

調節準静的特性記録時の瞳孔反応同時測定 (図7)

土屋 邦彦・鶴飼 一彦・石川 哲 (北里大学医学部眼科)

Concurrent Recording of Accommodative and Pupillary Responses
Elicited by Quasi-static Accommodative Stimulation

Kunihiko Tsuchiya, Kazuhiko Ukai and Satoshi Ishikawa

Department of Ophthalmology, School of Medicine, Kitasato University

要 約

調節の準静的特性記録装置と電子瞳孔計の面積測定回路を利用する事により、調節刺激時の調節反応と瞳孔反応を同時に記録する装置を開発し、24名の正常者を対象に測定を行った。その結果、調節刺激による瞳孔反応では、瞳孔の縮瞳相と散瞳相は同一の軌跡をとらなかったため、別々に解析を行った。まず、調節反応の起こる前の瞳孔面積にかなりの個人差が認められること、調節刺激によって起こる縮瞳の過程には、直線的なもの、上に凸な曲線、あるいは、下に凸な曲線となるものなどのパターンが認められることが明らかとなった。また、その縮瞳率は、 $51.8 \pm 18.0\%$ であった。次に、調節刺激が遠ざかる際には、調節のリラックスに対し瞳孔散大の遅れが目立った。すなわち、正常者でも、調節反応と瞳孔反応に解離が存在することを認めた。この調節反応と瞳孔反応の解離は、疲労との関係が示唆され、今後本法の広い応用が考えられた。(日眼 92:336-343, 1988)

キーワード：調節, 瞳孔

Abstract

The accommodative response (AR) and pupillary area (PA) were measured by an infrared optometer and an infrared television pupillography, respectively, as the accommodative stimulus (AS) was slowly changed from -12.5 diopters (dpt) to $+12.5$ dpt and then returned to -12.5 dpt with a constant velocity of 0.2 dpt/sec. Signals of AS and AR were fed into the x- and y-axes of the x-y recorder, and AS and PA signals were fed into another x-y recorder. Thus, AS-AR and AS-PA charts were obtained simultaneously. This method was applied in 48 normal eyes. The rate of pupillary constriction on the AS-PA chart was $51.8 \pm 18.0\%$ (mean \pm SD) in normal eyes. The pupillary dilatation process was complex and its trajectory was classified into 3 categories, based on degree of dilatation mostly its delay. Delayed dilatation was observed in 33% of the normal subjects. It was suggested that the delay is involved with visual fatigue. (Acta Soc Ophthalmol Jpn 92:336-343, 1988)

Key words: Accommodation, Pupil, Optometer, Infrared TV pupillogram

I 緒 言

調節機能の諸特性を他覚的に測定する事は、臨床面においても重要である。鶴飼ら¹⁾は、市販の自動屈折計

を改造したオプトメーターを用いて、調節の準静的記録、すなわち、調節の静的特性をそこなわない範囲内の一定速度 0.2 dpt/secで、刺激を連続的に変化させ、比較的短時間で調節機能全般を記録することのできる

別刷請求先：228 相模原市北里1-15-1 北里大学医学部眼科学教室 土屋 邦彦 (昭和62年9月18日受付)

Reprint requests to: Kunihiko Tsuchiya, M.D. Dept. of Ophthalmol., School of Med., Kitasato Univ.

1-15-1 Kitasato, Sagamihara 228, Japan

(Accepted September 18, 1987)

方法を開発した。これを利用して、調節系に関する種々の新知見が得られている²⁾⁻¹¹⁾。

この調節の準静的記録法では、調節負荷にともない瞳孔は当然縮瞳を起し、また逆に、調節負荷の解除にともなって散瞳を起している。しかし、調節負荷にともない縮瞳した瞳孔が、負荷が解除されても縮瞳したまま、すぐには戻らないなど、調節のみを観察しただけでは正常と思える例においても、調節負荷時瞳孔反応においては、何らかの異常を有する例が存在することを知った。そこで調節刺激時における瞳孔反応を記録すべく、従来の調節の準静的記録装置に、電子瞳孔計の面積測定回路を利用することにより、調節刺激時の調節反応と瞳孔反応を同時に記録することを試みた。この方法により若干の興味ある知見を得たので、ここに報告する。

II 方 法

1. 装置

測定に用いられた装置は、すでに報告した調節の準静的記録装置¹⁾に、瞳孔反応を同時記録するための改良を行ったものである。使用したオプトメーターは、市販の自動屈折計（ニデック製 AR-2000）を改造したもので、この自動屈折計は、Badal 光学系による視標

