

第 98 回 日本眼科学会総会 宿題報告 III

屈折・調節の基礎と臨床

調節機能とその臨床評価

加藤桂一郎¹⁾

福島県立医科大学眼科学教室

共同研究者

八子 恵子, 梶田 雅義, 石龍 鉄樹, 橋本 禎子, 鈴木 勝浩, 藤原 聡之
山口 洋, 荻原 香, 篠原 真美, 加宅田匡子, 大河内浩之, 鈴木 仁
小峯 輝男, 酒井 正典, 山内 健, 星 兵仁, 小林 敏郎, Neveu CF
江角 浩二

要 約

自覚的調節検査法は、「明視の質」と「時間的規制」において本質的な欠陥を持つ。一方、他覚的手法は、「明視の有無」の判断が難しく、調節に対する意識レベルをチェックすることが出来ない。今回、日常視に近い条件で明視時間を確認できる試作調節時間測定装置（試作アコモドメーター, New-accommodometer）を作成し、調節緊張・弛緩反応時間を測定した。その結果、正常若年者においては0.5秒前後で視標の明視が可能であったが、アコモドポリレコーダーでは0.8秒以上を要し分散も大きく、糖尿病群では明視時間の遅れがみられた。また、偽水晶体眼の二重焦点レンズによる視標明視時間は0.6秒以上を要した。外部視標を用いた赤外線オプトメーターにより、視標の大きさ、調節刺激量を変えて明視下における反応形態を分析した。これらの結果を試作アコモドメーターの成績と対応させた場合、調節緊張・潜時後の急速反応期にほぼ明視が獲得され、4D以下で

は刺激量に関係なくほぼ一定の経過時間に対応するものと推測された。偽水晶体眼の偽調節と呼ばれる明視過程には、従来いわれるような軽度の乱視が関与するが、加齢に伴って明視の質的低下を許容する傾向もどうかえした。また、回折型多焦点眼内レンズでは、近方視において屈折・回折部を随時使用し得る例があることもわかった。調節微動を最大エントロピー法により分析し、定型例について三次元グラフにより表示した。また、正常若年者について spectral-power 分析を行った結果、視標の「ボケ」状態において反応波の増加がみられた。併せて、調節機能関連用語の統一と、明視・反応時間・反応量を同時に分析し得る装置の早急な開発の必要性について強調した。（日眼会誌 98：1238～1255, 1994）

キーワード：調節機能、調節微動、偽調節、明視、赤外線オプトメーター

Accommodation Function and its Clinical Evaluation

Keiichiro Kato

Department of Ophthalmology, Fukushima Medical College

Abstract

On subjective examination in accommodation, we found fundamental fault in the self-selection of

clear vision against stimulus target and the time control of examination. On the other hand, it was

別刷請求先：960-12 福島県福島市光が丘1 福島県立医科大学眼科学教室 加藤桂一郎
(平成6年9月22日受付, 平成6年10月18日改訂受理)

Reprint requests to: Keiichiro Kato, M.D. Department of Ophthalmology, Fukushima Medical College,
1-Hikarigaoka, Fukushima-shi, Fukushima-ken 960-12, Japan

(Received September 22, 1994 and accepted in revised form October 18, 1994)

difficult to objectively judge clear vision or check subjects consciousness for the tests. In this study, we made a trial instrument called new accommodometer which was able to confirm the time limit for clear vision, and measured response time for accommodation in constriction and relaxation. Young healthy subjects could obtain clear vision within 0.5 seconds on the new accommodometer, but this took over 0.8 seconds with scattered distribution on an accommodopolyrecorder. The required time for clear vision tended to increase in diabetic cases, and also in pseudophakia corrected bifocal lenses, over 0.6 seconds. We analyzed the form of accommodative response under clear vision, using on infrared optometer with stimulus-targets prepared outside, meanwhile changing the size of targets and amplitude of accommodative stimulus. When we compare these results to those of the new accommodometer, it will be easily seen that accommodative clear vision may be acquired in a rapid response stage after a latent period of constrictive accommodation, and

usually with a steady running time under 4 D stimulus. For getting clear vision in far and near objects simultaneously, in pseudophakia, moderate astigmatism plays an important part, but it tends to cause deteriorated quality of clear vision. In diffractive intraocular lenses, we can find patients who are able to see using arbitrarily both areas, the refractive or diffractive part. We analyzed microfluctuation of accommodation by the maximum entropy method, and one of the typical cases revealed three-dimensional drawings reconstructed from it. In analyzing the spectral power of young healthy subjects, the response waves tend to increase in blurred conditions for targets. (J Jpn Ophthalmol Soc 98:1238-1255, 1994)

Key words: Accommodation function, Accommodative microfluctuation, Pseudoaccommodation (Apparent accommodation), Clear vision, Infraredoptometer

I 緒 言

眼病変の診断・加療の最終目的は「視機能の改善」にあり、その評価法と結果に従って診断の決定、加療の良否について判断を下されることが多い。したがって、調節機能も臨床の実態に則した適切な評価法を行わなければ、誤った判断、あるいは結論に導かれることも十分考えられる。昨今、調節検査、およびその評価法については個人のもつ感覚レベルで評価する「自覚的手法」と、生体における反応形態を客観的に捕える「他覚的手法」が使われ、時にそれらが同一レベルで比較され論議を呼ぶことも少なくない。また、エレクトロニクスの進歩は新たな「調節機能関連用語」を生み出し、結果的に混乱を助長することにもつながっている。これらの現状に鑑み、初めに歴史的な調節機能の研究経過を概説したい。調節機能の存在に関する最初の記載はDescartであるといわれているが、科学的な分析がなされたのは18世紀から19世紀初頭といわれる。Purkinje, Helmholtzを初めとする生理・解剖学的な分析はともかくとして、臨床的には老眼鏡処方に対応させるための読書を主とした活字判読が出来るかどうか調節検査の当初の目的があったとされている。その結果、Snellen, Jaeger, Sloanなどいくつかの近距離視力表 (reading-test) が考案されており、ある程度の目的は達成されたものと推定される¹⁾。

一方、19世紀中頃にDonders²⁾によって初めてamplitude of accommodation (調節力) という概念が提唱され、明視可能な遠方、ならびに近方の限界をいわゆるHair-optometerにより決めた上で、それぞれの距離に

対応した屈折度の逆数の差で調節力が定義されている。いうなれば、調節力はあくまでも自覚的な感覚的能力を規定したのが始まりといえる。このDonders²⁾による、いわゆる調節力を測定する手法は、内外においていくつかの経緯がみられるが、本邦では「石原式近点計」³⁾と「アコモドポリレコーダー」(Accommodo-polyrecoder, 以下, AP)⁴⁾による手法が本流となり現在に至っているといえよう。一方、水晶体を主とした調節の生体変化を捕える客観的手法は、20世紀初頭のCrossらを中心とする動的検影法 (dynamic retinoscopy) に始まり¹⁾、現在繁用されている赤外線オプトメーター (infrared optometer, 以下, IO), または、レーザーオプトメーター (laser-optometer) への発展がみられる⁵⁾。しかし、これはDondersが規定した明視を前提とした調節力 (amplitude of accommodation) ではなく、あくまでも生体の調節反応を客観的に記録する方法であり、その評価において感覚的レベルの関与は除外されているのが実情であり、明確に区別して論ずる必要がある。

本論では、混乱を来しやすい調節用語の問題にふれた後、測定条件の異なる調節機能検査の成績をいかに判断すべきか、いくつかの実験結果を呈示し私見を述べてみたい。

II 調節機能関連用語について

緒言でも述べたようにエレクトロニクスの導入により、レーザー、赤外線、あるいは電位変化などを介して調節機能を客観的に捕える手法が開発された。これらの手法を用いて測定される検査法は一般に他覚的調節検査

法といわれているが、従来の自覚的調節機能検査法と同一レベルで比較することは困難である。また一般に、前者がより正確な調節測定法と判断される傾向にもあるが、これも正しい評価とはいえない。これらの理由については「眼科」誌上^{6)~8)}においても説明を加えているが、本論において用いるいくつかの調節関係用語のみに限って、著者なりにその要点をまとめておきたい。

1. 調節力、調節域（調節幅）と調節反応量

「調節力」とは amplitude of accommodation の日本語訳であり、明視可能な範囲を diopter (D) で表わしたものである。畑⁹⁾、および萩原⁹⁾によれば「眼ガ調節休止即遠點明視ノ位置カラ 近點明視ノ状態ニ至ル迄 即チ調節ヲ極度ニ 緊張セシメル際ニ増加スル所ノ眼ノ屈折力」に対して命名したものと説明を加えている。一方、加藤¹⁰⁾は「遠点から近点に至る間の空間にある凡ての点は適度の調節によって明視し得られる」ので調節域と表現し region of accommodation に、同一領域についてレンズの度数で量定されたものを調節幅とし range of accommodation にそれぞれ対応させ区別している。しかし、この表現によれば調節力と調節幅は全く同じものを示すこととなり、非常に粉らわしい。西信⁶⁾は Duke-Elder の成書¹¹⁾における説明を取り上げ、range of accommodation については距離感を重視した表現としているので「調節域」とし、「調節力」は amplitude of accommodation に対応させてはどうかと述べている。著者も同一見解をもつものであることを強調したい。いずれにせよ、調節力、調節域は自覚的な明視認知の能力を表わす表現であり、眼光学系における生体側の反応の有無、あるいは変化の程度を問題とした表現ではないことを念頭に置く必要がある。それ故、他覚的測定装置を用いた変化量は、それぞれの機種を用いた「調節反応量」として記載されるべきであり、評価対象は amplitude of accommodative response に該当する。当然のことながら、相互の値は絶対量としての比較対象ではないことも理解されよう。

2. 調節測定法に関わる用語

石原式(定速度)近点計、定屈折近点計、あるいは AP に代表される自覚的手法については特に問題を提起される用語はみられない。しかし、前述したように調節力が自覚的明視閾値を表現し、調節反応量が他覚的な調節反応の程度を表わすものと規定すれば、かつて散見された自・他覚的調節力という特異な発想も今後はみられないものと期待したい。さて、現在他覚的に調節反応量を測定する機種に赤外線オプトメーター (IO) があり、テクノストレス眼症のスクリーニングを初めとする調節機能の良否を判断する手法として高い評価を受けている。本器を用いた検査法には、視標の提示法に準じて準静的特性を利用した検査と動的検査に分けられ、前者は quasistatic stimulus (および quasistatic response)、後者は

step stimulus (および step response) としてほぼ定着した表現となってきている¹¹⁾。しかし、調節機能は本来 dynamic なものであり、static あるいは quasistatic と呼ばれる機能はなく、前者はあくまでも検査法 (または記録法) としての表現であることを認識しておくことが肝要である。

また、手法は多岐にわたるにせよ、調節力測定 (法) は自覚的検査によるものを、調節反応量測定 (法) は他覚的検査によるものを示すものと理解すれば、多少とも混乱は防げるかと考える。

3. 調節微動と調節変動

調節運動に伴って生ずる 1.5~2 Hz 近辺の微細な動揺について、鈴木¹²⁾は微動調節と呼んでいるが、いわゆる accommodative microfluctuation¹³⁾ に対応させるものと考えれば、調節微動が適切であろう。また、奥山ら¹⁴⁾は調節微動に相当する変化を広義の調節変動として用いていることもあるが、後者は言葉の印象として比較的大きな変化を推定させるので、誤解を避ける意味からも調節微動に統一した方が無難と考える。

