

第3章 差動式回転磁束型磁気センサの欠陥検出特性

第3.1節 緒言

第2章では、高周波励磁の渦電流探傷法では検出の困難さから従来あまり対象とされていなかった肉厚鋼板裏側の欠陥や肉厚ステンレス板裏側欠陥を対象とし欠陥検出素子を分離した偏位式回転磁束型磁気センサの動作解析や欠陥検出特性の検証を実験や数値解析を通して行った。その結果、実験を行った全ての偏位式回転磁束型磁気センサにおいて、5 mm厚軟鋼板やステンレス板裏側の2 mm以上の深さの欠陥をよい精度で検出できるなど従来の磁気センサでは得られなかった高い感度が得られた。また、これらの偏位式回転磁束型磁気センサの欠陥検出機構に関しても解明した。

一方、偏位式に対する差動式という方式がある^[13-15]。この差動という考え方は、計測の分野以外の他の分野、たとえば、OPアンプの入力回路などに差動増幅回路は、広く用いられている。OPアンプの入力回路などに用いられる差動増幅回路は、入力信号の差分だけを増幅の対象とする。そのため、2個のトランジスタをペアで使用した差動増幅回路は、同相雑音に強く、回路を構成している2つのトランジスタの温度が同時に変化すれば2つのトランジスタの定数も同時に変化し、温度による影響を最小限に押さえることができるという特徴を持っている^[87]。一般に差動という考え方を導入した素子や回路、機器などは、入力信号の変化分(差分)だけを取り扱うことで同相の外乱に対して自己補償性を持たせていると言える。非破壊検査用センサにおいても欠陥検出素子に差動の考え方を導入して欠陥の存在する部分だけで磁気センサから出力信号が現れるようにした磁気センサも用いられている。たとえば、直径数mm程度のパンケーキ型コイルを近接して同一平面上に並べ、欠陥がない場合には、両コイルの誘導起電力が平衡し出力は現れないが、欠陥があると両コイルの誘導起電力に差が生じその差が出力信号となるような差動式のセンサがある^[33]。また、単一のコイルであってもその形状の工夫によって欠陥部のみで信号が得られる差動式センサもある^[35-36, 52-53]。

この第3章では、回転磁束型磁気センサに差動の考え方を導入した差動式回転磁束型磁気センサの詳細を示し、差動式回転磁束型磁気センサの有効性を明らかにする。差動式回転磁束型磁気センサは、肉厚軟鋼板裏側欠陥を対象に2種類、肉厚ステンレス板裏側欠陥を対象に1種類開発した。肉厚軟鋼板裏側欠陥を対象にした磁気センサは、次のような基本的考え方をもとに開発した。第一に、励磁磁気回路を閉磁路とした形式の回転磁束型磁気センサは、強印加磁束密度が得られることや、漏れ磁束が少ないことからこの形式を採用することにした。第二に、肉厚軟鋼板裏側欠陥を対象にした場合は、被検査材と同材質の欠陥を持たない比較検査材を用意し、両者の信号の差を出力信号とする形式とした。第三に、欠陥検出素子を複数個用意し、それぞれの素子の誘導起電力の差を取ることで差動を実現することとした。さらに、第四として、センサの欠陥に対する空間分解能を向上させるため、センサ自体をなるべく小さく作成し、小さな範囲の欠陥検出信号の差成分を得るようにした。また、肉厚ステンレス板裏側欠陥を対象にする場合は、ステンレス板が磁性をほとんど持たないことから励磁磁気回路を閉磁路にできないことをのぞいて肉厚軟鋼板裏側欠陥を対象にした場合と同様の考え方を採用し、製作した。

第3.2節では、肉厚軟鋼板裏側欠陥を対象にして、励磁コアをけい素鋼板で製作し被検査材と同質の材料で作られた比較検査材を持つ3軸差動サーチコイルを備えた回転磁束型磁気センサ(3軸差動サーチコイル型磁気センサ)^[22,27]と励磁コアをフェライトコアで製作した3軸差動ピックアップコイルを備えた回転磁束型磁気センサ(3軸差動ピックアップコイル型磁気センサ)^[23-24]を開発し、この2種の磁気センサの欠陥検出機構や欠陥検出特性などを明らかにする。また、これらの磁気センサの欠陥検出信号が大きな変化を示し、非常に高感度であることを示す。さらに、3軸差動サーチコイル型磁気センサの3つの欠陥検出信号を欠陥に関するベクトル信号と見なし、その大きさを欠陥評価指標 κ と定義した。この欠陥評価指標 κ は、欠陥の存在面や方向角 ϕ で明らかな変化を示し欠陥の評価に利用できる可能性を示した。第3.3節では、3軸差動ピックアップコイル型磁気センサの磁気等価回路を作成し、磁気等価回路を用いたシミュレーションが実験結果とよく一致することを示す^[25]。さらに、第3.4節では、肉厚ステンレス板裏側欠陥を対象にして、3軸差動ピックアップコイル型磁気センサについてその欠陥検出機構や欠陥検出特性などを明らかにする。この磁気センサの欠陥検出信号を利用した欠陥形状評価指標 χ を提案し、その有用性を明らかにする^[26]。最後に第3.5節では、この章で得られた成果を要約する。

第3. 2節 肉厚軟鋼板裏側欠陥の磁気探傷

3. 2. 1 概要

本研究で開発した差動式回転磁束型磁気センサは、3軸差動サーチコイル型磁気センサと3軸差動ピックアップコイル型磁気センサの2種類である。3軸差動サーチコイル型磁気センサの特徴は、差動接続された2個の3軸サーチコイルを持つことと、欠陥を持つ被検査材からの信号と比較するために欠陥を持たない比較検査材を備えていることである。5 mm厚軟鋼板裏側の1 mmの欠陥をはっきりと検出できる非常に高感度の磁気センサである^[22, 27]。また、3軸差動ピックアップコイル型磁気センサの特徴は、励磁ヨークにフェライトコアを用い一体型で製作したことと、全体の寸法が小型であることである^[23-25]。この磁気センサは、軟鋼板の比較検査材を用いることで強磁性体の軟鋼板裏側欠陥に対して有効であり、さらに、第3. 4節で述べるように非(弱)磁性体のステンレス板裏側欠陥に対しても高感度なセンサである。

以下、この第3. 2節では、肉厚軟鋼板裏側欠陥を対象にした2種類の差動式回転磁束型磁気センサの構造、基本的欠陥検出特性などの詳細について述べ、その有効性を示す。

3. 2. 2 軟鋼板用差動式磁気センサの構造

(1) サーチコイル型磁気センサの構造

3軸差動サーチコイル型磁気センサの特徴は、2個の3軸サーチコイルを持つことと、欠陥を持つ被検査材からの信号と比較するために欠陥を持たない比較検査材を備えていることである。回転磁束型磁気センサは、被検査材中に回転磁束を作ることによって従来の磁気センサが持っていた欠陥検出感度の方向性などの多くの欠点を克服した。しかし、回転磁束を作るためには、XとYの90度位相の異なった2相磁界が必要であることから4個の励磁コイルか、4本の励磁用の磁極が同一平面上に必要である。そのため、被検査材からの信号と比較検査材からの信号の差をとる構造とするにはその構造が制限される。そこで、3軸差動サーチコイル型磁気センサは、Fig. 3-1に示すような構造とした。同一寸法や巻き数で4個のけい素鋼板製励磁ヨークを備えた励磁コイルを作り、蝶型磁気センサと同一の形態に配置した。この励磁コイルで囲まれた部分の中央部上下にお互いに幾何学的に対象となるように3軸サーチコイルを配置する。それぞれの3軸サーチコイルは、被検査材と比較検査材の間に一定のリフトオフを取って固定した。ここで比較検査材は、被検査材の欠陥のない部分での3軸サーチコイルの各出力電圧がなるべく等しくなるように被検査材と同質の材料で製作した。Fig. 3-1では、被検査材は、センサの下部に配置する。Fig. 3-2にほぼ組立の終了した3軸差動サーチコイル型磁気センサの写真を示す。

この磁気センサの各励磁コイルや3軸サーチコイルの配置を決定する枠は、10 mm厚の亚克力板をNC工作機械を使用して加工した。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。磁気センサの全体の外形寸法は50 mm x 50 mm x 20 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、30 mm x 10 mm x 20 mm である。励磁ヨークは 0.35 mm 厚で 20 mm x 20 mm のけい素鋼板を 8 枚重ねて製作した。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、0.4 mm 径のホルマル線を 140 回巻いている。リフトオフは、0.12 mm あるいは、0.188 mm である。励磁ヨークと比較検査材と間は接している。また、それぞれの励磁ヨークは、被検査材から 0.5 mm の位置に印加磁束密度測定用の B-コイルを巻いた。B-コイルは、0.1 mm 径のホルマル線を 5 回巻いている。

Fig. 3-3 に 3 軸差動サーチコイル型磁気センサを用いた 3 軸サーチコイルの構造を示す。また、Fig. 3-4 にリード線を接続する前の 3 軸サーチコイルの写真を示す。これらの図からわかるようにこの 3 軸サーチコイルは、全体の寸法を少し小さくしたことと XY 軸のサーチコイルの巻き数が少し少ないことをのぞけば、空心蝶型磁気センサに用いたものと同様である。全体の寸法を小さくしたのは、磁気センサの近接欠陥に対する空間分解能を向上させるためである。また、全体の寸法を小さくしたため、XY 軸の巻き数を減らさざるを得なかった。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 (5 mm x 5 mm) を設けた 0.5 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 5 mm x 5 mm x 3 mm であり、0.04 mm 径のウレメット線をそれぞれ 500 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 (5 mm x 5 mm x 0.5 mm) が内蔵されている。Z 方向のサーチコイルは、外径 8 mm、内径 4 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。サーチコイルは、その複雑かつ微細な構造から手作りで行わざるを得なかった。そのため、2 個の 3 軸サーチコイルが完全に同一の性能とはならなかった。また、XY 軸サーチコイルと Z 軸サーチコイルの配置に多少の誤差が生じた。

このような比較検査材を用いる形式の差動型磁気センサの場合、比較検査材の寸法が問題になる。被検査材の寸法に比べて比較検査材が小さいと欠陥がない部分でサーチコイルの出力電圧のバランスがとれない。また、大きいと磁気センサ上部が磁気センサを保持したりする際のじゃまになり測定に不便である。そこで適当な大きさの比較検査材が必要になる。この節で示す実験データは、80 mm x 80 mm x 5 mm の寸法を持つ比較検査材を使い、各軸のサーチコイルの出力電圧のバランスを電子回路的にとった^[28]。

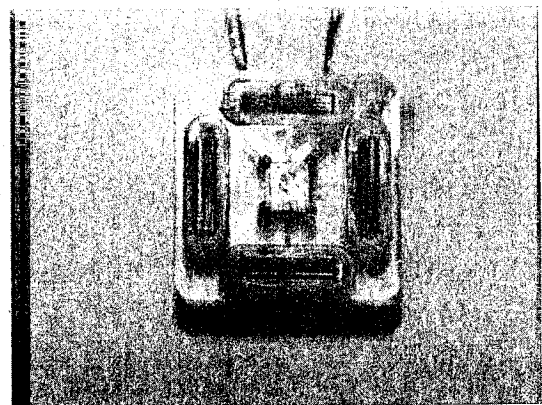
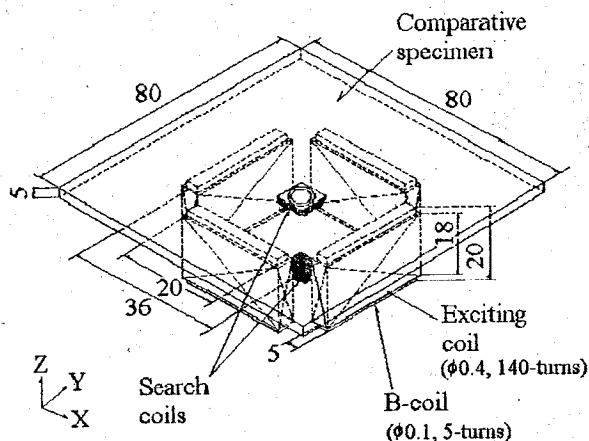


Fig. 3-1. Structure of the magnetic sensor. Fig. 3-2 Photograph of the magnetic sensor.

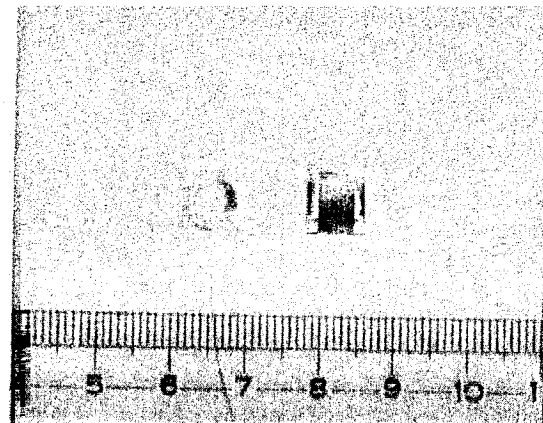
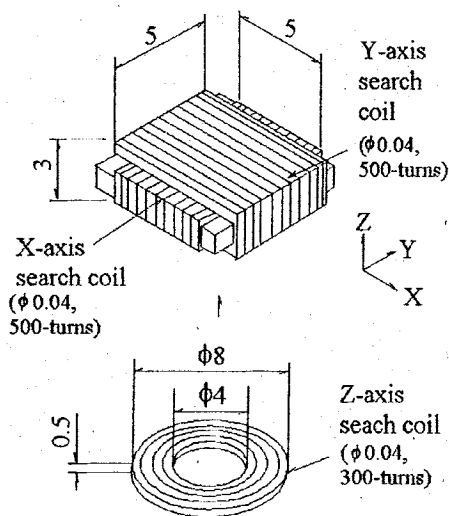


Fig. 3-3 Structure of the three axis search coil. Fig. 3-4 Photograph of the three axis search coil.

(2) ピックアップコイル型磁気センサの構造

3軸差動ピックアップコイル型磁気センサは、軟鋼板裏側やステンレス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。励磁用コイルや印加磁束密度測定用コイルは、従来の回転磁束型磁気センサと同様にそれぞれ2組備えているが、欠陥からの信号を捕らえるピックアップコイルをXY軸は、4個、Z軸は2個持っていることが大きな特徴である。全体の寸法を小さくしたのは、将来、3軸差動ピックアップコイル型磁気センサを複数配列した探索範囲の広いアレイ型磁気センサの開発を考慮したためである。ここでは、単体の3軸差動ピックアップコイル型磁気センサの欠陥検出特性などを議論する。軟鋼板の被検査材については、欠陥を持つ被検査材からの信号と比較するために欠陥を持たない比較検査材を用いた。

3軸差動ピックアップコイル型磁気センサは、全部で3個製作した。No.1のフェライトコアの材質は、Mn-Zn系フェライトのML-24D(日立金属)である。No.2とNo.3のフェライトコアの材質は、No.1と同等のものである。また、No.1とNo.2は、肉厚軟鋼板裏側欠陥用とし、No.3は、肉厚ステンレス板裏側欠陥用とした。3軸差動ピックアップコイル型磁気センサの構造をFig.3-5に示す。Fig.3-6に巻き線の終了した3軸差動ピックアップコイル型磁気センサ(No.1)の写真を示す。Fig.3-7にNo.2の磁気センサの被検査材と接する面から見た写真を示す。磁気センサ後部に軟鋼板で製作した比較検査材が見える。No.3の3軸差動ピックアップコイル型磁気センサについては、ステンレス板用としたため第3.4節で示す。

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、0.2mm径のホルマル線を60回巻いている。No.1の3軸差動ピックアップコイル型磁気センサでは、リフトオフは、0.12mmとした。No.2およびNo.3の磁気センサでは、0.188mmの厚さのシートを使用した。励磁コイルの下に巻かれている励磁磁束密度測定用のB-コイルは、0.1mm径のホルマル線を6回巻いている。XY方向のピックアップコイルは、フェライトコアの脚部端の8箇所に0.04mm径のウレメット線をそれぞれ20回(No.1 and No.2)あるいは50回(No.3)巻いている。さらに、Z方向のサーチコイルは、0.04mm径のウレメット線を20

回 (No. 1 and No. 2) あるいは 50 回 (No. 3) 巻いた。また、XY 方向のピックアップコイルについては、センサの上部の 2 つのコイルおよび下部の 2 個のコイルを和動接続とし、上部と下部の接続を差動接続とした。Fig. 3-8 に各コイルの配置を示し、Fig. 3-9 に Fig. 3-8 の A 面で磁気センサをカットした場合の各ピックアップの配置を示す。磁気センサの Y 軸に関しては、X 軸と幾何学的に対称である。Fig. 3-10 に各ピックアップコイルの相互の接続の概念図を示す。X 軸で言えば、 X_1 と X_3 を和動接続になるように接続し、 X_2 と X_4 も同様に和動接続とした。この 2 組の出力を差動接続とした。これによって、欠陥を持つ可能性のある被検査材と比較検査材を比較することができる。No. 1 の 3 軸差動ピックアップコイル型磁気センサの各ピックアップコイルの相互の接続は、各ピックアップコイルのリード線の接続で和動、差動を実現し、不平衡出力電圧をなるべく小さくするため、比較検査材の寸法を、100 mm x 100 mm x 5 mm とした^[23, 24]。No. 2 および No. 3 の磁気センサの場合は、OP アンプで作られた差動増幅器で 10 倍に増幅した後、和動、差動の接続を実現した。よって、比較検査材の寸法を、80 mm x 80 mm x 5 mm とした^[25, 28]。

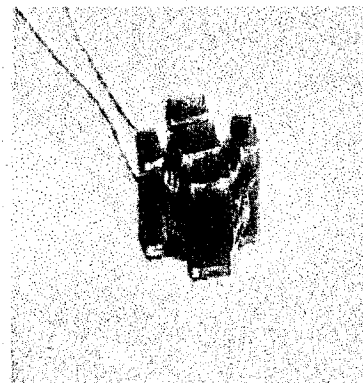
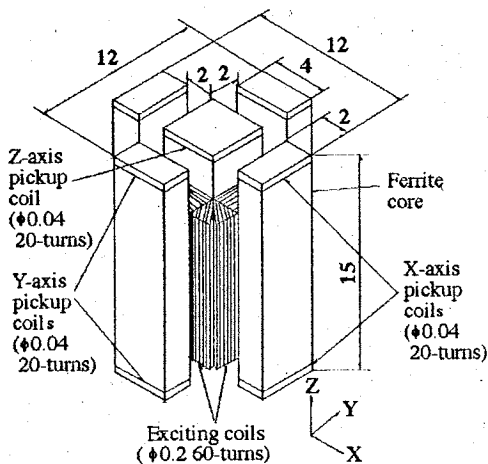


Fig. 3-5 Structure of the magnetic sensor. Fig. 3-6 Photograph of the magnetic sensor.

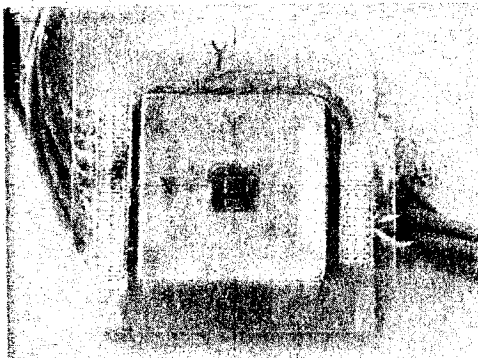


Fig. 3-7 Photograph of the magnetic sensor with a comparative specimen.

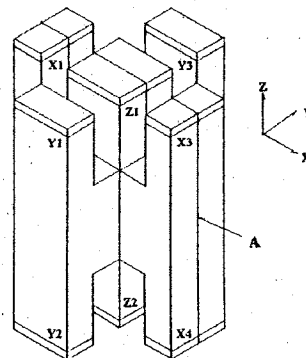


Fig. 3-8 Distribution of pickup coils.

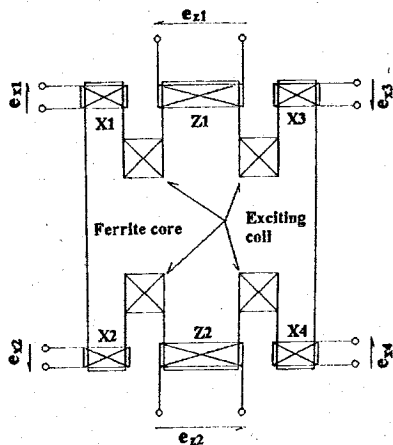


Fig. 3-9 Cross section of the sensor.

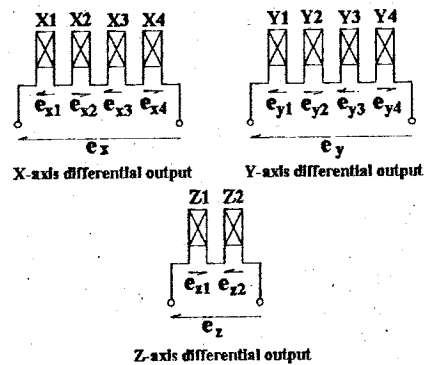


Fig. 3-10 Connection of pickup coils.

3. 2. 3 被検査材および実験方法

被検査材は、前章で用いた軟鋼板 (SS400) を使用した。(Fig. 2-14 参照。) また、リフトオフを換えての実験は、比較検査材と励磁ヨークの間の距離は一定に保ったまま、厚さ 0.05 mm と 0.1 mm のテフロンシートを組み合わせてセンサと被検査材の間に挟むことによって行った。

この実験から測定装置を大幅に変更した。その変更された測定装置のブロック図を Fig. 3-11 に示す。システムを統括する 32 ビットコンピュータ (DELL XPS300 300 MHz, 128 MB-RAM, 8 GB-HD, 3.5 インチ FD x 1, ZIP 100 MB x 1) 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 GP-IB インターフェイスボード (Interface 社 IBX-4303) を介してウエーブシンセサイザ (NF 回路ブロック社 1946) で 90 度位相差を持った励磁電圧 (E_x , E_y) を発生している。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、B-コイルの XY 方向の出力信号の最大値 ($B_{e,max}$, $B_{ey,max}$) が等しくなるように励磁電圧をプログラムで自動調整する。両者が等しくなったところで測定を開始する。これは、測定系のキャリブレーション操作である。

欠陥で乱された信号は、3 軸サーチコイルや 3 軸ピックアップコイルによって各方向成分ごとに被検査材表面近傍と比較検査材表面近傍のそれぞれの磁束密度を検出し、低雑音アンプでいったん 10 倍増幅される。その後、各軸ごとに差をとるため簡単な LPF を兼ねた加算減算増幅器で合成される。各欠陥検出用の欠陥検出信号の合成時に、欠陥のない試料を用いて増幅器の利得を微調整し、合成後の各軸の出力電圧がなるべく 0 (零) に近くなるようにした。しかし、この増幅回路では、各欠陥検出用コイルの出力電圧の位相のずれは補正できない。よって、欠陥のない部分で各軸の出力を完全に 0 とする事はできなかったがこの電子回路的に差動を取る方法で大幅に不平衡出力を減らすことができた。次に、欠陥検出信号は、A/D 変換に必要な大きさまで増幅される。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 IBX-3151 100 k sample/second 8-ch) 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 つの欠陥検出用コイルからの被検

査材表面近傍の信号と、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、各種パラメータの算出などの処理を行っている。なお、プログラミング言語は、Windows NT Ver. 4.0上のVisual Basic Ver. 5.0を使用した。Fig. 3-12に実験システムの写真を示す。

ここで、3軸差動サーチコイル型磁気センサや3軸差動ピックアップコイル型磁気センサの欠陥検出信号の算出方法を述べる。各欠陥検出用コイルに発生する誘導起電力 e_{1j} 、 e_{2j} (e_{ij}) は、(3-1)式で表される。

$$e_{ij} = -N_{ij} \frac{d\phi_{ij}}{dt} \quad (i=1, 2, (3, 4) \quad j=x, y, z) \quad (3-1)$$

ただし、3軸差動ピックアップコイル型磁気センサのXY軸については i は1から4である。各軸について誘起電力の差をとると

$$e_j = e_{1j} - e_{2j} (+ e_{3j} - e_{4j}) \quad (j=x, y, z) \quad (3-2)$$

となる。ただし、 N_{ij} は、各欠陥検出用コイルの巻き数であり、 ϕ_{ij} は、各サーチコイルと鎖交する磁束である。さらに、各欠陥検出用コイルで検出する磁束密度 B_j は、(3-3)式で算出できる。

$$B_j = -\frac{1}{N_j S_j} \int e_j dt \quad (j=x, y, z) \quad (3-3)$$

ここで、 S_j は、各欠陥検出用コイルの面積である。また、各コイルの巻き数は次の関係にある。

$$N_j = N_{1j} = N_{2j} (= N_{3j} = N_{4j}) \quad (j=x, y, z) \quad (3-4)$$

また、各コイルの面積は次の関係にある。

$$S_j = S_{1j} = S_{2j} (= S_{3j} = S_{4j}) \quad (j=x, y, z) \quad (3-5)$$

3軸差動サーチコイルや3軸差動ピックアップコイルからの欠陥検出信号を使用して被検査材表面の各方向の磁束密度 (δB_x 、 δB_y 、 δB_z) を算出し、さらに、 δB_x 、 δB_y 、 δB_z の最大値である $\delta B_{x\max}$ 、 $\delta B_{y\max}$ 、 $\delta B_{z\max}$ や、 δB_x 、 δB_y 、 $\delta B_{z\max}$ 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、 δB_x 、 δB_y 、 δB_z の波形と、 δB_x 、 δB_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、 δB_x 、 δB_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。

さらに、3軸差動サーチコイル型磁気センサの場合は、 δB_x 、 δB_y 、 δB_z をXYZ方向のベクトルと考え、位相10度ごとに δB_x 、 δB_y 、 δB_z を合成したベクトルの大きさ κ を計算している。このベクトルの大きさ κ は、欠陥に関しての多くの情報を含んだ量であることから欠陥評価指標 κ と呼んだ^[22]。ただし、3軸差動ピックアップコイル型磁気

センサの場合は、欠陥評価指標 κ を使用していないため算出してない。

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メモリに蓄積する。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図っている。また、磁気センサは、XY方向にコンピュータのRS-232Cを介して制御されているXYステージ(THK AX-2525P6A and SD-2)を用いて0.5 mm あるいは1 mm ごとに移動する。このXYステージの位置精度は、0.005 mm である。

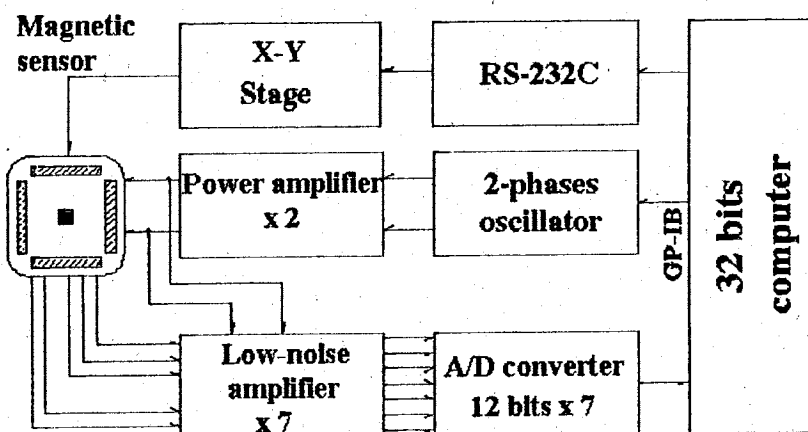


Fig. 3-11 Measurement system.

