

洞察問題解決における洞察獲得と瞳孔反応の関係の解明

The relation between insight acquisition and pupil response in insight problem solving

松井 一樹[†], 田岡 祐樹[†], 齊藤 滋規[†]
Kazuki Matsui, Yuki Taoka, Shigeki Saito

[†]東京工業大学

Tokyo Institute of Technology

matsui.k.am@m.titech.ac.jp

概要

本研究の目的は、洞察問題解決におけるひらめきや行き詰まりと生体反応の関係を調査することである。実験では、アイトラッカーや腕装着型センサを使用し、18名の被験者の洞察問題解決における瞳孔径および心拍を計測した。結果、それぞれの思考状態が瞳孔径に違いとして現れ、インパスでは縮瞳し、問題の正答に向かい散瞳する様子が確認できた。これは今後の創造的問題解決に関する手法の発展に貢献する知見となり得る。

キーワード：洞察問題, 瞳孔径, 心拍, ひらめき

1. はじめに

近年、社会問題は複雑化し、創造性を活用した問題解決のアプローチが重要視されている。創造的問題解決の1つである洞察問題解決では、人は深刻な手詰まり状態（インパス）[1]を経験した後、新たな連想や先入観の解消を伴う突然のひらめきを自覚し[2]、「洞察」を得る。外部から直接観測することが難しい洞察の獲得は、瞳孔径や心拍など、認知状態と密接に関連する生体反応[3][4][5]を用いて検知する方法が考えられる。検知に基づき客観的に適切なタイミングで外部刺激や孵化を施すことができれば洞察の獲得を促進できる可能性がある。しかし、洞察問題解決におけるこれらの生体反応とひらめきやインパスとの関係は明らかにされていない。そこで本研究の目的は、洞察問題解決におけるひらめきやインパスと生体反応の関係を解明することとする。

2. 既存研究

2.1. 洞察問題

洞察問題の解決には、過去の経験などから形成される固着の解消と問題表象の転換が必要となる[6]。この問題解決には、通常の問題解決とは異なるいくつかの特徴が存在する。まずは、「インパス(impassé)」と呼ばれる行き詰まりの発生である。問題解決者は、過去の

問題解決経験に固着し、解のない問題空間で失敗を繰り返す。また、解を思いついた瞬間、「Aha体験」と表現される感情的な体験を経験する。さらに、洞察の前と後では、問題解決者の問題に対する捉え方（問題構造の理解、定式化の方法など）が根本的に変化する。

インパスにおける固着の原因は「制約」と呼ばれ、問題解決者の先入観や問題の知覚的な情報により作り出される。問題を解決する洞察の獲得には、この制約を緩和し、「問題表象」や「探索する問題空間」の転換することが重要となる。創造的問題については、一時的に問題から離れる「孵化」と呼ばれる段階がこの制約の緩和に効果をもつ。洞察問題においても、この孵化が適切に働き制約を緩和することで、解決に必要な問題表象の転換を促進することが示されている[7]。

2.2. 生体反応と洞察

洞察とは、新しい連想や思考の再構築を伴う突然の気づきであり、思考の中断や注意の切り替えを要する。注意状態の調整を支える脳内メカニズムには、青斑核ノルアドレナリン系(LC-NE)が関連している。脳内の神経核である青斑核(LC)は、ノルアドレナリン(NA)と呼ばれるホルモンを脳内に放出し、広範囲の神経系に影響を及ぼす。そのためLC-NEの活動は、自律神経系と密接な関係をもつ生体反応の変化とも関連がある[8]。交感神経系優位では散瞳や心拍数の増加、副交感神経優位では縮瞳や心拍数の低下などの反応が起こる。瞳孔径は、瞳孔括約筋と瞳孔散大筋の2種類の筋肉により大きさが変化し、瞳孔括約筋は副交感神経、瞳孔散大筋は交感神経の神経支配を受ける[9]。これより、ストレスや認知負荷などにより交感神経系が活性化される[10]と瞳孔径は散瞳し、反対に副交感神経系が優位になると縮瞳する。瞳孔径の変化は、不随意運動であり、自律神経系の活性に素早く反応する。このように、瞳孔をはじめとする生体反応が、間接的にLC-NEの活動を示すと考えると、これらの反応は洞察による問題解決

