

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18686

研究課題名（和文）瞬目と瞳孔反応の同時計測による客観的認知機能評価

研究課題名（英文）Objective evaluation of human cognitive functions with simultaneous measurements of eyeblinks and pupillary responses

研究代表者

木村 英司 (Kimura, Eiji)

千葉大学・大学院人文科学研究院・教授

研究者番号：80214865

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、瞬目と瞳孔反応という生理指標と認知処理との関係を検討し、これらの生理指標が人の認知機能を客観的に評価する上で重要な役割を果たしていることを示した。研究の結果、視覚意識（刺激の見え）の切り替わりと瞬目との間に密接な関係があることが確認された。意図的な瞬目や開眼により視覚意識の切り替わりが促進される一方で、視覚意識が切り替わった直後には瞬目が多く生じた。また、対象を監視している際の注意の集中に応じて瞳孔は散大し、その散大の仕方は、監視時間の相対的長さに応じて変化した。本研究により、瞬目と瞳孔反応を同時に計測することで、人の認知機能を多面的に評価できる可能性も示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、同一の実験事態で、自発性瞬目と随意性瞬目が及ぼす効果を比較し、さらには、ブラックアウトや随意性の開眼の効果とも比較することにより、自発性と随意性の瞬目が機能的に異なる働きをすること、そしてそれは、眼を閉じることによって生じる一過性の視覚変化によらずに、随意性の眼瞼運動に伴う脳活動による可能性が高いことを示唆した点が学術的に重要である。瞳孔反応に関しても、持続的な注意の集中に対応した変化を示すことを明らかにした。瞬目や瞳孔反応は、携帯情報端末に搭載されたCCDカメラで簡便に計測できるため、これら生理指標を用いた客観的な認知機能のモニタリング・システム等への応用展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the relationship between cognitive processing and physiological measures of eyeblinks and pupillary responses. It showed that these physiological measures could play an important role in objectively evaluating human cognitive functions. The present results showed a close and reciprocal relationship between the switching of visual awareness (perceptual switching) and the eyeblink. Voluntary blinking or eyelid opening facilitated the perceptual switching, and after the perceptual switching, more spontaneous blinking was observed. In addition, the pupil dilated in response to focusing attention while observers monitored the visual stimulus. How much the pupil dilated depended on the relative length of the monitoring period. The present study suggested the feasibility of a multifaceted evaluation of human cognitive functions by simultaneously measuring eyeblinks and pupillary responses.

研究分野：実験心理学

キーワード：瞬目 瞳孔反応 知覚的競合 視野闘争 持続的注意

1. 研究開始当初の背景

人間の心の動きを科学的な手法を用いて外から読み取ろうとする試みは、古くから研究者の関心を集めてきた。近年、脳計測に基づくインターフェース技術も研究されているが、高価で大型の装置や特殊な実験室環境を必要とし、日常場面への応用はまだまだ難しい状況にある。これに対して、心的活動を反映する有用な生理的指標として瞳孔径の変化(瞳孔反応)や瞬目が挙げられる。瞳孔径が光の強度だけではなく、多様な認知機能を反映して変化することは、研究開始時点ですでに指摘されていた。また、注意の脳内神経ネットワーク内でハブ(結節点)として機能し、ノルアドレナリンを放出する青斑核の神経活動と、瞳孔の散大反応が高い相関を示すことが示されていた。瞬目に関して、視聴しているビデオや会話での話題の切り替わり時に頻発するなど、認知機能との密接な関係が示されており、さらには、学習、記憶、注意などを調整するドーパミン神経系回路の活動と瞬目率との強い関連が指摘されていた。こうした研究の進展により、瞬目と瞳孔反応のそれぞれが覚醒水準や認知負荷、注意の変化、情動、意思決定など、さまざまな認知・感性機能の客観的指標として、そして脳内神経活動を客観的に検討できるツールとして利用できる可能性が示唆され、瞬目や瞳孔反応の有用性が注目を集め始めていた。

