

ステレオ映像の及ぼす生体への影響： 調節・輻輳の刺激が矛盾すると何が起こるか

鵜飼 一彦

早稲田大学 理工学部

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

1. はじめに

ステレオ映像 (stereoscopic image) を見ることによって眼の疲れを訴える人がいる。眼の疲れは、映像を見ること、視覚ディスプレイを伴うコンピュータ作業を行うこと、ちらついた光を見ること、特定のパターンを見ること、などによって引き起こされるが、ステレオ映像による疲労はこれらよりも強いと彼らは訴える。疲労をはじめとする、ステレオ映像の生体への影響を考えるには次のようなステップが必要と考えられる。(1) 三次元映像とは何か、三次元映像とステレオ映像は何が異なるか。(2) ステレオ映像はどのような方法で見ると、そこにはどのような問題がありうるのか？(3) ステレオ映像(あるいは普通の映像)を見ているときにはどのように眼が機能しているのか？(4) その機能は疲労などに関係するのか？もし関係するとしたらどのように？(5) そもそも疲労とは何か？(6) (映像による) 疲労は測定できるのか？

ここでは(1)、(2)に関して、2節で簡単に触れ、(3)については、関連している眼の機能の基礎を3節で復習し、4節で最近の研究の結果について解説する。しかしながら(4)~(6)に関しては、答えるのが非常に困難であり、期待された方には申し訳ないが、ここでは割愛させていただく。疲労は、主観的なものであり、その人が疲労しているといえ(嘘をついているという話はなしにして)疲労しているのである。これを客観的に捉えるのはほとんど不可能

であり、可能なのは、主観的な疲労感と相関する客観的な指標を見つけることである。このような道筋はここで扱うには荷が重く、他の適当な方の解説を待ちたい。疲労のメカニズムに関しても分かっていることは非常に少ないと思う。その中で、英国のWilkins¹⁾は、視覚ストレスに注目し、ストレスの解明を目指している。たとえば、特定のパターン(細かい縞など)を見てみると脳の特定の場所を強く刺激し、それによってその部位が酸素不足を引き起こし、結果として片頭痛などが生じるという考えである。したがって、片頭痛を起こしやすい人は眼精疲労も起こしやすいとしている。ストレス(応力, stress)が引き起こす歪み(ひずみ, strain)の一つが疲労であると考えれば、ストレスが解明されれば、のちに疲労のメカニズムも解明される可能性がある。ちなみに、細かい縞などの強い刺激により脳の特定期部位が反応し、そこから脳全体に興奮が広まり、抑制系の不完全さから脳全体が同期して興奮すればパターンによるてんかん発作となってしまう。これは映像(映像に限らず視覚刺激全般にいえることである)の生体影響の別の課題である。

2. 奥行知覚・三次元映像・ステレオ映像

2.1 奥行知覚

奥行知覚にはいくつかの手がかりがあり、大別すると、心理的要因と生理的要因に分けられる。前者には、パースペクティブ、重なり、空気透視、影、見かけの大きさ、きめ、などがある。また、後者には、両眼視差、運動視差、調

節、輻輳などがある。教科書的にはこのように書かれているが、もちろん前者だけでも奥行の知覚は可能であり、そうでなければ、写真・絵画において全く距離感が得られない。映像においては自分自身が動かなくともカメラの動きにより一種の運動視差が得られ、これにより奥行感を得る。3D-CG (3-dimensional computer graphics) などはこの要因を主として用いる。これに自然な心理的要因に加えている。一方で、調節と輻輳は奥行感にどの程度影響を与えているか、よく分からない。調節はぼけ具合と関係して奥行感に寄与するが、これは心理的な要因に含まれ、レンズ調節の強さを感覚として捉えて、そこから奥行感を得ているかどうかは疑問である。輻輳についても同様で、強く輻輳をかけると視対象が小さく見えてしまうことから、大きさの恒常性にいくぶんかは寄与していると考えられるが、奥行知覚が可能かどうかは分からない。両眼視差は、輻輳の効果を相殺すると左右眼の網膜像差となり、この差は生理的に奥行感を生じさせる。

ここに挙げた、すべての要因を映像で再現できれば、それは真の三次元映像といえる。一般的なステレオ映像では左右眼用に2枚の映像を用意することによって視差を作り、それによって奥行感を生じさせている。真の三次元映像の実用化に向けてはいろいろな開発が行われているが、いまだ安価に実用的に扱えるシステムはない。一方で、最近の映像機器の大画面化により、映像から得られる臨場感は増加しており、後述するように大きな問題点を含むステレオ映像をあえて使用する必要はない、という考え方も強い。

