第52回 日本視能矯正学会

シンポジウム「3D映像が視機能及び心身に与える影響と安全性対策」

3D映像による生体影響とガイドライン

江本 正喜

NHK 放送技術研究所

Health hazards by stereoscopic 3D images and guidelines

Masaki Emoto

Science & Technology Research Laboratories, Japan Broadcasting Corporation (NHK)

要 約

実用化を迎えたステレオ方式3D映像は、2D映像による生体影響に加えて、視聴者に両眼立体視に伴う視覚疲労を起こす可能性が懸念される。この視覚疲労の要因、機序、防止方法を検討するため、視覚疲労要因をあらためて整理した。まず、実体視の例から類推して左右像の融像努力が必要となるような疲労要因を、非原理的要因である左右像差と、原理的要因である水平両眼視差に分類した。この分類に基づく2つの疲労評価実験を、主に視機能変化を指標として行った。実験1では両要因が混在する状態での疲労評価を行い、2D映像と3D映像による視覚疲労の差を検証した。その結果、2Dより3Dの方が疲労が大きいことが示唆された。実験2では、原理的要因のみが存在する疲労負荷による疲労評価を行った。その結果、快適視域を超える大きい輻湊負荷や、その時間変動が視覚疲労の原因となることが示唆された。これらに基づき、見やすく、視覚疲労の少ない良質な3D映像の制作のために次を推奨する。(1) 左右映像の差を最小化すること、(2) 視聴者に提示される両眼視差分布とその時間変化を統制すること、(3) 瞳孔間隔の狭い年少者への配慮を行うこと。また、課題として、3D映像視聴による発達への長期的影響は不明であることを指摘し、さらに、若年者の視聴環境を十分に管理する必要性と、これらの問題に配慮ができる番組制作者の育成や経験の蓄積が急務であることに言及する。

Abstract

Stereoscopic 3D images are in current practical use. Health hazards, especially visual fatigue, induced by stereopsis of 3D images is an extra burden compared to 2D images. To investigate the causes, mechanisms, and measures of visual fatigue, we pigeonholed the visual fatigue factors.

J-STAGE 早期公開日：2012年11月30日

別冊請求先（〒157-8510）東京都世田谷区砧1-10-11

Tel. 03 (5494) 3395 Fax. 03 (5494) 3241

E-mail : emoto.m-hy@nhk.or.jp

Key words : 3D映像、ステレオ方式、生体影響、ガイドライン、視覚疲労

3D images, stereoscopic, health hazards, guidelines, visual fatigue

Firstly, we assumed that the visual fatigue factors are identical to real world factors, which includes viewer's fusion efforts. Then, we partitioned the visual fatigue factors into two categories; in-principle factors, in which there is horizontal binocular parallax, and non-principle factors, in which there are differences between left and right images with the exception of horizontal binocular parallax. Based on these categories, we conducted two visual fatigue experiments in which the fatigue indices were based mainly on visual function changes. In experiment 1, we tested the difference in degrees of the visual fatigue between 2D and 3D images including both factors in both categories. The result showed that the degree of 3D fatigue was greater than for 2D. In experiment 2, we investigated the visual fatigue including only in-principle factors. The result demonstrated that excessive horizontal binocular parallax exceeding the area of comfort and the time-varying change of parallax could possibly be the cause of visual fatigue. To work towards a comfortable and fatigue-minimized 3D content, we proposed the following important methodology: (1) minimizing undesired differences between left and right images, (2) distribution of binocular parallax and time-varying change of the parallax must be carefully controlled, and (3) considerations for young people who have narrow inter pupil distance who tend to be burdened with heavy parallax must be given. Furthermore, we pointed out that the effects of prolonged viewing of 3D images are not yet clear. Lastly, we referred to the adequate control of the viewing conditions that young people encounter and the urgent necessity to train content providers in regards to 3D production experiences.

