

## 高耐電圧電線用絶縁被覆材の開発

安部ゆかり\*・柳明洋\*・谷口秀樹\*・二宮信治\*・金澤誠司\*\*  
本田宜彦\*\*\*・梅原英嗣\*\*\*・利光淳\*\*\*・相原茂\*\*\*・柴北俊英\*\*\*  
\*工業化学担当・\*\*大分大学・\*\*\*西日本電線株式会社

### Development of the Insulating Material for High Inverter Surge Resistant Enameled Wire

Yukari ABE \*・Akihiro YANAGI \*・Hideki TANIGUCHI\*・Shinji NINOMIYA\*  
Seiji KANAZAWA\*\*・Yoshihiko HONDA\*\*\*・Eiji UMEHARA\*\*\*  
Jun TOSHIMITSU\*\*\*・Shigeru AIHARA\*\*\*・Toshihide SHIBAKITA\*\*\*

\*Industrial Chemistry Group・\*\*OITA UNIVERSITY・\*\*\*NISHI NIPPON ELECTRIC WIRE & CABLE CO., LTD.

#### 要 旨

平成 21 年度から、大分県産業科学技術センターと西日本電線株式会社及び大分大学は、「次世代電磁力応用技術開発事業(大分県地域結集型研究開発プログラム)」において、「高出力電磁力応用機器用高耐圧電線の開発」の共同研究を実施してきた。次世代電磁力応用機器のモーターは、高効率・小型高出力化が求められている。モーターのコイルに使われる巻線(エナメル線)の絶縁被覆部分では、インバーターサージによる部分放電が起き、絶縁被覆部分が侵食・劣化し、結果としてコイルの寿命が短くなる。加えて近年の駆動電圧の高電圧化によりインバーターサージが発生しやすくなっているため、コイルはますます過酷な使用環境にある。このインバーターサージ発生時の絶縁破壊を抑制するため、高温や傷、絶縁破壊に強い被覆材への期待が高まっている。これまでに堅型炉を有するメーカーにおいてエナメル線化を行い、被覆の断面観察や耐部分放電性試験(課電寿命試験)などを行った。その結果、2.5 kV 以上の印加電圧では、先行市販品より長寿命なエナメル線を実現した。今年度は被覆のフィラー量傾斜構造を検討し、2.0 kV でも市販品を上回る長寿命なエナメル線为目标に開発を行った。その結果、市販品寿命の約 8 割まで到達することができた。

#### 1. はじめに

昨今の電力供給のひっ迫に加え、環境・エネルギー分野においては様々な問題が取り沙汰され、自動車産業のみならず、製造業を始めとする多くの産業界で省エネルギー、省資源等の意識が高まっている。多くの電気製品に使われるインバーター駆動モーターも、省エネルギー、高効率化などのニーズは非常に高い。例えば、ハイブリッドカーや電気自動車など次世代の電磁力応用機器に用いられるモーターは、高効率化と小型高出力化に伴い、コイルの巻線に用いられる電線(エナメル線)の高性能化(高耐電圧化)が急務となっている。

しかし、モーターのインバーター制御や高電圧化は、インバーターサージと呼ばれる立ち上がり時間が非常に短く、繰り返し周波数の高い急峻なパルス状の電圧が発生する。インバーターサージは、モーターのコイルエナメル線巻線間の部分放電の原因となり、結果としてエナメル線の絶縁被覆部分の侵食劣化を招き、コイルの寿命を低下させている。従って、この絶縁破壊を極力抑え、耐部分放電性に優れ、かつ、傷や高温に強い材料の開発

が切望されている。

このような状況の下、大分県産業科学技術センターは西日本電線株式会社、大分大学との共同研究で高耐電圧電線の開発を行ってきた。耐部分放電性を向上させるには、エナメル線被覆にナノフィラーを分散させることが有効な手段の一つである。調査・検討の結果、絶縁被覆用の樹脂は耐熱性の高いポリアミドイミド系、ナノフィラーは無機シリカとした。これまでにこの研究において被覆をフィラー傾斜構造とすることで、従来の単一組成被覆よりも優れた耐電圧性が発現することを、銅板に被覆材原料(ワニス)を塗布し焼き付けたモデルで確認し、特許を出願した<sup>(1)</sup>。被覆中のフィラー傾斜構造の確認については、電子顕微鏡による評価方法を確立した。樹脂溶液へのフィラーの配合は、超音波照射機とメカニカルスターラーの併用により、良分散かつ試作に対応した大量配合が可能となった。この被覆材原料(ワニス)を塗布焼き付けすることによりエナメル線化した。

