法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-15

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

佐藤, 庸平 / 早野, 誠治 / SAITO, Yoshifuru / SATO, Yohei / 斎藤, 兆古 / HAYANO, Seiji

(出版者 / Publisher)法政大学情報メディア教育研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title) Bulletin of Research Center for Computing and Multimedia Studies, Hosei University / 法政大学情報メディア教育研究センター研究報告

(巻 / Volume)
19
(開始ページ / Start Page)
125
(終了ページ / End Page)
129
(発行年 / Year)
2006-03-23
(URL)
https://doi.org/10.15002/00025073

佐藤 庸平 早野 誠治 斎藤 兆古 法政大学大学院

我々は三相交流の平衡度へ着目した三相交流磁気センサーを開発し、従来型 ECT センサーに比較して一桁程度感度 が向上することを報告した。現在我々は、この磁気センサーの位置分解能の向上、および小型・軽量化を試みている。 第一段階として、理論上、感度が向上する3コイル分離型を試作し、理論の実験的検証を行った。その結果、磁性・非 磁性を問わず金属薄板の歪み・たわみ・くぼみ等の品質管理上に問題となる欠損を可視化可能であることを報告する。

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種で 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 対象間の磁気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、センサーコイル 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ーでは、 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 サーを用いて、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ー

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 サー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。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 ンサーを提案した。この三相交流磁気センサーの原理は、 Fig。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 センサーは、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。



Fig.1 Operating Principle of the Three Phase Magnetic Sensor System

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

Table. 1 に供試センサ - コイルの仕様を示す。Fig.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、センサーが非接触で 探査可能であるので、金属とセンサーが接触した状態と 非接触状態での測定を行った²⁾³⁾。センサーコイル間距離 が大きいほど三相センサー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 センサー感度が高くなる。よって、Fig.2 に示すように、 三相交流磁気センサーのセンサーコイル三個中の二個は お互いに磁気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ーを使用す る。このコイル分離型センサーは実質上三相センサーコ イル間距離を無限大にした状態に設定されている。Fig。 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。



Fig.2 Target Silicon Steel and Moving Direction of the Sensor



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

V_n=(中性点電圧/平衡時の中性点電圧)×100[%](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。Figs.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。センサーの中心が欠損の 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。センサー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、センサー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ー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。

2.3 たわみ探査

Fig.4 に示す装置を用いて実験を行った。センサーは金属 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、センサーと金属の間には 1.5mm のアクリル板を配 置し、アクリル板上にセンサーを搭載している。アクリ ル板上のセンサー固定位置は Fig.4 に示すように検査対象 金属の中心部 L=3 c mである。金属がたわんでいない状態 を ΔX =0 とし、この ΔX =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。 ΔX =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 はセンサーと金属との距離ではなく、金属部 端の変位であるので、実際にはセンサーと金属の距離は ΔX よりもかなり小さい値であることに注意を要する。ま た、たわみ検査対象として、磁性体の珪素鋼鈑と非磁性 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。



Fig.4 Schematic Diagram for the Deflection Sensing

Fig.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 ーと磁性体間の距離が変化す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 センサーの最大の利点は非接触、すなわちセンサーと対 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 ΔX 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 Fig.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。



Fig.5 Deflection Sensing

2.4 くぼみ探査

Fig.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に三相 電源を調節する。 X=0から X を増加し、金属のくぼ み量に対する中性点電圧側定する。センサーコイルと金 属の間には 1.5mm のアクリル板を介してあるため、三相 交流磁気センサー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。



Fig.6 Schematic Diagram for the Hollow Sensing

Fig.7 に実験結果を、Fig.8 にくぼみを等電位線分布で可 視化した例を示す。Fig.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。Fig.7 ではセンサー 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 のアクリル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。



Fig.8 Visualized Hollow Parts in the Target Material

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 ンサーを提案し、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ーは、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ーを用いて、三相交流磁気 センサーが本質的に好感度、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個のセンサーコイルと電源を用いるのに対し、 三相交流センサー法は3個のセンサーコイルと電源を用 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:「多相交流センサーによる金属の 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:「多相交流センサーによる金属欠 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)

<u>キーワード.</u>

三相交流回路、磁気センサ

Summary.

Advanced 3 Phase Magnetic Sensor and Its Application to Defect Visualization of Thin Metallic Materials

Yohei Sato Seiji Hayano Yoshifuru Saito Graduate school of Engineering, Hosei University

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.

Keywords.

3 Phase Circuit, Magnetic Sensor