

経頭蓋磁気刺激等の生体磁気につわる近況

片山, 喜規
九州大学大学院システム情報科学研究院情報学部門

<https://hdl.handle.net/2324/7402674>

出版情報 : IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials. 134 (1), pp.6-9, 2014-01-01. 電気学会
バージョン :
権利関係 : © 2014 The Institute of Electrical Engineers of Japan.



経頭蓋磁気刺激等の生体磁気に関する近況

正員 片山 喜規*

Latest Report about Biomagnetism, including Transcranial Magnetic Stimulation

Yoshinori Katayama*, Member

(2013 年 10 月 10 日受付)

Recently the biomagnetism and its medical applications become popular than ever, by understanding the usefulness of it (such as MRI) widely spreading among people. The noncontact and noninvasive features of the magnetic applications reduce the risk of subjects. This paper introduces recent trends around the biomagnetism and its medical applications slightly focusing on the recent topics about the transcranial magnetic stimulation (TMS).

キーワード : 生体磁気, 磁気の医療応用, 磁気利用ガイドライン, 経頭蓋磁気刺激

Keywords : biomagnetism, medical application of magnetism, guidelines for applying magnetism, transcranial magnetic stimulation

1. はじめに

近年, 磁気を生体および生体関連機器への適用, いわゆる生体磁気 (Biomagnetism) への関心が高まりつつある。生体はイオンを多く含む体液から絶縁体の骨に至るまで組織毎に様々な導電率を有している。一方, 磁気的には組織に関係なくほぼ透磁率が真空の透磁率に等しいため磁気は生体に対して透過性がある。従って磁気発生装置を体に接触させたり埋め込んだりする必要はない。また, 生体内のターゲットに限定して誘導渦電流や磁気効果による作用を施すことにより, 磁気適用時における外科的措置の必要性や痛みを伴うこともほぼ無い。この様に, 磁気を生体への適用は一般的に非接触かつ非侵襲なものとなる。体外から脳神経系を含んだ生体内への非侵襲な作用を行える手段としては他に超音波⁽¹⁾等があるが, 方向性を持った作用を生体内のターゲットに与えることができるという点において, 磁気は他よりも制御の余地がある手段と言えよう。一方, 生体への磁気適用を安全に行うためには磁気 (広義には電磁気) が生体に及ぼす影響に対するガイドラインを整備する必要がある。

磁気を生体透過性は, 生体の神経活動に伴う磁気的変動を体外から観測する場合でも有効である。その場合, 生体内から生じる微小な磁気信号を検出するための超伝導量子干渉素子 (SQUID), 外界の様々な電磁波から微小な磁気の

測定環境を確保するためのシールド技術等が必要となる。

生体磁気における磁気の医療応用技術の動向に関しては, 電気学会磁気応用による医療へのシーズ技術調査専門委員会 (委員長: 山田外史) が 2012 年に技術報告書⁽²⁾をまとめている。本稿は, 上記報告書を概説すると共に, 経頭蓋磁気刺激に関する近況を加えたものである。

2. 磁気の医療応用技術の動向

磁気を医療に应用する場合, 生体そのものや生体内の装置を磁気適用のターゲットとする。電磁誘導や磁性体への磁気トルクにより, 生体への磁気適用下においては非侵襲・非接触の状態で信号やエネルギーの取得・伝送, 力の伝達が可能となる。これらの磁気の機能を①刺激作用, ②センシング, ③アクチュエータ・シールド, ④エネルギー, の 4 種類に分類し, それぞれの医療応用技術の動向を示す。

〈2・1〉 生体の磁気刺激と医療技術 磁気刺激で生体が受ける直接的な作用を医療に応用する研究である。主に以下の 3 種類が挙げられる。

(1) 磁界の物理化学効果による新規医療応用 酵素の様な生体内化学反応において, タンパク質分解酵素のトリプシンで 20T, 活性酸素系酵素の SOD 等で 14T までの磁場効果は見出されていない。生物の感覚器官の中では視覚系が電磁場に対して高感度であり, 10Hz, 20mT 程度の交流磁界に対して網膜細胞が「磁気閃光」現象を起こす事が知られている。更に, 生物の磁気感覚に用いられているラジカル対による磁気コンパスの機能解明, 生体内マグネタイトの磁界配向作用の応用や人工合成ナノ磁性粒子によるドラッグデリバリーや細胞マニピュレーション等の研究も

