Detection of the Cracks using High- T_c SQUID

Tatsuhiko Fujii Non-member (Collage of Industrial Technology, Osaka University, fujii@cit.sangitan.ac.jp)

Tae Hyun-sung Non-member (Osaka University)

Tsuyoshi Takamatsu Non-member (Osaka University)

Ken Sakuta Member (Osaka University)

Hideo Itozaki Non-member (Osaka University)

Keywords : High- T_c SQUID, Non-destructive evaluation, Eddy current

1. Introduction

Eddy current non-destructive evaluation (NDE) is very useful method for detection of cracks. But in the former method, it is used the high frequency excitation magnetic field, we can't detect the crack in the deep part from the sample surface by the skin effect. So in this measurement system, we use the SQUID which have the very high magnetic sensitivity and have the frequency independence. We try to detect the crack by SQUID-NDE method.

2. SQUID-NDE Measurement

Figure 1 shows the apparatus of SQUID-NDE system. Excitation magnetic field (200Hz) is supplied in the metal sample, so generated the Eddy current in the sample. Generated magnetic field by this Eddy current is detected by the SQUID. We use the dc-SQUID. The sample with a through hole(10mm ϕ) is made of Aluminium (200mm x 200mm x 15mm).

First NDE measurement, we respect the result of SQUID-NDE by simulation. We use the finite element method for this simulation. We confirmed the possibility of detected the signal from defect in the sample.

Next we try to detect the signal from the hole in Al sample by

SQUID-NDE method. Figure 2 shows the scanning result of the detected magnetic field intensity. There is the hole at the center of circle in this figure. This result is reasonable by the simulation.

We substitute various depth not through holes for the through hole. The hole depths are 1mm, 5mm, and 10mm, respectively. The result of 1mm depth hole, the magnetic field intensity is not clearly. For this reason, the depth of the hole is shallower than the skin depth, and the disorder of eddy current is very small.

The scanning result of measurement for 5mm depth hole, the signal of magnetic field intensity is clear. The hole depth 5mm is same level with skin depth, the disorder of eddy current is increased. When the hole depth is 10mm, the disorder of Eddy current is so large, and the magnetic field intensity is so clearly.

We try to measure the hidden hole. The hole exists 5mm depth from the surface. We succeed to detect the signal from hidden hole. From this result, we will be able to detect the defects existed in the various depth with changing the excitation frequency.

For various SQUID-NDE applications, we must try to measure with this method not only for non-magnetic materials but also for magnetic materials, for example, Fe, Mn, Ni and their alloy.

Fig. 1. Apparatus of SQUID-non destructive evaluation system

Fig. 2. Result of the magnetic image from hole on the metallic plate

High- T_c SQUID を用いた金属クラックの検出

非会員 藤井 龍彦^{*,**} 非会員 Tae Hyun-sung^{**}
 非会員 高松 剛^{**} 正員 作田 健^{**}
 非会員 糸崎 秀夫^{**}

Detection of the Cracks using High- T_c SQUID

Tatsuhiko Fujii^{*,**}, Non-member, Tae Hyun-sung^{**}, Non-member, Tsuyoshi Takamatsu^{**}, Non-member,
 Ken Sakuta^{**}, Member, Hideo Itozaki^{**}, Non-member

Eddy current non-destructive evaluation (NDE) is very useful technique for detection of cracks. We use the high- T_c SQUID in this system. First, we respect the result of this measurement by the finite element method. We can detect of the signal from the hole by NDE system with high- T_c SQUID. This result is reasonable to compare with the result of simulation. Finally, we can detect of the hidden defect under 5mm depth from the sample surface.

