

<p>学術論文</p>

単板磁気試験器を用いた剪断加工歪みによる
磁気特性変化の測定方法の検討

Investigation of method for measuring magnetic properties affected
by shearing strain using a single sheet tester

中岡 将吉	(岡山大学)	高橋 則雄	(岡山大学)
河邊 盛男	(神鋼電機)	中野 正典	(岡山大学)
藤原 耕二	(岡山大学)		

Masayoshi NAKAOKA
Norio TAKAHASHI Member
Morio KAWABE
Masanori NAKANO
Koji FUJIWARA Member

Magnetic properties of motor cores are affected by the distortion due to cutting. The report which investigated such behavior systematically is very few, although the examination of the detailed behavior of magnetic properties is important. In this paper, the magnetic properties of single sheet specimens punched in various widths are measured using a newly developed single sheet tester which can measure until 2 T. It is shown that the magnetic field intensity and core loss are increased due to the cutting. The detailed behavior of the deterioration of $B - H$ curve and core loss is illustrated.

Key Words: Deterioration, Single sheet tester, Silicon steel

1 まえがき

モータコアなどを切断すると、加工歪みのために磁気特性が劣化する。電気鉄板メーカーのカタログ値を用いて、有限要素法などの数値解析法により電磁機器の磁気回路設計を行った場合、コアの締め付け圧力や切断による加工歪みにより、実機の特性は設計段階で推定した特性と異なることが問題になっている。機器の特性を精度良く推定するためには、これらの要因による磁気特性の変化を考慮する必要がある。切断した試料を複数枚並べて測定した例 [1] はあるが、それでは切断歪みが素材特性にどのように影響を与えるかを正

確に測定することができない。また従来、エプスタイン試験器を用いた測定が行われているが、磁路長が正確に与えられない [2]、試料 1 枚だけの磁気特性を正確に測れないなど、精度に問題がある。

そこで本研究では、切断による加工歪みが磁気特性に及ぼす影響を検討するためには、試料 1 枚だけの素材特性を測定する必要があることを示すと同時に、水冷式の小形単板磁気試験器 (SST)[3][4] を用いて、電磁鋼板に加工歪みがある場合の磁気特性を高磁束密度領域まで測定した。

連絡先: 高橋 則雄, 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1, 岡山大学工学部, e-mail: norio@elec.okayama-u.ac.jp

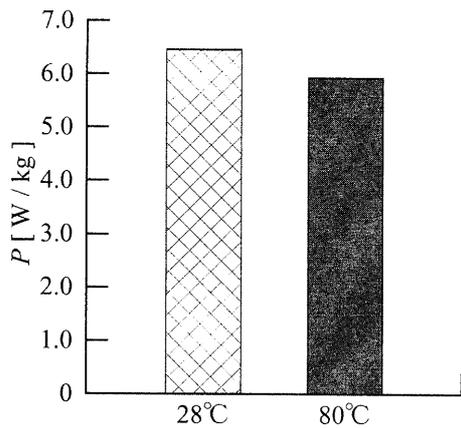


Fig. 1 Effect of temperature (35A250, 50 Hz, 2.0 T)

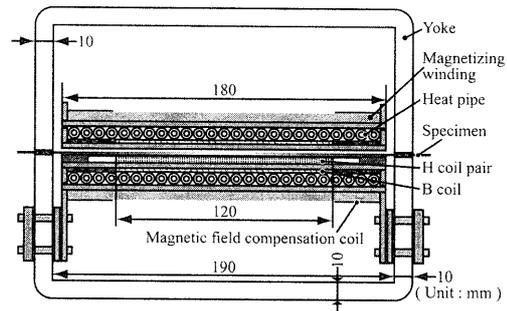
2 水冷式小形単板磁気試験器

ここでは、比較的小形の試料の磁気特性が測定できるように製作した小形 SST を用いて、高磁束密度の磁気特性を測定する際の問題点、並びに測定が可能ないように改良した装置について述べる。

