

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14273

研究課題名（和文）認知的要求の推移にともなう注意資源配分の調整メカニズム

研究課題名（英文）Investigation of the mechanism of modulation of attentional resource allocation

研究代表者

杉本 史恵 (Sugimoto, Fumie)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員

研究者番号：10738917

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は注意資源配分の調整メカニズムの検討を目的として、注意資源配分量の評価技術の時間解像度向上、および、自らの動作に基づいた予測による注意資源配分調整の検討を行なった。事象関連脳電位（ERP）を用いた注意資源配分量評価技術（課題非関連プローブ法）の手続きを改変することで、評価時間を短縮できる可能性を示した。また、自らが動作を行う時に、動作の結果（i.e., 音の変動）についての予測が生じ、その予測によって動作の結果の処理に配分される注意資源量が調整されることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって注意資源配分評価技術の時間解像度が向上した結果、注意資源配分を評価可能な作業環境が拡大されることにより、快適で安全な作業環境の構築や、人間に適合したシステムの開発が加速すると期待できる。さらに本研究は、自らの連続的な動作の結果の予測によって注意資源配分調整が行われることを初めて示した。本成果を応用することで、予測と実際の動作結果の一致度、すなわち「モノを思い通りに操作できている感覚」の評価技術の開発が進むと期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research was to investigate the mechanism of the modulation of attentional resource allocation. The first aim was to establish a method that could assess the allocation of attentional resource with high temporal resolution: event-related brain potentials (ERPs) elicited by auditory stimuli unrelated to a current cognitive task (i.e., probes) could be used to evaluate the amount of attentional resource allocated to the task. The experimental results showed that manipulating the time intervals between probes could improve the temporal resolution in evaluating the allocation of attentional resources. The second aim was to investigate the top-down modulation of attentional resource allocation. The experimental results demonstrated that the allocation of attentional resource could be modulated by the prediction of consequences of one's own action.

研究分野：生理心理学

キーワード：注意資源 事象関連脳電位（ERP） 認知的要求 予測

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

私たちは日常の中で様々な認知作業を行なっている(たとえば自動車の運転)。適切に作業を行うためには、作業の認知的要求(課題難度)に応じて、適切な量の注意資源を作業関連の認知情報処理に配分する必要がある。もし配分された注意資源が少なすぎれば作業パフォーマンスが低下し、逆に多すぎれば強い疲労が生じてしまう。このように注意資源の配分は作業の安全性や効率性に密接に関わる。そのため注意資源配分量の客観的な評価技術や、注意資源を適切な状態に誘導する介入技術に対する社会的ニーズは高い。このニーズを背景に、脳波などの生体信号計測を用いた、注意資源配分量の評価技術が発展してきた。その一方で、注意資源配分の調整メカニズムは十分に解明されていない。作業中には、その認知的要求レベルに応じて、注意資源配分の調整が必要となる。その調整がどのような特性をもち、どのような要因の影響を受けるのかが明らかになれば、将来的には評価だけでなく、注意資源配分を適切な状態に誘導する介入技術の開発にも資することができる。以上の背景から本研究は、注意資源配分の調整メカニズムの検討を目的として、(1) 注意資源配分量の評価技術の時間解像度向上、および(2) 自らの動作に基づいた予測による注意資源配分調整の検討を行なった。

2. 研究の目的

本研究は、注意資源配分の調整メカニズムの検討を目的として、以下の研究を実施した。

(1) 注意資源配分量の評価技術の時間解像度向上

注意資源配分の調整メカニズムを検討するためには、作業や課題に対して配分された注意資源量の評価技術の確立が重要である。これまでに開発がすすめられてきた、事象関連脳電位(event-related brain potentials: ERP)を指標とする評価技術(i.e., 課題非関連プローブ法)は、様々な作業環境に適用できる高い汎用性を持っているが、その利便性には向上の余地がある。これまでの課題非関連プローブ法(Takeda et al., 2016, *Biol. Psychol.*)では数分単位での評価が限界であったが、さらに短い時間単位での評価が可能になれば、例えば数十秒単位での評価が求められる作業環境へも適応範囲を拡大できる。そこで、注意資源配分量の評価時間の短縮を目的として、この評価技術手続きの改変・最適化を行った。

