全頭型SQUIDシステムにより計測された自発脳磁界の主成分分析と主成分除去法

小 林 哲 生
北海道大学 電子科学研究所
Tetsuo Kobayashi
Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

1．はじめに

人間の脳機能を非侵襲的に調べる有力なツールの一つとして脳磁界計測がある。近年、脳磁界計測は多チャネルのSQUID (Superconducting Quantum Interference Device) システムを用いて行われるのが一般的となってきた。しかし、多チャネルSQUIDシステムにより同時計測される誘発脳磁界には、加算平均後にも空間的な規則性の高い律動的な自発脳磁界が残存し、信号源推定の誤差の原因となることが指摘されている[1]。本稿では、残存自発脳磁界成分を低減する為に新たに考案した主成分除去法[2,3]と共に、全頭型SQUIDシステムを用いて計測された自発脳磁界の時空間特性について述べる。

2．主成分除去法

各試行毎に計測される脳磁界**B**はSQUIDシステムのチャネル数pとデータサンプル数kの積の成分を有する次式のような行列となる。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11}, B_{12}, \cdots, B_{1p} \\ B_{21}, B_{22}, \cdots, B_{2p} \\ \vdots \\ B_{k1}, B_{k2}, \cdots, B_{kp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1' \\ \mathbf{b}_2' \\ \vdots \\ \mathbf{b}_k' \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで ' は転置を示す。

Bは誘発脳磁界**Be**と自発脳磁界**Bb**および、外来磁気雑音やシステム雑音との和からなっている。

各試行毎の**B**を主成分分析[4-6]すると、固有ベクトル行列

$$\mathbf{A} = \left[\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \cdots, \mathbf{a}_j, \cdots, \mathbf{a}_p \right] \quad (2)$$

が得られる。ここで、$\mathbf{a}_j$ はp個の成分からなる第j主成分の固有ベクトルである。行列の性質を利用すると**B**は次式の様に変形できる。

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}\,\mathbf{I}_p = \mathbf{B}\,\mathbf{A}\mathbf{A}' = \mathbf{B}\,\mathbf{a}_1\mathbf{a}_1' + \mathbf{B}\,\mathbf{a}_2\mathbf{a}_2' + \cdots + \mathbf{B}\,\mathbf{a}_p\mathbf{a}_p' \quad (3)$$

$\mathbf{I}_p$ はp次単位行列である。

式(3)から**Bb**を主に表現する項を次式のように除去して新たな磁界データ**B**newを得た後加算平均することにより、得られる誘発脳磁界に残存する自発脳磁界の寄与の低減が期待できる。

$$\mathbf{B}_{new} = \mathbf{B} - \mathbf{B}\,\mathbf{a}_j\mathbf{a}_j' = \mathbf{B} - (\mathbf{a}_j'\mathbf{B}')'\,\mathbf{a}_j' = \mathbf{B} - (\mathbf{a}_j\,\mathbf{S}_j)' \quad (4)$$

ここで $\mathbf{S}_j$ は第j主成分の主成分得点のベクトルであり、次式となる。

$$\mathbf{S}_j = (\mathbf{a}_j'\,\mathbf{B}') = \left[S_{j1}, S_{j2}, \cdots, S_{jk} \right] \quad (5)$$

3．全頭型SQUIDシステム

使用した全頭型SQUIDシステムはカナダ、ＣＴＦ Systems社製で、64チャネルと143チャネルの２つのタイプである。いずれのタイプも磁界の検出に、ハードウエア的には１次微分グラジオメータを使用しているが、さらにソフトウエアにより２次あるいは３次微分グラジオメータが実現できる様になっている。このため磁気シールドルームなしで高精度の計測が可能である。グラジオメータのコイル径20mm、上下コイル間隔50mmは両タイプのシステム共通である。コイル中心間距離は64チャネルシステム、143チャネルシステム各々45と32mmである[7]。

4．結果および検討

図１に64チャネルシステムにより計測された自発脳磁界の任意の１エポックに対して求めた主成分の内、第１～第３主成分の空間分布、寄与率並びに時間波形として表した主成分得点ベクトルを示す。被験者は年齢31歳右利きの男性

（開眼状態）である。脳磁界はサンプル周波数250Hzで１エポックにつき1.0s間、これを100エポック分収集した。グラジオメータは３次であり、0～100Hzの帯域通過フィルタをかけて計測した。第1主成分の分布を見ると左半球から磁界が湧き出し、右半球に吸い込まれるという全頭にわたる大きなパターンを示していることがわかる。また第1主成分の主成分得点の時間変動から約8～9Hzの周波数を有していることが分かり、第１主成分にはα波が抽出されていると判断できる。他のエポックについても、空間分布に変動はあるものの、第1主成分が全頭全体に広がる相関の高いα波の時空間特性を示すと判断できる結果であった。先に直径144mmの円形の測定領域をカバーできる37チャネルSQUIDシステム(BTi社製)により同様の解析を行った結果、その第1主成分もα波の時空間特性を示すと判断できたが[2,3]、その空間分布は測定範囲内でほぼ平坦なモノポール的パターンを示していた。本研究の結果は、このモノポール的パターンが全頭全体に広がる大きな同期的活動の一部を示していることを示唆している。また本研究により先に述べた主成分除去法が全頭型SQUIDシステムにも適用可能であることが確認できた。

