

解説

Review

マイクロウズ電流探傷技術 (μ -ECT) とその応用

山田外史*

Micro Eddy-Current Technology (μ -ECT) and Applications

Sotoshi Yamada

Synopsis

Eddy-current testing (ECT) technique is a well-known methodology of nondestructive evaluation technique that is usually applied to inspect the material flaws without changing or altering testing materials. Generally, ECT technique is used as crack detection in piping systems of nuclear power plants and as an imperfect welding spot detection on aircrafts. The advantage of ECT technique is to highly sense material conductivity which depends on many variables such as material thickness, crack, aging and etc..

The planar exciting coil and the advanced magnetic sensor instead of the conventional inductive ECT probe enable us to invent the probe structure and its applications. The proposed ECT probe consists of a planar meander coil as exciter and spin-valve type giant magnetoresistive (SV-GMR) sensor. The utilization of SV-GMR as a magnetic sensor of ECT probe provides the feasibility of high-spatial resolution, high-sensitivity to low magnetic fields, and high operating frequency range. Due to the SV-GMR advantages, the inspection of micro defect and the detection of micro conductors can be performed by the proposed ECT probe. We call this system " μ -ECT".

The advanced SV-GMR sensor improves the on-site ECT system in the previous metal inspection industry and also invents a new application in a different industrial field. We proposed the ECT system to the inspection system to electronic products, the PCB inspection system and the recognition of solder bead for ball-grid array package. Defects on high-density PCB are examined by ECT technique. The inspection evaluates not only imperfections of the PCB conductor but also PCB conductor dimensions and alignment. We discuss the ECT system and the experimental results.

1. 緒 言

製品の検査技術は、製品の高度化・高機能化に伴い重要性を増し、コストに占める割合も増加している。これらの検査技術において必須の技術が非破壊検査である。非破壊検査は、検査対象に機械的、熱的、電氣的にストレスを与えずに（できる限り）その性状（物理特性、形状、経年変化など）を計測する。各種の物理現象を利用した非破壊検査手法の中で、電磁的検査であるうず電流探傷法（Eddy-current testing technology : ECT）は、励磁コイルで誘導されたうず電流により対象の性状の情報を導電率、透磁率から得るものである。特にうず電流の表皮効果より非磁性の金属製品の表層性状に高感度であり、加えて検出プローブ

が簡易で小形であることから、うず電流探傷技術は産業界で欠くことのできない検査技術である。

うず電流探傷技術のさらなる発展に向けて、コイルで構成された ECT プローブに対して、プレーナ形励磁コイルと巨大磁気抵抗効果素子をセンサとして用いた ECT プローブが報告されている^{1)~3)}。この主目的は、プローブの小形化により高空間分解能を達成しつつ、高感度の検出を目指すものである。ただし、コイルに変わり磁気デバイスを用いることによる熱などのノイズ要因に注意をする必要がある。磁気デバイスを用いた ECT の応用例として、高熱の鋼材から保護するための高リフトオフでの検査法、 μm から mm サイズの小さい欠陥、浅い引っかきキズなど

2006 年 4 月 14 日受付

* 金沢大学自然計測応用研究センター，工博（Dr., Eng., Institute of Nature and Environmental Engineering, Kanazawa University）

の検出など金属製品検査への ECT 検査技術の高度化がある^{4), 5)}。

著者は、ECT の新しい応用として電子分野における電子製品の検査への適用について検討してきた。その例が製造段階でのプリント基板、すなわちベアボード（素子が結線されていない基板）の不良検査、さらには IC などの表面実装に用いられるハンダボールの配置検査である^{6), 7)}。当初超小形のコイルからなる ECT プローブを検討したが、高感度、高分解能の巨大磁気抵抗効果素子で構成した ECT プローブを製作し、可能性を実験により示した。本稿では ECT プローブの構成とその性能について解説し、提案する応用例の概要について記述する。

2. 巨大磁気抵抗効果素子とウズ電流探傷プローブ

2.1 マイクロウズ電流探傷プローブ

小さな検査対象もしくは小さな欠陥の検出・検査を目的としたウズ電流探傷技術（以降、単に ECT と記載する）において、検査プローブを基本的にどのようにすればよいか。ここでは、この目的に対する ECT 技術をマイクロウズ電流探傷技術（ μ -ECT）と呼ぶことにする。ただし、この意味はマイクロメートルサイズの大きさを示すものではなく、コイルを用いた ECT 技術からは困難であった mm もしくはそれ以下の μ m サイズの形状を対象とすることを意味する。

Fig. 1 は、ECT 技術の一般構成を示したものであり、検査対象にウズ電流を誘導する励磁系（トランスミッタ）と対象の情報を含む磁束・磁界を検出する検出系（レシーバ）がある。励磁系は、検査対象の欠陥に対してウズ電流が効果的に流れる（欠陥によるウズ電流への変化を大きくできるように考慮する）ようにその励磁コイル形状を考慮する。よって、対象や傷の大きさとは直接には関係せずに設計できるが、励磁周波数は表皮効果と関係するので一般に高周波励磁とする必要があり、コイルインピーダンスを小さくするため形状はおのずと小形となる。

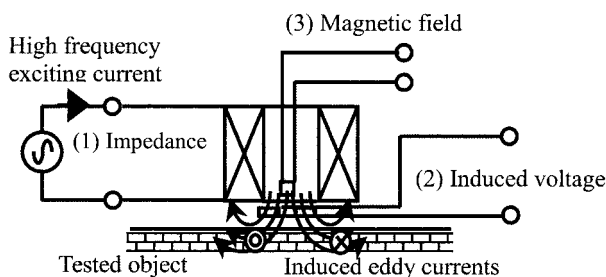


Fig.1. General eddy-current testing system.

