

**事象関連電位 (ERP) と認知活動 : 工学心理学での利用を例に\***

入戸野 宏

広島大学総合科学部

(e-mail: nittono@hiroshima-u.ac.jp)

**Event-related potentials (ERPs) and cognitive activity:  
A new perspective from engineering psychology**

Hiroshi NITTONO

Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

**Abstract**

Event-related potentials (ERPs) are voltage fluctuations of the brain that are time-locked to an objectively definable event. Only part of cerebral electric activities associated with the event are observed as ERPs. Although ERPs may not be the online manifestation of the neural processes that actually operate and transform the event information, the elicitation of a certain ERP component indicates the occurrence of a certain type of information processing in the brain. ERPs can be measured (1) in parallel with a variety of tasks without distorting ongoing cognitive processes and (2) even outside the laboratory using a portable recording system. These merits are especially useful in the field of engineering psychology, whose goal is to understand and predict human cognition and behavior during the interaction with tools, machines, and systems. According to the activity theory which suggests that human mental activities are intrinsically mediated by artifacts, engineering psychology is not only an application-oriented but also a theoretically important area of psychological investigation. The use of ERPs for research topics in engineering psychology was illustrated by examples.

Key words: event-related potentials, engineering psychology, activity theory

---

\* 本稿は、日本行動科学学会誌「行動科学」2003年42巻1号に寄稿した同名の論文に、補足説明を加えたものである（2003年1月31日）。

## 1. はじめに

脳活動の測定は、認知と行動のしくみを理解するためのひとつのツールである。本稿では、脳波の一種である事象関連電位（event-related potential: ERP）が人間の認知活動の理解にどのように貢献するかについて解説する。

2 節では、ERP の定義を行い、その測定方法と神経生理学的基礎について概説する。3 節では、ERP データから認知過程について推測するときの手続きを説明し、行動指標や主観指標、その他の脳活動指標と ERP を比較する。4 節では、筆者が関心をもっている工学心理学という心理学の一分野を紹介し、そこでの ERP の利用例について述べる。最後の 5 節では、心理学・行動科学における今後の ERP 研究の方向性について私見を述べる。

## 2. ERP の基礎知識

### 2-1. 定義と測定

ERP はその名のとおり“事象に関連した脳の電位”である。しかし、2 つのキーワードを補うとより正確になる。ERP とは“客観的に定義できる”事象に“時間的に”関連した電位である。客観的に定義できない事象に対する ERP は測定できない。ERP の中には心理事象に関連して生じる電位もあるが、その事象が起こった時点を示す何らかの手がかりがないかぎり ERP は求められない。また、事象との関連性は時間的なものであり、機能的に関連しているとはかぎらない。ERP として観察される電位は、事象を実際に処理している神経活動のあらわれではなく、その副産物の可能性もある。たとえば、ゴミ処理場の煙突から煙が出ていれば、ゴミを燃やしていることが分かる。実際にゴミを燃やして処理しているのは火と熱であり、煙はその副産物にすぎない。しかし、煙が出ていることはゴミを燃やしていることの指標になる。これと同じように、脳で実際に情報を変換・操作している過程が ERP としてあらわれてくるとはかぎらない。しかし、副産物であったとしても、ERP が生じることでその処理が行われたことを推測できる。

ERP は、被験者にある課題を行わせながら脳波を記録し、特定の事象の前後の脳電位を加算平均して測定する。ERP の測定でよく用いられるオドボール課題（oddball は“変わり者”という意味）の例を Figure 1 に示す。ERP は、持続して生じる自発的な脳の電気活動（背景脳波）に重畳してあらわれるため、1 試行ごとの波形を直接観察するのは難しい。そこで、多数の試行で得られた脳波波形を事象の生起時点にそろえて

加算平均する. この方法により, 事象とは時間的に無関係に生じる脳波成分は相殺され, 検討したい事象に時間的に関連した電位を抽出することができる. なお, 加算平均法は背景脳波を完全に取り除く方法ではない. ERP の少なくとも一部分は, 背景脳波の位相が刺激によってリセットされたものと考えられている (Makeig et al., 2000) . そのため, 本稿では ERP を “客観的に定義できる事象の生起時点にそろえて脳波を加算平均することで得られる電位” と操作的に定義する. ERP の標準的な記録手続きはガイドラインにまとめられている (Picton et al., 2000; 下河内, 1997) . <sup>1</sup>

