

運動による瞳孔径の変化

石 垣 尚 男

The Change of Pupil Size by Exercise

Hisao ISHIGAKI

The purpose of this study is to investigate how the pupil changes, and the relationship between the deterioration of the visual acuity and the pupil size by exercise.

Result were as follows.

1. The temporary deterioration of visual acuity was not caused by mydriasis.
2. Maximum mydriasis was 0.52mm of diameter as compared with the size before exercise in this experiment. The mydriasis by exercise was small. It was conjectured that the heavier the exercise load, the longer the exercise time, the larger the mydriasis become.
3. After exercise, the pupil size became smaller than the size before exercise. It was considered that the myosis occurs quickly after exercise, and it continues a comparatively long time.
4. There were found almost parallel relations between the mydriasis and the increase of heart rate, but there was a difference between the recovery processes of the pupil and heart rate.

1 はじめに

瞳孔は瞳孔散大筋と括約筋のバランスでその大きさが決定されている。2つの筋のバランスはいろいろな因子により影響されるので、瞳孔の大きさは絶えず変動している。両筋は自律神経の支配下にあることから、瞳孔は自律神経系の指標の1つとされている。瞳孔の大きさを決定する因子の1つとして筋の収縮¹⁾がある。一般に筋運動により瞳孔は散瞳するとされているが、これまで筋運動の負荷と散瞳の程度は明確ではない。また、瞳孔のはたらきの1つとして、焦点深度の調節がある。瞳孔²⁾は刺激光にたいして最高の視力を得るように、常に最適な大きさにコントロールされている。このため、刺激光が一定である場合に、瞳孔が散瞳すれば、焦点深度は浅くなり、球面収差が大きくなるので視力は低下すると考えられる。先の研究³⁾で、運動によって一過性に視力は低下すること、視力低下の主因は調節力の低下にあることを推測した。しかし、運動による散瞳の程度が明らかではなかったため、散瞳による視力低下の可能性も否定し得なかった。そこで、この研

究では以下の点について明らかにすることを目的とした。

- 1 運動による視力低下は散瞳によるものか
- 2 運動と瞳孔にはどのような関係があるか

2 方法

2・1 装置

瞳孔面積の測定

被験者の左眼に赤外線をあて、これを赤外線カメラで撮影し、video pupulography (浜松フォトニクス Inc.)のモニターテレビに映す。モニターテレビ画面では瞳孔は白く映しだされ、高いコントラストによって瞳孔以外の部分と区別される。この画像をAD変換し、白くスライスされた瞳孔部分の画素子の数を personal computer PC-9801 によりカウントした。瞳孔を正円とみなし画像処理により画素子数から瞳孔面積、直径を求めた。あらかじめ、直径5 mmの正円の画素子数を算出し、これを較正值とした。画像入力装置は512×512画素、輝度レベル256、取込速度は1/60secである。まぶたや、まつげが瞳孔にか

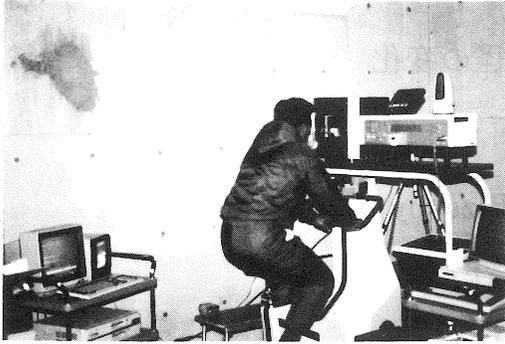


図1 実験装置

かることをさけるため、画面に window をかけ瞳孔の周辺だけ走査するようにした。まばたきしないように、また、眼を細めないように注意を与えた。測定は毎秒30回のサンプリングタイムで、10秒間連続し、計300個のデータを収録した。このうち前半5秒、計150個を平均し、測定値とした。

視力測定

動体視力計 AS-4A (KOWA Inc.) のラ氏環がハーフミラーをとうして、被験者の前方2 m におかれている黒色ボードに投射されるように視力計を改造した(写真)。視力計のラ氏環は視距離30m で視力1.0 に相当するものである。ラ氏環の遠方→近方への験者の手動によるスライドにより、ボード上に投射されているラ氏環が小→大となるので、被験者は次第に大きくなるラ氏環の切れ目の方向(上下左右のいずれか)を両眼視で判読する。切れ目が判読できたただちに有声応答し、判読できた視力計の距離から視力値に換算する。この装置では絶対値としての視力値の算出は困難であるが、相対的な視力変化は測定可能である。ラ氏環は 2 cd/m^2 、黒色ボードは 1 cd/m^2 である。