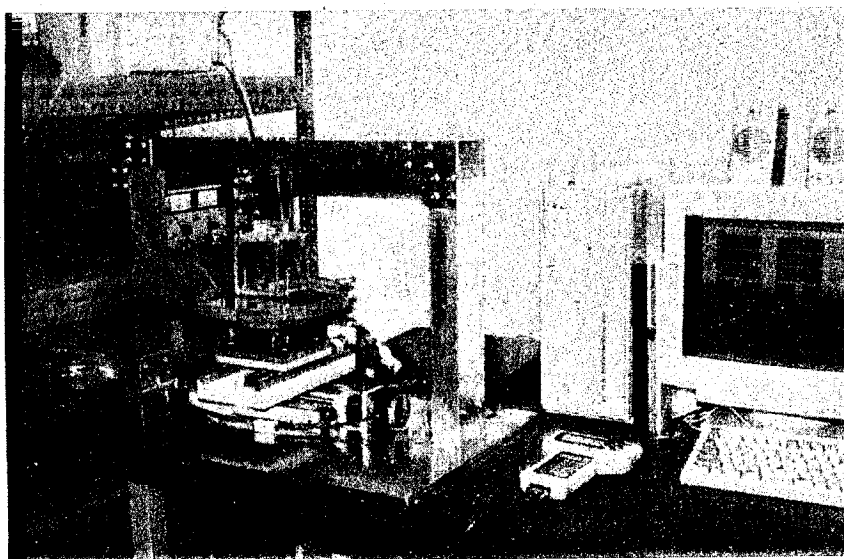


Fig. 3-12 Photograph of measurement system.

3. 2. 4 サーチコイル型磁気センサの欠陥検出特性

(1) 欠陥検出機構

3軸差動サーチコイル型磁気センサにおいて使用されている3軸サーチコイルについては、第2章で説明した。この型の磁気センサは、被検査材と比較検査材、けい素鋼板製の励磁コアで閉磁路を構成していることから、3軸サーチコイルを備えたU字鉄心型磁気センサと同様の欠陥検出機構で動作しているものと考えられる。よって、XY軸のサーチコイルについては、欠陥によって被検査材表面から漏れ出す漏れ磁束の変化が支配的だと考えられ、Z軸のサーチコイルについては、渦電流の流路変化が支配的だと考えられる。当然、比較検査材に接している3軸サーチコイルは、センサの移動や欠陥の有無とは関係なくいつも一定の電圧を出力する。また、被検査材に接している3軸サーチコイルは、欠陥の有無によって出力が変化する。

この磁気センサのような比較検査材を使用し比較検査材表面近傍と被検査材表面近傍の磁束密度の差を欠陥検出信号とする形式の磁気センサでは、比較検査材と被検査材の相対的な寸法差が差動接続された欠陥検出用コイルの残留出力を生じさせる。当然、両者の寸法が等しければこの寸法差に起因する残留出力は生じないが実際の検査で同じとすることは物理的に不可能である。そこで、比較検査材の大きさの違いによる磁束線分布の違いを見るために Fig. 3-13 に示すメッシュを使って2次元有限要素法で磁界解析を行った結果を Fig. 3-14 と Fig. 3-15 に示す。Fig. 3-14 は、比較検査材の寸法が、80 mm x 80 mm x 5 mm の場合である。Fig. 3-15 は、メッシュは変更せずに比較検査材を 46 mm とした場合の解析結果である。解析条件は、励磁コイルの電流密度 1.5×10^6 A/m、被検査材と比較検査材の導電率 1.4×10^7 S/m、励磁周波数 5 Hz、被検査材と比較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。励磁ヨークの比透磁率は、500 とした。また、欠陥の幅は、1 mm、深さは、4 mm である。アモルファスコアと励磁ヨークの導電率は、両者とも積層してあるため無視した。

Fig. 3-14(a) と Fig. 3-15(a) を見ると同じ欠陥がない場合であるにも関わらず 2 個のサーチコイル付近の磁束線の分布は完全には一致していない。これは、比較検査材の大きさが被検査材に比べて両者とも小さいためである。そのため、比較検査材の大きさが被検査材と同一の場合以外は、無欠陥部で上下のサーチコイルの出力電圧のアンバランスを吸収して等しくする工夫が必要であることを示している。本論文では、アンバランスの補正は、後段に設置した低雑音アンプの増幅度をそれぞれのコイルごとに調整を行った。前述したようにこの方法では、信号の位相までは調整できないが、この方法によってアンバランスを最小に押さえることができた。Fig. 3-16 に低雑音アンプでのバランス補正の原理を示す。

次に、比較検査材表面近傍と被検査材表面近傍の磁束密度の差で欠陥を検出する原理を確認するために同様のメッシュと条件で有限要素解析を行った。Fig. 3-14 の場合、欠陥のない場合とある場合でサーチコイルと鎖交している磁束が異なり上下に差動接続されたサーチコイルが欠陥を検出する様子がよくわかる。また、Fig. 3-15 においても同様である。

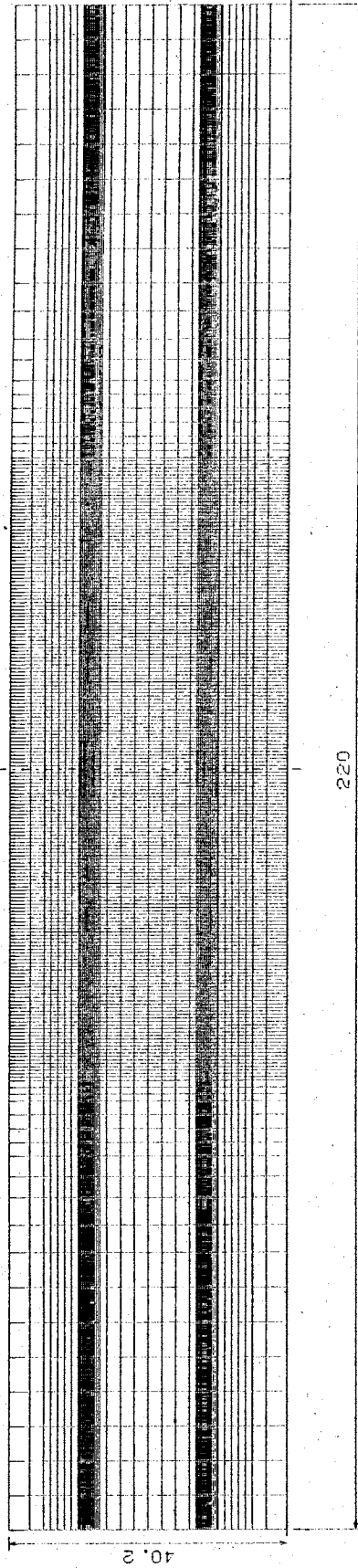


Fig. 3-13 Mesh for F.E.M. analysis.

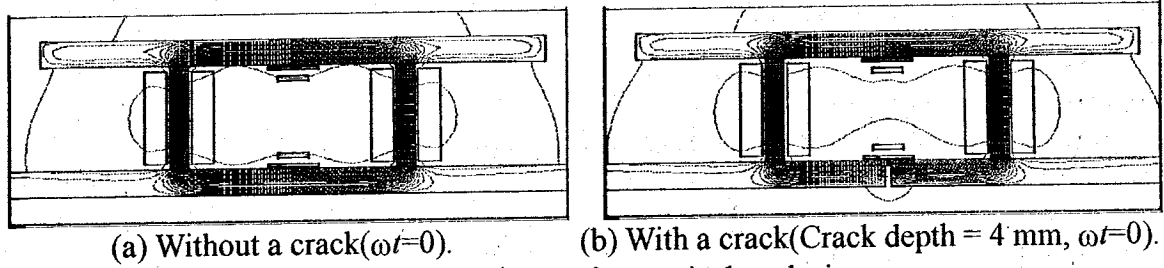


Fig. 3-14 Results of numerical analysis.

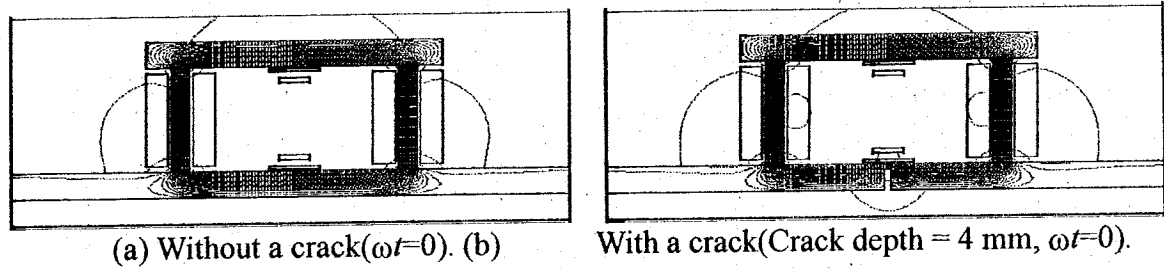


Fig. 3-15 Results of numerical analysis.

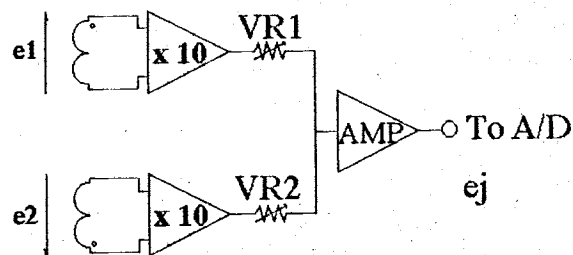


Fig. 3-16 Connection of each axis search coil.

(2) 欠陥検出特性

1) 基本欠陥検出特性

最初に、3軸サーチコイル差動型回転磁束型磁気センサの軟鋼板裏側溝型欠陥に対する欠陥検出特性を求める実験を行った。実験は、次の条件で行った。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5から10 Hzを中心に行った。最大印加磁束密度は、磁気回路の非線形性を考慮して欠陥のない部分においてXおよびY方向のB-コイルで検出される最大印加磁束密度を0.1 Tになるように励磁した。印加磁束密度をB-コイルで検出される最大印加磁束密度で規定したのは、差動型の出力形式をもつ回転磁束型磁気センサでは、無欠陥部でリサージュ波形は規定されないためである。そこで、XおよびY方向の最大印加磁束密度が等しくなるように、励磁コイルに印加する電圧の大きさをコンピュータのプログラムにより自動調整した。これによって、測定系のキャリブレーションを行っている。測定は、試料中央部で欠陥の左右25 mmを0.5 mm毎に行った。さらに、1点の測定は、励磁周波数の80周期分としその平均を測定値とした。

Fig. 3-17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

化させている (0 mm (欠陥なし), 1 mm~4 mm)。欠陥の幅は、0.4 mm である。

Fig. 3-18, Fig. 3-19, Fig. 3-20 は、裏側にある欠陥の幅 0.4 mm で励磁周波数 5 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. 3-13, Fig. 3-14 より、 $\delta B_{x_{max}}$ 、 $\delta B_{y_{max}}$ の変化は、欠陥と磁気センサの距離と欠陥の深さに比例して増減していることが分かる。全ての深さの欠陥において $\delta B_{x_{max}}$ の最大値を示す位置は、欠陥の位置とよく一致している。特に 1 mm の深さの欠陥の場合に、 $\delta B_{x_{max}}$ とセンサの位置の関係のグラフで欠陥の有無と位置を特定できることは、この磁気センサが非常に高感度であることを示している。さらに、 $\delta B_{x_{max}}$ の変化と $\delta B_{y_{max}}$ の変化が異なるのは、欠陥の方向が磁気センサの Y 軸と平行であるからである。このことは、偏位式の回転磁束型磁気センサと同じように、この差動式の磁気センサでも欠陥の方向をとらえることができることを示している。Fig. 3-15 は、 $\delta B_{z_{max}}$ の変化と磁気センサの位置との関係を示している。このように、Z 軸に関して欠陥の存在と位置をよく捕らえている。

Fig. 3-21 のリサージュ波形の軸比 α の変化は、偏位式の回転磁束型磁気センサと異なり、欠陥付近で減少するという変化を示していない。Fig. 3-22 のリサージュ波形の傾き角 θ の変化も、偏位式の回転磁束型磁気センサと異なり、欠陥付近で複雑な変化をする。しかし、基本的には、欠陥付近で軸比 α 、傾き角 θ とも増加する傾向を示している。これは、 $\delta B_{x_{max}}$ と $\delta B_{y_{max}}$ の変化が単純な変化を示していることと対照的である。この現象は、リサージュ波形の軸比 α とリサージュ波形の傾き角 θ が δB_x と δB_y の大きさと位相の両方の情報を含んでいるパラメータであることや、Fig. 3-24 と Fig. 3-25 に示す $\delta B_{x_{max}}$ と $\delta B_{y_{max}}$ が最大値を示す位相角 $\Phi_{x_{max}}$ と $\Phi_{y_{max}}$ が両者とも偏位式回転磁束型磁気センサより大きく変化していることから説明できる。

Fig. 3-25 に示す、 $\Phi_{z_{max}}$ は、見かけ上大きく不連続に変化しているように見えるが、実際には、偏位式回転磁束型磁気センサのようになめらかに欠陥の左右で増減する変化を示している。これも偏位式回転磁束型磁気センサと同様に欠陥の周りの渦電流の変化で説明できる。

Fig. 3-26, Fig. 3-27, Fig. 3-28 は、このセンサが差動型であることに着目して、各深さの欠陥の測定値の最小値を基準にして欠陥による信号の変化分だけを抽出したものである。従って、この節では、以後この各信号の変化分のみを用いたグラフを用いる。

Fig. 3-29 に $\delta B_{x_{max}}$ 変化率を第 2. 2. 5 項で示した計算法と同じ方法で計算した結果を示す。欠陥からの信号の変化率が大きい差動型の特徴が明らかである。また、深さ 1 mm の場合の変化率も欠陥がない場合の変化率と比べて明らかに大きく、深さ 1 mm の欠陥を判別可能である。なお、欠陥がない場合の変化率が 1 とならないのは、信号に雑音を含んでいるからである。

また、Fig. 3-30 に欠陥の深さ 3 mm、励磁周波数 5 Hz の場合の、 $\delta B_{x_{max}}$ と $\delta B_{y_{max}}$ の変化とセンサ位置 5 mm ごとにリサージュ波形の関係を示す。リサージュ波形がセンサ位置に従って変化する様子がよく現れており、差動式回転磁束型磁気センサにおいてもリサージュ波形による欠陥の評価が有効な手段であることを示している。

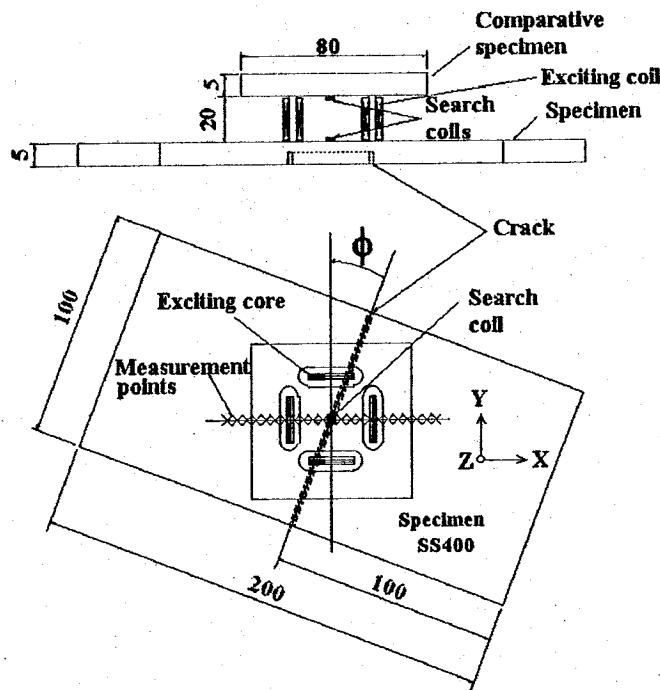


Fig. 3-17 Distribution of the magnetic sensor and the dimension of the specimen.

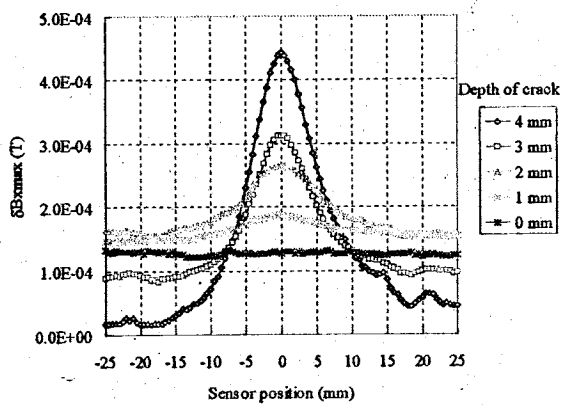


Fig. 3-18 $\delta B_{x\max}$ vs. the sensor position.

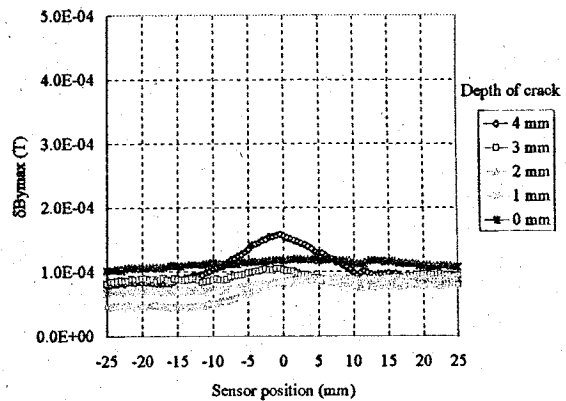


Fig. 3-19 $\delta B_{y\max}$ vs. the sensor position.

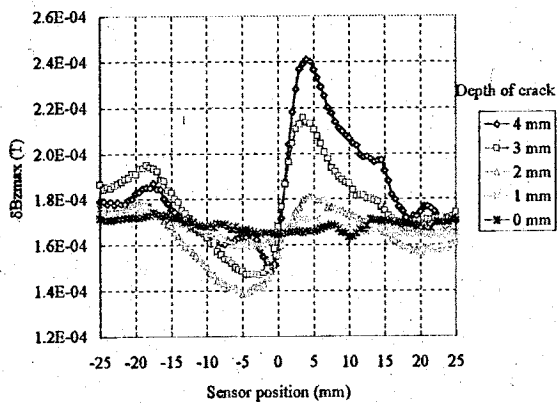


Fig. 3-20 $\delta B_{z\max}$ vs. the sensor position.

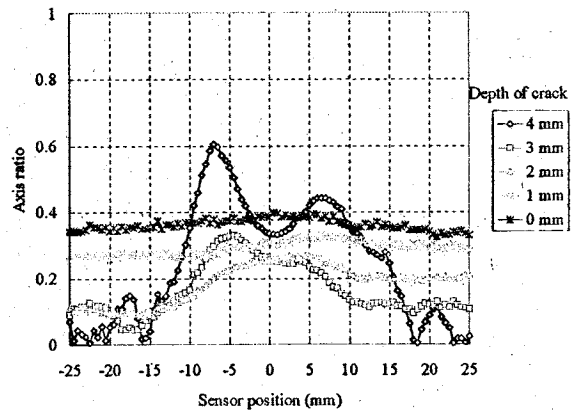


Fig. 3-21 Axis ratio(α) vs. the sensor position.

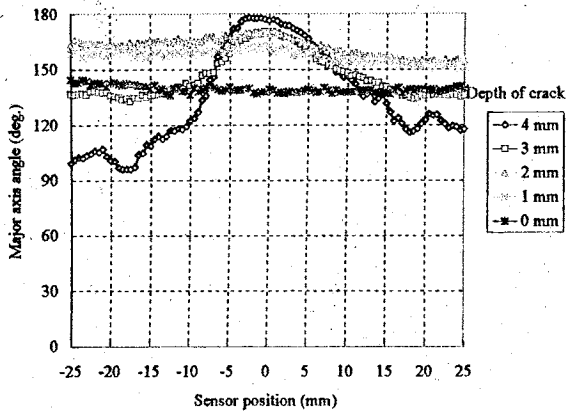


Fig. 3-22 Major axis angle vs. the sensor position.

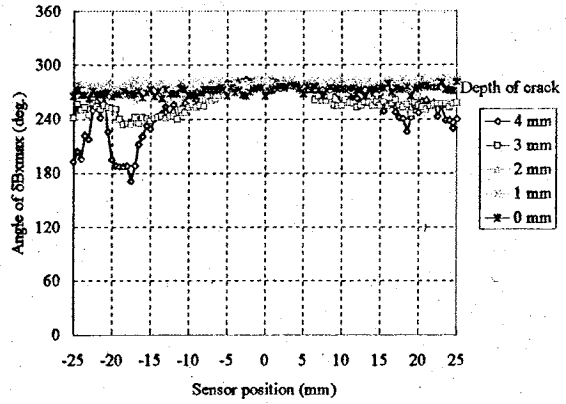


Fig. 3-23 $\Phi_{x_{max}}$ vs. the sensor position.

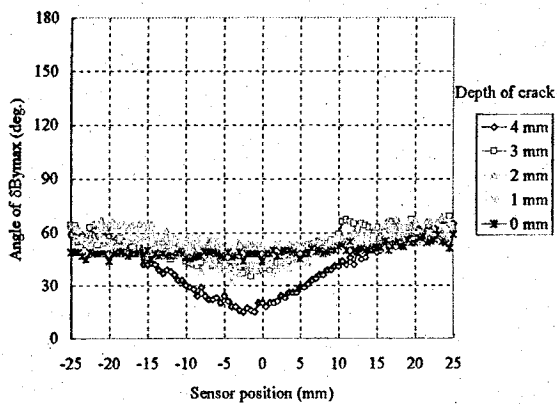


Fig. 3-24 $\Phi_{y_{max}}$ vs. the sensor position.

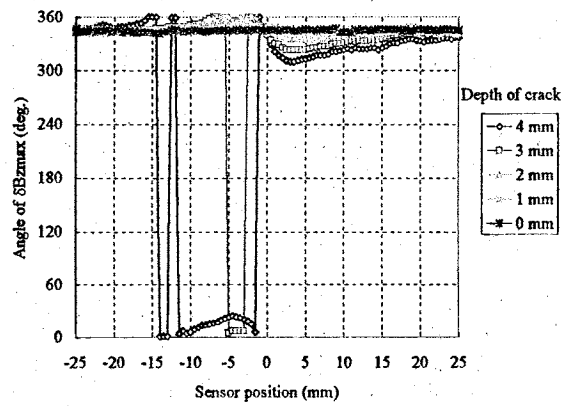


Fig. 3-25 $\Phi_{z_{max}}$ vs. the sensor position.

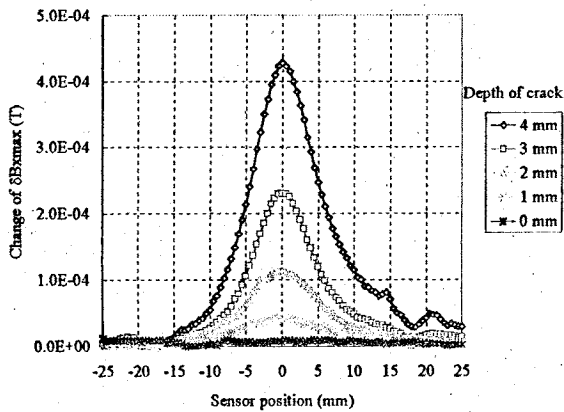


Fig. 3-26 Standardized $\delta B_{x_{max}}$ vs. the sensor position.

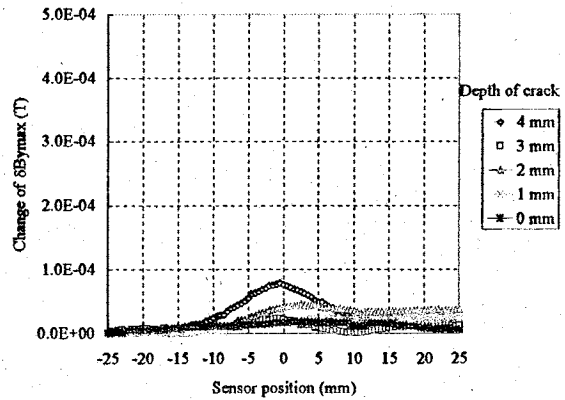


Fig. 3-27 Standardized $\delta B_{y_{max}}$ vs. the sensor position.

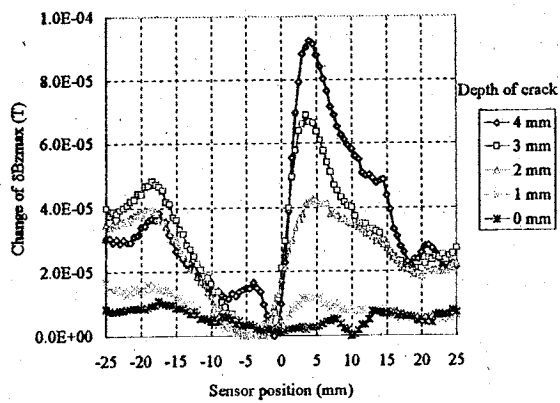


Fig. 3-28 Standardized δB_{zmax} vs. the sensor position.

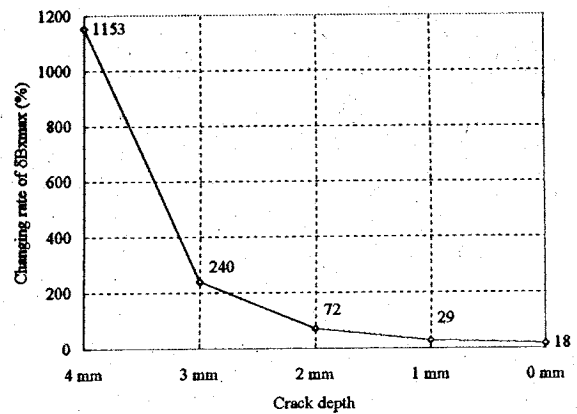


Fig. 3-29 Change rate of δB_{zmax} vs. the crack depth.

