

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	測光色画像を用いた視認性推定法の構築とユニバーサルデザインへの展開
Title(English)	
著者(和文)	加藤洋子
Author(English)	Yoko Kato
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11200号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中村 芳樹,田村 哲郎,淺輪 貴史,大風 翼,村田 涼
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11200号, Conferred date:2019/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成 30 年度博士論文

測光色画像を用いた視認性推定法の構築とユニバーサルデザインへの展開

Establishment of Visibility Estimation Method Using Luminous Color Image
and Development Toward Achieving Universal Design

指導教員

中村 芳樹 教授

東京工業大学 環境・社会理工学院
建築学系 都市・環境学コース

加藤 洋子
KATO Yoko

目次

第1章 序論

1.1. 本研究の背景.....	1 - 1
1.1.1. 視環境設計における視認性推定の必要性	
1.1.2. 従来の照明設計基準	
1.1.3. 節電時の公共空間の様子	
1.1.4. 視認性に関する既往研究とその問題点	
1.2. 本研究の目的.....	1 - 4
1.3. 本研究の位置づけ.....	1 - 5
1.3.1. コントラスト・プロファイル法	
1.3.2. 測光色画像と表色系	
1.3.3. 視認性に関する既往研究との関係および本研究の新規性	
1.4. 本研究の範囲と構成.....	1 - 13
1.4.1. 研究範囲	
1.4.2. 研究構成	
第1章参考文献.....	1 - 16

第2章 晴眼者を対象とした輝度画像を用いた視認性推定法の構築

2.1. 本章の目的	2 - 1
2.2. 円形視標の視認閾値推定に関する検討.....	2 - 2
2.2.1. 本節の目的	
2.2.2. 円形視標の視認評価 [実験 2-A]	
2.2.2.1. 実験概要	
2.2.2.2. 分析方法	
2.2.2.3. 実験結果	
2.2.3. サイズの大きい円形視標の視認評価 [実験 2-B]	
2.2.3.1. 実験概要	
2.2.3.2. 実験結果	
2.2.4. 円形視標の視認閾値推定式の構築	
2.3. 円形視標の見やすさ推定に関する検討.....	2 - 15
2.3.1. 本節の目的	
2.3.2. 通常視力晴眼者を対象とした円形視標の見やすさ評価 [実験 2-C]	
2.3.2.1. 実験概要	
2.3.2.2. 実験結果	
2.3.3. 通常視力晴眼者における見やすさ推定法の構築	

2.3.4.	低視力晴眼者を対象とした円形視標の見やすさ評価 [実験 2-D]	
2.3.4.1.	実験概要	
2.3.4.2.	実験結果	
2.3.5.	低視力晴眼者における見やすさ推定法の検討	
2.4.	減能グレアを考慮した見やすさ推定に関する検討	2 - 34
2.4.1.	本節の目的	
2.4.2.	減能グレアに関する既往研究	
2.4.3.	視野内に高輝度面が存在する場合の見やすさ評価 [実験 2-E]	
2.4.3.1.	実験概要	
2.4.3.2.	実験結果	
	(1) 高輝度面がない場合	
	(2) 円環状の高輝度面が存在する場合	
	(3) 円環状の高輝度面が半分のみ存在する場合	
2.4.4.	既往研究による視認閾値推定と実験結果の比較	
2.4.5.	減能グレアを考慮した円形視標の視認性推定法の構築	
2.5.	第 2 章まとめ.....	2 - 57
	第 2 章参考文献	2 - 59

第3章 輝度画像を用いた視認性推定法の弱視者への適用法の検討

3.1.	本章の目的	3 - 1
3.2.	低視力晴眼者を対象とした円形視標の見やすさ推定に関する検討	3 - 2
3.2.1.	本節の目的	
3.2.2.	均一背景における見やすさ評価 [実験 3-A]	
3.2.2.1.	実験概要	
3.2.2.2.	実験結果	
3.2.3.	不均一背景における見やすさ評価 [実験 3-B]	
3.2.3.1.	実験概要	
3.2.3.2.	実験結果	
3.3.	弱視者を対象とした円形視標の見やすさ推定に関する検討	3 - 17
3.3.1.	本節の目的	
3.3.2.	均一背景における見やすさ評価 [実験 3-C]	
3.3.2.1.	実験概要	
3.3.2.2.	実験結果	
3.3.3.	不均一背景における見やすさ評価 [実験 3-D]	
3.3.3.1.	実験概要	
3.3.3.2.	実験結果	

3.4. 第3章まとめ.....	3 - 34
第3章参考文献	3 - 36
第4章 一般色覚者を対象とした色の影響を考慮した見やすさ評価に関する検討	
4.1. 本章の目的	4 - 1
4.2. 色度コントラストの表現方法	4 - 2
4.3. 一般色覚者を対象とした円形視標の見やすさ評価	4 - 5
4.3.1. 実験概要	
4.3.2. 背景輝度および円形視標の色度が増加する場合(背景色度 D65) [実験 4-A]	
4.3.2.1. 実験条件	
4.3.2.2. 分析方法	
4.3.2.3. 実験結果	
4.3.3. 背景色度および円形視標の色度が増加する場合 [実験 4-B]	
4.3.3.1. 実験条件	
4.3.3.2. 実験結果	
4.3.4. 円形視標サイズおよび円形視標の色度が増加する場合(背景色度 D65) [実験 4-C]	
4.3.4.1. 実験条件	
4.3.4.2. 実験結果	
4.3.5. 円形視標の輝度色度が増加する場合(背景色度 D65) [実験 4-D]	
4.3.5.1. 実験条件	
4.3.5.2. 実験結果	
4.4. 第4章まとめ.....	4 - 22
第4章参考文献	4 - 23
第5章 色弱者を対象とした色の影響を考慮した見やすさ評価に関する検討	
5.1. 本章の目的	5 - 1
5.2. 色弱者を対象としたヒアリング調査	5 - 2
5.2.1. 対象者	
5.2.2. 調査結果	
5.3. 色弱者を対象とした円形視標の見やすさ評価.....	5 - 9
5.3.1. 実験概要	
5.3.2. 背景輝度および円形視標の色度が増加する場合(背景色度 D65) [実験 5-A]	
5.3.2.1. 実験条件	
5.3.2.2. 分析方法	
5.3.2.3. 実験結果	
5.3.3. 背景色度および円形視標の色度が増加する場合 [実験 5-B]	

5.3.3.1.	実験条件	
5.3.3.2.	実験結果	
5.3.4.	円形視標サイズおよび円形視標の色度が変化する場合(背景色度 D65) [実験 5-C]	
5.3.4.1.	実験条件	
5.3.4.2.	実験結果	
5.3.5.	円形視標の輝度色度が変化する場合(背景色度 D65) [実験 5-D]	
5.3.5.1.	実験条件	
5.3.5.2.	実験結果	
5.3.5.3.	追加実験条件	
5.3.5.4.	追加実験結果	
5.4.	第 5 章まとめ	5 - 38
	第 5 章参考文献	5 - 39
第6章 一般色覚者・色弱者を対象とした測光色画像を用いた視認性推定法の構築		
6.1.	本章の目的	6 - 1
6.2.	色の影響を考慮した視認性推定法の構築	6 - 2
6.2.1.	Lab コントラストによる実験結果の表現	
6.2.2.	LMS 刺激値コントラストによる実験結果の表現	
6.2.3.	LMS 刺激値コントラストによる視認性推定法の構築	
6.3.	第 6 章まとめ	6 - 21
	第 6 章参考文献	6 - 22
第7章 実空間の測光色画像を用いた視認性推定の例		
7.1.	本章の目的	7 - 1
7.2.	実空間の輝度画像を用いた視認性推定の例	7 - 2
7.2.1.	推定概要	
7.2.2.	推定結果	
7.3.	実空間の測光色画像を用いた視認性推定の例	7 - 14
7.3.1.	推定概要	
7.3.2.	推定結果	
7.4.	第 7 章まとめ	7 - 26
	第 7 章参考文献	7 - 27
第8章 結論		
8.1.	本研究の結論	8 - 1
8.2.	今後の課題と展開	8 - 4

本研究に関連する研究業績.....	A - 1
謝辞.....	A - 4

第1章 序論

1.1. 本研究の背景

1.1.1. 視環境設計における視認性推定の必要性

視環境設計において、視認性(見やすさ)の確保は、安全性、作業性の向上のため第一に必要とされている。自動車や飛行機等の操縦で、障害物やサインの視認性が必要とされるのはもちろんであるが¹⁾、公共空間等では、晴眼者だけでなく、弱視者、高齢者、色弱者等のあらゆる利用者を想定した上で、障害物やサインの視認性が確保された適切な計画を行なわなければならない²⁾。

2006年12月に、「高齢者、障害者等の移動等の円滑化に関する法律」(通称「バリアフリー法」)が施行された。「バリアフリー法」は、「高齢者、身体障害者等が円滑に利用できる特定建築物の建築の促進に関する法律」(通称「ハートビル法」,1994年施行)と「高齢者、身体障害者等の公共交通機関を利用した移動の円滑化の促進に関する法律」(通称「交通バリアフリー法」)(2000年施行)が一体となった法律であり、施設とその移動経路、移動手段を一体的、総合的にバリアフリー施策を推進することが位置づけられている。この法律の施行を受け、国土交通省より「高齢者、障害者等の円滑な移動等に配慮した建築設計標準」³⁾や「バリアフリー整備ガイドライン(旅客施設編・車両等編)」^{4,5)}が設けられている。視覚的な要件について、「鉄道駅舎においてはJISZ9110(後述1.1.2を参照)に示された照度を参考とする」といった記述もあるが、鉄道駅舎以外の場合では、「夜間等の通行に支障のない明るさを確保できるように照明設備を設ける」、「必要に応じて足元灯を設ける」程度の記述しかなく、具体的にどの程度の数量の明るさ(照度や輝度)が必要であるかは明確ではない。また、案内表示(サイン計画)に関しても、「文字・図記号、図、背景の色の明度、色相又は彩度の差を確保したものとすることが望ましい」、「わかりやすく読みやすいように大きめの文字を用いるほか、色づかい・コントラスト、点字の併記、取り付け位置等に十分配慮したものとす」等と述べられているが、どのような大きさ、色、コントラストを用いれば適切に視認性を確保できるのか、不明確な点が多い。

上記の日本国内における基準やガイドラインと同様に、海外においても同様の基準やガイドラインが多く設けられている。しかし、日本よりも詳細に記述されているものは少ない⁶⁾。

視覚的なユニバーサルデザインやバリアフリーに配慮した視環境設計を行なうためには、光や色に関する物理量から定量的に晴眼者、弱視者、高齢者、色弱者等の視認性を予測する必要がある。

1.1.2. 従来の照明設計基準

従来の照明設計では、光源から対象物へ照射される光の量を示す照度(単位は[lx])が多く用いられ、主に床面の照度によって設計が行われてきた。表 1.1 に JIS によって定められた駅施設各部の照度基準⁷⁾の例を示す。

しかし駅舎等では、図 1.1 に示すように、鉛直面にもサインが多く存在し、反射と発光によるものが混在している。また柱等の障害物も存在する。これらの視認性は、水平面の照度でなく、図 1.2 に示すような対象物から放たれる光の量である輝度(単位は[cd/m²])の分布によって視認性を推定すべきと考えられる。

表 1.1 駅施設各部の JIS 照度基準⁷⁾

	JIS照度基準(JIS Z 9110)		
	A級駅 1日の乗降客数 15万人以上	B級駅 1日の乗降客数 1万~15万人未満	C級駅 1日の乗降客数 1万人未満
旅客関係			
コンコース	500 lx	300 lx	—
待合室	500 lx	300 lx	100 lx
ホーム(上家あり)	200 lx	100 lx	75 lx
ホーム(上家なし)	15 lx	10 lx	5 lx
通路・階段	200 lx	100 lx	75 lx
トイレ	200 lx	100 lx	75 lx
駅前広場(出入口周辺)	100 lx	50 lx	15 lx
窓口関係			
改札口	1000 lx	500 lx	200 lx
駅務室	500 lx	200 lx	—
事務関係			
駅事務室	500 lx	200 lx	200 lx

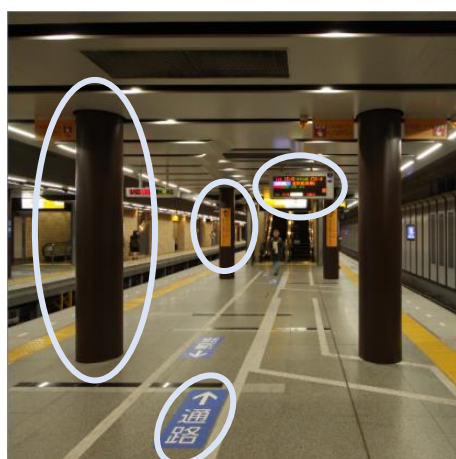


図 1.1 駅のホームの様子

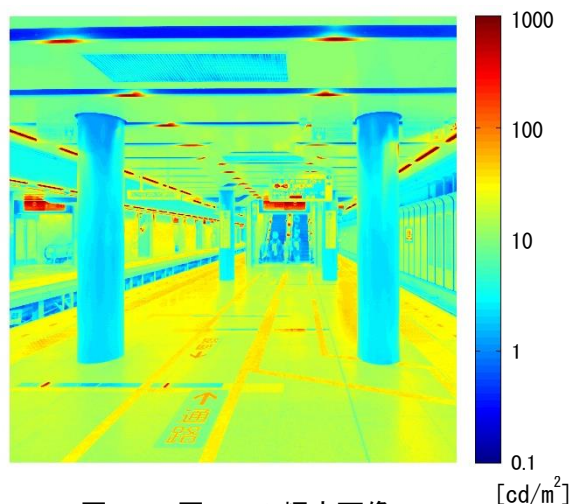


図 1.2 図 1.1 の輝度画像

1.1.3. 節電時の公共空間の様子

2011年3月東日本大震災発生時に、東京電力管轄内の各所で節電が強いられた。その際、駅舎のような不特定多数の人が利用する空間でも、図1.3のように照明の消灯や間引き点灯が行なわれ^{8~10)}、案内看板や足元が見にくいといった視認性が損なわれる弊害が生じた。そして、2018年9月の北海道胆振東部地震においても、北海道電力管轄内で節電が行なわれ、同様の事態が生じた。

このような災害時はもちろんであるが、平常時においても照明の省エネルギー化は求められている。視覚的ユニバーサルデザインにも配慮し、効率的に視覚的安全性を確保した省エネルギー性の高い照明設計が求められていると考えられる。

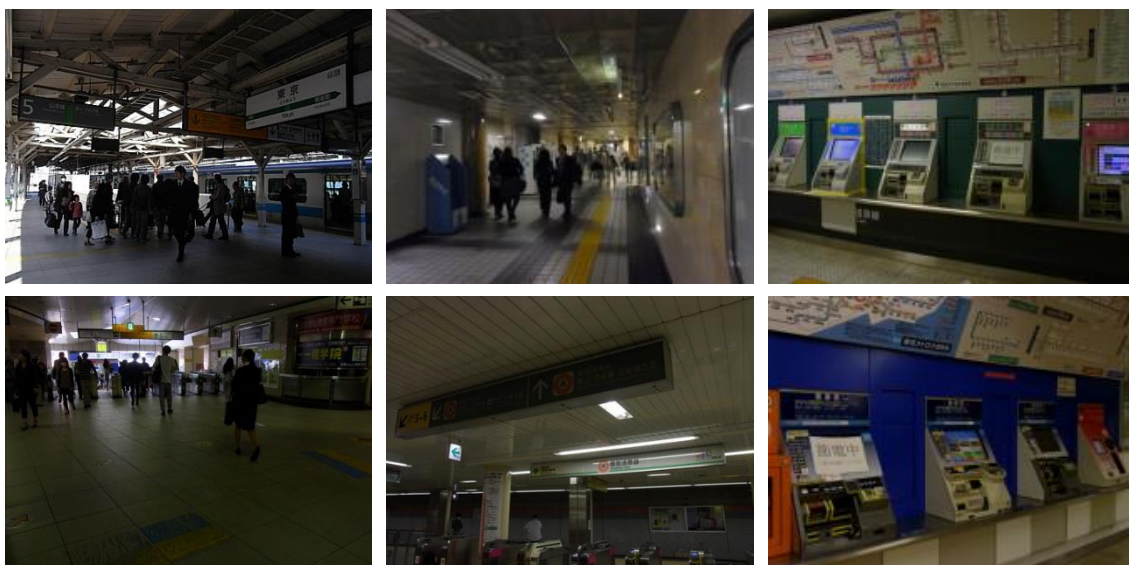


図 1.3 東日本大震災発生時の駅舎の様子

1.1.4. 視認性に関する既往研究とその問題点

視認性推定に関する基礎的な考えとして、「明視三要素」^{11~14)}がある。明視三要素は、視認性に影響を与える三要素であり、①視対象サイズ、②視対象と背景の対比、③順応輝度(平均輝度)である。視対象とは、「見ようとする対象物」のことであり、一般に、①~③のそれぞれの値が大きいくほど見やすくなると考えられている(図1.4)。

この明視三要素の考え方に基づき、これまで、ランドルト環、円形視標、文字等を用いた数多くの研究や調査が行なわれてきた^{11~14)}。しかし、それらの成果を実際の空間(実空間)に適用する場合、視対象や背景が複雑な輝度分布をもつため、直接適用することが困難である。また、弱視者や高齢者の視認性に関する既往研究^{15~21)}や、色が視認性に及ぼす影響に関す

る既往研究^{18,21~25)}も多くあるが、同様に、実空間に適応するまでに至っていないのが現状である。



1.2. 本研究の目的

以上の事柄を踏まえ、本研究では、実空間に適用できる手法を用いた上で、視認性推定に関する「標準観測者(Standard observer)」の関数を導出し、実空間のように複雑な輝度色度分布を持つ場合でも、障害物やサインの検知についての視認性推定が可能な視認性推定法を構築することを一つの目的とする。

そして、公共空間等では、あらゆる利用者に配慮して視環境設計を行なう必要があることから、構築した視認性推定法を視覚的ユニバーサルデザインに活用できるよう展開させることを二つ目の目的とする。本研究では、晴眼者、弱視者、高齢者、色弱者等を問わず、必要とする視覚的情報が伝わることを、「視覚的ユニバーサルデザイン」と定義する。

本研究は、「標準観測者」の関数を導出するための被験者の人数について、多人数として精度の高い関数を求めることよりも、8~10名程度に留め、本研究で提案する手法によって実空間の実空間の視認性推定が可能であることを示すことを優先する。

1.3. 本研究の位置づけ

1.3.1. コントラスト・プロファイル法²⁶⁾

中村²⁶⁾が提案した輝度コントラストの算出方法は、対数輝度画像に対しメキシカンハット型の空間フィルタ(N フィルタ)を検出サイズを変化させながら適用するコントラスト・プロファイルと呼ばれるものである。連続関数の形で表現されている N フィルタを、デジタル計算を可能とするため 9×9 のマトリックスで近似したものが図 1.5 である。N フィルタを近似する精度を決めると、必要とする画像解像度、畳み込むマトリックスサイズ、検出視対象サイズの関係が一意的に決まることになり、図 1.5 の 9×9 のマトリックスに近似した場合、検出視対象サイズを $S[\text{deg}]$ とすると、必要な解像度は $S/3[\text{deg}]$ となる。実際にデジタルフィルタリングを行う場合は、検出視対象サイズに合わせ、ダウンサンプリングやアップサンプリングによって必要解像度を持つ画像を生成し、 9×9 のマトリックスを畳み込む。

この計算を、検出視対象サイズを変化させながら進めると、均一背景上に円形視標が提示された条件では、検出視対象サイズと円形視標のサイズが一致したとき、円形視標の中心位置でコントラストが最大となり、①「視対象サイズ」、②「視対象と背景の対比」が得られる。そして、図 1.5 と同サイズの平均化フィルタ(図 1.6)の畳み込み計算によって算出された値を③「順応輝度(平均輝度)」とすれば、どのような輝度分布であっても視認性を評価するための明視三要素¹¹⁻¹⁴⁾を得ることが出来る。筆者らの既報^{27,28)}では、視対象を含む対数輝度画像に対してコントラスト・プロファイルを適用し、検出視対象サイズ、輝度コントラスト(以下、C 値)、対数輝度平均(以下、A 値)を算出し、視対象サイズ毎に輝度コントラスト評価図(以下、CA 図)上にプロットすることで、視対象の視認性が定量的に推定できることを示した。また、視力検査でもよく用いられるランドルト環²⁹⁾を用いた視認性評価実験結果と既往研究^{11,12)}の比較により、輝度画像から C 値、A 値を算出し、CA 図に表現することによって視認性推定が可能であることが確認している。図 1.7 に均一背景上の円形視標の C 値、A 値の算出例を、図 1.8 に CA 図の例を示す。

コントラスト・プロファイル法により、視対象や背景が複雑な輝度分布をもつ実空間においても、輝度コントラストや順応輝度を算出でき、視認性推定に活用できることが示されている。そのため本研究では、コントラスト・プロファイル法の考えを基に、研究を進めることとした。

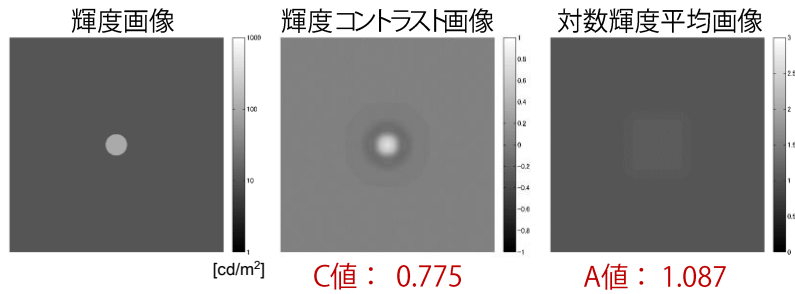
-9.03E-09	-6.9E-07	-1.4E-05	-8.14E-05	-0.000145	-8.14E-05	-1.4E-05	-6.9E-07	-9.03E-09
-6.9E-07	-4.77E-05	-0.000851	-0.004344	-0.007298	-0.004344	-0.000851	-4.77E-05	-6.9E-07
-1.4E-05	-0.000851	-0.012131	-0.044467	-0.060253	-0.044467	-0.012131	-0.000851	-1.4E-05
-8.14E-05	-0.004344	-0.044467	-0.037362	0.094129	-0.037362	-0.044467	-0.004344	-8.14E-05
-0.000145	-0.007298	-0.060253	0.094129	0.49049	0.094129	-0.060253	-0.007298	-0.000145
-8.14E-05	-0.004344	-0.044467	-0.037362	0.094129	-0.037362	-0.044467	-0.004344	-8.14E-05
-1.4E-05	-0.000851	-0.012131	-0.044467	-0.060253	-0.044467	-0.012131	-0.000851	-1.4E-05
-6.9E-07	-4.77E-05	-0.000851	-0.004344	-0.007298	-0.004344	-0.000851	-4.77E-05	-6.9E-07
-9.03E-09	-6.9E-07	-1.4E-05	-8.14E-05	-0.000145	-8.14E-05	-1.4E-05	-6.9E-07	-9.03E-09

図 1.5 輝度コントラスト算出フィルタ

$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$
$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$
$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$
$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$
$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$
$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$
$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$
$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$
$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$	$1/9^2$

図 1.6 対数輝度平均算出フィルタ

正対比 [背景より円形視標が明るい] 例) 背景輝度 L_b : 10 [cd/m²]
 円形視標輝度 L_t : 100 [cd/m²]



逆対比 [背景より円形視標が暗い] 例) 背景輝度 L_b : 100 [cd/m²]
 円形視標輝度 L_t : 10 [cd/m²]

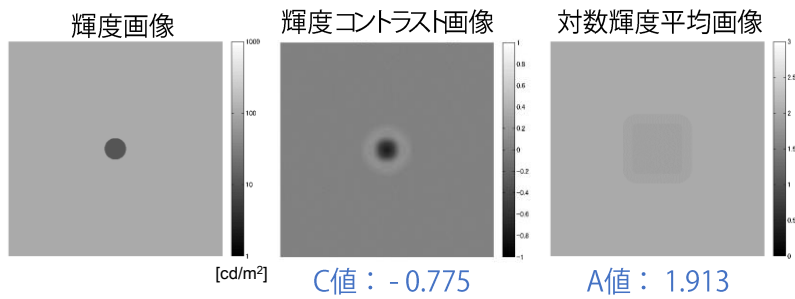


図 1.7 C 値, A 値の算出例

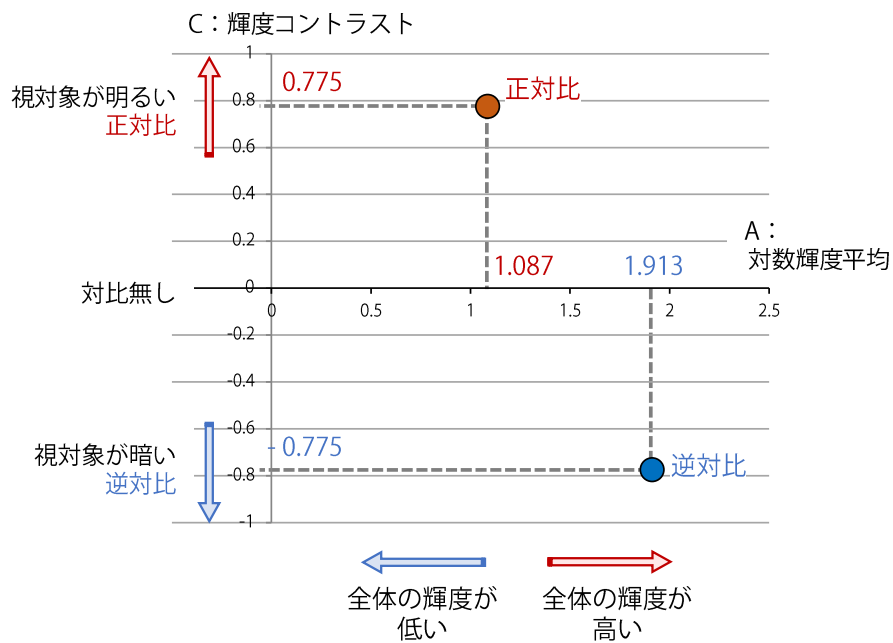


図 1.8 輝度コントラスト評価図(CA 図)の例

1.3.2. 測光色画像と表色系

本研究では、CIE1931XYZ 表色系 XYZ 表色系 XYZ 刺激値等のように、光、色を定量的に表現した値を測光色とし、測光色の分布を二次元で表現する画像を総称して、「測光色画像」と定義する。

図 1.9 は、XYZ 刺激値の分布を持つ測光色画像の例である。Y 刺激値は輝度と等しく、Y 刺激値の分布を表す Y 刺激値画像は輝度画像として扱うことができるため(図 1.9)、輝度画像(Y 刺激値画像)も測光色画像に含まれる。筆者らの既往研究^{27,28)}において、輝度画像によって視認性推定が可能であることが示されていることから、このような測光色画像を用いることにより、色の影響を考慮した視認性推定も可能と考えられる。本研究では、輝度画像での検討を基に、測光色画像を用いて色の影響を考慮した視認性推定法へ発展させることとした。

また、輝度や XYZ 刺激値は、反射・発光(物体色・光源色)を区別することなく表現が可能であるため、実空間のように反射・発光が複雑に混在する場合でも適用可能と考えられる。

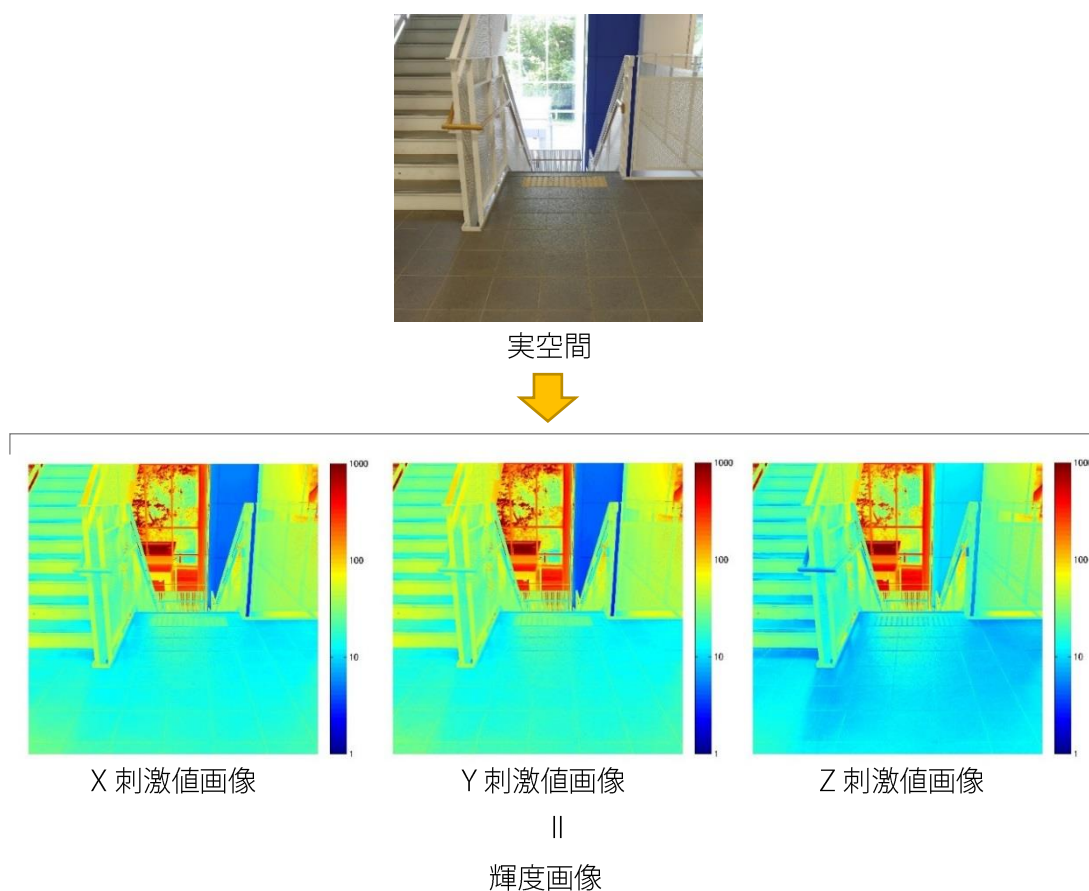


図 1.9 XYZ 刺激値で表現した測光色画像の例

表色系とは、色を説明するために考えられた体系であり、上記で挙げた XYZ 表色系の他、(CIE1931)RGB 表色系、マンセル表色系等が存在する。表色系は、顕色系と混色系に大別される。顕色系とは特定の条件下での色の見えを、色票を用いて標準化するもので、赤や青等の言葉を用いて表現する色を表示の対象としており、マンセル表色系等が挙げられる。それに対し、混色系とは色を定量的に表示するもので、計算式から得られた値によって表現する色を表示の対象とし、XYZ 表色系、RGB 表色系等が挙げられる。

XYZ 表色系は、式(1.1)、(1.2)を用いて XYZ 刺激値から色度座標(x, y)を求めることで、図 1.10 の xy 色度図上に色みを表現でき、Yxy 表色系とも呼ばれている。1931年に CIE(国際照明委員会)で標準表色系として採択され、広く用いられている表色系である。

$$x = X/(X+Y+Z) \quad \cdots (1.1)$$

$$y = Y/(X+Y+Z) \quad \cdots (1.2)$$

X: X 刺激値

Y: Y 刺激値

Z: Z 刺激値

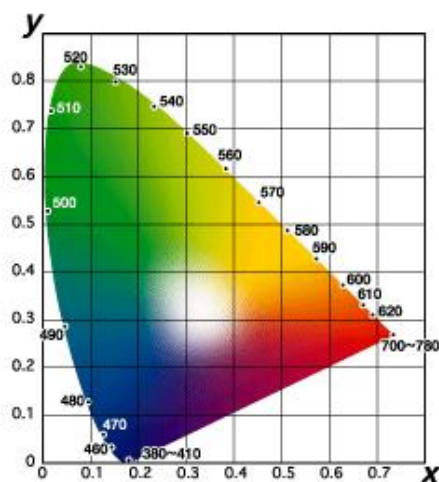


図 1.10 XYZ 表色系 xy 色度図

XYZ 表色系は、図 1.11 に示すように、(CIE1931)RGB 表色系、(CIE1976) $L^*a^*b^*$ 表色系(CIELAB)、(CIE1976) $L^*u^*v^*$ 表色系(CIELUV)、LMS 色空間等、他の表色系や色空間に相互変換が可能である^{30,31)}。本研究では、このように相互変換できる全ての値を測光色とする。

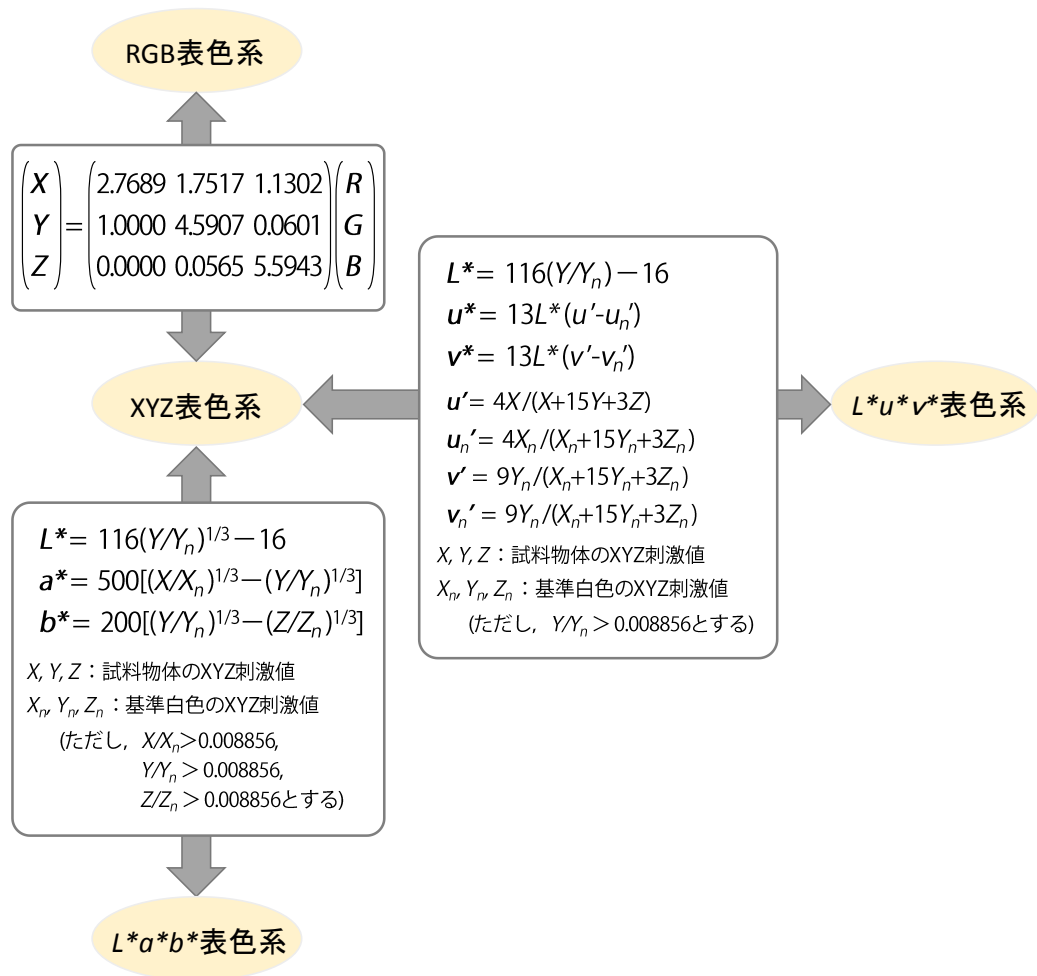


図 1.11 表色系の相互変換の例

1.3.3. 視認性に関する既往研究との関係および本研究の新規性

視認性や色の見え方に関する研究は、国内外問わず、これまで数多く行なわれてきた。それらの一部を表 1.2 に示す。しかし、実空間のような複雑な輝度色度分布において、視認性の推定を可能とする研究成果は存在していない。

本研究では、第 2 項(1.3.2)で説明した測光色画像に、第 1 項(1.3.1)で説明したコントラスト・プロファイル法²⁶⁾(輝度コントラスト算出フィルタの畳み込み計算)を適用する事によって、実空間の物体の視認性推定が可能な視認性推定手法の構築を試みた。

本研究は、これらの既往研究(表 1.2)の成果では不可能であった「実空間の視対象の視認性推定を可能とする」という点で、新規性があるといえる。

表 1.2 視認性に関する既往研究と分類

大分類	小分類	
輝度	ランドルト環の視認閾値	<ul style="list-style-type: none"> 中根芳一,伊藤克三: 明視照明のための標準等視力曲線に関する研究,日本建築学会論文報告集,第229号,pp.101-109,1975.3 中根芳一,西田尚代,金恵英,岩田三千子: 逆対比視標の視認に基づく等視力曲線に関する研究,日本建築学会計画系論文集,第62巻,第492号, pp.15-21, 1997.2 池田紘一,野田真次,山口昌一郎: ランドルト環視標の輝度対比および順応輝度と視力との関係,照明学会誌,第67巻,第10号, pp.527-533, 1983.10
	円形視標の視認閾値	<ul style="list-style-type: none"> O.M. Blackwell and H.R. Blackwell: Visual Performance Data for 156 Normal Observers of Various Ages, Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol.1, No.1, 1971.10 CIE: An Analytic Model for Describing the Influence of lighting parameters upon visual performance, CIE Publication 19/2.1, 1981.10
	文字の見やすさ (読みやすさ)	<ul style="list-style-type: none"> 原直也, 佐藤隆二: 文章の読みやすさについての多様な設計水準に対応する明視三要素条件を示す「等読みやすさ曲面」,日本建築学会環境系論文集,第69巻,第575号, pp.15-20, 2004.1 佐藤隆二, 伊藤克三, 大野治代: 見やすさに基づく明視照明設計に関する研究-照明の評価指標としての見やすさレベル(VEL)の有用性-, 照明学会誌, 第64巻, 第10号, pp.541-548, 1980.10 岩井彌, 岡嶋克典: 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, 第88巻, 第11号, pp.874-881, 2004.10 田淵義彦: CRTディスプレイの表示文字の好ましい輝度比のビジビリティレベル, 照明学会誌, 第81巻, 第8A号, pp.700-702, 1997.8
	顔の見やすさ	<ul style="list-style-type: none"> 奥田紫乃, 佐藤隆二, 山中俊夫: レースカーテンを通した人の顔の見え易さとそれに対応する明視要素についての検討,日本建築学会計画系論文集,第66巻,第542号, pp.29-34, 2001.4
	弱視者	<ul style="list-style-type: none"> 岩田三千子, 北本裕之: 弱視者の明視に関わる照度と輝度比の関係, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第732号, pp.121-128, 2017.2 岩田三千子, 北本裕之: 弱視者に配慮した階段下降時の踏面端部ラインの明視条件の検討, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第742号, pp.1005-1014, 2017.12
	高齢者	<ul style="list-style-type: none"> 秋月有紀, 井上容子: 明視性評価における年齢の取り扱い及び相対視力の適用範囲に関する検討,日本建築学会計画系論文集,第67巻,第562号, pp.15-21, 2002.12 秋月有紀, 井上容子: 個人の最大視力に対する視力比の概念の導入-個人の視力に配慮した視認能力評価における背景輝度と視距離の影響の取り扱いについて-, 照明学会誌, 第86巻, 第11号, pp.819-829, 2002.11
減能グレア	<ul style="list-style-type: none"> L. L. Holladay: The Fundamentals of Glare and Visibility, Journal of the Optical Society of America, Vol. 12, No.4, pp. 271-319, 1926 L. L. Holladay: Action of a Light-source in the Field of View in Lowering Visibility, Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments, Vol. 14, No.1, pp.1-15, 1927 W. S. Stiles, B. H. Crawford: The Effect of a Glaring Light Source on Extrafoveal Vision, Proceedings of the Royal Society, Vol. 122B, pp.255-280, 1937 Commission Internationale de l'Eclairage: CIE Equations for Disability Glare, 146: CIE TC 1-50 report, 2002 B. H. Crawford: The Integration of the Glare Effects from a Number of Glare Sources, Proceedings of the Physical Society, Vol. 48, No.1, pp.35-37, 1935 中根芳一, 伊藤克三: 中心窩における光幕光量に関する研究II: 高輝度光源が視認閾値に及ぼす影響に基づく検討, 日本建築学会論文報告集, 第285号, pp.109-115, 1979.11 	

