原　著

製品の安全基準と生体影響リスク
―3D 立体映像のガイドライン規制を例にして

Safety standard and health risk: with the special reference of the guideline for 3D stereoscopic displays

小嶌健仁
Takehito Kojima

名古屋大学・情報科学研究科

要　旨

過去に2回、1950年代と1980年代に3D立体映像が流行した。流行の第三の波は2010年に起こった。多くの人々は、より高度で魅力的な立体表示を期待したが、残念なことに、3D テレビは魅力あるものとならなかった。わが国の公共放送の立体映像は飛び出しも引っ込みも極めて控えめであり、リアルな映像とはほど遠かったことで人々を引きつけられなかった、さらに、過去の研究者は 3D 映像観視にともなう眼疲労、不快感は、調節と輻輳の矛盾が原因であると述べており、これを根拠に 3DC 安全ガイドラインによって 3D の視差（飛び出し、引っ込み量）が規制された。この調節―輻輳矛盾とは、3D 立体映像の観視では、水晶体調節は画面に固定されているが、輻輳は立体映像の位置で交差し、両者は乖離している、というものである。だが我々の先行研究では、3D 立体映像観視時の被験者の調節は画面に固定されておらず、しかも、調節焦点が画面から離れても被験者は映像のボケをほとんど感じていないということがわかった。本論文では、一定の距離で被験者に実物体と 3D 立体映像を注視させて調節と輻輳を同時計測した。また、被験者が困難や不快感を伴わない状態での 3D テロップの最大飛び出し量の検証を行なった。さらに、内外の文献を考察し、ガイドラインの基準が適切であるかを検証し、快適で疲労の少ない 3D 映像の復権をめざして、3D の向かうべき方向性を論じる。

Summary

In the past, 3D stereoscopic images were popular in two different periods: the 1950s and the 1980s. A third wave of 3D technology arose in 2010 and many people expected more advanced and attractive 3D images. The advent 3D televisions failed expectations. The 3D images produced from public broadcasting in Japan that resulted in the retraction and emergence of images was very discreet. Past researchers have stated that eye fatigue results from an inconsistency in accommodation and convergence; that is, lens accommodation is fixed on a screen while convergence intersects at the position of the stereo-images. On this basis, the 3DC Safety Guidelines in Japan regulate the parallax of 3D（the amount of retraction and emergence of images）. In previous studies, we found that lens accommodation of subjects is not always fixed on the screen and that no blurring occurs. In this paper, we measured the fixation distances between lens accommodation and convergence in subjects as they viewed real objects and 3D video clips. We also examined the maximum distance in which the subjects' eyes could recognize a 3D character without any difficulty or discomfort. We described the state of safety standards and health risks in viewing such images.

キーワード：3D 立体映像、視差、調節、輻輳、安全ガイドライン
Key words: 3D stereoscopic images, parallax, accommodation, convergence, Safety Guidelines

1．はじめに

今日ほど情報技術が人々の日常に密接に関係している時代はなかった。世界人口に対する携帯電話加入率は、96.2％に達しているという（2013 年 ITU 統計による）。アフリカでも、約 10 億人の人口に対して、携帯電話の回線が 5 億 5,000 万回線契約されており、商取り引きでも、農産物の収穫時期でも、また、気象の急変や自然災害の予防にも、欠くことができない状況になっている。こうした全世界的な技術革新の恩恵を受け、利便性・有用性・経済性（安価）・即時性が向上した反面、偽情報、なりすまし、依存性、犯罪への利用、サイバーいじめ、健康影響、西欧諸国への富の集中、情報の一元的支配、盗聴など、かつて人類が経験したことがない不利益や危険事象の広がりが懸念されている。そうした中で、ヨーロッパを中心に、製品や製造物の国際標準を設定し、だれもが安心して役に立つ製品を利用しようという動きがますます盛んになっている。古くは、パソコンが普及し始めたころ、CRT ディスプレイからの電磁波や、高圧送電線の付近での低周波電磁場変動によって、発がんなどをはじめとする健康影響が出るのではないか、との危惧が持ち上がり、一部の疫学研究ではその可能性が示唆され、また、他の疫学研究では否定されるということがおきた。そうした中で、ALARA の原則がスウェーデンの労働組合を中心に提唱された。ALARA の原則とは「利便性と危険性のあるものを規制する場合は、その基準は合理的でかつ実現可能なほど低くする」というものである。

我が国では、1997 年に、「ポケモン事件」が発生した。これは、画面全体のめまぐるしい点滅により、全国のテレビ視聴者（主に児童・生徒）が、光刺激性けいれん発作を起こし、一説には、全国で約 700 台の救急車が出動し、また、13,000 人が影響を受けたと試算されている。この経験は、テレビ画面の光刺激がヒトの健康に大きな影響をもたらすという事実を全国民、とくに放送関係者やテレビ製造企業にあらためて深く認識させたものである。

2009 年の 3D 映画「アバター」の記録的ヒットに続き 3D 映画は次々に公開され、2010 年には世界初のフルハイビジョン 3D テレビの発売がそれに続いた。しかし国民的な期待にもかかわらず、3D テレビは魅力あるものとならなかった。当初の 3D が時分割方式の液晶シャッター眼鏡であったことも普及しにくい要因の一つとなった。1 台約 1 万円で家族 4 人で楽しむには 4 万円もの出費が強いられた。また、この眼鏡は重く、寝転んだり顔を傾けると立体が崩れてしまうなどの欠点があった。そのうえ、後にも述べるとおり、立体映像は飛び出しも引っ込みも極めてひかえめであり、リアルな映像とはほど遠く、期待に応えられなかった。一方、3D 映画はハリウッドを中心に、迫力ある立体映像を実現し、表示方式も円偏光メガネを用いたものは、軽く、顔を傾けてもかなりのレベルまで立体視を維持できるため、テレビとは異なり興行収入をあげ続けている。

人類にとっての豊かな映像表現の手段である 3D 立体映像が、少なくとも我が国の公共テレビ放送においては、著しく存在価値を失ってしまったことは重大な損失である。「人に優しい 3D 普及のための 3DC 安全ガイドライン」[1)]（以下、安全ガイドライン）という安全基準が、調節輻輳の矛盾を根拠に視差範囲を 1.0 度にしてしまったことが 3D の魅力を低下させたのではないかと思われる。3D コンテンツのクリエータからは、安全ガイドラインに従っていると、迫力ある 3D 映像は作れない、という声も上がっている。

