

三相交流磁気センサによる金属板の非破壊検査

佐藤庸平，早野誠治，斎藤兆古*（法政大学大学院）

Three Phase Magnetic Sensor and Its Application to Nondestructive Testing
Yohei Satoh, Seiji Hayano and Yoshifuru Saito (Graduate School of Hosei University)

Abstract

This paper proposes a three phase magnetic sensing system which makes it possible to detect the defect, bending and deflection of metallic plate. Operating principle of this system is based on the essential nature of three phase transformer circuit. When balanced three phase currents are fed into the primary coils which work as the sensing part, zero phase voltage is detected if the target, i.e. Secondary circuits have defects. Zero phase voltage is not detected if the target has no defects. Distribution of these zero phase voltages visualize the defect, bending and deflection of the metallic materials.

キーワード：3 相交流回路，磁気センサ，非破壊検査
(3 Phase Circuit, Magnetic Sensor, NDT)

1. はじめに

エレベータやエスカレータ，さらに航空機などの構造を支える金属材料の非破壊検査は安全性確保のために極めて重要な技術である。他方，金属そのものの品質評価要素として，材料の均一性，ゆがみ，たわみなどがあり，これらの要素を計測する手段としての非破壊検査技術もある。金属の非破壊検査として，超音波，放射線，電気抵抗，渦電流などが用いられている。この中で，超音波による金属の非破壊検査は精度が良く信頼性も高い反面，振動子を検査対象に接触させる必要がある。この意味では電気抵抗測定による非破壊検査も同様に直接接触させる必要がある。放射線による方法は，安全性の観点から放射線の取り扱いに一定の基準が課されているため，使用上に制約がともなう。

渦電流による方法は検査対象と直接接触の必要がなく，比較的簡単な装置で高速な作業が行える反面，渦電流の流れる方向によって金属中の欠損を探知できない問題もある。しかしながら，非接触で探査可能であり他の非破壊検査法に比較して有利な特性を渦電流法は有する。渦電流法は検査対象に交番磁界を照射して渦電流を生成し，渦電流経路のインピーダンス変化から対象物の健全性を評価する方法である。この意味で渦電流法は広義の磁気による非破壊検査法の一つである。渦電流による非破壊検査で，励磁磁界を発生するコイルを変圧器の一次コイルとみなせば渦電流の流れる検査対象が変圧器の二次回路に対応し，欠損の有無による二次回路のインピーダンスの変化を一次回路に換算して評価することができる。これが渦電流法の基本原理である。従って，渦電流法の探査感度は励磁コイルと検査対象間の磁氣的結合に大きく依存し，励磁コイルと検査対象が空間的に接近するほど，探査感度が向上することとなる。これは磁気による非破壊検査が非接触である利点と渦電流法の探査感度が相反することを意味する。換言すれば漏れ磁束が少ないほど正確な渦電流探査が可能である。しかし，非接触であれば必然的に漏れ磁束が増加し，渦電流探査の感度は低下する⁽²⁾⁽³⁾。

このように従来の渦電流探査法では，センサコイルのインピーダンスの変化として欠損を探査するため，励磁コイルと検査対象間に高い磁氣的結合が必要である。すなわち，漏れ磁束が少ないほど感度が向上する。

これに対し，本論文で提案する三相交流磁気センサでは，各励磁コイルに独立に鎖交する磁束の相違から欠損を探査する方式，すなわち，検査対象の独立した3点のインピーダンスの相違を利用したセンシング方式であり，対象自体の均一性を前提としている。このため，対象の非均一性に繋がるひび割れや歪みなどに検出感度向上が期待できると考えられる。

本論文はこの三相交流磁気センサを用いて，金属板の「たわみ」や「くぼみ」分布の可視化手段として基礎的検討を行い，金属板等の品質管理に広範な応用が期待できることを報告する。