キーワード : High- T_c SQUID, 非破壊検査, 低周波誘導磁場

Keywords : high- T_c SQUID, NDE, low frequency magnetic field

1. はじめに

近年、測定対象を破壊せずに欠陥等を検出する非破壊検査のニーズが増加しており、研究が活発に行われている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。本研究では、SQUID の持つ磁場高感性に着目し、非破壊で金属クラックを検出する方法を検討した。SQUID は、従来の方法では成し得なかった微小な信号差の判別に用いた。本研究で紹介する SQUID を用いた非破壊検査技術は、SQUID の磁場高感性が重要な役割を果たしている。

SQUID を用いた非破壊検査の特徴は、低周波誘導電流が使用可能な点である。金属には表皮効果があり、高い周波数ほど金属に浸透する信号の減衰率は高くなる。つまり、高周波を用いると、その信号が深部まで伝達されず表面のみにとどまるため、深部のクラックは検出できなくなる。しかし低周波信号では試料内部まで信号が伝達可能なので、深部のクラックも検出できるようになる。しかし、これまでの計測技術では、高周波の測定感度は高いが、低周波での計測感度が低く、深部のクラックの検出がきわめて困難であった。

そこで、磁場感度に対する周波数依存性のない SQUID に

着目し計測を行うことで、これまで困難とされてきた低周波領域での計測を可能にした。また、SQUID は、磁場感度も高く、極微細な欠陥検出にも有効であると考えられる。

本研究の目的は、低周波誘導磁場を用い、SQUID の特性をフルに利用した非破壊検査応用で、被測定物の微細な欠陥を検出することである。

2. SQUID によるクラック検出法

SQUID を用いた NDE 測定の基本になるのが試料の渦電流による誘導磁場測定である。ここで渦電流による信号以外の不要な信号は除去する必要がある。渦電流による信号以外でノイズとなりうる要因のうち、最も測定に影響を与える要素は、励起コイルから直接 SQUID に入る磁場である。

図 1 は、送信信号による磁場キャンセル測定機構を示している。まず、ダブル D コイルと称する D コイルが 2 つ逆向きに設置されたコイルを用い、SQUID をコイルの中心軸上に配置することで、コイルから直接入る磁場を極力小さくするようにした。二つの D コイルに同じ向きの電流を流すと、中心では両方の電流から生じる磁場が打ち消される。したがって SQUID がダブル D コイルの軸上にあると、送信信号からの影響を無視することができる。しかし、実際はダブル D コイルの中心軸上から SQUID が僅かに変位しているため、ダブル D コイルから SQUID に入力する磁場を、SQUID の上に置かれているキャンセルコイルにて除去する必要がある。キャンセルコイルには可変抵抗を接続し、磁場強度を調整可能とした。これにより、可変抵抗でキャンセルコ

* 産業技術短期大学電気電子工学科
 〒561-0047 尼崎市西昆陽 1-27-1
 College of Industrial Technology
 1-27-1, Nishikoya, Amagasaki 561-0047

** 大阪大学大学院基礎工学研究科
 システム創成専攻電子光科学領域
 〒560-8531 豊中市待兼山町 1-3
 Osaka University
 1-3, Machikaneyama, Toyonaka 560-8531

図 1 実験装置

Fig. 1. Apparatus of measurement system.

イルからの磁場を調整し、SQUID に直接入力する磁場を除去可能となった。(図 1 (b))

図 1(a)は SQUID を用いた非破壊検査の測定装置図を示す。渦電流による磁場を SQUID で測定し、その結果がロックインアンプに表示される。ここでダブル D コイル、キャンセルコイルの直径は両方 20mm とし、コイルに流す信号はファンクションジェネレータにより発生させた。測定試料はダブル D コイルの向きを考慮し、矢印方向に移動するようにセッティングした。測定試料とダブル D コイル、ダブル D コイルと SQUID、そして SQUID とキャンセルコイルの間隔はそれぞれ 2mm, 2mm, 2mm である。本実験で使用した入力周波数は 200Hz とした。また使用した SQUID は dc-SQUID であり、磁束分解能 $40 \mu \phi / \sqrt{\text{Hz}}$ 、磁場分解能 $1.0 \text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。

測定試料はアルミニウムで、大きさは約 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 、厚さは 15mm で、直径 1mm の貫通孔以外に、深さ 1mm, 5mm, 10mm の孔を準備した。

試料の走査にはロボットアームを用いた。ロボットアームを用いることによってより正確な座標で試料のスキャンが可能である。非破壊検査では正確な位置座標で走査することが必要不可欠なので、本研究でロボットアームの役割は非常に重要である。図 1(c)は、ロボットアームを用いた計測イメージである。

3. 磁場シミュレーション

SQUID を用いた非破壊検査実験を行うにあたり、まず電磁界シミュレータを用いたシミュレーションを行い、実験の予測を行った。シミュレーションには有限要素法を用いた。そのモデル構成を図 2 に示す。

モデルの試料はアルミニウムで、大きさは正方形 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 、厚さは 10mm とした。アルミニウムの中心には直径 10mm の貫通孔を配置し、励起コイルにはダブル D コイルを用いた。コイルの直径は 20mm とし、コイルに流す

図 2 電磁界シミュレータを用いたシミュレーションモデル

Fig. 2. Model of the simulation.

