

## 4 K 画像撮影時の絞り値を変化させたときに生じる奥行き感の分析 Analysis of depth feeling when changing the diaphragm stop of the camera shooting 4K image

岩田 光史      飯野 郁未      竹中 奨      望月 信哉      山田 光穂  
Koji Iwata   Ikumi Iino   Susumu Takenaka   Shinya Mochizuki   Mitsuho Yamada

### 1. 研究背景

#### 1.1 研究背景

近年、4K 解像度のテレビが登場し、表示媒体としての注目を集めている。この 4K 解像度は、現在広く普及しているフルハイビジョンの約 200 万画素の 4 倍である約 800 万画素の解像度を持ち、従来以上の高精細な映像を楽しむことが可能になりつつある。また、この 4K 解像度を超えるスーパーハイビジョン、8K の開発も進んでいる[1-3]。このような高解像度化により、大画面のテレビやディスプレイを近距離で見た場合においても映像の画素の粗さを感じることなく視聴することが可能になり、視聴者に対して現実空間にいるような高臨場感や実物感を与えることができる。

このような超高精細映像において、放送技術や伝送技術、符号化、表示ディスプレイ開発などの研究が行われているが[4-6]、映像や画像を視聴した際の視覚特性から検討した研究は臨場感や奥行き感、力量感等の提示面角依存性を調べた江本らの研究[7]があるものの多くはない。撮影時のカメラの絞り値を変化させると、被写界深度が変化し撮影された画像の奥行き感が変化することが知られている。そこで、本研究では、精細感をもたらす奥行き知覚を検証することを目的に、4K 画像撮影時のカメラの絞り値を変化させ輻輳眼球運動、調節応答の同時測定を行った。

#### 1.2 焦点深度と被写界深度

本実験を行うにあたってカメラレンズの仕組みとして重要な役割を担う焦点深度と被写界深度の詳細について本章にて説明する。

はじめに、焦点深度について。レンズには収差があり光には回折限界があるので厳密にはレンズは点像を結像することができず、ある大きさの円形像をつくるとされている。しかし、実際には、像面上でボケがある大きさになるまではピントがあっているように見える。写し出された像のボケが許容される大きさの錯乱円を、許容錯乱円と呼ばれている。また、レンズでスクリーンに物体の像がぼけない範囲がある。この範囲を焦点深度と呼ぶ。焦点深度は、錯乱円の大きさが許容錯乱円よりも小さくなる範囲である。[8]

次に被写界深度について説明する。レンズでスクリーンに物体の像を映すとき、レンズと物体の距離を多少変えても像のぼやけない範囲がある。この範囲を被写界深度と呼ぶ。物体が被写界深度にあるとき像面上のボケの大きさは許容錯乱円以下に収まり、被写界深度の範囲にある物体の像は焦点深度の範囲にできるということになる。そして、焦点深度に対応する物体側の範囲が被写界深度になるとされている。[8]

次に被写界深度と焦点深度、絞り、被写体距離の関係について説明する。遠くの物体にピントを合わせていくと、物体の後側被写界深度の端が無限遠になる。このように、無限遠の位置が被写界深度に入る最短の撮影距離を、過焦点距離と呼ぶ。カメラのピントを過焦点距離に合わせて、そこから手前 1/2 までピントが合う。このようにして写真を撮影することをパンフォーカスと呼ぶ。また、被写界深度と焦点距離、絞り、被写体距離の関係は表 1 のようになる。[8]

表 1 被写界深度と焦点距離・絞り・被写体距離の関係[8]

