

研究論文

高温超伝導 SQUID を用いた銅製伝熱管表面の微細欠陥の非破壊検査

廿日出 好[†], 小杉 明史, 森 憲亮*, 田中 三郎

Nondestructive Inspection Using an HTS SQUID for Copper Heat-exchanger Tubes

Yoshimi HATASUKADE, Akifumi KOSUGI, Kazuaki MORI* and Saburo TANAKA

Synopsis: A nondestructive inspection (NDI) system using an HTS SQUID for copper heat-exchanger tubes has been constructed. An eddy-current-based NDI method using an HTS SQUID gradiometer cooled using a cryocooler was employed for the detection of micro flaws in thin copper tubes 6.35 mm in diameter and 0.8 mm in thickness. With an excitation field of 1.6 μ T at 5 kHz, a flaw in the tube, measuring 30 μ m deep and 15 mm long, was successfully detected by the system with a high signal-noise ratio of at least 20. Numerical simulations were also conducted to determine how many sensors would be required for inspection around the circumference of an entire tube.

Keywords: HTS SQUID, nondestructive inspection, copper tube, eddy current, gradiometer

1. はじめに

近年、空調冷媒用の銅製伝熱管として、1 mm 以下の厚さにまで薄肉化された銅管が生産・使用されている¹⁾。このような薄い銅管に曲げ加工やフレア加工を行った際、銅管表面の深さわずか数 10 μ m の溝状欠陥が割れの原因となることが報告されている。銅管に発生するこの種の欠陥を検出するため、現在、商用の超音波探傷装置と渦流探傷装置が使用されているが、上記の商用探傷装置は、検出可能な傷深さが約 50 μ m と限界がある¹⁻³⁾。また、商用渦流探傷装置としては、長さ約 10 mm のベースラインをもつ 2 個の貫通型誘導コイルにブリッジ回路を組み合わせて傷検出を行うタイプが一般に用いられる。このため、銅管生産時の延伸作業により銅管軸方向に引き延ばされた、発生頻度の高い 10 mm 以上の長さをもつ溝状欠陥に対しては、ブリッジ回路が機能せず有効な検出能を持たないことが報告されている。このため、薄肉化された銅管表面の深さが 50 μ m 未満で、かつ長さが 10 mm 以上の溝状欠陥を検出可能な実用的非破壊検査技術の開発が強く望まれていた。

一方、高温超伝導 SQUID (HTS SQUID) は、DC から

約 1 MHz の帯域において、現在最高レベルの感度をもつ磁気センサである⁴⁾。このため、HTS SQUID を使って、より微小でより深部にある欠陥を早期発見可能とする SQUID 非破壊検査技術の研究開発が世界各国で現在盛んに進められている⁵⁻⁹⁾。微小欠陥については、我々はこれまでに、導電性をもつ炭素繊維炭素強化複合材料への SQUID 非破壊検査適用により、幅が数 10 μ m、長さ数 mm~数 10 mm の欠陥の検出が可能であることを示している¹⁰⁾。したがって、銅管の非破壊検査に超高感度な HTS SQUID を用いることにより、従来技術を上回る微小欠陥検出能を得られることが期待できる。そこで我々は、HTS SQUID をセンサに用いた渦電流法ベースの銅管用非破壊検査装置を構築して、その検出能力限界を明らかにした。本研究において、HTS SQUID グラジオメータの使用により深さ 10 μ m 未満、かつ長さ 10 mm 以上の溝状欠陥を磁気シールドなしで検出できる可能性を示す良好な結果を得ることができたので報告する。また、検査における実用的なケースを想定して、管表面の欠陥がセンサに対して最も近い管頂上の位置にある場合と比較して、頂上から欠陥位置がずれた場合、欠陥による発生磁界がどのように変化するかをシミュレーションにより計算した。

2. サンプルと欠陥検出原理

2.1 溝状欠陥を持つサンプル

これまでに問題となっている長さ 10 mm 以上の浅い溝状欠陥を模擬した、人工欠陥をもつ銅製伝熱管サンプルを用意した。サンプルの写真を Fig. 1 に示す。銅管のサイズは、管外径、肉厚、長さがそれぞれ 6.35 mm, 0.8 mm,

Received March 15, 2005

豊橋技術科学大学

〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibirigaoka, Tempaku,

Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

* 住友軽金属工業株式会社 生産本部 伸銅所

〒441-1295 愛知県宝飯郡一宮町大木新道 100

Sumitomo Light Metal Industries, LTD. Copper Works, 100

Ougishinmichi, Ichinomiya-cho, Hoi-gun, Aichi 441-1295, Japan

[†] E-mail: hatukade@eco.tut.ac.jp

300 mm である。この銅管の表面に、放電加工により溝状欠陥を作製した。欠陥のサイズは、長さ、幅がそれぞれ 15 mm, 0.1 mm で、深さが 30 μm , 50 μm , 100 μm のものを別々の銅管サンプルに作製した。

2.2 欠陥検出原理

本研究で検出対象とする欠陥は、Fig. 1 に示すように管の軸方向に延伸した溝状欠陥である。このような欠陥を HTS SQUID で感度よく検出するため、銅管を貫通させるタイプのヘルムホルツ型コイルを励磁コイルに採用した。

