けい素鋼板の動的回転磁気ひずみ

Rotational Dynamic Magnetostriction of Si-Fe Sheet

榎園正人・鈴木毅浩・J. Sievert*

大分大学工学部, 大分市旦野原 700 (〒870-11)

*PTB Abteilung 2. 42, Bundesallee 100, 3300 Braunschweig, ドイツ

M. Enokizono, T. Suzuki and J. Sievert*

Faculty of Engineering, Oita Univ., 700 Dannohara, Oita 870-11

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 3300 Braunschweig, Germany

Rotational dynamic magnetostriction (RDM) was measured as a function of rotating magnetic flux density on nonoriented and grain-oriented silicon steel sheets under various magnetization conditions. Rotational dynamic magnetostriction was measured by using the two-dimensional strain gauge, which provides x - and y -direction output. The rotational dynamic magnetostriction in silicon steel sheet is larger than the alternating magnetostriction along the rolling direction.

Key words: rotational dynamic magnetostriction, silicon steel sheet, magnetostriction, rotating field

1. ま え が き

磁性材料としてのけい素鋼板の磁気ひずみは電気機器の騒音の主原因として、低騒音化の重要な課題に挙げられている。また一般的にも磁性材料の磁気特性を支配する重要な要素でもある。電気機器の低損失低騒音化のためには、磁気ひずみの小さいけい素鋼板の開発が必要である。これまで低磁気ひずみ化の手段として鋼板の配向性化や、材料に張力を印加して、その方向に 180° 磁区を生成させるなどの工夫が払われてきた。これらのけい素鋼板は、近年著しい進歩が見られており、機器の省エネルギー化に大きく貢献しつつある。ところが、こうした低磁気ひずみ低損失の鋼板であるにもかかわらず機器に組み込んでみると、損失の増大や騒音の増加が見受けられる。この傾向は回転磁束下において著しい兆候を示す¹⁾。我々はこの原因は磁束の方向が変わることによって起こるものと考えた。つまり、従来の磁気測定では一方向に励磁して測定するため、磁界 H と磁化 M が平行の状態における磁気特性である。(我々はこれを 1 次元測定と呼ぶことにした。)^{2), 3)} ところが磁束が方向を変えたり、回転したりすると印加磁界 H と磁束密度 B (あるいは磁化 M) は平行とはならない³⁾。このような関係を

含めた磁気特性を測定するため、我々は 2 次元測定を提唱した。

とりわけ磁気ひずみは一方向 (例えば圧延方向) に小さくても、 90° 磁区に依存するため磁化の方向が変わると磁区構造も変化し、増大することは十分考えられることである。我々は先に、回転磁束下での 2 次元測定によって動的磁気ひずみ (動的回転磁気ひずみを RDM と称することにした。)を測定し、その値がこれまでの交番磁界下での測定値を大幅に上まわる値を示すことを明らかにした⁴⁾。この値は低磁気ひずみ材料であるにもかかわらず、3 相変圧器鉄心の T 接合部や回転機鉄心における振動の発生をも説明できる。本論文は文献 4 を補足し、かつ、この動的回転磁気ひずみの基本的特徴と磁化変化との関係を明らかにした。

2. 動的回転磁気ひずみの測定方法

動的回転磁気ひずみ (2 次元磁気特性) を測定するための磁化器ならびに基本的構成は回転磁束鉄損 (2 次元磁気特性) 測定装置¹⁾と同じで、 $80 \times 80 \text{ mm}^2$ の矩形板試料の中央部に $18 \times 18 \text{ mm}^2$ の磁界測定用 H_x ならびに H_y コイルと、20 mm 幅の十字形の磁束密度測定用 B_x ならびに B_y コイルに、さらに動的回転磁気ひずみ測定用としてひずみゲージが設置されている。この測定に使用したひずみゲージは 2 方向検出用の特殊ゲージである⁴⁾。 H ならびに B ベクトルおよび磁気ひずみ λ_x ならびに λ_y の、各検出された電圧は差動増幅器を介して 14 bit A/D コンバータに入力され、マイクロコンピュータに取り込まれて処理される。位相と大きさを制御した波形を 16 bit D/A コンバータを介して電力増幅器に供給し、励磁コイルに印加される。データのサンプリングは一周期 250 分割で、 H コイルならびに磁気ひずみの出力のノイズ低減のため、16 同期の波形を仮想平均法⁵⁾による周期加算処理⁶⁾が行われている。本研究において x

ならびに y 軸方向を観測軸として、動的回転磁気ひずみの大きさ λ_r を次のように定義して評価することにした。

$$\lambda_r = \sqrt{\lambda_{x-p-p}^2 + \lambda_{y-p-p}^2}$$

ここで λ_{x-p-p} , λ_{y-p-p} は、 λ_x と λ_y から得られたリサージュからそれぞれ x (圧延と直角方向) および y 方向 (圧延方向) の磁気ひずみのピークからピークまでの値である。

測定に使用した試料は新日本製鉄製の無方向性けい素鋼板 H50 (板厚 0.50 mm) と方向性けい素鋼板 ZDKHG 6H (板厚 0.27 mm) である。なお本測定における励磁周波数は 50 Hz である。

3. 回転磁束下の磁気ひずみの変化

3.1 基本的特徴

まず最初に、円回転磁束下での磁気ひずみの挙動について無方向性けい素鋼板の結果を Fig. 1 に示す。無方向性けい素鋼板の場合、回転磁束の磁束密度の増大とともに λ_x および λ_y はほぼ均等に増大し、したがって回転磁気ひずみは y 軸から約 45° 方向に単調に増加している。

Fig. 1 Locus of rotational magnetostriction and magnetic flux density. (Non-oriented sheet.)

