

巻線開発の歴史と今後の展望

History and Future Prospects of Magnet Wire Development

菅原 潤*
Jun Sugawara

佐伯 孝之
Takayuki Saeki

小林 直弘
Naohiro Kobayashi

木村 康三
Kouzou Kimura

住友電工でエナメル線の製造が始まってから2016年で100年になった。導体に絶縁皮膜を被覆した巻線は電装品や家電、電力用機器、等の様々な用途で利用され産業基盤を支える製品となっている。本報では巻線開発・製品化の流れを概説し、これまでに製品化した主な巻線を紹介する。さらに、今後の巻線開発の方向性について述べる。

This year marks 100 years since Sumitomo Electric Industries, Ltd. first produced its enameled wire. The magnet wire, coated with an insulation film, has been used in various products including electrical components, household appliances, and electrical conductors, and supported the industry. This paper outlines the history of magnet wire from development to commercialization over the century, and introduces our major products. We also discuss the direction of future wire development.

キーワード：巻線、エナメル線、耐熱性、耐傷性

1. 緒 言

巻線（マグネットワイヤ）（口絵写真）とは電気エネルギーと磁気エネルギーを相互に交換するために用いる電線の総称であり、自動車用電装品、産業用モータ、家庭用電化製品、電力用機器、情報通信機器などの基幹部材として、我々の生活を取り巻く広範な分野で重要な役割を果たしている。巻線の種類は多岐にわたり、絹や綿、紙、糸、フィルム、ガラスを銅などの導体に被覆した横巻線や、乾性油等の天然樹脂を被覆した油性エナメル線、現在主流となっている合成樹脂ワニスなどの絶縁材料を塗装焼き付けした合成エナメル線などがある。

当社の巻線事業は、1916年がその始まりとされる。その後、戦後の工業化の急速な進展で合成樹脂工業も発展し、それまでの天然樹脂に替わり、絶縁被覆に好適な合成樹脂材料が次々と開発され市場に出現した。さらには家電製品、自動車工業など様々な産業の工業化の発展にともなう顧客のニーズに応えるべく、材料開発や製品開発を鋭意続け今日に至っている。また、グローバル化の進展により、巻線の顧客も国内から、中国、東南アジアを中心とした海外各地に拡大していった。1969年には当社初となる巻線の海外製造拠点をタイに設立し、その後も海外展開を図り、現在では海外拠点は5拠点となっている。近年では当社の得意分野である耐傷性、耐熱巻線分野に特に注力し、自動車用途の巻線に注力している（写真1）。

本稿では、当社の巻線事業と開発の歴史を振り返るとともに今後の展望についてまとめた。

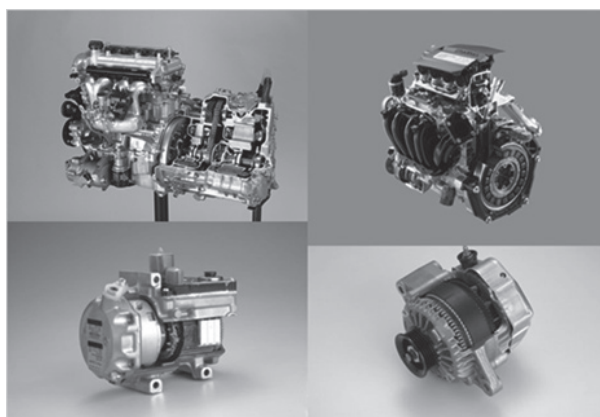


写真1 当社巻線製品を使用した製品の一例

2. 巻線事業の黎明期

巻線の歴史は、第二次世界大戦以前の旧時代、第二次世界大戦以降昭和30年頃までの復興の時代、さらにその後今日に至るまでの発展の時代の3つに大別することができる。本章では、当社巻線事業の黎明期とも言える1955年（昭和30年）頃までをまとめた^{(1)~(3)}。

2-1 事業開始から戦後の復興

当社は、第一次世界大戦中の1916年に開設した大阪製作所の被覆線工場にてエナメル線の製造を開始した。この年をもって当社巻線事業の開始年としている（表1）。当時は品種、生産量とも少なく、油性エナメル線や綿巻線、絹巻線、紙巻線などを製造していた。油性エナメル線は天然樹

