

(論文)

# 純鉄系軟磁性鋼板

土田武広\*<sup>1</sup>・森田晋也\*<sup>2</sup>

## Soft Magnetic Iron Sheets

Takehiro TSUCHIDA・Shinya MORITA

### 要旨

カーボンニュートラルへの世界的な流れのなか、自動車をはじめとするあらゆる分野において、モータや各種電磁制御部品の高性能化ニーズが高まっている。当社は、冷間鍛造用線材や鉄粉を中心に培ってきた純鉄系軟磁性材料の技術を鋼板に適用し、新たな用途への展開をめざしている。

開発中の純鉄系軟磁性鋼板は、一般の軟鋼板より不純物量を低減し、結晶粒径などの材質を最適化することにより磁気特性を向上させており、とくに高い磁束密度を特長としている。板厚を薄くすることにより、交流磁気特性も改善可能であることから、ソレノイドや電磁リレーなどの直流用途のほか、モータコアなどの交流用途への適用も視野に入れている。

### Abstract

In the global trend toward carbon neutrality, there is an increasing need for higher performance motors and various other electromagnetically controlled components in all fields, including automobiles. Kobe Steel strives to develop new applications by applying soft-magnetic iron technology, which has been cultivated mainly in the field of cold forging wire-rods and iron powder, to steel sheets. The soft magnetic iron sheet newly developed has improved magnetic properties, thanks to having reduced amounts of impurities compared with general mild steel sheets, as well as optimized material properties such as grain size, and features a particularly high magnetic flux density. Since the alternating-current magnetic properties can be improved by reducing the sheet thickness, the newly developed sheet is expected to be applied not only to direct current applications such as solenoids and electromagnetic relays, but also to alternating current applications such as motor cores.

### 検索用キーワード

軟磁性, 純鉄, 鋼板, 電磁鋼板, 磁束密度

まえがき = 脱炭素化の世界的な流れのなか、自動車をはじめとするあらゆる分野において、モータや各種電磁制御部品の高性能化ニーズが高まっている<sup>1)</sup>。当社は、線材や鉄粉を中心に培ってきた純鉄系軟磁性材料<sup>2)~4)</sup>の技術を鋼板に適用し、新たな用途への展開をめざしている。当社の純鉄系軟磁性線材であるELCH2は、優れた磁気特性と冷間鍛造性を有し、リニアソレノイドなどさまざまな用途に使われているが、部品形状によっては板材から加工する方が容易な場合もある。そのため、当社では同様の磁気特性を発揮できる鋼板の開発を行っている。

本稿では、純鉄系軟磁性鋼板（以下、純鉄鋼板という）を試作し、製造条件とマイクロ組織および磁気特性の関係を調査した結果について、一般の軟鋼板や無方向性電磁鋼板と比較しながら述べる。また、交流用途への適用可能性を検討するために、鉄損の比較結果についても紹介する。

## 1. 純鉄鋼板の考え方

試作した磁気特性に優れた純鉄鋼板は、純鉄系軟磁性線材ELCH2の磁気特性向上の考え方に準じて、下記のコセプトを踏襲している。

①清浄なフェライト単層組織とすることにより素材中の

磁気モーメントを増加させる。⇒ C の低減

②磁気応答性を阻害する結晶粒の不均一性を抑制する。⇒ Al, N の低減

## 2. 試作材および評価方法

### 2.1 純鉄鋼板の試作

試作した純鉄鋼板Steel Aおよび比較材Steel B, C, Dの化学成分を表1に示す。試作材はELCH2線材の中間製品（155 mm角）を出発材料とし、熱間鍛造により厚さ約30 mmとした後、熱間圧延および冷間圧延により板厚0.1~1.0 mmとして各評価に用いた。なお、冷間圧延の最終工程はスキンプラス仕上げとし、その直前に軟化焼鈍を実施した。実際の部品製造では、スキンプラス仕上げした鋼板をプレス加工等で部品形状に成形した後、加工ひずみ除去と結晶粒粗大化による磁気特性の最大化を目的に磁気焼鈍を実施することが想定される。量産部品に即した特性を把握するため、磁気測定にはスキンプラス仕上げ後に一般的な磁気焼鈍（850℃×3 h）を施した試料を用いた。一部の試験片は磁気焼鈍前のスキンプラスの圧下率を0~10%程度に変えて、磁気焼鈍後のマイクロ組織と磁気特性への影響を調査した。また、磁気焼鈍後の断面を光学顕微鏡観察し、JIS G 0551に記載の式（1）および（2）に従い、比較法で測定した粒度番号から平