2.2 ステレオ映像提示の方式による生体影響

ステレオ映像の左右眼用の映像の分離法にはいくつかの方法が知られている。ステレオ映像が持っている疲労を与える可能性のほかに、それぞれの方式が持つ固有の特徴が、疲労あるいはその他の影響を視聴者に与える可能性がある。

赤青めがねなどによる左右像の分離方式(anaglyph)は、現行の家庭用テレビジョンシス

テムに何らの変更・追加を加えることなく実施できる方式として使用されることがある。しかし、両眼の網膜像の色の違いは視野闘争を引き起こす。この状態が長時間続くことによる影響は未知の点が多い。少なくとも疲労を引き起こすことは間違いない。

偏光フィルター方式も劇場映画やテーマパークのアトラクションなどでよく使用される。この方式は、透過率が悪いためにやや映像が暗くなること、光とフィルターの偏光軸が直交していても若干の透過光があるためにクロストークがあることが知られているが、実用的には大きな問題ではない。最大の問題点は、頭を傾けたときに偏光軸が変わってしまうことで、90度頭を傾けると左右像が逆転する。45度傾けた場合には2枚の画像が同じ強さでミックスされて両眼に入ってしまう。

液晶シャッターめがねではフリッカーが気になる。通常のTV方式と同程度のフリッカーに押さえようとする、倍速のシステムが必要となってしまう。フリッカーは疲労の大きな原因である。また、めがねにシャッターを組み込むために電源や回路、液晶パネルが必要となる。これはめがね重量の増加につながる。

HMD (head mounted display) では、頭を動かしても映像がついてくる。これは自然には起きない特殊な現象であり、前庭の活動を狂わす可能性がある²⁾。

パララックスバリア方式ではステレオ映像を見ることのできる位置が固定されてしまう。また大勢で同時に楽しむことが困難である。コンピュータの画面など、一定の位置で個人が楽しむには問題が少ない。

2.3 ステレオ映像の問題点

ステレオ映像固有の現象として強い疲労感がある。方式にかかわらず存在するため、ステレオ映像の原理そのものに付随する現象と考えられている。自然な環境や二次元の映像と異なる特徴として、ステレオ映像では両眼視差の付与により、輻輳あるいは網膜像差が生じて視対象が飛び出して見える。しかし、映像が存在する

のはスクリーン面上であり、調節はスクリーン上にあっていないと像がぼけてしまう。この輻輳と調節の刺激上の矛盾が疲労の原因であると考え、ステレオ映像の特徴とよく合う。かくして、輻輳・調節刺激矛盾説が広く信じられている。この説の真偽は、疲労というものがどのようなものであるか分からないために確認がはなはだ困難である。ステレオ映像で付与する両眼視差が不自然に大きくなりがちで、そのような過度の両眼視差を継続して見るのが、脳の特定の機能に過度な負荷を与えて疲労につながる、という考えも捨て切れない。ここでは、疲労の機序を考えることを放棄して、それ以前の問題として、ステレオ映像のような刺激を見ているときに調節や輻輳はいかなる反応を示しているか、という点について次節以降で述べる。そんなこともまだ分かっていないのかと言われそうであるが、詳しくこれを調べた報告はない、というのが現状である。

3. 調節と輻輳の機能

3.1 調節・輻輳フィードバック制御系

調節制御系は、視対象までの距離を入力とし、レンズの厚み変化を出力とするフィードバック制御系である。誤差信号は焦点はずれ量である。直接的には網膜像のぼけを最小にするシステムであるが、それを中心に記載するとかえって分かりにくくなってしまふ。視対象までの距離（逆数）、レンズの厚み変化により現在ピントの合っている場所までの距離（逆数）はディオプター（D）という単位で記述でき、両者の単純な差が焦点はずれ量である。焦点はずれ量と実際に検出される網膜像のボケ具合は密接な関係があるが、一つ注意しなければならないのは、調節過剰であっても調節不足であっても、網膜像のボケ具合からは判定できないことである。

輻輳眼球運動の制御系は、やはり、視対象までの距離を入力とし、両眼の視軸の交点までの距離を出力とする制御系である。誤差信号は距離のずれであるが、調節の場合と同様、実際に

検出されているのは距離ではなく、両眼の網膜像のずれである。

後述するように、調節の制御系も輻輳の制御系も、大きく速く運動する成分とゆっくりと細かく動く成分に分けられる。表現は異なるが、多くの研究者によりこの二相性は指摘されている³⁻⁵⁾。