表 1.2 視認性に関する既往研究と分類 (続き)

大分類	小分類	
色	区別できない色の範囲	<ul style="list-style-type: none"> D. L. MacAdam: Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight, Journal of the Optical Society of America, Vol. 32, No. 5, pp.247-274, 1942.5
	有彩色の文字の見やすさ (読みやすさ)	<ul style="list-style-type: none"> 原直也, 野口太郎: 無彩色背景有彩色文書の文字の明度, 彩度, 色相が読みやすさと等価輝度対比に及ぼす影響, 照明学会誌, 第88巻, 第11号, pp.866-873, 2004.10 舟川政美: 色コントラストと可読性に関する実験研究, 照明学会誌, 第84巻, 第11号, pp.785-792, 2000.11
	有彩色のランドルト環	<ul style="list-style-type: none"> 阪口忠雄, 野口透: 色相明度, 彩度がもの見え方に及ぼす影響, 照明学会誌, 第53巻, 第5号, pp.213-218, 1969.5
	弱視者	<ul style="list-style-type: none"> 岩田三千子, 北本裕之: 無彩色背景における有彩色と無彩色ラインの弱視者の視認性, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第734号, pp.301-308, 2017.4 岩田三千子: 視対象周辺の色が若年者および高齢者の視力と主観評価に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第68巻, 第568号, pp.111-117, 2003.6
	高齢者	<ul style="list-style-type: none"> 秋月有紀, 井上容子: 個人の視認能力を考慮した色の三属性の細部識別関への影響, 照明学会誌, 第92巻, 第5号, pp. 241-249, 2008.5 岩田三千子: 視対象周辺の色が若年者および高齢者の視力と主観評価に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第68巻, 第568号, pp.111-117, 2003.6
	色弱者 (カラーユニバーサルデザイン)	<ul style="list-style-type: none"> 伊藤啓: カラーユニバーサルデザイン色覚バリアフリーを目指して, 情報管理, 第55巻, 第5号, pp. 307-317, 2012.8 岡嶋克典: 視機能から見た印刷物におけるユニバーサルデザイン, 日本印刷学会誌, 第46巻, 第3号, pp.124-130, 2009.7 Vivianne C. Smith and Joel Pokorny: Spectral Sensitivity of the Foveal Cone Photopigments between 400 and 500 nm, Vision Research, Vol.15, No.2, pp.161-171, 1975.2 岡部正隆, 伊藤啓: 色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション(1)色覚の原理と色盲のメカニズム, 細胞工学, 第21巻, 第9号, pp.733-745, 2002.7 Françoise Viénot, Hans Brettel, and John D. Mollon: Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats, Color research and application, Vol. 24, No. 4, pp.243-252, 1999.8
	LMS錐体の感度	<ul style="list-style-type: none"> J. J. Vos and P. L. Walraven: Back to Helmholtz, Color Research Application, Vol. 16, No. 6, pp.355-359, 1991.12 Austin Roorda and David RWilliams.: The Arrangement of the Three Cone Classes in the Living Human Eye, Nature, Vol. 397, pp.520-522 1999.2 河本健一郎, 矢口博久, 塩入諭: L, M錐体コントラスト平面における色弁別の時間周波数特性, 光学, Vol. 32, No. 2, pp.105-112, 2003.2 Graeme R. Cole, Trevor Hine, and William McIlhagga: Detection Mechanisms in L-, M-, and S-cone Contrast Space, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 10, No. 1, pp. 38-51, 1993.1 辻村誠一, 塩入諭, 平井有三, 矢口博久: 背景の置換による錐体の選択的な順応効果, 光学, Vol.27, No.11, pp.675-682, 1998.1

1.4. 本研究の範囲と構成

1.4.1. 研究範囲

本研究の対象範囲を図 1.12 に示す。

本研究は、測光色画像を用いて、障害物やサインの検知について視認性推定が可能な視認性推定法を構築する。そして、あらゆる利用者を想定し、視覚的ユニバーサルデザインへの展開を目指す。

本研究では初めに、輝度分布が視認性に及ぼす影響について検討を進める(図 1.12 左)。「一般的な視力を持つ晴眼者(以下、通常視力晴眼者)」を対象に、実空間を想定し、輝度画像から視認性推定が可能な視認性推定法を構築する(図 1.12 左上)。そして、構築した視認性推定法の「低視力晴眼者」や「弱視者」への適用法について検討する(図 1.12 左下)。

次に、色の影響も考慮し、輝度色度分布が視認性に及ぼす影響について検討を進める(図 1.12 右)。「一般的な色覚をもつ者(以下、一般色覚者)」を対象に、色の影響について検討し、測光色画像から視認性を推定可能な視認性推定法を構築する(図 1.12 右上)。「色弱者」を対象とした場合についても検討する(図 1.12 右下)。

「高齢者」についても検討する必要があると考えられるが、研究範囲が広くなりすぎるため、本研究では対象外とする。また本研究は、中心視での視認性のみを扱うこととする。

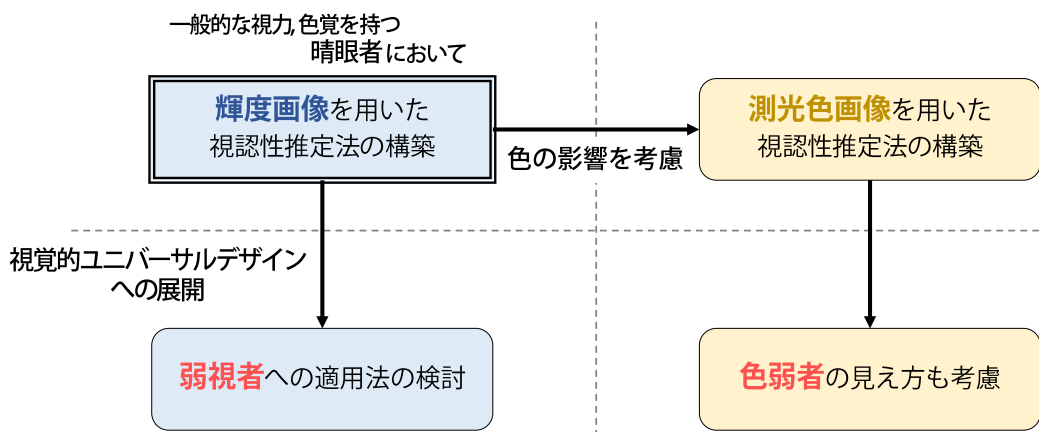


図 1.12 本研究の研究範囲

1.4.2. 研究構成

本研究の構成を図 1.13 に示す。

第 2 章では、本研究の初段階として、晴眼者を対象とした輝度画像を用いた視認性推定法を構築する。円形視標を視対象とする視認評価実験を行い、輝度コントラスト評価図を用いた視認閾値の推定法を検討する。そして、その視認閾値を基に、見やすさの程度の推定法を検討する。また、視野内の高輝度なグレア光源の存在によって生じる視認性低下(減能グレア)の影響についても検討する。

第 3 章では、第 2 章で構築した輝度画像を用いた視認性推定法の、弱視者への適用法を検討する。はじめに、弱視者を対象に検討する前段として、視力の低い晴眼者(以下、低視力晴眼者)を対象に、第 2 章で構築する視認性推定法が適用可能か検討する。第 2 章では均一背景によって検討するが、第 3 章では、より現実環境に近い不均一背景も用いることとし、背景の輝度分布が視認性に及ぼす影響についても検討する。そして、様々な疾病や障害等級をもつ弱視者を対象に同様の検討を行い、第 2 章で構築する視認性推定法が適用可能か検討する。

第 2 章、第 3 章の検討は輝度に基づくものであり、視対象や背景の色度を CIE 標準光源 D65 相当に限定して検討する。第 4 章では、色度コントラストを表現する方法を示し、一般色覚者を対象として、円形視標の色度も変化させた実験を行い、色の影響を考慮した見やすさ評価について検討する。

第 5 章では、色弱者を対象として検討を行う。はじめに、色の見え方に関するヒアリング調査を行う。そして、第 4 章で一般色覚者を対象に行なう色の影響を考慮した円形視標の見やすさ評価に関する検討を、色弱者に対して行なう。

第 6 章では、第 4, 5 章で得られた成果を基に、一般色覚者・色弱者を対象とした測光色画像を用いた視認性推定法を構築する。

第 7 章では、実空間の測光色画像を用いた視認性推定の例を示す。第 2, 3 章で得られた成果を基に、実空間の輝度画像(色味情報を持たない測光色画像)を用いて、晴眼者、低視力者、弱視者を想定し、視認性推定を行なう。また、第 6 章の成果を基に、実空間の測光色画像を用いて、一般色覚者、色弱者(1 型・2 型)を想定し、色の影響を考慮した視認性推定を行なう。

第 8 章では、本研究を総括し、今後の課題と展望について述べる。

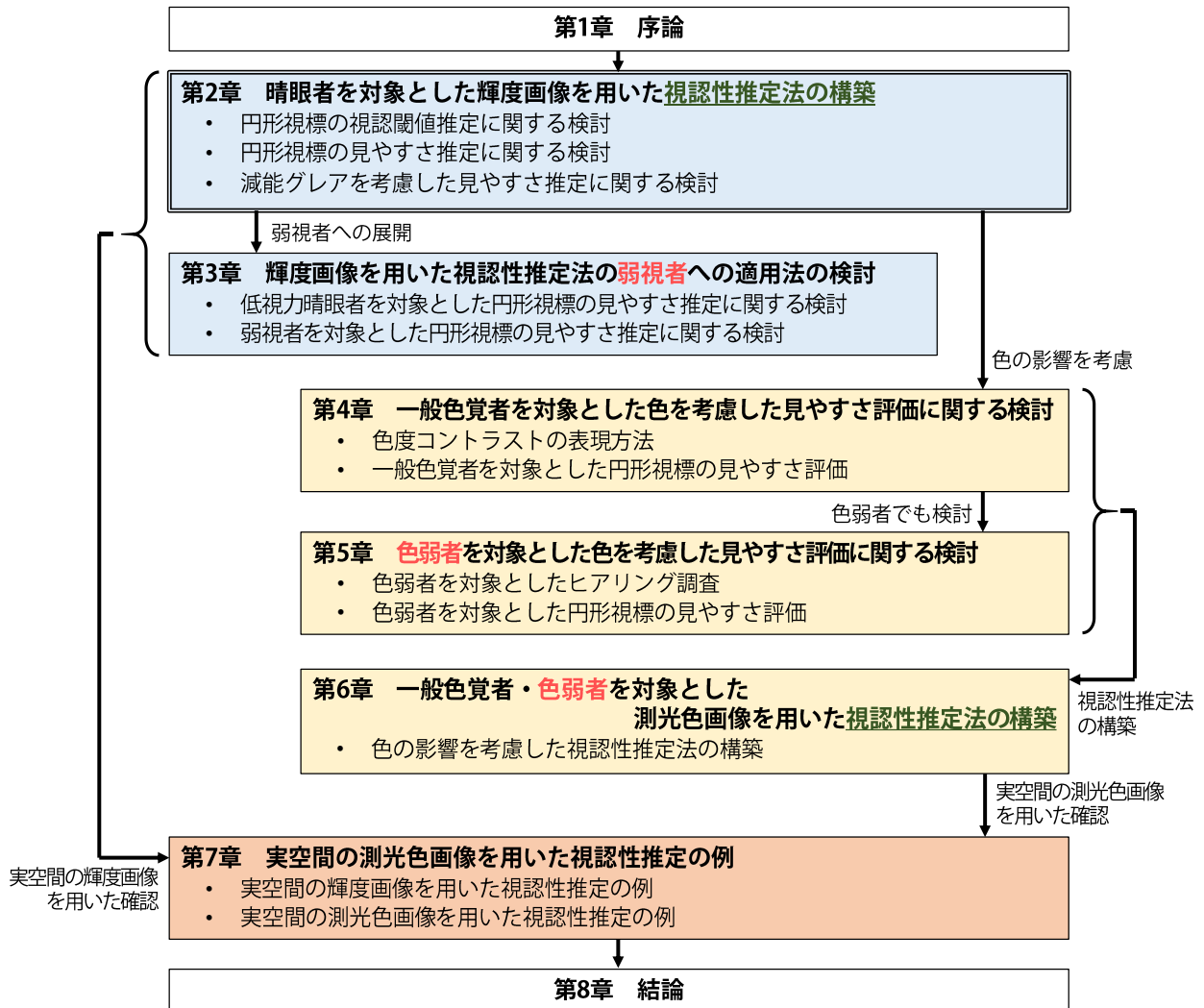


図 1.13 本研究の構成

第1章参考文献

- 1) 照明学会：道路照明のビジビリティレベルに関する研究調査委員会報告書, JIER-072, 2002.3
- 2) 照明学会：ロービジョンを対象とした視環境計画に関する研究調査委員会報告書, JIER-092, 2006.9
- 3) 国土交通省：高齢者,障害者等の円滑な移動等に配慮した建築設計標準, 2017.3
- 4) 国土交通省総合政策局安心生活政策課：公共交通機関の旅客施設に関する移動等円滑化整備ガイドライン(バリアフリー整備ガイドライン旅客施設編), 2018.7
- 5) 国土交通省総合政策局安心生活政策課：公共交通機関の車両等に関する移動等円滑化整備ガイドライン(バリアフリー整備ガイドライン車両等編), 2018.7
- 6) 交通エコロジー・モビリティ財団：海外における公共交通機関に関する法律, 基準等の基礎調査報告書, 2015.3
- 7) 日本工業規格：照明基準総則, JIS Z 9110, 2010
- 8) 伊藤大輔, 加納さくら, 望月悦子, 岩田利枝, 中村芳樹：東日本大震災に伴う節電時の駅舎照明実態調査：その1 調査概要と節電時の点灯率(照明の運用と評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.431-432, 2012.9
- 9) 加納さくら, 伊藤大輔, 望月悦子, 岩田利枝, 中村芳樹：東日本大震災に伴う節電時の駅舎照明実態調査：その2 照度測定結果と利用者評価(照明の運用と評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.433-434, 2012.9
- 10) 岩田三千子：節電で学んだユニバーサル社会の照明計画, 電気設備学会誌, Vol. 34, No. 1, pp.3-5, 2014.1
- 11) 中根芳一, 伊藤克三：明視照明のための標準等視力曲線に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第229号, pp.101-109, 1975.3
- 12) 中根芳一, 西田尚代, 金恵英, 岩田三千子：逆対比視標の視認に基づく等視力曲線に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第62巻, 第492号, pp.15-21, 1997.2
- 13) 池田紘一, 野田貢次, 山口昌一郎：ランドルト環視標の輝度対比および順応輝度と視力との関係, 照明学会誌, 第67巻, 第10号, pp.527-533, 1983.10
- 14) 原直也, 佐藤隆二：文章の読みやすさについての多様な設計水準に対応する明視三要素条件を示す「等読みやすさ曲面」, 日本建築学会環境系論文集, 第69巻, 第575号, pp.15-20, 2004.1
- 15) 岩田三千子, 北本裕之：弱視者の明視に関わる照度と輝度比の関係, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第732号, pp.121-128, 2017.2
- 16) 岩田三千子：視対象周辺の色が若年者および高齢者の視力と主観評価に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第68巻, 第568号, pp.111-117, 2003.6
- 17) 岩田三千子：大阪梅田ターミナル地区における階段の実態調査：高齢者および身体障害者に配慮した公共空間の階段の計画に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第68巻, 第570号, pp.61-66, 2003.8
- 18) 岩田三千子, 北本裕之：無彩色背景における有彩色と無彩色ラインの弱視者の視認性, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第734号, pp.301-308, 2017.4
- 19) 岩田三千子, 北本裕之：弱視者に配慮した階段下降時の踏面端部ラインの明視条件の検討, 日本建築

- 学会環境系論文集, 第 82 卷, 第 742 号, pp.1005-1014, 2017.12
- 20) 秋月有紀, 井上容子: 明視性評価における年齢の取り扱い及び相対視力の適用範囲に関する検討, 日本建築学会計画系論文集, 第 67 卷, 第 562 号, pp.15-21, 2002.12
- 21) 秋月有紀, 井上容子: 個人の視認能力を考慮した色の三属性の細部識別閾への影響, 照明学会誌, 第 92 卷, 第 5 号, pp. 241-249, 2008.5
- 22) 原直也, 野口太郎: 無彩色背景有彩色文書の文字の明度, 彩度, 色相が読みやすさと等価輝度対比に及ぼす影響, 照明学会誌, 第 88 卷, 第 11 号, pp.866-873, 2004.10
- 23) 舟川政美: 色コントラストと可読性に関する実験研究, 照明学会誌, 第 84 卷, 第 11 号, pp.785-792, 2000.11
- 24) 岩田三千子: 視対象周辺の色が若年者および高齢者の視力と主観評価に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第 68 卷, 第 568 号, pp.111-117, 2003.6
- 25) 阪口忠雄, 野口透: 色相, 明度, 彩度がものの見え方に及ぼす影響, 照明学会雑誌, 第 53 卷, 第 5 号, pp.213-218, 1969.5
- 26) 中村芳樹: 光環境における輝度の対比の定量的検討法, 照明学会誌, 第 84 卷, 第 8A 号, pp.522-528, 2000.8
- 27) 中村芳樹, 加藤洋子, 岩田三千子: 輝度コントラストによる視認性の検討, 平成 27 年度照明学会全国大会論文集, 0605, 2015.8
- 28) Nakamura Yoshiki, Kato Yoko and Iwata Michico: Study on Visibility Estimation of Objects in Complicated Luminance Image, Proceedings of the 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance (CZ), pp.96-102, 2016.9
- 29) 日本工業規格: 視力検査装置, JIS T 7309, 2002
- 30) 照明学会: 照明ハンドブック第 2 版, 2003.11
- 31) 日本色彩学会: 新編色彩科学ハンドブック[第三版], 2011.4

第2章 晴眼者を対象とした輝度画像を用いた

視認性推定法の構築

2.1. 本章の目的

本章では、本研究の初段階として、晴眼者を対象に輝度分布が視認性に及ぼす影響について検討し、輝度画像を用いた視認性推定法を構築する。

初めに、基礎的検討として、晴眼者を対象に実環境で障害物やサインを検知することを想定し、単純な図形である円形視標を視対象とした視認評価実験を行い、輝度コントラスト評価図(CA 図)における晴眼者の視認閾値の推定法について検討する。

次に、視認閾値を基に見やすさの程度の推定法を構築することを目的とし、視認閾値と見やすさの評価の関係を調査する。視力の高い晴眼者(通常視力晴眼者)だけでなく、視力の低い晴眼者(低視力晴眼者)も対象とし、通常視力晴眼者で検討した閾値や見やすさの程度の推定法が低視力晴眼者にも適応可能であるか検討する。

最後に、視野内の高輝度なグレア光源の存在によって生じる視認性低下(減能グレア)の影響について検討を行なう。視作業性や安全性を確保するためには、減能グレアを考慮して適切に視認性を推定することも重要である。

2.2. 円形視標の視認閾値推定に関する検討

2.2.1. 本節の目的

本節では、輝度画像から視認性を推定するための基礎的検討として、晴眼者を対象に、実環境で障害物やサインを検知することを想定し、単純な図形である円形視標を視対象とした視認評価実験を行う。輝度コントラスト評価図(以下、CA 図)(第 1 章第 3 節参照)を用いて、晴眼者の視認閾値の推定法を検討する。

2.2.2. 円形視標の視認評価 [実験 2-A]

2.2.2.1. 実験概要

実環境で障害物やサインを検知することを想定し、単純な視標である円形視標が提示された場合の視認評価実験を行った。図 2.1 に実験室概要を示す。被験者から 2500[mm]離れた位置に設置した 27 インチの PC モニタ(EIZO Color Edge CG277, 2560×1440[px])に、CIE 標準光源 D65 に相当する色度(色彩輝度計による CIE1931xy 色度座標測定値は、 $x=0.319, y=0.325$)の均一背景および円形視標の提示を行った。PC モニタの周辺部が暗すぎないように、天井に設置されている蛍光灯を調光し PC モニタの周辺部の輝度を 2.5[cd/m²]とした。図 2.2 に提示刺激の様子、表 2.1 に実験条件を示す。PC モニタの 8bit(256 階調)の RGB 階調値に基づいて背景および円形視標の輝度を調光した。背景の輝度は、2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160[cd/m²]の 7 条件とし、円形視標の直径サイズおよび円形視標と背景の輝度コントラスト(C 値)をランダムに変化させ提示した。被験者は、提示される円形視標について、手元のテンキーを用いて「見える」または「見えない」の二択で回答する。各被験者、全条件を 1 回ずつ評価した。

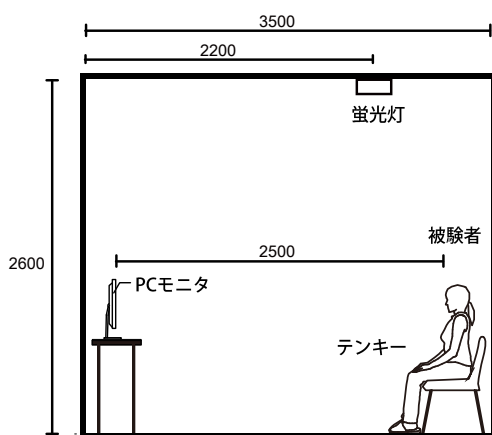


図 2.1 実験室概要[mm]

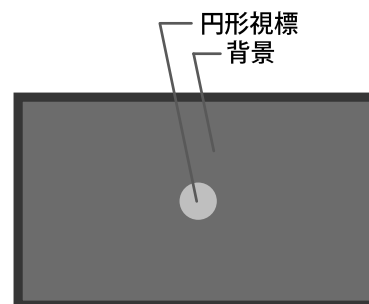


図 2.2 PC モニタ上の提示刺激の様子

表 2.1 実験 2-A 実験条件

	独立変数	条件数
背景輝度 [cd/m ²]	2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160	7
C 値 (目標値)	-1.008, -0.775, -0.542, -0.405, -0.308, -0.233, -0.172, -0.120, -0.0751, -0.0355, 0, 0.0355, 0.0751, 0.120, 0.172, 0.233, 0.308, 0.405, 0.542, 0.775, 1.008	最大 21
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]	20, 10, 6.67, 5, 3.33, 2.5, 2, 1.67, 1.43, 1.25, 0.667	11

被験者は 20 代の晴眼者 10 名とし、観察距離 2500[mm] でランドルト環を用いて測定した視力値を表 2.2 に示す。視力値は、視認可能な最小切れ目幅の視角[deg]を逆数で表現したものである。一般的にランドルト環を用いた視力検査では、観察距離 5000[mm]で測定することとなっているが、本実験の観察距離が 2500[mm]であるため、観察距離 2500[mm]として視力値を得た。視力測定に使用したランドルト環のサイズは、視力値 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0 であった。

表 2.2 実験 2-A 被験者リスト

被験者 No.	性別	年齢	矯正	両眼視力 (観察距離: 2500 [mm])
1	女	27	コンタクト	1.20
2	女	24	裸眼	2.00
3	女	23	コンタクト	1.50
4	女	24	コンタクト	1.20
5	女	22	コンタクト	1.00
6	男	22	メガネ	1.00
7	男	22	メガネ	1.50
8	男	24	裸眼	1.50
9	女	22	メガネ	1.50
10	男	24	裸眼	1.00
平均値				1.34
中央値				1.35

2.2.2.2. 分析方法

通常，コントラスト・プロファイル法²⁾による輝度コントラスト(以下，C 値)，対数輝度平均(以下，A 値)の算出は，第 1 章第 3 節第 1 項(1.3.1)で述べたように，輝度コントラスト算出フィルタ(第 1 章図 1.5 参照)と対数輝度平均算出フィルタ(第 1 章図 1.6 参照)を畳み込み計算して算出するが，均一背景上の円形視標については下記の式(2.1)，(2.2)より，円形視標の中心位置の C 値および A 値の簡易的な算出が可能である．この式(2.1)，(2.2)の係数は，あらかじめ用意した高解像度の画像を視対象サイズに合わせてダウンサンプリングし，コントラストを計算する状況を想定して求めた．具体的には，高解像度で表現された円形視標を，視標サイズの 1/3 の解像度にダウンサンプリングすると，図 2.3 に示すような面積比率となる．この面積比率と N フィルタおよび対数輝度平均算出フィルタの積の総和を求めることで係数が得られる．

$$C = 0.775 * \log_{10}(L_t) - 0.775 * \log_{10}(L_b) \quad \cdots (2.1)$$

$$A = 0.087 * \log_{10}(L_t) + 0.913 * \log_{10}(L_b) \quad \cdots (2.2)$$

C: 輝度コントラスト

A: 対数輝度平均

L_t : 円形視標の輝度 [cd/m²]

L_b : 背景の輝度 [cd/m²]

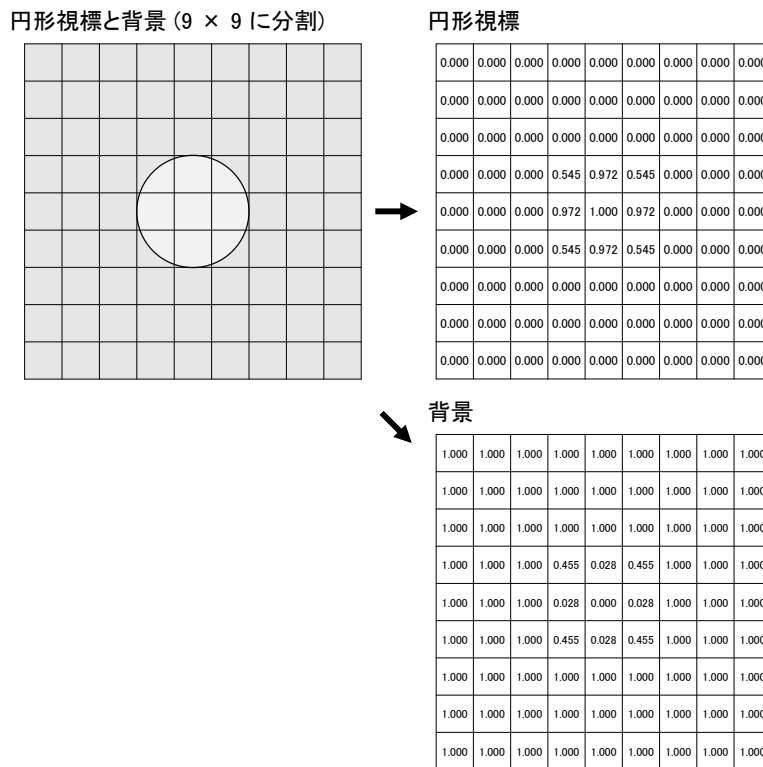


図 2.3 9×9 マトリックスにおける円形視標と背景の面積比率

実際のコントラスト・プロファイルの計算では、検出視対象サイズに合わせたダウンサンプリングやアップサンプリングによって必要解像度を持つ画像を生成し、その画像に輝度コントラスト算出フィルタ(第 1 章図 1.5 参照), 対数輝度平均算出フィルタ(第 1 章図 1.6 参照)をそのまま畳み込む。従って、円形視標サイズが変化した場合でも、それに合わせて画像解像度を変化させるため、 9×9 で表現した面積の比率は変わらず、式(2.1), (2.2)の係数は検出サイズによらず一定となる。

本実験では、式(2.1), (2.2)の算出式を用いて実験条件の C 値, A 値を算出し、円形視標サイズごとに縦軸 : C 値, 横軸 : A 値とする輝度コントラスト評価図(以下, CA 図と呼ぶ)に視認評価結果をプロットする。なお, 本研究では, 円形視標が背景よりも明るい場合(C 値が正)を正対比, 暗い場合(C 値が負)を逆対比と定義する。

2.2.2.3. 実験結果

円形視標サイズ 10, 2.5, 1.25, 0.667[min]の場合の被験者 10 名の評価結果を図 2.4 の CA 図に示す。10 名とも, 円形視標サイズが大きいほど, C 値の絶対値が大きいほど, A 値が高いほど視認性が向上し, 前章で示した明視三要素に関して同様の傾向を示すことが確認できた。図 2.4 の CA 図は 10 名のうちの半数(5 名)以上が視認できた条件を○, 視認できなかった条件を●で示している。また, 円形視標サイズ 2.5[min]を例として, 視認可能な人数の分布の様子を図 2.5 に示す。

実験結果 CA 図(図 2.4)より, 視対象サイズが小さくなるほど, 「見えない」の条件が多くなり, A 値が大きくなるほど, 視認しやすくなっていることが確認できる。また, 正対比に比べ逆対比は検知しにくいことが示された。ランドルト環を用いた視力値と視認できる円形視標の最小サイズの関係を見ると, 正対比ではランドルト環視力値(表 2.2)と同等のサイズまで視認できるが, 逆対比ではコントラストが高い場合でも視力値の半分程度のサイズまでしか視認できないことが示された。

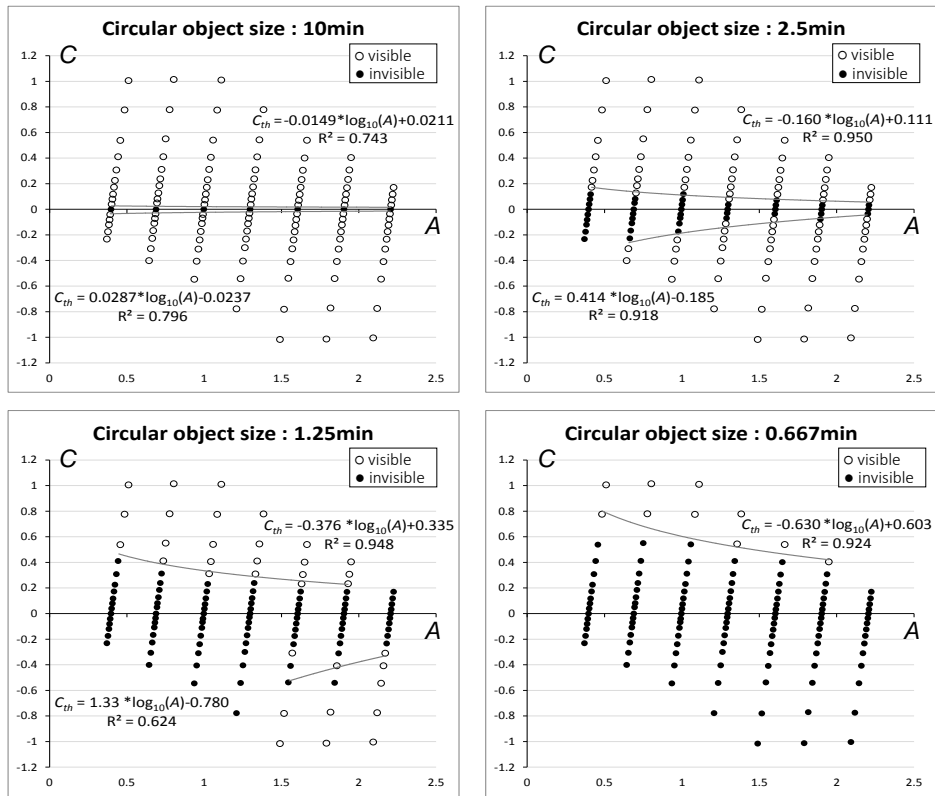


図 2.4 実験 2-A 評価結果 CA 図(円形視標サイズ 10, 2.5, 1.25, 0.667[μm])

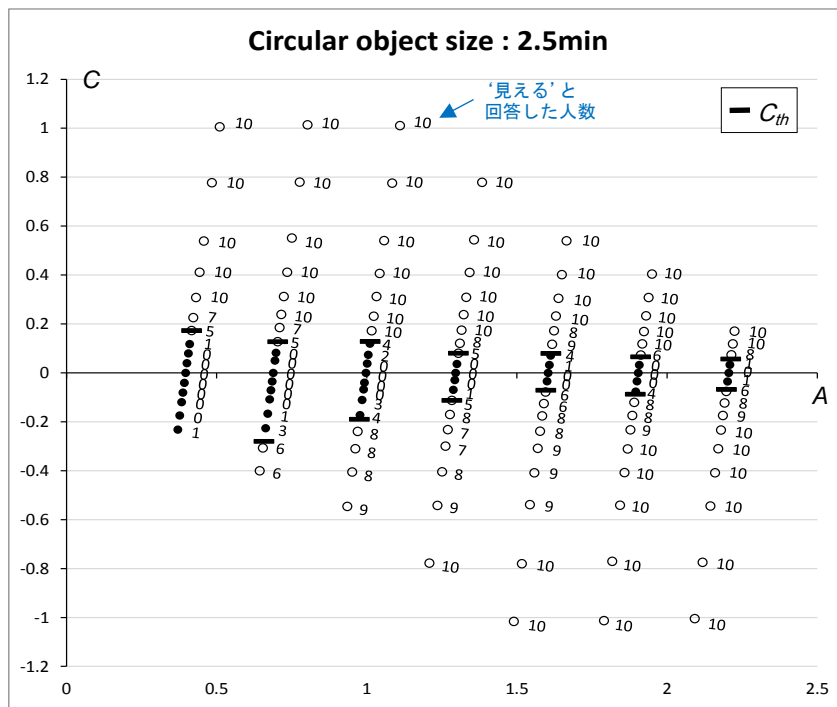
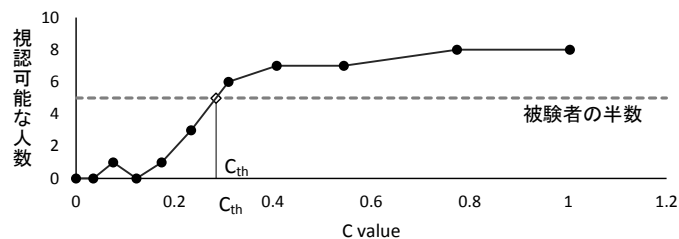
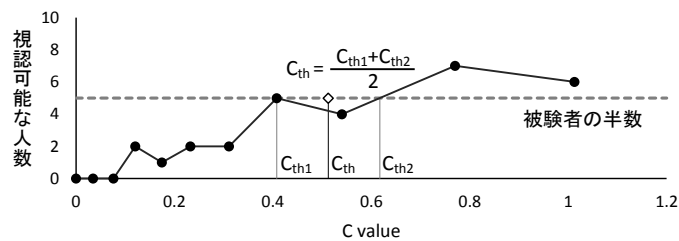


図 2.5 視認可能な人数の分布(円形視標サイズ 2.5[μm])

視認閾値の変化を検証するため、実験結果より、同一視対象サイズ、背景輝度毎に 5 名が視認可能となる視認閾値 C_{th} を求めた(図 2.5 に一で示す)。図 2.6 に算出方法を示す。同一背景輝度・視対象サイズであれば、C 値の絶対値が高くなるほど視認可能な人数が増えるため、図 2.6-(i)Example 1 に示すように、視認可能な人数が 5 名となる C_{th} を求めることが出来る。しかし、被験者の評価のばらつきにより、図 2.6-(ii)Example 2 のように視認可能な人数が 5 名となる箇所が 2 箇所以上存在することがある。この場合は、それらの視認可能な人数が 5 名となる C 値を平均したものを C_{th} とする。



(i) Example 1



(ii) Example 2

図 2.6 視認閾値 C_{th} の算出方法

今回の実験結果において、順応輝度(つまり A 値)が上がるほど C_{th} が一定になる傾向があることから、背景輝度毎に得た C_{th} より、 $C_{th} = m \cdot \log_{10}(A) + n$ の近似式を求め、視対象サイズ毎に視認可能と不可能の条件の間に視認閾値曲線を引くことができた(図 2.4 の曲線)。視対象サイズが小さくなるほど、視認閾値曲線が外側へ開き、視認に必要な視認閾値 C_{th} の絶対値が高くなることを確認した。定数 n は、順応輝度が $10[\text{cd}/\text{m}^2]$ ($A=1$) のときの C_{th} の値となる。なお、視対象サイズ $20, 10[\text{min}]$ については、 C_{th} が小さく、いずれの背景輝度においても C 値が 0 から絶対値が大きくなる 1 つ目条件で視認可能となり、精度の高い視認閾値曲線が得られていない。

2.2.3. サイズの大きい円形視標の視認評価 [実験 2-B]

2.2.3.1. 実験概要

実験 2-A にて円形視標の視対象サイズ 0.67~20[min]の範囲の視認閾値が得られた。今後、設計に活用しやすくすることや、弱視者へ展開させることを想定すると、実験 2-A の検討範囲では視対象サイズが小さく、視対象サイズが大きい範囲についての検討が不十分と考えられる。そのため、実験 2-A より大きいサイズの円形視標について視認評価実験を行い検討した。

20 代晴眼者 10 名(観察距離 2500[mm]で測定した両眼視力中央値 1.70)を被験者とした(表 2.3)。実験条件を表 2.4 に示す。実験 2-A の円形視標サイズ 0.67~20[min]に対し、本実験では円形視標サイズ 3.3~600[min]の 15 条件とした。そのうち 3.3~60[min]では実験 2-A と同様に観察距離を 2500[mm]としたが、それより大きい円形視標サイズ 120~600[min]では PC モニタ上に十分な背景(視対象サイズの 3 倍と仮定する)の領域が確保されないため、観察距離を 625[mm]として実験を行った。円形視標サイズ 60[min]については、被験者の焦点調節の影響を確認するため、625[mm]と 2500[mm]の両方の観察距離で行った。観察距離 625[mm]での視力測定を試みたが、観察距離 625[mm]を想定したランドルト環視標は非常に小さく、表現が難しいために測定できなかった。

