接着電磁鋼板コアの諸特性について

正員 開道 力 (新日本製鐵) 非正員 竹田和年 (新日本製鐵)
非正員 脇坂岳顕 (新日本製鐵) 正員 溝上雅人 (新日本製鐵)

Characteristics of Adhesive Coating Non-oriented Electrical Steel Sheet Cores

Chikara Kaido, Member, Kazutosi Takeda, Non-member, Takeaki Wakisaka, Non-member,
Masato Mizokami, Member (Nippon Steel Co.)

Magnetic and mechanical characteristics of adhesive coating non-oriented electrical steel sheet cores were measured in the conditions of motor, comparing with those of welded cores. The deteriorations of iron losses and exciting currents by adhesion are less than those by welding. The noise levels and vibrating levels of adhesive coating cores are about 10dB lower than welded cores. The results of modal analysis of adhesive coating core and welded one support the results of noise and vibration tests. The heat conductivities of adhesive coating cores in lamination direction are higher.

キーワード：電磁鋼板、コア、接着被膜、鉄損、騒音、振動、溶接

1. 緒言

モータは高効率、小形高出力化が重要であり、モータコア素材には高透磁率、低鉄損が要求され、コア加工では特性の劣化が問題となる¹⁾。また、モータの低騒音、低振動は環境問題と共に制御される位置の精度に対しても重要度が増している。モータコアは一般に電磁鋼板を積層して使用されるが、積層コアの固定の為に、従来、溶接、カシメやボルト締めが使用されている。しかし、これらの加工はコア磁気特性の劣化を伴い、機械剛性面でも十分とは言えず騒音振動問題と無関係ではありえない。一方、電磁鋼板積層コアの層間を接着することを目的とした接着被膜電磁鋼板²⁾がある。この接着被膜電磁鋼板を用いて積層間を固定した接着コアは溶接コア等と比べ、加工による磁性劣化が少なく、またコア剛性も高く騒音振動問題に対して良い結果が得られると予想される。今回、この接着コアについてコア磁気特性と機械性能を溶接コアと比較して調べてみた。

2. 接着コアの製作とコア磁気特性

接着コアは板厚0.5mmの無方向性電磁鋼板50A1300³⁾を素材とした接着被膜電磁鋼板を図1に示される形状に打ち抜き、積層後、面圧(10kg/cm²)を加えて温度200℃、大気中で接着した。コアサイズは図1に示されるように外径120mm、継鉄部内径90mm、歯部直径61mmで歯数24である。比較コアとして、接着被膜電磁鋼板と同一品種の無方向性電磁鋼板を打ち抜き積層した溶接コア(シーム溶接、表面溶接)を用いた。溶接コアは図1のように継鉄部外周4カ所を溶接したものをを用いた。接着コアも歪取り焼鈍は行っていない。

接着コアと溶接コアに用いた接着被膜無方向性電磁鋼板

と無方向性電磁鋼板の素材特性(外径45mm、内径33mmのリング試料で測定)を表1に示す。試作した接着コアと溶接コアの継鉄部(リングの閉磁路)の磁気特性を表1と図2に示す。コア断面積は継鉄部外径120mm、内径90mmと積層厚から設定した。接着コアの方がモータコアにおける励磁電流やヒステリシス損の増加が少ないので、接着コアの方が溶接コアに比べて歪が入り難いと推察する。

実際のモータ磁気回路における磁化特性を図1の主巻線を用いて直流で測定した。主巻線は騒音振動試験の励磁巻線と兼ねるため、図4のように継鉄部が外部から直視できるように巻いた。コアの磁束密度は図1のサーチコイルを用いて測定した。最大磁束密度1.5Tの結果を図3に示す。コアのリング測定に対応した結果が得られている。

図1 コア形状(溶接コア)

Fig.1 Core configuration (Welding core)

3. 接着コアの騒音、振動

接着コアと溶接コアの騒音を無響音室(暗騒音16dB)で図4に示されるように固定して測定した。コアの騒音だけを検出するため、測定位置は図1のコアのSLM点から2cmのところで、Brüel&Kjær製騒音計でA特性を測定した。図1の主巻線だけの交番磁界でコアを励磁した。コア励磁による加振の影響のみを調査するには回転子を回転しない方が適していると考えた。図1のサーチコイルに誘起される起電力よりコアの磁束密度を計算して設定した。

図5より、50Hz、1.5Tで接着コアが溶接コアより約10dB程度騒音が低いことがわかる。図6の音圧の周波数

表1 コア素材とコアの磁気特性 (1.5T, 50Hz)
Table 1 Magnetic properties (1.5T, 50Hz).

	全鉄損 (W/kg)	ヒステリシス損 (W/kg)	渦電流損 (W/kg)	磁界 (A/m)
接着コア素材	8.3	5.5	2.8	641
溶接コア素材	8.4	5.6	2.8	654
接着コア	7.9	5.4	2.5	647
溶接コア	8.3	5.7	2.6	710

図2 接着コアと溶接コアの直流磁化曲線 (リング測定)
Fig.2 D.c. magnetization curves of adhesive coating and welding cores (Ring measurement).

