

珪素鋼板の磁歪

The Magnetostriction of Electrical Silicon Steel Sheet

飯塚 富雄*

Tomio Iizuka

内 容 梗 概

変圧器の騒音防止の問題と関連して検討した珪素鋼板の磁歪の測定法と測定結果について述べた。静磁歪の測定には従来⁽²⁾の方法を用いたが、商用周波数の交番磁場によつて励磁された場合の動磁歪の測定にはピックアップを用いて測定する方法を開発した。これらの方法を用いて熱圧珪素鋼板と方向性珪素鋼帯の磁歪特性の相違を明らかにして、その原因について考察を加えた。

1. 緒 言

最近市街地変電所における変圧器の騒音対策は変電所計画にあつて無視することのできないものとなつた。日立製作所においては早くからこの問題を採り上げ研究を続けてきたが、その成果はすでに低騒音変圧器の完成⁽¹⁾によつて示された。

変圧器騒音の発生機構については種々考えられるが、主因は鉄心材料の磁歪振動であると一般に認められている。したがつて変圧器騒音の防止対策にあたつては現用各種珪素鋼板の磁歪特性を明らかにする必要がある。本報は以上の観点から珪素鋼板の磁歪特性の測定を中心に研究の一端を取りまとめたものである。

2. 珪素鋼板の静磁歪

2.1 装置および測定法

静磁歪測定装置は増本、白川氏らの装置⁽²⁾と同様で、磁歪による微小変位をローラ・ミラー方式で拡大して読取望遠鏡で測定する方法である。ただ珪素鋼板の磁歪は 1×10^{-6} 程度で非常に小さい上に試料が厚さ0.35mm程度の薄板であるので、装置の製作は慎重に行い、また測定には感度を上げるために直径0.321mmのローラを使用し、さらに望遠鏡に接眼測微計を取り付けて尺度の約1/20mmの変化まで読みうるようにした。また機械的な振動の除去と測定中における試料および装置の熱膨張の補正に留意した。

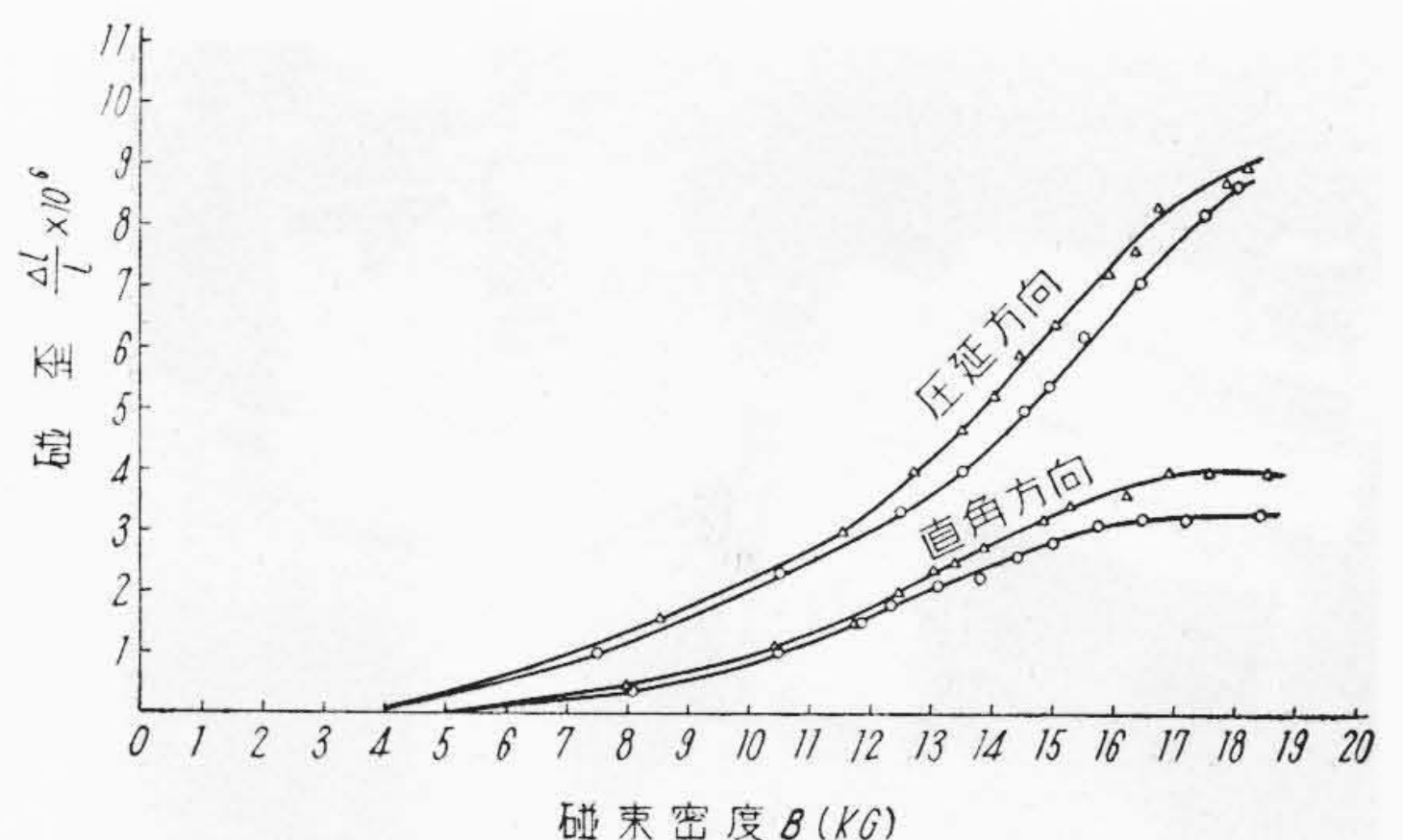
試験片は所定の珪素鋼板を幅6mm長さ100mmの板にシャーで切断した後フライス加工で仕上げて用いた。また試片の磁化はソレノイドを用いた。

