

平成 21 年 5 月 28 日現在

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19500386  
 研究課題名（和文）ミリサイズ頭部ボクセルモデルの高速電磁界解析に基づく脳磁界計測法  
 研究課題名（英文）Numerical electromagnetic field analysis in human head models composed of millimeter size cubic voxels for Magnetoencephalography  
 研究代表者  
 濱田 昌司 (HAMADA SHOJI)  
 京都大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：20246656

研究成果の概要：ボクセルサイズ 1mm の成人男性頭部モデルに対し、204 チャンネルの脳磁計測用グラディオメータ出力のリードフィールド(エントリーは約 5 億 4 千万個)計算を可能にした。これによりモデルの灰白質位置に脳神経活動を模擬した等価電流ダイポールを配置した際の、脳磁計測結果のシミュレーションを可能とした。最近の並列化技術により計算速度を向上させ、数値電磁界計算技術の側面から、高速・高精度・高信頼度の MEG 計測システムの確立に寄与できた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用生体工学・生体材料学

キーワード：電磁界解析・ボクセルモデル・脳磁界計測・相反定理・高速多重極法

## 1. 研究開始当初の背景

脳磁計測や脳波計測結果に基づいて脳神経活動分布の時間・空間変化を推定する技術が、各種診断や脳機能研究に必要とされており、脳磁図 (MEG)・脳電図 (EEG) 技術として実用化されている。この推定のためには脳神経活動を電流源などで模擬し、これによって頭表周辺に誘起される磁場分布や電位分布を電磁界計算技術を用いて順計算しておく必要がある。この順計算結果は計測データの逆計算時に、いわゆるリードフィールド行列として使用され、その解品質が逆計算の品質に直接的に影響を及ぼすことが知られ

ている。順計算手法としては、多くの場合に単一球近似に基づく解析式 (サーバスの式) が使用され、より高い精度を求める際にも同心多球モデルの解析式が使用されるケースが多い。境界要素法などの数値解法を用いるケースも多いが、脳溝などの複雑形状を詳細に考慮すると演算コストが莫大になり、必ずしも十分な詳細モデル解析は行われていない。このように、現状で実用化されている脳磁図・脳電図技術には、電磁界計算技術の観点からも改良の余地が多分にあると考えられている。一方で最近の数値電磁界計算技術の進展により、MR 画像に基づく頭部詳細ボ

クセルモデルに基づいて数値電磁界計算を行うことが比較的容易になってきており、こうした詳細電磁界計算手法を用いてリードフィールドを計算することで、逆計算品質の向上を図ろうとする試みが広がりつつあった。一方、本研究代表者は、高速多重極法(FMM)と呼ばれる、境界要素法系列の電磁界計算法の高速化手法の研究を行ってきた。その成果としてボクセルモデル用高速多重極表面電荷法と呼ぶ、ボクセルモデル内の低周波電磁界解析に適した数値解法を開発し、体内誘導電磁界の数値計算などに応用していた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、ボクセルモデル用高速多重極表面電荷法(以下、ボクセルモデル用FMM-SCM)を用いて、ミリサイズのボクセルからなる頭部詳細モデルの電磁界解析を行うことで、脳磁図(MEG)逆計算用の高精度なリードフィールド行列を、実用的な計算機材・計算時間・計算精度で獲得する技術を確立することにある。加えて関連技術の整備によって、高速・高精度・高信頼度のMEG計測システムの確立に寄与することを目的とした。関連技術の中には、以下に列挙する技術等が含まれる。

(1)MR画像データからミリサイズの頭部詳細ボクセルモデルを作成する技術の整備、(2)高速数値計算のための各種並列計算技法の整備、(3)電磁界計算結果の校正標準となる非同心の多球モデル内電磁界厳密計算技術の整備、(4)拘束条件付きビームフォーマと同等の最小自乗逆問題推定手法の整備、(5)電界計算と磁界計算とを結びつけるMEG用相反定理の整備、(6)脳電図(EEG)用リードフィールド計算用の電流場(ラプラス場)計算技術の整備、(7)電流計算と電位計算とを結びつけるEEG用相反定理の整備、などである。