運動負荷の設定

運動は自転車エルゴメーターの60rpm/min のペタリングとし、被験者の $\dot{V}O_2\text{max}$ を強度の指標とした。各被験者の $\dot{V}O_2\text{max}$ は、Åstrand の自転車エルゴメーターによる推定法⁴⁾から求めた。Medical Telemeter (NEC 三栄 Inc.) により1分ごとの心拍数を記録した。

手続き

予備実験において、被験者に瞳孔および視力測定について習熟させ、視力についてはあらかじめ同装置により各被験者の最高視力値を把握した。実験室

は $3 \times 4 \text{ m}$ の小室で、実験中の照度は一定である。照度に順応するため入室15分後から実験を開始した。

3 実験と結果

実験1 運動による瞳孔変化と視力低下の関係

10lx という薄明視下における瞳孔変化と視力との関係を明らかにすることを目的とした。被験者は19—26才の眼疾患のない成人男子10名(含む、矯正)で、5 m 視力(単眼視標視力測定装置 kowa Inc.) の平均は両眼視で1.50であった。推定された $\dot{V}O_2\text{max}$ の平均は 3.37 l/min であった。運動負荷は各被験者の $\dot{V}O_2\text{max}$ の20%、40%、60%、80%の漸増負荷とし、それぞれ10分ずつ、計40分間連続した。運動後を30分とし、自転車エルゴメーター上に座したままとした。もちいた負荷は平均37watt(20%)、88w(40%)、137w(60%)、186w(80%)であった。瞳孔および視力測定時はペタリングを停止し、頭部固定器で顎と頭部を固定し、頭部の動揺がないようにした。瞳孔および視力の測定は運動前、20%、40%、60%、80%の各10分のペタリング終了直後、および運動10分、20分、30分後とした。まず瞳孔を10秒間測定し、つぎに視力を3回連続して測定した(平均値)。

結果

図2は瞳孔、視力、および心拍数の変化(10名の平均値)である。瞳孔は直径で表した。視力は動体視力計による視力値を視角に換算し、運動前の視角を100%としたときの低下率で示した。運動前との差は Wilcoxon Matched pair signedrank test で検定した。有意差は図中に示す。

心拍数：運動前80拍/分の心拍数が20% $\dot{V}O_2\text{max}$ では約90拍/分、40% $\dot{V}O_2\text{max}$ では100-110拍/分、60% $\dot{V}O_2\text{max}$ では140-150拍/分、80% $\dot{V}O_2\text{max}$ では160-180拍/分に増加した。

瞳孔：運動前の瞳孔径の平均は6.50mmであった。20% $\dot{V}O_2\text{max}$ で6.51mm、40% $\dot{V}O_2\text{max}$ で6.52mm、60% $\dot{V}O_2\text{max}$ で6.53mmときわめてわずかに散瞳した。最大の散瞳は80% $\dot{V}O_2\text{max}$ の直後で6.56mmであり、前値にたいして0.06mmの散瞳であったがいずれも有意な変化ではなかった。運動後は運動前より縮瞳した。運動後20分で前値にたいして0.18mm有意に縮瞳した。

視力：負荷の漸増にともない視力は有意に低下し

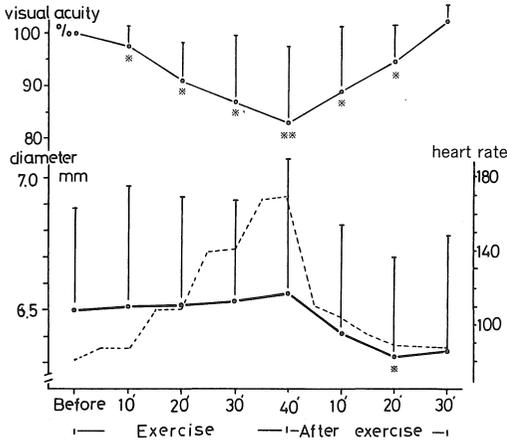


図2 20%, 40%, 60%, 80% $\dot{V}O_2\max$ の各10分間, 計40分のペタリングによる瞳孔直径, 視力, 心拍数の変化 照度10lx 被験者10名の平均値±SD
* P<0.05 ** P<0.01

た。80% $\dot{V}O_2\max$ で視力は最も低下し, 低下率は16.7%であった。運動後は次第に回復し, 運動後30分前で値に戻った。

実験2 1時間連続運動による瞳孔変化

一定の運動負荷でも運動時間が長くなると散瞳がすすむものと仮説し, 照度300lxの明所視下において, 60% $\dot{V}O_2\max$ で1時間連続運動をしたときの瞳孔変化をみた(図3)。被験者は実験1と同じもの8名。60% $\dot{V}O_2\max$ の負荷の平均は143wattであった。15分間ペタリングしたら, 瞳孔を測り, これを4回繰り返して, 計60分間ペタリングした。瞳孔測定中のペタリング停止時間は約15秒である。運動後は, 自転車エルゴメーター上に座したまま, 10分, 20分, 30分に測定した。調節状態を一定にするため, 実験1の装置をもちい, 視力値1.0に相当するラ氏環を2.0m前方に提示し, これを注視させた。