脂を銅線に塗布し焼き付けたものであり、絶縁塗料の主原料は支那桐油等の乾性油を主成分としたものである。油性エナメル線は皮膜の機械強度が低く、小さなマグネットコイルに使用するほかは、そのまま使われることは殆どなく、エナメル線の上に綿や紙巻きを施していた。

また当社は、1943年に名古屋製作所を開設した。しかしながら、名古屋製作所は1944年の東海地震と1945年初めの空襲で工場建屋の7割は焼失或いは倒壊して荒野と化した。

終戦直後、疎開工場では被災を逃れた油性エナメル線の製

造設備などを名古屋製作所に移し、復興が進められた。その結果、翌1946年には操業できるまでに至った。

合成樹脂材料を用いた巻線に関する研究は、合成、製法を中心に1940年から当社研究部で進められた。残念ながら終戦までに成功を見ないまま1944年に研究は中断したが、戦後当社の巻線事業の発展に大きく寄与することになる。一方で、米国GE社はポリビニルホルマールPVFを焼き付けた合成エナメル線を発明し、1939年に発表していた。合成樹脂エナメル線は油性エナメル線に比べ機械強度が高く、保護皮膜なしで使える画期的なものであると考えられ

表1 当社巻線事業における主な出来事と製品開発

年度	主な出来事	製品開発
1897 (明治30)	「住友伸銅場」開設 (創業)	
1911 (明治44)	「住友電線製造所」設立 (創立)	
1916 (大正5)	新工場 (現住友電工大阪製作所) 開設	エナメル線 製造開始
1920 (大正9)	「株式会社住友電線製造所」設立 (設立)	
1939 (昭和14)	社名を「住友電気工業株式会社」(現社名) に改称	
1943 (昭和18)	住友電工 名古屋製作所 開設	
1945 (昭和20)	名古屋製作所へ設備移転 エナメル線の製造開始	
1950 (昭和25)		ホルメット線 製造開始
1951 (昭和26)		ガラス巻線 製造開始
1958 (昭和33)		ポリエステル線 製造開始
1960 (昭和35)		ハネカムポリウレタン線 開発
1961 (昭和36)		テフロン線 開発
1962 (昭和37)		ポリエステルナイロン線 製造開始
1963 (昭和38)		超極細線 開発
1965 (昭和40)		ポリエステル線 ATZ-100 開発
1967 (昭和42)		変性ポリエステル線 ATZ-200 開発
1968 (昭和43)	住友電工 機器電線事業部 発足	
1969 (昭和44)	タイに海外初の製造拠点 Siam Electric Industries Co., Ltd. 設立 (現WIN-T)	
1970 (昭和45)		耐熱線 ATZ-300 開発
1972 (昭和47)		短絡誘発機能線 NCW 開発
1973 (昭和48)	シンガポールに製造拠点 Sumitomo Electric (Singapore) Pte., Ltd. 設立 (のちのWIN-S)	半田付け可能155℃クラスエナメル線 FEIW 製造開始 半田付け可能155℃クラス ATZ-400 開発
1974 (昭和49)		テレビ偏向ヨークコイル用融着線 SSB-60 (EIW+ナイロン) 開発
1975 (昭和50)		耐熱性自己融着線 SSB-11 (ATZ-300+エポキシ) 開発
1976 (昭和51)		自己潤滑性ポリエステルナイロン線 PEW-N 開発
1977 (昭和52)		半田付け可能耐熱ウレタン線 SEUW 開発 製造開始
1978 (昭和53)		極細平角線開発
1979 (昭和54)		自己融着線 SSB-SE (SEUW+エポキシ) 開発
1986 (昭和61)		自己融着線 SSB-EE (PEW+エポキシ) 開発
1988 (昭和63)	マレーシアに製造拠点 Sumitomo Electric Magnet Wire(M) Sdn., Bhd. 設立 (現WIN-M)	自己潤滑性耐熱線 HLW 開発 製造開始 高速巻線用超極細線 UEW-H 開発
1989 (平成元)	米国に製造拠点 SPD Magnet Wire Company 設立 (現WIN-A)	偏向ヨークコイル用 SSB-HD SSB-98 開発
1992 (平成4)		新冷媒R134a対応巻線 GLW 開発 高強度巻線 UHW 開発 ガスレス耐熱ウレタン線 SR-SEUW 開発
1994 (平成6)	インドネシアに製造拠点 SES BATAM 設立 中国に製造拠点 住友電工(無錫) 設立 (現WIN-W)	
1996 (平成8)		耐傷性耐熱線 UTZ 開発
2000 (平成12)	製造会社「住電マグネットワイヤー」、販売会社「ウインテックワイヤー」設立	
2002 (平成14)	「住友電工ウインテック」設立、営業開始	
2004 (平成16)	住友電工ウインテック名古屋事業所 (旧住友電工名古屋製作所) 閉所	
2008 (平成20)	WIN-A 製造終了、販売拠点化	ワニス含浸用耐傷性耐熱線 HGZ 開発
2011 (平成23)	WIN-S 閉鎖、WIN-Mへ統合	耐冷媒性自己融着線 SSB-41 開発

