高いけい素鋼板の鉄損特性に及ぼすけい素量， 板厚，熱処理の影響

正 員 田 中 靖 (NKK)

非会員 浪 川 操 (NKK)

非会員 日 裏 昭 (NKK)

非会員 毕 曉 昉 (NKK)

正 員 高 田 芳 一 (NKK)

Effects of Silicon Content, Thickness and Heat Treatment on Iron Loss Properties of High Silicon Electrical Steel Sheets

Yasushi Tanaka, Member, Misao Namikawa, Non-member, Akira Hiura, Non-member, Xiao Fang Bi, Non-member, Yosikazu Takada, Member (NKK)

The Magnetic properties of high-silicon steel sheets of thickness range from 0.35 mm to 0.03 mm and silicon content from 3% to 7.5% were investigated. The minimum iron losses were obtained with the silicon higher than 6.5% at high frequency range over 30 kHz. The sheet thickness dependency index m was estimated. The heat treatment effects to soft magnetic properties were also studied.

キーワード：けい素鋼板，鉄損，けい素量，規則不規則変態

1. はじめに

1900年にHadfieldによって鉄-けい素合金の磁気特性がそれまでの鉄系磁性材料と比べて飛躍的に優れたものであることが明らかにされて以来⁽¹⁾，Gossによる方向性けい素鋼板の発明などに代表されるように鉄けい素合金磁性材料は長足の進歩を遂げてきた。これらの進歩はけい素鋼板の低鉄損化を目指したものであり，結晶方位コントロール，板厚の薄手化，Si量の増加，磁区の細分化などの手法が試みられてきている。

元来鉄けい素合金のなかではSiが6.5%近辺において磁わいがゼロになることから最も優れた軟磁気特性を示す。しかしながらSiが4%を超えると材料が極めてもろくなるので薄板にすることができず，このために今までのけい素鋼板のけい素量は最大でも4%程度に制限されていた。

著者らは，6.5%けい素鋼板製造の実用化に取組み，圧延法，CVD法の二種類の 방법으로6.5%けい素鋼板を製造することに成功した。特にCVD法は，圧延時

には板厚を薄くすることが容易な低Siの状態であり，あとからSiを富化するため板厚の薄いものの製造に適し，高周波用鉄心材料の製造方法としてユーザーズに適合したプロセスであるといえる。また応用面では，6.5%けい素鋼板は可聴周波数帯域で使用される変圧器やリアクトルに適用すると，20 dBから30 dBの低騒音化が達成され，また鉄損値も低くなるために鉄心の小型化が可能になることが明らかにされている⁽³⁾⁽⁴⁾。本論文では，高いけい素鋼板の鉄損特性に影響を及ぼす因子のうちで，Si量，板厚，熱処理に焦点をあて，それぞれ鉄損に及ぼす影響について実験結果を基に述べる。

2. 実験方法

供試材は圧延法あるいはCVD法で作製した板厚0.35 mmから0.03 mmの高いけい素鋼板を用いた。けい素量を変化させる実験ではCVD法により試料を作製し，そのけい素量の調整はCVD時のSi添加量をコントロールすることにより行った。磁気測定用にはリング形状試料（外径31 mm，内径19 mm，一次巻

き数 30 回, 二次巻き数 30 回)あるいは 25 cm エプスタイン試験枠により行った。磁気測定には岩崎通信機製交流磁気試験器 (SY-8617) および理研電子製直流磁気試験器 (BHU-60) を用いた。

3. 結果, 考察

〈3・1〉 Si 量の影響 図 1 に CVD 法で作製した板厚 0.20 mm の高い素鋼板において Si 量を変化させたときの最大透磁率の変化を示す。最大透磁率は Si 量が 3.5% 付近でいったん極大値をとった後 5% で極小値を示し, 6.5% 付近で最大値を示す。これは Fe-Si 合金系の磁わいの変化と関連がある。図 2 に同じ試料の多結晶のままの飽和磁わい振幅を測定した結果を示す。磁わい振幅は Si 量が 5% で極大値を示しており, この結果から磁わいの効果により最大透磁率の変化が引き起こされていることがわかる。また, 保磁力

図 1 最大透磁率に及ぼすけい素量の影響
(板厚: 0.20 mm)

Fig.1. Si content dependence on maximum permeabilities.

図 2 磁わいに及ぼすけい素量の影響
Fig.2. Si content dependence on magnetostriction.

