触覚刺激を用いた誘発脳波のフラクタル解析

正員 田中久弥 (青山学院大学)

正員 井出英人 (青山学院大学)

非会員 長嶋祐二 (工学院大学)

Fractal Analysis of Somatosensory Evoked Potentials by Tactile Board Stimuli Skin

Tanaka Hisaya, Member, Ide Hideto, Member (Aoyamagakuin University), Nagashima Yuji,
Non-member (Kogakuin University)

Evoked potentials of EEG means sensation, recognition and action of human. Generally, somatosensory evoked potentials are analysed using averaging or frequency analysis. However, averaging analysis is defective in that high-frequency off-phased components tend to cancel each other and so detailed information may easily be lost. On the other hand, in the frequency analysis, time-axis information may easily be lost. In addition, in the past analysis of data, the amount of the fluctuation represented by the $1/f$ power spectrum has been treated in its entirety as noise. Nevertheless, non-linear phenomena as represented by chaos of fractal indicate the possibility of quantification in numerical analysis.

In this paper, the fractal analysis of event related potential is carried out, and its results are used to examine fluctuational conditions in intellectual activity. In addition, peaks equivalent to N100 or P300 did not show up clearly. This is considered to be because fractal analysis is more suited to the detection of variations in inducement amount rather than that of peaks.

キーワード：触覚, 脳波, SEP, フラクタル解析

1. はじめに

ヒトの感覚, 認知, 行動に伴う脳神経活動は誘発脳波に反映される⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾。一般に誘発脳波は自発脳波に比べ信号が微弱なため, 刺激や運動開始に合わせて加算平均処理を施すことにより, 特徴抽出が行われてきた。

体性感覚誘発電位(somatosensory evoked potential:SEP)は感覚神経系の誘発電位である。刺激後20msまでの短潜時成分は外部刺激の感覚成分として分析されている。それ以降の中・長潜時成分については認知過程に関係するため, 誘発成分が増大して状態が不安定になる。SEP解析は一般に加算平均解析法が用いられ500から2000回の加算回数が必要とされている⁽¹²⁾。しかし加算回数が増大すると $1/f$ ゆらぎなどのゆらぎ情報が雑音と見なされるため, 脳波の定常状態を評価することはできなかった⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

そこで本研究では誘発脳波の分析にフラクタル解析を導入した。タクトイルボードを用いた触覚誘発脳波を測定して, 時系列のフラクタル次数を求め時間-フラクタル領域における感覚, 認知過程の特徴抽出について検討したので報告する。

2. 時系列のフラクタル解析

乱雑な時系列のパワースペクトルが顕著なパワーを持った周波数成分が無い連続的な構造を示すことが知られている⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾。このパワースペクトルが $P(f) \propto f^{-\alpha}$ で近似できるときに, この時系列を広義の $1/f$ ノイズとよぶ。もし時系列が $1/f^{-\alpha}$ で十分近似できる時, この時の α が乱雑さを表現する一つの指標になる。

このパワースペクトルから α を求める解析のほかに, Mandelbrot⁽¹³⁾の提案による R/S 解析などが乱雑な時系列の定量解析に応用されてきたが, 最近ではフラクタルやカオスのアイデアにより非線形モデルについての解析が行われるようになった。これらの解析では, 非周期的なものや, 乱雑な振る舞いを持つものを定量的に表現することが可能であり, 従来ノイズとみなされてきたものに対して, 一定の法則性を持つことが示されている。そこでフラクタル⁽¹⁾の考えを導入することにより, ゆらぎが持つ情報を定量的に表現することが可能となった。

時系列のフラクタルを適用するにあたり, 時系列 $X(i)$ がフラクタルであるということを以下のように定義する。

様々な k で粗視化を行ったときの時系列全体の長さを $L(k)$ とする。このとき $\log k$ vs $\log L(k)$ が直線になるときに、時系列はフラクタルである。このとき直線は $L(k) \propto k^{-D}$ と表せ、フラクタル次元はこの直線の傾きにより決定される。