Fig. 2 に本研究で用いた欠陥検出原理を示す。図に示すように、交流磁界を発生するヘルムホルツ型励磁コイルに溝状欠陥をもつ銅管を貫通させると、欠陥延伸方向と垂直な管の円周方向に渦電流が流れる。管表面に溝状欠陥がある場合、欠陥両端付近で渦電流の乱れが生じて、渦電流由来の磁界分布に異常信号が現れる。HTS SQUID を励磁コイルの中間かつ管の上部に配置して、銅管を移動させることにより、発生磁界中の欠陥による異常信号を検出することができる。

3. SQUID 非破壊検査装置

3.1 システム構成

上記検出原理に基づき、HTS SQUID を用いた銅管非破壊検査装置を携帯電話周波数帯域遮断用の簡易電磁シールドルーム内に構築した。本研究では、将来的に本検査技術を銅管生産ラインへ導入・実用化することを視野に入れ、磁気シールド無しで安定動作する、環境磁気雑音低減に優れた HTS SQUID グラジオメータをセンサに用いた。また、現場での使用を想定して、液体窒素が不要で、かつ低振動・低雑音特性をもつパルス管冷凍機を HTS SQUID の冷却に用いた¹¹⁾。Fig. 3 に開発した検査装置の概略図を示す。図に示すように、本装置は HTS SQUID グラジオメータと冷凍機、エレクトロニクス、ヘルムホルツ型励磁コイル、電動スライダ、交流電流源、ロックインアンプとノートブック型コンピュータから構成される。冷凍機の駆動に用いるバルブモータとコンプレッサは図から省略した。

ここで用いた HTS SQUID グラジオメータは、ダイレクトカップルタイプの 1 次微分型で、2.88mm \times 3.6mm の矩形ピックアップコイルを 2 つ持ち、ベースライン長は 3.6mm となる¹²⁾。グラジオメータの使用により、冷凍機振動に由来する磁気ノイズ増加も抑制される¹¹⁾。

使用したパルス管冷凍機の詳細は参考文献 11) に示す。今回用いたヘルムホルツ型励磁コイルのサイズに合わせて、冷凍機に組み合わせたクライオスタットの先端部を細くする改良を行った。Fig. 4 に冷凍機の先端部の断面図を示す。図に示すように、冷凍機コールドヘッドから SQUID へ伝達される振動を緩和するため、銅細線の束を用いて銅製のステージとコールドヘッドを接続した。この構造により、振動の抑制と熱伝導を実現した。加速度計を用いて、

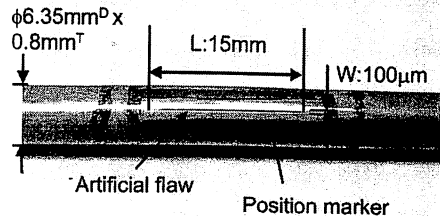


Fig. 1 An artificial flaw in a copper heat-exchanger tube.

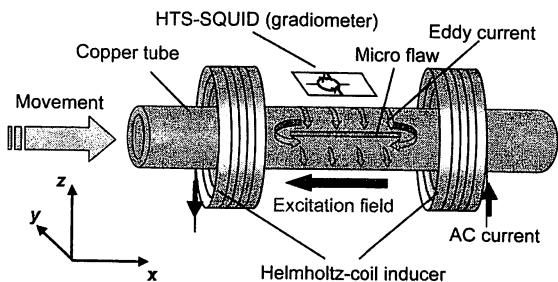


Fig. 2 Eddy-current-based NDI method using HTS SQUID (gradiometer) for a copper heat exchanger tube.

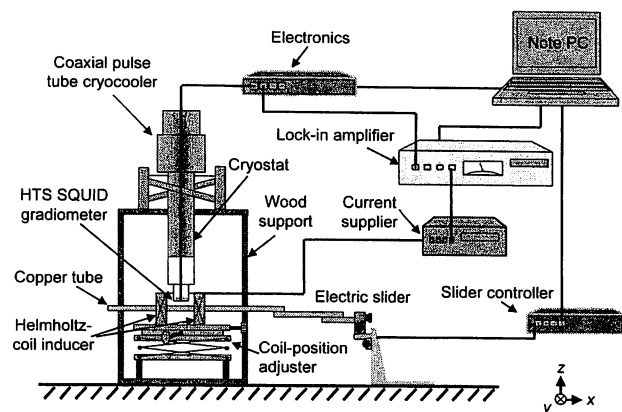


Fig. 3 Schematic diagram of the NDI system using an HTS SQUID gradiometer for copper tubes. The system was constructed in an electromagnetically shielded room.

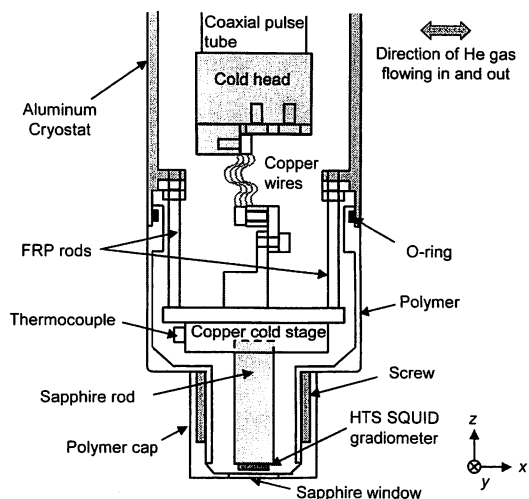


Fig. 4 Cross-sectional view of the bottom part of the cryostat.

