

MI マイクロ磁気センサの開発システム ——産学官連携のありかた——

Development System for MI Micro Magnetic Sensors

毛利佳年雄 名古屋大学工学研究科電気工学専攻

K. Mohri, Department of Electrical Eng., Nagoya University

Principles and mathematical expression of the magneto-impedance (MI) effect in amorphous wires and thin films and the construction of MI micro magnetic sensors using CMOS IC chips are summarized. The CMOS IC MI sensor with 1–2 mm long amorphous wires show a resolution of several microgauss with ± 1.5 Oe full scale (FS), a response speed of up to several MHz, a power consumption of about 10 mW, and a zero drift of less than 0.02%/FS $^{\circ}\text{C}$ at temperature between RT and 80 $^{\circ}\text{C}$ when a pulse-synchronous circuit with analog switches is used.

MI sensors are already in practical use as environmental electro-magnetic wave detectors, electro-magnetic wave analyzers with a FFT function, and car speed sensors for car navigation systems in cars imported into the Japan.

The paper also introduces MI sensor development systems supported by the Japanese government through the MI sensor consortium established by the Japanese Science and Technology Corporation (JST) and the Proposal-Based Promotion Program on Immediate-Effect R&D established by the New Energy Development Organization (NEDO).

Key words: magneto-impedance effect, skin effect, amorphous wire, MI micro magnetic sensor, CMOS IC

1. はじめに

筆者は、今から6年前の1993年のRQ-8国際会議(8th International Conference on Rapidly Quenched Metals, Sendai)において、アモルファスワイヤの「磁気インピーダンス効果(Magneto-Impedance (MI) effect)」と命名した電磁気効果を発表し、マイクロ寸法のヘッドをもつ磁界検出感度が高くかつ高速応答の新しい磁界センサができることを提案した¹⁾。これを契機に、翌年1994年のインターマグ会議(International Conference on Magnetism '94, Albuquerque)では、Magneto-Impedanceのセッションが設定された²⁾。

その当時の応用磁気分野では、従来の誘導型磁気ヘッドに代わって磁気抵抗効果(MR)ヘッドがコンピュータハードディスク用ヘッドへ採用され始めた時期であり、さらに高感度の磁気ヘッドを目指して、1988年にフランス

と米国で同時に発表された巨大磁気抵抗(GMR)効果によるヘッドの可能性が追求され始め、IBM AlmadenのSperiousらがスピナルブなる商標のGMRヘッドの概念を提案し始めた頃であった。

MI効果は、基本性能ではGMR効果より高感度であることや、情報社会における産業技術の流れが多くの分野で電子制御システムの知能化を必要とし、そのキーデバイスとしての高感度のマイクロセンサを必要としていることなどの社会的要因により、国際会議や技術開発のレベルにおいて注目を集めるようになった。米国や日本では、MIマイクロ磁気センサの開発研究と実用化が展開され、ヨーロッパでは、MI効果の物性的研究が年々盛んになり、国際的研究プロジェクトチームがいくつか結成されている。

そこで、MIマイクロ磁気センサの基礎と応用に関して、1995年に本誌に解説文を著した³⁾。

我が国においては、産業の空洞化やバブル経済の崩壊後、政府出資金によって新しい技術を育成する技術戦略政策が採られるようになった。

その結果、MIマイクロ磁気センサの開発が一つのターゲットとなり、1997～98年の科学技術庁、科学技術振興事業団による先端技術展開試験制度(ハイテクコンソーシアム、名古屋大学と企業7社)⁴⁾、1998～2000年の通産省、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の即効型最先端技術開発提案公募プロジェクト(名古屋大学と企業1社の共同研究体)、1999～2003年科学技術振興事業団委託開発(名古屋大学と企業1社)、同独創的技術育成事業(1999年)などによって開発が多面的に進められている。

企業による実用化も1997年から進展し、ハンディ電磁波センサ、外国車カーナビゲーション用車速センサ、FFT機能電磁波解析器などが市販されている。

一方、国立大学においては、国全体の行政改革の一環としてここ数年、教養部の廃止・大学院重点化の組織改革・大学教育改革が全国的に実施されており、この流れの中で、大学は大学における研究成果の社会還元、産学連携、産学官連携などを推進するよう求められている。筆者は、国立大学で研究を享受している者の一人として、MIマイクロ磁気センサを介して、社会への貢献を目指しており、本稿では編集委員から求められた課題に沿って、1995年

以降の MI 効果と MI マイクロ磁気センサの発展方向の要点を概説するとともに、国立大学と産学官連携のありかたに関する私見も述べさせていただくことにする。

2. MI 効果

細長い高透磁率合金（電気抵抗率 ρ 、長さ l 、断面積 S ）に直流または低周波電流を通電すると、その両端間の電圧は 99% 程度が電気抵抗 $R_{dc} = \rho l / S$ によるオームック電圧であるので、外部から磁界を印加しても工学的に意味のある電圧の変化はほとんどない。

これに対して、高周波電流（角周波数 ω ）またはパルス電流を通電すると、磁性合金内に表皮効果が生じ、電流通路の深さ（表皮深さ $\delta = \sqrt{2\rho/\omega\mu}$ 、 μ ：電流による磁界方向の透磁率）が外部磁界 H_{ex} による μ の変化によって変えられるので、電気抵抗とインダクタンスの変化が同レベルになり、インピーダンス Z の大きさ $|Z|$ が H_{ex} によって変化することになる。

このインピーダンスの大きさの変化率は、アモルファスワイヤでは 1 エルステッド (1 Oe, 79 A/m) 当たり 100% (100%/Oe) が容易であり、いわゆる超高感度であるので、この電磁気現象を「磁気インピーダンス (MI) 効果」と称している（ヨーロッパでは、巨大磁気インピーダンス (GMI) 効果と呼ばれている）。電気回路の交流理論により、複素表示（ベクトル）による電圧 V 、電流 I の関係は $V = Z(H_{ex})I$ 、 $|V| = |Z(H_{ex})||I|$ であるので、 $|I|$ を一定にすれば、この MI 効果により $|V|$ が H_{ex} によって変化する。この MI 効果の最大の特徴は、通電方向（磁性体の長さ方向）と直角の周回方向を励磁するために磁極が発生せず、したがって励磁に関して反磁界が発生しないため、磁性体の長さを 1 mm 以下（マイクロ寸法）に短くしても MI 効果の感度が劣化しないことである。

