

## 微動調節の調節維持に対する効果

氏家 弘裕\*・池田 光男\*\*

東京工業大学大学院総合理工学研究科 〒226 横浜市緑区長津田町 4259

### Effects of Microfluctuations of Accommodation on Maintaining Accommodative Responses

Hiroyasu UJIKE\* and Mitsuo IKEDA\*\*

Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology Graduate School, 4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226

The microfluctuations of accommodation (MA) has long been discussed as to if it has a role in human accommodative system; however, it is still uncertain because the literature have discussed the role on the basis of the basic characteristics of MA, but not on the basis of the observations of the accommodative responses with and without MA. To examine the effects of MA, especially the high frequency component (HFC) of MA, on maintaining accommodative responses, we compared (i) the maximum responses and also (ii) the time delays of accommodation to accommodative bias in two conditions: one in which the accommodative loop was opened (condition OL), and the other in which the accommodative loop was opened except in the frequency range of HFC (condition AM). Both the conditions were made by using the apparatus the authors have reported. The accommodative bias were sinusoidal change of target position with four different amplitudes: 0.08, 0.15, 0.25 and 0.40 D. The results of both the maximum responses and the time delays of accommodation indicates that there is no significant effects of MA on maintaining accommodative responses, thus, suggesting that there is no important role of MA for accommodative responses.

#### 1. はじめに

人が行うピント調節には、微動調節 (microfluctuations of accommodation) とよばれる微小な振幅で周期性のある調節変化が存在する。この微動調節は、赤外光による調節測定装置を開発した Collins により、大きさ 0.5 D で 1 Hz ないしはそれ以上の周波数の調節変化として報告され<sup>1)</sup>、Campbell らなどによるスペクトル解析で、0.5 Hz 以下の低周波成分 (LFC) と 1.3~2.2 Hz の高周波成分 (HFC) をもつことが示された<sup>2,3)</sup>。こ

の微動調節の視覚系に対する意味については、調節機能に対する補助的な役割という点で、次の二点に対して議論が行われてきた。すなわち、次に注視する対象への調節の方向の手掛りを与えるかどうか、あるいは注視している対象に調節を維持するための手掛りを与えるかどうかである。そしてこのような議論は主に、明確な周期性をもつ HFC について行われてきたが、近年 Winn らをはじめとして、LFC に関しても議論が行われはじめている<sup>4)</sup>。

微動調節の調節機能に対する役割のうち、調節変化の方向の手掛りについては、Alpern や Campbell らによってその考え方が示唆された<sup>5,6)</sup>。Alpern は微動調節による微小な調節変化に応じた網膜像の境界部分の光強度変化をもとに調節の方向が決められるとし、また Campbell らの微動調節による調節方向の手掛けりが調節系にフィードバックされるには、HFC の方が適当であるとしている。また Kotulak らは、微動調節が調節の

\* 現在: 工業技術院生命工学工業技術研究所人間情報部 〒305 つくば市東1-1  
Present address: Human Informatics Department, National Institute of Bioscience and Human-Technology, 1-1, Higashi, Tsukuba 305

\*\* 現在: 京都大学工学部建築学教室 〒606-01 京都市左京区吉田本町  
Present address: School of Architecture, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyou-ku, Kyoto 606-01

方向の手掛けを与えるような調節系のモデルを提案した<sup>7)</sup>。モデルでは、微動調節による調節変化の方向とそれによる網膜像のコントラスト変化の方向に応じて調節の方向が決定されるとして、実際にシミュレーションを行っている。また微動調節の調節維持のための手掛けについては、Charman らの考え方がある<sup>8)</sup>。彼らは、複数の空間周波数の刺激を用いて求めた調節の静特性と、シミュレーションによって求めた焦点ずれによる網膜像のコントラスト感度特性との比較を行った。そのうえで微動調節による網膜像のコントラスト変化をもとに、コントラスト感度勾配が一定値をとるよう調節量が決められるとする調節モデルを提案している。

しかしこうした考え方の一方で、微動調節は単なるノイズであり調節系への寄与はないとする考え方もある。Stark らは調節の周波数応答を測定し、その結果をもとに調節のフィードバックモデルを提案したが、その共振周波数が 2 Hz であったことから、微動調節の HFC は調節系の不安定性によって説明できるとした<sup>9)</sup>。さらに Stark らは、被験者に通常の奥行き手掛けのない単眼視で調節のステップ刺激に対する方向を判断させたところ、正答率がチャンスレベルであったことから微動調節は調節の方向手掛けを与えないとした<sup>10)</sup>。さらに Charman は微動調節に関するそれまでの報告を総括したなかで<sup>11)</sup>、Berny による眼球のナイフエッジパターン<sup>12)</sup>から、微動調節は水晶体の周辺部での曲率変化で生じたもので機構的なノイズではないかとしている。

