

3次元映像の生体への影響：視機能への影響

鶴飼 一彦

日本福祉大学 情報社会科学部

〒475-0012 愛知県半田市東生見町 26-2

1. はじめに

視覚系と映像の関係は切っても切れない関係にある。映像の作成は視覚を刺激することを前提に成立しているのであるから。本来、映像も映像以外の視覚環境も同様に光によって視覚を刺激するためになら区別される必要のないものである。

しかしながら、映像には自然に存在しない光環境としての特性がいくつかある。それらの一部は、映像を提示する機器の技術的制約から生じるものであり、一部は映像を作る際に人為的に加えられるものである。そのような不自然な状況は、場合によって人体に影響をもたらす。映像をまず受ける視覚系への影響のみならず全身に影響が及ぶことも考えられる。映像機器が普及し始めた初期からそのような問題はあった。TVを見過ぎると近視になる（暗いところで見ると？近くで見ると？）、TVゲームをやり過ぎると近視になる、コンピュータディスプレイを使用した仕事では近視になる（必ずしも近見作業ではないのに）、疲労が激しい（ディスプレイのみが原因ではない）、大スクリーンの映画を見ていると気分が悪くなる、両眼視差による3D映像を見ていると目の周囲や頭が痛くなる、ちらつき画像により光発作を起こす、などである。これらの現象の影響の度合いは、見ている側の個人差によってまったく異なる。見ているときの体調などの差で影響が異なり再現性がない。また、長期的な影響は因果関係も確認しづらい。このため、映像の生体影響

を調べることは困難を伴う。その中には一過性の症状では、症状を客観的にとらえることの困難さも含まれる。

そのような状況の中で、著者は3D映像を中心とした映像の生体影響を調査するプロジェクトに参加する機会に恵まれた。プロジェクト全体としては生体への影響の総合的評価をおこなうことが主目的であるが、ここでは、まず、プロジェクトで使用した映像提示システムと視覚系の他覚機能の測定機器の概要、およびその機器によって得られた結果の一部を解説する。また、自覚評価としてアンケート調査を同時に行っており、それについても報告する。プロジェクトの全体は、斎田¹⁾、吉沢²⁾、坂東³⁾を合わせ読むことによって把握していただきたい。詳細は、プロジェクトの報告書⁴⁾をご覧ください。また、プロジェクトと関連した研究としてメンバーが個別に手がけている研究のうち、著者の分を簡単に紹介する。

2. 総合評価実験：方法（循環器系測定法と総合評価法を除く）

2.1 映像提示システム

映像提示システムはHMDとプロジェクション+偏光眼鏡方式の2種類が用意された。両者とも3D映像が提示でき、視聴時の瞳孔、眼球運動を解析記録できるような装置（後述）と組み合わせて使用される。音声はHMD使用の場合もプロジェクションシステムに付随のスピーカーを利用した。

HMDは市販の2D HMDを2台用意し、2台分の部品を用いて一台に改造することにより3D HMDとした。HMDの画角は水平約30度、設定像面距離は2.0m、両眼の画枠の輻湊角も2メートル角である。画素数は約18万である。

液晶プロジェクター（画素数236万画素、明るさ550 ANSIルーメン）2台から80インチスクリーンにフロント方式で偏光フィルターを通して投影する形式の3D映像システムである。被験者は偏光フィルターを装着する。視距離を2.2mと設定した。このとき画角は水平約40度となる。プロジェクターは被験者の後部上方に設置された。画像に歪みが出ないようにあおり角などの調整がなされている。

視覚刺激は3D CGムービー（ビジュアルサイエンス社：The 3D world, 3D Dinosaurs）の一部を著作権者の許可を得て用いた。選択した部分は4分の長さで、最初の1分を最後に繰り返し5分の映像とした。映像の前後に眼球運動のキャリブレーション映像と瞳孔刺激（全画面）を加えている。同一映像を視差の有無を変えて提示した。このほか、必要に応じて環境ビデオや自作の回転パターン映像を利用した。

2.2 アンケート

アンケートの項目は、1：目が疲れている、2：目がしょぼしょぼする、3：目がかすむ、4：眉間またはこめかみが痛い、5：頭がぼんやりする、6：頭が重い、7：気分が悪い、8：吐き気がする、9：めまいがする、10：眠気がする。この項目については後述のごとくHMD（比較対照は普通のTV）を使用したゲームの前後でのアンケート調査（28項目）の結果を因子分析し、3因子を求めたのち、各因子を代表するような3-4項目を選んだ。7件法（1がそう思わない、7がそう思う）で、インタビュー形式で問うた。

データは、グループとしてのデータと個人のデータにわけて解析する。グループデータ

は2D/3Dの差、HMD／投影型の差などの検討を行い、瞳孔などのグループデータと比較した。個人のデータは、瞳孔の個人変化などの視覚系のデータ、さらには自律神経系の個人データと付きあわせて検査項目間の相関などをとるために用いられる。