また、高周波電流が磁気変調のキャリアとなるため、MHz オーダーの応答の早い磁気センサが構成されることや、通電による励磁効率が高いため消費電力が非常に小さく、後述するように CMOS IC との組み合わせにより、10 mW 程度の微小消費電力の携帯型磁気センサが容易に構成されるなどの多くの特徴を兼ね備えたマイクロ磁気センサが実現される^{5)~10)}。

アモルファスワイヤなどの半径 α の円形断面細線形状磁性体のインピーダンスは、マクスウェル方程式を用いて、ベッセル関数の比による次式で表される⁵⁾。

$$Z = (\alpha/2\sqrt{2\rho}) R_{dc} k \alpha J_0(k\alpha) / J_1(k\alpha) \quad k = (1-j)/\delta \quad (1)$$

$$\approx R_{dc} + j\omega L, \quad L = \mu l / 8\pi \quad \text{for } \delta \gg \alpha \quad (2)$$

(低周波励磁)

$$\approx (\alpha/2\sqrt{2\rho}) R_{dc} (1+j) \sqrt{\omega\mu} \quad \text{for } \delta \ll \alpha \quad (3)$$

(高周波励磁)

高周波励磁の場合、磁壁の共振（共振角周波数 ω_{wo} ）の影響が現れる場合は (3) 式において

$$\mu = \mu_{dc} / (1 + j\omega/\omega_{wo}) \quad (4)$$

となる。さらに高周波でスピン共鳴の影響が現れる場合は、(3) 式において

$$\mu = \frac{\mu_{wo}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{wr}} - \left(\frac{\omega}{\omega_{wo}}\right)^2} + \frac{\mu_{so}\left\{1 + j\frac{\omega}{\omega_{r2}} - \left(\frac{\omega}{\omega_{so}}\right)^2\right\}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{r1}} - \left(\frac{\omega}{\omega_{so}}\right)^2} \quad (5)$$

ここに、 μ_{wo} は磁壁移動による準静的線形化透磁率、 μ_{so} はスピン回転による準静的線形化透磁率、 ω_{wr} は磁壁移動の緩和角周波数、 ω_{wo} は磁壁の慣性を考慮した共振角周波数 ($\omega_{wo} > \omega_{wr}$) である⁶⁾。

表皮効果が生じ、磁壁の共振やスピン共鳴の影響が無視できる場合は、(3) 式より

$$|Z| \approx (\alpha/2\sqrt{\rho}) R_{dc} \sqrt{\omega\mu(H_{ex})} \quad (6)$$

また、薄膜（厚さ $2\alpha \ll$ 幅 w 、長さ l ）のインピーダンスは⁶⁾、

$$Z = (\omega\mu\delta l / 2(1+j)w) \coth((1-j)\alpha/\delta) \quad (7)$$

$$|Z| \approx (l\sqrt{\rho}/2w) \sqrt{\omega\mu(H_{ex})} \quad \text{for } \delta \ll \alpha \quad (8)$$

3. MI 効果ファミリー

Fig. 1~7 に、アモルファスワイヤ（as cast 120 μm 径から室温線引き 30 μm 径とし、2 kg/mm² の張力アニールで円周方向に磁化容易方向を誘導したワイヤ；磁歪 $\lambda = -10^{-7}$ 、 $B_s = 6.8$ kG、 $H_k \approx 1$ Oe、ユニチカ(株)中央研究所に作製依頼）の種々の MI 特性を示す。

Fig. 1 は、周波数 $f = 1$ MHz、振幅 5 mA、の正弦波交流を通電した場合の、ワイヤ（5 mm 長）の長さ方向に印加したヘルムホルツコイルによる直流磁界 H_{ex} に対するワイヤ両端間電圧の振幅 E_w の測定結果である。 E_w の減少率は、 H_{ex} の正負に対して対称であり、約 -40%/Oe である。

表皮効果は $f > 50$ kHz で生じ ($\mu(H_{ex} = 0) \approx 10^4$)、 $f = 1$ MHz では主として円周方向の磁壁の移動で円周方向の磁束変化が生じており、 H_{ex} によって磁化がワイヤ長さ方向

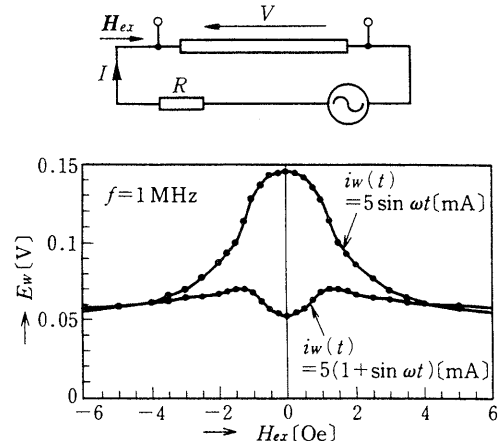


Fig. 1 MI characteristics in an amorphous wire for f of 1 MHz.

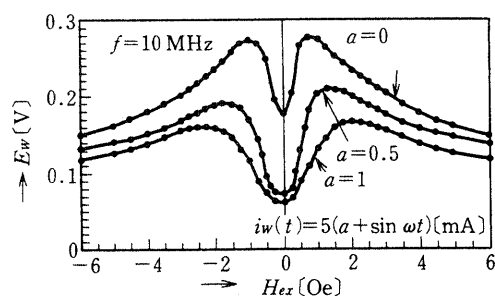


Fig. 2 MI characteristics in an amorphous wire for f of 10 MHz (with or without dc bias).

