

脳波があらわす心の過程

北海道大学大学院教育学研究院 准教授

河西哲子 (かさい てつこ)

Profile—河西哲子

産業技術総合研究所特別研究員，北海道大学大学院教育学研究科助手を経て，2009年より現職。専門は視覚心理学，認知心理生理学。著書は『基礎心理学入門』（分担執筆，培風館），『新編 感覚・知覚心理学ハンドブック Part2』（分担執筆，誠信書房）など。



はじめに

もしものうがなかったら
 なにもかんがえない なにもしない
 ろぼつとがでんげんぎれみたいに
 ずととずとと

この詩は，当時まだ小学校に上がる前，6歳だった娘が，寝入り端に突如として口走ったものである。何がきっかけかは分からない。思考や行為が脳に由来するというのをいつの間にか知ったのかと不思議に思いながら，慌てて起き上がって書き留めた。しかし，正確にはこう言うべきだろう。「もしも脳波がなかったら……」

脳波は，頭皮上または皮質表面から脳電図 (electroencephalogram: EEG) として記録される大まかな電場であり (図1)，脳を構成する神経細胞 (ニューロン) の集団の活動が同期して (位相が揃って) 振動していることの現れである。脳があったとしても，それが生きて，リズムカルに脳波を生じている状態であれば，思考や行為が起こることはない。

では脳波で何がわかるのだろうか。脳波に関する研究は次々とレビュー論文が出ている段階で，蓄積されつつもまだ収束していない。本稿では，基礎心理学で脳波を用いている者として，脳波が何を反映するかを考えてみたい。

脳と脳波

ヒトの大脳皮質にはおよそ百億のニューロンがあり，1個のニューロンの樹状突起には他の細胞と接続する1万個ものシナプスがある。シ

ナプスからの化学的または電気的入力統合されて，1個のニューロンから10余りの出力が他のニューロンへと送られる。脳における基本的なネットワークは興奮性ニューロンと抑制性のニューロン間の相互作用と，上行性，下行性，および側方性の双方向の結合である。

そのような超複雑なシステムにおいて，脳波の発生は軸索が脳の中心を向く錐体細胞に由来し，多くの細胞集団における興奮性と抑制性のシナプス後電位の総和により生じると仮定される。EEGリズムの生成機序は完全には明らかでないが，皮質と視床のネットワークにおける相互作用が重要な働きをしている (Pizzagalli, 2007)。

頭皮上に張り付けた電極からの脳波の記録は，非侵襲的で，比較的安価な脳機能測定法である (図2)。頭皮上で観察される脳波は，頭皮や骨，脳脊髄液，硬膜などを通して99パーセント以上が減衰したもので，正常な脳波の振幅は大人では大きくても50 μ Vほどである。低い空間解像度とミリ秒単位の高い時間精度，特にさまざまな周波数帯域での律動に関する豊

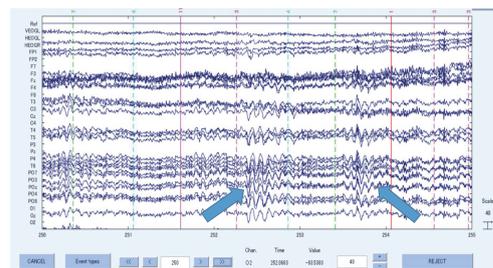


図1 頭皮上から記録された脳波の例。下に行くほど頭皮上の後方部。色のついた縦線は視覚刺激が提示されたタイミングを示す。開眼して課題を行っているが高振幅の α 波が出現している (矢印)。

富な情報を持つ点がユニークである。

脳波リズムが睡眠―覚醒のサイクルと関わるのはよく知られる。ヒトの脳波の最初の記録は、1929年、精神科医ハンス・ベルガー（Hans Berger）による。自身の息子が目を閉じたときに生じた1秒間に波の1同期（山と谷）が10回（10Hz）程度で振動する波が、規則的な波形の最初の観察であったためアルファ波（ α 波）と呼ばれる。実際には、脳波は脳のさまざまな場所に由来し、異なる帯域の周波数を含んだ複雑な形状をしている（図1）。その中で α 波は8～12Hzの帯域の成分として定義される。音や光などさまざまな自然現象が異なるスケールの波で構成され、私たちの心の基盤もその例外でないことは面白い。

脳波成分について概説書によりまとめると（Baars & Nicole, 2013）、 α 波は安静時に後方でよく出現するが、深い安静や浅い睡眠時にはシータ波（ θ 波, 3.5～7.5Hz）が優勢になり、深い眠りの際にはもっとも遅いデルタ波（ δ 波, 4Hz未満）が現れ、その振幅は外界への気づきと逆の関係にある。一方、活動的で集中しているときや不安な思考があるときには、 α 波が減衰（脱同期）し、不規則で低振幅のベータ波（ β 波, 12～25Hz）が観察される。このように脳波は覚醒水準との関係が深い。

しかし異なるニューロン集団間の協調である律動は認知処理にも関わる。基本的に遠い距離にあるニューロン集団間の同期は比較的低い周波数帯域に関連し、広く分散した神経ネット