一方、検出系に関しては一般には励磁コイルのインピーダンス変化、2次コイルの誘起電圧の変化、ならびに欠陥周りの磁界変化を検出することになる。小さな対象への ECT 検査を考慮した場合、空間分解能を高くするためにコイルを小形化する。一方高感度化のためのコイル巻数を多くする必要がある、径が小さく高さのあるコイルとなる。しかし、実質的に対象からの距離（ECT ではリフトオフ高さという）が増加し、欠陥からの信号磁界が減衰することになる。そこで、高分解能すなわち小形検出素子でありかつ高感度を実現するには半導体もしくはその他の磁界センサが期待される。

マイクロ ECT 技術を目指した磁界センサを検出素子とする場合、小形であること以外に考慮しないといけない点を列記する。

- (1) 数 100 kHz から数 10 MHz 程度の高周波に対して動作可能であること。
- (2) ECT プローブの簡単さを阻害しないこと。
- (3) 大きな励磁磁界中で欠陥に由来する微細な磁界信号を検出できる。
- (4) 近傍磁界源である欠陥による微小磁界が検出できる。
- (5) 検査対象と近接するために対象の環境に影響がされないこと。

項目 (2) に関して、ECT 技術の利点は直接電気信号として情報が得られ、プローブも小形・簡易なものとすることができることであり、他の非破壊検査手法に対する重要な特徴である。よって、この点を阻害するような場合は、ECT 技術自身の利点に反することになる。また、項目 (5) に関しては、ECT プローブは一般には検査対象と接近させて配置されることとなり、検査対象の温度などの影響を受けるため耐環境性も重要な選択の要素である。以上のことを考慮したとき、巨大磁気抵抗効果素子は ECT プローブの検出素子として魅力的な素子である。

2.2 巨大磁気抵抗効果素子と特性

著者らは、マイクロ ECT プローブを開発するにあたり、その検出素子として磁気抵抗素子のなかでもスピンバルブ形磁気抵抗素子 (Spin-valve type giant magnetoresistive sensor: SV-GMR) を採用した¹⁾。GMR 素子は、nm 厚さの磁性層と導電層が積層された構造を持ち、ホール素子との違いは組成が金属であることである。動作原理はスピン効果に基づき、2つの強磁性体の磁化の方向が平行か反平行かによって、導電層の電子に作用し導電率が変化する。今日、GMR 素子はハードデスクのヘッドの検出素子として、記録密度向上に大きく寄与している。SV-GMR センサは、磁気抵抗効果素子の 1 種であり、Fig. 2 に示すような構造

を持っている。2つの磁性層のうち1つは磁化固定層 (Pinned magnetic layer) であり、もう一方は自由磁化層 (Free magnetic layer) であり外部磁界によって磁化方向が面内で回転する。名前の Spin-valve (栓を回す) は、自由磁化層の磁化回転から由来している。

SV-GMR の一般的な特性の比較を Table 1 に示す。ECT 技術に適用する場合に考えられる利点を列記する。

- (1) 素子は2端子である。
- (2) アレー化するのが容易である。
- (3) 材料は金属であり、耐環境性が高い。
- (4) 特性は両極性（正負の計測が可）である。
- (5) 感度は高く、ホール素子に比べ 1000 倍程度である。
- (6) 定電流駆動により素子両端の電圧が変化し、計測が容易である。
- (7) 素子のサイズは、数十 μm 平方（数 μm も可能）と極めて小さく空間的分解能が高い。
- (8) 厚みが数十 nm と薄く、極表面近くを計測できる。

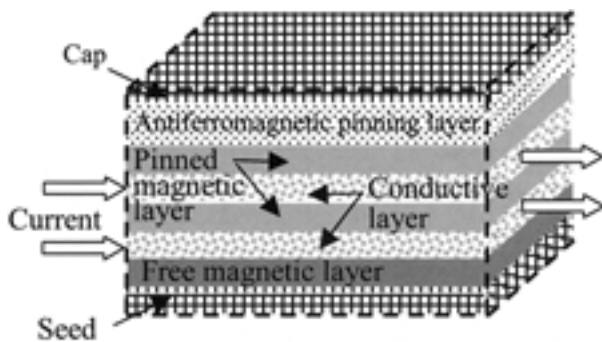


Fig. 2. Structure of spin-valve type giant magnetoresistive device.

(9) 周波数特性が直流から数 100 MHz 以上まで動作可能（形状に依存）。

(10) 抵抗は数十～数百 Ω ，印加電流は数 mA 程度であり，極低電力駆動である。

(11) 温度変動が小さく，ホール素子に比べ 1/20 倍程度である。

このように，SV-GMR センサは ECT プローブの検出素子として多くの利点がある。

ECT プローブ用の SV-GMR 素子を TDK 株式会社の協力により数種類の素子を製作した。Fig. 3 は、その 1 例であり、セラミック基板上に長さ 180 μm ，幅 18 μm ，厚さ約 70 nm の短冊形の素子が形成され、4 エレメントが直列に接続されたハーフブリッジ構成が可能な2つのセンサから成っている。SV-GMR の磁化固定層は z 方向に着磁されている。仕様のパラメータを Table 2 に示す。ヘルムホルツコイル中に SV-GMR センサを置き測定した直流磁界での

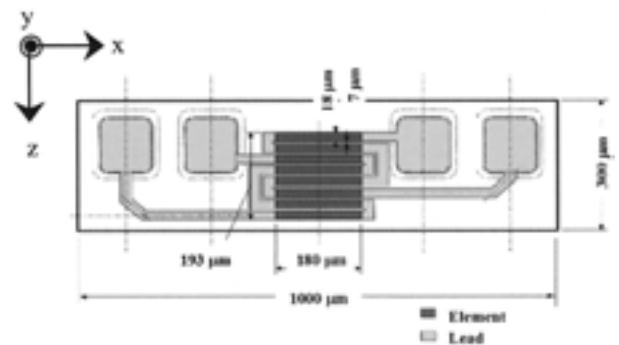


Fig. 3. SV-GMR sensor (sample 1).