## 3. 研究の方法

ボクセルモデル用FMM-SCMは、境界要素法の一つとして知られる表面電荷法(間接型境界要素法)に対し、ボクセルモデルの取り扱いへの特化とFMMの適用という改造を加えたものであり、速度・容量性能に優れ、解の安定性の高いラプラス場のソルバである。表面電荷要素の個数(=未知数の個数)をN個として、コンプレキシティがO(N)となるという長所を有する。既にコイル磁界印加時の人体ボクセルモデル内の誘導電界・電流計算を行った実績も有するので、これにイートンの相反定理を適用することでリードフィールドを計算できる。つまり、灰白質内に等価電流ダイポールPを配置した時に頭表外部に配置したコイルに誘導される磁束Φは、このコイルに電流Iを流した時に灰白質内に誘導され

る電界Eを用いて、 $\Phi = -P \cdot E / (j\omega I)$ として計算できる。等価電流ダイポールの配置個数(数万~数十万)がコイルの個数(数百)よりも圧倒的に多数であるので、相反定理を用いる方法は相反定理を用いない方法と比較して、百倍~千倍程度効率が良い。

以上の理論的背景を出発点として、この計算法によって実用精度で磁束を計算できることを、まず、多球モデルに対する厳密電磁界解析結果を用いた校正計算により検証する。コイル形状としては、102チャンネルマグネトメータ、204チャンネルグラディオメータを想定し、多球頭部モデルとしては眼球2個を含む偏心7球頭部モデルを採用する。また、ボクセルモデル用の各種数値解法で電磁界解析を行うと、ボクセル形状が滑らかでないことに起因して計算電磁界の乱れが生じることが広く知られている。この影響を緩和するために計算電界のスムージング処理が必要となるので、各種スムージング手法の性能評価も実施する必要がある。

次に、MR画像に基づく詳細頭部モデルを取り扱った解析を実施するが、この計算も2段階に分ける。まず、2mmサイズのボクセルモデルで構成された公開の人体モデルである、NICT Taroモデルの頭部を用いて解析を行う。これにより、モデリングに起因する諸課題の検討を省略でき、また未知数の個数が比較的少なく済むので、コード開発の効率を向上できる。特に、コイル磁界に相当するベクトルポテンシャルが表面電荷要素に及ぼす駆動項の値を、ツリー法的な手法で高速計算する部分などに、コード検証が必要な開発部分があるため、小規模問題によって動作確認を行うことが望まれる。これは、各種の並列化技法の適用や、計算されたリードフィールドの取り扱いなどについても当てはまり、小規模問題を対象として開発を行うことで、コード開発効率を向上できる。

次に、1mmサイズのボクセルモデルを構築し、その数値解析を行うことで、目的とするリードフィールド計算を実施する。モデルの作成には自前のMR画像を用い、SPMに付属の灰白質・白質領域抽出機能などを流用することで、画像をモデルに変換する。モデルの導電率にはTaroモデルに使用されている組織ごとの導電率データを流用する。なお、数値電磁界計算手法の高速化の工夫については、アルゴリズム面やハードウェア面も含めて、最新の技術を随時取り入れていく。1mmモデルに対して得たリードフィールドを用いて、任意の等価電流ダイポールが誘導する計測磁束をシミュレーション可能とする。