【謝辞】

本研究を遂行するにあたり、全頭型SQUIDシステムの使用を快く許可して頂いたSimon Fraser大学、Weinberg教授並びにCTF社、Burbank博士、実験にご協力頂いたCTF社、Cheyne博士並びにRobinson博士に深謝する。

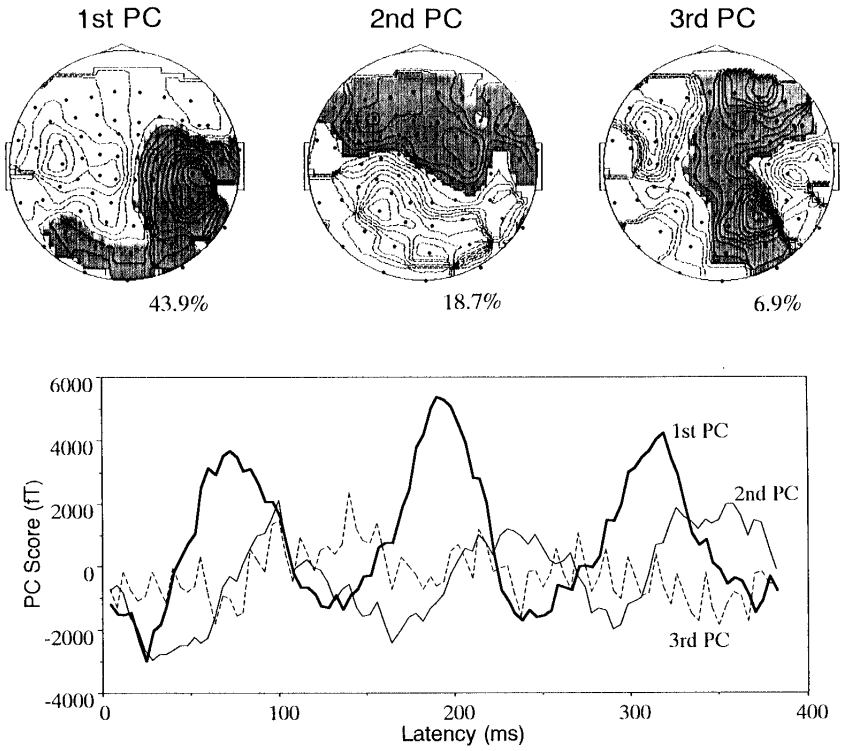

図１　64チャネル全頭型SQUIDシステムにより計測された自発脳磁界の任意の１エポックにおける第１～第３主成分の空間分布（等高線間隔は0.05ステップ、グレーの部分が負の値）、寄与率並びに時間波形として表した主成分得点ベクトル

[参考文献]

[1] Kuriki S., Takeuchi F. and Kobayashi T., "Characteristics of the background fields in multichannel-recorded magnetic field responses", Electroenceph Clin. Neurophysiol , vol. 92, pp.56-63, (1994)

[2] 小林哲生、栗城真也、"多チャネル誘発脳磁界計測における自発脳磁界成分低減の検討"、電子情報通信学会技術研究報告、MBE96-35, pp.7-12 (1996)

[3] 小林哲生、栗城真也、"誘発脳磁界に重畳する規則性の高い背景脳磁界の低減"、日本生体磁気学会誌、Vol.9, No.1, pp.64-65 (1996)

[4] Maier J., Dagnelie G., Spekreijse H. and Van Dijk B.W., "Principal component analysis for source localization of VEPs in man", Vision Res. **27** 165-177 (1987)

[5] Baumgartner C., Sutherling W.W., Di Shi and Barth D.S., "Investigation of multiple simultaneous active brain sources in the electroencephalogram", J. Neurosci. Meth. **30** 175-184 (1989)

[6] Kobayashi T., Kuriki S. and Takeuchi F., "A simulation study on the dynamic characteristics of neuromagnetic fields using single-moving-dipole and two-fixed-dipoles models", Physics in Medicine and Biology, Vol.38, pp.1271-1282 (1993)

[7] Vrba J, "SQUID gradiometers in real environments", In SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications, (Kluwer Academic Pub., 1996)pp.117-178.