

著者最終稿

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—<sup>1)</sup>

広島大学大学院総合科学研究科  
入戸野 宏

Measuring attention to video clips:  
An application of the probe stimulus technique using event-related  
brain potentials

Hiroshi NITTONO  
Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University  
1-7-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8521, Japan  
E-mail: nittono@hiroshima-u.ac.jp

The amplitude of a late positive wave (P3 or P300) of the event-related brain potential (ERP) elicited by probe stimuli in a secondary task is inversely related to the amount of perceptual-central processing resources allocated to a primary task. The historical overview of this theory is discussed and a selective review of the probe stimulus technique using ERPs is presented. Then, an extension to the study by Suzuki, Nittono, and Hori (2005, *International Journal of Psychophysiology*, 55, 35-43) is reported to demonstrate that the amplitude of the P300 elicited by auditory probe stimuli varies with the level of interest in video clips, even when their perceptual complexity is equivalent. More specifically, P300 amplitude was smaller when participants watched a video clip for the first time than when they watched the same video clip for the fifth time. Moreover, the amplitude reduction was more prominent for the P300 elicited by perceptually deviant, non-target probe stimuli than for the P300 elicited by target probe stimuli presented with an equally low probability. The potential merits of the probe stimulus technique using ERPs in non-occupational settings are discussed.

**Keywords:** mental workload, processing resources, P3(P300), secondary task

---

2006年2月8日受稿, 2006年3月3日受理

1) 研究設備を快く提供して下さった堀忠雄先生, 実験の遂行に協力してくれた鈴木淳氏, 草稿に対して有益なコメントをくださった片山順一先生と松田いづみ先生, 信号処理の最近の進歩について教えてくださった Sergei Shishkin 先生に感謝します。本研究は, 科学研究費補助金(若手研究(B)14710044), 第31回日産学術研究助成(特定領域基礎研究)を受けて行った。

【要約】二次課題に含まれるプローブ刺激に対する事象関連電位 (event-related brain potential: ERP) の後期陽性波 (P3 または P300) の振幅は、主課題に配分される知覚・中枢処理資源の量と負の相関関係にある。この理論が生まれた経緯について述べ、ERP を用いたプローブ刺激法の簡単なレビューを行う。次に、Suzuki, Nittono, and Hori (2005, *International Journal of Psychophysiology*, 55, 35-43) を補足する実験を報告し、聴覚プローブ刺激に対する P300 の振幅が映像 (ビデオクリップ) への関心度に応じて変化すること、それは映像の知覚的複雑さが同等であっても生じることを示す。具体的には、実験参加者がビデオクリップを最初に見るときの方が、同じ映像を 5 回目に見るときよりも、プローブ刺激に対する P300 の振幅が小さかった。また、知覚的に逸脱した非標的プローブ刺激に対する P300の方が、同じ低確率で呈示される標的プローブ刺激に対する P300 よりも、振幅の減衰が顕著であった。労働以外の場面における ERP を用いたプローブ刺激法の利点について論じる。

## はじめに

楽しいことをしているとあっという間に時が過ぎるが、退屈なことをしていると時が経つのが遅い。あることに夢中になると、それ以外のことは意識から消え去り、自分がどんな状態であるかさえ忘れてしまう。行為に没入しているときに人が感じるこのような包括的な感覚は、フロー体験 (flow experience) とよばれる (Csikszentmihalyi, 1975)。フロー体験は一種の究極的な状態であり、楽しい行為がいつでもフロー体験をもたらすわけではない (Koster, 2005)。しかし、対象に興味をもっているときと退屈しているときで、心理状態に明らかな違いがあることは誰もが経験的に知っている。

著者らは、このような何かに興味をもったり退屈したりという心理状態を客観的に検討することをめざして、“注意の配分”という観点から取り組んでいる。注意という言葉は多義的であるが、ここでは処理資源 (processing resources) として捉える。処理資源とは、簡単にいえば、心理的エネルギーのことであり、さまざまな心理的活動はこのエネルギーの配分をうけて実行されると考えられている。<sup>1</sup> ひとつのことに注意を向けると、他のことがおろそかになる。この現象は、利用できる処理資源の量には一定の限界があり、ある活動に多く配分されると、他の活動には配分できなくなってしまうからだと説明される。

このような意味での“注意”を表現するのに、当初は“容量 (capacity)”や“努力 (effort)”という表現

が使われた (Kahneman, 1973; Moray, 1967)。“処理資源”という用語は、Norman & Bobrow (1975) によって提案されたものである。似たような意味で、処理容量 (processing capacity) や注意資源 (attentional resources) という語を使うこともある。注意を心理的エネルギーと捉える発想は、フロー体験を説明するときにも用いられる。個人の目標達成のために注意が集中され、それ以外に散逸することがないときにフロー体験が生じると考えられている (Csikszentmihalyi, 1990)。

本論文では、日常的に興味をもつことが多い対象の例として映画を取り上げ、映像に向けられる注意の量を測るために、脳波の一種である事象関連電位 (event-related brain potential: ERP; 入戸野, 2005) が有用であることを示す。まず、注意を測るために使われるプローブ刺激法について簡単に説明する。次に、注意 (処理資源) と関係が深いとされる ERP の P3 (P300) 成分についての先行知見を整理する。さらに、プローブ刺激によって惹起される P300 の振幅が、映像に対する関心度の違いを反映して変化することを示した研究データを紹介する。最後に、ERP を用いたプローブ刺激法の利点について考察し、今後の課題を述べる。

## 注意を測定するプローブ刺激法

ある対象にどのくらい注意 (処理資源) が配分されているかを調べることは、精神作業負荷 (mental workload) の測定というテーマで研究されてきた。よく用いられる方法に、二次課題法 (secondary task technique) がある。副課題法・副次課題法 (subsidiary task technique) や二重課題法 (dual task technique)

<sup>1</sup> 正確に言えば、処理資源には、注意の容量や努力だけでなく、種々の記憶容量や通信チャンネルといったものも含まれる (Norman & Bobrow, 1975)。

とよばれることもある。この方法では、処理資源の配分量（精神作業負荷の大きさ）を知ろうとする課題を主課題（primary task）とし、それと並行して別の課題（二次課題）を行わせる。このとき二次課題は“主課題の遂行が低下しない程度に”という制約をつけて行わせる。先ほど述べた処理資源モデルに従うと、主課題が難しくなるとそこに向けられる処理資源の量が増えるので、二次課題に向けられる処理資源が減る。その結果、二次課題の成績が低下すると考えられる。二次課題法は行動測度を用いた研究が数多く行われているが（Gawron, 2000）、それに加えて ERP を測定することもできる。

ERP を用いた二次課題法は、プローブ刺激法ともよばれる。プローブ（probe）とは“探り針”の意味である。ある心理状態を推定するために、別の刺激をプローブとして投げ入れ、それに対してどのような反応が生じるかを測定する。プローブ刺激法には2種類ある。プローブ刺激に対してボタン押しや計数などの積極的な反応を求める関連プローブ法（relevant probe technique）と、反応を求めない無関連プローブ法（irrelevant probe technique）である（Kramer & Weber, 2000）。無関連プローブ法は、受動的プローブ法（passive probe technique）ともよばれ、実験参加者が主課題の遂行に専念できるという利点がある（Kramer, Trejo, & Humphrey, 1995; Sirevaag et al., 1993; Ullsperger, Freude, & Erdmann, 2001; 総説として Papanicolaou & Johnstone, 1984）。その反面、実際の・理論的な問題も抱えている。第1に、無関連プローブ刺激に対する ERP は低振幅であることが多く、細かい条件差を検討しにくい。第2に、プローブ刺激に対して積極的な反応を求めなければ、残っている資源がプローブ刺激の処理に使われるという保証がなくなり、プローブ刺激に対する ERP に注目する根拠が揺らぐ。このような理由から、本論文では、前者の関連プローブ法に焦点を絞って話を進める。