時のストレスや認知活動を測定するのに適したマーカーとなり得る。洞察と瞳孔径の関係を調査した研究では、問題解決におけるひらめきを自覚する前段階から瞳孔が散大する様子が報告されている[3][4]。これらの研究からも、洞察と瞳孔径の関係が示唆されているが、ひらめきの前に存在するインパスや制約緩和などとの関係は、洞察問題においても明らかにされていない。

そのため、本研究では洞察問題解決における瞳孔径と心拍を計測し、問題表象を転換する洞察の獲得に向けインパスに陥り制約を緩和していく被験者の思考状態の変遷と生体反応の関係を調査することとする。

3. 方法

本研究では、解決にひらめきや思考の転換を必要とする洞察問題を用いて、問題解決中の瞳孔直径および心拍を計測した。洞察問題には、9点問題を発展させた16点を6本の直線の一筆書きで通ることを求める16点問題を使用した。実験では、解決中の思考状態(行き詰まりやひらめき)を解答中および終了後に自己申告する。本実験は、各被験者1人ずつ、眼鏡型アイトラッカー (Pupil Core) を着用した状態で実施する。本実験には、大学生と大学院生および20歳以上の社会人の合計18名が参加した。この18名のうち12名は、アイトラッカーに加え腕装着型センサ (empatica E4) も着用した。

実験参加者は実験課題の説明を受ける前に、アイトラッカーおよびセンサを装着し1分間ベースラインとなる瞳孔直径や心拍変動を測定する。その後、制限時間を30分間として、16点問題に取り組む。解答開始後30分以内に解決できた場合は、その時点で解答を終了する。課題は、コンピューター上のオンラインホワイトボード Miro を利用して解答する。本実験では、16点問題における制約緩和の定義を、「16点で形成される領域外にはみ出して、領域外の架空の点で折り返すように線を引くこと」と定義する(図1)。

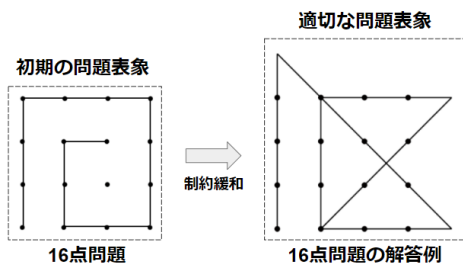


図1 16点問題と16点問題の解答例

解析対象は瞳孔直径および心拍変動とし、問題解答の可否や思考状態の違いが生体反応の違いとして現れるかを調査するため、それぞれの時系列的な変化や統計的な有意差を分析した。全18名の被験者の中から、技術的問題でデータの取得に失敗した1名の被験者を分析対象外とした。したがって、本実験は17名の被験者(年齢範囲21-25, 10人男性)を分析対象とする。

4. 結果

本実験の結果、制限時間内に16点問題の正答に至ったのは6名、不正解者は11名であった。また、17名のうち6名が解答中の行き詰まりを報告し、制約を緩和した被験者は、8名であった。取得した瞳孔直径は、ローパスフィルタ(カットオフ周波数1Hz)を適応した後、ベースライン時の瞳孔直径の平均値と分散を用いて、Z値化の処理を施す。心拍変動は、周波数解析から低周波領域と高周波領域のパワー比(LF/HF)を得た。図2に、問題解決中の被験者における瞳孔直径とLF/HFの時系列変化を例示する。

