交流磁気ひずみ測定における測定誤差要因の評価 —垂直振動, 摩擦力, 鋼板のたわみの影響—

Evaluation of the Error of ac Magnetostriction Measurement:
Influence on the Vertical Vibration, Friction, and Bend

茂木 尚・熊野知二

新日本製鐵(株) 八幡技術研究部, 北九州市戸畑区飛幡町1-1 (〒804-0001)

H. Mogi and T. Kumano

Yawata R&D Laboratory, Nippon Steel, 1-1 Tobihata, Tobata, Kitakyushu 804-0001

(1998年10月8日受理, 1999年1月21日採録)

This paper describes the influence of ac magnetostriction measurement on the vertical vibration, friction, and bend of a sample. Mechanical disturbances of the sample cause errors in the measurement, since the ac magnetostriction amplitude is less than $1 \mu\text{m}$. To obtain an accurate measurement, the error caused by the disturbances is calculated. By taking accurate measurements, a plate on the sample decreases the bend, even when compressive stress is applied to the sample in the measurement direction.

Key words: ac magnetostriction, vertical vibration, bend, friction, laser Doppler velocimeter, silicon steel

1. はじめに

生活環境の快適さが求められている中, 電力用変圧器からの騒音低減は現代において必要不可欠な研究開発の一つであり¹⁾, かつ古くからの継続テーマである²⁾. 変圧器騒音の発生原因は鉄心として広汎に用いられるけい素鋼板の磁気ひずみによる振動や鉄心接合部の渡り磁束によって生じる鋼板間の電磁振動が挙げられる. このうち磁気ひずみについては騒音との相関が調査され³⁾, その測定の重要性が改めて指摘されている.

けい素鋼板を対象とした磁気ひずみの測定には従来から用いられている接触方式と近年報告の多い非接触方式とに大きく分類される. 非接触式磁気ひずみ測定法は様々な方法⁴⁾⁻⁶⁾が提案されており, 直流磁束重畳時の特性⁷⁾, 6.5%Si 材を対象とした微小磁気ひずみの測定⁸⁾等がなされている. しかしながら, 実用時を想定した圧縮応力下での測定例はほとんどない.

本実験では交流磁気ひずみ測定における測定精度を把握するため, 電磁力による板面垂直方向の垂直振動, 鋼板接触面に生じる摩擦力, および圧縮応力印加時に生じる鋼板のたわみの影響を定量的に調査した.

2. 実験方法

交流磁気ひずみはFig. 1に示すレーザドップラー振動計からなるシステムにより測定した. 試料は圧延方向長 500mm × 幅 100mm × 厚さ 0.23mm の一方方向けい素鋼板を用いた. 鋼板の一方は固定し, 反対側の鋼板面上に固定した反射器にレーザを当てて交流磁気ひずみを測定した. 測定時, フレームの振動による測定誤差を低減するため, 参照光を用いてフレームの振動を取り除いた. 板面垂直方向の垂直振動は, Fig. 2に示すように反射ミラーを鋼板上から離れて設置し, レーザ光を鋼板表面に垂直に当てて測定した.

本装置は $0-0.5\text{kg/mm}^2$ の圧縮応力を鋼板の測定方向に印加し交流磁気ひずみを測定する構造になっている. 摩擦力の影響および圧縮応力による鋼板のたわみはFig. 2に示すように鋼板上にのせるガラス板, ベークライト板, 真ちゅう板の重量を変えて, 交流磁気ひずみの変化量を見た. ガラス板は鋼板全面を覆う時, 摩擦ができるだけ少ない治具として用い, 反射ミラーと接触しないようにスリットを設けた. ベークライト板は測定点の垂直振動を抑えるため測定点近傍に置き, 真ちゅう板は摩擦力を増す重りとしてコイル内に適宜入れた. 真ちゅう板は非磁性体で, 透磁率が試料より 10^{-5} 倍と小さく, ここで内部に流れる渦電流の影響は無視できるものとした.

尚, 交流磁気ひずみは磁区構造が単純である磁化飽和状態を

Fig. 1 Block diagram of the ac magnetostriction measurement system.

Fig. 2 Setup for measurement to evaluate the influence of friction and sample bending.

Fig. 3 Measurable movement for a laser Doppler velocimeter.

Fig. 4 Locus of the magnetostriction and vertical vibration of a sample without coating.

Fig. 5 Locus of magnetostriction and vertical vibration of a sample without coating under a bakelite and glass plate.

