

# HEV/EV用モータ向け平角巻線

Rectangular Magnet Wire for HEV/EV Inverter-Drive Motor

太田 慎弥\*

Shinya Ota

中島 晋吾

Shingo Nakajima

山内 雅晃

Masaaki Yamauchi

齋藤 秀明

Hideaki Saito

持田 博紹

Hirotsugu Mochida

山田 健太郎

Kentaro Yamada

近年、モータのインバータ駆動に伴うサージ電圧で発生する部分放電が巻線の絶縁劣化を引き起こし、モータの耐電圧寿命が低下することが問題となっている。寿命を向上させるためには部分放電の抑制が必要であり、低誘電率皮膜を適用した高い部分放電開始電圧 (PDIV) を有する巻線の開発が求められている。当社は、絶縁皮膜の内部に独立気泡を均一に形成する新規技術を開発することで、画期的な低誘電率巻線の開発に成功した。

Steep surges generated by high-voltage inverter-drive motors are expected to cause significant damage on the insulators of magnet wires. Sumitomo Electric Industries, Ltd. has developed a novel magnet wire with uniform micro-closed cells introduced into the insulation. This paper discusses the excellent dielectric properties of the newly developed magnet wire.

キーワード：平角巻線、モータ、部分放電、低誘電率、気泡

## 1. 緒 言

近年、世界各国の環境規制に伴い、ハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) などの電動車市場が急速に拡大している。電動車の駆動モータは、小型化・高効率化による出力密度向上の観点から、インバータ駆動が用いられ、動作電圧の高周波数化、高電圧化が進んでいる。それに伴い、発生するインバータサージが巻線に侵入して部分放電が生じ、絶縁皮膜が劣化してモータの耐電圧寿命が低下することが問題となっている<sup>(1)</sup>。寿命を向上させるには、部分放電を抑制する必要があり、その手法として、低誘電率皮膜を適用した巻線の開発が進められている。

当社は今回、巻線の皮膜内部に独立気泡を均一に形成する新たな技術を開発することで、画期的な低誘電率巻線の開発に成功したので、以下に詳細を報告する。

## 2. 巻線の部分放電

### 2-1 巻線に発生するインバータサージ電圧

インバータサージ電圧とは、インバータのスイッチングに伴い、モータの端子に発生する急峻な電圧のことである (図1)。インバータサージは、インバータ、モータ間の配

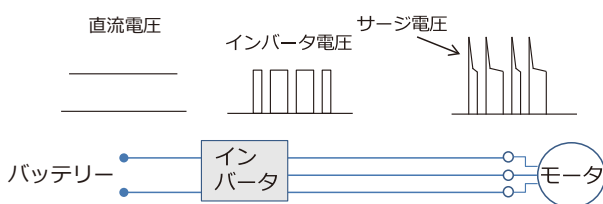


図1 インバータサージ電圧の模式図

線長が長いほど大きくなり、ピーク値はインバータ電圧の2倍程度に達することもある<sup>(2)</sup>。

### 2-2 部分放電による巻線皮膜の劣化

巻線間に高電圧が印加され、部分放電開始電圧 (Partial Discharge Inception Voltage: PDIV<sup>\*1</sup>) を超えると、巻線皮膜の表面で微小な放電 (部分放電) が発生する。

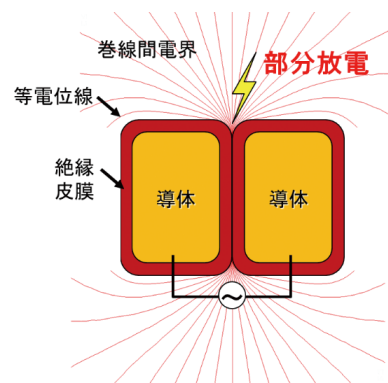


図2 巻線の部分放電と皮膜劣化

部分放電が発生し続けると、皮膜が浸食、劣化し、最終的には絶縁破壊に至る (図2)。そのため、耐電圧寿命を向上させるためには高周波、高電圧下でも部分放電の発生を抑制できる巻線が必要である。一般的にPDIVは、Dakinらが提唱しているように皮膜の比誘電率<sup>\*2</sup>、膜厚と相関がある (式(1)) ことが知られている<sup>(3)</sup>。しかしながら、皮膜を厚膜化すると、背反としてモータスロット内の断面積に対す

