

## 脳波計測に基づいた PC キーボードの キースwitchの操作性の検証<sup>1),2)</sup>

富田 新\*・大原貴弘\*

### A Research on Usability of Key Switches of PC Key Boards on the Basis of the Measurement of Electroencephalogram and Event-related Potential P300

Arata TOMIDA\* and Takahiro OHARA\*

Considering usability of key switches of PC keyboards, two parameters “key stroke” (the amount of vertical movements of the key switches) and “drop of load” have been thought to be very important. Both parameters are mechanically implemented in key switches. We investigated how each of them would affect usability of key switches of PC key boards by measuring  $\beta/\alpha$ , which is the ratio of the powers in power-spectrum of electroencephalogram, and event-related potential P300. In experiment 1, usability of the key board whose switches had no key stroke was compared with the one whose switches had normal key stroke by measuring  $\beta/\alpha$ . At the topographical position O1, the value of  $\beta/\alpha$  tended to rise after using the stroke-less key board but did not rise after using normal keyboard. This result suggested that usability of the normal key board would be better for the participants than that of the stroke-less one. In experiment 2, whether the participants could detect the tactile feelings of “click” (drop of load) in key switches was investigated by measuring their P300s. The mean amplitude of the P300s suggested that they could detect them although the result was not statistically significant.

**key words:** usability of key switches of PC key boards, electroencephalogram, event-related potential P300

#### 問 題

総務省の行った平成 27 年度通信利用動向調査によれば、インターネット利用時の端末使用率はパーソナルコンピュータ（以下 PC と略記）が 56.8%、スマートフォンが 54.3%、タブレット型端末が 18.3%であるという（総務省、2016）。この調査結

果から、文字入力装置としての PC キーボードの普及率が依然として高いことがうかがえる。しかし、キーボードの操作性に関する人間工学的研究は最近あまり行われなくなってきている（富田・大原、2015）。キーボードがすでに成熟製品であること、開発・改良の余地が少ないと考えられていることなどがその理由として挙げられるであろう。キーボー

<sup>1)</sup> 本論文は平成 18 年度から平成 20 年度に行われたアルプス電気(株)による委託研究「入力機器の操作性に関する研究」(研究代表者: いわき明星大学理工学部システムデザイン工学科教授・清水信行, 研究協力者: いわき明星大学人文学部心理学科准教授・富田 新, 同学科准教授・大原貴弘, 同大学機械工学科・東 哲也(所属・職位はいずれも当時))の成果に基づいている。研究の実施にあたってはアルプス電気(株)から絶大なご支援・ご協力をいただいた。また、(株)メディカルシステム研修所の岡田保紀所長からは、脳波測定に関して様々なアドバイスをいただいた。これらの皆様のご協力に深く感謝の意を表します。

<sup>2)</sup> 本論の内容は日本心理学会第 76 回大会(2012: 専修大学)及び日本心理学会第 77 回大会(2013: 北海道医療大学)の発表報告に基づいている。

\* いわき明星大学人文学部心理学科

Department of Psychology, College of Humanities, Iwaki Meisei University, 5-5-1 Chuodai Iino, Iwaki-shi, Fukushima 970-8551, Japan

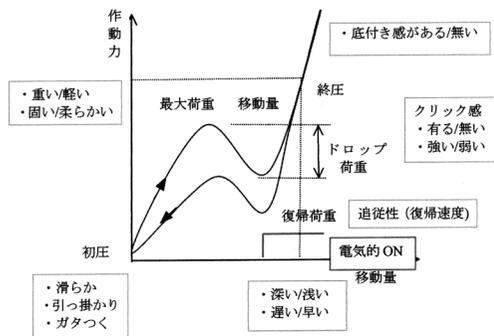


Figure 1 作動圧曲線の機械的パラメータと操作性の関係

ドのキースイッチの操作性（押し心地）は、Figure 1 に示したキースイッチの作動圧曲線とそれを構成する種々の機械的パラメータの組み合わせによって規定されていると経験的には考えられてきた（富田・大原，2015）。しかし、作動圧プロフィールにセットされた個々のパラメータがキースイッチの操作性にどのような影響を与えているかについては、まだ十分に検証がなされていない。

昨今は平面型のキーボードが多く開発され、一部が市販化されている。平面キーボードとは、キースイッチのキートップの“高さ”をなくしたキーボードのことである。キーの“高さ”をなくしただけでなく、Figure 1 の重要なパラメータである“キーストローク”（“移動量”）や“クリック”（“ドロップ荷重”）をなくしたキーボードも開発されている。指に振動を与えるなど、従来とは異なった形で“触感的クリック”を実現しているキーボードもある。

また、見た目は平面だが、“ストローク”と“クリック”の両方が実装されたキーボードも市販されている。これらの平面型キーボードの操作性が、従来のキーボードに比べてどのように異なっているかについても、十分に検証が行われているとはいえない。

以上のことを踏まえて、本研究では、これまでキーボードに実装されてきた2つのパラメータ（“移動量”と“ドロップ荷重”）が、キーボードの操作性に与えている影響について検証を行った。

実験1では、“キーストローク”の有無がPCキーボードの“操作感”にどのような影響を与えているかが検証された。“キーストローク”とは、キースイッチを押したときに生ずるキートップの“移動

量”のことである。通常はキースイッチの押し込み量（移動距離：単位はmm）として定義される（Figure 1）。キーストロークの最大値はキースイッチが底を突くまでの移動距離である。PCキーボードのキースイッチは、キートップを指で押し込むことでキーストロークが生じ、その途中で電気的ON点に達し、ユーザが意図した効果（例えば、文字の入力）が得られるように設計されている。キーストロークが装備されることで、キーの押下という操作が生じ、また、キースイッチの操作性も左右されていると考えられる<sup>3)</sup>。実験1ではキーストロークの有無がキースイッチの操作性に与える影響について調べた。

実験2では、“ドロップ荷重”によって生ずる“クリック感”を、ユーザが触知的に感知しているかどうかを検証された。“クリック感”とは、ユーザが「キースイッチが押された」と感じる感覚的・知覚的印象のことで、“クリック印象”とも呼ばれる。クリック感はある程度ユーザの内部に生ずる心理的印象であるため、Figure 1 に示された個々の機械的パラメータとは、明確に対応していない可能性がある。例えば、ユーザがキー押しの完了をモニタ画面の表示や効果音等で確認している場合には、画面表示や効果音の知覚印象がユーザにクリック感をもたらすことになる。ただし、キースイッチの開発においては、Figure 1 の作動圧曲線にセットされた機械的パラメータの1つである“ドロップ荷重”（キーストロークの途中で生ずる押圧の低下量：単位はgf）が、タクトイル（触知的）なクリック感としてユーザに感知されているのではないかと考えられている。このドロップ荷重が作動圧曲線に導入されたことにより、キーの底突きによって生じていた腱鞘炎の発症が激減したことはよく知られた事実である。このことから、キースイッチの押下時にユーザがキースイッチのドロップ荷重を触知的に感知し<sup>4)</sup>、指の押圧をコントロールしている可能性は高いと思われる。実験2では、ドロップ加重をユーザ

