waveform of PD signal under the impulse voltage.

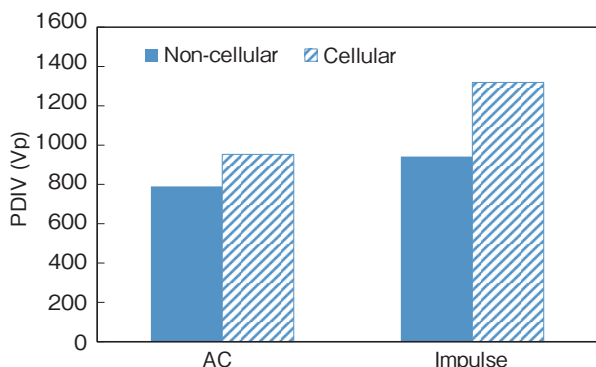


図13 交流および繰り返しインパルス電圧印加での無気泡・気泡皮膜線ツイストペアのPDIV測定結果  
Measured PDIV of non-cellular and cellular coating twisted pair under AC and repetitive impulse voltages.

4.2.2 Volume-Time理論によるPDIV推定

交流およびインパルス電圧印加時におけるエナメル線ツイストペアのPDIV推定手法として空気楔ギャップ中の放電過程を

考慮したVolume-Time理論に基づく解析を用いて検討する。Volume-Time理論とは電界分布の空間的、時間的変化を考慮することで初期電子発生確率を求める理論であり、任意の試験電極系に任意の電圧波形を印加した際の初期電子発生確率Pを求めることができる。本計算では空気中の負イオンからの電子離脱と陰極皮膜表面からの電界電子放出を初期電子発生源とした。初期電子発生確率Pは式(4)で与えられる<sup>7)~9)</sup>。

$$P = 1 - \exp \left[ - \int_0^t \left( \int_{V_{cr}} \frac{dn}{dt} dV + \int_{S_{cr}} \frac{di}{dt} dS \right) dt \right] \quad (4)$$

ここで $dn/dt$ および $di/dt$ はそれぞれ空気中の負イオンおよび皮膜表面から単位時間あたりに発生する初期電子数の期待値である。式(4)の積分領域である $V_{cr}$ は臨界体積、 $S_{cr}$ は臨界面積である。

まず $O_2^-$ イオンから離脱する初期電子の発生について説明する。単位時間・体積あたりに空気中の $O_2^-$ イオンから離脱する初期電子数は、式(5)のように $O_2^-$ イオン密度 $n^-$ と電子脱離係数 $k_d$ の積で与えられる<sup>9)</sup>。

$$\frac{dn}{dt} = k_d \times n^- \quad (5)$$

ここで電子脱離係数 $k_d$ は空気中の電界 $E$ を臨界電界 $E_{cr}$ で除した過電圧率 $E/E_{cr}$ に依存する値である<sup>8)</sup>。空気中の $O_2^-$ イオン密度 $n^-$ は大気圧において $150 \text{ ions/cm}^3$ とした。

次に皮膜表面の電界電子放出による初期電子の発生について説明する。Fowler-Nordheim (F-N)理論に基づいた電界電子放出が陰極面上の突起で発生することは一般的であるが、最近では陰極面上に不純物層を含む絶縁体や付着物が存在する場合、F-N理論と同様な電界電子放出が起こることが明らかにされている<sup>12)</sup>。そこで高電界下では皮膜の不純物や付着物もしくはトラップ準位から電界電子放出により初期電子が放出されると考えた。この現象を計算に組み込むためF-N理論による電界電子放出を表す式<sup>13)</sup>を用いて単位時間・面積あたりに皮膜表面から放出される初期電子数の期待値 $di/dt$ を式(6)のように与えた。

$$\frac{di}{dt} = \frac{e^3 (\beta E_i)^2}{8\pi h (e\phi_D)} \exp \left[ - \frac{8\pi\sqrt{2m}}{3he\beta E_i} (e\phi_D)^{3/2} \right] \quad (6)$$

ここで $e$ は電気素量、 $m$ は電子の有効質量、 $h$ はプランク定数、 $\beta$ は電界強調因子、 $\phi_D$ は電位障壁の高さ、 $E_i$ は皮膜の電界である。皮膜表面の突起や不純物の影響で局所的に高電界になることを電界強調因子 $\beta$ を用い皮膜の電界 $E_i$ を補正することで考慮した。

