

洞察問題解決におけるひらめきと瞳孔反応の関係の探索 Exploring the Relationship between Insight and Pupillary Response in Insight Problem Solving

伊藤 鈴[†], 田岡 祐樹[†], 岡崎 祐樹[†], 齊藤 滋規[†]
Rin Ito, Yuki Taoka, Yuki Okazaki, Shigeki Saito

[†] 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology
ito.r.as@m.titech.ac.jp

概要

本研究の目的は、洞察問題解決過程におけるひらめきや行き詰まりと瞳孔反応の関係を調査することである。6人の被験者にアイトラッカーを装着させ、洞察問題の一つである16点問題に取り組む過程の瞳孔径を計測した。その結果、問題に取り組むことによる認知負荷が瞳孔径に反映されることを確認した。また、ひらめきの前後で瞳孔が散大していく様子が見受けられた。ひらめきや行き詰まりのメカニズムを明らかにすることで、創造的課題解決に関する手法の発展に貢献できる。

キーワード：洞察問題、瞳孔反応、ひらめき

1. はじめに

過去の経験に拠らず、創造性を活用して問題解決する、創造的問題解決能力を拡張する重要性が高まっている。創造的問題解決の一つである洞察問題解決では、人はインパス（深刻な手詰まり状態）の後に、アイデアを「ひらめき」として自覚する。日常環境下でインパスや「ひらめき」を検知することができれば、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で創造性を拡張できる可能性がある。眼球運動（瞳孔径やまばたきの頻度）は、人の認知状態と密接な関係があるとされているが[1][2]、洞察問題解決における眼球運動と「ひらめき」やインパスの関係は明らかにされていない。そこで本研究の目的は、洞察問題解決過程における瞳孔反応と「ひらめき」やインパスの間の関係を探索することとする。

2. 既存研究

2.1 瞳孔運動

瞳孔は、瞳の中の虹彩に囲まれた穴で、瞳孔括約筋と瞳孔散大筋の2つの筋肉を介して制御されている。瞳孔には目に入る光の量を調節する役割があり、暗い場所では（散瞳）し、明るい場所では縮瞳する。

瞳孔は、交感神経線維とつながる瞳孔散大筋によって広げられる。交感神経線維は、ストレスや恐怖を感じる出来事に対する自動的な生理的反応である闘争・逃走反応にも関係している（心拍数、呼吸、汗腺など）。また、瞳孔は、副交感神経線維とつながる瞳孔括約筋によって取り巻かれている。副交感神経線維は、リラックスした状態で活発になり[3]、副交感神経が優位になると縮瞳する。青斑核(LC)と瞳孔径の間には、強い関連性がある[3]。青斑核は脳内の器官で、ノルアドレナリン (NA) と呼ばれるホルモンを調節する小さな神経核であり、広範囲の神経系に影響を与える。その影響には、覚醒度やストレスも含まれる。NAが増加すると、心拍数や瞳孔径の増加にもつながる。NAと瞳孔径の間には即時的で緊密な関係があるため、瞳孔径はストレスや認知活動を測定するのに適した指標となる[3]。瞳孔は、精神的な興味や興奮など情動的刺激により散大し、精神作業評価の指標ともなる[4]。瞳孔径は課題要求に応じて変化するため、被計測者の認知処理の強度を客観的に測定するための指標となりえる。

2.2 洞察問題

洞察問題とは、その解決にひらめき、あるいは発想の転換を必要とする問題である[5]。洞察問題及び洞察問題解決の特徴のいくつかを挙げる[5][6][7]。

- ・インパスの存在：洞察問題は、問題解決の過程でインパスと呼ばれる深刻な手詰まり状態に陥るように設計されている。洞察問題では、問題解決者は過去の問題解決経験に固着し、解の存在しない問題空間を探索し、繰り返し失敗することでインパスに陥る。

- ・重要なデータの無視：問題解決者は、洞察問題の解決過程において、正解に辿り着くために必要な情報を無視してしまうことがある。たまたま有効な試行を行うことがあっても、それがすぐに解に結びつくわけではなく、見過ごしてしまう場合がある。

