

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

Polyphase Magnetic Sensor

- Deflection, Position and Shape 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、エレベータ・エスカレータなど、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。これらの設備や装置の安全性確保のために金属材料の非破壊検査は極めて重要な技術である。また、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直接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、放射線の強さや取扱いに一定の基準が安全性の観点から課されているために制約がともなう。渦電流による方法は検査対象とセンサーが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おこなえる反面、渦電流の流れる方向によっては金属中の欠損を感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、出力が電気信号で得られるため、デジタル計算機でのデータ処理が容易であるなどの、他の非破壊検査法と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時間変化する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探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、渦電流探査感度は低下する。この問題点を解決する1方法として筆者らは多相交流渦電流法を提案した[1, 2]。多相交流渦電流法は、多相励磁コイルの各相コイルに面する検査対象で欠損の有無に起因して磁束分布の相違があり、その結果として生ずる不平衡電圧を利用する全く新しい原理に基づいている。多相交流渦電流法は従来型渦電流法に比較して原理的に感度が高く、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ーとして広範な応用が期待される。

2. 多相交流センサー

2. 1 動作原理

渦電流法の動作原理は、コイルに交流を通電し、コイルから生ずる交番磁界を金属に加えることで金属の表面に渦電流を発生させ、金属の表面に欠損が存在すれば、渦電流の経路が変わり結果としてコイルの入力インピーダンスが変化することに基づく。すなわちこのインピーダンスの変化から欠損を探索することが渦電流検査の基本原理となる。極めて簡単でしかも非接触での探索が可能であるため、高感度で高速に検査を行うことができ、金属の非破壊検査法として広範に用いられている。

これに対し、多相交流センサーは、多相交流回路において、電源と負荷共に星型結線し、電源および負荷が両者共に平衡している場合電源と負荷間の中性点電圧は存在しないが、負荷が不平衡の場合電源と負荷間の中性点電圧が存在することに基づく。すなわち各相励磁コイルが導電または磁性体材料に面しているとき、1相でも導電率また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存在する。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。これが多相交流磁気センサーの基本原理である。図1に三相交流磁気センサーの動作原理を示す。多相交流磁気センサーの構成は、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、励磁コイルを1次、検査対象を2次とする一種の多相変圧器として多相交流磁気センサーはみなし得る。多相変圧器は各相の磁路が独立である単相変圧器を相数分用いて構成する場合と、磁路を共通とする多相変圧器を用いる場合とがある。前者は磁路が独立であるため励磁コイル間に磁氣的結合がない。後者は磁路が共通であるため励磁コイル間の磁氣的結合が密である。多相交流磁気センサーは2次回路の不平衡度を1次回路の中性点電圧として検出する原理に基づくから、2次回路の不平衡性が1次回路にどのように反映するかを吟味する必要がある。単相変圧器を相数分用いた多相変圧器は、2次の負荷がそれぞれ1次側に独立に変圧比で換算される回路と考えられる。これは2次の不平衡性が1次に直接反映することを意味する。他方、磁路を共通とする多相変圧器における2次の不平衡性は零相分に相当する。このため、2次も星型結線とすれば、負荷の不平衡性に起因する2次中性点電圧は1次回路の中性点電圧に反映しない。従って、多相交流磁気センサーは励磁コイル間の磁氣的結合が弱いほど高感度となる。検査対象が非磁性体である場合、検査対象中に流れる渦電流を利用するから、多相交流センサーは渦電流法の一つと考えられる。検査対象が導電率の小さいフェライトなどの磁性体の場合、多相交流センサーは渦電流法と異なる。この意味で多相交流磁気センサーはより広範な磁気センサーである。