と、アライメント用の赤外線モニターTVを内蔵している。また調節の準静的記録を実現するために、視標の制御を外部からマイクロコンピュータにより自由に行う事ができる。また、視標の位置と眼屈折の値が、アナログ信号で外部に取り出せる。このオプトメーターの赤外線モニターTVの出力を、電子瞳孔計（浜松ホトニクス製 C-671）の面積測定回路に接続することにより、調節の準静的記録時の瞳孔反応を同時に測定する機能を追加した。なお、瞳孔反応の記録の精度を増すために、モニター用カメラレンズの焦点距離を変更し、瞳孔の像が拡大される様にした。

2. 手順

用いた手順も、すでに報告された調節の準静的記録法¹⁾と全く同様であるので、ここではその詳細については触れない。概略を示すと、外部のマイクロコンピュータにより制御される視標を、0.2dpt/secの速度で、-12.5dpt からゆっくりと+12.5dpt まで動かし、そこで折り返して、再び-12.5dpt にもどす。この間の眼屈折の変化はオプトメーターにより、瞳孔面積の変化は電子瞳孔計により測定され、この調節と瞳孔の変化は、図1に示すように2台の x-y レコーダーに同時に記録される。またペンレコーダーを用いればそれぞれの時間的変化を示すことも可能である。

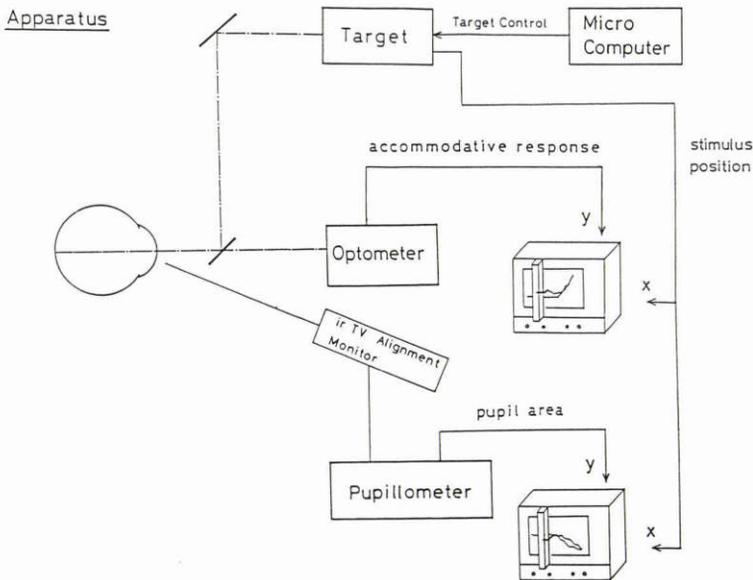


図1 眼屈折の測定は、オプトメーターにより、瞳孔面積の測定は赤外線モニターTVを介して電子瞳孔計による。Badal 光学系による視標は、外部マイクロコンピュータにより制御される。調節の準静的特性、瞳孔面積の変化はそれぞれ x-y レコーダーに記録される。

III 測定例

図2(a), (b), (c) に測定例を示す. 図2(a) は, 20歳の女性の準静的刺激条件により得られた AS-AR

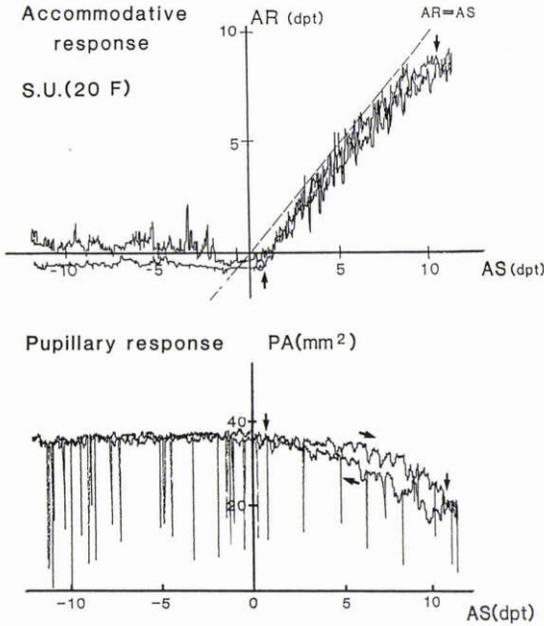


図2(a)

