

# ●高熱伝導性粉体塗料アロンパウダー® EL-3000 シリーズ

Thermal Conductive Insulating Powder Paint ARONPOWDER® EL-3000 Series

丹羽 真  
Makoto Niwa

Key Word : Powder Paint, Coatings, Insulation, Thermal Conductive, Thermal Management

## 1 緒言

近年、EV（電気自動車）・HV（ハイブリッド車）など自動車の電動化が進み、その高品質化への取組みが旺盛である。これら次世代自動車に搭載されるモーター・バッテリー・インバーターなどの電装部品は高出力化が求められ、それに伴う熱マネジメントがしばしば問題となる。特にエンジンなど駆動系周辺の高温環境においては、電装部品の作動熱を効率良く伝導・放出して、部品温度の上昇を抑えることが必要になってくる。

そういった中で、東亜合成グループでは、熱伝導性を有する新規材料の開発に取り組んでいる<sup>1)</sup>。当社のエポキシ系粉体塗料アロンパウダー-ELシリーズ（表1）は、その優れた電気特性から家電製品や自動車部品などの絶縁処理に使用されているが、塗膜の熱伝導率は0.4~0.5 W/m・Kであり、熱伝導性に優れた材料とは言い難い。

	EL-1000/1000S	EL-2000
塗装方式	流動浸漬法/スプレー	流動浸漬法
絶縁処理方法	<p>導体 粉体塗装 エッジカバー 外部に対して絶縁</p>	<p>導体 粉体塗装 &amp; 含浸 導体同士を相互に絶縁</p>
特徴	高エッジカバー性	基材含浸性
熱伝導率 W/m・K	0.52	0.43

今回我々は、高熱伝導性フィラーを選定して塗料設計を最適化することで、従来品の約3倍の熱伝導性を有するアロンパウダー-EL-3000シリーズを完成した。本稿では、このアロンパウダー-EL-3000シリーズの設計コンセプトと特徴、用途展開について記す。

## 2 設計コンセプト

### 2.1 熱伝導性フィラーの種類

熱硬化性粉体塗料は、有機成分と無機成分からなるハイブリッド材料である。今回の開発においては、有機成分として電気特性に優れたエポキシ樹脂を用い、無機成分であるフィラー（充填剤）として表2に示す高熱伝導性材料の中から絶縁性の高いものを選定した。

表2 高熱伝導性フィラー

材料	化学式	熱伝導率 W/m・K	電気特性
単層グラフェン	C	3000	導体
銅	Cu	375	
アルミニウム	Al	228	半導体 絶縁体
炭化ケイ素	SiC	270	
窒化アルミニウム	AlN	200	
窒化ホウ素	BN	60	
マグネシア	MgO	40	
アルミナ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30	
結晶性シリカ	SiO <sub>2</sub>	10	
水酸化マグネシウム	Mg(OH) <sub>2</sub>	8	
炭酸カルシウム	CaCO <sub>3</sub>	0.5~1	

### 2.2 フィラー充填率

一般に複合材料中のフィラー充填率と熱伝導率には、以下のBruggemanの式が成り立つ<sup>2)</sup>。

$$\phi = (\lambda_c - \lambda_f) / (\lambda_m - \lambda_f) \times (\lambda_m / \lambda_c)^{1/3}$$

ここで、 $\phi$ はフィラーの体積充填率、 $\lambda_f$ はフィラーの熱伝導率、 $\lambda_m$ は樹脂の熱伝導率、 $\lambda_c$ は塗料組成物の熱伝導率を示す。エポキシ樹脂（ $\lambda_m = 0.2$  W/m・K）をマトリックスとした場合の熱伝導性フィラーの体積充填率と熱伝導率の関係を図1に示す。一般的な粉体塗料のフィラー充填率は20~30 vol%程度であり、塗膜の熱伝導率を上げるにはこれを高めることが重要である。

東亜合成株式会社 R&D総合センター 製品研究所  
New Products Research Laboratory, General Center of R&D, TOAGOSEI CO., LTD.

