

ERP (事象関連電位) データを読み解くための基礎知識

菅井 康祐
近畿大学

概要

言語を対象とする研究でも ERP (事象関連電位) を用いたものが多く見られるようになり、言語研究者にとっても有益な調査結果は多い。しかし、その実験手法や解釈法などに馴染みが薄いために敬遠されることも多いように思われる。そこで本稿では、ERP 調査の基本的な手法を概観するとともに、他の実証研究と同様に調査結果の解釈をするための一つの基準を紹介する。

Keywords: ERP (事象関連電位) , 解釈, 言語研究, 入門

1. はじめに

言語の認知過程は非常に複雑で、高次の脳内活動を伴うため、言語学のみならず、心理学・神経科学など様々な分野の研究者の関心を引きつける。また、言語を扱う研究の手法も多様化し、様々な神経生理学的手法を用いられることも多くなってきた。本論は、そのような手法の中でも比較的歴史が古く、言語調査に用いられることの多い Event-Related Potentials (ERP: 事象関連電位) を取り上げ、この手法に馴染みのない言語研究者が ERP を用いた調査研究を理解するための一助となることを目指す。なお、実際に脳波実験を行うことや、ERP の分析を実際に行うことは目的としていないので、技術的な部分の紹介は最小限にとどめる。

1.1 ERPとは

ERP とは大脳皮質における数百万個のニューロンの活動によって生じる電位 (数十マイクロボルト) を頭皮上の複数の電極によって計測するいわゆる脳波 (electroencephalogram: EEG) の一種である。しかし、外的刺激により引き起こされる大脳誘発電位 (evoked potential) とはことなり、刺激 (事象) に対する被験者の認知的態度を反映する内因性の電位である (丹羽・鶴, 1997)。さらに、様々な認知処理に対応して特定の潜時 (ある事象から出現するまでの時間) に特徴的な波形成分 (後述) が出現するため認知過程の測定に幅広く用いられている。

1.2 ERP の特徴

最近では、脳の活動を測定する機器も色々なものが発展しており、言語研究においてもこれらを用いた実験研究が多く見られるようになってきた。ここでは、いくつかの代表的なものと比較しながら ERP の特徴について考える。言語を含む認知心理学研究において用いられる代表的な脳機能の測定法には ERP の他に MEG (magnetoencephalography: 脳磁図), NIRS (near infra-red spectroscopic optical topography: 近赤外光トポグラフィー), fMRI (functional magnetic resonance imaging: 機能的磁気共鳴イメージング) などがある。それぞれの特徴をまとめたものが表 1 であり、それぞれに得手・不得手がある。ERP の一番の特徴は時間分解能が高いということと、比較的成本が低いことである。その反面、fMRI や NIRS などと比べると空間分解能は非常に低い上に、各電極でとらえられた電位がその直下の部位から届いたものであるという保証は無いので¹、大脳活動の部位特定などには不向きである。

表 1

EEG (ERP), MEG, NIRS, fMRI の比較

手法	空間分析 (mm)	時間分析 (ms)	費用
ERP	30~40	○ 1~10	○
MEG	5~10	○ 1~10	×
NIRS	20~30	5~8	△
fMRI	○ 3~5	10~100	×

2 計測と記録

2.1 電極配置

頭皮への電極の装着は国際 10-20 法に基づいて行われる (図 1)。

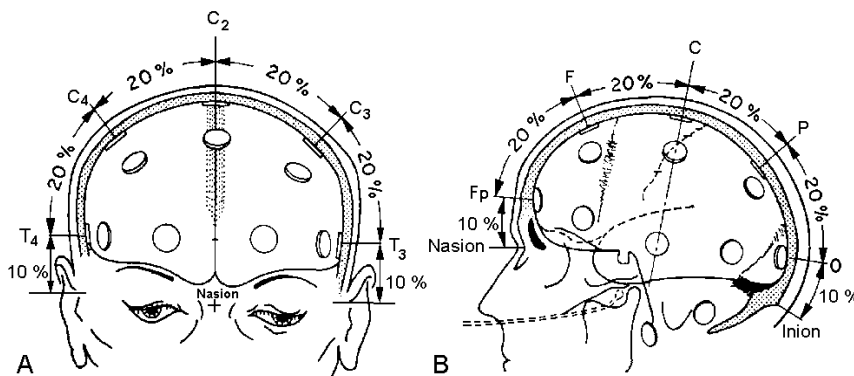


図 1. 国際 10-20 法 (Jasper, 1958)