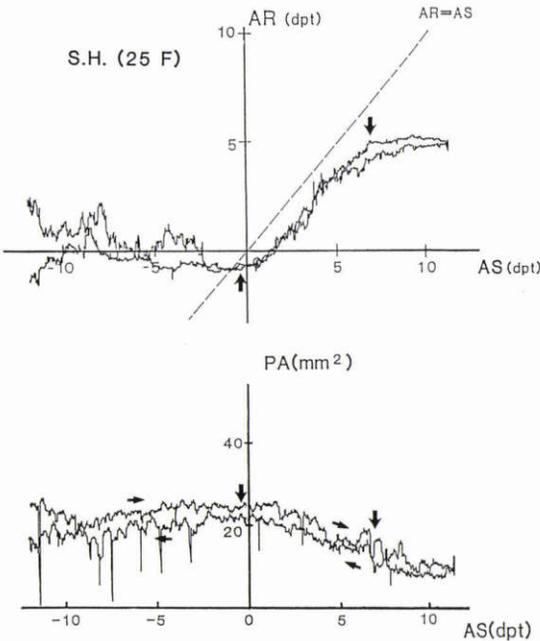


図2(b)

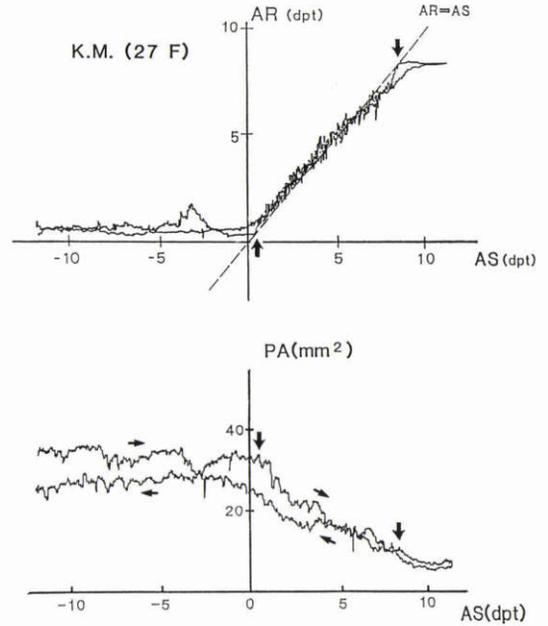


図2(c)

図2 a) 正常者(20歳, 女性)の AS-AR 図(調節準静的記録)(図上), AS-PA 図(準静的条件による調節刺激時の瞳孔面積の変化)(図下), AS-PA 図では, 調節反応に従い縮瞳が, 調節刺激が近方より遠方に向かうに従い散瞳が見られる. b) 正常者(25歳女性)の AS-AR 図および AS-PA 図. c) 正常者(27歳女性)の AS-AR 図および AS-PA 図.

図 (AS: accommodative stimulus; AR: accommodative response), および AS-PA 図(PA: pupillary area)である. AS-AR 図より軽い遠視が認められる. 調節遠点および近点のおよその位置が矢印にて示されている. 調節幅は10dpt 以上である. AS-PA 図では, 調節反応が始まるまでは瞳孔面積がほぼ一定であり, 調節が反応するに従い縮瞳が見られる. 調節刺激が近方から遠方へ向かうに従い, 再び散瞳する過程が明らかである. 図2(b), (c)でも同様な結果が見られる.

IV 視標移動速度の検討

視標の速度が調節の速度と比して速すぎると, 得られる結果は視標の往復で異なるという履歴現象が見られる. 視標速度0.2dpt/sec は40歳までの正常被検者でこの履歴現象が見られないように定めた¹⁾. 瞳孔についてもこの速度が適切であるかどうか, まず検証する.

