

# 瞳孔反応に対する検索依存性について： 再認記憶におけるトップダウン検索に着目した実験的検討 Task Dependence on Pupillary Responses Experimental Investigation from top-down retrieval in Recognition Memory

大石 充希<sup>†</sup>, 林 勇吾<sup>‡</sup>  
Mitsuki Oishi, Yugo Hayashi

<sup>†</sup>立命館大学大学院人間科学研究科, <sup>‡</sup>立命館大学総合心理学部

<sup>†</sup>Graduate School of Human Science, Ritsumeikan University

<sup>‡</sup>College of Comprehensive Psychology, Ritsumeikan University

<sup>†</sup>cp0095pf@ed.ritsumei.ac.jp <sup>‡</sup>yhayashi@fc.ritsumei.ac.jp

## 概要

近年、長期記憶において瞳孔反応が課題に依存することが確認されている。しかし、この課題依存性の原因である検索の違い(ボトムアップとトップダウン)に関する検討は十分でない。本研究では両検索を促すことができる fan 課題に着目し、トップダウン検索における情報量の多さに対する瞳孔反応を検討した。結果として、情報量の多さに対する認知負荷により瞳孔が散大した。今後は、ボトムアップ検索で検討された瞳孔散大を本研究手法から調べていく。

キーワード：瞳孔計測, fan 課題, トップダウン検索

## 1. はじめに

瞳孔径が長期記憶における記憶の強さに反応することは新旧効果として確認されている。新旧効果とは学習の有無を判断する再認課題において、非学習刺激よりも学習刺激で瞳孔が散大する現象(Vo et al, 2008)である。Otero et al(2011)は、意味処理のような深い符号化では知覚情報への処理といった浅い符号化に比べて、再認判断時の瞳孔が散大することを示した。また、Siefert et al.(2024)は単純な記憶の強さだけでなく、記憶内における視空間的文脈(色や位置情報)にも瞳孔が反応することを示した。記憶内における文脈情報の参照量に伴う瞳孔散大は synergistic ephory(Tulving, 1972)というプロセスに対する瞳孔の役割を新たに示唆する結果であった。synergistic ephory とは、エピソード記憶を想起する際に外部刺激から適切な情報を抽出し、記憶された利用可能な情報と組み合わせる相互作用的なボトムアッププロセスのことである。

上記の通り瞳孔径と記憶の強さには正の関係が確認されているが、負の関係も存在する。例えば、再生課題において、再生すべき情報量が単純に多い場合や同じカテゴリに属す単語を再生し続けた際に瞳孔の散大が

確認された(van Rijn et al., 2012; Johansson et al, 2018)。Siefert et al. (2024)は、この結果は知識間の干渉による弱い記憶に対して瞳孔が散大していると捉え、再認課題と再生課題が持つ記憶プロセスの違いが瞳孔と記憶の強さの関係を変化させていると考えた。具体的に、再認課題においては外部刺激と利用可能な記憶情報の相互作用的なボトムアップ検索に、再生課題では記憶情報そのものを生成する努力的なトップダウン検索に依存するという。また、2つの記憶プロセスの相対的な重要性による瞳孔役割の変化はどのような記憶パラダイムにおいても成り立つことが推察される(Siefert et al, 2024)。

記憶プロセスと瞳孔反応の関係性は最近になり焦点が当てられ、実験的検討は十分でない。例えば、パラダイムや心理的要因において統制されておらず、記憶プロセスの相対的な重要性による瞳孔への影響は不明瞭である。そこで、本研究では、先行研究(Siefert, et al, 2024; van Rijn et al., 2012)において共通して注目される情報量に対する記憶プロセスの交絡に着目し、記憶プロセスと瞳孔反応の関係性を捉えていく。

