

# 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

Polyphase Magnetic Sensor  
-Deflection Sensing-

亀澤 高志、早野 誠治、斎藤 兆古  
T. Kamezawa, S. Hayano and Y. Saito

法政大学 工学部  
College of Engineering, Hosei University

## 1. まえがき

現在、原子力発電所、化学工場などの各種プラントや、ガス・水道管、鉄道などの公共設備、さらにはエレベータ・エスカレータなどの屋内設備に至るまで、安全性確保のために高度の信頼性を必要とする設備・装置が我々の周りにはたくさん存在する。しかし、これらの設備・装置の経年変化による金属疲労や腐食などが、欠陥を生むことは避けられず大事故に発展しかねない。そこで、このようなことが起こる前に定期的な非破壊検査を行うことで、欠陥を見つける必要がある。

非破壊検査の種類には超音波、放射線、磁粉、電気抵抗、渦電流を用いたものがあり、その中でも特に渦電流による探査法は簡単な装置で、非接触で導体表面の欠陥の検出という点で優れている。このため、渦電流を用いた金属中欠陥探査法として筆者らは多相交流センサーを研究・開発している。この多相交流センサーの原理は電源と負荷（センサーコイル）をそれぞれ星型に結線し、電源、負荷ともに平衡状態のとき中性点電圧は存在しないが、負荷すなわちセンサーのインピーダンスが不平衡（欠損が存在する）になると中性点電圧が発生する事を利用したものである。換言すれば、中性点電圧を測定することで欠損の有無を探査することができる。

平面状金属中の欠損を探査する目的で3相交流センサーを試作し、実験を行ったところ、完全な平面状金属は存在せず、ゆがみのため欠損のない平面状金属でも中性点電圧は変化することが判明した。このことから、本稿では金属板のゆがみが検出可能であることを利用し、多相交流センサーによるたわみ測定を中心として報告する。

## 2. 多相交流センサー

### 2.1 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被検査対象に加えることで、被検査対象の表面に渦電流を発生させる。被検査対象の表面に欠損やクラック存在すれば、渦電流の経路が変わり結果としてセンサーコイルの入力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查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、原子炉の熱変換器等では広範に使われている。しかしながら、欠点としてインピーダンスの相対的变化を測定するため、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、従来の渦電流探查の欠点を補うため、多相交流を利用した新しい原理のセンサーを提案した[1]。この多相交流磁気センサーの原理は、多相交流の星型結線で、平衡した多相交流が印加されたとき中性点電圧が常に零であり、1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ものである。今、磁界を発生する3個のコイルを星型結線し、この3個のコイルに被探查対象を接近させたとき、被探查対象に欠損がなければ平衡した3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、被探查対象に欠損があれば平衡した3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、多相交流磁気センサーは、被探查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[1]。

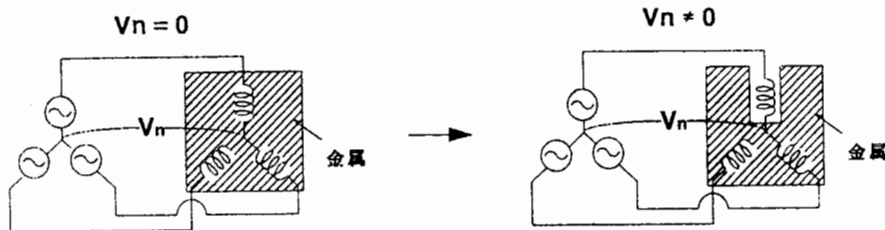


図2.1 測定原理

## 2.2 センサーの構造

この実験で使用する縦積み型センサーと平面型センサーの構造について説明する。縦積み型センサーは、各相コイルを巻き線方向が同方向となるように3段に重ねて置いたものである。欠損に対して一番近い下部のコイルが対象の存在に起因する磁束分布の影響を受けて大きく変化し、2、3段目のコイルは金属と離れており、対象の存在に起因する磁束分布への影響が少ないために各コイル間のインピーダンスが不平衡になり、中性点電圧が生じる。