Table 1. Comparisons between magnetic sensors for ECT application.

Sensor	Material	Range [T]	Sensitivity [%/mT]	Resolution [μT]	Frequency [Hz]	Operating temperature & variation
Hall element	InSb, GaAs	10	—	1	10 kHz	-50 to +150 $^{\circ}\text{C}$ 2 % / $^{\circ}\text{C}$
Anisotropic magneto-resistance	NiFe, FeCo	0.1	2	1	1 MHz	-50 to +150 $^{\circ}\text{C}$ 0.2 % / $^{\circ}\text{C}$
Giant magneto-resistance (GMR)	Magnetic/non-magnetic multi-layer film	1	2	1	>100 MHz	-40 to +150 $^{\circ}\text{C}$ 0.09 % / $^{\circ}\text{C}$
Spin-valve GMR	Magnetic/non-magnetic multi-layer film	0.01	200	0.01	>100 MHz	-40 to +150 $^{\circ}\text{C}$ 0.09 % / $^{\circ}\text{C}$
Magnetic impedance element	Amorphous material	0.001	1000	0.001	1 MHz	-40 to +125 $^{\circ}\text{C}$

Table 2. Specifications of SV-GMR(sample 1).

Resistance	620 Ω	Driving current	5 mA max.
Saturated magnetic flux density	3 mT	Structure	(18 * 180 μm) * 4 element series, 2 sensors

大振幅特性を Fig. 4 に示す. 一方, 周波数 $f = 1.0$ kHz での小振幅特性を Fig. 5 に示す. ここで x 方向に対する小振幅特性は, 大振幅特性が原点付近で偶関数特性となることにより, 小振幅では感度は小さくなる. よって, このセンサは, 小振幅磁界に対して短冊の長手方向に対して直角方向の磁界 (z 方向) に対してのみ高感度を持つ.

また, Fig. 6 に示す 4 素子からなるマルチ SV-GMR センサを試作した. SV-GMR エlement は, $18 \times 100 \mu\text{m}^2$ とその半分の形状である $9 \times 50 \mu\text{m}^2$ であり, それらを 4 Element 直列に接続されている. 厚み方向の構成, 素子材料は, ハーフブリッジ形と同等の緒言で作成されているが,

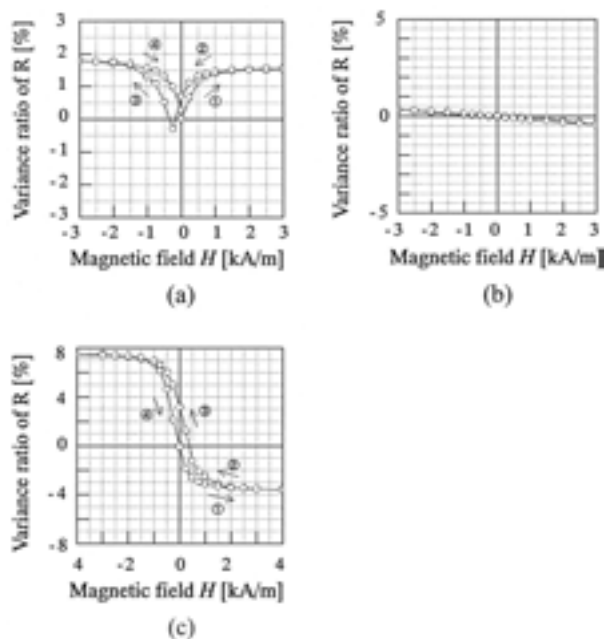


Fig. 4. Dc large-signal characteristics of SV-GMR sensor.

- (a) H_x vs. $\Delta R/R$ characteristics.
 (b) H_y vs. $\Delta R/R$ characteristics.
 (c) H_z vs. $\Delta R/R$ characteristics.

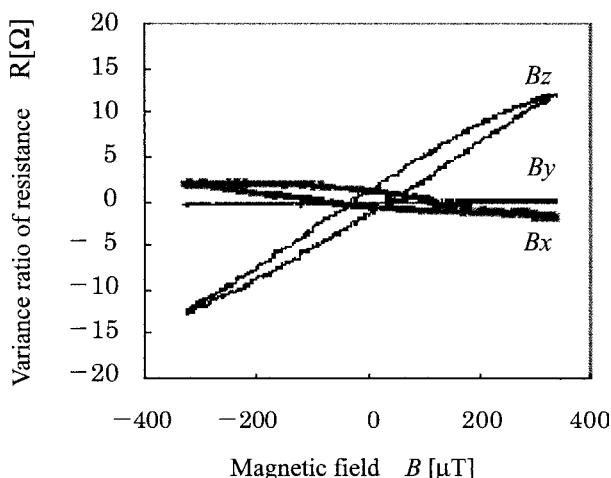


Fig. 5. Ac small-signal characteristics of SV-GMR sensor ($f = 1.0$ kHz).

