

打抜き性と絶縁抵抗に優れた 電磁鋼板用環境対応型絶縁被膜の開発

竹田 和年¹⁾ 藤井 浩康²⁾ 山崎 修一³⁾

1. はじめに

モータやトランス等の鉄芯に用いられる無方向性電磁鋼板の表面には、層間短絡防止のために厚さ 1~2 μm の絶縁被膜が形成されており、そこでは 3 価のクロム酸化合物と有機樹脂を含有する有機無機混合被膜(当社における呼称: L コート)が40年以上にわたって世界的に使用されてきている⁽¹⁾。

一方近年、ヨーロッパの RoHS に代表されるように、環境に対する意識の高まりから 6 価のクロム酸化合物の規制が強化されるとともに、規制上問題は無くてもその他のクロム酸化合物も使用は忌避されるようになってきた。この情勢の中で電磁鋼板絶縁被膜についても、6 価のクロムが残存しないよう被膜形成条件のより厳密な管理がなされ、クロム酸化合物の形態検査も含めて多大な費用が発生するようになってきている。そこで本課題の抜本的解決策として、クロム酸化合物を含有しない新たな環境対応型絶縁被膜が求められていた。

しかし、絶縁被膜には絶縁抵抗だけでは無く、モータやトランス等の鉄芯を製造する際に必要な諸特性、密着性やすべり性といった基本特性、および打抜き性や溶接性などの加工性、さらには耐熱性や耐溶剤性といった耐久性が必要である。また環境に対応するためには、有機溶剤や環境ホルモンも含有しない必要がある。これらを厳しいコスト制約下で実現しなくてはならない。

このような現状に鑑み、本報告では無方向性電磁鋼板の絶

縁被膜に必要な諸特性を保持し、かつ従来のクロム酸化合物含有被膜よりも絶縁抵抗が高く、打抜き性に優れた環境対応型絶縁被膜(G コート)を開発したので紹介する。

2. 開発した絶縁被膜の概要

G コートはりん酸塩と有機樹脂の有機無機混合被膜であり、L コート同様標準的な厚さは 1~2 μm である。製造方法は、りん酸塩と有機樹脂エマルジョンを主成分とする水溶液を鋼板に塗布し、200℃~400℃で数十 sec から 1 min 程度で焼き付けるもので有機溶剤等は使用していない。

G コートの特徴は、(1)りん酸塩が安定なトリディマイト構造を有し、(2)最表層に親油性の炭素層を有することで優れた打抜き性を保持し、(3)有機樹脂の物性を最適化することにより、りん酸塩結晶が均一で微細分散していることである。

表 1 に今回開発した G コートと、クロム酸化合物を主成分とし非晶質である従来被膜である L コートの概要を示す。

これまで脱クロム酸化合物被膜の候補として、りん酸塩の被膜も検討されていたが、必要な被膜特性を満たすものは開発されていなかった。一方、りん酸塩は様々な形態を取り得る中で、我々はこれをトリディマイト構造の微細結晶とすることにより、他の材料に無い優れた基本特性を担保できる事を見出し、脱クロム酸に成功した。図 1 に G コートと L コートの SEM 写真を示す。G コートでは有機樹脂(黒い点状)によってりん酸塩が分断され、微細な結晶状態となっている。

表 1 絶縁被膜の概要。

	G コート	L コート
無機成分	りん酸塩	クロム酸塩
有機成分	ソープフリー型 有機樹脂	界面活性剤使用 有機樹脂
主要添加剤	水溶性有機化合物	
被膜の状態	微細分散微結晶 トリディマイト	非晶質

* 新日本製鐵株式会社

技術開発本部: 1) 広畑技術研究部主任研究員

2) 八幡技術研究部主幹研究員

3) 鉄鋼研究所電磁材料研究部主幹研究員

Development of Environmental-Friendly Coating on Electrical Steel Sheets with Excellent Punchability and Interlaminar Resistance; Kazutoshi Takeda, Hiroyasu Fujii, Shuichi Yamazaki (Nippon Steel Corporation)

