

外63-3

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

Static and Quasi-static Aspects of
Human Ocular Accommodation

視覚系の調節機構に関する研究
— 静的および準静的特性の解析 —

申請者

鵜飼 一彦

Kazuhiko Ukai

昭和63年4月

網膜上に明瞭な像が形成されることが視覚の出発点である。注視対象までの距離が変化しても明瞭な網膜像を保つため、水晶体の屈折力を変化させ焦点合わせを行なう必要がある。この機構を調節と呼ぶ。調節機構では、網膜像が焦点外れにより劣化していることの検出（エラー検出）という感覚機構、正しく結像するためには水晶体を厚くすべきか薄くすべきかという中枢での決定、決定結果をいかに実現するかという運動機能から成り立ち、生体の各部分でみられる帰還制御系と同様な構成を持つ。しかし、エラー検出は形態覚の本質と密接な関連を持つ高次の機能であり、また運動系としては生体でもっとも遅いという特徴を持つ。本論文の目的は、この調節機構の仕組みを明らかにすることにある。

生体機構の解明のためには多くの手段がある。しかし、どちらかといえばソフトウェアよりである高次機能では、最近発達している電気生理学や神経解剖学もいまだ有力な手段となるに至らない。残る手段は、刺激を系統的に変化させた時の反応を解析し、中の仕組みを推定するという機能的解析である。調節の機能的解析としては、両眼視・輻輳との関連、心理的な奥行き感の影響、動特性など重要なことがある。ここでは、もっとも単純化された、ある位置に置かれた視標を単眼視した時、どこに焦点を合わせているか、という静特性を中心に解析する。静特性は一般に横軸に調節刺激（距離の逆数）、縦軸に調節反応（見ている所までの距離の逆数）を示した図（理想的には傾き1のグラフ）により示される。

本論文は3部からなる。第1部（第1～4章）では、調節静特性を測定するための方法論を展開する。第2部（第5～8章）では、眼球系の光学特性が調節に伴いどのような変化をするかを扱う。第3部（第9～14章）では、視覚入力を様々に変化させたときの調節の変化を測定し、調節機構のメカニズムを考察する。

動的レーザースペックルパターンの動きが観察眼の屈折状態により変化することは広く知られている。しかし、これを利用し、調節を精密にかつ広範囲で測定する装置を開発するためには、運動粗面により生じるレーザースペックルのふるまいを動的に解析することが必要である。第1章では、コヒーレントな光が粗面によりランダムな位相シフトを受け、結像光学系を介して、観測面上にランダムな干渉パターンを生じ、観測面上での光強度分布を計算することにより求め、粗面の移動による干渉パターンの移動を、光強度分布の時空間的な変化として相関計算により求めた。その結果、移動の向きは光学系の結像状態に依存すること、特に観測面とコヒーレント光源が光学系により共役となる場合に限り、粗面が移動してもスペックルパターンは静止することが明かとなった。逆に言えば、網膜上に観察されるスペックルパターンが静止して見えるように光源の位置を移動させれば、その時の眼球光学系の結像状態が求められることになる。

第2章では、第1章で得られた結果をもとに、眼屈折を実際に測定するレーザーオプトメーター光学系を設計した。光学系は、光源までの距離を変化させるためのoptical trombone、tromboneの距離変化が眼屈折の単位である距離の逆数に

比例するように変換するためのBadal光学系、測定範囲を広げるため光源の位置を空間に投影するためのリレーレンズ系を含む。また、望ましい運動粗面の形状についても詳細に議論した。この方法は、被験者の判断が必要とされる。

これとはまったく別に、二つの赤外光束を瞳面上異なった位置から眼底上に投影し、眼底上の二つの像を眼外から捉え、像間隔がゼロとなるように光束を調整することにより、他覚的に高速に眼屈折を測定する方法が知られている。この原理による機器が眼鏡合わせのために市販されている。この機器に若干の改造を施せば、非常に安定した調節機能測定装置（赤外線オプトメーター）が得られる。しかも、視標も内蔵されている。第3章では、この改造の方法および調節の準静的特性測定手順を記した。この手順は、内臓の視標を調節静特性を損なわない程度の速度でゆっくりと全レンジを掃引させ、その間調節反応を連続的に測定し、調節刺激をx-yレコーダーのx軸、調節反応をy軸に記録するというものである。この一枚の記録から、調節遠点・近点、調節力、刺激と反応の乖離、グラフの傾き、調節に対する手掛かりがまったくない一様視野(empty field)に対する調節など調節静特性全般と、調節微動など一部動特性を読み取ることができる。