電流を 10 mA とした。

コイルは孔の中心を基準として -20mm から $+20\text{mm}$ まで x 軸(右方向)方向に移動させた。移動間隔は 2mm とし、渦電流分布を計算した。試料とコイル間の距離は 5mm とした。

図 2 で設計したモデルでの、試料の渦電流の分布シミュレーション結果を図 3 に示す。ダブル D コイルの位置を変位させた時の渦電流分布を示した。図 3(a)は、孔の中心から 20mm 離れた位置にダブル D コイルの中心がある場合、図 3(b)は 8mm でコイルの片側に孔が重なっている場合、そして図 3(c)は孔の軸上にコイルが置かれている場合である。図 3 上図は試料の表面から 1mm での渦電流分布を示し、下図は深さ方向の渦電流分布を示している。

図 3(a)では、コイルが孔と離れているため、左側の D コイルによる渦電流は、孔による影響は受けないが、右側の D コイルによる渦電流は、多少孔の影響をうけて歪んでいることがわかる。

図 3(b)では、孔の上に右側の D コイルがあるため、渦電流が孔により非常に大きく歪められていることがわかる。

図 3 シミュレーション結果
Fig. 3. Result of the simulation by finite element method.

図 3(c)では、孔の中心上にダブル D コイルがあるため、渦電流は孔周辺で大きく歪んではいないが、左右対称となっていることが分かる。

図 3 の渦電流分布から見積もった D コイル中心上 5mm における磁場強度を示したものが図 4 である。この位置は、SQUID の位置を仮定したものである。孔の位置を 0mm とした。渦電流が孔により歪められ、その結果、仮想 SQUID 位置での磁場が、孔の影響により大きく変化する結果を得た。孔近傍では、磁場の方向が 3 度反転しており、孔上では磁場は 0 となる結果が得られた。これにより、孔の中心位置は磁場強度が 0 となる 3 点のうち、2 番目の点であると推測される。

図 4 磁場強度変化のシミュレーション結果
Fig. 4. Result of the simulation of magnetic flux density.

図 5 渦電流深さ分布の周波数依存性
Fig. 5. Frequency dependence of the depth of Eddy current.

図 6 直径 10mm 貫通孔の測定結果

Fig. 6. Result of magnetic image for 10mm through hole.

図 7 直径 10mm 貫通孔の測定結果

Fig. 7. Result of magnetic image for 10mm through hole.

図 5 は、渦電流浸透深さの周波数依存性を示している。200Hz, 500Hz, 10kHz の 3 種類の周波数でシミュレーションを行った。図より、周波数が低いほど、渦電流分布は深くなっている。逆に 10kHz では表面に渦電流が集中している。この結果より、表皮効果と同じく、周波数が高くなるほど表皮の深さは小さくなることを、シミュレーションで確認できた。この結果より、実験での励起磁場周波数は 200Hz と決定した。

4. SQUID による検出結果

次に、SQUID を用いた計測を行った。図 6 は、直径 10mm の貫通孔の測定結果である。(a)は試料とダブル D コイルの間隔が 2mm, (b)は 5mm の測定結果である。データの間隔

は、X 方向 0.08mm, Y 方向 2mm とした。図 6(a)の結果、孔の周辺では非常に大きな磁場の変化が観測された。図中点線における磁場強度を図 7 に示す。磁場強度が 3 度反転する図 4 のシミュレーション結果と同様の磁場の極性反転が確認できた。このことから孔の位置を予測すると、図 6(a)中の矢印が孔の存在位置だと考えられる。シミュレーションとの磁場強度の差は、試料とコイルが完全に平行ではなくわずかに傾いており、間隔が徐々に近づいているため、振幅が増加したものと考えられる。