平面型は3つのコイルを同一平面上に $2\pi/3$ ずつずらして配置したもので、平面方向の方向性によって感度が異なる。どちらのセンサーも反対側の面および側面は、非探查対象以外に磁束が分布しないように珪素鋼板で覆われている。

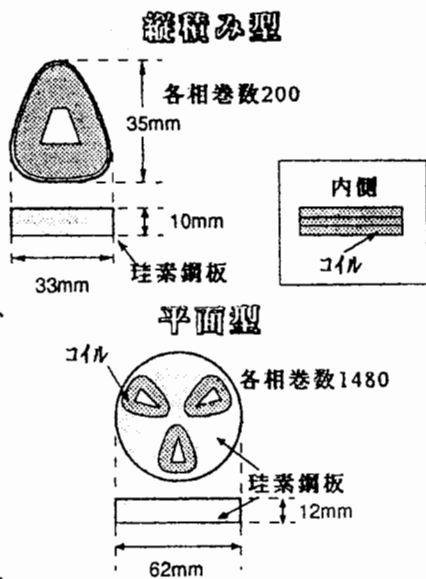


図2.2 センサー構造

### 3. 実験

#### 3.1 欠損探査実験

3.1.1 実験方法 図3.1.aに示したように、縦積み型・平面型センサーを用いて、幅10mmの欠損上を通過時の中性点電圧変化について測定した。その際に、このセンサーが非接触での探査が可能であるので、金属とセンサーが接触した状態と非接触状態で距離を大きくしたときの測定も行った。平面型センサーはコイルが分散して配置してあるので、1つの欠損に対して2～3のピークが存在する。今回の実験では図3.1.bに示した方向にセンサーを移動したので、2つのピークが存在することになる。金属には珪素鋼板を用い、周波数は1kHz、電流は縦積み型が0.6A、平面型は0.2Aとした。

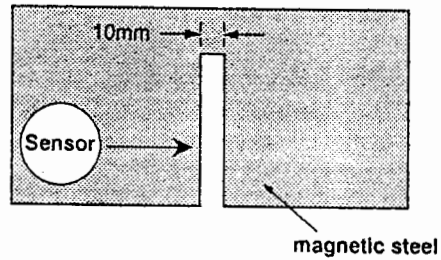


図3.1.a 欠損探査

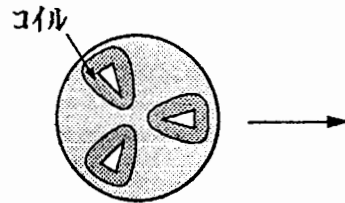


図3.1.b 平面型センサー探査方向

3.1.2 結果 縦積み型センサーの測定結果を図3.1.c.dに示す。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、その値は接触時で初期値の約2.5倍、金属とセンサーの距離が5mmのときで約7倍となっている。なお、このセンサーと金属の距離が10mmのときについても測定を行ったが、欠損に対する中性点電圧の変化を感知することはできなかった。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離れたときでは、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を推定する感度は低下する。しかし、欠損の有無は明確に判定できる。

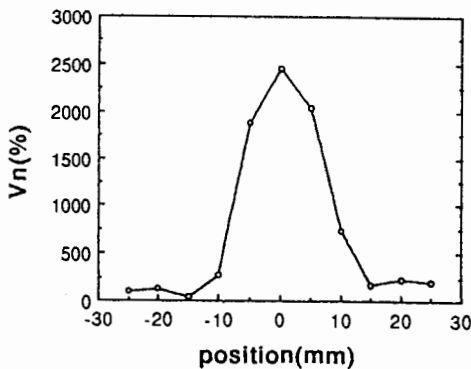


図3.1.c 縦積み型センサーによる欠損探査 (センサーと金属の距離0mm)