2. 三相交流磁気センサ

2.1 動作原理

金属中の欠損を探査する非破壊検査法には，金属を貫く放射線を利用する方法，超音波による方法，浸透液を利用する方法，さらに渦電流を利用する方法等がある。

この中で渦電流を利用する方法は，非接触で可動して測定できるため，比較的多く実用化されている。この渦電流法の原理は，コイルに交流を通電し，コイルから生ずる交番磁界を検査対象に加えることで，検査対象の表面に渦電流を発生させる。検査対象の表面に欠損やクラックが存在すれば，渦電流の経路が変わり結果としてセンサコイルのインピーダンスが変化する。このインピーダンスの変化から欠損を探査することが渦電流検査の基本的な着想である。このように極めて簡単な原理に基づくため，高感度で高速に検査が行なえ，原子炉の熱交換器等では広範に使われている。しかしながら，インピーダンスの相対的変化を測定するため，あらかじめ欠損のない材料でインピーダンスの校正を必要とすることや，インピーダンス測定用ブリッジの平衡度が直接感度に影響するなどの問題点がある。

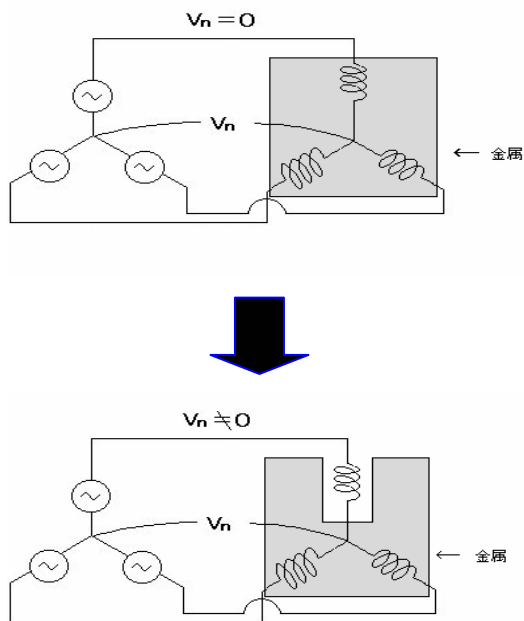


図1 3相交流磁気センサの動作原理
Fig.1. Operating principle of the three phase magnetic sensor system

筆者らは従来の渦電流探査の欠点を補うため、三相交流を利用した新しい原理のセンサを提案した。この三相交流磁気センサの原理は、図1に示すようにY結線された三相交流で、平衡した三相交流が印加されたとき、中性点電圧が常に零であり、一相でも不平衡になれば中性点電圧が生ずることを利用する。いま、磁界を発生する三個のコイルをY結線し、この三個のコイルに探査対象を接近させたとき、探査対象に欠損がなければ平衡した三相の渦電流が対象内に流れるため、コイルの中性点電圧は発生しない。しかし、探査対象に欠損があれば平衡した三相の渦電流とはならないため、各コイルの磁束振幅は異なることとなり、結果として中性点電圧が発生する。従って、三相交流磁気センサは、探査対象の欠損の有無を直接中性点電圧の有無で測定できるため、極めて高感度で正確な非破壊検査が可能となる。

表1 供試センサコイルの仕様

Table 1. Various constants of tested sensor coil

巻き数	1000[回]
外形	20[mm]
内径	10[mm]
長さ	8[mm]

2.2 欠損探査

表1に供試センサコイルの仕様を示す。図2に示すように、幅20mmの欠損上を通過時の中性点電圧変化について測定した。この実験では、センサが非接触で探査可能であるので、金属とセンサが接触した状態と非接触状態での

