省資源型高強度電磁鋼板 SXRC の開発

田中一郎^{*}₁₎ 屋鋪裕義^{*}₂₎ 岩本繁夫^{*}₃₎ 高丸広毅^{*}₄ 中山大成^{*}₅

1. はじめに

近年、地球温暖化防止の観点から環境対応車のニーズが高まり、我が国では世界に先駆けて数多くのハイブリッド車(HEV)、電気自動車(EV)が生産されている。HEV、EVの心臓部分である駆動モータは小型、高出力、高エネルギー効率を全て満足する必要があり、リラクタンストルクを有効活用する観点から永久磁石を回転子内部へ埋め込んだInterior permanent magnet motor (IPM モータ)が広く採用されている(1).このような駆動モータ分野へのIPM モータの適用拡大にともない、駆動モータの回転子用途では、従来は優れた磁気特性を要求されるのみであった電磁鋼板に対し、高強度も要求されるようになってきた。これはIPM モータの回転子形状および高速回転化に起因する。即ち、前述のリラクタンストルクを有効活用するために回転子形状は複雑化する傾向にあり、高速回転時の応力集中により回転子の変形や疲労破壊が懸念されるためである。

磁気特性を劣化させることなく高強度化するには,固溶強化が最も効果的である.そのため,従来の高強度電磁鋼板はSi, Mn, Ni などを多量に含有している⁽²⁾.しかしながら,固溶強化では製品段階の強度のみならず圧延前段階の強度も増加してしまい,所望の製品板厚への圧延加工が困難になり生産性に大きな課題がある.また,高価なNi を含有させるなど,合金コストの大幅な増加も大きな問題である.

このような現状に鑑み、当社では HEV, EV の駆動モータの回転子に適した特性を有する無方向性電磁鋼板について鋭

意研究を重ね、電磁鋼板の生産性の低下と合金コストの増加を抑制し、かつ優れた機械特性と磁気特性を兼備した高強度電磁鋼板 SXRC の開発に成功した.

2. 開発のポイント

(1) 転位強化による磁気特性と機械特性の両立

我々は、電磁鋼板の圧延加工性を損なうことなく高強度化する手段として転位強化に着目した.電磁鋼板の磁気特性は転位密度に大きく影響されることが知られており(3)、転位強化された鋼の鉄損(エネルギー損失)は増大する.しかしながら、回転子に使用される鋼板は固定子に使用される鋼板より鉄損が大きくとも許容される.これは、モータのエネルギー効率は固定子の鉄損に支配されており、回転子の鉄損の影響は小さいことに起因する. IPM モータにおける回転子用電磁鋼板の鉄損レベルは、ジュール熱に起因した永久磁石の熱減磁を抑制する観点から設計すればよく、回転子用電磁鋼板の強化機構として、転位強化は十分に適用可能と想起したのである.

表1に、従来のJIS-35A230に対応した無方向性電磁鋼板の冷間圧延ままと仕上焼鈍後の磁気特性、機械特性を示す. 圧延ままでは十分な強度を有しているものの鉄損が著しく高く、駆動モータへ適用するには不十分である. 鉄損低減には冷間圧延にて導入された転位を低減すればよいが、仕上焼鈍中の再結晶にともない強度が急激に低下するため、強度の観点から駆動モータへの適用は困難である. 以上より、転位強化により強度と磁気特性を両立するためには、再結晶を適度

表1 JIS-35A230の磁気特性,機械特性.

