

IEC 標準化に向けた材料評価のための単板磁気測定技術

杵掛暁史*・城門由人*・池田哲*・金田嗣教**・榎園正人***

*企画連携担当・**大分県産業創造機構・***大分大学

Measurement technology of single sheet tester for material evaluation towards IEC standardization

Akifumi KITSUKAKE*・Yukihito KIDO*・Tetsu IKEDA*・

Tsugunori KANADA**・Masato ENOKIZONO***

*Planning Group・** Organization for Industry Creation・*** Oita university

要 旨

大分県では、平成20年1月から平成24年12月の5年間、県内外の産学官が連携し「大分県地域結集型研究開発プログラム」（独立行政法人 科学技術振興機構）での研究開発事業を実施し、次世代電磁力応用機器の開発に取り組んだ。電磁力応用機器の構成部材で、機器の効率やサイズへの関与が大きいのが電磁鋼板である。我々は当該事業において、特に電磁鋼板の磁気特性の測定技術に関する研究開発を推進した。本稿では、研究開発事業の期間中に当センターで開発または導入した磁気特性試験器の概要と、磁気特性等の測定結果について報告する。

1. はじめに

電磁鋼板やアモルファス金属薄帯等の電力用軟磁性材料は、電磁力応用機器の性能や効率に大きく関与する。従って、高効率高出力機器の設計開発では、機器に最適な磁気特性を有する電磁鋼板を選択するため、また実機特性に近い高精度な磁界解析を行うために、鋼板の真の磁気特性や、鋼板に生じた残留応力等の実使用条件を考慮した応力下の磁気特性が必要である。これら磁気特性の測定を、ここでは材料の評価測定（技術）と呼ぶ⁽¹⁾。

一方、IEC（国際電気標準会議）やJIS（日本工業規格）で標準化されている試験器には、エプスタイン試験器や単板磁気試験器がある。ここでは、標準化済みの測定方法を標準測定（技術）と呼ぶ。標準測定は、測定の再現性と簡便性では優れるが、商取引の場で鋼種分類に用いる値（いわゆるカタログ値）を求めることを基本的な概念とした手法のため、評価測定（真の磁気特性測定）には向かない。また、応力下の磁気特性の測定方法は、IECやJISでは未だ標準化されていない。

このような背景のもとで我々は、磁性材料の評価測定技術の構築とIECでの標準化を目標として、引張および圧縮応力下の電磁鋼板の正確な磁気特性を測定できる応力負荷型単板磁気試験器を開発した。これに加え、標準測定のためのエプスタイン試験器およびIEC規格に適合するIEC準拠型単板磁気試験器を整備した。本稿ではこれら試験器の特徴を示し、特に応力負荷型単板磁気試験器で得られる磁気特性の測定結果等について報告する。

2. 標準測定のための磁気特性試験器

2.1 エプスタイン試験器

Fig.1は、IEC規格（IEC 60404-2⁽²⁾）に準拠した商用周波用エプスタイン試験器（メトロン技研 SK3266）により得られた磁気特性（鉄損）の測定例である。用いた試料は、幅30mm×長さ280mm、枚数は無方向性電磁鋼板35A250がRDとTDの各12枚で計24枚、方向性電磁鋼板30P120が計28枚である。RDとTDは、それぞれ圧延方向に切り出した試料と圧延方向に直角に切り出した試料を示す。Fig.1より、両試料ともにJISの規格値（カタログ値） $W_{15/50} \leq 2.50$ （35A250）、 $W_{17/50} \leq 1.20$ （30P120）を満たしていることが分かる。