3.2 調節ラグと固視ずれ

1970年代の調節の主要なテーマは調節安静位⁶⁾であった。横軸に調節刺激（距離の逆数）、縦軸に調節反応（距離の逆数）をとり、静的な調節を調べた結果をプロットすると、理想的には45度の直線となるはずであるが、実際には、図1に示すように、このグラフの傾きは理想的な条件よりも小さい。このグラフと45度の直線の交点は、暗黒中などの調節無刺激条件下での反応（調節安静位）とほぼ一致していた。交点よりも近方側では調節不足（調節ラグ）、交点よりも遠方側では調節過剰な状態（調節リード）となっている。傾きは刺激の条件により様々に変わるが、片眼では0.8前後しかないことから、調節制御系はずいぶん不正確なことがあるのが分かる。

固視点への輻輳がずれていると対象が二重に見えてしまう。したがって、固視しているときの輻輳は正確であると考えがちである。しかしながら、ある程度の範囲ならば、固視点と異なった奥行にある物体も融像可能である。ならば、実際はどこか仮想的なところに輻輳が合っていて、今固視しているところもたまたまその融像の範囲に入っているにすぎないとも考えることもできる。この状態は視覚実験で、左右眼に異なった刺激を与える場合に、融像のための視標とは別にノニアスと呼ばれる左右眼のずれを調べるための視標を用いるのでご存知の方も多いと思う。このずれを fixation disparity（固視ずれ、日本ではほとんど無視されているので日本語の用語は正確でないかもしれない）という。この fixation disparity は、補正してやろうと視標をずらしたりプリズムを装用させたりしても、簡単には補正されず複雑な変化を示す⁷⁾。個人

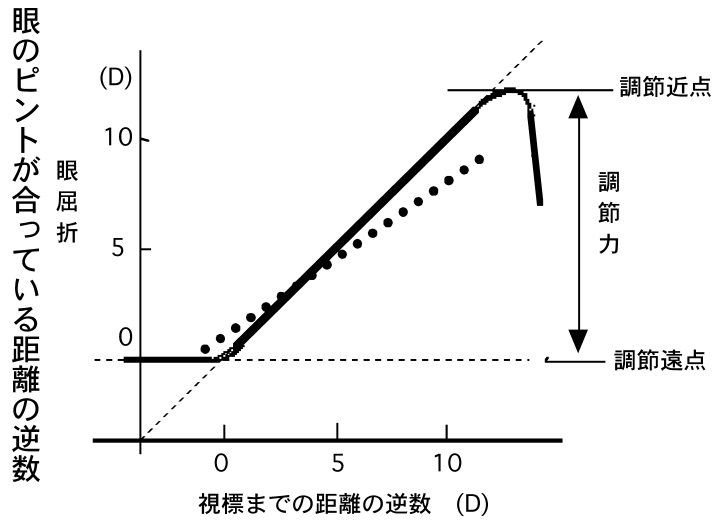


図1 調節性特性. 調節ラグ（リード）が存在する.

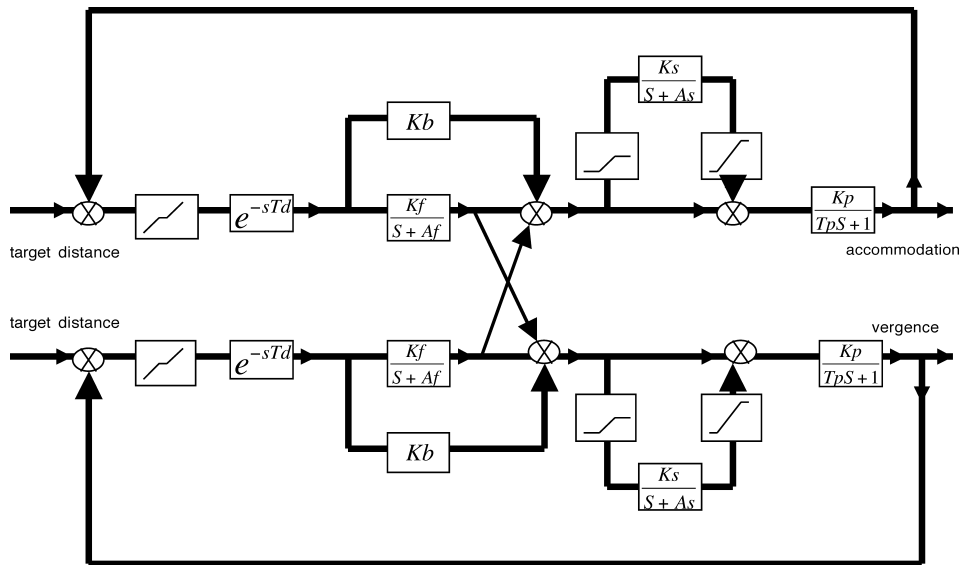


図2 調節・輻輳制御系のモデル. Schor⁸⁾をもとに作図.