	被写界深度	
	浅い	⇔ 深い
絞り	開く (F 値小)	絞る (F 値大)
焦点距離	長い (望遠)	短い (広角)
被写体距離	近い	遠い

最後に絞り値を変えた場合、画像がどのように変化するかについて図 1、図 2 の画像を用いて説明する。図 1 は、絞り値 11 に絞って撮影した画像である。そして、図 2 は、絞り値 3.5 に開放し、撮影した画像である。両画像ともに箸置きにピントを合わせている。絞り値 11 の写真と絞り値 3.5 の写真を比べると、背景と手前のボケが大きく違うことがわかる。したがって、絞り値を開放すると写真のピントのあっている範囲以外に大きくボケが生じる。カメラの絞り値とピントの合う範囲の関係を図 3 に示す。絞り値の変化により、ピントの合う範囲が変化する。絞り値を小さく(絞り値を開放)した場合、ピントの合う範囲が狭くなり、絞り値を大きく(絞り値を絞り込む)した場合、ピントの合う範囲が広がる。人物を強調させたい場面、被写体に立体感を出したい場面、一つのモノを強調させたい場面は、絞りを開放する。全体的にクリアな写真を撮りたい場面、有名な建物を背景に写真を撮りたい場面は、絞りを絞ると言われている。[9]



図 1 絞り値 11 の画像



図 2 絞り値 3.5 の画像

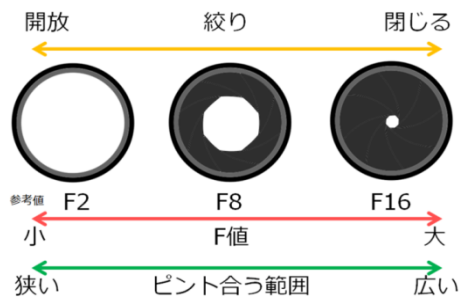


図 3 カメラの絞り値とピントの合う範囲の関係性

## 2. 実験

### 2.1 実験目的

4K 画像注視時の輻輳眼球運動や調節応答、瞳孔径を同時測定し、カメラの絞り値を変化させた場合にどのような違いが見られるのか検証した。画像の明るさにより目の瞳孔径に変化が生じ、それにより画像の被写界深度も変わる為、実験中に瞳孔をモニタリングした。加えて、奥行きの主観評価も同時に測定し、被写界深度や焦点深度の変化によってもたらされる奥行き知覚の変化の検証を試みた。

### 2.2 実験環境

被験者は、20 代男子学生 3 名で行った。実験環境として、照度 6.5Lux、最小輝度(黒)0.42cd/m<sup>2</sup>、最大輝度(白)ピーク 277.7cd/m<sup>2</sup>、画像の切り替えを Windows Media Center で表示し、視距離 1.5H (102 cm)で行った。画像は、NIKON J1 を用いて 4K 解像度(3840×2160)として 10 枚の写真を F 値 11, 8, 5.6, 3.5 の 4 種類で 40 枚撮影した。PC 上で表示させた表示画像を 4K 映像アダプター THD-MBAI に通して TOSHIBA REGZA 55X3 に表示した。F 値 11 の実験画像を基本画像とし、F 値 8, 5.6, 3.5 の実験画像を比較画像にした。実験画像の間には、固視点画像、グレー画像を挟み、画像の提示時間は固視点画像 5 秒、グレー画像を 3 秒、基

本画像 10 秒、比較画像 10 秒とした。視距離は 4K 標準観視距離の 1.5H(102 cm)とした。眼球運動の測定には竹井機器工業株式会社の TalkEye Lite、調節応答の測定には、シギヤ精機 WAM-5500 を使用した。主観評価は、約 10cm のスライダ機構がある連続尺度評価装置を用いた。

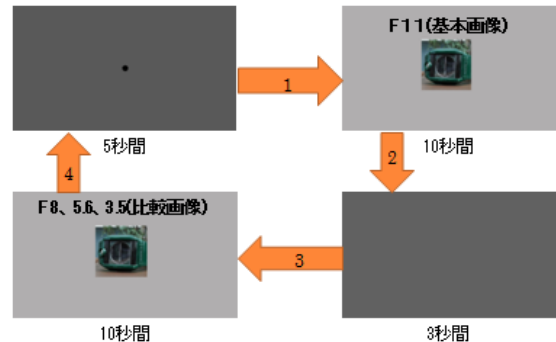


図 4. 実験に表示する画像の流れ

### 2.3 実験手順

被験者を WAM - 5500 のあご台に載せ頭部を固定し、被験者には実験画像の切替時に固視点画像の位置を注視するように指示した。連続尺度評価装置は被験者の左側に置き、基本画像に対して、比較画像の背景を奥に感じたら、スライダを奥に動かすよう指示をした。比較画像から固視点画像に切り替わったら、実験者が手動でスライダを元の初期値に戻した。また、途中休憩を挟み、3 回に分けて実験を行った。