瞳孔反応と瞬目が注目を集める一方で、これら2種類の生理指標は個別に研究されることがほとんどであった。しかし、両者は高解像度カメラを用いたビデオ撮影により同時に計測可能であり、また、以下のような相補的な特徴を持っている。(a) 瞬目は散発的であるのに対し、瞳孔反応は連続的に生じ、認知機能の持続的なモニタリングが可能である。(b) 瞬目は意図的に制御・操作できるが、瞳孔反応ではできない。(c) 瞳孔反応の振幅は小さく、高い測定精度を要するが、瞬目の検出は極めて容易である。以上から、2種類の生理指標の特性を活かした研究手法の開発は、重要な意義を持つと考えられた。

2. 研究の目的

本研究の長期的な目標は、瞬目と瞳孔反応(瞳孔径の変化)を同時計測することにより、2つの生理指標の特徴を活かし、客観的かつ非侵襲的に、効率よく、ヒトの認知機能を検討・評価する手法を確立することであった。この長期目標を達成するために、本研究では、下記の2つの研究課題を取り上げ、瞳孔反応と瞬目という2種類の生理指標と認知処理との対応関係の解析を進めることを目的とした。研究課題1では主として瞬目を、研究課題2では瞳孔反応を検討の対象としながら、他方の指標に関して解析を進めることで、瞬目と瞳孔反応の同時計測のメリットを探った。

(1) 研究課題1: 視覚意識の切り替わりと生理指標の対応関係の解析

左右の眼に大きく異なる刺激を提示すると、視野闘争と呼ばれる知覚的競合が生じ、左右眼に提示した刺激の一方が見えたり他方が見えたりと、刺激の見え(視覚意識)が時間とともに切り替わる、という現象が生じる。研究課題1では、この視野闘争のうち特に連続フラッシュ抑制(図1、後述)と呼ばれる実験事象を用いて、瞬目が視覚意識の切り替わり(知覚交替)に及ぼす影響、その逆に、知覚交替が瞬目の生起に及ぼす影響、さらには、知覚交替と瞳孔反応との関係について検討することを目的とした。

(2) 研究課題2: 注意課題遂行中の注意の推移と生理指標の対応関係の解析

研究課題2では、ランダムな遅れ時間の後に変化し始める視覚刺激を監視し、刺激の変化開始をできるだけ早く検出するという持続的注意課題を取り上げた。そして、課題遂行中の注意の推移と、瞬目・瞳孔反応との対応関係を検討し、注意の働きを客観的に評価することが可能かどうかを検討することを目的とした。

3. 研究の方法

瞬目と瞳孔反応は、赤外線カメラを用いて観察者の瞳孔の直径と位置を計測しておけば、実験後に検討を進めることが可能である。瞳孔反応は、刺激や人の内的過程の変化による瞳孔径の変化であり、瞬目は眼を閉じることにより瞳孔径の計測値が大きく変化するため、容易に検出が可能である。本研究では、実験中に、観察者の左眼を赤外線カメラにより撮影し、瞳孔の直径と位置を測定し続けた。実験終了後に、瞳孔径の測定結果に基づいて瞬目を検出した。また、瞬目時の瞳孔径は補間し、瞳孔反応分析のために加算平均に用いた。

(1) 研究課題1: 視覚意識の切り替わりと生理指標の対応関係の解析

研究課題1では、連続フラッシュ抑制と呼ばれる現象を用いて検討を進めた(図1)。これは、ダイナミックな高コントラスト刺激(抑制刺激)を一方の眼に提示して優勢状態を確立すると、他方の眼に別の静止刺激(検査刺激)を提示しても、その知覚が抑制され、長時間にわたって意識にのぼらなくなる、という現象をさす。抑制されている検査刺激のコントラストを増加させると最終的には検出されるが、抑制を打ち破り、意識にのぼるまでに数秒間を要する。