2010年11月4日受理

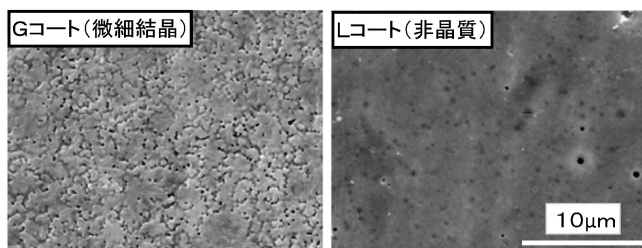


図1 G コートの SEM 観察写真.

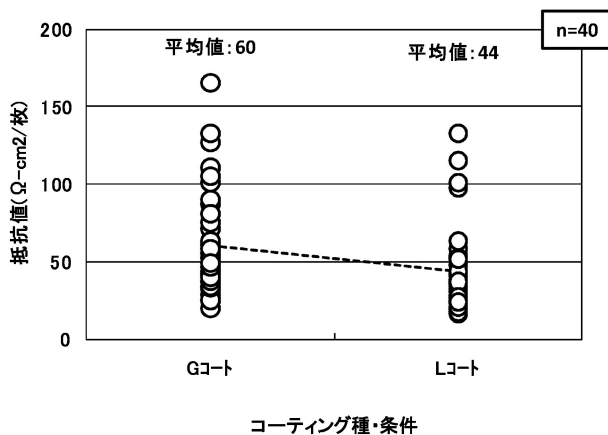


図2 各コーティングの絶縁抵抗.

3. 開発のポイント

(1) リン酸塩の構造と絶縁性

無方向性電磁鋼板の絶縁被膜特性の中でも絶縁抵抗と打抜き性は非常に重要である。絶縁抵抗は電磁鋼板を鉄芯に加工した際に渦電流損を低減し、電気機器の効率を向上させる。絶縁被膜の膜厚を増やすと絶縁抵抗を大きくできるが、占積率(基準体積中の鉄の割合)が低くなって、磁束密度が低下し鉄芯の性能が低くなる。このため同一膜厚で絶縁性を高める必要があり、被膜中の含水率を減らすことが重要である。

図2に同一膜厚でのGコートとLコートの絶縁抵抗を示す。絶縁抵抗はいずれの被膜においても幅広い値を取っているが、Gコートでは最小値と平均値が共にLコートより勝っており、良好な絶縁性を有する事が分かる。絶縁被膜中の水分量をカールフィッシャー法で測定したところ、Lコートの水分量は0.003~0.005 mass%であるのに対し、Gコートでは検出限界(0.001 mass%)以下であった。これはりん酸塩は含水塩を持つものが多い中で、Gコートでは様々な工夫を凝らすことで非常に安定なトリディマイト構造とし、加水分解し難いため含水率が低くなり絶縁抵抗を高くできていると推定される⁽²⁾。

(2) 最表層構造と打抜き性

鉄芯を製造する際には、金型を用いて電磁鋼板を同一形状に打抜きが、打抜き性が悪いと打抜き回数が増加するに従って鋼板の端部が反り返って立った部分(以下、かえりと呼称)が大きくなり、短絡を起こしてしまう。このため頻繁に金型を研磨する必要があり、生産性が大幅に低下する。

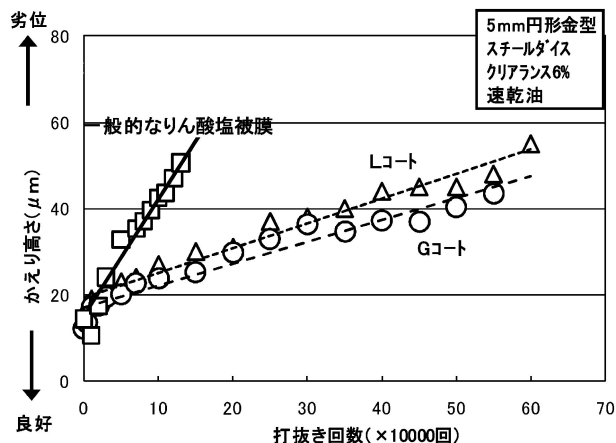


図3 打抜き回数とかえり高さの関係.

