視線方向と眼の焦点調節

正会員 武田 常 広[†], C. Neveu^{††}, L. Stark^{††}

Eye Accommodation Evoked by Line of Gaze

Tsunehiro Takeda[†], Carles Neveu^{††} and Lawrence Stark^{††}

Abstract In this paper, slight near accommodation associated with vertical eye movement is measured dynamically for the first time with the aid of a newly developed three-dimensional optometer III. The amount of accommodation decreases when the target position is moved towards the subject. The results agree with P. H. Ripple's results (1952) on the accommodation induced at far points, but contradict with the accommodation evoked at near points. The results also differ on the accommodation evoked by horizontal eye movement. A plausible explanation is presented by comparing the response of the pupil diameter with the accommodation response.

1. ま え が き

眼球運動, 焦点調節, 瞳孔反応は眼の3大機能と呼ばれ, 相互に影響し合っていることが知られている^{1)~4)}. 例えば, 近く of 物を見る時, 眼は両眼を内寄せし, 近方調節すると共に, 縮瞳する. これを近見反応という. 眼を内寄せすると近方調節が引き起こされ (Vergence Accommodation, V/A), 調節すると眼が内寄せされる (Accommodation Vergence, A/V)⁵⁾. この眼の3大機能の制御系は triad system と呼ばれ⁶⁾, 1960年代, その特性を明らかにする研究が盛んに試みられた. しかしながら, 眼が動く条件下で焦点調節と瞳孔反応を計測できる測定機が開発できなかったため, 1970年代以降, 研究は充分進展しなかった.

視線方向によって焦点調節が影響を受けるという考

えは, 何人かの研究者に受け入れられ, その仮定に基づいた研究もいくつかなされている⁷⁾⁸⁾. しかしながら, その仮定を裏づける報告はほとんど見あらず, 1952年の P. H. Ripple の論文が唯一のものであると思われる⁹⁾. Ripple は, 57名の老眼になる前の若い被験者を用いて, 単眼で視標を見ている時, 視線の上下左右方向変化によって, 如何に近点が変化するかを調べた. また, そのうち20名について, 視線の上下方向変化による遠点の変化も調べた. 表1はそれについてまとめたものであり, 以下のように主張されている.

- (1) 視線を下方に向けることによって, 近点, 遠点ともに, 近方にシフトする.
- (2) 視線を内側に寄せることによって, 同様に近点は近方にシフトする.
- (3) 上下方向に眼を動かした時, 近点変化の方

キーワード: 焦点調節, 視線方向, 眼球運動, 瞳孔径, 他覚的計測

1991年6月1日, 1991年日本人間工学会学術講演会で発表

1991年7月26日受付, 1991年10月4日再受付

[†] 製品科学研究所 (〒305 つくば東 1-1-4, TEL 0298-54-6783)

^{††} カリフォルニア大学バークレイ校

[†] Industrial Products Research Institute (1-1-4, Higashi, Tsukuba-shi, 305, Japan)

^{††} Department of Physiological Optics and of Engineering Science, University of California, Berkeley (Berkeley, California 94720, USA)

表 1 20名の被験者に関する上下方向の視線変化に伴う遠点と近点の変化と、56名の左右方向の視線変化に伴う近点の変化 (Ripple 1952 より)
Shift of near and far points of 20 normal presbyopic individuals with respect to gaze direction (cited from Ripple, 1952).

上下の視線方向 (度, $n=20$)	遠点 (D)	近点 (D)	左右の視線方向 (度, $n=56$)	近点 (D)
20 (上)	1.5	-10.1	20 (外側)	-10.4
0	0.55	-11.28	0	-10.6
-20 (下)	0.075	-12.25	-20 (内側)	-11.0
-40 (下)	-0.45	-13.63	-40 (内側)	-11.4

が、遠点の変化より約2倍大きい。

我々は、従来測定に際し禁止されていた眼と頭の動きに規制を加えず、自由な観察条件の下で眼の3大機能と、頭の動きを同時にリアルタイムで計測可能な測定機、3次元オプトメータⅢ (TDOⅢ: Three-dimensional OptometerⅢ)を開発した¹⁰⁾¹¹⁾。この3次元オプトメータを用いて、見かけの奥行き知覚によって調節が誘発されることを発見したが、同時に視線の上下方向変化によって、小さな調節が引き起こされることも見つけられた¹²⁾。しかしながら、その研究では、視線の上下方向変化が調節に及ぼす影響については将来の課題として残された。