2.2 IEC準拠型単板磁気試験器（IEC-SST）

複数枚の試料を要するエプスタイン試験に対し、1枚の試料で測定が可能な単板磁気特性試験はIEC規格（IEC

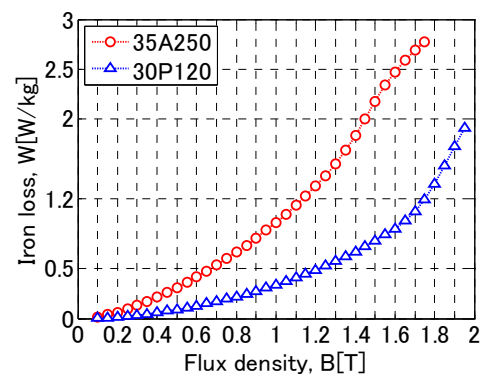


Fig.1 エプスタイン試験による鉄損曲線（50Hz）

60404-3⁽³⁾)にて規定されている。そこで我々も、IEC規格に準拠した単板磁気試験器を製作した。

Fig.2に、IEC準拠型単板磁気試験器(IEC-SST)の外観を示す。いずれもメロン技研製である。IEC規格で示される試料サイズは幅500mm×長さ500mmと大型であるが、試料やヨークの取り扱いが容易でないこと等の理由から、幅100mm×長さ500mmの試料に適合する試験器、およびエプスタイン試験用試料を想定した幅30mm×長さ280mmの試料に適合する試験器を製作した。以下ではそれぞれ、IEC-SST₁₀₀およびIEC-SST₃₀と呼ぶ。試料サイズに関すること以外の仕様は、IEC規格に準拠させた。

Table 1に、IEC-SST₁₀₀とIEC-SST₃₀の主な仕様を示す。構造の詳細は、IEC 60404-3や参考文献⁽⁴⁾⁽⁵⁾を参照していただきたい。IEC規格で示される単板磁気試験器は、磁界強度の算出に励磁電流法(以下、MC法と呼ぶ)を用いる。MC法は実効磁路長の概念を必要とするため、測定精度の向上に限界がある⁽⁶⁾。また、Bコイルは励磁コイルと同等の巻幅であるため、Bコイル(すなわち測定領域)の両端では磁界強度分布が不均一になる。これらの仕様は、標準測定としては問題ないが、評価測定のような鋼板の真の磁気特性を得る目的には向かない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。導入したIEC-SSTは、次章の試験器との磁気特性の測定値との比較を行い、評価測定技術の優位性の確認に用いる。

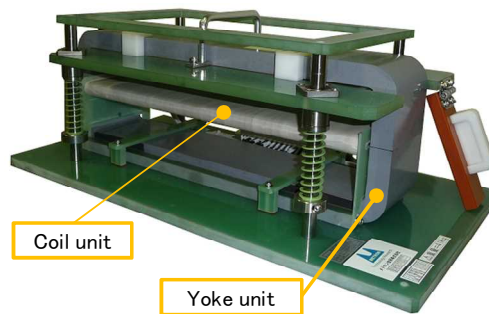
3. 材料評価のための単板磁気試験器

鋼板の評価測定技術を確立するため、IEC-SSTの問題を改善し、さらに応力下の磁気特性の測定を念頭においた単板磁気試験器を開発した。Fig.3に、開発した応力負荷型単板磁気試験器(S-SST; Stress load type-Single Sheet Tester)の外観を示す。S-SSTは、測定する試料の幅によって100mm幅用(以下、S-SST₁₀₀と呼ぶ)と30mm幅用(以下、S-SST₃₀と呼ぶ)の2種がある。両S-SSTは、JIS C 2556⁽⁷⁾で示される縦型複ヨーク式を基本構造とし、試料の長手方向に引張および圧縮応力を印加可能な機構を備える。

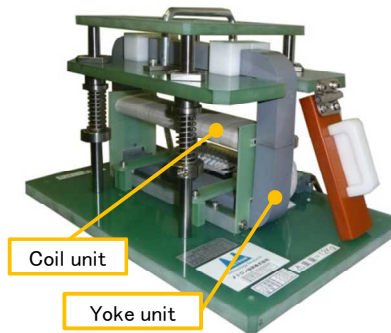
3.1 応力負荷型単板磁気試験器(S-SST)

以下に、S-SST₁₀₀の構造を示す。S-SST₃₀と異なる仕様は文中、語句の右肩に*印をつけ、Table 2に比較表を示した。両S-SSTで用いるHコイルの大きさ等の仕様は、電力用磁性材料の評価活用技術調査専門委員会(電気学会)での検討結果⁽¹⁾を参考にしている。

S-SSTの励磁コイルには、ポリフェニレンサルファイド製コイル枠の長手方向全域の415mm長に、ポリアミドイミド銅線を巻いた。各層の巻線は、直列に接続した。磁気特性の測定領域は、均一な磁場が得られる励磁コイルの長手方向中央部分の100mmの間とした⁽⁸⁾。この均一磁



