

変圧器用 Fe 基アモルファス合金とその磁気特性測定法の規格化

Standardization of Fe-based Amorphous Strips and Magnetic Testing Method

東 大地*
Daichi Azuma

中島 晋*
Shin Nakajima

渡壁 竜**
Ryu Watakabe

藤原 耕二**
Koji Fujiwara

石原 好之**
Yoshiyuki Ishihara

Fe 基アモルファス薄帯の国際規格化 (IEC 規格) に向けた磁気特性測定法を検討した結果、ソフトフェライトを用いた単ヨーク構成で、磁界の強さの検出には H コイル法を用いた単板試験法が適していることが分かった。回送試験の結果より、提案した単板試験法は規格に要求される相対標準偏差 3% 以下の測定再現性を有することを確認した。本研究成果をもとにした磁気特性測定法および材質の規格案を IEC/TC68 に新規提案して承認され、2018 年の発行を目標に審議中である。JIS は IEC 規格より早く 2016 年度に発行される見込みである。

To establish international standards for Fe-based amorphous strip materials, and a method for measuring their magnetic properties, a standard measurement method was studied. It was found that a single sheet tester using a single yoke made of soft ferrite and a H coil for measuring the magnetic field strength was adequate for this purpose. Through round robin tests it was confirmed that measurements of the specific power loss using the proposed method had a relative standard deviation of less than 3%, which is a sufficiently high reproducibility for the standard. The method was approved at IEC/TC68 and discussion is underway with regard to issuing this standard in 2018. It is expected that the JIS will be issued earlier than this, in fiscal 2016.

● Key Word : Fe 基アモルファス合金薄帯, 単板試験器, 規格化
● Production Code : Metglas® 2605SA1, Metglas® 2605HB1M

● R&D Stage : Research

1. 緒言

液体急冷法により作製される Fe 基アモルファス合金薄帯 (以下、アモルファス) は、飽和磁束密度が 1.5 T 以上と比較的高く、低鉄損であるため平均負荷率が低い配電用変圧器の高効率化に有効である。1980 年代に米国でアモルファスを鉄心材に使用した変圧器の開発と実用化が精力的に進められた¹⁾。日本では 1991 年から柱上変圧器への適用が始まり、2000 年以降は中国やインドなどの新興国でも広く採用されるに至った。この材料に関する規格には、電子部品用アモルファスの磁気特性試験法として JIS H 7152 がある。変圧器用アモルファスの規格としては、米国試験材料協会が発行した占積率測定法²⁾、磁気特性測定法^{3), 4)}、材質規格⁵⁾が存在するものの、国際規格 (IEC 規格) は存在しない。これらの規格が制定された 1990 年代、変圧器用アモルファスの製造会社が米国企業一社であったため、変圧器に従来から使用されている方向性電磁鋼板のよ

うに複数企業が製品を供給・競合することを前提にした品質区分を有する規格となっていない。しかしながら現在では、日立金属 (前記米国企業を買収) 以外の複数社がアモルファスの製造と販売に参入しており、公正な商取引のための適切な品質区分のある材質規格、ならびに品質を測定する測定法規格を制定する必要性が高まってきた。このような状況を受けて 2012 年に磁性材料の IEC 規格を審議している IEC/TC68 (International Electrotechnical Commission/Technical Committee 68) に日本国内委員会からアモルファスの材質とその磁気特性測定法の規格化を提案して以降、日本国内委員会が規格化の作業を主導して進めており、日立金属も積極的に参加している。具体的には日本国内委員会の中に設置されたアモルファス WG において、アモルファスに適した磁気特性測定法 (主として鉄損測定法) の開発、国際回送試験の実施、ならびに材質規格案について検討してきた。これらの結果を踏まえ、IEC/TC68 に回送試験や検討結果の報告ならびに規格案の

* 日立金属株式会社 高級金属カンパニー
** 同志社大学

* High-Grades Metals Company, Hitachi Metals, Ltd.
** Doshisha University

提案を行ってきており、2016 年現在も IEC 規格案の作成作業を続けている。材質規格案についてはユーザーの利便性を考慮し、可能な限り方向性電磁鋼板の規格と整合を取りながらアモルファスの特徴を考慮した規格案となるように努めている。一方、IEC/TC68 に提案した規格案を基にした日本の国家規格の JIS（日本工業規格）の策定作業も同時に進められ、IEC 規格より先行して 2016 年度内に JIS が発行される見込みである。なお、本稿における磁気特性測定法は、商取引のための測定値を得ることが目的であり、商用周波数 (50 Hz, 60 Hz) における 1.3 T, 1.4 T での鉄損と 80 A/m での磁束密度の測定法である。この測定条件は、アモルファスを用いた変圧器の設計磁束密度が大体 1.3 ~ 1.4 T の範囲であることを反映したものである。