I. 緒言

白黒放送から始まった放送サービスは、ハイビジョン (High Definition TV) に進歩し、そしてついに3D映像が実用化を迎えた。実用化された3D映像は、視聴者の左右眼に両眼視差を持つ左右像をそれぞれ提示し、視聴者が両眼立体視機能を駆使して奥行きを知覚するステレオ方式である。この方式は、技術的に比較的容易であり、画質も良好であるが、実物を見ているときの実体視で得られる立体知覚手がかりがすべて得られるわけではない。そして、この差異がステレオ方式3D映像による生体影響の原因となる。

従来の2D映像による生体影響として、光の点滅や幾何学模様などによる光過敏反応^{1), 2)}、手ぶれ映像などによる映像酔い³⁾、Video display terminal (VDT) 作業による眼の疲労^{4)~10)}が問題となっている。これらは、3D映像でも共通であるが、映像酔いは3D映像で尤進する可能性があり、眼の疲労では2D映像にはない両眼視差の要因が加わるため、3D映像特有の両眼立体視に伴う疲労が懸念される。

本稿では、3D映像特有の両眼立体視に伴う

視覚疲労の要因、機序、防止方法を検討する。一般には眼の疲労は、休憩によって回復する「眼疲労」と、医学的治療の対象となる「眼精疲労」に区別されるが、ここでは、両者を区別せず、「視覚疲労」という語を用いる。

「疲労は本来、主観的な概念であり、直接、計測の対象となるものではない¹¹⁾」にも関わらず、「疲労による生体における何らかの歪みによって生理的活動にも変化をきたし、機能の変化、物質変化、主観的訴え、能率の変化などを生じる¹¹⁾」ことから、3D映像による視覚疲労評価においても、焦点調節のステップ応答、瞳孔径、AC/A比、融像幅、近点距離、視覚誘発電位、臨界融合周波数Critical Fusion Frequency (CFF) の変化などが評価指標として用いられてきた^{12)~16)}。しかし、3D映像による視覚疲労評価指標の確立にまでは至っていない。これは、視覚疲労評価の困難さに加えて、視覚疲労要因の整理が十分でないため、様々な要因が混在していること、疲労負荷の統制が困難であること、個人差の問題などが原因であると考えられる。

そこで本稿では、3D映像による視覚疲労要因をあらためて整理する。まず最初に、実体視

における視覚疲労要因を参照する。実体視では、融像困難な左右像を融像努力により融像する必要がある場合や¹⁷⁾、病的原因により、相対調節や相対輻湊が健常者よりも著しく狭窄している場合¹⁸⁾には疲労の原因となる。これより、3D映像による視覚疲労原因も、融像しづらい左右像を融像するための融像努力であるという仮説を立てることができる。次に、3D映像において、左右像の融像努力が必要となるような視覚疲労要因を、非原理的要因と原理的要因に分類し、図1に示す。非原理的要因とは、左右の映像機器の特性差に起因する左右像差であり、主にハードウェアの問題である。原理的要因とは、ステレオ方式3D映像では不可避の水平両眼視差であり、主にソフトウェアの問題である。

要因

1. 非原理的要因	視機能との対応
左右の映像機器の特性差	
左右像の	
— 大きさの差	不等像視
— 垂直差	上下斜位, 斜視
— 傾き差	回旋斜位, 斜視
— 輝度差	
— コントラスト差	
— 色度差	
— 等	
2. 原理的要因	
水平両眼視差	水平斜位, 斜視

図1 視覚疲労要因

この分類に基づき、本稿では2つの実験を行った。実験1では両要因が混在する状態での視覚疲労評価を行い、2D映像と3D映像による視覚疲労の差を検証した。次に、両要因の内、非原理的要因は技術的改善によって駆逐または最小化できると考えられることから、実験2では、重要性の高い原理的要因のみが存在する疲労負荷による視覚疲労評価を行った。その際、実験参加者の融像能力の高低に応じた疲労負荷統制を行うため、各実験参加者の融像幅（相対輻湊全量）に対する比で融像負荷を設定し、評価指標は主に視機能の変化を用いた。

II. 対象および方法

実験1

実験1では、左右眼用2系統の映像機器で撮像、記録、表示された3D映像を約1時間視聴したときの視覚疲労評価を行い、同じ番組を2D映像で視聴したときと比較した。2系統の映像機器を用いているため、非原理的要因である左右の映像機器の特性差に起因する左右像差と、原理的要因である水平両眼視差の両要因が混在する3D映像である。ただし、3D映像制作経験豊富な要員による制作番組であるため、番組制作時に生じる非原理的要因である左右像差は可能な限り最小化する注意が払われている。また、疲労評価実験での表示の際にも左右像差は可能な限り最小化した。視覚疲労評価指標として、主観評価、AC/A比、融像幅を用いた。

