

自動車電装品の小型化，高機能化に貢献する 打抜加工性に優れた電磁鋼板*

川崎製鉄技報
35 (2003) 1, 1-6

Electrical Steels Having Excellent Punchability for Compact and High-functional Automotive Electrical Components



河野 雅昭
Masaaki Kohno
技術研究所
電磁鋼板研究部門
主任研究員(課長補)



千田 邦浩
Kunihiko Senda
技術研究所
電磁鋼板研究部門
主任研究員(主席掛長)



早川 康之
Yasuyuki Hayakawa
技術研究所
電磁鋼板研究部門
主任研究員(課長)・
工博

要旨

電磁鋼板の打抜加工性，および加工による歪が磁気特性に及ぼす影響を評価した。打抜加工性には表面コーティングの影響が大きく，有機系の接着被膜である B コート材は特に優れた金型寿命を示す。鋼板硬度の増加によっても金型寿命は低下する。一方，加工端面に導入される歪による磁気特性の劣化は，板厚が薄く高硬度の鋼板ほど影響が小さいため，歪取り焼鈍を施さずに使用されるモータ用途では有利となる。駆動用モータ，EPS モータ用途に好適な，良好な打抜性と低鉄損および高磁束密度を兼ね備えた無方向性電磁鋼板 RMHE および RMHF シリーズ，分割コア用途に適した加工性と異方性を改善した新方向性電磁鋼板 RGE を紹介する。

Synopsis:

The punchability of an electrical steel sheet and magnetic property with strain induced by punching were evaluated. Insulation coatings have much influence on the operating life of a stamping die. Inorganic-organic coating "A coating" has better punchability than inorganic coating "D coating", and self-adhesive type organic coating "B coating" has excellent punchability. The operating life of a stamping die is shortened with the increase of hardness of steel sheets. On the other hand, the deterioration of magnetic property with induced strain is restrained in a thinner and harder material. RMHE and RMHF series consist of good punchability, high flux density, low iron loss and low hysteresis loss and therefore they are suitable for driving motors and EPS motors. Newly developed glass-less grain-oriented electrical steel "RGE" has better punchability and magnetic anisotropy than conventional steels and accordingly, it is expected to be applicable to segmentalized motors.

1 緒 言

自動車にはスタータ，オルタネータなどの始動，充電系をはじめとして，駆動制御，空調系や内外装機器に多種多様のモータ，電装品が用いられており，その数は大衆車クラスで約 20 個，高級車では 60 個以上に達している¹⁾。これらの電装品のコア材料としてはこれまで SPCC クラスの冷間圧延鋼板が多く用いられてきた²⁾。

近年では，環境問題への対応として，電気自動車 (EV) やハイブリッド車 (HEV) など主駆動系の電動機化が目立っており，一部の車種では実用化段階にある。主駆動系以外でも，従来油圧式であったパワーステアリングの電動化により，数% の燃費改善が図れることから電動パワーステアリング搭載車が増加している。さらに，自動車電源の標準電圧を 14 V (バッテリー電圧 12 V) から 3 倍の 42 V (バッテリー電圧 36 V) 化する新システムの開発が日・米・欧を中心

に活発になされている³⁾。42 V システムでは，モータジェネレータを使った簡易ハイブリッドシステム，電動 4 輪駆動システム，電動パワーステアリング，電動カーエアコン，電動ブレーキなどの省エネルギー，安全および快適装備の搭載が容易となる。このことから，自動車における電装品は今後大幅に増加するものと考えられる。以上のような背景から，自動車電装品への小型軽量化，高効率化，高出力化および高機能化などの要求は厳しさを増しており，今後も DC ブラシレスモータなど高性能モータの適用や電磁鋼板の採用が増加すると予想されている。

これらの電装品に用いられる鉄心コアは，鋼板をプレス打抜き後，積層して製造される。ここで金型の摩耗や型かじりなどのトラブルは生産性低下，メンテナンス負荷の増大をもたらす，製造コストアップ要因となるため，プレス打抜性に優れた鋼板が要望されている。特に小型モータでは，コア体積に対する加工部の比率が高くなるため，磁気特性およびモータ特性に及ぼす加工の影響も懸念される。