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 材料研究所 \*<sup>2</sup> 技術開発本部 応用物理研究所

表1 供試材の化学成分および板厚  
Table 1 Chemical composition and thickness of specimens

Materials		Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Al	N
Prototype of iron sheet	Steel A	0.1~1.0	0.005	0.002	0.21	0.010	0.003	0.001	0.0034
	Steel B	1.0	0.022	0.01	0.14	0.016	0.008	0.032	0.0025
General mild steel sheet	Steel C	1.2	0.046	0.01	0.21	0.012	0.005	0.032	0.0034
	Steel D	1.0	0.050	0.02	0.21	0.016	0.010	0.044	0.0060
Electrical steel sheet	35A300	0.35	0.004	2.81	0.17	0.018	0.002	0.265	0.0025
	50A800	0.5	0.002	0.27	0.23	-	0.002	0.265	0.0010

均結晶粒径に換算した。

$$d = 1/\sqrt{m} \dots\dots\dots (1)$$

$$m = 8 \times 2^G \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $d$ ：平均結晶粒径 ( $\mu\text{m}$ )、 $m$ ：1 mm<sup>2</sup>当たりの平均結晶粒数、 $G$ ：粒度番号である。

## 2.2 磁気特性の評価

磁気特性については、60 mm角の単板を用い、850℃×3 hの水素中磁気焼鈍後に、直流磁気特性と交流磁気特性を評価した。磁気特性評価には、メトロ技研製磁気測定装置を使用した。

直流磁気特性はJIS C2556に準じて、初磁化曲線とヒステリシス曲線を測定し、各磁界強度における磁束密度 $B$ 、保磁力 $H_c$ 、最大比透磁率 $\mu_{\text{max}}$ を求めた。ソレノイドやリレー等の直流用途を想定した場合の比較材として、当社の量産鋼種のうち一般的な軟鋼板の中から選んだ板厚1 mm前後の試料を用いた。

交流磁気特性はJIS C2556に準じて、板厚0.1~0.5 mmの試作材と市販の電磁鋼板に対して、1.5 Tにおける鉄損値を50 Hzと400 Hzの周波数で求めた。モータ鉄心等の交流用途を想定した比較材には、市販の無方向性電磁鋼板JIS-35A300およびJIS-50A800を用いた。35A300は高級グレード、50A800は汎用グレードの無方向性電磁鋼板として選定した。

## 3. 評価結果および考察

### 3.1 直流磁気特性と化学成分およびミクロ組織の関係

試作した純鉄鋼板Steel A、一般軟鋼板Steel B、C、Dおよび無方向性電磁鋼板35A300、50A800の直流磁気特性を表2に示す。純鉄鋼板と一般軟鋼板を比較すると、試作した純鉄鋼板Steel Aは保磁力が小さく最大比透磁率が高くなっており、おおむね良好な磁気特性を示す。とくに、純鉄鋼板は一般軟鋼板に比べて保磁力が小さい。

無方向性電磁鋼板との比較では、純鉄鋼板Steel Aの保磁力は35A300と同等であり、最大比透磁率は35A300と50A800の間に位置する特性レベルにある。いっぽう、Steel Aの磁束密度は、高磁界側において無方向性電磁鋼板よりも高いことが特長になっている。これは、純鉄鋼板ではSiやAlなどの合金元素が添加されておらず、SiとAlを合計で約3 mass%添加した35A300、約0.6 mass%添加した50A800に比べてFeの含有率が高いためである。

