

博士論文

光学的手法を用いた  
高齢者視覚模擬に関する研究

Study on Simulation of Elderly Vision using Optical Methods

国立大学法人 横浜国立大学大学院  
環境情報学府

鈴木 敬 明  
Takaaki SUZUKI

横浜国立大学附属図書館



11737224

2006年3月

寄贈者：鈴木敬明

11737224  
工学的手法を用いた高齢者視覚模擬  
に関する研究

377.51  
SU

博士論文

光学的手法を用いた  
高齢者視覚模擬に関する研究

Study on Simulation of Elderly Vision using Optical Methods

横浜国立大学附属図書館



11737224

国立大学法人 横浜国立大学大学院  
環境情報学府

鈴木 敬明  
Takaaki SUZUKI

2006 年 3 月

## 目 次

1	序 論	1
1.1	本研究の社会的背景	1
1.1.1	高齢社会の急速な進展	1
1.1.2	高齢者対応製品・ユニバーサルデザイン製品の開発と高齢者視覚	2
1.2	本研究の学術的背景	3
1.2.1	視覚機能の加齢変化	3
1.2.2	光学的手法を用いた高齢者視覚模擬についての既存研究	6
1.3	用語の説明	8
1.4	本研究の目的と本論文の概要	11
1.5	本研究の意義	11
2	高齢者の水晶体の黄変を光学的に模擬した場合の反応時間・反応速度の変化	13
2.1	目的	13
2.2	方法	13
2.2.1	水晶体の分光透過率の加齢変化と高齢者水晶体擬似フィルタ	13
2.2.2	実験配置	16
2.2.3	被験者	16
2.2.4	刺激	17
2.2.5	実験手順	18
2.2.6	主観評価尺度	21
2.3	結果	21
2.3.1	反応時間	21
2.3.2	無反応率	25
2.3.3	反応速度	25
2.3.4	主観評価結果	30
2.4	考察	31
2.4.1	反応速度と実効輝度・実効輝度コントラスト・実効色差の関係	31
2.4.2	反応速度と主観評価の関係	35
2.4.3	水晶体の黄変以外の加齢効果の影響	37
2.4.4	今回の結果から考えられる高齢者水晶体擬似フィルタの利用方法	37
2.5	本章のまとめ	38
3	視覚刺激に対する反応時間・認知時間の加齢変化と水晶体の黄変の影響	40
3.1	本章の目的	40



3.2	実験方法 .....	40
3.2.1	事象関連電位 (Event-Related Potential: ERP) .....	40
3.2.2	被験者 .....	41
3.2.3	刺激 .....	42
3.2.4	実験配置と生体信号計測 .....	42
3.2.5	実験手順 .....	44
3.2.6	データ処理 .....	44
3.3	結果 .....	45
3.3.1	反応速度 .....	45
3.3.2	P300 潜時 .....	48
3.3.3	P300 振幅 .....	52
3.3.4	主観評価結果 .....	52
3.4	考察 .....	53
3.4.1	若年者フィルタ無と高齢者の結果の比較 .....	53
3.4.2	若年者フィルタ有と高齢者の結果の比較 .....	54
3.4.3	水晶体の黄変が加齢による認知時間の増加に与える影響 .....	54
3.4.4	反応速度、P300 潜時と実効輝度・実効輝度コントラスト・実効色差の関係 .....	55
3.4.5	反応時間と主観評価の関係 .....	58
3.5	本章のまとめ .....	60
4	環境照度を考慮した高齢者視覚の模擬ゴーグルの製作 .....	61
4.1	本章の背景と目的 .....	61
4.2	老人性縮瞳の模擬の概要 .....	61
4.3	瞳孔面積測定の実験方法 .....	63
4.3.1	被験者 .....	63
4.3.2	実験配置および実験手順 .....	63
4.3.3	実験手順 .....	64
4.3.4	データ処理 .....	65
4.4	実験結果 .....	66
4.5	老人性縮瞳模擬フィルタの透過率の検討 .....	69
4.6	老人性縮瞳模擬フィルタと高齢者視覚模擬ゴーグルの作成 .....	73
4.6.1	EC(Electro-Chromic)フィルタ .....	74
4.6.2	老人性縮瞳模擬フィルタの透過率の実現と高齢者視覚模擬ゴーグルの製作 .....	75
4.7	本章のまとめ .....	77
5	高齢者視覚模擬ゴーグルの効果・応用とその適応範囲 .....	79
5.1	反応時間と認知時間 .....	79

5.2	色弁別と色の見え .....	83
5.3	空間コントラスト感度 .....	84
5.4	JIS S 0031:2004「高齢者・障害者配慮設計指針－視覚表示物－年代別相対輝度の求め方及び光の評価方法」に関連した利用 .....	85
5.4.1	JIS S 0031 による評価方法 .....	86
5.4.2	本研究結果に基づく評価と JIS S 0031 .....	87
5.4.3	本研究成果と JIS S 0031 に基づいた製品評価事例 .....	88
5.5	本章のまとめ .....	90
6	総合的考察 .....	92
7	総 括 .....	96
	参考文献 .....	98
	本論文に関連する発表文献 .....	104
	第 2 章 .....	104
	第 3 章 .....	104
	第 4, 5 章 .....	105
	謝 辞 .....	106

## 1 序 論

本章では、本研究を実施した背景、本研究の位置づけ、および目的について述べる。近年の高齢社会の進展に伴い、高齢者対応製品、ユニバーサルデザイン製品の開発ニーズが高まっている。これらの製品を開発するにあたっては、視覚特性の加齢変化を考慮した設計が必要となるが、視覚の加齢変化に伴う視認性の悪化や、機器の表示に対する高齢者の応答の遅延を定量的に評価する方法がないため、本研究では、高齢者対応製品の設計開発への応用を目的とし、若年者が高齢者の視覚を精度よく模擬し、定量的に評価する手法について研究を実施した。製品の視認性は、網膜上の光強度、コントラスト、色差に大きく影響される。そこで、網膜に到達する光を変化させる主な生理的加齢要因である水晶体の黄変と、瞳孔収縮に注目した。これらの視覚の加齢特性について、光学的手法を用いた模擬方法を確立するとともに、これらの加齢変化が高齢者の認知や反応に与える影響について検討した。

### 1.1 本研究の社会的背景

#### 1.1.1 高齢社会の急速な進展

2004 年の高齢者白書<sup>1)</sup>によれば、2004 年 10 月 1 日現在、日本の総人口は 1 億 2,769 万人、65 歳以上の高齢者人口は過去最高の 2,488 万人(前年 2,431 万人)で、高齢化率(高齢者人口が総人口に占める割合)は 19.5%(前年 19.0%)に達する。今後は、高齢者人口は 2020 年までさらに増加すると見込まれている一方で、総人口は 2006 年以降、減少に転ずると予想されている。高齢化率は 2015 年に 26.0%、2050 年には 35.7%に達し、国民の約 3 人に 1 人が 65 歳以上の高齢者という極めて高齢化の進んだ社会の到来が予想されている。このような社会状況により、日本の消費市場における高齢者の割合が増加するため、高齢者の特性を考慮した、高齢者が使いやすい製品の開発が望まれている。

また、世界的に見ても、2005 年の世界の総人口は 64 億 6,475 万人であり、2050 年には 90 億 7,590 万人になると見込まれているが、総人口に占める 65 歳以上の高齢者の割合は、2050 年には 16.1%にまで上昇し(2005 年は 7.4%)、21 世紀後半には高齢化が急速に進展することが予想されている<sup>2)</sup>。したがって、今後、高齢者対応製品や、その開発技術は世界的な規模で必要になると考えられる。日本は世界に先駆けて高齢社会を迎えており、高齢者対応製品の開発技術を確立することは、将来的なこの分野の世界的な広がりを考えても、その意義は大きいと言えよう。

### 1.1.2 高齢者対応製品・ユニバーサルデザイン製品の開発と高齢者視覚

前述のような高齢社会の進展に伴い、様々な高齢者対応製品の開発が行われている。これまでの製品開発は若年者を対象としたものがほとんどであり、加齢による身体機能の低下を考慮する必要がなかったため、設計開発者がその使いやすさを容易に想像し、評価することができた。ところが、高齢者対応製品を開発するにあたっては、その設計基準をどのように決めるのが 1 つの大きな問題となっている。この問題を解決するために、人間工学的な手法を取り入れて身体機能の加齢変化を計測し、その特性を考慮して製品設計を行う技術について研究が行われ始めている。このような研究開発事例として、例えば、高齢者の膝の負担が少なくなるよう設計されたイスの開発が報告されている<sup>3-7)</sup>。この事例では、高齢者の加齢による運動機能の低下について 3 次元動作解析手法により高齢者の立ち上がり動作を計測し、その動きから膝の負担を計算すると同時に、筋電図によって立ち上がり時の筋負担を評価している。また、筋電図測定による筋負担評価とともに行動観察を行い、高齢者の下着の着脱時の身体負担を評価した研究も報告されている<sup>8,9)</sup>。

一方で、高齢者の加齢による身体機能の低下だけでなく、身体障害者の身体機能の低下や欠損も考慮し、身体的な特性や障害にかかわらず、より多くの人々が共に利用しやすい製品・施設・サービスを提供しようとするユニバーサルデザイン(UD)という思想が提唱されている<sup>10)</sup>。人間工学的な手法を用いた UD 製品の研究開発事例として、健常者でも視覚機能が十分に働かないことが多い浴室環境で用いる操作機器に対して、視覚障害者(全盲者)に配慮したインタフェースを設計することにより、健常者がその機器を利用する際の利便性を向上させた研究開発が報告されている<sup>11-14)</sup>。

上記の事例は、運動機能の低下や視覚機能の損失を考慮した製品開発であったが、高齢者対応製品、UD 製品におけるインタフェースデザインには、加齢による視覚機能の低下が必ず考慮されているべきである。なぜなら、高齢者の視覚機能の低下により製品の表示の視認性は悪化し、それに伴い製品の使いにくさが増大するからである。しかし、高齢者の視覚機能の低下による影響を定量的に捕らえて製品開発に応用することは容易ではない。加齢による運動機能の低下については、前述のように、高齢者を観察することで理解が可能であり、動きの計測についても外部から身体の運動を測定すればよく、比較的簡易である。一方、視覚機能の加齢変化は、眼球光学系、網膜、網膜から脳への神経伝達経路、および脳内の視覚情報処理の過程で生じる。また、見え方の変化は、脳の内部で生じるため、若年者が高齢者の視覚機能の低下を直接観察することは不可能であり、計測も非常に困難である。さらに、視覚の加齢変化は、長期間に渡って徐々に進行するため、高齢者自身がその機能低下に気付いていないことも多い。

高齢者の視覚機能の低下を評価する 1 つの方法として、2004 年 1 月 20 日に、日本工業規格「JIS S 0031:2004 高齢者・障害者配慮設計指針－視覚表示物－年代別相対輝度の求め方及び光の評価方法」<sup>15)</sup>が制定された。この規格は、若年者から高齢者までの年齢の観測対象者が光源及び物体を見るとき光の視感効率、および、それに基づく視認性を、対象者の年齢を考慮した年代別相対輝度を用いて評価する方法について規定している。JIS S 0031 では、視覚の加齢効果を考慮した光源や物体の明るさが計算でき、特に高齢者が安全で快適な生活を送るために必要な見やすい視覚表示物のコントラストなどの評価・設計に利用可能であるとしている。しかしながら、JIS S 0031 を製品設計に応用するにあたっては、高価な測定機器が必要であったり、違う年代間での評価ができなかったり、高齢者に適切な評価基準が規定されていなかったりという技術的な問題がある。JIS S 0031 の評価方法については、本研究で行った方法と関連する部分が多いため、本論文の 5.4 節では、JIS S 0031 に関連した本研究の応用方法について議論する。

高齢者における視認性の評価方法として、Inoueら<sup>16,17)</sup>は紙に印刷された日本語文章の読みやすさについて報告している。彼女らの研究では、読みやすさ評価値に対する視対象の輝度と文字の大きさの関係を定式化している。この研究に代表されるように、高齢者の視認性評価に関する研究は、主観評価法を用いたものがほとんどであった。しかしながら、製品のインタフェース設計において製品の使いやすさを向上させるためには、実際の製品の使用状況を考え、「見る、認識する、行動する」の一連の作業が滞りなく行われるかを評価することが重要である。つまり、視覚の加齢変化に伴う視認性の主観評価に加えて、表示に対する認知、反応特性の変化を定量的に評価する必要がある。ところが、現在、そのような評価方法は存在せず、高齢者対応製品を効率よく設計開発する 1 つの大きな障壁となっていた。

これらの問題を解決し、高齢者対応製品の開発を効率よく行うには、科学的根拠に基づく高齢者視覚の数値的な評価方法の確立と、視覚に伴う人間の反応の変化と設計パラメータを関連付けた設計指針が望まれる。誰にでも簡単に使える評価ツールを用いることで、主観評価、視覚の加齢変化に伴う認知、ならびに応答速度の変化が簡便かつ定量的に評価できれば、高齢者対応製品の開発を効率化し、製品の品質を向上させる非常に有用な手段となる。

## 1.2 本研究の学術的背景

### 1.2.1 視覚機能の加齢変化

加齢による視覚機能の変化は、おおまかに眼球光学系と神経系の 2 種類の変化に大



別することができる。眼球光学系(図 1.1)の加齢変化としては、遠視化や調節機能の低下(老視)、水晶体の混濁と黄変、老人性縮瞳などがあげられる。神経系の変化については、光受容体の感度低下、網膜から脳への神経系の変化、脳内の細胞の減少や視覚情報処理の劣化が考えられる。

老視のうち、遠視化は加齢による水晶体の屈折率の低下が原因と言われている。調整機能の低下は、水晶体の弾性が低下する説<sup>18)</sup>と、毛様筋の加齢変化によるという説<sup>19)</sup>がある。老視による視覚機能の低下は、眼球光学系でのピントのズレによる網膜像のボケが原因であり、メガネやコンタクトレンズなどの視力矯正具での矯正が可能である。水晶体の混濁と黄変は、加齢による水晶体内の蛋白質の凝集や水晶体の厚さの増大によって起こる。水晶体の混濁は、眼球内に散乱光を発生させ網膜像を劣化させる。特に視界内に強い光源が入った場合に視覚機能を低下させる。水晶体の黄変は、網膜に到達する光を減少させると共に、網膜に到達する光の分光成分を変化させる<sup>20-22)</sup>。老人性縮瞳は、加齢による交感神経系の機能低下、脳内情報処理の伝達速度の遅れ、瞳孔収縮に関与している筋肉の老化などが原因で<sup>23)</sup>、網膜に到達する光(網膜照度)を減少させる。神経系の加齢変化については、神経細胞数の減少や、眼球光学系の加齢変化を補償する機能があることなどが知られているが、その具体的なメカニズムは明らかになっていない。

表示の輝度コントラストや色コントラストは、その視認性・可読性に影響を及ぼすことがよく知られている<sup>16,17,24-28)</sup>。つまり、高齢者の輝度コントラストや色コントラスト感度に影響をおよぼす視覚の加齢変化が、製品の視認性に大きく影響し、高齢者対応製品を設計する際に考慮すべき要因であると考えられる。

本研究では、前述の視覚の加齢変化のうち、輝度コントラスト、色コントラストに影響を及ぼし、その特性を定式化できると考えられる水晶体の黄変と老人性縮瞳に注目した。以下に、水晶体の黄変、および老人性縮瞳が高齢者視覚に与える影響についてさらに詳しく述べる。

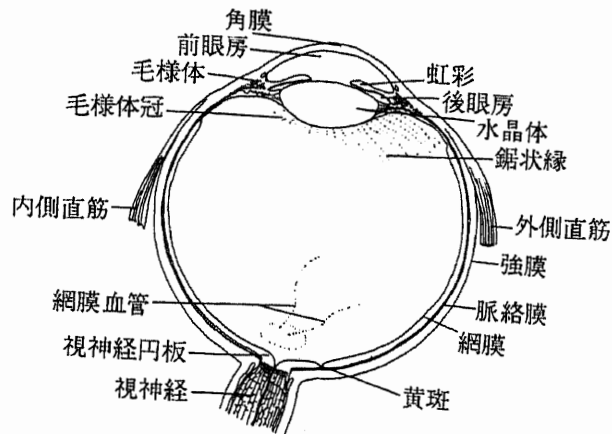


図 1.1 眼球の構造: 瞳孔は虹彩に囲まれた円形状の孔  
(斉藤共著: 医療のための人体解剖学、廣川書店より抜粋)

### 水晶体の黄変の影響

人間の眼の水晶体は、加齢に伴う厚さの増大や蛋白質の凝集によって光学濃度が増大し、特に短波長の可視光の透過率が減少(黄変化)する<sup>20-23)</sup>。この水晶体の黄変は、高齢者の輝度や色の知覚に大きな影響を与えることが報告されている。Weale<sup>31)</sup>は、水晶体の黄変が原因で短波長刺激に対する暗所比視感度の低下が生じることを報告している。Kraftら<sup>32)</sup>は、高齢者の比視感度は短波長側で加齢とともに減少し、その感度低下は水晶体の分光光学濃度の加齢による増大で説明できることを報告している。Pokornyら<sup>29,30)</sup>は、この水晶体の分光光学濃度を年齢の関数として定式化した水晶体加齢モデルを提案している。図 1.2 に CIE(国際照明委員会)が定義した標準比視感度(標準分光視感効率) $V(\lambda)$ と、Pokornyらの水晶体加齢モデルにおける70歳の水晶体分光透過率を考慮して計算した70歳の比視感度を示す。短波長側の感度低下が生じることが分かる。Ishiharaら<sup>33)</sup>は、高齢者視覚の黄変によって、高齢者が「電話の使用」、「薬物を飲む」と言った手段的日常生活動作(instrumental activities of daily living, IADLs)を行う際に不便さを感じさせていることを報告している。

### 老人性縮瞳の影響

加齢による脳内情報処理の伝達速度の遅れ、瞳孔収縮に関与している筋肉の老化、交感神経系の機能低下などが原因で、人間の眼の瞳孔の大きさは、20歳前後に最大になり、それ以降小さくなることが知られている<sup>24,34)</sup>。この現象は老人性縮瞳と呼ばれており、網膜に到達する光量(網膜照度)を減少させる。Jackson<sup>35)</sup>らは、暗所視における高齢者の網膜

感度が低下していることを報告しており、Sloane<sup>36)</sup>らは対象の輝度レベルが低下すると高齢者のコントラスト感度が低下すると報告している。これらの既存研究の結果は、老人性縮瞳によって網膜照度が低下すれば、高齢者の視認性が悪化することを示唆している。また、Knoblauch<sup>37)</sup>らは、高齢者に第3色覚異常に似た色弁別機能の低下があることを明らかにした。第3色覚異常とは、青－黄の判別が難しい症状を示す色覚異常である。また彼らは、低照度下では若年者でも高齢者と同様に第3色覚異常に似た色弁別機能の低下が生じることを報告している。これは、水晶体の黄変に加えて、網膜照度の低下が色覚機能を変化させていることを示唆している。以上のような既存研究から、老人性縮瞳による網膜照度の減少は、高齢者の視覚機能の劣化に強く影響していると考えられる。

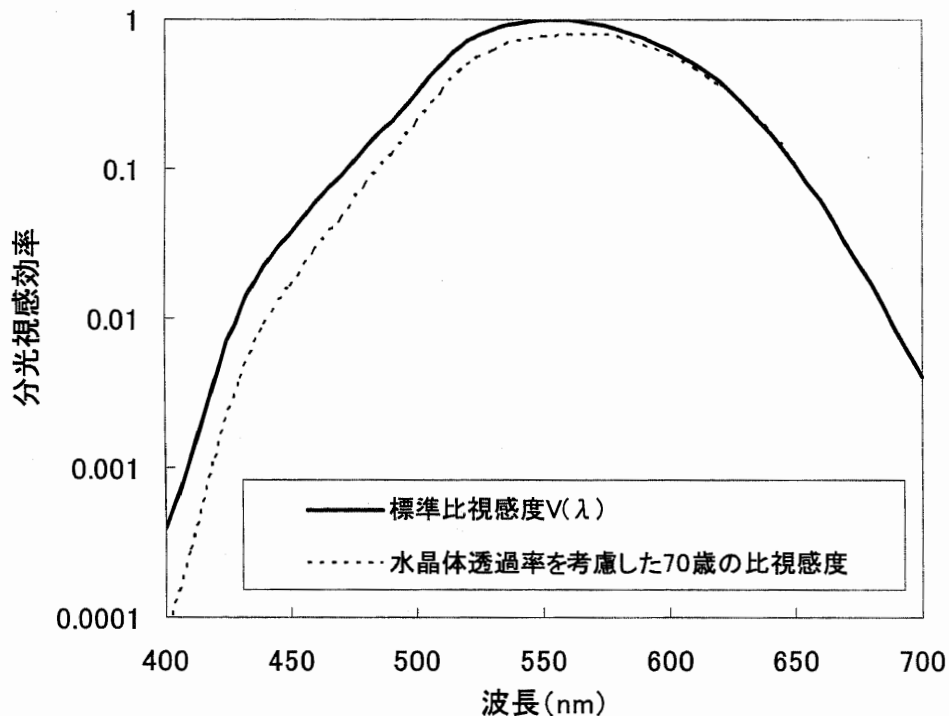


図 1.2 標準比視感度  $V(\lambda)$  (標準分光視感効率)と、水晶体の分光透過率の加齢変化を考慮した 70 歳の比視感度

### 1.2.2 光学的手法を用いた高齢者視覚模擬についての既存研究

高齢者に、製品の表示や配色、インタフェースのデザインが見やすいかどうかを視覚の加齢変化の影響を考慮して評価するために、若年者が高齢者の眼球光学系の加齢変化を光学デバイスを用いて擬似的に体験し、評価しようという研究がいくつか報告されている。

水晶体の黄変については、市販の黄色フィルタを使用して高齢者の視覚を模擬しようとした既存研究<sup>38,39)</sup>があるが、これらの研究で使用しているフィルタの分光透過率は高齢者の水晶体の分光透過率を模擬できるものではなく、それらの結果の信頼性は低い。一方で、岡嶋ら<sup>40,41)</sup>は、Pokornyら<sup>29,30)</sup>によって提唱された Two-Factor モデルに基づく高齢者の水晶体の分光透過率を模擬することが可能なフィルタ(以下、高齢者水晶体擬似フィルタと呼ぶ)を作製し、若年者がこのフィルタを使用して高齢者の色の見えを模擬できるかを検討した。その結果、十分な前順応を行えば、若年者は高齢者水晶体擬似フィルタを用いても色の見えが大きく変化せず、実際の高齢者での色の見えの実験結果と傾向が一致することが示された。この結果は、若年者が高齢者水晶体擬似フィルタを装着する際には、そのフィルタを通して見た環境にある程度の色順応を行う必要性を示している。また、高齢者の色の見えと傾向が一致したことは、高齢者の色の見えを補正する色恒常性メカニズムが関与している可能性を示唆している。また、Okajima ら<sup>42,43)</sup>の別の研究では、高齢者の色の見えの補償は、若年者がフィルタを装着した時に生じるような短時間の色順応ではなく、もっと長期間にわたる色の補償機構によるものであると報告されている。これらの報告は、主に高齢者の水晶体の分光透過率を正確に再現した場合の色の見えについての研究であり、視認性や視覚刺激に対する人間の時間的な反応を調査した研究ではない。すなわち、本研究以前には、高齢者の水晶体の黄変が製品の表示の視認性や高齢者の時間的な反応にどのような影響を与えるかという知見は得られていなかった。これは、製品の設計時に水晶体の黄変を考慮する場合、どのような配色にすれば視認性が確保できるのかや、製品の表示の配色に対して製品のインタフェースでの許容時間(例えば画面遷移の待ち時間をどの程度に設定すればいいかなど)をどのくらいに設定すればよいのかなどの知見がなかったということである。

一方、老人性縮瞳による網膜照度の減少を光学的に模擬する方法は、もっぱら若年者と高齢者の瞳孔面積を比較し、縮瞳による網膜への入射光量の減少を、減光フィルタを用いて模擬するという方法が取られている<sup>39)</sup>。この方法には 2 つの欠点がある。第一に、環境照度によって変化する高齢者の視覚特性を考慮していない。高齢者の色の見え、色弁別、コントラスト感度は、環境照度によって大きく変化することが報告されている<sup>37,44,45)</sup>。この事実を考えれば、高齢者の視覚を模擬する際には、環境照度を考慮し、そのときの環境照度に適合した模擬が必要であるといえよう。環境照度に伴って変化する視覚機能の 1 つは、瞳孔径の変化である。瞳孔の大きさは環境照度によって変化し、高齢者と若年者の瞳孔面積の差(もしくは比)は環境照度によって一定ではない。しかし、これまでの老人性縮瞳の模擬に減光フィルタを用いる手法では、減光フィルタの透過率は環境照度によらず

常に一定であった。これは、ある一定の環境照度下での縮瞳を模擬しているにすぎない。もし様々な照明環境下で老人性縮瞳を模擬しようとするれば、環境照度の変化に応じて模擬の特性を変化させられる模擬手法が必要である。第二の問題点は、若年者が減光フィルタを装着した場合に、減光フィルタによって若年者の眼に入る光量が減少し、それに対応して若年者の瞳孔が開くため、縮瞳によって減少すると見積もった光量より多くの光量が若年者の眼に入ってしまうことである。この問題を解決するには、フィルタを装着したときの若年者の瞳孔変化も加味しつつ光量を減少させるようなフィルタ透過率の設計が必要である。老人性縮瞳による網膜照度の減少を模擬するためには、この2つの問題を解決する必要がある。

### 1.3 用語の説明

以下に、本論文で扱う主な用語について説明する。

#### 輝度と実効輝度

輝度は、光源や面の明るさを表す心理物理量であり、標準観測者の比視感度(CIE が定義した標準分光視感効率  $V(\lambda)$ )を基に計算される測光量の1つである。輝度は(1.1)式のように定義される。CIE が標準比視感度を定義するのに用いたデータでは標準観測者の年齢はおよそ 32 歳であり、加齢による眼球光学系の光学的な変化(水晶体の黄変、瞳孔面積の変化など)に伴い、分光視感効率(比視感度)が変化するので、同じ輝度の光でも年代や個人によって明るさの感じ方が異なる。そこで、(1.2)式に示すように、加齢による眼球光学系の透過率の変化率や、本研究で若年者が装着する高齢者の眼球光学系の透過率を模擬する光学フィルタの透過率を、輝度を定義する(1.1)式に乗じた値を実効輝度と定義する。また、本論文で、被験者が装着する光学フィルタを通して対象物の輝度を輝度計で測定した場合も、上記の定義と等価な値が測定されると考え、実効輝度と呼ぶこととする。

CIE が標準比視感度を定義するのに用いたデータでは標準観測者の年齢はおよそ 32 歳と考えられるが、本論文では本研究に参加した若年被験者は標準分光視感効率を持っていると仮定する。つまり、若年被験者の実効輝度は輝度と等価であると考ええる。

$$\text{輝度: } L = K_m \int L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1.1)$$

ここで、 $K_m$ : 最大視感度(683lm/W)

$L_{e,\lambda}$ : 分光放射輝度

$V(\lambda)$  標準比視感度(標準分光視感効率)



$\lambda$ : 波長

$$\text{実効輝度: } L' = K_m \int L_{e,\lambda} \tau(\lambda) V(\lambda) d\lambda = K_m \int L_{e,\lambda} V_a(\lambda) d\lambda \quad (1.2)$$

ここで、 $V_a(\lambda) = \tau(\lambda) V(\lambda)$

$V_a(\lambda)$ : 加齢効果を考慮した比視感度

$\tau(\lambda)$ : 加齢による眼球光学系の透過率の変化量、または本論文  
中で用いられる高齢者の眼球光学系の透過率を模擬する  
光学フィルタの透過率

### 実効輝度コントラスト

実効輝度から算出した輝度対比である。本論文で実効輝度コントラスト、輝度コントラストは、マイケルソンコントラストで示している。マイケルソンコントラストは、 $C = (L - L_b) / (L + L_b)$  で定義される。 $L$  は対象の輝度を、 $L_b$  は背景の輝度を示す。

### 色度と実効色度

色度は、光源や面の色を表す心理物理量であり、標準観測者の等色関数(CIE が定義した  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ ) を基に計算される測光量である。本研究では CRT 上に表示した刺激を用いるため、刺激の色度は光源の色度を扱う際に一般的に用いられる CIE1976UCS ( $u', v'$ ) 色度図を用いた。CIE1976UCS ( $u', v'$ ) 色度図は、色度図上の全ての個所において、輝度の等しい色の感覚差が図上の幾何学的距離にほぼ比例するように意図して目盛を定めた色度図である。色度座標( $u', v'$ ) は、(1.3)式に示す三刺激値  $X, Y, Z$  をもとに(1.4)式によって求められる。

実効輝度の定義の場合と同様に、等色関数も標準観測者を仮定して定義されているが、加齢の眼球光学系の光学的な変化(水晶体の黄変、瞳孔面積の変化など)に伴い、等色関数が増加するので、同じ色度の光でも年代や個人によって色の感じ方が異なる可能性がある。そこで、眼球光学系の加齢変化に伴う等色関数の変化を考慮し、網膜に到達する光の減少率や、本研究で若年者が装着する光学フィルタの透過率を通常の三刺激値の定義式((1.3)式)に乗じて計算した三刺激値  $X', Y', Z'$  ((1.5)式)を(1.4)式に代入して得られた色度値を実効色度と呼ぶこととする。また、本論文で、被験者が装着する光学フィルタを通して対象物の色度を色彩輝度計で測定した場合も、上記の定義と等価な値が測定されたと考え、その測色値を実効色度と呼ぶこととする。

本論文では本研究に参加した若年被験者の色覚は標準等色関数の特性に基づいていと仮定する。つまり、若年被験者の実効色度は CIE1976UCS 色度と等価であると考え

る。

$$\begin{cases} X = K_m \int L_{e,\lambda} \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = K_m \int L_{e,\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = K_m \int L_{e,\lambda} \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\ v' &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\begin{cases} X' = K_m \int L_{e,\lambda} \tau(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda = K_m \int L_{e,\lambda} \bar{x}'(\lambda) d\lambda \\ Y' = K_m \int L_{e,\lambda} \tau(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda = K_m \int L_{e,\lambda} \bar{y}'(\lambda) d\lambda \\ Z' = K_m \int L_{e,\lambda} \tau(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda = K_m \int L_{e,\lambda} \bar{z}'(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (1.5)$$

### 実効色差

実効色差は、実効色度から算出した色差である。色差は、 $L^*u^*v^*$  色差を用いた。 $L^*u^*v^*$  色差は(1.6) 式で定義される。実効色度を(1.6) 式に代入して計算した色差が実効色差  $dE$  である。

$$\Delta E^*_{uv} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \quad (1.6)$$

$\Delta L^*$ 、 $\Delta u^*$ 、 $\Delta v^*$  は色度座標  $L^*$ 、 $u^*$ 、 $v^*$  の差であり、色度座標  $L^*$ 、 $u^*$ 、 $v^*$  は次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 \quad \text{ただし } \frac{Y}{Y_0} > 0.008856 \\ u^* &= 13L^* (u' - u'_0) \\ v^* &= 13L^* (v' - v'_0) \end{aligned}$$

ここで、 $Y_0$ 、 $u'_0$ 、 $v'_0$  は完全拡散面の  $Y$ 、 $u'$ 、 $v'$  座標値であり、本研究では、CRT のに表示される白色の最大輝度での  $Y$ 、 $u'$ 、 $v'$  座標値とした。

### 網膜照度

網膜上の単位面積にどのくらいの光束が入射しているかを示す値である。網膜照度は、

網膜上の照度を表すものとして導入されたが、その絶対値は眼球光学系の透過率などの特性に依存するために、「Troland(トロランド)」と呼ばれる相対値が一般的に用いられる。相対値としての眼球照度(Troland)  $e$  は、 $e = L \times S$  ( $L$  は視対象の輝度、 $S$  は瞳孔面積) で定義される。しかし、本論文では眼球内の透過率も含めて網膜照度を議論するため、本論文内で「網膜照度」は、網膜上の単位面積に入射している光束の絶対値を意味する用語として用いる。

#### 1.4 本研究の目的と本論文の概要

本研究では、高齢者対応製品における表示やヒューマンマシンインタフェースの設計評価に利用することを目的とし、高齢者の眼球光学系の加齢変化を光学的に模擬する手法について検討した。視覚の加齢効果については、特に高齢者の視認性に対する影響が大きい加齢要因である水晶体の黄変と老人性縮瞳に注目した。

水晶体の黄変については、黄変した水晶体と等価な分光透過率を持つ光学フィルタを用い、高齢者の視認性を模擬する可能性について検討した。評価指標として、反応時間、認知時間(事象関連電位 P300 潜時)、主観評価を計測した。これらの評価指標が、人間の色刺激に対する反応にどのような影響があるかについて明らかにし、この模擬手法の有効性について検討した。また、網膜上での実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差によって、評価指標(反応時間、認知時間)を予測するモデル式を導出した(第2、3章)。

老人性縮瞳については、環境照度を考慮した模擬手法を確立し、老人性縮瞳が反応時間、認知時間に与える影響について検討することを目的とした。環境照度を考慮した老人性縮瞳模擬フィルタを設計するために、若年者、高齢者の瞳孔面積を広範囲の環境照度に対して測定し、縮瞳特性を定式化した。得られた縮瞳特性から、各環境照度下での老人性縮瞳による網膜照度の減少率を算出し、模擬フィルタの透過率を環境照度の関数として導出した。得られた結果を用いて、周囲の環境照度をセンシングしながらその照度に応じて眼への入射光量をリアルタイム制御する老人性縮瞳模擬フィルタを開発した。また、老人性縮瞳による網膜照度の減少が反応時間、認知時間に与える影響を見積もり、本手法の有効性について検討した。最後に、水晶体の黄変と老人性縮瞳の2つの模擬手法を組み合わせ、光学的な高齢者視覚模擬ツールとして高齢者視覚模擬ゴーグルを試作し、その有用性、応用方法について検討した(第4、5章)。