このエナメル線に対して、耐部分放電性試験(課電寿命試験)を行ってきた。これまでに 2.5 kV 以上の印加電

庄において、市販エナメル線より長寿命なエナメル線を開発した。しかし 2.0 kV では、市販エナメル線の約 4 割の寿命しか得られていない。傾斜構造については、これまでは最外層に向かってフィラー濃度が高くなる構造を検討してきたが、他にも検討の余地がある。これらの傾斜構造は、無伸長時の長寿命化だけでなくエナメル線の巻線化など実用化に向けての諸物性(可とう性、伸長時長寿命化など)の向上も期待できる。今年度は目標物性の達成を目指しこれらの多様な傾斜構造について検討した。これらについて報告する。

## 2. 実験

### 2.1 試料

樹脂溶液にフィラーを分散し、絶縁被覆材原料(ワニス)とした。これを外部委託による試作で、導体径 1.0 mm の銅線に塗布し焼き付け、傾斜複数層エナメル線を作製し試料とした。樹脂とフィラーは、ポリアミドイミド系と無機シリカである。なお、今回使用したすべての試薬、材料は、市販品である。

### 2.2 装置

試料の断面作製にはイオンビームミリング装置 EM RES101(ライカマイクロシステムズ株式会社製)を使用した。走査型電子顕微鏡観察には JSM-7400F(日本電子株式会社製)を用い、外観観察にはマイクロスコプ VHX-1000(株式会社キーエンス製)を使用した。フィラーの配合には超音波細胞破碎器(有限会社大岳製作所製)とスリーワンモーター 1200G(新東科学株式会社製)を併用し、脱泡には MS 攪拌・脱泡機 SNB-550N(松尾産業株式会社製)を用いた。

### 2.3 被覆材原料(ワニス)作製方法

外部委託によるエナメル線作製には、被覆層 1 層当たり被覆材原料(ワニス)が約 1 kg 必要であった。超音波分散のみ、若しくはホモジナイザー分散のみの分散方法では、大量配合に伴う攪拌効率の低下によるフィラー凝集の可能性が懸念されたため、超音波分散とメカニカルスターラーによる攪拌を併用して樹脂溶液にフィラーを分散させた。分散後に脱泡を行った。

## 3. 結果及び評価

### 3.1 試料の断面作製及び観察

作製した試料中のフィラー分散の様子を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察するには、良好な断面を得る必要がある。従来の機械研磨では表面を滑らかに仕上げても、ナノオーダーの物質の観察には微小な傷が残り SEM 観察の

妨害となる。そこで Fig.1 に示すイオンビームミリング装置を使用した。イオンビームミリングは、アルゴンイオンのビームで試料を削っていくため、極めて平滑な断面が得られる。この装置を用いて各々の試料の断面を作製した。本研究で作製した試料は、そのままの状態では本装置の試料ホルダーに取り付け断面を得ることが難しい。そのため、光硬化性樹脂に試料を包埋したのちホルダーに取り付けることで、ミクロンオーダーの正確な位置決めとイオンビームによる照射が可能となった。さらに電流・加速電圧などの条件探索を行うことで、SEM で観察可能な滑らかな試料断面を作製できるようになった。

これら試料中フィラーの SEM 観察においては、通常使用する導電性コーティングを施した場合、観察対象物がナノオーダーであるため、フィラー形状が確認できなくなる。そこで導通を取る工夫を行い、加速電圧を大幅に下げることによって、導電性コーティングなしでフィラーを観察することが可能となった。以上の方法で被覆の傾斜構造を確認する手法を確立した。



Fig.1 イオンビームミリング装置(EM RES101)

上記の方法で得た市販エナメル線の断面を SEM で観察した。その結果を Fig.2 に示す。白い小さな点状に見えるものがナノフィラーである。被覆中に良好に分散している状態が観察できた。

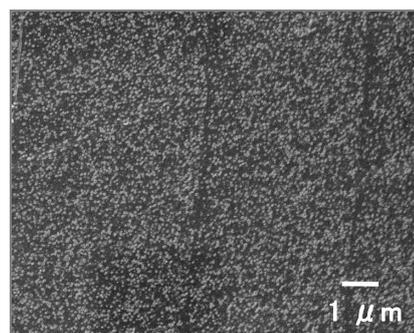


Fig.2 市販エナメル線の SEM 像

### 3.2 耐部分放電性試験(課電寿命試験)

試作したエナメル線の電気的特性を調べるため、耐部分放電性試験(課電寿命試験)を行った。IEC規格において、インバーターサージによる耐部分放電性試験の試験方法は、規格委員会にて検討は行われているが、試験装置の仕様を含めた部分で未だ規格化されていない。そこで、実機を想定した試験を行うため高電圧で繰り返し周波数の高いパルス電圧を発生できる特別仕様の試験設備を構築した。