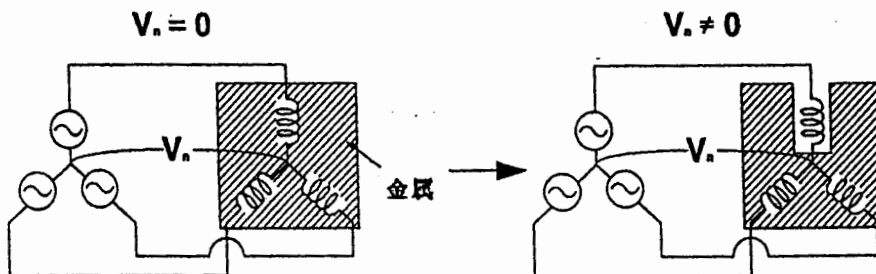


図1. 多相交流センサー動作原理

2. 2 欠損探査

2. 2. 1 実験方法 筆者等はすでに多相交流磁気センサーを用いて、センサーと金属を非接触にして欠損探査が可能であることを、また、たわみ量・おもりの重量測定への応用も可能であることを報告した [2]。これらの実験では、図2に示す縦積み型センサーと平面型センサーの2種類のセンサーを試作した。縦積み型センサーは各相コイルを巻線方向が同じになるように3段重ねたもので、平面型センサーは各相コイルを同一平面上に120°ずつずらして配置したものである。この2種類のセンサーを用いて図3 (a) に示す方法で実験を行った。センサーは珪素鋼板から常に5mm離れたところに位置する。珪素鋼板上には幅10mmの欠損が存在しており、センサーをまずこの欠損から十分離れた所に置き、中性点電圧が零に近づくように電源を調節した後、センサーを移動して欠損上を通過する際の中性点電圧を測定した。平面型センサーの場合は、進行方向によって感度が異なるので、図3 (b) に示す方向にセンサーを移動をした。また、周波数は1k Hz、電流は縦積み型が0.6A、平面型が0.2Aとした。

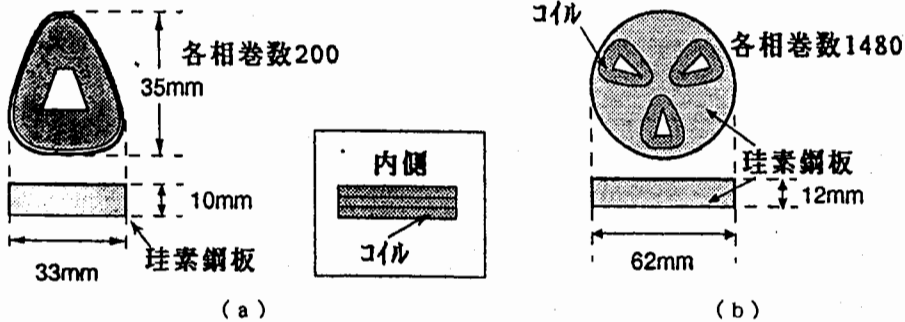


図2. 試作センサー構造 (a)縦積み型、(b)平面型

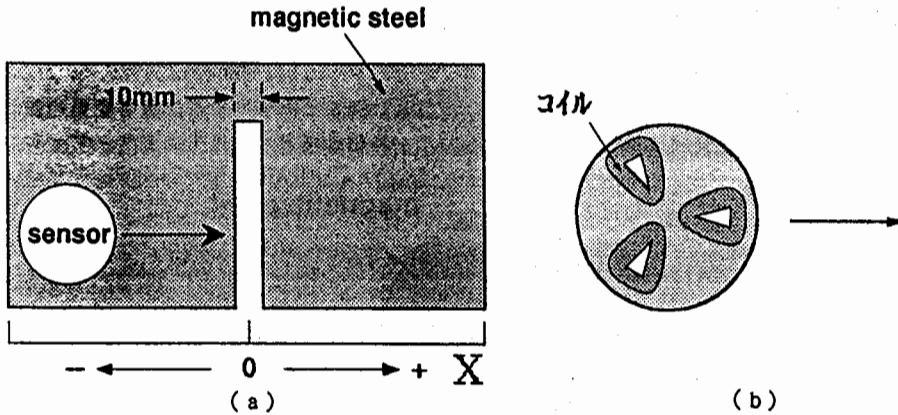


図3. 欠損探査 (a)実験装置、(b)平面型センサー進行向き

2. 2. 2 実験結果 実験結果を図4に示す。横軸はセンサーの中心から欠損の中心までの距離を表している。縦軸の中性点電圧を変化率で表しているのは、多相交流センサー自体は理論上、中性点電圧が零であるが、実際には零にならないため、電源を調節して中性点電圧を可能な限り零に近づけた。感度はこの中性点電圧に対する変化率で表さ

