

耐加工性に優れた電線の開発

Development of Magnet Wires Having Excellent Windability

小比賀 亮介 *

Ryousuke Obika

立松 義伯 *

Yoshinori Tatematsu

目崎 正和 *

Masakazu Mesaki

東浦 厚 *

Atsushi Higashiura

概 要 近年、家庭電化製品や自動車電装品に使用されるモーターやトランスなどは、高性能化やコストダウンが以前にもまして重要となっている。このような製品を製造しているメーカーでは、巻線加工工程の高速化と共に自動化の改善が積極的に行われている。更に、製品の高効率化のために高占積率化（機器の全体体積に占める巻線の体積の割合）も進んでいる。したがって巻線に加えられる加工負荷（ダメージ）は以前にも増して厳しくなっており、その結果、巻線皮膜が損傷する原因となっている。従来はこのような損傷を防ぐために、電線表面へのワックス塗布、自己潤滑化などの表面潤滑性を有する電線の開発が行われてきた。しかし、特に日本においてますます厳しくなる電線加工に対しての要求（例えば、占積率を向上させるために皮膜厚さの縮小が求められる）に対して、従来の手法はこれらの要求を満足するのに十分ではない。我々はこれらの要求に応えるべく、従来の皮膜の自己潤滑化とは異なった観点から、導体と皮膜間の密着性を向上させた電線を開発した。この密着性の改善により、電線の外的要因における損傷に対する電線皮膜の耐加工性が大きく向上した。本稿では、この電線の特性及びその効果について述べる。

1. はじめに

近年、電気機器の製造においては省力化や合理化が進み、モーターやトランスなどのコイルの巻線加工工程においても、自動化や高速化が盛んに行われている。しかしながら、自動巻線機を使用した場合、加工される電線に強い張力が加わりながら屈曲、摩擦等をうけて巻線されるため、電線の絶縁皮膜に損傷を受ける可能性が高くなると共に、これにより得られるコイル自体の電気的信頼性が低下してしまうといった問題がある。

また、コイルを成型する場合、占積率を可能な限り大きくすることが望ましく、このことは得られる機器全体の経済性及び作業性などにおいて極めて有効である。コイルの占積率を小さくするには、電線に張力を加えて緊密にコイル巻きを行うことが必要である。しかし、モーターの固定子スロットの中により多くの電線を強引に詰め込むような場合、結果として巻線工程で絶縁皮膜に損傷を生じる危険性がある。その結果、絶縁皮膜に損傷が生じると、レアー不良やアース不良などが発生するという問題がある。したがって、コイルに使用される電線に対しては、高度な巻線加工性が要求されている。

巻線加工性は、主に電線表面の潤滑性及び耐摩耗性が大きく関与していると考えられており、従来から、ワックスやオイルなどを巻線表面に塗布する方法やポリオレフィンを添加した塗料を焼付けオーバーコートする方法などにより表面潤滑性を付与する方法が検討されてきている。

しかしながら、このような手法だけでは、高速化、自動化が

ますます進んでいる現状では巻線加工に対する対応としては十分とはいえない。

今回、我々はこれらの要求に応えるために、従来以上に巻線加工性の優れた電線の開発を行った。本稿では、導体と絶縁皮膜間の密着性を従来以上に向上させた電線の特性及びその効果について述べる。

2. 開発のコンセプト（巻線加工性の改善手法）

電線の巻線加工性を向上させるのには3つの手法がある。図1にその概略を示した。

まず1つ目は、絶縁皮膜の強度向上を図ることであり、それにより摩擦等の外的要因に対して、絶縁皮膜が強度的に勝ることから傷が付きにくくなる。例えば、熱可塑性樹脂¹⁾を添加

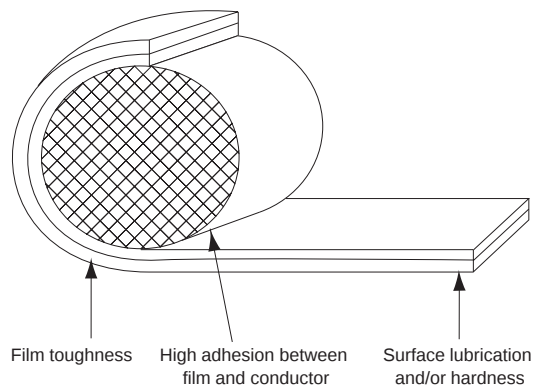


図1 耐加工性改善手法の概念図
Concept of windability improving techniques

* 平塚研究所高分子研究室

したアミドイミド樹脂をオーバーコートした電線がそれにあた

る。
つぎに2つ目として絶縁皮膜の表面状態の改質が挙げられる。例えば、潤滑性を絶縁皮膜の表面に付与した場合には、その潤滑の効果によって、絶縁皮膜の損傷を防止することが出来る。潤滑性向上の手法としては、ワックスやオイルなどを塗布する方法、更にポリオレフィンを添加した樹脂をオーバーコートする自己潤滑化手法がある。特に後者は、すべり性、耐摩耗特性が良好であり、高速巻線や自動巻線に対応可能である。

