

HEV モータ用マグネットワイヤ絶縁被膜の低誘電率化

Low Relative Permittivity of Magnet Wire Insulation Coating for HEV Motor

金子 遼太郎¹
Ryotaro KANEKO

西山 忠夫²
Tadao NISHIYAMA

梓 沢 慶 介³
Keisuke AZUSAWA

要 旨

HEV モータ用に耐熱性と絶縁性を両立させた絶縁被膜を開発した。ポリイミド樹脂に対して、独立した気泡を均一に分散させることで、温度指数が 250℃ という高い耐熱性を持ちながら、比誘電率をポリエチレンなどの低誘電率材料と同等水準の 2.4 まで下げる技術確立した。本技術により従来のマグネットワイヤに対して絶縁性を維持しながら被膜厚さを約 20% 低減することができ、導体断面積が約 6% 増加した。その結果として新開発モータの損失を従来モータ比で 5% 低減することができた。

ABSTRACT

An insulation coating that achieves a balance of heat resistance and insulating properties was developed for use in HEV motors. Technology was established that lowers the relative permittivity as low as 2.4, which is at the level of polyethylene and other such low-permittivity materials, while also having heat resistance with the high temperature index of 250°C by causing independent gas bubbles to be dispersed evenly in polyimide resin. This technology made it possible to maintain the insulating properties of conventional magnet wire while reducing the coating thickness by approximately 20% and increasing the cross-sectional area of the conductor by approximately 6%. As a result, losses in newly developed motors were successfully reduced by 5% relative to conventional motors.

1. ま え が き

近年、車両の走行中における CO₂ 排出削減や低燃費化への要求から Hybrid Electric Vehicle (HEV), Electric Vehicle (EV) といった電動車両の普及が急速に進んできており、今後も燃費規制の強化により電動化はさらに加速される見込みである。また、適用車種についても小型車両から大型車両、ミニバンや SUV などさまざまな種類の自動車への適用が広がっている。特に小型車両へ搭載するためには、駆動用モータに対しては高トルクと高出力特性を維持しながら小型化することが求められる。しかしモータ特性向上のための電流増加やモータ体格の小型化による熱容量の低下により、モータ温度の上昇が課題となっている⁽¹⁾。発熱源であるマグネットワイヤの発熱を低減するには導体断面積拡大による通電時の抵抗低減が効果的である。モータ体格を維持しながら導体断面積を拡大するには絶縁

被膜を薄くする必要があるが、主要機能である絶縁性が低下する。被膜厚さを薄くしつつ絶縁性を維持するには、絶縁被膜における比誘電率の低減が有効となる⁽²⁾。

最も効果的に比誘電率を低減できるアプローチとしては樹脂の多孔質化が知られている。絶縁体の中で最も比誘電率の低い気体を樹脂に分散させることで、樹脂単体では得ることのできない比誘電率を達成することが可能になる。また、樹脂の多孔質化は絶縁性の向上だけでなく軽量性や吸音性、断熱性、緩衝性などさまざまな特性を向上させることもできる⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。絶縁用途としての多孔質化の研究も多数報告⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾されているが、マグネットワイヤの絶縁被膜として実用化された例はない。実用化のためには、数 μm サイズの独立した気泡が被膜全体で均一に分散されていることが要求される^{(9), (10)}。

樹脂の多孔質化は物理的手法と化学的手法の二つのアプローチに大別される。物理的手法の代表例としては二酸

¹ 先進技術研究所

² 本田技研工業株式会社

³ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

化炭素などの超臨界流体を用いた手法がよく知られている^{(9), (11), (12)}。しかし超臨界法は高圧環境が必要であるため、非連続生産となり生産性が低いことが課題である⁽¹³⁾。一方、化学的手法は熱膨張性の発泡剤を利用した手法が一般的であるが、形成される気泡サイズが大きくなってしまふことや隣接する気泡同士が連通孔を形成してしまふ気泡の独立性を保つことが容易ではない^{(9), (14)}。そのため、超臨界流体を用いた物理的手法と発泡剤を用いた化学的手法は絶縁被膜の多孔質化には適していない。

そこで我々は外殻を有する気泡形成材を用いた熱化学法を適用することで、多孔質化された絶縁被膜を実用化した。本技術をマグネットワイヤの絶縁被膜として適用することによって、新型モータの損失を従来比で5%低減した。本稿では、車載用駆動モータにおける絶縁被膜設計の考え方と開発モータとしての気泡被膜の最適設計およびモータ特性として評価した結果について述べる。

