

超高感度 MI センサを用いた非接触携帯型脳波計の開発

Non contact portable type brain wave detection system using highly sensitive MI sensor

2011001



研究代表者	名古屋大学 大学院 工学研究科	准教授	内 山 剛
共同研究者	名城大学 理工学部	准教授	山 田 宗 男

[研究の目的]

人間の意志を外部的につなぐことにより、失われた機能を再建するシステムや、意志の表示を可能とするシステムが脳機能計測技術の応用として提案されている。また、ゲームや情報通信の分野では、操作端末の代わりに脳波を利用したインターフェース開発の取り組みがあり、製造業では、脳の活動情報に基づいた機器制御技術に関する研究が始まっている。従来、簡易的な脳機能の計測装置として用いられている脳波計では、電極を頭皮に設置する作業が煩雑であること等からその使用において負担が大きい。本研究では、超高感度 MI センサを用いた非接触携帯型脳波計を開発し、脳波計測を人間に親和性の高い汎用的な技術とすることが目的である。

さて、脳細胞の電気活動に伴う磁気信号を検出する方法としては超伝導量子干渉磁力計 (SQUID) による脳磁図 (MEG) の計測が知られているが、常温で動作する小型磁気センサを用いて MEG を計測した例は、これまでほとんどない。本研究では、携帯電話やスマートフォンに内蔵される電子コンパスとして実用化されている MI センサを高感度・安定化することにより、低温や電磁シールド装置など特殊な環境の構築によらず、通常的环境下での微小磁界を計測する MI グラジオメータ (勾配磁界計測装置) の開発を行い、その MI グラジオメー

タにより、MEG 計測を行うことを目標とした。

また、人体後頭部に近接させて置いた MI グラジオメータとデジタル脳波計 (EEG) との同時計測の実験を行い、MI グラジオメータの出力信号が脳活動による電気的特性を反映しているかどうかについて調査した。

[研究の内容、成果]

①高精度 MI グラジオメータの試作開発

SQUID による脳磁図の計測結果では、 α 波 (8-13 Hz) の磁気信号の大きさは、約 1 pT とされている。しかし、我々の予備実験により、頭部表面から距離が 10 mm 以下の α 波磁場の大きさは、数 10 pT 程度であると推定された。その理由として、通常 SQUID による計測では検出コイルの位置から頭部まで約 50 mm 離れていることによると考えた。すなわち、MEG の磁気信号は、距離の二乗で減衰することが知られており、信号源からの距離が 4~5 倍違うことを仮定すれば、SQUID による MEG 計測と MI センサによる MEG 計測における磁場の大きさの違いを合理的に説明することができる。そこで、本研究では、磁気シールド等の特殊な環境を構築することなく pT オーダーの生体磁気を計測するグラジオメータの開発を行った。