・飛躍的解決：インパスの状態から，ある時突然解がひらめいたかのように発見される[7]．洞察を阻害するような制約が，たまたま適切な形で逸脱されたときに洞察が生じる[5]．

・感情の体験の随伴：洞察問題解決においては、解に気付いた瞬間に、ある種の感情的な体験（驚きや感動など）を伴うことが少なくない[6].eureka moment や Aha 体験と表現される。

洞察と瞳孔の関係を調査した研究として、Suzuki らは、徐々に画像が浮かび上がる動画を視聴させるタスクにおいて、被験者が主観的にひらめいたと感じる前段階から、瞳孔が散大していく様子を捉えている[2]。また、ひらめきに対する自信は散瞳に関連せず、ひらめきを得たかどうかにのみ関連することを示している。ひらめきと瞳孔の関係が示唆されているが、ひらめきとその前段階の制約緩和との関係性が、洞察問題において研究されていない。

そのため、本研究では、被験者が主体的に手を動かして取り組むタスクにおいて、繰り返しのインパスに陥ったり制約緩和したりしながら洞察問題に取り組む過程において、瞳孔径とひらめきやインパスの関係を調査することとする。

3. 方法

過去の課題解決経験がインパスを引き起こす「洞察問題」に取り組み、課題実施中の眼球運動を計測する。洞察問題として、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16点問題を使用した(図1)。本論文では、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。大学生と大学院生および20歳以上の社会人12名が実験に参加した。全12名の被験者の中から、過去に9点問題または16点問題を解いたことがある、もしくは、技術的問題でデータの取得に失敗した6名の被験者を分析対象外とした。したがって、本実験は6名の被験者(平均年齢=23.33(範囲21-25), 3人男性)を分析対象とする。

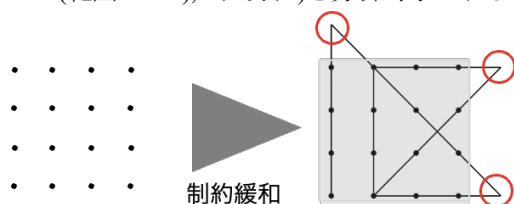


図1 16点問題と正答例

本研究は各被験者 1 人ずつ、装着型のアイトラッカー (Pupil Core) を着用した上で、コンピューター上のオンラインホワイトボードサービス Miro を利用して実験を実施した。実験の様子を図 2 に示す。被験者は洞察問題に取り組む前に、アイトラッカーを装着し 1 分間ベースラインとなる瞳孔径を測定する。次に被験者は 16 点問題に解答する。16 点問題では、解決できた時点で問題解答を終了させ、解答開始後 30 分以内に解決できなかった場合は、30 分が経過した時点で問題解答を終了させた。実験中に、被験者は思考状態 (インパスやひらめき) を自己申告する。問題解答終了後に、解答用紙を見せながら問題解答中の試行や線の引き方に関するインタビューを行った。質問例を下に示す。

インタビュー質問例

0.何を考えて線を引いていましたか？

Q.途中で線の引き方を変えた箇所はありますか？

Q.なぜそのような線の引き方に変わりましたか？

Q. そのような線の引き方は直観的な引き方か、あるいは何か意図を持った戦略的な引き方のどちらですか？

瞳孔径を解析対象とし、瞳孔系の時系列変化と自己申告された思考状態やインタビューにより報告された思考の推移、課題解決の有無との関連性を分析する。



図2 実験の様子

(個人情報保護の観点から画像を加工)

4. 結果と考察

本実験の結果、分析対象の被験者 6 名のうち 3 名の参加者が制限時間以内に正答し、3 名が制限時間以内に正答できなかった。そのうち、問題に取り組んでいる間

にインパスに陥ったと申告した人はそれぞれ 1 名であった。制約緩和することができた被験者は全員時間内に正答し、正答できなかった被験者は制約緩和もできなかった。被験者の対応表を表 1 に示す。