fan 課題はこの目的を達成するにあたり有用だと考えられる。情報量の多さがもつ再認判断への影響には抑制効果と促進効果が fan 課題を通して確認されており、それぞれの効果が各記憶プロセスと対応づけることが考えられるからだ。fan 課題では概念の連想数(fan)が異なる複数の文を記憶することが求められ、連想数の多い概念を含む文ほど干渉が大きく、反応時間は増加する(Anderson., 1974)。この連想数に伴う干渉は活性化拡散モデルで説明される。具体的には、主語と述語に対応するノードが活性化し、さらに関連ノードへの均一な活性化が生じる。そのため、リンクの数が増加することによりノード一つ当たりの検索時間が増加し、反応時間も増える。しかし、連想数が多いほど手掛かりの増

加に伴い反応時間は短くなることも示されている (Reder & Wible, 1984). 上記の結果を踏まえて連想数に伴う抑制効果は Siefert et al. (2024)の考察における努力的なトップダウン検索に、利用可能な記憶情報が増加することに伴う促進効果はボトムアップ検索に対応すると考える。そのため、先行研究の考察が正しければ、いずれも連想数の高さが瞳孔散大につながるものが推測される。本研究は情報量の多さが持つ抑制効果と瞳孔の関係性を検討した結果を取り扱う。

fan 課題における連想数をもたらす干渉効果はワーキングメモリ容量(WMC: Working Memory Capacity)や符号化方略によって変化する。本研究はそれらの要因を考慮して fan 課題を瞳孔から評価する。WMC がもたらす干渉効果への影響は、WMC の差が注意資源の分配能力の差異と関連しているため生じるとされている (Bunting et al., 2004)。また、符号化方略においては符号化時に記憶されるメンタルモデルの数が記憶想起に影響を与えるとされている (Radvansky & Zacks., 1991)。例えば、単一の場所が複数のものと関連している場合と単一のものが複数の場所と関連している場合では後者の方が情報の統合は難しい。なぜなら、前者は符号化時に物と場所に関して1つのメンタルモデルを作ればよいが、後者は場所ごとの複数のメンタルモデルを作る必要があり、干渉の影響を強く受ける。本実験では前者を単一場所条件、後者を複数場所条件とする。

本研究では、情報量に対するトップダウン検索に伴う瞳孔反応について検討していく。具体的にはトップダウン検索における干渉効果と瞳孔径の関連について、WMC と符号化方略を実験に取り入れ確認する。実験条件は WMC を参加者間要因、符号化方略が含まれた fan の大きさを参加者内要因とした2要因混合計画で行う。仮説としては fan が大きくなるほど瞳孔が散大する (H1)、複数場所条件において瞳孔が散大する (H2)、WMC が低い人ほど fan の増加が瞳孔の散大をもたらすこと (H3)が考えられる。

## 2. 方法

### 2.1. 実験参加者

立命館大学生 42 名(女性 : 30 名, 男性 : 12 名) が実験に参加した。実験参加者の半数は WMC 高群, 残り半数を WMC 群とした。実験参加者は学内のシステムを使って募集した。

### 2.2. 装置

実験装置は、実験用 PC・60Hz で動作する Tobii Pro nano(トビー・テクノロジー株式会社)によって構成される。実験用 PC 内部では、実験参加者が行う fan 課題と日本語オペレーションスパンテストのプログラムを動作させる。fan 課題は JavaScript を、オペレーションスパンテストは小林・大久保 (2014)が Java を用いて構築したプログラムを利用した。実験は遮光カーテンを取り付けた実験室で実施した。

### 2.3. 刺激

「ものが場所にある。」という 24 の学習文が 15 のもの単語と場所単語をランダムに組み合わせて作成された。また同じ単語を用いて同数の非学習文を作成した。上記の学習文・非学習文では文間における単語の重複度が設定されており、この連想数が干渉の程度に対応している。具体的には、3つの条件を用意した。1つ目がもの単語と場所単語いずれも重複のない fan 低条件、2つ目がもの単語の重複はなく、場所単語の重複が3つある単一場所条件、3つ目が場所単語の重複はなく、もの単語の重複が3つある複数場所条件である。文の作成には大学生 26 名に対して行ったアンケート調査の結果を利用した。

