慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	生体情報計測による臨場感映像の評価
Sub Title	Evaluation of high presence sensation image by measuring biological information
Author	久保田, 曜丞(Kubota, Yosuke) 小木, 哲朗(Ogi, Tetsuro)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・ マネジメント研究科
Publication year	2012
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2012年度システムエンジニアリング学 第102号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002012-0025

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文　　2012 年度

生体情報計測による
臨場感映像の評価

久保田 曜丞
(学籍番号：81133210)

指導教員　教授　小木 哲朗

2013 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
システムデザイン・マネジメント専攻

Master's Dissertation 2012

Evaluation of High Presence Sensation Image by Measuring Biological Information

Yosuke Kubota
（Student ID Number：81133210）

Supervisor Teturo Ogi

March 2013

Graduate School of System Design and Management,
Keio University
Major in System Design and Management

論　　文　　要　　旨

学籍番号	81133210	氏　名	久保田　曜丞

論 文 題 目：

生体情報計測による臨場感映像の評価

（内容の要旨）

近年、ドーム環境やＣＡＶＥ、3D 映画や 4K 映像などに代表される様々な高臨場感ディスプレイ、高臨場感映像に関する研究・開発・実用化が行われている。しかしながら、臨場感を生み出す要因は何か、どのように測定するのかという問い対しては、明確な答えがないのが現状である。臨場感は直接測定することができないため、アンケートの様な主観評価による臨場感の定量化が試みられてきているが、「臨場感」という用語は、評定者にとって意味が明確に捉えられないことが指摘されている。

本研究では、抽象的な表現がされている臨場感を、心電計測、顔面皮膚温度計測、視点計測といった客観的評価である生体情報計測を行い、操作的定義により臨場感を定義することを研究目的とした。心電計測では、RRV という値に着目した。心電にあるＲ波とＲ波の間隔を RRI 呼び、RRI の分散を RRV とし、先行研究から、RRV が低い値であると、被験者が集中しているとされている。顔面皮膚温度では、額と鼻の温度に着目した。精神的負担を感じると鼻の温度が下がると言われている。注視点移動であるが、被験者に映像を見せた際の注視点の移動回数を測定した。

実験としては、大きく分けて 3 つ行った。①ドーム環境における生体情報計測実験、②解像度、立体視、ディスプレイサイズの違いによる実験、検証として③星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験である。

ドーム環境の実験として日本科学未来館のプラネタリウムで実験を実施。ドームディスプレイと平面ディスプレイの被験者の視聴時の状態を比較するため、視野角を調整し異なるディスプレイサイズで実験を行った。この実験から、ディスプレイサイズが臨場感の変化に影響を与えていることが分かった。次に、解像度、立体視、ディスプレイサイズの 3 つの要因との組み合わせによって生じる生体情報を分析する実験を行った。結果、4K3D 大画面の様な高臨場感を与えることができると思われる映像では、RRV 値が低い、鼻部温度の低下が少ない、注視点の移動が多いという傾向が得られた。これらの実験結果を検証するため、星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験を実施。国際宇宙ステーションから送られてきたハイビジョン映像を 2D/3D 変換技術を使用し、2D 映像と 3D 映像の放映し生体情報の検出を行った。結果、臨場感が高いと言われる 3D 映像の方が、RRV 値が低い、鼻部温度の低下が少ない、注視点の移動が多いという傾向が得られ、これまでの実験結果の検証が得られた。

以上から、“その場に居るかのような”、“ワクワク感”といった表現がされている臨場感を生体情報から操作的定義により定義した。

キーワード（5 語）

臨場感、生体情報計測、4K 映像、3D 映像、プラネタリウム

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	81133210	Name	Yosuke Kubota

Title

Evaluation of High Presence Sensation Image by Measuring Biological Information

Abstract

Recently, the research on high presence display or high presence contents such as planetarium, 3D movie, 4K image is being progressed. But questions like what is presence, what causes presence and how we can measure presence is still uncertain, as high presence sensation cannot measure directly. Although quantification of realism by subjective evaluation such as surveys has been attempted, "high presence sensation" is still not a clear meaning for testers to point out.

In this research, We will define precense by objectively biological information, such as ECG, temperature of face, and eye movement instead of the vague high presence sensation definition. The main purpose of this research is definite the presence by operation definition.

In this research, we will definite the presence with RRV, the temperature of noses and focus point of the user's eyes. RRV is a measure of the result of ECG. Previous research had indicated that RRV has a negative relationship with the level of focus by participant. When the person is experiencing psychological pressure, the nose temperature would reduce. The shift of focus point is measured on number of movement while the focus point is projected to subject.

We will compare the viewer's conditions between dome-display and flat display. The dome-environment experiment is performed in planetarium in National Museum of Emerging Science and Innovation. We will compare resolution, stereoscopic vision and display size combined in the experiment to obtain biological information.

We will verify the experiment result, by real time communication between Earth and astronaut in ISS.

Key Word(5 words)

High Presence Sensation, Biological Information, 4K Image, 3D Movie, Planetarium

目次

第 1 章　序論 10
1.1　研究背景 10
1.1.1　本論文の構成 10
1.1.2　3D 映像について 11
1.1.3　4K 映像について 16
1.1.5　ドーム映像について 16
1.2　まとめ 17
1.3　臨場感の評価指標と評価手法 17
1.3.1　臨場感の要因 17
1.3.2 臨場感の評価手法 19
1.4　関連研究 19
1.4.1　アンケート評価 19
1.4.2　重心動揺測定 20
1.5　操作的定義 21
1.6　研究目的 22
第 2 章　ドーム環境での生体情報計測実験 25
2.1　実験目的 25
2.2　実験環境 25
2.2.1　日本科学未来館　プラネタリウム 25
2.2.2　超高解像度ディスプレイ CDF 26
2.2.3　映像コンテンツについて 28
2.3　実験方法 29
2.4　主観評価 30
2.5　生体情報計測について 31
2.5.1　心電計測について 32
2.5.2　計測機器 33
2.5.3　計測方法 34
2.6　顔面皮膚温度計測について 35
2.6.1　計測目的 35
2.6.2　計測機器 36
2.6.3　計測方法 37
2.7　注視点計測について 39
2.7.1　計測目的 39
2.7.2　計測機器 39
2.7.3　計測方法 40
2.8　実験結果 45
2.8.1　心電計測の実験結果 45
2.8.2　顔面皮膚温度計測の実験結果 47
2.8.3　注視点計測の実験結果 49
2.8.4　実験結果のまとめ 51
2.9　考察 52
第 3 章　解像度、立体視、ディスプレイサイズの違いによる生体情報計測実験 ... 53
3.1　実験目的 53
3.2　実験概要 53

3.3　生体情報計測 54
3.4　実験方法 54
3.5　主観評価 56
3.6　実験結果 57
3.6.1　心電計測の実験結果 57
3.6.2　顔面皮膚温度計測の実験結果 60
3.6.3　注視点計測の実験結果 62
3.6.4　分析結果のまとめ 65
3.7　考察 66
第4章　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験 67
4.1　実験概要 67
4.1.1　実験準備 69
4.1.2　アンケート調査 72
4.2　アンケート結果 73
4.3　実験方法 77
4.4　実験結果 78
4.4.1　心電図 78
4.4.2　顔面皮膚温度 79
4.4.3　注視点移動回数 81
4.5　考察 81
第5章　結論 82
第6章　今後の展望 83
謝辞 87
参考文献 88
外部発表 90
付録 91

図目次

図 1　世界の 3D テレビの出荷台数の推移 11
図 2　両眼視差 12
図 3　立体映像の撮影方式 13
図 4　サイドバイサイド（SIDE-by-SIDE） 14
図 5　トップアンドボトム（TOP-and-BOTTOM） 14
図 6　ラインバイライン（LINE-by-LINE） 15
図 7　フレームシーケンシャル（フィールドシーケンシャル） 15
図 8　仮設ドーム 17
図 9　重心動揺測定 21
図 10　日本科学未来館　プラネタリウム 25
図 11　MEGASTAR-II cosmos 26
図 12　Concurrent Design Facility 26
図 13　CDF のシステム構成 27
図 14　パナソニック　3D VIERA TH-P42GT3［42 インチ］ 28
図 15　アクティブシャッターメガネ 28
図 16　CG で描かれた映像　　図 17　アニメの映像 29
図 18　日本科学未来館での実験風景 29
図 19　ＣＤＦに伝送された 3D 映像 31
図 20　RRV 算出 32
図 21　BioTrace+for NeXus-4 33
図 22　ディスポーサブル心電図電極（積水化成品工業株式会社） 33
図 23　BioTrace+for NeXus-4 とディスポーサブル心電図電極 34
図 24　電極の位置（BioTrace+for NeXus-4 の画面より） 34
図 25　心電図（http://www.readmyheart.jp/readmyheartplus/howto.html） . 35
図 26　「ちきゅうをみつめて」の視聴中の RRV 35
図 27　サーモカメラ　(NEC/Avio InfReC Thermography R300S) 36
図 28　解析ソフトウェアの画面 37
図 29　額と鼻の温度 38
図 30　額部―鼻部の温度 38
図 31　視点計測機のコントローラ　　図 32　視点計測機(EMR-9)ヘッドユニット 39
図 33　視点計測機ナックアイマークレコーダ（EMR-9)を装着 40
図 34　視点計測機（EMR-9)のカメラ 41
図 35　眼球カメラの位置設定 41
図 36　瞳孔のトラッキング 42
図 37　キャリブレーションの道具 42
図 38　キャリブレーション① 43
図 39　キャリブレーション② 43
図 40　キャリブレーション終了 44
図 41　キャリブレーション後の視点計測 44
図 42　画面サイズによる RRV 値 47
図 43　画面サイズによる額部-鼻部の差分温度[℃] 49
図 44　画面サイズによる注視点移動回数 51
図 45　白川郷の撮影　　図 46　light connects 54
表 10　8 パターンの実験　　図 47　大画面と小画面視聴 ... 55
図 48　4K3D 大画面視聴前の安静時の被験者の様子 55

図 49　4K2D 大画面視聴前の安静時の被験者の様子 56
図 50　解像度の違いによる RRV 59
図 51　立体視の違いにおける RRV 60
図 52　ディスプレイサイズの違いにおける RRV 60
図 53　ディスプレイサイズの違いにおける額部－鼻部の差分温度 62
図 54　立体視の違いにおける注視点移動回数 64
図 55　ディスプレイサイズの違いにおける注視点移動回数 65
図 56　分析結果 65
図 57　宇宙交信システム 68
図 58　前イベントの様子 68
図 59　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信の様子（実験席から撮影） 69
図 60　マルチイメージプロセッサー「ＭＰＥ－200」 69
図 61　ＭＰＥ―200 の設置 70
図 62　ちきゅうをみつめて　　図 63　古川聡飛行士との通信映像 .. 70
図 64　招待する小学生とインタビュアーの位置確認 71
図 65　本番のサーモカメラの位置決定 71
図 66　アンケート 72
図 67　質問項目 1 と 7 の比較 73
図 68　質問項目 2 と 8 の比較 74
図 69　質問項目 3 と 9 の比較 74
図 70　質問項目 4 と 10 の比較 75
図 71　質問項目 5 と 11 の比較 76
図 72　質問項目 5 と 11 の比較 76
図 73　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験の様子 77
図 74　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信視聴時 78
図 75　2Ｄ映像視聴時の RRV 78
図 76　3Ｄ映像視聴時の RRV 79
図 77　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信視聴中のサーモグラフィー 79
図 78　2D 映像視聴時の額と鼻の温度変化 80
図 79　3D 映像視聴時の額と鼻の温度変化 80
図 80　映像に対する臨場感の構成要素 82
図 81　3D カメラによる撮影　　図 82　3D カメラによる皆既日食 83
図 83　使用した 4K カメラ　　図 84　4K カメラでの撮影の様子 84
図 85　被災地の 4K 映像 1 85
図 86　被災地の 4K 映像 2 85
図 87　4K カメラによる撮影 86

表目次

表 1　アンケート評価 20
表 2　実験パターン 30
表 3　主観評価 30
表 4　基本性能 37
表 5　基本性能 40
表 6　被験者の RRV..... 46
表 7　被験者の額部―鼻部の差分温度 48
表 8　被験者の注視点移動回数 50
表 9　分析結果のまとめ 51
表 10　8 パターンの実験
図 47　大画面と小画面視聴... 55
表 11　主観評価の順位 56
表 12　被験者の RRV..... 58
表 13　RRV を従属変数とした各要因ごとの有意確率..... 59
表 14　被験者の額部―鼻部の差分温度 61
表 15　額部―鼻部の差分温度を従属変数とした各要因ごとの有意確率 62
表 16　被験者の注視点移動回数 63
表 17　注視点移動回数を従属変数とした各要因ごとの有意確率 64
表 18　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信イベント詳細 113
表 19　3D 映像のリアルタイム交信についてのアンケート結果..... 115
表 20　2D 映像のリアルタイム交信についてのアンケート結果..... 115

第１章　序論

1.1　研究背景

近年、ドーム環境やCAVE、3D映画や4K映像などに代表される様々な高臨場感ディスプレイ、高臨場感映像に関する開発・実用化が行われている。通信・放送事業者等プラットフォーム提供者や医療従事者等ユーザや視聴者への影響等を扱う心理学等専門家も幅広い研究が行われている。また、遠隔会議、遠隔医療、芸術等のグループ共有体験型鑑賞、科学教育等への臨場感視聴覚教育といった臨場感を求めるデバイスが導入されてきている。しかしながら、臨場感を生み出す要因は何か、どのように測定するのかという問い対しては、明確な答えがないのが現状である。主観的感覚である臨場感は直接測定することができないため､アンケートの様な臨場感の定量化が試みられてきているが、「臨場感」という用語は、評定者にとって意味が明確に捉えられないことが指摘されている。また、従来の客観的評価として、重心動揺測定が行われているが、広い観視野角が得られるほど姿勢制御は安定するかどうかを検証するために行われている。この方法は、静止画を用いたものであり、従来の視覚誘導自己運動感覚を生起きさせるような動画を用いた検討と一線を画する。映像の臨場感評価に動画を用いることは、不可欠でありこの方法で臨場感評価が成功していないのが現状である。

1.1.1　本論文の構成

本論文の構成であるが、序論である本章を含めて全6章から構成されている。

1章では、現在臨場感があると言われている3D映像、4K映像、プラネタリウムの現状と仕組みについて述べる。次に、臨場感の構成要素、現在行われている関連研究、操作的定義、研究目的について述べる。

2章では、1章で述べた本研究の目的から、提案する生体情報を用いた映像に対する臨場感計測システムの設計と結果について述べる。ここでは、ディスプレイサイズの違った映像に対する臨場感を生体情報によって計測する実験を行った。

3章では、2章で実施した生体情報を用いた映像に対する臨場感計測システムの設計と結果からを考察し、ディスプレイサイズの違いだけでなく、解像度、立体視の違いによる生体情報の変化を計測した。

4章では、2章、3章の実験によって得られた結果の検証について述べる。具体的には星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験を実施し検証を行った。

5章では、2章から4章までの実験、検証から、視覚による臨場感を操作的定義により定義したことについて述べる。

6 章では、1 章から 5 章までをふまえた上で今後の展望について述べる。

1.1.2　3D 映像について

現在、3D 映像、4K 映像、プラネタリウムといった臨場感があるというデバイス存在する。特に、3D 技術は、通信、放送、医療、教育、商取引、芸術分野等様々な分野で新たなサービス・製品が製造されており、関連市場を含む市場規模見込みは、2020 年に世界で 151 兆円と言われている。ここでは 3D 映像の現状から述べてゆきたい。

3D 映像の現状

3D 映像は、映画「アバター」の成功で一躍脚光を浴びた。この 3D シネマブームの流れに平行してテレビメーカー・エレクトロニクス･ソフトメーカーは家庭用 3D テレビ及び 3D 関連製品（3D メガネ、3D ブルーレイ・ディスク、業務用カメラ、2D⇒3D 変換ソフト、3D デジカメ、3D デジタルフォトフレーム等）の開発・発売に一斉に向かったと言われている。2015 年には 3D テレビの出荷台数が 7800 万台、出荷金額は 644 億米ドルに達する図 1。3D テレビ元年と言われている 2010 年は出荷台数が 420 万台、出荷金額は 74 億米ドル。2015 年は対 2010 年比で台数は約 19 倍、金額は約 9 倍と 5 年間で大きく拡大すると言われている。

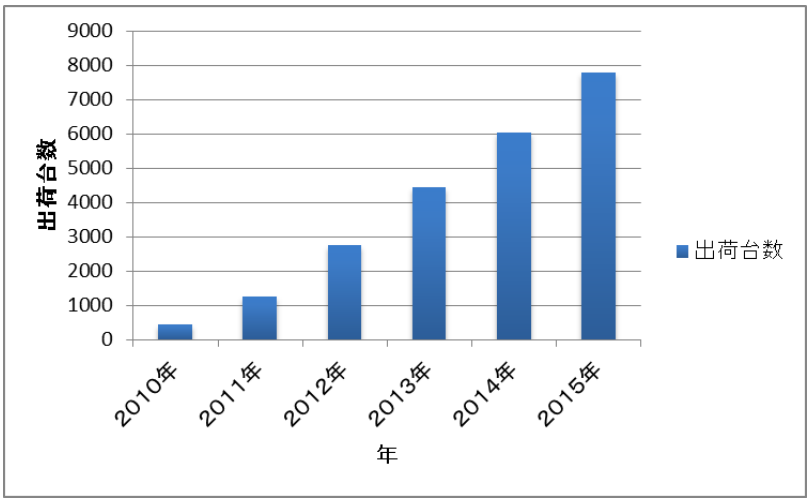


図 1　世界の 3D テレビの出荷台数の推移

3D 映像の仕組み

これだけ普及が見込まれている 3D テレビであるが、そもそもなぜ人は 3D 映像にすることで奥行を感じることができるかについて述べてゆきたい。3D 映像の仕組みであるが、人は、奥の物体は手前の物体に遮られると見えなくなる。遠方になるほど物体は小さく見える。あるいは、大気中では遠方の物体ほど、彩度、明度、コントラストが低く見える。人間は様々な視覚的な情報を手がかりに奥行き感を知覚している。数ある手がかりのなかでも、近距離では左右の眼から見える物体の像の差異＝「両眼視差」（図 2）が奥行き感を知覚する上で最も有効な手がかりの一つであることが知られている。現在実用化されているメガネ式の 3D 映画や 3D テレビは、いずれもメガネとプロジェクタあるいはディスプレイを組み合わせて、両眼視差を与えた映像をそれぞれ左右の眼に振り分けて送り込むことで立体視を実現している。

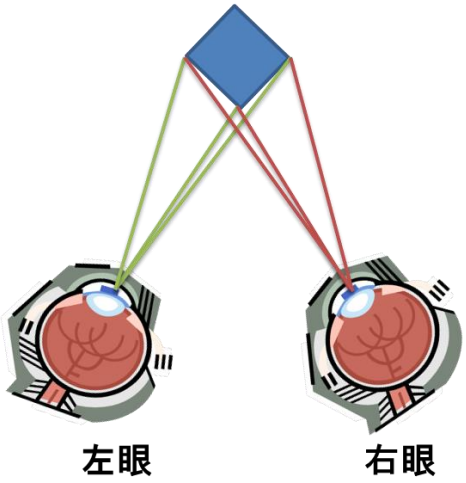


図 2　両眼視差

3D 映像撮影方法について

立体映像の撮影方式には、交差法と平行法の 2 種類がある。交差法とは左右のカメラの光軸を交差させる方式で、平行法とは左右のカメラの光軸を平行にする方式。人間が物を見るような眼の状態に近い交差法が、一般的に立体映像の撮影に使われている。

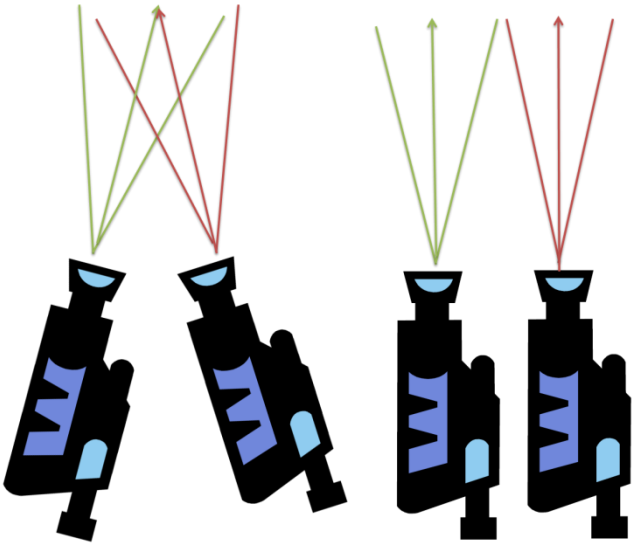


図 3　立体映像の撮影方式

交差法を用いた撮影では、カメラの光軸の交点、「クロスポイント」をどこに合わせるか決める必要がある。クロスポイントの位置によって得られる立体感が変わってきている。クロスポイントの位置にある被写体は、3D 映像をモニタに映したときに、画面上に再生される。クロスポイントよりも手前にある被写体は画面よりも飛び出して見え、それよりも奥にある被写体は画面よりも奥に見えることになる。もしクロスポイントを極端に遠い位置に設定したとすると、多くの被写体が飛び出して見えるような、飛び出し感の強い映像になる。このような映像はあまり望ましくない。このように、撮影時の設定により鑑賞時の立体感が変わってくるため、交差法による 3D 撮影においては、クロスポイントをどこに設定して、鑑賞時に被写体をどのくらいの位置に再生させるかといった、立体感の調整を行うことが必要になる。

先述の通り、立体像の過度な飛び出しは鑑賞者に視覚負担を与える。過度に飛び出した立体像を長時間見続けると、環境によっては眼の痛みを訴えるほどの影響を与えることがある。一方で視覚負担を少なくしようと、奥行き量を少なくしていくと平面映像に近づき、立体映像としての魅力が失われている。

3D 映像の伝送方式

3D 映像の伝送方式であるが、3D 映像（動画）は 2 つのハイビジョンカメラを使うため容量が大きくなってしまい、現在の技術ではそのまま伝送するには困難な場面がある。

サイドバイサイド（SIDE-by-SIDE）

サイドバイサイド方式とは、図 5 のように左右カメラそれぞれの映像を水平方向（1920px なら 960px）に圧縮し、左右に並べた形で伝送する方式。左右分割方式とも呼ばれる。圧縮することで通常のサイズと同じになり、従来形式で伝送可能なためテレビ放送などで採用されている。

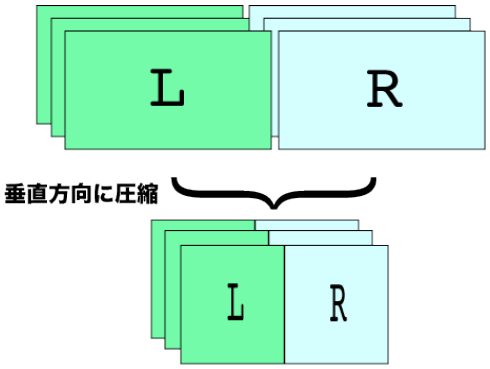


図 4　サイドバイサイド（SIDE-by-SIDE）

トップアンドボトム（TOP-and-BOTTOM）

トップアンドボトム方式とは、図 6 のように左右カメラそれぞれの映像を垂直方向（1080px なら 540px）に圧縮し、上下に並べた形で伝送する方式。上下分割方式とも呼ばれる。サイドバイサイド方式と同様、現在テレビ放送などで採用されている。

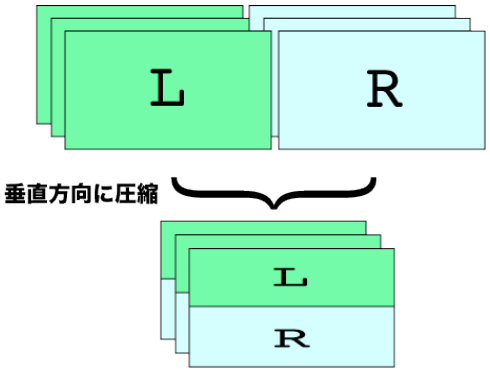


図 5　トップアンドボトム（TOP-and-BOTTOM）

ラインバイライン（LINE-by-LINE）

1 ライン毎に左右の映像が互い違いに出力されているため、それをうまく分離して人間の眼に映し出す必要がある。偏光メガネは、左右で違う角度の偏光板が使われており、

例えば左眼には奇数番目のライン、右眼には偶数番目のラインの映像しか通さないように作られている。このことにより人間は立体映像として認識できる。

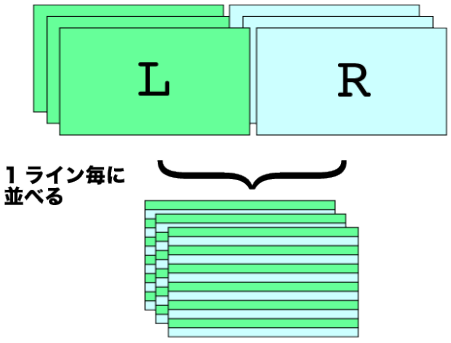


図 6　ラインバイライン（LINE-by-LINE）

フレームシーケンシャル

フレームシーケンシャル方式は、テレビ側で高速に左右の映像を切り替え、その速度で同期されたシャッター式メガネで 3D 映像を視聴する方式である。

この方式は、現在各家電メーカーから発売されている 3D テレビで採用されている方式である。具体的な動作の流れとしては、まず 1 フレーム目が左眼用の映像だとすると、テレビでは 1 フレーム目の映像を表示すると同時に、メガネに対して「右眼レンズのシャッターを閉じ、左眼レンズのシャッターを開け」という信号を送る。同様に、次の 2 フレーム目を表示すると同時に「左眼レンズのシャッターを閉じ、右眼レンズのシャッターを開け」という信号を送る。この流れを 1 秒間に約 60 回繰り返し、人間に 3D 映像として認識させている。

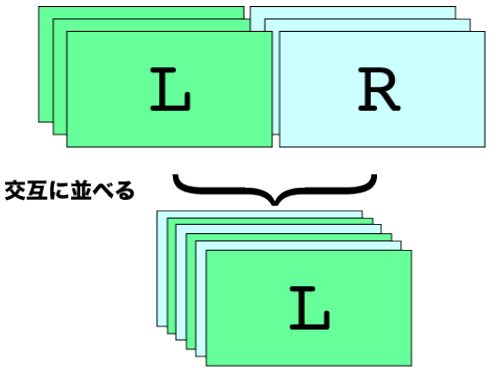


図 7　フレームシーケンシャル（フィールドシーケンシャル）

以上述べてきた撮影方法から伝送方式を通して 3D 映像の視聴を実現している。

1.1.3　4K 映像について

次に、臨場感があると言われている映像技術が 4K 映像である。これは表示パネルの画素数が、フルハイビジョンの 4 倍ある高画質化を追求した映像である。横(水平画素)が 3840(約 4000)で、1000 は 1K（キロ)という単位で表されるため、4K テレビと呼ばれる。現在主流のフルハイビジョンテレビの画素数は、横(水平画素)1920×縦(垂直画素)1080 で、縦横合計で 207 万 3600 あるが、4K テレビは、横 3840×縦 2160 で合計 829 万 4400。つまり、フルハイビジョンの 4 倍の画素数となる。

4K 映像の現状

4K 映像の現状であるが、総務省は次世代の 4K 放送開始時期について、当初予定していた平成 28 年から 2 年程度前倒しし、26 年夏の開始を目指す方針を固めた。放映の順序でだが、4K 映像フルハイビジョンの 4 倍の画素数のため大量の映像データを電送する必要があり、まず電波帯域に余裕の多い衛星放送のＣＳで始め、ＢＳ、地上波と順次拡大する見通しと言われている。

1.1.5　ドーム映像について

プラネタリウムのスクリーン特性

近年、プラネタリウムのような大きなスクリーンに高精細・広視野角な映像を投影する高臨場感ディスプレイが注目されつつある。全天周のドーム型ディスプレイの場合、立体眼鏡のような特別な装置を利用することなく、裸眼状態で立体感を感じられることが分かってきた。それは、一般的な四角形のディスプレイと違い、フレームがなく、スクリーン形状が三次元形状であり視野全体を映像で覆うことが出来ることから、素直に映像の世界に没入することが出来るためである。　そのため、プラネタリウムの視聴者は家庭用テレビや映画館のスクリーンで見るような映像とは異なった迫力のある臨場感の高い映像を視聴できると言われている。

また、2012 年 11 月 6 日に慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科で行われた星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信イベントの映像をリアルタイムに仮設ドームを設置し投影した。

図 8　仮設ドーム

1.2　まとめ

これまで、述べてきたように現在、臨場感があると言われているデバイスは、2D 映像に立体視を含んだ 3D 映像、フルハイビジョンの 4 倍の画素数である 4K 映像、プラネタリウムといった超大画面ディスプレイがある。しかしながら、どの様な方式で映像を放映することが臨場感を生み出すために有効であるかという問いに答えることができない。つまり、技術の向上だけが進んでいる。そこで臨場感についてどのように評価するのかどのような手法で評価すべきなのかについて第 3 節で述べてゆきたい。

1.3　臨場感の評価指標と評価手法

1.3.1　臨場感の要因

人が感じる臨場感を概念的定義で表現すると、“その場に居るかのような”、“ワクワク感”と言われているが、臨場感の概念をより深く分析してみると、臨場感は単一の感覚というより、複数の感覚要素から成り立っていることが分かる。臨場感を分析する際の評価指標として、空間要素、時間要素、身体要素の 3 つの要素に分解できると考える。

まず、臨場感の空間要素として、立体感、質感、包囲感を挙げることができると考えられる。立体感とは、空間に存在する物体の奥行や立体形状に関する感覚である。質感とは、物体表面のざらつき、硬さ、柔らかさ、光沢、透明度などに関する感覚であり、

これらの情報から人は、物質を推定することができる。包囲感とは、自己周りに空間的な広がりを感じる感覚であり、その空間に埋没する没入感、あるいはその場の雰囲気を感じる空気感も包囲感の一種と考えられる。

時間要素として、動感、因果感、同時感を挙げることができる。動感とは、環境の時間的変化をとらえる感覚であり、人は外界の物の動きを素早く推定している。因果感とは、ある事象が他の事象が原因となって、その結果生じていると感じる感覚である。同時感とは、異なる事象が同期して生じていると感じる感覚である。例えば、物と物が接触して映像と衝撃音が同時に得られると、人はこれらから同一の物理現象であると認識する。

身体要素として、自己存在感、インタラクティブ感、情感を挙げることが出来る。人は、環境を空間的、時間的に正確に捉えること田としても、そこに自分自身を感じるとき、人は臨場感をより感じる。自己存在感とは、自己の身体全体あるいは身体各部の状態を感じる感覚である。インタラクティブ感とは、環境に存在する物や他者に働きかけた時に特定の反応が得られる相互作用の感覚である。情感とは、対象物に対して身体が感じる状態であり、このような感情が生じると人は高い臨場感を感じる。

