

## 調節の緊張緩和と眼精疲労

岩崎 常人<sup>1)</sup>, 田原 昭彦<sup>1)</sup>, 三宅 信行<sup>2)</sup><sup>1)</sup>産業医科大学眼科学教室, <sup>2)</sup>株式会社ニコン事業開発センター

## 要 約

**目的:** 眼精疲労の原因の一つには, 調節における毛様体筋の過緊張がある。そこで, 調節に対して光学的な遠方化刺激を与え, 調節の緊張緩和が眼精疲労に対して効果を有するか否かについて実験的に検討した。

**方法:** 女子学生 20 例に対して, 3-D 画面上で立体像を注視する視作業を 15 分間負荷し, その直後に遠方化刺激を 2 分間与えた。視覚負荷と遠方化刺激の前後に調節ステップ応答の測定および段階評定法による自覚症状調査を行った。遠方化刺激は, Badal の光学系上で風景画像を被験者の遠点に対応したフィードバックによって, 遠方から近方へと正弦波状に動かした。遠方化刺激時における被験者の屈折値の変動は, 刺激と同時に記録された。

**結果:** 遠方化刺激中に屈折値が遠方にシフトしたものは 9 例(遠方化群), 近方にシフトしたものが 11 例(近

方化群)であった。負荷と遠方化刺激の試行前後で, 近方化群では, 調節緊張時間が平均 0.86 秒から 0.97 秒へと有意に延長し( $p=0.043$ ), 遠方調節位置が平均 +1.21 D から +1.13 D へと有意に遠方に移動した( $p=0.048$ )。自覚症状でも, 眼が疲れる, 眼が重い, 眼が乾く訴えの評定点が有意に上昇した(各  $p=0.0035$ ,  $p=0.0038$ ,  $p=0.0162$ )。しかし, 遠方化群では, 試行前後での視機能, 自覚症状ともに有意な変化はなかった。

**結論:** 調節への遠方化刺激による調節の緊張緩和は, 眼精疲労の回復に効果があると考えられた。(日眼会誌 107: 257-264, 2003)

**キーワード:** 調節, 眼精疲労, 屈折, 調節の遠方化刺激, 3-D ディスプレイ

## Reduction of Asthenopia-related to Accommodative Relaxation

Tsuneto Iwasaki<sup>1)</sup>, Akihiko Tawara<sup>1)</sup> and Nobuyuki Miyake<sup>2)</sup><sup>1)</sup>Department of Ophthalmology, University of Occupational and Environmental Health, Japan<sup>2)</sup>Business Development Center, Nikon Corporation

## Abstract

**Purpose:** We investigated experimentally the effect of accommodative relaxation by outward shift stimuli for accommodation on asthenopia.

**Methods:** Twenty female students fixed on optical outward-shift stimuli at accommodation for 2 min immediately after 15 min of a sustained task on a 3-D display. Before and after the trial task and the outward shift stimuli, their accommodative step response was measured and their subjective symptoms were assessed. The outward shift stimuli in the optical system, which was set on a refractometer, were presented by moving the target scenery images from far to near and near to far repetitively a round both eyes' far point position. At the same time as the accommodation measurements, the changes of refraction were recorded from the same eye.

**Results:** While looking at the outward shift stimuli, the refraction of 9 out of 20 subjects showed an outward shift and that of the other 11 subjects shifted inward. The post-trial value of contraction (from far to near) time of accommodative step

response in the inward-shift group was markedly prolonged, from 0.86 s to 0.97 s ( $p=0.043$ ), and the post-trial accommodative power at the far target was shifted outward; from +1.21 D to +1.13 D ( $p=0.048$ ). The subjective symptoms of "ocular fatigue", "eye heaviness" and "eye dryness" also increased after the is ( $p=0.0035$ ,  $p=0.0038$ ,  $p=0.0162$ , respectively). In the outward-shift group, however, no statistical changes were found.

**Conclusion:** From these results, we suggested that accommodative relaxation produced by outward shift stimuli at accommodation is effective in reducing of asthenopia following the deterioration of accommodative functions.

Nippon Ganka Gakkai Zasshi (J Jpn Ophthalmol Soc 107: 257-264, 2003)

**Key words:** Accommodation, Asthenopia, Refraction, Outward shift stimuli for accommodation, 3-D display

別刷請求先: 807-8555 北九州市八幡西区医生ヶ丘 1-1 産業医科大学眼科学教室 岩崎 常人  
(平成 14 年 7 月 22 日受付, 平成 14 年 10 月 9 日改訂受理)

Reprint requests to: Tsuneto Iwasaki, M.D. Department of Ophthalmology, University of Occupational and Environmental Health, Japan. 1-1 Iseigaoka Yahatanishi-ku Kitakyushu 807-8555, Japan

(Received July 22, 2002 and accepted in revised form October 9, 2002)

## I 緒 言

近年の情報技術 (information technology, IT) の進展は、モバイルコンピュータや携帯電話、インターネット、双方向 BS デジタル放送などの新たな電子機器の普及を促し、従来とは異なる視覚情報の入出力形態や視環境を生んでいる。環境因子の変化が容易に眼精疲労を発症することは古くからいわれており<sup>1)2)</sup>、現在でも特に visual display terminal (VDT) 作業の作業環境と眼精疲労との関係については、多くの研究報告がある。IT の進展は、視覚に与える刺激をさらに増大させ、眼精疲労の多発を懸念させる。