2.3 視覚系計測システム

3D視聴時の輻輳眼球運動の測定や輻輳と瞳孔の関連に注目した。また、輻輳眼球運動時の回旋運動には未知な点が多いこと、回旋眼球運動は「酔い」とも密接な関係があると推測されること、などを考慮し、両眼輻輳回旋計測原理確認実験機を製作した。この装置では、赤外線TVカメラをHMDの内側に設置し、同時に輻輳眼球運動・瞳孔も計測可能にした。瞳孔・輻輳眼球運動は自律神経系と同時測定を行うためにリアルタイム測定可能とした。

視覚系測定装置は、虹彩撮影部、両眼映像・刺激映像・被験者頭部運動映像合成装置、映像記録、リアルタイム瞳孔・眼球運動解析装置、オフライン映像解析装置よりなる。

虹彩撮影部は耳鼻科のめまい診断用装置として開発された虹彩紋理撮影装置⁹⁾と同一の部品を使用した。赤外の照明光にカメラと同期したLEDパルス光を利用して像のぶれを除き、また、偏光フィルターで光源の角膜表面における反射像を押さえて、クリアな画像を得ている。HMD組み込みのものと赤外反射・可視透過のダイクロイックミラーを利用して任意の映像提示装置が使用可能なものの2種類を作成した。実際にHMDに組み込んだ状態を図1に示す。

眼球運動（瞳孔中心の位置）および瞳孔の面積のリアルタイム計測装置はソフトウェアでコントロール可能な2値化機能の付いた位置面積計測ボード2枚をパーソナルコンピュータに内蔵して作成した。アナログ出力にはD/Aコンバータボードを使用する。両眼の水平垂直位置と瞳孔面積の計6チャンネル

を用いる。

映像記録にコンピュータへの画像取り込みを考えてデジタルビデオ（以下、DVと略記）デッキを用意した。なお、視覚刺激の映像、頭部回転、両眼の画像を同時に記録する際には4つの画像を1枚に合成する装置 Quad Switcher を使用して DV に記録した。

回旋の解析には画像解析フリーソフトウェア（NIHImage）を利用して、マクロを組むことで実現⁶⁾した。

画像解析によって回旋と同時に頭の傾きを検出するソフトを同様のシステムを用いて作成した。両者を組み合わせ、頭の傾きと眼球回旋運動の関係が詳細に検討できる。

以上の装置のほか、必要に応じて瞳孔対光反応の各種パラメータを自動計算可能な小型のイリスコダーを単独で使用した。次のような対光反応因子が計算される。瞳孔刺激前瞳孔径（ $D1$ ）、光刺激により縮瞳したときの最小径（ $D2$ ）、縮瞳率（ $CR: (D1-D2)/D1$ ）、初期状態の瞳孔面積（ $A1$ ）が計測される。時間

要素として $T1, T2, T3, T5$ 、すなわち潜時、瞳孔径の変化の1/2までの時間、瞳孔が最小になるまでの時間、瞳孔が最小から散瞳して63%の大きさになるまでの時間が求まる。VC, VD は散瞳、縮瞳速度の最高値、AC は縮瞳の加速度最高値である。

2.4 手順

1 回目の実験は、7名の被験者に、安静、2D（環境ビデオ）、3D、回旋誘発画像の4条件の中継して諸計測を行なった。最初と各条件の後で計5回アンケートと簡易型イリスコダーによる計測を行なった。2回目/3回目にはそれぞれ10名の被験者でHMD/投影型の映像提示装置を用い2D・3D同一の映像で視聴中の循環系諸計測と輻輳眼球運動、瞳孔径測定を行なった。最初と2D・3D各映像の後でアンケート調査を行なった（3回）。2D・3D各映像の前後で、映像に組み込んだ刺激により瞳孔対光反応を計測した。映像に含まれていた映像が回転するシーンを利用して回旋眼球運動を測定した。



図1 HMD 組み込み型 CCD カメラの装用例。

3. 総合評価実験：結果（自覚症状と視覚系）

3.1 自覚評価の結果

1回目実験では、全10項目の合計では3Dよりも2Dの方が悪化していた。しかし、統計的有意差はない。2回目（HMD）、3回目（投影型）の実験においては、2D、3Dの映像の前後、計3回のアンケートをおこなった。差のみを表1に示す。20名の平均について、2Dと3Dを比較してみると右端の欄に示すように6番目の項目（頭が重い）で2Dの方が3Dよりも若干悪化している傾向があるが、他の項目も含めて統計的な有意差はなかった。また、映像視聴の前後で変化があるかどうかを各項目ごとに統計的に調べても有意差は認められなかった。

