

第2章 偏位式回転磁束型磁気センサ

第2.1節 緒言

現在、非破壊検査用に広く用いられている渦電流探傷用磁気センサは、被検査材中により大きい渦電流を流すことや大きな欠陥検出信号を得るために比較的高い励磁周波数（数十 kHz から数百 kHz 程度）を用いている^[7-8]。このため、被検査材が肉厚のものであっても渦電流は、表皮効果の影響で被検査材の表面近傍を流れ、欠陥が被検査材の中や裏側にある場合には欠陥検出信号を得ることができない。そこで、渦電流探傷用磁気センサを用いる場合は、検査対象を被検査材の表面に存在する欠陥に限定するか、被検査材中、あるいは被検査材の裏面に存在する欠陥も対象とする場合は、表皮効果の影響を無視できる薄板とせざるを得ない。このような理由から渦電流探傷法の対象となる被検査材の肉厚は、非磁性体においては、1ないし2 mm 程度以下となる^[7-8]。さらに、検査対象が強磁性体では、表皮効果がより顕著になることからさらに肉厚の薄いものに限られることになる。また、従来の渦電流探傷用磁気センサは、欠陥検出信号を励磁コイルのインピーダンスの変化として捕らえる形式が多くなっている。そこで、インピーダンスの変化をその実部と虚部に分離して測定を行うこと^[33-34, 40]や信号検出用のコイルを別に設けるなどの工夫を行い^[35-36]欠陥検出信号の多様化を図っている。しかし、欠陥検出信号に含まれる欠陥に関する情報量には限りがあり、これ以上の増加は望めない状況にある。これは、欠陥の属性を短時間に明らかにする場合に大きな障害となっている。以上のような理由から従来の渦電流探傷法では、肉厚金属板の中や裏側に存在する欠陥はその対象とされていない場合が多かった^[12]。

しかし、磁気を用いる探傷法は、磁気センサの構造が簡単で取り扱いが容易であり小型軽量の磁気センサが製作できることや、磁気センサを駆動し欠陥検出信号を処理する測定システムも電子回路とコンピュータを統合化した形で比較的簡単に構築できることからその存在意義は大きいものがある^[5-9]。そこで、実用上多くの利点を持った磁気を用いる非破壊検査用センサを、肉厚金属板の中や裏側に存在する欠陥にも対応した磁気センサとして開発することは重要なことである。また、発電プラントの配管の検査などの目的で使用される磁気センサは、経済的観点から短時間になるべく多くの欠陥に関する情報を収集する必要がある^[5]。本章では、肉厚金属板の中や裏側に存在する欠陥に対応した磁気センサの一つの形式である偏位式回転磁束型磁気センサについてその構造や欠陥検出特性について示し、その有用性を明らかにする。

まず、第2.2節では、小型軽量の磁気センサでありながら肉厚軟鋼板裏側欠陥の確実な探傷とより多くの欠陥に関する情報収集を目指して開発した空心型磁気センサ（アモルファスコア入り3軸サーチコイルを備えた空心励磁式回転磁束型磁気センサ）の有用性を明らかにする^[16-17]。また、励磁系を多少大きめに設計し各種の欠陥検出用コイルを選択使用できることや強力な印加磁界による欠陥検出信号の高出力化を目的に開発したU字鉄心型磁気センサ（欠陥検出用コイルの違いによって3種に分けられるU字鉄心励磁式回転磁束型磁気センサ）の有効性についても明らかにする^[19]。さらに、独自に新しく開発した被検査材表面近傍の磁束密度の分布をXYあるいはXYZ方向に分離して検出することのできる欠陥検出用コイル（3軸サーチコイルや2軸ピ

ックアップコイル) は、欠陥の情報を多く得ることができるという利点があることを示す。また、欠陥検出用コイルからの XY の 2 軸方向の信号を利用したリサージュ波形を用いた欠陥判定法が回転磁束型磁気センサと 3 軸サーチコイルの組み合わせが欠陥の情報を多く得ることができるという特徴を利用した有効な欠陥検出法であることを示す^[10-11, 16-17]。第 2. 3 節では、欠陥検出信号と雑音の比である SN 比を用いて軟鋼板裏側欠陥を対象にした磁気センサを比較した結果を示し、磁気センサを用いて微小な欠陥を検出する際には磁気センサの高 SN 比化が重要であることを明らかにする^[81-82]。第 2. 4 節では、低い励磁周波数でありながら弱磁性体 (あるいは非磁性体) である肉厚ステンレス板裏側の欠陥を対象とし、欠陥形状の判定を目的とした鉄心入り蝶型磁気センサ (空心 3 軸サーチコイルを備えた軟鉄鉄心励磁式回転磁束型磁気センサ) の有用性を示す^[20-21]。また、この節では、回転磁束型磁気センサだけから得られる欠陥検出信号を利用した欠陥形状評価指標を定義し、この欠陥形状評価指標が欠陥形状の評価に有効であることを示す。最後に、第 2. 5 節で、この章で得られた成果を要約する。

第 2. 2 節 肉厚軟鋼板裏側欠陥の磁気探傷

2. 2. 1 概要

この節では、肉厚軟鋼板裏側に存在する溝型欠陥の確実な検出を目指して開発した 2 種類の偏位式回転磁束型磁気センサであるアモルファスコア入り 3 軸サーチコイルを備えた空心励磁式回転磁束型磁気センサ^[16-18]（以後、空心蝶型磁気センサと呼ぶ。）と欠陥検出用コイルの違いによって 3 種に分けられる U 字鉄心励磁式回転磁束型磁気センサ^[19]（以後、U 字鉄心型磁気センサと呼ぶ。）について、その構造や欠陥検出機構、欠陥検出特性などを実験や数値解析の結果から明らかにする。また、回転磁束型磁気センサを特徴づける XY 2 軸の欠陥信号を利用したリサージュ波形による欠陥判定法についてもその有用性を明らかにし、リサージュ波形から得られるパラメータを利用した欠陥属性の判定例を示す。さらに、実験に用いた軟鋼板試料や実験装置、実験方法を示す。

2. 2. 2 軟鋼板用偏位式磁気センサの構造

(1) 空心蝶型磁気センサの構造

空心蝶型磁気センサは、旧型の回転磁束型磁気センサ^[9-11]の利点を受け継ぎながら、小型軽量で軟鋼板裏側に存在する欠陥に対して高感度な非破壊検査用磁気センサを目指して開発したものである。空心蝶型磁気センサは、励磁コイルの寸法や巻き数、Z 軸サーチコイルの巻き数を変えたものを 2 種類製作した。励磁コイルの寸法や巻き数を変えた理由は、印加磁束密度の違いによる欠陥検出特性の変化をみるためであり、Z 軸サーチコイルの巻き数を変えた理由は、巻き数の違いによる出力信号の違いを確認するためである。励磁コイルの巻き数の少ないものを No. 1^[16]とし、多いものを No. 2^[17]とする。Fig. 2-1 に空心蝶型磁気センサ (No. 1) の構造を、Fig. 2-2 にこれと組み合わせた 3 軸サーチコイルの構造を示す。さらに、Fig. 2-3 に空心蝶型磁気センサ (No. 2) の構造を示し、Fig. 2-4 にこれと組み合わせた 3 軸サーチコイルの構造を示す。2 種の空心蝶型磁気センサは、基本構造が同じなので欠陥検出特性などの傾向はほぼ同じである。ここでは励磁コイルの巻き数の多い No. 2 の空心蝶型磁気センサについて詳細に説明する。以後、特別に記述しない限り空心蝶型磁気センサといえ、No. 2 の空心蝶型磁気センサを指すこととする。なお、No. 1 の空心蝶型磁気センサについては、第 2. 3 節で、基本的な欠陥基検出特性の一部について示す。

Fig. 2-5 に空心蝶型磁気センサの被検査材と接する面から見た写真を示し、Fig. 2-6 に 3 軸サーチコイルの外観の写真を示す。この磁気センサは、10 mm 厚の亚克力板を NC 工作機械を使用して加工されている。そのため、各コイルの相対位置関係などは、極めて正確である。磁気センサ全体の外形寸法は 42 mm x 42 mm x 10 mm である。2 組の励磁コイルは、相対するコイルを 1 組とし直交するように配置している。一つの励磁コイルの形状は、外径 14 mm、内径 8 mm、高さ 9 mm の円筒形で、小型軽量化するために空心としている。また、励磁コイルの巻棒は、20 mm 径の亚克力棒から旋盤加工で製作された。この励磁コイルは、90 度位相差を持った 2 相電流で励磁

され被検査材中に回転磁界を作る。それぞれの励磁コイルは、0.35 mm 径のホルマル線を140回巻いている。励磁コイルと被検査材との距離（以後、リフトオフと呼ぶ。）は、0.5 mm である。

(2) 空心蝶型磁気センサに用いた3軸サーチコイルの構造

本方式の磁気センサは、その構造上、被検査材中の励磁コイルの中心部付近にほぼ均等な回転磁界が発生する。励磁コイルの中心部の被検査材に近接した位置に欠陥信号検出用の素子を設置すれば、回転磁界を用いることの利点を最大限に利用できる。また、被検査材表面近傍の磁束の分布は、欠陥の有無や回転磁界の位相などによって変化する。被検査材面上をXY方向とし、被検査材に垂直な方向をZ方向とすると、励磁磁界が回転磁界であるため欠陥信号検出用の素子が設置されている被検査材表面近傍の磁束は、XY方向成分を持っている。さらに、この磁束のXY方向成分は、励磁磁界の位相に従って回転する。また、欠陥による磁束分布の偏りや被検査材中に誘起される渦電流によって被検査材表面近傍の磁束は、Z方向成分も発生する。そこで、励磁コイルの中心部で被検査材表面近傍の磁束の水平方向成分と垂直方向成分を同時に検出する欠陥信号検出用の素子として3軸サーチコイルを新たに考案した^[18]。さらに、3軸サーチコイルのような欠陥信号検出用の素子を別途用意すると、大きな励磁磁束が欠陥信号検出用の素子を通過しない。よって、欠陥信号検出用の素子を通過する磁束のより微小な変化を検出することができる。

以上のように、3軸のサーチコイルは、欠陥に起因する被検査材表面近傍の磁束の変化をXYZの3方向に分けて捉えることを目的に考案した。これによって、被検査材表面近傍の磁束の変化をベクトル的に捉えることができ、回転磁束型磁気センサに「欠陥からの多くの情報を得ることができる」という特徴を加えることができた。一方、3軸サーチコイルは、励磁コイルの中央に被検査材に接するように配置されている。しかし、実際のサーチコイルは、巻枠が必要なことや物理的なコイルの配置の関係で必ずしも磁気センサの底面に接してはいない。Z軸のサーチコイルの巻枠は、厚さ0.2 mmの塩ビ板で作成されているため、0.2 mmだけ被検査材とは離れている。また、XY軸のサーチコイルは、Z軸のサーチコイルの上部に配置されているため、センサの底面とは、1 mmの距離がある。

各方向のサーチコイルの諸元は次のとおりである。XY方向のサーチコイルは、中央にアモルファスのコアが入る切り抜きを設けている1 mm厚の塩ビ板の巻枠に互いに直交するように巻いている。また、寸法は、コイル部の外形8 mm x 8 mm x 3 mmであり、0.04 mm径のウレメット線をそれぞれ700回巻いている。さらに、XY方向の巻線には、大きな出力信号を得るために、アモルファスコア（7 mm x 7 mm x 1 mm、比透磁率30,000以上）を内蔵している。Z方向のサーチコイルは、外径10 mm、内径6 mm、厚さ0.6 mmのパンケーキ型のコイルで、0.04 mm径のウレメット線を300回巻いている。サーチコイルのコイルは、その複雑かつ微細な構造から手巻で行わざるを得なかった。そのため、コイルの均一さや寸法は、充分注意して巻いたにも関わらず多少の誤差が出たが、欠陥の検出には支障のない事を確認している。Fig. 2-6に示すように、3軸サーチコイルは、巻線保護のためにエポキシ樹脂でコーティングしている。

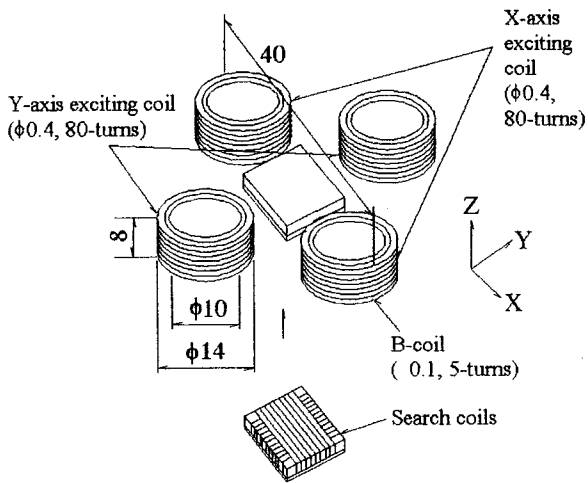


Fig. 2-1 Structure of the magnetic sensor.(No. 1)

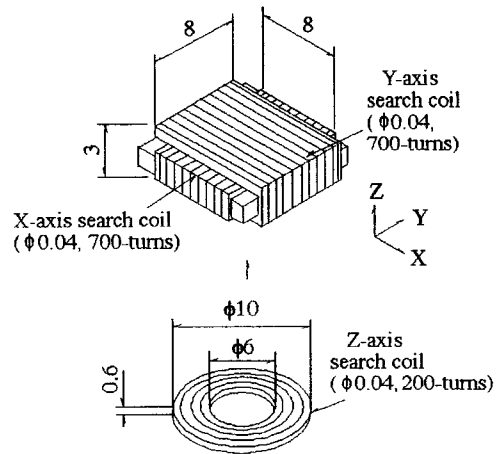


Fig. 2-2 Structure of the three axis search coil(No. 1).

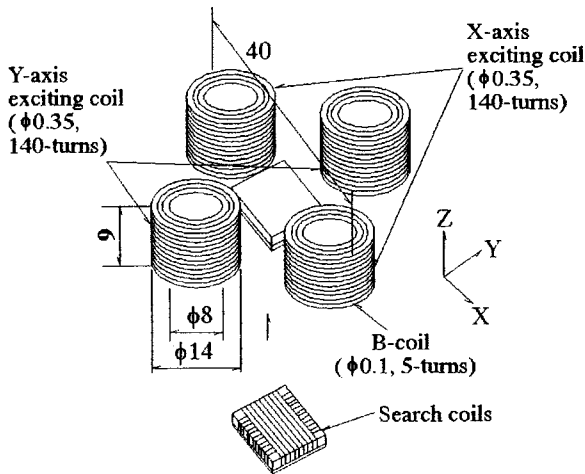


Fig. 2-3 Structure of the magnetic sensor(No. 2).

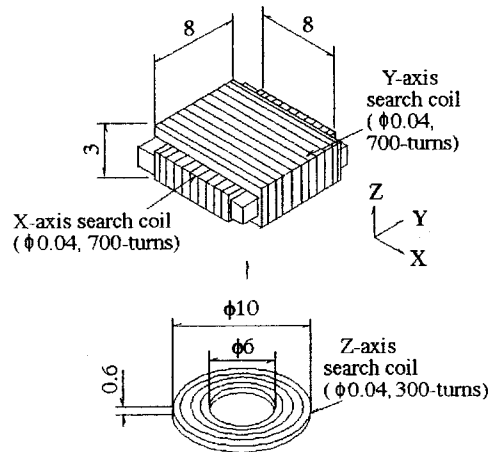


Fig. 2-4 Structure of the three axis search coil(No. 2).

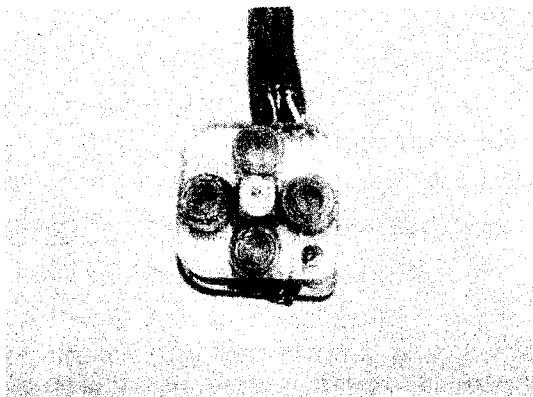


Fig. 2-5 Photograph of the magnetic sensor(No. 2).

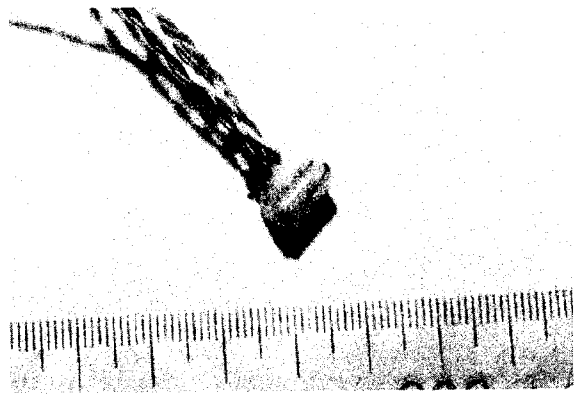


Fig. 2-6 Photograph of the three axis search coil(No.2).

(3) U字鉄心型磁気センサの構造

U字鉄心励磁式回転磁束型磁気センサ（以後、U字鉄心型磁気センサと呼ぶ。）は、励磁系を多少大きめに設計し各種の欠陥検出用コイルを選択使用できるようにすることや、励磁系にけい素鋼板製のU字型のヨークを用い、励磁系の磁気回路を閉回路とすることで得られる強力な印加磁界による欠陥検出信号の高出力化を目的に開発した。励磁系を大きめに設計したことにより回転磁界が発生する領域を広げることができた。また、励磁系が大きくなったことよって被検査材中の励磁磁束の分布が被検査材に対して垂直方向に均一性を増した。これは、磁束が被検査材裏側までほぼ均一に到達することを意味し、被検査材裏側に存在する微小欠陥を検出する際に有利となった。さらに、励磁系を大きくしたことによりサーチコイルを格納する部分に余裕ができ、サーチコイルの交換によって各種形式の欠陥検出用の素子の比較検討が可能になった。

一方、この磁気センサでは欠陥からの信号を検出する役割を持った欠陥検出用の素子を2種類用意し、励磁系の中心部に配置した。励磁用磁気回路をU字型に加工したけい素鋼板製ヨークと強磁性体の被検査材で構成し閉回路としたことと欠陥検出用の素子を分離したことによって、欠陥を検出する際に有害な欠陥と関係ない部分を通過し、サーチコイルと直接鎖交する磁束を減らしながら大きな印加磁束を実現した。また、欠陥がない場合のサーチコイルの出力電圧が減少し、欠陥がある場合の出力電圧との差が大きくなった。さらに、U字鉄心型磁気センサは、励磁により励磁ヨークと被検査材の間に吸引力が発生するため励磁ヨークが被検査材に自己密着する性質があるのでリフトオフが安定する利点が認められた。

Fig. 2-7にU字型磁気センサの構造を示す^[19]。2組の励磁ヨークは、直交するように配置した。Fig. 2-8にU字型磁気センサの外観の写真を示す。この磁気センサの励磁ヨークは、0.35 mm厚のけい素鋼板から、放電加工機を使用して切り出したU字型鉄心を110枚積層した。このような形式で2組の励磁系をXY方向に組み合わせると、励磁系の磁路長に差が生じ両方の励磁電流を同じとすると印加磁束密度が異なることになる。この印加磁束密度の差は、各方向の励磁電流をプログラムを工夫することによって調整している。励磁コイルは、塩ビ板で作った巻枠に0.5 mm径のホルマル線を各88回巻いた。各励磁系やサーチコイルの位置関係を決定するセンサの基板は、NC工作機械を使用して正確に製作された。リフトオフは、0.12 mmである。また、欠陥検出素子の直径は、20 mmとし、励磁系の中央に被検査材とのリフトオフが励磁ヨークのリフトオフと等しくなるように配置した。

(4) U字鉄心型磁気センサに用いた欠陥検出素子の構造

U字型磁気センサのために2種類の欠陥検出素子を用意した。第一の欠陥検出素子は、U字型磁気センサの広がった欠陥検出素子収納部を有効に利用するように空心蝶型磁気センサに使用した3軸サーチコイルを改造した3軸サーチコイル^[19]である。第二の欠陥検出素子は、欠陥が存在することにより変化する被検査材表面の漏れ磁束を積極的に検出できるように考案した、高透磁率材料でできたコの字型コアを持つ2軸ピックアップコイル^[81-82]である。Fig. 2-9に新型3軸サーチコイル、Fig. 2-10に2軸ピックアップコイルの構造図をそれぞれ示す。

U字鉄心型磁気センサ用の3軸サーチコイルは、寸法的に空心蝶型磁気センサに用いた3軸サーチコイルに比べて余裕があることから、XY軸のサーチコイルをできる限

り被検査材に近づけることと、Z軸のサーチコイルの巻き数をできるだけ多くし出力を大きくすることを目的に製作した。

XY軸のサーチコイルは、空心蝶型磁気センサに用いたサーチコイルと同様の構造、大きさである。寸法は、コイル部の外形8 mm x 8 mm x 3 mmで0.04 mm径のウレメット線をそれぞれ700回巻いている。さらに、XY方向の巻線には、アモルファスコア(7 mm x 7 mm x 1 mm)を内蔵している。XY軸のサーチコイルは、Z軸サーチコイル中央部の0.5 mm厚の塩ビ板の上に配置している。また、Z方向のサーチコイルは、外径20 mm、内径15 mm、厚さ3 mmのドーナツ型のコイルで、0.04 mm径のウレメット線を2200回巻いている。巻枠は、20 mm径の亚克力棒から旋盤加工で製作した。Z軸のサーチコイルは、磁気センサの底面と0.5 mm離れている。実験結果から空心蝶型磁気センサに用いたZ軸サーチコイルと比較すると、このZ軸サーチコイルは、巻き数が増加した関係で出力電圧は増加したが、外形寸法が大きくなった分だけ欠陥に対する位置分解能は低下した。また、外径が大きいため被検査材中の渦電流との位置関係が変化したことや、励磁系の漏れ磁束が減少したために出力特性も大きく変化し、V字特性を示すようになった。Fig. 2-11(a)にリード線を接続する前の新型3軸サーチコイルを、Fig. 2-11(b)にアセンブル終了後の写真を示す。

次に、漏れ磁束の積極的な検出を目指して開発した2軸ピックアップコイルを説明する。きわめて小さいコ字型のコア(Fig. 2-10参照。無方向性けい素鋼板H-18の2枚重ね。厚さ0.5 mm。)に0.04 mm径のウレメット線を300回巻いたピックアップコイルをXYの各方向に2個並べて配置したものである。このピックアップコイルは、高透磁率のけい素鋼板で作成した磁気ヘッド様のコ字型のコアを持ち被検査材と近接させることにより、欠陥によって漏れ出す磁束を積極的に捕らえことができるようにしたものである。また、各軸2組のピックアップコイルの接続を外部で変えることにより和動接続と差動接続にすることができる。Fig. 2-12(a)にリード線を接続する前の2軸ピックアップコイルを、Fig. 2-12(b)にアセンブル終了後の写真を示す。

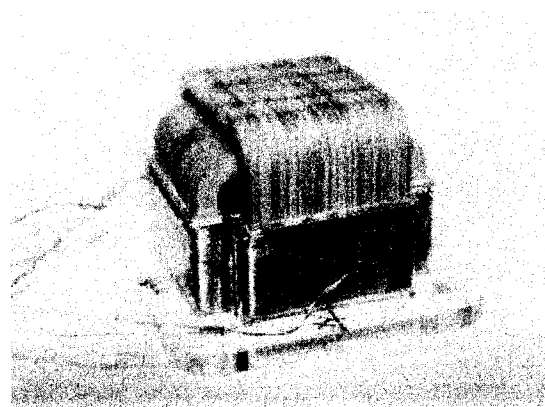
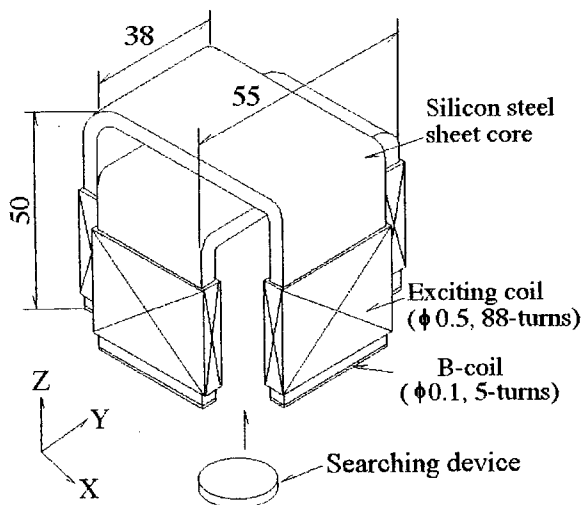


Fig. 2-7 Structure of the magnetic sensor. Fig. 2-8 Photograph of the magnetic sensor.

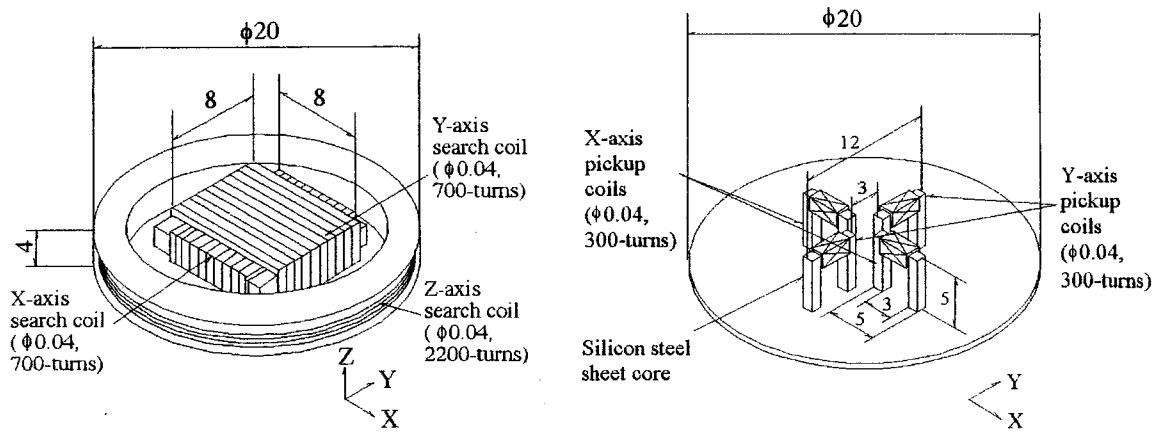


Fig. 2-9 Detail of the three axis search coil. Fig. 2-10 Detail of the two axis pickup coil.

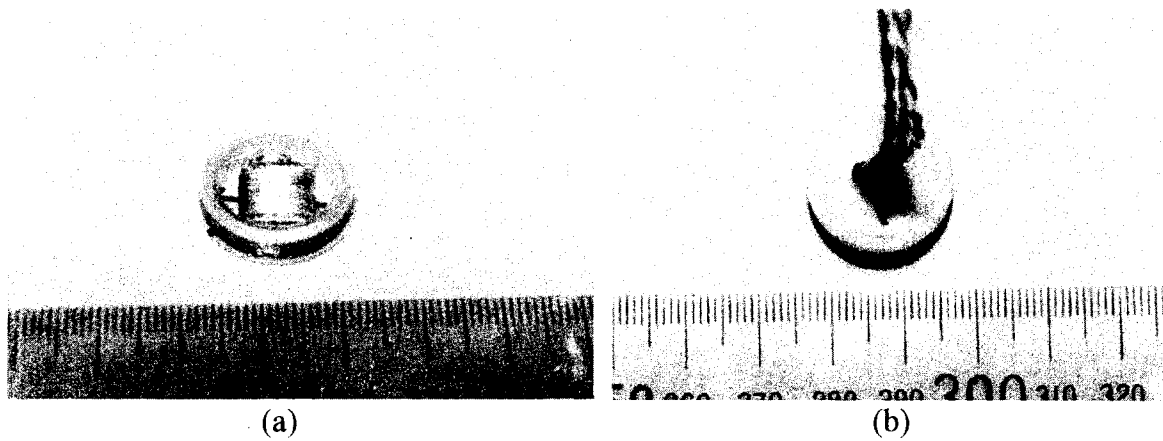


Fig. 2-11 Photograph of the three axis search coil.

