

xEVモータ向け巻線でのポリイミド樹脂の活用

(古河電気工業株式会社) ○原 奈摘子、冨澤 恵一

【要旨】

自動車の二酸化炭素排出量の削減要求などの環境規制を背景に、電気自動車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。モータの動力性能や燃費向上を目的として、搭載されるモータは小型化と高出力化が加速しており、これらのモータに使用される巻線にはより高い絶縁性能を有する皮膜と低損失な導電材が要求されている。当社では部分放電現象と絶縁劣化の研究に取り組み、高い絶縁性を有する巻線皮膜材料を開発してきた。当社の開発の取り組みと巻線の絶縁皮膜に求められるポリイミド樹脂の特性について紹介する。

【自動車の電動化】

地球温暖化に対応していくため、自動車は電動化が求められている。IPCC 第6次評価報告書WG1¹によれば、CO₂の累積排出量と気温上昇量の関係はほぼ線形関係であり、気温上昇をあるレベルで止めるためにCO₂を含む温室効果ガスの排出量を制限する必要があることが明確に示されている。これを受けて「カーボンニュートラル」の試みが世界共通の課題となり、日本でも2050年度までにカーボンニュートラルを達成することが目標になった。2020年度の日本におけるCO₂排出量のうち、自動車を含む運輸部門の排出量は17.7%と最も高い割合を占めた。つまり、運輸部門で脱炭素化に向けて取り組んでいくことが非常に重要である。²

自動車の脱炭素化を実現する手段として注目されている技術が自動車を電気で行きさせる「電動化」である。電気を動力源とする自動車の総称として「xEV」が使用される。xEVには、電気自動車(BEV)やハイブリッド自動車(HV/HEV)、プラグインハイブリッド自動車(PHV/PHEV)、燃料電池自動車(FCV)等がある。EUやイギリス、フランスでは2035~2040年の近い将来にEV・FCVの普及率100%を目標としており、日本でも類似の目標が設定されている。³これらの各国の方針を受け、xEVの販売比率は世界的に高まっている。

xEV向けモータは「小型化・高出力化」が求められており、これを達成するために巻線には高電圧化などの電気特性の向上が必須となる。図1にはモータの出力と電圧を軸に、xEV向けモータの特性値をプロットしたチャートを示す。HEVやPHEVでは、エンジン駆動の補助としてモータが使用されるため、要求されるモータ出力は200kW程度であることが多い。一方、駆動用モータとして搭載されるBEV(図1中EVと表記)では、大型車になるほど高トルクを実現するために高出力かつ高電圧が求められる。したがって、これを達成するために巻線は電気的特性を現在以上に向上させる必要がある。

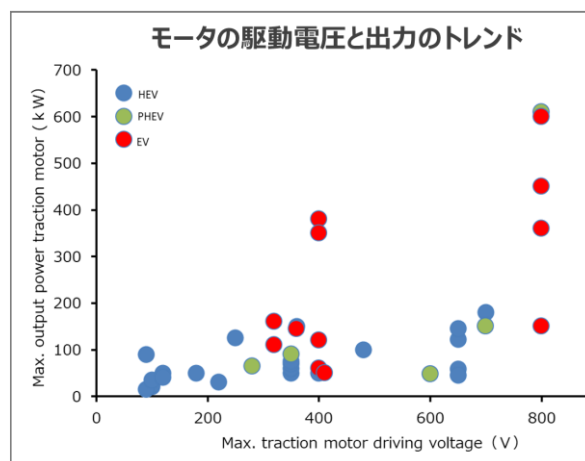


図1. xEV向けモータの要求特性値

【巻線に求められる電氣的・熱的特性】

一般的なモータは、回転する部品で永久磁石をもつロータと、回転しない部品で磁石を回すためのステータで構成される。ステータに配された巻線に電気が通ることによって磁界が発生するため、ロータが回転し、動力が出力されるようになる。