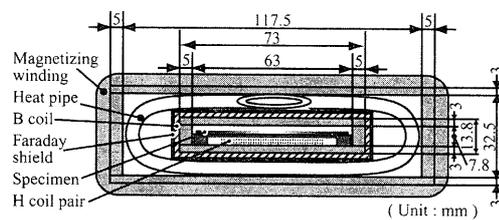
2.1 従来の小形単板磁気試験器の問題点

小形 SST を用いて無方向性けい素鋼板の磁気特性を測定することができる [4]。ところが、小形 SST を用いて測定可能な磁束密度領域は、無方向性けい素鋼板については 1.8 T 以下である。一方、数値解析では、飽和領域の 2.0 T 程度までの磁気特性データを必要とする。1.8 ~ 2.0 T の高磁束密度領域を測定出来ない理由は、本器の励磁巻線が、1.038 mm 径のポリエステル電線 (PEW) を使用し、165 ターン/層の 3 層構造となっているためである。本器を用いて、高磁束密度領域の測定を行うためには、電流密度が $2\text{A}/\text{mm}^2$ 以上の大きな電流を励磁巻線に流す必要があり、励磁巻線が発熱する結果、試料の温度が上昇して試料の磁気特性が変化する。Fig.1 に、試料の温度上昇による鉄損の変化の一例を示す。また、大きな電流を流すと、発熱により励磁巻線の絶縁皮膜が損傷して不都合が生じる。

従って、高磁束密度領域を測定するためには、従来の小形 SST よりも励磁巻線の巻数を増やしてアンペアターンを大きくし、かつ、励磁巻線から生じる熱を試料に伝えない構造に改良した小形 SST を作成する必要がある。



(a) Front view



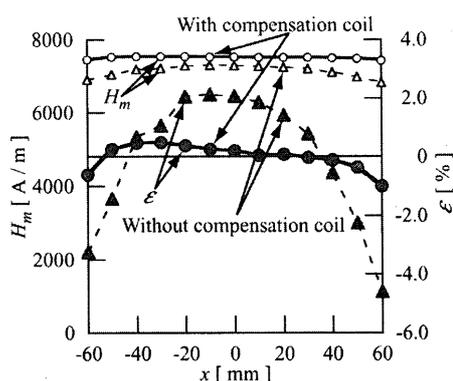
(b) Side view

Fig. 2 Small size SST

2.2 水冷式小形単板磁気試験器の製作

前項で述べたように、高磁束密度領域を測定するためには、従来の小形 SST の問題点を補うように改良した小形 SST を製作する必要がある。ここでは、製作した水冷式の熱交換器を有する小形 SST について詳述する。Fig.2 に水冷式小形単板磁気試験器 (SST) を示す。本器は従来の小形 SST [3] と基本的には同じ構造であるが、励磁巻線は大電流に耐えるように耐熱性ポリイミド電線 (PIW) を用いた。励磁巻線は 5 層巻いてあり、1 層当りの巻数は 188 ターンである。また、励磁巻線で生じた熱が試料に伝わらないよう、励磁巻線と試料の間に水冷管を設置して改良を行った。励磁巻線は波形ひずみ低減のため、直列に接続した [5]。

水冷管は、励磁巻線と B コイルの間に位置し、耐熱性のフッ素樹脂 (PTFE) を用いて作られたチューブをコイル状に巻いたものである。チューブの内径、外径および肉厚は、それぞれ、6.0 mm, 3.0 mm および 1.5 mm である。本器は、給水タンクを床面から 130 mm の高さに設置し、また、排水タンクを床面に設置したので、冷却水はサイフォンの原理によって、給水タンクから SST 内部を通り排水タンクへ伝達される。さらに、排水タンクに貯まった使用済みの冷却水を手

Fig. 3 Distribution of H_m inside SST

動ポンプおよび容器を用いて再び給水タンクへ補給することで、同じ冷却水を何度も再利用できる。ところで、前述の Fig.1 は、本 SST を用いて、水冷と空冷の各場合における測定を行った結果の一例である。空冷では試料温度は $80\text{ }^\circ\text{C}$ であったが、水冷を行うと励磁巻線から生じた熱が試料まで伝わらなかったため、試料温度は $28\text{ }^\circ\text{C}$ であり、室温状態での磁気特性の測定を行えたことがわかる。