2. 絶縁被膜設計の考え方

車載用駆動モータには回転数を高精度に制御できる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うパルス電圧の急峻な立ち上がりや、インバータの出力インピーダンスとモータの入力インピーダンスの不整合などにより、高電圧のインバータサージ電圧がマグネットワイヤに印加される。インバータサージ電圧のピーク値は通常のインバータ電圧の2倍程度⁽¹⁵⁾となることもあり (Fig. 1)、マグネットワイヤの絶縁保証が重要である。

マグネットワイヤの絶縁保証のために重要な特性の一つに部分放電開始電圧 (PDIV) がある。ワイヤ間に生じた電位差が PDIV を超えると絶縁被膜間の空間で部分放電と呼ばれる微小な放電が発生する。Fig. 2 に示すように、部分放電が発生し続けると放電の衝突エネルギーにより絶縁被膜が侵食され、最終的には絶縁破壊による短絡が起こり車両停止に至ってしまう恐れがある。そのため車載モータに

対しては気圧が低くなる高地や高温などの厳しい環境下においても、部分放電が発生しないように絶縁被膜を設計する必要がある。

その設計指針としては式 (1) に示す Dakin の式が広く知られており、PDIV は被膜厚さと比誘電率の関数となる。PDIV 向上には式 (1) に示すように、被膜の厚膜化もしくは比誘電率の低減が有効であるが、厚膜化はスロット内の導体占積率を低下させモータ容積効率の低下につながる。そのため、HEV や EV などの電動車両駆動に求められる小型かつ高効率なモータ用のマグネットワイヤでは、絶縁被膜における比誘電率の低減が重要である。

$$PDIV = A \times (2 \times t / \varepsilon_r)^{0.46} \quad (1)$$

A : Constant

ε_r : Relative permittivity

t : Thickness of coating

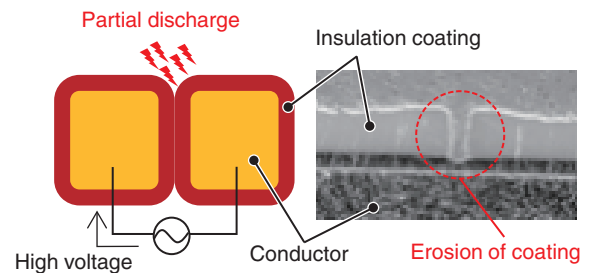


Fig. 2 Partial discharge of magnet wire and example of erosion of insulation coating

3. 絶縁被膜の低誘電率化

3.1. 低誘電率化の課題

Fig. 3 に主な絶縁樹脂の温度指数と比誘電率の関係を示す。温度指数とはマグネットワイヤ用絶縁被膜の耐熱性の指標の一つである⁽¹⁶⁾。HEV などの駆動用モータの有機部材には耐熱性や耐油性、耐薬品性などのさまざまな特性が求められる。そのため、駆動用モータにおけるマグネットワイヤの絶縁被膜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) やポリイミド (PI) などのスーパーエンジニアリングプラスチックに分類される絶縁樹脂がよく用いられている。しかしそれらの比誘電率は 3.1 以上であり、ポリエチレン (PE) やポリテトラフルオロエチレン (PTFE) のような比誘電率の低い材料より 30% 以上も高く、絶縁特性が低いという課題がある。一方、PE やポリプロピレン (PP) は絶縁樹脂の中で 2.2-2.3 の低い比誘電率を示すが耐熱性が低く、登坂時や高速走行時などで高温環境下となる車載用駆動モータには不向きである。ま

