



視標のコントラストおよび空間周波数と微動調節反応

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 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1990年3月9日受付, 1990年4月16日受理)

Dependence of Micro-Accommodation Responses on Contrast and Spatial Frequency of the Square-Wave Grating

Hiroyasu UJIKE and Mitsuo IKEDA

Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology Graduate School, 4259, Nagatsuda, Midori-ku, Yokohama 227

(Received March 9, 1990; Accepted April 16, 1990)

When the eye fixates on a stationary target, the accommodative responses shows small fluctuations at around 2 Hz frequency. This is called micro-accommodation or accommodation microfluctuations. Since the role of micro-accommodation in the accommodative control system is still uncertain, the investigation of micro-accommodation under various conditions is important. In the present study, monocular accommodative responses were measured by an infrared optometer when subjects fixated on 28 different square-wave gratings where spatial frequencies and contrasts differed from each other. The responses were analyzed in terms of the Fourier power spectra. The power of micro-accommodation was clearly large when the contrast of the target was high for the low spatial frequency region. On the other hand, it was small when the spatial frequency of the target was high. It was also found that the power of micro-accommodation was small when the accommodative lag was large.

1. はじめに

物体を認識するという視覚過程では、さまざまな情報処理が行われているが、なかでも基本的な視機能として網膜上に物体の鮮明な像を投影する焦点合せ(調節)がある。この調節のメカニズムは、これまで多くの人々が研究の対象としてきたが、まだ解明されていない点も多い。たとえば、どのような情報を基本として調節が働いているかという点に関しても、大きさ知覚などにより経験的に得られる物体までの距離や両眼視差、また網膜のボケなどが可能性としてあげられているが、情報の優位性や情報間の相互の影響などに関してはわかっていない。

ところで静止物体を単眼で注視するような条件で調節を測定すると、微動調節(micro-accommodation または accommodation microfluctuations)といわれる周波

数約 2 Hz, 振幅 0.1~0.3 D の調節の微小な振れが測定される¹⁻³⁾。この微動調節の存在理由に関しても明確ではなく、調節のノイズである⁴⁾、あるいはボケなどの情報を得る手段である⁵⁻⁸⁾、とされている。一方同様な条件で調節の静特性を調べると、調節量と物体までの目標値との間には若干の差(調節ラグ)がみられ、物体のコントラストや空間周波数により変化する⁹⁻¹²⁾。この調節ラグについては、調節システムが焦点深度の一方の端(調節安静位点に近いほう)にピントを合わせるためと言われている⁹⁾。これは微動調節による網膜像のコントラストや照度勾配などの時間変化を基にした処理である可能性がある^{7,8)}。

調節システムが、微動調節による網膜像のコントラスト変化や照度勾配を検出するという考え方はこれまでも示されている。Kotulak らは微動調節によるコントラスト変化を検出してフィードバックを行う調節モデルを

提案した¹³⁾。しかしこのモデルは像全体のコントラストを対象とするため、視標の空間周波数が小さい場合にはコントラストの変化が生じず、不完全さが残る。一方、笠井らは微動調節によって網膜像の明るさの空間的勾配を検出するという考え方を示しており、視標の空間周波数によらず網膜上で照度勾配の最大値を一定に保つメカニズムの存在を示唆している⁹⁾。

調節システムが、微動調節による情報を基にして焦点深度の一方の端にピントを合わせるとすれば、その付近での調節量の変化による像の変化の大小により調節の難易が変わるので、視標の性質により微動調節の大きさも変化することが考えられる⁹⁾。実際に鵜飼は、視標の質が低下するほど微動調節の振れは大きいと報告している¹⁴⁾。そこで本研究では、視標のコントラストや空間周波数によって微動調節の振幅がどのようになるかを測定し、そのアルゴリズムの解明を試みた。

2. 方 法

2.1 微動調節の測定装置

微動調節の測定は、他覚的に細かい時間サンプリング間隔で連続的に行う必要がある。そこで測定にはこうした条件を満たす自作の赤外線オプトメータを用いた。この装置は Fig. 1 の実線と点線で示すように、調節量の変化に応じて網膜共役面が移動し、二つ穴のアーチャーを通過して受光器（一次元 CCD）上に結ばれる二つの眼底反射像の距離が変化することを利用するものである。すなわち調節量を CCD 上の二つの光点の間隔として読み取る。この方法は、Cornsweet 型のオプトメータ¹⁵⁾にみられる可動部分がないために測定に機械的な遅れが生じないという利点をもっている。