眼精疲労の原因は、Duke-Elder ら<sup>1)</sup>によると、視機能に関しては、屈折異常における未矯正と調節異常、斜位、輻湊異常、融像の不適切、不等像視の6つが挙げられている。特に、調節機能の異常や低下が眼精疲労発症の主要な原因の一つであると考えられている。調節と眼精疲労の関係を報告した論文は他にも多くあり、調節を構成する機能的要素のうち、視作業の後や眼精疲労様症状を有するものでは、調節力の減少<sup>3)4)</sup>や調節近点の延長<sup>5)</sup>、調節速度や調節時間の遅延<sup>6)~8)</sup>、微動調節運動の低周波化<sup>9)</sup>、dark focus (DF)<sup>10)~12)</sup>の近方へのシフトが確認されている。

例えば、DF は近方調節 (positive accommodation) と遠方調節 (negative accommodation) の中間に位置することから、tonic accommodation (TA) または調節安静位と同義であり、自律神経系支配の均衡のとれた状態にある調節と考えられる。したがって、DF の近方化は副交感神経系の興奮であり、眼精疲労の原因が副交感神経系の異常興奮にあるとする報告<sup>13)14)</sup>もある。このことからすれば、眼精疲労の発症は調節の緊張に一因がある。眼精疲労様症状を多く訴える VDT 作業員や VDT 作業就業後の調節機能を測定した報告<sup>9)15)~18)</sup>においては、その作業員もしくはその作業後に、調節緊張が生じ調節遠点の短縮や屈折値の近視化が生じ、調節緊張がやはり眼精疲労と関係しているとされる。

このように、眼精疲労は調節機能の低下または異常が原因している可能性が非常に強く、特に、毛様体筋に対する副交感神経系の作用による調節の緊張状態が大きく関与していると考えられている。また、毛様体筋は自律神経系の支配を受けるため、情動性の精神心理的刺激も調節に影響を及ぼし、視作業や視覚情報処理にメンタルストレスや認知要求 (cognitive demand) などの要因が加味された場合には、調節はさらに緊張する方向へ反応する<sup>19)~22)</sup>。IT の進展から、例えば、携帯メールなどにみられる双方向通信における視覚情報の送受信は、他者からの情報に対する規制や束縛といった心理的負担を増大させ、調節はより一層緊張状態を強いられると推測される。

そこで、調節系に対して光学的に調節遠点を遠方化させる刺激を与え、調節の緊張の緩和が眼精疲労に対して効果があるか否かについて実験的に検討を行った。実験的に眼精疲労を発現させる視覚負荷として与えた視作業は、IT 化との関連から、近年眼精疲労の報告が多くなされている立体 (3-D) 画像<sup>23)~31)</sup>とした。

## II 方 法

### 1. 対 象

今回の実験に影響を与える可能性のある既往歴や疾患がなく、赤外線オプトメータ (AR 3-SV 6, ニデック) によって検査された調節ステップ応答が良好であった女子学生 20 例を対象とした。年齢層は 20~22 歳 ( $20.9 \pm 1.0$  歳、平均値  $\pm$  標準偏差) であった。事前検査におけるオートレフラクトメータ (AR-1100, ニデック) による他覚的屈折値は、 $0 \sim -1.94$  D ( $-0.74 \pm 0.65$  D、平均値  $\pm$  標準偏差) であった。乱視度数は、いずれの被験者も  $0 \sim -0.5$  D 以内であり、放射状の乱視表でも濃淡を自覚しなかった。すべての被験者は、実験に使用したランダム・ドット・ステレオグラム (random-dot stereogram, RDS) による立体画像をいずれの図形でも複視を生じることなく明瞭に認識できた。

### 2. 調節に対する緊張緩和の方法

オートレフラクトメータ (Speedy-1, ニコン) の上部に Badal の光学系に基づいた視標呈示システムを設置した (図 1)。この光学系内には、図 2 に示す風景画像 (中央の木; 約  $4 \text{ cd/m}^2$ 、周辺の空; 約  $40 \text{ cd/m}^2$ 、周辺の畑; 約  $8 \text{ cd/m}^2$ ) が視標として組み込まれており、各被験者の屈折度に応じて遠方から近方へ、また近方から遠方へと移動でき、眼位は平行位としてダイクロイックミラーを介して観察させるシステムである。Speedy-1 と視標呈示システムは、コンピュータ (PC, SOLO 5300, Gateway) で接続され、Speedy-1 からの屈折値データ処理と視標の遠近移動制御がこの PC によって行われた。

視標呈示システム内の具体的な視標の設定は、まず被験者の両眼の屈折度を Speedy-1 によって求め、調節遠点の位置を決定する。両眼それぞれにおいて、両遠点位置から  $+0.5$  D 遠視側に視標を設定し、その遠方位置を視標移動の出発点として、遠点に対して  $-0.5$  D 近方に相当する位置まで、 $0.5 \text{ D/s}$  の速度で視標を移動する。その位置で 1 秒間停止させた後、再び同様の速度で前述の  $+0.5$  D の遠方位置まで移動し、その位置で 2.5 秒間停止させる。これを 1 周期として、被験者には 2 分間光学系内の視標中央部の樹木をみるように指示したので、遠近の視標移動は全部で 16 周期となった。この間、優位眼の屈折度の変化が  $200 \text{ ms}$  に 1 回の割合で Speedy-1 によって測定され、1 周期分に得られた被験者の屈折値の平均を PC によって求めた。視標呈示の  $n$  番目の周期に対する被験者の平均屈折値が  $n-1$  番目の平均屈折値よ