同一被検者に対して, 完全な静的刺激条件下での瞳孔面積, すなわち調節刺激を一点に静止させ, その点

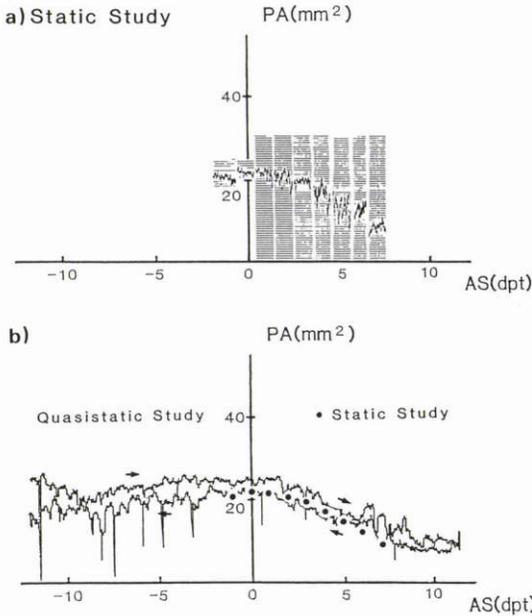


図3 a) 静的刺激条件により得られた瞳孔面積の変化, b) 視標速度0.2dpt/secの準静的条件時の瞳孔面積変化と、静的条件により得られた結果の比較。

における瞳孔面積を数十秒間連続的に測定した結果と、視標速度0.2dpt/secにて得られた準静的記録との比較を図3に示す。図3(a)は数十秒間の連続測定の一部を切り取り、対応する刺激の位置に並べたものである。図3(b)は準静的刺激により得られた図であり、軌跡の上は遠点から近点(縮瞳相)、下は近点から遠点(散瞳相)を示す。図3(a)から得られた静的条件下での瞳孔面積が、図3(b)ではプロットで示されている。縮瞳相では、準静的条件の方が面積が大きくなっている。しかし、両者の差は、縮瞳開始前の瞳孔面積の差をほぼ保っており、この視標速度でも、視標が動いていることによる大きな差は認められない。

次に散瞳相について検討する。散瞳相は、完全に静的な刺激条件下では、本来縮瞳相と一致するはずである。しかし、図2(b), (c)にも示されている様に、履歴曲線が認められる。したがって、この視標速度(0.2 dpt/sec)は速すぎる。ところが、後に詳細に検討するように、たとえ視標速度を1/10に遅くしても履歴曲線が認められる場合があることが明らかとなった。これらの点を考慮し、瞳孔反応は縮瞳相によって異常の有無を判定し、視標速度は調節を中心に考えて、現行のままとすることにした。この状態で検査時間は4分であり、これ以上速度を遅くすることは、被検者の負担

が増加するため良い結果をもたらさないと考えられる。

V 正常者における AS-PA 図の解析

1. 対象

調節の準静的刺激時の瞳孔反応の正常値を求めるため、軽い屈折異常以外の眼科的疾患を有しない、19歳から32歳(平均年齢24.1歳)の24名48眼を対象とした。なおこの中には、VDT 作業者は含まれていない。調節の準静的記録による調節機能、および電子瞳孔計による対光反応に異常を認めないことを、あらかじめ確認した。調節刺激による瞳孔の反応では、瞳孔の縮瞳相と散瞳相のそれぞれにおいて、個人差の存在が異なった形で見られたため、それぞれに適していると考えられた解析方法を採用した。

2. 縮瞳相の解析

図4(a)は、調節の遠点より近点に至るまでの範囲内での瞳孔の変化、すなわち、縮瞳過程の軌跡を、正常と考えられる10名について、1つの図に示したものである。縮瞳過程は、それぞれ非直線的に示されている。調節反応の起こる前の瞳孔面積には、かなりのバラつきが認められた。今回の全被検眼48眼では、 $34.8 \pm 9.8 \text{ mm}^2$ であった。

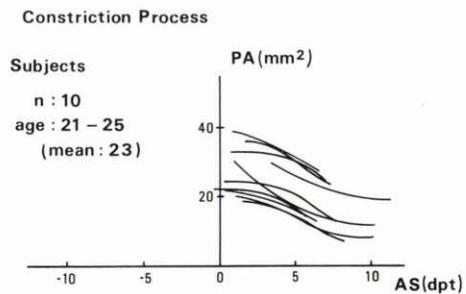


図4(a)

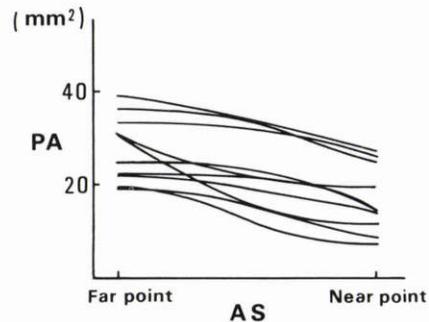


図4(b)

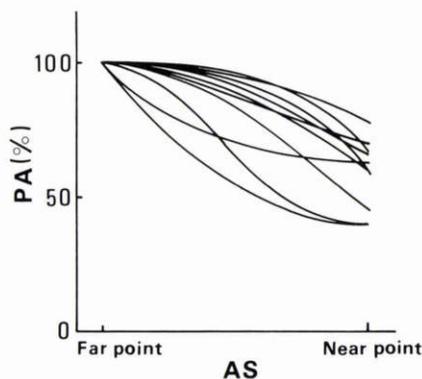


図 4(c)