光学系の概略図を Fig. 2(a) に示す。光源 (S) はキセノンランプであるが、使用した波長領域は赤外透過フィルタ (IR 1) により 800 nm 以上に制限している。ピンホール (AP1)、レンズ (L2) で、マックスウェル視系を構成し、L2 の焦点位置に置かれた横長のスリット (AP2, 挿入図参照) の像が、ハーフミラー (HM)

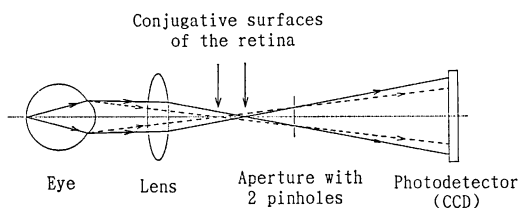


Fig. 1 Principle of optics in the optometer.

を通してターゲット (T) を見ている被験者 (Sub.) の眼底に投影される。網膜からの反射像は、レンズ (L3) の後方で再び結像し、角膜の共役面に置かれた二つ穴のアーチャー (AP3, 挿入図参照) を通過する。その後ウェッジプリズム (WP) により Fig. 2 (b) のように2光路に分けられ、レンズ (L4) およびシリンダーレンズ (CL) によって CCD 上に投影される。シリンダーレンズは、横長のスリットの網膜反射像を CCD の画素幅に絞りこんで、受光量を増加させるためのものである。CCD 上の光の強度分布は挿入図にあるとおりで、二つのピーク間隔 (Fig. 2 の A) を測定することで調節量が計られる。なお、角膜の反射は AP3 により除去される。また赤外透過フィルタを再び用いて、CCD に入射する光も 800 nm 以上に制限している。測定可能な最小瞳孔径は、二つ穴のアーチャーの間隔および穴径から 3 mm に制限される。

オプトメータにより得られたデータはサンプリング間隔の 50 ms ごとにコンピュータに送られジオプター値に変換されて記録される。この調節データの最小分解能は CCD の画素寸法から 0.1 D となる。ただしこの調節データには、1回のサンプリングごとに最小分解程度に変化するような電気的ノイズが、ところどころで現れることが模型眼による測定で観察されている。しかしこの状態での波形の周波数成分を FFT によって求めたところ特定の周波数成分をもたないホワイトノイズであることがわかった。したがって、微動調節を測定する際のこの電気的ノイズによる影響はないと考えてよい。

2.2 刺 激

被験者に提示した刺激は白黒の格子状グレーティングで、一辺が 6 cm の正方形の印画紙に焼き付けたものである。この刺激の空間周波数は 1.50, 3.75, 7.50, 15.0 c/deg の4種類とした。また各空間周波数について黒部分の濃度を変えて 4.0% から約 80% の範囲で7段階のコントラストを用意したが、焼付けの際の露光量の微妙な違いによって、空間周波数ごとに対応する各段階のコントラストは若干異なっている。実験に際して、刺激は照明装置の付加された提示台にセットされ被験者の右眼前方 25 cm (4 D) に置かれた。したがって視標の一辺は視角にして約 13.7° の大きさとなる。視標は白部分が常に約 6 cd/m² となるように照明した。また視標の後方は約 90 cm の距離で一様に白い面が輝度で約 2 cd/m² となるように白熱灯で照明された。コントラストなどの計算に用いた反射率のデータは、マイクロデンシトメータ (小西六社製) を用いて求めた。