試作した純鉄鋼板Steel Aおよび一般軟鋼板Steel B、C、Dの磁気焼鈍後の光学顕微鏡写真を図1に示す。図中のFGは粒度番号を示している。磁気特性が良好な純鉄鋼板Steel Aは一般軟鋼板に比べて結晶粒径が大きいことがわかる。結晶粒界は磁壁移動を妨げて磁気特性を低下させることが知られており、Steel AがSteel B、C、Dに比べて保磁力が小さい結果と一致する。C量と結晶粒径の関係を図2、結晶粒径と保磁力の関係を図3に示す。C量が多いほど結晶粒径が小さく、結晶粒径が大きいと保磁力が小さくなる傾向がみられる。C量が十分に低いと磁気焼鈍温度である850℃前後において $\alpha$ 単相となるため結晶粒成長しやすいが、C量がおおむね0.01 mass%を超えると800℃以上で $\alpha$ 相と $\gamma$ 相の2相になるため粒成長の阻害要因となる<sup>5)</sup>。また、C量が0.02 mass%を超えると冷却中にパーライトやセメンタイトが析出して磁気特性を低下させる。さらに、本実験の場合、Steel AはSteel B、C、Dに比べてAl量が少ないため、AlNの析出による粒成長抑制効果を最小限に抑えられることも保磁力が小さい要因と考えられる。

軟化焼鈍後におけるスキンプラスの圧下率と磁気焼鈍後における保磁力の関係を図4に示す。圧下率3~5%程度のスキンプラス圧延した後に磁気焼鈍することにより、保磁力が最小化することがわかる。圧下率と磁気焼鈍後の結晶粒径の関係を図5に示す。3~5%の圧下率で結

表2 供試材の直流磁気特性  
Table 2 Example of DC magnetic properties

Materials	Thickness (mm)	Coercive force (A/m)	Maximum specific permeability	Magnetic field density (T)								
				B100	B200	B300	B500	B1000	B2000	B5000	B20000	
Prototype of iron sheet	Steel A	1.0	24	5,520	0.68	1.26	1.46	1.55	1.61	1.67	1.78	2.03
	Steel B	1.0	39	3,803	0.41	0.96	1.31	1.50	1.59	1.64	1.74	2.00
General mild steel sheet	Steel C	1.2	33	5,607	0.66	1.31	1.49	1.57	1.63	1.68	1.78	2.02
	Steel D	1.0	50	3,231	0.37	0.81	1.20	1.56	1.71	1.80	1.91	2.06
Electrical steel sheet	35A300	0.35	26	14,665	1.20	1.36	1.42	1.47	1.53	1.59	1.70	1.93
	50A800	0.50	109	3,950	0.22	0.99	1.28	1.45	1.56	1.63	1.74	1.97