本論文の目的は、視線方向の変化が焦点調節に対して及ぼす影響を、TDOⅢを用いて動的、他覚的に計測して明らかにするとともに、Rippleの結果と比較することである。

2. 測定法

2.1 3次元オプトメータⅢ

すでに動作原理を報告した3次元オプトメータ (TDO)¹⁰⁾を改良し、眼と同時に頭をも自由に動かせる3次元オプトメータⅢ (TDOⅢ)¹¹⁾を使用した。TDOⅢは左右50°、上下40°の視野内の、左右40°、上下30°の測定可能領域中を、眼を自由に動かして両眼で見ているときに、眼の調節、視線方向、瞳孔径を測定可能である。測定眼は左眼であり、頭は顎台に固定する。1眼をアイパッチで覆うことによって、容易に片眼による視覚実験を行うことができる。眼のアライメントは、2系統のテレビモニタを用いることによ

写真 1 3次元オプトメータⅢ (TDOⅢ) と、それに取り付けられた Badal 視標系
The TDOⅢ and the Badal stimulator used.

って*、初めての被験者でも数分以内に可能であり、2回目からはさらに容易になり、多くは10秒程度で完了する。また、TDOⅢは、散瞳剤や歯形を使用する必要がなく、測定が容易になっている。

調節と瞳孔径の変化の測定精度はそれぞれ ± 0.125 D (Diopter)、 $\pm 2\%$ であり、現在利用可能な測定機の最高水準に達している。眼球運動の測定のノイズレベルと測定帯域は $\pm 0.15^\circ$ 、6.4 Hz (視角 20° p-p)である。TDOⅢの視線方向の測定精度は、 $\pm 0.25^\circ$ である。

2.2 Badal 視標系

TDOⅢの側面で眼の回旋点に一致する点に取り付け、上下方向に回転可能なBadal視標系*を設計した。視標系は幅40 cm、長さ120 cmのボードの上に配置され、手で上下方向に視標方向が変化できるようにした(写真1)。視標は、プロッタ (HP Color Pro 7440A)のペンホルダ上に取り付け、マイクロコンピュータで位置を制御した。Badalレンズは焦点距離75 mmのものを使用し、プロッタの位置精度は0.025 mmであったので、 $1/300$ Dの精度で、 $+25 \sim -12.5$ Dまで視標の位置を変えることができた。視標は、図1に示したようなものをフィルムに印画し、背後から懐中電灯によって照明して用いた。この視標は広い空間周波数を持っているため、像がぼけても充分視覚刺激になるという特徴を持っている。

このBadal視標系を見た時と、実視標を -5 、 -4 、 -3 、 -2 、 -1 Dに置いて見た時の調節応答の一例を図2に示した。縦軸は両応答ともに -1 D ~ -5 Dの範囲を示している。実視標は、光学ベンチ上に置いた図1の視標を手で動かして示した。段階状の線

* 1つのモニタは眼を光軸上から撮影して上下・左右方向のアライメントを助け、他のモニタは眼を斜め下方から撮影して前後方向のアライメントを助ける。

* 視標を見込む角度を不変に保ちつつ、視標のDiopter値(距離の逆数)を視標の移動距離に比例して変えられる視標系¹³⁾。

図 1 写真フィルムに焼き付けられて用いられた視標
The target used.

図 2 光学ベンチ上を動かした実視標に対する応答(上)と、Badal 視標系を見た時の応答(下)
The response of subject GR with monocular vision while looking at real target (Upper) and Badal stimulator (Lower).