Fig. 2 Magnetostriction of any direction. (Non-oriented sheet.)

Fig. 3 Distribution of λ_{p-p} on any direction. (Non-oriented sheet.)

この結果をさらに詳細に分析するため、 $\lambda_x - B_x$ および $\lambda_y - B_y$ のバタフライープから、任意方向の磁化に対するバタフライープが計算できるので、その結果を Fig. 2 に示した。これは磁化方向に観測されたものでないため、任意方向の磁気ひずみ特性を示すものではないが、磁気ひずみは 90° 磁区の挙動に依存するので、その影響や異方性の影響を検討することができる。この結果より磁化の方向が x および y 軸方向から遠ざかるにつれて磁気ひずみは減少していることから前述の影響は小さいものといえる。これを分かりやすくするため任意の磁化方向に対するその方向の回転磁気ひずみ (λ_{p-p} : 最大振幅) 分布として表示すると Fig. 3 のようになる。この結果は磁化方向による磁気ひずみの x および y 軸方向への影響

Fig. 4 Locus of rotational magnetostriction and magnetic flux density.
(Grain-oriented sheet.)

を表す。図から 45° の磁化方向で磁気ひずみが最小となり、無方向性鋼板の場合、磁気ひずみは磁化方向に強く依存する。

他方、方向性けい素鋼板の場合では、Fig. 4 に示すように圧延に直角方向（磁化困難方向）に極めて大きな磁気ひずみ λ_x が発生している。この鋼板は y 方向（圧延方向）における 1 次元測定において低磁気ひずみ材料として知られるものである。このとき λ_r は λ_x と λ_y の大きさの割合に対応した傾き角約 30° で単調に増加している。そこで、前述と同様に磁化方向の磁気ひずみを算出すると、Fig. 5 のようになる。これより、容易方向から 30° 付近で磁気ひずみが最小値となっている。また同様に λ_{p-p} の方向分布を Fig. 6 に示す。無方向性けい素鋼板に比べると、圧延に直角方向に比重がかかった分布を形成している。これは異方性の影響を強く受け、磁区構造が磁化の方向によって変化するためである。

Fig. 5 Magnetostriction of any direction.
(Grain-oriented sheet.)

Fig. 6 Distribution of λ_{p-p} on any direction.
(Grain-oriented sheet.)

3.2 回転磁束の軸比による変化

Fig. 7(a), (b) は各けい素鋼板について回転磁束の軸比 (a = 楕円磁束の短軸/長軸) を変化させたときの λ_r の変化を示す。図中に示したパラメータ θ は圧延方向からの長軸方向の傾き角を表す。軸比が 0 の時は交番磁束下の磁気ひずみであることを考えると、いずれも軸比が増大するとともに λ_r は増大している。しかも従来の 1 次元磁気測定において低磁気ひずみを示した方向性けい素鋼板の場合の増加は極めて大きいことが分かる。しかも圧延方向からの傾き角 θ の増加とともに増加する傾向にある。これらの現象は先に述べた 3 相変圧器の T 接合部や回転機の鉄心の振動による騒音の増大を理解せしめる。

3.3 回転磁束の傾き角による変化

動的回転磁気ひずみは回転磁束の軸比 a ならびに圧

(a) Non-oriented sheet, $BI=1.5$ [T]

(b) Grain-oriented sheet, $BI=1.0$ [T]

Fig. 7 Relationship between rotational magnetostriction and axis ratio.

(a) Non-oriented sheet

(b) Grain-oriented sheet

Fig. 8 Relation among λ_r , a and θ .

延方向からの傾き角 θ の影響を強く受ける。そこで、それらの関係を立体的に表した結果が Fig. 8(a), (b) である。これより無方向性けい素鋼板に比べて方向性けい素鋼板の方が、動的回転磁気ひずみは軸比および傾き角の増大による増加が大きいことが分かった。これは、方向性けい素鋼板ほど磁気ひずみの主原因となる 90° 磁区の占める割合が無方向性けい素鋼板に比べてはるかに少ないためであろう。したがって、磁化方向の回転によって 180° 磁区は変化し新たな磁壁の発生や消滅過程をへて 90° 磁区が出現してくることが考えられる。このことは今後の回転磁束下での動的磁区観察によって明らかになるであろう。

4. む す び

けい素鋼板の動的回転磁気ひずみについて、その基本的特徴を明らかにした。以下にその結果について要約する。

- 1) 動的回転磁気ひずみは通常の交番磁束下でのそれに比べてはるかに大きいことが分かった。
- 2) 方向性けい素鋼板の動的回転磁気ひずみの方が無方向性けい素鋼板のそれより大きい。
- 3) 動的回転磁気ひずみは回転磁束の軸比ならびにその長軸の傾き角によって大きく変化する。

文 献

- 1) 電気学会技術報告 (II 部): 第 276 号 (1988).
- 2) 榎園, 鈴木, J. Sievert: 日本応用磁気学会誌, **14**, 455 (1990).
- 3) M. Enokizono, T. Suzuki, J. Sievert, J. Xu: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 2562 (1990).
- 4) M. Enokizono, T. Suzuki, J. Sievert: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 2067 (1990).
- 5) 山口, 松原, 指方: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-81-31 (1981).
- 6) 雨宮, 信号処理入門, pp. 22~26, オーム社 (1987).

1990 年 12 月 4 日受理, 1991 年 2 月 28 日採録