III 調節機能と調節力測定条件

1. 視標認知能・調節反応量・時間的制御について

調節機能を正確に評価するには、視標認知能、調節反応量、および判断に至る時間的制御条件の3条件が満たされなければならないが、現在臨床において繁用されている調節機能測定装置は、いずれもが1つ、あるいは2つの条件を満たすにすぎないのが実情である。この理由は、測定目的が自覚的感覚(視標明視)レベルを重視するか、他覚的な調節反応レベルを捕えるかによって異なることと、製品化における経費の問題があるものと推定される。

図1は3つの条件の相互関係と、代表的な測定機種の位置づけを示したものである。すなわち、自覚的感覚(視標明視)をチェックする機種は、調節反応量および調節の時間的測定が困難か、不正確であり、調節反応量をチェックする機種は調節反応に伴う明視レベルを確認する機構を備えていない。したがって、測定結果を評価する場合、その信憑性の確認や、調節機能の全体像の把握ができないのが現状といえる。

2. いわゆる調節力測定法の問題点

近点計による調節力測定は、測定条件によって著しく異なる結果が得られることはしばしば経験する。表1はそれらの要因をまとめたものである。これらの中で、視標面、あるいは室内の明るさは一定の想定を設けるべき問題であり、測定時間は誤差要因というより結果そのものを評価する対象であるため、考察からは除かれるべき事項といえよう。

さて、視標の移動速度が屈折力の変化に対応しない定速度近点計に代わって、定屈折度近点計が使われるよう

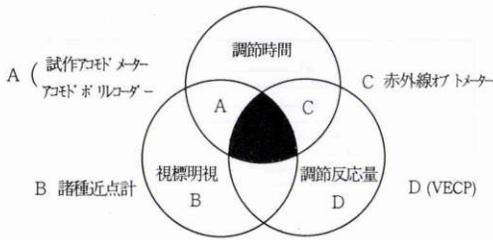


図 1 調節機能の評価。

表 1 調節力測定法の誤差要因

測定環境	1) 照度 2) 測定時間
視標条件	1) 種類 2) 大きさ 3) コントラスト
測定手技	1) 定速度・定屈折 2) 視標提示位置・速度 3) 測定方向 4) 屈折度の調整
内環境	1) 被験者の判断力 2) その他

になり、速度による誤差要因をある程度除くことが可能となった¹⁵⁾。その結果、本法は臨床ルーチンに使われる手法になりつつあることは衆目の認めることと思われる。それ故、「定屈折度近点計」を仮の starting-point として視標条件、測定条件、内環境について、項を改めて論じてみたい。

3. 調節力測定法と小実験

1) 視標の選択

明視の限界を確認する目的においては、スターバースト (star-burst) 型視標が最良であり、その成果もいくつか報告¹⁶⁾されている。しかし、本視標の欠点は、ボケの認知基準が必ずしも被験者により同一ではないことが挙げられる。その点においてランドルト氏環 (Landolt-ring, 以下、ラ氏環) は、ボケ像の判断資料としては不適切であり、厳密な意味では問題点を残すが、個人差が比較的少ない利点を持つ視標とも考えられる。少なくとも明視の有無においては一定の結果が得られるため、判断基準についての個人差は軽減できるといえよう。選択視標の大きさについては2)項において述べる。

2) レンズ付加・視標の大きさと調節力¹⁷⁾

通常の調節力測定では、近点距離の実測は測定範囲を外れない限りレンズの付加を行わないが、遠点距離はある程度の近視眼以外には実測されることがなく、屈折度 (矯正レンズ度数) に代表させて加減する手法がとられている。それ故、屈折度数の量定が正確でなければ誤った結果が得られることとなる。

対象と方法：年齢層の異なる正視眼 3 例 (22 歳, 32 歳, 39 歳) を対象に、遠・近点距離をそれぞれ測定可能な範囲内に設定できる凸レンズ (+2 D, +3 D, +4 D) を付加し、裸眼時の調節力との比較を行った。使用視標は

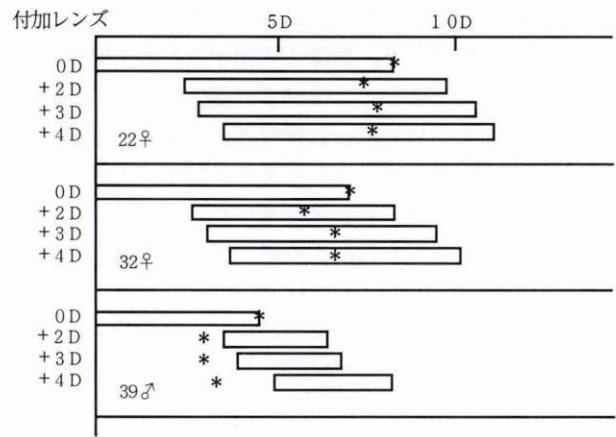


図 2 裸眼とレンズ付加による調節力測定例。

* : 調節力, □ : 明視域

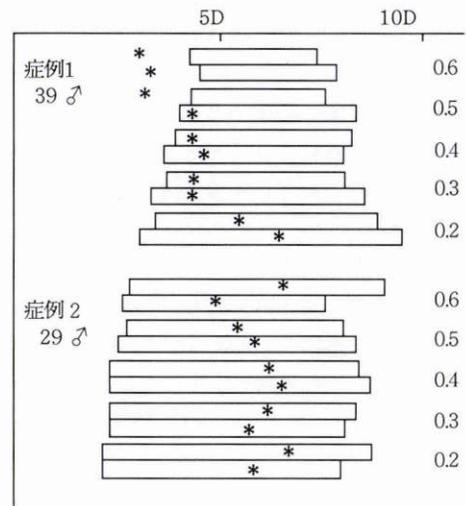


図 3 視標の大きさと調節力測定成績。

□ : 調節域, * : 調節力

0.3 (30 cm) のラ氏環である。

次いで、+3 D の凸レンズを加入した条件下において、正視眼 2 例 (29 歳, 39 歳) を対象に、視標の大きさの違い (0.2~0.6) による調節力への影響を検討した。

測定は定屈折近点計で行った。各眼につきそれぞれ 3 回の試行を行い、遠・近点距離の平均値を求め屈折度差により調節力を算出した。

実験結果と考察：図 2, 3 にそれらの結果を示す。

図 2 は裸眼時と +3 D レンズ付加時における測定結果を比較したものである。実験結果によると、いずれの例においても +3 D レンズの付加を行って遠点を実測した場合の方が裸眼時の調節力よりも少なめに量定され、その差は加齢に伴い増大する傾向がみられる。本実験においては、イ) 視標の大きさを距離に応じて調整できないこと、ロ) 付加レンズにより像の拡大を来すこと、などが問題点として残されるが、遠点を併せて実測できるため、屈折度の測定誤差を避け得る利点があるといえよう。

一方図 3 において、視標の大きさによる差異は若年者

では比較的小さいが、中年においては視標が小さくなるほど調節域が狭くなり、視標を明視するための時間的要素の影響が出てくるように推察される。すなわち、凸レンズ加入、あるいは視標の選択などの設定条件では加齢群では影響が大きく出ることもあり、測定結果の検討においては常に留意する必要性がある。

今回の結果のみから判断する限りでは、選択されるべき視標としては、0.4前後のものが年齢に関わりなく普遍性をもつものと考えられるが、なお検討を要する。

3) 視標移動の開始位置と調節力

調節力の測定において、誤差要因として経験されるものの一つに、視標移動の起始点の設定がある。近点計も手動式から電動式に、かつ、等屈折手法が繁用されるようになり、検者の主観は大分除かれるようになったため誤差要因は減ずることとなったが、起始点 (starting-point) の設定による影響は残された課題の一つともなった。

対象と方法：対象は前項の2名(29歳, 39歳)である。視標の提示は明視領域より「ボケ」領域への定屈折移動により明視の限界(近点)を求めるものである。起始点の設定は+3Dを加入した状態の3, 4, 5, 6, 7Dとし、左右眼の近点を求めた。

実験結果と考察：図4は、起始点を変えて量定した場合における近点の推移を示したものである。予測されたことではあるが、移動距離が長いほど近点が延長する傾向がみられる。近点チェックの位置はわずかな相違であっても、屈折度に換算すれば最大・最小値の差は3~4Dと極めて大きく、明視保持の困難さをうかがわせる結果といえる。本法の致命的な欠点でもあり、検討課題かともいえよう。

IV 調節時間測定装置の試作とその成績

自覚的調節検査法から他覚的調節反応量への対応においてアプローチを試みる場合に、最も問題とすべき事項の一つに時間的制御がある。今回、日常視に近い条件で近方視標を提示し、遠近の明視に要する反応時間を測定する装置を試作し、2, 3の実験を試みた。

1. 試作装置の概要

今回試作した装置は、遠・近視標の提示時間を制御しながら、調節反応時間を測定する装置である(図5)。

1) 装置の構成：遠・近視標の提示は斜め下方の距離に一致させた実在空間に設定しており、視標(ラ氏環)の大きさも距離に対応させ得るようになるために、液晶板を用いている。本器は後述するが、相対的な反応時間を比較する目的から、視標精度よりも時間的精度に重点をおいたものである。いわば、阪大式アコモドメーターの発想¹⁸⁾を外部視標に置き換えたものともいえる。本器を仮に「New-accommodometer」(以下、NA)と呼ぶ。NAの構成は、次の3つの要素から成る。すなわち、

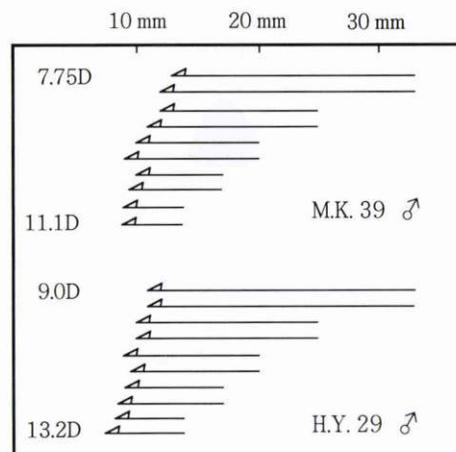


図4 視標移動開始位置と近点距離。

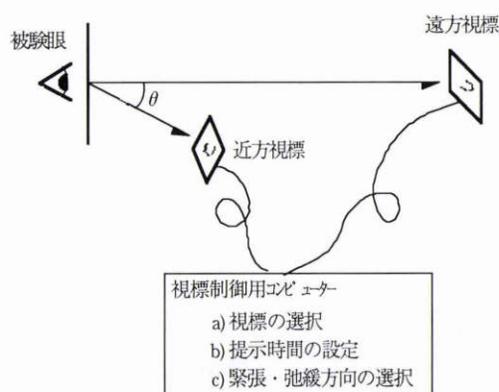


図5 試作調節時間測定装置(試作アコモドメーター)。

① 遠距離視標：5mに設定された液晶によるラ氏環視標(0.4, 0.5)であり、提示時間の制御が可能である(0.2~10.0秒まで0.1秒間隔で任意に設定)。

② 近距離視標：近距離(20~100cmの任意の距離・可変)に設定された液晶によるラ氏環視標(0.4, 0.5)であり、提示時間の制御は遠距離視標に準じ独自の設定ができる。