制限時間以内に正答した人の解答時間はそれぞれ 1561 秒, 1310 秒, 1043 秒であった。正答にたどり着くまでの平均試行数は 28.3 個, 正答できなかった人が制限時間 30 分で書いた試行数は平均 43 個であった。また, 1 試行に要した時間は, 正答できた人が平均 31.0 秒 (標準偏差 18.4, 範囲 7-104), 正答できなかった人が平均 36.3 秒 (標準偏差 51.5, 範囲 6-432) であった。

表 1 対応表			
被験者	解決の可否	制約緩和の可否	インパスの有無
A	○	○	×
B	○	○	×
C	○	○	○
D	×	×	○
E	×	×	×
F	×	×	×

ベースライン時の瞳孔径の平均値と分散を用いて, 解答時間中に測定された瞳孔径に Z 値化の処理を施す。図 3 は, 解答時間中の瞳孔径 Z 値の平均値を, 正答者と非正答者で分類して比較したものである。正答者は非正答者に比べて, 解答時間中に瞳孔径が広がっていたことを示している。

図 3 解答時間中の Z 値化された瞳孔直径の平均値

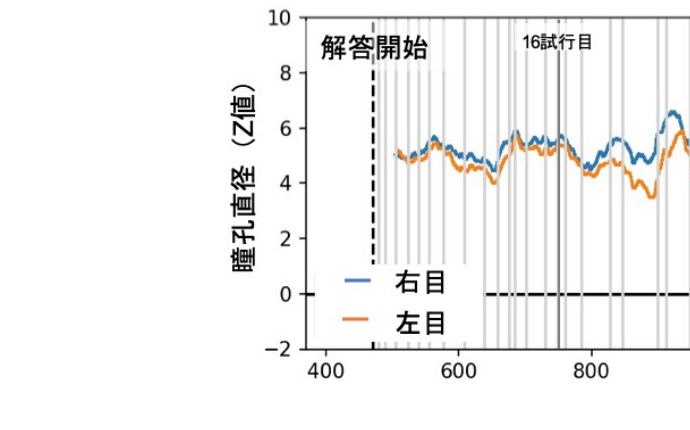


図 4 解答時間中の瞳孔径変化 (正答できた被験者 A)

図 4,5,6,7 に, 解答時間中の瞳孔径の変化の様子を示す。図中の瞳孔系の推移は, 0.5 秒ごとの移動平均値とした。被験者 A, B, C は時間内に正答し, 被験者 D は時間内に正答できなかった。グレーの縦線は, 各試行に取り組み始めた時間を示している。例えば, 被験者 A は, 解答開始 (破線) から試行を重ね, 36 試行目で制約逸脱し (青実線), 37 試行目で正答し (破線), 解答終了した。被験者 D も同様に解答開始から試行を重ね, 25 試行目を書き終えた後にインパス状態であると自己申告した (桃色実線)。その後再び取り組んだが, 30 分経過した時点で問題解決できなかったため解答を終了した (黒破線)。

正答することができた参加者は, ベースラインに比べて解答時間中に瞳孔が散大している様子が見られる。正答できた参加者のうち被験者 A, B は, 制約緩和したタイミングの前後及び正解の試行前後に瞳孔径が広がっている様子が確認できる。被験者 C にはそのような様子は見られなかった。正答できなかった被験者は, 解答時間中に瞳孔がベースラインよりも縮瞳する様子が見られた。

