

自動車の電動化を支える高分子材料

日産自動車（株） 材料技術部
小川和宏

1. はじめに

自動車の普及が人々の生活を豊かにした一方、自動車社会の進展により、交通渋滞、交通事故、化石燃料枯渇、地球温暖化などの問題に直面している。地球温暖化を見てみると、2016年の年平均気温は、1891年の統計開始以降最も高い値となっている。長期的には100年あたり約0.72℃の割合で上昇しており、特に1990年代半ば以降、高温になる年が多くなっている（図1）

[1]。この地球温暖化の原因となるCO₂（換算値）排出量を部門別で整理すると、運輸が14.3%と決して少なくなく、運輸部門での地球温暖化対策が必須となっている（図2）[2]。こうした背景から、欧州を始め世界各国で燃費規制がより一層強化されており、2020年には、CO₂ 95-120g/km レベルに達する見込みである。今後も経済成長と地球環境保全を両立していくため、自動車業界は地球温暖化やエネルギー問題に対応する責務があるが、これら課題に対応する自動車のキーテクノロジーが“車の電動化”となる。

電気自動車はバッテリーに蓄積した電力を、インバータを介して交流変換し、モータで電力を力学的エネルギーに変換し駆動力を得ている。これらモータ、インバータは、車の動力性能や電費を大きく左右するため、電気自動車の普及、さらには商品力向上のために重要な役割を担っている。

今回は、これら電動ユニットのモータ、インバータについて、性能・品質を支える高分子材料の開発の取組みの現状と、将来の開発の方向性について紹介する。

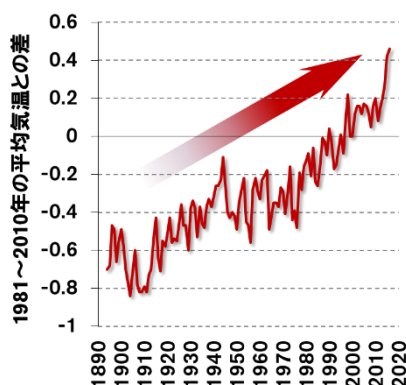


図1 世界の年平均気温偏差 [1]

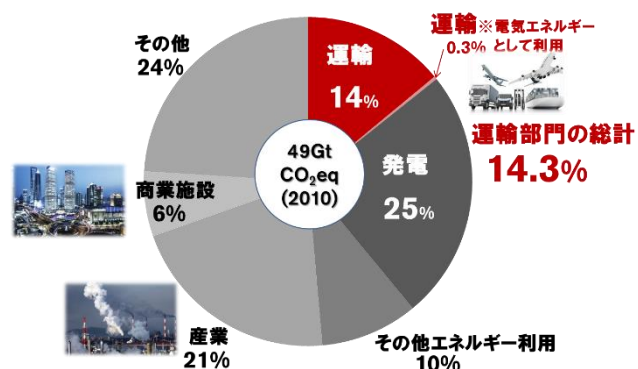


図2 世界の部門別 GHG 排出量-CO₂ 換算- (2010年) [2]

2. モーター用高分子材料

種々のモーターの中で、電動車で多用されているのは、永久磁石同期式モーターであり、そのステータの導体の絶縁部材として、コイルエナメル皮膜、絶縁紙、コイル含浸ワニス等を適用している（図3）。モーター使用時の熱、湿度のほか、冷却方式によっては、冷却油に対する耐性が求められる、モーターの使用環境に合わせた種々の耐熱樹脂を採用している。例えば、日産リーフでは