ところで、こうした否定意見にもさらに反論が試みられている。Hung らは Stark ら<sup>10)</sup>のフィードバックモデルが時間遅れを 0.1 s と小さくするために共振周波数が 2 Hz となったのであって、実験的に求めた時間遅れ 0.3 s を用いれば共振周波数は 0.45 Hz となるとしている<sup>13)</sup>。また Stark ら<sup>10)</sup>の調節方向の手掛けに対する否定についても、方向判断を手指で行った点を問題にしている。さらに Winn らは調節変化を水晶体の中心部と周辺部で測定し、HFC の微動調節が中心部で多くみられたことから、Charman<sup>11)</sup>の議論に反論している。

このように、微動調節の調節系に対する効果については長い間議論されてきたが未だに明確な結論がない。それだけでなく、微動調節の存在の有無によって調節反応に何らかの違いが生じるかどうかについての実験的データもない。これは上の議論の流れをみてもわかるように、これまででは微動調節や調節反応の基礎特性やそれをもとにした調節モデルを組み立てることによってのみ議論が行われてきたためで、その多くが微動調節の調節に

対する効果の推測に留まっていたためと思われる。そこで本論文では、微動調節の有無によって、調節刺激の緩やかな変化に対する応答に相違があるかを比較することで、微動調節の調節維持に対する効果を調べる。ただし、調節変化に含まれる微動調節自体を直接コントロールすることは難しいので、氏家の提案した調節刺激提示装置<sup>14)</sup>を用いて、微動調節による光学的ボケ変化を網膜上に生じさせるか否かで、微動調節の有無を考える。なお、ここでは微動調節のうちこれまで盛んに議論の対象となってきた HFC について調べることにする。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験原理

この実験で用いられた調節刺激提示装置は、被験者の調節変化に応じて刺激の位置（光学的距離）を変化させることで、網膜上に生じる刺激の像の光学的ボケをコントロールすることが可能である。例えば、刺激の位置を常に被験者の調節位置に完全に一致させれば、原理的には網膜上での光学的ボケ変化は生じず調節のオープンループ状態を作り出すことができる。また刺激の位置を HFC を除いた調節変化に一致させれば、網膜上には HFC のみによる光学的ボケ変化が生じることになる。このように被験者の調節変化に応じて光学的提示距離の変化する刺激を調節フィードバック刺激とよぶことにする。

今回の実験では微動調節の HFC による網膜上での光学的ボケ変化を有する場合とそうでない場合とで調節の応答を比較する。そこために実験条件として、刺激位置を HFC を除く調節変化に一致させて網膜上に HFC のボケ変化を生じさせる AM (accommodation micro-fluctuations) 条件と、刺激位置を調節位置に一致させて調節をオープンループ状態とする OL (open-loop) 条件とを用意する。したがって、AM 条件では微動調節の HFC を除くオープンループ状態を、OL 条件では微動調節の全周波数成分に対するオープンループ状態を生じているといえる。具体的に AM 条件では、調節変化に 1.1 Hz 以上 3.0 Hz 以下の時間周波数成分を取り除くフィルターをかけて、その波形に合わせて刺激位置を移動させる。さらに AM, OL の各条件のもとでの調節維持の様子を比較するため、両条件での調節フィードバック刺激の位置変化に、一度遠のいてから次に近づき再びもとに戻る（あるいはその逆）のような、一周期 5 s の間の正弦波状の位置変化を加えることとする。この付加される刺激位置変化をバイアス調節刺激とよぶことに

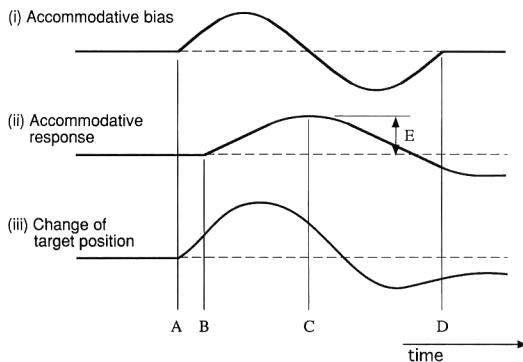


Fig. 1. Schematic diagram of (i) the accommodative bias, (ii) expected accommodative response to the bias and (iii) the change of the target position.