## 4. 研究成果

多球モデルに対する厳密電磁界解析結果を用いた校正計算の結果について述べる。使

用した7球モデルとコイル配置を図1に示す。

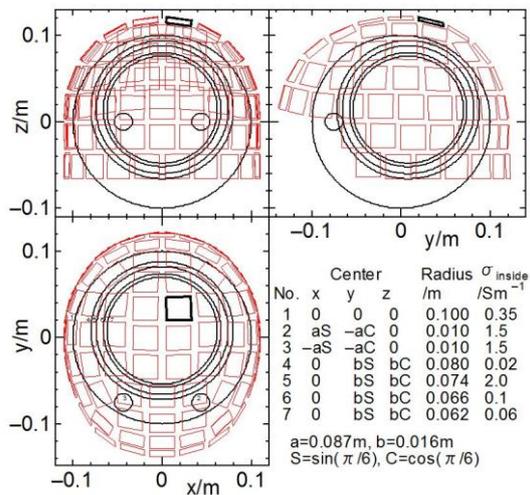
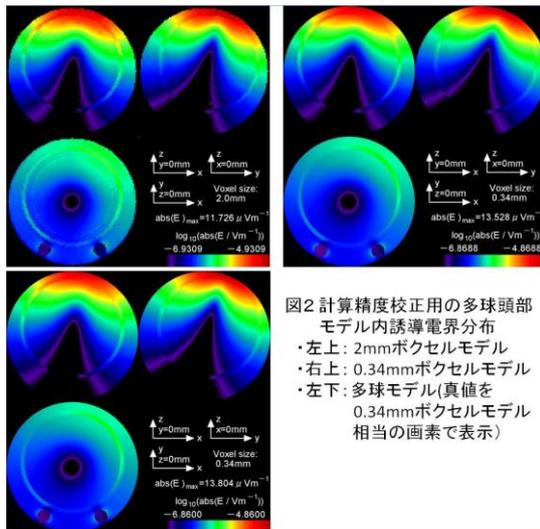


図1 計算精度校正用の多球頭部モデル (ボクセル表現した多球モデルとマグネトメータコイル配置)

厳密解の計算には極変換付き等価多重極モーメント法を使用し、ボクセルモデル用FMM-SCMによる計算時は球モデルをボクセル表現して計算を実行した。計算された誘導電界分布の計算例を図2に示す。



ボクセルサイズとしては、2mm, 1mm, 0.5mm, 0.34mmの4種類を用い、各種電界平滑化法(境界近傍のみで実施)の効果を数値的に検証した。灰白質領域の厚みを4mmとし、1mmのボクセルを使用した例で、重み付き電界平滑操作により、電界誤差の標準偏差は灰白質内最大電界の1.57%となった。さらに体積平均操作なども加えることで同値を0.89%にまで改善できた。なお、0.34mmのボクセルモデルではボクセル数は1億657万個となり、1回の電界計算所要時間は約60分となった(Core2Duo, 2.66GHz, 64bit windows PC)。

次に、2mmサイズの人体頭部詳細ボクセルモデルに対してリードフィールド計算を行った結果について述べる。使用したモデルは、2mmボクセルで構成された日本人成人男性標準モデルとして広く使用されているNICT Taroモデルの頭部部分であり、組織導電率(等方)ごとに着色して描画した結果を図3に、102チャンネルのコイル配置を重ねたものを図4に示す。

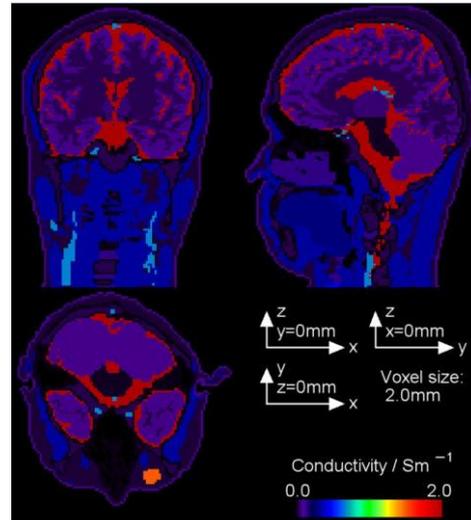
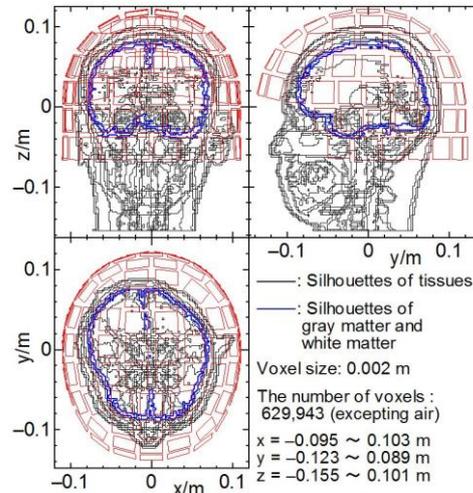


図3 2mmボクセル成人男性頭部モデル (NICT Taroモデルの一部)



