

静 的 な 筋 収 縮 に よ る 瞳 孔 応 答 の 観 察
- 交 感 神 経 活 動 の 指 標 と し て -

Observation of pupil response due
to static muscle contraction

- As index of sympathetic nerve activity -

石 垣 尚 男

Hisao Ishigaki

Abstract

The relation between dilation of pupil size and heart rate response due to static muscle contraction were investigated in this study. The hand grip during three seconds were used as static muscle contraction. Hand grip contraction of three conditions were 30%, 50% and 100% of maximum hand grip of each subjects.

a) Pupil size was found to be dilated by hand grip contraction. The stronger the hand grip contraction was made, the larger the pupil size was dilated. Dilation of pupil size in 100%max condition was merely 0.42mm in diameter.

b) Heart rate were increased due to during three seconds hand grip contraction likewise pupil size. Similarly, the stronger the hand grip contraction was made, the larger the heart rate were increased.

c) The response of pupil due to muscle contraction was sensitivity compared with heart rate response. It was speculated that the response of pupil comfort to as index of sympathetic nerve activity than heart rate response.

I はじめに

痛みや、音刺激¹⁾²⁾臭い³⁾、体性感覚刺激¹⁾などの精神感覚刺激 (psychosensory stimulation) による散瞳は反射性散瞳⁴⁾と総称されている。このような瞳孔散大は人の情動興奮によってもみられる現象で、瞳孔反応を期待や意志決定などの心理的な情動の指標とする研究⁵⁾もあり、心理学や生体工学の分野でも研究対象となっている。

瞳孔径は瞳孔散大筋 (M. dilator pupillae) と瞳孔括約筋 (M. sphincter pupillae) の互いに拮抗する平滑筋の緊張の程度で決定されている。瞳孔散大筋は交感神経支配であり、一般に交感神経優位で瞳孔は散大に傾く。

身体運動も瞳孔散大をもたらすものであるが、運動による瞳孔散大現象の研究はほとんどない。Ishi-

gaki⁶⁾は、自転車 ergometerを用いたペダリング運動による瞳孔の散大を観察している。ペダリング運動によって観察された瞳孔の散大は、All-out直後に最大の散瞳がみられたが、散大は平均 0.52mm (直径) という微細なものであった。

運動時には脳と活動筋への十分な血液の供給が必要である。このため、運動時には心臓支配の交感神経活動が促進し、心拍数と心拍出量を増加させる。同時に、骨格筋を支配する筋交換神経活動も促進し、末梢血管の抵抗が高まり、全身血圧を上昇させ、活動筋への血液供給を高める働きをする。

また、随意運動の際には、運動を開始する以前にすでに心拍数や血圧が上昇するが、これは運動に対する生体の準備反応とみられる。

Mark⁷⁾は、最大握力の30%の静的な掌握運動によって、前脛骨筋の交感神経活動が高まることを明

らかにした。また、斉藤ら⁸⁾は、最大収縮の20%の張力を維持した静的な手掌握運動による筋交感神経を記録し、運動時に筋交感神経活動が亢進することを観察している。さらに、斉藤ら⁹⁾は、運動開始前にあらかじめ運動開始の時間を予告し、運動(最大握力の30%張力の2分間の持続)に対する準備をさせた場合と、予告なしで運動させた場合の、運動開始前と運動中の筋、および皮膚交感神経活動を観察した。その結果、運動開始前には交感神経活動が高まるとされるこれまでの一般的な報告と異なり、運動開始前には、筋交感神経活動は減少し、皮膚交感神経活動は高まることを観察している。

これまで静的な筋収縮運動と瞳孔反応の関係を調べた研究はない。この研究は、静的な筋収縮運動として、握力をとりあげ、発揮される筋力と瞳孔散大の関係について明らかにするのが目的である。また、瞬時心拍数も同時に観察し、瞳孔応答が交感神経活動の指標となるかも考察し、あわせて、運動開始予告の有無という運動前の準備反応でみられる瞳孔応答も観察する。