する。

具体的にバイアス調節刺激、予想される調節反応、そして調節刺激の位置変化の概略についてFig. 1に示す。一周期の正弦波状のバイアス調節刺激は、Aの時点から加わり始め、これに対し、調節系は少し遅れてBの時点から反応し始める。一方下段の刺激位置は調節量にバイアス調節刺激の変化量を加えた量となる。この図では簡単のために、調節反応から微動調節のような細かい調節変化を省略して示しているが、実際にはAM条件においては調節反応や刺激位置変化には細かい変化が加わるはずである。ところでバイアス調節刺激が正の間は調節量は増加し、ゼロとなる時点Cのあたりで調節変化量が最大(図中E)となり、これを境に負のバイアス調節刺激によって調節量は減少し始める。そして最終的にバイアス調節刺激の変化が終了した時点(図中D)で、調節の反応も収束することになる。この間網膜に生じる光学的ボケは刺激位置変化と調節変化との差に対応し、OL条件ではバイアス調節刺激の変化に一致し、AM条件ではこれに細かい変化が加わったものとなる。

ここで、微動調節の調節維持に対する効果の有無を知るためにAM、OLの両条件で調節反応を比較すればよい。もし微動調節が調節維持に寄与しているのであれば、得られる調節反応はOL条件に比べて、調節反応の潜時が短く反応の大きさも大きくなる可能性がある。なぜなら、微動調節によって焦点ずれをより早く検出できることが予想されるし、またCharmanら<sup>8)</sup>の調節モデルで示されるようにコントラスト勾配が一定値になる方向へより適切に反応することが考えられるからである。したがって、実験ではAM、OLの両条件でFig. 1の調

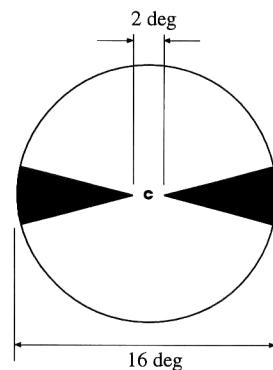


Fig. 2. Landolt C lying between two acute angles, as a target used.

節反応の遅れに相当するAからBまでの時間と、調節反応の最大値Eを比較する。

この実験でバイアス調節刺激を付加することによって生じる調節刺激は、焦点ずれが被験者の調節変化によって減少されない点で通常の調節刺激とは異なっている。しかし予備実験によってこのような刺激状況でも網膜上のボケを減らす方向で調節反応が生じることが確認できたので、AM、OL両条件で調節反応を比較することは可能であると考える。

## 2.2 被験者と刺激

刺激はFig. 2に示すように2つの鋭角に挟まれた白地に黒のランドルト環である。視野の大きさは約16degで背景輝度は12.8 cd/m<sup>2</sup>であり、ランドルト環のコントラストはほぼ100%であった。この刺激提示に用いた調節刺激提示装置の具体的な構成については、氏家ら<sup>14)</sup>に述べられているものと同一である。装置の刺激提示部分にはBadal型の光学系を用いており、したがって調節フィードバック刺激は、調節変化にともなう刺激位置変化によって刺激の視覚的大きさや明るさは変化しない。また調節量の測定から、それに応じた刺激位置変化までに要する時間遅れは約22~37 msである。

被験者はHM、KT、YNの男性3名で年齢は23~30歳、いずれも正常視であった。彼らに実験の目的や原理については知らされていない。用いたランドルト環の切れ目の幅はHM、KTに対しては視角で44および49s、YNに対しては66および71sであった。被験者は各試行中にランドルト環の方向を判断することで、刺激をしっかりと注視した。