測定を行った^{(2),(3)}。センサコイル間距離が大きいほど三相センサコイル間の相互干渉が削減し、一相当たりのインピーダンス変化が中性点電圧に反映しセンサ感度が高くなる。よって、図2に示すように、三相交流磁気センサのセンサコイル三個中のお互いに磁氣的結合を受けない位置に固定し、残りの一個を走査して探査を行うコイル分離型センサを使用する。このコイル分離型センサは実質上三相センサコイル間距離を無限大にした状態に設定されている。図3(a)に示すように、金属には珪素鋼板を用い縦、横の長さはそれぞれ等しく12cmとする。周波数は1kHz、印加電圧は6Vとし、縦11点、横11点の測定点における中性点電圧の変化率を測定した。

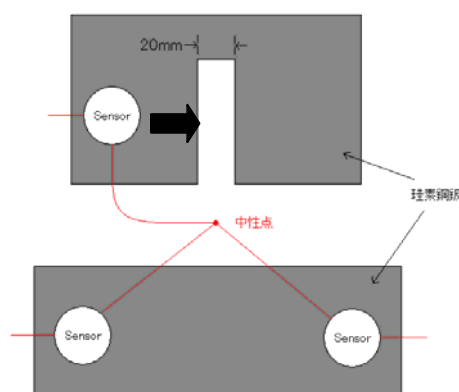


図2 被検査対象シリコンスチールとセンサの移動
Fig.2. Target Silicon steel and moving direction of the sensor

図3に欠損を等電位線分布で可視化した例を示す。尚、図3中の濃淡である等電位線分布は

$$V_n = (\text{中性点電圧} / \text{平衡時の中性点電圧}) \times 100[\%] \quad (1)$$

で定義される正規化された中性点電圧を用いて描かれている。(1)式で、理想的に平衡した三相交流電源と励磁コイルであれば、理論上電源とコイルの中性点電圧は零である。しかし、実際には完全に平衡したシステムの構成は困難であり、供試システムでは、電源を調節して約20mV程度の中性点間電圧が発生した。図3(b),(c),(d)はそれぞれ接触時、リフトオフ5mm、リフトオフ10mmとした場合の実験結果である。センサの中心が欠損の中心に位置するとき、中性点電圧は最高値を示しており、その値は接触時で非欠損部の約30倍、非接触時のときで約14倍(リフトオフ5mm)および約8倍(リフトオフ10mm)となった。センサと金属の接触時には、欠損の中心を基準にほぼ左右対象なピークを描いているのに対し5mm、10mm離れた場合は、欠損の中心でピークが存在しているが、電圧変化から欠損位置・形状を正確に推定する感度は低下する。いずれにしても、センサと金属間の距離が小さいほど感度もよく、欠損位置の誤差も小さくなるのは明らかであり、今回の実験で、この三相交流磁気センサは被検査対象金属と10mm程度離れていても欠損有無に関する探査が可能であることが判明した。

