

自発的脳活動に見られる 遷移ダイナミクス

伊藤 淳司^{*1}

理化学研究所 脳科学総合研究センター
計算論的神経科学研究グループ
認知動力学研究チーム^{*2}

概要

安静状態のヒトの脳波の主要成分であるアルファ活動が示す時空間ダイナミクスの解析から、安静時のヒト脳の活動は、さまざまな準安定な進行波パターン間の遷移と、その遷移確率分布の長時間スケールでの変動によって特徴づけられることが見出された。このような特徴は元データと同様の線形相関構造をもつサロゲートデータにおいては見られないことから、自発的脳活動に見られる複雑な状態遷移は単なるランダムな過程ではなく、脳神経系の非線形ダイナミクスを反映していると考えられる。

1 導入

従来の脳科学は主に外部からの刺激に対する脳神経系の応答に注目してきたが、近年、刺激の無い状態において脳神経系が自発的に示すダイナミクスへの関心が高まってきている [1]。今回我々は安静状態のヒトの脳波の主要成分であるアルファ活動 (8-13 Hz の周波数帯域の活動) の頭皮上位相分布が示す時空間ダイナミクスに着目し、安静時のヒト脳の活動は、さまざまな準安定な進行波パターン間の遷移と、その遷移確率分布の長時間スケールでの変動によって特徴づけられることを見出した [2]。

2 対象と方法

11 人の健康な被験者 (男性 5 人、女性 6 人、平均年齢 23.3(±3.1) 歳) が実験に参加した。(うち 1 人のデータはアルファ活動を示さなかったため除外。) 被験者は椅子に腰かけた状態で、脳波測定が行われる 8 分間のあいだ目を閉じてリラックスす

るように教示された。脳波は頭皮全体をカバーする 256 個の電極から 250 Hz のサンプリング周波数で同時測定され、0.1~100 Hz のバンドパスフィルタを通した後コンピュータに保存された。電位の基準は測定時頭頂部に置かれたが、測定後、全てのデータは全電極の平均を基準電位とした値に変換された。

測定データ中の非線形ダイナミクスの有無を統計的に検定するため、帰無仮説を「測定データに見られる時空間ダイナミクスは、時間的・空間的に線形の相関のみを持つランダムな過程である」と置き、これを満足するサロゲートデータをフーリエ変換法 [3] を用いて生成した。

3 結果

被験者から得られた脳波データは 8~13 Hz のバンドパスフィルタに通され、アルファ帯域成分が抽出された。第 i 番目のチャンネルから得られた脳波のアルファ帯域成分を $X_i(t)$ とすると、この信号の位相 $\theta_i(t)$ は $X_i(t)$ の Hilbert 変換 $\tilde{X}_i(t)$ を用いて $\theta_i(t) = \arctan \tilde{X}_i(t)/X_i(t)$ と表される。頭皮上の位相分布の時間変化は、頭皮全体に渡る進行波パターンとして観測される大域的な位相同期状態と、乱流様のパターンとの入れ替わりによって特徴づけられる [2]。位相同期状態間の遷移に注目するため、適当なチャンネル (第 R 番目のチャンネルであるとする) における位相から測った、各チャンネルの相対位相 $\phi_i(t_n) = \theta_i(t_n) - \theta_R(t_n)$ を用いて各時刻の位相パターンをベクトル $\mathbf{P}(t_n) = (\phi_1(t_n), \phi_2(t_n), \dots, \phi_N(t_n))$ で表す (N はチャンネルの総数)。この相対位相パターンベクトルの時間変化は位相同期状態の安定性を反映すると考えられるので、1 サンプリングステップにおける $\mathbf{P}(t_n)$ の時間変化 I を以下のように定義し、これを不安定性の指標として採用する。