式(5)及び式(6)より空気ギャップ中からの初期電子の期待値 $dn/dt$ 及び皮膜から放出される初期電子数の期待値 $di/dt$ の空気中の電界依存性の計算結果を図14に示す。同図より $E = 20 \text{ kV/mm}$ 程度で皮膜から大量の初期電子が供給されることがわかる。文献によると数十kV/mmの電界でF-N理論に基づく電界電子放出機構が観測されると報告されており<sup>12)</sup>、今回の $E$ に近い値となる。

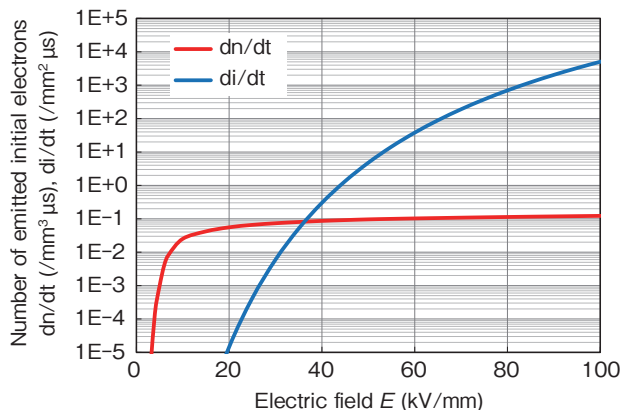


図14 単位時間・面積あたりに皮膜表面から放出される初期電子数の期待値 ( $di/dt$ ) および単位時間・体積あたりに空気中からの電子離脱による初期電子数の期待値 ( $dn/dt$ ) Expected number of emission electrons from the coating surface per unit time and volume ( $di/dt$ ), and expected number of emission electrons from air per unit time and volume ( $dn/dt$ ).

またガス中で放電が発生するためには発生した初期電子が衝突電離を繰り返し、ストリーマ(放電路)を形成する必要がある。よって初期電子発生確率  $P$  を初期電子がストリーマに転移できる領域  $V_{cr}$  で積分することにより部分放電発生確率を算出することができる。この  $V_{cr}$  を臨界体積とした。臨界体積  $V_{cr}$  は式(7)のストリーマ転移の条件式<sup>10), 11)</sup>を満たすガス領域として与えられる。

$$\int_x (\alpha - \eta) dx = K \tag{7}$$

ここで  $x$  は電子ドリフト経路長,  $\alpha$  は電離係数,  $\eta$  は付着係数,  $K$  は衝突電離回数である。空気中の実効的な電離係数  $\alpha - \eta$  は電界  $E$  [kV/mm] および圧力  $p$  [MPa] を用いて式(8)で与えられる<sup>11)</sup>。ただし  $E$  は臨界電界  $E_{cr} = 23.86 \text{ kV}/(\text{mm} \cdot \text{MPa})$  より大きくなければならない。

$$\frac{\alpha - \eta}{p} = 0.186 \left( \frac{E}{p} - 23.86 \right)^2 \tag{8}$$

$K$  は気体の種類によって決まる定数であり, 10 を用いた。また電子のドリフトは接地側から高圧側へ直線的な軌道をとるものと仮定し, 電子ドリフト経路長  $x$  はギャップ長  $d$  と同等であると近似して計算を行った。また  $V_{cr}$  に接する接地側エナメル線の表面積を臨界面積  $S_{cr}$  とした。

#### 4.2.3 Volume-Time 理論の計算結果と考察

式(4)によって求めた無気泡試料における部分放電発生確率  $P_{PD}$  の印加電圧ピーク値  $V_i$  依存性を図15(a)に示す。図15(b)は, 皮膜表面からの初期電子の発生 ( $di/dt$ ) を式(4)から除外した場合の計算結果である。図16(a)および図16(b)にも同様に, 気泡試料における  $P_{PD}$  の各計算結果を示す。また図15および図16において実線で示した曲線は交流電圧に対する計算結果, 破線で示した曲線はインパルス電圧に対する計算結果である。図15および図16より交流電圧下において式(4)による計算結果と式(4)から  $di/dt$  を除外した計算結果が一致していることが