3回の実験をすべてまとめて統計的検討を加えた結果でも、すべての項目で2Dと3Dの差は有意とならなかった。

以上、2Dと3Dの間では、すべて統計的有意差はなかった。また、全体としては視聴前後での有意な悪化もなかった。後述のHMDゲームの調査の時は多くの項目で視聴前後の変化（悪化）が見られ、また、数項目でHMDとふつうのTVとの有意差も見られた。

今回の実験条件の大きな違いは、視聴時間にあると思われる。すなわち、5分程度の視聴では、2D/3D、HMD/投影のいずれの条件においても、アンケート項目にあるような自覚的訴えが生じるとはいえない。それが、20分の使用になると、はっきりとした差となって現れる。もちろん、これは、グループに対しての平均スコアであって、個々の被験者にとって悪影響があるか否かについてはない。視覚系・自律神経系で得られた他覚的測定値とアンケートの自覚的測定値の間に何らかの関係が見いだされれば興味深い。

3.2 輻輳眼球運動

2回目実験、3回目実験にてリアルタイム記録された2D、3D各映像を視聴中の瞳孔径と輻輳眼球運動の変化をとりだし、各実験ごとの全被験者の平均値を求めた。2回目実験の結果を図2に示す。

3Dでは、各実験で同様に輻輳が認められた。このことは映像のもつ視差量に輻輳眼球運動が反応していることを示す。1秒ごとの映像の持つ視差量が計測され、像視差量と輻輳量を比較した。特徴的なイベントでの像視差と輻輳量はよく対応しているが、両者の相関を求めるほどには対応していないことが判

表1：2回目、3回目実験のアンケート結果

項目	3回目実験										2回目実験										平均	標準偏差	
	2D->3D					3D->2D					2D->3D					3D->2D							
	被験者1	被験者2	被験者3	被験者4	被験者5	被験者6	被験者7	被験者8	被験者9	被験者10	被験者11	被験者12	被験者13	被験者14	被験者15	被験者16	被験者17	被験者18	被験者19	被験者20			
2D	1	-1	0	0	0	-4	-1	0	0	-2	0	0	-2	-1	5	-1	0	0	0	-2	0	-0.5	1.7
	2	-1	0	0	2	0	-1	1	0	-1	-2	0	-1	-1	4	-1	-1	1	-2	-1	-0.3	1.4	
	3	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	-2	0	-1	2	0	-1	-2	1	0	0	-0.2	1.0	
	4	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	-0.3	0.6	
	5	0	0	0	0	0	-2	1	0	-2	-2	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	-0.4	0.8	
	6	0	0	-5	0	-4	-3	0	0	-2	-2	0	0	0	-2	-1	0	0	1	-1	0	-1.0	1.6
	7	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3	0.6	
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0.2	0.7	
	9	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	-0.1	0.7	
	10	-1	0	0	1	-1	0	0	0	0	-2	-1	1	-1	0	1	1	1	-1	-4	0	-0.3	1.2
	計	-3	0	-3	1	-9	-12	2	0	-12	-14	-2	-3	-6	9	-2	-1	0	1	-9	-1	-3.2	5.6
3D	1	0	-1	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	-2	0	-2	1	-1	1	0	-1	0	-0.4	0.8
	2	0	0	0	0	0	-1	-2	0	1	1	0	-2	0	-4	1	0	1	-3	0	-1	-0.5	1.4
	3	-1	0	0	0	-1	-1	-2	0	0	3	0	1	0	0	0	0	1	-1	0	0	-0.1	1.0
	4	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-0.2	0.4
	5	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	-2	1	-1	1	0	0	0	2	0	0	0	-0.1	0.9
	6	0	0	0	0	0	-1	0	0	-2	-2	0	0	0	0	1	0	1	-1	0	-1	-0.3	0.8
	7	0	0	0	0	1	-1	0	0	-3	-2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	-0.2	1.0
	8	0	0	0	0	0	-2	0	0	-1	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3	0.6
	9	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	-2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0.2	0.6
	10	1	-1	0	1	0	-1	-1	0	-2	-2	1	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	-0.2	0.9
	計	0	-3	0	1	0	-10	-7	-2	-8	-9	2	-3	1	-6	3	-2	8	-5	-1	-2	-2.15	4.4

マイナスが悪化

明した。

2Dではほとんど輻輳が生じないはずである。しかし、現実には10名の平均でもわずかな輻輳が認められる。今回の装置は瞳孔計測装置に眼球運動計測を兼ねさせておりさほど精度よくないため、眼球の向きによって疑似的な輻輳様の動きがあらわれてしまう(たとえば下方を見ると輻輳様のノイズが生ずる)可能性と、2D映像でも十分に映像が飛びだしてくるような迫力があり、そのため、物理的的刺激と無関係に輻輳が生じる可能性が考えられる。