連続フラッシュ抑制を実験に用いた主たる理由は、この方法であれば知覚交替のタイミング

がある程度予測できることにある。試行開始直後には抑制刺激がまず知覚され、ある時間経過後に検査刺激が知覚されるという推移をたどる。そして、検査刺激のコントラスト増加のタイミングと速さを調整することにより、検査刺激が意識にのぼり検出されるタイミング(検査刺激の検出時間)を、ある程度まで調整することができる。これによって、試行開始から検査刺激が検出されるまでの間に猶予時間を設けることができ、様々な実験操作が可能となった。また、その間に自発的な瞬目が生じることも期待できた。

実験では、抑制刺激を提示した0.5秒後に検査刺激(縞刺激)の提示を開始し、検査刺激のコントラストは3秒かけて最大値まで増加させた。観察者の課題は、検査刺激が見えたら、できるだけ早くその方位をボタン押しにより特定することであった。検査刺激の検出に要した時間が、行動的な反応指標であった。

実験条件は以下の4通りであった。それぞれの実験操作が、検査刺激の検出(知覚交替)に及ぼす効果を検討した。

(a) 連続フラッシュ抑制条件: 抑制刺激と検査刺激のみが提示された。本研究の基本となる実験条件であり、この条件に変更を加えることで、他の実験条件が設定された。なお、この条件の結果は、検査刺激の検出前に自発性瞬目が生じたか否かに応じて、自発性瞬目試行と瞬目なし試行に分類された。

(b) ブラックアウト条件: 検査刺激提示の1秒ないしは1.5秒後に、0.3秒ないしは0.4秒間にわたって、刺激提示ディスプレイを真っ暗にした。これは、瞬目による視覚刺激の変化を模した条件となる。

(c) 随意性瞬目条件: 刺激観察中に手がかりを提示し、手がかりに対してできるだけ早く、意図的に瞬きをするように求めた。手がかりは検査刺激提示の1秒後に提示された。

(d) 随意性開眼条件: 刺激は随意性瞬目と同じであり、手がかりに対して、瞬きではなく開眼を求めた。

(2) 研究課題2: 注意課題遂行中の注意の推移と生理指標の対応関係の解析

研究課題2では、持続的注意を要する課題遂行中の認知処理と、瞳孔反応や瞬目との関係を検討した。この研究では、観察者に数字列から成る視覚刺激を持続的に監視することを求めた。その数字列は、ランダムな遅れ時間の後にカウントアップを始めるように設定し、その変化に対してできるだけ早く反応することを求めた。この際の反応時間が、行動的な反応指標であった。

持続的注意課題では、カウントアップ開始に向けて注意を集中させていく必要があり、そうした内的変化を瞳孔径の変化によりモニターできるかどうか、重要な検討課題であった。また、持続的注意課題をしばらく続けていると、注意の持続が一時的に途切れてしまうことも生じうる。こうした一時的な注意低下に関しても、瞳孔径の変化により検出できるかどうかを検討した。さらに、カウントアップが始まるまでの遅れ時間の分布も操作し、0.5秒から2.0秒の間で変動する短遅延条件と、2.0秒から3.5秒の間で変動する長遅延条件の2種類を設け、異なるブロックで実施した。

研究を開始する時点では、持続的注意課題遂行中の瞳孔径の変化だけでなく瞬目頻度の変化も検討する予定であったが、瞬目については検討を断念し、課題遂行中にはできるだけ瞬きを抑えるように教示せざるを得なかった。これは、観察者によっては、刺激変化を見逃すまいと瞬目をすべて抑制してしまう者や、特に教示を行わないと試行開始時に(おそらくは課題遂行に備えて)頻繁に瞬きをする者があり、特に後者の場合には、瞬目が瞳孔反応計測の妨げになることがあったためである。このためこの研究課題では、瞳孔反応に関してのみ分析を行った。