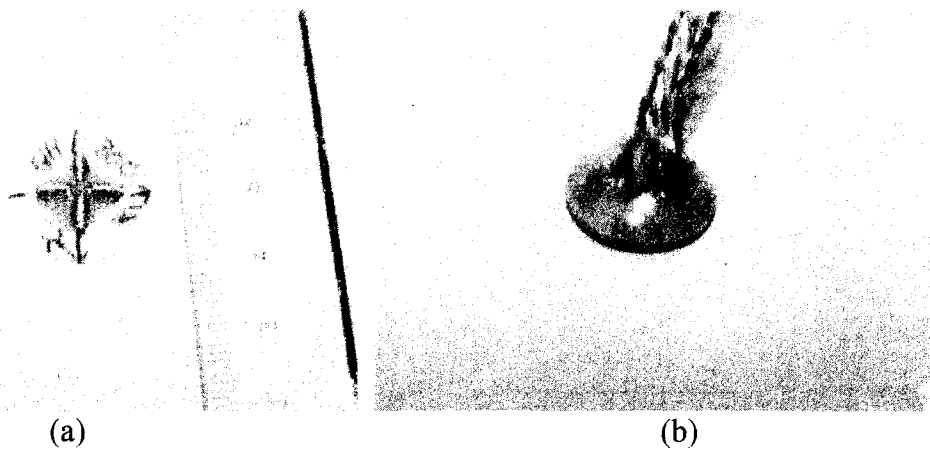


Fig. 2-12 Photograph of the two axis pickup coil.

2. 2. 3 リサージュ波形による欠陥判定

この新しい磁気センサは、回転磁界を用い欠陥からの情報がベクトルの的に得られる3軸のサーチコイルを使用しているため、欠陥の判定のためには、欠陥によって乱される磁束密度の大きさの変化と位相関係の変化を合わせて評価することが重要である。そこで、我々は、 B_x と B_y で書いたリサージュ波形の軸比 α (Axis ratio, 短軸長/長軸長)と傾き角 θ (Inclination angle of major axis [Major axis angle], 長軸とX軸のなす角)を用いて欠陥を評価する方法を考案した^[9-11, 16-18]。Fig. 2-13にリサージュ波形の軸比 α と傾き角 θ の関係を示す。この B_x 、 B_y で書かれるリサージュ波形は、以下に示すように磁束密度の大きさの情報と位相関係の情報を同時に評価することができる。

X, Y軸のサーチコイルから得られる B_x 、 B_y で書かれるリサージュ波形の式を、

$$\begin{aligned} x &= a \sin(\omega t) \\ y &= b \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (2-1)$$

とおくと、波形上の点Pと原点との間の距離 r は、次のように表される。ただし、 B_x 、 B_y との対応をつければ、 $x = B_x$ 、 $y = B_y$ 、 $a = B_{x\max}$ 、 $b = B_{y\max}$ 、 $\varphi =$ 位相差である。 r を原点とリサージュ上の点との距離とすると、 r は、(2-2)式のように表される。

$$r = \sqrt{\left\{a \sin(\omega t)\right\}^2 + \left\{b \sin(\omega t + \varphi)\right\}^2} \quad (2-2)$$

軸比 $\alpha (= r_{\min} / r_{\max})$ を求めるために r_{\max} と r_{\min} を求める。

$$\frac{dr}{dt} = \frac{2\omega a \sin(\omega t)\cos(\omega t) + 2\omega b \sin(\omega t + \varphi)\cos(\omega t + \varphi)}{2\sqrt{\left\{a \sin(\omega t)\right\}^2 + \left\{b \sin(\omega t + \varphi)\right\}^2}} \quad (2-3)$$

ここで、(2-3)式の分母は $\varphi \neq 0$ なので0となる事はない。よって、分子=0となる点が極値(r_{\max} 、 r_{\min})である。

$$a \sin(\omega t)\cos(\omega t) + b \sin(\omega t + \varphi)\cos(\omega t + \varphi) = 0 \quad (2-4)$$

(2-4)式を変形して、

$$\sqrt{\left\{a + b \cos(2\varphi)\right\}^2 + \left\{b \sin(2\varphi)\right\}^2} \cdot \sin(2\omega t + \varphi) = 0 \quad (2-5)$$

$$\text{ただし、} \quad \psi = \tan^{-1} \frac{b \sin(2\varphi)}{a + b \cos(2\varphi)} \quad (2-6)$$

ここで、 $2\omega t + \psi = 0$ のときと $2\omega t + \psi = \pi$ のときに(2-5)式は、0となり極値をとる。

(2-5)式の増減より $2\omega t + \psi = 0$ のとき r_{\min} となり、 $2\omega t + \psi = \pi$ のときに r_{\max} となることは明らかである。よって、

$$r_{\min} = r_{\omega t = -\frac{\psi}{2}} =$$

$$\sqrt{a^2 \sin^2 \left\{ -\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{b \sin(2\varphi)}{a + b \cos(2\varphi)} \right) \right\} + b^2 \sin^2 \left\{ -\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{b \sin(2\varphi)}{a + b \cos(2\varphi)} + \varphi \right) \right\}}$$

(2-7)

$$r_{\max} = r_{\omega t = \frac{\pi}{2} - \frac{\psi}{2}} =$$

$$\sqrt{a^2 \sin^2 \left\{ \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{b \sin(2\varphi)}{a + b \cos(2\varphi)} \right) \right\} + b^2 \sin^2 \left\{ \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{b \sin(2\varphi)}{a + b \cos(2\varphi)} + \varphi \right) \right\}}$$

(2-8)

よって軸比 α は、

$$\alpha = \frac{r_{\min}}{r_{\max}} =$$

$$\frac{\sqrt{a^2 \sin^2 \left\{ -\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{b \sin(2\varphi)}{a + b \cos(2\varphi)} \right) \right\} + b^2 \sin^2 \left\{ -\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{b \sin(2\varphi)}{a + b \cos(2\varphi)} + \varphi \right) \right\}}{\sqrt{a^2 \cos^2 \left\{ \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{b \sin(2\varphi)}{a + b \cos(2\varphi)} \right) \right\} + b^2 \cos^2 \left\{ \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{b \sin(2\varphi)}{a + b \cos(2\varphi)} + \varphi \right) \right\}}}$$

(2-9)

また、長軸の傾き角 θ は、 $\theta = \tan^{-1} \frac{y_{r_{\max}}}{x_{r_{\max}}}$ より、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{b \cos \left\{ \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{b \sin(2\varphi)}{a + b \cos(2\varphi)} \right) + \varphi \right\}}{a \cos \left\{ \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{b \sin(2\varphi)}{a + b \cos(2\varphi)} \right) \right\}}$$

(2-10)

となる。以上のように、X、Y軸のサーチコイルから得られる B_x 、 B_y で書かれるリサーチ波形の軸比 α と傾き角 θ は、 B_x 、 B_y の大きさだけでなく両者の位相関係も含んだ量であることが分かる。

XY軸のサーチコイルから得られる B_x 、 B_y で書かれるリサーチ波形の軸比 α と傾き角 θ は、回転磁束型磁気センサのような2次元磁気センサにとって欠陥探傷に有用なパラメータである。この軸比 α と傾き角 θ を使用した欠陥属性判定の具体例は、第2.2節の5で述べる。

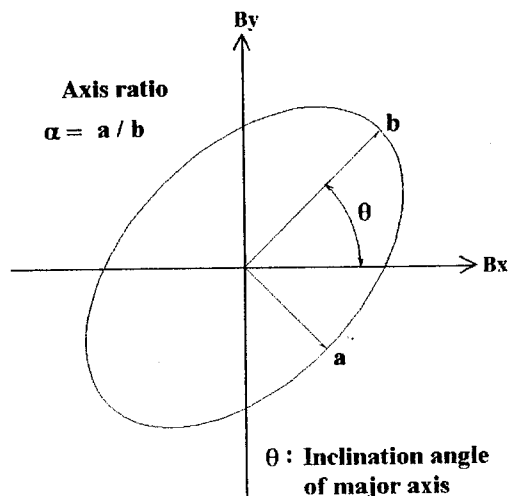


Fig. 2-13 Lissajous's figure of search coil's signals(B_x and B_y).

2. 2. 4 被検査材および実験装置

(1) 被検査材

被検査材は、Fig. 2-14 に示す形状のものである。材質は、構造材などにごく一般的に使われている軟鋼板(SS400)である。板厚は、5 mmである。模擬欠陥は、板の中央部裏側に機械加工されている。欠陥の幅(W)、深さ(D)は、Table 2-1 に示すように数種類用意した。

(2) 実験装置

Fig. 2-15 に測定装置のブロック図を示す。システムを統括する16ビットコンピュータ(EPSON PC-286G 20 MHz, 2.6 MB-RAM, 170 MB-HD, 3.5 インチFD x 2, 5 インチFD x 2)が測定装置の中心である。このコンピュータのバスに接続されたD/A変換器(12 bits x 2 Interface 社 AZI-211-98DA12(4))で90度位相差を持った励磁電圧(E_x 、 E_y)をプログラムによって発生している。励磁電圧は、2組のパワーアンプ(バイポーラ電源 菊水 POW-351A)で適当な大きさに増幅され、励磁コイルに印加される。測定に先立って、2つの励磁電圧は、被検査材上の欠陥のないところで、サーチコイルのXY方向の出力信号(B_x 、 B_y)で描かれるリサーチ波形が円に近くなるように励磁電圧と各チャンネル間の位相差を調整し、測定系のキャリブレーションを行っている。リサーチ波形が円に近くなったところで測定を開始する。

欠陥で乱された信号は、3軸のサーチコイルによって各方向成分ごとに検出され、低雑音アンプでA/D変換に必要な大きさまで増幅される。Fig. 2-16にXYZ軸用の増幅回路を示す。0.0022 μF のコンデンサは、LPFを構成するものである。励磁周波数によって適宜適当なものと交換しながら実験を行った。このLPFは、コンピュータからのデジタル的な雑音や、電源からのパルス的な雑音を除くのに大きな効果があった。また、この回路の初段は、インスツルメンテーションアンプ（高入力インピーダンスの差動増幅回路）で構成されており、電源からの誘導雑音などの同相雑音を差動接続により有効に押さえている。

低雑音アンプによって増幅された信号は、A/D変換器（12 bits x 7 Interface 社 AZI-275-98AD12 (32/16)-PTC）を通してコンピュータに取り込まれる。その後、2つの励磁電圧測定用の信号と3つのサーチコイルからの信号と2つの励磁磁束密度測定用のB-コイルの信号について、プログラムで直流分の除去や平滑化、数値積分などの処理を行っている。なお、プログラミング言語は、MS-DOS上のMS-C (Ver. 6)を使用した。

ここで、各サーチコイルに発生する誘導起電力 e_i ($i = x, y, z$)は、(2-11)式で表される。

$$e_i = -N_i \frac{d\phi_i}{dt} \quad (i = x, y, z) \quad (2-11)$$

ただし、 N_i は、各サーチコイルの巻き数であり、 ϕ_i は、各サーチコイルと鎖交する磁束である。さらに、各サーチコイルで検出する磁束密度 B_i は、(2-12)式で算出できる。

$$B_i = -\frac{1}{NS_i} \int e_i dt \quad (i = x, y, z) \quad (2-12)$$

ここで、 S_i は、各サーチコイルの面積である。

3軸のサーチコイルの信号を使用して被検査材表面の各方向の磁束密度(B_x, B_y, B_z)を算出し、さらに、 B_x, B_y, B_z の最大値である $B_{x\max}, B_{y\max}, B_{z\max}$ や、 B_x, B_y, B_z が最大を示す位相角 $\Phi_{x\max}, \Phi_{y\max}, \Phi_{z\max}$ を抽出している。また、各測定点ごとに E_x, E_y の波形とリサージュ波形、 B_x, B_y, B_z の波形と、 B_x, B_y によるリサージュ波形をコンピュータの画面上に描き測定状況を監視している。さらに、 B_x, B_y によるリサージュ波形の軸比 α や傾き角 θ などを各測定点ごとに算出している。これらのデータは、表計算ソフトで直ちに処理できるように1回分の測定が終わるごとにファイル形式を変換しHD（ハードディスク）に蓄積する。このように、このシステムは、ほとんどのデータ処理をコンピュータで行い実験の簡便化と迅速さをはかっている。

磁気センサは、XY方向にコンピュータで制御されているXYステージを用いて1mmごとに移動する。このXYステージは、市販の手動式XYステージとステッピングモータ駆動回路（ステッピングモータ 2LM-C0005 x 2, ステッピングモータ駆動信号発生用 IC PMM8713 x 2, ステッピングモータ駆動用 IC SI-7300A x 2）と8 bitsのPIO（周辺デジタル入出力 8255 x 1）から構成されている。平歯車を使用してステッピングモータの回転を10分の1に減速し、45ステップで0.1mmセンサが移動するように設定している。ただし、このXYステージは、数ステップ分のバックラッシュがありその分位置精度が悪くなっている。そのため、旋盤等のバックラッシュ補正と同じよ

うにステージが停止する方向をいつも一定となるようにプログラムを組み、バックラッシュによる位置誤差を防いだ。ステージの位置は、0.1 mm 精度の精密ポテンシオメータを用いて監視した。

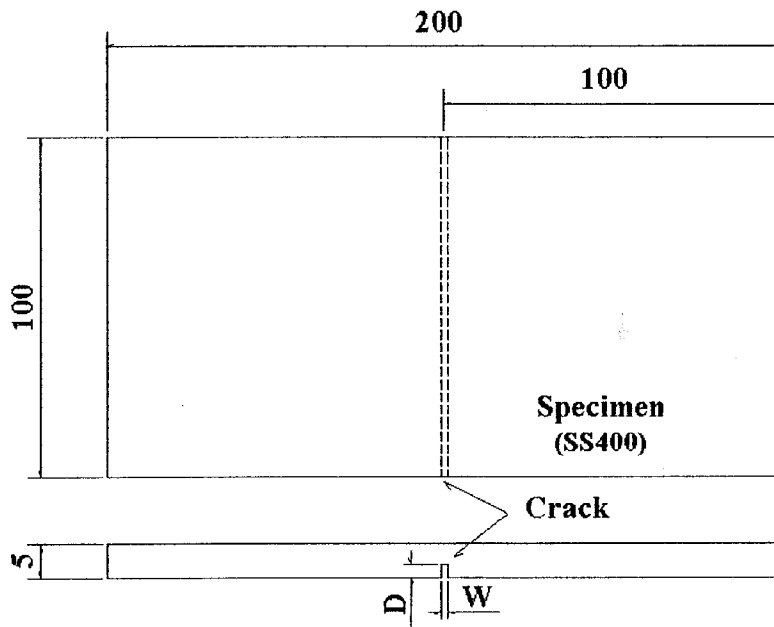


Fig. 2-14 Specimen with a reverse-side crack.

Table 2-1 Crack depth and width.

Crack depth (D)	Crack width (W)			
	0.4 mm	0.6 mm	0.8 mm	1 mm
4 mm	No. 1	No. 8	No. 12	No. 16
3 mm	No. 2	No. 9	No. 13	No. 17
2 mm	No. 3	No. 10	No. 14	No. 18
1 mm	No. 4	No. 11	No. 15	No. 19
0 mm (No crack)	No. 0	SS400		

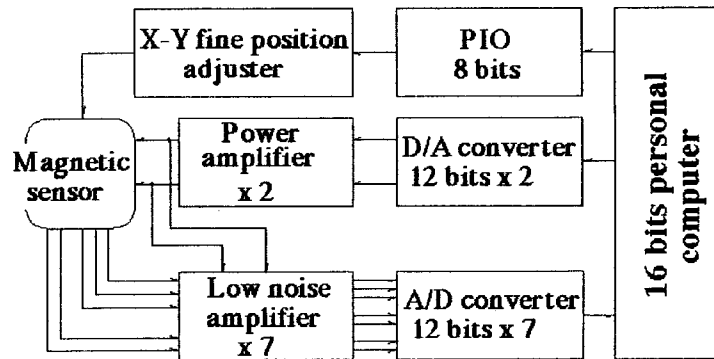


Fig. 2-15 Measurement system.

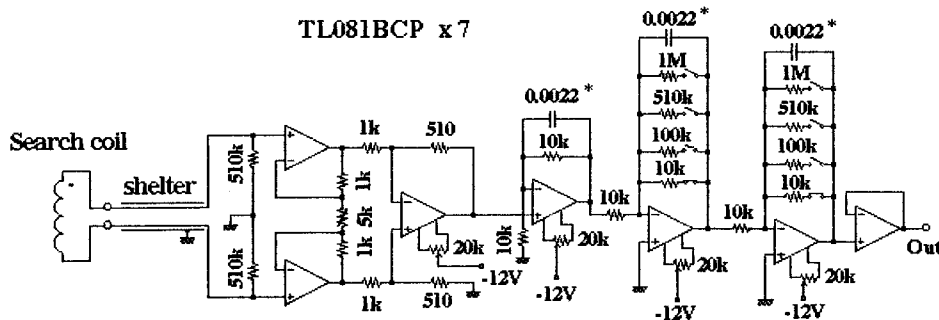


Fig. 2-16 Electronic circuit of the low noise amplifier.

2. 2. 5 空心蝶型磁気センサの欠陥検出特性

(1) 欠陥検出機構

回転磁束型磁気センサと3軸サーチコイルを組み合わせた磁気センサは、欠陥によって起こる次の3種類の磁気的変化を検出しているものと考えられる。もちろん、この3種の磁気的変化は、単一で起こっているのではなく複合していると考えられるが、ここでは、単純化してそれぞれの変化の様子を説明する。

1) 磁気抵抗の変化

欠陥によって励磁磁束の通過する部分の磁気抵抗が変化し^[16]、それによってサーチコイルと鎖交する磁束が変化することが考えられる。Fig. 2-17にその原理図を示す。この磁気センサは、XY軸の対称性から2次元に簡略化して考えることができる。励磁コイル、サーチコイル及び被検査材で構成する磁気回路の磁気抵抗は、磁気センサのリフトオフが一定だとすれば欠陥の有無やその寸法のみで変化する。また、欠陥の深さが被検査材の厚さに対してあまり大きくなければ、欠陥部の磁束は、ほとんど被検査材中を通り、欠陥部以外の磁気抵抗は一定だと考えられる。被検査材の厚さを T 、欠陥の実効的な幅を C_r 、欠陥の深さを C_d 、欠陥部での磁束通路の紙面に垂直方向の幅

を L (励磁コイルの直径程度である。) とすれば、欠陥部の磁気抵抗 R は、

$$R = \frac{C_w}{\mu L(T - C_d)} \quad (\mu \text{ は被検査材の透磁率}) \quad (2-13)$$

となる。欠陥の実効的な幅 C_w や欠陥の深さ C_d が大きくなればサーチコイル部の磁束は小さくなる。しかし、欠陥部以外の磁気抵抗は、サーチコイルと鎖交する磁束の通路の多くの部分が空気であることを考えると磁気抵抗 R の変化によるサーチコイルと鎖交する磁束の変化はごく小さいと考えられる。

一方、この事実を2次元有限要素法による磁界解析を用いて確かめた。Fig. 2-18(a) と Fig. 2-18(b) は、磁気センサを2次元モデルに置き換えて有限要素法を使って計算した結果であり、磁束線分布を示す。解析条件は、励磁コイルの電流密度 5.2×10^6 A/m、被検査材の導電率 1.0×10^7 S/m、励磁周波数 10 Hz、被検査材の比透磁率は 300、アモルファスコアの比透磁率は 30,000 である。また、欠陥の幅は、1 mm、深さは、4 mm である。Fig. 2-24 にこの数値計算に用いたメッシュを示す。この計算に用いた有限要素法は、一般に $A-\phi$ 法と呼ばれる渦電流を考慮した2次元有限要素法である。また、領域外は、2節点無限要素法を用いて近似している。このメッシュでは、各要素を四角形で示しているが実際には、この四角形を対角線で2分割し三角形要素として計算している。(本論文の中で用いた有限要素法の詳細については、巻末の付録で詳細に述べる。)

これらの図からサーチコイルと鎖交している磁束のほとんど (アモルファスコア中を通過している磁束とほぼ同じ。) は、直接励磁コイルから漏れたものであることが分かる。注意深く両図を比較すると、被検査材に欠陥がある場合のアモルファスコア中の磁束密度の分布が欠陥の影響を受けて減少していることがわかる。

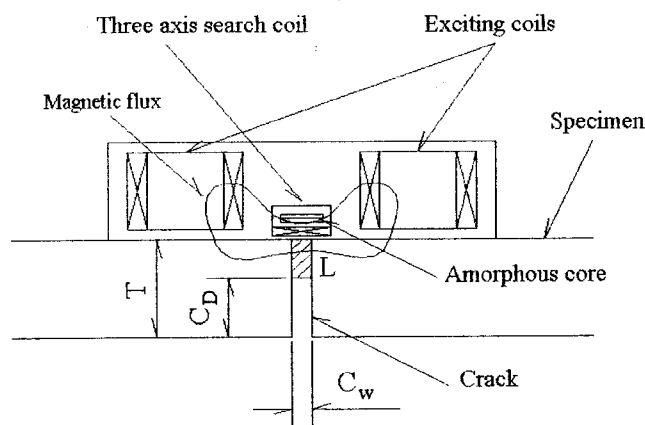


Fig. 2-17 Principle of detection(Change of magnetic resistance).

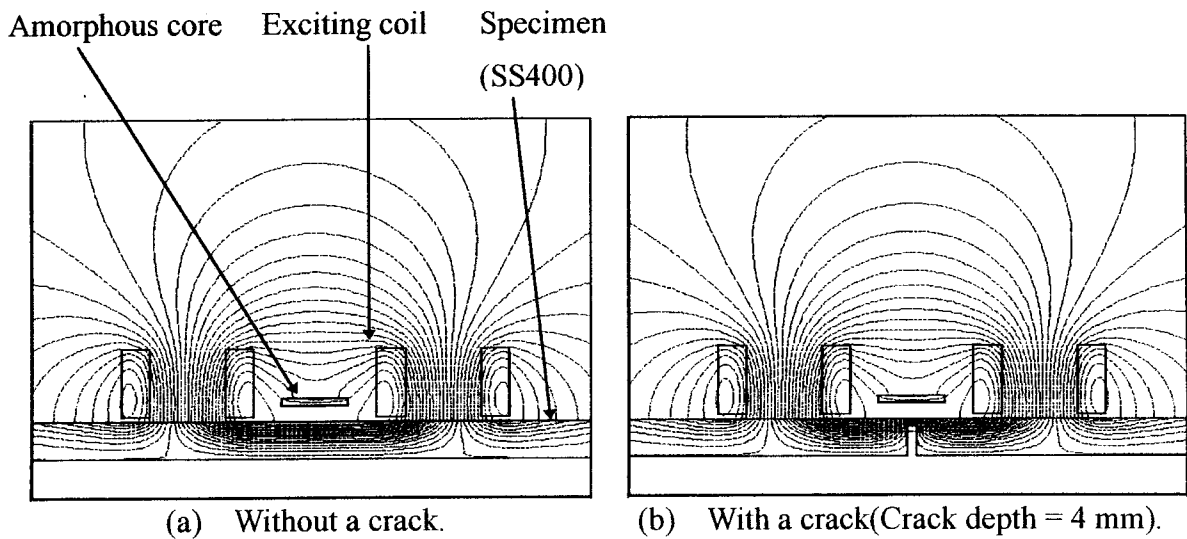


Fig. 2-18 Flux distribution by numerical analysis($\omega t=0$).

2) 漏れ磁束の変化

また、欠陥部で被検査材中を通る磁束は、被検査材上部に集中する。その磁束の一部が被検査材外部に漏れだしサーチコイルと鎖交する場合は考えられる。Fig. 2-19にその原理図を示す。また、前節と同様の条件で2次元有限要素法の計算結果をFig. 2-20(a)とFig. 2-20(b)に示す。この図では、現象をより顕著に表すために磁束線の数を増やしている。

欠陥のないFig. 2-20(a)図では、被検査材中から漏れアモルファスコア中を通過している磁束は観測されないが、欠陥の存在するFig. 2-20(b)では、被検査材から漏れだしてアモルファスコア中を通過している磁束を観測することができる。この漏れ磁束は、アモルファスコア中を通過する磁束を減少させる方向であり、前述の欠陥による磁気抵抗の増加と相まって裏側欠陥を検出する場合の信号として検出される。

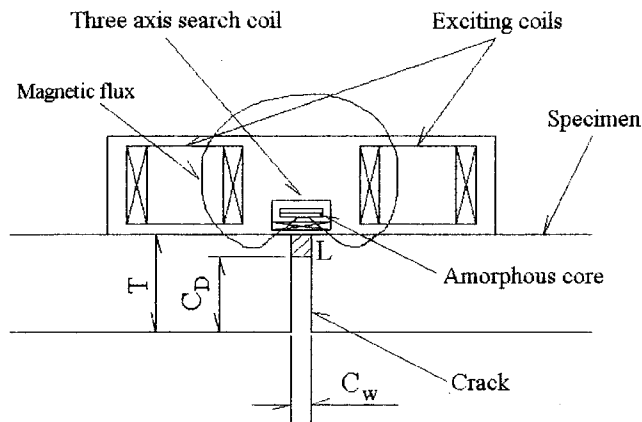
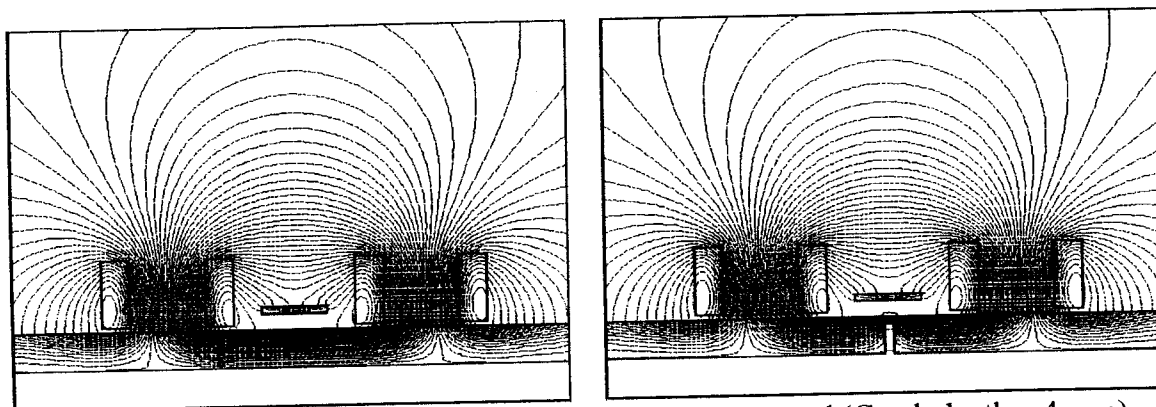


Fig. 2-19 Principle of detection(Change of leakage flux).



(a) Without a crack. (b) With a crack (Crack depth = 4 mm).
 Fig. 2-20 Flux distribution by numerical analysis($\omega t=0$).

