

無方向性電磁鋼板の総合評価技術

Total Evaluation System of Non-oriented Electrical Steel Sheets

中山大成/Taisei Nakayama・和歌山製鉄所 薄板技術管理部 薄板商品開発室 参事 工博

本庄法之/Noriyuki Honjo・和歌山製鉄所 薄板技術管理部 薄板商品開発室

要 約

無方向性電磁鋼板は家電機器、産業機器に使用されるモータやトランスの鉄心材料として幅広く使用されているが、その性能評価方法としては JIS C 2550(1986)に定められているのみである。しかしながら、金型内自動積層(自動かしめ)に代表されるモータあるいはトランス鉄心の打抜き製造技術の進歩、あるいはインバータ制御技術の進歩により従来の JIS に定められた方法では評価が実体と合わないことが多い。そこでまず、加工性について実体に沿った評価を行うために、自動かしめシステムとテスト金型を導入し、材料強度、コーティング厚みとかしめ強度、寸法精度の関係を調査した。

磁気特性については JIS に定められた方法(エプスタイン法)での材料評価と実際のモータコア、トランスコアの特性評価を比較し、素材と実体コアとの特性差を調べるのが可能な装置を導入した。実際の機器がインバータ化していることに対応させ磁気測定の励磁方法についても従来の正弦波励磁に加え、PWM(Pulse Width Module)による非正弦波励磁にも対応させている。

本報ではコア打抜き加工から磁気特性評価までの総合的な電磁鋼板の評価利用技術の現状について紹介する。

Synopsis

Magnetic and mechanical properties of non-oriented electrical steel sheets have been measured by tensile test in JIS Z 2241(1993) or hardness test in JIS Z 2244(1992), and Epstein frame magnetic measurement in JIS C 2550(1986). However, these measurements are not good enough to evaluate the properties of real motors or transformers. To meet the requirements of electrical appliance industries, we developed the new evaluation system from mechanical properties in stamping to magnetic properties measurement totally.

In this report, we introduce this total evaluating system of non-oriented electrical steel sheets.

1. 無方向性電磁鋼板とその評価方法

住友の無方向性電磁鋼板「スミロックス®」は電機工業分野の急速な進歩とともに発展を続け、JIS C 2552(1986)に規定された規格品のみならず、複雑な形状をしたモーターコア、特にステーターティース部での打抜きによる磁気特性劣化が少ない高加工性型、設計磁束密度の高い小型トランスや蛍光灯安定器用途に開発した高磁束密度型、打抜き加工後の磁性焼鈍(通常750℃、2時間、窒素ガス中)での磁気特性改善に優れたセミプロセス型などをシリーズ化している¹⁾。しかしながら、金型内自動積層に代表されるモータあるいはトランス鉄心の打抜き製造技術の進歩、あるいはインバータ制御技術の進歩により従来の JIS に定められた方法では評価が実体と合わないことが多くなってきた。そこでまず、加工性について、実体に沿った評価を行うために、金型内自動積層用(自動かしめ)テスト金型を製作し、材料強度、コーティング厚みとかしめ強度、寸

法精度の関係を調査した。また、実体での磁気特性を評価するためにモータ、トランスの形状での磁気特性を評価できるシステムを導入した。本システムは JIS に定められたエプスタイン法での測定のみならず、モータ、トランスとして磁気特性を測定ができ、その比較により、実体にあった最適素材の開発および提案を可能にした。また、実際の機器がインバータ化していることに対応させ磁気測定の励磁方法についても従来の正弦波励磁に加え、PWM(Pulse Width Module)による非正弦波励磁にも対応したシステムとなっている。