### 3 高熱伝導性粉体塗料の特徴

#### 3.1 厚膜用アロンパウダーEL-3000

アロンパウダーEL-3000の塗料特性を表3に示す。本製品は、膜厚>200 $\mu\text{m}$ の厚膜仕様をターゲットとして設計されており、流動浸漬法（粉体塗料特有の乾式ディップ方式）により塗装して200 $^{\circ}\text{C}$ ×10分程度焼付けることで、耐熱性・絶縁性に優れた堅牢な塗膜が得られる。その熱伝導率1.5 W/m $\cdot$ Kは、従来のエポキシ系粉体塗料の約3倍であり、業界最高水準の熱伝導性を有している。

表3 EL-3000 塗料特性

		EL-3000性能
平均粒径	D50, $\mu\text{m}$	70
塗装方式		流動浸漬法
塗装膜厚	$\mu\text{m}$	200~500
平滑性	目視	良好
光沢	60度反射	20%
熱伝導率	W/m $\cdot$ K	1.5
耐熱クラス	絶縁区分	F種相当(155 $^{\circ}\text{C}$ )
表面硬度	鉛筆硬度	8H
耐衝撃性	デュボン式, g/cm	1000/50
体積固有抵抗	$\Omega\text{cm}$	$2.3 \times 10^{15}$
絶縁破壊電圧	kV/mm	67
ゲルタイム	200 $^{\circ}\text{C}$ , sec	50
水平フロー	160 $^{\circ}\text{C}$ ×10min	2.5%

塗装条件：鋼板上、160 $^{\circ}\text{C}$ 予熱、200 $^{\circ}\text{C}$ ×10min焼付

100 $^{\circ}\text{C}$ の物体を3分間接触させた塗装面のサーモグラフ画像を図3に示す。EL-3000は、従来のエポキシ系粉体塗料に比べ、より広く熱が伝播している様子が見られる。

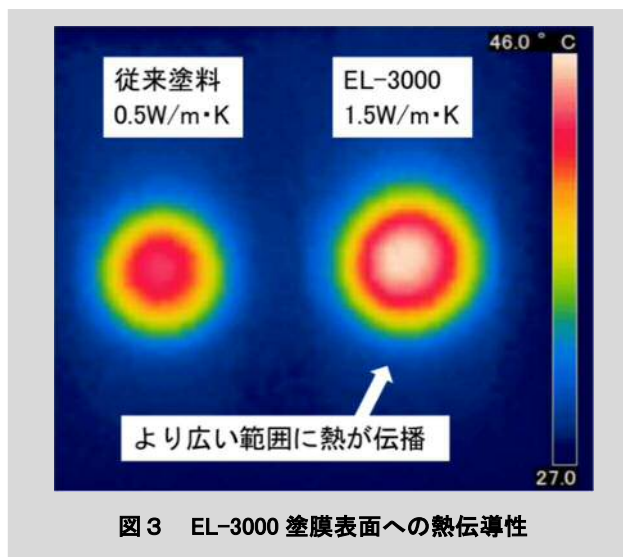


図3 EL-3000 塗膜表面への熱伝導性

外面に粉体塗装を施した金属容器に入れた熱湯の温度の経時変化を図4に示す。投入後3分経過時点で、従来のエポキシ系粉体塗料においては内温が約30 $^{\circ}\text{C}$ 低下するのに比べて、EL-3000では約40 $^{\circ}\text{C}$ 低下し、より速く放熱している。

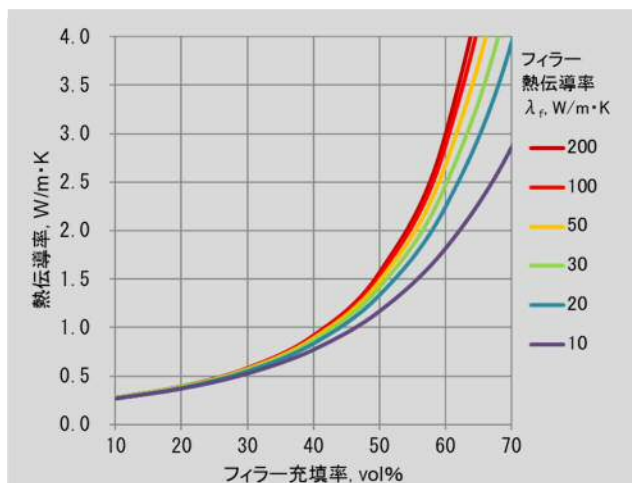


図1 フィラー充填率と熱伝導性の関係  
(樹脂熱伝導率 $\lambda_m=0.2\text{ W/m}\cdot\text{K}$ の場合)