は、視標の位置を示している。

両方の応答ともに、いわゆる調節ラグがあるが、実視標の方が調節量が大きく調節ラグが少ない。Badal 視標はその位置にかかわらず視角一定であるが、実視標は近づくにつれて視角が大きくなるので、より豊富な調節刺激となる。よって、図のように実視標に対し大きな調節反応を示したのは当然であると考えられる。このことを除いて、両反応は大略よく一致しており、Badal 視標系が正確に作られていると同時に、TDO III も正しく動作していると判断した。

2.3 TDO IIIの校正

TDO と同様に、TDO III は、視線方向によって誤差を生じないように慎重に校正されている。すなわち、異なる屈折力を持つ人工眼を、視野範囲内で視線方向を変えて測定し、その値に対して最小二乗法に基づいた多変数多項式校正行列を用いて校正している¹⁰⁾。TDO III の視線方向の計測は、角膜頂点からの反視光(第1プルキニエ像)をガルバノミラーでトラッキングする方法を用いているので、人眼と人工眼の角膜の反射率の差は誤差要因にならない。また、焦点調節の測定も、2つのLEDの網膜上の像が一致するようにサーボ系を組んで測定しているの、これも人眼と人工眼の網膜からの反射率の変化は、誤差要因にならない。したがって、人工眼を用いた校正は信頼性が高い。

図 3 Badal 視標を 2D から -10 D まで、0.5 D/s で動かしたとき(直線)の応答(実線)と、stigmatoscope に対する応答 (○印は平均値で、バーが標準偏差)

The comparison with the TDO III data (continuous line) with the stigmatoscope data (symbols ○ show mean value and bars show standard deviation). The stimulus is moved from 2 to -10D with the speed of -0.5D/s in the TDO III measurement.

図 4 暗室中にうしろから照明された視標を 0 D に置き、視標系を水平から 8°あるいは 16°下方に下げた後、再び元に戻した時の 2 名の被験者の調節応答と眼球位置 (Ver. 上下)

The responses of accommodation (Acc.) and vertical eye movement (Ver.) with respect to the change of direction of gaze. The target was presented at 0D in a totally dark room illuminated by back light. The vertical division is equal to 1D for accommodation, 15° for eye movements.

次に、TDO III の信頼性を実際の測定で検証するために、同一被験者を用いて、TDO III とカリフォルニア大バークレー校の stigmatoscope*を用いて測定値

* Badal レンズ系を 2 組用いて、1 つは視標を提示し、他の 1 つの系の中の視標を被験者がダイヤルで動かして一致させ測定する、自覚的調節測定機。瞳孔径が変化しても、視標系と測定系、双方に同じく影響するため、焦点深度の影響を除去できる利点を持つ¹⁴⁾。

を比較した(図3)．TDO IIIでは、視標が2 Dから-10 Dまで-0.5 D/sの速さで近づけられた．前もって、この速さは速すぎることはなく、被験者の調節力を充分引き出す速さであることを確認した．図中の直線が視標の動きを示す．

他方、stigmatoscopeでは、視標を+1 Dから-7 Dまでほぼ1 Dおきに近づけて提示し、10回測定を行い、その測定値の平均をとった．TDO IIIの測定において、対応する視標が提示された位置に、その平均値を“○”のシンボルで示し、同時に分散量をバーで表示した．TDO IIIの測定値は、全体にstigmatoscopeの測定値よりわずかに遠方側に出ているが、そのことを除いて、両測定値はよく一致しているといえる．よって、調節測定の相対値は信頼性が高いと判断した．

2.4 被験者

26, 30才の正視男子大学院生(GR, LC)と、32才、-5.5 Dの男子近視者(CM)を被験者とした．被験者の調節力を、Badal 視線系において、視標をランプ上に動かして測定したところ、それぞれ4.0, 4.5, 3.25 Dであった．3名共に、視覚関連の研究をしており、視覚実験には豊富な経験を持っていたが、TDO IIIを用いた実験は初めてであり、実験の目的も知らされていないかった．

3. 実験結果

3.1 視標の上下方向の影響

他の視覚刺激が混入しないように、視標は暗室で提示され、視標の動きしか被験者に見えないように注意した．予測しない視覚刺激が見えないようにするため、視標の明るさは数 cd/m²とわざと暗くした．視標は、水平状態から、8°あるいは16°だけ下方に2つの速度で変化させ提示された．2つの速度は“fast”“slow”であり、その速さはラフに決定された．

0 Dでの位置で提示された視標が、“fast”モードで動かされた時の被験者GRとLCの調節(Acc.)と、上下の視線方向(Ver.)の反応例を、図4に示した．視標は、被験者GRでは水平から8°, LCでは下方16°に変化させられた例を示した．ただし、TDO IIIの光学中心は10°下向きに向けられているので、図中、Ver.の0°は実際の空間では10°下方を意味している．

