

HEV/EV用高圧ケーブルの柔軟化

Flexible High-Voltage Cable for HEV/EV

田中 成幸*
Shigeyuki Tanaka

藤田 太郎
Taro Fujita

西川 信也
Shinya Nishikawa

四野宮 篤子
Atsuko Shinomiya

大川 裕之
Hiroyuki Okawa

島田 茂樹
Shigeki Shimada

HEVやEVの高性能化に伴い、パワーケーブルとして用いられる高圧ケーブルの太径化が進み、取り回しの観点からケーブルの柔軟化が強く求められている。ケーブルを構成する導体と絶縁体のそれぞれの柔軟化の方法と柔軟性への寄与度を見積もった。その結果、導体は素線の細径化、絶縁体は低弾性率化が柔軟化に効果的で、特に後者の寄与度が大きいことを明らかにし、低弾性率絶縁材の開発を進めた。ベースポリマーを詳細に検討し、ポリオレフィン系材料を選定した。ポリオレフィンの柔軟性は、結晶領域と非結晶領域の比率で決まるため、この比率をモノマー比率でコントロールし、高耐熱化・高難燃化の配合処方と架橋を行ってポリマー特性の向上を図り、柔軟性とJASO/ISO規格値を達成する新規の絶縁材を開発した。今後はさらに自動車用の柔軟性ケーブルの拡充を進める。

The advancement of hybrid electric vehicle/electric vehicle technology has led to an increase in the size of high-voltage cables used as power cables, and accordingly their flexibility is strongly required for easy handling. Our flexibility simulation revealed that the elastic modulus of an insulator contributes to the cable flexibility more than the structure of a conductor. We found that polyolefin polymers are ideal insulation base-resins because the softness of polyolefin can be controlled by the ratio of the crystal region and amorphous region, which changes with the amount of co-monomers. Using an anti-oxidant agent, flame retardant, and polymer cross-linking, we have developed a new flexible insulation material that meets JASO/ISO standard. Going forward, we will strengthen our product lineup of flexible cables.

キーワード：HEV/EV、自動車、柔軟、ケーブル

1. 緒 言

近年普及が進む、ハイブリッド車 (HEV) や電気自動車 (EV) では、蓄電池から供給される低電圧の電力をインバーターで500V以上に昇圧し、モーターに供給しており、インバーター (INV) /モーター間を接続する高圧ケーブル (パワーケーブル) には許容電流の観点から太径ケーブルが用いられている。一般的に、自動車用ケーブルでは、ワイヤーハーネスへの加工やカーメーカでのハーネス組み付け作業を行うにあたり、ケーブルの端末加工、コネクタ挿入、ケーブル配策などのハーネス加工を手作業で行うことが多く、作業効率や作業への負荷、組み付け精度などの観点から、ケーブルの柔軟性は重要な特性の一つとなっている。また、HEV/EV高圧ケーブルは太径であるために柔軟性に乏しく、取り回しづらい課題があった。

エンジンルームは、車体を大型化することなく車室内空間を最大化するために小型化される傾向があり、ケーブルの配策スペースは狭隘化し、ケーブルを小さな曲率半径で曲げて配策されるケースが増えており、一方で、HEVやEVの高性能化に伴い、駆動システムの高電圧大電流化が進みパワーケーブルは太径化 (図1) していることから、柔軟性の高い高圧ケーブルの開発が強く望まれていた。このような背景から、本研究ではHEV/EVに用いられる高圧ケーブルの柔軟化に取り組んだ。

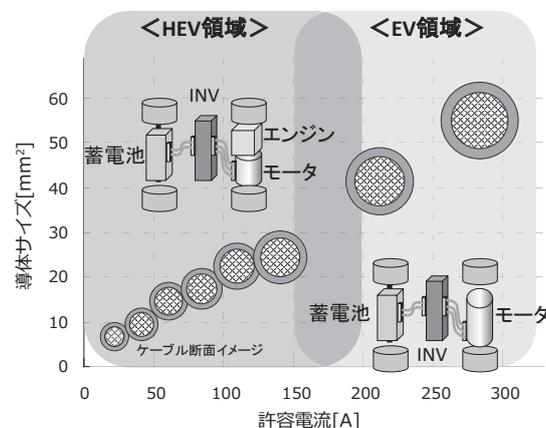


図1 HEV/EV用ケーブルサイズ

2. 開発目標

ケーブルの柔軟性が高いとは、ケーブルを曲げた際の反発力が小さいことと同義であり、反発力の評価方法として、曲げ剛性測定に用いるIEC60794-1-2 Method 17Cに記載の方法を用いた。この方法は、光ファイバーケーブルの特性評価方法であるが、柔軟性を定量的に評価する方法として適すると考え、採用した。具体的には、平行になる