<sup>3)</sup> キースイッチの操作性には、“キーストローク”以外にも、“初圧”（キースイッチの押し始めの押圧）など、他の機械的パラメータも様々な影響を与えていると思われる。

<sup>4)</sup> それは意識的または無意識的な“クリック感”としてユーザに感知されていると思われる。

が感知している可能性について検証を行った。

これらの検証を行うに当たり、本研究では、従属変数として脳波を採用した。実験1では背景脳波が、実験2では事象関連電位の陽性成分の1つである P300 が指標として採用された。

実験1で採用された背景脳波は、機器操作の快適感を測る際に比較的よく用いられている生理指標の1つである。とりわけよく用いられるのが、背景脳波の $\alpha$ 成分と $\beta$ 成分の比率 ( $\beta/\alpha$ ) である。背景脳波の成分比を用いた機器のユーザビリティ評価は少なからず報告されている (例えば、木村・上野・大平・松本, 2008)。ただし、作業中の背景脳波の測定には、ユーザの体動や筋電がアーチファクトとして混入してくるといった問題がある (末永・岡田, 2004; 大熊, 1999)。また、八木(1998)は、作業中の活動的な快適感 (pleasant) の指標として $\alpha$ 波 ( $\alpha$ 成分) を用いることに疑問を呈している。これらのことを勘案し、実験1では、キーボードの“操作中”ではなく、キーボード“操作の前後”で、“非活動的な快適感” (comfort) の指標である背景脳波の周波数成分の比率 ( $\beta/\alpha$ ) を算出することにより、通常のキーストロークを有するキーボードと、キーストローク0のキーボードの快適性の違いを調べることを計画した。

実験2では、事象関連電位の内因性成分のうち、最も代表的な陽性成分である P300 (沖田・諸富, 1998; 花谷・太田・野田, 1998; 大熊, 1999; 入戸野, 2005, 2007; 入戸野・堀, 2006) を指標として、ユーザが“クリック感”を感知しているかどうかを検証することを計画した。キースイッチ押下時のタクタイルなクリック感には、明瞭に自覚できる“自覚的クリック感”と、一連のキー押し時 (例えば、文章入力作業中) には明確に意識されないが、キーの打鍵に影響を及ぼしている“無自覚的クリック感”の2種類が存在していると考えられる。前者のクリック感については、“底付き感”や“確認感”といった“評価言葉”を用いた調査によってその特質を調べてゆくことができる (富田・大原, 2015)。これに対し、後者のクリック感には、参加者自身に明瞭に意識されていないため、言葉による評価のみでそれらを調べてゆくことは難しい。後者のクリック感をユーザが感知しているとすれば、その痕跡は脳波の変化として現れている可能性がある。後者のク

リック感は、キースイッチにセットされた機械的なパラメータ“ドロップ荷重”によって惹起される (Figure 1)、短い時間的変化を伴う事象関連電位 (event-related potential: ERP) の変化として捉えられるのではないかと考えられた (沖田, 1997; 沖田・諸富, 1998; 渡邊, 2004; 入戸野, 2005, 2007; 入戸野・堀, 2006)。問題は、ドロップ荷重によって惹起されるタクタイルなクリック感の捕捉にあたり、事象関連電位のどの成分を用いるかということであった。事象関連電位には数多くの成分 (N100, N200, CNV, MMN 等) が存在しており、各成分が反映する脳内情報処理や測定パラダイムは異なっているため (沖田・諸富, 1998; 大熊, 1999)、測定対象となる脳内事象と事象関連電位のマッチングが重要になる。

実験2では、代表的な陽性成分である P300 を測定指標として検証を行うこととした。その主な理由は以下のとおりである。

**(1) P300 はキースイッチのタクタイル (蝕知的) な刺激 (ドロップ荷重) によって惹起される**

P300 は聴覚、視覚、体性感覚など感覚刺激の種類に関係なく、標的刺激に対して出現すると考えられてきた (沖田・諸富, 1998)。体性感覚によって惹起された P300 を“注意の知覚・中枢資源配分の指標”として用いた研究もすでに存在する (入戸野, 2006b)。これらのことから、キースイッチにセットされたタクタイルなパラメータ (ドロップ荷重) によって P300 が惹起されると予測した。

**(2) 標的刺激 (ドロップ荷重, または、それによって惹起されるクリック感) に注意を向けたときに P300 は惹起される**

キースイッチにセットされた機械的パラメータ (ドロップ加重の有無) に対して、参加者が意識的に注意を向けたとき、P300 が惹起されると予想した。

**(3) P300 の振幅は注意の処理資源の配分の程度を反映する**

P300 の振幅は刺激事象から得られる情報量によって影響を受けると考えられている (沖田・諸富, 1998)。入戸野 (2006a) によれば、P300 の振幅は、刺激によって与えられる情報量が低い (刺激があいまいである/知覚後に不確かさが残る) ときに小さくなるという。この解釈に従えば、標的刺激が

予期 (expectancy) または構え (set) とより合致するほど、処理資源がより多く分配され、P300 振幅が増大すると予想される (このとき、不確実性の解消や文脈の更新もより強く起こると予想される) (Sutton, Baren, Zubin & John, 1965; Donchin & Coles, 1988; 大熊, 1999; 入戸野, 2007)。つまり、ドロップ荷重のセットされていないクリック感なしのキースイッチの検出時より、使い慣れたドロップ荷重のセットされたクリック感ありのキースイッチの検出において P300 振幅が有意に増大すると予想した<sup>5)</sup>。

## 目 的

以上のことから、本研究では、キースイッチの“移動量”と“ドロップ荷重”がキーボードの操作性に与える影響について、脳波を用いて検証した。これらのパラメータの影響について脳波を指標として検証した研究はこれまでほとんど行われていない。そのため、本研究の独自性は高いと思われる。本研究の実験 1 及び実験 2 の目的及び測定指標を Table 1 に示す。