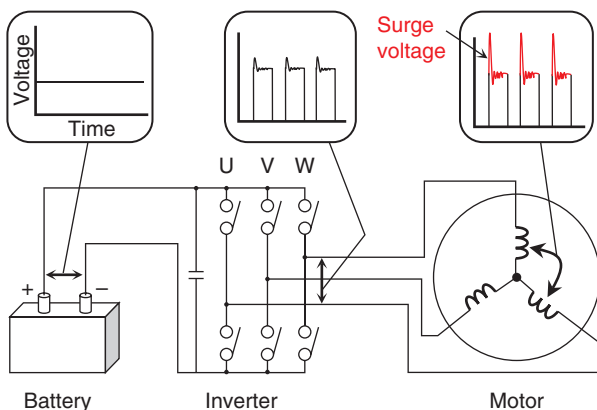


Fig. 1 Schematic diagram of inverter surge voltage

た PTFE などのフッ素樹脂は密着性や機械特性が低いため、導体との密着性や耐加工性が要求されるマグネットワイヤには適さない。

そこで耐熱性や密着性などのマグネットワイヤの絶縁被膜として必要な特性を満足しつつ比誘電率の低い絶縁被膜の開発を検討した。比誘電率の低い絶縁被膜を開発する上でベースとする樹脂には Fig. 3 に示すように、高い耐熱性を有し比較的比誘電率の低い PI を選択した。PI の比誘電率を下げる手法はいくつか報告⁽¹⁷⁾されており、式 (2) に示す Clausius-Mossotti の式に従い、イミド基濃度を下げるとしくはかさ高い構造にするといった化学構造設計はその一つである。しかし、いずれの手法も比誘電率は 2.7 程度までは下げられるものの PI の長所である耐熱性が下がってしまうことが報告されている⁽¹⁷⁾。またフッ素変性による比誘電率の低減も報告⁽¹⁷⁾されているが、前述同様に特性が背反し、特に密着性の低下が課題となるため、マグネットワイヤの絶縁被膜への量産適用は容易ではない。

$$\varepsilon_r = \frac{1+2(P_m/V_m)}{1-(P_m/V_m)} \quad (2)$$

P_m : Molar polarizability

V_m : Molar space occupied volume

3.2. 気泡分散による樹脂の低誘電率化

樹脂単体ではマグネットワイヤに必要とされる特性を満足しながら比誘電率を低減することは容易ではないため、絶縁体の中で最も比誘電率の低い気体に着目した。PI 樹脂内に気泡を形成させ、比誘電率を下げる手法はこれまでに多数報告^{(6), (8), (17), (18)}されているが、駆動用モータの絶縁被膜として実用化された例はない。Fig. 4 に今回試みた気泡分散による樹脂の比誘電率の低減手法をマグネットワイヤの絶縁被膜への適用観点で整理した。

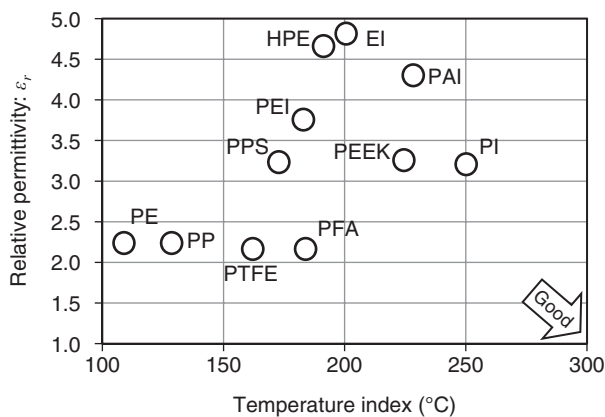


Fig. 3 Relationship between temperature index and relative permittivity of main insulating resins

超臨界法は高圧環境が必要な製法であるため、バッチ炉での製造が必要となり大量生産には向かない。また中空粒子を用いた気泡形成は従来のマグネットワイヤのプロセスに適用可能であるが、被膜形成の原料となるワニスの主成分で PI の前駆体であるポリアミック酸との密度差が大きいため分離しやすく、ワニスの保管安定性に課題がある。また一般的な熱化学法による気泡形成では、気泡化する際に隣接する気泡とつながり連通孔となるため、モータの冷却に用いるオイルの染み込みや絶縁破壊電圧 (BDV) の低下の懸案がある。そこで我々は一般的な熱化学法の課題である連通孔を解決するために、外殻を有する気泡形成材を用いた熱化学法により気泡を独立させることを検討した。

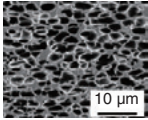
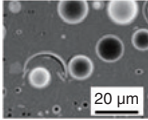
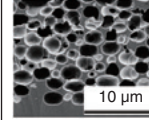
Item	Supercritical method	Hollow material method	Thermochemical method
SEM image			
Gas bubble size	1 - 5 μm (Large variation)	15 μm - (Large size)	3 μm (Controllable)
Gas bubble connection	Connected	Not connected	Connected
Varnish stability	Stable	Not stable	Stable
Continuous productivity	Not acceptable	Acceptable	Acceptable

Fig. 4 Methods and characteristics of gas bubble dispersion for insulation coating