③ 視標制御装置：遠・近視標の、イ)提示時間、ロ)視標の選択、および、ハ)ラ氏環の切れ目の方向(試行終了時にat randomに自動変換)を制御するパーソナル・コンピュータを備える。ただし、イ)、ロ)については任意設定が可能である。

2) 視標の条件：表2はNAについて計測された遠・近視標面輝度、白黒面のpercent対比を示したものである。

2. 調節緊張・弛緩時間と視標明視時間

調節力を要する対象であれば、調節刺激に変化を与えれば刺激提示の手法に応じて調節緊張・弛緩時間が測定できる。しかし、殆ど調節力をもたない完成された老視、あるいは偽・無水晶体眼では、本来の調節時間の測定はできない。また、遠・近視標の明視は視距離に対応させた多焦点レンズなどの光学的補助具が必要となる。その

表 2 試作調節時間測定装置視標輝度

		遠用視標輝度	近用視標輝度
測定条件	1) 測定角	0.1°	0.1°
	2) 測定距離	1 m	0.25 m
	3) 視標	VA: 0.3	VA: 0.2
白地部・平均輝度		515.2 cd/m ²	471.8 cd/m ²
黒地部・平均輝度		8.8 cd/m ²	55.3 cd/m ²
パーセント対比		98.3%	88.3%

VA: 視力

場合、時間的構成要素の殆どは明視に要する反応時間と推定されるので、これらの症例の結果を本論においては視標明視時間と仮称する。

さて、予備実験として、イ) 近方視標提示の傾斜角度、および、ロ) 視標面輝度 (ND-フィルター 0.1, 0.2 による減光) による調節反応時間への影響を検討したが、臨床成績からはそれぞれ有意差がみられなかったため、以下の実験においては次のような条件で試行した。すなわち、近方視標面についての傾斜角度 (θ) は下方 20°, 視標面輝度は ND-フィルターを使用しない条件である (予備実験の成績は本論ではふれない)。

1) 対象と方法

実験 1. 正常対象群における調節時間

実験対象には実験目的を十分理解している、屈折度が ± 0.75 以下の教室関係者 13 名 (23~34 歳, 平均年齢

28.4 歳) を選んだ。遠・近視標には基礎実験の結果から比較的見やすい 0.4 のラ氏環視標を用いた。

また、視標の提示時間は緊張・弛緩方向ともそれぞれ 5 秒間、遠・近視標を提示したあとに、調節刺激量に対応させて視標を切り替え調節緊張・弛緩時間を測定した。測定は、片眼 (右眼) および両眼視下の条件で 3 回施行し平均処理を行った。

次いで同一対象者について、AP, および外部視標による IO により測定した調節緊張・弛緩時間と比較検討を行った (IO による測定の対象・方法については第 V 章参照)。

実験 2. 糖尿病群における調節時間

病的群として、若年者 (20~40 代) で視力が良く、かつ、網膜症を有しない長期の糖尿病加療者 19 名を選び、実験 1 に準じて測定を行った。

実験 3. 偽水晶体眼の明視時間

偽水晶体眼 13 名について、測定距離に対応させた二重焦点レンズ (ペンタックスビジョン・複合試験レンズ) を装着させ NA で視標明視時間を測定した。遠・近視標の設定は、それぞれ 0.2 D, 3.0 D である。

2) 実験結果と考察

正常対象群における調節時間: 表 3, 4, 図 6, 7 は両眼, および片眼 (右眼) における調節緊張・弛緩時間について NA, AP および IO による結果を示したものである。

表 3 正常若年者の調節緊張時間

測定機種		調節刺激	0.2 ⇒ 2.0 D	0.2 ⇒ 2.5 D	0.2 ⇒ 3.0 D
両眼	試作アコモドメーター			0.45 ± 0.04	0.46 ± 0.05
	アコモドポリレコーダー			0.74 ± 0.10	0.80 ± 0.12
片眼	試作アコモドメーター		0.44 ± 0.06	0.53 ± 0.09	0.57 ± 0.10
	アコモドポリレコーダー			0.86 ± 0.12	0.87 ± 0.17
眼	赤外線 オプトメーター	潜時	0.24 ± 0.12	0.26 ± 0.08	0.27 ± 0.08
		最大速度 到達時間	0.61 ± 0.12	0.65 ± 0.09	0.69 ± 0.15
		整定時間	1.09 ± 0.24	1.16 ± 0.20	1.28 ± 0.26

D: diopter (24~34 歳, 13 例, 秒)

表 4 正常若年者の調節弛緩時間

測定機種		調節刺激	2.0 ⇒ 0.2 D	2.5 ⇒ 0.2 D	3.0 ⇒ 0.2 D
両眼	試作アコモドメーター			0.53 ± 0.05	0.57 ± 0.07
	アコモドポリレコーダー			0.87 ± 0.12	0.92 ± 0.19
片眼	試作アコモドメーター		0.50 ± 0.05	0.54 ± 0.04	0.57 ± 0.07
	アコモドポリレコーダー			1.06 ± 0.24	1.08 ± 0.24
眼	赤外線 オプトメーター	潜時	0.31 ± 0.13	0.27 ± 0.11	0.29 ± 0.11
		最大速度 到達時間	0.78 ± 0.17	0.65 ± 0.15	0.73 ± 0.11
		整定時間	1.17 ± 0.14	1.20 ± 0.14	1.33 ± 0.15

(24~34 歳, 13 例, 秒)

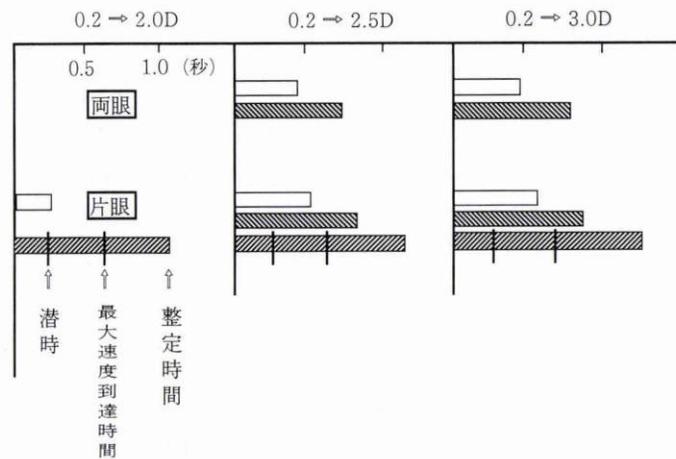


図6 正常若年者の調節緊張時間。

□：試作アコモドメーター，▨：アコモドポリレコーダー，▩：赤外線オプトメーター

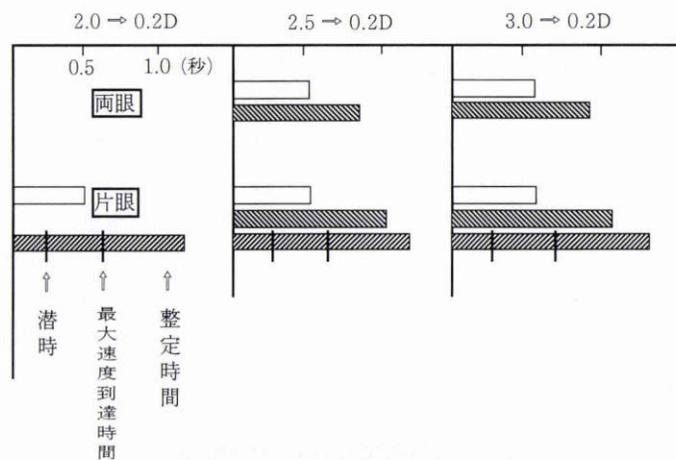


図7 正常若年者の調節弛緩時間。

□：試作アコモドメーター，▨：アコモドポリレコーダー，▩：赤外線オプトメーター

視標認知までの調節緊張時間はNAによると片眼では0.5秒前後であるが、両眼視状態では約0.1秒早く従来いわれておるように輻湊性調節の関与が推測される¹⁶⁾¹⁹⁾。

また、APでは1秒前後の調節緊張時間を要し、かつ、その分散も非常に大きい結果が得られている。一方IOでは、5.2秒強の潜時を経て0.6秒台までは急速な調節反応（最大速度到達時間と仮称）を示し、その後なだらかな調節反応形態をとった後にピークに達する傾向がみられる（詳細は第V章）。

一方、視標認知までの調節弛緩時間は、NAによると片眼・両眼ともに0.5秒強と片眼の緊張時間と類似している。いわば、輻湊機能の恩恵がみられないと類推させる成績を示している。またAPでは、緊張時間と比較して0.1～0.2秒程度の反応時間の遅れがみられ、個人差もさらに大きくなる傾向がうかがえる。

糖尿病群における調節時間：図8は、糖尿病群における調節緊張・弛緩時間を示したものである。正常対象例と比べて年齢構成が高く同一には論じられないが、緊

張・弛緩時間も年齢に比し延長する傾向がみられ、分散も大きい結果が得られている。このことは、従来いわれているような糖尿病に起因する神経伝達系の障害²⁰⁾²¹⁾があることを推測させる。しかし、ある程度の予備知識をもつ対象群との比較という意味では、測定方法の理解において欠ける点もあり、その分を割り引いて判断を下す必要性もあろう。

偽水晶体眼の視標明視時間：偽水晶体眼における視標明視時間は、

近方明視：0.61±0.25秒

遠方明視：0.63±0.28秒

を要した。正常な調節力を有する若年者では、「調節時間+視標明視時間」が0.5秒前後であることから推測すると、「視標明視時間」のみで0.6秒以上を要することは、加齢による反応時間の遅れが予想以上に大きいことを推測させる。

V 外部視標における調節反応量の解析

調節による視標の明視能力（調節力・調節反応時間）

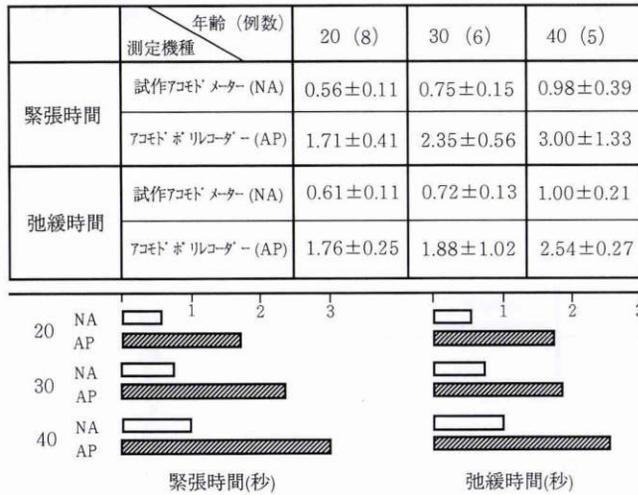


図8 糖尿病群の調節時間。

を、他覚的に量定される調節反応量に対比させて分析する目的からすれば、それぞれの装置を同軸面に置き、同一試行時における資料を比較検討すれば良い。しかし、装置の設定(試作)が現状において困難であることから、外部視標を用いたIOによる解析を別個に設定し、時間的経緯を含めてNAによる成績との比較検討を行い、調節反応と視標明視に至る過程の分析を試みた。また、内蔵するイリスコーダー(iriscorder)で瞳孔面積の変化を併せて記録し、明視との関連を検討した。