図中、GRの調節反応は多少遅れているが、全体としては、LCのようにVer.とAcc.の反応はよく同期し、視標が下方に動かされると、近方調節が引き起こされた．同様に、GRでは多少の変化が見られるが、

図5 被験者GRが、-3 D(33 cm)の位置に8°ずつ離れて田の字状に配置した図1の視標を順次見ている時の応答

The response of GR while he is looking at 9 calibration points on a grid separated by 8° each at -3D (33 cm).

下方に視標が止められている間、調節は全体として止まっており、再度視標が引き上げられた時、ほぼ正確に元の値に戻った．速度が変わられても、この反応はほぼ不変であった．図に見られるように、調節反応量は、視標が動かされた角度にほぼ比例していた．視標を提示する位置を、-2, -3, -4 Dのように次第に近づけた時、調節反応量は次第に小さくなる傾向を示した．図示しなかった被験者CMの反応も同様な傾向を示した．

3.2 視線の左右方向の影響

前節の反応が単にアーチファクトでないことを確認するため、互いに8°ずつ離れた位置に、図1の視標を田の字型にボード上に貼り付け、-2, -3, -4 Dの位置に置いて、視覚反応を測定した．図5は-3 D(33 cm)の位置に置いた視標を見ている時の被験者GRの調節(Acc.), 眼の左右(Hor.), 上下(Ver.)角を示した．図は見易くするため、測定の一部を表示している．

視線の上下方向変化に伴う調節量は比較的大きく、眼を下に向けた時、近方調節が起き、眼を上に向けると遠方調節が引き起こされている．しかしながら、眼の左右方向のみの動きの場合は、Hor.の1, 2, 3, 4番目の変化に対応するところで見られるように、調節量はわずかであり、その方向も一定の傾向が見られない．

表2に、-3 Dに置いた視標を3回見た時の調節反応量をまとめて示した．調節量は、調節が落ちついた部分のデータを数秒間平均して、その状態の調節と定義し、視線方向が変化した前後の差から求めた．表中、U, D, L, Rはそれぞれ視線が上下左右に向けられたことを意味し、数字は角度である．数は測定された

図 6 Badal 視標系の方向を水平(0°), 8°下方, 16°下方に設定し, 視標を 2D から -10D まで -0.5 D/s で被験者に近づけた時の調節応答 (LC に 1 つ欠測値がある)

Accommodative responses of the three subjects while they are watching the target in the Badal stimulator which is moved from 2 to -10D with the speed of -0.5D/s. As for the subject LC, we missed to measure the response of -8° direction.

表 2 被験者 GR が, -3D (33 cm) の位置に 8° ずつ離して田の字状に配置した図 2 の視標を順次見ている時の応答を 3 回分まとめたもの (D8: 下方へ 8°, D16: 下方へ 16°)

The accommodation evoked by the vertical and the horizontal eye movements gazing at a targets placed at -3D.

	D 8	D 16	U 8	U 16	R 8	R 16	L 8	L 16
数	16	19	14	18	15	12	12	11
合計(D)	4.8	12.2	-4.3	-11.3	-1.2	1.3	0.8	1.3
平均(D)	0.30	0.64	-0.31	-0.63	-0.08	0.11	0.07	0.12
パーセント(%)	7.5	16.1	-7.8	-15.8	-2.0	2.8	1.8	3.0

回数で, 近方調節をプラス, 遠方調節をマイナスとして誘発された調節の総量を合計として示し, 平均値を出した. 比率は, 被験者 GR の調節力に対する割合を示した.

視線の上下方向変化に伴う調節は, 大きさ, 方向共によくつじつまが当たっているが, 左右方向変化に伴う調節は, 大きさが極めて小さく, R8, R16 に見られるように, 同じ右側を向いても近方調節になったり遠方調節になったりしている. -2D, -4D に置かれたときの反応も, 大きさを除いて同じ傾向であった. よって, 左右方向の視線変化に伴う調節は, アーチファクトであると判断した.