3.3 回旋眼球運動

1回目実験においては白地に黒い放射線状のパターンが一定速度で時計回りに回転、その後静止、反時計まわりに回転、静止、というパターンで刺激が与えられた。この映像により誘発された、回旋眼球運動を解析した。7名中6名で解析可能であった。3名で大きな回旋が認められ、回転刺激は60度/秒であったのに対し、回旋反応は3度/秒であった。戻りの速い動きが0.7-1.0秒ごとに生じ、その間の振幅は1度弱である。

2回目実験においては、一部の被験者では

あきらかに回旋が誘発されていることが、モニター画面上でも確認できた。解析可能であったのは20件のうち9件であった。うち、5件で映像誘発回旋眼球運動が現われていた。誘発された回旋の速度は7-8度/秒であった。3回目実験ではモニター画面を見て回旋がはっきり現われたかどうかを主観的に評価(0-3の4段階、0は回旋なし)した。結果は、13件で回旋が認められ、7件では認められないか小さかった。

以上の結果、回転映像に誘発される回旋眼球運動は個人差が大きいことが判明した。動揺病の感受性との関係に興味を持たれる。

3.4 視聴中の瞳孔径

映像視聴中の視聴者の瞳孔径は、映像の平均輝度レベル、3D映像の場合は輻輳量、それ以外の自律神経系等の影響、の3種類の状況により変化すると考えられる。2回目実験の結果を図2に示す。なお、図には2D・3D視聴中の瞳孔径に加えて、その差(下向きが3Dの場合の方が縮瞳している)を同時に示した。

結果は、2回目/3回目、2D/3Dに関係なく瞳孔の動きはほとんど一致している。この

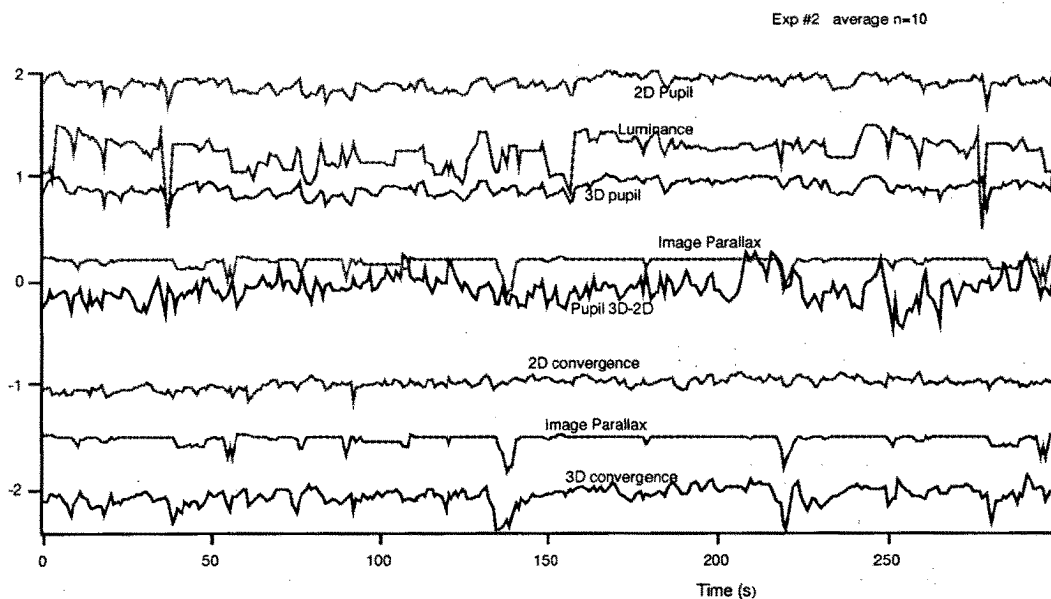


図2 映像輝度・映像視差と瞳孔・輻輳。

ことは、瞳孔の大きな動きはほとんど映像の輝度レベルで決定される事を意味する。

使用した映像の1秒ごとの平均輝度と瞳孔の径の変化を比較したところ両者はほぼ一致した動きを示すが相関はさほど高くない。瞳孔の動きが映像の明るさ変化に対して遅れること、短時間ではあるが積分的に働くことなどが影響したものと思われる。

強い飛び出し映像の場合には、モニターを見ていると輻輳とともにきれいな縮瞳が認められる。しかしながら、このときの縮瞳量は明るさの変化に対する瞳孔の変化とそのばらつきの中に埋もれてしまうような量であるのかもしれない。

3.5 視聴開始・終了時の瞳孔面積

各映像の最初と最後には映像により光刺激が与えられ、映像視聴中に対光反応を計測す

る試みが行われた。対光反応が現われる直前の瞳孔面積は、映像視聴の直前・直後で比較可能である。映像視聴最後の対光反応直前の面積は、映像の瞳孔に及ぼす影響をとらえる指標となる。

