アモルファスワイヤ C-MOS MI センサ回路による渦電流型金属近接検出

Proximity Sensing for Metals, Using an Amorphous Wire C-MOS MI Circuit

中林宗治・毛利佳年雄

名古屋大学工学研究科, 名古屋市千種区不老町 (464-8603)

M. Nakabayashi and K. Mohri

Graduate School of Electrical Engineering, Nagoya Univ., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya (464-8603)

(1998 年 10 月 15 日受理, 1999 年 1 月 21 日採録)

This paper presents a new proximity sensing method for metals that uses a C-MOS IC MI sensor circuit with an amorphous wire head 30 μm in diameter and 1-2 mm in length with a coil. A sharp pulse field with a rise time of a few nano seconds is generated from the amorphous wire by a coil current and the wire axis, and induces a field with an eddy current at the surface of a metal specimen. The new metal sensor with a micro-size head and quick response is expected to be useful for non-destructive testing (NDT) of micro region in metals.

Key words: magneto-impedance effect, amorphous wire, eddy current effect, metal detection, C-MOS IC circuit

1. はじめに

磁性体, 非磁性体金属などによる原子炉特殊容器や精密機構部品などの非破壊検査 (NDT) の高精度化の要求は, 社会の安全・セキュリティ, 産業生産の信頼性や環境保全などに対する要求の高度化に伴って, 益々厳しくなっている. 金属や金属内の欠陥の検出に関しては, 主として空心コイル励磁・検出方式の渦電流効果によるセンサ (渦電流センサ) が約 50 年来広く使用されてきており, 上記の要求に対して, 表面層の欠陥検出の高精度化を目指し, 表皮厚さを減少させるために励磁周波数の高周波化 (20 MHz 以上) の試みなどが図られているが, コイルの浮遊容量 (変位電流) による計測系の信号線の不安定動作やコイル形状のマイクロ化の困難性などの諸問題に直面しており, 検出技術のブレークスルーが求められている.

一方, 筆者らは, 先にアモルファスワイヤの磁気インピーダンス効果 (MI 効果) を利用した高感度・高速応答のマイクロ磁界センサ (MI センサ) を, C-MOS 回路によって構成し, アモルファスワイヤに鋭いパルス電流を印加する方式によって数十 MHz~数百 MHz の励磁に対応する高周波現象 (表皮効果) を安定に設定する回路手法を見出した¹⁾. 今回, この MI センサ回路において, アモルファスワイヤにコイルを施すことにより, 高周波渦

電流センサの機能を安定に実現できることを見出したので, これを用いた非磁性体試料の距離検出の基礎特性およびその動作機構の考察結果を報告する.

2. 磁気インピーダンス効果

磁気インピーダンス効果 (以下 MI 効果と略す) は, 高透磁率磁性体に高周波電流を通電すると表皮効果により, 外部磁界 H_{ex} の印加によってそのインピーダンス Z が円周方向透磁率 μ_θ の 1/2 乗に比例して敏感に変化する電磁気現象をいう²⁾.

$$|Z| = \frac{a}{\sqrt{2\rho}} R_{\text{dc}} \sqrt{\omega \mu_\theta (H_{\text{ex}})}. \quad (1)$$

ここに, a : ワイヤ半径, ρ : 抵抗率, R_{dc} : 直流抵抗, ω : 角周波数である.

本稿では, 高透磁率磁性体として直径 30 μm , 長さ 2 mm の 475 $^{\circ}\text{C}$ で 1 分間, 2 kg/mm² の張力下アニールされた Fe_{4.35} Co_{68.15} Si_{12.5} B₁₅ アモルファスワイヤを用いた. このワイヤの磁歪は, 飽和磁歪定数 $\lambda = -10^{-7}$ と僅かに負であるため, 磁歪の逆効果と張力アニールにより磁気異方性はワイヤの円周方向を向いていると考えられる.

ワイヤにパルス電流を通電すると, パルスの立ち上がり時に表皮効果を生じ, MI 効果を生じる. 立ち上がり時間 t_r のパルス電流 i は, パルス電流波形として $i = (I_p/2)(1 - \cos 2\pi f t)$, $0 \leq t \leq 1/f$ で近似すると, ワイヤのパルス励磁動作において次式の電流と見なすことができる (Fig. 1).

$$i = \frac{I_p}{2} - \frac{I_p}{2} \cos \left\{ \frac{2\pi}{(2 \sim 3)t_r} t \right\}. \quad (2)$$

ここに I_p はパルスの高さ, f は周波数である. ワイヤ表面

Fig. 1 Pulse current.