II 方法

1 被験者

18-19才の健康な男子大学生 7名

2 測定項目

2-1) 瞳孔径

被験者はAuto-refractometer AR-1100 (NIDEK) の内部視標を利き眼で固視する。Auto-refractometer のVTR信号をArea Analyzer(浜松フォトニクス)にとりこみ、瞳孔部分を白、その他の部分を黒に変換し、瞳孔部分の画素子の数をcomputerでカウントした。あらかじめ直径5mmの正円の画素子をカウントし、これをもとに直径に換算した。sampling timeは1/30secである。

2-2) 瞬時心拍数

Heart Rate Memory (VAIN)の胸部3点誘導信号をDAS-1098BPC(マイクロサイエンス社)にとりこみ、1拍ごとのR-R間隔をbeat/minに変換した。

2-3) 静的手掌握

Digital G・B Dynamometer(竹井機器)のanalog信号をDAS-1098BPC(マイクロサイエンス社)でA-D変換し、sampling time 15msecで検出した。

以上の3つのcomputerの時間関係は完全に同期している。

3 方法

実験装置を図1に示した。被験者は椅子にすわり、利き腕を直角に保持する。被験者はAuto-refractometerの固視点を注視した姿勢で、指示された握力を利き手で3sec間発揮した。

3-1) 発揮する握力

Auto-refractometerの内部視標を注視した姿勢で、最大握力の30%(30%max)、最大握力の50%(50%max)、最大握力(100%max)を出力する。各条件とも予備実験において十分な練習をおこなった。握力する時間は3secである。握力の開始、終了はすべてcomputerの音指示によった。