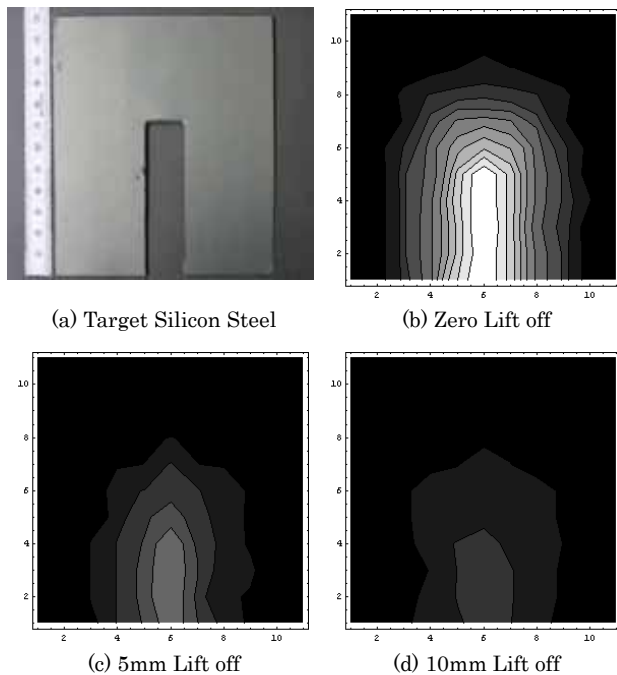


図3 珪素鋼板の可視化された欠損部
Fig.3. Visualized defect of a silicon steel plate

2・3 たわみ探査

図4に示す装置を用いて実験を行った。センサは金属がたわんでも同じ位置に固定されていなければならないので、センサと金属の間には1.5mmの亚克力板を配置し、亚克力板上にセンサを搭載している。亚克力板上のセンサ固定位置は図4に示すように検査対象金属の中心部 $L=3\text{ cm}$ である。金属がたわんでいない状態を $\Delta X=0$ とし、この $\Delta X=0$ のとき中性点電圧が最小値になるように三相電源を調節する。 $\Delta X=0$ から ΔX を増加し、金属のたわみ量に対する中性点電圧側定を行った。このたわみ量 ΔX はセンサと金属との距離ではなく、金属部端の変位であるので、実際にはセンサと金属の距離は X よりもかなり小さい値であることを注意を要する。また、たわみ検査対象として、磁性体の珪素鋼板と非磁性体のアルミ板を採用し、磁性体と非磁性体の相違を比較検討した。周波数は1KHzで、印加電圧は6Vとした。

図5に実験結果を示す。金属板のたわみでY結線された電源と励磁コイルの中性点間で発生する電圧は、センサと磁性体間の距離が変化するためたわみによる磁性体の透磁率変化によるものが考えられる。しかし、磁気センサの最大の利点は非接触、すなわち、センサと対象金属間にギャップの存在を許容する点にある。たわみによるギャップ変化から起こる磁気抵抗はギャップの透磁率が磁性体のそれより圧倒的に小さく、このためギャップの変化に起因する中性点電圧が支配的であると考えられる。また、ギャップ変化と磁性体の透磁率変化、両者による中性点電圧は和となるため、本実験では分離できない。

検査対象が磁性体である方が非磁性体の約2倍程度高感度である。しかし、たわみ量 X に対する出力電圧の変化率 V_n の直線性は非磁性体の方が良好であることが図5より明らかである。これは、検査対象金属が磁性体である

と磁束が検査対象に集中しやすいため感度が向上するが、材料の磁化特性が中性点電圧に反映し、直線性が悪くなると考えられる。あらかじめ、それぞれの金属のたわみ量に対する電圧値のデータベースを作っておくことにより、測定結果の電圧値からたわみ量を特定することが可能になる。よって、非接触での金属のたわみ量測定が可能であることが判明した。