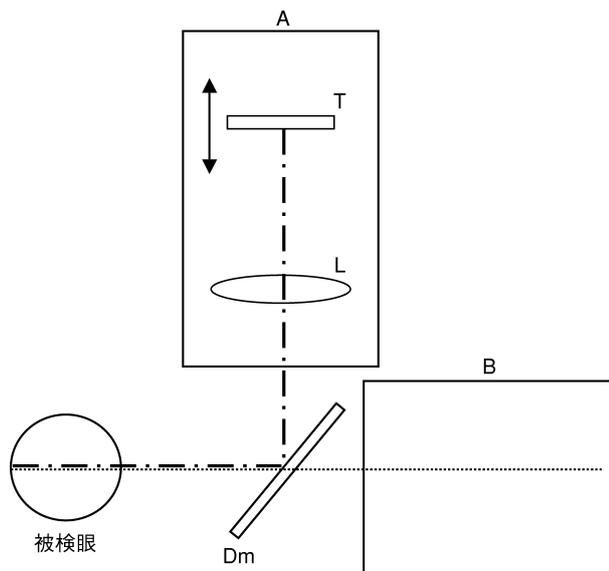


図 1 遠方化刺激呈示系と屈折測定系の模式図。

A：遠方化刺激呈示部 B：オートレフラクタメータ (Speedy-1, ニコン) T：風景視標 L：レンズ系 Dm：ダイクロイックミラー ---：可視光 .....：赤外光

コンピュータによって遠方化刺激呈示部とオートレフラクタメータは接続され、風景視標の遠近移動制御と屈折値の変動処理が行われた。風景視標の注視は両眼視下で、屈折値の測定は片眼(優位眼)で行われた。

り+側に偏位した場合には、視標呈示の  $n+1$  番目の周期では、両眼それぞれに+の偏位分を等しく加えて遠方に視標を呈示した。平均屈折値が、変化のなかった場合とその値が一方向への偏位の場合、および最初に測定された遠点位置より遠方に偏位しなかった場合はそのままの呈示条件を保った。つまり、被験者の屈折値の+偏位に応じたフィードバックをかけることによって、光学的に毛様体筋の緊張を緩解させ、被験者の調節遠点をより遠方化させることを試みた。

### 3. 遠方化刺激による屈折変動と群別

2分間の遠方化刺激時における被験者の屈折値の変化は、時系列的に記録されるので、得られた2分間の屈折値の変化を一次近似曲線として計算した。この近似曲線から、遠方化刺激を開始した時点の屈折値(初期値)と2分後の最終屈折値(最終値)を算出し、遠方化刺激で変化する各被験者の調節遠点の推移を屈折値としてとらえた。この屈折値が+値になった場合には、遠点は遠方に偏位し調節緊張が緩和されたことを意味し、逆に-値になった場合は、遠点は近方に偏位し調節は緊張したことを意味する。解析に当たっては、+に偏位した例と-に偏位した例をそれぞれ遠方化群と近方化群に層別し、各群において調節機能と自覚症状の変化を検討した。

### 4. 視覚負荷

視覚負荷は、明らかに眼疲労の訴えの上昇と、調節機能の低下が確認されている以下の方法<sup>32)</sup>で与えた。パラ



図 2 遠方化刺激に用いた風景画像。

視角：32.5°、輝度：中央の木；約 4 cd/m<sup>2</sup>、緑色、周辺の空；約 40 cd/m<sup>2</sup>、ほぼ青色、周辺の畑；約 8 cd/m<sup>2</sup>、ほぼ緑色

ラックス・バリア方式 3-D ディスプレイ (THD-10 PN 3, SANYO) 上でモノクローム RDS を呈示し、立体像として知覚させた。このディスプレイは、画面サイズが 10.4 inch の thin film transistor (TFT) アクティブマトリックス方式による透過型 twisted nematic (TN) 液晶パネルで 921,600 の画素をもつ。RDS は、コンピュータ上で Adobe Photoshop Ver. 5.5 によってノイズフィルタ処理(ノイズ量 500, 分布法均等分布)を施し、3-D ディスプレイ上に呈示した。RDS の図形は、具体的には水平視角を 4.5° とする正円形と正方形、正三角形の三種類を用意した。これらの図形を交差性に 1.0° の視差をとり、3-D ディスプレイの中央から近方に飛び出させて知覚させた。3-D ディスプレイと被験者との視距離は 50 cm であった。

全負荷時間は、先行する立体像負荷実験<sup>32)33)</sup>の結果から、調節機能の低下が示された 15 分とした。この間 5 秒間隔で正円と正方形、正三角形のいずれか一つの図形を無作為に表示し、被験者に、正円形が知覚される毎にマウスをクリックするように指示した。

### 5. 測定項目

#### 1) 調節

調節機能は、各被験者の優位眼の調節ステップ応答を前述の赤外線オプトメータで測定した。ステップ応答の調節刺激量は 3 D とし、測定機内の近方視標と遠方視標の呈示時間は、それぞれ 5 秒ずつ交互に各々 5 回の刺激を行った。調節刺激として設定した視標位置の全例での平均値は、近方視標が  $+4.25 \pm 0.41$  D (±標準偏差) で、遠方視標が  $+1.25 \pm 0.41$  D (±標準偏差) であった。被験

者には、いずれの視標の切り替えに対しても、即座に明視を行い、かつ明視状態の保持を指示した。視標の形状は、オプトメータ内の視角 $3^\circ$ のスターバーストであった。測定時期は、負荷前と負荷が終了し、遠方化刺激を2分間行った直後の2時点であった。