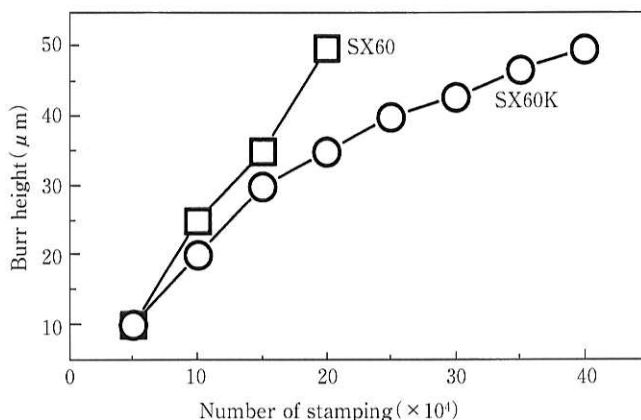
2. 加工性の評価方法

従来、モータ、トランスの製造にあたり、鋼板メーカーより供給された電磁鋼板フープを次のように加工していた。

連続打抜 → 焼 鈍 → 積 層
 (場合により実施) (溶接, ボルト締め)
 → 巻 線 → 組 立

ところが近年の精密打抜加工技術の進歩²⁾により, 金型内自動積層(自動かしめ)が主流となり製造工程も簡略となった一方で自動かしめ性が重要な評価ポイントとなった. 連続打抜自動かしめ → 焼 鈍 → 巻 線 → 組 立
 (場合により実施)

一方, これら特徴のある材料を評価するための技術開発も進めてきた. 打抜性の評価にあたっては連続プレス機による打抜回数評価での金型摩耗性の評価に加え, 金型内自動積層(自動かしめ)による結束力評価や寸法精度評価も行っている. 第1図に連続打抜性について高加工性電磁鋼板 SX60K と従来の JIS グレード材 SX60 を比較した. 本試験は写真1に示す連続打抜プレスに写真2の金型にて行った. 打抜性(耐金型摩耗性)は正方形の各辺のカエリ高さ測定することで評価している. すなわち高加工性電磁鋼板は通常材より打抜性に優れていることを示している.



第1図 高加工性材の打抜性

Fig.1 Punchability improved non-oriented electrical steel sheets

〈電磁鋼板〉

JIS グレード : SX60(0.2 %Si)
 高加工性材 : SX60K(0.2 %Si)
 表面コーティング : なし
 板 厚 : 0.5 mm
 表面仕上げ : ブライト(Ra=0.25μm)

〈打抜試験条件〉

プレス機 : 山田プレス製25t 連続順送プレス
 打抜寸法 : 17 mm×17 mm
 ダイス材質 : SKD11
 ストローク数 : 350 ストローク/分
 打抜油 : 出光ニューパンチ
 クリアランス : 5 %

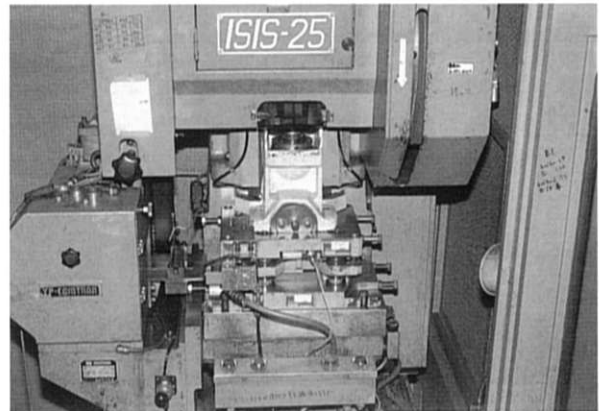


写真1 連続打抜プレス外観

Photo 1 Continuous stamper

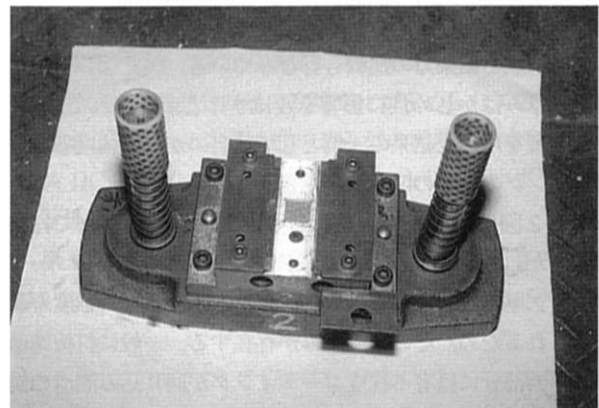


写真2 連続打抜金型(下型)

