6.5% けい素鋼板の磁歪特性

Magnetostriction of 6.5% Si Steel Sheets

二宮弘憲・鶴 清・日裏 昭・田中 靖・高田芳一・升田貞和

日本鋼管(株)鉄鋼研究所, 川崎市川崎区南渡田町 1-1 (〒210)

H. Ninomiya, K. Turu, A. Hiura, Y. Tanaka, Y. Takada and Y. Masuda

Steel Research Center, NKK Corp., 1-1, Minamiwatarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki 210

Technology for the world's first production of 6.5% Si steel sheets has been commercially developed in coil-form. The DC and AC magnetostriction in 6.5% Si steel sheets and the noise of the transformer made of 6.5% Si steel sheets were investigated in comparison with that of conventional 3% Si steel sheets. 6.5% Si steel sheets showed extremely low magnetostriction and were recognized to be suitable for application to the low noise audio frequency transformer.

Key words: 6.5% Si-Fe, magnetostriction, noise, audio frequency transformer, soft magnetic material, silicon steel

1. はじめに

鉄けい素合金はけい素量が 6.5 wt% 付近でその軟磁気特性が最良となることは昔から知られていた。しかしながら、鉄にけい素を添加していくと硬度が増し脆くなることから従来 6.5% けい素鋼板の薄板製造は不可能であった。我々はこの 6.5% けい素鋼板の量産製造技術の開発に世界で初めて成功した^{1)~4)}。市販の 3% けい素鋼板と磁気特性の比較をすると、けい素を多く含むことから飽和磁束密度は下がるものの、最大透磁率は無方向性にもかかわらず方向性けい素鋼板なみの値を示している。鉄損についてみると、固有抵抗が $82 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ と 3% けい素鋼板の 2 倍程度あることから渦電流損が押さえられ、特に高周波側で低鉄損が達成されている。6.5% けい素鋼板のもう一つの特徴は、磁歪がほぼ零になることである。この零磁歪特性を活かして可聴周波域の無騒音トランス、リアクトルなどの鉄心としての用途が考えられる。現在、これらに方向性けい素鋼板が用いられているが、主として磁歪による騒音発生が問題になっており、実際にはこの騒音を下げたため動作磁束密度をかなり下げて使用している。このため鉄心が大型化になってしまうという欠点があり、6.5% けい素鋼板を用いることによって鉄心を小型化できる可能性がある。

本論文では、6.5% けい素鋼板の直流ならびに交流の磁歪特性を鉄心材料として実用的な観点から調査すると共に実際に試作したトランスの騒音測定を行った結果を報告する。

2. 実験方法

6.5% けい素鋼板は、溶解、鑄造、熱間圧延、冷間圧延後、圧延方向を長手方向とするように切断し、真空焼鈍を行って作製した。比較材としては、集合組織の類似した市販の 3% 無方向性けい素鋼板 (JIS-35A330) を 6.5% けい素鋼板と同様な形状に切断後、歪取り焼鈍を行って用いた。なお、試料の板厚はすべて 0.35 mm とした。Fig. 1 に直流磁歪測定装置の構成を示す。試料は、幅 16 mm、長さ 44 mm および 60 mm の短冊を長方形閉磁路を形成するように交互に積層しテープで固定した後、直流 BH 特性ならびに磁歪を同時に測定した。磁歪の測定には抗磁性歪みゲージ (共和電業製: KBN-3-A1) を用いた。Fig. 2 に交流磁歪測定装置の構成を示す。試料は幅 10 mm、長さ 100 mm の短冊とし、交流 BH 特性ならびに歪みゲージによる磁歪を同時に測定した。またシグナルアナライザにて交流磁歪振幅の周波数分析を行った。図中の補償コイルは空隙補償するためのものである。騒音測定のために試作したトランスの仕様を

Fig. 1 Schematic diagram of DC magnetostriction measurement.

Table 1 に、測定の外観を Fig. 3 に示す。鉄心は 90° 付き合わせで積層しており、比較として 3% 方向性けい素

Fig. 2 Schematic diagram of AC magnetostriction measurement.

Fig. 3 Transformer test.

鋼板 (JIS-35G165) を用いたトランスも作製した。測定回路は Fig. 4 に示したとおりであり、トランス特性は無負荷で測定した。また、騒音測定は、暗騒音が A スケールで 30 dB の無騒音室においてトランス上辺の中心部から 100 mm 離れたところで騒音計により行い同時に騒音の周波数分析も行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 5 に 6.5% けい素鋼板と 3% 無方向性けい素鋼板の直流磁化曲線と磁歪曲線を示す。6.5% けい素鋼板の方は測定した磁束密度 ± 1.3 T 全域で磁歪 $\Delta l/l$ は $0.2 \times$

Table 1 Specifications of trans formers

Capacity	: 3kVA (single phase)
Core Material:	6.5%Si steel sheet
	Non oriented 3%Si steel
	(JIS-35A330)
	Oriented 3%Si steel
	(JIS-35G165)
Core Size	: 300(H) $\times$ 220(W) $\times$ 70(D)
Turns	: 20 (primary turn only)

Fig. 4 Scheme of noise measurement for transformer.

Fig. 5 DC magnetization and magnetostriction curves of 6.5% Si steel sheet and non oriented 3% Si steel sheet.