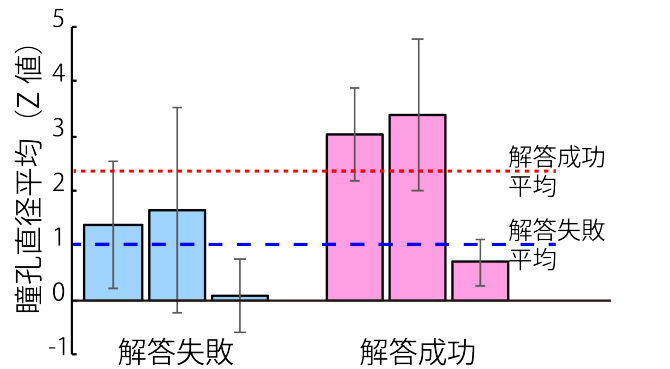


図 3 解答時間中の Z 値化された瞳孔直径の平均値

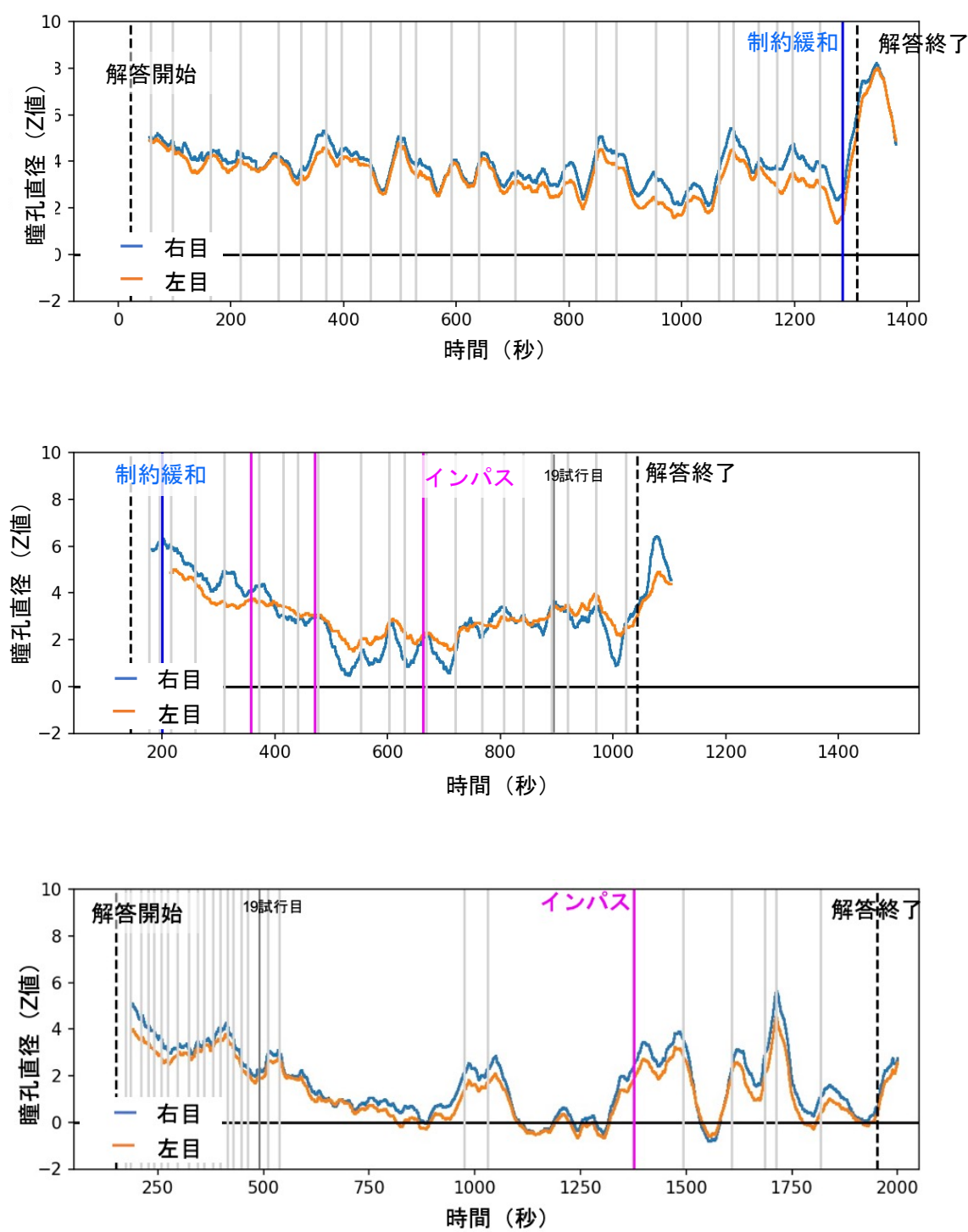


図 5,6,7 解答時間中の瞳孔径変化
(正答できた被験者 B, C, 時間内に正答できなかった被験者 D)