巻線の用途としては、自動車、電装品、家電、産業機械、電子部品、トランスコイルなど多岐に渡る。巻線の要求特性としてどの製品にも小型化は求められるが、自動車や電装品は使用環境を考慮して高耐熱化も要求される。また、xEVはモータの高出力化も求められるため、巻線の耐電圧化・高電圧化も必要になっており、種々の巻線用途の中でも要求特性が多い。各製品で巻線が使用される電圧領域と要求される耐熱指標を図2に示す。電子部品向けでは求められる耐熱指標・皮膜の常用電圧は比較的低いが、産業用モータ、家電、自動車電装品になるほど要求される耐熱指標が高くなる。一方、変圧器に求められる耐熱指標は100℃程度だが、常用電圧は非常に高くなる。この中でxEV向け駆動用モータの要求領域はチャートの右上に位置する水準が求められており、高耐熱・高電圧を両立する巻線が必要になっている。

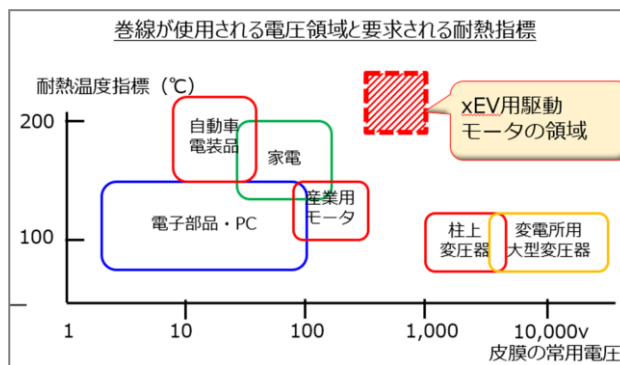


図2. 使用される電圧領域と要求される耐熱指標

【巻線の構成】

巻線は電気を通す導体と電気を通さない絶縁皮膜で構成される。導体の形状は丸形や矩形が主流であり、導体の素材には銅やアルミが使用される。絶縁皮膜は巻線の仕様に合わせて、膜厚や樹脂材料を決定する。巻線の絶縁皮膜において、高耐熱化するためには樹脂材料を耐熱指標の高いものに変更する。また、高電圧化するためには絶縁皮膜の低誘電率化や厚膜化を実施する。

図3には耐熱グレードによって階層分けした樹脂材料の一覧を示す。熱硬化性樹脂は焼付により被覆し、熱可塑性樹脂は押出成形加工により被覆する。xEV向けでは、どちらのピラミッドでも上層に位置する青枠内の樹脂が採用される。その中でも熱硬化性・熱可塑性樹脂の両方で最も高い耐熱性を有するポリイミドは、高耐熱化が必要な製品の巻線では最有力の候補となる。

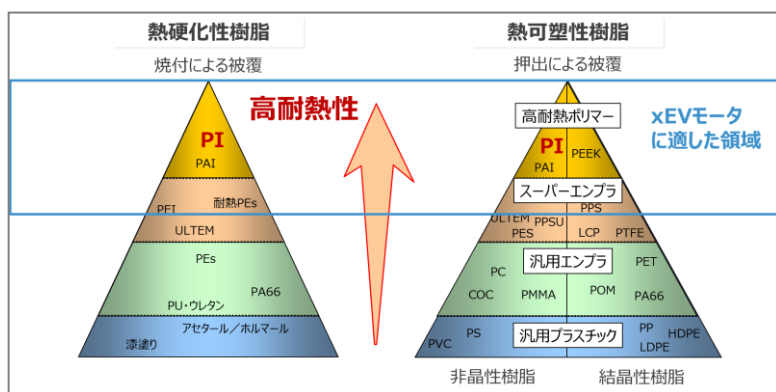


図3. 耐熱グレードによって階層分けした樹脂材料の一覧

【巻線の絶縁性】

巻線の絶縁性は、絶縁皮膜の破壊強度と長期的な寿命について考慮する必要がある。特に自動車のように何千時間も使用する製品では、絶縁性の寿命を意識して開発することが求められる。

