

Title	平行最適化による脳磁図分析
Author(s)	林, 娟
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/58266">https://hdl.handle.net/11094/58266</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

【141】

氏 名	林 ケン ケン
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 24626 号
学位授与年月日	平成 23 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 基礎工学研究科システム創成専攻
学位論文名	平行最適化による脳磁図分析
論文審査委員	(主査) 教授 鈴木 貴 (副査) 教授 名和 範人 教授 白旗 慎吾 招聘教授 雄山 真弓

### 論文内容の要旨

脳磁図分析(magnetoencephalography, MEG)は脳の機能を測定するもので、超伝導量子干渉素子(SQUID)を用いた高感度の磁束センサーを多チャンネル配置した脳磁計により、脳の神経に流れる微小電流が電磁誘導により発生した磁場を頭皮表面で観測し、脳内部の磁場源を推定するものである。時間分解能が高く、脳に対して無侵襲で、生体への危険がないことが特徴である。脳磁図の電源解析は、解がユニークに定まらない逆問題を解くことによって行われるので、複雑な脳活動を解析する場合にはしばしば困難を伴う。したがって、数理的により客観的で信頼度の高い電源解析法を開発することは重要である。

生体磁場計測による双極子推定は、磁場源としてあらかじめ双極子数を定め、その位置とモーメントを過剰決定系より推定する方法が標準的である。ここでは脳磁図の電源解析に一般的に用いられている、単一双極子による磁場解析

(sECD) 法を取り上げる。一方で、多数の双極子から不足決定系により脳の形状に依存しない空間的な広がりをもった電流密度を再現する方法が電流素片分布法である。平行最適化理論に基づいた逆源探索法であるクラスタリング

(clustering) は電流素片分布法を改良して、双極子数を予め設定せずに不足決定系から素片を集めて双極子を探索する方法である。

クラスタリングの逆源探索数値実験については双極子数を事前に指定することもlocal minimumに陥ることもなく4~5個の双極子が正確に再現されることが報告されている。本論文では医療現場での実用化を目指し、ノイズを含むデータに対するクラスタリングの適切性を研究する。そのためにphantom や生体実データ分析によって双極子の位置やモーメント推定の精度を詳しく調査し、sECD 法による分析結果との比較を行う。特にfreezing zone とsparking の判断をより適切に行えるようにアルゴリズムを改良することで、ノイズのあるデータに対しても十分にMEG 逆問題（脳磁図分析）に適用可能であることを示す。脳磁図分析で用いられるモデル（順問題）には、脳を球形と仮定した電流双極子モデル、全電流密度からBiot-Savart の式で磁場を計算する方法などがある。脳の形状が複雑であることからニューロン電流（双極子）にBiot-Savart の式を直接適用して磁場を計算する簡略化された方法が採用されることもある。本論文は生体実データを使って両者の推定結果の比較を行った。クラスタリングとsECD 法から得られた結果を対比させBiot-Savart の式を適用することの妥当性を検証した。

## 論文審査の結果の要旨

本研究は脳磁図から磁場源を推定するプロセスである逆源探索に焦点を絞り、新しい数理的原理に基づく分析ソフトを開発し、数値実験やファントム・実データを用いた分析によってその有効性を検証した。このソフトの作動原理は平行最適化理論とクラスタリングであり、多数の電流素片の推定精度を保ったまま適切な状態に集め、磁場源としての双極子を再現する。誤差を減少させるように反復列を構成するアプローチングによって反復列が動かなくなる現象がフリージングであって、その原因は反復列が偽解の多様体に捕捉されることにある。そのとき逆にこの多様体の接平面を用いて微小な誤差を保ったまま反復列を動かすのがメルティングである。平行最適化はフリージングしたかどうかを判定するフリージングゾーン概念とアプローチング・メルティングを行列の特異値分解を用いて統一的に実施するスキームであり、クラスタリングは多数の素片を少数の場所に集めることで逆源を探索する方法である。まず正数  $\epsilon$  を定め、できるだけ小数のボールで素片全体をカバリングする。次に素片が外に出ないようにカバリングボールを縮小し、素片がカバリングボールの外にでないという制約をかけて平行最適化を実行し、最終的に素片を縮約して有限個の双極子を再現する。本論文ではこれらのサブルーチンを統合し、数値実験によって単一時刻でのデータから多数の双極子が正確に再現できることを実証している。特に瞬間データから7つの双極子をほぼ正確に推定し、一意性のない不足決定系から正しい推定が得られることを実証した。またいくつかの数理モデルの適切な適用範囲についてファントムデータを用い、適合度の基準を定めて検証し、さらに実データからの双極子分析では双極子の移動・消滅・生成・分岐・衝突・増減など時系列の動きを再現した。これらの研究成果は、斬新かつ綿密で説得力のあるものであり、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。