

注意容量の推定

－プローブ刺激法の可能性－

Estimating of attentional capacity

－ Possibilities about probe stimulus technique －

玉越 勢治

Seiji Tamakoshi

abstract

The notion of divided attention assumes that the processing resource can be allocated to multiple tasks. In order to estimate attentional capacity, many studies have examined using of the dual-task paradigm that a participant is required to perform a primary and secondary task simultaneously. The presumption is that the secondary task is performed by a surplus of attentional capacity directed to the primary task. For this reason, it can be interpreted that the performance of a secondary task reflects attentional capacity toward a primary task. Researchers have recently attempted to elucidate the cognitive brain function via the “probe stimulus technique,” which is an assessment of attentional capacity by the event-related brain potential (ERP). This technique, however, presents some problems that need to be addressed, such as how to present a stimulus to measure the ERP. Although one of its advantages is that ERP can be measured without a participant's overt reaction, ERP wave forms in such condition are unclear compared to the conditions under which the participant's reaction is required. By improving the time resolution, it is possible to examine the time-series behavior of attentional capacity in future studies.

要 約

人は複数の課題に注意を配分する事が可能である。この分割的注意について、2重課題法を用いた注意容量の推定が検討されている。この手法では実験参加者は主課題と2次課題の同時遂行が求められる。2次課題は主課題への注意容量の余剰によって遂行されるため、2次課題の成績は主課題に向けられた注意容量を反映すると解釈可能である。最近では、事象関連脳電位（ERP）を用いて、認知に関する脳機能の解明が試みられている。このプローブ刺激法には刺激の呈示方

法等の、いくつかの解決すべき課題がある。また、顕在的な反応なしで ERP は計測可能であるという利点があるが、その場合 ERP 波形が不明瞭となる。今後、時系列的な注意容量の挙動について検討が期待される。

1. はじめに

我々は日常場面において、外部環境からの情報（刺激：stimulus）に対して適切な行動（反応：reaction）を生じさせることによって、適応的に生活している。例えば道を歩く場合、車道と歩道を区別し、他者とぶつからないように進行方向を調整しながら、交差点では信号に従い停止する。さらにクラクションを鳴らされると振り返り、安全を確保しなければならない。こうした場面では信号は視覚刺激、クラクションは聴覚刺激と言い換えることができ、停止や振り返る行動は刺激に対する反応と言い換えることができる。我々は刺激に対する反応を繰り返しながら日々を過ごしている。しかし、こうした環境から得られる刺激は膨大で、その全てに対して反応が生じているわけではない。道路には標識があるが、同時に商店などの看板もある。耳には他者の話し声や騒音の混ざった雑多な情報が入力されている。我々はそうした情報から必要に応じて見たいものを見て、聞きたいものを聞いているのである。さらに、意図的に情報を選択している場合と、そうでない場合がある。このような情報を取捨選択する心的過程は注意（attention）と呼ばれている。特に視覚刺激は眼球を動かす事によって、随意的に情報を入力する事が可能である。このような意図的な注意過程は顕在的注意（overt attention）あるいは選択的注意（selective attention）と呼ばれている。

本稿はこれらの注意と呼ばれる概念や、その機能的役割における分割的側面について概説する。さらに、その客観的評価における近年得られた知見と、解決すべき課題について紹介する。

2. 注意容量とその評価

2つ以上の複数の課題に対して注意容量を分割し配分する機能は分割的注意と呼ばれている（e.g. Kahneman, 1973）。注意には必要に応じて対象を選択し、集中的に処理を行う機能があるが、一方で複数の対象に同時かつ分散的に処理を行う側面もある。音楽を聞きながら歩行することがあるが、耳から入力される音楽に注意を向けながら、道の様子や歩行者にも注意を向ける必要がある。こうした場面では注意を向ける対象が多いほど、それぞれに配分される注意は少なくなると予想される。これは我々の注意容量（attentional capacity）には限界があり、限られた資源（resource）を複数の対象に分割して処理していると考えられている。こうした概念は注意容量モデルと呼ばれ説明されている（Kahneman, 1973）。複数の対象に分割された資源が、それぞれの