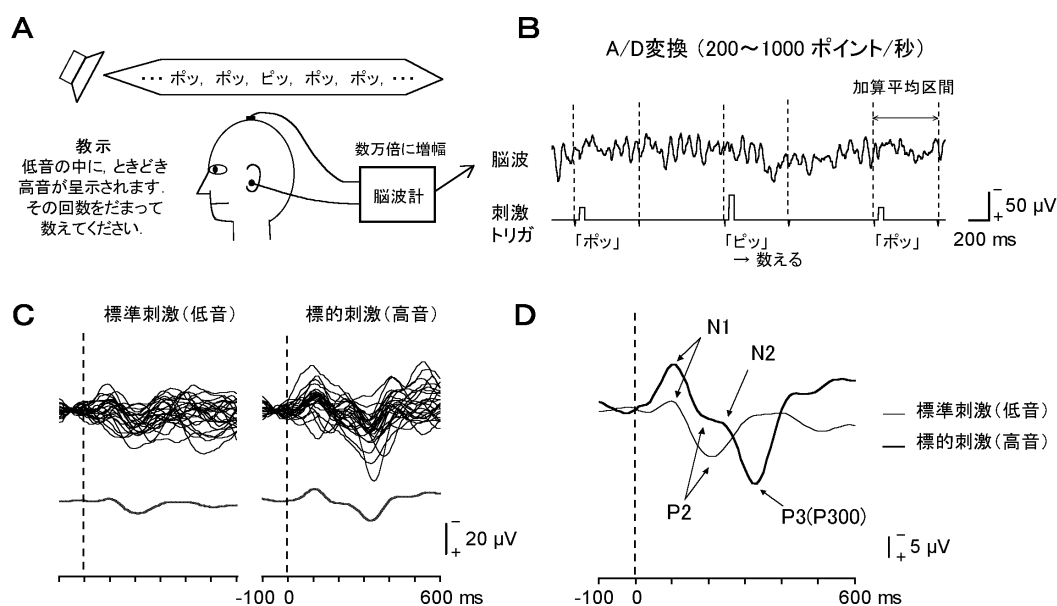


Figure 1. オドボール課題による ERP の測定. (A) 2 音の弁別課題中に脳波を測定する. (B) 脳波をアナログ／デジタル変換して数値化する. (C) 刺激の呈示時点にそろえて数十試行の波形データを加算平均する. (D) 加算平均波形のそれぞれの波は, 極性 (Positive, Negative) と順序 (1, 2, 3, ...) あるいはおよその潜時 (300 ms) を組み合わせた名称で呼ばれる.

## 2-2. 神経生理学的基礎

ERP を含めた脳波は主に大脳皮質から生じている. 皮質下 (たとえば脳幹) の神経核で生じた電位が頭皮上で記録されることもあるが, その振幅は小さく,  $1 \mu\text{V}$  以下である. 大脳皮質は 6 層からなり, 錐体細胞や顆粒細胞など形態の異なるニューロン (神経細胞) を含む. 脳波の主要電源と考えられているのは, 第 V 層に細胞体があり大脳皮質表面に向かって樹状突起を伸ばした錐体細胞である (加藤, 2000) . <sup>2</sup>

脳波の発生機構の模式図を Figure 2 に示す。ニューロン同士はシナプスを介して連絡している。平均的なニューロンには約 1,000 個のシナプスがあり、それ以上の数（数千から数万）のシナプス入力を受ける（Kandel, Schwartz & Jessell, 2000, p. 175）。ニューロン内部は通常マイナス（約-65 mV）に帯電している。シナプスから放出される神経伝達物質が樹状突起や細胞体にある受容器と結合すると、イオンの流入／流出が起こり、ニューロン内部の電位が変化する。このようにして生じる電位をシナプス後電位（postsynaptic potential: PSP）という。PSP は受容器の種類によって興奮性（excitatory PSP: EPSP）と抑制性（inhibitory PSP: IPSP）に分けられ、それぞれ受容器付近の電位をプラスあるいはマイナス方向に変化させる。PSP が時間的・空間的に加重されて合計約 10 mV を超えると活動電位が生じ、次のニューロンへと信号が伝達される。活動電位の振幅は約 100 mV と大きい持続時間が約 1 ms と短いので、脳波にはあまり貢献しないといわれている。

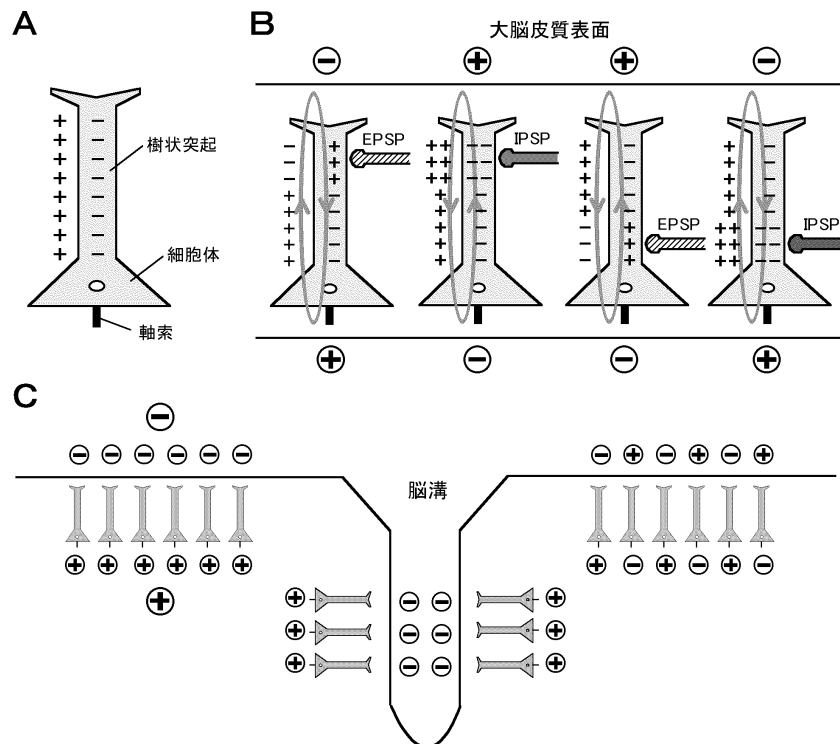


Figure 2. 脳波の神経生理学的基礎。(A) 脳波の主要電源は大脳皮質の錐体細胞である。静止時にはニューロン内部は約-65mV に帯電している。(B) 大脳皮質表面に垂直に伸びた樹状突起に結合したシナプスによって EPSP/IPSP が生じると、ニューロン内部に電流が流れて双極子となる。(C) 同じ方向を向いた多数の電流双極子の同期した活動が脳波として記録される。神経活動が生じて、電流双極子が脳溝の内側で向き合っていたり、方向が不揃いと記録できない。

ニューロン内部は外からの作用がないときは電氣的に安定しているが、PSPが生じると受動的に電流が流れて、双極子 (dipole) となる。シナプスが結合する場所と受容器の興奮性/抑制性によって電流双極子の向きが変わる。表層に近い樹状突起には主に脳幹網様体-視床非特殊核からのニューロンがシナプス結合し、深部には主に視床特殊核 (感覚中継核) からのニューロンがシナプス結合している。一つのニューロンのPSPは0.1-10 mVと小さいので、たくさんのニューロンが同時に活動しないと頭皮上で記録できる大きさにならない。また、反対向きの電場は互いに打消しあうので、電流双極子は同じ方向にそろって活動しなければならない。錐体細胞は皮質1 mm<sup>2</sup>に約10万個あるが、頭皮上で記録されるためには40-200 mm<sup>2</sup>の神経集団の活動が必要といわれている (磁場についての推定値; Hämäläinen, Hari, Ilmoniemi, Knuutila & Lounasmaa, 1993, pp. 424-425) .