サイズ, 素子形状のアスペクト比による着磁層の違いにより特性が異なる. 4 Element のマルチ SV-GMR の素子特性について, ゼロ磁界時の抵抗値のばらつきについて $100 \mu\text{m}$ 素子においては偏差 4Ω (1 %) 以内, $50 \mu\text{m}$ 素子では 15Ω (4 %) 以内であった.

3. 電子工学分野への利用

3. 1 マイクロうず電流探傷技術の電子工学への応用

うず電流探傷技術は, 原子力機器, 航空機を代表とする機械構造物, 機械製品の非破壊検査技術として, 他の手法と併用して独自の用途分野を占めてきた. 提案する μ -ECT プローブは小さな欠陥などを検出できる能力があることに注目して, これまでに例の少ない電子分野への応用の可能性を検討した.

電子部品・材料などの検査において, 導電率, 抵抗値, 導通検査などうず電流探傷の検査対象との共通性が考えられる. たとえば, うず電流を用いた薄膜などの導電率計測装置が知られている. 今日, 電子部品が小形・高密度化している中で電子部品の検査において, μ -ECT 技術の高分解能, 高感度, 非接触の特徴を生かす検査対象が考えられる.

μ -ECT 技術の電子製品の検査として, プリント基板ならびに平面実装技術 (Ball grid array package など) でのハンダボールの検出についてその可能性と実験を行った. プリント基板の検査においては, 高密度配線に対応して非接触検査にて単にプリント配線の断線・短絡のみならず, 配線の厚みやかけ欠陥なども検査可能である. 現在, プリント基板や BGA のハンダボール検出には光学的なイメージ検査法が主流であるが, イメージパターン検査と導通の検査は本質的に異なった検査であり, 光学的には得ることの

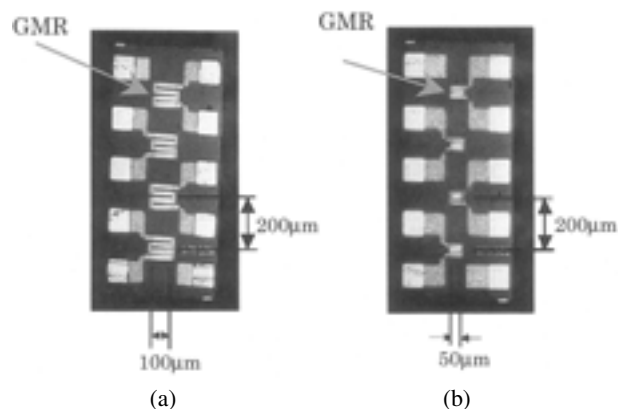


Fig. 6. Multi SV-GMR sensors.

- (a) $100 \mu\text{m}$ type (sample 2).
 (b) $50 \mu\text{m}$ type (sample 3).

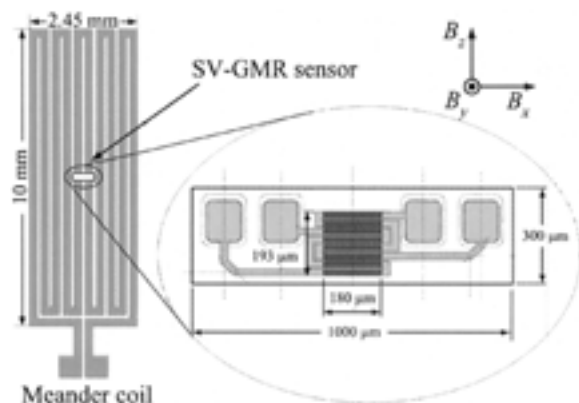


Fig. 7. ECT probe for printed circuit inspection. The exciting coil has meander structure and GMR sensor is located among coils.

できない真の導電性に関する情報を μ -ECT 技術では得られる。以下、プリント基板検査とハンダボール検査について、 μ -ECT 技術による現状について記載する。

3.2 マイクロECT技術によるプリント基板検査

(1) プリント基板検査での μ -ECT 技術

今日、携帯電話などに代表される電子部品の高密度配線においてプリント基板の配線は高密度になり、線幅が $100\ \mu\text{m}$ 以下、厚みも $10\ \mu\text{m}$ 以下となっている。このような現状において、プリント基板の配線の単に導通のみならず配線の抵抗値も検査の対象となり、製造段階のプリント基板の検査においてエッチングによる配線の厚み欠陥やかけ欠陥などにも対応する必要が出てきている。

現在主に使用されているプリント基板の配線検査は、大きく分けて光学機器によるイメージの検査法と導通試験法の2種類である^{8),9)}。光学的イメージ検査は、非接触にて検査できるが直接配線の導電性を検査してはいない。一方、ピン端子の接続による導通試験は配線と接触する必要があり、高密度の配線を検査するには多くの検査時間を必要とする。うず電流探傷技術は、誘導作用によりうず電流を配線に流し、かつ非接触で検査ができ、前出の2つの検査法の利点を兼ねる技術である。ただし、これまでのうず電流探傷技術の検査対象と異なるのは、対象が均一な導体ではなく、設計されたパターンの中での不良箇所を検出する必要がある。この点については、光学検査手法と同様でありパターン処理技術を駆使して、不良部分を認識するプロセスが必要である。この点については本稿では議論せずに、ECT 技術でプリント配線からどのような検査情報が得られるかを記述する。

(2) プリント基板検査用のマイクロ ECT プローブ

高密度のプリント配線の導体を、直線の細く長い、かつ薄い導体としてモデル化して検査対象とする。この導体に

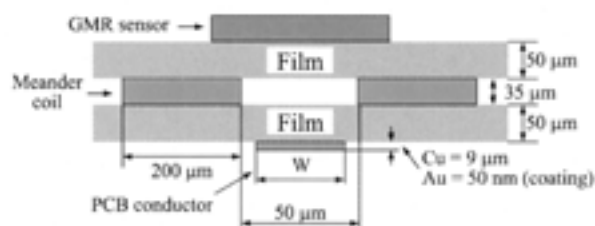


Fig. 8. Principal of ECT inspection for PCB conductor.