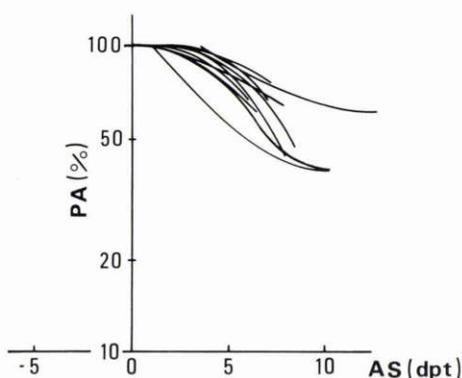


図 4(d)

図 4 a) 正常者(10眼)の調節反応が起こっている範囲内(調節の遠点と近点の間)での瞳孔面積の変化(縮瞳)の概要。縮瞳過程は、それぞれ非直線的に示されている。調節反応前の瞳孔面積に、個人差が認められる。b) (a)の縮瞳曲線の左端、および右端をそろえたもの。縮瞳過程に、直線に近いもの、上に凸な曲線となるもの、下に凸な曲線となるものなど様々なパターンが見られる。c) (a)の縮瞳曲線の瞳孔面積の変化を、最散瞳時の面積に対する割合(縮瞳率)で示した図。縮瞳過程に(a)と同様の傾向が見られる。d) (a)の縮瞳曲線の縦軸を、最散瞳時の面積に対する割合(縮瞳率)の対数で示したもの。縮瞳過程は、非直線的に示される。

図 4(b)では、比較を容易にするために、縮瞳曲線の調節の遠点(曲線の左端)、および近点(曲線の右端)をそろえ、調節力の差によって生じる縮瞳過程の差を少なくしている。この図より、縮瞳過程には、直線に近いもの、上に凸な曲線となるもの、あるいは、下に凸な曲線となるものなどの、様々なパターンが認められることがわかる。この傾向は、瞳孔面積を最散瞳時の面積に対する割合で示した図 4(c)でも、同様に認め

られた。なお、今回の全被検眼48眼では、縮瞳率が $51.8 \pm 18.0\%$ 、縮瞳量が $17.8 \pm 7.9 \text{mm}^2$ であった。図 4(d)は図 4(c)の縦軸を対数で示したものである。

3. 散瞳相の解析

散瞳相については、対象48眼について、その傾向をパターン分類により検討した。測定中の瞳孔のもどり方を基準として、(1)多少の遅れはあるにしても、ほぼ調節刺激に伴い調節反応と同様にもどるもの(図 5 上)、(2)調節反応にしてかなりの遅れが認められるが、測定時間内に最初の大きさまで戻らぬもの(図 5 中)、(3)測定時間内では縮瞳したままで、最初の瞳孔の大きさまで戻らないもの(図 5 下)の、3つのパターンに分類した。その結果、それぞれ頻度は、52%、15%、33%であった。散瞳の遅れが認められるものかなりの頻度で存在していた。

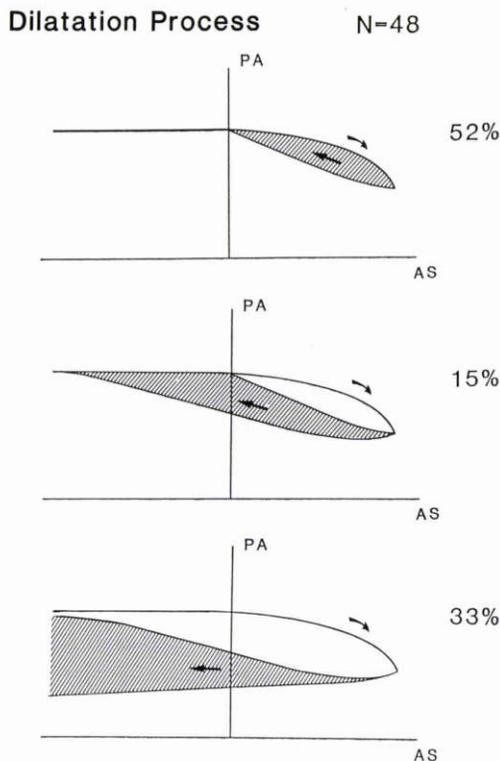


図 5 対象48眼について、散瞳相の傾向を、(1)多少の遅れはあるにしても、ほぼ調節刺激に伴い、調節反応と同様に散瞳するもの(図上)、(2)調節反応に対してかなりの遅れが認められるが、測定時間内に最初の大きさまで戻らぬもの(図中)、(3)測定時間内では縮瞳したままで、最初の瞳孔の大きさまで戻らないもの(図下)の3つのパターンに分類し示した。それぞれの頻度を示す。