3) 渦電流の変化

さらに、Z軸のサーチコイルについては、欠陥の両側に渦電流が集中し、この渦電流が作る磁束がサーチコイルと鎖交する場合がある^[56-57]。Fig. 2-21 にその原理図を示す。さらに、Fig. 2-22(a) から Fig. 2-22(d) に磁束線分布と磁束密度ベクトルを示す。Z軸のサーチコイルにおいても、上記2種類の原因による検出信号の変化が生じていると考えられるが、実験結果と比較するとここで述べる渦電流の変化による信号の変化を主に検出しているものと思われる。

欠陥がなくZ軸のサーチコイルが Fig. 2-22 の位置の場合、被検査材中の渦電流によってサーチコイルの右部分に誘起される電圧と左部分に誘起する電圧が平衡し出力がゼロとなる。一方、欠陥が存在し、Z軸のサーチコイルが Fig. 2-21 のBの位置にある場合、被検査材中の渦電流によってサーチコイルの右部分に誘起される電圧と左部分に誘起する電圧は、向きが反対で大きさもほぼ等しい。そこで、Z軸サーチコイルの出力はゼロとなる。また、Z軸のサーチコイルが Fig. 2-21 のAあるいはCの位置にある場合、被検査材中の渦電流によってサーチコイルの右部分に誘起される電圧と左部分に誘起する電圧の大きさが異なりその位置によって正の出力、あるいは、負の出力となる。

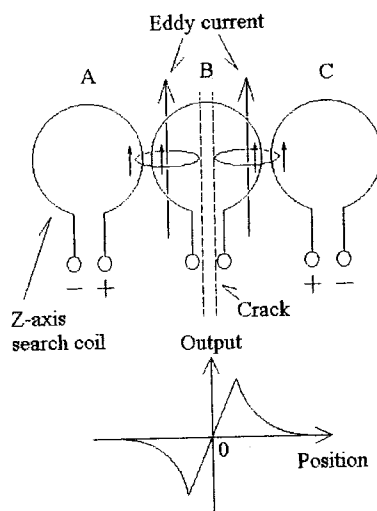
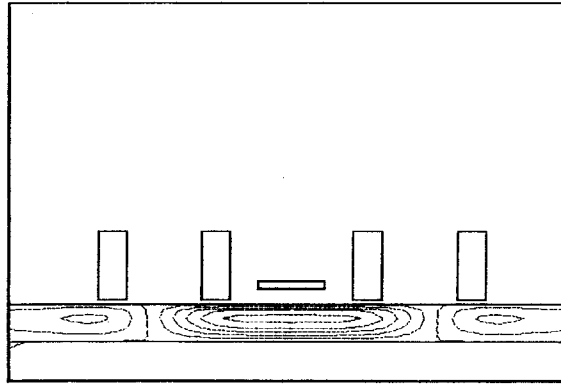
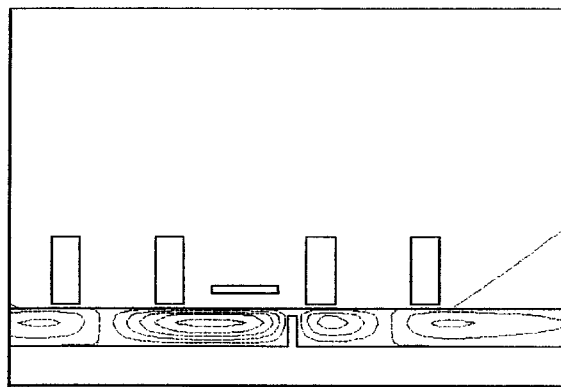


Fig. 2-21 Principle of detection(Change of eddy current).

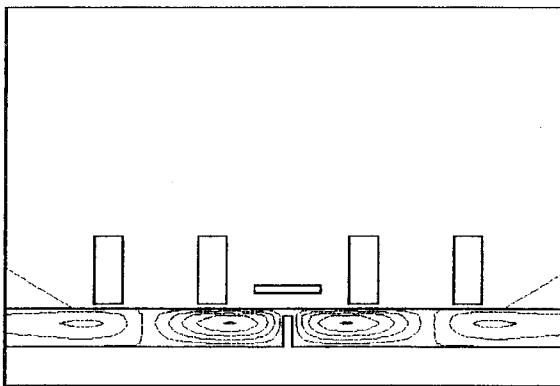


Without a crack.

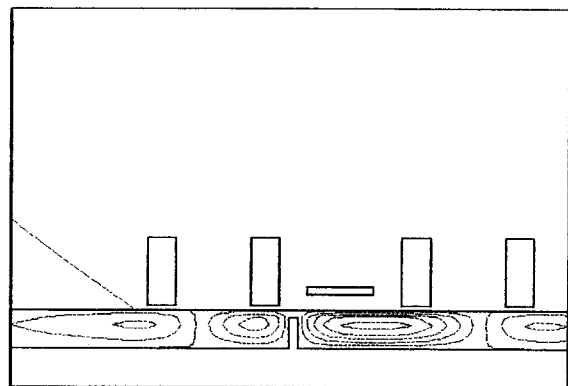
Fig. 2-22 Flux distribution by numerical analysis($\omega t=90$).



(a) Position A.



(b) Position B.



(c) Position C.

Fig. 2-23 Flux distribution by numerical analysis(Crack depth = 4 mm, $\omega t=90$).

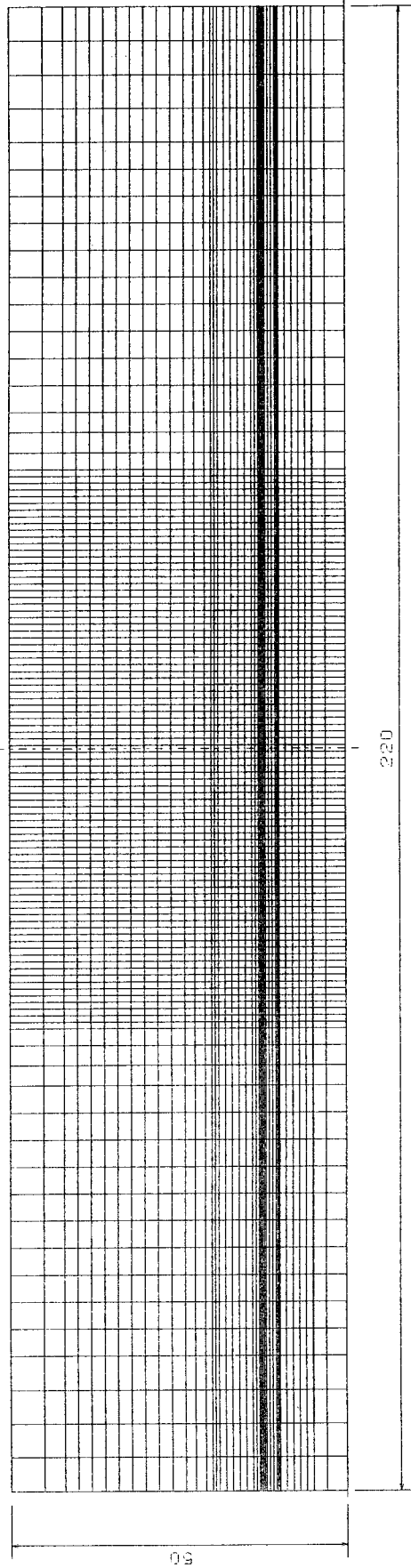


Fig. 2-24 Mesh for F.E.M. analysis.

(2) 欠陥検出特性

実験は、次の条件で行われた。予備実験やシミュレーションの結果から 40 Hz 以上の励磁周波数では、表皮効果の影響で磁束が被検査材裏面まで到達しない。そこで、励磁周波数は、表皮効果を考慮し、回転磁束が試料裏面まで達するように 10 Hz を中心に行った。印加磁束密度は、欠陥のない部分において X および Y 方向のサーチコイルで検出される磁束密度を 0.01 T になるように励磁した。印加磁束密度は、大きい方がサーチコイルからの出力電圧が大きくなるため好ましいが、あまり高いレベルに設定すると被検査材の磁気的な非線形性の影響がでてくる。そこで、非線形性が現れない範囲でなるべく大きな値としてこの値を採用した。この時の印加電流の最大値は、X および Y 方向とも約 1 A である。印加磁束密度をサーチコイル部の磁束密度で規定したのは、 B_x 、 B_y で描かれるリサージュ波形の軸比 α と傾き角 θ で欠陥の評価を行うために、無欠陥部でリサージュ波形が円となるように調整する必要があるからである。無欠陥部でリサージュ波形の軸比 α が 0.99 以上になるまで、励磁コイルに印加する電圧の大きさや位相差を調整した。測定は、試料中央部で欠陥の左右 20 mm を 1 mm 毎に行った。さらに、1 回の測定は、励磁周波数の 6 周期分の平均とし、同じ点を欠陥に磁気センサが近づく方向を変えて 3 回測定しその平均を測定値とした。

Fig. 2-25 に磁気センサの配置や軟鋼板試料の寸法、測定点の配置を示す。試料中央部裏側に、溝型の模擬欠陥が設けられている。欠陥の深さは、試料毎に 1 mm ずつ変化する (0 mm (欠陥なし), 1 mm ~ 4 mm)。欠陥の幅は、0.4 mm である。

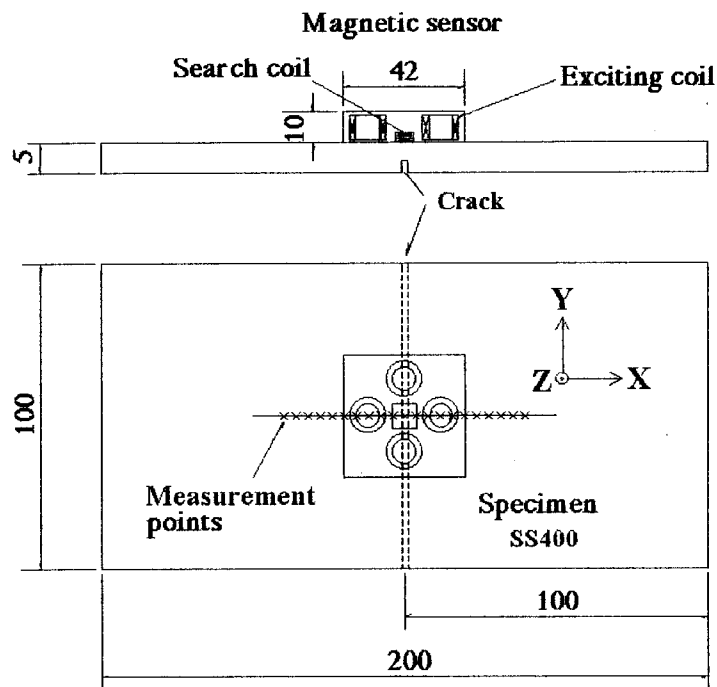


Fig. 2-25 Distribution of the magnetic sensor and the dimension of the specimen.

1) 基本欠陥検出特性

Fig. 2-26 から Fig. 2-33 は、軟鋼板裏側にある欠陥の幅 0.4 mm で励磁周波数 10 Hz の場合の欠陥の深さと欠陥検出信号の関係を示している。Fig. 2-26、Fig. 2-27 より、 $B_{x_{max}}$ 、 $B_{y_{max}}$ の変化は、欠陥と磁気センサの位置と欠陥の深さに比例して増減していることが分かる。 $B_{x_{max}}$ の最小値を示す位置は、欠陥の位置とよく一致している。このように、この磁気センサは、欠陥の位置を正確に測定することができる。さらに、 $B_{x_{max}}$ の変化と $B_{y_{max}}$ の変化が異なるのは、欠陥の方向が磁気センサの Y 軸と平行であることによる。このことは、この磁気センサは、欠陥が伸びている方向をとらえることができることを示唆している。Fig. 2-28 に、Z 方向の磁束密度の最大値 ($B_{z_{max}}$) の変化と磁気センサの位置との関係を示す。この結果に見るように、Z 軸に関しても欠陥の存在をよく捕らえている。

Fig. 2-29 より、リサージュ波形の軸比 α の変化は、 $B_{x_{max}}$ や $B_{y_{max}}$ の変化よりシャープになっている。これは、XY 方向の変化の相互作用によるものである。Fig. 2-30 より、リサージュ波形の傾き角 θ が欠陥で減少し、その他の部分で増加していることは、欠陥と磁気センサの相対的な位置関係によって被検査材内の渦電流方向が変化することや、XY 方向の励磁磁束の干渉状態が変化するためである。このリサージュ波形の傾き角 θ の変化は、深さ 1 mm の欠陥の検出を可能ならしめている。

Fig. 2-31、Fig. 2-32、Fig. 2-33 は、センサの位置と位相角 $\Phi_{x_{max}}$ 、 $\Phi_{y_{max}}$ 、 $\Phi_{z_{max}}$ の関係を示している。Fig. 2-31、Fig. 2-32 は、欠陥付近でも大きな変化を示さないが Fig. 2-33 においてはセンサの位置に従って明確な変化を示している。これは、Z 軸の信号は、特に、被検査材中の渦電流の影響を受けているためである。

Fig. 2-34 に欠陥の深さに対しての $B_{x_{max}}$ 変化の割合を示す。この変化率は、欠陥に関係ない部分の $B_{x_{max}}$ の平均値を基準にして欠陥による信号の変化の割合を算出している。信号の変化は、欠陥付近の $B_{x_{max}}$ の最小値と最大値の差を意味する。ここで、欠陥に関係ないと思われる部分とは、測定した範囲 (欠陥を中心として -20 mm から 20 mm まで) の両端、5 mm の範囲である。この値を基準としたのは、欠陥深さの異なる被検査材では微妙な材質の差などで無欠陥部分での各測定値に差があるためである。この図より、4 mm の深さの欠陥では、 $B_{x_{max}}$ は、約 3.5 % 変化する。欠陥の深さ 1 mm の場合は、0.6 % 程度の変化しかないが明らかに変化している。この磁気センサは、欠陥からの多くの情報を一次元の走査で知ることができる特徴を備えている。また、検出感度は、欠陥深さ 1 mm の場合でも軸比 α と傾き角 θ を組み合わせて判断することによって位置の特定が可能であり高感度である。

次に、軸比 α と傾き角 θ を組み合わせて判断することによって位置の特定を行った例を示す。Fig. 2-29 と Fig. 2-30 のリサージュ波形の軸比 α と傾き角 θ の変化から欠陥位置の特定に必要な特徴を抽出すると、リサージュ波形の軸比 α は、欠陥の真上の位置で最小値を示すことと、リサージュ波形の傾き角 θ は、欠陥近傍だけ 90 度～100 度を示し、それ以外の場所では 300 度以上の値を示すことの 2 つがあげられる。これらの特徴から、次に示す欠陥位置推定式を導出できる^[18]。欠陥位置推定式は、欠陥存在率を η_{ar} (Abundance Ratio)、リサージュ波形の軸比を α 、傾き角を θ 、軸比の最大値を α_{max} 、とすると、

$$\eta_{ar} = \frac{1-\alpha}{\alpha_{max}} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } (\theta > 180) \text{ then } 0 \\ \text{else } 1 \end{array} \right\} \quad (2-14)$$

となる。この欠陥存在率 η_{ar} の値が 1 となる磁気センサの位置が、欠陥位置である。ここでは、リサージュ波形の傾き角 θ が 180 度を欠陥有無の判定のための閾値として、傾き角 θ の変化を 2 値化した。Fig. 2-35 に (2-14) 式を利用した欠陥存在率 η_{ar} の算出結果を示す。この図より、(2-14) 式による推定欠陥位置と欠陥の位置は、非常によく一致しており、この欠陥位置推定式は有効である。このように、リサージュ波形の 2 つのパラメータの変化から欠陥の位置を特定できる。

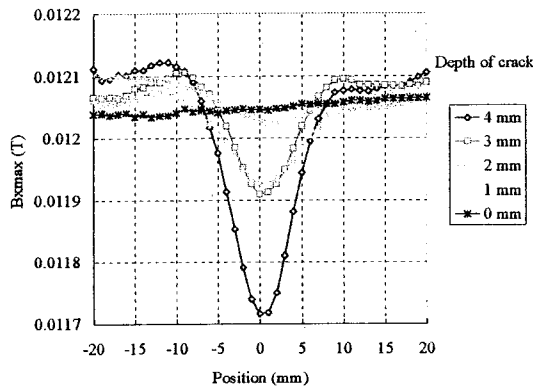


Fig. 2-26 $B_{x_{max}}$ vs. the sensor position.

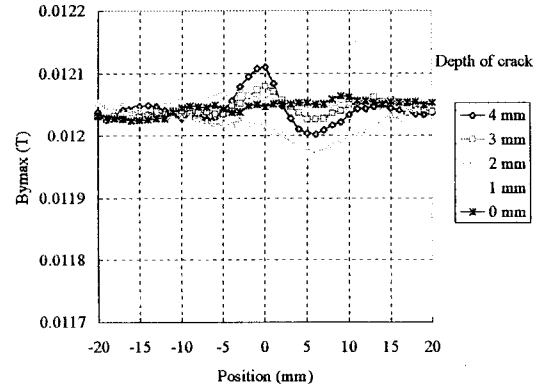


Fig. 2-27 $B_{y_{max}}$ vs. the sensor position.

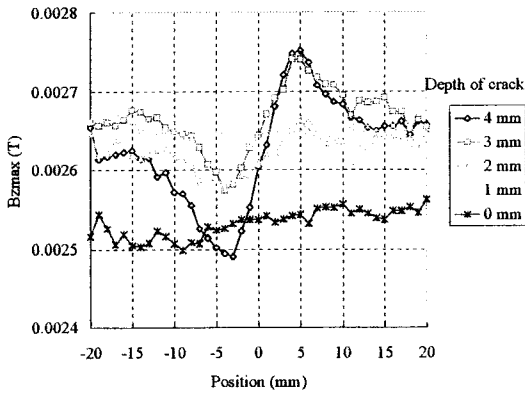


Fig. 2-28 $B_{z_{max}}$ vs. the sensor position.

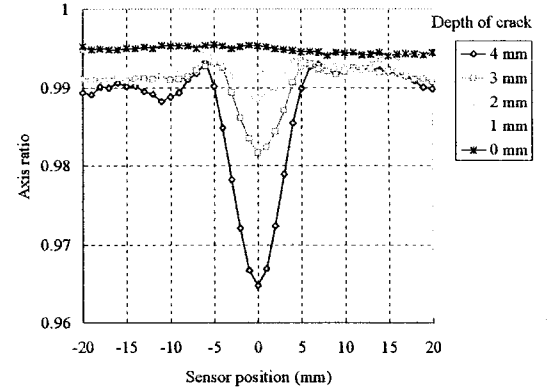


Fig. 2-29 Axis ratio vs. the sensor position.

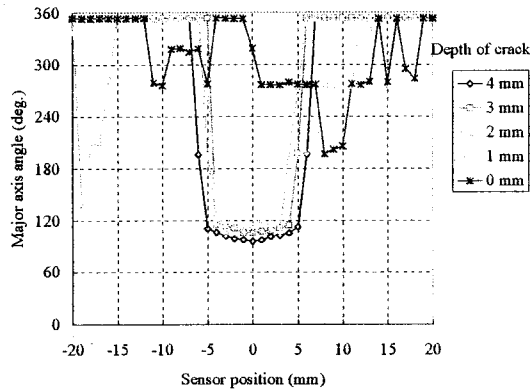


Fig. 2-30 Major axis angle vs. the sensor position.

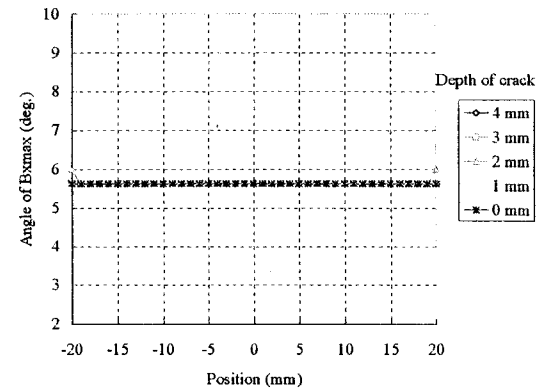


Fig. 2-31 $\Phi_{x_{max}}$ vs. the sensor position.

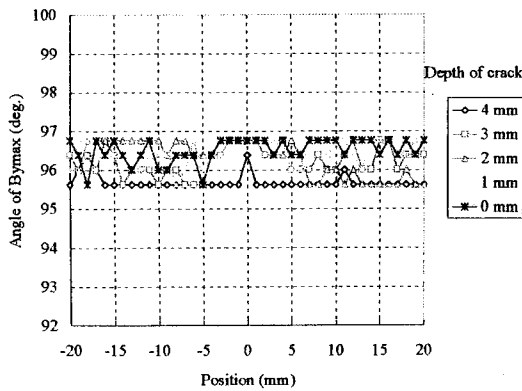


Fig. 2-32 $\Phi_{y_{max}}$ vs. the sensor position.

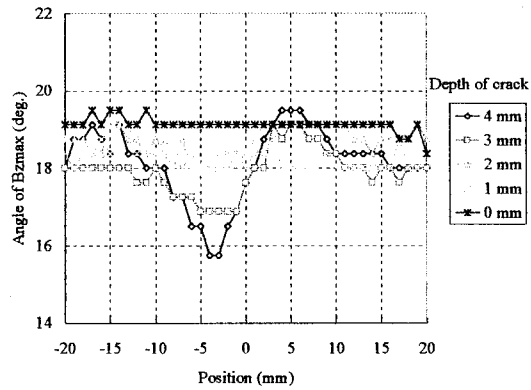


Fig. 2-33 $\Phi_{z_{max}}$ vs. the sensor position.

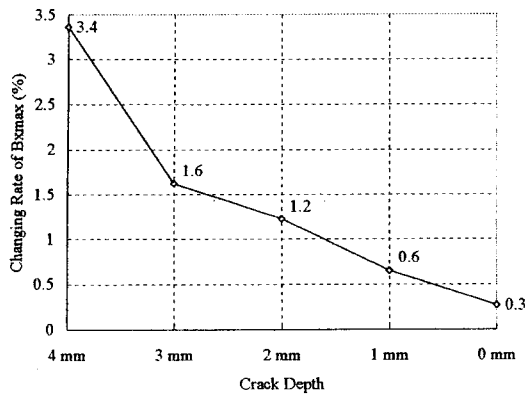


Fig. 2-34 Changing rate of $B_{x_{max}}$ vs. the crack depth.

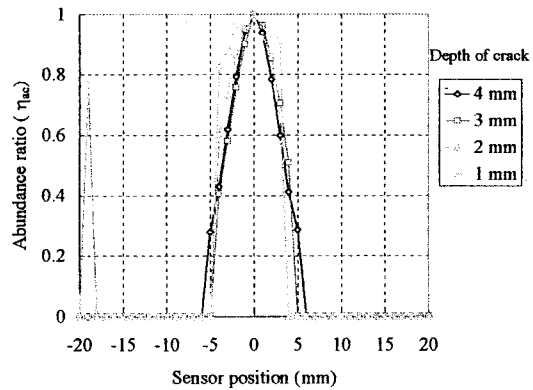


Fig. 2-35 Abundance ratio (η_{ar}) vs. the sensor position.

2) 励磁周波数の欠陥検出特性に及ぼす影響

励磁磁束あるいは非磁性体を問わず金属を対象にした非破壊検査用磁気センサは、励磁磁束を被検査材に浸透させて欠陥による磁気抵抗の変化を検出する方法や欠陥による渦電流の変化を検出する方法で欠陥を検出している。そのため、被検査材中に励磁磁束が浸透することが重要である。しかし、導電体である金属に磁束を深く浸透させるためには、表皮効果の影響を常に考えなければならない。しかも、裏側欠陥の探傷を目的とする場合は、被検査材中深く磁束を浸透させなければ欠陥の検出が困難であるため表皮効果に対するより慎重な配慮が必要である。肉厚金属板の深部に磁束を浸透させるためだけの観点から考えれば、表皮効果の小さい低い励磁周波数を用いればよい。一方、励磁磁束による渦電流も欠陥検出に大きく関与している点から考えれば、高い励磁周波数を用いる方がよい場合もある。さらに、磁性体の比透磁率は周波数の増大とともに減少し、被検査材の磁気抵抗の増大に関与する。以上のように、肉厚金属板裏側欠陥を探傷するためには、被検査材の電気・磁氣的性質から与えられる最適な励磁周波数が存在するはずである。励磁周波数の欠陥検出特性に及ぼす影響を調べることは磁気センサを最高の状態で使用するために必要な実験である。

Fig. 2-36 に欠陥深さ 2 mm、欠陥幅 0.4 mm の場合の励磁周波数と $B_{x_{max}}$ の関係を示す。この図から励磁周波数が低いほど $B_{x_{max}}$ の変化が僅かながら大きいことが分かる。これは、周波数が低いほど表皮効果の影響が少ないことを示している。しかし、励磁周波

数を低くとると1回の測定に時間が多くかかるようになる。よって、表皮効果などの制限で用いることのできる周波数の上限が規制されるが、測定に要する時間を短くする観点からは、欠陥を検出できる範囲で励磁周波数は高いことが望ましいと言える。

3) 欠陥幅の欠陥検出特性に及ぼす影響

欠陥幅の変化は、被検査材中の磁気抵抗の変化や漏れ磁束の変化を起し、欠陥近傍の渦電流の変化も起こす。そこで、欠陥幅の欠陥検出特性に及ぼす影響を調べることは、磁気センサがどの程度の微小欠陥を検出できるかを知る上で重要である。そこで、以下に示す実験を行った。

励磁周波数 10 Hz、裏側欠陥の深さ 2 mm の場合の欠陥の幅と B_{xmax} の関係を Fig. 2-37 に示す。この図から本実験の範囲の欠陥幅の変化では、 B_{xmax} の値に大きな変化を及ぼさないことが分かる。さらに、幅の異なった欠陥で確認する必要がある。

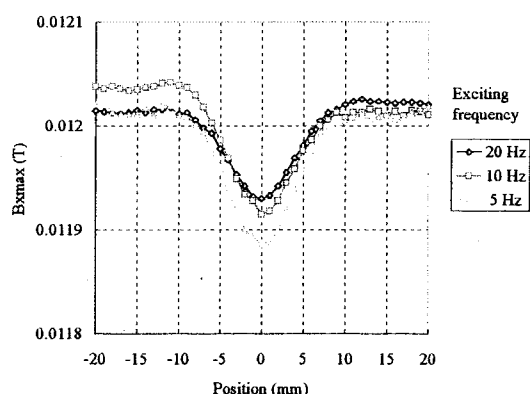


Fig. 2-36 Exciting frequency vs. B_{xmax} .

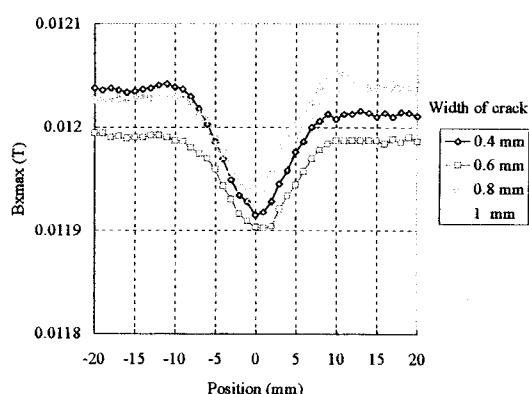


Fig. 2-37 Crack width vs. B_{xmax} .