脳波としてあらわれるのは、このような厳しい条件を満たす神経活動のみであり、脳の内部ではそれ以外の神経活動も多数生じている。後に述べるように、これがERPデータを解釈するときの制約条件となる。また、脳波はニューロン内部で生じた電流が、神経路以外の脳組織や頭蓋骨を伝わって頭皮上で記録されたものである (これを体積伝導 volume conduction という)。最大の電位が認められた部位の直下で神経活動が起こっているわけではないので、一般に、脳波やERPの発生源を特定するのは難しい。

### 3. 心理学・行動科学とERP

#### 3-1. ERP データからの推測

ERPデータから認知過程について推測するときの手続きを、Rugg & Coles (1995) に準拠して簡単に説明する。さらに詳しい解説は、筆者のWebページからダウンロードできるので参照していただきたい (<http://home.hiroshima-u.ac.jp/nittono/erp.pdf>) .

2つの条件でERPを測定したところ、Figure 3に示す波形が得られたとしよう。このデータから何がいえようか。まず、ERPが適切な方法で測定されていて、得られた波形がノイズでなければ、2つの条件はERP波形に異なる効果を与えたといえる。さらに、認知処理は脳の神経活動によって担われており、ERPはその神経活動の一部を反映していると認めるならば、条件Aと条件Bの認知過程はどこか異なっていたといえる。ただし、この逆は正しくない。2つの波形が同じであっても認知過程が同じだという証拠にはならない。前述のようにERPとしてあらわれない神経活動があるからである。

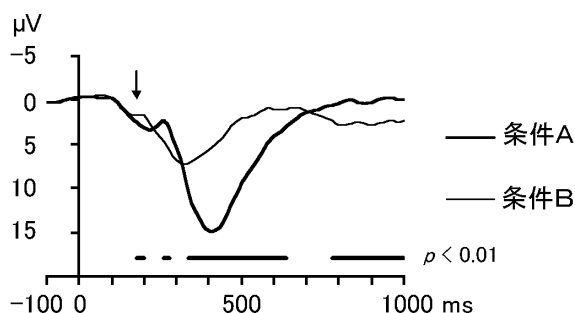


Figure 3. 2つの条件で得られたERP波形(36名の総加算平均波形). 横軸上の太線は対応あるt検定で有意差が得られた潜時帯を示す. 矢印は2つの波形が最初に有意に分離した点を示す.

さて、2つの条件の認知過程はどのように異なるのだろうか。どの時点から異なるかは、複数の被験者から得られた波形データに対して時間ポイントごとに統計検定をすることで確かめられる。Figure 3の例では、潜時180msから2つの条件が分離した。有意差があらわれた時点は“少なくともその時点までに2つの条件が別のものであるとして処理されるようになった”という上限を示す。ERPとしてあらわれない神経活動がそれ以前にも異なっていた可能性があるからである。

さらに進んで、2つの条件が質的にどう異なっていたかを検討するには、得られたデータだけでは不十分である。先行研究を参考にして、成分(component)を同定する必要がある。ERP波形上のそれぞれの波がおおよそ成分に相当するが、一つの波が複数の成分から構成されていることもある。厳密には、ERP成分は、潜時、極性、頭皮上分布、実験変数への応答性によって定義される(Fabiani, Gratton, Karis & Donchin, 1987)。なかでも実験変数への応答性が特に重視される。一つに見えていた波が、実験変数の操作によって2つに分離すれば、2つの成分が重畳していたことが分かる。各ERP成分がどのような情報処理と結びついているかについての先行知見を参考に、2つの条件の認知過程の違いを推測する。この推測を容易にするために、ERPの研究では、あらかじめ特定の成分が出現することが分かっている課題を用いることが多い(沖田, 1992a, 1992b)。ERPの測度としては、頂点潜時や頂点振幅(頂点が不明瞭な波については区間平均電位)がよく使われる。

### 3-2. 他の心理指標との比較

行動指標や主観指標と比較したERPの長所として、次の2点が挙げられる。第1に、被験者の認知過程を歪めずに並行して記録できることである。ボタンを押すといった行

動反応やどう感じたかといった主観評価を求めると、課題の構造が変わってしまうことがある。その典型例が注意の研究である。注意を向けている刺激については行動反応や主観評価によって検討できるが、注意を向けていない刺激がどのように処理されるかを直接調べることは難しい。このようなときに ERP を使えば、課題の構造を変えずに、注意を向けていない刺激の処理を検討できる。顕在反応を求めなくても記録できることが ERP の長所である。<sup>3</sup>

第 2 に、時間軸にそって複数の測度が入手できることである。刺激に対する行動反応は一連の処理の結果であり、主観評価も事後的な判断を反映している。これに対して、ERP は刺激入力から反応出力まで（さらにはそれ以降）の過程を継時的に測定することができる。<sup>4</sup>

実際の研究では、ERP を単独で測定することは少なく、行動指標や主観指標と同時に記録する。実験者が意図したとおりに課題を行っていたかを確認した上で、ERP データを解釈するのがふつうである。<sup>5</sup>

### 3-3. 他の脳活動指標との比較

現在よく用いられる脳活動指標を Table 1 に示した。脳磁図 (magnetoencephalogram: MEG) は、神経の電気活動を磁場の面から記録したものである。ポジトロン CT (陽電子断層撮影法 positron emission tomography: PET) や機能的磁気共鳴映像法 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) は、血流に伴う物質の移動 (主に酸素の消費や供給) を計測する方法である。物質の移動が神経の電気活動と対応しているかについては議論があるが、サルの視覚野から fMRI と電気活動を同時記録した最近の研究では、どちらも類似した神経現象 (その場所への情報の入力) を反映していることが示唆されている (Logothetis, 2002)。<sup>6</sup>