2回目実験(HMD)から求めた視聴後の瞳孔面積視聴前に対する比では、10名の平均では変化がなかった。10名のうち2Dで10%以上の散大1, 5%以上の散大2, 5%以上の縮小1, 3Dでは5%以上の散大1, 5%以上の縮小2であり、個人差は大きい。3回目実験(投影)でも同様である。

2回目と3回目を合わせたデータでの平均でも、グループとしてみた場合、2D/3Dにかかわらず視聴直後の瞳孔面積には5分間の映像視聴の影響はまったくない。このことは、映像の輝度レベルによる影響、視差による輻

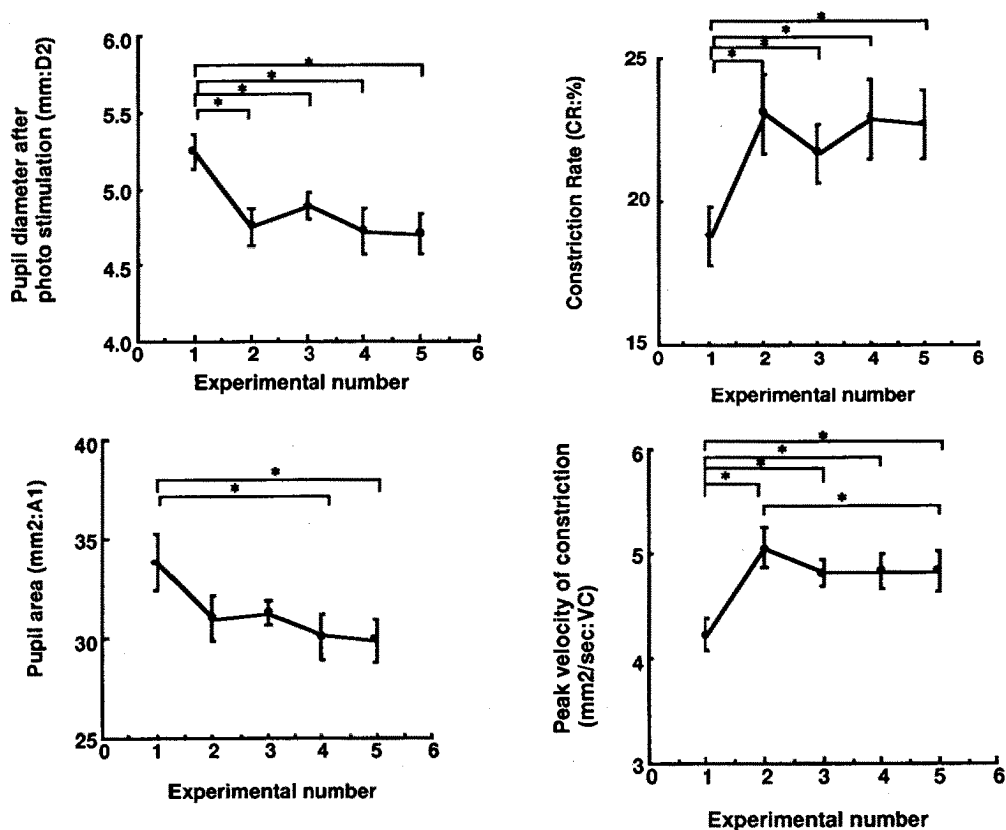


図3 1回目実験の対光反応各パラメータ(5回の測定ごとの7名の平均値と標準偏差,*は5%水準での有意差を示す)。Experimental Numberは1:実験開始時,2:安静後,3:2D映像後,4:3D映像後,5:回転映像後。

輻の影響、自律神経の影響がトータルでゼロになったことを示す。ただし、3Dの輻による残効と自律神経の影響が相殺された可能性は残る。その場合、3Dの自律神経経路で瞳孔に及ぼす影響は散瞳である。また、映像の輝度レベルによる残効、自律神経の影響が相殺された可能性は残る。この場合は、2D/3D無関係に自律神経は散瞳効果を示したことになる。

個人に見られる様々な変化に関しては、次のように考えられる。2回目、3回目の実験においては2D、3Dの状況にかかわらず映像の輝度レベルは同一である。したがって、視聴の影響が現れた場合には、3D映像による輻の残効が現れた(3Dで縮小する)か、自律神経の影響(たとえば、興奮すれば散瞳し、ねむくなれば縮瞳する⁷⁾、など)と解釈される。