以上のように、人は、様々な感覚要素を統合して臨場感を感じ取っている。そして、これらの感覚要素は必ずしもお互いに独立ではなく、相互に関連し合っており、臨場感の感覚要素が複合的に与えられた場合、相乗的な効果が生じると考えられる。これに対し、これらの感覚要素のいくつかが欠けていたり、お互いに矛盾したりしている場合に特異な臨場感を生じさせる場合もあると考える。例えば、手で触れても感覚が得られないバーチャルな立体映像を観察、体験すると驚きの感覚が生じる。リアルとバーチャルの二重性が人にある種の臨場感を与えていると考らえる。

次に、臨場感がどこから生じるのか、その要因を考察する。臨場感の感覚要素が生じる要因としては、外的要因と内的要因の 2 つを考える必要がある。外的要因による臨場感とは、過去の経験や学習により脳内に蓄積された感覚の記憶に基づき脳内で生成される臨場感である。例えば、波の音を聞くと海の風景がリアルに目に浮かぶが、これは過去の経験から想起される視覚イメージが臨場感を作り出しているためと考えられる。又、小説や詩を読むときのように、人は文字情報だけ豊かなイメージを思い浮かべることもできる。

このように、人は外界からの物理情報を分析して、それをそのまま脳内で再現しているわけではなく、学習、経験で蓄積された情報を用いて外界からの情報を解釈、補完し、その実在感を生じさせていると考えられる。このことは、超臨場感システムを構築する

際に、いかにして脳内に蓄積された情報を引き出して臨場感を高めるかということを考慮して設計することの重要性を示している[1]。

1.3.2 臨場感の評価手法

これまで述べたように、臨場感は様々な感覚要素から構成されている。人が感じる臨場感を測定する手法には、主観評価、心理物理評価、生体信号計測、行動計測の 4 つの手法が考えられる。主観評価は通常、提示された言葉に対応する印象を被験者自ら評定する手法である。印象評定は特殊な測定装置がなくても質問紙で手軽に行える。しかしながら、自分が感じている印象を正確に内観することは必ずしも容易ではない。また、提示される言葉の受け取り方にも個人差がある。よって、提示する言葉を予備実験などから厳選するとともに、データの総計的分析を行い、出来る限り信頼性の高い結果を導く必要がある。また、厳密な官能評価を行う場合は、被験者が特定の刺激に対して一定の反応を示すように、練習や訓練を行うことが重要になる。

一方、心理物理評価は、物理刺激に対する人の応答特性を定量的に測定する手法である。例えば、心理物理実験を行うことで異なる提示条件で同じ感覚が生じる「主観的等価点」や異なる感覚が生じ始める「丁度可知差異」を物理的数値として求めることができる。心理物理評価を用いると、意識下のプロセスを探ることも可能であり、物理次元と対応づけることであり定量的かつ信頼性の高い結果が導ける。ただし、物理的対応が取りづらい高次の認知的感覚を心理物理手法で捉えることは、困難である。

これに対し、臨場感のより直接的な測定手法として人の身体に現れる無意識的変化を捉える心拍、皮膚温度といった生体情報計測、眼球運動や重心動揺といった行動計測が有効である[1]。

1.4　関連研究

1.4.1　アンケート評価

臨場感の評価として、アンケート評価がある。臨場感は主観的感覚であり直接測定することができないため、アンケートの様な主観評価による臨場感の定量化が試みられてきている。従来の評価方法として従来の臨場感評価のアンケート調査では、表1のような臨場感や迫力に関する五段階批評アンケートなどが行われている。

表 1　アンケート評価

■ 臨場感・迫力感に関する設問 (五段階批評)					
A. 自分がその場にいるかのような感覚 (臨場感) を得られましたか？					
	1. 全く得られない	2. 得られない	3. 普段通り	4. 得られた	5. とても得られた
B. 前方カメラのみの映像と比べ，迫力のある映像でしたか？					
	1. 全く迫力がない	2. 迫力がない	3. 普段と同じ	4. 迫力がある	5. とても迫力がある
C. 映像の画質はどうでしたか？					
	1. 非常に低い	2. 低い	3. 普通	4. 高い	5. 非常に高い
D. 前方スピーカのみの音響と比べ，迫力のある音響でしたか？					
	1. 全く迫力がない	2. 迫力がない	3. 普段と同じ	4. 迫力がある	5. とても迫力がある
E. 音質はどうでしたか？					
	1. 非常に低い	2. 低い	3. 普通	4. 高い	5. 非常に高い
■ 自由筆記形式の設問					
F. 体感してみたいシーンがあればお聞かせください．					
G. より臨場感を高めるために必要だと思われる要素や機能があればお聞かせください					

この方法の特徴は統計的な指標である。メリットとしては、特殊な測定装置を必要とせず、質問紙手軽に行える。感性的評価が得られることである。しかしながら、デメリットとして、意識化の信頼性、再現性、個人差の問題がある。多人数のデータを統計分析し、信頼性を高める必要がある[1]。

1.4.2　重心動揺測定

重心動揺計とは直立姿勢時における足底圧の垂直作用力を変換器で検出し、足圧中心の動揺を電気信号変化として出力する足圧検出装置である。めまい・平衡障害を体の揺れ方として捉え、揺れの速さ・方向性・集中度合をコンピューター解析することである[2]。

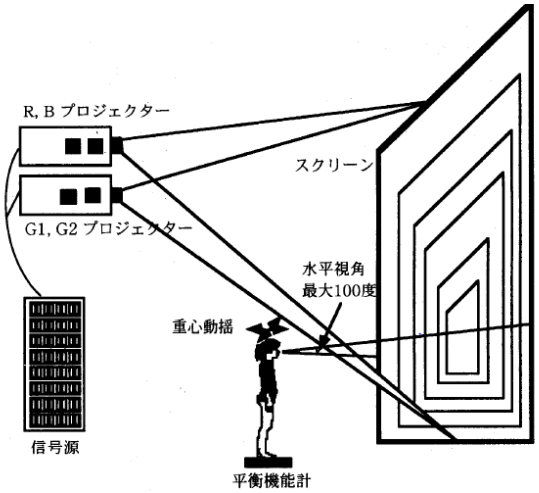


図 9　重心動揺測定

従来行われている重心動揺測定は、被験者に視野角30度から100度までの静止画像を見せ、広い観視野角が得られるほど姿勢制御は安定するかどうかを検証するために行われている。この方法は、静止画が用いたものであり、従来の視覚誘導自己運動感覚を生起きさせるような動画を用いた検討と一線を画する。しかしながら、映像の臨場感評価に動画像を用いることは、不可欠であり、この方法で臨場感評価が成功していない。

1.5　操作的定義

操作的定義(operational definition)とは、“客観性・検証可能性”を持つ科学的研究や論文作成を行うために、「概念(concept)」を分かりやすく明確に定義することである。例えば、犯罪は、実体のない構成概念であり、定義することで初めて取り扱いが可能となる。その定義の代表的なものに刑法上の定義がある。しかし、刑法上の定義では、犯罪の研究には不十分である。それでは、一体、犯罪の研究では、どのように犯罪を定義すればよいのかわからない。それに対する答えとしては、研究の目的によって，研究の手法によって、利用できるデータの性質によって、一番良いと考えられる方法で定義するとしかいいようがなく、明確に定義することができない。実際に、犯罪をどう定義し、どう数量化し、把握するかと言うための基本となる考え方が操作的定義である。有名な例として「知能」がある。以下に操作的定義と概念的定義について述べる。

概念的定義とは一言でいうと抽象度の高い定義の仕方のことである。ウェクスラーによる知能の定義は、「個人が目的を持って行動し、合理に思考し、自らの環境を効果的に処理する総合的・全体的能力」というものでこれが概念的定義である。この定義を読むと何となく意味は伝わるが、目の前に対象者がいたとして、この人の知能はどのくらいなのか？と問われた場合、明確な答えがない。この人は合理的に思考しているのだろうか、自らの環境を効果的に処理しているのだろうか、そうするための総合的、全体的能力はどうかなどと言われても、どうすればよいのか解らないのである。そこで、知能検査というものが登場してくる。知能検査は、複数種類の課題を実施してその成績を見ることで、その人の知能が解ることになっている。つまり、先に述べたような定義を元にして、どのような手順に従って、どのように対象者を取り扱えば「知能（指数）」と呼ばれる結果が算出されるかが事細かに定義されているのが知能検査である。

このように，意味は何となく分かるが曖昧な概念的定義を具体的で、誰が取り扱っても等しい結果が出るくらいまでに客観的したものを操作的定義と言う。つまり、知能の操作的定義は、「知能とは知能テストで測られたもの」ということになる（犯罪統計入門 浜井浩一（編）2006 p.10)。このように操作的定義を行うことで、実体を持たない知能を測定することが可能になる[3]。

1.6　研究目的

これまで述べた通り、近年、3D 映像や 4K 映像、ドーム環境などに代表される様々な高臨場感ディスプレイ、高臨場感映像に関する研究・開発・実用化が行われている。また、遠隔医療、遠隔会議といった臨場感を必要とするデバイスが増えている。しかしながら、臨場感を生み出す要因は何か、どのように測定するのかという問い対しては、明確な答えがないのが現状である。主観的感覚である臨場感は直接測定することができないため、アンケートの様な臨場感の定量化が試みられてきているが、「臨場感」という用語は、評定者にとって意味が明確に捉えられないことが指摘されている。

また、人は、五感の感覚受容器で受け取った外界からの情報を脳に伝え、複雑な知覚、認知の情報処理を経て臨場感を感じ取っている。人が感じる臨場感の仕組みを科学的に明らかにし、臨場感を正確に測定、評価できるようになれば、「超臨場感システム」を構築していく上で大きな意義を持つ。第一に、超臨場感システムの安全性の確保という意義がある。超臨場感システムとは、実体のない情報をあたかも実体があるがごとく人に

伝える人工的なシステムであり、気が付かいうちに人の脳、神経系に危害を与えている可能性がある。人の心理、生理に違和感や疲労を与えることなく安全に臨場感を正確かつ定量的に評価する必要がある。臨場感の解明、評価のもう一つの意義は、人に臨場感を与える新しい方式の発見に繋がる可能性である。例えば、赤、緑、青という 3 色に感度特性を持つ光受容器が目に備わっていることを利用しているからこそ、映像ディスプレイは 3 色を組み合わせてあらゆる色を人が感じることができる。このように五感の知覚メカニズムが明らかになれば、全ての物理特性を忠実に再現することなく、効率的かつ効果的に人に臨場感を感じさせることが出来る可能性がある[1]。

本研究では、抽象的な表現がされている臨場感を心電計測、顔面皮膚温度計測、視点計測といった客観的評価である生体情報計測を行い、操作的定義により臨場感を定義することを研究目的とした。心電計測では、RRV という値に着目した。心電にあるＲ波とＲ波の間隔を RRI 呼び、RRI の分散を RRV とし、先行研究から、RRV が低い値であると、被験者が集中しているとされている。顔面皮膚温度では、額と鼻の温度に着目。精神的負担を感じると鼻の温度が下がると言われている。注視点移動であるが、被験者に映像を見せた際の注視点の移動回数を測定した。

実験としては、大きく分けて 3 つ行った。①ドーム環境における生体情報計測、②解像度、立体視、ディスプレイサイズの違いによる実験、検証として③星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験である。

ドーム環境の実験として日本科学未来館のプラネタリウムで実験を実施。ドームディスプレイと平面ディスプレイの被験者の視聴時の状態を比較するため、ＣＤＦの 180 インチディスプレイ、パナソニックの 42 インチディスプレイを使用した。この実験によって、ディスプレイサイズが臨場感の変化に影響を与えていることが分かった。次の実験として、解像度、立体視、ディスプレイサイズの 3 つの要因との組み合わせによって生じる生体情報を分析する実験を行った。この 2 つの実験において被験者に臨場感を感じた順番にアンケート調査を行い、主観評価であるアンケート調査の結果と、心電計測、顔面皮膚温度計測、視点計測といった客観的評価である生体情報計測の結果の相関を求めることで、操作的定義によって臨場感の定義化を試みた。しかしながら、これらの映像は、リアルタイム通信ではないため、臨場感の構成要素である時間要素を含んだ形で定義をすることはできないと考え、2 つの実験結果によって導き出された臨場感の定義の検証を行うため、星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験を実施した。この実験によって、時間要素を含んだ臨場感の定義化を行うことができる。

以上の実験と検証の結果から、“その場に居るかのような”、“ワクワク感”といった抽

象的に表現されている臨場感を主観評価と生体情報から臨場感を操作的定義することを研究目的とした。

第２章　ドーム環境での生体情報計測実験

2.1　実験目的

臨場感を与える要因として、高解像度、3D などが考えられるが、研究背景部分でも述べたが、現在、臨場感を与えるデバイスとしてプラネタリウムが注目されている。本研究では、まず、被験者がプラネタリウムの様な全天周スクリーンディスプレイと通常の平面ディスプレイを視聴している状態を生体情報から分析を行った。

2.2　実験環境

2.2.1　日本科学未来館　プラネタリウム

日本科学未来館では112席の球形シアターで全周を覆う広いスクリーンを活かした迫力の大画面映像や日本初の全天周・超高精細3D映像を使用した立体視プラネタリウム作品など､3つの映像システムを用いてさまざまな映像プログラムを上映している。

図 10　日本科学未来館　プラネタリウム

・恒星投影機：MEGASTAR-II cosmos

既存のプラネタリウムでは、数万個程度の星までしか投影していないことがほとんどであるが、このMEGASTAR-IIでは、12.5等星まで、500万個の恒星という、我々の肉眼で見ることのできない星までも再現している。これまでは、プラネタリウムの専門家の間でも、そこまで星を再現する必要性はあまり考えられていなかったようである。しかし、天の川の立体感や色の濃淡、細かい暗黒星雲のディテールまで再現することのできるプラネタリウムは、今のところ、世界中探してみてもこのメガスターだけである[4]。

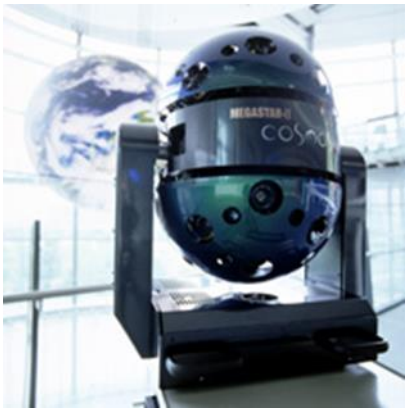


図 11　MEGASTAR-II cosmos

2.2.2　超高解像度ディスプレイ CDF

図 12　Concurrent Design Facility

CDF（Concurrent Design Facility）は、4K 立体視映像を中心としたマルチディスプレイ環境で、通常の授業から、遠隔講義や遠隔会議、システムデザインのための設計、シミュレーション、ビジュアリゼーション等の幅広い研究用途に利用することができる。4K とは水平 4,096×垂直 2,160 画素の高解像度映像で、特に CDF では 4K プロジェクタ 2 台をスタックで使用することで、高解像度かつ高没入感の映像を実現している。また 4K ディスプレイは 4K 解像度の映像としてだけではなく、フルハイビジョン 4 画面のマルチディスプレイとしても使用することができ、両サイドに設置された 108 インチ液晶モニタと合せて、最大 6 画面のマルチディスプレイ環境としても利用することができる。

表 3　システム構成

4KプロジェクタSONY	SONY SRX-S110（10,000ANSIルーメン, 4096×2160）×2台
スクリーン	リア投影用ハードスクリーン　ニップラ ブルーオーシャン
立体視方法	直線偏光立体視
モニタ	シャープ108インチ液晶モニタ ×2台
4K映像用計算機	Dell Precision T7400（Quad Core Xeon 3.2GHz×2＋NVIDIA Quadro Plex 1000 Model IV）×2台
開発用計算機	Dell Precision T7400（Quad Core Xeon 3.2GHz×2）×4台
入力デバイス	ゲームコントローラ

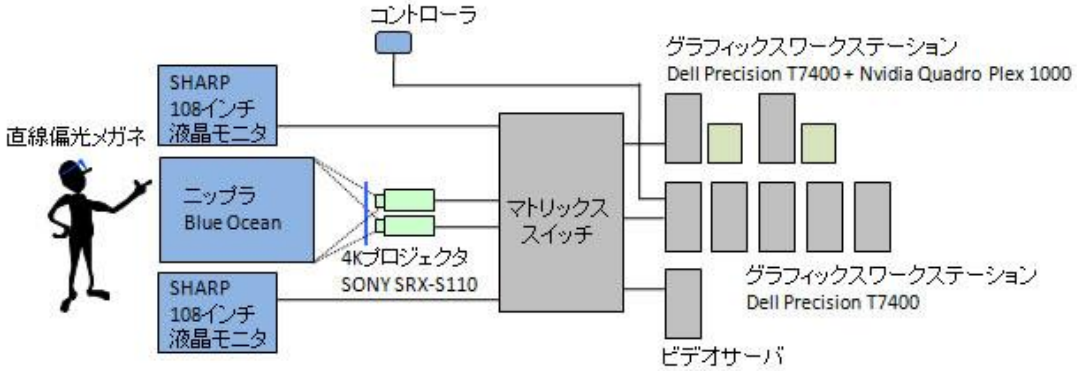


図 13　CDF のシステム構成

■ 使用例

CDF はコンピュータグラフィックスによる各種シミュレーションデータの高解像度立体視による可視化の他、高解像度立体視、ビデオ映像の提示等に利用することができ

る。また、マルチスクリーン環境を利用した設計やディスカッション環境としての利用にも有効である。

パナソニック　3D VIERA TH-P42GT3［42 インチ］

小画面視聴の実験のため本研究では､パナソニック　3D VIERA TH-P42GT3［42 インチ］、3D メガネは、アクティブシャッター方式のメガネを使用。

図 14　パナソニック　3D VIERA TH-P42GT3［42 インチ］

図 15　アクティブシャッターメガネ

2.2.3　映像コンテンツについて

コンテンツとして使用した映像は、「ちきゅうをみつめて」という実際に日本科学未来館で上映されている映像である。この映像は、没入感あふれるドーム映像と

音楽によって、地球と私たちを別の角度から"みつめる"体験となる作品となっており、実際には上映時間は約 30 分であるが、実験では CG で描かれた映像図 16 とアニメの映像図 17 を視聴した際の生体情報を計測するため視聴時間を約 12 分とした。

大型映像作品：「ちきゅうをみつめて」

図 16　CG で描かれた映像

図 17　アニメの映像

2.3　実験方法

日本科学未来館、ＣＤＦでの実験ともに被験者が椅子に座った状態で、安静 3 分、映像鑑賞約 12 分、安静 3 分の計約 18 分の実験を行った。

図 18　日本科学未来館での実験風景

提示映像は、CG で描かれた映像とアニメの映像を含み、これらを小画面（視野角:16deg)、大画面（視野角:36deg)、ドームディスプレイ（視野角:180deg）の異なる画面サイズに提示し、被験者 5 人で 6 パターンの実験を行い、心電計測、顔面皮膚温度計測、視点計測を行った。大画面視聴の際は、ＣＤＦの 180 インディスプレイから、6．2ｍ（前から 2 列目の真ん中の席)、小画面視聴の際は、パナソニック 3D VIERA TH-P42GT3 [42 インチ]を被験者から 3．3mの位置に配置し実験を行った。

表 2　実験パターン

映像内容	ディスプレイ
CG で描かれた映像	小画面
CG で描かれた映像	大画面
CG で描かれた映像	ドーム
アニメ映像	小画面
アニメ映像	大画面
アニメ映像	ドーム

2.4　主観評価

被験者に 6 パターンの映像を視聴して頂いた後、臨場感を最も感じた順に順位付けを行って頂いた。その結果が表 3 である。

最も臨場感を感じた環境が、映像内容が「ＣＧで描かれた映像」でドームディスプレイ。最も臨場感を感じなかった環境が、映像内容が「2 次元のアニメ映像」で小画面ディスプレイという結果になった。主観評価からディスプレイのサイズが臨場感に強く影響を及ぼしていることが分かった。

表 3　主観評価

順位	映像内容	ディスプレイ
1	CG で描かれた映像	ドーム
2	CG で描かれた映像	大画面
3	アニメ映像	ドーム
4	アニメ映像	大画面
5	CG で描かれた映像	小画面
6	アニメ映像	小画面

2.5　生体情報計測について

本研究で心電計測、顔面皮膚温度計測、視点計測の 3 つの生体情報計測を行った。この生体情報を選択した根拠であるが、2010 年大晦日にベートーベンは凄い！全交響曲連続演奏会を 3D 映像＋5.1ch サラウンドで、コンサートホール映像の伝送実験を実施した図 19。この実験で、被験者の生体情報を行った。具体的には、脳波 (EEG)、心電図 (ECG)、顔面皮膚温度、唾液中アミラーゼ、フリッカーテストである。生体計測の結果、心電図、顔面皮膚温度において有意差が見られた。この結果を踏まえて、本研究では、心電計測、顔面皮膚温度計測を採用し、また映像の興味を測るため、視点計測を合わせた 3 つの生体情報計測を行った。

図 19　ＣＤＦに伝送された 3D 映像

2.5.1　心電計測について

計測目的

集中度評価として RRV を算出する。心電に現れるパルスのうち、最も大きいものを R 波と呼ぶ。R 波と R 波の間隔を RRI (RRInterval) と呼び、RRI の分散を RRV (RRVariance) と呼ぶ。心臓の拍動リズムは，自律神経系である交感神経および副交感神経の働きによって調節されている。心電図のＲ−Ｒ間隔を計測し，スペクトル解析を得てパワー分析を行うと，高周波数成分と低周波数成分に分類でき、副交感神経活動の指標は高周波数成分として，低周波数成分と高周波数成分の比は交感神経活動の指標とされるこのような日常における自律神経活動から，ものごとに集中しているときは心拍動が速く・規則正しくなり，リラックスしている状態ではゆっくり・不規則になることが知られており，拍動リズムの規則性を分析することによって集中度を客観的に判断できる。

拍動の規則性は、心電図のＲ波とＲ波の間隔（RRInterval：RRI）から得られ，RRI の値にバラツキが大きければ拍動は不規則であり，少なければ規則的である。ある区間の全 RRI を統計的に算出して分散計算した RRV（RRVariance）を用いると，その規則性が客観的に示される。この RRV は,図 20 にあるようにｎ＋1 個の RRI の平均値ＲＲｌ（ｔ），RRI（ｔ－1），RRI（ｔ－2）…… ＲＲｌ（ｔ－ｎ）を求め（移動平均），それらの値を用いて RRV（ｔ），RRV（ｔ－1），RRV（ｔ－2）……RRV（ｔ−ｎ）を計算する[5]。

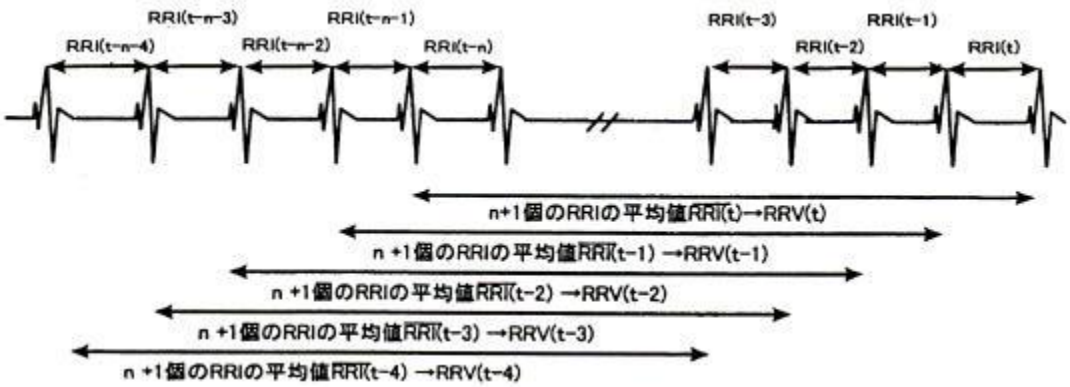


図 20　RRV 算出

被験者が集中している状態では、RRV が低く、集中出来ていない状態や、リラックスしている時は RRV が高くなる[2]。本研究ではこの RRV の値に着目した。

2.5.2　計測機器

心電計測機器として BioTrace+for NeXus-4 図 25 を使用した。

図 21　BioTrace+for NeXus-4

BioTrace+for NeXus-4 に取り付ける電極は、ディスポーザブル心電図電極（積水化成品工業株式会社）を使用した。

図 22　ディスポーサブル心電図電極（積水化成品工業株式会社）

BioTrace+for NeXus-4 とディスポーサブル心電図電極を用いて計測を行う。

2.5.3　計測方法

心電の取得には、図 23 のようなアースと＋電極、－電極を直接被験者に付ける三点誘導方式を用いた。

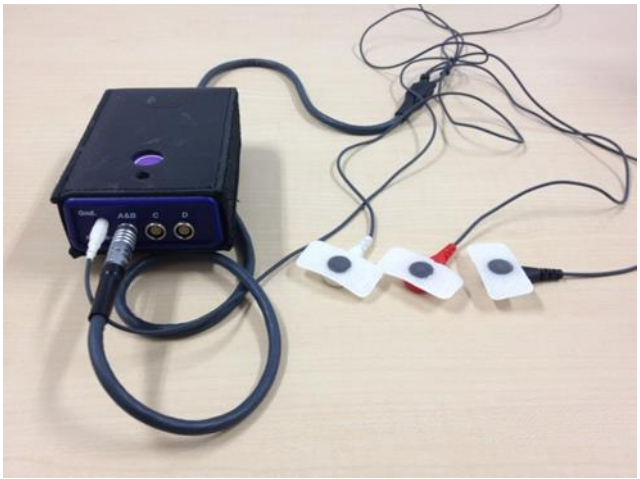


図 23　BioTrace+for NeXus-4 とディスポーサブル心電図電極

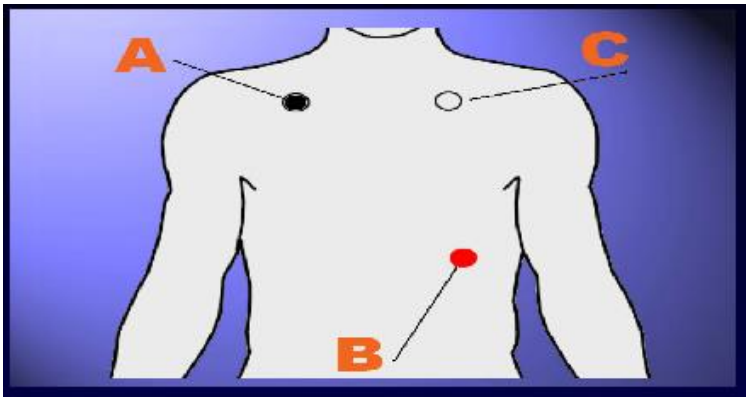


図 24　電極の位置（BioTrace+for NeXus-4 の画面より）

RRV 検出

心電図には、図 25 にあるようにＰ波、Ｑ波、Ｒ波、Ｓ波、Ｔ波がある。心電にある高い波がＲ波である R 波と R 波の間隔を RRI（RRInterval）と呼ぶ。RRI を導き出し、その

後 RRI の分散である RRV を検出した。

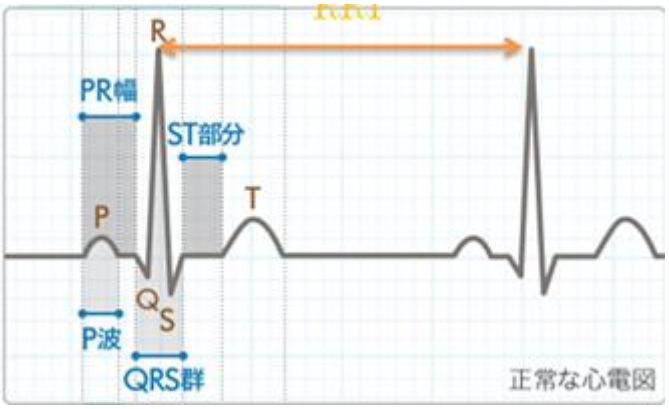


図 25　心電図（http://www.readmyheart.jp/readmyheartplus/howto.html）

約 18 分の実験の被験者の RRV 算出後グラフ化を行う。一例であるが、図 30 に RRV のグラフを載せた。縦軸を RRV、横軸を時間（秒）である。

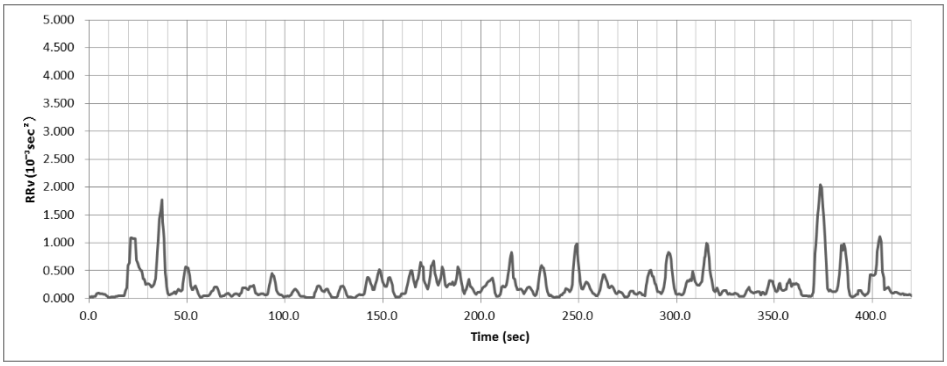


図 26　「ちきゅうをみつめて」の視聴中の RRV

2.6　顔面皮膚温度計測について

2.6.1　計測目的

顔面皮膚温度計測の目的だが、交感神経系の血管収縮作用を中心とした自律神経系の活動により血流量変化が生じる。特に鼻部周辺には、毛細血管の血流量を調整する動静

脈合血管（ＡＶＡ：Arteriovenous anastomoses）と呼ばれる動脈と静脈の吻合部（発症皮膚血管）が集中し、他の体部位と比較して多い。さらに、血管が他の部位では脂肪層の下を走っているのに対し、鼻部周辺においては皮膚と鼻骨のわずかな隙間を走っている。皮膚温度は、血流量の変化に依存ずるため生理・心理状態が鼻部皮膚温度に顕著に表れる。副交感神経優勢時には、ＡＶＡを通る血流量が増加することにより、鼻部皮膚温度が上昇する。逆に交感神経が優勢時には、ＡＶＡを通る血流量の減少により温度が下降する。一方、額部の体幹部に位置し、ＡＶＡの密度が低いため自律神経活動の変化による血流変化が少ない。したがって、額部皮膚温度と鼻部皮膚温度との温度の時間的変化を測定することは、交感神経系・副交感神経系を間接的に計測することができる[5]。本研究においても、周囲の温度変化の影響を補正するためには、精神的負荷が現れない額部と精神的負荷の影響が現れる鼻部の温度差を用いる方法[6]を本研究でも用いた。

2.6.2　計測機器

計測機器は、赤外線サーモグラフィ R300S（NEC Avio 赤外線テクノロジー）を使用した。

図 27　サーモカメラ　(NEC/Avio InfReC Thermography R300S)

表 4　基本性能

測定温度範囲	-40℃～120℃
温度分解能	0.025℃ at 30℃(S/N改善時)
温度指示精度	±2℃ or ±2%
検出器	2次元非冷却センサ(マイクロボロメータ)
有効画素数	320(H)×240(V)
測定波長	8～14μm
フレームタイム	60Hz
測定視野角	22°(H)×17°(V)
空間分解能	1.2mrad
測定距離範囲	10cm～∞(標準レンズ搭載時)