うず電流を効率的に電磁誘導するため、高周波電流が流れる励磁コイルと検出用の SV-GMR センサの配置を検討した結果、Fig. 7 に示すプローブ構成を開発した^{10),11)}。

Fig. 8 に配線の欠陥の検出原理について示した。高周波電流が印加されたミヤンダ形コイルによりそのギャップ間には磁界が発生し、コイル面においては y 方向の磁界成分となる。ミヤンダ方向と平行に配置したプリント導体には、印加電流と同一の z 方向の循環するうず電流が誘導される。断線ならびに形状の変化（バンプ、配線の曲がりなど）があるとうず電流には x 方向成分が発生し、その結果印加磁界と直交した z 方向の磁界が発生する。この成分を検出することにより断線、ならびに接続パッド部分が検出できる。幅や厚みの欠陥の場合もうず電流の方向が変化、すなわち z 方向の磁界が誘導されることになる。よって、 z 方向の磁界を検出するように SV-GMR センサの配置を微小信号に対する高感度方向 (Fig. 5 での B_z 磁界方向) と一致させる。

実験的検証のため $9\ \mu\text{m}$ 厚さのモデルプリント導体での

実験結果を Fig. 9 に示す。測定条件は、励磁コイルの周波数 $f = 5 \text{ MHz}$ 、励磁電流 $I = 200 \text{ mA}$ （実効値）である。Fig. 9(a) は、プリント配線上を走査したストリップチャートである。図は、センサの信号をロックインアンプにより測定し、振幅を図示したものである。結果より断線の部分において明確な信号が現れている。オフセット信号の変化は、プローブ走査によるプローブとプリント配線面との距離の変動に基づくものである。このキズ信号のピーク間の値をプリント配線幅に対して実験した結果を Fig. 9(b) に示す。ECT 手法による幅や厚みの欠陥の検査についての結果を Fig. 9(c), (d) に示す。この結果は、欠けキズ、厚み欠

損を ECT 手法により検出可能であることを示している。

Fig. 10 は、ECT プローブの2次元の走査により得られた断線やかけキズの画像イメージを示す。この画像は、欠陥を明確にするために計測したデータに対して、オフセット信号の消去のために空間差分を行い、その後 5×5 のメデアンフィルタによりノイズ処理を行っている。この結果より、 $100 \mu\text{m}$ 幅のプリント基板の検査は十分可能であることが明確となった¹²⁾。将来の展望としては、 $100 \mu\text{m}$ 幅以下のプリント基板への適用のため、励磁コイル、SV-GMR センサの改良などの更なる検討が必要である。