磁歪 $\frac{\Delta l}{l}$ の算出は次式によつた。

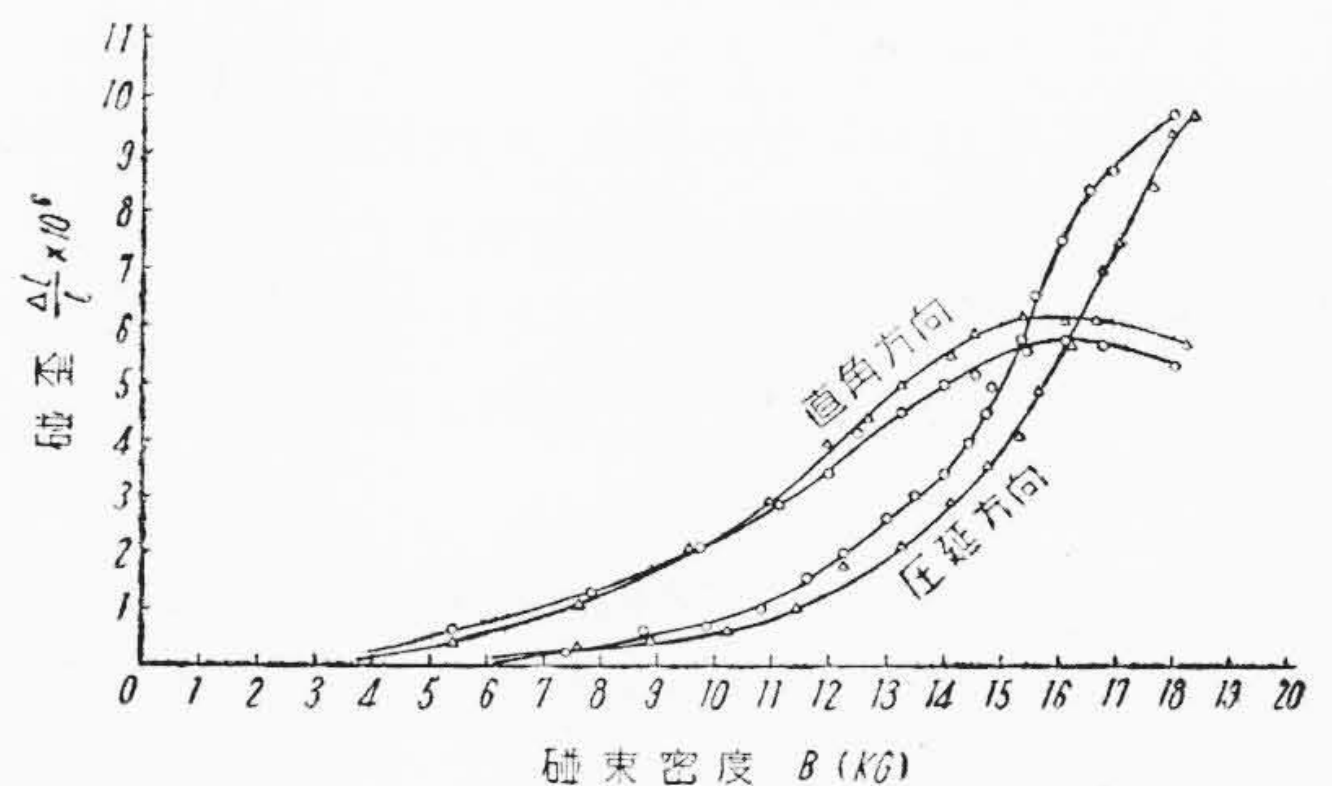
$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{rn}{lD}$$