た。これが世界各国に反響を呼び、挙ってこの種の研究を開始したが、まもなく第二次大戦が勃発し各国の研究状況は不明となった。

2-2 ホルメット線の工業化と発展

当社は戦後研究を再開し、顧客からの要請もあってPVF線の工業化に注力した。戦時中からの知見の蓄積があったこともあり研究は急速に進展し、これを商品名「ホルメット線」と命名し1950年に販売を開始した。ホルメット線は、当社独自の技術によって国内で最初に開発、工業化された合成エナメル線であり、電気特性、機械強度、耐熱性等の向上で電気機器の小型化に大きく寄与し歴史的価値も大きい。業界からは高く評価され、名古屋製作所はホルメット線工場の拡張、設備の増強を次々と行い、今日の発展の基礎を築くことになった。量産開始当初の1950年には生産能力は2tであったが、1956年には新ホルメット工場を完成させ100t超に、更に設備を増設し、1960年には320tの能力となった。1955年発行の当社技術誌には、「ホルマール線、硝子巻線等の実用化の完成された時期であり、それだけに需要もまた旺盛を極めた。この情勢に即応して、ホルメット線工場、硝子巻線工場を新設、整備、拡充し需要の激増に応えると共に更に高品質、高能率を得ることに努めた。」とあり、当時の需要急増の様子が伺い知れる。

また、ホルマール樹脂が使用されるようになったのを機に、戦前の油性エナメル線から合成樹脂を用いた合成樹脂エナメル線に主流が移るとともに、戦後の合成化学の進歩にも重なり様々な新しい合成樹脂が開発、工業化されることにつながった。

3. 1960年以降の新製品開発

3-1 合成エナメル線の進展

ホルマール樹脂が使用されるようになったのを機に、いろいろな新しい合成樹脂が開発された。基本的な樹脂は1970年頃には出揃った。当社もホルメット線以外に特殊な性能を持つ合成樹脂エナメル線の開発を進め、ポリエステル線、直接半田付け可能なポリウレタン線、エアコン用冷媒R-22に耐えるフレメット線（ウレタン変性ホルマール線）、ポリアミドイミド線などを相次いで開発した。ホルメット線の場合と比べると、それら開発は必ずしも業界をリードするものばかりではなかったが、基本ワニスをベースに各種機能を付与した応用ワニスを迅速に開発できるメリットが生まれ、後年の多様な製品の開発につながっていった。

3-2 耐熱線：ATZ-300

1968年、エアコン用耐熱ロータリーコンプレッサの実用化検討のため、ポリエステルイミドのシングルコート品を検討したが性能を満足することができず、下層を180℃クラスの変性ポリエステルイミド、上層をポリアミドイミドの二重皮膜の耐熱線ATZ-300を開発した⁽⁴⁾。ATZ-300

の特長は、下層のポリエステルイミドの弱点を、あらゆる特性についてより高い品質を有するポリアミドイミドが補い、いわば上層が外殻の役割を果たすことによって、全機能的な性能とした点にある。すなわちATZ-300は、耐熱安定性、耐加工劣化性、耐冷媒性、耐クレーピング性、耐湿熱性などにおいて単体のポリエステルイミドに比べ優れた性能を備えていた。高価なポリアミドイミドとダブルコート化することで原価低減と高性能化を両立させることができた（図1）。