Table 1  
現在よく用いられる脳活動指標の比較

指標	空間 分解能	時間 分解能	測定 の手軽さ
脳波 (EEG)	△	◎	○
脳磁図 (MEG)	○	◎	△
ポジトロンCT (PET)	○	△	△
機能的MRI (fMRI)	◎	○	△

指標の性能は、空間分解能（活動部位をどのくらい細かく特定できるか）と時間分解能（活動時点をどのくらい細かく特定できるか）によって評価される。血流に伴う物質の移動を計測する技術は、優れた空間分解能をもち、PET で 1-2 cm, fMRI では数 mm の単位で脳活動を捉えられる。しかし、時間分解能は実質的に心臓の 1 回の拍動（1 秒程度）に制約される。MEG は、脳波と同様に時間分解能が優れているが、体積伝導のない磁場を測定するので、脳波にくらべて高精度で電源が推定できる（ただし、脳深部の活動は記録できない）。

このような新しい技術と比較すると、脳波は空間分解能の点で劣る。そのため、脳を三次元的に検討する認知神経科学のツールとしての価値はあまり高くない。しかし“測定の手軽さ”という次元でみると、脳波が大変優れていることが分かる。PET や fMRI, MEG が大規模な測定装置を必要とするのに対して、脳波は携帯型脳波計があれば実験室外（フィールド）でも測定できる。この長所を最大限活かせるのが、次節で述べる工学心理学の分野である。<sup>7</sup>

## 4. 工学心理学における ERP の利用

### 4-1. 工学心理学とは

工学心理学（engineering psychology）は耳慣れない用語であるが、道具やシステムのデザインに応用できる人間の心理特性（能力や限界）について研究する心理学の一分野と定義されている（Wickens & Hollands, 2000）。これと似た用語に、人間工学（human factors engineering あるいは ergonomics）があるが、こちらは実際の道具やシステムのデザインに直結した工学の一分野をさす（Wickens, Gordon & Liu, 1998）。工学心理学は、実験心理学の影響を強く受け、道具やシステムにかかわる心理特性の理論化・一般化を目指す。これに対して人間工学は、エラーを減らし、生産性を上げ、安全性を高め、快適性を増すことを目的として、具体的なもの作りを行う。人間工学では、心理だけでなく生理的・身体的な側面も重視される。

日本では、感性工学、認知工学、心理工学など「〇〇工学」という名称はよく聞かれる（八木・山田, 2002）。しかし、同じ学際領域を工学ではなく心理学の立場から見直すことで、新しい研究テーマの発見につながることもあるだろう。筆者は、実際にものを作るかどうかにかかわりなく、現実場面で道具やシステムを使うときの人間の認知と行動を理解し予測することが、工学心理学の課題であると考えている。



#### 4-2. 基礎心理学としての工学心理学

工学心理学は応用心理学と考えられることが多い。たしかに工学心理学の研究トピックは応用的な必要性から選ばれたものである。しかし、道具の使用を人間の心理活動の根幹と考える立場もある。旧ソヴィエトにおいてマルクス主義心理学として発展し、冷戦後は北米を含めて国際的に評価が高まっている“活動理論 (activity theory)” がそれである (中村, 1998)。天野 (1994) によれば, 「活動理論とは, 人間の生産活動に典型的に認められる外界の諸対象に対して道具を用いて働きかけを行う目的志向的・道具的な活動を, 人間に特有な高次の意識的・社会的行動を説明するモデルと考え, それを基礎に心理学及び人間諸科学の理論の再構築を標榜している理論, 方法論である」(p. 2)。ここでいう“道具”とは, 単なる自然物ではなく, 他者によって作られた人工物であり, その使用法が人から人へと伝えられる社会的-文化的-歴史的な産物をさす。

代表的な理論家であるレオンチェフ (Leont'ev, 1975/1980) は, 人間の心理を刺激-反応図式 (二項図式) で説明することは「主体と対象的世界とを実際に結びつけている内容豊かな過程—つまり, 主体の对象的活動—を研究の範囲外に押し出し」てしまう (訳書 p.64) と述べ, 主体と客体という両極の結びつきを媒介する中間項 (活動) を含んだ三項図式によって心理学を再構成することを提唱した。活動は, 単なる運動や行動ではなく, 外界を変化させるとともに主体の認識を変えるという 2 つの側面を持っている。人間には動物と共通の反射過程もあるが, 人間に特有の心理機能は, 社会的-文化的-歴史的な道具を使用して外界に働きかける活動を抜きにしては考えられず, その中で形成されると主張する。

どのような道具を使うかで心理活動が変わることは日常経験からもうなずける。計算するのに紙と鉛筆しか使えなかった学生のとときと, 電卓を自由に使える今とでは, 計算に対する認識が異なるだろう。インターネットに慣れると, コミュニケーションについての認識が変化し, 行動や感情も変化する (Wallace, 1999)。人間の心理活動の根底にすでに道具使用が含まれるという活動理論の立場からすると, 実際にもものを作るかどうかとは別次元で, 工学心理学を心理学の基礎と考えることもできよう。人間と人間の間を扱う分野として社会心理学があるならば, 人間とものとの関係を扱う分野として工学心理学があってもよい。ものによって媒介される心理活動を考えることは, 急速な発展を続ける科学技術と遺伝的にほとんど進化しない人間のバランスを考える上で, これからますます重要になると思われる。