科学技術の進歩の中で、ともすれば経済的利益のために安全をないがしろにする規制の骨抜きが世界史的には目立つのが実情であるが、3D は、そうした意味では逆の作用をもたらせたものといえる。3D 立体映像の「安全」を理由にした過剰な規制が、その技術の本来持っている優位性を喪失させているとするならば、どのような規制が望ましいのかを実験的検証を行ない、あるべき規制のレベルについて考察する。

2．3D の歴史と現状

3D の流行は約 30 年周期であるといわれている。両眼視による 3D 技術自体は新しいものではなく、1838 年に英国の物理学者 Charles Wheatstone が、ステレオペア画像を立体視する「ステレオスコープ」を発表している。したがって、映画が発明された 19 世紀末にはすでに立体写真の観視方法は広まっており、映画の初期から 3D 映画は製作されている。1950 年代に、テレビが一般家庭に普及し始め、ハリウッドは対抗策として 3D 映画の導入を急いだ。これが最初の 3D ブームであったが、基本的にモノクロームであるアナグリフ方式（赤青眼鏡方式）の限界や、コンテンツの不足で収束していった。1980 年代に 2 回目の 3D ブームが起こった際も、低品質な映像による映像酔いや立体感の乏しさ、映画の内容等で消費者が興味を失っていき

定着することはなかった。80 年代には、ゲーム機やビデオにも 3D 表示端末やコンテンツが登場しているが、キラーコンテンツといえるものがなく、映画同様消えていった。

3 回目の今回は、2009 年の映画「アバター」が火付け役となった。興行成績でも歴代のトップになったが 3D 技術を表現の手段として効果的に使用したことが興行成績に貢献しているのはまちがいない[2)]。

一方、2010 年のフルハイビジョン 3D テレビ発売時点では、3D 放送が充実しておらず、また、「飛び出す映像」という宣伝にもかかわらず、主に奥行方向に広がる 3D であり、期待外れの結果になってしまった。さらに、当時の主流が液晶シャッター眼鏡方式であったことで「眼鏡が高価」「重い」「画面が暗い」といったマイナス評価が出やすくなり、結果として「3D でなくてもいいのでは」「重い眼鏡を掛けてテレビを見たくない」といった感想も聞かれた。

わが国の 3D テレビの現状は、この流行がもはや終焉を迎えたかと思われるほどである。3D テレビを製造しているメーカーは裸眼・多視点 3D 方式に注目し、医療関係に市場をシフトしつつある。他方、韓国や台湾などアジアの新興国は、テレビ生産でも日本を凌駕し、3D でもシェアを拡げつつある。

3. 現行のガイドライン等による 3D の規制内容

2004 年に、経済産業省の 3D コンソーシアムにより安全ガイドラインが策定され、この中で、3D 映像の快適視差範囲は± 1.0 度以内とされている。

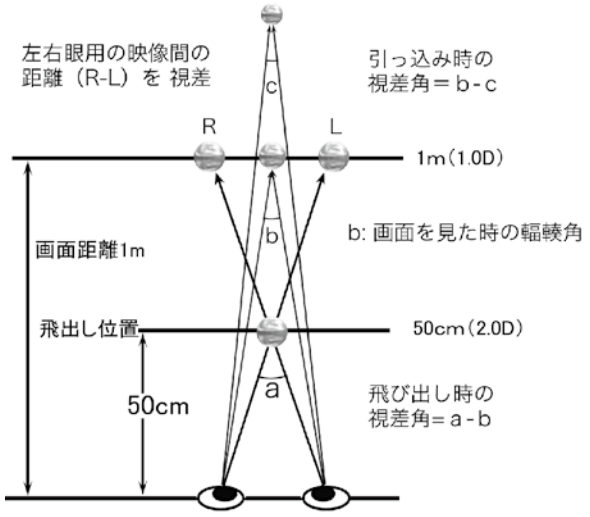

Fig.1　輻輳角、視差角

視差（角）とは、両眼で物体を注視した場合の眼球の角度の差である（Fig. 1）。図中の角 b が、画面上の一点を注視した場合の両眼のなす角度で輻輳角 b、これに対して 3D 映像が仮想位置に飛び出してきた場合、両眼の輻輳角は b より大きくなり角 a となる。視差（角）とは、この 2 つの角度の差であり、飛び出しの場合は、a − b、引っ込みの場合は、b − c である。また、角度の代わりに画面上の左右眼用の映像間距離（ピクセルや mm）を用いて視差と呼ぶ場合もある。

安全ガイドラインに示されている、両眼視差 1.0 度の飛び出しがどれくらいの距離かというと、視距離が 1.0m の場合、画面から約 21cm 飛び出す距離であり、この飛び出し量が最高限度（瞬間的には越えることもある）として厳守されているため、通常の飛び出し量は 1.0m の視距離に対して十数センチに過ぎない。前述した「飛び出す映像」のイメージからするとかなり少ない飛び出し量に感じる。ダイナミックな飛び出しを期待する消費者にとってはいわばレリーフにすぎないようなひかえめのコンテンツでは立体映像としての魅力が感じられなかったのであろう。

3D 映像の有害生体影響としては、眼疲労や映像酔いがあげられてきた。安全ガイドラインにも、この原因として、見えの不自然さ、不適切な視差の設定、調節・輻輳の矛盾、映像の歪、箱庭効果、書割効果、画枠歪、垂直視差の有無、運動視差の矛盾、左右像の幾何学的ずれ（特に上下）、左右像の光学的特性の差、左右色の差などがあげられている。このうち、眼疲労が起きるメカニズムについて説明されているのは、「調節と輻輳の乖離が原因とされる」という箇所と「過度の視差は 2 重像を生じさせるため視覚疲労の原因となる」という個所である。この、過度な視差（角）は、眼疲労を引き起こす、という理由で、3D 映像の視差（角）は 1.0 度（60 分）以内でなくてはならない、という原則が制作部門でもテレビ製造業界でも一般化され、ひとり歩きしている。今日、テレビ関係者はだれもが、3D は 1.0 度を超えて飛び出したり、引っ込んだりしてはいけないと信じ込まされている。疑問があろうと、テレビ局が認めないし、また、自動的に視差 1.0 度以上をチェックする機器も普及している。

一方、3D テレビに関する検討会最終報告書[3)] では、「違和感や不快感を生じさせるような 3D 映像を長時間視聴すると、視覚疲労につながる可能性が高いと一般的には想定されるが、現状では、関連性が明確に示されている研究はない」としており、こちらは原因が