4. 気泡被膜の最適設計

車載駆動モータのマグネットワイヤの絶縁被膜として量産適用するために重要な設計要素である気泡率、気泡径および気泡の均一分散性について以下で述べる。

4.1. 気泡率

絶縁被膜全体に対する気泡の体積比率 (気泡率) と比誘電率の理論式として、式 (3) の A. S. Windeler の式がよく用いられる。

$$\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_r}{\varepsilon_i - \varepsilon_a} = \frac{F}{100} \cdot \frac{3\varepsilon_r}{2\varepsilon_r + \varepsilon_a} \quad (3)$$

ε_i : Relative permittivity of resin

ε_r : Relative permittivity of entire insulation coating

ε_a : Relative permittivity of gas (=1.0)

F : Porosity (%)

Fig. 5 に気泡被膜の気泡率と比誘電率の関係を示す。ねらい通り気泡率が上がるほど比誘電率が下がっており、理論式とほぼ一致していることを確認した。開発モータの損失低減目標値から導体断面積および被膜厚さの目標値を定め、必要絶縁性も考慮して比誘電率の目標値を 2.7 以下と定めた。比誘電率 2.7 以下を達成する気泡率は理論式から 15% 以上となる。

気泡率が上がるほど絶縁性には有利な一方、耐加工性が低下することが課題となる。Fig. 6 に気泡率 30%、気泡径 3 μm の PI 気泡被膜モデルに対して引張応力を与えたときに PI に発生する応力分布のシミュレーション結果の一例を示す。気泡近傍の PI に応力集中が見られ、不均一な応力分布になっていることがわかる。気泡率が上がるほどこの応力集中は顕著となり、これが被膜伸び低下の原因となる。

Fig. 7 に気泡被膜の適用を検討した開発モータのステータコンポーネント中のマグネットワイヤの加工形状を示す。開発モータは小型、高効率のために 4 本の平角マグネットワイヤを U 字形状に成形したユニットコイルを密に重ね合わせてステータコア内に一括挿入し、接合により導

体を結線する組立て方式⁽¹⁹⁾を採用している。そのため、U 字形状に成形する際に気泡被膜に対して大きな引張変形が生じる。その最大引張伸びは 45% 程度にもなる。

これらを考慮して、気泡率を変えたサンプルの引張試験をおこない、気泡率と被膜伸びの相関を検証した。Fig. 8 に今回の実験で得られた被膜の気泡率と破断伸びの関係を示す。シミュレーションどおり気泡率が上がるほど破断伸びは低下し、反比例の関係にあることがわかった。この結果から、マグネットワイヤの成形で発生する最大伸び 45% で破断しない気泡率は 33% 以下であることがわかった。

4.2. 気泡径

気泡内での放電と被膜厚さのばらつき精度の観点から最適な気泡径を検討した。放電と空間ギャップの関係を示す式 (4) として Paschen の式が広く用いられている⁽²⁰⁾。Fig. 9 に式 (4) における圧力を大気圧下 (1013 hPa) としたときに得られる火花放電電圧と電極間距離の関係を示す。グラフからわかるように 22 μm を最小値にして電極間距離がそれより小さくなると火花放電電圧は高くなり、8 μm 辺

