



eAxle 用高耐熱耐油柔軟電線

Flexible Cable for eAxle with High Heat Resistance and Oil Resistance

福本 遼太*
Ryota Fukumoto

藤田 太郎
Taro Fujita

山内 雅晃
Masaaki Yamauchi

真山 裕平
Yuhei Mayama

遠藤 仁
Hitoshi Endo

大川 裕之
Hiroyuki Okawa

BEV/PHEV/HEVの生産台数の増加に伴い、モータ、ギア、インバータを一体化したeAxleの開発が活発化している。eAxleモータの電源配線はバスバーが主流であるが、耐振動性に優れ、設計の自由度も高まる電線にニーズがあると考え、油冷方式のeAxleモータの電源配線をターゲットに、配策しやすい柔軟な電線の開発に取り組んだ。柔軟な絶縁被覆材のベース材料として、冷媒兼潤滑油であるATFへの耐性と、耐熱性に優れるフッ素ゴムを選定した。しかし、柔軟性と背反する、耐摩耗性、絶縁被覆材同士の耐互着性の改善が課題であった。そこで、耐摩耗性は結晶成分の微分散で、耐互着性は架橋による分子の運動性のコントロールで課題を解決した。本検討により、ISO200℃定格適合、耐ATF性、柔軟性、を兼ね備えた電線を開発でき、上市した。

As production numbers of battery electric vehicles (BEVs), plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs), and hybrid electric vehicles (HEVs) increase, the development of eAxle, which integrate motors, gears, and inverters, is accelerating. Although busbars currently dominate power supply harnesses to eAxle motors, there is a growing demand for flexible cables that offers superior vibration resistance and greater design freedom. Thus, we developed an easily deployable flexible cable, specifically for the power supply of oil-cooled eAxle motors. We selected fluoro rubber as the flexible insulation coating material due to its excellent resistance to ATF, which serves as both a refrigerant and a lubricant. However, we faced challenges in balancing flexibility with properties such as abrasion resistance and the prevention of adhesion between insulation coating materials. We addressed these issues by achieving the fine dispersion of crystalline components to enhance abrasion resistance and by controlling molecular mobility through cross-linking to reduce the adhesion of insulations. Through this study, we were able to develop a cable that meets the ISO 200°C rating, has ATF resistance and flexibility, and put it on the market.

キーワード：eAxle、高耐熱、耐油、柔軟、電線

1. 緒 言

電動車（BEV/PHEV/HEV）の生産台数は世界的に堅調な増加が見込まれている。そして、それに伴い電動車のコア部品である、モータ、ギア、インバータ等を一体化し、小型化、軽量化、安価化できるeAxleの開発が進められている（図1）。現在、eAxleモータの電源配線には、板状の導電性金属体のバスバーが主に使用されている。それに対して、電線は容易に曲げることができるため、設計の自由度が高まる。また、耐振動性に優れるというメリットがあ

ることから顧客ニーズがあると考え、eAxleモータ用の電源配線を開発して新規参入することを目指した。

eAxleのモータを効率よく作動させる上で、冷却は重要な機能である。冷却には、モータ周囲にウォータージャケットを配して冷却する水冷方式と、オートマチックトランスミッションフルード（ATF）等の油を直接モータに接触させて冷却する油冷方式がある。油冷方式は、冷却能力では水冷方式と比較してやや劣るが、小型で、潤滑性も併せて付与できるため、採用が増加している。しかし、ATF等の油冷に使用する油は、絶縁被覆材を構成するポリマーに対して侵食性があり、種類によっては悪影響を及ぼすため、適した絶縁被覆材を選択する必要がある。

また、eAxleは小型化が追求されているため、eAxle内の電線の配策スペースは狭小化し、電線を小さな曲率半径で曲げて配策されることが想定される。それらの配策は手作業で行われることが多く、作業効率や作業への負担、組み付け精度の観点から、電線の柔軟性は重要な特性の一つとなる。