磁界 H_0 は

$$H_0 = i / (2\pi a). \quad (3)$$

となる。顕著な表皮効果を生じさせる場合、ワイヤの表皮深さ δ は

$$\delta = \sqrt{\frac{(2 \sim 3)\rho t_r}{\pi\mu_0}} \ll a. \quad (4)$$

となる。パルスの立ち上がりを数 ns 以下とすれば、数十 MHz 以上の高周波に対応し、十分な表皮効果が得られると考えられる。 $t_r = 2$ ns のパルスは、直流バイアスされた約 200 MHz の交流と見なされる。この周波数は、30 μ m 径の零磁歪アモルファスワイヤ（異方性磁界 $H_k = 2$ Oe, 160 A/m）の MI 効果が最大となる周波数である^{2)~5)}。

3. 渦電流効果形センサの原理

Fig. 2 はアモルファスワイヤのみの渦電流による磁界の発生モデルである。ワイヤ電流 I_{wire} による磁界 H_{wire} が対象金属板に印加され、渦電流による反磁界 H_{eddy} がアモルファスワイヤに印加される。しかし、アモルファスワイヤは直径方向には反磁界が大きいので、この H_{eddy} が磁化に与える効果は小さい。

したがって、反磁界が小さいアモルファスワイヤの長さ方向に磁界を発生させる必要があり、ここでは Fig. 3 のように、アモルファスワイヤの周囲にコイルを施して磁界発生を試みた。 R_L をコイル負荷抵抗、 C_s をコイル浮遊容量とする。

ワイヤの円周方向が磁化容易方向となっているため、ワイヤの磁束 Φ もワイヤ円周方向に変化する。そこでコイルとワイヤ円周方向のなす角を θ_{coil} とすると、コイルには電圧 $e_c = N \sin(\theta_{coil}) d\Phi / dt$ が誘起され、コイルの負荷インピーダンス Z_c に対してコイル電流ベクトル

Fig. 2 Eddy current and demagnetizing field induced by a wire current.

Fig. 3 Eddy current and demagnetizing field induced by a coil current.

$$I_{coil} = \frac{j\omega N \Phi_m \sin \theta_{coil}}{\sqrt{2} Z_c}. \quad (5)$$

が発生する。 N はコイル巻数、 Φ_m は Φ の振幅である。

すなわち、Fig. 3 に示すように、ワイヤの磁束変化方向とコイルの巻線方向の微小な角度 θ_{coil} を利用してコイルにパルス鎖交磁束変化を生じさせ、コイルに (5) 式の誘導電流 (I_{coil}) を発生させ、コイル面に垂直方向（ワイヤ長さ方向）にパルス磁界 (H_{coil}) を発生させた。 H_{coil} のコイル端面垂直成分の大きさは、

$$H_{coil} = \frac{N I_{coil}}{2\sqrt{r^2 + l^2}}. \quad (6)$$

である。 r はコイル半径、 l はコイル長さである。以下、 H_{coil} 、 B_{coil} （それぞれ coil によって生じた磁界、磁束）によって金属板にコイルによる渦電流 $I_{eddy-coil}$ が流れ、 $I_{eddy-coil}$ によって $H_{eddy-coil}$ 、 $B_{eddy-coil}$ （それぞれ coil による渦電流によって生じた磁界、磁束）が発生する。この $B_{eddy-coil}$ はワイヤの長さ方向であるため、MI 効果によってワイヤのインピーダンス変化に寄与する。 B_{coil} は B_{eddy} と逆向きであるために、渦電流効果がある場合にはワイヤ長さ方向の見かけの磁束が減少することになる。よってワイヤインピーダンスは減少する。

Fig. 4 はコイル（内径 0.8 mm、外径 0.95~1.15 mm、軸方向の長さ 2 mm、コイル導線の直径 50 μ m、コイルとワイヤのなす角 $\theta_{coil} = 10^\circ$ 、コイル端開放 ($R_L = \infty$)）を施したアモルファスワイヤに、パルス電流（立ち上がり時間 2 ns、半値幅 7 ns、高さ 60 mA、繰り返し周波数 1 MHz）を印加し、アルミ板（縦 100 mm×横 600 mm×厚さ 1 mm）を近づけた場合（0 mm）と遠ざけた場合（50 mm）のコイル電圧である。アルミ板を近づけた場合にはコイルに誘起される電圧の振幅が小さくなっており、コイルに鎖交する磁束が小さくなっていることがわかる。コイル端開放でも軸方向へ磁界が発生する理由は、

(a) Distance: 0 mm

(b) Distance: 50 mm

Fig. 4 Coil voltage with the parameter of the distance from the sensor head to the Al plate.

後述するようにコイルの浮遊容量による閉回路の形成に基づくものと考えられる。

Fig. 5は、コイルを施していないアモルファスワイヤと、コイル（内径 0.8 mm、外径 0.95~1.15 mm、軸方向の長さ 2 mm、コイル導線の直径 50 μ m、コイルとワイヤのなす角 $\theta_{\text{coil}} = 0^\circ$ 、コイル端開放）を施したアモルファスワイヤとに、パルス電流（立ち上がり時間 2 ns、半値幅 7 ns、高さ 60 mA、繰り返し周波数 1 MHz）を印加した場合のワイヤパルス電圧とコイル電圧である。コイルを施したワイヤの電圧では、約 7 ns 周期の波が大きく現れ、コイルにはコイルのインダクタンス L とコイルの浮遊容量 C_s による LC 振動と思われる周期約 35 ns 波形が誘起されている。すなわち、このワイヤとコイルの粗結合により、1 次側（ワイヤ電流）の駆動により 2 次側に LC パラメータ励振が励起されている（ $f = 1 / 2\pi LC_s$ ）と考えられる。コイルが開放されているにもかかわらず、LC 共振しているのはコイル導線間の浮遊容量か、またはコイルに接続したプローブの端子容量（14 ~ 20 pF）によって閉ループができていたためと考えられる。

Fig. 6は、アモルファスワイヤヘッド（30 μ m 径、2 mm 長、コイル 48 ターン、端子短絡（ $R_t = 0$ ）、コイルの中心

(a) Wire voltage without coil.