### P300 振幅と処理資源

注意を向けている情報源にまれな事象が生じると、その発生からおよそ 300–600 ms 後に、頭皮上の中心部から頭頂部にかけて大きな陽性波が出現する。この

波はP3あるいはP300とよばれる。<sup>2</sup> P300の測定には、オドボール（oddball）課題とよばれる単純な刺激弁別課題がよく用いられる。典型的には、2種類以上の刺激事象を出現頻度を変えて呈示し、低頻度の事象（オドボール刺激）に対して、その出現回数を黙って数えさせたり、ボタンを押して反応させたりする。P300は、このような反応を求められている標的刺激に対して高振幅で出現する。他方、計数やボタン押しを求めず、刺激を無視させているときには、P300は出現しない（Duncan-Johnson & Donchin, 1977）。

P300についてのこの知見から、刺激に向ける注意の量とP300の関係について、2つの可能性が考えられる。ひとつは、P300はある程度以上の注意が向けられると一定の大きさで出現するが、それ以下だと出現しないという全か無かの性質をもつというものである。もう一つは、P300は刺激に向けられる注意の量に応じて段階的に大きくなるというものである。この点を明らかにするため、イリノイ大学の Donchin らは、オドボール課題に向ける注意の量を、他の課題を同時に行わせることで操作した。もしオドボール課題で得られる P300 振幅が、同時に行う課題の困難度に応じて段階的に変化するならば、P300 振幅は刺激に向けられる注意（処理資源）の量を反映する測度になるかもしれないと期待したのである（Donchin, Kramer, & Wickens, 1986）。

1970年代後半から行われた一連の研究では、オドボール課題とトラッキング課題（tracking task, ディスプ

<sup>2</sup> ERPには観察的な命名法と理論的な命名法がある。測定された波形の特徴を指してP3（3番目の陽性波）あるいはP300（約300msに頂点潜時がある陽性波）とよぶことができる。他方、特定の機能をもった心理生理学的実体を指してP300という用語を使うこともある。本論文で扱う後期陽性波は、異なった神経過程を反映する少なくとも2つの成分——P3a（novelty P3）とP3b——から構成されると考えられる。“P300”という語は、随意的注意に関連したP3bを指して使われることが多いが、本論文で扱う後期陽性波はP3bのみを含むわけではなく、刺激設定によっては不随意的注意に関連したP3a（novelty P3）も含んでいると考えられる。本論文では、このような事情を考慮した上で、作業負荷や処理資源に関するこれまでの多くの研究に倣って、“P300”という用語を後期陽性波の総称として使うことにする。

レイ上のカーソルを標的にできるだけ近づけるように操作レバーを動かす)を組み合わせたことが多かった。トラッキング課題を主課題とし、その遂行と干渉しない程度に、二次課題のオドボール課題(標的刺激を黙って数える)を行うように教示した。標的刺激にプロープ刺激の役割をもたせ、それに対する P300 の振幅が、(a)主課題を導入することで変化するか、(b)主課題の困難度に応じて変化するか、という 2 点が検討された。

最初の研究(Wickens, Isreal, & Donchin, 1977)では、動き回るカーソルを操作レバーを動かして一定の場所(標的)に留めておくという課題が用いられた。課題の困難度はカーソルの移動が 1 次元(水平のみ)か 2 次元(水平と垂直)かによって操作した。オドボール課題として、周波数の異なる 2 音を刺激間隔 1.5 秒でイヤホンから呈示し、一方の音を黙って数えさせた。その結果、標的刺激に対する P300 の振幅は、オドボール課題のみを行っているとき(統制条件)に比べて、トラッキング課題を導入したときに小さくなった。しかし、カーソルの移動が 1 次元から 2 次元になり課題が難しくなっても、P300 振幅はそれ以上減衰しなかった。これに対して、音に対するボタン押し反応を求めたときは、カーソルの移動次元数が増えることで反応時間も延長した。この結果は、一見すると、P300 振幅よりも反応時間の方が主課題の作業負荷の変化に敏感であることを示しており、わざわざ二次課題で ERP を測定する意義はないように思える。

同様の否定的な結果は、Isreal, Chesney, Wickens, & Donchin (1980a) も報告している。聴覚オドボール課題と 1 次元(水平)のトラッキング課題を組み合わせ、カーソルの移動速度と方向変換の頻度を段階的に変化させることでトラッキングの困難度を操作した。Wickens et al. (1977) の研究と同様、P300 振幅はオドボール課題のみを行っているとき(統制条件)に比べて、トラッキング課題を導入したときに小さくなったが、トラッキングが難しくなっても、それ以上減衰することはなかった。しかし、オドボール課題で用いた 2 音に対して選択反応を求めると、トラッキングが難しくなることで反応時間は延長した。

トラッキング課題が難しくなると、オドボール課題における反応時間は延長するが、P300 振幅は変化しな

いという一見否定的な結果は、多重資源モデル(Wickens, 1984)の枠組みを採用することで合理的に説明された。注意(処理資源)についての初期のモデルでは、資源は単一のプールであってどの課題にも利用されると考えていたが、その後、同時に遂行しても干渉が生じない課題の組み合わせがあることが指摘され、複数の資源が提案された(歴史的な総説として Sanders, 1997)。Wickens (1984) の多重資源モデルでは、3 つの次元——処理の段階、処理のコード、入力と反応のモダリティ——から処理資源を構造的に分類した。処理の段階は知覚-中枢と反応、処理のコードは言語と空間、モダリティは入力では視覚と聴覚、反応では発声と手というように、それぞれの次元において 2 種類の資源を仮定した。このモデルによると、刺激の符号化・評価(知覚-中枢段階)と反応の選択・実行(反応段階)では異なる資源が使われることになる。トラッキングが難しくなると、二次課題の反応時間が延長したが、P300 振幅は変化しなかったという結果は、困難度の増加が主に反応に関連した段階で生じたことを示すと解釈された。P300 振幅は主に知覚-中枢資源に関連し、反応時間は知覚-中枢資源と反応資源の両方に関連すると考えれば、両者の結果が一致しなくても矛盾は起こらない。むしろ、その違いを積極的に利用することで、主課題の困難度の増加がどの段階で生じているかを診断できると主張された。<sup>3</sup>

P300 振幅は知覚-中枢資源を反映するという提案は、P300 の頂点潜時についての知見とも整合している。P300 潜時と反応時間の関係を調べた初期の研究により、P300 潜時は反応選択過程とは比較的独立した刺激評価過程に関連すると提案された(Magliero, Bashore, Coles, & Donchin, 1984; McCarthy & Donchin, 1981)。刺激の処理にかかわる変数を操作する(e.g., 視覚ノイズを加えて刺激の弁別を難しくする)と P300 潜時と反応時間の両方が延長するが、反応だけを難しくする

<sup>3</sup> ここで述べた処理資源の分類法から分かるように、P300 振幅は“知覚-中枢資源を反映する”という提案は、“反応に関連した資源とはあまり関係しない”という意味であって、“知覚と中枢の両方の段階に関係している”という積極的な意味ではない。“知覚-中枢(perceptual-central)”は“知覚-認知(perceptual-cognitive)”ということもある。多重資源モデルについての最近の総説としてWickens (2002)がある。