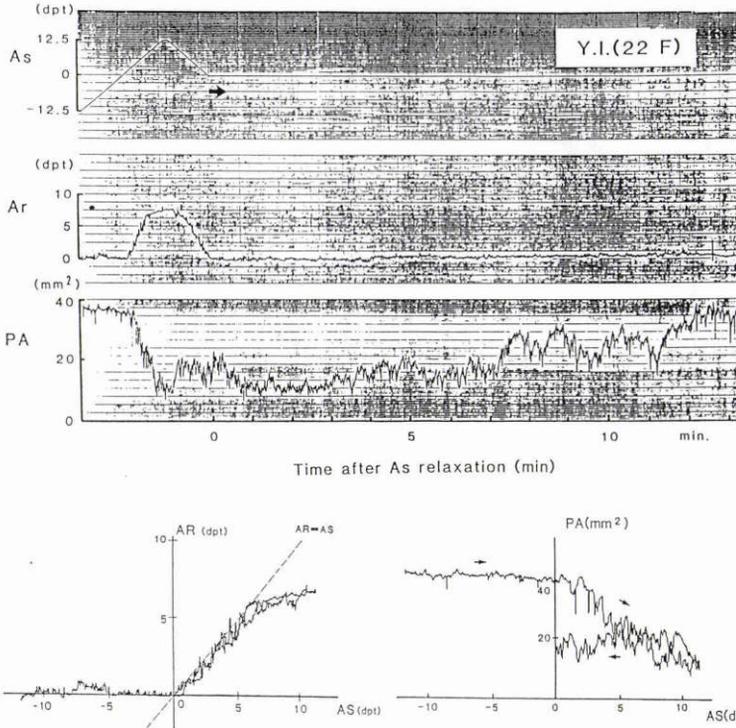


図6 縮瞳が続き、散瞳しない傾向を示す被検者のうち顕著な例. 測定の途中で刺激を0dpt/secに固定し、瞳孔面積の変化をペンレコーダーにより記録したもの. 調節反応は、ほぼ0dptのままであるが、瞳孔はゆっくり散瞳し、約13分後に調節前の大きさまで回復している. 下図にx-yレコーダーによる記録を示す.

図6は、顕著に散瞳が遅い例において、散瞳にどの程度の時間を要するかを測定したものである。他の測定と同様の手順で測定を行って行き、折り返しの途中で調節刺激が0 dptに達したとき視標を固定し、その前後における瞳孔の面積変化をペンレコーダーにより記録した。調節の反応は刺激とほぼ平行に0 dptにもどり、その後大きな変化を認めないのに対し、瞳孔はゆっくりと散瞳し、調節負荷前の大きさまでもどるのに13分以上必要であった。同様な傾向を示した別の例において、2度の測定を続けて行ってみた結果の記録を図7に示す。1回目の測定では、測定時間内においては、瞳孔は縮瞳したままであり、ほとんど散瞳が見られない。この縮瞳状態のまま、2回目の測定を行って見たところ、AS-PA図ではほぼ平坦な軌跡を示し、縮瞳状態からさらに縮瞳するという現象は見られなかった。AS-AR図には、1回目の測定結果と比較して、大きな差異は認められなかった。

VI 考 按

調節の諸特性の測定は、臨床的にも重要であり、また調節と同時に起こる瞳孔反応を測定することも大きなメリットがあると考えられる。しかし、このような検査は未だ一般的には行われていない。過去にはAlpern¹²⁾、大野¹³⁾の調節刺激時の瞳孔反応に関する基礎的な研究が知られているのみである。その理由としては、測定及び測定後の解析において、かなりの負担が要求されたためと考えられる。しかし、今回の我々の方法は、比較的短時間で調節機能を概観することのできる調節の準静的記録法に若干の改良を加えたものである。このため、比較的容易に、調節刺激による瞳孔反応を調節反応と同時に記録することが可能となっている。また調節の準静的記録法に準じているため、静的特性を損なうことも少なく、さらに記録法は、調節の記録法と同様に、完全に静的な方法ではないために、場合によっては動的特性の異常も推定できると考えられる。