しかし時系列において時間軸方向の粗視化は Δt の整数倍で行われ、最大 $N\Delta t$ (N :データ数) までである。よって最小値 Δt 、最大値 $N\Delta t$ を越える区間において粗視化を行うことは不可能であり、この区間内においてのみフラクタルであるとした。ここで $X(1), X(2), \dots, X(N)$ 個のデータがあるとき、新たに k で粗視化した時系列セット X_k^m ; $X(m), X(m+k), X(m+2k), \dots, X[m+\{(N-m)/k\}k]$, ($m=1, 2, \dots, k$) を用意し、このように構成された個々の x_k^m に対する長さを次のように定義する。

$$L_m(k) = \frac{\sum_{i=1}^{(N-m)/k} |X(m+ik) - X\{m+(i-1)k\}| \cdot \frac{N-1}{(N-m)/k}}{k}$$

k により粗視化された時系列の長さ $L(k)$ を k 個の $L_m(k)$ の算術平均で定義する。

$$L(k) = \frac{\sum_{m=1}^k L_m(k)}{k} \dots\dots\dots (2)$$

このとき $L(k) \propto k^{-D}$ であれば、 D 次元のフラクタルである。

3. 実験方法

〈3・1〉 測定装置と測定方法 ここではタクトイルボード(図 3)を用いて被験者の右手差指に凸状の触覚刺激を与えた場合の誘発脳波(SEP)を測定する。測定装置を図 1に示す。生体アンプは日本光電社製の Neurotop(MME-3132)を用いる。ローカットフィルタは0.16Hz、ハイカットフィルタは60Hzに設定する。データレコーダのサンプリングレイトは200Hzとする。測定は電波シールドルームで行う。遮蔽効果は100dB(0.2から1000MHzまで)である。電源はすべて医療機器用のノイズフィルタ付電源ボックスより供給される。誘発脳波は刺激前100msから刺激後400msまでを1レコードとして記録する。脳波は耳朶裏の乳様突起を基準電位(A1,A2)にした基準電極(単極)導出法により測定する。導出電極は、10-20国際電極法に基づき⁽¹²⁾装着し、更に左側体性感覚野を中心に10ch追加して計29chの電極を頭皮上に装着する(図 2)。電極インピーダンスは5kΩ以下とする。

〈3・2〉 被験者と呈示刺激 被験者は20から25歳の健康な男女各6名、合計12名とした。被験者は図 4 のような

図1 システム構成図
Fig. 1. System diagram

図2 電極装着部位
Fig. 2. Electrodes placement

姿勢で安静覚醒閉眼状態で測定する。刺激条件は以下のとおりである。

- ・ 刺激の種類 Tactile board による触覚刺激(図 3)
- ・ 刺激圧力 6.25kg・cm⁻² + threshold
- ・ 刺激部位 右手差指の先端部(指紋のある部位)
- ・ 刺激呈示間隔 ランダム(ただし呈示間隔は2秒以上)

刺激は指先の1点刺激と、2点刺激を用意する。試行は1点刺激を標的的刺激、2点刺激を非標的的刺激とする。また逆に1点刺激を非標的的刺激、2点刺激を標的的刺激の場合も測定する。標的刺激の出現確率は20%とする。生起順序はランダムである。被験者には標的刺激の計数課題を与える。

〈3・3〉 解析方法 はじめに記録された脳波データに対して100回の加算平均を行う。この加算平均は信号のノイズ除去が目的である。一般にSEP(触覚誘発電位)を加算平均解析するには500~2000回の averageが必要とされて

図3 タクタイルボード

Fig. 3. Tactile board

図4 測定中の被験者の状態

Fig. 4. Subject state in experiment

いるので、100回の加算平均によるフラクタル解析への影響は少ないと考えられる。加算平均の解析時間は刺激呈示前-100msから呈示後400msとする。次に加算平均後のデータに対してフラクタル解析を行う。解析時間は刺激呈示前96msから呈示後360msとする。解析の切り出し幅は64msとして、16msずつ時間軸方向に移動しながらフラクタル次数を計算する。