H コイルは、狭い幅の試料 1 枚だけを測定できるように試料幅に対応したものを各種作成した。H コイルの巻数、巻いた長さおよび巻枠の板厚は共通して、それぞれ、800 ターン、120 mm、1.0 mm とした。SST 内部の磁界分布が不均一であると測定精度が悪くなるので、磁界分布の均一度の検討を行った。試料を挿入していない状態での励磁巻線内の磁界分布を、B コイルおよび H コイルの測定範囲である 120 mm の範囲において、11 ターンの可動 H コイルを 10 mm 毎に移動させて測定を行ったところ、磁界の誤差 ϵ は最大 $\pm 5\%$ の不均一な分布となっていた。そこで、PIW を励磁枠の両端部から中央部に向けてそれぞれ 1 層分 (25 ターン) 巻いて磁界補償を行った。

Fig.3 に、周波数 50 Hz、励磁電流 1 A、空心状態での磁界補償前後の SST 内部の磁界分布と、その平均値に対する誤差 ϵ [%] を示す。但し、SST の中央からの距離を x [mm] とした。 ϵ は次式で定義した。

$$\epsilon = \frac{(x \text{ 点の } H_m) - (H_m \text{ の平均値})}{(H_m \text{ の平均値})} \times 100[\%] \quad (1)$$

Fig.3 より、磁界補償を行うと、 ϵ は $\pm 1.0\%$ 程度となり、理想的な磁界分布に近づいた。これ以上に補償巻線を増やすと端部の磁界だけでなく中央部の磁界も上昇してしまうため、この状態が最適であると考えられる。

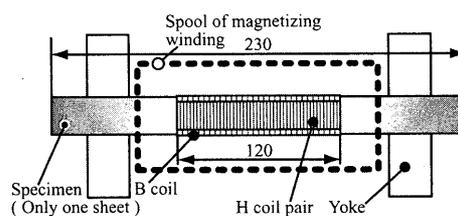


Fig. 4 One piece of specimen, B coil and H coil

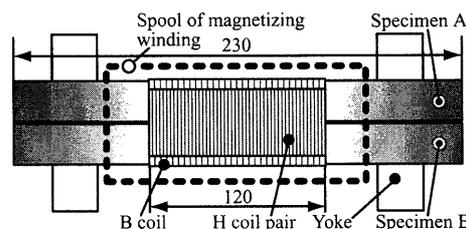


Fig. 5 Specimens installed in parallel

3 加工歪みと磁気特性の相関

3.1 試料を並列に設置した場合の測定誤差

従来、切断による磁気特性の変化は、エプスタイン試験器を用いて測定したり、SST 内で試料を並列に設置して測定がなされていた [1]。エプスタイン試験器を用いた際は、素材 1 枚の特性を測定できないことは言うまでもない。ここでは、試料を並列に設置して SST で測定する場合も、素材本来の特性を得ることができないことを明らかにし、SST 内に単板試料を 1 枚だけ設置して測定を行う方法の必要性について述べる。

50A1300 を打ち抜き加工で 30 mm 幅に切断した試料 2 枚 (試料 A および B) を用いて、Fig.4 のように SST 内へ 1 枚ずつ設置した場合、および、Fig.5 のように 2 枚並列に設置した場合の測定を行い、並列の影響について検討する。

最大磁束密度 B_m は、SST 内へ 1 枚ずつ設置した場合は 0.1 T から 2.0 T まで、0.1 T 毎に変化させた。SST 内へ 2 枚並列に設置した場合は、まず、 B_m が 0.1 T から 1.6 T まで 0.1 T 毎の測定を 5 回繰り返した。 B_m が 1.7 T から 2.0 T までの測定では電流がかなり大きくなるので、励磁側の変圧器の巻数比を変更して、0.1 T 毎の測定を 5 回繰り返した。周波数は 50 Hz とした。 B_m の誤差 ϵ_{B_m} および B コイルの誘導起電力の波形率の誤差 ϵ_{FF} を、それぞれ 0.1% および 0.05% 以内とする収束条件下で波形制御を行った。H コイルは、SST 内へ 1 枚ずつ設置した場合は 30 mm 幅試料用を、2 枚並列に設置した場合

