

標準ファントムを用いた脳磁計評価法の最適化に関する研究

金沢工業大学 小山 大介

1. 研究の実施内容及び成果に関する報告書

(1) 研究概要

研究の背景

完全非侵襲で高性能に脳機能計測が可能な装置として「脳磁計」*があり、脳機能研究への応用だけでなく、てんかんや脳疾患検査など臨床の現場でも活用されている。

一方、脳磁計は比較的新しく発展途上の技術でもあるため、脳磁計メーカーによってその装置自身の性能評価や、データ計測・解析手法が大きく異なる。そのため、情報の共有や比較が難しく、脳磁計の普及を妨げる一因となっていた。

研究の目的

研究代表者らは平成 20～24 年度の「ほくりく健康想像クラスター事業：MEG 標準化制定プログラム」において、脳磁計装置の評価標準として「脳磁計用標準ファントム」*を開発した。このファントムは世界で唯一の「校正済ファントム」として、工学的に高い評価を受けた。

一方、計測及び評価方法の確立が不十分であり、脳磁計ユーザーにファントムの活用方法を周知させることができなかった。そこで今回の取り組みでは、ファントムを利用した脳磁計評価方法を開発し、その活用法について脳磁計ユーザーに広げるための下地作りをすることを目的とした。

研究の概要

本テーマによる取り組みでは、脳磁計を有する企業や研究所に依頼してファントムによる計測実験をおこない、得られた結果から最適な脳磁計評価手法をまとめる。

※用語説明として別添資料 1 を添付した。

(2) 研究の実施内容及び成果

① ファントムの改良

はじめに、様々な脳磁計設置サイトで計測実験をおこなうための準備として、従来までに開発したファントムや電子回路を改造した。

ファントムについては、従来の構造では持ち運びや実験の繰返しにより破損しやすい部分があった。そこで、より頑丈で取り扱いしやすい形状に変更することによって、破損しにくい構造に改良することができた。なお、後述するように研究期間中にファントムを国内外に持ち運んで実験をおこなったが、破損することは無かった。実験に使用する電流ドライバ回路については、小型化や電流値の校正を目的として新たに開発した。

ファントムを持ち運びして計測を実施することを想定した実験セットを図 1 に示す。ファントムや電流ドライバ回路のほか、ケーブルや周辺部材を持ち運びケースにまとめることによって効率良く、かつ、安全に持ち運びできるようになった。



図 1 ファントム実験セット (左：ファントム本体、右：電流ドライバとケーブル)

② ファントム及びドライバの校正

ファントムの改良にともない、磁気信号源となるワイヤ位置の再計測をおこなった。形状計測結果（協力：石川県工業試験場）を基にして導出した等価電流双極子（信号源）の位置、向き、強度を、別添資料2に示す。なお、ファントムの構成や校正方法に関して記述した論文が *Journal of Neuroscience Methods* に掲載された（別添資料3）。

③ 評価方法に関する統一プロトコル

ファントムを用いた脳磁計評価実験手法に関する検討をおこない、実験及びデータ解析に関するマニュアルを作成した。別添資料4に作成したマニュアル（概要）を示す。解析における太字で示した（7, 9, 10）の処理は本取り組みで開発したソフトウェアにより実行する。（9）及び（10）で利用するソフトウェアを例として別添資料4に示す。

本取り組みで提案した評価手法の特徴として、異なる信号強度での計測や異なる加算平均回数での解析を実施し、異なる信号／雑音比における信号源推定結果を評価する点がある。脳磁計の信号源推定精度は信号／雑音比によって大きく左右される。異なる脳磁計設置場所ではもちろん、同じ場所でも時間帯や周囲の環境によって雑音状態が大きく変化する。そこで、ファントムを利用した実験では様々な信号／雑音比の条件で計測・解析をすることによって、実験環境に即した信号源推定精度の評価ができるようになった。

④ ファントムを利用した脳磁計評価実験

開発したファントムを用いて、以下の脳磁計における評価実験をおこなった。

- ・ 金沢工業大学 先端電子技術応用研究所
- ・ Physikalisch-Technische Bundesanstalt（ドイツ・ベルリン）
- ・ New York University Abu Dhabi（アラブ首長国連邦・アブダビ）
- ・ Macquarie University（成人用脳磁計、小児用脳磁計、Hearing-MEG；豪州・シドニー）
- ・ ほか、民間企業2社