	$W_{10/400} \ (\mathrm{W/kg})$	YS (MPa) RD/TD	TS (MPa) RD/TD
冷間圧延まま	106	1084/1140	1122/1140
仕上焼鈍後	17	336/348	464/472

RD-圧延方向, TD-圧延直角方向

総合技術研究所 薄板研究開発部:1)主任研究員 2)部長研究員 和歌山製鉄所 薄板部:3)参事補

和歌山製鉄所 薄板生産技術部:4)担当員 5)参事

Development of High Strength Electrical Steel SXRC of Resource–saving Design; Ichiro Tanaka, Hiroyoshi Yashiki, Shigeo Iwamoto, Hiroki Takamaru, Taisei Nakayama (Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

2009年10月29日受理

^{*} 住友金属工業株式会社

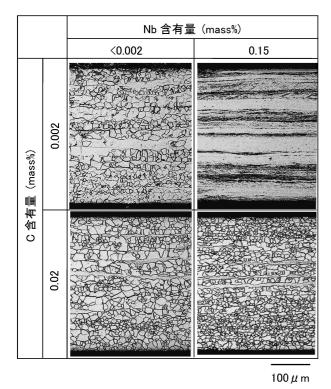


図1 仕上焼鈍後のミクロ組織.

に抑制することが必要不可欠と判明した.

(2) 固溶 Nb による再結晶抑制

再結晶を抑制する最も簡便で有効な手段は仕上焼鈍温度の低温化であり、例えば600 C以下にすることが考えられる $^{(4)}$. しかしながら、連続焼鈍ラインにて上記温度を実現するのは困難であり、生産性も著しく低下する. 新製品 SXRC にて再結晶を適度に抑制し、強度と磁気特性を両立させた技術的ポイントは固溶 Nb を活用した点にある.

図1に、無方向性電磁鋼板の連続焼鈍ラインでの仕上焼鈍に相当する焼鈍を施した後のミクロ組織を示す。C含有量が0.002%の鋼(極低C鋼)にNbを積極的に添加した条件でのみ再結晶が抑制され、強度の低下が抑制されることとなる。上記鋼ではNbCとして析出する量を超えるNbを含有しており、この余剰のNb量が固溶状態のNb量に対応する。無方向性電磁鋼板の再結晶はNbの析出物にはほとんど影響を受けず、固溶Nbによって大きく抑制されることが明らかとなったのである。即ち、本手法によれば、著しく低温で焼鈍する特殊な製造期間を設ける等の生産性低下を引き起こすことなく、安定して高強度電磁鋼板を製造可能と判明したのである。

新製品 SXRC の特性

これらの結果に基づき、再結晶の適度な抑制により機械特性と磁気特性を両立した新製品がSXRCである。SXRCと従来のJIS対応無方向性電磁鋼板の鉄損-強度バランスを図2に、SXRCおよびSXRC同様に製造が容易なdual phase鋼(DP鋼)の磁気特性、機械特性を表2に示す。SXRCは十

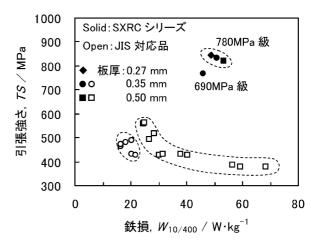


図2 SXRC と JIS 対応品の鉄損-強度バランス.

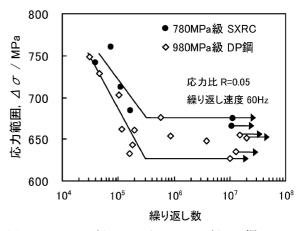


図 3 780 MPa 級 SXRC と980 MPa 級 DP 鋼の S-N 線図.

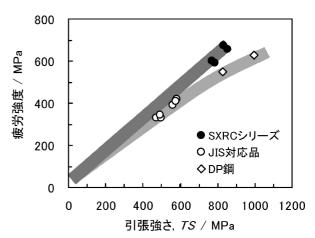


図4 疲労強度と引張強さの関係. (疲労試験条件は図3と同一)

分な強度を維持したまま、DP鋼と比較して約70%、表1に示した冷間圧延ままの鋼板と比較しても約50%の鉄損低減を実現している。さらに、0.50 mm 厚の JIS 対応無方向性電磁鋼板相当の鉄損を有しつつ、これを遙かに凌駕する強度を実現している。これらの鉄損レベルは IPM モータの回転子用途として十分に適用可能であり、強度レベルも回転子の変形および疲労破壊を抑制するには十分である。図3 および