4. 研究成果

(1) 研究課題1: 視覚意識の切り替わりと生理指標の対応関係の解析

(a) 瞬目や開眼が視覚意識の切り替わりに及ぼす効果

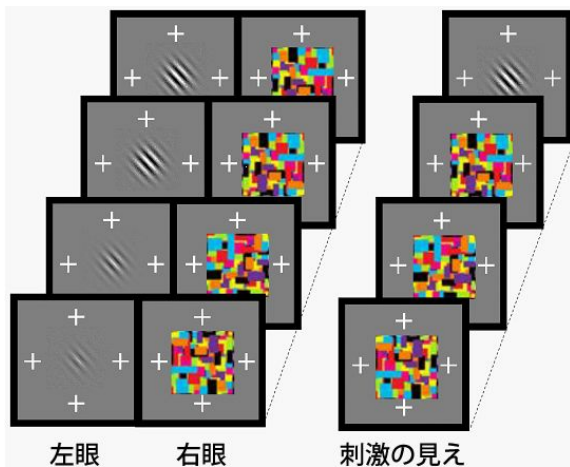


図1: 連続フラッシュ抑制の刺激系列

実験の結果、瞬目や開眼が知覚交替(検査刺激の検出)に影響し、知覚交替が促進されることが明らかとなった。検査刺激の検出時間を実験条件別に比較したところ、瞬目なし試行と比較して、自発性瞬目試行では検出時間が長く、随意性瞬目試行や随意性開眼試行では検出時間が短かった。一方、ブラックアウト試行では、瞬目なし試行との間で検出時間に有意差は認められなかった。次に、瞬目や開眼と知覚交替の時間関係を分析したところ、随意性瞬目試行や随意性開眼試行においては、瞬目の0.4~0.5秒後に刺激検出が頻発しており、瞬目や開眼を意図的に行うことにより、知覚交替が促進されていた。これに対して、自発性瞬目試行でも同様の分析を行ったところ、知覚交替のタイミングは瞬目に対してほぼ独立に分布しており、

両者の間に明確な関係は認められなかった。自発性瞬目試行で検査刺激の検出時間が長かったという結果は、自発性瞬目により検出時間が長くなったのではなく、検査刺激の検出に時間を要した試行では、単純に時間が長いという理由で、自発性瞬目が生じる頻度が高いという傾向があり、その結果として認められた関係であると考えられる。

本研究の結果として、瞬目の種類によって知覚交替に対する効果が異なること、瞬目を模したブラックアウトは知覚交替に影響を及ぼさないこと、意図的なものであれば瞬目だけでなく開眼によっても知覚交替が促進されること、などから、瞬目が及ぼす効果は、瞬目により生じる網膜上で一過性の視覚変化では説明することができない。能動的な眼瞼運動が重要であり、その基礎となる神経過程が視覚意識の切り替わりを変調しうることを示唆している。

(b) 視覚意識の切り替わりが瞬目に及ぼす効果

知覚交替が生じた後に自発性の瞬目が生じるタイミングを分析したところ、知覚交替の0.5~1.0秒後に瞬目が頻繁に生じることが確認された。また、この結果は、知覚交替前に瞬目が生じていない瞬目なし試行でも、瞬目が生じていた自発性瞬目試行でも、同様に認められた。一般に、瞬目は検出課題遂行中には抑制される。そうした抑制により生じた角膜の乾燥に対処するために瞬目が生じているのだとすると、瞬目を行っていない時間の長い瞬目なし試行で、検査刺激の検出後により多くの瞬目が生じるはずであるが、その予測は支持されなかった。また、連続フラッシュ抑制中を通じて提示刺激自体はほぼ一定であることから、知覚交替後の瞬目頻度の増加は、物理的な変化に対する応答とも考えにくい。先行研究においても、視聴しているビデオや会話での話題の切り替わり時に瞬目が頻発することが報告されていることから、本研究で見られた瞬目頻度の増加に関しても、注意や認知処理の切り替わりと関係していると考えられる。

