法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-13

三相交流磁気センサ

HIRAMA, Yutaka / 亀澤, 高志 / 齊藤, 兆古 / KAMEZAWA, Takashi / SAITO, Yoshifuru / 平間, 豊

(出版者 / Publisher)
The Institute of Electrical Engineers of Japan / 社団法人電気学会
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
電気学会論文誌 A, 基礎・材料・共通部門誌
(号 / Number)
10
(開始ページ / Start Page)
956
(終了ページ / End Page)
961
(発行年 / Year)
1995-09-20

論 文

三相交流磁気センサ

Three Phase Magnetic Sensor

斎藤兆古*, 亀澤高志*, 平間豊** Y.Saito*, T.Kamezawa* and Y.Hirama**

> *法政大学 工学部 College of Engineering, Hosei University

**日立ビルシステムサービス株式会社

Hitachi Building Systems Engineering and Service Co.LTD

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. has defects. Zero phase voltage is not detected if the target' has no defects. Experimental verification was carried out about the defect, bending and deflection of the metallic plates.

Keywords : Three Phase Circuits, Magnetism, Sensor, Defect, NDT, ECT

1. まえがき

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 属の非破壊検査法として,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放射線の強さや取り扱いに安全性の観 点から一定の基準が課されているため,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 れる方向によっては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 は検査対象中に渦電流の発生を交番磁界を照射して行う。 このため,渦電流法は広い意味で磁気による非破壊検査の 一種とみなされる。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1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2次回路に対応し,欠損の有 無による2次回路のインピーダンスの変化を1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 間の磁気的結合に大きく依存し、励磁コイルと探査対象が 空間的に接近するほど、探査感度が向上することになる。 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。

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 ルと被探査対象間に高い磁気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は向上する。これに対し、本 論文で提案する三相交流磁気センサシステムでは、励磁コ イル間の磁気的結合が弱ければ、各励磁コイルに独立に鎖 交する全磁束の相違から欠損を探査する方式である⁽¹⁾

本論文は三相交流回路で,負荷が不平衡になった場合に Y結線された三相電源の中性点と負荷の中性点間で零相電 圧が発生する原理に基づく磁気センサを提案することとど のような用途に適するかの基礎的検討を行なったものであ る。たとえば文献(3)で検討されている原子炉の熱交換 器用パイプの非破壊検査で使用されるECT(Eddy Current Testing)システムでは、センサコイルのインピーダンスの 変化をブリッジで検出し、インピーダンスの大きさとその 実数部・虚数部の割合から欠損を評価するシステムである。 これに対し、本論文で提案する三相交流磁気センサシステ





ムでは、電源とセンサコイル共にY結線された中性点間の 電圧をセンサ出力としている。これは、三相交流回路の平 衡度がブリッジの平衡条件と対応するため、上記ECTシ ステムに比較して、外部にブリッジが必要なく探査を可能 とすることを意味する。本論文では、励磁コイル間の磁気 的結合が異なる縦積み型と平面型の2種類の磁気センサを 試作し、センサの特性を実験的に吟味する。

三相交流磁気センサの適用性を吟味するため,珪素鋼板 の欠損探査実験と金属板のたわみ量測定実験を磁性体と非 磁性体に対して行った。欠損探査実験ではセンサと金属を 接触,非接触の両方の場合について測定を行い,縦積み型 は欠損の位置を容易に特定することができること,平面型 は縦積み型と比較して各相励磁コイル間の磁気的結合が小 さいため感度が良くなるが,欠損の位置を特定することが 困難であることが判明した。金属のたわみ量測定実験では 金属がたわむことでセンサの漏れ磁束が変化して電圧が発 生する。従って,あらかじめ典型的な欠損およびたわみに ついて測定したデータベースを作成しておき,実際に使用 する場合,データベースに基づいて推定する。また,検査 対称金属が磁性体である方が非磁性体よりも約2倍の高感 度となることも判明した。

以上より三相交流磁気センサシステムは従来型渦電流法 に比較して感度が高く,金属板のゆがみやたわみ量を感知 できるため磁気センサとして広範な応用が期待されること を報告する⁽¹⁾。