4) 数値解析結果との比較

Fig. 2-39 と Fig. 2-40 に測定系を 2 次元モデルに置き換えた有限要素法を用いて、X 軸と Z 軸のサーチコイルで検出する被検査材表面近傍の磁束密度の変化を計算した。解析条件は、励磁コイルの電流密度 5.2×10^6 A/m、被検査材の導電率 1.0×10^7 S/m、励磁周波数 10 Hz、被検査材の比透磁率は 300、アモルファスコアの比透磁率は 30,000 である。また、欠陥の幅は、1 mm、深さは、0 (傷なし) から 4 mm まで 1 mm ごとに変えた。Fig. 2-38 にこの数値計算に用いたメッシュを示す。ここでは、計算時間短縮のため、被検査材の幅を 80 mm とし、欠陥の位置を移動させて計算を行った。X 軸方向の検出磁束密度は、アモルファスコア部の磁束密度の X 軸方向の平均値であり、Z 軸方向の検出磁束密度は、アモルファスコア直下の空気領域の Z 軸方向の磁束密度の平均値である。(実際、この部分には Z 軸サーチコイルが巻かれている。Fig. 2-26 と Fig. 2-39、Fig. 2-28 と Fig. 2-40 を比較すると、両図とも絶対値は多少の誤差があるが、変化の様子は大変よく一致している^[18]。

また、実験結果は Fig. 2-26 のように雑音 (コンピュータや測定器、電源などから混入する外来雑音、リフトオフの変化、裏側欠陥を対象とする場合は表側欠陥など。) を多く含んだ信号である。一方、当然のことながら数値解析による結果は、実験の場合と異なり雑音が全くない状態での欠陥検出信号である。雑音がない状態であっても欠陥深さ 1 mm の場合の信号の変化は、非常に小さいことが Fig. 2-39 と Fig. 2-40 か

らわかる。このことは、深さ 1 mm の裏側欠陥を検出することがいかに困難なことであるかを示している。

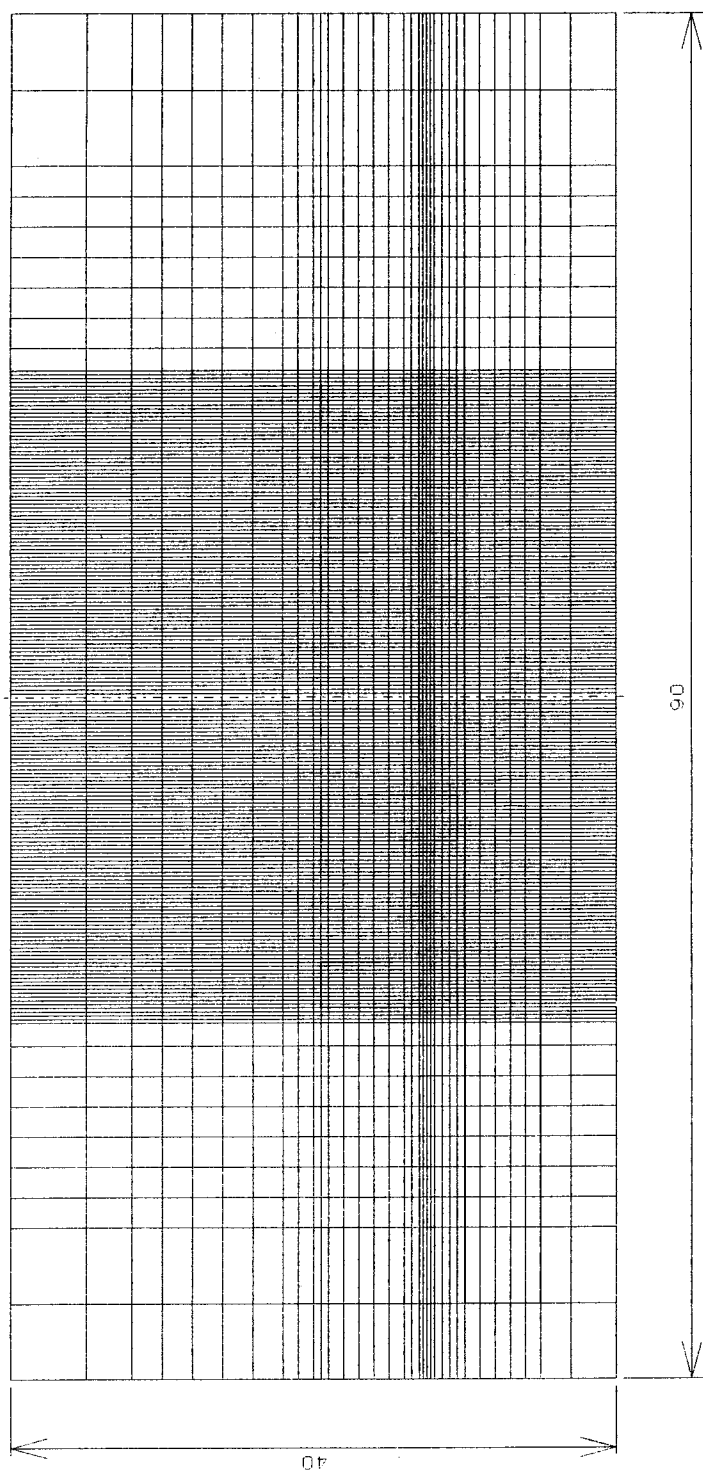


Fig. 2-38 Mesh for F.E.M. analysis.

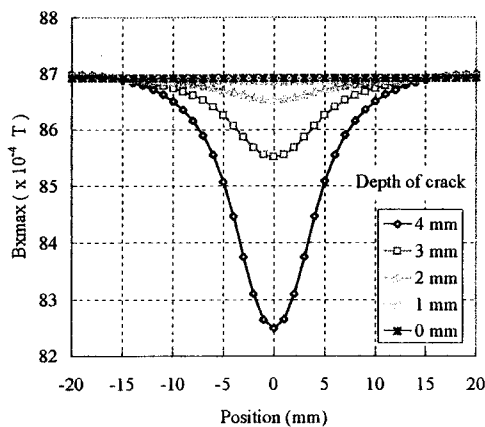


Fig. 2-39 $B_{x\max}$ vs. the sensor position
(Result of numerical analysis).

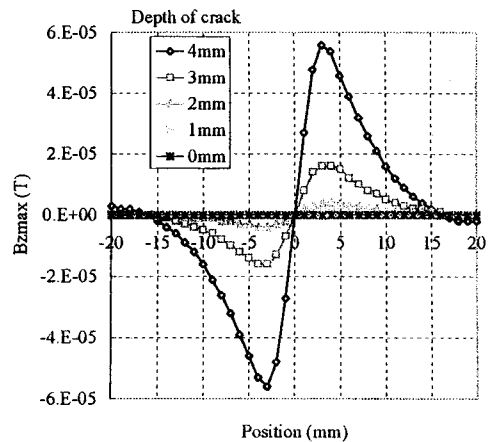


Fig. 2-40 $B_{z\max}$ vs. the sensor position
(Result of numerical analysis).

5) 欠陥の方向角の欠陥検出特性に及ぼす影響

磁気センサのY軸と欠陥のなす角 ϕ を欠陥の「方向角」と呼ぶこととする。欠陥が、Y軸に平行な場合を方向角 $\phi=0$ 度とし、 -90 度から 90 度の範囲を 15 度刻みで測定し、時計回りを正とした。対称性を考慮して ± 90 度内を測定した。欠陥の方向角を変化させて実験する場合の磁気センサの配置や被検査材の配置をFig. 2-41に示す。

Fig. 2-42とFig. 2-43に、磁気センサのY軸に対して、 ± 90 度の範囲で 15 度毎に欠陥を傾けて磁気センサを走査した場合の、リサーチ波形の各パラメータと磁気センサの位置の関係を示している。実験条件は、無欠陥部でサーチコイルが検出する磁束密度 0.012 T、励磁周波数 10 Hz、裏側欠陥で幅 0.4 mm、深さ 3 mmである。リサーチ波形の軸比 α は、欠陥の方向角 ϕ が大きくなればその変化は緩やかになる。また、方向角 ϕ が ± 60 度付近でリサーチ波形の軸比 α の変化が最大となることや、磁気センサが軸比 α の変化を捕らえ始めてから感知しなくなるまでの磁気センサの位置の範囲が、方向角 ϕ が大きくなれば広がるのがわかる。これは、 $B_{x\max}$ および $B_{y\max}$ が磁気センサの位置の変化に従って同時に変化するためである。Fig. 2-43より、リサーチ波形の傾き角 θ の変化は、欠陥の方向角 ϕ の正負によってほとんど2値的に変化する。欠陥の方向角 ϕ が正の場合のリサーチ波形の傾き角 θ は、欠陥の方向角 ϕ が負の場合と比較して約 80 度大きくなっている。

以上のリサーチ波形の軸比 α と傾き角 θ の変化をまとめると次の2つにまとめることができる。第1に、リサーチ波形の傾き角 θ は、方向角 ϕ が負の場合は 140 度付近を示し、正の場合は 210 度付近を示す2値的な変化をする。第2に、リサーチ波形の軸比 α の半値幅(リサーチ波形の軸比 α が{(最大値-最小値)/2+最小値}以下となっている間に磁気センサが動いた距離)は、方向角 ϕ の絶対値に比例して大きくなる。Fig. 2-47に、方向角 ϕ とリサーチ波形の軸比 α の半値幅の関係を示す。

以上のことから、本磁気センサは、方向角 ϕ の変化についてもよくその変化を捕らえている。よって、この磁気センサを使用して欠陥を横断する形で1回だけ走査したデータがあれば、欠陥の方向角 ϕ は以下の方法での推定が可能である^[18]。未知の方向角 ϕ を持った試料に対してX軸方向に測定を行い、その半値幅を計算する。Fig. 2-47と半値幅から方向角 ϕ を求め、その正負をリサーチ波形の傾き角 θ から判定する。

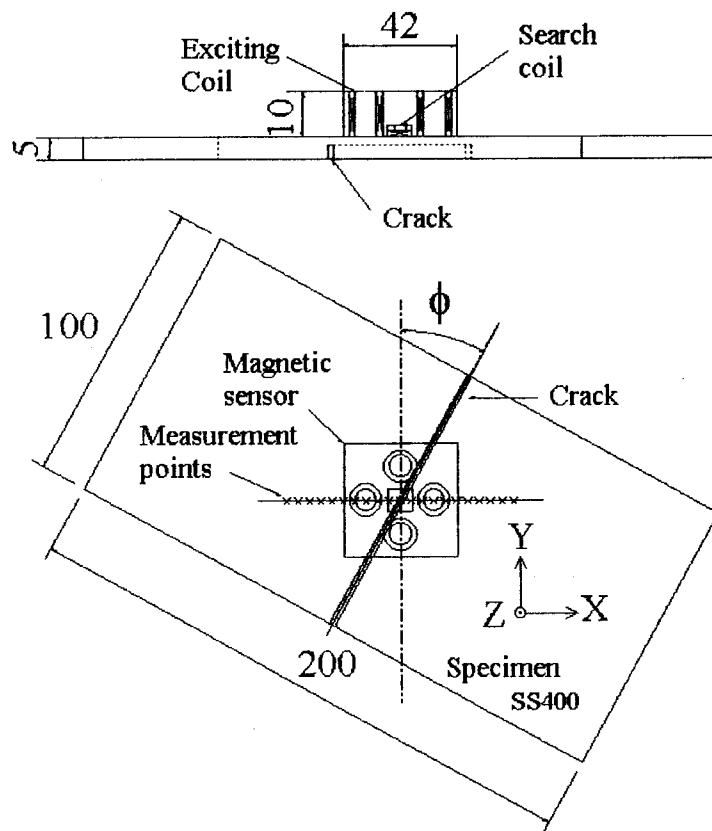


Fig. 2-41 Distribution of the magnetic sensor and the dimension of the specimen.

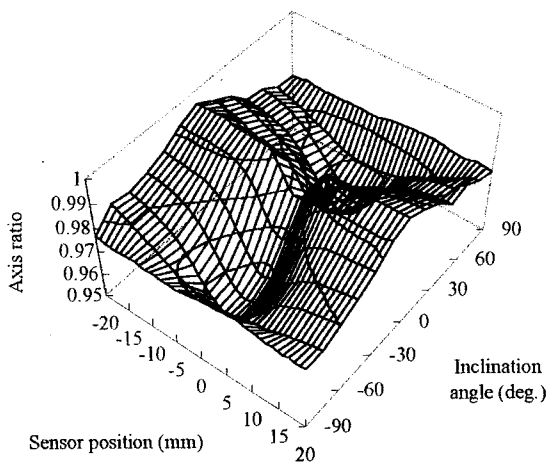


Fig. 2-42 Axis ratio vs. inclination angle vs. the sensor position.

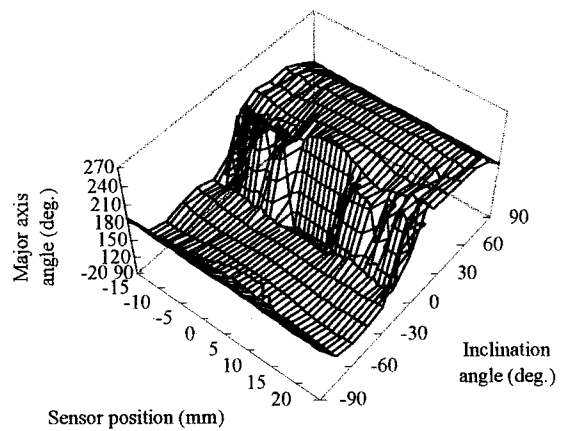


Fig. 2-43 Major axis angle vs. inclination angle vs. the sensor position.

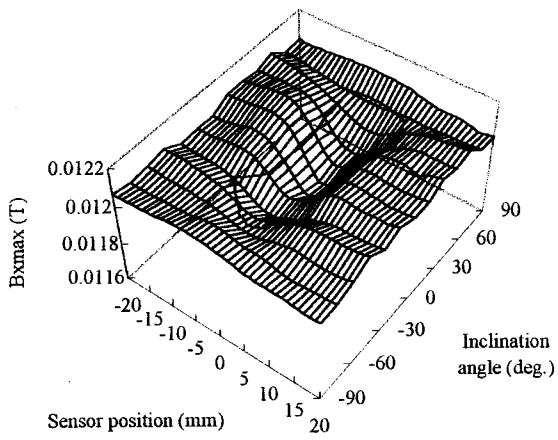


Fig. 2-44 $B_{x_{max}}$ vs. inclination angle vs. the sensor position.

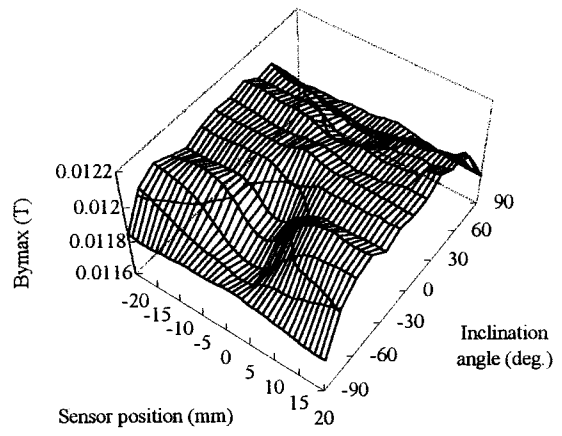


Fig. 2-45 $B_{y_{max}}$ vs. inclination angle vs. the sensor position.

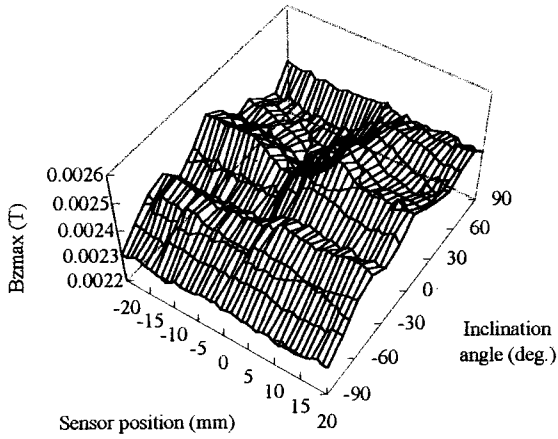


Fig. 2-46 $B_{z_{max}}$ vs. inclination angle vs. the sensor position.

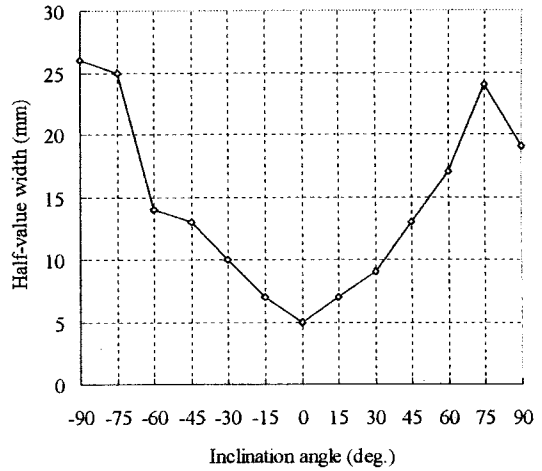


Fig. 2-47 Half-value width vs. the inclination angle.

2. 2. 6 U字鉄心型磁気センサの欠陥検出特性

(1) 欠陥検出機構

U字鉄心型磁気センサの欠陥検出機構を解明するために有限要素解析を行った結果を以下に示す。解析条件は、励磁コイルの電流密度 4.0×10^6 A/m、被検査材の導電率 1.3×10^7 S/m、周波数 5 Hz、被検査材の比透磁率 300、けい素鋼板製の励磁ヨークの比透磁率 500、サーチコイルのアモルファスコアの比透磁率 30,000 とした。励磁ヨークとアモルファスコアの導電率は無視した。また、欠陥の幅は、1 mm であり、 ωt は、0 度である。

Fig. 2-48 と Fig. 2-49 に 3 軸サーチコイルタイプの磁気センサの欠陥がない場合とセンサの中央から 5 mm 離れた位置に欠陥がある場合の磁束線分布を示す。これら図からサーチコイルと鎖交している磁束のほとんどは、いったん被検査材中を通過し、欠陥付近で漏れだしてきたものであることがわかる。両図を比較すると、被検査材に欠陥がある場合、サーチコイル付近の磁束線の分布が欠陥の影響を受けて変化していることがわかる。また、Fig. 2-50 に同様の場合で ωt が、90 度のときの磁束線分布を示す。空心蝶型磁気センサと比べて励磁コアの脚部の間隔が増した分だけ渦電流の流れる領域が広がっている (Fig. 2-22 から Fig. 2-23 参照。)。このため、Z 軸のサーチコイルと渦電流の位置関係が以前のセンサと比べて変化している。また、Z 軸のサーチコイルに電圧を誘起する被検査材に垂直な成分を持つ漏れ磁束も空心蝶型磁気センサに比較して大幅に減少している。Fig. 2-51 と Fig. 2-52 に 2 軸ピックアップコイルタイプの場合の磁束密度分布を示す。これらの図から、欠陥が存在すると多くの漏れ磁束がピックアップコイルと鎖交していることがわかる。よって、2 軸ピックアップコイルタイプの磁気センサは、漏れ磁束を積極的に捕らえることができる構造となっている。以上の結果から、XY 軸のサーチコイルは、欠陥に起因し欠陥近傍の被検査材表面に漏れ出す漏れ磁束の変化を主に検出し、Z 軸のサーチコイルは、試料中に発生する渦電流の流路変化を主に捕らえている。また、2 軸ピックアップコイルを欠陥信号検出用の素子として用いた場合は、欠陥に起因し欠陥近傍の被検査材表面に漏れ出す漏れ磁束の変化を主に検出している。

なお、Fig. 2-53(a) と Fig. 2-53(b) に 3 軸サーチコイルと 2 軸ピックアップコイルの場合の有限要素解析に用いたメッシュをそれぞれ示す。

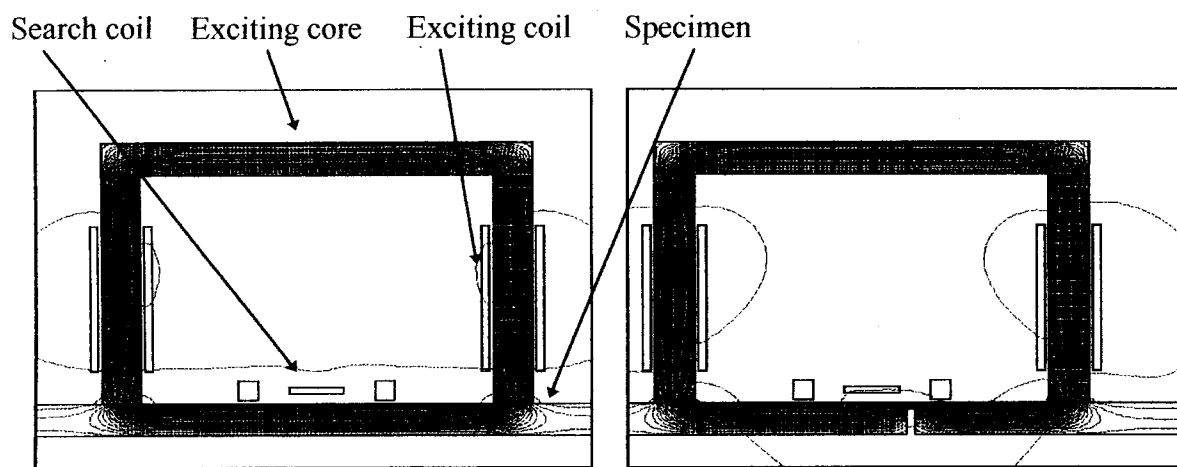
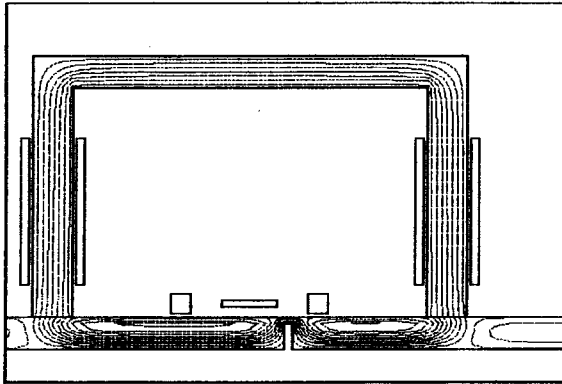
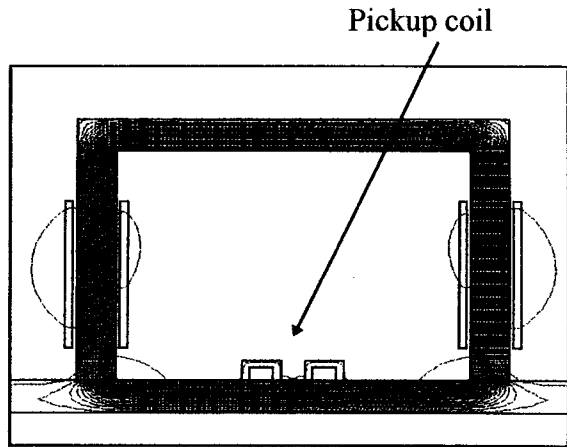


Fig. 2-48 Flux distribution by F.E.M..

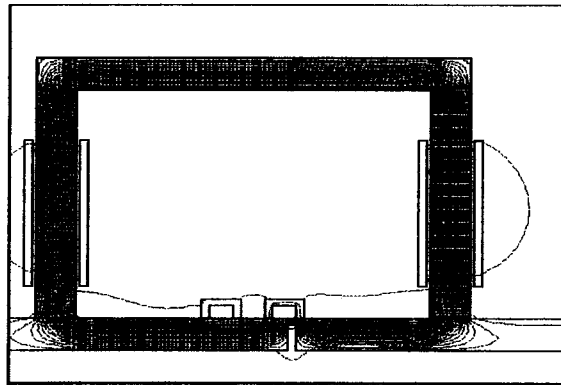
Fig. 2-49 Flux distribution by F.E.M..



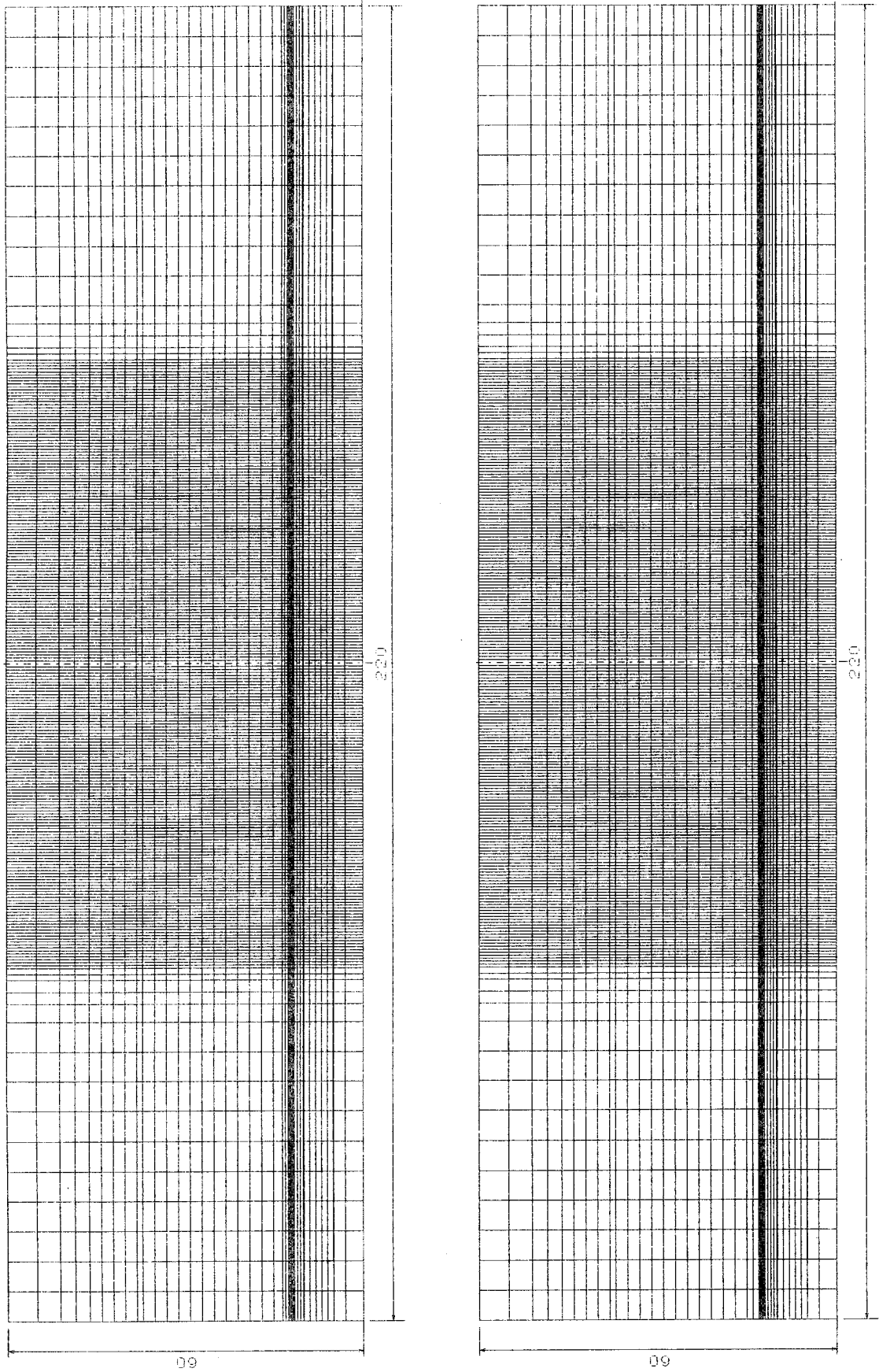
With a crack(Crack depth = 4 mm, $\omega t=90$)
 Fig. 2-50 Flux distribution by F.E.M..



Without a crack($\omega t=0$)
 Fig. 2-51 Flux distribution by F.E.M..



With a crack(Crack depth = 4 mm, $\omega t=0$)
 Fig. 2-52 Flux distribution by F.E.M..



(a) Three axis search coil type.

(b) Two axis pickup coil type.

Fig. 2-53 Mesh for F.E.M. analysis.

(2) 欠陥検出特性

この実験に用いた測定装置は、空心蝶型磁気センサの実験に用いたシステムと同じものである。ただし、LPFのカットオフ周波数や各軸の低雑音アンプの増幅度は、このセンサにあわせて調整した。また、2軸ピックアップコイルタイプの実験の際には、Z軸用のアンプ等は使用していない。3軸サーチコイルタイプの場合と2軸ピックアップコイルの和動接続の場合は、空心蝶型磁気センサの実験と同じように測定に先立って、2つの励磁電圧を被検査材上の欠陥のないところでリサーチ波形が円に近くなるように測定系のキャリブレーションを行った。リサーチ波形が円に近くなったところ ($\alpha=0.96$) で測定を開始した。一方、2軸ピックアップコイルの差動接続の場合は、2軸ピックアップコイルで得られる B_x と B_y を使用したリサーチ波形が安定に得ることが非常に困難であったのでB-コイルで測定した最大印加磁束密度が、両軸で等しくなるように励磁電圧を調整した。欠陥検出信号の処理方法や磁気センサの移動方法は、空心蝶型磁気センサと同様である。

Fig. 2-54 にU字鉄心型磁気センサの場合の磁気センサと被検査材の配置を示す。

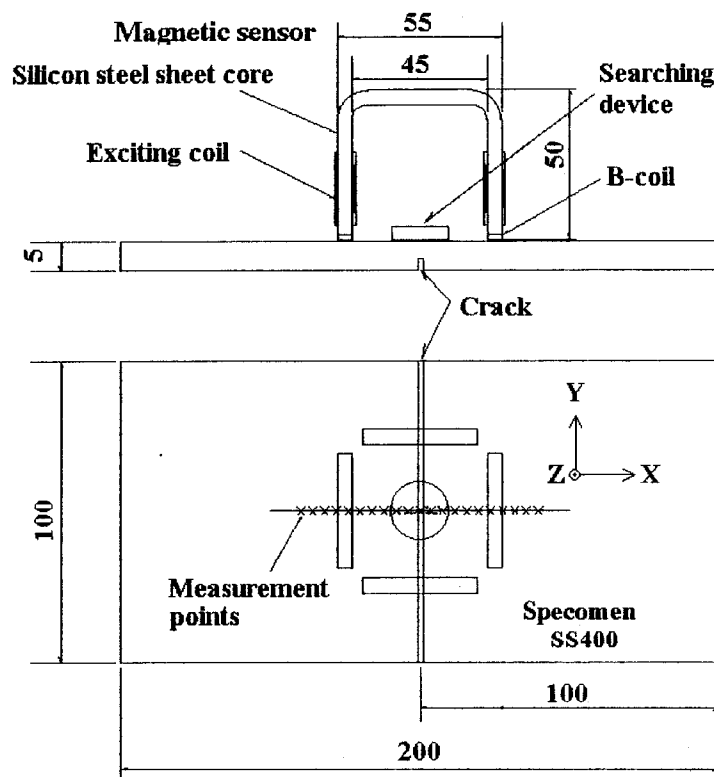


Fig. 2-54 Distribution of the magnetic sensor and measurement positions.