図に示す x , y , z 方向のステージの振動を測定したところ、いずれの方向においても振動振幅は $1.5 \mu\text{m}$ 以下の大きさであった¹³⁾。今回、このステージ上に直径 15 mm のサファイヤロッドをマウントすることにより、クライオスタット先端部の直径を約 $\phi 30 \text{ mm}$ にした。HTS SQUID グラジオメータはサファイヤロッドの先端にマウントされている。これにより、銅製ステージに直接 SQUID をマウントする場合に生じるジョンソンノイズの増加を抑制することができる。Fig. 4 に示すように、サファイヤ窓をもつクライオスタットの底部はスクリーとなっており、これにより SQUID と室温サンプル間の距離を 1 mm 弱まで近づけることができる。また、ステージ温度を調整するためにヒータと温度調節器 (Lakeshore Model331) を用いた。これにより、ステージ温度を 74 K 付近で $\pm 0.03 \text{ K}$ の揺れ幅で安定させることができた¹³⁾。

励磁コイルとして、Fig. 5 に示すヘルムホルツ型コイルを使用した。コイルはそれぞれ 3000 回ずつ導線が巻かれた 2 つの円形コイルからなる。円形コイルの外径と幅は 52 mm と 42 mm で、コイル間の距離は 44 mm である。2 つのコイルの中心軸は一致させており、その軸上に HTS SQUID グラジオメータのベースラインが軸と平行になるよう設置した。したがって、コイルの軸は Fig. 3 に示すように x 方向と平行となり、HTS SQUID グラジオメータは鉛直方向磁場 B_z の x 方向勾配 $\text{d}B_z/\text{d}x$ を測定することとなる。なお、検査前に電流を励磁コイルに印加して、SQUID 出力に対する励磁磁束の影響が最小になるようにコイルの位置の微調整を行った。サンプルが、このコイル中を SQUID の真下で x 方向に移動することにより検査が行われる。エレクトロニクスの出力はロックイン検出される。

3.2 システム感度

上記装置により HTS SQUID グラジオメータを 74 K に冷却し、装置の磁束感度および磁場勾配感度を測定した。なお、動作温度が 74 K の場合、 77 K よりも優れた素子特性が得られたため、 74 K で実験を行った。感度測定結果を Fig. 6 に示す。システムのホワイト磁束ノイズは約 $60 \mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ であり、これは磁場勾配ノイズに換算すると約 $6 \text{ pT/cm}/\text{Hz}^{1/2}$ となる。以下の測定では、図に見られる商用周波数やその高調波以外の周波数を励磁周波数に用いた。

4. 実験と考察

4.1 欠陥検出実験

上記非破壊検査装置を用いて、溝状欠陥をもつ銅管の欠陥検出を行った。励磁コイルには、両コイルの中心で Fig. 2 もしくは Fig. 3 の x 方向に振幅 $1.6 \mu\text{T}$ の磁界が発生するように正弦波電流を印加した。励磁周波数として 440 Hz と 5 kHz を用いた。銅管サンプルを、 0.3 mm のステップでコイル中を移動させ、ステップ毎の磁場勾配を HTS SQUID グラジオメータで測定した。このとき、リフトオフ (セン

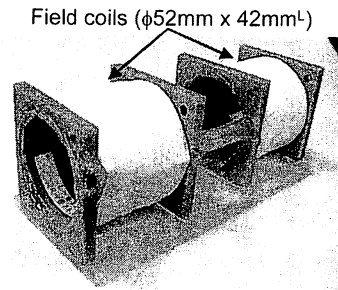


Fig. 5 Helmholtz-coil inducer composed of two identical field coils with 3,000 turns and a separation distance of 44 mm .

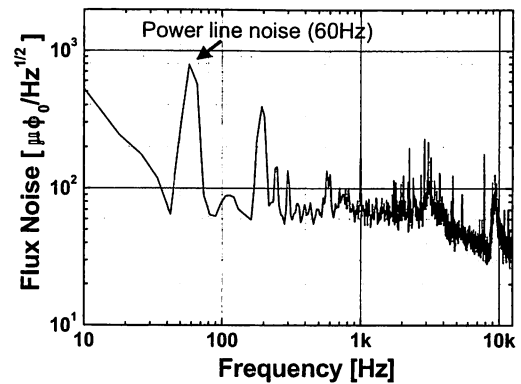


Fig. 6 System noise spectrum. Working temperature of the HTS SQUID gradiometer was 74 K .

サ・サンプル間距離)は 1.5 mm とした。最大の信号雑音比 (S/N) を得るため、全ての実験で欠陥が管の頂上にくるように設定した。ロックインアンプの測定帯域幅は 5 Hz を用いた。なお、前述のように、検査の前に SQUID に対して励磁コイルの位置を調整した結果、SQUID に鎖交する励磁コイルの漏れ磁束は約 $500 \mu\phi_0$ であった。この値は、測定中一定値として出力に含まれるため、測定の S/N に影響を与えることはない。

4.2 測定結果

$1.6 \mu\text{T}$, 440 Hz の励磁磁場を用いて、深さ $100 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ の溝状欠陥付近上部の磁場勾配分布を測定した結果を Fig. 7 に示す。参考のため、欠陥を持たない同形状の銅管サンプルを測定した結果を Fig. 7 (a) に示した。全ての出力結果に含まれる線形な位置依存性は、欠陥が管の中心に位置していないために生じる端効果と考えられる^{8,9)}。全てのサンプルにおいて欠陥位置が少しずつ異なるため、端効果による傾きの大きさは結果によりそれぞれ異なったものとなっている。Fig. 7(a)と(b)が示すように、深さ $100 \mu\text{m}$ と $50 \mu\text{m}$ の欠陥については、欠陥の両端上部に正方向と負方向の対となるピークをもつ迂回渦電流による異常磁気信号を検出した。Fig. 7(c)に示す深さ $30 \mu\text{m}$ 欠陥の場合は、十分な S/N が得られなかった。