* 九州大学大学院システム情報科学研究院情報学部門
〒819-0395 福岡市西区元岡 744
Department of Informatics, Graduate School of Information Science
and Electrical Engineering, Kyushu University
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

進められている。

（２） 磁界と薬剤の併用 従来パルス磁場暴露による抗がん剤の作用増強の報告例が多数行われてきたが、柿川らによってマイトマイシン C 他数種類の薬剤の殺細胞作用における 60Hz 磁場の増強効果の測定とそのメカニズムが検証された⁽³⁾。培養液中の残存薬剤作用を測定することにより、交流磁場暴露によって薬剤の細胞膜透過率が高まり、薬剤効果が増強することが判明した。また、分子量の大きな薬剤は細胞膜透過率が高まり難くなる事も示唆された。

（３） 磁気刺激の医療応用 経頭蓋磁気刺激（TMS）の有用性が周知され、診断やアルツハイマー病、脳卒中後のリハビリテーションに盛んに用いられている。更に近年はパーキンソン氏病等の運動中枢系疾患やうつ病等の精神疾患の治療応用も試みられているが、磁気刺激の作用に関してはまだ不明な点がある。また、磁気刺激の温熱作用などを介した筋疲労回復効果の研究、電磁誘導による温熱磁気刺激による末梢血流量および体表皮温度の変化といった新しいタイプの生体磁気刺激応用が進められている。なお、神経認知科学的な磁気刺激応用も活発になされている。

〈2・2〉 生体機能計測 磁気を能動的・受動的に用いた生体機能計測として、以下の４種類の研究を示す。

（１） 脳波・TMS の組み合わせによる脳機能計測 パルス磁界によって生体内に渦電流を誘起させ、これにより神経や筋を刺激する磁気刺激が脳機能計測・イメージングの有効な手段として注目されている。Ueno らによる 8 字コイルを用いた局所的磁気刺激法が提案⁽⁴⁾されて以来、TMS は大脳皮質の標的を 5mm 以内の分解能で刺激することが可能となった。TMS はその非侵襲性により運動機能検査、障害回復による皮質運動野の可塑性評価、皮質運動野の位置同定・マッピング、脳内の機能性連関等に応用されている。近年では、反復経頭蓋磁気刺激（rTMS）を用いた高次脳機能計測や脳の可塑性の促進も試みられている。

また、TMS により脳神経を刺激すると共に脳波を計測し、脳機能をダイナミックに計測する手法が提案されている。脳磁図や脳波、fMRI、近赤外線分光法（NIRS）などによる脳機能イメージング法は脳活動を受動的に計測するが、この手法は脳活動を TMS で制御しながら生じる脳波変化を計測することから、脳内処理におけるネットワークを能動的に計測できる可能性がある⁽⁵⁾。

（２） 神経磁気検査技術 SQUID 磁束計を用いて脳磁計（MEG）を構成する手法は既に医療機器の承認の下、臨床現場で使用されている。脳機能マッピングやてんかんの診断が適用対象であるが、最近では脳磁計の応用範囲を広げる研究が進んでいる。坂本らによる虚血状態の神経の低周波発振現象を用いた脳虚血の早期診断⁽⁶⁾、開眼時と閉眼時とでの脳波のアルファ波成分の違いを用いた認知症の早期診断⁽⁷⁾、脳磁計の時間分解能の高さを活かして脳の部位毎の同期状態を検査するコヒーレンス解析に基づいた菊知らによる脳波のシータ波成分の伝導と言語表現能力との関連を調べた神経精神病学への応用⁽⁸⁾が挙げられる。

脳深部からの信号測定としては、木村らによる手指の電気刺激の反応が視床から大脳皮質に伝播する様子を捉えた例⁽⁹⁾がある。体性誘発反応の測定における加算回数を従来の 100 回程度から 2500 回に増やすことで観測が可能となった。

測定対象に特化した SQUID 磁束計システム開発の 1 つに脊磁計⁽¹⁰⁾による頸部脊髄神経の伝播信号の測定がある。従来の MRI や CT による形態調査では判らなかつた脊髄神経の伝導障害の様子が脊磁計で確認出来るようになった。

SQUID による磁気測定応用としては、ターゲットの深さ方向の磁界成分を計測できる SQUID を格子状に配置することによる三次元心磁図計測や、SQUID からの信号にデジタル制御の FLL (Flux-Locked-Loop) を適用することによって磁気シールドルームレスで多チャンネル化が可能な SQUID 計測システム⁽¹¹⁾の開発等が研究されている。