処理に必要な最低限を満たしていれば課題遂行に支障はない。しかしながら、課題が困難であれば多くの処理資源を割かなければならない。この場合、他の課題に対して処理資源が割く事ができなくなる。例えば、高速道路の分岐ポイントでは、運転に多くの資源を割かなければならない。この時、ナビゲーションの指示に注意を向けることができず、結果的に行き先を見失う事がある。あるいは、ナビゲーションに注意を向ける事で事故につながる可能性が高まる。

このような場面を想定した、ある課題に対する注意容量あるいは精神作業負荷（mental workload）の測定法に2重課題法（dual-task technique）がある。この手法では精神作業負荷を測定する課題を主課題とし、同時に別の2次課題を並行して遂行させる。主課題の難易度が高い場合、主課題に注意資源は奪われ、2次課題の成績は低下する。2重課題法における実験室場面での検討において、多くの先行研究では主課題としてトラッキング課題が使用されている。これはプログラムによって制御された課題で、PCを使用する場合が多い。ディスプレイ上にターゲットであるボール等が縦横ランダムに移動する。実験参加者は同じ画面上に表示されるサークルをマウスやジョイスティックを使用して操作し、移動するボールがサークルの中に収まるように求められる。ボールの移動速度やサークルのサイズによって課題の難易度を操作する事が可能である。2重課題法では参加者はトラッキング課題と並行して、もう1つ（あるいは幾つか）の課題を遂行することが求められる。例えばある高さの音が聞こえたら、主課題と並行してボタンを押す反応が求められる。主課題であるボールの速度が遅ければ、音に対して容易に反応が可能である。しかしながらボールの速度が速く、サークルの操作が困難になれば、音に対する反応は遅れ、時に反応が生じなくなる。これらの課題において音に対する反応から主課題に向けた注意容量が推定される。同じ要領で、実験室以外の日常生活場面での応用研究が進められている。

3. 2重課題法における認知過程の指標

3.1 行動指標

人の認知機能を客観的に計測する手法として、刺激に対する反応を求め、その正確さや反応に要する時間（reaction time：反応時間）を指標として用いることが可能である。例えば、呈示される視覚（あるいは聴覚や触覚など）の刺激に対し、なるべく早く且つ正確に反応するよう参加者に予め教示をする。この時求められる反応時間は単純反応時間（simple reaction time）と呼ばれ、人が刺激に対して反応できる最低限必要な時間と言い換えられる。刺激を複数種類用意し、ある特定の特徴を有する刺激にのみ反応するように教示を行うと、刺激の種類を弁別（discrimination）するという認知過程が課題に必要となってくる。このような課題の結果として得られる反応時間は単純反応時間と比較して遅延する。この遅延した時間は呈示された刺激の弁別に要された時間であると推察される。刺激の弁別が容易であれば時間は余りかからず、弁別が困難になるほど時間を必要とする。この関係より課題に対する認知処理に必要な時間の関数が得

られる。例えば、ディスプレイ上に三角形が表示されると反応ボタンを押し、四角形が表示されると反応しない、という条件であれば刺激の弁別は簡単である。一方、「直径 12cm の赤色の三角形」というように、サイズの要素、色の要素、形の要素など刺激を定義する特徴が増えれば弁別は困難となっていくだろう。このような実験において、反応を求められる特徴を持つ刺激を標的刺激 (target) と呼び、標的刺激以外の反応を求められない刺激を妨害刺激 (distracter) と呼ぶ。標的刺激が複数設定され、それぞれの刺激に対して個別の反応が求められる実験事態 (4 種類の反応ボタンや両手両足を使用する等) では、より反応は困難となる。結果的に先の弁別に加えて反応を選択する認知過程に要する時間が反応時間に加算される。