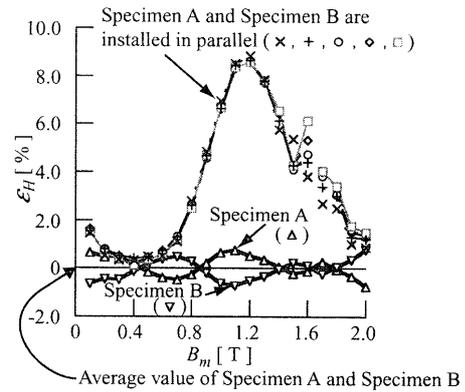
では、60 mm 幅試料用のものを使用した。幅の異なる H コイルを使用しているが、各 H コイル共に校正を行ったため、H コイルによる誤差は無視できると考えられる。Fig.6 に、試料 2 枚の平均値に対する磁界の強さ H と鉄損 P の誤差を示す。ここで、誤差 ϵ を次式で定義した。

$$\epsilon = \frac{(\text{測定値}) - (2 \text{ 枚の平均値})}{(2 \text{ 枚の平均値})} \times 100[\%] \quad (2)$$

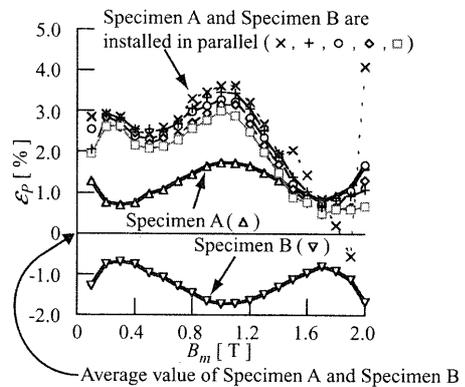
磁気特性にばらつきのある試料を複数枚並列に設置して測定を行った結果、各試料の平均値に対する測定誤差は、Fig.6 のように磁界で最大 9 % 程度、鉄損で最大 4 % 程度となった。磁気特性にばらつきがある場合、Fig.7 のように磁束がかたよるため、みかけの磁気特性はそれぞれの磁気特性よりも悪くなると考えられる。試料を並列にした場合の ϵ_H は、各試料 A, B の ϵ_H よりも大きくなっている。また、並列にした場合の ϵ_H の曲線の形は、Fig.6 (a) の個々の ϵ_H の曲線と異なったものとなっている。以上より、従来の方法を用いた測定結果は例えば数 % の誤差を含んでおり、解析で必要とされるような素材本来の特性を得られていないことが明らかになった。従って、以下の検討では、SST 内に単板試料を 1 枚だけ設置して測定を行った。ところで、切断による加工歪みを有する試料は、Fig.8 のように、磁気特性の劣化した部分と劣化していない部分に区別できる。これは、特性の異なる試料を並列に配置したものと見なせる。前述の検討結果から、試料 1 枚だけを用いて測定しても素材本来の特性を得ることが出来ないのではないかとこの疑問が生じる。しかし、今回の目的は、加工により劣化した部分そのものの磁気特性を測定することではなく、劣化した部分を含む電磁鋼板のマクロな磁気特性を測定することであるため、本方法により測定を行った。

3.2 測定条件

ここでは、コア材の切断が磁気特性に及ぼす影響の検討を行う際の、測定条件について述べる。試料は、未焼鈍の無方向性けい素鋼板 50A1300 を 5, 10, 30 mm の各幅に打抜き加工 (パンチ) で細く切断したものを各 1 枚使用した。3.1 で述べたように、ここでは、Fig.4 のように試料 1 枚だけを SST 内に設置し、試料幅と同じ幅の H コイルを用いて測定を行うことにする。B コイルは、試料と間の空隙部を少なくする観



(a) Magnetic field strengths



(b) Iron losses

Fig. 6 Error of H and P of each specimen

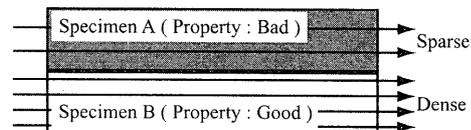


Fig. 7 Deviation of flux

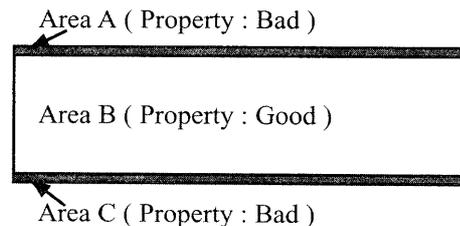
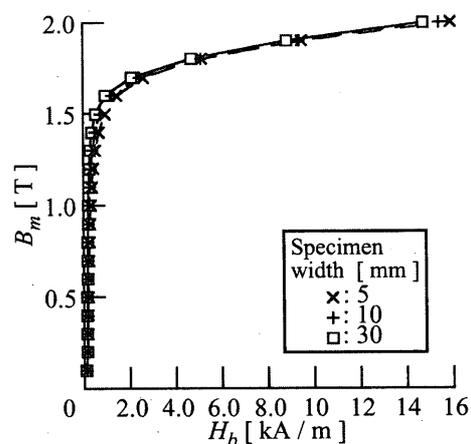