絶縁皮膜の破壊強度としては、絶縁性が失われる電圧「絶縁破壊電圧（Breakdown Voltage：BDV）」を測定する。印加電圧が皮膜のBDVを上回ると、短絡して導体が露出し、皮膜の絶縁性

は失われてしまう。一方、絶縁性の寿命としては、絶縁性が劣化し始める電圧「部分放電開始電



図 4. 放電劣化による絶縁破壊

圧 (Partial Discharge Inception Voltage : PDIV)」を測定する。BDV とは異なり、印加電圧が皮膜の PDIV を上回っても皮膜の絶縁性は即時には破壊されない。しかし部分放電が発生すると、部分放電に浸食された部分は徐々に皮膜が薄くなり、健全な部分より絶縁性が低下する。そしてこれが蓄積した結果、図 4 のように導体が露出し、絶縁性は失われる。つまり部分放電の発生は、モータのコイル絶縁の重大な損傷に繋がるため、モータの寿命を短くする原因になり得る。

【部分放電開始電圧】

車載用モータにおいて、回転数を制御するために搭載されたインバータに起因して、部分放電は発生する。省電力化や高精度な可変速度制御を目的として、モータの駆動にはインバータが採用されている。しかしインバータを高速でスイッチングするときに、サージが発生する。この急峻で高電圧なサージはインバータサージとよばれ、インバータサージは正常な駆動電圧の 2 倍以上の高電圧成分を含むと言われている。このインバータサージ電圧が絶縁皮膜の PDIV を超えた場合、部分放電が発生する。⁴

部分放電の発生メカニズムを図 5 に示す。絶縁体に対して電圧が印加されると、部分放電が発生する。部分放電はコアー巻線間や対地ー巻線間でも発生するが、図 5 では巻線ー巻線間を例に模式図を示した。巻線に電圧が印加されると、絶縁皮膜では導体直上の下層と皮膜表面の上層で分極が生じる。この分極によって皮膜の表面には電荷が生じ、これを表面電荷という。表面電荷が蓄積されると、図 5 中の赤線で示すように、2 本の巻線間の一定の空間ギャップが存在する位置で部分放電が発生する。部分放電が発生すると、部分放電エネルギーによる劣化、熱劣化、オゾン劣化など種々の要因により、絶縁皮膜は浸食されて徐々に薄くなっていく。

PDIV の主な影響因子を図 6 に示す。種々の影響因子について解明してきたが、絶縁皮膜の設計で調整できる因子は「絶縁皮膜の厚さと誘電率」である。Dakin の実験式 (式(1)) は、誘電率と膜厚の関係性を示しており、絶縁設計に広く用いられている。⁵ この式によれば、PDIV は絶縁皮膜 (絶縁層) の厚さに比例し、比誘電率に反比例する。比誘電率は材料に固有の値であり、温度の依存性を考慮する必要がある。一方、絶縁皮膜の厚さは製法により上限が存在するが、モータ効率を考慮すると薄いほうが好まれる。これは、ある一定のステータの空間を仮定し