1) 対象と方法

対象は、実験の目的を熟知した若年者10名(屈折度:±0.50D以下、年齢23~33歳)である。実験に用いた装置は前述したように、IO(NIDEK)に外部視標系を調節刺激として設定したもので(図9)、明視の客観的確認を可能とさせるため、視標にはラ氏環を用いた。この装置を用い、以下の2つの実験を行った。

実験1. 調節刺激量の差による調節・瞳孔反応形態刺激視標としては0.4(距離に対応)のラ氏環を用い、遠方を0.2D、近方刺激量を5段階(1.0D、1.5D、2.0D、2.5D、3.0D)に変えて調節緊張・弛緩反応、および瞳孔反応(面積)を記録した。なお、視標の提示時間はそれぞれ10秒とした。

実験2. 視標差による明視の有無と調節・瞳孔反応形態

調節刺激量を-3Dと一定にし、視標の大きさを6段階(0.4、0.5、0.7、0.8、0.9、1.0)に変えて調節緊張・弛緩反応を記録した。また、明視の有無を3段階(clear, unclear, blur)に分けて問診し併記した。

2) 実験結果と考察

表5、図10、11は実際の調節刺激量に対しての調節・瞳孔反応形態を分析した結果を示したものである。本実験には比較の見やすい視標(0.4)を用いた。調節刺激量に対する調節反応量の割合、すなわち、調節反応率は調節刺激量が増すにつれて増大し、瞳孔面積も一定の比率で縮小する傾向がみられる(表5、図10)。

また、整定時間(調節緊張が一定の反応を呈するまでの時間)²²⁾は調節刺激量が増すにつれて延長を示す。しかし、経時的な速度変化をみた場合、調節反応が最大速度に達するまでの時間(最大速度到達時間)は調節刺激量と関係なくほぼ一定であり、潜時を含めても0.7~1.0秒前後となる。換言すれば、調節刺激が大きくなるほど初期の緊張速度が早くなり、明視に関与して来る過程をうかがわせるものといえる。一方、調節弛緩時間に関しては、整定時間・最大速度に達するまでの時間とも緊張時間ほど著明な変化はみられず、それぞれの反応時間とも緊張時間に比して遅い(表5、図11)。

明視の有無に関する視標の分析には3視標(0.4、0.7、1.0)を代表させた(表6、図12a、b)。視標差と、いわ

表5 調節刺激量と諸種条項

調節刺激量 (D)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
瞳孔面積	105.5	107.5	85.3	78.1	73.6
調節反応率 (%)	44.3	66.4	66.6	74.3	88.5
調節緊張・整定時間 (秒)	1.52	1.80	2.10	2.37	2.18
調節緊張・最大速度到達時間	0.70	1.02	1.06	0.72	0.81
調節弛緩・整定時間 (秒)	2.42	2.34	2.29	2.60	2.81
調節弛緩・最大速度到達時間	1.20	1.24	0.98	1.14	0.89

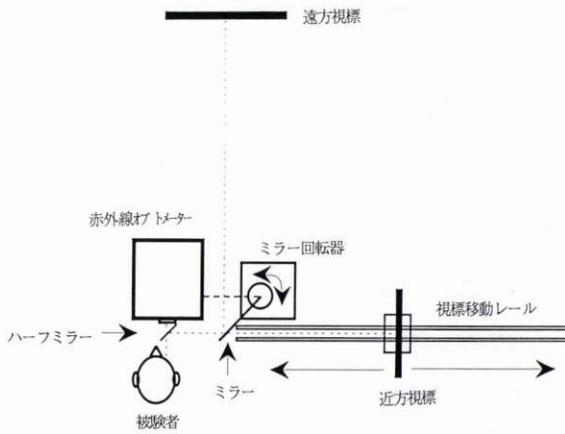


図9 外部視標系の構成.

オプトメーターの前にハーフミラーを置き、外部視標系の観察を可能とする。ミラー回転装置でミラーを回転させることにより、遠・近方視標の切替が可能となる。近方視標はレールの上に設置されているので、遠近視標のアラインメントを保たせながら視標呈示位置を調整できる。

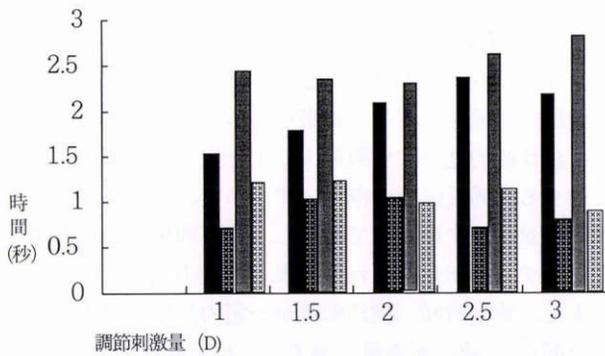


図10 調節刺激量と諸種条項.

■：調節緊張・整定時間，▨：調節緊張・最大速度到達時間，▧：調節弛緩・整定時間，▩：調節弛緩・最大速度到達時間

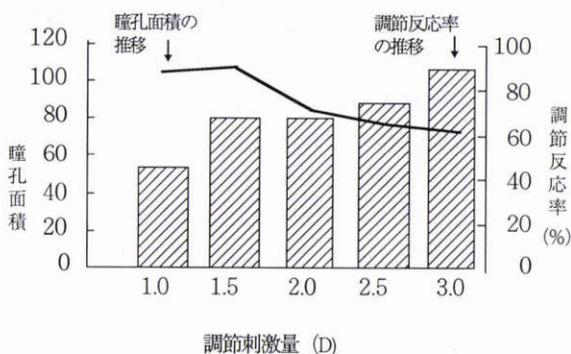


図11 調節刺激量に伴う調節・瞳孔反応.

ゆる AR/AS (accommodative-response/accommodative-stimulus) (調節反応率), および瞳孔反応(瞳孔面積)との関連を「明視群」と「ボケ群」に分けて比較した場合, 比較的大きい視標 (0.4) では両群間に差は認められないが, 相対的に視標が小さくなると両群間に反応差が認められる. すなわち, 視標が小さくなると調節反応率

表6 視標の大きさと明視反応

視標の大きさ	0.4	0.7	1.0
調節反応率 (明視群・%)	88.3	93.2	98.3
調節反応率 (ボケ群・%)	85.5	77.3	79.5
瞳孔面積 (明視群)	84.5	88.0	82.3
瞳孔面積 (ボケ群)	77.2	72.0	68.4

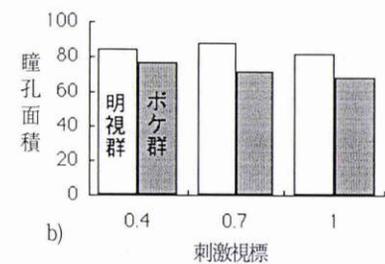
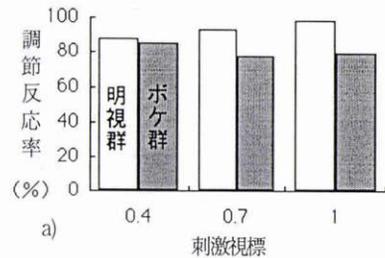


図12 刺激視標の大きさと明視反応.

は「明視群」では増加するが, 反面縮瞳傾向は「ボケ群」に強くみられる。

試作 NA による実験結果と上記の経過から, 調節緊張・弛緩反応はいくつかのステージに分けることができ, その過程において明瞭な像 (clear-image) として認知されるものと想定される. その一つの仮説として, 調節反応は潜時を経て急速反応期 (fast-response stage) および緩徐反応期 (slow-response stage) があるが, ある程度の明視が可能となる時期は急速反応期の後半 (0.5~0.7 秒) であろうと推定される. その結果, 調節反応量といわれるものは一般に反応がオーバーシュート (over-shoot) した側面をみているものとも推測できる (図6, 7).

VI 偽水晶体眼における明視現象

昨今, 本邦において偽調節の視機能, 特に偽調節 (apparent accommodation, pseudo-accommodation) を話題とされることが少なからずあり, 未だ結論が得られていない. 著者らは, いわゆる apparent accommodation については, Hueber²³⁾が詳細に記載し術後の軽い乱視が構成要因をなしていると述べており, 異論を挟む余地はないと考えている. 本邦の文献を検索する過程において, apparent accommodation が問題視される第一の原因は, 本事象を「偽調節」と訳したことに端を発するものと思われる. その結果, 量定の必要性が生じ明視の質

(quality of vision) が問われることとなったが、それぞれの測定背景が異なるため不必要な論議を生む結果を招来している。

ここで、過去に埋もれた資料を提示しておく。藤田敏彦氏(当時・岩手医科大学学長)は白内障の手術を受けた術後の視感覚を、第 9 回東北眼科学会・特別講演「白内障受術後の視覚諸現象」(昭和 26 年)において次のように述べている。すなわち、「老人性白内障に対する弁状摘出術を、右眼に受術した経験について、右眼における術前術後の視覚的諸現象並に 1 眼無水晶体眼 1 眼老人性白内障眼の現状における視覚的諸現象について、述べるところがあった」と。生憎、本講演の原著は残されていないが、昭和 26 年の臨床眼科誌上において、梶浦が「合成樹脂性水晶体挿入手術」と題する論文²⁴⁾で本講演の印象を次のように記している。すなわち、「同学長は、レンズは寧ろ収差の悪い安価な眼鏡の方が自分には良い。之は収差を逆に利用して遠近両方に明視できるといわれたので非常に興味を覚えた事がある。然し同学長は像の跳躍する苦痛がある事を訴えておられた」と。

生理学、眼科学を専門とする両氏の説明は、自験例でもあるため非常に説得力があり、乱視の存在が偽調節機能についての重要なウエイトを占めるものと推察できる。

表 7 は偽調節に関与すると想定される主要素を挙げたものである。基本的には有水晶体眼にはなく、無、または偽水晶体眼にみられる所見に限られるが、両者にみられても程度の差が著しければ偽調節要因として許容されよう。これらの要素の中からいくつかを、教室における実験例を含めて整理して置きたい。

1. 明視の質

偽調節現象を問題とする場合において、最初に規定すべきものとして明視の質 (quality of vision) を上げる必要がある。本来、白内障自体が高齢者に多いことは、明視と判断される許容限界が相対的に広い可能性があることは容易に推察される。近点計に使われるラ氏環、文字視標の認知は、いわゆる「ボケ」の判断とは異なるため、前述したように個人差が極めて大きいといわれている¹⁶⁾。

小実験：偽水晶体眼の明視の実態

表 8 は偽水晶体眼患者において、臨床的に偽調節現象がある症例、いわゆる「遠方も、近方も良く見える」群 (38 眼) について、年齢と、ラ氏環による眼内レンズ (intraocular lens, 以下、IOL) 視力の実態をみたものである。0.5 以下の視力でも十分満足する例が高齢者群 (70 歳以上) では 40% を超し、期待する明視の質がさほど厳格ではないことを示唆するものといえる。一方、70 歳未満の症例では明視の質が比較的高く、遠方視では 0.5 以下は 13% に過ぎない。