10-20 法とは、大脳を覆う形で頭蓋表面に比率で基準を定める方法で、まず左右には両耳の間に（図 1 A）、前後には鼻根（nasion）から頭蓋結節（inion）の間に（図 1B）10%, 20%, 20%, 20%, 20%, 10% の間隔で点をとる。そして、その点を結んで出来る円を真上から見た時に出来る円周上に電極を配置する（図 2 左）。

また、近年見られるような 64 チャンネルを超えるような他チャンネル計測を行う場合には、10-20 法を発展させた国際 10%法が用いられる（図 2 右）。

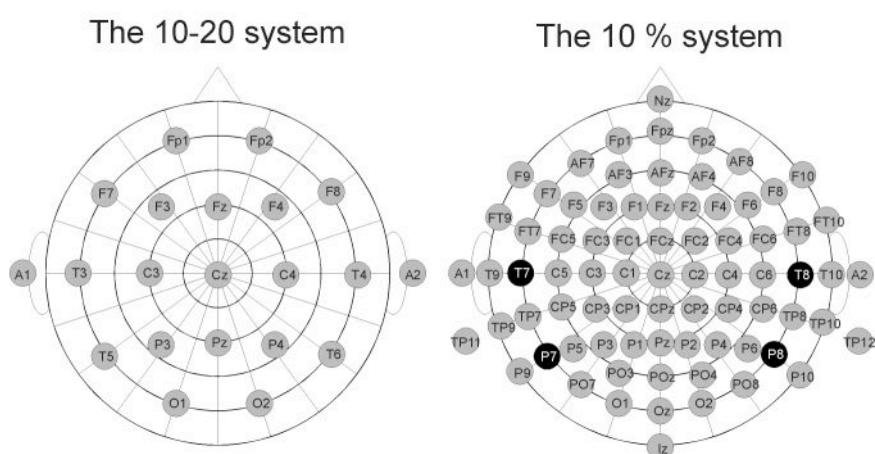


図 2. 電極配置を上から見た図（入戸野，2005）

ただ、現在では実際に実験者が毎回この基準に照らし合わせて一つ一つの電極を頭皮上に設置するのではなく、あらかじめ 10-20 法に基づいて電極を配置された電極帽を用いて実験を行うのが一般的である。電極の名前は、その部位を表す語句の頭文字のアルファベット（以下参照）に、正中線を z (zero) として、側頭部に向けて左右に順に振られた番号を加えたものである（入戸野, 2005）。

Fp: frontal pole（前頭極）

P: parietal（頭頂部）

F: frontal（前頭部）

O: occipital（後頭部）

C: central（中心部）

T: temporal（側頭部）

2.2 信号のデジタル化

頭皮上で検出される電位は人体から発せられるアナログ信号であるため、以下のプロセスを通して、コンピュータ（PC）などで分析可能なデジタル情報に変換・記録される。

まず、前出の 10 - 20 法に基づいて頭皮上に配置された電極より電位（基準電極との電圧差）を抽出する。次に生体アンプによって PC で記録できる十分な電圧（数万倍）に

増幅する。そして、この電気信号をコンピュータ上で A/D (analogue to digital) 変換・記録する。



図 3. システム概略図

この A/D 変換を行う時点の設定 (サンプリングレート (Hz)・量子化 (bit)) で、脳波波形データの解像度・データの大きさが決定される。これについては、音声信号などの A/D 変換と原理は同じである。例えばサンプリングレートを 1000 Hz に設定すれば、1 ms (ミリセカンド) の時間分解能のあるデータを得られ、500 Hz に設定すれば 2 ms の解像度のデータが得られるということになる。

2.3 加算平均

ERP の成分は非常に電圧が低く、そのままの状態では他の脳波成分などのノイズの影響によって、波形上で確認することができない。そこで、ERP の反応の時間的規則性 (time locked) を生かし、同一刺激に対する複数回の反応を加算平均することで、標的とする反応以外の不規則な成分の影響を小さくすることができる (図 4)。