## 2.3 実験手順

刺激は右眼に提示された。被験者は歯形をかみ、自らボタンを押して試行を開始する。開始直後より2sの

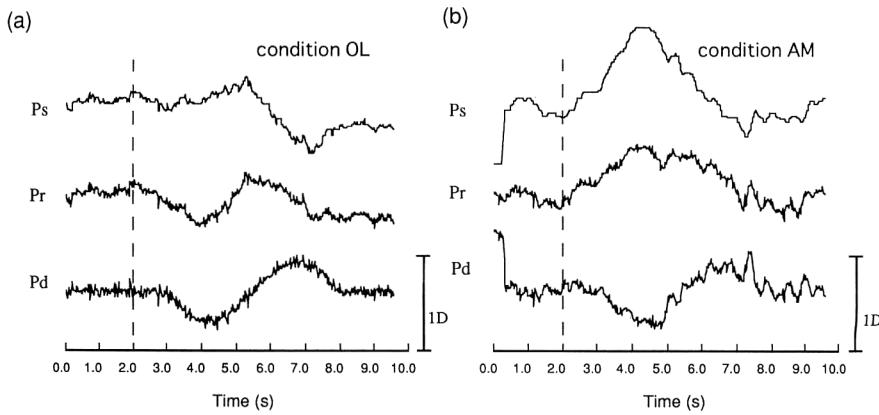


Fig. 3. Examples of the change of the target position (Ps), accommodative response to the target (Pr) and the difference between them (Pd) in condition OL (a), and condition AM (b). The target was just stationary before 2 s shown with the broken line on the figure. Amplitude of the accommodative bias, in this examples, was 0.40 D.

間、切れ目の幅が75 sのランドルト環が距離4 Dに提示される。これは次に続く調節フィードバック刺激の提示位置を距離4 Dのあたりに安定させるためである。提示距離4 Dを用いたのはこのあたりで微動調節が生じやすいということを考慮しているためである<sup>15,16)</sup>。この2 sの間の後、7.6 sの間AM条件かOL条件かのいずれかによって調節フィードバック刺激が提示される。その間に、バイアス調節刺激は試行開始3 s後から5 sの間正弦波の一周期として加えられる。そして被験者は調節フィードバック刺激提示後のランドルト環の切れ目の方向を判断し、試行終了後にその方向を上下左右のいずれかで答えた。また試行途中で明確に方向判断ができた場合でも、試行終了まで刺激のピントを外さないように注视することが要求された。

与えられたバイアス調節刺激の振幅は0.08 D, 0.15 D, 0.25 D, 0.40 Dの4種類で、さらに、始めに視標が遠ざかる場合と近づく場合とで、180度位相の異なるものが各々使われた。実験はこれら8種類にAM条件およびOL条件の2つを組み合わせた16試行を1つのセッションとし、1人の被験者に対し合計16セッションが行われた。さらにバイアス調節刺激の振幅が0.08 Dと0.25 Dについては32セッションを追加した。

### 3. 実験結果

Fig. 3に実験で得られた刺激位置変化(図中Ps)、調節変化(同Pr)および両者の差分波形(同Pd)の例を示す。(a)はOL条件、(b)はAM条件のもので、両者

ともバイアス調節刺激は初め遠ざかって次に近づくようになに変化した場合のものである。横軸は試行の開始を0 sとする時刻で、2 sの位置に引かれた破線は調節フィードバック刺激提示開始を示す。縦軸は上向きに調節量が増加する相対値を表し、図中の縦線分を1 Dとする。また網膜像のボケは刺激位置と調節位置とのずれに応じて変化するが、このずれはPdとして示されている。図からOL条件では、Pdは装置の時間遅れによると思われる非常に細かい変化分を除けばバイアス調節刺激の一周期の正弦波が存在し、AM条件ではこのバイアス調節刺激に微動調節と思われる調節変化が付加していることがわかる。

調節変化の大きさや遅れを調べるために、得られた調節波形を条件ごとに複数の試行で平均化した。具体的な処理の手順は以下のとおりである。まず一試行の調節変化をその試行での平均調節量からの変化とし、次にOL, AMの各条件およびバイアス調節刺激の振幅ごとに、バイアス調節刺激の位相の異なるものを含めて波形を平均化し、その測定条件での調節のドリフトを求める。次にその測定条件でのバイアス調節刺激の位相のものを平均化し、先に求めたドリフトを差し引いて結果とする。この処理によって、調節フィードバック刺激によるドリフトを取り除き、個々の条件での調節変化の傾向を調べることができる。