また、円形視標サイズが大きくなると、視認閾値 C_{th} が極めて小さくなることが実験 2-A の実験結果から予想されたため、提示する C 値の範囲および間隔は、円形視標サイズ、背景輝度毎に適宜調整することとした。その他の実験方法は実験 2-A に準ずる。

表 2.3 実験 2-B 被験者リスト

被験者 No.	性別	年齢	矯正	両眼視力 (観察距離: 2500 [mm])
1	女	24	コンタクト	1.40
2	女	29	裸眼	1.35
3	女	23	コンタクト	2.00
4	女	23	コンタクト	1.45
5	女	24	コンタクト	1.60
6	男	24	メガネ	1.60
7	男	24	メガネ	1.90
8	男	25	裸眼	2.20
9	女	26	メガネ	2.00
10	男	24	裸眼	1.80
平均値				1.73
中央値				1.70

表 2.4 実験 2-B 実験条件

	独立変数	条件数
背景輝度 [cd/m ²]	2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160	7
C 値	円形視標サイズおよび背景輝度によって異なる	
円形視標サイズ [min]	600, 540, 480, 420, 360, 300, 240, 180,	15
※ 1 [deg] = 60 [min]	120, 60, 20, 10, 6.67, 5, 3.33	
観察距離 [mm]	625, 2500	2

2.2.3.2. 実験結果

円形視標サイズ 600, 300, 60[min]の場合の、被験者 10 名分の評価結果 CA 図を図 2.7 に示す。円形視標サイズ 60[min]の場合については、観察距離 625[mm]と 2500[mm]の両方を示す。実験 2-A と同様に、被験者 10 名とも、明視三要素に関して同様の傾向を示すことを確認した。被験者 10 名中の半数である 5 名以上が視認可能な条件を○、視認不可能な条件を●で示す。実験 2-A の結果(図 2.4)と比べると、視対象サイズが大きいため閾値が小さくなっていることが確認できる。また、円形視標サイズ 300[min]のときの視認可能と回答した人数の変化の様子と、実験 2-A と同様に 5 名が視認可能となるよう求めた視認閾値 C_{th} を図 2.8 に示す。

視対象サイズ 60[min]について、焦点調節の影響を確認するため 625[mm]と 2500[mm]の両方の観察距離で行ったところ、2500[mm]の方が視認可能なプロットが多くなり視認しやすい傾向が見られた(図 2.7)。しかし、両者の実験結果について t 検定を行った結果、有意水準 1%で有意差が見られなかった($p > 0.01$)。そのため、625[mm]と 2500[mm]の観察距離の違いは視認評価結果には影響がないと考える。また、正対比において 120~240[min]の 3 条件、300~600[min]の 6 条件、逆対比において 240~600[min]の 7 条件についても、それぞれ有意水準 1%で有意差が見られなかった($p > 0.01$)。そのため、有意差が見られなかった 60[min]の観察距離 625[mm]と 2500[mm]、正対比の 120~240 [min]、300~600[min]、逆対比の 240~600[min]については、それぞれ実験結果を合わせて $C_{th} = m^* \log_{10}(A) + n$ の閾値曲線を得た。

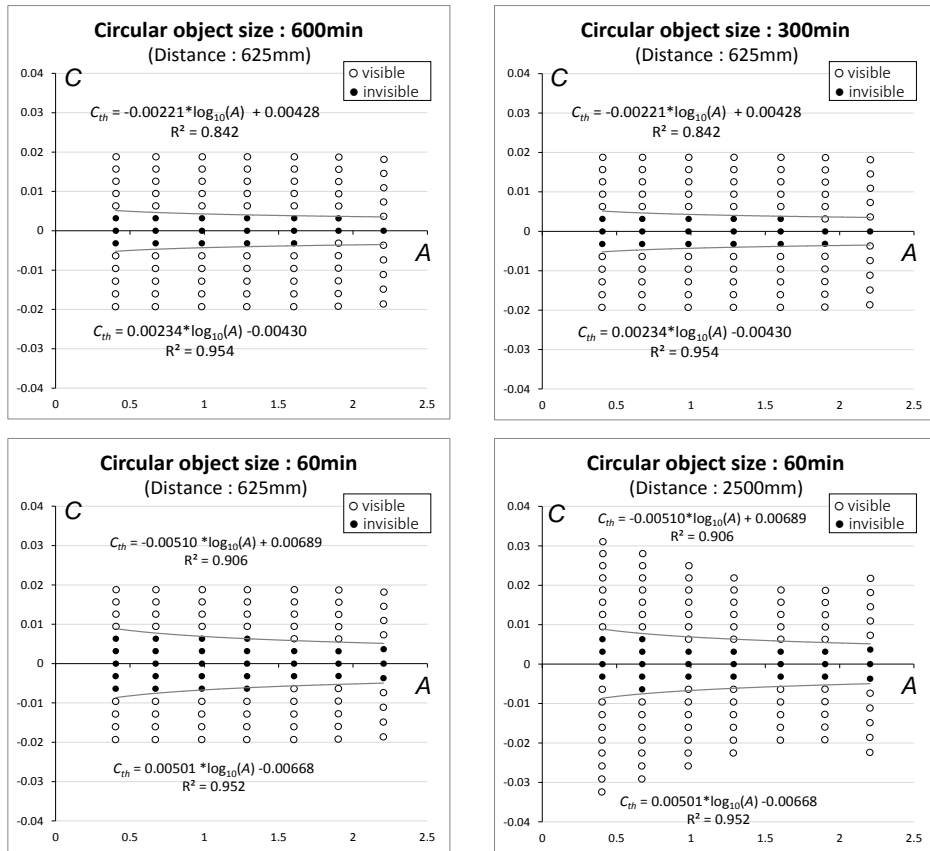


図 2.7 実験 2-B 評価結果 CA 図(円形視標サイズ 600, 300, 60[min])

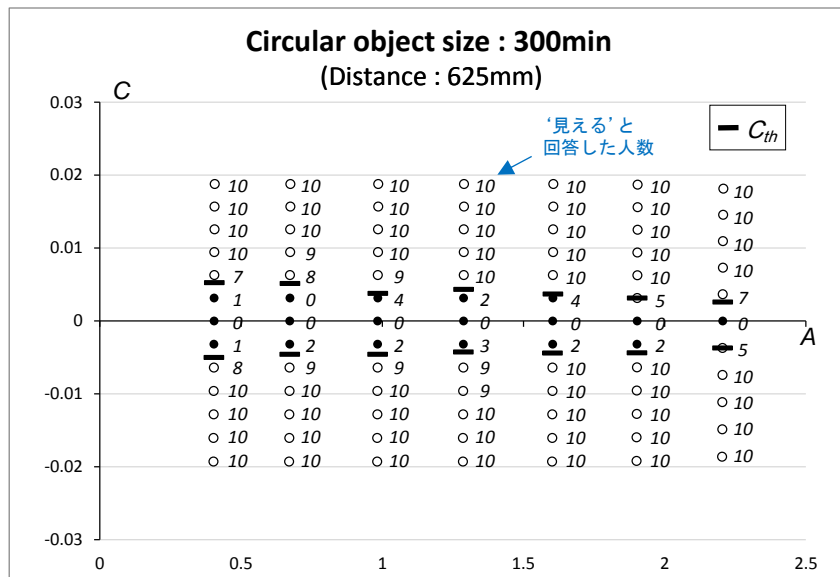


図 2.8 視認可能な人数の分布(円形視標サイズ 300[min])

2.2.4. 円形視標の視認閾値推定式の構築

実験 2-A, 実験 2-B の結果から得た視対象サイズ 1.25~600[mm]の C_{th} (C 値の視認閾値)の近似曲線より, 円形視標の視認閾値推定式を構築する. 円形視標の視認閾値推定式の構築にあたり, 式(2.3)を本研究の視認閾値曲線の基本式とする. 視対象サイズ毎に得られた m, n 一覧を表 2.5 に示す. 実験 2-A の視対象サイズ 20, 10[mm]については, 精度の高い近似式を得られなかったため除外した. m, n と対数視対象サイズ($\log_{10}(S)$)との関係を逆対比, 正対比それぞれ図 2.9 示すと, 実験 2-A, 実験 2-B の視対象サイズ条件が重なるところ(図 2.9 に赤丸で示す部分)で不連続となっている. これは, 観察距離 2500[mm]の被験者 10 名の両眼視力中央値が, 実験 2-A では 1.35, 実験 2-B では 1.70 であり, 視力の差異によって生じたと推察される. そこで, 秋月ら³⁾の相対視力に関する研究を参考に, 視対象サイズ S と視力 VA を掛けた S' (式(2.4)), つまり, 視対象サイズと視認可能な最小サイズの比を用いて, 視対象サイズごとの実験結果よりに得られた m, n と($\log_{10}(S')$)の関係を逆対比, 正対比それぞれ図 2.10 に示したところ, 双方のプロットが近づき図 2.9 に比べ連続的になることが確認できた. そのため, 本研究では S' を用いて推定式を得ることとした. また, 実験 2-B では観察距離 2500[mm]と 625[mm]で実験を行っているが, 観察距離 625[mm]での視力測定が困難であったため, 観察距離 2500[mm]の視力と同じであると仮定した.

$$C_{th} = m * \log_{10}(A) + n \quad \dots (2.3)$$

C_{th} : 視認閾値 C 値

A : A 値

m, n : 視対象サイズと視力に応じた係数, 定数

$$S' = S * VA \quad \dots (2.4)$$

S' : 視対象サイズ/視認可能な最小サイズ

S : 視対象サイズ[mm]

VA : ランドルト環の視力値 (1/視認可能な最小サイズ[mm])

実験 2-A, 実験 2-B では被験者の視力中央値が異なっていたが, S' (視対象サイズ×視力)を用いることにより, 双方を連続した m, n の近似式を得ることができ(式(2.5), (2.6), (2.7), (2.8)), 幅広い視対象サイズに適応可能な円形視標の視認閾値推定式を構築できた(図 2.10).

表 2.5 視対象サイズ毎に得られた m, n

	円形視標 サイズ [min]	逆対比			正対比			S^*	両眼視力 中央値
		m (係数)	n (定数)	R^2	m (係数)	n (定数)	R^2		
実験 2-B 観察距離: 625[mm]	600	2.34.E-03	-4.30.E-03	0.954	-2.21.E-03	4.28.E-03	0.842	1020	1.70
	540	2.34.E-03	-4.30.E-03	0.954	-2.21.E-03	4.28.E-03	0.842	918	
	480	2.34.E-03	-4.30.E-03	0.954	-2.21.E-03	4.28.E-03	0.842	816	
	420	2.34.E-03	-4.30.E-03	0.954	-2.21.E-03	4.28.E-03	0.842	714	
	360	2.34.E-03	-4.30.E-03	0.954	-2.21.E-03	4.28.E-03	0.842	612	
	300	2.34.E-03	-4.30.E-03	0.954	-2.21.E-03	4.28.E-03	0.842	510	
	240	2.34.E-03	-4.30.E-03	0.954	-2.36.E-03	5.12.E-03	0.866	408	
	180	4.32.E-03	-5.23.E-03	0.858	-2.36.E-03	5.12.E-03	0.866	306	
	120	4.70.E-03	-5.75.E-03	0.941	-2.36.E-03	5.12.E-03	0.866	204	
	60	5.01.E-03	-6.68.E-03	0.952	-5.10.E-03	6.89.E-03	0.906	102	
実験 2-B 観察距離: 2500[mm]	60	5.01.E-03	-6.68.E-03	0.952	-5.10.E-03	6.89.E-03	0.906	102	1.35
	20	6.50.E-03	-8.81.E-03	0.963	-1.38.E-02	1.07.E-02	0.914	34.0	
	10	1.53.E-02	-1.37.E-02	0.929	-2.11.E-02	1.24.E-02	0.927	17.0	
	6.67	3.86.E-02	-2.19.E-02	0.928	-3.19.E-02	2.07.E-02	0.819	11.3	
	5	5.21.E-02	-3.25.E-02	0.916	-4.35.E-02	2.96.E-02	0.849	8.50	
	3.33	9.44.E-02	-5.58.E-02	0.983	-7.44.E-02	5.03.E-02	0.971	5.67	
実験 2-A 観察距離: 2500[mm]	6.67	7.64.E-02	-3.70.E-02	0.945	-5.85.E-02	3.38.E-02	0.885	9.00	1.35
	5	1.38.E-01	-6.36.E-02	0.969	-6.92.E-02	4.62.E-02	0.917	6.75	
	3.33	2.13.E-01	-1.02.E-01	0.942	-1.35.E-01	8.52.E-02	0.914	4.50	
	2.5	4.14.E-01	-1.85.E-01	0.918	-1.60.E-01	1.11.E-01	0.950	3.38	
	2	6.58.E-01	-2.94.E-01	0.996	-2.29.E-01	1.80.E-01	0.963	2.70	
	1.67	8.41.E-01	-3.84.E-01	0.998	-3.02.E-01	2.18.E-01	0.981	2.25	
	1.43	1.37.E+00	-6.43.E-01	0.959	-4.18.E-01	2.79.E-01	0.852	1.93	
1.25	1.33.E+00	-7.80.E-01	0.624	-3.76.E-01	3.35.E-01	0.948	1.69		

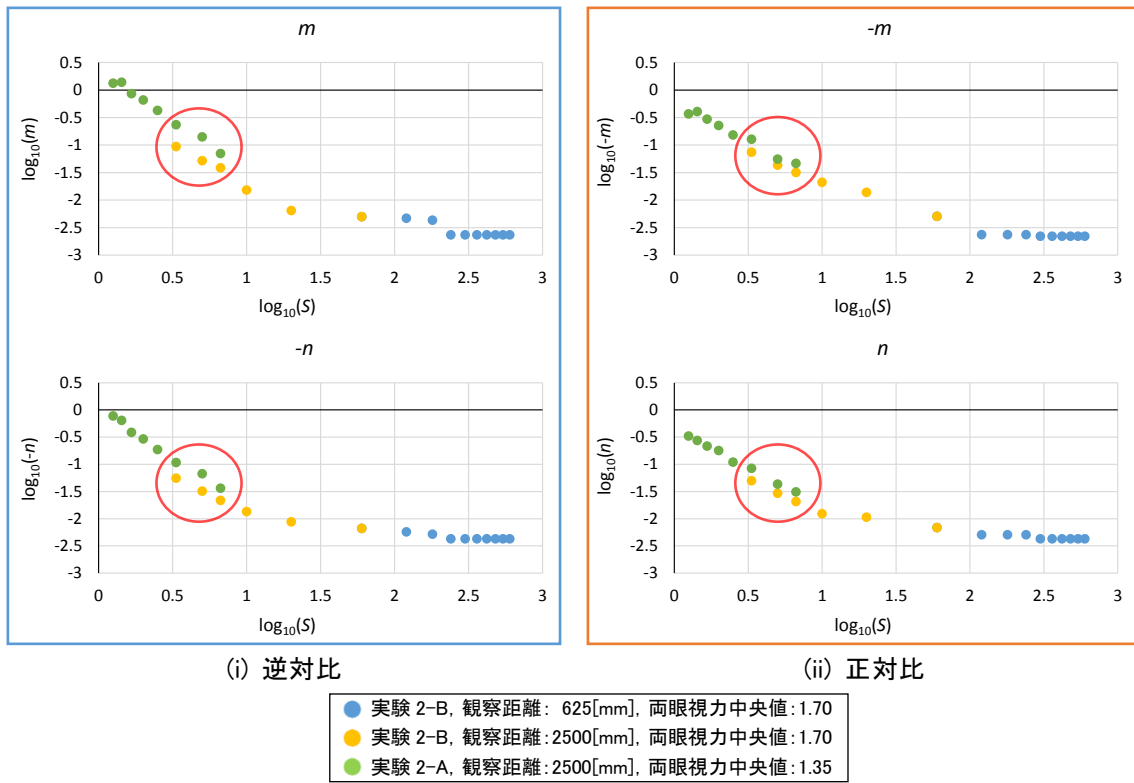


図 2.9 m, n と S の関係

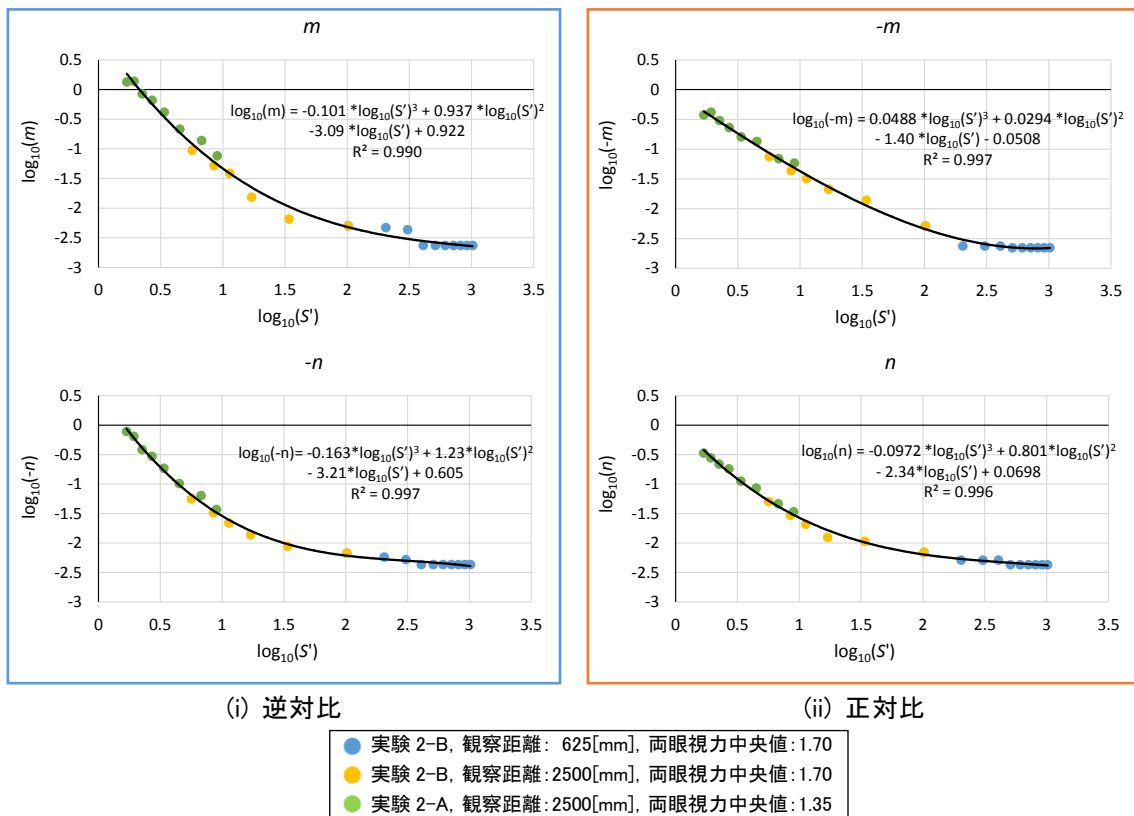


図 2.10 m, n と S' の関係

〈逆対比〉

$$m = 10^{(-0.101 \cdot \log_{10}(S')^3 + 0.937 \cdot \log_{10}(S')^2 - 3.09 \cdot \log_{10}(S') + 0.922)} \quad \cdots (2.5)$$

$$n = -10^{(-0.163 \cdot \log_{10}(S')^3 + 1.23 \cdot \log_{10}(S')^2 - 3.21 \cdot \log_{10}(S') + 0.605)} \quad \cdots (2.6)$$

〈正対比〉

$$m = -10^{(0.0488 \cdot \log_{10}(S')^3 + 0.0294 \cdot \log_{10}(S')^2 - 1.40 \cdot \log_{10}(S') - 0.0509)} \quad \cdots (2.7)$$

$$n = 10^{(-0.0972 \cdot \log_{10}(S')^3 + 0.801 \cdot \log_{10}(S')^2 - 2.34 \cdot \log_{10}(S') + 0.0698)} \quad \cdots (2.8)$$

次に、得られた視認閾値推定式を、CIE 技術報告書にも記述されている Blackwell らの既往研究^{4,5)}と比較した。Blackwell らの研究では 20~30 歳の晴眼者 68 名を対象とし、直径 4[mm]の円形視標を 0.2 秒間提示した場合の視認閾値のコントラストが得られている(式(2.9), (2.10))

$$C = |(L_D - L) / L| \quad \cdots (2.9)$$

$$\bar{C}_{ref} = 0.05936 \cdot [(1.639 / L)^{0.4} + 1]^{2.5} \quad \cdots (2.10)$$

C : (Blackwell の研究における)輝度コントラスト

L_D : 円形視標の輝度

L : 背景輝度

\bar{C}_{ref} : 閾値の輝度コントラスト

これを C 値 A 値に変換し CA 図上表現すると、図 2.11 の黒線となる。本研究のモデルから得られる視対象サイズ 4[mm]の閾値曲線と比較するため、本研究で構築した推定式の視力値を 1.70 とした場合の曲線を図 2.11 左に青線で示した。Blackwell らの曲線と比べると C 値の絶対値が低い側に位置していることが分かる。視力値を 1.50 としてみると図 2.11 右の青線となり、2 つの曲線の整合性が高いことが分かる。Blackwell の実験の対象者の本推定式の視力 1.50 に相当すると考えられる。

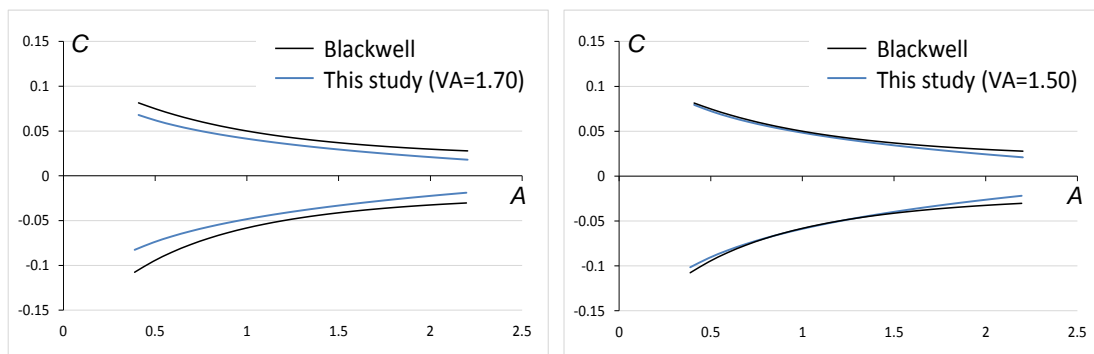


図 2.11 Blackwell の既往研究^{4,5)}と本節で構築した推定式の比較

2.3. 円形視標の見やすさ推定に関する検討

2.3.1. 本節の目的

前節では、輝度コントラスト評価図(CA 図)を用いて視認性を推定するための基礎的な検討として、実環境で障害物やサイン等を検知することを想定し、晴眼者を対象に円形視標を用いた視認評価実験を行い、視認閾値推定式を構築した。

本節では、前節で構築した視認閾値推定式を基に見やすさの程度を推定すること、また、弱視者の検討の前段として、比較的視力の高い晴眼者(以下、通常視力晴眼者)で検討した評価手法が視力の低い晴眼者(以下、低視力晴眼者)に適用可能か調査することを目的とする。

本節では、初めに、通常視力晴眼者を対象に円形視標を用いた見やすさ評価実験を行い、視認閾値と見やすさの評価の関係を調査し、見やすさの程度の推定法について検討した。次に、低視力晴眼者を対象として同様の実験を行い、通常視力晴眼者で検討した見やすさの程度の推定法が低視力晴眼者にも適応可能であるかを調査した。

2.3.2. 通常視力晴眼者を対象とした円形視標の見やすさ評価 [実験 2-C]

2.3.2.1. 実験概要

実験 2-C では、前節で示した輝度コントラスト評価図(CA 図)の視認閾値推定式を基に見やすさの程度を推定することを目的とし、前節の実験の被験者と同等の視力が比較的高い晴眼者(通常視力晴眼者)を対象に、見やすさの程度を評価する実験を行ない、CA 図を用いて実験結果を分析した。

前節の実験と同様の実験室(図 2.12)において、実環境で障害物等を検知することを想定し、単純な視標である円形視標が提示された場合の見やすさ評価実験を行った。被験者から 625[mm]または 2500[mm]離れた位置に設置した 27 インチの PC モニタ(EIZO Color Edge CG277, 2560×1440[px])に CIE 標準光源 D65 に相当する色度(色彩輝度計による CIE1931xy 色度座標測定値は、 $x=0.319$, $y=0.325$)の均一背景および円形視標を提示し(図 2.13)、両眼で観察させ見やすさの程度を評価させた。PC モニタの周辺部が暗すぎないように、天井に設置されている蛍光灯を調光し PC モニタの周辺部の輝度を $2.5[\text{cd}/\text{m}^2]$ とした。

見やすさの評価尺度は、文字や顔等の見やすさに関する既往研究^{3,6-9)}を参考に、〈0.見えない 1.やっと思える 2.多少見えにくいが見える 3.苦勞せず(普通に)見える 4.見やすい〉の 5 段階の評価で回答させた(図 2.14)。

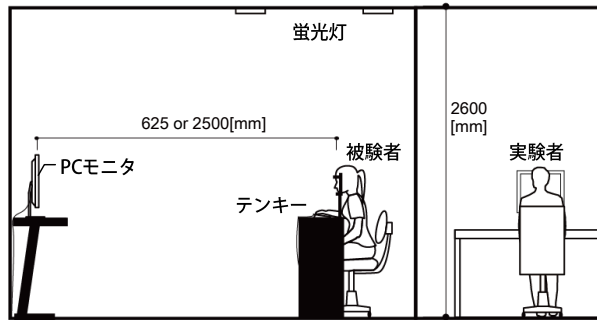


図 2.12 実験室概要

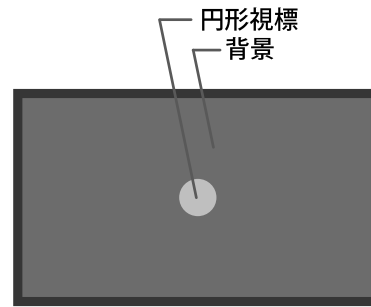


図 2.13 PC モニタ上の提示刺激の様子

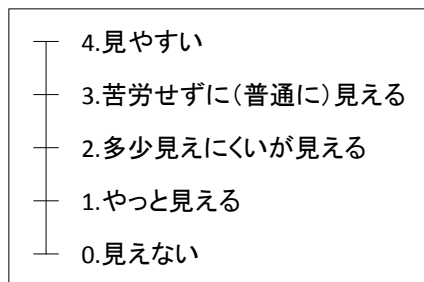


図 2.14 評価尺度

表 2.6 に実験条件を示す。PC モニタの 8bit(256 階調)の RGB 階調値に基づいて背景および視標の輝度を調光した。背景の輝度は、2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160[cd/m²]の 7 条件とした。それぞれの評価を得るために十分な C 値の範囲を予備実験からあらかじめ決定し、円形視標の直径サイズおよび円形視標の輝度(C 値)をランダムに変化させ提示した。円形視標のサイズ 240, 120, 60[mm]の場合を例として、表 2.7 に円形視標の輝度および括弧内に C 値の条件を示す。円形視標のサイズは、1.25~600[mm]の 12 条件とした。観察距離は、1.25~120[mm]の 8 条件は 2500[mm]としたが、それより大きい 240~600[mm]の 4 条件では十分な背景領域(視対象サイズの 3 倍と仮定する)が確保されないため、625[mm]として実験を行った。また、60[mm]と 120[mm]の円形視標サイズについては、被験者の焦点調節の影響を確認するため、観察距離 625[mm], 2500[mm]の両方で行なった。各被験者、全条件を 1 回ずつ評価した。

表 2.6 実験 2-C 実験条件

	独立変数	条件数
背景輝度 [cd/m ²]	2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160	7
C 値	円形視標サイズおよび背景輝度によって異なる	
円形視標サイズ [mm]	600, 480, 360, 240, 120, 60, 20, 10, 5, 2.5,	12
※ 1 [deg] = 60 [mm]	1.67, 1.25	
観察距離 [mm]	625, 2500	2

第2章 晴眼者を対象とした輝度画像を用いた視認性推定法の構築

表 2.7 背景と円形視標の輝度(円形視標サイズ 240,120,60[min])

背景輝度 [cd/m ²]	円形視標の輝度 [cd/m ²] (下段:C値)	条件数
2.5 (実際は 2.53)	2.02, 2.04, 2.06, 2.08, 2.10, 2.12, 2.15, 2.17, 2.19, 2.21, 2.23, 2.26, 2.28, 2.30, 2.32, 2.35, 2.37, 2.39, 2.42, 2.44, 2.46, 2.49, 2.51, 2.53, 2.56, 2.58, 2.61, 2.63, 2.66, 2.68, 2.71, 2.73, 2.75, 2.78, 2.81, 2.83, 2.86, 2.88, 2.91, 2.93, 2.96, 2.98, 3.01, 3.04, 3.06, 3.09 (-7.68, -7.33, -6.98, -6.63, -6.29, -5.94, -5.60, -5.26, -4.92, -4.58, -4.24, -3.91, -3.58, -3.24, -2.91, -2.58, -2.26, -1.93, -1.60, -1.28, -0.96, -0.64, -0.32, 0.00, 0.32, 0.63, 0.95, 1.26, 1.57, 1.88, 2.19, 2.50, 2.80, 3.11, 3.41, 3.71, 4.01, 4.31, 4.61, 4.91, 5.21, 5.50, 5.80, 6.09, 6.38, 6.67)	46
5 (実際は 4.70)	3.74, 3.78, 3.82, 3.86, 3.90, 3.94, 3.98, 4.02, 4.06, 4.10, 4.14, 4.18, 4.23, 4.27, 4.31, 4.35, 4.40, 4.44, 4.48, 4.52, 4.57, 4.61, 4.66, 4.70, 4.74, 4.79, 4.83, 4.88, 4.92, 4.97, 5.02, 5.06, 5.11, 5.16, 5.20, 5.25, 5.30, 5.34, 5.39, 5.44, 5.49, 5.54, 5.58, 5.63, 5.68, 5.73 (-7.68, -7.33, -6.98, -6.63, -6.29, -5.94, -5.6, -5.26, -4.92, -4.58, -4.24, -3.91, -3.58, -3.24, -2.91, -2.58, -2.26, -1.93, -1.60, -1.28, -0.96, -0.64, -0.32, 0.00, 0.32, 0.63, 0.95, 1.26, 1.57, 1.88, 2.19, 2.50, 2.80, 3.11, 3.41, 3.71, 4.01, 4.31, 4.61, 4.91, 5.21, 5.50, 5.80, 6.09, 6.38, 6.67)	46
10 (actually 9.63)	7.74, 7.82, 7.90, 7.98, 8.07, 8.15, 8.23, 8.32, 8.40, 8.48, 8.57, 8.66, 8.74, 8.83, 8.91, 9.00, 9.09, 9.18, 9.27, 9.36, 9.44, 9.53, 9.63, 9.72, 9.81, 9.90, 9.99, 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 10.7, 10.8, 10.9, 11.0, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 11.6 (-7.33, -6.98, -6.63, -6.29, -5.94, -5.60, -5.26, -4.92, -4.58, -4.24, -3.91, -3.58, -3.24, -2.91, -2.58, -2.26, -1.93, -1.60, -1.28, -0.96, -0.64, -0.32, 0.00, 0.32, 0.63, 0.95, 1.26, 1.57, 1.88, 2.19, 2.5, 2.8, 3.11, 3.41, 3.71, 4.01, 4.31, 4.61, 4.91, 5.21, 5.5, 5.8, 6.09, 6.38)	44
20 (実際は 19.4)	15.7, 15.9, 16.1, 16.2, 16.4, 16.6, 16.7, 16.9, 17.1, 17.2, 17.4, 17.6, 17.8, 17.9, 18.1, 18.3, 18.5, 18.6, 18.8, 19.0, 19.2, 19.4, 19.6, 19.7, 19.9, 20.1, 20.3, 20.5, 20.7, 20.9, 21.1, 21.2, 21.4, 21.6, 21.8, 22.0, 22.2, 22.4, 22.6, 22.8, 23, 23.2 (-6.98, -6.63, -6.29, -5.94, -5.60, -5.26, -4.92, -4.58, -4.24, -3.91, -3.58, -3.24, -2.91, -2.58, -2.26, -1.93, -1.60, -1.28, -0.96, -0.64, -0.32, 0.00, 0.32, 0.63, 0.95, 1.26, 1.57, 1.88, 2.19, 2.50, 2.80, 3.11, 3.41, 3.71, 4.01, 4.31, 4.61, 4.91, 5.21, 5.50, 5.80, 6.09)	42
40 (実際は 40.1)	32.9, 33.3, 33.6, 34.0, 34.3, 34.7, 35.0, 35.4, 35.7, 36.1, 36.4, 36.8, 37.1, 37.5, 37.9, 38.2, 38.6, 39.0, 39.4, 39.7, 40.1, 40.5, 40.9, 41.2, 41.6, 42.0, 42.4, 42.8, 43.2, 43.6, 44.0, 44.4, 44.8, 45.2, 45.6, 46.0, 46.4, 46.8, 47.2, 47.6 (-6.63, -6.29, -5.94, -5.60, -5.26, -4.92, -4.58, -4.24, -3.91, -3.58, -3.24, -2.91, -2.58, -2.26, -1.93, -1.60, -1.28, -0.96, -0.64, -0.32, 0.00, 0.32, 0.63, 0.95, 1.26, 1.57, 1.88, 2.19, 2.50, 2.80, 3.11, 3.41, 3.71, 4.01, 4.31, 4.61, 4.91, 5.21, 5.50, 5.80)	40
80 (実際は 79.8)	66.3, 67.0, 67.6, 68.3, 69.0, 69.7, 70.4, 71.1, 71.8, 72.5, 73.2, 73.9, 74.7, 75.4, 76.1, 76.8, 77.6, 78.3, 79.1, 79.8, 80.6, 81.3, 82.1, 82.8, 83.6, 84.4, 85.1, 85.9, 86.7, 87.5, 88.3, 89.1, 89.9, 90.7, 91.5, 92.3, 93.1, 93.9 (-6.25, -5.91, -5.57, -5.23, -4.89, -4.55, -4.22, -3.89, -3.56, -3.22, -2.9, -2.57, -2.24, -1.92, -1.60, -1.27, -0.95, -0.63, -0.32, 0.00, 0.31, 0.63, 0.94, 1.25, 1.56, 1.87, 2.18, 2.48, 2.79, 3.09, 3.39, 3.70, 4.00, 4.29, 4.59, 4.89, 5.18, 5.48)	38
160 (実際は 160.4)	135.2, 136.9, 138.5, 140.1, 141.7, 143.4, 145.0, 146.7, 148.3, 150.0, 151.7, 153.4, 155.1, 156.9, 158.6, 160.4, 162.1, 163.9, 165.7, 167.4, 169.2, 171.1, 172.9, 174.7, 176.6, 178.4, 180.3, 182.1, 184.0, 185.9 (-5.73, -5.33, -4.94, -4.55, -4.16, -3.77, -3.38, -3.00, -2.62, -2.24, -1.86, -1.49, -1.11, -0.74, -0.37, 0.00, 0.37, 0.73, 1.10, 1.46, 1.82, 2.17, 2.53, 2.89, 3.24, 3.59, 3.94, 4.29, 4.63, 4.98)	30

被験者は 20 代の晴眼者 14 名をとり、観察距離 2500[mm] でランドルト環を用いて測定した視力値を表 2.8 に示す。視力測定は、JIS T 7309:2002¹⁾ に準拠し、背景の輝度を 200[cd/m²]、ランドルト環の輝度を 10[cd/m²] 程度とし、5 個のうち 3 個以上正答するかを判定基準として行なった。視力値は、視認可能な最小切れ目幅の視角[min]を逆数で表現したものであり¹⁾、視力測定に使用したランドルト環のサイズおよび間隔は、視力値 0.40 から 2.25 の間で 0.05 刻みであった。本実験における被験者 14 名の両眼視力中央値は 1.70 となり、前節実験 2-A の両眼視力中央値 1.35、実験 2-B の両眼視力中央値 1.70 と比較して同等である。

表 2.8 実験 2-C 被験者リスト

被験者 No.	性別	年齢	矯正	両眼視力 (観察距離: 2500 [mm])
1	女	24	コンタクト	1.40
2	女	29	裸眼	1.35
3	女	23	コンタクト	2.00
4	女	23	コンタクト	1.45
5	女	24	コンタクト	1.60
6	男	24	メガネ	1.60
7	男	24	メガネ	1.90
8	男	25	裸眼	2.20
9	女	26	メガネ	2.00
10	男	24	裸眼	1.80
11	男	20	裸眼	1.00
12	女	21	コンタクト	1.50
13	男	20	コンタクト	2.25
14	男	22	裸眼	2.00
平均値				1.72
中央値				1.70

2.3.2.2. 実験結果

前節と同様の手法で実験条件の C 値, A 値を算出し, CA 図による分析を行なった。被験者 14 名とも, 円形視標のサイズが大きいほど, C 値の絶対値が大きいほど, A 値が高いほど評価が向上し, 明視三要素に関して同様の傾向を示すことが確認できた。

前節では, 被験者の半数が視認可能かを判定基準として実験結果を示した。本節においても, 被験者の半数で評価が得られたかを判定基準とし, 14 名中 7 名以上が評価 4 と回答した条件を○, 7 名以上が評価 3 以上と回答した条件を●, 7 名以上が評価 2 以上と回答した条件を▲, 7 名以上が評価 1 以上と回答した条件を■, 8 名以上が評価 0 と回答した条件を×として結果を示す(図 2.15)。

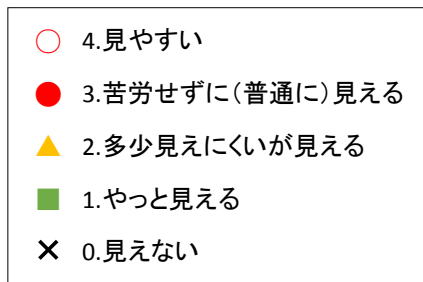


図 2.15 実験結果凡例

被験者 14 名分の円形視標サイズ 600, 240, 120, 60, 20, 10[mm]の評価結果 CA 図を図 2.16 に示す. 図 2.16 の CA 図内の実線は, 前節で構築した円形視標の視認閾値曲線であり, 評価 0 と評価 1 の境界に位置することが確認できる. また, 視認閾値曲線から C 値の絶対値が高くなるにつれ, 評価 2, 評価 3, 評価 4 へと変化し見やすさ評価が向上していることが確認できる. 評価 0, 評価 1 の視認閾値に比べるとやや乱れがあるものの, 評価 3 までの段階では大きなばらつきはなく, 視認閾値と同様に標準的なデータとして扱うことができると判断した. 評価 3, 評価 4 の境界は被験者ごとのばらつきが大きく, 個人の評価基準(何を見やすいとするか)の差異が要因であると推察される. 本研究では, 評価 3 以上を得ることが重要であると考え, 今回は評価 3, 評価 4 をまとめて分析を進めることとした.

