

多層押出技術を用いた鉄道車両向け細径3層被覆電線の開発

Development of Small-Diameter Three-Layer Coated Electric Wire for Trains Using Multilayer Co-Extrusion Technology

加賀 雅文*
Masafumi Kaga

藤本 憲一朗*
Kenichiro Fujimoto

梶原 稔尚**
Toshihisa Kajiwara

* 日立金属株式会社
機能部材事業本部
Advanced Components and Materials
Division, Hitachi Metals, Ltd.

** 九州大学大学院
工学研究 化学工学部門
Department Chemical Engineering,
Kyushu University

鉄道車両用電線において各種特性を満足しながら細径・軽量化を図るために、現行の2層被覆に代わる細径3層被覆電線を開発した。高精度な3層薄膜被覆を実現するために、押出クロスヘッド内流路構造を最適化した。本研究ではクロスヘッド内樹脂分配流路における圧力降下の周方向均一性に着目し、流体力学に基づいた流路寸法設計理論を構築した。これにより、3層被覆の中間絶縁層で $120 \pm 10 \mu\text{m}$ の被覆厚精度を達成することができた。本開発電線は、現行品と同等の各種特性を得ながら、断面積で約30%、重量で約16%低減できた。

A new electric wire for trains with three coating layers has been developed to reduce the diameter and the weight compared to double-coated wire. The flow channel structure of the cross-head of the extruder was optimized to realize precise multi-layer coating. In this study, the authors established a flow-channel design theory based on fluid dynamics to equalize the pressure drop in all the flow paths around the distributor. The thickness of the three-layer middle insulation layer is $120 \pm 10 \mu\text{m}$. The cross sectional area and the weight of the wire are less than those of conventional wire by 30% 16%, respectively, without any loss of performance.

● **Key words** : cable, wire coating process, multi-layer co-extrusion
● **R&D Stage** : Development

1. 緒言

高速鉄道に代表される鉄道車両では、安全性、利便性の観点からIoT化、自動運転化が進展しつつある¹⁾。このような鉄道車両の高機能化に伴い、ぎ装される電線は急激に増加する。そのため省スペースで軽量な鉄道車両用電線が必要である。一方で鉄道車両に用いられる電線には、電気絶縁性、火災安全性、強度をはじめとする機械特性が求められる。これらの諸特性を単一の被覆材料を用いて満たそうとすると、特に難燃性と機械特性および電気絶縁性がトレードオフの関係にあり、難燃性を向上させると機械特性と電気絶縁性が低下する課題がある。日立金属では本課題の解決のために被覆を電気絶縁層と難燃層の2層構造としたEN規格準拠の電線(POLYENEX[®])を上市している²⁾。この電線の構造は電気絶縁層(Insulation layer)と難燃層(Flame retardant layer)の2層構造である。

今回、著者らは2層構造をベースに、電気絶縁性、火災安全性、機械特性の規格を満足し、省スペース・軽量

化を実現する3層被覆構造を新たに設計した。2層から3層への多層化に伴い、各層厚さをさらに高精度で成形する必要がある。押出成形の高精度化には、各層押出機の樹脂押出量を安定化する技術とそれを成形するクロスヘッドの設計技術の両方が必要である。本報では薄膜多層被覆を実現するための、クロスヘッド内の流路の検討結果を中心に報告する。

2. 細径3層被覆電線

2.1 細径3層被覆構造

鉄道車両用電線において最も微細な成形が求められる導体断面積 1 mm^2 (1SQ)の電線を対象に、電気絶縁性と難燃性を満足させながら、省スペース・軽量化を実現するために、内層を半導電層、中間層を電気絶縁層、外層を難燃層とする細径3層被覆構造を設計した³⁾。図1に2層被覆構造の鉄道車両用電線と細径3層被覆構造の断

● POLYENEXは日立金属株式会社の登録商標です。

面を示す。細径3層被覆構造では、導体の直上に半導電層、中間層には電気絶縁性の高い材料を用いた電気絶縁層、外層には火災安全性を考慮して難燃層を配置した。それぞれの厚さは電気絶縁性と難燃性のバランスを加味して決定した。