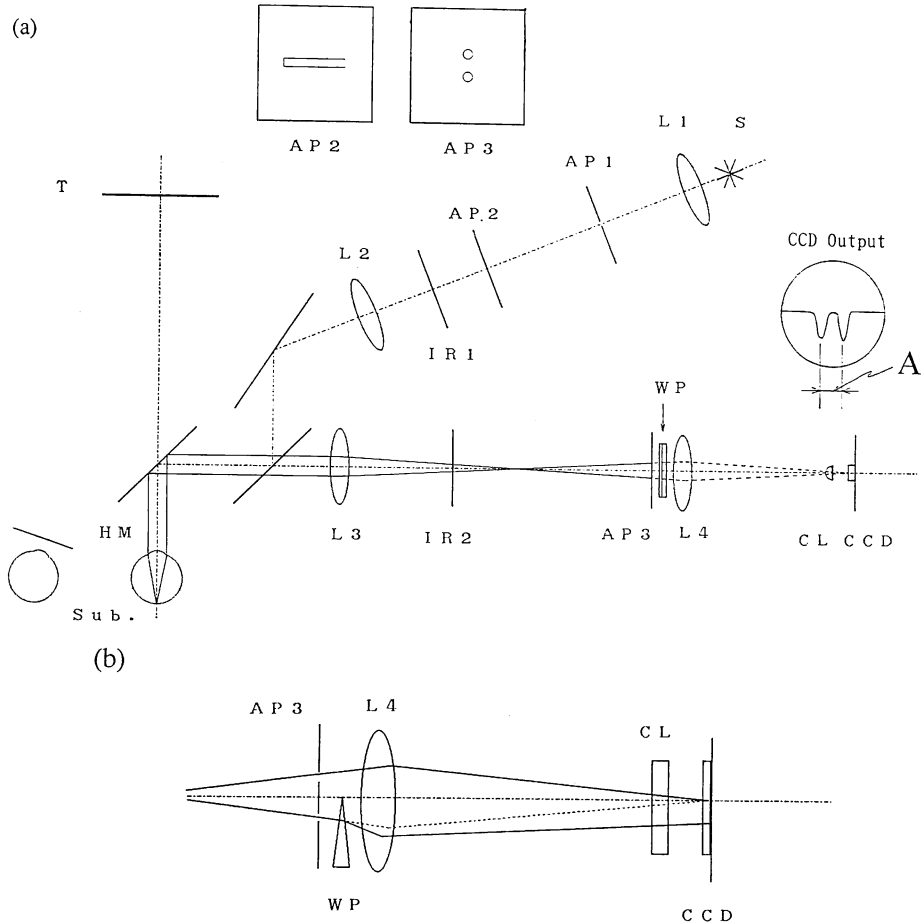


Fig. 2 (a) Schematic diagram of the optical arrangement for the infrared optometer: S, light source; L, lens; IR, infrared filter; AP, aperture; HM, half mirror; WP, wedge prism; CL, cylindrical lens; CCD, one-dimensional charge coupled device; T, target; Sub., subject. (b) The reflected light from subject's retina dividing into two directions by WP (a side view).

2.3 手順

被験者は提示された視標を右眼で注視する。その際、左眼は眼帯で遮閉する。被験者に与えられる指示は、「視標の中心付近をできるだけ自然に、しかしピントははずさないように注意して見る」とである。測定は1回25.6秒間、これを一つの視標に対して4回繰り返して行う。次にランダムに次の視標を取り上げ、同じように4回測定を行う。一つの視標に対してこの測定を2回繰り返して実験を終える。得られた調節波形は、瞬きによるエラーを含む場合があるのでこの部分をなめらかに補間して最終データとした。

2.4 被験者

被験者は、KU (36歳, 男), KO (26歳, 男), TT (27歳, 男) の3名で、いずれも近視であった。実験に

際して近視は眼鏡によって矯正した。またニデック社製オートレフラクメータ AR-1100を用いて暗黒中で調節安静位点を求めたところ KU (2.0D), KO (2.0D), TT (0.25D) であった。

3. 結果

測定された調節の波形の例を **Fig. 3** に示す。これは被験者 KU について1回25.6秒間の測定分4例を示したもので、各512個のデータから成る。調節測定中の瞬きは図中には2回あったが、この間隔を矢印ではさむ線分によって表した。また(a)~(d)のそれぞれは、各空間周波数で最も高いコントラスト条件のものを示した。視標は4Dの位置に提示されており、調節波形は各条件で定常誤差を保ちつつほぼ一定の位置に留まってい