## 実 験 1

### 目的

実験 1 では、キーボード操作の“前後”で、“非活動的な快適感” (comfort) の指標である背景脳波の周波数成分の比率 ( $\beta/\alpha$ ) を算出することにより、通常のキーストロークを有するキーボードと、キーストローク 0 のキーボードの操作性 (快適性) が比較された。背景脳波の測定に際しては、データに影響を及ぼす可能性のある要因 (電磁ノイズ, 参加者の体動等) をできるだけ厳密に統制した。

### 仮説

ユーザは通常のキーボードに慣れており、その使用において“不快感”や“違和感”を感じない

**Table 1** 本研究における 2 つの実験の目的と測定指標

	目的	測定指標
【実験 1】	キーストロークの有無が操作性に与える影響を調べる	背景脳波 $\beta/\alpha$
【実験 2】	ドロップ荷重によって生ずるクリック感をユーザが感知しているかどうかを検証する	事象関連電位 P300

め、背景脳波を測定したとき、“文章入力作業の前後”で  $\beta/\alpha$  はそれほど上昇しない。これに対し、キーストローク 0 のキーボードでは、“不快感”や“違和感”を感じるため、“作業前”に比べて“作業後”に  $\beta/\alpha$  が上昇する。

### 方法

#### 装置

- ・脳波計 (SYNAFIT 2500 EE2514)
- ・通常のキーストロークを有するキーボード
- ・キーストローク 0 のキーボード (キー押しの際、キーの沈み込みがない状態で電氣的に ON するキーボード)

2 つのキーボードはいずれもアルプス電気(株)によって特別に開発されたものである。デスクトップ PC のキーボードで、キーストロークの有無以外の形状や仕様は全く同一であった。

**参加者** いわき明星大学学生 9 名 (男 5 名, 女 4 名: 年齢範囲 19~22 歳)

**実施時期** 2007 年 7 月~8 月

**手続き** 通常のキーストロークを有するキーボードと、キーストローク 0 のキーボードを参加者に使用させたとき、背景脳波の周波数成分の比率 ( $\beta/\alpha$ ) が使用前・使用後でどのように変わるかを比較した。背景脳波は、各キーボードの使用前・使用後の一定時間 (約 90 秒間) 閉眼で測定した。参加者に課せられた課題は、各キーボードを使用して 216 文字から成る文章を入力することであった。課題文章の入力完了をもって作業の完了とみなした。実験は、生理心理実験室にあるシールドルームで行われた。電極装着後、実験者はシールドルームの外に出て隣室からマイクで参加者に指示を出した。キーストロークありとキーストローク 0 のキーボードのいずれかを先に使用して作業を行うかは、参加者間でカ

<sup>5)</sup> 新奇性に対する novelty P300 (P3a) の解釈 (Courchesne, E., Hillyard, S. A. & Galambos, R., 1975; 大熊, 1999) に基づけば、実験 2 の仮説と逆の仮説 (「使い慣れたクリック感ありのキースイッチよりも慣れから逸脱したクリック感なしのキースイッチの検出において P300 振幅が有意に増大する」) を立てることも可能であった。しかし、実験 2 の結果からは、そのような可能性は低いように思われる。

ウンターバランスされた。

**背景脳波計測法** エレクトロキャップを使用して脳波計測を行った。エレクトロキャップを使用することにより、10-20 電極配置法 (ten-twenty electrode-system) (藤澤, 1998) による電極装着が手早く簡単に行える。脳波導出法 (誘導法) としては、平均基準電極法 (Average referential derivation: AV 法) を用いた。測定時の各電極のインピーダンスは 20 k $\Omega$ 以下とした。

## 結果

**分析ソフト (tiny map) によるトポグラフィマップの作成** 頭皮上の 12 の部位のパワースペクトル値に基づき、切り出した各区間のパワー分布 (トポグラフィマップ) が描かれた。トポグラフィマップの作成には、脳波計の附属ソフト (tiny map) が使用された。tiny map を用いると、各フェーズ全体を通しての各脳波成分 ( $\alpha$ 成分,  $\beta$ 成分,  $\theta$ 成分,  $\delta$ 成分) のパワー分布の変化を見ることができる。しかし、脳波は絶えず変動しているため、トポグラフィマップの変化を視察で追跡しても、そこから一貫した傾向を読み取ることは難しい。そのため、トポグラフィマップはあくまでも参考データとするに止めた。

**各フェーズからの分析区間の切り出し** ストローク 0 のキーボードの使用前・使用後、通常キーボードの使用前・使用後の 4 つの測定フェーズ (各フェーズ 90 秒) から、アーチファクトの少ない 10 秒間の背景脳波をそれぞれ 2 箇所切り出し、FFT (Fast Fourier Transform) を用いてパワースペクトル分析にかけた。各フェーズ (90 秒) から 2 区間ずつ切り出したのは、1 区間 (10 秒間) だけだと、たまたま他と異なった傾向を示す背景脳波が切り出される危険性があることを危惧したためである。作業直後の波形には体動や瞬き等によるアーチファクトの混入が一部見られたため、タスク直後の波形が必ずしも分析に適しているとは限らなかった。また、タスクによる背景脳波の変化は 60 秒から 100 秒間持続すると考えられており (Oohashi, Nishina, Honda, Yonekura, Fuwamoto, Kawai, Maekawa, Nakamura, Fukuyama, & Shibasaki, 2000), タスク終了後の 90 秒間のうち 2 区間 (10 秒ずつ) を切り出してもそれほど問題は無いものと判断した。各キーボードの使用前・使用後の背景脳波の一貫した傾向を知るためには、できるだけ長時間のデータを切り出して周波

数解析 (FFT) を行うことが望ましい。しかし、分析時間をあまり長くしてしまうと、体動や瞬目など、アーチファクトが波形に混入しやすくなり、スペクトル解析の信頼性が低下する。今回の分析では、脳波の波形の視察に基づき、各フェーズで体動や瞬目などのアーチファクトの影響が少ないと思われる 2 区間 (10 秒ずつ、計 20 秒) を切り出した。

**各分析区間からの  $\beta/\alpha$  の算出** 切り出した区間のすべてについてパワースペクトル解析を行い、 $\alpha$  及び  $\beta$  のパワー値を求め  $\beta/\alpha$  を算出した。“快適”であれば、相対的に  $\alpha$  成分のパワーが増し、 $\beta$  成分のパワーが低下する。これにより  $\beta/\alpha$  の値は低下すると予想される。これに対し、“不快”であれば相対的に  $\beta$  成分のパワーが強くなり、 $\beta/\alpha$  の値が上昇すると予想される。 $\beta/\alpha$  の分析は後頭部 O1 と O2 の 2 部位で行った。 $\alpha$  波は閉眼時、後頭部でもっとも強く出現する傾向があるため、後頭部の 2 部位 (O1, O2) において  $\beta/\alpha$  の変動をもっとも明確に検出できると考えた。O1 及び O2 で各フェーズから切り取った 2 区間の  $\beta/\alpha$  の値の平均値を算出し、各フェーズにおける代表値とした。

