

標準化に向けた磁歪測定法の構築

沓掛暁史・池田哲
電磁力担当

Construction of methods of measurement of the magnetostriction characteristics for the international standardization

Akifumi KUTSUKAKE・Tetsu IKEDA
Electromagnetic Section

要 旨

モーターや変圧器等の電気機器に必須の材料である電磁鋼板を有効に活用するには、機器の性能を左右する電磁鋼板の磁気特性を考慮しなければならない。その磁気特性のひとつに磁気ひずみ（磁歪）があり、特に変圧器では騒音の原因として注目される。そのため、磁歪の測定方法の標準化が IEC（国際電気標準会議）にて進められ、2021年11月に IEC 60404-17 として規格化された。その過程で我々は、磁歪測定方法の国際的な標準化に向けた試作器の製作や国際回送試験への参加等により測定法の規格立案に協力し、併せて保有する磁気測定技術を拡大するため磁歪測定の実験環境構築を進めてきた。本稿では、測定法の規格案に合わせて開発した磁歪測定試験器と磁歪の測定方法、測定結果等について報告する。

1. はじめに

電磁鋼板（けい素鋼板）は、モーターや変圧器等の電気機器の鉄心材料として多く利用される軟磁性材料である。電磁鋼板の磁気特性は、電気機器の性能や体格に強く影響するため、近年、当所には磁気特性の依頼測定が増えている。電気機器の開発に必須の磁気特性である磁界の強さや鉄損の測定には、我々が開発した応力負荷型単板磁気試験器や国際標準のエプスタイン試験器、市販の B-H アナライザ等を用い、産業界からの磁気特性の測定ニーズに応えてきた。

また、磁気特性のパラメータとして磁気ひずみ（以下、磁歪と呼ぶ）がある。これは、強磁性体に磁場を加え磁化すると、磁化の方向に形状の変化が生じる現象である。交流励磁の場合、特に変圧器の騒音の主原因として古くから問題にされており、近年ではモーターの振動等の原因として注目されている。磁歪の測定法には様々な研究成果が提案されており、我々も特許 5631344 号で特徴的な磁歪測定方法を提案した。しかし業界標準となる磁歪測定方法は存在しておらず、新しい磁歪測定方法の評価や商取引の場、設計開発でのシミュレーションで用いられるカタログ値の信頼性を求める観点から、国内外で測定法に対する標準化の要望があった。

そこで、IEC（国際電気標準会議）の TC68/WG2（磁性合金および磁性鋼、材料試験方法の検討 WG）において、磁

歪測定方法の標準化に向けた議論が進められた。ここでは日本が主導して測定方法が提案され、2021年11月に国際規格 IEC 60404-17 Ed.1.0 (Methods of measurement of the magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester and an optical sensor) が発行された⁽¹⁾。

我々は、IEC/TC68 国内委員会の下で詳細仕様の検討を進める磁歪測定 WG に参画する機会を得て、規格案の検討作業に加わった。その結果、磁歪測定に関する様々な知見を蓄積し、その測定環境を整備することができた。本稿では、磁歪測定法の国際規格に従い製作した試験器と、磁歪測定結果等について示す。

2. 磁歪測定用試験器

我々は、規格発行までに磁歪測定用の試験器（試験枠）を2台製作した。1台目の試験器で実施された国際回送試験で磁歪測定の課題が抽出され、その成果を基に現行規格の2台目を製作、これを現在保有している。試験器は、(株)ブライテック（大分市）と共同で製作した。

2.1. 磁歪の測定環境

磁歪測定の試料の寸法は、幅 100 mm±0.2 mm、長さ 500 mm±0.5 mm である。方向性電磁鋼板のみが対象となる。

IEC 規格で示される磁歪の測定システムは、Fig. 1 に示すと

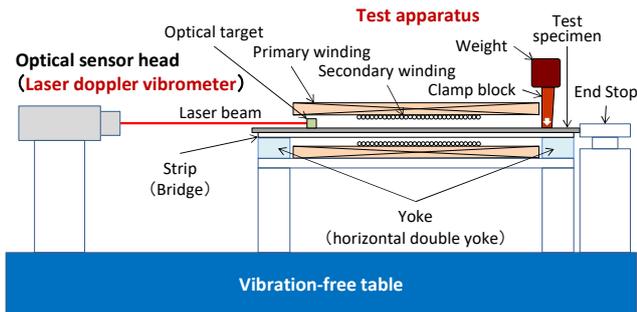


Fig. 1 磁歪測定システム図 (横形複ヨーク, 断面図)