Photo 2 Die for punchability evaluation

一方, 自動かしめ性を評価するために写真1のプレス機に写真3に示す自動かしめ金型を載せ試験を行った. 金型は黒田精工(株)製ファステックシステム金型寸法は外径45.000mm, 内径33.000mmの真円で作成, 5ステージ順送の4点かしめ方式で, かしめ部(ダボ)は写真4に示すV型, 丸平型, 角平型, 丸V型の4種類を比較, か

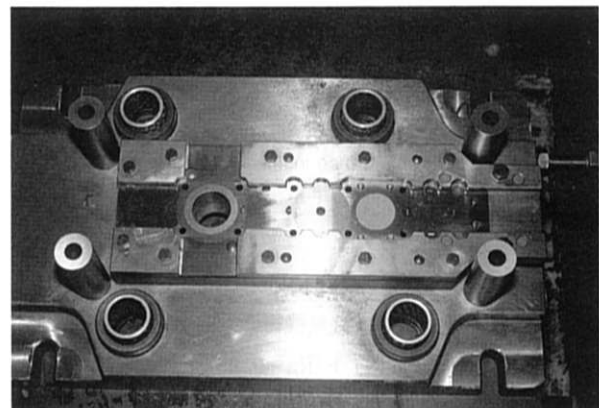
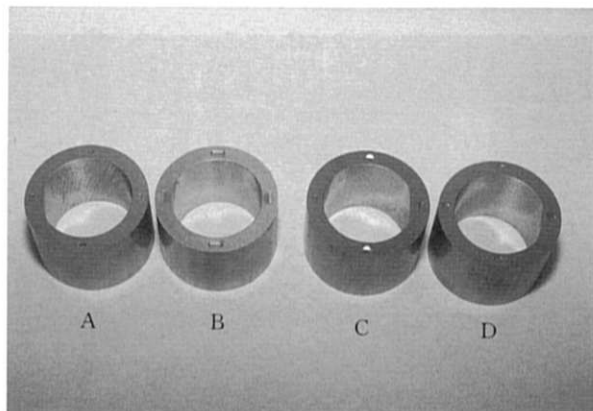


写真3 自動かしめ金型(下型)

Photo 3 Die for interlocking system core

技術報文



Type of interlocking

A: (V-type), B: (Rectangular)

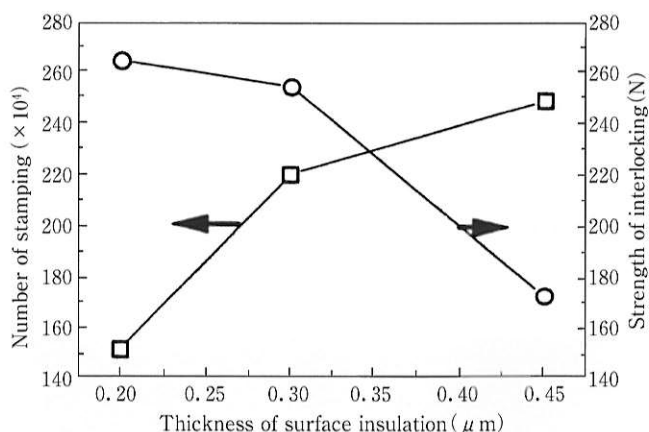
C: (Circular V), D: (Circular)

写真4 各種かしめ形状

Photo 4 Various type of interlocked ring

しめ形状と結束力の比較も行なっている。例えばコーティング厚みはかしめ性に影響を及ぼすことが知られており³⁾ 本金型を用いた結果の一例として材料のかしめ強度とコーティングの厚みの関係を第2図に示した。

第2図に示すとおりコーティング厚みの最適化で打抜き性、かしめ性とも良好なものが得られる。すなわちコーティング厚み減少により打抜き性が落ちるが、かしめ強度が改善されるため、その最適厚みが存在する。一般に打抜き端面の剪断部分には有る程度コーティングが回り込み潤滑の働きをする。この潤滑が打抜き性にプラスに、かしめ性にはマイナスに影響を及ぼしているためである。



第2図 打抜き性、かしめ性とコーティング厚み

Fig.2 Effect of surface insulation coating thickness on punchability and interlocking performance