明確ではないとしている。

このような状況での規制のあり方の先行事例として、スウェーデンの例を挙げる。かつて、VDT からの低周波電磁場変動の人体曝露に対して、スウェーデンの労働組合を中心に「アララの原則」（ALARA: As Low As Reasonably Achievable）が提唱された。これは、VDT から低周波電磁場変動が起きているのは間違いないが、危険だからといって使わないと、極めて不便を強いられる。そこで、合理的に実現可能なだけ被曝量を低くすることで、リスク（危険）とベネフィット（利益）のバランス、資金、社会的影響、なども考えたうえで、有害影響をできる限り低く抑えるという考え方である。

3D 映像についても同様な考え方ができるのではないだろうか。過剰な両眼視差を持たせた 3D 映像はユーザの視覚に過度の負担を強いる。だからといって、厳しく規制しすぎれば、映像表現としての立体効果が激減してほとんど立体として感じられなくなり、魅力を失ってしまう。3D 映像も ALARA の原則にもとづいて、ユーザの安全を第一に、しかし、3D の魅力を損なわないレベルで飛び出し（引っ込み）量の制限を定めるべきであろう。

本論文では、主に眼精疲労と視差角について視差角の許容量を実験的に検証した結果をもとに論を進める。

4. 基本的視機能と立体感の手がかり

ここで、我々が物体を見る場合の基本的な視機能と立体視の際に使用している手がかりについて述べる。ある物体を注視する場合、我々の眼は、主として水晶体調節と輻輳の 2 つの視機能によって奥行き感をつかんでいる。その他にも多くの手がかりがあり、それぞれについて詳細な研究がある。

<4.1> 調　節

眼球をカメラに例えた場合、レンズは文字通りレンズ（水晶体）であり、フィルム（受光素子）は網膜にあたる。カメラがピントを合わせる場合はレンズを前後に動かしてフィルム上に鮮明な像を結像させるが、我々の眼はレンズの厚さを変えて、網膜上に結像する。このピント合わせを調節と呼ぶ。

<4.2> 輻　輳

我々が近くの物体を注視した場合、左右の眼は一点に向かって寄り目の状態になる。この、水平方向で内側に向かう眼球運動を輻輳と呼び、視線の交差する点を輻輳焦点、輻輳焦点までの距離を輻輳距離と呼ぶ。

<4.3> その他の立体感の手がかり

1．両眼視差
2．単眼運動視差
3．物の大小
4．物の高低
5．物の重なり
6．きめの粗密
7．形状
8．明暗（陰影）
9．コントラスト
10．彩度
11．鮮明度

以上のように、両眼視差がもっとも影響が大きいが、次いで、運動視差も強い影響をもち、それ以下の各項目の豊富な手がかりで、立体の認知を実現しているわけである。

5. 調節―輻輳矛盾説と安全ガイドライン

<5.1> 調節―輻輳矛盾説の誤りの実証

1）目　的

前述の安全ガイドラインにもあるとおり、従来の説明では、実物体を注視している場合は水晶体調節と輻輳の焦点は同じところにあるが、3D 映像観視時には水晶体調節の焦点は映像の表示されている画面に合っており、輻輳は仮想物体の飛び出し（引っ込み）位置に合うため、両者が乖離しており、この乖離が大きいと視覚疲労や不快感を生じる。とされてきた[4) 5) 6) 7)]。これは調節－輻輳矛盾説[8)]と呼ばれる。

我々はこれに対し、1.0m（1.0D：ディオプトリ）から 50cm（2.0D）の間を往復する実物体および 3D 映像を用いて水晶体調節と輻輳の同時計測を行った。このことによって、調節－輻輳矛盾説の誤りを実証しようと考えた。

2）実験の方法

実物体は視標移動ロボットを用い、映像はオリンパスメモリーワークス社のアドバンスト Power 3D™ 技術を用いて作られた物を使用した。実物体は被験者の眼前 1.0m（1D）から 50cm をサインカーブ曲線で 10 秒周期で往復する。3D 映像も実物体と同様、眼前 1.0m から 50cm までを 10 秒周期で往復する。なお、映像を表示するディスプレイは被験者の眼前 1.0m に設置した。映像の設定を Table 1 、Fig. 2 に、3D 立体映

像の画面を示す。

被験者は計測前に視力検査を行い、必要な者はソフトコンタクトレンズにより正視に矯正した後、実験に参加させた。また、事前にインフォームドコンセントを行ない同意を得た。本実験は名古屋大学情報科学研究科倫理審査委員会の承認を得ている。

Table1　３D 映像仕様

視距離	1.0 m (1.0 D)
瞳孔間距離	60 mm
3D表示方式	サイドバイサイド
飛び出し位置	眼前0.5 m(2.0 D, 視差角3.5°)
引っ込み位置	眼前1.0 m(1.0 D, 視差角0°)
背景位置	1.21 m (0.83 D)
輝度	通常
画面輝度 （計測器越し）	70.4 cd/m^2

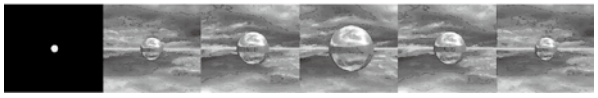

Fig. 2　実験に使用した 3D 映像

3）結　果

典型例を Fig. 3a、3b に示す。計測結果は、若年者の場合、実物体・3D 映像に限らず水晶体調節も輻輳も注視する視標の運動に同期して遠近運動していることが示された（調節が輻輳焦点から 0.3 ～ 0.4D 程度下がる人も多い[9) 10)]）。一方、中高年の場合、輻輳は年齢に関係なく注視する物体とともに移動するが、老視の進行により水晶体調節の能力が低下して近見視が困難になるため、実物体・3D 映像にかかわらず調節と輻輳は乖離しており、常に調節―輻輳矛盾の状態になっている。

実験結果より、若年者においては、3D 映像観視時に水晶体調節が画面に固定されている、とするのは誤りであるといえる。また、中高年については、老視の進行にともない、実物体を見ている場合であっても、近見視では調節と輻輳が乖離している。