問題解答中の瞳孔径が変化していることから、問題の取り組みによる認知負荷が瞳孔径に反映されていると考えられる。正答することができた被験者の瞳孔径の方が大きいことから、高い認知負荷で問題に取り組んでいたと予想される。正答することができた被験者は、正答の前後に瞳孔径

が徐々に開いていく様子が確認できる。被験者が、ひらめきの瞬間に興奮や驚きなどの感情的体験をし[6]、情動的刺激により瞳孔が散大した[4]ためであると考えられる。

正答することができた被験者 A, B について、最初に制約緩和した試行の次の試行で正解に辿り着いている。インタビューの結果から、被験者 A は主観的には直感的でありながら、1本の線で多くの点を通る方法を考えてながら線を引いていた。被験者 B は戦略を立てて試し、その戦略がうまくいかなければ直感的に線を引き、新たな戦略を立てることを繰り返していたことがわかった。

「15 までは縦、横、斜めだったりパターン化しながら引いていたんですけど、いまいち解答が見つからなかったで、16 からは闇雲っていう感じで。」

「(35 試行目終了後) ...横の線を引いた時にあんまり点が結べないことに気づいて、何とかして斜めの線を使って多く引こうと思ったんですね。今までは斜めの線を 3 本以上引いていなくて、2 本じゃダメだなんて気づいて、36 からどうやったら斜めの線を増やせるだろうかっていうのを考えた時に、点の外にもっていけば斜めに引けるってことに気づいた。」(被験者 A)

「(1, 2 試行目について) あんまり深く考えていないんですけど、そもそも作業を慣らすっていう意味でも手を動かしていた。」

「(23, 24 試行目について) ...ここまで色々線を引いて、7 本では弾けるけど 6 本では引けないというのを感じていて、なんとなくあんまり今まで書いていた方法だとできないのかなというのを感じていた。」

「...一番多く(点を通るように線を)引けるのが、斜めに線を引いた 4 点か、辺の部分の 4 点引くかが必要なのかなというのを考えていて、どうにかして斜めの線を他の斜めの線にも持っていけないかなというのを考えていたら、ちょっと外側に伸ばすのもありなんじゃないかなと考えた。」(被験者 B)

被験者 A, B の制約緩和前後の瞳孔径について考察する。被験者 A, B の試行の一部を図 8, 9 に示す。

被験者 A は、正答の一つ前の思考で、洞察を阻害している制約がたまたま適切な形で逸脱するような線の引き方がされたが[5]、制約逸脱した試行では正答に至

らず、情動的刺激として感じなかったためだと考えられる。

被験者 B は、制約逸脱後に急激に瞳孔が散大している。26 試行目で初めて制約逸脱し、正答に至っていることから「飛躍的解決」が発生し[6]、感情的体験による情緒的刺激を受けたためだと考えられる。



図 8 被験者 A の試行 (一部)



図 9 被験者 B の試行 (一部)

被験者 C は、3 番目の試行で最初に制約緩和したが、その後も繰り返しインパスに陥り、正解に辿り着くまでに 21 試行を要した。19 番目の試行を終えた後、1本の線で通らなければならない点の数を計算し、その後解答に辿り着いた。今回、制約緩和を「16 点で形成される領域外にはみ出して、架空の点で折り返すように線を引く」ことであると定義した。一方で、領域外の架空の点で折り返すことができるなら、引ける線のパターンは無限大になる可能性がある[8]。被験者 C は、「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」という制約を緩和した後、架空の点を含めた 5×5 の点で構成される領域で再びインパスに陥ってしまったと考えられる。被験者 C の試行の一部を図 10 に示す。



図 10 被験者 C の試行 (一部)