図2（左）脳波実験のために電極を装着しているところ。（右）実験の合間の休憩。課題遂行中の疲労や眠気が最小限になるように、十分な休憩を挟んでいる。

ワークによる認知課題に関わる傾向がある。睡眠時だけでなく瞑想時や記憶課題時にも観察される θ 波は、記憶の検索と固定化が行われる際の海馬領域と前頭皮質の協調に関わる。一方、視知覚の意識体験や単純な単語問題の解決に伴って生じるガンマ波（ γ 波, 約40Hzを中心とする26～70Hz）は、皮質領域間のコミュニケーションに関わる。ただしそれらは、注意や認知的な状態、脳の異常や年齢などさまざまな要因に依存する。

脳波と処理過程

筆者が所属する北海道大学教育学部に脳波計が導入されたのは、50年余り前である。きっかけは、言語や行為で内的状態を表現することができない重度の障害を持った子どもたちであり、科学的・客観的な精神的診断と処置の実現への願いであった。当時、大型の脳波計を、元指導教員である諸富隆先生たちが、医学部からがらりと運んできたのがはじまりと聞いている。手のひらサイズの多チャンネル脳波計があり、コンピュータの処理速度と容量が大幅に向上した今日において、目標はどこまで達成されたであろうか。

当初は学習の基礎機構を反映する指標として α 波が注目された（狩野, 1971）。閉眼・安静時に出現する α 波には、突然の光や音などの刺激に対して速やかに減衰する α ブロッキングまたは脱同期が生じる。同じ刺激を見続けると増加し新たな刺激には減衰する「馴れ」と「脱馴れ」も起こる。このような反応は先行する刺激の記憶なしには生じないので、学習の基礎的な仕組みの一つと捉えられる。しかしその後、研究室における主な生理指標は、特定の事象に対する皮質処理をより直接的に反映すると考えられる事象関連電位（event-related potential: ERP）へと移行して今日に至る。

ERPは一般的に、脳波を事象の生起時点に揃えて数十回以上の加算平均を行うことで、事象に連動していない脳波のプラス部分とマイナス部分を相殺して抽出される。「生の」EEGには複数の周波数成分が混在し、信号処理技術で

要するのに対して (Pizzagalli, 2007), 基本的に平均化処理で算出できるERPの簡便さと単純さは、大きなメリットである。

視覚や聴覚、触覚など感覚刺激に対するERPは特に誘発電位と呼ばれ、通常、感覚入力後数百ミリ秒以内に特徴的な複数の波を伴う (図3)。脳の重要な役割の一つは外界の刺激にある曖昧性を解決することである。視覚の場合、断片的・2次元的な網膜像から、図地分離や知覚の群化、物体を単位とした注意選択といった一連の過程が、速やかな認識と学習に不可欠である。それを実現する階層的な処理段階に、視覚刺激の出現に対する一連のERPは関わると考えられる (Kasai, Takeya & Tanaka, 2015)。

一方で、意味や感情的判断、注意や予測など、さまざまな処理過程に関わるERP成分が、課題などの工夫により見出され、膨大な知見がある。それらは行動反応では測ることの難しい認知機能のバイオ・マーカーとして、さまざまな研究領域での応用が可能である。例えば、認知機能の個人差や、臨床的・教育的介入の効果のアセスメントに有益であろう。実際、条件差が

行動反応にはなくても、ERPには見出す研究は多い。

ただしERPは自発的なEEGと独立ではなく、さまざまな周波数帯域で起こるEEGの事象関連律動 (event-related oscillation) に由来すると考えられている。自発的EEGは発達に伴い全般に、遅い周波数帯域 (δ , θ) が減少し、早い帯域 (α , β) が増加するが、事象関連律動にも周波数帯域によって異なる発達の変化がある (Yordanova & Kolev, 2008)。事象関連律動の位相ずれが大きいほど加算平均されたERPが過小評価されるので、ERPを発達や個人差の指標に用いるのには注意を要する。またERPが反映する処理過程の違いは、覚醒や動機付けの状態によっても変わり得るので、持続的・自発的なEEGとERPを合わせた分析が求められる。

さまざまな α 波

ところで、研究室の脳波研究は α 波からはじまったものの、 α 波はERP実験においてはどちらかというと悪者であった。実験の後半で増大する α 波は、飽きて課題への集中を欠いてきたことを示すかもしれないし、ERPよりはるかに高振幅の α 波は加算平均したERPをゆがめてしまうかもしれない。しかし、集中して課題を行っていても α 波が減衰しない参加者もあり、実験中よく見る脳波でありながら、不思議な存在であった。

α 波は安静時によく出現するため、伝統的には皮質のアイドリングまたは不活性化に関連し、 α 波の減衰と β 波への推移は、それが起こった皮質における活性化の指標と考えられている。しかし α 波は、感覚入力への積極的な抑制に関わることも示唆されている (Händel, Haarmeier & Jensen, 2011)。実際に筆者も、左右視野のいずれかに注意する実験中、無視すべき刺激が提示される視野に対応する (対側の) 半球に明瞭な α 波の増大を観察したことがある。このように、 α 波は単純にリラクスの指標とは言えないことが分かる。