1) サーチコイル型の基本欠陥検出特性

Fig. 2-55 から Fig. 2-62 に3軸サーチコイルタイプU字型磁気センサの各軸方向の欠陥検出特性を示す^[19]。欠陥幅0.4mmの被検査材を用いて、励磁周波数2.5Hzを用いた。最大励磁磁束密度は、磁気回路の磁気飽和の影響を受けない範囲の適切なレベル値である0.55Tとした。鉄心の磁気飽和は、励磁ヨークに巻いたB-コイルで監視することにした。

Fig. 2-55 の $B_{x\max}$ については、2 mm 以上の深さの欠陥を確実に検出している。欠陥深さに従って変化幅も大きくなっている。さらに、欠陥なしの場合の出力信号が非常に安定しておりセンサの被検査材への自己密着性の効果が現れている。Fig. 2-56 の $B_{y\max}$ については、センサの Y 軸と欠陥が平行であるため大きな変化は示していないが、測定値は非常に安定している。さらに、Fig. 2-57 の $B_{z\max}$ については、欠陥なしの場合の出力信号の値が空心蝶型磁気センサに比べて1桁近く減少していることから励磁磁束との直接の鎖交が大幅に減少していることがわかる。これは、けい素鋼板による積層鉄心構造の励磁ヨークを採用した効果である。さらに、 $B_{z\max}$ の変化特性が、空心蝶型磁気センサと異なり欠陥の両側で増大する特性を示している。これは、欠陥と関係なく Z 軸と鎖交する磁束が大きく減ったことと、Fig. 2-62 に示すように $\Phi_{z\max}$ が欠陥の左右で大きく変化していることから以下のように説明できる。深い欠陥 (3 mm および 4 mm) では、欠陥による渦電流の流路は、欠陥が深いことから浅い欠陥に比べて大きく変化する。一方、測定に使用しているプログラムは、 $B_{z\max}$ を検出する際にその位相は考慮していない。よって、渦電流によって Z 軸サーチコイルに誘起される電圧は、欠陥の左右で S 字状に変化するが、プログラムで $B_{z\max}$ を検出する際にその位相には関わりなく最大値だけを検出しているため $B_{z\max}$ の絶対値は V 字状に変化するのである。これは、浅い欠陥 (2 mm) による $B_{z\max}$ の変化が S 字状になっていることから明らかである。

次に、Fig. 2-58 と Fig. 2-59 に示すリサージュ波形の軸比 α と傾き角 θ の変化の様子について考察する。Fig. 2-29 の空心蝶型磁気センサの場合と比較して、軸比 α は先に述べた理由で B_x と B_y の信号が安定しているので欠陥付近でなめらかに変化し、その変化幅は大きい。しかし、欠陥の深さ 2 mm の場合は、変化が小さくなっている。また、傾き角 θ の変化は、欠陥深さ 3 mm と 4 mm の場合以外は大きく変化せず、その変化もなめらかではない。

Fig. 2-60、Fig. 2-61、Fig. 2-62 に位相角 $\Phi_{x\max}$ 、 $\Phi_{y\max}$ 、 $\Phi_{z\max}$ の変化を示す。 $\Phi_{x\max}$ 、 $\Phi_{y\max}$ は、欠陥の深さ 4 mm の場合に $\Phi_{x\max}$ が大きく変化している以外はきわめて小さい変化しか示していない。 $B_{x\max}$ 、 $B_{y\max}$ は、励磁と直接関係した信号であることからその変化は小さなものとなっている。 $\Phi_{z\max}$ については、Z 軸の信号が XY 方向の励磁が相互に干渉して生まれる信号であることからこのように欠陥の存在によって大きく変化するパラメータとなっている。

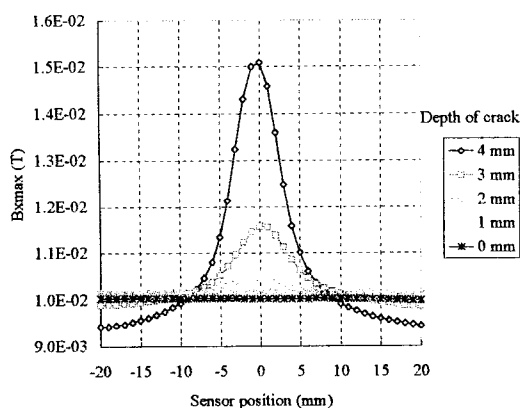


Fig. 2-55 $B_{x\max}$ vs. the sensor position.

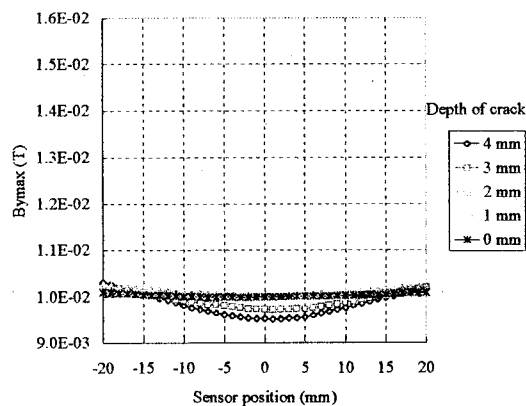


Fig. 2-56 $B_{y\max}$ vs. the sensor position.

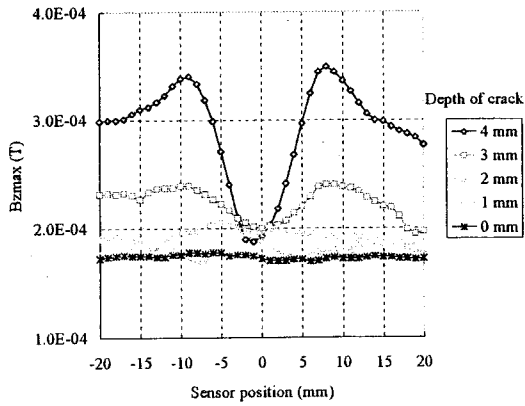


Fig. 2-57 B_{zmax} vs. the sensor position.

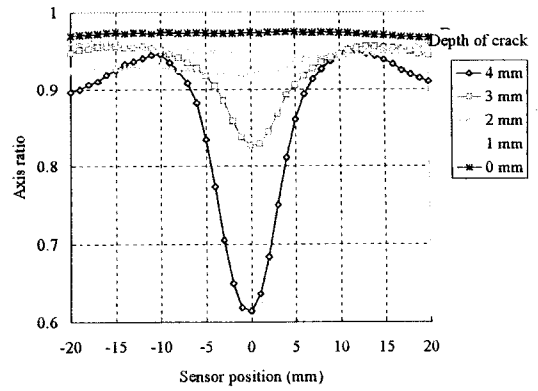


Fig. 2-58 Axis ratio vs. the sensor position.

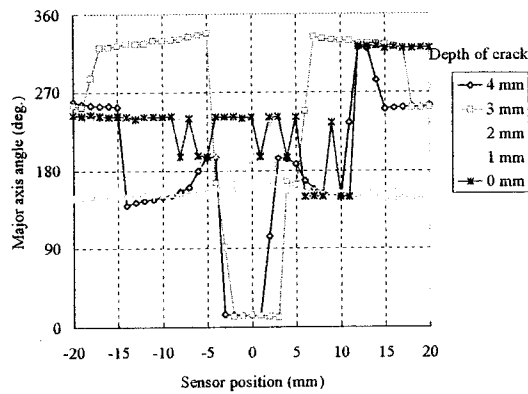


Fig. 2-59 Major axis angle vs. the sensor position.

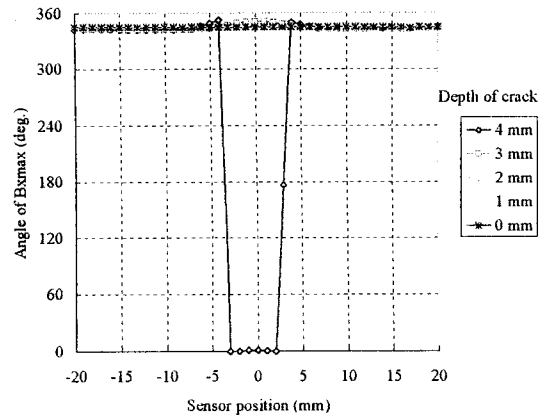


Fig. 2-60 Φ_{xmax} vs. the sensor position.

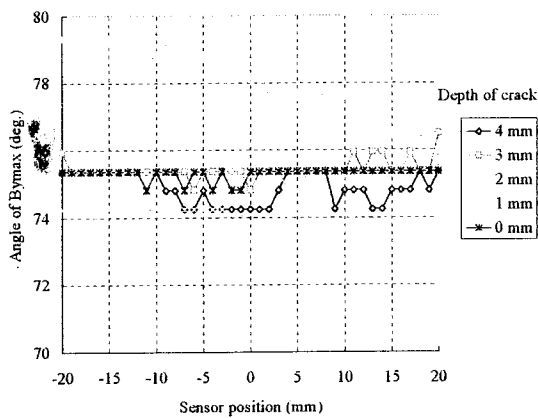


Fig. 2-61 $\Phi_{y max}$ vs. the sensor position.

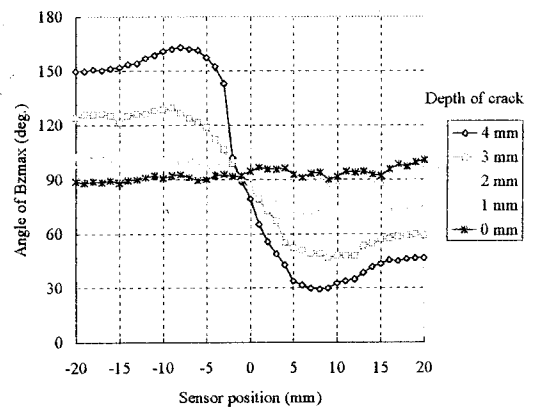


Fig. 2-62 Φ_{zmax} vs. the sensor position.

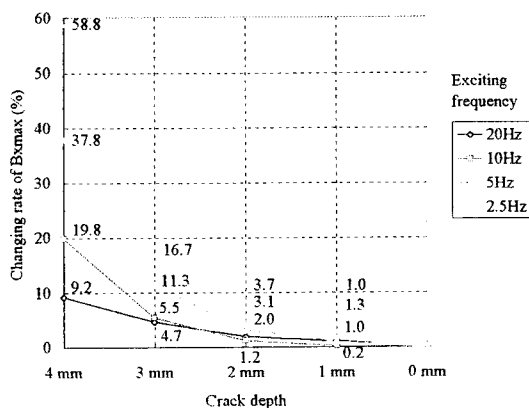
2) 励磁周波数の欠陥検出特性に及ぼす影響
 励磁周波数の違いによる欠陥検出特性の変化を調べるために励磁周波数を 2.5、5、10、20 Hz と変えて欠陥検出実験を行った。励磁周波数以外は、基本的欠陥検出特性

を求めた場合と同様の条件である。その結果を示す。

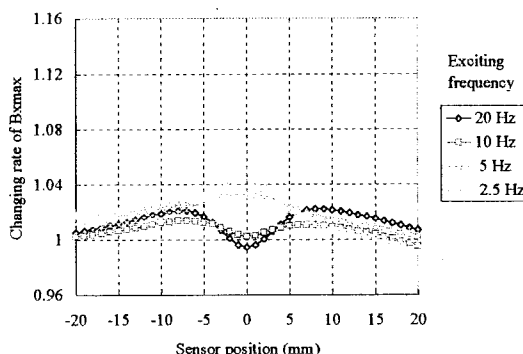
Fig. 2-63 に $B_{x\max}$ の変化率（信号の変化率の計算法は、空心蝶型磁気センサのところで述べた方法と同じ計算法で求めた。以下同様。）を各励磁周波数ごとに求めたものを示す。励磁周波数 2.5 Hz の場合 4 mm の深さの欠陥では、60 % もの変化を示している。一方、欠陥が浅くなるに従って励磁周波数による差が小さくなっている。

次に、欠陥深さ 2 mm の場合の実験による励磁周波数と $B_{x\max}$ の変化をセンサの位置ごとに示したものを Fig. 2-64 に示す。この図では、励磁周波数が、10 Hz 以上の場合とそれ以下の場合と変化の方向が全く逆になっている。Fig. 2-65 に有限要素法による解析により求めた Fig. 2-64 と同様の結果を示す。有限要素法の解析条件やメッシュは「基本欠陥検出機構」のところで用いたものと同じである。解析結果も同様な結果を示している。これは、Fig. 2-66 に示す励磁周波数 20 Hz の場合の磁束密度分布からもわかるとおり、励磁周波数を大きくすると欠陥の左右にある渦電流よりできる磁束が大きくなり、これがサーチコイルと鎖交する磁束を減らす方向に働くためである^[19]。

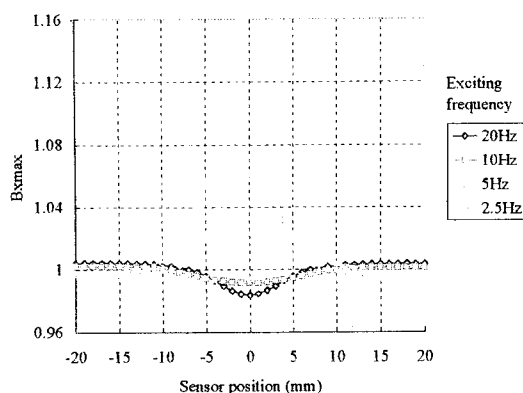
以上の結果は、被検査材や磁気センサの形式によって微小裏側欠陥検出のための最適励磁周波数が存在することを示唆している。



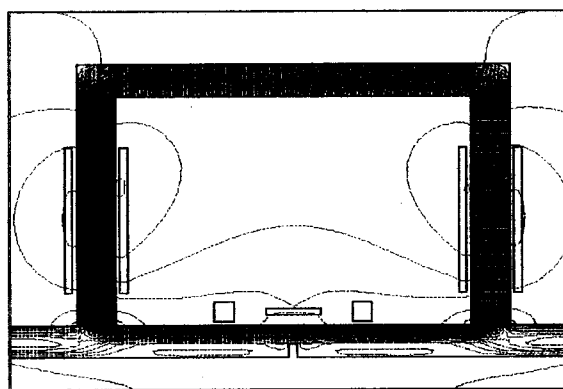
Experimental results
Fig. 2-63 Frequency characteristics.



Experimental results, Crack depth = 2 mm
Fig. 2-64 Frequency characteristics.



Analytical results
Fig. 2-65 Frequency characteristics.



Exciting frequency = 20 Hz, $\omega t = 0$
Fig. 2-66 Flux distribution By F.E.M..

3) 和動ピックアップコイル型の基本欠陥検出特性

次に、和動2軸ピックアップコイル型の磁気センサの欠陥検出特性を示す。Fig. 2-67、Fig. 2-68 に2軸ピックアップコイルタイプU字型磁気センサの各軸方向の欠陥検出特性を示す。欠陥幅0.4 mmの被検査材を用いて、励磁周波数は、5 Hzで、最大励磁磁束密度は、0.67 Tである。なお、測定開始段階で軸比 α が0.95以上となるように調整した。

Fig. 2-67の $B_{x\max}$ については、欠陥検出信号の変化が2つのピークを持つ特性となっていることが大きな特徴である^[81-82]。これは、各軸を構成している2個のピックアップコイルが中心間隔で6 mm離れているためである。また、各ピーク間の距離は、ピックアップコイルの中心間隔にほぼ等しい。これを解決するには、ピックアップコイルの寸法をさらに小さくし、間隔を詰めて配置すればよい。欠陥の検出感度は、2 mm以上の深さの欠陥を確実に検出している。また、欠陥深さが深くなるに従って変化幅も大きくなっている。さらに、すべての被検査材について出力信号は、XY軸とも非常に安定している。Fig. 2-68に示す $B_{y\max}$ については、他の実験の場合と同じ理由で大きな変化は示していない。

次に、Fig. 2-69とFig. 2-70にリサージュ波形の軸比 α と傾き角 θ の変化の様子を示す。軸比 α は欠陥付近でなめらかに変化し、その変化幅は3軸サーチコイルタイプと同程度に大きい。しかし、欠陥の深さ2 mmの場合は、変化が小さくなっている。また、傾き角 θ の変化は、欠陥深さ3 mmと4 mmの場合は、 $B_{x\max}$ や軸比 α と同じように2つのピークを持つ変化を示しているが、その変化はなめらかではない。欠陥の深さ2 mmの場合は、欠陥深さ3 mmと4 mmの場合とは逆の変化を示している。

Fig. 2-71、Fig. 2-72に示す $\Phi_{x\max}$ 、 $\Phi_{y\max}$ は、欠陥の深さ4 mmと3 mmの場合に $\Phi_{x\max}$ が大きく変化している以外はきわめて小さい変化しか示していない。欠陥の深さ2 mmの場合には、前者とは多少異なった変化を示している。これは、他の空心蝶型磁気センサと同じように $B_{x\max}$ 、 $B_{y\max}$ は、励磁と直接関係した信号であることから $\Phi_{x\max}$ 、 $\Phi_{y\max}$ の変化は小さくなっている。欠陥深さによる出力信号の変化率をFig. 2-73に示す。

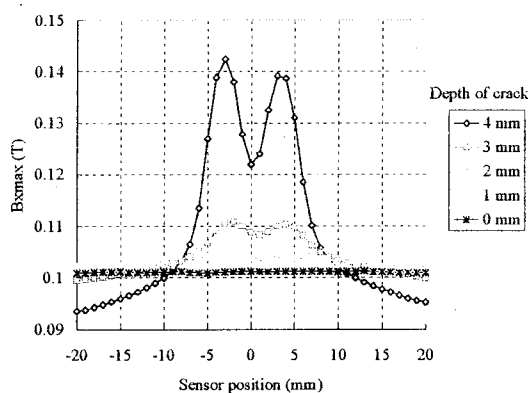


Fig. 2-67 $B_{x\max}$ vs. the sensor position.

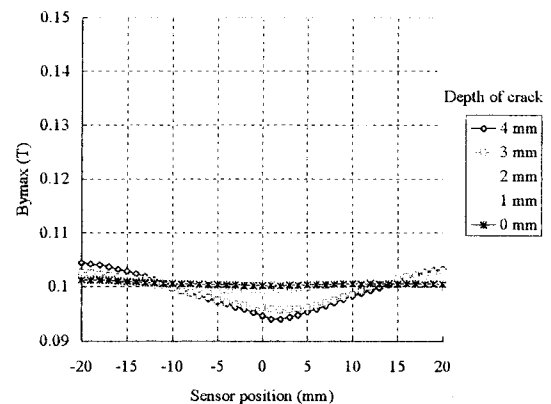


Fig. 2-68 $B_{y\max}$ vs. the sensor position.

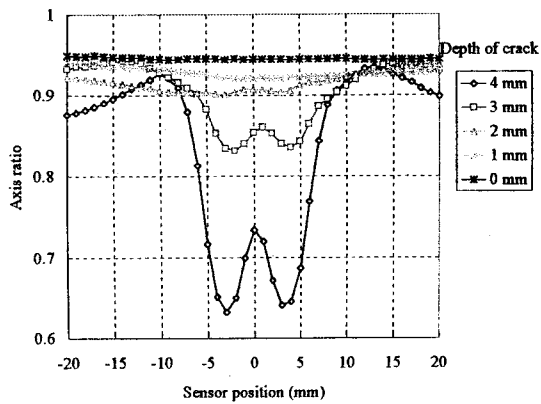


Fig. 2-69 Axis ratio vs. the sensor position.

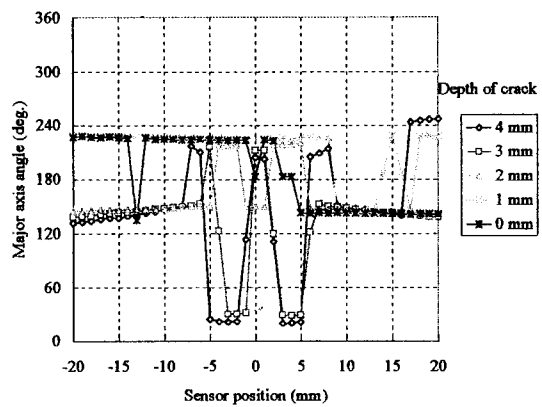


Fig. 2-70 Major axis angle vs. the sensor position.

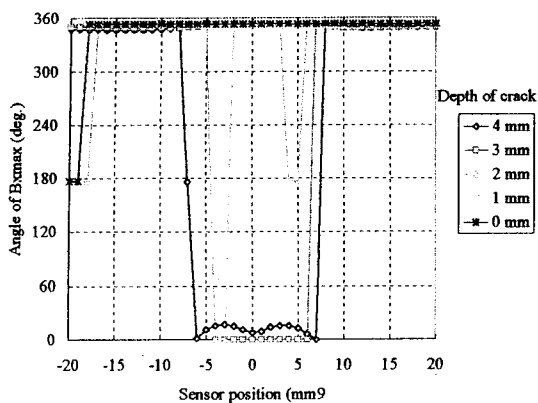


Fig. 2-71 $\Phi_{x\max}$ vs. the sensor position.

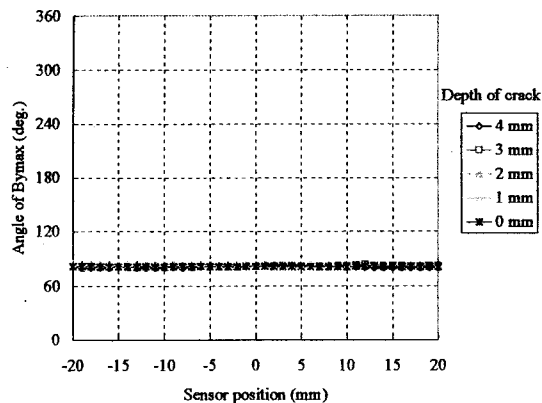


Fig. 2-72 $\Phi_{y\max}$ vs. the sensor position.

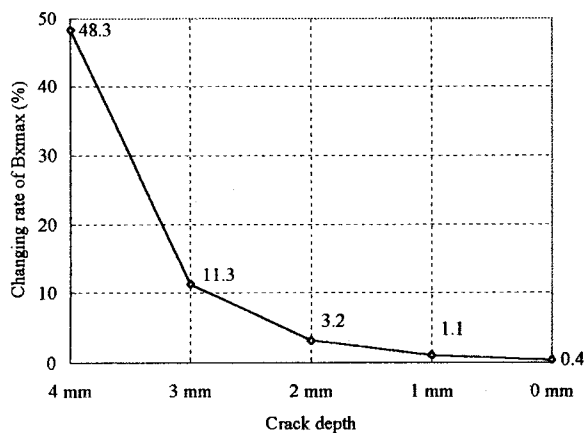


Fig. 2-73 Changing rate of $B_{x\max}$ vs. the crack depth.

4) 差動ピックアップコイル型の欠陥検出特性

Fig. 2-74、Fig. 2-75 に差動 2 軸ピックアップコイルタイプ U 字型磁気センサの各軸方向の欠陥検出特性を示す。欠陥幅は、0.4 mm、励磁周波数は、5 Hz、最大励磁磁束密度は、0.67 T である。なお、この最大励磁磁束密度は、各軸の励磁磁束密度が等

しくなるように励磁電圧を調整した。測定方法等は同じである。

Fig. 2-74 の $B_{x_{max}}$ については、欠陥検出信号の変化が和動 2 軸ピックアップコイルタイプと同様に 2 つのピークを持つ特性となっていることが大きな特徴である。また、その変化率が非常に大きいことも特徴である。各軸の欠陥検出信号は、すべての被検査材について安定しており、2 mm 以上の深さの欠陥を確実に検出している。Fig. 2-75 に示す $B_{y_{max}}$ については、他の形式の回転磁束型磁気センサと同様に大きな変化は示していない。

次に、Fig. 2-76 と Fig. 2-77 にリサーチ波形の軸比 α と傾き角 θ の変化の様子を示す。両者ともあまり有意な変化を示しておらず、この 2 つのパラメータを欠陥の判定に使用することはできない。

Fig. 2-78、Fig. 2-79 に示す $\Phi_{x_{max}}$ 、 $\Phi_{y_{max}}$ は、欠陥の深さ 4 mm、3 mm、2 mm の場合に $\Phi_{x_{max}}$ が大きく変化している。 $\Phi_{x_{max}}$ が大きく変化するのは、ピックアップコイルが差動接続となっているため少しの変化が誇張されて現れるためである。 $\Phi_{y_{max}}$ は、欠陥の深さ 4 mm の場合以外は、きわめて小さい変化しか示していない。これは、欠陥とセンサの Y 軸が平行であるためである。

欠陥深さによる X 軸の出力信号の変化率を Fig. 2-80 に示す。変化率が最大 2,000 % 以上に達しており差動型の特徴がよく現れている。ただし、欠陥が浅くなると急激に変化率は低下する。

この差動 2 軸ピックアップ型の磁気センサは、Z 軸からの信号がなくなって欠陥に対する総合的な情報量が減ったことを考慮に入れてもその信号の変化率が極めて大きく微小欠陥探査用センサとして有用な特性を持っている。

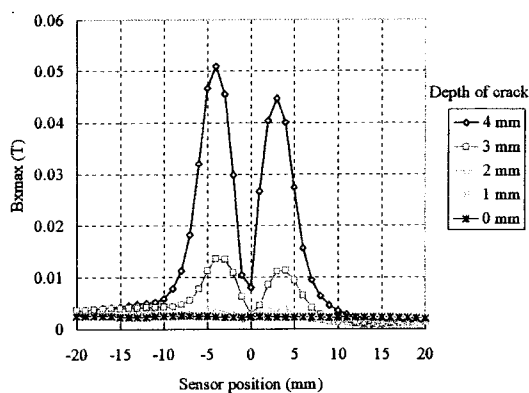


Fig. 2-74 $B_{x_{max}}$ vs. the sensor position.

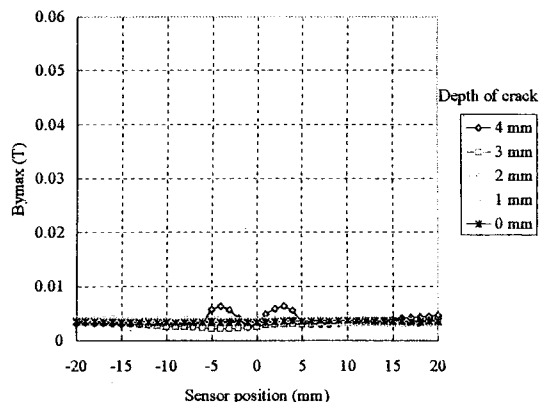


Fig. 2-75 $B_{x_{max}}$ vs. the sensor position.

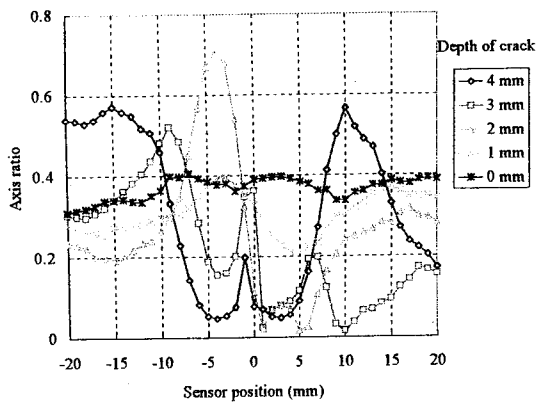


Fig. 2-76 Axis ratio vs. the sensor position.