的に変化のパターンがあり、そのパターンはいくつかに分類される。1950~60年代の仕事である。中心視力と両眼視機能が正常である限り、この fixation disparity は2~3分のオーダーであり、小さい。

3.3 調節と輻輳の相互リンク

調節と輻輳の制御系はリンクしている。これは例えば Schor⁸⁾の示す cross-coupling モデル

(図2)にも現れている。このモデルでは、先に紹介した二相性を示す要素が、調節・輻輳それぞれの制御系に組み込まれていることも示されている。両者のカップリングがどの程度の大きさなのかは、眼鏡レンズの処方には不可欠なデータであるため、臨床的な検査方法がよく知られている。すなわち、輻輳制御系がオープンループ化されたときに、調節刺激を与え、その

ときの輻輳反応（調節性輻輳）を調べれば、調節系から輻輳系への結合の係数が分かるし、ちょうどその裏返して輻輳系から調節系への結合の係数が求まる。単位調節あたりの調節性輻輳を AC/A 比（ratio of accommodative convergence to accommodation）、単位輻輳あたりの輻輳性調節を CA/C 比（ratio of convergence accommodation to convergence）という。これは個人差の大きな機能である⁹⁾。

実際には、調節性輻輳の測定は容易であるのに対し、輻輳性調節の測定は困難である。その理由は、調節と輻輳を比べるとその測定自体に難易の差がある。調節は幾何光学的に測定することになり、多くの測定方法では測定光学系の軸と眼球の光軸が変化しないことが前提である。しかし、輻輳を負荷する時点で眼球が動いてしまうのは避けられず、調節の測定は困難になる。さらに、輻輳系をオープンループにするには片眼を遮蔽するのみで良い（図3）のに対し、調節系をオープン化するには、ピンホールの使用、焦点はずれによっても見えが変化しない視標の使用、調節測定値で視標を動かす人工的フィードバックの使用、などが考えられるが、ピンホールはそれを通すと調節の測定が困難になるし、人工的なフィードバック系では時間遅れが生じてしまう。2番目の焦点はずれによっても見えが変化しない視標は、一例として DoG (difference of Gaussian)¹⁰⁾ という高周波数成分を含まないパターンなどが使用されている。DoG パターンを図4に示す。

3.4 調節と輻輳のずれ

ステレオ映像を見ているときのように、調節と輻輳の刺激に不自然な状態が生じるとどのような反応が引き起こされるであろうか。次節でこの問題を集中的に取り上げるが、実は、このような問題はステレオ映像の場合に限られるわけではない。自然の視対象にはそのようなことはないが、生体側では、例えば、眼鏡を使用する、老視になってしまう、斜位がある、眼鏡などに弱いプリズム作用がある、などで調節や輻輳の刺激が修飾されて不自然な対応になること

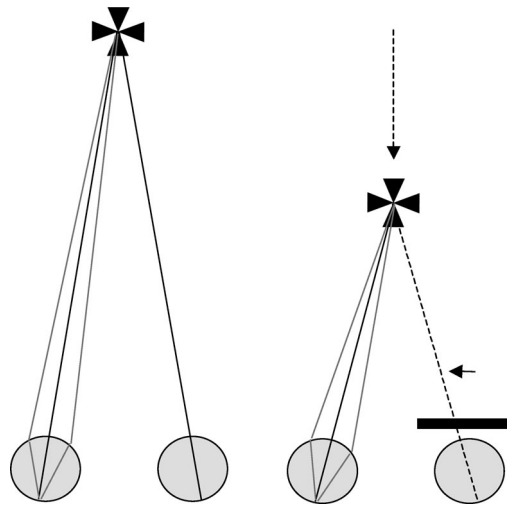


図3 調節性輻輳の測定。片眼で見ているときに視標を近づけると、隠されている眼も内に寄る。輻輳制御系はオープンループ化されている。



図4 DoG パターンの一例。この図を2枚用意して、視差をつけて左右眼に与えれば、調節はオープンループ状態で輻輳刺激を与えられる。

はいくらでもある。このような場合、調節と輻輳のずれが弱ければ、ぼけもせず二重にも見えない、すなわち、反応が食い違うことはありうる。これは、調節・輻輳の様々な刺激の組み合わせに対して一定の範囲で成立し、その範囲はドンデルスの領域として知られている。そこからはずれてしまうと、ぼけるか、あるいは二重に見えるか、という状況になる。