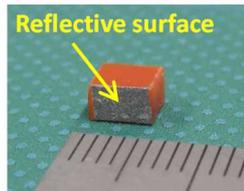


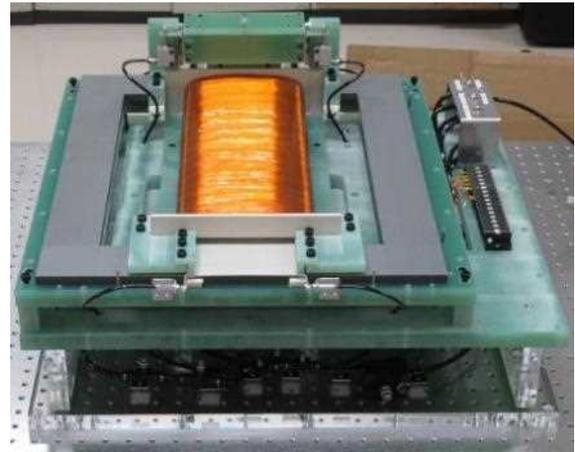
Fig. 2 光学ターゲット (反射テープを貼付済のもの)

おり, 磁歪測定用試験器(2.2 節)とレーザドップラ振動計, 除振台で主に構成される。

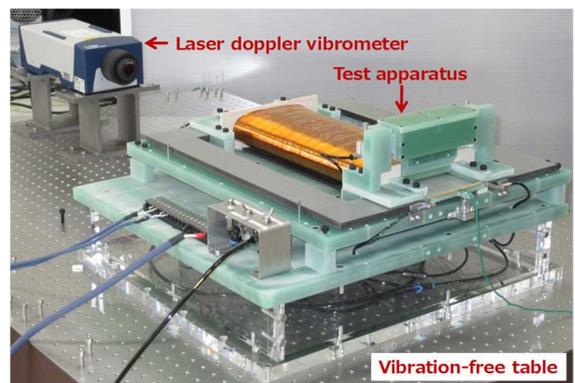
磁歪の大きさは 10^{-6} オーダと極めて小さいため, 磁歪測定の外乱となる外部環境からの微小振動を除去するために除振台を必須とする。Fig. 1 のように, 磁歪測定用試験器の励磁コイル部は台座によって除振台天板から距離をとるため, 除振台天板が非磁性である必要はない。我々は, 空気ばね除振台 J02-1510T (駿河精機製) を用いた。

微小振動である磁歪の測定には高分解能な検出器が必要であるため, IEC 規格では非接触で高分解能 (例えば $0.01 \mu\text{m}$ 以下, @100 Hz) な測定が可能なレーザドップラ振動計が求められる。磁歪の測定にはひずみゲージによる方法⁽²⁾があるが, 局所的な測定である点と測定再現性が低い点で, 標準化においては不適である。我々は, レーザドップラ振動計に, センサヘッド VibloFlex VFX-I-120 (ポリテック製) と専用のコントローラ VibloFlex VFX-F-110 (ポリテック製) を用いた。この振動計は, 光源に赤外線レーザを用いており, レーザ光を反射しにくい対象物でも感度良く振動測定が可能な特徴を持つ。保有する振動計の周波数帯域は DC から 500 kHz で, 磁歪測定には十分な帯域と分解能を有する。

レーザドップラ振動計の採用に合わせて, IEC 規格ではレーザの反射板である光学ターゲットの形状と寸法が示された。Fig. 2 に, 製作した光学ターゲットの外観写真を示す。寸法は 3 mm (H) × 5 mm (W) × 4 mm (D) で, ベークライト材で製作した。重さは約 0.08 g で, 規格で要求される 0.2 g 未満を満足した。レーザ光の高い反射強度を得るための反射材には, 超高輝度反射シート 7610 (スリーエム製) を用いた。磁歪の測定時は, この光学ターゲットを試料に貼り付ける。光学ターゲット (Fig. 2) を試料に貼り付ける位置は, IEC 規格に従いヨーク内端から 10