3.3 視線方向とランプ応答

次に, 水平, 8° および 16° 下方に Badal 視標系を設置し, 視標を 2D から -10D まで -0.5 D/s の速さ

で近づけた時の応答を測定した. 測定は 3 回行い, その平均値を図 6 に示した. ただし, 被験者 LC の 8° 下方の測定は欠測値となっている.

一般に, 被験者が充分な視覚刺激を得られない場合, 調節は offset level とか dark focus, intermediate resting position, empty myopia¹⁵⁾ などいろいろに称されるような, 遠点と近点の間のある一点に漸近する¹⁶⁾. しかしながら, 本研究で用いた図 1 の視標は広い MTF を持っているため, 視標が被験者の調節域より大きくはみだしても, 充分視覚刺激になっていたため, 遠点・近点にほぼ保持されていた. ただし, 被験者 GR では, 遠点より遠方におかれた視標に対する応答において, わずかに offset level に近づく様子が見られた.

図 6 は, 方向を変えて視標を提示した後漸近させた刺激に対し, 調節応答が極めて明瞭に近点に収束していることを示している. すなわち, 遠点は視標が下げられるにしたがい近方にシフトするが, 近点は上下の視線方向の変化から影響を受けないことがわかる.

4. 考 察

本実験によって以下の点が明確になった.

- (1) 視線を下方に向けると, 近方調節が誘発される.
- (2) その量は, 焦点位置が遠いほど大きい.
- (3) 近点は, 変化しない.
- (4) 視線の左右方向の変化によって, 調節は誘発されない.

この結果は, (1) において Ripple の自覚測定によ

図7 図6の条件下における、被験者GRの調節 (Acc.)と瞳孔径 (Pup.)の応答
Accommodation and Pupil diameter responses of subject GR under the same condition of Fig. 6.

結果と一致するが、(2)～(4)については異なる。

2つの研究結果が異なる理由はいくつかあると思われるが、まず第1の理由は、近点は生理的な限界であり、水晶体の弾性限界によって決定する¹⁷⁾、という広く一般に認められた事実に関連する。すなわち、近点が視線方向によって変化する可能性は少なく、本研究の結果の方が妥当性が高いものと思われる。第2の理由は、自覚測定における判断の変化などに帰着できるのではないと考えられる。被験者は、近方を見る時、視線を下方にして見る方が多少見やすく感じる可能性がある。また、一般に判断基準は大きく変動するものである。

第3に、本研究ではデータの信頼性が一部問題であったため、充分検討しなかった瞳孔径の影響もあるものと考えられる。図7は図6と同じ条件で測定した、被験者GRの調節反応と瞳孔径を示した。図には、大きな遅れや、不規則な反応が見られるが、すべての応答に近方調節に伴う2 mm程度の縮瞳が見られる。このように、近方を見た時大きく縮瞳することによって、焦点深度が深くなり、Rippleの実験において、結果的に自覚的な近点が大きく近方にシフトした可能性が高い。もしこれが事実なら、近点は、本来調節の一番近い点を表すので、従来行われていた自覚測定における“近点”は、注意して扱う必要があるということになる。

他方、左右の視線方向変化に伴う調節については、原因は定かではない。この相違の原因を正確に明らかにするには、まだ多くの実験を行うことが必要である。本装置では、TDO IIIの上下方向の測定範囲は30°しかなく、視標を載せたボードを大きく動かすことが

困難であり、眼の回転角度を16°に制限したため調べられなかったが、視線の上下方向変化による調節の限界があるのか、またその定量的な量はどの程度なのかといった新たな疑問も生まれた。このように、残された疑問点も多いが、視線の上下方向変化の調節への影響が明確にされた。

5. む す び

長らく客観的なデータが要望されていた、視線方向に伴う焦点調節について、その本態が他覚的測定によって明らかにされた。定量化についてはまだ多くのデータを収集する必要があるが、本論文の結果は、多方面において示唆に富むことと思われる。

例えば、VDT画面の適正な高さは、画面中心を見た時、視線が水平面により約20°下方になる時であると示唆されているが¹⁸⁾、必ずしも充分な根拠があるわけではない様子である。このVDTの配置を考える上でも本論文の結果は参考になろうし、テレビの設置場所の選定根拠にもなりうる。また、ICの検査など、長時間顕微鏡作業を行う労働者において、意図しない調節に伴う、数々の労働衛生上の問題点が指摘されているが、こういった問題にも本論文の研究が示唆を与えることを期待する。