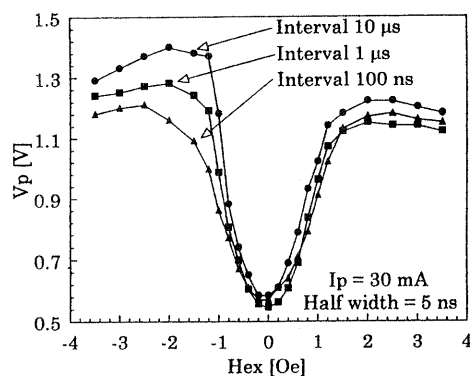


Fig. 3 Pulse magnetization MI characteristics in an amorphous wire.

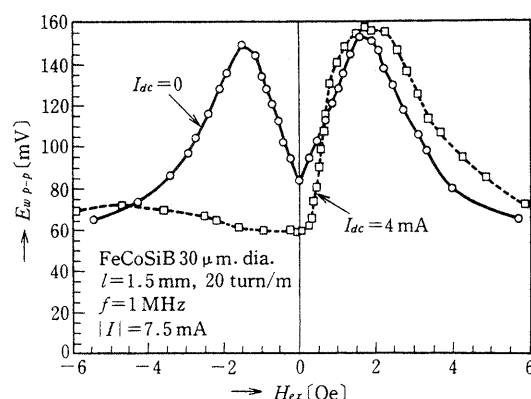


Fig. 4 Asymmetrical MI characteristics in a twisted amorphous wire.

に傾斜することによって μ が単調に減少していき、(3)式によって E_w が減少する。

Fig. 2 は、 $f=10$ MHz の場合である。Fig. 1 と同様に H_{ex} の正負に対して対称であるが、 $|H_{ex}| < H_k$ の範囲では磁壁移動と磁化回転によって E_w は $|H_{ex}|$ とともに急激に増加していき、 $H_{ex} \approx 1$ Oe で最大値を示し、 $|H_{ex}| > H_k$ では磁化回転によって $|H_{ex}|$ の増大とともに緩やかに減少していく。正弦波交流に直流電流を重畳すると、直流電流による円周方向の直流磁界のため磁壁が消失して単磁区となり磁化回転のみで磁束変化が生じるので、 E_w の変化率は 120%/Oe に達する。

Fig. 3 は、Fig. 2 の MI 効果を $l=2$ mm のワイヤにおいてパルス電流通電で実現したものである。 E_w の変化率は

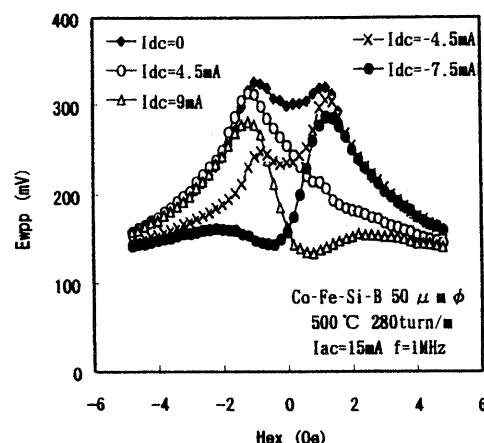


Fig. 5 Asymmetrical MI characteristics in a torsion annealed amorphous wire.

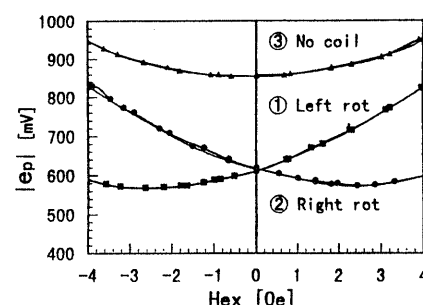


Fig. 6 Asymmetrical MI characteristics in an amorphous wire through which a pulse current is applied with a wire coil.

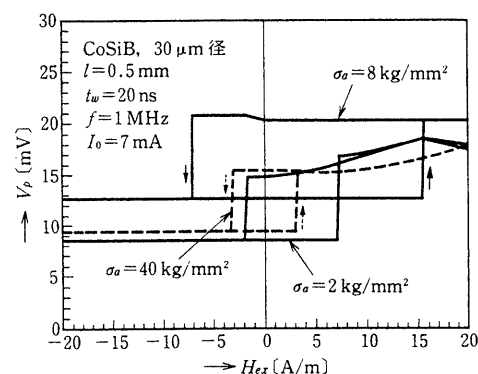


Fig. 7 Bistable MI characteristics in high tension annealed amorphous wires.

100%/Oe である¹⁵⁾。

パルス電流波形の高さを I_p 、立ち上がり時間を t_r とおくと、励磁に関してはパルス電流 $i_p(t)$ は

$$i_p(t) = (I_p/2)(1 + \sin(2\pi t/nt_r)), \quad n \approx 2 \quad (9)$$

と同等である。

したがって、 $t_r=5$ ns、 $I_p=10$ mA のパルス電流は、MI 効果に関しては、 $f=100$ MHz、振幅 5 mA の正弦波交流に 5 mA の直流電流が重畳した通電電流と同等である。

このパルス通電による MI 効果は、CMOS インバータ回路によるパルス通電によって容易に実現されるので、消費電力の微小な携帯型の MI マイクロ磁気センサの構成の基

礎となっている。この CMOS IC による MI センサは、ASIC 化に適し、マイクロコンピュータとの整合が良いので応用展開の自由度が高い。

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 は、 H_{ex} の正負に対して非対称の MI 効果を生じさせる方法を示したものである。リニア磁界センサを構成する場合、対称 MI 特性では適当な直流バイアス磁界を印加して E_w が H_{ex} に比例する領域の動作点を設定する必要があるが、このバイアス磁界の発生に要する電力が数十 mW であるため、携帯型 MI センサの構成の障害になる場合が多い。この非対称 MI 効果素子を一对用いることにより、バイアス磁界の不要なリニア磁界センサを構成することができる。Fig. 4, Fig. 5 は、ワイヤにスパイラル磁化を誘導する方法、Fig. 6 は、スパイラル磁界を生じさせる方法によって非対称 MI 効果を得ている。