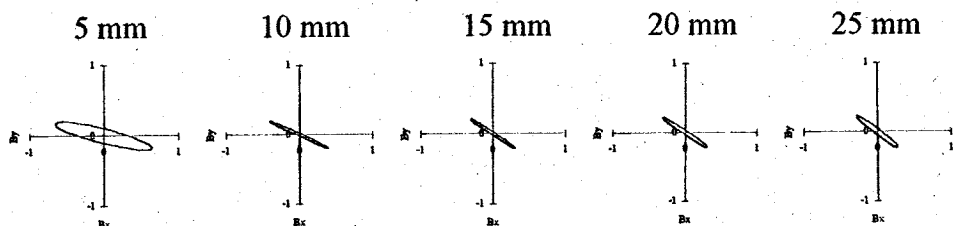
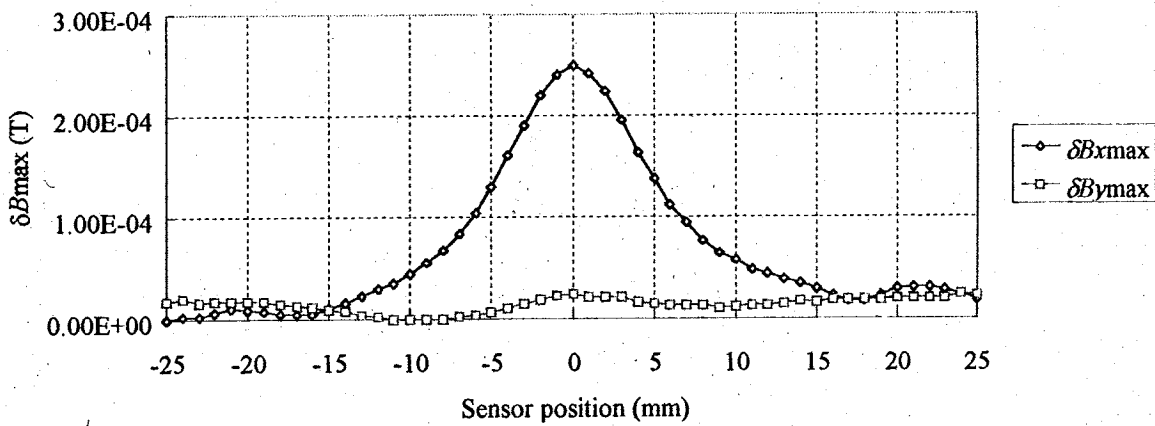
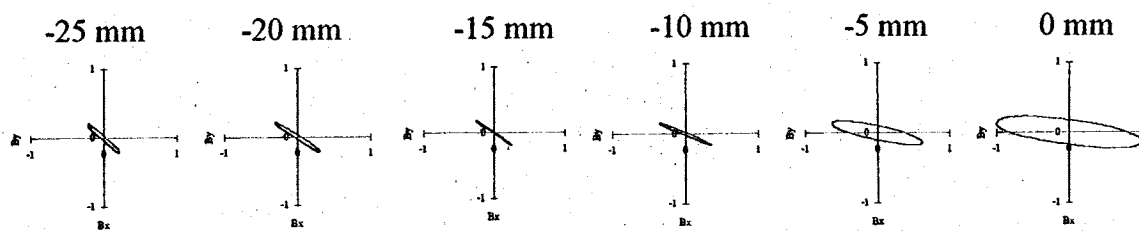


Fig. 3-30 Change of Lissajous's figure.

2) 励磁周波数の欠陥検出特性に及ぼす影響

励磁周波数の欠陥検出特性に及ぼす影響を比較するために、Fig. 3-31 と Fig. 3-32 に欠陥の深さ 4 mm の場合と 2 mm の場合の $\delta B_{x\max}$ の変化の様子を励磁周波数を 2 Hz から 20 Hz まで変化させながら測定した結果を示す。このときの印加磁束密度は、0.1 T であり、欠陥の幅は、0.4 mm である。また、リフトオフは、被検査材側が 0.12 mm で比較検査材側は、0 mm である。同様の条件で、 $\delta B_{z\max}$ についての測定結果を Fig. 3-33 と Fig. 3-34 に示す。ここで、 $\delta B_{x\max}$ と $\delta B_{z\max}$ だけを示し、 $\delta B_{y\max}$ を示さなかったのは、欠陥とセンサの Y 軸が平行なため $\delta B_{y\max}$ が大きな変化を示さないためである。

$\delta B_{x\max}$ は、欠陥の深さ 4 mm の場合は、励磁周波数 8 Hz 位まではほとんど変化がないが、10 Hz より上の励磁周波数でその出力が低下している。しかし、欠陥の深さ 2 mm の場合は、低い周波数で多少大きな出力となっているが全ての励磁周波数において欠陥の深さ 4 mm の場合ほど大きくは変化していない。欠陥の深さ 4 mm の場合は、励磁周波数が高くなるに従って、励磁磁束が表皮効果により被検査材表面に集中するため、励磁磁束が欠陥に影響される部分が減少し出力が小さくなる。欠陥の深さが浅い場合は、励磁周波数が低い場合においても欠陥と作用する励磁磁束が少ないため励磁周波数によって出力は大きく変化しない。

逆に、 $\delta B_{z\max}$ に関しては、欠陥の深さ 4 mm の場合においては、10 Hz 以下の励磁周波数で出力が低下し、それ以上の励磁周波数では余り変化していない。欠陥の深さ 2 mm の場合においては、6 Hz の励磁周波数から出力が低下し始めている。これは、 $\delta B_{z\max}$ が欠陥の近くに誘起される渦電流の変化を検出しているため、渦電流が小さくなる低い周波数で出力が低下するのである。このことは、欠陥検出機構の考察結果とよく一致している。

以上の結果から、この磁気センサの最適な励磁周波数は、5 Hz 程度から 8 Hz 程度であると言える。しかし、深い欠陥は、自ずから大きな出力変化が得られその発見も容易なので、浅い欠陥に有利な励磁周波数を選ぶ方がよいと言える。そこで、測定に必要な時間も考慮して 5 Hz が最適であると考え、印加磁束密度の変化やリフトオフの変化に対する欠陥検出特性の変化を調べる実験などで励磁周波数として 5 Hz を用いた。

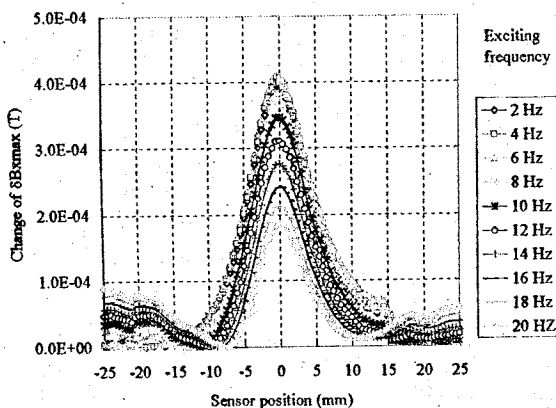


Fig. 3-31 Exciting frequency characteristics of $\delta B_{x\max}$ (Crack depth = 4 mm).

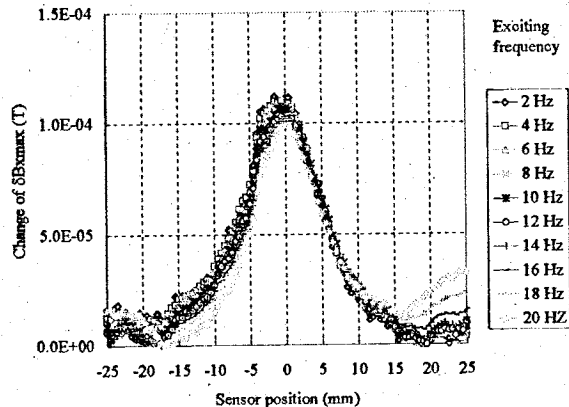


Fig. 3-32 Exciting frequency characteristics of $\delta B_{x\max}$ (Crack depth = 2 mm).

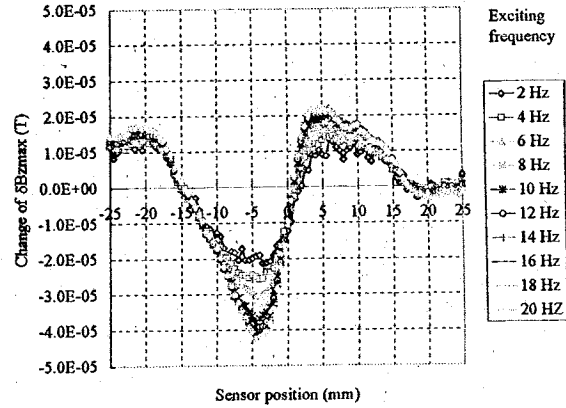
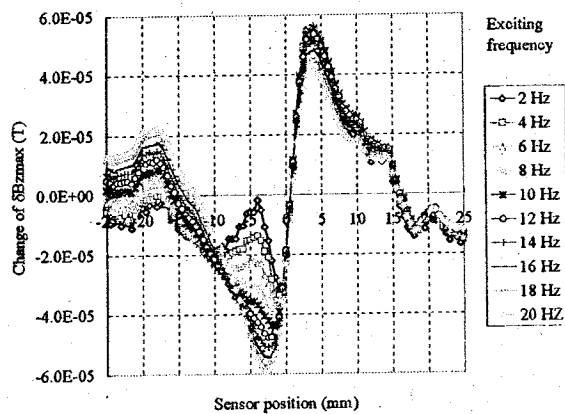


Fig. 3-33 Exciting frequency characteristics of δB_{zmax} (Crack depth = 4 mm).

Fig. 3-34 Exciting frequency characteristics of δB_{zmax} (Crack depth = 2 mm)

3) 印加磁束密度の欠陥検出特性に及ぼす影響

励磁周波数 5 Hz、裏側欠陥の深さ 3 mm、欠陥の幅 0.4 mm の場合の印加磁束密度と δB_{xmax} 、 δB_{zmax} の関係を Fig. 3-35 と Fig. 3-36 に示す。リフトオフなどの条件は周波数特性の場合と同じである。

両図から分かるとおり、印加磁束密度が大きい場合ほど信号の変化幅が大きくなっている。そのため、印加磁束密度は、ある程度大きい方が SN 比の点で有利となる。しかし、印加磁束密度の増加幅に比例して信号の変化幅は、大きくはならない。一方、被検査材、励磁コア、比較検査材で構成する磁気回路の飽和も考慮しなければならない。よって、印加磁束密度 0.1 T から 0.25 T 程度が適当である。なお、本節の実験では、印加磁束密度 0.1 T を主に用いた。

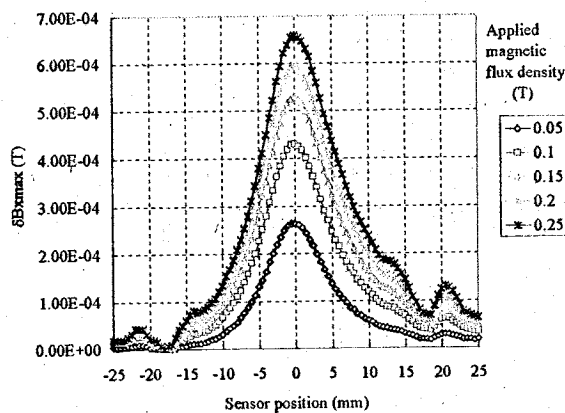


Fig. 3-35 Applied magnetic flux density characteristics of δB_{xmax} (Crack depth = 3 mm).

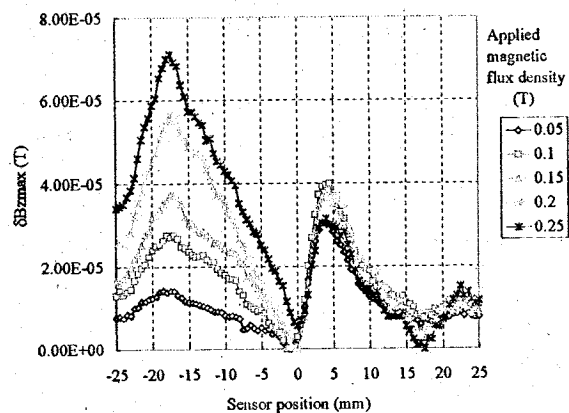


Fig. 3-36 Applied magnetic flux density characteristics of δB_{zmax} (Crack depth = 3 mm).

4) リフトオフの欠陥検出特性に及ぼす影響

磁気センサと被検査材との距離（リフトオフ）は、被検査材表面に塗料が塗ってあったり被検査材表面が完全に平面でなかったりすると磁気センサに位置によって変化する。このリフトオフの変化は、磁気センサの出力の変動となって現れ微小欠陥の検出には有害なノイズとなる。そこで、リフトオフの変化が磁気センサの欠陥検出特性に及ぼす影響を把握しておくことは重要である。

Fig. 3-37 と Fig. 3-38 に欠陥の深さ 4 mm の場合と 2 mm の場合の δB_{zmax} との変化の様子をリフトオフを 0.12 mm から 0.42 mm まで、0.05 mm ごとに変えながら測定した結果を示す。このときの印加磁束密度は、0.1 T であり、欠陥の幅は、0.4 mm であり、励磁周波数は、5 Hz である。また、同様の条件で、 δB_{zmax} についての測定結果を Fig. 3-39 と Fig. 3-40 に示す。

δB_{zmax} は、欠陥の深さ 4 mm の場合は、全てのリフトオフについてほとんど変化がない。しかし、欠陥深さ 2 mm の場合は、リフトオフが大きくなるに従ってわずかながら出力が小さくなっている。 δB_{zmax} に関しては、両者に顕著な違いはない。以上の結果から、この磁気センサは、0.3 mm 程度のリフトオフの変化に対応できる特性を持っている。

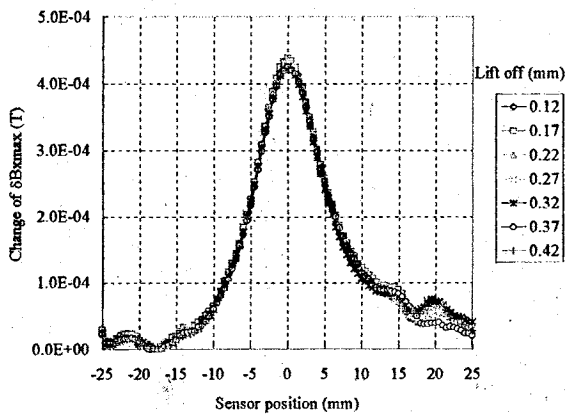


Fig. 3-37 Change of lift-off vs. δB_{zmax}
(Crack depth = 4 mm)

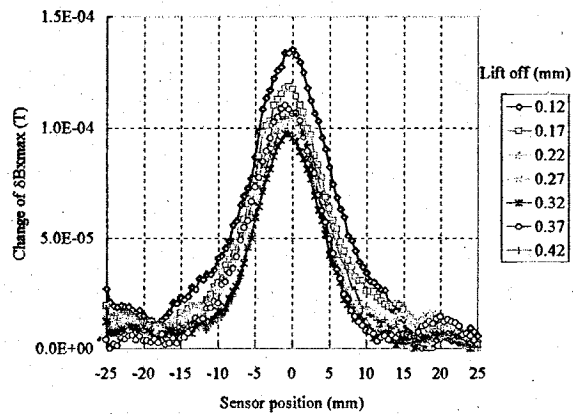


Fig. 3-38 Change of lift-off vs. δB_{zmax}
(Crack depth = 2 mm)

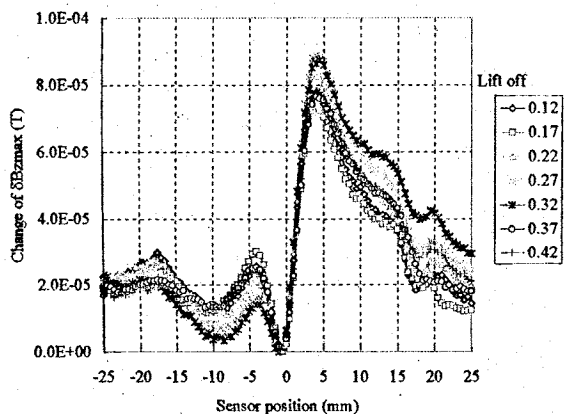


Fig. 3-39 Change of lift-off vs. δB_{zmax}
(Crack depth = 4 mm)

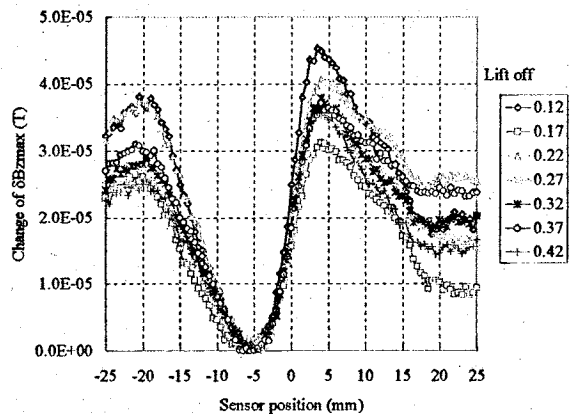


Fig. 3-40 Change of lift-off vs. δB_{zmax}
(Crack depth = 2 mm)

5) 欠陥の方向角の欠陥検出特性に及ぼす影響

欠陥の方向角 ϕ (Fig. 3-17 参照) は、2 次元的な広がりを持つ欠陥属性である。よって、従来の磁気センサでは、欠陥の方向角 ϕ を推定するためには、2 次元的な走査が必要であった。しかし、回転磁束型磁気センサは、1 次元の走査で欠陥の方向角 ϕ を推定できることは、前章で述べた。ここでは、3 軸差動サーチコイル型磁気センサにおいても同様な簡単な走査で欠陥の方向角 ϕ を推定することができる根拠となる欠陥の方向角 ϕ が欠陥検出特性に及ぼす影響を示す。

測定は、欠陥が Y 軸に平行な場合の方向角 ϕ を 0 度とし、 -90 度から 90 度の範囲を 10 度刻みで測定し、時計回りを正とした。 ± 90 度以上は磁気センサの対称性から測定しなかった。

Fig. 3-41 は、励磁周波数 5 Hz、裏側欠陥で幅 0.4 mm、深さ 3 mm の場合のリサーチ波形の軸比 α と欠陥の方向角 ϕ と磁気センサの位置の関係を示している。Fig. 3-42 は、リサーチ波形の傾き角 θ と磁気センサの位置関係を示している。リサーチ波形の軸比 α は、 ± 70 度付近より小さな方向角では、多少差異はあるが、ほぼ同じような変化を示している。 ± 60 度より欠陥の方向角 ϕ が小さな範囲では、欠陥付近での軸比 α の変化が大きくなっている。従来と同様に、 $\delta B_{x_{max}}$ および $\delta B_{y_{max}}$ 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。

リサーチ波形の傾き角 θ の変化は、欠陥の付近で方向角 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 が負の場合のリサーチ波形の傾き角 θ は、欠陥の方向角 ϕ が正の場合と比較して約 80 度大きくなっている。

Fig. 3-43 から Fig. 3-45 に、 $\delta B_{x_{max}}$ 、 $\delta B_{y_{max}}$ および $\delta B_{z_{max}}$ の方向角 ϕ の変化に対する変化を示す。 ± 30 度より小さな方向角では、 $\delta B_{x_{max}}$ が大きな値を示し、 $\delta B_{y_{max}}$ は ± 45 度付近で大きな値を示している。また、 $\delta B_{z_{max}}$ では、方向角 ϕ の正負によってちょうど逆の変化を示している。

このような結果から 3 軸差動サーチコイル型磁気センサにおいても 1 次元の走査で欠陥の方向角 ϕ を推定することが可能である。

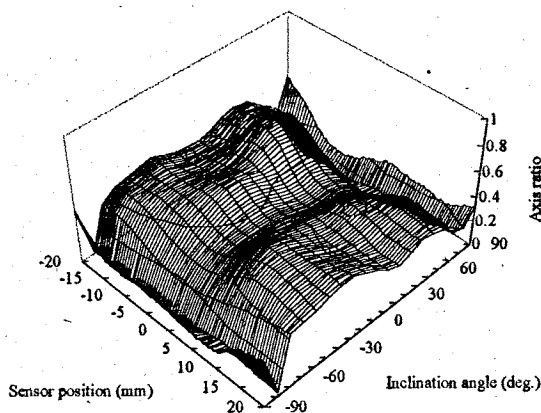


Fig. 3-41 Axis ratio(α) vs. inclination angle vs. the sensor position.

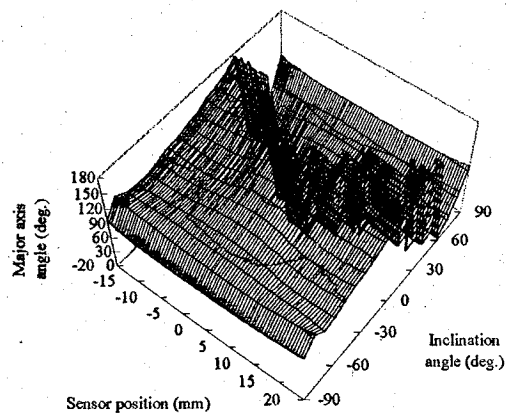


Fig. 3-42 Major axis angle vs. inclination angle vs. the sensor position.

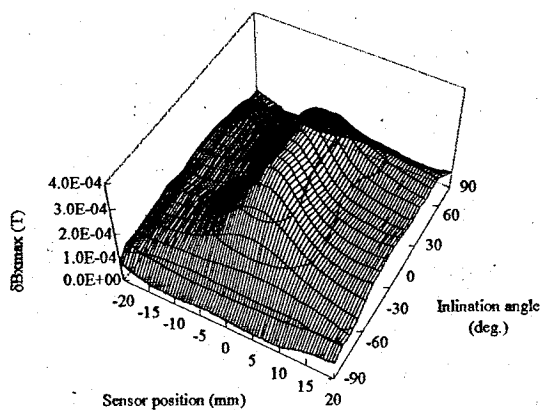


Fig. 3-43 $\delta B_{x\max}$ vs. inclination angle vs. the sensor position.

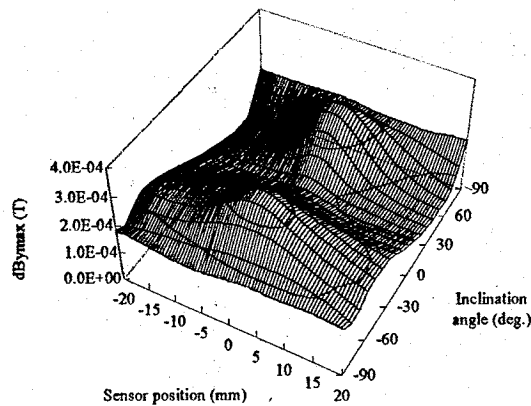


Fig. 3-44 $\delta B_{y\max}$ vs. inclination angle vs. the sensor position.

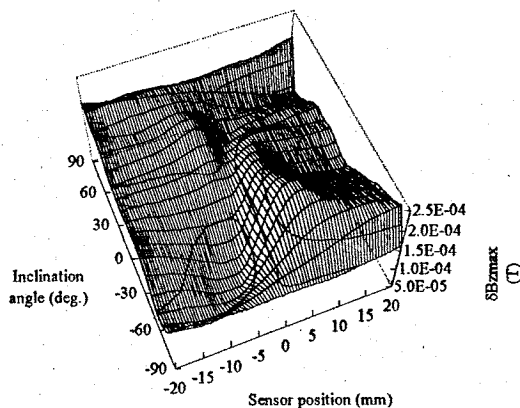


Fig. 3-45 $\delta B_{z\max}$ vs. inclination angle vs. the sensor position.