（３） 超高感度磁気センサを用いた細胞組織評価 生命科学において細胞の分化誘導を確認する現在の主な手法は細胞組織の電気的特性を光学的な信号に変換する方法であるが、色素を細胞に取り込ませる事自体が侵襲的である。その代用として、細胞組織レベルの電気生理学的現象を超高感度磁気センサで非侵襲的に観測する試みがなされた。同時計測された細胞電位によって測定された Ca^{2+} 移動に同期した磁気測定結果が得られることが確認された⁽¹²⁾。

（４） 磁気マーカーによるバイオセンシング技術 ナノメータサイズの磁気微粒子を高分子で被覆し、その表面に検査用抗体や薬剤を結合させたものを磁気マーカーと呼ぶ。磁気マーカーの大きさは 50~200nm であり、蛋白質や細胞の分離・精製、MRI の造影剤、磁気的ハイパーサーミア、磁気的免疫検査等種々の医療・バイオ分野に応用されている。前 2 つは既に市販、後 2 つは研究段階にある。

磁気マーカーを用いたバイオセンシングには、体外診断、体内診断を目指した検査システムの開発が行われている。体外診断ではバイオ物質と結合した磁気マーカーと遊離したものとでブラウン磁気緩和特性が大きく異なることから識別でき、体内診断ではガン細胞の抗体を持つ磁気マーカーの体内凝集度の違いがガン細胞の広がりに対応する。

〈2・3〉 磁気アクチュエータ・磁気シールド技術 生体に直接作用はしないが、磁気の医療応用として必要な技術として、人工臓器等の生体内医療機器の駆動・制御技術や上述の各種測定環境を確保するための磁気シールド技術に関する研究を示す。

（１） 体内埋込型人工心臓 人工心臓の研究は全置換人工心臓から補助人工心臓へと移行し、構造的にも拍動型から羽根車を回すターボポンプを用いた連続型が主流となった。中でも遠心ポンプは臨床研究が進み、2010 年 12 月に日本での製造販売の承認を受けるに至った。遠心ポンプは羽根車の回転軸と軸受が必要となるが、軸受でのシール材の低寿命性、摺動部の摩擦熱による血球破壊・凝固、軸受の磨耗等の諸問題を解決するために、ピボット軸受方式、動圧軸受方式を経て羽根車を磁気で非接触支持する磁気軸受方式の開発に至っている。

(2) 外部磁界によるワイヤレス駆動技術 生体内の医療機器の駆動に磁気を用いる研究は古くから提案されている。何れも磁界と磁性体との間に生じるトルクを利用しており、磁界の印加方法によって回転磁界、直流磁界、交流磁界による駆動がある。回転磁界を磁石に印加すると磁石が回転運動する。回転物体の外壁に螺旋構造を形成することによりカプセル内視鏡の前進後退運動や微小送液ポンプに使用されている。直流磁界を磁石に印加すると磁石には磁化方向と磁界が平行になる方向にトルクが働き、また勾配磁場環境下では並進力が働く。これらはカテーテルの先端屈曲機構や磁性クリップで挟んだ組織の体外磁気による保持、胃腔観察を目的とする磁気誘導型カプセル内視鏡の姿勢制御に応用されている。交流磁界を磁石に印加すると磁石に回転振動が生じる。磁石にブラシや弾性版を取り付けることで、カプセル内視鏡の直線運動や体内埋込用マイクロポンプの流体送出機構に応用が検討されている。

(3) 医療機器用磁気シールド 磁気共鳴イメージング(MRI) 検査における装置やシールドルームから患者が受ける圧迫感を軽減する目的で、大きな透光性開口部を持つ MRI 室が構築されている。磁気シールド材である磁性体を短冊状や角筒状に形成することにより、直流磁場や電磁場の遮蔽機能を確保・調整しつつ十分な透光性の確保や熱の透過、MRI 室の改修を容易にする工夫がなされている。

(4) 磁気シェイキングを適用した磁気シールド 低保持力で高角型特性を有する強磁性体に適度な交流磁界を印加することで磁壁移動のエネルギーを供給し、微弱な低周波外部磁界に対して磁性体の磁壁移動に対応することにより実効的増分透磁率を増大させる磁気シールド手法である。見かけの比透磁率を大きくすることにより磁気シールドの軽量化、更にはシェル分離型の研究が行われている⁽¹³⁾。