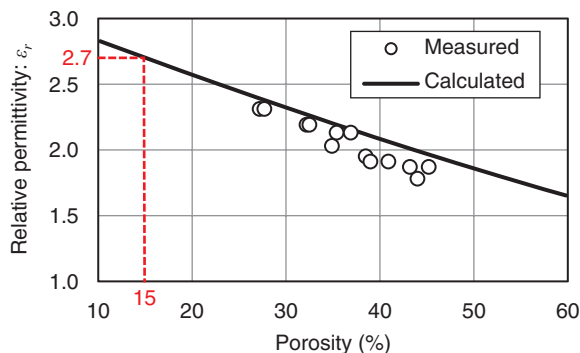


Fig. 5 Relationship between relative permittivity and porosity of PI

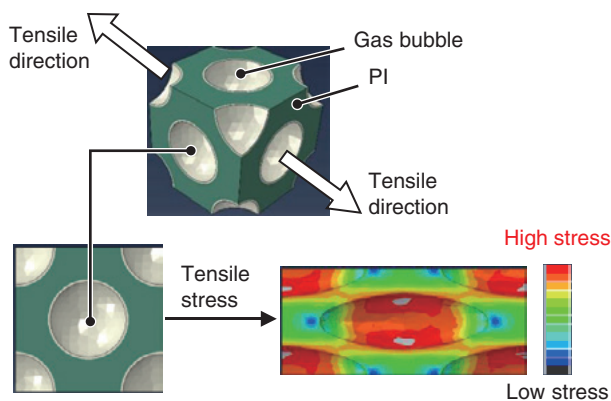


Fig. 6 Simulation results of elongation and stress distribution of bubble film

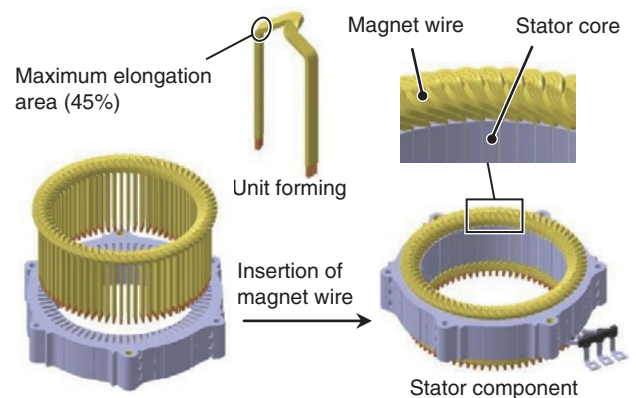


Fig. 7 Shape of magnet wire in stator component

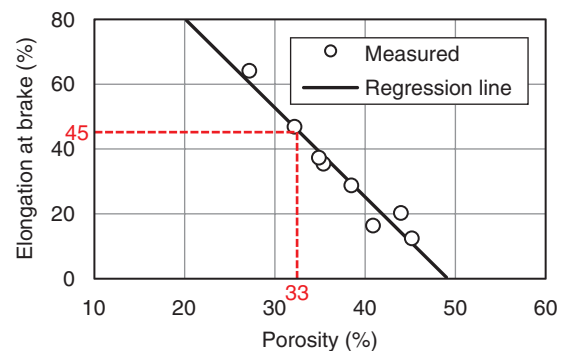


Fig. 8 Relationship between elongation of insulation coating and porosity of PI

りから急激に高くなる。これは 8 μm 以下の電極間距離では数千 V 程度の高電圧下においても放電が発生しないことを意味する。

$$V_s = \frac{B(Pd)}{\log(Pd) + C} \quad (4)$$

V_s : Spark discharge voltage (V)

P : Barometric pressure (hPa)

D : Electrode distance (μm)

B, C : Constant (Air: $B=94.5, C=0.095$)

Fig. 10 に放電発生エリア (a) と電極間距離 8 μm 以下 (b) での放電発生有無のメカニズムイメージを示す。Fig. 10(a) のように放電は電極間に生じた電位差により発生した電界によって空間に存在する初期電子が加速され、酸素などの空気中の分子に衝突し電子をはじき出す。この現象が連続的に起こることで、放電が成長する。しかし Fig. 10 (b) のように電極間距離が小さい場合、初期電子が加速するのに十分な距離が確保されないため、分子への衝突により電子の放出が起こるエネルギーに達さず放電が起きない。Yanaze らは気泡径と気泡内での部分放電の関係を検証し、

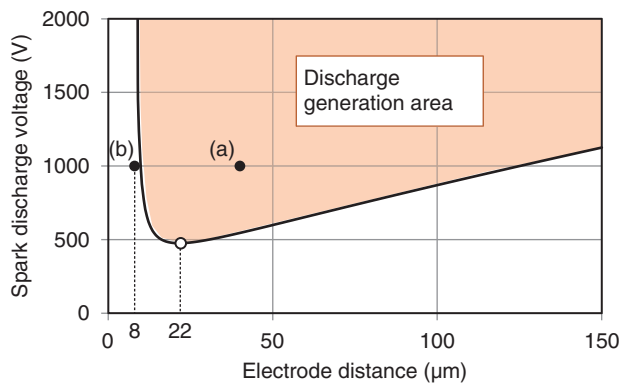


Fig. 9 Relationship between spark discharge voltage and electrode distance

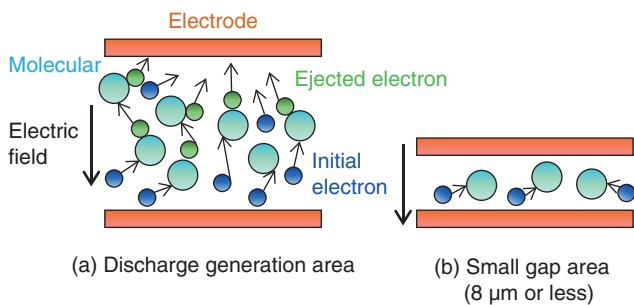


Fig. 10 Schematic diagram of discharge generation mechanism

34 μm の気泡径では部分放電が発生するが、5 μm および 11 μm の気泡径では気泡内で放電が起きないことを実証報告⁽²¹⁾しており、式 (4) の考え方を支持する結果であった。以上のことから絶縁被膜中の気泡径が 8 μm 程度以下であれば気泡内で放電が起こることはなく、比誘電率を低減することができると考えた。