(a) IEC-SST₁₀₀ (100mm幅試料用)



(b) IEC-SST₃₀ (30mm幅試料用)

Fig.2 IEC準拠型単板磁気試験器(IEC-SST)外観

Table 1 IEC-SST₁₀₀とIEC-SST₃₀の主な仕様の比較

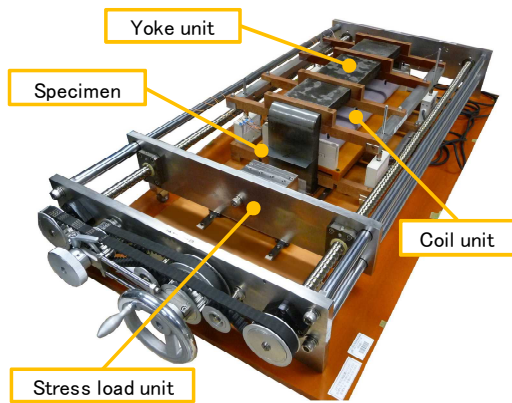
| | IEC規格 | IEC-SST ₁₀₀ | IEC-SST ₃₀ |
|--------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| 試料長 | 500mm | 500mm | 280mm |
| 試料幅 | 500mm | 100mm | 30mm |
| 励磁コイル巻幅 | 440mm以上 | 444mm | 224mm |
| 励磁コイル層数 | 5層以上 | 5層 | |
| ヨーク磁極間内寸(外寸) | 450±1mm (500±5mm) | 450mm (500mm) | 230mm (280mm) |
| Bコイル線径 | 測定系に依存 | φ1.0mm | φ0.5mm |
| Bコイル巻長 | 440mm以上 | 444mm | 224mm |
| 空隙補償コイル | 相互誘導コイル(SST外部) | | |
| 磁界強度測定 | 励磁電流法 | | |

場領域に、磁束密度測定用Bコイルと空隙補償コイル、磁界強度測定用Hコイルを配置した。正確な磁界強度の測定のため、S-SSTではHコイル法を採用する。

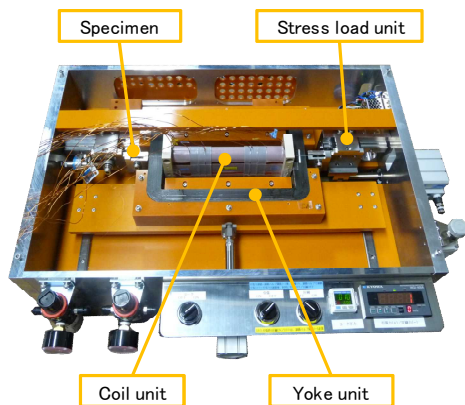
ヨークには、低鉄損の方向性電磁鋼板23ZDKH90を用いた。試料に対するヨークの圧力は、S-SST₁₀₀では上側ヨークの自重にて一定とした。S-SST₃₀では、空気圧により任意の圧力を印加できる機構⁽⁹⁾を有する。

Fig.4は、コイルユニットの構造図である。Bコイルには、ポリウレタン銅線(U EW)φ0.1mmを20回、測定領域長100mmの間に1層均一に巻線を施した。Bコイルの空隙補償は、Hコイル枠にHコイルとは別に巻線したコイルを逆相に接続して構成した。

Hコイルには、幅90mm*×長さ140mm×厚さ1mmの巻枠



(a) S-SST₁₀₀



(b) S-SST₃₀

Fig. 3 応力負荷型単板磁気試験器 (S-SST)

に UEW $\phi 0.04\text{mm}$ を 1666 回、1 層均一に巻線を施し、H コイル枠全体を樹脂で固めた。試料幅 100mm に対し H コイルの幅を 90mm にしたのは、試料切断時の残留応力による影響を排除するためである。さらに S-SST は、2 つの H コイルを試料の上下に、各々が試料に近接するように配置し、磁界強度値は 2 つの H コイル出力の平均値とした。これを、ave2H 法と呼ぶ。各 H コイルのエリアターン*は、校正用のソレノイドコイル (コイル長 1900mm, 内径 145mm) を用い、エリアターンの値が既知のコイルとの電圧値比較により求めた。