2. 三相交流磁気センサシステム

<2・1> 原理

三相交流回路で、電源と負荷ともに星型結線する。電源 と負荷ともに平衡している場合、電源と負荷との中性点間 の電位差は零である。しかし、負荷が不平衡になると電源 と負荷の中性点間に電圧が発生する。負荷が同一仕様の励 磁コイルを星型結線して構成されているとしよう。各相の 励磁コイルに導電または磁性体材料が面しているとき、一 相でも導電率もしくは透磁率が異なる金属に面しているな らば,不平衡負荷となり中性点電圧が発生する。従って, 中性点電圧の有無が各相励磁コイルに面する材料の相違を 示すことになる。これが三相交流磁気センサの基本原理で ある。

図1に三相交流磁気センサの動作原理を示す。三相交流 磁気センサの構成は、星型結線された励磁コイルと励磁コ イルに面する検査対象からなる。このため、三相交流磁気 センサシステムは励磁コイルを一次、検査対象を二次とす る一種の三相変圧器とみなされる。三相交流磁気センサシ ステムを三相変圧器で,各相の磁束が独立となる単相変圧 器を3個用いたモデルとして考える。電源と変圧器の一次 回路がY結線されている場合、それぞれの単相変圧器の負 荷が不平衡であれば、電源と変圧器の一次回路それぞれの 中性点間で零相電圧が発生する。しかし、三脚鉄心を用い た三相変圧器のモデルとして考えると、対称座標法を用い て二次不平衡時の回路方程式を変形すれば、一次と二次間 の零相分の相互インダクタンスは存在せず、結果としてY 結線された電源と一次コイルの中性点間の電圧は二次が不 平衡であっても発生しない ⁽⁵⁾ 。これは三相交流磁気セン サの励磁コイル間で磁気的結合が弱いほど感度が向上する ことを意味する。

<2・2> 実験

(a) 試作センサ 三相交流磁気センシングのために,励磁コイル間の磁気的結合の密な縦積み型と,励磁コイル間の磁気的結合が疎な平面型センサを試作した。図2(a), (b)にそれぞれ縦積み型と平面型センサの形状を示す。表1 に試作センサの仕様を示す。縦積み型・平面型いずれもコ イルの片面は検査対象以外へ磁界が分布しないことおよび 外部磁界の影響をすくなくするため珪素鋼板で覆われてい る。コイルの仕様は寸法,形状の制約から決定した。

表1. 試作三相交流センサ仕様

形式	コイル形状	コイル巻き数	コイル数
縦積み型	三角形	200	3
平面型	三角形	1480	3



平面上に120° ずつずらして対称に配置してあり、3個のコ イル中で1個もしくは2個のコイルに鎖交する磁束分布が 異なる場合、電源と負荷の中性点間電圧が変化する。 (b) 欠損探査 検査対象として図3に示す珪素鋼板を用い

た。センサを図3に示すように中央部の欠損に対して直角 方向へ5mmずつ移動して、Y結線に接続した三相電源と励磁 コイルの中性点間電圧の変化を測定した。リフトオフ高さ はセンサと金属が接触、非接触の場合として、それぞれ0mm と5mmで実験を行った。なお、励電周波数は1kHz、励磁電流 の大きさは、励磁コイルを囲む珪素鋼板が磁気飽和しない ように、縦積み型と平面型それぞれ0.6Aと0.2Aに設定した。 電流の大きさが縦積み型と平面型で異なるのは励磁コイル の巻数が異なるためである。

図4にたて積み型センサによる実験結果を示す。図4で、 縦軸は

Vo= (中性点電圧/平衡時の中性点電圧)×100 [%](1)

で定義される中性点電圧変化率である。(1)式で、理想的に



x(mm)



図4. 縦積み型センサによる欠損探査実験結果 Fig.4 Experimental results for the piled up type sensor



図5. 平面型センサによる欠損探査実験結果

Fig.5 Experimental result for the flat type sensor

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 とコイルの中性点間電圧は零であるが、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10mV程度の中性点間電圧が発生した。横 軸は図3(a)に示す欠損の中心を零、左方向を負さらに右方 向を正とした検査対象上の位置である。図4(b)は縦積み型 センサのリフトオフ高さを5mmとした場合の実験結果である。 縦積み型センサの場合、電圧変化特性のピークはセンサの 中心が欠損の中心上に位置する点に存在するために、容易 に欠損の位置を特定することができる。

図5に平面型センサによる実験結果を示す。平面型セン サは励磁コイルの欠損に対する位置で出力が異なるため, 励磁コイルの位置は図3(b)に示す位置に保って,センサが 回転しないように左側から右側へ走査した。平面型センサ