また、絶縁被膜の塗装は一般的に生産性の観点から導体上に数 μm オーダの厚さで塗装し、それを規定の回数繰り返すことで所定の膜厚を得る。そのため、1 回当たりの塗布膜厚に対して気泡形成材の径が大きい場合、表面性状が粗くなり膜厚のばらつきが大きくなる。そのため膜厚を均一化するために、気泡径となる気泡形成材の径のオーダは数 μm となるようにした。

4.3. 気泡の均一分散性

開発モータでは台当たり全長数百メートルのマグネットワイヤを使用している。被膜内の気泡が密集してしまうと成形時に被膜割れが発生し、逆に気泡が少ないエリアではある条件下において部分放電が発生する可能性がある。そのため、気泡が被膜内に均一分散されていることが求められる。Fig. 11 に被膜の焼付け工程と気泡被膜の形成プロセスを示す。まず気泡の元となる気泡形成材が配合された PI ワニスが導体にコーティングされ、次に焼付け炉内で PI ワニスの硬化と気泡形成材における内部成分の熱による気化が進行し、最終的には硬化が完了した PI と気泡形成材の外殻が残ることで気泡被膜が形成される。そのため、PI ワニス内の気泡形成材の分散性が被膜内の気泡の均一分散性を左右する。

Fig. 12 に気泡形成材の分散度合いが異なる 3 種類の PI ワニスの概念図と粒度分布およびそれらを用いて試作した気泡被膜の表面外観写真と断面 SEM 像を示す。A, B,

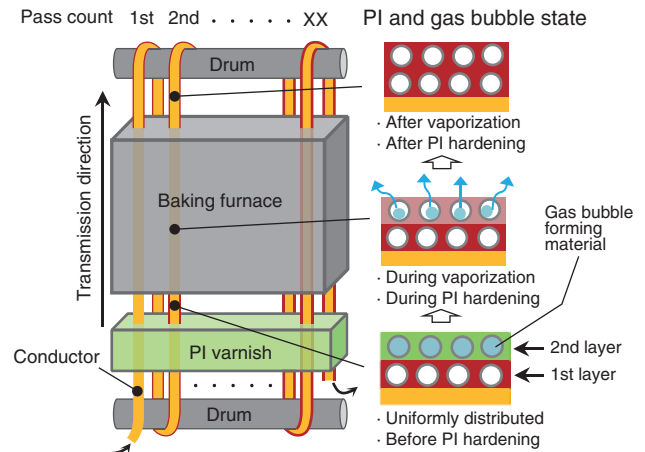


Fig. 11 Schematic diagram of developed magnet wire coating process and gas bubble formation

Cの順で分散度合いが高くなり、Cは気泡形成材が均一に分散されている状態である。Aのワニスには粒度分布から気泡形成材の凝集が観測され、でき上がった気泡被膜の表面はそれに由来して表面が粗く、断面からも気泡が凝集していることを確認した。Bのワニスでは粒度分布から2次および3次凝集に由来するピークが観測され、Aよりは改善されているものの形成された被膜は表面外観および断面SEMから部分的な凝集が観察された。Cのワニスには粒度分布から気泡形成材の径と一致するピークが観測され、単分散であることが確認された。そして、でき上がりの被膜表面も滑らかな外観であり、断面SEM像からも気泡が均一に分散されていることを確認した。以上より、PIワニス内の気泡形成材の分散性をコントロールすることで気泡が均一に分散された絶縁被膜が得られることがわかった。

Fig. 13に最適設計の結果得られた開発品のイメージ図および断面SEM像を示す。外殻があることで近傍の気孔と連通することなく、数 μm サイズの独立した気泡が均一に分散していることがわかる。外殻はマグネットワイヤの加工時に生じる伸びを考慮して、伸びのある材料組成としている。