主観評価として、映像視聴直後に目の疲れや体の変調の自覚症状について該当項目を選択するアンケートと自由記述での内省報告を行った。

Stimulus AC/A比の測定は映像視聴前、映像視聴直後に行った¹⁹⁾。AC/A比の変化は、時分割方式テレビで検討された例があり、視聴後の増加が報告されている²⁰⁾。

融像幅の測定は映像視聴前、映像視聴直後、休憩後、2回目の休憩後に映像視聴を行ったモニターを用い、バーテスト^{21), 22)}の測定範囲を拡張して行った。映像視聴を行ったモニターでの融像幅測定には、映像視聴後速やかに測定を行うことができるという利点がある。融像幅の変化は、前述の²⁰⁾やVDT作業に伴う疲労検討の際に用いられている¹⁰⁾。

映像視聴では3Dハイビジョン番組を約1時間視聴した。視聴条件は標準視聴条件に準じて設定した^{23), 24)}。視距離は画面高の3倍で約1.2m、水平視角は約33度であった。

実験参加者はインフォームドコンセントの得られた成人12名であった。スクリーニング^{21), 22)}によって視機能に問題がないことを確認した。さらに、両眼立体視に対する慣れの視覚疲労への影響を検討するため、ランダムドットステレオグラムの裸眼立体視テストにより、

実験参加者を裸眼立体視ができる群6名、できない群6名の2つの実験参加者群に分類した。各実験参加者は2D映像と3D映像を視聴する実験を各一回ずつ、異なる日に実施した。2D映像と3D映像の順番はカウンターバランスがとられた。

3D映像視聴の際の左右像はそれぞれ2台の32インチCRTモニタに提示された。モニタ前面に貼られた直線偏光フィルタと偏光眼鏡により両眼分離提示した、対照のための2D映像視聴時には実験参加者は左右眼とも同一方向の偏光フィルタから成る眼鏡をかけることによって、左眼用の映像を両眼で視聴した。

実験2

実験2では、1系統の映像機器で撮像、記録、表示された映像を様々な度のプリズムを通して約1時間視聴したときの視覚疲労評価を行い、原理的要因である水平両眼視差のみが存在する3D映像視聴の模擬を行った。これは、3D映像視聴による視覚疲労の原因と言われている両眼の輻湊と焦点調節の不一致が本当に疲労の原因となるかどうかについての検証でもある。同時に、実験1で明らかとなる融像幅の大きい個人差の影響を最小化するため、各実験参加者の融像幅に対する比でプリズム負荷を設定した。

最初に各実験参加者の融像幅を測定し、快適視域²⁵⁾の内外に実験条件を設定した。図2に設定した実験条件を、表1に各実験参加者の実験条件を示す。快適視域内の条件として、快適視域中央条件 (Center条件)、快適視域中央から

図2 快適視域と実験条件

開散側融像限界へ1/3の位置に輻湊を誘導するBIプリズムを用いる条件（-1/3条件）、輻湊側融像限界の1/3だけずれた位置に輻湊を誘導するBOプリズムを用いる条件（+1/3条件）を設定した。また、快適視域外の条件として、融像性開散限界の2/3（-2/3条件）、融像性輻湊限界の2/3だけずれた条件（+2/3条件）を設定した。プリズム負荷が $-2\Delta \sim +2\Delta$ に計算された条件では実際のプリズム負荷は 0Δ として実験を行い、得られたデータは負荷 0Δ の2D条件としても重複して使用した。これらの条件では映像視聴中、負荷となるプリズムの度は一定であった。さらに、プリズムの度が映像視聴中、時間変化する条件として、快適視域内で疑似乱数によりランダムにBI、BO両方のプリズムの度が変動する条件（R1/3条件）と、快適視域外まで変動が及ぶ条件（R2/3条件）を設定した。さらに、R2/3条件と同様、プリズムの度は快適視域外まで変動が及ぶが、誘導された輻湊点に焦点調節要求が行われるようにレンズ補償を加えた条件（Lens条件）を設けた。さらに、比較のため、プリズムを用いることなく、両眼視差