空気領域を除いたボクセル数は約60万個、表面電荷要素数は約50万個、灰白質ボクセルの個数は73,362個である。このモデルに対してコイルの個数と同一回数の誘導電界計算を行いイトンの相反定理により各コイルへの誘導磁束を求めてリードフィールド行列を得た。行列のエントリーはマグネトメータの場合で73362×3×102=22,448,772個であり、グラディオメータの場合はその2倍となる。等価電流ダイポールを灰白質内任意の位置に配置してマグネトメータ出力を表示した例を図5に示す。

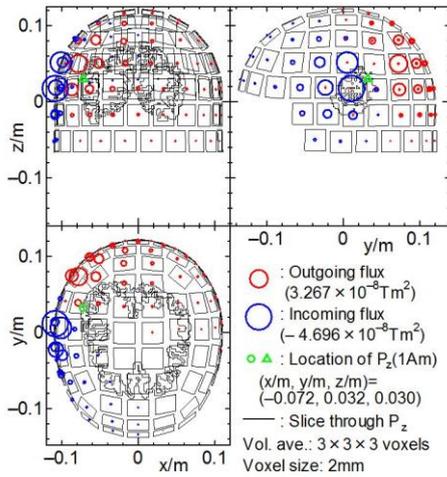


図5 等価電流ダイポールによるマグネトメータ出力の例 (3面展開図; 2mmボクセルモデル)

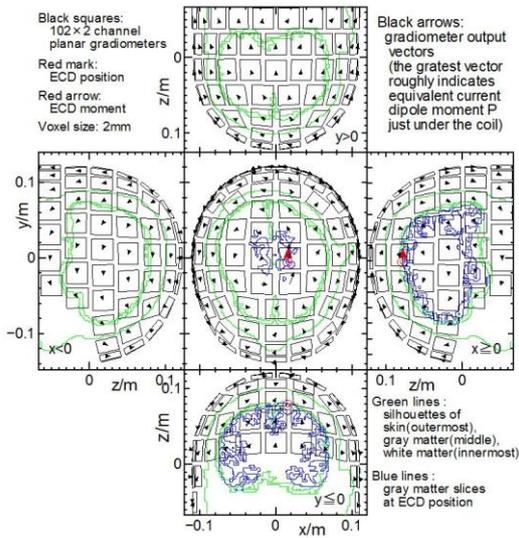


図6 等価電流ダイポールによるグラディオメータ出力の例 (5面展開図; 2mmボクセルモデル)

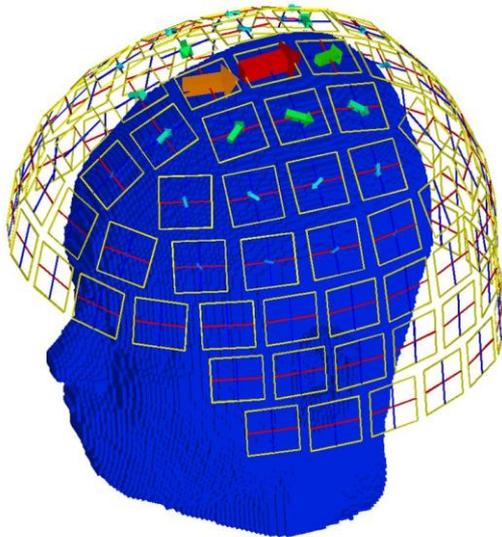


図7 等価電流ダイポールによるグラディオメータ出力の例 (3D表示; 2mmボクセルモデル)

同様に別位置に配置した等価電流ダイポールによるグラディオメータ出力を図6と図7に示す。全リードフィールド計算(電磁界解析204回)の所要時間はCore2quad, 3GHzのPCを2機使用して約4時間となった。

次に、1mmサイズの人体頭部詳細ボクセルモデルに対してリードフィールド計算を行った結果について述べる。使用したモデルは、日本人成人男性のMR画像から画像処理によって作成したオリジナルモデルである。空気領域を除いたボクセル数は約460万個、表面電荷要素数は約150万個、灰白質ボクセルの個数は878,725個である。組織ごとに着色して描画した結果を図8に示す。