3.6 瞳孔対光反応

1回目の実験において、実験開始時、安静後、2D後、3D後、放射線回転映像後に浜松ホトニクス製イリスコーダを用いて瞳孔対光反応を計測した。光刺激後の瞳孔直径(D2)、縮瞳率(CR)、瞳孔面積(A1)、縮瞳速度の最高値(VC)において最初とその他の条件との間に有意な変化が見られた。これらを図3に示す。また、縮瞳速度の最高値(VC)では安静後と回転映像後の間でも有意な差が認められた。時間要素(T1、T2、T3、T5)は、すべての対光反応測定結果の間には有意差はない。最初のデータと比べて安静後にどちらかにデータが動き、2D、3D、回転映像後にはまた逆方向に動くというような傾向が見られる。これは、安静によりいったん副交感優位となった状態が、再び映像によって交感優位の方向に変化したものと考えられる。

4. HMDによる動揺病

4.1 HMDの特性と動揺病

3D映像の提示によく使用されるHMDで

は、たとえ2Dとして使用していても、両眼の刺激が別々に行なわれ、光学的な軸合わせなどの問題点が発生し、眼精疲労などが生じる可能性がある⁸⁻¹⁰⁾。また、映像の種類によっては乗物酔のような症状(動揺病: motion sickness)が生じることがある¹¹⁾。動揺病は頭部の動きとそのフィードバックによる映像に時間遅れがあるようなVR条件において顕著ではあるが、通常のスクリーン、とくに大型のそれに投影された映像を単純に見ている場合にも認められる症状である。VR条件でないHMDでもスクリーンサイズの割には生じやすいように思われる。おそらく、映像以外の周囲が見えないことが多く、映像の動きが身体の動きの感覚としてとらえやすいことがほかの提示方法よりも動揺病が生じやすい原因であろう。3Dとして使用した場合には臨場感がありますことからこのような症状がより現れやすいことも考えられる。また、HMD使用時に頭が動いた場合、頭の動きとそれともなう眼の動きの関係がほかの映像提示装置のように自然でないこともこの酔いを助長している可能性がある。ここでは、まず、同様な条件下でのHMDと通常のTVモニターで動揺病の発生頻度に差があるかいなかを検証し、次に、HMD使用時に頭部が動いた場合の眼球運動を実際に測定した。

4.2 動揺病の自覚評価¹²⁾

学生30名がゲーム(ゆっくりとした上下動をとまなう動きをするドラゴンの視線から見た映像が続く)をTVモニターとHMDを使用してそれぞれ別の日に20分間プレイした。ゲームの前後でアンケート調査を行った。アンケート作成には過去の研究¹³⁻¹⁵⁾に使われた既存のアンケートや日本眼科医会のVDT症候群診断基準を参考にした。作成したアンケートの内容は、1.目が疲れている、2.目が痛い、3.目が重くなる、4.目がごろごろする、5.目がしみる、6.目が乾いた感じがする、7.涙が出る、8.目がちかちかする、9.目がしょぼしょぼする、10.目

がかすむ, 11. 見つめていると像がぼける, 12. 遠くの物が見づらい, 13. 近くの物が見づらい, 14. 目が熱い, 15. ものが二重に見える, 16. こめかみが痛い, 17. 後頭部が痛い, 18. 眉間が痛い, 19. 頭がぼんやりする, 20. 頭が重い, 21. 気分が悪い, 22. 吐き気がする, 23. めまいがする, 24. 肩が凝る, 25. ふらふらする, 26. 全身がだるい, 27. 眠気がする, 28. 首が痛い, の 28 項目である. 評価は 7 段階でおこなった. 解析は SPSS を使用し, 記述統計, t 検定, 因子分析 (主成分分析) を行なった.

その結果, HMD でのゲームは「酔い」に関連した項目で症状が悪化し, 動揺病を引き起こしやすいといえることが明らかになった. 動揺病は自己運動感覚が大きな影響を与えていると考えられており, HMD の性能向上で臨場感が増せばさらに悪化すると思われる. また, 視覚刺激と前庭刺激が矛盾するために起きる症状は HMD の性能向上で改善されることはありえない. 問題は提示される映像の内容にあり, 今回用いたようなゆっくりとした揺れをとまなう映像では酔いの症状が通常のモニターで見ている場合にも現われる. HMD ではこれが顕著になっているといえよう.

なお, 乗物酔に関しては, 一般的に小学校高学年において現われやすいと考えられている. 前庭機能がこの年代で発達過程にあるため, それ以前や以降では酔いを感じにくいというように説明されている. 視覚刺激と前庭刺激の矛盾する HMD 使用がこの発達過程の年代に及ぼす影響は未知であるが, やはり十分に配慮が必要である.

HMD・TV モニタでのアンケート項目の変化の差に対して因子分析を行った. その結果, 3 つの大きな因子に分けたことができた. 28 項目のアンケートは, 記入にかかる手間が大きく, 実験によってはこの手間を減少させることが必要になろう. プロジェクトの総合評価実験では, ここでの結果をふまえて項目を 10 項目に整理した.