### 2.4 実験結果

解析方法は以下の手順で行った。はじめに、被験者の輻輳眼球運動、調節応答、瞳孔径の変化、主観評価の変化を画像の提示から 3~8 秒の 5 秒間抽出する。次に、F11 の実験画像を基準に F8, 5.6, 3.5 の変化量の平均値を求め図 5~8 に示す。次に変化量の差の平均値を実験画像毎に 3 名の被験者間の平均を求め図 9~18 に示す。瞳孔径の変化は小さかったため、各図に数値で示した。さらに、全画像の変化量の平均の結果(輻輳眼球運動、調節応答、主観評価、瞳孔径の変化)を図 19~22 に示す。

### 2.5 考察

はじめに、図 5 を用いて輻輳眼球運動について述べる。輻輳眼球運動は、ディスプレイ面上を 0 と定義し、-の値が手前、+の値が奥を示す。縦軸は輻輳角の変化(deg)、横軸は実験画像の種類を示している。A 画像、C 画像、D 画像、F 画像、G 画像、H 画像では、絞り値を開放させる毎に奥行き方向の変化が見られる。次に、図 6 を用いて調節応答について述べる。縦軸は調節応答の変化(diopter)を示している。A 画像、C 画像、F 画像、H 画像を見た時では、絞り値を開放させる毎に奥行き方向の変化が見られる。次に、図 7 より主観評価について述べる。縦軸はスライダの移動距離(mm)を示す。全画像で絞り値を開放する毎に被験者が奥行きを感じている事が分かる。さらに、画像毎のデータについてまとめ表 1 に示す。C 画像、F 画像は絞り値を開放する毎に輻輳眼球運動、調節、主観評価のすべてに奥行き方向の変化が見られた。他の画像では、輻輳眼球運動、調節、主観評価について共通の傾向が見られなかった。