本報告では，打抜加工性に及ぼす鋼板素材因子の影響，および打抜加工歪が素材磁気特性およびモータ特性に及ぼす影響を明らかに

* 平成14年10月23日原稿受付

Table 1 Characteristics of insulating coating for non-oriented electrical steel sheet

Coating code in Kawasaki Steel	D	A1 (Thin type)	A1 (Thick type)	B
Composition	Inorganic	Inorganic-organic		Organic
TIG weldability (cm/min)	120	60	< 30	Adhesion coating
Heat resistance	Good	Good	Good	Poor

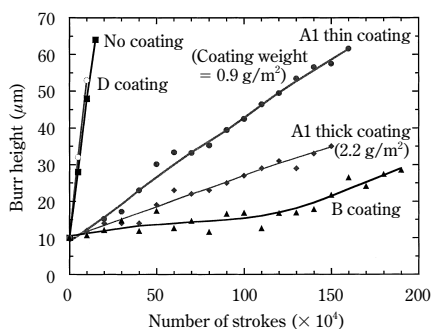
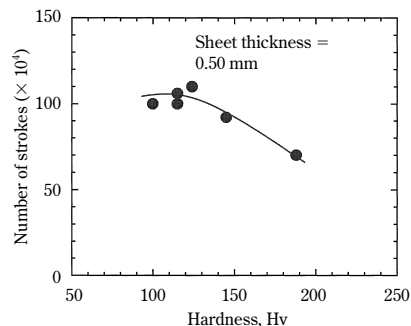


Fig. 1 Influence of insulating coatings on continuous punching (Die: Steel die, Lubricant: Normal punching oil, Clearance: 5%, Sample: 50RM800)

Fig. 2 Influence of hardness of electrical steel sheets on number of punching strokes to reach a burr height of 50 μm (Die: Steel die, Lubricant: Normal punching oil, Clearance: 5%, Coating: A1 thin coating)

し，各種自動車電装品に適する電磁鋼板を提案する。

2 電磁鋼板の打抜加工性

金型摩耗や型かじりなどプレス打抜性には，金型材質やクリアランス設定など装置要因の影響が大きいが，電磁鋼板の素材特性も影響しており，特に金型摩耗に対しては表面に塗布されたコーティングの影響が大きい。

コーティングは鋼板積層時の渦電流損の発生を抑制するため層間絶縁性を付与する目的で塗布されるが，他にも溶接性や歪取り焼鈍時の耐熱性など，用途に応じてさまざまな特性が要求される。これらの要求に対し川崎製鉄では，種々の無方向性電磁鋼板用コーティングを開発しており，その一例を Table 1 に示す。Fig. 1 にこれらのコーティングを施した電磁鋼板の連続打抜試験結果を示す。金型が摩耗すると鋼板打抜き端面のかえり（バリ）が大きくなるため，かえり高さを打抜性の評価指標として用いた。無機被膜の D コートは優れた溶接性と絶縁性を有するが，かえり高さ 50 μm に達するまでの打抜回数は 10 万回程度である。一方，無機化合物と有機化合物の混合被膜として打抜性を改善し，標準コーティングとして広く用いられている A1 コートは，薄目付タイプでも十分な絶縁性と 100 万回以上の優れた打抜性を示す。さらに膜厚を増加することにより耐金型摩耗性は一層の向上が可能となる。これはコーティング中の有機樹脂が素材／金型間で一種の潤滑材の役割を果たすためと考えられる。ホットメルト系の有機樹脂被膜である B コートも非常に良好な打抜特性を有している。B コートは，打抜き後の積層加圧加熱（加圧力 0.5 ~ 1 N/ m^2 ，接着温度 200 ~ 250 $^{\circ}\text{C}$ ，保持時間 10 s 以上）により積層コアを一体化することができる接着コーティングである⁴⁾。かしめや溶接などによる一体化では，固定にともなう弾塑性歪の導入，層間短絡による渦電流損の増加が懸念されるため，かしめ，溶接フリーの新たな接合方式として注目されている。