フィラーとして単一粒径の真球粒子を考えた場合、六方最密構造が最高の充填率(≒74 vol%)である。しかし、粒径の異なる粒子同士を組み合わせることで74 vol%を超える充填率を達成できる。この場合、フィラーの半径比 a によって、次のような充填構造をとる。

a<0.66…特殊な相互配置で充填率>74 vol%可能

a<0.41…大粒子の充填構造を保持して小粒子が配置後者を多成分系に拡張した充填モデルを図2に示す<sup>3)</sup>。

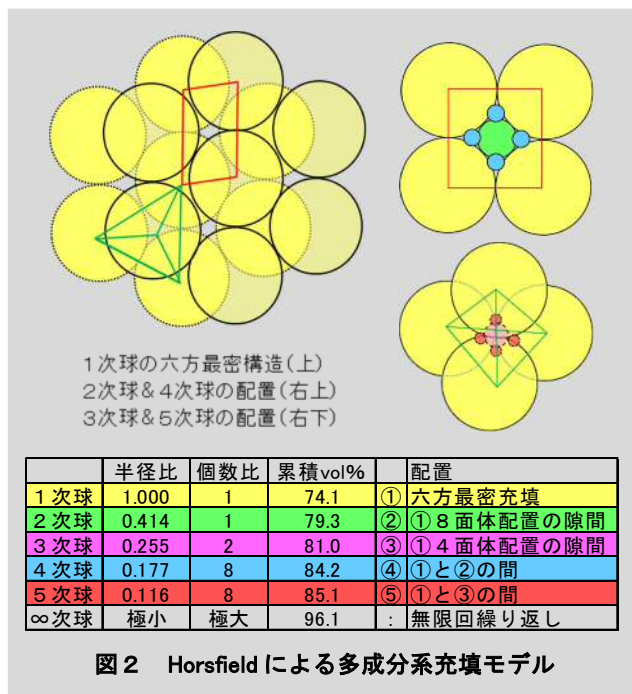


図2 Horsfieldによる多成分系充填モデル

常温固体の粉体塗料においては、マトリックス樹脂が溶融状態においてかなり高粘度であるため、前述のような高充填率は望めない。しかし、これらの考え方を元に複数の粒径のフィラーを最適化した結果、塗料として必要なフロー性を確保しつつフィラーの充填率を高めることに成功し、高熱伝導性粉体塗料EL-3000を完成した。

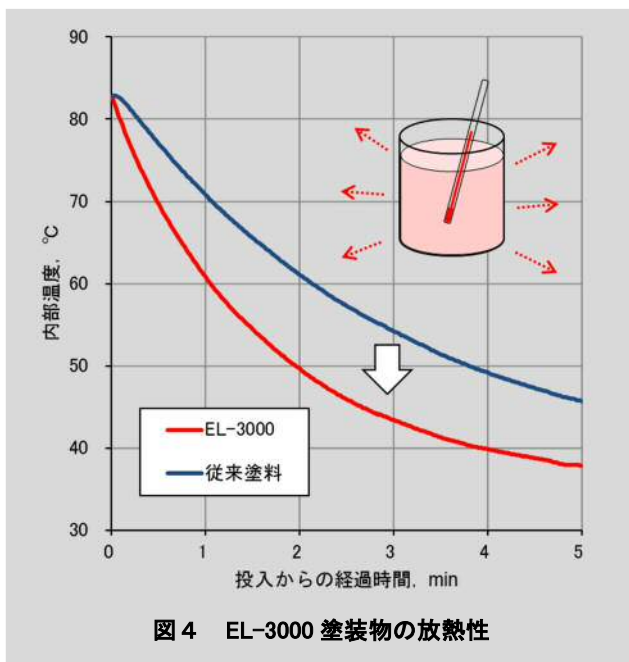


図4 EL-3000 塗装物の放熱性

### 3.2 薄膜用アロンパウダーEL-3000S

車載電装部品の使用電圧は、最大でも数百Vであり、エポキシ系材料であれば膜厚 100 μm 程度の薄膜で絶縁することが可能であるが、同時に塗装仕上りについてはシビアな品質が求められる。わずかな塗膜内のポイド（空隙）の発生により電流がリークする危険性が増し、高い安全性を要求される車載用途に十分な絶縁信頼性は得られない。

今回我々は、塗膜内のフィラーの分散状態に着目して検討を続け、フィラーの再選定などの最適化を行なった。その結果、図5に示すように塗膜内に発生するポイドを大きく抑制することに成功した。