本実験で試作開発した、MI 素子を用いた磁界センサの基本回路を図 1 に示す。方形波発振回路により得られる電圧波形を狭いパルス幅の

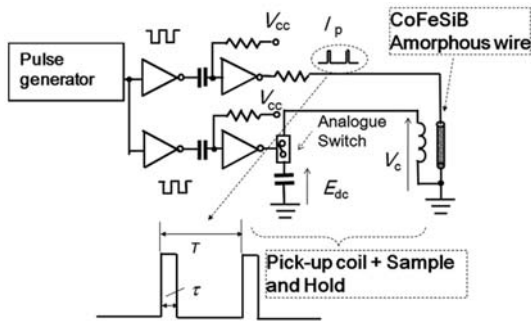


図1 超高感度 MI センサの基本電子回路

正パルス電圧に変換するために微分回路を R と C により構成している。微分回路により整形されたパルス電圧は C-MOS インバーターを介すことにより電流に変換され、パルス幅 τ およびパルス間隔 T のパルス列電流としてアモルファスワイヤへ通電される。通電電流の立ち上がりが早いパルス励磁によりアモルファスワイヤには強い表皮効果が生ずる。コイルに誘導されるパルス電圧 V_c はアナログスイッチによる同期整流回路により、直流的な出力電圧 E_{dc} に変換される。試作 MI 磁界センサの磁界検出特性を図 2 に示す。ワイヤの長さは 1 cm でありワイヤに周回したピックアップコイルの巻数は 300 ターンとした。磁界の範囲が $\pm 7 \mu\text{T}$ ($\pm 0.1 \text{ Oe}$) の範囲で、良好な線形性と 70 kV/T という非常に高感度で線形性良い磁界検出特性が得られている。MI センサによるグラジオメータの構成を図 3 に示す。図 1 の基本回路を対にして、測定用ヘッドと参照用ヘッドに印加される磁界の差を出力信号とするものである。すなわち、このグラジオメータでは、測定用ヘッドと

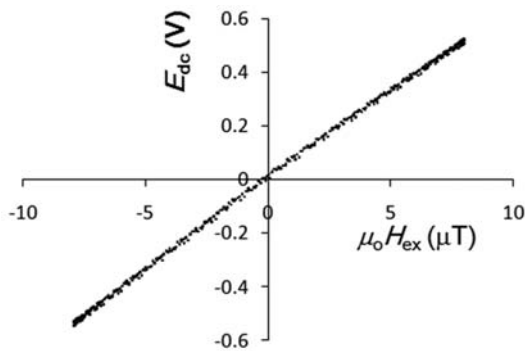


図2 超高感度 MI センサの磁界検出特性

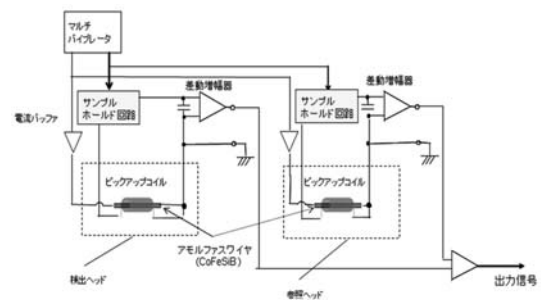


図3 超高感度 MI センサによるグラジオメータの構成

参照用ヘッドの磁界に対する感度を精度良く揃えることにより、地磁気など一様な外乱の磁界を相殺し、検出ヘッドのみに印加される局所的な磁界に比例した信号を出力として得ることができる。

さて、アモルファスワイヤ磁気インピーダンスセンサの原理的な磁気ノイズは次式で表わされることが報告されている。

$$\beta = \sqrt{\frac{2ak_B T}{\gamma M_s \pi a^2 l}} \quad (1)$$

ここで T は温度、 a は磁気ダンピング定数、 k_B はボルツマン定数、 γ はジャイロ比、 M_s は飽和磁化、 a はワイヤ半径そして l はワイヤ長さである。バンド幅を 1 Hz として測定した Co-rich のアモルファスワイヤの磁気ノイズの値を (1) 式に基づいて計算すると、室温で約 10 fT と見積もることができる。すなわち、外乱磁界によるノイズや電子回路のノイズが無視できる場合には、MI センサの最高性能として、室温で fT オーダーの磁界検出分解能が得られる可能性を理論的に示すものである。

図 4 は周波数に依存する、環境磁場の大きさを調査した NASA による公表データである。周波数が 1 Hz から 40 Hz の間では、地磁気による外乱 (Geo-magnetic noise) は 1 pT 程度と小さくまた、実験室ノイズ (Laboratory noise) の大きさも数 10 pT ~ 1 nT 程度であることが示されている。例えば、周波数 1 Hz ~ 40 Hz の生体信号を検出する場合に、図 5 の参照用受信部と測定用の受信部の感度差を 0.1%