ように配置した板の間に180°に曲げたケーブルを置いて、ケーブルの端を平行な板に固定し、板上にロードセルを置き、所定の曲げ間隔になるまで曲げたときの荷重を測定して、反発力を求めた(図2)。試験は常温で行った。曲げ間隔は、ケーブル配策時の最小曲げを推定し、60mmとした。この時に求められる最大反発力を柔軟性の指標として用いた。

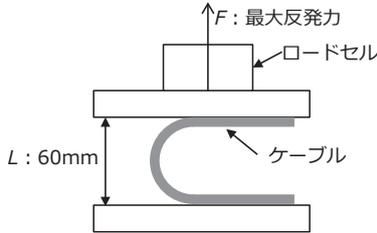


図2 ケーブル柔軟性の評価方法

たとえば、現行のHEV/EV高圧ケーブル30sq (19/19/0.32) をこの方法で測定すると、最大曲げ反発力79Nである。

柔軟性の目標としては、作業性改善を実感できる柔軟性として、現行ケーブルから反発力半減を目標とした。

また、自動車用ケーブルの規格には、JASO規格、ISO規格があり、これらを満足する必要がある。HEV/EV高圧ケーブルは、通電時の導体の発熱とHEVの場合にはエンジンからの排熱に曝されるため、特に長期耐熱性が重要であり、通常HEV/EV高圧ケーブルに求められる150℃耐熱を目標とした。JASO規格での150℃耐熱とは、10000

時間経過後に絶縁体伸びの絶対値が100%となる温度が150℃以上であること、ISO規格での150℃耐熱とは、ケーブルの150℃で3000時間老化後に自己径1.5倍径の巻き付け試験を行い、1kV、1分間の耐圧試験で絶縁破壊なきことである。主に、国内ではJASO規格、北米や欧州ではISO規格が要求されることが多く、本研究ではグローバルに使用されることを目的とし、JASO、ISOいずれの規格も満足することを目標とした。主な目標特性を表1に示す。

3. 柔軟化シミュレーション

ケーブルは導体と絶縁体とから構成されているため、導体と絶縁体の両方の柔軟化を検討する必要がある。HEV/EV高圧ケーブルで用いられる太径導体の実験評価には大きな開発費や時間を要するため、柔軟化への寄与度を定量的に見積もり、効率的に開発を進めることを目的に、計算による柔軟化シミュレーションを行って開発方針を定めた。

前述のケーブルの最大反発力は、式(1)によって求めることができる⁽¹⁾。曲げ剛性は、断面二次モーメントと弾性率の積として求められ、それぞれの構成材の曲げ剛性の和として求めることができる。

$$F = K_B / (0.348 (L - D)^2) \dots\dots\dots (1)$$

$$K_B = K_{cnd} + K_{ins} = E_{cnd} \cdot I_{cnd} \cdot N + E_{ins} \cdot I_{ins} \dots\dots\dots (2)$$

- F: 最大反発力、 K_B : 曲げ剛性
- L: 曲げ間隔、D: ケーブル外径
- K_{cnd} : 導体曲げ剛性、 K_{ins} : 絶縁体曲げ剛性
- E_{cnd} : 導体素線弾性率、 E_{ins} : 絶縁体弾性率
- I_{cnd} : 導体素線断面二次モーメント、N: 導体素線本数
- I_{ins} : 絶縁体断面二次モーメント