〈電磁鋼板〉

SX40(0.5 %Si) (JIS グレード材)

コーティング : X1(有機無機複合コート)

表面仕上げ : プライト (Ra=0.25 μm)

〈打抜き条件〉

プレス機 : 山田プレス製25t 連続順送プレス

自動かしめ金型: 黒田精工製ファステック

かしめコア形状: 内径33 mm 外径45 mm のリング

かしめ部形状 : 丸 V 型

かしめ部個数 : 4 ヶ所

積層枚数 : 60枚/コア

打抜き速度 : 250ストローク/分

連続順送打抜き

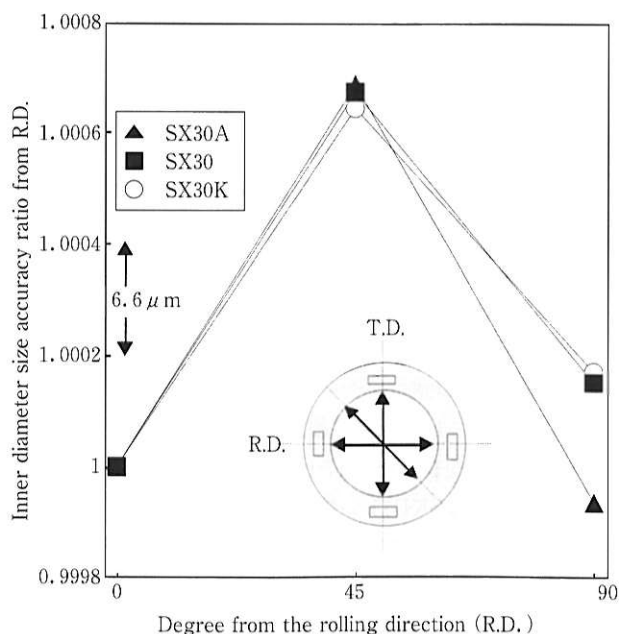
金 型 : 17 mm×17 mm (SKD11)

打抜き速度 : 350 ストローク/分

打抜き油 : 出光ニューパンチ

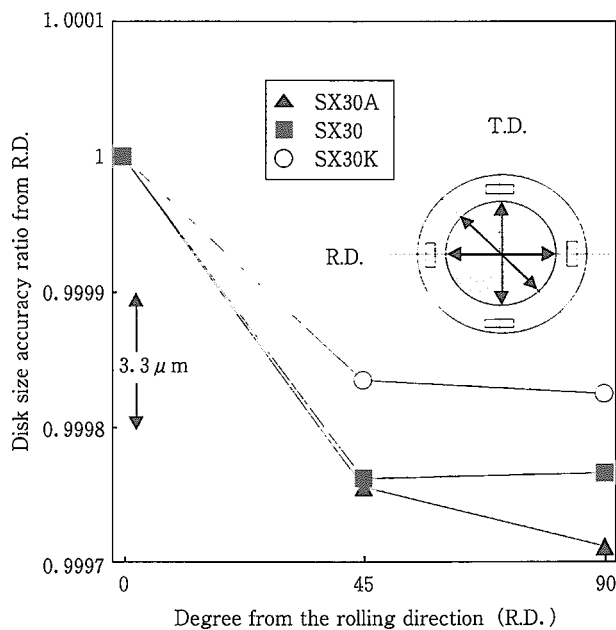
クリアランス : 5 %

一方、寸法精度についても検討を行っている。自動かしめ打抜き後のリングコアとバラ抜きのディスクはそれぞれモータのステータ、ロータに相当する。実際のモータの特性を支配する重要な因子の一つであるエアギャップはロータとステータの隙間であり、打抜き寸法精度が悪いところのエアギャップが大きくなりモータの性能は落ちる。通常、金型が真円の場合、電磁鋼板の機械的性質の異方性により打抜き後のリング、ディスクはわずかに楕円となる。楕円となるとロータとステータのエアギャップはある部分で広く有る部分では異常に狭いか接触する事態も発生する。したがってこのような事態をさけるためにより広いエアギャップを取る必要がありモータ特性の劣化を招いていた。そこでこのエアギャップが少なく済む材料、すなわち打抜き後の真円度が改善される高加工性電磁鋼板を開発し、本自動かしめ試験システムで評価した。第3図、第4図に一例として高加工性電磁鋼板 SX30K と通常の JIS グレード材 SX30、更にセミプロセス用途も兼ねた SX30A との比較を行った。