表 7 偽調節現象の有無と関連因子

	有水晶体眼	無水晶体眼	偽水晶体眼
1) 偽調節現象の有無	(-)	(+)	(++)
2) 症状の頻度と年齢	不明	高齢者?	高齢者?
3) a) 焦点深度			
縮瞳	(+)	(+, ++)	(+, ++)
乱視	(±)	(±, +, ++)	(±, +, ++)
考えよう b) コントラスト	/	増強	増強
要る c) 解剖学的変化			
角膜曲率	(-)	(-)	(-)
前房深度	(±)	(±)	(±)

表 8 偽水晶体眼明視の実態

年齢 (例数)	視 力		視 力	
	遠 方 視	遠 方 視	近 方 視	近 方 視
	0.6 ≤	0.5 ≥	0.6 ≤	0.5 ≥
70 ≤ (22)	58%	42%	55%	45%
70 > (16)	87%	13%	69%	31%

表 9

瞳 孔 径	1 mm	2 mm	3 mm
1) 偽調節 (近点計)	2.82 ±0.59 D	1.72 ±0.42 D	1.28 ±0.39 D
2) 焦点深度 (光線追跡)	1.96 ±0.19 D	1.14 ±0.22 D	0.80 ±0.16 D

(無水晶体眼 18 例の測定成績, 小峯による)

2. 瞳 孔 径

焦点深度の増大に瞳孔 (縮瞳) の関与が欠かせないと報告は極めて多い²⁵⁾²⁶⁾。しかし、近見に縮瞳が伴うことは有水晶体眼にもあり、明視の構成にとり重要視されるとすれば、両者間に焦点深度に影響を及ぼす程度の有意差がある場合に限るべきものと考えられる。Gullstrand の模型眼によると、瞳孔径が 3 mm の場合の焦点深度は、0.5 の視標では 0.5 D、1.0 の視標では 0.25 D に過ぎず、瞳孔径に 1 mm の差が生じても焦点深度の増大は 0.2 D にも達せず、偽調節現象に果たす役割は極めて微々たるものと推定される。表 9 は、無水晶体眼において瞳孔径を変えて実測した明視域、偽調節量と焦点深度を示したものである。近点計による測定値は光線追跡で予測されたものよりわずかに大きい、その量は 1 mm の瞳孔径の差があっても 0.5 D にも達しないことが理解される¹⁾²⁷⁾。

3. 明るさとコントラスト

有水晶体眼と比較した場合、無・偽水晶体眼がもつ重要な差に、水晶体を摘出することによる明るさの変化がある。無・偽水晶体眼における光量の増加は、併せて瞳孔の大きさを有水晶体眼に比して縮小ぎみに作用させる可能性も大きく、結果的に明視機能をさらに高めること

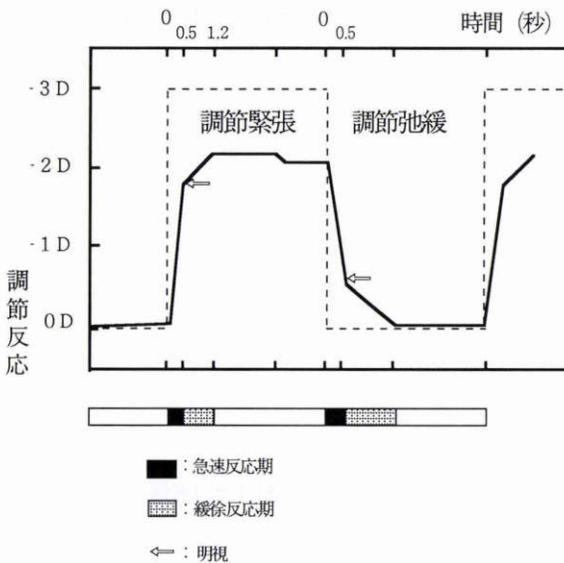


図13 調節反応のプロセス.

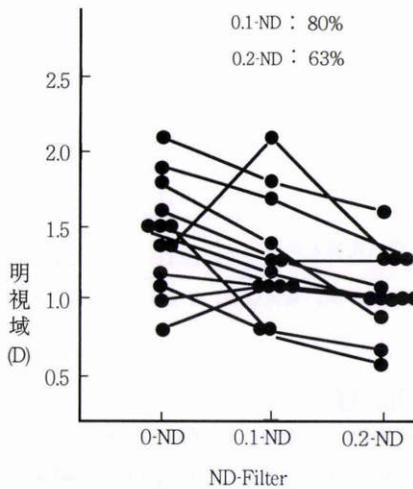


図14 ND (neutral-density) フィルターによる偽水晶体眼明視域の変化.

も十分想定される。

片眼無水晶体眼を非手術眼と同程度の明るさにNIKON-ブラウン染色により調整する場合、染色されるべき濃度は予想以上に高い。当然のことながら、対象の年齢、非手術眼の視力にも依存するが、15~20%の染色は必須と考えてよい²⁸⁾。前述の結果をふまえ、今回偽水晶体眼に対してND-フィルターによる減光を行い、視力、明視域に対する影響を検討した。

1) 対象と方法

対象として選んだ症例は、60歳以上の偽水晶体眼13眼であり、IOL (追加矯正も含む) による近方視力が0.8以上を有するものとした。偽水晶体眼の屈折値に+3Dを加入し、O (IOLのみ)、およびNo. 0.1, No. 0.2 Kodak ND-フィルター (それぞれ、可視光透過率：80%, 63%) の条件下において、D'ACOMO (定屈折近点計) による明視域 (視標、ラ氏環 0.5) を測定した。

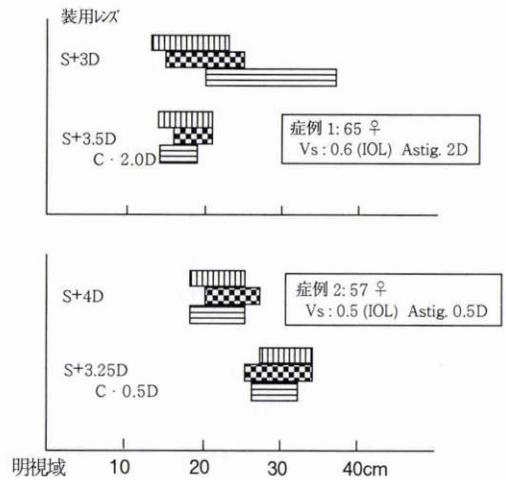


図15 視標の種類と明視域.

■: 線視標 (強主経線方向), ■: 文字視標, ≡: 線視標 (弱主経線方向)

2) 測定成績と考察

ND-フィルターにより減光前後の明視域を測定したものが図14である。なお、全症例ともND-フィルターにより遠方視力の低下はなく、近方視力は実測していないが感覚的視力の低下は訴えていない。

有水晶体眼の明るさは偽水晶体眼の80%以下と予測され、ND-フィルター0.1, 0.2を付加した条件に類似し、それ自体でコントラストの低下、ひいては視標認知能の劣化が存在することを推定させる。

4. 乱視

軽度な術後乱視の前後焦点線が感覚的な焦点深度の増大にとって有利に働くことは多くの報告があり、偽調節現象にとってかなりのウェイトを占めていることが想像される²³⁾²⁹⁾³⁰⁾。本論においては、視標条件と明視域、および測定距離における視力の実態 (quality of vision) について乱視との関係を質的に検討した成績について述べる³¹⁾³²⁾。

1) 視標条件と明視域

対象と方法：対象は術後経過が良好で、1.0以上の視力が確保できた偽水晶体眼、6眼である。

縦・横2方向の線視標、および文字視標 (視距離に対応させ、写真印画下で作成) をみせた時のいわゆる明視領域について、a) +3Dの球面付加レンズのみの群と、b) +3Dの球面付加レンズに円柱度数を加え完全矯正を行った群について、明視域の広さを比較した。

測定成績と考察：図15に代表例2例 (症例1：65歳、女性、乱視量-2D) (症例2：57歳、女性、乱視量-0.5D) の結果を示す。症例1では乱視度数を追加することにより、文字視標、および線視標の明視領域は減ずるが、症例2では殆ど変化がみられない。また、球面度数のみの症例1では、各視標の明視領域は相対的に広く、線視標の明視範囲は文字視標の両側にシフトして位置付けられているのがわかる。すなわち、本例におけるいわゆる

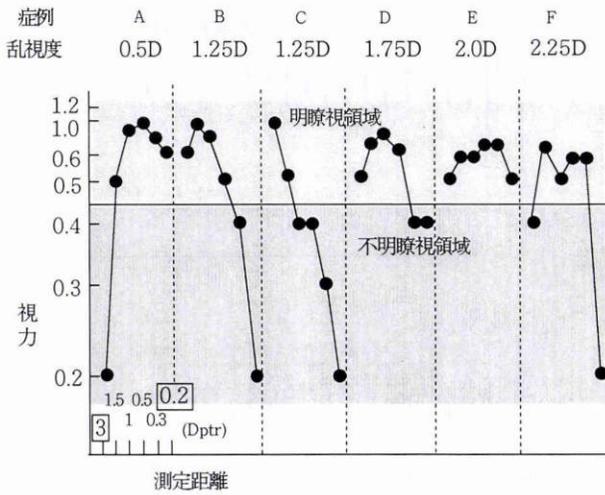


図 16 乱視度と異なる測定距離における視力。

偽調節領域は、線・文字視標が包括する範囲に近似するものと推定され、遠方視は弱主経線の焦線領域、近方視は強主経線の焦線領域まで明視に関与してくるものと想像される²⁹⁾。

2) 測定距離と視力

対象と方法：対象は上記症例である。測定距離に対応させた大きさの文字視標を作り（視標の作成も前実験に準ず）、追加矯正を行わずに各距離について視力を実測した。

測定成績と考察：図 16 に 6 症例の結果を示す。視力 0.5 以上を、ある程度明視が確保された領域と仮定すれば、今回の対象においては症例 D, E (乱視量：1.75 D, 2.0 D) が偽調節現象を示す例に近いものと推察されるが、同現象の自覚的意識レベルには個人差があり一致をみない場合も少なくない。また、今回の選択対象は、術後乱視の分布状況が比較的均一であり、乱視を中心として全体の趨勢を理解する上では貴重な資料といえよう。

3) 有・偽水晶体眼症例

症 例：症例は片眼白内障術後で、非手術眼の視力が良好な 69 歳男性である。

本例は術後屈折値が両眼とも極めて近似した貴重な症例である。

非矯正下の各距離に応じた両眼の視力分布を示したものが図 17 であり、非手術眼が術眼と類似した形態を示している。しかし、全体的に非手術眼においては距離に関わりなく視力の低下がみられた。また瞳孔の大きさにも差がなく、光量の差が明視を阻害させるものと類推させる。本例は空間周波数特性 (modulation transfer function, MTF) の測定結果でも同様な結果が得られ、光透過量の差 (コントラストの差) が視力差を生ずる要因の一つであろうと推測している。