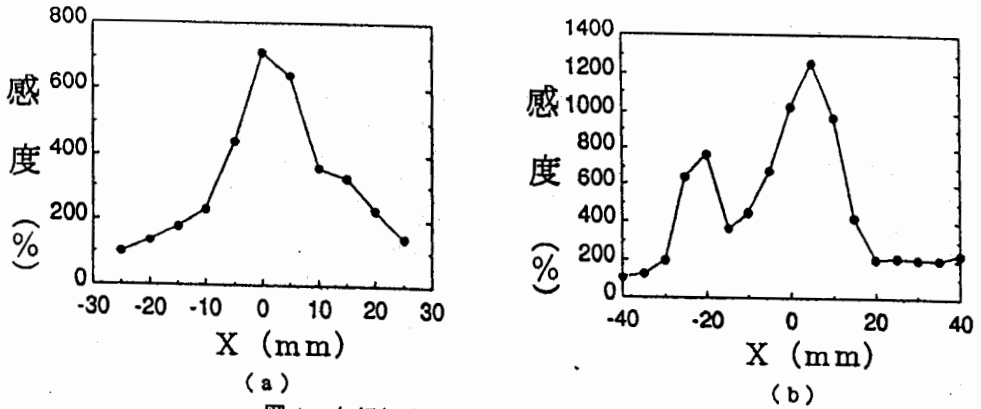


図4. 欠損探査実験結果 (a)縦積み型、(b)平面型

れることとなる。

図4 (a)が縦積み型センサーの測定結果である。縦積み型センサーの場合は、1欠損に対する中性点電圧変化のピークは1個だけになり、ピークはセンサーの中心が欠損の中心に位置するとき存在する。このピークは約700%の感度を示し、縦積み型センサーが非接触で欠損探査を可能とすることが証明された。図4 (b)は平面型センサーの測定結果である。縦積み型センサーが1個のピークが出ていたのに対して、平面型センサーの感度はピークが2個存在している。しかしながら、ピークの値は約1300%の感度となり、縦積み型センサーよりも2倍近く感度が高い。

以上の結果をまとめると、非接触での金属中の欠損探査において、縦積み型センサーは欠損の位置を容易に判定することができるが、励磁コイル間の磁氣的結合が強いため感度が低くなる。これに対し、平面型センサーは欠損の位置は判定しにくくなるが、縦積み型と比較して励磁コイル間の磁氣的結合が弱いため感度が高くなる。そこで我々は、この感度が高い平面型センサーを用いて、さらなる感度の向上、欠損位置、欠損形状の推定を目標に実験的研究を行った。

2.3 可動コイル型センサー

まず、平面型センサーの励磁コイル位置に注目し、図5に示すコイル位置を変更可能な可動コイル型多相交流磁気センサーを作成した。各相励磁コイルは平面型センサーと

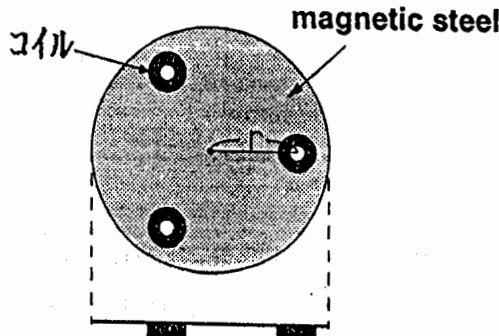


図5. 可動コイル型センサー構造

同様、同一平面上で空間的に120°ずつずらして配置しており、各相コイルの巻き数は1000回とした。

3. 実験

3.1 コイル間距離変化時の感度測定

3.1.1 実験方法 可動コイル型センサーを用いて、可動コイル型センサーのコイル間距離 r (センサーの中心から励磁コイルの中心点までの距離) およびセンサーと金属間距離 z に対する感度測定を行った。3個の励磁コイルはセンサーの中心からそれぞれ等距離に配置されている。この可動コイル型センサーを欠損探査実験と同様に、図3(a)に示す実験装置を用いて、珪素鋼板の欠損から十分離れている点に置き、中性点電圧を零に近づくよう設定した後、センサーを移動し、中性点電圧が最大値をとるセンサーの位置で測定を行った。同様の実験手順をコイル間距離 r 、センサーコイルと対象間の距離 z を変化させて繰り返して測定を行った。なお、励磁周波数は1kHz、電流は0.2Aとした。