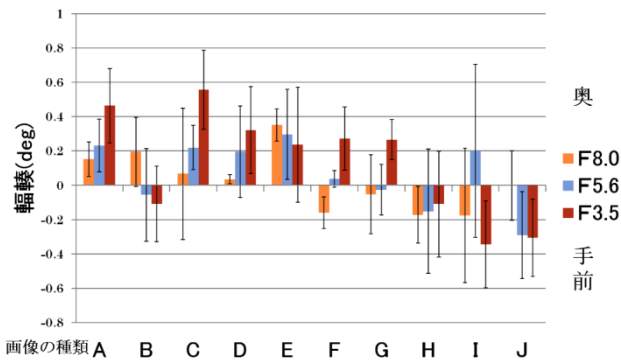


図 5. 画像注視時の輻輳眼球運動

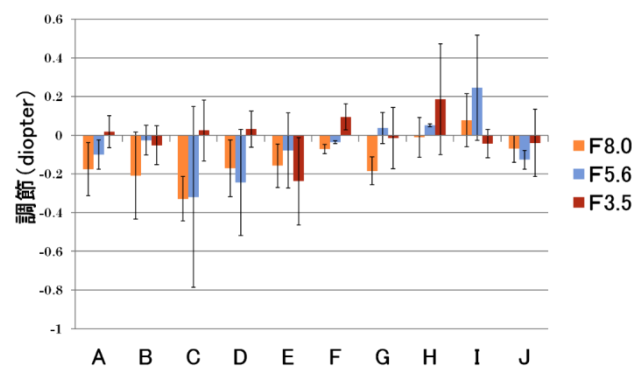


図 6. 画像注視時の調節応答

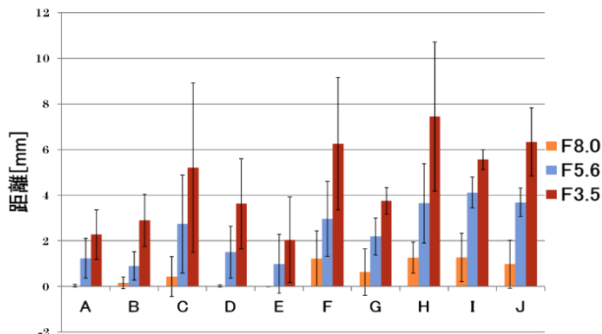


図 7. 画像注視時の主観評価

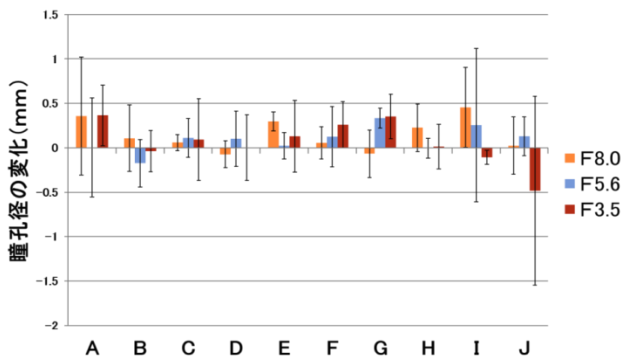


図 8. 画像注視時の瞳孔径の変化

表.2 画像毎のデータの結果まとめ

画像種類	輻輳眼球運動	調節応答	主観評価
A 画像(図 9)	奥行き方向	手前方向	奥行き方向
B 画像(図 10)	傾向なし	傾向なし	奥行き方向
C 画像(図 11)	奥行き方向	奥行き方向	奥行き方向
D 画像(図 12)	奥行き方向	傾向なし	奥行き方向
E 画像(図 13)	手前方向	傾向なし	奥行き方向
F 画像(図 14)	奥行き方向	奥行き方向	奥行き方向
G 画像(図 15)	手前方向	傾向なし	奥行き方向
H 画像(図 16)	手前方向	手前方向	奥行き方向
I 画像(図 17)	奥行き方向	傾向なし	奥行き方向
J 画像(図 18)	奥行き方向	傾向なし	奥行き方向

次に、図 9~18 を用いて画像毎の結果について述べる。縦軸はスライドの移動距離(mm)、輻輳角の変化(deg)、調節応答の変化(D)を示し、横軸は主観評価、輻輳角、調節を示している。C 画像(図 11)、F 画像(図 14)では表 2 で説明したように、絞り値を開放する毎に主観評価、輻輳角、調節について奥行き方向の変化が見られた。他方、他の画像(図 9,10,12,13,15~18)については、絞り値の開放に対して共通の傾向は見られなかった。

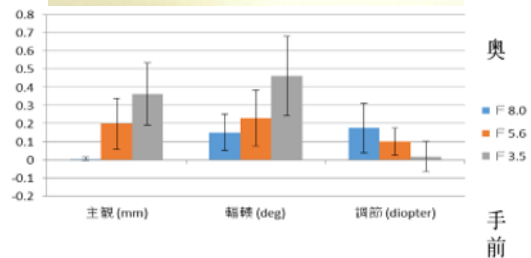


図 9.A 画像と A 画像注視時の変化量のデータまとめ  
A 画像を見た時の瞳孔径の変化量の平均値の数値  
F 8 : 0.35mm F5.6 : 0.22mm F3.5 : 0.34mm

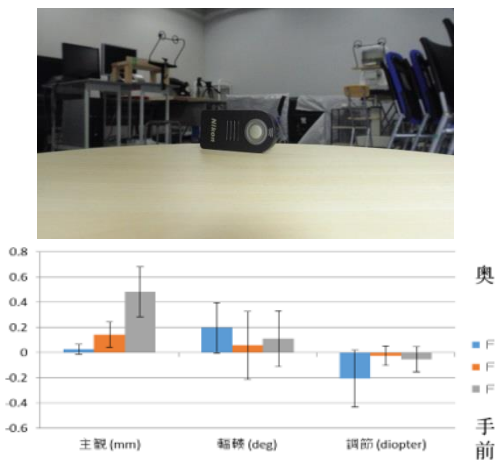


図 10.B 画像と B 画像注視時の変化量のデータまとめ  
B 画像を見た時の瞳孔径の変化量の平均値の数値  
F 8 : 0.1mm F 5.6 : -0.17mm F 3.5 : -0.03mm