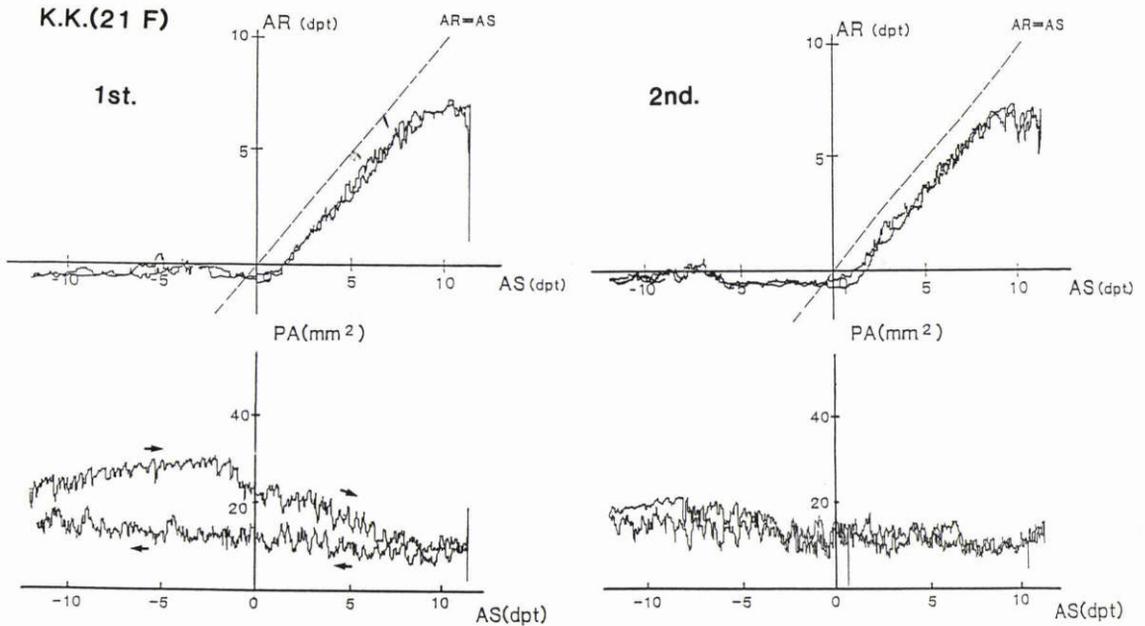


図7 散瞳に遅れが見られる例において、2度の測定を続けて行った結果の記録。瞳孔は縮瞳したままであり、ほとんど散瞳は見られない。しかし、この縮瞳状態のまま測定を行っても、調節反応にはほとんど差異は認められない。

すでに述べたように、今回我々は、調節の準静的記録と同時に記録された、瞳孔の変化を、調節刺激の負荷によって起こる、縮瞳相と、逆に調節刺激の解除にもなって起こる瞳孔の回復過程である散瞳相の2つについて別々に検討した。

まず調節の刺激によって起こる縮瞳では、一般的に調節刺激が大きくなるほど、瞳孔が急激に小さくなるという傾向(グラフでは上に凸となる)が見られ、少数において、調節刺激の大きさにかかわらず、縮瞳が一定の割合で生じるもの(グラフでは直線となる)、縮瞳の初期において急激に縮瞳し、徐々に緩やかとなるもの(グラフでは下に凸となる)も見られた。Alpernら¹²⁾は同様な測定において、AS-PA特性は直線で示されると報告した。また、大野ら¹³⁾は、瞳孔面積を対数で示すことにより、AS-PAのグラフは2本の直線からなるとしている。しかし、今回の我々の結果(図4(a)~(d))では、データをどのように表示しても大部分が直線とならない。このような差が刺激方法の差によるという可能性は、図3に示した静的特性が図4(a)の代表的軌跡と一致することからも考えにくい。今回の結果からは、正常者においても個人差の大きいことが認められ、Alpernら¹²⁾、大野ら¹³⁾の結果も一部においては当てはまる。ただ、彼らの結果を一般化することは

問題があると考えられる。このようなことが明らかとなったのも、本法では、多数の被検者の記録を容易に集めうるというメリットによる。

また、調節の負荷が大きくなったときに、調節反応は調節の近点においてはほぼ一定となるのに対して、瞳孔はさらに縮瞳し続ける例が見られる(図2(b), (c))。この理由は、明らかではない。しかし、Alpernら¹²⁾もこの現象を報告しており、彼らは、調節近点をこえる調節刺激により被検者は網膜像のボケを認め、それに対し、調節の努力だけは継続するというを原因としている。