以上の背景より本稿では、磁気特性測定法の中で関心が高い鉄損測定に関する検討結果について述べる。また、国際回送試験の結果、ならびに材質規格の品質区分の考え方について説明する。

2. アモルファスの磁気特性測定法の検討⁶⁾

2.1 測定システムとアモルファス用単板試験器の検討

アモルファスの板厚は 25 μm と一般的な方向性電磁鋼板の 1/10 である。さらに、原子配列に長周期性がなくアモルファス構造のため結晶磁気異方性が存在せず透磁率が非常に高い。また、飽和磁歪定数が 27 ppm と比較的大きいため応力感受性が高いという特徴がある。これらの点に配慮しながら規格に求められる測定再現性を実現する測定法の確立が必要である。試験体としてトロイダルコアを採用した場合、アモルファスの応力感受性の高さゆえにわずかな曲率の変化によって生じるひずみが原因で磁気特性が変化し、標準磁気特性測定法に求められる測定再現性を得ることが難しい⁶⁾。そこで、測定時にひずみがかかりにくい平坦な単板試料を用いた磁気特性測定法の検討を行った。

磁気特性を測定するためには、磁束波形と磁界の強さの波形を測定する必要がある。変圧器や回転機に使用される磁性材料の磁気特性は 2 次巻線 (B コイル) に誘起される電圧波形を積分した磁束波形が正弦波になる、いわゆる磁束正弦波条件で測定される。磁界の強さの波形を測定する方法は 2 つあり、(1) 式により 1 次巻線 (励磁コイル) に流れる電流と規定の磁路長から算出する励磁電流法と、(2) 式に示したように試験片近傍に置いた空心コイル (H コイル) に誘起される電圧波形を積分することで算出する H コイル法がある。

$$H = \frac{N_1 I_1}{l_m} \quad (1)$$

$$H(t) = -\frac{1}{\mu_0 (N_H A_H)} \int_0^t U_H(t) dt \quad (2)$$

ここで、 N_1 : 励磁コイルの総巻数、 I_1 : 励磁コイルに流れる励磁電流、 l_m : 既定の有効磁路長、 μ_0 : 磁気定数 (4

$\pi \times 10^{-7}$ H/m)、 $(N_H A_H)$: H コイルのエリアターン (巻数 N_H × 実効断面積 A_H (m²)), U_H : H コイルからの誘起電圧を表す。

図 1 に測定システムのプロット、図 2 に国際回送試験に用いた 60 mm 幅用のアモルファス用単板試験器を図 2 (a) ソフトフェライトヨーク、図 2 (b) 方向性電磁鋼板ヨークについて示す。各アモルファス用単板試験器の諸元を表 1 に示す。なお、両アモルファス用単板試験器とも励磁電流法と H コイル法で同時に測定できる構成とした。アモルファスは板厚、鉄損とも方向性電磁鋼板の約 1/10 であり、測定する信号強度が非常に小さくノイズ対策が重要となるため、低ノイズの小容量 (定格容量 25 VA) 励磁電源を使用した。本検討に用いた試験片には、呼称幅 170.2 mm のアモルファス薄帯 (日立金属製 Metglas[®]2605HB1M) から幅 60 mm、長さ 270 mm の形状に切り出し後、2,400 A/m の直流磁界を試験片の長手方向に印加しながら 340°C、2 時間の磁場中熱処理を施し、誘導磁気異方性を付与してある。