2.6.3　計測方法

サーモカメラで計測後、InfReC Analyzer NS9500 Standard（ソフトウェア）を使用し、解析を行う。

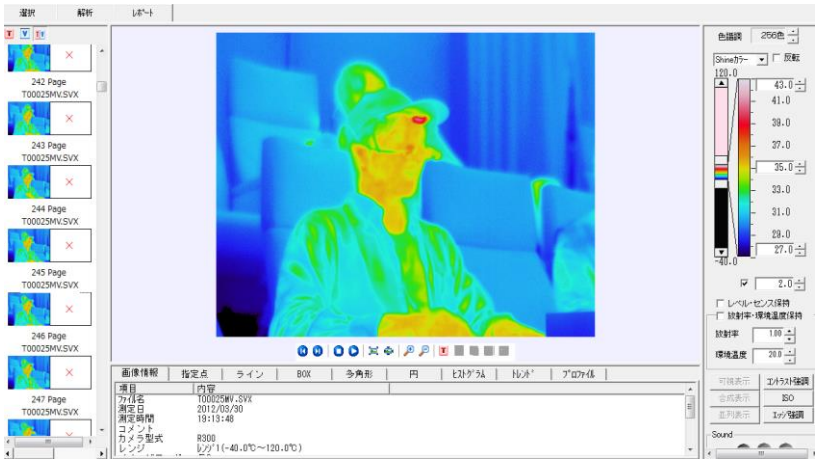


図 28　解析ソフトウェアの画面

解析方法であるが、図 33 が被験者の頭部の熱画像である。サーモカメラは、1 秒間に 2 フレームの感覚で熱画像を撮影することができる。

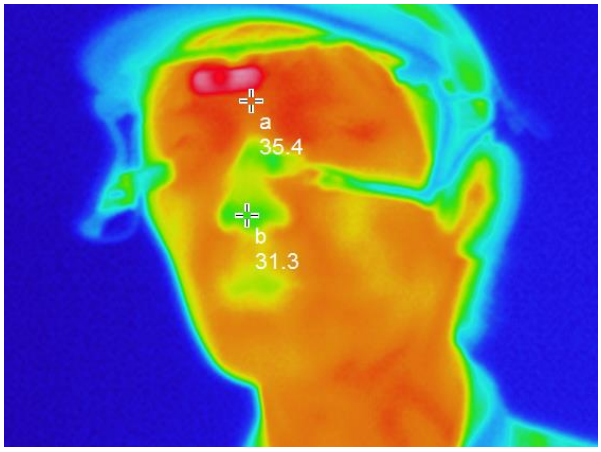


図 29　額と鼻の温度

本研究では、取得した被験者の熱画像の額部と鼻部にマーキングを行い、視聴中の額と鼻の温度を計測する。本研究では、10 秒おきにプロットしていきグラフ化（図 34）を行う。縦軸が温度、横軸が時間、赤のラインが額部の温度、青部のラインが鼻の温度である。

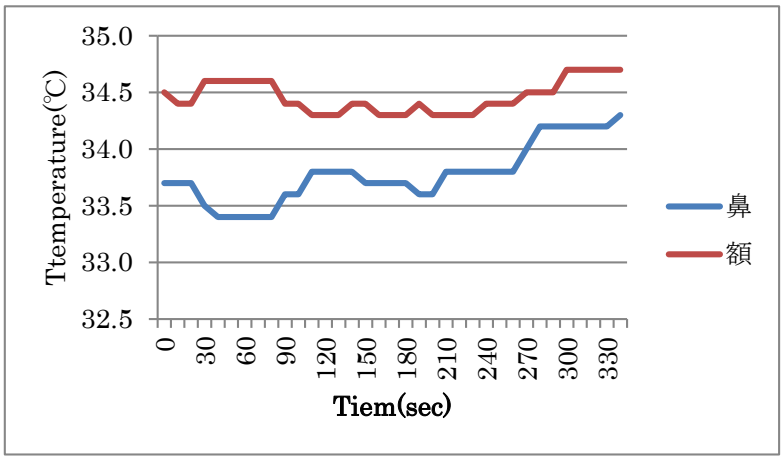


図 30　額部―鼻部の温度

2.7　注視点計測について

2.7.1　計測目的

注視点計測では、視点計測機（EMR-9)を使用し、映像に対する興味を測るために、被験者が映像を視聴する際の注視点移動回数に注目し計測を行った。

2.7.2　計測機器

計測機器、視点計測機（EMR-9)ヘッドユニットは帽子タイプ両眼150g、グラスタイプは両眼75g、コントローラは本体質量590g。詳しい使用は以下の通りである。

図 31　視点計測機のコントローラ

図 32　視点計測機（EMR-9)ヘッドユニット

表 5　基本性能

視野カメラ	検出センサ:1/3インチカラーイメージセンサ　有効画素数:640(H)x480(V)
アイマーク検出ユニット	
有効画素数	640(H)x480(V)
測定範囲	眼球運動:水平±40°、垂直±20°
検出方式	瞳孔/角膜反射法式、瞳孔法(暗瞳孔法)
検出レート	60Hzモデル、60/120/240Hzモデル(2種類)
検出分解能	60Hz:水平分解能0.1°　垂直分解能0.1°　瞳孔径:0.02mm
	120Hz:水平分解能0.1°　垂直分解能0.2°
	240Hz:水平分解能0.1°　垂直分解能0.4°
コントローラ	
出力信号	映像信号(データ重畳可能)
	AUDIO出力(モノラル)
	シリアルデータ(フレームカウンタ、注視点座標等)
	イベント出力(TTL信号)
記録時間	約60分
記録データ	アイマーク重畳視野映像(MPEG4 640×480)
	音声(AAC モノラル)
	計測データ(バイナリ形式)

2.7.3　計測方法

キャリブレーション方法

キャリブレーション方法に関しては、図 33 から図 40 で説明する。ＥＭＲ－9 は、図 33 のようなカメラが取り付けてある帽子を被る。

図 33　視点計測機ナックアイマークレコーダ (EMR-9)を装着

帽子の位置は、被験者自身で正常な位置で被ることが難しいため、実験者は、正常な位置で被るために手伝いを行う。コントローラを確認しながら、図 34 の視野カメラ①の角度の調節を行う。まず、被験者を側面から見て、目じりと耳の付け根上部を結ぶ線をイメージし、その線が地面に平行になる姿勢をとってもらい、その線から約 10 度の方向にある物を注視させる。次に被験者が見ている物が視野映像の中心に来るように視野カメラの上下調整を行う。

図 34　視点計測機（EMR-9)のカメラ

右眼カメラ、左眼カメラ②の調整は、被験者に左右方向を見てもらい、左右いつでも瞳孔が移るように眼球カメラの位置を調整する。実験者はコントローラのモニタの眼球映像を見ながら片手でメガネのブリッジまたはカメラアームを持ち、もう片方の手で眼球カメラを左右に動かして位置を調節する。

図 35　眼球カメラの位置設定

眼球カメラの位置調整の際、フォーカスが合っていない場合、モニタ映像の鮮明度を見ながら眼球カメラを回してフォーカスを調整する。被験者の眼球映像が捉えられたら瞳孔の 2 値化閾値を設定する。瞳孔がかすれることなく、まつげなどの領域と接触しないように 2 値化閾値を設定する。その際、十字線が瞳孔中心付近以外に表示されている場合は、瞳孔が正常に検出されていないので 2 値化レベルを調整し直す。

図 36　瞳孔のトラッキング

キャリブレーションの際、実験者は、懐中電灯、レーザーポインタまたは、図 37 を使用。

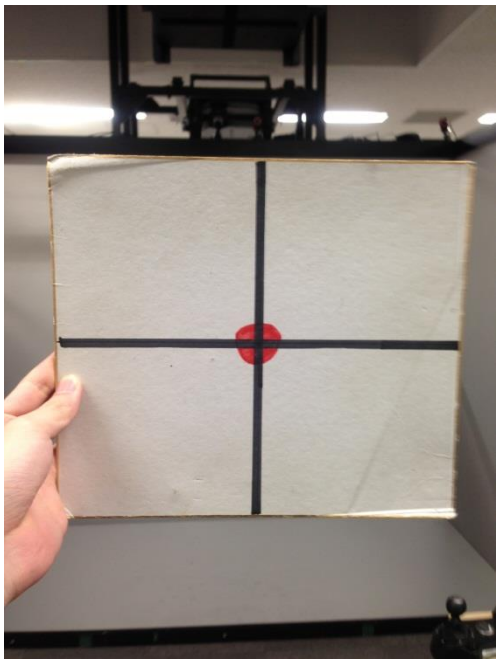


図 37　キャリブレーションの道具

図 38　キャリブレーション①

視野映像を見て強調表示されるＣＡＬマークと同じ位置をレーザーポインタで照射する図 38。その後被験者に照射位置を見るように指示する。正常にキャリブレーションデータが得られるとＣＡＬマークの強調が 2 点目に移る。ここで、2 値化が正常にできていないなどでキャブレーションデータが得られない時は、ＣＡＬマークの強調表示は移動しないので、キャリブレーションを中止し 2 値化設定をやり直す。9 点のキャリブレーションデータが取得できるとキャリブレーションモードは自動的に終了し、視野映像にアイマークが表示される。のディスプレイに表示されるＣＡＬマーク

図 39　キャリブレーション②

9 点方式キャリブレーションの場合、各マークに対応するアイマークデータは線で結ばれ格子状図 44 に表示されるが、格子が大きくゆがんだ場合や大きく外れた場合、被験者が注視した物とアイマークが大きくずれることが起きる。そのような場合は、キャリブレーションをやり直すか、外れた視点方向に注意してマニュアルで 2 値化の設定を行い

再度キャリブレーションすることにより問題を解決する。

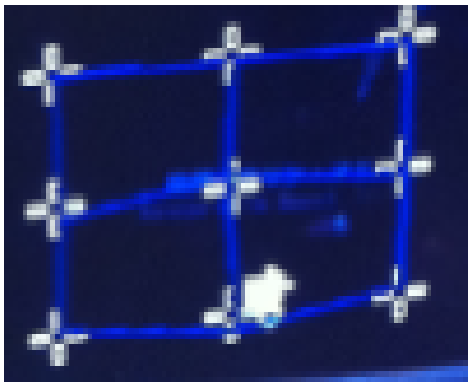


図 40　キャリブレーション終了

キャリブレーションは、被験者によって変わるが、約 30 分から 1 時間 30 分かかる。図 44 のように格子状がコントローラに表示されるとキャリブレーションは成功である。キャリブレーションが成功すると、図 41 のように被験者が映像のどこを見ているのかを確認することができる。□が右眼、＋が左眼、○が中央。その後、動画ソフトで被験者の注視点移動回数を分析する。

図 41　キャリブレーション後の視点計測

2.8　実験結果

以上の 3 つの生体情報計測を行い被験者 5 人の生体情報を算出した。RRV 値、鼻部温度、注視点移動回数の実験結果について、被験者、映像内容（CG で描かれた映像と 2 次元のアニメ映像)、画面サイズを要因とした 3 元配置分散分析を行った。その後多重比較をからディスプレイごとの比較を行った。

2.8.1　心電計測の実験結果

心電計測については、RRI から RRV を算出し分析を行った。被験者が異なるディスプレイサイズで映像内容（CG で描かれた映像と 2 次元のアニメ映像）視聴している際の RRV が表 6 である。

表 6　被験者の RRV

被験者	映像内容	ディスプレイサイズ	RRV
A	CG	小画面	6.62
A	CG	大画面	1.481
A	CG	ドーム	2.387
A	アニメ	小画面	10.261
A	アニメ	大画面	2.037
A	アニメ	ドーム	2.136
B	CG	小画面	1.697
B	CG	大画面	0.919
B	CG	ドーム	2.398
B	アニメ	小画面	2.068
B	アニメ	大画面	0.951
B	アニメ	ドーム	1.564
C	CG	小画面	1.91
C	CG	大画面	0.858
C	CG	ドーム	0.341
C	アニメ	小画面	1.662
C	アニメ	大画面	1.446
C	アニメ	ドーム	0.301
D	CG	小画面	0.18
D	CG	大画面	0.247
D	CG	ドーム	0.935
D	アニメ	小画面	0.493
D	アニメ	大画面	0.255
D	アニメ	ドーム	0.958
E	CG	小画面	0.197
E	CG	大画面	0.932
E	CG	ドーム	0.08
E	アニメ	小画面	0.287
E	アニメ	大画面	1.203
E	アニメ	ドーム	0.062

各被験者の RRV を算出後、三元配置分散分析により被験者(p=0.000)、画面サイズ(p=0.001)、被験者×画面サイズ(p=0.001)について有意であった。ディスプレイサイズにおける有意差を分析するため多重比較を行った結果、小画面＞大画面 (p=0.001)、小画面＞ドーム(p=0.001)となり有意であった図 46。このことから小画面より大画面の方がより集中しているということができる。つまり被験者による個人差は大きいが、画面サイズがある一定の大きさを持つと RRV 値の低下、つまり映像への集中の効果が見られることが分かった。

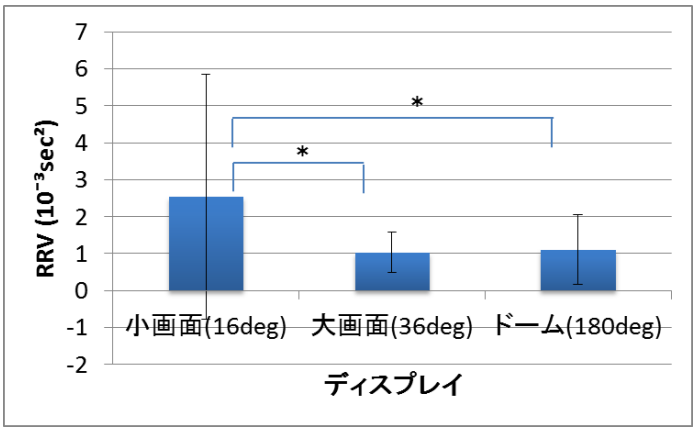


図 42　画面サイズによる RRV 値

2.8.2　顔面皮膚温度計測の実験結果

顔面皮膚温度計測については、被験者が異なるディスプレイサイズで映像（CG で描かれた映像と 2 次元のアニメ映像）を視聴している際の額部温度―鼻部温度の差分温度を算出した表 7。

表 7　被験者の額部―鼻部の差分温度

被験者	映像内容	ディスプレイサイズ	額部-鼻部の差分温度(℃)
A	CG	小画面	2.564
A	CG	大画面	0.704
A	CG	ドーム	1.011
A	アニメ	小画面	2.492
A	アニメ	大画面	0.585
A	アニメ	ドーム	1.282
B	CG	小画面	0.761
B	CG	大画面	0.24
B	CG	ドーム	1.424
B	アニメ	小画面	0.672
B	アニメ	大画面	0.231
B	アニメ	ドーム	1.277
C	CG	小画面	2.6
C	CG	大画面	1.864
C	CG	ドーム	0.133
C	アニメ	小画面	2.592
C	アニメ	大画面	1.6
C	アニメ	ドーム	0.236
D	CG	小画面	0.7
D	CG	大画面	0.776
D	CG	ドーム	0.85
D	アニメ	小画面	0.708
D	アニメ	大画面	0.623
D	アニメ	ドーム	0.222
E	CG	小画面	0.128
E	CG	大画面	0.208
E	CG	ドーム	0.356
E	アニメ	小画面	0.2
E	アニメ	大画面	0.4
E	アニメ	ドーム	0.587

顔面皮膚温度も同様に、被験者(p=0.000)、画面サイズ(p=0.000)、被験者×画面サイズ(p=0.000)について有意であった。ディスプレイサイズにおける有意差を分析するため多重比較を行った結果、小画面＞大画面 (p=0.000)、小画面＞ドーム(p=0.000)となり有意であった図 47。つまり被験者による個人差は大きいが、画面サイズがある一定の大きさを持つと鼻部の温度低下が減少、つまり精神的負荷が少なくなることが分かった。

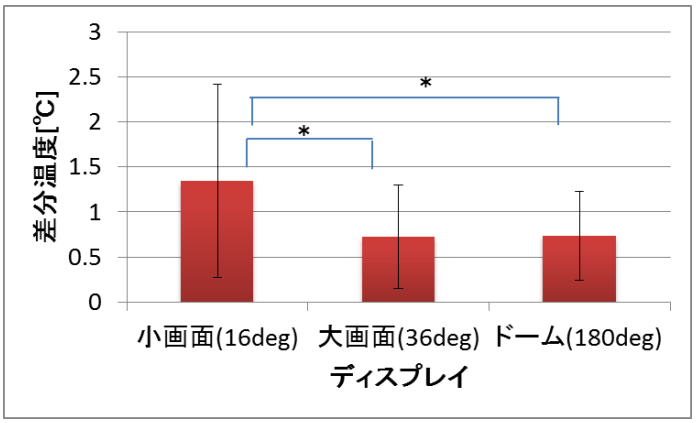


図 43　画面サイズによる額部−鼻部の差分温度[℃]

2.8.3　注視点計測の実験結果

注視点移動については、異なるディスプレイサイズで映像内容（CG で描かれた映像と 2 次元のアニメ映像）を被験者が視聴している際の 1 秒当たりの注視点移動回数に着目して分析を行った表 8。

表 8　被験者の注視点移動回数

被験者	映像内容	ディスプレイサイズ	注視点移動(/sec)
A	CG	小画面	0.730
A	CG	大画面	0.852
A	CG	ドーム	0.949
A	アニメ	小画面	0.733
A	アニメ	大画面	0.815
A	アニメ	ドーム	0.807
B	CG	小画面	0.717
B	CG	大画面	1.160
B	CG	ドーム	1.498
B	アニメ	小画面	0.689
B	アニメ	大画面	1.156
B	アニメ	ドーム	1.504
C	CG	小画面	0.734
C	CG	大画面	1.152
C	CG	ドーム	1.203
C	アニメ	小画面	0.770
C	アニメ	大画面	1.274
C	アニメ	ドーム	1.356
D	CG	小画面	0.616
D	CG	大画面	0.886
D	CG	ドーム	1.456
D	アニメ	小画面	0.711
D	アニメ	大画面	1.037
D	アニメ	ドーム	1.526
E	CG	小画面	0.451
E	CG	大画面	1.118
E	CG	ドーム	1.460
E	アニメ	小画面	0.541
E	アニメ	大画面	1.022
E	アニメ	ドーム	1.430

その後、3 元配置分散分析を行い、多重比較からディスプレイごとの比較を行った。注視点移動回数では、被験者(p=0.000)、画面サイズ(p=0.000)、被験者×画面サイズ(p=0.000)について有意であった。ディスプレイサイズにおける有意差を分析するため多重比較を行った結果、小画面＞大画面 (p=0.000)、小画面＞ドーム(p=0.000)、大画面＞ドーム(p=0.000)となり有意であった図 48。つまり被験者による個人差は大きいが、画面サイズが大きくなるほど、より注視点が動く傾向がみられることが分かった。

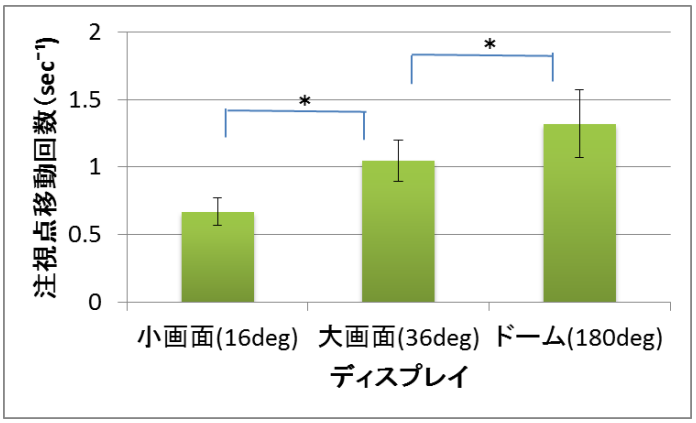


図 44　画面サイズによる注視点移動回数

2.8.4　実験結果のまとめ

実験結果をすべてまとめると図 45 になる。この結果から、RRV では、画面サイズがある一定の大きさを持つと RRV 値の低下、つまり映像への集中の効果が見られることが分かった。画面サイズがある一定の大きさを持つと鼻部の温度低下が減少、つまり精神的負荷が少なくなることが分かった。注視点移動回数では、画面サイズが大きくなるほど、より注視点が動く傾向がみられることが分かった。

表 9　分析結果のまとめ

生体情報	有意差
RRV	小画面＞大画面(RRV)
	小画面＞ドーム(RRV)
顔面皮膚温度(額部-鼻部)	小画面＞大画面(℃)
	小画面＞ドーム(℃)
注視点移動回数	小画面＜大画面(回数)
	小画面＜ドーム(回数)
	大画面＜ドーム(回数)

2.9　考察

本実験を始める前の仮説では、ＣＧで描かれた映像と 2 次元のアニメ映像とでは、RRV、顔面皮膚温度、注視点移動回数に有意差が現れると考えていたが、CG で描かれた映像と 2 次元のアニメ映像では、有意差はみられなかった。大画面やドームといった高臨場感を与えることができると思われるスクリーンでは、RRV 値、鼻部温度、注視点移動回数に有意な傾向がみられた。この結果から、臨場感を感じている状態を、RRV 値が低く集中し、鼻部温度の低下が大きくないことから精神的負荷が少なく、注視点の移動が多い状態として捉えることができる。

第３章　解像度、立体視、ディスプレイサイズの違いによる生体情報計測実験

3.1　実験目的

「ドーム環境での実験」により、CG で描かれた映像と 2 次元のアニメ映像では、有意差はみられなかったが、大画面やドームといった高臨場感を与えることができると思われるスクリーンでは、RRV 値、鼻部温度、注視点移動回数に有意な傾向がみられた。この結果から、ディスプレイサイズに影響を受ける臨場感は、RRV 値が低く集中し、鼻部温度の低下が大きくないことから精神的負荷が少なく、注視点の移動が多い状態として捉えることができる。「解像度、立体視、ディスプレイサイズの違いによる実験」では、4K、HD といった解像度の違い、3D、2D といった立体視の違いが被験者に与える臨場感を生体情報から分析し、この実験による、臨場感を与える要因の中で何の要因が最も要因を与えているのか、解像度、立体視、ディスプレイサイズといった 3 つの要因を組みあわせによる生じる生体情報の変化を分析する。この実験結果は、臨場感を必要とする遠隔医療、遠隔会議などを行う際に指標になると考える。

3.2　実験概要

ＮＨＫメディアテクノロジーの撮影スタッフと共同で撮影した図 50、4K3D 映像(light connects 図 51）を映像コンテンツとして使用し、4K3D 大画面、4K2D 大画面、HD3D 大画面、HD2D 大画面、4K3D 小画面、4K2D 小画面、HD3D 小画面、HD2D 小画面の 8 パターンの実験を被験者 5 人で行った。合計 40 回の実験では、「ドーム環境での実験」と同様に、心電計測、顔面皮膚温度計測、注視点計測を行い分析した。実験環境は、ＣＤＦの 180 インチディスプレイ、パナソニックの 3D VIERA TH-P42GT3 [42 インチ]を使用し、室内温度は 25 度として実験を行った。

図 45　白川郷の撮影

図 46　light connects

3.3　生体情報計測

解像度、立体視、ディスプレイサイズの違いによる実験では、「ドームでの実験」と同様に心電計測、顔面皮膚温度計測、注視点計測を行った。心電計測では、BioTrace+for NeXus-4 を使用し、被験者の RRI から、RRI から RRV を算出し分析を行った。顔面皮膚温度計測は、額部―鼻部温度をサーモカメラにより計測し差分温度を求めた。注視点計測は、視点計測機（ＥＭＲ－9）を使用し、被験者の注視点移動回数を計測し、1 秒当たりの注視点移動回数を分析した。

3.4　実験方法

提示映像は light connects、解像度は 4K、HD、立体視は 3D、2D、ディスプレイサイズは小画面（視野角:16deg)、大画面（視野角:36deg）の要因で行った。被験者 5 人で 8 パターンの実験を行い、心電計測、顔面皮膚温度計測、視点計測を行った。4K3D 大画面、4K2D 大画面視聴の際は、ＣＤＦの 180 インディスプレイから、6．2m（前から 2 列目の真ん中の席)、4K3D 小画面、4K2D 小画面の視聴は、ＣＤＦの 180 インディスプレイから、6．2m（前から 2 列目の真ん中の席)。HD3D 大画面、HD2D 大画面視聴は、パナソニック 3D VIERA TH-P42GT3 [42 インチ]から 3．3m。HD3D 小画面、HD2D 小画面視聴は、パナソニック　3D VIERA TH-P42GT3 [42 インチ]から 1.2mの位置に配置し実験を行った図 52。

解像度	立体視	ディスプレイ
4K	3D	大画面
4K	3D	小画面
4K	2D	大画面
4K	2D	小画面
HD	3D	大画面
HD	3D	小画面
HD	2D	大画面
HD	2D	小画面

表 10　8 パターンの実験

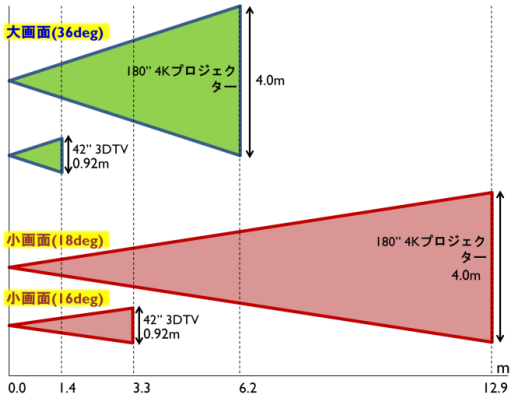


図 47　大画面と小画面視聴

この実験では、被験者 5 人集め 8 パターンの実験を行い、合計 40 回の実験を行った。実験環境であるが実験場所はＣＤＦ内で行い、室内温度は 25 度に設定した。実験方法は、被験者に所定の位置に映像を視聴する姿勢で座ってもらう。その後、心電計のアースと＋電極、－電極を直接被験者に付け、しばらく安静にしてもらい心電が測れているのかを確認する。次に顔面皮膚温度の計測を行うために、サーモカメラを被験者の額と鼻がはっきり確認でき、また、映像を視聴する際に邪魔にならない場所に配置する。最後に視点計測を行う。3D 映像を視聴する際は、視点計測機ＥＭＲ－9 を装着する前に、3D メガネを装着する。3D メガネをかけた状態だと 3D メガネに光が反射することがあるため、ＣＤＦ内の照明を調整してキャリブレーションを行う図 53。

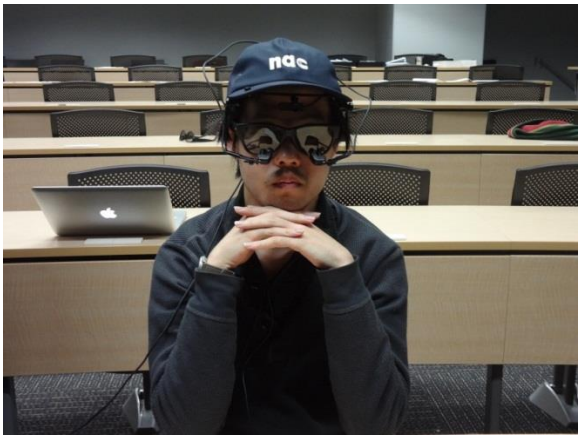


図 48　4K3D 大画面視聴前の安静時の被験者の様子

図 49　4K2D 大画面視聴前の安静時の被験者の様子

3.5　主観評価

表 11　主観評価の順位

順位	解像度	立体視	ディスプレイ
1	4K	3D	大画面
2	HD	3D	大画面
3	4K	2D	大画面
4	HD	2D	大画面
5	4K	3D	小画面
6	HD	3D	小画面
7	4K	2D	小画面
8	HD	2D	小画面

主観評価として 8 パターンの映像を視聴後、被験者 5 人に臨場感を感じた順番に順位付けをして頂いた。主観評価では、ディスプレイサイズが最も臨場感に影響を及ぼしていることが分かった。

3.6　実験結果

3 つの生体情報計測を行い被験者 5 人の生体情報を算出し RRV 値、額部―鼻部の差分温度、注視点移動回数の分析を行った。実験結果から解像度、立体視、ディスプレイサイズを要因とした 3 元配置分散分析を行った。

3.6.1　心電計測の実験結果

心電計測については、RRI から RRV を算出したのが表 11 である。

表 12　被験者の RRV

被験者	解像度	立体視	ディスプレイサイズ	RRV
A	4K	3D	大画面	0.850
A	4K	3D	小画面	1.200
A	4K	2D	大画面	1.110
A	4K	2D	小画面	1.870
A	HD	3D	大画面	1.060
A	HD	3D	小画面	1.970
A	HD	2D	大画面	1.710
A	HD	2D	小画面	2.520
B	4K	3D	大画面	0.760
B	4K	3D	小画面	1.380
B	4K	2D	大画面	1.250
B	4K	2D	小画面	2.370
B	HD	3D	大画面	1.190
B	HD	3D	小画面	2.240
B	HD	2D	大画面	1.260
B	HD	2D	小画面	2.290
C	4K	3D	大画面	0.610
C	4K	3D	小画面	0.540
C	4K	2D	大画面	0.800
C	4K	2D	小画面	1.750
C	HD	3D	大画面	0.720
C	HD	3D	小画面	1.680
C	HD	2D	大画面	0.540
C	HD	2D	小画面	1.690
D	4K	3D	大画面	0.090
D	4K	3D	小画面	0.280
D	4K	2D	大画面	0.850
D	4K	2D	小画面	1.460
D	HD	3D	大画面	0.980
D	HD	3D	小画面	1.110
D	HD	2D	大画面	0.450
D	HD	2D	小画面	1.730
E	4K	3D	大画面	0.89
E	4K	3D	小画面	2.07
E	4K	2D	大画面	0.8
E	4K	2D	小画面	1.8
E	HD	3D	大画面	1.12
E	HD	3D	小画面	1.28
E	HD	2D	大画面	1.26
E	HD	2D	小画面	1.59

算出した RRV を解像度、立体視、ディスプレイサイズを要因とし 3 元配置分散分析を行った表 12。

表 13　RRV を従属変数とした各要因ごとの有意確率

従属変数: RRV

ソース	自由度	平均平方	F 値	有意確率
解像度	1	0.801	4.375	0.044
立体視	1	1.253	6.846	0.013
ディスプレイサイズ	1	5.271	28.794	0

3 元配置分散分析から、解像度（有意確率=0.044)、立体視（有意確率=0.013)、ディスプレイサイズ（有意確率=0.000）となり、RRV は、解像度、立体視、ディスプレイサイズの 3 つの要因の影響を受けていることになる。

3 元配置分散分析後、解像度における有意差を分析するため HD と 4K の RRV でＴ検定を行った結果 HD＞4K（p=0.028)となり有意であった図 51。このことから HD より 4K の方がより集中しているということができる。