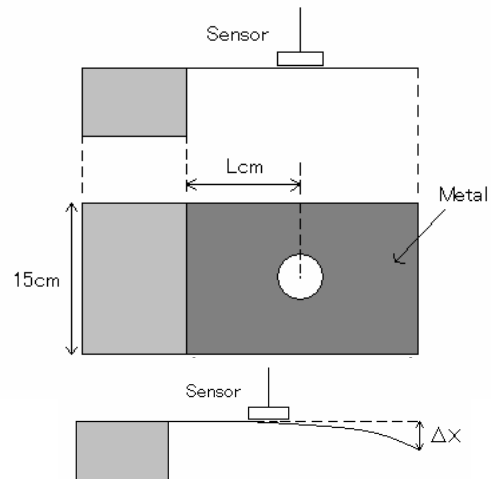


図4 たわみセンシングの測定図
Fig.4. Schematic diagram for the deflection sensing

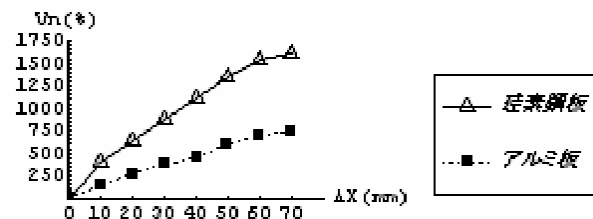


図5 たわみセンシング
Fig.5. Deflection sensing

2・4 くぼみ探査

図6に示すように金属板を複数枚重ねることにより、人工的に金属のくぼみを作成する。くぼみの幅は欠損探査同様20mmとする。金属がくぼんでいない状態を $X=0$ とし、 $X=0$ 時に中性点電圧が最小値を取るよう三相電源を調節する。 $\Delta X=0$ から ΔX を増加し、金属のくぼみ量に対する中性点電圧側定する。センサコイルと金属の間には1.5mmの亚克力板を介してあるため、三相交流磁気センサによる非接触でのくぼみ量変化側定実験である。検査対象金属として0.5mmの珪素鋼板を採用し、電源は周波数1KHz、印加電圧6Vと設定した。測定点数は欠損探査同様、縦11点、横11点である。

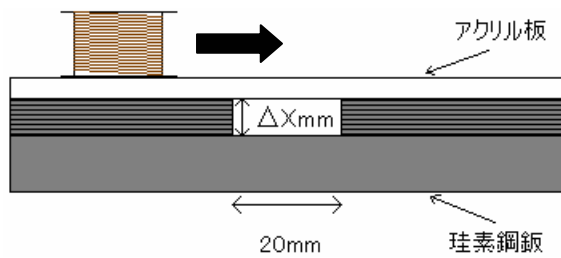


図6 空洞部分の測定方法
Fig.6. Schematic diagram for the hollow sensing

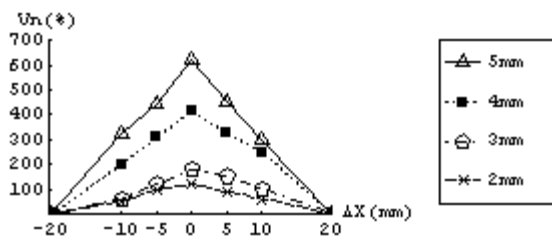


図7 空洞部分検査の結果
Fig.7. Results of hollow sensing testing

図7に実験結果を、図8にくぼみを等電位線分布で可視化した例を示す。図8中の濃淡は(1)式で定義した正規化された中性点電圧分布である。図7ではセンサコイルから金属のくぼみまでの距離2mm, 3mm, 4mm, 5mmの時の中性点電圧変化を示している。実際は1.5mmの亚克力板を介しているため、2mmの実験の空隙を通して珪素鋼板一枚分のくぼみを探査していることとなる。よって、珪素鋼板一枚分(0.5mm)以上のくぼみであれば非接触でも探査可能であることが判明した。