一方，鋼板の電気抵抗が高いほど交流磁化時の渦電流が抑制され低鉄損となるため，電磁鋼板には Si や Al といった鋼の電気抵抗を高める元素⁵⁾が，目標とする磁気特性レベルに応じて添加されてい

る。ところが，これらの元素の添加は鋼板の機械的特性を変化させるため加工性にも影響を及ぼす。Fig. 2 は，種々の鋼組成の電磁鋼板（A1 コートを目付量 0.9 g/ m^2 コーティング）について，初期かえり高さが 10 μm となるよう金型調整した後に連続打抜試験を行い，かえり高さが 50 μm に達するまでの打抜き回数を鋼板素材硬度（ピッカース硬度：Hv 1）との関係で整理したものである。Si，Al などの添加で鋼板硬度が上昇すると，金型摩耗が促進される傾向にある。加えて，高硬度の素材では型かじりなども生じやすくなるため，量産機種用の材料では硬度 200 ポイント以下に制限されることが多い。

3 加工歪による磁気特性の変化

プレス打抜きにより切断部近傍に導入される加工歪は，磁壁移動の障害となり磁気特性を劣化させる要因となるため，クリアランスなど切断条件を最適に管理して歪の少ない加工方法をとる必要がある。できれば加工後に歪取り焼鈍を行うことが望ましいが，生産性，コストなどの理由により，打抜きままでコア加工されることも多い。そこで電磁鋼板の加工による磁気特性の変化を評価した。

Fig. 3 にプレス打抜き端面近傍の硬度分布の一例示。切断面近傍は打抜き時に加工硬化しており，その領域は板厚 0.50 mm 材の

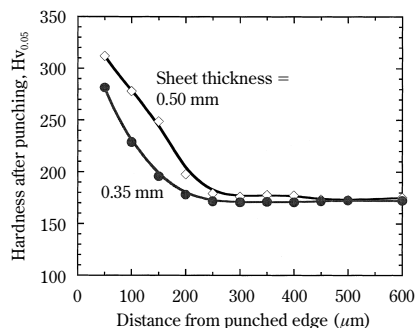


Fig. 3 Distribution of hardness in the vicinity of punched edge

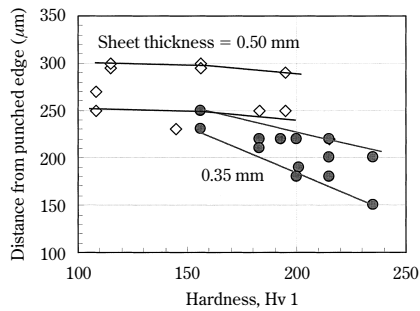


Fig. 4 Influence of hardness and sheet thickness of electrical steel sheet on strain hardening area induced by punching

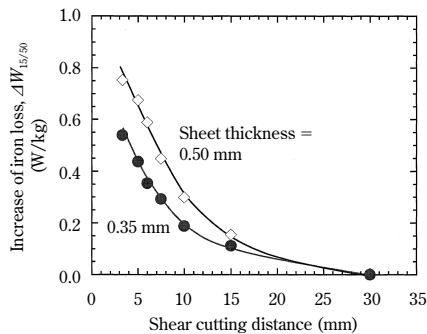


Fig. 5 Influence of shear cutting distance on increase of iron loss

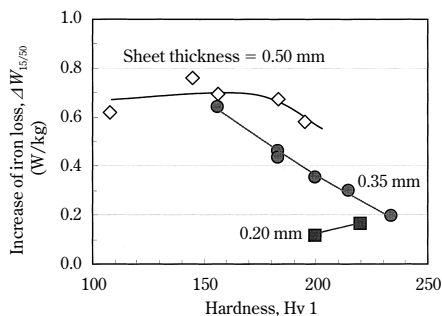


Fig. 6 Influence of hardness and sheet thickness of electrical steel on increase of iron loss by shear cutting distance