(2) 自らの動作に基づいた予測による注意資源配分調整の検討

注意資源配分は、作業の難しさなどに応じたボトムアップの制御だけでなく、予測によるトップダウンの制御が行われる(Kahneman, 1973, *Attention and Effort*)。例えば、私たちがモノを操作する時、自らの行為の結果として、モノからどのような聴覚・視覚・または体性感覚情報がフィードバックされるかを予測している。そしてその予測と一致した情報は、一致しなかった情報に比べて少ない注意資源で処理される(Schröger et al., 2015, *Eur. J. Neurosci.*)。この予測による注意資源配分の調整は、自らの操作によって生じた刺激に対する脳波反応の減衰として現れる。しかしこれまで、自らの動作に基づいた予測による注意資源配分の調整は、ボタン押しのような離散的な動作でしか報告されていない。そこで、連続的な動作を行なっているときにも、予測と一致する自らの行為結果の処理に対する、注意資源配分の減少が生じるのかを検討した。

3. 研究の方法

(1) 注意資源配分量の評価技術の時間解像度向上

課題中に呈示される課題非関連な聴覚刺激(プローブ)に対する事象関連脳電位(ERP)を指標として、課題への注意資源配分量を評価できる: プローブに対するERPのN1とP2の振幅は、課題への注意資源配分量が少ない場合に比べて多い場合に減衰する。本研究は、プローブの呈示時間間隔(stimulus onset asynchrony: SOA)の操作によって、注意資源配分量の評価時間を短縮できるか検討した。プローブの平均SOAを短くすると、一定時間内に呈示できるプローブ数が増えて脳波データの加算回数が増えるため、短い計測時間でERPを評価できる可能性がある。また変動SOAよりも固定SOAの方が最短のSOAが長いので、ERPの振幅低下に伴う床効果が生じにくい可能性がある。実験ではプローブSOAについて平均(長・短)と変動の有無(変動・固定)の組合せによる4条件を設定し、運転ゲーム課題中(低速度・高速度)に呈示した。速度条件間でERP振幅に有意差(低速度に比べて高速度条

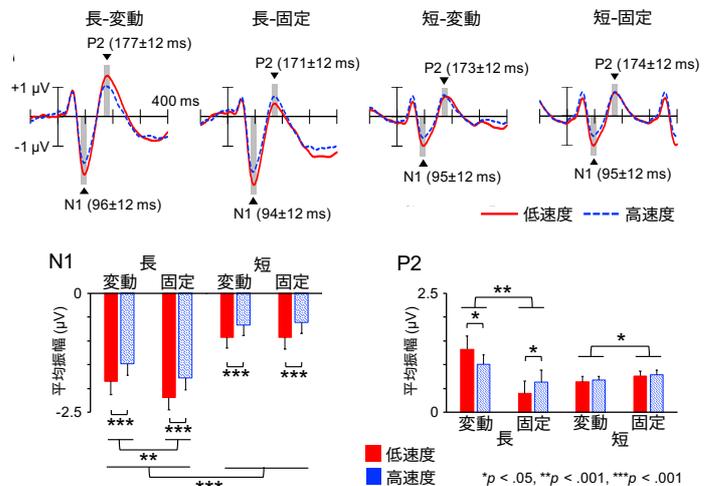


図1. 総加算ERP波形(FCz)およびN1とP2平均振幅

件で減衰)を得るために必要な脳波データ長が短い SOA 設定ほど、短時間で注意資源配分量を評価できると示唆される。

実験には成人 28 名 (18–32 歳) が参加した。実験参加者の課題は、運転ゲームで急カーブの多いコースを、コースアウトせずにできるだけ速く走行することであった。走行可能な最高速度は、低速度条件で約 30 km/h、高速度条件で約 200 km/h であった。走行中にプローブを呈示した。プローブ呈示の SOA は、従来のプローブ呈示手続きである長-変動条件で 400、500、600、700、800 ms (平均 600 ms)、長-固定条件で 600 ms、短-変動条件で 200、250、300、350、400 ms (平均 300 ms)、短-固定条件で 300 ms であった。速度条件 (2) とプローブの SOA 条件 (4) の組み合わせからなる 8 条件を実施し、各条件で課題中の 460 秒間の脳波データを記録した。

各条件の 460 秒間の脳波データについて、プローブ呈示から -100–400 ms の区間を加算平均して N1 と P2 の平均振幅値を算出し、3 要因 (2 : 平均 SOA × 2 : SOA 変動 × 2 : 速度) 分散分析を行った (図 1)。さらに各 SOA 条件において、分析に用いる脳波データ長が 10 から 460 秒 (10 秒きざみ) の各場合について、速度条件間で N1 振幅に有意差が得られるか検討した。ブートストラップ法を用いて N1 差分値 (高速度ひく低速度) の 95% 信頼区間 (下側 2.5% 点) を推定した。下側 2.5% 点 が 0 より大きい場合は、低速度に比べて高速度条件で N1 振幅が有意に小さいことを示す。統計解析の結果、N1 振幅は全ての SOA 条件で低速度に比べて高速度で小さかった ($ps < .001$)。P2 振幅は長-変動条件のみ低速度に比べて高速度条件で小さかった ($p < .05$)。また、長-変動、長-固定、短-変動、短-固定 SOA 条件について、分析に用いる脳波データ長がそれぞれ 90、70、80、60 秒以上の場合に、N1 差分値の下側 2.5% 点 が 0 を上回った。

