

瞳孔径変動量は注意状態を支える青斑核の一過性活動に影響される

山下 純平
寺島 裕貴
米家 惇
丸谷 和史
熊田 孝恒

NTT アクセスサービスシステム研究所
京都大学大学院情報学研究科
NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT コミュニケーション科学基礎研究所
京都大学大学院情報学研究科

自動車運転などの作業中に注意状態が低下すると、致命的なヒューマンエラーにつながる恐れがあるため、外部から注意状態を推定することは非常に有用である。これまでの研究で、注意状態は青斑核ノルアドレナリン系 (LC-NE) の状態に影響されるため、LC-NE の活性度が低下すると増大する瞳孔径変動量から、注意状態低下を推定できることが示唆されている。しかし、LC-NE には持続性と一過性の2種類の活動が存在しており、瞳孔径変動量の増大がLC-NE のどちらの活性度低下をとらえているかは明確ではなかった。本研究では、LC-NE の持続性活動が低下すると成績が低下する一方で、一過性活動が低下すると成績が向上する高速逐次視覚呈示 (RSVP) 課題を用いて、瞳孔径の変動量がLC-NE のどちらの活動に影響されているか調べた。その結果、瞳孔径の変動量増大はRSVP 課題の成績向上と正に相関しており、瞳孔径の変動量はLC-NE の一過性活動と関係している可能性が示唆された。

Keywords: attention, micro-pupillary unrest index, locus coeruleus-norepinephrine system, rapid serial visual presentation.

問題・目的

自動車運転などの作業中に注意状態が低下すると、致命的なヒューマンエラーにつながる恐れがあるため、外部から注意状態を推定することは非常に有用である。注意状態を支えている脳内メカニズムに、青斑核ノルアドレナリン系 (Locus Coeruleus and Norepinephrine system: LC-NE) がある。青斑核は、脳内のほぼ全領域に対してノルアドレナリンを投射する経路を持っており、これにより、刺激に対する応答程度、すなわち注意状態を調節していると考えられている (Aston-Jones & Cohen, 2005)。

瞳孔径は、このようなLC-NEの活動と相関することが知られている。そのため、瞳孔径を用いて、LC-NE が支える注意状態を推定できる可能性が報告されている。Yamashita et al. (2020) は、瞳孔径変動量を Micro-Pupillary Unrest Index (M-PUI) として定量化し、M-PUIの増大を注意状態低下の指標として用いる手法を提案している。Psychomotor Vigilance Taskを用いた検証の結果、M-PUIは注意状態 (ビジランス水準) を反映した反応時間 (RT) と正の相関を持っており、瞳孔径変動量の増大が注意状態 (ビジランス水準) 低下の指標となる可能性が示唆されている。

瞳孔径変動量の増大は青斑核に関連した注意状態の低下を予測したことから、青斑核の活動 (活性度) 低下を反映していると考えられる。しかしながら、LC-NEの活動には持続性と一過性の2種類が存在しており、瞳孔径変動量がどちらの活動を反映しているか明確ではなかった。

本研究では、高速に文字が切り替わりながら呈示される中で、2つのターゲットを検出することを求められる高速逐次視覚呈示課題 (RSVP課題) を用いて、瞳孔径変動量が反映するLC-NEの活動の種別を明らかにすることを目的とした。

RSVP課題では、睡眠はく奪が続き覚醒度が低下すると、2つのターゲット間の時間間隔 (Ia) にかかわらず、ターゲットの検出率が低下する (Gallegos et al., 2018)。LC-NEの活動のうち、持続性活動は、覚醒度と関連したものである。そのため、瞳孔径変動量の増大がLC-NEの持続性活動 (覚醒度) 低下を反映しているのならば、全てのIaにおいて、瞳孔径変動量の増大と、ターゲット検出率の間には負の相関がある (変動量の増大と検出率低下が結びつく) はずである。

一方、RSVP課題は、LC-NEのもう1つの活動である一過性の活動とも関係している。LC-NEの一過性の活動は、顕著な、あるいは課題に関連した刺激が出現した際に、その信号を瞬時に増強することに関与している。RSVP課題では、1つ目のターゲットに対して一過性活動を強く生じさせると、Iaが短い場合のみ、2つ目のターゲットの検出が阻害され、検出率が低下する (Wierda et al., 2012)。そのため、瞳孔径変動量の増大がLC-NEの一過性活動低下を反映しているのであれば、瞳孔径変動量と、2つ目のターゲット検出率の間に正の相関がみられる (変動量の増大と検出率向上が結びつく) はずである。加えて、その相関はIaが短い場合に強いはずである。

方法

実験参加者 20名（男性5名，女性15名，年齢20-43歳）が参加した。有効データは19名であった。

装置 実験参加者から60 cm離れたLCDディスプレイ（144 Hz, 27-in, 1920×1080 pixels）に刺激が呈示された。実験は暗幕中に行い，光源から薄暗い明かりを灯していた。SR Research Eyelink 1000を用いて，左眼の瞳孔径をサンプリングレート1000 Hzで計測した。