図 6(b)は図 6(a)での測定試料とコイルの間隔を 5mm に広げたときの測定結果である。2 つの結果を比較すると、図 6(b)の方がノイズの影響で測定結果が不明瞭である。これは試料上に到達する励起磁場が小さくなり渦電流密度も低くなるため、その結果検出磁場も小さくなるためである。この結果から SQUID が含まれているコイル系をできるだけ測定試料に近づけた方が良い結果が得られることが分かる。また、図 4 と図 7 の振幅の差異も、距離による信号の差であることが説明できた。傾いた試料を用いたシミュレーションでも、同様の結果が得られた。

次に、深さの異なる孔の測定を行った。図 8(a)は深さ 1mm の孔の測定結果である。信号がノイズと同レベルではあるが、孔の信号は観測できた。図 8(b)は深さ 5mm の孔の測定結果である。図 8(a)より、孔による信号がかなり明瞭に現れるようになった。

図 8(c)は、深さ 10mm の孔の測定結果である。図 8(a)(b)より孔の信号はより明瞭に観測されている。

この結果は、励起周波数による渦電流の深さが決まっており、孔が深くなることで渦電流の歪みが大きくなり、それによる磁場信号の変化が大きくなったと考えられる。励起信号磁場を大きくするか、測定試料とコイル系の間隔を縮めると、孔の信号がさらに明瞭に観測できると考えられる。

図 8 異なる深さの孔での測定結果

Fig. 8. Measurement result of magnetic image from hole for various depth.

図9 検出磁場強度の深さ依存性

Fig. 9. Depth dependence of the magnetic field intensity.

図10 深部欠陥測定結果

Fig. 10. Result of magnetic image for the hidden defect.

図 8 の結果より、信号強度の深さ依存性を求めた (図 9)。200Hz の励起磁場では渦電流は表面から 5.8mm に分布して

いるため、ごく浅い深さ 1mm の孔では渦電流の乱れは少なく、信号磁場は小さいが、孔が深くなるにつれ渦電流の乱れが大きくなり、信号強度が増す。また、磁場侵入深さ以上の深さの孔では、磁場信号強度に変化がなくなることがわかる。このことより、励起磁場の周波数を変化させることで、深さ方向の情報を得ることが可能であることがわかった。

低周波誘導電流を用いた非破壊検査の特徴は深部欠陥の検出が可能なことである。そこで、厚さが 15mm のアルミニウム試料に開けられた深さ 10mm の非貫通孔を、非開口側から計測した。つまり、表面から深さ 5mm に存在する欠陥である。この深さは理論的に計算した 200Hz での表皮の深さ 5.8mm より小さいので、十分孔の信号が観測可能ではなくである。図 10 に測定結果を示す。励起コイルに流す電流が前述と同じ 10 mA では計測困難であったが、倍の 20 mA とすることで多少不明瞭ではあるが、孔に起因する信号が計測可能となった。励起磁場強度をさらに大きくすることにより、さらに明瞭な結果が得られるはずであるので、今後さらに大きな励起磁場での実験を進める予定である。

5. 結論

SQUID を用いた非破壊検査装置を作製し、その評価を行った。

電磁界シミュレータによるシミュレーションでは渦電流を用いた非破壊検査のモデルを構成し、その結果から実験での結果を予測した。渦電流の分布をシミュレーションより確認することによって結果の解析的な説明ができた。

優れた SQUID の感度と低周波誘導電流による測定試料の深部の渦電流は非磁性体であるアルミニウムの欠陥測定を可能にした。深さの違う 3 種類の孔と、表面だけでなく深部に存在している孔の観測も可能であった。

SQUID を用いた非破壊検査は低周波による深部の欠陥が検出できた。周波数により浸透する深さと渦電流により生

ずる磁場の大きさが変化する。従って周波数特性実験を行って欠陥信号の検出に最適な周波数を調査することも今後の課題である。

最後に、磁性体の測定装置の構築、最適周波数の使用、SQUID の可動化が実現されると、より幅広い分野での、正確で実用的な非破壊検査装置の構築が可能となるであろう。