断面二次モーメントは、導体素線を円柱形、絶縁体を円筒形(図3)とし、下記の式により求める。

$$I_{cnd} = \pi \cdot R^4 / 4 \dots\dots\dots (3)$$

$$I_{ins} = \pi \cdot (D^4 - d^4) / 64 \dots\dots\dots (4)$$

R: 導体素線半径、D: 絶縁体外径、d: 絶縁体内径

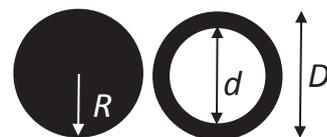


図3 断面二次モーメント計算形状

表1 JASO規格/ISO規格目標特性一覧

規格	項目	条件	単位	規格値
JASO	絶縁引張特性	引張強度	MPa	≥ 10.3
		伸び	%	≥ 150
	耐熱性1B	150℃ 240h後、巻付耐圧試験	-	破壊なきこと
	耐熱性1C	巻付、200℃ 30min	-	破壊なきこと
	低温性	-40℃ 4h後、巻付耐圧試験	-	破壊なきこと
	耐油性	ガソリン23℃ 20h後巻付	-	導体露出なきこと
	耐摩耗性	テープ法 1.9kgf	最小摩耗抵抗	≥ 550
	難燃性	水平難燃	秒	30秒以内消炎
ISO	長期耐熱性(絶縁体)	伸び100% 10000時間耐熱温度	℃	≥ 150
	長期耐熱性(ケーブル)	150℃ 3000h後、巻付耐圧試験	-	破壊なきこと

この計算の妥当性を確認するため、サイズの異なる現行ケーブルでの反発力計算値と、実際の現行ケーブルで測定した反発力実測値を比較した。結果を表2、図4に示す。計算値と実測値がおおむね一致し、開発の指針を得るための妥当な手法と判断した。

表2 現行ケーブル反発力計算値と実測値比較

导体サイズ	sq	8	30	50	
导体	より数/素線数/素線径	本/本/mm	1/50/0.45	19/19/0.32	16/32/0.32
	外径	mm	3.7	7.8	10.1
絶縁	厚さ	mm	0.8	1.4	1.6
	外径	mm	5.3	10.6	13.3
导体弾性率	GPa	100	100	100	
絶縁体弾性率	MPa	96	96	96	
反発力計算値	N	11.0	71.4	171	
反発力実測値	N	6.68	78.8	183	

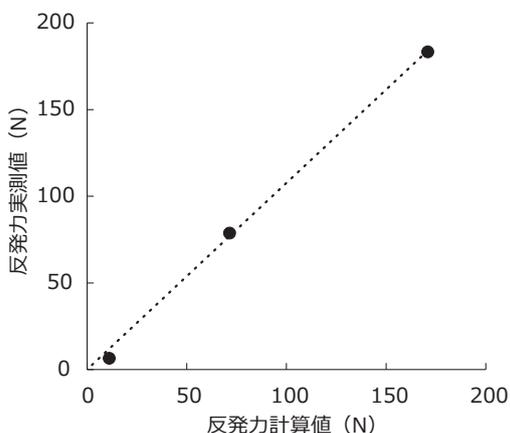


図4 現行ケーブル反発力計算値と実測値

この計算手法を用いてケーブルの反発力を、様々な导体構成と絶縁体について計算し、导体と絶縁体それぞれの反発力を求めて、柔軟性への効果と寄与度を調べた。表3は、ケーブルサイズ15~50sqについて、素線径が0.32mmと0.18mmでの导体構成、絶縁体弾性率が現行ケーブルの96MPaおよびその半分の48MPaで、导体のみの反発力と、导体+絶縁体のケーブルとしての反発力を計算した結果である。図5は、素線径の違いについて、図6は絶縁体弾性率の違いについて、サイズごとに比較したグラフである。また、図7には导体のみと导体+絶縁体の比較を素線径0.18mm、絶縁体弾性率96MPaの場合について示した。

まず素線径の影響を評価した所、素線径0.18mmと0.32mmの各場合で比較すると、素線径を細くすることにより、反発力をおおよそ1/3程度に低減でき、効果があることがわかる。これは素線径が細い方が同じ曲げ半径で

表3 様々な構成での反発力計算結果

导体サイズ		sq	15	20	30	40	50
导体	より数/素線数/素線径	本/本/mm	19/9/0.32	19/13/0.32	19/19/0.32	19/26/0.32	19/32/0.32
	外径	mm	5.3	6.5	7.8	9.1	10.1
絶縁	厚さ	mm	1.1	1.1	1.4	1.4	1.6
	外径	mm	7.5	8.7	10.6	11.9	13.3
导体弾性率	GPa	100	100	100	100	100	
絶縁体弾性率	MPa	96	96	96	96	96	
反発力計算値	导体のみ	N	8.45	12.8	19.6	28.2	36.1
	导体+絶縁	N	20.8	34.2	71.4	109	171