3. 2. 5 欠陥評価指標 κ の導入と κ による欠陥評価

磁気探傷に用いる磁気センサは、なるべく短時間に多くの欠陥に関する情報を収集できることが望ましい。また、磁気センサから得られた情報から、技術者の経験や勘に頼ることなく確実に欠陥の有無のみならずその属性についても推定することができれば有用である。そこで、ここでは、回転磁束型磁気センサが被検査材表面近傍の磁束密度の変化をXYZの3軸に分けてベクトルとして捕らえることができるという特徴を生かすことによって、なるべく簡単に欠陥の存在面や方向角 ϕ 、深さなどを推定できるパラメータを考案した。そのパラメータとは、励磁電圧の各位相ごとに計算したベクトルの大きさである。このパラメータを欠陥評価指標 κ と呼ぶことにした。実験結果から、この欠陥評価指標 κ は、簡単な指標でありながら、欠陥の深さや方向角 ϕ 、存在面などに関して明らかな差異を示し、欠陥属性の評価に有効である可能性がある。

この被検査材表面近傍の磁束密度は、大きさだけではなく位相も欠陥により変化する。そこで、欠陥によって乱される磁束密度の大きさと位相の変化を合わせて評価するための欠陥評価指標 κ を定義した^[22]。 κ は、 δB_x 、 δB_y 、 δB_z を欠陥からのベクトル信号と見なし、励磁電圧の1周期を36分割した各位相時の原点からの距離である。

δB_x 、 δB_y 、 δB_z を(3-6)式と仮定すると、 $\omega t=0$ の時の κ は、(3-7)式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \delta B_x &= a \sin(\omega t + \theta_x) \\ \delta B_y &= b \sin(\omega t + \theta_y) \\ \delta B_z &= c \sin(\omega t + \theta_z) \end{aligned} \right\} \quad (3-6)$$

$$\kappa(\omega t=0) = \sqrt{\left\{a \sin(\theta_x)\right\}^2 + \left\{b \sin(\theta_y)\right\}^2 + \left\{c \sin(\theta_z)\right\}^2} \quad (3-7)$$

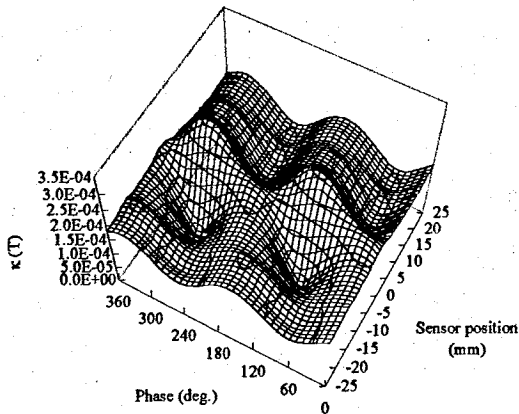
(3-7)式から分かるように、新たに提案する欠陥評価指標 κ は、欠陥からの信号の大きさだけでなく位相も同時に評価することができる。

励磁周波数 10 Hz、印加磁束密度 0.1 T の場合について、Fig. 3-46 から Fig. 3-48 に各位相時の κ とセンサの位置の関係を示す。Fig. 3-46 は、欠陥が表側にある場合の κ の変化である(欠陥の方向角 $\phi=0$ 度)。欠陥の深さが異なるごとに κ の分布は明らかに変化している。欠陥の深さが 1 mm の場合でも分布が変化していることが分かる。また、Fig. 3-47 は、欠陥が裏側にある場合である。これらの図も Fig. 3-26 から Fig. 3-28 と同様に欠陥の深さによって明らかな変化を示している。さらに、両図を比較すると κ の変化は明らかに異なっており欠陥の存在面の区別が可能であることを示している。さらに、Fig. 3-48(a)は、欠陥が裏側にあり方向角 ϕ が -15 度の場合であり、Fig. 3-48(b)は、欠陥が裏側にあり方向角 ϕ が 0 度の場合である。また、Fig. 3-48(c)は、欠陥が裏側にあり方向角 ϕ が 15 度の場合である。これらの図についても κ の変化は明らかに異なっており欠陥の方向角 ϕ の推定が可能であることを示している。この場合、欠陥の深さ 2 mm である。

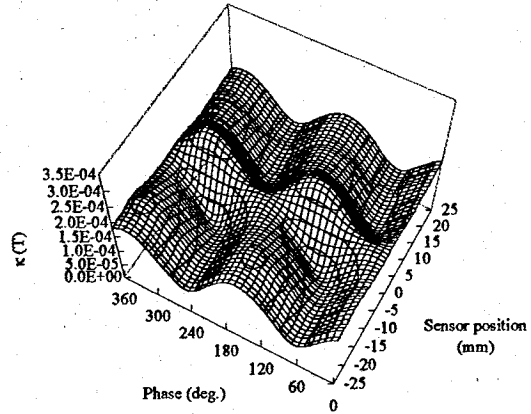
Fig. 3-49 に励磁周波数 10 Hz、印加磁束密度 0.1 T の場合で、裏側欠陥の深さが、3 mm の場合の κ の変化を $\delta B_{x_{\max}}$ 、 $\delta B_{y_{\max}}$ 、 $\delta B_{z_{\max}}$ の変化と対応づけた図を示す。 κ は、各測定点において、励磁周波数の 1 周期について表示しているので、これをリサージュ波形と同様の方法で書かせたものである。磁気センサと欠陥の相対位置関係で様々に変化している。Fig. 3-30 の δB_x 、 δB_y で書かれたリサージュ波形と比較すると、 δB_z の情報が含まれているため、欠陥の左右で異なった変化をしている。

次に、欠陥評価指標 κ の変化の特徴を利用した欠陥評価を行うために、欠陥評価指標 κ が最大値を示すセンサの位置を抽出する。Fig. 3-50 に欠陥評価指標 κ が最大値を示すセンサの位置と欠陥の深さと存在面の関係を示す。この図から、欠陥が表面に存在すると κ が最大値を示すセンサの位置は負の値を取り、裏面に存在すると正の値を取ることがわかる。また、Fig. 3-51 に κ が最大値を示すセンサの位置と欠陥の方向角 ϕ の関係を示す(欠陥の深 2 mm)。この結果より、方向角が正の場合よりも負の場合は約 5 mm だけ κ が最大値を示すセンサの位置が右側にシフトしていることがわかる。また、全体として欠陥の方向角 ϕ が -90 度から大きくなると右側にシフトすることもわかる。このように κ が最大値を示すセンサの位置は、欠陥の存在面や方向角によって変化し、欠陥の存在面や方向角 ϕ の推定に利用できるパラメータである。これらの実験では、磁気センサを欠陥を横断する方向に 1 回だけ走査している。一方、従来の磁気センサは、欠陥の方向角のような 2 元的な欠陥の属性を知るためには、最低

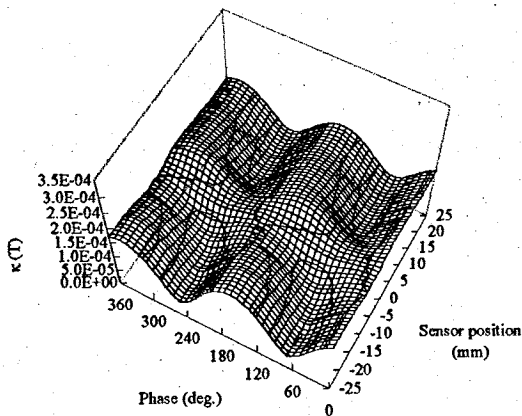
2回の走査を必要としていた。しかし、回転磁束型磁気センサでは、欠陥からの信号がベクトル的に得られることから1回の走査のみで欠陥の方向まで知ることができる。しかし、 κ や κ が最大値を示すセンサの位置のみでは、欠陥の深さが浅い場合にはその変化が微小であるため、欠陥の位置の特定が多少難しい。そこで、最終的な欠陥の評価には、 δB_{\max} などと併用した評価が必要である。



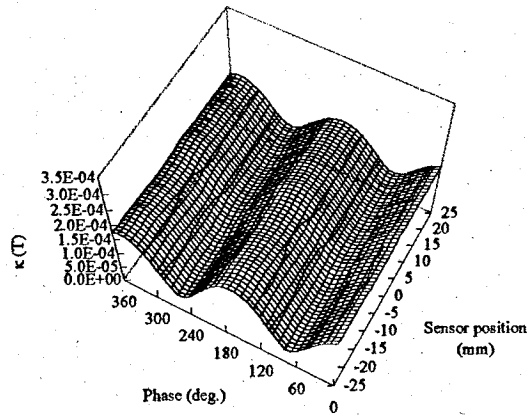
(a) Crack depth = 4 mm.



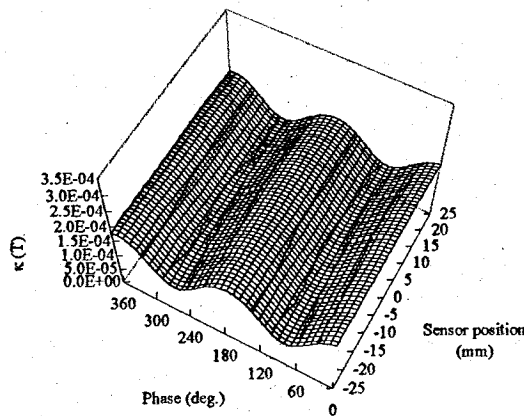
(b) Crack depth = 3 mm.



(c) Crack depth = 2 mm.

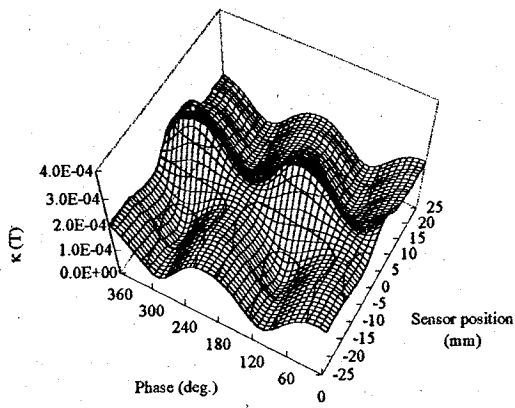


(d) Crack depth = 1 mm.

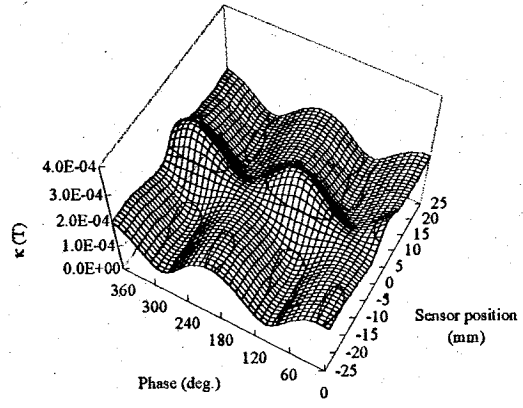


(e) Crack depth = 0 mm.

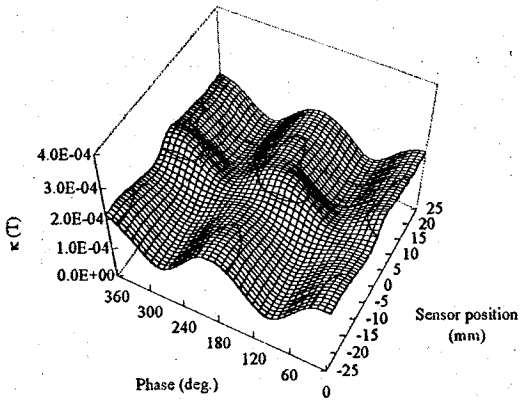
Fig. 3-46 κ vs. the sensor position(Front side).



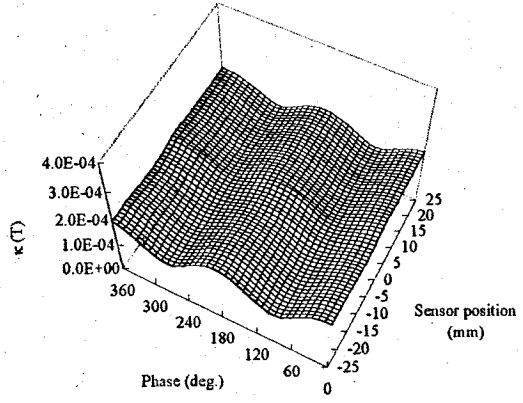
(a) Crack depth = 4 mm.



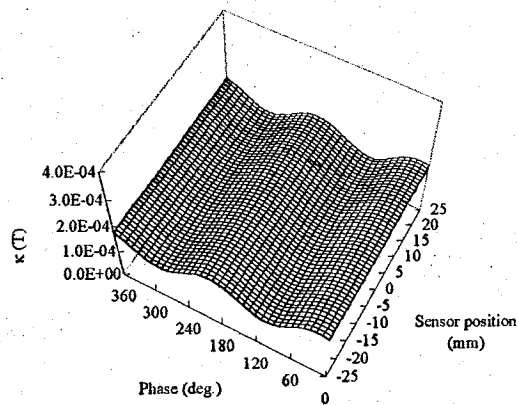
(b) Crack depth = 3 mm.



(c) Crack depth = 2 mm.

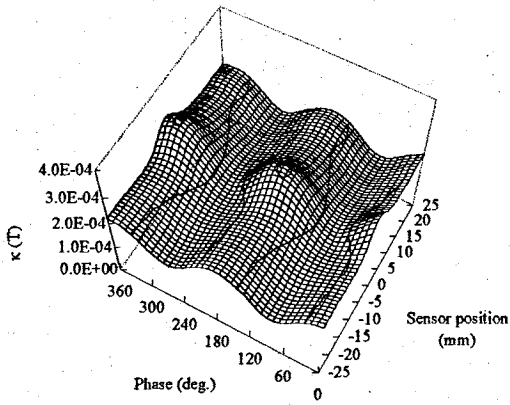


(d) Crack depth = 1 mm.

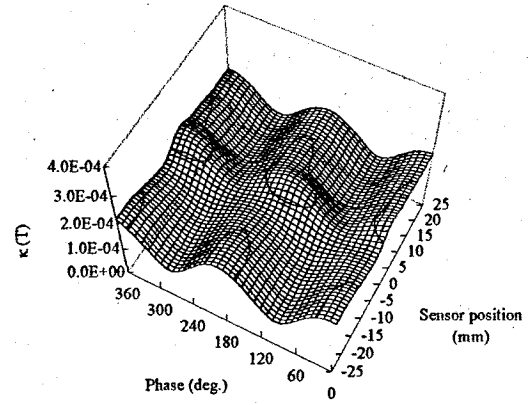


(e) Crack depth = 0 mm.

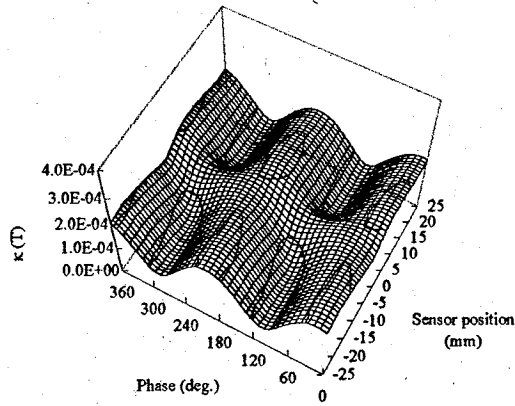
Fig. 3-47 κ vs. the sensor position (Reverse side).



(a) Inclination angle = -15 deg.



(b) Inclination angle = 0 deg.



(c) Inclination angle = 15 deg.

Fig. 3-48 κ vs. the sensor position
(Reverse side, Change of the inclination angle, Crack depth = 2 mm).

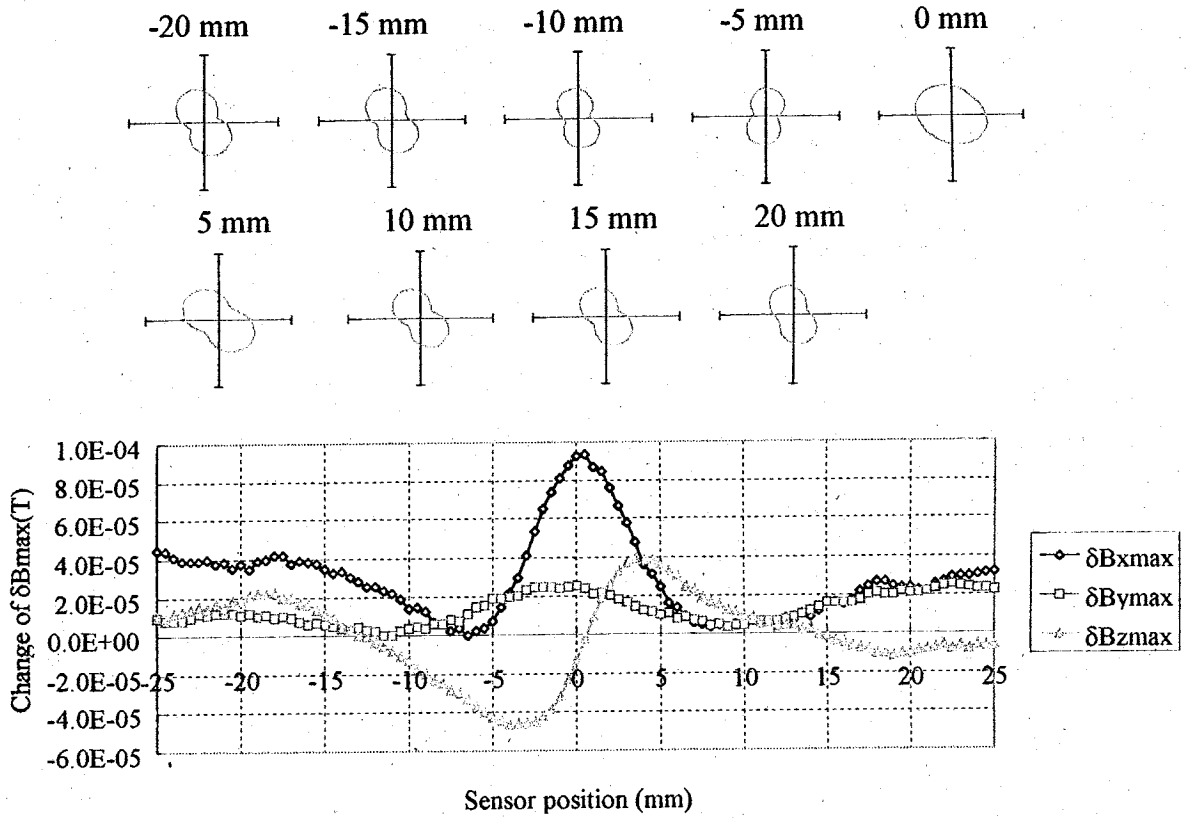


Fig. 3-49 Change of κ .

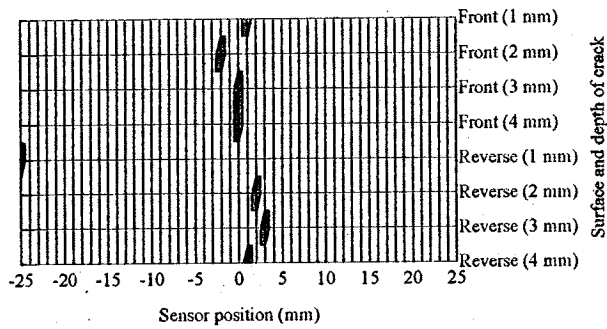


Fig. 3-50 Position of the maximum value of κ vs. existing surface and depth of a crack.

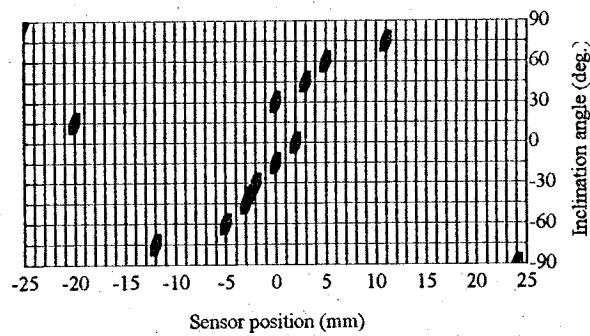


Fig. 3-51 Position of the maximum value of κ vs. inclination angle of a crack.

3. 2. 6 ピックアップコイル型磁気センサの欠陥検出特性

(1) 欠陥検出機構

3軸差動ピックアップコイル型磁気センサの欠陥検出機構を解明するために2次元有限要素法を利用した磁界解析を行った。この解析には、Fig. 3-52に示すメッシュを使った。解析条件は、励磁コイルの電流密度 3.0×10^6 A/m、被検査材と比較検査材の導電率 1.0×10^7 S/m、励磁周波数 40 Hz、被検査材と比較検査材の比透磁率は 400 である。フェライトコア製励磁ヨークの比透磁率は、5000 とした。また、欠陥の幅は、1 mm、深さは、4 mm である。フェライトコア製励磁ヨークの導電率は無視した。この場合の比較検査材の大きさは、80 mm x 80 mm x 5 mm である。

3軸差動ピックアップコイル型磁気センサは、その構造が第2章や第3章第2節の回転磁束型磁気センサと大きく異なっているため、欠陥検出機構も大きく異なっているものと考えられる。そこで、X軸(Y軸)とZ軸に分けて考えることにする。X軸(Y軸)のピックアップコイルに鎖交する磁束は、欠陥のない部分では、Fig. 3-53に示す分布であると考えられる。ただし、 E_x は励磁磁束の大きさであり、矢印はその方向を示す。また、 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 のピックアップコイルと鎖交する磁束をそれぞれ Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 、 Φ_4 とする。Fig. 3-54に欠陥がなくセンサが被検査材の中央にある場合の有限要素法による磁束線分布の計算結果を示す。Fig. 3-54の磁束線分布から、Fig. 3-53の概要図は正しいと言える。このとき、 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 、 Φ_4 は、ほぼ、 $\Phi_1 + \Phi_3 = \Phi_2 + \Phi_4$ となっておりX軸のピックアップコイルの出力電圧は、ほぼ、0となる。(ただし、被検査材と比較検査材の寸法が完全に同じでないため、多少不平衡出力電圧が発生する。)また、Fig. 3-55のように、欠陥が存在しセンサの中央にある場合は、 X_2 、 X_4 と鎖交しない磁束が欠陥の存在により発生するため $\Phi_1 + \Phi_3 > \Phi_2 + \Phi_4$ となり出力電圧が発生する。これが欠陥検出信号となる。さらに、Fig. 3-57のように欠陥が X_2 に近いところにある場合も上下のピックアップコイルの出力電圧のバランスがくずれ出力電圧が発生する。Fig. 3-56とFig. 3-58にFig. 3-55とFig. 3-57の場合に対応する磁束線分布を有限要素法によって計算した結果を示す。以上が、X軸あるいはY軸のピックアップコイルが欠陥を検出する機構である。

次にZ軸について考察する。 Z_1 、 Z_2 のピックアップコイルと鎖交する磁束をそれぞれ Φ_1 、 Φ_2 と Φ_3 、 Φ_4 とすると、Fig. 3-59のように欠陥がなければ、 $\Phi_1 + \Phi_3 = \Phi_2 + \Phi_4$ となっておりZ軸ピックアップコイルに出力信号は発生しない。また、Fig. 3-60のように欠陥が中央にある場合も同様に出力信号は発生しない。しかし、Fig. 3-52のように欠陥が中央以外の磁気センサ下部付近にある場合は、 Φ_3 と Φ_4 のバランスが壊れ出力信号が発生する。また、欠陥が磁気センサの中央の右側にあるか左側にあるかによって Φ_3 と Φ_4 のどちらが大きくなるかが決まり、Z軸ピックアップコイルの出力電圧の向きが決まる。Fig. 3-61にピックアップコイル X_2 に近いところに欠陥がある場合の Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 、 Φ_4 の様子を示す。これが、Z軸のピックアップコイルが欠陥を検出する機構である。

一方、Fig. 3-54、Fig. 3-56、Fig. 3-58に示す有限要素法による解析の結果から、励磁周波数 40 Hz では、磁気センサ直下に大きな渦電流が発生している。この渦電流の流路が欠陥により変化することによっても欠陥検出信号に変化を与える。この磁気センサは、欠陥によるピックアップコイル周辺の漏れ磁束の変化と渦電流の変化を併せて検出している。

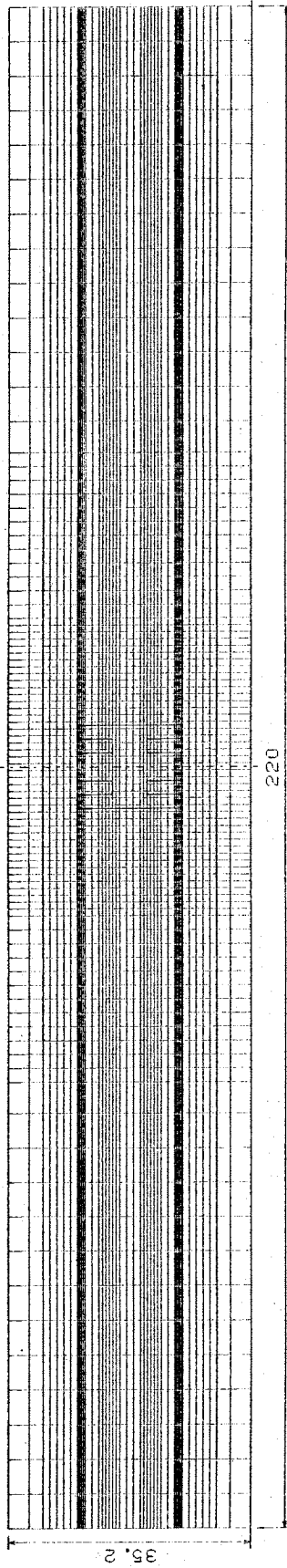


Fig. 3-52 Mesh for F.E.M. analysis.

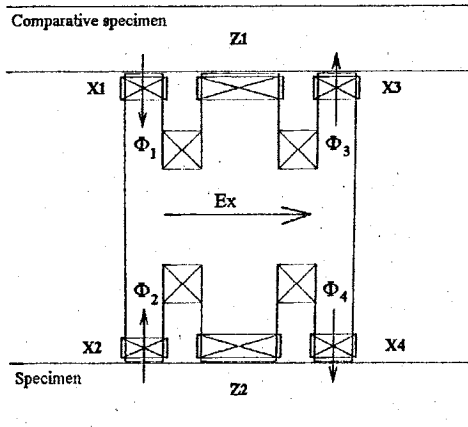


Fig. 3-53 Principle of detection
(Without a crack).

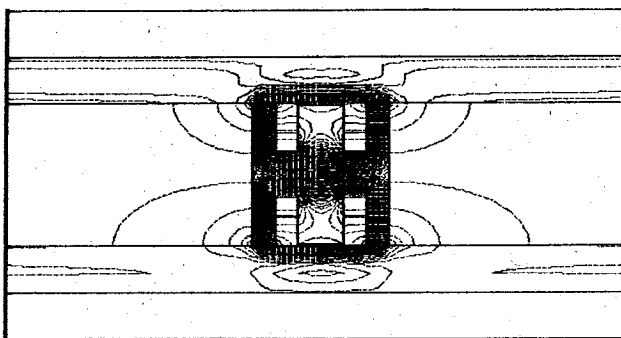


Fig. 3-54 Flux distribution by F.E.M..
(Without a crack)

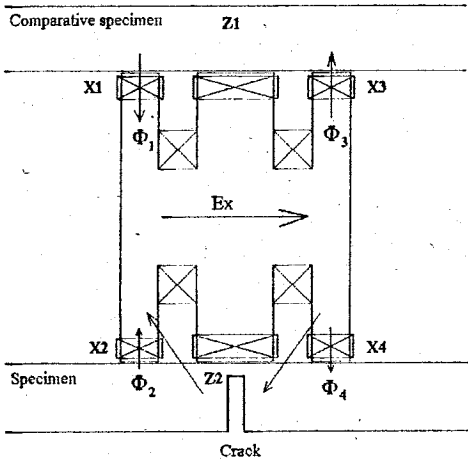


Fig. 3-55 Principle of detection
(With a crack in the center).

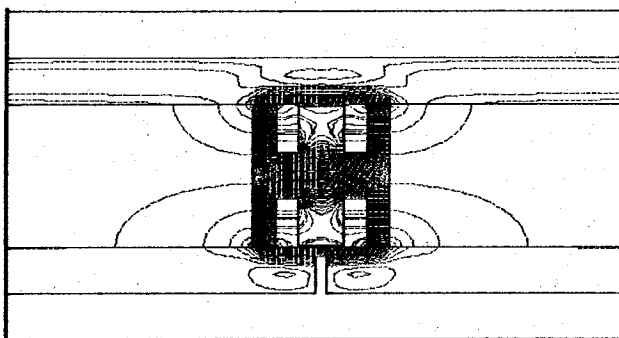


Fig. 3-56 Flux distribution by F.E.M..
(With a crack in the center)

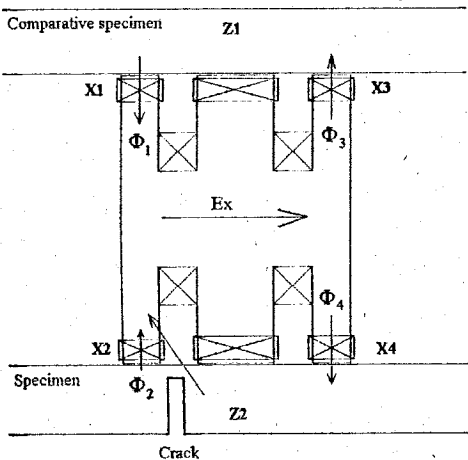


Fig. 3-57 Principle of detection
(With a crack off the center).

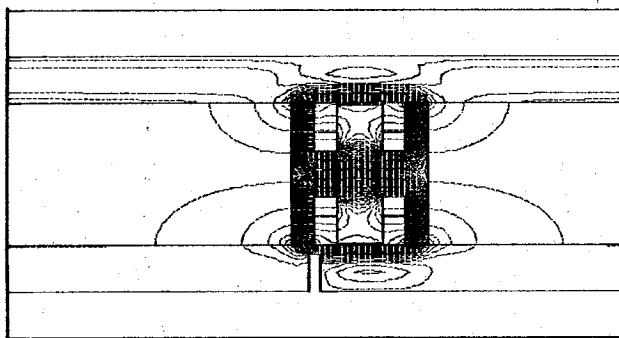


Fig. 3-58 Flux distribution by F.E.M..
(With a crack off the center)

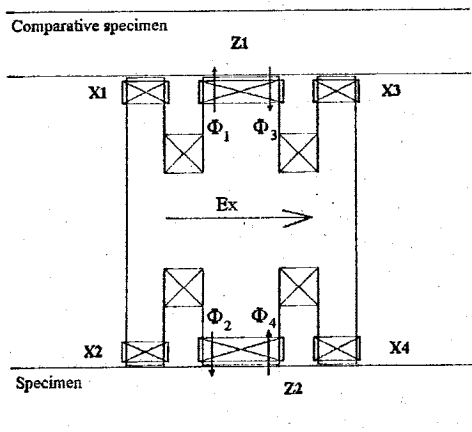


Fig. 3-59 Principle of detection
(Without a crack).