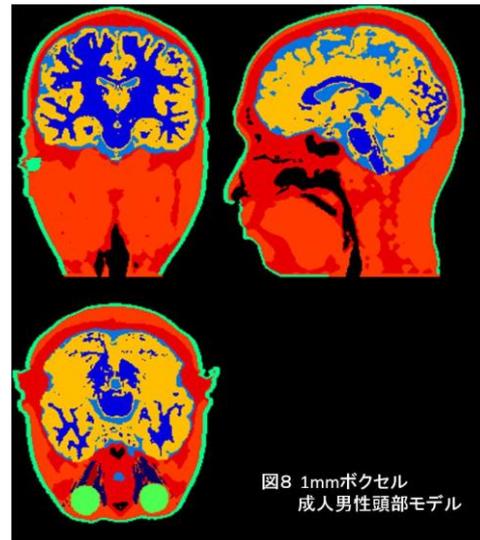


図8 1mmボクセル成人男性頭部モデル

グラディオメータ用の8字コイルに電流を通電させたとして、モデル内部に誘導される電界を計算した結果の例を図9に示す。

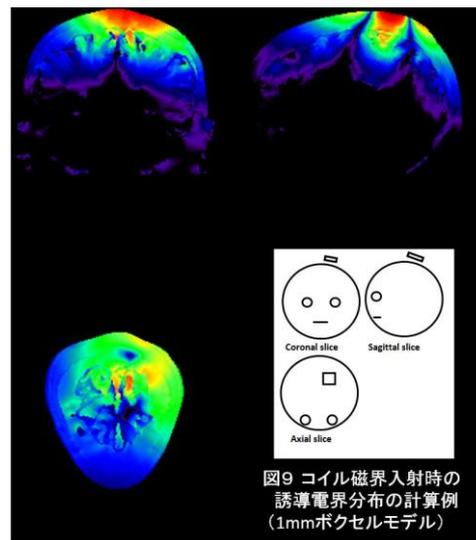


図9 コイル磁界入射時の誘導電界分布の計算例 (1mmボクセルモデル)

これらの結果から、今回もイトンの相反定理によりリードフィールド行列を計算した。

行列のエントリーはマグネトメータの場合で 878, 725×3×102=268, 889, 850 個であり、グラディオメータの場合はその 2 倍の 537, 779, 700 個となる。等価電流ダイポールを灰白質内任意の位置に配置して得たグラディオメータ出力を図 10 と図 11 に示す。

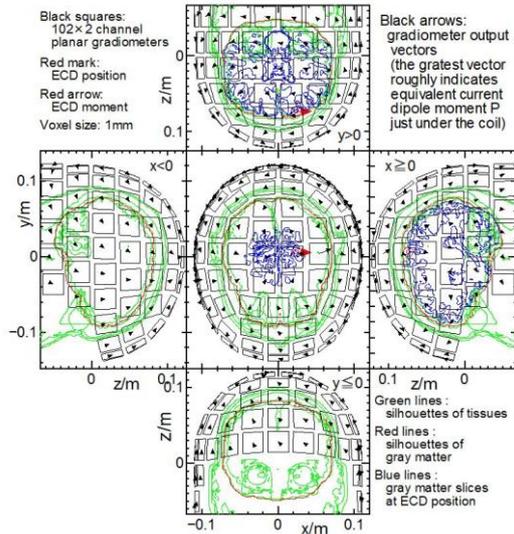


図10 等価電流ダイポールによるグラディオメータ出力の例 (5面展開図: 1mmボクセルモデル)

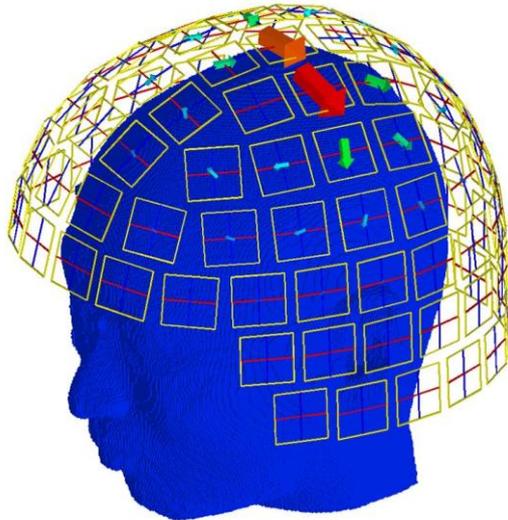


図11 等価電流ダイポールによるグラディオメータ出力の例 (3D表示: 1mmボクセルモデル)