第3図 高加工性材の寸法精度(リング内径)

Fig.3 Ring core inner diameter size accuracy of punchability improved non-oriented electrical steel sheets



第4図 高加工性材の寸法精度(ディスク)

Fig.4 Disk size accuracy of punchability improved non-oriented electrical steel sheets

〈電磁鋼板〉

JIS グレード : SX30(0.9 %Si)

高加工性材 : SX30K(0.9 %Si)

比較材(セミプロセス兼用材) : SX30A(0.9 %Si)

コーティング : X1(有機無機複合コート)

表面仕上げ : ブライト(Ra=0.25μm)

〈打抜条件〉

プレス機 : 山田プレス製25t 連続順送プレス

自動かしめ金型 : 黒田精工製ファステック金型

かしめコア形状 : 内径33mm 外径45mm のリング

かしめ部形状 : 角平型

かしめ部個数 : 4ヶ所

積層枚数 : 60枚/コア

打抜速度 : 250ストローク/分

高加工性電磁鋼板が真円度、すなわち圧延方向と45度、90度方向の差が通常材よりも小さいことがわかる。このことはこの高加工性電磁鋼板を使用すればより小さいエアギャップ設計が可能になりモータの効率が改善できることを意味する。

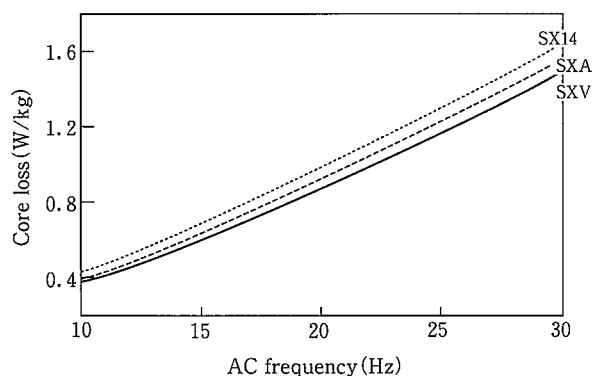
以上のように、実際のモータコア製造プロセスと同じ連続打抜自動かしめ試験システムによって、加工性に優れた材料の開発を行いその評価が行えるようになっている。

3. 磁気試験と実体評価

従来、交流誘導モータはその原理から一定回転数しか得られなかったが、直流モータは速度可変のために、速度コントロールの必要な産業用機器は直流機が主流であった。しかしながら直流機には構造としてブラシがあり、このブラシメンテナンスの必要性が交流誘導機に比べ不利であるがために、冷蔵庫、エアコン、洗濯機等の大型の家電機器には使用されず、交流誘導機を使用して非効率な ON-OFF 制御や減速機を用いて速度コントロールを行っていた。ところが、制御機器の進歩でインバータが安価なものとなり交流誘導機も駆動周波数が電源周波数(一定)のみから解放され、交流誘導モータが速度可変機の主流となった。ところがこの周波数可変という制御によりコア材料である電磁鋼板の見方を従来とは変える必要性を生じさせている。

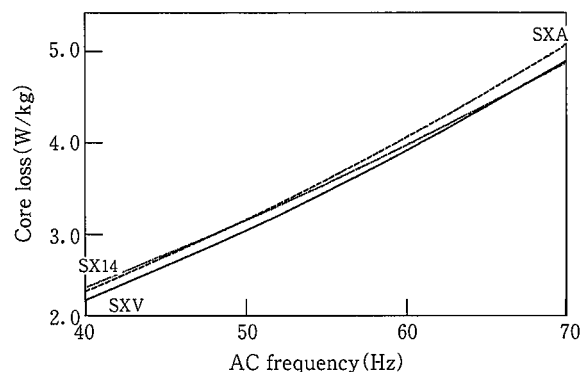
加えて、近年の地球温暖化問題で炭酸ガス排出を抑制するために個々の消費機器の高効率化が求められエアコン、冷蔵庫などでは永久磁石埋め込み型の同期モータ(ブラシレス DC モータ)が採用されるようになり、ますます周波数と鉄損の関係が重視されるようになった。