また、測定時の地磁気の影響を除去するため、試料が地磁気に直交するように S-SST を設置した。

IEC-SST (2.2 節) と S-SST の大きな相違点は、均一磁場での測定 (B コイルの巻長) と H コイル法の採用、試料への引張と圧縮応力印加機構の有無である。

3.2 S-SST による磁気特性測定システム

S-SST の励磁系には、D/A 変換器 (横河電機 WE7282) と電力増幅器 (高砂製作所 AA2000XG2) を用いた。測定系には、B コイルおよび H コイルの誘起電圧取得に A/D 変換器 (横河電機 WE7275) を用いた。S-SST₁₀₀ では、A/D 変換器の前段にプリアンプ (NF 回路設計ブロック P-64) を導入

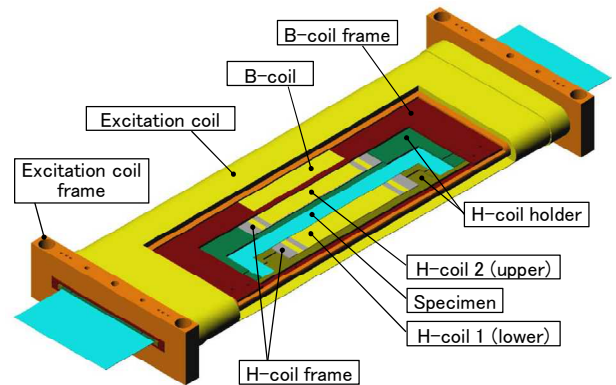


Fig. 4 S-SST のコイルユニットの構造

Table 2 S-SST₁₀₀ と S-SST₃₀ の主な仕様の比較

| | S-SST ₁₀₀ | S-SST ₃₀ |
|--|--|--|
| 試料長：応力印加用 | 550mm | 305mm |
| 無応力用 | 500mm | 280mm |
| 試料幅 | 100mm | 30mm |
| 励磁コイル巻幅 | 415mm | 195mm |
| 励磁コイル層数 | 6 層 | 7 層 |
| 巻数 | 計 2907 回 | 計 1435 回 |
| H コイル幅 | 90mm | 27mm |
| H コイルエリアターン (上段：H ₂ , 下段：H ₁) | 0.16086m ² 0.16689m ² | 0.04802m ² 0.04859m ² |
| 応力印加手法 | 手動 (ハンドル) | 空気圧 ⁽⁹⁾ |

した。また、ノイズ低減のため、A/D 変換後の取得波形に対して励磁周波数の第 52 次以上の高調波を除去した。

励磁電圧波形は、磁束密度波形が正弦波となるようデジタルフィードバック制御により生成される。

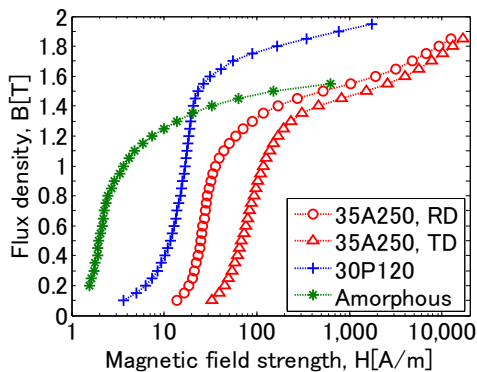
なおエプスタイン試験器や IEC-SST でも、S-SST とほぼ同様の機器の構成で測定を行う。

3.3 H コイル法のための位相補正

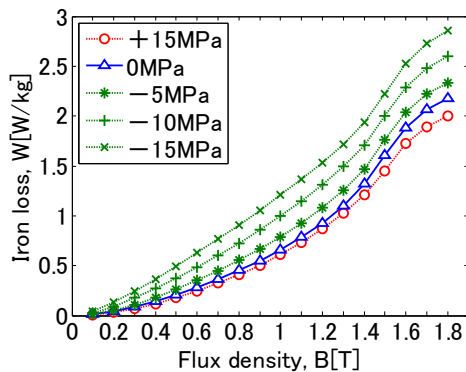
試料の真の磁気特性を得るという目的では、実効磁路長が不要な H コイル法は、MC 法に比べ有利である。しかし H コイル法では、測定システムに用いる計器や H コイルの巻線容量等による測定信号間の位相誤差により、正確な鉄損値が得られない。そこで我々は、S-SST 空心時の H コイルと B コイルの誘起電圧から得られる位相差を利用し、H コイル電圧の位相を補正することで、正確な鉄損測定を行う手法を提案した⁽¹⁰⁾。以下、S-SST の H コイル法による磁気特性の測定結果には、すべて提案の位相補正を適用している。