方が 0.35 mm 材よりも広い。この打抜加工による硬化領域を種々の素材について同様に評価した。Fig. 4 に素材硬度との関係で整理して示した。0.50 mm 材では素材硬度に関わらず端面から 250 ~ 300 μm の領域まで加工歪の残留が認められる。一方 0.35 mm 材は 0.50 mm 材より歪蓄積領域が狭く、かつ硬度が高い素材ほど歪蓄積領域は小さくなる。

幅 30 mm の試験片を磁気測定後、2 分割（切断幅 15 mm）から 9 分割（同 3.3 mm）となるよう剪断して再度測定し、加工歪による磁気特性の変化を評価した。Fig. 5 に剪断による鉄損変化の一例を示す。剪断幅の減少にともない鉄損劣化しており、特に剪断幅 10 mm 以下での劣化が大きい。Fig. 6 は種々の電磁鋼板素材について、幅 30 mm の単板磁気測定試験片を幅 5 mm に分割した場合の鉄損劣化量を素材硬度との関係で整理したものである。幅分割により、0.50 mm 材では素材硬度によらずほぼ同程度の鉄損劣化を生じるのに対し、より板厚の小さい 0.35 mm 材や 0.20 mm 材では劣化量が小さくなり、かつ素材硬度が高いものほど劣化が抑制される傾向にある。これは Fig. 4 に示した端面加工硬化の結果と良い相関が見られることから、板厚が薄い素材の方が剪断時の変形領域が狭いため、かつ高硬度材ほど剪断変形量が減少するためと考えられる。

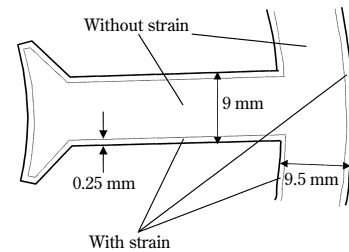


Fig. 7 Calculation model considering edge strain

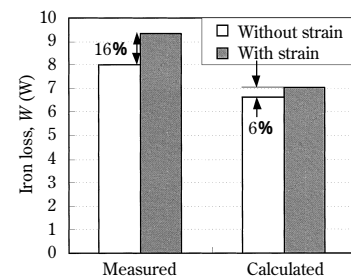


Fig. 8 Comparison of motor iron losses obtained from measurement and calculation

4 加工歪がモータ特性に及ぼす影響

川崎製鉄では、さまざまなモータタイプに対応したモータ評価装置を開発し、モータ特性に及ぼす鉄心素材の影響を検討している⁶⁻⁸⁾。ここでは、プレス打抜きにより導入された加工歪がモータ特性に及ぼす影響を、ブラシレス DC モータ評価装置を用いた評価、および打抜加工歪の影響を考慮した磁界解析計算により検討した結果⁹⁾を紹介する。

試験モータは 3 相 8 極 12 スロットの表面磁石型ブラシレス DC モータ（定格出力 300 W）を用いた。ステータコアに 50RM230（板厚 0.50 mm, $W_{15/50} = 2.16$ W/kg, $B_{50} = 1.67$ T）を用い、打抜きままの状態、および 750°C で 2 h の歪取り焼鈍後の状態でモータ特性を測定した。ここで 50RM230 は鋼板製造工程で十分高温の仕上げ焼鈍を行っており、歪取り焼鈍では結晶粒成長が起こらずに打抜端部の加工歪のみが解放されるとみなせるので、両者を比較することで加工歪の影響を評価できる。一方、磁界解析は加工歪を考慮しない場合と、Fig. 7 に示すようにティース幅 9 mm のうち、加工端部から幅 0.25 mm の領域を加工歪導入領域とした場合を計算し、両者を比較した。端面近傍の導入歪量は連続的に変化しているが、ここでは簡単のためにこの領域内の平均の歪量で一定とした。加工歪導入部の磁気特性は、この領域の平均の硬度上昇分に相当する加工歪を、別途軽圧延により導入した鋼板の磁気特性に等しいと仮定した。