(a) 磁歪測定用試験器の外観



(b) 試験器とレーザドップラ振動計, 除振台

Fig. 3 製作した磁歪測定用試験器

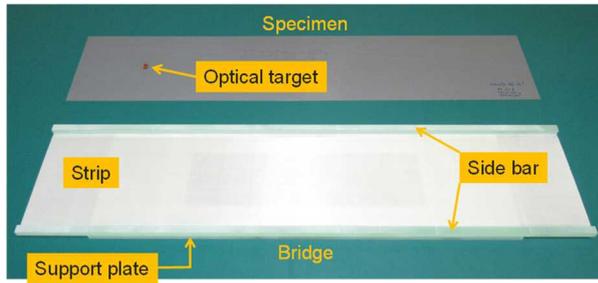
mm ± 1 mm の励磁コイル内側である。

2.2. 磁歪測定用試験器の特徴と構造

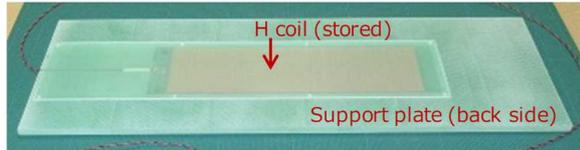
Fig. 3 に, IEC 規格に基づく磁歪測定用試験器の外観を示す。横形複ヨークや, 試料の片端を固定するためのクランプブロック (Clamp block) 等の構造が特徴である。

磁歪の測定のため, 光学ターゲットの反対側の試料の片端を, ヨーク直上のクランプブロックにより固定する。着実に押さえるため, クランプブロックの上には, 15~20 N の重し (Weight) を乗せる。

測定再現性の向上のため, 試料は Fig. 4(a) に示すブリッジ (Bridge) と呼ぶ治具に載せて設置される。ブリッジはガラスエポキシ製で, 試料を載せる厚さ 1.0 mm のシート (Strip と呼ぶ) の両端に梁 (Side bar と呼ぶ) を配置し, Strip 裏面には剛性の高いサポートプレート (Support plate) を取り付け, Strip の平坦性の確保と変形や振動に強い構造としている。また, ヨークと Strip との接触部分の平坦性を高めるために, 高真空シリコングリースでの密着が IEC 規格で提示されている。グリースには, HVG-50 (東レ・ダウコーニング製) を用いた。これらの工夫により, 磁歪振動の主方向以外の不要な振動である面外振動を抑



(a) ブリッジと試料



(b) サポートプレート (裏面)

Fig. 4 ブリッジと試料の外観



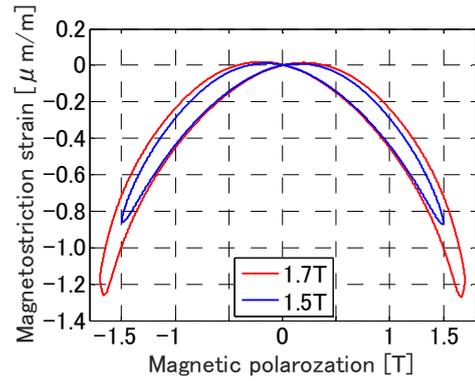
Fig. 5 磁歪測定に用いた H コイルの外観

制する。Support plate の内部には、H コイルを配置する。試料が接する Strip 表面には、磁歪運動に影響しない様に低摩擦のフッ素樹脂含侵ガラスクロステープ AGF-100FR(中興化成工業製)(摩擦低減シートと呼ぶ)が貼り付けられる。

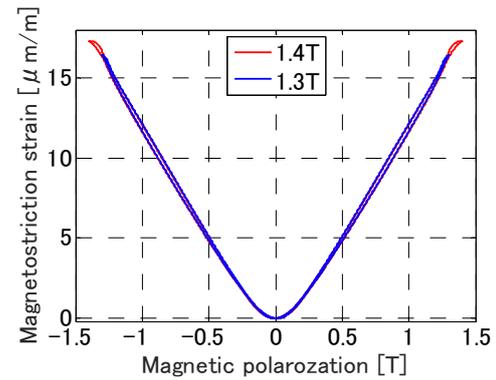
励磁コイル枠の開口部内部の幅は 120 mm、内部の高さは 15 mm である。一次巻線(励磁コイルと呼ぶ)は、ヨーク内側の可能な限り直近まで、均一に巻き線を行った。二次巻線(Bコイルと呼ぶ)は、励磁コイルの半分の長さとした。それぞれの巻き数は規格では示されないため、励磁コイルはφ1.0 mm のポリアミドイミド銅線により 8 層直列巻き(340 回/層)、B コイルはφ0.3 mm のポリウレタン銅線により 1 層 38 回巻とした。また、励磁コイル自身の振動を抑制するために、励磁コイル下に防振ゴムを配置した。