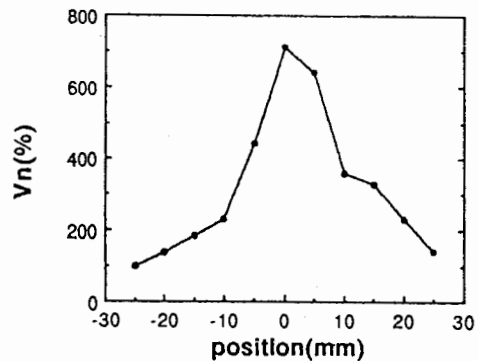


図3.1.d 縦積み型センサーによる欠損探査 (センサーと金属の距離5mm)

平面型センサーの測定結果を図3.1. e, f, gに示す。接触・非接触時それぞれのピーク位置およびピークの値について比較してみると、接触時に-20mmに出ているピークは約70倍、これが金属とセンサーの距離が5mmの場合はピーク位置は変わらずピーク値は約8倍にまで低下する。図3.1. gに示すように、センサーとの距離が10mmになるとピークが存在しなくなる。次に2つめのピークについて注目してみると、これは2つのセンサーコイルが同時に欠損上を通過する際にできたピークであるが、接触時にはセンサーコイルの位置が+5~10mmに在ったピークは、金属との距離が5mmのときにはセンサーコイル位置+5mmに移り、10mm離れたときにはセンサーコイル位置+10mmへと変わっている。ピークも接触時には約75倍であるが、10mm離れたときにはその10分の1以下に低下している。しかし、最初のピークは測定できないにもかかわらず、2つ目のピークは明確に測定される。これは、平面型センサーが10mm離れた位置での欠損探査が可能であることを意味する。また、三相平面型センサーの場合、二個のコイルが並行して配置してある部分が一個の部分よりも高感度であることを示している。

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、この多相交流センサーは非検査対象金属と10mm程度離れていても欠損探査が可能であることが判明した。

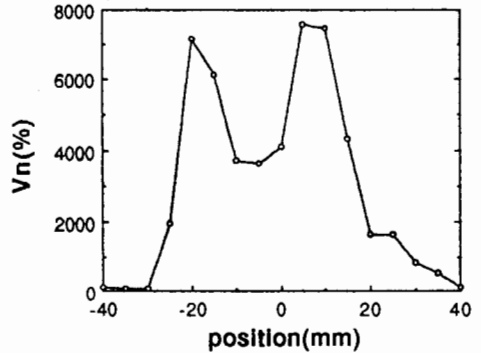


図3.1. e 平面型センサーによる欠損探査(センサーと金属の距離0mm)

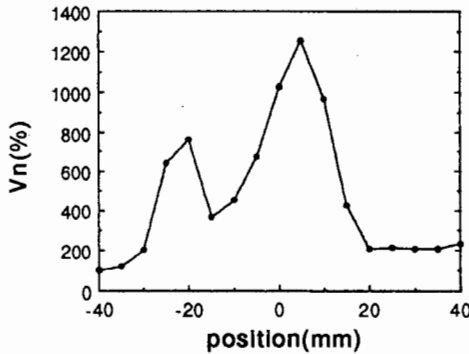


図3.1. f 平面型センサーによる欠損探査(センサーと金属の距離5mm)

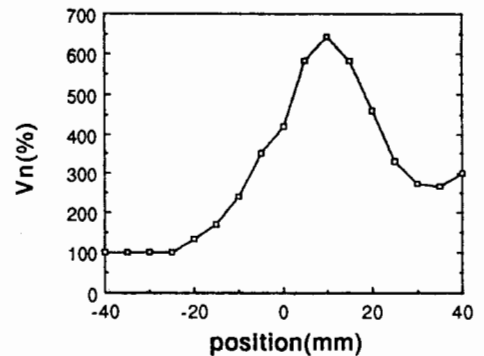


図3.1. g 平面型センサーによる欠損探査(センサーと金属の距離10mm)