【参 考 文 献】

- 1) E. F. Fincham: "The Accommodation Reflex and Its Stimulus", Brit. J. Ophthal., **35**, pp. 381-393 (1951)
- 2) F. W. Campbell and G. Westheimer: "Factors Influencing Accommodation Responses of the Human Eye", J. Opt. Soc. Am., **49**, pp. 568-571 (1959)
- 3) P. B. Kurgel and J. Pola: "Stimuli for Accommodation: Blur, Chromatic aberration and gaze", Vision Res., **26**, pp. 957-971 (1986)
- 4) 笠井健: "眼の焦点調節機構", 生理光学第5章, pp. 115-137 朝倉書店 (1975)
- 5) 仁田正雄: "眼科学", pp. 51-81, 文光堂 (1968)
- 6) G. A. Myers and L. Stark: "Topology of the near response triad", Ophthal. Physiol. Opt., **10**, 5, pp. 157-181 (1990)
- 7) S. G. Hill and H. E. Kroemer: "Preferred Declination of the Line of Sight", 29th Proc. Human Factors Society, pp. 625-629 (1985)
- 8) H. Heuer, et al.: "The Effect of Sustained Vertical Gaze on the Resting State of the Vergence System", Vision Res., **26**, pp. 1337-1344 (1988)
- 9) P. H. Ripple: "Variation of Accommodation in Vertical Direction of Gaze", American J. Ophthalmology, **35**, pp. 1630-1634 (1952)
- 10) T. Takeda, Y. Fukui and T. Iida: "Three-dimensional Optometer", Applied Optics, **27**, 12, pp. 2595-2602 (1988)
- 11) 武田, 福井, 飯田: "三次元オプトメータIII (TDO III) の特性", 日本眼科学学会誌, **11**, 1, pp. 89-97 (1990)
- 12) T. Takeda, T. Iida and Y. Fukui: "Dynamic Eye a Accommodation Evoked by Apparent Distances", Optometry and Vision Science, **67**, 6, pp. 450-455 (1990)

- 13) 武田常広：“VDTによる視覚機能障害(2)―調節機能変化の測定法―”，光学技術コンタクト，**22**, 7, pp.9-18 (1984)
- 14) F. Sun and L. Stark：“Dynamics of Accommodation: Measurements for Clinical Application”，Experimental Neurology，**91**, pp. 71-79 (1986)
- 15) 飯田健夫：“輝度低下における眼球屈折力”，製品科学研究所報告，**78**, pp.31-35 (1977)
- 16) H. W. Leibowitz and D. A. Owens：“Night Myopia and the Intermediate Dark Focus of Accommodation”，J. Opt. Am., **65**, 10, pp. 1121-1128 (1975)
- 17) L. Stark：“Presbyopia in Light of Accommodation”，In L. Stark and G. Obrecht eds., pp.264-274, Presbyopia, Fairchild Publications, New York (1987)
- 18) A. Cakir, D. J. Hart and T. F. M. Stewart：“Visual Display Terminals”，pp. 153-182, John Wiley & Sons (1980)

たけだ つねひろ

武田 常広 昭和52年，東京大学大学院計数工学博士課程修了。同年，通産省製品科学研究所に入所。現在，応用人間工学部情報機能課主任研究官。1990年，米国カリフォルニア大学バークレー校招聘研究員。人間の視覚情報処理システム，VDT作業による視覚疲労などの研究に従事。工学博士。正会員。

チャールズ ネベウ

Charles Neveu 1983年，Wisconsin大学卒業。1984年，同大学修士修了。Sandia National lab. Advanced Decision Systemsなどの研究員を経て，1989年から，California大学Berkeley校博士課程在学中。

ローレンス

スターク

Lawrence W. Stark 1942年，Columbia大学卒業。1954年からYale大学，1960年からMIT，1965年からIllinois大学の各大学で教鞭をとり，1968年からCalifornia大学Berkeley校基礎工学と生理光学における教授。人間の視覚における脳の制御機構を制御工学的手法によって研究。医学博士。名誉工学博士。