ここに l は試料の長さ、 Δl は磁化による長さの変化、

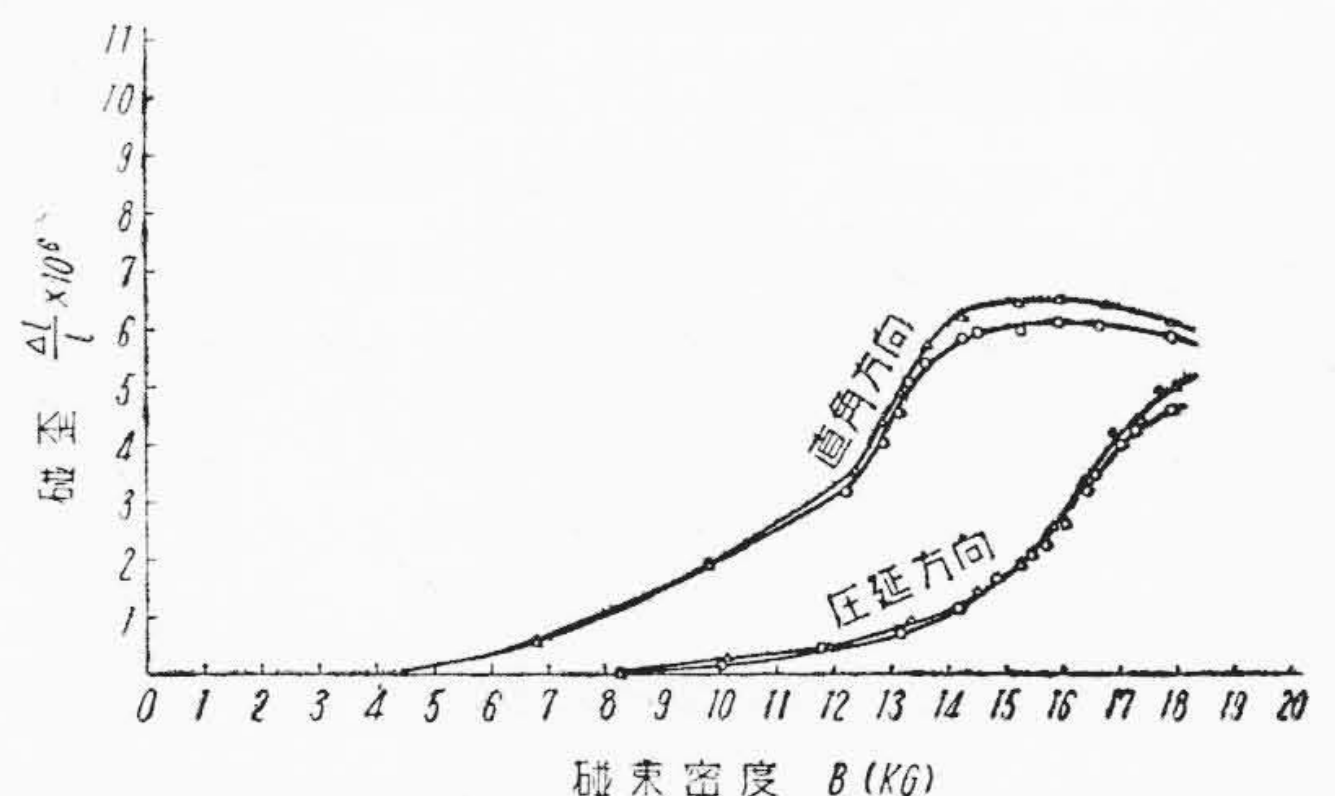
* 日立製作所日立研究所



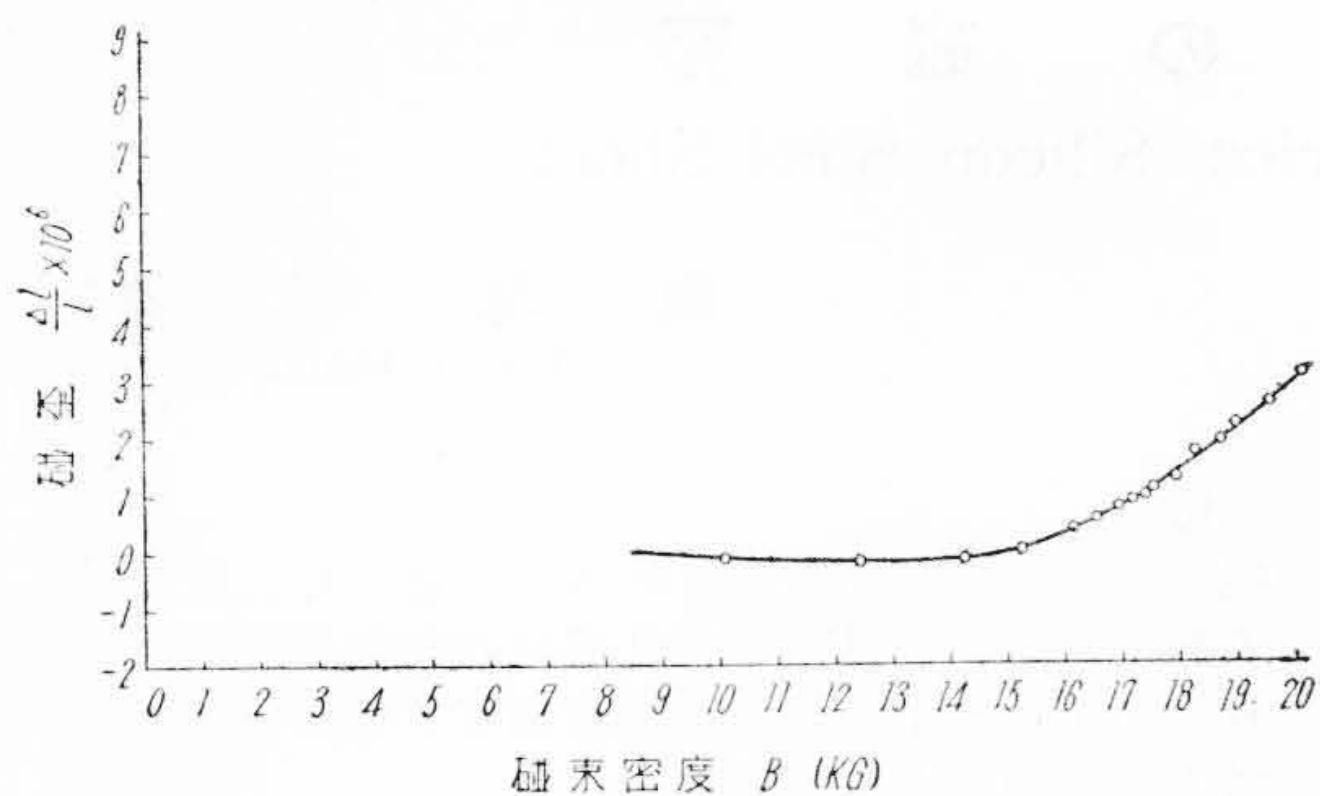
第1図 国産T-90の静磁歪測定結果



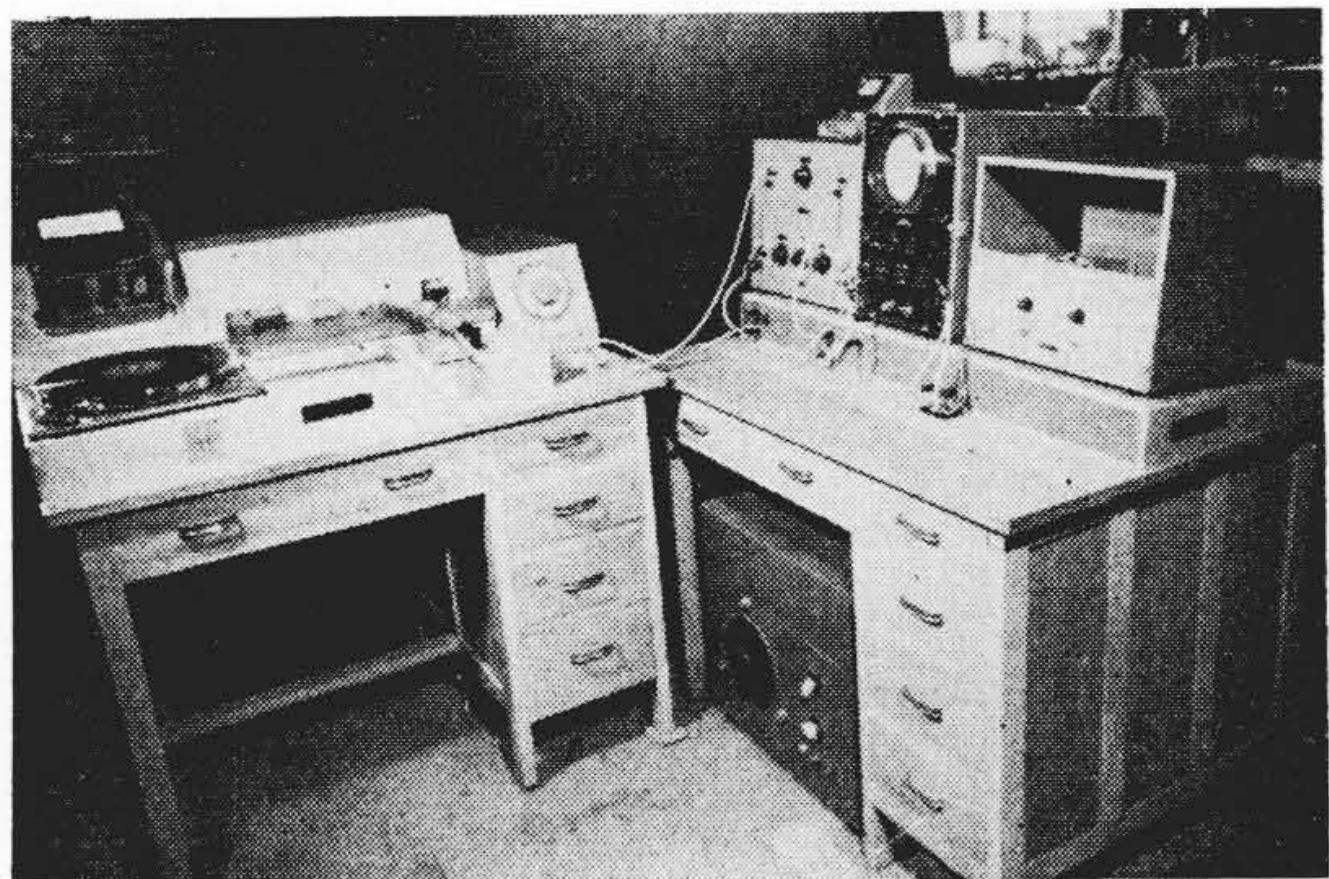