30 新技術·新製品

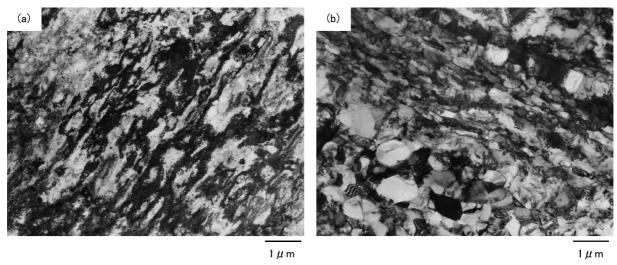


図 5 板面からみた新製品 SXRC の透過電子顕微鏡による観察例. (a)冷間圧延まま, (b)焼鈍後.

表 2 新製品 SXRC と DP 鋼の磁気特性,機械特性.

グ	`レード	板厚 (mm)	$W_{10/400} \ (\mathrm{W/kg})$	YS (MPa) RD/TD	TS (MPa) RD/TD
新製品 SXRC	690 MPa 級	0.35	46	659/705	768/766
	780 MPa 級	0.27 0.35 0.50	49 51 53	761/834 743/807 724/779	842/851 833/855 818/837
980 MPa 級 DP 鋼 0.3		0.35	158	667/651	995/952

RD-圧延方向, TD-圧延直角方向

図4に示すとおり、SXRCはより強度レベルの高いDP鋼をも凌ぐ優れた疲労特性を有しており、回転子としての実用性能は極めて高い.

SXRCの優れた特性は、その特徴的なミクロ組織に起因する。冷間圧延にて多量の転位が導入され、強度は増加するものの鉄損が著しく増大する(図 5(a))。これらの転位は焼鈍中に再配列し、転位密度の減少した母相中に微細な再結晶粒が形成される(図 5(b))。固溶 Nb は転位の合体消滅を適度に抑制する作用を通じ、機械特性と磁気特性の両立に好ましい特徴的なミクロ組織の発達に極めて重要な役割を果たすのである。

この特徴的なミクロ組織に起因する転位強化は、冷間圧延 後の仕上焼鈍を通じて達成される。そのため本手法では圧延 前段階の強度が変化することはない。さらに、上述のミクロ 組織を得るための焼鈍温度は連続焼鈍ラインにて十分に実現 可能である。即ち、本手法によれば冷間圧延、仕上焼鈍の両 工程にて生産性を全く損なうことなく、機械特性と磁気特性 を兼備した高強度電磁鋼板を安定的に製造可能である。ま た,高価な Ni を使用することなく所望の強度を達成可能であり,合金コスト増加をも抑制可能な極めて省資源型の製品となる.

4. ま と め

固溶 Nb によるミクロ組織制御を基本とする電磁鋼板分野では世界でも類をみない独自の新技術を確立し、機械特性と磁気特性を高次元で両立した高強度電磁鋼板 SXRC を開発した。SXRC は駆動モータの回転子として好適な特性を有しており、既に量産 HEV への採用が決定している。省資源型の本製品は環境対応車の普及に必要不可欠な要件である車両の低コスト化にも大きく寄与するものであり、今後の展開を通じて地球温暖化問題、エネルギー問題の解決に大きく貢献するものと期待される。

5. 特 許

新製品に関わる特許は国内外へ20件以上を出願しており、基本特許は特許第4265508号として登録済みである.

文 献

- (1) A. Kabasawa and K. Takahashi: SAE Technical Papers, 2005–01–0276.
- (2) I. Tachino, T. Kubota, A. Sakaida, T. Uemura and S. Nishida: Anales de Fisica B, 86 (1990), 250–252.
- (3) A. H. Qureshi and L. N. Chaudhary: J. Appl. Phys., **41**(1970), 1042–1043.
- (4) A. Martínez-de-Guerenu, F. Arizti, M. Díaz-Fuentes and I. Gutiérrez: Acta Mater., **52**(2004), 3657–3664.