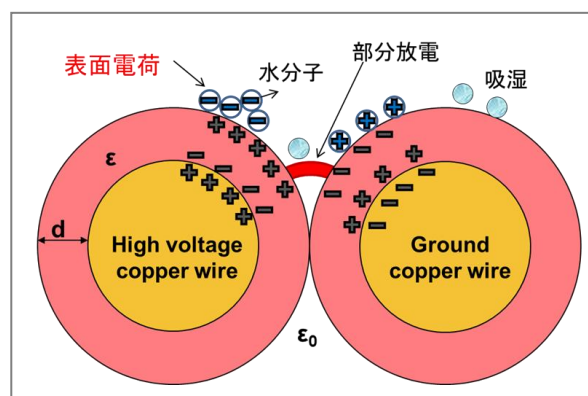


図 5. 部分放電の発生メカニズム

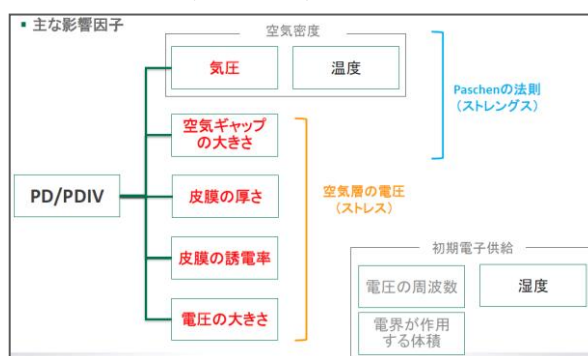


図 6. PDIV の主な影響因子

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

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 [μ m]

たときに、導体が占める割合、すなわち導体占積率が大きい方が大電流を流すことができるためである。つまり絶縁皮膜は、皮膜厚を厚くするより比誘電率を下げるほうが好ましいとされる。

比誘電率が低い材料としてポリイミドは非常に有用な樹脂である。ポリイミドは耐熱性が高いため、高温下でも低い比誘電率を維持でき、xEVの使用環境である150℃以上の高温域でも高い優位性を発揮する。ポリイミドをさらに低誘電率化するためには分子骨格を調整する。例えば、モノマーの分子量を高くしてイミド基濃度を下げる、分子内共役系を遮断して非局在化しやすい構造を避ける、かさ高い置換基を導入して分子鎖の絡みを疎くする、電気陰性度の低い元素を導入して電子を局在化させるなどが挙げられる。

【巻線に求められる機械的特性】

xEV向け巻線の要求特性として、熱的特性と電気的特性のほかに機械的特性も求められる。モータの成型時に巻線は曲げたり捻じったり様々な加工が加えられるので、皮膜に亀裂が入ることによって絶縁性を損なわないように、絶縁皮膜には高い伸長率と導体との高い密着力が要求されるためである。モータ加工時における主な巻線の加工例を図7に示す。ステータ内部に通すために差込部の近傍や頭頂部には曲げ加工が入り、皮膜剥離部同士で溶接するために皮膜剥離部の近傍にも曲げ加工が入る。このような加工部では導体に追従して絶縁皮膜も十分に伸長する必要がある。もし加工部で亀裂が生じて導体が露出してしまったり、皺ができて導体と絶縁皮膜の間に浮きが生じてしまったりすると、皮膜の絶縁性を維持できなくなる。