**$\beta/\alpha$  を用いた分散分析** O1, O2 の各フェーズにおいて算出された各参加者の代表値 ( $\beta/\alpha$ ) を用いて、キーボードの種別 (キーストロークあり, キーストローク 0)  $\times$  実験フェーズ (使用前, 使用後) の 2 要因分散分析を行った。キーストローク 0 のキーボードにおいて、作業後に“不快感”が上昇するならば、これら 2 要因の間で有意な交互作用が検出されると予測した。統計解析に使用したソフトは SPSS Ver. 12.0J であった。また、多重比較には Bonferroni 検定が用いられた。

**O1 における分散分析結果** O1 において、キーボードの種別 (ストロークの有無)  $\times$  実験フェーズ (使用前後) の交互作用が有意傾向であった ( $F(1, 8) = 4.736, p = .061, \eta_p^2 = .372$ )。また、各要因の主効果は有意ではなかった (キーボード種別:  $F(1, 8) = 3.427, p = .101, \eta_p^2 = .300$ , 実験フェーズ:  $F(1, 8) = .398, p = .545, \eta_p^2 = .047$ )。各条件における平均値と平均値のプロフィールを Figure 2 に示す。Figure 2 から、キーストローク 0 のキーボードの使用後の  $\beta/\alpha$  の値の上昇が、交互作用が有意傾向になる原因になったものと推測できた。単純主効果検定を行ったところ、使用後のキーボードの種別 (キーストローク

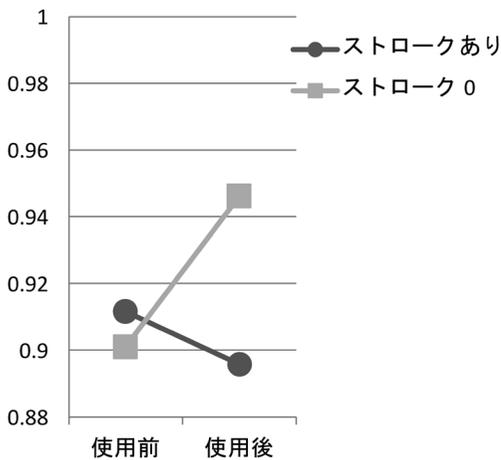


Figure 2 各キーボードの使用前後の $\beta/\alpha$  (O1)

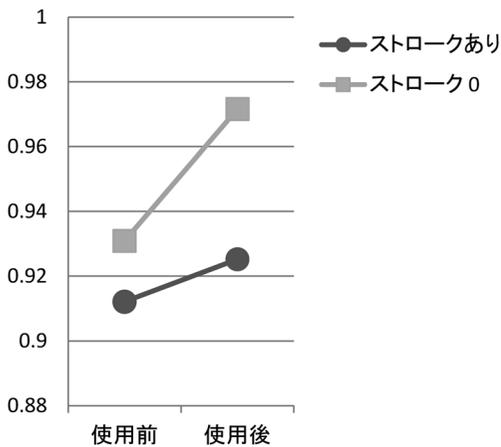


Figure 3 各キーボードの使用前後の $\beta/\alpha$  (O2)

クあり、キーストローク0) の $\beta/\alpha$ の平均値の差が有意であった ( $p=.037$ )。

**O2における分散分析結果** O2においても、O1と同様な分散分析を行った。その結果、キーボードの種類別(キーストロークあり, キーストローク0)の主効果が有意であった ( $F(1, 8)=19.738, p=.002, \eta_p^2=.712$ )。使用前後(使用前, 使用后)の主効果 ( $F(1, 8)=1.464, p=.261, \eta_p^2=.155$ )、及び2要因の交互作用 ( $F(1, 8)=.382, p=.554, \eta_p^2=.046$ ) はいずれも有意ではなかった Figure 3。

**考察**

O2 では仮説は必ずしも支持されなかったが、O1 では仮説を支持する傾向が見られた ( $p<.10$ )。O1

と O2 の違いがなぜ生じたのかについては不明だが、実験前後の各フェーズから、異なる2区間を切り出し、その平均値を求めたことが、O1とO2のプロフィールの違いにつながった可能性もあると思われる。また、ケース数が9人と少ないことも、両部位で安定した傾向が見られなかった要因の1つであったと思われる。今回のデータからだけでは、仮説が必ずしも支持されたとは言えないが、① O1の交互作用が仮説を支持する傾向を示していたこと、② O1の交互作用の効果量 ( $\eta_p^2$ ) も低い値ではなかったこと、③ O2でもキーストローク0のキーボード使用後に $\beta/\alpha$ の上昇が見られたことなどから、参加者がストローク0のキーボードの操作性をより低く評価していた可能性は高いと思われる。今後はデータ数を増やし、改めて検証を行ってゆく必要があるだろう。

**実験 2**

**目的**

実験2では、“ドロップ荷重”によって生ずる“クリック感”を、ユーザが触知的に感知しているかどうかを検証された。P300の意味づけや解釈の多様性 (Sutton et al., 1965; Donchin & Coles, 1988; 沖田・諸富, 1998; 花谷他, 1998; 大熊, 1999; 入戸野, 2006a, 2007; 入戸野・堀, 2006) を考慮したうえで、タクトイルなクリック感の測定に際し、以下のような仮説を立てた。

**仮説**

ドロップ荷重のセットされた“クリック感あり”のキースイッチとドロップ荷重がセットされていない“クリック感なし”のキースイッチを、それぞれ標的刺激(レア条件)として検出させたとき、“クリック感なし”のキースイッチを押した時に比べて、使い慣れて知覚後に不確かさが残りにくい“クリック感あり”のキースイッチを押した時にP300振幅が増大する。非標的刺激(フリクエント条件)押下時にも、“クリック感あり”のキースイッチを押した時のP300振幅が、“クリック感なし”のキースイッチを押した時のP300振幅よりも大きくなる。

**方法**

**装置**

- ・誘発脳波計 (SYNTAX 2100 ER2108)