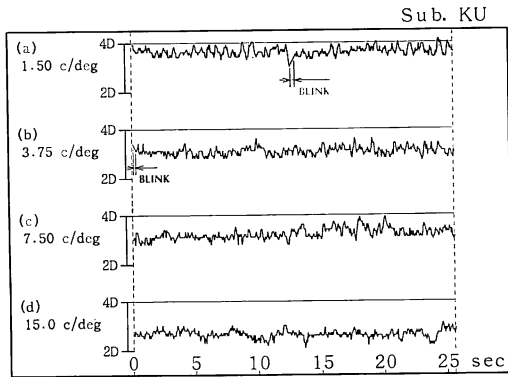


Fig. 3 Accommodative responses when subject KU fixated square-wave grating targets at the distance 4D. Each data represents different spatial frequencies. The contrast was the highest in each case.

る。その一方で各波形は全体に細かく揺れており、その中には模型眼を用いた測定でも観察されたオートレフラクタメータの電気ノイズと思われる非常に細かい変化も観察される。しかしとくに空間周波数の低い条件(a)では、この被験者の場合 1.5 Hz 程度の微動調節と思われる一定した揺れが顕著であり、また(b),(c)にも若干この揺れが観察できる。このように視標の条件に対して調節波形に含まれる微動調節の量は変化し、一定の傾向を示しているように思われる。そこで、調節波形に含まれる周波数成分を調べるために FFT によりスペクトルを求め、さらに 2 Hz 付近の微動調節の量について刺激条件との関係調べた。

求めたスペクトルは、調節波形に含まれる正弦波としての周波数成分の量 (パワー: D^2) とした。スペクトルは、1 回の調節波形データ 512 点を四つに分割し、おのおの自己相関関数を求め、さらに FFT にかけて得られたスペクトルの結果を一つの条件内で平均をとって求めた。したがって一つのスペクトルは、32 個のスペクトルの平均である。スペクトルの結果の例を Fig. 3 の各条件に対応させて Fig. 4 に実線で示す。横軸に周波数、縦軸にパワーをとり、調節波形に含まれる正弦波の振幅の 2 乗の周波数分布を表す。

このスペクトルから、先に調節波形より述べたことが確認できる。すなわち、空間周波数の低い場合には 1.5 Hz 付近の微動調節の成分が増大し、空間周波数の高い場合には減少する。一方、0.5 Hz 以下の低周波数の領域には全てに共通に多く成分をもっている。研究者によってはこれも微動調節と考えているようである¹⁾。しかしここでは前者のみを対象とする。

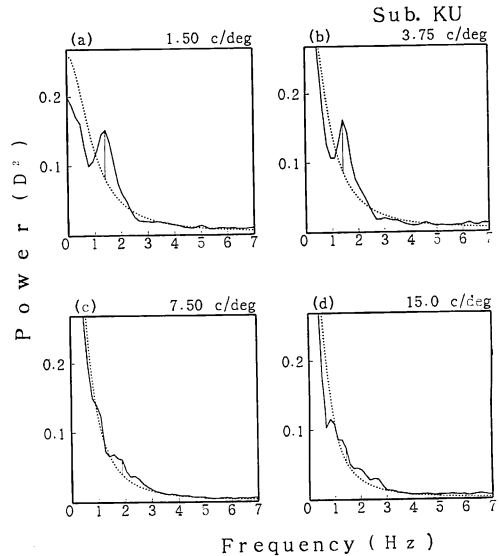


Fig. 4 Frequency spectra of accommodative responses for 4 experimental conditions, 1.50, 3.75, 7.50, and 15.0 c/deg, shown by solid lines. Frequency spectra of supposed random component calculated from corresponding auto-correlation function are also shown by dotted lines. The difference in powers at a peak near 2 Hz is shown by a vertical line.