表1 各実験参加者の実験条件

	限界	プリズム一定					限界	プリズム変動		
	BI limit	-2/3	-1/3	Center	+1/3	+2/3	BO limit	R1/3	R2/3	Lens
実験参加者 1	-12	-5.0	<u>0.0(2.0)</u>	9.0	16.0	20.0	30	2.0~16.0	-5.0~23.0	-5.0~23.0
実験参加者 2	-10	-7.4	-4.6	-2.0	<u>0.0(0.6)</u>	3.4	6	-4.6~0.6	-7.4~3.4	-7.4~3.4
実験参加者 3	-10	-6.4	-2.6	<u>0.0(1.0)</u>	4.6	8.4	12	-2.6~4.6	-6.4~8.4	-6.4~8.4
実験参加者 4	-12	-5.2	<u>0.0(1.4)</u>	8.0	14.6	21.4	28	1.4~14.6	-5.2~21.4	-5.2~21.4
実験参加者 5	-12	-5.2	<u>0.0(1.4)</u>	8.0	14.6	18.0	28	1.4~14.6	N/A	N/A
実験参加者 6	-10	-5.0	<u>0.0(0.0)</u>	5.0	10.0	15.0	20	0.0~10.0	-5.0~15.0	-5.0~15.0

BI Prismをマイナス、BO Prismをプラスで示す。単位は△。下線は2D条件として重複使用。（ ）内はもとの計算値。
斜体はプリズムの度を計算値より減少させて実施。

をもつ一般的な3D映像を左右眼に提示する条件(3D条件)を設定した。ただし、この3D映像は経験豊富な要員による制作番組であり、番組制作時に生じる非原理的要因である左右像差は可能な限り最小化され、3組のカメラの輻湊点もほぼ一致している。

視覚疲労評価指標として、輻湊系に関連し、実験1で指標として有効であることが示される融像幅を、映像視聴前、映像視聴直後、休憩後、2回目の休憩後に映像視聴を行ったモニターに細い十字を提示して測定した。また、焦点調節系に関連する焦点調節のステップ応答と、視覚中枢系に関連深いと思われる視覚誘発電位を映像視聴前、映像視聴直後に測定した。

焦点調節のステップ応答とは、ステップ状に奥行きが変化する視標に対する焦点調節反応である。これまでに行われた視覚疲労評価によって、比較的長時間、視覚負荷状態に置かれた実験参加者の焦点調節応答が変化することが知られている²⁰⁾。本実験では、調節要求がステップ状に変化する指標に対する、優位眼の焦点調節応答をオートレフラクトメーター(ニデックAR-1100)を用いて5回連続で測定した。

視覚誘発電位(VECP)は、Transient型VECPのP100潜時を測定した。従来、時分割3D映像視聴によってP100成分の出現潜時が遅延することが報告されている¹⁵⁾。本実験では、眼前30cmに設置された1秒間隔で発光するフラッシュ刺激に対するVECPを50回加算平均した。脳波計として(NEC三栄 EE-1100)を、フラッシュ刺激をトリガーとした加算平均にはシグナルプロセッサ(NEC三栄 DP-1200)をそれぞれ用いた。

実験参加者は約1時間のハイビジョン番組を連続して視聴した。視聴条件は実験1と同一であった。実験参加者は立体視機能に問題がなく、インフォームドコンセントの得られた成人6名であった。ただし、R2/3、Lens条件では1名の実験参加者については体調不良のため実験を実施しなかった。各実験参加者は各実験条件の実験を各一回ずつ、異なる日に実施した。実験条件順はカウンターバランスがとられた。3D条件以外では実験参加者はプリズム、レンズ、

偏光フィルターから成る光学系(ニデック、電動レフラクター RT-2100)を通じて、一台の32インチCRTモニタに提示された映像を視聴した。3D条件では同一の光学系を通じて、二台のモニタに提示された左右映像を視聴した。実験終了後、疲労感や融像幅が十分に回復したことを確認した後、実験参加者は退出した。

Ⅲ. 結果

実験1結果

映像視聴直後の疲労主観評価で、3D映像の方が2D映像より疲労の度合いが大きかったとした実験参加者は5名、同程度は6名、2D映像の方が大きいのは1名であった。自覚症状では、3D映像で33件、2D映像で21件が報告されており、3D映像の方が増加した。自由記述では、実験参加者が自ら比較を行い、3D映像の方が疲れることを回答していることが特徴であった。これらの主観評価結果より、2Dに比較して3Dの方が疲労が大きかったことが示唆された。