2 重課題法では主課題に加えられる 2 次課題について、上記のような指標で認知過程を推定する。この場合 2 次課題は主課題の遂行を損なうことなく、また主課題に干渉しないような一定の課題を用いる。すなわち 2 次課題の遂行に必要な注意資源は、主課題に割かれる資源の余剰分と考える事が可能である。主課題の難易度を操作する事により、2 次課題の認知処理に向けられる注意資源の余剰が減少し、結果として反応時間が増加し且つ正確さが減衰する事となる。裏を返せば、2 次課題の成績によって主課題に割かれた注意容量を推定できるのが 2 重課題法の考え方である。

3.2 事象関連脳電位を指標としたプローブ刺激法による検討

近年、こうした 2 重課題法における 2 次課題の指標として反応時間などの行動指標のみならず、人の認知過程を反映する事象関連脳電位 (event-related brain potential : ERP) を用いて検討されている。ERP とは頭皮上から得られる脳波 (electroencephalogram : EEG) のなかで、刺激入力や認知処理に応じて特異的に得られる電位変動である。ERP 成分は刺激入力 (もしくは反応出力) といった事象が生じた時点からの経過時間 (latency : 潜時)、振幅とその極性 (amplitude)、頭皮上分布 (topography) といった波形の持つ特徴と、実験変数への応答性で定義される。

前述した視覚刺激に対し反応を求める実験課題を例にすると、まず視覚刺激の入力に対し、視覚誘発性の ERP 成分が観察される。入力された刺激が標的刺激であれば、注意に関連した ERP 成分が時系列的に続いて観察される。前者のような刺激の感覚モダリティや強度などを反映する成分は外因性成分と呼ばれ、後者のような認知処理に関連する成分は内因性成分と呼ばれ、分類されている。例えば、標的刺激と妨害刺激に対する ERP を比較すると、どちらも同じ視覚刺激であるので外因性成分は変化しないが、標的を検出するという認知処理に応じて内因性成分が、標的刺激に対して特異的に観察される。大きな音と小さな音など刺激の物理的特性が異なる条件間では外因性成分に差が生じる。心理学実験として人の認知過程を検討したい場合は、外因性成分に影響が出ないように刺激の物理的特性は統制 (control) する工夫が必要である。すなわち物理的エネルギーが同じ刺激に対する ERP の内因性成分の違いから、心的状態の違いを明らかに出来

る事が求められる。また、行動指標は認知処理の結果であるが、ERPは時間分解能が高いため、時系列を追った脳内処理の過程を検討する事が可能である。

3.3 注意容量を反映する P300 とプローブ刺激法

もっとも典型的な ERP 内因性成分は P300 と呼ばれる、刺激呈示後 300 – 600 ms に陽性の頂点を持ち、頭頂部優勢に分布する成分である。P300 は予期しない文脈からの逸脱事象に対して出現する。この P300 を惹起する典型的なパラダイムはオッドボールパラダイムと呼ばれる。2 種類の刺激（例えば、1000 Hz と 500 Hz の短い純音）が、一方が高頻度（例えば 80%）、他方が低頻度（20%）で、ランダム順に呈示される。つまり、いつ低頻度刺激が呈示されるか予測はできない。ここで、参加者に低頻度刺激を標的刺激として検出を課し、ERP を記録すると標的刺激に対して P300 が出現する。

P300 の頂点潜時はその刺激を評価するための時間を反映し、振幅はその刺激に要した注意資源の量を反映すると考えられている。したがって、課題遂行中の参加者に 2 次課題としてオッドボール課題を遂行させ、P300 振幅を計測すると、主課題に多くの資源が使われているときには 2 次課題の標的刺激に対する P300 振幅の減衰として観察される。