赤外線オプトメータからのアナログ信号は、コンピュータ(PC-9801 BX 2, NEC)に送られ、A/Dボードによって80 msに1回の割合でデジタル信号に変換された。得られたステップ応答の解析は、まず、遠方から近方へと、近方から遠方への各5つの波形をコンピュータ上で各々1つの平均波形とした。この平均波形から、調節緊張時間と調節弛緩時間、近方調節応答位置、遠方調節応答位置の4項目を計測した。調節緊張時間は、近方視標を呈示した時点から調節の反応が終了した時点までとし、調節弛緩時間は、遠方視標を呈示した時点から調節反応が終了する時点までの時間とした<sup>6)7)20)34)35)</sup>。近方調節応答位置は、近方視標へ切り替えた時点から2.5秒以降、つまり、視標呈示時間の後半2.5秒分実際に応答した屈折の平均値を算出した。遠方調節応答位置は、遠方視標呈示に対して同様の2.5秒間に応答した屈折の平均値を計算した。

## 2) 自覚症状

眼精疲労は眼不定愁訴を主体とした症候群であるから、段階評定法<sup>36)</sup>によって眼精疲労に関する自覚症状を調査した。自覚症状項目には、日本産業衛生学会・産業疲労研究会による「新装産業疲労ハンドブック」(労働基準調査会)<sup>37)</sup>および鈴村の眼精疲労の鑑別診断用自覚症状項目<sup>38)</sup>から、主に眼に関する以下の15項目を選定した。

① 眼が疲れる、② 眼が痛い、③ 眼が重い、④ ものがぼやけて見える、⑤ 眼がかすむ、⑥ ものが二重に見える、⑦ 眼が熱い、⑧ 眼が乾く、⑨ 涙がでる、たまる、⑩ 眼がちかちかする、くしゃくしゃする、⑪ 眼がかゆい、⑫ 瞼がびくびくする、⑬ まぶしい、⑭ 色が違って見える、⑮ 頭が痛い。

段階評定には7段階を用い、各項目毎に段階数値に1. 全く感じない、2. かすかに感じる、3. やや感じる、4. 感じる、5. やや強く感じる、6. かなり強く感じる、7. 非常に強く感じる、の意味を有する字句を付記し、自覚的訴えの程度を評価した。自覚症状調査は、言葉による誘導偏倚を避けるため問診形式をとらず、被験者自身によって現在の状態に相当する段階数値に○印を付けさせた。調査は、負荷前の調節測定の前に1回と、負荷終了の後、遠方化刺激後、調節測定終了後に1回行った。

## 3) 統計処理

両群それぞれにおいて、調節緊張・弛緩時間、近方・遠方調節応答値、自覚症状ともに負荷前の値(Pre)と負荷ならびに遠方化刺激後の値(Post)に対して、対応の

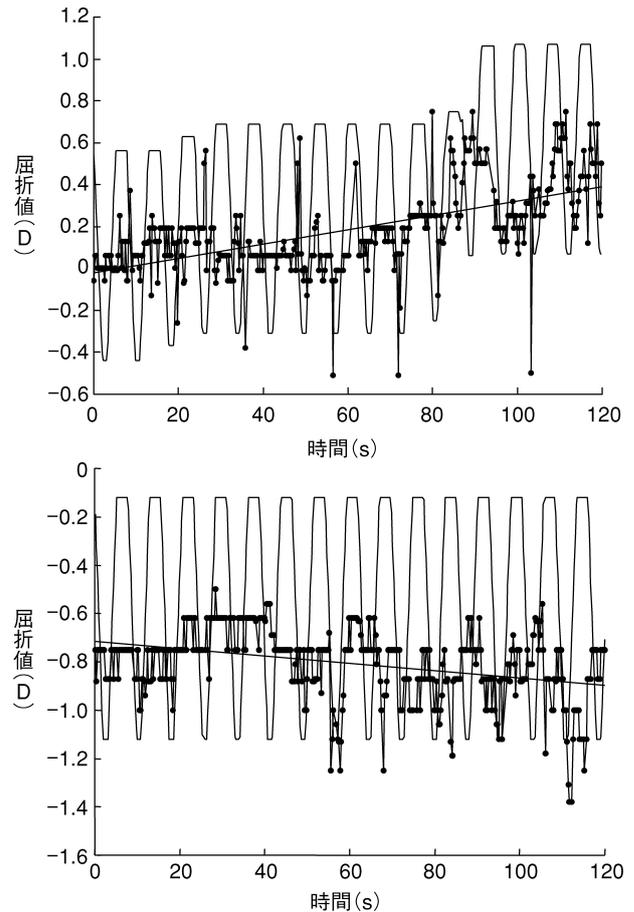


図3 遠方化刺激時における屈折値の偏位とその近似直線。

上：遠方に偏位したものの1例(表1のSub. 1-7)，  
下：近方に偏位したものの1例(表1のSub. 2-8)，  
正弦波様の細線：視標呈示装置(図1のA)内の視標(図1のT)の動き、ドット線：被験者の屈折値の推移

あるt検定(両側)を実施し、危険率5%未満を有意差ありと判定した。両群間でのPre値に差のないことは、対応のないt検定(両側)を用いて同様の判定規準で行った。

## III 結 果

### 1. 遠方化群と近方化群

遠方化刺激による屈折値の推移例を図3に示す。図3上は負荷後の遠方化刺激によって、屈折値の変化が遠方にシフトした例であり、屈折値の変動から計算された一次近似曲線は $y=0.0033x-0.015$ となった。この近似式から、遠方化刺激を開始した時点での初期値は $-0.02$  Dであったものが、刺激終了時の最終値は $+0.88$  Dとなり、屈折偏位幅は $+0.40$  Dで調節遠点が遠方化して調節の緊張が緩和された。逆に図3下の例では、一次曲線は $y=-0.0017x-0.709$ と近似され、初期値は $-0.71$  D、最終値は $-0.91$  Dとなり、偏位幅は $-0.20$  Dで一方に偏位し、調節遠点が近方化し調節の緊張は緩和されなかった。