る導体断面積の比率（占積率）が低下し、モータの効率が低下する。そのため、占積率を損なわず、PDIVを向上させるには、皮膜の比誘電率を低下させることが必要となる。

【Dakin式】

$$V = A \times (2 \times t / \epsilon_r)^{0.46} \dots\dots\dots (1)$$

- A : 定数
- V : 部分放電開始電圧 [Vp]
- $\epsilon_r$  : 絶縁皮膜の比誘電率
- t : 絶縁皮膜の厚さ [ $\mu\text{m}$ ]

### 3. 絶縁皮膜の開発

#### 3-1 ベース樹脂の開発

HEV/EV向け巻線では、絶縁皮膜に高い耐熱性と絶縁性が要求される。耐熱性の指標となる絶縁樹脂のガラス転移温度と比誘電率の関係を示す（図3）。ガラス転移温度（Tg）とは、樹脂が分子運動しやすいゴム状態になる温度であり、ガラス転移温度を超えた樹脂は弾性率が低下するためモータ生産時の溶接加工において絶縁皮膜が発泡するリスクが高まる。また、体積抵抗の低下や比誘電率が上昇するため絶縁性も低下する。駆動モータは登坂時や高速走行時に200℃近い高温環境下となるため、Tgが200℃以上となる樹脂であることが望ましい。スーパーエンプラであるポリエーテルエーテルケトン（PEEK）やポリフェニレンスルフィド（PPS）といった熱可塑性樹脂やポリエステルイミド（PEI）は一般的に耐熱性が高いとされるが、Tgが200℃より低く駆動モータ用の巻線皮膜としては不適と判断した。アミドイミド（PAI）はTgが200℃超であり、これまで駆動モータ用の巻線に採用されてきたが、近年の長期熱耐久性、耐加工劣化性に対する顧客要求はさらに高いものとなってきたことから、当社はPAIを凌ぐ性能を持つポリイミド（PI）を巻線皮膜として採用したPI巻線を上市してきた<sup>(4)、(5)</sup>。