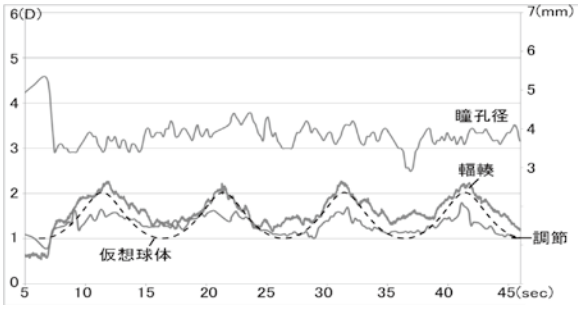

Fig. 3a　10 秒周期のサインカーブで移動する仮想球体の調節、輻輳同時計測結果の典型例（20 代男性）

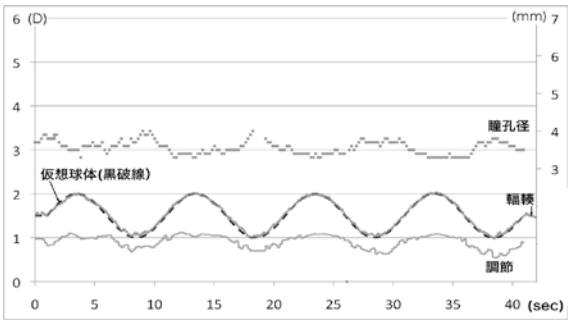

Fig. 3b　10 秒周期のサインカーブで移動する仮想球体の調節、輻輳同時計測結果の典型例（40 代男性）

<5.2> 視差角 1.0 度の妥当性を検証する実験

水晶体調節の画面への固定を理由の一つとしている視差角 1.0 度について、文献的な検討及び実験 2 を計画し、検証を行なった。

1）視差角 1.0 度の根拠の文献的な検討

安全ガイドラインの快適視差範囲の項目では「時間的、空間的に急な 1.0 度以上の視差角変化は疲労原因となるため避けるのが望ましい」としている。この根拠となっている江本、矢野らの論文[11) 12)]には、3D 映像の認知割合は、視差角 0 ～ 1.0 度未満で 87%、となっており「両眼視差の変化が 1.0 度程度に収まるようにすれば今回の実験条件では、ほとんどの観察者（約 87%）は二重像にならずに融合して観察することを示している」という記述がある。

この論文の発表後、実験を実施した長田は「立体映像の観察時における輻輳性立体視限界 VFSL の分布」[13)]を発表し、その中で、84%以上の人が融合可能な両眼視差を多人数の分布を用いて VFSL として決定している。「VFSL」とは、「立体視の可否判断も加えた最大の両眼視差を輻輳性融合立体視限界（Vergence fusional stereoscopic limit, VFSL）」であり、立体視の

可否判断とは、「努力して融像するのではなく、通常の感覚で融像するレベル」で判断したものである。江本らの論文と同程度の認識率である 84%以上の被験者が得られているのは、非交差（引っ込み）で 2.04 度、交差（飛び出し）で 1.84 度であり、視差角約 2 度までは 84%の被験者が 3D 映像を容易に認識できている。実験結果では、江本らの 1.0 度は長田の 2 度に相当する。2 つの実験条件では被験者層に違いがあり、江本らは 18 ～ 67 才の 301 名、長田は 18 ～ 40 才の 392 名であるが、この条件が実験結果の差につながったとは考え難い。また、長田自身高年層の解析もしており、有意差がないため 18 ～ 40 才で実験、解析を行った。とのことである（長田私信）。

両者の論文の約 1.0 度の開きについて、長田は論文中で以下のように述べている。（以下転載）「…測定から、被験者の 80% が融合可能な両眼視差は、非交差 2.20 度、交差 2.15 度であった（Model: uncrossed 50% 3.05, 84% 2.04, crossed 50% -3.34, 84% -1.84 deg）。…中略…測定データの一部での報告文献 14 では、…中略…　結論で分布の特徴量を「図 8 と表附より、両眼視差の変化が 1 度程度に収まるようにすれば、ほとんど（約 87%）の観察者は二重像にならずに融合して観察できる、また 2 度程度あると約半数は二重像を知覚することを示す」と述べている。本研究結果とは約 1 度の差異がある。上記の差異を具体的に考えると、図 3 で、例えば中央値に両眼視差 1 度の違いが生じれば、立体視可能な観察者数では 4 割弱の違いがあり、…中略…　設計基準に活用しようとする分布測定としては致命的な欠陥になる。被験者集団の偏り、あるいは測定システム自体の信頼性、延いては、立体映像の設計基準としての分布の測定結果に対する有効性に疑義を生じさせる。…中略…　提示した両眼視差は連続値であることから、2.0 度で 87% の観察者が可能であると言える。また同様に、50% の観察者が可能な値は 3.0 度級区分内において、即ち 3.0 度を少し超す値であることを示している。これらは本論の測定結果（対数正規分布モデル）の値と一致する。文献の誤謬は、前述した VFSL の測定法の不十分な理解の上に、初歩的統計学上の扱いから逸脱して拙速に処理したことによる。」（以上）

すなわち、1 度の開きは、江本らが、3D を認識した被験者の累積を誤ったためと考えられる。江本らの論文の図 8 とは、角度ごとのヒストグラムと累積度数のグラフである。交差性（飛び出し）の結果（図 8b）は、n=301 に対し、0 度以上 1 度未満、つまり 1 度以上の視差で立体視できなかった被験者が数名、0 度以上 2 度未満（2 度以上の視差で立体視できなかった被験者）は累計で 40 名弱である。この割合は、40/301 = 0.133 で、多く見積もって 14%。残りの 86%は視差 2 度以上の融像が可能である。0 度以上 3 度未満まで認識できた被験者累計は 150 名弱であり、残りの 150 名強は 3 度以上の視差の 3D 画像を融像できている。この数値は上述の長田の計上した数値とよく一致する。

2）実験と方法

3D 映像の認識率を確認するため、健常な両眼視機能を有する被験者 94 名による 3D 映像の飛び出し距離の認知実験を行った。年齢別の内訳は、若年（18–29）:27 名、壮年（30–44）:12 名、中年（45–64）:39 名、高年（65–81）:16 名であった。被験者は、視差角を 1.0 度から 6.0 度まで変化させた 3D 映像を観視し、3D として認知可能か確認し、さらに飛び出し距離の主観評価を行なった。用いた映像を Fig. 4 に、実験の概要を Fig. 5 に示す。提示画像は、黒色の背景に緑のマルテスクロスで、十字のサイズは縦横 186 ピクセルであった。ディスプレイは LG 社製、円偏光フィルター方式 42 型テレビ。被験者は 3H（画面の高さの 3 倍：本実験では 157 cm）の距離に着席し、ポインタを使用して飛び出していると感じられる距離を示す。