2 重課題法の内、2 次課題に対して ERP を同時に計測する手法はプローブ刺激法と呼ばれる（入戸野, 2006; 杉本ら, 2011）。2 次課題に行動反応を求める手法を関連プローブ法（relevant probe technique）、反応を求めない手法を無関連プローブ法（irrelevant probe technique）と呼ぶ。2 次課題がオッドボール課題の場合、無関連プローブ法であれば低頻度刺激に対して積極的な反応を求めないが、並行して記録される ERP には、関連プローブ法に比べて振幅が小さいものの低頻度刺激（逸脱刺激）に対して P300 が観察される。このように無関連プローブ刺激法は反応を求めない潜在的な注意過程を検討することが可能である。プローブ刺激法において、P300 振幅は知覚 – 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おり、主課題の難易度によって変化することが報告されている（Kramer, Trejo, & Humphrey, 1995; Sirevaag, Kramer, Wickens, Reisweber, Strayer, & Grenell, 1993; Wickens, Kramer, Vanasse, & Donchin, 1983）。

4. プローブ刺激法の解決すべき課題

4.1 プローブ刺激を呈示する感覚モダリティ

2 次課題が主課題の遂行に影響を及ぼさないことが 2 重課題法の前提条件である。同じ感覚器に呈示した場合、主課題の構造を歪めてしまう可能性があり、結果の解釈も明確ではなくなってしまう。日常生活で行う課題の多くは視覚への依存性が高い為、2 次課題で用いるプローブ刺激は主課題で使用する視覚とは異なる感覚器への刺激を用いることがほとんどである。

現在触覚や聴覚を用いたプローブ刺激法の有用性が検討されている。まず触覚について、Kida

ら(2004)や重光・入戸野・堀(2007)では指先に触覚を刺激する呈示装置を装着し、2重課題法遂行時の主課題の難易度、あるいは映像視聴時の注意配分を触覚性のERPが反映する事を報告した。しかしながら、指への触覚刺激呈示は日常場面を想定した場合、機器の操作など制限がある。そのため杉本・野村・片山(2011)では肩への電気刺激をプローブ刺激として用いて、同様の検討を行っている。結果として肩への触覚刺激に対するP300は主課題の難易度を反映するため、日常場面での応用に期待されている。

これらの先行研究は、視聴覚に対して触覚は課題遂行に対する影響が低いという観点から検討されている。一方、日常生活を鑑みた場合、聴覚を用いてもその影響は少なく、触覚よりも呈示方法が簡便であると考えられる。そこで玉越・中・片山(2013)では映像鑑賞時において、聴覚刺激を用いて検討している。多くの先行研究でも主課題で視覚、2次課題で聴覚の組み合わせを用いているが、実験的に精度を高めるには主課題には聴覚刺激を含まないものが良い。一方、聴覚系はそもそも複数の音源から発生する情報を自動的に弁別する特性を持つ(聴覚情景分析: auditory scene analysis)。その特性を活かし、聴覚刺激を含む主課題に聴覚プローブ刺激を被さるように呈示できれば、より日常生活に近い場面で検討が可能と考えられる。実験参加者には主課題として映像鑑賞をさせ、映像が含む音声を呈示する条件と呈示しない条件で比較検討を実施した。結果として、聴覚刺激が物理的に干渉しない限りにおいて、聴覚を用いたプローブ刺激法の有用性が報告された。