(平成 17 年 4 月 25 日受付, 平成 17 年 10 月 24 日再受付)

文 献

- (1) K. Allweins, Gierelt, H.-J. Krause, and M.v. Kreutzbruck : "Defect Detection in Thick Aircraft Samples Based on HTS SQUID-Magnetometry and Pattern Recognition", *IEEE Trans. Superconductivity*, Vol.13, p.250 (2003)
- (2) J. T. Jeng, S. Y. Yang, H.E. Horng, and H. C. Yang : "Detection of Deep Flaws by Using a HTS-SQUID in Unshielded Environment", *IEEE Trans. Superconductivity*, Vol.11, p.1295 (2001)
- (3) H. E. Horng, J. T. Jeng, H. C. Yang, and J. C. Chen : "Evaluation of the flaw depth using high Tc-SQUID", *Physica C*, Vol.367, p.303 (2002)
- (4) H. Nakane : "Non Destructive Evaluation in Multilayer Structure Using the High Tc SQUID", *IEICE Trans.*, Vol.E88-C, 2, p.188 (2005)
- (5) C. Carr, D. Graham, J. C Macfarlane, and G. B Donaldson : "HTS SQUIDs for the nondestructive evaluation of composite structures", *Supercond. Sci. Tech.*, Vol.16, p.1387 (2003)
- (6) A. Ruosi, M. Valentino, G. Pepe, V. Monebhurrin, D. Lesselier, and B. Duchene : "High Tc SQUIDs and eddy-current NDE: a comprehensive investigation from real data to modelling", *Meas. Sci. Tech.*, Vol.11, p.1639 (2000)
- (7) H. J. Krause and M. v. Kreutzbruck : "Recent developments in SQUID NDE", *Physica C*, Vol.368, p.70 (2002)

藤 井 龍 彦

(非会員) 1964 年 5 月 27 日生まれ。1988 年 3 月大阪大学工学部卒業。1990 年 3 月大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。1991 年 7 月大阪大学大学院工学研究科博士課程中途退学。1991 年 8 月大阪大学助手, 1997 年 4 月大阪大学講師, 2003 年 11 月大阪大学助教授, 2005 年 10 月産業技術短期大学助教授, 大阪大学招聘助教授, 現在に至る。超伝導デバイスのための薄膜電子材料の研究に従事。工学博士。応用物理学会会員。

Tae Hyun-sung

(非会員) 1982 年 1 月 7 日生まれ。2005 年 3 月大阪大学基礎工学部電子物理科学科エレクトロニクスコース卒業。SQUID を用いた金属材料の非破壊検査システムの構築, 及びその電磁界シミュレーションの研究に従事。

高 松 剛

(非会員) 1980 年 6 月 17 日生まれ。2003 年 3 月大阪大学基礎工学部卒業。2005 年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。2005 年 4 月村田製作所。現在に至る。SQUID を用いた生体磁場計測, および非破壊検査の研究に従事。応用物理学会会員。

作 田 健

員。

(正員) 1960 年 12 月 20 日生まれ。1983 年 3 月大阪大学基礎工学部卒業。1985 年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。1985 年 4 月日立製作所入社。1989 年大阪大学助手, 1993 年 4 月大阪大学講師, 2003 年大阪大学助教授, 現在に至る。超伝導量子機能素子による環境・生体磁気測定の研究に従事。工学博士。応用物理学会, 映像情報メディア学会所属会員。

糸 崎 秀 夫

(非会員) 1952 年 10 月 25 日生まれ。1974 年 3 月大阪大学工学部卒業。1976 年 3 月大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。1982 年 6 月ノースウエスタン大学博士修了。1976 年 4 月住友電気工業。1992 年 5 月超伝導センサ研究所高温遮蔽研究部長。1998 年住友電気工業伊丹研究所電子材料研究部長。2001 年 4 月日本 ITF 理事。2001 年 12 月物質・材料研究機構超伝導材料研究センターディレクター。2004 年 4 月大阪大学教授。超伝導エレクトロニクスの研究に従事。Ph.D. IEEE, 応用物理学会, 日本応用磁気学会, 日本物理学会会員。