結果

心拍数: 運動前87拍/分(8名の平均値)の心拍数が運動開始とともに増加し, 開始後5分で140拍/分となった。以後も徐々に増加し, 60分では161拍/分に達した。

瞳孔: 運動前の瞳孔径は4.87mmであった。運動開始後15分, 30分ではそれぞれ5.13mm, 5.07mmとな

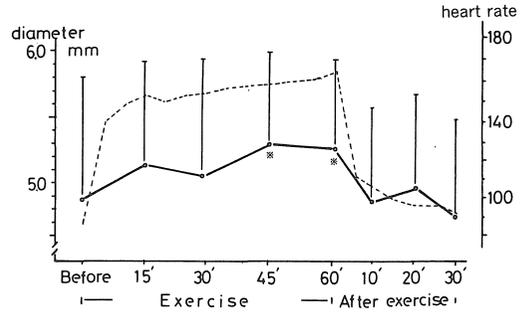


図3 60% $\dot{V}O_2\max$ で1時間連続ペタリングを負荷したときの瞳孔直径と心拍数の変化 照度300lx 被験者8名の平均値±SD
* P<0.05

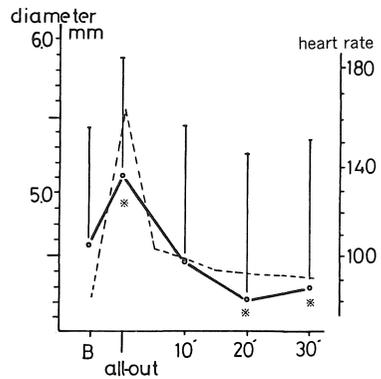


図4 100% $\dot{V}O_2\max$ を負荷し, all-out 時の瞳孔直径と心拍数の変化 照度300lx 被験者5名の平均値±SD
* P<0.05

ったが有意な散瞳ではなかった。開始後45分で5.29mm, 60分で5.26mmと, 約0.4mmの有意な散瞳を示した。運動後は10分で4.85mm, 20分で4.96mm, 30分で4.74mmと, 運動前より縮瞳する傾向を示した。

実験3 all-out 時の瞳孔変化

最大散瞳はall-outに達する最大負荷運動で起こるものと仮説し, 300lxの明所視下において, 100% $\dot{V}O_2\max$ の負荷でall-outに達するまでペタリングをし, 直後の瞳孔を測定した(図4)。被験者は実験1とおなじもの5名。100% $\dot{V}O_2\max$ の負荷の平均は270wattであった。all-outには1分52秒~5分04

秒で達し、平均3分36秒であった。運動後は自転車エルゴメーター上に座したままとし、10分、20分、30分に測定した。注視状態は実験2と同じ。

結果

心拍数：運動前83拍/分の心拍数がall-out時には166拍/分に達した。運動後は速やかに回復したが、30分後でも90/分であり完全に回復していなかった。

瞳孔：運動前4.59mmの瞳孔がall-out直後5.11mmとなり0.52mm有意に散瞳した。運動後は10分で4.46mm、20分で4.31mm、30分で4.38mmとなり運動前より縮瞳した。

4 考 察

瞳孔の役割の1つに、収縮により焦点深度を深め、球面収差や色収差を減少させるという働きがある。Campbell²⁾は人工瞳孔を用い、視標の輝度を変化させて、最高視力を得る瞳孔径を測定した。その結果、瞳孔は刺激光の強さに対して、常に最高の視力を得るように制御されていることが明らかとなった。従って、このことは、刺激光が一定であるとき、なんらかの要因で瞳孔が散瞳すれば、焦点深度が浅くなり、収差が大きくなるため視力は低下することを示唆している。瞳孔は瞳孔散大筋の収縮、および瞳孔括約筋の弛緩で散瞳することから、交感神経系優位となる身体運動は瞳孔を散瞳させる要因の1つとなる。先の研究³⁾で、運動が視力に与える影響を、調節、微動調節、屈折、中枢との関係から調べた。その結果、運動によって一過性に視力は低下すること、視力低下は負荷の強いほど大きいこと、視力低下は主として調節力の低下によると考えられることを明らかにした。しかし、先の研究では視力と瞳孔を同時に測定できなかったため、果たして、運動による視力低下に瞳孔が関与しているかは不明であった。