3-2) 予告音の有無

握力の開始を事前に知らせた場合と、知らせなかった場合の、瞳孔、心拍反応を観察するために、computer音で予告し、握力開始前の瞳孔、心拍反応を記録した。

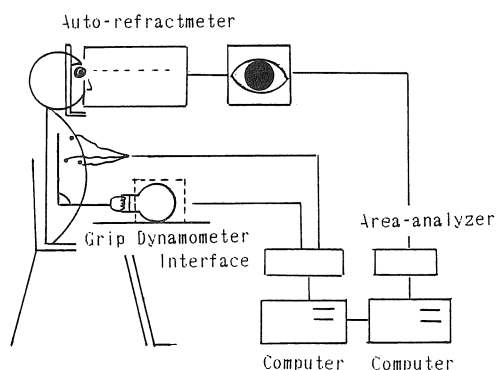


図1 実験のレイアウト

3-3) タイムスケジュール

1試行の測定時間は16secである。測定開始後3secで予告音、8secで握力開始音、11secで握力終了音を鳴らし、16secで終了した。これらの指示音はす

静的な筋収縮による瞳孔応答の観察

—交感神経活動の指標として—

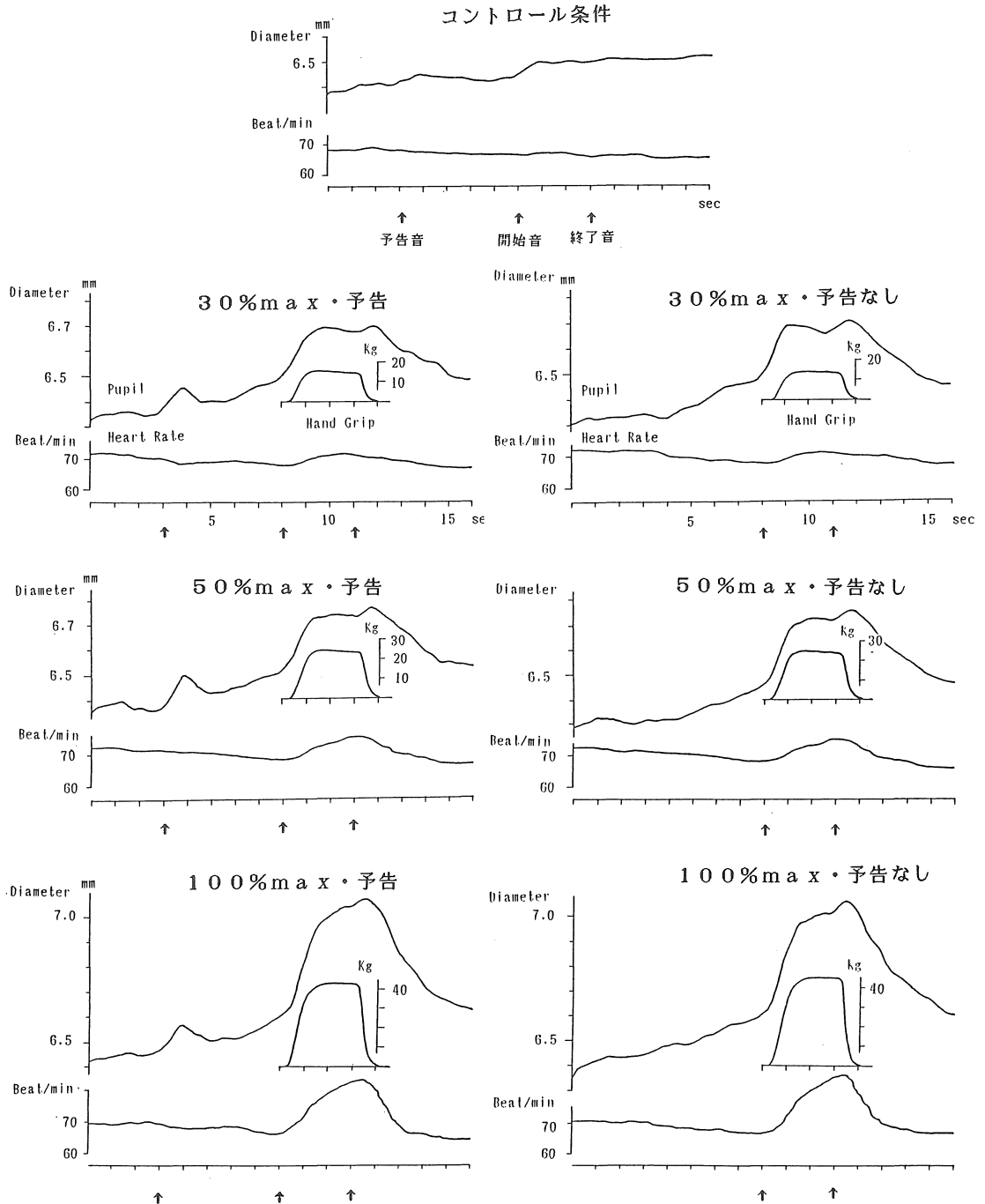


図 2 瞳孔、瞬時心拍、握力の変化

各被験者10回の結果を加算処理し、平均を求め、さらに7名を加算平均した。↑はそれぞれ、予告音、開始音、終了音

べて同一のcomputerによる短音である。予告音と握力終了音は 0.1sec間、握力開始音は 0.2sec間の長さであり、被験者はこれらの音の区別に十分習熟したのち実験をおこなった。

3-4)測定条件と回数

予告音あり、予告音なし(2条件)、握力は、30%max、50%max、100%max(3条件)の6条件である。さらにコントロール条件として予告音、開始音、握力終了音は鳴るが、握力運動をおこなわない条件を設定した。一人の被験者につき、各条件10回測定した。測定順序はすべてカウンターバランスした。被験者がどの条件で握力をおこなうかは、その測定前に「30%」、「50%」、「100%」、「握力なし」とのみ告げた。測定の開始(瞳孔、心拍数の計測開始)は被験者に予測されないようにおこなった。

したがって、被験者は事前に発揮する握力の%は知っているが、予告音があるか、ないかは知らない。0.1secの音が鳴った場合には、5sec後に握力運動を開始することを準備することになる。0.1secの音が鳴らずに、0.2secの音が鳴った場合、たたちに握力運動を開始する。

室内は水平面照度 500 lxで、室内の静粛を保った。実験はPM 7時~PM 10時におこなった。

III 結果

一般に反射性散瞳はヒトでは微小であるうえ、Hippusとの区別が困難な場合もあるので反応パターンは、Hippusを消去する意味からも加算してはじめて可能になるという¹⁰⁾。この実験でも、各条件10回おこなった瞳孔反応、瞬時心拍、握力をcomputerで加算し、各被験者の平均を求めた。図 2は7名のデータを平均化したものである。

1)コントロール条件

この条件は、あらかじめ被験者に「握力なし」と告げたもので、被験者は開始音で掌握運動をおこなわない。この条件では、心拍数は測定中、わずかに減少する傾向がみられる。瞳孔径は測定終了までに約 0.1mmの散瞳があった。予告音、開始音、終了音による散瞳はほとんど観察されない。