(2) 自らの動作に基づいた予測による注意資源配分調整の検討

① 動作中の注意資源配分調整

外部から与えられた聴覚刺激に比べて、自らの離散的な動作 (e.g., ボタン押し) によって生じた聴覚刺激に対する ERP の振幅は減衰する。この ERP の減衰は、自らの動作に基づいた予測による注意資源配分の調整を反映していると考えられる。本研究は、自らの連続的な動作によって変動する聴覚刺激に対して ERP の減衰が起きるかを検討した。ハンドル操作条件では音の系列が呈示され、実験参加者はハンドル操作によって音の周波数を変化させた。音再生条件ではハンドル操作条件と同じ音の系列が再生され、実験参加者は何も操作を行わずに音を聞いた。自らの連続的な動作の結果について予測処理が生じるならば、音再生条件に比べてハンドル操作条件で音に対する ERP の振幅が減衰すると予測される。

実験には成人 43 名 (19–35 歳) が参加した。ハンドル操作条件では音 (50 ms、75 dB SPL) の系列が呈示され (刺激間隔 400 ms)、実験参加者はハンドルを連続的に回転させて音の周波数を変化させた。音の系列は 1 試行につき 20 秒間呈示され、その間実験参加者は自由なタイミングでハンドルの回転方向を切り替えた。音の周波数はハンドル角度に対応して 800–1800 Hz の範囲で変化した: 例えばハンドルを左に回すと周波数が徐々に低くなり、右に回すと徐々に高くなった。音再生条件ではハンドル操作条件で生成された音の系列が再生され、実験参加者は何も操作を行わずに音を聞いた (図 2)。音の系列に対する注意を統制するため、

両条件でターゲット音検出課題を課した。ターゲット音は 1000 Hz、持続時間 80 ms の音で、5 試行につき 1 または 2 試行において、試行中に 1 回だけ呈示された。実験参加者は各試行の終了時にターゲット音の有無を回答した。実験は 5 試行を 1 ブロックとして、2 条件を 4 ブロックずつ交互に実施した。課題中の脳波を頭皮上 23 部位から鼻尖を基準として記録し、音の呈示から -100–400 ms の区間を加算平均し、得られた ERP の N1、Tb、P2、および N2 の平均振幅値を算出した。これらの平均振幅値について t 検定 (ハンドル vs. 音再生) を行なった結果、Tb および N2 の振幅は音再生条件に比べてハンドル操作条件で小さかった ($p < .001$)。

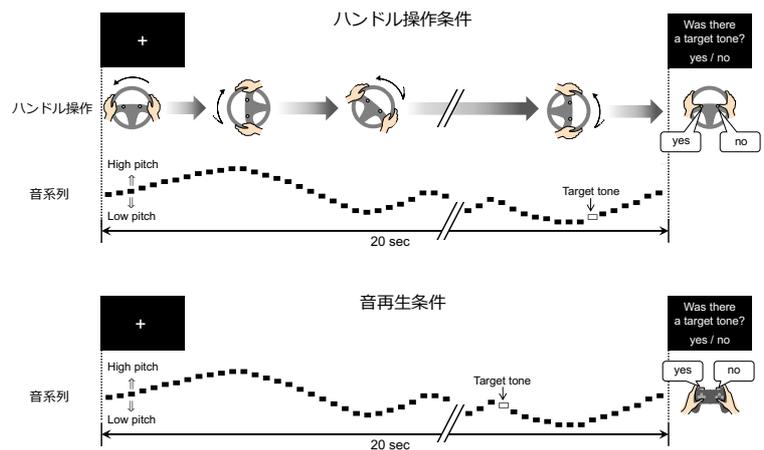


図 2. 各条件の 1 試行の流れ

② 予測の効果の検証

上記①の成果として、音再生条件に比べてハンドル操作条件において ERP の減衰が生じた。この ERP 減衰が、自らの動作の結果 (i.e., 音の周波数変化) についての予測が生起することによって生じるのか (仮説 1)、あるいは動作遂行に注意資源が利用される結果、音の処理に利用できる注意資源が減少することによって生じるのか (仮説 2) を検討した。ハンドル操作条件では音系列が呈示され、実験参加者はハンドル操作によって音の周波数を変化させた。まれに、周波数がハンドル操作と一致しない逸脱音が呈示された。音再生条件ではハンドル操作条件と同じ音系列が再生された。逸脱音に対する N2 と P3 の振幅は、仮説 1 が真であれば音再