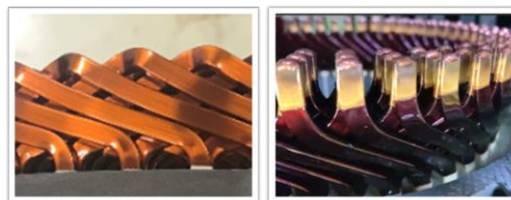


図7. モータ加工された巻線

巻線の機械的特性を評価する方法として、①ピール試験、②可撓性試験、③伸長切断試験の3つを紹介する。これらの評価方法を図8に示す。

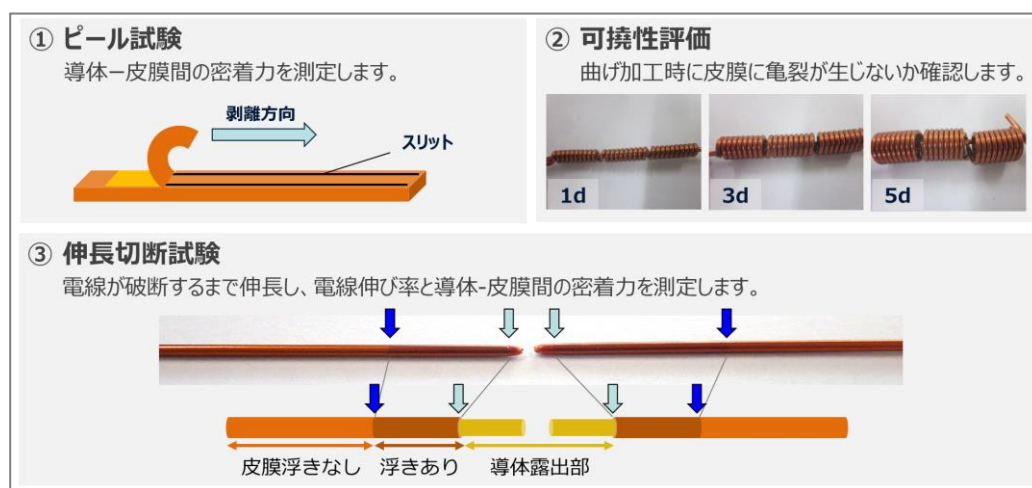


図8. 巻線の機械的特性の評価方法

ピール試験では、導体まで達するスリットを刃物で絶縁皮膜に加え、そのスリットに沿って絶縁皮膜を導体から引き剥がす。引き剥がし時にかかる荷重を測定することで、導体と絶縁皮膜間の密着力を測定する。可撓性試験では、モータの曲げ加工を模擬して、丸線を一定の径で巻きつける。評価する巻線に直接沿わせて巻く場合を1倍径で1dと表記し、徐々に巻き径を大きくする。

一方、平角線ではあらかじめ整直にした巻線を任意の角度に曲げる。丸線や平角線を曲げたときに、絶縁皮膜に亀裂や皺が生じないかを確認することで、曲げ加工に耐え得る巻線かを評価する。丸線と平角線の可撓性評価の例を図9に示す。伸長切断試験では、電線破断時の電線の伸び率や弾性率を測定する。さらに破断時に露出した導体の長さや絶縁皮膜が導体から浮いた長さを測定し、導体と絶縁皮膜間の密着力を見積もっている。



図9. 可撓性評価における合格・不合格例

基板用途で開発したポリイミド樹脂を巻線用途に展開しようとした際に、シート形状に成型したときより機械的特性が低下する場合がある。その主な原因が巻線の製造方法と使用環境である。

巻線の製造工程では、導体の上に有機溶剤に溶けたポリアミック酸を塗布・焼成し、それを複数回繰り返すことで一定の絶縁皮膜層を形成する。したがって製造時間を短縮するために、1回当たりの焼成時間を短くすることが要求される。そのため1回当たりの焼成時間は数十秒と非常に短く、短時間で十分な熱量を加えるために昇温速度が非常に速い。また導体の比熱が大きいため、焼成条件の調整はさらに複雑になる。以上の理由から巻線の製造では焼成工程が速く短いため、開発したポリイミドを用いるとイミド化反応が完結せずに機械的特性が低下する場合がある。

また、巻線は150℃以上で数千時間、ATF (Automatic Transmission Fluid) 浸漬下等で使用される。ATFとは自動変速機用オイルの略称であり、潤滑性能や動力伝達機能など様々な機能を有している。巻線の試験には長期耐久性試験があり、この試験後に絶縁皮膜の絶縁性や伸び性が維持されているか確認する。ATFの浸食等で絶縁皮膜に亀裂が生じるとこれらの特性が低下してしまうため、ATF浸漬後も浸漬前の外観を維持する必要がある。長期耐ATF試験後の巻線を図10に示す。

以上の理由から、巻線向け絶縁皮膜では高耐熱と高伸び性を両立することが要求される。

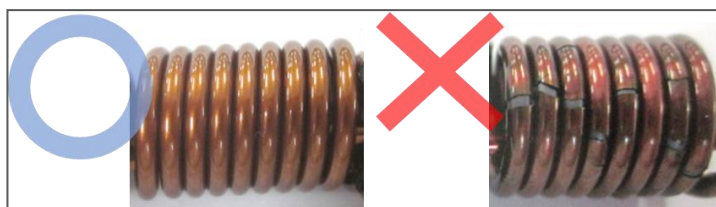


図10. 長期耐久性試験後の巻線の外観

【機械的特性の改善】

機械的特性を向上するための理想的な設計として3つの手法を図11に示す。

1つ目は分子骨格の調整である。硬く伸びにくい絶縁皮膜なら、剛直な構造ではなく柔軟な構造の分子を組み込み、皮膜の柔軟性を付与する。ただしこの手法は熱的特性が低下する可能性があるため、両立する領域を見極めることが必要である。