### 4-3. 実際例

3 節で述べたように、ERP は認知過程を歪めずに並行して記録でき、しかもフィールドでも測定できる。これらの長所は、道具やシステムを使っている人間の認知活動を検討するのに特に有用である。ERP にかぎらず、心拍数や皮膚電気活動などの生理指標は、作業中の人間から並行して測定できるので、工学心理学でよく用いられてきた。そのような研究領域を総称して“工学心理生理学 (engineering psychophysiology)” と呼ぶことがある (Boucsein & Backs, 2000)。

ERP の P300 (P3b) 成分は、精神作業負荷 (mental workload) の推定に利用されてきた (Kramer & Weber, 2000)。2 つの課題を同時に遂行させて、一方の課題を難しくする (あるいは優先権を高くする) と、他方の課題の遂行成績が悪くなる。この現象は、それぞれの課題で必要とされる処理資源 (注意) の総量に限界があるためと説明される。たとえば、上述のオドボール課題を遂行中に、別の課題 (画面上で動き回る標的をレバーを操作して追いかけるトラッキング課題など) を行わせて処理資源を使ってしまうと、オドボール課題で得られる P300 の振幅が低下する。このような二重課題法を用いた研究から、P300 振幅は、それを惹起した事象に対する知覚-中枢レベルの処理資源の配分量を反映すると考えられている (Donchin, Kramer & Wickens, 1986)。また、配分できる処理資源の量には個人差があることも示唆されている (Nittono, Nageishi, Nakajima & Ullsperger, 1999)。

ERP を用いて精神作業負荷を推定する方法には、大きく分けて 3 つある (Kramer & Weber, 2000)。(1)関連プローブ法 (relevant probe technique)、(2)無関連プローブ法 (irrelevant probe technique)、(3)主課題法 (primary task technique) である。プローブとは“探り針”の意味で、ある課題を行っているときの状態を別の物理刺激 (プローブ) に対する反応を手がかりに間接的に評価しようとする方法である

(Papanicolaou & Johnstone, 1984)。関連プローブ法ではプローブに対して積極的な反応 (ボタン押しや計数) を求めるが、無関連プローブ法では特に気にとめないように教示する。プローブに対する ERP 反応が大きいほど、利用できる処理資源が余っていること、つまり課題の作業負荷が少ないことを示す。このような間接的な方法に対して、課題の中で使われる刺激から直接 ERP を測定するのが主課題法である。課題が難しくなり処理資源が多く配分されるほど、大きな P300 が生じる (Kramer, Wickens & Donchin, 1985)。<sup>8</sup>

道具やシステムを使う人間の認知活動を ERP を用いて検討するには、これとは異なるアプローチもある。これまで述べた方法では、実験者が与える刺激に対して被験者が決められた方法で反応するという刺激-反応パラダイムが用いられている。しかし、実際にわれわれが道具やシステムを使うときは、自分から行動して刺激を得ることが多い。たとえば、コンピュータ作業では、ユーザの行動に対してコンピュータが応答し、それをユーザが確認して、次の行動をするという繰り返しが行われる。これをヒューマン-コンピュータインタラクション (human-computer interaction) とよぶ。現在のコンピュータシステムでは、キーボードやマウスを用いたインタラクションが一般的だが、このような“外界へ働きかけて刺激を得る”というインタラクティブな環境で ERP を測定した例はほとんどない。

筆者らは、オドボール課題における ERP を、刺激が自動的に呈示される条件と、被験者がボタンを押すと刺激が呈示される条件で比較した (Nittono & Ullsperger, 2000)。80%の確率で呈示される標準音 (1000 Hz) に混じって、標的音 (2000 Hz) と新奇音 (毎回異なるコンピュータ合成音) をそれぞれ 10%の確率で呈示し、標的音に対して行動反応を求めた。低頻度で呈示される標的音と新奇音の後には大きな陽性波 P3 が出現したが、その振幅は自分の行動によって刺激を得た条件の方が大きかった。この効果は、前頭-中心部で顕著に認められた。

P3 は、P3a (novelty P3) と P3b (狭義の P300) の 2 つの成分が重畳したものである。P3a は P3b にくらべて、潜時が 60-80 ms 短く、前頭-中心部寄りに分布している。P3a は注意の定位に、P3b は認知符号化処理の終結あるいは作業記憶の更新に関連するといわれている (Halgren, Marinkovic & Chauvel, 1998; Knight & Scabini, 1998)。前頭-中心部で P3 振幅が増大したことは、P3a の増大を示唆している。入野・堀 (2001) は、P3a と P3b を比較的独立に惹起できる刺激セットを使ってオドボール課題を行い、意図的な行動によって刺激を得るときに P3a が選択的に増大することを明らかにした。Figure 4 にこの結果を模式的に示した。被験者は自分の行動の結果として起こる事象を予期しており、予期とは異なった事象が生じると、それに注意が強く引きつけられて、高振幅の P3a が生じると考えられる。

意図的な行動とその結果を結びつける脳の働きがあることは、時間判断課題を用いた最近の研究から示唆されている。自分の意図的なボタン押しに随伴する音は実際よりも早く生じたように知覚される (Haggard, Clark & Kalogeras, 2002)。この効果は、頭蓋外から運動野を磁気刺激して同様の運動を引き起こしたときには見られない。意図的

な行動とその結果を結びつける脳のシステムについての研究はようやく始まったところである (Elsner et al., 2002) .

道具の使用は目標指向的な行動であり、外界に対する働きかけと、その結果の評価という 2 つの側面から成り立っている (Norman, 1986) . 認知過程を歪めずに並行して測定できる長所を活かし、マウスクリックやキー押しの結果として生じる事象に対する ERP を測定することができる。筆者らは、これを“マウスクリックパラダイム”と名づけ、ヒューマン-コンピュータインタラクションにおける認知活動を検討する手段になると考えている (Nittono, Hamada & Hori, 2003) .