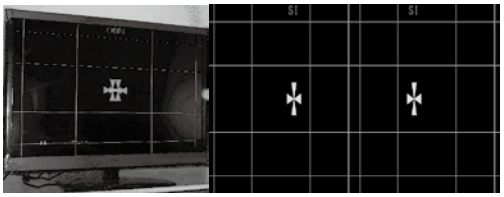

Fig. 4　提示画像（左：提示状態、右：左右眼用原画）

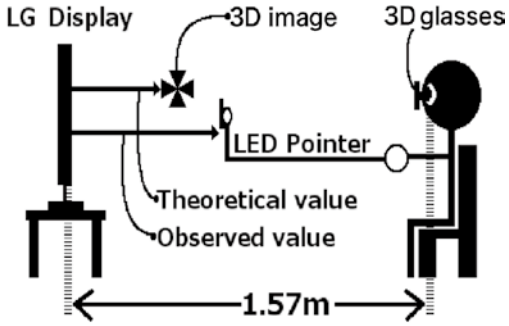

Fig. 5　実験概要

なお、ポインタ（指示棒）による立体視のかく乱を防ぐため、マーカーの LED を指示棒から 20cm 上方に固定した。

3）結　果

結果を Table.2 と Fig. 6 に示した。すべての被験者の平均では視差角 1.0 度は 100％、2.0 度は 80％以上の被験者が認知できていることが示された。また、文献で検討した数値ともよく一致する。

Table.2　視差角別の３D を認知できた被験者の割合

		合計	若年	壮年	中年	高年
	被験者(人)	94	27	12	39	16
割合(%)	6°まで認知	64.9	74.1	75.0	64.1	43.8
	5°まで認知	68.0	77.8	83.3	66.7	43.8
	4°まで認知	70.2	81.4	83.3	66.7	50.0
	3°まで認知	73.4	85.2	83.3	69.3	56.3
	2°まで認知	86.2	92.6	91.7	87.2	68.8
	1°まで認知	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

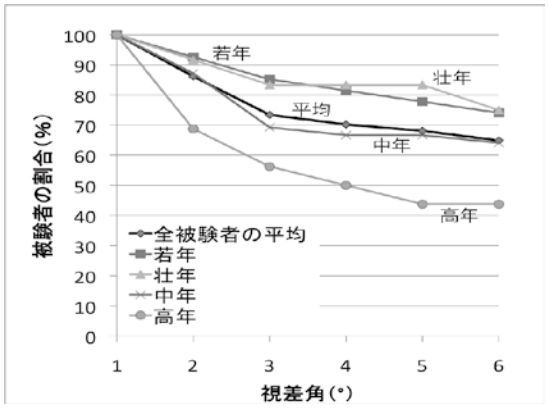

Fig. 6　３D を認知できた被験者の割合

<5.3> 考　察

文献の検討および２つの実験から、調節―輻輳矛盾説と快適視差範囲1.0度以下の基準値について考察する。

調節―輻輳矛盾説について。我々の眼は近見視において、輻輳運動、水晶体調節、瞳孔縮瞳の３つが連動するため、調節と輻輳が乖離することが好ましくないのは確かである。しかし、「3D 立体映像の観視時に調節が画面に固定されている」ことはこれまで充分に検証されて来なかった。我々は先行研究において、調節輻輳の同時計測で調節が画面に固定されていないことを検証した。これを受けてか、安全ガイドラインの表記は、2010 年改訂版（3dc_guideJ_20100420.pdf）では「眼はディスプレイ面にピントを合わせる」となっているが web 上の最新のファイル（3dc_guideJ_20111031.pdf）では「ピントを合わせるべき画像はディスプレイ面にある」という記述に変わっている。また､最近の書籍によっては「調節は画面に固定」ではなく「調節は鮮明な網膜像を得るために画面近傍に働きます」[14] とある。これらのことからも「調節が画面に固定される」かどうかが充分に検証されてこなかったことがわかる。一方、記述の変化は、「調節は画面から離れて働いている」ことが認知され始めている証左である。

<5.1> の実験結果では、若年者の場合、3D 立体映像観視の際に、大きな調節―輻輳矛盾は生じていないという結果が、一方、老視の進行している中高年の場合は、近見視であれば、実物体、3D 映像にかかわらず、調節―輻輳矛盾の状態であるという結果が得られた。中高年については常に調節―輻輳矛盾状態であるのに、日常生活でいつも眼疲労や不快感を生じているわけではない。

次に安全ガイドラインに述べられている快適視差範囲± 1.0 度について検討する。この基準値については、長田論文の結果に基づくならば大多数の人が快適に融像出来る範囲は２度と考えられる。したがって、視差角の記述については、現行の 1.0 度を修正し 2.0 度とするべきである。快適視差範囲は± 2.0 度となり、約半数が二重像を知覚するようになるのは視差角 3.0 度の場合となる。我々の実験による検証でも長田論文と同様の結果が得られており、文献による検討結果を実験により実証できている。

ただし、奥行き側（引っ込み）については、視差角よりも眼球の開散が起こらない視差量（大人 60mm、子供 50mm）に留意し､視差角を決定する必要がある。

6. 映像のボケと被写界深度についての考察

<6.1> ボケと被写界深度の文献的検討

若年者では、3D 立体映像を観視している時の調節は画面から離れてバーチャル位置に近い場所に移動しているという我々の主張に対し「水晶体調節が画面に固定されていないのであれば、観視している映像はボケて感じられるのではないか」という疑義が提示された。これに対して、実際にはボケをほとんど感じない根拠を実験結果とともに考察する。

十分な明るさの画面を観視する場合、瞳孔の縮瞳にともない視力が向上する。さらに被写界深度が深くなり、ボケずに見られる範囲が広がる [15) 16) 17)]。Table.3

に瞳孔径と視力値の変化を示す。

Table.3　Westheimer の瞳孔径と視力（555nm の光）

瞳孔径(mm)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Cut-off 空間解像度 (Hz/min arc)	0.26	0.52	0.79	1.05	1.31	1.57
およその視力	2.0	1.0	0.65	0.5	0.4	0.3

Patterson らは、充分に明るい状態では被写界深度は ± 0.5D 程度存在し、瞳孔径が 1.0mm 拡大するごとに 0.12D ずつ深度が減少するとしている[18) 19)]。また、調節―輻輳矛盾は映像観察者に対して存在するかもしれないが、それは視距離が短い時にのみ生じやすいとしている。それは視距離が短くなるにつれ、被写界深度も浅くなっていくからである。Patterson はさらに、被写界深度のおかげで立体映像を見るほとんどの条件下では調節 - 輻輳矛盾は起きないであろうことを示した[15) 18) 19) 20)]。