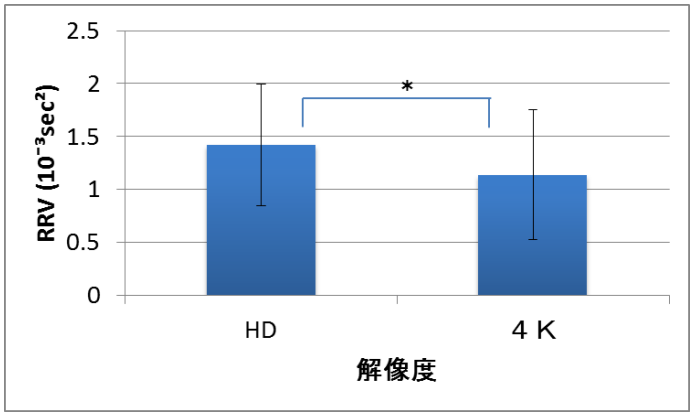


図 50　解像度の違いによる RRV

解像度における有意差を分析するため 3D と 2D の RRV でＴ検定を行った結果 2D＞3D

(p=0.000)となり有意であった図 52。このことから 2D より 3D の方がより集中しているということができる。

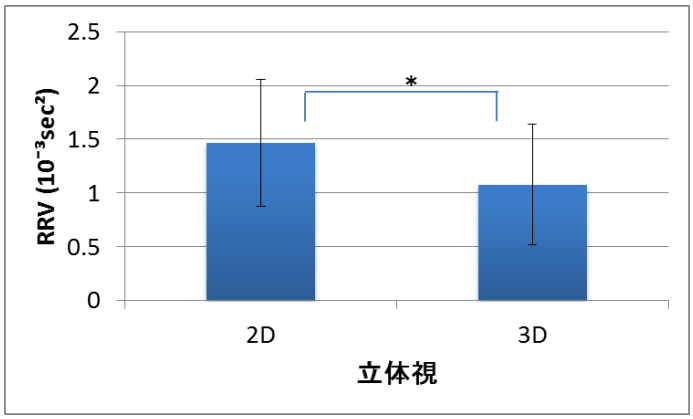


図 51　立体視の違いにおける RRV

解像度における有意差を分析するため大画面と小画面の RRV でＴ検定を行った結果小画面＞大画面（p=0.000)となり有意であった図 53。このことから小画面より大画面の方がより集中しているということができる。

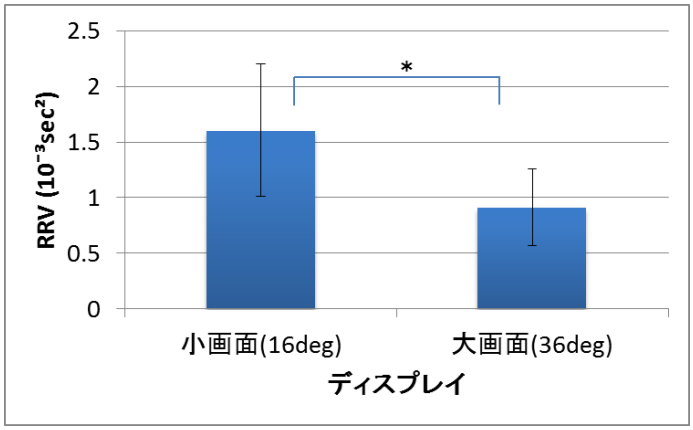


図 52　ディスプレイサイズの違いにおける RRV

3.6.2　顔面皮膚温度計測の実験結果

顔面皮膚温度は、額部―鼻部の差分温度を算出した表 14。

表 14　被験者の額部―鼻部の差分温度

被験者	解像度	立体視	ディスプレイサイズ	額部－鼻部の差分温度(℃)
A	4K	3D	大画面	0.394
A	4K	3D	小画面	2.137
A	4K	2D	大画面	0.451
A	4K	2D	小画面	2.663
A	HD	3D	大画面	0.771
A	HD	3D	小画面	0.834
A	HD	2D	大画面	0.657
A	HD	2D	小画面	1.709
B	4K	3D	大画面	0.420
B	4K	3D	小画面	1.443
B	4K	2D	大画面	0.377
B	4K	2D	小画面	0.754
B	HD	3D	大画面	0.240
B	HD	3D	小画面	0.512
B	HD	2D	大画面	0.309
B	HD	2D	小画面	0.460
C	4K	3D	大画面	0.451
C	4K	3D	小画面	0.871
C	4K	2D	大画面	0.357
C	4K	2D	小画面	0.909
C	HD	3D	大画面	0.680
C	HD	3D	小画面	0.789
C	HD	2D	大画面	0.826
C	HD	2D	小画面	1.111
D	4K	3D	大画面	0.651
D	4K	3D	小画面	2.054
D	4K	2D	大画面	0.166
D	4K	2D	小画面	4.491
D	HD	3D	大画面	0.626
D	HD	3D	小画面	1.563
D	HD	2D	大画面	0.989
D	HD	2D	小画面	1.663
E	4K	3D	大画面	1.094
E	4K	3D	小画面	0.397
E	4K	2D	大画面	0.206
E	4K	2D	小画面	0.222
E	HD	3D	大画面	0.268
E	HD	3D	小画面	0.117
E	HD	2D	大画面	0.127
E	HD	2D	小画面	0.761

算出した額部－鼻部の差分温度を解像度、立体視、ディスプレイサイズを要因とし3 元配置分散分析を行った表 14。

表 15　額部―鼻部の差分温度を従属変数とした各要因ごとの有意確率

従属変数：額部－鼻部の差分温度

ソース	自由度	平均平方	F 値	有意確率
解像度	1	0.755	1.341	0.255
立体視	1	0.21	0.372	0.546
ディスプレイサイズ	1	5.93	10.526	0.003

3 元配置分散分析から、解像度（有意確率=0.255）、立体視（有意確率=0.546）、ディスプレイサイズ（有意確率=0.003）となり、額部－鼻部の差分温度は、ディスプレイサイズに影響を受けていることになる。3 元配置分散分析後、ディスプレイサイズにおける有意差を分析するため小画面と大画面の RRV でＴ検定を行った結果小画面＞大画面（p=0.000）となり有意であった図 54。このことから小画面と大画面では大画面の方が鼻部の温度低下が減少、大画面の方がより精神的負担が少ないと言える。つまり精神的負荷が少なくなることが分かった。

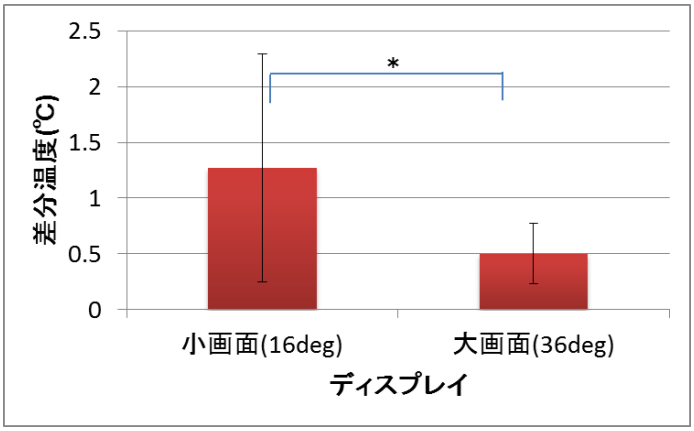


図 53　ディスプレイサイズの違いにおける額部－鼻部の差分温度

3.6.3　注視点計測の実験結果

注視点計測は、視点計測機（ＥＭＲ－9）を使用し、被験者の注視点移動回数を計測

し 1 秒当たりの注視点移動回数を算出した表 15。

表 16　被験者の注視点移動回数

被験者	解像度	立体視	ディスプレイサイズ	注視点移動回数(/sec)
A	4K	3D	大画面	0.885
A	4K	3D	小画面	0.832
A	4K	2D	大画面	0.888
A	4K	2D	小画面	0.591
A	HD	3D	大画面	0.876
A	HD	3D	小画面	0.806
A	HD	2D	大画面	0.865
A	HD	2D	小画面	0.768
B	4K	3D	大画面	0.885
B	4K	3D	小画面	0.856
B	4K	2D	大画面	0.909
B	4K	2D	小画面	0.679
B	HD	3D	大画面	0.912
B	HD	3D	小画面	0.835
B	HD	2D	大画面	0.909
B	HD	2D	小画面	0.832
C	4K	3D	大画面	0.850
C	4K	3D	小画面	0.697
C	4K	2D	大画面	0.738
C	4K	2D	小画面	0.597
C	HD	3D	大画面	0.832
C	HD	3D	小画面	0.679
C	HD	2D	大画面	0.812
C	HD	2D	小画面	0.656
D	4K	3D	大画面	0.953
D	4K	3D	小画面	0.826
D	4K	2D	大画面	0.938
D	4K	2D	小画面	0.709
D	HD	3D	大画面	0.888
D	HD	3D	小画面	0.797
D	HD	2D	大画面	0.876
D	HD	2D	小画面	0.779
E	4K	3D	大画面	1.024
E	4K	3D	小画面	0.806
E	4K	2D	大画面	0.974
E	4K	2D	小画面	0.806
E	HD	3D	大画面	0.894
E	HD	3D	小画面	0.712
E	HD	2D	大画面	0.888
E	HD	2D	小画面	0.735

算出した注視点移動回数を解像度、立体視、ディスプレイサイズを要因とし 3 元配置分散分析を行った表 16。

表 17　注視点移動回数を従属変数とした各要因ごとの有意確率

従属変数：注視点移動回数

ソース	自由度	平均平方	F 値	有意確率
解像度	1	0	0.044	0.836
立体視	1	0.02	4.226	0.047
ディスプレイサイズ	1	0.196	41.086	0

3 元配置分散分析から、解像度（有意確率=0.836）、立体視（有意確率=0.047）、ディスプレイサイズ（有意確率=0.000）となり、注視点移動回数は、立体視、ディスプレイサイズに影響を受けていることになる。

3 元配置分散分析後、立体視における有意差を分析するため 2D と 3D の注視点移動回数でＴ検定を行った結果 3D＞2D（p=0.010）となり有意であった図 55。このことから 2D と 3D では 3D の方がより注視点移動回数が多く、3D の方がより映像に興味を持っていると言える。

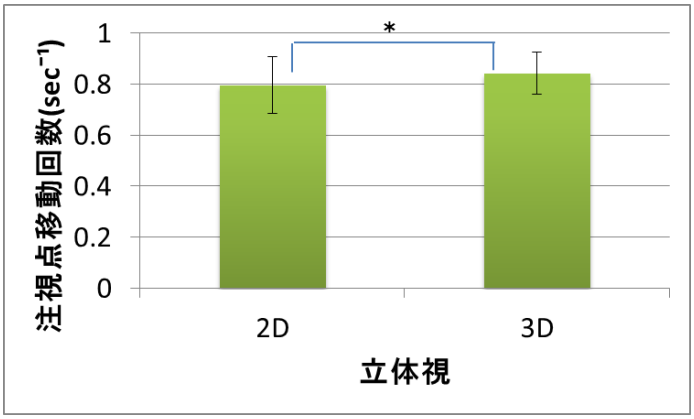


図 54　立体視の違いにおける注視点移動回数

3 元配置分散分析後、ディスプレイサイズにおける有意差を分析するため小画面と大画面の RRV でＴ検定を行った結果小画面＞大画面（p=0.000）となり有意であった図 56。このことから小画面と大画面では大画面の方がより注視点移動回数が多く、

大画面の方がより映像に興味を持っていると言える。

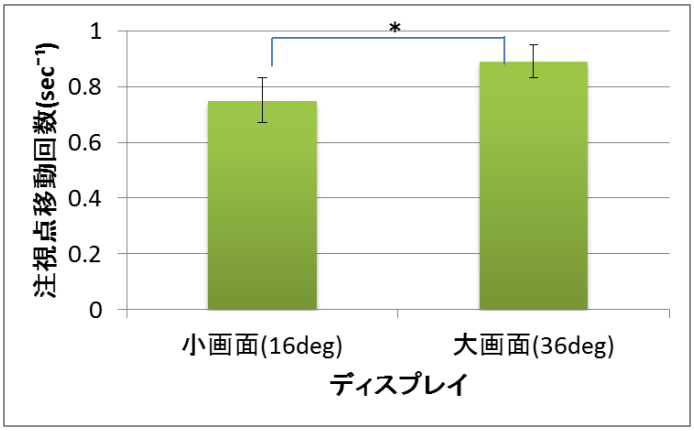


図 55　ディスプレイサイズの違いにおける注視点移動回数

3.6.4　分析結果のまとめ

生体情報	要因	有意差
RRV	解像度	HD>4K(RRV)
	立体視	2D>3D(RRV)
	ディスプレイ	小画面＞大画面(RRV)
顔面皮膚温度(額部-鼻部)	ディスプレイ	小画面＞大画面(℃)
注視点移動回数	立体視	2D<3D(回数)
	ディスプレイ	小画面＜大画面(回数)

図 56　分析結果

RRV 値、鼻部温度、注視点移動回数の実験結果について、解像度、立体視、ディスプレイサイズを要因とした 3 元配置分散分析を行った、その後、多重比較を行いディスプレイごとの比較を行った。

RRV 値において、HD＞4K (p=0.028)、2D＞3D (p=0.000)、小画面＞大画面 (p=0.000) について有意であった。つまり RRV において、HD と 4K では 4K の方が低い RRV を検出しており、4K の方がより集中していると言える。2D と 3D では 3D の方が低い RRV を検出しており、3D の方がより集中していると言える。小画面と大画面では大画面

の方が低い RRV を検出しており、大画面の方がより集中していると言える。顔面皮膚温度（額―鼻）は、小画面＞大画面（p=0.000)について有意であった。小画面と大画面では大画面の方が鼻部の温度低下が減少、大画面の方がより精神的負担が少ないと言える。つまり精神的負荷が少なくなることが分かった。また、注視点移動回数では、3D＞2D（p=0.010)、大画面＞小画面（p=0.000)について有意であった。2D と 3D では 3D の方がより注視点移動回数が多く、3D の方がより映像に興味を持っていると言える。小画面と大画面では大画面の方がより注視点移動回数が多く、大画面の方がより映像に興味を持っていると言える。ディスプレイサイズに関しては、すべての生体情報において有意差がみられた。これは、ドーム環境での実験結果と一致しており、ディスプレイサイズが臨場感に大きな影響を及ぼしているのではないかと考える。

3.7　考察

「ドーム環境での生体情報計測実験」では、大画面やドームといった臨場感を与えることができると思われるスクリーンでは、RRV 値、鼻部温度、注視点移動回数に有意な傾向がみられた。この結果から、ディスプレイサイズに影響を受ける臨場感を感じている状態を、RRV 値が低く集中し、鼻部温度の低下が大きくないことから精神的負荷が少なく、注視点の移動が多い状態として捉えることができると考えた。今回の実験においても、4K3D 大画面の様な高臨場感を与えることができると思われる映像では、RRV 値が低い、鼻部温度の低下が少ない、注視点の移動が多いという傾向が得られた。特に、ディスプレイサイズに関しては、RRV 値、額部―鼻部の差分温度、注視点移動回数おいて有意差があった。被験者による主観評価では、「ドーム環境での生体情報計測実験」、今回の実験ともにディスプレイサイズが臨場感に最も影響を与えていた。以上の主観評価、客観評価から映像による臨場感を感じている状態を RRV 値が低く集中し、鼻部温度の低下が大きくないことから精神的負荷が少なく、注視点の移動が多い状態として捉えることができる。操作的定義から、臨場感をより集中し、精神的負荷が少なく、映像に興味を持った状態だと定義できるのではないかと考えた。そこで、これまでの 2 つの実験結果の検証のために、第 4 章にある星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験を実施した。

第４章　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験

4.1　実験概要

協生館 3F の CDF(Concurrent　Design Facility)教室を使用し、国際宇宙ステーション(ISS)に滞在中の星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信イベント「情報技術と宇宙時代」を開催した図 62。前半のプレイベントでは、SDM 研究科および JAXA の講師陣により、ISS およびリアルタイム交信を実現するための情報技術に関する解説が行われた。

星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信は夜の 10 時から 20 分間行われ、ここでは国際宇宙ステーションから送られてきたハイビジョン映像を 2D/3D 変換技術を使用し、CDF の 180 インチの 4K3D ディスプレイに擬似 3D 映像として表示することで高臨場感通信を実現した。また CDF 会場から、IP 伝送装置、テレビ会議システム、IP テレビ電話、動画配信サービス等を使い、協生館内の藤原ホールと仮設プラネタリウムを始め、東京大学、京都大学、世田谷区、南三陸町の各会場に同時配信し、全 7 会場を相互接続したパラレル･リアリティとしての宇宙交信体験を実現した図 63。星出宇宙飛行士との交信は、SDM 研究科の大学院生および世田谷区、南三陸町の小中学生が行ったが、大画面に映し出された星出宇宙飛行士の 3D 映像と対峙しながら、ISS での活動や宇宙での価値観の変化等、さまざまな質問を行った図 57。 本実験は、星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信時における被験者の心電計測、顔面皮膚温度計測、注視点計測といったこれまでと同様の 3 つの生体情報計測を行った。

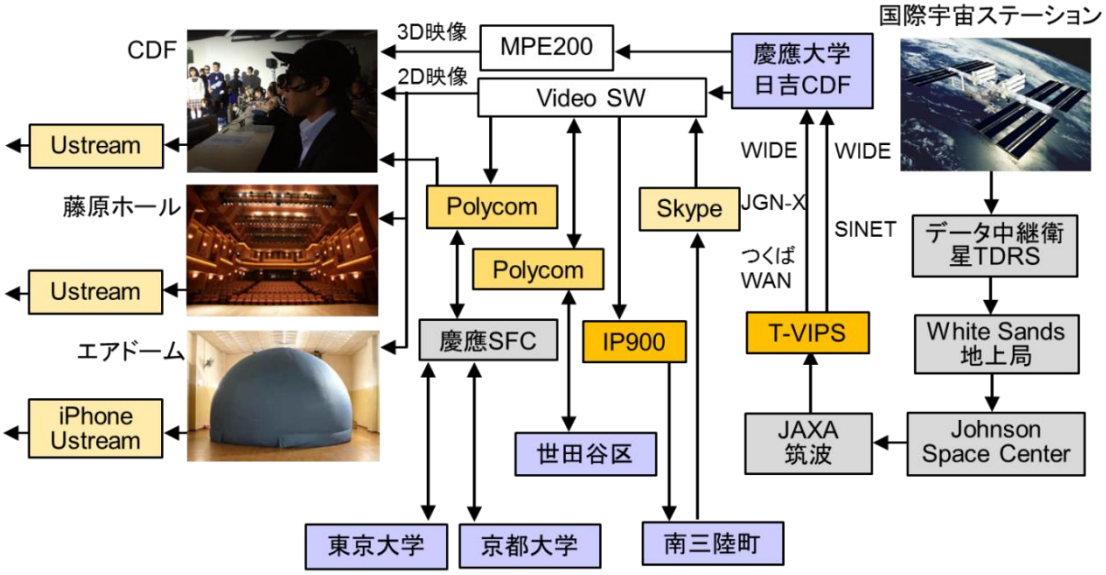


図 57　宇宙交信システム

図 58　前イベントの様子

図 59　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信の様子（実験席から撮影）

4.1.1　実験準備

2D/3D 映像変換

ＳＯＮＹの 3D 映像を 2 台のカメラで撮影する際に生じる映像のずれを調整するマルチイメージプロセッサーＭＰＥ―200 を使用し、2D 映像を 3D 映像に変換を行った。

マルチイメージプロセッサー 『MPE-200』

図 60　マルチイメージプロセッサー「ＭＰＥ－200」

3D 映像の撮影には、2 台のカメラとカメラを固定するカメラリグを使用し、左目用と右目用の映像をそれぞれ同時に撮影する方法が一般的であるが、『MPE-200』は、高性能マイクロプロセッサ Cell Broadband EngineTM（Cell/B.E.）を搭載し、2 台のカメラで 3D 映像を撮影する際に生じるカメラ間の色味や光軸等のわずかなずれ

を高速演算で解析して表示できるため、簡単に補正することができる。これにより、3D 映像を撮影する際、従来は映像を人間の目で見て確認しながら行っていた 2 台のカメラ間の調整が容易になるため、カメラの設定にかかる時間を短縮することができる。HD-SDI による 4 系統のビデオ入出力機能を有しているため、ＣＤＦの 180 インチディスプレイで 2D 映像 3D 映像変換することに成功した。

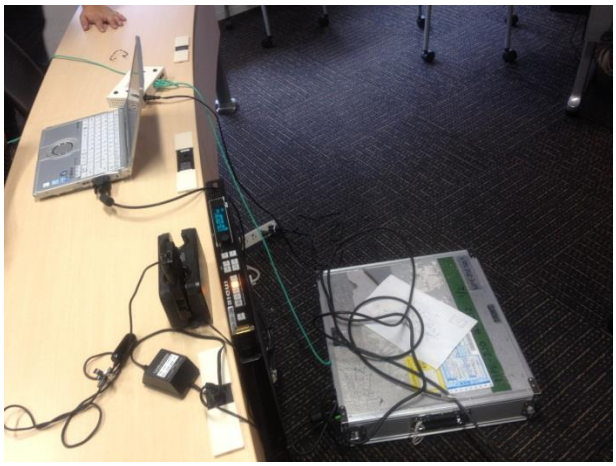


図 61　ＭＰＥ―200 の設置

映像テストとして、ドーム環境での実験の映像コンテンツである「ちきゅうをみつめて」と、古川聡飛行士との通信映像を 2D 映像をＭＰＥ―200 を使用して 3D 映像に変換を行った。

図 62　ちきゅうをみつめて

図 63　古川聡飛行士との通信映像

ＪＡＸＡとの通信実験、読売新聞社との打ち合わせ

ＪＡＸＡからの通信実験を行いながら、読売新聞社のイベント本番の打ち合わせを行った。特に、読売新聞社の撮影カメラ位置、インタビュアーと招待する小学生の位置、カメラフラッシュンの影響、3D 映像の効果、当日のスケジュールである。

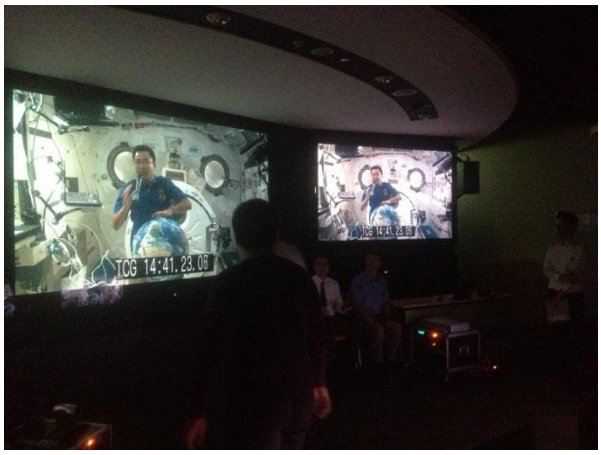


図 64　招待する小学生とインタビュアーの位置確認

サーモカメラの位置確認

読売新聞社との打ち合わせの結果、ＣＤＦの 180 インチディスプレイから見て左側にインタビュアー、小学生達が立つことになり写真を撮るカメラマンの方々と私の実験に支障がない場所にサーモカメラを設置した。

図 65　本番のサーモカメラの位置決定

4.1.2　アンケート調査

星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信イベント終了時に参加者に対して質問項目は 12 個で 5 段階評価アンケート調査を行った。アンケート調査に答えて頂いた参加者は 39 人だった。

ー星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信イベントーについてのアンケート

本日は、星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信イベントにご出席頂き誠にありがとうございました。
皆様からご意見をうかがっております。ご回答お願いいたします。

1. 出席者様について以下の質問にお答えください。

性別	□女性	□男性	学年or職業	
年齢	□10代以下	□20代	□30代	□40代	□50代	□60代以上

2. リアルタイム交信についてあなたの評価に最も近い番号ものに丸をつけてください。

項目	←なかった				あった→
1:3D映像は立体感があった	1	2	3	4	5
2:3D映像は集中して見た	1	2	3	4	5
3:3D映像は興奮した	1	2	3	4	5
4:3D映像は疲労を感じた	1	2	3	4	5
5:3D映像は自分に話しかけられている感じがあった	1	2	3	4	5
6:3D映像は同じ空間にいる感じがあった	1	2	3	4	5
7:2D映像は立体感があった	1	2	3	4	5
8:2D映像は集中して見た	1	2	3	4	5
9:2D映像は興奮した	1	2	3	4	5
10:2D映像は疲労を感じた	1	2	3	4	5
11:2D映像は自分に話しかけられている感じがあった	1	2	3	4	5
12:2D映像は同じ空間にいる感じがあった	1	2	3	4	5

3. ありがとうございました。その他ご意見等ございましたらご自由にお書きください。

このアンケートにご記入いただきました個人情報は、十分プライバシーに配慮し、慶應義塾大学が適正に管理を行います。個人情報は、ご本人の承諾なしに第三者に提供することはありません。

All information provided above is controlled strictly by Keio University and will not be used for any other reasons.
Privacy

図 66　アンケート

4.2　アンケート結果

3D 映像と 2D 映像を視聴した際の参加者の主観評価を集計しＴ検定により分析を行った。

質問事項 1 と 7 において、3D 映像と 2D 映像を視聴した際の立体感について五段階評価のアンケートを実施した。その結果、「質問事項 1 の 3D 映像は立体感があった」の平均値は 4.158、「質問事項 7 の 2D 映像は立体感があった」の平均値は 2.658 という結果が得られた図 68。 t 検定により視聴者の主観評価では P=1.44E-07 となり、3D 映像の方が立体感を感じているといった結果が得られた。

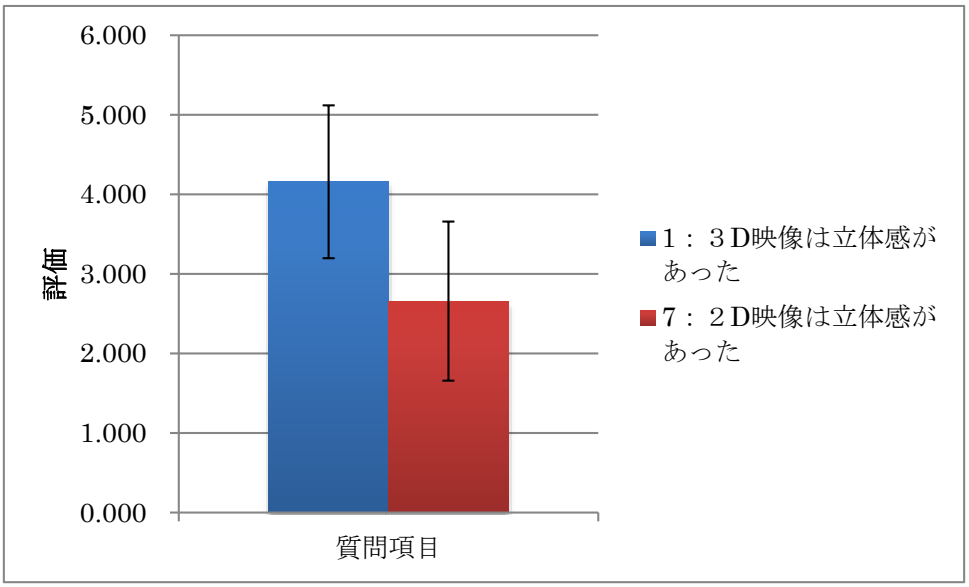


図 67　質問項目 1 と 7 の比較

質問事項 2 と 8 において、3D 映像と 2D 映像を視聴した際の集中度について五段階評価のアンケートを実施した。その結果、「質問事項 2 の 3D 映像は集中して見た」の平均値は 4.210、「質問事項 8 の 2D 映像は集中して見た」の平均値は 3.710 という結果が得られた図 69。 t 検定により、P= 0.001 となり、視聴者の主観評価では、3D 映像の方が集中していると結果が得られた。

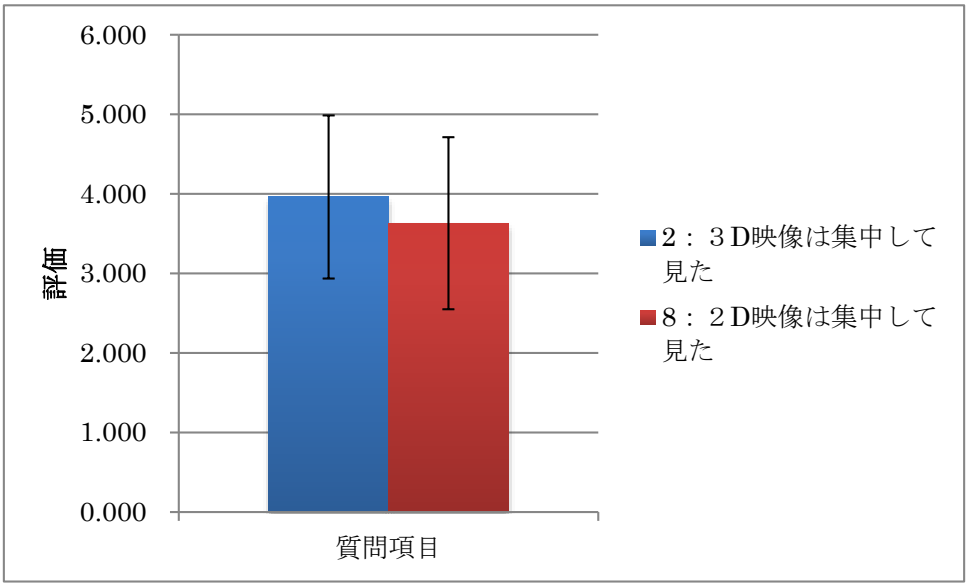


図 68　質問項目 2 と 8 の比較

質問事項 3 と 9 において、3D 映像と 2D 映像を視聴した際の興奮度について五段階評価のアンケートを実施した。その結果、「質問事項 3 の 3D 映像は興奮した」の平均値は 3.894、「質問事項 7 の 2D 映像は興奮した」の平均値は 3.210 という結果が得られた図 70。 t 検定により、P= 0.004 となり、視聴者の主観評価では、3D 映像の方が集中していると結果が得られた。

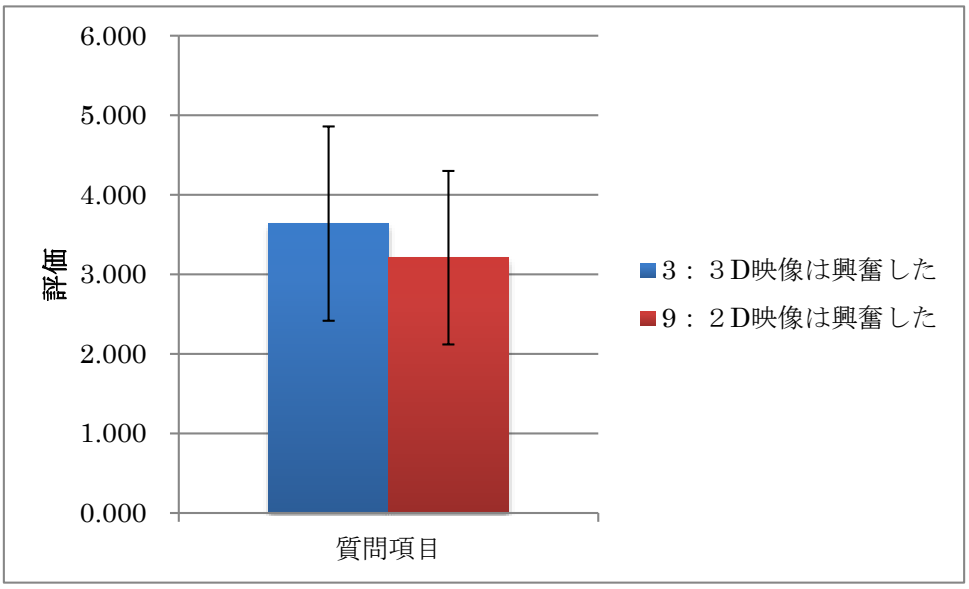


図 69　質問項目 3 と 9 の比較

質問事項 4 と 10 において、3D 映像と 2D 映像を視聴した際の疲労感について五段階評価のアンケートを実施した。その結果、「質問事項 4 の 3D 映像は疲労を感じた」の平均値は 2.657、「質問事項 10 の 2D 映像は疲労を感じた」の平均値は 2.078 という結果が得られた図 71。 t 検定により、P= 0.005 となり、視聴者の主観評価では、2D 映像の方が疲労をあまり感じなという結果が得られた。