### 2.4. 手続き

実験は fan 課題(学習セッションと再認記憶課題)とオペレーションスパンテストを行った。学習セッションでは実験参加者に 24 の文に対して確認テストに通過できるような暗記を求めた。確認テストは学習項目で使われていた 15 のもの単語と 15 の場所単語に関する計 30 個の手がかり再生テストを行った。再認記憶課題では、画面中央部に1つずつ提示される 48 個の単語組が学習項目か非学習項目かをキー押しで判断させた。また、瞳孔径を個人で比較できるようにベースラインの瞳孔径からの変化率を算出した。ベースラインは刺激が提示される前の 200ms 間の平均瞳孔径とした。オペレーションスパンテストは練習段階と本番段階から構成されており、記憶課題(記銘課題と再生課題)と計算課題、2つの複合課題からなる練習段階のうちに本番段階として複合課題を行わせた。再生課題において提示された文字を選択する際に提示された順で選ぶよう求めた。複合課題では記憶課題における記銘

と計算課題を2~7回繰り返し、その後、再生課題が行われた。繰り返し回数の6パターンはランダムな順で1回ずつ提示され、この6試行を1ブロックとし、3ブロック計18試行が行われた。計算課題においては正解率を85%以上で維持するように伝えた。

## 2.5. 実験計画

参加者間要因として2種類のWMC(低・高)、参加者内要因として符号化方略を含む3種類のfan(低・高(単一場所条件・複数場所条件))からなる2(WMCの程度) $\times$ 3(fanの程度)の2要因混合計画である。従属変数は瞳孔変化率の平均、ピーク値後の瞳孔変化率とした。

## 2.6. 分析

WMC(小・大)とfan数(低・高(単一場所条件・複数場所条件))の組み合わせごとに瞳孔変化率の平均値、ピーク値後の瞳孔変化率の比較を行った。Fan数が低い文はもの単語と場所単語が1対1で組み合わせたものであり、高い文は3対1(単一場所条件)か1対3(複数場所条件)で組み合わせたものである。ベースラインの瞳孔径からの変化率を算出し、2要因混合要因の分散分析を行った。ベースラインは刺激が提示される前の200ms間の平均瞳孔径とした。瞳孔データの事前処理として2mmを下回るもしくは8mmを上回る瞳孔径データ、2点前(1/30秒前)の計測データと比べて0.1mm以上異なるデータ点はアーチファクトとして消去した。さらに、誤再認、瞳孔データを適切に得ることが出来なかった実験参加者2名は分析から外した。WMCが小さいデータとしてオペレーションスパンテストの成績が下位50%、大きいデータとして上位50%とした。低群と高群の平均値は55.15点、71.80点で、標準偏差は7.54、3.11であった。

## 3. 結果

Figure1は条件ごとの瞳孔変化率に対する平均を示したグラフである。2要因混合要因の分散分析を行った結果、fanの主効果のみが有意( $F(2,76)=5.952, p<.01, \eta_p^2=0.135$ )であった。Bonferroni法を用いた多重比較を行った結果、fan1の平均1.041が複数場所の平均1.056よりも有意に小さく( $t(39)=3.118, p<.01$ )、単一場所の