(e.g., 左右の手を交差させた状態で左右の光刺激に反応させる; Ragot, 1984) と P300 潜時は変化せず反応時間のみが延長する。このような知見に基づき、P300 潜時を刺激評価過程の持続時間を反映する測度とみなす研究が数多く行われた。Verleger (1997) は、P300 潜時と反応時間に関する膨大な先行研究をレビューし、P300 潜時は刺激関連処理と反応関連処理を厳密に区別する診断ツールにはならず、そもそもそのような区別が適切かどうかとも疑わしいと結論づけている。しかし、先ほど述べた Wickens (1984) の多重資源モデルに基づいて、処理の段階を知覚-中枢と反応の 2 つに大きく分けるならば、P300 に反映される過程はどちらかといえば前者に関連しているという主張は現在でも認められるだろう。

その後の研究では、主課題の困難度によって P300 振幅が変化するという知見が数多く報告されている。トラッキング課題を用いたものでは、操作レバーを倒した角度がカーソルの速度に対応するとき（一次運動：ある角度に倒すと一定の速度で動く）と加速度に対応するとき（二次運動：ある角度に倒すと加速度的にだんだんはやく動く）を比較した。前者よりも後者の方がトラッキングが難しくなるが、聴覚プローブ刺激（オドボール課題の標的刺激）に対する P300 振幅も後者で小さくなった (Kramer, Wickens, & Donchin, 1983; Sirevaag, Kramer, Coles, & Donchin, 1989; Wickens, Kramer, Vanasse, & Donchin, 1983)。この結果は、加速度運動ではカーソルを制御するための認知的予測が必要となり、多くの知覚-中枢資源が使われるためだと説明されている。また、トラッキング課題で標的的位置の変化が予測できるときとできないときでは、予測できないときの方が聴覚プローブ刺激に対する P300 振幅が小さくなった (Wickens et al., 1983)。予測できないときは標的的位置の変化を毎回認識する必要があり、そこに知覚-中枢資源が使われると考えられる。トラッキング課題における知覚-認知的負荷が二次課題における P300 振幅を低下させるという知見は、プローブ刺激として体性感覚刺激（弱い電気刺激）を用いたときにも得られている (Kida, Nishihira, Hatta, Wasaka, Tazoe, Sakajiri, Nakata, Kaneda, Kuroiwa, Akiyama, Sakamoto, Kamijo, & Higashiura, 2004)。

トラッキングとは異なる知覚-運動課題として、

Kramer, Sirevaag, & Braune (1987) は、フライトシミュレータを用いた実験を行った。風・乱気流・計器故障がない容易なフライト条件に比べて、それらがすべて生じる難しいフライト条件では、二次課題（聴覚オドボール課題）の標的刺激に対する P300 振幅が低下した。同じ刺激に対する反応時間や正反応率には有意差がなかった。Baldwin & Coyne (2005) は、運転シミュレータで知覚負荷（霧の有無）を操作し、同時に行う視覚オドボール課題で得られる P300 振幅が、霧があるときに低下したことを報告している。このときも同じ刺激に対する反応時間や正反応率に有意差はなかった。

運動要件がほとんど含まれない主課題として、Isreal, Wickens, Chesney, & Donchin (1980b) は、空港管制をシミュレートした監視課題を用いた。モニタ上で直線的に動く図形（□や△）がときどき方向を変えたり光ったりするのを見ながら、□の進路変更や発光を検出するように求めた（△の変化は無視させた）。図形が 4 つ（□△各 2 つ）の条件と 8 つ（□△各 4 つ）の条件を設定して、知覚負荷を操作した。□の進路変更を検出する課題では、図形が 4 つのときよりも 8 つのときに検出率が低下し、主課題が難しくなったことが示された。これと一致して、聴覚プローブ刺激（オドボール課題の標的刺激）に対する P300 振幅は、図形が 4 つのときよりも 8 つのときに小さくなった。他方、□の発光を検出する課題では、図形の数によって検出率に差がなく、聴覚プローブ刺激に対する P300 振幅にも条件差がなかった。

これらの研究の副産物として、二次課題のオドボール課題で用いる刺激が主課題に埋め込まれているときは、主課題が難しくなるほどオドボール課題で得られる P300 振幅が大きくなる場合があることが分かった (Kramer, Wickens, & Donchin, 1985; Wickens et al., 1983; 小さくなることもある, Kramer et al., 1983)。この現象は、プローブ刺激法における予測とは正反対のものであるが、トラッキング課題（主課題）における標的の移動回数やカーソルの発光回数を数えさせるようなときに生じる。主課題と二次課題で同じ対象の異なる側面を処理するときは、主課題に資源を向けることによって同時に二次課題の刺激にも資源が向けられるようになる（課題の統合が起こる）ためと説明され

ている。プローブ刺激は主課題と異なる感覚モダリティで与えた方が、結果の解釈にあいまいさがなくなるといえるだろう。

以上の研究結果をまとめると、次のようになる。(a)2つの課題を同時に行うときは、オドボール課題を単独で行うときに比べて P300 振幅が低下する、(b)知覚-中枢段階の負荷が原因で主課題が難しくなると、プローブ刺激に対する P300 振幅が低下する（このときは行動測度に差がないこともある）、(c)主課題の困難度が主に反応に関連した段階で生じていれば、P300 振幅は低下しない（このときは行動測度に差が生じる）、(d)オドボール課題で使うプローブ刺激が主課題に埋め込まれているときは、主課題が難しくなるとオドボール課題で得られる P300 振幅が増大することもある。

### 映像への関心度と P300 振幅

テレビや映画に対する注意の量を測定するために、二次課題法を用いて反応時間を測定した研究は以前からある (Basil, 1994; Reeves & Nass, 1996; Reeves & Thorson, 1986; Reeves, Thorson, & Schleuder, 1986)。映像に多くの注意が向けられているほど、プローブ刺激に対する反応時間が延長するという仮定に基づいて研究が行われている。映像を見るという課題は、運動に関連した処理を含まないので、純粹に知覚-中枢資源に関係していると考えられる。映像を処理するための資源が増加すれば、二次課題で得られる P300 の振幅は低下するはずである。

Rosenfeld, Bhat, Miltenberger, & Johnson (1992) は、面白い (exciting) 映画と退屈 (boring) な映画を見ているときに、聴覚オドボール課題を同時に行わせた。面白い映画にはアクション映画 (e.g., 『007 ゴールドフィンガー』)、退屈な映画にはアート系映画 (e.g., 『八月の鯨』) を用いた。オドボール課題として、標準刺激 (1260 Hz,  $p=0.78$  または  $0.67$ ) と標的刺激 (1200 Hz,  $p=0.22$  または  $0.33$ ) を 2.5 秒に 1 回の割合でランダムに呈示し、標的刺激の呈示回数を黙って数えるように求めた。その結果、面白い映画を見ているときは、退屈な映画を見ているときよりも、標的刺激に対する P300 の振幅が有意に小さかった。これに加えて、標準刺激によって惹起された P300 の振幅も、面白い映画を見ているときに小さくなった。