図3 接着コアと溶接コアの直流磁化曲線
(モータ磁気回路1.5T)
Fig.3 D.c. magnetization curves of adhesive coating and welding cores
(Motor magnetic circuit measurement, 1.5T).

図4 騒音振動試験の写真
Fig.4 Photographs of noise and vibration tests.

図5 接着コアと溶接コアの騒音比較 (50Hz)
Fig.5 Comparison of noise between adhesive coating and welding cores (50Hz).

図6 接着コアと溶接コアの騒音スペクトラム
Fig.6 Noise spectra of adhesive coating and welding cores.

分析より接着被膜では200Hz以下で音圧レベルが高いが、溶接コアに比べ音圧レベルが低い。溶接コアにはコア励磁に関連した基本波100Hzの高調波が多く含まれているが、接着では殆ど現れていない。

次に、コアの振動とその分布をレーザドップラー変位計 (Ometron製) を用い図1のVLPの点で測定した。コアの励磁は騒音振動試験と同じである。コアの軸方向の振動速度を測定した結果を図7に示す。接着コアは殆ど振動していないが、溶接コアは歯先端と継鉄外周部で振動している。その歯先端と継鉄外周部の振動速度波形を図8に示す。誘起電圧が高いとき振動の速度変化即ち加速度が大きい。歯先端と継鉄外周部の振動位相は180°差があり波形も非対称であるが、イロ間を節とする振動が生じ、また端面で測定した為、非接触側に大きく振動したものと推定する。

図7 スタータコアの振動分布 (50Hz)
Fig.7 Vibration distribution of stator core(50Hz).

図8 溶接コアの振動波形 (50Hz, 1.5T)
Fig.8 Vibration waveform (Welding core, 50Hz, 1.5T).

騒音振動の原因を明らかにするため、接着コアと溶接コアのモード解析を行った。図9、図10のように、加振源はコアの半径方向と軸方向の4カ所A、CとB、Dであり、検出点もコアの半径方向と軸方向の4カ所a、cとb、dである。

接着コアの測定結果を図11、溶接コアの結果を図12に示す。C、Dでの加振とc、dの測定点結果はほぼ同様な結果であったので割愛する。

接着コアの伝達関数Gは一般に溶接コアより20 dB程度低く、またピークは3 kHzと3.4 kHzに現れた。溶接コアは複雑な特性を示し、多くのピークが存在した。

3 kHzの共振は、加振と検出が両方とも半径方向の場合〔図11、図12の(1)〕に強く生じ、逆に両方とも軸方向の場合は生じてないので、半径方向の共振と考えられる。従って、半径方向の振動は積層の影響を受け難く、接着コアと溶接コアの伝達関数の値の差が他の場合〔図11、12の(2)、(3)、(4)〕より小さく、溶接コアの

図9 ステータコアの振動特性測定方法

Fig.9 Vibration measurement of stator core.

図10 ステータコアの振動特性測定方法外観

Fig.10 Vibration test of stator core.

特性も他の場合よりピークの数少なくシンプルである。一方、同様な理由より、3.4 kHzは軸方向の共振と考えられる。溶接コアは接着コアと同様に3 kHzに高いピークが現れているが、接着コアで現れた3.4 kHzでは顕著なピークはないが幅の広い山が存在している。これは積層間の剛性が低いためと考えられる。この3 kHzの共振点は騒音試験結果には現れていない。この3 kHzの共振モードが軸方向の振動と関係がないと推定する。3 kHzの共振以外は騒音振動試験の結果を支持するものとする。

次に接着コアの振動特性について温度の影響を調べた。接着コアは長さ140 mm、幅30 mm、積層厚20 mmの試料を用い、恒温槽に入れて、中央部を積層方向に加振し、同点の加速度を測定した。標準の接着被膜（ガラス化温度 $T_g=120^\circ\text{C}$ ）を用いた接着コアに対し、熱可塑性を示し易い低ガラス化温度（ $T_g=5^\circ\text{C}$ ）の接着被膜を用いた接着コアと、溶接コア（溶接部は図14のように長さ方向両端より12 mmである。）を比較した。測定温度は20°Cと100°Cである。図13、図14、図15にモード解析結果を示す。

標準の接着被膜を用いた接着コアは溶接コアと同様に温度の影響を受け難く、高温でも接着能力に変化がないことが分かる。低ガラス化温度の接着被膜の接着コアは室温では標準の接着コアの結果とほぼ同じ結果を示しているが、温度が高くなると溶接コアに似た結果を示している。この結果より、低ガラス化温度の接着被膜では高温で層間の固定力（接着能）が低下していると考えられ、コアの剛性が低下していることが推察できる。