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) における脳磁計評価実験の様子を図2に示す。また、評価実験結果の例として、別添資料5に脳磁計評価結果を示す。計測データから推定された等価電流双極子の位置及び強度ずれを示したグラフであり、③で述べたように

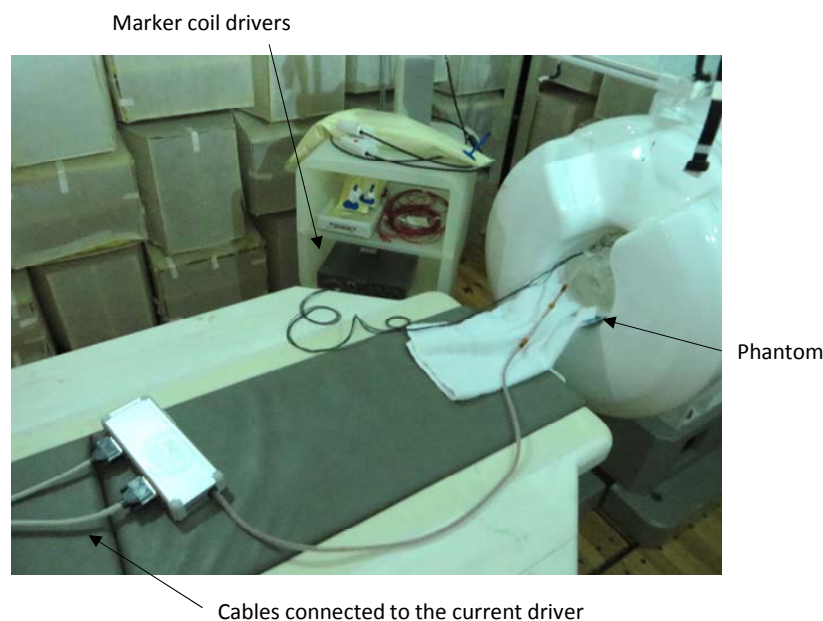


図2 PTB における脳磁計評価実験の様子

異なる信号／雑音比での信号源推定精度が得られている。信号／雑音比が高くなる（電流値が大きい、加算回数が大きい）につれて各ずれの値が小さくなっており、あるレベルで収束していることが分かる。これによって各システムが持つ系統的な信号源推定精度を評価できる可能性があり、引き継ぎ、データの解析を進める。

⑤ 簡易型ファントム

本研究では、ユーザーが簡単に扱えるようなファントムを開発することも目的の一つとし、図3に示すような簡易型ファントムの製作をおこなった。前項までに述べた評価実験用のファントムでは25個のボビンを利用したファントムだったが、価格や取り扱いの煩雑さを抑えるため、最少一つのボビンから構成できるようにした。一方、従来通り複数のボビンで実験するという用途も確保するため、ボビンを任意の配置に組み立てられるようなステージや治具も製作した。

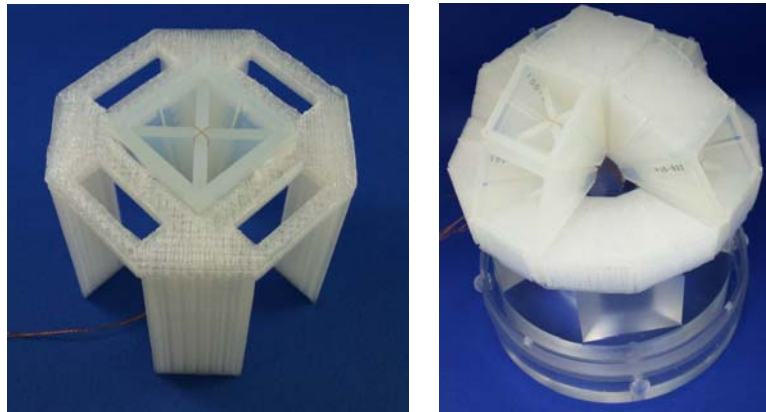


図3 簡易型ファントム（左：個別に使用する場合、右：組み立てて使用する場合）

⑥ 室温磁気センサによる脳磁計開発への利用

近年、SQUID磁束計以外の室温で動作する磁気センサの高感度化が進み、心磁計や脳磁計をはじめとした生体磁気計測装置への利用が展開されつつある。センサの高感度化においては「信号を検出できるほど十分に高感度か？」といった点がポイントとなるが、ヒトを対象とした計測だけでは正解の信号がはっきりしないため、不確かさや再現性を確保することが難しい。そこで本研究では、室温磁気センサの評価にファントムを利用することを提案し、その評価手法について有効性を示すことができた。本項目は取り組み開始時の計画には無かったが、生体磁気関連産業の拡大に貢献できる成果として追記しておく。

