

# コラム間相互作用が脳波に与える影響

## Influence of interaction between columns on electroencephalogram

成瀬康(PY)<sup>1)</sup>, 眞溪歩<sup>2,1)</sup>, 宮脇陽一<sup>1,3)</sup>, 岡田真人<sup>2,4)</sup>

Yasushi Naruse (PY), Ayumu Matani, Yoichi Miyawaki and Masato Okada

<sup>1)</sup>情報通信研究機構, <sup>2)</sup>東京大学, <sup>3)</sup>国際電気通信基礎技術研究所, <sup>4)</sup>理化学研究所

y\_naruse@po.nict.go.jp

**Abstract** — We developed an EEG model for cortical column circuits, which model consists of alpha rhythm generators interacting each other through excitatory connections. Our model succeeded in reproducing event-related potentials and event-related synchronization/desynchronization (ERS/ERD). Moreover, the model suggested that coherence between the alpha rhythm generators dominantly caused ERS/ERD.

**Keywords** — EEG, alpha rhythm, cortical column, ERP, ERS/ERD

### 1 はじめに

脳波は約80年前に発見されて以来, 多くの実験的研究に利用されている. その結果, 視覚刺激等により事象関連電位(ERP)が発生し,  $\alpha$ 波等の自発活動の強度変化(ERS/ERD)が引き起こされることなどが分かった. 更にERPやERS/ERDが認知的活動と関連することも数多く報告された. しかし, ERPやERS/ERDがどの様にして認知的活動と関連するのかの神経基盤は未だ不明である. これまで, 脳波を用いた研究は実験的手法にのみ頼ってきたが, モデルシミュレーションの手法を組み合わせることでこの神経基盤を解明出来る可能性がある. しかし, 確立した脳波モデルは未だ存在しない. そこで本研究では様々な脳波の現象を再現出来るモデルを構築した.

$\alpha$ 波は脳波に含まれる主要な成分の1つである. 1つの領野に $\alpha$ 波を発生する活動源( $\alpha$ 波ジェネレータ)が数多く有ることが知られており, これらの相互作用が複雑な脳波の現象を引き起こしていると考えられている. 大脳皮質のコラム構造に注目したモデルを利用することで $\alpha$ 波を再現することが出来る[1]. 本研究ではこのモデルを元に1つの領野内で複数の $\alpha$ 波ジェネレータが相互作用するモデルを構築し, このモデルよりERPやERS/ERDを再現できることを示す. また, ERS/ERDが起こるメカニズムは未だ不明である. 本研究では構築したモデルを用いてERS/ERDが起こるメカニズムを考察する.

### 2 脳波モデル

本研究にて用いた $\alpha$ 波ジェネレータのモデルはpyramidal neuronの集合体がexcitatory interneuronの集合体からpositive feedbackを, inhibitory interneuronの集合体からnegative feedbackを受けるという構造になっている(図1).  $h_e(t)$ ,  $h_i(t)$ はそれぞれ, EPSP, IPSPのインパルス応答を表し,

$$h_e(t) = \begin{cases} \frac{G_e t}{\tau_e} \exp\left(-\frac{t}{\tau_e}\right) & t \geq 0 \\ 0 & t < 0, \end{cases}$$

$$h_i(t) = \begin{cases} \frac{G_i t}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) & t \geq 0 \\ 0 & t < 0, \end{cases}$$

である. 各ニューロンの集合体の平均発火率は postsynaptic potential (PSP)  $x$  からシグモイド関数で変換

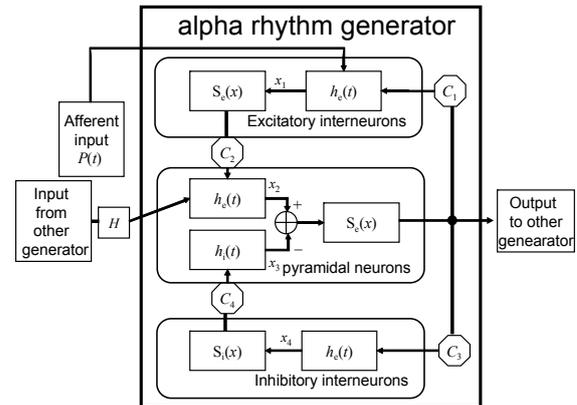


図1  $\alpha$ 波ジェネレータのblock diagram

される.  $S_e(x)$ ,  $S_i(x)$ はそれぞれ, pyramidal neuronとexcitatory interneuronの平均発火率, inhibitory neuronの平均発火率を表す.  $P(t)$ はafferent inputを表しノイズ成分と刺激によって生じるtransient成分から成る.  $C_1 \sim C_4$ はニューロンの集合体間の結合定数を表す.