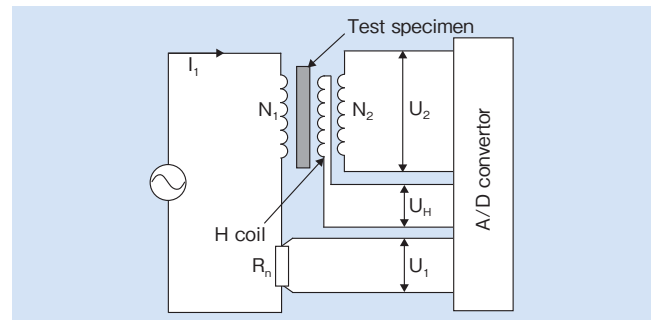


図 1 磁気特性測定システムのプロット
Fig. 1 Schematic image of measurement system

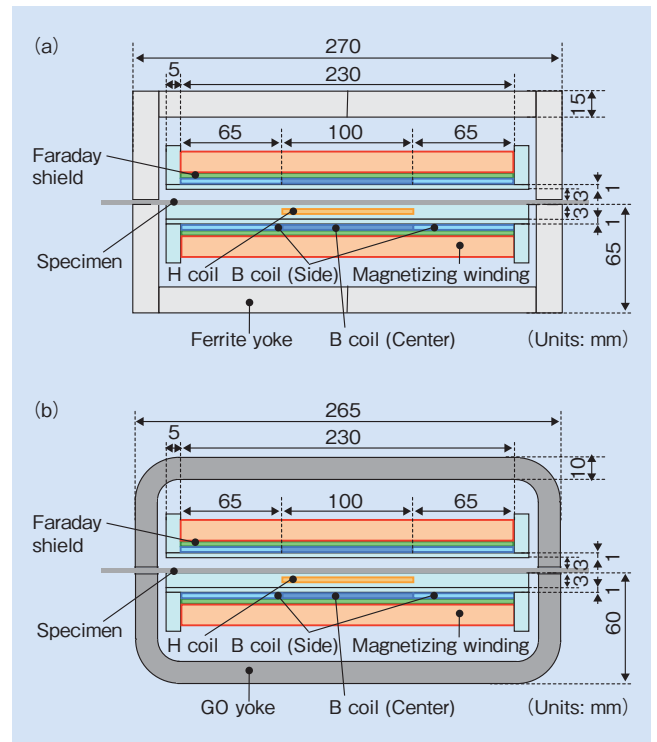


図 2 Fe 基アモルファス用単板試験器
(a) ソフトフェライト (b) 方向性電磁鋼板⁶⁾
Fig. 2 Single sheet tester for Fe-based amorphous strip
(a) soft ferrite (b) grain-oriented silicon steel (GO)⁶⁾

表 1 60 mm 幅アモルファス単板試験の諸元

Table 1 Configuration of single sheet tester for 60 mm wide amorphous strip

	Soft ferrite	Grain-oriented silicon steel
Conventional magnetic path length, l_m	240 mm	245 mm
Length of magnetizing winding	230 mm	
Magnetizing winding	ϕ 1 mm, 200 turns	
Length of B coil	100 mm	
B coil	ϕ 0.5 mm, 170 turns	
Size of H coil	Length: 100 mm, Thickness: 2 mm, Width: 50 mm	
Area-turn of H coil	0.125 turn \cdot m ²	

2.2 ヨーク材質の影響

励磁電流法で鉄損を測定する場合は、ヨークを含んだ磁気回路全体の損失を測定することになるため、測定した鉄損に占めるヨーク損失の影響を明らかにする必要がある。厚さ 25 μ m のアモルファスを 1.5 T まで励磁したときのソフトフェライト、方向性電磁鋼板ヨークの励磁磁束密度は、それぞれ約 1.1×10^3 T、 1.7×10^3 T である。これらの励磁条件下でのヨーク損失を各ヨーク材質の単位重量当たりの鉄損と励磁磁束密度の関係、およびヨーク体積から外挿して求めた結果を図 3 に示す。方向性電磁鋼板ヨークの損失は、励磁電流法で測定したアモルファスの損失の約 10% を占めており無視できない。一方のソフトフェライトヨークの損失は 1% 以下と十分に小さく無視できる範囲にあることが分かる。

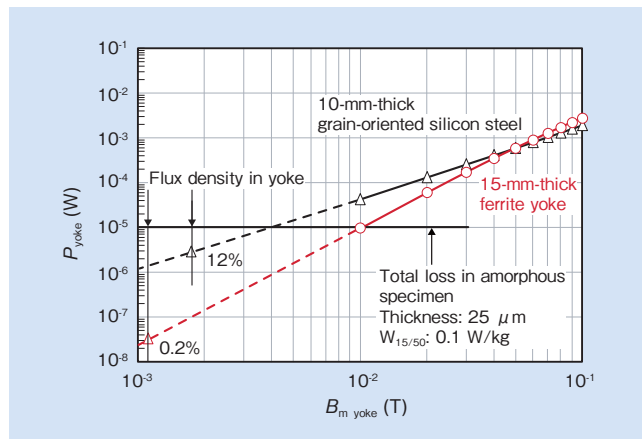


図 3 フェライトと方向性電磁鋼板ヨークの鉄損と励磁磁束密度の関係
Fig. 3 Power loss for ferrite and grain-oriented silicon steel based yokes