の変化の傾向も磁わいの変化の傾向と同様に Si 量 5% で極大値を有する。図 3 に 1 kHz, 1 T で励磁したときの鉄損値の Si 量依存性を示す。Si 量が 4.5 から 5.5% の間でプラトー部が存在するが, これはこの部分において磁わいの効果により保磁力が極大をもつため, ヒステリシス損失が大きくなるためであると考えられる。その他の部分では, 鉄損値は Si 量の増加に伴って単調に減少している。

Si 量が増えると固有抵抗が増大し, 渦電流損失が低減する。このため渦電流損失の割合が大きくなる高周波帯域では, Si 量が 6.5% を超えたところに鉄損極小点があることが考えられる。このことを調査するため, Si 量を変化させた板厚 0.05 mm の高い素鋼板の CVD 法による製造を試み磁気特性の調査を行った。図 4 に周波数を 20, 30, 40 kHz とした場合の鉄損値の変化を示す。磁束密度はいずれも 0.1 T であ

図 3 鉄損に及ぼすけい素量の影響
(板厚: 0.20 mm : $f=1$ kHz, $B=1$ T)

Fig.3. Si content dependence on iron losses.

図 4 高周波鉄損に及ぼすけい素量の影響
Fig.4. Si content dependence on high frequency iron losses.

る。周波数が増大するにつれて鉄損の極小点は Si 6.5%より高 Si 側に移動し、40 kHz では 7.5%のほうで低鉄損となる。20 kHz 以上の高周波になると磁わい騒音の問題がなくなるため磁わいがゼロでなくてもよくなることや、動作磁束密度が下がってくることから、このように板厚を極端に薄くしかつ Si 量も増やして、渦電流損失を低減させ低鉄損化を実現することも実用上可能であると思われる。

〈3・2〉 板厚の影響 板厚の効果をより詳細に調査するために、Si 量を 6.5%に固定して板厚を 0.35 mm から 0.03 mm にまで変化させて磁気特性を調査した。図 5 に最大透磁率と保磁力に与える影響を示す。板厚が減少すると軟磁気特性が劣化するのは、板厚の減少と共に結晶粒径が小さくなるためであると思われる。図 6 にこの板厚と結晶粒径の関係を示す。このように板厚は焼鈍後の結晶粒径に影響を及ぼし、磁気特性には板厚および結晶粒径の二つの側面から影響を及ぼす。図 7(a), (b) に磁束密度 0.1 T 一定で 1 kHz から 40 kHz までの各周波数における鉄損値を

示す。周波数 5 kHz 以下においては板厚 50 μm のものが最も低鉄損になるが、周波数 10 kHz 以上においては板厚 30 μm のものが最も低鉄損になっており、周波数によって鉄損値が極小を示す板厚が異なり、励磁周波数が高いほうがその板厚が薄いことがわかる。

次に、全鉄損値 W を渦電流損失と W_e とヒステリシス損失 W_h に分離し、それぞれの鉄損への寄与を調査した。鉄損分離は全鉄損 W を周波数依存項と非依存項とに

$$W = W_h \times f + A f^k \dots\dots\dots (1)$$

のように定義された関数形において、非線形最小二乗法により各定数を求めヒステリシス損失 W_h を求めることにより行った。この方法により求められた W_h を図 8 に示す。この値は直流磁気測定により求められたヒステリシス曲線の囲む面積から求めたヒステリシス損失と極めてよく一致した。このようにして求められた W_h に周波数を乗じ全鉄損 W から差し引くことにより渦電流損失 W_e を求めた。更に、 W_e の板厚依存性を求めるために、

図 5 最大透磁率、保磁力と板厚の関係
Fig. 5. Dependence of maximum permeability and coercive force upon thickness.

図 6 板厚と平均粒径の関係
Fig. 6. Relationship between thickness and average grain diameter.

(a) 1~5 kHz

(b) 10~40 kHz

図 7 鉄損の板厚依存性
Fig. 7. Dependence of core loss upon thickness.

図 8 ヒステリシス損失の板厚依存性
Fig. 8. Dependence of hysteresis loss upon thickness.