試験は Fig.3 に示す装置で行った。モーター巻線間で発生する部分放電を模擬するため、エナメル線をツイストペアにしてパルス高電圧発生器から模擬インバーターサージ電圧(正負交互に1発ずつ発生する矩形波パルス電圧、毎秒当たりのパルス数 10 kpps, パルス幅 10  $\mu$ s)を印加し、破壊するまでの時間を測定した。

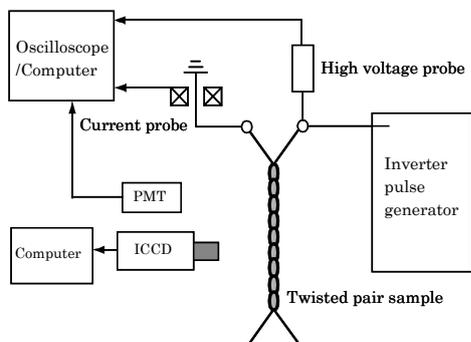


Fig.3 試験装置模式図

### 3.3 可とう性試験

エナメル線を巻線化するには応力がかかる。このような機械的ストレスを与えたときに、被覆のしなやかさが重要であり、これを表すものとして可とう性がある<sup>(2)</sup>。可とう性試験は JIS C3216-3 に準拠した試験方法で実施した。

### 3.4 エナメル線焼き付け

エナメル線は、被覆材原料(ワニス)を導体上に塗布焼き付けしたものである。一般的に、製造は被覆材原料(ワニス)の塗布と焼き付け工程を繰り返すことで行う。エナメル線の焼き付け炉には、横型炉と縦型炉がある。縦型炉は被覆の均一性に優れ、導体径が 0.6 mm を上回る太いエナメル線の製造に使用されると言われている<sup>(3)</sup>。

横型炉は熱効率の面で優れているので、横型炉における大径エナメル線作製の可能性を把握するために、横型炉を所有するエナメル線メーカーで試作した。そのエナメル線の断面写真(導体径 0.8 mm)を Fig.4 に示す。被覆の偏心率((被覆の最厚部)/(被覆の最薄部)×100(%))

は 200 % 以上であった。このように横型炉では重力の影響により導体がたるみ、安定的にダイスの中心を通過させることが困難である。よって一般的な品質基準である偏心率約 120 % のエナメル線を作製することができなかった(最小偏心率: 222 %)。以上により、縦型炉を所有するワニスメーカーに試作を依頼することにした。

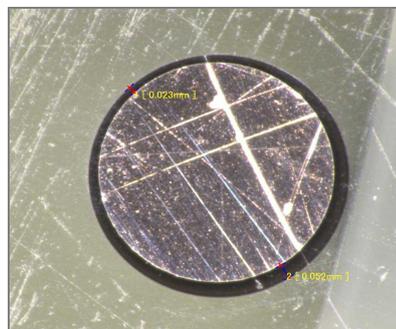


Fig.4 試作エナメル線(横型炉)の断面写真

縦型炉で試作したエナメル線の全体像を Fig.5 に示す。横型炉のとき(Fig.4)と比較すると、偏心率が明らかに改善していることがわかる。今回の試作エナメル線の偏心率は、概ね 120~130 % であった。以上より、この試作品は電気的特性試験に偏心が与える影響は小さく、良好なフィラー分散状態及び明確な傾斜構造による課電寿命時間の向上が期待される。従って、今後は縦型炉を用いてエナメル線を作製し、市販エナメル線とともに、課電寿命時間の測定やフィラー分散状態の観察、可とう性の測定を行うことにした。

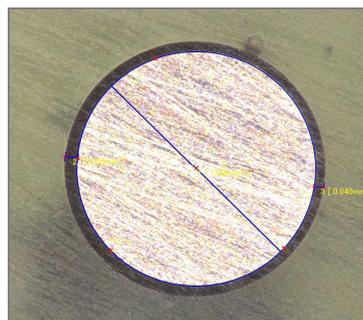


Fig.5 試作エナメル線(縦型炉)の断面写真

### 3.5 試作エナメル線

昨年度までに、2.5 kV 以上の印加電圧において、市販エナメル線より長寿命なエナメル線を開発した。しかし 2.0 kV では、市販エナメル線の約 4 割の寿命にとどまっていた。そこでさらなる長寿命化を目指し、被覆のフィラー傾斜構造が異なる数種類のエナメル線を作製した。作製したエナメル線と市販品の概要を Table 1 に示す。