著者らは、関心度の高い (interesting) 映画と中程度の (neutral) 映画を見ているときに、3 音オドボール課題を行わせた (Suzuki, Nittono, & Hori, 2005)。前者にはアクション映画 (e.g., 『ミッション・インポッシブル』)、後者には科学教育映画 (e.g., 『樹木の一生』) を用いた。オドボール課題として、1800 Hz ( $p=.70$ , 標準刺激), 2000 Hz ( $p=.15$ , 標的刺激), 500 Hz ( $p=.15$ , 逸脱刺激) の 3 つの純音を、平均して 1.5 秒に 1 回の割合でランダムに呈示し、標的刺激に対してボタン押し反応を求めた。関心度の高い映画を見ているときは、映画を見ていない統制条件や中程度の映画を見ているときと比較して、標的刺激に対する P300 と逸脱刺激に対する P300 の振幅がどちらも有意に低下した。統制条件と中程度の映画の差は、逸脱 P300 の振幅についてのみ有意であった。関心度が高い映画と中程度の映画を見ているときの標的 P300 の振幅は、それぞれ統制条件の 74%, 92% であったが、逸脱 P300 の振幅はそれぞれ 45%, 73% であった。標的 P300 よりも逸脱 P300 の方が減衰の程度が大きく、映像に向けられる注意の量を敏感に反映することが示された。標的刺激に対する反応時間は、映像を見ていない統制条件でもっとも短くなったが、映像の種類による有意差はなかった。

しかし、これら 2 つの研究では、異なる映像を見せた 2 つの条件を比較している。アクション映画の方がアート系映画や科学教育映画よりも知覚的に複雑である (e.g., シーンの切り換えや動きが多い) ために、参加者の映像に対する関心度（ここでは“情報を能動的に取り込もうとする欲求の程度”と定義する）とは関係なく、自動的に多くの注意が引きつけられ、オドボール課題で得られる P300 の振幅が低下した可能性もある。そこで、映像の物理的特性による影響を排除するため、同じ映像を反復呈示することによって関心度を低下させる（飽きさせる）という手続きを用いて、再検討を行った。<sup>4</sup>

### 方法

**実験参加者** 右手利きの大学生・大学院生 12 名 (男性 8 名, 女性 4 名: 平均年齢 21.2 歳) がインフォームドコンセントをうけて実験に参加した。視力 (矯正視力)

<sup>4</sup> 本研究の一部は、第 22 回日本生理心理学会大会で発表した (鈴木・入戸野・堀, 2004)。

と聴力は正常であった。

**刺激** プローブ刺激として、Suzuki et al. (2005) と同じく、1800 Hz ( $p = .70$ , 標準刺激), 2000 Hz ( $p = .15$ , 標的刺激), 500 Hz ( $p = .15$ , 逸脱刺激) の3つの純音を用いた(持続時間 70 ms, 立ち上がり立下がり 10 ms)。これらの刺激をヘッドフォンから約 60 dB SPL でランダムな順序で呈示した。標的刺激または逸脱刺激は連続して呈示されないようにした。刺激のオンセット間隔は 1.4–1.6 秒の間でランダムに変動させ、平均 1.5 秒となるように設定した。知名度の低いアクション映画 (e.g., 『アクシデンタル・スパイ』) から4つの映像(各 5 分間)を選定した。そのうちの2つを新奇ビデオ(new video)条件, 残りの2つを反復ビデオ(repeated video)条件で用いた。同じ映像を、半数の参加者には新奇ビデオ条件で、残りの半数には反復ビデオ条件で呈示するように設定した。映像は、眼前 1.5 m の 10 インチテレビ画面に音声なし・字幕なしで呈示した。ビデオなし(no video)の統制条件では、静止画像(動物や風景)をテレビ画面に呈示した。

**手続き** ERP を測定する前に、参加者は反復ビデオ条件で使う映像を4回繰り返して見た。その後、初めて見る新奇ビデオ条件、5回目に見る反復ビデオ条件、ビデオなしの統制条件のそれぞれについて、オドボール課題を2ブロックずつ行った(1ブロック 180 刺激/4.5 分)。条件の順序は参加者間でカウンタバランスした。実験参加者には、映像を見ながら、標的刺激に対してできるだけはやく正確に人差し指でボタンを押すように教示した。ボタン押しを行う手は参加者間でカウンタバランスした。オドボール課題は映像呈示の30秒後から開始した。参加者には、各ブロック終了後に映像の印象についての質問紙に回答してもらうこと、細かい内容を記憶する必要はないことを教示した。各ブロックの終了後に、プローブ刺激に向けた注意の量を9件法で主観評定させた(1: 少ない–9: 多い)。ビデオを見る条件では、映像に向けた注意の量(1: 少ない–9: 多い)と映像の面白さ(1: 退屈した–9: 面白かった)も評定させた。実験に先立ち、オドボール課題の練習を1分間行った。

**ERP 記録** 脳波は鼻尖を基準として正中線上3部位(Fz, Cz, Pz)から記録した。まばたきと垂直眼球運動を監視するために、左眼窩上下から眼電図を双極導出した。

時定数 3.2 秒 (ローカットフィルタ 0.05 Hz), ハイカットフィルタ 60 Hz, サンプリング周波数 200 Hz で記録した。電極インピーダンスは 5 k $\Omega$  以下とした。

**分析** すべての測度は、条件ごとに2ブロックを平均して求めた。標的刺激後 200–1200 ms のボタン押しを正反応とした。ERP 波形は、刺激呈示前 200 ms から呈示後 800 ms までの区間を、参加者・条件・刺激・部位ごとに加算平均して求めた。ベースラインは刺激呈示前 200 ms 間の平均電位にそろえた。脳波と眼電図に $\pm 80 \mu\text{V}$  を超える電位を含む試行と誤反応試行は加算から除外した。標的刺激または逸脱刺激の呈示後 250–500 ms に生じる最大陽性ピークを P300 と同定し、優勢部位(標的 P300: Pz, 逸脱 P300: Cz)における潜時を求めた。さらに、その潜時にそろえて3部位における振幅を求めた。統計検定には反復測定を考慮した多変量分散分析(multivariate analysis of variance: MANOVA)を用い、多重比較は Bonferroni の方法を用いた。有意水準は.05 に設定した。

## 結果

**主観・行動測度** Table 1 に、主観測度と行動測度をまとめた。新しいビデオは反復されたビデオよりも面白いと評定された。また、新しいビデオには反復されたビデオよりも主観的に多くの注意が向けられていた。プローブ刺激に向けられた主観的な注意の量はビデオなし条件で多かったが、2つのビデオ条件の間には有意差がなかった。反応時間は、ビデオなし条件と反復ビデオ条件に比べて、新奇ビデオ条件で有意に延長した。誤反応率は全般に低く、条件差は有意でなかった。ERP 標的・逸脱・標準刺激に対する ERP 総加算平均波形を Figure 1 に示す。標的刺激と逸脱刺激に対して潜時 300–400 ms に大きな陽性電位 P300 が生じた。Figure 2 に P300 振幅の平均値を示す。標的 P300 は頭頂部(Pz)で最大であったが、逸脱 P300 はそれよりも中心部寄りに分布していた。P300 振幅について、刺激 $\times$ 条件 $\times$ 部位の MANOVA を行ったところ、刺激 $\times$ 部位の交互作用が得られた ( $F(2, 10) = 41.53, p < .0001$ )。ベクトル長で基準化した振幅値を用いた分析(McCarthy & Wood, 1985)でも、同様の交互作用が確認された ( $F(2, 10) = 19.30, p = .0004$ )。このことから標的 P300 と逸脱 P300 の頭皮上分布は異なっていたといえる。

Table 1. Means and standard deviations of subjective, behavioral, and P300 latency measures in the three viewing conditions

	Video clip			$F(2, 10)$	$p$
	No	Repeated	New		
Interest (min: 1–max: 9)	—	$4.0 \pm 1.2^c$	$7.1 \pm 1.3^b$	$57.13^d$	.0001*
Attention (min: 1–max: 9)					
Video clips	—	$4.2 \pm 1.6^c$	$6.6 \pm 1.4^b$	$18.61^d$	.0012*
Probe stimuli	$7.1 \pm 1.5^{b,c}$	$5.8 \pm 1.4^a$	$4.8 \pm 1.3^a$	25.07	.0001*
Reaction time (ms)	$385 \pm 56^c$	$402 \pm 71^c$	$440 \pm 94^{a,b}$	6.31	.0169*
Miss (%)					
Target	$0.3 \pm 0.7$	$0.9 \pm 1.5$	$1.9 \pm 2.5$	1.80	.2150
False alarm (%)					
Standard	$0.0 \pm 0.1$	$0.1 \pm 0.2$	$0.1 \pm 0.2$	0.30	.7505
Deviant	$0.0 \pm 0.0$	$0.2 \pm 0.5$	$0.8 \pm 1.2$	2.20	.1615
P300 latency (ms)					
Target (at Pz)	$366 \pm 30$	$385 \pm 51$	$381 \pm 33$	2.92	.1000
Deviant (at Cz)	$313 \pm 35$	$322 \pm 40$	$323 \pm 37$	1.04	.3902

<sup>a</sup> Significantly different from the values in the no video condition (Bonferroni  $p < .05$ ).

