

暗順応過程における瞳孔対光反応の変化

鶴飼一彦・松井孝子・堀 菜穂子

北里大学 医学部 眼科学

〒228 相模原市北里 1-15-1

1. はじめに

瞳孔の求心路は一般の視覚の経路と異なっている可能性もある。Ukai¹⁾はチェッカーボードのパターン反転刺激に対し、平均輝度一定でも瞳孔は反応すること、チェックサイズと瞳孔変化の関係は、瞳孔面積の基線の変化と反応量の変化で異なり、2種類の経路の空間特性を表している可能性のあることを報告した。その後、Youngら^{2,3)}は、正弦波格子の輝度反転や色光の色相変化を刺激としてえられた瞳孔反応を一過性と持続性の二つの反応に分離し、それぞれ神経節細胞の対応する型の性質と関連づけて議論した。単純な光刺激でも視覚系には一過性、持続性の反応が存在することが知られている。我々は、暗順応状態での各種強度の光刺激(5秒間)に対する瞳孔対光反応を測定した結果、主として桿体が働いている光強度領域では刺激のオン時に一過性の縮瞳があらわれ、錐体が働く領域では持続性の反応(縮瞳保持)が得られることを報告し、両成分は視細胞およびそれに続く視路の性質を反映すると考察した⁴⁾。このことは、Youngらの瞳孔の反応に一過性・持続性両成分が存在すること^{2,3)}、動物の生理実験では桿体からの出力は一過性の反応を示す神経節細胞のみにつながっていると報告されていること⁵⁾、などから確かなことと思えた。今回、さらにこの考えを確かめるために、暗順応過程における対光反応を記録したところ、予期せざる結果となった。この実験について報告するとともに、そのような結果が得られた原因について

考察する。

2. 方法

2.1 刺激と測定装置

用いた刺激と測定装置は前報⁴⁾と同様であり詳細はそちらを見ていただきたい。すなわち、刺激は浜松ホトニクス製イリスコーダに内蔵された、橙色LED(ピーク波長605nm)によりマクスウェル視光学系により被験者の右眼に与えられる(視野18度円形, 中心視)。刺激の最大強度は、3,000 TdでNDフィルタを用いて減弱させる。今回は、0.7 log Tdを中心として、補助的に0.1と1.3 log Tdを用いた。刺激の持続は5秒である。瞳孔反応は前述のイリスコーダを用い、被験者の左眼から記録した。記録のサンプリングは60Hzであった。刺激前1秒、刺激中5秒、刺激後5秒間が記録される。

2.2 手順

被験者はまず2分間明順応を行う。このために眼底カメラの照明光が用いられた。順応光の広さは30度以上である。被験者は前順応が終了後ただちに暗室に置かれ、以降、暗所にて2分ごとに1回、30分までで計15回、5秒刺激に対する対光反応を記録した。

これを1試行とし、被験者と刺激強度を変えながら、各条件2~5試行を行ない加算平均して瞳孔反応波形を求めた。

2.3 被験者

被験者は屈折異常以外に眼科的疾患を持たない5名で、1名(KU)は40歳代男性、他は20代女性である。うち2名では刺激輝度条件は0.7 log Td一種類である。

3. 結果

最初に光覚増分閾の暗順応過程での変化（暗順応曲線）を図1に示す。この図は、定められた手順にしたがって2分に一回瞳孔反応を測定している合間にゴールドマン暗順応計によって自覚的に求めた。10分前後に cone-rod break が認められる。31分で、瞳孔測定は終了した。31分から38分にかけて増分閾が低下しているが、この低下分が瞳孔に対する刺激光により暗順応が妨げられていた量となる。このときの瞳孔に対する刺激光強度は $1.3 \log \text{Td}$ であった。

図2に暗順応経過時間をパラメータとした5秒刺激に対する被験者 NH の瞳孔反応を示す。刺激強度は3種類である。瞳孔反応波形は、同一条件の全試行の反応を平均した後、さらに経過時間4分と6分、8分と10分、... というように2回の測定を平均してある。図3には別の被験者の瞳孔反応を示す。図4には暗順応過程における瞳孔面積（光刺激直前の値）の変化を5名の被験者すべてについて示した。図5には暗順応過程における瞳孔反応量の変化を面積値で示した。