第5図～第7図は商用周波数50 Hz ではほぼ同等の鉄損(W15/50=3.2~3.4 W/kg)を示す SX14, SXA, SXV の

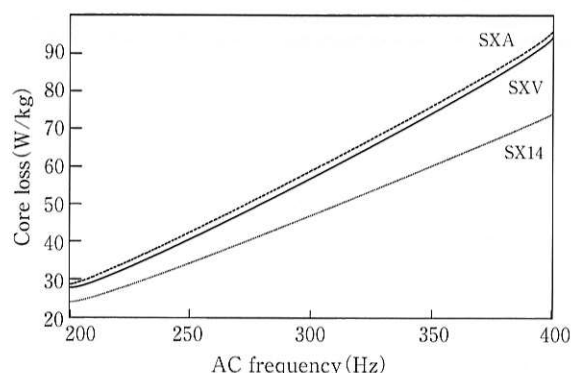


第5図 鉄損の周波数特性(低周波域)測定磁束密度 B=1.5T

Fig.5 Core loss in low ac frequency(Measured at B=1.5T)

第6図 鉄損の周波数特性
(商用周波数付近)測定磁束密度 B=1.5TFig.6 Core loss near commercial ac frequency
(Measured at B=1.5T)

技術報文



第7図 鉄損の周波数特性(低周波域)測定磁束密度 $B=1.5T$
Fig.7 Core loss in high ac frequency(Measured at $B=1.5T$)

〈電磁鋼板〉

SX14 : JIS グレード材(2.0 %Si-0.3 %Al)

SXA : セミプロセス材(0.9 %Si-0.3 %Al)

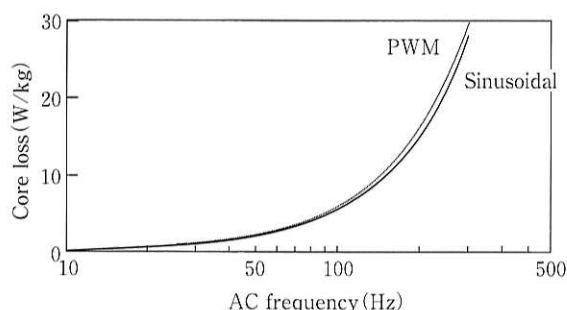
SXV : セミプロセス材(0.9 %Si-0.3 %Al)

板 厚 : 0.5 mm

〈磁気測定〉

JIS C 2550(1986) 25 cm エプスタイン枠

正弦波励磁



第8図 PWM 励磁と正弦波励磁の比較

測定磁束密度 $B=1.5T$

Fig.8 Core loss comparison between sinusoidal and non-sinusoidal(Pulse Wave Module) magnetization (Measured at $B=1.5T$)

〈電磁鋼板〉

SX9 : JIS グレード材(3.0 %Si-1.0 %Al)

板 厚 : 0.5mm

〈磁気測定〉

JIS C 2550(1986) 25 cm エプスタイン枠

PWM 励磁 : スイッチング周波数 : 49次

デューティー比 : 1.0

3 グレードの材料について、鉄損の周波数特性をそれぞれ商用以下の低周波域、商用周波数付近、高周波域で比較した。本試験は JIS 法に基づくエプスタイン試験であるが、それでも高周波域での SX14 の優位性や、低周波域での SXV の優位性があることなどが明らかとなり、これまでの商用周波数特性のみで評価したのでは不十分であることが示唆された。

更に第8図に示すように正弦波励磁と PWM 励磁では同一周波数でも差があり PWM 励磁のほうが鉄損が大きい傾向にある。これはインバータでのスイッチングにより発生させた高周波分の鉄損が加算されるため、インバータ制御機器では常に問題となる。

一方、エプスタイン試験の結果が実際のモータ、トランスの特性に一致しないことがしばしば起こる。そこで実体磁気特性評価試験装置を導入しモータ、トランスの特性を評価できるようにした。写真5～写真7に測定装置の測