の出力は、図5の実験結果から分かるように、欠損に対し て励磁コイルが同一条件で位置しないため欠損を中心とし て対称とならない。平面型センサは励磁コイル間の磁気的 結合を弱めることで感度が向上することを確認することが 目的であるため、完全に磁気的結合を無くす方が好ましい。 しかし、外部磁界の影響をいずれの励磁コイルも同じ条件 で減少させるため円形珪素鋼板上に配置した。この結果、 平面型センサは励磁コイル間の磁気的結合があるものの、 縦積み型センサに比較して弱い。この感度の向上により、 図5(c)に示すように励磁コイルと検査対象間の距離が10mm であっても欠損の有無を充分探査することができる。

(c)金属板のたわみ探査 図6にたわみ量を探査する実 験構成図を示す。磁性体と非磁性体金属に対する探査感度 の相違を調べるため、たわみ量探査の供試材料として珪素 鋼板とアルミ板を用いた。

図7に実験結果を示す。図7で,縦軸は(1)式で定義され る中性点電圧の変化率であり,横軸は図6に示してある金 属端のたわみ量Δxである。このたわみ量Δxはセンサと 金属の距離ではなく,金属端の変位であることに注意を要 する。センサは縦積み型,平面型共にセンサの位置をL=3cm とした。測定結果を図7に示す。

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

電学論A, 115巻10号, 平成7年



図7.たわみ量探査実験結果

Fig.7 Experimental results for the deflection sensing

るためと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の 変化率と磁性体の透磁率変化を考えた場合、全体の磁気抵 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。

たわみ量を探査する実験においても励磁コイル間の磁気 的結合の強い縦積み型に対して、励磁コイル間の結合が弱 い平面型が5倍以上の感度であることが、図7の実験結果 からわかる。また、検査対象が磁性体である方が非磁性体 の約2倍程度高感度になる。しかし、たわみ量Δxに対す る出力電圧の変化率Voの直線性は非磁性体の方が良好であ ることが図7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。

3. むすび

本論文では金属材料の非破壊検査を行う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。その 結果、以下のことが判明した。

- (i) 三相交流磁気センサの励磁コイルはコイル間の磁気 的結合が弱いほど高感度なセンサが構成できる。
- (ii) 励磁コイル間の磁気的結合が弱いほど高感度なセン サになるが、欠損探査の場合に欠損の位置が不明確 となる。

(iii)探査対象が磁性体である方が感度が高くなる。

- (iv)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、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⁽¹⁾。
 - (平成7年1月18日受付、同7年5月8日再受付)

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・斎藤兆古:「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, (平6)
- (3)橋本:東京大学工原子力工学科,博士論文(平2)
- (4)Y.Hirama,et al.,"An application of DC magnetic fields to eddy current sensor", Simulation and Design of Applied Electromagnetic Systems, Elsvier Pub., 129~132 (1994)
- (5)尾本・米山・山下・執行:「電気機器工学I」,電気学会,179,(昭39)

斎藤 兆古 (〕



(正員) 1946年 7月24日生。1975年 3月法 政大学大学院工学研究科博士課程修了。同 年同大学助手, 1976年同講師, 1978年同助 教授, 1987年同教授,現在に至る。電磁気 学,電気機器,及び大学院応用数学,電磁 力学,磁気工学の講座を担当。主として, 計算電磁力学に関する研究に従事。工学博

士。International Journal of Applied Electromagnetics in Materials, Advisory Editorial Board。 IEEE, 電子 通信情報学会,日本応用磁気学会,日本生体磁気学会,日 本AEM学会会員,Electromagnetics Academy(MIT)会員。



亀澤 高志 (学生員) 1971年 7月 30日生。1994年 3月 法政大学工学部電気工学科電気電子専攻卒 業。同年 4月同大学大学院工学研究科電気 工学専攻博士前期課程在学中。主として, 多相交流磁気センサに関する研究に従事。

平間 豊



(正員) 1940年11月16日生。1958年 3月千秋 工業高等学校電力科卒業。同年 4月小樽市 水道局水質試験所勤務。1960年10月(株) 日立ビルシステムサービス勤務。磁気探傷 関係に関する研究に従事(ロープテスター の開発等)。現在社内技術士として技術コ ンサルタントを担当。日本技術士会,日本AEM

学会, 電気学会, 機械学会, 会員技術士(電気電子部門)。