导体サイズ		sq	15	20	30	40	50				
导体	より数/素線数/素線径	本/本/mm	19/30/0.18	19/42/0.18	19/63/0.18	19/80/0.18	37/54/0.18				
	外径	mm	5.5	6.5	7.9	8.9	10.2				
絶縁	厚さ	mm	1.1	1.1	1.4	1.4	1.6				
	外径	mm	7.7	8.7	10.7	11.7	13.4				
导体弾性率	GPa	100	100	100	100	100					
絶縁体弾性率	MPa	96	48	96	48	96	48	96	48		
反発力計算値	导体のみ	N	2.84	4.13	6.53	8.62	11.9				
	导体+絶縁	N	16.0	9.52	24.8	14.6	58.6	32.9	82.0	45.8	147

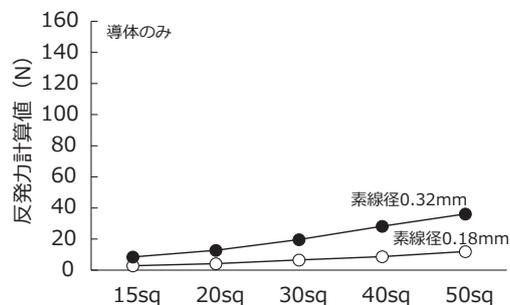


図5 素線径の影響

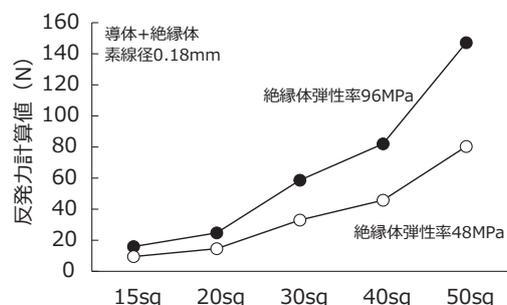


図6 絶縁体弾性率の影響

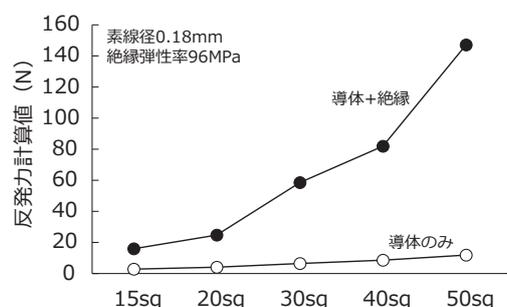


図7 导体と絶縁体の寄与度

変形させた際の歪が小さくなるためである。

次に絶縁体の弾性率の影響を評価すると、弾性率が半減すると、ケーブルの反発力はおおよそ1/2程度の低減となり、効果があることがわかる。また、図7からは導体と絶縁体とでは、絶縁体の方が反発力への寄与度が大きいことがわかる。特に絶縁体のケーブルが太径になるほど、絶対値としての低減効果は大きく、作業現場で体感する柔軟化の効果は大きいと考えられる。

以上の検討結果から、反発力低減を目指すには、絶縁体の低弾性率化に取り組むことが重要であることがわかった。導体の素線径細径化も柔軟化に寄与するが、絶縁体に比べると寄与度は小さく、また、素線径細径化は製造コストが大きくなるという課題がある。自動車用電線の製造コストを考慮すると、特に柔軟化が必要な場合に素線径0.18mmで構成することが最適であると判断した。

目標とした反発力半減を達成するための絶縁体弾性率を計算により求めたところ、43MPa以下とする必要があることがわかり、この絶縁体弾性率を実現する材料の検討を進めた。

4. 絶縁体材料選定

絶縁体を柔軟にするには、ベースとするポリマー材料として柔軟で高耐熱な材料を選定する必要がある。そのような材料として、ポリオレフィン系、シリコンゴム、アクリルゴム、フッ素ゴム、EPゴムを候補として挙げた。それぞれの特徴を表4に示す。

表4 ポリマーの特徴まとめ

	ポリオレフィン	シリコンゴム	アクリルゴム	フッ素ゴム	EPゴム
柔軟性	○	◎	◎	◎	◎
長期耐熱性	○	◎	○	◎	×
機械強度	○	×	○	○	○
耐油性	○	×	○	◎	○
電気特性	○	○	△	○	○
材料費	○	×	△	×	○

- ・ポリオレフィン
柔軟性、耐熱性、材料費のバランスが取れている。
- ・シリコンゴム
自動車用ケーブルで重要な機械強度（引張強度や引き裂き強度）、耐油性が悪く、材料費も高い。
- ・アクリルゴム
柔軟性に優れるが、体積固有抵抗が芳しくなく、材料費も高い。
- ・フッ素ゴム
耐熱性、耐油性に優れるが材料費が高い。150℃耐熱