第2図 国産方向性珪素鋼帯（末焼鈍）の静磁歪測定結果



第3図 国産方向性珪素鋼帯（焼鈍）の静磁歪測定結果



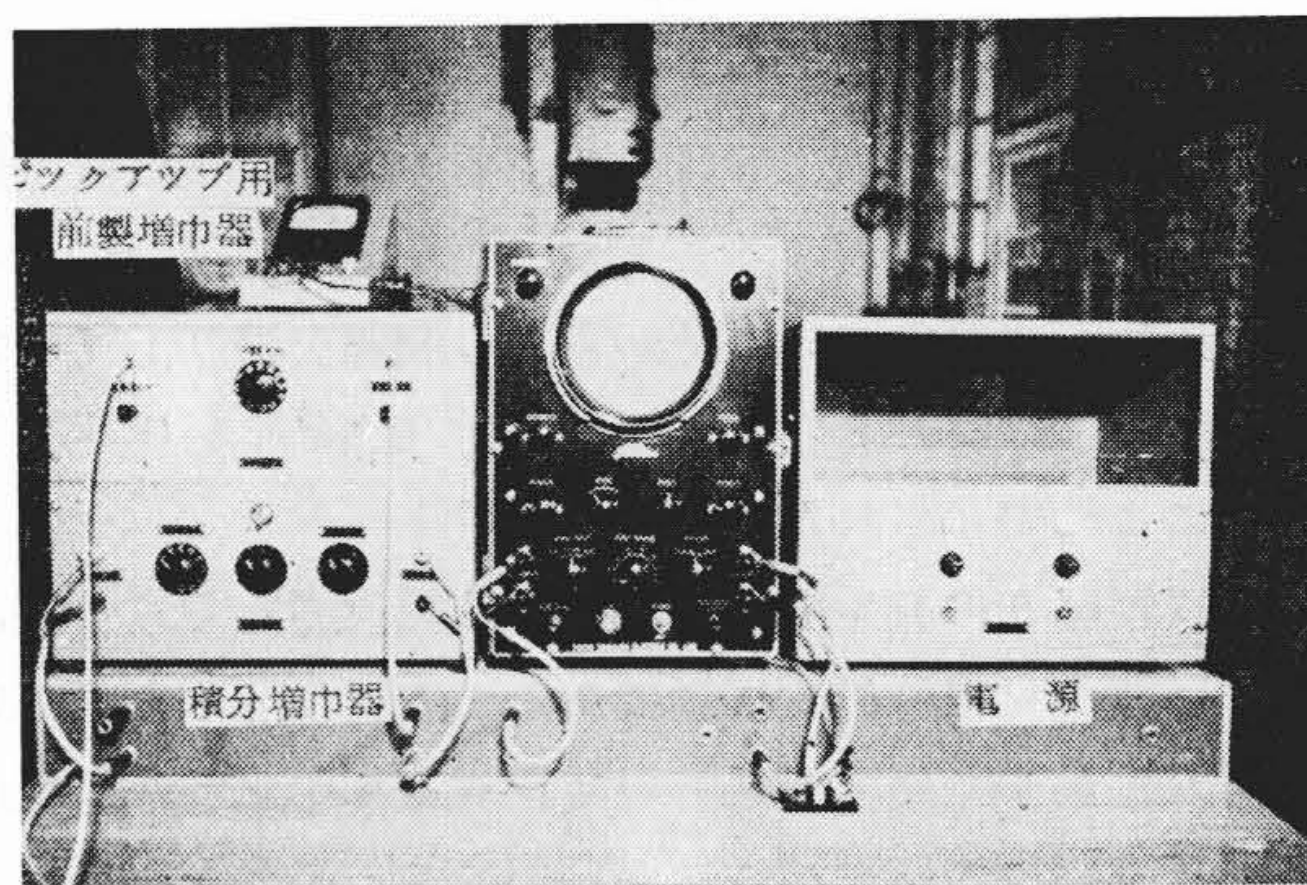
第4図 国産方向性珪素鋼帯（焼鈍）の静磁歪測定結果



第5図 動磁歪測定装置



第6図 磁化および検出装置



第7図 増幅器および観測装置

$\frac{\Delta l}{l}$ は磁歪, r はローラの半径, n は尺度の読み, D は鏡と尺度との距離である。本測定では $r = 0.161 \text{ mm}$, $l = 100 \text{ mm}$, $D = 1,000 \text{ mm}$ としたので尺度の読取値 $n = 1 \text{ mm}$ に対する磁歪 $\frac{\Delta l}{l}$ は 0.161×10^{-6} となり, おおよそ満足すべき感度であつた。