平均1.048が複数場所の平均1.056よりも有意に小さい傾向があった( $t(39)=2.42, p<.1$ )。

Figure 1 条件ごとの瞳孔変化率の平均。エラーバーは標準誤差を示す。+は $p<.1$  \*\*は $p<.01$ を示す。

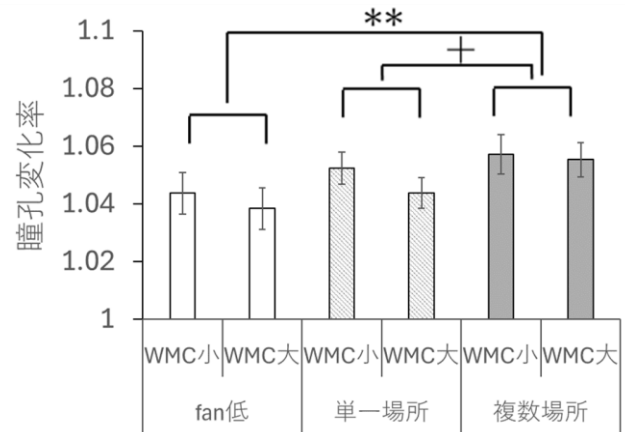
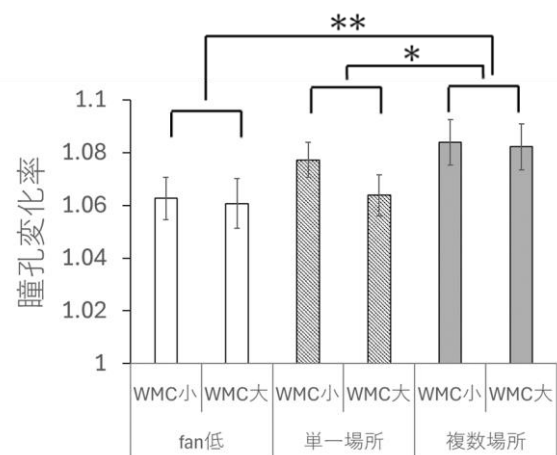


Figure 2は条件ごとのピーク値後の瞳孔変化率の平均を示したグラフである。2要因混合要因の分散分析を行った結果、fanの主効果のみが有意( $F(2,76)=6.427, p<.01, \eta_p^2=0.145$ )であった。Bonferroni法を用いた多重比較( $\alpha=0.05$ , 両側検定)を行った結果、fan低の平均1.062が複数場所の平均1.083よりも有意に小さく( $t(39)=3.133, p<.01$ )、単一場所の平均1.07が複数場所の平均1.083よりも有意に小さかった( $t(39)=2.694, p<.05$ )。

Figure 2 条件ごとのピーク値後の瞳孔変化率の平均。エラーバーは標準誤差を示す。\*は $p<.05$ , \*\*は $p<.01$ を示す。



## 考察

本研究は再認課題において再認課題時の連想数の多さが持つ効果と瞳孔反応の関係を検討することが目的

である。結果として、H1 と H2 が支持された。この結果から再認課題においても、同じ手掛かりから多くの記憶を思い出せる干渉効果の高い条件で瞳孔が大きくなることが示された。瞳孔が反応した理由として以下のメカニズムが考えられる(Johansson et al., 2018)。瞳孔は青斑核からのノルエピネフリンの放出と密接に関与しており、LC-NE 系は前頭前皮質を含む認知制御系に影響を与える。そして、複数の情報からの選択が生じる競合状態において前帯状皮質からの投射が青斑核と前頭前皮質の反応性を同時に増加させるため、本研究において瞳孔が散大したとされている。また、補足的な結果として Figure2 からメンタルモデルのような記憶表象に対しても瞳孔が反応することが示唆された。

本研究にて fan 課題における干渉効果に瞳孔が反応することが明らかとなった。これまでの再認研究 (McLaughlin et al., 2022; Montefinese et al., 2018)では干渉と瞳孔の関係性は十分に確認されなかったことを踏まえると本研究結果は意外かもしれない。一つの要因として2重過程モデルが考えられる。fan 課題は、特に回想性(recollection)に基づいた処理が主であり、親近性(familiarity)の性質は少ないように思われる。回想性とは記憶項目を学習したときの詳細を想起することであり、親近性は学習時の詳細まで想起することはできないが学習したことは認識できることを表している。そのため、十分に学習する時間が与えられる fan 課題では、数秒の学習しか行われな再認研究に比べて回想性を持った判断が多くなることが考えられる。そのため、トップダウン検索が高まり、情報量の多さが干渉を引き起こすことで、瞳孔が散大したと推測する。