原点として比較評価した。したがって、励磁磁束密度は 2.0T とした。

3. 実験結果および考察

3.1 レーザドップラー振動計の精度

レーザドップラー振動計の測定可能範囲を Fig. 3 に示す⁹⁾。周波数が 10^{-3} Hz から 50 kHz の間において、0.1 mm から 10 nm までの変位が測定可能である。測定する交流磁気ひずみは周波数 50 Hz から 10 kHz の間において 10 nm から 1 mm にあたる。したがって、本実験において交流磁気ひずみはこの測定範囲内にあり本振動計の精度は十分実用的であると考えて良い。

3.2 電磁力と交流磁気ひずみによる垂直振動

測定される鋼板は交流磁気ひずみによる水平方向の振動の他に、ヨークとの接触面で働く電磁力および交流磁気ひずみからの伸縮により上下方向の垂直振動を引き起こす。この振動が交流磁気ひずみ測定に与える影響を調べた。交流磁気ひずみは、測定方向と平行に鋼板上の反射器へレーザを当てて測定し、垂直振動はこの反射器を外した位置へ鋼板面に垂直にレーザを当てて測定した。交流磁気ひずみと垂直振動による測定点の軌跡を Fig. 4-Fig. 7 に示す。

Fig. 6 Locus of the magnetostriction and vertical vibration of a coating sample.

Fig. 7 Locus of the magnetostriction and vertical vibration of a coating sample under a bakelite and glass plate.

Fig. 4 には張力被膜のない一方向性けい素鋼板の測定結果を示した。この場合、鋼板上にはガラス板等の重量はのせていない。一方、Fig. 5 には垂直振動を抑える目的で、同じ鋼板ガラス板とベークライト板をのせた。鋼板上に板をのせたにもかかわらず、垂直振動の大きさはあまり変わらず、軌跡を描く測定点は鋼板が伸びた時上方に位置した。磁束密度0で、鋼板が縮んだ時、測定点は下方に位置した。交流磁気ひずみは鋼板上に板をのせた時小さくなり、軌跡の傾きが大きくなった。

Fig. 6, Fig. 7 では同様の実験を張力被膜のある一方向性けい素鋼板で行った。この実験においても同様に、鋼板上に板をのせると垂直振動の大きさはあまり変わらず、一方、測定される交流磁気ひずみは小さくなった。

これらの実験により鋼板に板をのせると垂直振動にはあまり変化がないが、測定される交流磁気ひずみは小さくなり、垂直振動に関しては鋼板上においた板の重量による抑制効果は余りないと考えられる。

Fig. 8, Fig. 9 は鋼板上に板を置き、2.0T の交流磁束密度波形で励磁した時の垂直振動波形を示した。張力被膜がある鋼板は垂直振動が小さい傾向であった。

測定点の軌跡から明らかであるが、交流磁気ひずみと比較し、垂直振動の方が一桁小さかった。張力被膜のある鋼板は交流磁気ひずみが小さいためその軌跡の範囲は小さくなった。

以上の知見をもとにして、垂直振動が交流磁気ひずみ測定に

Fig. 8 Vertical vibration of a sample without coating under a bakelite and glass plate.

Fig. 9 Vertical vibration of a coating sample under a bakelite and glass plate.

与える影響を調べるため、Fig. 10 に示す計算を行った。ここでは測定点である反射器が垂直に振動すると測定方向の誤差 Le が生じると仮定した。上下の垂直振幅はFig. 4 に示した値を用いた。計算の結果、垂直振動による誤差は $Le = 51 \times 10^{-6} \text{ nm}$ となり交流磁気ひずみ測定量に対し8桁以上小さい。したがって、垂直振動の影響は無視できると考えて良い。

3.3 摩擦の影響

鋼板上に板をのせず垂直応力が0の場合、測定方向に圧縮応力を加えると鋼板はたわみ、交流磁気ひずみの測定が行えない。たわみを少なくするため、鋼板上にガラス板、ベークライト板等の重量を加えるが、この重量は鋼板接触面に摩擦力を生み、測定される交流磁気ひずみは小さくなる。これはFig. 4 と Fig. 5, およびFig. 6 と Fig. 7 の関係から明らかである。

摩擦力と測定される交流磁気ひずみの関係をFig. 11 に示す。ここで σ は鋼板の長手方向に加わる圧縮力である。摩擦力は鋼板にのせる重量が大きくなるに連れて増し、測定される交流磁気ひずみが増すほど減少する。これは摩擦力が垂直応力に比例するため、鋼板伸長と反対方向に力が働き、伸びを抑えている

L : Distance between mirror and fixed block

Lb : Vertical vibration caused by magnetic force

Le : Error caused by vertical vibration

$$\sin \theta = Lb / L \approx Le / Lb$$

$$\text{if } Lb = 120 \text{ nm}$$

$$\text{then } Le = Lb^2 / L = 51 \times 10^{-6} \text{ nm}$$

(800 nm (ac magnetostriction amplitude))

Fig. 10 Calculation of the error caused by vertical vibration.

Fig. 11 Measured ac magnetostriction and perpendicular force.