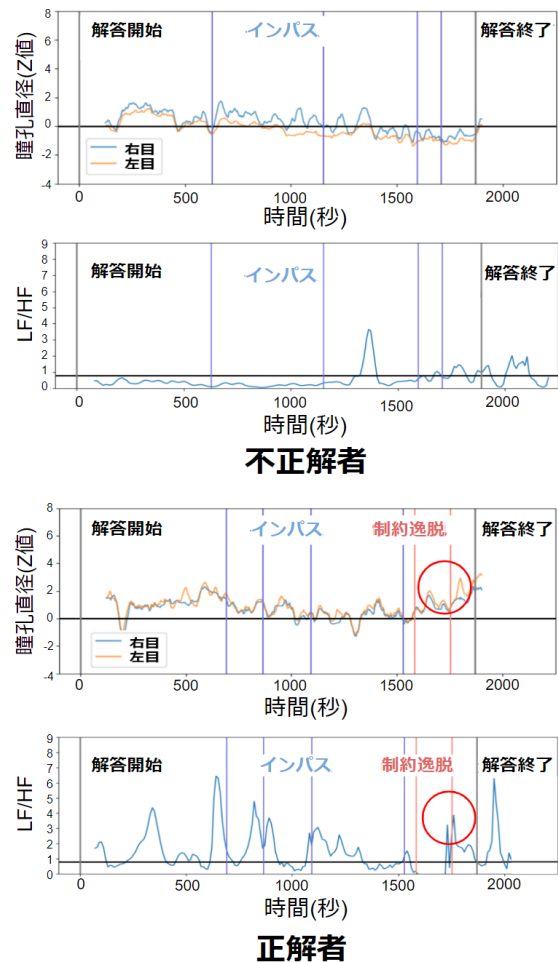


図2 各被験者の瞳孔直径とLF/HFの時系列変化

瞳孔径の推移は、4秒ごとの移動平均値とした。この被験者を含む問題の正解者は、図2中の赤丸のように制約逸脱および正答の前後において、瞳孔が散大していく様子が確認された。LF/HFについても、正答に向かい瞳孔が散大したタイミングの前後において、値が増大している傾向が捉えられた。

図3は、解答時間中の瞳孔直径Z値およびLF/HFの平均値を、不正解者と正解者で分類したものである。両者における瞳孔直径Z値の平均値を比較するため、対応のないt検定を行った。分析ではLeveneの検定を通じて等分散性を確認した。Leveneの検定結果では、等分散性が確認された ($F(1, 15) = 0.162, p = 0.693$)。その後、独立サンプルt検定を行った。結果、正解群 ($M = 2.7183, SD = 1.01255$) と不正解群 ($M = 1.7636, SD = 1.03694$) との間に有意な差は認められなかった ($t(15) = -1.828, p = 0.087$) が、図3からは正答者は不正解者に比べて解答時間中に瞳孔直径が広がる傾向を確認した。LF/HFに関しても、同様に有意差は認められなかった。

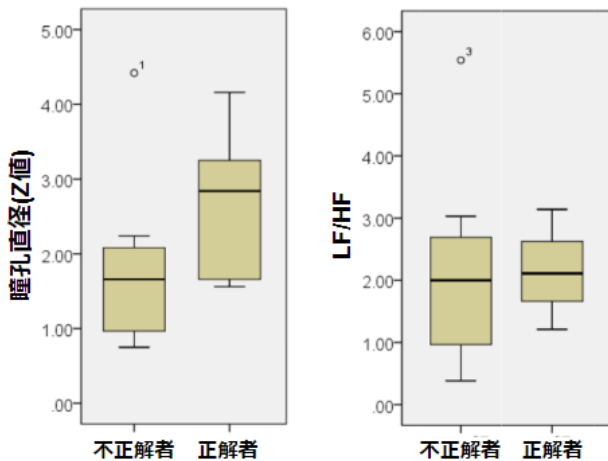


図3 解答中の瞳孔直径 (左), LF/HF (右) の平均値

また、問題解決における思考状態の違いを比較するため、次に示す5つの思考状態の段階を定義し、該当する区間内の瞳孔直径Z値およびLF/HFの平均値を比較した(図4, 図5)。区間の長さは、全被験者が1試行に要した時間の平均値を参照し30秒間とした。

- (1) ベースライン：解答開始前に測定したベースラインにおける30秒間
- (2) 解答開始：解答開始直後30秒間
- (3) インパス：行き詰まりの報告から前後30秒間
- (4) 制約緩和：本研究で定義した制約緩和にあたる試行から前後30秒間
- (5) 正答：正答の試行から前後30秒間