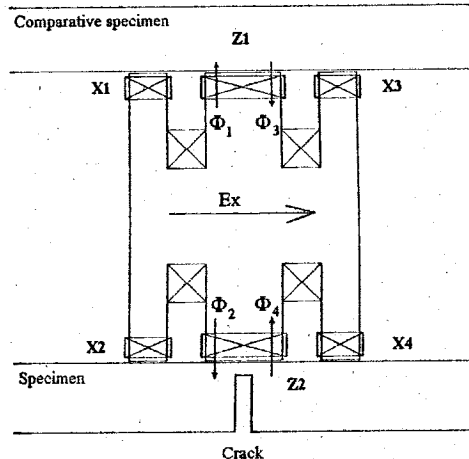


Fig. 3-60 Principle of detection
(With a crack in the center).

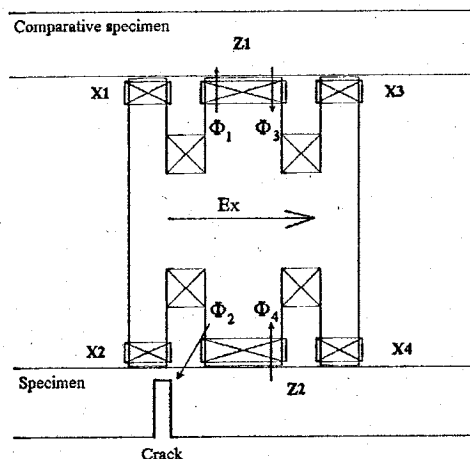


Fig. 3-61 Principle of detection (With a crack off the center).

(2) 欠陥検出特性

1) 基本欠陥検出特性

最初に、この3軸差動ピックアップコイル型磁気センサ (No. 2) の欠陥検出特性を求めるための実験を行った^[25, 28]。実験は、次の条件で行った。本研究で用いている軟鋼板製被検査材の表皮厚さは、2.5 Hz で約 5 mm であるが、ピックアップコイル型磁気センサ (No. 1) を使った実験の結果から^[23-24]、欠陥検出信号の変化率が大きくかつ安定した測定値の得られる励磁周波数は、40 Hz であった。よって、40 Hz を励磁周波数として採用した。このような表皮効果から得られる励磁周波数の 16 倍となる励磁周波数が欠陥検出信号の大きな変化率を示したのは、この磁気センサが欠陥による漏れ磁束の変化だけでなく渦電流の流路変化も併せて検出しているためである。印加磁束密度は、フェライトコアや被検査材の非線形性を考慮して、欠陥のない部分において X および Y 方向の B-コイルで検出される最大印加磁束密度が 0.2 T になるように励磁した。また、X および Y 方向の最大印加磁束密度が等しくなるように、

励磁コイルに印加する電圧の大きさを自動調整し、測定系のキャリブレーションを行った。測定は、被検査材中央部で欠陥の左右 25 mm を 0.5 mm 毎に行った。さらに、1 回の測定は、励磁周波数の 80 周期分としその平均を測定値とした。

Fig. 3-62 に各ピックアップコイルと低雑音アンプの接続の概念図を示す。各コイル間の和動と差動を電子回路的に実現し、同時に各ピックアップコイルの出力電圧のアンバランスも吸収した。Fig. 3-63 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。被検査材は、幅 0.4 mm の溝型欠陥がある軟鋼板である。

Fig. 3-64、Fig. 3-65、Fig. 3-66 は、励磁周波数 40 Hz、励磁磁束密度 0.2 T 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. 3-55、Fig. 3-57 より、 $\delta B_{x_{max}}$ 、 $\delta B_{z_{max}}$ の変化は、欠陥と磁気センサの距離と欠陥の深さに比例して増減している。また、全ての深さの欠陥において $\delta B_{z_{max}}$ の最大値を示す位置は、欠陥の位置とよく一致している。特に 1 mm の深さの欠陥の場合においても欠陥付近で $\delta B_{z_{max}}$ は最大値を示している。この結果は、磁気センサが非常に高感度であることを示している。さらに、 $\delta B_{y_{max}}$ の変化は、欠陥の方向が磁気センサの Y 軸と平行であるにもかかわらず大きな変化を示している。Fig. 3-66 は、 $\delta B_{z_{max}}$ の変化と磁気センサの位置との関係を示している。Z 軸に関して欠陥の存在と位置をよく捕らえている。

Fig. 3-67 のリサージュ波形の軸比 α の変化や Fig. 3-68 のリサージュ波形の傾き角 θ の変化は、空心蝶型磁気センサなどと異なり、単純な変化を示していない。しかし、基本的には、磁気センサが欠陥に掛かる付近で軸比 α 、傾き角 θ とも増加し、欠陥の真上付近で減少する傾向を示している。ここで、リサージュ波形の軸比 α とリサージュ波形の傾き角 θ は δB_x と δB_y の大きさと位相の両方の情報を含んでいるパラメータである。よって、この変化は、Fig. 3-60 と Fig. 3-61 に示す $\Phi_{x_{max}}$ と $\Phi_{y_{max}}$ が両者とも変化していることから説明できる。また、 $\Phi_{x_{max}}$ 、 $\Phi_{y_{max}}$ 、 $\Phi_{z_{max}}$ は、見かけ上大きく不連続に変化しているように見えるが、実際には、なめらかに欠陥の左右で増減する変化を示している。

Fig. 3-72 に $\delta B_{z_{max}}$ の変化率を示す。欠陥からの信号の変化率が大きく差動型磁気センサの特徴が良く現れている。また、深さ 1 mm の場合の変化率も欠陥がない場合の変化率と比べて大きく、深さ 1 mm の欠陥を判別可能である。なお、欠陥がない場合の変化率が 1 とならないのは、信号に雑音を含んでいるからである。

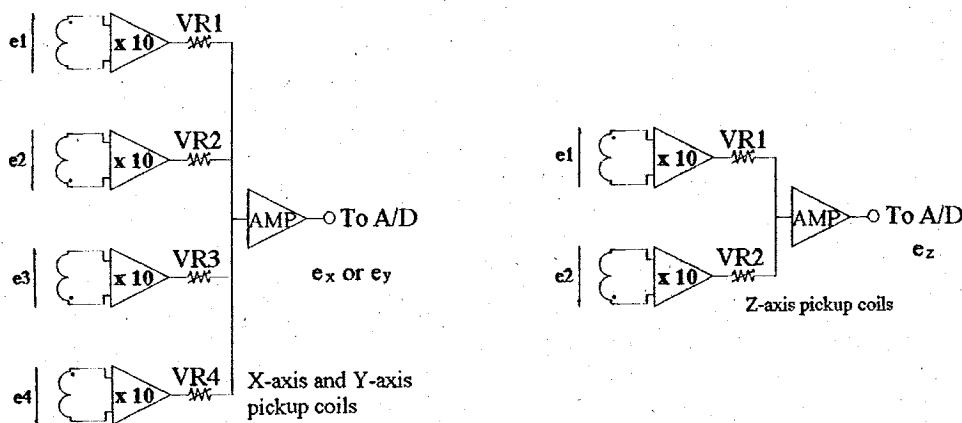


Fig. 3-62 Connection between pickup coils and amplifiers.

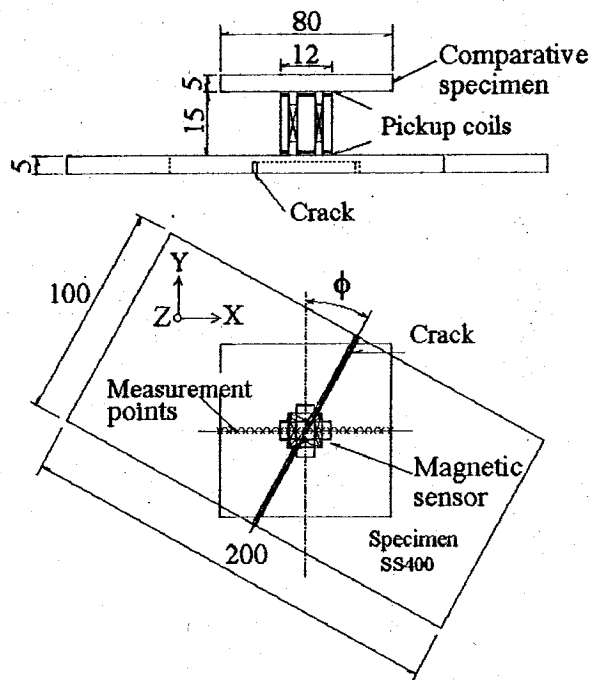


Fig. 3-63 Distribution of the magnetic sensor and the dimension of the specimen.

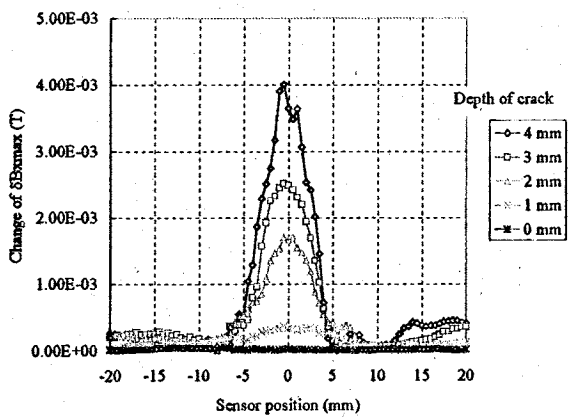


Fig. 3-64 $\delta B_{x\max}$ vs. the sensor position.

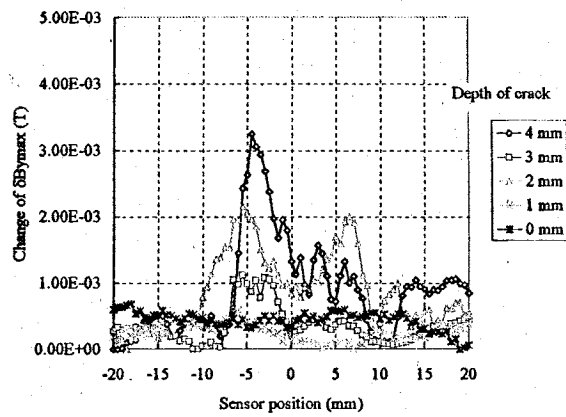


Fig. 3-65 $\delta B_{y\max}$ vs. the sensor position.

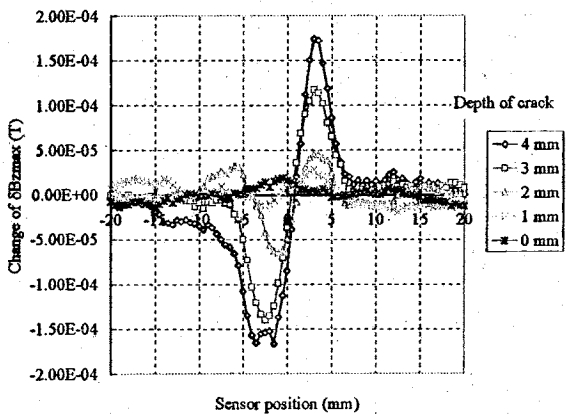


Fig. 3-66 $\delta B_{z\max}$ vs. the sensor position.

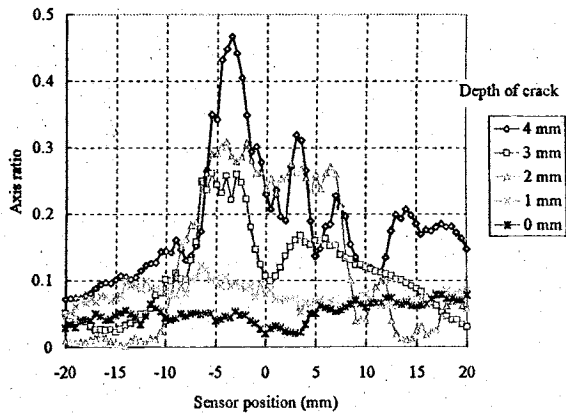


Fig. 3-67 Axis ratio(α) vs. the sensor position.

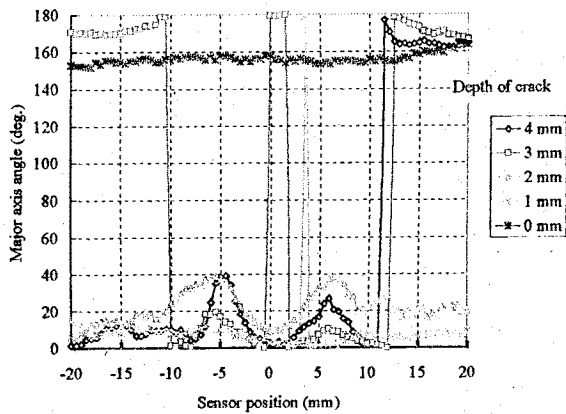


Fig. 3-68 Major axis angle vs. the sensor position.

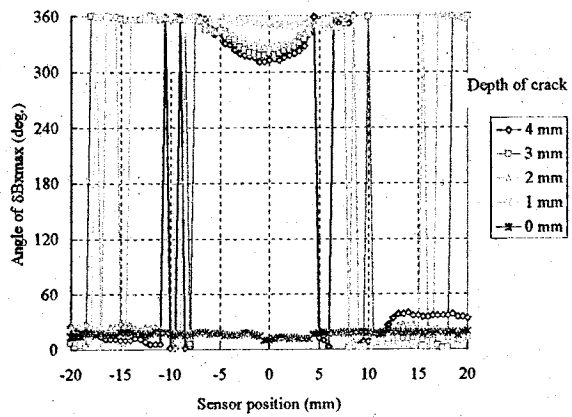


Fig. 3-69 $\Phi_{x_{max}}$ vs. the sensor position.

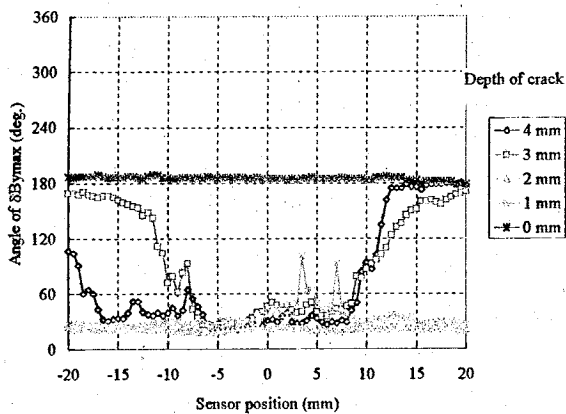


Fig. 3-70 $\Phi_{y_{max}}$ vs. the sensor position.

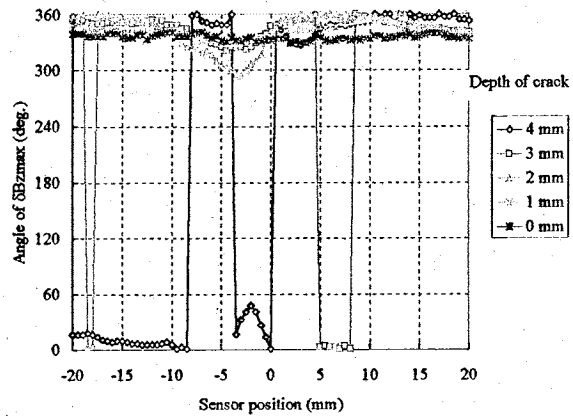


Fig. 3-71 $\Phi_{z_{max}}$ vs. the sensor position.

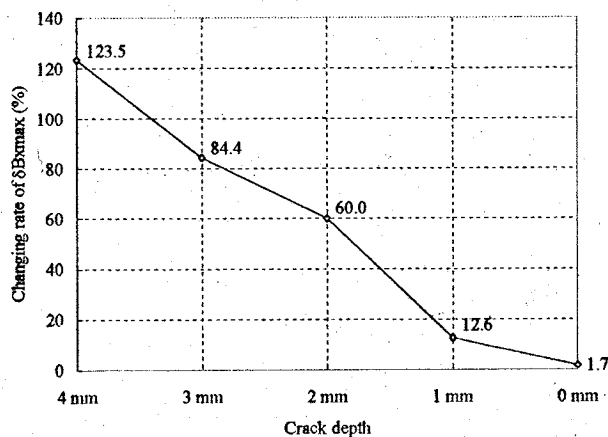


Fig. 3-72 Changing rate of $\delta B_{x_{max}}$ vs. the crack depth.

2) 励磁周波数の欠陥検出特性に及ぼす影響

励磁周波数の欠陥検出特性に及ぼす影響を比較するために、Fig. 3-73 と Fig. 3-74 に欠陥の深さ 3 mm の場合の $\delta B_{x_{max}}$ と $\delta B_{z_{max}}$ の変化を励磁周波数を 20 Hz から 320 Hz まで変化させながら測定した結果を示す。このときの印加磁束密度は、0.2 T であり、

欠陥の幅は、0.4 mmである。また、リフトオフは、被検査材側が 0.188 mm で比較検査材側も 0.188 mm である。 $\delta B_{x_{max}}$ は、励磁周波数 80 Hz で最大の変化を示している。 $\delta B_{z_{max}}$ については、励磁周波数 40 Hz 以下と 80 Hz 以上ではセンサと欠陥の位置関係的に全く逆の変化をしている。また、変化の幅は、160 Hz、320 Hz が大きくなっている。これは、Z 軸の欠陥検出機構が渦電流の影響を大きく受けていることを示唆している。

以上の結果から、この磁気センサの最適な励磁周波数は、40 Hz 程度から 80 Hz 程度である。

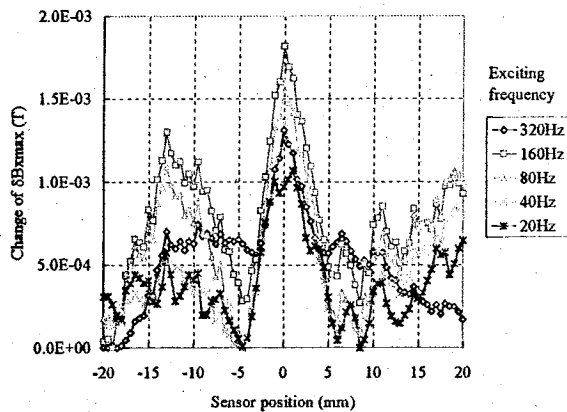


Fig. 3-73 Exciting frequency characteristics of $\delta B_{x_{max}}$ (Crack depth = 3 mm).

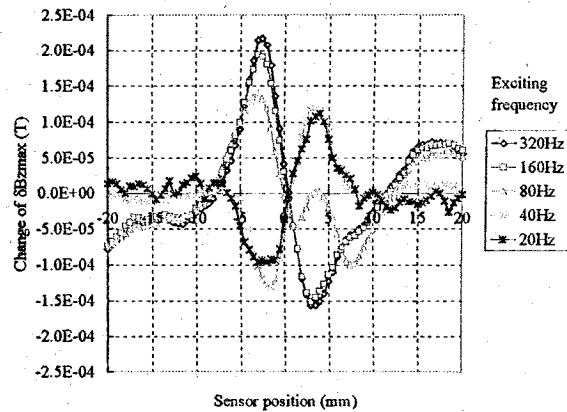


Fig. 3-74 Exciting frequency characteristics of $\delta B_{z_{max}}$ (Crack depth = 3 mm).

3) 欠陥の方向角の欠陥検出特性に及ぼす影響

3 軸差動ピックアップコイル型磁気センサにおいても欠陥の方向角 ϕ を推定することができる根拠となる欠陥の方向角 ϕ が欠陥検出特性に及ぼす影響を示す^[28]。

測定は、欠陥が Y 軸に平行な場合を方向角 ϕ を 0 度とし、-90 度から 90 度の範囲を 10 度刻みで測定し、時計回りを正とした。±90 度以上は磁気センサの対称性から測定しなかった。

Fig. 3-75 は、励磁周波数 40 Hz、裏側欠陥で幅 0.4 mm、深さ 3 mm の場合のリサーチ波形の軸比 α と欠陥の方向角 ϕ と磁気センサの位置の関係を示している。リサーチ波形の軸比 α は、±60 度より欠陥の方向角 ϕ が小さな範囲では、欠陥付近での軸比 α の変化が大きくなっている。Fig. 3-76、Fig. 3-77、Fig. 3-78 に、 $\delta B_{x_{max}}$ 、 $\delta B_{y_{max}}$ 、 $\delta B_{z_{max}}$ の方向角 ϕ の変化に対する変化を示す。 $\delta B_{x_{max}}$ 、 $\delta B_{y_{max}}$ 、 $\delta B_{z_{max}}$ とも欠陥の近くで方向角 ϕ の変化に従って大きな変化を示している。軸比 α および $\delta B_{x_{max}}$ 、 $\delta B_{y_{max}}$ 、 $\delta B_{z_{max}}$ とも無欠陥部の測定データがなめらかでない。これは、この磁気センサが、本研究で使用した他のセンサに比べて寸法的に小さいため、微小なリフトオフの変化や表側欠陥などの影響を受けやすいためである。

しかし、軸比 α および $\delta B_{x_{max}}$ 、 $\delta B_{y_{max}}$ 、 $\delta B_{z_{max}}$ とも欠陥の方向角 ϕ の変化に従って明らかな変化を示すことから 3 軸差動ピックアップコイル型磁気センサにおいても 1 次元の走査で欠陥の方向角 ϕ を推定することが可能である。

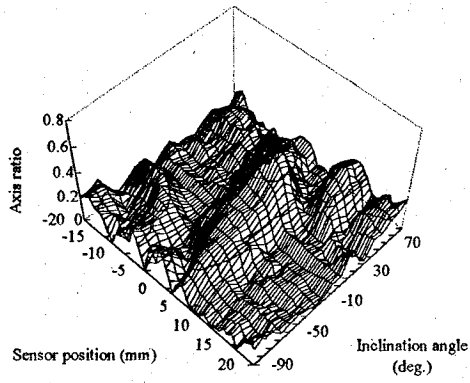


Fig. 3-75 Axis ratio(α) vs. inclination angle vs. the sensor position.

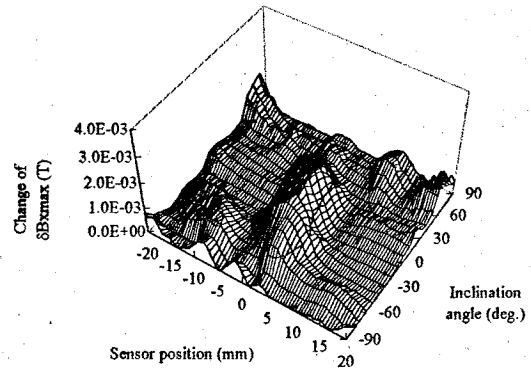


Fig. 3-76 $\delta B_{x\max}$ vs. inclination angle vs. the sensor position.

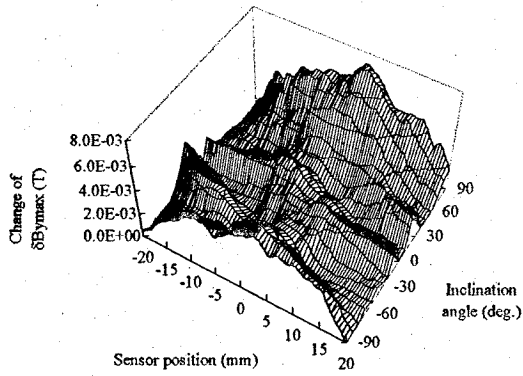


Fig. 3-77 $\delta B_{y\max}$ vs. inclination angle vs. the sensor position.

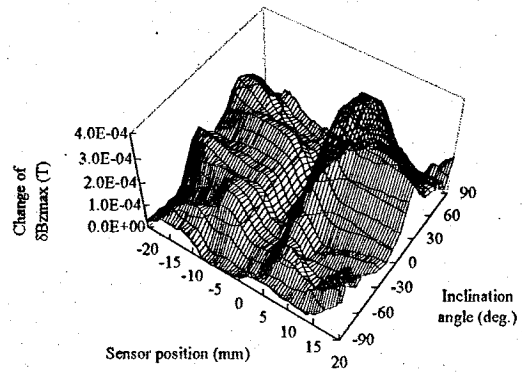


Fig. 3-78 $\delta B_{z\max}$ vs. inclination angle vs. the sensor position.

第3.3節 磁気等価回路による解析

3.3.1 概要

近年、磁気センサの欠陥検出機構の解明^[43-44]や欠陥属性推定問題のためのデータベース作成^[49]などを目的として有限要素法や境界要素法といった計算力学シミュレーションがその精度のよさからよく用いられている。しかし、複雑な形状の磁気センサの有限要素法解析には、2次元解析でさえ大きなCPUパワーと計算時間を必要とする。まして3次元問題では、さらに膨大なCPUパワーと計算時間を必要とする。このため、各種の手法を使用して^[74-75]計算時間の短縮を計っているのが現状である。

一方、磁気等価回路を用いて磁気センサを表現し、磁気センサの欠陥検出機構の解明やニューラルネットワークの学習データの作成などに利用している例もある^[52-53]。磁気等価回路は、変圧器の解析などに古くから用いられている技法であるが、対象としている機器の磁気的な振る舞いのすべてを、いわば集中定数回路で置き換えて表すため自ずから多くの近似を伴う。しかし、注意深く作成された磁気等価回路は、充分に機器の特性をシミュレーションできる。磁気等価回路を使った磁気センサのシミュレーションは、集中定数回路で表現されているため、キルヒホッフの法則を用いて作成した回路方程式を解くだけで行える。この回路方程式は、一般にあまり大きな次元とはならず、計算時間の大幅な短縮が期待できる。よって、磁気センサあるいは欠陥の多くのパラメータを変更しての欠陥検出特性予測などが行える。そこで、3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサの磁気等価回路を作成した。ここで作成した磁気等価回路は、X軸とY軸の対称性からX軸とZ軸のみを考慮した2次元の磁気等価回路である。磁気等価回路を作成する際には、表皮効果の影響や磁気センサ付近に励磁磁束が集中する効果も考慮した。

ここでは、肉厚鋼板を対象にした3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサの磁気等価回路を導出し、磁気等価回路を使用した欠陥検出特性のシミュレーション結果を示す^[25]。さらに、3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサの磁気等価回路を用いた欠陥検出特性が実験による欠陥検出特性とよく一致していることを示す。また、リフトオフを変えたシミュレーションの結果を示し、磁気等価回路を使用した磁気センサのシミュレーションが有効であることを示す。

3.3.2 磁気等価回路の導出

3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサの外形寸法や各コイルの配置、各コイルの巻き数などは、Fig. 3-5、Fig. 3-6、Fig. 3-9およびFig. 3-10に示した。Fig. 3-79に3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサの2次元磁気等価回路を作成するための寸法図を示し、Table 3-1にフェライトコア、比較検査材、被検査材の導電率と比透磁率を示す。Fig. 3-79に示す寸法のうち、 D_1 は、センサの中心とX軸あるいは、Y軸の脚の中心までの距離である。

Fig. 3-80に比較検査材や被検査材の厚さ(h)、欠陥の寸法(幅 W 、深さ D)、フェライトコアと比較検査材や被検査材との距離(リフトオフ=エアギャップ g_{11} 、 g_{12} 、 g_{13} 、

g_{14} , g_{21} , g_{22})などを示す。Fig. 3-81にこのセンサの中の主な磁束を示す。この磁気センサは、磁気回路が高透磁率材料で閉磁路を構成することから漏れ磁束は、無視した。

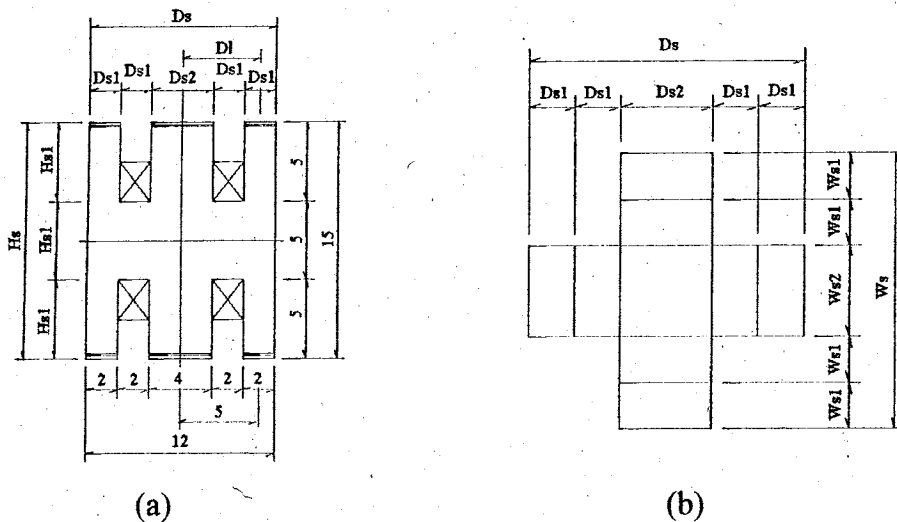


Fig. 3-79 Diminution of the sensor.