それではその領域の範囲内なら疲労しないかというとそのようなことはない。そのため、わずかであっても眼鏡レンズに意図しないプリズ

ム効果が出現しないようになどの注意が払われている。この範囲は非常に個人差が大きいばかりでなく、経年変化も著しい。老視の出現が、その例である。非常にゆっくりとした状況の変化には、プリズム順応などの機構により一般的には対応が可能である。

4. ステレオ映像視聴時の調節・輻輳

4.1 映像による視機能変化

ステレオ映像、一般の映像を問わず、視機能への影響が多く調べられている。一般の映像では、一定の視距離の対象を見続けることで、プリズム順応が生じ、眼位が変化してしまう可能性がある。ステレオ映像では、逆に不自然な輻輳負荷がこのような変化をもたらす可能性がある。瞳孔は、自律神経の支配を受けており、全身状態を反映している可能性がある。調節は、疲労の数少ない生理的指標として使われることがあり、そのため、多く測定が行われる。主としてステップ応答の反応速度などが指標となる。また、調節順応という現象があり、近視の進行などとも関連して興味を持たれている。フリッカーの臨界周波数も疲労の指標と考えられている。輻輳範囲や立体視機能は、まさにステレオ映像で使用される機能であり、どのような影響が表れるか、興味もたれる。

これらの機能を、一定の時間の映像負荷前後でどのような変化が生じるかという観点から調べた報告が多くある。ステレオ映像としては、Oohira & Ochiai (1996)¹¹⁾による、液晶シャッター方式によるステレオ TV 映像視聴前後における眼位、融像範囲、AC/A 比、調節、瞳孔の活動性の調査、Hasebe ら (1996)¹²⁾による、25 分間のステレオ HMD 使用による AC/A 比、立体視機能、輻輳幅、屈折の変化の研究、Kawara, Ohmi & Yoshizawa (1996)¹³⁾による、40 分間の Virtual Reality 作業による眼球運動、調節の変化、Suzuki ら (2004)¹⁴⁾による、30 分間のパララックスバリア方式のステレオ映像視聴による調節ステップ応答速度に関する研究、Emoto, Nojiri & Okano (2004)¹⁵⁾による、ステ

レオ映像 TV 視聴前後の輻輳近点変化の研究、などである。余談になるが、ステレオ映像に関しては、検索で見つけ出された研究はすべて日本人によるものであった。これをもって、「日本人はステレオ映像が好きだ」と発言したところ、名古屋大学の古賀先生より、日本でこんなに（悪影響があるかどうかの）研究があるのは日本人には実はステレオ映像が嫌いな人がいるのではないかと指摘を受けた。実際には、実用化の前に悪影響に関する危険性を排除しておくための予備研究を十分に行っている、と解釈したいところである。

一般の映像視聴による視機能変化の研究については、Saito, Sotoyama & Taptagaporn (1994)¹⁶⁾による 4 時間の VDT (visual display terminal) 作業後の瞳孔、調節の変化、Ukai, Tsuchiya & Ishikawa (1997)¹⁷⁾による VDT 作業従事者における近見負荷により誘発される瞳孔のヒップス (5 秒に 1 回程度の遅くて、非常に振幅が大きい瞳孔の周期的変化、全体としては縮瞳している) の頻度の多さ、Ukai, Oyamada & Ishikawa (2000)¹⁸⁾による 2 時間の HMD を使用した映像視聴前後の調節、輻輳の変化、Wolffsohn, Edgar & McBrien (2001)¹⁹⁾によるヘッドアップディスプレイを使用した飛行訓練の前後における調節反応の変化、などが知られている。

ここに挙げた研究は、視聴前後の比較が主であり、視聴中の機能が調べられているわけではない。また、映像と機能変化と疲労の間の因果関係を調べるというよりは、影響の有無、影響があるとすればその程度を知ることが主目的としている。結果をざっと見ると、影響のある機能もない機能も様々であるが、影響のある場合も比較的小さな影響で、疲労のために頑張って検査を行う気力が失ってしまった、と解釈できないこともない。それはそれで、疲労の存在を裏づけることにはなるのであるが。