次に、散瞳相においては、調節負荷の解除により、調節反応は低下し、瞳孔も同様に散大すると考えられる。しかし、実際には、調節反応に対して散瞳の遅れが、かなりの頻度で認められた。このような例では、後で尋ねてみると、その他のパターンに比べて眼精疲労を訴える率が高いという傾向がみられた。また同一被検者において、朝と夕方パターンが異なるものも見られ、夕方では、散瞳の遅れを認めるパターンに移行するものが多い傾向が認められた。従って、この散瞳の遅れについては、疲労と何らかの関係を持つことが示唆された。なお、今回の研究では、測定の時間帯は考慮されておらず、このため、散瞳の遅れが見られた

ものの頻度が多く現れていることも考えられる。また、この遅れは逆に、眼の疲労の指標にもなりうる可能性もあり、今後 VDT 作業者の検診等への応用も考えられる。

この散瞳の遅れは、今回新たに見い出された現象であり、調節安静位の異常²⁾を伴っておらず、調節と瞳孔反応が解離していると考えられる。しかし、その機序については現在のところ不明であり、今後の課題である。ただし、刺激を止めてもさらに縮瞳して行く例、いったん散瞳を始めた後再び縮瞳する例もあり、時間的要素等を考慮すると、瞳孔においてアセチルコリンの分解が低下している状態、すなわち、cholinergic な状態にあることが示唆された。

このような瞳孔面積の変化が生じると、縮瞳により焦点深度が増大し調節反応に影響を及ぼすことが考えられる。しかし、図7では、そのような現象は認められない。Ward ら¹⁴⁾は、瞳孔径が3mm (面積7.1mm²) 以下の時には調節反応に影響を受けると報告している。今回の刺激条件では、そのような強い縮瞳は通常生じない。したがって、調節準静的記録は瞳孔径の影響を受けることは、ほとんどないと考えられる。

VII 結 語

調節機能の他覚的測定、及びその時に同時に起こる瞳孔反応の測定の重要性については、改めて強調する必要はないと思われる。しかし、実際に臨床において行うには、多くの負担が必要とされたため、十分な研究はなされていない。今回我々が用いた測定方法は、比較的短時間に、容易に調節刺激に対し同時に起こる調節反応と瞳孔反応を測定、記録することを可能としている。このような方法を臨床に応用することは、調節、瞳孔の解離現象など、今までに指摘されていない新たな機能異常などを見いだすのに有用であるばかりでなく、検診等への応用、また、この方面の基礎研究においても有用であると考えられる。

文 献

- 1) 鶴飼一彦, 石川 哲: 調節の準静的特性. 日眼 87: 1428—1343, 1983.
- 2) 種本康之, 鶴飼一彦, 石川 哲: 調節無刺激状態での異常緊張. 眼光学 5: 67—74, 1984.
- 3) 鶴飼一彦: 調節微動の視機能低下による変化. 光学 14: 385—386, 1985.
- 4) Ukai K, Ishii M, Ishikawa S: A quasi-static study of accommodation in amblyopia. Ophthalmic Physiol Opt 6: 287—295, 1986.
- 5) 鶴飼一彦, 石川 哲, 市橋裕一他: Dark focus of accommodation の測定. 眼光学 8: 61—65, 1987.
- 6) 高橋裕昭, 蒲山俊夫: 調節の準静的特性の臨床応用, 調節痙攣と調節衰弱の2症例の治療経過について. 眼科 28: 467—471, 1986.
- 7) 蒲山俊夫, 伏屋陽子, 渡会友季子他: VDT 作業による調節の準静的特性の変化. 眼科 28: 1405—1409, 1986.
- 8) 蒲山俊夫, 伏屋陽子, 宮崎仁志: VDT 作業負荷が調節機能に及ぼす影響 (特に調節の準静的特性の変化について). 眼科 29: 217—224, 1987.
- 9) 若倉雅登, 石川 哲: VDT 作業者を含む眼精疲労患者における調節, 特に A/A の評価. 眼臨 80: 1331—1337, 1986.
- 10) 蒲山俊夫, 伏屋陽子, 宮崎仁志: 調節の準静的特性における正常者の加齢変化. 日眼 91: 494—497, 1987.
- 11) 宮崎仁志, 高橋裕昭, 蒲山俊夫: 頭頸部損傷における調節の準静的特性. 臨眼 41: 785—789, 1987.
- 12) Alpern M, Manson GL, Jardimico RE: Vergence and accommodation. 5. Pupil size changes associated with changes in accommodative vergence. Am J Ophthalmol 52: 762—767, 1961.
- 13) 大野新治, 石川 哲: 調節負荷時の調節および瞳孔反応. 日眼 78: 516—523, 1974.
- 14) Ward PA, Charman WN: Effect of pupil size on steady state accommodation. Vision Res 25: 1317—1326, 1985.