また, 被験者の焦点調節の影響を確認するため, 観察距離を変化させた 120, 60[mm]の円形視標のサイズ実験結果について, 2500[mm]と 625[mm]の観察距離による評価の違いについて t 検定を行った(表 2.9). 120, 60[mm]のどちらも, 評価 3 の正対比のみ, 有意水準 1%で有意差が見られ, 同じ視角サイズでも観察距離に近い方がやや視認性が向上することが示された. しかし, 評価 0 および評価 1 の正対比・逆対比, 評価 2 の正対比・逆対比, 評価 3 の逆対比では, 有意水準 1%で有意差が見られなかったため, 今回の被験者は, 観察距離によらず同等の評価をしていると解釈した.

表 2.9 観察距離 2500[mm], 625[mm]間の t 検定結果

円形視標サイズ	対比	p 値 (両側)			
		評価 0	評価 1	評価 2	評価 3
60 [mm]	逆対比	0.557	0.557	0.094	0.120
	正対比	0.251	0.251	0.475	8.63.E-05
120 [mm]	逆対比	0.879	0.879	0.589	0.0125
	正対比	0.925	0.925	0.484	2.71.E-04

また一部の被験者より, 正対比(円形視標が背景より明るい)で輝度コントラストが高い場合, 円形視標が光っているように感じ, 輪郭が分かりづらくなることが報告された.

第2章 晴眼者を対象とした輝度画像を用いた視認性推定法の構築

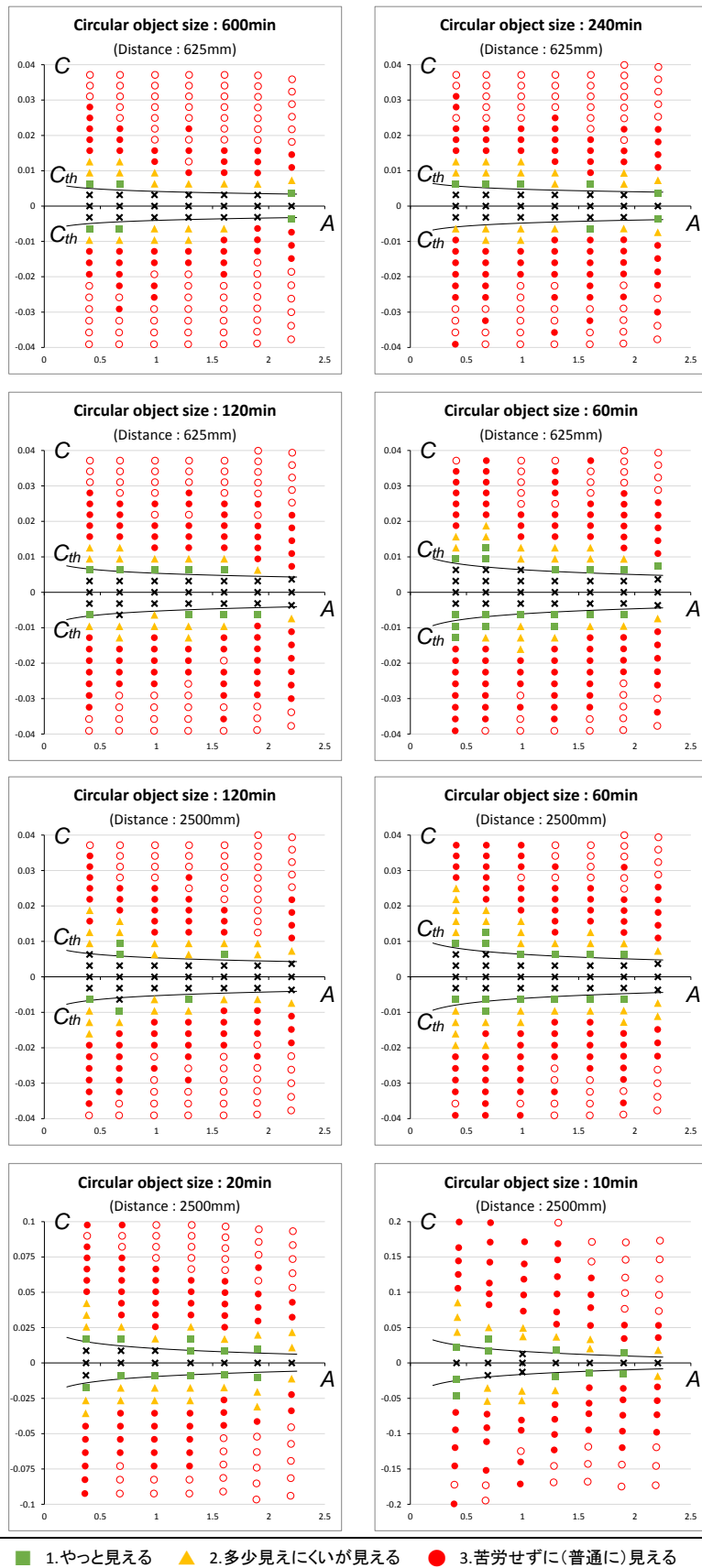


図 2.16 実験 2-C 評価結果 CA 図

2.3.3. 通常視力晴眼者における見やすさ推定法の構築

見やすさの推定の手法として、式(2.11)のように、明視三要素①視対象サイズ、②視対象と背景の対比、③順応輝度)のうちのいずれかの閾値に対する比を用いることにより、見やすさ推定が可能であることが報告されている^{5,7,9~12)}。本研究では、②の視対象と背景の対比に相当する輝度コントラストに注目し、輝度コントラストの閾値比によって見やすさ推定を試みた。

$$Visibility\ Level = C / C_{th} \quad \dots (2.11)$$

C : 評価対象の輝度コントラスト

C_{th} : 視認閾値輝度コントラスト

評価 1 と評価 2 の閾値を C_{th1-2} 、評価 2 と評価 3 の閾値を C_{th2-3} とし(図 2.17)、視対象サイズ、背景輝度(A 値)ごとに閾値比 C_{th1-2}/C_{th} 、 C_{th2-3}/C_{th} を求めた。これ以降、閾値比 C_{th1-2}/C_{th} 、 C_{th2-3}/C_{th} を R_{1-2} 、 R_{2-3} と表現する。

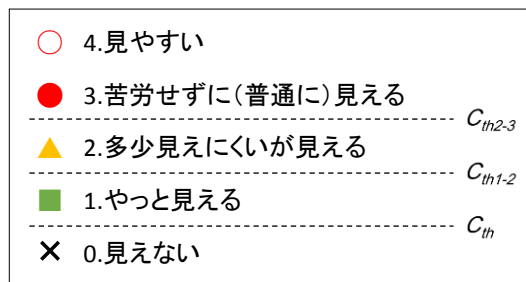


図 2.17 閾値の定義

C_{th1-2} 、 C_{th2-3} の算出方法については前節の C_{th} の算出方法(図 2.6)と同様とし、図 2.18-(i)Exmample 1 に示すように評価 2 以上が被験者 14 名中の 7 名となる C 値、評価 3 以上が 7 名となる C 値を求めた。評価のばらつきにより、図 2.18-(ii)Exmample 2 の C_{th2-3} のように 7 名となる箇所が 2 箇所以上存在する際は、それらの C 値を平均した値を用いることとした。評価 0 と評価 1 の閾値に相当する C_{th} については、前節で構築した円形視標の視認閾値推定式より算出した。 R_{1-2} 、 R_{2-3} と A 値との関係を図 2.19 に示す。

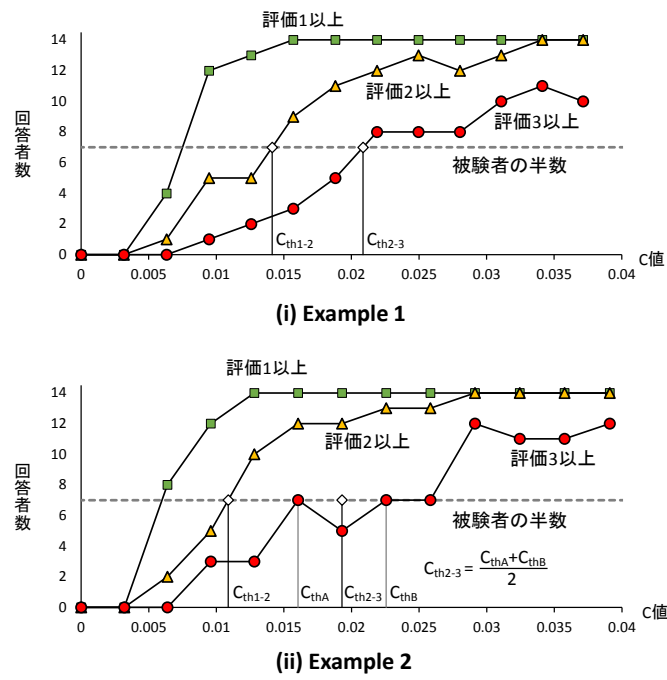


図 2.18 C_{th1-2} , C_{th2-3} の算出方法

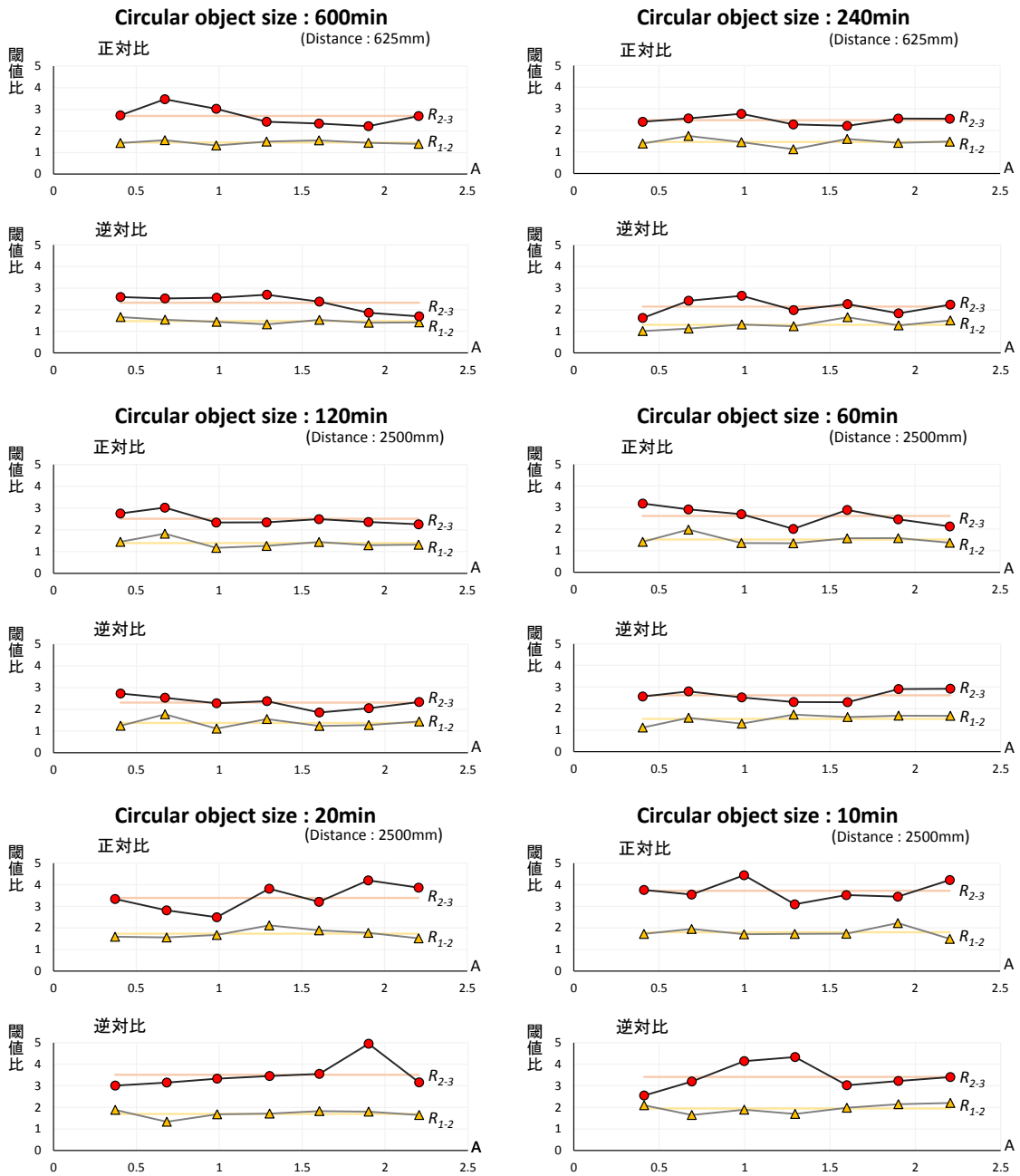


図 2.19 閾値比 R_{1-2} , R_{2-3} と A 値との関係

円形視標のサイズが小さくなるほど高い評価を得にくく評価が不安定となるが、A 値によらず R_{1-2} , R_{2-3} はほぼ一定であると解釈し、以下の論を進める。視対象サイズごとに求めた R_{1-2} , R_{2-3} の平均値を表 2.10 に示す。円形視標サイズ 60, 120 [min] については、観察距離 2500[mm], 625[mm] によらず同等であるとして、それぞれ観察距離の評価結果から得た R_{1-2} , R_{2-3} を平均した。また、円形視標のサイズが小さい場合に、今回の実験条件では全ての背景輝度条件で R_{1-2} または R_{2-3} を求められない場合があり、今回の検討ではそれらを除外した。

前節では、秋月ら³⁾の相対視力に関する研究を参考に、視力値と視対象サイズを掛けた S' をもとに視認閾値推定式を構築した。本節でも同様に、視力値と視対象サイズを掛けた S' を用いて、 S' の対数を横軸、背景輝度ごとに得られる R_{1-2} , R_{2-3} の平均値を縦軸として関係を図 2.20 に示す。逆対比(図 2.20(i))、正対比(図 2.20(ii))ともに、視対象サイズが小さくなるほど閾値比 R が高くなり相関があることが分かる。視対象サイズが小さいほど、評価を向上させるためには高い閾値比が必要である。視認閾値 C_{th} と視対象サイズに応じた閾値比から、式(2.12), (2.13)によって各評価の閾値を算出し、見やすさ推定が可能といえる。対象サイズに応じた閾値比 R_{1-2} , R_{2-3} は、式(2.14)~(2.18)から推定される。

$$C_{th1-2} = C_{th} \times R_{1-2} \quad \cdots (2.12)$$

$$C_{th2-3} = C_{th} \times R_{2-3} \quad \cdots (2.13)$$

C_{th1-2} : 評価 1 と 評価 2 の閾値

C_{th2-3} : 評価 2 と 評価 3 の閾値

R_{1-2}, R_{2-3} : 視対象サイズに応じた閾値比

$$\langle \text{逆対比} \rangle R_{1-2} = -0.358 \times \log_{10}(S') + 2.337 \quad \cdots (2.14)$$

$$R_{2-3} = -0.776 \times \log_{10}(S') + 4.376 \quad \cdots (2.15)$$

$$\langle \text{正対比} \rangle R_{1-2} = -0.239 \times \log_{10}(S') + 2.090 \quad \cdots (2.16)$$

$$R_{2-3} = -0.585 \times \log_{10}(S') + 4.072 \quad \cdots (2.17)$$

$$S' = S \times VA \quad \cdots (2.18)$$

S' : 視対象サイズ/視認可能な最小サイズ

S : 視対象サイズ[min]

VA : ランドルト環の視力値(1/視認可能な最小サイズ[min])

表 2.10 背景輝度ごとに得られる R_{1-2} , R_{2-3} の平均値

円形視標サイズ [min]	$\log_{10}(S)$	$\log_{10}(S')$	逆対比		正対比	
			R_{1-2}	R_{2-3}	R_{1-2}	R_{2-3}
600	2.778	3.009	1.467	2.324	1.464	2.697
480	2.681	2.912	1.366	2.213	1.439	2.360
360	2.556	2.787	1.288	2.214	1.400	2.457
240	2.380	2.611	1.304	2.144	1.458	2.469
120	2.079	2.310	1.432	2.327	1.437	2.333
60	1.778	2.009	1.543	2.564	1.525	2.534
20	1.301	1.531	1.696	3.514	1.731	3.394
10	1.000	1.230	1.951	3.411	1.796	3.721
5	0.699	0.929	1.817	3.675	1.906	3.377
2.5	0.398	0.628	2.367		1.967	
1.67	0.223	0.453				
1.25	0.097	0.327				

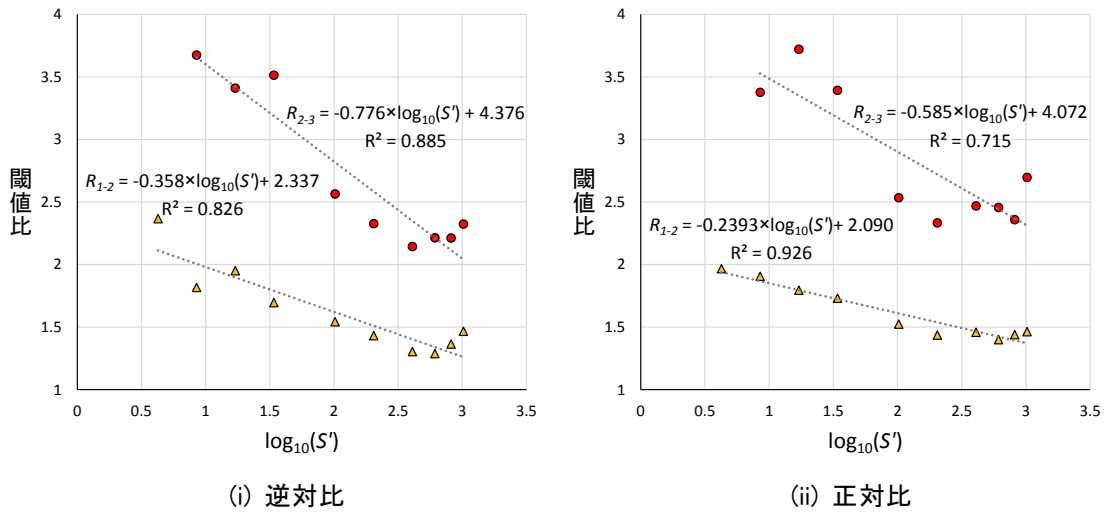


図 2.20 S' と閾値比 R_{1-2} , R_{2-3} の関係

今回は図 2.20 に示す線形の近似式にて式(2.14)~(2.17)を得たが、240~480[min]に比べ600[min]の円形視標は評価を向上させるのに高い閾値比を要する結果となっている。これは、人間の最も錐体の密度が高い中心窩視野は視対象の細部を認識するのに重要な役割をしており¹³⁾、600[min](=10[deg])の円形視標が中心窩視野に比べ大きいサイズであることが起因して、視認性が低下したと考えられる。視認性を向上させるためには視対象サイズが大きければ良いのではなく、適度な視対象サイズに設定することが有効といえる。

また、岩井ら⁹⁾の研究を例として、‘見える - 見えない’の閾レベルと‘見やすい - 見にくい’の閾上レベルでは、視認性の特性が異なることが示唆されているが、図 2.19, 図 2.20 に示す本実験の C 値を用いた閾値比では、サイズの効果はあるものの閾レベルと閾上レベルで同様の特性をもつ可能性が示された。既往研究^{6,7,9,12)}の輝度コントラストは $|L_t - L_b|/L_b$ (L_t : 視対象の輝度, L_b : 背景の輝度)で算出されているのに対し、本研究の輝度コントラスト(C 値)は式(2.1)の $0.775 \times \log_{10}(L_t/L_b)$ によって算出し、非線形な変換が含まれるため、既往研究とは特性が異なると考えられる。

2.3.4. 低視力晴眼者を対象とした円形視標の見やすさ評価 [実験 2-D]

2.3.4.1. 実験概要

実験 2-D では、弱視者の検討の前段として、通常視力晴眼者で検討した評価手法が低視力者にも適用可能か調査することを目的とする。本章第 2 節で構築した視認閾値推定式は、視力を変数として視認閾値推定式を構築しているため、その視力値を変化させることで、視力の低い者にも適用できる可能性がある。実験 2-C の通常視力晴眼者よりも視力の低い晴眼者(低視力晴眼者)を対象に、実験 2-C と同様の実験方法で実験を行い、輝度コントラスト評価図(CA 図)を用いて実験結果を分析し、通常視力晴眼者と同様の手法で視認性を推定できるか検討する。

実験に参加する低視力晴眼者は、実験 2-C の被験者よりも視力の低い 20 代晴眼者とし、裸眼または矯正視力で 1.0 程度に満たない者を対象とした。本研究では、裸眼では近視等の屈折異常の症状があり、眼鏡等の矯正状態では日常生活に支障の無い者を低視力晴眼者と定義する。計 20 名の被験者が参加したが、視力の程度に大きな差が有るため、両眼視力中央値 0.750 の 8 名、両眼視力中央値 0.250 の 8 名、両眼視力中央値 0.100 の 4 名の計 3 グループに分け実験を行った。実験 2-C の視力測定と同様に、背景の輝度を 200[cd/m^2]、ランドルト環の輝度を 10[cd/m^2]程度とし、5 個のうち 3 個以上正答するかを判定基準とした。ランドルト環のサイズおよび間隔は、Group1,2 は視力値 0.25, 0.375, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 とし、Group3 は 0.020 から 0.100 の間で 0.005 刻み、0.10 から 0.40 の間で 0.05 刻みとした。観察距離 2500[mm]の被験者の視力値を表 2.11 に示す。

表 2.11 実験 2-D 被験者リスト

Group1				
被験者 No.	性別	年齢	矯正	両眼視力 (観察距離: 2500 [mm])
1	男	23	メガネ	0.75
2	男	22	裸眼	1.00
3	男	21	メガネ	0.75
4	女	21	裸眼	0.75
5	男	22	メガネ	0.75
6	男	22	メガネ	1.00
7	男	22	裸眼	0.75
8	男	22	裸眼	1.00
			平均値	0.844
			中央値	0.750

Group2				
被験者 No.	性別	年齢	矯正	両眼視力 (観察距離: 2500 [mm])
1	男	20	裸眼	0.25
2	男	24	裸眼	0.25
3	女	21	裸眼	0.25
4	男	22	裸眼	0.25
5	男	21	裸眼	0.375
6	男	21	裸眼	0.375
7	女	21	裸眼	0.25
8	男	21	裸眼	0.25
			平均値	0.281
			中央値	0.250

Group3				
被験者 No.	性別	年齢	矯正	両眼視力 (観察距離: 2500 [mm])
1	女	24	裸眼	0.100
2	女	23	裸眼	0.095
3	女	23	裸眼	0.100
4	女	22	裸眼	0.100
			平均値	0.099
			中央値	0.100

実験装置および評価尺度は、実験 2-C の実験に準ずる。表 2.12 に実験条件を示す。背景輝度は実験 2-C と同様に、2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160 [cd/m²]の計 7 条件とした。C 値をランダムに変化させ、円形視標を提示した。円形視標のサイズはグループごとに設定し、Group 1 は 1.25~120[μ m]の 10 条件、Group 2 は 1.25~120[μ m]の 10 条件、Group 3 は 6.25~120 [μm]の 10 条件とした(表 2.13)。被験者は該当するグループの全条件を 1 回ずつ評価した。なお、低視力晴眼者は、観察距離による焦点調節の影響が生じやすいと考え、本実験での観察距離は 2500[mm]のみとした。

表 2.12 実験 2-D 実験条件

	独立変数	条件数
背景輝度 [cd/m ²]	2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160	7
C 値	円形視標サイズおよび背景輝度によって異なる	
円形視標サイズ [μm] ※ 1 [deg] = 60 [μm]	グループによって異なる(表 2.11 参照)	
観察距離 [mm]	2500	1

表 2.13 実験 2-D 円形視標サイズの条件

被験者グループ	円形視標サイズ [μm] ※ 1 [deg] = 60 [μm]	条件数
Group1	120, 60, 40, 30, 20, 10, 5, 3.33, 2.5, 1.25	10
Group2	120, 80, 60, 40, 20, 10, 6.67, 5, 2.5, 1.25	10
Group3	120,100, 60, 50, 25, 20, 16.67, 12.5, 10, 6.25	10

2.3.4.2. 実験結果

実験条件の C 値, A 値を算出し, CA 図による分析を行なった. 被験者 20 名とも, 円形視標のサイズが大きいほど, C 値の絶対値が大きいほど, A 値が高いほど評価が向上し, 明視三要素に関して同様の傾向を示すことが確認できた. 実験 2-C と同様に, 各グループにおいて被験者の半数で評価が得られたかを判定基準とし, グループごとの円形視標サイズ 60, 20[min]の実験結果 CA 図を図 2.21 に示す. 図 2.21 の円形視標サイズ 60[min]の CA 図の C 値の範囲は, Group1,2: -0.12~0.12, Group3: -0.24~0.24 とする. 円形視標サイズ 20[min]の CA 図の C 値の範囲は, Group1,2: -0.24~0.24, Group3: -0.60~0.60 とする.

図 2.16 の両眼視力中央値 1.7 の通常視力晴眼者の 60, 20 [min]の結果と比べ, いずれのグループも視認および評価の向上に必要な C 値の絶対値が高く, Group 1, 2, 3 の順, つまり視力が低下するほど, 視認に必要な C 値の絶対値が増加していることが確認できる. 前章で得られた視認閾値推定式より, 各グループの視力中央値 V_A と視対象サイズ S の積である S' を用いて視認閾値曲線を示したところ, 評価 0, 1 の境界である C_{th} に概ね一致することが確認でき, 視力と視対象サイズの積である S' を用いることで, 低視力者においても第 2 節と同様の手法で視認閾値の推定が可能であることが示された. 視認閾値曲線は視対象サイズが一定の場合, 視力が低下するほど曲線が外側へ開き視認閾値 C_{th} の絶対値が高くなる.

また, 視力測定による被験者の視力中央値は, Group 1 が 0.75, Group 2 が 0.25, Group 3 が 0.10 であったが, 1.08, 0.267, 0.172 と調整することにより, 視認閾値曲線がさらに適合することが分かった(図 2.21). これは視力測定の精度や実験の誤差と考えられ, 今回の Group1,2 の視力測定においては 1.00 のランドルト環が見えなかった場合は視力 0.75 となる等, ランドルト環の視力値の間隔が粗かったことが主な要因と考えられる. Group3 に関しては, 通常視力晴眼者や Group1, 2 に比べ被験者数が少ないことや, 前章で視認閾値推定式を構築した際の被験者の視力(視力中央値 1.35 と 1.70)と比較して差が大きいことも, 誤差が発生した要因として考えられる. 前章の視力測定にも誤差は有ると考えられ, 統制する必要があると考えられるが, 今回は第 2 節の視認閾値推定式に合わせる形で調整することとした. 以降, 視力値を Group 1 は 1.08, Group 2 は 0.267, Group 3 は 0.172 として分析を進める.

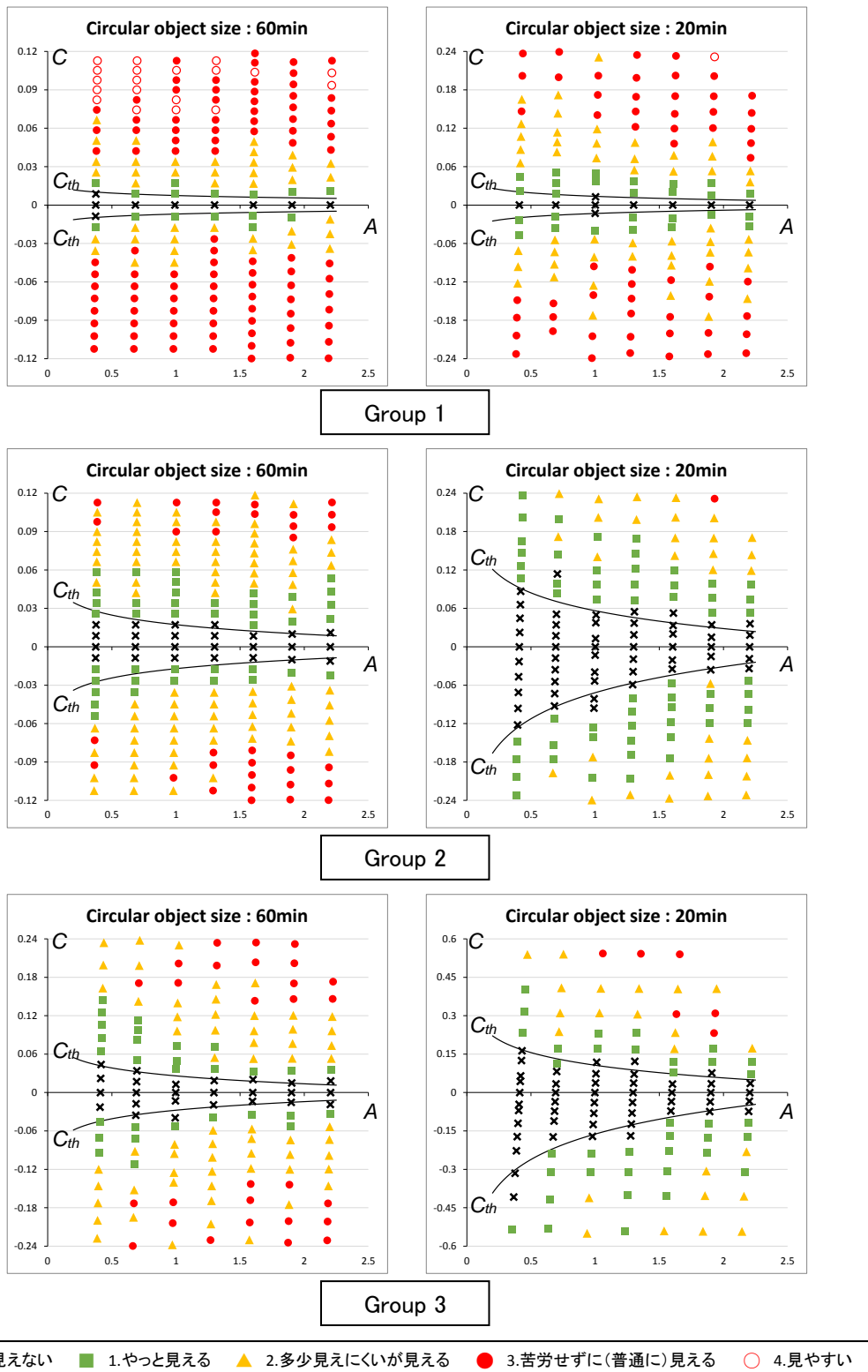


図 2.21 実験 2-D 評価結果 CA 図

2.3.5. 低視力晴眼者における見やすさ推定法の検討

第 3 項(2.3.3)と同様に、評価 1 と評価 2 の閾値 C_{th1-2} 、評価 2 と評価 3 の閾値 C_{th2-3} として Group 1, 2, 3 における閾値比 R_{1-2} 、 R_{2-3} を求めた(図 2.22)。また、視力値と視対象サイズを掛けた S' の対数を横軸、Group 1, 2, 3 において視対象サイズごとに求めた R_{1-2} 、 R_{2-3} の平均値を縦軸として関係を示す(図 2.23)。Group 1, 2, 3 の R_{1-2} 、 R_{2-3} のいずれも、図 2.23 内に点線で示す両眼視力の中央値 1.7 の通常視力晴眼者の閾値比より高いことが分かる。従って、通常視力晴眼者で検討した見やすさ推定を低視力晴眼者に適用することは困難といえる。実験 2-C において矯正視力、実験 2-D において裸眼で参加した被験者からは、実験 2-C ではくっきり見えたときに評価 3 と回答したが、実験 2-D では屈折異常によって円形視標の輪郭(エッジ)部分がくっきりと見えることが無いため、‘評価が低くなる’または‘評価に迷う’という意見があった。低視力者の場合、評価 0, 1 の境界である視認閾値 C_{th} に関しては通常視力晴眼者と同様の手法で推定可能であるが、円形視標の輪郭(エッジ)部分の高周波成分が見つらいために輝度コントラストが増加してもそれ以上の評価(評価 2, 3, 4)へ向上しにくく、通常視力晴眼者と比べ閾値比が高くなったと推察される。高周波成分を含む場合と高周波成分を含まない場合についても、引き続き検討が必要と考えられる。

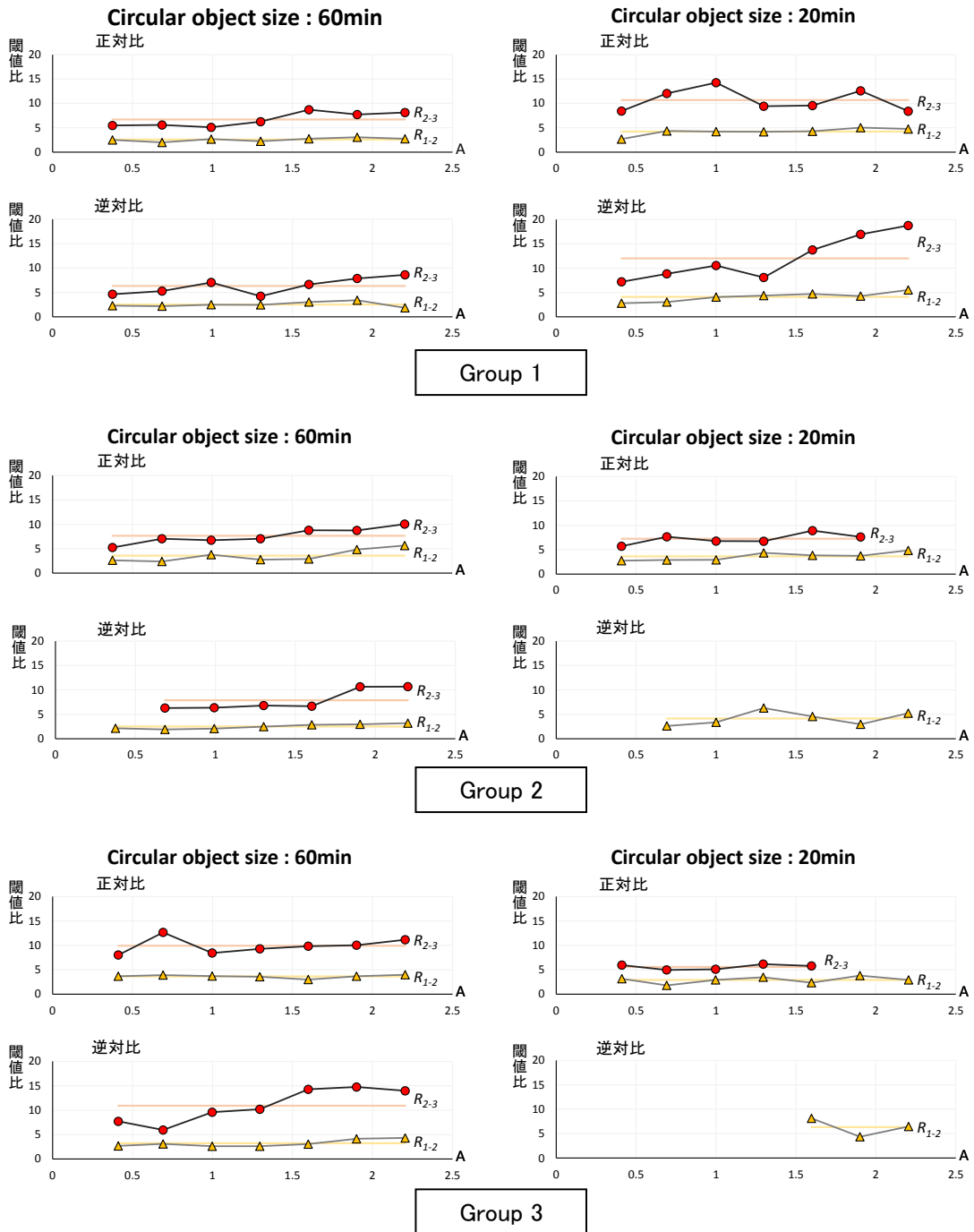


図 2.22 閾値比 R_{1-2} , R_{2-3} と A 値との関係

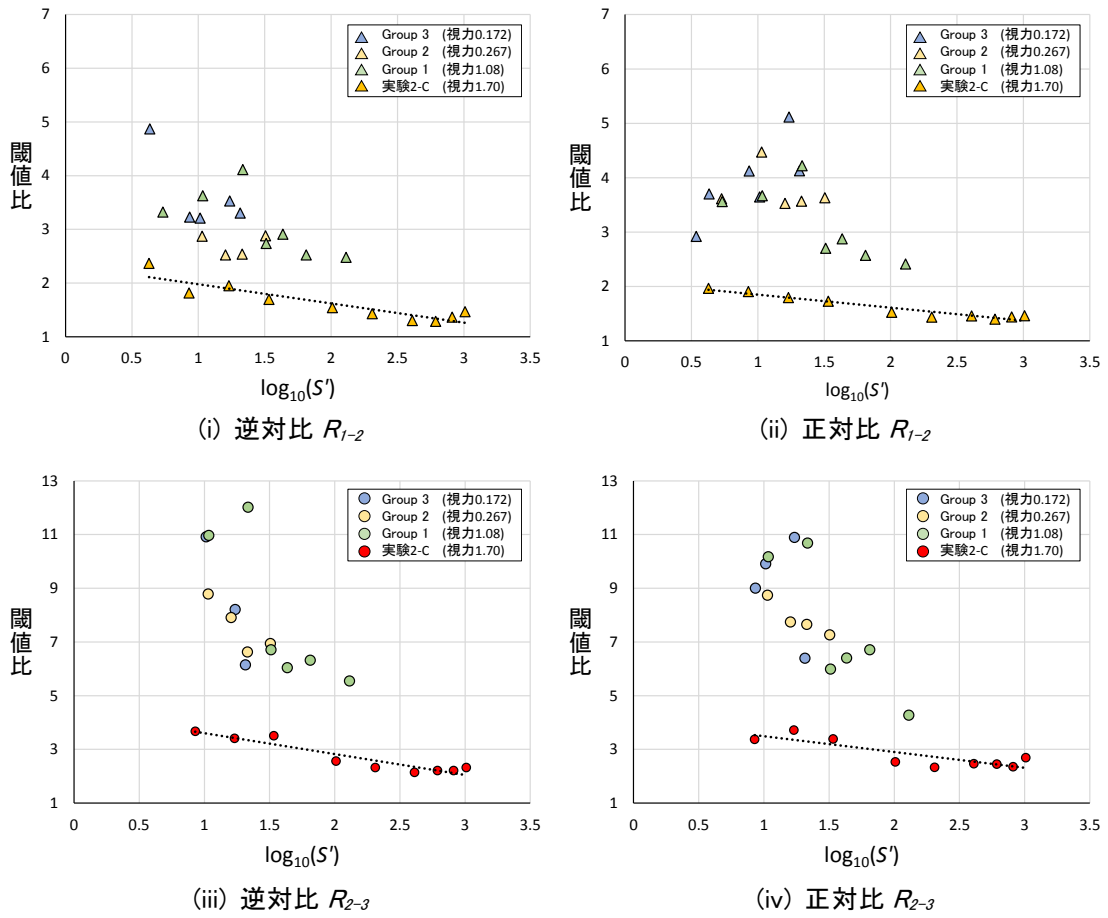


図 2.23 S' と閾値比 R_{1-2} , R_{2-3} の関係

2.4. 減能グレアを考慮した見やすさ推定に関する検討

2.4.1. 本節の目的

本章第 2 節, 第 3 節では, 円形視標の視対象以外には背景輝度(順応輝度)を越える光源が存在しない条件下で実験を行なったため, 視野内の高輝度なグレア光源の存在によって生じる視認性低下(減能グレア)についての検討を行っていない. 建築空間における LED 照明の使用や窓面による昼光利用は照明の省エネルギー化に有用であるが, LED 照明や窓面は高輝度になりやすいため, 減能グレアが生じ, 視認性の低下によって視作業性等が損なわれることがある¹⁴⁾. また道路照明においては, 対向車のヘッドライト等によって生じる減能グレアは安全性にも関わる¹¹⁾. 視作業性や安全性, 省エネルギー性を兼ね備えた視環境設計のためには, 減能グレアを考慮して適切に視認性を評価することが重要である.