3.4 S-SST による磁気特性の測定

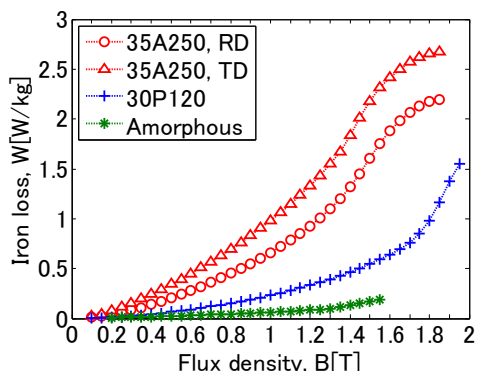
ここでは、主に S-SST₁₀₀ によって得られる磁気特性の測定事例を示す。S-SST₃₀ も、S-SST₁₀₀ と同様の測定を行える。測定可能な最大磁束密度は、主に励磁コイル銅線の線径に対する励磁電流値によって制限される。磁界強度の算出は、ave2H 法である。



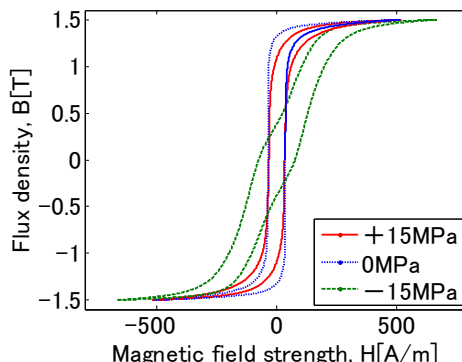
(a) 磁化特性



(a) 鉄損特性



(b) 鉄損特性



(b) BH 曲線 (1.5T)

Fig. 5 磁気特性の測定例 (S-SST₁₀₀, 50Hz, 無応力)

Fig. 6 応力下磁気特性 (S-SST₁₀₀, 50Hz, 35A250, RD)

Fig. 5 に、S-SST₁₀₀ を用いて測定した電磁鋼板数種の磁気特性の測定例を示す。試料は無方向性電磁鋼板 35A250 と方向性電磁鋼板 30P120 および Fe 系アモルファス金属薄帯で、励磁周波数は 50Hz である。応力は印加していない。このように S-SST は、方向性電磁鋼板やアモルファス金属薄帯等の高透磁率材料、低鉄損材料の磁気特性の測定が可能である。

Fig. 5 では励磁周波数が 50Hz の測定例を示したが、60Hz や 100Hz, 200Hz での測定も行える。この場合、励磁周波数の増加と共に、鉄損値の増加が確認される。また、励磁周波数を変えて測定した結果を基に、2 周波法によりヒステリシス損と渦電流損との分離を行うこともできる。

Fig. 6 に、試料の長手方向に、引張および圧縮応力を印加して測定した磁気特性を示す。試料は無方向性電磁鋼板 35A250, RD である。引張応力印加 (+) 時の磁気特性は、無応力 (0MPa) 時とほぼ同等か好転している。一方、圧縮応力時 (-) の磁気特性は、応力値が大きいくほど悪化することが分かる。また圧縮応力印加時 (-15MPa) の BH 曲線には、Fig. 6(b) のように、中央部に特徴的なくびれが確認できる。