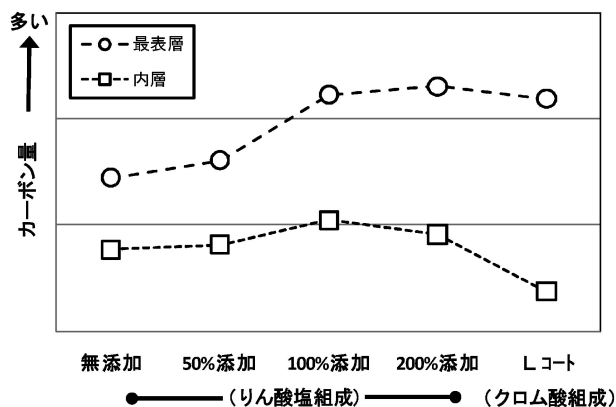


図4 絶縁被膜表面の ESCA 分析結果.

図3にGコートの打抜き回数とかえり高さの関係を示す。従来、絶縁被膜の打抜き性は混合した有機樹脂量に比例して向上すると言われていた。しかしりん酸塩に有機樹脂をLコートと同等量添加した被膜を作製しても(図には、一般的なりん酸被膜と表示)、かえり高さが急激に高くなり打抜き性が悪い事が明らかとなった。そこで、りん酸塩系の被膜では打抜き時に使用する加工油(打抜き油)の濡れが悪く、油膜切れが起きて金型が摩耗し、打抜き性が低下するのではないかと推定した。更にその支配因子として、被膜最表層の炭素量に注目し、水溶性有機化合物を添加することでこの炭素量を制御すれば、被膜表面に打抜き油に対する親和性を付与し油膜切れを起こり難くして、打抜き性を向上出来るのではないかと考えた。この材料設計の結果、図3に示すようにGコートにおいて、Lコートと同等以上の打ち抜き性を確保する事に成功した。

図4は、りん酸塩と有機樹脂を混合した組成に水溶性有機化合物の添加量を変えた絶縁被膜を形成し、ESCA法で被膜の最表面と被膜内部(鋼板側)の炭素量を測定した結果である。Gコートにおける水溶性有機化合物の配合量を100%とし、無添加、50%添加、200%添加とLコートについて比較した。この解析の結果、まずLコートでは内層の炭素量は低いのにに対し、最表層では多くなっている事が明らかとなった。この最表層の炭素は有機樹脂以外の成分に由来するものと考えられる。一方りん酸塩に有機樹脂を混合したのみで

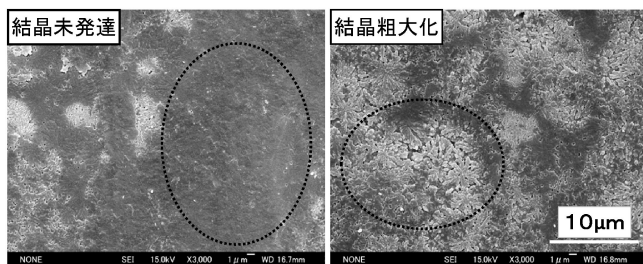


図5 有機樹脂の分散性が悪い状態のSEM 外観。

は、内層の炭素量はLコートより多いのに、最表層では逆にLコートよりも少ない。またりん酸塩組成に水溶性有機化合物を添加することで、最表層の炭素量は予想通り増加し、Lコートと同等になっている。この結果は、我々の想定した被膜最表層の炭素量による打抜き性向上メカニズムを支持している。