この $\alpha$ 波ジェネレータを $4 \times 4$ の二次元的に配置し, 隣り合うジェネレータ同士のpyramidal neuron間を結合定数 $H$ で結合した. これを微分方程式で書き下すと

$$\frac{d^2 x_1^m(t)}{dt^2} = \frac{G_e}{\tau_e} \{P^m(t) + C_1 S_e(x_2^m(t) - x_3^m(t))\} - \frac{2}{\tau_e} \frac{dx_1^m(t)}{dt} - \frac{1}{\tau_e^2} x_1^m(t)$$

$$\frac{d^2 x_2^m(t)}{dt^2} = \frac{G_e}{\tau_e} \left\{ C_2 S_e(x_1^m(t)) + \sum_{n=1, n \neq m}^{16} H(m, n) S_e(x_2^n(t) - x_3^n(t)) \right\} - \frac{2}{\tau_e} \frac{dx_2^m(t)}{dt} - \frac{1}{\tau_e^2} x_2^m(t)$$

$$\frac{d^2 x_3^m(t)}{dt^2} = \frac{G_i}{\tau_i} \{C_4 S_i(x_4^m(t))\} - \frac{2}{\tau_i} \frac{dx_3^m(t)}{dt} - \frac{1}{\tau_i^2} x_3^m(t)$$

$$\frac{d^2 x_4^m(t)}{dt^2} = \frac{G_e}{\tau_e} \{C_3 S_e(x_2^m(t) - x_3^m(t))\} - \frac{2}{\tau_e} \frac{dx_4^m(t)}{dt} - \frac{1}{\tau_e^2} x_4^m(t)$$

となる. 各パラメータは個々のジェネレータが $\alpha$ 波で発振するように決めた. 脳波は多くのpyramidal neuronのPSPの空間的な和を表していると考えられている. そこで, シミュレーション結果の全ジェネレータのpyramidal neuronのPSPの平均を頭皮上で計測される脳波と仮定し, 実際に頭皮上で計測したフラッシュ刺激時の脳波実験結果と比較した.

### 3 結果と考察

1000 試行分シミュレーションした後に試行間で加算平均した. ここで現れる波形がERPである. この波形を脳波実験結果のERPと比較した(図2). 短潜時成分であるN70, P100そして, 長潜時成分であるalpha ringingがよく再現できた. 実験結果に見られるP100とalpha ringingとの間の成分は複数の領野間の相互作用で発生していることが実験的な研究から示唆されている. 本モデルでは1つの領野のみをモデル化した為, P100成分とalpha

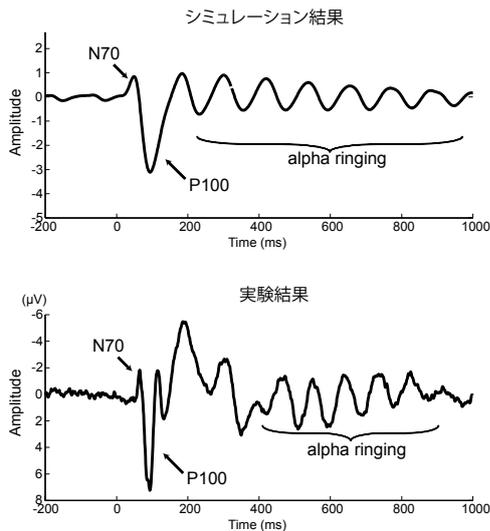


図2 シミュレーション結果のERP(上)と実験結果のERP(下).

ringing との間の成分を再現できなかつたと考えられる。

続いて、 $\alpha$  波の強度変化を調べた。強度が減少することが ERD であり、増加することが ERS である。図 3 はシミュレーション結果と実験結果の  $\alpha$  波強度変化を示す。この結果から、共に ERD が起こり、続いて ERS が起こっていることがわかり、その潜時もほぼ一致した。この結果は、本モデルが ERS/ERD を再現できることを示している。