4.2 プローブ刺激に対する反応

2次課題に対して反応を求めない無関連プローブ法を用いることによって、主課題の構造を歪めることなく、実際に行う状態と同じく主課題を遂行する事が可能である。しかしながら、無関連プローブ刺激に対しては明瞭なERP反応が観察されにくいデメリットもある。Takeda & Kimura(2014)ではP300ではなく、高頻度で呈示される聴覚刺激に対して誘発されるN1成分が映像の興味を反映したと報告している。Takedaらの研究では、実験参加者は刺激に対して特に注意を向けていないため、参加者が主課題に集中できるという利点を活かす事が可能となる。今後の展開が期待される。また、注意容量を反映するP300以外のERP成分の可能性として、聴覚刺激の逸脱事象について出現するミスマッチ陰性電位(mismatch negativity)がある。ミスマッチ陰性電位は刺激に対して注意を向けていない場合や、参加者の意識的な気付き等に関わらず出現するため、自動的な処理を反映すると報告されている。こうした特性から、無関連プローブ法であっても聴覚刺激の逸脱事象に対してはミスマッチ陰性電位が得られると予想される。ミスマッチ陰性電位はP300と異なり、注意容量を直接反映するものではないが、関連プローブ法におけるmiss試行(実際には標的が呈示されたが参加者の反応が得られない事態)との比較など、より多面的な検討が可能となる。これらの研究は、顕在反応を求めなくても認知処理の計測が可

能であるため重要である。

4.3 指標の時間分解能

ERP の時間分解能は、行動指標など他の指標と比較し極めて高いが、実際に ERP の計測には複数試行、すなわち刺激の繰り返し呈示が必要となる。脳は特定の刺激や認知課題に対して、特異的な反応をしていると考えられる。しかし、頭皮上から得られる電位変動は極めて小さいため、そのままでは ERP は観察できない。脳は実験課題に関連した特異的な反応以外にも、同時に様々な活動を行っているため、ERP の反応が埋もれてしまうのである。このため、特定の事象を複数回記録し、事象の発生を時間的基準点として加算平均処理を実施する必要がある（詳細は入戸野、2003 等を参照）。ある特定の事象に対する時間分解能は高いが、その ERP の信号を検出するために 30 回程度（実際には 60 回程度）の記録が必要となる。これは時々刻々と変化するような課題の評価には向いていない事を意味する。実験事態では、ある条件下で 5 分ほどプローブ刺激法を実施し、信号の抽出を経て ERP を得る事となる。この場合、主課題に割かれた注意容量は 5 分間の平均したものと解釈される。

このように、実験では難易度条件ごとにブロックを設定し、ブロック間の比較を行うことで難易度の水準を検討している。しかしながら、難易度が一定のブロック内においても時間的に注意容量は変動する可能性がある。そこで玉越・長江・山村・義平・八木・片山（2012）では 3 分間のブロック内において、主課題として課題の難易度が 1 分ごとに 3 水準に変化するトラッキング課題を、2 次課題として聴覚オッドボール課題を設定し実験した。時間的変動を検討するため切り替わり直後の 30 秒間と、その後の 30 秒間で ERP 波形の比較を行った。1 ブロックの課題遂行時間は 3 分間であるが、難易度の組み合わせを変化させ、6 ブロック実施した。こうすることで、1 つの難易度条件に対して、合わせて 6 分間のデータが得られ、加算平均によって ERP を抽出することが可能となる。実験は、大学生および大学院生 12 名（女性 6 名、男性 6 名）、平均年齢 23.1 歳（範囲：22 - 26 歳）を対象に実施した。トラッキング課題の難易度はボールの速度によって規定し、速度が速い条件は難易度が高く、速度が遅い条件は難易度が低い課題であった。ブロック内の難易度条件ごとに 30 秒の前後半に分割し、それぞれの P300 とトラッキング課題の難易度について検討した。結果、課題切り替わり直後の 30 秒間は後続する時間帯と比較すると、より課題の難易度を ERP が反映する事が明らかとなった。難易度が変化して暫くすると課題に対する慣れ等が生じ、課題で設定した難易度に対して参加者の注意容量が変動しないという考察が得られた。これは難易度が変化した直後は、より注意容量を必要とする可能性を示唆する結果でもある。例えば一般道から高速道路への最初の合流では、速度を合わせる必要があり、運転がシビアになると想像できる。すなわち、これまでのプローブ刺激法での検討は、一般道と高速道路の難易度の比較に留まるものであった。今後はそれぞれの場面ごとで異なる難易度を検討する事が期待され