本節では, CA 図上で評価が可能な減能グレアを考慮した視認性推定法の提案を目的とする. 視野内に高輝度面(グレア光源)が存在する様々な条件下で見やすさ値実験を行い, 実験結果を CA 図で表現し, 視野内の高輝度面の有無, 程度や位置によって, 視認に必要な輝度コントラスト(C 値)がどのように変化するかを調査する. 得られた実験結果より, 減能グレアを考慮した視認性推定法を検討する.

2.4.2. 減能グレアに関する既往研究

これまでの減能グレアに関する既往研究では, 光源から眼に入射する光が眼球内で散乱することによって生じる光幕が網膜像に重なり, 視対象と背景との輝度コントラストを下げるために, 視認性低下が生じると考えられている.

この眼球内の光幕量は, Holladay^{15,16)}によって, それと視覚的に等価な視野内に重畳された光幕の輝度として評価できることが示され, 等価光幕輝度(Equivalent Veiling Luminance)と呼ばれている. 等価光幕輝度は, グレア光源の位置と観察者の目の位置での鉛直面照度を変数とする関数で表現される. 一般に, グレア光源と視線のなす角度(視角)を θ [deg], 光源から受ける鉛直面照度を E [lx] とする時, 中心視に生じる等価光幕輝度 L_v [cd/m²] は, 式(2.19)で表現される. k, a は定数であり, それらの値は研究者によって異なるが, CIE では, Stiles & Crawford¹⁷⁾の研究をもとに, $(k, a)=(10, 2)$ を用いることで合意が得られている¹⁸⁾.

$$L_v = k \times E / \theta^a \quad \dots \quad (2.19)$$

L_v : 等価光幕輝度[cd/m²]

E : グレア光源から受ける鉛直面照度[lx]

θ : グレア光源と視線のなす角度[deg]

k, a : 定数

また, Holladay¹⁵⁾や Crawford¹⁹⁾は等価光幕輝度の加法性が成立することを示している. 視野内に複数のグレア光源が存在する場合は, それぞれのグレア光源から生じる等価光幕輝度の加算により, 全体の等価光幕輝度の算出が可能である(式(2.20)).

$$L_v = k \times \sum_{i=1}^n E_i / \theta_i^a \quad \dots (2.20)$$

n : グレア光源の個数

上記の式(2.19), (2.20)の等価光幕輝度と, 第 2 節で構築したグレア光源がない場合の視認閾値 C 値(C_{th})の推定式を組み合わせ, グレア光源が存在する場合の視認閾値 C 値(C_{thg})を求めることにより, CA 図上においても減能グレアによる視認性低下を考慮した視認性推定が可能と考えられる(図 2.24).

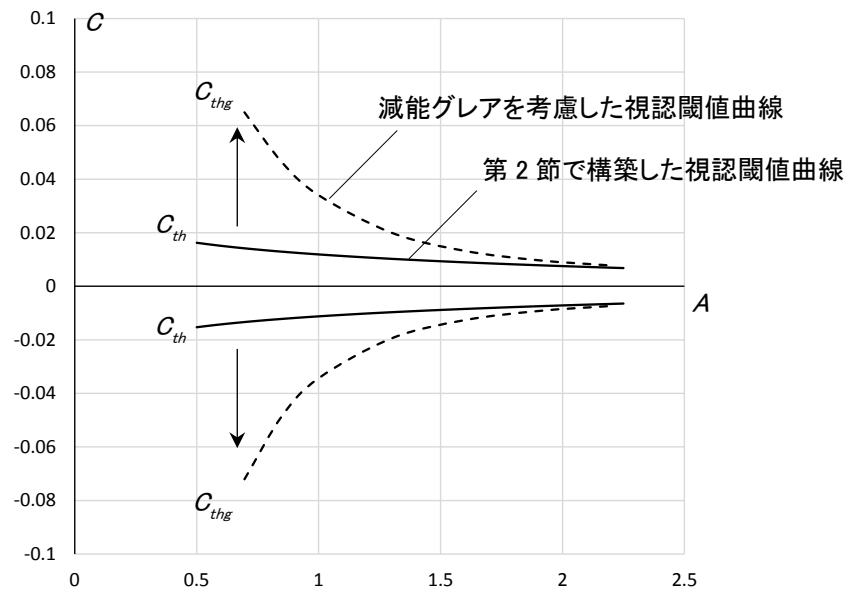


図 2.24 CA 図における視認閾値曲線の例

本節では, 既往研究の等価光幕輝度の式によって視認性推定が可能であるかを確認し, 視野内のグレア光源によって生じる視認性低下の推定法の提案を目指した.

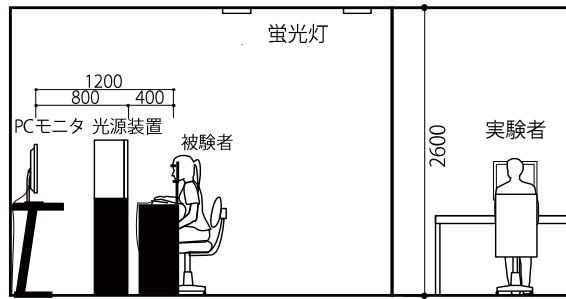
2.4.3. 視野内に高輝度面が存在する場合の見やすさ評価 [実験 2-E]

2.4.3.1. 実験概要

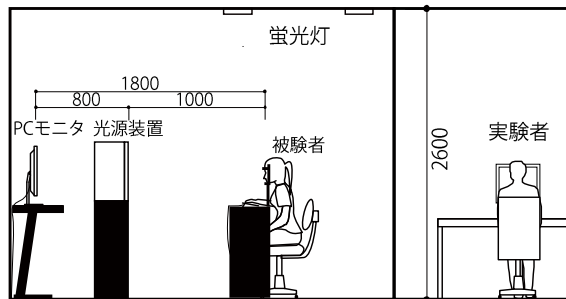
20~30 代晴眼者 8 名(表 2.14 右眼視力中央値 1.325)を対象に、本章第 2 節、第 3 節と同様に円形視標を視対象として、視野内にグレア光源となる高輝度面を有する様々な条件下で見やすさ評価実験を行った。既往研究の等価光幕輝度の式(2.19), (2.20)が視角を変数とする関数であることから、視対象を中心に円環状にグレア光源(高輝度面)を配置することとした。実験空間は第 2 節、第 3 節の実験を基に、27 インチ PC モニタ(EIZO Color Edge CG277, 2560×1440[px])の 800[mm]手前に、中央部が貫通した円環状に発光可能な光源装置を設置し、PC モニタ上に均一背景および円形視標を提示した(図 2.25, 2.26)。被験者は、右眼のみで光源装置越しに見える PC モニタ上の円形視標を観察し、見やすさの程度を回答する。

表 2.14 実験 2-E 被験者リスト

被験者 No.	性別	年齢	矯正	右眼視力 (観察距離: 2500 [mm])
1	女	30	裸眼	1.20
2	男	24	メガネ	1.65
3	女	23	コンタクト	1.10
4	女	24	コンタクト	1.80
5	男	24	メガネ	1.10
6	女	24	コンタクト	1.35
7	男	30	裸眼	1.35
8	男	22	コンタクト	1.30
平均値				1.356
中央値				1.325



(a) PC モニタまでの距離 1200 [mm]



(b) PC モニタまでの距離 1800 [mm]

図 2.25 実験室概要 [mm]

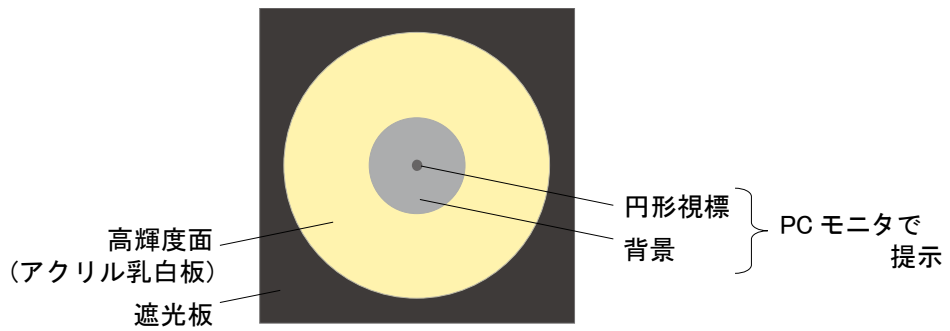
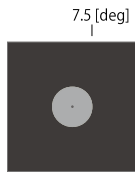


図 2.26 提示刺激の様子

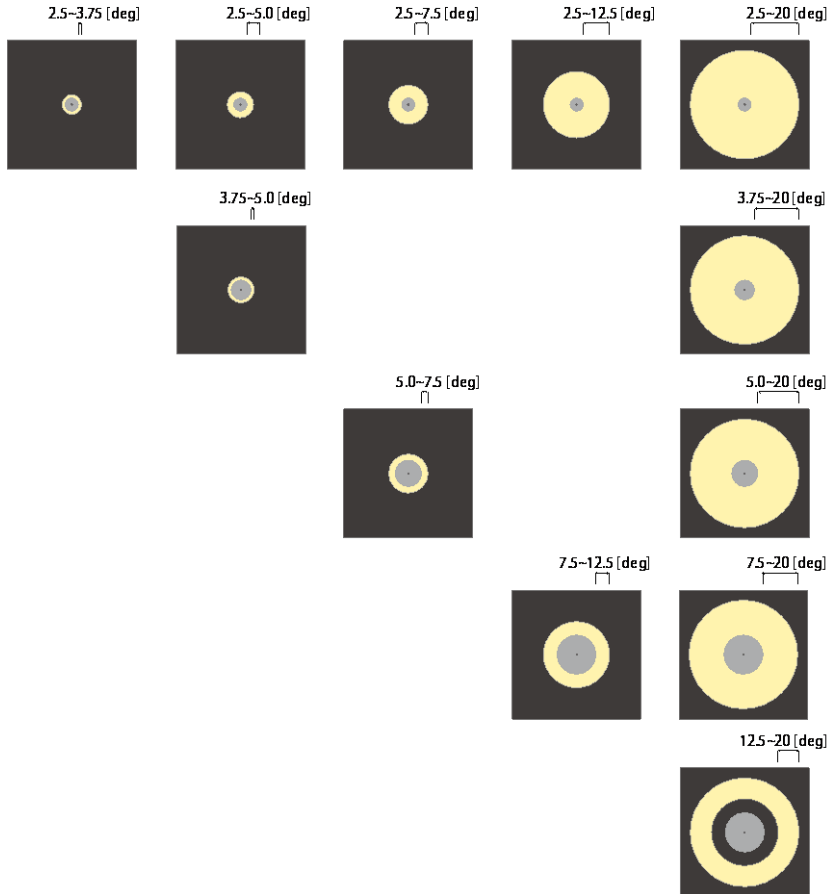
光源装置は、白色塗装した木製の箱(H345×W345×D300 [mm])、LED光源、アクリル乳白板、黒色塗装の遮光板(1.7[cd/m²])、漏れ光を遮断するための筒から構成され、被験者側からはアクリル乳白板の高輝度面と遮光板のみが見える(図 2.26)。同一の光源装置を用いて高輝度面の視角範囲の可変範囲を増やすため、PC モニタまでの距離を 1200[mm]と 1800[mm]の2種類設定し(図 2.25)、アクリル乳白板と遮光板の組み合わせによって、高輝度面の視角範囲を変化させた(図 2.27, 図 2.28)。PC モニタまでの距離 1200[mm](光源装置までの距離 400[mm])の場合は 2.5~20[deg]、PC モニタまでの距離 1800[mm](光源装置までの距離 1000[mm])の場合は 1.0~5.0[deg]の範囲内で高輝度面の視角範囲を変化させた。PC モニタまでの距離が 1200[mm]の場合では、高輝度面のない1条件、円環状に高輝度面が存在する12条件、円環状の高輝度面が半分のみ存在する2条件×4方向の計21条件、PC モニタまでの距離が 1800[mm]の場合では、高輝度面のない1条件、円環状に高輝度面が存在する7条件、円環状の高輝度面が半分のみ存在する1条件×4方向の計12条件で変化させた(図 2.27, 図 2.28, 表 2.15)

高輝度面(アクリル乳白板)の輝度は、LED光源の調光用デジタルスイッチ(100階調)によって調光した。実験中、数分間に渡って高輝度面を見続けることが想定されることため、安全上の理由から高輝度面の輝度は、最大で 3600[cd/m²]とした(表 2.15)。建築照明や車のヘッドライト等の輝度を想定すると、3600 [cd/m²]はやや低いと考えられるが、PC モニタで提示する背景(図 2.26)の輝度が 4.96, 10.01[cd/m²]の場合には、高輝度面輝度が 3600 [cd/m²]でも減能グレアによる視認性低下の影響が大きく生じることが予備実験から確認された。

(1) 高輝度面なし



(2) 円環状の高輝度面が存在



(3) 円環状の高輝度面が半分のみ存在

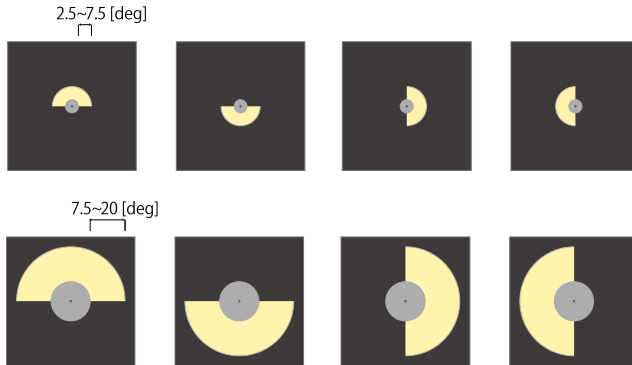
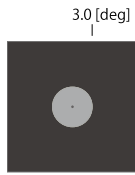
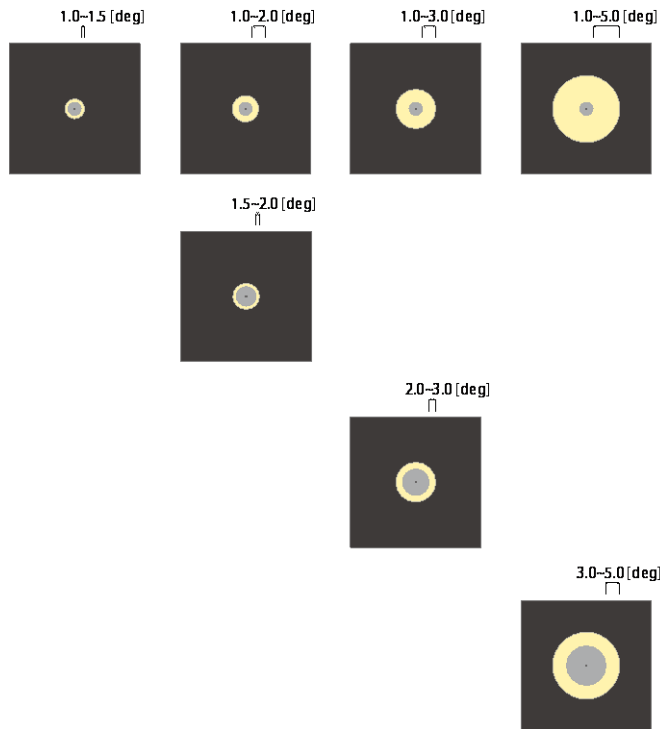


図 2.27 高輝度面の視角範囲条件(a. PC モニタまでの距離 1200[mm])

(1) 高輝度面なし



(2) 円環状の高輝度面が存在



(3) 円環状の高輝度面が半分のみ存在

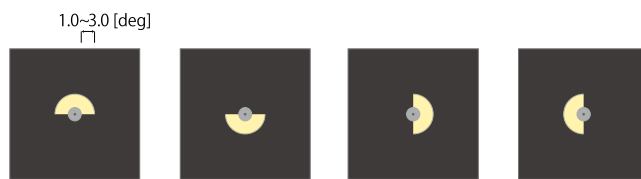


図 2.28 高輝度面の視角範囲条件(b. PC モニタまでの距離 1800[mm])

表 2.15 実験 2-E 実験条件

独立変数		条件数
高輝度面の輝度 [cd/m ²] (高輝度面ありの場合)	3600 (一部, 1800, 900 も実施)	1(+2)
高輝度面の視角範囲 [deg] (図 2.28, 図 2.29 参照)	a. PC モニタまでの距離 1200 [mm] (1) 高輝度面なし (2) 円環状の高輝度面が存在 2.5-3.75, 2.5-5.0, 2.5-7.5, 2.5-12.5, 2.5-20, 3.75-5.0, 3.75-20, 5.0-7.5, 5.0-20, 7.5-12.5, 7.5-20, 12.5-20 (3) 円環状の高輝度面が半分のみ存在 2.5-7.5 (上半分, 下半分, 右半分, 左半分) 7.5-20 (上半分, 下半分, 右半分, 左半分) b. PC モニタまでの距離 1800 [mm] (1) 高輝度面なし (2) 円環状の高輝度面が存在 1.0-1.5, 1.0-2.0, 1.0-3.0, 1.0-5.0, 1.5-2.0, 2.0-3.0, 3.0-5.0, (3) 円環状の高輝度面が半分のみ存在 1.0-3.0 (上半分, 下半分, 右半分, 左半分)	33
背景輝度 [cd/m ²]	4.96, 39.66 (一部, 10.01, 160.36 も実施)	2(+2)
円形視標の輝度 [cd/m ²]	高輝度面および背景輝度の条件に応じて変化	
円形視標のサイズ (直径) [min]	20 (一部, 10, 60も実施)	1(+2)

また、PC モニタの 8bit(256 階調)の RGB 階調値によって背景輝度、円形視標の輝度、円形視標のサイズを変化させた。高輝度面の輝度、高輝度面の視角範囲、背景輝度、円形視標のサイズの条件ごとに、円形視標の輝度をランダムな順序で変化させ、見やすさの程度を評価させた。各被験者は全条件を 1 回ずつ評価する。評価尺度は、後に見やすさの評価についても検討することを想定し、前節の実験と同様に、〈0. 見えない 1. やっと見える 2. 多少見えにくいが見える 3. 苦勞せず(普通に)見える 4. 見やすい〉の 5 段階とした。しかし、円形視標の輝度(C 値)の条件に関して、「0. 見えない」から「3. 苦勞せず(普通に)見える」程度の評価が得られる程度まで提示すると、条件数が膨大となることが予備実験の結果から予想されたため、今回は予備実験の結果をもとに「1. やっと見える」の評価を得るために必要な範囲を目安として円形視標の輝度(C 値)の条件を設定した。なお、前節より、「0. 見えない」と「1. やっと見える」の境界は視認閾値(「見えない」と「見える」の境界)と一致することが確認されている。

実験装置の輝度および色度は、コニカミノルタ色彩輝度計 CS-100 を用いて測定し(測定距離約 1.0[m])、高輝度面、背景、円形視標の色度は、CIE 標準光源 D65 の色度に相当することを確認した。また、Panasonic LUMIX DMC-GX7 の撮影画像から作成した輝度画像(3448×4592[px]、水平画角 63.5[deg])を用いて、高輝度面に輝度ムラが生じていないことを確認した。

なお、被験者の視力測定は、JIS T 7309:2002¹⁾に準拠し、観察距離 2500[mm]としてランドルト環を用いて測定した(表 2.14)。背景の輝度を 200[cd/m²]、ランドルト環の輝度を 10[cd/m²] 程度とし、5 個のうち 3 個以上正答するかを判定基準として行なった。

2.4.3.2. 実験結果

これまでと同様に、実験条件の背景および円形視標の輝度値から、均一背景上の円形視標の輝度コントラスト(C 値)および対数輝度平均(A 値)の算出式(2.1), (2.2)を用いて、C 値, A 値を算出し、高輝度面の輝度・視角範囲の条件ごとに、評価結果を示す輝度コントラスト評価図(CA 図)を作成する。また本節でも、減能グレアの影響の一般化を想定し、被験者の半数で評価が得られたかを判定基準とする。8 名中 4 名以上が評価 4 と回答した条件を○, 4 名以上が評価 3 以上と回答した条件を●, 4 名以上が評価 2 以上と回答した条件を▲, 4 名以上が評価 1 以上と回答した条件を■, 5 名以上が評価 0 と回答した条件を×として実験結果を示す(図 2.29)。

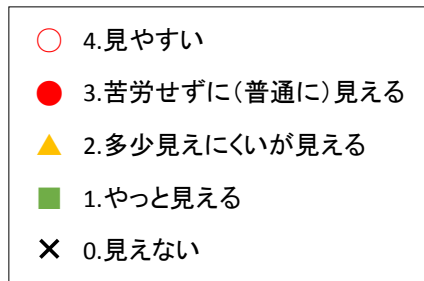
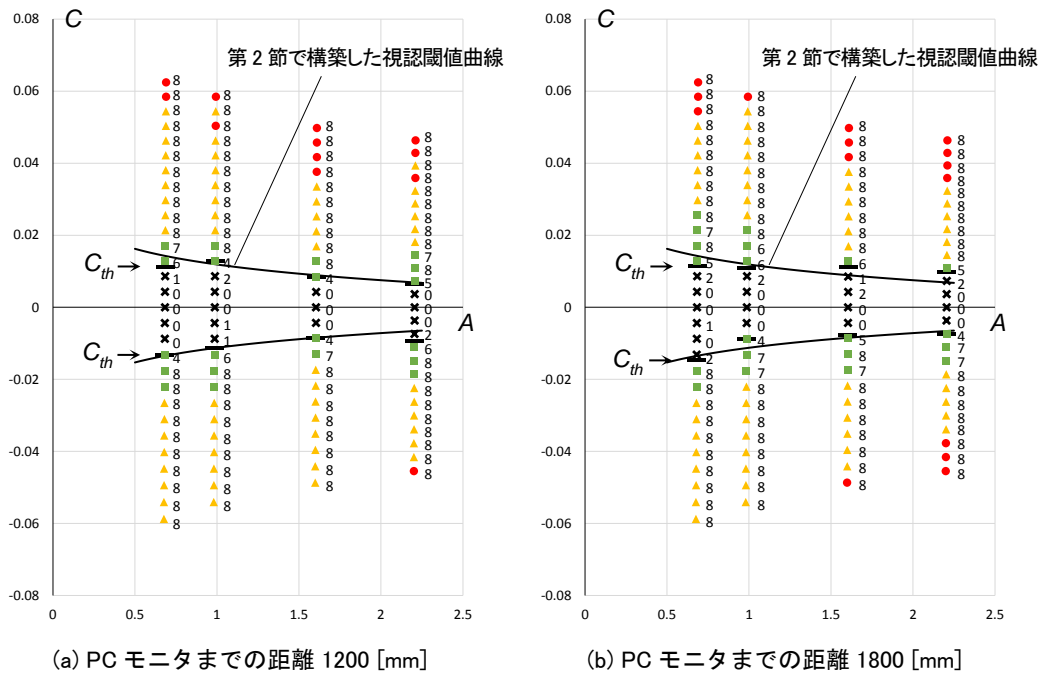


図 2.29 実験結果凡例

(1) 高輝度面がない場合

高輝度面がない場合の円形視標サイズが 20[mm]の被験者 8 名分の評価結果 CA 図(C 値の範囲を-0.08~0.08 とする)を図 2.30(a), (b)に示す。PC モニタまでの距離 1200[mm]の結果が図 2.30 (a), PC モニタまでの距離 1800[mm]の結果が図 2.30(b)である。評価のばらつきの程度を示すため、「1. やっと思える」以上の評価人数、つまり視認できた人数を図 2.30 の各プロットの右側に示す。また、被験者 8 名中 4 名が視認可能(「1. やっと思える」以上)となる視認閾値 C 値(C_{th})を図 2.30 に「-」で示す。 C_{th} の算出方法は、第 2 節と同様とし、同一背景輝度毎に 8 名中 4 名が視認可能となる C_{th} を逆対比・正対比それぞれ求めた。

さらに、第 2 節で構築した視認閾値曲線(視力値を今回の被験者の右眼視力中央値 1.325 として作成)を図 2.30 に実線で示す。PC モニタまでの距離が 1200[mm], 1800[mm]のどちらの場合も、今回の実験の視認閾値 C 値(C_{th})とほぼ一致することが確認できる。以下、視力値 1.325 の視認閾値曲線を高輝度面がない場合の視認閾値 C 値(C_{th})と仮定して検討を進める。



× 0.見えない ■ 1.やっと見える ▲ 2.多少見えにくいが見える ● 3.苦勞せずに(普通に)見える ○ 4.見やすい

図 2.30 実験 2-E 評価結果 CA 図-(1)高輝度面なし

(2) 円環状の高輝度面が存在する場合

円形視標サイズが 20[min], 高輝度面輝度が 3600[cd/m^2], 円環状の高輝度面が存在する場合の被験者 8 名分の評価結果 CA 図(C 値の範囲を-0.6~0.3 とする)の一部を図 2.31(i)~(iv) に示す. 評価のばらつきの程度を示すため, 背景輝度 4.96[cd/m^2](A 値=0.70)の条件について視認可能(「1. やっと見える」以上)と回答した人数を示す. また, 被験者 8 名中 4 名が視認可能となる高輝度面が存在する場合の視認閾値 C 値(C_{thg})を図 2.31 に「-」で示す. C_{thg} の算出方法は C_{th} の算出方法に準ずる. そして, 「(1) 高輝度面なし」の結果と同様に第 2 節で構築した視認閾値曲線(視力値 1.325 とする)を図 2.31 に実線で示す.

前節の高輝度面がない場合の視認閾値 C 値および第 2 節で構築した視認閾値曲線(C_{th})と比べ, 高輝度面が存在する場合には, いずれの条件も視認閾値 C 値(C_{thg})の絶対値は高く, 減能グレアが生じていることがわかる(図 2.31(i)~(iv)). また, 図 2.31(i)~(iv)それぞれの CA 図において背景輝度(A 値)が低いほど, C_{thg} の絶対値が高いことも確認できる. 図 2.31(i), (ii), (iv)の比較および図 2.31(iii), (iv)の比較より, 高輝度面の視角範囲が広いほど C_{thg} の絶対値が大きいことが確認できる. 図 2.31(ii), (iii)の比較では, 図 2.31(ii)の方が高輝度面の面積が小さいがやや C_{thg} の絶対値が高く, 高輝度面が視野の中心近くに存在するほど C_{thg} の絶対値が高いといえる.

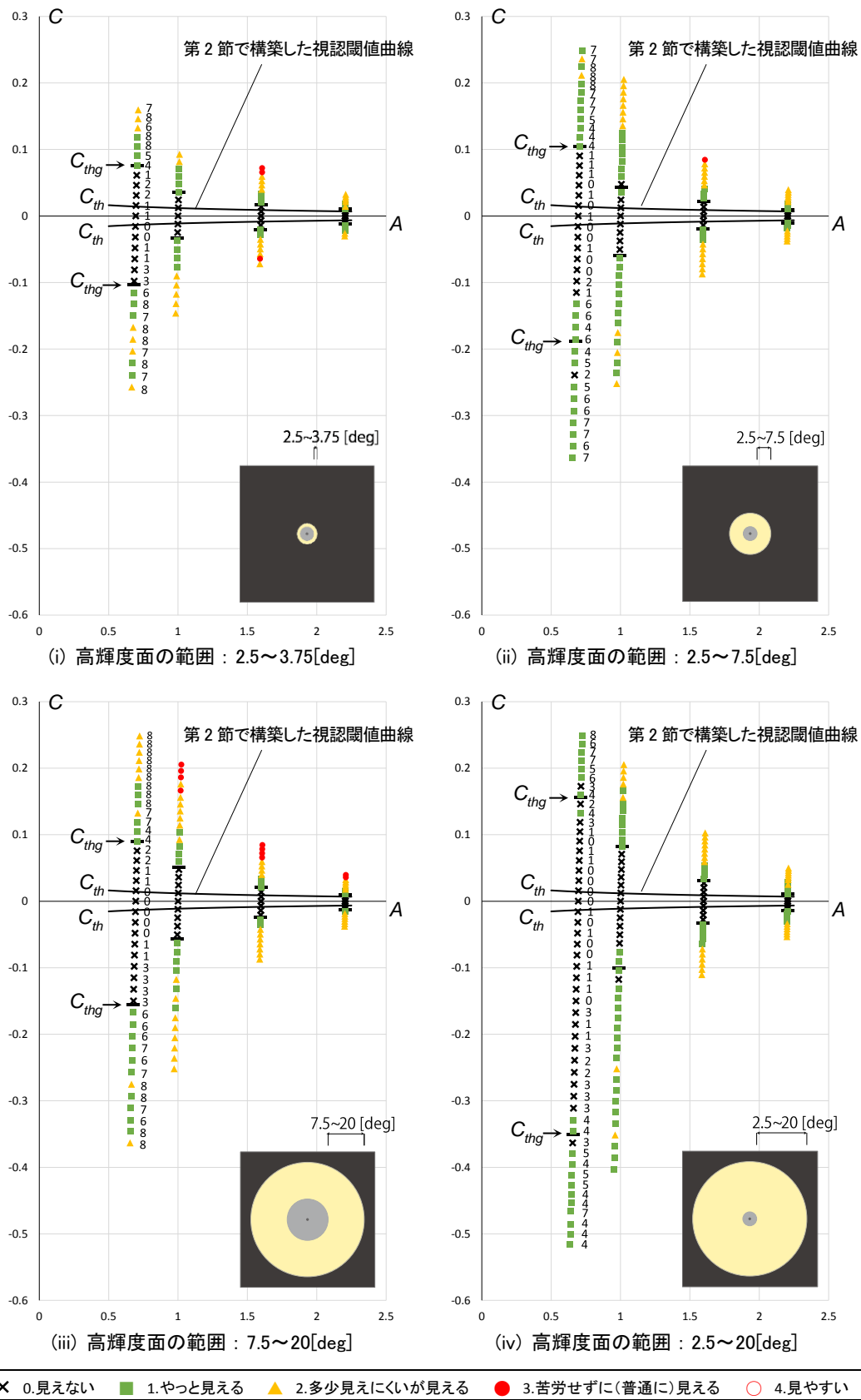


図 2.31 実験 2-E 評価結果 CA 図-(2) 円環状の高輝度面が存在

さらに、円形視標サイズを変化させず(20[min]), 高輝度面輝度を 900, 1800[cd/m^2]に変化させた場合の結果と比較したところ、高輝度面輝度 3600[cd/m^2]の結果が最も C_{thg} の絶対値が高く、高輝度面の輝度が高くなるほど、 C_{thg} の絶対値が高くなることが確認できた(図 2.32(i)). 高輝度面輝度を変化させず(3600[cd/m^2]), 円形視標サイズを 10, 60[min]に変化させた場合の比較では、円形視標サイズが小さくなるほど、 C_{thg} の絶対値が高くなることが確認できた(図 2.32(ii)).

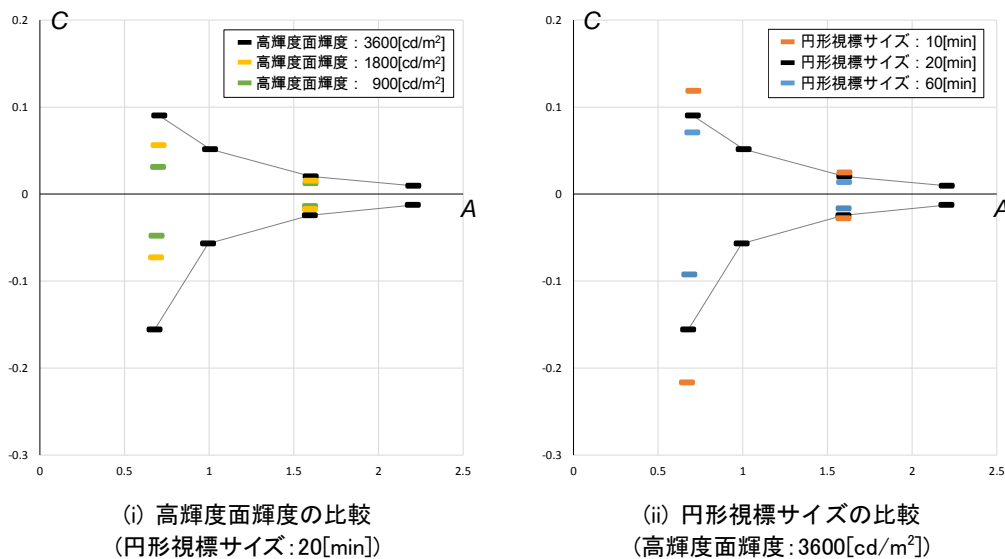


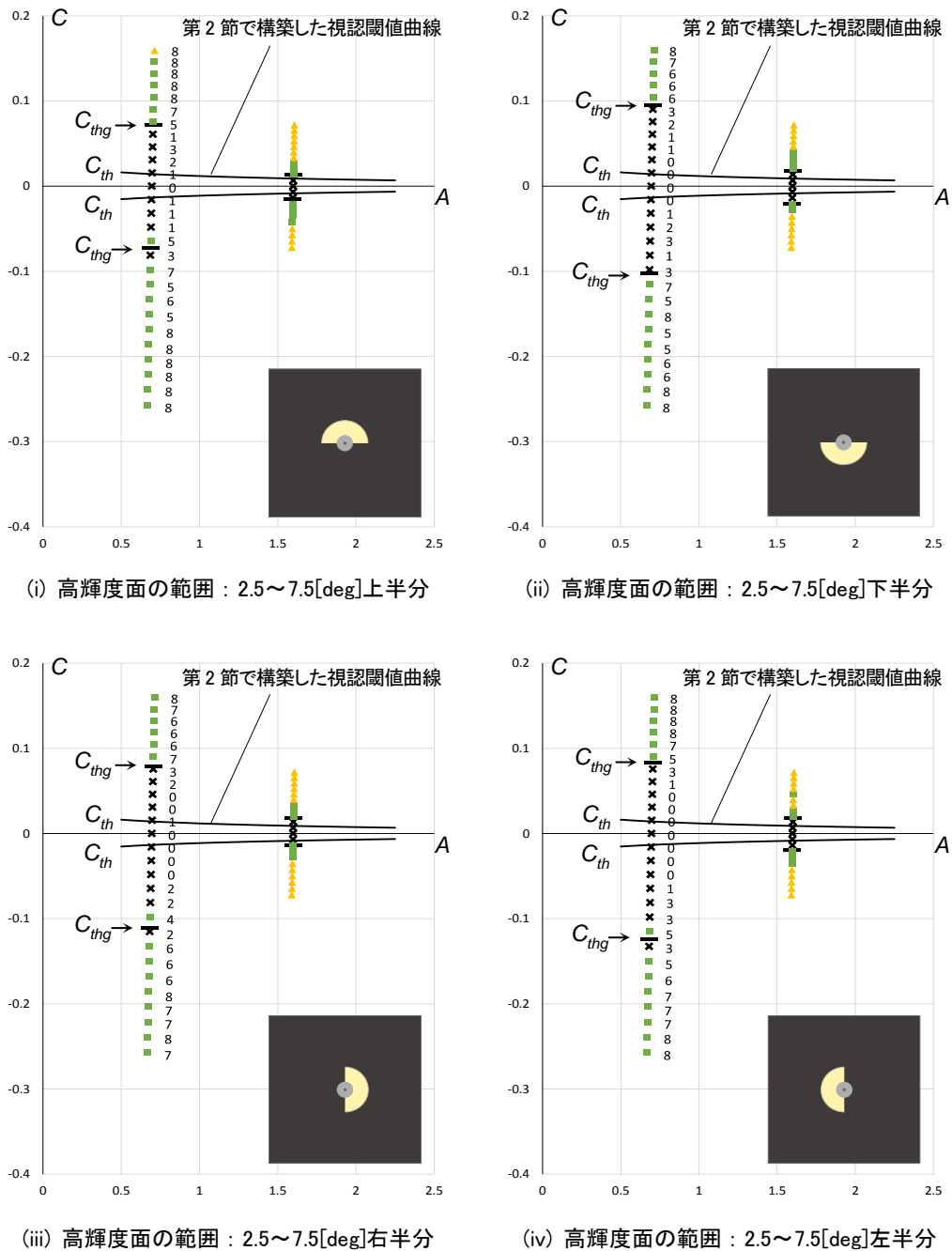
図 2.32 視認閾値 C 値(C_{thg})の比較(高輝度面の範囲: 7.5~20[deg])

(3) 円環状の高輝度面が半分存在する場合

円形視標サイズが 20[min], 高輝度面輝度が 3600[cd/m^2], 視角範囲 2.5~7.5[deg]の高輝度面が半分のみ存在する条件(上半分, 下半分, 左半分, 右半分)の被験者 8 名分の評価結果 CA 図(C 値の範囲を-0.3~0.2 とする)を図 2.33(i)~(iv)に示す. また、背景輝度 4.96[cd/m^2] (A 値 \approx 0.70)の条件について視認できた人数を示す. 図 2.33(i)~(iv)より、方向によらず同等の結果であることが分かる. 上半分, 下半分, 右半分, 左半分の 4 条件の結果について一元配置分散分析を行ったところ、有意差が無いことが示された($p > 0.1$). 視角範囲 1.0~3.0[deg], 7.5~20[deg]の高輝度面が半分のみ存在する条件の評価結果でも同様に、方向によらず同等の結果となり、一元配置分散分析により 4 条件の間に有意差が無いことが示された($p > 0.1$). そのため本研究では、視対象に対して高輝度面が位置する方向には差はないとして、以下の論を進める.