<sup>b</sup> Significantly different from the values in the repeated video condition (Bonferroni  $p < .05$ ).

<sup>c</sup> Significantly different from the values in the new video condition (Bonferroni  $p < .05$ ).

<sup>d</sup> The degrees of freedom here are 1 and 11.

\* $p < .05$ .

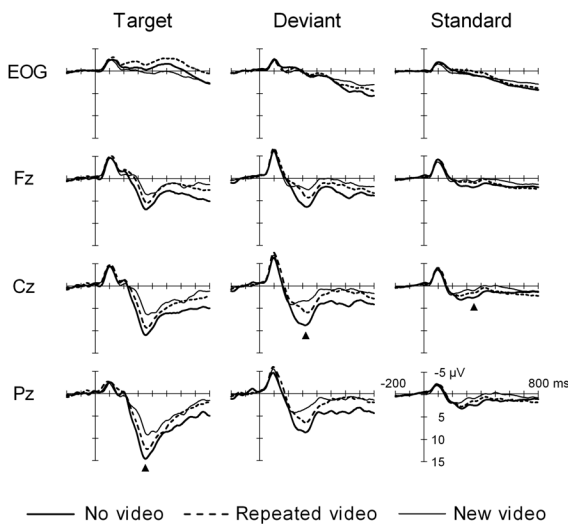


Figure 1. Grand mean ERP waveforms elicited by target (2000 Hz,  $p = .15$ ), deviant (500 Hz,  $p = .15$ ), and standard tones (1800 Hz,  $p = .70$ ) in the three viewing conditions ( $N = 12$ ). These stimuli replicated those used in Suzuki, Nittono, and Hori (2005). All recordings except EOG were referenced to the nose tip. Solid triangles indicate P300 or equivalent positive waves.

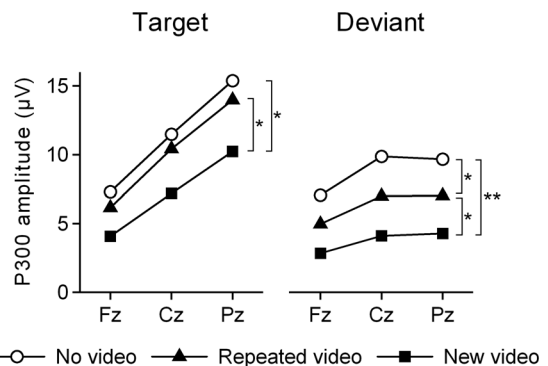


Figure 2. Mean amplitudes of the P300 elicited by target and deviant tones in the three viewing conditions. The results of multiple comparison (Bonferroni  $t$  test) of the mean amplitude values collapsed across sites are also shown. \* $p < .05$ . \*\* $p < .01$ .

P300 潜時 Table 1 に P300 潜時を示す。刺激×条件の MANOVA を行ったところ、刺激の主効果が有意であり、標的 P300 は逸脱 P300 よりも潜時が長いことが確認された ( $F(1,11) = 28.98, p = .0002$ )。P300 潜時は、ビデオを見ている条件でやや延長する傾向があったが、有意ではなかった。

**標的 P300** 振幅について条件×部位の MANOVA を行ったところ、条件と部位の主効果が得られた ( $F(2, 10) = 5.15$  and  $46.42$ ,  $p = .029$  and  $p < .0001$ )。条件×部位の交互作用は有意でなかった ( $F(4, 8) = 1.16$ ,  $p = .40$ )。部位についての多重比較の結果、すべての部位間に有意差が認められた： $Fz$  ( $5.8 \mu V$ ,  $SD 4.1$ )  $<$   $Cz$  ( $9.7 \mu V$ ,  $SD 5.0$ )  $<$   $Pz$  ( $13.2 \mu V$ ,  $SD 5.3$ )。条件についての多重比較の結果を Figure 2 に示す。標的 P300 の振幅は、新奇ビデオ条件において他の条件よりも有意に減衰した。反復ビデオ条件とビデオなし条件には有意差がなかった ( $p = .81$ )。優勢部位の  $Pz$  において、新奇ビデオ条件と反復ビデオ条件における振幅は、ビデオなし条件における振幅のそれぞれ 67%, 91% であった。

**逸脱 P300** 振幅について条件×部位の MANOVA を行ったところ、条件と部位の主効果が得られた ( $F(2, 10) = 8.21$  and  $9.41$ ,  $ps = .0078$  and  $.005$ )。条件×部位の交互作用は有意でなかった ( $F(4, 8) = 2.81$ ,  $p = .10$ )。部位についての多重比較の結果、逸脱 P300 の振幅は  $Fz$  ( $5.0 \mu V$ ,  $SD 3.2$ ) よりも  $Cz$  ( $7.0 \mu V$ ,  $SD 4.0$ ) と  $Pz$  ( $7.0 \mu V$ ,  $SD 4.0$ ) において有意に大きかった。条件についての多重比較の結果を Figure 2 に示す。すべての条件間に有意差が認められ、新奇ビデオ条件  $<$  反復ビデオ条件  $<$  ビデオなし条件であった。優勢部位の  $Cz$  において、新奇ビデオ条件と反復ビデオ条件における振幅は、ビデオなし条件における振幅のそれぞれ 42%, 71% であった。

**その他の ERP** 標準刺激に対しても P300 の潜時帯に小さな陽性電位が生じており、その振幅が条件によって異なっているように見える。頂点は測定できないので、300–400 ms の区間平均電位を求めた。 $Cz$  における平均振幅値は、ビデオなし条件で  $2.4 \mu V$  ( $SD 2.1$ )、反復ビデオ条件で  $1.4 \mu V$  ( $SD 1.2$ )、新奇ビデオ条件で  $0.8 \mu V$  ( $SD 1.1$ ) であり、映像に注意が向けられているほど小さくなるという傾向が見られた。しかし、条件×部位の MANOVA を行ったところ、条件の主効果や条件×部位の交互作用は得られなかった ( $F(2, 10) = 2.65$ ,  $p = .12$ ;  $F(4, 8) = 0.68$ ,  $p = .63$ )。初期成分 (約 100 ms に生じた前頭・中心部優勢の陰性電位 N1 と約 200 ms に生じた中心部優勢の陽性電位 P2) についても頂点潜時・振幅を測定して統計検定を行ったが、条件差は認められなかった。

## 考察

主観測度の結果から、反復呈示による関心度の操作が妥当であったことが確認された。新しいビデオを見ているときは、映像に対する主観的な注意の量が増え、反応時間は延長した。この結果は、映像に注意が向けられるほどプローブ刺激に対する行動反応の成績が低下するという先行知見と一致する (e.g., Reeves & Nass, 1996)。