生条件に比べてハンドル条件で増大し、仮説 2 が真であれば音再生条件に比べてハンドル条件で減衰すると予測される。

実験には成人 20 名 (18–31 歳) が参加した。実験①と同様に、ハンドル操作条件では、実験参加者がハンドルを連続的に回転させている間に、音 (50 ms、75 dB SPL) の系列が 1 試行につき 20 秒間呈示された (刺激間隔 400 ms)。音の周波数はハンドル角度に対応して 800–1800 Hz の範囲 (標準音) で変化した。周波数が 400 Hz (Low) または 2400 Hz (High) の逸脱音が、1 試行中に 2 または 3 回呈示された。音再生条件ではハンドル操作条件で生成された音系列が再生され、実験参加者は何も操作を行わずに音を聞いた。音系列に対する注意を統制するため、両条件で標的音検出課題を課した。標的音は持続時間 100 ms で、1 試行中に 0 または 1 回呈示された。実験参加者は各試行の終了時に標的音の有無を回答した。実験は 5 試行を 1 ブロックとして、2 条件を交互に 8 ブロックずつ実施した。課題中の脳波を頭皮上 23 部位から鼻尖を基準として記録し、音の呈示から -100–400 ms の区間を加算平均し、得られた ERP の N1、Tb、P2、および N2 の平均振幅値を算出した。また逸脱音–標準音の差分 ERP から、逸脱音に対する N2 と P3 の平均振幅を算出した。標準音に対する N1、Tb、P2、および N2 の平均振幅値について *t* 検定 (ハンドル vs. 音再生) を行なった結果、いずれも音再生条件に比べてハンドル操作条件で小さかった ($p < .05$)。また、逸脱音に対する N2 と P3 の平均振幅について 2 要因 (2 : ハンドル操作、音再生 × 2 : Low 逸脱、High 逸脱) 分散分析を行った結果、いずれも音再生条件に比べてハンドル操作条件で大きかった。

③ 能動的注意の影響

自らの連続的な動作によって周波数が変動する音に対する ERP の減衰が、音が課題非関連な場合にも生じるのか、また生じる場合は、自らの動作に由来する予測が関与しているのかを検討した。ハンドル操作条件では視覚弁別課題中にハンドル操作を行った。その間に課題非関連な音系列が呈示され、音の周波数はハンドル角度に応じて変化した。まれに逸脱音が呈示された。音再生条件ではハンドル操作をせずに視覚弁別課題を行い、課題中にハンドル操作条件と同じ課題非関連な音系列が再生された。自らの連続的な動作によって生成された課題非関連な音に対して ERP の減衰が生じるならば、音に対する ERP 振幅は音再生よりハンドル操作条件で減少すると予測される。これに自らの動作に由来する予測が関与しているならば、逸脱音に対する ERP 振幅は音再生よりハンドル操作条件で増大すると予測される。

実験には成人 32 名 (19–35 歳) が参加した。視覚弁別課題では直径 3.0 cm の丸図形が呈示された。25 秒間の 1 試行中に 2–4 回、丸図形の直径が 120 ms 間縮小した (ターゲット)。ターゲットの直径は低難度条件で 1.5 cm、高難度条件で 2.9 cm であり、試行終了時にターゲット数の報告を求めた。音呈示のハンドル操作条件では、参加者は視覚弁別課題中にハンドルを連続的に回転させた。課題中に音 (50 ms、75 dB SPL) の系列が呈示され (刺激間隔 400 ms)、音の周波数はハンドル角度に対応して 800–1800 Hz の範囲 (標準音) で変化した。逸脱音 (400 Hz) が 1 試行中に 2–3 回呈示された。音再生条件ではハンドル操作は行わず、ハンドル操作条件で生成された音系列が視覚弁別課題中に再生された。いずれの条件でも音を無視するよう参加者に教示した。課題中の脳波を頭皮上 23 部位から鼻尖を基準として記録し、音の呈示から -100–400 ms の区間を加算平均し、得られた ERP の N1、Tb、P2、および N2 の平均振幅値を算出した。また逸脱音–標準音の差分 ERP から、逸脱音に対する N2 と P3 の平均振幅を算出した。標準音に対する N1、Tb、P2、および N2 の平均振幅について 2 要因 (2 : 低/高視覚難度 × 2 : ハンドル操作、音再生) 分散分析を行った結果、N1、Tb、P2、および N2 の振幅は、いずれも音再生条件に比べてハンドル操作条件で小さかった ($p < .01$)。また、逸脱音に対する N2 と P3 の平均振幅について 2 要因分散分析を行った結果、P3 の振幅は、音再生条件に比べてハンドル操作条件で小さかった ($p = .006$)