このように、電磁鋼板に生じた応力は磁気特性に大きく作用する。鋼板への応力は様々な工程で生じるが、そ

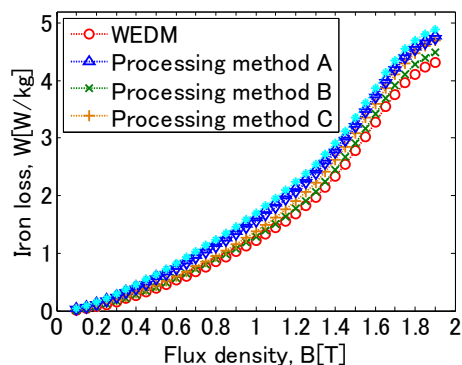


Fig. 7 加工方法の違いによる鉄損の差 (S-SST₃₀, 50Hz, 50A440, RD)

のひとつが鋼板の加工 (切断) 時である。Fig. 7 は、試料切り出し時の加工方法の違いによる磁気特性の差を示したもので、ワイヤ放電加工 (WEDM) と比較している。現在、加工条件と磁気特性との関係を調査中であり、磁気特性を劣化させない有用な加工方法の検討を進めている。

また、磁性材料が交流励磁されると磁歪が生じ、電磁力機器での騒音等の一因となる。よって、材料の選定においては磁歪量の測定も必要である。Fig. 8 は、S-SST₁₀₀ による無応力下での λ-B 曲線の一例で、ゲージ長が 15mm

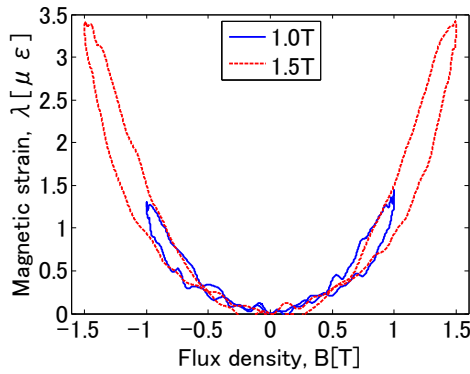


Fig. 8 λ-B 曲線 (S-SST₁₀₀, 50Hz, 35A440, RD)

のひずみゲージを用いて測定した。一方、S-SST の磁気特性の測定領域は励磁コイル中央 100mm であるため、この領域の平均磁歪量の測定も必要となる。このために、1 台のレーザドップラ振動計による任意長の磁歪測定方法を考案し、特許⁽¹¹⁾を出願した。

4. 評価測定技術を応用したその他の磁気試験器

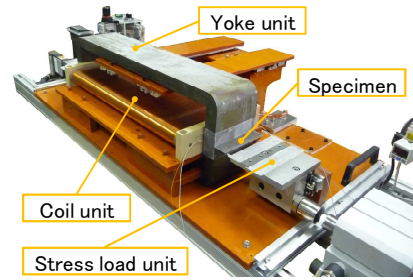
4.1 高磁束密度測定型 S-SST (Ver. 2)

3.1 節にて示した 100mm 幅用または 30mm 幅用の応力負荷型単板磁気試験器 (S-SST) よりも、高い磁束密度まで測定可能な試験器を製作した。Fig. 9(a) と (b) に、高磁束密度測定型の S-SST (Ver. 2) の外観写真を示す。高磁束密度での測定を行うために、電流密度を高める目的で励磁コイルに平角線を用いた。励磁コイルの線径は、100mm 幅用が AIW 0.65×1.5mm, 30mm 幅用が AIW 1.0×1.0mm である。Fig. 9(c) は、S-SST₁₀₀ と S-SST₁₀₀ Ver. 2 の磁気特性の比較である。これより、S-SST では 1.90T までしか測定できていないが、Ver. 2 では 2.05T まで測定できていることが分かる。

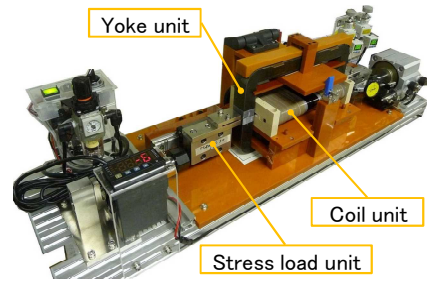
4.2 積層コア磁気試験器

電磁鋼板は、電磁力応用機器では 1 枚だけで使われることは無く、積層された状態で用いられる。また、積層状態の磁気特性は、1 枚での磁気特性と異なることも明らかになっている。そこで我々は、評価測定技術を活用し、電磁鋼板を積層した試料 (積層コア) の磁気特性を測定可能な試験器の開発を開始した。積層コア磁気試験器で想定する試料サイズは、幅 30mm×長さ 260mm×厚さ 10mm とした。例えば厚さ 0.025mm のアモルファス金属薄帯の場合、積層コア試料は、薄帯を厚さ方向に約 400 枚積み重ねたものとなる。