表 1 遠方化刺激による屈折値の偏位幅から層別された 2 群

群	Sub. #	年齢(年)	一次近似曲線	屈折値の偏位幅(D)
遠方化群	1-1	20	$y=0.001x-2.653$	+0.12
	1-2	22	$y=0.0006x-0.413$	+0.07
	1-3	22	$y=0.0011x+0.199$	+0.13
	1-4	20	$y=0.0003x-0.335$	+0.04
	1-5	20	$y=0.0057x-3.360$	+0.68
	1-6	22	$y=0.0009x+0.184$	+0.11
	1-7	22	$y=0.0033x-0.015$	+0.40
	1-8	20	$y=0.0002x-0.580$	+0.02
	1-9	20	$y=0.0006x-0.787$	+0.07
平均値±標準偏差				+0.18±0.21
近方化群	2-1	20	$y=-0.0021x-0.791$	-0.25
	2-2	21	$y=-0.0009x-1.399$	-0.11
	2-3	20	$y=-0.0024x-0.709$	-0.29
	2-4	20	$y=-0.0016x-2.555$	-0.19
	2-5	22	$y=-0.0005x-0.481$	-0.06
	2-6	22	$y=-0.0006x+0.374$	-0.07
	2-7	21	$y=-0.0038x-1.792$	-0.46
	2-8	20	$y=-0.0017x-0.709$	-0.20
	2-9	20	$y=-0.0012x-2.778$	-0.14
	2-10	22	$y=-0.0026x-0.265$	-0.31
	2-11	22	$y=-0.0003x-0.392$	-0.04
平均値±標準偏差				-0.19±0.12

偏位幅：一次近似曲線から算出した最終値から初期値を引いた値

表 2 両群における調節時間(平均値±標準偏差)の Pre と Post での変化

群	緊張時間(s)		弛緩時間(s)	
	Pre	Post	Pre	Post
遠方化群 (n=9)	1.01±0.23	1.09±0.33	0.98±0.14	0.98±0.20
近方化群 (n=11)	0.86±0.24	0.97±0.28	1.03±0.12	1.05±0.13

NS：有意差なし，\*：p=0.043(t検定，Preの値に対する変化)

同様の方法によって偏位幅を計算した結果，全 20 例のうち負荷直後の遠方化刺激によって，屈折偏位が+側であった遠方化群は 9 例(平均偏位幅+0.18 D)あり，逆に-側に偏位した近方化群は 11 例(平均偏位幅-0.19 D)であった(表 1)。また，実験前の優位眼の平均屈折値は，近方化群が-0.77 D(±0.71 D，標準偏差)，遠方化群が-0.70 D(±0.62 D)で差はなかった。

2. 調節機能の変化

表 2 に両群での負荷と遠方化刺激の後の調節時間の变化を示す。遠方化群の平均調節緊張時間は，Pre で 1.01 秒，Post で 1.09 秒と有意な変化はなかった。調節弛緩時間についても，Pre 0.98 秒，Post 0.98 秒と全く変化はなかった。しかし，近方化群での弛緩時間は，Pre 1.03 秒，Post 1.05 秒で有意差はなかったが，緊張時間は Pre が 0.86 秒から Post が 0.97 秒へと有意に延長した(p=0.043)。

表 3 に両群での調節応答位置の Pre と Post での变化を示す。近方視標に対する近方調節応答位置については，遠方化群で平均+3.43 D から+3.36 D，近方化群で平均+3.29 D から+3.25 D へと，いずれも有意な変化はなかった。遠方調節応答位置については，遠方化群では，Pre+1.05 D，Post+0.99 D と有意差はなかったが，近方化群では，Pre+1.21 D から Post+1.13 D へと有意に応答位置が遠方に移動した(p=0.048)。

3. 自覚症状の変化

表 4 に両群での自覚症状の平均評定点の变化を示す。自覚症状全 15 項目のうち，両群を通じて Post に評定点の有意に上昇した項目は 3 項目であった。遠方化群では，15 項目とも評定点の有意な変化はなかった。有意な変化のあった 3 項目は，いずれも近方化群のみであった。「眼が疲れる」の評定点は，Pre 1.00 から Post 2.64 へ上昇し(p=0.0035)，「眼が重い」は，Pre 1.00 から Post 1.73 へ(p=0.0038)，「眼が乾く」は Pre 1.09 から Post 2.00 へと有意に上昇した(p=0.0162)。

IV 考 按

今回の実験で，遠方化刺激後調節遠点が近方に偏位した近方化群では，調節緊張時間の延長と調節応答位置の遠方偏位による遠方視標に対する lag が増大し，明らかに調節機能の低下が起こった。また，「眼が疲れる」と「眼が重い」，「眼が乾く」訴えの自覚症状が上昇した。これに反して，遠方化刺激によって遠点が遠方に偏位し

表 3 両群における調節応答位置(平均値±標準偏差)の Pre と Post での変化

群	調節刺激位置(D)		近方調節応答位置(D)		遠方調節応答位置(D)	
	近方	遠方	Pre	Post	Pre	Post
遠方化群 (n=9)	+4.22±0.44	+1.22±0.44	+3.43±0.50	+3.36±0.50	+1.05±0.56	+0.99±0.61
近方化群 (n=11)	+4.27±0.41	+1.27±0.41	+3.29±0.65	+3.25±0.64	+1.21±0.71	+1.13±0.76