4. 考察

まず、図1からは、今回の測定が暗順応過程に与える影響が少ないことがわかる。次に図4からは暗順応過程における瞳孔面積の変化がきわめて個人差の大きいことがわかる。同一人での再現性はばらつきで見るとかぎり良いと思われる。特に個人差と比べれば試行ごとの同一人で

のばらつきは小さい。特に初期過程（10分まで）では、2分ですでに完全に暗順応したときの瞳孔面積の85%まで回復しているものが3名いるのに対し、残りの2名は2分では50%以下、10分でやっと85%程度まで散大している。これだけでも興味ある事実である。ただし、今回は明順応直後の瞳孔面積が測定されていないために、この比は面積の絶対値で比較している。刺激前の瞳孔の大きさのみならず、図5では、光に対する反応量も個人差が大きいことが認められる。3名では最初のプロット（3分）を除くと、反応量が時間によってほとんど変化しない。残り2名では20分くらいまでは

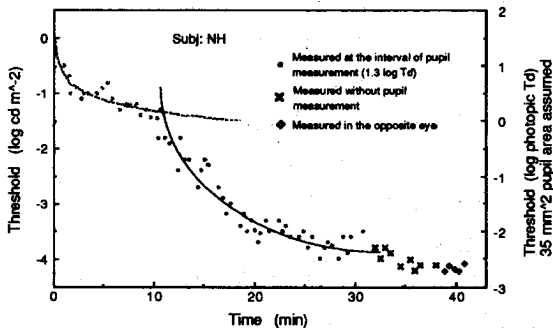


図1 暗順応曲線。瞳孔反応を記録する合間に自覚的に求めた。

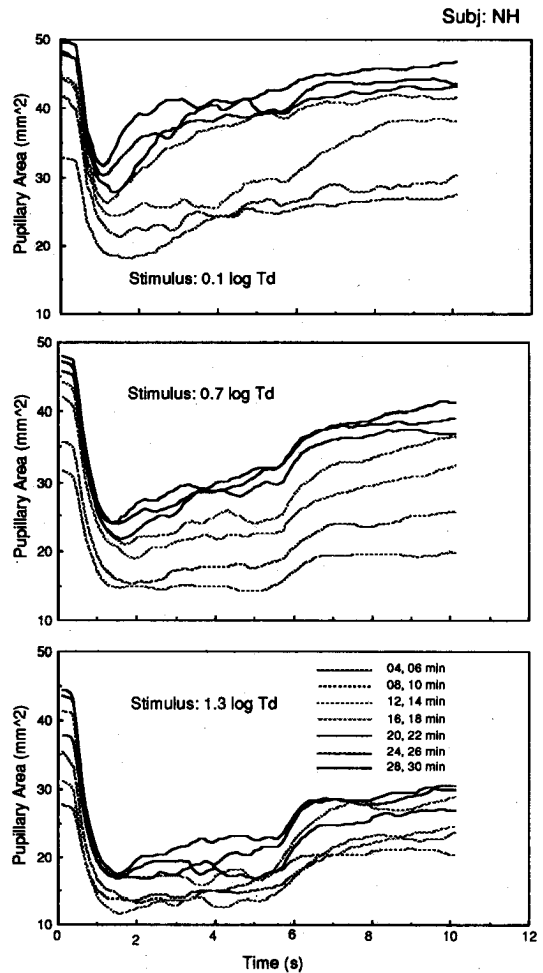


図2 暗順応経過時間をパラメータとした5秒刺激に対する瞳孔反応。3種類の刺激強度に対するグラフ。被験者 NH。

反応量が増加するが、けっしてきれいな曲線ではなく、cone-rod breakも明確ではない。数回の平均でこのようなデータしか得られないのであるから、今回使用した輝度レベルで瞳孔の反応量をもって暗順応曲線を描くのは非常に困難である。瞳孔の反応量により暗順応曲線を求めた例として過去には Ohba and Alpern⁷⁾の報告があるが、少数の被験者で、条件の異なった環境（特に、刺激時間が今回のようには長くない）で得た測定であろうと思われる。このように、被験者の光覚感度を瞳孔を用いて測定すること自体に困難がある。しかしながら、刺激の強さを変化させたときの瞳孔反応量の変化は、数回の平均処理で十分信頼に足るデータが得られると考えられる。