このような背景から、本研究では耐ATF性を有し、柔軟性の高いeAxleモータ用の高耐熱耐油柔軟電線の開発に取り組むこととした。

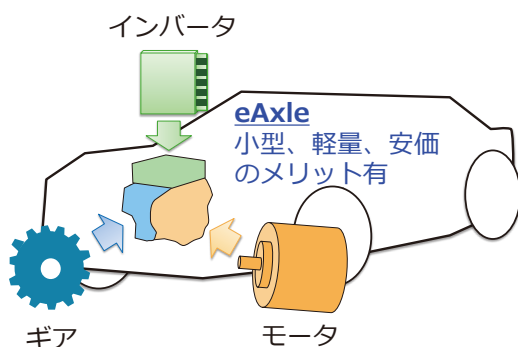


図1 eAxleの代表例

2. 開発目標

発熱するモータ周辺での使用環境を考慮し、自動車用電線の規格である ISO 規格の150℃定格適合を目標とした。その他の特性としては、最大150℃のATFに晒されるため、150℃1200時間経過後も絶縁被覆材の引張強さ、伸び残率が90%以上を維持することを目指した。また、電線の柔軟性、及び、耐摩耗性にニーズがあると考え、電線の柔軟性に大きく影響する絶縁被覆材の弾性率は100MPa以下とし、図2に示す条件の摩耗試験で摩耗回数が250回以上となることを目指した。

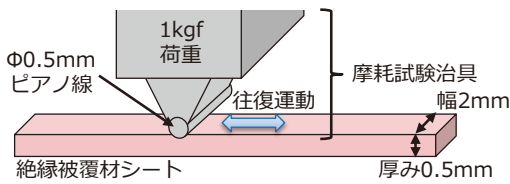


図2 摩耗試験の試験方法

絶縁被覆材を柔軟化すると、電線の絶縁被覆材同士が互着して加工時の作業性を損なう恐れがある。この現象は界面で分子鎖が相互拡散して絡まり合うことが原因であり⁽¹⁾ (図3)、結晶量が少なく、分子鎖の運動性が高い柔軟なポリマーで発生しやすい。保管温度が上昇すると分子鎖の運動性が更に高まり、互着が促進される。そこで、ドラムに巻いて50℃72時間保管し、電線被覆材同士の互着がないことを目標とすることとした。主な目標特性を表1に示す。

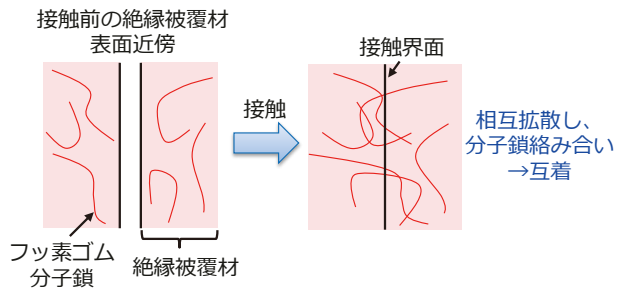


図3 絶縁被覆材同士の互着のメカニズム

表1 主な目標特性

規格	項目	条件	単位	目標値
ISO	電気特性	3%塩水4時間後、耐圧試験	-	破壊なきこと
		水70℃ 2時間後、体積抵抗率測定	Ω・mm	≥ 1 × 10 ¹²
	低温性	-40℃ 4時間後巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと
	難燃性	45°傾斜難燃試験	秒	30秒以内消炎
	耐熱性 150℃定格	200℃ 6時間後巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと
		175℃ 240時間後巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと
		150℃ 3000時間後巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと
	耐油性 150℃定格	ATF 23℃ 10秒浸漬後、150℃ 240時間後巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと
その他	耐ATF性	ATF 150℃ 1200時間浸漬後、引張試験	%	引張強さ残率 ≥ 90 伸び残率 ≥ 90
	柔軟性	絶縁被覆材弾性率	MPa	≤ 100
	耐摩耗性	絶縁被覆材幅2mm、厚み0.5mmのシートが貫通・摩耗するまでの回数	回	≥ 250
	耐互着性	ドラム巻きして50℃ 72時間保管	-	互着なきこと

3. 絶縁被覆材の選定

柔軟な材料として、オレフィンゴム、シリコンゴム、アクリルゴム、ウレタンゴム、フッ素ゴムを挙げた。それぞれの特徴を表2に示す。

表2 ポリマーの特徴まとめ

	オレフィン ゴム	シリコン ゴム	アクリル ゴム	ウレタン ゴム	フッ素 ゴム
柔軟性	○	○	○	○	○
長期耐熱性	△	○	○	×	◎
耐ATF性	×	×	×	○	◎
耐摩耗性	△	×	△	△	△
耐互着性	△	△	△	△	△
電気特性	○	○	△	○	○
材料費	◎	○	○	○	△

- ・オレフィンゴム
材料費は安いですが、耐ATF性が大幅に劣る。
- ・シリコンゴム
長期耐熱性は良好であるが、耐摩耗性、耐ATF性が大幅に劣る。
- ・アクリルゴム
長期耐熱性は良好であるが、電気特性、耐ATF性が劣る。
- ・ウレタンゴム
耐ATF性は良好であるが、長期耐熱性が劣る。
- ・フッ素ゴム
材料費は高く、耐摩耗性、耐互着性は不十分であるが、長期耐熱性、耐ATF性が極めて良好。