図 9 指数 m と周波数との関係
Fig. 9. Relationship between m and frequency.

$$W_e = t^m \times B_m^n \times f^k \dots\dots\dots (2)$$

の定義に従って最小二乗法により板厚依存性指数 m を求めた。図 9 に各励磁磁束密度における m の値を示す。この m の値を使用される磁束密度、周波数について図 9 によって決めることにより検討した板厚範囲内での鉄損の予測が可能である。

これまで W_e の理論式としては磁区構造を考慮に入れないモデルでは(3)式、短冊状磁区モデルでは(4)式、平板状磁区モデルでは(5)式になることが知られている⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。

$$W_e = \frac{(\pi t f B_m)^2}{6\rho} \dots\dots\dots (3)$$

$$W_e = \frac{8.4 b t f^2 B_m^2}{N \pi \rho} \dots\dots\dots (4)$$

$$W_e = \frac{(\pi t f)^2 B_m^2}{4 \rho B_s} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 P ：固有抵抗、 b ：板幅、 N ：動磁壁の数、 B_m ：最大磁束密度、 B_s ：飽和磁束密度

ここで測定した試料は結晶粒径が 1 mm 以下の多結晶であり、結晶方位もほぼランダムであることから、磁

区構造がモデルで仮定したものと異なり必ずしも(4)式および(5)式に示される理論が当てはめられない。しかしながら、周波数が高くなり表皮効果が顕著となる領域では磁壁移動は短冊状から平板状に移行していくと考えられる。このため(4)、(5)式の理論から板厚依存性指数は周波数の増大と共に増加するはずであり、定性的にはこの理論は実験結果を裏付けているといえる。

〈3・3〉 熱処理の影響 6.5%Si-Fe 合金は規則不規則を有する合金であり、その相の状態により磁気特性が大きく影響を受けることが知られている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。ここでは種々の温度で熱処理を行った後、その磁気特性を調査すると共に透過電子顕微鏡観察により微細組織の観察を行い、組織と磁気特性の関連を調査した。

板厚 0.35 mm の 6.5%けい素鋼板を、真空中で 1,200°C 1 時間の均熱を施し室温まで徐冷した後、規則化処理として、再び 300°C から 900°C までの各温度まで真空中にて加熱し各温度で 10 分間均熱し、そのまま油中へ焼き入れた。このような規則化処理を行った後の最大透磁率の変化を図 10 に示す。最大透磁率は 500°C から油中に焼き入れた試料において最大値を示す。これらの変化は規則化処理時の保持時間を 3 時間、10 時間と変化させても同じであった。更に、これらの試料の鉄損値の変化を図 11(a)、(b)に示す。500°C 焼き入れ材はどの周波数においても最も低鉄損となり、規則化処理をする前に比べいずれの周波数でも約 12% の鉄損低減効果が得られている。このような焼き入れ温度と磁気特性の関係については、既に規則不規則変態に伴う磁わいおよび磁気異方性の変化と対応させて議論がなされている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。磁わいなどの磁気的性質の変化は原子レベルでの構造の変化を反映しているはずあり、この観点から電子顕微鏡を用いて微細構造を観察し、規則相の形態と関連づけてこの現象を考察することを試みた。電子線回折における規則相不規則相の禁制則と考慮した暗視野像を観察することにより、微細組織の規則相の同定ができる。表 1 にこのようにして同定された各焼き入れ温度からの試料の B_2 、 DO_3 規則相の存在状態を示す。600°C 以下においては B_2 相と DO_3 相が同時に観察されているが、 B_2 相と DO_3 相の形態、存在量に大きな違いは認められない。500°C 焼き入れ材の特性が最も優れていることの原因をこの規則相の形態、存在量の観点から説明することはできないが、更に微細組織を詳細に観察すると 500°C 焼き入れ材において B_2 相中に細かな濃度揺らぎに起因すると思われるコントラストの違いが観察される。この結果を Fe-Si 合金状態図から考

図 10 最大透磁率に及ぼす焼き入れ温度の影響

Fig. 10. Dependence of quenching temperature on maximum permeability.

(a) $f=400$ Hz

(b) $f=1$ kHz

図 11 鉄損に及ぼす焼き入れ温度の影響

Fig. 11. Dependence of quenching temperature on iron loss.

えると 500°C 焼き入れ材は Fe-rich 相と Si-rich 相にスピノーダル分解していることが示唆される。500°C 焼き入れ材の磁気特性が最も優れていることは、このような微細構造の違いから発生していることも考えら

表 1 電子顕微鏡観察による規則相の同定
Table 1. Identifications of order-phase by TEM.