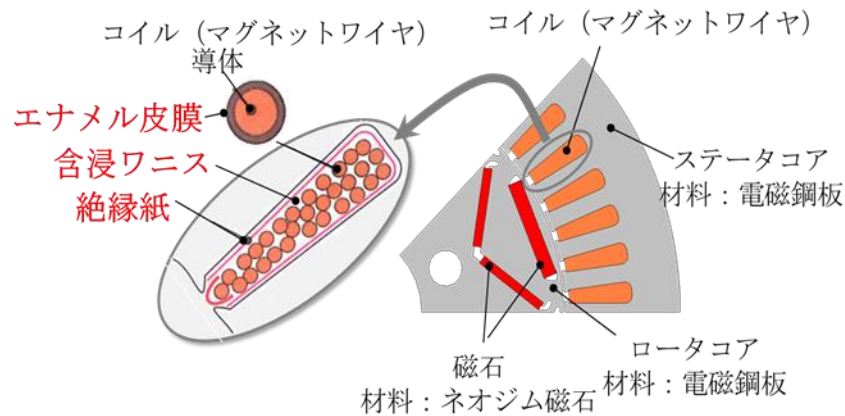


図3 モーターに使用される材料（モーター断面模式図）

通電発熱等の生涯環境負荷に耐えうる材料として、ポリアミドイミド樹脂のコイル皮膜や、不飽和ポリエステル樹脂を用いた固着用ワニスを適用している。コイルエナメル皮膜とワニスの材質の組合せによっては、単体の絶縁性能が確保されないケースも有ることから、組合せ評価により材料選定を行う必要がある。

また将来の電気自動車の革新に向けては高出力密度モーターの開発が求められているが、その設計指針としては、大電流化、高電圧化、高占積率化が

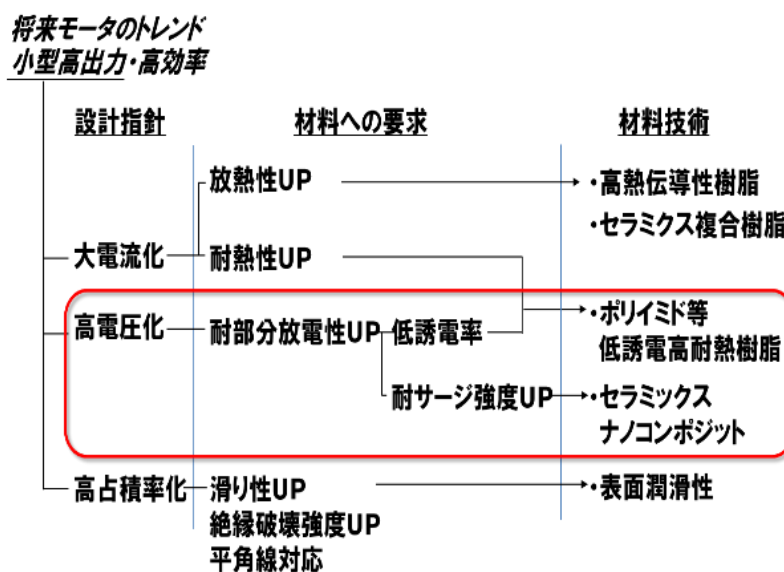


図4 将来モーターのトレンドとその対応技術例

ある。対応する材料技術として絶縁材料に関しては高耐熱、低誘電、高熱伝導が求められている（図 4）。今回は、高電圧化の取組みについて、詳しく紹介する。

電気自動車用インバータは、IGBT などの半導体素子によりスイッチングしているが、その高速化に伴い、図 5 に示すようなインバータサージがモータ端子付近で発生する。そのピーク値は約 2 倍になると言われており、このサージ電圧が、エナメル線間の部分放電発生電圧を超える場合には、放電が発生し皮膜侵食を引き起こし最終的に絶縁破壊に至るリスクがある。

対応としては、部分放電開始電圧を高めた“放電を発生させないエナメル線”の開発、または“部分放電が発生しても破壊に至る寿命を延ばすエナメル線”の開発の 2 つが考えられ、それぞれ各社で開発に取り組んでいる [3][4]。