最後に3つ目として今回我々が取り組んだ手法であるが、絶縁皮膜と導体の密着性向上を図ることである。この手法は皮膜に加えられる外的要因に対して導体から絶縁皮膜が容易に剥離することを防ぎ、結果として巻線加工性を向上させるものである。ここで特にこの3つ目の手法について更に詳細な説明を加えると、導体と絶縁皮膜間の密着性を向上させる手法として導体表面処理によるものと樹脂改質によるものがある。まず前者の導体表面処理によるものとしては、例えば導体表面にイミダゾールなどを塗布する処理等を行うことが以前から知られている。この手法は、樹脂の改質を行う必要がないという利点があるが、一方で、この方法は製造工程が増え、また、長手方向に対して正確に塗布し、それを管理することが難しいという問題点が発生する。

また後者の樹脂改質によるものであるが、絶縁皮膜と導体との密着性は、ポリエステル樹脂>エステルイミド樹脂>アミドイミド樹脂のごとく絶縁皮膜材質による差がある。この差は、樹脂中の、例えば、-OH基などの極性の高い末端基の存在量に起因していると考えられる。したがって、導体と絶縁皮膜との密着性を高めるためには、樹脂中に導体との相互作用の高い極性基を導入することが必要である。しかし、密着性が向上する反面、樹脂特性が変わってしまう懸念も発生する。

既報²⁾において、我々は、THEIC (Tris-hydroxyethyl Isocyanurate) 変性H種ポリエステル(以下HPE)を使用したポリアミドイミド(以下AI)/HPE電線を紹介した。この電線

は、エステルイミド樹脂以上に、導体と絶縁皮膜間の密着性が高められている。我々は、樹脂改質を行うことにより、更に導体と絶縁皮膜間の密着性を向上させることに成功した。

これらの巻線加工性の改善手法を組み合わせることによって、従来から検討されていた電線、すなわち単純に表面潤滑性を向上させた電線以上の巻線加工性を得られた。

3. 開発電線の特性

今回評価を行った電線は3タイプの電線であり、その電線の絶縁層の構成を表1に示す。またそれらの電線の一般特性を表2に示す。いずれの電線も一般特性としてはほぼ同等であることが分かる。

つぎに、本稿の目的である電線の巻線加工性改善について、特に密着性に焦点を絞り評価検討した結果を以下に示す。

3.1 密着性について

密着性の評価方法として幾種類かの方法がある。従来行われている方法の中で、簡便な評価試験はピール捻回剥離試験である。この方法は、まず、長手方向に1力所カッターで切込みを入れた電線の一端を固定し、500 gの荷重をかけた状態で、標間距離を150 mmとし、電線を水平に張る。そしてもう一端を円周方向に捻回させ、絶縁皮膜が剥離して、導体が露出するまでの捻回回数を測定するものである。この評価方法はある程度、密着性の強弱の尺度となりうるが、絶縁皮膜自体の柔軟性によって捻回剥離回数が変動する可能性がある。そこで、我々は、導体と絶縁皮膜間の密着力を直接評価する新しい方法を試みた。まず、電線のある圧縮率でつぶし、そのつぶした電線の長手方向に水平に2本切込みを約0.6 mmの間隔で入れる。そして、切込みをいれた絶縁皮膜の一端を導体から引き剥がし、電線に対して、90度の方向に、2 mm/minの速度で引き剥がしていく際の張力を測定した。

図2から、捻回剥離試験結果をみると、AI/EIと比較して、AI/HPE電線のほうが、さらにはN-AI/HPEのほうが絶縁皮膜が剥離して導体が露出するまでの捻回数が多い。

つぎに、上記で示した新しい密着性の評価法での結果を図3に示す。ここでの縦軸の密着力は、電線を平角状にある圧縮率でプレス加工したときの引き剥がし力であり、横軸の圧縮率とはプレス加工にて電線が圧縮加工された、すなわち電線が変位した割合を示す。このような加工圧縮後の密着力を測定した理