4. 研究成果

(1) 注意資源配分量の評価技術の時間解像度向上

速度条件間で ERP 振幅に有意差を得るために必要な脳波データ長は、従来のプローブ呈示手続きである長-変動 SOA 条件に比べて、他の SOA 条件で短かった。この結果から、プローブ呈示手続き (SOA) を操作することで、課題非関連プローブ法を用いた注意資源配分量評価にかかる時間を短縮できる可能性が示された。

課題非関連プローブ法は、様々な作業環境で注意資源配分量を評価可能な、独自性の高い技術である。本研究によってこの技術の時間解像度が向上し、注意資源配分量を評価可能な作業環境が拡大する結果、快適で安全な作業環境の構築や、人間に適合したシステムの開発が加速すると期待できる。

(2) 自らの動作に基づいた予測による注意資源配分調整の検討

① 動作中の注意資源配分調整

自らの連続的な動作によって変動する聴覚刺激に対して、ERP の Tb と N2 の減衰が生じた。この結果から、連続的な動作を行なっているときにも、予測と一致する自らの行為の結果に対する、注意資源配分の減少が生じることが示された。

② 予測の効果の検証

標準音に対する N1、Tb、P2 および N2 の振幅は音再生条件に比べてハンドル操作条件で減少したことか

ら、実験①で報告した自らの連続的な動作によって変動する聴覚刺激に対する ERP の減衰が再現された。逸脱音に対する N2 と P3 の振幅はリスニング条件に比べてハンドル操作条件で増大したことから、自らの連続的な動作によって変動する音に対する ERP の減衰には、自らの動作の結果についての予測と、その予測による注意資源配分の調整が関与しているという仮説が支持された。

③ 能動的注意の影響

標準音に対する N1、Tb、P2、および N2 の振幅が音再生条件に比べてハンドル操作条件で減少したことから、自らの連続的な動作によって生成された課題非関連な音に対して ERP の減衰が生じることが示された。一方で逸脱音に対する P3 の振幅は音再生条件に比べてハンドル操作条件で減少したことから、標準音に対する ERP の減衰は、自らの動作に基づいた予測による注意資源配分の調整を反映したものではない可能性がある。自らの動作に由来する予測による注意資源配分の調整が生じるには、音に対する能動的な注意の関与が必要であることが示唆された。

本研究は、私たちが日常的に行っている連続的な動作において、その結果の予測による注意資源配分調整が行われることを初めて示した。今後の展望として、本研究が明らかにした、自らの動作に由来する予測による ERP の減衰という現象は、予測された動作結果と実際の動作結果の一致度の指標としても利用できる可能性がある。そのような指標として利用できれば、「モノを思い通りに操作できている」という感覚の評価技術が開発でき、将来的には、人間に適合した使いやすいシステムや製品の開発にも貢献できると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sugimoto Fumie, Kimura Motohiro, Takeda Yuji	4. 巻 166
2. 論文標題 Attenuation of auditory N2 for self-modulated tones during continuous actions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biological Psychology	6. 最初と最後の頁 108201 ~ 108201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biopsycho.2021.108201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugimoto Fumie, Kimura Motohiro, Takeda Yuji	4. 巻 177
2. 論文標題 Investigation of the optimal time interval between task-irrelevant auditory probes for evaluating mental workload in the shortest possible time	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Psychophysiology	6. 最初と最後の頁 103 - 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijpsycho.2022.04.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 杉本史恵, 木村元洋, 武田裕司
2. 発表標題 課題非関連プローブ法を用いた注意資源配分量の評価—プローブ呈示時間間隔が評価時間に及ぼす影響—
3. 学会等名 第39回日本生理心理学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本史恵, 木村元洋, 武田裕司
2. 発表標題 自己の連続的動作に応じて変化する音に対するERPの減衰—予測の関与の検討—
3. 学会等名 第40回日本生理心理学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本史恵, 木村元洋, 武田裕司
2. 発表標題 自己の連続的動作に応じて変化する音に対するERPの減衰－音が課題非関連の場合－
3. 学会等名 第41回日本生理心理学会大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関