以上の検討の結果、材料費は高いが、重要特性である耐 ATF 性が良好なフッ素ゴムをベース材料として選定した。しかし、耐摩耗性、電線被覆材同士の耐互着性を改善することが課題であった。

そこで、柔軟性は乏しいが、長期耐熱性、耐 ATF 性が良好であり、結晶成分を有するために耐摩耗性、耐互着性に優れるフッ素樹脂をフッ素ゴムにブレンドすることとした。しかし、単純なブレンドでは、フッ素樹脂のブレンド比率に対して期待ほど耐摩耗性が向上せず、柔軟性と両立することができなかった。

単純ブレンドの絶縁被覆材を走査透過電子顕微鏡で観察したところ、フッ素ゴム中にフッ素樹脂が約1~5μmで分散して島相を形成しており（図4 (b)）、摩耗試験時に応力集中が界面で発生し、耐摩耗性が低下していると推定した（図5）。そこで、応力集中を緩和するべく、結晶成分が約50~100nmに微分散したフッ素系熱可塑性エラストマー^{※1}を樹脂メーカーと協力して開発した（図4 (a)）。これにより、目標の柔軟性と耐摩耗性を両立することができた（図6、表3）。

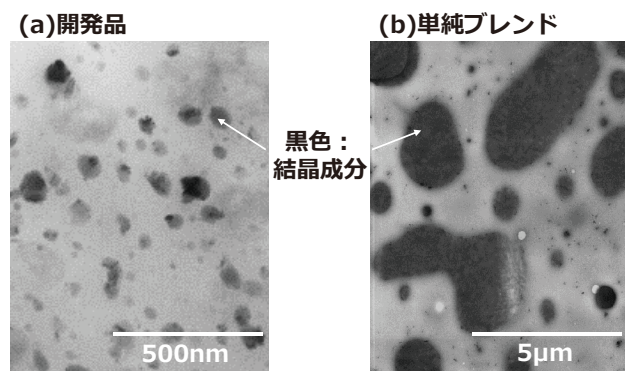


図4 走査透過電子顕微鏡による観察結果
(スケール (a) : 500nm、(b) : 5μm)

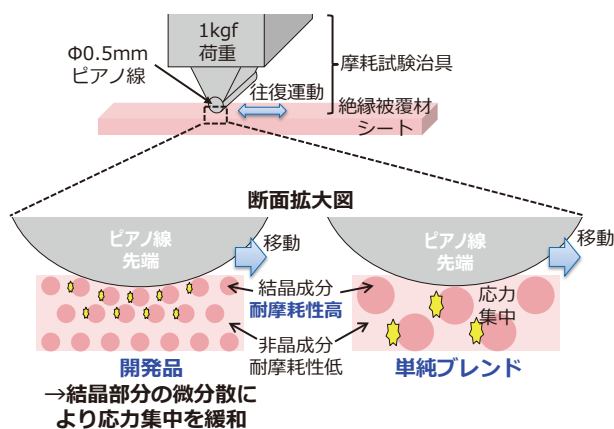


図5 単純ブレンドと開発品の摩耗試験時の違い

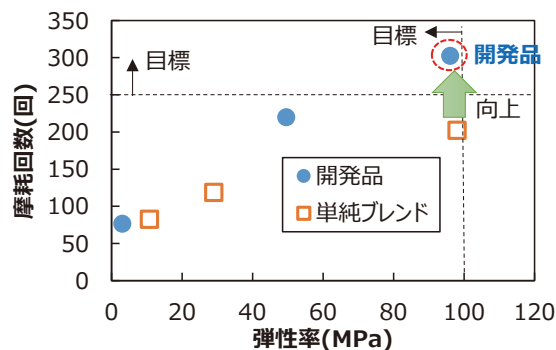


図6 絶縁被覆材の弾性率と摩耗回数

表3 弾性率と摩耗回数の評価結果

特性	条件	単位	目標値	フッ素ゴム単体	単純ブレンド	開発品	フッ素樹脂単体
柔軟性	絶縁被覆材弾性率	MPa	≤ 100	3	98	96	883
耐摩耗性	絶縁被覆材幅2mm、厚み0.5mmのシートが貫通・摩耗するまでの回数	回	≥ 250	77	202	302	≥ 5000

電線被覆材同士の耐互着性に関しては、結晶成分の導入だけでは、改善が不十分であった。そこで、架橋により分子鎖の運動性を低下させ、相互拡散を抑制して改善することとし（図7）、電線被覆材のプレス成型シートにて基礎評価を行い、その有効性を確認した（図8）。