<6.2> 実　験

1）方　法

被写界深度の影響を検証するため、実験 3 を行なった。映像は実験 1 で使用した画像を用いて、ステップ変動視標として、1.0D（1.0m）、1.5D（67cm）、2.0D（50cm）で 10 秒ずつ停止させた。また、被験者の瞳孔径を変化させるため、通常の画面輝度に加えて低輝度映像を用い、瞳孔径を散大させて被写界深度を浅くして調節、輻輳を同時計測した。

被験者は 21 歳から 47 歳までの男女 7 名、ディスプレイは円偏光方式 23 型、視距離は 1.0m に設定した。瞳孔径の計測値に基づき、瞳孔径 2.5mm で被写界深度を ± 0.5D とし、1.0mm の散大につき 0.12D ずつ減算してグラフに示した。調節値の上下にかかっているハッチが被写界深度域である。

2）結果と考察

計測結果の典型例を Fig. 7，8 に示した。20 才代、40 才代のどちらも、計測のほとんどの部分で画面位置（縦軸の 1D）が被写界深度の範囲内に入っている。特に 40 代の場合、老視の影響が出はじめ、調節値の変化量も減少しているため、画面位置の前後でしか調節が動かず、結果として全域で画面位置が被写界深度内に入っている。つまり、画面から水晶体調節が仮想物体の　動きに連動して移動しても、ほとんどの場合、ボケを感じることなく観視可能ということである。興味深いのは、20 代の低輝度、2.0D の飛び出し時（Fig. 25 ～ 35 秒あたり）に、調節が輻輳値（50cm）と画面位置を往復するような動きを示したことである。仮想物体の飛び出し位置と、画面位置のどちらかが被写界深度域から外れていると、そちらへ動くかのような動きであった。ただし、低輝度環境は実験用に設定した、通常の 1/3 以下の輝度であり、一般の観視環境にはあり得ない暗さである。

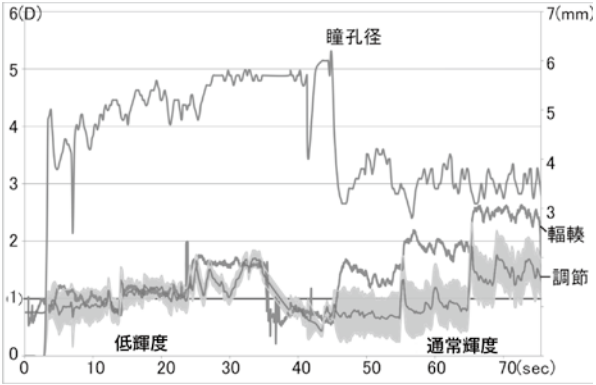

Fig. 7　20 才代ステップ変動視標
視標は 1.0D（1.0m), 1.5D（67cm), 2.0D（50cm）で変化し、ハッチ部分が被写界深度を示している右:低輝度での計測結果、左：通常輝度での計測結果

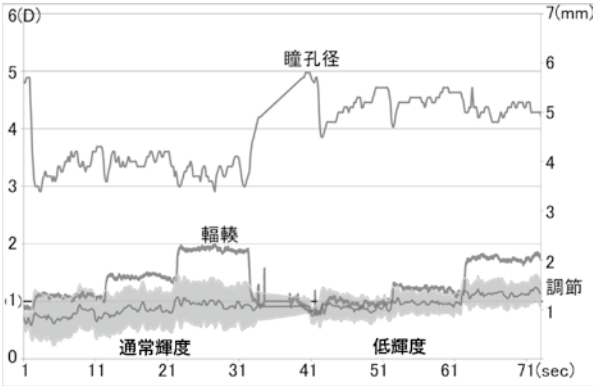

Fig. 8　40 才代ステップ変動視標
視標は 1.0D（1.0m), 1.5D（67cm), 2.0D（50cm）で変化し、ハッチ部分が被写界深度を示している右:低輝度での計測結果、左：通常輝度での計測結果

<6.3> 考　察

本実験では視距離 1.0m で計測したが、映画館や一般家庭の大型テレビでは、大きな視距離がある。仮にスクリーンまで 5m（0.2D)、水晶体調節が眼前 2.5m（視距離の中間：0.4D）まで移動したと仮定する。映画館は暗いので、瞳孔径が 2.0mm 散大して被写界深

度が 0.5 − 0.12 × 2 = 0.26D になっても、0.4 − 0.2 = 0.2D でスクリーンは被写界深度に入っていることになる。また、50 型程度のテレビも同様で、視距離 2.0m（0.5D）調節が 1.0 m（1.0D）まで移動したとする。テレビ画面は通常 300 cd/m^2 程度の輝度があり、瞳孔径は 3 mm 以下になっており、被写界深度はほぼ 0.5 D あると考えられる。画面と調節は 0.5 D 離れているため、やはりボケをほとんど感じることなく観視可能となる。

次に、水晶体調節の焦点位置と、観視対象が離れている場合について、Fig. 9 に視距離 1.0m（1.0D）、飛び出し位置（＝水晶体調節位置）が 50cm（2.0D）、さらに被写界深度が 0D と仮定して、水晶体調節が手前に移動した場合の画面の見え方を考察する。

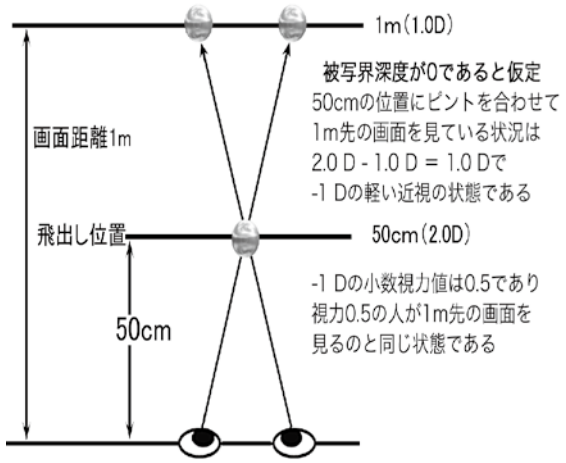

Fig.9　眼前 50cm にピントを合わせた場合の視力

視距離 1.0m（1.0D）で 50cm（2.0D）の位置にピントを合わせた状況（1.0 − 2.0 = − 1.0D）は、− 1.0 D の軽い近視の状態であり、1.0m 視力 0.5 の人が 1.0 m 先の画面を見るのと同じである。Fig. 10 に近視と視力の関係を示した。グラフは 1998 ～ 2009 年までの乱視のない小学 5 年生の裸眼視力を測ったものである。横軸の − 1.0D（軽い近視）は小数視力値（縦軸）の 0.5 に相当する。小数視力値 0.5 であれば、よほど細かい文字でなければ問題なく観視可能である。したがって、画面より前に調節が移動した場合の視力低下を考慮しても、映像がボケて感じられることはほとんど起こらないということができる。