このようにして平均化された調節波形の例を被験者HMについて、Fig. 4に示す。他の2人の被験者の場合も結果は同様であった。図で縦軸は上向きに調節量が増

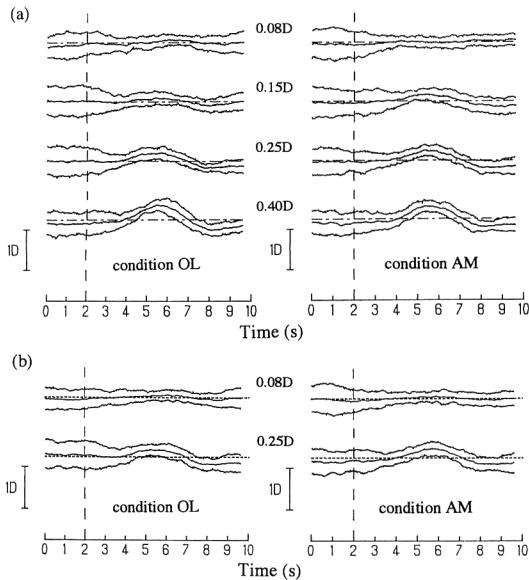


Fig. 4. Averaged accommodation responses and its standard deviations with 16 trials (a), and with the selected trials which were judged to have HFC of microfluctuations of accommodation (b). They are shown for each condition and for each amplitude of accommodative bias. See the detailed in text.

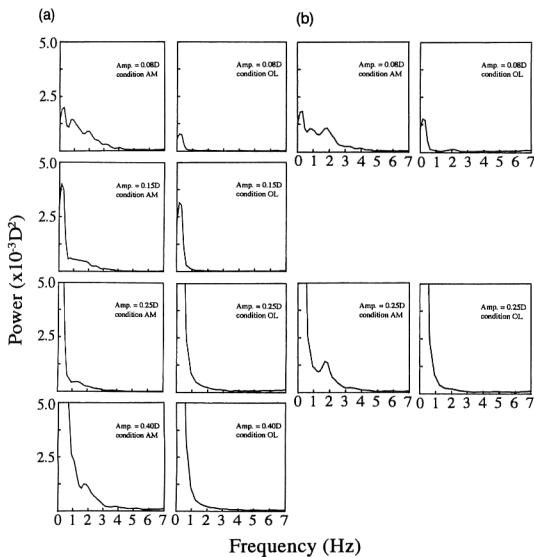


Fig. 5. Power spectrum averaged with 16 trials (a), and with the selected trials which were judged to have HFC of microfluctuations of accommodation (b). They are shown for each condition and for each amplitude of accommodative bias. See the detailed in text.

加する相対値を表し、図中の縦線分を 1D とする。

(a) は 4 つのバイアス調節刺激の振幅の 16 試行の平均で、(b) はバイアス調節刺激の振幅 0.08 D と 0.25 D について追加分の 32 試行を加えた 48 試行のうち、各波形のスペクトルに微動調節の HFC の成分が存在すると思われたものの平均である。平均された試行数は OL 条件で 21 (0.08 D) と 22 (0.25 D), AM 条件で 23 (0.08 D) と 20 (0.25 D) であった。図は各々左側に OL 条件、右側に AM 条件が、振幅値の小さい順に上から示されている。それぞれの波形変化には平均波形と各々の時刻における標準偏差とが示されており、中心の波形が平均波形で上下の波形が標準偏差である。全体的な傾向は Fig. 1 に示したものと同様であり、調節の応答する量はバイアス調節刺激の振幅とともに増加している。またバイアス調節刺激の変化開始 (時刻 3 s) から調節の立ち上がりまでに約 1 s であるのに対し、調節の最大値はバイアス調節刺激の中間の時刻 5.5 s と一致し、さらに調節変化が一定に落ちてくるのがバイアス調節刺激が終了する時刻 8.0 s とほぼ一致している。これは OL, AM の条件によらずほぼ同様である。

また Fig. 4 の結果に対応する試行でのスペクトル平均を Fig. 5 に示す。これも被験者 FM についてのものであるが、他の 2 人の被験者でも結果はほぼ同様であった。グラフではすべてのスペクトルで 1 Hz 以下に大きな成分がみられるが、これはバイアス調節刺激の 0.2 Hz によるものである。OL 条件ではいずれもこの低周波の成分のみがみられ、2 Hz 近辺の HFC の成分はみられない。一方、AM 条件の (a) では HFC の成分は存在しているが、ピークはあまり明確ではない。これは、HFC の微動調節が必ずしも毎試行に現れなかつたためと思われる。これに対し、AM 条件の (b) では 2 Hz 付近の HFC の成分に明確なピークがみられる。そこで調節変化の傾向の検討では、(a) のような個々の条件でのすべての試行の一括平均結果に加え、(b) のようにバイアス調節刺激の振幅が 0.08 D と 0.25 D のものについて微動調節を含むと思われた試行のみの平均結果についても行った。