### 3.2 金属のたわみセンシング

**3.2.1 たわみ量変化 (a) 実験方法** 図3.2. a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厚さ0.5mmの亚克力板を取り付けて、その上にセンサーを乗せている。センサーの固定する位置は縦積み型、平面型ともに探査が可能である $l=3\text{cm}$ にしてある。金属がたわんでない状態を $\Delta X=0$ とし、この $\Delta X=0$ のとき中性点電圧が0になるように電源を微調節する。そこから $\Delta X$ を増加し、金属のたわみ量に対する中性点電圧測

定を行なった。このたわみ量  $\Delta X$  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  $\Delta X$  よりもかなり小さい値であることに注意を要する。また、磁性体の珪素鋼板と非磁性体のアルミ板を金属試料として用い、その違いに対する変化についても比較検討を行った。周波数は1kHzで、電流は縦積み型は0.47A、平面型は0.20Aとした。

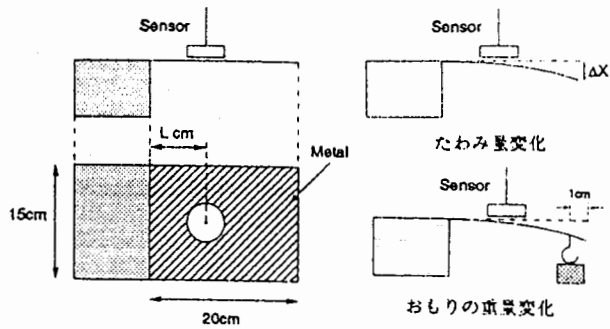


図3.2.a たわみ測定実験装置

(b) 結果 縦積み型センサーの磁性体・非磁性体金属たわみ量測定結果を図3.2.bに示す。磁性体は2次関数的に、導体は直線的にそれぞれたわみ量  $\Delta X$  に比例して増加している。平面型センサーの測定結果を図3.2.cに示す。図3.2.cから、磁性体は飽和特性を示し、今回測定した範囲においては、縦積み型の時と同様に非磁性体は磁性体と比較して感度が低下している。

今回の実験でセンサーと金属の間にアクリル板を挟んであるので、磁性体・非磁性体の両方の金属に対して、多相交流センサーによる非接触でのたわみ量変化測定が可能であるといえる。また、縦積み型、平面型センサーともに、今回測定したたわみ量の範囲では、磁性体が導体よりも感度が良かった。しかし、磁性体に対する縦積み型センサーの出力電圧は2次関数的に変化し、平面型センサーでは飽和特性を示すのに対して、非磁性体金属に対する出力電圧はたわみに対して線形に変化する。これは、磁性体と非磁性体で磁束分布が異なり、磁性体の方が磁束が集中するため感度が高くなるが、磁性体の磁化特性が感度に影響することに起因すると考えられる。