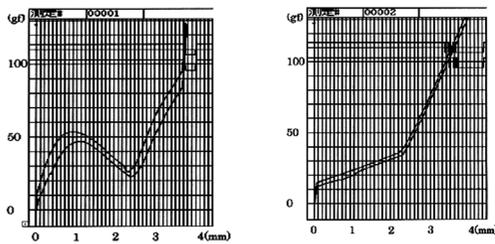


Figure 4 クリック感ありキーの差動圧曲線 (左) とクリック感なしキーの差動圧曲線 (右)

- ・実験用に開発された特殊なキーボード 2台
- ・上記のキーボードを誘発脳波計に接続するためのトリガパルス発生回路

実験にあたって、2台の特殊なキーボードが用意された。1台はドロップ荷重のセットされていないクリック感なしのキースイッチを標的刺激(レアキー)、ドロップ荷重のセットされたクリック感ありのキースイッチを非標的刺激(フリクエントキー)としたキーボード(キーボード1)。いま1台はこの関係を逆にして、クリック感ありキーを標的刺激(レアキー)、クリック感なしキーを非標的刺激(フリクエントキー)としたキーボード(キーボード2)であった。いずれのキーボードも形状やキースイッチの操作感と同じであった。レアキーは、60個のキースイッチのうちから18個(3割)を選び出し、ランダムに配置した。キー押しを行ったキースイッチは70個であったが、その中にトリガパルスを発生できないキースイッチが含まれていたため、レア:フリクエントの比率は3:7よりもレアの比率が若干低くなっていた。Figure 4に各キースイッチの差動圧曲線が示されている。実験を実施するにあたり、アルプス電気(株)の協力の下、トリガパルス発生回路が開発された。この回路を用いたキースイッチのON点からトリガ入力までの遅延時間は $1.4 \pm 0.9$  msと極めて短く、精度の高いものであった<sup>6)</sup>。

<sup>6)</sup> 実験ではキースイッチの電氣的ON点をトリガとして採用した。電氣的ON点はドロップ荷重の発生位置とは必ずしも一致していないが、押圧のドロップ(低下)のピーク位置(差動圧曲線の谷)と極めて近いところにセットされている(Figure 1)。このことから、電氣的ON点を加算の基点として採用しても、事象関連電位の波形やP300検出に大きな問題は生じないものと考えた。

**参加者** いわき明星大学学生 20名(男11名, 女9名: 年齢範囲 19歳~22歳)

**実施時期** 2007年7月~8月

**手続き** 参加者にはP300を検証するための標準的な課題の一つであるオッドボール課題(oddball task)が課された。参加者はキーボードのキースイッチを1つずつ順番に押してゆき、ターゲット(レアキー)を検出したと思ったら、反応キー(誘発脳波計付属のキー: キーボードのキーではない)を押すように教示された。キーボード1ではクリック感なしのキースイッチ, キーボード2ではクリック感ありのキースイッチがターゲット(レアキー)であった。参加者はもっとも押しやすいと感じる手の指を使ってキーボードのキースイッチを押した。反応キーはキーボードを押す手とは反対の手の親指で押した。キー押しのペースは約1秒に1個。キー押しのペースはあらかじめ参加者に教示された。キー押し時の事象関連電位が測定された。キーボード上のキースイッチが押されたときのON点をモニタし、そこを基点として誘発脳波計にトリガパルスがインプットされた。このトリガを基点として事象関連電位の加算が行われた。加算はレア条件の加算回数が30回に達するまで続けられた。ただし、それ以前に打ち切り基準(100回)に達したときは測定が打ち切られた。加算回数が基準に達するまで、参加者は左上→右下, 右上→左下のように何往復かして、ターゲット(レアキー)の検出を繰り返した。

**電極の装着と測定法** 事象関連電位の測定は10-20電極配置法に則って行われた。各参加者の正中線上の3点(Fz, Cz, Pz)からそれぞれ事象関連電位が測定された。測定にはAg/AgCl電極が用いられた。また、眼球運動等によるアーチファクトを除去するため、参加者の目の上下に電極を貼り付け、瞬目や眼電図(electrooculography: EOG)を同時に測定した。ノイズ電圧が生じた試行については加算処理から除外された。

**測定精度** 交流ノイズは完全にカットすることはできなかった。外部トリガをかける際にノッチフィルタが十分に機能しなかったためである。しかし、移動平均によるスムージング処理をかけて波形を平滑化することにより、事象関連電位の波形としては問題のないレベルの波形を得ることができた。

## 結果

20名の参加者の事象関連電位が測定された。P300が比較的明瞭に生起していると思われる波形サンプルを、Figures 5, 6に示す。

**P300成分の特定** 波形処理においてまず行ったのは、各波形におけるP300成分の特定である。P300の特質（“潜時が部位によらず個人内で比較的一貫していること”，“電圧が大きく明瞭なピーク（この場合は波形の谷）を形成すること”，“オッドボール課題における事象関連電位の中でN100-N200-P300という連続体を構成すること”等（大熊，1999））を考慮して、各参加者の波形ごとに、300-500ms周辺にある陽性成分ピーク（各波形グラフの下向きに描かれている谷の頂点）を特定していった。解析の結果、P300が明瞭に認められない

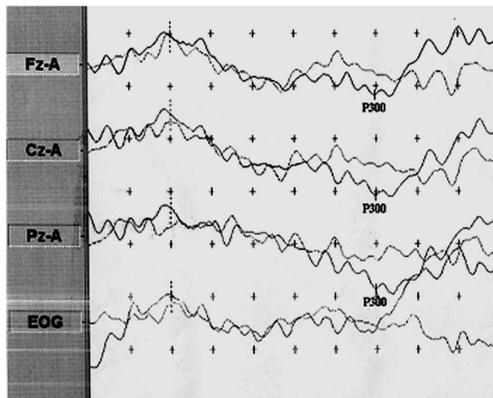


Figure 5 参加者Bのキーボード1におけるP300  
(太線：レア，細線：フリクエント)

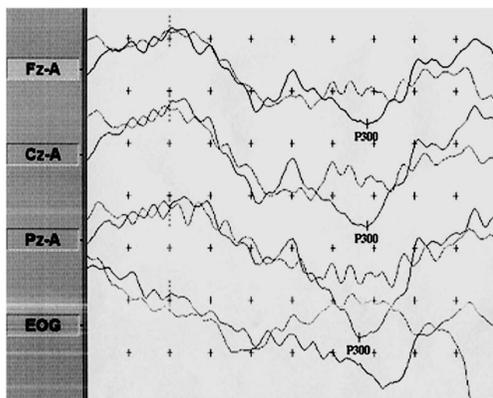


Figure 6 参加者Bのキーボード2におけるP300  
(太線：レア，細線：フリクエント)