Fig. 4 は、Fig. 1 のアモルファスワイヤにひねり応力を印加した状態でワイヤ両端を半田づけで固定（ワイヤの両端は鋼細線でプリント基板に機械的に固定した上で半田づけ）した場合の MI 特性である。ひねり応力による磁歪の逆効果により、ワイヤ表面にはひねり応力と直角方向にスパイラル磁気異方性が誘導されている。このワイヤに正弦波交流のみを通電した場合は、 H_{ex} のスパイラル異方性方向成分 H'_{ex} に加算される通電電流による円周磁界の直流成分は発生しないので、Fig. 2 と同様な対称 MI 特性が得られるのみであるが、正弦波交流に直流電流を重畳させると、この直流による円周磁界のスパイラル異方性方向成分が H'_{ex} の正負に対して加算および減算作用を生じて、非対称 MI 効果を生ずる。このとき、対称 MI 効果の変化率 50%/Oe に対して非対称 MI 効果では 130%/Oe に増加している⁷⁾。この非対称 MI 効果は、(9) 式によりパルス通電によっても得られる。

Fig. 5 は、Fig. 4 のスパイラル異方性をひねり応力下熱処理によって残留させた場合の非対称 MI 効果である⁸⁾。Fig. 4 の場合は、応力緩和による感度ドリフトが生じる可能性があるが、熱処理後は安定化し、ワイヤ両端の半田づけによる電極形成の信頼性が向上する。Fig. 4, Fig. 5 共に、ひねりの方向を逆にするか、通電電流の直流成分の方向を逆にすれば、MI 効果の非対称性が逆になる。

Fig. 6 は、ワイヤ通電パルス電流をワイヤに周回巻した導線コイルに直列に通電することにより、ワイヤ通電電流による円周磁界とコイル電流によるワイヤ長さ方向磁界のベクトル和によって、ワイヤのスパイラル方向にパルス磁界を生じさせ、非対称 MI 効果を得た結果を示す⁹⁾。この方法は、Fig. 4, Fig. 5 のようにワイヤにひねり応力を与える必要はないが、コイルを要する。

Fig. 7 は、40 kg/mm² 以上の強い張力でアニールを施したワイヤでは、円周方向の磁壁が磁壁エネルギー密度が大きいため跳躍的に長さ方向に伝播する大バルクハウゼン効果 (Large Barkhausen effect) が生じることを利用し

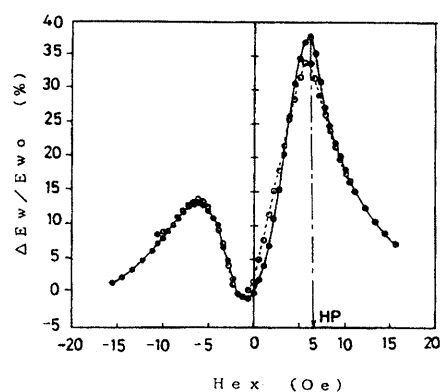


Fig. 8 Asymmetrical MI characteristics in a thin film with cross anisotropy.

た、パルス通電による双安定 MI 効果 (bistable MI effect) である。非破壊メモリ効果素子やスイッチ方式の近接センサなどに応用される¹⁰⁾。

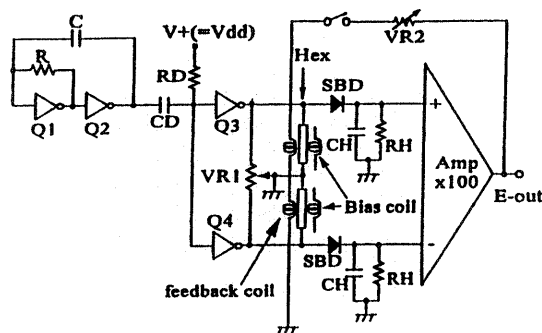
これらの MI 効果ファミリーは、感度が 1/2 以下ではあるが、薄膜によっても実現される^{11)~13)}。薄膜によるスパイラル磁化は、2 層の薄膜で異方性を交差させることによって実現される。Fig. 8 は、直交する異方性を磁界中スパッタで形成した FeCoB アモルファススパッタ膜の 2 層構造によりスパイラル異方性を実現し、非対称 MI 効果を得た結果を示す¹⁴⁾。

次に、以上に示した MI 効果素子をヘッドにして、電子回路によりマイクロ磁気センサを構成した場合の特徴と要点を述べる。

4. MI マイクロ磁気センサの電子回路構成

MI マイクロ磁気センサを構成する場合の留意点は、マイクロコンピュータとの組み合わせの観点から、以下のようにならなければならない。

- ① ヘッド寸法は 1 mm 程度にする。記録磁気や磁極磁界の検出では、ヘッド寸法は微細であるほど検出精度（信号対雑音比 S/N）が高い。しかし、半導体センサ回路の安定な動作の面では適度のインピーダンスの大きさが必要であり、20~30 μm 径ワイヤでは 1~2 mm 長のヘッドが使用しやすい。10 μm 径以下のワイヤでは MI 効果が低下する。
- ② CMOS IC チップマルチバイブレータによるパルス励磁回路により、低消費電力形で小型（薄型）・軽量のセンサ回路を構成する。この回路方式は、ハイブリッド IC, ASIC, カスタム IC へ発展する基礎になる。電源電圧は、最近のマイクロコンピュータが DC4V 程度であり、乾電池などの同一電源でセンサとマイクロコンピュータを動作させることができるので、知能化デバイスへの発展を期することができる。
- ③ アモルファスワイヤは、高感度の MI 効果を発揮する反面、ワイヤ両端の電極形成に工夫を要する。この



Q1, Q2, Q3, Q4: 74AC04 (C-MOS inverter) C: 100 pF R: 20 kΩ
CD: 100 pF RD: 200 Ω VR1: 200 Ω VR2: 1kΩ
SBD: 1SS97 CH: 2000 pF RH: 51 kΩ

Fig. 9 A MI micro magnetic sensor using a CMOS IC multivibrator, schottky barrier diodes and 2-mm long amorphous wires.