Fig. 8 にモータ評価装置により測定したモータ鉄損と磁界解析により求めた鉄損を示す。モデルモータ測定では歪取り焼鈍により約 16% の鉄損改善が見られたのに対し、磁界解析計算では端部歪による鉄損劣化分は全鉄損の 6% 程度であり、実測された鉄損改善分の 1/3 程度であった。今回磁界解析で考慮されていない因子として、かしめによる歪やコア外周溶接による歪、弾性歪の影響などがある。実測したモータでは歪取り焼鈍によりこれらの歪も減少しうするため、より大きな改善効果が得られるものと考えられる。

以上の検討結果より、特にティース幅やヨーク幅が細い小型モータ

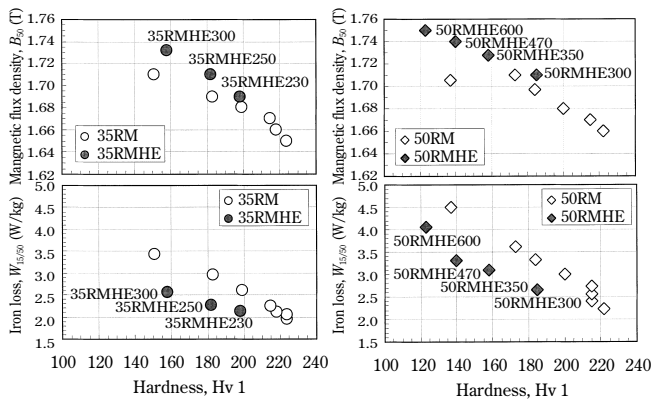


Fig. 9 Relationship between magnetic properties and hardness of non-oriented electrical steel produced by Kawasaki Steel

タで歪み取り焼鈍なしで使用される場合には、加工歪による磁気特性劣化抑制の観点から、(1) 薄板厚で、(2) 打抜性を阻害しない範囲 ($Hv 1 \leq 200$) で比較的高硬度である材料が有利であるといえる。

Fig. 9 に川崎製鉄の無方向性電磁鋼板製品群の一例を示す。RMHE シリーズは Si, Al, Mn などの主要元素の添加量最適化、介在物制御、集合組織制御などの技術により、素材硬度レベルを 200 ポイント以下に抑制しつつ、JIS グレード品である RM シリーズの同一硬度レベル材に対し低鉄損と高磁束密度を両立した製品群である。中でも最高級グレードである 35RMHE230 は良好な打抜加工性を有しつつ、加工による磁気特性劣化が抑制できると考えられる。また、高磁束密度素材を使用したモータは低磁束密度材のモータと比較すると、同一体格では高トルクとなり、同一トルク設計とすると小型化が可能となる。自動車電装品ではトルクが重視される場合が多いことに加え、設置スペースなど設計上の空間制約が大きく小型化の要求も強いことから、高磁束密度材が有利となる用途と考えられる。

5 自動車電装品用鉄心素材の提案

5.1 駆動用モータ

EV, HEV などの主駆動および補助駆動用モータに関して、種々のモータタイプが検討されているが、これまでのところ日本においてはブラシレス DC モータが主流となっている¹⁰⁻¹²⁾。これは、(1) 低速域でも効率が良いので、発進、停止を繰り返す日本の都市部での走行環境で有利である、(2) 日本は優れた磁石製造技術を有しているため高性能な磁石の使用が可能であり、小型軽量、高効率化が図れることが主な理由と考えられる。

ブラシレス DC モータは、ロータに希土類磁石などの強力な磁石を用いることで励磁のための一次電流が小さくなり、かつロータに二次導体回路を持たないため二次電流が発生しない。したがって、誘導モータと比較して銅損が小さくなり、モータ損失における鉄損の占める割合が相対的に高くなる。さらに、PWM 励磁波形や磁石励磁によって、鉄心ティースおよびヨーク部の磁束密度波形には高調波成分が重畳しているため、同期周波数よりもより高周波での鉄損とモータ効率の相関が高いことが明らかとなっている。また定格を超えるような高出力領域では、励磁電流が増加し銅損比率が増大するため高磁束密度材ほど効率が向上する傾向がある¹³⁾。以上のことから、ブラシレス DC モータ用素材としては、高効率化のために