Fig. 8 Specimen having deterioration

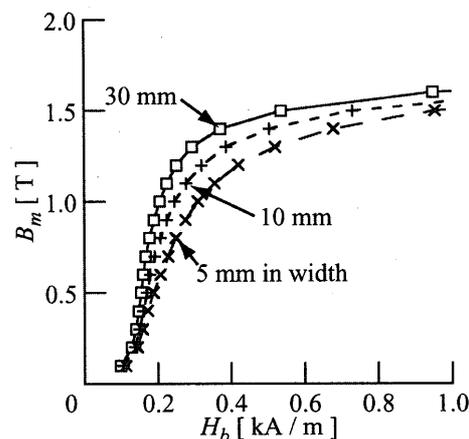
点から, SST 内蔵の B コイルを使用せず, あらかじめ試料にできるだけ密着するように紙を巻き, その上から 120 mm の範囲に等間隔に 60 ターン巻いた直巻きの B コイルを使用した。空隙補償法としては, H コイルの測定値, B コイルの断面積などを用いて空隙の磁束量を計算する方法を用いた。また, 磁界の検出方法として, 2 H コイル法を用いた。最大磁束密度 B_m は 0.1 T から 2.0 T まで, それぞれ 0.1 T 毎に変化させた。周波数は 50 Hz とした。 B_m の誤差 ϵ_{B_m} および B コイルの誘導起電力の波形率の誤差 ϵ_{FF} を, それぞれ 0.1 % および 0.05 % 以内とする収束条件下で波形制御を行った。

3.3 測定結果と検討

Fig.9 および Fig.10 に, $B_m - H_b$ 曲線および $B_m - P$ 曲線を, Fig.11 に $B_m = 1.0$ T のときの 5 mm 幅および 30 mm 幅試料のヒステリシスループを示す。また, 30 mm 幅試料での所定の磁束密度 B_m に対する磁界の強さ H_b を H_{b30} , 鉄損 P を P_{30} とし, 30 mm 幅の試料を基準にした場合の H_b および P の結果をそれぞれ Fig.12, Fig.13 に示す。以上の結果より, 試料が劣化すると, 透磁率の大きい領域 ($B_m = 1.5$ T 付近) で所定の B_m を生じるための H_b が増加し, B_m が小さい領域で鉄損が増加することがわかる。またその増加割合は, 試料幅が狭いほど著しい。 Fig.12 および Fig.13 より, 鉄損の増加割合よりも H_b の増加割合が大きかった。これは, 鉄損の増加はヒステリシスループの面積の差であるのに対して, H_b の増加は所定の磁束密度 B_m に対する磁界の強さの差であることに注意すれば, Fig.11 より明らかである。今回用いた試料では, 切断することにより, H は, 最大で 2 倍近く増加したが, 鉄損 P は約 1.2 倍以内であった。また, 2 T 付近での劣化率はいずれも 10 % 以下である。このように鉄損のもとと大きい 50A1300 の劣化率は, 2 T 付近ではあまり大きくないので, 電磁鋼板のカタログ値を用いて設計した場合でも, 実機と大きな差を生じないと考えられる。それに対し, 鉄損の少ないけい素鋼板の場合は切断ひずみによる鉄損の増加分が全体の鉄損に比べて無視できなくなるので, 低鉄損の高級電磁鋼板を用いる場合は, 試料幅による差が今回の試料よりも大きくなると考えられる。



(a) Whole $B - H$ curves



(b) Enlarged

Fig. 9 $B - H$ curves.

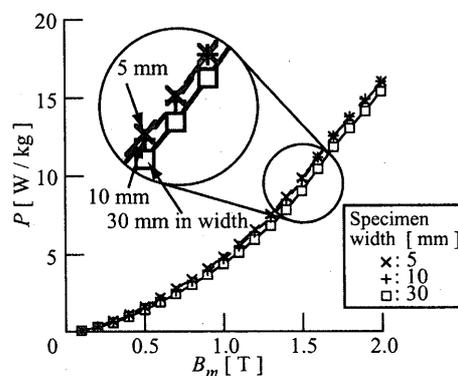


Fig. 10 $B_m - P$ curves.