2) 発揮された握力

握力開始音で被験者は指定された掌握運動を 3sec間おこなった。開始後、ほぼ 1secで握力はpeakに達し、終了音まで一定であった。終了音の時点の握力は、30%max(予告あり)で14.3kg、30%max(予告なし)で13.7kg、50%max(予告あり)で23.4kg、50%max(予告なし)で23.7kg、100%max(予告あり)は45.2kg、100%max(予告なし)は44.7kgであった。

100%maxの握力を基準としたとき、30%max(予告あり)は31.7%、おなじく30%max(予告なし)は30.6%、50%max(予告あり)は51.7%、50%max(予告なし)は52.9%であり、ほぼ所期の握力が発揮されていた。また、予告があるか、ないかといった条件に関わりなく、発揮された握力には統計的な差はなかった(T-test)。

3) 発揮された握力と瞳孔散大の程度

瞳孔は測定開始とともに徐々に散大している。予告条件のすべてに、予告音の直後に0.07~0.08mm程度の一過性な瞳孔散大がみられる

掌握運動によって、図に明らかのように瞳孔は散大した。瞳孔は掌握開始とともに急激に散大した。30%max、50%maxでは約 1sec後にpeakに達し、その後、握力終了までほぼ一定であった。100%maxでは約 1secまで急激に散大したのち、終了まで徐々に散大した。開始音の時点の瞳孔径を基準としたとき、3sec後(終了音)では30%max(予告あり)で0.17mm散大している。30%max(予告なし)でも0.17mmである。また、50%max(予告あり)で0.22mm、50%max(予告なし)で0.25mmであり、100%max(予告あり)では0.42mm、100%max(予告なし)で0.41mmであった。

100%maxの場合の散大を基準としたとき、30%max(予告あり)は40.9%であり、おなじく30%max(予告なし)は42.1%、50%max(予告あり)は51.3%、50%max(予告なし)は62.3%であった。予告があるか、ないかといった条件に関わりなく、散大には統計的な差はなかった。

4) 心拍数

測定開始後、心拍数は徐々に減少し、掌握開始によって増加した。心拍数も、図に明らかのように発揮された握力が強いほど増加も大きかった。開始音の時点をもとにした場合、3sec後(終了音)の時点

の心拍数の増加は、30%max（予告あり）で3.1 beat/min、30%max（予告なし）で3.3 beat/min増加している。また、50%max（予告あり）では6.6 beat/min、50%max（予告なし）で6.7 beat/minであり、100%max（予告あり）では16.9 beat/min、100%max（予告なし）で17.5 beat/minであった。100%maxの場合の増加を基準としたとき、30%max（予告あり）は18.2%であり、おなじく30%max（予告なし）は18.8%、50%max（予告あり）は39.1%、50%max（予告なし）は38.2%であった。予告があるか、ないかといった条件に関わりなく、心拍数の増加には統計的な差はなかった。

IV 論議

この実験では、3sec間の静的な手掌握によって出力された握力と瞳孔散大の関係を観察した。30%max、50%max、100%max条件ともほぼ所期の筋出力であった。これに対して完全な比例関係ではないが、瞳孔は発揮された筋出力におおむね比例して散大している。また、握力開始後 1.0sec間、瞳孔は急激に散大しており、筋出力の立上がりとはほぼ fitしている。

一方、心拍も30%max、50%max、100%max条件とも増加している。発揮された筋出力が強いほど心拍数の増加も大きいですが、増加率は瞳孔の増加率に較べて少ない。心拍の増加（立ちあがり）は瞳孔に比較して速くはない。

以上の結果からすると、瞳孔の応答性は心拍の応答に比較して鋭敏であり、発揮された筋出力におおむね比例して散大するようである。

瞳孔は終了音とともにさらに 0.1mm程度散大している。この散大の程度は、発揮された握力には関係なく、ほぼ同じであることから終了音による反射的な散瞳によるのではないかと考えられる。また、いずれの条件でも、瞳孔は握力を終了して約 5secでほぼ開始音の時点のレベルに戻っている。