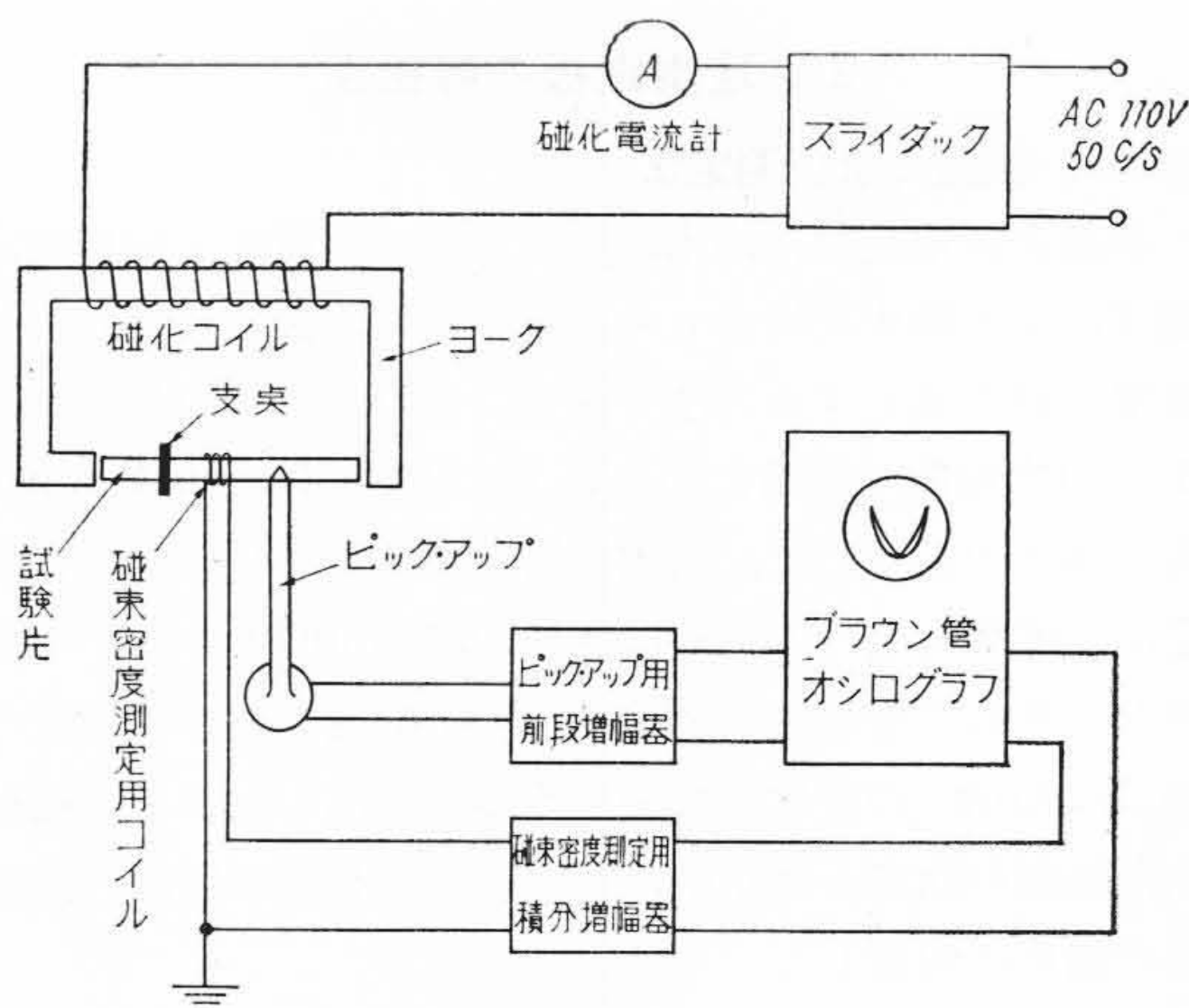
なお磁束密度の測定は弾動検流計法により, 磁歪の測定の場合と同一条件のもとに試料の中央にサーチコイルを巻いて行つた。

2.2 測定結果

第1図は国産熱間圧延珪素鋼板 T-90 の静磁歪特性をまた第2, 3図は国産方向性珪素鋼帯の未焼鈍および焼鈍後の静磁歪特性を示す。この方向珪素鋼帯は熱圧鋼板と比較して特に応力, 磁区構造などに敏感であり, 良好な処理状態では第4図に示すような磁束密度の低いところでは非常な磁歪量が小さく, しかもその符号が一であり, ある磁束密度のところから+に転化してそれから急激に増加するという特有な磁歪特性を示した。

3. 珪素鋼板の動磁歪

交番磁場による動磁歪の測定については種々な方式^{(3)~(6)} が用いられているが, 変圧器の騒音を対象とした場合ピックアップを使用した方式が適当と考えられたの



第8図 動磁歪測定装置原理図

で, 筆者はこの方式による動磁歪測定装置を試作し, 国産珪素鋼板の商用周波数の交番磁場における動磁歪特性についても検討した。

3.1 装置

第5図は装置の全体を第6図は磁化および検出装置を, 第7図は増幅器および観測装置の外観を示す。また

第8図は動磁歪測定装置の原理図を示す。

磁化装置の寸法は小型エプスタイン鉄損測定装置用試験片(30mm×280mm)をそのまま用いるように定めた。試験片は中央に磁束密度測定用コイルを巻かれ、防振装置を施こして表面を研磨仕上した真鍮の台上に置かれ、適当な位置に重錘をのせて支点とする。一方ピック・アップのアームは真鍮台に固定され、その針先は試験片上支点より規定の距離のところに接触させる。

磁化装置に交流を流すと試料は交番磁場によつて真鍮台上で磁歪振動をする。この振動をピックアップで受け、その出力はピックアップ用前段増幅器を経てブラウン管オシログラフの垂直軸に接続する。一方磁束密度測定コイルに誘起された電圧は磁束密度測定用積分増幅器によつて増幅および積分され、ブラウン管の水平軸に導かれる。この状態でブラウン管には磁束密度と磁歪振幅とのリサーチ図形すなわち磁歪履歴曲線が得られる。またブラウン管の水平軸を時間軸に切り換え、垂直軸に磁歪振幅または磁束密度を入れることにより磁歪振動波型および磁束密度波型を別々に観測することもできる。

磁歪振幅の較正は標準周波数レコードを用い、また磁束密度の較正は積分増幅器の入力に既知の標準正弦波電圧を与えて行つた。

磁歪振幅の較正すなわちピック・アップ感度の較正にはビクター標準周波数 LP レコードを使用した。このレコードの 100c/s の振動は速度振幅 $\sqrt{2}v = 1.07\text{cm/s}$ で吹込んであるのでその振幅 A は

$$A = \frac{\sqrt{2}v}{\omega} = 1.71 \times 10^{-3} \text{cm} \dots \dots \dots (1)$$