α 律動の同期・脱同期は他にもさまざまな認

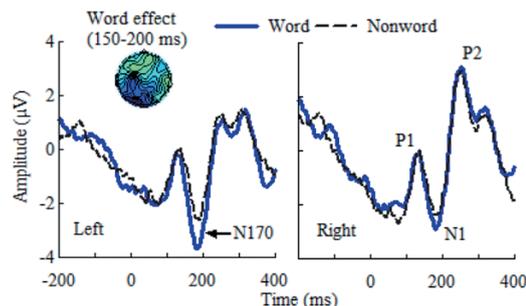


図3 2文字の平仮名からなる単語と非単語に対して測定されたERPの例 (unpublished data)。9名のデータを平均化したもの。刺激提示時点を0msとしている。課題はたまに出現する青色の文字列または記号列に対してボタン押すこと。刺激提示後400ms以内に視覚刺激に一般的ないくつかの波が見られる (前からP1, N1, P2: P/Nは極性、番号は順序を示す)。非単語に比べて単語で左側の後頭側頭部における陰性の増大 (N170) が見られる。用いた単語と非単語は平均すると同じ文字で構成されるので、単語への増大は、文字列の組み合わせの学習に基づくと解釈できる。左後頭側頭部のN170は、文字列のまとまりとしての知覚に関わる (Okumura, Kasai & Murohashi, 2015)。

知課題に関わることが示されているが、学習と適応の観点から特に注目されるのは、接近・回避の動機付けまたは感情のバイオ・マーカーとされる前頭部 α パワーの左右半球比である (Marshall & Fox, 2008)。感情の状態は、処理資源を外界と内的世界へ配分するモードであり (Vanlessen, De Raedt, Koster & Pourtois, 2016)、脳の統合的機能に重要な役割があると推測される。

おわりに

授業で脳波実験を体験した学生から、心の中が知られてしまいそうで怖いという感想があった。脳波の性質上、個々人の思考の内容を当てるのは容易でないが、脳波の応用領域 (ブレイン・マシン・インターフェースやニューロフィードバックなど) を見ると、将来、体脂肪計付きの体重計のように、脳波で心の状態を気楽に測るのも夢ではないかもしれない。

マッケイ (Mackay, 1986) はその著書の中で、今現在の自分自身を脳機能の画像により知ることは決してできない、と論じている。今現在の自分の脳が働いている状態を見ることができたとしても、見た途端に、脳は学習し新たな状態へと変化してしまうからである。私たちの脳は、「ともに発火すれば、互いに結びつく (Neurons that fire together, wire together)」ヘッブの法則 (Hebb's rule) に従い、常に学習しつつある存在である。それはさらに次の反応と学習への準備状態の形成でもある。異なるニューロン集団間の律動の同期は、まさにその学習と準備の過程だと捉えられる。

文献

Baars, B. & Gage, N. M. (2013) *Fundamentals of cognitive neuroscience: A beginner's guide*. Waltham: Academic Press.

Händel, B. F., Haarmeier, T. & Jensen, O. (2011) Alpha oscillations correlate with the successful inhibition of unattended stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23, 2494-2502.

狩野陽 (1971) 視知覚の形成と衰退：学習の基礎理論系と脳波資料の集積. 『北海道大学教育学部紀要』18,

1-47.

Kasai, T., Takeya, R. & Tanaka, S. (2015) Emergence of visual objects involves multiple stages of spatial selection. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 69, 22-30.

MacKay, D. M. (1991) *Behind the eye*. Oxford, UK: Cambridge. [D・M・マッケイ／金子隆芳 (訳) 『ビハインド・アイ：脳の情報処理から何を学ぶか』新曜社]

Marshall, P. J. & Fox, N. A. (2008) Electrophysiological measures in research on social and emotional development. In L.A. Schmidts & S. J. Segalowitz (Eds.) *Developmental psychophysiology: Theory, systems, and methods*. New York: Cambridge University Press. pp.127-149.

Okumura, Y., Kasai, T. & Murohashi, H. (2015) Attention that covers letters is necessary for the left-lateralization of an early print-tuned ERP in Japanese Hiragana. *Neuropsychologia*, 69, 22-30.

Pizzagalli, D. (2007) Electroencephalography and high density electrophysiological source localization. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. Berntson (Eds.) *Handbook of psychophysiology*. Cambridge: Cambridge University Press. pp.56-84.

Yordanova, H. & Kolev, V. (2008) Event-related brain oscillations in normal development. In L.A. Schmidts & S. J. Segalowitz (Eds.) *Developmental psychophysiology: Theory, systems, and methods*. New York: Cambridge University Press. pp.15-68.

Vanlessen, N., De Raedt, R., Koster, E. H. & Pourtois, G. (2016) Happy heart, smiling eyes: A systematic review of positive mood effects on broadening of visuospatial attention. *Neuroscience Biobehavioral Review*, 6, 816-837.