4.2 ステレオ映像視聴時の調節・輻輳反応

ステレオ映像視聴時の調節・輻輳反応を記録した例はいくつかあるが、ここでは筆者らの報告を紹介する。前述のごとく、輻輳眼球運動が

生じているときの調節ダイナミクスは測定が困難である。被験眼に近接せずにこれらが測定可能なビデオレフラクション法は、解析の厄介さと、較正の困難さに難はあるが、このような目的には最適である。Ukai & Kato²⁰⁾は、市販のビデオレフラクション装置を連続測定可能にして、パララックスバリア方式のステレオ刺激による調節反応を記録した。結果の一例を図5に示す。1.4m⁻¹のところのスクリーンがあり、視差のない視標と、2.2m⁻¹のところの浮き出て見えるような視差を持つ視標が交互に現れる。視標の周りには常に視差のない参照視標が現れる。図では、数回の反応が重ねて記録されている。調節・輻輳ともこの条件下では1回の反応で一定値に達せず、緊張・弛緩を繰り返しているのが分かる。これよりも視差の小さい刺激に対しても、同様なふらつきが認められた。その中で、調節は最初に大きく反応してその後戻ってくるのが認められた。オーバーシュートに似た波形である。これは、最初に輻輳性調節で生じた調節反応が、その反応ゆえにスクリーン面に対しデフォーカスとなり調節し直すために生じたと考えられる。ただし、最初のスクリーン面に調節している状態までは戻らない。このようなオーバーシュート様の波形はInoue & Ohzuによる報告²¹⁾にも認められる。ただし、この記録はCornsweet型のサーボオプトメーターによる記録であり、輻輳が生じたときの調節記録はエラーを引き起こす可能性もある。先に述べた輻輳・調節のふらつきは、輻輳の限界に近いために生じる。輻輳の限界は、融像限界とも関係し、視差を持つ注視標のすぐ近傍に視差を持たない参照視標があるため、両者ともに融像するのが困難になり、比較的飛び出し量が小さいにもかかわらず限界に近くなったと考えられる。

さて、ステレオ映像を見ているとき、定常状態ではどのような調節が生じているだろうか。先の繰り返しステップ応答を測定し、オーバーシュート様波形の終わった時点での反応を測定し、平均を求めれば良い。Okadaら²²⁾は、この実験を網膜像サイズを検出するタイプのオプ

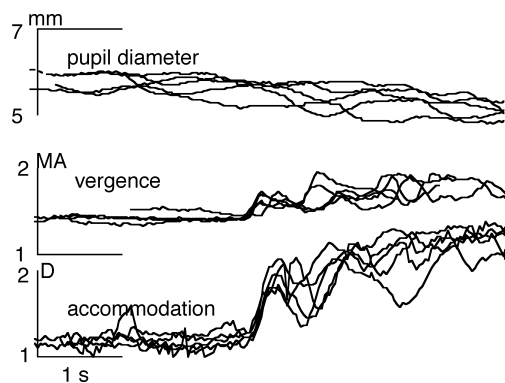


図5 ステレオ映像を見ているときの近見反応。Ukai and Kato²⁰⁾による (一部改編)。

メーターにより行った。その結果、調節反応は、スクリーン面を見ているときと飛び出している位置を見ているときの間のややスクリーン面に近い側にあった。この量は、輻輳性調節とデフォーカスによる調節の綱引きのバランス点と考えられる。この考えを裏づけるために、デフォーカスによる調節のデマンドを減少させてみた。その方法には注視標をぼかしてしまうという簡単な方法を採用した。ぼかすということは、視標の持つ高空間周波数成分をカットすることを意味する。残された低空間周波数成分は、デフォーカスの有無によりパターンの変化が少ない。視標の空間周波数成分と調節反応(ラグ、動特性)の関係に関する研究は多い²³⁻²⁹⁾。Okadaら²²⁾の結果を図6に示す。もとの視標を使った場合と2段階のぼけを与えたときの、計3種類の視標を変数に、スクリーン位置・飛び出し位置に置いた二次元視標を置いた場合とステレオ視標の場合の3種類がパラメーターとなり、調節反応量を示している。図6は5名の被験者の平均である。グラフの下にはそれぞれの状況での調節を模式的に示してある。また、使用された視標も同時に記載されている。結果は、視標のぼけを増していくと調節反応は飛び出し位置に近づいていくことを示している。これはデフォーカスによる調節のデマンドが、ぼけに応じて弱まっていると解釈可能である。このぼけの極限状況はちょうどDoGで使用された視標

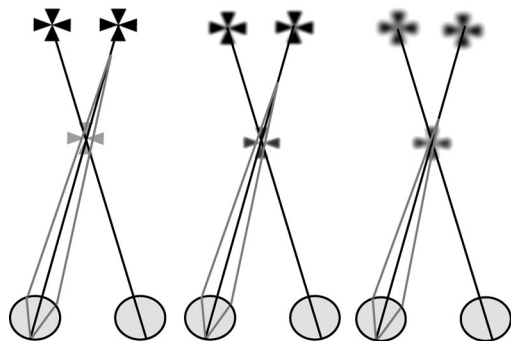
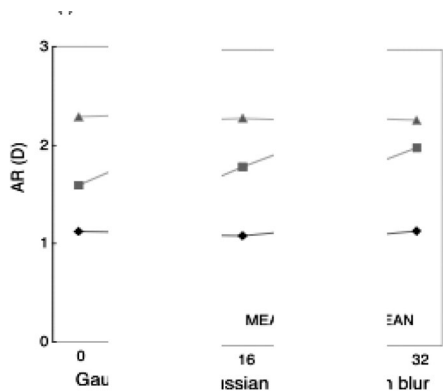