前回報告したように、暗順応下での瞳孔対光反応は刺激強度によって波形が異なり、弱い刺激では一過性、強い刺激では持続性の反応が得られた。この原因として、桿体の反応が一過性反応を示す神経節細胞のみに伝達されるという生理学的の知見との関連を指摘したが、もし、この説が正しければ、暗順応過程の初期では持続性、後期で一過性の反応が得られるはずである。図2に示すように、被験者NHではこの仮説を裏付けるような反応が得られた。HH, KUでもここには示さないがそのような傾向が見られた。しかし、被験者TMでは常に一過性の反応しか得られず、図3に示す被験者NNでは逆に初期の波形の方が一過性を示している。したがって、先の仮説は全体として成立しない。

では、完全な暗順応下で3名の被験者で一致して得られた、瞳孔波形の一過性、持続性とい

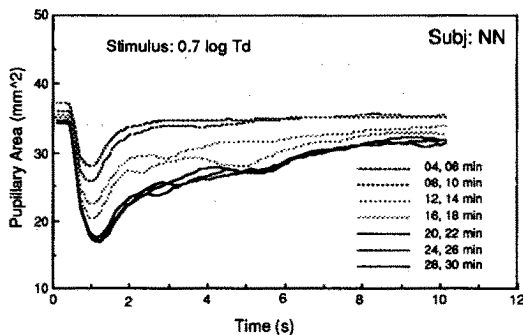


図3 図2と同様。被験者NN。

う性質の変化が、暗順応過程においては被験者によって異なった結果として現れた原因は何であろうか。ヒントは図4と図5にあった。すなわち、被験者NNでは図4をよく見るといったん散大した瞳孔が時間とともにわずかに縮小していることが認められる。にもかかわらず、図5に示すように反応量は暗順応とともに増加していつている。このとき、光刺激による最縮瞳