調節変化の傾向のうち、バイアス調節刺激の振幅に対する調節の最大応答量と調節変化の遅れとを、各々 Fig. 6 と Fig. 7 と示す。ここで調節の最大応答量は、試行開始からバイアス変化開始までの 3 s の間の調節の平均値に対する初めに変化した方向での最大の応答量とし、また調節変化の遅れとは、バイアス変化開始以降調節変化が初めて最大応答量の半分の量に達するまでの時間と

した。横軸はバイアス調節刺激の振幅を表し、縦軸は調節の最大応答量 (Fig. 6) または調節変化の遅れ (Fig. 7) を表す。各々(a)は16試行の平均波形についてのもので3人の被験者で平均している。また(b)はFig. 4と同様に微動調節を含むと思われた試行のみの平均波形のもので被験者ごとに示されている。いずれも白円はAM条件のもの、白四角はOL条件のものである。

Fig. 6からまずわかることは、Fig. 4でもみられたように調節の最大応答量がバイアス調節刺激の振幅とともに増加していることである。そして(a)についてみると、OL条件とAM条件とで明確な相違はみられない。一方、(b)については、バイアス調節刺激の振幅が0.25 DのときにAM条件の方が調節の最大応答量が小さかった。統計的検定ではHMとYNでは有意な差があったが、KTではなかった(HM:  $3.75 > t$  (40, 0.01); YN:  $3.31 > t$  (38, 0.01); KT:  $1.25 < t$  (43, 0.05))。以上より、調節の最大応答量の点では、微動調節が調節維持に寄与するとの明確な結果は得られなかつた。ただし、上に述べた有意差については次節で検討する。

またFig. 7(a)ではバイアス調節刺激の振幅が増加するにともない調節変化の遅れが小さい値から1.4 s付近に収束している。バイアス変化が小さいほど遅れが短いという結果は奇妙であるが、Fig. 4をみてわかるようにバイアス変化が小さい場合、調節の変化が少し不安定で明確な凸型にならなかったことが影響していると考えられる。実際に各被験者でバイアス変化が小さいときの遅れの値はかなり異なっていた。またOL条件とAM条件とで明確な相違はみられなかつた。したがって、調節変化の遅れ時間の点で、微動調節の調節維持に対する役割は示されなかつた。

#### 4. 考 察

微動調節が調節維持に寄与するかどうかを調べる方法として、微小で緩やかな調節刺激の位置変化に対する調節反応の大きさや時間遅れへの影響を探ることが有効である。なぜなら、これらは適切な焦点合せを維持するための速やかで正確な調節反応かどうかの指標となるからである。

微動調節が調節維持に寄与すると仮定して、その時間遅れに影響を与えるという考え方方は次のようなものである(Fig. 8)。図で横軸は時間、縦軸は相対的な位置変化とする。いま刺激位置の変化によってボケ閾下の焦点ずれが生じたとする。(a)のように調節変化がなければ、

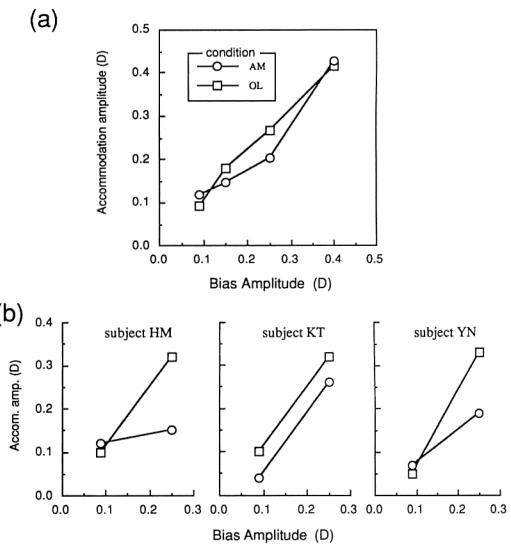


Fig. 6. Maximum responses of accommodation as a function of amplitude of accommodative bias in condition AM (open circle) and condition OL (open square). (a) for the data averaged with 16 trials and three subjects, and (b) for the data averaged with the selected trials which were judged to have HFC of microfluctuations of accommodation.