図6 ステレオ映像を見ている際の視標のぼけによる調節反応の差。上のグラフはOkadaら²²⁾によるものを、3枚に分けた。■がステレオ映像、上のプロットは飛び出している位置に実視標が合ったとした場合の調節反応。下のプロットはスクリーン上の視標を見ているときの調節反応。ぼけの大きさによって、ステレオ映像に対する調節位置が変化する。

と同じように、調節制御系に対してオープンループになっていると考えられる。この実験においては輻輳反応はほとんど変化がないと思われた。この点については、調節の動特性とともに、今後詳細に調べていくつもりである。

また、鳥居ら³⁰⁾は、調節に対する刺激量を変化させることのできる特殊なステレオ映像提示装置を用いて、調節刺激をスクリーン面においたときと等価な状態（実際にはスクリーンを使わないので、想定スクリーン面に調節刺激が固定された状態）で飛び出させた刺激と、飛び出させるときに輻輳刺激（視差）のみならず調節刺激（刺激からの光束の波面曲率）も同時に変

化させたときの比較で、明らかに調節刺激の変化が伴わないときに調節反応がスクリーン面側に寄っていることを示した。この実験では比較的瞳孔径が小さく、調節制御系に対してオープンループに近い条件であったので差は小さかったが、この結果も、ステレオ映像において、輻輳性調節とデフォーカスによる調節が綱引きをしていることを裏づけている。

5. むすび

ここまで、ステレオ映像の視聴時に問題となる眼精疲労について、現在、原因と疑われている調節と輻輳の刺激の矛盾（不自然、乖離）説を考える際に、基礎とすべき調節反応の実態について記載した。しかしながら、まだまだ不明な点も多く、課題は多く残されている。

最後に、ステレオ映像（あるいは静止画）についてよく受ける質問と、ここで紹介した研究の帰結として推測される質問に対する考えを記述しておく。まず、過度な飛び出しの映像では、調節も近くに合い、近視が進むことが考えられるが、ならば、反対に奥に沈む映像なら眼には良いのかという質問である。飛び出している映像でも調節はそれほど強くなく、近視の進行は眼精疲労とむしろ関係があるのかもしれない、その疲労が調節・輻輳の刺激の矛盾によっているならば、飛び出しているでも凹んでいても矛盾が存在することには変わりなく、眼に良いとは考えられない。ただし、疲労のメカニズムが不明な現在の知識では、この考えも成立するかどうかはわからない。次は、今回紹介した研究の結果が正しいのであれば、映像技術の進歩によって、画像の質が向上しつつある現在、多くの点で画像の自然さが向上し好ましいが、ステレオ映像に限って言えば、画質の向上（ぼけと反対）は調節と輻輳の矛盾を増大させ、疲労しやすくなるのか、という疑問である。少なくとも調節反応はスクリーン面により正しく合せなくてはならなくなっていると思う。ただし、それが疲労につながるかどうかはやはり不明である。ステレオディスプレイの研究者の中にはそ