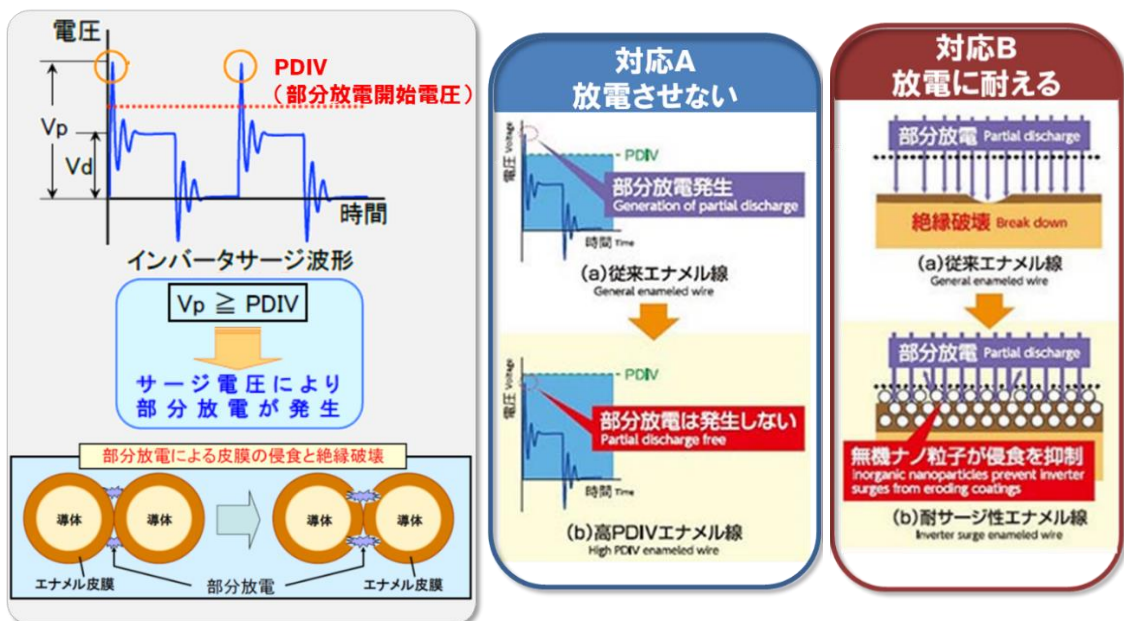


図 5 インバータサージによる部分放電劣化およびその対応 [3][4]

部分放電発生開始電圧は、Dakin の式に示される通り、材料の誘電率と膜厚に依存しており、PDIV を高めるためには、膜厚 UP、誘電率 DOWN が必要となる。

Dakinの式

$$V_p = \sqrt{2} \times 163 \times (t/\epsilon_r)^{0.46}$$

V_p : 部分放電開始電圧(PDIV)
 ϵ_r : 比誘電率
 t : 膜厚

ただし、膜厚 UP はステータの占積率（銅の占める割合）の低下を引き起こすことから、絶縁皮膜の低誘電率化が有効な対応方法となる。

低誘電率化の方策として、低誘電材料を皮膜として適用する方法の他、微小な気泡を有する発泡皮膜線の適用を取組んだ事例があり、数 100V の部分放電向上を達成している（図 6,7） [5]、（図 8,9） [6]。

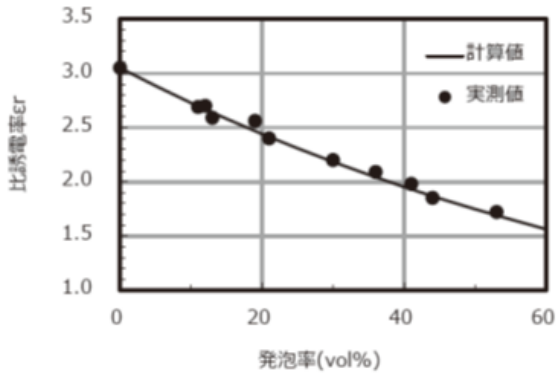


図 6 発泡 PI 巻線の比誘電率[5]
PI : Polyimide

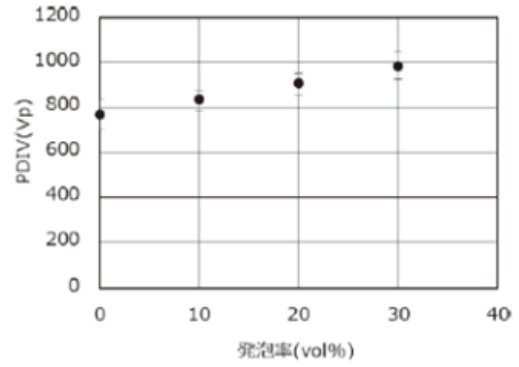


図 7 発泡 PI 巻線の部分放電開始電圧
測定結果 (25℃) [5]