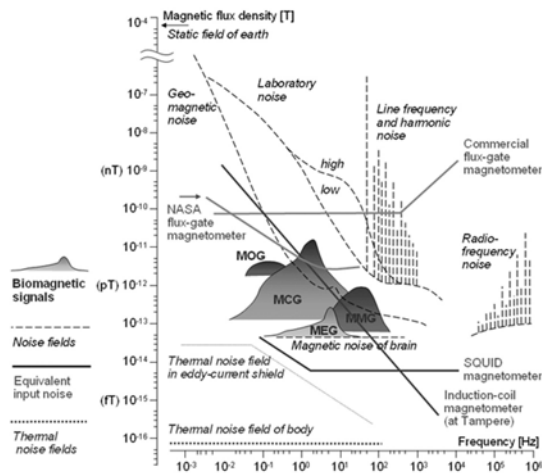


図4 外乱磁界の周波数依存性

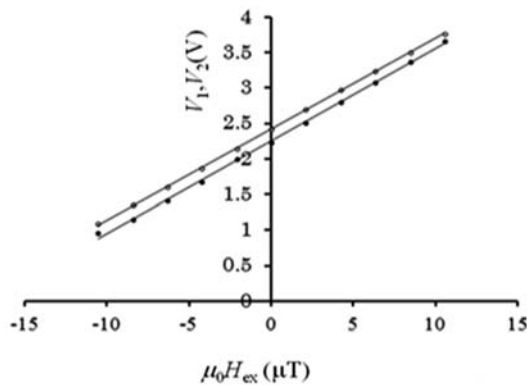


図5 グラジオ型センサにおける測定用ヘッドと参照用ヘッドから検出電圧の磁界依存性

とするグラジオセンサ構成により、磁界検出分解能として 1 pT は、達成可能な目標であると分かる。図5は、500ターンのピックアップコイル（機械巻きで）作製した測定用コイルからの検出電圧 V_1 および参照コイルからの検出電圧 V_2 の磁界依存性を調べた結果である。両者の傾きはほぼ一致して、 V_1 と V_2 の感度の差は1%程度である。またその直線の傾きから感度を求めると、 130 kV/T が得られる。即ち、 1 pT の印加磁界から 100 nV 以上の出力信号が得られる感度である。計装用のアンプの雑音スペクトルが通常 $10 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ であることを勘案すれば、 1 pT の磁場に対して信号出力として得られる 100 nV は、帯域を 1 Hz に制限した計測システムの電子回路ノイズに比べて十分に大きい。図6はシールドレスの環境で、グラジ

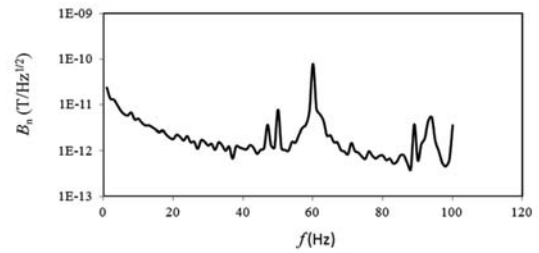


図6 試作開発したMIグラジオメータのノイズスペクトル

オメータを動作させた場合の出力ノイズ特性をスペクトル解析した結果であり、スペクトル密度 ($\text{V/Hz}^{1/2}$) を磁界検出感度 (V/T) で割って縦軸とし、横軸は周波数として表してある。この図から、周波数が $20 \text{ Hz} \sim 40 \text{ Hz}$ の領域ではノイズフロアがほぼ $1 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ であることが分かる。

②試作MIグラジオメータによるMEG計測

MEG計測システムでは 60 Hz 以上のパワーラインノイズの影響を避けるため、図7ように 1.5 Hz から 40 Hz に周波数帯域を制限して実験を行った。図8に示すように、座った状態の被験者に対して、計測用のセンサヘッドは後頭部に垂直な磁場 B_z を計測する方向として、後頭部表面から 5 mm 離れた距離に設置した。図9