この結果、電気絶縁性、難燃性と細径化の両立が可能となり、断面積で約30%、重量で約16%の軽量化が実現した。

2.2 中間層の目標寸法精度と課題

細径3層被覆構造では各層が従来の2層被覆構造よりも薄いため厳しい寸法精度が求められる。特に中間に位置する電気絶縁層は電線の機能として最も重要な電気絶縁性を担う層である。その周方向の層厚さは中心値120 μm、標準偏差で±10 μmの寸法精度を目標とした。

電気絶縁層を3層の中間に均一に薄膜成形することが細径3層被覆電線の主な開発課題である。

3. 分配流路の設計

3.1 電線製造方法

細径3層被覆電線の製造方法を図2(a)に示す。半導電層、電気絶縁層、難燃層の各材料は各押出機により熔融させ、クロスヘッドに高圧で注入される。クロスヘッドの上流部で各材料流体は分配流路(Distributor)で同心円状の筒形にそれぞれ成形され(図2(b))、クロスヘッド下流部で積層し、その積層した材料をダイ内で同時に被覆する。導体被覆後に水槽で冷却・固化させることで、連続的に電線被覆が成形される。このような異なるプラスチック熔融体をクロスヘッド内で分配・合流させて一括で押出成形する方法は多層押出と呼ばれている。電線被覆の多層押出では各層の均一化のために、分配流路とその後の各層合流流路の設計が必要となる。各層合流部は流動解析を用いた研究が報告されており⁴⁾、設計の参考とした。本報では主な課題であった分配流路の設計について述べる。

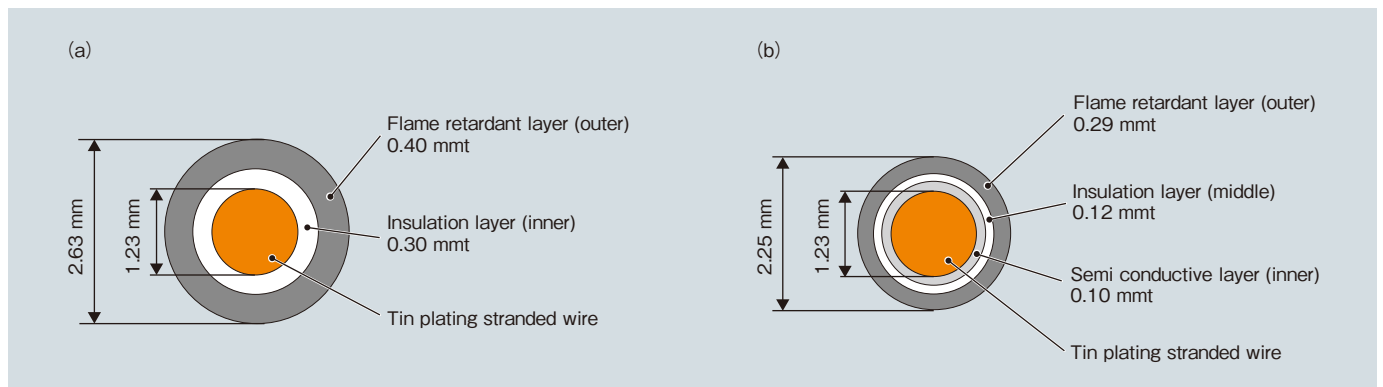


図1 鉄道車両用電線の構造 (a) 2層被覆構造 (b) 細径3層被覆構造
Fig. 1 Structure of wire for train: (a) two-layer structure, (b) small-diameter three-layer structure