焼き入れ温度 (°C)	B2 相	DO ₃ 相
900	○	△
800	○	△
700	◎	△
600	◎	○
500	◎	○
400	◎	○
300	◎	○

◎: 強い, ○: 中間, △: 弱い

れるが、この点に関しては今後より詳細な検討が必要である。

4. ま と め

従来よりも Si 量の高い 6.5% けい素鋼板を中心に、その鉄損に及ぼす Si 量の影響、板厚の影響、熱処理の影響について考察した。得られた結果について以下に要約する。

(1) Si 量が 3% 以上の高い素鋼板について最大 Si 量 7.5%，最小板厚 0.05 mm まで変化させて鉄損に及ぼす影響を調査した。その結果、板厚 0.05 mm のものでは周波数域が 30 kHz を超えるあたりから 6.5%Si よりも高 Si サイドで低鉄損化が観測された。

(2) 6.5% けい素鋼板に関して板厚 0.35 mm から 0.03 mm の範囲で板厚依存性指数を求めた。これにより、この板厚範囲での鉄損の予測が可能となった。

(3) 6.5% けい素鋼板の熱処理による低鉄損化を試み、500°C から焼き入れることにより更に低鉄損化が図られることが明らかとなった。

最後に、本論文をまとめるにあたり高い素鋼板を提供いただいた NKK 冷延鋼板部 阿部正広氏、電子顕微鏡観察とその解釈に尽力いただいた NKK 鉄鋼研究所 佐藤 馨氏に深く御礼申し上げる。

(平成 3 年 8 月 27 日受付)

文 献

- (1) W. F. Barret, W. Broun & R. A. Hadfield: "Electrical conductivity and magnetic permeability of various alloys of Fe", *Sci. Trans. Roy. Dublin Soc.*, 7, 67 (1900)
- (2) Y. Takada, M. Abe, S. Masuda & J. Inagaki: "Commercial scale production of Fe-6.5 wt. %Si sheet and its magnetic properties", *J. Appl. Phys.*, 64, 5367, (1988)
- (3) 田中・日裏・二宮・鶴・升田・高田: 「6.5% けい素鋼板を用いた低鉄損低騒音高周波トランスの試作」, 平 2 電気学会大会, No. 1614
- (4) 山田・霜村・堀内: 「6.5% けい素鋼鉄心の磁気および騒音特性」, 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-91-116 (平 3)
- (5) R. M. Bozorth: *Ferromagnetism*, p. 778 (1951) D. Van Nostrand Co.

- (6) Y. Sakaki: "Relationship among eddy current loss, frequency, maximum flux density and a new parameter concerning the number of domain walls in polycrystalline and amorphous soft magnetic materials", *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-17, 1478 (1981)
- (7) 榑・石川・山岸: 「50%Ni-Fe 磁心の渦電流損失とスイッチング特性との関係」, 電学論 A, 95, 125 (昭50-3)
- (8) K. Narita & M. Enokizono: "Effect of ordering on Magnetic properties of 6.5 % silicon-iron alloy" *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-15, No. 1, 911 (1979)
- (9) 例えば, 大森・荒井・三浦・津屋, 「高けい素鉄合金の規則不規則変態と磁気特性」, 第7回応用磁気学会学術講演概要集, 7pD-6 (昭58)

田 中 靖 (正員)

昭和31年生。55年東京工業大学大学院原子核工学専攻修士課程修了。同年NKK入社。以来, 研究所にて磁性材料, 高けい素鋼板研究開発に従事。61年から62年まで独Max-Planck研究所金属研究所客員研究員。現在, 鉄鋼研究所磁性材料研究室主任研究員。日本金属学会, 日本応用磁気学会会員。

浪 川 操 (非会員)

昭和38年生。平成2年東京大学大学院物理学専攻修士課程修了。同年NKK入社。以来, 研究所において高けい素鋼板の研究開発に従事。現在, 鉄鋼研究所磁性材料研究室研究員。

日 裏 昭 (非会員)

昭和33年生。59年東北大学大学院金属材料工学専攻修士課程修了。同年NKK入社。以来, 研究所にて高けい素鋼板の研究開発に従事。現在, 鉄鋼研究所磁性材料研究室主任研究員。日本物理学会, 日本金属学会, 日本応用磁気学会会員。

半 曉 防 (非会員)

昭和36年生。平成2年東京工業大学金属工学専攻博士課程修了。同年NKK入社。以来, 高けい素鋼板の研究開発に従事。工学博士。現在, 鉄鋼研究所磁性材料研究室研究員。日本金属学会会員。

高 田 芳 一 (正員)

昭和23年生。48年東北大学大学院金属材料工学専攻修士課程修了。同年NKK入社。以来, 研究所にて薄鋼板の材質研究および高けい素鋼板の研究開発に従事。工学博士。現在, 京浜製鉄所冷延鋼板部スーパーEコアチーム主査。日本鉄鋼協会, 日本金属学会, 日本応用磁気学会会員。