4. 解析結果および考察

図5に被験者D(25歳男性)の触覚誘発電位(標的刺激のもの)を示す。これは電極部位P3,C3,24,25,29(左側体性感覚野付近)及びCzにおいて計測された脳波を100回加算平均した結果である。刺激呈示が0msである。以後、発現するスパイク状の電位が幾つも確認できるが、11ms付近の陽性電位(P11)は脊髄後索、13ms付近の陽性電位(P13,P14)は脳幹諸核、20msの陰性電位(N20)は第1次体性感覚野の限局した部位をそれぞれ起源としている⁽⁹⁾。20ms以降の電位成分については、大脳感覚野が認知活動に複雑に関係してくると考えられる。中・長期潜時成分の中でも図5にみられるようなP45,N60,P100成分は一般的に知られている。

図6に、図5の誘発脳波から計算したフラクタル次数の時間変化を示す。その結果、体性感覚野付近では潜時が0msつまり刺激呈示後0から64msの区間データ前後にフラク

図6 体性感覚野付近のフラクタル解析結果

Fig. 6. Fractal analysis in somatosensory area

図7 体性感覚野以外のフラクタル解析結果

Fig. 7. Fractal analysis in non-somatosensory area

タル次数の低いピークがみられ、それを過ぎるとフラクタル次数が上昇していく傾向がみられた。これは100ms以内に現れる誘発脳波の成分では脳の情報処理過程を反映する誘発脳波のゆらぎが減少する方向に向かい、その後の過程では逆にゆらぎが大きくなることを表している。定常状態にあった脳波は刺激による誘発電位によってその定常性を失いしばらくして回復する。またこの変化は刺激を感覚する過程と刺激を認知する過程を代表する結果と考えられるので、その境が潜時100ms付近にあるのではないかと推定される。

図7に同じく被験者Dの左側体性感覚野以外(電極部位F4,C4,P4)で測定されたデータのフラクタル解析結果を示す。右側体性感覚に関わらないこれらの部位では、左側体性感覚野付近で見られるような変化を確認することはできない。

図8に被験者Dのフラクタル次数のトポグラフィマップを示す。この図は刺激呈示前96msから0ms(呈示時点)のフ

図5 触覚誘発脳波の加算平均結果

Fig. 5. Averaged EEG (Somatosensory Evoked Potentials:SEP)

ラクトル次数の平均値を基準とし、相対差を等高線表示したものである。これは誘発量の変化を時間的、空間的に表現している。図8では色が赤い部分がフラクタル次数が増加傾向にあり、青い部分が減少傾向にある。右手に触覚刺激を与えると(神経線維は延髄錐体で交叉しているため)左脳一次感覚野の右差指の支配領域が賦活する。図8の32msから144msのトポグラフの青い領域が感覚成分を反映して

いると考えられる。青い右手差指の賦活領域は脳電位図による空間的解析と一致する⁽⁹⁾⁽⁷⁾。一方256ms付近から頭頂部を中心とした赤い領域が現れるが、これは認知過程の反映と考えられる。

図9に被験者Dについての標的及び非標的の刺激のフラクタル解析の比較を示す。刺激認知の誘発脳波は事象関連電位と呼ばれ、潜時約300msに陽性電位が発現するP300波

図8 フラクタル解析結果のトポグラフ表示
Fig. 8. Fractal-topograph analysis

が知られている。P300波は頭頂部を中心に現れるので電極Czの測定値で議論されることが多い。今回のフラクタル解析もこれにないCzのデータとする。非標的刺激を提示した場合には潜時100msまではフラクタル次数は減少し、その後は再び刺激呈示前と同等の次数まで戻る。一方標的刺激を呈示した場合には、潜時100msまでは非標的刺激と同様に次数は減少する。さらに潜時320msまで次数は減少しその後は刺激呈示前と同じ次数まで戻る。

この結果から安静時にはフラクタル次数に大きな変動はないが刺激が呈示されると誘発脳波により定常状態が崩れ、フラクタル次数が減少すると考察できる。特に非標的刺激では150msec以降、フラクタル次数が回復することに対して、標的刺激を呈示した場合には、潜時300ms付近まで次数の減少が続き、1に近づいている。これは認知に関わる誘発成分が強く影響しているものと考えられる。

図9 Czにおけるフラクタル解析結果
Fig. 9. Fractal analysis in Cz

5. ま と め

脳波は時間経過に対して多様な変化を示し、音声、筋電や心電図のゆらぎと比べて微弱かつ複雑な信号である。そのためヒトの感覚情報処理ではその定常性についての議論が多く行われ、その定量的解析は一般に困難であることされている。