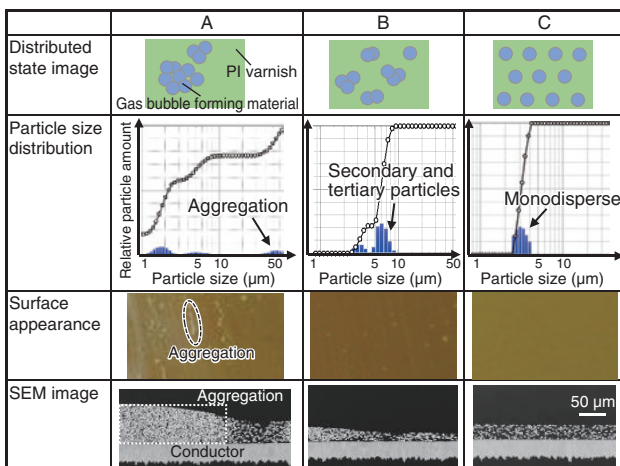


Fig. 12 Comparison of three types of PI varnishes with different degrees of dispersion

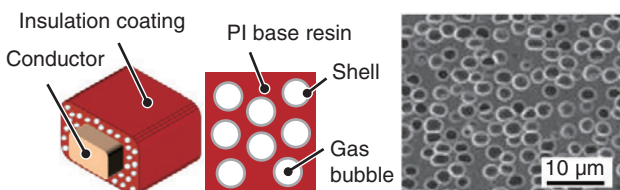


Fig. 13 Schematic diagram and cross section SEM image of newly developed insulation coating

5. 開発品の特性およびモータ損失低減効果

5.1. 気泡被膜の絶縁性と耐熱性

Fig. 14に従来品⁽¹⁹⁾および開発品の比誘電率と温度指数の位置づけを示す。PIに独立した気泡を均一分散させることで、PIの高い耐熱性を維持しつつ、比誘電率を2.4まで下げることができ、耐熱性と絶縁性を両立したこれまでにない領域の絶縁被膜を開発することができた。

5.2. モータ損失低減効果

Fig. 15に今回開発したモータの損失低減効果を示す。従来技術モータ⁽¹⁹⁾に対してマグネットワイヤの膜厚を約20%低減し、導体断面積を約6%増加させることができ、5%の損失低減効果を確認した。その他に磁気回路の最適化によるトルク増加分の電流低減や低損失制御などの技術を合わせて採用することで、モータ全体の損失はトータル14%低減させることができた。

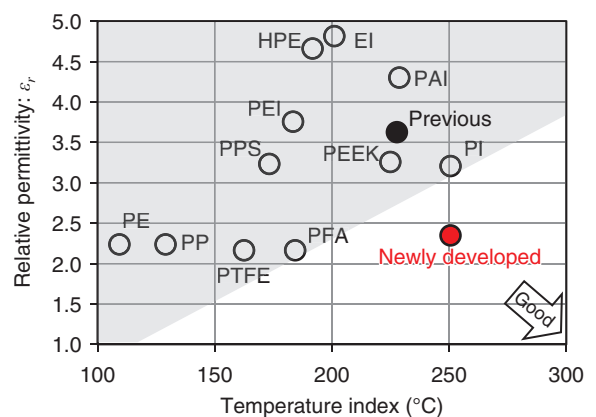


Fig. 14 Positioning of relative permittivity and temperature index of developed insulation coating

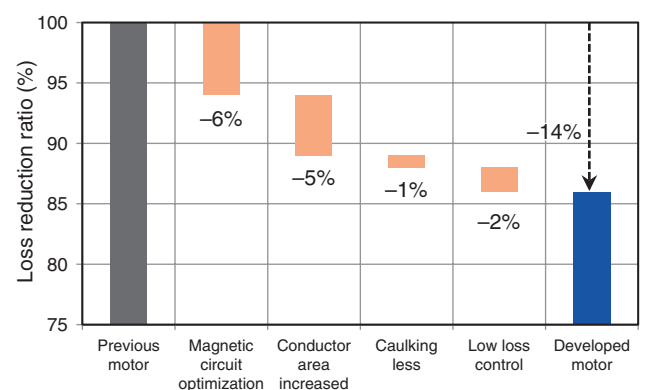


Fig. 15 Loss reduction effect of developed motor

6. まとめ

- (1) マグネットワイヤの絶縁被膜に気泡被膜を適用するに当たり、外殻を有した気泡形成材を用いた熱化学法を用いることで、数 μm サイズの独立気泡が均一に分散された気泡被膜を得ることができた。
- (2) この気泡被膜を新型モータのマグネットワイヤに適用することによって、モータ損失を従来比で 5% 低減した。