続いて、ERS/ERD が起こるメカニズムについて調べた。 $\alpha$  波は数多くの  $\alpha$  波ジェネレータの活動の空間的な和を反映しているため、ERS/ERD が起こる要因として、1) ジェネレータ間の同期性 (inter-generator coherence) が変化すること、2) ジェネレータの平均活動強度 (mean amplitude of the generators) が変化すること、が挙げられる。実験結果では個々のジェネレータの活動を知ることが困難であるため、この二つを切り分けることが出来ない。しかし、本モデルでは個々のジェネレータの活動をシミュレートしているため切り分けることが出来る。1 試行目の  $m$  番目のジェネレータの  $\alpha$  波 ( $\alpha_{mi}(t)$ ) は

$$\alpha_{mi}(t) = a_{mi}(t) \times \exp(j\phi_{mi}(t)),$$

と表すことが出来る。ここで、 $a_{mi}(t)$  は  $\alpha$  波の振幅、 $\phi_{mi}(t)$  は  $\alpha$  波の位相である。inter-generator coherence ( $I(t)$ ) は

$$I(t) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M \frac{\exp(j\phi_{mi}(t))}{M} \right|}{L}$$

である。ここで、 $L$  はトライアル数、 $M$  はジェネレータ数を表す。inter-generator coherence はジェネレータ間の位相が揃うに従い大きな値となる。また、mean amplitude of the generators ( $P(t)$ ) は

$$P(t) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M \frac{a_{mi}(t)}{M} \right|}{L}$$

である。シミュレーション結果に対して inter-generator coherence 及び mean amplitude of generators を計算した。この二つの要因の影響を直接比較するために、刺激提示前のそれぞれの値を参照値として dB 値を計算した。その結果を図 4 に示す。刺激提示直後には inter-generator

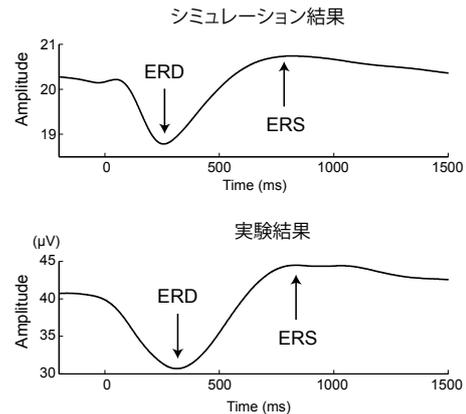


図3 シミュレーション結果の  $\alpha$  波強度(上)と実験結果の  $\alpha$  波強度(下).

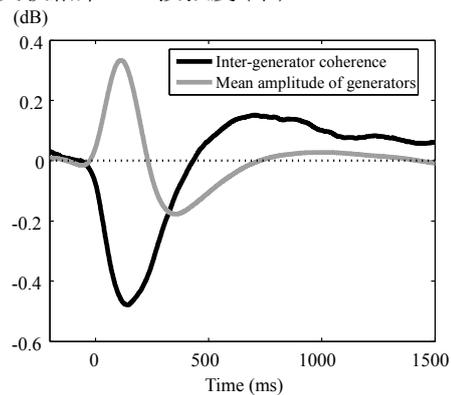


図4 Inter-generator coherence と mean amplitude of generators.

coherence は減少し、mean amplitude of generators は増加したが、inter-generator coherence の減少量の方が大きかった。このことから、図 3 に見られる刺激提示直後の ERD は inter-generator coherence の減少により起こっていることが示唆された。また、刺激提示後 500 ms 以降では inter-generator coherence 及び mean amplitude of generators は共に増加したが、増加量は inter-generator coherence の方が大きかった。以上から、inter-generator coherence の変化が主に ERS/ERD を生み出していることが示唆された。

#### 4 まとめ

本研究ではコラム構造を模した  $\alpha$  波ジェネレータを利用して、複数の  $\alpha$  波ジェネレータが相互作用するモデルを構築した。これを用いることで、ERP 及び ERS/ERD の再現が出来た。更に、コラム間の相互作用により変化する、各コラムの活動間での coherence の変化が ERS/ERD の発生に重要な役割を果たしていることが示唆された。今後、本モデルを利用することにより、実験的手法のみでは解明することが困難であった脳波の現象を解明することが出来る可能性がある。

謝辞

本研究は科研費 (19800068) の助成を受けた。

参考文献

- [1] David O, Harrison L, Friston KJ (2005) Modelling event-related responses in the brain. *NeuroImage* 25, 756-770.