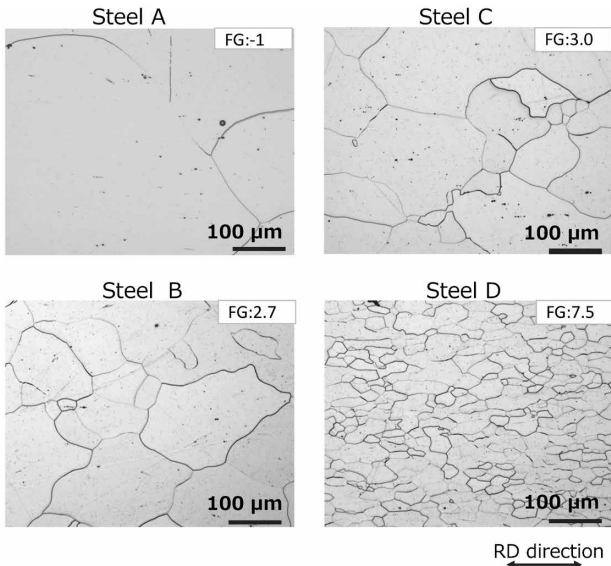


図1 磁気焼鈍後の断面マイクロ組織  
Fig.1 Microstructure of steels after magnetic annealing

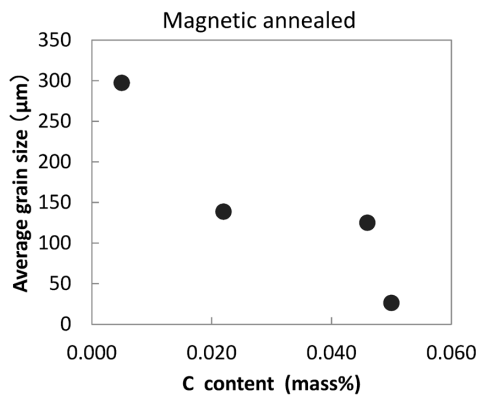


図2 C量と磁気焼鈍後の結晶粒径の関係  
Fig.2 Relationship between C content and grain size

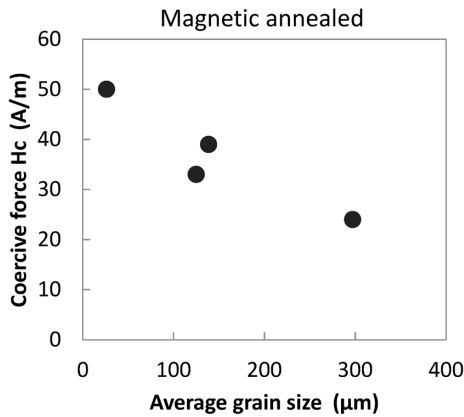


図3 結晶粒径と磁気焼鈍後の保磁力の関係  
Fig.3 Relationship between grain size and coercive force

晶粒径は最大化する傾向にあり、保磁力変化の傾向と一致する。これは、適度に導入したひずみが、次工程の磁気焼鈍において粒成長を促進するためと考えられる。圧下率がさらに大きくなると結晶粒径がしだいに小さくなり、磁気特性は低下するが、これは磁気焼鈍における再結晶の核生成サイトの増加によるものと推察される。以上の結果より、純鉄鋼板の最終製造工程では、軟化焼鈍後に適度な圧下率のスキンパスを実施することが望ましい。

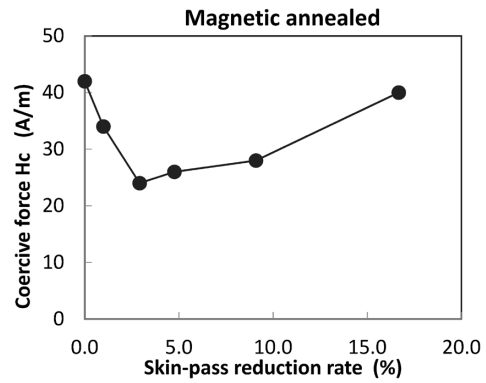


図4 スキンパス圧下率と磁気焼鈍後の保磁力の関係  
Fig.4 Effect of skin pass rolling condition on coercive force

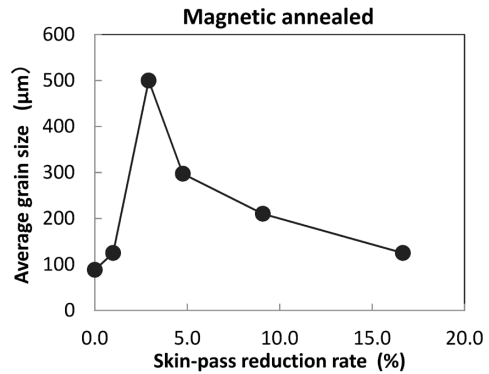


図5 スキンパス圧下率と磁気焼鈍後の結晶粒径の関係  
Fig.5 Effect of skin pass rolling condition on grain size

### 3.2 交流磁気特性に及ぼす板厚および電気抵抗率の影響

1.5 T, 50 Hzおよび1.5 T, 400 Hzの励磁下における鉄損測定値  $W_{15/50}$ ,  $W_{15/400}$  を図6および図7に示す。ここで、Steel A-0.5, Steel A-0.35, Steel A-0.1は、交流用に試作した板厚0.5 mm, 0.35 mm, 0.1 mmの純鉄鋼板の測定値である。50 Hzにおいては、板厚0.5 mmの純鉄鋼板と板厚0.5 mmの無方向性電磁鋼板(50A800)の鉄損がほぼ等しくなっているが、400 Hzでは純鉄鋼板の鉄損増加が大きく、その内訳をみると渦電流損失が大きな割合を占めている。純鉄鋼板は、Siを含有する電磁鋼板に比べて電気抵抗が小さいため、同じ板厚の電磁鋼板よりも渦電流損失が大きくなる<sup>6)</sup>。本実験で用いた材料の電気抵抗の実測値は、Steel A : 0.1150  $\mu\Omega\text{m}$ , 35A300 : 0.4735  $\mu\Omega\text{m}$ , 50A800 : 0.2010  $\mu\Omega\text{m}$ であり、同じ板厚での渦電流損失の傾向と一致している。また、磁界周波数が高いほど渦電流損失の影響は顕著になり、50 Hzよりも400 Hzにおいて純鉄鋼板の鉄損が大きくなる傾向がみられる。渦電流損失  $W_{EC}$  ( $\text{W}/\text{m}^3$ ) と電気抵抗率  $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ )、板厚  $d$  (m)、周波数  $f$  (Hz)、最大磁束密度  $B_m$  (T) の関係は古典的渦電流式である式(3)で表される<sup>7)</sup>。