波形もいくつか認められた。P300等の内因性成分は、注意や認知といった参加者の内的プロセスによって変動する。それゆえ、参加者によってはP300が明瞭に認められないこともあった。レア条件においてP300が明瞭に認められなかった波形については分析の対象から除外した<sup>7)</sup>。また、測定上の不備があった2名の被験者の波形についても分析の対象から除外した。最終的な分析の対象となったのは、11名分（男8名，女3名）の波形であった。

**P300振幅と潜時の算出** P300成分を特定した後、その振幅(amplitude)を計測した。振幅計測の際には、基線レベルをどこに設定するかが問題となる。本研究ではプリトリガ区間(160ms)の平均電位レベルを基線としてP300の振幅算出を行った。測定に使用した誘発脳波測定装置では、プリトリガ区間の平均電位を自動に算出することができなかったため、基線の上側（負の電位）の積分値（面積）と下側（正の電位）の積分値（面積）が目分量でほぼ等しくなるように基線を移動し、そこからの振幅を算出した。基線レベルが決まれば、そこからの振幅算出については装置の機能を用いて正確に測定することができる。この方法はやや精度に劣るものの、P300振幅の計測として、それほど不正確なものにはなっていないと思われる。

**分析方針** 頭皮上の位置(Fz, Cz, Pz)ごとに、P300振幅を指標とした分散分析を行った。分散分析のモデルは、2（キーボードの種類(1, 2)）×2（キースイッチの種類（レア，フリクエント））の2要因分散分析である。11名分のデータを用いて、クリック感ありキーとクリック感なしキーを標的としたときの、レアキー・フリクエントキー押下時のP300振幅が比較された。

**FzにおけるP300振幅の分析** 分散分析の結果、キースイッチの種類の主効果のみが有意であり( $F(1, 10)=6.694, p=.027, \eta_p^2=.401$ )、キーボードの種類の主効果( $F(1, 10)=0.06, p=.938, \eta_p^2=.001$ )、及びこれら2要因の交互作用は有意ではなかった( $F(1, 10)=1.114, p=.316, \eta_p^2=.100$ )。各条件における

<sup>7)</sup> フリクエント条件でP300が明瞭に認められないケースもあったが、波形を確認し、レア条件のP300の出現位置に近いところで陽性成分が大きくなっている箇所の振幅を計測し、フリクエント条件のP300振幅として採用した。

平均値のプロフィールを Figure 7 に示す。

Figure 7 の目盛りは、マイナス方向が陽性電位を示している。つまり、目盛の数が小さいほど、P300 振幅が大きかったことを示している。P300 は標的刺激検出時により強く惹起されるが、キースイッチの種類（レア、フリクエント）の主効果はこの傾向を示すものであった。すなわち、キーボード 1、キーボード 2 のいずれにおいても、標的刺激（レアキー）の検出時に P300 振幅が有意に大きくなっていった。この結果は、いずれのキーボードにおいても、ユーザが標的刺激（クリック感（ドロップ荷重の有無））に注意を向け、それを検出した際に、P300 がより強く惹起されていたことを示すものである。有意な交互作用は得られなかったものの、Figure 7 より、レアキー検出時の P300 振幅は、仮説通り、キーボード 2（クリック感ありキーの検出時）においてより大きいことが見て取れる。他方、フリクエントキーでは、キーボード 1 のフリクエントキー（クリック感ありのキー）の P300 振幅がキーボード 2 のそれを上回っていた。この結果も、クリック感ありキーの検出時に P300 振幅が大きくなる傾向を示したものと解釈できる。

フリクエント刺激検出時には明瞭な P300 が生じないことが多く、フリクエント刺激の P300 については分析対象から外すことも多い。しかし、分析では、フリクエントキー押下時の P300 振幅も分析対象に含めた。その理由は、参加者が意図的な注意を向けていない場合（フリクエントキーの押下時）であっても、キースイッチのクリック感を感知して

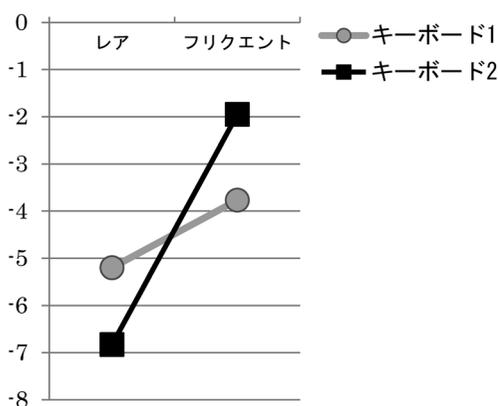


Figure 7 FzにおけるP300振幅プロフィール（単位は $\mu\text{V}$ ）

いれば P300 振幅が大きくなるのではないかと予想したためである。フリクエント条件のデータを分析の対象からはずし、レア条件のみで振幅を比較すれば、検定の結果は変わってくる。このとき、分散分析はキーボードの種類(1,2)のみの1要因分散分析となる。レア条件のキーボードの種類(1,2)を要因とした1要因分散分析を行ったが、有意差は認められなかった ( $F(1, 10)=1.109, p=.317, \eta_p^2=.100$ )。

**CzにおけるP300振幅の分析** 同様な分散分析を Czで行ったところ、やはりキースイッチ（レア、フリクエント）の主効果のみが有意であった ( $F(1, 10)=25.34, p=.001, \eta_p^2=.717$ )。標的刺激の検出時に P300 がより強く惹起されたことが Czでも確認された。キーボードの種類の主効果 ( $F(1, 10)=0.815, p=.388, \eta_p^2=.075$ )、及び2要因の交互作用は有意ではなかった ( $F(1, 10)=0.546, p=.477, \eta_p^2=.052$ )。各条件における振幅の平均値のプロフィールを Figure 8 に示す。Figure 8を見ると、レア条件で、キーボード 2（クリック感ありがレアキー）の P300 振幅がキーボード 1（クリック感なしがレアキー）の P300 振幅よりわずかに大きかったものの、ほとんど差のない結果となった。Fzで見られたようなフリクエントキーにおける振幅の逆転は見られなかった。レアキーのみでキーボードの種類(1,2)の1要因分散分析を行ったが、有意差は認められなかった ( $F(1, 10)=0.057, p=.816, \eta_p^2=.006$ )。