正答できなかった被験者も同様に、まず直感的に線を引き、戦略的に線の引き方を変えて取り組んでいたが、時間が経ち失敗を繰り返すうちに「全然わからなくなった」り、最終的に「思いつき」で線を引いていたと発言していた。インパス状態で問題に取り組み続けることにより覚醒度合いが低下し、瞳孔径がベースライン程度まで縮瞳したと考えられる[9]。

「(25 試行あたりについて、) 思いついたような気がしたものが、何を思いついたのかも分からなくなっちゃって、なんだっけなと思いながら書いていました。」
(被験者 D)

主観的にインパス状態に陥ったと申告した被験者2名(被験者 C, D) に関して、インパス前後の瞳孔径に特徴は見られなかった。インパスの申告がなかった箇所でも、同じ解答を繰り返し書いたり(図 11)、問題文を読み返したりしていたことから、客観的にはインパス状態に陥っていたと考えられる。また、インタビューの発言からもインパス状態であったことが推測できる。

「... 15 になっても解答が見つからないので、このまま解けないのがちょっと悔しくて、16 からはひたすらヤケクソって感じです。」 (被験者 A)

「この辺りからもう訳がわからなくなっていて、24 とか 23 とか 22 くらいからかもしれないですけど、半ばヤケクソ的というか、とりあえず数打ちや当たるかなみたいな気持ちで(線を)引いていました。」 (被験者 D)

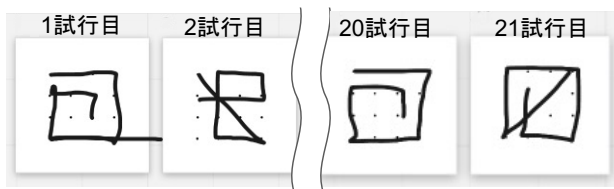


図 11 被験者 D の試行 (一部)

5. 結言

今回の調査から、洞察問題の一つである 16 点問題の解決過程において、認知負荷が瞳孔径に反映される様

子が確認できた。また、正答の前後で瞳孔が開いていく様子を確認できた。

制約緩和の前後では瞳孔径の変化は見られなかったが、洞察問題の特徴であるように制約緩和したことを、解決のために必要な情報であるとすぐに認識できなかったからだと考えられる。

また、本実験では被験者自身にインパス状態であることを申告させたが、主観的にはインパス状態であると認識できない場合があった。より詳細に瞳孔径とインパスの関係を分析するためには、インパス状態を客観的に確認する必要がある。

本実験では眼球運動の一つである瞳孔径の変化を調査対象としたが、瞬きの回数や速度、サッケード(眼球の揺れ)についても調査することで、より詳細に「ひらめき」やインパスを計測することが可能になると考えられる。そうすることで、日常状況下での「ひらめき」やインパスを検知することへの一助となる可能性がある。

6. 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 (A20090)。

文献

- [1] 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.
- [2] 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>.
- [3] Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H. and Van de Weijer, J. (2011). "Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures", OUP Oxford
- [4] 加藤象二郎, 大久保堯夫編(2006) "初学者のための生体機能の測り方 第2版" 日本出版サービス, pp.127-128
- [5] 鈴木弘明(2004) "創造的問題解決における多様性と評価 洞察研究からの知見" 人工知能学会論文誌 19 巻 2 号 SP-F pp.145-153
- [6] 三輪和久, 寺井仁(1997) "洞察問題解決の性質 認知心理学から見たチャンス発見" 人工知能学会論文誌 12 巻 1 号 a
- [7] 寺井仁, 三輪和久, 古賀一男(2005) "仮説空間とデータ空間の探索から見た 洞察問題解決過程" *COgnitive Studies*, 12(2), pp.74-88
- [8] Öllinger M, Jones G, Knoblich G. (2014). "The dynamics of search, impasse, and representational change provide a coherent explanation of difficulty in the nine-dot problem". *Psychol Res*. Vol.78, No.2, pp.266-75.
- [9] 和久井秀樹, 平田豊(2014), 眼球・瞳孔運動に現れる覚醒状態とその神経機構, 日本神経回路学会誌 21 巻 1 号 pp. 20-31