瞳孔直径Z値については、ベースラインと比較し問題解答中にあたるその他の瞳孔径が大きくなっている。また、解答中はインパスの段階の瞳孔径が最も小さく、正答時に最も大きい状態となる傾向が表れた。本結果に対しても、図5と同様に瞳孔直径Z値およびLF/HFの平均値をそれぞれ比較した。比較にはKruskal-Wallis検定と事後検定としてDunn検定を実施した。仮説検定の結果、瞳孔径の分布は思考状態のカテゴリー間で有意な差があることが示された ($p = 0.000$)。有意差はそれぞれ、ベースラインと他の条件(インパス($p = 0.010$), 制約緩和($p = 0.000$), 解答開始($p = 0.000$), 正答($p = 0.000$)), そしてインパス-正答($p = 0.033$)の間で確認された。

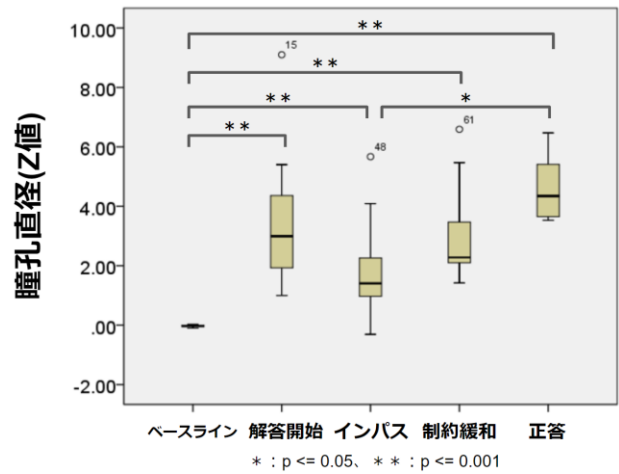


図4 各思考状態における瞳孔直径の平均値

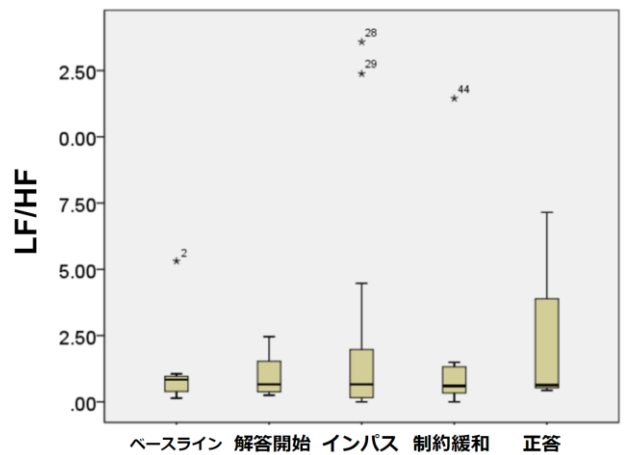


図5 各思考状態におけるLF/HFの平均値

5. 考察

本研究では、洞察問題解決における洞察の獲得に向け変化する被験者の思考状態と生体反応（瞳孔径、心拍）の関係を調査した。図4および図5の瞳孔直径Z値が示すように、問題解答中の瞳孔径は、問題解答前のベースラインと比較し大きく、また正解者の方が不正解者と比べて大きい傾向があることを確認した。このことは、高い認知負荷が瞳孔の散大と関連することからも[11]、正解者の方がより高い認知負荷で問題に取り組んでいたことが予想される。解決能力以上の高難度な問題の解決や注意力の低下により瞳孔径が収縮するという研究があることから[11][12]、インパスの段階に瞳孔が縮小しているのは、被験者が制約に固着し失敗を繰り返す中で、問題の難易度を高く感じ集中力が低下していることが原因と予想される。反対に、制約緩和を経て正答に向かう過程では、瞳孔が散大していた。LC-NEの活動が活性化すると、注意の範囲が広がり認知の柔軟性が高まるため、思考が中断されやすくなる[2]。そして、関連性の弱い連想を発見しやすくなるため、問題定式化の再構築や表象の転換に辿り着くことが知られている[13]。今回の瞳孔散大は、これら一連の思考過程と深く関係していることが推測される。