そこで低周波数領域の成分を除去し、2 Hz 付近の周期成分を定量的評価をすることを試みた。低周波数領域の除去に際しては、これをランダム成分によるものと仮定した。これは、時系列 $x(t)$ が周期波形 (正弦波: 振幅 a , 周波数 f) とランダム波 $r(t)$ との合成

$$x(t) = a \sin(2\pi ft + \theta) + r(t) \quad (1)$$

(ただし、 θ は位相項)

によってできているものとする。この自己相関関数 $c(\tau)$ を求めると、

$$c(\tau) = (a^2/2) \cdot \cos(2\pi f\tau) + \overline{r(t) \cdot r(t+\tau)} \quad (2)$$

(ただし、 $\overline{\quad}$ は時間平均を表す)

のように、周期成分とランダム成分のそれぞれの自己相関関数の和となること、さらにフーリエ変換の線形性から式(2)のスペクトルは両成分のそれぞれのスペクトルの和となることに基づく。具体的には、まずスペクトルを求める過程で得られる自己相関関数が、 $\tau=0$ で最大となり、 τ の増加に伴って指数関数的に減少する成分をランダム成分とし、その自己相関関数を近似的に求める。これはランダム成分を一次マルコフ過程によるものとするにに基づく。さらにこの関数を FFT にかけてランダム成分のスペクトルとする。

このようにして求めたのが、Fig. 4 の点線のスペク

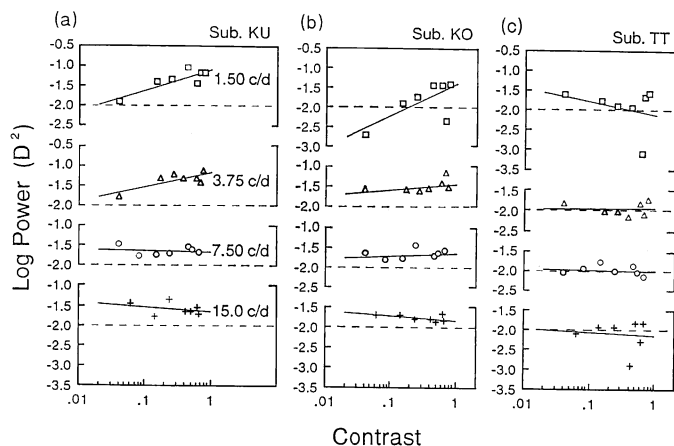


Fig. 5 Log spectral power (D^2) of micro-accommodation plotted against contrast of target. Subjects: KU (a), KO (b), TT (c).

トルである。グラフ中に垂線で示されるように、点線と実線の差のスペクトルを求め、2 Hz 付近のピークの大きさを微動調節のパワーとした。この際、2 Hz 付近のピークが顕著でない(d)のような例もあったが、その場合には1 Hz から3 Hz のうちでスペクトル値の差の最も大きい点をピークとした。

ランダム成分として求めたスペクトル(点線)は、低周波数領域では調節のスペクトル(実線)に比べて高く、周波数が高くなるにつれ等しくなる。この傾向は、2 Hz 付近の調節スペクトルのピークが高いほど顕著である。これは、波形の分散値である $c(0)$ の値を元の調節波形とランダム成分の波形とで等しいとしたために、スペクトル全体の積分値が等しくなってしまったことによる。しかし全体を通じて、2 Hz 付近の微動調節のパワーは両者の差をとることでよく表されたと考える。

全ての被験者および条件で、以上のようにして求めた2 Hz 付近の微動調節のパワーとコントラストの関係をグラフにしたものが Fig. 5 である。両軸とも対数軸とし、各空間周波数ごとに値比較のために、縦軸の -2.0 の値に基準軸を設けた。各データには一様に近似直線をひいたが、被験者 TT の一部のデータなどのように直線でよく表されているとはいえないものもある。

ところでこのグラフにはいくつかの特徴がある。被験者 KU および KO で、視標の空間周波数が低い場合には微動調節のパワーはコントラストとともに増加する。また空間周波数が高い場合には、この傾向はなくなり逆にコントラストの低い部分で若干微動調節のパワーが増加している。これらの傾向は、この2人の被験者でほぼ一致しており、微動調節のメカニズムの何らかの特徴を

表していると思われる。一方被験者 TT では空間周波数が小さい場合、先の2人の被験者とは異なりコントラストの大きい三つを除いては、コントラストの増加に従って一定の割合で、微動調節のパワーが減少するような傾向を示している。さらに他の空間周波数の結果も、他の2人とは異なっているように見える。