$$W_{EC} = (\pi d f B_m)^2 / (6\rho) \dots\dots\dots (3)$$

式(3)のとおり、渦電流損失は板厚を小さくすると低減できることがわかる。図6および図7に示すとおり、純鉄鋼板の板厚を0.5 mmから0.35 mm, 0.1 mmと薄くすることにより渦電流損失が低減され、板厚0.1 mmでは、磁界周波数50 Hz, 400 Hzとも板厚0.35 mmの高級

グレード無方向性電磁鋼板と同等の鉄損が得られている。表2に示すとおり、純鉄鋼板は電磁鋼板に比べて高い磁束密度が得られる特長があるため、板厚を小さくすることにより弱点である鉄損を改善すれば、モータコアなどの交流用途への適用も可能になると期待される。その場合、「打抜き加工での生産性低下」や「積層したときの占積率低下」などが想定され、これらは今後の検討課題である。

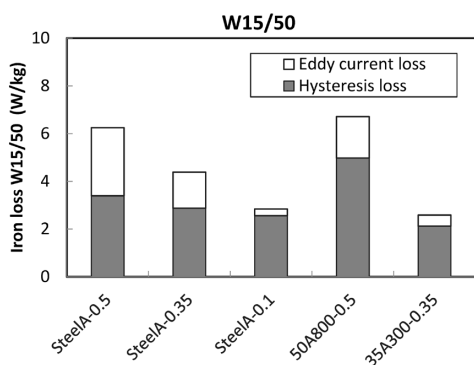


図6 試作した純鉄鋼板および市販電磁鋼板の鉄損 (1.5 T/50 Hz)  
Fig.6 Comparison of iron loss between prototype iron sheets and commercially available electromagnetic steel sheets (W15/50)

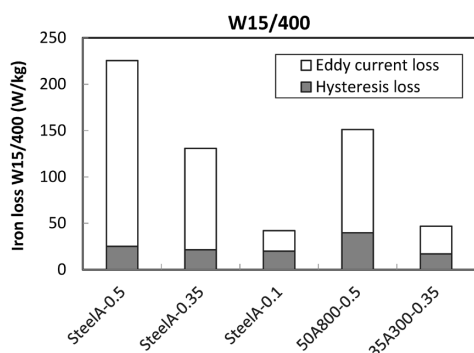


図7 試作した純鉄鋼板および市販電磁鋼板の鉄損 (1.5 T/400 Hz)  
Fig.7 Comparison of iron loss between prototype iron sheets and commercially available electromagnetic steel sheets (W15/400)

むすび = 直流磁気特性と冷間鍛造性に優れる ELCH2 線材と同様な不純物低減と組織制御の考え方を鋼板に適用し、純鉄鋼板を試作した結果、一般の軟鋼板に比べて優れた直流磁気特性が得られた。また、板厚を小さくすることにより、交流磁界下の鉄損を無方向性電磁鋼板と同等にすることができた。純鉄鋼板は、高い磁束密度、良好な加工性、さらに高い熱伝導率<sup>8)</sup>などの特長を持っており、これらの特長を生かしてさまざまな用途への適用が期待できる。今後は量産化を検討し、鋼板を素材とする電磁気制御部品やモータコアへの適用により、カーボンニュートラル実現に貢献していきたい。

#### 参考文献

- 1) 内閣官房ほか. 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略. [https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ggs/pdf/green\\_honbun.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf) (参照2022-02-04).
- 2) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.2, p.18-21.
- 3) 坂田昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.6-11.
- 4) 北条啓文ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.2, p.12-16.
- 5) 高山武盛ほか. 鉄と鋼. 1982, Vol.68, No.8, p.1016-1023.
- 6) 田中一郎. 特殊鋼. 2014, Vol.63, No.5, p.12-14.
- 7) 榊 陽. 電気学会誌. 1979, Vol.99, No.2, p.144-147.
- 8) 山崎修一ほか. 鉄と鋼. 2021, Vol.107, No.2, p.121-127.