ため、ワイヤ両端をスズメッキ細線や銅細線で機械的に固定した上で低温半田づけを行う少量生産方法や、ボンディング法で MI チップの量産体制を確立する方法が開発されている。

Fig. 9 は, CMOS インバータを 6 個内蔵した市販の IC チップを使用し, 2 個のインバータでマルチバイブレータ形パルス励磁回路を構成した MI センサ回路を示す¹⁵⁾. マルチバイブレータの方形波電圧は微分回路でパルス電圧 (t_r は数 ns) に変換され, 2 個のインバータで増幅整形されて 2 個の MI 素子に通電され表皮効果を生じる. その誘起パルス電圧はショットキーバリアダイオード (SBD) で整流された後, ピークホールド回路で直流電圧に変換され, 2 個の MI 素子の誘起電圧の差がアンプで増幅されてセンサ出力電圧 E_{out} になる.

2 個の MI 素子には、Fig. 6 の方式によるパルス磁界バイアスが印加され、バイアスコイルの巻方向を組み合わせることにより、2 個の MI 素子に印加される H_{ex} の和を E_{out} にすることも、それぞれの印加磁界の差を E_{out} (磁界差センサ) にすることもできる。この対称型回路構成は、コモンモードノイズを相殺する高精度センサ回路である。

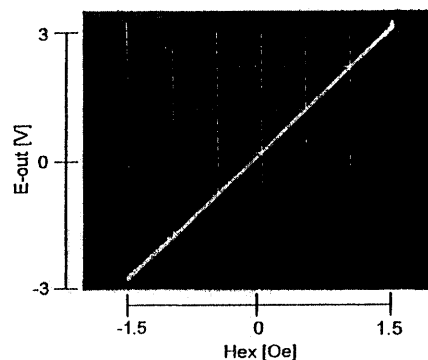
また、 E_{out} に比例した電流を帰還可変抵抗 R_f および MI 素子に周回巻した帰還コイル（コイル高さ l_c 、巻回数 N_f ）に通電すると、励磁回路→検波回路→アンプ→帰還回路の一巡伝達関数の利得 G を 1 に比べて十分大きく設定しておけば、磁界の負帰還作用により、

$$E_{\text{out}} \doteq (l_c/N_f)R_f H_{\text{ex}} \quad (10)$$

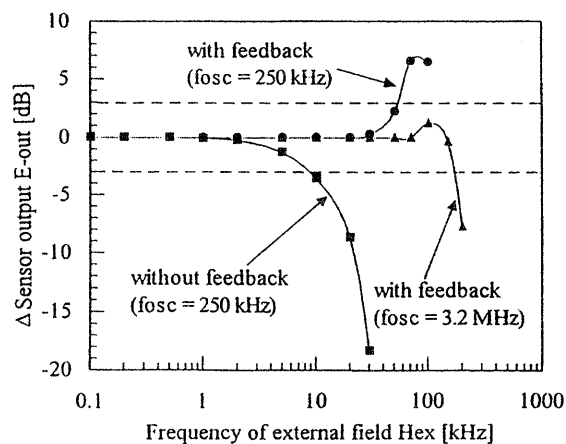
が成り立つ。この強い負帰還作用により、直線性の良い、 H_{ex} の増減に対するヒステリシスのない、感度が R_f によって自由に調整される量産型の磁界センサとなる。

負帰還によって、応答速度も大幅に向上する. すなわち、負帰還を施さない場合のセンサの遮断周波数を f_c とおくと、負帰還を施したセンサ全体の遮断周波数 f_n は、

$$f_n = f_c(1 + |G|) \quad |G| \gg 1 \quad (11)$$



(a)



(b)

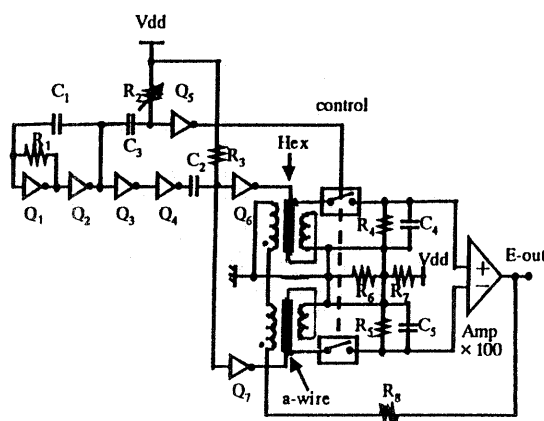
Fig. 10 Field detection characteristics in (a) and signal frequency characteristics in (b) of the MI sensor as illustrated in Fig. 9.

となるので、応答速度を容易に 10 倍以上にすることができ¹⁶⁾。

Fig. 10 は、Fig. 9 の回路で MI 素子として $30\text{ }\mu\text{m}$ 径、 2 mm 長アモルファスワイヤを用いた場合の磁界検出特性であり、(a) は磁界検出特性、(b) は周波数特性である。この特性を基礎に、mG 単位のデジタル表示で単 3 電池で連続 7 日間動作するハンディ地磁気センサが試作されている。

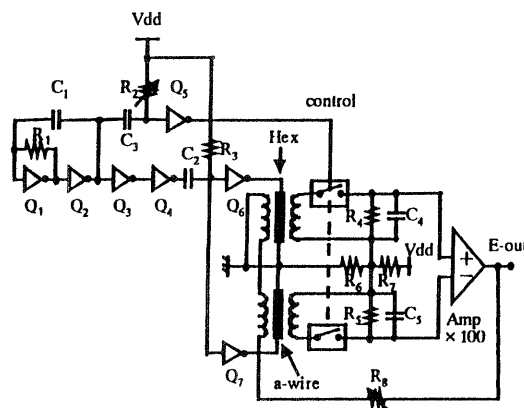
センサの零点ドリフト ($H_{cx}=0$ に対する E_{out} の時間変動) の主原因であるセンサの温度特性は、負帰還によっても十分に安定させることは困難である。Fig. 9 のセンサは環境温度の変動が小さい場合は、SBD の温度安定性が不十分なため、零点ドリフトは室温 (RT) から 80°C までの温度変化で FD の数 % 発生する。自動車応用などの環境の苛酷な分野には、適用しにくい。