Table 1 試作エナメル線

傾斜構造	被覆厚(μm)	偏心率(%)	課電寿命時間(時間)	可とう性
A	46.3	134	4	×
B	46.5	111	14	×
C	49.5	132	12.5	○
市販品	39.0	109	17.5	◎

※課電寿命時間の印加電圧：2 kV

※試験環境：温度 25 %，湿度約 60 %

被覆厚はほぼ同じであった。堅型炉を用いたことによって偏心率も大幅に改善し、市販エナメル線と比較可能なものが作製できた。そこで課電寿命時間の測定を 3.2 で述べた方法で行った。

傾斜構造の最適化を図ることで、2 kV の印加電圧でも市販エナメル線寿命時間(17.5 時間)の約 8 割に到達するもの(傾斜構造 B：14 時間)が作製できた。しかし、可とう性は市販品より劣っていた。次に傾斜構造 C を検討した結果、可とう性は向上したが寿命時間は B より短くなった。今後傾斜構造のより詳細な最適化や、フィラー量の調製によって、市販エナメル線を上回るものを作製できることが期待できる。

今回これらの試験を通して、課電寿命時間の試験では、試験環境条件のうち湿度の影響が大きいことが確認された。高湿度環境下では低湿度環境下と比べて、寿命時間が短くなる傾向が見られた。原因はまだ解明できていないが、規格委員会でも試験条件が定まっていないため、一定の試験条件で試験を行うなどの注意が必要である。

エナメル線を巻線化する際に重要となる可とう性についても、試作を重ねることで向上した。これは分散方法や、傾斜構造とフィラー量などの最適化によるものである。可とう性が劣る A, B の被覆について亀裂部分をマイクロスコブで観察すると、ほとんどの箇所 Fig. 6 に見られるようなフィラーの凝集物が確認できた。よって、凝集が可とう性を悪くしている一因と考えられる。

凝集が起こる原因はいくつか考えられるが、大きな原因としては、外部委託による試作のため被覆材原料配合から試作までに本来不要な時間を要し、その間にフィラーの凝集・沈降が発生しやすくなることである。塗布焼き付け直前に、再度超音波照射を行えばある程度回避できるが、現状困難である。さらに製造工程を把握することができないため、焼き付け条件などを最適化できない。これらは、製造設備を構築すれば回避可能であり、より可とう性の優れたエナメル線を作製できると考えられる。

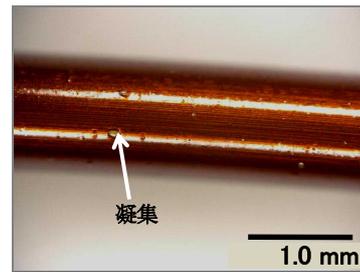


Fig. 6 試作エナメル線の概観

#### 4. まとめ

高耐電圧エナメル線を実現するために、エナメル線被覆用樹脂とナノフィラーを検討した。試作用大量配合方法、フィラー分散状態の観察法を確立した。

従来品と異なり被覆を傾斜構造にすることで、耐電圧性が向上することを見出した。

堅型炉を使用することで、偏心率の小さい複数層傾斜被覆エナメル線が作製できた。

被覆構造の最適化を行うことで、印加電圧 2 kV でも市販エナメル線の約 8 割の課電寿命時間を有するエナメル線を作製できた。

分散方法や傾斜構造とフィラー量などの最適化により可とう性が向上した。

#### 追記

本研究は、「次世代電磁応用技術開発事業」により実施しました。

#### 謝辞

本研究は、独立行政法人 科学技術振興機構 (JST)、大分県地域結集型研究開発プログラムの支援により実施しました。関係各位のご協力に心より御礼申し上げます。

#### 参考文献

- (1) 柴北俊英, 竹明寿雄, 梅原英嗣, 金澤誠司, 二宮信治, 谷口秀樹, 安部ゆかり: 絶縁電線 特願 2010-144797, 2010.
- (2) 電気学会 マグネットワイヤ専門委員会: 合成樹脂エナメル線, 1962, P. 17. コロナ社.
- (3) 日立電線株式会社: 電線・ケーブルハンドブック, 1995, P. 50. 山海堂.