〈2・4〉 生体内へのエネルギー・信号伝達 エネルギー伝送に磁気を用いる利点は、非侵襲・低侵襲でかつ非接触(ワイヤレス)で体外から体内のターゲットにエネルギーを伝達できることである。用途としては人工心臓等の体内にある医療機器への電力供給や生体への機能的電気刺激(FES)用電力供給、ハイパーサーミアでの熱転換エネルギー供給などがある。エネルギー伝達を目的とした強度の磁界に皮膚や体内機器が暴露されるため熱損を考慮する必要がある、伝送エネルギー密度には限界がある。

ハイパーサーミア(温熱療法)は、がん細胞近傍の血管が径拡張による放熱性に乏しいことによるがん細胞の熱耐性の低さから、患部を局所的に一定時間 42~43℃以上に加温することによってがん細胞を死滅させる治療法である。磁気応用として、磁場を受けて作用する発熱体を体内(患部)に埋め込み、体外から強磁場を照射して選択的に加温する誘導加温法がある。現在は、カテーテルを経由して体内に輸送可能な直径 1mm 程度のハイパーサーミア用共振回路インプラント、フェライトナノ粒子を高分子で被覆し前述の磁気マーカーに類した構造の磁気ビーズ、デキストラン・マグネタイト(DM)という磁性流体等を発熱体とした研究

が行われている。DM に関しては、大きな粒子(実際はクラスター構造粒子)の選別による発熱効率の向上、ダブルパンケーキ型励磁コイルによる深部加熱が試みられている。

磁気による非接触エネルギー伝達と信号通信を両立させる場合、両者が共に電磁波であるため信号が伝送エネルギーに埋もれてしまうこと、低侵襲性の要求から生体内インプラント側が小型であることが問題となる。解決策として、①エネルギー伝送磁界と通信コイルの鎖交面を直行させる、②2つの通信コイルでエネルギー伝送ノイズを逆相で受信しノイズキャンセリングをかける、の2方式が提案されており、どちらも高いフィルタリング能力を示している。

〈2・5〉 医療機器の磁界利用ガイドライン MRI 検査の汎用化により、公衆や職業的従事者が強い静磁界に暴露される機会が増えている。これに対して国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)が静磁界暴露に対する人体防護ガイドラインを1994年に策定し、2006年の世界保健機構(WHO)の環境保健クライテリアにより見直され2009年に改訂された。また、低周波磁界暴露の人体安全性に関してはICNIRPの1998年発行のガイドライン(0~300GHz)が高レベル磁界の短期暴露における0~100kHzでの急性影響等を加味して2010年11月に大幅改訂された。ガイドライン策定には網膜の「磁気閃光」現象が考慮されている。

医療機器の電磁両立性(EMC)に関する国際規格は、機器からの電磁放射を制限するエミッション規格と機器の電磁耐性を規定するイミュニティ規格で構成され、IEC60601-1-2(第1版,1993)に規定され、JIS T 0601-1-2(2002)にJIS化されている。現在の最新版はIEC60601-1-2 Ed.3(2007)である。

TMS は脳神経へのパルス磁場暴露という特殊性のため、別途学会によって安全使用のためのガイドラインが提案されている。単発、二連発 TMS に関しては安全性が確立していると言え、刺激周波数が 1Hz 以下の低頻度磁気刺激に関しては 1 週間の刺激回数に上限を設定する提案がなされている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。刺激周波数が 1Hz 以上の高頻度時期刺激のヒトでの応用に関しては、倫理委員会の承諾、刺激パラメータの準拠⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾等、より厳しいガイドラインが提言されている。MRI においても、従来は禁忌であったペースメーカーや埋め込み式除細動器装着者に対する MRI 検査のガイドラインが模索されている⁽¹⁸⁾。

3. 経頭蓋磁気刺激に関する最近の動向

生体磁気の中で特に TMS にまつわる最近の研究事例として、関野らによる在宅治療用のポータブル TMS 装置の開発と片山らによる TMS 適用中の脳波測定時に生じる TMS アーチファクトの除去について触れる。

〈3・1〉 在宅治療用小型 TMS 装置の開発 治療目的で rTMS を適用する場合、例えば難治性神経障害性疼痛に対しての治療効果の継続は約 1 日と言われる。rTMS の効果を継続して得るためには定期的な通院が必要となる。患者の QOL 向上の観点から、在宅治療が可能でコンパクトな磁気刺激システムの開発が望まれている。その要素技術として、