AC/A比は調節力不足のため、2名は測定ができなかった。分散分析の結果、立体、2D映像視聴共に、時刻の主効果、裸眼立体視の可否の主効果、交互作用のいずれも有意とは認められなかった。

裸眼立体視の可否で分けた実験参加者の融像幅変化を3D映像視聴時を図3に、2D映像視聴時を図4にそれぞれ示す。エラーバーは標準偏差を示す。重複測定分散分析の結果、3D映像視聴時には時刻($P=0.029$)、裸眼立体視可不可($P=0.023$)共に有意差が認められた。一方、2D映像視聴時には有意差は認められなかった。次に視聴前との差を検討するため、Dunnettの多重比較を行った結果、視聴前と視聴直後の間に有意差が認められた($P=0.014$)。これらより、裸眼立体視できない実験参加者は裸眼立体視ができる実験参加者よりも融像幅が狭く、3D映像視聴によって融像幅が一時的に狭まるが、休憩によって回復することが示唆された。

以上、実験1では非原理的要因と原理的要因の両要因が混在する状態での視覚疲労評価を行い、映像視聴による視覚疲労評価指標として、

図3 3D映像観視時の融像幅変化

図4 2D映像観視時の融像幅変化

AC/A比は視聴前後で大きな変化が認められない一方で、視聴前後での融像幅の変化が有効であることが示唆された。さらに、実験参加者の裸眼立体視の可否によって融像幅が異なり、3D映像視聴に伴う視覚負荷の相違や、疲労に対する耐性などが異なる可能性があることが示唆された。

実験2結果

焦点調節のステップ応答は、一部の実験参加者で近見応答に調節速度低下と調節力低下が見られたものの、全体的には系統的な変化は認められなかった。

VECPは正中後頭部(MO)のP100成分潜時を求めた。映像視聴前と視聴後のP100潜時を、実験参加者6人で平均した結果を実験条件別に図5に示す。対応のある片側t検定を行った結

図5 P100潜時の変化

図6 融像幅の変化

果、R1/3条件 ($p=0.037$, $t(5)=-2.25$) とR2/3条件 ($p=0.028$, $t(4)=-2.67$) で有意な延長が検出された。これらのみの標準偏差をエラーバーで示す。

映像視聴前、映像視聴直後、休憩後、2回目の休憩後に測定した融像幅を図6に示す。

重複測定分散分析の結果、時刻と実験条件の交互作用が有意であった ($P=0.04$, $F(27, 108)=1.638$)。次に、視聴前との差を検討するため、実験条件別にDunnettの多重比較を行った。その結果、3D条件 ($P=0.009$) とR2/3条件 ($P=0.005$) の映像視聴前、直後間のみ有意差

が認められた。これらのみの標準偏差をエラーバーで示す。これより、視聴直後に認められた融像幅減少が休憩後にほぼ回復する変化は、映像視聴に伴う視覚疲労が、視聴後の休憩によって回復する過程を反映していると考えられる。さらに、R2/3条件と同一の輻湊負荷に、レンズ補償を加えたLens条件では視聴前との有意差は認められなかった。これより、相対輻湊負荷でなければ視覚疲労は小さいことが示唆された。また、他の条件では映像視聴前、直後間が有意傾向 $-1/3$ ($P=0.069$), $-2/3$ ($P=0.053$), $2/3$ ($P=0.056$) である一方、R1/3条件では、視聴前と2回休憩後間が有意傾向 ($p=0.058$) である。しかも、2回休憩後には視聴前よりも広い融像幅となっており、快適視域内に収まる程度の適度な輻湊開散眼球運動の繰り返しは、融像幅を増大させる訓練効果をもつことが示唆される。

以上、実験2では原理的要因である水平両眼視差のみが存在する3D映像視聴の模擬状態で、融像の個人差を考慮した視覚疲労評価を行った。その結果、輻湊負荷が大きい条件や時間変動する条件で、一部の実験参加者の近見焦点調節ステップ応答に変化が見られた。また、輻湊負荷が時間変動する条件で、フラッシュ刺激に対するTransient型VECPのP100潜時の延長が検出された。また、3D条件や輻湊負荷が時間変動する条件で、融像幅は視聴直後減少し、休憩後にほぼ回復した。この融像幅変化は、映像視聴時の相対輻湊に伴う視覚疲労が、視聴後の休憩によって回復する過程を反映していると考えられる。これらより、各実験参加者の融像幅の比で輻湊負荷をかけた場合、ある程度個人差を吸収することが可能で、快適視域を超える輻湊負荷や時間変動する輻湊負荷が視覚疲労の原因となることが示唆された。