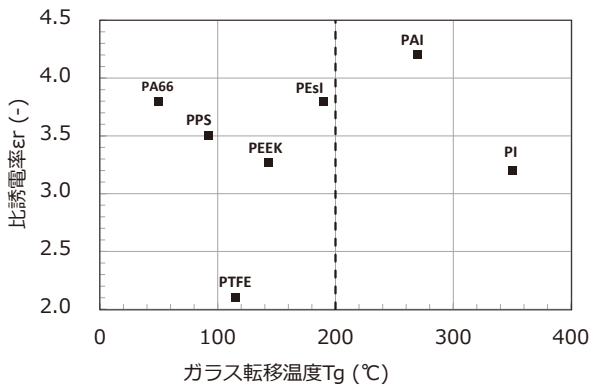


図3 耐熱性と比誘電率の関係

#### 3-2 PIの低誘電率化

当社は巻線の高PDIV化を志向し、PIの化学構造との比誘電率の相関を体系的に検証し、低誘電率化を検討してきたが、比誘電率を2.7程度まで下げることが限界であった。また、背反として耐熱性が低下するため、絶縁皮膜への適用は容易ではなかった。そこで、耐熱性を維持しながら、絶縁皮膜の比誘電率を下げる手法として、比誘電率が1.0の空気を皮膜に導入することに着目した<sup>(6)、(7)</sup>。駆動用モータ用の巻線皮膜へ気泡を導入する場合、絶縁性への影響を考慮し、各手法を選択する必要がある。例えば、形成した気泡内部での部分放電の発生<sup>(8)</sup>、気泡分布の偏りによる絶縁性の不均一化、並びに、気泡が独立でない場合、モータの冷却に用いる油が気泡を介して皮膜に浸透する等のリスクが挙げられる。PI巻線は前駆体であるポリアミック酸ワニスを加熱により硬化させてポリイミドの絶縁皮膜を被覆するが（図4）、相分離法は、ワニスと相溶しない液体の化合物を混合し、分離した状態のまま加熱し絶縁皮膜とすることで気泡を形成する手法である。但し、形成される気泡の状態はワニスの混合方法や焼付条件によって変わるので、気泡同士がつながりやすいことや、絶縁皮膜の長手、および、厚み方向で形成される気泡に密度の差が生まれる。そのため、絶縁皮膜中で気泡のサイズや気泡の導入率を制御することが非常に難しい（以下、気泡を導入した巻線を気泡巻線、気泡の導入率を気泡率と記載）。熱分解法は熱により分解反応が進む固体の樹脂粒子をワニスに混合し、絶縁皮膜を形成する際の加熱で気泡を導入する方法である。但し、通常の熱分解法による気泡形成においては、相分離法と同様に隣接する気泡と連通するため、気泡のサイズ制御や冷却油の浸透などの課題がある。そこで、当社は、外殻を有する気泡形成材を用いた熱分解法により気泡を独立させることを検

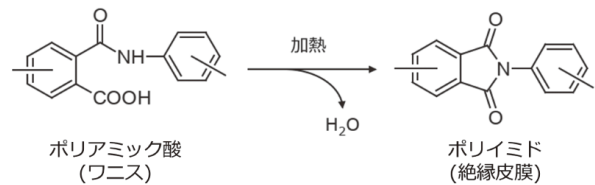


図4 ポリイミドの硬化反応

表1 気泡導入の手法比較

	相分離法	熱分解法(従来)	熱分解法(開発品)
SEM写真			
気泡サイズ	1-5 $\mu\text{m}$ 制御困難	1-5 $\mu\text{m}$ 制御困難	1-5 $\mu\text{m}$ 均一に制御可能
気泡状態	連通の可能性 (粗大化の恐れ)	連通の可能性 (粗大化の恐れ)	独立
気泡分布	不均一	均一	均一

討した。外殻には耐熱性が高く加熱により熱分解しない材料を用いることで、気泡のサイズを制御しつつ独立した気泡を導入することができる。また、気泡形成材の量を変えることで絶縁性の要求に応じ、気泡率を設計できる(表1)。

### 4. 気泡巻線の開発

#### 4-1 気泡巻線の皮膜設計

最適な気泡サイズを検討するにあたって、気泡内での放電発生リスクから検証した。放電電圧と空間距離の関係はPaschenの式(式(2))が広く知られており<sup>(9)</sup>、気泡内の放電電圧は本式を用いて推定した。圧力を大気圧下としたときに得られる放電電圧と電極間距離の関係を図5に示す。グラフの通り、12μm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る。駆動モータでは、1000~2000Vp程度の電圧が印加されるため、絶縁皮膜中の気泡が連通し粗大にならぬように独立させ、サイズを12μm以下になるよう制御することが望ましい。当社は開発した熱分解法を用い、気泡サイズを12μm以下に制御して巻線を製造できる。

【Paschenの式】

$$V_s = B \frac{pd}{K + \log(pd)} \dots\dots\dots (2)$$

- Vs : 火花電圧 (放電開始電圧) (V)
- p : 気圧 (mmHg)
- d : 電極間距離 (μm)
- B, K : 定数

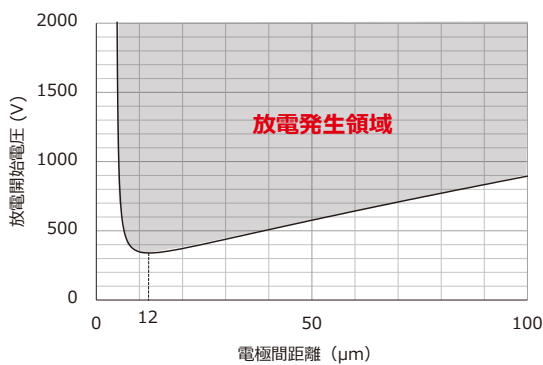


図5 Paschenの式による放電開始電圧の推定

巻線の気泡率と比誘電率の関係を図6に示す。気泡率の増加に伴い、理論計算通りに比誘電率を低下させることができた。比誘電率3.2のPI内部に気泡を約20vol%導入することで、比誘電率を2.5、約40vol%導入することで2.0程度にまで低減させることが可能となった。