また、‘高輝度面輝度が 3600[cd/m^2]で視角範囲 2.5~7.5[deg] の高輝度面が半分のみ存在する場合の結果’と‘高輝度面輝度が 1800[cd/m^2]で視角範囲 2.5~7.5[deg]の高輝度面が全体に存在する場合の結果’, ‘高輝度面輝度が 3600[cd/m^2]で視角範囲 7.5~20[deg]の高輝度面が半分のみ存在する場合の結果’と‘高輝度面輝度が 1800[cd/m^2]の視角範囲 7.5~20[deg]の

高輝度面が全体に存在する場合の結果は、それぞれ一元配置分散分析において有意差が無く ($p > 0.1$), 同等であることが分かった。



× 0.見えない ■ 1.やっと見える ▲ 2.多少見えにくいが見える ● 3.苦勞せずに(普通に)見える ○ 4.見やすい

図 2.33 実験 2-E 評価結果 CA 図-(3) 円環状の高輝度面が半分のみ存在

2.4.4. 既往研究による視認閾値推定と実験結果の比較

既往研究の等価光幕輝度 L_v の推定式(式(2.20))と、第 2 節で構築したグレア光源がない場合の視認閾値 C 値(C_{th})の推定式を組み合わせることにより、グレア光源が存在する場合の視認閾値 C 値(C_{thg})を推定し、今回の行なった実験の結果との整合性を確認する。

まず、等価光幕輝度 L_v の推定式(式(2.20))を用いて、本実験の高輝度面の輝度・視角範囲の条件ごとに等価光幕輝度 L_v を算出する。定数(k, a)は、(10, 2)を用いることとする^{23,24)}(式(2.21))。グレア光源から生じる等価光幕輝度の加算により、視野全体から生じる等価光幕輝度の算出が可能であることから^{21,25)}、本実験の高輝度面の視角範囲条件をもとに、視角範囲を 1.0-1.5, 1.5-2.0, 2.0-2.5, 2.5-3.0, 3.0-3.75, 3.75-5.0, 5.0-7.5, 7.5-12.5, 12.5-20.0[deg]の 9 つに分割し(表 2.16)、各視角範囲から生じる等価光幕輝度を算出し、加算して 1~20[deg]の視角範囲から生じる等価光幕輝度を求めることとする。立体角投射の法則(図 2.34)より、高輝度面の受照点を中心とした単位球で切り取り(S'_i)、受照面に正投射した面積 S''_i に面光源の輝度 L_i を乗じることで、各視角範囲から受ける照度 E_i を算出し、分割した各視角範囲の代表点(内側と外側の視角の平均値とする、表 2.16)を用いて、等価光幕輝度を算出する。

表 2.16 視角範囲と代表点, 正射影面積

i		1	2	3	4	5	6	7	8	9
視角範囲[deg]	内側	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.75	5.0	7.5	12.5
	外側	1.5	2.0	2.5	3.0	3.75	5.0	7.5	12.5	20.0
代表点 θ_i [deg]		1.25	1.75	2.25	2.75	3.375	4.375	6.25	10.00	16.25
正射影面積 S''_i		0.00120	0.00167	0.00215	0.00263	0.00483	0.0104	0.0297	0.0936	0.2203

$$L_v = 10 \times \sum_{i=1}^n E_i / \theta_i^2 \quad \dots \quad (2.21)$$

L_v : 等価光幕輝度[cd/m²]

n : 視角範囲の分割数

E_i : i 番目の視角範囲から受ける鉛直面照度[lx]

θ_i : i 番目の視角範囲の代表点[deg]

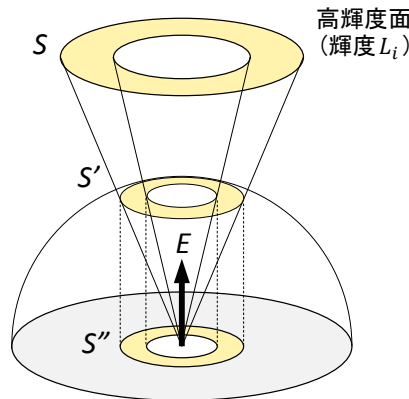


図 2.34 立体角投射の法則

次に、求められた等価光幕輝度 L_v と第 2 節で構築した視認閾値推定式から求められる視野内にグレア光源がない場合の視認閾値 C 値(C_{th})を用いて、グレア光源が存在する場合の円形視標の視認閾値 C 値(C_{thg})の推定値を算出する。

C_{th} および背景輝度 L_b 、グレア光源がない場合の円形視標の視認閾値輝度 L_{t_th} は、式(2.1)より式(2.22)の関係が成り立つ。視野内にグレア光源が存在し、等価光幕輝度 L_v が背景および円形視標に重畳している場合、高輝度面がない場合の視認閾値 C 値(C_{th})と等しくなったときに視認できるとすると、式(2.23)が成り立つ。そのため、式(2.22)、(2.23)より式(2.24)とすることができる。式(2.24)を変形した式(2.25)によって、 L_{t_thg} を求めることができる。 L_{t_thg} を式(2.26)に代入することで、視野内にグレア光源がある場合の視認閾値 C 値(C_{thg})の推定値を求めることができる。

$$C_{th} = 0.775 \times \log_{10} \frac{L_{t_th}}{L_b} \quad \dots (2.22)$$

$$C_{th} = 0.775 \times \log_{10} \frac{L_{t_thg} + L_v}{L_b + L_v} \quad \dots (2.23)$$

$$\frac{L_{t_th}}{L_b} = \frac{L_{t_thg} + L_v}{L_b + L_v} \quad \dots (2.24)$$

$$L_{t_thg} = L_{t_th} - L_v + \frac{L_{t_th} \times L_v}{L_b} \quad \dots (2.25)$$

$$C_{thg} = 0.775 \times \log_{10} \frac{L_{t_thg}}{L_b} \quad \dots (2.26)$$

L_{t_th} : グレア光源がない場合の円形視標の視認閾値輝度[cd/m²]

L_{t_thg} : グレア光源がある場合の円形視標の視認閾値輝度[cd/m²]

C_{th} : グレア光源がない場合の円形視標の視認閾値 C 値

C_{thg} : グレア光源がある場合の円形視標の視認閾値 C 値

L_b : 背景輝度[cd/m²]

L_v : 等価光幕輝度[cd/m²]

以上の手順によりグレア光源がある場合の視認閾値 C 値(C_{thg})を推定し作成した視認閾値曲線を図 2.35(i)~(iv)の CA 図(C 値の範囲を $-0.5\sim 0.3$ とする)に青の破線で示す。円形視標サイズは 20[min], 高輝度面輝度は 3600[cd/m²]とし, 前項の実験結果(図 2.31)から得た視認閾値 C 値(C_{thg})を前章と同様に‘-’で示す。

図 2.35(i)の高輝度面の視角範囲が 2.5~3.75[deg]の場合のように, 高輝度面の面積が比較的小さく, 高輝度面が 5.0[deg]未満に存在する場合には, 概ね実験結果から得られる C_{thg} と合致している。しかし, 図 2.35(ii)~(iv)のように高輝度面の面積が大きい場合や視角 5.0[deg]以上の範囲に高輝度面が存在する場合, 推定される C_{thg} の絶対値が高くなり, 推定精度が低いことが分かった。円形視標サイズが 10[min]や 60[min]の場合も同様となった。また, 高輝度面の輝度が 1800, 900[cd/m²]となった場合には, 7.5[deg]程度まで推定可能であることが示唆された。

この C_{thg} の実験値と推定値の差異は, 視対象やグレア光源の条件の違い, 被験者の属性の違い等が影響していると考えられる。例えば, 本研究では単純な円形の視標を視対象としたが, 既往研究では異なる図形の視対象を用いている¹⁵⁾。また, 本研究の実験は視対象を囲むように円環状に高輝度面を配置しているが, 既往研究では円形のグレア光源を視対象のいずれかの方向に配置して実験が行なわれている¹⁵⁾。さらに, 今回用いた等価光幕輝度の定数(k, a)=(10, 2)は, 一般化のため複数の研究から得られた(k, a)を平均化して得られた値であるため¹⁷⁾, 本実験とは差異が生じる可能性がある。中根らは²⁰⁾, 光源の輝度や背景輝度によっても(k, a)が変化することも示唆している。

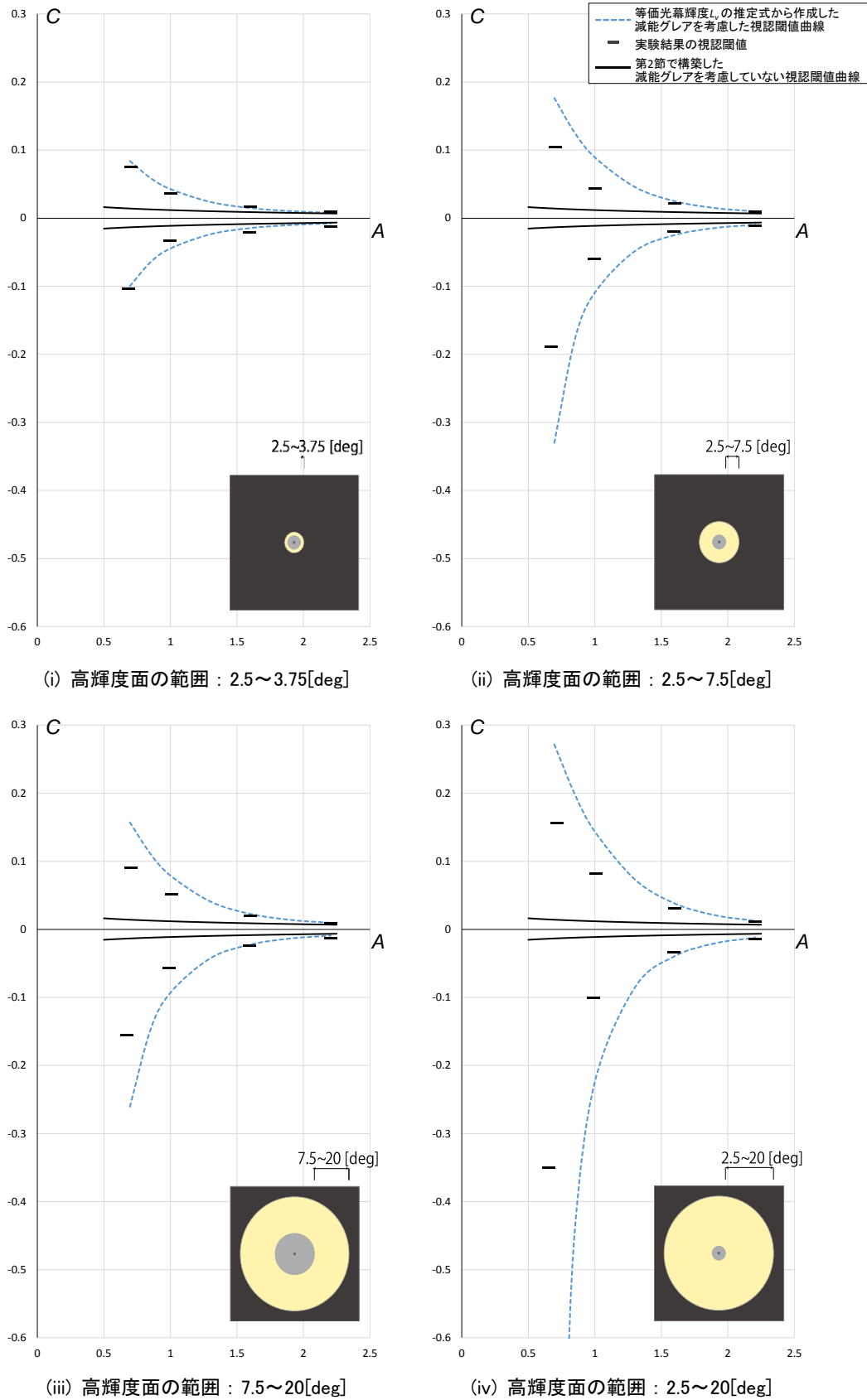


図 2.35 既往研究を用いて作成した視認閾値曲線と実験結果の C_{thg} の比較

2.4.5. 減能グレアを考慮した視認閾値推定法の構築

前項では、既往研究の等価光幕輝度の推定式¹⁵⁻¹⁹⁾を用いて CA 図上に減能グレアを考慮した視認閾値曲線を作成した場合、適用範囲に限りがあることが示された。また、式(2.21)から等価光幕輝度 L_v を求めた後、式(2.25)、(2.26)によって視認閾値 C 値(C_{thg})を求める必要があり、計算過程やや繁雑で扱いにくいと考えられる。本章では上記を踏まえ、CA 図上で扱うことを想定し、より直接的に減能グレアの影響を考慮した視認閾値 C 値(C_{thg})の推定が可能な新たな推定式の構築を目指す。本研究では、グレア光源がない場合の視認閾値(C_{th} , 図 2.31, 図 2.33 の実線)から、グレア光源が存在する場合の視認閾値 C 値(C_{thg} , 図 2.31, 図 2.33 の‘-’)の増加量 ΔC (式(2.27))に着目し、減能グレアによる視認性低下の推定式の構築を試みた。

$$\Delta C = |C_{thg} - C_{th}| \quad \dots \quad (2.27)$$

ΔC : グレア光源による視認閾値 C 値の増加量

まず、高輝度面が存在する全ての実験結果 CA 図より、本実験の背景輝度条件の中で最も高輝度面の影響による ΔC の増加が大きかった背景輝度 $4.96[\text{cd}/\text{m}^2]$ における ΔC を逆対比・正対比それぞれ求めた。等価光幕輝度 L_v の推定式と同様に、グレア光源の視角と観察者の目の位置での鉛直面照度を変数とする関数になると仮定し、 ΔC を目的変数、表 2.16 の各視角範囲から受ける鉛直面照度を説明変数とする重回帰分析を逆対比・正対比それぞれ行なった(表 2.17)。重回帰分析から得られた各視角範囲から受ける鉛直面照度 $1[\text{lx}]$ あたりによって生じる ΔC を縦軸、高輝度面の視角範囲の代表点を横軸として関係を示したところ、逆対比・正対比それぞれ $\log_{10}(\Delta C) = -a \times \log_{10}(\theta_i) - b$ の形で回帰できることが示された(図 2.36(i),(ii))。上記の式は、 $\Delta C = 10^{-b} / \theta_i^a$ に変形することができ、図 2.36(i),(ii)の回帰式より、背景輝度 $4.96[\text{cd}/\text{m}^2]$ における視野全体(1~20[deg])の ΔC の推定式は、各視角範囲から受ける鉛直面照度 E_i を考慮して、逆対比・正対比それぞれ式(2.28)、(2.29)となり、等価光幕輝度の式と同様の形($k \times \sum_{i=1}^n E_i / \theta_i^a$)で表現できた。

表 2.17 重回帰分析結果($L_b = 4.96[\text{cd}/\text{m}^2]$)

視角範囲[deg] (代表点 θ_i)	1.0-1.5 (1.25)	1.5-2.0 (1.75)	2.0-2.5 (2.25)	2.5-3.0 (2.75)	3.0-3.75 (3.375)	3.75-5 (4.375)	5.0-7.5 (6.25)	7.5-12.5 (10)	12.5-20 (16.25)	切片	重決定R2	
1[lx]あたりの ΔC	逆対比	0.02122	0.01284	0.00859	0.00228	0.00336	0.00128	0.00048	0.00021	8E-05	0	0.9924
	正対比	0.01483	0.00574	0.00173	0.00316	0.00101	0.00066	0.00027	9.4E-05	4.5E-05	0	0.9625

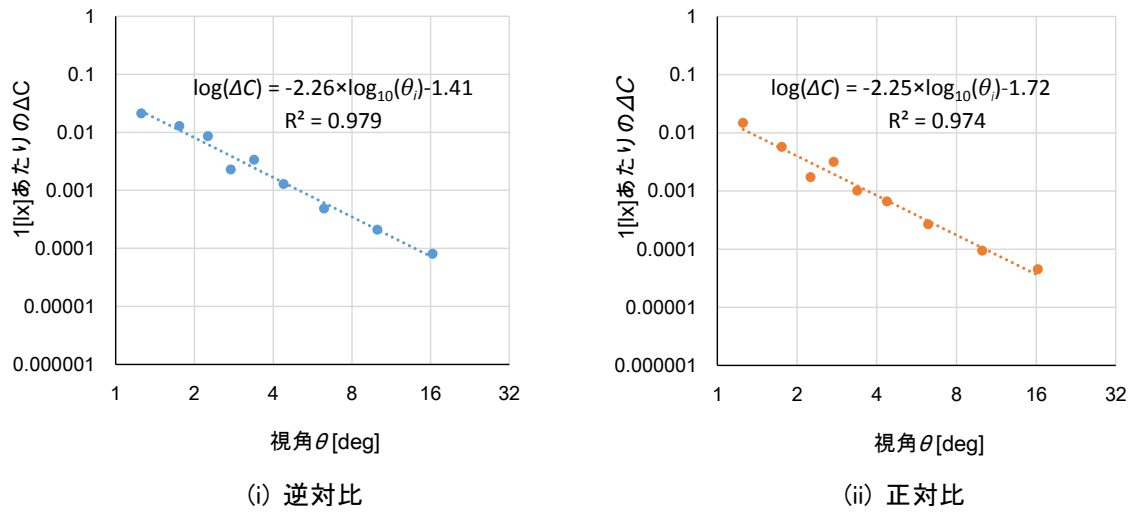


図 2.36 重回帰分析から得た係数と視角の関係($L_b = 4.96[\text{cd}/\text{m}^2]$)

$$\text{逆対比} \quad \Delta C = 0.0386 \times \sum_{i=1}^n E_i / \theta_i^{2.26} \quad \dots \quad (2.28)$$

$$\text{正対比} \quad \Delta C = 0.0190 \times \sum_{i=1}^n E_i / \theta_i^{2.25} \quad \dots \quad (2.29)$$

E_i : i 番目の視角範囲から受ける鉛直面照度[lx]

θ_i : i 番目の視角範囲の代表点[deg]

また、図 2.31, 図 2.33 の C_{thg} と C_{th} の差, つまり ΔC に着目すると, 背景輝度 L_b (A 値) の増加によって ΔC は減少している. 背景輝度 $10.01, 39.66[\text{cd}/\text{m}^2]$ における ΔC について, 上記の背景輝度 $4.96[\text{cd}/\text{m}^2]$ の場合と同様にして行なった重回帰分析の結果を図 2.37(i),(ii) に示す. 背景輝度 $4.96[\text{cd}/\text{m}^2]$ の場合と比べると ΔC が小さく評価結果が乱れているため, 背景輝度 $4.96[\text{cd}/\text{m}^2]$ における重回帰分析結果(図 2.36(i),(ii))よりも決定係数 R^2 が低くなった. また, 逆対比よりも正対比の方が実験結果の ΔC が低いため, さらに評価結果が乱れ, 決定係数 R^2 が低くなった. 図 2.36(i),(ii)よりも図 2.37(i),(ii), さらに, 逆対比よりも正対比において, 決定係数 R^2 があまり高くないものもあるが, 背景輝度によって $\log_{10}(\Delta C) = -\alpha \times \log_{10}(\theta_i) - b$ の b の値が変化し, 図 2.36(i),(ii)の回帰式が逆対比・正対比それぞれ平行移動していると解釈する. 背景輝度 L_b を横軸, 10^{-b} つまり k を縦軸として表現すると, 背景輝度の増加に伴って k が減少することが確認できる(図 2.38(i),(ii)). 以上より, 推定式(2.28),(2.29)の k に図 2.38(i),(ii)の背景輝度の増加による ΔC の減衰の効果を加え, 背景輝度 $4.96[\text{cd}/\text{m}^2]$ 以外の背景輝度にも適用可能な ΔC の推定式(2.30), (2.31)を構築した. なお, 背景輝度 $160.36[\text{cd}/\text{m}^2]$ の結果は, $39.66[\text{cd}/\text{m}^2]$ 以下の背景輝度条件の場合と比べ, さらに減能グレアの影響(ΔC)が小さくなり実験結果が乱れるため, 重回帰分析を行なうことが難しいと判断し, 今回の推定式構築においては除外した.

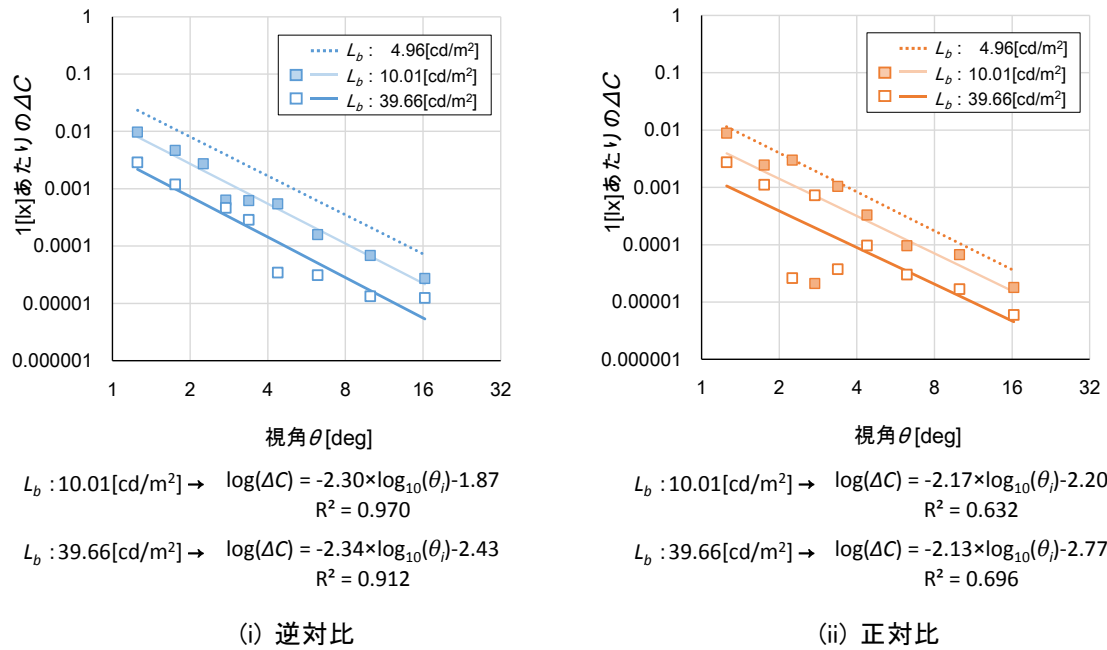


図 2.37 重回帰分析から得た係数と視角の関係 ($L_b = 10.01, 39.66 [\text{cd}/\text{m}^2]$)

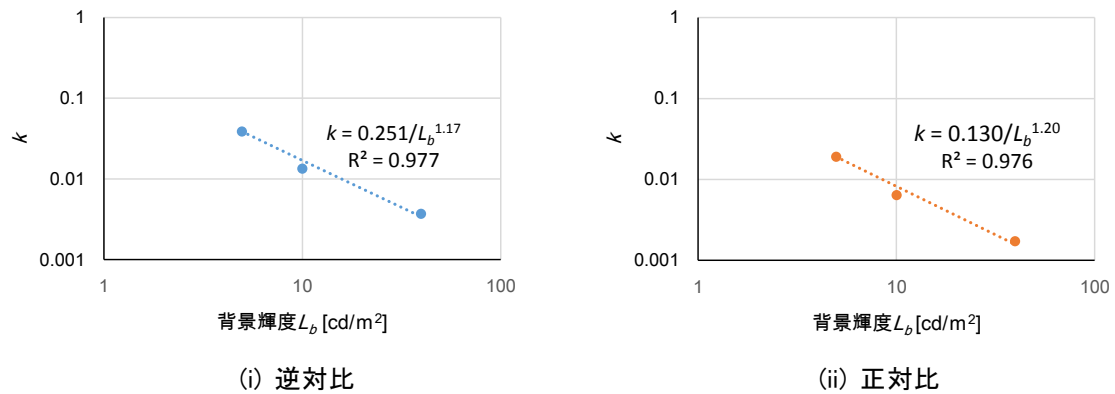


図 2.38 背景輝度と $k (=10^{-b})$ の関係

逆対比 $\Delta C = (0.251/L_b^{1.17}) \times \sum_{i=1}^n E_i / \theta_i^{2.26} \quad \dots \quad (2.30)$

正対比 $\Delta C = (0.130/L_b^{1.20}) \times \sum_{i=1}^n E_i / \theta_i^{2.25} \quad \dots \quad (2.31)$

L_b : 背景輝度 [cd/m^2]

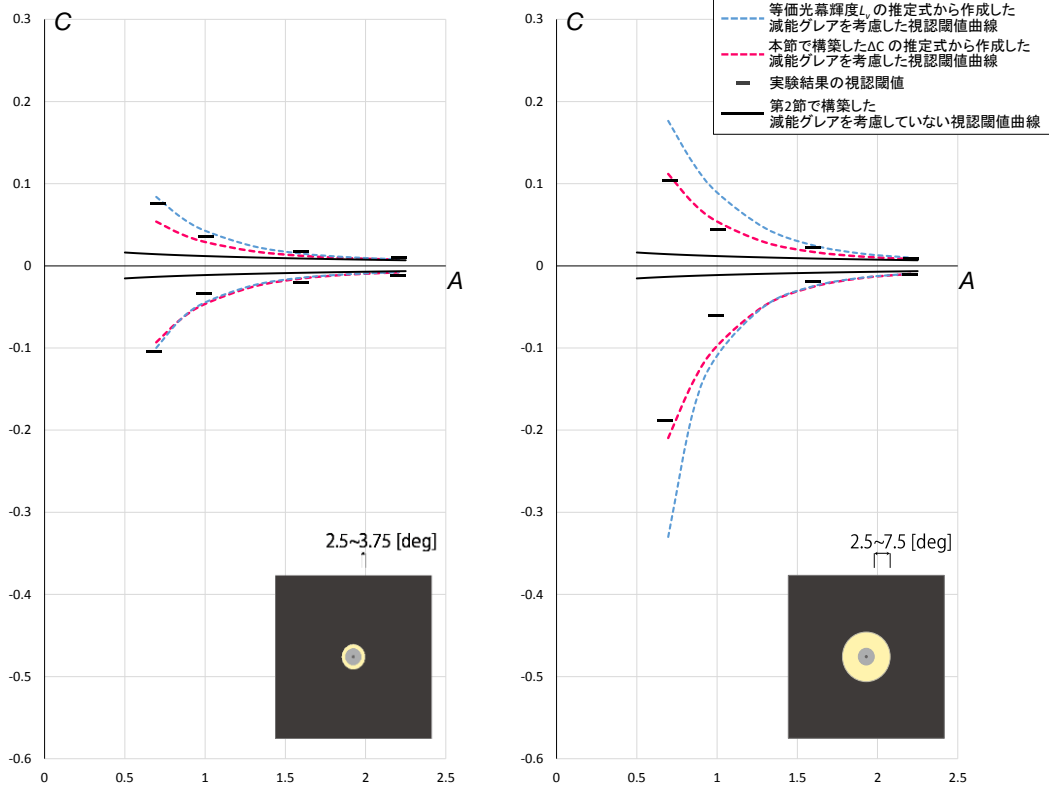
E_i : i 番目の視角範囲から受ける鉛直面照度 [lx]

θ_i : i 番目の視角範囲の代表点 [deg]

表 2.16 の領域および代表点をもとに推定式(2.30), (2.31)から ΔC を推定して作成した減能グレアを考慮した視認閾値曲線 C_{thg} を図 2.39(i)~(iv)の CA 図(C 値の範囲を-0.5~0.3 とする)に赤の破線で示す。本実験では 1~20[deg]の視角範囲に高輝度面を配置したため、今回は視線から 20[deg]までの視角範囲から受ける照度を考慮して ΔC を算出した。視角が大きくなれば、減能グレアの影響(ΔC)は減衰するため(図 2.36, 図 2.37), ある一定の範囲を計算対象とすることは妥当と考えられる。図 2.39(i)~(iv)の赤の破線は、図 2.39(図 2.36)の青の破線(既往研究による視認閾値推定)と比べ、実験結果の視認閾値 C_{thg} (‘-’で示す)に合致していることが確認できる。等価光幕輝度 L_v は、視対象と背景の関係が逆対比・正対比であるかに関わらず同一の式を用いるのに対し、本研究の ΔC 推定式は式(2.30), (2.31)に示すように逆対比と正対比で式が異なり、背景よりも円形視標の輝度が低い逆対比の方が、グレア光源による視認性低下が大きいことを示している。

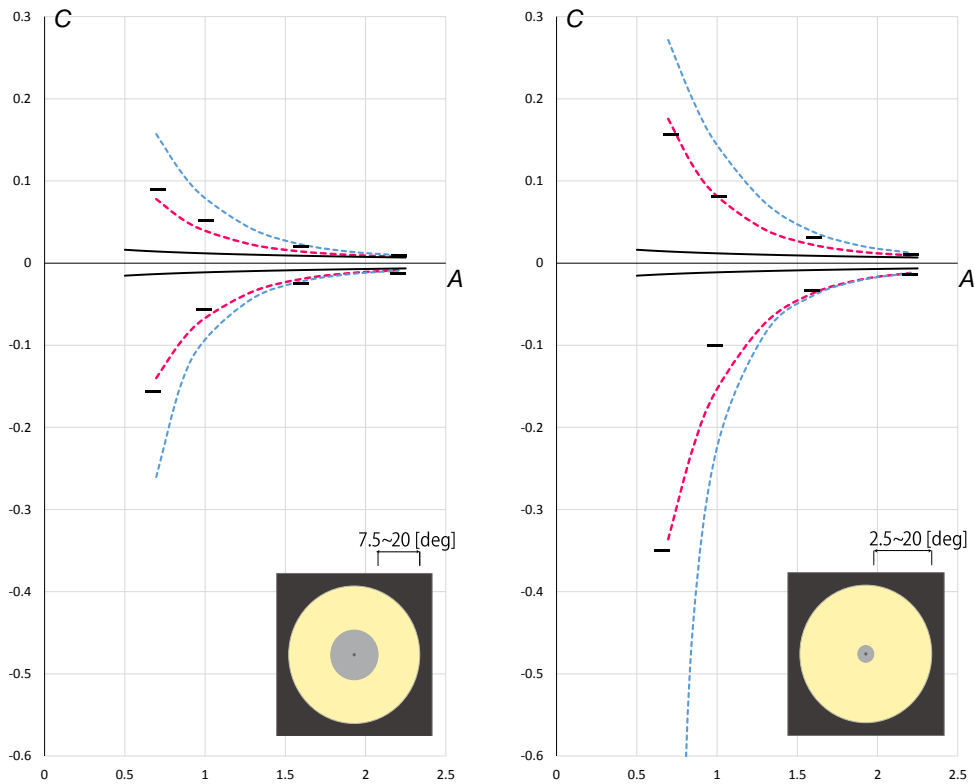
今回、円形視標サイズが 20[min]の実験結果より ΔC の推定式を構築したが、円形視標サイズ 10, 60[min]の ΔC と比べると、ほぼ同等であるものの円形視標サイズが大きいほど ΔC がやや低下することが示された。そのため、本研究の実験条件の範囲外の視対象サイズに関しても、今後確認する必要がある。また、背景輝度 4.96[cd/m²]の場合は、高輝度面の輝度が高く、高輝度面の視角範囲が大きく視野の中心に近くに存在するほど ΔC が増加したが、背景輝度 160.36[cd/m²]の場合では高輝度面の有無によって ΔC が大きく変化し、高輝度面の輝度や視角範囲による ΔC の変化が小さいことが分かった。背景輝度が高い場合では、眼球内の散乱光よりも、グレア光源が存在することによって背景輝度および視対象を暗く感じる効果の方が、 ΔC の増加に大きく関与している可能性がある。

本節では、CA 図上でより直接的に扱うことが可能で、減能グレアの影響を考慮した視認閾値 C 値(C_{thg})の推定式を新たに構築した。これらの成果によって、輝度画像を用いて、各ピクセルの輝度値から照度を計算し ΔC を推定することで、減能グレアを考慮した視認閾値 C 値(C_{thg})の推定が可能になるになると考えられる。また、本節では「0. 見えない」と「1. やっと見える」の境界となる視認閾値の推定式を構築した。見やすさの程度については、第 3 節と同じように視認閾値の比によって推定可能と考えられるが、追って確認を進めたい。



(i) 高輝度面の範囲 : 2.5~3.75[deg]

(ii) 高輝度面の範囲 : 2.5~7.5[deg]



(iii) 高輝度面の範囲 : 7.5~20[deg]

(iv) 高輝度面の範囲 : 2.5~20[deg]

図 2.39 本節で構築した視認閾値曲線と実験結果の C_{thg} の比較

2.5. 第2章まとめ

本章では、本研究の初段階として、晴眼者を対象に輝度分布が視認性に及ぼす影響について検討し、実験条件の輝度分布から C 値(輝度コントラスト), A 値(対数輝度平均)を算出し、輝度画像から視認性推定を行う事を想定した、輝度コントラスト評価図(CA 図)による視認性推定法を構築した。

第2節では、CA 図を用いて視力の高い晴眼者(通常視力晴眼者)の円形視標の視認閾値について検討し、以下の事項を明らかにした。

- ・ 円形視標を視対象とした、幅広い視対象サイズ条件での視認評価実験により、幅広い視対象サイズにおける視認閾値データを取得した。
- ・ 視認評価実験から得られた視認閾値データより、輝度コントラスト評価図を用いて、視認閾値 C 値の推定式を構築した。今回は、被験者 10 名ずつの実験結果より、推定式を構築したが、大きく外れる者はおらず、被験者数を増やしても、大きく実験結果が変化することは無いと考えている。
- ・ 構築した円形視標の視認閾値推定式と Blackwell の既往件究と比較し、整合性があることを確認した。

第3節では、第2節で構築した視認閾値推定式を基に、通常視力晴眼者の見やすさの程度を推定することを目的とした。また、第2節で構築した視認閾値推定式は視力を変数としているため、その視力値を変化させることで、視力の低い晴眼者(低視力晴眼者)や弱視者に適用できる可能性があると考えられる。第3節では、弱視者の視認性を検討する前段として通常視力者での評価手法が低視力者にも適応可能であるか調査することを2つ目の目的とした。通常視力および低視力の晴眼者を対象に円形視標を用いた見やすさ評価実験を行い、CA 図を用いて分析、検討し、以下の事項を明らかにした。

- ・ 通常視力晴眼者における見やすさ評価は、C 値の閾値比によって推定可能であることを明らかにした。
- ・ 低視力晴眼者の視認閾値について、第2節で構築した視認閾値推定式の視力の変数を変化させることで、通常視力晴眼者と同様の手法で推定できることを確認した。
- ・ 低視力晴眼者における見やすさ評価の視認比は、通常視力晴眼者よりも高いことが明らかになった。そのため、通常視力晴眼者の実験結果から構築した「見やすさ」の推定式は、低視力者等には適用できないことが示された。

第4節では、第2節で構築した視認閾値推定式を基に、視野内のグレア光源の存在によって生じる視認性低下(減能グレア)の影響を考慮することを目的として検討した。視野内に高輝度面が存在する様々な条件下で見やすさ評価実験を行ない、高輝度面の有無、存在する位

置や大きさ、輝度の程度によって、視認に必要な輝度コントラストがどのように変化するかについて、CA 図を用い分析によって調査し、以下の事項を明らかにした。

- 等価光幕輝度に関する既往研究より減能グレアを考慮した視認閾値 C 値を推定する場合、一部の範囲のみ適用できることを確認した。
- グレア光源による視認閾値 C 値の増加量(ΔC)に着目し、CA 図上でより直接的に扱うことが可能で、既往研究の等価光幕輝度の推定式を用いる場合よりも推定精度の高い、減能グレアの影響を考慮した視認閾値推定式を新たに構築した。

第 2 章参考文献

- 1) 日本工業規格：視力検査装置, JIS T 7309, 2002
- 2) 中村芳樹：光環境における輝度の対比の定量的検討法, 照明学会誌, 第 84 巻, 第 8A 号, pp.522-528, 2000.8
- 3) 秋月有紀, 井上容子：明視性評価における年齢の取り扱い及び相対視力の適用範囲に関する検討, 日本建築学会計画系論文集, 第 67 巻, 第 562 号, pp.15-21, 2002.12
- 4) O.M. Blackwell and H.R. Blackwell : Visual Performance Data for 156 Normal Observers of Various Ages, Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol.1, No.1, 1971.10
- 5) CIE : An Analytic Model for Describing the Influence of lighting parameters upon visual performance, CIE Publication 19/2.1, 1981.10
- 6) 原直也, 佐藤隆二：文章の読みやすさについての多様な設計水準に対応する明視三要素条件を示す「等読みやすさ曲面」, 日本建築学会環境系論文集, 第 69 巻, 第 575 号, pp.15-20, 2004.1
- 7) 佐藤隆二, 伊藤克三, 大野治代：見やすさに基づく明視照明設計に関する研究-照明の評価指標としての見やすさレベル(VEL)の有用性-, 照明学会誌, 第 64 巻, 第 10 号, pp.541-548, 1980.10
- 8) 奥田紫乃, 佐藤隆二, 山中俊夫：レースカーテンを通した人の顔の見え易さとそれに対応する明視要素についての検討, 日本建築学会計画系論文集, 第 66 巻, 第 542 号, pp.29-34, 2001.4
- 9) 岩井彌, 岡嶋克典：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, 第 88 巻, 第 11 号, pp.874-881, 2004.10
- 10) Peter R. Boyce: Human Factors in Lighting 3rd Edition, CRC Press, pp.129-131, 2014.4
- 11) 照明学会：道路照明のビジビリティレベルに関する研究調査委員会報告書, JIER-072, 2002.3
- 12) 田淵義彦：CRT ディスプレイの表示文字の好ましい輝度比のビジビリティレベル, 照明学会誌, 第 81 巻, 第 8A 号, pp.700-702, 1997.8
- 13) Wesley E. Woodson: Human Engineering Guide for Equipment Designers, University of California Press, 1954
- 14) 加藤洋子, 明石行生, 菅野普：窓面のグレアが鉛直面のコンピュータ作業の視作業性に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 727 号, pp.757-764, 2016.9
- 15) L. L. Holladay: The Fundamentals of Glare and Visibility, Journal of the Optical Society of America, Vol. 12, No.4, pp. 271-319, 1926
- 16) L. L. Holladay: Action of a Light-source in the Field of View in Lowering Visibility, Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments, Vol.14, No.1, pp.1-15, 1927
- 17) W. S. Stiles, B. H. Crawford: The Effect of a Glaring Light Source on Extrafoveal Vision, Proceedings of the Royal Society, Vol. 122B, pp.255-280, 1937
- 18) Commission Internationale de l'Eclairage: CIE Equations for Disability Glare, 146 : CIE TC 1-50 report, 2002
- 19) B. H. Crawford: The Integration of the Glare Effects from a Number of Glare Sources, Proceedings of the Physical Society, Vol. 48, No.1, pp.35-37, 1935

- 20) 中根芳一, 伊藤克三: 中心窩における光幕光量に関する研究 II: 高輝度光源が視認閾値に及ぼす影響に基づく検討, 日本建築学会論文報告集, 第 285 号, pp.109-115, 1979.11

第3章 輝度画像を用いた視認性推定法の 弱視者への適用法の検討

3.1. 本章の目的

前章では、実空間のように視対象や背景が複雑な輝度分布をもつ場合で視認性推定を行うことを想定し、輝度コントラスト評価関(以下、CA 関)を用いて、視認閾値や見やすさの程度の推定法について検討した。この手法を弱視者の視認性推定に用いることを目標に、まずは晴眼者を対象に視認性の検討を行ってきた。本章では、前章で構築した輝度画像を用いた視認性推定法の弱視者への適用法について検討する。

また前章では、均一背景を用いて検討してきたため、背景が複雑な輝度分布をもつ場合については確認していない。従って本章では、均一背景および不均一背景上に提示される円形視標について、見やすさ評価実験を行い、CA 関を用いて実験結果を分析し、背景の輝度分布が視認性に及ぼす影響についても調査する。