IV. 考按

融像幅の再現性

実験1では映像視聴による視覚疲労評価指標として、融像幅が有効であることが明らかとなったが、その再現性についてのデータの1例を図7に示す。実験1では4回の融像幅測定を

図7 融像幅の再現性

行ったが、図7では、実験1と同一の映像を視聴しながら5分おきに融像幅測定を行った。この実験を別の日に2回行い、融像幅の変化を重ね書きした。この図より比較的良好な再現性が得られており、融像幅変化が視覚疲労評価指標として適していることが示唆される。ただしこの場合、融像幅測定回数の増加により、融像幅測定自体が視覚疲労の原因となっていることは否定できない。

プリズム順応

実験2において、度が一定のプリズムを用いる実験条件では、プリズム順応が起きる可能性がある。これを確認するため、映像視聴前に対

図8 プリズム順応

	山之上ら	Kooi et al.	Hanazato et al.	実体視
大きさ	2.89%	2.5%		5-13%
垂直	16.3分	34.4分		視対象大きさ, 視距離, 網膜部位に依存
傾き	1.14度	1度		数度
明るさ			黒レベルが重要	
クロストーク		5%	4-10%	

表2 左右映像差の許容範囲

する映像視聴後の融像限界点の比を開散、輻湊側別に図8に示す。プリズム誘導された側の融像限界点は増加し、反対側では減少していることから、プリズム順応が起きたことを確認できた。一方、プリズムの度が時間変化する実験条件では、プリズム順応は認められなかった。

P100潜時延長の自律神経解釈

実験2では、輻湊負荷が時間変動する実験条件でP100潜時延長が認められた。これは、疲労によって自律神経のバランスが副交感神経優位となり、縮瞳して網膜照度が低下した結果、潜時延長が検出されたと解釈可能である。

非原理的要因の許容限

本稿では直接扱わなかった、撮影や左右映像機器の特性差に起因する左右映像の差は3D映像の見づらさに直結し、長時間視聴では視覚疲労につながる可能性がある。この左右映像の差は本来はないことが望ましいが、実際には機器の製造精度などの問題から完全になくすことは困難である。そこで、3D映像の見づらさの観点から、左右映像差の許容範囲が提唱されている。これらを表2に示す^{27)~38)}。

ガイドライン

以上の知見を元に、3D映像制作に関わるガイドラインが公開されている³⁹⁾。また、国際標準化も進められている⁴⁰⁾。

見やすく視覚疲労の少ない3D映像のために

以上より、見やすく視覚疲労の少ない3D映像製作のためには、水平両眼視差分布やその時

間変化を統制することが重要である。そのための手順は以下になる。

1. 非原理的要因である撮影や左右映像機器の特性差に起因する左右映像の差を最小化する⁴¹⁾。
2. 表示するディスプレイの大きさなどの視聴条件を設定し、提示される水平両眼視差分布から空間再現の設計を行う。その際、60分より広い両眼視差分布となることが予想される場合、カメラ間隔を狭める、被写体の奥行き範囲を制限するなどの方策が有効である。瞳孔間隔の狭い年少者⁴²⁾が視聴する可能性がある場合には、水平両眼視差が過大となる可能性が高くなるので、特に注意する。図9に狭い瞳孔間隔による奥行き強調が生じることを示す。

図9 瞳孔間隔による再現空間

3. 映像の編集時などでは、複数カメラのカット切り替えなどによる、被写体奥行きの不連続かつ急激な変化は避ける。また、画面に文字スーパーを挿入する場合には、一般に、スーパーが映像にめり込まないように奥行きが決定されるが、その水平両眼視差が過大にならないよう統制する必要がある。

さらに、3D映像では、再現された3D空間に特有の歪みが生じることがある。典型的な歪みには、被写体の厚みが感じられない「書き割り効果」、再現空間中の被写体を小さく感じられる「箱庭効果」が挙げられる。これらは映像機器の光学系が人眼の光学系と異なること、自由度が大きいことが原因となっている。幾何学的解析によって撮影条件と表示条件から3D再生空間を計算することが可能であるため⁴³⁾、3D映像特有の歪みを防ぐことが可能である。さらに一歩踏み込んで、この歪みを積極的に演出に利用することも行われており、見づらくなったり、視覚疲労を起こしたりしない範囲であれば、有効な演出手法となる。