グラディオメータの全リードフィールド計算 (解析 204 回) の所要時間は Core2quad, 3GHz の PC を 2 機用いて約 13 時間となった。

本研究代表者の一連の解析は、偏心多球モデルの厳密解を用いた解法の校正手順を踏んでおり、この点で他の類似研究と比較しても信頼性の高い解析結果を与えているものと考えられる。また、1mm ボクセル頭部詳細モデルを僅か 1Gbyte 程度のメモリ容量で取り扱え、メモリ容量 4Gbyte の 64bit 4core PC

では 4 プロセス同時実行可能で、2機 8 core を使用すると約 7.5 倍の速度向上が得られる。また、境界要素法系列の解法の特長として、要素充填率の低い多球モデルの解析速度は極めて高速である。さらに、高速多重極境界要素法系列の解法は、モデル全体領域の 1 次元分割数を  $D$  として、コンプレキシティが  $O(D^2)$  で収まるという特長を有する。よって、サブミリサイズのボクセルを使用すると、相対的にさらに有利な速度特性が期待される。また、PC 用の汎目的 GPU を使用すると FMM の計算効率を単精度で 100 倍近く、倍精度でも 10 倍近くまで向上できるという報告もあり、今後の開発課題としたい。なお、駆動ベクトルポテンシャルのツリーアルゴリズムによる計算部は、均等 6 面体要素の有限要素解析に流用しても高い計算効率が期待できる。

一方、最近の他組織の研究では異方性の考慮とその評価がポイントの一つとなっている。有限要素法や直接型の境界要素法を用いる場合は、異方性の考慮は比較的容易だが、間接型の境界要素法である表面電荷法を用いる場合は異方性の考慮は容易でない。骨の導電率異方性は皮質と髄質とを分離することで等方解析できる可能性があるが、白質線維の異方性を取り扱うには積分方程式法の枠にまで解法を拡張する必要がある。

他方、EEG 用のリードフィールド計算も、詳細ボクセルモデルに基づく計算法が有効である。まず、頭表に 2 個の電極 (一方は接地) を配置する。電極間に電流  $I$  を通電させ、灰白質のある位置での電界  $E$  を数値計算すると、その位置に配置された等価電流ダイポール  $P$  が先の非接地電極に誘導する電位  $V$  は、グリーンの相反定理より  $V = -P \cdot E / I$  となる。ボクセルモデル用 FMM-SCM を用いて、この電界計算も可能である。EEG と MEG とを統合的に (同時ではなくとも) 実施することで、単独で脳神経活動を推定するよりも信頼性の高い推定結果が得られる可能性がある。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① 濱田昌司, 増谷圭吾, 小林哲生, Gumerov の 2 スカラポテンシャル法による多球モデル内時間調和電磁界解析, 電気学会論文誌 A, 129, 168-176, 2009, 有
- ② Mitsuhiro Kitano, Shoji Hamada, Tetsuo Kobayashi, Analytical formula of induced electric fields in a spherical conductor by an ELF dipole magnetic field source, Electrical Engineering in Japan, 166, 8-17, 2009, 有
- ③ 増谷圭吾, 濱田昌司, 小林哲生, 低周波一様磁界中における偏心二導体球内の誘導電界二次・三次解析式, 電気学会論文誌 A, 128, 710-720, 2008, 有