3.1.2 実験結果 コイル間距離 r を変化したときのセンサーと金属間距離 z に対する測定結果を図6(a)に、センサーと金属間距離 z を変化したときのコイル間距離

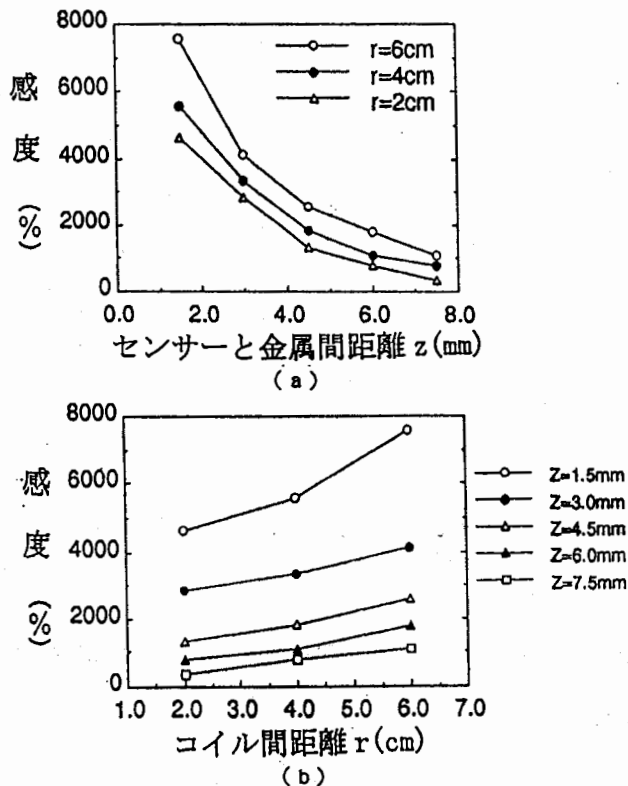


図6. 感度測定 (a)センサーと金属間距離 z に対する感度特性、(b)コイル間距離 r に対する感度特性

r に対する測定結果を図6 (b) に示す。図6 (a) から感度はセンサーと金属間距離 z に対して反比例している。これは当然の結果といえるが、図6 (b) からはコイル間距離 r を大きくすることで、感度は2次関数的に増加することがわかる。これは、多相交流センサーの動作原理で説明したように、コイル間距離 r を大きくすることでコイル間の磁氣的結合が弱くなっているためであると考えられる。

3.2 欠損位置推定

3.2.1 実験方法 感度測定の実験結果からコイル間距離 r が大きくなると感度も向上することがわかった。ここでは可動コイル型センサーのコイル間距離 r を変化させて欠損の位置を推定する。まず、可動コイル型センサーのコイル間距離を $r=6\text{cm}$ の最大とし、センサーを進行方向に 1cm ずつ移動した。各位置でセンサーを 15° ずつ $0\sim 105^\circ$ まで回転させ、それぞれの角度で中性点電圧を測定し、平均値を算出した。次に、得られた平均値の結果をもとに欠損のある位置を特定し、コイル間距離 $r=2\text{cm}$ の最小として前述と同様な測定を行った。但し、移動間隔は 5mm とした。センサーと金属間距離、励磁周波数および電流はそれぞれ、 3mm 、 1kHz 、 0.2A とし、検査対象は図3 (a) の珪素鋼板である。