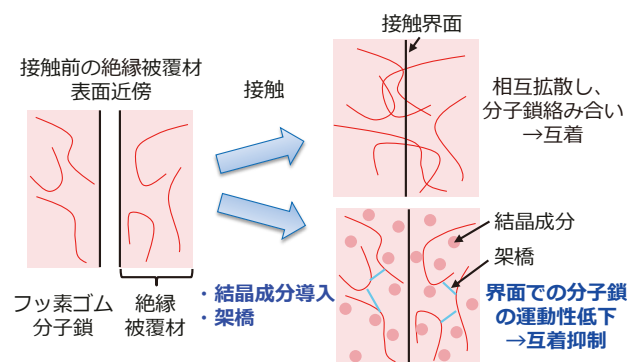


図7 耐互着性改善のメカニズム

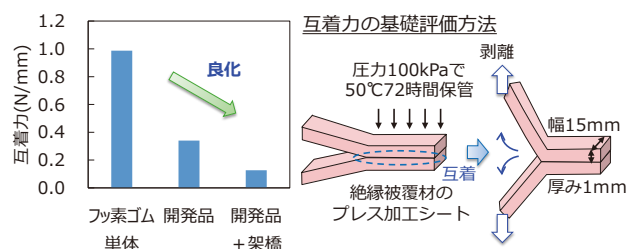


図8 プレス成型シートでの耐互着性の基礎評価結果

以上の検討を踏まえ、25sq 電線（絶縁被覆厚0.55mm）の試作を行った。代表的な特性を表4に示す。本電線はISO規格の150℃定格に加えて、200℃定格にも適合することがわかった。耐熱性向上は、許容電流値を向上させることができるため、顧客への導体径のサイズダウン提案も可能となる。また、その他重要特性である、耐ATF性、耐摩耗性、柔軟性の目標を満足することができた。耐互着性に関しても、ドラムに巻いて50℃72時間保管後も、電線被覆材同士の互着が発生しないことを確認した。

表4 電線の評価結果

規格	項目	条件	単位	目標値	結果
ISO	電気特性	3%塩水4時間後、 耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
		水70℃2時間後、 体積抵抗率測定	Ω・mm	≧1×10 ¹²	3×10 ¹⁵
	低温性	-40℃4時間後 巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
	難燃性	45°傾斜難燃試験	秒	30秒以内 消炎	3
	耐熱性 150℃定格	200℃6時間後 巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
		175℃240時間後 巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
		150℃3000時間後 巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
	耐油性 150℃定格	ATF23℃10秒浸漬後、 150℃240時間後 巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
	耐熱性 200℃定格	250℃6時間後 巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
		225℃240時間後 巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
その他		200℃3000時間後 巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
	耐油性 200℃定格	ATF23℃10秒浸漬後、 200℃240時間後 巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
	耐ATF性	ATF150℃1200時間 浸漬後、引張試験	%	引張強さ残率 ≧90 伸び残率 ≧90	98 101
	柔軟性	絶縁被覆材弾性率	MPa	≦100	96
	耐摩耗性	絶縁被覆材幅2mm、 厚み0.5mmの シートが貫通・摩耗 するまでの回数	回	≧250	302
	耐互着性	ドラム巻きて50℃ 72時間保管	-	互着なきこと	互着なし

4. 結 言

本研究にて開発したeAxle用高耐熱耐油柔軟電線は、ATFに対して高い耐久性を示し、ISO規格の200℃定格に適合する。また、柔軟性と耐摩耗性を両立する電線である。現在、eAxleメーカーにて採用され、量産中である。本絶縁被覆材は押出成形性にも優れており、絶縁電線のみならず、多芯ケーブルのシースや、丸状以外の異形状の電線への展開も検討している。

用 語 集

※1 熱可塑性エラストマー

加熱によって柔らかくなり、冷却によって硬化する特性を有するポリマー。

参 考 文 献

- (1) 黄海升美、[粘着剤概論]、日本ゴム協会誌、39巻、10号、pp. 800-805 (1966年10月)

執 筆 者

福本 遼太*：エネルギー・電子材料研究所 主査



藤田 太郎：エネルギー・電子材料研究所
部長補佐



山内 雅晃：エネルギー・電子材料研究所 部長



真山 裕平：住友電工電子ワイヤー(株) 主席



遠藤 仁：住友電工電子ワイヤー(株) 課長



大川 裕之：住友電工電子ワイヤー(株) 部長



*主執筆者