

学 位 論 文 題 名

色覚関連誘発脳磁界の計測に関する研究

—低振幅反応の検出と磁気ノイズ低減の検討—

学位論文内容の要旨

視覚の情報処理過程には脳に組み込まれている情報処理アルゴリズムの多くが利用されていると考えられており、明暗、方向、形状、動き、色彩などの属性に応じて直列・並列の情報処理が行なわれている。このような視覚機能の情報処理過程についての知見は、他の視覚機能の処理過程や認知などの高次機能発現の過程を解明するうえで重要なステップとなる。

本研究は、局所的な脳の神経活動を非侵襲で計測できる脳磁界を用いて、特に色覚に関わる脳磁界誘発反応を検出することを目的に研究を行なった。色覚の処理に対する選択的反応を得ることを目的として、色のみが交替する刺激図形を考案し、この図形により誘発反応を比較することで、色覚に関連する成分の特定を試みた。その結果、低振幅の誘発脳磁界反応が認められた。一般に誘発応答の振幅は非常に微弱であるため、環境磁気ノイズのわずかな増大が、著しい SN 比の低下をまねく。そこで、環境ノイズの中で特に問題となる電源周波数磁気ノイズを低減することを目的として、電源磁気ノイズの空間分布ベクトルの算出方法を検討し、ベクトル差分による電源磁気ノイズ除去の有効性について検討した。以下に本論文の各章の概略を示す。

第 1 章は序論として、本研究の目的について述べた。

第 2 章では、脳磁界の発生源と脳磁界計測に使用した SQUID 計測システムを説明し、脳磁界信号源の推定方法について概説した。

第 3 章では、研究の背景として色覚の視覚情報処理系の構造についての概説と、これまでの脳波と脳磁界による色覚の研究結果を簡略にまとめ、これらから主に色に関連する反応を得るような刺激図形の条件を示した。作成した刺激図形は白色の線で 8 分割した円で、視角にして直径約 2.5 度である。特定の象限内の色が赤から緑、緑から赤へと 800～1100ms の間隔で交替する。第 1 象限のみ色が交替する場合と第 3 象限のみ色が交替する場合の 2 種類の刺激図形を使用し、提示した色は flicker 法により主観的な輝度を約 11cd/m^2 の白と同一にした。

以上の刺激図形を用いて誘発脳磁界応答を、4 人の被験者について測定した。

赤緑、緑赤の切り替わりをトリガとして、低頻度刺激である青の提示とその後の数回の交替を除いた各々200 応答を選択的に加算平均した。得られた応答を、色の交替順序と交替する象限で波形振幅や空間分布に差異があるのかを比較し、さらに信号源推定計算の結果を検討した。その結果、色の交替の順番で波形ピーク潜時と磁界分布が異なる反応を観察した。また、緑赤反応と赤緑反応で信号源推定の位置が異なる例が見られたことから、交替する色により活動する皮質内の部位が異なる可能性が示された。全被験者の信号源の位置が頭頂後頭溝付近に多く推定されたことから、この部位は色覚に関連する情報処理を行っていることが推測される。脳磁界計測を用いた検査が臨床に普及し始めている現在、本研究の知見は、脳磁界計測を用いた色覚検査の基礎に利用できる可能性がある。

第4章では、簡易磁気シールド下で行なう脳磁界計測で特に問題となる電源周波数磁気ノイズの低減を目的として、電源磁気ノイズの空間分布ベクトルの算出方法を検討し、ベクトル差分による電源磁気ノイズ除去の有効性について定量的に評価した。考案した方法は、生体磁気信号計測とは別個に信号を含まない環境磁界データを計測し、そこから取り除きたい磁気ノイズ成分を周波数フィルタ処理によって抽出して、磁気ノイズ成分の磁界単位ベクトルを算出する試みである。環境磁気ノイズデータ（100 エポック）の一つのエポックから磁界単位ベクトルを算出して異なるエポックの磁気ノイズ成分を差分し、周波数スペクトル解析による 50Hz 成分のパワーを差分前と比較すると、電源周波数 50Hz 成分は 8.6% に減衰していた。さらに誘発応答をシミュレートし、本手法のノイズ差分が信号源推定結果に与える影響を調べた。その結果、加算平均のみの場合と比べ、ほとんどの場合で GOF（goodness of fit：計測磁界と計算磁界の一致度の指標）と距離誤差の平均値およびそれらの標準偏差の値が改善されていることがわかった。このことは、電源周波数の磁気ノイズ成分が効果的に除去できたことで、SN 比が増加し推定精度が上昇したことを示している。

第5章は結論として、本研究で得られた主な結論を要約した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 栗 城 眞 也