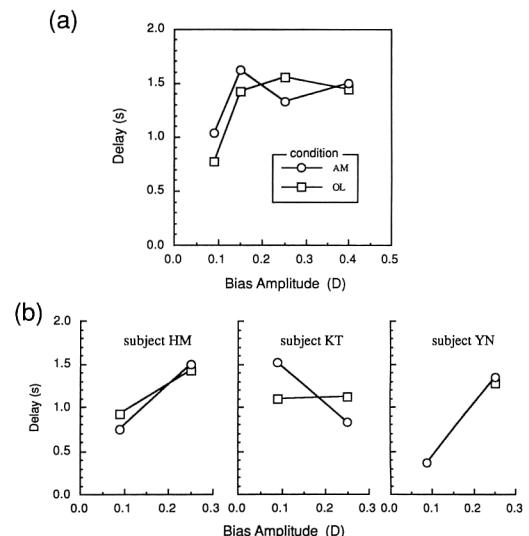


Fig. 7. Delay of accommodation as a function of amplitude of accommodative bias in condition AM (open circle) and condition OL (open square). (a) for the data averaged with 16 trials and three subjects, and (b) for the data averaged with the selected trials which were judged to have HFC of microfluctuations of accommodation.

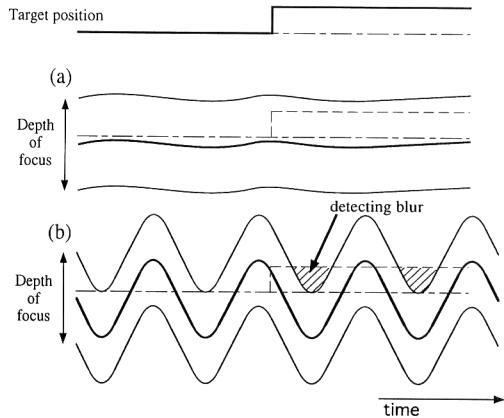


Fig. 8. Detecting blur with microfluctuations of accommodation. The small change of target position within depth of focus can be detected with the microfluctuations (b), but not without them (a).

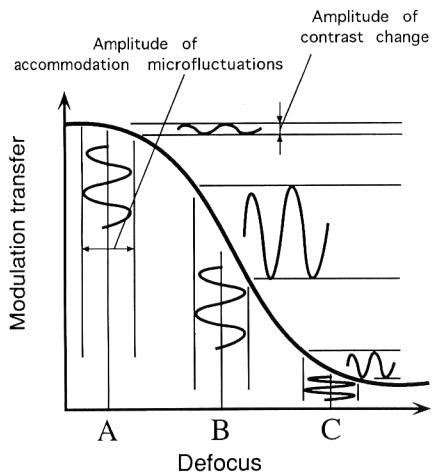


Fig. 9. Modulation transfer as a function of defocus. As a result of microfluctuations of accommodation, the change of modulation transfer (or contrast of a frequency component) occurs with its amplitude depending on the inclination of the function.

刺激位置変化によるボケは検出されないので調節変化は生じない。一方(b)のように微動調節が存在すれば、刺激位置はボケ閾からはずれる可能性があるのでその時点でボケを検出し、それを打ち消す方向に調節変化が生じる。なお今回の実験では、ボケは連続的に変化し(a)のような場合でも一定量焦点ずれがあれば光学的ボケを検出することになる。したがって問題は調節系が(b)のような場合に光学的ボケを早く検出して調節変化が生じるかどうかである。結果では、2つの場合でほとんど違いはなく微動調節の効果はないといえる。

一方調節の最大応答量については、16試行の平均(Fig. 6(a))ではOL条件とAM条件とで明確な相違はなかったが、微動調節を含むもののOL条件とAM条件との比較において、バイアス調節刺激の振幅が0.25 Dのときに、2人の被験者ではAM条件での値が有意に小さかった。これは、実験で用いたバイアス調節刺激は調節変化自体によっては打ち消されないという、調節刺激としての特殊性と関連があるかもしれない。例えばAM条件の場合微動調節によって光学的ボケ変化が生じるが、一定振幅の微動調節に対する光学的ボケ変化の大きさは焦点ずれがある一定のところで最大となりそれより大きいあるいは小さい焦点ずれでは小さくなる<sup>8)</sup>。これを、Charmanら<sup>8)</sup>のモデルで考えてみる。彼らはボケの増加を各空間周波数成分のコントラストの低下、すなわちMTFの低下ととらえ、焦点ずれに対するあるひとつの空間周波数のMTFの値の変化をFig. 9のような形で与えている。したがって、縦軸は下にあるほど、ある空間周波数成分のボケが増加することを示している。