磁界の強さの測定には、Support plate 内に配置(Fig. 4(b))の H コイルを用いた。Fig. 5 に、H コイルの外観を示す。IEC 規格では H コイルの仕様は指示されないため、我々は厚さ 3 mm の巻線枠に、φ0.1 mm のエナメル銅線を巻線長 196 mm に 1480 回巻線した⁽²⁾⁽³⁾。H コイルのエリアターンは、我々が保有するソレノイドコイルと基準コイルを用いて測定し、Fig. 5 に示す H コイルでは 0.23455 m²と校正された。

高い精度で磁束密度を測定するための B コイルの空隙補償は、単板磁気試験器による磁気試験法の国内外の規格⁽²⁾⁻⁽⁵⁾において、相互誘導器や専用の空隙補償コイルを用いた方法が



(a) 試料 A1



(b) 試料 C1

Fig. 6 磁歪の測定例 (バタフライループ)

示される。磁歪測定法の IEC 規格では、H コイルを用いた数値演算が推奨されており、我々もその方法を採用した。

また、我々の磁歪測定用試験器には、試料の挿抜時にクランプブロックをエアシリンダで持ち上げる機能と、Bridge の挿抜等のメンテナンス時に励磁コイル全体をエアシリンダで持ち上げる機能が付加されている。

2.3. 計測機器と測定条件

試料の励磁系には、D/A 変換器 WE7282(横河電機製)と電力増幅器 HSA4014(エヌエフ回路設計ブロック製)を、B コイルと H コイルの誘起電圧およびレーザドップラ振動計の速度信号の取得には、A/D 変換器 WE7275(横河電機製)を用いた。なお、取得波形のノイズ低減のために A/D 変換後の波形に対して励磁周波数に対する高次高調波を PC 上でソフトウェアにより除去した。励磁電流の検出には、1.0 Ω の超精密大電流用抵抗器 PSBX1R000B(アルファ・エレクトロニクス製)を用いた。磁気特性測定時の励磁電圧波形は、磁束密度波形が正弦波(ひずみ率 0.5%以下、振幅率 0.05%以下)となるようにデジタルフィードバック制御で生成した。

3. 磁歪の測定

ここでは、磁歪測定用試験器による方向性電磁鋼板の

Table 1 磁歪の測定結果 (5回の平均値と標準偏差)

単位: $\mu\text{m}/\text{m}$

Test specimen		1.5 T		1.7 T	
		λ_{p-p}	λ_{0-p}	λ_{p-p}	λ_{0-p}
A1	Ave.	0.876	-0.856	1.278	-1.166
	Std. dev.	0.002	0.001	0.004	0.005
A2	Ave.	0.923	-0.900	1.309	-1.184
	Std. dev.	0.004	0.004	0.003	0.004
A3	Ave.	0.975	-0.956	1.366	-1.258
	Std. dev.	0.009	0.009	0.009	0.009
A4	Ave.	0.957	-0.940	1.349	-1.241
	Std. dev.	0.005	0.005	0.008	0.008
A5	Ave.	0.936	-0.916	1.322	-1.209
	Std. dev.	0.006	0.006	0.009	0.009
B1	Ave.	0.859	-0.844	1.149	-1.089
	Std. dev.	0.007	0.007	0.007	0.007
B2	Ave.	0.894	-0.880	1.194	-1.138
	Std. dev.	0.008	0.009	0.010	0.011
B3	Ave.	0.863	-0.849	1.128	-1.071
	Std. dev.	0.008	0.008	0.010	0.010
B4	Ave.	0.897	-0.883	1.170	-1.108
	Std. dev.	0.005	0.005	0.008	0.008
B5	Ave.	0.905	-0.891	1.189	-1.122
	Std. dev.	0.004	0.004	0.005	0.005
Test specimen		1.3 T		1.4 T	
		λ_{p-p}	λ_{0-p}	λ_{p-p}	λ_{0-p}
C1	Ave.	16.453	16.441	17.332	17.319
	Std. dev.	0.011	0.011	0.010	0.010
C2	Ave.	16.751	16.739	17.658	17.647
	Std. dev.	0.014	0.014	0.016	0.016
C3	Ave.	16.645	16.632	17.495	17.484
	Std. dev.	0.010	0.011	0.012	0.012