わかる。この結果は単位時間当たりの初期電子発生数の小さい空気ギャップ中(図14参照)からでも交流電圧の数msという比較的長い電圧印加時間であれば式(5)を十分に満たす初期電子が供給されるため, 皮膜表面の電界電子放出を考慮しなくてもよいことを示している。一方でインパルス電圧下において式(4)による計算結果と式(4)から  $di/dt$  を除外した計算結果には大きな差がある。この差はインパルス電圧のパルス幅が  $1 \mu\text{s}$  と短く, 空気ギャップ中からだけでは式(7)を十分に満たす電子供給が行われず放電に至る確率が低くなるとともに, 高電界領域になると皮膜表面からの電界放出が支配的になり(図14参照)式(7)を満たすのに十分な初期電子が供給され, 放電発生の確率が高くなることによる。

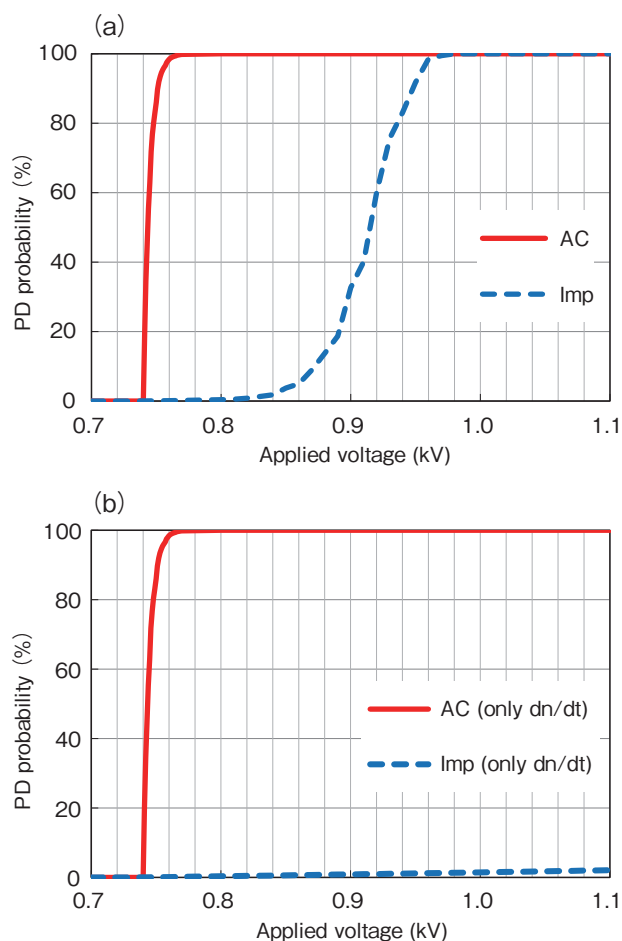


図15 無気泡試料における部分放電発生確率  $P_{PD}$  の印加電圧  $V_i$  依存性 PD probability dependence on the applied voltage for the non-cellular specimen.  
(a) 式(4)による計算結果 Calculated value by equation (4).  
(b) 式(4)から  $di/dt$  を除外した計算結果 Calculated value by equation (4) excluding of the term  $di/dt$ .