の目標に対し、フッ素ゴムは200℃耐熱であり、オーバースペックである。ただし今後さらなる高電圧・大電流化に対して150℃以上の高耐熱化が求められる場合には、可能性のある材料である。

- ・EPゴム
柔軟性が十分あり、材料費も問題ないが、長期耐熱性が低い。

以上の検討の結果、最適な材料はポリオレフィン系と考えた。

5. ポリオレフィン系材料の柔軟化

ポリオレフィンの柔軟性は、その結晶成分の比率が大きく関わっている。図8にポリオレフィンの分子構造の模式図を示す。ポリオレフィンは結晶性高分子であり、分子の一部が規則正しく並んだ結晶領域を持つ。結晶領域は密度が高く、剛直な性質を示す。一方、非結晶領域は分子がランダムな配置となり密度が低く分子が動きやすい状態であるため、柔軟な性質を示す。よって、結晶領域と非結晶領域の比率を調整すれば、ポリオレフィン系ポリマーの柔軟性をコントロールできる。また、非結晶領域を増加させることで低下する特性は、ポリマーの架橋を行う方法で改善させることを考えた。

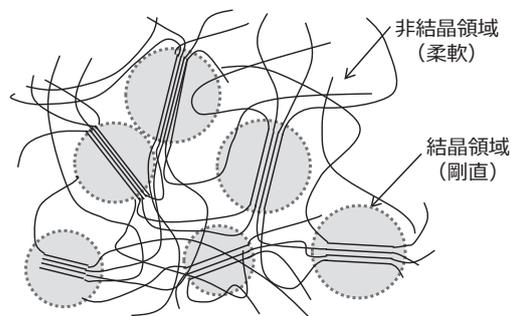


図8 ポリオレフィンの結晶と非結晶の模式図

結晶領域を低減し、非結晶領域を増加させる方法には、ポリオレフィンの分子内に結晶化を阻害するコモノマー^{*1}を共重合させたコポリマー（共重合体）とする方法が考えられる。コモノマー比率が高いほど、ポリオレフィン鎖が規則正しく並びにくくなり、結晶領域が低減する。図9には、コモノマー比率と弾性率との関係を調べた結果を示す。想定通り、コモノマー比率が上がるにつれ結晶量が低減することで、弾性率は低下する傾向があり、目標の弾性率を満足するにはコモノマー比率20%以上である必要があることがわかった。

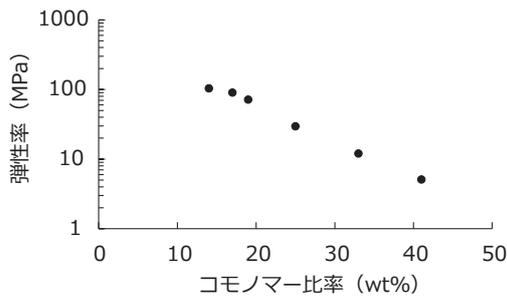


図9 コモノマー比率と弾性率の関係

結晶領域を低減してポリオレフィン系ポリマーを柔軟化することに対して、悪化する背反特性は、耐摩耗性と耐油性である。これらの特性が柔軟化により低下する理由は、耐摩耗性は柔軟な非結晶領域が変形や損傷を受けやすいため、また、耐油性は非結晶領域に油が侵入しやすく、機械強度を大きく低下させるためである。

耐摩耗性、耐油性共にJASO規格、ISO規格で規定される項目であり、これらと柔軟性を両立させるために、ポリマーの架橋を検討した。架橋とは分子鎖同士を化学反応により結合させることで、分子が三次元的なネットワーク状となり、強度や耐熱性を向上させることができる。架橋の方法には、熱架橋、電子線照射架橋、シラン架橋があり、いずれも同様の効果を得ることができる。但し、熱架橋とシラン架橋では、長期耐熱性を向上させるために多量配合する酸化防止剤によって架橋阻害を起こすのに対し、電子線照射架橋は架橋阻害が小さく、また使用できるポリマーの自由度が高いため、最適な架橋方法であり、電子線照射架橋を採用した。

以上の検討結果を踏まえ、開発目標を満たすコモノマー比率の最適化検討を行った。耐熱性、難燃性を発現させる配合処方にてコンパウンドを作製し、コモノマー比率の異なるポリマーを用いて評価した結果を表5に示す。規格を満足する最適なポリマーとしてポリマーBを選定し、この材料で8sqケーブル評価を行い、JASO、ISOの両規格に合格することを確認した。代表的な特性を表6に示す。絶縁体の弾性率は37MPaであり、目標の柔軟性を満足することがわかった。