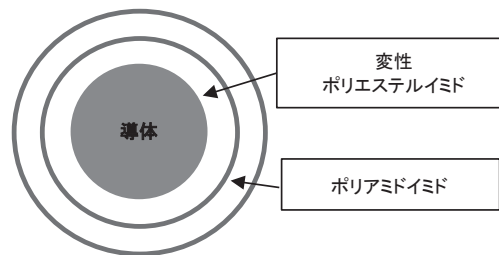


図1 ATZ-300の断面図

3-3 半田付け可能線

1970年頃より、家電製品などのコンパクト化、自動車や航空機などの軽量化が強力に推し進められ、巻線にはより高い耐熱性が求められるようになってきたが、一般に耐熱線は耐化学薬品性が良好なため、通常市販されている化学剥離剤による端末の皮膜剥離ができないという問題があった。半田剥離をするにおいても溶融半田では耐熱線皮膜を完全に剥離することはできないし、機械的に皮膜剥離する方法だと一本ずつ処理しなければならず自動化ができない。このように顧客が耐熱線を使用する際にはその端末剥離による工数増などのデメリットがあった。そこでワニスメーカーと協業し半田付け可能な耐熱ワニス（ポリエステルイミド）を開発した。これにポリアミドイミドをオーバーコートした線の諸特性が155℃クラス相当である半田付けが可能であるATZ-400を1973年に開発した⁽⁵⁾。現在、ATZ-400の需要はなく生産していないが、この製品で開発に成功した半田付け可能ポリエステルイミドは、90年代に急増したパソコン用ディスプレイのブラウン管に使用する偏向ヨークコイル用自己融着線の下塗りに使用された。またシングルコート品FEIWは現在も生産されている。

3-4 自己潤滑線：PEW-N/HLW

1974年からの第一次オイルショックによるワニス価格の高騰（従前比1.7倍）を契機に、巻線顧客から合理化・原価低減強化の要求が従来以上に強まった。これに応えるための取り組みのひとつとして、顧客での生産性向上、すな

わち捲線高速化やコイル入れ効率化を図るべく、巻線の滑り性向上についての研究を始めた。対象品種は、当時生産比率が39%と最も高く、コスト的にも有利なポリエステル系を選定した。1962年に開発済みのポリエステルナイロンをベースとし、上膜の6,6-ナイロンに滑剤を添加することで、静摩擦係数 μ_s を従来品の0.15から0.05を達成した。上膜の自己潤滑ナイロン層を薄膜化することでコストを抑え、従来品と同等のコストで性能が優れる製品を開発した。その後、自己潤滑線の耐熱線のニーズが高まり、耐傷性エナメル線ATZ-300をベースにPEW-Nで確立した自己潤滑技術を活用した自己潤滑皮膜を付与したHLWを1986年に開発した。自己潤滑線はパラフィン塗布などの潤滑付与ができない、冷蔵庫・エアコン等の密閉型圧縮機用電動機に多く使用された。圧縮機内で冷媒と冷凍機油とが共存した環境下で運転されるため、これに使用される巻線は高温高圧の冷媒蒸気や冷媒を溶解した冷凍機油中での優れた耐冷媒特性が要求されたが、当社自己潤滑線は上記の性能を十分に満足していた。尚、1980年代後半からのフロン規制により従来の冷媒が使用できなくなったため、代替冷媒に対して耐冷媒特性を持つ巻線の選定が必要となった。十分な評価検証の結果、当社の自己潤滑線は代替冷媒に対しても耐冷媒性を有していることが判明した⁽⁶⁾。

3-5 耐傷性耐熱線：UTZ/HGZ

部品の小型化、高性能化のため高占積率^{*1}を要求される機器が増え、使用される耐熱エナメル線には過酷とも言える加工が施されるようになった。自己潤滑線の潤滑性をより一層向上させ、また、導体との密着性を付与することで耐傷性を極限にまで高めた耐傷性耐熱線UTZ⁽⁷⁾を1996年に開発した(図2)。この開発は当時業界初であり他社に先駆けて製品展開したため、当社を代表する製品として業界をリードすることができた。世界初のハイブリッド車(HEV)に採用され、その心臓部とも言える駆動モータの高出力化、小型化に大きく貢献した。また、モータの種類は含浸・非含浸の2つに別けられ、含浸ワニス性向上のニーズは高い。高占積率化に当たり、UTZの優れた耐傷性に加えて含浸ワニス性を向上させた、ワニス含浸用耐傷性耐熱線HGZを2008年に開発した⁽⁸⁾。