4. 接着コアの熱伝導性（抜熱性）

モータコア等において、鉄損や銅損による熱の、コアによる抜熱性を検討するため、積層コアにおける積層方向の熱伝導を接着コアと溶接コアで比較した。試料は機械特性への温度の影響を調べたものと同じ寸法である。試験方法は図16に示す。まず、空気中で、ホットプレートで鉄の厚板（150 mm×150 mm×5 mm）を100°Cに加熱した後、室温（29°C）の接着コアと溶接コアを加熱された厚板の上に置いて、図16に示される測定点（①～⑥）の温度を熱電対（CA）で測定し温度変化を調べた。厚板表面の温度は図の①、②の点で測定した。コアの温度測定点はコアの厚板接触面とは反対の面で、幅方向に対して中央で測定した。③、④は溶接コア、⑤、⑥は接着コアの温度測定点で、③、⑤は溶接位置に対応する位置、④、⑥は長さ方向の中央の位置である。試験結果を図17に示す。縦軸は100°Cからの温度差で示した。

図17より、接着コアの方が温度変化が速いことがわかる。また、厚板との到達温度差も接着コアの方が溶接コアの場合の温度差より約1/2以下であることが明らかとなった。これらの結果より、接着コアの方が溶接コアより熱伝導性が良く、モータコアにおける抜熱性に優れていることが確認された。

図11 接着コアのモーダル解析

Fig.11 Modal analysis of adhesive coating core.

図12 溶接コアのモーダル解析

Fig.12 Modal analysis of welding core.

図13 モーダル解析(接着コア、 $T_g=120^\circ\text{C}$)

Fig.13 Modal analysis(Adhesive coating, $T_g=120^\circ\text{C}$).

図14 モーダル解析(接着コア、 $T_g=5^\circ\text{C}$)

Fig.14 Modal analysis(Adhesive coating, $T_g=5^\circ\text{C}$).

図15 モーダル解析(溶接コア)

Fig.15 Modal analysis(Welding, $T_a=5^\circ\text{C}$).

図16 熱伝導試験方法

Fig.16 Method of heat conduction test.

図17 接着コアと溶接コアの熱伝導の比較

Fig.17 Comparison of heat conductivity.

5. 結言

今回、接着被膜無方向性電磁鋼板を用いた接着モータコアについて、溶接コアと比較して磁気特性、騒音振動特性及び熱伝導性について調査した。その結果、従来の溶接コアに比べ、コア磁気特性の劣化が少ないことが明らかとなった。また、交番磁界励磁(モータのような回転磁界でない。)において、騒音振動も小さく問題が少ないことが明らかとなった。実際のモータでは、巻線励磁による加振以外に回転子の回転による機械的、電磁的な加振が加わるので、接着コアの有意性はさらに高くなると考える。接着コアは積層方向に高い熱伝導性を示すので、モータなどでは鉄損

や銅損によるコアの温度上昇の抑制にも効果がある。

以上のように、モータ用コアとして、接着コアは溶接コア等に比較して、磁気特性、機械特性及び抜熱性で優位であることが明らかとなった。

最後に、日頃、有益な御指導、御助言をして頂いております九州工業大学山崎二郎教授に深く感謝します。また、研究推進において当社棟田孝司氏にご協力を頂きました。

(平成10年12月22受付, 平成11年3月16日再受付)

文 献

- (1) 脇坂、開道：「無方向性電磁鋼板の鉄損に及ぼす加工歪・応力の影響」電気学会回転機研究会資料, RM-98-26 (1998)。
- (2) 開道、脇坂、棟田、竹田：「回転機における電磁鋼板への要求機能と新しい対応」電気学会回転機研究会資料, RM-96-84 (1996)。
- (3) 日本工業規格「無方向性電磁鋼帯」, JIS C 2552-1986

開道 力 (正員) 1950年 9月 7日生まれ。1975年 3

月東京工業大学電子物理工学専攻修士課程修了。同年新日本製鐵(株)入社。主として電磁鋼板をはじめとする磁性材料の磁気応用、磁気物性及び磁気計測等の研究に従事。現在、同社技術開発本部鉄鋼研究所主幹研究員。

竹田 和年 (非正員) 1963年 6月23日生まれ。1983年

3月神戸大学大学院自然研究科化学系専攻修士課程修了。同年新日本製鐵(株)入社。主として、電磁鋼板の絶縁被膜等の研究に従事。現在、同社技術開発本部広畑技術研究部主任研究員。

脇坂 岳顕 (非正員) 1967年 3月29日生まれ。1993年

3月大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻修士課程修了。同年新日本製鐵(株)入社。主として、電磁鋼板の開発、磁気応用等の研究に従事。現在、同社技術開発本部鉄鋼研究所研究員。

溝上雅人 (正員) 1960年11月1日生まれ。1983年3月

岡山大学工学部電気工学科卒業。1985年 3月同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4月新日本製鐵(株)入社。現在、同社技術開発本部鉄鋼研究所主任研究員。主として、電磁鋼板の利用技術研究に従事。