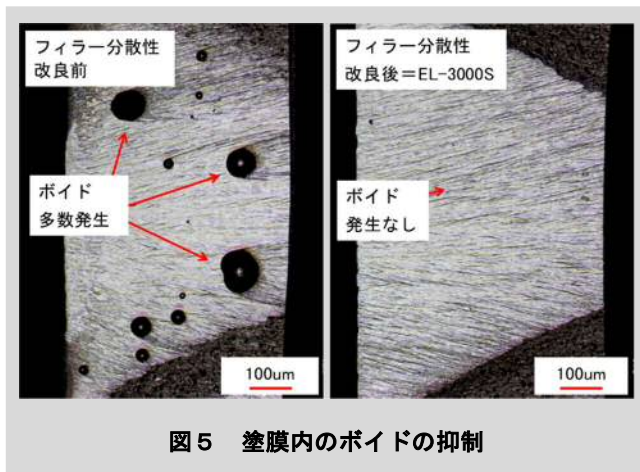


図5 塗膜内のポイドの抑制

さらに、静電スプレー塗装に適する粒子設計、微細な基材形状に追従する高いフロー性、連続生産時の短いタクトタイムに対応する速硬化性などを盛り込み、表4に示すようなアロンパウダーEL-3000Sを完成した。熱伝導性は 1.2 W/m・K と EL-3000 に比べてやや低下したものの、薄膜で絶縁信頼性の高い塗膜が得られるのが特徴である。

表4 EL-3000S 塗料特性

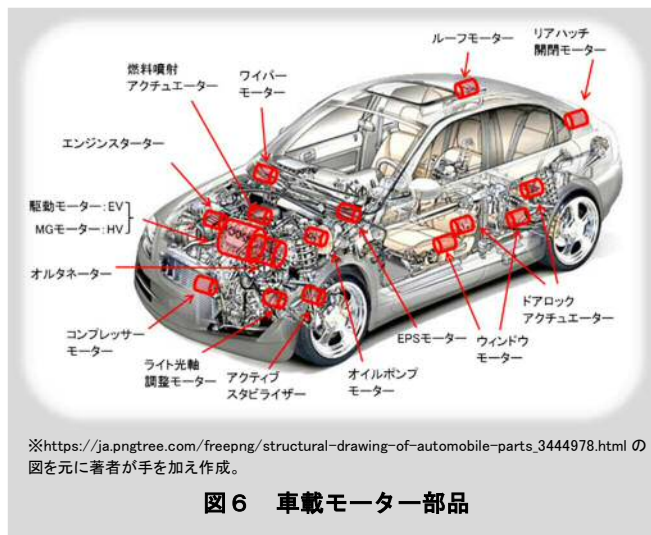
		EL-3000S性能
平均粒径	D50, μm	30
塗装方式		トリボ帯電ガン
塗装膜厚	μm	50~150
基材付き回り性	目視	良好
平滑性	目視	良好
光沢	60度反射	50%
熱伝導率	W/m・K	1.2
耐熱クラス	絶縁区分	F種相当 (155°C)
表面硬度	鉛筆硬度	8H
耐衝撃性	デュポン式, g/cm	500/20
体積固有抵抗	Ω cm	1.6 × 10 <sup>15</sup>
絶縁破壊電圧	kV/mm	52
ゲルタイム	200°C, sec	20
水平フロー	160°C × 10min	7.5%

塗装条件：鋼板上、200°C × 10min焼付

## 4 用途展開

### 4.1 車載モーター

代表的な車載電装部品であるモーター部品の例を図6に示す。本質的に燃料が不要なEVにおいて、燃料噴射アクチュエーターなどが一部省略されるものの、ライト光軸やブレーキ、操舵系などセンサーと連動して自動調整するモジュールが増加するため、市場全体として見ると車載モーターの生産台数は将来伸びる傾向にある。