この図で考えると、通常の調節刺激では焦点ずれを検出してそれを打ち消すように調節変化が生じ、焦点ずれ量がA, B, Aの順で変化する。それに対して一定振幅の微動調節による光学的ボケ変化の大きさは小、大、小と変化する。一方、今回の調節刺激では調節変化によって焦点ずれを打ち消すことができず、バイアス調節刺激の増加によって、焦点ずれ量がA, B, Cの順で変化する。そして、これに対しても光学的ボケ変化の大きさは小、大、小と変化する。つまり微動調節による網膜上での光学的ボケ変化を調節系がとらえていたとして、焦点ずれの単なる増加を焦点ずれの減少ととらえてしまう可能性がある。AM条件で調節変化が小さかったのはこのことと関係しているかもしれない。これはひとつの可能性であって、このことが、直ちに微動調節の調節維持における役割を示すものではないが、今後検討する必要がある。

今回の実験で、微動調節が調節維持にとって効果的に機能しているとの明確な結果は得られなかった。また、微動調節のうち特にHFCは個人差があり、また同じ被験者でも時にみられたりみられなかったりして、あまり安定しないことがある。もちろん測定時の条件等について十分に検討する必要はあるが、微動調節が常に存在するわけではないことも考え合わせると、微動調節が調節維持に対して積極的に役割を果たす可能性は小さいといえる。

## 文 献

- 1) G. Collins : "The electronic refractometer," *Br. J. Physiol. Opt.*, **1** (1937) 30-42.
- 2) F. W. Campbell, J. G. Robson and G. Westheimer : "Fluctuations of accommodation under steady viewing conditions," *J. Physiol.*, **145** (1959) 579-594.
- 3) J. C. Kotulak and C. M. Schor : "Temporal variations in accommodation during steady-state conditions," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 223-227.
- 4) B. Winn, J. R. Pugh, B. Gilmartin and H. Owens : "The frequency characteristics of accommodative microfluctuations for central and peripheral zones of the human crystalline lens," *Vision Res.*, **30** (1990) 1093-1099.
- 5) M. Alpern : "Variability of accommodation during steady fixation at various levels of illuminance," *J. Opt. Soc. Am.*, **48** (1958) 193-197.
- 6) F. W. Campbell, G. Westheimer and J. G. Robson : "Significance of fluctuations of accommodation," *J. Opt. Soc. Am.*, **48** (1958) 669.
- 7) J. C. Kotulak and C. M. Schor : "A computational model of the error detector of human visual accommodation," *Biol. Cybern.*, **54** (1986) 189-194.
- 8) W. N. Charman and J. Tucker : "Accommodation as a function of object form," *Am. J. Optom. Physiol. Opt.*, **55** (1978) 84-92.
- 9) L. Stark, Y. Takahashi and G. Zames : "Nonlinear servo-analysis of human lens accommodation," *IEEE Trans. Syst. Sci. Cybern.*, **SSC-1** (1965) 75-83.
- 10) L. Stark and Y. Takahashi : "Absence of an odd-error signal mechanism in human accommodation," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **BME-1** (1965) 138-146.
- 11) W. N. Charman : "Fluctuations in accommodation: A review," *Ophthalmol. Physiol. Opt.*, **8** (1988) 153-164.
- 12) F. Berny : "Etude de la formation des images retiniennes et determination de l'aberration de sphericite de l'oeil humain," *Vision Res.*, **9** (1969) 977-990.
- 13) G. K. Hung, J. L. Semmlow and K. J. Ciuffreda : "Accommodative oscillation can enhance average accommodative response: A simulation study," *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, **SMC-12** (1982) 594-598.
- 14) 氏家弘裕, 池田光男 : "微動調節の視覚機能への効果を調べるための刺激提示装置", *光学*, **24** (1995) 117-122.
- 15) P. Denieul : "Effects of stimulus vergence on mean accommodation response, microfluctuations of accommodation and optical quality of human eye," *Vision Res.*, **22** (1982) 561-569.
- 16) C. Miege and P. Denieul : "Mean response and oscillations of accommodation for various stimulus vergences in relation to accommodation feedback control," *Ophthalmol. Physiol. Opt.*, **8** (1988) 165-171.