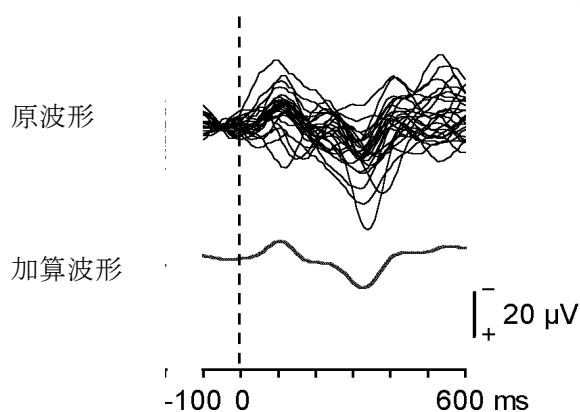


図 4 加算平均波形加算平均波形 (入戸野, 2003 より改編)

図 4 の原波形にみられるように、同一刺激に対するすべての反応は非常にばらつきが大きいですが、すべてを加算平均すると図 4 の加算波形のように成分のはっきりと視認できる

一本の波形になる。加算回数は多ければ多いほどノイズの無い滑らかな波形を得ることが出来るが、その一方で加算回数が増えればそれだけ実験協力者の負担も増えることになる。波形上のどの成分のあたりを分析対照とするかにもよるが、言語研究に良く用いられる P300, N400, P600 など（後述）のように比較的電圧が高い後期成分に対して十分な S/N 比（signal-to-noise ratio）を得るには、30 回ほどの加算回数があれば良いとされている（詳しくは Luck, 2005; 入戸野 2003 などを参照）。また、記録中にまばたきなどによる大きな筋電（アーチファクト）が発生した試行は加算平均には加えられないので²、10 から 20 試行程度は余分に記録しておくことが望ましい。

2.4 課題提示

ERP の各成分は非常に小さく、他のノイズの影響を受けやすいものなので、標的刺激（target）に対するはっきりとした反応を見るためにはそれに応じた課題設定が必要になる。なかで最も広く使われるものの一つが odd-ball 課題である。これは、標的刺激（odd: target）と標準刺激（normal）を提示し、その際に標的刺激に対して得られた波形を分析するやり方であり、元々は P3 を引き出すために考案されたパラダイムである（入戸野, 2005）。例えば、日本語母語 EFL 学習者が、英語の /l/ の音声から /r/ を識別出来るかどうかが見たい場合には、/ra/ を標的刺激、/la/ を標準刺激とするといったやり方である。また、標的刺激に対する反応をはっきりと引き出すためには標的刺激の確率を全体の 30% 以内に抑える必要がある。つまり、十分な加算回数を得るには一つの課題に対して最低でも標的刺激を 30 回、標準刺激を 70 回提示する必要がある、さらにアーチファクトにより取り除かれる数を考慮すると 170 回程度の刺激の提示が必要になる。また、まれではあるが、標的刺激のみを連続して提示する場合もあり、これでも同様の結果が得られるという実験結果も報告されている（Mertens & Polich, 1997）。

3. ERP の主要成分

ここでは、ERP の成分のなかで言語を対象とする調査においてよく言及される代表的なものを紹介する。

N1 (N100) : 刺激提示後最初の陰性波（なので N1 と呼ばれる）で、純音などの単純な課題では 100 ms あたりの潜時にピークを持って出現する (N100)。これは、課題に対する選択的注意を反映すると考えられている (Coles et al., 1990)。

MMN (mismatch negativity) : 聴覚刺激課題において、標準刺激に対する標的課題の音響的逸脱を反映して発生すると考えられており (Näätänen, 2007)、N2a ともよばれる。

P3 (P300) : これまでに最も研究されてきた成分で、標的課題の頻度や、識別の難易度などに影響を受け、その頂点潜時は反応時間測定課題の結果とも高い相関を示

す (Ullsperger & Gille, 1988)。また、最近の研究では P3a, P3b などとその下位成分の存在も明らかになっており、P3b がこれまで P3 と呼ばれてきた成分に該当すると見られている (Luck, 2005)。

N400: Kutas and Hillyard (1980) で初めて報告された成分で、言語における意味の逸脱に対して見られると考えられている。

P600: 比較的最近報告され始めた成分で、文の統語的逸脱に対して見られると考えられている (Osterhout & Holcomb, 1992)。

4. 結果の解釈

前説までは ERP の技術的な側面について紹介してきたが、本節では言語研究者が ERP データを見るときの一つの考え方を示す。

ERP データを読むのが難しく感じられたり、結果を受け入れにくいと思われたりする理由の一つは、3 節で紹介したような各成分の解釈に起因する場合が多いように思われる。例えば、統語処理の研究で P600 の裏付けとしてよく引用される Osterhout & Holcomb (1992) を見てみる。この研究では、統語的逸脱の無い文 (1) と統語的逸脱を含む文 (2) を提示し、統語的妥当性の判断基準となる *to* の頭を起点とする波形を分析した。すると (2) の文に対して、500 ms から 800 ms あたりに特徴的な陰性成分が検出されたため、これは統語的逸脱に対する反応 (P600) だと考えられた。

(1). The broker hoped to sell the stock.