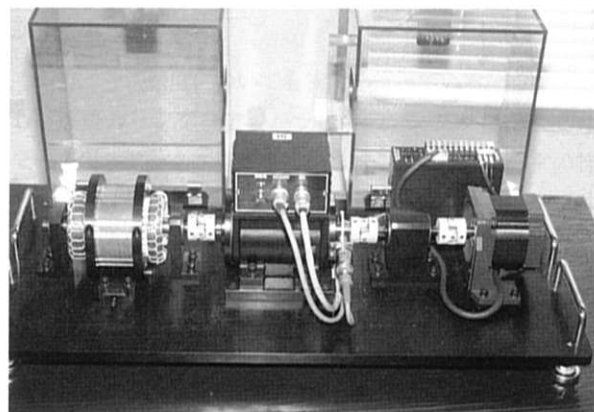


写真5 実体磁気特性評価装置(モータ評価部)

Photo 5 Motor tester

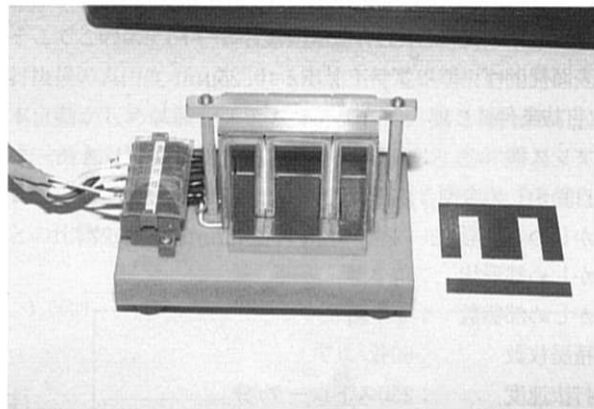


写真6 実体磁気評価試験装置(小型トランス評価部)

Photo 6 Choke (EI transformer) tester

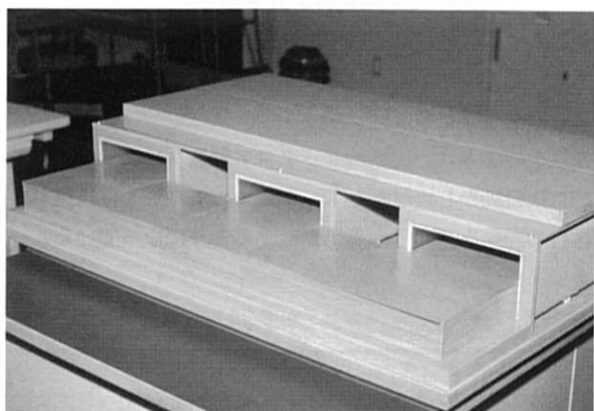


写真7 実体磁気評価試験装置(大型トランス評価部)

Photo 7 Model transformer

定部「モータ、小型トランス(EI コアトランス)、大型トランス(モデルトランス)」の測定部を示した。モータの複雑な打抜形状、回転磁場と交番磁場の違いなどの因子が実際のモータとシートのエプスタイン値との間に差を生じていることなどが明らかにできるようになった。

4. まとめ

モータ、トランスの製造技術、制御技術の進歩に伴い、電磁鋼板の素材性能評価方法も変化してきた。JIS に定められた基本性能評価方法のみではすでにマーケットニーズに答えられない状況にあり、打抜性能評価方法としての連続打抜自動かしめシステムの導入、実体磁気特性評価装置による実際のモータ、トランスの特性と母材シートの磁気特性比較など新たな評価技術を開発した。このような総合評価システムにより材料設計からカスタマーサービスまで幅広く応用できるようになった。



中山大成/Taisei Nakayama

和歌山製鉄所 薄板技術管理部
薄板商品開発室 参事 工博

(問合せ先：0734(51)2509)

参考文献

- 1) 中山, 永井, 本庄, 屋鋪, 住友金属48(3), 39(1996)
- 2) 黒田 第178回塑性加工シンポジウム 塑性加工学会,

1(1998)

- 3) 中山 日本国特許第274268号