と考えられる。

以上の結果より、摩擦力とたわみの影響を最少にするためには、たわみの影響が小さくなる最小の重量で交流磁気ひずみを測定することが好ましいと考えられる。あるいは、摩擦力の影響を含んで測定したデータの延長上に、垂直応力=0の点を外挿して摩擦の影響が無い値を予測することが更に厳密であると考えられる。

3.4 たわみの影響

鋼板のたわみは物理的に交流磁気ひずみの測定を不可能にするが、垂直応力を加えてたわみを抑え、測定が可能になったとしてもその影響が残る、交流磁気ひずみの測定値に大きな誤差を与える場合がある。Fig. 12に張力被膜のない鋼板に圧縮応力を加えた例を示す。ここで σ は鋼板の長手方向に加わる圧縮力である。100gwの垂直応力では鋼板のたわみを完全に抑制できず、正確な測定ができなかった。これは圧縮応力が部分的に不均一に印加され、指示した圧縮応力にならないため、また交流磁気ひずみの伸縮振動がたわみにより減衰されたためと考えられる。

本試料においては垂直応力150gwが加わる板をのせるとたわみの影響が少なくなり、測定される交流磁気ひずみが大きくなった。この測定値の大きな差は板厚が0.23mmと薄く、張力被膜が無い鋼板において顕著である。同じ板厚でも張力被膜のある鋼板ではこの現象は生じなかった。また板厚の厚い鋼板においてもこの現象は見られなかった。鋼板がたわみやすい材料で生じることから、本現象は鋼板のたわみが原因であると考えられる。

この測定誤差は摩擦力によるものより大きいので、測定に際しては十分注意する必要がある。

4 まとめ

交流磁気ひずみ測定における板面垂直振動、鋼板と接触面の摩擦力、および圧縮応力印加時に生じる鋼板のたわみの影響を定量的に調査し、以下の知見が得られた。

Fig. 12 Measured ac magnetostriction influenced by sample bending.

- (1) 交流磁気ひずみによる振幅は垂直振動による振幅より1桁大きく、交流磁気ひずみ測定に与える影響は少ない。
- (2) 重量が重くなると摩擦力が増え、測定される交流磁気ひずみが小さくなる。
- (3) 板厚0.23mmで張力被膜のない材料は圧縮時に測定される交流磁気ひずみが小さく測定される。

以上の知見をもとに、圧縮応力下の交流磁気ひずみ測定を行うことが必要である。

謝辞 本研究に有益なご指導を頂いた東北大学電気通信研究所 荒井賢一教授に感謝いたします。

文 献

- 1) 静止器技術委員会：電気学会技術報告第616号(1996)。
- 2) B. G. Churcher, and A. King: IEE, **87**, 539 (1940)。
- 3) 磁性材料常置専門委員会：電気学会技術報告(I)部第101号(1971)。
- 4) 籾本政男：特許No. 1874250, (特願平2-105221), (1990)。
- 5) T. Sasaki, S. Takada, S. Saiki, and K. Hibi: *Nonlinear Electromagnetic System* IOS Press, 764(1996)。
- 6) T. Nakata, N. Takahashi, M. Nakano, K. Muramatsu, and M. Miyake: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 4563(1994)。
- 7) H. Mogi, M. Yabumoto, M. Mizokami, and Y. Okazaki: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 4911(1996)。
- 8) 二宮, 田中：平成6年電気学会全国大会要項1792(1994)。
- 9) レーザ振動計仕様書：Polytec社。
- 10) 藤倉, 溝上, 増井, 松尾, 籾本, 久保田：日本応用磁気学会誌, **22**, 166(1998)。
- 11) 中瀬, 中野, 藤原, 高橋：電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-96-248**, 113(1996)。
- 12) A. Allia, A. Ferro-Milone, G. Montalenti, G. P. Soardo, and F. Vinai: *IEEE Trans. Magn.*, **14**, 362(1978)。
- 13) 新谷, 斎藤, 岩間, 宮沢：電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-97-78**, 1(1997)。
- 14) S. Wada and T. Yagisawa: *J. Magn. Magn. Mat.*, **19**, 39(1980)。
- 15) T. Yamaguchi: *IEEE Trans. Magn.*, **20**, 2033(1989)。
- 16) M. Imamura, T. Sasaki, and H. Nishimura: *IEEE Trans. Magn.*, **19**, 20(1983)。
- 17) M. Imamura, T. Sasaki, and A. Saito: *IEEE Trans. Magn.*, **17**, 2479(1981)。
- 18) 榎園, 高橋, 山浦：電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-98-64**, 61(1998)。
- 19) 佐野, 佐々木, 高田, 鍋谷：電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-92-146**, 9(1992)。
- 20) 佐伯, 佐々木, 高田：電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-90-208**, 91(1990)。
- 21) 佐々木：電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-85-75**, 1(1985)。
- 22) M. J. Sablik and D. Jiles: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 2113(1993)。