標的・逸脱刺激に対する P300 の振幅は、反復された映像を見ているときよりも、新しい映像を見ているときに有意に減衰した。本研究で呈示した映像はどちらの条件でも同じだったことから、映像の知覚的な複雑さではなく、映像に対する関心度の違いが P300 振幅に反映されたといえる。

反復ビデオ条件とビデオなし条件の差は、逸脱 P300 では認められたが、標的 P300 では認められなかった。この結果は、逸脱 P300 の方が標的 P300 よりも主課題に向けられる処理資源の量を敏感に反映するという Suzuki et al. (2005) の提案と一致する。標的刺激には行動反応が求められているため、映像に向けられた処理資源の一部を振り替えるなどして、優先的に資源が配分されると考えられる。これに対して、逸脱刺激は無視してよいので、そのような措置はとられない。そのため、逸脱刺激に対する P300 の方が、標的刺激に対する P300 に比べて、映像に向けられた処理資源の量を敏感に反映することになるのだろう。標的刺激に対する P300 の振幅は、トラッキングのような知覚・運動課題を同時に行わせると、ふつうは低下する。しかし、Willard, Johnson, & Rosenfeld (1994) は、純粋な知覚課題 (退屈な映画視聴) を主課題として用いたときは、同時遂行によって P300 振幅の有意な減衰が生じないこともあると報告しており、本研究の結果と一致する。

標的 P300 に比べて逸脱 P300 は潜時が短く、頭皮上分布が中心部寄りであった。この違いは次のように説明できる。頭皮上で記録される P300 には、P3a と P3b という少なくとも 2 つの異なる (しかし互いに関連する) 成分が含まれていると考えられている (Halgren, Marinkovic, & Chauvel, 1998; Knight & Scabini, 1998)。P3a (novelty P3 とよばれる) は、逸脱事象に対する注意の定位に関連し、前頭・中心部優位の分布を示す。

他方、P3b は、惹起事象の意図的な検出と符号化に関連し、頭頂部優位の分布を示す。P3b は P3a よりも 60–80 ms 遅れて出現する。ひとつの刺激が P3a と P3b の両方を惹起することもあり、刺激特性と実験操作によってどちらがどれくらいの割合で含まれるかが変化する (Friedman, Cycowicz, & Gaeta, 2001; Goldstein, Spencer, & Donchin, 2002; Spencer, Dien, & Donchin, 2001)。今回用いた 3 音オドボール課題は、標準刺激と標的刺激の弁別が難しく、逸脱刺激が知覚的に顕著であったために、標的 P300 は P3b を多く含み、逸脱 P300 は P3a を多く含んでいたと考えられる (Comerchero & Polich, 1998, 1999; Katayama, & Polich, 1998)。

従来の精神作業負荷の研究では、標的刺激に対する P300 (P3b を多く含む) に焦点が当てられてきたが、本研究の結果から、知覚的に逸脱した低頻度非標的刺激に対する P300 (P3a を多く含む) の振幅も、資源配分の敏感な測度となる可能性が示された。

### プローブ刺激法の利点

ERP を用いたプローブ刺激法の利点は、次の 3 つにまとめられる。(a) どのような主課題とも組み合わせて使える、(b) 行動測度よりも敏感な測度になりうる (特に知覚・中枢資源が関係する場合)、(c) 主課題に集中しすぎてプローブ刺激に対する行動反応ができなくなったときでも測定が続けられる。顕在反応を求めなくても測定できることは ERP の長所であるが、プローブ刺激法の場合には実験参加者に顕在反応を求めた方がよい。反応時間には P300 振幅とは異なる処理資源の側面が反映されると考えられるからである。初期の研究で使われてきた計数課題は、刺激ごとに行動測度が得られないだけでなく、記憶負荷によって課題が難しくなるので避けた方がよい (Polich, 1998)。

ボタン押しや計数を求めるプローブ刺激法 (関連プローブ法) は、主課題の遂行の邪魔になる (obtrusive) という可能性が捨てきれないので、実験室の外——特に、安全が最優先される現場 (自動車の運転、航空機の操縦など) —— で使われることは少なかった (Kramer & Weber, 2000; Parasuraman, 1990)。しかし、この欠点は、今回紹介した映像に対する注意の評価のような労働以外の場面では、大きな障害にならないと思われる。

プローブ刺激法を使わずに、主課題に含まれる事象に対して ERP を測定する方がより直接的に注意の配分を測れるのではないかという提案もある。この方法は、主課題法 (primary task technique) とよばれる (Kramer & Weber, 2000)。現在では“処理資源の量は一定の限界がある”という仮定そのものが疑われることもあるので (Sanders, 1997)、この方法は魅力的に思える。

実験室で行われた研究から、主課題に処理資源が配分されるほど、主課題に含まれる事象に対する P300 の振幅が大きくなることが分かっている (Kramer et al., 1985; Sirevaag et al., 1989; Wickens et al., 1983)。しかし、主課題法を実際に利用すると、いくつかの問題が生じる (Wickens, 1990)。まず、ERP を測定するための事象を主課題から見つけ出す (あるいは埋め込む) ことが難しく、汎用性に欠ける。これに対して、プローブ刺激法は、主課題の内容にかかわらず同じ刺激セットが使えるので、汎用性が高い。一つの解決策は、課題中に生じる実験参加者の自発的な行為をきっかけにして ERP を測定することである。視覚課題中に眼球が停留した時点に関連して生じる ERP (眼球停留関連電位) を測定する方法 (八木, 2002) や、マウスクリックやボタン押しなどのインタフェース操作に関連して ERP を測定する方法 (Nittono, 2005; Nittono, Hamada, & Hori, 2003) などが提案されている。しかし、これらの方法を用いたときには、行為後に生じる事象の物理的特性や生起頻度を完全には統制できないという問題が起こる (特に現実場面において)。そのため、2 つの条件で得られた ERP データを比較するときには、これらの変数に差がないかを慎重に検討する必要がある。これに対して、プローブ刺激法では、ERP を求める刺激の物理的特性・生起頻度・呈示間隔などを 2 つの条件で完全に一致させることができるので、結果の解釈が容易である。

この点に関連して、“P300 振幅は刺激に向けられる知覚・中枢資源の量を反映する”といえるのは、刺激や課題の構造が変化しないときに限られる (Kok, 2001)。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) ときには小さくなる (Johnson, 1988; Ruchkin & Sutton, 1978)。たとえば、刺激の弁別が難しくなると、

参加者は課題に対してより集中することが求められるので、多くの処理資源が向けられるはずである。しかし、いくら処理資源を投入しても、刺激の情報量はもともと少ない（不確かさが残る）ので、弁別が容易なときに比べて、P300 振幅はむしろ小さくなる。このように主課題法において P300 を惹起する事象を統制できないときは、P300 振幅の解釈が難しくなる。これに対して、プローブ刺激法では、常に同じ刺激と課題を用いるので、そこで得られる P300 振幅の変化は、刺激や課題の構造変化によるものではなく、プローブ刺激に対する知覚・中枢資源の配分量の変化を反映していると主張できるのである。

### 今後の課題

これまで述べてきた先行知見や実験データは、ERP を用いたプローブ刺激法が映像に対する注意を測るのに有用であることを示している。映像を見ることには運動に関連した処理が含まれないので、知覚・中枢資源を反映する P300 振幅を使って測定するのに適した事例であるといえる。プローブ刺激法は労働場面における精神作業負荷を測定するために開発されてきたという経緯があるが、さまざまな日常場面における注意を測るツールとしても幅広く利用できるだろう。