Table 3-1 Relative permeability and conductivity.

	Comparative specimen	Specimen	Ferrite core	Air gap
Relative permeability	300	300	4000	1
Conductivity S/m	1.00E+07	1.00E+07	0	0

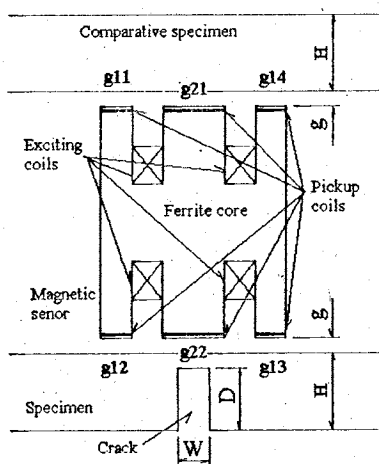


Fig. 3-80 Crack depth, width and length of air gap.

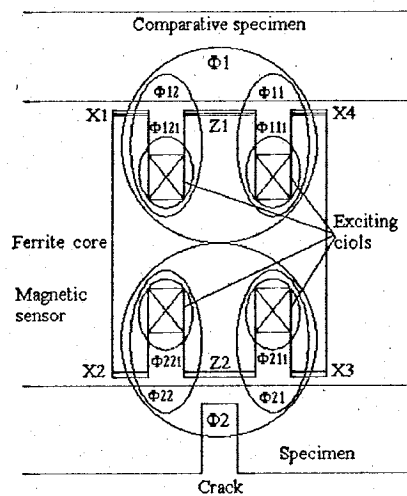


Fig. 3-81 Definition of the magnetic flux.

Fig. 3-82 に、フェライトコア中の磁気等価回路を示す。端子(TA, TB, TC)は、被検査材との接続点を示し、端子(TD, TE, TF)は、比較検査材との接続点を示す。また、端子(TA, TC, TD, TF)は、X 軸のフェライトコアの脚部中央に位置し、端子(TB, TE)は、Z 軸のフェライトコアの脚部中央に位置する。また、各軸の励磁コイルは2分割されているので、X 軸の励磁コイルによる起磁力は、 F_{x1} と F_{x2} に分割されている。励磁コイルの電流を I_e とし、X 軸の励磁コイルの巻き数を N_x とすると、起磁力 F_x は(3-8)式で表される。

$$F_{x1} = F_{x2} = \frac{N_x I_e}{2} = F_x \quad (3-8)$$

ここで、Fig. 3-70、Fig. 3-71 の各部の寸法と Table 3-1 に示した磁気回路を構成する各材料の比透磁率を考慮し、空気の透磁率を μ_0 とするとフェライトコア周りの各磁気抵抗は(3-9)式で表される。

$$\left. \begin{aligned} R_{g11} &= \frac{g_{11}}{\mu_0 D_{s1} W_{s1}} & R_{g12} &= \frac{g_{12}}{\mu_0 D_{s1} W_{s1}} \\ R_{g13} &= \frac{g_{13}}{\mu_0 D_{s1} W_{s1}} & R_{g14} &= \frac{g_{14}}{\mu_0 D_{s1} W_{s1}} \\ R_{g21} &= \frac{g_{21}}{\mu_0 D_{s2} W_{s2}} & R_{g22} &= \frac{g_{22}}{\mu_0 D_{s2} W_{s2}} \\ R_l &= \frac{D_{s1}}{\mu_0 H_{s1} W_{s2}} & R_{f1} &= \frac{H_{s1}}{2\mu_0 \mu_r D_{s2} W_{s1}} \\ R_{f2} &= \frac{H_{s1}}{4\mu_0 \mu_r D_{s2} W_{s2}} & R_{s1} &= \frac{H_{s1}}{2\mu_0 \mu_r D_{s2} W_{s1}} \\ R_{s2} &= \frac{H_{s1}}{4\mu_0 \mu_r D_{s2} W_{s2}} & R_e &= \frac{D_{s1}}{\mu_0 \mu_r H_{s1} W_{s2}} \end{aligned} \right\} \quad (3-9)$$

ここで、各磁気抵抗の大きさや磁気回路を流れる磁束に与える影響を考慮するとフェライトコア周りの磁気回路は、Fig. 3-83 のように簡略化される。よって、フェライトコア中の磁気抵抗は(3-10)式のみで表される。

$$\left. \begin{aligned} R_{g11} &= \frac{g_{11}}{\mu_0 D_{s1} W_{s1}} & R_{g12} &= \frac{g_{12}}{\mu_0 D_{s1} W_{s1}} \\ R_{g13} &= \frac{g_{13}}{\mu_0 D_{s1} W_{s1}} & R_{g14} &= \frac{g_{14}}{\mu_0 D_{s1} W_{s1}} \\ R_{g21} &= \frac{g_{21}}{\mu_0 D_{s2} W_{s2}} & R_{g22} &= \frac{g_{22}}{\mu_0 D_{s2} W_{s2}} \end{aligned} \right\} \quad (3-10)$$

次に、Fig. 3-84 に示す比較検査材中の磁気抵抗を求める。ここで、比較検査材中に取った各磁気抵抗の接続点 A, B は、センサが移動しても、センサとの相対位置は変

わからないものとする。また、A 点の深さは、比較検査材の厚さの 1/2 とし、B 点の深さは、比較検査材の厚さとしている。また、比較検査材中において磁束の通過する幅は、センサの脚の幅とする。よって、 R_{cs1} 、 R_{cs2} 、 R_{cs3} 、 R_{cs4} 、 R_{cs5} 、 R_{cs7} は、(3-11)式となる。

$$\left. \begin{aligned}
 R_{cs1} &= \frac{\left(\frac{h}{2}\right)}{\mu_0 \mu_s W_{s2} \left(\frac{h-D}{2}\right)} & R_{cs2} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}}{\mu_0 \mu_s W_{s2} \left(\frac{h-D}{2}\right)} \\
 R_{cs3} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}}{\mu_0 \mu_s W_{s2} \left(\frac{h-D}{2}\right)} & R_{cs4} &= \frac{\left(\frac{h}{2}\right)}{2\mu_0 \mu_s W_{s2} \left(\frac{h}{2}\right)} \\
 R_{cs5} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + h^2}}{\mu_0 \mu_s W_{s2} D} & R_{cs7} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + h^2}}{\mu_0 \mu_s W_{s2} D}
 \end{aligned} \right\} (3-11)$$

同様に、Fig. 3-85 に示す被検査材中の磁気抵抗を求める。ここで、被検査材中にある各磁気抵抗の接続点 A は、センサが移動しても、センサとの相対位置は変わらないものとする。しかし、B、C は、欠陥とセンサの相対位置によって変化する。センサの中心と欠陥の中心の距離を x としている。また、欠陥の深さは、 D であり、幅は、 W である。また、A 点の深さは、欠陥上部から被検査材下面までの 1/2 とし、B 点の深さは、被検査材上面から欠陥深さの 1/2 までとしている。よって、 R_{sp1} 、 R_{sp2} 、 R_{sp3} 、 R_{sp4} 、 R_{sp5} 、 R_{sp6} 、 R_{sp7} は、(3-12)式となる。ただし、 R_{sp4} では欠陥の幅 W を考慮すべきであるが、欠陥幅 W の R_{sp4} に対する影響は小さいので無視した。

$$\left. \begin{aligned}
 R_{sp1} &= \frac{1}{\mu_0 \mu_s W_{s2}} & R_{sp2} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h-D}{2}\right)^2}}{\mu_0 \mu_s W_{s2} \left(\frac{h-D}{2}\right)} \\
 R_{sp3} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h-D}{2}\right)^2}}{\mu_0 \mu_s W_{s2} \left(\frac{h-D}{2}\right)} & R_{sp4} &= \frac{\sqrt{x^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}}{\mu_0 \mu_s W_{s2} \left(\frac{h}{2}\right)} \\
 R_{sp5} &= \frac{\sqrt{(Dl-x)^2 + \left(h - \frac{D}{2}\right)^2}}{\mu_0 \mu_s W_{s2} D} & R_{sp6} &= \frac{W}{\mu_0 W_{s2} D} \\
 R_{sp7} &= \frac{\sqrt{(Dl+x)^2 + \left(h - \frac{D}{2}\right)^2}}{\mu_0 \mu_s W_{s2} D}
 \end{aligned} \right\} (3-12)$$

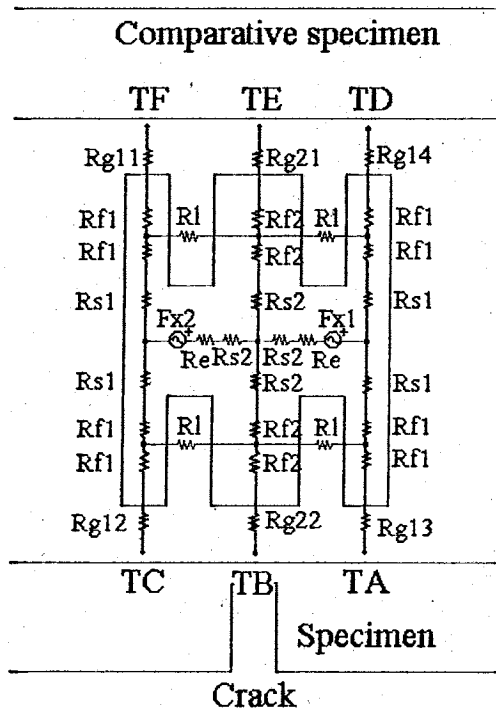


Fig. 3-82 Equivalent magnetic circuit in the ferrite core.

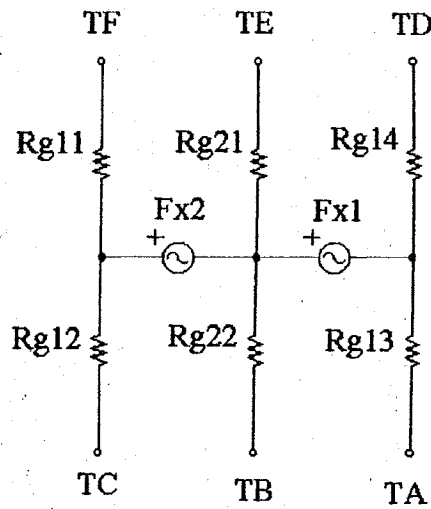


Fig. 3-83 Reduced Equivalent magnetic circuit in the ferrite core.

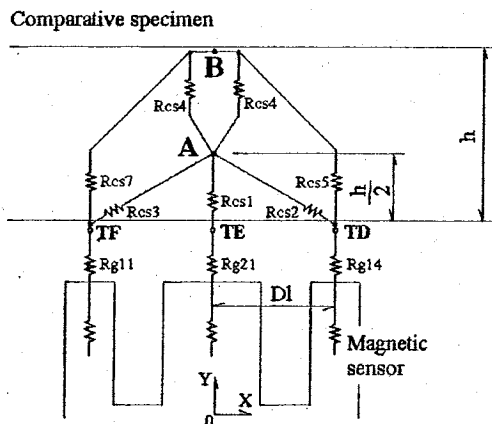


Fig. 3-84 Equivalent magnetic circuit in the comparative specimen.

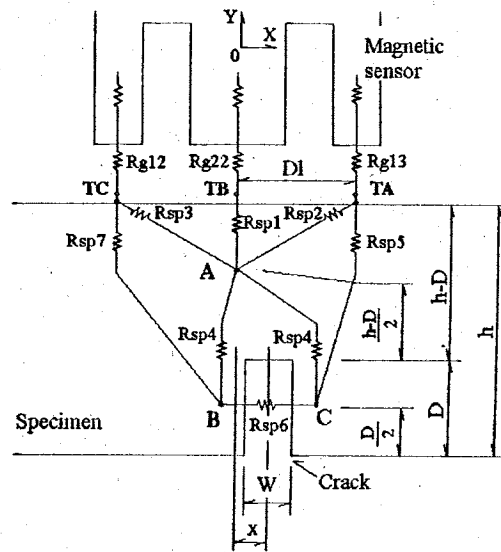


Fig. 3-85 Equivalent magnetic circuit in the specimen.

この磁気センサの欠陥検出動作には、渦電流の影響が大きい。そこで、被検査材中や比較検査材中の磁気抵抗に関して表皮効果による励磁磁束への影響を考慮する必要がある。表皮厚さ δ は、励磁角周波数を ω 、導体の導電率を σ 、透磁率を μ とすると(3-13)式で表される^[88]。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (3-13)$$

この表皮効果が被検査材や比較検査材中の磁気抵抗にあたる影響を表す表皮効果係数 K_e を(3-14)式のように定義する。ただし、 D_p は、各磁気抵抗の平均深さである。表皮効果係数 K_e は、各磁気抵抗の平均深さが深くなれば各磁気抵抗が表皮効果の影響を受けて等価的に大きくなるという事実に基づいている。

$$K_e = \frac{1}{\exp\left(-\frac{D_p}{\delta}\right)} \quad (3-14)$$

各磁気抵抗の表皮効果係数 K_{cs1} 、 K_{cs2} 、 K_{cs3} 、 K_{sp1} 、 K_{sp2} 、 K_{sp3} 、 K_{sp4} は、(3-15)式のと
なる。

$$\left. \begin{aligned} K_{cs1} &= \frac{1}{\exp\left(-\frac{h}{4\delta}\right)} & K_{cs2} &= \frac{1}{\exp\left(-\frac{3h}{4\delta}\right)} \\ K_{cs3} &= \frac{1}{\exp\left(-\frac{h}{2\delta}\right)} & K_{sp1} &= \frac{1}{\exp\left(-\frac{h-D}{4\delta}\right)} \\ K_{sp2} &= \frac{1}{\exp\left(-\frac{3h-2D}{4\delta}\right)} & K_{sp3} &= \frac{1}{\exp\left(-\frac{2h-D}{4\delta}\right)} \\ K_{sp4} &= \frac{1}{\exp\left(-\frac{2h-D}{2\delta}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (3-15)$$

よって、各磁気抵抗の表皮効果係数 K_{cs1} 、 K_{cs2} 、 K_{cs3} 、 K_{sp1} 、 K_{sp2} 、 K_{sp3} 、 K_{sp4} を考慮した各磁気抵抗は、(3-16)式で表される。

$$\left. \begin{aligned} R_{cs1} &= \frac{\left(\frac{h}{2}\right)}{2\mu_0\mu_s W_{s2}\left(\frac{h-D}{2}\right)} K_{cs1} = \frac{\left(\frac{h}{2}\right)}{2\mu_0\mu_s W_{s2}\left(\frac{h-D}{2}\right) \exp\left(-\frac{h}{4\delta}\right)} \\ R_{cs2} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2}\left(\frac{h-D}{2}\right)} K_{cs1} = \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2}\left(\frac{h-D}{2}\right) \exp\left(-\frac{h}{4\delta}\right)} \\ R_{cs3} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2}\left(\frac{h-D}{2}\right)} K_{cs1} = \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2}\left(\frac{h-D}{2}\right) \exp\left(-\frac{h}{4\delta}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned}
R_{cs4} &= \frac{\left(\frac{h}{2}\right)}{2\mu_0\mu_s W_{s2}\left(\frac{h}{2}\right)} K_{cs2} = \frac{1}{2\mu_0\mu_s W_{s2} \exp\left(-\frac{3h}{4\delta}\right)} \\
R_{cs5} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + h^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2} D} K_{cs3} = \frac{\sqrt{Dl^2 + h^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2} D \exp\left(-\frac{h}{2\delta}\right)} \\
R_{cs7} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + h^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2} D} K_{cs3} = \frac{\sqrt{Dl^2 + h^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2} D \exp\left(-\frac{h}{2\delta}\right)} \\
R_{sp1} &= \frac{h - D}{2\mu_0\mu_s W_{s2}(h - D)} K_{sp1} = \frac{1}{2\mu_0\mu_s W_{s2} \exp\left(-\frac{h - D}{4\delta}\right)} \\
R_{sp2} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h - D}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2}(h - D)} K_{sp1} = \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h - D}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2}(h - D) \exp\left(-\frac{h - D}{4\delta}\right)} \\
R_{sp3} &= \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h - D}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2}(h - D)} K_{sp1} = \frac{\sqrt{Dl^2 + \left(\frac{h - D}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2}(h - D) \exp\left(-\frac{h - D}{4\delta}\right)} \\
R_{sp4} &= \frac{\sqrt{x^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2}\left(\frac{h}{2}\right)} K_{sp2} = \frac{\sqrt{x^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2}\left(\frac{h}{2}\right) \exp\left(-\frac{3h - 2D}{4\delta}\right)} \\
R_{sp5} &= \frac{\sqrt{(Dl - x)^2 + \left(h - \frac{D}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2} D} K_{sp3} = \frac{\sqrt{(Dl - x)^2 + \left(h - \frac{D}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2} D \exp\left(-\frac{2h - D}{4\delta}\right)} \\
R_{sp6} &= \frac{W}{\mu_0 W_{s2} D} K_{sp4} = \frac{W}{\mu_0 W_{s2} D \exp\left(-\frac{2h - D}{2\delta}\right)} \\
R_{sp7} &= \frac{\sqrt{(Dl + x)^2 + \left(h - \frac{D}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2} D} K_{sp3} = \frac{\sqrt{(Dl + x)^2 + \left(h - \frac{D}{2}\right)^2}}{\mu_0\mu_s W_{s2} D \exp\left(-\frac{2h - D}{4\delta}\right)}
\end{aligned} \tag{3-16}$$

次に、Fig. 3-86 に示すように、励磁磁界は比較検査材や被検査材中では磁気センサの脚の間に集中する。磁気センサは、励磁磁束や励磁磁束によって発生した渦電流が欠陥によって乱されることを検出するため、励磁磁束が小さくなっている部分についてはほとんど感度を持たない。この励磁磁束の集中の効果も磁気等価回路作成時に考慮しなければ、正確な磁気センサの欠陥検出特性をシミュレーションすることはできない。しかし、実験的に被検査材中の磁束の分布を求めることは不可能である。そこで、被検査材中の磁束の分布を有限要素法を使って求めた。メッシュは、Fig. 3-52 に示すものを用いた。ただし、Y 方向のメッシュの寸法は、リフトオフを 0.188 mm としたため 35.376 mm である。解析条件は、比較検査材 (80 mm x 80 mm x 5 mm) の比透磁率 300、導電率 1.0×10^7 S/m、被検査材 (200 mm x 100 mm x 5 mm) の比透磁率 300、導電率 1.0×10^7 S/m、フェライトコアの比透磁率 4,000 である。また、励磁電流密度 3.0×10^6 A/m² (0.4 A)、励磁周波数 40 Hz である。また、同様の条件で、被検査材中の磁束密度の大きさを被検査材の深さ 0.5 mm ごとに計算したグラフが、Fig. 3-86 である。なお、磁束密度分布を求める際の被検査材中の深さは、被検査材上面を 0 mm とした。Fig. 3-86 は、欠陥とセンサの間隔が広がれば、欠陥による磁束の乱れが小さくなることを意味している。このことは、欠陥とセンサの間隔が広くなれば、比較検査材や被検査材中の磁気抵抗が Fig. 3-86 に従って大きくなると考えることができる。そこで、この磁束の集中の影響を磁気等価回路に導入するために、Fig. 3-86 で表される磁束密度分布の近似式を作成した。Fig. 3-86 に示す励磁磁束の分布の近似式を (3-17) 式に示す。

$$\left. \begin{aligned} f(x)_{x>0} &= 1 / \left\{ 1 + \exp(1.5x - 8) \right\} \\ f(x)_{x \leq 0} &= 1 / \left\{ 1 + \exp(-1.5x - 8) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3-17)$$

Fig. 3-87 に有限要素法で求めた磁束密度分布と (3-17) 式で求めた磁束密度分布の比較を示す。この図より、(3-17) 式は、被検査材中の磁束密度分布をよく近似している。

Fig. 3-88 に最終的に得られたこの磁気センサのシミュレーションのための磁気等価回路を示す。また、Fig. 3-89 に回路方程式作成のための磁気等価回路を示す。

Fig. 3-90 と Fig. 3-91 に、欠陥の幅 0.4 mm、励磁電流 0.4 A (励磁磁束密度表示では、ほぼ 0.2 T である。)、リフトオフ 0.188 mm の場合のこの磁気等価回路を使用したシミュレーションの結果を示す。両図ともこの磁気センサの欠陥検出特性を良く表している。このことから磁気等価回路を用いた欠陥検出特性のシミュレーションは、有効であると言える。

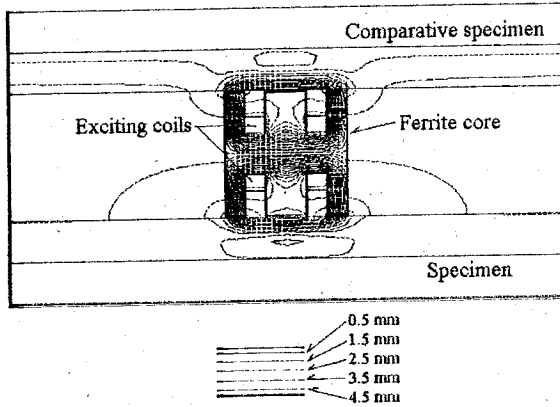


Fig. 3-86 Flux distribution in the specimen and the comparative specimen by F.E.M.

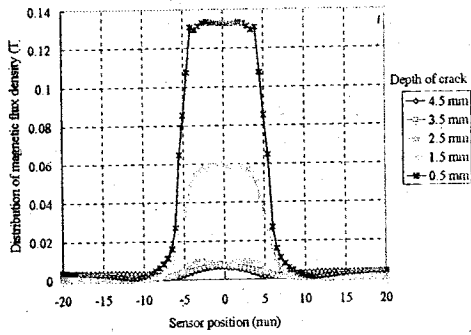


Fig. 3-87 Distribution of magnetic flux density in the specimen.

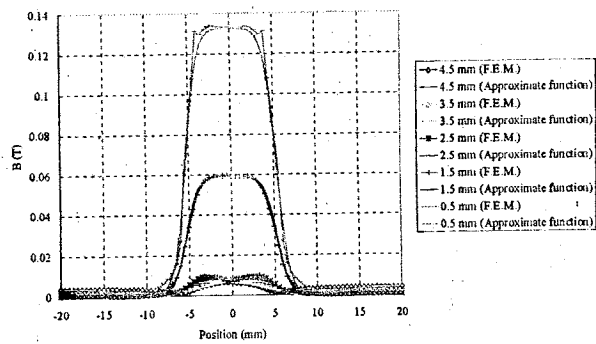


Fig. 3-88 Comparison with numerical analysis by F.E.M. and by the approximation function.

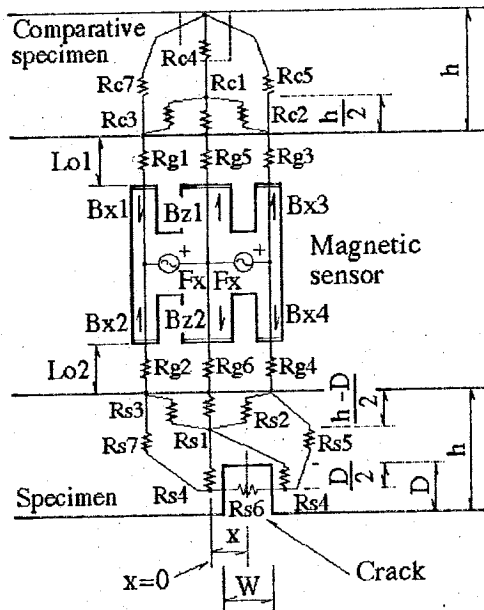


Fig. 3-89 Equivalent magnetic circuit of the sensor system.

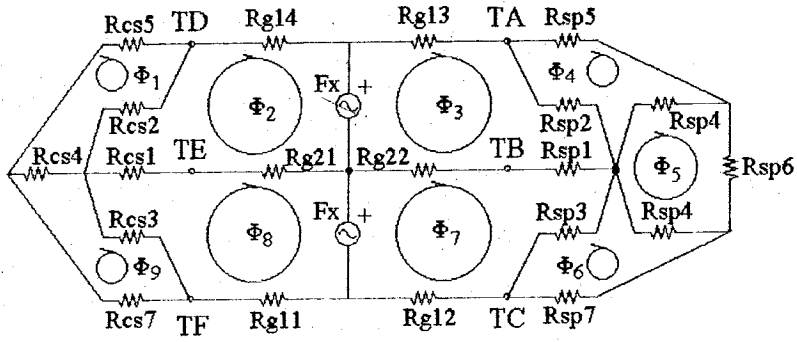


Fig. 3-90 Equivalent magnetic circuit.

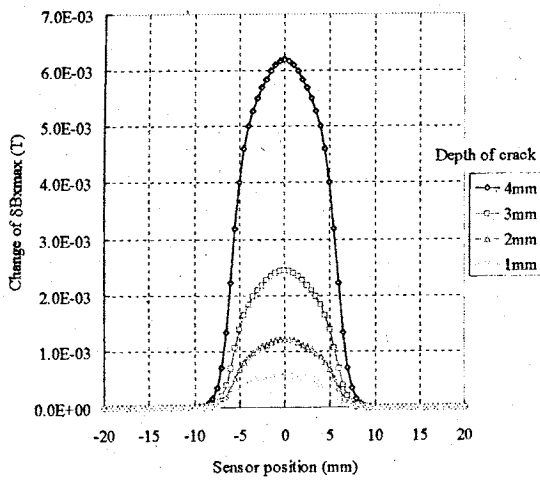


Fig. 3-91 Results of numerical analysis using equivalent magnetic circuit(ΔB_{zmax}).