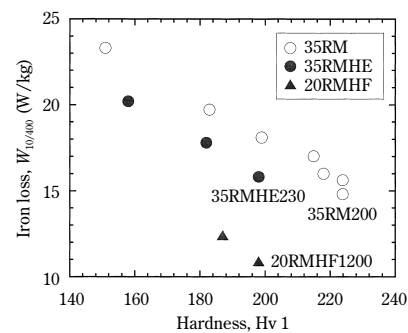


Fig. 10 Relationship between iron loss at 400 Hz and hardness of 0.35 and 0.20 mm thick non-oriented electrical steel

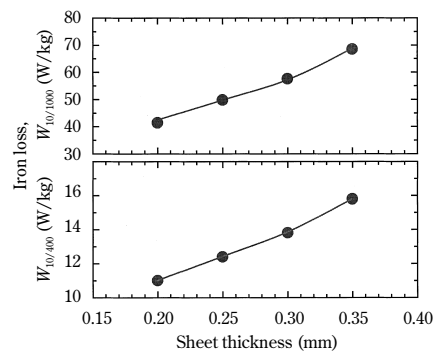


Fig. 11 Influence of sheet thickness on iron loss at high frequency

高周波域での鉄損の低い材料が適しており、高出力域での特性も考慮すると磁束密度も高いことがより望ましいといえる。

Fig. 10 に板厚 0.35 mm 材および 0.20 mm 材の素材硬度と 400 Hz における鉄損の関係を示す。35RM200 は $W_{50/400} = 14.8$ W/kg と 0.35 mm 厚の中では最も優れた低鉄損性を示すが、硬度が 224 ポイントと高い。硬度が 198 ポイントで $W_{50/400} = 15.8$ W/kg の 35RMHE230 は、 $B_{50} = 1.69$ T の高い磁束密度 (Fig. 9) と合わせ、加工性と磁気特性において良好なバランスを示している。板厚が 0.20 mm の RMHF1200 ではさらに優れた低鉄損性を有している。

Fig. 11 に板厚と高周波鉄損の関係を示す。鉄損はヒステリシス損 (W_h) と渦電流損 (W_e) に分けられる。渦電流損は磁気変動が起こった周囲に流れる渦電流に起因する損失であり、さらに古典的渦電流損 W_{ec} と磁区構造を考慮した異常渦電流損 W_{ea} に分けられる。古典的渦電流損は、

$$W_{ec} = k(tfB)^2 / \rho D \dots \dots \dots (1)$$

k : 定数, t : 板厚, f : 励磁周波数, B : 磁束密度, ρ : 固有抵抗, D : 比重

で表され、板厚と周波数の 2 乗に比例することが知られている。したがって、薄厚化による渦電流損の低下により低鉄損化できる。さらに励磁周波数が高くなると全鉄損に占める渦電流損の比率が高まるため、高周波域での低鉄損化に対して薄厚化は特に有効な手段となる。ただし、鋼板が薄くなるとコア積層枚数が増加し生産性が低下するなどの課題もある。川崎製鉄では、板厚 0.20 mm の高周波用薄厚電磁鋼板 20RMHF シリーズを主として IT 分野向けに量産しており、薄厚電磁鋼板についても供給体制を整えている。