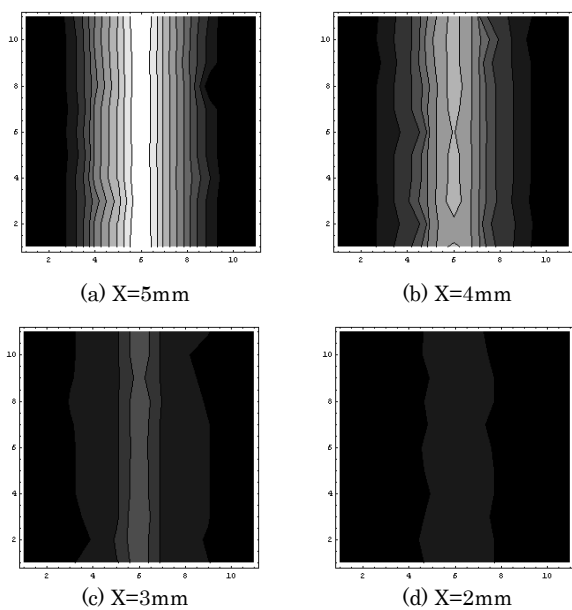


図8 検査対象金属の空洞部分の可視化
Fig.8 Visualized hollow parts in the target material

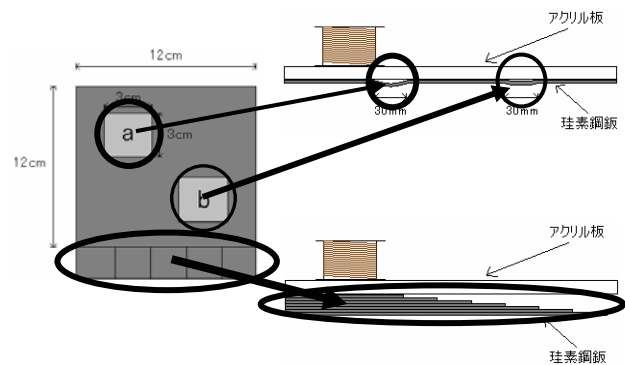


図9 くぼみ欠損探査実験概略
Fig.9. Schematic diagram of experimental setup for fundamental sensor characteristics.

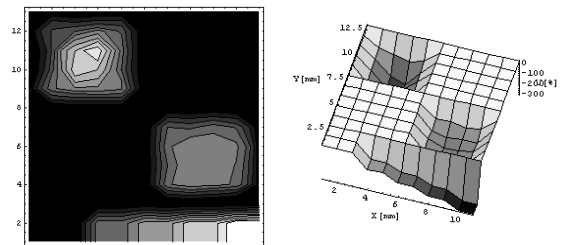
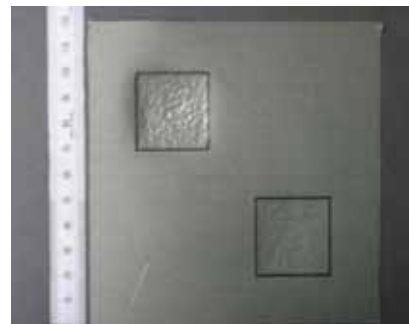


図10 実際のくぼみと探査結果
Fig.10. Experimental result of sensor response

図9は正方形の珪素鋼板に局部的なくぼみ a,b を作成し、珪素鋼板端部に深さのマーカとなるように0.5mm厚の長方形珪素鋼板を階段状に配置した実験装置と実験の概略図である。図10は実験結果である。この結果から2.5mmの深さ程度までのくぼみが探査可能であることが判明した。

3. まとめ

本論文では金属材料の非破壊検査用の三相交流磁気センサを提案し、その基礎特性について実験を行った。三相交流磁気センサは、従来型渦電流法の持つ欠点を完全に克服するものではなく、従来型渦電流探査法と同様に、励磁コイルと探査対象間の距離が増加すると探査感度が低下する。しかし、各相のコイルに鎖交する磁束の相違を利用

するため、絶対的な感度が高い。本稿では試作したコイル分離型センサを用いて、三相交流磁気センサが本質的に好感度、特に欠損位置の探査に関して有効であることが実証された。これは、従来型渦電流探査法が1個のセンサコイルと電源を用いるのに対し、三相交流センサ法は3個のセンサコイルと電源を用いるから、ある意味で感度向上は当然と言える。

参考文献

- (1) I.Marinova、S.Hayano、N.Ishida & Y.Saito：“Polyphase eddy current testing、”*J.App,Phys*、75、10、5904～5906（1994）
- (2) 亀澤・早野・齋藤：「多相交流センサによる金属のたわみ・ゆがみセンシング」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-94-116、（1994）
- (3) 亀澤・早野・齋藤：「多相交流センサによる金属欠損の位置・形状センシング」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-95-31、（1995）
- (4) 佐藤庸平、早野誠治、齋藤兆古、堀井清之、“三相交流磁気センサーの高度化と薄板状金属の欠損可視化”、可視化情報学会誌、Vol.25、No.1、pp.185-188、（2005）