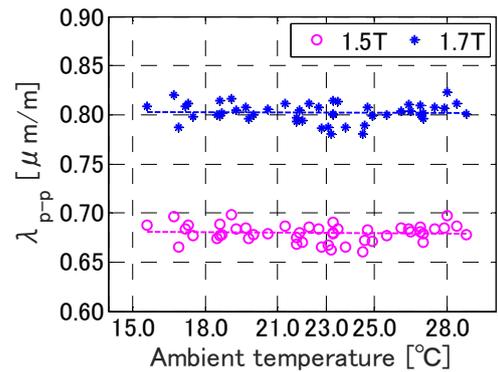
磁歪の測定例や磁歪測定と外乱の影響等について示す。

3.1. 方向性電磁鋼板の磁歪の測定例

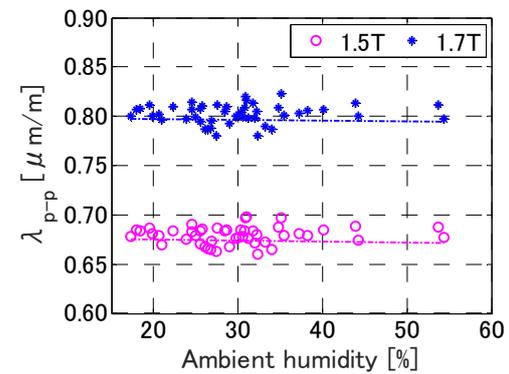
IEC TC68/WG2 は、磁歪測定法の国際標準化のための国際回送試験を2020年に実施した。これには、当所を含む国内外の8機関が参加した。測定の一例を、以下に示す。

回送試験の試料は方向性電磁鋼板3種で、2鋼種各5枚(圧延方向に切り出した試料, 試料A1~A5と試料B1~B5)と1鋼種3枚(圧延直角方向に切り出した試料, 試料C1~C3)の計13枚であった。また、各試料の測定の回数は5回である。回送試験で比較する主なパラメータは、周波数50 Hzの交流励磁で得られる磁束密度 $B[\text{T}]$ と磁歪量 $\lambda [\mu\text{m}/\text{m}]$ とで表現されるバタフライループの総振幅 λ_{p-p} およびゼロピーク幅 λ_{0-p} 、各測定時の磁束密度波形と磁歪波形である。

次に、磁歪の測定結果を示す。Fig. 6は、試料A1とC1から得られたバタフライループである。これから試料Aは負磁歪、試料CはV字型が特徴的な正磁歪⁽⁶⁾であることが分かる。Table 1は、計13枚の試料の測定値(5回の平均



(a) 周囲温度と磁歪測定値



(b) 湿度と磁歪測定値

Fig. 7 周囲温度と湿度の磁歪測定への影響

値と標準偏差)で、我々の測定は高い再現性が得られていることが明らかになった。

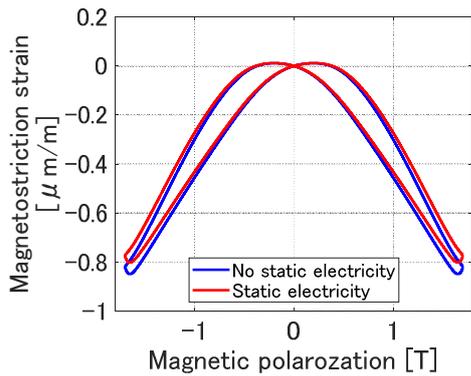
また我々の測定結果は、回送試験に参加した他所と比べても平均的な値で測定の際ばらつきも突出して大きくなく、測定波形の高調波成分は少ないことも分かった。このことから、我々の磁歪測定用試験器と測定方法および測定環境は妥当であると判断できた。