今回の結果から、多相交流センサーの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。

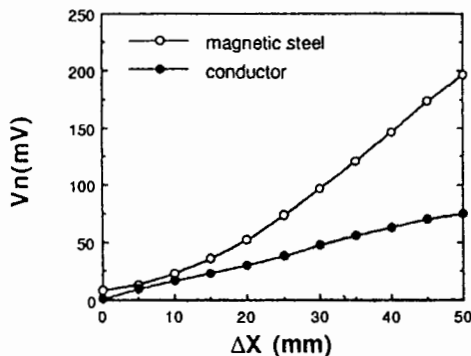


図3.2.b 縦積み型センサーによるたわみ量変化測定

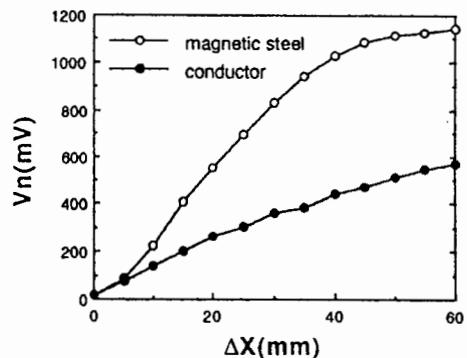


図3.2.c 平面型センサーによるたわみ量変化測定

3.2.2 おもりの重量変化 (a) 実験方法 図3.2.aに示す実験装置を用いて実験を行った。金属は自重ですでにたわんでいるので、このたわんでいる状態のおもりを0としたときに、中性点電圧が0に近づくように電源を調整する。金属端から1cmのところにおもりを吊し、このおもりの重量に対する中性点電圧の変化について測定した。金属は珪素鋼板、おもりは水を用い、センサーの位置を固定するために、先の実験と同じように金属とセンサーの間の $\Delta X=0$ の位置に厚さ0.5mmのアクリル板を取り付け固定し、縦積み型は $L=5\text{cm}$ 、平面型は $L=0\text{cm}$ の位置でそれぞれ測定を行った。周波数は1kHzで、電流は縦積み型は0.47A、平面型は0.20Aとした。

(b) 結果 図3.2.d.eにそれぞれ縦積み型、平面型センサーの測定結果を示す。縦積み型センサーはたわみ量変化の時とは異なり、おもりの重量に対して出力電圧は飽和特性を示す。平面型はおもりの重量に対してほぼ直線的な出力電圧の増加が見られる。いずれにしても、これらの出力電圧の値はおもりの重量に比例している。従って、中性点電圧からおもりの重量を決定することができ、多相交流センサーの重量測定への応用が可能であるといえる。

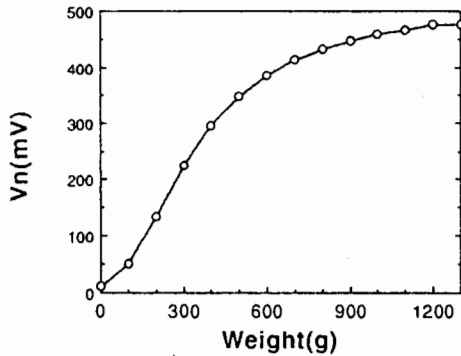


図3.2.d 縦積み型センサーによるおもりの重量変化測定

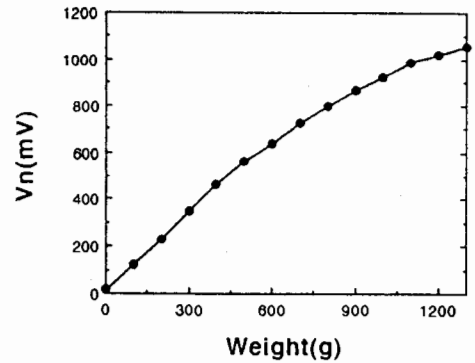


図3.2.e 平面型センサーによるおもりの重量変化測定

#### 4. まとめ

本稿では、非接触での探査が可能な多相交流センサーを提唱し、その中性点電圧を測定することで欠損の有無を探査可能であることを示した。さらに、実際に実験を行い、縦積み型・平面型センサーによる非接触での欠損探査が可能であることを証明し、金属のたわみ量測定、おもりの重量測定への応用も可能であることを実証した。このセンサーによる重量測定の利点は、情報が電気信号であるために伝達が早いことである。また、今回使用したセンサーではコイルの太さ、巻き数、印加電圧が異なるために一概にはどちらのセンサーが、欠損探査やたわみセンシングに適していると言うことはできないが、縦積み型、平面型それぞれの特徴を生かしての実用化が可能であると思われる。

最後に、この多相交流センサーは構造が簡単で、非接触での探査が可能であるので、単に欠損を探査するだけでなく、金属の位置、角度、歪、形状測定や金属のゆがみやねじれなどから、トルクや張力測定などの広範な応用が期待できる。

**【参考文献】**

- [1] I. Marinova, S. Hayano, N. Ishida, Y. Saito "Polyphase eddy current testing"  
J. Appl. Phys., Vol. 75, No. 10, May 1994, pp. 5904-5906
- [2] Y. Hiramata et al., "An application of DC magnetic fields to eddy current sensor"  
Simulation and Design of Applied Electromagnetic Systems, Elsevier  
Pub. Co. LTD., 1994, pp. 129-132

原稿受付日
-------

平成 6 年 7 月 25 日
-----------------