この実験では、あらかじめ握力の開始時点を知らせることによって、運動準備前の被験者の内的興奮が、瞳孔、心拍反応に表れるかもみている。図に明らかのように、予告したか否かにかかわらず、測定開始から握力の開始までの 8sec間に瞳孔は徐々に散大し、心拍数はやや減少している。この間のパターンはすべての条件でほぼ同じである。予告音なしで、開始音でただちに握力させた場合には、この間、瞳孔は散大しないのではないかと予測した。

このために、被験者には測定の開始がわからないようにし、いつ握力するかが予測されないように設定した。しかし、瞳孔は徐々に散大している。このことは、このような条件設定でも被験者の内的な興奮が高まっていることを示しており、瞳孔応答の鋭敏性を示唆するとともに、条件設定に配慮を要することも表している。

予告音で、0.07~0.08mm程度の一過性な瞳孔散大が起きている。これは音による反射性の散瞳と思われる。しかし、コントロール条件のように、事前に「握力なし」と指示された場合では、音による散瞳はほとんど起きておらず、「握力する」ことが事前にわかっている場合に起きている。心理的な構えの違いが瞳孔応答に影響する現象ではないかと考えられる。

今回の実験でみられた瞳孔応答がどのような機序によるかは明らかではない。握力開始前の散瞳は内的な興奮が瞳孔に表れた情動性的のものであろう。正中神経刺激によって瞳孔散大がおこる¹⁾ことからみて、握力開始後は筋収縮に伴うなんらかの刺激によるものかもしれない。くわえて随意運動であるため、なんらかの情動性の関与も否定できないであろう。今後の課題としたい。

V 要約

静的な筋収縮運動として、3sec間の握力をおこない、これによって発揮される筋出力と瞳孔散大の関係を観察した。あわせて、瞬時心拍反応も測定し、交感神経の指標としての瞳孔応答と心拍応答を比較した。

- 1 瞳孔は握力によって散大した。散大の程度は発揮された出力にかなり比例しており、強い筋出力であるほど瞳孔の散大も大きかった。100%maxの条件で最大に散瞳し、0.42mm（直径）の散瞳であった。
- 2 心拍数も 3sec間の握力の間に増加した。心拍数の増加の程度も強い筋出力であるほど大きかった。しかし、増加の程度は瞳孔の散大に比較して少なかった。
- 3 筋出力による瞳孔の応答は、心拍応答と比較して鋭敏であり、瞳孔応答は交感神経系の指標として心拍より適合していると考えられた。

文献

- 1)大野新治、真崎浩見、川野庸一「聴覚および体性感覚誘発瞳孔反応」日眼会誌88(2)、169-177、1984
- 2)M. Clyner : The non-linear biological dynamics of unidirectional rate sensitivity illustrated by analog computer analysis, pupillary reflexes to light and sound, and heart rate behavior. Annals of New York Academy of Sciences, 98,806-845,1962
- 3)三浦武夫、石橋富和、北川睦彦「臭気の生理・心理学的研究(第1報) - 臭気と瞳孔反応 -」大阪府立公衆衛生研究所所報、労働衛生編、11,39-44、1973
- 4)O.Lowenstein & T.E. Loewenfeld : Role of sympathetic and parasympathetic systems in reflex dilation of the pupil. Archives of Neurology and Psychiatry,64(3),313-377,1950 -
- 5)松永勝也、熊谷陽子、福田恭介、船津孝行「音方向弁別時の瞳孔運動」九州大学哲学年報
- 6)H.Ishigaki., M.Miyao & S.Ishiharaish :Change of pupil size as a function of exercise. J of Human Ergology,20,61-66,1991
- 7) A.L.Mark., R.G. Victor., C. Nerhed., & B.G. Wallin : Microneurographic studies of mechanisms of sympathetic nerve responses to static exercise in human. Circ Research,57,461-469,1985
- 8)齊藤 満、間野忠明「微小神経電図法による静的筋収縮時のヒト交感神経活動の観察」体育学研究、31(3)、235-241、1986
- 9)齊藤 満、間野忠明「運動予測と皮膚及び筋交感神経反応」体力科学、41(1)、117-123、1992
- 10)大野新治「反射性散瞳 - 精神感覚刺激と瞳孔 -」神経進歩、29(5)、775-784、1985

(受理 平成 5年 3月 20日)