3.2. 周囲温度と湿度の影響

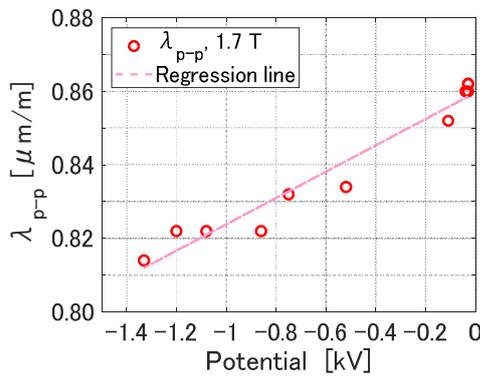
試験環境周囲の温度と湿度の磁歪測定への影響を検討するため、試験室の室温を変化させ磁歪測定を実施した。試験室内の湿度は制御できないため、任意の測定時の湿度をパラメータとした。周囲温度と湿度の測定は、温湿度計 175H1(テストー製)を用い、磁歪測定試験器の脇(除振台上)に配置して測定した。Fig. 7に、測定結果を示す。周囲温度に対する磁歪値と、湿度に対する磁歪値ともに相関は見られず、これらは磁歪測定に影響しないことを明らかにした。なおIEC規格では、周囲温度は $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ と規定され、湿度は指示されない。

3.3. 静電気の影響

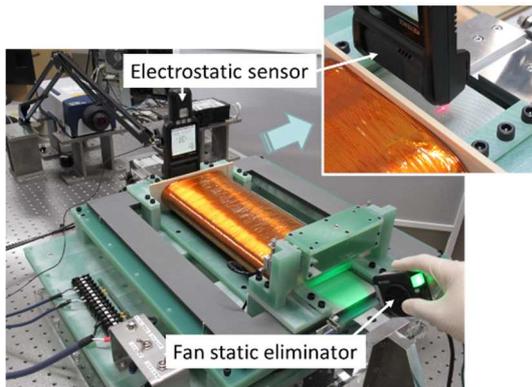
磁歪の動きを阻害する要因に、静電気が考えられる。IEC規格による試験法において、試料(電磁鋼板)と摩擦低減シートとの間の静電気による吸着力は測定される磁歪値を減少させるため、これを可能な限り排除する必要がある。Fig. 8(a)に、



(a) 静電気によるバタフライープの変化の例



(b) Strip 上の静電気量と磁歪測定値

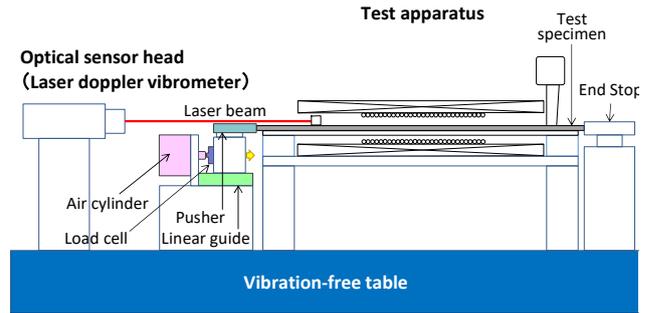


(c) 静電気測定器と除電ブローアの位置

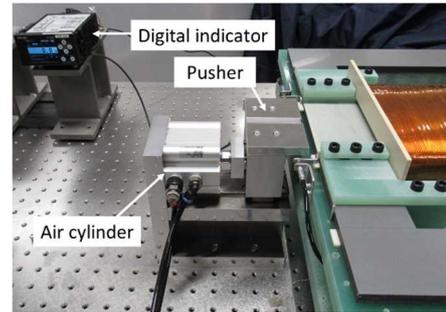
Fig. 8 静電気の磁歪測定への影響

試料と摩擦低減シートとの間に静電気の影響がある場合と、静電気の影響が無いの場合(後述する静電気対策後)のバタフライープを示す。Fig. 8(a)では静電気の影響と考えられるループ形状の変化が確認でき、この場合、静電気の影響がある時の磁歪値は、静電気の影響が無い時に比べ、 λ_{p-p} は約 5.3 % 減少している。