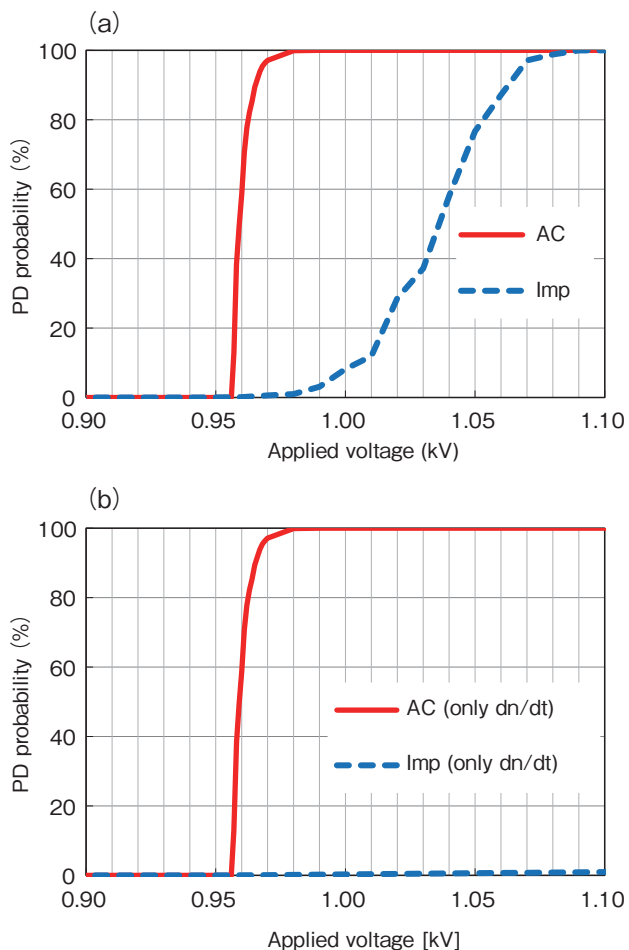


図16 気泡試料における部分放電発生確率 $P_{PD}$ の印加電圧 $V_i$ 依存性  
 PD probability dependence on the applied voltage for the cellular specimen.  
 (a) 式(4)による計算値  
 Calculated value by equation (4).  
 (b) 式(4)から $di/dt$ を除外した計算値  
 Calculated value by equation (4) excluding of the term  $di/dt$ .

また図15(a)および図16(a)において交流電圧およびインパルス電圧において気泡試料が無気泡試料よりも高い値を示している。この結果は気泡試料が無気泡試料よりも低誘電率であるため式(8)中の皮膜の電界 $E_i$ に影響し、皮膜表面からの初期電子の発生を抑えられることを示している。

次に図15(a)および図16(a)における $P_{PD}$ からPDIVを導出し、PDIVの測定値との比較を行った。PDIVの導出方法として臨界体積 $V_{cr}$ 内に発生する初期電子数の期待値が1となるときの、すなわち $P_{PD}=63.2\%$ となるときの $V_i$ をPDIVとして算出した。図17(a)および図17(b)にそれぞれ無気泡試料および気泡試料の各電圧波形におけるPDIVの測定値 $PDIV_{Me}$ とVolume-Time理論による計算値 $PDIV_{VT}$ を示している。パッシェン則による計算値 $PDIV_{Ph}$ も同様に示す。同図(a)および(b)の交流PDIVにおいては $PDIV_{Me}$ 、 $PDIV_{VT}$ および $PDIV_{Ph}$ が両試料において一致していることがわかる。またインパルスPDIVにおいても $PDIV_{Me}$ と $PDIV_{VT}$ は一致した。この結果はVolume-Time理論による本手法が、交流およびインパルス電圧下の双方においてPDIVの理論的求解法として有効であるこ

とを示唆する。更に気泡試料は低誘電率化の影響によって無気泡試料よりもPDIV値が高くなることを示している。

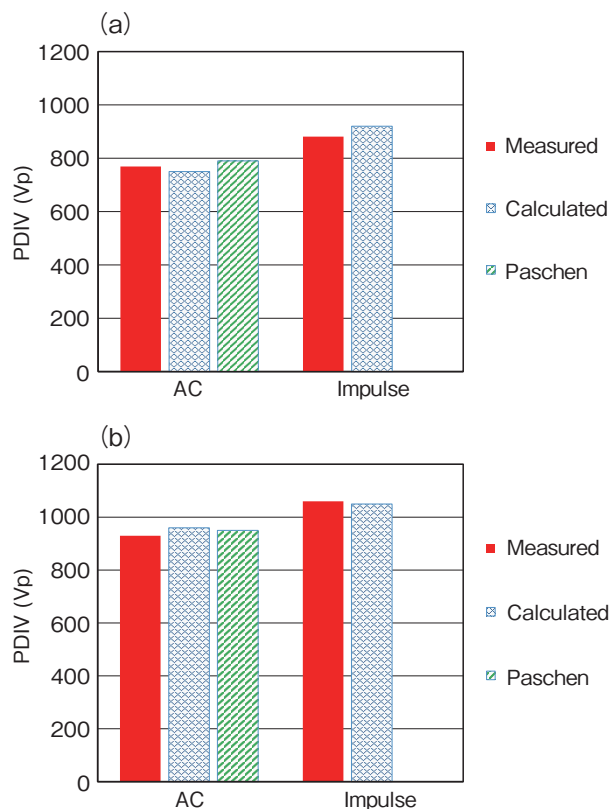


図17 PDIVの実測値と推定値の比較  
 Comparison of measured and calculated PDIV.  
 (a) 無気泡試料  
 Non-cellular specimen.  
 (b) 気泡試料  
 Cellular specimen.