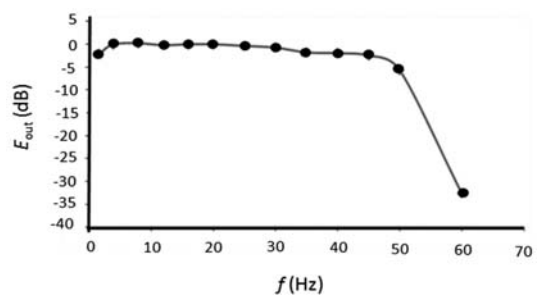


図7 脳磁場（MEG）計測システムの周波数特性

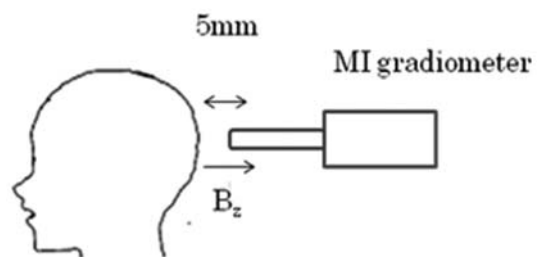


図8 後頭部MEG測定系

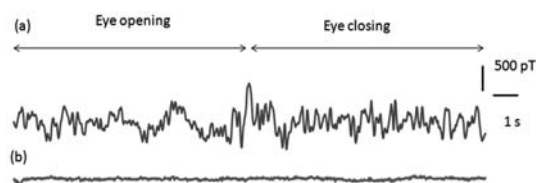


図9 (a) 後頭部 MEG 測定波形
(b) バックグラウンド

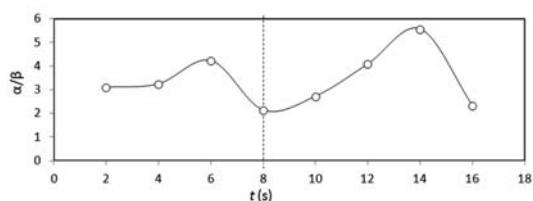


図10 α/β の時間依存性

は、計測した後頭部磁場の時系列をバックグラウンドノイズと比較して示している。後頭部磁場は、前半の8秒間は眼を空けた状態での計測を行い、その後の8秒間は眼を閉じた状態での計測を行った。後頭部磁場信号の大きさは、バックグラウンドノイズに比べて10倍以上大きいことが分かる。また、開眼時と閉眼時の後頭部磁場波形の比較から、閉眼による α 波(8-13 Hz)の増加が示唆される。閉眼による α 波の増加を定量的に確かめるため、後頭部 MEG のスペクトル解析を行った。図10は α/β の時間依存性を示すものであり、ここで α は α 波のパーシャルオーバーオールであり、 β は β 波(14-30 Hz)のパーシャルオーバーオールである。この図から明らかに、 α/β が閉眼直後から増加していることが分かる。EEG による計測により α 波は、開眼により抑制されることが知られている。したがって、MI センサを用いた MEG 計測は、非接触で脳活動を評価する手法として、磁気シールド装置を用いない環境でも、信頼性が高い可能性がある。

これまでに述べた、MEG の計測結果に外乱磁場以外のアーチファクトが存在するかどうかについては、明らかではない。しかし、一般的に、被験者が座った状態での測定では、姿勢を保つための筋電の影響などがアーチファクトの原因として考えられる。したがって、次に筋電