課題

以上、現段階で得られた知見を述べたが、課題も残されている。3D放送などが利用できるようになり、3D映像を長期に渡って視聴したときの影響は未だ検討されていない。特に、若年者は脳や視機能が発達途中であり、3D映像視聴による発達への長期的影響は不明であることが問題である。また、若年者は自覚的疲労を訴えにくいという側面も否定できず、周囲の成人が視聴番組、視聴時間、および、3D眼鏡も含めて、若年者の視聴環境を十分に管理することが望まれる。これらの課題を検討するためには、若年者をステレオ3D映像に長期的に曝露させる実験が必要であるが、これは倫理的に許されないため、疫学研究を待つしかないと考えられる。

最後に、3D映像番組制作側の問題として、年少者や両眼立体視の弱い視聴者にも配慮ができる番組制作者の育成や経験の蓄積が急務である。

以上、見やすく、自然で、視覚疲労の少ない

良質な3D映像番組が広範に提供され続けることで、われわれの生活を豊かにする映像文化の健全な発展を期待する。

参考文献

- 1) Harding G.F.A, Harding P.F.: Televised Material and Photosensitive Epilepsy. *Epilepsia*, 40: 65-69, 1999.
- 2) Harding G.F.A, Jeavons P.M.: Photosensitive Epilepsy, Mac Keith Press, London, 1994.
- 3) Ujike H, Ukai K, Nihei K.: Survey on motion sickness-like symptoms provoked by viewing a video movie during junior high school class. *Displays*, 29: 81-89, 2008.
- 4) Smith M.J, Cohen B.G, Stammerjohn L.W, Happ A.: An investigation of health complaints and job stress in video display operators. *Human factors*, 23: 387-400, 1981.
- 5) Ishikawa S.: Examination of the near triad in VDU operators. *Ergonomics*, 33: 787-796, 1990.
- 6) Murata K, Araki S, Yokoyama K, Yamashita K, Okumatsu T, Sakou S.: Accumulation of VDT work-related visual fatigue assessed by visual evoked potential, near point distance and critical flicker fusion. *Ind. Health*, 34: 61-69, 1996.
- 7) Jaschinski-Krusa W.: Visual strain during VDU work: the effect of viewing distance and dark focus. *Ergonomics*, 31: 1449-1465, 1988.
- 8) Gray L.S, Gilmartin B, Winn B.: Accommodation microfluctuations and pupil size during sustained viewing of visual display terminals. *Ophthal. Physiol. Opt.*, 20: 5-10, 2000.
- 9) Kaneko K, Sakamoto K.: Spontaneous blinks as a criterion of visual fatigue during prolonged work on visual display terminals. *Percept. Mot. Skills*, 92: 234-250, 2001.
- 10) Gratton I, Piccoli B, Zaniboni A.: Change in Visual Function and Viewing Distance