2.3 磁界の強さの測定法の検討

図 4 に 60 mm 幅の試験片に対してソフトフェライトの単ヨークを用いて H コイルと励磁電流法で同時に測定したヒステリシス曲線を示す。励磁電流法で測定したヒステリシス曲線の角形比が顕著に低いことが分かる。これは、主としてヨークと試験片間のギャップによるものである。励磁電流法ではヨーク損失やヨークと試験片間のギャップの影響も含めて測定することになるため、材料特性を測定するためには H コイル法の方が望ましいと言える。

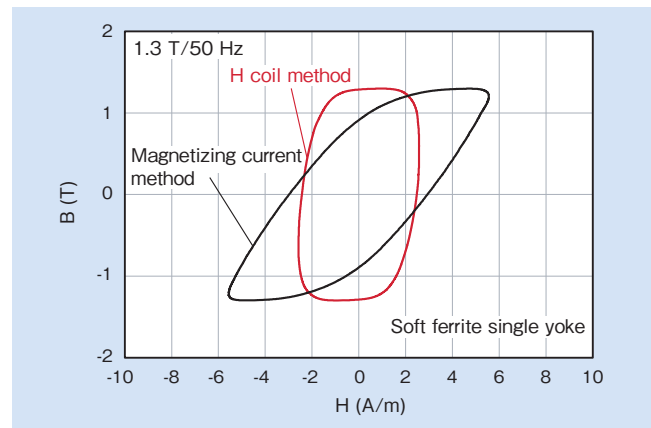


図 4 H コイル法と励磁電流法で測定したヒステリシス曲線
Fig. 4 Hysteresis loops measured by H coil and magnetizing current methods

3. 国際回送試験^{7), 8)}

3.1 回送試験の概要

測定法の IEC 規格化には、複数箇所での測定値の再現性を確認するために国際回送試験を行うことが求められており、国内 6 局所、海外 (アメリカ、イギリス、ドイツ (2 局所)、ベルギー、イタリア、中国) 7 局所の合計 13 局所が参加した。回送試験の参加団体の中でアモルファスの単板を測定した経験のある企業、研究所はそれほど多くないこと、および H コイル法での測定経験が十分とはいえない参加局所もあるため、前節で検討した 60 mm 幅のアモルファス用単板試験器をベースに国際輸送に耐えられる構造とした回送試験用のアモルファス用単板試験器を 2 台作製した。2 台の試験器のうち 1 台を回送し、残る 1 台をホームサイトである同志社大学での測定に用いた。各局所向けに 5 枚の試験片を準備し、同志社大学と参加局所の間を往復させた。試験片を回送せず往復させた理由は、回送中にひずみに敏感なアモルファスの試験片に誤って応力がかかり、特性劣化が生じた場合の影響を避けるためである。なお、同志社大学に返送された試験片は再度測定され、回送試験前後での特性劣化の有無を確認した。

上述のアモルファス用単板試験器による回送試験の後に、異なる磁気回路 (すなわち異なる試験器) を用いても同様の結果が得られることを確認するために、初回の回送試験の参加局所の中の複数の局所が各自の単板試験器を用いてアモルファスを測定する 2 回目の回送試験を行った。なお、測定項目、試験片の数および回送方法は 1 回目と同じとした。

3.2 回送試験結果

回送試験に用いたすべての試験片についてホームサイトである同志社大学で測定した 1.3 T、50 Hz での鉄損の偏差の百分率を図 5 に示す。なお、各試験片について 3 回測定しており、すべてのデータを図 5 にプロットしている。H コイル法は、励磁電流法に比べて鉄損測定値の偏差が大きいことが分かる。これは H コイルからの出力信号が 1 mV 以下であり、励磁電流法の場合のシャント抵抗両