はじめに、弱視者を対象に検討する前段として、視力の低い晴眼者(以下、低視力晴眼者)を対象に、前章で構築した視認性推定法が適用できるかを検討する。そして、様々な疾病や障害等級をもつ弱視者を対象に同様の検討を行う。前章第 2 節の視認閾値推定式との関係や、低視力晴眼者との差異について検討する。

3.2. 低視力晴眼者を対象とした円形視標の見やすさ推定に関する検討

3.2.1. 本節の目的

本節では、前章第 3 節と同様に弱視者を対象とした調査を行なう前段として、低視力晴眼者を対象とし、2 種類の実験を通じて検討する。実験 3-A では、本節で被験者とする低視力晴眼者が前章と同様の傾向を示しているかを均一背景の実験により確認する。実験 3-B では、輝度分布の操作が比較的容易である市松模様を背景に用いて、不均一背景の実験を行ない、背景の輝度分布が視認性に及ぼす影響について調査する。低視力晴眼者を対象とする意義として、後に行なう弱視者用の実験条件の検討や実験結果の比較の目的もあるが、災害時に眼鏡等の視力矯正器具を持ち出すことができなかつた場合や、眼鏡の予備がない時に眼鏡を破損してしまった場合等の緊急時を想定すると、低視力晴眼者の視認性も検討しておくことは有効といえる。

3.2.2. 均一背景における見やすさ評価 [実験 3-A]

3.2.2.1. 実験概要

まず、実験 3-A では低視力晴眼者を対象に、均一背景および円形視標を用いた実験を行ない、前章の晴眼者と同様の傾向であるかを確認する。本研究では、裸眼では近視等の屈折異常の症状があり、眼鏡で矯正することで日常生活に支障の無い者を低視力晴眼者と定義する。実験結果は、CA 図を用いて分析する。

前章の実験と同様の暗幕で囲われた実験室(図 3.1)において、実験を行った。被験者から 2500[mm]離れた位置に設置した 27 インチの PC モニタ(EIZO Color Edge CG277, 2560×1440[px])に CIE 標準光源 D65 に相当する色度(色彩輝度計による CIE1931xy 色度座標測定値は、 $x=0.319$, $y=0.325$)の均一背景および円形視標を提示し(図 3.2)、両眼で観察させて見やすさの程度を評価させた。

見やすさの評価尺度は、第 2 章第 3 節の評価尺度(第 2 章図 2.14 参照)に合わせ 5 段階とするが、後に市松模様の不均一背景でも実験を行い、実験結果を比較することを想定し、〈0.見えない 1.かろうじて何かの存在が分かる 2.円に見えにくいが存在が分かる 3.だいたい円に見える 4.くっきり円が見える〉とし、第 2 章第 3 節の評価尺度(第 2 章図 2.14 参照)より具体的な表現を用いることとした(図 3.3)。

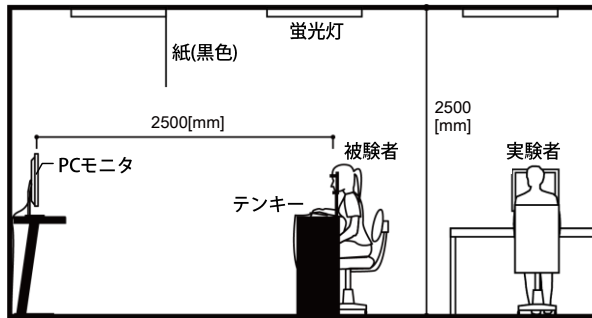


図 3.1 実験室概要

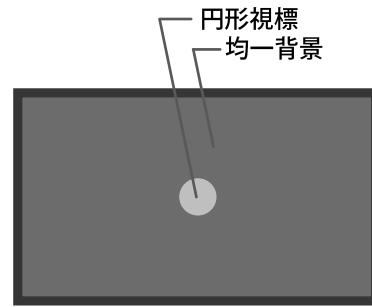


図 3.2 PC モニタ上の提示刺激の様子

—	4. くっきり円が見える
—	3. だいたい円に見える
—	2. 円に見えにくいが存在が分かる
—	1. かるうじて何かの存在が分かる
—	0. 見えない

図 3.3 評価尺度

表 3.1 に実験条件を示す。PC モニタの 8bit(256 階調)の RGB 階調値に基づいて背景および視標の輝度を調光した。背景の輝度は、5, 10, 20, 40 [cd/m²](常用対数で 0.70, 1.00, 1.30, 1.60)の 4 条件とした。背景輝度 5, 10[cd/m²]の際は天井に設置された蛍光灯を消灯し、背景輝度 20, 40 [cd/m²]の際は、PC モニタがまぶしく見えるのを防ぐため蛍光灯を点灯した。PC モニタ周辺部は、蛍光灯消灯時は概ね 0[cd/m²]、点灯時は 0.5~10[cd/m²]程度の輝度が分布する。C 値は-0.930~0.852 の最大 17 条件(背景輝度 40 [cd/m²]の際は-0.930~0.620 の 15 条件)とする。C 値、A 値は、前章と同様に式(3.1), (3.2)によって算出する。円形視標の直径サイズは、5~120[mm]の 8 条件とし、同一背景輝度ごとに円形視標サイズおよび円形視標の輝度 (C 値)をランダムに変化させ提示した。1 つの条件を評価すると同時に円形視標が消え、次の円形視標が提示されるまでの 1.0 秒間は均一背景のみが提示される。被験者はテンキーを用いて見やすさの程度を回答する。

被験者は 14 名とし、全員が裸眼で実験に参加した。観察距離 2500[mm]でランドルト環を用いて測定した視力値を表 3.2 に示す。視力測定は、JIS T 7309:2002¹⁾に準拠し、背景の輝度を 200[cd/m²]、ランドルト環の輝度を 10[cd/m²]程度とし、5 個のうち 3 個以上正答するかを判定基準として行なった。視力値は、視認可能な最小切れ目幅の視角[mm]を逆数で表現したものである¹⁾。今回の視力測定に使用したランドルト環のサイズは、視力値 0.020 から 0.100 の間で 0.005 刻み、0.100 から 0.350 の間で 0.025 刻み、0.35 から 0.60 の間で 0.05 刻みであった。被験者 14 名の両眼視力は 0.055 から 0.275 の間に分布し、平均値は 0.149, 中央値

は 0.125 であった(表 3.2)。前章第 2 節で検討した低視力晴眼者の Group2(両眼視力中央値 0.25)および Group 3(両眼視力中央値 0.1)程度の視力に相当する。

表 3.1 実験 3-A 実験条件

	独立変数	条件数
対数背景輝度 (\log_{10} (背景輝度[cd/m^2]))	0.70, 1.00, 1.30, 1.60	4
C 値(目標値)	-0.930(-0.852), -0.775, -0.620, -0.465, -0.310, -0.232, -0.155, -0.077, 0.000, 0.077, 0.155, 0.232, 0.310, 0.465, 0.620, 0.775, 0.852	最大 17
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]	120, 90, 60, 45, 30, 20, 10, 5	8

$$C = 0.775 * \log_{10}(L_t) - 0.775 * \log_{10}(L_b) \quad \dots (3.1)$$

$$A = 0.087 * \log_{10}(L_t) + 0.913 * \log_{10}(L_b) \quad \dots (3.2)$$

C : 輝度コントラスト

A : 対数輝度平均

L_t : 円形視標の輝度 [cd/m^2]

L_b : 背景の輝度 [cd/m^2]

表 3.2 実験 3-A 被験者リスト

被験者 No.	性別	年齢	矯正	両眼視力 (観察距離: 2500 [mm])
1	女	21	裸眼	0.080
2	男	20	裸眼	0.250
3	男	21	裸眼	0.090
4	女	22	裸眼	0.225
5	男	22	裸眼	0.060
6	女	21	裸眼	0.100
7	女	21	裸眼	0.175
8	女	22	裸眼	0.275
9	女	20	裸眼	0.055
10	男	22	裸眼	0.250
11	女	22	裸眼	0.150
12	女	21	裸眼	0.095
13	男	21	裸眼	0.100
14	男	22	裸眼	0.175
平均値				0.149
中央値				0.125

3.2.2.2. 実験結果

式(3.1),(3.2)より，実験条件の C 値，A 値を算出し，円形視標サイズごとに CA 図を作成した。

前章では，被験者の半数が視認可能かを判定基準として評価結果を示した。本節においても，被験者の半数で評価が得られたかを判定基準とし，被験者 14 名中 7 名以上が評価 4 と回答した条件を○，7 名以上が評価 3 以上と回答した条件を●，7 名以上が評価 2 以上と回答した条件を▲，7 名以上が評価 1 以上と回答した条件を■，8 名以上が評価 0 と回答した条件を×として結果を表現することとした(図 3.4)。

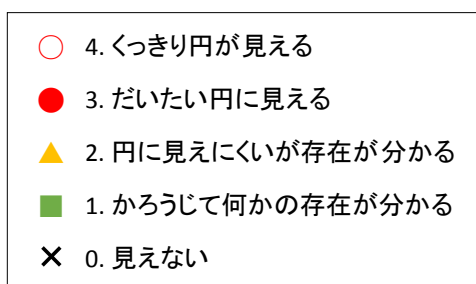


図 3.4 評価尺度

図 3.5 に円形視標サイズ 90, 60, 30, 20[min]における評価結果 CA 図を示す。また，評価のばらつきの程度を示すため，「1. かろうじて何かの存在が分かる」以上の評価人数，つまり視認可能である人数を図 3.5 の各プロットの右側に示す。図 3.5 より，円形視標サイズが大きくなるほど，C 値，A 値が大きくなるほど，視認可能となる人数が増加し，見やすさも向上していることが確認できる。また，円形視標サイズが小さくなるほど，正対比(C 値が正，背景輝度に対して円形視標の輝度が高い)に比べ逆対比(C 値が負，背景輝度に対して円形視標の輝度が低い)は検知されにくいことがわかる。円形視標サイズ 120, 45, 10, 5[min]における評価結果でも同様の傾向が確認できた。

また，前章第 2 節で両眼視力中央値 1.35, 1.70 の比較的高い視力の晴眼者の結果を用いて構築した視認閾値曲線を，図 3.5 に実線で示す。視認閾値曲線は，視認閾値 C 値(C_{th})を目的変数，A 値，視力値，視対象サイズを説明変数とする関数であり，視力値は本実験の被験者 14 名の両眼視力中央値の 0.125 を用いた。図 3.5 より，視認閾値曲線が概ね評価 0, 1 の境界もしくはやや外側(C 値の絶対値が高い側)に位置していることがわかる。前章第 3 節の低視力晴眼者の評価結果でも，視力値をやや高くすることで視認閾値曲線と実験結果の C_{th} がより適合することが示されたのと同様に，今回の評価結果からも，被験者の視力中央値を用いると C_{th} の絶対値がやや高い側に推定されることが示された。さらに前章第 3 節同様に，評価 0, 1 の閾値を C_{th} ，評価 1, 2 の閾値を C_{th1-2} ，評価 2, 3 の閾値を C_{th2-3} として，円形視標サイズ，背景輝度(A 値)ごとに閾値比 R_{1-2} ， $R_{2-3}(C_{th1-2}/C_{th}, C_{th2-3}/C_{th})$ を算出し，前章第 3 節の低視力晴眼者 Group2, 3 の閾値比 R_{1-2} ， R_{2-3} と比較したところ，特に R_{1-2} では，

正対比・逆対比とも前章第3節の低視力晴眼者 Group2, 3 よりも値が低くなっていた。要因として、本実験で用いた評価尺度(図 3.3)が前章第3節で用いた評価尺度(図 2.14)と異なっていること、また、被験者の違いや主観的な評価が含まれていることが挙げられる。

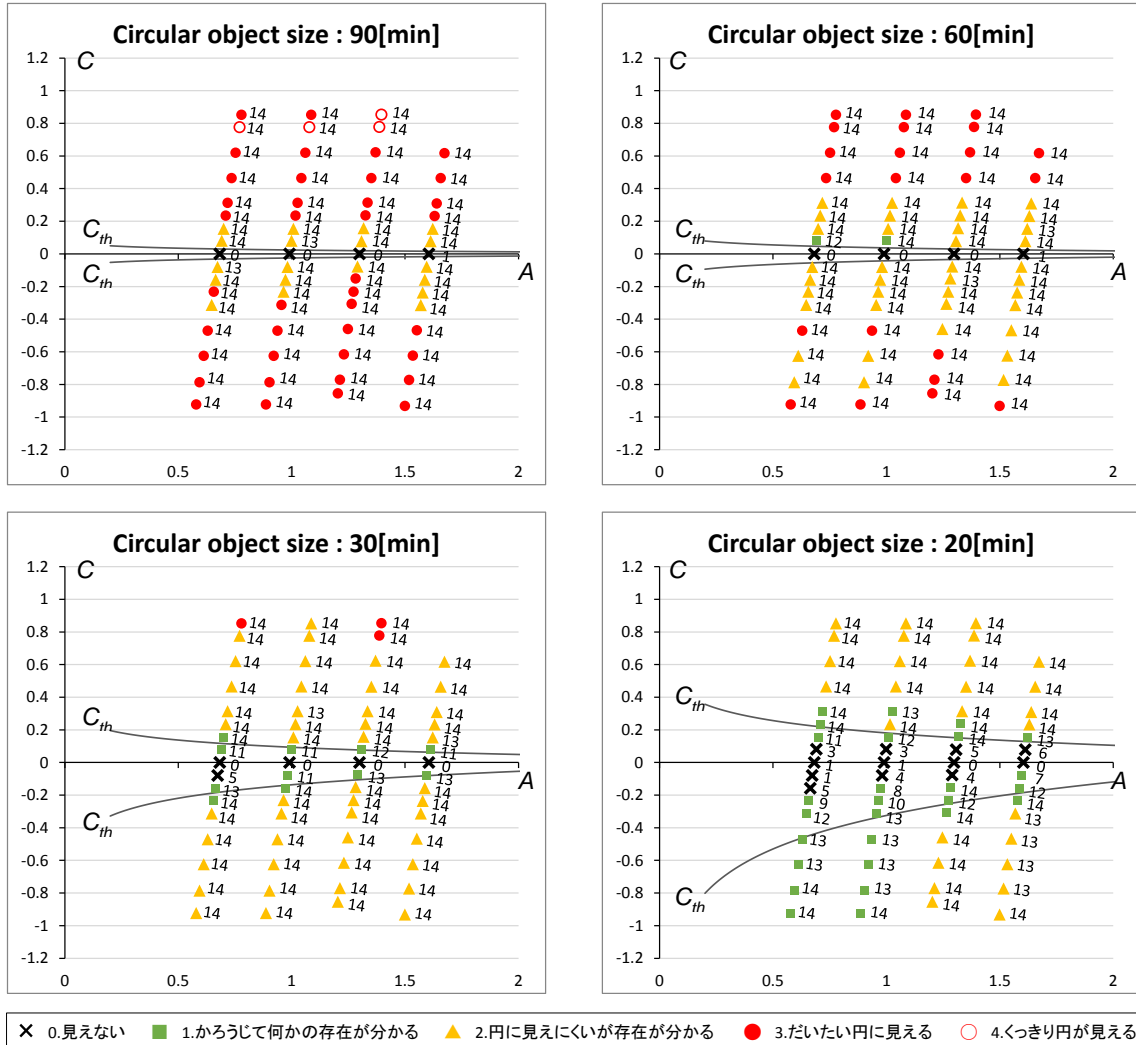


図 3.5 実験 3-A 評価結果 CA 図(円形視標サイズ 90, 60, 30, 20[min])

3.2.3. 不均一背景における見やすさ評価 [実験 3-B]

3.2.3.1. 実験概要

実験 3-B では、背景が輝度分布を有する場合(不均一背景)について検討する。不均一背景の実験を行なうにあたり、輝度分布(輝度コントラストやサイズ, 平均輝度等)の操作が比較的容易である市松模様を背景に用いて検討を行なった(図 3.6)。実験空間および評価尺度は実験 3-A と同様とし(図 3.3), 被験者についても実験 3-A と同じ低視力晴眼者(表 3.2)を対象とした。

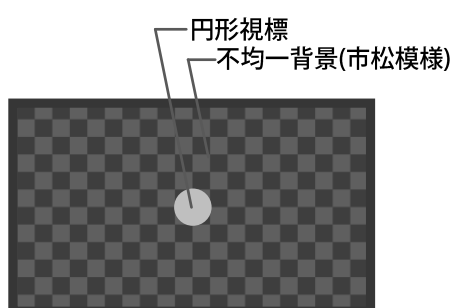


図 3.6 PC モニタ上の提示刺激の様子(実験 3-B)

背景の市松模様は、格子の対数平均輝度, 格子の輝度コントラスト(市松模様の高い方の輝度と低い方の輝度の比), 格子のサイズを変化させて作成した(図 3.7)。表 3.3 に実験条件を示す。背景の輝度を実験 3-A の条件と同等にするため, 市松模様の常用対数平均が 0.70, 1.00, 1.30, 1.60 の 4 条件となるようにした。市松模様の格子の輝度コントラストは \log_{10} (市松模様の高い方の輝度/低い方の輝度)=0.10, 0.40, 0.80 の 3 条件, 格子サイズは 10, 20, 40, 80[μm] の 4 条件とした。円形視標サイズを 90[μm], 30[μm]とした場合を例として, 市松模様の格子の輝度コントラストおよび格子サイズを変化させた提示刺激の様子を図 3.8, 図 3.9 に示す。また, 実験 3-A に倣い, C 値の範囲は-0.930~0.852 の最大 17 条件, 円形視標の直径サイズは 10~120[μm]の 5 条件とした。実験 3-A と同様に, 同一背景ごとに円形視標サイズおよび円形視標の輝度(C 値)をランダムに変化させ提示し, 実験を行なった。1つの条件を評価すると同時に円形視標が消え, 次の円形視標が提示されるまでの 1.0 秒間は市松模様の背景が提示される。

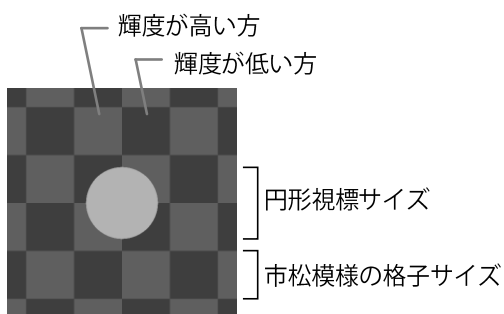


図 3.7 背景(市松模様)の条件

表 3.3 実験 3-B 実験条件

	独立変数	条件数
背景の対数輝度平均 ($\log_{10}(\text{高い方の輝度}) + \log_{10}(\text{低い方の輝度}) / 2$)	0.70, 1.00, 1.30, 1.60	4
市松模様のコントラスト ※ $\log_{10}(\text{高い方の輝度} / \text{低い方の輝度})$	0.10, 0.40, 0.80	3
市松模様の格子サイズ	10, 20, 40, 80	4
C 値(目標値)	-0.930(-0.852), -0.775, -0.620, -0.465, -0.310, -0.232, -0.155, -0.077, 0.000, 0.077, 0.155, 0.232, 0.310, 0.465, 0.620, 0.775, 0.852	最大 17
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]	120, 90, 60, 30, 10	5

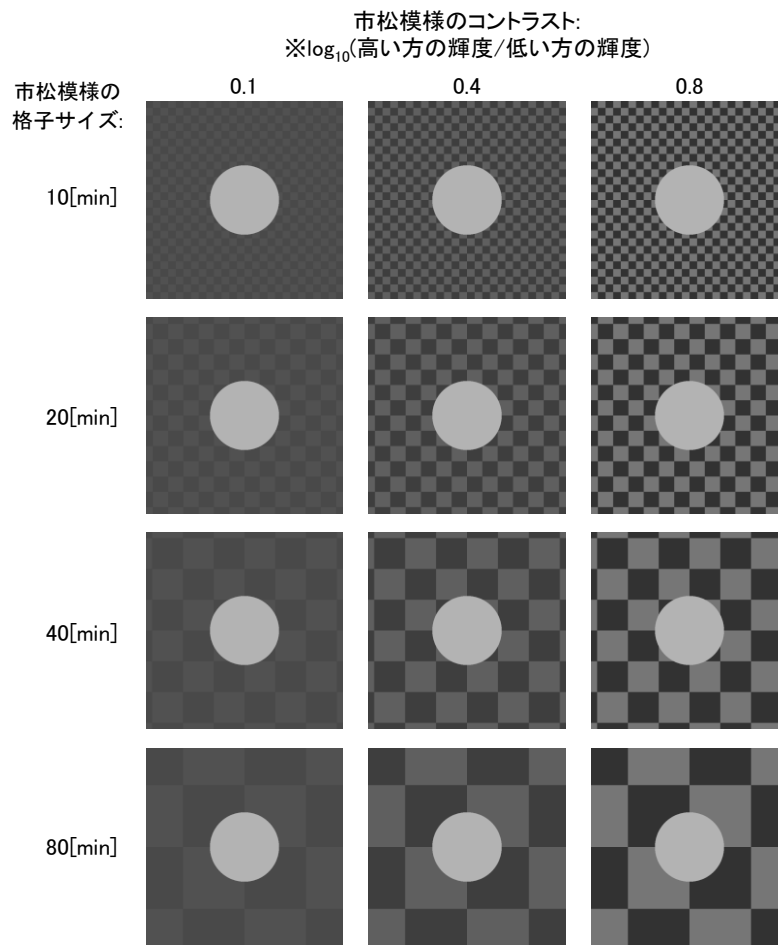


図 3.8 提示刺激の例(円形視標サイズ : 90[μm])

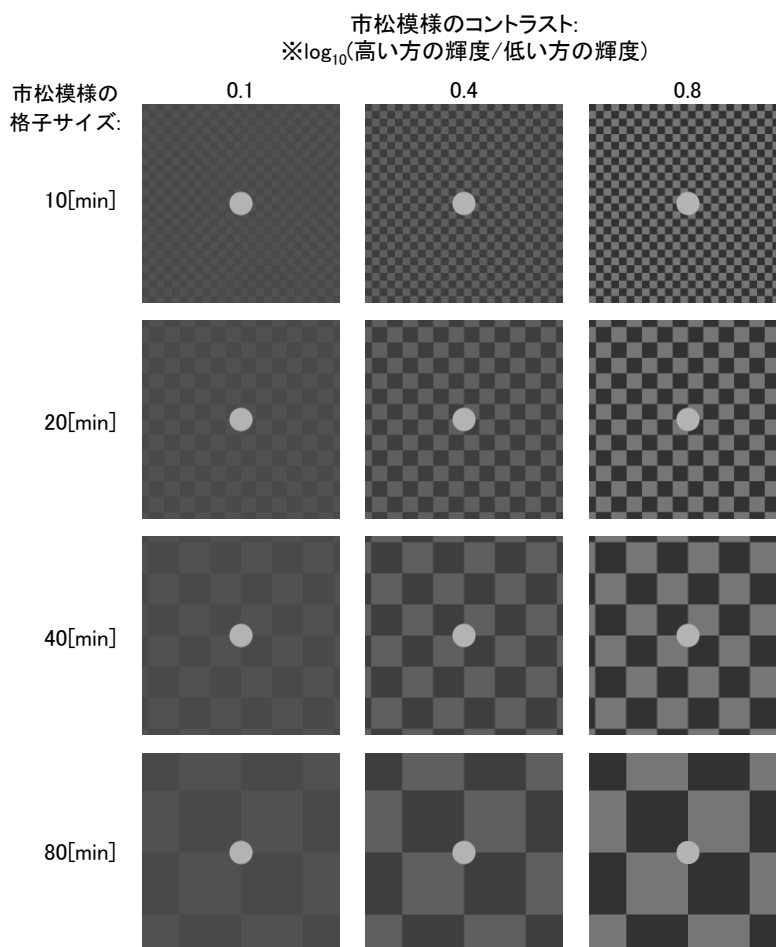


図 3.9 提示刺激の例(円形視標サイズ : 30[μm])

背景の市松模様は、円形視標の中心点を基点に市松模様の輝度が高い方の領域と低い方の領域の面積比が 1 : 1 となるよう配置している(図 3.8, 図 3.9 参照). そのため, 式(3.1), (3.2)の対数背景輝度を, 市松の高い方の輝度と低い方の輝度の対数平均に置き換えることができ, 式(3.3), (3.4)によって簡易的に C 値, A 値を求めることができる.

$$C = 0.775 \times \log_{10}(L_t) - 0.775 \times \frac{\log_{10}(L_{bh}) + \log_{10}(L_{bl})}{2} \quad \dots \quad (3.3)$$

$$A = 0.087 \times \log_{10}(L_t) + 0.913 \times \frac{\log_{10}(L_{bh}) + \log_{10}(L_{bl})}{2} \quad \dots \quad (3.4)$$

C : 輝度コントラスト

A : 対数輝度平均

L_t : 円形視標の輝度 [cd/m^2]

L_{bh} : 市松模様の高い方の輝度 [cd/m^2]

L_{bl} : 市松模様の低い方の輝度 [cd/m^2]

3.2.3.2. 実験結果

式(3.3), (3.4)より, 実験条件の C 値, A 値を算出し, 円形視標サイズ, 市松模様の格子の輝度コントラスト, 格子サイズの条件ごとに評価結果の CA 図を作成した. 前節の実験 3-A と同様に, 被験者 14 名中 7 名以上で評価が得られたかを判定基準とした. 図 3.10 に, 円形視標サイズ 90[mm]の場合を例として, 市松模様の格子の輝度コントラスト 0.10, 0.40, 0.80, 格子サイズ 10, 20, 40, 80[mm]の条件について, それぞれ評価結果 CA 図を示す.

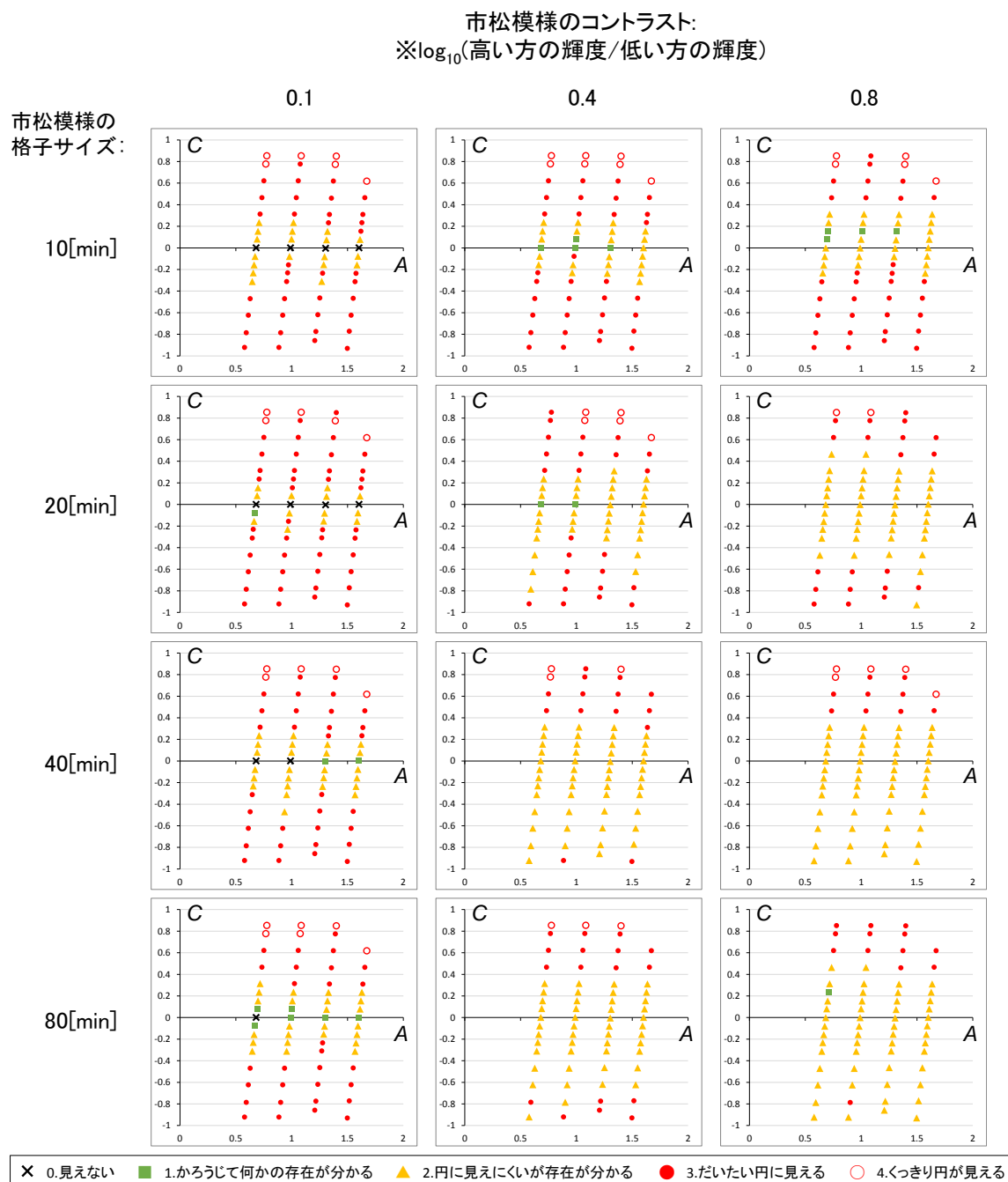


図 3.10 実験 3-B 評価結果 CA 図(円形視標サイズ : 90[mm])

図 3.10 より市松模様の格子の輝度コントラストが低く、格子サイズが小さいほど、図 3.5 の均一背景の円形視標サイズ 90[**min**]の結果と近いことがわかる。格子の輝度コントラストが小さく、格子サイズが小さいほど、市松模様を視認しづらくなり均一背景のように見えるためと推察される。また、格子の輝度コントラストが大きく、格子サイズが大きいほど、 $C=0$ 付近の条件について「0. 見えない」の評価が減少している。市松模様が視認しやすくなり、背景と円形視標が重なる部分に市松模様が見られないために、円形視標が存在していることがわかる可能性もあると考えられる。それに対し、格子の輝度コントラストが大きく、格子サイズが大きいほど、「2. 円に見えにくいが存在が分かる」以下の評価が占める範囲が広くなり、視標が提示されていることは認識できるものの円形の形状が正しく認識できていないこともわかる。一部の被験者より、円形視標と市松模様が繋がり、円形ではなく、楕円形、土星、亀等といった他の図形に見えることがあると報告された。すなわち、背景の様子が認識しやすくなるほど、視対象の形状がわかりにくくなる可能性があることが示唆された。

また、円形視標サイズ 120, 90, 60, 30, 10[**min**]の場合の評価結果の比較より、円形視標サイズが小さくなるほど、「0. 見えない」と評価される条件が増えることを確認した。図 3.11 に円形視標サイズ 30[**min**]における評価結果 CA 図を示す。図 3.10 の円形視標サイズ 90[**min**]の評価結果と比べ、全体的に「0. 見えない」と評価される条件が増え、視認性が低下していることが確認できる。また、図 3.10 の円形視標サイズ 90[**min**]の場合では、市松模様の格子の輝度コントラストが大きく、格子サイズが大きいほど、 $C=0$ 付近の条件について「0.見えない」の評価が減っていたが、図 3.11 の円形視標サイズ 30[**min**]の場合では、格子の輝度コントラストが増加するほど「0. 見えない」や「1. かるうじて何かの存在が分かる」の評価が増え、視認性が低下することがわかる。また、円形視標サイズ 30[**min**]の場合、均一背景(図 3.5)や市松模様の格子の輝度コントラスト 0.10 の場合では $C=0$ 付近に「0.見えない」の評価が存在しているのに対し、格子の輝度コントラストが 0.40, 0.80 へ増加するにつれ、いずれの格子サイズでも、「0. 見えない」の評価が正対比($C>0$)側に移っていることがわかる(図 3.11)。格子の輝度コントラスト 0.80 においては、 $C=0$ から正対比側へ 2 つ目の条件($C=0.155$)の付近で、「0. 見えない」と評価されやすいことが分かる。今回の実験条件では、円形視標サイズ 30[**min**] の場合にこの現象が顕著に見られたが、円形視標サイズ 120[**min**]で市松模様の格子サイズ 10[**min**]の場合や、円形視標サイズ 90[**min**](図 3.10)で市松模様の格子サイズ 10[**min**]の場合、円形視標サイズ 60[**min**]で市松模様の格子サイズ 10, 20, 40, 80[**min**]の場合等でも、市松模様の格子の輝度コントラスト 0.80 では、 $C=0$ から正対比側へ 2 つ目の条件($C=0.155$)の付近で「1.かるうじて何かの存在が分かる」の評価となり、同一背景の中で最も視認性が低下していることが確認できた。そのため、円形視標サイズ 30[**min**]だけではなく、他のサイズでも起こる現象と考えられる。この $C=0.155$ の円形視標の輝度は、市松模様の対数をとらない平均輝度と近いことがわかった。これまで、輝度コントラスト(輝度比)を算出するため、対数輝度画像(logarithmic luminance image)を N フィルタの畳み込み計算することによって算出される値を C 値と定義し、検討を行な

ってきた。しかし上記のことにより、対数をとらない輝度画像<raw luminance image>から求められる輝度差に相当する値を用いた方が、今回の実験結果の現象をより説明できる可能性がある。

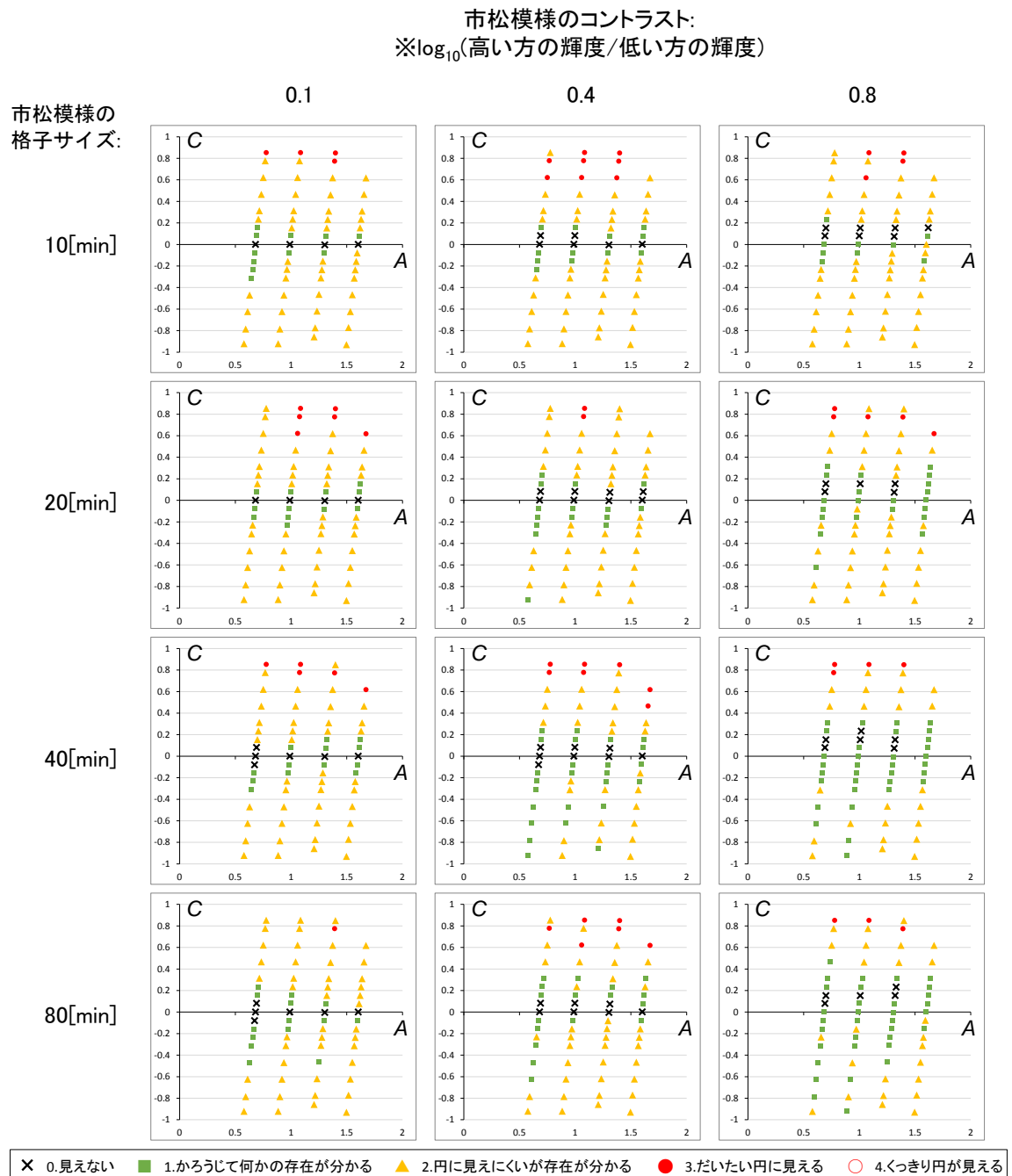


図 3.11 実験 3-B 評価結果 CA 図(円形視標サイズ : 30[min])

対数をとらない輝度画像より C 値, A 値を算出することを想定した場合, C 値, A 値の算出式は式(3.5),(3.6)となる. 図 3.11 で示した円形視標サイズ 30[*min*]の場合の評価結果について, 式(3.5),(3.6)から算出する C 値, A 値(C_{raw} , A_{raw} とする)より作成した CA 図を図 3.12 に示す. 図 3.12 より, $C_{raw} \approx 0$ 付近に「0. 見えない」の評価が分布していることが確認できる. また図 3.13 に, 式(3.3)から算出する C 値(C)と式(3.5)から算出する C 値(C_{raw})の比較例を示す. $C = 0.000$ の条件の C_{raw} よりも, $C = 0.153$ の条件($C \approx 0.155$)の C_{raw} の方が絶対値が小さくなっている.

$$C_{raw} = 0.775 \times L_t - 0.775 \times \frac{L_{bh} + L_{bl}}{2} \quad \dots \quad (3.5)$$

$$A_{raw} = 0.087 \times L_t + 0.913 \times \frac{L_{bh} + L_{bl}}{2} \quad \dots \quad (3.6)$$

C_{raw} : 輝度差

A_{raw} : 輝度平均

L_t : 円形視標の輝度 [*cd/m*²]

L_{bh} : 市松模様の高い方の輝度 [*cd/m*²]

L_{bl} : 市松模様の低い方の輝度 [*cd/m*²]

前章では均一背景を用いて検討を行ってきたが, 本実験のように背景に輝度分布がある不均一背景の場合, 対数をとらない輝度画像から C 値, A 値を算出し, 輝度差によって視認性推定すべきである可能性が示唆された. なお, 円形視標 10[*min*]の場合では, 「0. 見えない」の評価が占める C 値の範囲が広く逆対比側にも及んでいたため, 市松模様の格子の輝度コントラスト 0.80 の際に, $C \approx 0$ から正対比側へ 2 つ目の条件($C \approx 0.155$)の付近で最も視認性が低下するかを確認するには至らなかった. 他の視力や視対象(円形視標)サイズ, 通常視力晴眼者や弱視者においても, この現象が見られるかを確認すべきである.