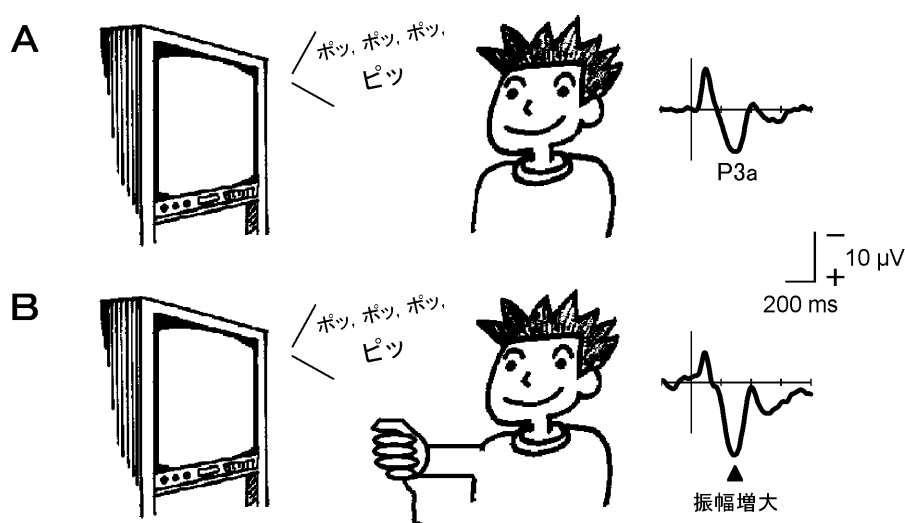


Figure 4. インタラクティブな環境における ERP の測定。低頻度逸脱刺激に対する ERP (P3a) の振幅は、(A) 受動的に受け取る時に比べて、(B) 意図的な行動の結果として受け取る時の方が大きい(正中線中心部 Cz からの記録; 入野・堀, 2001 を改変)。

## 5. 結語 —これからの ERP 研究—

1960 年代半ばに ERP の研究が始まってから、40 年が経とうとしている。そのあいだに多くの知見が蓄積され、測定技術も安定してきた。心理学・行動科学において、ERP をツールとして使いこなせる時代がやってきたといえる。今後、ERP を利用した魅力的で面白い研究テーマを見つけるためには、次の 3 点が鍵になるだろう。<sup>9</sup>

第 1 に、指標としての限界を把握し、長所を活かすことである。MEG や PET, fMRI などの優れた技術が定着した現在、認知神経科学のツールとしての ERP の魅力は薄れている。これらの最新技術と比較した ERP の長所は、実験室外でも手軽に測定できる

ところにある。今後は、フィールドにおける日常認知の研究で ERP が利用できないかを積極的に検討してみる価値があるだろう。

第 2 に、新しい実験パラダイムを開発することである。従来の ERP 研究では、行動実験で使われてきたパラダイムを流用することが多かった。しかし、ERP は、行動指標と異なり、認知過程を歪めずに並行して測定できる。この長所を活かせば、行動実験の枠組みにとらわれずに、マウスクリックパラダイムのような新しい実験パラダイムを理論駆動型で開発することができるだろう。

第 3 に、心理学・行動科学の視点から ERP の利用可能性を迫及することである。脳科学は基本的に個体の内側へ向かう学問である。脳の中で起こっている出来事をマクロ（領野）からミクロ（神経や遺伝子）へと掘り下げていく。これに対して、心理学・行動科学は個体とそれ以外のもの（環境・他者・道具）との関係性を扱う学問である。このような外に開かれた性質があるために、心理学・行動科学が脳科学に還元されることはない。関係性を扱うツールとして ERP を活用することが、心理学・行動科学にとって意義のある研究につながると考えられる。

## 引用文献

- 天野清 (1994) 発達研究の現在—Activity theory (活動理論) の発展と現状—。児童心理学の進歩, 33, 1-32.
- Boucsein, W. & Backs, R. W. (2000) Engineering psychophysiology as a discipline: Historical and theoretical aspects. In R. W. Backs & W. Boucsein (Eds.) Engineering psychophysiology: Issues and applications. Mahwah, NJ, Lawrence Erlbaum. Pp. 3-30.
- Donchin, E., Kramer, A. F. & Wickens, C. D. (1986) Applications of brain event-related potentials to problems in engineering psychology. In M. G. H. Coles, E. Donchin & S. W. Porges (Eds.) Psychophysiology: Systems, processes, and applications. New York, Guilford Press. Pp. 702-718.
- Elsner, B., Hommel, B., Mentschel, C., Drzezga, A., Prinz, W., Conrad, B., et al. (2002) Linking actions and their perceivable consequences in the human brain. NeuroImage, 17, 364-372.
- Fabiani, M., Gratton, G., Karis, D. & Donchin, E. (1987) Definition, identification, and reliability of measurement of the P300 component of the event-related

- brain potential. In P. K. Ackles, J. R. Jennings & M. G. H. Coles (Eds.) *Advances in Psychophysiology* (Vol. 2). Greenwich, CT, JAI Press. Pp. 1-78.
- Haggard, P., Clark, S. & Kalogeras, J. (2002) Voluntary action and conscious awareness. *Nature Neuroscience*, 5, 382-385.
- Halgren, E., Marinkovic, K. & Chauvel, P. (1998) Generators of the late cognitive potentials in auditory and visual oddball tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 106, 156-164.
- Hämäläinen, M., Hari, R., Ilmoniemi, R. J., Knuutila, J. & Lounasmaa, O. V. (1993) Magnetoencephalography – theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain. *Reviews of Modern Physics*, 65, 413-497.
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (Eds.). (2000) *Principles of neural science* (4th ed.). New York, McGraw-Hill.
- 加藤元博 (2000) 脳波の成立と生理学的基礎. 鶴紀子(編) 臨床脳波と脳波解析. 東京, 新興医学出版社. Pp. 1-16.
- Knight, R. T. & Scabini, D. (1998) Anatomic bases of event-related potentials and their relationship to novelty detection in humans. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 15, 3-13.
- Kramer, A. F. & Weber, T. (2000) Applications of psychophysiology to human factors. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary & G. G. Berntson (Eds.) *Handbook of psychophysiology* (2nd ed.). New York, Cambridge University Press. Pp. 794-814.
- Kramer, A. F., Wickens, C. D. & Donchin, E. (1985) Processing of stimulus properties: Evidence for dual-task integrality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11, 393-408.
- レオンチェフ, A. N. 西村学・黒田直実 (訳) (1980) 活動と意識と人格. 東京, 明治図書出版. (原著 1975 年)
- Logothetis, N. K. (2002) The neural basis of the blood-oxygen-level-dependent functional magnetic resonance imaging signal. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 357, 1003-1037.
- Makeig, S., Westerfield, M., Jung, T.-P., Enghoff, S., Townsend, J., Courchesne, E., et al. (2002) Dynamic brain sources of visual evoked responses. *Science*, 295, 690-694.