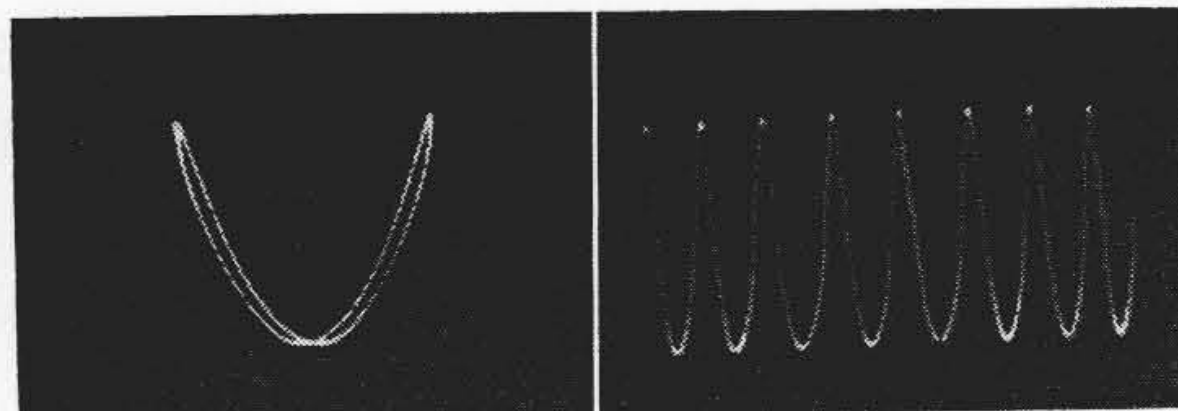
である。そこでいま磁歪を測定したと同一増幅度でピック・アップをレコードに接触させ、100c/s の振動によるブラウン管上の振れを H' 、測定しようとする磁歪振動の振幅 ξ によるブラウン管上の振れを H とすれば求める磁歪 ξ は次式によつて計算できる。

$$\xi = \frac{H}{H'} r \times 1.71 \times 10^{-3} \text{cm} \dots \dots \dots (2)$$

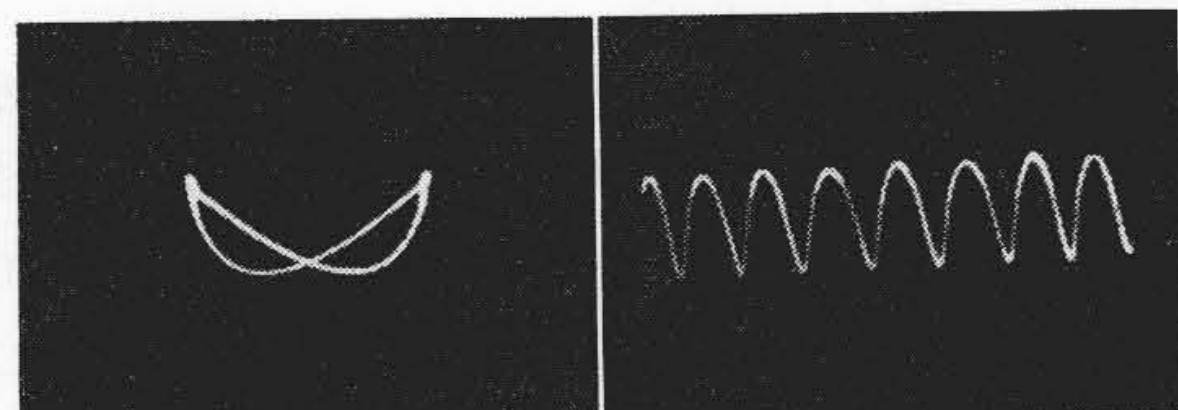
ただし r は前段増幅器の中間に付属した倍率器の倍率比で、標準周波数レコードの場合は増幅器の倍率を通常 1/100 に下げて測定する。

次に磁束密度の較正は、積分増幅器の入力に規定正弦波電圧を入れて比較する。本装置ではスイッチ切換によつてそれぞれ 3, 10, 30 および 100mV (実効値) の正弦波電圧が増幅器に与えられるようにした。そこでいまこの較正電圧 E ボルトによるブラウン管上の振れを h' 、磁束密度 B を測定したときの振れを h とすれば、 B は (3) 式で計算される。

$$B = \frac{\sqrt{2} E}{2\pi f N S} \frac{h}{h'} \times 10^8 \text{ G} \dots \dots \dots (3)$$



第9図 国産 T-90 鋼板の動磁歪波型
圧延方向, 最大磁束密度 12.5KG



第10図 国産方向性珪素鋼帯の動磁歪波型
圧延方向, 最大磁束密度 13.8 KG

ただし f は電源周波数 (50c/s), S は試料の断面積 (cm^2), N は測定用コイルの巻数である。

この装置において磁歪振動に対して本質的な誤差となるのは磁化装置のヨークと試料との間の空隙における磁気吸引力であるが、実測によれば空隙間隔を 1mm としたても磁気吸引力によるひずみは磁歪量の約 1/10 であるので、磁束密度の比較的低いところにおいてはこの吸引力による影響はほぼ省略できる。また前述のようなヨークで試料を磁化するので 280mm の試料の全長にわたつて均一には磁化されない。この点を確認した結果中央部の 100mm はほぼ一様に磁化されているとみなしうることがわかつた。したがつて本実験では支点と針との間隔はすべて 100mm とした。

3.2 測定結果

この装置を用いて静磁歪と同様国産熱間圧延珪素鋼板 T-90 および国産方向性珪素鋼帯の動磁歪特性を測定した。測定結果の一例を第9図および第10図に示す。この写真はいずれもブラウン管上に現われた磁歪履歴曲線および磁歪振動波型を撮影したものである。