端からの電圧信号レベル (約 10 mV) より 1 桁小さく, S/N 比が良くないことが原因であり, H コイルに重畳しているノイズが主因と考えている。

各局所において単ヨークで測定した 1.3 T, 50 Hz における鉄損を, 同志社大学で測定した鉄損の平均値で正規化したものを図 6 に示した。また, 各局所での相対標準偏差をエラーバーとしてあわせて示す。図中の一点鎖線は規格で目標とする相対標準偏差 3% を表している。点線はすべての局所での測定結果に対する相対標準偏差を表している。励磁電流法が H コイル法よりも測定再現性が良い点は図 5 に示した同志社大学での測定結果と一致している。H コイル法で測定した場合の相対標準偏差は, 大半の測定局所で 3% 以内に入っているが, 測定局所 g と k は 3% より大きい結果となっている。両局所の H コイルからの出力波形と同志社大学の波形を比べると高周波ノイズが多く重畳した波形となっていることが共通しており, H コイルからの出力信号に重畳するノイズの低減, および S/N 比を改善することが測定再現性向上のひとつの指針である。

次に参加局所が各自の単板試験器を用いてアモルファスの測定を行った 2 回目の回送試験の結果について述べる。回送局所ごとにおいて各試験片について 3 回測定した鉄損値の偏差の百分率を図 7 (a) H コイル法, 図 7 (b) 励磁電流法について示す。図中の点線は各局所での測定値の相対標準偏差を表している。この結果から測定法にかかわらずヨーク構成をダブルヨークとした方が相対標準偏差が大きくなる傾向があり, 特に励磁電流法でその違いを明確に

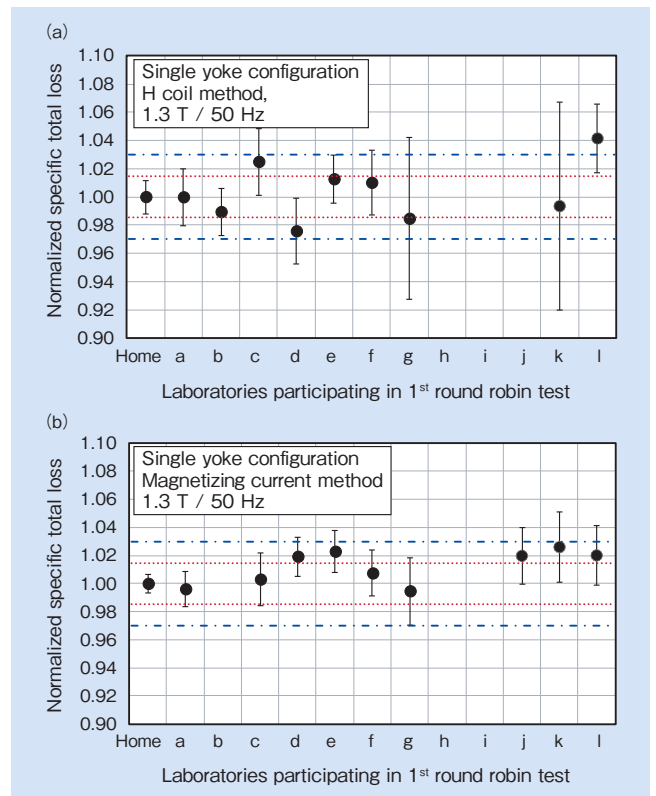


図 6 各測定局所での測定した鉄損値を同志社大学での測定値で正規化鉄損値と相対標準偏差 (単ヨーク, 1.3 T, 50 Hz)

(a) H コイル法 (b) 励磁電流法⁶⁾
 Fig. 6 Normalized specific total loss and relative standard deviation at 1.3 T, 50 Hz with single yoke configuration at each test site (a) H coil method (b) magnetizing current method⁶⁾