JASOの長期耐熱評価については、150℃よりも高温の条件での熱劣化データを用いたアレニウスプロットから、

表5 ポリマー選定評価結果

ポリマー	コモノマー比率 (wt%)	コンパウンド弾性率 (MPa)	JASO耐熱性	JASO耐油性耐摩耗性
A	小	96	○	○
B	中	37	○	○
C	大	13	×	×

表6 ケーブル評価結果

規格	項目	条件	単位	規格値	結果
JASO	絶縁引張特性	引張強度	MPa	≥ 10.3	14.5
		伸び	%	≥ 150	561
	耐熱性1B	150℃ 240h後、巻付耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
	耐熱性1C	巻付、200℃ 30min	-	破壊なきこと	破壊なし
	低温性	-40℃ 4h後、巻付耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
	耐油性	ガソリン23℃ 20h後巻付	-	導体露出なきこと	露出なし
	耐摩耗性	テープ法 1.9kgf	最小摩耗抵抗	≥ 550	788
	難燃性	水平難燃	秒	30秒以内消炎	0
ISO	長期耐熱性(絶縁体)	伸び100% 10000時間耐熱温度	℃	≥ 150	152
	長期耐熱性(ケーブル)	150℃ 3000h後、巻付、耐圧試験	-	破壊なきこと	破壊なし
絶縁体弾性率			MPa	≤ 43	37

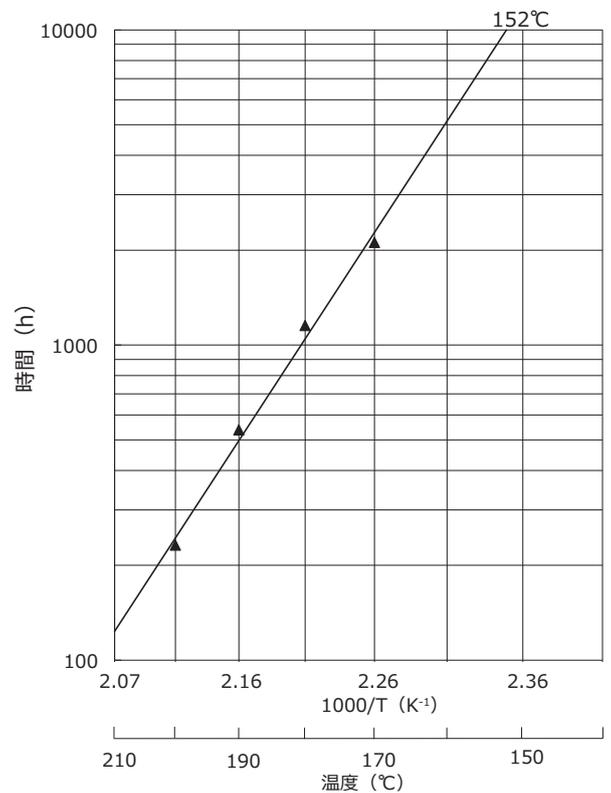


図10 アレニウスプロット

10000時間後に伸び100%まで劣化する温度を推測し、150℃、10000時間の熱老化後の伸びの絶対値が100%以上を満足することを確認した。

6. 結 言

本研究にて開発した柔軟ケーブルは、カーメーカにて採用され、量産中である。今後は150℃耐熱クラスだけでなく、200℃耐熱のケーブルにおいても同様の考え方を適用することで、高耐熱の柔軟ケーブルを実現することができると考え、取組中である。

用語集

※1 コモノマー

ベースとなるモノマー（ポリエチレンの場合はエチレン）とともに、一緒に重合反応することでポリマーの分子の一部となるモノマー。

参考文献

(1) M. Tachikura, H. Takemoto and N. Tomita, OECC'97, p.526

執筆者

田中 成幸* : エネルギー・電子材料研究所 主席



藤田 太郎 : エネルギー・電子材料研究所
グループ長



西川 信也 : エネルギー・電子材料研究所 部長



四野宮 篤子 : 住友電工電子ワイヤー(株)



大川 裕之 : 住友電工電子ワイヤー(株) 課長



島田 茂樹 : 解析技術研究センター グループ長



*主執筆者