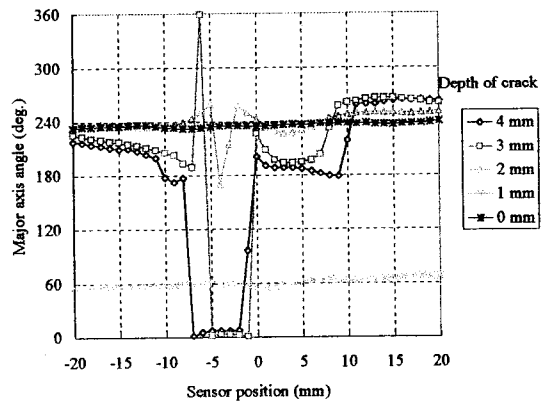


Fig. 2-77 Major axis angle vs. the sensor position.

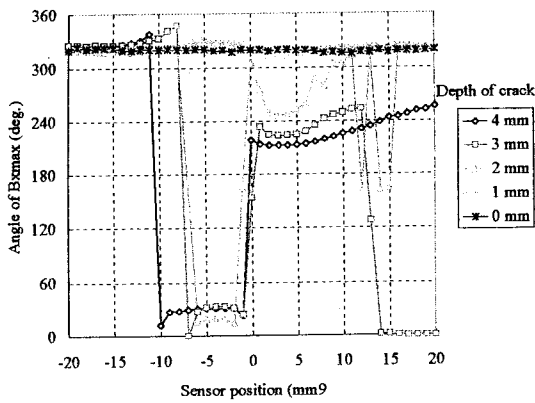


Fig. 2-78 $\Phi_{x_{max}}$ vs. the sensor position.

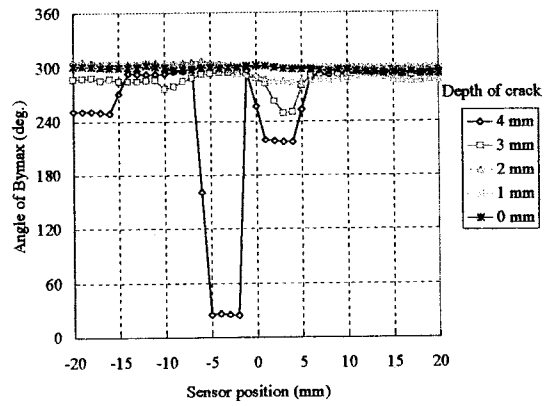


Fig. 2-79 $\Phi_{y_{max}}$ vs. the sensor position.

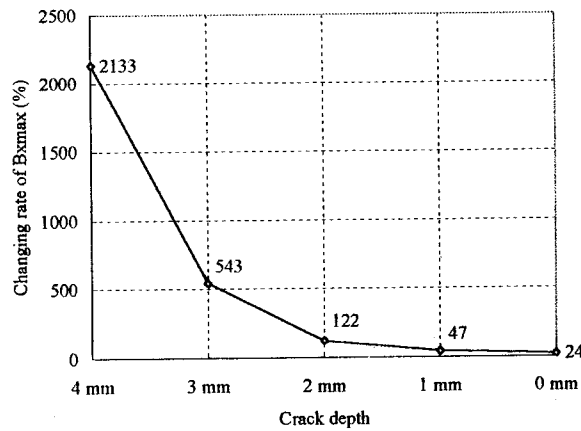


Fig. 2-80 Changing rate of $B_{x_{max}}$ vs. the crack depth.

第2.3節 回転磁束型磁気センサのSN比による比較

2.3.1 概要

第2.2節で大別して4種類の肉厚鋼板裏側欠陥を対象にした回転磁束型磁気センサの欠陥検出特性やその違いを述べた。非破壊評価を目的とした磁気センサにおいては、微小欠陥に対する感度や安定度、測定の容易さ、測定の迅速さなどがセンサを評価する場合の重要な要素となる。なかでも、肉厚金属材の裏側から進行してくる欠陥や裏側に存在する欠陥の探傷を目的とする磁気センサにおいては、各種の雑音に埋もれた微小な欠陥からの信号を検出する必要があり、その感度とともにSN比が大きいことが要求される^[81-82]。ここでは、これらのセンサの欠陥検出特性を信号(S)対ノイズ(N)比(SN比)^[83]を用いて比較する。

2.3.2 肉厚軟鋼板裏側欠陥に対する欠陥検出特性の比較

(1) 磁気センサの種類と実験条件

Fig. 2-81に磁気センサの励磁素子を示す。Type-Aは、空心蝶型磁気センサNo. 1の励磁素子であり、Type-Bは、空心蝶型磁気センサNo. 2の励磁素子である。Type-Cは、U字鉄心型磁気センサの励磁素子である。Fig. 2-82に3種類の欠陥検出素子を示す。Type-1は、Z軸サーチコイルの巻き数によって2種類あり200回巻きのもは、空心蝶型磁気センサNo. 1に用いられたものであり、300回巻きのもは、空心蝶型磁気センサNo. 2に用いられたものである。Type-2は、U字型磁気センサと組み合わせて用いた3軸サーチコイルであり、Type-3は、同じくU字鉄心型磁気センサと組み合わせた和動2軸ピックアップコイルである。

Table 2-2に実験に使用した4種類の磁気センサの励磁素子と欠陥検出素子の組み合わせを示す。Type-A1の磁気センサとは、Type-Aの励磁素子とType-1(Z軸200回巻きのサーチコイル)を組み合わせた磁気センサである^[16]。すなわち、空心蝶型磁気センサNo. 1を示す。また、Type-B1の磁気センサとは、Type-Bの励磁素子とType-1(Z軸300回巻きのサーチコイル)を組み合わせた磁気センサである^[17]。すなわち、空心蝶型磁気センサNo. 2を示す。また、Type-C2は、3軸サーチコイルタイプU字鉄心型磁気センサであり^[19]、Type-C3は、和動2軸ピックアップコイルタイプ磁気センサである。また、この表に、各磁気センサが検出できる磁束密度の方向も示した。Table 2-3に実験を行った際の印加励磁密度や欠陥検出素子のXY軸の最高検出磁束密度の平均値等を示す。また、各センサの名称の括弧内に励磁周波数を示す。励磁周波数は、すべての磁気センサを同一の条件で比較できるように5 Hzと10 Hzを採用した。同様に欠陥の幅もすべて0.4 mmの場合である。

(2) 欠陥検出特性の概要

各磁気センサの $B_{x\max}$ と軸比 α の欠陥による変化の様子は、すでに第2.2節で詳しく述べた。ここでは、Fig. 2-83からFig. 2-86に $B_{x\max}$ の変化の様子をまた、Fig. 2-87からFig. 2-90に軸比 α の変化の様子を示す。 $B_{x\max}$ については、それぞれの磁気センサを同一の条件で比較するため、欠陥なしの被検査材の測定値の平均で規格化したグラフを示す^[81-82]。

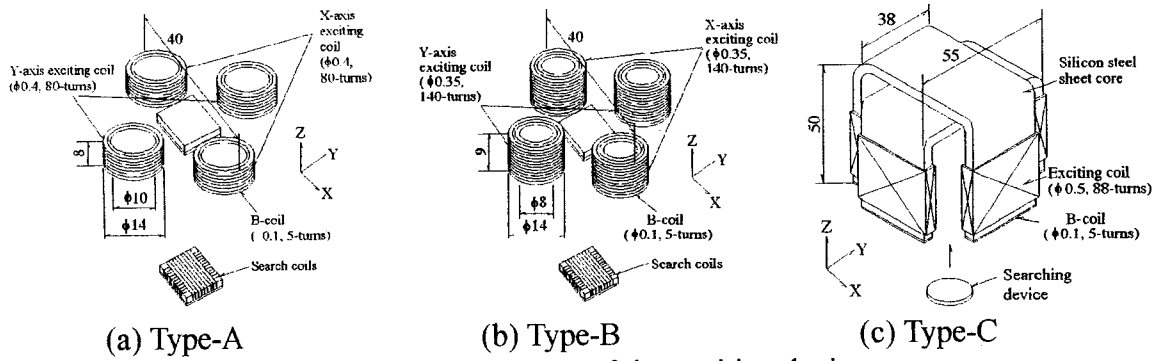


Fig. 2-81 Three types of the exciting device.

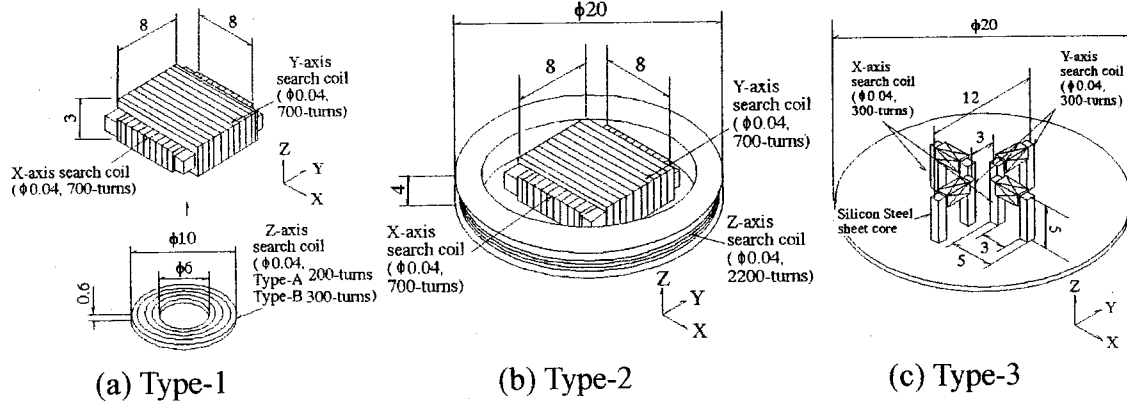


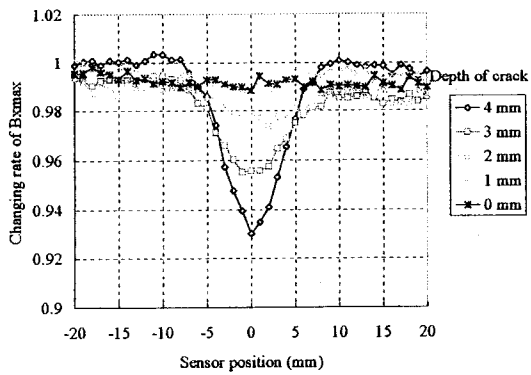
Fig. 2-82 Three types of the searching device.

Table 2-2 Constructions of four types rotational magnetic flux sensors.

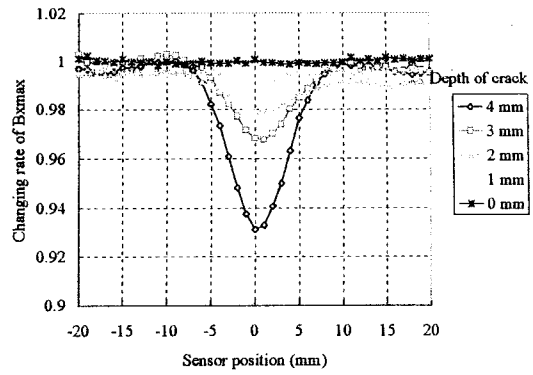
	Exciting Device	Searching Device	Sensing directions
Type-A1	Type-A	Type-1	X, Y, Z
Type-B1	Type-B	Type-1	X, Y, Z
Type-C2	Type-C	Type-2	X, Y, Z
Type-C3	Type-C	Type-3	X, Y

Table 2-3 Measurement conditions.

	Exciting freq.	Applied magnetic flux	Average B_{xmax} and B_{ymax}
Type-A1(5)	5 Hz	0.0058 T	0.002 T
Type-A1(10)	10 Hz	0.0057 T	0.002 T
Type-B1(5)	5 Hz	0.01 T	0.012 T
Type-B1(10)	10 Hz	0.01 T	0.012 T
Type-C2(5)	5 Hz	0.52 T	0.01 T
Type-C2(10)	10 Hz	0.46 T	0.01 T
Type-C3(5)	5 Hz	0.65 T	0.1 T
Type-C3(10)	10 Hz	0.45 T	0.1 T

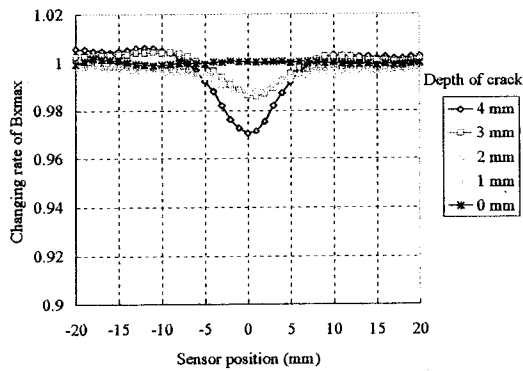


(a) 5 Hz

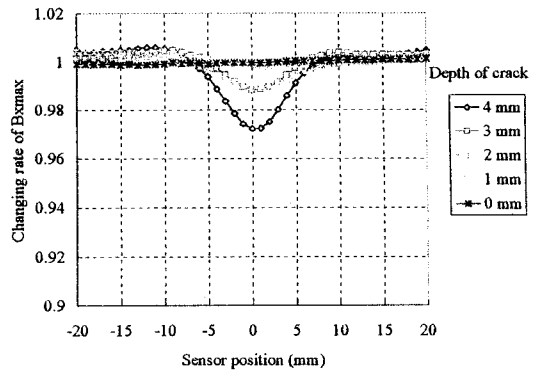


(b) 10 Hz

Fig. 2-83 B_{xmax} vs. the position of the Type-A1 sensor.

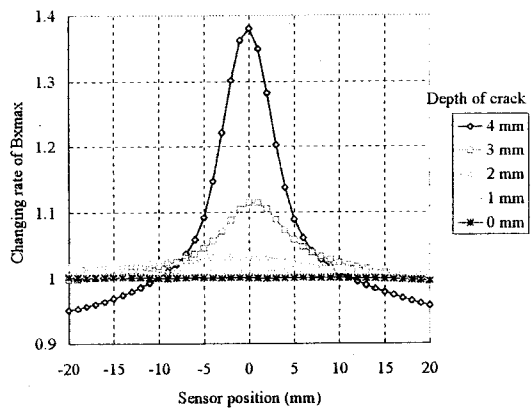


(a) 5 Hz

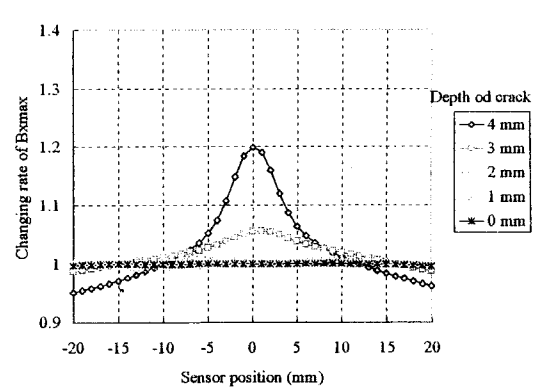


(b) 10 Hz

Fig. 2-84 B_{xmax} vs. the position of the Type-B1 sensor.

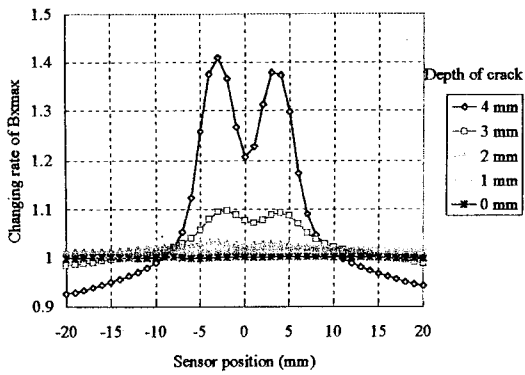


(a) 5 Hz

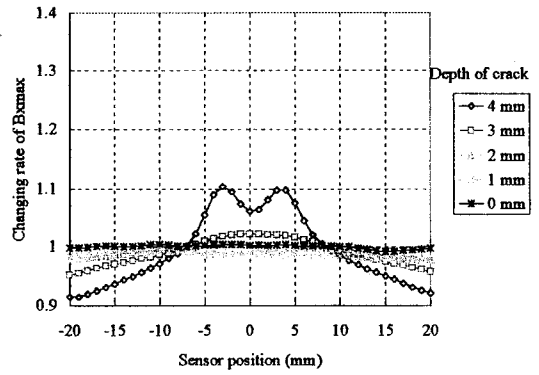


(b) 10 Hz

Fig. 2-85 B_{xmax} vs. the position of the Type-C2 sensor.

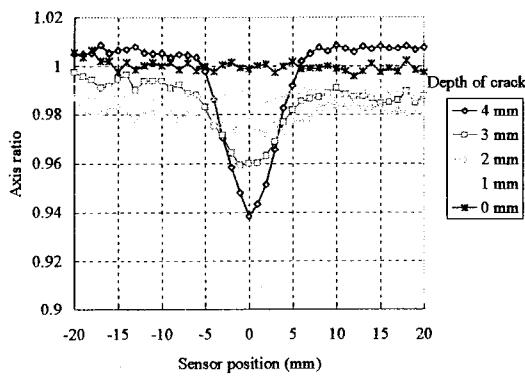


(a) 5 Hz

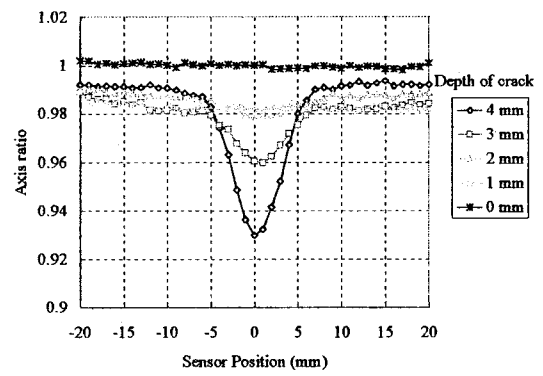


(b) 10 Hz

Fig. 2-86 B_{xmax} vs. the position of the Type-C3 sensor.

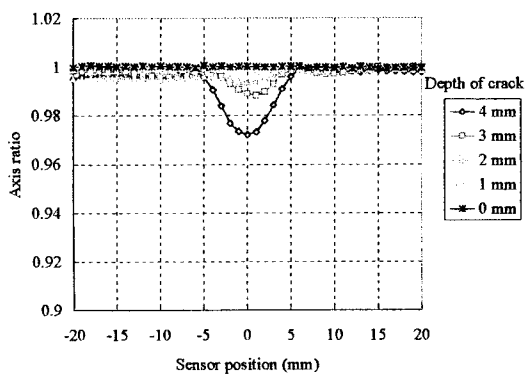


(a) 5 Hz

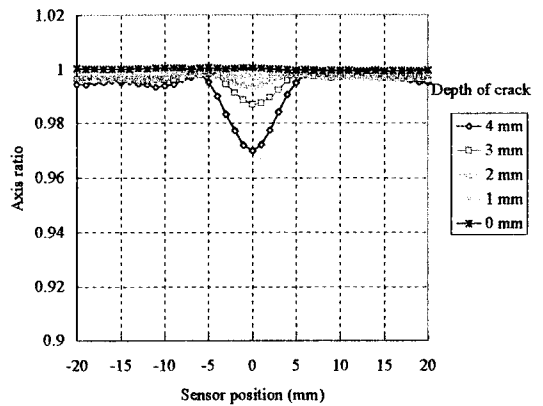


(b) 10 Hz

Fig. 2-87 Axis ratio(α) vs. the position of the Type-A1 sensor.

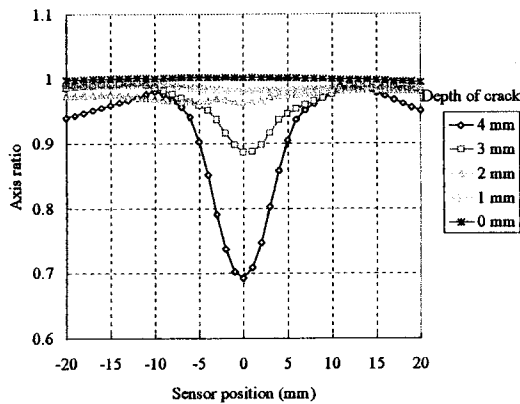


(a) 5 Hz

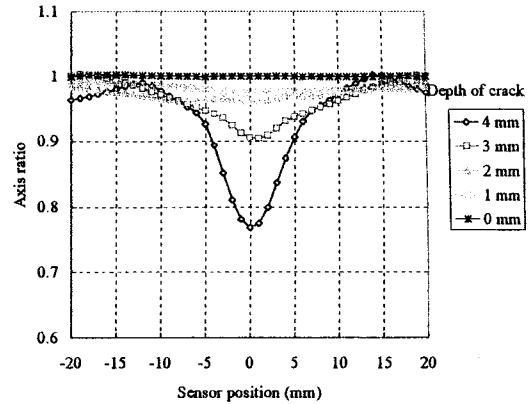


(b) 10 Hz

Fig. 2-88 Axis ratio(α) vs. the position of the Type-B1 sensor.

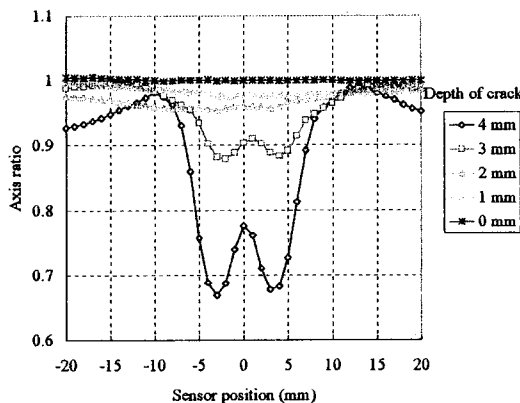


(a) 5 Hz

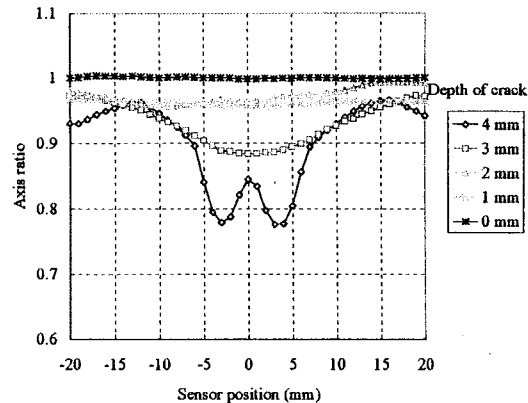


(b) 10 Hz

Fig. 2-89 Axis ratio(α) vs. the position of the Type-C2 sensor.



(a) 5 Hz



(b) 10 Hz

Fig. 2-90 Axis ratio(α) vs. the position of the Type-C3 sensor.

2. 3. 3 SN比の定義

非破壊検査用磁気センサやその測定系には欠陥情報を埋もれさせる雑音が存在する。この雑音は、リフトオフの変化、コンピュータや測定器、電源などから混入する外来雑音、裏側欠陥を対象とする場合は表側欠陥などが考えられる。外来雑音については、電気的な方法（信号線をシールドする、アンプの入力を差動型とする、低雑音アンプを用いるなど）によって相当程度の低減が可能である。一方、リフトオフの変化についても、センサの支持方法等の工夫によってある程度減少させることができる。しかし、たとえ微小なリフトオフの変化であっても測定結果に影響を与えていると考えられる。また、実験においては、表側欠陥は考慮する必要はない。しかし、非破壊検査の現場ではリフトオフの変化や表側欠陥は、裏側欠陥を確実に検出する際の重要な問題となることが予想される。そこで、ここでは、実験に用いた磁気センサの

雑音を、磁気センサだけでなく測定システム全体を含めた雑音とした。また、欠陥検出信号の中にも雑音を含んでおり、欠陥検出信号と雑音は分離することは困難であるので、信号を欠陥検出信号と雑音の重ね合わさったものとした。よって、ここでは、(2-15)式を用いて信号対雑音比 (SNR) を定義した。

$$\text{信号対雑音比 (SNR)} = \frac{\text{雑音を含む欠陥からの信号}}{\text{全雑音}} \quad (2-15)$$

一般に SN 比 (SNR) は、デシベル表示される。

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{S+N}{N} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2-16)$$

次に、測定結果について信号と雑音を定義する。 $B_{x\text{max}}$ を使用した SN 比の比較には、Fig. 2-91 に示すように D_s と雑音 (N_s) をそれぞれ定義した。 D_s は、信号の最大値と最小値の差であり、雑音 (N_s) は、欠陥なし被検査材の測定値の最大値と最小値の差とした。この SN 比による各センサの比較が、より現実に近く厳しい比較となるように、信号 (S+N) を ($D_s - N_s$) とした。軸比 α を用いる場合も、Fig. 2-92 に示すように D_s と雑音 (N_s) をそれぞれ定義し、信号 (S+N) も同様に定義した。なお、 D_s は、2 つピークがある欠陥検出特性であっても単純に最大値と最小値の差とした。よって、この SN 比による比較では、SNR を (2-17) 式で計算した。

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{D_s - N_s}{N_s} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2-17)$$

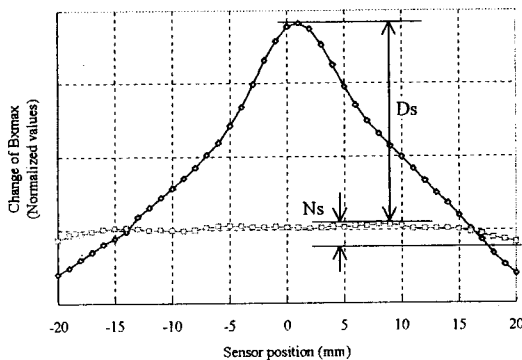


Fig. 2-91 Definition of D_s and N using $B_{x\text{max}}$.

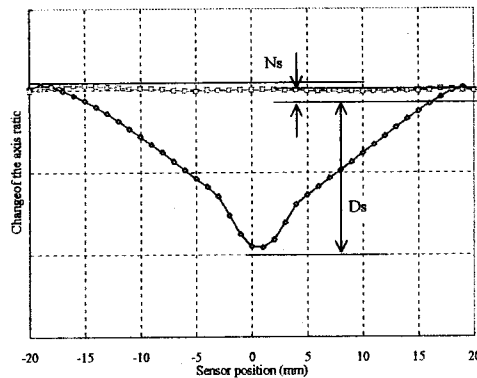


Fig. 2-92 Definition of D_s and N using axis ratio (α).