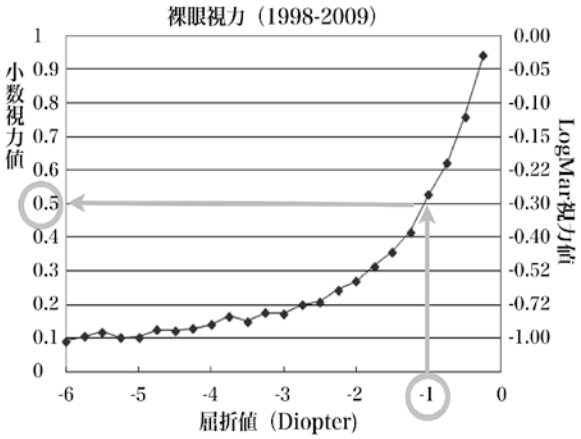

Fig.10　乱視のない小学５年生の屈折値

（出典：電子情報通信学会 2012 岡山総合大会講演）

実際には、明るい画面を見ることで瞳孔径が縮瞳するため、被写界深度が深くなりピントの合う範囲が前後に増えるため、映像のボケを感じることはより起こりにくい。視距離 1.0m、2.0m における飛び出し量と視差角の関係を Fig. 11, 12 に示した。視距離 1.0m は、実験環境で用いた距離である。また、瞳孔間距離は日本人成人男子の平均である 65mm で計算してある。Fig. 11 の視距離 1.0m における視差角 1.0 度は、画面上では 18 mm の距離である。画面の一点を注視した場合の輻輳角は 3.72 度、仮想物体の飛び出し位置は画面から 22cm で、輻輳角は 4.72 度である。4.72 度 − 3.72 度 = 1.0 度である。視差角 2.0 度では左右像間の距離は 35 mm、飛び出し量は画面から 35 cm であり、輻輳角は 5.72 度である。なお、実験で用いた映像は、1.0m（1.0D）から 50cm（2.0D）まで飛び出す仕様であり、これは視差角では 3.5 度にあたるが、映像のボケについては、低輝度画像の 2.0D の飛び出し時に「融像できなかった」というコメントが 1 名から出されたのみであった。また、視差角 3.5 度まで飛び出した場合でも、ディオプトリでは 2.0D − 1.0D = 1.0 D であり、Fig. 9 で示した軽い近視の状態と同じである。視距離 2.0m の場合が Fig. 12 である。一般家庭に普及している 40 型から 55 型のテレビ画面（縦横比 16：9）の高さは、50 ～ 70cm であり、勧奨距離 3H（画面の高さの 3 倍）で観視すると、視距離は 2.0m 前後である。Fig. 11 と同様に飛び出し量と輻輳角を考えると、画面位置の輻輳角は 1.86 度、視差角 1.0 度での飛び出しは画面から 70cm、輻輳角は 2.86 度で 2.86 − 1.86 = 1.0 度である。視差角 2.0 度の場合は、飛び出し 104cm、輻輳角 3.86 度である。なお、同じ視差角 1.0 度であっ

ても、視距離 2.0 m の場合、輻輳角は 2.86 度で、視距離度の影響も加味すると、2.0 度の飛び出しであってもボケのない映像を見ることが可能である。現行のガイドラインの快適視差範囲は 1.0 度以下と規定しているが、上記の考察から 2.0 度が修正基準値の有力な候補として考えられるであろう。

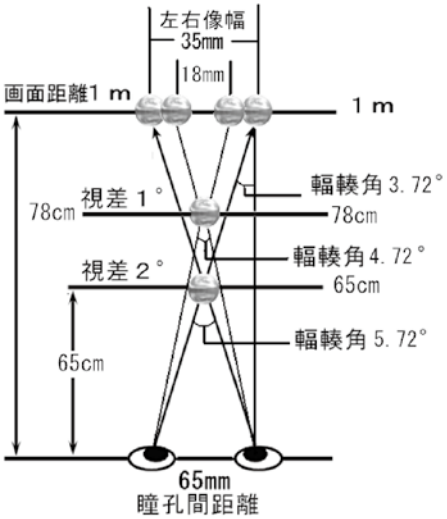

Fig.11　視距離 1.0m における飛び出し量と視差

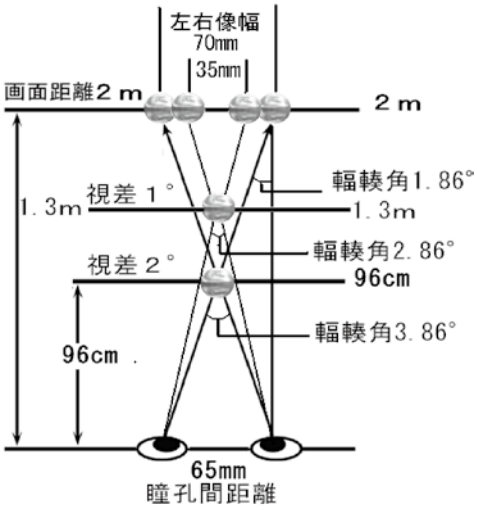

Fig.12　視距離 2.0m における飛び出し量と視差

7. 映像技術

今回検証に用いた Power3D 技術を用いて作られた 3D 映像は、画面のどこを見ても映像が破綻しないような作りになっている。飛び出してくるオブジェクトは視差角の大きい 2 台のカメラで、背景は視差角の設定が狭い別の 2 台のカメラで撮った映像と同じ視差である、この 2 種の映像を、スーパーインポーズのように合成する。この結果、観視者が画面のどこを注視しても不自然な視差がついていない映像となっている。