調節刺激位置：赤外線オプトメータ内に設定した近方視標(近方)と遠方視標(遠方)の位置を表す。

近方調節応答位置：近方視標に対して被験者が実際に反応した調節応答の位置を示す。

遠方調節応答位置：遠方視標に対して被験者が実際に反応した調節応答の位置を示す。

NS：有意差なし \*：p=0.048(t検定, Preの値に対する変化)

表 4 両群における評定点の上昇した自覚症状項目と評定点(平均値±標準偏差)

群	眼が疲れる		眼が重い		眼が乾く	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
遠方化群 (n=9)	1.00±0.00	1.78±1.09	1.00±0.00	1.56±1.01	1.22±0.44	1.89±1.05
近方化群 (n=11)	1.00±0.00	2.64±1.43	1.00±0.00	1.73±1.01	1.09±0.30	2.00±1.18

NS：有意差なし, \*1：p=0.0035, \*2：p=0.0038, \*3：p=0.0162(t検定, Preの値に対する変化)。

他の12項目は両群ともPostでの有意な上昇はなかった。

た遠方化群では、調節機能の低下もいずれの自覚症状の上昇も起こしていない。自覚症状と調節機能の他覚的所見から、遠方化群では眼精疲労が発現しなかったことになる。これらの結果から、明らかに調節の緊張緩和は、眼精疲労の発現に対して回復させる効果があったといえる。また今回の実験は、逆に調節の緊張が眼精疲労の主要な発症原因であることを示している。

調節の障害や機能低下は、眼精疲労と非常に深くかかわり、それらを治療することで眼精疲労が消退する場合があることは古くからいわれている。Duke-Elderら<sup>3)</sup>は遠方と近方を明視する訓練法が有効であるとし、Daum<sup>39)40)</sup>は少なくとも調節力が3D増強すれば、眼精疲労患者の88%に改善をみている。他にもレンズ交換法によって調節刺激を行い、調節力を増加させると、眼精疲労の減少がみられている<sup>41)</sup>。また、今回の実験と同様、調節緊張緩和を目的とした0.025~0.05%の塩酸シクロペントラートの1~2か月間の就寝前点眼が眼精疲労に奏功している<sup>42)~44)</sup>。これらの結果は、点眼期間が長期間にわたり、また、対照症例がないため、眼精疲労の消退が真に点眼薬による処か、環境における有害因子が除去されたためか明確ではない。しかし、副交感神経ブロックによる毛様体筋の弛緩は、遠方化刺激と同様に調節の緊張緩和の作用があり、逆に今回の結果は、上記の論文の結論を追認すると同時に眼精疲労の原因に調節が深く関与していることを示す。

ところで、負荷直後に被験者に与えられた遠方化刺激の目的は、調節遠点の遠方化によって調節緊張を緩和することにあった。20例中9例はこの目的に沿っていた

が、残り11例の近方化群は、逆に調節遠点が近方にソフトし、調節の緊張は負荷終了直後から増加した。眼精疲労の主要な原因の一つに調節緊張が考えられたことから、如何に円滑に調節緊張を緩和させるかは、この遠方化刺激の方法論上重要な課題である。そのためには、近方化の原因を考える必要がある。

調節に影響する最も強い刺激は、網膜像のぼけである。像のぼけに対する閾値は、Rosenfield<sup>45)</sup>の報告では、正視眼では平均±0.11Dであり、近視眼では平均±0.18Dである。これからすると、遠方化刺激での±0.5Dの移動量は、被験者がぼけを自覚するには十分な量であり、大きな調節誘発の刺激となった可能性がある。Randle<sup>46)</sup>は今回と類似した遠点の遠方化訓練による調節の弛緩が、軽度近視の治療に有効であると報告した。これは、患者の遠点位置に応じて視標を設置し、明視できたことを自覚的に確認しながら0.1Dまたは0.2Dの増分で少しずつ遠点位置から視標を遠ざける、いわば自覚的フィードバックで遠点の遠方化を遂行する。しかしこの時、増分を0.3D以上に設定すると遠方化は失敗しており、この原因はぼけを自覚する閾値を超えてしまうことで、逆に調節が刺激され緊張緩和は生じないためであるとしている。今回の近方化した11例も、近方への0.5Dの移動は本人が有する調節で明視可能であるが、遠方への0.5D分の移動に対して調節が追従しなければ、ぼけの刺激が調節を誘起してしまい、その結果、緊張する方向に偏位したと考えられる。ところが、遠方化群においても風景画像の最遠方時の屈折値と本人の屈折値との差(例えば、図3上での正弦波の上部とドット

線の値の差に相当)は、いずれの被験者の場合も 0.3 D 以上であり、ぼけの閾値を超えている。単にぼけの刺激のみが調節を誘発し、近方化の原因になったとは考えにくい。

調節への刺激は、網膜上像のぼけと同様に距離の要素も大きく関与する。Ebenholtz ら<sup>47)48)</sup>は視作業を各被験者の調節近点と遠点、DF と近点の中間および DF と遠点の中間の位置に相当する距離で負荷し、調節の hysteresis(調節順応)について実験を行った。負荷後の DF は、DF 位置より近距離で負荷がなされた場合には近方にシフトし、DF 位置より遠距離でなされた場合には遠方にシフトした。DF の位置に相当する距離を境として近方では調節が緊張する順応が起こり、逆に遠方では調節が弛緩する方向に順応が生じている。これらの調節順応の結果からすると、今回の遠方化刺激は、被験者の遠点位置を中心に移動させ、被験者の DF より遠方で刺激が与えられおり、調節は本来弛緩する方向に誘導されるはずである。遠方化群における調節の緊張緩和は調節順応で説明されるが、近方化群での調節の緊張については、距離に対する調節順応だけの解釈は不可能である。調節順応は、屈折状態とも関わるといわれている。Hung ら<sup>49)</sup>は近業後の調節順応が近視群で大きく、正視群と遠視群では低い順応であることを明らかにした。今回の遠方化群と近方化群での屈折値の平均には差がなく、遠方化刺激による近方化の原因が屈折状態の影響とも考えにくい。