Fig. 11 は, Fig. 9 の回路の SBD をアナログスイッチに置き換えた温度安定性を改善した MI センサ回路である. MI 素子の誘起パルス電圧を同期検波するとともに, アナログスイッチの内部抵抗を利用して安定な回路動作を実現している. $RT \sim 80^{\circ}\text{C}$ で零点ドリフトは, 約 $0.6\%/FS$



Q₁, Q₂, Q₃, Q₄, Q₅, Q₆, Q₇: 74AC04 (C-MOS inverter),
AMP: AD524, Analog Switch: 74HC4066,
R₁: 5.1 k Ω , R₂: 3 k Ω , R₃: 200 Ω , R₄, R₅: 51 k Ω ,
R₆, R₇: 2 k Ω , R₈: 3 k Ω , C₁, C₂, C₃, C₄, C₅: 100 pF

Fig. 11 A MI micro magnetic sensor using a CMOS IC multivibrator, analog switches and 2-mm long amorphous wires.



Q₁, Q₂, Q₃, Q₄, Q₅, Q₆, Q₇: 74AC04 (C-MOS inverter),
AMP: AD524, Analog Switch: 74HC4066,
R₁: 5.1 k Ω , R₂: 3 k Ω , R₃: 200 Ω , R₄, R₅: 51 k Ω ,
R₆, R₇: 2 k Ω , R₈: 3 k Ω , C₁, C₂, C₃, C₄, C₅: 100 pF

Fig. 12 A MI micro magnetic sensor using a CMOS IC multivibrator, analog switches for coil induced pulses and 2-mm long amorphous wires.

(0.017%/FS $^{\circ}$ C) である。

Fig. 12 は, Fig. 11 の回路で, MI 素子の誘起パルス磁束と鎖交する MI 素子周巻コイルの誘起パルス電圧を, アナログスイッチとピークホールド回路で検波するコイル電圧同期検波方式の MI センサ回路を示す¹⁷⁾。張力アニールによって円周方向に磁気異方性を誘導したアモルファスワイヤでは, コイル誘起パルス電圧の大きさは H_{ex} に正比例するので, バイアス磁界が不要である。

Fig. 13 は, Fig. 12 の MI センサ (30 μ m 径, 2 mm 長アモルファスワイヤ 2 本に 30 ターンずつのコイル巻方式ヘッド構成) の磁界検出特性, 周波数特性, 温度ドリフトの測定結果である。パルス同期検波方式と負帰還回路により, 遮断周波数はマルチバイブレータ発振周波数 (1 MHz)

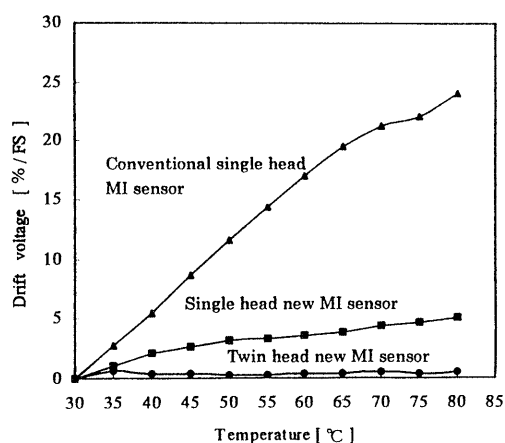
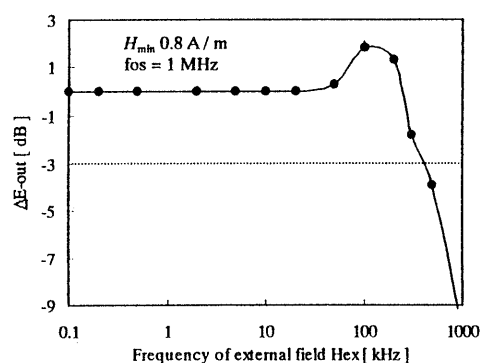
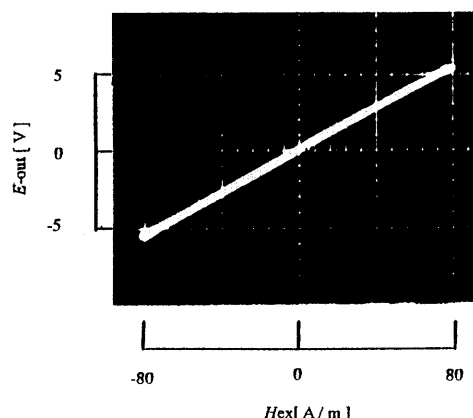


Fig. 13 Characteristics for field detection in (a), the output voltage *vs.* signal frequency in (b), and temperature stability in (c) for the MI sensor illustrated in Fig. 12.

の 1/2 程度であり, Fig. 10 の整流方式より高速応答になっている。温度安定性は, 0.002%/FS $^{\circ}$ C ($RT \sim 80^{\circ}$ C) であり, 自動車応用などの苛酷な環境分野に適用が可能である。

Fig. 9~13 の MI センサ回路の出力端子を CMOS インバータ発振回路の電源回路に直列に接続すると, 数十 MHz 帯の周波数変調回路となり, 無線通信型の磁界センサが構成される¹⁸⁾。

5. MI マイクロ磁気センサの国産開発制度

[コンソーシアム]

MI センサを我が国独自技術として開発することが, 科

学技術庁、科学技術振興事業団 (JST) で決定され、1997 年 10 月～98 年 3 月の「先端技術展開試験制度」により、アモルファスワイヤによる MI マイクロ磁気センサハイテクコンソーシアムとして、名古屋大学および企業 7 社で短期集中型で実施された⁴⁾。