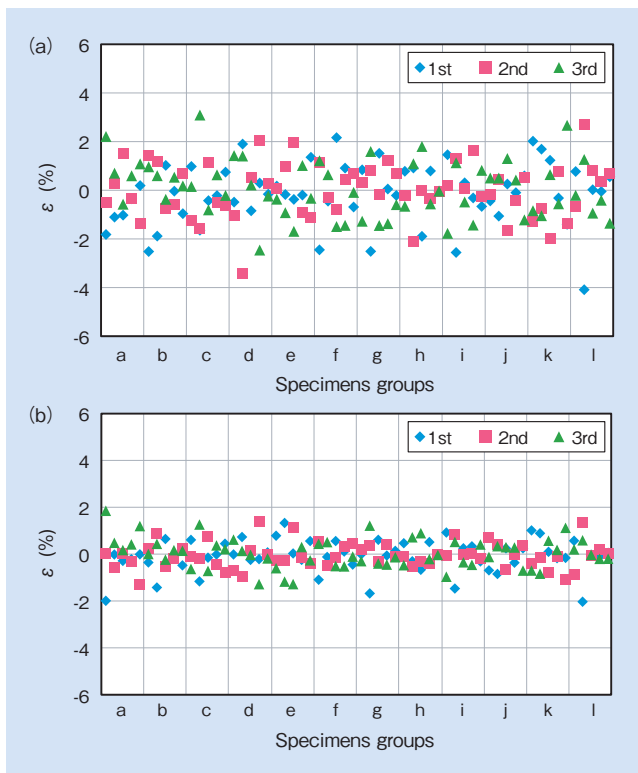


図 5 同志社大学で測定した回送試験片の鉄損値の偏差 (1.3 T, 50 Hz, 単ヨーク) (a) H コイル法 (b) 励磁電流法⁷⁾
 Fig. 5 Scatter of specific total loss for all specimens measured at Doshisha University (1.3 T, 50 Hz and single yoke configuration) (a) H coil method (b) magnetizing current method⁷⁾

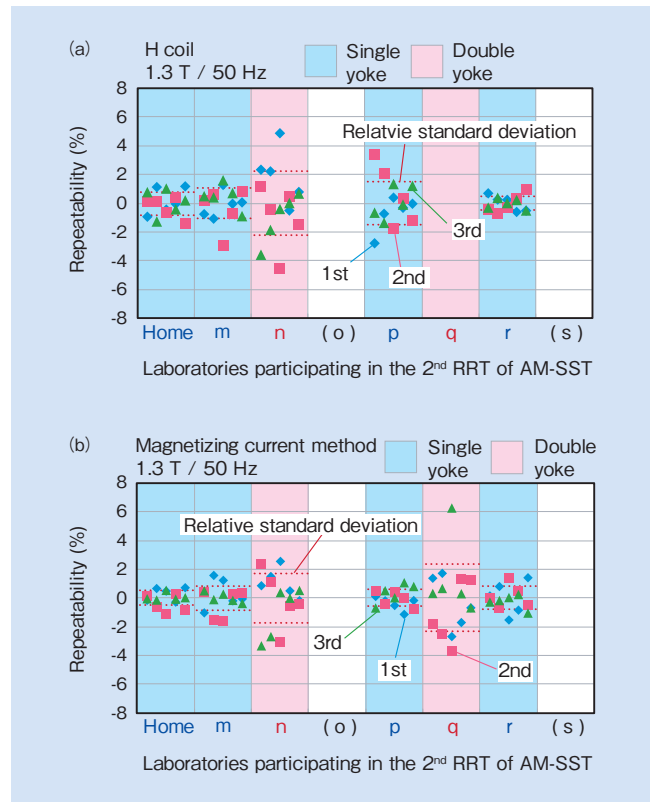


図 7 各測定局所での測定した鉄損値の繰り返し精度 (1.3 T, 50 Hz) (a) H コイル法 (b) 励磁電流法
 Fig. 7 Repeatability of specific total loss at each test site (1.3 T, 50 Hz) (a) H coil method (b) magnetizing current method

確認できる。Hコイル法ではHコイルが設置された領域（試験片長手方向の中央、長さ120 mm）の鉄損を評価しているのに対して、励磁電流法では、上側ヨークを置くことによって生じたヨーク磁極部の試験片の歪みの影響も含めて測定した結果、測定再現性が悪くなったためと考えられる。したがって試験片に応力をかけない単ヨークの方がアモルファスに適していると言える。

4. 広幅アモルファス用単板試験器^{8),9)}

上述の60 mm幅用アモルファス用単板試験器の検討と回送試験の結果をもとに、デファクトスタンダードとなっている日立金属のアモルファス標準幅の142.2 mm, 170.2 mm, 213.4 mm幅のアモルファスを1台で測定できる試験器を作製した。Hコイルからの出力信号のS/N比を改善するためにHコイルの厚みを2 mmから3 mmに厚くし、さらに広幅材を測定するためにHコイルの幅を50 mmから120 mmにした。これによってエリアターンが大きくなった結果、Hコイルからの出力信号は1 mV以下から数mVに増大した。作製した広幅アモルファス用単板試験器の測定再現性を確認するために、ひとつの試験片について測定ごとに試験片を出し入れし、1.3 T, 50 Hzにおける鉄損を10回測定してその繰り返し精度を評価した。142.2 mm, 170.2 mm, 213.4 mm幅についてHコイル法と励磁電流法により測定した鉄損値の偏差の百分率を図8 (a) および図8 (b) に示す。図中の点線で示した全測定に対する相対標準偏差を表す。図5に示した結果とは