次に、1.6 μT 、5 kHz の励磁磁場を用いて、同一のサンプルを検査した結果を Fig. 8(a)~(c) に示す。図に示すように、深さ 30 μm の欠陥についても、欠陥由来の異常信号を約 20 という高い S/N で測定することができた。異常信号の振幅が Fig. 7 に示す場合よりも一桁近く大きいため、Fig. 8 では端効果の影響があまり強く見られない。以上の結果から、HTS SQUID グラジオメータを用いることにより、深さ 30 μm かつ長さ 15 mm の欠陥を非磁気シールド環境でも高い S/N で検出できることがわかった。

4.3 欠陥深さと励磁周波数への信号強度の依存性

以上の結果が示すように、溝状欠陥による信号振幅は、欠陥の深さと励磁周波数に依存している。これらの関係を明らかにするため、まず、欠陥の深さと信号振幅の関係を求めて、Fig. 9 に示した。ここで信号振幅は、Fig. 8(c) に示すように定義した。Fig. 9 に示すように、周波数に係らず信号振幅は欠陥深さ d の二乗に比例していることがわかった。このような関係になる定性的な理由を以下に考察した。欠陥の深さ d が欠陥の幅 w と同じかそれ以下の値で、欠陥長さが w より十分に長い溝状欠陥をもつ銅管に、渦電流が誘起された Fig. 10 のような場合を考える。なお、Fig. 10 は欠陥の一方の端近くのみ欠陥形状と渦電流の流れを示した概念図を示している。欠陥は非貫通欠陥のため、欠陥の端を除く部分では欠陥に向かう電流は欠陥の下をくぐって流れると考えられる。これら図に示す yz 平面を流れる電流が作る磁場は B_z 成分を持たない。一方、欠陥の端の部分では、図の網掛けの三角形に向かう電流は、欠陥の下をくぐるのではなく欠陥端を迂回して流れると考えられる。このように xy 平面を流れる電流が作る磁場は B_z 成分を持つ。このような粗い近似から、異常磁気信号を発生する渦電流量は図に示す三角形の面積 $d^2/2$ に比例すると考えられる。この考察に従い、Fig. 9 に示す 5 kHz の結果を延長し、システムの最小磁場勾配感度を示す水平線との交点をとることにより、本システムは深さ約 10 μm の欠陥も S/N が 2 以上で検出できる可能性があることが示されている。

つぎに、信号振幅と励磁周波数の関係を調べるため、深さ 30 μm の欠陥サンプルを、440 Hz から 5 kHz の範囲の励磁周波数を用いて検査を行った。その結果得られた周波数と信号振幅の関係を Fig. 11 に示す。図に示すように、1 kHz 以下では周波数にほぼ比例して増加しているが、2 kHz 以上では信号増加が飽和していることがわかった。このような関係になる定性的な理由を以下のように考察した。今回、検査に適用した欠陥検出原理は、Fig. 12 に示すような、励磁コイルを 1 次側、銅管を 2 次側とする磁束伝達回路と等価であると考えられる。図に示すように、1 次側は電流源 I_1 とインダクタンス L_1 、抵抗 R_1 を持ち、2 次側はインダクタンス L_2 と抵抗 R_2 を持つものとした。今、1 次側コイルと 2 次側コイルの相互インダクタンスを M とし、2 次側コイルに鎖交する磁束量を $\phi = MI_1$ とすると