表1 電線の構成
Insulation film structure of magnet wire

	AI/EI	AI/HPE	N-AI/HPE
下層	エステルイミド樹脂	H種ポリエステル樹脂(従来)	H種ポリエステル樹脂(本開発)
上層	アミドイミド樹脂	アミドイミド樹脂	アミドイミド樹脂

表2 一般特性
General properties

	AI/EI	AI/HPE	N-AI/HPE
導体径 [mm]	0.85	0.85	0.85
皮膜厚 [μm]	30	30	30
B.D.V.[kV]	10.2	10.1	10.5
Cut through[]	420	420	420
NEMA ヒートショック 220 × 30 min	1D OK	1D OK	1D OK
可撓性220 × 6 hr	1D OK	1D OK	1D OK

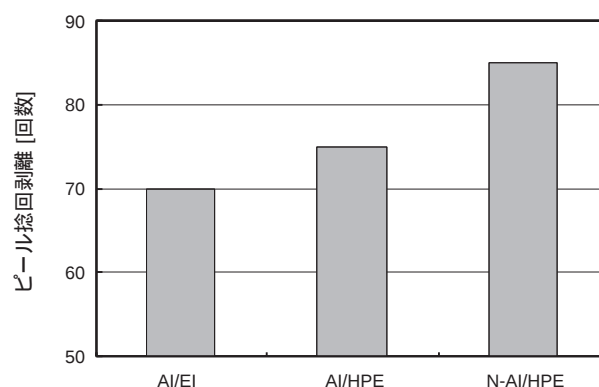


図2 ピール捻回剥離結果
Result of peel-twist test

由は、電線が実際に加工により大きくつぶされる場合が多いため、限界値として60%圧縮率の測定を行った。密着力は、圧縮率の増加と共に減少する傾向が見られた。N-AI/HPEは、ピール捻回剥離試験と同様の傾向を示し、AI/EI及びAI/HPE電線と比較して、密着力の値が高い。特に注目すべきはN-AI/HPE電線の密着力は、60%圧縮率の加工後においても、6 gf/mmと他の導体と絶縁皮膜間の密着力に比べ、大きいことが分かる。

以上の2つの密着評価結果から、導体と絶縁皮膜間の密着性が、従来のAI/HPE電線などと比べて、N-AI/HPE電線は格段に改善されていることが確認された。

3.2 巻線加工性について

つぎに密着性のレベルが巻線加工性に影響することを確認するために、一方向摩耗試験、往復摩耗試験、NEMAワインダビリティ試験を行った。その結果を表3に示す

一方向摩耗試験は、ピアノ線と電線とを直交させて、電線の長手方向に摩耗させながら一定の割合でその荷重を変化させていき、電線の絶縁皮膜が破れ、導体が露出したときの荷重を測定している。往復摩耗試験は、一定の荷重をかけた状態で繰り返し摩耗を行い、導体が露出するまでの回数を測定している。NEMAワインダビリティ試験では、電線をマンドレルに1周巻き付け、電線に張力をかけた状態で、マンドレル自体を長手方向に往復運動させる。この際、電線とマンドレル間に1500 Vの電圧をかけ、短絡した箇所が3個以上検出されるまでのストローク回数を測定する。

一方向摩耗試験をみると、AI/EI電線及びAI/HPE電線と比較して、N-AI/HPE電線のほうが、摩耗荷重の値が高くなっている。一方向摩耗特性については、N-AI/HPE電線が最も良好であると考えられる。往復摩耗試験において、N-AI/HPE電線

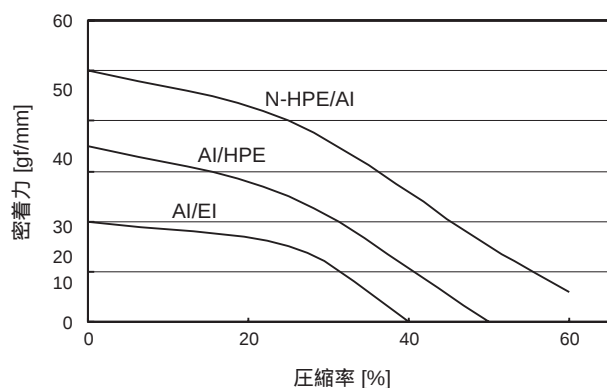


図3 導体-皮膜間の密着力測定結果
Result of adhesion force measurement between conductor and film