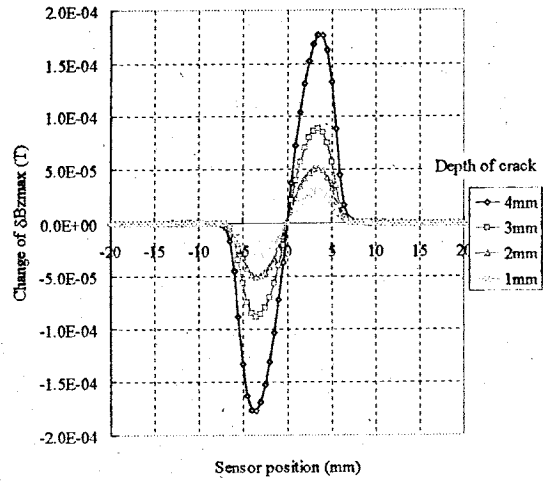


Fig. 3-92 Results of numerical analysis using equivalent magnetic circuit(ΔB_{zmax}).

3. 3. 3 実験結果との比較

第3. 2節の6項で求めた、3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサの実験による欠陥検出特性と磁気等価回路によるシミュレーションの結果を比較する。磁気等価回路によるシミュレーションの条件は、前項で用いたものと同じである。Fig. 3-93に $\delta B_{x_{max}}$ の比較の結果を、Fig. 3-94に $\delta B_{z_{max}}$ の比較の結果を示す。両図とも実験結果とよく一致しており、このシミュレーションが有効であることを示している。特に、 $\delta B_{z_{max}}$ は非常によく一致している。

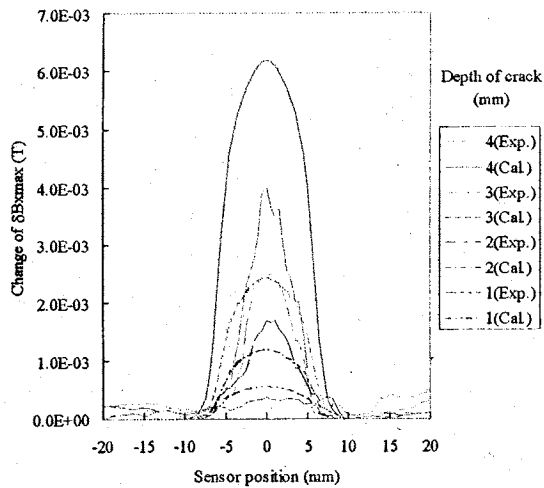


Fig. 3-93 Comparison with results of numerical analysis and results of experiments. ($\delta B_{x_{max}}$)

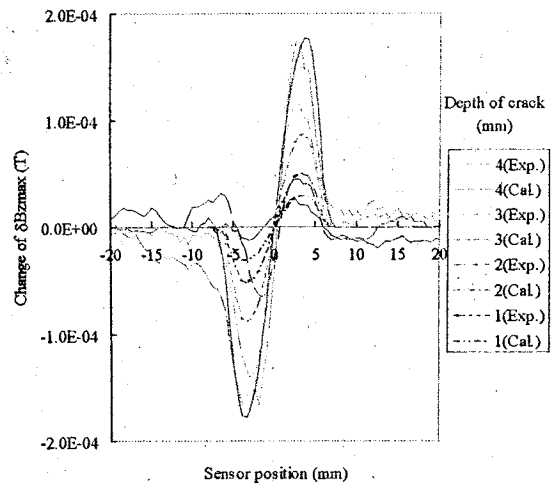


Fig. 3-94 Comparison with results of numerical analysis and results of experiments. ($\delta B_{z_{max}}$)

3. 3. 4 リフトオフの変化

シミュレーションの条件を前項と同様にして、磁気センサが被検査材に接する部分の片方のギャップを 0.01 mm だけ変化した場合の Z 軸の欠陥検出信号の変化の様子を Fig. 3-95 に示す。磁気センサと被検査材の相対的な位置関係をこのような状態に実験的に設定することは、非常に困難である。しかし、磁気等価回路を使用したシミュレーションでは容易に実現することが出来る。この結果は、この磁気センサがリフトオフの左右のバランスに非常に敏感であり、磁気センサを被検査材と常に平行に保つ必要があることを示唆している。このような、シミュレーションの結果を利用して実験を行えばより正確な実験が期待できる。この点にも磁気等価回路を利用したシミュレーションの有効性がある。

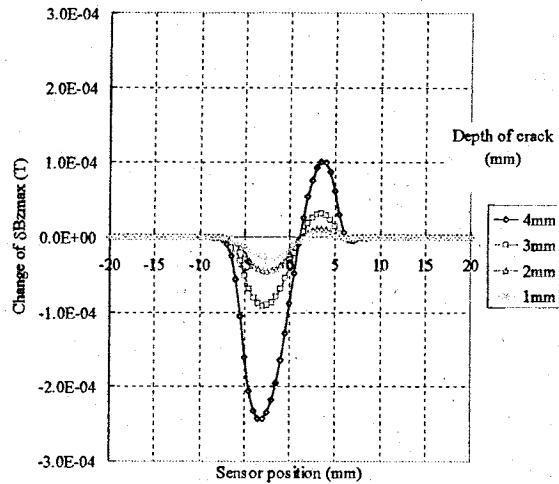


Fig. 3-95 Change of lift off vs. ΔB_{zmax} .
($g_{11} = 0.18$ mm, $g_{12} = 0.18$ mm, $g_{13} = 0.19$ mm and $g_{14} = 0.18$ mm)

第3. 4節 肉厚ステンレス板裏側欠陥の磁気探傷

3. 4. 1 概要

肉厚のステンレス板の裏側欠陥を対象とした差動式回転磁束型磁気センサを開発した^[26]。開発した差動式回転磁束型磁気センサは、励磁コアにフェライトコアを用いたもので、その形状や各種コイルの巻き数（ピックアップコイルを除く。）などは、軟鋼板を対象にした3軸差動ピックアップコイル型磁気センサと同じである。ただし、軟鋼板を対象にした場合は、センサの下部に被検査材を配置し、上部に被検査材と電氣的に同質の比較検査材を配置した構成で非破壊検査用磁気センサとしたが、ステンレス板を対象にした場合は、比較検査材を用いていない。これは、ステンレス板の比透磁率や導電率が軟鋼板に比べて小さいため比較検査材を用いなくても低雑音増幅器の利得調整で上部下部のバランスがとれるためである。

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差動式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差動式回転磁束型磁気センサの差動型であるという特性を利用して欠陥による欠陥検出信号の変化分のみに着目した「欠陥形状評価指標 χ 」を導入した^[26]。この欠陥形状評価指標 χ が欠陥形状の判定に有効であることを明らかにする。

3. 4. 2 肉厚ステンレス板用差動式磁気センサの構造

3軸差動ピックアップコイル型磁気センサは、ステンレス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。ステンレス板用の3軸差動ピックアップコイル型磁気センサの構造や差動の実現方法などは、全く軟鋼板のそれと同じである。ただし、比較検査材を用いない。Fig. 3-96に3軸差動ピックアップコイル型磁気センサの構造を示す。Fig. 3-97に磁気センサの上部から見た写真を示す。

3. 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は、第3. 2節で示したのと同じである。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。

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ごと移動する。試料の中心を $X = 0 \text{ mm}$ 、 $Y = 0 \text{ mm}$ とすると測定は、XY軸とも -25 mm から $+25 \text{ mm}$ の範囲を面状に走査した (2,601点)。1点の測定値は、励磁周波数の120周期分とし、その平均値を用いた。また、被検査材は、第2. 4節に示したのと同じである。

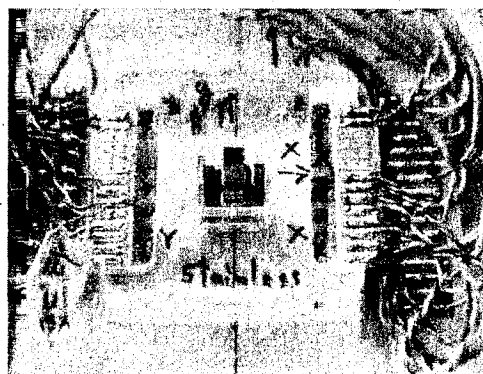
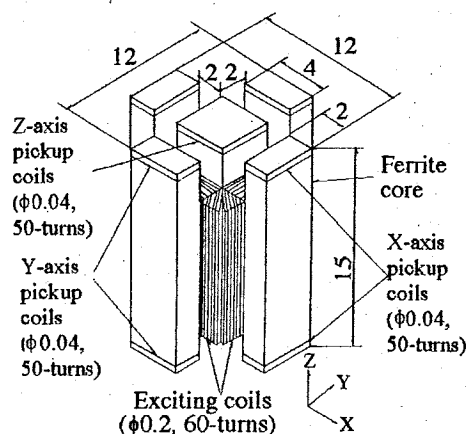


Fig. 3-96 Structure of the magnetic sensor. Fig. 3-97 Photograph of the magnetic sensor.

3. 4. 4 ピックアップコイル型磁気センサの欠陥検出特性

(1) 欠陥検出機構

肉厚軟鋼板を対象にした3軸差動ピックアップコイル型磁気センサの欠陥検出機構については、第3.2節で説明した。肉厚ステンレス板裏側欠陥を対象とした3軸差動ピックアップコイル型磁気センサは、被検査材の比透磁率や導電率、比較検査材を用いていないなど、動作条件が大きく異なっているため、欠陥検出機構も異なっているものと考えられる。そこで、肉厚ステンレス板を対象とした3軸差動ピックアップコイル型磁気センサの欠陥検出機構を解明するために2次元有限要素法を利用した磁界解析を行った。解析条件は、励磁コイルの電流密度 1.5×10^5 A/m、被検査材の導電率 1.39×10^6 S/m、励磁周波数 1,600 Hz、被検査材の比透磁率は 1.02 である。フェライトコア製励磁コアの比透磁率は、5,000 とした。また、欠陥の幅は、10 mm、深さは、4 mm である。励磁コアの導電率は無視した。

Fig. 3-98 と Fig. 3-99 に欠陥なしの場合の磁束線分布を示す。なお、Fig. 3-98 の場合は、 $\omega t = 0$ 度であり、Fig. 3-99 の場合は、 $\omega t = 90$ 度である。比較検査材を用いないで、欠陥なし被検査材の中央で、各軸の差動接続されたピックアップコイルの出力電圧が最小となるように電子回路的に調整されているため、このときの各軸の差動ピックアップコイルの出力電圧は、最小値となっている。他言すれば、この場合、上下のピックアップコイルと鎖交する磁束については、キャンセルアウトされると言える。欠陥の存在によって Fig. 3-98 と Fig. 3-99 の磁束線分布から変化した分だけが欠陥検出信号として出力されることになる。Fig. 3-100 と Fig. 3-101 は、欠陥の真上にセンサがある場合の磁束線分布である。Fig. 3-98 と Fig. 3-100 の $\omega t = 0$ 度の場合を比べると磁束線分布が磁気センサの上下で多少変化していることがわかる。しかし、Z 軸を構成しているセンサの中央の脚部付近では、その違いははっきりしない。X 軸 (Y 軸) においては、センサの上下の磁束線分布の違いを検出し、欠陥検出信号が現れることになる。しかし、Z 軸においては、ほとんど欠陥検出信号が得られない。さらに、Fig. 3-99 と Fig. 3-101 の $\omega t = 90$ 度の渦電流が最大の場合を比べると欠陥があれば、渦電流が流れる領域が小さくなるため磁束線分布が磁気センサの上下で変

化していることもわかる。Fig. 3-102 と Fig. 3-103 は、欠陥の真上から 5 mm だけセンサが離れている場合の磁束線分布である。Fig. 3-98 と Fig. 3-102 の $\omega t = 0$ 度の場合を比べると磁束線分布が磁気センサの上下および左右で変化していることがわかる。また、Z 軸を構成しているセンサの中央の脚部付近では、センサの上下で違いがはっきり観測される。X 軸 (Y 軸) においては、センサの上下および左右での磁束線分布の違いを検出し欠陥検出信号が現れ、Z 軸においても、センサの上下で異なっている磁束線分布を検出し欠陥検出信号が得られることになる。さらに、Fig. 3-99 と Fig. 3-103 の $\omega t = 90$ 度の渦電流が最大の場合を比べるとセンサの上下左右で磁束線分布が明確に異なっている。

Fig. 3-104 と Fig. 3-105 に上記と同じ条件で有限要素法を用いて計算した δB_{zmax} と δB_{zmax} とセンサの位置の関係を示す。3次元形状の欠陥を2次元に近似し計算したため、その絶対的な値は、実験結果と一致していないが、変化の傾向は、実験結果とよく一致している。ただし、計算上の数値を Float (単精度実数型) で取り扱ったため丸め誤差等が現れている。以上の結果から、この磁気センサは、欠陥の存在による微小な比透磁率の違いや、渦電流の流路の違いを検出している。ただし、この解析には、Fig. 3-106 に示すメッシュを使った。

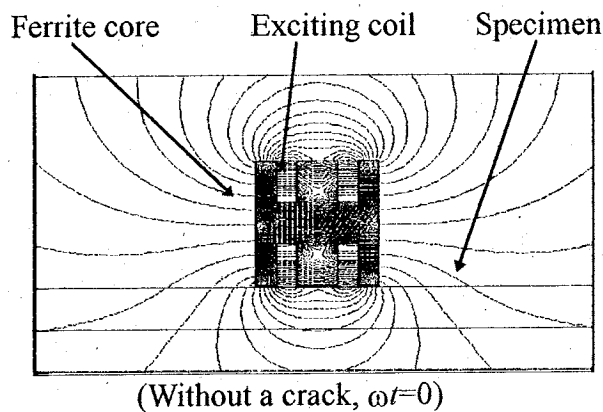


Fig. 3-98 Flux distribution by F.E.M.

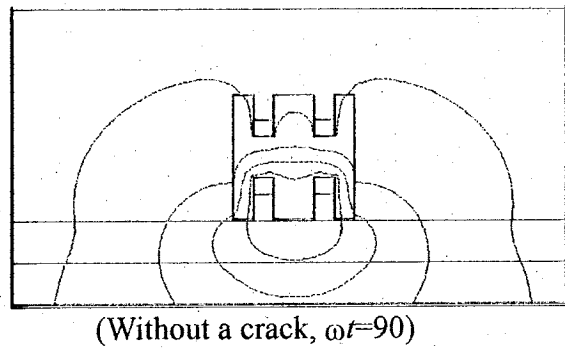


Fig. 3-99 Flux distribution by F.E.M.

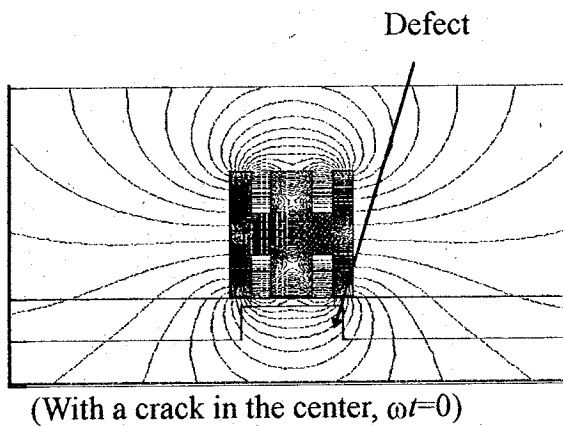


Fig. 3-100 Flux distribution by F.E.M.

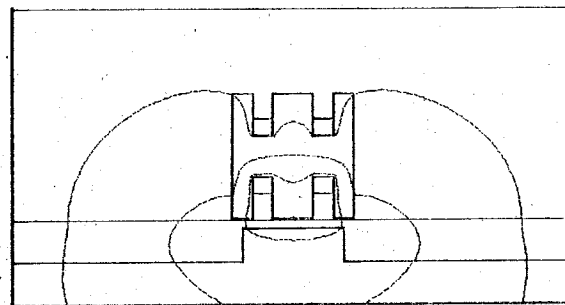
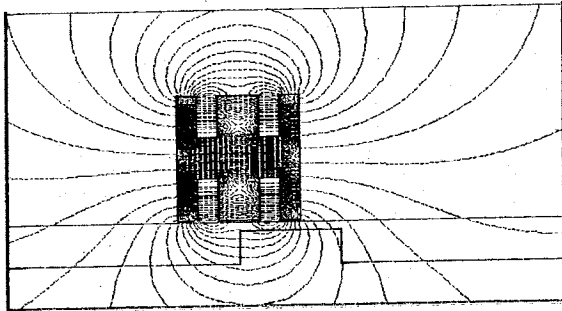
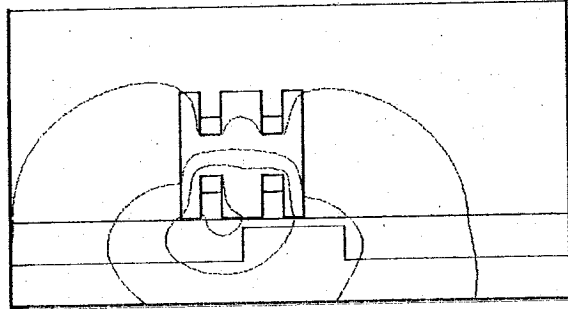


Fig. 3-101 Flux distribution by F.E.M.



(With a crack off the center, $\omega t=0$)
 Fig. 3-102 Flux distribution by F.E.M..



(With a crack off the center, $\omega t=90$)
 Fig. 3-103 Flux distribution by F.E.M..

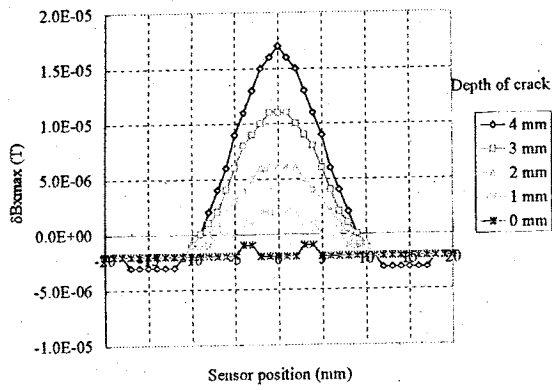


Fig. 3-104 $\delta B_{x\max}$ vs. sensor position
 by F.E.M. analysis.

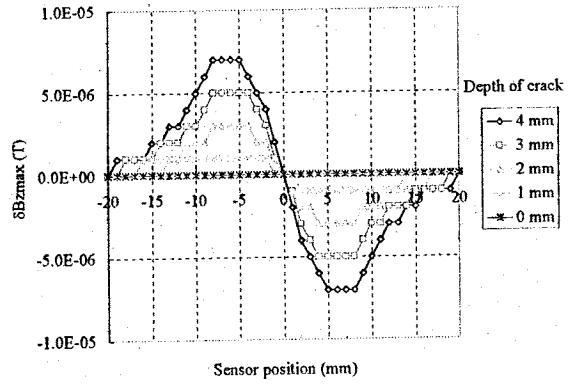


Fig. 3-105 $\delta B_{z\max}$ vs. sensor position
 by F.E.M. analysis.

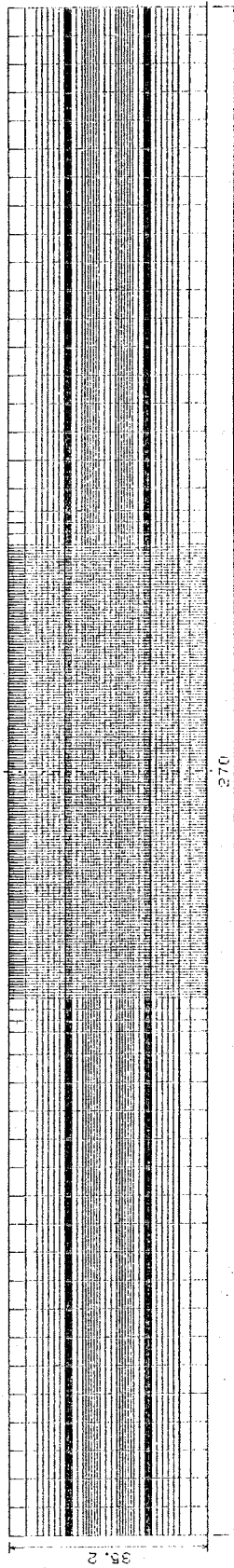


Fig. 3-106 Mesh for F.E.M. analysis.

(2) 欠陥検出特性

1) 基本欠陥検出特性

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。ここでは、裏側欠陥を対象とすることから被検査材の表皮効果を考慮する必要があるが、フェライト製の励磁コア中の渦電流を考慮しなくてよいため比較的高い励磁周波数である 1,600 Hz を採用した。印加磁束密度は、欠陥のない部分において励磁磁束密度測定用コイルで検出される磁束密度を 0.02 T になるように励磁した。無欠陥部で印加磁束密度である B_x 、 B_y が等しくなるまで、励磁コイルに印加する電圧の大きさ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 25 mm を 1 mm 毎に行った。さらに、1 回の測定は、励磁周波数の 120 周期分の平均とした。

Fig. 3-107 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 (0 mm (欠陥なし), 1 mm ~ 4 mm)。

一方、この実験でも、ピックアップコイルから得られる差動出力電圧が非常に微小なことから、測定値に含まれるノイズが比較的多くなっている。そこで、第 2. 4 節と同様にメディアンフィルタを用いノイズの低減をはかった。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. 3-108 から Fig. 3-111 は、5 mm 厚のステンレス板裏側にある一辺 10 mm の正方形欠陥の深さ 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。これらの図は、測定の結果得られたデータそのままである。しかし、このセンサが差動型である特性を利用して以下の式を用いて欠陥検出信号の変化分を平均値を用いて規格化する。これによってより統一的な欠陥形状や深さによる欠陥検出信号の比較を行うことができる。 $\delta B_{x \max}$ を例にする。 $\delta B_{x \max}$ を測定値とし、 $\delta B_{x \max}$ の平均値を $\overline{\delta B_{x \max}}$ とすると、規格値 ($\delta B_{x \max}$) は、

$$(\delta B_{x \max}) = (\delta B_{x \max} - \overline{\delta B_{x \max}}) / \overline{\delta B_{x \max}} \quad (3-18)$$

となる。以後、この規格値 ($\delta B_{x \max}$) を使用したデータを用いることにする。Fig. 3-112 から Fig. 3-115 は、Fig. 3-108 から Fig. 3-111 と同じ一辺 10 mm の正方形欠陥の深さ 4 mm の場合のセンサの位置と欠陥検出信号の関係を規格値を用いて示している。ただし、信号の変化をよりはっきりとさせるために、グラフの数値軸を上下反転している。

Fig. 3-112 から Fig. 3-115 より、 (α) 、 $(\delta B_{x \max})$ 、 $(\delta B_{y \max})$ 、 $(\delta B_{z \max})$ とも欠陥の付近で大きく欠陥検出信号が変化しており、この磁気センサは、ステンレス板裏側の欠陥をよく捕らえることができる。

次に、Fig. 3-116 から Fig. 3-119 に欠陥の深さと $(\delta B_{z \max})$ の関係を示す。欠陥の形状は、15 mm 長のトラック型欠陥である。また、Fig. 3-120 は、Fig. 3-119 との比較のために欠陥なしの場合の $(\delta B_{z \max})$ の分布を示した。以上の結果より、この磁気センサは、深さ 2 mm 以上の欠陥を確実に捕らえており、従来その検出が困難であった 1 mm の深さの欠陥もその存在を確認することができる高感度な磁気センサである。

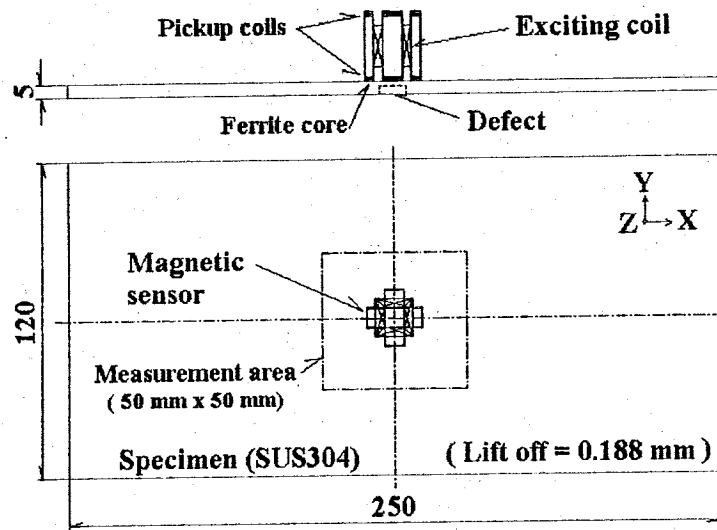


Fig. 3-107 Distribution of the magnetic sensor and measurement positions.

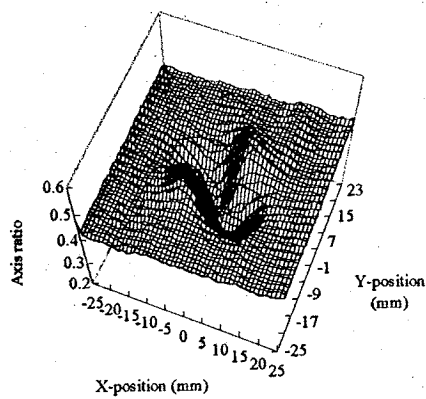


Fig. 3-108 Axis ratio (α) vs. the sensor position.

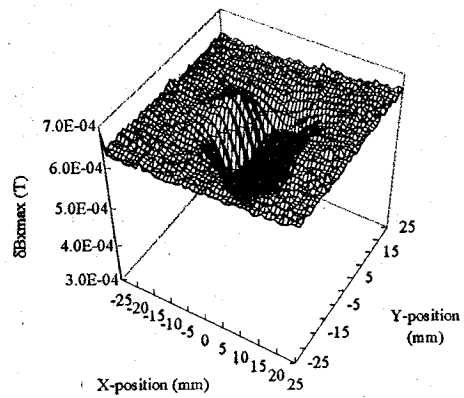


Fig. 3-109 $\delta B_{x\max}$ vs. the sensor position.

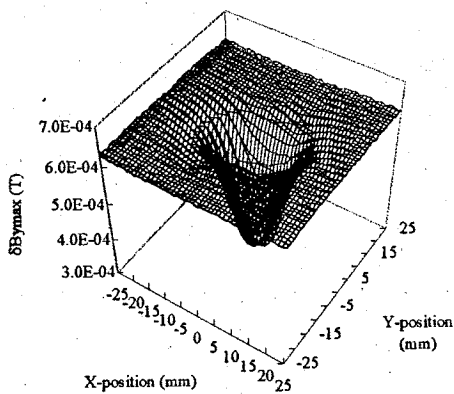


Fig. 3-110 $\delta B_{y\max}$ vs. the sensor position.