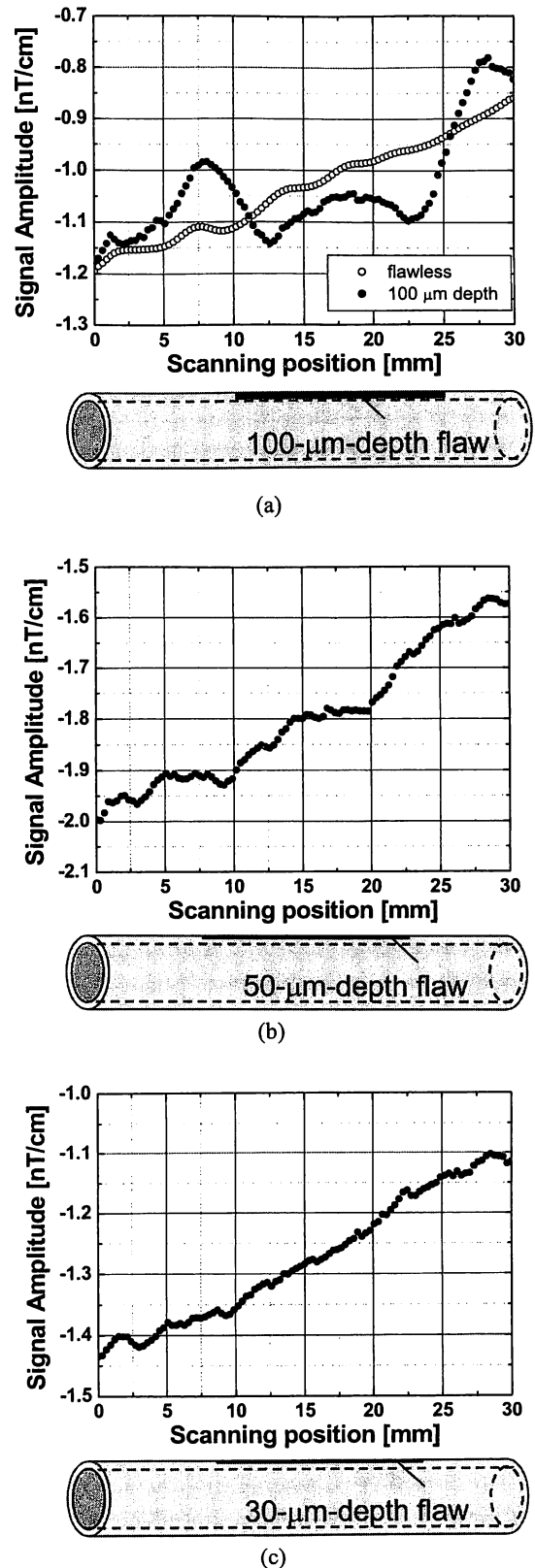
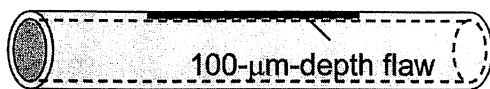
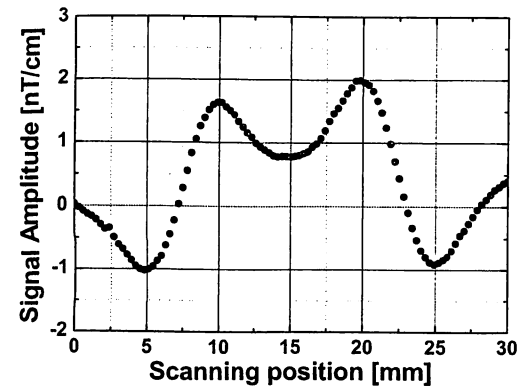
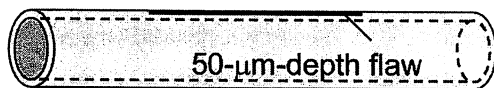
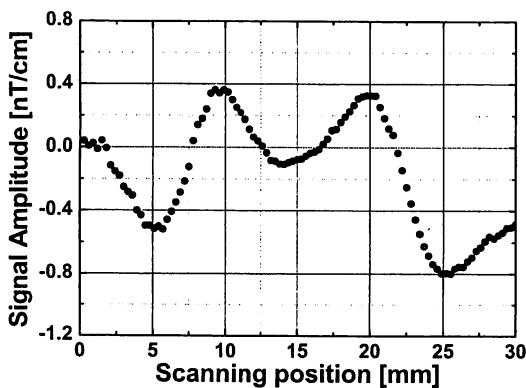


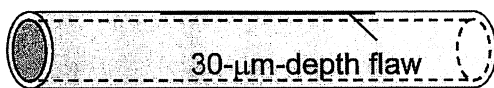
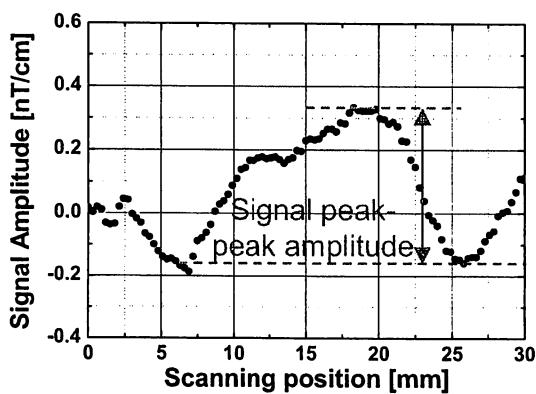
Fig. 7 Measurement results with 1.6 μT at 440 Hz. (a) Flawless and 100 μm deep flaw, (b) 50 μm deep flaw, (c) 30 μm deep flaw.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Measurement results with 1.6 μT at 5 kHz. (a) 100 μm deep flaw, (b) 50 μm deep flaw, (c) 30 μm deep flaw.

誘導起電力により二次側で発生する電流 I_2 は,

$$I_2 = \frac{\omega M I_1}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} \quad (1)$$

で表される。ここで ω は角周波数で $\omega = 2\pi f$ である。上式が示すように、 $R_2^2 \gg (\omega L_2)^2$ となる低周波領域では渦電流の強さは f に比例する。一方、 $R_2^2 \ll (\omega L_2)^2$ となる高周波数領域では、周波数に依らず渦電流の強さは、ほぼ一定値に近似される。欠陥信号振幅は渦電流の強さに比例するため、周波数と信号振幅の関係は Fig. 11 のようになったものと考えられる。この結果から、本装置で検査を行う場合、2~5 kHz の励磁周波数帯域を用いるとよいことがわかった。

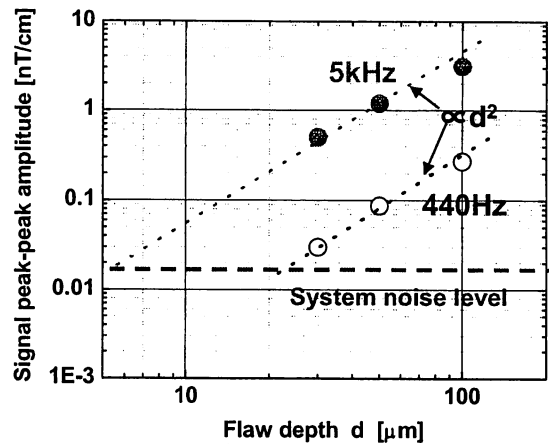


Fig. 9 Signal peak-peak amplitude due to a flaw as a function of a flaw depth.