る。同様の検討は Takeda and Kimura (2014) でも行われている。この研究では 20 秒の時間分解能での検討が可能であると報告されている。今後は信号検出技術の向上により、短い時間分解能による時々刻々と変動する注意容量の推定が期待される。

5. おわりに

本稿は、観察することのできない心的過程を客観的に検討するための手法をいくつか紹介した。心的過程の結果として表出される行動的反応と、脳活動に伴って頭皮上から計測される脳波・事象関連脳電位を指標とした注意容量の推定が検討されている。人は同時に複数の対象に注意を向け、並列的な処理が行える。一方で、処理容量には限界があるため、資源を適切に分割する必要がある。実験室場面では参加者に課題を教示する事によって、どちらが主課題であるか明示する。また、2次課題は主課題を妨げないよう実験的な設定を行う。しかしながら、日常場面ではどの課題が主たるものか、処理するべき刺激はどれか、生活体自身が選択を行わなければならない。しばしば、これらの選択の誤りが事故を起こす原因にもなっている。実験的な検討は、実際の生活場面を想定すると必ずしも妥当性が保証されているわけではない。もし研究の到達点が安全な社会生活であるならば、注意容量に余裕のある単一の課題のみ行わせるように、行動を制限する社会を実現すれば良い。しかしそうではない。容量の限界をサポートする技術が工学的に開発され、衝突前にブレーキをかける等、今日では人の意志を超えた制御を可能とした製品が広まっている。今後、さらにサポートの割合が拡大すると、人と機械との主従関係が曖昧な世の中になっていくのではないかと予想される。こうした中で人は処理能力を過信し、また注意は散漫であるため、膨大な情報の中で自分の居場所や注意を向けるべき箇所を見失うのではないかと危惧される。しかしながら、これらの問題もまた心理学的なものであり、こうした問題を解決する為にも心理学研究は今後、益々役立てるべきであると考えられる。

References

- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.
- Kida, T., Nishihira, Y., Hatta, A., Wasaka, T., Tazoe, T., Sakaiiri, 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.
- Kramer, A.F., Trejo, L.J., & Humphrey, D. (1995). Assessment of mental workload with task-irrelevant auditory probes. *Biological Psychology*, 40, 83-100.
- 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, 25-35.
- 入戸野宏 (2006). 映像に対する注意を測る一事象関連電位を用いたプローブ刺激法の応用例一. *生理心理学と精神生理学*, 24, 5-18.

- 重光ゆみ・入戸野宏・堀忠雄 (2007). 振動プローブ刺激に対する P300 を指標とした視聴覚体験に対する注意配分の検討. *生理心理学と精神生理学*, 25, 1-9.
- Sirevaag, E.J., Kramer, A.F., Wickens, C.D., Reisweber, M., Strayer, D.L., & Grenell, J.F. (1993). Assessment of pilot performance and mental workload in rotary wing aircraft. *Ergonomics*, 36, 1121-1140.
- 杉本史恵・野村亜弓・片山順一 (2011). 肩への電気刺激に対する P300 を指標とした無関連プローブ法の検討. *精神生理学と生理心理学*, 29, 13-20.
- Takeda, Y., & Kimura, M. (2014). The auditory N1 amplitude for task-irrelevant probes reflects visual interest. *International Journal of Psychophysiology*, 94, 35-41.
- 玉越 勢治・中 弘樹・片山 順一 (2013). 主課題の聴覚刺激の有無が聴覚 2 次課題の P300 に及ぼす影響 [抄録]. *生理心理学と精神生理学*, 31, 134.
- 玉越勢治・長江新平・山村智弘・義平真規・八木昭宏・片山順一 (2012, 12). 課題難易度を反映する ERP P300 のブロック内変動の検討. 日本基礎心理学会第 31 回大会ポスターセッション.
- Wickens, C., 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.