P300 振幅に注目したプローブ刺激法を今後普及させていくためには、測定手続きを標準化することが必要になる。そのための4つの検討課題を以下に挙げる。

第1に、最適な刺激セットの作成である。従来の研究では、2刺激のオドボール課題を用い、標的刺激に対する P300 の振幅に注目してきた。しかし、著者らの研究から、3刺激のオドボール課題を用いたときは、標的刺激に対する P300 よりも、非標的逸脱刺激に対する P300 の振幅の方が、主課題に向ける注意の量を敏感に反映する可能性が示された。このような知見を蓄積することにより、実験的証拠に基づいて最適な刺激セットを提案できるだろう。

第2に、プローブ刺激のモダリティの工夫である。これまでの研究では、聴覚または視覚のプローブ刺激が用いられてきた。しかし、日常のほとんどの体験は視聴覚の複合体験であり、感覚レベルでの干渉を避けるには、他の感覚モダリティを用いたプローブ刺激法があると望ましい。著者らは、現在、体性感覚刺激（振

動刺激）を用いたプローブ法で ERP を測定する研究を行っている。今回報告した聴覚プローブ刺激法とほぼ同様の結果が得られており、将来有望であると考えている。

第3に、測度の洗練化である。ERP の振幅には個人差が非常に大きい。これは心理的な要因というより解剖学的・電気的な要因で生じることがある。そのため、振幅そのものではなく、振幅値から二次的に導出される測度の方が、注意の指標として適しているかもしれない。たとえば、Wickens et al. (1977) は、P300 の振幅そのものよりも、P300 振幅の系列効果 (sequential effect) の方が、作業負荷の変化を反映しやすいことを示した。系列効果とは、同じ刺激に対する ERP が先行する刺激系列の影響を受けて変わるとい現象である (Squires, Wickens, Squires, & Donchin, 1976)。2つの刺激がランダムな順序で呈示される場合、前と同じ刺激が反復呈示されるときよりも、他の刺激に交替するときの方が、P300 の振幅が大きくなる。この効果は、先行する刺激系列についての短期記憶によって生じると考えられている。主課題の作業負荷が増すほど、二次課題のオドボール課題で得られる P300 振幅に及ぼす刺激系列の効果が小さくなる（記憶の崩壊が早くなる）という結果が得られている。フライトシミュレータの作業負荷と P300 振幅の関係を検討した Kramer et al. (1987) の研究でも、作業負荷が大きいほど系列効果が小さくなることが示されている。プローブ刺激法における系列効果については、その後ほとんど研究されていないが、再検討してみる価値があるだろう。

第4に、信号処理方法の改善である。ERP は数十回の試行における反応を加算平均して求めることが多いために、時系列的な変化を検討することが難しいといわれてきた。しかし、ERP の中でも P300 波は、特に高振幅で出現し、同様の周波数帯域の活動が背景脳波に含まれないために、単一試行での分析が行いやすい。P300 振幅と処理資源の関係を検討した初期の研究 (Wickens et al., 1977) において、すでに一試行ごとに P300 振幅を推定し、作業負荷の時系列的变化を検討するという試みが行われている。単一試行データの分析では、見たい信号 (P300) をノイズ (背景脳波) からいかにして取り出すかという工夫がなされる。大きく分けて、信号の周波数や時間的变化パターンに注

目する方法と頭皮上分布の特徴に注目する方法とがある。前者の例として、ハイカットフィルタ (Ruchkin & Glaser, 1978), ウェーブレット変換 (wavelet transform; Quiroga & Garcia, 2003), サブスペース正則化 (subspace regularization; Holm, Ranta-Aho, Sallinen, Karjalainen, & Müller, 2006) などを用いた方法があり, 後者の例として, 独立成分分析 (independent component analysis) を用いた方法 (Xu, Gao, Hong, Miao, Gao, & Yang, 2004) がある。どの方法が最も優れているかは現時点では明らかでない。しかし, どの刺激に対する ERP のどの側面に注目するかを明確にできれば, 加算平均の制約を越えた分析法を工夫することは可能だろう。このような高度な信号処理技術は, 一般の心理生理学者の手に負えないことが多いので, 工学者との協同作業が求められる。

ERP を用いたプローブ刺激法の実用化に向けてこのような取り組みを続けることにより, これまで質問紙などの主観指標で評価されることが多かった“興味をもっている状態”や“退屈な状態”を客観的に検討することが可能になると期待される。

### 引用文献

- Baldwin, C. L., & Coyne, J. T. (2005). Dissociable aspects of mental workload: Examinations of the P300 ERP component and performance assessments. *Psychologia*, **48**, 101-119.
- Basil, M. D. (1994). Secondary reaction-time measures. In A. Lang (Ed.), *Measuring psychological responses to media messages*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, pp. 85-98.
- Comerchero, M. D., & Polich, J. (1998). P3a, perceptual distinctiveness, and stimulus modality. *Cognitive Brain Research*, **7**, 41-48.
- Comerchero, M. D., & Polich, J. (1999). P3a and P3b from typical auditory and visual stimuli. *Clinical Neurophysiology*, **110**, 24-30.
- Csikszentmihalyi, M. (1975). *Beyond boredom and anxiety: Experiencing flow in work and play*. San Francisco: Jossey-Bass. (チクセントミハイ, M. 今村浩明 (訳) (2000). *楽しみの社会学—改題新装版—* 新思索社)
- Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The psychology of optimal experience*. New York: Harper & Row. (チクセントミハイ, M. 今村浩明 (訳) (1996). *フロー体験 喜びの現象学* 世界思想社)
- 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.
- Duncan-Johnson, C. C., & Donchin, E. (1977). On quantifying surprise: The variation of event-related potentials with subjective probability. *Psychophysiology*, **14**, 456-467.
- Friedman, D., Cycowicz, Y. M., & Gaeta, H. (2001). The novelty P3: An event-related brain potential (ERP) sign of the brain's evaluation of novelty. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, **25**, 355-373.
- Gawron, V. J. (2000). *Human performance measures handbook*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum
- Goldstein, A., Spencer, K. M., & Donchin, E. (2002). The influence of stimulus deviance and novelty on the P300 and Novelty P3. *Psychophysiology*, **39**, 781-790.
- 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.
- Holm, A., Ranta-Aho, P. O., Sallinen, M., Karjalainen, P. A., & Müller, K. (2006). Relationship of P300 single-trial responses with reaction time and preceding stimulus sequence. *International Journal of Psychophysiology*, in press.
- Isreal, J. B., Chesney, G. L., Wickens, C. D., & Donchin, E. (1980a). P300 and tracking difficulty: Evidence for multiple resources in dual-task performance. *Psychophysiology*, **17**, 259-273.
- Isreal, J. B., Wickens, C. D., Chesney, G. L., & Donchin, E. (1980b). The event-related brain potential as an