異なり、Hコイル法と励磁電流法ともに同程度の相対標準偏差であり、目標とする3%以内を実現できることを実証した。Hコイル法での測定再現性の改善はエリアターンを大きくした結果と考えている。

また、アモルファスの透磁率が大きいこと、1.3 T, 50 Hzで励磁したときの磁界の強さは10 A/m程度と地磁気（約30 A/m）より小さく、地磁気による偏磁が鉄損値に影響を及ぼす。そのため地磁気による偏磁を避けるために単板試験器を磁気シールドで覆うなどの対策が必要となる⁸⁾。

5. アモルファスの材質規格

ユーザーの利便性の観点からアモルファスの材質規格分類法は、主用途が同じ変圧器である方向性電磁鋼板と可能な限り一致させることが望ましい。IEC規格において方向性電磁鋼板は、材質（高磁束密度材、普通材）、呼称板厚および1.7 T/50 Hzの鉄損最大値によって分類されている。アモルファスは、現在のところ呼称板厚を大きく変化させることは難しいため呼称板厚による分類は行わず0.025 mmの一種類とする（ただし分類記号には入っている）。アモルファスは液体急冷法により製造されること、および板厚が方向性電磁鋼板の約1/10であることから占積率に分布が生じやすいため最小占積率による分類を加えることとした。また、IEC規格にはアモルファス用の占積率測定法が存在しないため、ASTM A900/A900M-01をもとにした測定法を材質規格の附属書に記載している。

Fe基アモルファス薄帯の分類は、過去十数年にわたり供給してきた製品の品質と性能改善の歴史を考慮して提案した。その分類表を表2に示す。具体的には2つの材質

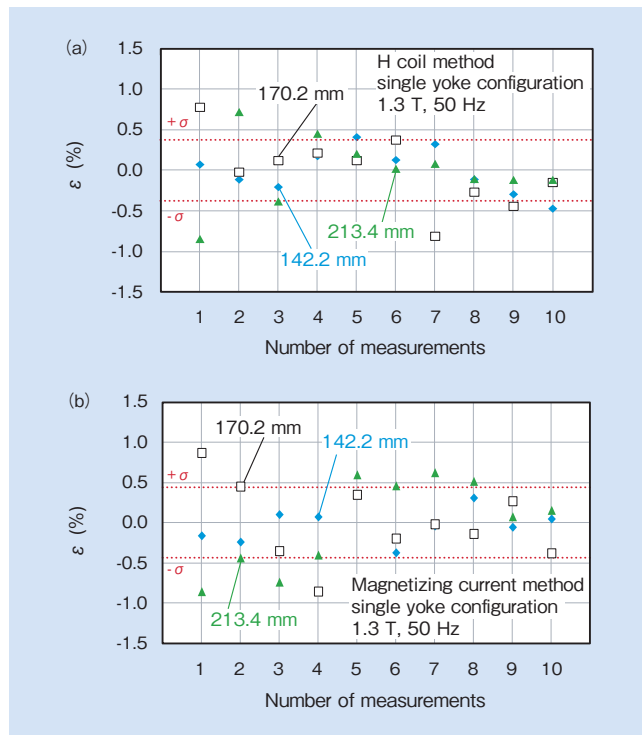


図8 広幅アモルファスの単板試験器の繰り返し精度 (a) Hコイル法 (b) 励磁電流法⁹⁾

Fig. 8 Repeatability of specific total loss measured with single sheet tester for wide amorphous strip (a) H coil method (b) magnetizing current method⁹⁾

表2 高磁束密度材のアモルファスの種類、鉄損および占積率
Table 2 Specific total loss and stacking factor for high permeability grades of Fe-based amorphous strip

Material grade	Maximum specific total loss at 1.3 T/50 Hz (W/kg)	Minimum stacking factor
AM08-25P5-90	0.08	0.90
AM08-25P5-88		0.88
AM08-25P5-86		0.86
AM08-25P5-84		0.84
AM10-25P5-90	0.1	0.90
AM10-25P5-88		0.88
AM10-25P5-86		0.86
AM10-25P5-84	0.12	0.84
AM12-25P5-90		0.90
AM12-25P5-88		0.88
AM12-25P5-86		0.86
AM12-25P5-84	0.16	0.84
AM16-25P5-90		0.90
AM16-25P5-88		0.88
AM16-25P5-86		0.86
AM16-25P5-84	0.84	