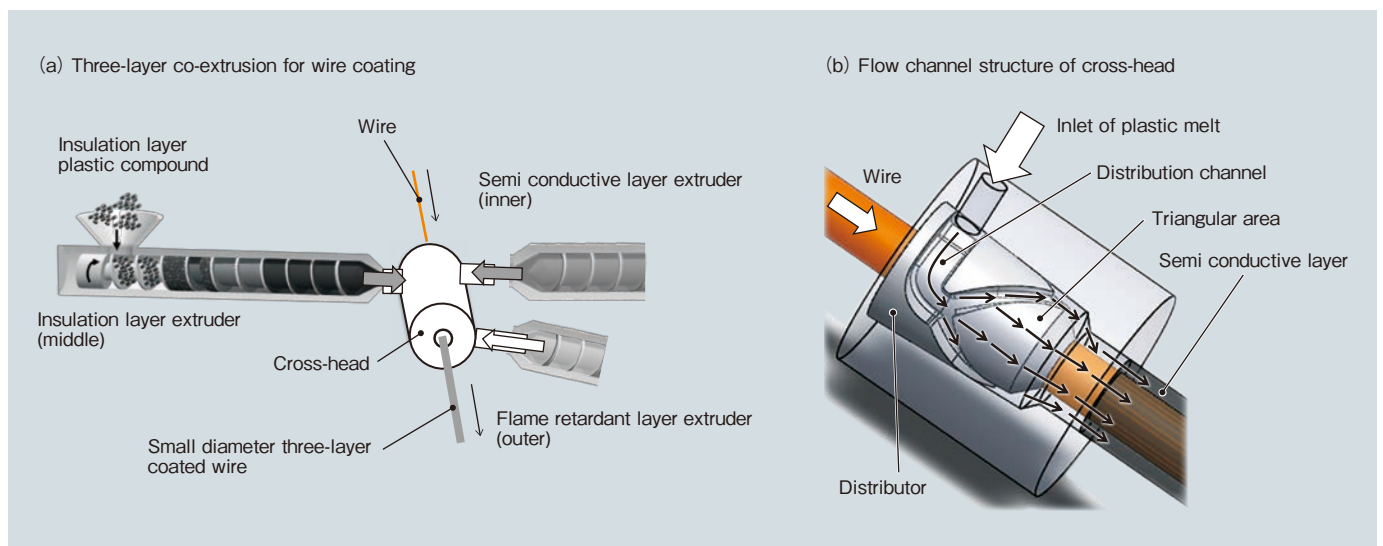


図2 3層押出とクロスヘッド内分配流路
Fig. 2 Three-layer extrusion and distributor in cross-head

3.2 分配流路の設計と材料粘度

中間層の層厚さ $120 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ を実現するためにはクロスヘッド内分配流路において周方向に分配される流量を均一化する必要がある。中間層の分配流路のみの流量を均一化しても内・外層と合流することでそれらの層の流体から応力を受けて合流界面が変化するので、3層すべてについて周方向の流量を均一化する必要がある。

この分配流路の設計は押出成形において重要な課題のひとつであり、流体力学シミュレーションを用いた設計が行われている⁵⁾。この設計の難しさはプラスチック溶融体が非ニュートン流体であり、それを考慮した設計を行わなければならない点である。非ニュートン流体はせん断速度が異なると粘度が変化することが特徴である。ここでキャピラリーレオメーターで測定した中間層の粘度の両対数グラフを図3に示す。図3の粘度 η はせん断速度 $\dot{\gamma}$ に対して両対数グラフで直線であるので、次式のべき乗則モデルで定式化することができる。

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

ここで、 m は粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{sec}$)、 n は粘性指数 (無次元) でそれぞれ材料固有の定数である。各層材料で粘度が異なるので、分配流路もそれぞれ個々に設計する必要がある。

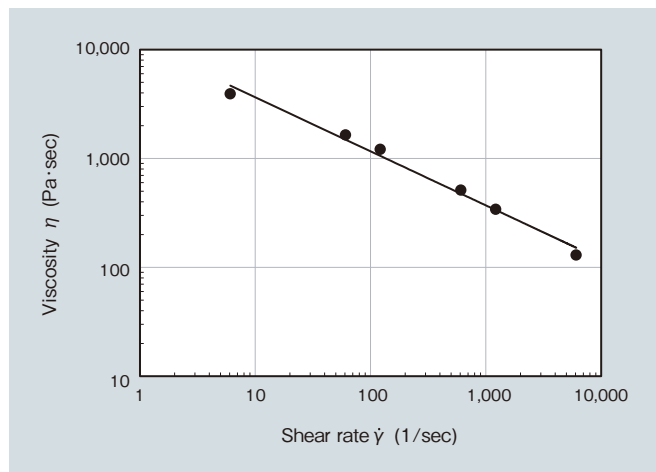


図3 中間層の粘度
Fig. 3 Viscosity of middle layer polymer

3.3 分配流路の数理モデル化

分配流路の流量均一化設計の一般的なアプローチとしては分配流路形状を種々変更し、流体力学シミュレーションにて流量を評価し、そのばらつきを目標以下とするまで繰り返す方法がある。本方法は3次元空間上で流速、圧力、流線などを計算でき、それらの空間分布を可視化できる利点がある。一方で、流体力学シミュレーション