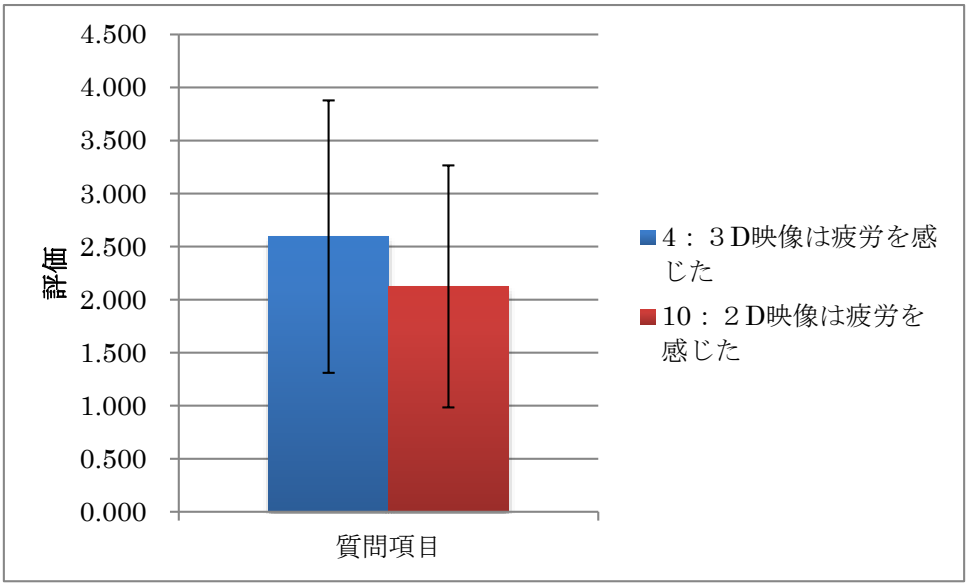


図 70　質問項目 4 と 10 の比較

質問事項 5 と 11 において、3D 映像と 2D 映像を視聴した際の自分に話しかけられている感じについて五段階評価のアンケートを実施した。その結果、「質問事項 5 の 3D 映像は自分に話しかけられている感じがあった」の平均値は 3.631、「質問事項 11 の 2D 映像は自分に話しかけられている感じがあった」の平均値は 2.921 という結果が得られた図 72。 t 検定により、P= 0.001 となり、視聴者の主観評価では、3D 映像の方が自分に話しかけられている感じがするという結果が得られた。

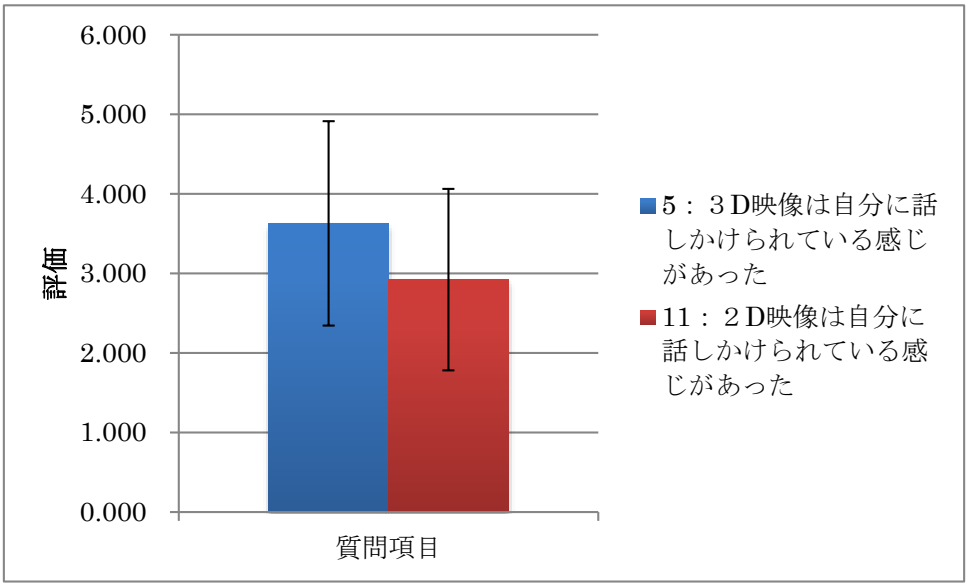


図 71　質問項目 5 と 11 の比較

質問事項 6 と 12 において、3D 映像と 2D 映像を視聴した際の自分に話しかけられている感じについて五段階評価のアンケートを実施した。その結果、「質問事項 6 の 3D 映像は同じ空間にいる感じがあった」の平均値は 3.578、「質問事項 12 の 2D 映像は同じ空間にいる感じがあった」の平均値は 2.868 という結果が得られた図 73。ｔ検定により、P= 0.001 となり、視聴者の主観評価では、3D 映像の方が自分に話しかけられている感じがするという結果が得られた。

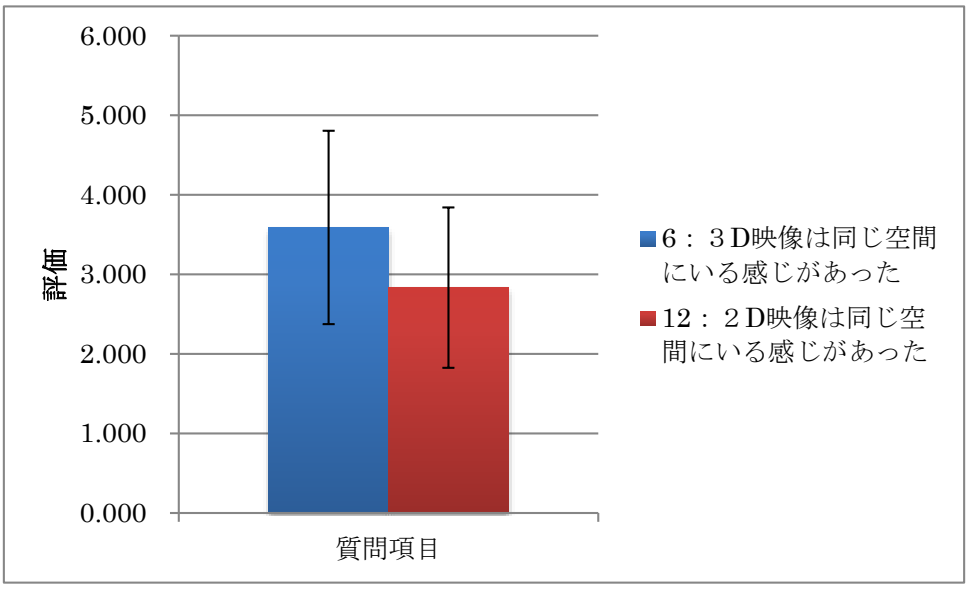


図 72　質問項目 5 と 11 の比較

4.3　実験方法

実験方法であるが、この実験は、これまでの実験の検証に位置づけられるため、これまで同様に、心電計測、顔面皮膚温度計測、視点計測の 3 つの生体情報計測を行った。「情報技術と宇宙時代」星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信イベントは、付録のイベント詳細に示した通り、19:00 からＣＤＦでイベントが開催されており、これまでの実験の様にＣＤＦで心電計測、顔面皮膚温度計測、視点計測の準備をすることができない。そこで、協生館の 3 階の小部屋で心電計測の準備、視点計測のキャリブレーションを行った。今回もこれまでと同様に、心電計測では BioTrace+for NeXus-4、顔面皮膚温度計測では Avio InfReC Thermography R300S 、注視点計測ではナックアイマークレコーダ（EMR-9)を使用した。22 時から、星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信が行われるため、20 時半から小部屋で被験者に協力して頂き、心電計を装着、しばらく安静にして頂き、心拍が正常に計測できているのか確認。その後、視点計測機（ＥＭＲ－9）のキャリブレーションを行った。ＥＭＲ－9 は、瞳孔をトラッキングすることで、被験者視点移動を計測するため、少しでもずれると正常に視点移動を計測できない。キャリブレーション完了後、被験者には安静にして頂き、21 時 50 分にＣＤＦに入室し、所定の位置に座って頂き、前日にＣＤＦに設置しておいたサーモカメラのスイッチを入れ、計測を始める。この段階ですべての生体情報計測が行われる。22 時から 22 時 20 分までの星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信映像を 2D 映像 10 分、3D 映像 10 分間で放映し計測を行った。

図 73　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験の様子

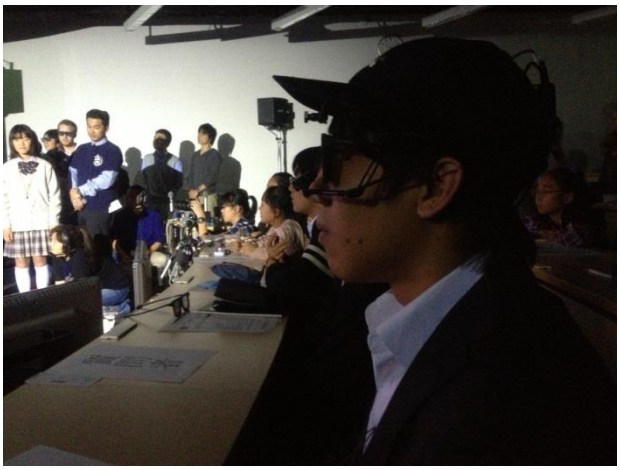


図 74　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信視聴時

4.4　実験結果

4.4.1　心電図

これまでの実験同様に心電計測では BioTrace+for NeXus-4 を使用した。図 75、図 76 は、星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信を放映時の被験者の RRV である。赤いラインを境目とし、最初の約 10 分間は 2D 映像、残りが 3D 映像を視聴した際の RRV である。

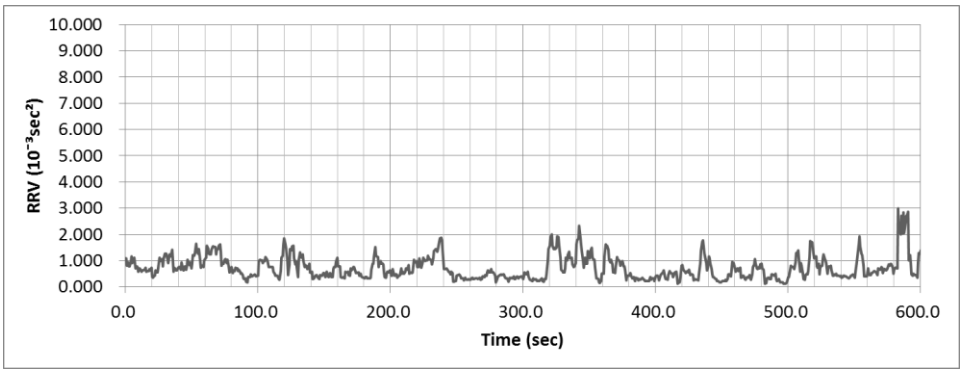


図 75　2D映像視聴時の RRV

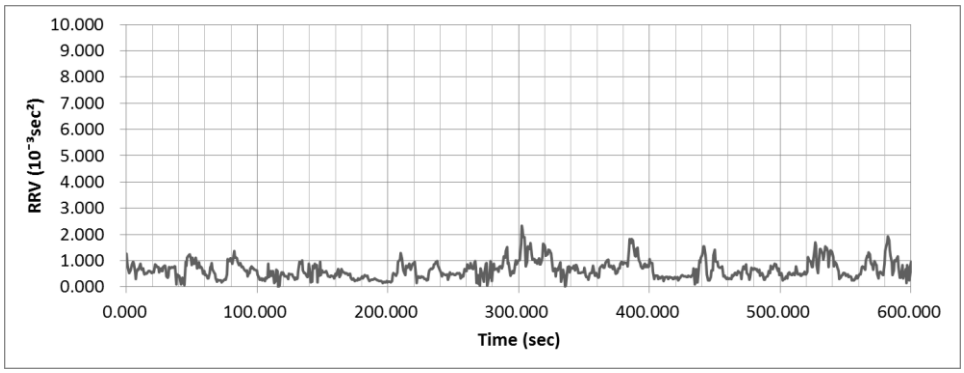


図 76　3D映像視聴時の RRV

分析の結果、2D 映像の RRV の平均値は 0.715、3D 映像の RRV の平均値は、0.657 であった。T 検定の結果、p=0.000233 より、3D 映像の方が 2D 映像より RRV が低いという結果が得られた。このことから 2D と 3D では、3D の方がより集中していると言える。

4.4.2　顔面皮膚温度

これまでの実験同様に、顔面皮膚温度計測では Avio InfReC Thermography R300S を使用し図 77、額部―鼻部温度の差分温度の計測を行った。

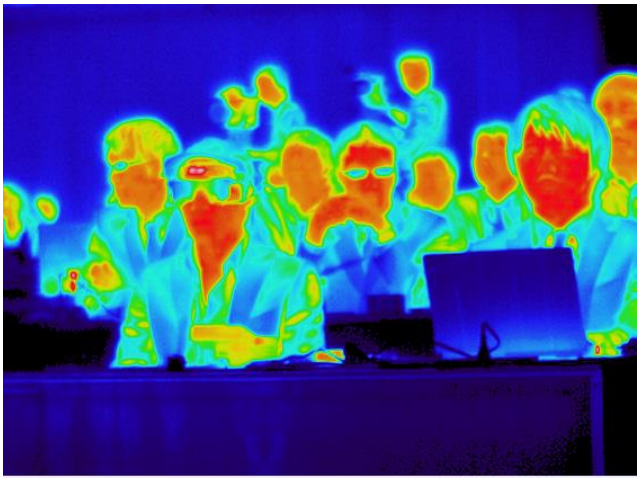


図 77　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信視聴中のサーモグラフィー

図 78 は、被験者の 2D 映像視聴時の額部と鼻部温度である。縦軸が温度、横軸が時間、赤のラインが額の温度、青のラインが鼻の温度である。

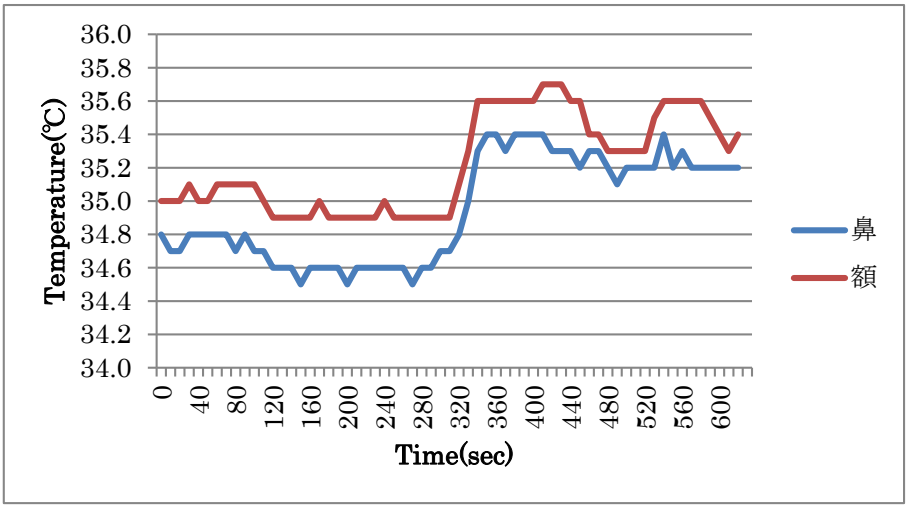


図 78　2D 映像視聴時の額と鼻の温度変化

図 79 は、被験者の 3D 映像視聴時の額部と鼻部の温度である。

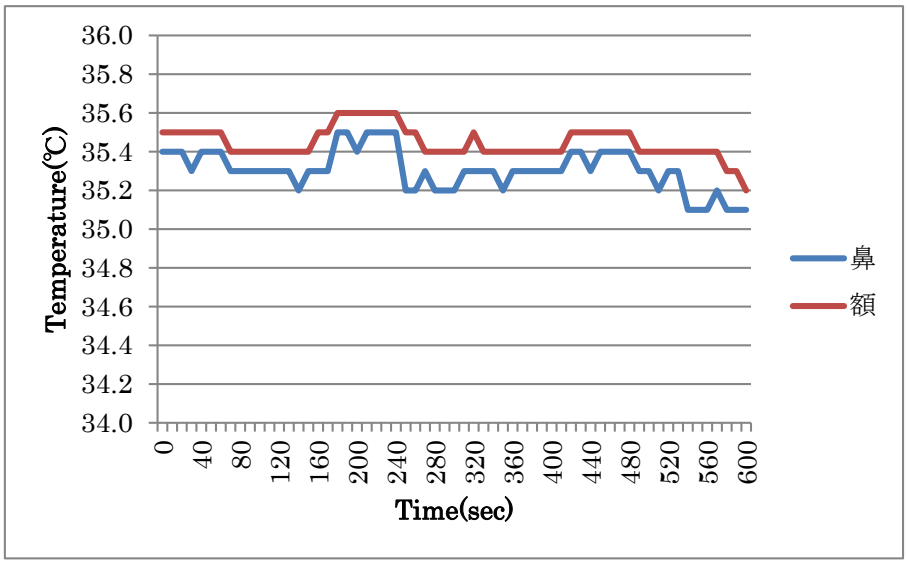


図 79　3D 映像視聴時の額と鼻の温度変化

分析の結果 2D 視聴時の額部－鼻部の差分温度の平均は 0.276 、3D 視聴時の額部－鼻部の差分温度の平均は 0.141 であった。T 検定によりに 2D＞3D で有意差 (p=2.03584E-16)。この結果から、3D 映像の方が精神的負担が少ないと言える。

4.4.3　注視点移動回数

注視点移動回数の分析結果、2D 視聴時の注視点移動回数(sec^{-1})：1.064、3D 視聴時の注視点移動回数(sec^{-1})：1.147。3D 視聴時の方がより注視点の移動が多い。このことから小画面と大画面では大画面の方がより注視点移動回数が多く、大画面の方がより映像に興味を持っていると言える。

4.5　考察

日本科学未来館で行ったドーム環境での生体情報計測実験、ディスプレイサイズ、立体視、解像度の違いによる生体情報計測実験において、臨場感が高いと感じる映像では、RRV値、鼻部温度、注視点移動回数に有意な傾向がみられていた。検証として、星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験を行った。これまでの結果と同様に、3D視聴時には、RRV値、鼻部温度、注視点移動回数に有意な傾向がみられた。この結果から、臨場感の構成要素である時間要素を含んだ場合においても、臨場感を感じている状態を、RRV値が低く集中し、鼻部温度の低下が大きくないことから精神的負荷が少なく、注視点の移動が多い状態として捉えることができる。これまでの実験結果と今回の検証実験結果という客観評価を用いることで操作的定義により臨場感を定義できると考える。

第５章　結論

第2章で実施したドーム環境による生体情報計測実験の結果から、主観評価で臨場感が高いと言われている大画面（視野角36度）やプラネタリウム（視野角180度）の様なドームディスプレイでは、RRV値が低い、鼻部温度の低下が少ない、注視点の移動が多いと言う結果が得られた。つまり、より集中し、精神的負荷が少なく、映像に興味を持った状態であるということができる。

視覚による臨場感は、ディスプレイサイズだけでなく、解像度、立体視も影響を及ぼしていると考え、第3章では、解像度、立体視、ディスプレイサイズによる生体情報の変化を分析し、4K3D大画面といった臨場感が高いと言われている映像では、RRV値が低い、鼻部温度の低下が少ない、注視点の移動が多いと言う結果が得られた。つまり、心電計測、顔面皮膚温度計測、注視点計測の結果から映像に対する臨場感を定義すると、より集中し、精神的負荷が少なく、映像に興味を持った状態であると定義できる。

2つの実験結果の検証のために、第4章にある星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信実験を実施した。具体的にはリアルタイム交信映像を2D映像と3D映像で表示し、これまでと同様に心電計測、顔面皮膚温度計測、注視点計測を行った。結果、3D映像での視聴は2D映像で視聴より、RRV値が低い、鼻部温度の低下が少ない、注視点の移動が多いと言う結果が得られた。

以上の実験結果と検証をふまえて、生体情報から操作的定義により、視覚による臨場感はより集中し、精神的負荷が少なく、映像に興味を持った状態だと定義した図80。

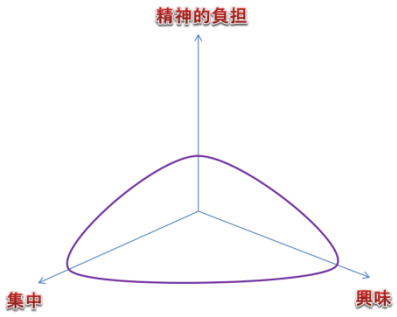


図 80　視覚による臨場感の構成要素

第６章　今後の展望

本研究では、視覚による臨場感を生体情報といった客観的指標を用いて、操作的定義により臨場感を定義した。実験は、合計 71 回行ったが被験者は 11 人であり、もっと被験者を集め実験を行うことにより、実験結果の精度が増すと考えられる。

臨場感には、視覚のみならず触覚、嗅覚も関係していると考えられる。触覚、嗅覚が臨場感にどのように影響するのかを検証することが今後の課題である。

今回のドーム環境で行った実験では、「ちきゅうをみつめて」の CG で描かれた映像とアニメの映像では、映像コンテンツによる生体情報おいて有意差がみられなかったが、臨場感は、コンテンツ内容による差も計測する必要があると考える。そのために様々なコンテンツによる生体情報計測を行う必要があると考える。

本研究の映像コンテンツとしては使用しなかったが、実際に、3D 映像と 4K 映像撮影を行った。

3D 映像撮影

本研究では 3D 映像の撮影実験として、2012 年 5 月 21 日に皆既日食時の 3D 映像の撮影を行った図 81。

図 81　3D カメラによる撮影

図 82　3D カメラによる皆既日食

撮影した皆既日食の 3D 映像をＣＤＦの 180 インチディスプレイで放映した図

82。結果として、この映像を使用して、生体情報計測を行わなかったが、自分自身で 3D 映像を撮影したことは非常に有意義であった。皆既日食の 3D 映像は貴重であり、今後映像コンテンツとして使用して頂けたらと考えている。

4K 映像撮影

実際に、2011 年 11 月に東日本大震災の被災地である石巻市、南三陸市、陸前高田市に研究室のメンバーと共に 4K 映像実験を行った図 83。この 4K 映像撮影実験は、研究科が所有する 4K カメラ、ＵＤＲ、仮説電源を使用した。図 84 の通り、車のトランクがいっぱいになるほど大掛かりな作業であった。撮影実験を行った感想だが、持ち運びやＵＤＲや電源プラグの確保等で撮影は困難であり、将来的に、持ち運びやすさといった点で、現在の市販されている一般的なカメラと変わらなくなった時、映像コンテンツへの利用が容易になると感じた。

図 83　使用した 4K カメラ

図 84　4K カメラでの撮影の様子

図 85　被災地の 4K 映像 1

図 86　被災地の 4K 映像 2

また、被災地の 4K 映像撮影の他に、2012 年 5 月 21 日に皆既日食時の 4K 映像の撮影にも成功した。

図 87　4K カメラによる撮影

この撮影は、協生館の大部屋の裏で撮影を行ったため、4K カメラ、ＵＤＲの移動も少なく、比較的撮影は容易であった。本研究では、被災地、皆既日食の映像自体を使用して、生体情報計測は行わなかったが、自分自身で 4K 映像を撮影したことは、非常に有意義であった。被災地、皆既日食の 4K 映像は貴重であり、今後、映像コンテンツとして使用して頂けたらと考えている。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科の小木哲朗教授、副査の先生である中野冠教授や神武直彦准教授、同じ研究室所属の立山義祐研究奨励助教から多くの御指導をいただきました。また、実験施設を提供していただいた近清武さん（SDM研究所研究員　Micro Museum Lab.）、被験者として協力いただいた慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科の栗田祐輔さん、石山友基さん、伊藤研一郎さん、佐久間悠さん、陸灝さん、関口健太郎さん、濱口諒平さん、松田侑己さん、鈴木創史さん（当麻研究室所属）、このように多くの方々に研究を進める上で多大なる協力をしていただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

[1] 安藤 広志 , カラン 明子 , Nawa Norberto Eiji [他]”臨場感の知覚認知メカニズムと評価技術”,情報通信研究機構季報 56(1・2), 157-165, 2010-03

[2] 江本 正喜 , 正岡 顕一郎 , 菅原 正幸”広視野映像システムの臨場感評価”,電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎 106(496), 25-30, 2007-01-18

[3] 操作的定義 http://digitalword.seesaa.net/article/117850643.html

[4] 日本科学未来館 http://www.miraikan.jst.go.jp/sp/megastar2cosmos/megastar/03.html

[5] 堀内 尚行 , 早川 聡一郎 , 池浦 良淳 , 沢井 秀樹 , 三浦 祥太 , 三田 誠一,”RRV 法を用いた自律走行車の減速動作の乗り心地評価”,生体計測とヒューマンファクタ　年次大会講演論文集 : JSME annual meeting 2010(7), 411-412, 2010-09-04

[6] 上野 由歌 , 栗谷川 幸代 , 景山 一郎,”顔面温度を用いた緊張状態推定に関する研究”,交通・物流部門大会講演論文集 2003(12), 229-232, 2003-12-08

[7] 椎野 貴博 , 中山 実 , 清水 康敬,”顔面皮膚温度変化に関する検討”,電子情報通信学会総合大会講演論文集 1997 年.情報システム(1), 305, 1997-03-06

[8] 坂本 涼 , 野澤 昭雄 , 田中 久弥 , 水野 統太 , 井出 英人,”顔面熱画像によるドライバーの覚醒評価”,周辺温度と風量の影響　電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌 = The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. C, A publication of Electronics, Information and System Society 126(7), 804-809, 2006-07-01

[9] 広瀬 通孝 , 石井 威望,”知的作業の客観的評価の手法”,日本機械学會論文集. C 編 51(471), 3153-3158, 1985-11-25

[10] 宮浦 理彰 , 鳴海 拓志 , 西村 邦裕 , 谷川 智洋 , 廣瀬 通孝,”嗅覚ディスプレイを用いた作業支援”,映像情報メディア学会技術報告 34(25), 137-142, 2010-06-29

[11] 安藤 広志,”人が感じる臨場感の知覚認知機構と評価技術”,電子情報通信学会総合大会講演論文集 2008 年_通信(2), ″SS-39″-″SS-40″, 2008-03-05

[12] 大出訓史,”超臨場感映像の評価技術”,情報処理学会研究報告. MBL, 2011-MBL-58(16), 1, 2011-05-26

[13]　日経ＢＰ　データで読むＩＴマーケット
http://www.nikkeibp.co.jp/article/column/20100405/219390/
[14]　ITU-R Recommendation BT. 1127:”Relative Quality Requierments of Television Broadcast Sysmtems”(1994)
[15]　金澤 勝，西垣 順二，竹内 和浩，原田 良三，今村 崇之,”ドーム型シアターに向けた映像表示の検討”,映像情報メディア学会技術報告 35(16), 129-132, 2011-03-08
[16]　金澤 勝,”超高精細映像・音響システムスーパーハイビジョン”， 電子情報通信学会誌 92(12), 1046-1049, 2009-12-01
[17]　M. Kanazawa, K. Mitani, K. Hamasaki, M. Sugawara, F. Okano,K. Doi, M. Seino: Ultrahigh Definition Video System with 4000 Scanning Lines. SMPTE Motion Imaging, pp.339-346(Oct./Nov.2003)
[18]　柳 在鎬，橋本 直己，佐藤 誠,”没入型ディスプレイにおける視覚誘導自己運動の分析”，電子情報通信学会技術研究報告.MVE, マルチメディア・仮想環境基礎 103(107), 63-68, 2003-06-03
[19]　吉岡 利忠，小林 康孝，後藤 勝正,”心拍の動揺から見た精神的作業負荷の様相”， 疲労と休養の科学 16(1), 27-38, 2001-08

外部発表

第 16 回 テレイマージョン技術研究会
「生体情報による高臨場感映像の評価」
久保田曜丞，当麻哲哉，小木哲朗（慶應義塾大学大学院）

ヒューマンインタフェースシンポジウム 2012
「高臨場感映像体験時の生体情報計測」
久保田 曜丞，当麻 哲哉，小木 哲朗(慶應義塾大学大学院)

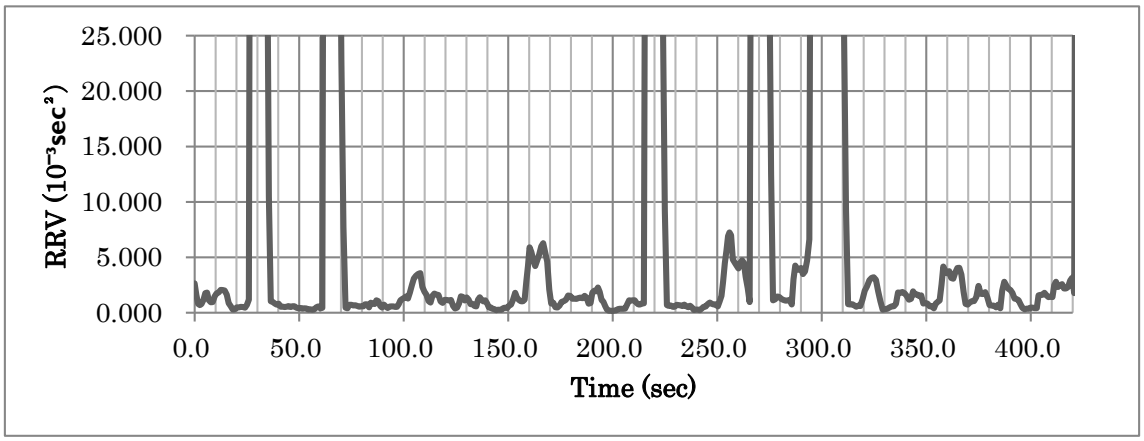
付録

ドーム環境での各被験者 RRV

・被験者Ａ

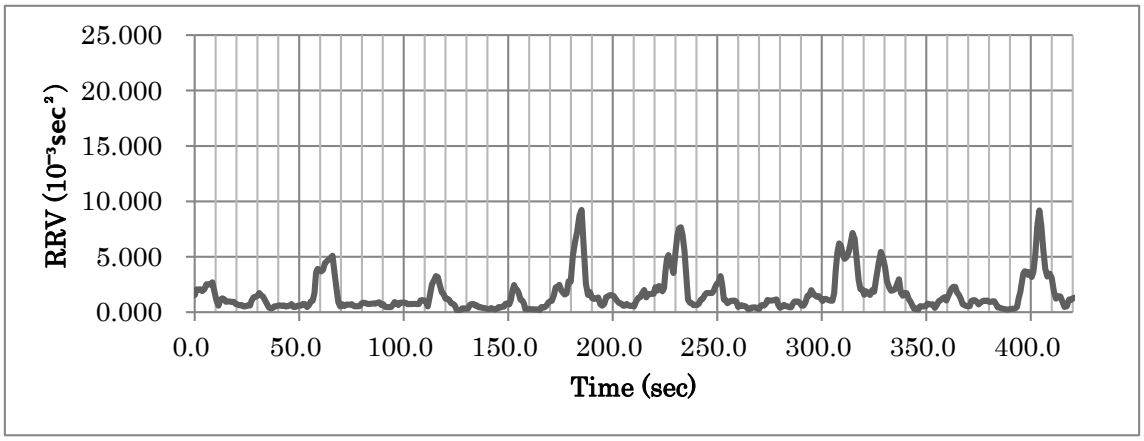
小画面でＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：6.62