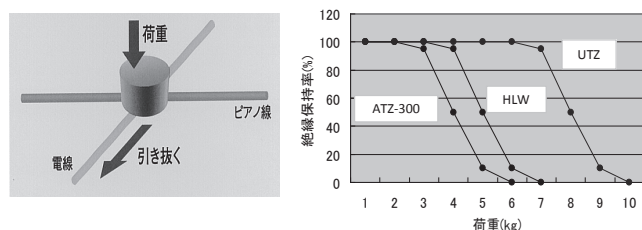


図2 耐熱線の加工性比較

3-6 自己融着線

自己融着線とは、絶縁皮膜の上に融着層を形成したエナメル線であり、捲き線後、融着層を加熱溶融、線間を固着させる機能を有する。自己融着線を捲線したコイルは、融着層を溶融して線同士を融着させることにより、形状を容易に固定化できることから、この特長を生かした用途としてテレビなどのブラウン管の画像表示を担う偏向ヨークコイルに最も多く使用された。テレビ用偏向ヨークコイルの自己融着線SSB-60 (EIW+ナイロン)は1974年に開発した。画像表示の高精細化の要求が年々強くなり、高性能な融着材料を使用した高精細偏向ヨークコイル用自己融着線SSB-98及びSSB-HDを1989年に開発した^{(9),(10)}。その後、液晶テレビの置き換えとともに偏向ヨークコイル用自己融着線は需要そのものが消失した。また、自己融着線は、モータの含浸ワニス処理を無くすための手段としても利用された。含浸ワニス工程は長時間の熱処理を必要とし、溶剤揮発による環境悪化を引き起こすという点で問題が多い。一般的なモータ用としての自己融着線SSB-EE (PEW+エポキシ)及びSSB-11 (ATZ300+エポキシ)などを開発し、冷媒および冷凍機油に浸漬する特殊環境下で運転されるモータ用の耐冷媒性自己融着線SSB-41を開発した⁽¹¹⁾。

4. 今後の展望

初めてHEV駆動モータ用に採用されたUTZに比べて、耐熱安定性、耐加工劣化性に優れたアミドイミド線(AIW)はその後のHEV駆動モータ用にも採用されるなど高圧モータ用途の巻線として使用されてきた。近年、熱耐久性、耐加工劣化性、絶縁性(高PDIV^{*2}化)に対する顧客要求はさらに高いものとなって来た。そこで、当社はHEV向け巻線として、AIWを凌ぐ性能を持つポリイミド(PI)をベースとした巻線(PIW)を開発し、上市した。

AIWとPIWの特性一覧を表2に示す。耐熱性、皮膜伸び、絶縁性(誘電率^{*3})全てにおいてPIWはAIWに勝る特性を有している。しかし、PIWはAIW比較で価格が高価であった。原価低減のため、当社では皮膜作製原料であるワニスの合成法を改善し、安価なワニスを合成する技術を開発した。これによりPIWの低価格化を実現、価格競争力の

表2 アミドイミド線 AIW とポリイミド線 PIW の特性比較

	アミドイミド線 AIW	ポリイミド線 PIW
耐熱クラス	220℃	240℃
熱耐久性	220℃×500h _{NG}	280℃×2000h _{OK}
皮膜伸び	~45%	~80%
誘電率	4.3	3.0
吸水率	4.5%	3.0%
ガラス転移温度	280℃	350℃
高温弾性率@400℃	30MPa	1000MPa

ある巻線を世に出すことができた。

丸線に比べると平角線はエナメル皮膜の厚さ分布が悪くなる傾向がある。従来の平角線は焼付により形成される皮膜の厚みがコーナー部で薄くなる、という課題があった。絶縁性能を満足するためには皮膜の最薄部での絶縁耐圧により性能保証することとなる。そのため、厚さ分布が悪いと特性保証には不要な厚い皮膜部が存在する。当社はその課題を解消する焼付方法を開発し、均一な皮膜厚の分布を実現した(図3)。これにより、「余分な皮膜」を削減することで原価低減を図ることができた。

図4に当社でまとめた車載用巻線の開発ロードマップを示す。低価格化は言うまでもなく、モータ性能向上のために巻線に要求される機能は高絶縁性、高耐加工劣化性、と予想している。このような高機能化と低価格化が両輪となった高い競争力を持つ製品の開発が必須と考えている。