は流体力学方程式を空間的に離散化するメッシュ生成することで近似的に計算している。計算の精度は離散化メッシュのサイズに依存し、細かくすればするほど精度は向上するが計算時間はメッシュサイズの3乗で長くなる欠点がある。今回は層厚さばらつきの目標から流量ばらつきを約1%の分解能で評価する必要があるが、この精度を求めようとすると計算時間が長くなり現実的でないことがわかった。

そこで別のアプローチとして、系を流体力学に基づいて数理モデル化し、その解を求める方法を検討した。数理モデル化の際に誤差が発生するが、数理モデルを補正することで誤差を小さくすることができる⁶⁾。実際の中間層の流路形状とそのモデルを図4に示す。分配溝 (Distribution channel) は下流の三角エリア (Triangular area) よりも深溝となっており、流体は分配溝に沿って流れながら、三角エリアに流れ出すことで周方向に分配している。ここで、流出口周方向に θ 軸を設定し、形状を θ の関数として定式化する。分配溝の長さを $x(\theta)$ 、三角エリア長さを $L(\theta)$ とする。三角エリアの形状は三角エリア長さ $L(\theta)$ の関数形で表すことができる。

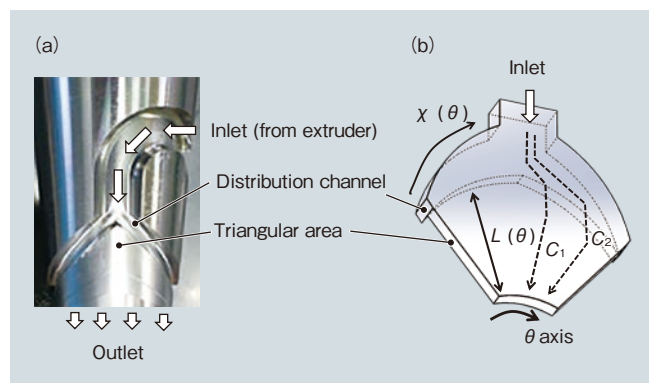


図4 中間層の流路モデル (a) 分配流路 (b) 数理モデル
Fig. 4 Distributor and mathematical model

3.4 流量均一化のための圧力降下の計算

図4 (b) のモデルにて流動経路 C_1 と C_2 を経て出口へ到達した流体は流量が同じであったとすると、 C_1 と C_2 いずれの流動経路でも圧力降下は等しくなっている。すなわち、流量を均一化するという問題を、すべての流動経路で圧力降下を等しくする問題に置き換えることができる。以下では流量が均一であった場合の圧力降下を計算して、分配流路に対する条件式を導出する。圧力降下を計算するために、流動経路と流量分布を図5に示すように仮定する。

分配溝流量を $Q(x(\theta))$ 、流出口の各 θ 位置での出口流量は一定であるので q とする。ここで、分配溝流量 $Q(x(\theta))$ と出口流量は質量保存則から以下の関係にある。

$$Q(x(\theta)) = qx(\theta) \quad (2)$$

さらに、出口流量 q は全流量 Q_{total} として次式で与える。

$$q = \frac{Q_{total}}{2\pi R} \quad (3)$$

ここで、 R は流出口の円筒の半径である。

流量と流路形状が明らかになったので任意の出口位置 θ を選び、それに至る経路について圧力降下を計算する。流出口の圧力降下 $\Delta P(\theta)$ は流動経路に沿った分配溝の圧力降下 $\Delta P_d(\theta)$ と三角エリアの圧力降下 $\Delta P_t(\theta)$ の合計で次式となる。

$$\Delta P(\theta) = \Delta P_d(\theta) + \Delta P_t(\theta) \quad (4)$$

分配溝の圧力降下 $\Delta P_d(\theta)$ は非ニュートン流体を考慮して次式で近似する⁷⁾。

$$\Delta P_d(\theta) = \int_0^{x(\theta)} \left[\left(\frac{3n+1}{2n} \right)^n m \frac{C(x')^{n+1}}{S(x')^{2n+1}} Q(x')^n \right] dx' \quad (5)$$