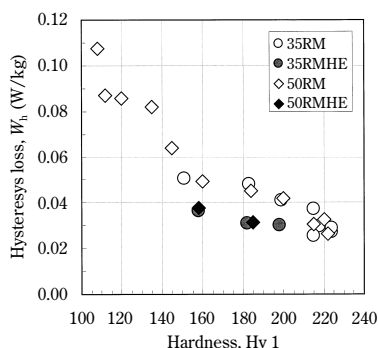


Fig. 12 Hysteresis loss of non-oriented electrical steel

5.2 電動パワーステアリング用モータ

エンジン運転中に常時油圧ポンプが駆動している従来の油圧パワーステアリングに対して、電動パワーステアリング (EPS) はハンドル操舵時のみにモータを駆動しトルクアシストする方式であり、約 3~5% の燃費向上が可能となる¹⁴⁾ため、近年急速に普及している。開発初期は軽自動車への搭載であったが、順次リッターカーや普通車クラスなど適用車種が大型化しており、モータの必要出力も大きくなっている。ところが、大出力化のためモータサイズが大きくなると、ロストルク、トルクリップルなども増大するため、操舵感が悪くなる傾向がある。このうちロストルクはロータ/ステータ間に発生する磁気的作用の影響が大きいため、高出力 EPS モータ用の電磁鋼板には特にヒステリシス損の小さい材料が求められている。

Fig. 12 に素材の硬度レベルと励磁磁束密度 1.5 T におけるヒステリシス損 W_h の関係を示す。素材のハイグレード化にともない、ヒステリシス損は低下する傾向にある。これは、Si, Al などの添加量の多いハイグレード材は、高温でもフェライト単相組織であるため高温焼鈍による結晶粒成長が可能となること、鋼の高純度化レベルがより厳しく管理されていることなどにより磁壁の移動を妨げる結晶粒界や鋼中介在物が減少しているためである。加えて RMHE シリーズでは、磁壁移動しやすい方位に集合組織が制御されており、より低いヒステリシス損を示している。ところで、Fig. 6 で示した加工歪による鉄損劣化はほぼヒステリシス損の増加によるものであるため、打抜後に歪取り焼鈍を施すことが推奨される。しかし生産上の制約などにより打抜加工ままで使用される場合には、クリアランスなど金型調整を十分に行ったうえで、加工歪の影響を比較的軽減できる板厚 0.35 mm で素材硬度が高い素材 (35RMHE230 など) を用いることが望ましいと考えられる。

5.3 分割モータ

ステータ銅線の集中巻き方式は従来の分布巻き方式と比較して、巻線作業の効率化とともに、巻線長が短いためコイルエンド部の小型化と銅損の低減が可能となるといった利点があるため、近年採用例が増加している。一部の集中巻きモータではさらにステータを分割コアとし、巻線占積率の向上や効率化を達成したものが、HEV 駆動モータ¹⁵⁾やエアコン用コンプレッサモータ¹⁶⁾として実用化されている。分割コア方式では巻線技術の改良のみにとどまらず、電磁鋼板打抜歩留まりの向上も可能となる。さらに一体抜きコアでは全周方向に等方的な磁気特性を有する鋼板が望ましいのに対し、分割コアでは鉄心の分割の仕方を工夫し磁束の集中するティース方向の鋼板磁気特性のみを改善すれば、他の方向の磁気特性はさほど良好

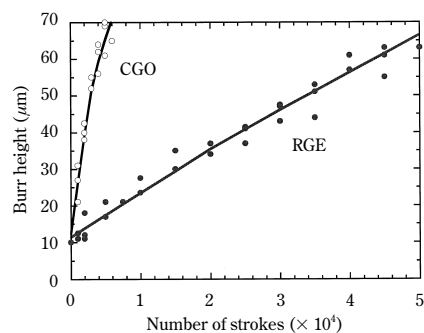


Fig. 13 Result of continuous punching test of grain oriented electrical steel (Die: Steel die, Lubricant: Normal punching oil, Clearance: 5%)