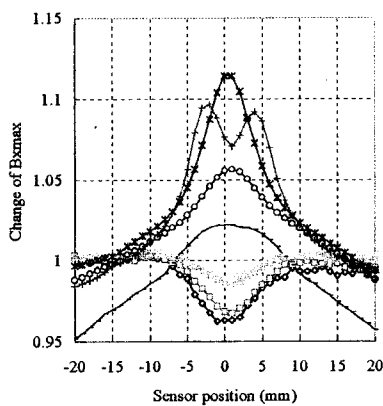
2. 3. 4 X 軸信号を使った SN 比の比較

各センサを $B_{x\text{max}}$ を用いた SN 比で比較する基礎データとして、Fig. 2-93 に欠陥の深さ 3 mm、2 mm、1 mm の場合と欠陥がない場合について $B_{x\text{max}}$ の変化を示す。これらの

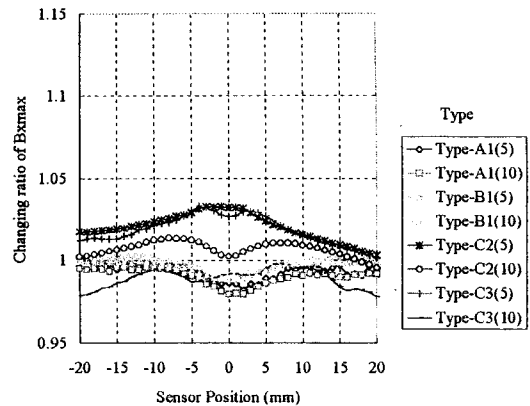
グラフによって各センサの欠陥による信号の変化の様子をはっきり捕らえることができる。Fig. 2-94 の(a)、(b) に Fig. 2-93 から信号 (S+N) や雑音を抽出して、各センサごとに信号 (S+N) や雑音の大きさを示した。Fig. 2-94(a) から Type-A1(5) と Type-C3(10) の雑音が特に大きいことがわかる。また、Fig. 2-94(b) より、信号は、欠陥の深さ 3 mm の場合においては、Type-C2(5)、Type-C2(10)、Type-C3(5) が、欠陥の深さ 2 mm の場合においては、Type-C2(5)、Type-C3(5) が大きくなっている。

最後に、Fig. 2-94(c) より、 $B_{x_{max}}$ を用いた SN 比を比較する。欠陥の深さ 2 mm の時は、Type-A1(5) と Type-C3(10) の SN 比が負の値を示している。この 2 つのセンサは、欠陥の深さ 2 mm は、雑音と信号を区別することができず、2 mm の深さの欠陥を検出できないことを意味している。しかし、他のセンサは、2 mm 以上の欠陥であれば 5 dB 以上の SN 比を持って深さ 2 mm 以上の欠陥を検出できる。特に、Type-B1(10) と Type-C3(5) は、両方の深さの欠陥とも 10 dB 以上の SN 比を持つ低雑音で高感度のセンサとすることができる。

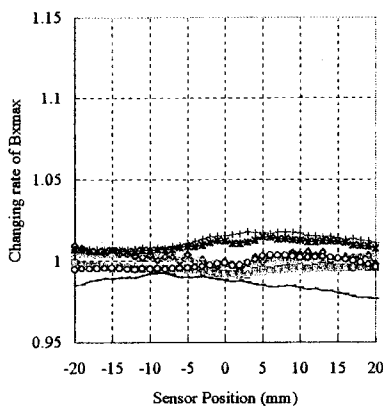
空心型のセンサと鉄心型センサを比べると、空心型では 10 Hz の方がおおむね SN 比が大きな値を示し、鉄心型では、5 Hz が大きくなっている。これは、欠陥検出機構の違いから生じている。



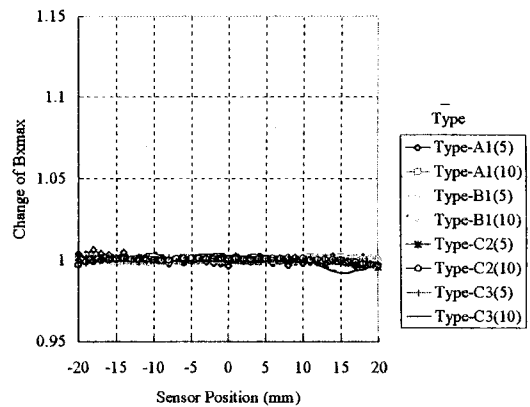
(a) 3 mm depth crack.



(b) 2 mm depth crack.

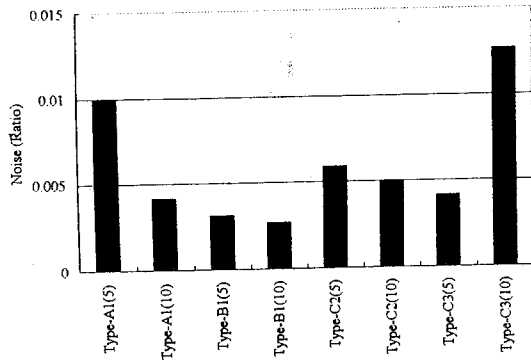


(c) 1 mm depth crack.

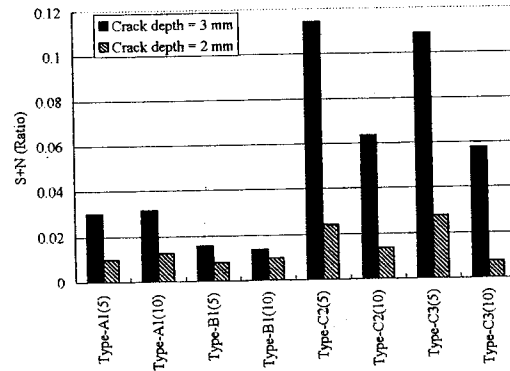


(d) 0 mm (No crack) depth crack.

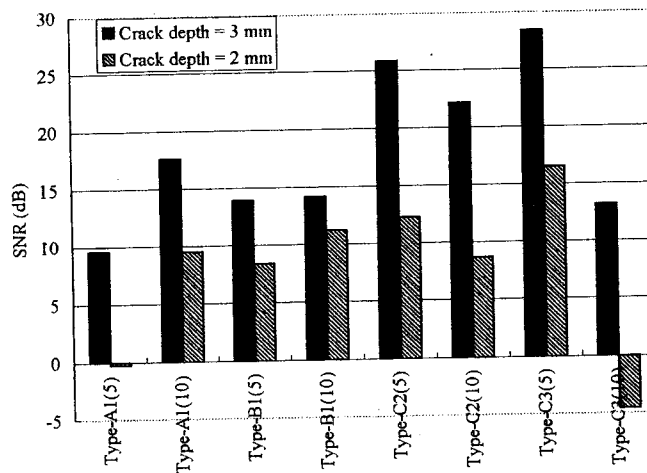
Fig. 2-93 $B_{x_{max}}$ vs. the sensor position.



(a) Noise (0 mm).



(b) S+N (2 mm and 3 mm).



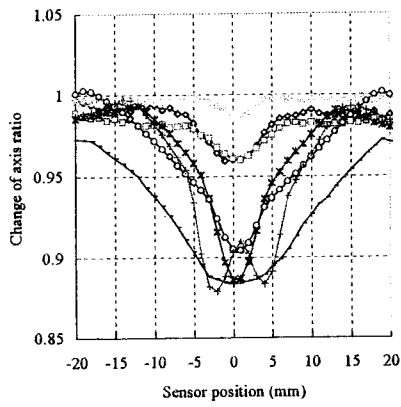
(c) SNR (2 mm and 3 mm).

Fig. 2-94 Results of comparison using $B_{x\max}$.

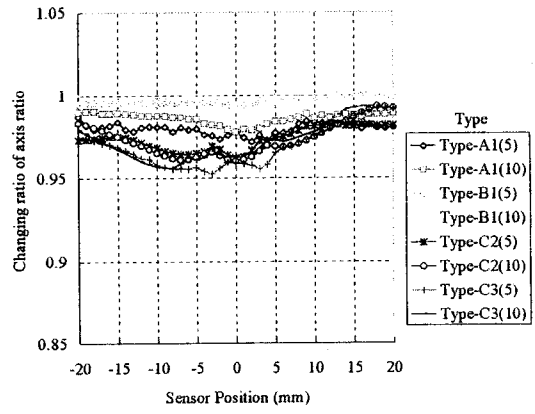
2. 3. 5 軸比 α を使った SN 比の比較

次に、軸比 α の SN 比を各センサごとに比較する。各センサを比較する基礎データとして、Fig. 2-95 に欠陥の深さ 3 mm、2 mm、1 mm の場合と欠陥がない場合について軸比 α の変化をまとめたグラフを示す。Fig. 96 の (a)、(b)、(c) に各センサごとに信号 (S+N) や雑音を抽出したグラフや SN 比のグラフを示す。 $B_{x\max}$ の場合と軸比 α の場合を比較すると、大きな差があることがわかる。それは、全体的に軸比 α を用いた SN 比の方が大きな値を示すことであり、また、欠陥の深さ 3 mm と 2 mm の場合の SN 比の違いが大きいことである。この理由は、軸比 α は、XY 両方向の信号から得られる

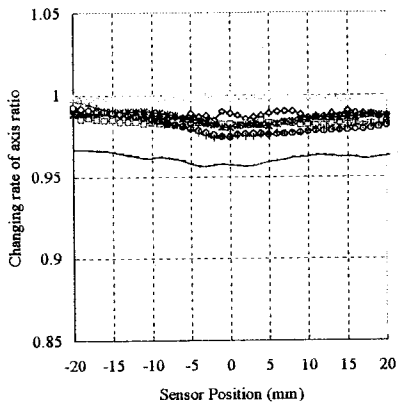
パラメータのため、同じ欠陥に対して X 方向の信号の変化がより大きい鉄心型センサの SN 比が大きくなっているものと思われる。



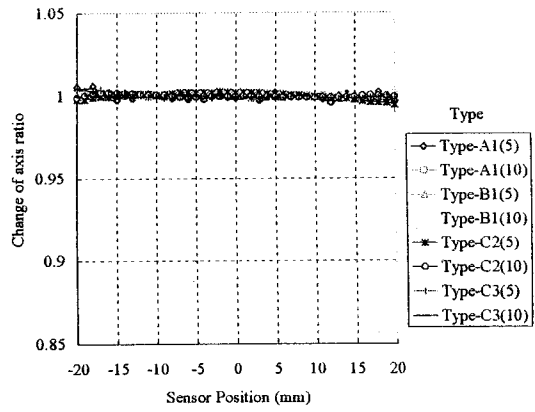
(a) 3 mm depth crack.



(b) 2 mm depth crack.

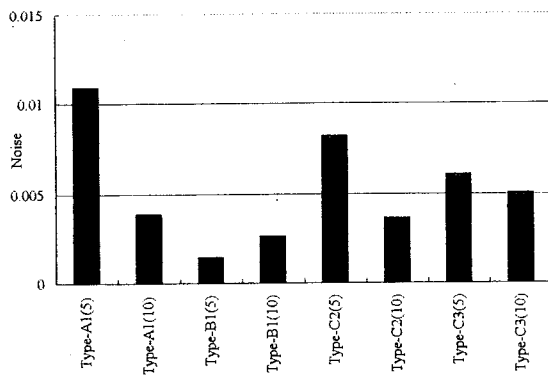


(c) 1 mm depth crack.

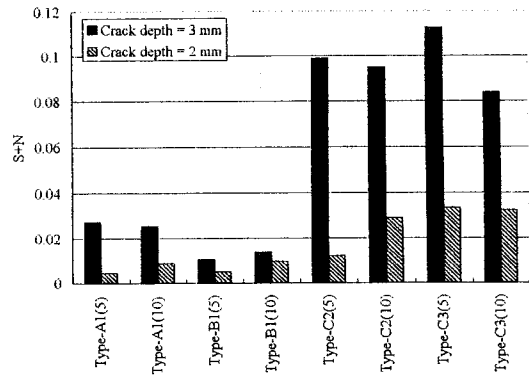


(d) 0 mm (No crack)depth crack.

Fig. 2-95 Axis ratio(α) vs. the sensor position.

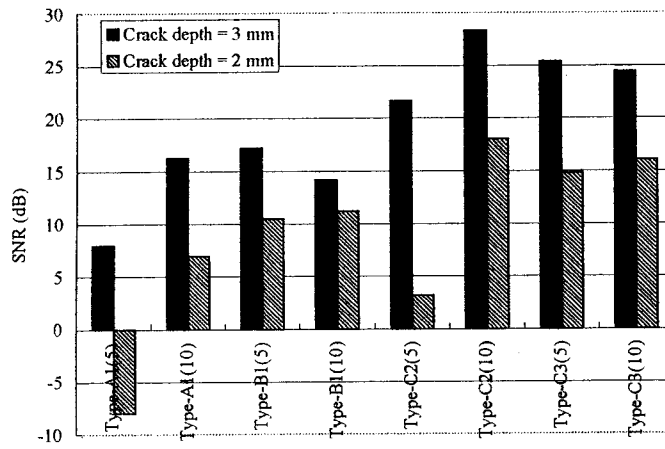


(a) Noise (0 mm).



(b) S+N (2 mm and 3 mm).

Fig. 2-96 Results of comparison using axis ratio (α).



(c) SNR (2 mm and 3 mm).

Fig. 2-96 Results of comparison using axis ratio (α).

第2. 4節 肉厚ステンレス板裏側欠陥の磁気探傷

2. 4. 1 概要

一般にもっとも多く用いられている構造材は、軟鉄や鋼のような鉄系の金属である。しかし、それ以外にもステンレスやインコネルなどの金属も原子力関係や発電関係のプラントなどで重要な部材として数多く使用されている^[1-3, 7-8, 33-34]。そこで、このような材料に対しても高感度で高安定な回転磁束型磁気センサを開発する必要がある。

軟鋼板とステンレスやインコネル 600^[1]の最大の相違点は、比透磁率の違いである。軟鋼板の比透磁率は、数百から数千以上あるのに対してステンレスやインコネルは1に近い値しか持たない。ただし、ステンレスは、その組成によって強磁性体から非磁性体まで変化する^[84]。また、抵抗率も両者で1桁近く異なっている。このように、両者の電気的特性が大きく異なっていることから、電磁界を用いる欠陥探傷用の磁気センサも異なった形状や構成にならざるを得ない。一方、肉厚の薄い非磁性体を対象にした非破壊検査用磁気センサは、渦電流探傷用磁気センサとして広く用いられている^[4]。しかし、この形式の磁気センサは、肉厚な被検査材の中や裏側にある欠陥に関しては、励磁周波数が高く表皮効果が顕著なため感度が十分でないことや、欠陥から得られる欠陥検出信号が含んでいる情報量が少ないことなどの欠点があり現在のところ満足するものではない。この点に肉厚の非磁性体の裏側欠陥を対象とした磁気センサを開発する意義がある。

そこで、肉厚の非磁性体の裏側欠陥を対象とし、欠陥検出信号が多く欠陥に関する情報を含んでいる回転磁束型磁気センサを開発した。試料は、インコネル 600 より多くの場面で使用されているステンレス板を用いた。ここで使用したステンレス板の試料の大きさは、250 mm x 120 mm x 5 mm で、材質は SUS304^[84]である。この板の中央裏側に機械加工で、直径 10 mm の円形欠陥や一辺 10 mm の正方形欠陥などをその深さを変えて作成したものである。欠陥は、疲労などで発生するクラックだけではなく、エロージョンなどのようにある形状を持つ場合がある。よって、ここでは溝型欠陥ではなく、ある形状を持った欠陥とした。また、現在まで、欠陥の形状の違いを区別できるような磁気センサがあまり報告されていないからである。さらに、最近では、磁気を用いた非破壊検査の関心が欠陥の有無だけではなくその属性の決定も興味の対象となってきているからである^[8]。

本節では、ステンレス板の裏側欠陥の検出と形状判定を対象にした回転磁束型磁気センサについてその有用性を示す。また、欠陥形状の判定については回転磁束型磁気センサ固有の性質を利用した「欠陥形状評価指標 δ 」を導入し^[21]、この欠陥形状評価指標 δ が欠陥形状の判定に有効であることを明らかにする。

2. 4. 2 ステンレス板用偏位式磁気センサの構造

Fig. 2-97 に空心 3 軸サーチコイルを備えた軟鉄鉄心励磁式蝶型回転磁束型磁気センサ（鉄心蝶型磁気センサ）の構造の概要を示す^[21]。Fig. 2-98 に鉄心蝶型磁気センサの被検査材と接する面から見た写真を示す。この磁気センサは、空心蝶型磁気センサと同様に NC 工作機械を使用して製作されている。磁気センサの全体の外形寸法は

42 mm x 42 mm x 10 mm である。2 組の励磁コイルを直交するように配置している。一つの励磁コイルの形状は、外径 14 mm、内径 8 mm、高さ 9 mm の円筒形で、励磁磁束を集中させ印加磁束密度を増加させるために内部に直径 6 mm、長さ 10 mm の円筒形の軟鉄コアを備えている。この軟鉄コアは、加工が容易なことから用いた。また、励磁コイルの巻枠は、20 mm 径のアクリル棒を加工した。この励磁コイルは、90 度位相差を持った 2 相電流で励磁され被検査材中に回転磁界を作る。それぞれの励磁コイルは、0.5 mm 径のホルマル線を 60 回巻いている。リフトオフは、0.5 mm である。

各方向のサーチコイルの寸法や巻き数は次のとおりである。XY 方向のサーチコイルは、1 mm 厚のアクリル板の巻枠に互いに直交するように巻かれている。また、寸法は、コイル部の外形 8 mm x 8 mm x 3 mm であり、0.04 mm 径のウレメット線をそれぞれ 700 回巻いている。XY 方向のサーチコイルは、被検査材中を通過しない磁束がサーチコイルと直接鎖交するのを防ぐためにアモルファスコアは内蔵していない。Z 方向のサーチコイルは、外径 10 mm、内径 6 mm、厚さ 0.6 mm のパンケーキ型のコイルで、0.04 mm 径のウレメット線を 300 回巻いている。空心蝶型磁気センサと同様に、3 軸サーチコイルは、励磁コイルの中央に被検査材に接するように配置している。

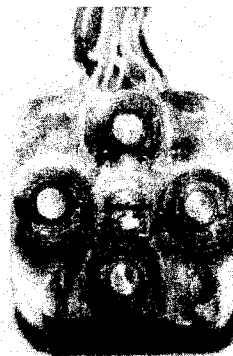
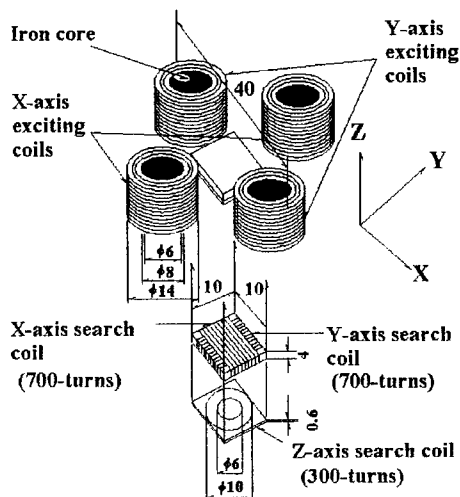


Fig. 2-97 Structure of the magnetic sensor. Fig. 2-98 Photograph of the magnetic sensor.

2. 4. 3 被検査材および実験装置

この実験に用いた測定装置のブロック図を Fig. 2-99 に示す。前節の実験に用いたシステムと同じものである。ただし、LPF のカットオフ周波数や各軸の低雑音アンプの増幅度は、このセンサにあわせて調整した。

測定に先立って、2 つの励磁電圧 (B_x , B_y) で描かれるリサージュ波形が円に近くなるように励磁電圧と各チャンネル間の位相差をプログラムにより自動調整する。リサージュ波形が円に近くなったところ ($\alpha = 0.95$) で測定を開始する。

この実験では、磁気センサは、XY 方向にコンピュータで制御されている XY ステージを用いて 1 mm ごとに移動する。試料の中心を $X = 0$ mm、 $Y = 0$ mm とすると測定は、XY 軸とも -20 mm から +20 mm の範囲を面状に走査した (1681 点)。測定値は、欠陥にセンサが近づく方向を変えて 2 度測定しその平均値を測定値とした。さらに、1 点の

測定値は、励磁周波数の6周期分とし、その平均値を用いた。

被検査材は、Fig. 2-100 に示す形状である。材質は、構造材などにごく一般的に使われているステンレス板 (SUS304) である。板厚は、5 mm である。Fig. 2-101 に示す模擬欠陥は、板の中央部裏側に機械加工されている。欠陥の形状や、深さ (D) は、Table 2-4 に示すように数種類用意した。

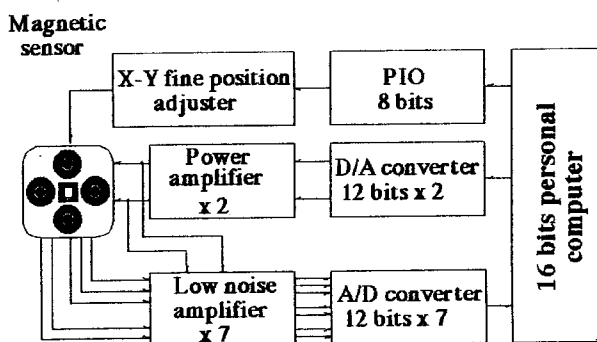


Fig. 2-99 Measurement system.

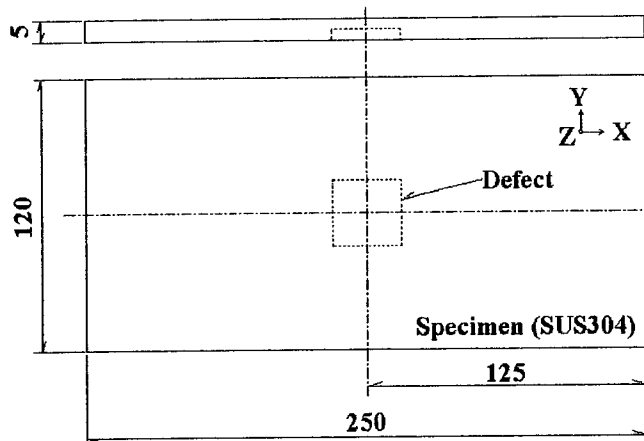


Fig. 2-100 Specimen with a reverse-side defect.

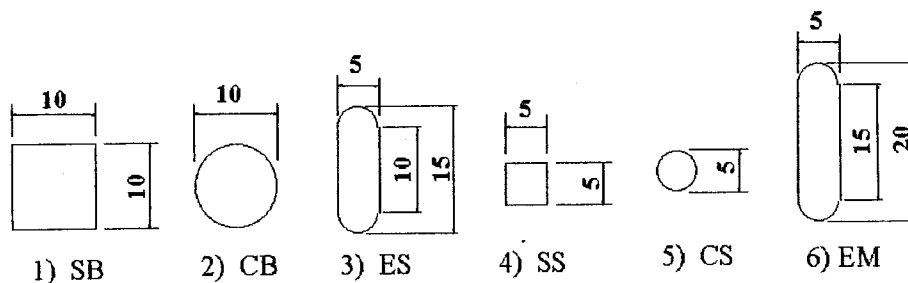


Fig. 2-101 Defect shapes.

Table 2-4 Defect shape and depth.

	Defect shape	Defect depth (mm)			
		4	3	2	1
a	10 mm long square	No. 1	No. 2	No. 3	
b	5 mm long square	No. 4	No. 5	No. 6	
c	10 mm diameter circle	No. 7	No. 8	No. 9	
d	5 mm diameter circle	No. 10	No. 11	No. 12	
e	15 mm long track-shaped	No. 13	No. 14	No. 15	No. 16
f	20 mm long track-shaped	No. 17	No. 18	No. 19	
	No defect	No. 20			

2. 4. 4 鉄心蝶型磁気センサの欠陥検出特性

(1) 欠陥検出機構

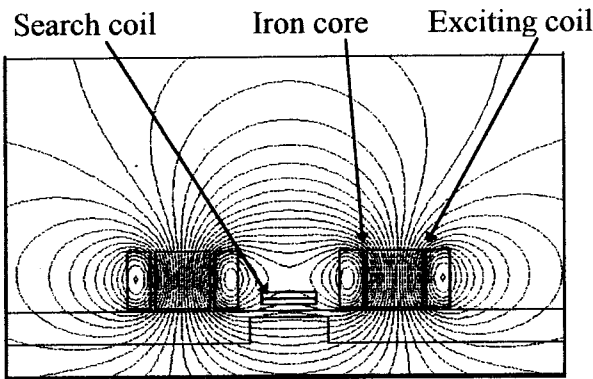
この鉄心蝶型磁気センサが対象とする被検査材は、きわめて低透磁率（比透磁率 μ_r = 約 1.02、導電率 $\sigma = 1.39 \times 10^6$ S/m^[65]）のステンレス（SUS304）である。よって、サーチコイルは、微小な磁気抵抗の変化や試料中に発生する微小な渦電流の変化を捕らえていると考えられる。励磁コイルに鉄心を用いた効果や、サーチコイルからアモルファスコアを除いた効果を確認しながら鉄心蝶型磁気センサの欠陥検出機構を明らかにするために空心蝶型磁気センサと同じメッシュ（Fig. 2-24 参照。）を使い、各材料の電氣的定数を変更して有限要素解析を行った。なお、計算時間短縮のため、被検査材の長さを 250 mm ではなく 200 mm とした。解析条件は、励磁コイルの電流密度 2.2×10^6 A/m、被検査材の導電率 1.39×10^6 S/m、周波数 40 Hz、被検査材の比透磁率は 1.02、軟鉄のコアの比透磁率は 100 である。軟鉄コアの導電率は、 1.0×10^7 S/m とした。

最初に、励磁コイルに鉄心を用い、サーチコイルからアモルファスコアを除いた効果を有限要素法を用いた磁界解析の結果から示す。Fig. 2-102 に励磁コイルとサーチコイルとも空心の場合の磁束線分布を、Fig. 2-103 に励磁コイルを空心としサーチコイルにアモルファスコアを用いた場合を、Fig. 2-104 に励磁コイルとサーチコイルともコアを備えた場合を示す。Fig. 2-102 と Fig. 2-103 または、Fig. 2-104 と比べると励磁コイルに鉄心がないと磁束線分布が粗であり被検査材に印加される磁束密度が小さい。また、サーチコイルにアモルファスコアを持つと、アモルファスコア中を通過する磁束のほとんどが被検査材中を通過していない。これは、欠陥を検出するためには、いったん被検査材中を通過した磁束を検出する必要があり、アモルファスコアを設けることが欠陥検出に不利であることを示している。以上の結果から、励磁コイルに鉄心を持ち、サーチコイルにコアを持たない構造がステンレス板裏側欠陥に検出に有利である。

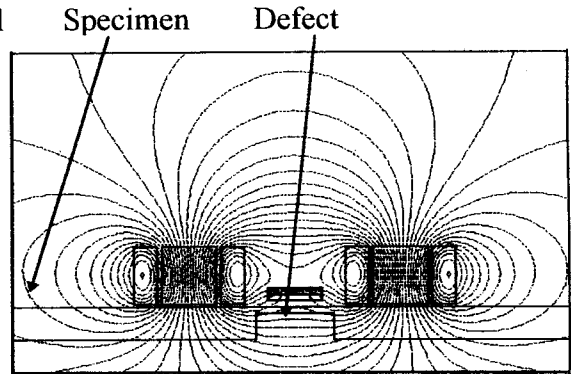
Fig. 2-105、Fig. 2-106、Fig. 2-107 に励磁コイルに鉄心を持ち、サーチコイルにコアを持たない構造の鉄心蝶型磁気センサの磁束密度分布を示す。これらの図を比較すると、欠陥の有無、欠陥と磁気センサの相対位置などで磁束線分布が微妙に変化している。この変化が欠陥検出信号となり、サーチコイルにより検出される。ただし、これら磁束線分布の図は、3次元形状の磁気センサや被検査材を2次元化して解析して

いる関係で実際の磁束線分布とは多少異なっている。

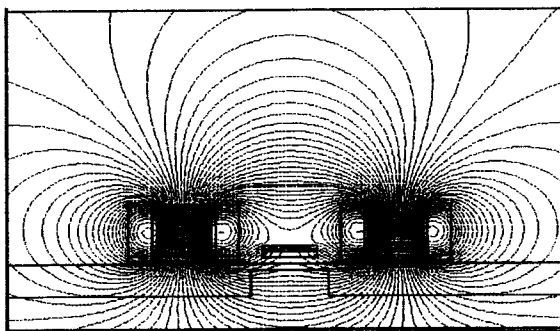
次に、Z軸サーチコイルで検出する被検査材表面の磁束密度 ($B_z, \omega t = 0$) とセンサの位置の関係を解析した。欠陥幅 10 mm、深さ 4 mm の場合である。計算結果を Fig. 2-108 と Fig. 2-109、Fig. 2-110 に示す。Fig. 2-108 は、被検査材の比透磁率 μ_r を 1.02、導電率 σ を 1.39×10^6 S/m として $B_z (\omega t = 0)$ を計算した結果である。Fig. 2-109 は、被検査材の比透磁率 μ_r を 1.0 とし渦電流による影響だけを考慮して $B_z (\omega t = 0)$ を計算した結果である。さらに、Fig. 2-110 は、被検査材の導電率 σ を 0 S/m として磁気抵抗の影響のみを考慮して $B_z (\omega t = 0)$ を計算した結果である。これらのグラフは、3次元形状の欠陥を2次元化して解析している関係上、Fig. 2-105 から Fig. 2-107 の図と同様に実験結果との厳密な一致は見られないが、欠陥の端付近で値の変動が大きくなっている点は実験結果と一致している。以上の結果から、Z軸の信号の変化には、磁気抵抗の変化と渦電流の変化が相互に関係している。



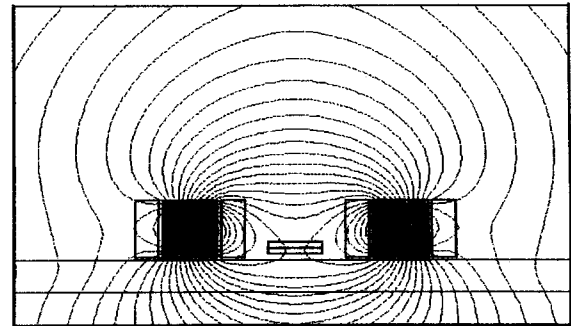
With a crack(Crack depth = 4 mm, $\omega t=0$)
Fig. 2-102 Flux distribution by F.E.M..
 $\sigma(\text{Iron core}) = 0, \mu_r(\text{Iron core}) = 1,$
 $\mu_r(\text{Amorphous core}) = 1$



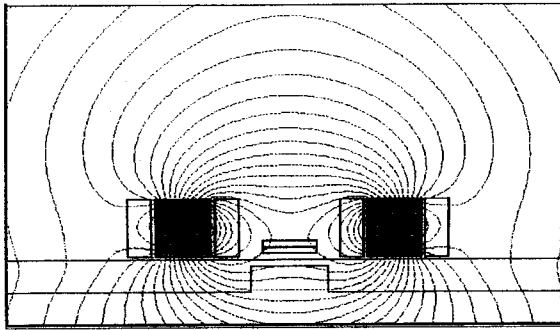
With a crack(Crack depth = 4 mm, $\omega t=0$)
Fig. 2-103 Flux distribution by F.E.M..
 $\sigma(\text{Iron core}) = 0, \mu_r(\text{Iron core}) = 1,$
 $\mu_r(\text{Amorphous core}) = 30,000$



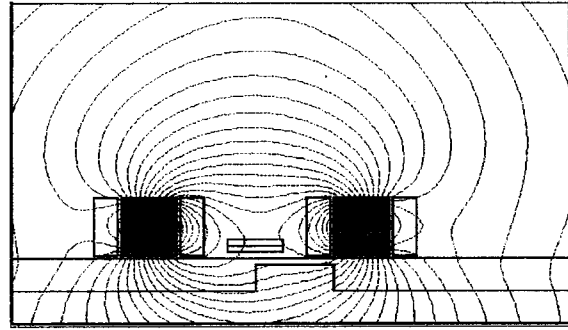
With a crack(Crack depth = 4 mm, $\omega t=0$)
Fig. 2-104 Flux distribution by F.E.M..
 $\sigma(\text{Iron core}) = 1.0 \times 10^7 \text{ S/m}, \mu_r(\text{Iron core})$
 $= 100, \mu_r(\text{Amorphous core}) = 30,000$



Without a crack($\omega t=90$)
Fig. 2-105 Flux distribution by F.E.M..