今後は、先行研究に則り、ボトムアップ検索を高めた fan 課題に対して瞳孔から評価し、Siefert et al. (2024)が示した利用可能な情報量の増加が瞳孔を散大させることを調べる。2種類の記憶プロセスがもたらす瞳孔への影響を再認判断時の情報量という1つの要因から捉えることで、記憶プロセスに応じて瞳孔反応の原因が変わることを実験的に示せると考える。

#### 4. まとめ

本研究ではトップダウン検索がもたらす情報量に対する瞳孔反応を検討した。結果的に、トップダウン検索の性質が強いとされる再生研究と同様に再認課題においても記憶間の干渉に対して瞳孔が反応した。今後

は、同じ課題を用いて、ボトムアップ検索がもたらす情報量に対する瞳孔反応を検討する。

#### 謝辞

本研究は一部、立命館大学グローバルイノベーション機構(R-GIRO)による助成を受けた。ここに感謝の意を記したい。

#### 引用文献

- Anderson, J. R. (1974). Retrieval of propositional information from long-term memory. *Cognitive Psychology*, 6, 451–474. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(74\)90021-8](https://doi.org/10.1016/0010-0285(74)90021-8)
- Bunting, M. F., Conway, A. R.A., & Heitz, R. P. (2004). Individual differences in the fan effect and working memory capacity. *Journal of Memory and Language*, 51, 604–622. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2004.07.007>
- Johansson, R., Pärnamets, P., Bjernstedt, A., & Johansson, M. (2018). Pupil dilation tracks the dynamics of mnemonic interference resolution. *Scientific Reports*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23297-3>
- 小林 晃洋・大久保 街垂 (2014).日本語版オペレーションスパンテストによるワーキングメモリの測定 心理学研究, 85, 60-68. <https://doi.org/10.4992/jjpsy.85.60>
- McLaughlin, D. J., Zink, M. E., Gaunt, L., Brent, Spehar, Van Engen, K. J., Sommers, M. S., & Peelle, J. E. (2022). Pupillometry reveals cognitive demands of lexical competition during spoken word recognition in young and older adults. *Psychon Bull Rev*, 29, 268–280. <https://doi.org/10.3758/s13423-021-01991-0>
- Montefinese, M., Vinson, D., & Ambrosini, E. (2018). Recognition memory and featural similarity between concepts: The pupil's point of view. *Biological Psychology*, 135, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.04.004>
- Otero, S. C., Weekes, B. S., & Hutton, S. B. (2011). Pupil size changes during recognition memory. *Psychophysiology*, 48, 1346–1353. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01217.x>
- Radvansky, G. A., & Zacks, R. T. (1991). Mental models and the fan effect. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17, 940–953. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.17.5.940>
- Reder, L.M., & Wible, C. (1984). Strategy use in question-answering: Memory strength and task constraints on fan effects. *Memory & Cognition*, 12, 411–419. <https://doi.org/10.3758/BF03198302>
- Siefert E. M., He, M., Festa, E. K., & Heindel, W. C. (2024). Pupil size tracks cue-trace interactions during episodic memory retrieval. *Psychophysiology*, 61. 10.1111/psyp.14409
- van Rijn, H., Dalenberg J. R., Borst J.P., & Sprenger S.A. (2012). Pupil dilation co-varies with memory strength of individual traces in a delayed response paired-associate task. *PLoS One*, 7. 10.1371/journal.pone.0051134
- Vo, M.L., Jacobs, A.M., Kuchinke, L., Hofmann, M., Conrad, M., Schacht, A., Hutzler, F. (2008). The coupling of emotion and cognition in the eye: introducing the pupil old/new effect. *Psychophysiology*, 45, 130–140. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2007.00606.x>