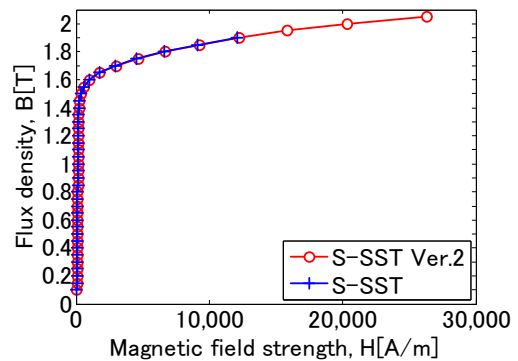
積層コア磁気試験器の基本構造は、特許出願⁽¹²⁾済みである。現在、試験器はほぼ完成し、測定の準備を進めているところである。



(a) S-SST₁₀₀ Ver. 2



(b) S-SST₃₀ Ver. 2



(c) 磁化特性の比較 (50Hz, 50A1300, RD)

Fig. 9 高磁束密度まで測定可能な S-SST Ver. 2

5. まとめ

5 年間の研究開発事業により、当センターに標準測定および評価測定のための磁気特性測定試験器が整備された。特に応力負荷型単板磁気試験器は、次世代の高効率電磁力応用機器開発に向けた電力用磁性材料の選定等に寄与する能力を有しており、今後有効な利活用が期待できる。小型、高効率、高出力などの優位性を持つ、電磁鋼板を用いた機器開発の際は、当センターが保有する各種の磁気特性試験器を活用していただきたい。

磁性材料の評価測定には、IEC 規格に示される標準測定には無い工夫が必要である。また、応力下の磁気特性測定や磁歪測定についても多くの機関で研究開発が進められ、早急な標準化が求められている。評価測定技術の IEC や JIS における標準化への一助となるよう、研究開発の深化と関係機関への提案を引き続き行いたい。

謝辞

本研究は、独立行政法人 科学技術振興機構（JST）の大分県地域結集型研究開発プログラム「次世代電磁力応用機器開発技術の構築」の支援の基に遂行されました。関係者各位のご協力に、心より感謝いたします。

参考文献

- (1) 榎園，柳瀬，島村，谷：電力用磁性材料の評価・活用技術，電気学会マグネティックス研究会資料，pp.33-37，MAG-10-198，2010
- (2) Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame, IEC 60404-2, 2008
- (3) Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester, IEC 60404-3, 2010
- (4) 沓掛，城門，池田，金田，榎園：材料評価の観点からみた IEC 測定法の問題点，電気学会マグネティックス研究会資料，pp.15-20，MAG-12-040，2012
- (5) 沓掛，城門，池田，金田，榎園：材料評価の観点からみた IEC 測定法の問題点（第2報），電気学会マグネティックス研究会資料，pp.17-22，MAG-12-149，2012
- (6) 沓掛，城門，池田，金田，榎園：H コイル法と励磁電流法によるけい素鋼板の評価測定，第19回電磁現象および電磁力に関する（MAGDA）コンファレンス講演論文集，pp.577-580，2010
- (7) 電磁鋼板単板磁気特性試験方法，日本工業規格 JIS C 2556，1996
- (8) 城門，池田，沓掛，金田，榎園：単板磁気特性試験法による電磁鋼板の応力下磁気特性，第22回電磁力関連のダイナミクス論文集，pp.140-143，2010
- (9) 城門，沓掛，池田，榎園：応力負荷型単板磁気試験器，特願 2011-188655
- (10) 沓掛，城門，池田，金田，榎園：H コイル法による高精度鉄損測定のための位相補正，電気学会論文誌 A，pp.441-447，2012
- (11) 城門，沓掛，池田：磁気歪測定法及び磁気歪測定装置，特願 2012-39544
- (12) 城門，沓掛，池田：磁気特性試験器，特願 2013-18040