3.2.2 実験結果 図7 (a)、(b) にコイル間距離を $r=6\text{cm}$ 、 2cm としたときの測定結果を示す。図7 (a) でピークは $60\sim 200\text{mm}$ 間に存在し、この値はセンサーの中心の位置を表しているので、センサーの中心からコイルの中心までの距離を考慮すると欠損は $90\sim 170\text{mm}$ に位置していると言える。この結果をもとにコイル間距離を $r=2\text{cm}$ として $90\sim 170\text{mm}$ 間を測定した。その結果を図7 (b) に示す。図7 (b) から $125\sim 130\text{mm}$ を軸に左右対称なピークが $100\sim 155\text{mm}$ 間に存在する。この結果にセンサーとコイルの距離を考慮すると、欠損は $110\sim 145\text{mm}$ 間に存在することがわかる。これだけの実験では欠損の形状を推定することは不可能であるが、 $110\sim 145\text{mm}$ 間に存在するという結果を用いて、欠損の形状を推定する。

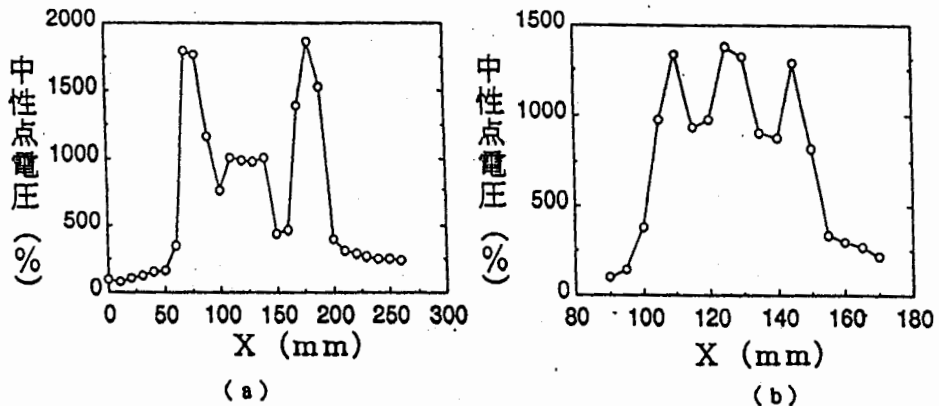


図7. 欠損位置推定 (a)コイル間距離 $r=6\text{cm}$ 、(b)コイル間距離 $r=2\text{cm}$

3.3 形状推定

3.3.1 推定方法 3.2.2節の結果から、欠損の存在する位置を $110\sim 145\text{mm}$ 間と絞ることができたが、この結果をもとに欠損の形状および正確な位置を特定化すること

を考える。3.2.1節で $r=6\text{cm}$ として行った実験を図8に示すように、欠損が存在すると推定される範囲の中心130mmの位置を軸に、センサーの進行する角度を $+30^\circ$ 、 -30° として繰り返す。このとき、測定された感度の中で中性点電圧が特に大きかったとき、すなわちコイルの中心が欠損上に位置しているときの3個のコイルが置かれている位置を座標軸にプロットすることで欠損形状を推定する。

3.3.2 実験結果 3.2.2節の結果で、110~145mm間に欠損が存在するという結果を考慮してプロットした結果を図9に示す。この結果から、これらのプロットした点は125~135mmの間に集中していると言え、縦長に分布しているのほぼ実際の欠損の形状を特定化することができた。今回の実験ではセンサーの回転角度を 15° ずつとしたが、この回転の間隔を特定せずに、回転しながら常に中性点電圧の大きかった範囲を記録すれば、より明確に欠損の形状を推定できる。