**PzにおけるP300振幅の分析** Pzにおいても同様な分散分析を行った。キースイッチの主効果のみが有意であった ( $F(1, 10)=17.585, p=.002, \eta_p^2=.637$ )。

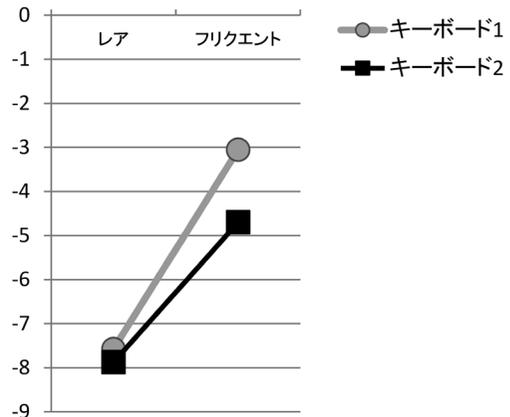


Figure 8 CzにおけるP300振幅プロフィール（単位は $\mu\text{V}$ ）

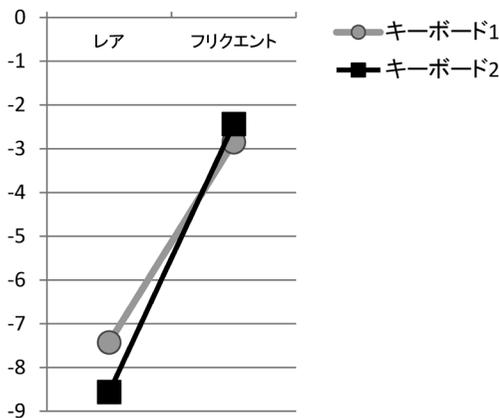


Figure 9 PzにおけるP300振幅プロフィール (単位は $\mu\text{V}$ )

Fz, Czと同様に、標的刺激(レアキー)の検出時にP300振幅が有意に大きくなるのがPzでも確認された。キーボードの種類の主効果( $F(1, 10)=0.113, p=.744, \eta_p^2=.011$ ), 及び2要因の交互作用は有意でなく( $F(1, 10)=0.317, p=.586, \eta_p^2=.031$ ), 「クリック感ありキーの検出時にクリック感なしキーの検出時よりもP300振幅が有意に大きくなる」とする仮説はPzでも支持されなかった。各条件におけるP300振幅の平均値のプロフィールをFigure 9に示す。

Figure 9から、Pzにおいても、レア条件で、キーボード2(クリック感ありキーがターゲット)のP300振幅が、キーボード1(クリック感なしキーがターゲット)のP300振幅より大きくなるのが確認された。この傾向は頭皮上の部位(Fz, Cz, Pz)によらず一貫していた。しかし、電圧値で見るとその差はごくわずかであり、有意差は認められなかった。また、フリクエント条件で、キーボード1とキーボード2のP300振幅の逆転が見られた。レア条件でキーボードの種類(1, 2)による1要因分散分析を行ったが、有意差は認められなかった( $F(1, 10)=0.468, p=.509, \eta_p^2=.045$ )。

### 考察

以上の結果から、仮説は統計的には支持されなかった。レア条件では、Fz, Cz, Pzのいずれの部位でも、キーボード2のP300振幅がキーボード1のP300振幅を上回っていたが、その差は電位にしてそれぞれ、 $1.63 \mu\text{V}$ ,  $0.3 \mu\text{V}$ ,  $1.14 \mu\text{V}$ とごくわずかであった。また、フリクエント条件では、Fz, Pzの2つの部位で、キーボード1のP300振幅がキーボー

ド2のP300振幅を上回っていたが、統計的には有意でなかった。仮説が統計的に支持されなかった理由としては、ドロップ荷重の知覚印象が参加者にとって曖昧であったこと、キー押しという自発的な判断を伴っていたこと、加算回数が参加者間で均一でなかったこと等が考えられる。

### 総合考察

#### 1. キースイッチのキーストロークとドロップ荷重がPCキーボードの操作性に与える影響

実験1の背景脳波の測定結果(O1の $\beta/\alpha$ の傾向)から、キーストロークをなくすことで、PCキーボードの操作性が低下する可能性が示唆された。少なくとも、実験を行った2007年当時は、多くのユーザがキーストロークのあるPCキーボードの使用に慣れており、キーストロークをなくすことで、PCキーボードの操作性の低下を招く可能性が高かった可能性がある<sup>8)</sup>。ドロップ荷重の必要性和役割については、実験2の結果からだけでは明確に結論づけることはできなかった。しかし、P300振幅の比較から、参加者がキースイッチのドロップ荷重をタクトイルなクリック感として感知していた可能性を完全には排除できず、ドロップ荷重をなくすことで、PCキーボードの操作性が低下することも予想される。データ数を増やすなどして、今後さらに検証を行っていく必要があると思われる。

#### 2. 平面キーボードの操作性について

上記の2つの実験結果は、平面キーボードの操作性についてネガティブな見通しを示唆するものであった。一部の平面キーボードには、キーストローク、ドロップ荷重のいずれのパラメータも組み込まれていない。それゆえ、これらの平面キーボードは、従来のPCキーボードよりも操作性が劣っている可能性がある。ただし、この見解は、あくまでも「従来のPCキーボードの使用に慣れたユーザが、従来のPCキーボードと同じ形状の、特殊な(上記の2つのパラメータを取り除いた)キーボードを使用した場合に限り」という付帯条件が付く。今回実験に参加した参加者の多くは、従来のPCキーボードを使用することに慣れており、経験や学習を通し

<sup>8)</sup> スマートフォンやタブレットPCが普及した2017年現在においては、これとは異なった結果が得られる可能性もある。

て、従来のキーボード特性に合わせた操作法や知覚傾向をすでに獲得していたものと思われる。参加者にとって、キーストロークやドロップ荷重のないキースイッチは未知のデバイスであり、上の2つの実験結果は、新奇なデバイスを操作したときの参加者の初期的反応を記録したに過ぎない、と解釈することも可能である。今後検証してゆくべき重要な課題は、これら2つのパラメータ（キーストロークとドロップ荷重）を取り去ったキーボード（例えば、タブレット PC の平面キーボード）にユーザがある程度習熟したとき、通常の PC キーボードと平面キーボードの操作法や操作性評価がどのように変化してゆくかを調べることである。それは、“マン・マシンインタラクション”に基づく“機器操作への習熟過程”を調べることであり、ユーザの機器操作法とユーザビリティ評価がどのように獲得され、最適化されてゆくか、を調べることにほかならない。マン・マシンインタフェース研究における中核的テーマの1つであると言えるであろう。