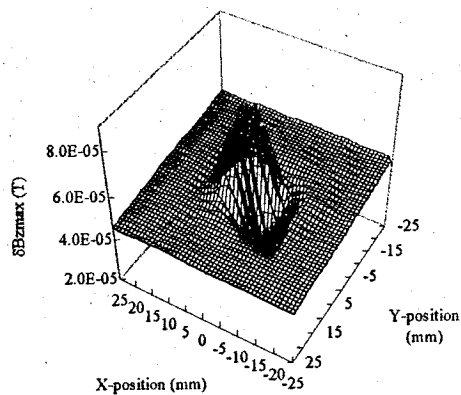


Fig. 3-111 $\delta B_{z\max}$ vs. the sensor position.

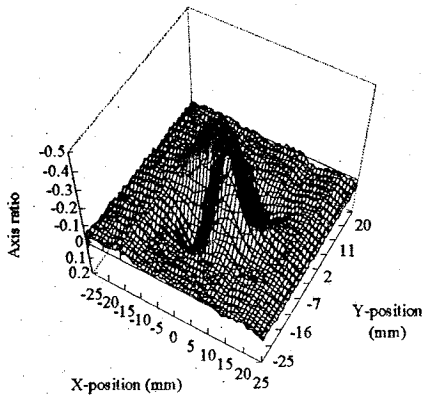


Fig. 3-112 (α) vs. the sensor position.

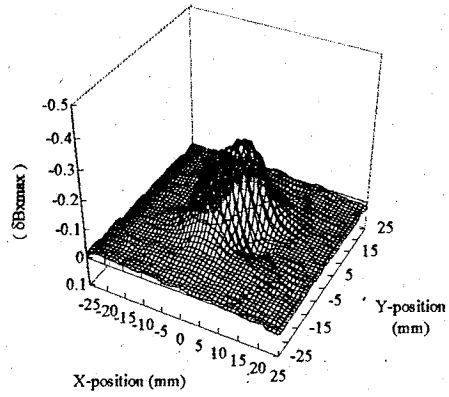


Fig. 3-113 $(\delta B_{x\max})$ vs. the sensor position.

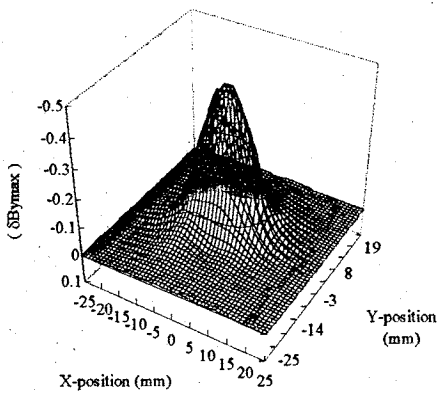


Fig. 3-114 $(\delta B_{y\max})$ vs. the sensor position.

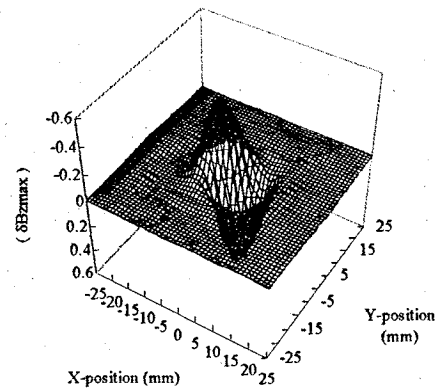


Fig. 3-115 $(\delta B_{z\max})$ vs. the sensor position.

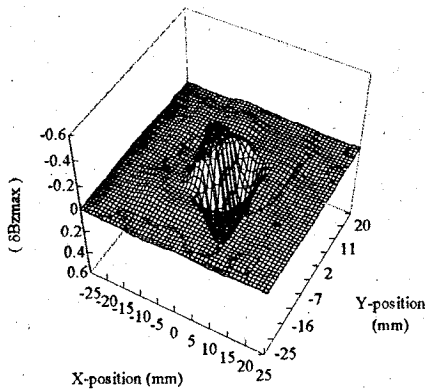


Fig. 3-116 $(\delta B_{z\max})$ vs. the sensor position (Depth = 4 mm).

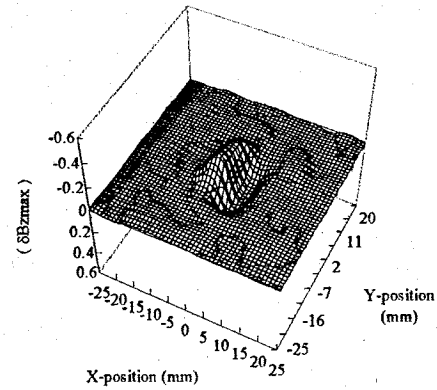


Fig. 3-117 $(\delta B_{z\max})$ vs. the sensor position (Depth = 3 mm).

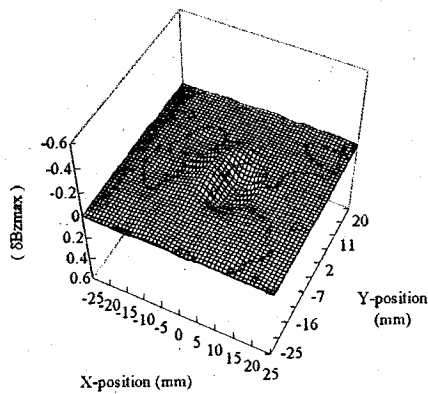


Fig. 3-118 (δB_{zmax}) vs. the sensor position (Depth = 2 mm).

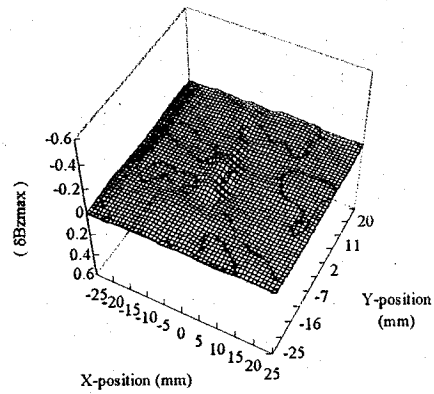


Fig. 3-119 (δB_{zmax}) vs. the sensor position (Depth = 1 mm).

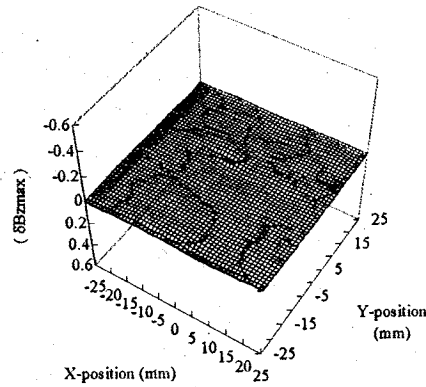


Fig. 3-120 (δB_{zmax}) vs. the sensor position (Without a defect).

(3) 励磁周波数の欠陥検出特性に及ぼす影響

3 軸差動ピックアップコイル型磁気センサは、軟鋼板裏側欠陥に対して最適な励磁周波数が存在していた。そこで、ステンレス板の裏側欠陥に対して最適励磁周波数を調べるために次の実験を行った。実験は、励磁磁束密度 0.01 T とし、深さ 3 mm、半径 10 mm の円形欠陥を持つ被検査材を使用した。欠陥の真上を $X = -25$ mm から $X = 25$ mm の間を走査した場合の (δB_{xmax}) の変化を Fig. 3-121 に、 (δB_{zmax}) の変化を Fig. 3-122 に示す。 (δB_{xmax}) の変化は、600 Hz と 800 Hz の間を境に変化の方向が逆転している。また、800 Hz 付近の変化幅が大きくなっている。これは、700 Hz 付近で、X 軸のコイルのインピーダンスや電子回路の位相変化等が重なり合い、X 軸の出力が最小となる点が生じ、その前後の周波数で X 軸の出力の位相が反転しているためである。一方、 (δB_{zmax}) の変化は、励磁周波数が増加するに従って大きくなっている。これは、Z 軸が主に、渦電流の変化を捕らえているためである。

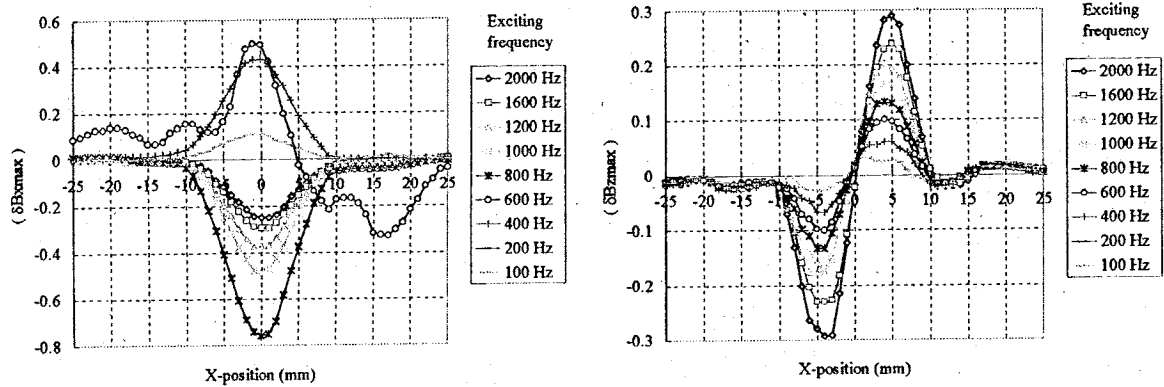


Fig. 3-121 ($\delta B_{x\max}$) vs. exciting frequencies. Fig. 3-122 ($\delta B_{z\max}$) vs. exciting frequencies.

3. 4. 5 欠陥形状評価指標 χ の導入と χ による欠陥評価

3軸差動ピックアップコイル型磁気センサは、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軸ピックアップコイルを備えているので、3軸方向のすべての欠陥検出信号を利用して欠陥の形状を評価することがこの磁気センサを効果的に活用する上で必要であると考えられる。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 $\delta B_{z\max}$ を利用して欠陥形状評価指標 χ を定義した。

リサージュ波形の軸比を α 、その平均値を $\bar{\alpha}$ 、 $\delta B_{z\max}$ の平均値を $\overline{\delta B_{z\max}}$ として欠陥形状評価指標 χ を(3-19)式で定義した。また、Fig. 3-123に(3-19)式を利用して欠陥形状評価指標 χ を算出した例を示す。

$$\chi = \frac{(\alpha - \bar{\alpha})}{\bar{\alpha}} \cdot \frac{(\delta B_{z\max} - \overline{\delta B_{z\max}})}{\overline{\delta B_{z\max}}} \quad (3-19)$$

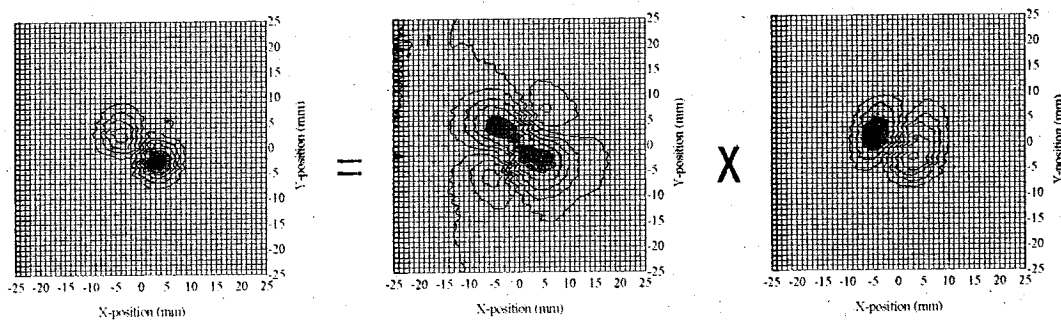


Fig. 3-123 Definition of χ (10 mm long square defect, Depth=4 mm).

Fig. 3-124にFig. 3-112からFig. 3-115に示す5 mm厚のステンレス板裏側にある一辺10 mmの正方形欠陥の深さ4 mmの場合のセンサの位置と欠陥検出信号の関係のデータを(3-19)式で表現し直したものである。よって、一辺10 mmの正方形欠陥の深さ4 mmの場合の欠陥形状評価指標 χ の分布を表している。また、Fig. 3-125は、

Fig. 3-124 のグラフ形式を変更したものを示す。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 χ の分布の差異を明確に判別できる Fig. 3-125 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 χ の -0.25 から 0.22 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、欠陥形状評価指標 χ の変化幅が小さいグラフについては適宜スケールを変換している。スケールの変換倍率は、図の下部に示した。

Fig. 3-125 から Fig. 3-130 に欠陥の深さ 4 mm の各種欠陥形状の場合の欠陥形状評価指標 χ の分布を示す。また、Fig. 3-131 は、欠陥なしの場合である。また、Fig. 3-132 から Fig. 3-135 に欠陥形状が 15 mm 長のトラック型欠陥の場合の欠陥深さによる欠陥形状評価指標 χ の分布の変化を示す。これらすべての図において欠陥形状評価指標 χ の分布は、欠陥の形状そのものを表しているわけではないが、形状や深さによって異なっていることがわかる。さらに、分布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。また、円形の欠陥よりも角形の欠陥の欠陥形状評価指標 χ が大きな変化を示している。これは、角形の欠陥は、その角部分で渦電流の流路が急角度で変化するためである。

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 χ の分布は、明らかに異なっており、この磁気センサが欠陥の形状の差異を捕らえることのできる能力を持っていることを示している。3 軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサは、欠陥形状評価に有効であると言える。

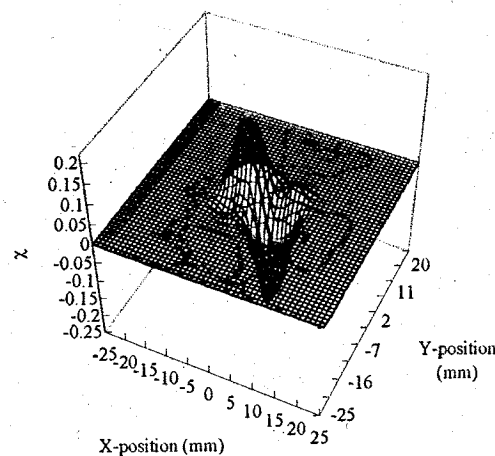


Fig. 3-124 χ vs. the sensor position(10 mm long square defect, Depth = 4mm).

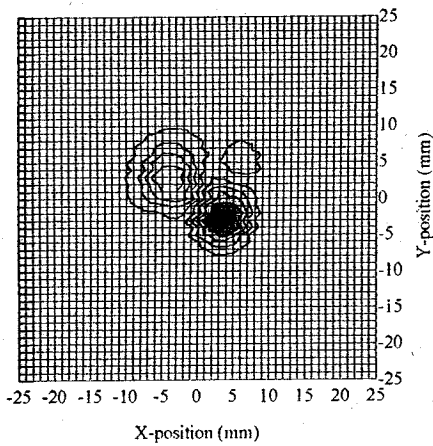


Fig. 3-125 χ vs. the sensor position(10 mm long square defect, Depth = 4mm).

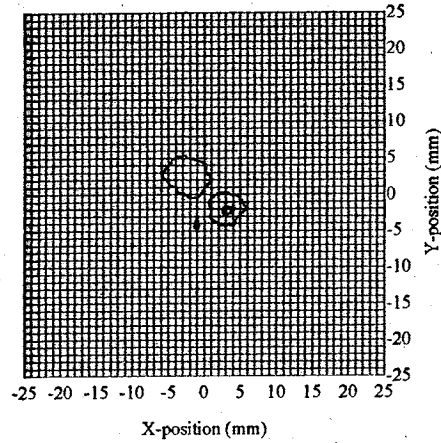


Fig. 3-126 $\chi * 2$ vs. the sensor position (5mm long square defect, Depth = 4mm).

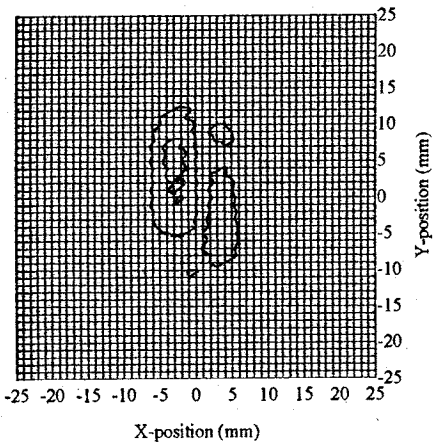


Fig. 3-127 χ vs. the sensor position(20 mm long track-shaped defect, Depth = 4mm).

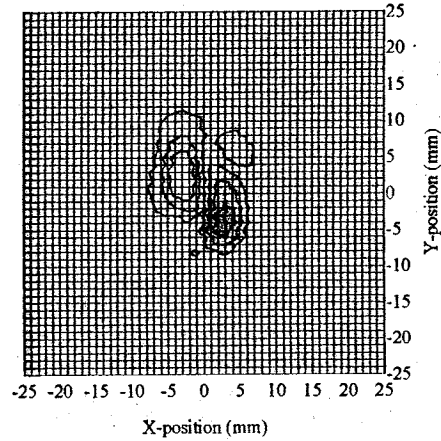


Fig. 3-128 χ vs. the sensor position(15 mm long track-shaped defect, Depth = 4mm.).

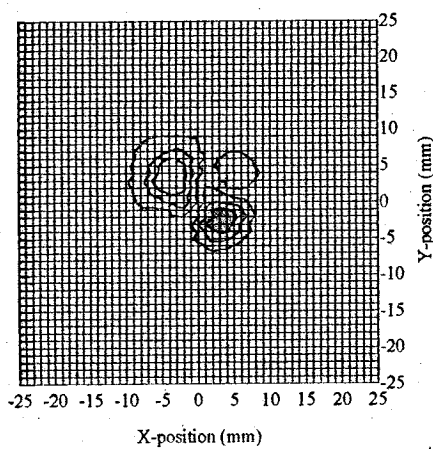


Fig. 3-129 χ vs. the sensor position(10 mm diameter circular defect, Depth = 4mm).

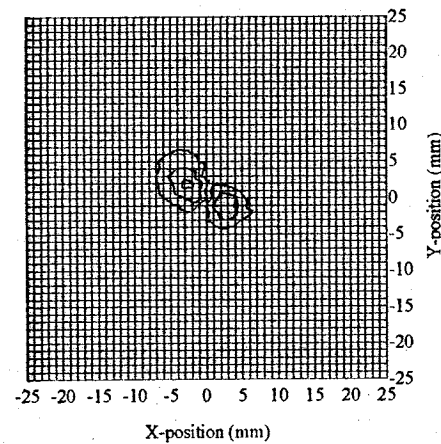


Fig. 3-130 $\chi * 2$ vs. the sensor position(5mm diameter circular defect, Depth = 4mm).

第3.5節 結言

第3章においては、肉厚軟鋼板裏側の溝型欠陥の検出を目的にして開発した2種類の差動式回転磁束型磁気センサと、肉厚ステンレス板裏側の幾何学的形状の欠陥の検出と形状判別を目的として開発した1種類の差動式回転磁束型磁気センサについて欠陥検出機構を明らかにし、欠陥検出特性を実験的に解明した。さらに、差動式回転磁束型磁気センサの特徴をさらに有効に活用できるように、欠陥評価指標 κ や欠陥形状評価指標 χ を提案して、その有用性を示した。また、肉厚鋼板を対象にした3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサについては、磁気等価回路を使用したシミュレーション法を提案し、その有用性を示した。以下、差動式回転磁束型磁気センサに対してこの章で得られた知見を要約する。

(1) 差動式回転磁束型磁気センサについて

- a. 差動式回転磁束型磁気センサは、偏位式回転磁束型磁気センサと同様に欠陥からの多くの情報が1点の測定で得られた。
- b. 差動式回転磁束型磁気センサの欠陥検出信号の変化率は非常に大きく、欠陥を明瞭に検出できた。
- c. 差動式回転磁束型磁気センサにおいても δB_x と δB_y で書いたりサージェ波形の軸比 α と傾き角 θ は欠陥の評価に有効なパラメータであった。
- d. 肉厚軟鋼板裏側欠陥を対象とする場合は、無欠陥部での欠陥検出コイルの出力を小さくするためには被検査材と同質の比較検査材を用いることが必要であった。
- e. 肉厚ステンレス板裏側欠陥を対象とする場合は、比較検査材を用いなくても電子回路的に無欠陥部での欠陥検出コイルの出力を最小とすることができた。
- f. 差動式磁気センサは、偏位式磁気センサに比べて多少構造的に複雑になった。

(2) 肉厚軟鋼板裏側欠陥用差動式回転磁束型磁気センサについて

- a. 3軸差動サーチコイル回転磁束型磁気センサおよび3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサとも、その欠陥検出信号の変化率が大きく明瞭な欠陥検出信号が得られた。
- b. 両タイプのセンサとも5 mm厚の被検査材裏側に設けられた深さ1 mmの溝型欠陥を検出することができた。
- c. 両タイプのセンサとも1次元の走査で欠陥の方向角 ϕ を推定できる欠陥検出特性を備えていた。
- d. 3軸差動サーチコイル回転磁束型磁気センサは、5 mmの厚さの軟鋼板裏側欠陥に対して5から10 Hzの励磁周波数が最適であった。しかし、欠陥の深さにより最適な励磁周波数が異なっていた。また、0.3 mm程度のリフトオフの変化では、欠陥検出特性に大きな変化を与えない。さらに、励磁磁束密度は、測定系を構成する磁気回路が非線形性を示さない範囲で大きい方が大きい欠陥検出信号が得られた。
- e. 3軸差動サーチコイル回転磁束型磁気センサで定義した欠陥評価指標 κ は、欠陥の深さや、存在面、方向角 ϕ などで有意に変化する欠陥を評価するために有用なパラメータである。また、欠陥評価指標 κ が最大値を示す磁気センサの位置も欠陥の深さや、存在面、方向角 ϕ などで有意に変化した。

- f. 3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサは、5 mmの厚さの軟鋼板裏側欠陥に対して40から80 Hz程度の励磁周波数が大きい欠陥検出信号が得られた。この励磁周波数では、表皮効果によって5 mm厚の試料の裏側まで励磁磁束は到達しないが、この励磁周波数では、渦電流が大きくなるためである。
- g. 3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサの磁気等価回路は、3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサの限られた側面だけであるがよくその欠陥検出特性をごく短時間にシミュレートすることができた。
- h. 3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサは、その形状が小さく試料と接する面が狭いことから、試料に完全に平行に支持することが難しい。特に、強磁性体の試料の場合は、各脚ごとの微妙なリフトオフの違いが大きな磁気抵抗の差となって現れるため、欠陥検出信号の平衡を取ることが難しい面を持っている。センサの支持方法の工夫が必要である。

(3) 肉厚ステンレス板裏側欠陥用差動式回転磁束型磁気センサについて

- a. XYZのすべての軸の欠陥検出信号が欠陥によって変化し、しかも、それぞれが欠陥の形状によって特徴的な変化をした。
- b. 3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサは、5 mm厚のステンレス板の裏側に設けられた深さ1 mmの模擬欠陥を検出することができた。
- c. 3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサを肉厚ステンレス板を対象に用いる場合は、比較検査材を必要としないため、小型軽量で取り扱いの簡単な磁気センサであった。
- d. 励磁コアをフェライトで製作したことにより励磁コア中の渦電流を考慮することなく励磁周波数を高くすることができた。
- e. 3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサは、本論文で提案した欠陥形状評価指標 χ を用いることで欠陥の形状を明瞭に判別することができた。

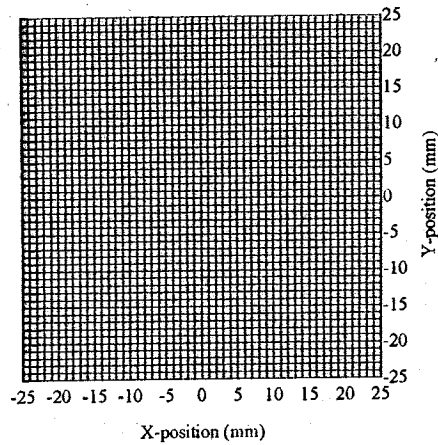


Fig. 3-131 χ vs. the sensor position(No defect).

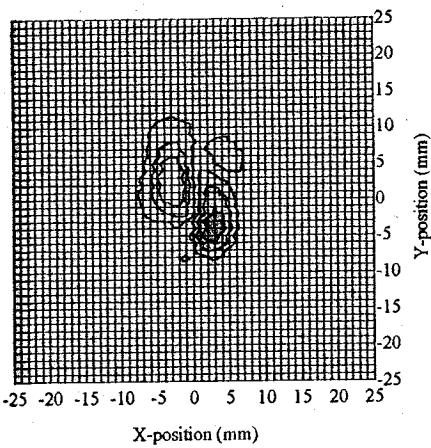


Fig. 3-132 χ vs. the sensor position(15 mm long track-shaped defect, Depth = 4mm).

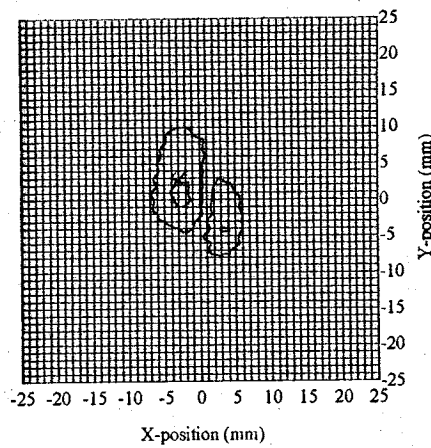


Fig. 3-133 $\chi \times 2$ vs. the sensor position(15 mm long track-shaped defect, Depth = 3mm).

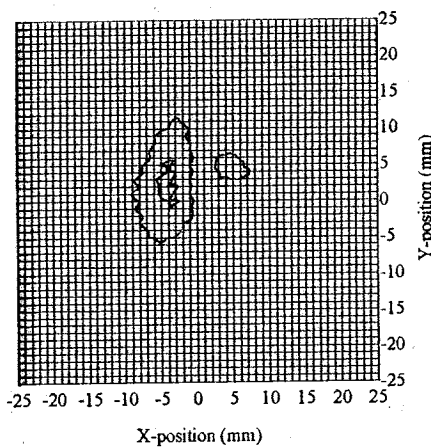


Fig. 3-134 $\chi \times 10$ vs. the sensor position(15 mm long track-shaped defect, Depth = 2mm).

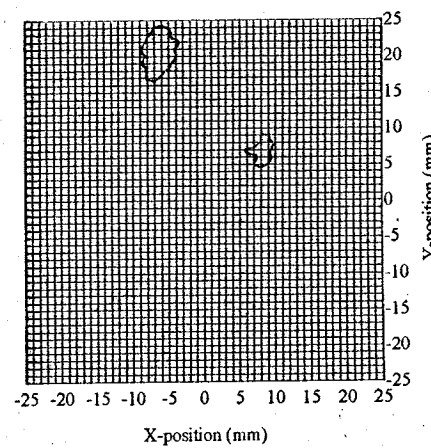


Fig. 3-135 $\chi \times 20$ vs. the sensor position(15 mm long track-shaped defect, Depth = 1mm).