非医療従事者でも安全かつ容易に TMS コイルの位置決めを行える磁場ナビゲーションシステムの開発⁽¹⁹⁾や、従来の 8 字コイルに対して渦電流をより集中させ刺激の局所性を高めた偏心 8 字コイルの開発および回路定数の数値解析の研究⁽²⁰⁾が行われている。TMS コイルの高性能化は磁気刺激システム全体の小型化に寄与するため、同システムの早期実現が切望される。

〈3・2〉 TMS 適用時測定脳波アーチファクト除去

TMS 適用中の脳波計測を行うと、測定脳波波形には TMS に依存した雑音波形が重畳される。この雑音は TMS アーチファクトと呼ばれ、発生原因としては電磁誘導や空間寄生容量、表皮伝播が考えられている。TMS アーチファクトは通常の脳波に対して大きな振幅成分となり脳波解析上の障害となるため、TMS アーチファクトの低減除去が望まれている。そのための従来手法として、独立成分分析 (ICA) によるアーチファクト成分の検出と除去、サンプルホールド回路の導入、主成分分析 (PCA) に基づく多重情報源モデル、カルマンフィルタの適用等がある。片山らは TMS アーチファクト形成の主原因が TMS コイルからの磁束によって脳波測定装置系に生じる誘導起電力であると想定した。TMS 装置と脳波測定装置系を電気回路モデルで近似表現し、TMS コイルからの磁束による誘導起電力の影響を解析解で表現、測定脳波に適合させることで TMS アーチファクトを除去する手法を提案した⁽²¹⁾。このモデルは TMS アーチファクトの形状を記述・生成できるため、TMS アーチファクト除去手法の評価におけるアーチファクト源としても使用できる⁽²²⁾。

4. おわりに

本稿では近年医療応用への関心が高まりつつある生体磁気まつわる最近の動向を概説すると共に、とりわけ TMS における最近の研究事例を示した。磁気医療応用研究の動向に関しては、電気学会磁気応用による医療へのシーズ技術調査専門委員会の報告書に負う所が大きい。この解説を通して生体磁気医療応用に関する知見が広がることを期待している。

文 献

- (1) Y. Tufail, A. Matyushov, N. Baldwin, M. L. Tauchmann, J. Georges, A. Yoshihiro, S. I. H. Tillery, and W. J. Tyler: "Transcranial Pulsed Ultrasound Stimulates Intact Brain Circuits", *Neuron*, Vol.66, No.5, pp.681-694 (2010)
- (2) 磁気応用による医療へのシーズ技術調査専門委員会編:「磁気医療応用研究の動向」, 電気学会技術報告, No.1260 (2012)
- (3) M. Kakikawa, T. Fujihata, M. Iwahara, and S. Yamada: "Enhanced Potency of Anticancer Drug, Bleomycin by ELF Magnetic Fields", *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mecha.* (APSAEM08), Vol.17, pp.83-86 (2009)
- (4) S. Ueno, T. Tashiro, and K. Harada: "Localized stimulation of neural tissues in the brain by means of a paired configuration of time-varying magnetic fields", *J. Appl. Phys.*, Vol.64, No.10, pp.5862-5864 (1988)
- (5) G. Thut and A. Pascual-Leone: "Integrating TMS with EEG: How and what for?", *Brain Topogr.*, Vol.22, pp.215-218 (2010)
- (6) S. Sakamoto, W. Ide, I. Hashimoto, H. Kamada, H. Tanaka, and K. Sekihara: "Recovery of spontaneous neuromagnetic activity after extracranial-intracranial bypass in a patient with middle cerebral artery occlusion", *Acta Neurochir.*, Vol.150, No.12, pp.1285-1290 (2008)