以上の結果から、視覚意識と瞬目との間には、随意的な瞬目（および開眼）によって視覚意識の切り替わりが促され、また、視覚意識が切り替わるとそれに応じて自発性の瞬目が生じるといふ、互いに影響し合う関係があることが示唆された。こうした結果は、人の認知機能を評価する上で瞬目が有用な生理的指標となることを強く示唆するものである。

(c) 連続フラッシュ抑制中の瞳孔反応

連続フラッシュ抑制を用いた実験中は瞳孔径を計測していたが、高コントラストの抑制刺激に対する瞳孔径の縮小が顕著に生じ、知覚交替（検査刺激の検出）の前後での明確な瞳孔反応を捉えることはできなかった。連続フラッシュ抑制は、上記のように、知覚交替のタイミングをある程度予測できるという特徴があり、瞬目が知覚交替に及ぼす影響を調べる上では有用であった。しかし、抑制刺激を10Hz程度の頻度で断続的に更新し続けるという実験条件であり、知覚交替に伴って生じる小さな振幅の瞳孔反応を計測するには、あまり適した条件ではなかったと考えられる。

ただし、手がかりを提示して随意性の瞬目や開眼を求めた実験条件において、瞬目時と比較して開眼時には、手がかり提示後により大きな散瞳が生じるという特徴的な違いを見いだすことができた。随意的な瞬目と開眼は知覚交替に対してほぼ同様の影響を及ぼすが、その際に生じる瞳孔反応が異なるという結果は、瞬目と開眼の影響の生理学的な基盤が異なる可能性を示唆する結果であり、また、瞬目と瞳孔反応の同時計測を活かす知見であることから、今後、さらに検討を進めていく予定である。

(2) 研究課題2：注意課題遂行中の注意の推移と生理指標の対応関係の解析

持続的注意課題遂行中の瞳孔径の変化を検討したところ、数字列の提示からカウントアップの開始にかけて、観察者が注意を集中させていくのに伴い、瞳孔径も散大していくことが確認された。興味深いことに、その散瞳は、時間の関数として同じ割合で生じるわけではなく、遅れ時間の分布に応じて変わることが明らかとなった。本研究では、0.5秒から2.0秒の間で変動する短遅延ブロックと、2.0秒から3.5秒の間で変動する長遅延ブロックで測定を行い、どちらの実験ブロックにも物理的な遅れ時間が等しい2.0秒条件が含まれていた。しかし、散瞳の大きさは、物理的な遅れ時間が等しい2.0秒条件で等しい振幅とはならず、どちらの実験ブロックでも、ブロック内で遅れ時間が最大となるときの（短遅延ブロックでは2.0秒、長遅延ブロックでは3.5秒）に最大の散瞳が生じ、その大きさもブロック間でほぼ等しくなった。つまり、瞳孔の散大は、同一実験ブロック内での遅れ時間の相対分布に伴って変化した。この結果は、我々が認知課題を遂行する際には、実験条件に応じて注意をどのように時間的に集中させていくかを、能動的かつ柔軟に調整していることを反映していると考えられる。

瞳孔の散大が注意の集中の程度を反映しているのであれば、カウントアップ開始時の瞳孔径と、その試行での反応時間には負の相関（瞳孔径が大きいほど、反応時間が短い）という関係が認められることが予想された。しかしながら、分析の結果、瞳孔径と反応時間の間には、統計的に有意な相関は認められなかった。ただし、本研究における反応時間は安定して短い値となっていたことから、床効果のために瞳孔径との相関が認められなかったという可能性も考えられる。この解釈が妥当であれば、注意の集中度の評価に関しては、反応時間よりも瞳孔径の方が鋭敏な指標であるとも考えることができる。