4. 考 察

微動調節を定量評価するために、調節波形のスペクトルのうち低周波成分をランダム成分によるものと考え、除去するという方法をとった。だが、0.5 Hz 以下の成分も研究者によっては微動調節によるものとしている。この研究で、低周波成分を除去し、2 Hz 付近の周期成分のみに着目したのは主に次の理由による。

- (1) 得られたスペクトルでは条件によらず全ての被験者で低周波領域の成分が観察されるが、測定された調節波形には規則的な低周波の揺れがみられない。
- (2) 低周波成分をもつスペクトルの形状が、一次マルコフ過程によるランダム波形によるものと非常に類似している。
- (3) 低周波成分はどの条件でも存在し、特定の傾向がみられず、調節のメカニズムを考察するには不相当と考えた。

これらの考え方の根底には、調節波形のランダム成分と周期成分との分離という問題がある。微動調節が視覚系に対して何らかの役割を果たす生体活動の一種ならば、それは積極的な働きであり、外部からみても積極的な現象であるものとする。その意味で周期成分は積極

的な現象と見ることができるのに対し、ランダムな成分は積極的な現象とは言いがたい。したがってランダム成分については、今回の研究の対象とはしなかった。しかし、ランダムな成分が調節の制御などに効果がないとは言えない。これに関しては今後研究が必要であろう。ところで一次マルコフ過程によるランダム波形は、ある時刻の値がそれより過去の時点での値の影響を受けるものであり、調節波形に含まれるランダム成分として妥当と考えられる。

Fig. 5 は横軸だけでなく微動調節のパワーについても対数軸とした。そして空間周波数が小さい場合には横軸に比例して微動調節のパワーが増加している。これはコントラストの対数的増加に、微動調節の振幅が比例しているためと思われる。

今回の結果をコントラスト一定でみると、コントラストの大きい場合には、空間周波数 1.5 c/deg, 3.75 c/deg で微動調節のパワーが大きく、それより高い周波数では微動調節のパワーは小さい。一方 Owens は、コントラストの大きい正弦波状グレーティングを用いた実験で、この空間周波数付近 (約 3 c/deg) で調節ラグが最も小さくなるとしている¹⁰⁾。そこで今回の結果のうち各空間周波数ごとにコントラストの大きい三つのデータについて、微動調節のパワーと調節量との関係を Fig. 6 に示した。まず調節ラグ (ここでは視標の提示位置 4D と調節量との差) については、被験者 KU や KO の場合 1.5 c/deg や 3.75 c/deg では他に比べ小さく、Owens の結果にほぼ一致している。次に微動調節との関係をみると、とくに被験者 KU で顕著なのは、調節ラグが増加すると微動調節のパワーは小さくなるという点である。この傾向は被験者 KO にも若干見られる。

ところで Charman らは、コントラストの大きい正弦波状グレーティングを刺激とした場合、Owens の結果とは異なり空間周波数の増加とともに調節ラグが減少すると報告している^{7,9)}。そしてこの結果を、微動調節による網膜像コントラスト変化という点から説明している⁷⁾。すなわち視標の空間周波数の増加とともに、微動調節によるコントラスト変化が最大となる焦点はずれの量が小さくなり、結果として調節ラグは減少する。さらにこの考え方では、同時に調節変化に対するコントラスト変化が大きくなるので微動調節の振幅が減少する⁹⁾。したがって調節ラグの減少とともに微動調節も減少するというものである。しかしこの Charman らの結果は Owens の言うように¹⁰⁾、ピントが最良になるように注視した場合のものである。Owens や今回の実験のよう