5. 回折型多焦点眼内レンズと明視の選択

最近、白内障手術に多焦点眼内レンズを使う施設も増えており、それらの視機能についての論議がなされる機

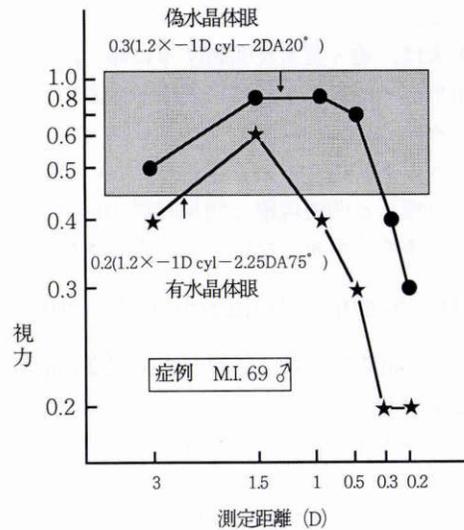


図 17 有・偽水晶体眼の視力。

症例 1 65 歳 ♀

遠方視力：

$$Vd: 0.1(1.2 \times -1.25D \cdot C - 2.0DA100^\circ)$$

$$Vs: 0.3(1.0 \times -0.25D \cdot C - 1.25DA90^\circ)$$

近方視力：

$$Vd: 0.2(0.8 \times +1.75D \cdot C - 2.0DA100^\circ)$$

$$Vs: 0.3(0.8 \times +2.75D \cdot C - 1.25DA90^\circ)$$

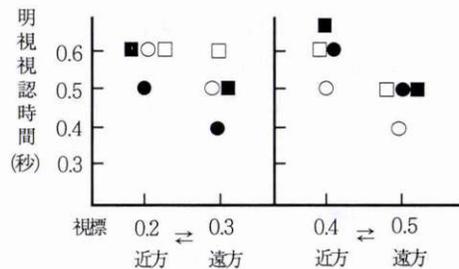


図 18 回折型眼内レンズの屈折・調節。

白丸：右) 遠方矯正 黒丸：右) 3 D 加入
白四角：左) 遠方矯正 黒四角：左) 3 D 加入

会も多い。特に、回折現象を利用した Diffrax-IOL については、同時視 (simultaneous vision) の視感覚としての実態は、静的状況においては把握されてはいるものの、時間的レベルにおいては殆ど把握されていないのが実情と思われる。今回、Diffrax-IOL の 2 症例を検索することができたので、その 1 例を呈示する。

症 例：症例は 65 歳、女性。図 18 に遠・近方視力、および NA により測定された遠用矯正のみ、および二重焦点レンズ (遠用矯正に +3 D 加入) による緊張・弛緩方向の明視時間を示す。測定に用いた視標は、前述した実験に準じ、0.2 (近方)、0.3 (遠方) の組み合わせと、同じく 0.4、0.5 の組み合わせである。

図 18 にみられるように、非常に興味のある事実として、「左右眼とも、追加矯正なしである程度の遠・近方視力、および円滑な明視反応 (0.5~0.6 秒) が得られる」

ことである。

この事実は、遠・近方を明視するに際し、その質はともあれ屈折部・回折部を任意に使用できることを示すものといえる。

また、他の1症例(46歳、女性)においても、同様の屈折度の重複した明視現象と明視時間(0.4~0.6秒)が認められ、偶発的事象でないことが立証された。

VII 調節機能の meridional analysis

人間の目が近方視を行うに際して乱視度が増加する、あるいは軸が変わるなど、調節に伴う乱視にかかわる変化については多くの報告がなされてきた^{33)~35)}。しかし、それらの報告の大部分は静的視標を使ったものであり、日常的に対応させた dynamic-change として捕える試みは必ずしも多くはない。

臨床において繁用されている IO は、水平方向の屈折変化を測定するように設定されており、垂直方向の屈折変化およびそれぞれの差(dynamic dissociation)を論ずることは現状では困難といえる。今回、任意の meridian の屈折変化が選択できるように IO に改造を加え、調節反応(step 応答)の経線差による違いがあるか、否かについて検討を加えた。

1) 対象と方法

対象は、本学職員 43 名(19~39 歳、平均年齢 26.9 歳)である。また、屈折値は球面度数+0.5~-7.0 D、円柱度数 3.25 D 以内(角膜乱視量 3.62 D 以内)を有している。調節反応量の測定には IO を用い、次の 2 つの実験を施行した。すなわち、

実験 1：内部視標(スターバースト、ラ氏環)、ステップ刺激(刺激量：-2, -3, -4 D、それぞれ 10 秒視標呈示)による水平、垂直反応量の測定

実験 2：外部視標(スターバースト、ラ氏環)、静的刺激(刺激量：-2, -3, -4 D、視標呈示 10 秒)による、水平、垂直反応量の測定と実験 1 との対比である。

2) 実験結果と考察

実験 1：図 19 (a, b) は、内部視標(ラ氏環)、ステップ刺激(刺激量：-4 D)による水平、垂直反応量を角膜乱視の程度に応じて分析した結果を示したものである。なお、角膜乱視はすべて直乱視を有する症例である。

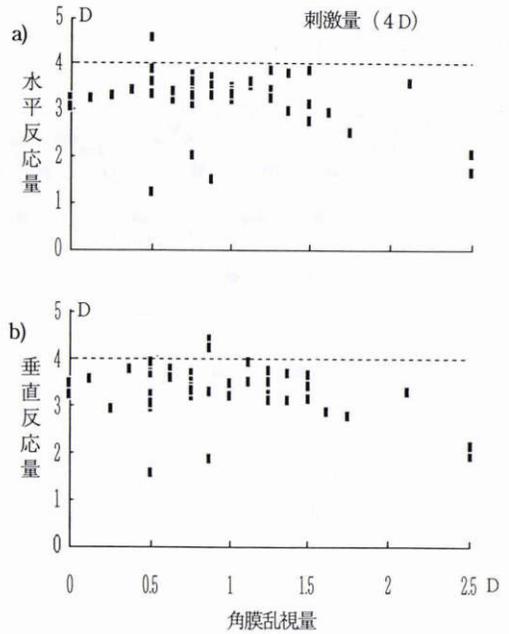


図 19 調節刺激と水平・垂直反応量。

角膜乱視度数と調節反応量は、それぞれの経線とも一定の方向性は認められない結果が得られた(相関性なし)。しかし、乱視量が大きくなるにつれて調節反応量が減ずる傾向もみられ、調節機能でカバーできない「ボケ」は調節反応を抑制する働きを示す可能性も示唆されるが、結論を得るには乱視度数が大きい症例の蓄積が必要と考える。

いずれにせよ、今回の実験結果からは、当初期待された経線に特異的な反応形態は得られなかった。

実験 2：表 10、図 20 は、外部視標(ラ氏環)、静的刺激(刺激量：-2, -3, -4 D)による結果を実験 1 と比較したものである。刺激条件が本質的に異なるため、直接的な比較の対象とはならないが、それぞれの傾向だけは推測できる。すなわち、内部視標による動的刺激(ステップ制御)では調節刺激量と反応量には殆ど差がないが、調節刺激量が増加するにつれて反応量は減ずる傾向がみられる(実験 1 の結果参照)。一方、外部視標による静的刺激では調節刺激量に比して反応量が大きく(overshoot)、刺激量が増すほどその傾向は強い傾向がうかがえる。しかし、実験 1 と同様、実験 2 においても経線に特異的な反応形態は得られていない。

表 10 動的・静的調節刺激と屈折値

調節刺激量	調節反応量 (D)			
	水平方向		垂直方向	
	ステップ制御 (動的)	静視標 (静的)	ステップ制御 (動的)	静視標 (静的)
2 D	2.18±0.48	2.45±0.41	2.05±0.42	2.45±0.38
3 D	3.05±0.45	3.60±0.65	2.93±0.38	3.75±0.60
4 D	3.82±0.61	4.64±0.75	3.85±0.42	4.94±0.77

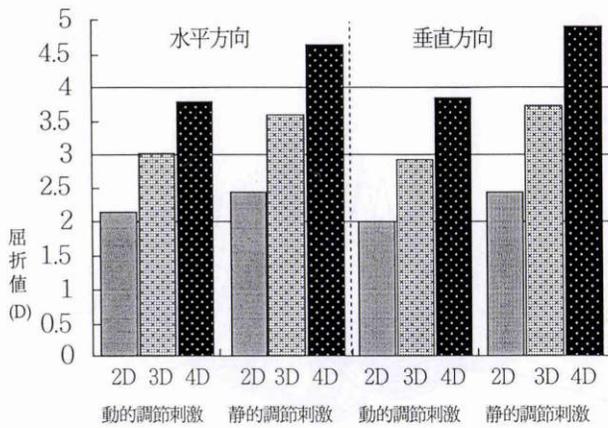


図20 動的・静的調節刺激と屈折値。

また、実験1, 2におけるスターバースト視標による結果も、ラ氏環視標のものと同様の成績を示している。この結果から、ラ氏環視標のものと同様の成績を示している。この結果から、ラ氏環視標のものと同様の成績を示している。

今回の実験結果からは、乱視を調節する調節反応の有無についての成果は得られなかったが、動的・静的調節刺激の屈折度に及ぼす影響には有意のある差があることを推測できる。すなわち、静的刺激は刺激時間にも影響を受けると思われるが、動的刺激に比べ明らかに大きく、過剰反応(over-shoot)の傾向を呈する。いふならば、近視寄りに偏位し、臨床的にしばしば経験する autorefractometry による結果と照合するものといえる。

VIII 調節微動の分析と意義

赤外線オプトメーターにより経時的に記録された屈折値の変化の中に、生体の動揺と考えられる正弦波様の揺れが観察される。Campbell³⁶⁾は、この波を accommodative microfluctuation と呼び、その本態について多くの研究がなされてきた^{36)~45)}。本邦においては、当初「微動調節」と訳されていたが、昨今は「調節微動」といわれることが多く、内容的にも適切な表現(日本語訳)として賛意を表したい(第II章)。調節微動は低周波成分(0.6 Hz 未満)と高周波成分(1.0~2.1 Hz)より構成され、それぞれ意義をもつものといわれているが⁴²⁾⁴⁴⁾、十分な解明がなされているとはいえない。

今回、外部視標を用いた実験系(第V章)における調節微動を分析し、視標差、および刺激量の差による影響を検討した。

1. 分析対象および分析方法

1) 分析対象

分析対象には第V章において行った資料の一部を使用した。すなわち、対象眼は眼鏡を装着していない、検査の目的を十分理解している正視眼8名である。

資料1：刺激量を3Dとし、近方視標サイズを0.4, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0と変化させた際の調節応答曲線(緊張, 弛緩)である。

資料2：視標サイズを0.5に固定し、刺激量(近方視標位置)を1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0Dと変化させた際の調節応答曲線(緊張, 弛緩)である。

なお、視標の提示時間は、いずれの場合も10秒間隔で3回の施行を行っている。

2) 分析方法

分析(周波数解析)に供した曲線は、原則として2回目の試行によるものを用いた。周波数の解析には最大エントロピー法(maximum entropy method, MEM)^{46)~48)}を用いた。解析に用いたサンプル点数は63点とし、これを3点(0.24秒)ずつずらして経時的にMEM処理を行った。解析周波数区間は、経時変化をみる目的から、理論的に信頼できる調節微動の高周波成分(1~2.5 Hz)のみを対象とした。また、MEMの解析に用いた次数は31に設定した。