4. 結果の検討

強磁性体はよく知られているように磁化によつて伸縮する。これは磁歪現象の一つでジュール効果と呼ばれているが、現象の理論的解釈はいまだ確立されておらず、もつぱら現象論的磁区理論からある仮定のもとに解釈されているのが現状である。

一方磁歪を支配する因子はかなり複雑であるが、大きな因子として次の三つが考えられている。

(1) 結晶構造 (2) 成分組成 (3) 磁区構造

これらの因子のなかで特に第3項の磁区構造は非常に

構造敏感 (structure sensitive) な性質を持っているので試料の処理、形および応力などに対して敏感に変化することが予想される。

静磁歪の測定結果をみると、熱間圧延珪素鋼板においては圧延方向と直角方向とでは磁歪の様相が異なり、直角方向の磁歪が小さく高磁束密度では飽和する傾向をもっている。このような特性の差異は熱間圧延の珪素鋼板でも結晶の集合組織があるためと考えられ方向性珪素鋼帯では特に判然としている。

次に方向性珪素鋼帯は適当な冷間圧延と高温焼鈍とを組合せ、集合組織の生成を利用して圧延方向の磁気特性を熱間圧延鋼板と比べて非常に向上させているもので、圧延方向に〔100〕方向、直角方向に〔110〕方向を持った結晶が多いと考えられる。そのため磁歪特性は圧延方向のものは単結晶の〔100〕方向と相似な特性をもっている。さらに磁区構造から考えると、方向性鋼板は理想的には圧延方向と並行に 180 度磁壁がそろっている磁区構造と考えられる⁽⁶⁾。したがって圧延方向に磁化すると最初の磁化は 180 度磁壁の移動によつて進行するので磁歪はなく、磁化が進み回転磁化範囲になつてはじめてかなり急激に伸びる特性を示すことが想像され、国産方向性珪素鋼帯の磁歪特性をこれらのことから説明することができるであろう。

また第 4 図に示された特長的な磁歪特性は Closure domain の生成⁽⁶⁾という説も立てられているが、現在のところ確定した説ではないと思われる。

実際にはこのように方向性鋼帯の磁歪は熱間圧延珪素鋼板と比較してかなり小さいことがわかるので、変圧器騒音の防止策として有用であろう。ただ第 2 図に示したように特に方向性鋼帯においてはひずみによつて相当磁

歪が増加するので、使用に当つては処理を慎重に行い取り扱いには十分注意する必要がある。

このような熱間圧延のものと方向性鋼帯との静磁歪特性における差異はそのまま動磁歪特性によつてもうかがわれるが、その上磁歪履歴曲線の様相が相当相違し、方向性鋼帯の方が履歴が著しいことが第 7, 8 図の比較によつてわかる。これから実際の変圧器においても振動の高調波成分の発生状態が異なることが想像される。

5. 結 言

以上変圧器の騒音防止の問題と関連して珪素鋼板の静磁歪および動磁歪特性の測定法と測定結果の一端について検討した。その結果熱間圧延珪素鋼板と方向性珪素鋼帯とでは、磁歪だけでなく磁歪履歴曲線の様相も相異することがわかつた。また方向性珪素鋼帯を使用すれば騒音防止に効果的であることが知られ、30MVA 変圧器の試作結果⁽¹⁾からも実証された。しかし方向性珪素鋼帯の磁歪は機械的ひずみに対し敏感であるので、その取り扱いには十分留意しなければならない。

終りに御指導を賜つた茨城大学工学部本多教授に感謝するとともに御協力をいただいた関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 小沢：日立評論 39, 761 (昭32-7)
- (2) 本多, 増本, 白川, 小林：金属学会誌 12, 1 (1948)
- (3) 青柳：電学誌 53, 654 (昭8)
- (4) 福島：第 15 回電気学会聯合大会予稿 (昭14)
- (5) 福島：第 17 回電気学会聯合大会予稿 (昭15)
- (6) P. W. Neurath: E. E. 991 (1954)

日立評論 別冊第 24 号

金 属 特 集 号 第 3 集

昭和 33 年 7 月発行予定

- ◎数種のオーステナイト系耐熱合金の高温機械的性質
- ◎18-8 ステンレス鋼溶接棒被覆剤中 Si の挙動
- ◎ダイキャストダイス鋼 DAC および DBC の空冷処理に硬度、変形率および高温機械的性質について
- ◎双物鋼の靱性に及ぼす熱処理の影響
- ◎大型鍛鋼品の内部亀裂の性状について
- ◎鍛鋼焼入ロールの製造について

- ◎マレブル用白鉄ガス成分について
- ◎黒心可鍛鉄の第二黒鉛化機構の研究
- ◎黒心可鍛鉄の汚水に対する耐蝕性について
- ◎鉄溶解に関する二、三の考察
- ◎鉄溶解のガス含有量の変動要因について
- ◎球状黒鉛鉄の耐摩耗性に及ぼす主要元素の影響
- ◎強力導電用 Cu-Cr-Ti 三元素合金の研究
- ◎Al 青銅に関する研究 (第 1 報)

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸ノ内 1 丁目 4 番地 振替口座東京 71824 番
取次店 株式会社オーム社書店 東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地 振替口座東京 20018 番