⑦ 学会発表等

論文（査読あり）

- ・ D. Oyama, Y. Adachi, M. Yumoto, I. Hashimoto, and G. Uehara, “Dry phantom for magnetoencephalography—Configuration, calibration, and contribution,” *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 251, pp.24-36, 2015

学会発表（2件＋2件予定）

- ・ 小山大介, 足立善昭, 上原弦, 「室温磁気センサによる生体磁気計測システムの開発に向けた脳磁計ファントムの活用」, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-16-001, 仙台市, 平成28年3月
- ・ 小山大介, 足立善昭, 上原弦, 「室温磁気センサによる等価電流双極子近傍の磁気分布計測」, 第31回日本生体磁気学会, P09-003, 石川県金沢市, 平成28年6月（本発表により、U35優秀発表賞を受賞）
- ・ 小山大介, 足立善昭, 上原弦, 「脳磁計ファントムを利用した磁気センサの評価手法」, 第40回日本磁気学会, 8aD-10, 石川県金沢市, 平成28年9月（予定）

- D. Oyama, Y. Adachi, G. Uehara, “Contribution of phantom experiments to MEG study and development”, BIOMAG2016, 10-1001, October 2016, Seoul, Korea (予定)

(3) 現状における課題、問題点

事業化に向けた課題として、ファントムの管理及び維持が挙げられる。ファントムは樹脂製のボビンを接着剤で貼り付けた構造になっており、持ち運び時の振動や、保存時の温度、湿度変化等によって形状が変化してしまうことが考えられる。そこで、できるだけ形状変化が無いような取り扱い方法を確立するとともに、定期的な校正作業が必要になると考えられる。

また、評価実験データの取り扱いについても、現状の解析プロセスは得られるデータ量に対して手作業での部分が多く、ヒューマンエラーが起りやすくなる原因となっている。データ取得から解析、評価までの一連の流れを自動で処理するソフトウェア開発の必要性が高い。

(4) 今後の目標と展開

本テーマの事業化に向けて、以下の三点を検討している。

- ① 簡易型も含めた、ファントムの販売
- ② ファントムによる脳磁計評価サービスの展開
- ③ ファントムの校正方法に関する他の製品への展開

①については、本研究を開始した当初は「脳磁計ユーザーのトレーニングのためのファントム」を挙げていたが、研究を進めるにつれて、ユーザーよりも脳磁計や磁気センサを開発するメーカーからのニーズが高いことが分かった。(2) ④でも挙げた民間企業の一つは脳磁計の開発を目指している企業であり、我々の取り組みを知ってファントムによる評価実験への協力を快諾していただいた。また、(2) ⑥で述べた室温の磁気センサの評価への利用についても別の民間企業から依頼を受け、ファントムを利用した評価実験をおこなった。今後はファントムを必要とするメーカーへの提供を目指す。

②については、脳磁計を設置している研究所や病院に対して、ファントムを利用した評価をおこなうサービスの展開である。今回開発したファントム及び評価方法をできるだけオープンにし、脳磁計の精度に関する認証を発行するようなサービスを展開したいと考えている。

③は、本取り組みによって得られたノウハウを他の製品に応用する取り組みである。金沢工業大学では磁気計測や磁気センサに関する様々な研究を行っており、コイルの製作は欠かせない技術である。これまではコイルの校正は実施されていなかったが、本取り組みによって確立したコイル（信号源）の校正方法を、従来のコイルについても応用することを検討している。

(5) 別添資料

1. 用語説明
2. ファントムの校正結果
3. 論文 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165027015001776>
4. 脳磁計評価実験及びデータ解析マニュアルの概要とソフトウェア
5. ファントムを利用した脳磁計の評価結果データ
6. 研究進捗タイムテーブル