副 査 教 授 清 水 孝 一

副 査 教 授 河 原 剛 一

学 位 論 文 題 名

色覚関連誘発脳磁界の計測に関する研究

—低振幅反応の検出と磁気ノイズ低減の検討—

視覚の情報処理過程には脳に組み込まれている情報処理アルゴリズムの多くが利用されていると考えられており、明暗、方向、形状、動き、色彩などの属性に応じて直列・並列の情報処理が行なわれている。このような視覚機能の情報処理過程についての知見は、他の感覚情報の処理過程や認知などの高次機能発現の過程を解明するうえで重要なステップとなる。他方、脳科学の発展に伴い、脳機能を計測・解析する多様なアプローチ法が求められている。

本論文は、局所的な脳の神経活動を非侵襲で計測できる脳磁界を用いて、特に色覚に関わる誘発反応を検出することを目的に研究を行なっている。色覚の処理に対する特異的な反応を得ることを目的として、色のみが交替する視覚刺激を考案し、この図形による誘発反応を検出することで色覚に関連する成分の特定を試みている。一方、色覚誘発反応のような脳磁界応答の振幅は非常に微弱であるため、環境磁気ノイズのわずかな増大が、著しい SN 比の低下をまねく。そこで、環境ノイズの中で特に問題となる電源周波数磁気ノイズを低減することを目的として、電源磁気ノイズの空間分布ベクトルの算出方法を考案し、ベクトル差分による磁気ノイズ除去の有効性について検討している。本論文の主な成果は、以下にまとめられる。

(1) 色覚関連誘発脳磁界応答の計測と解析

色覚の情報処理系の構造と、これまでの脳波と脳磁界による色覚の研究結果をまとめ、これらから主に色に関連する反応を得るような刺激図形の条件を示している。作成した刺激図形は白色の線で 8 分割した円で、視角にして直径約 2.5 度である。特定の象限内の色が赤から緑、緑から赤へと 800~1100ms の間隔で交替する。第 1 象限で色が交替する場合と第 3 象限で色が交替する場合の 2 種類の刺激図形を使用し、さらに提示した色は flicker 法により主観的な輝度を約 11cd/m^2 の白と同一にしている。したがってこの視覚刺激は他の属

性を一定とし、色のみが変化する。この刺激図形を用いて誘発脳磁界応答を 4 人の被験者について測定し、赤緑、緑赤の切り替わりをトリガとして、各々 200 応答を選択的に加算平均した。その結果、色の交替の順序で波形ピーク潜時と磁界分布が異なる反応を観察し、さらにそれらの反応間（緑赤反応と赤緑反応）で、信号源の位置が異なる例が見られたことから交替する色により視覚野の活動が異なる可能性を指摘している。また、全被験者の信号源の位置が頭頂後頭溝付近に多く推定されたことから、高次視覚野に対応するこの部位が色覚に関連する情報処理を行っていると推測している。脳磁界計測を用いた検査が臨床に普及し始めている現在、これらの知見は、脳磁界応答を用いた客観的色覚検に利用できる可能性がある。

（2）商用電源周波数磁気ノイズの低減

色覚誘発脳磁界のような低振幅の脳磁界応答を簡易磁気シールド下で計測する際に、特に問題となる環境ノイズに電源周波数磁気ノイズがある。そこで、その低減を目的として、ベクトル差分による電源磁気ノイズ除去法について定量的に検討を行っている。脳磁界計測とは別個に信号を含まない環境磁界データを計測し、そこから取り除きたい磁気ノイズ成分を周波数フィルタ処理によって抽出して、磁気ノイズ成分の磁界単位ベクトルを算出する方法を考案している。実際に環境磁気ノイズデータ（100 エポック）の一つのエポックから磁界単位ベクトルを算出して異なるエポックの磁気ノイズ成分を差分し、周波数スペクトル解析による 50Hz 成分のパワーを差分前と比較すると、電源周波数 50Hz 成分は 8.6% に減衰することを確認した。さらに誘発応答をシミュレートし、ノイズ差分が信号源推定結果に与える影響を調べた結果、加算平均のみの場合と比べ、ほとんどの場合で GOF（goodness of fit：計測磁界と計算磁界の一致度の指標）と距離誤差の平均値およびそれらの標準偏差の値が改善された。このことは、電源周波数の磁気ノイズ成分が効果的に除去できたことで SN 比が増加し推定精度が上昇したことを示しており、考案した磁気ベクトルの抽出方法の妥当性を示している。

以上を要するに、著者は色覚関連誘発脳磁界計測と磁気ノイズ成分低減の研究を行い有用な知見を得たものであり、生体工学に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。