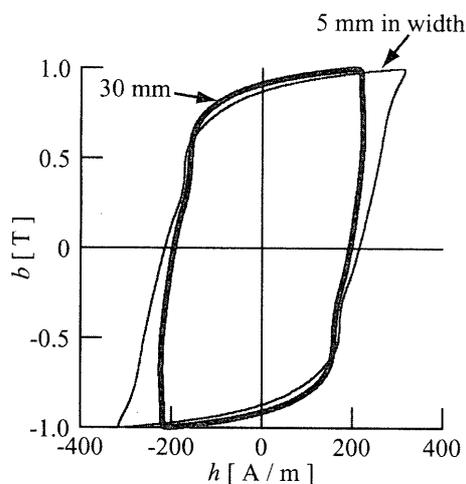
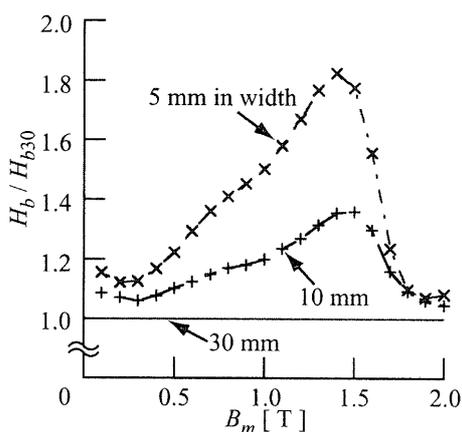
Fig. 11 Hysteresis loops ($B_m = 1.0$ T)

Fig. 12 Deterioration of magnetic field strength

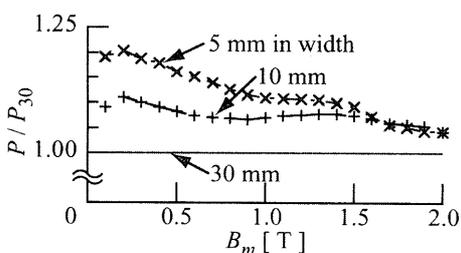


Fig. 13 Deterioration of core loss

4 むすび

本研究で得られた知見を要約すると、以下のようになる。

- (1) 高磁束密度領域を SST を用いて測定する場合、励磁巻線から生じた熱が試料に伝わると、試料の温度上昇により鉄損が変化した。水冷式の熱交換器を用いることにより、これを防ぐことが出来た。
- (2) 特性の異なる試料を並列して測定すると、各試料の平均値に対して最大で 10 % 程度の誤差が現れた。
- (3) 水冷式小形 SST を用いて、試料 1 枚の固有の磁気特性を測定した結果、試料幅が狭いほど残留応力を有する領域の割合が大きくなるため、マクロな磁気特性が悪くなった。
- (4) 試料の劣化により、ヒステリシスループの形状がどのように変化するかを示した。

(2002 年 7 月 2 日受付)

参考文献

- [1] 脇坂岳頭, 「無方向性電磁鋼板の鉄損に及ぼす加工歪み・応力の影響」, 電気学会回転機研究会資料, 開道力, 電学研資, RM-98-26 (1998).
- [2] T. Nakata et al., "3-D Magnetic Field Analysis of Epstein Frame for Measuring Magnetic Characteristics", Electric and Magnetic Fields (Eds. A. Nicolet and R. Belmans.), Plenum Press (1995) pp.291-294.
- [3] 中岡將吉他, 「幅狭試料用小型単板磁気試験器」, 平 12 電気学会全国大会 no.2-176 (2000).
- [4] 中岡將吉, 高橋則雄, 河邊盛男, 中野正典, 藤原耕二, 「幅狭試料用小型単板磁気試験器の測定精度の検討」, IEEE 広島支部学生シンポジウム, no.5A15 (2002).
- [5] K. Matsubara, N. Takahashi, T. Nakata, K. Fujiwara, M. Nakano and A. Date, "Effects of Impedances of Primary Winding and Mutual Inductor on Distortion of Flux Waveform in Single Sheet Tester", IEEE Trans. Magn., vol. 31, no. 6 (1995) pp.3382-3384.