以上の計算結果はインパルス電圧下における部分放電を引き起こす初期電子の多くが皮膜表面から放出されたものであることを示している。

## 5. おわりに

気泡を導入した低誘電率エナメル皮膜巻線について、インバータ駆動モータへの実装を想定した機械的ストレスおよび印加電圧が部分放電特性に与える影響を調査した結果、以下の知見を得た。

- ・伸張率10%から30%において気泡試料は無気泡試料よりもPDIV値が18%から26%高い。
- ・伸張率の増加に伴うPDIV低下の要因は皮膜の薄膜化による影響である。
- ・気泡線では伸張率の増大に伴い皮膜の比誘電率が低下する。
- ・交流および繰り返しインパルス電圧下における気泡試料のPDIVは無気泡試料に比べて約20%向上する。
- ・交流電圧のPDIVに対する繰り返しインパルス電圧のPDIVの比は無気泡試料では1.15、気泡試料では1.14である。
- ・気泡試料および無気泡試料の交流および繰り返しインパルス電圧のPDIVはVolume-Time理論による推定値と一致する。

以上のように伸張を与えた場合や繰り返しインパルス電圧印加時においても優れたPDIVを示すことを明らかにし、気泡巻線の有用性を確認した。更にVolume-Time理論による本手法が交流およびインパルス電圧下の双方においてPDIVの理論的求解法として有効であることを明らかにした。小型化・高効率化が加速することが予想される車載用モータの分野において本報告の内容は更なるモータの技術革新に寄与することが期待できるものである。当社としては今後も低誘電率材料やモータ内渦損失に着目し、モータの性能向上を達成する材料開発に注力する。

### 謝辞

本研究のデータ取得や考察に関して九州工業大学大学院修士課程の久保智洋氏、同大学大学院在学当時修士課程の前田健太氏に多大なる御協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

### 引用文献

- 1) 武藤, 大矢, 青井, 上野: 巻線の部分放電現象に関する研究, 古河電工時報, 133 (2014), 11-18.
- 2) 富澤, 島田, 池田, 武藤, 福田: 主機モータ用巻線のための次世代技術開発, 古河電工時報, 137 (2018), 8-13.
- 3) 久保, 中野, 小迫, 匹田, 福田, 池田, 富澤, 武藤: 伸張したマイクロ発泡試料エナメル線の誘電特性および部分放電特性, 第49回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, D2 (2018), 123-126.
- 4) 前田, 久保, 内村, 溝口, 小迫, 匹田, 福田, 武藤, 富澤, 池田: Volume-Time理論を用いた発泡皮膜線ツイストペアのインパルス部分放電開始電圧の推定, 放電/誘電・絶縁材料/高電圧合同研究会, ED-18-002, DEI-18-031, HV-18-042 (2018), 7-12
- 5) K. Maeda, T. Kubo, T. Uchimura, H. Mizoguchi, M. Kozako, M. Hikita, H. Fukuda, D. Mutou, K. Tomizawa, K. Ikeda, "Partial Discharge Inception Voltage of Enameled Cellular Wire under Impulse Voltage", 2<sup>ND</sup> IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIELECTRICS, No.3 (2018).
- 6) X. Xu, S. Jayaram, S. A. Boggs, "Prediction of Breakdown in SF6 under Impulse Conditions", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 3, No.6 (1996), 836-842.
- 7) K. Maeda, S. Nakamura, M. Kozako, M. Hikita, S. Yoshida, T. Chigiri, "Partial Discharge Characteristics of Wedge-Shaped Gap between Coated Electrodes in SF6 under Lightning Impulse Voltage", 21th International Conference on Gas Discharge and their Applications, 1 (2016), 301-304.
- 8) K. Maeda, M. Kozako, M. Hikita, S. Yoshida, T. Chigiri, "Partial Discharge Inception Voltage Measurement and Its Estimation by Volume-Time Theory for SF6/PET Insulated Wedge Gap under Impulse Voltage", 20th International Symposium on High Voltage Engineering, No.441 (2017).
- 9) N. Hayakawa, F. Shimizu, H. Okubo, "Estimation of Partial Discharge Inception Voltage of Magnet Wires under Inverter Surge Voltage by Volume-Time Theory", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19, No.2 (2012), 550-557.
- 10) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編, "放電ハンドブック", オーム社 (1998), 516-521.
- 11) 大久保仁編著, "高電界現象論", オーム社 (2011), 85-94.
- 12) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編, "放電ハンドブック", オーム社 (1998), 598-604.
- 13) 大久保仁編著, "高電界現象論", オーム社 (2011), 74-75.