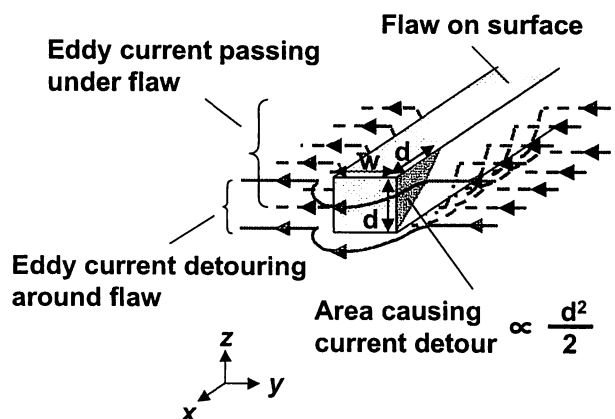


Fig. 10 Schematic illustration of eddy current flow near one end of a flaw in the surface of a copper tube. The currents flowing in the midst of the flaw should go through the flaw, while the current oriented toward the dark triangle area should detour around the flaw end.

5. 数値計算による欠陥存在位置の影響

これまでの実験では最大の S/N を得るため、欠陥が SQUID に最も近い管の頂上にくるように設定した。しかしながら、Fig. 13(a)に示すように、実際の検査では欠陥が必ずしもセンサに対して一番近い位置にあるとは限らない。そこで、欠陥の位置が管頂上部からずれた場合において、欠陥により発生する異常信号の分布について数値計算によりシミュレーションを行った。Fig. 13(a)は、シミュレーションに用いた銅管と欠陥モデルの zy 平面断面図、(b)が管を上部からみた図を示す。このシミュレーションでは、溝状欠陥により乱された渦電流により発生する磁界が、欠陥上に配置した渦電流と反対方向の電流モーメントをもつ仮想電流ダイポールにより近似できるものと仮定した。Fig. 13(a)では、断面図のためダイポールを一つのみ示しているが、実際には、(b)に示すようにある長さをもつ欠陥部に複数のダイポールが整列している状態を仮定した。簡単のため、ダイポールは全て等しい電流モーメント Q を持ち、1mm の間隔で並んでいるものとした。また、 i 番目のダイポールの位置ベクトルを r_i 、測定位置のベクトルを r とした。 yz 平面における欠陥位置と z 軸との角度を θ と定義した。 i 個のダイポールがそれぞれ r_i の位置に存在するとき、すべてのダイポールによりつくられる、位置 r における磁場 $B(r)$ は以下の式で計算される。

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_i \frac{Q \times (r - r_i)}{|r - r_i|^3} \quad (2)$$

μ_0 は真空の透磁率である。上式を用いて、次に示す条件における発生磁界を計算した。まず、管の直径、厚さ、欠陥の長さおよび幅は実験と同じ値を用いた。欠陥の深さは簡略化のため管厚さと同じに値に設定した。欠陥位置の管表面に、1 mm 間隔で配列した 16 個の電流ダイポールを仮定した。実験で印加した磁界 1.6 μ T、5 kHz を傷のない銅管に印加したときに発生する渦電流を計算し、電流が傷によって完全に遮断されるものと仮定した場合、ダイポールモーメント Q の大きさは 240 nAm となった。磁界分布の計測位置 r における z の値は 5 mm とした。欠陥位置を表す角度 θ の値は、欠陥が z 軸上にある場合を 0 とし、 $\theta = -180^\circ \sim 180^\circ$ の範囲内を 15° ごとに分割した値を用いた。以上の条件から、Fig. 13(b)に示す測定点 ($x=0$ mm, $y=-25 \sim 25$ mm, $z=5$ mm) における z 方向磁界成分 B_z を、Eq. (2)を用いて計算した。さらに、実験結果との比較を容易にするため、 B_z の計算結果から x 方向微分 dB_z/dx を計算した。

Fig. 14 に、 $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ における dB_z/dx 分布の計算結果を示す。実験結果と同様に、欠陥の両端の上に対となるピークを持った磁気信号波形を得ることができた。図に示すように、 $\theta = 0^\circ$ の場合に信号振幅は最大となり、 θ の増加に伴い、信号振幅は急激に減衰していくことがわかった。

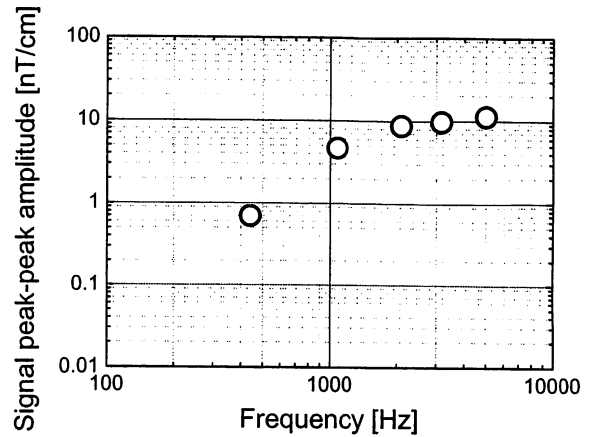


Fig. 11 Signal peak-peak amplitude due to a 30 μ m deep flaw as a function of excitation frequency.