上記とは別な原因によって、調節順応の現れ方に差異を生じた結果がある<sup>50)</sup>。この実験では、若年被験者合計 18 例に対して、33 cm の視距離で 10 分間の計算作業を負荷している。負荷後に調節順応を起こしたものは 11 例で残り 7 例は順応せず、順応した群では調節 lag に対する補正が強く、非順応群では補正が弱いという特徴を有していた。調節 lag の補正のあり方に個別別での違いがあるとすれば、遠方化刺激によって、遠方化群と近方化群で差を生じた原因は、本来個体が有する調節特性そのものの違いによる可能性がある。しかし、この結論を近方化の原因に適當させるためには、遠方化刺激の方法とも関連してくるが、遠方化のための視標移動が合目的に行われたかを検討しなければならない。今回の視標位置は、200 ms に 1 回測定される被験者の屈折値をフィードバックすることで決定した。遠方化刺激の早い時期で屈折値が遠方化した場合には、遠方化分に相応したフィードバックが適切に働いていたが、逆に、調節が緊張して近方化が生じた場合には、視標移動は初期設定のままフィードバックの処置はなされていない。したがって、近方化した場合に、その近方化分に対する何らかのフィードバックがかけられるといった視標の動きも新たに考案し、再度遠方化刺激を施行してみる必要がある。

今回の実験で、遠方化刺激後に屈折値が近方化した例のあったことが、調節の弛緩を促すための視標移動方法自体の問題によるのか、それとも、個体が本来有する調節特性の違いによるものかは明言できない。しかし少なくとも、遠方化刺激で調節の緊張が緩和されると、調節機能の低下と自覚症状の上昇が生じなかった。このことから、調節の緊張緩和は、眼精疲労の軽減または回復に効果があるといえる。

## 文 献

- 1) **Duke-Elder S, Abrams D** : Anomalies of accommodation. In : Duke-Elder S (Ed) : System of Ophthalmology Vol. V. Ophthalmic optics and refraction. CV Mosby, St Louis, 559—578, 1970.
- 2) **鈴木昭弘** : 眼精疲労. 臨床眼科全書第 1 巻, 大塚任, 他(編) : 金原出版, 東京, 295—320, 1972.
- 3) **Gur S, Ron S** : Does work with visual display units impair visual activities after work? Doc Ophthalmol 79 : 253—259, 1992
- 4) **Gur S, Ron S, Heicklen-Klein A** : Objective evaluation of visual fatigue in VDU workers. Occup Med(Lond) 44 : 201—204, 1994.
- 5) **Wolska A, Switula M** : Luminance of the surround and visual fatigue of VDT operators. Int J Occup Saf Ergon 5 : 553—581, 1999.
- 6) **Iwasaki T, Kurimoto S** : Eye-strain and changes in accommodation of the eye and in visual evoked potential following quantified visual load. Ergonomics 31 : 1743—1751, 1988.
- 7) **Iwasaki T, Kurimoto S, Noro, K** : The change in colour critical flicker fusion(CFF) values and accommodation times during experimental repetitive tasks with CRT display screens. Ergonomics 32 : 293—305, 1989.
- 8) **Iwasaki T, Kurimoto S** : Objective evaluation of eye strain using measurements of accommodative oscillation. Ergonomics 30 : 581—587, 1987.
- 9) **Saito S, Sotoyama M, Saito S, Taptagaporn S** : Physiological indices of visual fatigue due to VDT operation : Pupillary reflexes and accommodative responses. Ind Health 32 : 57—66, 1994.
- 10) **Pigion RG, Miller RJ** : Fatigue of accommodation : Changes in accommodation after visual work. Am J Optom Physiol Opt 62 : 853—863, 1985.
- 11) **Jaschinski-Kruza W** : Visual strain during VDU work : The effect of viewing distance and dark focus. Ergonomics 31 : 1449—1465, 1988.
- 12) **Miwa T, Tokoro T** : Asthenopia and the dark focus of accommodation. Optom Vis Sci 71 : 377—380, 1994.
- 13) **西山文子** : VDT 作業が調節機能に及ぼす影響について. 日眼会誌 96 : 209—216, 1992.
- 14) **Nakamura Y** : Measurement of pupillary unrest in eyestrain. Jpn J Ophthalmol 40 : 533—539, 1996.
- 15) **Ishikawa S** : Examination of the near triad in VDU operators. Ergonomics. 33 : 787—798, 1990.