表3 耐加工性特性
Windability properties

	AI/EI	AI/HPE	N-AI/HPE
一方向摩耗 [N]	15.2	16.2	18.6
往復摩耗 [回]	200	200	205
NEMA ワインダビリティ試験 [回]	23	26	30

は、AI/EI電線及びAI/HPE電線とほぼ同等であり摩耗回数に差が見られないことが分かった。NEMAワインダビリティ試験に関しては、AI/EI電線及びAI/HPE電線と比較して、N-AI/HPE電線のほうが、ストローク回数が増えている。したがって、NEMAワインダビリティ特性に関しては、N-AI/HPE電線が最も良好であると考えられる。

以上のことから、導体と皮膜間の密着性を高めたN-AI/HPE電線では、巻線加工性評価のうち一方向摩耗試験及びワインダビリティ試験において改善効果がみられ、巻線加工性が向上していることが確認できた。

3.3 考察（密着性と巻線加工性について）

つぎに導体と絶縁皮膜との密着性を向上させることにより前述した巻線加工性が改善が見られたので、その寄与度を知ること、あるいはその要因解析をすることは非常に重要であるので考察を行った。

ここではまず、要因を明確化するため、密着性のレベルが異なる電線AI/EI<AI/HPE<N-AI/HPEを用い、更に潤滑性のレベルが異なる処理、静摩擦係数・非潤滑（無処理）0.13、ワックス処理0.08、上層のアミドイミド樹脂の自己潤滑化0.03及び0.05をそれぞれの電線に処理した場合、密着性と潤滑性が相互にどのように関連するかを調査することにした。

まず、図4では一方向摩耗との関係を調査した。一方向摩耗については、表面潤滑性向上による効果は見られないが、それに対して、密着性向上による効果は明らかであり、特にN-

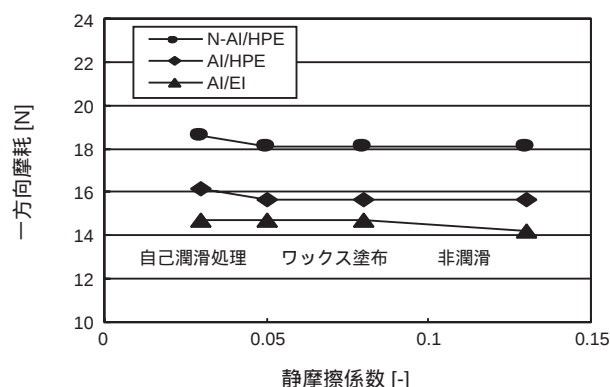


図4 一方向摩耗特性に及ぼす潤滑性及び密着性の影響
Effect of lubrication and adhesion on unidirectional abrasion

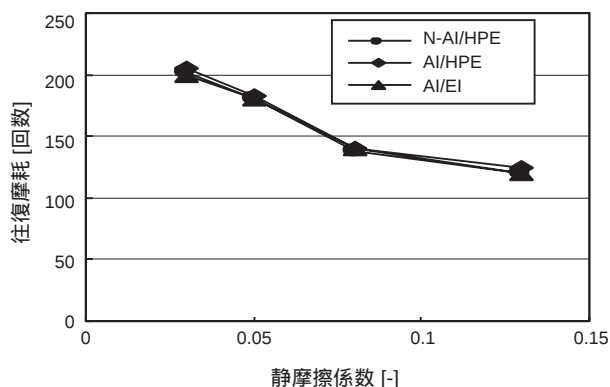


図5 往復摩耗特性に及ぼす潤滑性及び密着性の影響
Effect of lubrication and adhesion on repeated scrape

AI/HPE電線が良好になっていることが分かる。これは一方向摩耗試験のように、絶縁皮膜が剥離するような高荷重の外力が加わった場合に、導体-絶縁皮膜間の密着性が大きく影響するためと考えられる。

つぎに図5では往復摩耗との関係を調査した。往復摩耗については、一方向摩耗と逆に、表面潤滑性の向上による効果が顕著に見られるのに対し、密着性向上による効果がなく、改良電線と従来電線の差がないことがわかった。これは往復摩耗試験が比較的軽荷重での繰り返し摩耗であるため、電線の表面処理のみ影響したものと考えられる。

また図6ではNEMAワインダビリティ試験との関係を調査した。その結果、表面潤滑性向上による効果はみられないが、密着性向上による効果が明らかであり、一方向摩耗と同様の結果が得られた。ワインダビリティ試験については試験中、電線は張力が掛かった状態でマンドレルに巻き付けられ、長手方向に往復運動をうけるため、徐々に導体と絶縁皮膜間の密着力が弱まっていくものと思われ、その結果、異常に絶縁皮膜が不均一になる。このため、異常に絶縁皮膜が伸ばされた箇所、亀裂などの欠陥を生じる。N-AI/HPE電線はAI/HPE電線と比較