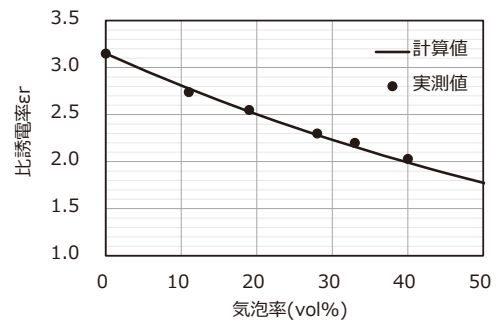


図6 気泡率と比誘電関係

#### 4-2 気泡の巻線の絶縁性

PDIVの測定用試料は、図7のように2本の平角線のフラット面同士を平行に合わせて固定したペアサンプルを使用した。従来のPI巻線と気泡PI巻線(気泡率15、30、40vol%)を測定に供した。測定温度は25℃、相対湿度は10%とし、繰り返し10回測定 of 平均値を求めた。

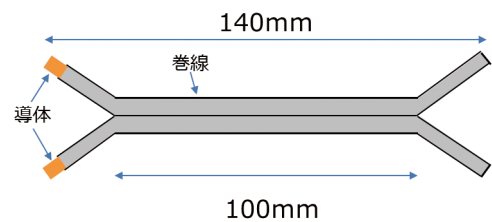


図7 PDIV測定用試料の模式図

図8に示すように気泡PI巻線のPDIVは気泡率が高いほど向上し、気泡率30vol%の気泡PI巻線は、気泡率0%のPI巻線に対してPDIVが250Vp、気泡率40%では400Vp程度向上することを確認した。

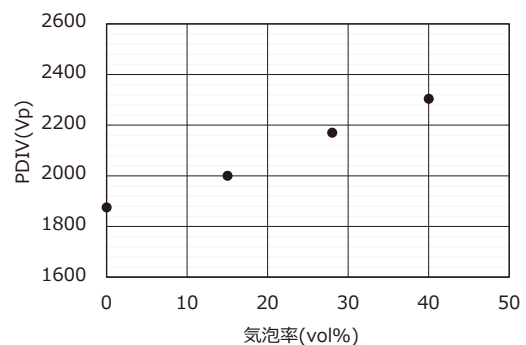


図8 気泡率とPDIVの関係

## 5. 気泡巻線の課題

気泡率が上がるほど絶縁性は有利になるが、一方で絶縁皮膜中のPI比率が減るため、加工した際に気泡間に存在するPIへの応力集中が高まる。そのため、気泡率が高いほど、絶縁皮膜の機械的性質（破断伸び）が低下する（図9）。モータ製造時の成形加工では30%以上、絶縁皮膜が伸ばされる可能性があるため、高い気泡率でも十分に絶縁皮膜が伸びて成形加工に耐える必要がある。

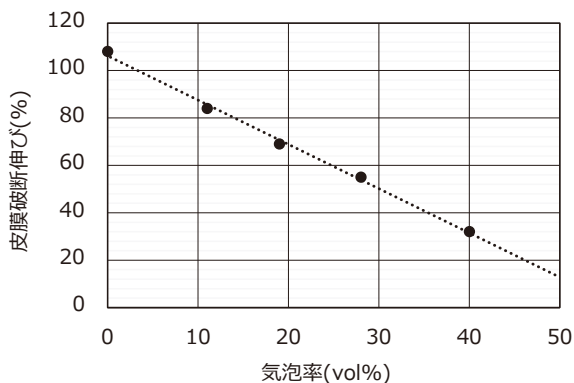


図9 気泡率と皮膜破断伸びの関係

今回、皮膜の破断伸びを改善すべく、応力が集中するPI皮膜の伸びを改良することを志向した。一般的にPIは剛直で強固な分子構造であることとイミド結合の強い分子間力により凝集構造をとることから高い破断伸びを示す。今回、分子構造と凝集構造を最適化したPIに気泡を導入した結果、気泡率40%でも破断伸び50%以上を達成することができた（図10）。破断伸びを改善できたことで、モータ製造時に厳しい成形加工が可能になると期待できる。