小画面でアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：10.261



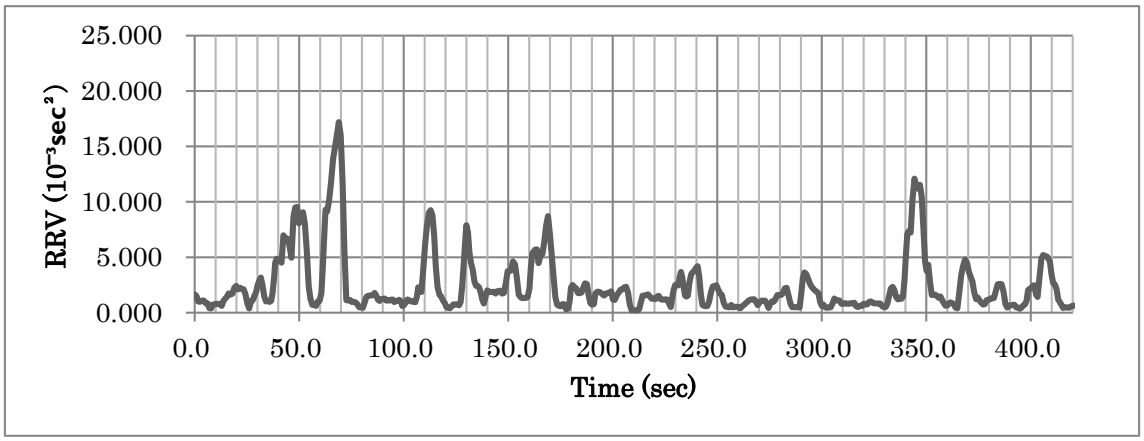
大画面でＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：1.481

大画面でアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：2.037



ドームでＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：2.387

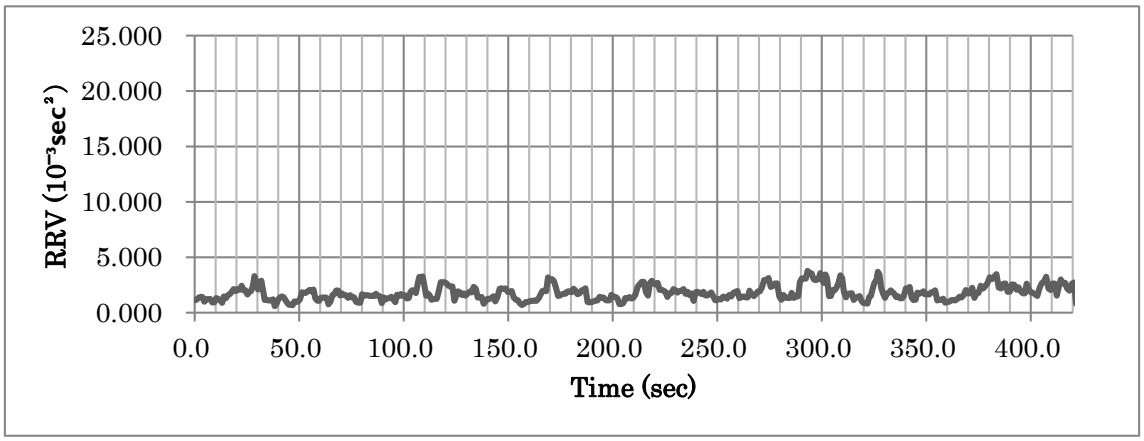
ドームでアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：2.136



・被験者 B

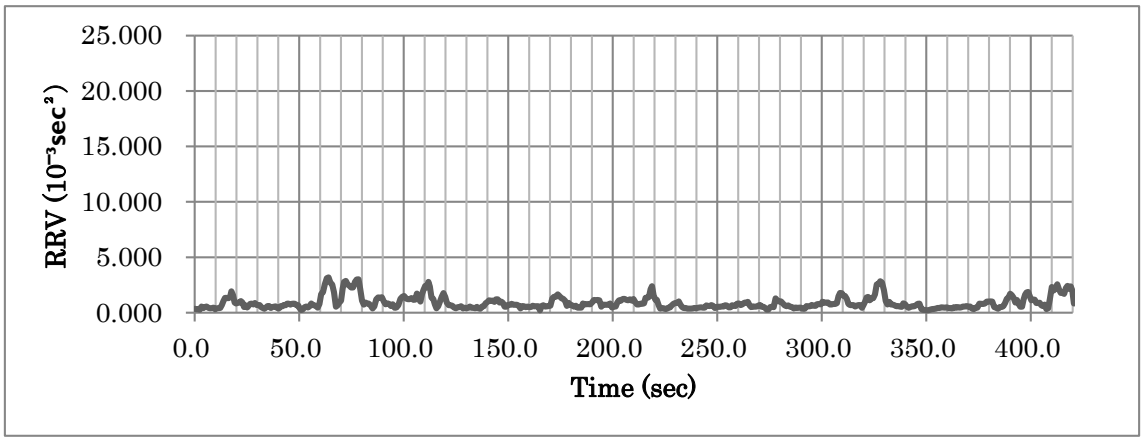
小画面でＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：1.697

小画面でアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：2.068



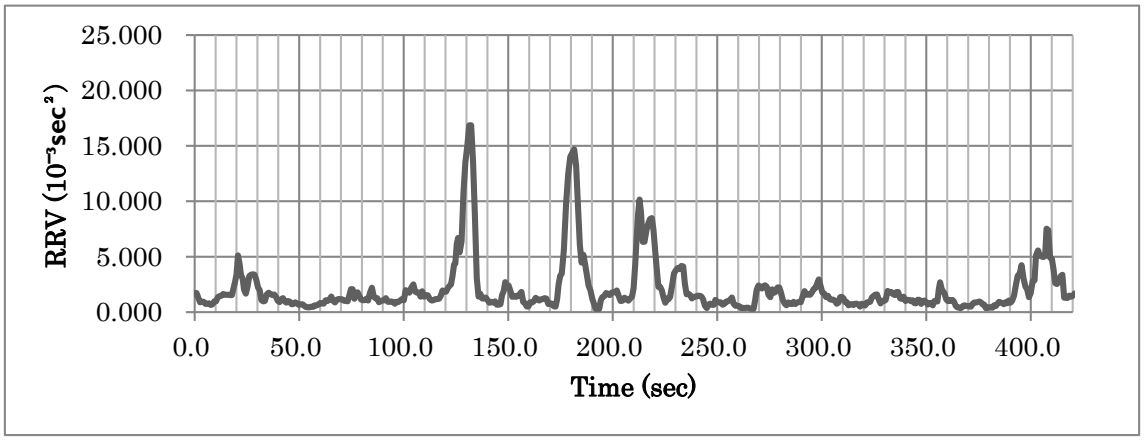
大画面でＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：0.919

大画面でアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：0.951



ドームでＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：2.398

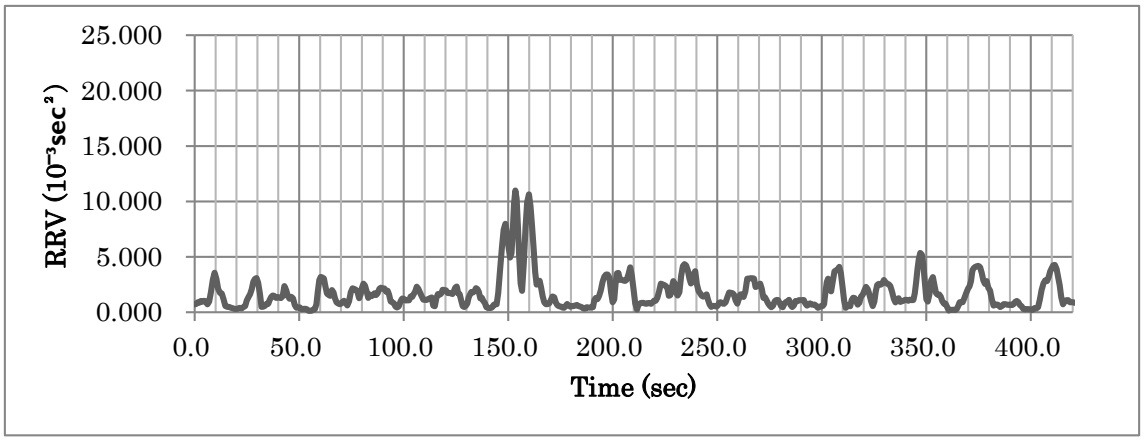
ドームでアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：1.564



・被験者 C

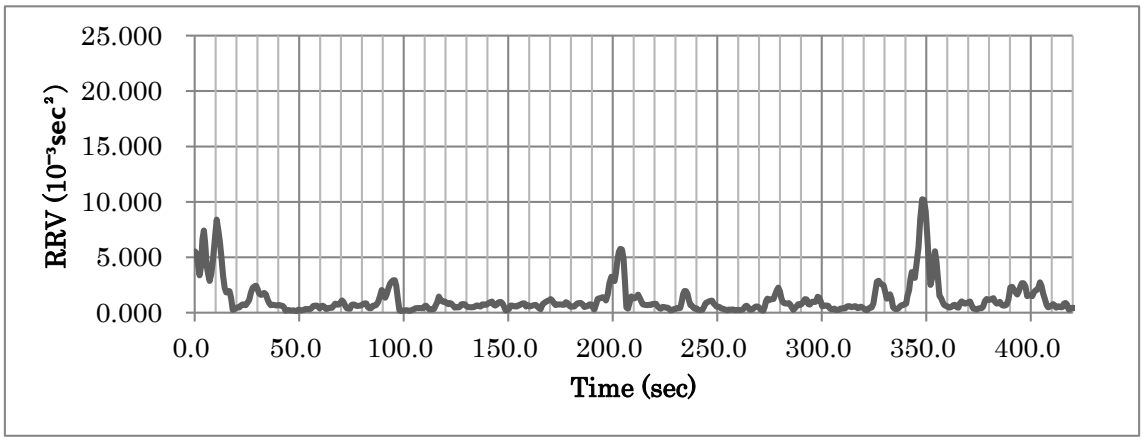
小画面でＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：1.910

小画面でアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：1.662



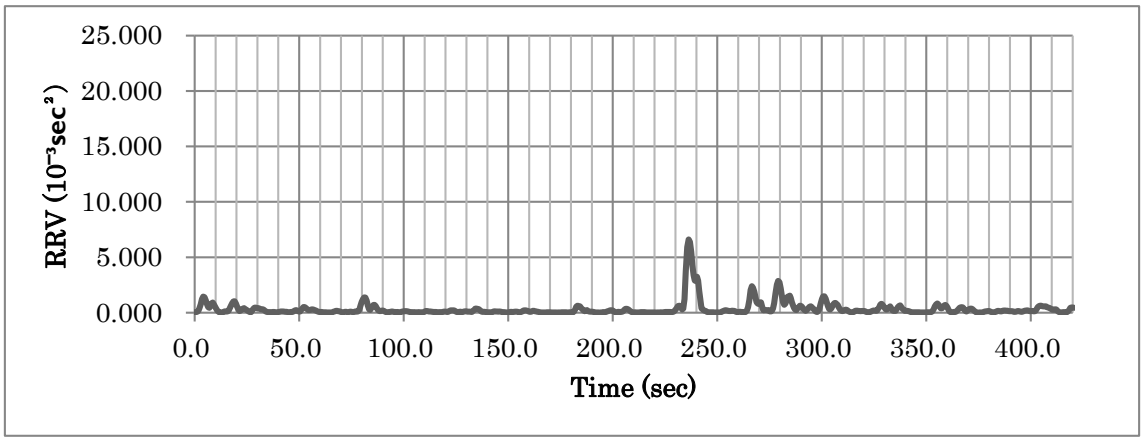
大画面でＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：0.858

大画面でアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：1.446



大画面でＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：0.341

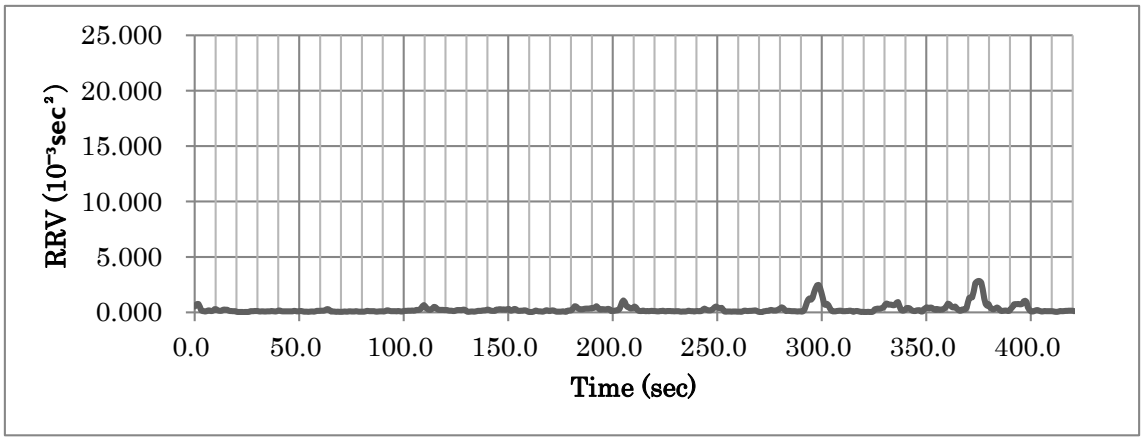
大画面でアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：0.301



・被験者 D

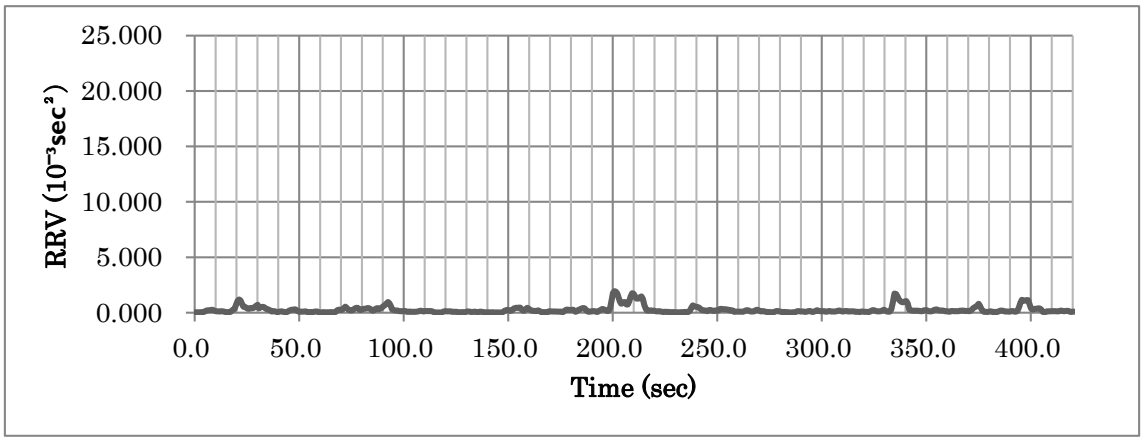
小画面でＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：0.180

小画面でアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：0.493



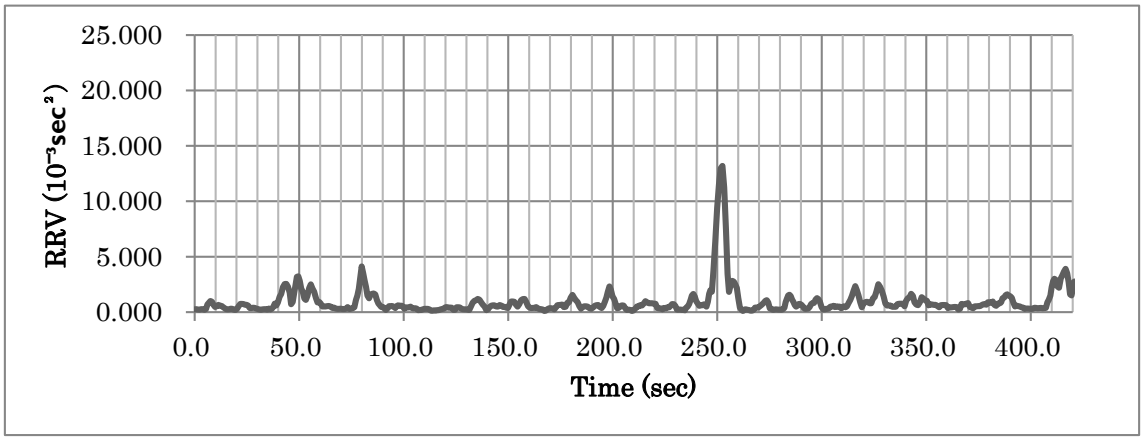
大画面でＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：0.247

大画面でアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：0.255



ドームでＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：0.935

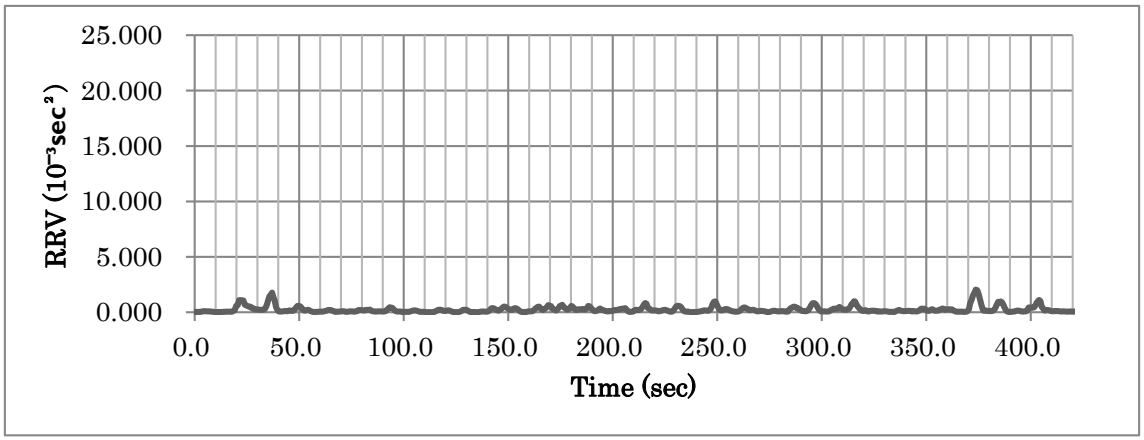
ドームでアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：0.958



・被験者 E

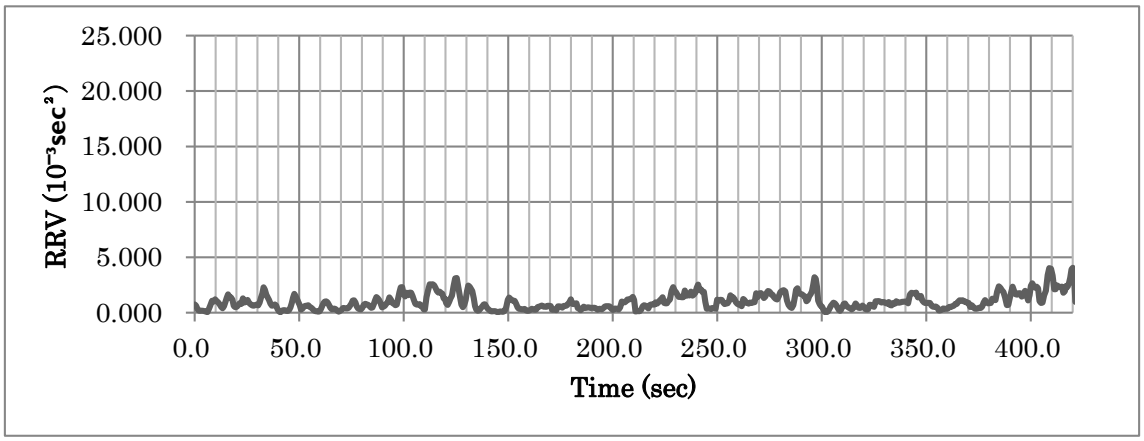
小画面でＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：0.197

小画面でアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：0.287



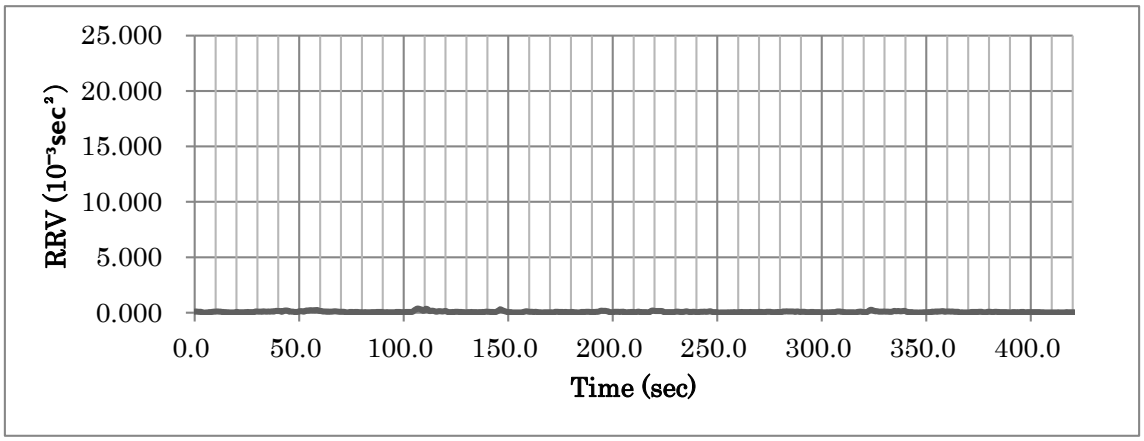
大画面でＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：0.932

大画面でアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：1.203



ドームでＣＧ映像視聴時の RRV 平均値（60sec～300sce）：0.008

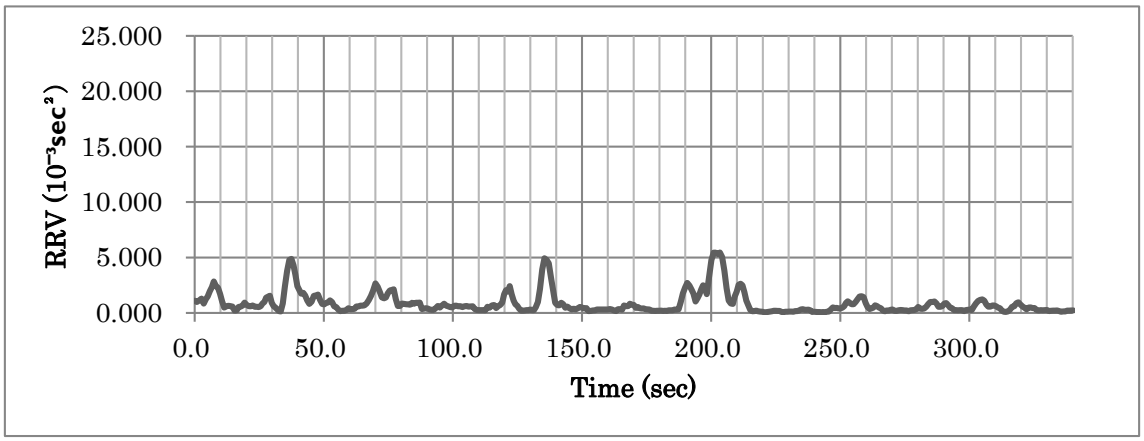
ドームでアニメ映像視聴時の RRV 平均値（301sec～420sce）：0.062



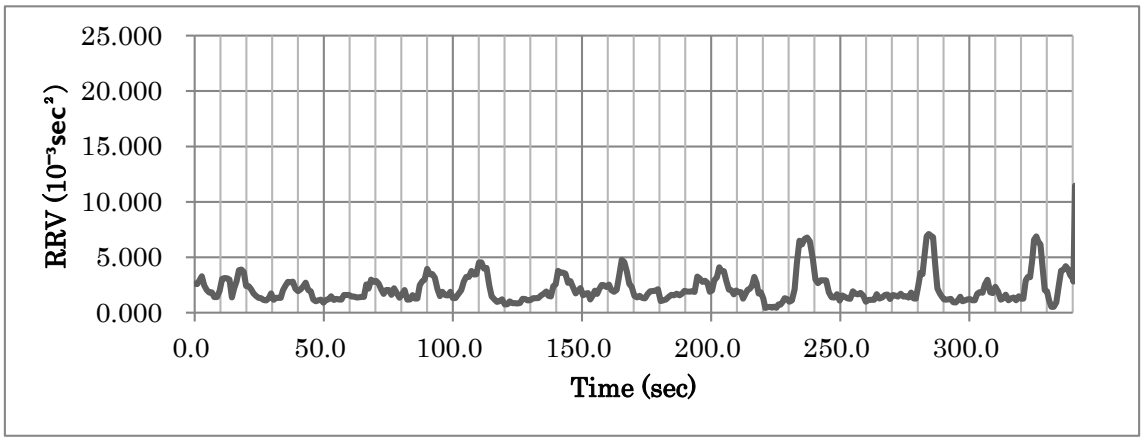
解像度、立体視、ディスプレイサイズの違いによる各被験者 RRV

・被験者Ａ

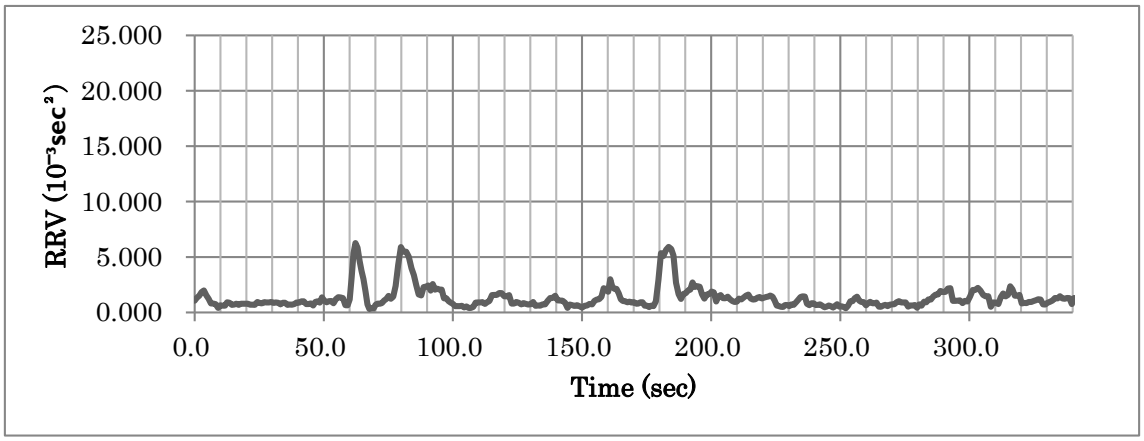
4K3D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.850



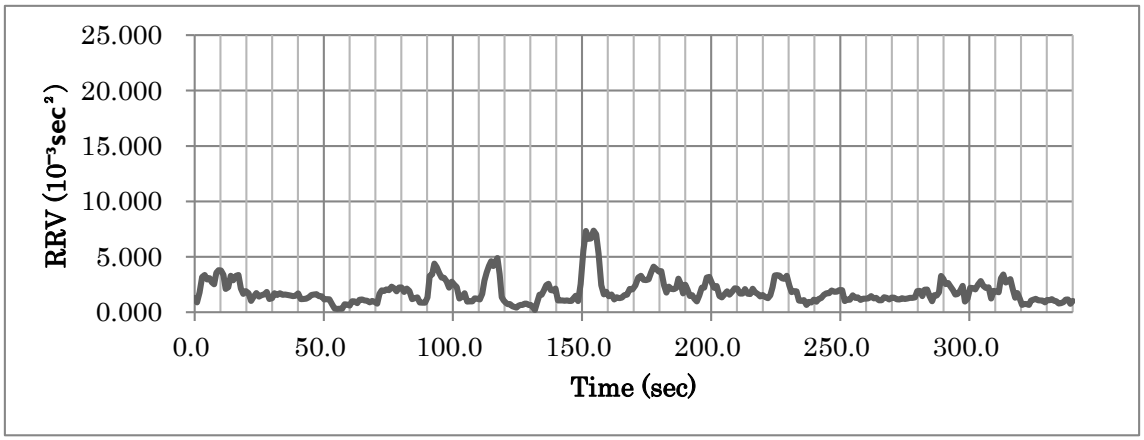
4K3D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.200



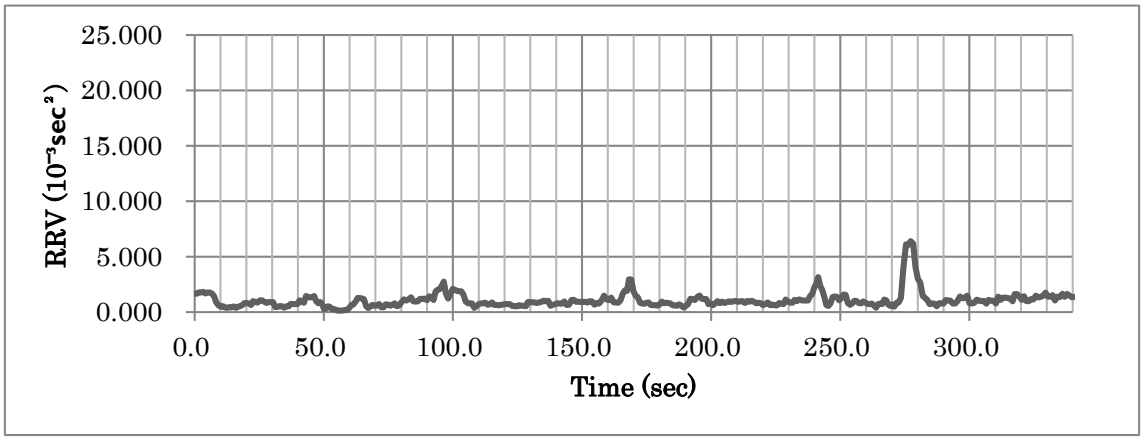
4K3D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.100