- index of display-monitoring workload. *Human Factors*, **22**, 211-224.
- Johnson, R., Jr. (1988). The amplitude of the P300 component of the event-related potential: Review and synthesis. In P. K. Ackles, J. R. Jennings, & M. G. H. Coles (Eds.), *Advances in psychophysiology* (Vol. 3). Greenwich, CT: JAI Press, pp. 69-138.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall
- Katayama, J., & Polich, J. (1998). Stimulus context determines P3a and P3b. *Psychophysiology*, **35**, 23-33.
- Kida, T., Nishihira, Y., Hatta, A., Wasaka, T., Tazoe, T., Sakajiri, Y., Nakata, H., Kaneda, T., Kuroiwa, K., Akiyama, S., Sakamoto, M., Kamijo, K., & Higashiura, T. (2004). Resource allocation and somatosensory P300 amplitude during dual task: Effects of tracking speed and predictability of tracking direction. *Clinical Neurophysiology*, **115**, 2616-2628.
- 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.
- Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, **38**, 557-577.
- Koster, R. (2005). *A theory of fun for game design*. Scottsdale, AZ: Paraglyph. (コスター, R. 酒井皇治 (訳) (2005). 「おもしろい」のゲームデザイン—楽しいゲームを作る理論 オライリー・ジャパン)
- Kramer, A. F., Sirevaag, E. J., & Braune, R. (1987). A psychophysiological assessment of operator workload during simulated flight missions. *Human Factors*, **29**, 145-160.
- Kramer, A. F., Trejo, L. J., & Humphrey, D. (1995). Assessment of mental workload with task-irrelevant auditory probes. *Biological Psychology*, **40**, 83-100.
- Kramer, A. F., & Weber, T. (2000). Applications of psychophysiology to human factors. In J. T. Cioppo, L. G. Tassinari, & 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. (1983). An analysis of the processing requirements of a complex perceptual-motor task. *Human Factors*, **25**, 597-621.
- 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.
- Magliero, A., Bashore, T. R., Coles, M. G., & Donchin, E. (1984). On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology*, **21**, 171-186.
- McCarthy, G., & Donchin, E. (1981). A metric for thought: A comparison of P300 latency and reaction time. *Science*, **211**, 77-80.
- McCarthy, G., & Wood, C. C. (1985). Scalp distributions of event-related potentials: An ambiguity associated with analysis of variance models. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **62**, 203-208.
- Moray, N. (1967). Where is capacity limited? A survey and a model. *Acta Psychologica*, **27**, 84-92.
- 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
- Nittono, H. (2005). Missing-stimulus potentials associated with a disruption of human-computer interaction. *Psychologia*, **48**, 93-101.
- Nittono, H., Hamada, A., & Hori, T. (2003). Brain potentials after clicking a mouse: A new psychophysiological approach to human-computer interaction. *Human Factors*, **45**, 591-599.
- Norman, D. A., & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, **7**, 44-64.
- Papanicolaou, A. C., & Johnstone, J. (1984). Probe evoked potentials: Theory, method, and applica-

- tions. *International Journal of Neuroscience*, **24**, 107-131.
- Parasuraman, R. (1990). Event-related brain potentials and human factors research. In J. W. Rohrbaugh, R. Parasuraman, & R. Johnson, Jr. (Eds.), *Event-related brain potentials: Basic issues and applications*. New York: Oxford University Press, pp. 279-300.
- Polich, J. (1998). P300 clinical utility and control of variability. *Journal of Clinical Neurophysiology*, **15**, 14-33.
- Quiroga, R. Q., & Garcia, H. (2003). Single-trial event-related potentials with wavelet denoising. *Clinical Neurophysiology*, **114**, 376-390.
- Ragot, R. (1984). Perceptual and motor space representation: An event-related potential study. *Psychophysiology*, **21**, 159-170.
- Reeves, B., & Nass, C. (1996). *The media equation: How people treat computers, television, and new media like real people and places*. New York: Cambridge University Press. (リーブス, B. & ナス, C. 細馬宏通 (訳) (2001). 人はなぜコンピューターを人間として扱うか: 「メディアの等式」の心理学 翔泳社)
- Reeves, B., & Thorson, E. (1986). Watching television: Experiments on the viewing process. *Communication Research*, **13**, 343-361.
- Reeves, B., Thorson, E., & Schleuder, J. (1986). Attention to television: Psychological theories and chronometric measures. In J. Bryant, & D. Zillmann (Eds.), *Perspectives on media effects*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, pp. 251-279.
- Rosenfeld, J. P., Bhat, K., Miltenberger, A., & Johnson, M. (1992). Event-related potentials in the dual task paradigm: P300 discriminates engaging and non-engaging films when film-viewing is the primary task. *International Journal of Psychophysiology*, **12**, 221-232.
- Ruchkin, D. S., & Glaser, E. M. (1978). Some simple digital filters for examining CNV and P300 on a single-trial basis. In D. A. Otto (Ed.), *Multidisciplinary perspectives in event-related brain potential research*. Washington DC: U.S. Government Printing Office, pp. 579-581.
- Ruchkin, D. S., & Sutton, S. (1978). Equivocation and P300 amplitude. In D. Otto (Ed.), *Multidisciplinary perspectives in event-related potential research*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, pp. 175-177.
- Sanders, A. F. (1997). A summary of resource theories from a behavioral perspective. *Biological Psychology*, **45**, 5-18.
- 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.
- Sirevaag, E. J., Kramer, A. F., Wickens, C. D., Reiswber, M., Strayer, D. L., & Grenell, J. F. (1993). Assessment of pilot performance and mental workload in rotary wing aircraft. *Ergonomics*, **36**, 1121-1140.
- Spencer, K. M., Dien, J., & Donchin, E. (2001). Spatio-temporal analysis of the late ERP responses to deviant stimuli. *Psychophysiology*, **38**, 343-358.
- Squires, K. C., Wickens, C., Squires, N. K., & Donchin, E. (1976). The effect of stimulus sequence on the waveform of the cortical event-related potential. *Science*, **193**, 1142-1146.
- 鈴木淳・入戸野宏・堀忠雄 (2004). 映像への関心度が処理資源の配分に及ぼす効果: 映像の反復呈示による検討 [抄録] 生理心理学と精神生理学, **22**, 173.
- Suzuki, J., Nittono, H., & Hori, T. (2005). Level of interest in video clips modulates event-related potentials to auditory probes. *International Journal of Psychophysiology*, **55**, 35-43.
- Ullsperger, P., Freude, G., & Erdmann, U. (2001). Auditory probe sensitivity to mental workload changes — An event-related potential study. *International Journal of Psychophysiology*, **40**, 201-209.

- Verleger, R. (1997). On the utility of P3 latency as an index of mental chronometry. *Psychophysiology*, **34**, 131-156.
- Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman, & D. R. Davies (Eds.), *Varieties of attention*. Orlando, FL: Academic Press, pp. 63-101.
- Wickens, C. D. (1990). Applications of event-related potential research to problems in human factors. In J. W. Rohrbaugh, R. Parasuraman, & R. Johnson, Jr. (Eds.), *Event-related brain potentials: Basic issues and applications*. New York: Oxford University Press, pp. 301-309.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, **3**, 159-177.
- Wickens, C. D., Isreal, J., & Donchin, E. (1977). The event related cortical potential as an index of task workload. In A. S. Neal, & R. F. Palasek (Eds.), *Proceedings of the Human Factors Society 21th annual meeting*. Santa Monica: Human Factors Society, pp. 282-286.
- Wickens, C. D., Kramer, A., Vanasse, L., & Donchin, E. (1983). Performance of concurrent tasks: A psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. *Science*, **221**, 1080-1082.
- Willard, J., Johnson, M., & Rosenfeld, J. P. (1994). Interaction of oddball probability and primary task type on P300 in the dual-task paradigm. *Biofeedback and Self Regulation*, **19**, 13-24.
- Xu, N., Gao, X., Hong, B., Miao, X., Gao, S., & Yang, F. (2004). BCI Competition 2003— Data set IIb: Enhancing P300 wave detection using ICA-based subspace projections for BCI applications. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **51**, 1067-1072.
- 八木昭宏 (2002). 眼球停留関連電位の産業場面への応用. *心理学評論*, **45**, 103-117.