- 中村和夫 (1998) ヴィゴツキーの発達論：文化-歴史的理論の形成と展開. 東京, 東京大学出版会.
- Nittono, H., Hamada, A. & Hori, T. (2003) Brain potentials after clicking a mouse: A new psychophysiological approach to human-computer interaction. Manuscript submitted for publication.
- 入戸野宏・堀忠雄 (2001) 自己ペース聴覚弁別課題における事象関連電位. 臨床脳波, 43, 780-784.
- Nittono, H., Nageishi, Y., Nakajima, Y. & Ullsperger, P. (1999) Event-related potential correlates of individual differences in working memory capacity. *Psychophysiology*, 36, 745-754.
- Nittono, H. & Ullsperger, P. (2000) Event-related potentials in a self-paced novelty oddball task. *NeuroReport*, 11, 1861-1864.
- Norman, D. A. (1986) Cognitive engineering. In D. A. Norman & S. W. Draper (Eds.) *User Centered System Design*. Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum. Pp. 31-61.
- 沖田庸嵩(1992a) ERP 研究に役立つ心理実験パラダイム(I). 臨床脳波, 34, 269-275.
- 沖田庸嵩(1992b) ERP 研究に役立つ心理実験パラダイム(II). 臨床脳波, 34, 334-339.
- Papanicolaou, A. C. & Johnstone, J. (1984) Probe evoked potentials: Theory, method, and applications. *International Journal of Neuroscience*, 24, 107-131.
- Picton, T. W., Bentin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S. A., Johnson, R., Jr., et al. (2000) Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: Recording standards and publication criteria. *Psychophysiology*, 37, 127-152.
- Rugg, M. D. & Coles, M. G. H. (1995) The ERP and cognitive psychology: Conceptual issues. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.) *Electrophysiology of mind*. New York, Oxford University Press. Pp. 27-39.
- 下河内稔 (1997) 誘発電位測定指針案 (1997年改訂). 脳波と筋電図, 25, 1-16.
- Wallace, P. (1999) *The psychology of the Internet*. New York, Cambridge University Press. 川浦康至・貝塚泉(訳) (2001) *インターネットの心理学*. 東京, NTT 出版.
- Wickens, C. D., Gordon, S. E. & Liu, Y. (1998) *An introduction to human factors engineering*. New York, Addison Wesley Longman.
- Wickens, C. D. & Hollands, J. G. (2000) *Engineering psychology and human performance* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall.
- 八木昭宏・山田富美雄 (2002) 心理工学からのアプローチー前書きにかえてー. 心理学評論, 45, 1-3.

## 補 足 説 明

1. ERP の教科書・参考書には、以下のものがある (Johnson, 1995; 加我・古賀・大澤・平松, 1995; 丹羽・鶴, 1997; Rugg & Coles, 1995) .
  
2. ここで述べる樹状突起は、錐体細胞の頂点 (apex) から伸びているので“先端樹状突起 (apical dendrite)”と呼ばれる。これに対して、図には示していないが、錐体細胞の側面や底辺から伸びる樹状突起を“基底樹状突起 (basal dendrite)”という。視床特殊核からのニューロンは基底樹状突起にもシナプス結合している。
  
3. 認知活動を歪めずに並行して記録できる ERP の長所を活かした研究として、覚醒から睡眠への移行期である入眠期に、外界の音刺激に対する注意機構の変化を検討した例がある (Nittono, Momose & Hori, 2001) . 目覚めているときは意識がはっきりしているので、特に注意していなくても外界の事象をモニタできる。しかし、眠ってしまうと意識は遠のき、外の世界のことは忘れてしまう。この変化がいつ生じるかを検討するために、筆者らは ERP のミスマッチ陰性電位 (mismatch negativity: MMN) に注目した。MMN は聴覚事象の変化に対して潜時 100-200 ms で生じる電位である。覚醒中は刺激を無視しているときでも惹起されるために、自動的な前注意過程を反映するといわれている (Näätänen, 1992) . 周波数の異なる 3 音 (標準音 1000 Hz,  $p = 0.90$ ; 低逸脱音 1050 Hz,  $p = 0.05$ ; 高逸脱音 1200 Hz,  $p = 0.05$ ) をランダムな順序で呈示し、被験者には聞き流して眠るように教示した。覚醒中は、低逸脱音・高逸脱音ともに MMN を惹起した。入眠期を詳細に検討した結果、覚醒を代表する背景脳波であるアルファ波 (8-13 Hz) が消えて、睡眠に特徴的なシータ波 (4-7 Hz) があらわれるとともに、MMN が消失することが明らかになった。その後は、P240-N360 という別の ERP 成分が高逸脱音に対してのみ出現した。これらの結果は、シータ波の出現とともに覚醒中の注意機構が睡眠中の別の注意機構に切り替わることを示唆している。入眠という活動を妨害せずに測定できる ERP の長所が活かされた研究だといえる。
  