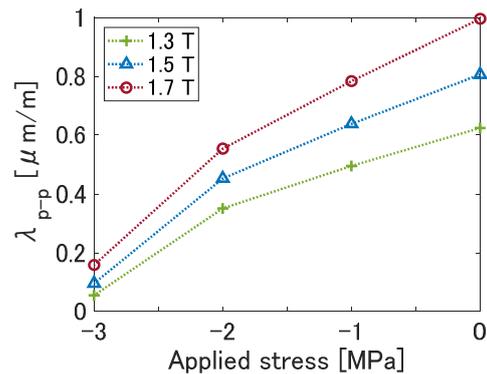
Fig. 8(b)に、磁歪測定用試験器の Strip 部分に故意に帯電させ、その状態で磁歪値(λ_{p-p} , 1.7 T 時)を測定した結果を示す。静電気量の測定は、静電気測定器 SK-H050(キーエンス製)を用い、測定位置はレーザードップラ振動系側の Strip 上とした。Strip 上の静電気は不均一に分布していると推測されるが、



(a) 磁歪測定システム図 (応力印加機構付き)



(b) 磁歪測定用試験器の応力印加機構の外観



(c) 応力下での磁歪測定例

Fig. 9 圧縮応力下の磁歪測定

Fig. 8(b)のとおり静電気量の増加とともに磁歪の測定値が小さくなっており、両者には相関があることが分かる。

また、静電気の印加後に次の静電気対策処理を行うと、対策後の磁歪値は静電気印加前の磁歪値に戻ることも確認できた。ここでは、静電気対策として除電ブローア SJ-L005F(キーエンス製)を用いた。Fig. 8(c)に、静電気測定と静電気対策(除電処理)の様子を示す。End Stop と試料とが接する位置に導電材を貼り付けアースに落とすこと(IEC 規格に記載)や、静電気除去ワイピングクロスで試料と摩擦低減シートを払拭することと合わせ、静電気測定器での監視や除電ブローアの実施によって、より再現性の高い磁歪測定が可能となった。

3.4. 応力下の磁歪測定

実際の電気機器は、アセンブリの時点で電磁鋼板に応力が加わることが多い。そのため、電磁鋼板に応力が加わった状

態での磁歪の測定ニーズがある。IEC 60404-17 の附録 B には、参考として応力下での磁歪測定法が記載されている。Fig. 9(a)に、IEC 規格を参考に応力印加機構を追加した測定システム図を示す。Fig. 9(b)は、保有する磁歪測定用試験器に設置した応力印加機構の外観である。応力印加機構には、エアシリンダに MQQTB40-10D (SMC 製)、ロードセルに TC-SR(T)500N/KN-G3 (ティアック製)、ロードセル用のデジタル指示計に TD-700T (ティアック製)を用いた。

IEC 規格では、通常 3 MPa の圧縮応力下での磁歪測定が指示されている。製作した応力印加機構を用いて、0.3 mm 厚の方向性電磁鋼板に対し、圧縮 3 MPa で試料の座屈が無く、磁歪の測定が可能であることを確認した。Fig. 9(c)は、その測定例である。

3.5. その他の対策

測定の再現性を高めるために、測定結果であるバタフライループが非対称にならないよう注意を要する。非対称になることを避けるためには、ヨークの残留磁化を除去するための消磁処理や、地磁気の影響キャンセルのための試験器の方向調整、パワーアンプの出力オフセット調整の実施等が挙げられる。

4. まとめ

本稿では、国際規格 (IEC 規格) として 2021 年 11 月に発行された方向性電磁鋼板の磁歪測定法に基づいて、我々が製作した磁歪測定用試験器の概要と磁歪の測定方法を示し、磁歪の測定結果と高い測定再現性を得るための工夫等について報告した。

本研究を遂行するにあたり、多くのご助言とご指導をいただいた IEC/TC68 国内委員会および磁歪測定 WG の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) IEC 60404-17:「Magnetic materials – Part 17: Methods of measurement of the magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester and an optical sensor」(2021)
- (2) IEC 60404-16:「Magnetic materials – Part 16: Methods of measurement of the magnetic properties of Fe-based amorphous strip by means of a single sheet tester」(2018)
- (3) JIS C2535:「単ヨーク形単板試験器による鉄基アモルファス帯の交流磁気特性の測定方法」(2017)
- (4) IEC 60404-3:「Magnetic materials – Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester」(2009)
- (5) JIS C 2556:「単板試験器による電磁鋼帯の磁気特性の測定方法」(2015)
- (6) S.Arai, M.Mizokami and M. Yabumoto:「Magnetostriction of grain-oriented Si-Fe and its domain model」Przegląd Electrotechniczny (Electrical Review), Vol.87, No.9b, pp 20-23(2011)