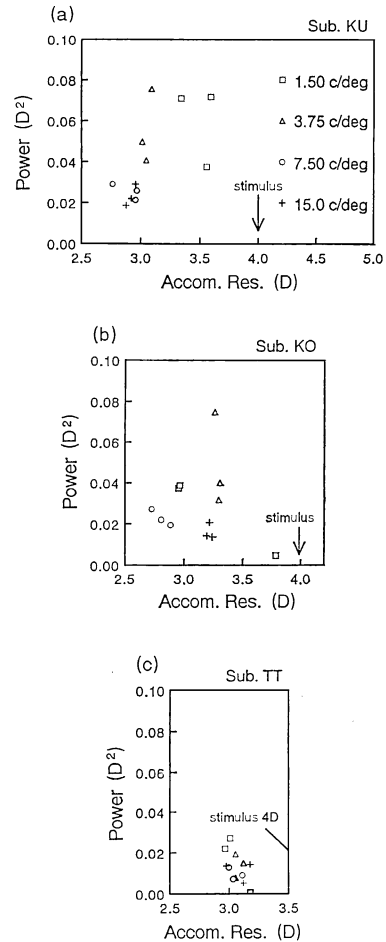


Fig. 6 Spectral power (D^2) with 3 high contrast targets of each spatial frequency as a function of accommodation (D). Targets are presented at 4 D. Subjects: KU (a), KO (b), TT (c).

に自然に視標を見る場合には、調節ラグの量と微動調節のパワーとは反比例し、Charman らの考え方では説明できないとも考えられる。これについては、刺激が正弦波状か格子状かという問題もあり、今後の研究が必要であろう。

視標のコントラストと微動調節のパワーとの関係が、被験者 TT の場合他の 2 人と異なっていた。この被験者の場合、Fig. 6 からわかるように微動調節のパワー自体が全体的に小さい。また先に述べたように調節の安静位点も TT のみ無限遠点に近い値となっている。したがって TT は他の 2 人とは異なる調節システムの形態をとっている可能性がある。

5. ま と め

本研究では微動調節を定量的に評価することを試みた。その際に、0.5 Hz 以下のスペクトル成分をランダム成分として除去した。その結果、視標として格子状グレーティングを用いた場合、視標の空間周波数が小さい場合にはコントラストが大きいと微動調節のパワーが大きく、空間周波数が大きい場合にはその逆となる傾向がみられた。また調節ラグが大きい場合には、微動調節量は少ないという傾向がみられた。

文 献

- 1) F. W. Campbell, J. G. Robson and G. Westheimer: "Fluctuations of accommodation under steady viewing conditions," *J. Physiol.*, **145** (1959) 579-594.
- 2) J. C. Kotulak and C. M. Schor: "Temporal variations in accommodation during steady-state conditions," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 223-227.
- 3) 鈴木昭弘: "微動調節の研究", *日眼会誌*, **79** (1975) 1257-1272.
- 4) W. N. Charman and G. Heron: "Fluctuations in accommodation: a review," *Ophthalm. Physiol. Opt.*, **8** (1988) 153-164.
- 5) 笠井 健: "眼の焦点調節機構", *生理光学, 応用物理学会光学懇話会編* (朝倉書店, 東京, 1975) pp. 115-136.
- 6) G. Walsh and W. N. Charman: "Visual sensitivity to temporal change in focus and its relevance to the accommodation response," *Vision Res.*, **28** (1988) 1207-1221.
- 7) W. N. Charman and J. Tucker: "Accommodation as a function of object form," *Am. J. Optom. Physiol. Opt.*, **55** (1978) 84-92.
- 8) M. Alpern: "Variability of accommodation during steady fixation at various levels of illuminance," *J. Opt. Soc. Am.*, **48** (1958) 193-197.
- 9) W. N. Charman and J. Tucker: "Dependence of accommodation response on the spatial frequency spectrum of the observed object," *Vision Res.*, **17** (1977) 129-139.
- 10) D. A. Owens: "A comparison of accommodative responsiveness and contrast sensitivity for sinusoidal gratings," *Vision Res.*, **20** (1980) 159-167.
- 11) C. A. Johnson: "Effects of luminance and stimulus distance on accommodation and visual resolution," *J. Opt. Soc. Am.*, **66** (1976) 138-142.
- 12) J. C. Kotulak and C. M. Schor: "The effects of optical vergence, contrast, and luminance of the accommodative response to spatial bandpass filtered targets," *Vision Res.*, **27** (1987) 1797-1806.
- 13) J. C. Kotulak and C. M. Schor: "A computational model of the error detector of human visual accommodation," *Biol. Cybern.*, **54** (1986) 189-194.
- 14) 鶴飼一彦: "調節機構の機能的解析", *あたらしい眼科*, **4** (1987) 491-497.
- 15) T. N. Cornsweet and H. D. Crane: "Servo-controlled infrared optometer," *J. Opt. Soc. Am.*, **60** (1970) 548-554.