ここで、 $S(x')$ と $C(x')$ はそれぞれ x 位置での分配溝の断面積と周長さ (図 5)、 m と n はそれぞれ式 (1) の粘性係数と粘度指数である。さらに、三角エリアの圧力降下 $\Delta P_t(\theta)$ は三角エリアの深さ h 、幅を ΔW としたスリット形状として以下で与える。

$$\Delta P_t(\theta) = \int_0^{L(\theta)} 2^{n+1} \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{m}{h^{2n+1}} \left(\frac{Q_{total}}{\Delta W(z)} \right)^n dz \quad (6)$$

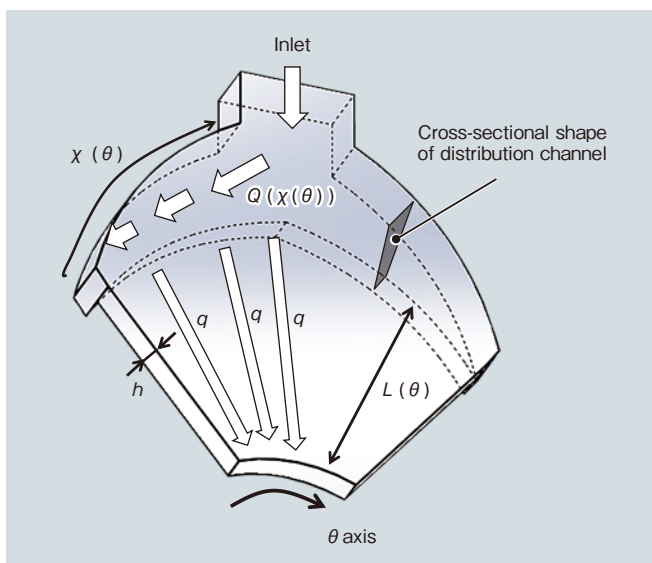


図 5 流動経路と流量分布
Fig. 5 Flow channel and flow distribution

ここで、積分は三角エリアの流動経路に沿って行い、 $\Delta W(z)$ はその経路上のスリット幅であり、流路が曲面上に構成されているのでその変化を考慮した。

流量が均一になるためには、式 (4) の圧力降下が任意の θ で等しい、故に式 (4) の θ 微分がゼロとなり、次の条件を得る。

$$\frac{d(\Delta P(\theta))}{d\theta} = 0 \quad (7)$$

各層材料の粘度がわかれば、式 (7) を満たすように式 (5)、(6) の分配溝寸法や三角エリア長さを決定することができる。

4. 流動可視化実験方法と結果

4.1 流動可視化実験方法

前項の式 (7) の妥当性確認のために、流動可視化実験を行った。図 6 に実験系を示す。φ 20 mm 押出機にアクリル製の透明クロスヘッドを取り付け、高粘度のシリコンオイルにプラスチック粉末を添加して、その流動状態をビデオカメラで撮影した。プラスチック粒子が出口付近の距離 d のストレート部を通過する時間を動画から計測することで各位置での流量 (平均流速) を求める。式 (7) を満たす最適設計の場合、故意に三角エリアの深さ h を最適値 h_{opt} から変化させた場合の実験を行った。

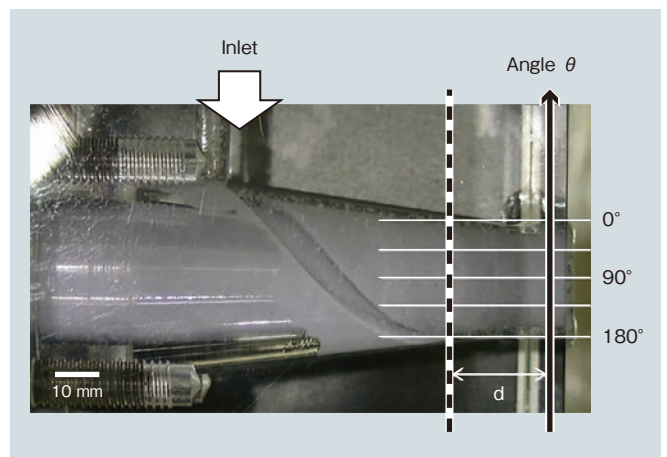


図 6 流動可視化実験
Fig. 6 Flow visualization experiment

4.2 流動可視化実験結果

図 7 に横軸を流出口の角度とし、縦軸に流速をその平均値で規格化した値でプロットした結果を示す。最適設計の h_{opt} では流速の変動率は約 5% であり、中間層厚さの目標 $120 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ に対して十分な精度で成形できる