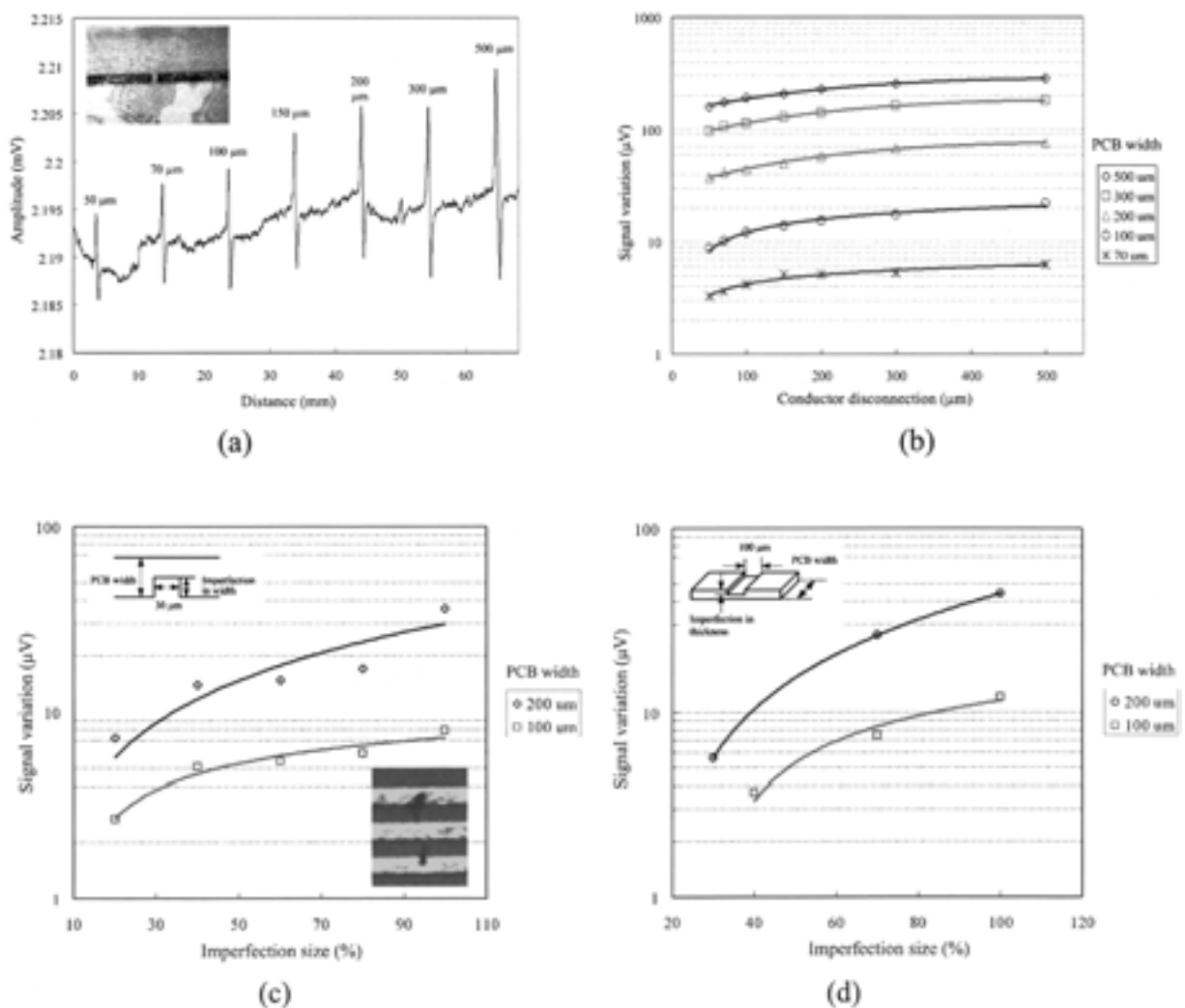


Fig. 9. Inspection of different defects on PCB conductor.
 (a) Inspection signal obtained from scanning over the PCB conductor.
 (b) Signal variations vs. conductor disconnections.
 (c) Signal variations vs. partial defects on PCB conductor widths.
 (d) Signal variations vs. partial defects on PCB conductor thicknesses.

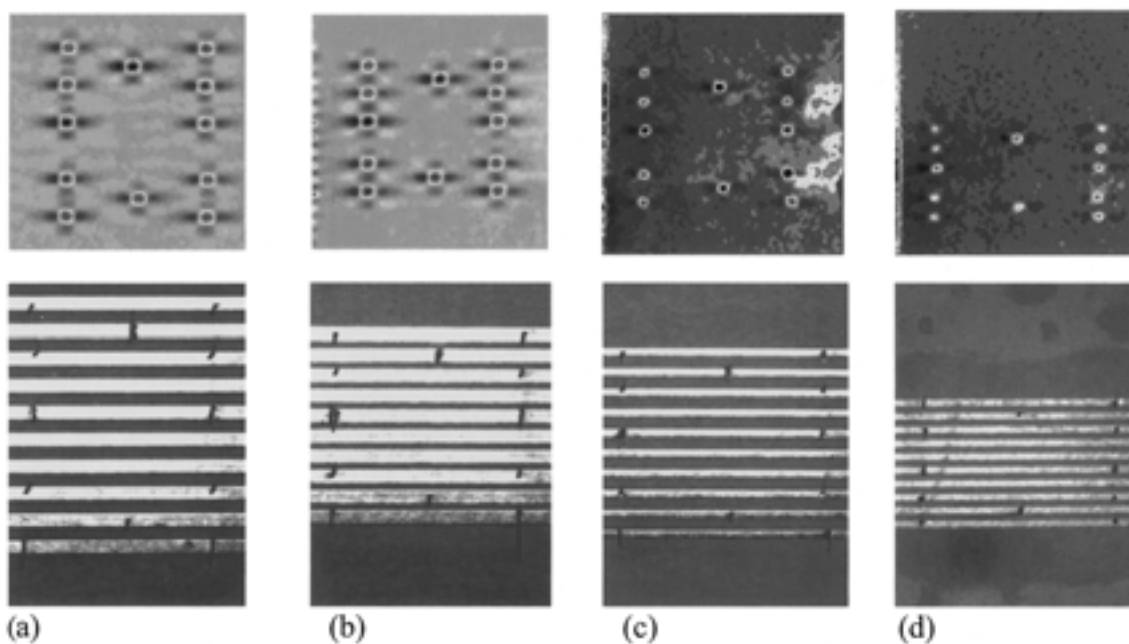


Fig.10. PCB models and inspection results (upper : ECT image, lower : photo image).

- (a) Width = 200 μ m, gap = 200 μ m.
(b) Width = 200 μ m, gap = 100 μ m.
(c) Width = 100 μ m, gap = 200 μ m.
(d) Width = 100 μ m, gap = 100 μ m.