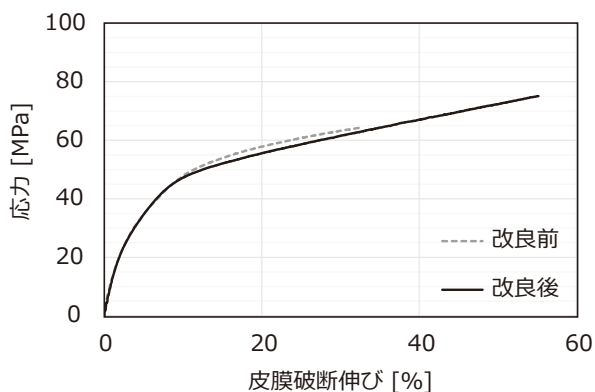


図10 改良前と改良後の皮膜破断伸び

## 6. 結 言

巻線の絶縁皮膜の内部に独立気泡を均一に形成する新規技術を開発し、画期的な低誘電率巻線の開発に成功した。開発した気泡ポリイミド巻線は、従来の巻線を凌駕する優れた誘電特性を示した。また、気泡巻線の課題である皮膜破断伸びの低下については、ポリイミドの改良によって破断伸びを向上させた。今後も、駆動モータは、小型化・高効率化の観点から動作電圧の高電圧化、高周波数化が進むと考えられ、今回開発した気泡ポリイミド巻線が幅広く適用されることが期待される。

### 用語集

#### ※1 部分放電開始電圧 (PDIV)

巻線間で放電が開始する電圧。放電が発生した場合、絶縁皮膜が劣化しモータ寿命が短くなる恐れがある。

#### ※2 比誘電率

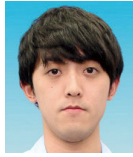
絶縁体の分極のしやすさを示す値。比誘電率が低いと部分放電開始電圧が高くなる。

### 参考文献

- (1) インバータサージ絶縁調査専門委員会、「特集インバータサージの絶縁システムの影響」、電気学会誌、Vol.126、No.7、pp.419-427 (2006)
- (2) 社団法人日本電機工業会、「400Vインバータで汎用モータを駆動する場合の絶縁影響について」、pp.1-3 (1995)
- (3) T. W. Dakin .et al., "Effect of Electric Discharges on the Breakdown of Solid Insulation," AIEE Part I: Communication and Electronics, 73 (1954), pp.155-161
- (4) 菅原潤 他、「巻線開発の歴史と今後の展望」、SEIテクニカルレビュー第190号、pp99-104 (2017年1月)
- (5) 岡本健太郎 他、「電動車用巻線の品質向上に向けた解析技術」、SEIテクニカルレビュー第196号、pp17-21 (2020年1月)
- (6) 上野秀樹、岡田翔、太田禎弥、溝口晃、山内雅晃、「高周波交流電圧印加時におけるエナメル線のV-t寿命特性」、電気学会 プラズマ・放電・パルスパワー合同研究会、ED-15-079 (2015)
- (7) シーエムシー出版、「最新ポリイミド材料及び応用技術」、p.102-105 (2002)
- (8) 田中杏樹、岡田翔、上野秀樹、太田禎弥、溝口晃、山内雅晃、「発泡エナメル線の空孔内放電に関する検討」、平成30年電気学会全国大会、1-129 (2018)
- (9) 安藤晃、犬竹正明、高電圧工学、朝倉書店、P.34

執筆者

太田 禎弥\* : エネルギー・電子材料研究所 主査



中島 晋吾 : エネルギー・電子材料研究所  
グループ長



山内 雅晃 : エネルギー・電子材料研究所 部長



齋藤 秀明 : 住友電工ウインテック(株)  
グループ長



持田 博紹 : 住友電工ウインテック(株) 主査



山田健太郎 : 住友電工ウインテック(株)



\*主執筆者