$$I(t_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^N d_i(t_n)^2},$$

$$d_i(t_n) = \pi - |\pi - |[\phi_i(t_n) - \phi_i(t_{n-1})] \bmod 2\pi||.$$

^{*1} E-mail: j-ito@brain.riken.jp

^{*2} 現在の所属は (同研究グループ) Gruen 研究ユニット

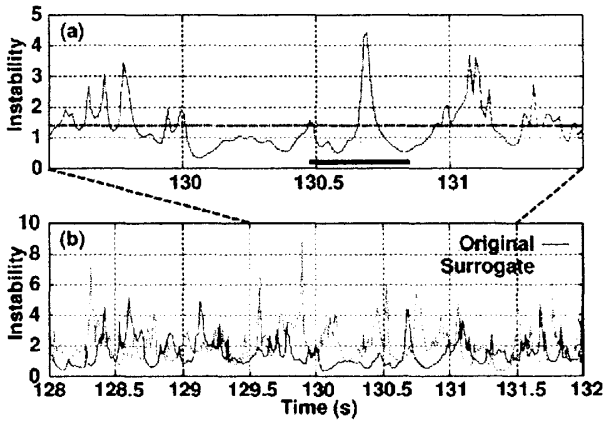


図1 不安定性指数 I の時間変化。

不安定性指数 I の時間変化を図1に示す。

指数 I は間欠的な変動を見せ、ラミナー部分は位相同期状態に、バースト部分は乱流様パターンに対応する。よって、適当な閾値 I_{th} を設け $I < I_{th}$ となる時間帯のみに着目することで、位相パターンの時系列から位相同期状態のパターンのみを抜き出すことができる。^{*3} $I < I_{th}$ となる時間帯のうち第 j 番目のものを $\mathbf{p}^j$ で表すとすると、この時間帯に現れる (相対) 位相パターンの平均 $\mathbf{p}^j$ は

$$\mathbf{p}^j = (\psi_1^j, \dots, \psi_N^j),$$

$$\psi_i^j = \arctan \frac{\sum_{t_n \in \mathcal{I}^j} \sin \phi_i(t_n)}{\sum_{t_n \in \mathcal{I}^j} \cos \phi_i(t_n)},$$

で表され、ベクトル列 $\{\mathbf{p}^1, \mathbf{p}^2, \dots\}$ は各相対位相パターンで特徴づけられる大域的位相同期状態間の遷移過程を表す。

この遷移過程のダイナミクスを解析するため、ベクトル列 $\{\mathbf{p}^j\}$ を以下のような手段でシンボル化する。相対位相 $\{\phi_i\}$ ($1 \leq i \leq N$) の張る相空間を c 個の細胞に分割し、各 $\mathbf{p}^j$ をそれが属する細胞を表すシンボルと同値とみなす。すなわち、相空間 X の分割を $\mathbf{B} = \{B_1, \dots, B_c\}$ として ($\bigcup_{\mu=1}^c B_\mu = X$ かつ、 $\mu \neq \nu$ のとき $B_\mu \cap B_\nu = \emptyset$)、関係式 $\mathbf{p}^j \in B_{s^j}$ によってベクトル列 $\{\mathbf{p}^j\}$ とシンボル列 $\{s^j\}$ を関

^{*3} 今回は閾値として I の値の分布の 50 パーセンタイルを取ったが、以降の結果は閾値の値に強くは依存しない。

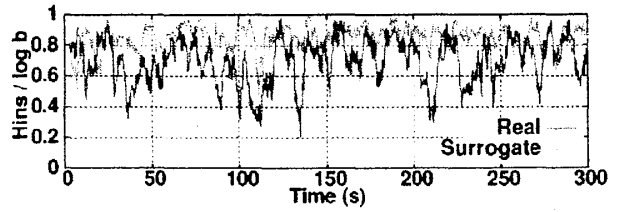


図2 パターン出現確率のエントロピー $H_{ins}(t_n)$ の時間変化。

連づける。相空間の分割は、 k -平均法を用いた $\{\mathbf{p}^j\}$ のクラスタリングによって行う。

シンボル列 $\{s^j\}$ によって表される位相同期状態間の遷移は、ある程度時間を粗視化して長時間スケールの挙動を見ることでその特徴が明らかになる。^{*4} 時刻 t_n を中心とし、幅 w 秒を持つ時間窓内の、シンボル μ に対応する位相パターンの出現確率 $\rho_\mu(t_n)$ を考える。

$$\rho_\mu(t_n) = \frac{\sum_{l^i \in [t_n - \frac{w}{2}, t_n + \frac{w}{2}]} \delta_{\mu s^i} \tau^i}{\sum_{l^i \in [t_n - \frac{w}{2}, t_n + \frac{w}{2}]} \tau^i}.$$