#### 1.5 本研究の意義

本研究を実施した意義として、以下の3点があげられる。

第一に、光学的手法を用いて若年者が高齢者の視覚特性を模擬することで、簡便に視認性や反応を評価する方法が確立され、高齢者対応製品、UD 製品の開発を効率よく行うことが可能となる。高齢者が低照度下で見えにくさを訴えていることは知られていたが、環境照度を考慮した模擬手法は存在しておらず、環境照度に応じた高齢者視覚の模擬を実現したのは本研究が最初である。また、反応時間、認知時間といった高齢者の時間的な反応について実験的な根拠がある評価方法は他にはなく、本研究では信頼性が高く応用価値のある高齢者視覚模擬手法が確立されている。

第二に、模擬の妥当性を評価した実験結果を解析することで、網膜上の実効輝度・実効輝度コントラスト・実効色差から反応時間・認知時間を予測するモデル式が示される。この結果により、製品のインタフェースにおける表示の設計値(輝度、明度、色度)から、人間の時間的な反応を予測することが可能となる。

第三に、眼球光学系の加齢変化(水晶体の黄変と、老人性縮瞳による網膜照度の減少)が、高齢者の視認性、反応時間、認知時間におよぼす影響が明らかにされる。高齢者を対象とした実験を行う場合に、高齢者から得られるデータは、眼球光学系の加齢変化と、神経系の加齢変化の両者の影響を受けた結果であり、どちらか片方の加齢変化だけを抽出することは難しい。本研究では、若年者が水晶体の黄変と老人性縮瞳による網膜照度の減少だけを模擬した状態で実験を行っているため、水晶体の黄変と老人性縮瞳による網膜照度だけを受けた人間の反応が計測される。このデータは、高齢者の反応から神経伝達系や脳内の視覚情報処理の加齢変化を切り分けて解析する上で、学術的にも重要であると考えられる。

## 2 高齢者の水晶体の黄変を光学的に模擬した場合の反応時間・反応速度の変化

本章では、高齢者の水晶体の黄変について、若年者の網膜に到達する光の分光分布が高齢者と等価になるような光学フィルタを用いることで、高齢者の色刺激に対する反応が評価できるかを検討した内容について述べる。反応時間、反応速度(反応時間の逆数)、主観評価を指標として、高齢者と若年者、および若年者がフィルタをつけた場合の反応の比較を行う。その結果として、視認性の主観評価値は、フィルタをつけない若年者と高齢者で傾向が異なるが、フィルタをつけた若年者と高齢者は一致し、このフィルタが高齢者の視認性を定量的に評価できるツールであることを示す。また、フィルタをつけた若年者と高齢者で反応速度が遅くなる色は一致するが、どの刺激色に対しても全体的に高齢者の反応速度が遅いことから、若年者がこのフィルタを用いることで高齢者の表示に対する反応を定性的に評価できることを述べる。また、データの解析結果から、網膜上の刺激色の実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差から反応速度を予測できる重回帰式が得られた。

### 2.1 目的

高齢者の水晶体の黄変を、若年者の網膜に到達する光の分光分布が高齢者と等価になる光学フィルタを用いて模擬することで、高齢者の色刺激に対する反応が評価できるかを検討した。反応時間、無反応率、反応速度と主観評価を評価の指標とし、CRT ディスプレイ上の色ランドルト環刺激に対する若年者と高齢者の反応と、若年者がフィルタを装着した際の反応について比較、検討を行った。また、水晶体の黄変によって変化する網膜上の刺激の実効輝度や実効色度が、これらの指標に与える影響について検討した。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 水晶体の分光透過率の加齢変化と高齢者水晶体擬似フィルタ

Pokorny ら<sup>29,30)</sup>は、水晶体の光学濃度の加齢変化を年齢の関数として定式化した Two-factor model を提案している。Two-factor model を(2.1)式に示す。 $D$ は光学濃度、 $A$ は年齢、 $\lambda$ は波長、 $TL_1(\lambda)$ 、 $TL_2(\lambda)$ は定数項である。この光学濃度から(2.2)式で水晶体の分光透過率  $\tau(\lambda, A)$  を計算することができる。(2.2)式から計算した各年代の水晶体の分光透過率を図 2.1 に示す。



$$D(\lambda, A) = \{1.00 + 0.02(A - 32)\}TL_1(\lambda) + TL_2(\lambda) \quad \text{for } 20 < A < 60$$

$$D(\lambda, A) = \{1.56 + 0.0667(A - 60)\}TL_1(\lambda) + TL_2(\lambda) \quad \text{for } A \geq 60 \quad (2.1)$$

$$\tau(\lambda, A) = 10^{-D(\lambda, A)} \quad (2.2)$$

本研究で用いた高齢者水晶体擬似フィルタは、この Two-factor model から計算された分光透過率に基づき、20歳の若年者が高齢者(70歳)の水晶体の分光透過率を模擬できるよう、図 2.1 で 70歳の分光透過率を 20歳の分光透過率で除した分光透過率を持つよう設計されている<sup>40,41)</sup>。このため、20歳の若年者が、フィルタを装着することにより、70歳の分光透過率を体験することになる。高齢者水晶体擬似フィルタの分光透過率の理論値と実測値を図 2.2 に示す。実験では、このフィルタを眼鏡のフレームに取り付け(図 2.3)、実験中に実験手順に従って若年被験者に装着させた。

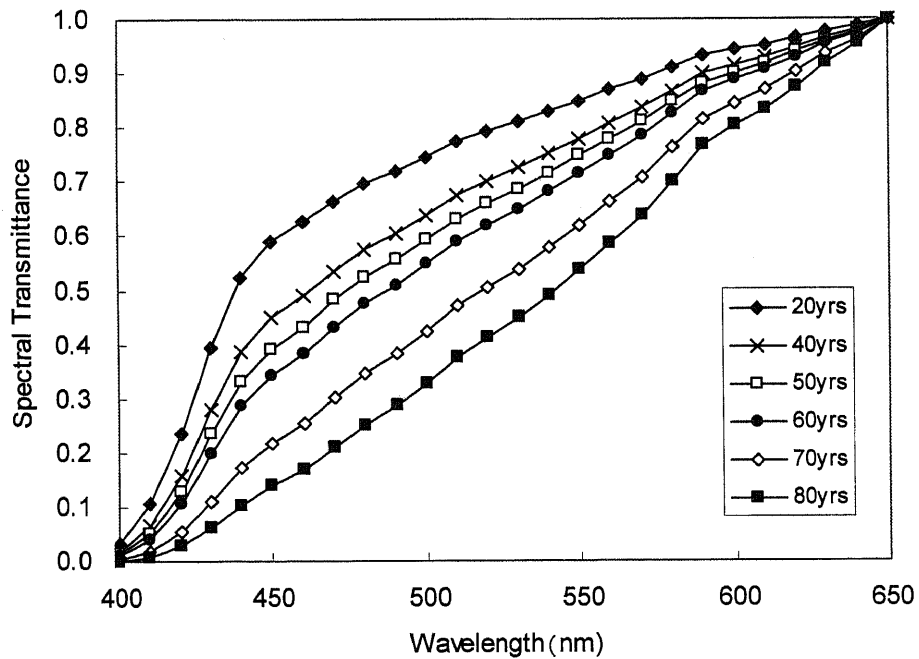


図 2.1 Two-factor model に基づいて計算した各年代の水晶体の分光透過率

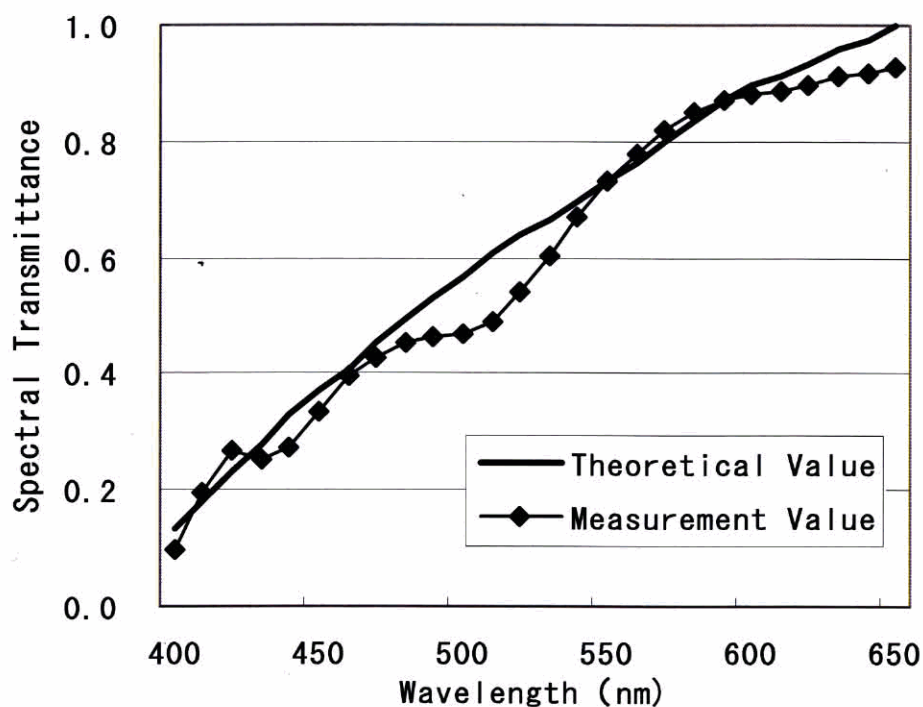


図 2.2 Two-factor model に基づいて計算した 20 歳が 70 歳の水晶体の黄変を模擬する場合の分光透過率(太線)。実験に用いた高齢者水晶体擬似フィルタの分光透過率の実測値(◆)



図 2.3 メガネフレームに取り付けた高齢者水晶体擬似フィルタ。実験では若年者が装着し、高齢者の視覚を模擬できるかを評価。

### 2.2.2 実験配置

図 2.4 に実験配置を示す。被験者は実験室内のイスに座り、1m 前方に置かれた映り込み防止フード付の刺激提示用 CRT ディスプレイ(SONY CPD-G520)を観察した。刺激画像は、コンピュータ(NEC MateNX MA45J and MULTI STIM BOX MB-71)によって制御され、この CRT ディスプレイに提示された。

被験者は、押しボタンを持ち、標的刺激が提示されたときにボタンを押して応答するよう要求された。その時の反応の有無と反応時間(刺激が提示されてからボタン押しまでの時間)を測定した。測定した応答時間の誤差は 2ms 以内であった。

実験は、一般的なオフィス用蛍光灯(松下電工製 FLR40SWMX36、色温度 4200K)照明下で行い、被験者頭部高さの水平照度は約 500lx であった。

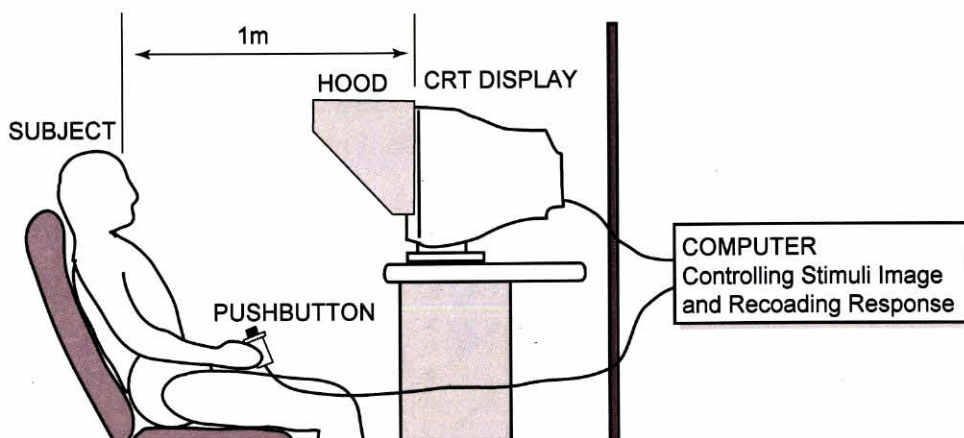


図 2.4 実験配置

### 2.2.3 被験者

実験には、8 名の高齢者(平均年齢 65.9 歳)と、8 名の若年者(平均年齢 22.3 歳)が参加した。全ての被験者について、眼の疾病に対する既往歴がないことを実験前に口頭で確認し、色覚が正常であることを東京医大式色覚検査表(村上色彩研究所製)を用いて確認した。被験者のうち視力矯正が必要な高齢者、若年者各 6 名は、被験者が日常生活で用いている視力矯正具(メガネ、コンタクトレンズなど)を装着し実験に参加した。被験者の平均年齢、平均視力(3m 視力)は表 2.1 に示すとおりである。被験者には実験前に実験の目的を説明し、書面で実験参加の同意を得た。被験者には実験後に謝金が支払われた。

表 2.1 参加した被験者の数 N、平均年齢、3m 視距離での平均視力と標準偏差  
(カッコの中はスネレン視力)

	N	Age	Visual Acuity	
			Right	Left
Young Subjects	8	22.3±1.4	1.1(9.84/8.8)±0.3	1.1(9.84/8.8)±0.3
Elderly Subjects	8	65.9±3.9	0.7(9.84/14.1)±0.3	0.7(9.84/14.1)±0.3

## 2.2.4 刺激

刺激画像の形状はランドルト環とし、そのランドルト環の色を刺激色として変化させた。ランドルト環のサイズは視距離 1m で視力 0.1 相当の大きさ(画面上の大きさは、高さ 15 mm、太さ 3mm、開口部幅 3mm)で、開口部の向きが上下左右にある 4 種類を用いた。被験者の視力がうまく矯正されない場合でも網膜像の光学ボケが無視できるように、ランドルト環の大きさは被験者の平均視力(若年者 1.1、高齢者 0.7)よりも十分大きい 0.1 のサイズを選択した。ランドルト環の色(刺激色)は、灰、赤、黄、緑、青の 5 種類である。刺激画像の背景は灰色とし、刺激色は、以下のように決定した。

- i) 刺激色と背景色の輝度コントラストを約 0.05 とした。ここで、輝度コントラスト  $C$  は、マイケルソンコントラストである。
- ii) 刺激色が黄色のランドルト環については、フィルタ透過後および高齢者の水晶体を通った後の網膜上での実効輝度コントラストが低くなるように、背景より低い輝度とした(負のコントラスト)。それ以外の刺激色の輝度は、背景色よりも高かった(正のコントラスト)。各刺激色の高齢者に対する実効輝度は、高齢者水晶体擬似フィルタを通して輝度計を用いて測定した。
- iii) 有彩色の色度は、CIE1976UCS ( $u^*v^*$ ) 色度図上で背景色との色差が約 0.65 になるように調整した。

表 2.2 に、色彩輝度計(BM-7、トプコン製)を用いて CRT 上に表示された刺激画像を測定して得られた刺激色、背景色の輝度  $L$ 、色度( $u^*, v^*$ ), ( $x, y$ )、刺激色と背景色の輝度コントラスト  $C$  を示す。

表 2.2 実験に用いた、刺激色、背景色の輝度  $L$ 、色度  $(u', v'), (x, y)$ 、刺激色と背景色の輝度コントラスト  $C$

Color	$L$ ( $\text{cd/m}^2$ )	$C$	CIE1976UCS		CIE1931	
			$u'$	$v'$	$x$	$y$
Gray	6.616	0.050	0.178	0.481	0.298	0.358
Red	6.627	0.051	0.241	0.494	0.391	0.357
Yellow	5.392	-0.052	0.184	0.544	0.376	0.495
Green	6.647	0.052	0.142	0.529	0.291	0.482
Blue	6.647	0.052	0.173	0.420	0.246	0.266
Background	5.984		0.179	0.481	0.300	0.358

### 2.2.5 実験手順

被験者は、実験室に入室後、図 2.4 に示したイスに座り、CRT ディスプレイを見た。被験者のうち視力矯正が必要な高齢者、若年者各 6 名は、被験者が日常生活で用いている各人のメガネまたはコンタクトレンズを用いた。若年者は、実験中に高齢者水晶体擬似フィルタを装着できるよう、視力矯正具としてコンタクトレンズのみ使用した。

刺激画像は CRT ディスプレイ中央に一つずつランダムな順序で提示され、被験者には指示された向きのランドルト環(標的刺激)が表示されたらボタンを押す odd-ball 課題<sup>46)</sup>を与えた。刺激の提示時間は 800ms とし、一定のリズムで反応しないように提示間隔は  $2500\text{ms} \pm 300\text{ms}$  の間でランダムに変化させた。1 つの刺激色に対する 1 系列の試行での刺激提示回数は 60 回(うち標的刺激 15 回)とした。

高齢被験者の実験手順を 図 2.5 (a) に示す。被験者は、実験室に入室し、タスクの練習を行い、目をあけたままで 2 分間安静を取った。その後、5 種類の刺激色について測定を行った。各刺激色に対する 60 回の試行を 1 ブロックと呼び、すべての刺激色に対する 5 つのブロックの集まりを 1 セッションと呼ぶこととする。各ブロック内の各試行に対し、反応の有無と反応時間の測定を行った。同一のブロック内では刺激色は同じとし、セッション中に提示する刺激色の順序は被験者ごとランダムとした。被験者には、各ブロックの終了後に、表 2.3 に示す 6 段階の視認性評価尺度を用い刺激の判別しやすさを回答させた。

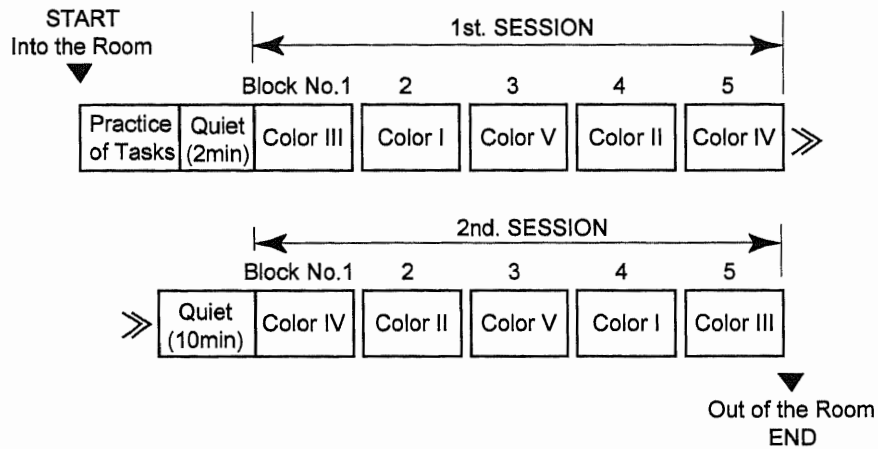
高齢被験者は最初のセッションを終了後、目をあけたままで 10 分間の安静を取り、同様に 5 つのブロックについて実験を行った(第 2 セッション)。刺激色の提示順が実験結果



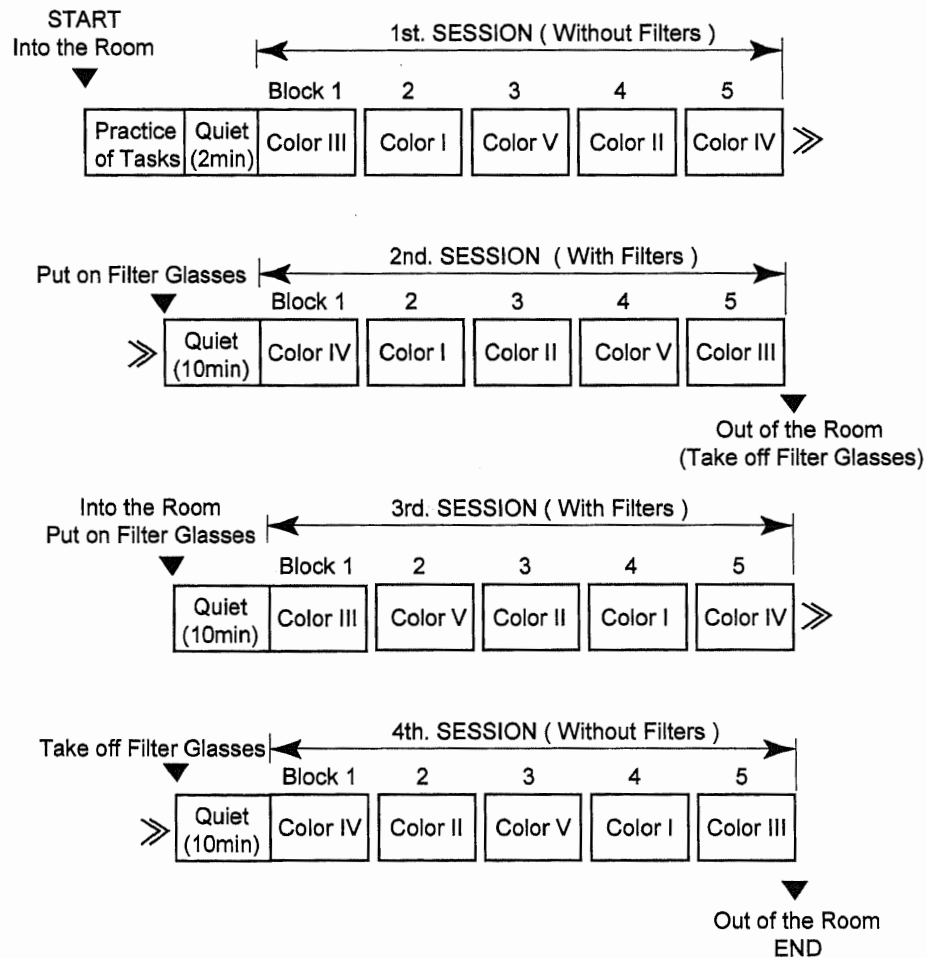
に及ぼす影響を除去するため、第 2 セッションでの刺激色の提示順は第 1 セッションの提示順の逆とした。

若年被験者の場合の実験手順を 図 2.5(b) に示す。若年被験者の場合は、第 1 セッションが終了した後に、高齢者水晶体擬似フィルタを取り付けたメガネを装着し、目をあけたままで 10 分間安静を取り、フィルタを取り付けた状態で目を順応させ、フィルタをつけたままで第 2 セッションを行った。第 2 セッション終了後、フィルタを外して実験室を退出し、控え室で 30 分程度休憩した。休憩後、再度、実験室に入室し、フィルタを装着して、目をあけたままでフィルタを取り付けた状態で 10 分間の順応を行った後、第 3 セッションを行った。第 3 セッション終了後、フィルタを外して 10 分間安静にし目を順応させ、第 4 セッションを行って実験を終了した。刺激色の提示順が実験結果に及ぼす影響を少なくする目的で、第 3 セッション、第 4 セッションでの刺激色の提示順は、第 2 セッション、第 1 セッションの提示順の逆とした。

実験に要した時間は、高齢被験者では被験者 1 人当たり 1 時間程度、若年被験者では被験者 1 人当たり 2 時間程度であった。



(a) 高齢被験者の実験手順



(b) 若年被験者の実験手順

図 2.5 実験手順: 刺激色の提示順は一例。各タスクの間には 1 分間の休憩を含む。

表 2.3 視認性評価尺度

6	非常に判別しやすい
5	判別しやすい
4	苦勞せず判別できる
3	多少判別しにくいだが判別できる
2	やっとな判別できる
1	判別できない

### 2.2.6 主観評価尺度

実験での各ブロックの終了後に、表 2.3 に示す視認性評価尺度を用いて、刺激の判別しやすさを被験者に回答させた。この尺度は、佐藤ら<sup>47)</sup>の文章の読みやすさ評価に関する既存研究で用いられた評価尺度を改良したものである。彼らは、1m 視距離での日本語の文章に対して読みやすさ評価を行っている。その実験では、「読めない」、「やっとな読める」、「多少読みにくいを読める」、「苦勞せずに読める」、「読みやすい」、「非常に読みやすい」の 6 段階の評価カテゴリに基づき被験者に読みやすさを評価させている。そして、その評価値と、文章の背景輝度や文字サイズを比較し分析している。また、岩井ら<sup>28)</sup>は、この実験結果を詳細に分析し、文字の輝度、背景輝度、文字の大きさと読みやすさ評価値の関係を導出している。以上のことから、この評価尺度は、視覚刺激の測光量と比較するのに適切だと考え、本研究で使用した。本研究では、視覚刺激が文章でなくランドルト環だったため、視認性評価尺度の言葉を「読む」ではなく「判別する」に置き換え、表 2.3 に示した 6 段階の評価尺度として用いた。

## 2.3 結果

### 2.3.1 反応時間

若年者が高齢者水晶体擬似フィルタを装着しない場合(若年者フィルタ無)、若年者が高齢者水晶体擬似フィルタを装着した場合(若年者フィルタ有)、高齢者の場合における、刺激色に対する反応時間の測定結果を図 2.6(a)～(c)に示す。標的刺激が提示されても被験者が反応しない無反応の場合は、反応時間が計測されないため、図 2.6 の結果には含まれていない。若年者フィルタ無の結果(図 2.6(a))では、刺激提示からボタン押しまでに要した反応時間はおよそ 370～670ms で、被験者による反応時間の違いは最大で約 250ms 程度であった。若年者フィルタ有の結果(図 2.6(b))では、赤、黄色の刺激色に対

する反応時間はフィルタを装着しない場合(図 2.6(a))と比較してほとんど変化がないが、緑、青、灰色の刺激色に対する反応時間は増加し、被験者間のばらつきも大きくなった。高齢者の結果(図 2.6(c))は、若年者の結果(図 2.6(a)、(b))と比較して反応時間が大きく増加し、刺激提示後からボタン押しまでにおよそ 500~900ms 以上要したことを示している。また、刺激色による反応時間の違いも大きく、灰色と青の刺激色に対する反応時間が特に長くなった。

各被験者カテゴリにおける反応時間の平均値と標準偏差を図 2.6(d)に示す。若年者フィルタ無の場合の反応時間の平均値はおよそ 450~500ms である。高齢者はどの各刺激色の場合でも若年者に比べて反応時間が長く、平均値でおよそ 600~800ms であった。刺激色による違いをみると、若年者フィルタ無では色による反応時間の差が 100ms 以内であった。高齢者は若年者フィルタ無と比べて、特に灰色と青の刺激色に対する反応時間が他の刺激色より約 100~200ms 程度長くなった。若年者がフィルタを装着した場合の変化を見てみると、若年者フィルタ有の場合の反応時間の平均値は、赤、黄、緑の刺激色に対してはフィルタ無しの場合と比較して数十 ms 長くなったただけだったが、灰色と青の刺激色に対する反応時間は若年者フィルタ無と比較して約 100ms 前後長くなった。色による反応時間の違いは高齢者と同様の傾向が示され、この結果は、高齢者水晶体擬似フィルタを用いて高齢者の反応時間を定性的に模擬できることを示している。

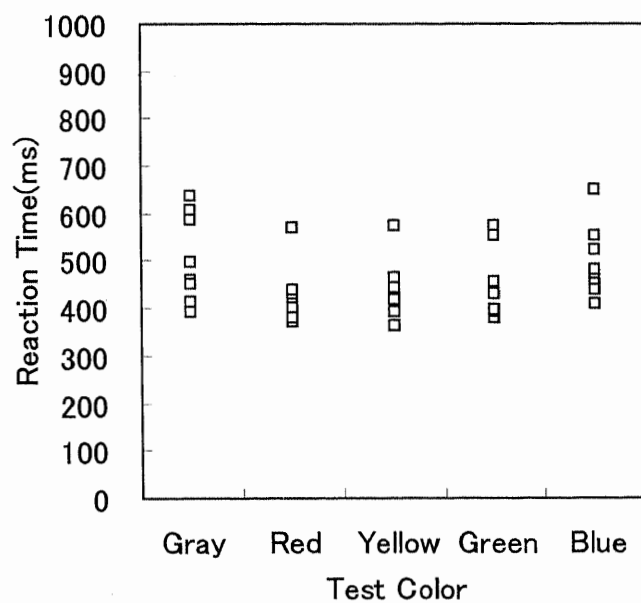


図 2.6(a) 若年者フィルタ無の刺激色に対する反応時間の測定結果

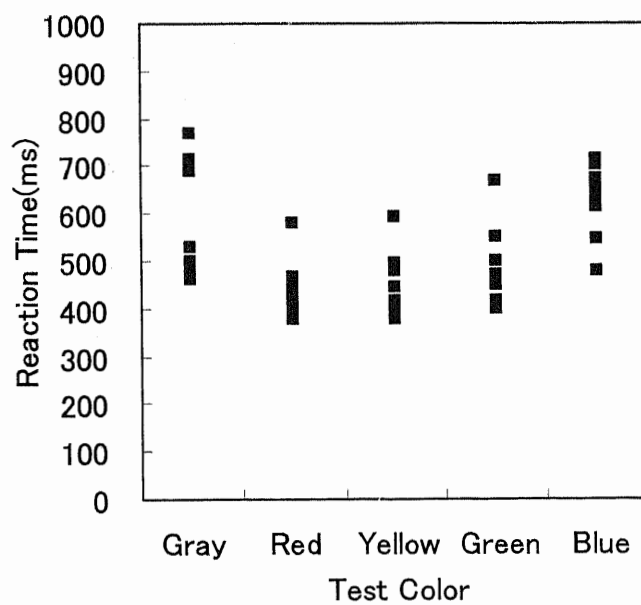


図 2.6(b) 若年者フィルタ有の刺激色に対する反応時間の測定結果

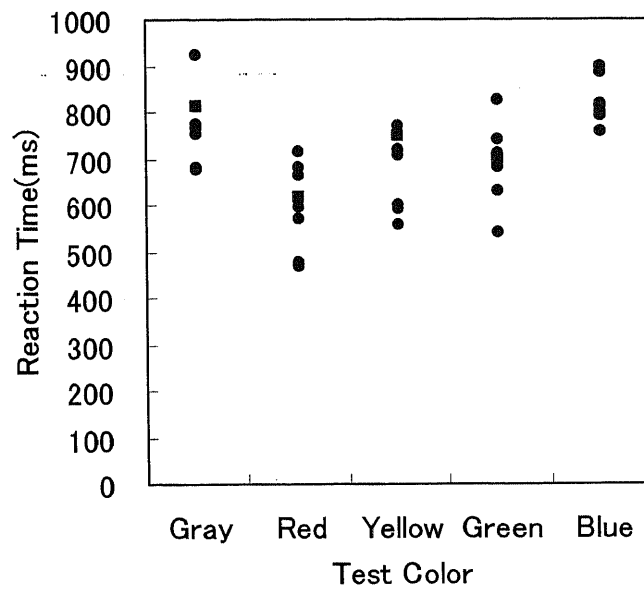


図 2.6(c) 高齢者の刺激色に対する反応時間の測定結果

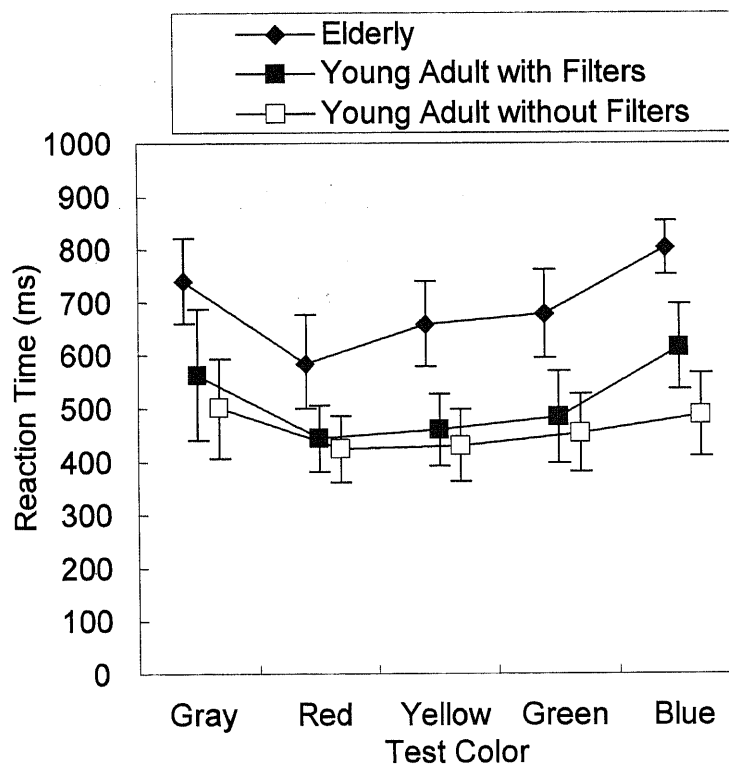


図 2.6(d) 刺激色に対する各被験者カテゴリの平均反応時間

### 2.3.2 無反応率

無反応の数を標的刺激の数で割った値を無反応率とし、刺激色ごとの各被験者カテゴリの平均値を図 2.7 に示す。若年者フィルタ無では、無反応率はどの色でも 3%以下である。それに対し、高齢者は色によって無反応率が大きく異なった。灰色と青の刺激色で無反応率は 50%を超え、逆に赤の刺激色での無反応率は 10%以下であった。表 2.2 に示したように、どの色の刺激も刺激色と背景色の輝度コントラストと色差はほぼ一定であり、なおかつ若年者の無反応率が低かったにもかかわらず、高齢者では刺激色によって視認性に変化が生じていることを示している。一方、若年者フィルタ有も、灰色と青の刺激色で 10%以上の無反応率を示し(他の色の無反応率は 1%以下であった)、灰色と青の刺激色で無反応率が高いという、高齢者と同様の傾向を示した。

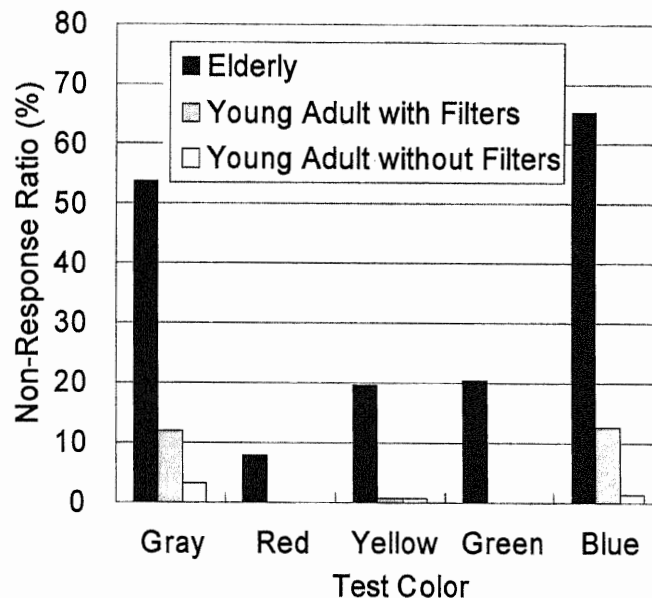


図 2.7 刺激色に対する各被験者カテゴリの無反応率

### 2.3.3 反応速度

次に、反応時間に無反応のデータを加えて評価するために、反応速度を計算した。反応速度は、1 秒間に反応できる刺激の数と定義し、反応時間の逆数として計算した。無反応の場合には、反応時間は無限大と仮定して反応速度を 0 とし、反応があった場合と合わせて集計した。若年者フィルタ無、若年者フィルタ有、高齢者での刺激色に対する反応速度を図 2.8(a)～(c)に、各被験者カテゴリでの反応速度の平均値と標準偏差を図 2.8(d)に示す。若年者フィルタ有の場合の灰色と青の刺激色に対する反応速度は、若年者フィ