2. 解析結果と考察

対象例について得られた spectral-power (SP) を、三次元座標系に表示するまでの過程を示した一例が図21である。図21において、SPはMEMにより算出された power (P) を $SP = \log(1 + P)$ を用いてデシベル変換を行い表示されている。また、調節微動の数値評価の試みとして、便宜上緊張時、弛緩時をそれぞれ前半と後半に分けて、緊張前期(early constriction stage, CE)、緊張後期(late constriction stage, CL)、弛緩前期(early relaxation stage, RE)弛緩後期(late relaxation stage, RL)で表示、調節微動の高周波成分のピークが存在すると予測される、1.5~2.0 Hzの間のSKを加算(積分)して8症例の平均値を比較したものが図22である。

また、表11 a, 図23は、資料1(視標差)、表11 b, 図24は資料2(刺激量差)の分析結果を示したものである。

1) 近方視標の大きさと高周波成分 (SP)

表11 視標サイズと調節負荷の変化に伴う Spectral-Power

a) 視標サイズ				
	RE	RL	CE	CL
0.4	134.62	125.28	307.47	334.94
0.5	134.87	120.18	353.34	344.90
0.7	121.32	140.57	391.69	340.73
0.8	112.93	103.97	395.45	401.77
0.9	152.73	160.56	354.98	373.71
1.0	219.43	172.31	418.62	396.45
b) 調節負荷 (D)				
	RE	RL	CE	CL
1.0	105.71	115.63	180.91	158.18
1.5	145.28	126.17	239.61	245.82
2.0	127.67	109.44	330.75	280.54
2.5	195.77	150.02	395.87	396.13
3.0	150.65	156.92	387.41	358.58

RE：弛緩前期, RL：弛緩後期, CE：緊張前期, CL：緊張後期

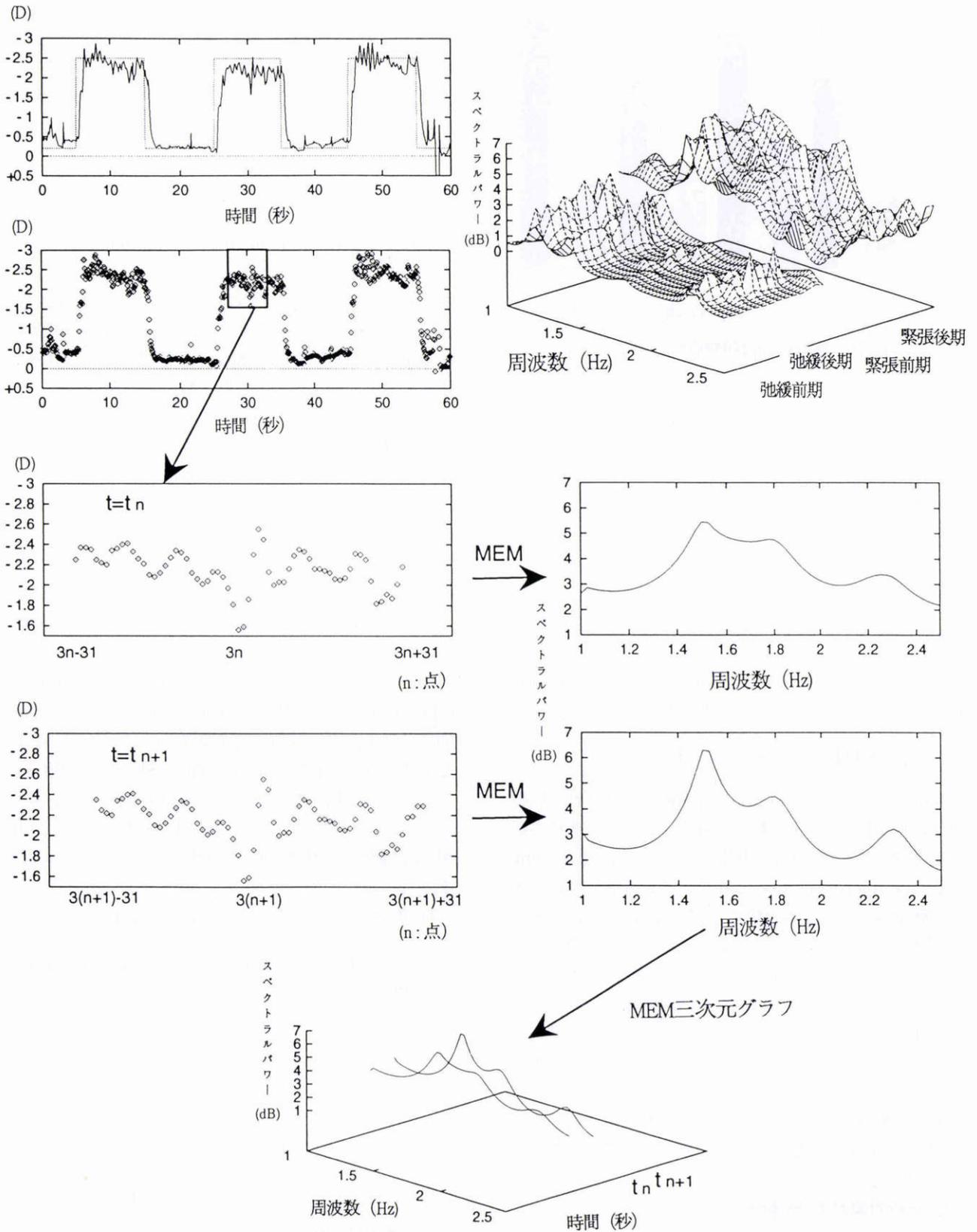


図 21 調節微動の spectral-power 曲線と三次元表示法.

調節応答曲線から、時間 t_n の maximum entropy method (MEM) は区間 $(3n-31 \sim 3n+31)$ の 63 点を切り出し、MEM 処理を行う。次に、 t_{n+1} の区間 $[39(n+1)-31 \sim 3(n+1)+31]$ と 63 点に関して同様の処理を行い、これを随時繰り返す、得られた spectral-power 曲線を三次元座標系にプロットし、時間および周波数推移が容易に観察出来るように一定の周波数間隔で線分を結んだ。

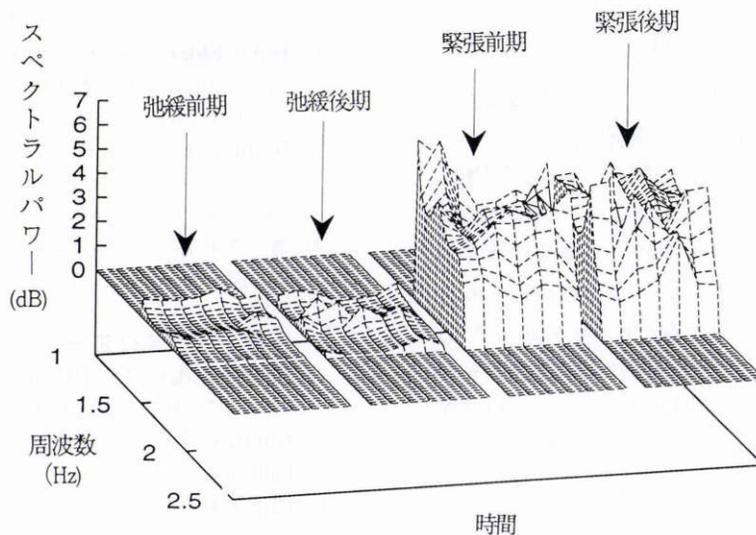


図 22 調節微動周波数成分出現頻度の数値化.

調節微動の高周波成分出現頻度の数値化を行うために、便宜上、調節応答過程を弛緩前期(RE)16.24~17.92秒、弛緩後期(RE)18.00~19.60秒、緊張前期(CE)26.24~27.92秒、緊張後期(CE)28.00~29.60秒の4つの過程に分割した。これらの区間はMEMの処理区間に調節の過渡応答が含まれず、各過程に7本のmaximum entropy method(MEM)のspectral-power曲線が含まれる。これらの区間のspectral-powerを周波数区間(1.5~2.0 Hz)で加算することにより、高周波成分の出現頻度の数値化を試みた。

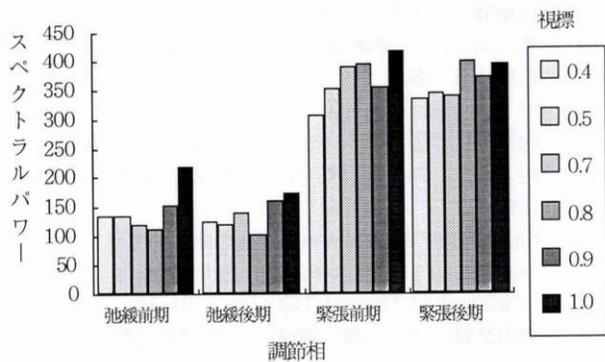


図 23 視標サイズと spectral-power.

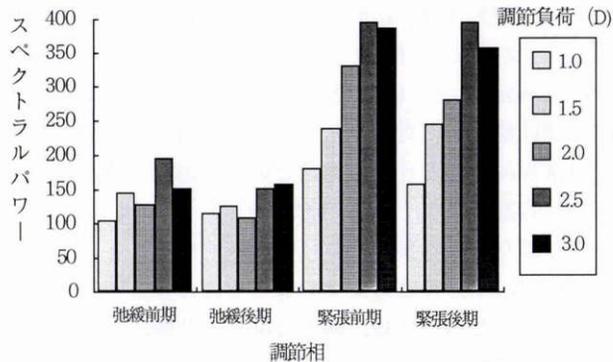


図 24 調節負荷と spectral-power.

調節緊張時において、刺激視標が小さくなるにつれて調節微動のSPは徐々に増加する傾向がみられるが、その差は比較的小さい。

一方、調節弛緩時においては、視標が0.8まではSPの変化はみられないが、視標が0.9、1.0と小さくなると増加を示す。しかし、量的には緊張時の1/2、あるいはそれ以下にすぎない。

2) 調節刺激量と SP

近方視標提示位置を変え、調節刺激負荷量を変化させた場合には、弛緩前・後期(RE, RL)においては調節刺激量に伴うSPの差は比較的少ないが、緊張時(CE, CL)においては2.5 Dまでは調節刺激量に比例したSPの増加がみられ、飽和状態に達する傾向がみられる。

今回の分析結果から類推されることは、第一に「視標のボケ」がSPの増大要因となっていること、第二にSPは調節安静位(仮に1 D前後と予測した場合)に近づくにつれ減ずる傾向に向かう可能性があることである。

また、いずれの分析においても、調節緊張方向に向かう場合が、弛緩方向へのそれよりもSPに及ぼす影響が極めて大きく、分析手法の要点を示唆するものといえる。極言すれば、弛緩方向のSPの差異は誤差範囲に含まれる程度のものであり、調節緊張方向の変化を分析することにより全体像を把握しても、大きな誤りを犯すものではないと思われる。このような観点において改めて図23、24をみた場合、視標注視のSPに及ぼす影響は相対的に大きく0.7~0.8以上では殆ど差はないといえる。一方、調節負荷量のSPに及ぼす影響は、いわゆる dose-dependent であり、かつ、2.5 D 以上において飽和に達する。いい換えれば、2.0 D 以下に前述した静節安静位に対応する屈折状況が存在するものと推測される。これらの事実は、本法を用いた分析における最初の課題ともいえよう。