- 16) **Gratton I, Piccoli B, Zaniboni A, Meroni M, Grieco A** : Change in visual function and viewing distance during work with VDTs. *Ergonomics* 33 : 1433—1441, 1990.
- 17) 小島良宏, 青木 繁, 石川 哲 : VDT 作業者における近見反応. *北里医学* 22 : 620—626, 1992.
- 18) **Piccoli B, Braga M, Zambelli PL, Bergamaschi A** : Viewing distance variation and related ophthalmological changes in office activities with and without VDUs. *Ergonomics* 39 : 719—728, 1996.
- 19) **Bullimore MA, Gilmartin B, Royston JM** : Steady-state accommodation and ocular biometry in late-onset myopia. *Doc Ophthalmol* 80 : 143—155, 1992.
- 20) **Iwasaki T** : Effects of a visual task with cognitive demand on dynamic and steady-state accommodation. *Ophthalmic Physiol Opt* 13 : 285—290, 1993.
- 21) **Wolffsohn JS, McBrien NA, Edgar GK, Stout T** : The influence of cognition and age on accommodation, detection rate and response times when using a car head-up display (HUD). *Ophthalmic Physiol Opt* 18 : 243—253, 1998.
- 22) **Wolffsohn JS, Edgar GK, Stone HE, Williams M, McBrien NA** : Does over-accommodation occur when using aircraft head-up displays? *Aviat Space Environ Med* 70 : 666—673, 1999.
- 23) **Mon-Williams M, Wann JP, Rushton S** : Binocular vision in a virtual world : Visual deficits following the wearing of a head-mounted display. *Ophthalmic Physiol Opt* 13 : 387—391, 1993.
- 24) **Cho A, Iwasaki T, Noro K** : A study on visual characteristics of binocular 3-D images. *Ergonomics* 39 : 1285—1293, 1996.
- 25) **Miyao M, Ishihara S, Saito S, Kondo A, Sakakibara H, Toyoshima H** : Visual accommodation and subject performance during a stereographic object task using liquid crystal shutters. *Ergonomics* 39 : 1294—1309, 1996.
- 26) **Oohira A, Ochiai M** : Influence on visual function by a stereoscopic TV programme with binocular liquid crystal shutter and Hi-Vision TV display. *Ergonomics* 39 : 1310—1314, 1996.
- 27) **Hasebe H, Oyamada H, Ukai K, Toda H, Bando T** : Changes in oculomotor functions before and after loading of a 3-D visually-guided task by using a head-mounted display. *Ergonomics* 39 : 1330—1343, 1996.
- 28) **Mitsuhashi T** : Evaluation of stereoscopic picture quality with CFF. *Ergonomics* 39 : 1344—1356, 1996.
- 29) **Mon-Williams M, Plooy A, Burgess-Limerick R, Wann J** : Gaze angle : A possible mechanism of visual stress in virtual reality headsets. *Ergonomics* 41 : 280—285, 1998.
- 30) **Howarth PA** : Oculomotor changes within virtual environments. *Appl Ergon* 30 : 59—67, 1999.
- 31) **Morse SE, Jiang BC** : Oculomotor function after virtual reality use differentiates symptomatic from a symptomatic individuals. *Optom Vis Sci* 76 : 637—642, 1999.
- 32) 岩崎常人, 田原昭彦 : パララックス・バリア方式 3D ディスプレイによる眼精疲労. *あたらしい眼科* 17 : 1719—1725, 2000.
- 33) 岩崎常人, 秋谷 忍, 野呂影勇, 鳥居塚崇 : 仮想現実の視機能への影響と眼科学的考察. *ヒューマンサイエンス* 8 : 87—94, 1995.
- 34) **Tucker J, Charman WN** : Reaction and response times for accommodation. *Am J Optom Physiol Opt* 56 : 490—503, 1979.
- 35) **Culhane HM, Winn B** : Dynamic accommodation and myopias. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 40 : 1968—1974, 1999.
- 36) 吉竹 博 : 疲労自覚症状と全体的な疲労感の関係. 産業疲労—自覚症状からのアプローチ. 労働科学研究所, 神奈川, 109-131, 1981.
- 37) 日本産業衛生学会・産業疲労研究会 : 新装産業疲労ハンドブック (労働基準調査会). 362—363, 1995.
- 38) 鈴村昭弘 : 眼疲労. *眼科* 23 : 799—804, 1981.
- 39) **Daum KM** : Predicting results in the orthoptic treatment of accommodative dysfunction. *Am J Optom Physiol Opt* 61 : 184—189, 1984.
- 40) **Daum KM** : Accommodative dysfunction. *Doc Ophthalmol* 55 : 177—198, 1983.
- 41) **Cooper J, Feldman J, Selenow A, Fair R, Buccerio F, MacDonald D, et al** : Reduction of asthenopia after accommodative facility training. *Am J Optom Physiol Opt* 64 : 430—436, 1987.
- 42) 近江源次郎, 木下 茂 : 難治性眼精疲労患者に対する調節麻痺剤点眼治療について. *臨眼* 43 : 659—663, 1989.
- 43) 渥美一成 : テクノストレス眼症の分類と治療. *日本の眼科* 61 : 1334—1337, 1990.
- 44) 近江源次郎, 木下裕光, 木下 茂 : 塩酸シクロペントラート単回点眼の調節・瞳孔に及ぼす影響について. *日眼会誌* 95 : 1099—1104, 1991.
- 45) **Rosenfield M** : Accommodation and myopia. In : Rosenfield M, et al (Eds) : *Myopia & near work*. Butterworth Heinemann, Oxford, UK, 91—116, 1998.
- 46) **Randle RJ** : Responses of myopes to volitional control training of accommodation. *Ophthalmic Physiol Opt* 8 : 333—340, 1988.
- 47) **Ebenholtz SM, Zander PA** : Accommodative hysteresis : Influence on closed loop measures of far point and near point. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 28 : 1246—1249, 1987.
- 48) **Ebenholtz SM** : Accommodative hysteresis as a function of target-dark focus separation. *Vision Res* 32 : 925—929, 1992.
- 49) **Hung GK, Ciuffreda K** : Adaptation model of nearwork-induced transient myopia. *Ophthalmic Physiol Opt* 19 : 151—158, 1999.
- 50) **Rosenfield M, Gilmartin B** : Accommodative error, adaptation and myopia. *Ophthalmic Physiol Opt* 19 : 159—164, 1999.