4.3 HMD 使用時の頭部ロール運動による反対回旋眼球運動の解析

前庭 (平衡覚の受容器からの最初の中継点) に加えられた刺激により眼球運動が生じる (前庭動眼反射: VOR). 頭部水平運動に対しては眼球は反対方向に運動し, 空間的に視線方向が変わらないように保つ. この際, 前庭刺激も視覚刺激も矛盾しない. 固視目標があれば, ほぼ完全に視線は空間に対して保たれる. 視覚刺激が生じない暗所でもゲインは減じるが VOR は生じる. しかし, たとえば, HMD を使用している場合 VOR は生じないほうが都合が良く眼球運動は生じない. VOR の視覚抑制と呼ばれる. 水平眼球運動は視覚刺激によく追従し, 前庭刺激よりも視覚刺激が優勢になるためである. 一方, 頭部のロール運動に対しては眼球が回旋する (反対回旋). 一方, 回転する画像を見ているときの視覚性回旋眼球運動は非常に小さい. 視覚刺激よりも前庭刺激の方が優勢になっていそうである. HMD 使用時の反対回旋眼球運動はどのようなになるであろうか?

頭の動きとともに回転する映像と静止している映像, 頭部を静止させ映像のみを回転する刺激の 3 種を用い HMD により刺激した. この時の眼球回旋を HMD 内に組み込まれた小型カメラにより撮影し, 頭部運動, 視覚刺激とともに画像解析を行い, 眼球回旋の頭部運動あるいは視覚刺激に対する速度ゲインを計算することにより比較した.

速度ゲインの 5 名の平均値は, 前庭刺激と視覚刺激が矛盾しない条件 (自然な頭部運動の条件), 前庭刺激のみが加わった条件 (普通の HMD 使用条件), 視覚刺激のみが加わった条件で, それぞれ, 0.42, 0.30, 0.01 であった. 3 条件のいずれの 2 条件間でも統計的に有意な差が認められた. 視覚抑制は存在すると言えよう. しかし, その抑制は明らかに完全ではなく, 自然な反対回旋の 3 割程度を抑制するに過ぎない. 水平眼球運動の場合には VOR はほぼ完全に抑制される. このこと

は視運動性眼振で見られるように視覚により誘発された眼球運動がほぼ完全であることから説明される。一方、反対回旋や視覚抑制の実験と同一の条件で測定された視覚誘発回旋眼球運動の速度ゲインは非常に小さいものであった。この点から言えば、3割といえども視覚抑制が存在することは視覚誘発回旋眼球運動からは説明できないと考えられる。したがって、どのような機序で反対回旋の視覚抑制が生じるかは不明である。また、回旋眼球運動の性質にはかなりの個人差がある。この差が、動揺病の症状がでやすいかどうかという個人差とどういう関係になっているのか、現在調査中であるが、回旋眼球運動の計測の困難さから、なかなか調査が進まない。

なお、今回の装置では輻輳眼球運動や両眼の瞳孔面積の変化も同時に測定できる。両眼視差を利用した3Dディスプレイでは調節と輻輳の矛盾が眼精疲労の原因と指摘されている。また、眼精疲労の訴えと瞳孔面積の関係も指摘されている。このようにHMDにも生じるディスプレイ使用時の視覚関連の健康問題を扱う場合にも本装置は有益である。本装置の開発はこのプロジェクトの視覚系測定装置の開発として行なわれ、総合評価システムにて使用された。

5. むすび

ここでは、映像の生体への影響を実験的に測定してきた。測定項目は、輻輳眼球運動、回旋眼球運動、瞳孔径、瞳孔対光反応、瞳孔近見反応、自覚症状などであった。

これらは輻輳眼球運動以外は両眼視差3D映像固有の問題でなく、映像一般にあてはまる考えうる影響であり、ここでも新しい映像技術であるHMDや大視野スクリーンを刺激として使用した。両眼視差3D映像のもっとも大きな問題点である、調節と輻輳刺激の矛盾については、ここでは触れなかった。これについては、装置上の制約が大きく、映像を見ているときの自然な状態で調節を測定すること

が非常に困難（不可能というわけではなくいくつかの報告¹⁶⁾もあるが、容易に準備できるような装置の使用のみでは不可能)であったことによる。この解説と同時に掲載されている報告(加藤・鶴飼¹⁷⁾)により、ようやく調節・輻輳・瞳孔の同時測定が連続的に、比較的容易に行なえるようになったところである。したがって、調節と輻輳刺激の矛盾に対する反応の実測は今後の課題である。