ルタ無の結果と比較して低下した。若年者フィルタ有の刺激色による反応速度の違いの傾向は、高齢者の場合と同じであった。しかし、高齢者の反応速度は、若年者フィルタ有の場合より遅く、絶対値は一致しなかった。

若年者がフィルタをつけた場合の反応速度が、つけていない場合とどのように違うのかをさらに詳しく調べるために、刺激色ごとにフィルタをつけた場合とつけない場合の反応速度を Wilcoxon 符号付順位和検定<sup>48,49)</sup>を用いて比較した。比較の結果得られた  $p$  値を表 2.4 に示す。青の刺激色の場合にのみ、フィルタ有の反応速度はフィルタ無の場合と比較して有意に遅いことが示された ( $p < 0.027$ )。

次に、被験者の各カテゴリ(高齢者、若年者フィルタ有、若年者フィルタ無)内での刺激色による反応速度の差について統計的に検討した。それぞれの被験者カテゴリ内における各刺激色の反応速度に対し、Friedman 検定<sup>48)</sup>で多重比較を行い、刺激色間の反応速度に有意差があることが確認された場合には post-hoc 検定として Wilcoxon 符号付順位検定を用い、各刺激色の結果について個別に比較を行った。多重比較を行う場合には、第 1 種の過誤が生じることを考慮して比較した。今回の場合では、5 つの刺激色があるため、多重比較の組み合わせは、 $(5 \times (5 - 1) / 2) = 10$  通りの組み合わせが考えられる。もし、5%の有意水準 ( $p < 0.05$ ) で多重比較結果を判定したとすると、約 50% ( $p < 0.5 = 0.05 \times 10$ ) の有意水準の検定を行うことになってしまう。そのため、多重比較を行う場合には、適切な多重比較法を用いる必要がある。そこで、今回の結果の多重比較には Bonferroni の補正法<sup>50)</sup>を用いた。Bonferroni の補正法を用いることで、第 1 種の過誤が有意水準を超えない  $p$  値を決めることができる。Bonferroni 補正法では、各比較検定の有意水準は、本来の有意水準を比較する組み合わせの数で割った値とする。今回は 10 個の組み合わせがあったので、有意水準  $\alpha$  を 5% とするとき、 $p < 0.005 (= 0.05 / 10)$  とした。

表 2.5 に、各被験者カテゴリ内での刺激色に対する反応速度の違いについて、上記の統計的手法で比較した  $p$  値を示す。若年者フィルタ無(表 2.5(a))の結果では、どの刺激色間にも反応速度に有意差はなかった ( $p > 0.015$ 、有意水準  $\alpha > 0.15$ )。しかしながら、高齢者の場合(表 2.5(c))では、灰色と青の刺激色に対する反応速度が、赤、黄、緑の刺激色に対する反応速度に比べ有意に遅かった ( $p < 0.005$ 、有意水準  $\alpha < 0.05$ )。若年者フィルタ有の場合では、有意水準を 12% ( $p < 0.012$ 、 $\alpha < 0.12$ ) とすると、有意差がある刺激色の組み合わせ(灰色 $\leftrightarrow$ 赤と、青 $\leftrightarrow$ 赤、緑、黄)は、高齢者で有意差のある刺激色の組み合わせと同一であった。若年者フィルタ無(表 2.5(a))では、同様の傾向は見られなかった。若年者フィルタ有の他の刺激色間の比較では、有意差はなかった ( $p > 0.027$ 、 $\alpha > 0.27$ )。つまり、若年者フィルタ有の時に他の刺激色に比べて反応速度が有意に遅くなる刺激色は、高齢



者の場合に反応時間が有意に遅くなる刺激色と一致することが分かった。以上の結果は、高齢者水晶体擬似フィルタを用いることで、高齢者の反応速度を定性的に評価できることを示している。

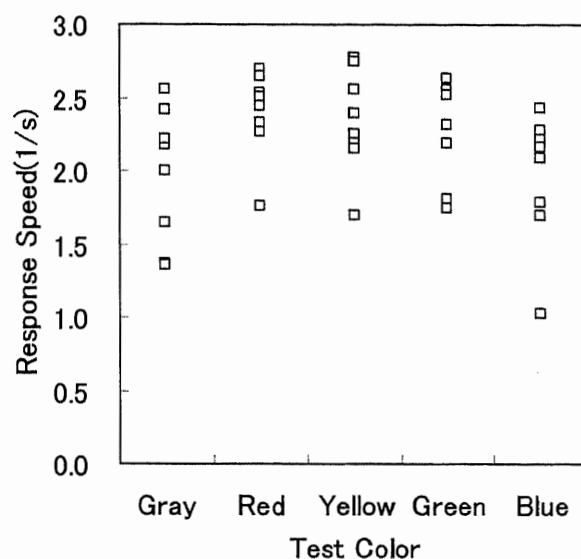


図 2.8(a) 若年者フィルタ無の刺激色に対する反応速度

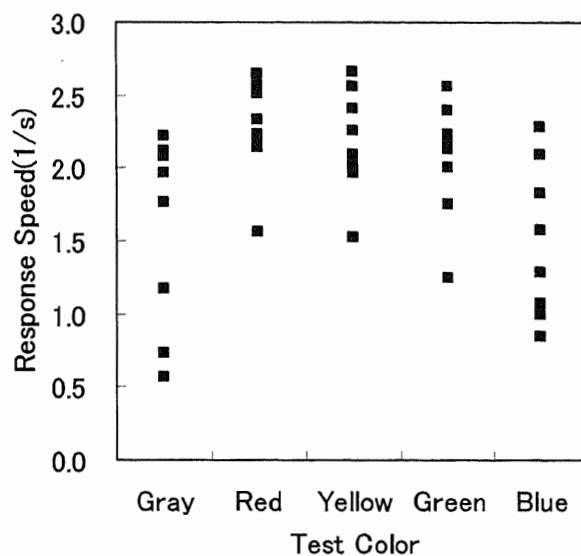


図 2.8(b) 若年者フィルタ有の刺激色に対する反応速度

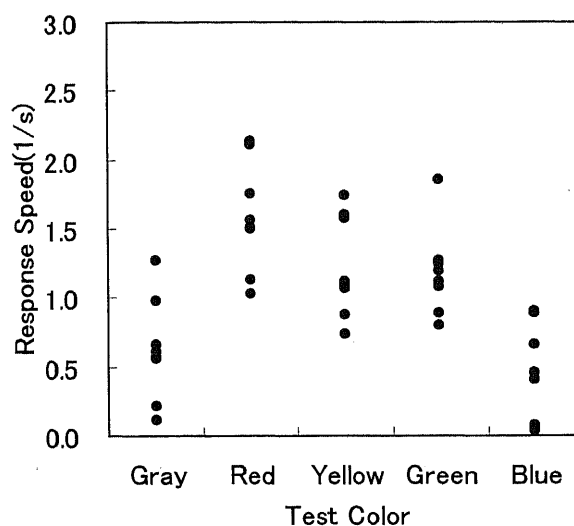


図 2.8(c) 高齢者の刺激色に対する反応速度

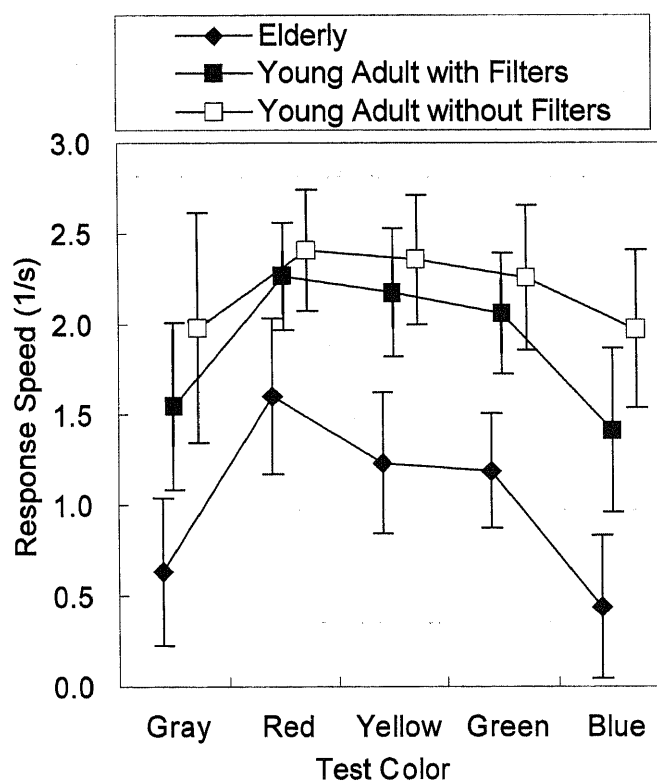


図 2.8(d) 刺激色に対する各被験者カテゴリの反応速度の平均値と標準偏差

表 2.4 若年者フィルタ有とフィルタ無での反応速度について統計的な検定を行ったときの有意確率  $p$  ;  $p < 0.05$  についてはイタリックで示している。

Stimuli	Gray	Red	Yellow	Green	Blue
$p$	0.115	0.248	0.345	0.345	<i>0.027</i>

表 2.5 刺激色に対する反応速度の違いについて、Wilcoxon 符号付順位和検定 (Bonferroni 補正) を行った  $p$  値: (c)、(d) で  $p$  値が 0.012、0.005 以下のものは太字になっている

(a) 若年者フィルタ無

	Gray	Red	Yellow	Green	Blue
Gray					
Red	0.035				
Yellow	0.074	0.674			
Green	0.172	0.293	0.528		
Blue	0.916	0.015	0.115	0.141	

(b) 若年者フィルタ有

	Gray	Red	Yellow	Green	Blue
Gray					
Red	<i>0.005</i>				
Yellow	0.027	0.529			
Green	0.036	0.172	0.600		
Blue	0.529	<i>0.003</i>	<i>0.008</i>	<i>0.012</i>	

(c) 高齢者

	Gray	Red	Yellow	Green	Blue
Gray					
Red	<i>0.002</i>				
Yellow	0.009	0.142			
Green	0.016	0.059	0.834		
Blue	0.248	<i>0.001</i>	<i>0.003</i>	<i>0.002</i>	

### 2.3.4 主観評価結果

被験者は、図 2.5 に示した実験手順の各ブロック後に、表 2.3 に示した視認性評価尺度を用いて刺激画像の判別のしやすさを主観評価した。各被験者カテゴリの主観評価結果の平均値と標準偏差を図 2.9 に示す。2.3.1 節、2.3.3 節で述べた反応時間や反応速度の結果では、高齢者と若年者フィルタ有の間で、刺激色による傾向は同じになったが、反応の絶対値は大きく異なっていた。しかし、主観評価の結果は、高齢者と若年者フィルタ有の評価の絶対値に大きな差はなかった。刺激色の違いによる傾向を見ると、高齢者、若年者とも灰色と青の刺激色に対する視認性の評価値が低く、特に若年者フィルタ有では、フィルタ無と比べて青の評価が低くなり、高齢者の評価値に近づくことが示された。

得られた主観評価値(図 2.9)と表 2.3 に示した主観評価カテゴリを対応させると、どの被験者カテゴリでも、赤、黄、緑の刺激色に対する主観評価値の平均値は、おおよそ 4 であり「苦勞せずに判別できる」と感じていたことが分かる。灰色の刺激色に対する若年者フィルタ無の場合の主観評価値は、おおよそ 3 と 2 の間に分布し、「多少判別にくいだが判別できる」、「やっと判別できる」と感じていたことが分かる。灰色の刺激色に対する若年者フィルタ有と高齢者の平均値は 2 で、「やっと判別できる」と感じていたことが分かる。ただし、高齢者の場合は標準偏差の大きさから分かるように、主観評価値 3 の「多少判別にくいだが判別できる」から主観評価値 1 の「判別できない」まで被験者の評価値のばらつきが大きかった。青の刺激色に対しては、若年者フィルタ無の平均値は、おおよそ 3 で「多少判別しにくいだが判別できる」であったが、若年者フィルタ有と高齢者の平均値はおおよそ 2 で「やっと判別できる」となっており、判別しやすさが低下していた。

被験者カテゴリ間の主観評価の結果を統計的に比較するために、各刺激色内での被験者カテゴリ間の主観評価結果について Kruskal-Wallis 検定を行い、被験者カテゴリが有意に影響していることが確認されれば、その後 Mann-Whitney 検定を用いて多重比較を行った。このとき、第 1 種の過誤を見積もり、有意水準については Bonferroni 補正を行った(組み合わせ数 3)。その結果、青の刺激色の場合にだけ若年者フィルタ無と高齢者、および若年者フィルタ無と若年者フィルタ有の結果の間に有意差が認められた( $\alpha < 0.01$ 、 $p < 0.003$ )。また、すべての刺激色に対しても、若年者フィルタ有と高齢者間の結果に有意差は認められなかった。この結果は、若年者が高齢者水晶体擬似フィルタを用いることで、若年者と高齢者の主観評価が一致することを意味しており、高齢者水晶体擬似フィルタが高齢者の視認性を定量的に評価できるツールとなることを示している。

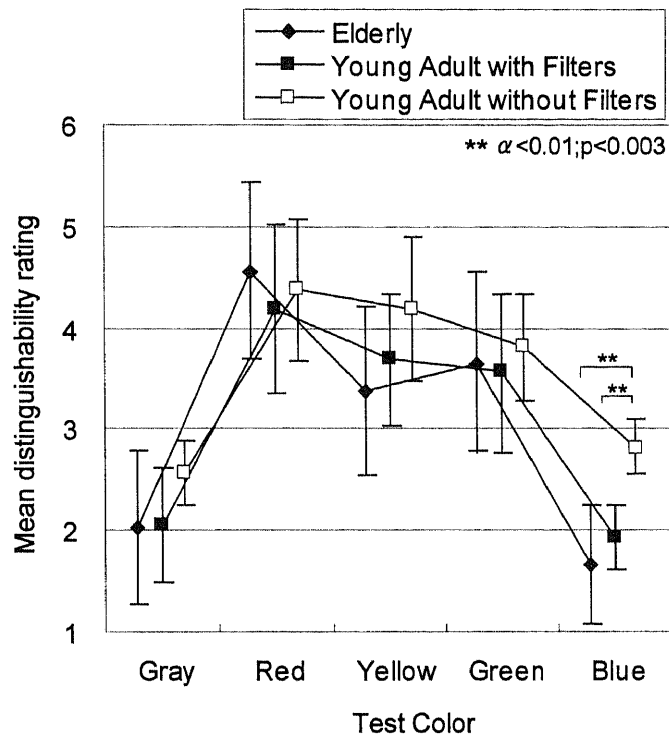


図 2.9 刺激色に対する各被験者カテゴリの主観評価結果

## 2.4 考察

### 2.4.1 反応速度と実効輝度・実効輝度コントラスト・実効色差の関係

実験の結果、若年者が高齢者水晶体擬似フィルタを装着することにより、刺激色に対する反応時間、無反応率、反応速度が高齢者と同様の傾向を示すことが明らかになった。このように、フィルタを装着した若年者と高齢者の応答が刺激色によって同様な傾向で変化するのは、フィルタと高齢者の水晶体の黄変によって、網膜上に結像された刺激の背景色と刺激色の実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差の3つの要因が同様に変化したことが原因ではないかと考えられる。高齢者水晶体擬似フィルタを通して色彩輝度計で測定した刺激の背景色と刺激色の輝度と色度は、若年者フィルタ有と高齢者の場合の網膜上の実効輝度、実効色度と考えることができる。この実効輝度と実効色度から、実効輝度コントラスト、実効色差を計算した。これらの測定結果、計算結果を表 2.6 に示す。フィルタを通さずに測定した色度と、フィルタを通して測定した実効色度を色度図上にプロットした結果を図 2.10 に示す。表 2.6、図 2.10 から、フィルタを通さない場合の輝度コントラスト、色差は、実験条件として統制されているため刺激色によらずほぼ一定になっているが、フィルタを通ることによって、これらの値は刺激色に依存して大きく変化していることが分かる。

青の刺激色に対する高齢者と若年者フィルタ有の反応速度は、若年者フィルタ無の結果に対して有意に低下した。青の刺激色は、高齢者水晶体擬似フィルタの短波長領域の透過率が低いために、実効輝度、実効輝度コントラストが低下し(表 2.6)、色度図上での座標値が背景色(灰色)方向にシフトするため背景色との色差が小さくなる(図 2.10)。すなわち、高齢者、若年者フィルタ有の場合に青の刺激色に対する反応速度が遅かったのは、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差の低下が原因になっているのではないかと考えられる。一方で、若年者フィルタ無の灰色の刺激色の場合には、背景色との色差が刺激色のなかで最も小さいにも関わらず、反応速度は低下しなかった。これは、色差は小さかったが、輝度コントラストが低くなかったことが原因だと考えられる。以上の結果から、高齢者の水晶体の黄変による色刺激に対する反応速度の低下は、実効輝度コントラストの低下が強く影響しているのではないかと考えられる。さらに、若年者フィルタ有の灰色の刺激色の場合には、フィルタ無の場合と比較して実効輝度コントラストと実効色差がほとんど変化しないにも関わらず、反応速度が低下した。これは、フィルタによって網膜上の実効輝度が低下したことが影響しているのではないかと考えられる。しかしながら、若年者フィルタ有の黄色の刺激色の場合には、実効輝度が刺激色の中で最低でも反応速度は低下していない。これは、実効色差および実効輝度コントラストが低下しなかったことが原因ではないかと考えられる。このフィルタ有の場合の灰色と黄色の結果の比較から、両者とも実効輝度コントラスト、実行色差ともにそれほど変化しないのに、灰色の場合にのみ実効輝度の変化に比べて反応速度が低下したのは、フィルタ有の灰色の場合には、実効色差は変化しなかったもののその絶対値自体が小さかったことが原因と考えられる。つまり、灰色の刺激色のように背景色との色差が小さい場合には、実効輝度の低下による効果を強く反映し反応速度が低下するのではないかと考えられる。

ところで、若年者フィルタ無の場合でも青の刺激色の場合に、若干、反応速度が低下している。これは網膜上の錐体のうち短波長の光に感度をもつ S 錐体の数が少ないことや<sup>51)</sup>、微小刺激に対する色覚特性が一般に短波長側の感度が低いこと(foveal tritanopia)<sup>52)</sup>、青-黄色に対する視覚の分解能が小さいこと<sup>53)</sup>が原因ではないかと考えられる。

ここまで述べたように、反応速度は、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差と密接に関係していると予想される。そこで、若年者の反応速度に対するこれらの要因の影響を重回帰分析を用いて分析した。その結果、(2.3)式で示される重回帰式で、若年者の反応速度と各因子との関係を表現できることが示された。(2.3)式で、 $L'$  は実効輝度、 $C'$  は実効輝度コントラスト、 $dE'$  は実効色差を示す。この式は、若年者の反応速度は、視覚刺激の実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差によって変化することを示している。

$$S_{young} = 0.083L' + 4.309C' + 0.019dE' + 0.966 \quad (R=0.841) \quad (2.3)$$

また、高齢者の反応速度は、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差が同じであっても、若年者フィルタ有の反応速度よりも遅かった。これは水晶体の黄変以外の加齢効果による影響である。そこで、上式に、水晶体の黄変以外の加齢効果の項を加え、高齢者の反応速度について再度重回帰分析を行ったところ、(2.4)式に示す重回帰式が得られた。ここで、Age は世代群を表す定数とし、若年者(平均年齢 22.3 歳)の場合に 0、高齢者(平均年齢 65.9 歳)の場合に 1 をとるものとする。

$$S = 0.085L' + 7.829C' + 0.014dE' - 0.992Age + 0.891 \quad (R=0.950) \quad (2.4)$$

(2.3)、(2.4)式の Age の項に実年齢を入れて定式化することも検討したが、本研究では若年者と高齢者の 2 つの世代群についてのみ実験を行っているので、年齢の項は世代群として扱い定式化した。また、(2.4)式で若年者の場合は Age = 0 となり、本来なら(2.3)式と一致するはずであるが、(2.3)式は若年者のデータから重回帰分析を行った結果であり、(2.4)式は若年者と高齢者のデータから重回帰分析を行った結果であって、分析に用いたデータの違いによる誤差が原因で、(2.4)式は若年者(Age = 0)の場合に(2.3)式と一致しない。

図 2.11 に、(2.4)式から反応速度に対する  $L'$ 、 $C'$ 、 $dE'$  を 3 次元プロットしたものを示す。図に表示された面は、同じ反応速度を示すと予想される  $L'$ 、 $C'$ 、 $dE'$  の組み合わせである。図 2.11(a) は(2.4)式で Age = 0 とした若年者の場合を、図 2.11(b) は(2.4)式で Age = 1 とした高齢者の場合を示す。図 2.11(c) は、反応時間  $S$  が 1.6 となる若年者と高齢者に対する  $L'$ 、 $C'$ 、 $dE'$  の組み合わせである。図 2.11(c) での若年者と高齢者の差が、水晶体の黄変以外の加齢効果によるものと考えられる。

(2.4)式、図 2.11 より、今回実験した実験条件の範囲内で、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差が分かれば、若年者および高齢者の反応速度を予測することができる。(2.4)式を用いれば、製品のインタフェースを設計する際に画面の配色に対する高齢者の反応時間が予測できるため、画面遷移のタイムアウト時間などを適切に設計することが可能と考えられる。また、一定時間内に操作を行わせたい場合には、表示画面にどの程度の輝度、輝度コントラスト、色差を与える必要があるかを計算することができる。以上のように(2.4)式は、インタフェース設計の表示デザインの設計値と、高齢者を含めた人間の反応速度を結びつけるもので、高齢者対応製品の設計開発において、その利用価値は非常に高いものと考えられる。

ところで、(2.4)式から若年者および高齢者の反応速度を予測することができるので、反応速度を評価するには、(2.4)式を用いれば高齢者水晶体擬似フィルタは必要ないように思えるかもしれないが、(2.4)式に代入する実効輝度  $L'$ 、実効輝度コントラスト  $C'$ 、実効色差  $\Delta E'$  は、色彩輝度計と高齢者水晶体擬似フィルタを用いて測定することが必要である。(詳しくは 2.4.4 節に記載)。

表 2.6 刺激画像の輝度  $L$ 、刺激色と背景色の輝度コントラスト  $C$ 、刺激色と背景色との色差  $\Delta E(L^*u^*v^*)$ 。フィルタを通して測定した実効輝度  $L'$ 、実効輝度コントラスト  $C'$ 、実効色差  $\Delta E'(L^*u^*v^*)$ 。  $\Delta E(L^*u^*v^*)$  は、 $Y, Y_0$  として刺激色の輝度と CRT の最大輝度を用いて計算した。

Color	$L$ (cd/m <sup>2</sup> )	$C$	$\Delta E(L^*u^*v^*)$	$L'$ (cd/m <sup>2</sup> )	$C'$	$\Delta E'(L^*u^*v^*)$
Gray	6.616	0.050	1.65	4.709	0.047	1.55
Red	6.627	0.051	28.80	5.030	0.080	32.09
Yellow	5.392	-0.052	25.58	3.946	-0.041	29.06
Green	6.647	0.052	26.91	4.659	0.042	25.11
Blue	6.647	0.052	27.45	4.598	0.035	8.60
Background	5.984			4.287		

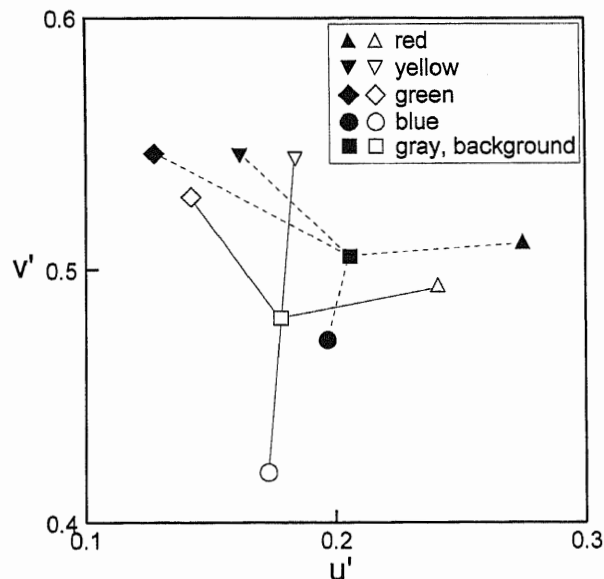


図 2.10 CRT 上に表示された刺激色の色度値 ( $u', v'$ ) と、高齢者水晶体擬似フィルタを通して測定した色度値 (白抜きのシンボルはフィルタを通さず測定した色度を示し、黒塗りのシンボルはフィルタを通して測定した色度値を示す)



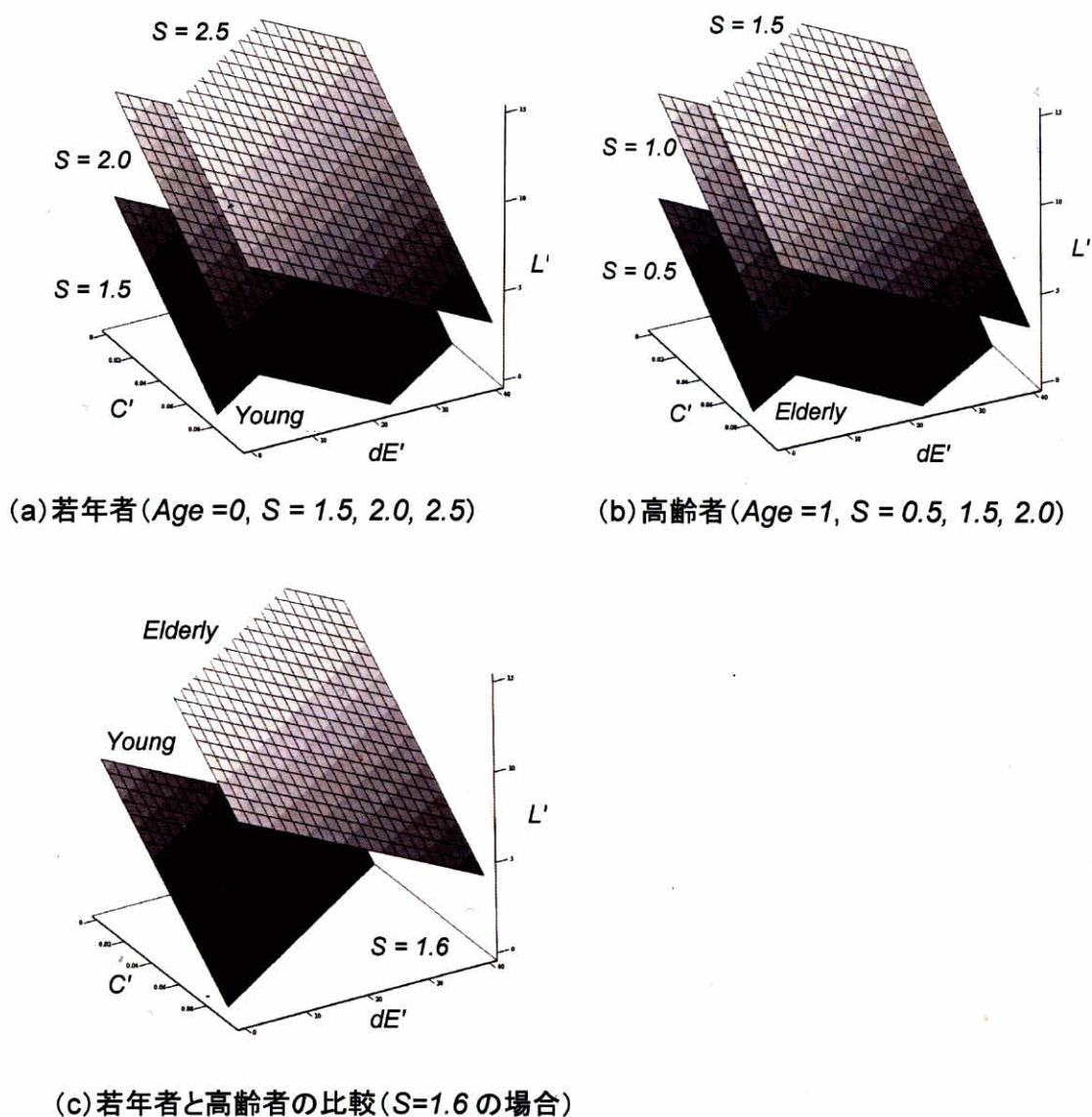


図 2.11 (2.4)式から、いくつかの反応速度に対する  $L'$ 、 $C'$ 、 $dE'$ を 3 次元プロットした。図に標示された面は、同じ反応速度を示す  $L'$ 、 $C'$ 、 $dE'$ の組み合わせである。

#### 2.4.2 反応速度と主観評価の関係

この節では、視認性に対する主観評価値と反応速度の関係について検討する。被験者カテゴリごとに各刺激色の主観評価値と反応速度の関係をプロットしたグラフを図 2.12 に示す。表 2.3 での視認性評価尺度で「判別できない」に相当する主観評価値 1 の刺激の場合に反応速度が 0 となり、主観評価値 6「非常に判別しやすい」になった時には反応速度は被験者の限界値に漸近すると仮定し、プロットされた点に対して被験者カテゴリごとに指

数関数  $y = \text{Exp}(Ax)$  をフィッティングさせた。得られた回帰曲線の定数項  $A$  と相関係数  $R$  を表 2.7 に示す。図 2.12 と表 2.7 の結果から、若年者はフィルタの有無に関わらず主観評価値と反応速度の関係がほぼ一致していることが分かる。しかし、高齢者の主観評価値と反応速度の関係は、若年者と大きく異なっている。このことから、同じ年齢カテゴリの被験者は、反応時間と主観評価の間に同一の判断基準を持っていて、視環境に関係なく主観評価と反応時間の間に特定の関係を示すと考えることができる。図 2.12 で、高齢者の主観評価－反応速度曲線は、若年者の主観評価－反応速度曲線とは一致せず、若年者の特性を左方向へシフトしたような特性を示した。この若年者と高齢者の特性の違いは、若年者と高齢者の主観評価値が同じ視刺激(表示)であっても、加齢によって反応速度が遅くなることを示す。これまで、高齢者が見やすい配色の評価は、主観評価法を用いて行うことが多かったが、今回の結果から、主観評価値と反応速度の関係は年齢によって大きく変化することが示唆される。これは、主観評価の結果だけで視認性や操作性を評価することには問題があることを意味する。

一方、高齢者の水晶体の黄変を模擬する若年者フィルタ有の結果は、若年者フィルタ無の結果と比較して、図 2.12 上の主観評価-反応速度曲線に沿った変化(視環境が悪化するため曲線上の左下方向へのシフト)として表われる。この結果からも、若年者が光学的手法を用いて高齢者の水晶体の黄変を模擬しても、高齢者の主観評価－反応速度特性を定量的に模擬することはできないことが分かる。

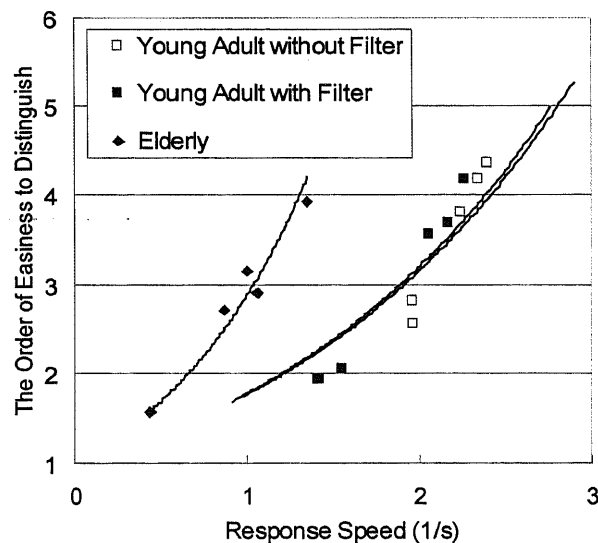


図 2.12 各被験者カテゴリの反応速度と主観評価  
(各刺激色に対する平均値をプロット)

表 2.7 反応速度と主観評価の関係(図 2.12)に  $y = \text{Exp}(Ax)$  を  
フィッティングして得られた  $A$  と相関係数  $R$

SUBJECT	$A$	$R$
Elderly	1.064	0.977
Young Adult with Filter	0.574	0.853
Young Adult without Filter	0.581	0.923

### 2.4.3 水晶体の黄変以外の加齢効果の影響

今回の実験で、高齢者に比べて、高齢者水晶体擬似フィルタを装着した若年者の反応時間は長く、反応速度は遅く、高齢者の結果と一致しなかった。また、若年者と高齢者の主観評価と反応速度の関係も一致しなかった。これは、水晶体の黄変以外の加齢効果によって高齢者の反応が遅くなっていることが原因だと考えられる。今回の実験は水晶体の黄変だけを模擬しており、今回の結果はそれ以外の加齢効果である老人性縮瞳<sup>24,34)</sup>や、網膜での受容体の減少<sup>52,53)</sup>、脳内での処理能力、判断力の低下、身体的な運動能力の低下などの諸要因が反応速度へ与える影響も考慮する必要があることを示唆している。認知時間については、次章で、事象関連脳電位の測定を行い、認知時間と反応時間の加齢による遅れを比較し、水晶体の黄変が認知時間に与える影響と、認知後の反応に与える影響についてより詳細に検討する。さらに、第4章では老人性縮瞳による実効輝度の低下を見積もり、それによる反応速度の低下について詳細に検討する。