刺激・手続き 黒い背景の中央に，10個の文字（視角1°）が高速逐次呈示された（図1）。呈示された文字のうち，1文字は赤色（ターゲット1: T1）であり，残りは白色であった。白色の文字のうち，1つは数字（ターゲット2: T2）であり，残りはアルファベットであった。T1の出現タイミングはランダムであったが，T2はT1の2つ後（lag 2），4つ後（lag 4），6つ後（lag 6）のいずれかのタイミングで出現した。実験参加者は，T1およびT2を報告することを求められた。各lagは40試行あり，計120試行の課題を行った。

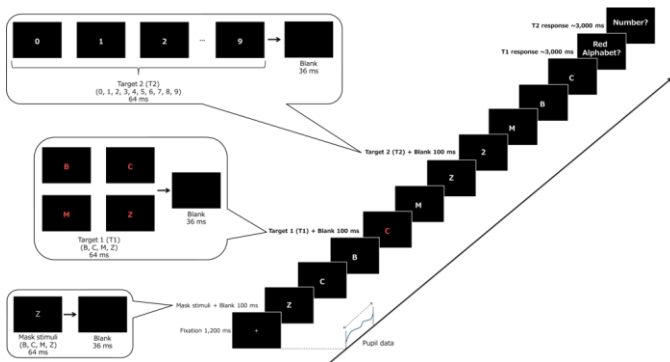


図1. 本実験のRSVP課題における1試行の流れ

M-PUI算出 文字の呈示開始直前の固視点呈示中（1200 ms）の瞳孔径を用いた。瞬目区間を無効区間として除外した。瞳孔径の時系列データを長さ50 msのハンギング窓で平滑化した後，その変動量を有効区間の長さで除算した値を全試行について算出し，その平均を実験参加者ごとのM-PUIとして算出した（図2，詳細はYamashita, et al. (2020) になった）。

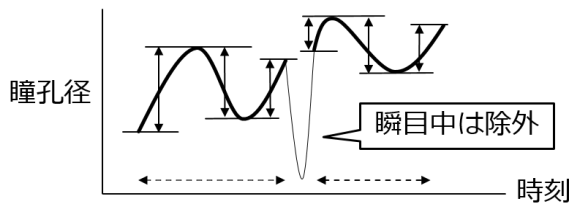


図2. M-PUIの算出方法。実線が瞳孔径時系列をあらわす。M-PUIは変動量（実線の矢印の長さ合計）を有効区間の長さ（破線の矢印の長さ合計）で除算することで算出された。

結果

全てのlagで，T1正答率（T1 correct）に比べ，T1正当後のT2正答率（T2|T1 correct）は低かった。各lagの

T2|T1 correctは，lag 2で68.9%，lag 4で77.2%，lag 6で78.0%であり，lag 2とlag 4の間にのみ有意な差が認められた ($t(18)=2.59, p<.05$)。

各lagにおける，各実験参加者の平均M-PUI（Mean M-PUI）と，T2|T1 correctの関係を図3に示した。すべての相関は正であり，Lagが短いほど相関は強かった。並び替え検定の結果，Lag 2においてのみ，平均M-PUI（Mean M-PUI）とT2|T1 correctの間に有意な正の相関が認められた ($r=0.39, p<.05$)。

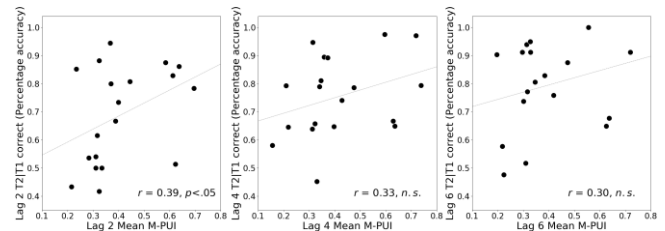


図3. 各lagにおける各実験参加者の平均M-PUI（Mean M-PUI）とT2|T1 correctの関係

考察

T1から200 ms以内に出現したT2の検出率は，T1から400 ms以上経ってから出現したT2の検出率に比べて低かった。このことから，特にlag 2において，青斑核の一過性活動と関連したT2の見落としが生じていたことが示唆された。

全てのlagにおいて，瞳孔径変動量（平均M-PUI）とT2|T1 correctとの間には正の相関があったが，有意な正の相関はlag 2においてのみ認められた。これらのことから，瞳孔径変動量は青斑核の一過性活動を反映していたことが示唆された。

参考文献

- Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). AN INTEGRATIVE THEORY OF LOCUS COERULEUS-NOREPINEPHRINE FUNCTION: Adaptive Gain and Optimal Performance. *Annual Review of Neuroscience*, 28(1), 403-450.
- Gallegos, C., García, A., Ramírez, C., Borrani, J., Azevedo, C. V., & Valdez, P. (2018). Circadian and homeostatic modulation of the attentional blink. *Chronobiology International*, 36(3), 343-352. doi:10.1080/07420528.2018.1543315
- Wierda, S. M., Rijn, H. V., Taatgen, N. A., & Martens, S. (2012). Pupil dilation deconvolution reveals the dynamics of attention at high temporal resolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(22), 8456-8460. doi:10.1073/pnas.1201858109
- Yamashita, J., Terashima, H., Yoneya, M., Maruya, K., Koya, H., Oishi, H., Nakamura, H., Kumada, T., (2020). Pupillary fluctuation amplitude before target presentation reflects vigilance level in Psychomotor Vigilance Tasks. Manuscript submitted