(3) 有機樹脂粒子の分散性

従来のクロム酸化合物含有被膜においては界面活性剤が添加され、これが有機樹脂の均一な分散に役立っていた。加えて、りん酸塩水溶液はりん酸イオンの価数が大きいため有機樹脂粒子の分散性が悪く、いわゆる凝析を生じ易かった。図5は、有機樹脂の分散性が悪かった場合の例である。この場合、りん酸塩の結晶化状況がばらついて、結晶化が未発達な場所と結晶が粗大化したところが出てしまい、部分的に摩擦係数が異なったり、粗大化した部分では発粉し易くなるなどの不都合が生じる。このためGコートでは、樹脂の均一分散に工夫が必要であった。

通常、水溶液中の有機樹脂の分散性を確保するためには、ソープフリーエマルジョンが使用される⁽³⁾。ここでは水溶液中のエマルジョンはゼータ電位が高いほど安定であるため、エマルジョン粒子の表面に電荷を持つ官能基が導入される。しかしりん酸塩水溶液の場合、導入した官能基が陽イオンの場合はりん酸と反応し、陰イオンの場合はりん酸の対イオンと反応し、いずれの場合も凝析が起き、分散性を確保することは非常に困難であった。

そこで我々は詳細にりん酸塩水溶液中のエマルジョン安定性について検討した結果、有機樹脂に導入する官能基を非イオン性のものに変更することで、従来の知見とは異なり、りん酸塩水溶液においても樹脂が凝集しない条件を見出した。図6はゼータ電位と凝集粒径の関係を示したもので、60 mV付近で凝集を解消できている事が分かる。これにより、樹脂を均一分散させ良好な被膜を得る事に成功した。

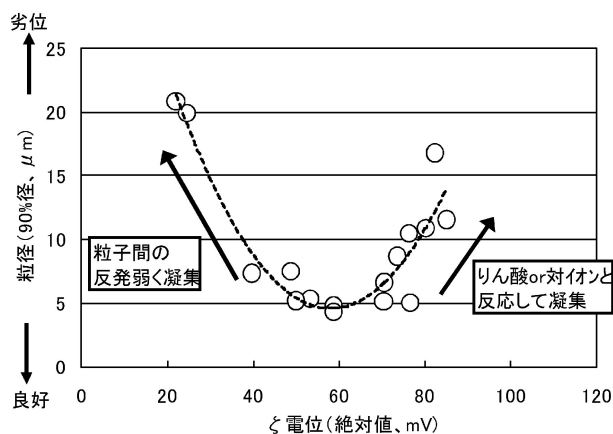


図6 ゼータ電位と凝集粒径の関係。

4. ま と め

40年以上世界で無方向性電磁鋼板用の標準被膜とされてきた、クロム酸化合物含有被膜と同等以上の特性を保持し、なおかつクロム酸化合物を使用しない汎用絶縁被膜であるGコートの開発に、世界で初めて成功した。

Gコートでは、りん酸塩が安定したトリディマイト構造を取り、含水率が少ないため優れた絶縁抵抗を示し、また水溶性有機化合物を配合することで、クロム酸化合物含有被膜と同等の打抜き性を確保した。さらに、りん酸塩水溶液中の樹脂エマルジョン粒子の安定性を高め、均一で被膜欠陥の少ない絶縁被膜を実現した。その他にも絶縁被膜に要求される特性は多く、基本特性として、占積率、密着性やべとつきの無いこと、加工性として、溶接性やワニス馴染み、耐久性として、耐溶剤性、耐フロン性、耐熱性等があり、主要な特性だけでも20種類以上ある。Gコートはその全項目で従来のクロム酸化合物含有被膜と同等以上が達成できた。

目下、Gコートは従来被膜と同等以上の特性を有する事がユーザーに認知され、環境対応型絶縁被膜として従来被膜からの切り替えが進行しており、今後一層の適用拡大が期待される。また、本技術に関連した特許も6件登録済で、基本特許は第3397291号を取得済である。

文 献

- (1) 中村元治, 岡田 弘, 松井 清, 北山 実: 鉄と鋼, **7** (1980), 1000-1009.
- (2) M. J. O'Hara *et al*: Ceram. Bulletin, **50**(1972), 590-595.
- (3) 前田靖治, 若林耕二, 増原憲一, 片山喜一郎: 鉄と鋼, **8** (1989), 1324-1331.