### 3. 刺激への慣れを P300 を指標として測定できる可能性について

実験2で測定指標として用いた P300 の振幅は、知覚・中枢資源の量や刺激の情報量に応じて増大すると考えられている（沖田・諸富，1998；入戸野，2006a）。実験2では「ドロップ荷重ありのキーを標的刺激（ターゲット：レア刺激）にしたとき、ドロップ荷重なしのキーを標的刺激としたときに比べて P300 振幅が大きくなる」という仮説を立てて検証を行った<sup>9)</sup>。同一の刺激の組み合わせで、標的刺激（レア刺激）と標準刺激（フリクエント刺激）を入れ替えた時、P300 の振幅に差が生じるとすれば、それはどのような理由によると考えられるのか。この時、トップダウン的に刺激弁別に振り向けられる知覚・中枢資源量は基本的には変わらない可能性が大である。いずれのキースイッチをターゲットとしたとしても、ドロップ荷重の有無を弁別するという点で、弁別すべき差異そのものは同じだからである。それゆえ、もし P300 振幅に差が生じるとすれば、トップダウン的な知覚・中枢資源の配分量より

はむしろ、ボトムアップ的な刺激の情報量の差異を反映する、と解釈するのが妥当であろう。入戸野（2006a）によれば、P300 の振幅は、刺激によって与えられる情報量が低い（刺激があいまいである／知覚後に不確かさが残る）とき小さくなるという。この時、刺激の情報量が何によって規定されるかが問題となる。ドロップ荷重のあるキースイッチの知覚が、ドロップ荷重のないキースイッチの知覚よりも情報量が多いとすれば、その違いはどこから来ていると考えられるのか。そこに関わる心理過程は、記憶痕跡の強さ、パターンマッチングのスムーズさ、慣れや学習の影響など、多様に想定できる<sup>10)</sup>。実験2では、Fzにおいて、ドロップ荷重ありのレアキーの P300 の振幅がドロップ荷重なしのレアキーの P300 の振幅よりも数値的に大きくなっていった。このことから、参加者の刺激情報（ドロップ荷重）への慣れ（もしくは学習の程度）が、P300 振幅に影響を与えるという可能性も完全には否定できないものと思われる。もしそうだとすれば、ターゲットを入れ替えた時の P300 振幅の差を手掛かりとして、ボトムアップ的な知覚・中枢資源量の配分量の多寡を調べることにより、刺激に対する慣れや学習の程度を測れるようになるという可能性も考えられる。そういった意味からも、実験2と同様なパラダイム（レア刺激とフリクエント刺激の入れ替え）を用いて P300 の測定と検証を続けてゆくことは、応用心理学観点のみならず、生理心理学的な観点からも、非常に興味深いテーマになり得るのではないかと考えている。

### 引用文献

- Courchesne, E., Hillyard, S. A., & Galambos, R. 1975 Stimulus novelty, task relevance, and the visual evoked potential in man. *Electroencephalogram, Clinical Neurophysiology*, *39*, 131–142.
- Donchin, E., & Coles, M. G. H. 1988 Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral*

<sup>9)</sup> 実験2のクリックありキーとクリックなしキーのレア、フリクエントの入れ替えがそれに当たるが、実験ではレア刺激の P300 の振幅に差は生じていなかった。

<sup>10)</sup> ドロップ荷重という機械的刺激があること自体が知覚者の刺激情報量が高めている、という可能性も当然考えられる。もしそうだとすれば、それは ERP の初期成分（外因性成分（exogenous potential））の相違に反映されると予想される。ここでは P300 という ERP の後期成分（内因性成分（endogenous potential））の振幅の相違が問題とされているという点に注意すべきであろう。

- and *Brain Sciences*, **11**, 357-374.
- 藤澤 清 1998 脳波 (6章) 宮田 洋 (監修) 新生理心理学 1 巻 北大路書房 pp. 90-103.
- 花谷隆志・太田義隆・野田哲朗 1998 病気と性格・行動パターンの生理心理学的研究 (5章) 宮田 洋 (監修) 新生理心理学 3 巻 北大路書房 pp. 50-63.
- 木村昌樹・上野秀剛・大平雅雄・松本謙一 2008 ユーザビリティ評価のための脳波計測手法構築へ向けた実験的検討 ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008 論文集, 735-742.
- 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.
- 入戸野 宏 2006a 映像に対する注意を測る —事象関連電位を用いたプローブ刺激法の応用例— 生理心理学と精神生理学, **24**(1), 5-18.
- 入戸野 宏 2006b 触覚刺激に対する脳電位を指標とした視聴覚体験の評価 第31回日産科学振興財団特定領域基礎研究助成研究成果報告書.
- 入戸野 宏 2007 P300 研究の歴史と現状 日本心理学会 YERP WS 議事録, 3-7.
- 入戸野 宏・堀 忠雄 2006 事象関連電位入門 (心理学研究における事象関連電位 (ERP) の利用) 広島大学総合科学部紀要 IV 理系編, **26**, 15-32 (2006年2月17日 3.2 節一部修正).
- 沖田庸嵩 1997 情報処理モデルと事象関連電位 (ERP) 宮田 洋 (監修) 新生理心理学 2 巻 北大路書房 pp. 2-17.
- 沖田庸嵩・諸富 隆 1998 事象関連電位 (7章) 宮田 洋 (監修) 新生理心理学 1 巻 北大路書房 pp. 104-123.
- 大熊輝雄 1999 臨床脳波学 (第5版) 医学書院.
- Oohashi, T., Nishina, E., Honda, M., Yonekura, Y., Fuwamoto, Y., Kawai, N., Maekawa, T., Nakamura, S., Fukuyama, H., & Shibasaki, H. 2000 Inaudible high-frequency sounds affect brain activity: Hypothetical effect, *The Journal of Neurophysiology*, **83**, 3548-3558.
- 総務省 2016 平成 27 年度通信利用動向調査の結果 (平成 28 年 7 月 22 日).
- 末永和栄・岡田保紀 2004 最新 脳波標準テキスト (改訂 2 版) メディカルシステム研修所.
- Sutton, S., Baren, M., Zubin, J., & John, E. R., 1965 Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, **150**, 1187-1188.
- 富田 新・大原貴弘 2015 PC キーボードのキースイッチの操作性評価に関する研究—タッチタイピングによる打鍵法の差異がもたらす操作性評価の相違について— 応用心理学研究, **41**, 87-97.
- 渡邊千晴 2004 脳誘発電位測定ハンドブック (第3版) メディカルシステム研修所.
- 八木昭宏 1998 生理心理学研究の産業応用における問題 (8章) 宮田 洋 (監修) 新生理心理学 3 巻 北大路書房 pp. 92-97.

(受稿: 2016.5.9; 受理: 2017.2.27)