3.3 マイクロ ECT 技術によるハンドボール検出

マイクロ ECT 技術の他の応用として、 μ -ECT プローブを mm サイズ以下の非磁性の微小金属粒子の検出に適用した。その具体的な利用は、BGA パッケージ技術 (BGA : Ball grid array) におけるハンダボールの検出がある¹³⁾。バイオ分野の検査技術において磁性微粒子の検出のため巨大磁気抵抗効果素子を利用することが検討されているが、ECT 技術を用いると磁性および非磁性粒子の検出が可能であり一層広い応用 to 貢献できるものと思われる¹⁴⁾。

μ -ECT 技術に基づいた微小金属粒子の検出プローブの構成を Fig. 11 に示す．励磁部はヘルムホルツコイルの構成とし，コイル中に検出部の SV-GMR センサを配置する．GMR センサは z 軸方向の磁界を検出できるように励磁コイルの中心に置く．検出部と検査対象の距離（リフトオフ高さ）は $d = 300 \mu\text{m}$ である．励磁コイルの印加電流は， $f = 1 \text{ MHz}$ ， $I = 200 \text{ mA}$ である．

Fig. 12 に示す解析モデルにより微小金属粒子の検出の可能性を検討した. Fig. 12 では, ヘルムホルツコイルからの磁界を均一な磁界 B_0 とすることにより金属粒子内のうず電流 $J(r, \theta, \phi)$, ならびにセンサが検出する粒子の直上の z 方向磁界 $B_z(z)$ は, 次式で与えられる.

$$J(r, \theta, \phi) = -j\omega\sigma a J_1(kr) B_0 \sin\theta \dots\dots\dots (1)$$

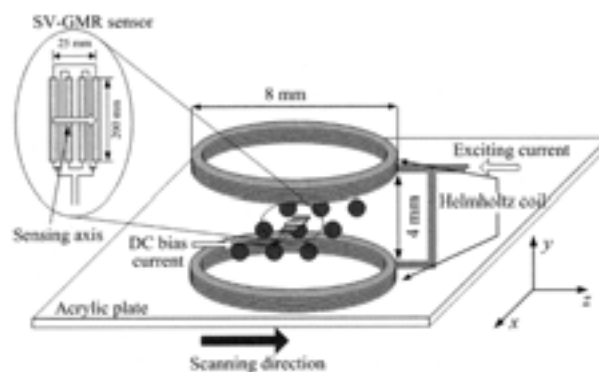


Fig.11. ECT system for detecting micro conductive bead.

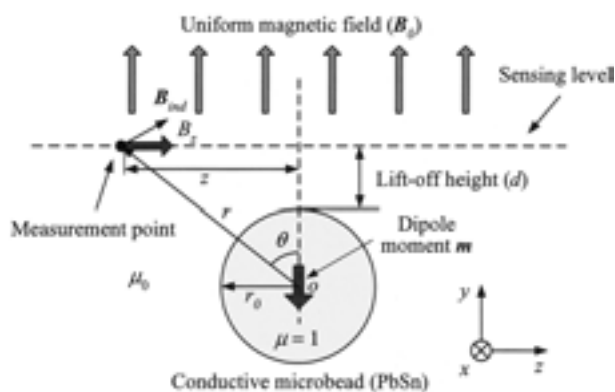


Fig. 12. Analysis model for detecting bead by ECT.

$$B_z(z) = 3b \frac{z(r_0 + d)}{r^5} B_0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで

$$a = \frac{r_0}{\mu_0 J_1(kr_0)/\mu_0 + [kr_0 J_0(kr_0) - J_1(kr_0)]/\mu} \dots\dots\dots (3)$$

$$b = r_0 \frac{J_1(kr_0)/2\mu_0 - [kr_0 J_0(kr_0) - J_1(kr_0)]/2\mu}{J_1(kr_0)/\mu_0 + [kr_0 J_0(kr_0) - J_1(kr_0)]/\mu} \dots\dots\dots (4)$$

$$k = (-1 + j) \sqrt{\omega \sigma \mu / 2} \dots\dots\dots (5)$$

σ : 粒子の導電率

μ_0, μ : 空気, 粒子の透磁率

J_0, J_1 : 0次, 1次のベッセル関数

BGA実装に用いられるハンダボール(SnPb)を対象に実験を行った。Fig. 13は、解析的結果と実験結果を比較したものであり、解析結果からの検出磁界 B_z のレベルからは $300 \mu\text{m}$ 径のハンダボールは十分検出が可能である。Fig. 13に示す波形のピーク値を信号レベルとして、ハンダボールの径に対する信号レベルの実験値ならびに解析した結果の比較を Fig. 14に示す。センサとボールの間隔、リフトオフ高さは $d = 300 \mu\text{m}$ としているが、リフトオフ高さを小さくすればさらに小さなボールの検出が可能である。

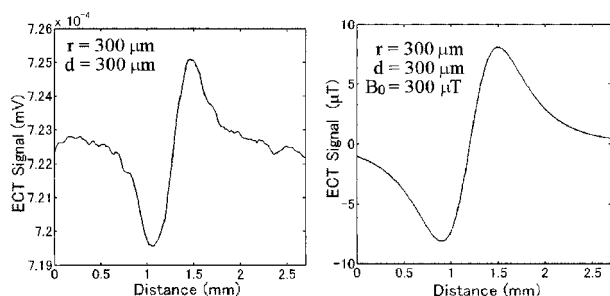


Fig. 13. Comparisons of detected signals for SnPb bead.
(a) Experimental result.
(b) Analytical result.

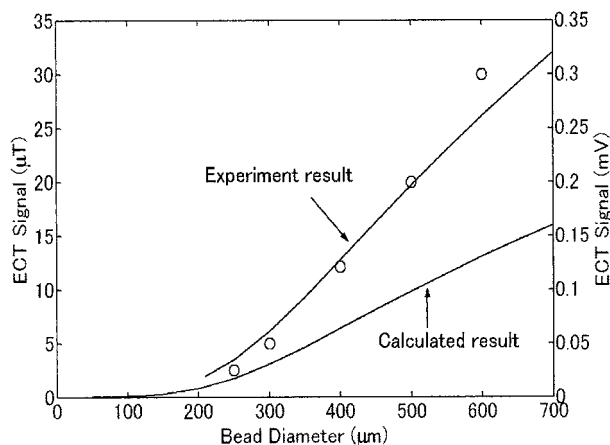


Fig. 14. Signal amplitude vs. bead diameter characteristics.