- ④ 濱田昌司, 北野允大, 小林哲生, ボクセルデータ用高速多重極表面電荷法の誘導電界計算精度の評価, 電気学会論文誌 A, 128, 223-234, 2008, 有
- ⑤ Shoji Hamada, Mitsuhiro Kitano, Tetsuo Kobayashi, Application of the equivalent multipole moment method with polar translations to forward calculation of neuromagnetic fields, Electronics and Communications in Japan, 91, 34-44, 2008, 有
- ⑥ Shoji Hamada, Tetsuo Kobayashi, Analysis of electric field induced by ELF magnetic field utilizing fast-multipole surface-charge simulation method for voxel data, Electrical Engineering in Japan, 165, 1-10, 2008, 有
- ⑦ 岡田雄介, 大橋俊平, 鄭址旭, 濱田昌司, 小林哲生, fMRI-MEG 統合解析法: fMRI 非捕捉信号源の干渉抑制による高精度・ロバスト化, 生体医工学, 45, 275-284, 2007, 有
- ⑧ 北野允大, 濱田昌司, 小林哲生, 低周波ダイポール磁界印加時の導体球内誘導電界の解析式, 電気学会論文誌 A, 45, 346-354, 2007, 有
- ⑨ 濱田昌司, 北野允大, 小林哲生, 極変換付き等価多重極モーメント法の脳磁界順計算への適用, 電気学会論文誌 A, 127, 171-179, 2007, 有
- ⑩ Shoji Hamada and Akiyoshi Tatematsu, Solving regularized least squares with qualitatively controlled adaptive cross-approximated matrices, Electrical Engineering in Japan, 159, 10-18, 2007, 有

[学会発表] (計 10 件)

- ① 濱田昌司, 3 次元 FFT を用いるボクセルモデル用表面電荷法, 平成 21 年度電気学会全国大会, 平成 21 年 3 月 19 日, 北海道大学
- ② Shoji Hamada, Tetsuo Kobayashi, Forward calculation of neuromagnetic fields by fast-multipole boundary element method in real head voxel model, 16th International Conference on biomagnetism (BIOMAG 2008), 平成 20 年 8 月 27 日, ロイトン札幌
- ③ 濱田昌司, 増谷圭吾, 小林哲生, Gumerov の 2 スカラポテンシャル法による多球モデル内時間調和電磁界解析, 平成 20 年電気学会 A 部門大会, 平成 20 年 8 月 21 日, 千葉工業大学・津田沼校舎
- ④ 濱田昌司, 増谷圭吾, 小林哲生, Gumerov の 2 ポテンシャル法を用いた多球モデル

内時間調和電磁界解析, 第 27 回日本シミュレーション学会大会, 平成 20 年 6 月 19 日, 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス

- ⑤ 濱田昌司, 増谷圭吾, 小林哲生, Gumerov の方法を用いた偏心多球モデル内高周波電磁界解析, 平成 20 年電気学会全国大会, 2008 年 3 月 20 日, 福岡工業大学
- ⑥ Shoji Hamada, Mitsuhiro Kitano, and Tetsuo Kobayashi, Numerical calculation of neuromagnetic fields by fast-multipole surface-charge-simulation method for voxel models, APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI, 2007 Dec. 6, Kyoto International Conference Hall
- ⑦ 濱田昌司, 3 次元ラプラス場の高速多重極計算のための数学公式集, 電気学会静止器回転機合同研究会, 2007 年 9 月 20 日, 岡山大学
- ⑧ 増谷圭吾, 濱田昌司, 小林哲生, 低周波一様磁界中の偏心二導体球内誘導電界の二次・三次解析式, 平成 19 年電気学会 A 部門大会, 2007 年 8 月 28 日, 大阪大学
- ⑨ 濱田昌司, 北野允大, 小林哲生, ボクセルデータ用高速多重極表面電荷法の誘導電界計算精度の評価, 平成 19 年電気学会 A 部門大会, 2007 年 8 月 28 日, 大阪大学
- ⑩ Shoji Hamada, Tetsuo Kobayashi, Analysis of electric field distribution induced by 50Hz magnetic fields utilizing fast-multipole surface-charge-simulation method for voxel models, International Conference on Computational Methods, 2007 April 4, International Conference Center Hiroshima

[その他]

ホームページ等

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~shamada/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

濱田 昌司 (HAMADA SHOJI)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20246656

### (2) 研究分担者

小林 哲生 (KOBAYASHI TETSUO) (2007 年度)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 40175336

### (3) 連携研究者

小林 哲生 (KOBAYASHI TETSUO) (2008 年度)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 40175336