対光反応や回旋眼球運動、輻輳眼球運動は、映像のもたらす生体への影響というよりは、映像刺激に対する反応そのものである。したがって、反応があるからといって、生体への直接的な影響があるとは言えない。しかしながら、そこには反応の個人差があって、これは生体が影響を受けやすいかいかと関連している。そのような見地から、自覚症状とこれらの反応の個人差との関連に注目したのであるが、いまだ明確な関係は求まっていない。瞳孔に限れば、その支配神経が自律神経であることから、全身の自律神経機能との関係が注意を引く。今回のプロジェクトが総合評価と銘打っているのはそのような事情からである。

HMDに限れば、生体への刺激の不自然さから生じると思われる影響が自覚症状としてあらわれ、不自然さそのものも計測することが可能であった。このような不自然さはHMDのみに見られるのではなく、たとえば自分が動いていないのにカメラが動けば映像が動く、などという事を考えれば映像の持つ本質的な特性でもある。そのような不自然さの影響は、おそらく、量が適当であれば快適に感じることもあれば、過大な刺激では生体の拒否反応にあう事もあろう。受け取り方の個人差も大きい。

過去の一部のディスプレイ機器のように明らかに性能的に劣っており、それによる生体影響が問題となる、という段階は注意を払えば避けられるようになってきた。今後は、使用者の個人差や映像の内容に大きな注意を払

わなければ、生体影響をうんぬんする事はできない。今回のプロジェクトの試みはそのようなことを明確にしたという点でも大きな成果を挙げたと考える。

最後に、本プロジェクトの遂行にあたりお世話になった、(財)機械システム振興協会、日本自転車振興会、(社)日本電子機械工業会、通商産業省の皆さんに深く感謝します。また、事務処理から実験日程の調整までさまざまな協力をいただいたユースタッフの皆さんに感謝します。さらに、本研究に参加された企業メンバーの献身的な協力に感謝します。なお、この報告のうち、対光反応の計測・解析は北里大学の石川 均、松井孝子の両氏に、刺激映像の輝度と視差の測定に関してはシャープ(株)の田中誠一氏に負うところが大きいことを付記します。

文 献

- 1) 斎田真也：「3次元映像の生体影響」プロジェクトの紹介。VISION, 12, 1-4, 1999.
- 2) 吉澤 誠：3次元映像の生体への影響：循環器機能への影響。VISION, 12, 15-23, 1999.
- 3) 板東武彦：3次元映像の生体への影響：総合評価。VISION, 12, 25-30, 1999.
- 4) 機械システム振興協会(編)：「3次元映像の生体影響総合評価システムの開発に関するフィージビリティスタディ」報告書。(財)機械システム振興協会・(社)日本電子機械工業会, 1999.
- 5) N. Ishikawa, H. Hosaka, M. Yarita, T. Yagi, T. Morizono and S. Yamanobe: A torsional, horizontal, and vertical eye movement analysis system. *Proceedings of the XIVth International Conference on Medical and Biological Engineering and Computing*, 29, 404, 1991.
- 6) K. Ukai, S. Saida and N. Ishikawa: Measuring torsional eye movements of head mounted display users. in preparation.
- 7) 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.
- 8) M. Mon-Williams, J. P. Wann and S. Rushton: Binocular vision in a bi-ocular world: Visual deficits following the wearing of a head-mounted display. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 13, 387-391, 1993.
- 9) S. Rushton, M. Mon-Williams and J. P. Wann: Binocular vision in a bi-ocular world: New-generation head-mounted displays avoid causing visual deficit. *Displays*, 15, 255-260, 1994.
- 10) K. Ukai, S. Ishikawa and H. Oyamada: Changes in accommodation and vergence following 2 hours of movie viewing through bi-ocular head-mounted display. O. Franzen, H. Richter and L. Stark (eds): *Accommodation and vergence mechanisms in the visual system*. Birkhauser verlag, Switzerland, in press, 2000.
- 11) 今井拓司：家庭用ヘッド・マウント・ディスプレイ、懸念される人体への影響。日経エレクトロニクス、通巻618号(1994年9月26日号)、67-83, 1994.
- 12) 大野さち子、鷗飼一彦：Head Mounted Displayをゲームに使用して生じる動揺病の自覚評価。準備中。
- 13) R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum and M. G. Lilienthal: A simulation sickness questionnaire (SSQ): An enhanced method for qualifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3, 203-220, 1993.
- 14) P. A. Howarth and P. J. Costello: The occurrence of virtual simulation sickness symptoms when an HMD was used as a personal viewing system. *Displays*, 18, 107-116, 1997.
- 15) 鷗飼一彦：ヘッドマウントディスプレイの影響を実験。日経エレクトロニクス、通巻668号(1996年8月19日号)、153-164, 1996.
- 16) T. Takeda, Y. Fukui and T. Iida: Three-dimensional optometer. *Applied Optics*, 27, 2595-2602, 1988.
- 17) 加藤由美、鷗飼一彦：ビデオレフレクション法による3Dディスプレイ注視時の両眼近見三要素の同時測定。VISION, 12, 56, 1999.