4. 時間軸にそって複数の測度が入手できる ERP の長所を活かした研究として、メロディ聴取時に ERP と主観指標を測定した例がある (Nittono, Bito, Hayashi, Sakata & Hori, 2000) . よく知っているメロディを聴いているときに、音程が外れたりタイミングが狂うと、不調和を感じる。筆者らは、終結音の音程 (正しい/半音ずれる) とタイミング (正しい/半拍遅れる) を変えた 4 パターンのメロディを被験者に聴かせて、それぞれの調和感を 6 段階で評定してもらった。その結果、音程とタイミングのずれは評定値に加算的に影



響し、音程とタイミングが共にずれたメロディの調和感が最低であった。しかし、同時に記録した ERP 波形を見ると、予期からの逸脱を示す脳電位反応 (P3) が一番大きかったのは、半音ずれた終結音が正しいタイミングで呈示されたときであった。主観指標と ERP のこの不一致は、主観評価は、脳で起こる過程と一対一で対応しているのではなく、複数の認知過程を事後的に総合判断した結果を反映していることを示唆している。

5. ERP の短所として、以下の 3 つが挙げられる。第 1 に、加算平均を行うために反復が必要であり、1 回しか起こらない事象に対する ERP は検討できない。1 回の波形からは、どの部分が事象に時間的に関連した脳波成分で、どの部分がノイズであるかを区別できないからである。ただし、多数試行のデータが得られている場合には、さかのぼって 1 試行ごとの ERP を検討することもできる。検討したい ERP の振幅が背景脳波にくらべて小さいほど、たくさんの試行を加算平均する必要がある、最低 20 回から数百回の加算平均が一般に行われる。第 2 に、電極装着に時間がかかる。数カ所の電極であれば 5 分程度で装着できるが、数十個の電極を頭皮に接着して固定しなければならない睡眠実験では 2 時間以上かかることもある。第 3 に、アーチファクト（脳波以外のノイズ）を減らすために、被験者の動作（瞬目や体動）を制限する必要がある。このため発話や大きな運動を伴う課題中に ERP を測定することは難しい。

6. PET の測定では、酸素の放射線同位体で標識した水 ( $\text{H}_2^{15}\text{O}$ ) やフッ素の放射線同位体で標識したフルオロデオキシグルコース (fluorodeoxyglucose:  $^{18}\text{FDG}$ ) などを体内に注入する。前者は脳血流の検討に、後者は代謝活動（グルコースの消費）の検討に用いられる。fMRI で測定するのは、代謝活動が起こっている脳部位に酸素が過剰に供給されることで生じる酸化ヘモグロビンと脱酸化ヘモグロビンの比率の変化である (blood-oxygen-level-dependent signal: BOLD 信号)。

7. 近年、近赤外線を用いて脳血流（酸素の供給と利用状態）を測定する新しい技術—機能的近赤外分光法 (functional near infrared spectroscopy: fNIRS)—が開発されている (星, 2002)。この方法はフィールドでも使えるが、現在では測定装置が高価なので、それほど普及していない。脳波よりも空間分解能は高いが、fMRI と同じく血流を測定するので、脳波に匹敵する時間分解能は望めない。

8. 実際、主課題の刺激に対する ERP と関連プローブに対する ERP を同時記録し、主課題に向ける処理資源の量を操作すると、主課題の刺激と関連プローブで得られる P300 振幅の和はおよそ一定になる (Sirevaag, Kramer, Coles & Donchin, 1989) .

9. 人間の頭皮上から脳の電気活動 (脳波) が記録できることは、ドイツの Hans Berger によって 1929 年に報告された。その 10 年後の 1939 年には、外部刺激に対する脳波応答 (誘発電位 evoked potential: EP) が覚醒中の人間から記録できることがアメリカの Pauline Davis によって報告された。1960 年代に入ると、現在でも標準的に使われるコンピュータを使った加算平均法が考案され、研究は飛躍的に増えた。その結果、物理的な刺激が存在しなくても生じる電位があること、注意などの心理的操作によって変化する電位があることなどが発見され、EP を含む包括的な用語として “ERP” が定着した (歴史的経緯については Brazier, 1984; 斎藤・豊嶋, 1997 参照) .

#### 補足説明の引用文献

Brazier, M. A. B. (1984) Pioneers in the discovery of evoked potentials.

Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 59, 2-8.

Johnson, R., Jr. (Ed.) (1995) Event-related brain potentials and cognition. In F.

Boller & J. Grafman (Eds.) Handbook of neuropsychology (Vol. 10). Amsterdam, Elsevier, Pp. 1-327.

加我君孝・古賀良彦・大澤美貴雄・平松謙一 (編) (1995) 事象関連電位 (ERP) マニュアル - P300 を中心に -. 東京, 篠原出版.

Näätänen, R. (1992) Attention and brain function. Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum.

Nittono, H., Bito, T., Hayashi, M., Sakata, S. & Hori, T. (2000) Event-related potentials elicited by wrong terminal notes: Effects of temporal disruption. Biological Psychology, 52, 1-16.

Nittono, H., Momose, D. & Hori, T. (2001) The vanishing point of the mismatch negativity at sleep onset. Clinical Neurophysiology, 112, 732-739.

丹羽真一・鶴紀子 (1997) 事象関連電位 - 事象関連電位と神経情報科学の発展 -. 東京, 新興医学出版社.

Rugg, M. D. & Coles, M. G. H. (1995) Electrophysiology of mind: Event-related brain potentials and cognition. New York, Oxford University Press.

---

斎藤治・豊嶋良一 (1997) 事象関連電位：歴史と概論. 丹羽真一・鶴紀子(編) 事象関連電位－事象関連電位と神経情報科学の発展－. 東京, 新興医学出版社. Pp. 3-21.

Sirevaag, E. J., Kramer, A. F., Coles, M. G. H. & Donchin, E. (1989) Resource reciprocity: An event-related brain potentials analysis. *Acta Psychologica*, 70, 77-97.