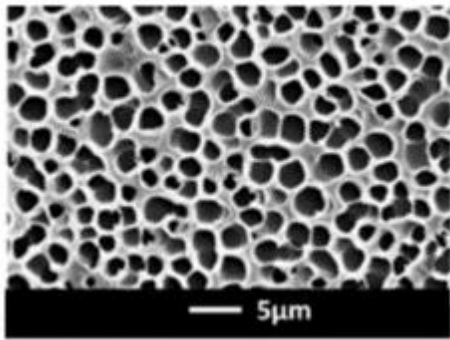


図 8 発泡 PAI 巻線皮膜部の断面図[6]
PAI : Polyamide-imide

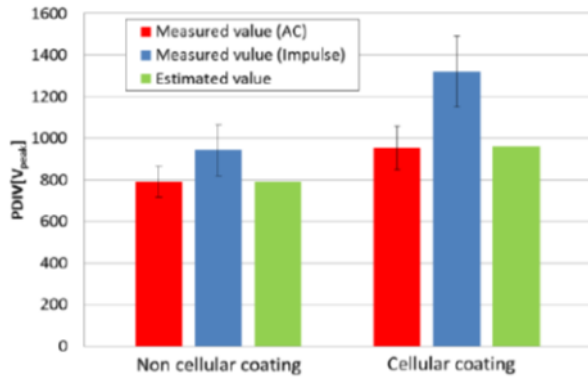


図 9 発泡 PAI 巻線の PDIV 実測値[6]

部分放電に対するもう 1つのアプローチは、部分放電が発生しても、そのエネルギーに耐えるエナメル層を設計するというコンセプトで、ナノコンポジット化による対策例が報告されている。ここでのポイントはフィラーのサイズと分散状態であり、ナノフィラーを凝集なく分散させることが、皮膜侵食と可とう性を兼ね備えることにつながる。またコンポジットするフィラーの量と種類によっても耐電圧寿命が向上する事例もある。図 10 に示すように、ベーマイトとよばれる、アルミナの水和物を用いることで、シリカに対し 9~16 倍の寿命延長を可能としている [7]。

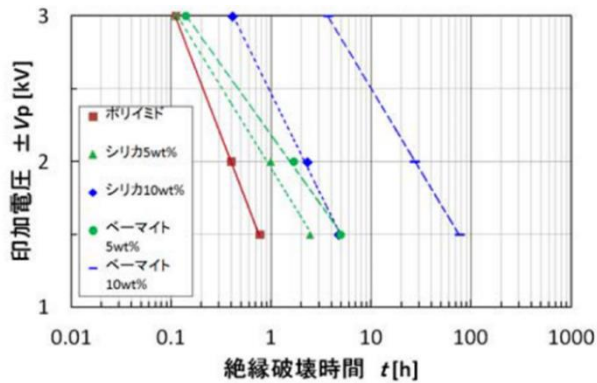


図 10 ナノフィラーを用いた PI コンポジット材料の V-t 特性 [7]

3. インバータ用高分子材料

インバータにおいては、パワーモジュール（PM）に実装された半導体素子の温度管理が出力性能を大きく左右する。解決のためには、半導体から発生する損失を低減するアプローチと、パッケージング構造の熱設計最適化のアプローチがある。

前者に関しては SiC、GaN 等の次世代半導体の適用が対策となるが、現在は Si 半導体が主流であることから、次世代半導体普及までは後者すなわちパッケージング構造での対応が必要となる。

PM の 1 方式である非絶縁型モジュールにおいては、絶縁材周辺の熱抵抗が高くなりやすいという課題があり、熱伝導性と絶縁性を両立する材料が求められる（図 11） [8]。弊社は、新規の絶縁シートと放熱グリスを材料メーカーと共同開発し採用した。