2つ目は導体と接する絶縁皮膜に密着機能層を設けることである。これは導体と絶縁皮膜間の密着力を高めることで、曲げや捻り加工を加えても導体を露出させず、絶縁性を維持させることが目的である。密着力を高める手法として、分子骨格を変えることや添加剤を加えることが多い。または導体に表面加工を行い、物理的・化学的・機械的に接合する方法もある。

3つ目は巻線製造時の焼成条件の調整である。急速に昇温して焼成したり、1層当たりの皮膜厚を厚くしたりすると、絶縁皮膜中に残留した溶剤や吸湿した水により発泡が生じて不均一な厚さの絶縁皮膜になり、電気的特性や機械的特性は安定しない。発泡を抑制するためには、焼付炉の

温度や昇温速度等の焼成条件や1層当たりの皮膜厚を調整し、均一な膜厚を形成する必要がある。

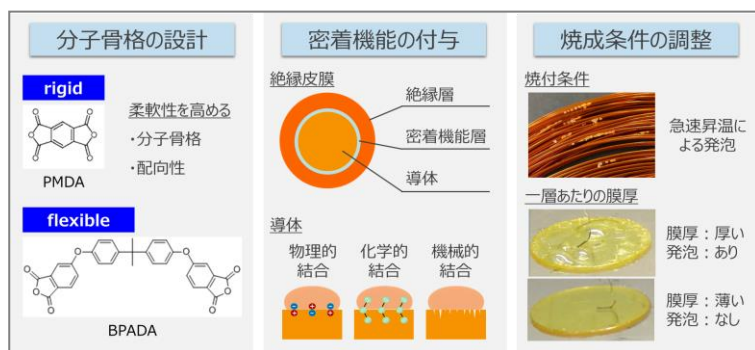


図 11. 機械的特性を向上させる巻線の設計思想

【結論】

x EV 向けを含む各種モータへ巻線を提供するために、当社では部分放電現象と絶縁劣化の研究に巻線業界の中でもいち早く取り組んできた。これによりモータの小型化と高出力化を実現する高い絶縁性能を有する巻線皮膜材料を開発してきた。絶縁性を高めるためには、絶縁皮膜の比誘電率を下げたり皮膜厚を厚くしたりすることが有効であるが、高い導体占積率を維持したまま実現するならば「絶縁皮膜の低誘電率化」が効果的である。ポリイミドは高温下でも低い比誘電率を維持できる点で、他の高耐熱樹脂と比べても非常に有用である。また、巻線向けで求められるポリイミド樹脂の特性とは、熱的、電氣的、機械的特性を両立した組成であることが重要である。これはモータの成型時に巻線は曲げたり捻じったり様々な加工が加えられるので、皮膜に亀裂が入ることで絶縁性を損なわないように、絶縁皮膜には高い伸長率と導体との高い密着力が要求されるためである。当社では部分放電現象の考え方にに基づき絶縁皮膜の絶縁性を高めつつ、各種評価により巻線の機械的特性を評価し、樹脂の組成や焼成条件を改良することで、よりよい巻線を開発している。



図 12. 様々な用途の巻線

【参考文献】

1. JCCA 全国地球温暖化防止活動センター WG1 第一次作業部会（自然科学的根拠）
<https://www.jccca.org/global-warming/trend-world/ipcc6-wg1>
2. 国土交通省 運輸部門における二酸化炭素排出量 令和4年7月5日更新
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
3. 経済産業省 資源エネルギー庁 自動車の“脱炭素化”のいま
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/xev_2022now.html
4. 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.
5. T. W. Dakin, H. M. Philofsky, W. C. Divens : “Effect of Electric Discharges on the Breakdown of Solid Insulation”, AIEE Part I : Communication and Electronics, 73 (1954), 155.