図3 膜厚分布の改善

		2015	2017	2022
システム動向			省エネ 低コスト	世界的感度規制強化 欧州ダウンサイジング: 48V化
HEVモータ 巻線動向と開発課題			(I) 小型高出力化 (II) 生産性向上 (III) 低コスト化・軽量化 (IV) 新規用途 高速回転化	高絶縁性巻線 新耐傷性巻線 高耐熱融着線 皮膜厚均一化・アルミ化 渦損対策巻線
電装品モータ 巻線動向と 開発課題	オルタネータ		① 高性能・多機能化 高占率率化・高出力化 新耐傷性巻線(潰し線、皮膜傷自己修復)	異形加工巻線 ○皮膜強度 ○柔軟導体 ○皮膜修復
	電動化部品 (コンポポンプ)		② 高速捲き巻線・小型化 生産性向上	
	小型モータ 各種ソレノイド		耐傷性巻線 → 新耐傷性巻線、皮膜傷自己修復 ③ 低コスト化・軽量化: 線準化・アルミ化	
	ダウンサイジング (電動モータ)		④ 新規用途 高速回転化 渦損対策巻線	○シールド線 ○分割導体

図4 電装品向け巻線開発ロードマップ

当社では次世代巻線の開発に継続して取り組んでいるが、その一例として、PIWを凌ぐ高い絶縁性能を持つ巻線を紹介する。高PDIVを達成するためには皮膜の誘電率を下げる必要がある。当社ではPI皮膜中に小さな空孔を設けることで、部分的に誘電率がほぼ1の空気層を形成し、皮膜全体の誘電率を下げる「空孔皮膜」構造を開発した。

皮膜中に空孔を均一に分散させることで、特性の均一性を実現している。ベース材料となるPI層中に設ける空気層の割合を50%とすることで、PIの誘電率3.0を空孔皮膜では1.7まで低減できることを確認した。

5. 結 言

住友電工における巻線開発の歴史と主要な開発製品および将来の製品開発の方向について紹介した。当社は様々な分野の顧客の要望に応える巻線を提供してきたが、その姿勢は今後も変わることはない。なかでも、自動車分野における巻線の需要量は順調な伸びが期待できる重要分野であり、今後も多機能・高性能な巻線開発を継続し市場に提供していく。

用語集

※1 占積率

モータのコアで、巻線が収まるスロットの断面積に対する巻線導体の断面積の比。これが大きいほどモータの出力は大きくなる。

※2 PDIV

Partial Discharge Inception Voltage (部分放電開始電圧)の略。コロナ開始電圧とも言う。

※3 誘電率

絶縁体に電界をかけた時に分極する強弱を示す値。誘電率が小さいと放電が起こり難く、PDIVが高くなる。

・ウインテック、ウインテックワイヤー、ATZ、SSB、SEUW、HLW、GLW、UHW、UTZは住友電工ウインテック(株)の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 住友電気工業(株)、「住友電工百年史」(1999)
- (2) 住友電気工業(株)、「住友電工戦後技術史」(1987)
- (3) 有馬純信、「電線技術の進歩(昭和29年度)」、住友電気集報第54号P1-P14(1955年2月)
- (4) 糸賀輝雄 他、「パイロメット線300(ATZ-300)について」、住友電気マグネットワイヤ特集号、P11-P19(1973年8月)
- (5) 中林洋彦 他、「ハンダ付け可能なF種マグネットワイヤーATZ-400-」、住友電気 マグネットワイヤ特集号、P20-P25(1973年8月)
- (6) 獅子野俊明 他、「フロン規制対応のためのR-22代替マグネットワイヤ評価」、住友電気第145号、pp92-96(1994年9月)
- (7) 「耐加工性向上により薄膜化可能な自己潤滑捲線UTZ」、住友電気第148号、P142-P143(1996年3月)
- (8) 吉田健吾 他、「新耐傷性エナメル線の開発」、SEIテクニカルレビュー第173号、p35-38(2008年7月)
- (9) 上岡勇夫 他、「新しい偏向ヨークコイル用自己融着線」、住友電気第136号、p178-181(1990年3月)
- (10) 山内雅晃 他、「コンピュータCRTディスプレイ用自己融着巻線の開発」、SEIテクニカルレビュー第155号、p77-81(1999年9月)
- (11) 吉田健吾 他、「耐冷媒性自己融着エナメル線の開発」、SEIテクニカルレビュー第174号、p111-P116(2009年1月)

執筆 者

菅原 潤* : 住友電工ウインテック(株) 主幹



佐伯 孝之 : 住友電工ウインテック(株) 部長



小林 直弘 : 住友電工ウインテック(株) 主席



木村 康三 : 住友電工ウインテック(株) 技師長
博士(学術)



*主執筆者