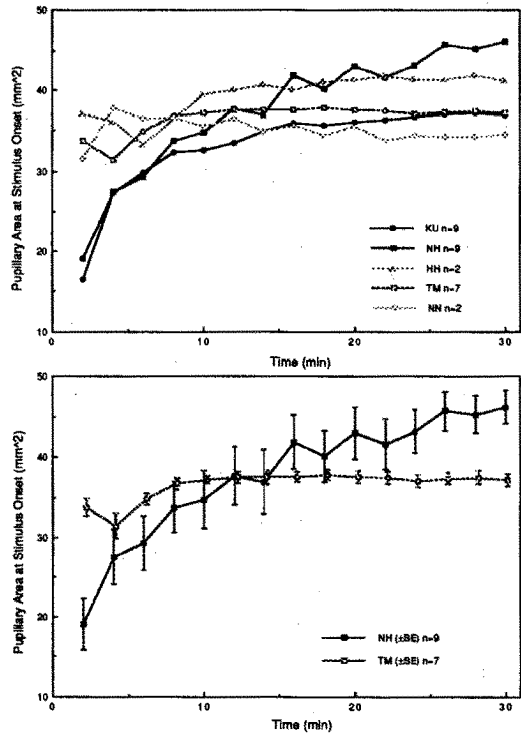


図4 暗順応過程における瞳孔刺激前面積の変化。5名の被験者。下は2名のSEを示す。

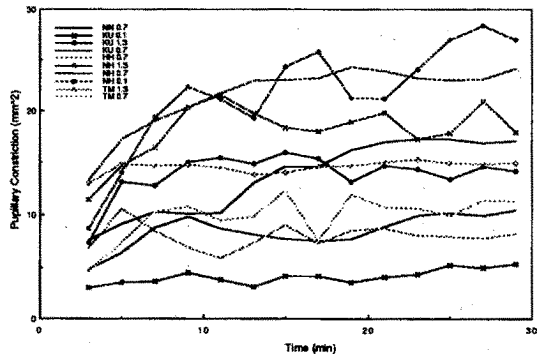


図5 暗順応過程における瞳孔反応量の変化。2・4分の平均を3分に、4・6分の平均を5分に、..示してある。

時の面積は時間とともに小さくなっている。TMでは図4で時間による変化はなく、図5で時間による反応量の変化がないことがわかる。NH, KUは、時間とともに瞳孔面積、反応量ともに徐々に大きくなっていく。しかし、反応量よりは瞳孔面積の方が大きな変化を示すために、最縮瞳時の面積は時間とともに大きくなっていく。けっきょく、対光反応での最縮瞳時の面積が大きいつきには一過性、小さいときには持続性の反応が得られるであろうことが推測された。5名共通に面積25 mm²あたりが境界となるようである。こちらの仮説では、前回3名の被験者ではほぼ同一の結果が得られたこと、さらに詳細に見ると、被験者TMで一過性から持続性に变化する刺激強度が若干大きな値になっていたことが説明できる。

このように考えてみると、思い当たる過去の研究がある。すなわち、Sun and Stark⁹⁾の、瞳孔escape現象(光刺激継続中に散瞳してくること、弱い刺激時に多い、脱髄疾患などで強い刺激でも見られる場合は「異常escape現象」)は大きな瞳孔面積の時に強く見られる、という報告である。前報で、この可能性よりも「桿体は一過性」という可能性に結び付けてしまったのは、後者が生理学的知見でありほぼすべての条件下で当てはまるデータであろうと思われたのに対し、後者は人間の瞳孔というはなはだきまぐれな反応を示すデータであり、さらにこのデータは瞳孔の面積を小さくさせるのに光刺激のほかに調節を負荷しており、このことによって持続性の反応が誘発される可能性を考慮したためであった。

5. むすび

以上の結果、今回得られた暗順応過程における5秒刺激瞳孔対光反応の波形の変化は、暗順応には直接関係なく、瞳孔の面積自体の変化による性質であること、前回報告した暗順応下での刺激強度と反応波形の関係も同様であること、結論できる。しかし、この瞳孔径と反応波

形の関係については、瞳孔の筋の性質が第一に考えられるが、それ以外の関与もありうること、従来の瞳孔波形の一過性、持続性の分離に関する研究のうち、一部(たとえば暗所視でのパターン反転では一過性反応しか得られないこと⁹⁾)は今回と同様の特徴をとらえているのであろうが、それでは説明のできない報告も多く(たとえば明所視での正弦波格子パターン反転による一過性、持続性の分離²³⁾は非常に小さな瞳孔反応を分析しており、刺激条件により瞳孔面積がバイアスされる可能性は小さい)、今後さらに研究を継続させる必要がある。

文 献

- 1) K. Ukai: Spatial pattern as a stimulus to the pupillary system. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 1094-1099, 1985.
- 2) R. S. L. Young, B.-C. Han and P.-Y. Wu: Transient and sustained components of the pupillary responses evoked by luminance and color. *Vision Research*, 33, 437-446, 1993.
- 3) R. S. L. Young and J. Kennish: Transient and sustained components of the pupillary responses evoked by achromatic spatial patterns. *Vision Research*, 33, 2239-2252, 1993.
- 4) 鶴飼一彦, 福原雅之, 小町裕子, 土屋邦彦: 主成分分析と成分推定法による瞳孔対光反応の解析. *VISION*, 5, 195-196, 1993.
- 5) M. Fukuhara, K. Ukai, K. Tsuchiya, N. Otsuka and Y. Komachi: Component estimation of pupillary light reflex. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 35, 1279, 1994.
- 6) N. W. Daw, R. J. Jensen and W. J. Brunken: Rod pathways in mammalian retinae. *Trend in Neuroscience*, 13, 110-115, 1990.
- 7) N. Ohba and M. Alpern: Adaptation of the pupil light reflex. *Vision Research*, 12, 953-967, 1972.
- 8) F. Sun and L. Stark: Pupillary escape intensified by large pupillary size. *Vision Research*, 23, 611-615, 1983.
- 9) R. S. L. Young, E. Kimura and P. R. Delucia: A pupillometric correlate of scotopic visual acuity. *Vision Research*, 35, 2235-2241, 1995.