今回の実験では、高齢者の水晶体の黄変が、視認性評価、反応時間、反応速度に与える影響について検討したが、高齢者の水晶体の黄変による高齢者の色の見えを評価したいという要求もある。今回用いた高齢者水晶体擬似フィルタを高齢者の色の見えの評価に利用することには注意が必要である。なぜなら、高齢者の水晶体の黄変は、非常に長期間に渡って徐々に起こる現象であり、水晶体の黄変に対して神経系で色の知覚の補正を行っていることが示唆されている<sup>42,54,56)</sup>。しかし、今回の結果から、高齢者水晶体擬似フィルタが視認性の評価に有効であることが示されたといえる。

### 2.4.4 今回の結果から考えられる高齢者水晶体擬似フィルタの利用方法

本節では、今回の実験結果をもとに、高齢者対応製品の開発評価での高齢者水晶体擬似フィルタの使用方法について議論する。高齢者とフィルタを装着した若年者の主観評

価値が一致したことから、単なる表示や標識など視認性のみが問題となる(表示された情報が見やすければよい)状況については、若年者がこのフィルタを用いて主観評価を行うことで、高齢者の視認性を評価することが可能である。一方で、使用者が製品の表示に対して応答して操作する必要がある機器については、表示に対する応答(反応時間、反応速度)を評価する必要がある。今回の実験の結果から、高齢者とフィルタを装着した若年者の反応時間、反応速度は一致しないが、若年者がフィルタを装着して反応が遅くなる配色と高齢者の反応が遅くなる配色は一致した。このことから、若年者がこのフィルタを用いて製品を操作した場合と、フィルタを用いないで操作した場合の反応速度を比較し、フィルタを用いた場合の反応速度が遅くなった配色に対しては、高齢者の反応速度も遅くなることが予想され、その配色を改善する必要があることが分かる。

また、(2.4)式を用いれば、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差、反応速度の4つのパラメータのうち3つが決まれば、もう1つのパラメータを決定することができる。高齢者水晶体擬似フィルタを通して色彩輝度計で対象となる表示の実効輝度、実効色度を測定し、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差を(2.4)式に代入すれば反応速度を予想することができる。逆に、操作に必要な反応速度が分かっているならば、(2.4)式から必要な配色(実効輝度、実効色差)を決定することができる。ただし、(2.4)式は、灰色背景上に被験者視力より十分大きい指標が表示された今回の実験条件の範囲で決定されたモデル式である。実際の表示では、背景色が有彩色の場合や、文字の大きさが小さい場合もある。これらの場合については、今回のモデル式をそのまま適応することは難しい。この点については、表示の条件が違う場合についてさらに検討し、適応範囲を広げるように(2.4)式を拡張することが必要である。

今回の結果から、高齢者の水晶体の黄変を模擬する光学フィルタを若年者が用いることで、視認性の主観評価については定量的に、反応速度や反応時間については定性的に評価できることが分かった。また、(2.4)式を用いれば、光学測定値から反応速度を予想できることが分かった。このような方法でこの高齢者水晶体擬似フィルタを用いれば、高齢者対応製品の表示や配色の設計を効率的に行うことが可能である。

## 2.5 本章のまとめ

本章では、若年者が高齢者水晶体擬似フィルタをつけた場合と、つけない場合、および高齢者について、色ランドルト環刺激を見たときの反応時間、反応速度、無反応率、主観評価値を測定した。背景が灰色の今回の刺激条件下では、高齢者水晶体擬似フィルタをつけない若年者と高齢者を比較すると、高齢者は灰色と青の刺激色では反応時間は長く、

無反応率は高く、反応速度は遅くなり、視認性の主観評価値も低いことが分かった。また、高齢者水晶体擬似フィルタを若年者が使用した場合には、他の色と比較して灰色と青の刺激色で視認性が低下し、反応時間は長く、無反応率は高く、反応速度は遅くなるという、高齢者と同じ傾向を示し、視認性の主観評価値は高齢者と一致した。

以上の結果から、高齢者水晶体擬似フィルタを若年者が装着することで、高齢者の視認性を定量的に評価できるツールとなり得ることが分かった（視認性の主観評価値の一致）。反応時間、反応速度については、高齢者の反応速度は、高齢者水晶体擬似フィルタを装着した若年者の場合よりも遅かったが、反応速度が遅くなる色は一致したため、若年者がこのフィルタを用いることで高齢者の表示に対する反応を定性的に評価できるツールとなり得ることが分かった。

このような現象が起こる原因として、高齢者水晶体擬似フィルタと加齢による黄変の影響で可視光の短波長成分の透過率が下がり、網膜上の刺激色と背景色の実効的な輝度（実効輝度）、実効輝度コントラスト、および実効色差が低下することに注目した。そして、それらの因子と反応速度と関係について分析し、反応速度と、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差について重回帰分析を行ったところ、相関の高い重回帰式が得られた。この重回帰式によって、反応速度、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差の4つのパラメータのうち3つのパラメータから残りの1つのパラメータを予測、決定することが可能となった。

今回の実験の結果で、高齢者水晶体擬似フィルタを装着しても、若年者の反応時間は高齢者と同じにならず200ms以上反応が遅いことが分かった。この反応の遅れは、認知プロセスで加齢による遅れの可能性や、反応時間を手によるボタン押しの反応で測定しているため加齢による運動機能の低下が原因となっている可能性が考えられる。今回の実験では、認知時間の調査を目的として実験を行っていなかったため、認知時間の評価は行わなかった。次章では、水晶体の黄変が認知時間に与える影響について調査した実験とその結果について述べ、詳しく考察する。

### 3 視覚刺激に対する反応時間・認知時間の加齢変化と水晶体の黄変の影響

本章では、色刺激に対する認知時間の加齢変化と、高齢者の水晶体の黄変が認知時間に与える影響について検討した内容について述べる。認知時間の指標として、事象関連電位 P300 の潜時を測定し、反応時間と比較しながら加齢の影響について検討している。実験結果から、加齢による水晶体の黄変は、色刺激に対する認知時間を有意に増加させることを示す。また、第 2 章で問題提起された高齢者の反応時間の増加については、認知時間よりもそれ以外の運動機能の低下などの影響が大きいことが示唆される。また、第 2 章の反応時間の場合と同様に、P300 潜時は、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差と密接に関係していることを示す。

#### 3.1 本章の目的

第 2 章で、高齢者水晶体擬似フィルタを若年者が装着した場合に、視認性の主観評価値は高齢者と一致するが、反応時間については高齢者よりも 200ms 以上反応が速いことが分かった。この反応時間の違いは、提示された刺激が網膜で神経インパルスに変換され、視神経を通して脳に送られ、刺激を知覚し、標的刺激であるか分類し、判定するという認知プロセスで生じている可能性がある。また、反応時間を手によるボタン押しの反応で測定しているため、認知プロセス以降の運動の命令系や運動機能の加齢による低下によって高齢者の反応時間が長くなっている可能性もある。

本章では、高齢者の視覚的な色刺激に対する反応時間の増加が、認知プロセスにおける加齢効果に起因しているのか、加齢による運動機能の低下に起因しているのかを調べるために、反応時間とともに、認知時間の指標となる事象関連電位 P300 を測定した。また、水晶体の黄変が認知時間に与える影響についても調べた。

#### 3.2 実験方法

第 2 章で行った実験方法とおおむね同様の手順、実験配置で実験を行った。

##### 3.2.1 事象関連電位 (Event-Related Potential: ERP)

今回の実験では、認知時間の指標として ERP を測定した。ERP は与えられた事象に対して脳で情報処理が行われた時に誘発される脳波である。視覚刺激が与えられた時に発現する脳波は視覚誘発電位 (visual evoked potentials :VEP) と呼ばれる。視覚刺激が提示された時、VEP は時間とともに脳の特定の部位で色々な種類の波形成分を示す。頻度の

少ない刺激 (novel stimuli) に対して応答するタスクを行い、頭頂部の脳波を測定すると、刺激提示から約 300ms で正のピーク波形が観察されることが知られている<sup>56)</sup>。この ERP 成分は P3 もしくは P300 と呼ばれる。P300 は、刺激の識別のしやすさや、反応の戦略、注意に応じて変化し、知覚入力と心理的なイベント処理にのみ影響を受け、その後の運動に関する情報処理に影響されないことが分かっている<sup>57)</sup>。それゆえ、P300 の潜時 (刺激提示から P300 ピーク出現までの時間) は、認知処理時間を示す指標として扱われることが多く、この指標は多くの研究においてその信頼性が確認されている<sup>58)</sup>。今回の視覚刺激は視覚の閾値に近いが、Snyder<sup>59)</sup>らは、閾値近くの視覚、聴覚、体性感覚刺激においても P300 が出現することを報告している。また、P300 に対する加齢の影響についても、いくつかの研究が行われている。Goodin ら<sup>60)</sup>は、聴覚刺激に対する ERP について調査し、潜時は年齢と共に増加し、振幅は年齢と共に減少することを報告している。Picton ら<sup>61)</sup>は、視覚と体性感覚刺激に対する P300 は感覚モダリティによらず同様の加齢変化が認められたと報告している。Czigler<sup>62)</sup>は、色刺激に対する注意に関連した ERP の潜時が、年齢に伴って増加することを報告している。

以上のような既存研究の結果から、ERP、特に P300 は、視覚刺激に対する認知時間の指標として適当であると考え、P300 の測定を行った。

### 3.2.2 被験者

高齢者 7 名 (男性 3 名、女性 4 名)、若年者 7 名 (男性 3 名、女性 4 名) が実験に参加した。高齢被験者のうちの 3 名と、若年被験者のうち 4 名は、第 2 章の実験にも参加している被験者である。今回の実験に影響すると思われる眼、神経系の既往歴がないこと、薬を服用していないことを実験前に口頭で確認し、色覚が正常なことを東京医大式色覚検査表 (村上色彩研究所製) を用いて確認した。被験者のうち視力矯正が必要な、高齢者 6 名、若年者 3 名は、被験者が日常の生活で用いている視力矯正具 (メガネ、コンタクトレンズ) を装着し実験に参加した。若年者は、実験中に高齢者水晶体擬似フィルタを装着できるよう、視力矯正具はコンタクトレンズのみ使用した。被験者の平均年齢、平均視力 (3m 視力) は表 3.1 に示すとおりである。実験に要した時間は、高齢者で 1 時間程度、若年者で 2 時間程度であった。被験者には実験前に実験の目的を説明し、書面で実験参加の同意を得た。被験者には、実験後、謝金が支払われた。

表 3.1 参加した被験者の平均年齢、3m視距離での平均視力と標準偏差  
(カッコの中はスネレン視力)

	Age	Visual acuity	
		Right	Left
Young	21.6 ± 1.1	1.0 (9.84/9.84) ± 0.2	1.0 (9.84/9.84) ± 0.3
Elderly	68.4 ± 1.1	0.7 (9.84/14.1) ± 0.3	0.7 (9.84/14.1) ± 0.2

### 3.2.3 刺激

第 2 章の実験と全く同一の刺激を用いた。実験に用いた刺激色、背景色の輝度  $L$ 、色度( $u', v'$ )、( $x, y$ )、刺激色と背景色の輝度コントラスト色度  $C$  は、表 2.2 に示すとおりである。

### 3.2.4 実験配置と生体信号計測

第 2 章で行った実験の配置に、事象関連電位の測定装置を追加した。実験配置を図 3.1(a) に、実験風景を図 3.1(b) に示す。実験室内の照明条件、刺激表示用 CRT ディスプレイ (SONY CPD-G520)、刺激提示用のコンピュータシステム (MateNX MA45J: NEC、Multi Stim software: NEC メディカルシステム製、Multi Stim Box MB-7 switching hardware : NEC メディカルシステム製) などの実験器具と、視距離などの実験配置は、第 2 章の実験と全く同じ機材を用いた。

脳波 (Electroencephalographic: EEG) の活動は、図 3.2 に示す国際 10/20 法の電極配置に基づき、頭中心部の Cz 部に電極を取り付け、そこからの信号を記録した。また、両耳朵に取り付けた電極を連結し、信号の基準とした。接地電極は前頭極 (Fpz) に取り付けた。眼球電図 (electro-oculogram: EOG) は、EEG にアーティファクトとして混入するために、測定後の信号処理の時に EOG の影響を取り除く必要がある。そのため、左目の上下眼窩縁に EOG 検出用の電極を取り付け、EEG と同時に EOG の波形も記録した。生体信号の検出のための電極には、銀塩化銀 (Ag/AgCl) 電極を用いた。計測された信号は、多用途テレメータ Syna Act MT-11 (GE メディカルシステムズ製) で 0.5-30Hz のバンドパスフィルタでフィルタリング後、増幅され、コンピュータ OptiPlex G1 (デルコンピュータ製) でデジタル化され、ERP 計測ソフトウェア EplyzerII (キッセイコムテック製) によって記録された。デジタル化し記録したサンプリングレートは 1000Hz であった。EEG は刺激提示前 128ms から記録を開始し、1024ms 間記録を行った (図 3.3)。デジタル化された各試行の信号は、その後の





### 3.2.5 実験手順

被験者は、前室で電極を取り付けた後、実験室に入室した。実験室に入室した後の手順は、第2章の実験と全く同一である(2.2.5節、図2.5参照)。各試行での反応時間、反応の有無、EEG、EOGを計測した。各ブロックのタスクが終了した後に、表示された刺激の判別のしやすさについて、表2.3の視認性評価尺度を用いて主観評価を行った。高齢者は2セッション、若年者はフィルタ有の場合と無の場合を各2セッション、合計4セッションを図2.5の手順で行った。実験中の刺激提示とEEGの記録タイミングは、図3.3に示すとおりである。

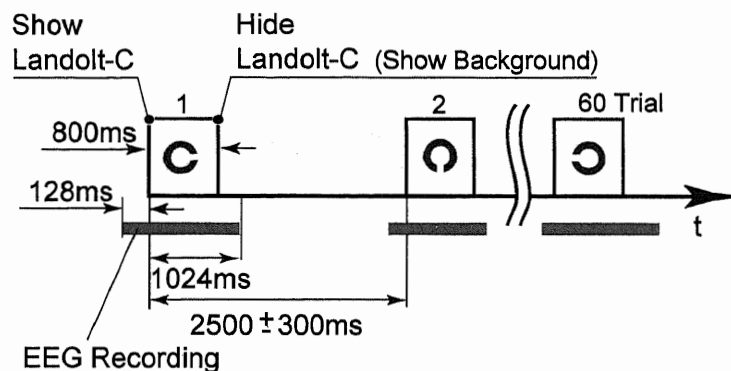


図 3.3 刺激提示と脳波の記録タイミング(1ブロック分)

### 3.2.6 データ処理

同一の実験条件でのターゲット刺激に対するEEG波形をEplyzer IIで加算し、ERPの波形を生成した。このとき、EOG波形がアーティファクトとして影響していると見受けられるEEGと、手でのボタン押しの反応がなかった試行でのEEGは、加算から除外した。P300潜時は刺激提示後250～800msの間に正の最大ピークが生じた時間として定義した。図3.4にP300の潜時、振幅の定義と各被験者カテゴリで計測されたERP波形の例を示す。

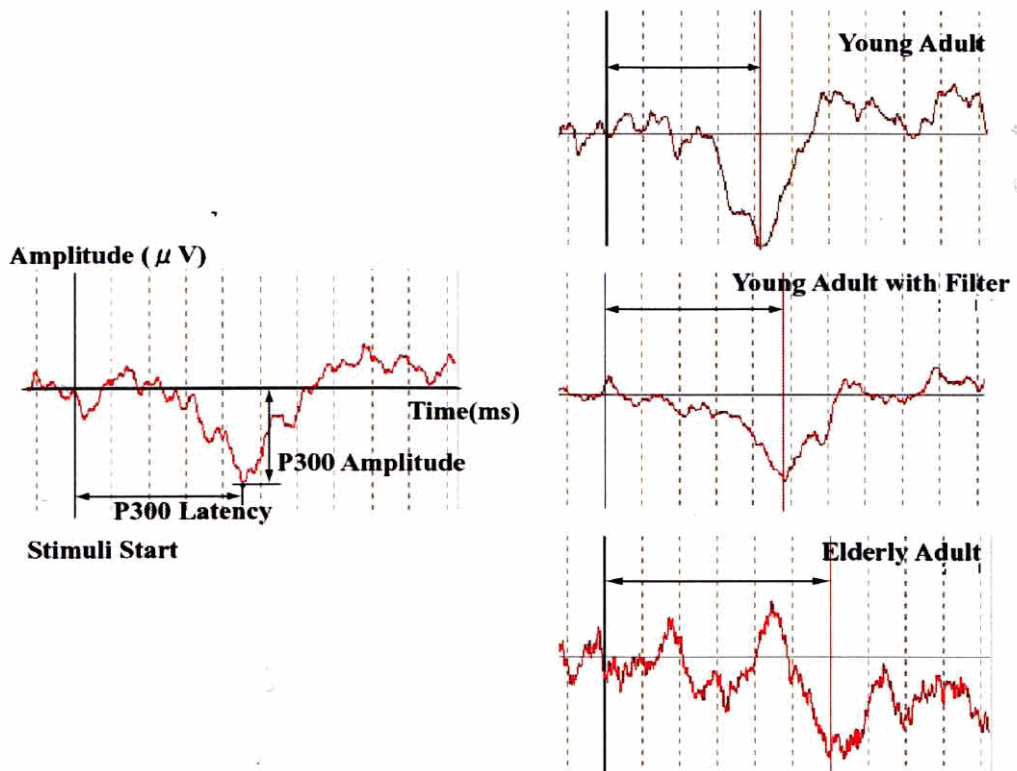


図 3.4 P300 の潜時、振幅の定義と、各被験者カテゴリでの ERP 波形の例

### 3.3 結果

#### 3.3.1 反応速度

若年者が高齢者水晶体擬似フィルタを装着しない場合(若年者フィルタ無)、若年者が高齢者水晶体擬似フィルタを装着した場合(若年者フィルタ有)、高齢者の場合の、3つのカテゴリにおける刺激色に対する反応時間の測定結果を図 3.5(a)～(c)に示す。また、各被験者カテゴリにおける反応時間の平均値と、標準偏差、カテゴリ間の有意差を図 3.5(d)に示す。反応速度は、各刺激色における被験者カテゴリ間の比較を Kruskal-Wallis 検定で行い、被験者カテゴリが有意に影響していることが確認されれば、Mann-Whitney 検定を用いて多重比較を行った。このとき、第 1 種の過誤を見積もり、有意水準については Bonferroni 補正を行った(組み合わせ数 3)。

第 2 章の実験と全く同じ条件の実験であり、被験者の約半数も第 2 章と同一であるため、第 2 章の実験結果(図 2.6)とほぼ同じ結果が得られた。図 3.5(d)で、若年者フィルタ無の場合は、刺激色の違いによる反応時間の差は 96ms 以下であり、その差は非常に小さかった。一方で、高齢者の反応時間は、刺激色によって大きく変化し、最大で 394ms であった。

特に青と灰色の刺激色に対する反応時間は長く、他の刺激色より 50～394ms 長かった。赤以外のすべての刺激色に対する高齢者の反応時間は、若年者フィルタ無の結果と比較して有意に反応時間が長く( $\alpha < 0.01$ ;  $p < 0.003$ )、それらの差は 200ms 以上であった。若年者フィルタ有の場合の反応時間は、高齢者の結果と同様の傾向を示し、刺激色に依存して変化した。特に青と灰色の刺激色に対する反応時間が長く、他の刺激色より 50～250ms 長かった。しかしながら、第 2 章でも述べたが、若年者フィルタ有の場合の反応時間は、高齢者の結果と定量的に一致するわけではない。黄色と青の刺激色に対する、若年者フィルタ有と高齢者の反応時間には、有意な差があった( $\alpha < 0.01$ ;  $p < 0.003$ )。また、高齢者のすべての刺激色の反応時間の平均は、若年者フィルタ有のすべての刺激色の反応時間の平均値と比較して 155ms 長かった。

この若年者フィルタ有と高齢者の反応時間の違いが、何に起因するかを認知時間の指標を用いて検討することが本章の目的である。以下に認知時間の測定結果と検討した内容について述べる。

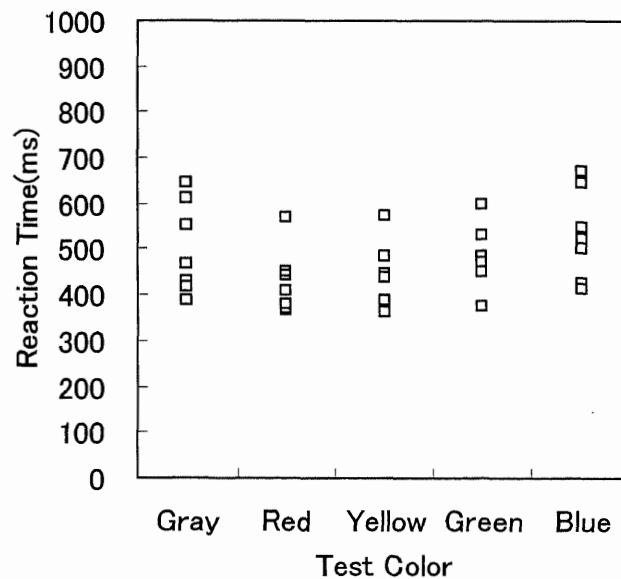


図 3.5(a) 若年者フィルタ無の刺激色に対する反応時間の測定結果

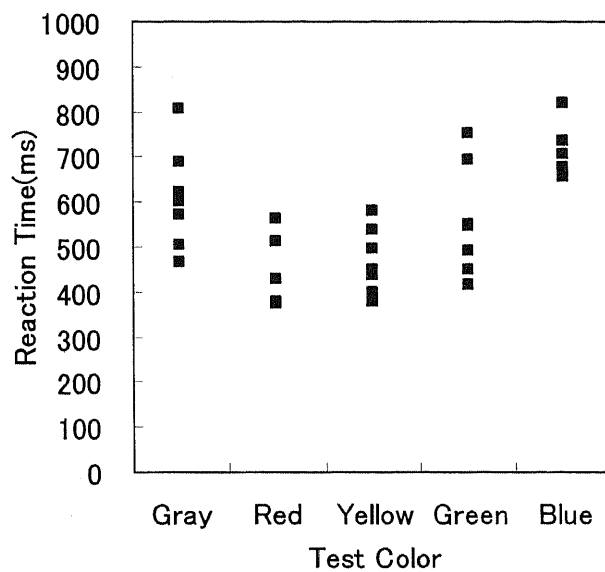


図 3.5(b) 若年者フィルタ有の刺激色に対する反応時間の測定結果

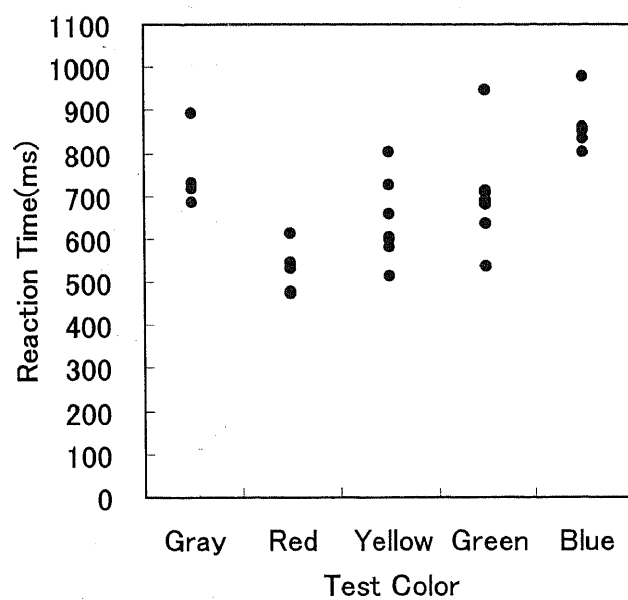


図 3.5(c) 高齢者の刺激色に対する反応時間の測定結果

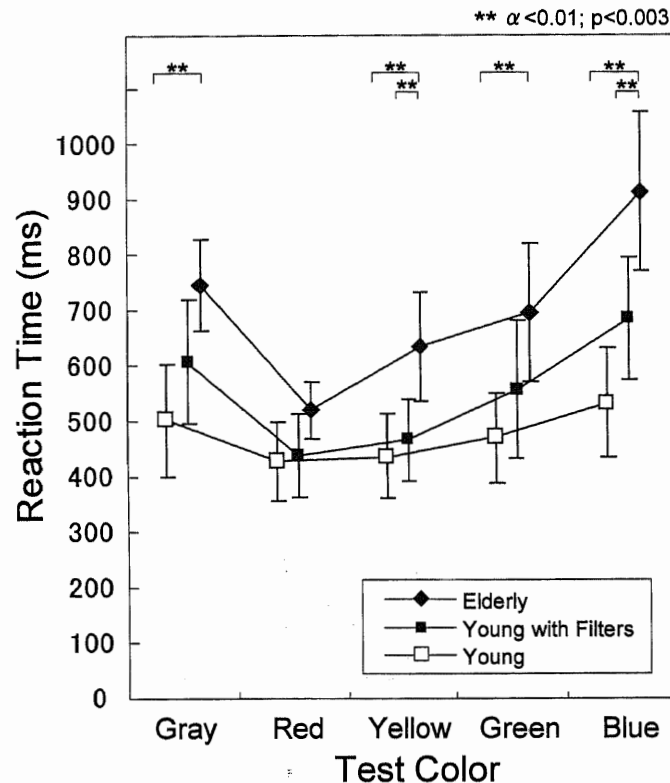


図 3.5(d) 刺激色に対する各被験者カテゴリの反応時間(平均値)

### 3.3.2 P300 潜時

今回の実験では、認知時間の指標として P300 潜時を測定した。若年者フィルタ無、若年者フィルタ有、高齢者の場合における、刺激色に対する P300 潜時の測定結果を図 3.6 (a)～(c)に示す。若年者フィルタ無の結果(図 3.6(a))では、刺激提示後およそ 400～600ms 後に P300 が測定されたことが分かる。被験者によるばらつきは反応時間(図 3.5 (a))より小さかった。青と灰色の刺激色に対して、若干 P300 潜時が長くなり、ばらつきも大きくなり、その傾向は反応時間の結果と同じであった。若年者フィルタ有の結果(図 3.6 (b))では、若年者フィルタ無の結果(図 3.6(a))と比較して、青の刺激に対する潜時が長くなり、被験者のばらつきも大きくなっていた。フィルタを装着することによって青の刺激が弁別閾値に近づき個人差が大きくなっている可能性がある。また、図 3.6(b)では図 3.6(a)と比較して赤の潜時が短かった被験者がいた。これは、フィルタを装着することにより、赤の実効輝度コントラスト、実効色差が増大したことが原因している可能性がある(表 2.6 参照)。高齢者の結果(図 3.6(c))は、反応時間(図 3.5(b)、(c))の結果に比べて、潜時の値と被験者のばらつきが若年者フィルタ有の結果(図 3.6(b))に近かった。

各被験者カテゴリにおける P300 潜時の平均値と、標準偏差、カテゴリ間の有意差を図 3.6(d) に示す。検定については、3.3.1 節と同様に、被験者カテゴリ間の比較について Kruskal-Wallis 検定を行い、被験者カテゴリの影響が有意であれば、post-hoc 検定として Mann-Whitney 検定で多重比較を行った(有意水準に対する  $p$  値については Bonferroni 補正を実施:組み合わせ数 3)。

図 3.6(d) で、若年者フィルタ無の場合の P300 潜時は、刺激色の違いによる差が小さく、55ms 以下であった。高齢者の P300 潜時は、反応時間の結果と同様に、刺激色によって変化した。特に、青の刺激色に対する高齢者の P300 潜時は、赤の刺激に対する潜時より 153ms 長かった。赤以外のすべての刺激色に対する高齢者の P300 潜時は、若年者フィルタ無の結果と比較して 68ms 以上長く、両カテゴリ間の結果に有意差があった( $\alpha < 0.05$ )。若年者フィルタ有の場合の P300 潜時は刺激色によって変化した、特に、青の刺激色に対する P300 潜時は赤の刺激色の場合よりも約 170ms 長かった。各刺激色について、若年者フィルタ有と高齢者の P300 潜時を比較したところ、この 2 つの被験者カテゴリ間ではどの刺激色に対しても有意差は見られなかった。しかし、高齢者のすべての刺激色の P300 潜時の平均は、若年者フィルタ有の P300 潜時の平均値と比較して 39ms 長く、有意差が認められた( $\alpha < 0.05$ )。

Mullis ら<sup>64)</sup>は、視覚刺激に対する P300 潜時は加齢によって遅延し、P300 潜時は  $547.3 - 4.86 \text{ age} + 0.063 (\text{age})^2$  で表すことができると報告している。彼らは、我々の実験と違って視覚刺激の色については考慮していないが、我々の結果と彼らの結果が一致するか比較した。上式に、本実験の高齢被験者の平均年齢 68.4 歳と、若年被験者の平均年齢 21.6 歳を代入すると、高齢者の P300 潜時は 510ms、若年者の P300 潜時は 472ms の計算結果が得られる。この計算結果は、今回の実験での高齢者の P300 の平均値の 532ms と、若年者の P300 の平均値 457ms とよく一致し、今回の実験で測定された P300 潜時は既存研究と比較しても妥当な値であると言える。

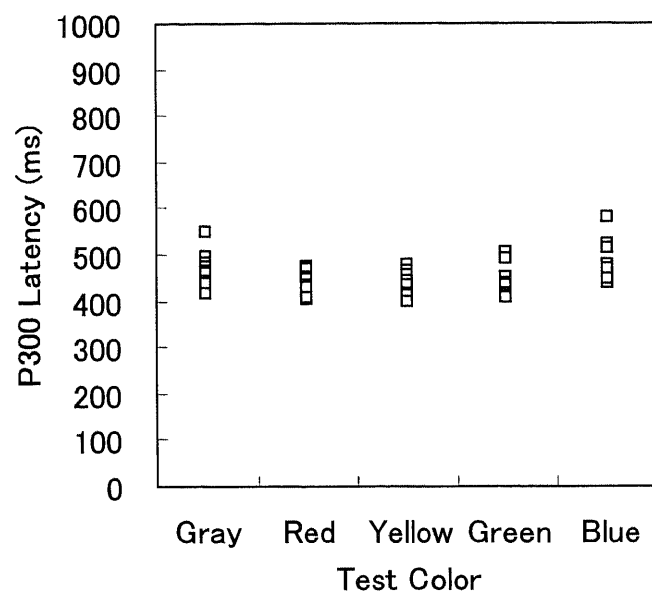


図 3.6(a) 若年者フィルタ無の刺激色に対する P300 潜時の測定結果

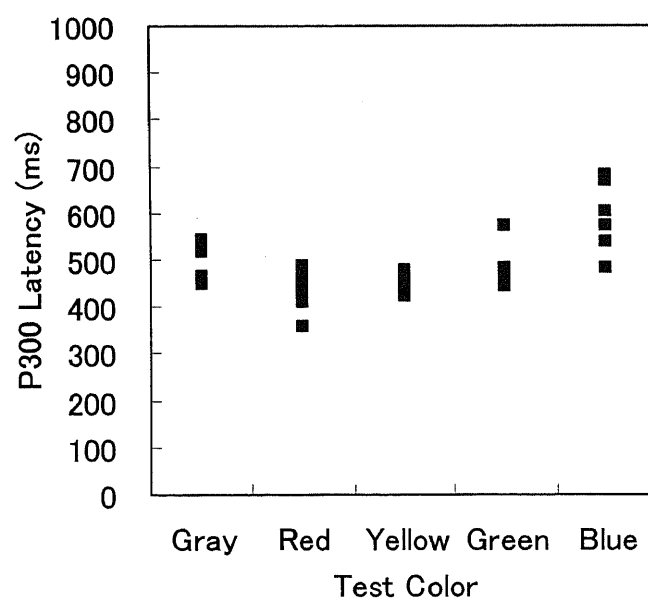


図 3.6(b) 若年者フィルタ有の刺激色に対する P300 潜時の測定結果



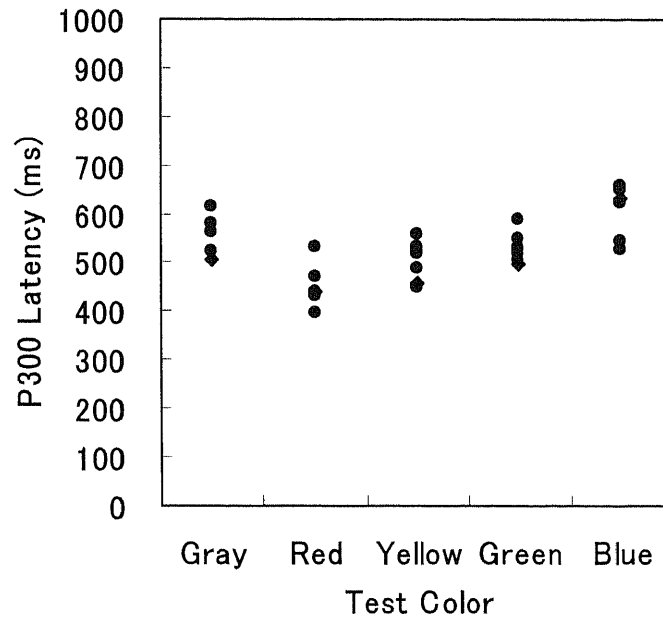


図 3.6(c) 高齢者の刺激色に対する P300 潜時の測定結果

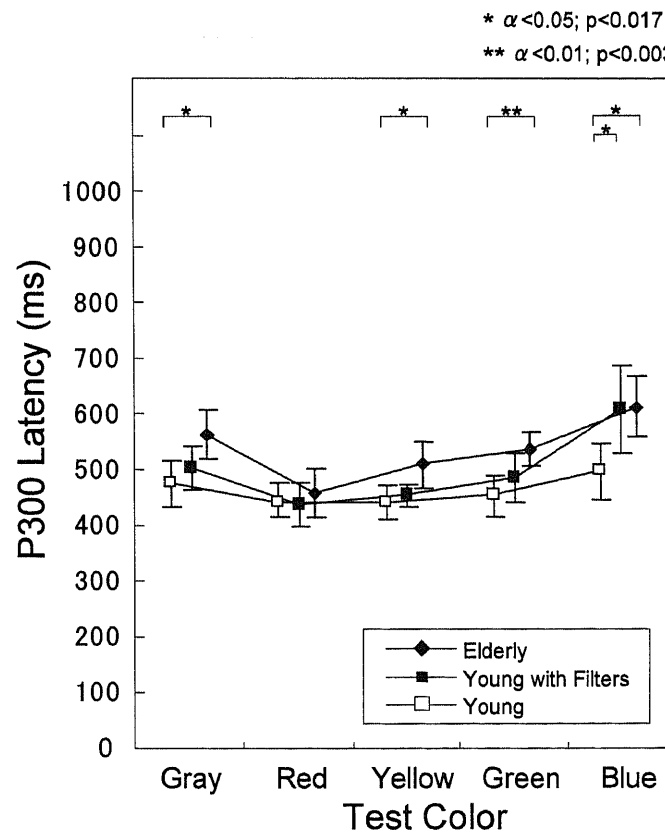


図 3.6(d) 刺激色に対する各被験者カテゴリの P300 潜時の平均値と標準偏差

## 3.3.3 P300 振幅

表 3.2 に各被験者カテゴリ、各刺激色に対する P300 の平均振幅と標準偏差を示す。すべての被験者カテゴリにおいて、青の刺激色に対する P300 振幅は他の刺激色と比較して最も小さく、灰色の刺激色に対する P300 振幅が 2 番目に小さい。高齢者の P300 振幅は、若年者フィルタ無の場合と比較して平均で  $8.7\mu\text{V}$  小さい。Picton ら<sup>61)</sup>は、聴覚刺激に対する P300 についてではあるが、「P300 振幅は 1 歳につき  $0.18\mu\text{V}$  の割合で低下する」と報告している。今回の実験における高齢被験者と若年被験者の年齢差は 46.8 歳であった。この年齢差を Picton らの報告に当てはめると、P300 の振幅は  $8.24\mu\text{V}$  低下すると予想される。本実験から得られた  $8.7\mu\text{V}$  の振幅の低下は、この予想とよく一致し、今回得られた P300 振幅は既存研究と比較しても妥当な値であるといえる。若年者フィルタ有の場合、青と灰色の刺激色に対する P300 振幅は  $20\mu\text{V}$  以下に減少した。一方で、若年者フィルタ有の赤と黄色の刺激色に対する P300 の振幅は、若年者フィルタ無の場合の振幅とほとんど同じであった ( $3.3\mu\text{V}$  以内)。若年者フィルタ有の場合の緑の刺激色に対する P300 振幅は若年者フィルタ無の場合より大きな値であった。各刺激色に対する P300 振幅の被験者カテゴリに対する差について Kruskal-Wallis 検定を行ったところ、被験者カテゴリ間の振幅の差に有意な差は認められなかった。