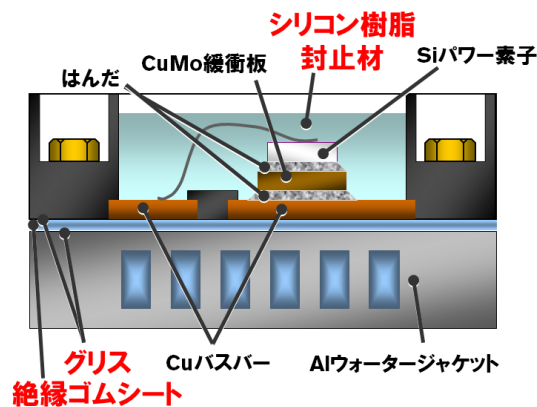


図 11 非絶縁モジュールの断面図 [8]

絶縁シートに関しては、フィラーの材質・サイズの調整やフィラー中の導電性不純物を抑制することで、絶縁性と可とう性を維持しつつ熱伝導率を 2 倍程度改善したシリコン系絶縁ゴムシートを開発した。放熱グリスに関しては、一般的に普及しているシリコン系熱伝導グリスを用いると、併用するシリコンゴムとの相溶性が高いため、油分が吸収され絶縁不良を引き起こしやすいという課題あった。そこでフッ素系熱伝導グリスを採用することで、熱抵抗を低減しつつ、絶縁信頼性を確保した（図 12） [9]。

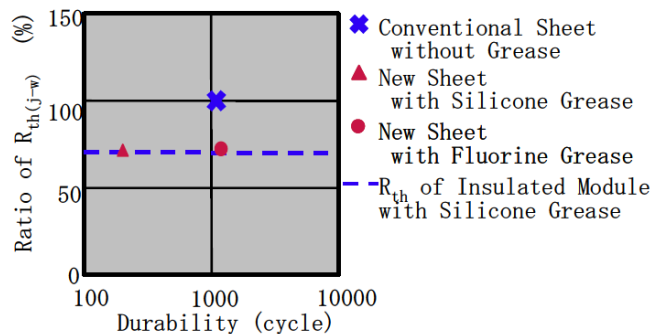


図 12 非絶縁モジュールの熱抵抗と耐久信頼性 [9]

今後のインバータの更なる性能向上のためには、前述した次世代半導体の採用が **KEY** となる。これらのデバイスは 200℃を超える高温作動が想定されており、半導体封止樹脂の高耐熱化、低線膨張率化が要求される。

4. まとめ

- ✓ 電動パワートレインの主要ユニットであるモータ、インバータに関連する材料技術に対する現在取組み、将来のニーズについて紹介した。
- ✓ 電気自動車の普及には、コストと性能を両立させた電動パワートレインの継続的な開発が不可欠であり、今後も機能性材料の性能向上は電動パワートレインの進化を支える重要な要素であると考えられる。
- ✓ そのためには磁性材料、導電材料のみならず、高耐熱絶縁材料の進化が、必要不可欠であり、業界一体となった取組みを期待したい。

5. 参考文献

- [1] 世界の年平均気温 気象庁 HP
- [2] Climate Change 2014 IPCC AR5 Synthesis Report
- [3] 菊池 ナノコンポジット材料によるエナメル線の耐部分放電性向上に関する研究
- [4] 日立金属 HP
- [5] 太田ら.高周波交流電圧に対する耐電圧寿命に優れる巻線 SEI テクニカルレビュー第 190 号
- [6] 柳瀬ら マイクロ発泡皮膜を適用したモータ巻線の部分放電特性 電気学会放電/誘電・絶縁材料/高電圧合同研究会 2016.1.28,
- [7] 石田ら シリカ系ナノコンポジットを超える耐インバータサージ絶縁材料の開発 平成 29 年電気学会全国大会 2-058
- [8] 村上ら 電動パワートレインの進化を支える材料技術 日産技報 76 号
- [9] 小川ら 電動車両用インバータの熱抵抗低減材料開発 電気学会全国大会講演論文集 2005