第4章では、第3章で記した装置を利用して、暗所での調節状態(dark focus)を測定する方法を述べた。暗所での調節は、一様視野に対する調節と併せて、無刺激状態の調節反応として制御系を解析する上で重要である。

第5章では、第2章の装置を使用して屈折状態を多数の被験者で測定し、装置の有効性をみた。スペックルをストライプ状に変換する高速回転プリズム、視野の上下でスペックルの移動方向を反転表示し静止の判定を助ける素子、乱視決定のため6経線で測定を行なう機構などを加えた。

屈折異常は調節遠点の無限遠からのずれとして定義される。この定義の妥当性を確かめたのが第6章である。また、眼鏡やコンタクトレンズによる矯正が調節機能上どのようにあらわれるかをスペックル法および準静的特性によりみた。

第7章では、眼球光学系の収差の一つである、軸上の色収差が、調節によりどのように変化するかを4波長のレーザーによるスペックルを用いて測定した。その結果、色収差はわずかに調節とともに増加することが判明した。

第8章では、眼球光学系の収差の一つである、軸上の非点収差(乱視)が、調節によりどのように変化するかを測定した。水晶体の力学的平衡状態あるいは支配神経系の平衡状態で、水晶体の歪みである調節による乱視は最小となるという考えもある。しかし、ここでの実験結果は水晶体が引き伸ばされた状態で乱視最小となった。調節による乱視は角膜等の水晶体以外に起因するのか、あるいは本来歪みを持つ水晶体を引っ張って均一にしているのか、と考えるを得ない。

第9章では、視標として矩形波格子を用い、刺激の輝度、空間周波数、格子の方位、照明光の波長等の条件を様々に変化させ、調節の静特性がいかに変化するかをレーザーオプトメーターにより測定した。また、本実験で不足した実験条件

に関しては文献的に調査した。その結果、静特性の傾きは最良で0.95、場合により約0.7まで低下すること、一般的に、網膜上にできた視標の像は焦点外れによりコントラストが低下するが、そのコントラスト変化が小さいか知覚しにくい条件下で傾き低下が大きくなることが明かとなった。ここで、 Δ （知覚コントラスト）/ Δ （焦点外れ量）という微係数を、調節刺激の質と定義することができる。

第10章では、暗所や一様視野という、調節刺激の質がもっとも劣化した状態での調節の測定結果を示した。また、網膜上に直接形成されるため調節状態が変化してもコントラストが変化しないスペckルパターンを、測定のためではなく刺激として用いた時の調節状態は一様視野の場合と同等であることを示した。これらの無刺激状態での調節は、調節安静位と呼ばれる状態に相当し、調節遠点よりも1~3D近方にあることが判明した。

第11章では、コントラスト感度特性が一眼中で低下している軽い弱視（未発達視覚）者10数名を用い、調節準静的特性を測定し、彼らの正常な他眼による結果と比較した。高空間周波数領域のコントラスト感度低下に伴い、刺激の質が実質的に低下したのと同じ効果が期待される。結果は予測どおりに、大部分の被験者で静特性の傾き低下が明瞭に認められた。その調節微動は近方視しているほど大きい。しかも、約半数の弱視眼で、調節微動の振幅が顕著に大きくなった。

第12章では、第9~11章の結果をもとに、調節のメカニズムを考察した。刺激の質と関連した刺激と反応の乖離は、コントラストの低下が検出されないかぎり調節反応は小さくなることを示す。静特性の傾き低下、すなわち近方ほど乖離が大きいことは、つねに安静位に向かおうとする力が存在し、近方視するほどその力が大きいことを示す。調節微動が刺激の質と関連して変化することは、調節微動は、単なる雑音ではなく、調節を小さく変化させその時のコントラスト変化をモニターするという積極的役割を考えねばならない。コントラスト変化が検出しにくい場合には、調節微動の振幅を増加させ、網膜像のコントラスト変化を大きくするというメカニズムが考えられる。光学理論によると、刺激の質を示す微係数はjust focusの状態よりややdefocusの状態で高い値を示す。したがって、調節微動に積極的役割を考える以上、静特性の刺激と反応の乖離は必然となる。さらに、調節に必要な網膜像変化は、調節機構では検出されているが知覚はされないことから、視覚中枢神経系における分散処理の可能性をも示唆している。

第13章では、第11章の結果が、弱視があるために調節機能が低下しているのか、調節の異常が原因で弱視が発生するのかを、議論している。

第14章では、ここで紹介してきた調節測定法が、調節機能異常者においてどのように適用され、どのような結果が得られるかを紹介している。

以上に記したように、単眼視での調節静特性に関する実験は、既知であり文献的に紹介した一部を除き、ほぼ網羅されている。これらの実験により考えられることは第12章にまとめられている。