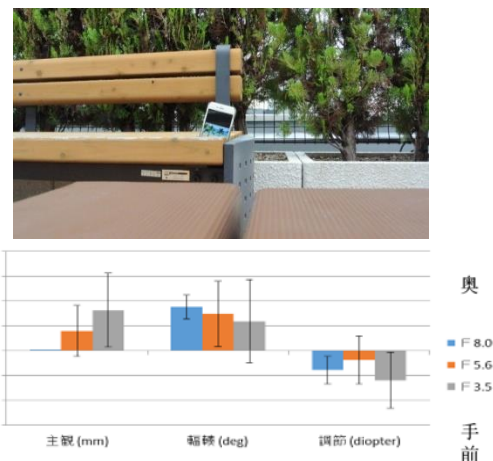


図 13.E 画像と E 画像注視時の変化量のデータまとめ  
E 画像を見た時の瞳孔径の変化量の平均値の数値  
F 8 : 0.2mm F 5.6 : 0.01mm F 3.5 : 0.1mm

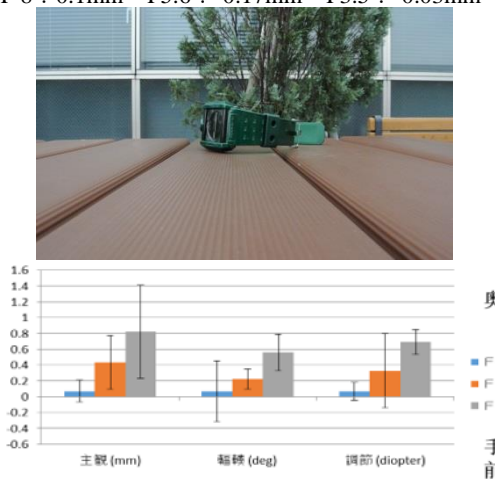


図 11.C 画像と C 画像注視時の変化量のデータまとめ  
C 画像を見た時の瞳孔径の変化量の平均値の数値  
F 8 : 0.05mm F 5.6 : 0.1mm F 3.5 : 0.09mm

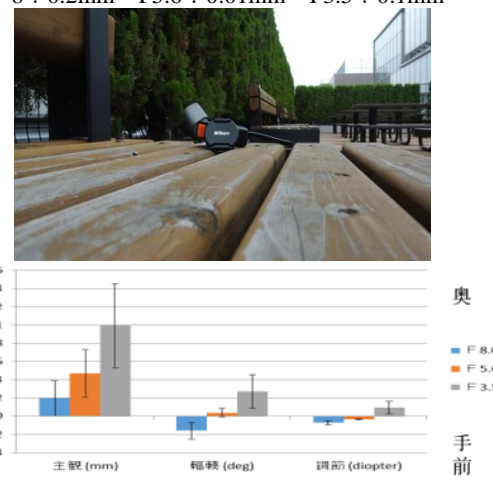


図 14.F 画像と F 画像注視時の変化量のデータまとめ  
F 画像を見た時の瞳孔径の変化量の平均値の数値  
F 8 : 0.05mm F 5.6 : 0.12mm F 3.5 : 0.26mm

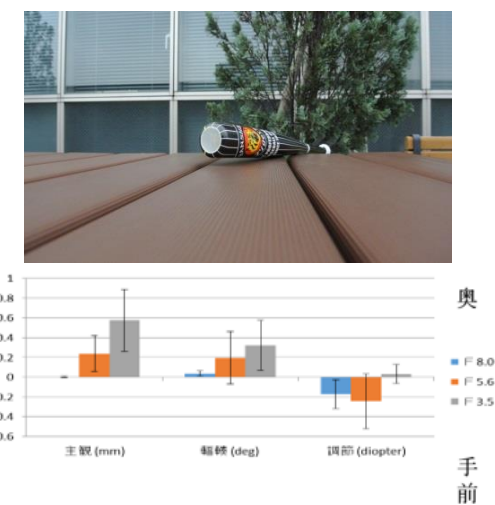


図 12.D 画像と D 画像注視時の変化量のデータまとめ  
D 画像を見た時の瞳孔径の変化量の平均値の数値  
F 8 : -0.07mm F 5.6 : 0.1mm F 3.5 : 0.002mm