表 3.2 各被験者カテゴリでの刺激色に対する P300 振幅の平均値 ( $\mu\text{V}$ )。

カッコ内は標準偏差を示す。

	Gray	Red	Yellow	Green	Blue	Average
Young without Filters	22.4 (7.5)	26.6 (8.5)	27.4 (8.8)	23.8 (8.7)	21.9 (9.1)	24.4
Young with Filters	17.4 (4.8)	23.3 (8.1)	24.7 (8.9)	24.9 (11.6)	14.9 (3.8)	21.0
Elderly	14.2 (5.3)	18.9 (9.8)	17.1 (13.2)	15.5 (11.5)	12.9 (6.2)	15.7

## 3.3.4 主観評価結果

実験の各ブロック後に、表 2.3 に示した視認性評価尺度を用いて刺激画像の判別のしやすさを主観評価した結果を、図 3.7 に示す。第 2 章の実験結果 (図 2.9) とほぼ同様の結

果が得られた。反応時間、P300 潜時、P300 振幅の結果では、高齢者と若年者フィルタ有の間で、刺激色による傾向は同じになったが絶対値は大きく異なっていた。しかし、主観評価の結果は、高齢者と若年者フィルタ有の評価の絶対値に大きな差はなかった。一方、青と灰色の刺激色に対する若年者フィルタ無と高齢者の主観評価値と、青の刺激色に対する若年者フィルタ無と若年者フィルタ有の主観評価値との間には有意差が認められた ( $\alpha < 0.01$ )。

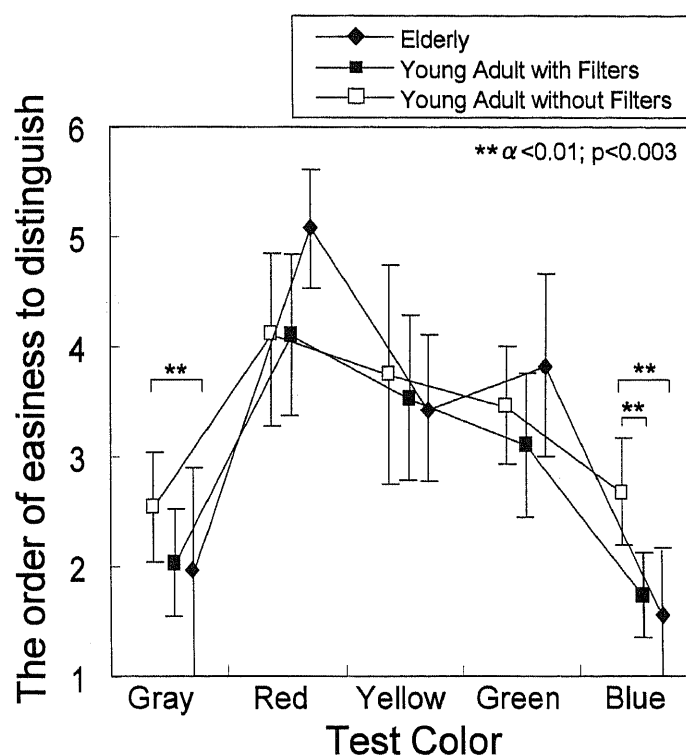


図 3.7 刺激色に対する各被験者カテゴリの主観評価結果(平均値)

### 3.4 考察

本章の目的は、高齢者の反応時間と認知時間が、若年者と比較してどのくらい変化したのか、また、加齢による水晶体の黄変は高齢者の認知時間にどのくらい影響を与えているのかを調べることにある。

#### 3.4.1 若年者フィルタ無と高齢者の結果の比較

若年者フィルタ無の場合の P300 潜時の刺激色による差は小さく、55ms 以内であった。これは、背景色と刺激色の輝度コントラストと色差が、刺激色によらず一定になるよう実験条件として設定されていたためと考えられる(2.4.4 節参照)。高齢者の P300 潜時は刺激色

によって大きく変化し、青と灰色の刺激色に対する P300 潜時は、他の刺激色と比較して非常に長くなった。若年者フィルタ有の場合も、高齢者の結果と同様に、青と灰色の刺激色に対する P300 潜時が長くなった。この結果は、刺激色によって変化する高齢者の P300 潜時の増加は、高齢者の水晶体の黄変が原因であることを示唆している。この水晶体の黄変による P300 潜時の増加は、第 2 章での反応速度の低下についての議論と同様に、水晶体の黄変によって網膜上に投影された刺激画像の実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差が減少し、刺激画像の視認性が低下することが原因ではないかと考えられる(3.4.4 節で詳細に検討)。

### 3.4.2 若年者フィルタ有と高齢者の結果の比較

高齢者と若年者フィルタ有の間の P300 潜時の差(図 3.6(d))は、同じカテゴリ間の反応時間の差(図 3.5(d))より小さかった。この結果は、加齢による反応時間の増加は、水晶体の黄変による視覚刺激の視認性の悪化にともなって生じる認知時間の増加だけに起因するものではなく、それに加えて、中枢神経系や運動機能の加齢による機能低下が影響していることを示唆する。

若年者フィルタ有の P300 潜時は、高齢者と同様の傾向を示すものの、高齢者の結果と全く一致するわけではなく、若年者フィルタ有の P300 潜時の平均値(すべての刺激色の結果の平均)と高齢者の P300 の平均値は、それぞれ、493ms、532ms であった。この差は、反応時間ほどは大きくはないが、有意な差があった。これは、Mullisら<sup>64)</sup>が報告した、視覚刺激に対する P300 潜時の加齢による遅延の可能性がある。また今回の実験では、水晶体の黄変だけを模擬しているので、老人性縮瞳<sup>23,34)</sup>、網膜上の受容体の感度の減少<sup>54,55)</sup>、視神経系の劣化<sup>65)</sup>、認知機構の機能低下などの水晶体の黄変以外の視覚および視覚情報処理系の加齢効果が関与している可能性も考えられる。Czigler<sup>62)</sup>は、色認識に対して注意に関連した ERP の潜時と反応時間は高齢者で増加し、加齢による注意プロセスの遅れがあるのではないかと報告している。

### 3.4.3 水晶体の黄変が加齢による認知時間の増加に与える影響

今回の研究では、色刺激の視認性における水晶体の黄変の影響を調べるために、高齢者水晶体擬似フィルタを用いている。反応時間と P300 の測定において、このフィルタを用いる利点は、視覚刺激に反応するタスクのパフォーマンスに影響を与える多くの加齢変化の中から、水晶体の黄変の影響だけを評価できることである。加齢による反応時間の増加と、加齢による認知時間(P300 潜時)の増加、および水晶体の黄変による認知時間の増

加(若年者フィルタを装着することによるP300潜時の増加)を表3.3に示す。青の刺激色に対する結果を見ると、加齢による認知時間の増加は、水晶体の黄変による認知時間の増加とほぼ等しく、ほとんど水晶体の黄変によるものであると考えられる。水晶体の黄変は、短波長の光の透過率を減少させるため、青の刺激色の視認性に大きく影響する。水晶体の黄変によって赤の刺激色に対する認知時間が減少しているが、これは水晶体の黄変の影響で赤の刺激色と背景の実効輝度コントラスト、実効色差が大きくなったため(表2.6)でないかと考えられる。表3.3で、加齢による認知時間の増加は、加齢による反応時間の増加のうちの20%(赤)から37%(緑)である。さらに、加齢による反応時間の増加は、認知時間の加齢による増加に伴って増加している。青の刺激色に対し、認知時間は水晶体の黄変の影響により116ms増加し、反応時間は加齢により385ms増加した。これらの結果は、加齢による視認性の低下は、認知時間を増加させるだけでなく、それにとまって高齢者の反応時間も増加させることを示す。この事実は、表示の視認性は、特に高齢者において、日常生活で迅速に行動する際の重要なファクタであることを意味している。

表 3.3 反応時間の加齢による増加(上段)、認知時間(P300 潜時)の加齢による増加(中段)、水晶体の黄変による認知時間の増加(下段)。RT は反応時間を、P3 は P300 潜時を、添え字の e は高齢者、yf は若年者フィルタ有、ynf は若年者フィルタ無を示す。

	Gray	Red	Yellow	Green	Blue
Age-related increase of RT ( $RT_e - RT_{ynf}$ ) [ms]	248	96	204	230	385
Age-related increase of cognition time ( $P3_e - P3_{ynf}$ ) [ms]	88	18	68	85	116
Increase of cognition time caused by yellowing lens ( $P3_{yf} - P3_{ynf}$ ) [ms]	28	-5	12	33	111

#### 3.4.4 反応速度、P300 潜時と実効輝度・実効輝度コントラスト・実効色差の関係

第2章で、反応時間の逆数として定義された反応速度は、刺激色の実効輝度、刺激色と背景色間の実効輝度コントラストと実効色差、世代の4つの項からなる多重回帰式で

表すことができることを述べた。そこで、今回の実験での反応時間と P300 潜時の逆数について、刺激色の実効輝度  $L'$ 、刺激色と背景の間の実効輝度コントラスト  $C'$  と実効色差  $dE'$ 、世代  $Age$  の 4 つの項を用いて多重回帰分析を行ったところ、以下の回帰式が得られた。 $Age$  は世代群を表す定数とし、若年者 (平均年齢 21.6 歳) の場合に 0、高齢者 (平均年齢 68.4 歳) の場合に 1 をとる。(3.1)、(3.2) 式の相関係数は、それぞれ、0.918、0.866 であった。

$$RT^{-1} = 0.056L' + 9.109|C'| + 0.013dE' - 0.453Age + 0.973 \quad (R=0.918) \quad (3.1)$$

$$P300^{-1} = 0.021L' + 6.712|C'| + 0.008dE' - 0.191Age + 1.517 \quad (R=0.866) \quad (3.2)$$

(2.3)、(2.4) 式で同様の検討を行っているが、(2.3)、(2.4) 式では無反応のデータが含まれる反応速度について解析を行った。本節の解析では、反応時間と認知時間を比較することが目的であるため、無反応時のデータは含まれてない。無反応時のデータを含めて反応速度の評価を行う場合には (2.4) 式を用いることで、無反応時のデータを含めずに反応時間と認知時間の評価を行いたい場合には (3.1)、(3.2) 式を用いることで、反応速度、反応時間、認知時間の予測が可能である。図 3.8(a) に、(3.1) 式から反応時間の逆数に対して  $L'$ 、 $C'$ 、 $dE'$  を 3 次元プロットしたものを示す。図に表示された面は、同じ反応時間になると予想される  $L'$ 、 $C'$ 、 $dE'$  の組み合わせである。図 3.8(a) は、第 2 章の図 2.11(c) に対応する。図 3.8(a) の  $C'$  に対する傾きは、図 2.11(c) より大きくなっている。これは、第 2 章の分析で無反応時のデータが含まれていることや、被験者の違いによるデータのばらつきが原因と考えられる。図 3.8(b) は、(3.2) 式から P300 潜時の逆数に対して  $L'$ 、 $C'$ 、 $dE'$  を 3 次元プロットしたものを示す。図に表示された面は、同じ P300 の潜時を示すと予想される  $L'$ 、 $C'$ 、 $dE'$  の組み合わせである。(3.1) 式、(3.2) 式、図 3.8 は、今回の実験条件の範囲内で、これらの 4 つの因子を用いて反応時間、P300 潜時を定量的に予測できることを意味する。

本論文では、若年者が高齢者の視覚特性を模擬することを目的としているため、本章および第 2 章では、高齢者 (平均年齢 60 歳代) と若年者 (平均年齢 20 歳代) の 2 つの年代の視覚特性に注目し、その測定結果を用いて解析、検討を行った。今後、それ以外の年代を含めて視覚の加齢特性を検討するためには、今回と同様の手法を用いて他の年代の特性を測定、解析することで、より詳細な加齢変化を定式化できると考えられる。

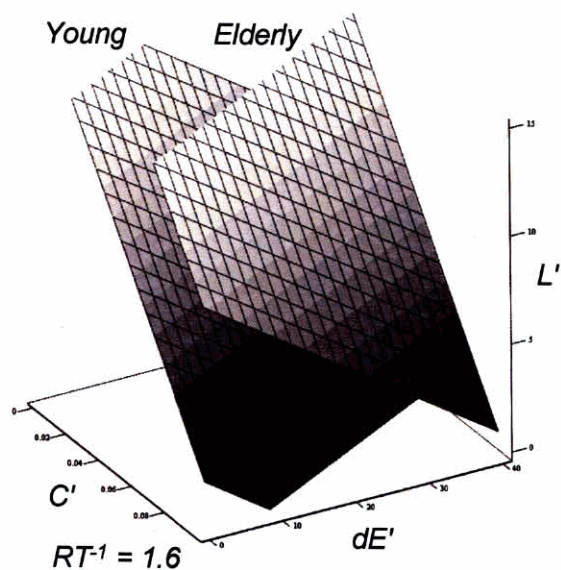


図 3.8(a) (3.1)式から反応時間の逆数が 1.6 になると予想される  $L'$ 、 $C'$ 、 $dE'$ の組み合わせ

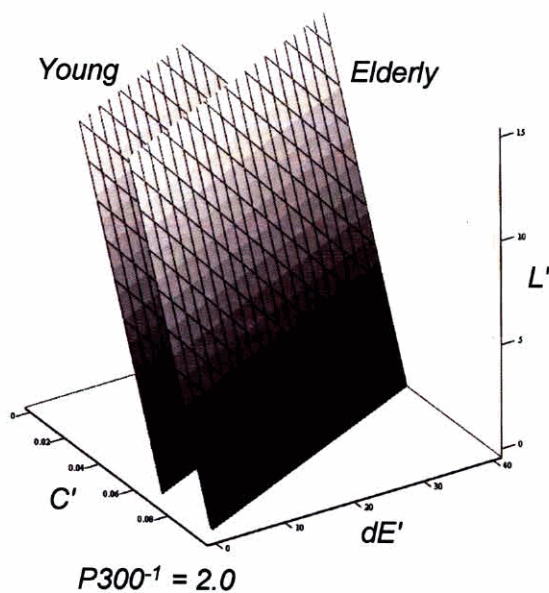


図 3.8(b) (3.2)式から P300 潜時の逆数が 2.0 になると予想される  $L'$ 、 $C'$ 、 $dE'$ の組み合わせ

## 3.4.5 反応時間と主観評価の関係

図 3.9 に各被験者カテゴリの反応時間に対する主観評価値を、図 3.10 に各被験者カテゴリの P300 潜時に対する主観評価値を示す。各被験者カテゴリの結果に対する回帰曲線を  $y = A \exp(-Bx)$  の関数を用いて求めた。回帰係数と相関係数を表 3.4 に示す。反応時間に対する主観評価値の回帰曲線は、2.4.2 節、図 2.11 の結果と同様に、若年者と高齢者の間で大きく異なる。若年者フィルタ有と、フィルタ無の結果の回帰曲線はほぼ一致する。一方、P300 潜時に対する主観評価値の回帰曲線(図 3.10)は、反応時間の場合(図 3.9)と異なり、若年者と高齢者の結果はかなり類似する。この結果は、P300 潜時は、世代に関わらず視覚刺激の視認性を定量的に評価する指標として利用できる可能性を示している。(3.2) 式では、表示のパラメータ(実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差)および世代と P300 潜時の関係を定式化した。P300 潜時と視認性の主観評価値の関係は得られていなかった。今回の結果から P300 潜時と視認性の主観評価値の関係が明らかになったので、この関係式と(3.2) 式を用いれば、表示のパラメータおよび世代から主観評価値を類推することも可能になる。

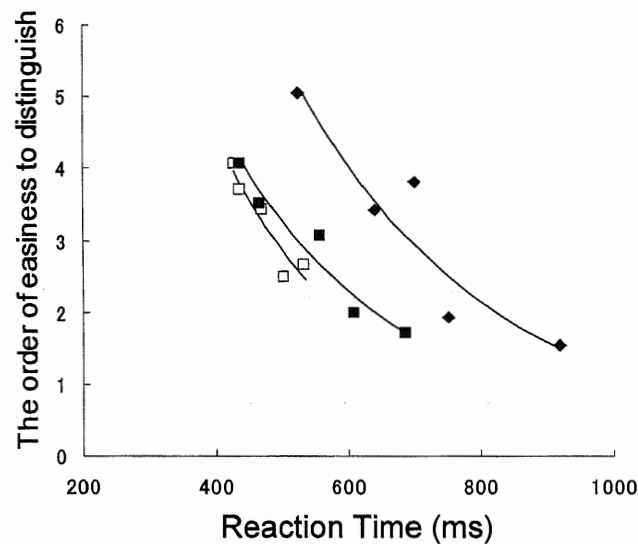


図 3.9 各被験者カテゴリの反応時間と主観評価  
(各刺激色に対する平均値をプロット)



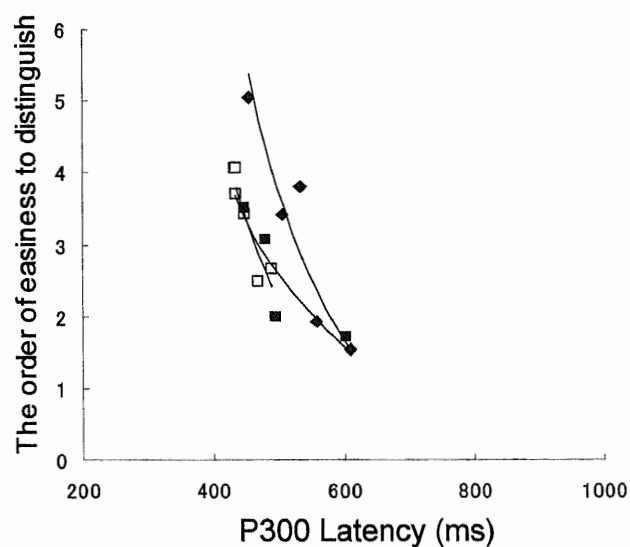


図 3.10 各被験者カテゴリーの P300 潜時と主観評価  
(各刺激色に対する平均値をプロット)

表 3.4 図 3.9、3.10 の回帰曲線  $y=A\exp(Bx)$  の回帰係数  $A$ ,  $B$  と相関係数  $R$

RT			
	Young without filters	Young with filters	Elderly
$A$	26.70	18.94	27.20
$B$	$-3.2 \times 10^{-3}$	$-3.5 \times 10^{-3}$	$-4.5 \times 10^{-3}$
$R$	0.925	0.969	0.934

P300 Latency			
	Young without filters	Young with filters	Elderly
$A$	211.03	31.75	125.86
$B$	$-8.1 \times 10^{-3}$	$-5.0 \times 10^{-3}$	$-8.0 \times 10^{-3}$
$R$	0.933	0.902	0.897

### 3.5 本章のまとめ

本章では、高齢者の反応時間と認知時間が、若年者と比較してどのくらい変化したのか、また、加齢による水晶体の黄変は高齢者の認知時間にどのくらい影響を与えているのかを調べるために、若年者が高齢者水晶体擬似フィルタを装着しない場合と、装着した場合、高齢者の場合について、反応時間、認知時間の指標として P300 潜時を計測し、視認性の主観評価値を測定した。その結果から、加齢による水晶体の黄変は、色刺激に対する認知時間を有意に増加させることが分かった。また、高齢者の反応時間の増加は、水晶体の黄変による視覚刺激の視認性の低下そのものが原因の 1 つであるが、それ以外の高次の加齢変化も反応時間の増加に大きく関与していることが示された。また、反応時間と P300 潜時の逆数について、水晶体の黄変によって変化する刺激の網膜上での実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差と、年代の 4 つの因子で重回帰分析を行ったところ、反応時間と P300 潜時の逆数は、これらの 4 つの因子からなる重回帰式で表現できることが分かった。さらに、高齢者の P300 潜時と主観評価値の関係は、若年者の結果と類似し、P300 潜時は年代に関係なく視認性の指標として利用可能であることが示唆された。以上の結果から、今回用いた高齢者の水晶体の分光透過率を模擬する高齢者水晶体擬似フィルタは、若年設計者がある配色パターンに対する高齢者の視認性、反応時間、認知時間を評価するのに非常に有効なツールとなることが明らかとなった。

## 4 環境照度を考慮した高齢者視覚の模擬ゴーグルの製作

### ー老人性縮瞳模擬フィルタと高齢者視覚模擬ゴーグルの試作ー

本章では、環境照度によって変化する高齢者の視覚機能を模擬するために、老人性縮瞳による網膜照度の低下を光学的に模擬する方法について検討する。様々な環境照度下で若年者と高齢者の瞳孔面積を測定し、環境照度に対する老人性縮瞳の特性を明らかにするとともに、若年者の網膜照度を高齢者の網膜照度と等価にする老人性縮瞳模擬フィルタの透過率を導出する。さらに、電氣的に透過率を変化させることができる光学能動素子を用いた老人性縮瞳模擬フィルタの作成について述べる。最後に、老人性縮瞳模擬フィルタと、第2章、第3章で述べた高齢者水晶体擬似フィルタを組み合わせた高齢者視覚模擬ゴーグルを提案する。

#### 4.1 本章の背景と目的

第1章で述べたように、製品の表示や、配色、インタフェースのデザインを高齢者が見やすいかどうかを評価するための、高齢者視覚の模擬・評価方法が提案されている。その1つの手法である高齢者水晶体擬似フィルタの有効性については、第2章、第3章で述べた。しかしながら、高齢者の色弁別、色の見え、コントラスト感度などの視覚機能は、環境照度によって大きく変化する<sup>37,44,45)</sup>。それにも関わらず、これまでの高齢者視覚模擬手法は、周辺の照明環境を考慮していなかった。精度の高い高齢者視覚の模擬を実現するためには、これまでの手法に加えて、照明環境の変化も考慮する必要がある。加齢や環境照度によって大きく変化する視覚機能の1つに瞳孔がある。瞳孔は、環境照度によってその大きさが変化し、網膜に入射する光の量を調節する。また、高齢者の瞳孔は、若年者と比較して小さいことが知られている(老人性縮瞳)<sup>23,34)</sup>。老人性縮瞳は、高齢者の網膜照度を低下させ、高齢者の視覚機能を低下させると考えられている。そこで本章では、幅広い環境照度レベルにおける老人性縮瞳の特性を明らかにし、様々な変化する照明環境下での老人性縮瞳による高齢者の網膜照度の低下を模擬する手法について検討する。

#### 4.2 老人性縮瞳の模擬の概要

瞳孔の大きさは環境照度によって変化するため、高齢者の網膜照度が若年者に比べて減少する割合も環境照度により異なる。そのため、老人性縮瞳による網膜照度の減少を若年者に模擬させるには、環境照度レベルごとに老人性縮瞳による網膜照度の減少割合を計算し、網膜照度の減少に応じて眼に入る光量を制御しなくてはならない。これが、老人

性縮瞳を模擬する 1 つの難しさであった。この問題点を解決するために、本研究では、図 4.1 に示すように電氣的に透過率の制御が可能な光学能動素子である Electro-Chromic (EC) デバイスを用いて、眼に入射する光を制御する技術を開発した。具体的には、老人性縮瞳の特性に合わせて眼に入る光量を瞬時に変化させることができるように、標準比視感度特性をもつ光センサで環境照度  $E$  をリアルタイムにセンシングし、その照度によって EC フィルタの透過率  $\tau(E)$  を変化させることを考えている(図 4.1)。このような方法で、老人性縮瞳による網膜照度の低下を模擬する検討を行った。

最初に、様々な照度レベルに対する高齢者と若年者の瞳孔面積(図 4.1 の  $S_1(E)$  および  $S_2(E)$ )を測定した。既存研究として、網膜照度に対する瞳孔径や面積の変化を調べた研究<sup>34)</sup>が存在する。しかし、既存研究では Maxwell 視(平行光線束を眼球の瞳孔中心に収束させて、その後に広がる光線を網膜に照射する方法。瞳孔中心に光が集光されるため、網膜照度は瞳孔の大きさによらず一定となる。)を用いて光を網膜に照射して網膜照度と瞳孔径の関係を調査していることや、測定した環境照度の範囲が狭いこともあり、今回の老人性縮瞳の模擬には利用できないと考えた。また、今回の模擬手法では、暗闇から屋外日陰程度の照度範囲を模擬の対象として想定している。そこで、日陰程度の高照度の条件から暗黒までの照度環境を実験室内に実現できる高照度光源を作成し、これらの照度範囲での若年者と高齢者の瞳孔面積を測定し、模擬する際の基礎データとした。

次に、実験結果から得られた若年者と高齢者の環境照度—瞳孔面積特性を比較し、老人性縮瞳による網膜照度の減少を計算した。そして、この老人性縮瞳による網膜照度の減少分だけ若年者の網膜照度を減少させるフィルタの透過率  $\tau$  を求めた。この老人性縮瞳による網膜照度の減少は環境照度によって異なるため、フィルタ透過率  $\tau$  は環境照度の関数  $\tau(E)$  となる。ここで注意したいのは、図 4.1 でフィルタの装着によって眼に入る光量が  $E$  から  $E'$  に低下すると、フィルタ装着者の瞳孔は拡大し、瞳孔面積は  $S_1(E)$  から  $S_1(E')$  に増加する。この  $E$  から  $E'$  へのフィルタによる光量の減少による瞳孔面積の増加を考慮しないと、フィルタを装着した若年者の網膜照度は、模擬するために実現しようとした網膜照度よりも高くなってしまう。そこで今回の検討では、フィルタによる光量の減少にともなうフィルタ装着者の瞳孔の拡大も考慮し、フィルタの透過率を決定した。この透過率  $\tau(E)$  を持ったフィルタを、以後、老人性縮瞳模擬フィルタと呼ぶ。

最後に、環境照度から老人性縮瞳模擬フィルタの透過率を決定するため、環境照度をセンシングして EC フィルタの透過率を制御する回路を製作した。この老人性縮瞳模擬フィルタと、第 2、3 章で述べた高齢者水晶体擬似フィルタを重ね、ゴーグル型の高齢者視覚模擬ツールのプロトタイプを試作した。この高齢者視覚模擬ツールを、以後、高齢者視覚

模擬ゴーグルと呼ぶ。高齢者視覚模擬ゴーグルは、環境照度に応じて高齢者の網膜照度を再現し、水晶体の黄変も含めて模擬することが可能である。

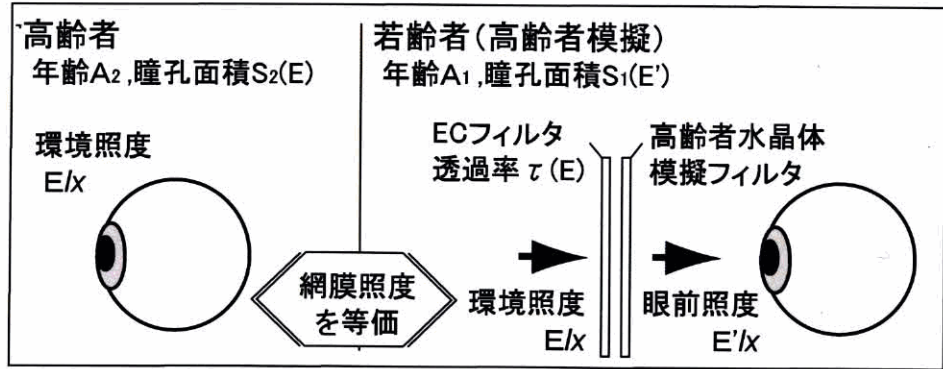


図 4.1 老人性縮瞳の光学的模擬手法の概念図

### 4.3 瞳孔面積測定の実験方法

#### 4.3.1 被験者

高齢者 8 名（男性 4 名、女性 4 名、平均年齢 67.1 歳：標準偏差 0.83 歳）、若年者 8 名（男性 4 名、女性 4 名、平均年齢 21.8 歳：標準偏差 0.89 歳）が実験に参加した。眼の疾病に対する既往歴がないこと、薬の服用、点眼をしていないことを実験前に口頭で確認後、色覚が正常なことを東京医大式色覚検査表（村上色彩研究所製）を用いて確認した。瞳孔面積は瞳孔を撮影した画像から測定するため、メガネ、コンタクトレンズは使用していない被験者を採用した。被験者には実験前に実験の目的を説明し、書面で実験参加の同意を得た。被験者には、実験後、謝金が支払われた。

#### 4.3.2 実験配置および実験手順

実験配置を図 4.2 に示す。瞳孔面積の測定には、電子瞳孔計イリスコーダ C7364（浜松ホトニクス製）を用いた。被験者は瞳孔計測用のゴーグルを装着した状態で、蛍光灯（松下電工製 FHF32EX-N-H、5000K）と拡散板で構成された面光源の前のイスに座った。そして、被験者は、おおよそ被験者の眼の高さの位置にある、面光源上の「+」の形状をした固視点を注視するよう指示された。光源は、蛍光灯を高密度に並べ、光源から 50cm の距離で 15000lx 以上の高照度の照明環境を作るよう工夫した。瞳孔計測用のゴーグルを装着した時の視野角は縦 24° × 横 32° であり、視野角の範囲内は輝度が均一な面光源とし、光源と被験者の眼の距離は 50cm とした。被験者の眼に入射する光量は、ゴーグルの

開口部に ND フィルタを取り付けることで 6 段階に変化させた。ゴーグル内の被験者の眼の直前位置での垂直照度と、ゴーグル内から光源を見たときの光源の輝度を表 4.1 に示す。

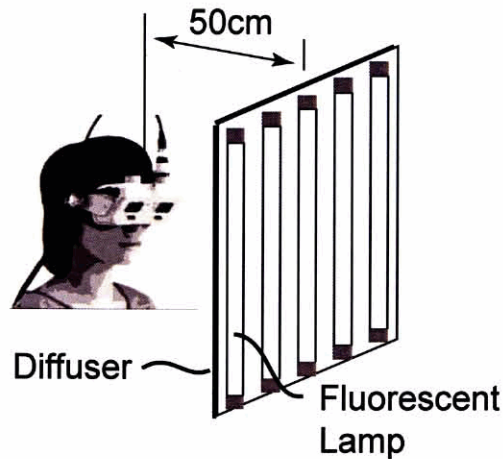


図 4.2 実験配置

表 4.1 実験条件

Condition No.	Illuminance ( $lx$ )	Luminance ( $cd/m^2$ )
1	4850	19000
2	372	1400
3	19.6	85
4	1.6	6.2
5	0.16	0.58
6	0.03	0.07

#### 4.3.3 実験手順

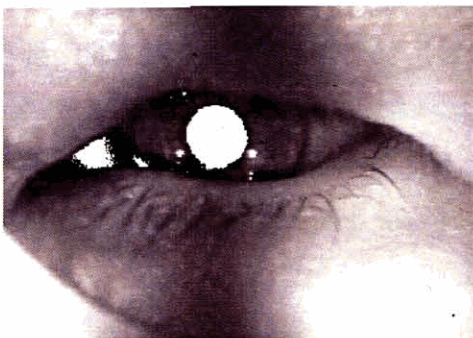
被験者は、実験用の光源が点灯していない実験室に入室し、瞳孔面積測定用のゴーグルを装着した。測定用ゴーグルに取り付けられている瞳孔面積測定用のカメラからの映像を見て、まつ毛が眼の前にかかって瞳孔面積測定の妨げになっていないことを確認し、もし、必要であれば化粧用ビューラーでまつ毛を上向きに曲げた。瞳孔測定計の画像に瞳孔全体が映っていることを確認した後、実験用の光源を点灯した。約 5 分程度の順応の後、測定を開始した。実験条件の順序は、表 4.1 の眼への入射光量が減少していく 1→6 の順