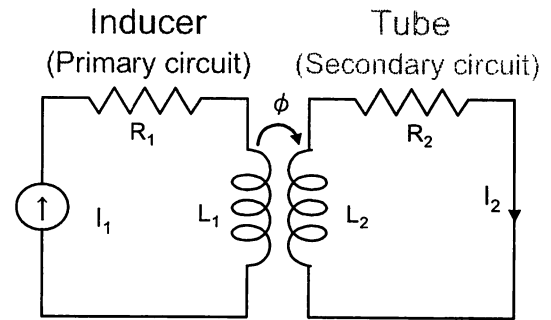


Fig. 12 Equivalent circuits between the inducer and tube. The former works as a primary circuit, while the tube works as a secondary circuit in a flux transformer.

また、 $\theta = 90^\circ$ では電流ダイポールが全て z 方向を向いているため B_z 成分が発生せず、信号は全ての測定点で 0 となっている。 θ が 90° を超えると、それ以前と比べて正負が逆転した信号が現れるが、測定点と欠陥の距離が増加するため、 y 方向にダイポールの向きが揃う $\theta = 180^\circ$ の場合でも $\theta = 60^\circ$ の場合とほぼ同じ大きさの信号振幅となった。

Fig. 15 に、 $\theta = -90^\circ \sim 90^\circ$ における欠陥位置を表す角度 θ とダイポール信号振幅の関係を示す。ここで、信号振幅は、 $\theta = 0^\circ$ の場合の振幅値により正規化されている。今、検出対象を深さ 20 μ m の欠陥と仮定すると、Fig. 9 が示すように現在の装置による検出の S/N は約 10 である。今、Fig. 15 の結果が深さ 20 μ m の欠陥にも適用できると仮定すると、S/N が少なくとも 2 で検出できる欠陥の角度は、図に示すように $\theta = -45^\circ \sim 45^\circ$ となる。したがって、本研究で開発した非破壊検査装置を銅管生産現場で使用する場合、管を周方向に回転させることができないため、センサが四個以上必要であると推測される。

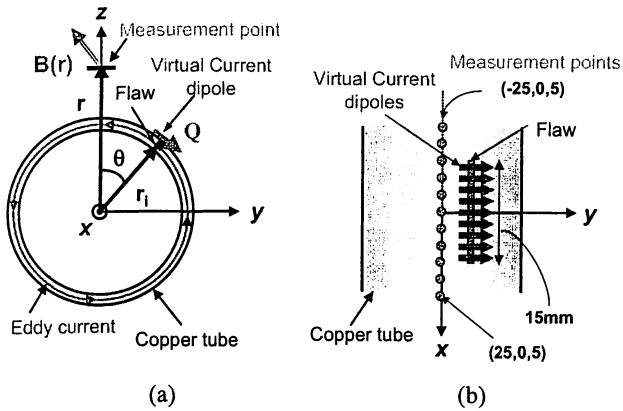


Fig. 13 Simulation model of a copper tube with a flaw while an eddy current is induced in the tube. The magnetic signal caused by the eddy current disturbed by the flaw is simulated by a magnetic signal due to virtual current dipoles located on the flaw. (a) Cross-sectional view, (b) Top view.

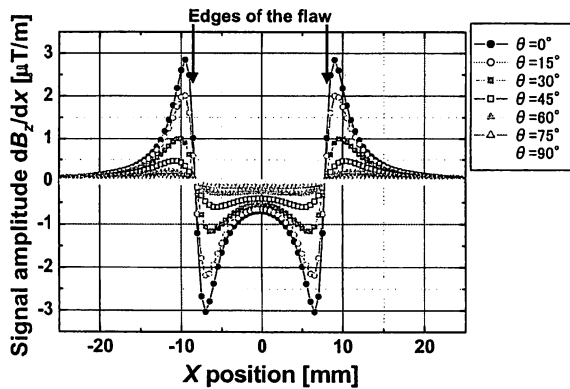


Fig. 14 The simulation results while changing the flaw angle θ stepwise at 15-degree steps from 0 to 90 degrees.

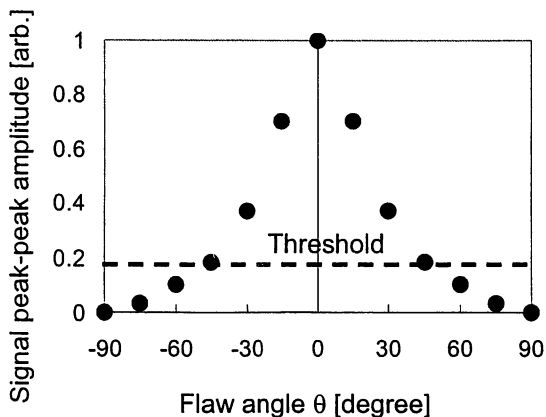


Fig. 15 Signal peak-peak amplitude due to the current dipoles as a function of a flaw angle θ . The amplitudes are normalized by the amplitude in the case of $\theta = 0$.