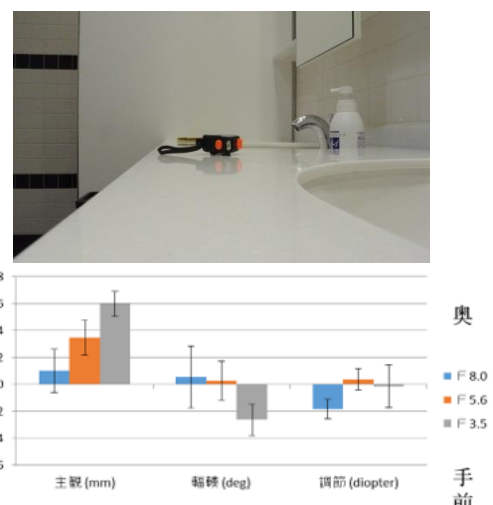


図 15.G 画像と G 画像注視時の変化量のデータまとめ  
G 画像を見た時の瞳孔径の変化量の平均値の数値  
F 8 : -0.06mm F 5.6 : 0.33mm F 3.5 : 0.35mm

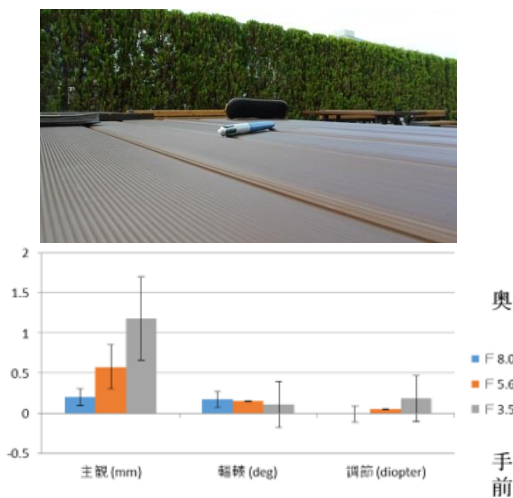


図 16.H 画像と H 画像注視時の変化量のデータまとめ  
H 画像を見た時の瞳孔径の変化量の平均値の数値  
F 8 : 0.22mm F5.6 : -0.006mm F3.5 : -0.012mm

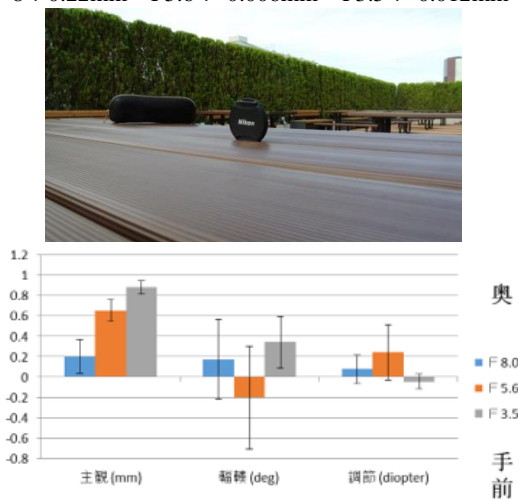


図 17.I 画像と I 画像注視時の変化量のデータまとめ  
I 画像を見た時の瞳孔径の変化量の平均値の数値  
F 8 : 0.45mm F5.6 : 0.25mm F3.5 : -0.1mm

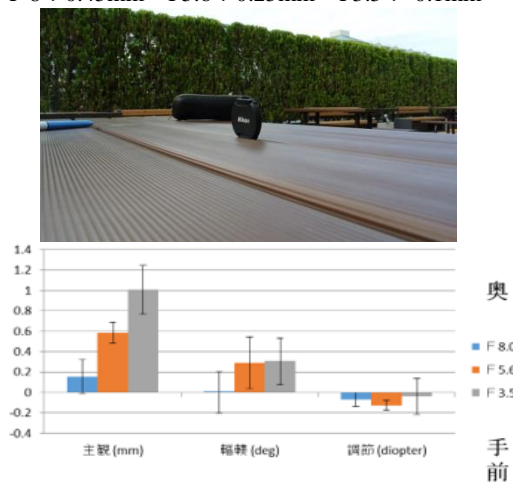


図 18.J 画像と J 画像注視時の変化量のデータまとめ  
J 画像を見た時の瞳孔径の変化量の平均値の数値  
F 8 : 0.02mm F5.6 : 0.12mm F3.5 : -0.4mm