- during Work with VDTs. *Ergonomics*, 33: 1433-1441, 1990.
- 11) 大島正光: 疲労の研究. 第2版, 4-8, 同文書院, 東京, 1979.
 - 12) Peli E.: The visual effects of head-mounted display (HMD) are not distinguishable from those of desk-top computer display. *Vis. Res.*, 38: 2053-2066, 1998.
 - 13) Inoue T, Ohzu H.: Accommodative responses to stereoscopic three-dimensional display. *Applied Optics*, 36: 4509-4515, 1997.
 - 14) 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.
 - 15) Yamazaki T, Kamijo K, Fukuzumi S.: Quantitative evaluation of visual fatigue encountered in viewing stereoscopic 3D displays: Near-point distance and visual evoked potential study. *Proceeding of the SID*, 31: 245-247, 1990.
 - 16) Mitsuhashi T.: Evaluation of stereoscopic picture quality with CFF. *Ergonomics*, 39: 1344-1356, 1996.
 - 17) 萩原 朗: 両眼視、輻輳及びその障碍, 日本眼科全書, 第7巻 眼機能, 385, 金原出版, 東京, 1958.
 - 18) 萩原 朗: 両眼視、輻輳及びその障碍, 日本眼科全書, 第7巻 眼機能, 403, 金原出版, 東京, 1958.
 - 19) 眼科MOOK No.3, 眼科一般検査法, 40-49, 金原出版, 東京, 1978.
 - 20) 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.
 - 21) ITEテストチャート委員会.: 立体映像標準チャート解説書. (社)映像情報メディア学会, 東京, 1998.
 - 22) ITU-R.: Subjective assessment of stereoscopic television pictures. Recommendation ITU-R BT. 1438, 2000.
 - 23) ITU-R.: Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures. Recommendation ITU-R BT. 500-510, 2000.
 - 24) ITU-R.: Subjective assessment methods for image quality in high-definition television. Recommendation ITU-R BT. 710-714, 1998.
 - 25) Percival A.S.: The relation of convergence to accommodation and its practical bearing. *Ophthal. Rev.*, 11: 313-328, 1892.
 - 26) 井上哲理, 野呂影勇, 岩崎常人, 大頭仁.: 視覚機能から見た立体映像の呈示条件. *テレビ誌*, 48: 1293-1300, 1994.
 - 27) Hanazato A, Yamanoue Y, Okui M, Yuyama I.: Evaluation of Cross Talk in Stereoscopic Display. 3D conference, 10-3, 1999.
 - 28) Kooi F.L, Toet A.: Visual comfort of binocular and 3D displays. *Displays*, 25: 99-108, 2004.
 - 29) Yeh Y.Y, Silverstein L.D.: Limits of fusion and depth judgement in stereoscopic color displays. *Human factors*, 32: 45-60, 1990.
 - 30) Seuntiëns P.J.H, Meesters L.M.J, Ijsselstein W.A.: Perceptual attributes of crosstalk in 3D images. *Displays*, 26: 177-183, 2005.
 - 31) 山之上裕一, 永山克, 尾藤峯夫, 棚田詢, 元木紀雄, 三橋哲雄, 羽鳥光俊.: 立体ハイビジョン撮像における左右画像間の幾何学的ひずみの検知眼・許容限の検討. *信学誌*, J80-D-II: 2522-2531, 1997.
 - 32) 花里敦夫, 奥井誠人, 岡野文男.: 輝度クリップ特性差による立体映像の劣化の評価. *映像情報メディア学会年次大会*, 4-5: 49, 2001.
 - 33) Duke-Elder S.: System of Ophthalmology, Vol. V, Ophthalmic Optics and Refraction. 513-534, Henry Kimpton, London, 1970.
 - 34) Kertesz A.E.: Effect of stimulus size on fusion and vergence. *J. Opt. Soc. Am.*, 71: 289-293, 1981.
 - 35) Hara N, Steffen H, Roberts D.C, Zee D.S.: Effect of Horizontal Vergence on the Motor and Sensory Components of Vertical Fusion.

- Invest. Ophthalmol. Vis. Sci., 39: 2268-2276, 1998.
- 36) Howard I.P, Fang X, Allison R.S, Zacher J.E.: Effects of stimulus size and eccentricity on horizontal and vertical vergence. *Exp. Brain Res.*, 130: 124-132, 2000.
- 37) Howard I.P, Sun L, Shen X.: Cyclovergence and cyclovergence: the effects of the area and position of the visual display. *Exp. Brain Res.*, 100: 509-514, 1994.
- 38) Howard I.P, Ohmi M, Sun L.: Cyclovergence: a comparison of objective and psychophysical measurements. *Exp. Brain Res.*, 97: 349-355, 1993.
- 39) 3Dコンソーシアム, 安全ガイドライン (internet): http://www.3dc.gr.jp/jp/scmt_wg_rep/index.html (accessed 2011-08-10)
- 40) ISO IWA 3:2005 Image safety, Reducing the incidence of undesirable biomedical effects caused by visual image sequences. 2005.
- 41) Yamanoue H, Nagayama M, Bitou M, Tanada J, Motoki T, Mituhashi T, Hatori M.: Tolerance for Geometrical Distortions between L-R Images in 3D-HDTV. *System and Computers in Japan*, 29: 37-48, 1998.
- 42) Dodgson N.A.: Variation and extrema of human interpupillary distance. *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI*, *Proc. SPIE*, 5291: 36-46, 2004.
- 43) Yamanoue H, Okui M, Okano F.: Geometrical analysis of puppet-theater and cardboard effects in stereoscopic HDTV images. *IEEE Trans. ON Circuits & Syst.*, 16: 744-452, 2006.
-