With a crack(Crack depth = 4 mm, $\omega t=90$)
Fig. 2-106 Flux distribution by F.E.M.



With a crack(Crack depth = 4 mm, $\omega t=90$)
Fig. 2-107 Flux distribution by F.E.M.

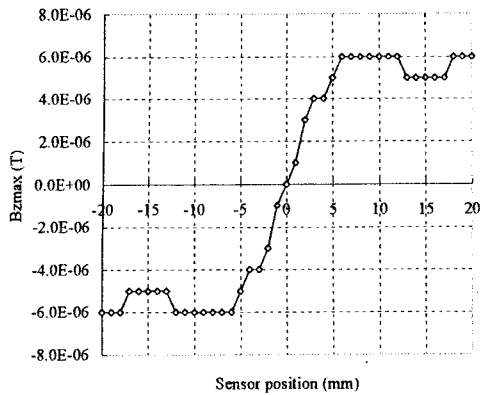


Fig. 2-108 B_z vs. the sensor position
(Result of F.E.M.)

$$\sigma(\text{Specimen}) = 1.39 \times 10^6 \text{ S/m}, \mu_r(\text{Specimen}) = 1.02$$

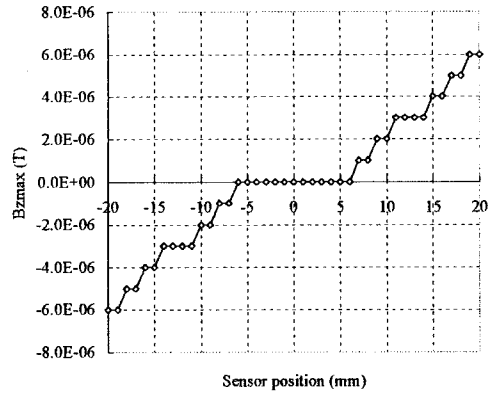


Fig. 2-109 B_z vs. the sensor position
(Result of F.E.M.)

$$\sigma(\text{Specimen}) = 1.39 \times 10^6 \text{ S/m}, \mu_r(\text{Specimen}) = 1$$

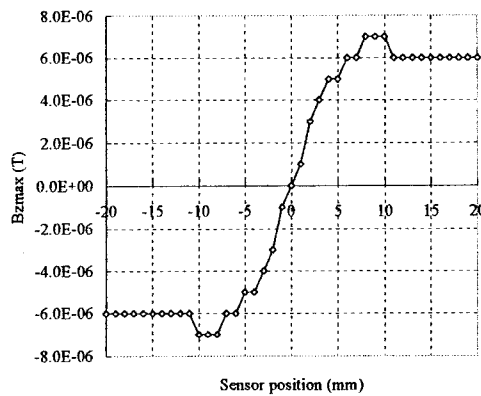


Fig. 2-110 B_z vs. the sensor position(Result of numerical analysis).
 $\sigma(\text{Specimen}) = 0 \text{ S/m}, \mu_r(\text{Specimen}) = 1.02$

(2) 欠陥検出特性

実験は、次の条件で行った。従来の研究結果から^[7-8]非磁性体の表側欠陥に対する磁気探傷では、比較的高い励磁周波数が渦電流を強く誘起することから有利であることがわかっている。しかし、ここでは、軟鉄製励磁コア中の渦電流等を考慮して40 Hzを励磁周波数として採用した。印加磁束密度は、欠陥のない部分においてXおよびY

方向のサーチコイルで検出される磁束密度を 0.013 T になるように励磁した。この時の印加電流の最大値は、X および Y 方向とも約 1 A である。印加磁束密度をサーチコイル部の磁束密度で規定したのは、 B_x 、 B_y で描かれるリサージュ波形の軸比 α と B_{zmax} で欠陥の評価を行うために、無欠陥部でリサージュ波形が円となるように調整する必要があるからである。無欠陥部でリサージュ波形の軸比 α が 0.95 以上になるまで、励磁コイルに印加する電圧の大きさや位相差をフィードバック制御を利用して制御用コンピュータで自動調整し、測定系のキャリブレーションを行った。測定は、試料中央部の欠陥の上下左右 20 mm を 1 mm 毎に行った。さらに、1 回の測定は、励磁周波数の 6 周期分の平均とし、同じ点を欠陥に磁気センサが近づく方向を変えて 2 回測定しその平均を測定値とした。Fig. 2-111 に磁気センサの配置やステンレス板試料の寸法、測定点の配置を示す。試料中央部裏側に、各種形状の模擬欠陥が設けられている。欠陥の深さは、試料毎に 1 mm ずつ変化させている（欠陥なし (0 mm), 1 mm ~ 4 mm）。

一方、この実験では、サーチコイルで検出する電圧信号が非常に微小なことから、測定値に含まれるノイズが相対的に多くなっている。その様子を Fig. 2-112 に示す。このノイズの原因は、電磁的な外来ノイズ、リフトオフの微小な変化、被検査材表面の微小な凹凸などが考えられる。これらのノイズの原因を取り除くために信号線のシールド、リフトオフの変動の抑制などを行った。しかし、最終的に残ったノイズは、信号処理法の工夫によって抑制した。ここで、採用した方法は、画像処理などで頻繁に用いられているメディアンフィルタ^[85-86]とした。このフィルタは、ノイズを押さえ効果の大きいことと、信号の急変部の状態をよく保存する特徴を持っている。Fig. 2-113 に Fig. 2-112 と同じデータに 2 次元のメディアンフィルタ処理を施した結果を示す。ノイズが押さえられ、かつ、変化は保存されていることがわかる。以後、この節のデータはすべてメディアンフィルタ処理を施したものをを用いる。

Fig. 2-113 から Fig. 2-116 は、5 mm 厚のステンレス板裏側にある直径 10 mm の円形欠陥の深さ 4 mm の場合のセンサの位置と欠陥検出信号の関係を示している。 B_{xmax} については、欠陥検出信号は、明確には現れていない。また、 B_{ymax} については、欠陥の存在する位置で信号の多少の盛り上がりが見られ欠陥を捕らえている。さらに、 B_{zmax} については、欠陥の上下端付近で大きくはっきりとした変化が見られる。この図から、明らかに欠陥を捕らえている。リサージュ波形の軸比 α についても欠陥付近で明らかに変化しており欠陥を検出している。

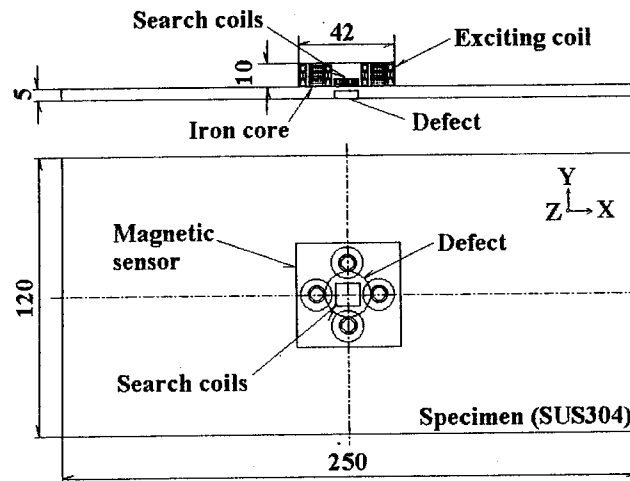


Fig. 2-111 Distribution of the magnetic sensor and measurement positions.

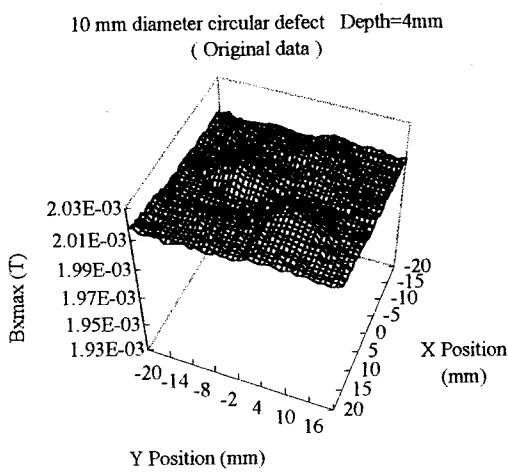


Fig. 2-112 $B_{x\max}$ vs. the sensor position.

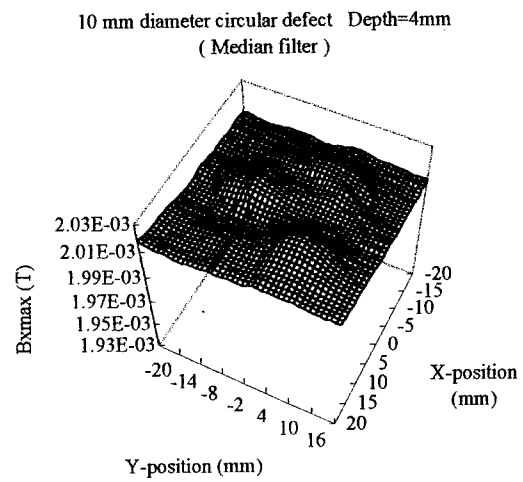


Fig. 2-113 $B_{x\max}$ vs. the sensor position.

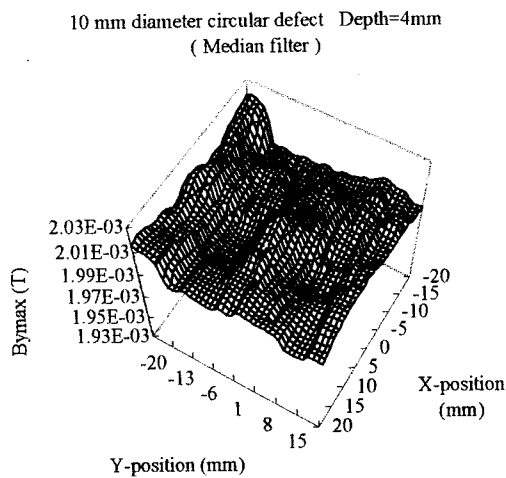


Fig. 2-114 $B_{y\max}$ vs. the sensor position.

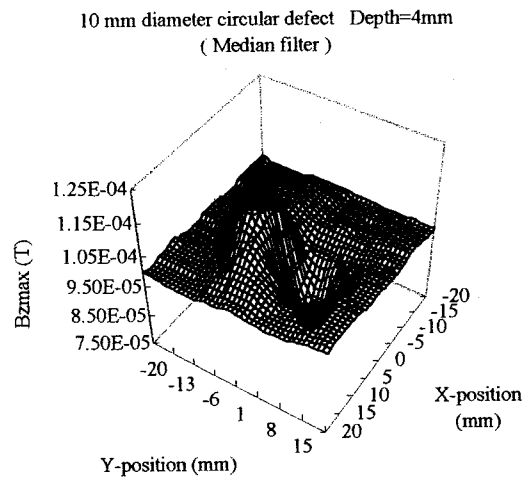


Fig. 2-115 $B_{z\max}$ vs. the sensor position.

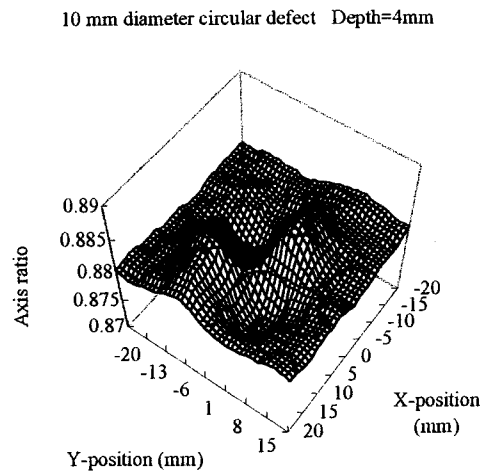


Fig. 2-116 Axis ratio(α) vs. the sensor position.

2. 4. 5 欠陥形状評価指標 δ による欠陥形状の評価

鉄心蝶型磁気センサは、被検査材表面近傍の XYZ の 3 軸方向の磁束密度の変化を捕らえることのできる 3 軸サーチコイルを備えているので、すべての信号を利用して欠陥の形状を評価することが鉄心蝶型磁気センサを効果的に活用する上で必要である。そこで、X 軸、Y 軸の両方の信号の大きさと位相を同時に含んだ欠陥評価指標であるリサージュ波形の軸比 α と Z 軸の信号の最大値である B_{zmax} を利用して欠陥形状評価指標 δ を定義した。

リサージュ波形の軸比を α 、その平均値を $\bar{\alpha}$ 、 B_{zmax} の平均値を $\overline{B_{zmax}}$ として欠陥形状評価指標 δ を (2-18) 式で定義した^[21]。また、Fig. 2-117 に 2-18 式を利用して欠陥形状評価指標 δ を算出した例を示す。

$$\delta = (\alpha - \bar{\alpha}) \cdot (B_{zmax} - \overline{B_{zmax}}) \quad (2-18)$$

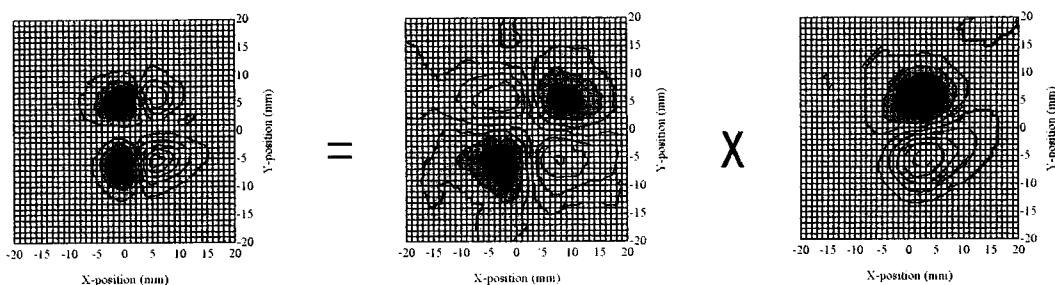


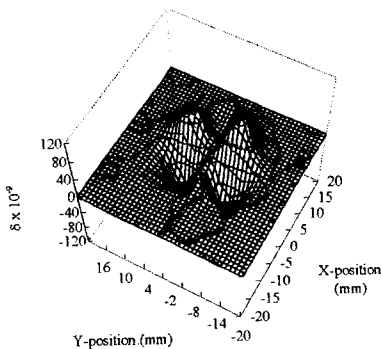
Fig. 2-117 Definition of δ (10 mm long square defect, Depth=4 mm).

Fig. 2-115 と Fig. 2-116 より上式を使用して欠陥形状評価指標 δ とセンサの位置の関係性を求めたものを Fig. 2-118 に示す。また、Fig. 2-119 は、Fig. 2-118 のグラフ形式を変更したものである。以下の各種比較に用いるグラフは、欠陥の形状や深さによって欠陥形状評価指標 δ の分布の差異を明確に判別できる Fig. 2-119 の形式のグラフ

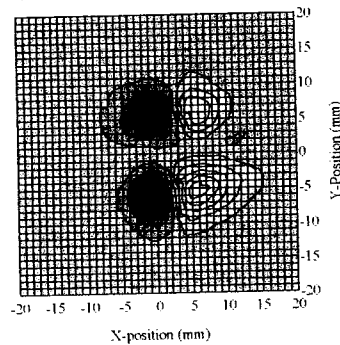
を用いることにする。一方、このグラフは、欠陥形状評価指標 δ の -1.1×10^{-7} から 1.1×10^{-7} の範囲を 11 等分し、最小段階を黒、最大段階を白で表したものである。ただし、Fig. 2-120 については、欠陥形状評価指標 δ の変化が小さいため -5.5×10^{-8} から 5.5×10^{-8} の範囲としている。

Fig. 2-119 から Fig. 2-124 に各種形状の欠陥の場合の欠陥形状評価指標 δ とセンサの位置の関係を示す。すべての欠陥の深さは、4 mm である。これらすべての図において欠陥形状評価指標 δ の変化が顕著に認められる位置は、欠陥の端部分である。この原因は、この部分で被検査材中に誘起される渦電流の流路が大きく変化するためや磁気抵抗が急変する場所であるからである。当然、Fig. 2-124 は、欠陥を持たない被検査材なので欠陥形状評価指標 δ は変化していない。Fig. 2-119、Fig. 2-121、Fig. 2-122 の場合は、欠陥が Fig. 2-120、Fig. 2-123 の場合と比べて大きく欠陥形状評価指標 δ の変化も大きくはっきりとしている。この原因は、サーチコイルの大きさより欠陥の大きさが小さいことが原因である。Fig. 2-125 に直径 10 mm、深さ 3 mm の円形欠陥の場合の欠陥形状評価指標 δ の分布を示す。また、Fig. 2-126 に同形状欠陥の深さ 2 mm の場合を示す。両図を比較するとこれも明らかな違いを見せており、この欠陥形状評価指標 δ は、欠陥の深さによっても有意な変化を示すパラメータである。

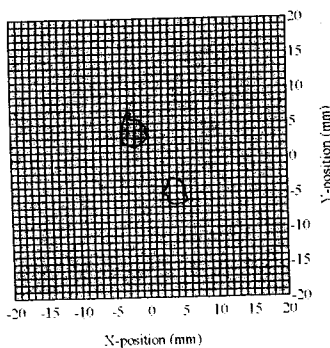
以上の結果から、欠陥の形状や深さにより欠陥形状評価指標 δ の分布は、明らかに異なっている。



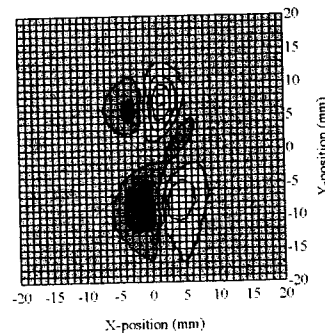
10 mm diameter circular defect(4 mm)
Fig. 2-118 δ vs. the sensor position.



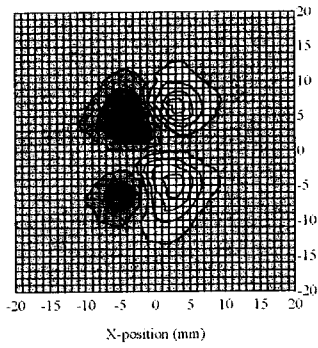
10 mm diameter circular defect(4 mm)
Fig. 2-119 δ vs. the sensor position.



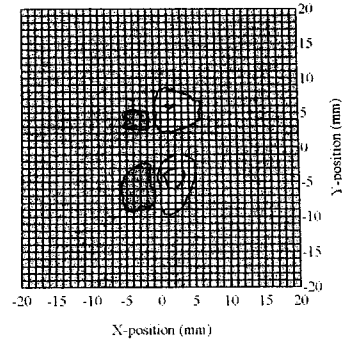
5mm diameter circular defect(4 mm)
Fig. 2-120 $\delta * 2$ vs. the sensor position.



15 mm long track-shaped defect(4 mm)
Fig. 2-121 δ vs. the sensor position



10 mm long square defect(4 mm)
Fig. 2-122 δ vs. the sensor position.



5mm long square defect(4 mm)
Fig. 2-123 δ vs. the sensor position.

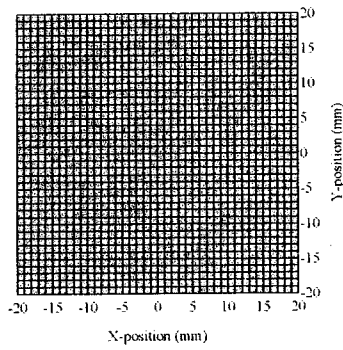
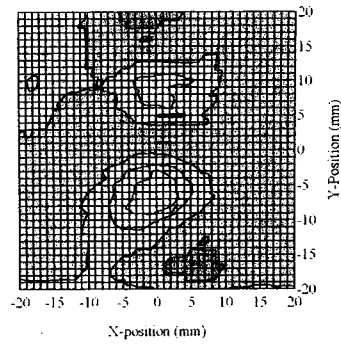
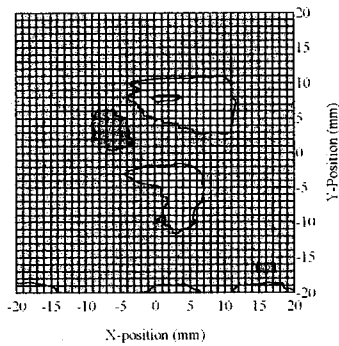


Fig. 2-124 δ vs. the sensor position(No defect.)



10 mm diameter circular defect(3 mm)
Fig. 2-125 δ vs. the sensor position.



(10 mm diameter circular defect(2 mm))
Fig. 2-126 δ vs. the sensor position.

第2. 5節 結言

この章では、従来、磁気を使った非破壊検査ではあまり取り上げられなかった、肉厚の軟鋼板やステンレス板の裏側に存在する欠陥を探傷することを目的にして数種類の偏位式回転磁束型磁気センサを独自に考案・試作し、その基本的な欠陥検出特性や周波数特性などを調べた。その結果以下のような知見を得た。

(1) 偏位式回転磁束型磁気センサについて

- a. 従来の磁気センサの励磁は直流、あるいは交番磁界であった。そのため、試料に垂直に進入する磁束が多く、深部までの進入は表皮効果などの影響で困難であった。しかし、回転磁束型磁気センサは4個の磁極を持つため試料に平行な励磁磁界の成分があり、しかも、回転する磁界で欠陥を検出するため裏側欠陥に対して感度が向上した。
- b. 旧型の回転磁束型磁気センサの検出コイルが励磁ヨークに巻かれていて、大きな磁束の通過する部分の小さな磁束の変化を検出する必要があったことに比較すると、励磁系と測定系を分けることによって励磁系からの干渉を減少させ微小信号の検出が容易になった。
- c. 旧型の回転磁束型磁気センサの検出コイルの設置場所は、励磁ヨークの脚部に限定されていたが、励磁系と測定系を分けることによって両者の設計に自由度が増し、多くの種類の励磁系や測定系を組み合わせることが可能となった。
- d. さらに、従来の回転磁束型磁気センサが、磁気抵抗の変化を中心に捕らえていたのに対して、励磁系と測定系を分けることによって、被検査材に欠陥が存在することによって様々に変化する被検査材の磁氣的性質の変化や渦電流の変化を複合して捕らえることが可能となった。
- e. 励磁系を閉磁路とすることによって安定で大きな欠陥信号を得ることができるが、空心としても必要な情報量や質は確保でき、目的によって励磁方法を選択する事が可能であることがわかった。
- f. ステンレス板のような非磁性体の被検査材についても回転磁束とアモルファスコアを除いた3軸サーチコイルを組み合わせた磁気センサは有効であることがわかった。

(2) 3軸サーチコイルについて

- a. 今回新たに提案した3軸サーチコイルは、被検査材表面近傍の磁束密度の変化を3次元のベクトル値として捕らえることができるので1点の測定で多くの欠陥に関する情報が得られ、1次元の測定（本章の実験で言えば、X方向に欠陥を横断して1回のみ測定。）で、欠陥の方向角 ϕ を推定可能であった。
- b. XYの両方向の信号を利用してリサージュ波形を書き、その軸比 α や傾き角 θ を定義して欠陥判定のパラメータとすることを提案したが、これは、信号の大きさのみでなく位相も含めて評価できるパラメータなので欠陥属性判定のために有用であった。
- c. 鋼板裏側欠陥については、3軸サーチコイルにアモルファスコアを内蔵することによって高感度化が達成できたが、ステンレス板裏側欠陥に対しては、空心とすることが有効であった。

(3) 2軸ピックアップコイルについて

- a. 和動型2軸ピックアップコイルは、出力特性が2つピークを持つ特性となり欠陥の位置の特定などで困難を来す場合があった。
- b. 差動型2軸ピックアップコイルは、出力信号の変化幅がきわめて大きく、出力特性が2つピークを持つ特性となるなどの欠点もあるが、今後さらに改良することによって高感度な磁気センサを実現できる可能性がある。
- c. 2軸ピックアップコイルは3軸サーチコイルに比べてZ軸の情報分だけ欠陥からの情報が減少するが、欠陥検出信号は大きく欠陥の存在によって変化した。

(4) 試作した回転磁束型磁気センサ全般について

- a. 試作・実験を行った3種類の磁気センサ全てにおいて、2 mmの欠陥を確実に検出できた。また、軸比 α や傾き角 θ などのパラメータを組み合わせることによって1 mmの深さの軟鋼板裏側欠陥の位置が特定できるセンサが製作可能であった。
- b. 深さ2 mm程度以下の軟鋼板裏側溝型欠陥を探傷する場合、欠陥検出信号が、欠陥の周りを流れる渦電流によって影響を受けるため、励磁周波数によっては、欠陥検出信号が、大きく検出されたり、小さく検出される場合がある。このことは、最適な励磁周波数を用いれば、さらに、浅い欠陥の検出もできる可能性を示唆している。
- c. 回転磁束型磁気センサは、欠陥からの多くの情報が1点の測定で得られる反面、扱う信号の数が多いため信号の処理系（低雑音アンプやA/D変換器、測定用プログラムなど。）が複雑になる欠点がある。これは、信号処理系に高速で高価なものを必要とするわけではないので、コンピュータやICの進歩や特化などで今後解決できる余地は十分ある。
- d. 磁気センサで裏側に存在する微小欠陥を検出するためには、高いSN比を必要とすることが、 B_{max} や軸比 α を用いた比較から明らかになった。高いSN比を実現するには、磁気センサのみではなく、測定系全体のノイズ低減が重要である。
- e. 今回の空心型の磁気センサの励磁コイルは、アクリル板の溝の中に巻き込んでいるので自己発熱した熱を発散させる効果が低い。そのため、温度上昇がサーチコイルにおよび、出力特性が変化する傾向が見られた。
- f. 欠陥形状評価指標 δ は、鉄心蝶型磁気センサと組み合わせることによってステンレス板裏側欠陥の形状や深さなどによって明らかに変化し、欠陥からの情報量の多い回転磁束型磁気センサならではの有効なパラメータである。