この展開試験制度の実施の条件は、大学研究者が国有特許（出願）を保有していることである。その上で、参加企業は MI センサに関する独自の開発テーマを設定し、JST 50%、企業 50% の予算を使用して、大学研究者のコンサルタントを受けつつ成果を上げるシステムである。このコンサルタントは、企業の若い開発技術者が名古屋大学においてアモルファスワイヤ CMOS IC MI センサを 3 日程度で試作し、それぞれの企業でセンシング実験を行うことが中心となった。CMOS MI センサは誰でも簡単に作製でき、かつ確実に動作させることができる。

また、大学研究者にとって、特許の意味は多彩であるが、研究の幅を広げるための条件である点に、最大の意義があるといえる。

企業 7 社の独自テーマは、アモルファスワイヤ MI 素子開発、CMOS MI センサ高密度実装技術、ハンディ MI センサ（脳腫瘍位置センサ）、ハンディ電磁波センサ、車載用 MI センサ（道路マーカー磁石検出センサ）、薄鋼板ピンホール検出システム、ロボット用加速度センサ、電力変換器電流センサ、であった。これらの成果は、1998 年 7 月の電気学会マグネティックス研究会（箱根）で全メンバーが公表した⁴⁾。

このコンソーシアムは、半年間の短期集中型産学官連携プロジェクトであるが、全メンバーが成果を十分上げ、大変楽しいものであった。3 者のメリットは、以下のようにまとめられる。

- ① 「産」は、50% の国の資金を使用することができ、開発テーマの設定と同様に、使用に関する規制がほとんどなく、極めて自由度が高い。大学のコンサルタントをいつでも受けることができる。
- ② 「学」は、大学における研究成果を、関心の高い企業グループとともに発展させ、迅速に社会に還元することができる。国立大学の工学研究者は、成果が産業界や社会に生かされることに強い喜びを覚える。コンソーシアムでは、研究室の中で企業技術者とともに実験や打ち合わせを行うことで、大学院生の実学意識が高まり、研究の意欲が助長される。
- ③ 「官」は、新規産業の創成につながる技術の育成事業を、大学と企業のグループが活用することで、国の施策を発展させることができる。

最後に、コンソーシアムを成功裏に実施するための要点は、大学側が企業の豊かな技術開発力を信頼し、技術者全員に誠意をもって対処することと、国の制度により、国民の税金を有効に使用する観点を忘れないことである。

〔提案公募型研究開発プロジェクト〕

上述のコンサルタントの成果を基礎に、筆者は MI センサの応用展開を構想し、1998～2000 年の通産省新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の即効型最先端技術開発提案公募プロジェクト「都市広域モニタリング用可搬設置型高感度マイクロ磁気センサの開発」を現在企業 1 社との研究共同体で実施中である。

愛知県は、トヨタ自動車があるため、国家戦略プロジェクトである高度道路交通システム (ITS) を 2005 年の日本国際博覧会（愛知万博）および中部新国際空港プロジェクトとからめて、関心の高い地域である。筆者らのプロジェクトは、直接 ITS とは関係しないが、名古屋市という高度情報化大都市の交通動態を、MI センサ道路鋏によって高度・知能化モニタリングシステムによって把握し、広域公害、省エネルギー、安全、防災、環境などの都市固有の諸問題の緩和を目指している。このプロジェクトのサブテーマは、車両検出のほか、地磁気変動検出による地震予知、地圏伝播電磁波の検出による環境電磁波の調査がある。

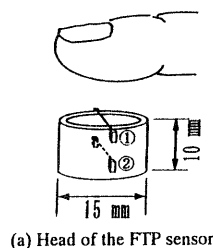
大学において、政府出資金による大型プロジェクトを進めるための要点は、スタート時点で専門家との打合せ会をもち、客観的な方向を設定し、独善的にならないことが必要である。本プロジェクトの開始時には、愛知県警察本部交通管制課のコメントを十分聞き、開発目標を設定している。

高感度 MI センサ開発のポイントは、アモルファスワイヤによる量産型の MI チップおよび CMOS IC によるカスタム IC 化であるが、1999～2002 年の JST 委託開発制度で進められている。

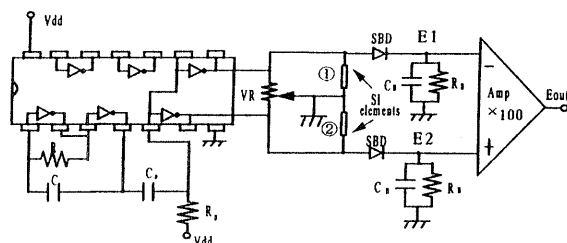
6. 応力インピーダンス (SI) 効果と SI センサ

MI 効果の基礎式 (6) は応用発展性の高い式である。すなわち、透磁率 μ を変化させる物理量や化学量はすべて MI 効果と同じ原理で、高感度に検出できることになる。20 μm 径アモルファス磁歪ワイヤ (CoSiB) を用いれば、表皮効果と応力磁気効果によりひずみゲージ率が 2,000～4,000 の超高感度の応力センサ（ひずみゲージ）が構成される（これを応力インピーダンス (SI) 効果と称する）¹⁹⁾。抵抗線ひずみゲージや半導体ひずみゲージ（圧力センサ）のゲージ率がそれぞれ、2 および 150 である。CoSiB アルモファスワイヤは、機械的強さの最大抗張力が 4 GPa あり、ピアノ線より強く合金中最大であるとともに、95% の弾性変形を示す強靱弾性体であることや、耐食性がステンレス以上であるので、応力印加応用に特に適している。

Fig. 14 は、CMOS IC マルチバイブレータによるパルス励磁方式の SI 効果応力センサ回路である。2 本の 20 μm 径 CoSiB 負磁歪ワイヤを使用し、1 本は基準ヘッド、他の 1 本に応力を印加し、それぞれのパルス誘起電圧の検波電圧を差動アンプに印加して、出力電圧に変換する。



(a) Head of the FTP sensor



$C: 100 \text{ pF}$, $R: 20 \text{ k}\Omega$, $C_D: 100 \text{ pF}$, $R_D: 200 \Omega$,
 $VR: 3 \text{ k}\Omega$, $C_H: 0.047 \mu\text{F}$, $R_H: 51 \text{ k}\Omega$, $V_{dd}: 3 \text{ V}$

Fig. 14 Stress-impedance sensor using amorphous magnetostrictive wires combined with a CMOS IC multivibrator.