目途が立った。また、最適設計 h_{opt} から故意に変化させた場合には、流速の変動率が大きくなっており、式(7)の妥当性を確認できた。

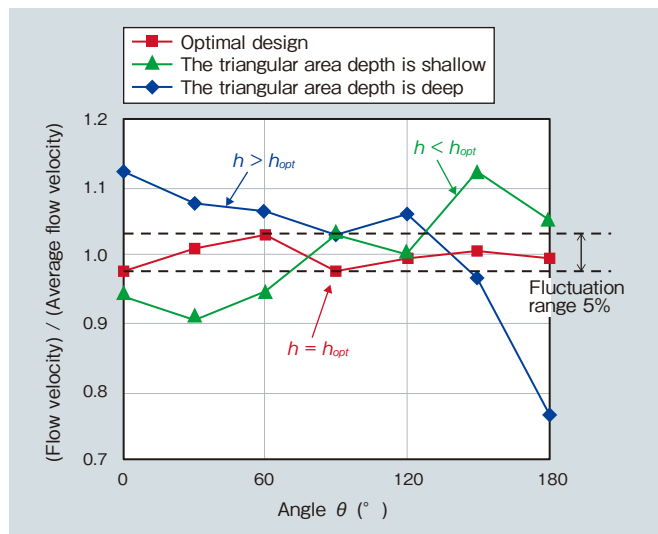


図7 流動可視化実験の流速分布
Fig. 7 Flow velocity distribution in flow visualization experiments

5. 細径3層構造電線試作

5.1 3層クロスヘッド試作

確立した分配流路の設計理論により、細径3層被覆電線のクロスヘッドを製作した。実機での制約条件(分配流路の大きさ、成形温度、押出量、圧力上限など)を考慮しながら、式(7)を満たすように内・中間・外層すべての分配流路を設計、製作した。その試作クロスヘッドで製作した細径3層被覆電線の断面を図8に示す。各層の界面は滑らかに成形されていることが確認できる。