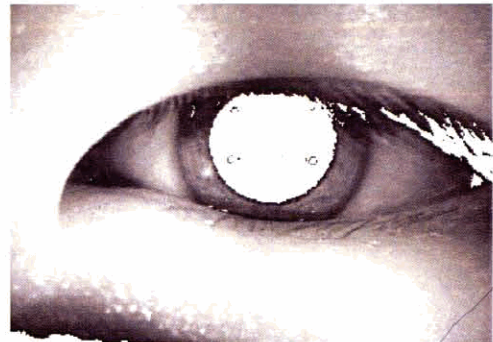
序で測定を行った後、入射光量が増加していく6→1の順序で測定を行った。各実験条件において被験者は約200秒間光源を見続け、その間の瞳孔面積を測定した。実験中は、被験者の眼の焦点距離をなるべく一定とするよう、固視点に眼のピントを合わせるよう指示した。実験に要した時間は、被験者1人に対し約1時間であった。

#### 4.3.4 データ処理

図4.3に、同じ照度下で電子瞳孔計によって観察された若年者と高齢者の瞳孔の映像を示す(白い部分が瞳孔と認識し測定した部分)。高齢者の瞳孔面積が明らかに小さいことが分かる。電子瞳孔計において、瞳孔に対応する画素の諧調を設定し、その諧調以下の濃度のデータから自動的に瞳孔径を算出し、その瞳孔径から瞳孔面積を計算した。測定は60Hzのサンプリング周波数で行った。図4.4に各照度条件下での瞳孔面積の測定データの例を示す。データは200秒間測定された。グラフでの急激なデータの変化は瞬目を示している。この瞬目による急激なデータ変化の部分はデータから削除し、以後のデータ処理を行った。実験条件を変えるとき環境照度の変化による影響を取り除くために、測定時間200秒のうち、その環境に順応したと思われる後半100秒のデータを平均した。1つの照度条件について、照度が上がる順番で実験条件を変化させ測定した結果と、照度が下がる順番で測定した2つの結果が存在するが、この2つの測定結果の平均値をその照度に対する瞳孔面積とした。



(a) 高齢者の瞳孔



(b) 若年者の瞳孔

図4.3 電子瞳孔計で観察された同じ照度下での高齢者と若年者の瞳孔の画像(一例)

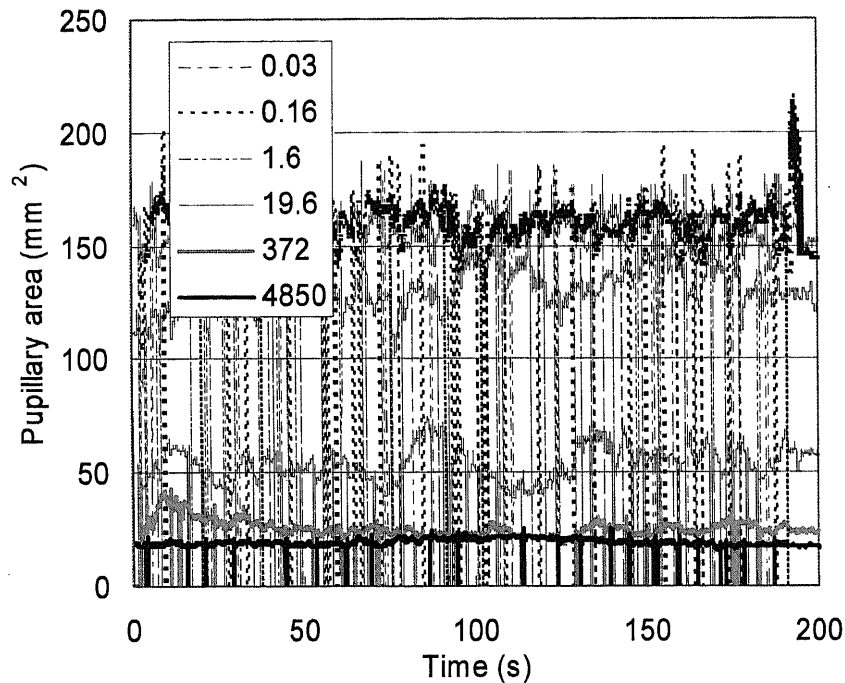


図 4.4 各環境照度条件下における瞳孔面積の測定データ例  
(凡例は環境照度  $lx$  を示す)

#### 4.4 実験結果

図 4.5(a)、(b)に、実験で得られた環境照度に対する若年者と高齢者の瞳孔面積の測定結果を示す。若年者の瞳孔面積(図 4.5(a))は、実験中の最大照度  $4850lx$  で約  $4mm^2$  で、個人のばらつきは小さかった。 $100lx$  以下になると瞳孔面積は急激に大きくなっていくが個人のばらつきも大きくなる。観察された最も大きな瞳孔面積は、 $58.4mm^2$ (照度  $0.03lx$ 、瞳孔直径は約  $8.6mm$ )であった。高齢者の瞳孔面積(図 4.5(b))は、明るい条件( $4850lx$ )では若年者の結果とそれほど変わらなかったが、 $100lx$  以下になるとその特性は明らかに若年者と異なっていた。照度  $0.03lx$  時に観察された、最も大きな瞳孔面積は  $34.8mm^2$ (瞳孔直径は約  $6.7mm$ )であり、最も小さい瞳孔面積は  $11.2mm^2$ (瞳孔直径は約  $3.8mm$ )であった。暗所(特に  $100lx$  以下)での瞳孔面積が高齢者に比べて非常に小さくなっていることが分かる。

図 4.5(c)に若年者、高齢者の平均値と標準偏差を示す。図 4.5(c)で、□、△は、それぞれ若年者と高齢者の平均値を示し、エラーバーは、「若年者平均値+若年者標準偏差  $SD_1$ 」(若年者の 68 パーセンタイル値)、「高齢者平均値-高齢者標準偏差  $SD_2$ 」(高齢者



の 32 パーセンタイル値)を示している。図 4.5(c)からも、加齢によって瞳孔面積が大きく減少していることが分かる。高齢者の平均値は最大で若年者の平均値の約半分に減少し、高齢者平均 $-SD_2$ は、最大で、若年者平均 $+SD_1$ の約 20%にまで減少している。

実験の結果から若年者と高齢者の環境照度と瞳孔面積の関係を求めるために、若年者平均値、高齢者平均値、若年者平均値 $+SD_1$ 、高齢者平均値 $-SD_2$ の結果に対し、(4.1)式に示すような  $\tanh$  関数を用いて回帰曲線を求めた。 $S(x)$ は瞳孔面積を示し、 $x$ は対数照度を、 $k, l, m, n$ は回帰係数を示す。得られた関数のグラフを図 4.4 の結果に重ねて示す。回帰計算で求めた各回帰係数を表 4.2 に示す。(4.1)式が図 4.1 の  $S_1(E')$ 、 $S_2(E)$ に対応する。

$$S(x) = k + l \tanh( mx + n ) \quad (4.1)$$

ここで、 $x = \log(E)$

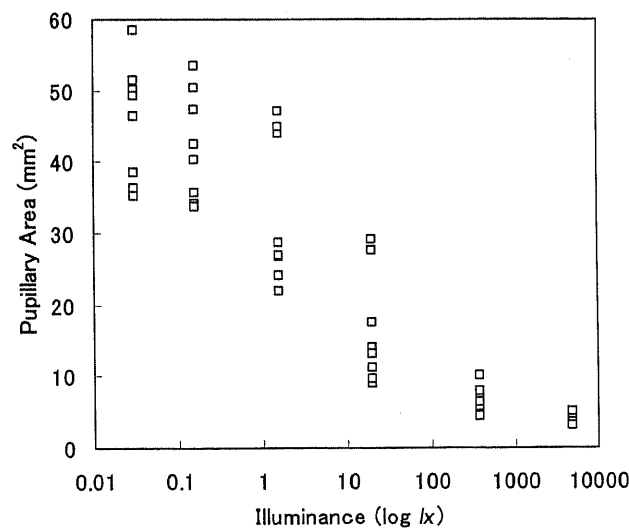


図 4.5(a) 照度(対数)に対する若年者の瞳孔面積

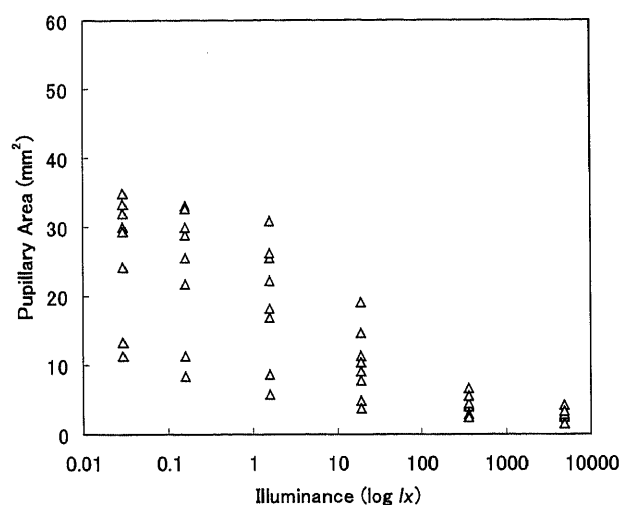


図 4.5(b) 照度(対数)に対する高齢者の瞳孔面積

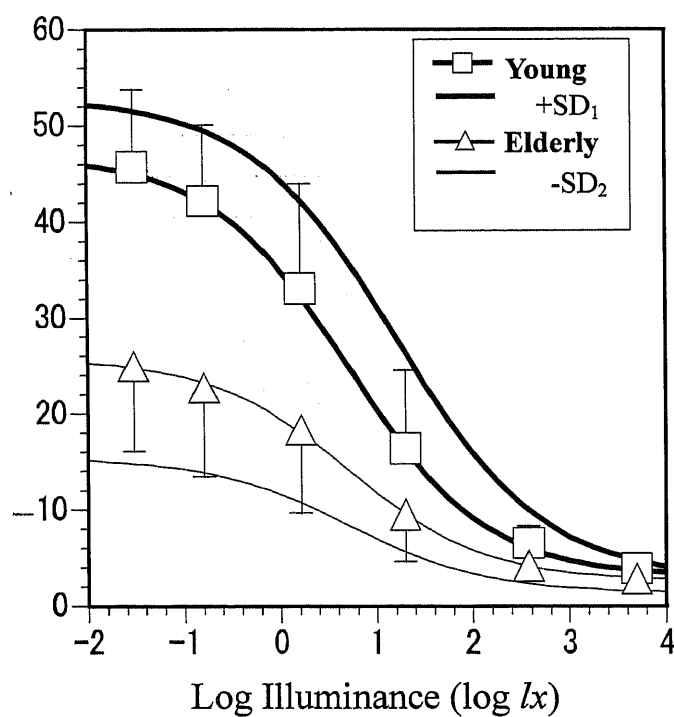


図 4.5(c) 実験で得られた各照度(対数)に対する高齢者と若年者の瞳孔面積と、それを元に計算した照度—瞳孔面積関数 (SD<sub>1</sub>、SD<sub>2</sub>は、若年者、高齢者の標準偏差)

表 4.2 (4.1)式の回帰係数

	$k$	$l$	$m$	$n$
Young	25.32	-21.91	0.712	-0.498
Young+SD <sub>1</sub>	28.59	-25.13	0.767	-0.827
Elderly	14.05	-11.59	0.702	-0.505
Elderly-SD <sub>2</sub>	9.911	-8.012	0.608	-0.052

#### 4.5 老人性縮瞳模擬フィルタの透過率の検討

本節では、実験で得られた高齢者と若年者の照度-瞳孔面積特性から、老人性縮瞳による網膜照度の減少を模擬するための老人性縮瞳模擬フィルタの透過率  $\tau(E)$  を求める。老人性縮瞳による網膜照度の減少を減光フィルタを用いて模擬する場合、高齢者と若年者の瞳孔面積の比から減光フィルタの透過率を見積もっている場合がある<sup>39)</sup>。しかしながら、フィルタを装着することにより眼に入射する光が減少し、その分だけ瞳孔は大きくなり、網膜照度は模擬しようとした値よりも高くなってしまう。そのため、今回の研究ではフィルタによって眼に入る光量の減少による瞳孔面積の変化も考慮した。図 4.6 に、高齢者、および若年者が高齢者水晶体擬似フィルタと老人性縮瞳模擬フィルタを装着したときに網膜照度に影響をおよぼす因子を模式的に示した。高齢者の網膜照度は、環境照度  $E$  と、瞳孔面積  $S_2$ 、水晶体の透過率  $T_e$  の積  $ET_e S_2(x)$  に比例する(図 4.6(a))。また、高齢者水晶体擬似フィルタと老人性縮瞳模擬フィルタを装着した若年者の網膜照度は、眼前照度  $E'$  と、瞳孔面積  $S_1$ 、水晶体の透過率  $T_y$  の積  $E'T_y S_1(x')$  に比例する(図 4.6(b))。ここで、 $x$ 、 $x'$  は照度の対数  $\log E$ 、 $\log E'$  を示す。図 4.6 で、高齢者とフィルタを装着した若年者の網膜照度が等しいと仮定すると、以下のような網膜照度等価式を立てることができる。

$$ET_e S_2(x) = E'T_y S_1(x') \quad x = \log E, x' = \log E' \quad (4.2)$$

ここで、若年者が水晶体擬似フィルタと老人性縮瞳模擬フィルタを装着した場合の眼前照度  $E'$  は、環境照度  $E$  と高齢者水晶体擬似フィルタの透過率、老人性縮瞳模擬フィルタの透過率  $\tau(E)$  との積で表される。高齢者水晶体擬似フィルタの透過率は、高齢者の水晶体の透過率と若年者の水晶体の透過率の比  $T_e/T_y$  になるよう設計されているので(2.2.1 節参照)、若年者が模擬フィルタを装着した場合の眼前照度  $E'$  は、以下の式のように表す

ことができる。

$$E' = E\tau(x) \frac{T_e}{T_y} \quad (4.3)$$

(4.2) 式に (4.3) 式を代入すると、

$$S_2(x) = \tau(x)S_1(x') \quad (4.4)$$

$$\text{ここで、} x' = \log \left\{ E\tau(x) \frac{T_e}{T_y} \right\}$$

また、 $T_e/T_y$  は、高齢者水晶体擬似フィルタの視感透過率であり、0.758 であることが分かっている。

(4.4) 式に、前節で得られた  $S_1(x')$ 、 $S_2(x)$  のモデル (4.1) 式を代入し、 $\tau(x)$  について解けば、老人性縮瞳による網膜照度の低下を模擬するフィルタの視感透過率  $\tau(x)$  が求まる。しかし、(4.4) 式は陰関数になっているため、直接  $\tau(x)$  を  $x$  の関数として解くことはできない。そこで、数値計算ソフトウェア Mathcad を使い、割線法及び Mueller 法によって、-2 から 6 まで 0.5 間隔の  $x$  に対し、数値解析的に  $\tau(x)$  を求めた。その結果を図 4.7 に示す。図 4.7 において、■印は、(4.1) 式の若年者と高齢者の瞳孔面積の平均の関数を用いて計算した結果を示し、○印は、(4.1) 式で若年者+SD<sub>1</sub>と高齢者-SD<sub>2</sub>の関数を用いて計算した結果を示す。

さらに、 $\tau(x)$  の関数型を求めるために、2 つの方法を行った。第一の方法は、(4.5) 式に示した関数を計算結果にフィッティングさせる方法である。(4.5) 式は (4.4) 式を  $\tau(x)$  について書き直し、 $\tau(x)$  と  $\log(T_e/T_y)$  を含む  $S_1(x')$  の項を、 $S_1$  の微分関数に置き換えたものである。この関数を用いた理由は、環境照度の  $E$  から  $E'$  への変化に対応した若年者の瞳孔面積関数  $S_1$  の変化を、 $S_1$  の微分関数として表せるのではないかと考えたことと、(4.1) 式に示した  $S_1$  の微分関数  $dS_1(x)/dx$  が  $S_1$  と同様の tanh 関数で表せるため ((4.6) 式)、後の解析が楽になる利点があるのではないかと考えたからである。図 4.7 に示した数値解析的に求めた結果に対して (4.5) 式をフィッティングした曲線を図 4.7 に重ねて点線で示す。回帰係数  $p$ 、 $q$ 、相関係数  $R$  は表 4.3 に示すとおりである。精度よくフィッティングされていることが分かる。

$$\tau(x) = S_2(x) / \{ S_1(x) + p(dS_1(x+q)/dx) \} \quad (4.5)$$

$$dS_1(x)/dx = kl(1 - \tanh(mx + n)^2) \quad (4.6)$$

第二の方法として、数値解析で求めた結果に対して6次の多項式を用いて多項式回帰を行った。得られた6次関数を(4.7)、(4.8)式に示す。(4.7)式は、(4.1)式で若年者と高齢者の瞳孔面積の平均値の結果から計算した関数であり、(4.8)式は(4.1)式で若年者+SD<sub>1</sub>と高齢者-SD<sub>2</sub>の結果から計算した関数である。図 4.7 上にフィッティングした曲線を実線で示す。相関係数  $R$  は表 4.3 に示すとおりである。結果として、(4.5)式を用いるよりも、多項式回帰を用いた場合の方が高い相関係数でフィッティングできた。そこで今回は(4.7)式、(4.8)式を老人性縮瞳による網膜照度の減少を模擬する老人性縮瞳模擬フィルタの透過率関数とする。

$$\begin{aligned} \tau_{mean} = & -3.30 \times 10^{-5} x^6 - 1.14 \times 10^{-3} x^5 + 4.61 \times 10^{-3} x^4 \\ & + 1.45 x^3 - 2.06 \times 10^{-2} x^2 - 7.20 \times 10^{-2} x + 0.485 \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \tau_{SD} = & 3.13 \times 10^{-4} x^6 - 1.19 \times 10^{-3} x^5 + 2.47 \times 10^{-3} x^4 \\ & + 2.75 x^3 - 4.37 \times 10^{-3} x^2 + -7.28 \times 10^{-2} x + 0.202 \end{aligned} \quad (4.8)$$

ここで、図 4.7 に示された老人性縮瞳による網膜照度の低下を模擬するためのフィルタの透過率の特性について議論する。図 4.7 から、事前の予想通り、高齢者の網膜照度の模擬には、模擬フィルタの透過率を環境照度によって大きく変化させる必要があることが分かる。平均的な加齢による網膜照度の減少を模擬する場合には透過率を 0.4~0.67 の範囲で、加齢による網膜照度の減少が大きいケースを模擬する場合(図 4.7 の○印、(4.8)式の場合)には 0.1~0.43 の範囲で変化させる必要がある。この結果は、従来の研究で用いられていた通常の透過率を持つ減光フィルタでは、一定の環境照度下での状態しか模擬できない(環境照度の変化の影響は模擬できない)ことを意味する。また、図 4.7 の透過率関数は、おおよそ  $10 \sim 100lx$  ( $\log 2 \sim \log 3$ ) の範囲に最小値を持っている。これは、この照度範囲で、若年者の瞳孔面積の変化が高齢者の瞳孔面積の変化よりも大きいことを示している。つまり、この照度範囲で若年者の瞳孔面積は高齢者より敏感に反応しているといえる。このような、環境照度の範囲における若年者と高齢者の瞳孔面積の変化の違いも視認性の加齢変化に影響を及ぼしているのかもしれない。一方で、環境照度の最も高い場合では、透過率は平均値比較で約 0.67、網膜照度の低下が大きいケースでは約 0.43 であり、老人性縮瞳による網膜照度の低下の影響は暗い環境照度の場合よりも小さいと考

えられる。これは、比較的明るい場所で(グレアの影響<sup>66)</sup>については考えないという前提で)、高齢者の不便さが少ないという事実と一致する。

本節での検討により、老人性縮瞳による網膜照度の低下を模擬する老人性縮瞳模擬フィルタの透過率特性を環境照度の関数として定義することができた。この透過率を実現するフィルタ制御システムを作成することにより、老人性縮瞳による網膜照度低下が原因となる高齢者視覚機能の低下を模擬することができる。

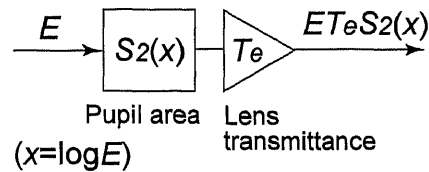


図 4.6(a) 高齢者の網膜照度に影響をおよぼす因子

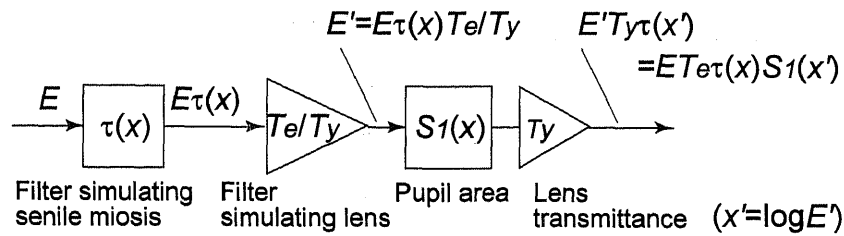


図 4.6(b) 若年者が高齢者水晶体擬似フィルタと老人性縮瞳模擬フィルタを装着した時に網膜照度に影響をおよぼす因子

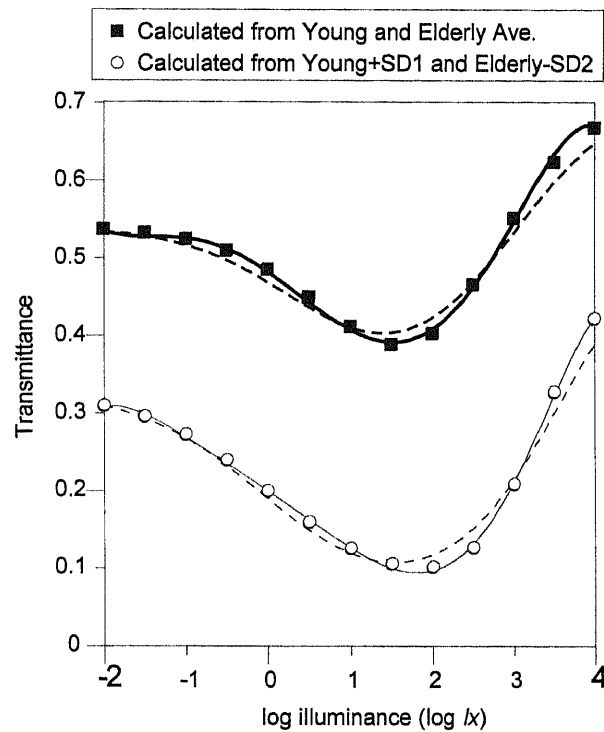


図 4.7 (4.4) 式から計算した老人性縮瞳模擬フィルタの透過率

■は若年者と高齢者の瞳孔面積の平均の関数から計算した透過率であり、○は若年者+SD<sub>1</sub>と高齢者-SD<sub>2</sub>の瞳孔面積の関数から計算した透過率。点線は式(4.5)でフィッティングした結果を示し、実線は式(4.7)(4.8)でフィッティングした結果を示す。

表 4.3 (4.5)(4.6)(4.7)式の回帰係数と決定係数

Eq. No.	Line in Fig.4.7	$p$	$q$	$R$
4.5 (mean)	-----	-0.506	-0.107	0.984
4.5 (mean±SD)	-----	-0.983	-0.233	0.988
4.6 (mean)	—————	-	-	0.998
4.7 (mean±SD)	—————	-	-	0.999

#### 4.6 老人性縮瞳模擬フィルタと高齢者視覚模擬ゴーグルの作成

本節では、これまで述べてきた老人性縮瞳による網膜照度の減少の模擬を光学能動素子を用いて実現する方法と、それに高齢者水晶体擬似フィルタを併用することで、老人性縮瞳による網膜照度低下と水晶体の黄変に起因する高齢者の視覚機能低下を模擬する

ゴーグルの作成について述べる。

#### 4.6.1 EC (Electro-Chromic) フィルタ

EC フィルタを用いて、図 4.7 に示した透過率関数を持つ老人性縮瞳模擬フィルタを実現することとした。EC フィルタとは、電気化学的な酸化還元反応による薄膜層の着消色（エレクトロクロミック現象）を利用し、透過率を電氣的に変化させることができるデバイスである。ここで使用した EC フィルタの外観写真を図 4.8 に示す。EC フィルタは印加する電圧によって透過率の制御が可能である。図 4.9 に使用した EC フィルタの分光透過率を測定した結果を示す。図 4.9 から、今回使用した EC フィルタは透過率の波長依存性が非常に少なく、眼に入る光の分光成分を変えずに網膜照度のみを減少させるフィルタとして適していることが分かった。また、約 80%～20%の範囲で透過率を可変にできることも確認した。

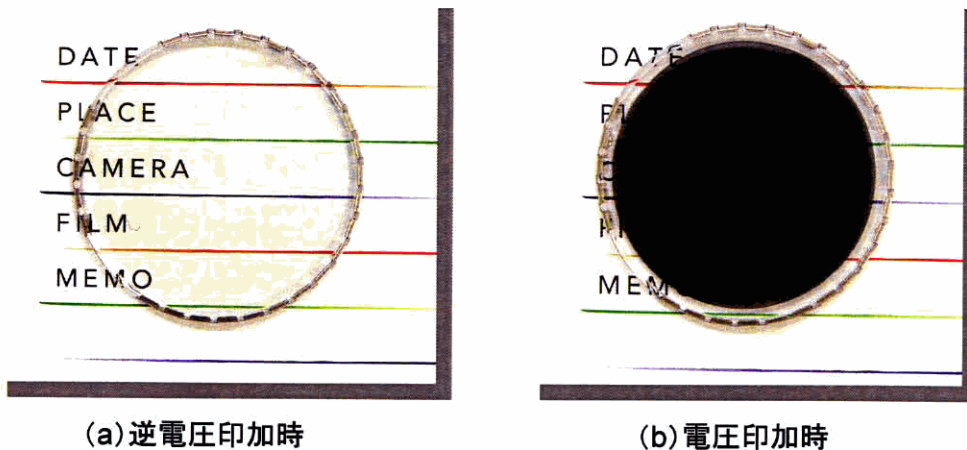


図 4.8 老人性縮瞳模擬フィルタの作成に使用した EC フィルタ



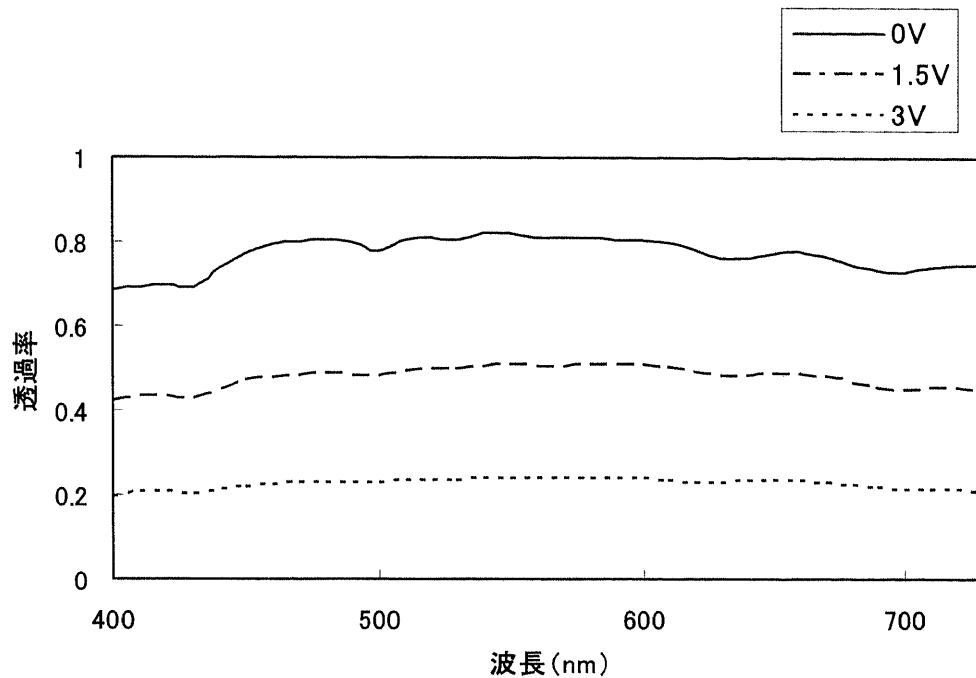


図 4.9 EC フィルタの分光透過率特性

#### 4.6.2 老人性縮瞳模擬フィルタの透過率の実現と高齢者視覚模擬ゴーグルの製作

図 4.10 に作成した高齢者視覚模擬ゴーグルの模式図を示す。センシングした環境照度に対応して EC フィルタの透過率が(4.7)式に従い変化するように設計した電気制御回路(図 4.11)を用い、EC フィルタへの印加電圧を制御した。センシングされた環境照度に基づき制御された EC フィルタの透過率と、実現したい透過率関数である(4.7)式の値を図 4.12 に示す。EC フィルタによって老人性縮瞳を模擬するための(4.7)式の透過率を実現できたことが分かる。

EC フィルタで作製した老人性縮瞳フィルタと高齢者水晶体擬似フィルタを重ね合わせ、図 4.13 に示す高齢者視覚模擬ゴーグルを試作した。環境照度はゴーグルの中央部に取り付けられたフォトダイオードでセンシングされる。制御回路は、環境照度をセンシングした信号に応じて、EC フィルタの透過率をコントロールするための電圧を供給する。制御回路は、ゴーグルを付けたまま自由に動き回れるようバッテリー駆動とし、使い勝手のよいように胸のポケットに入る大きさとした。また、このゴーグルには EC フィルタに重ねて高齢者水晶体擬似フィルタを取り付けてあるため、老人性縮瞳と同時に水晶体の黄変も模擬すること

が可能である。また、フィルタはねじ込み式の蓋で押さえられていて脱着が可能であり、老人性縮瞳と、高齢者の水晶体の黄変のどちらかだけの模擬も可能である。

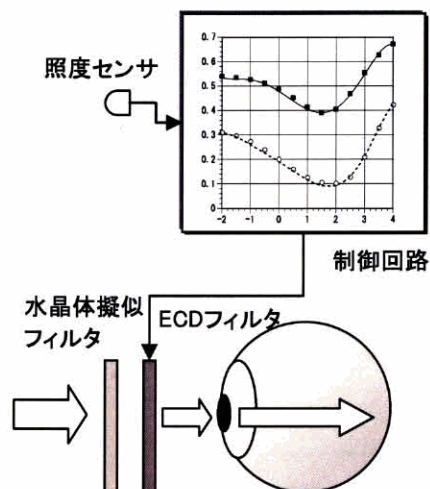


図 4.10 高齢者視覚模擬ゴーグルの模式図

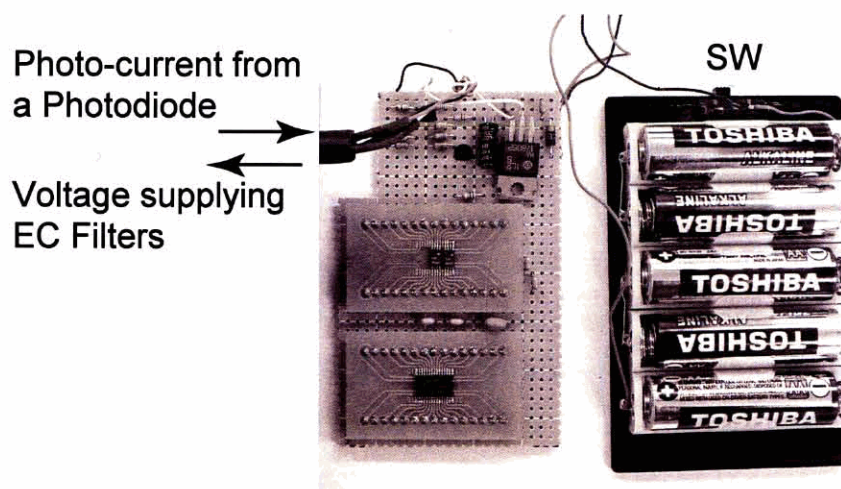


図 4.11 ECD フィルタ制御回路

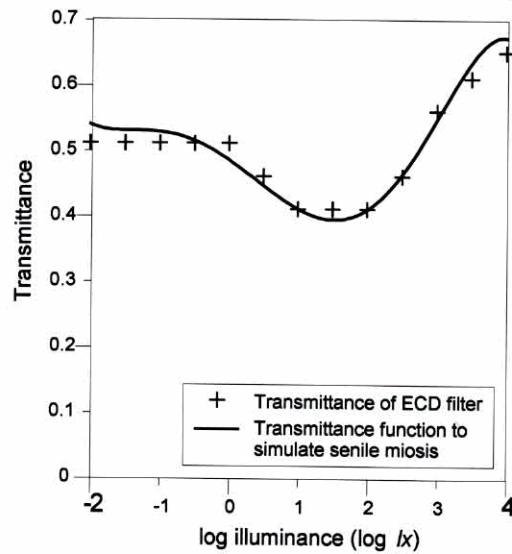


図 4.12 環境照度に対する EC フィルタの透過率と、透過率関数(4.7)式の値

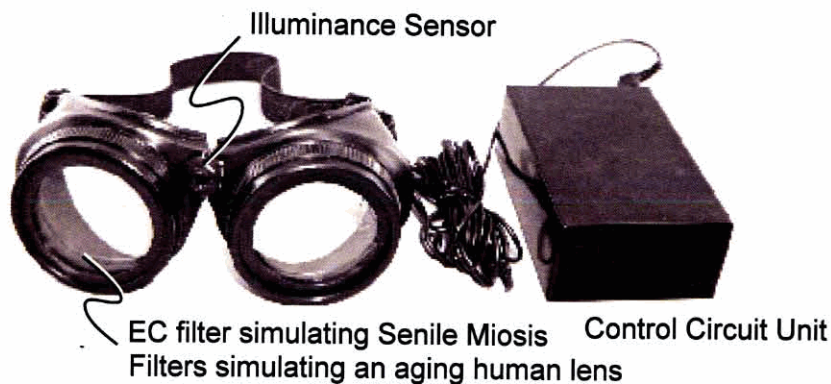


図 4.13 高齢者視覚模擬ゴーグルの概観

#### 4.7 本章のまとめ

本章では、高齢者の視覚機能の低下が環境照度によって大きく変化することを考慮し、環境照度に対する老人性縮瞳の特性を明らかにし、実環境下での老人性縮瞳による網膜照度の低下を模擬する手法について検討した。暗闇から屋外の日陰程度の照度に相当する様々な照度レベルでの高齢者と若年者の瞳孔面積を測定し、若年者と高齢者の環境照度—瞳孔面積特性を求めた。更に、実験結果から得られた若年者と高齢者の環境照度—瞳孔面積特性を比較し、老人性縮瞳による網膜照度の減少を計算した。そして、若年者の網膜照度を、老人性縮瞳による網膜照度の減少分だけ光量を減少させる老人性縮