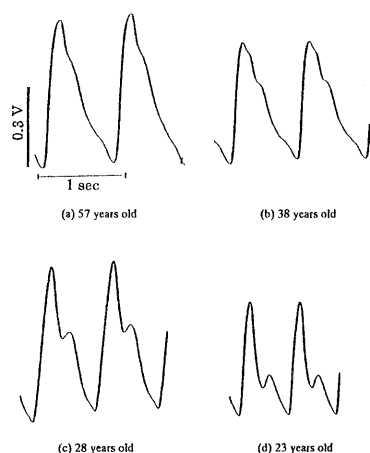


Fig. 15 Detection of finger-tip blood vessel pulsation using the SI sensor illustrated in Fig. 14.

Fig. 15 は, Fig. 14 の SI センサの高感度性を利用した指尖毛細血管脈波の検出結果である. プラスチック円筒の直径方向に固定したアモルファスワイヤに指腹を接触させて検出する. 指尖脈波は, 赤外線透過型センサでも検出できるが, その他の手首や肘などの赤外線が透過しない部位の血流の検出はできない. SI センサは, 血管の血流圧力を検出するので, 任意の部位で脈波が検出でき, 2 点間の脈波から脈波速度も測定できる. 喫煙実験では, 喫煙中および喫煙直後で脈拍数が上昇し脈波の強さが減少するとともに, 静脈反射期に細動が現れることや, 手首と指尖間の脈波速度が上昇するなどの現象が計測された²⁰⁾.

7. おわりに

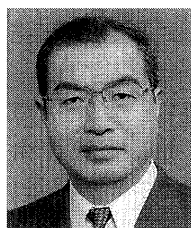
国立大学と社会の関係は, ここ数年間で急展開してい

る. 教養部の廃止・四年一貫教育(全学共通教育)による情報を核にした新たな教養教育(人間性教育), 大学院重点化とその後の社会に開かれた研究教育体制(産学官連携)の確立など, 国立大学全体が生まれ変わることが要求されている. この中で, 大学の工学研究者は研究の幅を広げ, 新たなコンセプトを社会に提示する責務を負っている.

参考文献

- 1) K. Mohri: *Mater. Sci. Eng.*, **A185**, 141 (1994) (invited).
- 2) L. V. Panina and K. Mohri: *J. Appl. Phys.*, **76**, 6198 (1994) (invited).
- 3) 毛利: 日本応用磁気学会誌, **19**, 847 (1995).
- 4) 科学技術振興事業団: 先端技術展開試験制度 '97 (MI マイクロ磁気センサ産官学コンソーシアム) 成果報告書(名古屋大学工学研究科電気工学専攻) (1998).
- 5) L. V. Panina and K. Mohri: *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 1189 (1994).
- 6) L. V. Panina and K. Mohri: 日本応用磁気学会誌, **19**, 265 (1995).
- 7) T. Kitoh, K. Mohri, and T. Uchiyama: *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 3137 (1995).
- 8) 小笠原, 川島, 上, 毛利: 電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-98-85**, 43 (1998).
- 9) 郡司, パニナ, 毛利: 日本応用磁気学会誌, **21**, 793 (1997).
- 10) L. V. Panina, T. Kitoh, M. Noda, and K. Mohri: 日本応用磁気学会誌, **20**, 625 (1996).
- 11) 内山, 毛利, 神保, 鋼島: 日本応用磁気学会誌, **19**, 481 (1995).
- 12) M. Senda, O. Ishii, K. Takei, Y. Koshimoto, and T. Toshima: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 4611 (1994).
- 13) A. Takayama, T. Umehara, A. Yuguchi, H. Kato, K. Mohri, and T. Uchiyama: Integrated Thin Film Magneto-Impedance Sensor Head Using Plating Process, Inter-mag '99, EF-02 (1999).
- 14) K. Ueno, M. Hiramoto, and K. Mohri: Asymmetrical Magneto-Impedance in Cross Anisotropy Films, Proc. Int. Workshop on Amorphous Wires, Thin Films & Micro Magnetic Sensors '99 (May 26-27, 1999).
- 15) T. Kanno, K. Mohri, T. Yagi, T. Uchiyama, and L. P. Shen: *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 3358 (1997).
- 16) 毛利: 磁気センサ理工学, p. 40 (コロナ社, 1998).
- 17) N. Kawajiri, M. Nakabayashi, C. M. Cai, K. Mohri, and T. Uchiyama: Highly Stable MI Micro Sensor Using CMOS IC Multivibrator Detecting Coil Induced Pulse Voltage, Inter-mag '99, EF-12 (1999).
- 18) C. M. Cai and K. Mohri: Frequency Modulation Wireless MI Micro Sensor Using CMOS IC, Proc. Int. Workshop on Amorphous Wires, Thin Films & Micro Magnetic Sensors '99 (1999).
- 19) 沈, 北, 成瀬, 毛利, 内山: 日本応用磁気学会誌, **22**, 677 (1998).
- 20) D. Kusumoto, L. P. Shen, Y. Naruse, K. Mohri, and T. Uchiyama: Detection of Finger-Tip Blood Vessel Pulsation Using CoSiB Thin Amorphous Wire CMOS IC SI Sensor, Inter-mag '99, BQ-06 (1999).

(1999年4月26日受理)



毛利佳年雄 もうり かねお

昭 38 九大・工・電子卒, 昭 43 九大院(博)単位取得退学, 昭 62 名大・工・教授, 平 10 名大情報メディア教育センター長(併任), IEEE Fellow 現在に至る.

専門 センサマグネティックス (工博)