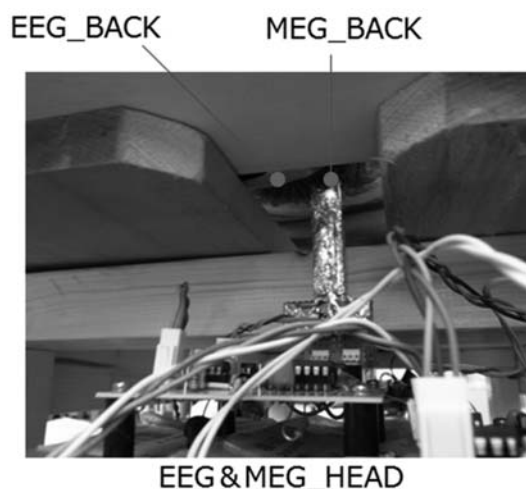


図11 EEG と MEG の同時測定

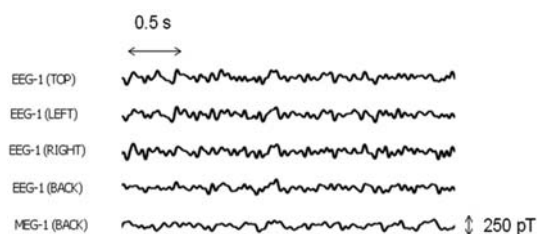


図12 EEG と MEG の同時測定結果

によるアーチファクトを避けるため、被験者を寝かせた状態で MEG の計測を試みた。図11は、後頭部における MI センサによる MEG と EEG の同時計測点を示す写真である。EEG と MEG の計測の干渉が生じないように 10 mm 程度の距離を置いて設置した。図12に EEG と MEG の同時測定の結果を示す。EEG の後頭部(back)に加え EEG の上部(Top)、右(Right)および左(left)部分での測定結果も合わせて表示している。EEG と MI センサによる MEG の結果には類似性が観測され、特にその傾向が EEG の後頭部と MEG の後頭部との間で強いことから MEG の後頭部の測定結果が後頭部における脳の電気的な活動を反映した出力信号であることを裏付ける結果となっている。

[ま と め]

非接触で脳機能を評価する携帯型の計測システムの構築を目指して、超高感度 MI センサに

よるゲジオメータの試作開発を行った。試作機による実証実験により、日常の環境下における超高感度 MI センサを用いた非接触脳波 (MEG) 計測の有用性を裏付ける結果を得た。

[成果の発表論文等]

論文

- (1) T. Uchiyama, K. Mohri, S. Nakayama "Measurement of spontaneous oscillatory magnetic field of guinea-pig stomachmuscle preparation using pico-Tesla resolution amorphous wire magneto-impedance sensor", IEEE Trans. Magn. **47**, 10, 3070-3073 (2011).
- (2) T. Uchiyama, K. Mohri, Y. Honkura, and L. V. Panina, "Recent Advances of Pico-Tesla Resolution Magneto-Impedance Sensor Based on Amorphous Wire CMOS ICMI Sensor", IEEE Trans. Magn., to be published.
- (3) K. Mohri, M. Yamada, K. Endo, T. Suzuki, Y. Mohr and T. Uchiyama, "Physiological Magnetic

Stimulation for Arousal of Elder Car Driver Evaluated with Electro-encephalogram and Spine Magnetic Field", IEEE Trans. Magn., to be published

国際会議 (発表予定を含む)

- (1) T. Uchiyama, K. Mohri, Y. Honkura, and L. V. Panina, "Recent Advances of Pico-Tesla Resolution Magneto-Impedance Sensor Based on Amorphous Wire CMOS IC MI Sensor", Intermag, FF-01, Vancouver, Canada, 05/07-11, 2012, **INVITED**.
- (2) K. Mohri, M. Yamada, K. Endo, T. Suzuki, Y. Mohr and T. Uchiyama, "Physiological Magnetic Stimulation for Arousal of Elder Car Driver Evaluated with Electro-encephalogram and Spine Magnetic Field", Intermag 2012, DE-04 Vancouver, Canada, 05/07-11, 2012
- (3) T. Uchiyama, K. Mohri, S. Nakayama, "A MEG measurement using pico-Tesla Sensitivity amorphous wire magento-impedance sensor for brain activity evaluation", PIERS, Moscow, Russia, 08/19-23, 2012, **INVITED**.

国内会議発表 (5 件)