次に図 19 を用いて輻輳眼球運動について全画像の平均を求めた結果を考察する。縦軸は輻輳角の変化(deg)、横軸は絞り値を示している。絞り値を F3.5 に開放した場合には奥行き方向にも手前方向にも大きなバラツキが見られる。次に、同様に調節応答について図 20 を用いて考察する。縦軸は調節応答の変化(D)を示している。絞り値を開放する毎に奥行き方向に変化が見られた。さらに、主観評価の結果を図 21 に示す。縦軸はスライダの移動距離(mm)を示している。絞り値を開放する毎に奥行きを感じている事がわかる。最後に、瞳孔径の変化を図 22 に示す。縦軸は瞳孔径の変化(mm)を示す。絞り値の変化による瞳孔径に一定の変化は見られなかった。

輻輳眼球運動と調節応答の測定で得られた結果から、同様の実験画像に同じ傾向がみられた。画像 A,C,H のようにフォーカスのあっている物と背景の距離が遠いほど奥行き方向に変化が生じていた。主観評価も同様であった。最後に、輻輳眼球運動と調節応答、主観評価の全データで奥行き方向に変化のあった C 画像と F 画像について t 検定を行った。C 画像の t 検定の結果は、輻輳眼球運動 (F8:  $p > 0.41$ , F5.6:  $p > 0.19$ , F8.0:  $p > 0.85$ )、調節応答 (F8:  $p > 2.19$ , F5.6:  $p > 5.1$ , F8.0:  $p > 0.136$ )、主観評価 (F8:  $p > 5.97$ , F5.6:  $p > 0.19$ , F8.0:  $p > 1.72$ ) であった。F 画像の t 検定結果は、輻輳眼球運動 (F8:  $p > 7.28$ , F5.6:  $p > 4.23$ , F8.0:  $p > 0.14$ ) 調節応答 (F8:  $p > 0.5$ , F5.6:  $p > 0.26$ , F8.0:  $p > 0.92$ ) 主観評価 (F8:  $p > 8.05$ , F5.6:  $p > 1.19$ , F8.0:  $p > 3$ ) であった。C 画像と F 画像の t 検定 (危険率 5%) の結果、C 画像と F 画像の基本画像 (F11) と比較画像

(F3.5,F5.6,F8.0) の変化の差に有意差は見られなかった。理由として、3 人の被験者のデータの結果の数値に個人差が大きくみられたため、有意差が得られなかったと考えられる。