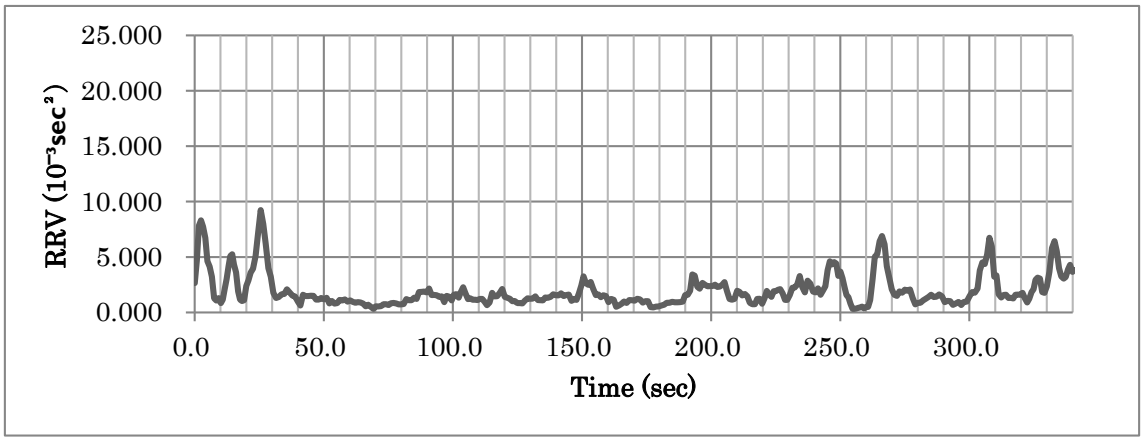
4K2D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.870



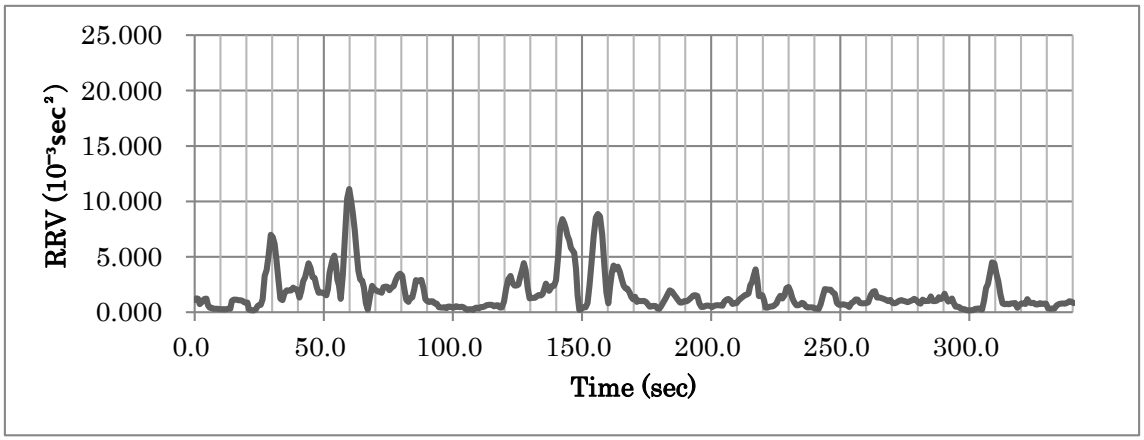
HD3D 大画面視聴時の RRV 平均値：1.060



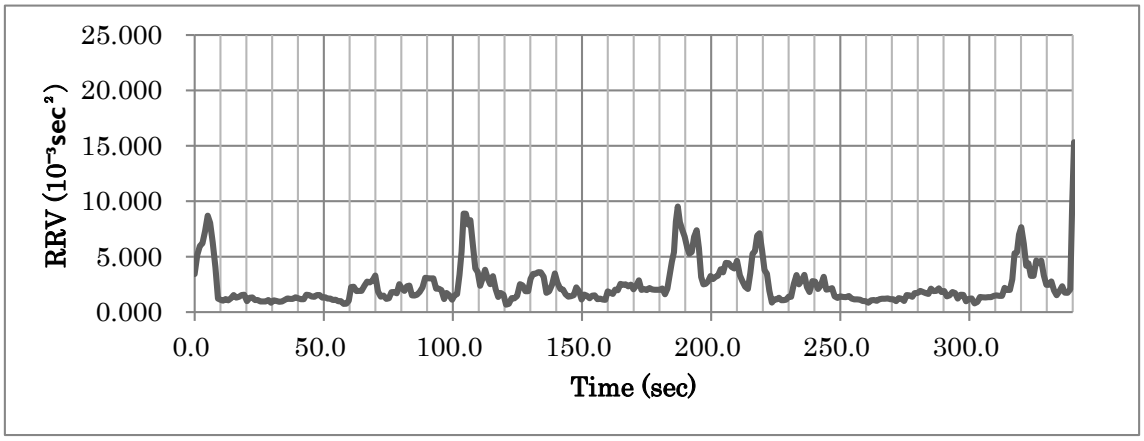
HD2D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.970



HD2D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.710

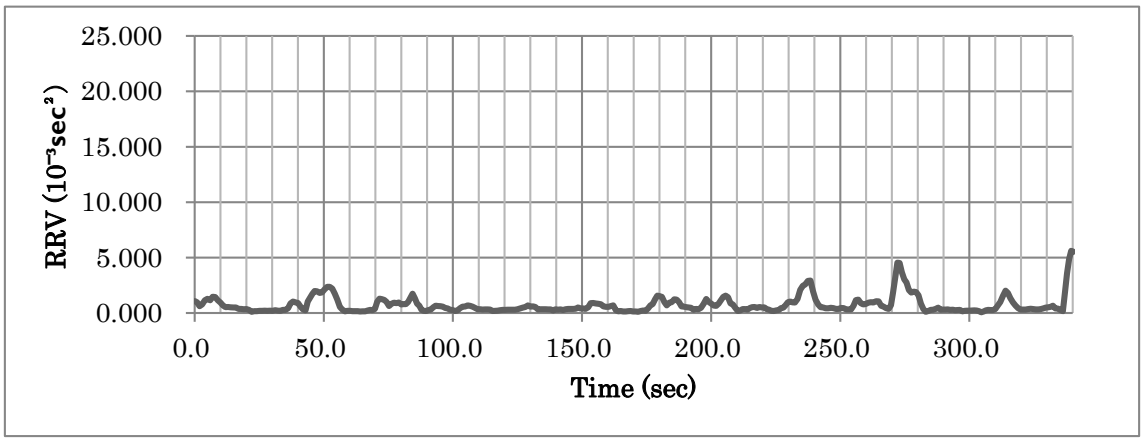


HD2D 小画面視聴時の RRV 平均値：2.520

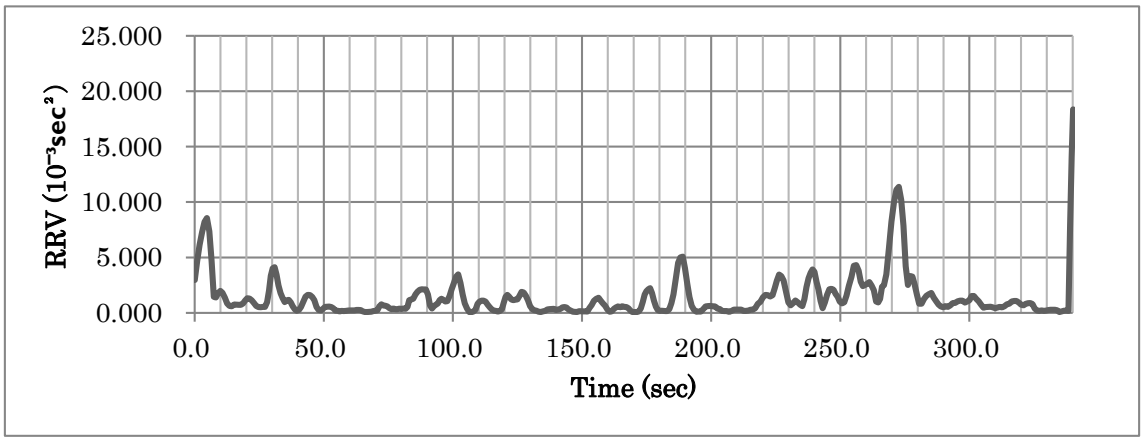


・被験者Ｂ

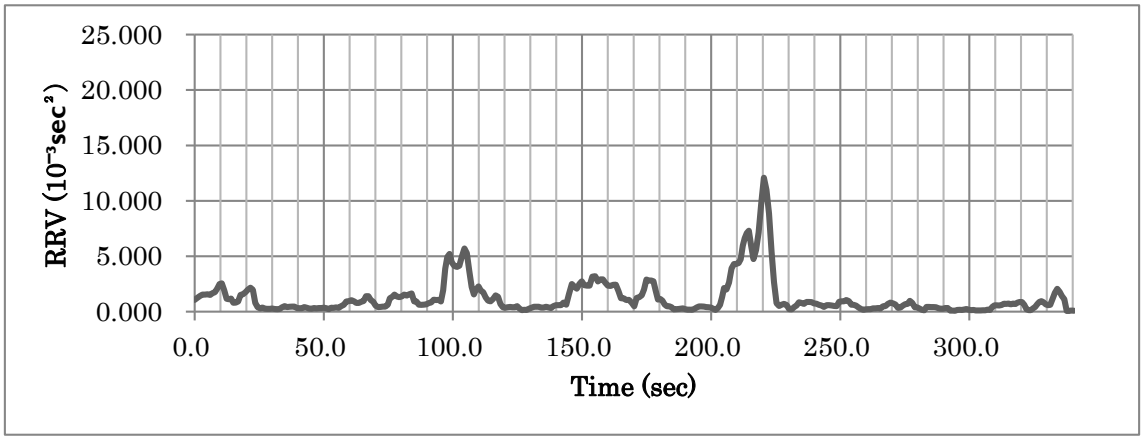
4K3D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.760



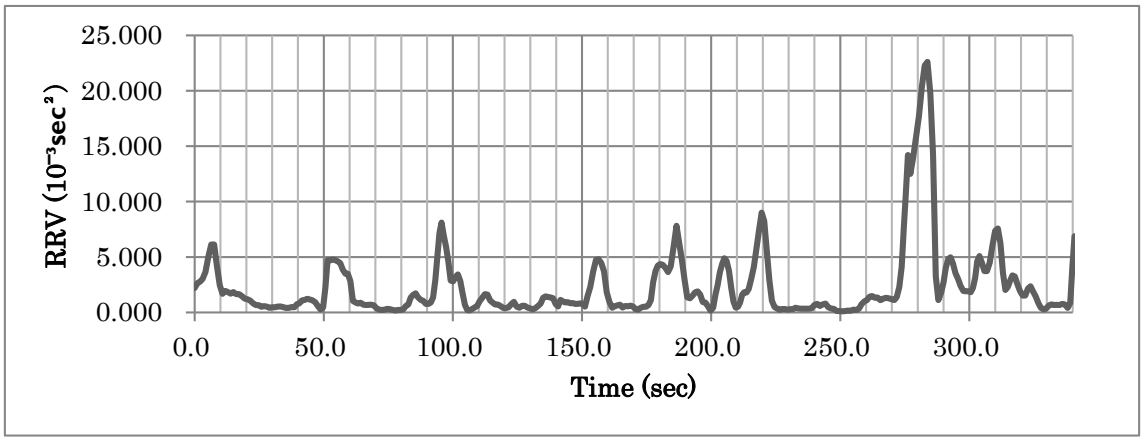
4K3D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.380



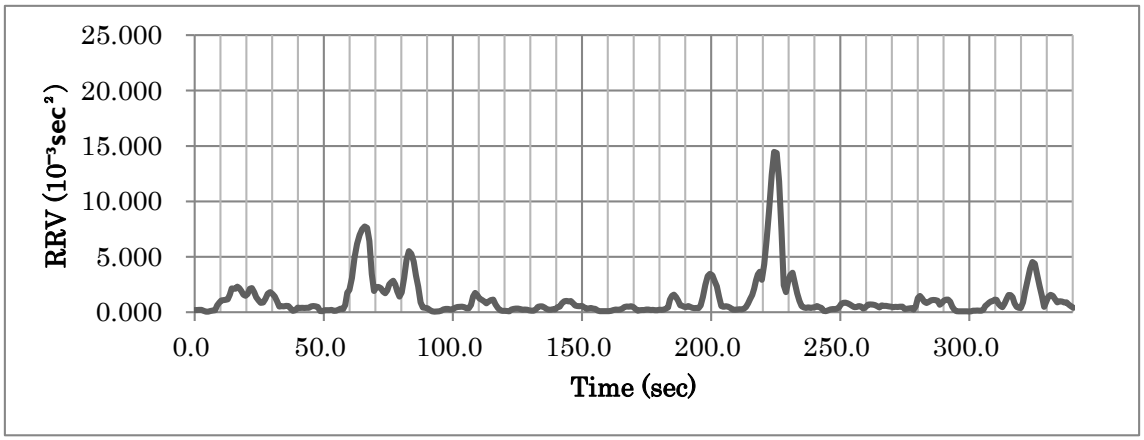
4K2D 大画面視聴時の RRV 平均値：1.250



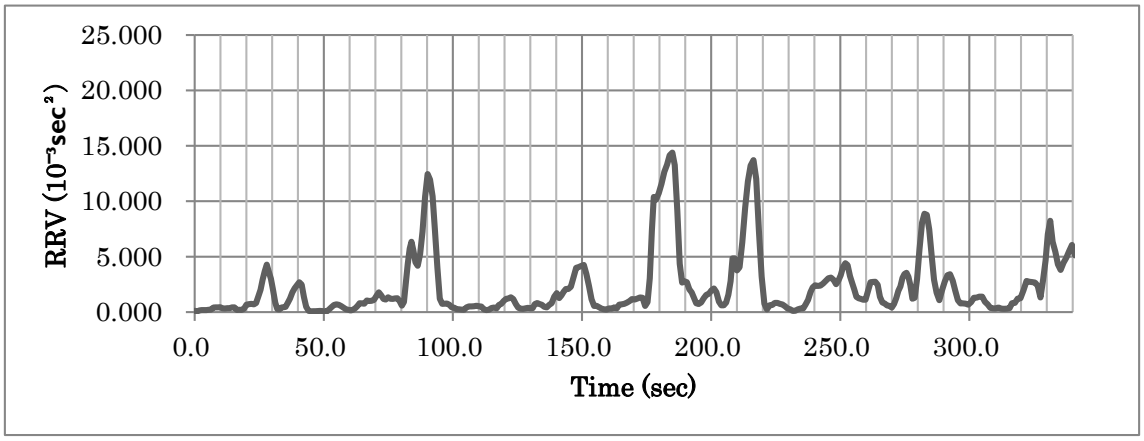
4K2D 小画面視聴時の RRV 平均値：2.370



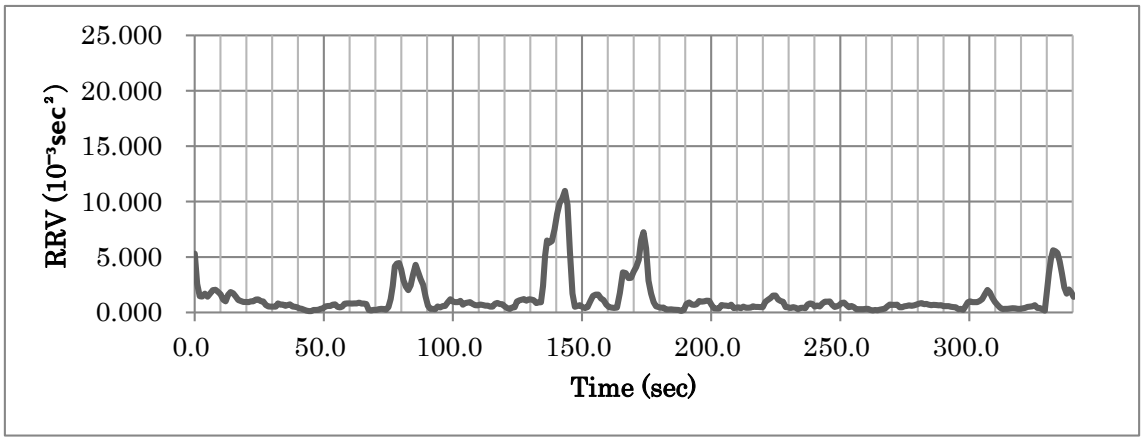
HD3D 大画面視聴時の RRV 平均値：1.190



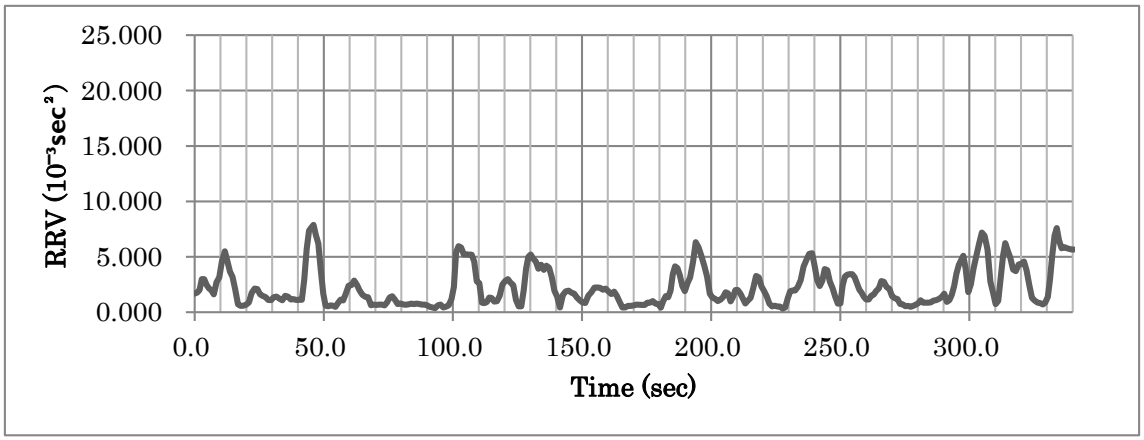
HD3D 大画面視聴時の RRV 平均値：2.240



HD2D 大画面視聴時の RRV 平均値：1.260

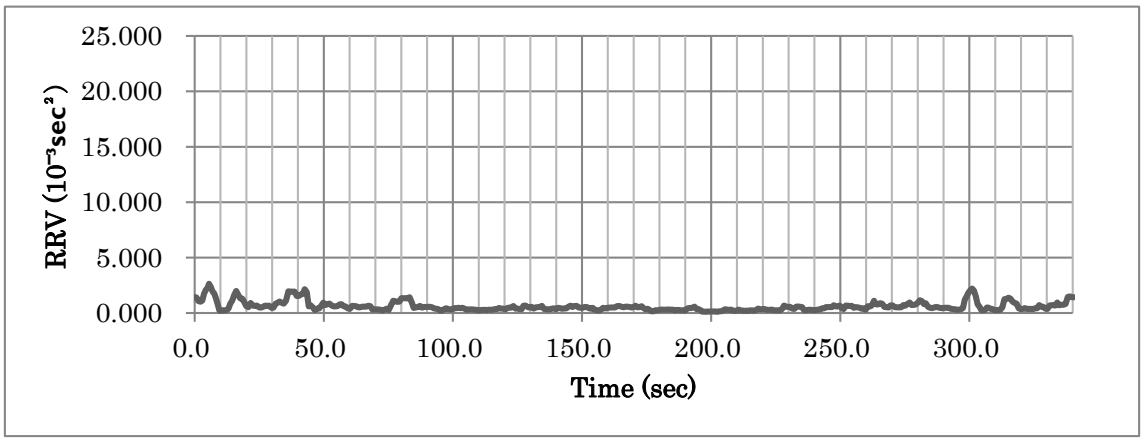


HD2D 小画面視聴時の RRV 平均値：2.290

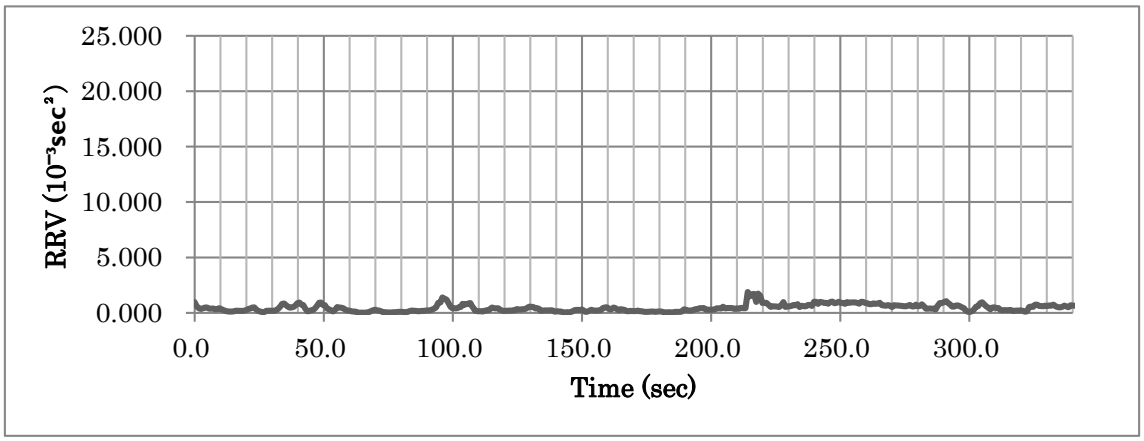


・被験者Ｃ

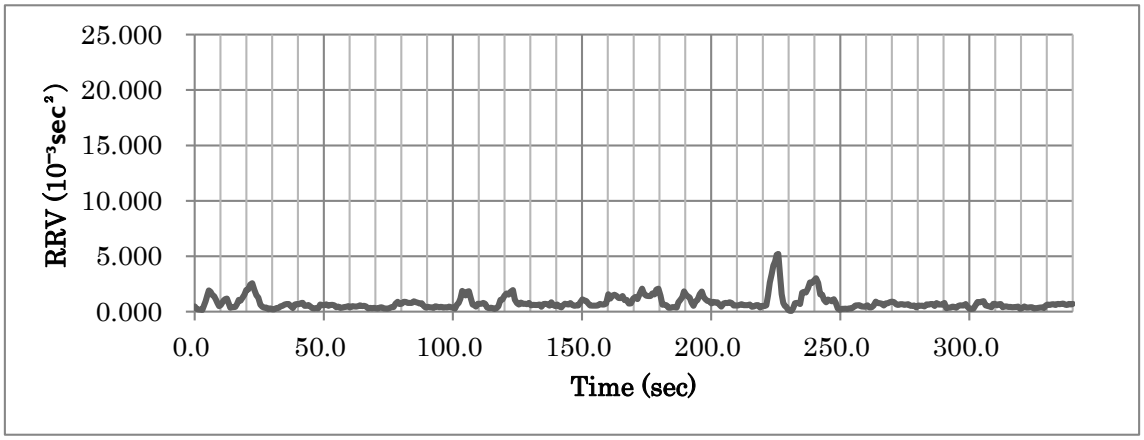
4K3D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.610



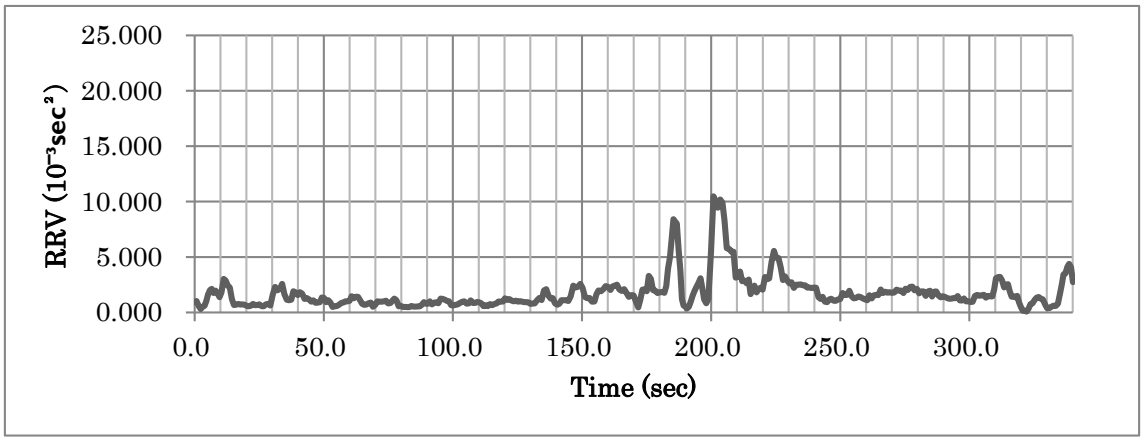
4K3D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.540



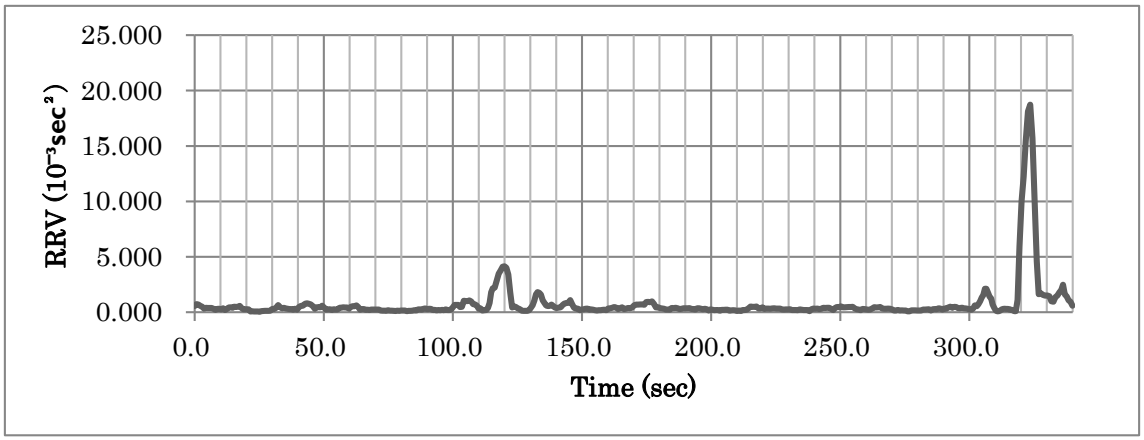
4K2D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.800



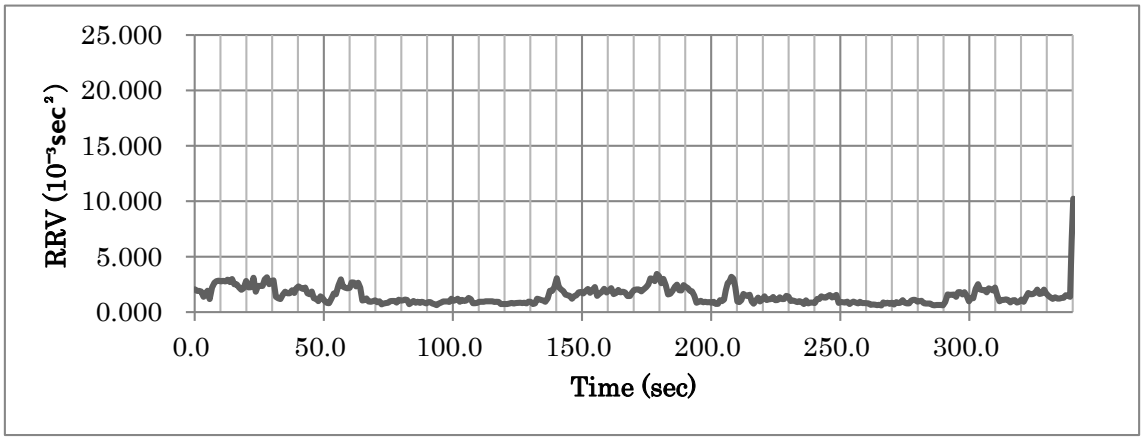
4K2D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.750



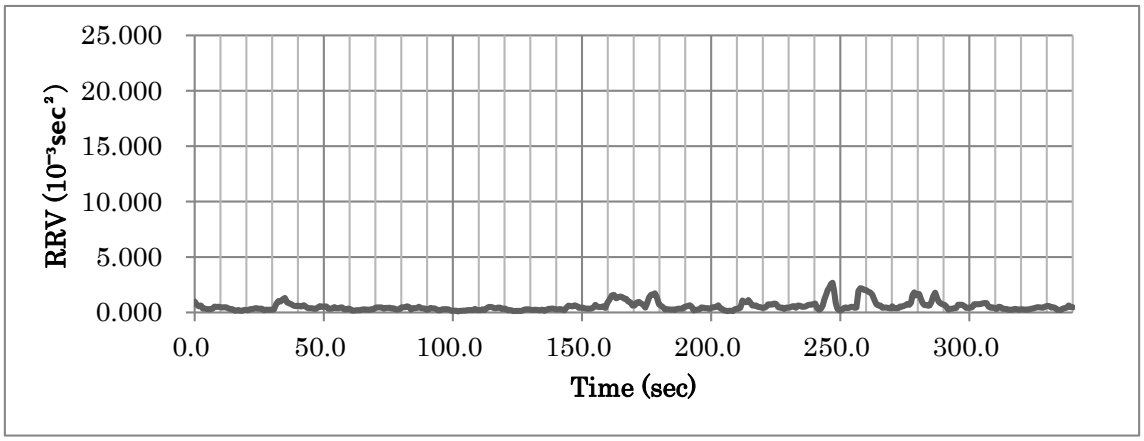
HD3D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.720