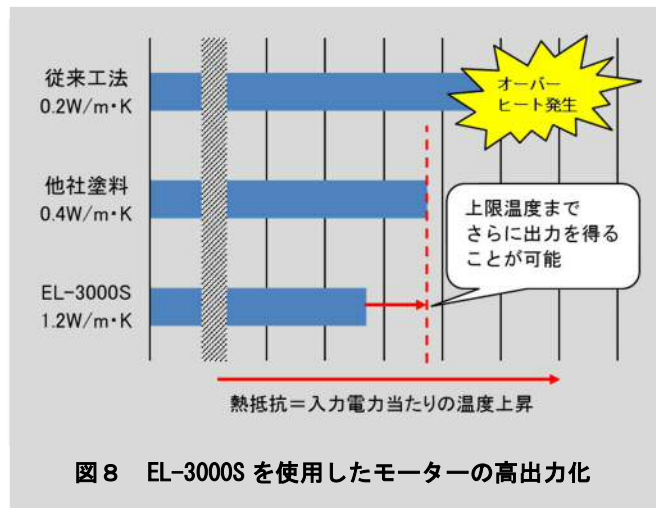
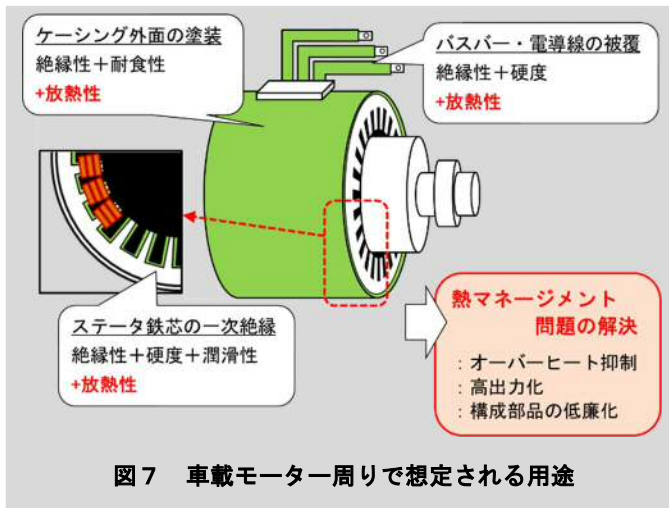
※[https://ja.pngtree.com/freepng/structural-drawing-of-automobile-parts\\_3444978.html](https://ja.pngtree.com/freepng/structural-drawing-of-automobile-parts_3444978.html) の図を元に著者が手を加え作成。

図6 車載モーター部品

これらのモーター部品は、いずれもサイズあたりの出力を上げるための改良が絶え間なく続けられている。また、駆動系周りの高温環境で使用される場合も多いため、高熱伝導性を満たす絶縁方法が要求されている。

### 4.2 高熱伝導性粉体塗料の適用

高熱伝導性粉体塗料を車載モーターへ適用した場合に期待されるメリットについて図7に示す。これらは、いずれも絶縁性・防食性・硬度などエポキシ系粉体塗料の基本特性に対して放熱性を付加するものである。



成形樹脂・絶縁紙など他材料による絶縁方式と比較した場合の優位性について表5に示す。粉体塗料による絶縁処理は薄膜を基材に密着させることができるため、他の絶縁方式と比較して構造的に放熱性能は高くなる。また、多様な基材への適応性・生産速度などの点で利点が多く、加工性に優れた工法だと言える。

さらにフィラー分散性・粒子設計などの最適化を加えた薄膜仕様向けアロンパウダーEL-3000Sにより、次世代車載モーターにおける熱マネージメント問題を解決した。今後、より広い用途の絶縁処理に対して本技術を応用した提案を行ない、さらなる電装部品の高出力化・低消費電力化などに貢献できるよう開発を進める所存である。

表5 他材料による絶縁方式との比較

		粉体塗料	成形樹脂	絶縁紙
材料特性	材料・電気強度	○良好	○良好	△加水分解性
	放熱性能	○良好	×低熱伝導性+厚膜	△密着性に限界
加工性	膜厚	○薄膜~厚膜可	×厚膜のみ	○
	大型基材	○	△芯材保持が困難	○
	立体基材	○	○	×折り加工に限界
	多形状への対応	○単一設備で対応	×金型が多数必要	△個別に切出し
	生産速度	○	○	△折り加工負担大
加工信頼性	△塗装品質に依存	△大型基材は精度難	○	

次世代車載モーターの開発にアロンパウダーEL-3000Sを適用した例を図8に示す。成形樹脂を用いる従来工法ではモーターの設計出力と運転時の温度上昇のバランスが取れないが、EL-3000Sを使うことにより連続運転時のオーバーヒートを回避することに成功した。また、他社の粉体塗料を使用した場合に比べてモーター運転時の温度上昇を抑えられるため、上限温度までの最大出力運転を行なった際に最も高い出力を得られることが確認された。

## 5 結言

今回、絶縁材料として実績のある既存銘柄をベースとして熱伝導性フィラーを高充填することで業界最高水準の熱伝導性を有する粉体塗料アロンパウダーEL-3000を開発した。

## 引用文献

- 1) 伊達憲昭, 山田成志, 東亜合成研究年報, **16**, 51 (2013).
- 2) D. A. G. Bruggeman, *Annalen der Physik*, **24**, 636 (1935).
- 3) 粉体工学会編, “粉体工学の基礎”, 日刊工業新聞社, (1992) P. 145.