以下で定義される $\{\rho_\mu(t_n)\}$ のエントロピー $H_{ins}(t_n)$ は、各時間窓内におけるパターン間遷移過程の秩序性を表す。

$$H_{ins}(t_n) = - \sum_{\mu=1}^c \rho_\mu(t_n) \log \rho_\mu(t_n).$$

図2にエントロピー $H_{ins}(t_n)$ の時系列を示す。サロゲートデータを用いた結果と実際のデータの結果を比較すると、実際のデータではエントロピーは激しく変動し、しばしば非常に低い値を取るのに対し、サロゲートデータでは揺らぎは小さく、一貫して比較的高い値を保っていることがわかる。表1にエントロピー H_{ins} の時間平均を各被験者ごとに示す。10人の被験者中8名において、サロゲートデータから得られた H_{ins} の平均値より有意に低い値が得られた。

^{*4} シンボル間遷移確率を用いた、短時間スケールの挙動の解析については文献 [2] を参照。

Sbj.	Real	Surrogate
1	2.18*	2.22 (± 0.02)
2	2.12*	2.19 (± 0.02)
3	1.86*	2.21 (± 0.01)
4	2.08*	2.26 (± 0.01)
5	2.15*	2.25 (± 0.02)
6	2.19*	2.24 (± 0.02)
7	2.25	2.27 (± 0.02)
8	2.30	2.30 (± 0.01)
9	2.28*	2.33 (± 0.01)
10	2.18*	2.27 (± 0.02)

表1 H_{ins} の平均値。アスタリスクは対応するサロゲートの平均より有意に低い値であることを示す。

4 議論

図1に示された H_{ins} の時系列を詳しく見ると、急激な値の落ち込みは10秒程度のタイムスケールで起こっていることがわかる。これは元となるアルファ活動のタイムスケール(0.1秒程度)と比べると非常に遅いダイナミクスである。また、この時系列を各パターンの出現確率 $\{\rho_{\mu}(t_n)\}$ の時系列と比較すると、 H_{ins} の値が急激に落ち込んでいる状態では、ある特定のひとつのパターンの出現確率が特異的に高くなっており、また引き続くそれぞれの H_{ins} 低下状態では、出現しやすいパターンはそれぞれ異なっていることがわかる(文献[2]参照)。このことは、安静状態のアルファ活動のダイナミクスが、ある特定の位相パターンで特徴づけられる状態を10秒程度維持した後、別のパターンで特徴づけられる状態へと遷移し、そのような遷移が延々と続いている、というものであることを意味している。このようなダイナミクスは脳神経系におけるカオス的遍歴[4]の一例として捉えることができるかもしれない。

また、今回観察されたものと同様の位相パターンの遷移過程は、脳神経系においてさまざまな時間・空間スケールで見出されており[5]、脳神経系のスケール不変なダイナミクスの特徴を表しているもの

と考えられる。

今回の我々の実験では、被験者は脳波測定中、認知タスク等を何も課されていないため、被験者の脳内ではさまざまな思考内容が独自のダイナミクスを持って変転していると考えられる。そのような変転がアルファ活動の長時間変動として観察されているとも考えられるが、この考察の検証には被験者からのレスポンスと適切なタスクを組み込んだ新たな実験プロトコルの設定が必要であり、今後の課題として残されている。

参考文献

- [1] Raichle ME, The Brain's Dark Energy. Science 314, 1249-1250 (2006); Kenet T et al., Spontaneous emerging cortical representations of visual attributes. Nature 425, 954-956 (2003); Sasaki T et al., Metastability of Active CA3 Networks. J. Neurosci. 27, 517-528 (2007).
- [2] Ito J et al., Dynamics of spontaneous transitions between global brain states. Hum. Brain Mapp., Epub ahead of print.
- [3] Prichard D and Theiler J, Generating surrogate data for time series with several simultaneously measured variables. Phys. Rev. Lett. 73, 951-954 (1994).
- [4] Tsuda I, Toward an interpretation of dynamic neural activity in terms of chaotic dynamical systems. Behavior. Brain Sci. 24, 793-847 (2001).
- [5] Freeman WJ et al., Aperiodic Phase re-Setting in Scalp EEG of Beta-Gamma Oscillations by State Transitions at Alpha-Theta Rates. Hum. Brain Mapp. 19, 248-273 (2003); Schiff SJ et al., Dynamical Evolution of Spatiotemporal Patterns in Mammalian Middle Cortex. Phys. Rev. Lett. 98, 178102 (2007).