IX 結 語

調節機能は視機能の最も基本的なテーマであるにもかかわらず、用語の問題を含め十分に理解されていない分野といえる。この大きな要因は、調節機能を研究課題としている研究者の大部分が生理学、あるいは optometry の分野に属するものであり、多くの優れた成果がありながら、臨床の関心とはある意味において dissociation を持ち、応用範囲が限られてくるためとも考えられる⁴⁹⁾⁵⁰⁾。

本邦における調節機能に関する最近の大きな業績としては、テクノストレス研究班(日本眼科医会)⁵¹⁾、東京医科歯科大学グループ^{52)~54)}、および西田ら⁵⁵⁾の仕事などを挙げることができるが、自覚的感覚閾値についての報告は必ずしも多くはなく、他覚的反応量における再現性の問題が議論の対象となることも少なくない。いうなれば、調節反応量の多寡は被験者の意識レベルにより常に左右されるため、異なる対象群(報告例)の比較が困難なことが多い。

今回の報告の主要な目的は、緒言でも言及したが、臨床領域において欠けている調節機能の課題である「明視とその時間的背景」に的をしぼり、他覚的測定がなされた調節反応との接点を見出すことにある。New accommodometer の開発は、実体空間における明視時間を調節反応量に対比させることにあったが、同軸設定と日常視に対応させた傾斜角との同一選択が技術的に必ずしも容易ではなく、時間的制約もあり、今回は前者に的をしぼり異なる次元における比較をすることとした。その結果、十分とはいえないまでもある程度の成果が得られたものと思われる。調節と乱視の問題、調節微動の分析などについては、未だ研究の方向づけがなされたに過ぎず、課題が山積しているのが実情ともいえる。

多くの臨床研究者により、これらの問題が少しずつでも解明されることを期待したい。

終わりに宿題報告の機会をお与え頂きました日本眼科学会評議会各位、ならびに学会長・所 敬教授、座長の労をお取り下さいました大阪市・湖崎 克博士に心から感謝申し上げます。

本研究の遂行に当たっては、Prof. Laurence Stark (Physiological Optics and Engineering Science, California University at Berkeley) から貴重なご助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。また、New-accommodometer の試作においてご協力を頂いた NIDEK 株式会社、および資料の分析についてご助言を下された高橋文男氏(ニコン KK)に御礼申し上げます。

最後に、物心両面にわたりご協力を頂いた、福島県立医科大学眼科学教室員、および同門会各位に深謝致します。

本研究の一部は文部省科学研究費(一般研究 B・課題番号 05454474)の補助を受けたものである。

文 献

- 1) Duke-Elder : System of Ophthalmology Vol. V, Ophthalmic Optics & Refraction. Henry Kimpton, London, 1970.
- 2) Donders FC : On the Anomalies of Accommodation and Refraction of the Eye. The New Sydenham Society, London, 1864.
- 3) 畑 文平 : 調節及其ノ障碍. 大日本眼科全書(第6巻, 第3冊・眼機能学, 第7編), 金原出版, 東京, 1934.
- 4) 鈴木昭弘, 谷口正子, 三輪武次 : Accommodo-Polyrecorder (HS-9B)による屈折異常者の調節機能について. 眼紀 23 : 150-157, 1972.
- 5) Guyton DL : Automated refraction. Invest Ophthalmol 13 : 814-818, 1974.
- 6) 西信元嗣 : 眼の調節に関する用語について. 眼科 33 : 849-852, 1991.
- 7) 加藤桂一郎 : 眼の調節に関する用語について. 眼科 33 : 1049-1051, 1991.
- 8) 加藤桂一郎 : 屈折・調節に関する用語について. 眼科 33 : 1599-1601, 1991.
- 9) 萩原 朗 : 両眼視及び輻輳の生理. 大日本眼科全書(第6巻, 第2冊・眼機能学, 第5編), 金原出版, 東京, 1934.
- 10) 加藤静一 : 調節及び調節障害. 日本眼科全書(第7巻, 第5冊), 金原出版, 東京, 1955.
- 11) 鶴飼一彦, 石川 哲 : 調節の準静的特性. 日眼会誌 87 : 1428-1434, 1983.
- 12) 鈴木昭弘 : 屈折異常と調節機能. 所 敬(編) : 眼科 Mook, 18, 屈折異常, 金原出版, 東京, 55-65, 1982.
- 13) Campbell FW, Robson G, Westheimer G : Fluctuations of accommodation under steady viewing conditions. J Physiol 145 : 579-594, 1959.
- 14) 奥山文雄, 所 敬 : 調節負荷と調節変動. 眼光学 11 : 181-182, 1990.
- 15) 魚里 博, 中川皓夫, 植村佐知子, 西信元嗣 : 底屈折近点計による両眼と片眼調節力の比較. 眼光学 10 : 213-217, 1989.
- 16) 石田友規子, 内海 隆, 野邊由美子, 澤ふみ子, 中村桂子, 菅澤 淳 : 調節検査に用いる視標の検討. その1. 石原式近点計の場合. 眼臨 78 : 1890-1894, 1985.
- 17) 加藤桂一郎 : 調節力測定における諸条件の影響. 第1報. 裸眼とレンズ付加による検討. 視覚の科学 14 : 35-37, 1993.
- 18) 中林正雄, 眞鍋禮三, 片野隆生 : 調節機能の研究(VII). フリースタート法の簡易化について. 眼紀 14 : 257-216, 1963.
- 19) 小南雅也, 植村佐知子, 中川皓夫, 魚里 博, 西信元嗣 : 底屈折近点計(D'ACOMO)の使用経験. 眼光学 11 : 137-141, 1990.
- 20) Moss SE, Klein R, Klein BEK : Accommodative ability in younger-onset diabetes. Arch Ophthalmol 105 : 508-512, 1987.
- 21) 三浦恵子, 三浦嘉久, 家田貴子, 岩淵薫子, 上野 真 : 初期糖尿病網膜症患者の調節機能. 眼紀 43 : 902-906, 1992.

- 22) 丸本達也：視標呈示方法の違いによる調節応答特性の変化と加齢要因。日眼会誌 94：197—202, 1990.
- 23) Hueber C: Myopic astigmatism, a substitute for accommodation in pseudophakia. *Doc Ophthalmol* 52: 123—178, 1981.
- 24) 梶浦睦雄：合成樹脂性水晶体挿入手術。臨眼 7：724—729, 1953.
- 25) 杉谷幸彦, 小森敏郎, 鬼頭練次郎, 早野三郎：眼内レンズ（人工水晶体）挿入眼の偽調節について。眼紀 30：326—331, 1979.
- 26) Nakazawa M, Ohtsuki K: Apparent accommodation in pseudophakic eyes after implantation of posterior chamber intraocular lenses. *Optical analysis. Invest Ophthalmol Vis Sci* 25: 1458—1460, 1984.
- 27) Komine T: Relationship of aphakic pseudoaccommodation to optics, with special reference to corneal curvature and pupil size. *ACTA XXIV International Congress of Ophthalmology Proceedings*: 1208—1211, 1983.
- 28) 加藤桂一郎：白内障術後の視機能管理について。臨眼 73：36—39, 1979.
- 29) 小峯輝男：人工水晶体挿入眼における屈折要素の分析、特に近方視との関連について。日眼会誌 89：368—374, 1985.
- 30) 植村佐知子：偽水晶体眼における偽調節に関する研究。奈良医誌 40：650—656, 1989.
- 31) 山内 健, 加藤桂一郎, 川田博文, 神田尚孝：偽水晶体眼における Apparent accommodation と全乱視。第4回日本眼内レンズ学会（京都）講演, 1989.
- 32) 山内 健, 加藤桂一郎, 酒井正典, 鹿野道弘：偽水晶体眼における Apparent accommodation についての検討。第25回日本眼科学会（奈良）講演, 1989.
- 33) Bannon RE: A study of astigmatism at the near point with special reference to astigmatic accommodation. *Am J Optom Arch Acad* 23: 53—75, 1946.
- 34) Rabbets RB: A comparison of astigmatism and cyclophoria in distance and near vision. *Br J Physiol Opt* 27: 161—190, 1973.
- 35) 市橋裕一, 鶴飼一彦, 石川 哲：調節による乱視の変化。眼光学 7：78—84, 1986.
- 36) Campbell FW, Rebsor JG, Westheioey G: Fluctuations of accommodation under steady viewing conditions. *J Physiol* 145: 579—585, 1959.
- 37) 鈴村昭弘：眼精疲労の研究、眼圧と調節機能との関係について。眼紀 29：237—254, 1970.
- 38) 鈴村昭弘：空間における動体視知覚の動揺と視覚適性の開発。日眼会誌 75：1974—2005, 1971.
- 39) 鈴村昭弘：微動調節の研究。日眼会誌 79：1257—1271, 1975.
- 40) Sun F, Brandy S, Nguyen A, Wong M, Stark L: Frequency analysis of accommodation single sinusoids. *Ophthalmol Physiol Opt* 9: 392—397, 1989.
- 41) Winn B, Pugh JR, Gilmartin B, Owens H: Atrial pulse modulates steady state ocular accommodation. *Curr Eye Res* 9: 971—975, 1990.
- 42) Winn B, Pugh JR, Gilmartin B, Owens H: The frequency characteristics of accommodative microfluctuations for central and peripheral zones of the human crystalline lens. *Vision Res* 30: 1093—1099, 1990.
- 43) Winn B, Gilmartin B: Current perspective on microfluctuations of accommodation. *Ophthalmol Physiol Opt* 12: 252—256, 1992.
- 44) Gray LS, Winn B, Gilmartin B: Effect of target luminance on microfluctuation of accommodation. *Ophthalmol Physiol Opt* 13: 258—265, 1993.
- 45) Gray LS, Winn B, Gilmartin B: Accommodative microfluctuation and pupil diameter. *Vision Res* 33: 2083—2090, 1993.
- 46) 南 茂夫, 善利元貞, 桜井捷海：機器分析のためのコンピューター入門。講談社, 東京, 1982.
- 47) Kawata S, Minami K, Minami S: Superresolution of Fourier transform spectroscopy by maximum entropy method. *Applied Optics* 22: 3593—3598, 1983.
- 48) 南 茂夫：波形データ処理。CQ出版社, 東京, 1986.
- 49) Ciuffreda KF: Accommodations and its anomalies. In: Charman WN, et al (Eds): *Visual Optics & Instrumentation, Vision & Visual Dysfunction Vol 1*, 231—278, The Machmillan Press Ltd, Houndmills, 1991.
- 50) Cooper J: Accommodative Dysfunction. In: Amos JF (Ed): *Diag. & Management in Vision Care*, Butterworths, Boston, 431—454, 1987.
- 51) 石川 哲（編）：テクノストレス眼症研究班業績集（1990—1993）。日本眼科医会 1993.
- 52) 奥山文雄：調節のゆらぎ。視覚の科学 13：167—174, 1992.
- 53) 土信田久美子, 奥山文雄, 所 敬, 秋沢尉子：調節の加齢変化、自覚的検査および他覚的検査による比較。日眼会誌 97：614—618, 1993.
- 54) 芝田理絵, 秋沢尉子, 奥山文雄, 所 敬：自覚的調節応答と他覚的調節応答との比較。視覚の科学 15：34—38, 1994.
- 55) 西田祥蔵：眼組織の老化と調節。日眼会誌 94：93—119, 1990.