(2). *The broker persuaded to sell the stock.

この研究は、統語的逸脱に対して P600 成分が現れるということが主張でありそれ自体は大変有意義なものである。しかし、言語研究者が P600 を解釈の拠り所にできるだけ確証があるかという疑問が残る。例えば、*hoped* と *persuade* という二つの動詞は、音節数や強勢の位置などの音韻構造も異なり、このような統語以外の要因が結果に影響を与えている可能性は排除できない。このように考えると、言語研究者が、「P600 と思われる成分が見られるので統語的逸脱を感じている」というような成分の特徴に依存しすぎた解釈をすることは望ましくない。

成分に依存しすぎない解釈の代表的なものが差分法と呼ばれるもので、統制された複数の課題に対する反応を差分することで結果を解釈する手法である。この方法であれば、あらかじめ設定された要因 (独立変数) に対して結果の解釈を行うので、その要因に対して「ERP においては差が見られた」というシンプルな結論を導きだすことができる。もちろん、その上で、これまでに報告されている成分をふまえて考察を加えることは可能であるが、あくまでも課題の設定・統制が妥当であるかどうかを主な判断基準になる。つまり

基本的には ERP 以外の実証研究と同じように結果を判断することが出来るのである。

5. おわりに

ERP は言語の認知過程を捉える上で非常に強力な道具立てではあるが、その技術的な複雑さ、解釈の難解さによって敬遠されがちな手法でもある。ただし、本論で述べたように課題や手続きの適切さを判断基準とすれば、その解釈については他の実験研究と大きく変わりはない。そのことを本稿で少しでもお伝えすることが出来れば幸いである。

謝辞

本論の口頭発表および執筆の機会を与えて下さった山西博之部会長・住政二郎事務局長・水本篤前部会長の三氏には、心より感謝の意を表したい。

注

1. 電気信号は、距離に関わらず抵抗の低いところを通る特性がある上に、頭蓋骨の厚さも一様ではないため、必ずしも電極の真下の部位の活動をとらえているとは言えない。
2. 筋電は波形成分よりも遥かに電圧が高いため、あらかじめ一定電圧以上の電位が現れた試行については自動的に排除されるようにフィルタ設定をしておくのが一般的。

参考文献

- Coles, M. G. H., Gabriele G, & M. Fabiani. (1990). Event-Related Potentials. In Cacioppo, J. T. & L. G. Tassinary. (eds.), *Principles of Psychophysiology: Physical, social, and inferential elements*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jasper, H.H. (1958). The ten twenty electrode system of the international federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 10, 371-375.
- Kutas, M., & Hillyard, S. (1980). Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207(4427), 203–205. doi:10.1126/science.7350657
- Luck. S. J., (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. Cambridge: The MIT Press.
- Mertens, R., & Polich, J. (1997). P300 from a single-stimulus paradigm: passive versus active tasks and stimulus modality. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 104, 488–497. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168559797000415>

- Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: a review. *Clinical Neurophysiology*, *118*(12), 2544–90. doi:10.1016/j.clinph.2007.04.026
- 入戸野宏 (2003). 「事象関連電位 (ERP) と認知活動：工学心理学での利用を例に」『行動科学』42 卷 1 号.
- 入戸野宏 (2005). 『心理学のための事象関連電位ガイドブック』北大路書房.
- 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』新興医学出版社.
- Osterhout, L. E. E., & Holcomb, P. J. (1992). Event-Related Brain Potentials Elicited by Syntactic Anomaly. *Journal of Memory and Language*, *31*, 785–806.
- Shafer, V. L., Yu, Y. H., & Datta, H. (2011). The Development of English Vowel Perception in Monolingual and Bilingual Infants: Neurophysiological Correlates. *Journal of phonetics*, *39*(4), 527–545. doi:10.1016/j.wocn.2010.11.010
- Ullsperger, P. & H.-G. Gille. (1988). The Late Positive Component of the ERP and Adaptation-Level Theory. *Biological Psychology* *26*, 299-306.