10^{-6} 以下であるのに対し、3% けい素鋼板は磁歪曲線はヒステリシスを描き、磁束密度 $\pm 1\text{T}$ 以内では磁歪は小さいものの磁束密度の高い領域では増加し 8×10^{-6} と大きくなっている。

Fig. 6 に交流磁歪測定装置を用いて測定した交流磁歪振幅の周波数特性の一例を示す。ここでの励磁周波数は 50 Hz、磁束密度は 1.47 T である。6.5% けい素鋼板の方は 100 Hz に小さなピークが観測されるが、これは励磁 1 サイクルに伸び縮みが 2 回発生するために現れるものと考えられる。これに対して 3% 無方向性けい素鋼板の方は 100 Hz 以外に 200, 300 Hz と 2 次、3 次の高調波成分が現れ、絶対値も 100 Hz 成分で 19 dB 高いことが分かる。この交流磁歪振幅の磁束密度依存性を表したものを Fig. 7 に示す。6.5% けい素鋼板は 1.3 T 以上でわずかに観測されるのに対して 3% けい素鋼板は $B=0.3\text{T}$ 付近から 100 Hz 成分が観測され、 $B=1.0\text{T}$ 付近から 200, 300 Hz の高次成分も現れる。さらに磁束密度を上げていくと基本波 (100 Hz) 成分は減少し、2 次、3 次成分にシフトしていくことが分かる。3% けい素鋼板の高調波成分が多いことについては Fig. 5 で観測された直流磁歪曲線の非線形性が反映しているものと考えられる。このように、交流で励磁した際も 6.5% けい素鋼板の磁歪振動は非常に小さいことが分かる。

Fig. 6 Dependence of AC magnetostriction amplitude on frequency of 6.5% Si steel sheet and non oriented 3%Si steel sheet.

最後に応用例として各種けい素鋼板を用いて試作したトランスの 400 Hz での騒音の磁束密度依存性を Fig. 8 に示す。測定磁束密度全域で 6.5% けい素鋼板は方向性、無方向性けい素鋼板と比べて 10~25 dB 低い騒音レベルを示している。この騒音を周波数分析した結果を Fig. 9 に示す。6.5% けい素鋼板は $B=0.5\text{T}$ で磁歪振動に対応した 800 Hz, 1600 Hz 成分のみ観測されているが、 $B=1.0\text{T}$ では磁歪振動以外の成分も現れている。これに対して 3% 無方向性けい素鋼板は $B=0.5\text{T}$ で磁歪振動に対応した 800, 1600, 2400 Hz 成分が特に大きく、これが $B=1.0\text{T}$ ではさらに顕著になっている。3% 方向性けい素鋼板は $B=0.5\text{T}$ では無方向性けい素鋼板と比べて高調波成分が低いものの、 $B=1.0\text{T}$ では高調波成分は強く現れている。こういった傾向は、Fig. 7 で示した交流磁歪測定の結果と一致することが分かる。

4. 結 論

6.5% けい素鋼板の磁歪特性を実用的な観点から調査

Fig. 7 Dependence of AC magnetostriction amplitude on induction of 6.5% Si steel sheet and non oriented 3% Si steel sheet.

Fig. 8 Induction dependence of transformer noise.

Fig. 9 Frequency dependence of transformer noise.

した。その結論を以下に示す。

① 800 A/m の直流磁場印加時に、6.5% けい素鋼板の磁歪は測定した磁束密度 $B = \pm 1.3$ T 以内で 0.2×10^{-6} 以下であった。これに対し 3% 無方向性けい素鋼板は $B < 1.0$ T では磁歪は小さいものの $B = 1.0$ T 付近から急激に増加し $\Delta l/l$ は 8×10^{-6} であった。

② 6.5% けい素鋼板は 50 Hz 励磁時においてもほぼ磁歪零であったが、3% 無方向性けい素鋼板は低磁束密度域から磁歪が発生し、磁束密度の上昇に伴って急激に増加し磁歪振動の周波数成分は高次側にシフトした。

③ 6.5% けい素鋼板と 3% けい素鋼板を用いたトランス騒音測定の結果、 $B \leq 1.4$ T で 10~25 dB の差が現れた。また、磁束密度が高くなるにつれて騒音の周波数成分が高次側にシフトした。

このように、6.5% けい素鋼板の磁歪は非常に小さく試作したトランスにおいても極めて低騒音であることが

確かめられた。これは、同一騒音レベルで磁束密度の比較を行った場合、6.5% けい素鋼板の磁束密度が 3% 方向性けい素鋼板の約 2 倍であることから分かるように、低騒音化を目的としたトランスにおいては 6.5% けい素鋼板を使用することにより小型化できることは明らかである。

文 献

- 1) Y. Takada, M. Abe, S. Masuda and J. Inagaki: *J. Appl. Phys.*, **64**, 5367 (1988).
- 2) 日裏 昭, 高田芳一, 田中 靖, 阿部正弘, 二宮弘憲, 鶴 清, 升田貞和: 日本金属学会講演概要, **104**, 111 (1989).
- 3) 田中 靖, 高田芳一, 日裏 昭, 升田貞和, 二宮弘憲, 阿部正弘: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-89-47 (1989).
- 4) 高田芳一, 村上忠義, 田中 靖, 升田貞和, 三原 豊, 小林英男: NKK 技報, NO. 127 (1989).

1990 年 1 月 8 日受理, 1990 年 3 月 13 日採録