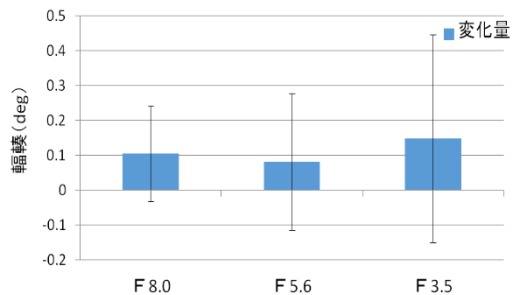


図 19. 画像注視時の輻輳眼球運動の全画像平均

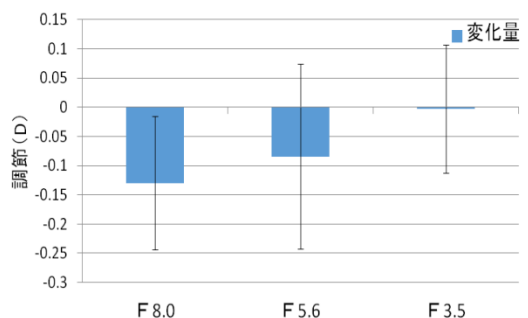


図 20. 画像注視時の調節応答の全画像平均

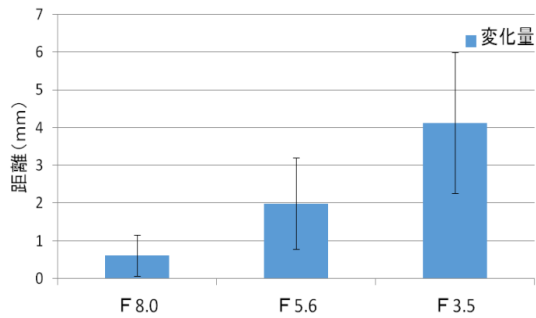


図 21. 画像注視時の主観評価の全画像平均

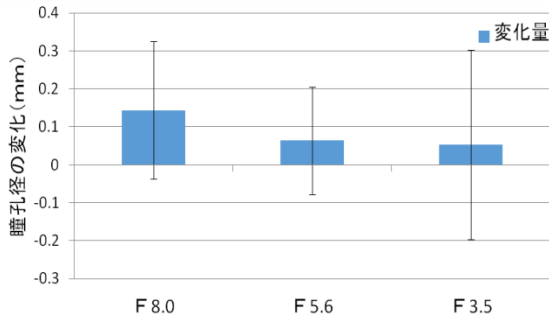


図 22. 画像注視時の瞳孔径の変化の全画像平均

### 3. まとめ

近年 4K,8K の映像が目覚ましい進歩を遂げており、これにより映像の高臨場感特に奥行き感を得ることが可能になったと言われている。そこで本実験では本当に 4K の画像から奥行き感を得られているのかを、4K 画像注視時の主観評価と輻輳眼球運動、調節応答、瞳孔径の変化を同時測定し傾向が見られるかを検証した。そのために撮影時にカメラの絞り値を変化させ、被写界深度を変化させた画像を撮影した。実験の結果、10 枚の実験画像を比べた時にフォーカスのあっている物と背景の距離が遠いほど、すなわち被写界深度の浅いほど、奥行を感じる事が分かった。そして、輻輳眼球運動の変化量の平均の結果は、ほとんどの実験画像が F 値 3.5 に開放した際に被験者が手前にも奥にも大きく変化を感じる事が示された。また、絞り値の変化による、一定した瞳孔径の変化は見られず、瞳孔径には影響を及ぼさなかったと考えられる。今回の実験結果から、画像の種類に依存するが撮影時の絞り値の変化に対して奥行き感や、輻輳眼球運動、調節に変化する傾向が示された。このことは主観的な奥行き感の印象を輻輳眼球運動や調節により評価できることを示唆している。しかし被験者数が少ないため統計的な有意差を得ることができなかった。被験者数を増やし統計的な検討を行うことが今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] M. Sugiura, M. Emoto, K. Masaoka, Y. Nishida, Y. Shishikui, "SUPER Hi-VISION for Next Generation Television," ITE Trans. on MTA, vol.1, no.1, pp.27-33, 2013.

- [2] 西田幸博, "スーパーハイビジョンの映像パラメーターと国際標準化," NHK 技研 R&D, no.137, pp.10-19, 2013.
- [3] 野尻裕司, "スーパーハイビジョン概要," 映情学誌, vol.61, no.5, pp.596-598, 2007.
- [4] J. Kurumida, S. Namiki, "Demonstration of optical communication network for ultra high-definition image transmission," Synthesiology English edition, vol.4, no.2, pp. 108-118, 2011.
- [5] 内藤整, 松本修一, "4K/2K 映像符号化," 映情学誌, vol.61, no.4, pp.435-438, 2007.
- [6] 石井啓二, 薄井武順, 斎藤信雄, 清水直樹, 関昌彦, 石橋将, 野口康幸, 古谷崇, 山下武, 村井隆一, "スーパーハイビジョン用プラズマディスプレイの開発," 映情学誌, vol.68, no.1, pp.J41-J46, 2014.
- [7] 江本正喜, 正岡顕一郎, 菅原正幸, 野尻裕司, "広視野静止画像による臨場感の提示視角依存性と評価指標間の関係," 映情学誌, vol.60, no.8, pp.1288-1295, 2006.
- [8] 桑島幹 "図解入門よくわかる最新レンズの基本と仕組み", 秀和システム, PP.5-10,2005
- [9] Canon LET'S START EOS  
<http://cweb.canon.jp/cpc/starteos/index.html>