本実験では、まずこの点を検証するために、実験1で先の研究とほぼ同じ照度である10lxという薄明視下で、運動による散瞳と視力の関係をみた。 $\dot{V}O_2$ maxの20%、40%、60%、80%の各10分の運動を負荷したが、運動前にたいして最大の散瞳が直径で0.06mmと、散瞳は極めてわずかであった。しかし、視力は負荷の漸増にともない有意に低下し、運動後30分で回復するという、先の研究とほぼ同様の結果となった。したがって、このことから、運動による一過性の視力低下は散瞳によるものではないことが明らかとなった。

つぎに、運動による散瞳の程度であるが、本実験で最大散瞳がえられたのは、all-outに達した最大負荷時であった。しかし、散瞳は運動前にたいして直径で0.52mmと僅かである。また実験2において、60% $\dot{V}O_2$ maxの負荷で1時間の運動を連続したが、有意な散瞳が得られたのは運動開始後45分、60分の時点で、散瞳はそれぞれ約0.4mmと僅かである。対光反応では最大8mmから最小2mmにまで及ぶ⁹⁾とされるダイナミックな瞳孔の変化と比較して、運動による散瞳は極めて小さいものといえる。

実験1で $\dot{V}O_2$ maxの20%、40%、60%、80%と負荷を漸増したところ、極めて僅かな散瞳であったが、負荷が強いほど散瞳が大きという関係にあった。照度10lxの実験1による散瞳が照度300lxの実験2、実験3に比較して小さかったのは、10lxという照度にたいする瞳孔の対光反応によって、大きく散瞳しているため、運動による散瞳はごくわずかし表れなかったためと考えられる。今回の実験では結論できるまでには到らないが、実験2、実験3の結果を併せて考察すると、運動による散瞳は負荷が強いほど大きく、また、同じ強度でも運動時間が長くなると散瞳が大きくなるという関係があると思われる。

運動後、瞳孔は運動前より縮瞳することが明らかとなった。いずれの実験でも運動後10分ですでに運動前より縮瞳していること、また運動後30分を経過しても回復していないことからみて、縮瞳は速やかに起こり、縮瞳は比較的長い時間続くものと思われる。実験1、2、3の最小縮瞳は運動前にたいし、それぞれ0.18mm、0.13mm、0.28mmで、運動後の縮瞳も大きなものではない。

心拍数との関係では、運動中の心拍数の増加と散瞳はほぼ平行関係がある。しかし、運動後は瞳孔は一旦、運動前より縮瞳し、その後徐々に回復することにおいて心拍数の変化とは異なっており、心臓機能と瞳孔にあたる自律神経系の機序が異なることを示すものと思われる。

今回の実験により、運動による瞳孔の変化は極めて小さいこと、また10lxのような照度が低い環境では更に瞳孔変化は微小になるという知見が得られた。今後の研究において、運動と瞳孔の関係をみる場合には、瞳孔変化の最も表れやすい照度の設定が重要になろう。今後、高照度から低照度までの様々な照度下における運動による瞳孔変化から、最適照

度を求める実験をおこなう予定である。

5 要 約

運動を自転車エルゴメーターのベタリング運動とし、運動による瞳孔変化が視力に与える影響、および、運動と瞳孔の関係についての実験をおこなった。

1 視力は負荷の漸増にともない一過性に低下したが、瞳孔の散瞳はきわめてわずかであった。運動による視力低下は散瞳によるものではないことが明らかとなった。

2 all-out 直後に最大散瞳が得られ、運動前に比較し0.52mm 散瞳した。また1時間の連続運動では、運動時間が長くなると散瞳はすすんだが、最大でも約0.4mm ほどの散瞳であった。運動による散瞳は僅かであること、負荷が強いほど散瞳は大きい関係にあるものと推測された。

3 運動後は運動前より縮瞳し、縮瞳は速やかで、比較的長い時間続くものとも思われた。しかし、縮瞳も大きなものでなかった。

4 運動中の縮瞳と心拍数の増加はほぼ平行していたが、運動後は異なる経過をたどった。

参考文献

- 1) 大塚 任 他編：臨床眼科全書. 第6巻, 瞳孔, 239, 金原出版, 東京, 1970.
- 2) F. W. Campbell and A. H. Gregory. : Effect of Size of Pupil on Visual Acuity, Nature, September, 24, 1121-1123, 1960.
- 3) 石垣尚男：15分間の自転車エルゴメーター運動による視力低下と要因分析, 体育学研究, 33, 185-192, 1988.
- 4) Åstrand. P. O, Rodahl. K : Textbook of work physiology オストランド運動生理学, 461-481, 大修館, 東京, 1976.
- 5) 勝木保次 編：生理学体系VI. 感覚の生理学 第9章. 眼の調節と瞳孔運動, 492-494 東京, 1967.

(受理 平成元年1月25日)