実験を進めるにあたって、注意の持続が途切れてしまう一時的な注意低下が生じることが予測されたが、本研究においては、上述の通り、観察者の反応時間は安定して短い値となり、カウ

ントアップの開始を検出し損ねたり、反応時間が大きく遅れるといった試行はほとんど見られなかった。これは、実験に参加した観察者が、真面目に集中して課題に取り組んでくれたことによると考えられるが、それが故に、一時的な注意低下に関しては検討を進めることができなかった。今後は、遅延時間の変動をより大きくするなど、注意の集中が途切れやすく、一時的な注意低下も生じやすい条件下での検討も必要であろう。

(3) 瞬目と瞳孔反応の同時計測

これまで紹介してきたように、本研究では、瞬目と瞳孔反応のそれぞれについては認知処理との興味深い関係を見いだすことができた。これらの知見は、瞬目と瞳孔反応が、認知処理やその際の脳活動を検討・評価する上で、重要な生理指標たりうることを強く支持するものである。しかしながら、瞬目と瞳孔反応の同時計測を活かすような検討方法の開発に関しては、課題を残す結果となった。瞬目の検討を進めやすい状況下では瞳孔反応の変化を検出しにくく、逆も同様といった事態となってしまったことから、瞬目と瞳孔反応の同時計測を活用するためには、適切な実験課題の選定が重要であると考えられる。しかしながら、研究課題1において、瞳孔反応の結果から、瞬目と開瞼の効果の生理学的な基盤が異なる可能性、つまりは、眼瞼運動に伴う脳内活動に関して、瞳孔径の変化により重要な手がかりが得られる可能性も示唆された。同時に計測した、異なる生理指標の解析結果を参照し合うことで、人の認知処理を多面的に検討できると考えられる。

瞬目や瞳孔径の計測は、CCD カメラさえあれば測定できるという簡便性、そして、本来の課題遂行を邪魔することなく、対象者から最小限の協力さえ得られれば測定できるという非侵襲性と非拘束性といった重要な特徴がある。認知課題遂行中の情報処理やその基礎となる脳神経活動を客観的に評価・検討する上で、今後も、瞬目や瞳孔反応の生理学的基盤、そして、認知処理との相互作用の解明が必要となろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Shimizu, M., & Kimura, E.	4. 巻 20 (3)
2. 論文標題 Eye swapping temporally modulates potency of continuous flash suppression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Vision	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1167/jovi.20.3.1	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14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 10件）

1. 発表者名 佐藤涼矢, 木村英司
2. 発表標題 知覚交替と瞬目の相互作用に関する検討
3. 学会等名 日本視覚学会2022年冬季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryoya Sato & Eiji Kimura
2. 発表標題 Spontaneous and voluntary eyeblinks differentially affect target detection during continuous flash suppression
3. 学会等名 20th Annual Meeting of Vision Sciences Society (Virtual VSS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤涼矢・木村英司
2. 発表標題 随意的な眼瞼運動による知覚交替の促進
3. 学会等名 日本基礎心理学会第39回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shimizu, M. & Kimura, E.
2. 発表標題 Quick buildup of suppression revealed by eye-swapping technique in continuous flash suppression
3. 学会等名 The 15th Asia-Pacific Conference on Vision (APCV2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sato, R. & Kimura, E.
2. 発表標題 Effects of eyeblinks on perceptual switching during continuous flash suppression
3. 学会等名 The 15th Asia-Pacific Conference on Vision (APCV2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤涼矢, 木村英司
2. 発表標題 連続フラッシュ抑制事態における自発的 / 随意的瞬目の効果
3. 学会等名 日本基礎心理学会第37回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤涼矢, 木村英司
2. 発表標題 連続フラッシュ抑制における見えの切り替わりと瞬目の相互作用
3. 学会等名 日本視覚学会2019年冬季大会
4. 発表年 2019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
---------	---------