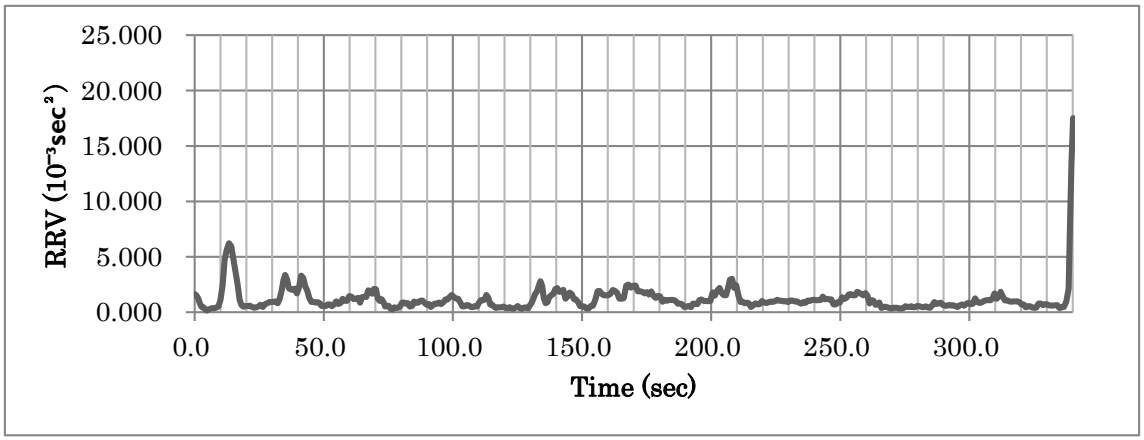
HD2D 大画面視聴時の RRV 平均値：1.680



HD2D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.504

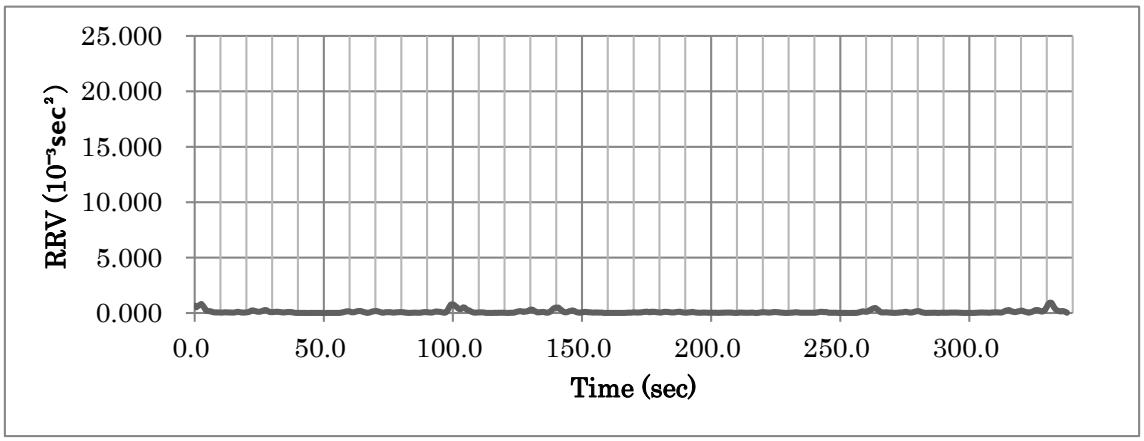


HD2D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.690

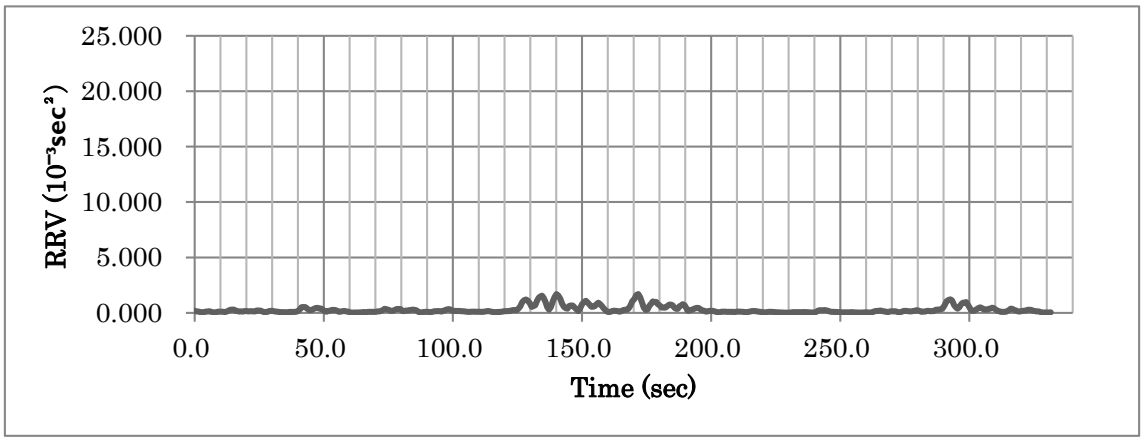


・被験者Ｃ

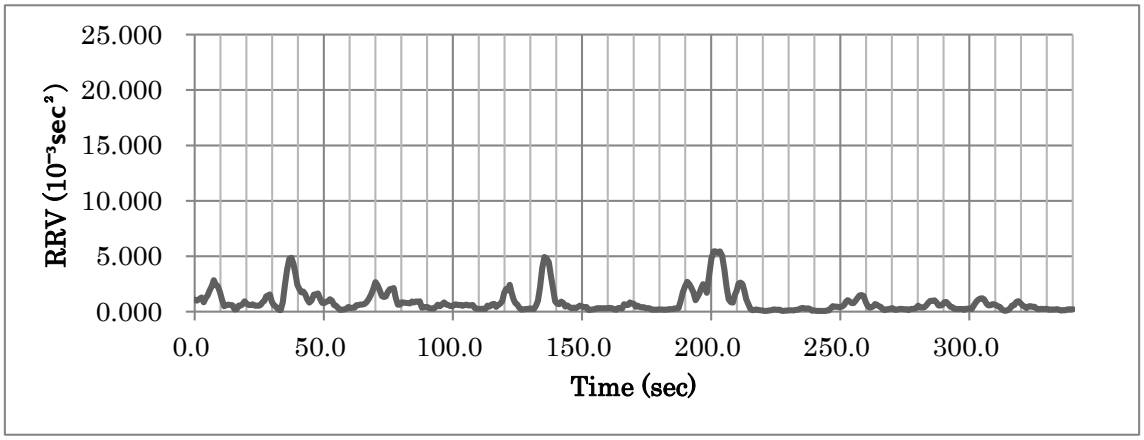
4K3D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.090



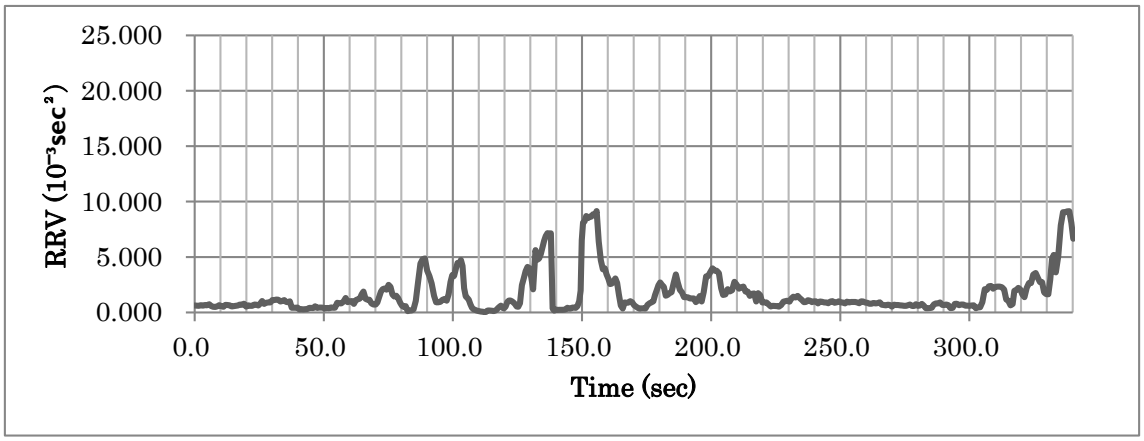
4K3D 小画面視聴時の RRV 平均値：0.280



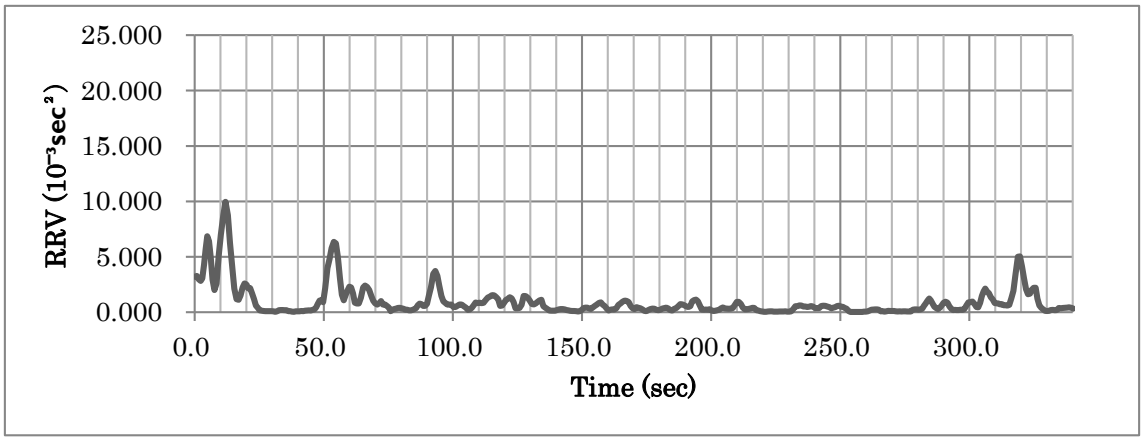
4K2D 大画面視聴時の RRV 平均値：0850



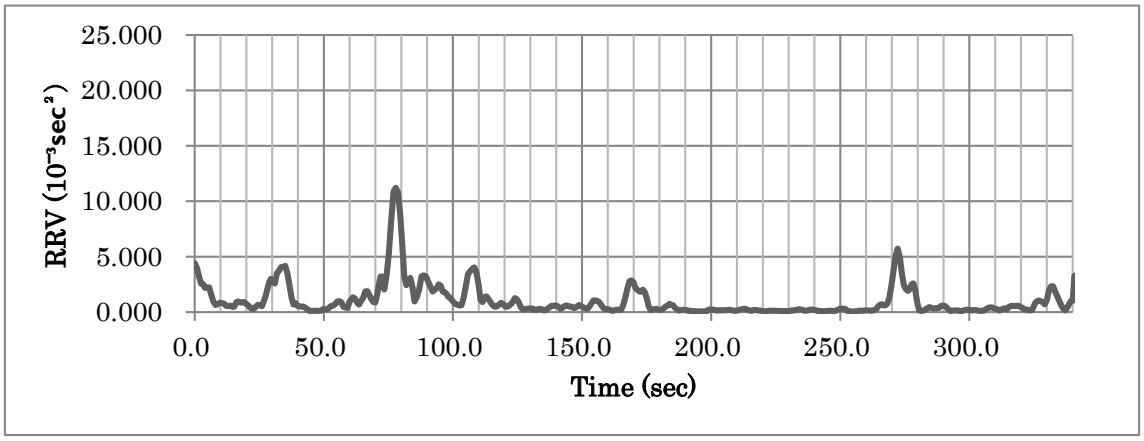
4K2D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.460



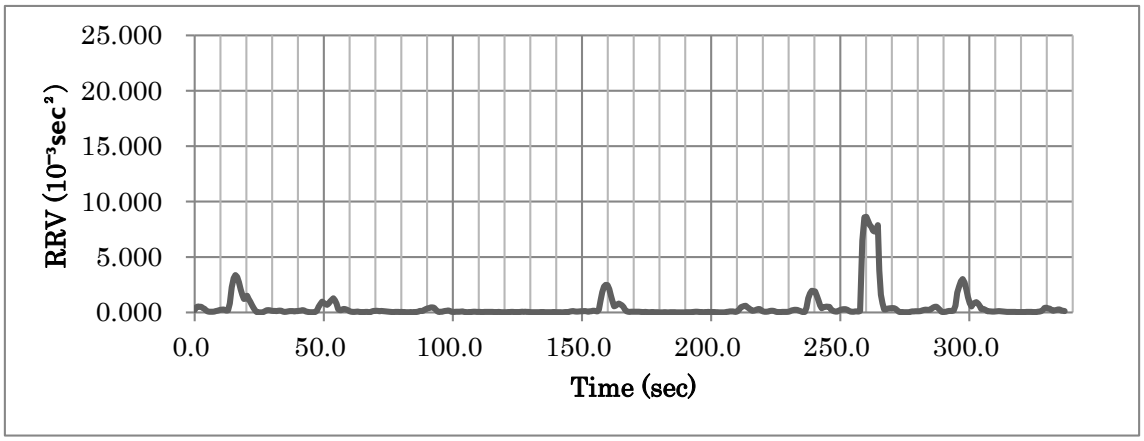
HD3D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.980



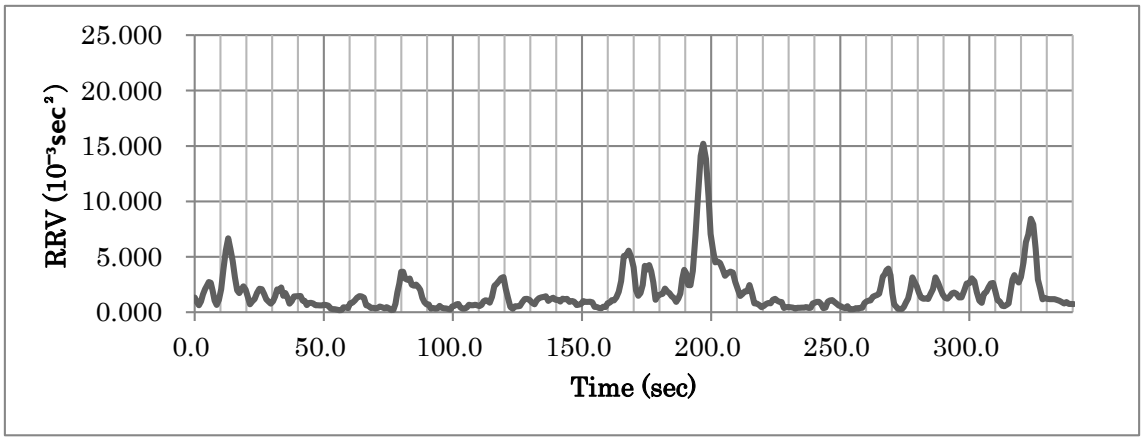
HD3D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.110



HD2D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.450

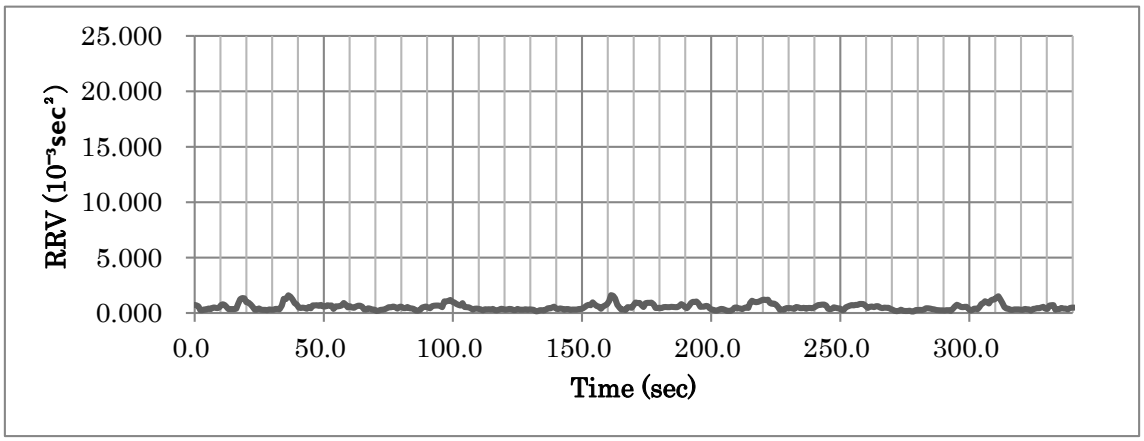


HD2D 大画面視聴時の RRV 平均値：1.730

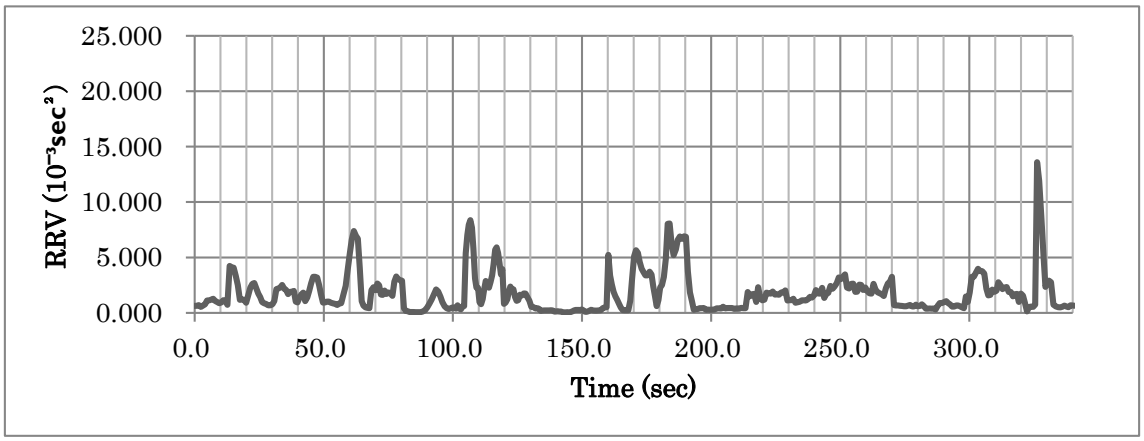


・被験者Ｅ

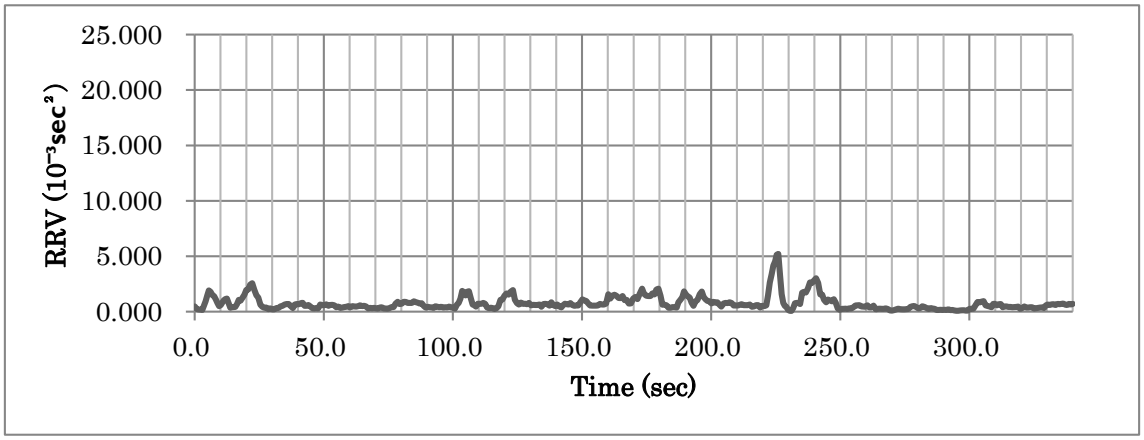
4K3D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.890



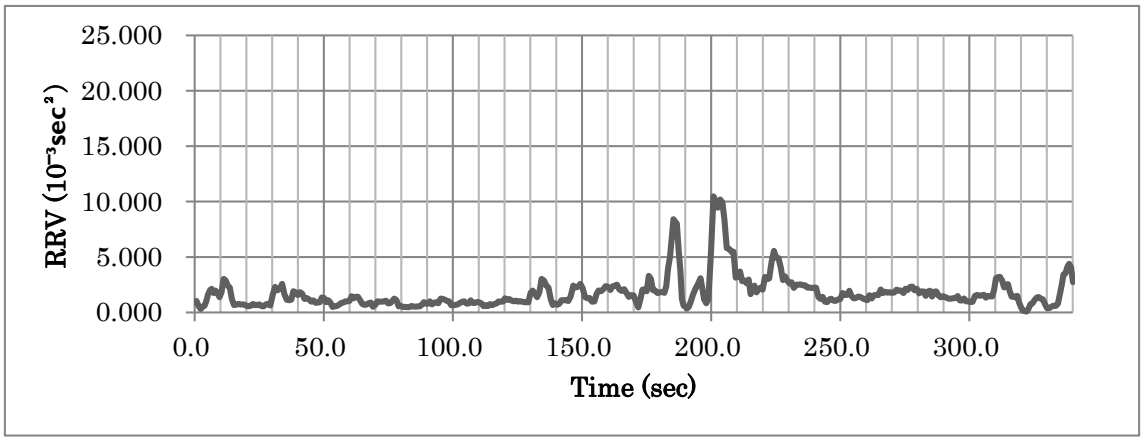
4K3D 小画面視聴時の RRV 平均値：2.070



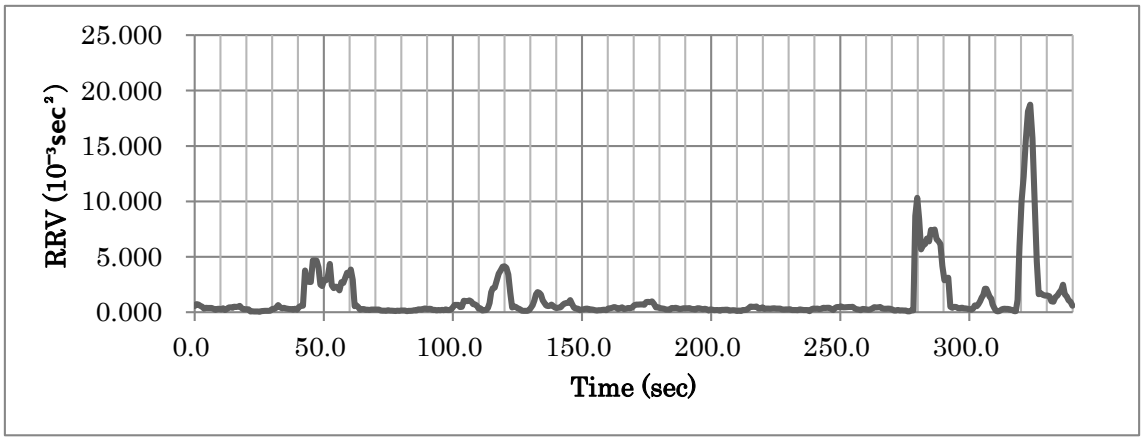
4K2D 大画面視聴時の RRV 平均値：0.800



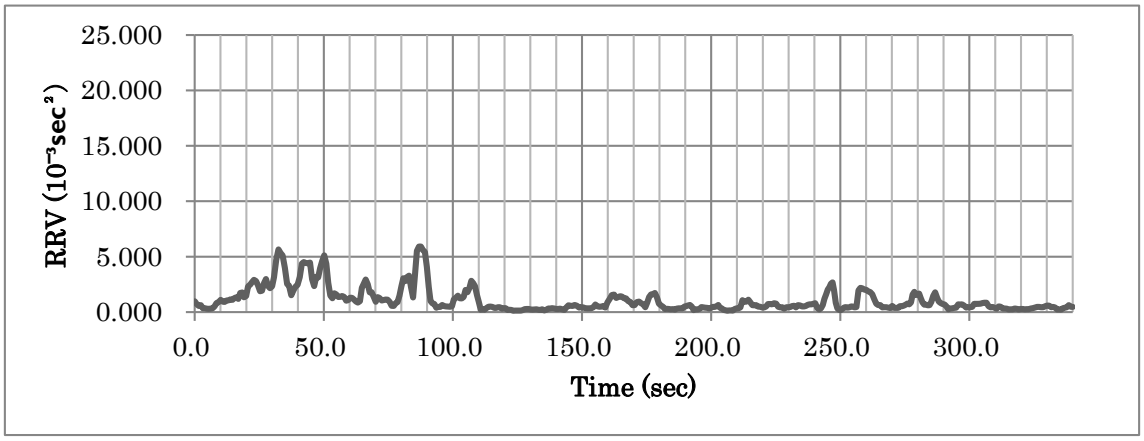
4K2D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.800



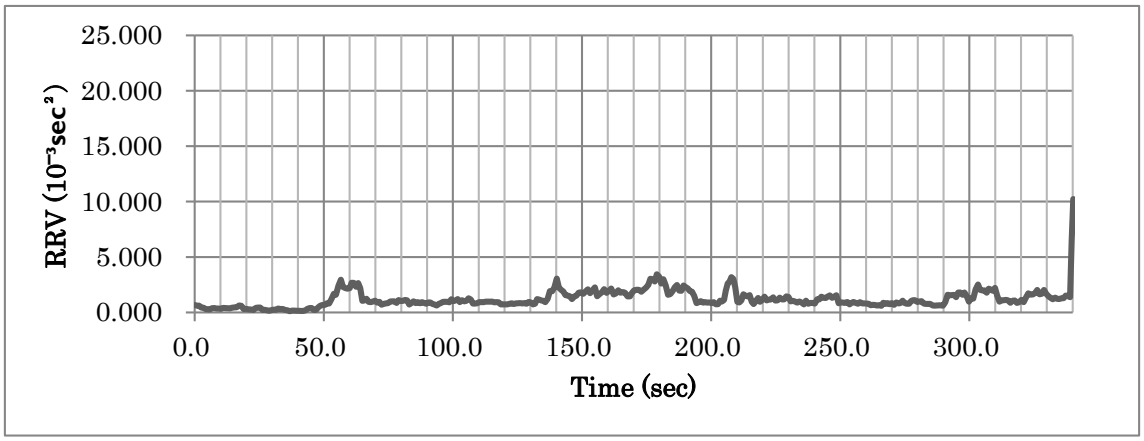
HD3D 大画面視聴時の RRV 平均値：1.120



HD3D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.280



HD2D 大画面視聴時の RRV 平均値：1.260



HD2D 小画面視聴時の RRV 平均値：1.590

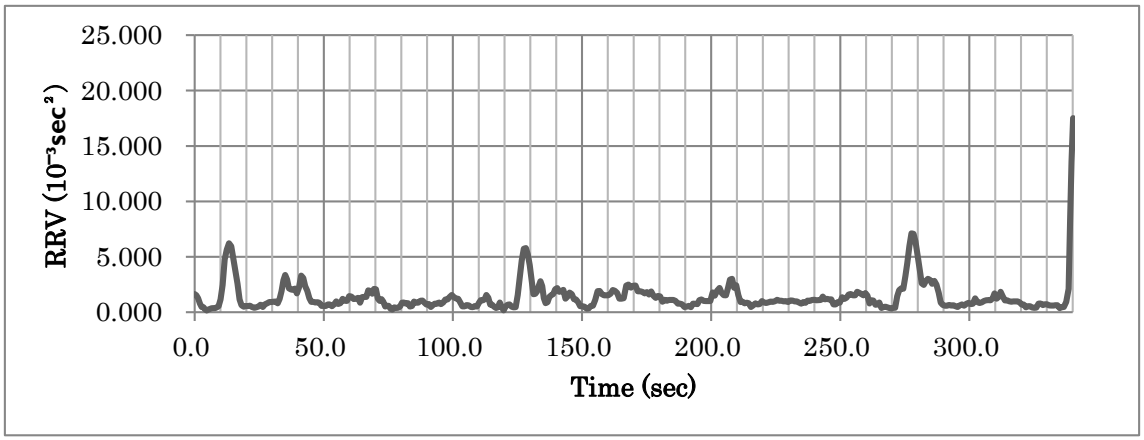


表 18　星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信イベント詳細

日時	11 月 6 日（火）19:00～22:20
場所	慶應義塾大学日吉キャンパス　協生館　CDF 教室 （横浜市港北区日吉 4-1-1）
プログラム 「情報技術と 宇宙時代」	19:00　開会・イベント概要説明　小木哲朗（慶應 SDM） 19:15　全会場挨拶　神武直彦（慶應 SDM） 19:30　3D 映像と高臨場感通信　立山義祐（慶應 SDM） 19:50　宇宙交信とパラレルリアリティ　小木哲朗（慶應 SDM） 20:10　休憩 20:20　ISS 解説 福田義也（JAXA 有人宇宙環境利用ミッション本部事業推進部） 20:40　星出宇宙飛行士の頼もしいパートナー ～きぼうロボットアーム～ 大塚聡子（慶應 SDM） 20:50　休憩　－NASA との通信テスト－ 21:10　宇宙へ行くと心も変わる　日比谷孟俊（SDM 研究所） 21:30　交信者紹介（世田谷区、南三陸町の小中学生、SDM 大学院生） 22:00　***国際宇宙ステーション交信*** 22:20　閉会

リアルタイム交信イベントのアンケート結果

星出宇宙飛行士とのリアルタイム交信イベントの参加者に実施したアンケート調

査の結果を付録として掲載した表 18、表 19。

表 19　3D 映像のリアルタイム交信についてのアンケート結果

視聴者	性別	1:3D映像は立体感があった	2:3D映像は集中して見た	3:3D映像は興奮した	4:3D映像は疲労を感じた	5:3D映像は自分に話しかけられている感じがあった	6:3D映像は同じ空間にいる感じがあった
小学6年生	女	5	5	5	1	5	5
小学5年	男	5	4	3	3	3	3
D1/会社員	女	2	3	3	4	2	2
小学5年	女	5	4	5	2	5	5
小学5年	女	4	5	5	3	2	3
中学2年	男	4	5	5	2	5	5
会社員30代	男	5	5	4	4	2	2
10代	女	4	5	4	4	3	4
中学3年	女	4	3	3	4	4	2
小学5年	男	5	5	3	2	4	2
M1	女	5	5	5	1	2	3
40代会社員	男	4	4	3	3	4	4
M120代	男	4	4	5	2	2	2
中学1年	女	5	5	5	3	5	5
20代学生	女	4	4	4	2	4	4
40代学生	女	5	5	5	3	3	3
40代学生	男	4	4	3	4	4	4
20代学生	男	3	4	2	1	3	2
30代会社員	男	4	4	2	5	5	5
団体職員40代	女	4	4	4	3	3	3
中学1年	女	5	5	4	1	4	5
小学6年生	女	1	2	1	1	2	1
小学6年生	男	5	5	5	1	5	5
小学5年	男	4	3	2	2	5	5
中学3年	女	5	4	5	2	5	5
学生10代	女	5	4	4	3	4	4
中学3年	女	5	4	4	3	4	4
教員	男	4	4	4	1	4	4
中学2年	男	4	5	5	3	4	4
会社員30代	男	4	3	4	3	3	2
sdmD150代	男	4	4	4	4	2	2
修士1年20代	男	3	4	3	3	4	3
会社員50代	男	5	5	5	4	2	3
40代	男	2	3	3	3	3	3
修士1年20代	男	3	5	3	4	3	4
小学6年生	男	5	5	5	1	5	5
学生10代	男	4	3	4	1	4	4
中学1年	男	5	5	5	5	5	5
平均値		4.158	4.211	3.895	2.658	3.632	3.579
標準偏差		0.960	0.800	1.071	1.198	1.086	1.184

表 20　2D 映像のリアルタイム交信についてのアンケート結果

視聴者	性別	7：2D映像は立体感があった	8：2D映像は集中して見た	9：2D映像は興奮した	10：2D映像は疲労を感じた	11：2D映像は自分に話しかけられている感じがあった	12：2D映像は同じ空間にいる感じがあった
小学6年生	女	3	5	4	1	3	3
小学5年	男	3	3	3	3	3	3
D1/会社員	女	3	3	3	3	3	3
小学5年	女	4	4	4	2	5	5
小学5年	女	2	3	1	1	1	1
中学2年	男	3	5	3	1	3	3
会社員30代	男	1	5	4	1	2	2
10代	女	4	4	3	2	3	2
中学3年	女	2	3	3	3	2	2
小学5年	男	3	5	2	1	3	2
M1	女	3	3	3	3	3	3
40代会社員	男	2	1	1	2	2	2
M120代	男	2	2	3	2	1	3
中学1年	女	1	5	5	2	4	4
20代学生	女	4	4	4	2	4	4
40代学生	女	4	4	4	4	3	3
40代学生	男	3	3	3	3	3	3
20代学生	男	3	4	4	1	3	3
30代会社員	男	1	3	3	1	1	2
団体職員40代	女	2	2	2	2	2	2
中学1年	女	3	5	2	1	3	3
小学6年生	女	2	2	3	1	3	4
小学6年生	男	1	5	3	3	5	5
小学5年	男	4	3	3	2	3	3
中学3年	女	3	5	5	1	4	4
学生10代	女	2	3	3	2	1	1
中学3年	女	1	3	3	3	3	3
教員	男	2	4	3	1	3	3
中学2年	男	3	5	5	1	5	3
会社員30代	男	3	3	3	3	3	2
sdmD150代	男	3	4	2	2	2	2
修士1年20代	男	3	3	4	4	4	3
会社員50代	男	3	3	3	2	2	3
40代	男	3	3	3	3	3	3
修士1年20代	男	3	5	4	3	3	3
小学6年生	男	1	5	1	1	1	1
学生10代	男	3	4	5	1	4	3
中学1年	男	5	5	5	5	5	5
平均値		2.658	3.711	3.211	2.079	2.921	2.868
標準偏差		0.981	1.074	1.055	1.036	1.109	0.978