瞳模擬フィルタの透過率  $\tau$  を導出した。老人性縮瞳模擬フィルタの透過率の設計にあたっては、老人性縮瞳模擬フィルタの装着による光量減少に伴うフィルタ装着者の瞳孔の拡大も考慮し、透過率を決定した。最後に、光センサ、EC フィルタ、ならびにその制御回路を用いて、老人性縮瞳模擬フィルタのリアルタイム透過率変化を実現した。この老人性縮瞳模擬フィルタと高齢者水晶体擬似フィルタを重ねることで、環境照度に応じた高齢者の網膜照度を再現し、水晶体の黄変も模擬することができる高齢者視覚模擬ゴーグルを試作した。

## 5 高齢者視覚模擬ゴーグルの効果・応用とその適応範囲

第4章では、環境照度によって変化する高齢者の視覚機能を模擬するために、老人性縮瞳による網膜照度の低下について、環境照度を考慮して模擬を行う老人性縮瞳模擬フィルタを設計、製作した。そして、第2、3章でその効果を確認した高齢者水晶体擬似フィルタと組み合わせた高齢者視覚模擬ゴーグルを提案した。本章では、高齢者視覚模擬ゴーグルを使用することで模擬可能な視覚の加齢効果と、模擬できない加齢効果(本研究成果の適応範囲)について、第2～4章での結果を踏まえながら検証、整理する。また、製品開発に応用する方法の提案も行う。応用については、最近制定された高齢者視覚に関するJIS規格と関連した考察も併せて行い、本研究の有効性について述べる。

### 5.1 反応時間と認知時間

本節では、第2～4章での結果に基づき、高齢者視覚模擬ゴーグルを用いた場合の反応時間、認知時間について考察する。

第2、3章で、色刺激に対する反応時間、反応速度、認知時間は、網膜上に結像される刺激の実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差によって変化することが明らかになった。第2、3章では、水晶体の黄変の影響についてのみ取り扱ったが、高齢者視覚模擬ゴーグルは、高齢者水晶体擬似フィルタに加えて老人性縮瞳模擬フィルタを用いることで、老人性縮瞳による実効輝度の減少も模擬できる。第2、3章の結果を基にすれば、老人性縮瞳による実効輝度の低下の影響も加えた反応時間、認知時間を予測することができる。以下に、第3章(3.1)(3.2)式を用いて、高齢者視覚模擬ゴーグルを用いた場合の、反応時間、認知時間を見積もる。

第2、3章の実験は約500lxの照明環境下で実験を行った。その照明環境での若年者、高齢者の瞳孔面積を(4.1)式から計算した。その結果を表5.1に示す。500lxの照度下では、高齢者の瞳孔面積は若年者の約66%になり、その影響によって高齢者の網膜上に結像される刺激像の実効輝度は、約34%減少すると考えられる。高齢者視覚模擬ゴーグルを用いた場合の反応時間、認知時間(P300潜時)は、第3章(3.1)(3.2)式において実効輝度を約34%減少させることで計算できる。老人性縮瞳模擬フィルタの分光透過率は可視光の範囲でほぼ一定であったので、老人性縮瞳模擬フィルタの実効輝度コントラスト、実効色差は変化ないと考えた。第3章における、刺激色の輝度、高齢者水晶体擬似フィルタを通して測定した実効輝度 $L'$ と、老人性縮瞳の影響を見積もり $L'$ を34%減少させた値 $L''$ を表5.2に示す。(3.1)(3.2)式から、若年者が高齢者視覚模擬ゴーグルを装着した

場合の反応時間、P300 潜時の増加量を求めるには、(3.1) (3.2) 式の実効輝度  $L'$  の係数 0.056、0.021 を用い、第 3 章の実験で得られた若年者フィルタ有の時の反応時間、P300 潜時の逆数から、実効輝度の減少分 ( $L' - L''$ ) に 0.056、0.021 乗じた値を引くことにより計算できる。以上の方法で求めた反応時間と P300 潜時を図 5.1、5.2 に示す。第 3 章での結果と比較できるように、図 5.1、5.2 は、得られた結果を図 3.5、3.6 に重ねて示してある。老人性縮瞳による実効輝度の低下により、反応時間は平均で約 30ms、P300 潜時は平均で 5.4ms 遅延すると見積もられた。高齢者視覚模擬ゴーグルを装着した若年者の反応時間、認知時間は、高齢者水晶体擬似フィルタのみの場合よりいっそう高齢者の値に近づくことが分かる。

P300 潜時は高齢者の値にかなり近づいていると考えるが、眼球光学の代表的な加齢現象である水晶体の黄変と老人性縮瞳を模擬しても、反応時間は高齢者の反応時間と一致しない。このことから、反応時間の増加は、運動の命令に関わる中枢神経系での加齢による機能低下か、加齢による身体的な運動能力の低下の可能性が大きいと推察できる。今回の結果から、高齢者の水晶体の黄変と老人性縮瞳による網膜照度の減少を光学的に模擬する高齢者視覚模擬ゴーグルは、高齢者の認知時間 (P300 潜時) を定量的に評価することが可能であり、高齢者の反応時間については定性的な評価が可能であるといえる。

(3.1)、(3.2) 式は、高齢者水晶体擬似フィルタを通して測定した実効輝度を用いていたが、老人性縮瞳による網膜照度の減少を見積もった  $L''$  (表 5.2) を用いて、再度、重回帰式を求めたところ、(5.1)、(5.2) 式が得られた。ここで、 $Age$  は、若年者の場合は 0、高齢者の場合は 1 である。(5.1) 式と (3.1) 式を比較すると、 $Age$  の項の係数が  $-0.453$  から  $-0.360$  になっている。同様に、(5.2) 式と (3.2) 式を比較すると、 $Age$  の項の係数が  $-0.191$  から  $-0.153$  になった。このことから、(3.1)、(3.2) 式では老人性縮瞳の影響が世代の項に含まれていて、 $Age$  の係数の絶対値が大きかったが、(5.1)、(5.2) 式で老人性縮瞳を見積もった  $L''$  を用いたことで加齢の項の影響が少なくなり、 $Age$  の係数の絶対値が小さくなったと考えられる。

$$RT^{-1} = 0.058L'' + 9.247|C'| + 0.013dE' - 0.360Age + 0.957 \quad (R=0.918) \quad (5.1)$$

$$P300^{-1} = 0.023L'' + 6.743|C'| + 0.008dE' - 0.153Age + 1.506 \quad (R=0.867) \quad (5.2)$$

表 5.1 (4.1)式から求めた 500lx の環境下での若年者と  
高齢者の瞳孔面積と、若年者に対する高齢者の瞳孔面積比

	Pupillary area (mm <sup>2</sup> ) in 500lx	Area ratio of elderly to young
Young	5.81	-
Elderly	3.81	0.656

表 5.2 第 2 章、第 3 章の実験で用いた刺激色の輝度  $L$ 、  
高齢者水晶体擬似フィルタを通して測定した実効輝度  $L'$   
 $L'$  に対し老人性縮瞳の影響を考慮して算出した実効輝度  $L''$

Color	$L$ (cd/m <sup>2</sup> )	$L'$ (cd/m <sup>2</sup> )	$L''$ (cd/m <sup>2</sup> )
Gray	6.616	4.709	3.091
Red	6.627	5.030	3.301
Yellow	5.392	3.946	2.590
Green	6.647	4.659	3.058
Blue	6.647	4.598	3.018
Background	5.984	4.287	3.091

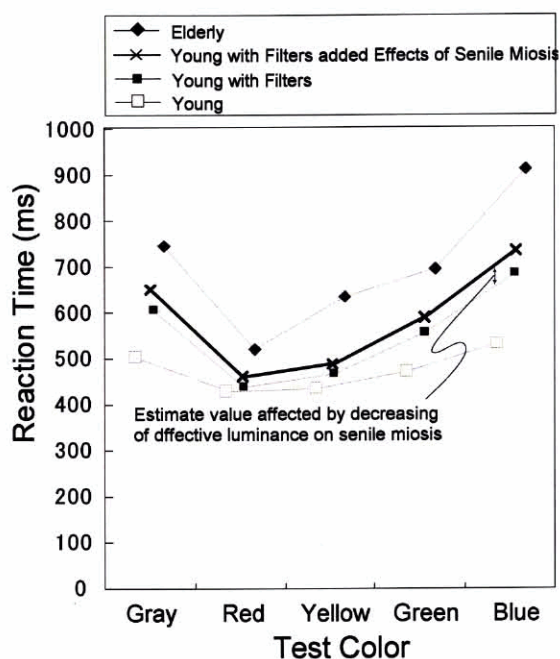


図 5.1 (4.1)式より、500lx 環境下での老人性縮瞳による瞳孔面積の減少を推定し、(3.1)式より若年者が高齢者視覚模擬フィルタを装着したときの反応時間を計算した結果を図 3.5 に重ねて表示する。

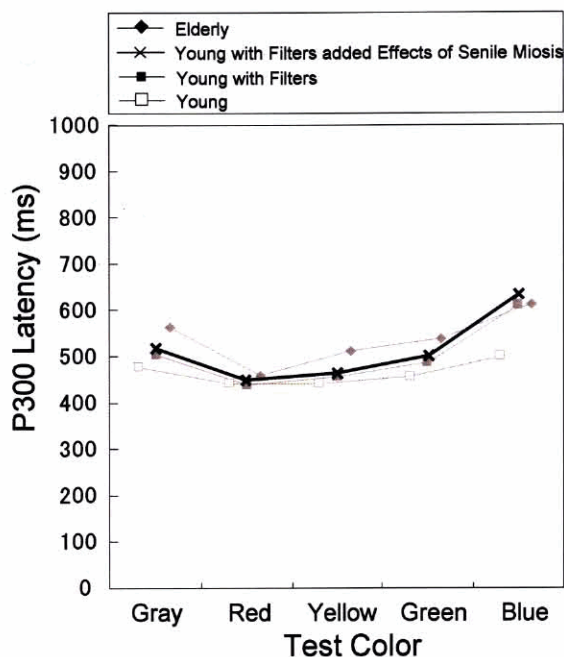


図 5.2 (4.1)式より、500lx 環境下での老人性縮瞳による瞳孔面積の減少を推定し、(3.2)式より若年者が高齢者視覚模擬フィルタを装着したときの P300 潜時を計算した結果を図 3.6 に重ねて表示する。



## 5.2 色弁別と色の見え

Knoblauchら<sup>37)</sup>は、様々な照度の下で、若年者と高齢者に Farnsworth-Munsell 100-hue test を実施し、高齢者に第 3 色覚異常に似た色弁別機能の低下があることを発見した。また彼らは、若年者でも低照度の下で同様の第 3 色覚異常に似た色弁別機能の低下が存在することも報告し、このような色弁別機能低下は、網膜照度の減少が原因ではないかと考察している。今回の老人性縮瞳模擬フィルタは、高齢者と等価な網膜照度を実現するため、このような色弁別機能の低下を模擬できると考えられる。図 5.3 (a) に示した色票を、500lx の環境下で老人性縮瞳模擬フィルタを通して撮影した結果を図 5.3 (b) に示す。図に示すように青の近傍の色が弁別しにくくなっていることが確認できる。

一方、水晶体の黄変については、本論文の第 2 章、第 3 章で色視認性、色刺激に対する反応時間、認知時間への影響が明らかにされた。しかしながら、Werner ら<sup>54,55)</sup>や Okajima ら<sup>4)</sup>の研究によれば、高齢者の水晶体の黄変は非常に長期間に渡って徐々に起こる現象であり、水晶体の黄変に対して神経系での色の知覚の補正を行っていることが示唆されている。このため、より厳密に高齢者視覚の模擬を行うためには、高齢者の色知覚メカニズムにおける色の補償機構を考慮する必要があるが、今回作成した高齢者視覚模擬ゴーグルは色知覚における高齢者の補償機構は考慮されていない。この点については、今後の研究が望まれる。参考までに、図 5.3 (a) に示した色表を、環境照度 500lx の環境下で、老人性縮瞳模擬フィルタと高齢者水晶体擬似フィルタを通して撮影した結果を、図 5.3 (c) に示す。

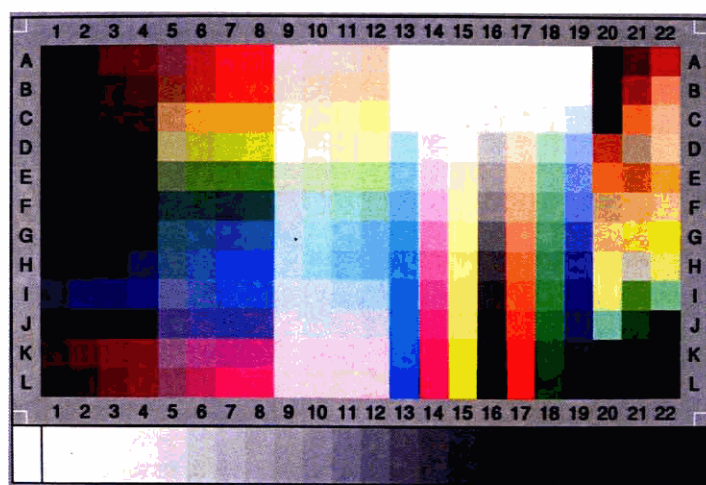


図 5.3 (a) 色サンプル

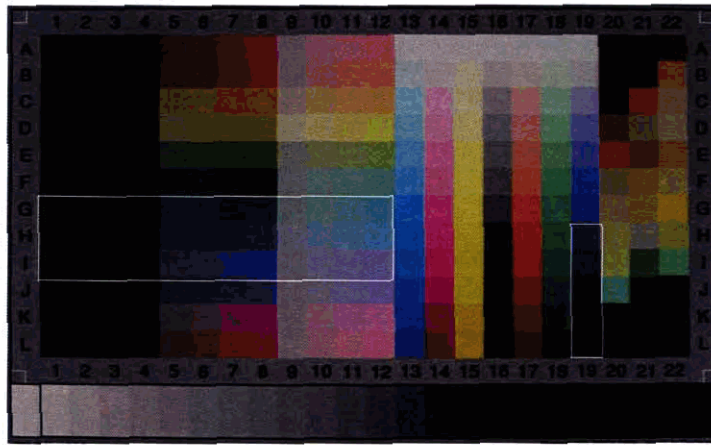


図 5.3(b) 老人性縮瞳模擬フィルタを通して撮影した色サンプル  
青色の近傍の色の弁別が難しくなる。

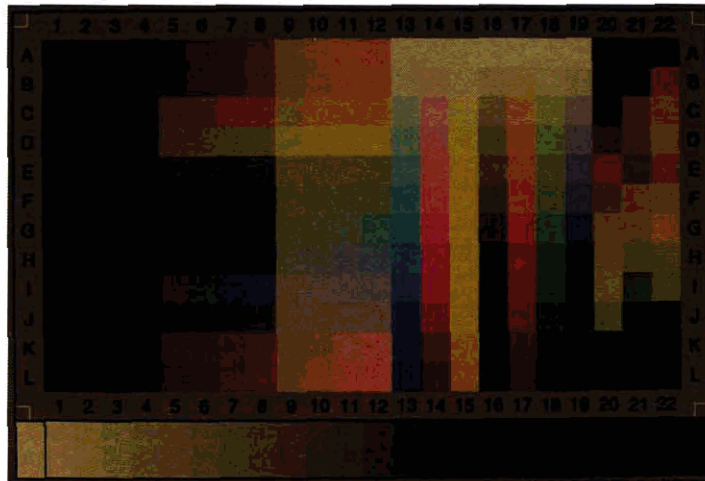


図 5.3(c) 老人性縮瞳模擬フィルタと高齢者水晶体擬似フィルタ  
を通して撮影した色サンプル

### 5.3 空間コントラスト感度

高齢者は、高空間周波数においてコントラスト感度が低下すること<sup>67)</sup>、対象の輝度レベルや視環境の照度レベルが低下するとコントラスト感度が低下すること<sup>16,45,68)</sup>が報告されている。このような視覚機能の低下の原因として、老人性縮瞳と水晶体濃度の増加により生じる高齢者の網膜照度の低下が示唆されている<sup>68-70)</sup>。したがって、高齢者視覚模擬ゴーグルで、高齢者の空間コントラスト感度特性を模擬できる可能性がある。

また、水晶体の混濁によって眼球内に散乱光が発生することで網膜像が劣化し、空間コントラスト感度を低下させる原因になっていることも報告されている<sup>71)</sup>。本研究では、水晶

体の混濁については考慮していないので、水晶体の混濁に起因する空間コントラスト感度の低下は模擬できない。水晶体の混濁は、特に、視界内に強い光源が入った場合や、高輝度の視対象を見た場合に視覚機能を低下させることが知られている<sup>66)</sup>。

また、今回の老人性縮瞳模擬フィルタでは、網膜照度の減少を減光フィルタを用いて模擬したため、縮瞳による眼球光学系の入射瞳の縮小は模擬されていない。老人性縮瞳が高齢者の視覚機能に与える影響については、網膜照度の低下以外に、入射瞳が縮小することによる光学収差の減少、焦点深度の増大という視覚機能向上の効果があることを示唆する既存研究もある<sup>36,72)</sup>。Leggeら<sup>73)</sup>は、縮瞳による焦点深度の増加は、低輝度や視覚低下時に重要な情報となる低空間周波数帯域において最も大きい、と報告している。Kurodaら<sup>74)</sup>の研究では、加齢によって角膜や水晶体にひずみや屈折率分布の変化が生じ、高齢者の眼球光学系には高次の光学収差が発生することが報告されている。縮瞳は、眼球光学系の光学収差を低減するため、この点からも、網膜に結像する画像の質が改善される効果は無視できないであろう。

以上のことから、高齢者視覚模擬ゴーグルでは、加齢による網膜照度の低下に起因する空間コントラスト感度低下の影響は模擬できるものの、縮瞳による光学収差の改善の効果は模擬できないため、使用に際してはこの点に注意する必要がある。老人性縮瞳による光学収差の低減が、どの程度空間コントラスト感度を改善するかについては既存研究もなく、今後さらに検討していくべき課題であると考えらる。

#### 5.4 JIS S 0031:2004「高齢者・障害者配慮設計指針－視覚表示物一年代別相対輝度の求め方及び光の評価方法」に関連した利用

我が国における高齢者人口の急激な増加に伴い、高齢者が安全で快適な生活を送るために必要な視環境の評価・設計の指針として、2004年1月20日に、日本工業規格「JIS S 0031:2004 高齢者・障害者配慮設計指針－視覚表示物一年代別相対輝度の求め方及び光の評価方法」<sup>15)</sup>が制定された。この規格は若年者から高齢者までの観測対象者が光源及び物体を見るとき、視感効率及びそれに基づく視認性を、対象者の年齢を考慮した年代別相対輝度を用いて評価する方法について規定している。JIS S 0031では、視覚の加齢効果を考慮した光源や物体の明るさが計算でき、特に高齢者が安全で快適な生活を送るために必要な見やすい視覚表示物のコントラストなどの設計評価に利用可能であるとしている。しかしながら、JIS S 0031を製品の設計評価に応用するにあたっては技術的な適用の難しさがある。JIS S 0031の評価方法は、本研究で行った方法と非常に関連する部分が多いため、本節では、JIS S 0031に関連して本研究の結果を製品設計、評価に

利用していく方法について議論する。

#### 5.4.1 JIS S 0031 による評価方法

JIS S 0031 では(5.3)式を用いて年代別相対輝度を計算する。実際の評価では、分光放射輝度計を用いて評価対象の分光放射輝度を測定し、その結果を(5.3)式に代入して、年代別相対輝度を計算する。得られた年代別相対輝度から、評価対象の視覚的コントラスト(年代別相対輝度の比)を計算し、高齢者に対して視覚的コントラストが低下していないかを評価するとしている。(5.3)式の年代別分光視感効率  $V(\lambda)$  は JIS S 0031 の中で規定されている。年代別分光視感効率のうち 20 歳と 70 歳の分光視感効率を図 5.4 に示す。

上記のような規定に基づき JIS S 0031 を製品設計、評価に適用するにはいくつかの難しさがある。第一に、(5.3)式で年代別相対輝度を計算するには、評価対象の分光放射輝度を測定する必要がある。しかし、分光放射輝度計は数百万円する計測機器であり、評価のための設備にかかる費用負担が大きい。第二に、評価対象の視覚的コントラスト(年代別相対輝度の比)を用いて評価することを推奨しているが、高齢者が見やすい表示に必要な視覚的コントラストをいくつにすればよいのかという基準値を示していないため、対象物の相対評価にしか利用できない。第三に、図 5.4 に示すように、分光視感効率は各年代での最大値を 1 とした値であるため、同じ年齢での相対輝度は比較できるが、異なる年齢での相対輝度は比較できない。また、同じ理由から、老人性縮瞳による網膜上の実効輝度の低下のように波長に依存しない相対輝度(本研究の実効輝度に対応)の低下も考慮されていない。

$$L_{(a)} = \sum_{400}^{700} L_{e,\lambda} V(\lambda)_{(a)} \Delta\lambda \quad (5.3)$$

ここで、 $L_{(a)}$ : 年代別相対輝度  
 $L_{e,\lambda}$ : 分光放射輝度  
 $V(\lambda)_{(a)}$ : 年代別分光視感効率  
 $\Delta\lambda$ : 波長幅

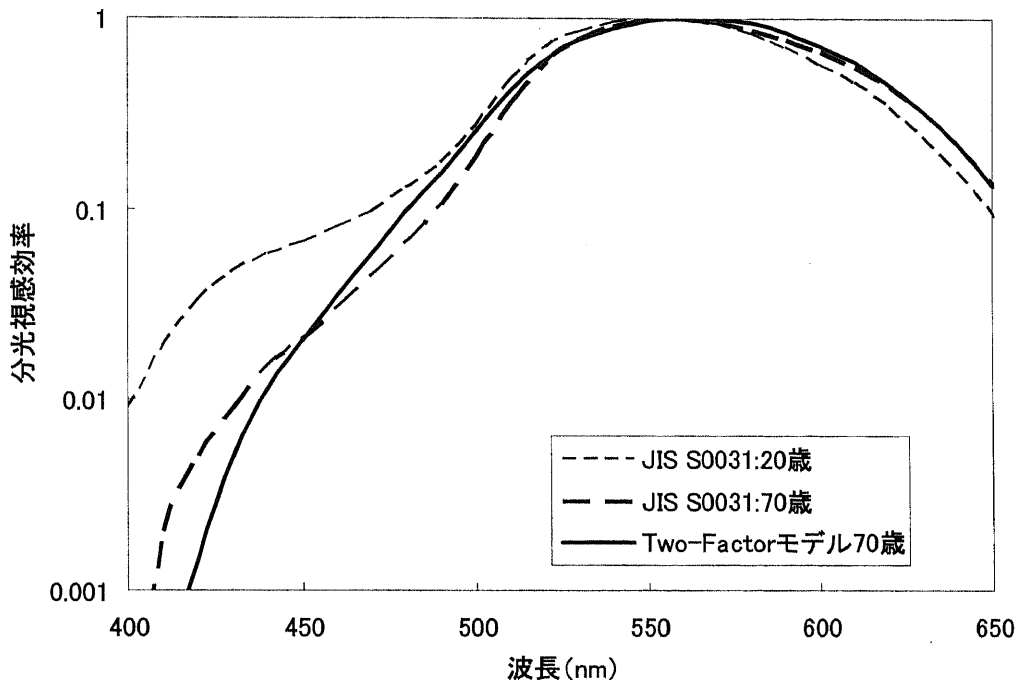


図 5.4 JIS S 0031 で規定されている 20 歳、70 歳の分光視感効率と、CIE 標準分光視感効率と Two-Factor モデル<sup>29,30)</sup>から計算した 70 歳の分光視感効率

#### 5.4.2 本研究結果に基づく評価と JIS S 0031

前節で述べた JIS S 0031 の問題点は、本研究成果を用いて解決することが可能である。

まず、JIS S 0031 に必要な分光放射輝度の測定であるが、高齢者(70 歳)に対する評価を行うのであれば、本研究で用いた高齢者水晶体擬似フィルタと通常の(分光機能のない)輝度計を用いれば、分光放射輝度計を用いる必要はない。高齢者水晶体擬似フィルタは、Pokorny らによって提唱された高齢者の分光光学濃度モデル式(Two-Factor モデル)に基づいて分光透過率を設計されたフィルタ<sup>29,30)</sup>である(2.2.1 節参照)。CIE の標準分光視感効率  $V(\lambda)$  に Two-Factor モデルの 32 歳と 70 歳の比を乗じて規格化することで算出した 70 歳の分光視感効率を図 5.4 に示す。その結果は、JIS S 0031 で規定した 70 歳の分光視感効率とそれほど違わない。つまり、高齢者水晶体擬似フィルタを通して通常の輝度計で視対象の輝度を測定した値は、JIS S 0031 で規定している 70 歳の相対輝度とほぼ同じになると考えられる。

次に、視覚的コントラストと高齢者の見やすさの関係であるが、この点については、高齢者視覚模擬ゴーグルを用いて、高齢者の反応時間、認知時間、主観評価値が模擬できる

ことをこれまで述べてきた。つまり、若年者が、高齢者視覚模擬ゴーグルを用いて主観評価を行えば、高齢者に見やすい視覚的コントラスト値を決定できる。それに加えて、JIS S 0031 では数値的な評価しか行えなかったが、本手法の最大のメリットは高齢者視覚模擬ゴーグルを装着して高齢者の製品の見えを疑似体験できることである。製品評価後に問題点が見つかった場合には、その問題点を改善しなくてはならないが、数値的に評価した場合には改善案をイメージすることが難しい。しかしながら、本手法では、擬似的に高齢者の見え方を体験できるので、その結果をイメージとして捉えることができ、評価結果を設計に反映しやすいという利点がある。

最後に、JIS S 0031 では異なる年齢での相対輝度は比較できなかったが、本研究の方法では、網膜上の実効輝度の絶対値が同じになるような模擬方法を検討しているので、異なる年代の網膜上に結像する視対象の実効輝度を直接比較することが可能である。老人性縮瞳による実効輝度の低下についても、5.1節で検討したように、第4章で得られた若年者と高齢者の環境照度－瞳孔面積特性(4.1)式から高齢者の瞳孔面積の減少率を求め、その減少率を用いて実効輝度の低下を見積もることが可能である。

#### 5.4.3 本研究成果と JIS S 0031 に基づいた製品評価事例

前節で、本研究成果を利用すれば、JIS S 0031 が推奨する方法に近い形で簡単に製品設計、評価が行えることが分かった。そこで、本研究の手法を応用して、実際の製品開発時の配色、表示輝度の設計、評価に利用した<sup>14,75)</sup>。図 5.5 に対象とした製品の概観図を示す。これは浴室で使う製品であり、屋内環境では比較的低照度の 100lx 以下の照明環境で使用する製品である。図 5.5 の製品を実際の浴室(環境照度約 30lx)に設置し、表示パネルの背景色と文字色の輝度を輝度計で測定した。また、高齢者水晶体擬似フィルタを通して実効輝度(JIS S 0031 の 70 歳相対輝度)  $L'$  を測定した。測定した結果から、背景色と文字色の輝度コントラスト  $C$  (JIS S 0031 の 20 歳の視覚的コントラストに相当)、実効輝度コントラスト(JIS S 0031 の 70 歳の視覚的コントラストに相当)、 $C'$  を計算した。測定結果を、表 5.3、図 5.6 に示す。実効輝度コントラスト  $C'$  は、輝度コントラスト  $C$  と比較して、その値はほとんど変化しないことが確認された。これは、JIS S 0031 において、年代が違っても視覚的コントラストが同じであることと同様であり、JIS S 0031 に照らし合わせても高齢者にも見やすい表示であるといえる。このように、本研究の手法を応用することで、非常に簡単に製品評価ができることが分かった。また、今回の測定結果から考えて、当製品は視認性に依存するタスクについては認知時間に若年者と高齢者には差がないことが予想される。したがって、反応時間においても、視認性の加齢効果に起因する遅れは生じないと予想で



きる。

この製品については、実際に、浴室内で様々な年代の被験者を対象にユーザビリティテストが実施された。その結果、視認性が問題となる誤操作や不具合が発生しないことが確認されている。

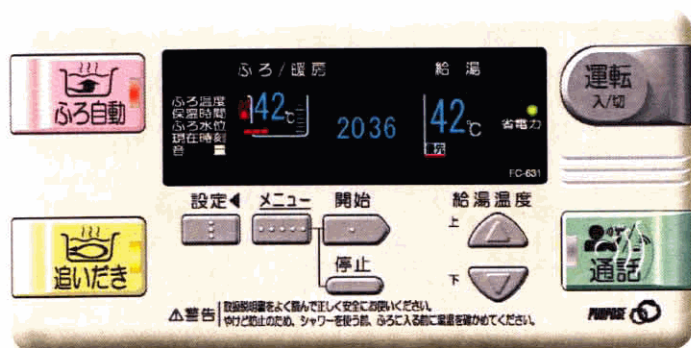


図 5.5 製品表示の視覚的コントラストを評価した製品  
(ガス給湯器用浴室リモコン)

表 5.3 図 5.5 に示した表示パネルの背景色と文字色の輝度測定結果と実効輝度コントラスト(JIS S 0031 の視覚的コントラストに対応)

環境照度約 30lx の浴室で実測した輝度  $L$ 、高齢者水晶体擬似フィルタを通して測定した実効輝度  $L'$ 、背景色と文字色の実効輝度コントラスト  $C$ 、 $C'$

測定対象	$L$ (cd/m <sup>2</sup> )	$C$	$L'$ (cd/m <sup>2</sup> )	$C'$
運転ボタン(灰)	3.85	0.72	2.76	0.71
通話ボタン(緑)	3.65	0.71	2.50	0.68
風呂自動ボタン(ピンク)	4.84	0.77	3.83	0.78
追いだきボタン(黄色)	4.37	0.75	3.17	0.74
本体パネル(白)	7.66	0.85	5.72	0.85
文字色(黒)	0.63	-	0.47	-
蛍光管(文字)	107	0.96	107	0.96
蛍光管背景部分	2.00	-	2.00	-

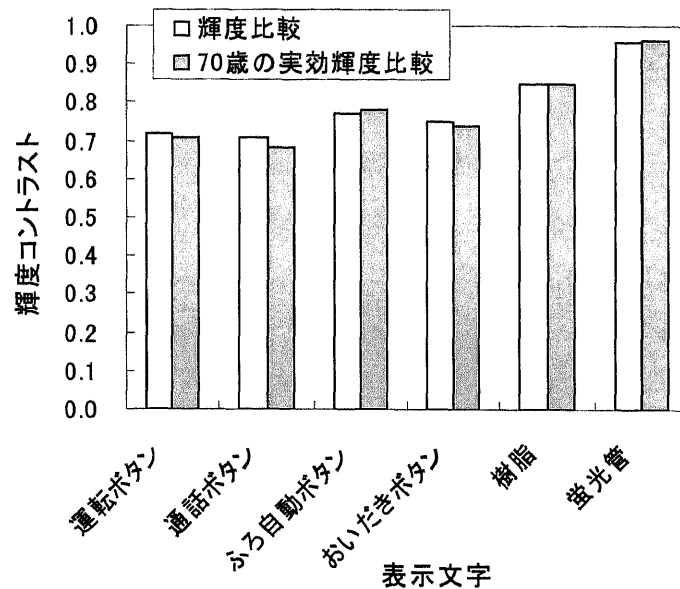


図 5.6 輝度コントラスト  $C$  と高齢者水晶体擬似フィルタを通して測定した実効輝度コントラスト  $C'$

### 5.5 本章のまとめ

本章では、高齢者水晶体擬似フィルタと、老人性縮瞳模擬フィルタを組み合わせた高齢者視覚模擬ゴーグルの効果について検討した。

反応時間と認知時間について、第 2～4 章での結果に基づき、若年者が高齢者視覚模擬ゴーグルを用いた場合の反応時間、認知時間を見積もったところ、高齢者水晶体擬似フィルタを用いた場合と比較して、老人性縮瞳による刺激色の実効輝度の低下により、反応時間は平均で約 30ms、P300 潜時は平均で 5.4ms 遅延することが見積もられた。若年者が高齢者視覚模擬ゴーグルを用いた場合の P300 潜時は、高齢者の値とほぼ一致すると考える。しかしながら、反応時間は、高齢者の反応時間と一致しなかった。このことから、反応時間の増加は、運動の命令に関わる中枢神経系での加齢による機能低下か、加齢による身体的な運動能力の低下の可能性が大きいと推察された。この結果から、高齢者視覚模擬ゴーグルは、高齢者の認知時間 (P300 潜時) の定量的な評価、高齢者の反応時間の定性的な評価には利用可能であると考ええる。

色弁別については、既存研究から、網膜照度の減少に起因する色弁別機能の低下を模擬できる可能性がある。色の見えについては、既存研究で示唆されている高齢者の色知覚メカニズムにおける補償機構を考慮していないため、高齢者の色の見えを精度よく評



価するには適さない。

空間コントラスト感度については、加齢による網膜照度の低下に起因する空間コントラスト感度の低下は模擬できると考えられるものの、縮瞳による光学収差の改善の効果は模擬できない。そのため、高齢者の空間コントラスト感度を完全には模擬できない可能性がある。

また、2004年に制定された「JIS S 0031:2004 高齢者・障害者配慮設計指針－視覚表示物－年代別相対輝度の求め方及び光の評価方法」の評価方法の問題点と本研究結果での評価方法を比較し、本研究の有用性について述べた。