BGA 実装においては、ハンダボールが欠損なくアレー状に定位置で配置されているかを検査する必要がある。現在光学的に検査する検査法が使用されているが、ECT 検査手法は周りからの雑音光やダストなどにより影響されにくい利点がある。ハンダボールアレーに対するシミュレーションならびに実験結果を Fig. 15に示す。この結果は、オフセット電圧ならびにボールの位置を明確にするためにプローブ走査の方向に対して空間差分を行った。Fig. 15に示すピークはボール中心を表している。このECT イメージより、ボールの位置ならびに存在を認識する。

4. 結 論

非破壊検査手法としてのうず電流探傷技術は、シンプルな機構でありかつ導電製品の表層状態に対して高感度である特徴に基づき、独自の検査分野の地位を占めている。著者らは、プレーナ励磁コイルと巨大磁気抵抗効果素子を組み合わせたうず電流探傷プローブを提案し、mm サイズ以下の対象また欠陥に対するうず電流探傷検査が実現できることを示した。

巨大磁気抵抗効果素子は、小形、高周波駆動、高感度センサであり、金属製品の検査への検査感度、性能を高めることが可能であるが、ここでは ECT 検査応用として例の少ない電子分野でのプリント基板の配線性状の検査、表面実装でのハンダボールの有無、位置検出などの新規応用に

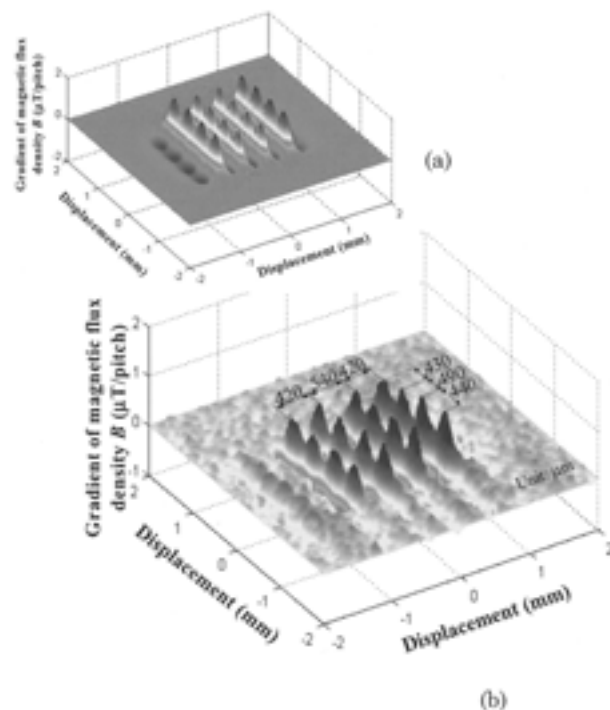


Fig. 15. ECT image of SnPb bead array. (a) Analytical result, (b) experimental result.

について紹介した。更なる新しい分野としては、バイオ分野がある。近年微粒子の医療応用が研究から実用にされているが、ECT 技術により導電粒子の検出・計数・濃度などの検出が考えられ、高感度、小形の巨大磁気抵抗効果素子による新しい分野への可能性を開くことができる。

(文 献)

- 1) S. Tumanski : Thin Film Magnetoresistive Sensor, Institute of Physics Publishing Ltd., (2001), 165.
- 2) C. H. Smith, R. W. Schneider, T. Dogaru and S.T. Smith : Review of QNDE, 22(2002), 419.
- 3) 福田祐三, C.コムクリット, 山田外史, 岩原正吉, 脇若弘之, 庄司茂 : 日本応用磁気学会論文誌, 28(2004), 3, 405.
- 4) H. Tian, S. Yamada, M. Iwahara, H. Tooyama, K.Miya : Trans. MSJ, 5(2005), 39.
- 5) H. Tian, S. Yamada, M. Iwahara, H. Watanabe : 日本応用磁気学会学術講演集, 29(2005), 22aB-3.
- 6) 宮腰貴久, D.カスプラザック, 山田外史, 岩原正吉 : 日本応用磁気学会論文誌, 23(1998), 4-2, 1613.
- 7) 中村和倫, 山田外史, 岩原正吉 : 日本応用磁気学会誌, 26(2002), 4, 555.
- 8) たとえば, Orbotech Ltd. : http://www.orbotech.com/products_pcb_main.asp
- 9) たとえば, 日置電機株式会社 : <http://www.hioki.co.jp/jp/product/incircuit/index.html>
- 10) 山田外史, 庄司茂 : 非破壊検査用渦電流検知センサ, 出願特-2003-27735, 2003.7.22.
- 11) K.Chomsuwan, Y.Fukuda, S.Yamada, M.Iwahara, H.Wakiwaka, and S.Shoji : Trans. MSJ, 4(2004), 1, 39.
- 12) K.Chomsuwan, S.Yamada, M.Iwahara, H.Wakiwaka, and S.Shoji : Proc, WCNDT(2004), 16, TS5.3.3.
- 13) 東レリサーチセンター調査研究部門編 : マイクロ接合・配線技術の最新動向, 東レリサーチセンター, (2003), 173.
- 14) 阿部正紀, 半田宏 : 日本応用磁気学会誌, 28(2004), 7, 841.