

財団の選考委員長の山崎先生に同行して内山先生を訪問するのは、今回が3度目で最終年度の成果報告でした。当日は我々のためにパワーポイントで3年間の研究を分かりやすくご説明いただきました。先生の研究は、高周波でインピーダンスが大きく変化するアモルファス磁性ワイヤを素子（素材は CoFeSiB）に用い、特殊な測定環境を必要としない通常環境下（常温、磁気シールドレス）で微小磁界を計測するモバイル型（小型、可搬性）の超高感度磁気センサモジュールの開発です。目的は非接触での生体磁気信号の検出および検出信号を用いた被験者の体調、気分などの状態検出です。具体的には、生体（脳）磁気信号を測定するために磁気インピーダンス（MI）センサの測定感度を向上させ、MIセンサ及び周辺回路をセンサモジュール化するために、モジュール化に向けたセンサヘッドの加工及び周辺回路の設計を行ない、試作したセンサモジュールを用いて脳活動の計測実験を行っています。

まず、各種生体計測法、電極を使う一般的な脳波計（EEG）、近赤外光を使って血流の変化をとるNIRS（near infra-red spectroscopic topography）、磁気を計測するSQUID（Superconducting Quantum Interference Device）と比較し、時間・空間分解能、侵襲性、装置規模などの観点から、MI法の利点をうかがいました。センサの原理は、ワイヤー状の素子の円周方向にスピンの配列する特性（表皮効果）を利用して、測定したい磁界によりスピンの向き（磁化ベクトル）が傾き、そのときパルス電流を印加すると、スピンの向きが変化し、その時の誘導起電力を素子の周りのピックアップコイルで検出します。ワイヤの誘導起電力がワイヤのインピーダンスに比例することから、MI素子を使うとノイズが小さいのと同時に、非常に大きな出力が得られます。また、MIセンサは原理的に磁気検出分解能に効く素子のホワイトノイズが室温で10 fT（フェムテスラ）であるとの論文（2008年）により、先生の高感度化への取り組みが加速されたようです。

MIセンサの開発は主に高感度化と環境磁場のノイズの除去です。高周波のバッファアンプを入れ、コイルの巻き数を増やしたことで、2倍程度高感度になったとのこと。環境磁場は一般に地球の磁場の変動、装置から発生するノイズ、電源ラインからのノイズがあり、生体磁気より大きなレベルの磁場ノイズが発生しています。弱い磁場の計測では、環境磁場を打ち消すために、磁界の勾配をとるようなセンサ構成（グラジオメータ）にしました。特性のそろった素子を2つ揃えて、検出コイルと補償コイルのピーク電圧の差から磁界の差をみます。ただ、これだけでは不十分なため、更にアクティブキャンセル型のグラジオメータで、補償側の素子から得られた磁界の電圧信号を電流に変えて、フィードバックコイルを使って印加されてくる磁界そのものをキャンセルするセンサシステムをモジュール化しました。基本的特性を調べた所、これにより1 pT（ピコテスラ）近くまで、ノイズキャンセルして安定的に測れることが分かってきました。

脳活動の計測では事象関連電位 P300 の計測をしています。これは一般的に認知活動に伴い大脳皮質におけるニューロンの活動によって生じる電位と言われており、外部刺激や運動動作に関連した電気生理学的反応です。信号としても非常に小さいので、25回同期加算します。その結果、300m秒当たりに波形の変化がみられ、再現性も確認され、SQUIDでのP300の測定結果と比較し、脳磁場測定が可能であることを確かめました。ちなみに、先生が示した結果（下図）は、アクティブノイズキャンセルをしないときの値で、アクティブノイズキャンセルにより更に精度の向上が期待されます。更に最近では、音ではなくビジュアルな刺激を与え、脳の応答をMIセンサとEEGの同時計測を実施し、音とは違った応答時間が得られ、刺激の種類、認識の難易度で変わるようで、今後の進展が期待される内容でした。

また、覚醒度の計測も実施しています。自動車の漫然運転などを防止するために、ドライバーの意識度のモニタリング技術として、MIセンサが使えないか調べています。覚醒度に関しては周波数帯域で、 $\delta, \theta, \alpha, \beta$ 波と特徴のある周波数を持つ脳波が知られています。古くから覚醒度の客観的な装置に使われている皮膚電位計による比較実験から、MIセンサの有効性を確認しています。MIセンサの計測では、特に後頭部の θ 波が睡眠から覚醒するときにスパット大きく負に変化し、その時 α 波は正に、 β 波は負に変化しています。ちなみに、眠った状態から起きた瞬間、皮膚電位計もスパット大きく負に変化します。磁気センサでは場所によって周波数が異なり、正確に測れるようになると、磁気センサの方が細かい生理現象などがはっきり分かる可能性があります。また、眼球の動きも脳波に影響する可能性もあり、ドライバーモニタリングなどで視点の動きを測ったりするので、脳波ではなく瞬きを非接触で直接磁気センサで測定した結果、同期加算しなくても顕著な信号の変化が得られました。眠くなると瞬きの頻度が変わることもあるので覚醒度にも関係します。

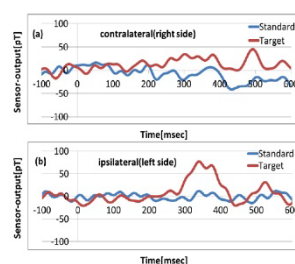
現在、企業との共同開発で、マイクロコイル素子を使った超高感度磁気センサを開発しています。半導体プロセスを使ってマイクロコイルするもので、将来は全部IC化して1チップにできると考えています。半導体プロセスを使えば量産化が可能になり、安定した良好な品質により多チャンネル化が容易になります。感度は基本的に立ち上がり時間に比例し、パルス電流の立ち上がり時間を5n秒から1n秒位にすると、50ターンの巻数でも300ターン程度の感度ができます。そこで、マイクロコイル化して巻数を500ターン程度に増やし、高周波化すれば小型で超高感度な磁気センサモジュールになるようです。

募集テーマ「機械が人に合わせる人に負担をかけない新しい相互的情報交流」を実現するハード面の第一歩を実感する内容です。

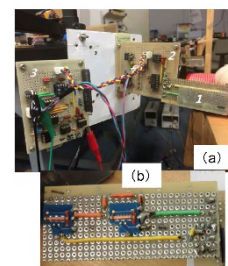
（2016年1月18日訪問、技術参与・飯塚）



右から3人目が内山先生、2人目が山崎先生



Mean P300 ERP elicited by target and standard stimuli of oddball paradigm. (a) is from the contralateral (right side) sensor and (b) is from the ipsilateral (left side) sensor. [J. Appl. Phys. 117, 17B306 (2015)より引用]



(a) MI sensor measurement system. (1) MI sensor head, (2) Measurement circuit, (3) Analog filter circuit. (b) MI sensor head without cover. [J. Appl. Phys. 117, 17B306 (2015)より引用]