区分, 普通材 (Metglas[®] 2605SA1 相当材) と高磁束密度材 (Metglas[®] 2605HB1M 相当材) を設け, 各材質ごとに最大鉄損値と最小占積率によって分けられる。また, 分類記号の表し方を図 9 に示す。この分類において例えば AM08-25P5-86 は, 1.3 T, 50 Hz における鉄損値が 0.08 W/kg 以下, かつ占積率が 0.86 以上である呼称板厚 0.025 mm のアモルファス高磁束密度材を表す。

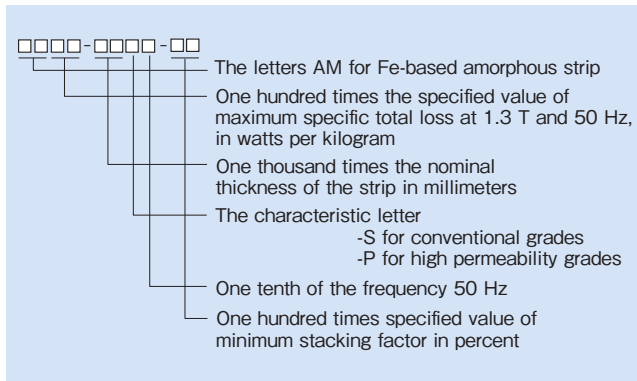


図 9 アモルファスの分岐記号の表し方

Fig. 9 Designation for Fe-based amorphous strip

6. 結 言

アモルファスの材質とその磁気特性測定法の IEC 規格化のために材料の特徴を考慮した磁気特性測定法を検討し, 国際回送試験を実施した結果, 以下の結論を得た。

- (1) 回送試験の結果, アモルファス用単板試験器で測定した鉄損の相対標準偏差は 3% 以内であることを確認し, 規格化に必要な測定再現性を確保できることを示した。
- (2) アモルファス用単板試験器の基本構成として, ヨーク材質にはヨーク損失が小さいソフトフェライトを使用し, かつアモルファスに応力を加えることがない単ヨークが適していることを示した。磁界の強さの測定法としてはヨークの影響を受けにくい H コイル法が適している。
- (3) 本研究結果を適用した磁気特性試験法と材質の規格案を IEC/TC68 に提案し, 新規提案として承認され 2018 年の国際規格発行に向けて審議中である。JIS が国際規格に先立ち 2016 年度内に発行される見込みである。

7. 謝 辞

アモルファス用単板試験器の検討には同志社大学の萩原博寛翔氏 (現: JR 西日本), 田中雅也氏 (現: 日立産機システム) に多大なご協力を頂いた。また, 回送試験には国内外の IEC/TC68 のエキスパートならびに IEC/TC68 国内委員に参加して頂いた。ここに謝意を表す。

引用文献

- 1) H. W. Ng et al.: A. Lowdermilk: Proc. IEEE, Vol.79 (1991), No.11, p.1608.
- 2) ASTM A900/A900M-01 (2012).
- 3) ASTM A912/A912M (2011).
- 4) ASTM A932/A932M-01 (2012).
- 5) ASTM A901 (2012).
- 6) H. Hagihara et al.: IEEE Trans. Magn., Vol.50 (2014), No.4, 6100604.
- 7) M. Tanaka et al.: J. Appl. Electromagn. Mech., Vol.48 (2015), No.2, 3, p.135.
- 8) R. Watakabe et al.: IEEE Trans. Magn., Vol.52 (2016), No.5, 6000204.
- 9) 渡壁 竜:平成 28 年電気学会全国大会講演論文集(2016) 第 2 分冊, p.119.



東 大地
Daichi Azuma
日立金属株式会社
高級金属カンパニー
博士 (工学)



中島 晋
Shin Nakajima
日立金属株式会社
高級金属カンパニー



渡壁 竜
Ryu Watakabe
同志社大学
理工学部
電気電子工学専攻



藤原 耕二
Koji Fujiwara
同志社大学
理工学部
電気工学科
博士 (工学)



石原 好之
Yoshiyuki Ishihara
同志社大学
名誉教授
工学博士