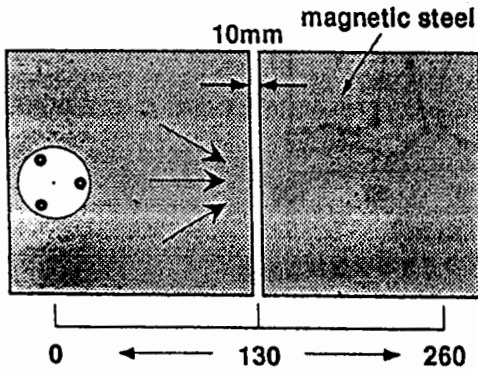


図8. 欠損形状判定実験装置

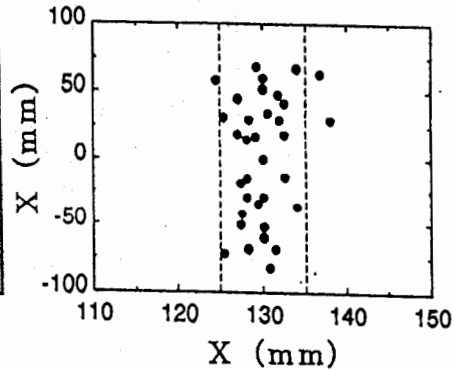


図9. 欠損形状判定プロット結果

3.4 感度の向上

3.4.1 実験方法 コイル間距離を変更した場合の感度測定結果から、コイル間距離が大きいほど感度が高いことがわかった。そこで図10に示すように、3相交流センサー2個の励磁コイルを探查対象金属と同じ材料で覆うことにより、実質上コイル間距離を無限大にしたときと同じ状態にセンサーを設定した。このセンサーを用いて、幅10mmの欠損上をセンサーが通過するときの中性点電圧測定を行った。このときのセンサーと金属間距離は3mm、励磁周波数は1kHz、電流は0.2Aで行った。

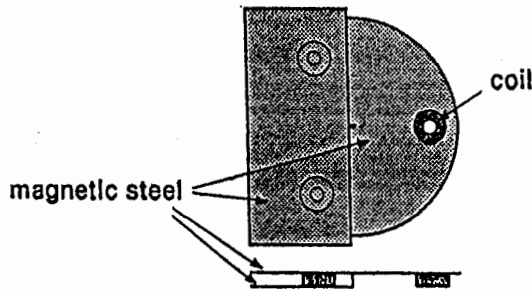


図10. コイル間距離を実質的に無限大にしたセンサー

3.4.2 実験結果 実験結果を図11に示す。コイル間距離が有限、つまり3個の励磁コイルで測定したときより、わずかではあるがコイル間距離を無限大とした方が感度は高くなっている。また、 $r=6\text{cm}$ のときは3個のコイルで探査を行っているために、3個のうちのいずれの励磁コイルが欠損上に位置しているのかを特定することが不可能だった。しかし、励磁コイル間距離を無限大としたとき、励磁コイル1個で探査しているため欠損の位置を容易に特定化することができる。よって、この結果から、コイル間距離を無限大にすることで、感度は最大値になり、欠損の位置を特定化することも容易であることがわかった。

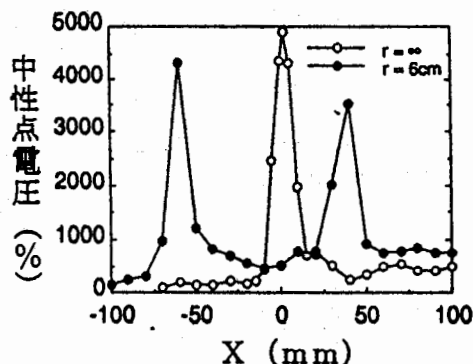


図11. コイル間距離を無限大のときの欠損探査結果

4. まとめ

本研究は多相交流磁気センサーの感度の向上、欠損の位置・形状の推定に関するものである。3相の励磁コイルを同一平面上に配置する平面型センサーの場合、コイル間距離を大きくすることによってコイル間の磁氣的結合が弱くなり、感度が高くなることが判明した。これを欠損探査に応用することで欠損の位置と形状を推定できることも実証された。その手順を概略すると、可動コイル型センサーを用いて、最初はコイル間距離が大きい状態で探査し、欠損の有無を探査する。次にセンサーを回転しながら中性点電圧を測定し、欠損が存在すると思われる範囲を絞り込み、コイル間距離を小さくしていき作業を繰り返す。最終的な欠損位置を絞った後、センサーを回転しながら中性点電圧が大きい時点の励磁コイルの位置を記録すれば、明確に欠損の形状を探査することができる。また、このような方法のほかにもコイル間距離を無限大、つまり多相交流センサーのコイル1個を残し、他のコイルすべてを探査金属と同じ材料で覆うことによって感度は最高値となり、位置・形状を容易に推定できることも実証された。

【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] 亀澤高志、早野誠治、斎藤兆古、"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 平成6年9月 資料MAG-94-116

| | |
|-------|-----------|
| 原稿受付日 | 平成7年2月10日 |
|-------|-----------|