- (7) 初坂奈津子・樋口正法・鶴谷奈津子・町谷知彦・山田正仁・賀戸 久:「認知症診断のための自発性脳磁場データベースの構築」, 第 22 回生体磁気学会論文集, Vol.20, No.1, pp.206-207 (2007)
- (8) M. Kikuchi, K. Shitamichi, Y. Yoshimura, S. Ueno, G. B. Remijn, T. Hirose, T. Munesue, T. Tsubokawa, Y. Haruta, M. Oi, H. Higashida, and Y. Minabe: "Lateralized theta wave connectivity and language performance in 2- to 5-year-old children", *J. Neurosci.*, Vol.31, No.42, pp.14984-14988 (2011)
- (9) T. Kimura, I. Ozaki, and I. Hashimoto: "Impulse Propagation along Thalamocortical Fibers Can Be Detected Magnetically outside the Human Brain", *J. Neurosci.*, Vol.28, No.47, pp.12535-12538 (2008)
- (10) 足立善昭・宮本政和・河合 淳・上原 弦・川端茂徳・佐藤朋也:「SQUID 磁束計による頸部脊髄誘発磁場計測システムの開発」, 電学論 E, Vol.129, No.6, pp.181-186 (2009)
- (11) 小山大介・小林宏一郎・吉澤正人・清水隆行・中居賢司・内川義則:「SQUID 用ダブルカウンタ方式によるデジタル FLL システムの開発」, 応用磁気学誌, Vol.29, No.3, pp.351-355 (2005)
- (12) T. Uchiyama, K. Mohri, and S. Nakayama: "Measurement of Spontaneous Oscillatory Magnetic Field of Guinea-Pig Smooth Muscle Preparation Using Pico-Tesla Resolution Amorphous Wire Magneto-Impedance Sensor", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.47, No.10, pp.3070-3073 (2011)
- (13) 笹田一郎・西村匡史・田島哲也・原田翔夢・竹田敏和・島田政紀:「分離型大型磁気シールド 2 号機の特長と心磁界計測」, 電気学会研資, MAG-11-086 (2011)
- (14) 脳刺激法に関する委員会:「磁気刺激法に関する委員会報告 No.10」, 臨床神経生理学, Vol.34, No.1, pp.71-72 (2006)
- (15) 脳刺激法に関する委員会:「磁気刺激法に関する委員会からのお知らせ」, 臨床神経生理学, Vol.35, No.6, p.565 (2007)
- (16) E. M. Wassermann: "Risk and safety of repetitive transcranial magnetic stimulation: report and suggested guidelines from the International Workshop on the Safety of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, June 5-7, 1996", *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, Vol.108, pp.1-16 (1998)
- (17) R. Chen, C. Gerloff, J. Classen, E. M. Wassermann, M. Hallett, and L. G. Cohen: "Safety of different inter-train intervals for repetitive transcranial magnetic stimulation and recommendations for safe ranges of stimulation parameters", *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, Vol.105, pp.415-421 (1997)
- (18) M. J. W. Götze, I. K. Rüssel, G. J. de Roest, T. Germans, R. F. Veldkamp, P. Knaapen, C. P. Allaart, and A. C. van Rossum: "Magnetic resonance imaging, pacemakers and implantable cardioverter-defibrillators: current situation and clinical perspective", *Neth Heart J.*, Vol.18, pp.31-37 (2010)
- (19) 福島大志・西川 敦・宮崎丈夫・関野正樹・安室喜弘・松崎大河・細見晃一・齋藤洋一:「在宅型反復経頭蓋磁気刺激治療のための磁場ナビゲーションシステムの開発」, 生体医工学, Vol.49, No.1, pp.122-131 (2011)
- (20) 加藤拓哉・関野正樹・松崎大河・西川 敦・齋藤洋一・大崎博之:「経頭蓋磁気刺激用の偏心 8 字コイルの回路定数と脳内渦電流分布の数値解析」, 生体医工学, Vol.50, No.1, pp.180-188 (2012)
- (21) Y. Katayama and K. Iramina: "Equivalent Circuit Simulation of the Induced Artifacts Resulted From Transcranial Magnetic Stimulation on Human Electroencephalography", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.45, No.10, pp.4833-4836 (2009)
- (22) N. A. Zilber, Y. Katayama, K. Iramina, and W. Erich: "Efficiency test of filtering methods for the removal of transcranial magnetic stimulation artifacts on human electroencephalography with artificially transcranial magnetic stimulation-corrupted signals", *J. Appl. Phys.*, Vol.107, Issue 9, p.09B305-1 (2010)

片山喜規 (正員) 1964 年 11 月 21 日生。1987 年 3 月九州大学工学部電子工学科卒業, 1989 年 3 月同大学大学院修士課程 (電子) 修了。現在, 同大学システム情報科学研究情報学部助教授。現在, 時系列パターン解析・認識, および生体・脳波信号処理に関する研究に従事。博士 (工学)。電気学会 磁気を用いた新たな診断・治療機器創出のための技術調査専門委員会 幹事補佐。2008 年度電子情報通信学会論文賞受賞。IEEE, 電子情報通信学会, 日本音響学会会員。