一方でフラクタル解析は時系列がもつゆらぎや周波数特性に着目して、そのゆらぎを定量的に表現することができる。本研究では触覚刺激による誘発脳波を測定し、フラクタル解析を行い、時間-フラクタル次数領域での分析を行った。その結果、誘発成分が脳波の定常状態へ影響していることが確認された。特に標的・非標的の両刺激の場合を比較すると、刺激後100msまでは両者は同様にフラクタル次数が減少するが、認知活動が起こる標的刺激ではその回復が300ms以降であることが確認された。これは今回示した被験者D(25歳男性)以外の被験者についても確認された。よって、フラクタル次数の時系列変化は感覚・認知過程の進行度を反映するものといえる。

今後は刺激方法を変えて実験・検討し、フラクタル次数の変化量の有意性について検討していく。

(平成9年5月1日受付、同10年2月4日再受付)

文 献

- (1) 加藤比呂子 他:脳波の時系列解析:定常性・フラクタル性・正規性, 電子情報通信学会 (D-II), J74-DII, pp.1466-1471(1991)
- (2) 井出英人, 八木真二郎:フラクタルによる聴覚誘発電位の解析, 電学論C, 113, 730(1993)
- (3) Nakagawa M: A Critical Exponent Method to Evaluate Fractal Dimensions Self-Affine Data, J. Phys. Soc. Jpn., 62, 12, pp.4233-4239(1993).
- (4) 木本早苗, 池口徹他:脳波の定常性: 信学技報, NLP92-31(1992)
- (5) 小河清隆, 中川国弘:脳波におけるカオスとそのフラクタル性, 信学技報, MBE93-135(1994)
- (6) 井出英人:可動タクトイル・ボード式文字提示装置, 電学論, 107C, 10, pp.962((1987)

-
- (7) 西藤聖二, 平川一美他: 脳波の相関次元, 信学論 (A), J75-A, 6, pp.1045-1053(1992-06)
 - (8) 橋本勲: 短潜時誘発電位, 臨床病理特集号 3, 筋・神経系機能検査の進歩 (1985)
 - (9) Eckmann J.P. and Oliffson Kamphorst S: Lyapunov exponents from time series, Phys. Rev. A, 34, 6, pp.4971-4979(1986)
 - (10) 高安秀樹: フラクタル, 朝倉書店 (1986)
 - (11) 誘発電位検査法委員会: 誘発電位測定指針, 脳波と筋電図 第13巻1号 (1985)
 - (12) B.B. Mandelbrot: The Fractal Geometry of Nature (Freeman, San Francisco, 1982), 広中平祐監訳, フラクタル幾何学, 日経サイエンス社 (1984)
 - (13) 樋口知之: 時系列フラクタル解析, 統計数理, 37, 2, pp.209-233 (1989)
 - (14) T. Higuchi: Approach to an Irregular Time Series on the Basis of the Fractal Theory, Physica, D, 31, pp.277-283 (1988)
 - (15) Tamas Vicsek: 宮島佐介訳: フラクタル成長現象, 朝倉書店 (1990)
 - (16) 山口昌哉: カオスとフラクタル, 講談社 (1986)
 - (17) 田中久弥, 安倍崇史, 長嶋祐二, 西谷善樹, 井出英人: 体制感覚誘発脳電位 (SEP) のトポグラフ解析法の検討, 電気学会計測研究会資料, IM-97-53 (1997)

田 中 久 弥 (正員) 1997年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了 (情報学専攻). 生体情報, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 現在, 青山学院大学理工学部電気電子工学科助手. 電子情報通信学会, 日本ME学会会員.

井 出 英 人 (正員) 1970年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了 (電気工学専攻). 1985年UCLA応用科学科客員研究員. 1986年UCLA脳研究所客員教授. 感覚の計測, 感覚代行の研究に従事. 青山学院大学理工学部講師, 助教授を経て現在, 同教授. 工博. 日本ロボット学会, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会会員.

長 嶋 祐 二 (非会員) 1980年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了 (電気工学専攻). 同年同大学電子工学科助手. 現在, 同大助教授. ヒューマンインタフェース, 生体計測の研究に従事. 工博. 電子情報通信学会会員.