れを裏づけるような感覚を持っている方がいるようであるが、多くの方に尋ねたわけではないので、その調査は今後の課題としたい。

文 献

- 1) A. J. Wilkins: Visual stress. Oxford University Press, 1995.
- 2) K. Ukai and A. Kibe: Counterroll torsional eye movement in users of head-mounted displays. *Displays*, **24**, 59–63, 2003.
- 3) G. K. Hung and J. C. Ciuffreda: Dual-mode behaviour in the human accommodation system. *Ophthalmic and Physiological Optics*, **8**, 327–332, 1988.
- 4) B. Wick and H. E. Bedell: Rapid- and slow-velocity vergence eye movements. *Ophthalmic and Physiological Optics*, **12**, 420–424, 1992.
- 5) B. G. Cumming and S. J. Judge: Disparity-induced and blur-induced convergence eye movement and accommodation in the monkey. *Journal of Neurophysiology*, **55**, 896–914, 1986.
- 6) H. W. Leibowitz and D. A. Owens: Night myopia and the intermediate dark focus of accommodation. *Journal of the Optical Society of America*, **65**, 1121–1128, 1975.
- 7) K. N. Ogle: Fixation disparity. *American Orthoptic Journal*, **4**, 33–39, 1954.
- 8) C. Schor: A dynamic model of cross-coupling between accommodation and convergence: Simulations of step and frequency responses. *Optometry and Vision Science*, **69**, 258–269, 1992.
- 9) C. Schor: Imbalanced adaptation of accommodation and vergence produces opposite extremes of the AC/A and CA/C ratios. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, **65**, 341–348, 1988.
- 10) T. K. Tsuetaki and C. M. Schor: Clinical method for measuring adaptation of tonic accommodation and vergence accommodation. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, **64**, 437–449, 1987.
- 11) A. Oohira and M. Ochiai: Influence on visual function by a stereoscopic TV programme with binocular liquid crystal shutter and Hi-Vision TV display. *Ergonomics*, **39**, 1310–1314, 1996.
- 12) H. Hasebe, H. Oyamada, K. Ukai, H. Toda and T. Bando: 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.
- 13) T. Kawara, M. Ohmi and T. Yoshizawa: Effects on visual functions during tasks of object handling in virtual environment with a head mounted display. *Ergonomics*, **39**, 1370–1380, 1996.
- 14) Y. Suzuki, Y. Onda, S. Katada, S. Ino and T. Ifukube: Effects of an eyeglass-free 3-D display on the human visual system. *Japanese Journal of Ophthalmology*, **48**, 1–6, 2004.
- 15) M. Emoto, Y. Nojiri and F. Okano: Changes in fusional vergence limit and its hysteresis after viewing stereoscopic TV. *Displays*, **25**, 67–76, 2004.
- 16) S. Saito, M. Sotoyama and S. Taptagaporn: Physiological indices of visual fatigue due to VDT operation: pupillary reflexes and accommodative responses. *Industrial Health*, **32**, 57–66, 1994.
- 17) K. Ukai, K. Tsuchiya and S. Ishikawa: Induced pupillary hippus following near vision: increased occurrence in visual display unit workers. *Ergonomics*, **40**, 1201–1211, 1997.
- 18) K. Ukai, H. Oyamada and S. Ishikawa: Changes in accommodation and vergence following 2 hours of movie viewing through biocular head-mounted display. *O. Franzen, H. Richter and L. Stark (Eds.): Accommodation and vergence mechanisms in the visual system*. Birkhauser Verlag, Switzerland, 313–325, 2000.
- 19) J. S. Wolffsohn, G. K. Edgar and N. A. McBrien: Using diplopia as a warning of an inappropriate visual (ocular) accommodative

- response (WIVAR). *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, **72**, 652–658, 2001.
- 20) K. Ukai and Y. Kato: The use of video refraction to measure the dynamic properties of the near triad in observers of a 3-D display. *Ophthalmic and Physiological Optics*, **22**, 385–388, 2002.
- 21) T. Inoue and H. Ohzu: Accommodative responses to stereoscopic three-dimensional display. *Applied Optics*, **36**, 4509–4515, 1997.
- 22) Y. Okada, K. Ukai, J. S. Wolffsohn, B. Gilmartin, A. Iijima and T. Bando: Target spatial frequency determines the response to conflicting defocus- and convergence-driven accommodative stimuli. 投稿中.
- 23) D. A. Owens: A comparison of accommodative responsiveness and contrast sensitivity for sinusoidal gratings. *Vision Research*, **20**, 159–167, 1980.
- 24) K. J. Ciuffreda and S. C. Hokoda: Effect of instruction and higher level control on the accommodative response spatial frequency profile. *Ophthalmic and Physiological Optics*, **5**, 221–223, 1985.
- 25) J. Tucker and W. N. Charman: Effect of target content at higher spatial frequencies on the accuracy of the accommodation response. *Ophthalmic and Physiological Optics*, **7**, 137–142, 1987.
- 26) W. N. Charman and J. Tucker: Dependence of accommodation response on the spatial frequency spectrum of the observed object. *Vision Research*, **17**, 129–139, 1977.
- 27) W. N. Charman and G. Heron: Spatial frequency and the dynamics of the accommodation response. *Optica Acta*, **26**, 217–228, 1979.
- 28) K. Ukai, M. Ishii and S. Ishikawa: A quasi-static study of accommodation in amblyopia. *Ophthalmic and Physiological Optics*, **6**, 287–295, 1986.
- 29) K. Niwa and T. Tokoro: Influence of spatial distribution with blur on fluctuations in accommodation. *Optometry and Vision Science*, **75**, 227–232, 1998.
- 30) 鳥居正人, 鶴飼一彦, 渡辺光由, 山田祥治: 調節刺激可変なステレオディスプレイ視聴時の近見反応. *VISION*, **17**, 135–138, 2005.