(b) Wire voltage with coil.

(c) Coil voltage

Fig. 5 Wire and coil voltage.

4. 金属近接検出

軸とワイヤの中心軸のなす角 $\theta_{\text{coil}} = 0 \sim 10^\circ$ ）を C-MOS マルチパイプレータと微分回路によりパルス通電し（高さ 60 mA、半値幅 7 ns、繰り返し周波数 1 MHz）、ワイヤ誘起電圧をピークホールドし、差動増幅器で増幅する実験回路である。この回路のヘッドにアルミ板（縦 100 mm×横 600 mm×厚さ 1 mm）をヘッドの長さ方向と平行になるように配置し、アルミ板とヘッドとの距離 x を変化させて、回路の出力電圧 E_{out} を測定した。ヘッドがアルミ板から十分離れた場合にセンサ出力が零になるように出力アンプの零点調整で設定した。結果を Fig. 7 に示す。 θ_{coil} が大きくなるほど E_{out} の変化が大きくなっている。これは θ_{coil} が大きくなることで（5）式によりコイルに流れる電流が大きくなり、（6）式によりワイヤ長さ方向に誘起される磁束が大きくなるためと考えられる。コイルを巻いていないヘッドはコイルを巻いてあるヘッドに比べて変化が小さかった。変化が零でない理由は、アモルファスワイヤを半田付固定した際にひねり応力が加わり、ス

パイラル磁気異方性が誘導されたためと考えられる。なお、ワイヤ長さ方向の磁束変化を検出する方法として、ひねり応力によるスパイラル異方性の利用も考えられる。距離検出分解能は x が 0~1 mm の範囲で約 5 μm であった。また、 E_{out} が変化する x の範囲が約 4 mm であり、従来型の固定電流駆動型センサに比して約 4 倍に拡大している。

5. アモルファスワイヤ・コイル直列接続形

Fig. 6 に示す回路において、アモルファスワイヤとコイルの部分ワイヤとコイルを直列に接続する形にし、ワイヤのパルス通電電流をコイルに直接通電する方法を試みた ($I_p = 60 \text{ mA}$, 立ち上がり 2 ns, 半値幅 7 ns, 繰り返し周波数 1 MHz, $\theta_{\text{coil}} = 0^\circ$ コイル 48 ターン)。結果を Fig. 8 に示す。コイルとワイヤを直列に接続したもの (①とする。 $R_l = 0$) は E_{out} の変化はほぼ 0.5 mm で終了し、その変化幅はコイルを開放したもの (②とする。 $R_l = \infty$) の 1/4 程度である。これは、②のコイルは弱結合のトランスの 2 次側コイルとして動作し、そのインダクタンス L と浮遊容量 C_s による自由振動のため、アルミ板の渦電流による反磁界の影響を受けやすく、①ではコイル電流がワイヤ電流と同一で固定されていることによると考えられる。①では距離検出分解能は 10 μm 程度である。

Fig. 6 C-MOS MI sensor circuit with a single-wire head.

Fig. 7 Distance detect characteristics of the single-wire head circuit.

Fig. 8 Distance detection characteristics of the coil series head circuit.

7. おわりに

アモルファスワイヤにコイルを施すことによってワイヤ単独の場合に比べて金属板距離検出感度が向上した。コイルを施したものは、金属板距離検出分解能が約 5 μm (検出範囲約 4 mm) のものが実現できた。

ワイヤ電流をコイルに通電すると距離検出可能範囲が狭くなることがわかった。これに比して、コイルの自由振動を利用した場合は金属板距離検出感度が上昇し、検出可能距離が約 4 倍に拡大することが分った。この機構を今後解明する予定である。

参考文献

- 1) 菅野崇樹, 毛利佳年雄: 日本応用磁気学会誌, 21, 645 (1997).
- 2) L. V. Panina, K. Mohri, K. Bushida and M. Noda: *J. Appl. Phys.*, 76, 6198 (1994).
- 3) K. Mohri: *Mater. Sci. Eng.*, A185, 141 (1994).
- 4) T. Kitoh, K. Mohri and T. Uchiyama: *IEEE Trans. Magn.*, 31, 3137 (1995).
- 5) K. Mohri, L. V. Panina, T. Uchiyama, K. Bushida and M. Noda: *IEEE Trans. Magn.*, 31, 1266 (1995).
- 6) 郡司智行, パニナ・ラリサ, 毛利佳年雄: 日本応用磁気学会誌, 21, 793 (1997).