従来の手法であれば、グリーンバック（被写体は緑や青の単色の背景で撮影し、本来の背景は被写体のマスクをかけて撮影して被写体と背景を合成する手法）で被写体と背景を合成する手法に似ている。過日公開された「塔の上のラプンツェル（2010）」は、これとよく似た「マルチリグ方式」を採用しており、前景、中景、遠景で、それぞれ円形の係数を変えて、画面のどこを見ても書割効果（前後関係は分かるが、個々の被写体が奥行きの乏しいものに見える現象）の出ないようにしている。「ラプンツェル」のステレオグラフィック・スーパーバイザーの Robert Newman は、日本の視差角 1.0 度の規制に対してどう思うか、との質問に「1.0 度にはあまり意味がなく、問題はどのように見せるか」だと答え、また、「3D には表現者にとっての大きな可能性がある。ところが、快適ではない常識から外れてしまっている 3D 映像がたくさんある。まずは、悪い 3D を減らすこと。みんなが快適に楽しめるようにならなければ、映像表現としての 3D は発展しない」と述べた[21) 22) 23)]。このような映像作成技術の開発や、画面内の視差量コントロールに注意を払うなど、制作側も快適で疲れない 3D 映像を作る努力を惜しんではならない。

8. まとめ

本論文では、安全ガイドラインの飛び出し量の基準値を文献及び実験データにより科学的に検証した。

3D 映像の快適視差範囲は、1 つの根拠となる調節―輻輳矛盾が成り立たず、また、もう 1 つの根拠である両眼融像の限界についても、文献的、実験的検証において、現行の基準値の「± 1.0 度以下」は今日では見直しが必要であり、有力な候補である 2.0 度への改定が妥当であると考えられる。飛び出し基準を 2.0 度にした場合、調節が基準値まで移動しても、画面とのディオプトリ差は僅少であり、明るい映像であれば画面は被写界深度内に収まるため、ボケを感じることなく観視可能である。

わが国ではダイナミックな映像表現が容認されている韓国などと異なり、安全ガイドラインに基づく規制が徹底されており、3D テレビは衰退してしまった。安全、快適で、かつ豊かな表現力と魅力を持った 3D 映像を生産できる土壌を作り、ユーザには「映画館だけでなく自宅のテレビでも見たい」と思わせるような、

内容的にも映像制作技術的にも質の高い映像を引き金に 3D の復権を目指さねばならない。

謝　辞

本論文の執筆にあたり、名古屋大学情報科学研究科宮尾克教授に細部に渡り指導、助言頂きました。厚く御礼申し上げます。また、本研究は日本学術振興会（JSPS）科研費（B）24300046 と 23300032 の補助を受けて実施された。

参考文献

1. 3D コンソーシアム . 人に優しい 3D 普及のための 3DC 安全ガイドライン . 2010. http://www.3dc.gr.jp/jp/scmt_wg_rep/3dc_guideJ_20111031.pdf、(2013.7.20 アクセス)
2. 古賀太朗編、大口孝之、谷島正之、灰原光晴．3D 世紀―驚異! 立体映画の 100 年と映像新世紀―．ボーンデジタル．2012
3. 3D テレビに関する検討会．3D テレビに関する検討会最終報告書．総務省．2012
4. F. M. Toates. Accommodation function of the human eye. Physiol. Rev. 1972; 52, 828–863
5. F. M. Toates, Vergence eye movements, Doc. Ophthal. 1974；37, 153–214
6. R. Patterson, M. D. Winterbottom, B.J. Pierce et al., Perceptual issues in the use of head-mounted visual displays, Hum. Factors 2006; 48, 555
7. M. Velger, Helmet-Mounted Displays and Sights, Boston: Artech House. 1998
8. D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley et al., Vergence--accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue, J. Vis. 2008; 8, No. 3, 1–30
9. M. Miyao, S. Ishihara, S. Saito et al., Visual accommodation and subject performance during a stereographic object task using liquid crystal shutters, Ergonomics 1996; 39, No.11, 1294–1309
10. Y. Otake, M. Miyao, S. Ishihara et al., An experimental study on the objective measurement of accommodative amplitude under binocular and natural viewing conditions, Tohoku J. Exp. Med. 1993; 170, 93–102
11. 江本正喜、矢野澄男、長田昌次郎．立体画像システム観察時の融像性輻輳限界の分布．映像情報メディア学会誌．2001；55–5, 703–710
12. 矢野澄男 . 両眼融合可能な視差の範囲 . 信学論 . 1991；J75-d-2, 10. 1720–1728
13. 長田昌次郎．立体映像の観察時における輻輳性融合立体視限界 輻輳性融合立体視限界 VFSL の分布．日本バーチャルリアリティ学会論文誌、2002；Vol. 7：No.2：239–246
14. 河合隆史、盛川浩史、太田啓路、阿部 信．3D 立体映像表現の基礎．オーム社．2010．110
15. F. W. Campbell, The depth of field of the human eye, Int. J. Optics. 1956; 4, No.4, 157–164
16. W. N. Charmana and H. Whitefoota, Pupil diameter and the depth-of-field of the human eye as measured by laser speckle, Int. J. Optics. 1977; 24, No.12, 1211–1216
17. S. Marcosa, E. Moreno, R. Navarro, The depth-of-field of the human eye from objective and subjective measurements, Vision Res. 1999; 39, No.12, 2039–2049
18. R. Patterson, Human factors of stereo displays: an update, J. SID, 2009; 17, No. 12, 987–996
19. K. N. Ogle and J. T. Schwartz, Depth of focus of the human eye, J. Opt. Soc. Am. 1959; 49, 273–280
20. B. Wang and K. J. Ciuffreda, Depth of focus of the human eye: theory and clinical applications, Surv. Ophthal. 2006; 51, 75
21. 本田雅一．本当に快適で楽しめる 3D 映像のために．［online］平成 23 年 11 月 7 日、［平成 25 年 7 月 20 日検索］、インターネット <URL：http://av.watch.impress.co.jp/docs/series/avt/20111107_489025.html>
22. Christina Radish Stereoscopic Supervisor Robert Neuman Exclusive Interview THE LION KING 3D.［online］14 September 2011, retrieved from the internet: 19 July 2013 <URL：http://collider.com/robert-neuman-lion-king-3d-interview/>
23. Dan Sarto. Stereoscopic Supervisor Robert Neuman Talks Disney 3-D.［online］18 April 2012, retrieved from the internet: 18 July 2013 <URL：http://www.awn.com/articles/interview/stereoscopic-supervisor-robert-neuman-talks-disney-3-d/page/1%2C1>