本技術は、マグネットワイヤの絶縁被膜としては世界で初めて実用化に成功したものであり、本技術を採用したモータは 2020 年 2 月発売の FIT e: HEV に搭載されている。

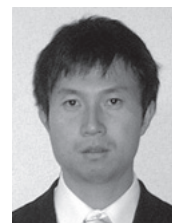
参考文献

- (1) 大上真樹, 井上雅志, 高松宏光, 鎌田太一郎, 赤井健一: ハイブリッドシステム用新構造モータの開発, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 45-207, p. 1100-1105, (2016)
- (2) 春野健太郎, 八代亮久, 佐野新也, 滝澤敬次, 水谷竜彦: 小型ハイブリッド車用 新型モータの開発, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 45-206, p. 1095-1099, (2016)
- (3) 伊藤彰浩: ネットワークポリマーの発泡成形における気泡構造制御, ネットワークポリマー, Vol. 35, No. 4, p. 176-186, (2014)
- (4) 吉本明史, 小林秀敏, 堀川敬太郎, 谷垣健一: ポリイミド発泡体の衝撃圧縮特性, 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, No. 134-1, p. 3-21, (2013)
- (5) 佐々木良平, 竹盛寛, 石沢和彦, 東勝美: 多孔質吸音材を用いた吸音材の音響特性—フェルト状吸音材の航空エンジンへの適用についての考察—, 日本航空宇宙学会誌, 第 27 巻, 第 304 号, p. 250-258, (1979)
- (6) 日本ポリイミド研究会: 最新ポリイミド—基礎と応用—, 株式会社エヌ・ティー・エス, p. 270-326, (2002)
- (7) 青井信雄: 低誘電率化をめざした層間絶縁膜技術, 応用物理, 第 68 巻, 第 11 号, p. 1263-1266, (1999)
- (8) 住ベリサーチ株式会社: 第 5 章, ポリイミドの特性とその改良, 躍進するポリイミドの最新動向 V, p. 152-158, (2013)
- (9) 日本ポリイミド研究会: 最新ポリイミド—基礎と応用—, 株式会社エヌ・ティー・エス, p. 283, (2002)
- (10) 住ベリサーチ株式会社: 第 5 章, ポリイミドの特性とその改良, 躍進するポリイミドの最新動向 V, p. 153, (2013)
- (11) 西川茂雄: 超臨界 CO_2 を用いた高分子加工技術, 日本ゴム協会誌, 第 77 巻, 第 10 号, p. 343-347, (2004)
- (12) 大嶋正裕: 超臨界流体とポリマー物性, 日本ゴム協会誌, 第 77 号, 第 8 号, p. 266-271, (2004)
- (13) 市川健太郎: 第 5 章 応用展開, プラスチック発泡技術の最新動向, 株式会社シーエムシー, p. 176, (2015)
- (14) 木原伸一, 孫穎, 滝島繁樹: 第 2 章 気泡構造制御, プラスチック発泡技術の最新動向, 株式会社シーエムシー, p. 22-61, (2015)
- (15) 繰返しインパルスにおける部分放電計測調査専門委員会: 繰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, 電気学会技術報告, 第 1218 号, p. 9, (2011)
- (16) JIS C 3216-6: 2011, 巻線試験方法
- (17) 後藤幸平: 第 9 章, 低誘電率ポリイミド, ポリイミド材料の基礎と開発, 株式会社シーエムシー出版, p. 102-105, (2011)
- (18) 株式会社東レリサーチセンター: 第 5 章, 有機高分子多孔質体の応用展開, 有機高分子多孔質体の技術動向, p. 207-210, (2009)
- (19) Inoue, M., Takamatsu, H., Ogami, M., Ninomiya, K., Ito, K., Shibata, T.: New-Structure Motor for Full Hybrid Electric Vehicle, SAE Technical Paper, 2016-01-1225, (2016)
- (20) 電気学会: 第 II 部, 第 1 章, 火花及びコロナ, 放電ハンドブック, オーム社, p. 104, (1962)
- (21) Yanaze, N., Kozako, M., Hikita, M., Tomizawa, K., Ohya, M.: Partial Discharge Inception Voltage and Breakdown Voltage of Micro Cellular Resin, 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 4B-13, p. 370-373, (2015)

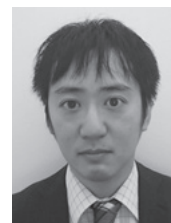
■ 著 者 ■



金子遼太郎



西山 忠 夫



梓 沢 慶 介