6. 結論

HTS SQUID グラジオメータをセンサに用いた渦電流法ベースの銅管用非破壊検査装置を非磁気シールド環境下で構築し、その検出能力限界を明らかにした。1.6 μT 、5 kHz の励磁磁場を適用することにより、深さ 30 μm 、かつ長さ 15 mm の溝状欠陥を磁気シールドの無い環境で高い S/N で検出することができた。また、欠陥による磁気信号振幅は、欠陥深さの二乗に比例することがわかった。この関係から本装置により深さ 10 μm 以下の欠陥も検出できる可能性が示された。一方、励磁周波数の増加に対しては、1 kHz 未満の低周波数帯域では信号強度は増加するが、1 kHz 以上の周波数帯域では信号増加が飽和することがわかった。さらに、数値計算により、固定された管について円周上全ての位置の欠陥を十分な S/N で検出するには、四個以上のセンサを等間隔で管周囲に配置する必要があるとの推測を得た。

本研究において、有用な議論をいただいた産業技術総合研究所の葛西直子氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) For example, SUMITOMO Light Metal Industries, LTD., <http://www.sumitomo-lm.co.jp>
- 2) For example, Foerster Japan Limited, <http://www.foerster.co.jp>
- 3) H. H. Roasmussen, H. Kristensen, and L. Jeppesen: "Ndt and heat exchanger tubes", 7th Euro. Conf. on Non-Destructive Testing 3 (1996) 739-745
- 4) Ed. A. Barone: "Principle and Application of Superconducting Quantum Interference Devices", World Scientific, Singapore, (1992) 62
- 5) A. Cochran, G. B. Donaldson, L. N. C. Morgan, R. M. Bowman and K. J. Kirk: "SQUIDS for NDT: the technology and its capabilities", Br. J. NDT 35 (1993) 173-182
- 6) W. N. Podney: "Performance measurements of a superconductive microprobe for eddy current evaluation of subsurface flaws", IEEE Trans. Appl. Supercond. 3 (1993) 1914-1917
- 7) R. Hohmann, M. Maus, D. Lomparski, M. Greuneklee, Y. Zhang, H. -J. Krause, H. Bousack and A. I. Braginski: "Aircraft wheel testing with machine-cooled HTS SQUID gradiometer system", IEEE Trans. Appl. Supercond. 9 (1999) 3801-3804
- 8) Y. Hatsukade, N. Kasai, H. Takashima and A. Ishiyama: "Non-contact SQUID-NDI method using a ferrite core for carbon-fibre composites", Supercond. Sci. Technol. 15 (2002) 1728-1732
- 9) Y. Hatsukade, T. Inaba, N. Kasai, Y. Maruno, A. Ishiyama and S. Tanaka: "Detection of deep-lying defects in carbon fiber composites using SQUID-NDE system cooled by a cryocooler", Physica C 412-414 (2004) 1484-1490
- 10) Y. Hatsukade, M. S. Aly-Hassan, N. Kasai, H. Takashima, H. Hata and A. Ishiyama: "SQUID-NDE method on damaged area and damage amount of defects in composite materials", IEEE Trans. Appl. Supercond. 13 (2003) 207-210

- 11) Y. Hatsukade, N. Kasai, H. Takashima, Y. Maruno and A. Ishiyama: "Development of a low-magnetic-noise nondestructive inspection system using a superconducting quantum interference device cooled by a coaxial pulse tube cryocooler", TEION KOGAKU **38** (2003) 686-692 (in Japanese)

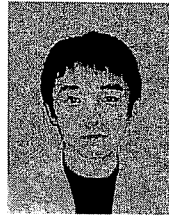
廿日出 好, 葛西 直子, 高島 浩, 丸野善生, 石山 敦士,
「同軸型パルスチューブ冷凍機を用いた低磁気ノイズ SQUID
非破壊検査システムの開発」, 低温工学 **38** (2003) 686-692

- 12) Y. Hatsukade, T. Inaba, Y. Maruno and S. Tanaka: "Mobile cryocooler-based SQUID NDE system utilizing active magnetic shielding", IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 723-728

- 13) Y. Hatsukade, N. Kasai, H. Takashima, Y. Maruno and S. Tanaka: "Low-noise cryocooler-cooled compact SQUID-NDE system for carbon-fiber composites", Appl. Supercond. **2003**, **181** (2005) 3231-3238



廿日出 好 昭和 51 年 2 月 26 日
生. 平成 15 年早稲田大学大学院理工学研究
科電気工学専攻博士課程修了. 同年 4 月より
豊橋技術科学大学に勤務, 現在エコロジー工
学系教務職員として SQUID 応用研究に従事.
低温工学協会, 応用物理学会会員. 工学博
士.



小杉 明史 昭和 56 年 3 月 14 日
平成 15 年豊橋技術科学大学工学部エコロ
ジー工学課程卒業. 平成 17 年豊橋技術科学
大学大学院工学研究科エコロジー工学専攻修
士課程修了.



森 憲亮 昭和 49 年 1 月 5 日生.
1996 年鹿児島大学工学部電気電子工学科卒
業. 同年住友軽金属株式会社名古屋製造所勤
務. 1997 年より同社伸銅所勤務. 主に非破壊
検査器開発に従事.



田中 三郎 1958 年 9 月 16 日生.
1983 年豊橋技術科学大学大学院修士課程電気
電子工学専攻修了. 同年住友電気工業株式会
社伊丹研究所研究員. 90 年~95 年(株)超
伝導センサ研究所主任研究員兼務. 91 年博士
(工学)の学位取得(大阪大学). 95 年住友電気
工(株)退職, 同年豊橋技術科学大学工学部
助教授. 96 年~97 年カリフォルニア州立大学バークレー校物理
学科客員研究員. 02 年より豊橋技術科学大学工学部教授. 03 年
同未来技術流動研究センター長併任. 高温超伝導 SQUID 磁気セン
サを利用した生体検査応用, DNA 検出, 食品異物検査システム
などの研究に従事.