## 6 総合的考察

近年の急速な高齢社会の進展に伴い、高齢者対応製品、ユニバーサルデザイン製品の開発が要望されているが、視覚の加齢変化に伴う視認性の悪化や、機器の表示に対する高齢者の応答の遅延等を製品開発時に評価する適切な方法がないという動機から本研究は開始された。本研究では、高齢者対応製品の設計・開発に利用することを目的とし、若年者が高齢者の視覚を模擬し評価する手法について検討した。視覚の加齢要因については、網膜上の実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差に影響を及ぼす水晶体の黄変と、老人性縮瞳に注目した。老人性縮瞳については、環境照度によってその特性が変化するために、その正確な模擬手法がこれまでなかった。そこで本研究では、水晶体の黄変が与える影響について調べるとともに、老人性縮瞳の模擬手法について検討した。また、本研究では、水晶体の黄変と老人性縮瞳の影響を光学的に模擬した場合に、反応時間、認知時間、主観評価がどのくらい高齢者に近づくのかを調査、検討した。そして、これらの要因を光学的に模擬する高齢者視覚模擬ゴーグルを作製し、その効果と応用方法について検討した。

水晶体の黄変の模擬については、高齢者の水晶体の分光透過率を模擬するよう設計された高齢者水晶体擬似フィルタを用いた。そして、高齢者と、若年者が高齢者水晶体擬似フィルタをつけた場合と、つけない場合における、視覚刺激(色ランドルト環)に対する反応時間、反応速度、無反応率、主観評価値を測定した。その結果、視認性の主観評価値は若年者フィルタ有と高齢者で一致し、このフィルタが高齢者の視認性を定量的に評価できるツールとなることが明らかになった。つまり、水晶体の黄変は、高齢者の視認性に対して大きな影響を与えていたと言える。反応時間、反応速度については、高齢者の結果は若年者フィルタ有の場合よりも全ての刺激色に対して反応が遅かったが、特に反応速度が遅くなる色は若年者フィルタ有の場合と一致した。この結果から、若年者がこのフィルタを用いることで、高齢者の表示に対する反応を定性的に評価できることが明らかになった。この結果は、水晶体の黄変は、高齢者の視覚刺激に対する反応に影響を与えている要因であることを示唆する一方で、高齢者の反応の遅れには水晶体の黄変以外の加齢効果が影響していることを示唆している。また、反応速度について、刺激色の網膜上の実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差の影響を重回帰分析を用いて調べたところ、反応速度と、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差について相関の高い重回帰式が得られた。これは、加齢による水晶体の黄変が網膜上の実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差を変化させ、その影響で高齢者の視覚刺激に対する反応が変化していることを示唆している。

## (第2章)

第2章で、高齢者の水晶体の黄変を模擬する高齢者水晶体擬似フィルタを装着することにより、若年者の反応時間は高齢者と定性的に一致するが、高齢者の反応時間は、若年者がフィルタを装着した場合よりも200ms以上が遅いことが分かった。そこで、高齢者の視覚刺激に対する反応時間の増加が、認知プロセスの加齢効果に起因しているのか、運動機能の低下などのその他の加齢効果に起因しているのかを調べるために、反応時間と伴に認知時間の指標となる事象関連電位 P300 潜時を測定した。その結果、高齢者水晶体擬似フィルタを装着した若年者の P300 潜時は、高齢者の P300 潜時にかなり近い値を示した。さらに、高齢者の P300 潜時と主観評価結果の関係は、若年者の結果に類似した関係を示し、P300 潜時は年代に関係なく視認性の評価指標として利用可能であることが示唆された。以上の結果から、今回用いた高齢者の水晶体の分光透過率を模擬する高齢者水晶体擬似フィルタは、若年設計者が高齢者の視認性、認知時間を評価するのに非常に有効なツールであることが明らかとなった。この事実は、高齢者が視覚刺激を認知する場合に、水晶体の黄変は視認性と認知時間に大きな影響を与えることを示している。一方、反応時間と P300 潜時の逆数について、水晶体の黄変によって変化する網膜上での実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差と、年代の4つの因子で重回帰分析を行ったところ、相関の高い重回帰式が得られた。この結果は、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差、年代から、若年者および高齢者の反応時間、認知時間を予測することを可能にした。この結果は、高齢者対応製品を設計する際に設計値を決めるのに役立ち、有効な指針となる。(第3章)

水晶体の黄変に加えて、環境照度の違いによる高齢者の視認性の劣化を模擬するために、老人性縮瞳による網膜照度低下を模擬する手法を検討した。若年者と高齢者の環境照度に対する瞳孔面積を測定し、若年者と高齢者の環境照度－瞳孔面積特性を定式化した。更に、老人性縮瞳による各照度レベルでの網膜照度の減少を計算し、若年者がこの網膜照度の減少を模擬するための光学フィルタの透過率を、環境照度の関数として求めた。このとき、フィルタを装着した場合にフィルタによる光量の低下で若年者の瞳孔面積が増加することも考慮して、フィルタの透過率を決定した。光学的な模擬を実現するために、透過率が制御可能なECフィルタを用い、環境照度に対応させて求めた透過率を実現する制御回路を製作し、老人性縮瞳模擬フィルタを実現した。そして、この老人性縮瞳模擬フィルタと高齢者水晶体擬似フィルタを重ねることで、環境照度に応じた網膜照度を模擬する高齢者視覚模擬ゴーグルを製作した。これまで、高齢者が暗いところでものが見えにくいということはよく知られていたが、照明環境に対応した高齢者視覚を模擬する手法

は存在しなかった。本研究で開発した高齢者視覚模擬ゴーグルを用いれば、環境照度に対応した高齢者視覚の模擬が可能になり、製品を使用する場所の照明環境を考慮した製品の表示の設計や、照明設計にも役立つ。また、本論文で定式化した視覚刺激に対する加齢特性から高齢者が若年者と同等の反応をするために必要な視覚刺激を導き出すことができる。視界に入る像を撮影し、高齢者が若年者と同等の反応をするように映像を変換した後、Head Mount Display 等を用いてリアルタイムにその映像を高齢者に提示すれば、高齢者の視覚機能低下を補助するツールの実現の可能性も考えられる。(第4章)

最後に、高齢者水晶体擬似フィルタと老人性縮瞳模擬フィルタを組み合わせた高齢者視覚模擬ゴーグルの効果と、模擬できる範囲について議論した。本研究で明らかになった水晶体の黄変による反応時間、認知時間の増加の影響と、老人性縮瞳による各照度レベルでの網膜照度の減少の影響から、水晶体の黄変による反応時間の増加に加え、老人性縮瞳の影響によって生じる反応時間、認知時間の増加を見積もることができた。認知時間については、本研究の高齢者視覚模擬ゴーグルを用いることで、高齢者の認知時間をほぼ定量的に評価できることが明らかとなった。反応時間については、高齢者視覚模擬ゴーグルで定性的な評価は可能であるが、定量的な評価を行うには視覚的な影響に加えて身体運動系の加齢効果を加味する必要がある。色弁別機能の加齢変化については模擬できる可能性があると考えられるが、色の見えの加齢変化の評価については、高齢者の長期間に渡る色補正機能が働くことが示唆されているため、今後より詳細な検討を行い、新たな模擬方法を検討する必要があるであろう。空間コントラスト感度の加齢変化については、既存研究において、網膜照度の減少に起因するという説、神経系の機能低下に起因するという説、また、老人性縮瞳による光学収差の減少、焦点深度の増加による視覚機能改善についての報告がある。今回の高齢者視覚模擬ゴーグルで、網膜照度の減少に起因する減少は模擬できるが、その他の原因に起因する機能低下がどの程度模擬できるかは、本研究の結果からは明らかにすることはできなかった。この点について、今後より詳細な検討が必要である。更に、2004年に制定された「JIS S 0031:2004 高齢者・障害者配慮設計指針—視覚表示物—年代別相対輝度の求め方及び光の評価方法」の評価方法が、本研究で行った方法と関連する部分が多いため、本研究結果と JIS S 0031 の評価方法を比較し、本研究の有用性について述べた。本手法を用いれば、JIS S 0031 よりも簡単にかつ実用的に製品評価が可能になると考える。(第5章)

以上のように、本研究では、光学的手法を用いて若年者が高齢者の視覚特性を模擬することで、製品に対する高齢者の視認性や反応を簡便に評価でき、かつ、信頼性の高い方法が確立された。また、製品のインタフェースにおける表示の設計値(輝度、色度)から、

人間の時間的な反応を予測することも可能となり、本研究の目的である高齢者対応製品、UD 製品の開発を効率よく行う有効な技術が確立されたと考える。

本研究で取り扱った視覚の加齢効果は、水晶体の黄変と、老人性縮瞳だけであり、今回の模擬の適用範囲は、これらの加齢現象の影響に限られている。高齢者の視覚、視覚情報処理の加齢現象はこれ以外にも多く存在する。また、高齢者対応製品、UD 製品の開発には、視覚以外の多くの身体機能も密接に関連している。今後、今回取り上げた以外の加齢現象、感覚や運動の複合領域なども含め、さらなる研究が必要であると考えられる。

## 7 総括

本研究から得られた主な知見を以下に示す。

### 【第2章】

- 高齢者の水晶体の黄変を光学的に模擬することで、若年者は高齢者の視認性を定量的に評価できることを明らかにした。
- 高齢者の水晶体の黄変を光学的に模擬することで、若年者は高齢者の表示に対する反応時間、反応速度を定性的に評価できることを明らかにした。
- 水晶体の黄変による網膜上の実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差の変化が、高齢者の視覚刺激に対する反応を変化させていることを明らかにした。
- 反応速度を、網膜上の実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差、年代の線形結合の重回帰式で表し、これらの因子から反応速度の予測を可能とした。

### 【第3章】

- 高齢者の水晶体の黄変を光学的に模擬することで、若年者は高齢者の認知時間をほぼ定量的に評価できることを明らかにした。
- 認知時間の指標とした P300 潜時は、年齢に関係なく視認性の主観評価値と高い相関を示し、視認性の評価指標となることを明らかにした。
- 若年者および高齢者の反応時間と認知時間を、実効輝度、実効輝度コントラスト、実効色差、年代の線形結合の重回帰式で表し、これらの因子から反応時間と認知時間の予測を可能とした。

### 【第4章】

- 若年者と高齢者の環境照度－瞳孔面積特性を明らかにした。
- 老人性縮瞳による網膜照度の減少を模擬するための光学フィルタの透過率を明らかにした。
- 環境照度に対応して透過率を変化させることにより、老人性縮瞳による網膜照度の減少を環境照度に応じて模擬する老人性縮瞳模擬フィルタを開発した。
- 老人性縮瞳模擬フィルタと高齢者水晶体擬似フィルタを重ねることで、老人性縮瞳による網膜照度の減少と水晶体の黄変を模擬する高齢者視覚模擬ゴーグルを製作した。

【第 5 章】

- 老人性縮瞳による網膜照度の減少によって生じる反応時間、認知時間の増加が予測された。
- 高齢者視覚模擬ゴーグルは、高齢者の認知時間をほぼ定量的に評価できることを明らかにした。
- 色弁別機能、空間コントラスト感度の加齢変化に対する模擬について、高齢者視覚模擬ゴーグルの適応範囲を明らかにした。
- JIS S 0031:2004 「高齢者・障害者配慮設計指針－視覚表示物－年代別相対輝度の求め方及び光の評価方法」と比較し、高齢者対応製品の開発に対する本研究の有用性を明らかにした。

【全 体】

- 製品に対する高齢者の視認性や反応を簡便に評価でき、かつ、信頼性の高い光学的な高齢者視覚模擬方法を確立した。
- 製品のインタフェースにおける表示の設計値(輝度、色度など)から、人間の時間的な反応の予測を可能とした。
- 以上述べたように、高齢者対応製品、ユニバーサルデザイン製品の開発を効率よく行う 1 つの有効な技術が確立された。

## 参考文献

1. 平成 17 年版高齢社会白書:内閣府 (2004)
2. UN, World Population Prospects: The 2004 Revision (United Nations Pubns)
3. 櫻川智史, 鈴木敬明, 易強, 田村久恵, "高齢者の起立動作に配慮した木製ダイニングセットの開発," 日本加工技術協会第 22 回年次大会講演要旨集, pp.41-42 (2004)
4. S. Sakuragawa, T. Suzuki, Q. Yi, H. Tamura, H. Sako, T. Yokoi, "Comparison of standing up motions between elderly and young adults," Proc. IEA2003, Vol.8:138-141 (2003)
5. 易強, 櫻川智史, 鈴木敬明, 田村久恵, "和室用ダイニングチェア開発のための立ち上がり動作時の筋負担評価," 日本人間工学会誌, Vol. 38 特別号(第 43 回講演集), pp.292-293 (2002)
6. 櫻川智史, 鈴木敬明, 易強, 田村久恵, 横井孝志, "異なる座面高の立ち上がり動作における膝関節トルク計算," 日本人間工学会誌, Vol.38 特別号(第 43 回講演集), pp.358-359 (2002)
7. 易強, 櫻川智史, 鈴木敬明, 田村久恵, 迫秀樹, 横井孝志, "3 次元動作解析による高齢者及び若年者の立ち上がり動作の比較," 日本生理人類学会誌, Vol.7 特別号(第 47 回大会要旨集), pp.42-43 (2002)
8. 易強, 櫻川智史, 鈴木敬明, 田村久恵, 八巻留美, 藤岡義久, 勝浦哲夫, "アンダーウェアをはき上げる時の姿勢の違いによる筋負担の変化," 日本人間工学会第 34 回関東支部大会講演集, pp.67-68 (2004)
9. 易強, 櫻川智史, 鈴木敬明, 田村久恵, 八巻留美, 藤岡義久, 勝浦哲夫, "連続動作の筋負担評価ー若年者及び高齢者のアンダーウェアのはき上げ動作についてー," 日本生理人類学会誌 Vol.9 特別号(1)第 51 回大会要旨集, pp.46-47 (2004)
10. Wolfgang F.E. (ed.). Universal Design Handbook. New York: McGraw-Hill. (2001)
11. 鈴木敬明, 櫻川智史, 易強, 田村久恵, 望月融, 澤畑広信, "ガス給湯器用浴室リモコンにおけるユニバーサルデザインのための視覚障害者配慮設計ー数値設定操作に基点音を用いた場合の有効性と問題点ー," 認知科学, 10(3):370-383 (2003)
12. 鈴木敬明, 易強, 櫻川智史, 田村久恵, 望月融, 澤畑広信, "視覚障害者に対応し



- たインタフェースにおける基点音の有効性—数値設定操作への応用—,” ヒューマンインタフェースシンポジウム 2003 論文集, pp.693-696 (2003)
13. 鈴木敬明, 易強, 櫻川智史, 田村久恵, 川口真弘, 望月融, ”給湯器用浴室リモコンのためのビデオマニュアルのユニバーサルデザイン,” テクニカルコミュニケーションシンポジウム 2003 論文集, pp.59-63 (2003)
  14. 鈴木敬明, ”浴室リモコンの報知音—高齢者・視覚障害者に配慮した開発事例—,” 人間生活工学「特集:生活をより楽しくする音の技術」, 5(4):16-19 (2004)
  15. JIS S 0031:2004 “高齢者・障害者配慮設計指針—視覚表示物—年代別相対輝度の求め方及び光の評価方法” 日本規格協会 (2004)
  16. Y. Inoue, Y. Akizuki, “Influence of age and visual acuity on readability and brightness – The proper illuminance for reading (Part1) –,” Proceedings Lux Pacifica '97, A-55-60 (1997)
  17. Y. Inoue and Y. Akituki, “The optimal illumination for reading: Effects of age and visual acuity on legibility and brightness,” J. Light & Vis. Env., 22, pp.23-33 (1998)
  18. J.F. Koretz, P.L. Kaufman, M.W. Neider, P.A. Goeckner, “Accommodation and presbyopia in the human eye—aging of the anterior segment,” Vision Res., 29(12):1685-92 (1989)
  19. R.F. Fisher, B.E. Pettet, “Presbyopia and the water content of the human crystalline lens,” J Physiol. 234(2):443-7 (1973)
  20. J.S. Werner, D.H. Peterzell, A.J. Scheetz, “Light, vision, and aging,” Optom Vis Sci, 67(3):214-29 (1990)
  21. R. A. Weale, “Age and transmittance of the human crystalline lens,” J of Physiology, 395:577-587 (1988)
  22. T. J. T. P. van den Berg, K. E. W. P. Tan, “Light transmittance of the human cornea from 320 to 700 nm for different ages,” Vision Res., 34:1453-1456 (1994)
  23. 長谷川, 石川, “正常対光反応の加齢による変化,” 日眼会誌, 93-10:955-961 (1989)
  24. 舟川, “色コントラストと可読性に関する実験研究,” 照明学会誌, 84(11) (2000)
  25. 舟川, “可読性に影響を与える空間要因に関する実験研究,” 照明学会誌, 84(11) (2000)

26. O.M. Blackwell, H.R. Blackwell, "Visual performance data for 156 normal observer of various ages," *J. Illum. Engng. Soc.*, 1:3-13 (1971)
27. 鈴木敬明、原口健、船井孝、佐藤祐子、長谷川茂、岡嶋克典, "照明光の映り込みがある液晶ディスプレイでの文字視認性評価" 日本光学会年次学術講演会 OJ2005 講演論文集 (2005)
28. 岩井, 岡嶋, "正対比文字で構成された文章に対する読みやすさ評価関数," *照明学会誌* 88(11):874-881 (2004)
29. J. Pokorny, V. C. Smith, M. Lutze, "Aging of the human lens," *Applied Optics*, 26:1437-1440 (1987)
30. J. Xu, J. Pokorny, V. C. Smith, "Optical density of the human lens," *J. Opt. Soc. Am.*, A-14: 953-960 (1997)
31. R.A. Weale, "Notes on the photometric significance of the human crystalline lens," *Vision Res.*, 1:183-191 (1961)
32. J.M.Kraft and J.S. Werner, "Spectral efficiency across the life span: flicker photometry and brightness matching," *J. Opt. Soc. Am.*, A-5:2122-2130 (1988)
33. K. Ishihara, S. Ishihara, M. Nagamachi, H. Osaki and S. Hiramatsu, "Independence of older adults in performing instrumental activities of daily living (IADLs) and the relation of this performance to visual abilities," *Theor. Issues in Ergon. Sci.*, 1-16 (2003)
34. B. Winn, D. Whitaker, D. B. Elliott, N. J. Phillips, "Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 35:1132-1137 (1994)
35. G.R. Jackson, C. Owsley, E.P. Cordle, C.D. Finley, "Aging and scotopic sensitivity," *Vision Res.*, 38:3655-3662 (1998)
36. M.E. Sloane, C. Owsley and S.L. Alvarez, "Aging, senile miosis and spatial contrast sensitivity at low luminance," *Vision Res.*, 28(11):1235-1246 (1988)
37. K. Knoblauch, F. Saunders, M. Kusuda, R. Hynes, M. Podgor, K.E. Higgins, F. M. de Monasterio, "Age and illuminance effects in the Farnsworth-Munsell 100-hue test," *Applied Optics*, 26(8):1441-1447 (1987)
38. E.Aarnisalo, "Effects of yellow filter glasses on colour discrimination of normal observers and on the illumination level," *Acta Ophthalmol (Copenh)*,

- 65(3):274-278 (1987)
39. M.E. Schneek, A.J. Adams, K. Huie and E. Lee, "A filter for simulating color and spatial vision of the elderly," *Colour Vision Deficiencies XI: Proceedings of the International Symposium*, Sydney:357-364 (1991)
40. 岡嶋, 高瀬, "マンセル色表の色名呼称における高齢者水晶体擬似フィルタ装着の効果," *照明学会誌*, 84(11):838-842 (2000)
41. 岡嶋, 吉田, 氏原, "輝度コントラストの加齢変化に基づく高齢者の色視認性評価法," *日本色彩学会誌* 24(3):164-170 (2000)
42. K.Okajima, M.Takase, "Computerized simulation and chromatic adaptation experiments based on a model of aged human lens," *Optical Review*, 8(1):64-70 (2002)
43. K.Okajima, N.Tsuchiya and K.Yamashita, "Age-related changes in color appearance depend on unique-hue components," *Proceedings of the 9th Congress of the International Colour Association (AIC Color 01)* 259-262 (2001)
44. V. J. Volbrecht et al., "Perception of electronic display colours as a function of retinal illuminance," *Displays*, 9(2):56-64 (1988)
45. 岩田, 岡嶋, 氏家, "照度レベルに依存するコントラスト感度の加齢変化," *照明学会誌* 85 (5):352-360 (2001)
46. R. Jr. Johnson, J. C. Baron (Eds.) "Handbook of neuropsychology," Amsterdam:Elsevier, 10 (1995)
47. 佐藤, 原, "明視三要素で構成される3次元空間における種々の見やすさレベルをあらわす曲線," *照学全大*, pp.130-131(1999)
48. 中澤, "R による統計解析の基礎," *ピアソンエデュケーション*:東京 (2003)
49. F. Wilcoxon, "Individual comparisons by ranking methods," *Biometrics*. 1:80-83 (1945)
50. S.B. Green, M.S. Thompson, J. Poirer, "An adjusted bonferroni method for elimination of parameters in specification addition searches," *Structural Equation Modeling*, 8(1):18-39 (2001)
51. H. Kolb, L. Lipetz, "The anatomical basis for colour vision in the vertebrate retina," In: Gouras P, ed. *Vision and visual dysfunction*. London: Macmillan, 128-45 (1991)

52. H. Hartridge, "The change from trichromatic to dichromatic vision in the human retina," *Nature*, 155:657-662 (1945)
53. K.T. Mullen, "The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings," *J Physiol*, 359:381-400 (1985)
54. J. S. Werner, V. G. Steele, "Sensitivity of human foveal color mechanisms throughout the life span," *J. Opt. Soc. Am.*, A-12:2122-2130 (1988)
55. J.S. Werner, "Progress in retinal and eye research. Visual problems of the retina during aging: compensation mechanisms and colour constancy across the life span," 15/2: 621-645 (1996)
56. S. Sutton, M. Braren, J. Zubin, E.R. John, "Evoked potential correlates of stimulus uncertainty," *Science*, 150:1187-1188 (1965)
57. G. McCarthy, E. Donchin, "A metric for thought: a comparison of P300 latency and reaction time," *Science*:211, 77-80 (1981)
58. J. Polich, "P300 in the evaluation of aging and dementia," In Brunia CHM, Mulder G., Verbaten MN eds. *Event-related brain research. EEG (Suppl.42):* 304-323 (1991)
59. E. Snyder, S.A. Hillyard, R. Galambos, "Similarities and differences among the P300 wave to detected signal in three modalities," *Psychophysiology*, 17:112-122 (1980)
60. D.S. Goodin, K.C. Squires, B.H. Henderson, A. Starr, "Age-related variations in evoked potentials to auditory stimuli in normal human subjects," *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 44:447-458 (1978)
61. T.W. Picton, D.T. Stuss, S.C. Champagne, R.F. Nelson, "The effects of age on human event-related potentials," *Psychophysiology*, 21:312-325 (1984)
62. Czigler, "Age, color processing and meaningfulness: an event-related potential study," *International Journal of Psychophysiology*, 22:25-34 (1996)
63. 大熊, "臨床脳波学," 医学書院、東京 (1991)
64. R.T. Mullis, P.J. Holcomb, B.C. Diner, R.A. Dykman, "The effects of aging on the P3 component of visual event-related potential," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol*, 62:141-149 (1985)
65. C.L. Dolman, A.Q. McCormick, S.M. Drance, "Aging of the optic nerve," *Arch Ophthalmol*, 98(11): 2053-8 (1980)

66. I.L. Bailey, M.A. Bullimore, "A new test for the evaluation of disability glare," *Optom Vis Sci.*, 68(12):911-917 (1991)
67. G. Derefeldt, G. Lennerstrand, B. Lundh B, "Age variations in normal human contrast sensitivity," *Acta Ophthalmol (Copenh)*, 57(4):679-90 (1979)
68. C. Owsley, R. Sekuler, "Spatial summation, contrast threshold, and aging," *Invest Ophthalmol Vis Sci.*, 22(1):130-3 (1982)
69. C.E. Wright, N. Drasdo, "The influence of age on the spatial and temporal contrast sensitivity function," *Doc Ophthalmol.*, 59(4):385-95 (1985)
70. J.F. Sturr, K.L. Church, H.A. Taub, "Temporal summation functions for detection of sine-wave gratings in young and older adults," *Vision Res.*, 28(11):1247-53 (1988)
71. D.B.Elliott, "Evaluating visual function in cataract," *Optom Vis Sci.*, 70(11):896-902 (1993)
72. J.M. Woodhouse, "The effect of pupil size on grating detection at various contrast levels," *Vision Res.* 15(6):645-8 (1975)
73. G.E. Legge GE, K.T. Mullen, G.C. Woo, F.W. Campbell, "Tolerance to visual defocus," *J Opt Soc Am A.*, 4(5):851-63 (1987)
74. T. Kuroda, T. Fujikado, S. Ninomiya, N. Maeda, Y. Hirohara, T. Mihashi, "Effect of aging on ocular light scatter and higher order aberrations," *J Refract Surg.*, 18(5):S598-602 (2002)
75. ユニバーサルデザイン研究会編, "新・ユニバーサルデザイン:ユーザビリティ・アクセシビリティ中心・ものづくりマニュアル," 日本工業出版:東京 (2005)

## 本論文に関連する発表文献

### 第2章

#### 【学術論文】

1. T. Suzuki, Q. Yi, S. Sakuragawa, H. Tamura, K. Okajima, "Comparing the visibility of low-contrast color landolt Cs. - Effect of aging human lens -," Color Res. Appl., VOL.30, NO.1; pp.5-12 (2005)

#### 【国際学会論文(Proceedings)】

2. T. Suzuki, Q. Yi, S. Sakuragawa, H. Tamura, K. Okajima, "Comparison of response speed to color stimuli between elderly and young adults with and without filters simulating an aged human lens," Proc. Color Communication and Management AIC 2003 Bangkok, pp.442-446 (2003)

#### 【学会発表(国内)】

3. 鈴木敬明, 易強, 櫻川智史, 田村久恵, 岡嶋克典, "高齢者水晶体擬似フィルタによる色刺激に対する反応速度の変化," ジェロンテクノロジー研究フォーラム 2002 論文集, pp.67-70, (2002)
4. 鈴木敬明, 易強, 櫻川智史, 田村久恵, 岡嶋克典, "高齢者と若年者の色視認性評価と高齢者水晶体模擬フィルタの効果," 2002 年映像情報メディア学会要旨集, (2002)
5. 鈴木敬明, 易強, 櫻川智史, 田村久恵, 岡嶋克典, "高齢者水晶体擬似フィルタによる色刺激に対する反応時間の変化," 照明学会第 35 回全国大会講演論文集, pp.101, (2002)

### 第3章

#### 【学術論文】

1. T. Suzuki, Q. Yi, S. Sakuragawa, H. Tamura, K. Okajima, "Age-related changes of reaction time and P300 for low-contrast color stimuli: Effects of yellowing of the aging human lens," Journal of PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY and Applied Human Science, (Accepted)

#### 【国際学会論文(Proceedings)】

2. T. Suzuki, Q. Yi, S. Sakuragawa, H. Tamura, K. Okajima, "Age-related changes of response time and ERP," Progress in Biochemistry and

Biophysics, Vol.31 Supplement (The Third Asian Conference on Vision ACV 2004 Chongqing, China), pp.176, (2004)

【学会発表(国内)】

3. 鈴木敬明,易強,櫻川智史,田村久恵,岡嶋克典,”水晶体分光透過率の加齢変化が色ターゲットの認知と動作時間に与える影響,” Optics Japan2003 日本光学会年次学術講演会予稿集,pp.502-503, (2003)
4. 鈴木敬明,易強,櫻川智史,田村久恵,岡嶋克典,”高齢者模擬フィルタを通して色刺激を見た場合の視認性評価ー反応時間と事象関連能電位 P300 の比較ー,” カラーフォーラム JAPAN2003 論文集, pp137-138, (2003)
5. 鈴木敬明,易強,櫻川智史,田村久恵,岡嶋克典,”色刺激に対する認知時間の加齢変化ー事象関連電位 P300 による評価ー,” 照明学会 36 回全国大会講演論文集, pp.125, (2003)
6. 易強,鈴木敬明,櫻川智史,田村久恵,岡嶋克典,”高齢者と若年者並びに高齢者水晶体擬似フィルタ入りメガネを装着した若年者の色刺激に対する P300 の比較,” 日本生理人類学会誌,Vol.8 特別号(第 49 回大会要旨集), pp.30, (2003)
7. 鈴木敬明,易強,櫻川智史,田村久恵,岡嶋克典,”高齢者水晶体擬似フィルタによる色刺激に対する反応速度の変化,” ジェロンテクノロジー研究フォーラム 2002 論文集, pp.67-70, (2002)

第 4, 5 章

【国際学会論文(Proceedings)】

- 1 T. Suzuki, K. Okajima, T. Funai, “ Development of senile miosis simulator adapting to variable illumination in colour environments,” in Proc. the 10th Congress of the International Colour Association, (AIC2005 Granada), pp17-20 (2005)

【学会発表(国内)】

- 2 鈴木敬明,岡嶋克典,船井孝,”環境照度に依存する老人性縮瞳特性を考慮した高齢者視覚模擬手法,” 日本光学会年次学術講演会 Optics Japan2004 予稿集,pp.428-429, (2004)

## 謝 辞

本論文は、2004 年 4 月に横浜国立大学大学院に入学した後に行った研究と、入学以前に行った研究のうち、主要な研究成果を横浜国立大学学位申請論文として取りまとめたものであります。

本研究のそもそもの始まりは、1999 年 8 月に高松市で行われた照明学会第 32 回全国大会で、現在の指導教員である岡嶋克典先生の高齢者視覚に関する発表を拝聴し、面識もないまま電子メールで連絡を差し上げ、ご指導のお願いに伺ったことだと記憶しております。横浜国立大学大学院助教授 岡嶋克典助先生には、そのような不躰なお願いをも寛大なお気持ちで引き受けていただいてから現在に至るまで、長い間辛抱強くお付き合いいただき、本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたっては、終始高い御見識で御指導御鞭撻を賜りました。また、先生には横浜国立大学在任以前の防衛大学校助教授当時にも、私が直接の学生ではなかったにもかかわらず、懇切なる御指導を頂きました。これらの多大なる御指導に心より感謝するとともに、本研究の御指導を通して今後研究活動を進めるにあたっての研究者の素地を授けてくださったことに、心より厚く御礼申し上げます。

横浜国立大学大学院教授 後藤敏行先生には、本論文の審査の労をお執りくださいましたこと、本論文の内容に付きまして、有益なご助言、ご教示を賜りましたことのみならず、横浜国立大学大学院への社会人学生としての入学から単位取得等の様々なご相談に乗っていただきましたことに、ここに深く感謝申し上げます。

横浜国立大学大学院教授 有澤博先生、横浜国立大学大学院教授 影井清一郎先生、横浜国立大学大学院教授 長尾智晴先生には、本論文の審査の労をお執り下さり、本論文の内容について有益な御指導を賜りましたことに、深く感謝申し上げます。

本論文の前半部分は、2001 年度から 2003 年度に静岡県静岡工業技術センターで実施した、静岡県プロジェクト研究「ユニバーサルデザインのためのものづくりシステムの開発」の研究の一部であります。このプロジェクト研究を企画し、私に参加するよう声をかけていただいたプロジェクト研究のリーダーであった田村久恵研究主幹には、研究推進について多大なる労をおかけし、また研究の推進にあたってはご助言、ご支援いただきましたこと心から感謝いたします。当プロジェクト研究でともに研究を行った櫻川智史主任研究員には、研究の進め方、まとめ方等についてご指導いただくとともに、公私にわたり数々の励ましの言葉をいただいたこと深く感謝いたします。同じく、共同で研究を行った易(陽東)強副主任には、本論文の第 3 章で述べた脳波の測定、解析について多大なるご協力、ご尽力を頂き、易氏の協力なしには第 3 章の内容については実施できなかったであろうことをこ



ここに記し、心からの感謝の意を表します。また、このプロジェクト研究は、民間企業、大学の先生方等の外部評価委員の意見を頂きながら実施されました。本論文の内容につきましても、松下秀鶴先生をはじめとする外部評価委員の諸先生方にご指導、ご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

第4章に示しましたECフィルタの製品開発についてご協力いただいた、株式会社村上開明堂の持塚持塚多久男氏に御礼申し上げます。

第5章に示しました製品開発事例につきましては、静岡県富士市にある高木産業株式会社との共同研究で実施した内容です。この共同研究でご協力いただいた、望月融氏をはじめとする開発関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

本研究を実施し、本論文としてまとめるために、2004年に横浜国立大学大学院に社会人入学しましたが、入学についてご理解いただき、ご支援いただいた、私の職場である静岡県静岡工業技術センターの前田勝利所長をはじめとする職員の皆さんに感謝いたします。特に、大学へ通学するにあたっては、私が職場を不在にすることも多く、所属する機械金属技術スタッフの皆さんには、大変ご迷惑をおかけいたしました。星川雅宥前基盤技術部長、日吉公男前基盤技術部長、小澤大洋前研究主幹、長谷川茂主任研究員、船井孝技師にご迷惑をおかけしたことをお詫びするとともに、そのご支援に対しましてここに深く感謝いたします。

岡嶋研究室に所属しました間に、本研究に関して議論に参加してくれた、院生・学生諸君にお礼申し上げます。

本研究を推進するに当たっては、外部の財団等からのご支援を頂きました。三菱財団殿より2003年に社会福祉事業・研究助成(共同申請者)を頂き、研究備品、材料、試作等に利用させていただきました。横浜学術教育振興財団殿からは、2004年に海外派遣助成を頂き、中国重慶市で開催されたThe Third Asian Conference on Vision 2004に参加し、発表する機会を得ることができました。井上科学振興財団殿からは、2005年に国際研究集会出席旅費の助成を頂き、The 10th Congress of the International Colour Associationに参加し、発表する機会を得ることができました。ここに深く感謝の意を表します。

ここに記すことができなかった多くの方にも、目に見える形、見えない形で多くのご支援を頂き、本論文をまとめることができたと感じています。今後は皆様方のご恩に報いるためにも、本研究を礎にして、今後の研究活動に一層の努力をしていく所存でございます。

最後になりましたが、本研究を実施し、論文としてまとめるに当たっては、家族の協力なしでは達成できなかったと心から感じています。時間的、経済的な負担をかけながらも、私

の仕事に理解を示し支援してくれた妻、早世美に感謝します。私が大学に通っているのかさえ分かっていなかったかもしれないが、休みの日でも仕事をさせてくれた2人の子供たち、茶々、大智、ありがとう。

2006 年(平成 18 年) 3 月

鈴木 敬明