6. 緒言

今回の研究では、問題解決に要する認知負荷や洞察獲得に至る思考状態の違いが、瞳孔径や心拍の違いとして表出する様子が示唆された。ただ、インパスや制約緩和、正答の段階における生体反応の違いに有意差は見られなかった。

しかし、同じ思考状態の段階であっても正解者と不正解者の間で生体反応が異なっている可能性が考えられる。そのため、今後は両者の思考状態およびその変化の違いを理解するためにも、各段階において正解者と不正解者を区別し生体反応を比較する必要がある。

また、心拍に関する情報からは思考状態の違いを明確な反応の違いとして確認することができなかった。ただし、瞳孔径の変化は認知活動だけでなく光や心情など多くの要因から影響を受けることから、複数の生体反応を掛け合わせて分析することが考えられる。洞察獲得に至るLC-NEの活性が思考状態を変化させ、生体反応がその変化を指標化するマーカーとなることを示すためには、瞳孔径だけでなく心拍など他の生体

反応との関連も含め、より詳細に各思考状態の違いを比較していく必要がある。

7. 謝辞

本実験は東京工業大学人を対象とする研究倫理審査委員会の承認のもと実施した（2024107）

8. 文献

- [1] 三輪和久, 松下正法, (2000) "発見における心的制約の緩和過程", 認知科学, Vol.7, No.2, pp.152-63.
- [2] Tulver, K., Kaup, K. K., Laukkonen, R., & Aru, J. (2023). Restructuring insight: An integrative review of insight in problem-solving, meditation, psychotherapy, delusions and psychedelics. *Consciousness and cognition*, 110, 103494.
- [3] Salvi, C., C. Simoncini, J. Grafman, and M. Beeman. (2020). "Oculometric Signature of Switch into Awareness? Pupil Size Predicts Sudden Insight Whereas Microsaccades Predict Problem-Solving via Analysis." *NeuroImage* 217: 116933.
- [4] Suzuki, Yuta, Tetsuto Minami, and Shigeki Nakauchi. (2018). "Association between Pupil Dilation and Implicit Processing Prior to Object Recognition via Insight." *Scientific Reports*, 8, 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25207-z>.
- [5] 國政秀太郎, 瀬尾恭一, 下田宏, & 石井裕剛. (2015). "パフォーマンス-認知負荷モデルを用いた精神負荷作業中の認知・作業状態推定手法". *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 17(4), 395-410.
- [6] Gilhooly, K. J., Georgiou, G. J., Sirota, M., & Paphiti-Galeano, A. (2014). Incubation and suppression processes in creative problem solving. *Thinking and Reasoning*, 21, 130-146.
- [7] 三輪和久. (2009). "飛躍を伴う発見における潜在的意識の関与: 洞察問題解決研究からの知見". *計測と制御 = Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*. Vol.48, No.1, pp.33-8.
- [8] Yamashita, J., Terashima, H., Yoneya, M., Maruya, K., Koya, H., Oishi, H., ... & Kumada, T. (2021). Pupillary fluctuation amplitude before target presentation reflects short-term vigilance level in Psychomotor Vigilance Tasks. *Plos one*, 16(9), e0256953.
- [9] 内田夏綺, 加藤綾子, 上條弘幹, 山崎一徳, 住倉博仁, 荒船龍彦, ... & 矢口俊之. (2020). 自律神経機能推定に向けたアルビノ系ラットにおける瞳孔径計測法の提案と拘束負荷中の瞳孔径変動解析. *ライフサポート*, 32(3), 83-89.
- [10] Chen, Fang, Jianlong Zhou, and Kun Yu. (2017) "Multimodal and data-driven cognitive load measurement." *Cognitive load measurement and application*. Routledge. 147-163.
- [11] Van den Brink RL, Murphy PR, Nieuwenhuis S (2016) Pupil Diameter Tracks Lapses of Attention. *PLOS ONE* 11(10): e0165274.
- [12] Poock, G. K. (1973). "Information Processing vs Pupil Diameter". *Perceptual and Motor Skills*, 37(3), 1000-1002.
- [13] Parimoo, S. (2016). Creative thinking & insight tests measure the same processes: Is creative thinking simply insight? *Inkblot*, vol.5, pp.20-25.