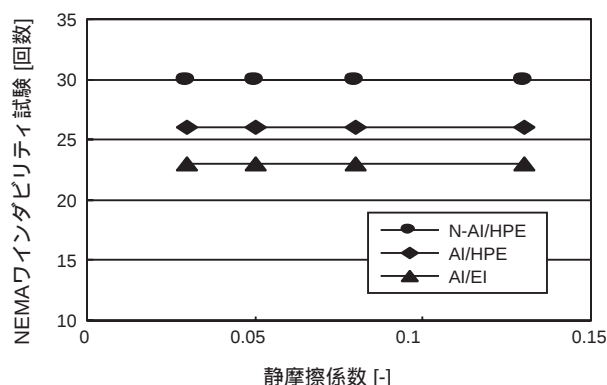


図6 NEMAワインダビリティ特性に及ぼす潤滑性及び密着性の影響
Effect of lubrication and adhesion on NEMA windability test

表4 耐加工性に及ぼす各種因子の影響
Effects of various factors on windability properties

	表面潤滑性	密着性
一方向摩耗	効果無し	効果有り
往復摩耗	効果有り	効果無し
NEMAワインダビリティ試験	効果無し	効果有り

表5 耐冷媒性特性
Refrigerant resistance

		AI/HPE	N-AI/HPE
R22+oil(150 × 1000 hr) Blister	120	発泡無し	発泡無し
	140	発泡無し	発泡無し
	160	発泡無し	発泡無し
R410A+oil(150 × 1000 hr) Blister	120	発泡無し	発泡無し
	140	発泡無し	発泡無し
	160	微小発泡	微小発泡

して、密着性の低下の程度が少ないため、結果的にストローク回数が増えたものと考えられる。

以上、得られた結果から巻線加工性と要因との関係を表4にまとめた。これまで、巻線加工性改善手法として、表面潤滑性の改善が精力的に行われてきた。潤滑性の向上は、電線同士あるいはコイルスロットとの接触による絶縁皮膜へのダメージを軽減することができる。その結果、絶縁皮膜の損傷を防ぐことができる。しかし、表面潤滑性だけでは軽減できないほどの外力（例えば一方向摩耗やワインダビリティ）が加えられたとき、導体と絶縁皮膜間の密着性向上がその絶縁皮膜の損傷の防止に効果があると推定される。したがって、導体と皮膜の密着性の向上と電線表面の潤滑性向上の組合せによって従来電線以上の巻線加工性が得られると考えられる。

3.4 冷媒性

一方、今回評価したAI/HPE電線は、冷蔵庫、エアコンなどの冷媒用電線としての用途が多い。

これらの用途では、電線は冷媒中に浸漬されて使用される。このため、冷媒中での電線特性に対する信頼性についても評価を行った。

エアコンなどに主に使用されている冷媒R22及びその代替冷媒として使用され始めている冷媒R410A中に、電線を150、1000時間浸漬した後、プリスター性を評価した。プリスター性とは、電線を冷媒中に浸漬後に取り出し、急激に所定温度まで加熱したときに生じる電線表面の発泡状態を観察するものである。表5に評価結果を示す。

AI/HPE電線とN-AI/HPE電線と比較すると、冷媒R22、R410Aに対して、冷媒R22に対する発泡性はAI/HPE、N-AI/HPEともに良好であり両電線を比較して発泡性の相違は認められなかった。新規冷媒R410Aにおいても同様な結果が得られた。

4. おわりに

- 1) 本開発電線（N-AI/HPE）は従来電線（AI/HPE）と比較して密着性が向上している。その結果、一方向摩耗、NEMAワインダビリティの特性が向上し、巻線加工性が良好となることが分かった。
- 2) また、本開発電線と高潤滑性を有する表面処理を組み合わせることによりますます厳しくなる巻線加工に対応可能であることも判明した。
- 3) 本密着改良手法による電線は、冷媒性などその他の基礎特性は従来電線と同等であり、従来と同様の用途への適用が可能と考える。

参考文献

- 1) James J Xu et al., "Dynamic mechanical properties of tough magnet wire", EMCW Proceedings 1998, p163-168
- 2) Y.Tatematsu et al., "Development of self-lubricating magnet wires for alternative refrigerant", EEIC/EMCW 1995 Proceedings, p427-430