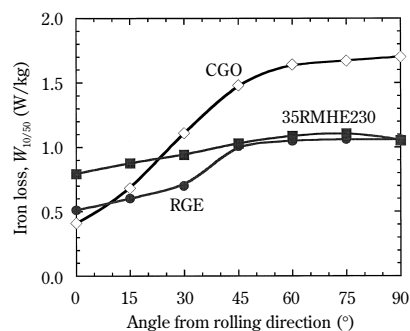


Fig. 14 Magnetic anisotropy of electrical steel

でなくともモータ性能の向上が図れる可能性がある。したがって、方向性電磁鋼板をモータに適用することも考えられる。

川崎製鉄ではこのような分割モータ用途への適用が期待できる、打抜加工性を改善した新規の方向性電磁鋼板 RGE を開発した¹⁷⁾。Fig. 13 に方向性電磁鋼板の連続打抜試験におけるかえり高さの変化を示す。かえり高さが 50 μm に達するまでの打抜回数で比較すると、RGE は従来の方向性電磁鋼板の約 10 倍もの優れた打抜性を示している。従来の方向性電磁鋼板表面は、コイル表面同士の密着防止のため塗布される焼鈍分離剤から反応生成したフォスフェイト (Mg_2SiO_4) 系下地被膜の上に、鋼板に張力を付与し鉄損を低減するためリン酸塩およびコロイダルシリカ系の絶縁被膜を塗布した形態を呈している。これらに RGE は、フォスフェイト被膜を持たず、無方向性電磁鋼板と同様の絶縁被膜を塗布できるため、大幅な打抜性改善が可能となった。

Fig. 14 に試料の切出し方向と磁気特性の関係を示す。RGE は従来の方向性電磁鋼板よりも磁気異性が小さく、圧延方向以外の磁気特性は大幅に向上している。モータの場合、磁束が集中するティース以外の方向にも磁束が流れ、回転磁束も動くことを考慮すると、分割コア方式においても異性が改善していることは大きな利点となると考えられる。

6 結 言

- (1) プレス打抜性には表面コーティングの影響が大きく、有機樹脂系コートが有利である。また鋼板素材硬度の増加にともない打抜性は低下する。
- (2) 加工歪による磁気特性の劣化量は板厚が薄く硬質な素材の方が小さいため、小型で打抜間隔が狭く、かつ歪取り焼鈍なしで

使用される電装品コアには有利である。

- (3) 駆動用モータ，EPS モータなどの用途には，良好な打抜性，高磁束密度および低鉄損を兼ね備えた無方向性電磁鋼板

RMHE および RMHF シリーズが，分割コア用途には，加工性と異方性を改善した新方向性電磁鋼板 RGE が適していると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 竹村芳孝，田原和雄，川口 仁：電気学会回転機研究会資料，RM-00-166，(2000)
- 2) 河野正樹，藤山寿郎，青木哲也：川崎製鉄技報，34(2002)2，96
- 3) 寺谷達夫：電学論 D，121(2001)4，433
- 4) 小森ゆか，足立重好，寺嶋 正：川崎製鉄技報，29(1997)3，187
- 5) R. M. Bozorth: "Ferromagnetism", D. Van Nostrand Comp. Inc., (1951), 40
- 6) A. Honda, B. Fukuda, I. Ohyama, and Y. Mine: *J. Mater. Eng.*, 12(1990), 141
- 7) 本田厚人，佐藤圭司，石田昌義，大山 勇：電気学会回転機研究会資料，RM-97-148
- 8) 石田昌義，稲永章子，本田厚人，大山 勇：電気学会回転機研究会資料，RM-98-147
- 9) 千田邦浩，本田厚人，石田昌義，秋山勇治：電気学会産業応用部門大会講演論文集，(2002)3，1507
- 10) 近藤康宏：日本金属学会セミナーテキスト「未来自動車のゆくえ」，(1998)，37
- 11) 阿部眞一：特殊鋼，51(2002)5，7
- 12) 松木正人，若城輝男，神山敏宏，佐藤利行，賀来嘉昭，神田正浩：Honda R&D Technical Review，14(2002)1，39
- 13) 本田厚人，千田邦浩，定廣健一：川崎製鉄技報，34(2002)2，85
- 14) 田中俊則：三菱電機技報，76(2002)6，387
- 15) 福田幸一，藤村 章，斉藤政昭，角田和彦，瀧口士郎：Honda R&D Technical Review，11(1999)2，1
- 16) 三宅展明：三菱電機技報，76(2002)6，426
- 17) 早川康之，今村 猛，平嶋浩一：川崎製鉄技報，35(2003)1，11