内層は撚線凹凸で層厚さの評価が難しいので、今回は中間層と外層の周方向に関する厚さ分布を計測した。その結果を図9に示す。

計測の結果、中間層の厚さばらつきは標準偏差で $\pm 7 \mu\text{m}$ となり目標を満たすことができた。

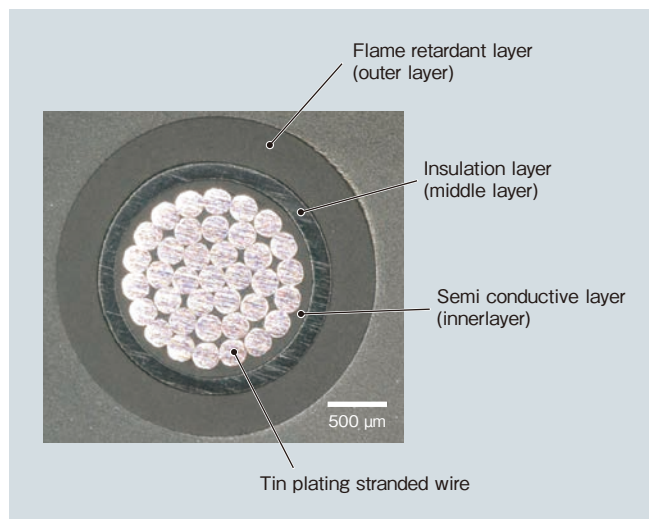


図8 細径3層被覆電線の断面
Fig. 8 Cross section of the three-layer coated wire

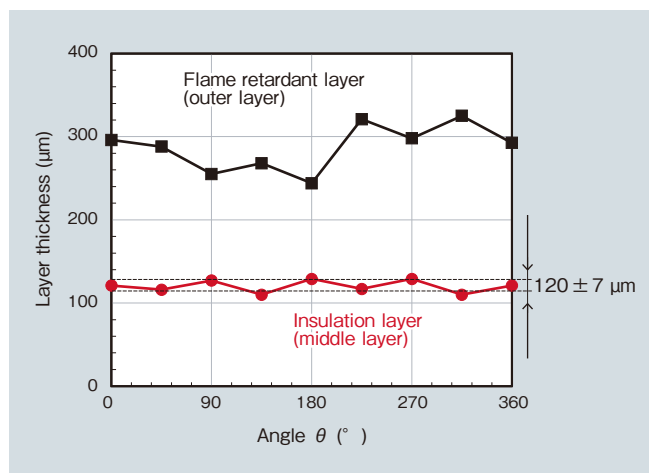


図9 外層と中間層の厚さ分布
Fig. 9 Layer thickness fluctuation in outer and middle layer

5.2 細径3層被覆電線の代表特性の評価

試作クロスヘッドで製作した細径3層被覆電線に電子線照射して、代表的な特性を評価した。表1にその結果を示す。いずれの項目も仕様を満たし、細径・軽量化を図りながら電気絶縁性と難燃性を両立することができた。

表1 細径3層被覆電線の特性結果
Table 1 Properties of small-diameter three-layer coating cable

Item	Test condition	Requirement *		Result
Tensile properties	20°C	Tensile strength (MPa)	≥ 10	13.3
		Elongation at break (%)	≥ 150	170
Electrical insulation (D.C. stability)	1,500 V, 85°C water including 3% salt	Does not break down	≥ 10 days	Pass
Flame retardance (flame propagation)	20°C	Burning distance (cm)	≤ 150	98

* EN 50264

6. 結言

薄膜多層被覆用クロスヘッド内の分配流路の設計方法を確立し、成形が困難であった導体断面積 1 mm^2 (1SQ) の鉄道車両向け細径3層被覆電線を開発した。

- (1) 層厚さの均一化を目的とし、クロスヘッド内樹脂分配流路の周方向圧力降下に着目して、流体力学に基づいた曲面を考慮した流路設計方程式を導出した。
- (2) アクリル製透明クロスヘッドにプラスチック粒子を添加した高粘度シリコンオイルを流し、その流動挙動を観察する流動可視化実験手法を開発した。プラスチック粒子の通過時間を計測することで流速を計測し、分配流路の設計妥当性を検証できた。
- (3) 3層同時押出により細径3層被覆電線を製造し、電気絶縁層の厚さ目標 $120 \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$ を満足することができた。
- (4) 試作した細径3層被覆電線は現行の2層電線と同等の電気絶縁性、難燃性を確保しながら、外径を 2.63 mm から 2.25 mm と細径化することで、断面積で約30%、重量で約16%低減できた。

引用文献

- 1) 西谷, 近藤, 高重, 片岡, 野口: 鉄道総研報告書, vol.32 (2018), No.8, p.23.
- 2) 日立金属技報, vol.30 (2014)
- 3) 工藤: 電線・電線の技術的変遷, 電気設備学会誌, vol.29 (2009), No.6, p.413.
- 4) T. Inomoto, T. Kajiwara: Journal of the Society of Rheology, Japan, vol.37 (2009), No.2, p.91.
- 5) N. Lebaal, S. Puissant, F.M. Schmidt, D. Schläfli: Polymer Engineering and Science, vol.52 (2012), No.12, p.2675.
- 6) Z. Tadmor, C. Gogos, Principles of polymer processing 2nd ed., Wiley (2006), p.706.
- 7) 伊藤: 押出成形用ダイの設計, 工業調査会 (1968) p.125.



加賀 雅文

Masafumi Kaga
日立金属株式会社
機能部材事業本部
機能部材研究所
理学博士



藤本 憲一朗

Kenichiro Fujimoto
日立金属株式会社
機能部材事業本部
機能部材研究所



梶原 稔尚

Toshihisa Kajiwara
九州大学大学院
工学研究院
化学工学部門
工学博士