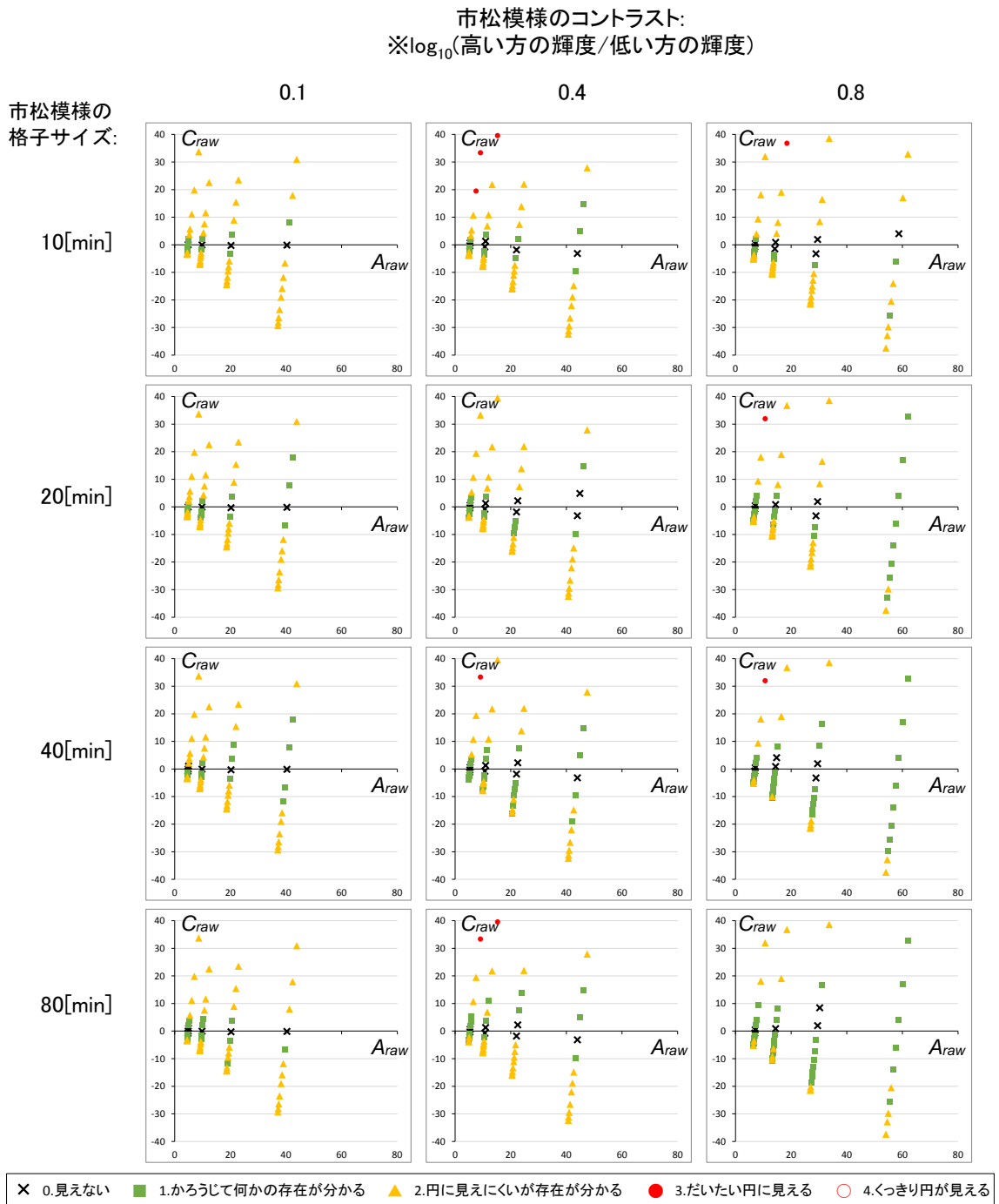


図 3.12 実験 3-B 評価結果 *Craw*-*Araw* 図(円形視標サイズ : 30[*min*])

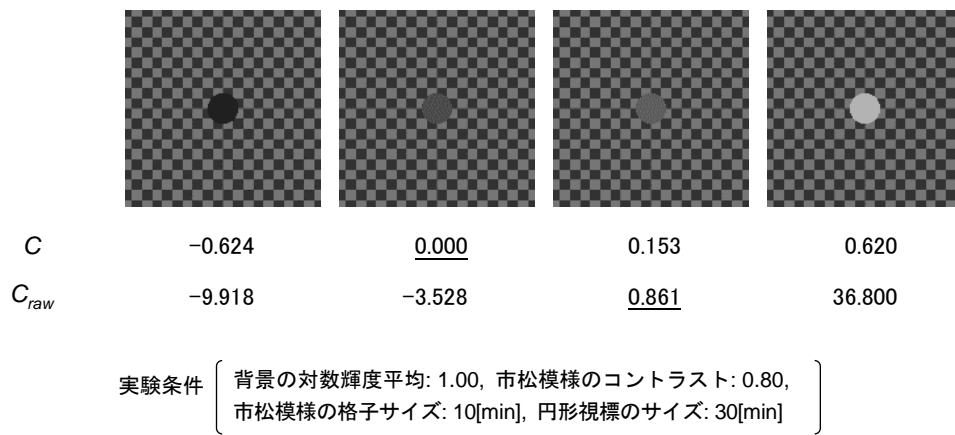


図 3.13 C 値と C_{raw} 値の比較

3.3. 弱視者を対象とした円形視標の見やすさ推定に関する検討

3.3.1. 本節の目的

弱視者や高齢者の視認性に関する研究や調査は数多く行なわれているが²⁻¹⁰⁾、それらの成果を実空間の視認性推定に適用するまでは至っていない。本節では、前節で低視力晴眼者を対象に行なった検討を、様々な疾病や障害等級をもつ弱視者を対象に検討する。前節と同様に、均一背景、市松模様を背景を用いることとし、実験結果は CA 図を用いて分析する。疾病や視野障害の程度による実験結果の特徴を確認し、前章第 2 節で構築した視認閾値推定式との関係や、前節の低視力晴眼者を対象とした場合との差異について検討する。

3.3.2. 均一背景における見やすさ評価 [実験 3-C]

3.3.2.1. 実験概要

実験 3-C では、弱視者を対象に、低視力晴眼者を対象とした実験 3-A と同様の均一背景および円形視標を用いた見やすさ評価実験を行ない、前章第 2 節で構築した視認閾値曲線や前節の評価結果との差異を調査する。本研究では、視覚障害があり身体障害者手帳を持つ者を弱視者と定義する。

実験は、前節(実験 3-A, 実験 3-B)と同一の暗幕で囲われた実験室および実験装置を用いて行った(図 3.14)。被験者から 2500[mm](一部被験者においては 625[mm])離れた位置に設置した 27 インチの PC モニタ(EIZO Color Edge CG277)に、CIE 標準光源 D65 に相当する色度(色彩輝度計による CIE1931xy 色度座標測定値は、 $x=0.319$, $y=0.325$)の均一背景および円形視標を提示し(図 3.15)、両眼で観察させて見やすさの程度を評価させた。評価尺度は前節と同様に、〈0.見えない 1.かろうじて何かの存在が分かる 2.円に見えにくいが存在が分かる 3.だいたい円に見える 4.くっきり円が見える〉の 5 段階とした(図 3.16)。前節の低視力晴眼者の場合はテンキーを用いて評価を回答したが、弱視者はテンキーを用いて回答することが困難であると考え、口頭で評価を回答することとした。

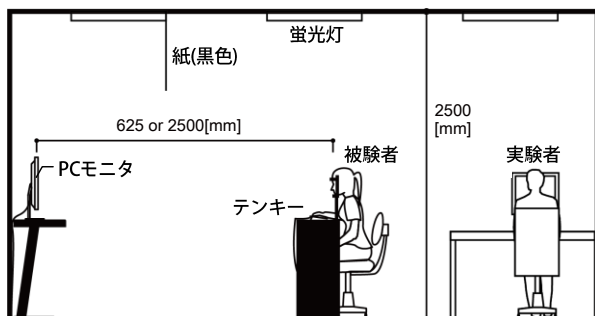


図 3.14 実験室概要

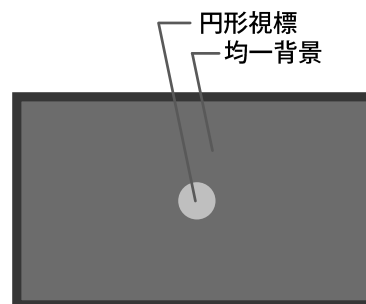


図 3.15 PC モニタ上の提示刺激の様子

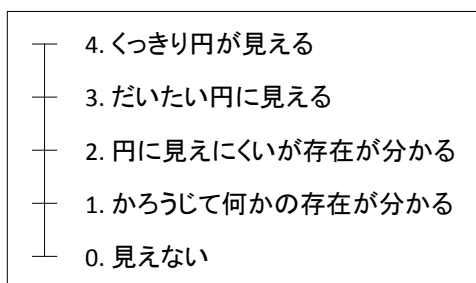


図 3.16 評価尺度

表 3.4 に実験条件を示す。背景および視標の輝度は、PC モニタの 8bit(256 階調)の RGB 階調値に基づいて調光した。本実験は口頭で評価を回答するため、前節の低視力晴眼者を対象とした実験(実験 3-A)より所要時間が増加すると想定される。そのため、背景輝度は、前節の低視力晴眼者の場合は 5, 10, 20, 40[cd/m²]の 4 条件としたが、本実験では 5[cd/m²]の条件を除外し、10, 20, 40[cd/m²]の 3 条件(常用対数で 1.00, 1.30, 1.60)とした。実験 3-A と同様に、背景輝度 10[cd/m²]の際は天井に設置された蛍光灯を消灯し、背景輝度 20, 40 [cd/m²]の際は、PC モニタがまぶしく見えるのを防ぐため蛍光灯を点灯した。PC モニタ周辺部は、蛍光灯消灯時は概ね 0[cd/m²]、点灯時は 0.5~10[cd/m²]程度の輝度が分布する。C 値の範囲は-0.930~0.852 の最大 17 条件(背景輝度 40[cd/m²]の際は-0.930~0.620 の 15 条件)とした。C 値、A 値は、これまでと同様に式(3.1), (3.2)によって算出する。円形視標の直径サイズは、5~120[mm]の 8 条件とし、同一背景輝度ごとに円形視標サイズおよび円形視標の輝度 (C 値)をランダムに変化させ提示した。1つの条件を評価の回答が終わると円形視標が消え、次の円形視標が提示されるまでの 1.0 秒間は均一背景のみが提示される。

表 3.4 実験 3-C 実験条件

	独立変数	条件数
対数背景輝度 (\log_{10} (背景輝度[cd/m ²]))	1.00, 1.30, 1.60	3
C 値(目標値)	-0.930(-0.852), -0.775, -0.620, -0.465, -0.310, -0.232, -0.155, -0.077, 0.000, 0.077, 0.155, 0.232, 0.310, 0.465, 0.620, 0.775, 0.852	最大 17
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]	120, 90, 60, 45, 30, 20, 10, 5	8

被験者は弱視者 27 名とした。被験者の性別、年齢、疾病、視野障害、色覚障害の有無、障害等級、発症時期、歩行時の補助具、左眼・右眼・両眼の視力(矯正器具の有の場合‘矯正’、視力 0.02 未満で測定不能の場合‘-’とする)の一覧を表 3.5 に示す。視力測定は、JIS T 7309:2002¹⁾ に準拠し、背景の輝度を 200[cd/m²]、ランドルト環の輝度を 10[cd/m²]程度とし、5 個のうち 3 個以上正答するかを判定基準として行なった。視力値は、視認可能な最小切れ目幅の視角[min]を逆数で表現したものであり¹⁾、視力測定に使用したランドルト環のサイズおよび間隔は、視力値 0.020 から 0.100 の間で 0.005 刻み、0.100 から 0.350 の間で 0.025 刻み、0.35 から 0.60 の間で 0.05 刻みとした。

また、被験者 No. 3, 4 は、観察距離 2500 [mm]で実験を開始したところ、視認できる円形視標が非常に少なかったため、観察距離を 625[mm]に変更して実験を実施した。

第3章 輝度画像を用いた視認性推定法の弱視者への適用法の検討

表 3.5 実験 3-C 被験者リスト

被験者 No.	性別	年齢	疾病	視野障害	色覚障害	障害 等級	発症 時期	歩行時の 補助具	視力 (観察距離: 2500mm)		
1	女	54	網膜色素変性症	周辺部	なし	2	35 歳	白杖, 遮光メガネ	矯正 -	矯正 0.125	矯正 0.125
2	男	34	白内障, 小眼球	上部	なし	4	先天性	なし	0.095	-	0.095
3	男	52	白内障, 眼球振盪症, 無虹彩症, 飛蚊症	なし	なし	2	先天性	白杖	-	-	-
4	女	23	黄斑変性症	中心部	なし	2	先天性	なし	-	-	-
5	男	72	網膜色素変性症	周辺部	なし	2	58 歳	白杖, ヘルパー	矯正 0.040	矯正 0.225	矯正 0.325
6	女	27	黄斑変性症	中心部	なし	5	17 歳	なし	0.045	0.050	0.060
7	男	44	黄斑ジストロフィー	中心部	なし	1	先天性	なし	-	0.020	0.025
8	女	60	網膜色素変性症	中心部	なし	2	47 歳	なし	-	0.0250	0.035
9	女	50	網膜色素変性症	中心部	あり	2	30 歳	白杖, ヘルパー	0.060	0.020	0.045
10	女	30	黄斑ジストロフィー	中心部	なし	5	24 歳	なし	0.070	0.080	0.080
11	女	20	白内障, 緑内障	なし	なし	3	先天性	白杖	矯正 0.045	矯正 -	矯正 0.055
12	男	22	白内障, 緑内障	なし	なし	4	先天性	白杖	矯正 0.150	矯正 0.02	矯正 0.200
13	女	66	網膜色素変性症	周辺部	あり	1	34 歳	白杖	0.070	-	0.085
14	女	48	網膜色素変性症	視野全体	あり	1	29 歳	白杖, ヘルパー	0.020	0.025	0.025
15	女	20	視神経脊髄炎	上部	あり	2	8 歳	白杖	-	-	-
16	男	57	網膜色素変性症	周辺部	あり	2	10 歳	白杖, ヘルパー	矯正 0.225	矯正 0.175	矯正 0.200
17	男	63	網膜色素変性症	複雑	あり	2	20 歳	白杖	0.090	0.150	0.250
18	女	45	網膜色素変性症	周辺部	あり	2	16 歳	白杖	0.045	0.085	0.095
19	男	71	網膜色素変性症	複雑	あり	2	40 歳	盲導犬	0.025	0.030	0.035
20	男	65	網膜色素変性症	周辺部	あり	5	35 歳	白杖 (たこまに使用)	矯正 0.300	矯正 0.125	矯正 0.325
21	男	62	網膜色素変性症	周辺部	あり	2	40 歳	白杖, ヘルパー	矯正 0.100	矯正 -	矯正 0.095
22	女	65	網膜色素変性症	中心部	あり	2	45 歳	なし	0.045	0.035	0.055
23	男	44	視神経系脊髄炎	複雑	あり	1	26 歳	白杖	0.020	0.045	0.055
24	男	64	白内障	なし	なし	5	不明	なし	0.080	0.065	0.150
25	女	64	網膜色素変性症, 両視野狭窄, 夜盲症	中心部	あり	2	42 歳	白杖, メガネ	0.045	0.025	0.055
26	男	68	網膜色素変性症	なし	なし	2	先天性	なし	矯正 -	矯正 0.070	矯正 0.075
27	男	31	第一次硝子体過形成遺残, 白内障, 緑内障	周辺部	なし	3	先天性	なし	0.035	-	0.035

3.3.2.2. 実験結果

前節の低視力晴眼者の実験(実験 3-A, 実験 3-B)では, 被験者の 14 人中の半数で評価が得られたかを判定基準として実験結果を示した. しかし, 弱視者は疾病の症状や視野障害の程度によって個人差が大きく生じると考えられるため, 本節では被験者 1 名ずつ実験結果を示すこととする. 式(3.1), (3.2)によって C 値, A 値を算出し, 評価 4 と回答した条件を○, 評価 3 と回答した条件を●, 評価 2 と回答した条件を▲, 評価 1 と回答した条件を■, 評価 0 と回答した条件を×として(図 3.4), 円形視標サイズごとに CA 図を作成した.

図 3.17 に被験者 No. 2(白内障および小眼球, 両眼視力 0.095), 図 3.18 に被験者 No. 9(網膜色素変性症, 両眼視力 0.045), 図 3.19 に被験者 No. 16(網膜色素変性症, 両眼視力 0.200), 図 3.20 に被験者 No. 13(網膜色素変性症, 両眼視力 0.085)とし, 円形視標サイズ 90, 60, 30, 20[min]における評価結果をそれぞれ示す. また, 前章第 2 節で両眼視力中央値 1.35 および 1.70 の比較的高い視力の晴眼者の実験結果より構築した視認閾値曲線を, 図 3.17~3.20 の CA 図上に実線で示す.

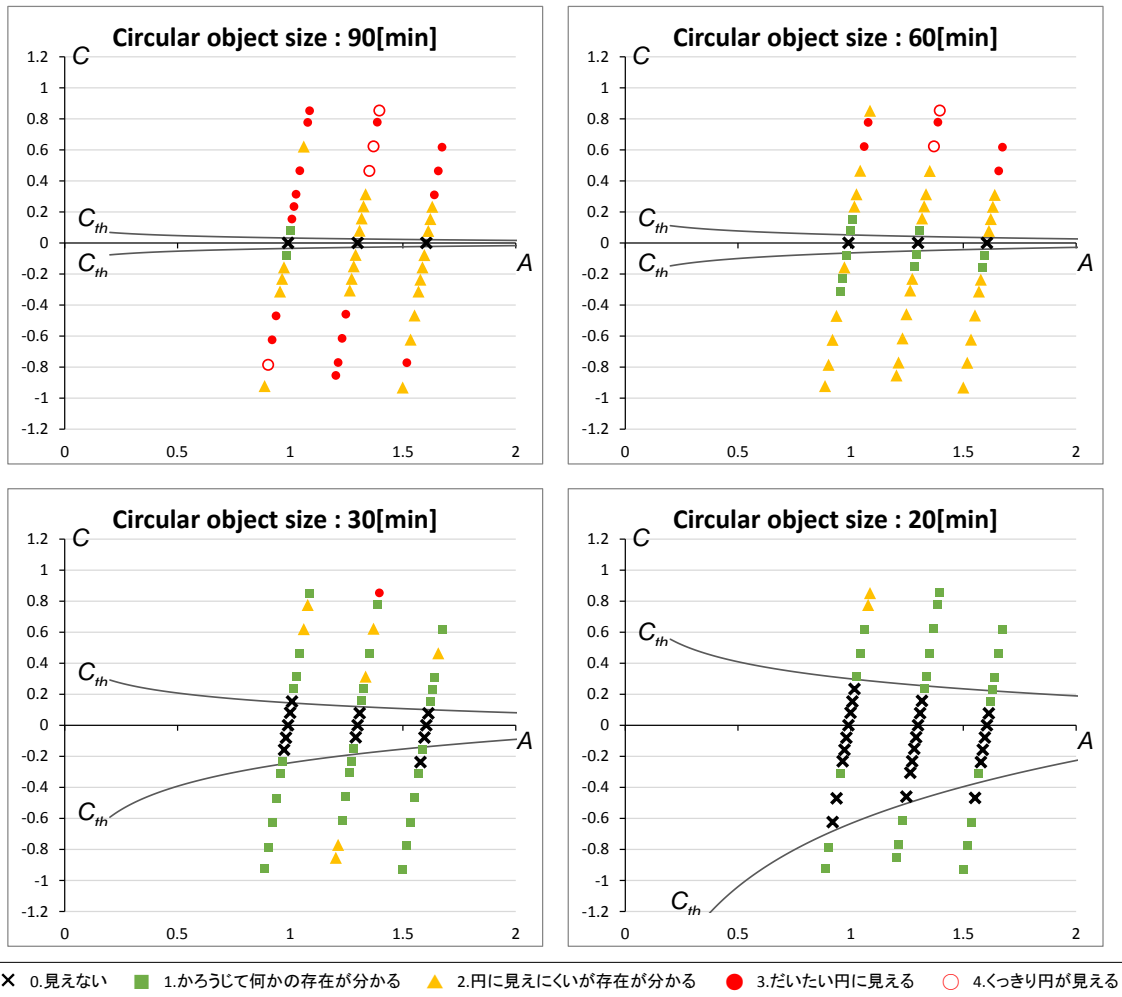


図 3.17 実験 3-C 評価結果 CA 図(被験者 No. 2) (円形視標サイズ 90, 60, 30, 20[min])

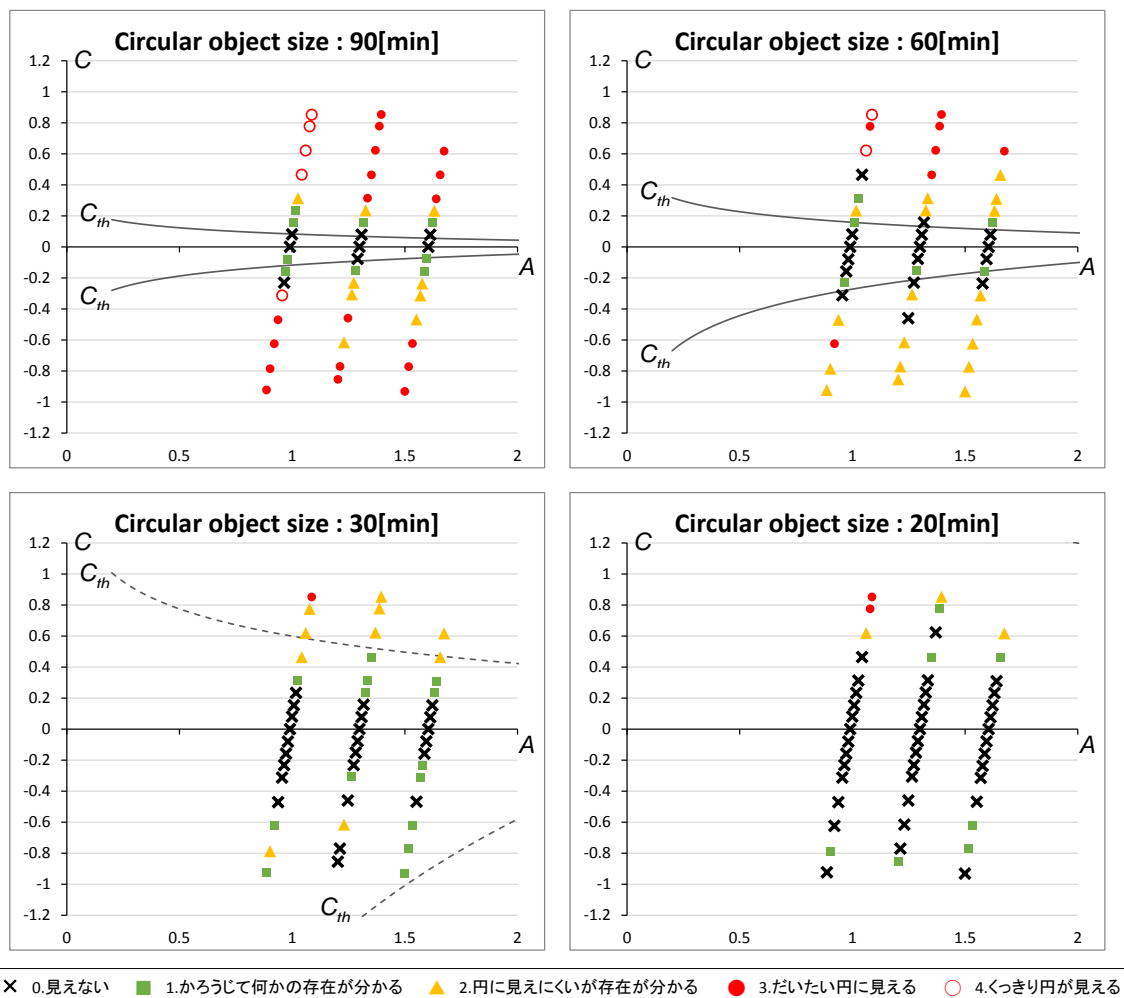


図 3.18 実験 3-C 評価結果 CA 図(被験者 No. 9) (円形視標サイズ 90, 60, 30, 20[min])

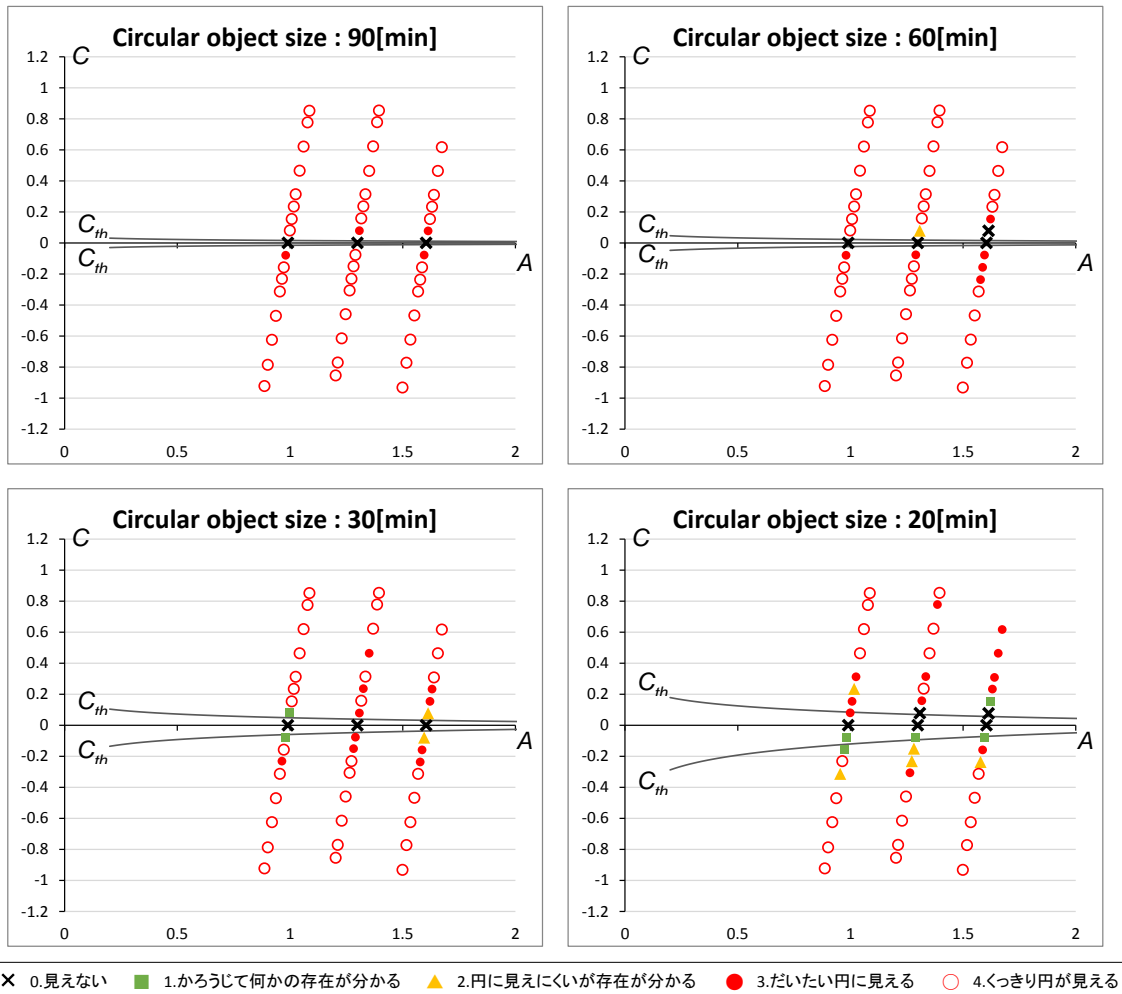


図 3.19 実験 3-C 評価結果 CA 図(被験者 No. 16) (円形視標サイズ 90, 60, 30, 20[min])

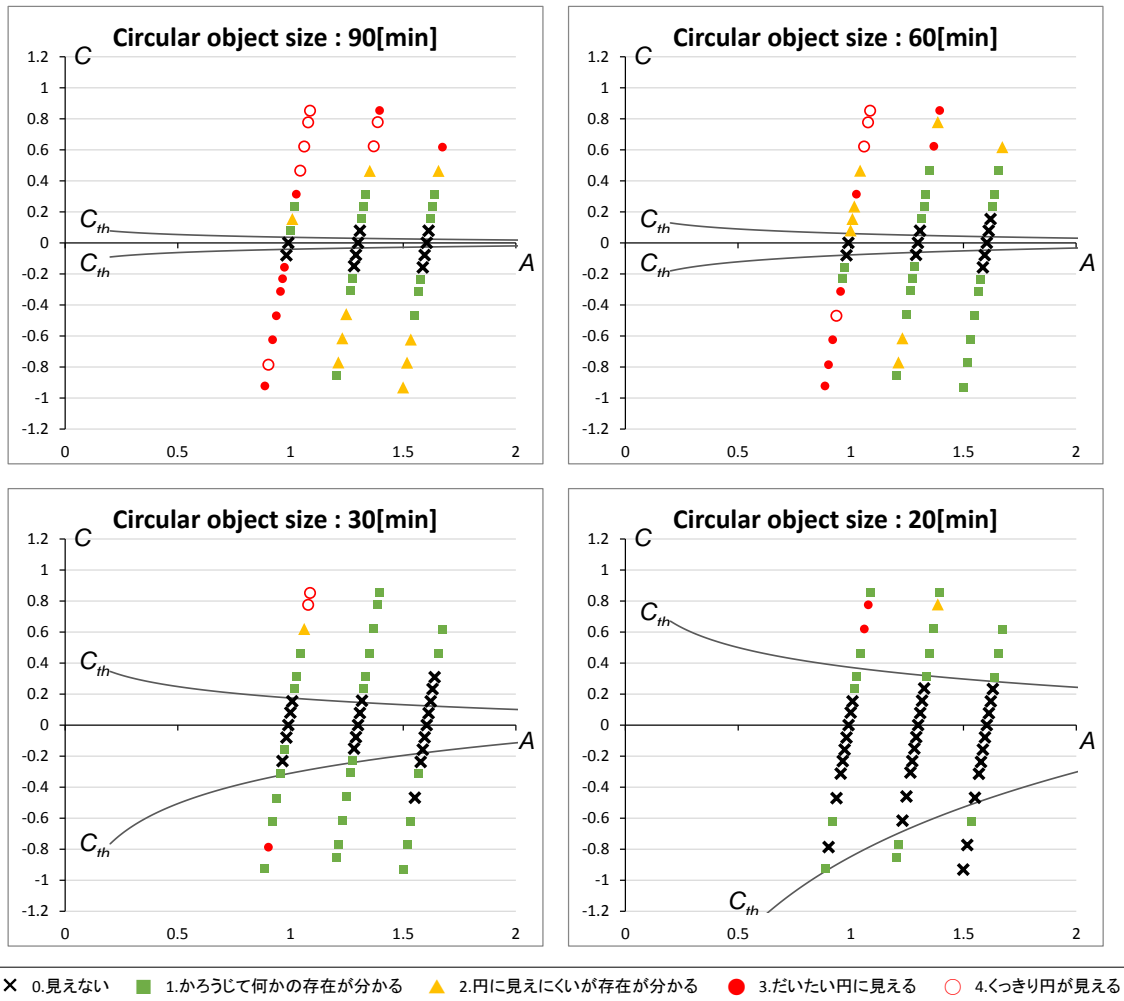


図 3.20 実験 3-C 評価結果 CA 図(被験者 No. 13) (円形視標サイズ 90, 60, 30, 20[min])

前章第2節では、円形視標サイズ 1.25~600 [min]における評価結果と、秋月⁸⁾らの研究を参考として視力と視対象サイズの積 S' の値を用いて推定式を構築した。そのため、構築に用いた S' の範囲は 1.6875 (1.25[min]×1.35)~1020 (600[min]×1.7)であった。被験者 No. 9 は両眼視力 0.045 であり、円形視標サイズ 30, 20[min]の場合は、視力と視対象サイズの積 S' が 1.6875 未満であり適用範囲外と考えられるため、推定される視認閾値曲線を破線で示す(図 3.18)(円形視標サイズ 20[min]の場合は C 値±1.2 よりも外側に視認閾値曲線がある)。図 3.17~3.19 より、図 3.18 の円形視標サイズ 30, 20[min]の場合を除き、視認閾値曲線が概ね「0. 見えない」、「1. だろうじて何かの存在が分かる」の境界、もしくはやや外側(C 値の絶対値が高い側)に位置していることが確認できる。従って、視力と視対象サイズの積 S' が 1.6875 以上となる範囲では、前章第2節で構築した視認閾値曲線が、弱視者にも適用できる可能性が示された。

被験者 No. 9(図 3.18)と被験者 No. 16(図 3.19)は、同じ網膜色素変性症の疾病で障害等級 2 級であるが(表 3.5)、被験者 No. 9 は視野障害が中心部、被験者 No. 16 は視野障害が周辺部となっている。視力検査および本実験は中心視での作業であるため、被験者 No. 16 よりも被験者 No. 9 の方が、視力値が低く、全体的に評価が低くなったと考えられる(図 3.18, 図 3.19)。被験者 No. 16(図 3.19)に関しては、実験 3-A の低視力晴眼者 14 名分の評価結果よりも評価が高く、中心視の作業に関しては、あまり問題が無いと考えられる。被験者 No. 8, 22(網膜色素変性症, 視野障害中心部)でも被験者 No. 9 と同様の特徴、被験者 No. 20(網膜色素変性症, 視野障害周辺部)でも被験者 No. 16 と同様の特徴が確認できた。表 3.6 に同様の特徴が見られた被験者の分類を示す。

その一方で、図 3.20 に示す被験者 No. 13(網膜色素変性症, 両眼視力 0.085, 視野障害周辺部)の場合では、視認閾値曲線よりも C 値の絶対値が高い側に「0. 見えない」の評価が存在している。視力が同等である被験者 No. 2 (両眼視力 0.095)の評価結果(図 3.17)と比べても評価が低く、特に円形視標サイズ 90, 120[min]等の大きい円形視標サイズの場合では、被験者 No. 9(両眼視力 0.045)と同程度で「0. 見えない」の評価が多く見られた。被験者 No. 16(図 3.19)と被験者 No. 13(図 3.20)は同じ網膜色素変性症の疾病で、視野障害が周辺部であるが、被験者 No. 13 の方が、視野障害が中心付近まで及び、大きい円形視標を捉えにくい可能性があると考えられる。被験者 No. 1, 5, 18, 21(網膜色素変性症, 視野障害周辺部)や被験者 No. 17, 19(網膜色素変性症, 視野障害複雑)でも被験者 No. 13(図 3.20)と同様に、円形視標サイズが 90, 120[min]の場合に、視認閾値曲線よりも C 値の絶対値が高い側に「0. 見えない」の評価が存在する様子が見られた。同じ周辺部の視野障害をもつ弱視者であっても、被験者 No. 16(図 3.19)のように中心視によってある程度の視認が可能な弱視者と、被験者 No. 13(図 3.20)のように視野の狭まりによって視対象サイズが大きい場合でも、視認が困難な弱視者が存在することがわかった。今後、視認閾値曲線に視野障害の程度を加味する必要であると考えられる。

また、これまで前章、本章第一節の晴眼者(低視力晴眼者も含む)の検討では、背景輝度(A 値)が増加するほど視認性が向上すると考えてきた。しかし、被験者 No. 13(図 3.20)のように一部

の弱視者では、A 値が増加するほど視認性が低下し、他の網膜色素変性症の数名(被験者 No. 14, 18, 19)でもこの様子がみられた。網膜色素変性症の代表的な症状には夜盲(暗所で視力低下)があるが、羞明(まぶしく感じる)や昼盲(明所で視力低下)の症状も有り得るためと考えられる¹¹⁾。今回の実験の背景輝度は 10~40[cd/m²]の狭い範囲であったため、より広い範囲での確認する必要があると考えられる。

さらに、被験者 No. 13(図 3.20)の場合とは反対に、視認閾値曲線より C 値の絶対値が低い側で視認できている被験者も数名いた(被験者 No. 6, 10, 23, 24, 25, 27)。ランドルト環の向きの判別は難しいが、円形視標の存在の検知は可能というように、視標の違いが影響している可能性がある。

表 3.6 実験 3-C 結果の特長分類

被験者 No.	疾病	視野障害	障害等級	両眼視力	視認閾値曲線との比較	似ている被験者
2	白内障, 小眼球	上部	4	0.095	○	No. 11, 12
9	網膜色素変性症	中心部	2	0.045	○	No. 8, 22
16	網膜色素変性症	周辺部	2	0.200	○	No. 20
13	網膜色素変性症	周辺部	1	0.085	× 90, 120[min]等の大きい円形視標サイズの場合に閾値曲線より外側に「見えない」の評価が多い	No. 1, 5, 18, 21 (視野障害:周辺) No. 17, 19 (視野障害:複雑)

3.3.3. 実験 3-D : 弱視者を対象とした不均一背景の見やすさ評価実験の概要

実験 3-D では、弱視者を対象に背景が輝度分布を有する場合について検討する。実験 3-B と同様に、輝度分布(輝度コントラストやサイズ, 平均輝度等)の操作が比較的容易である市松模様を背景に用いることとする(図 3.21)。実験空間および評価尺度は実験 3-C と同様とし(図 3.14, 図 3.16), 被験者についても実験 3-C と同じ弱視者を対象とした(表 3.5)。

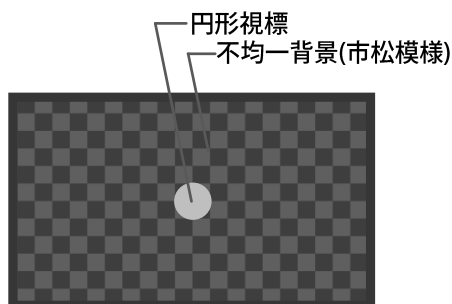


図 3.21 PC モニタ上の提示刺激の様子(実験 3-D)

実験条件は実験 3-B に準ずることとし、背景の市松模様は、格子の対数平均輝度、格子の輝度コントラスト(市松模様の高い方の輝度と低い方の輝度の比)、格子のサイズを変化させて作成した。表 3.7 に実験条件を示す。市松模様の常用対数平均は 1.00, 1.30, 1.60 の 3 条件、市松模様の格子の輝度コントラストは $\log_{10}(\text{市松模様の高い方の輝度}/\text{低い方の輝度})=0.10, 0.40, 0.80$ の 3 条件、格子サイズは 10, 20, 40, 80[min]の 4 条件とした。C 値の範囲は-0.930~0.852 の最大 17 条件、円形視標の直径サイズは 10~120[min]の 5 条件とした。

表 3.7 実験 3-D 実験条件

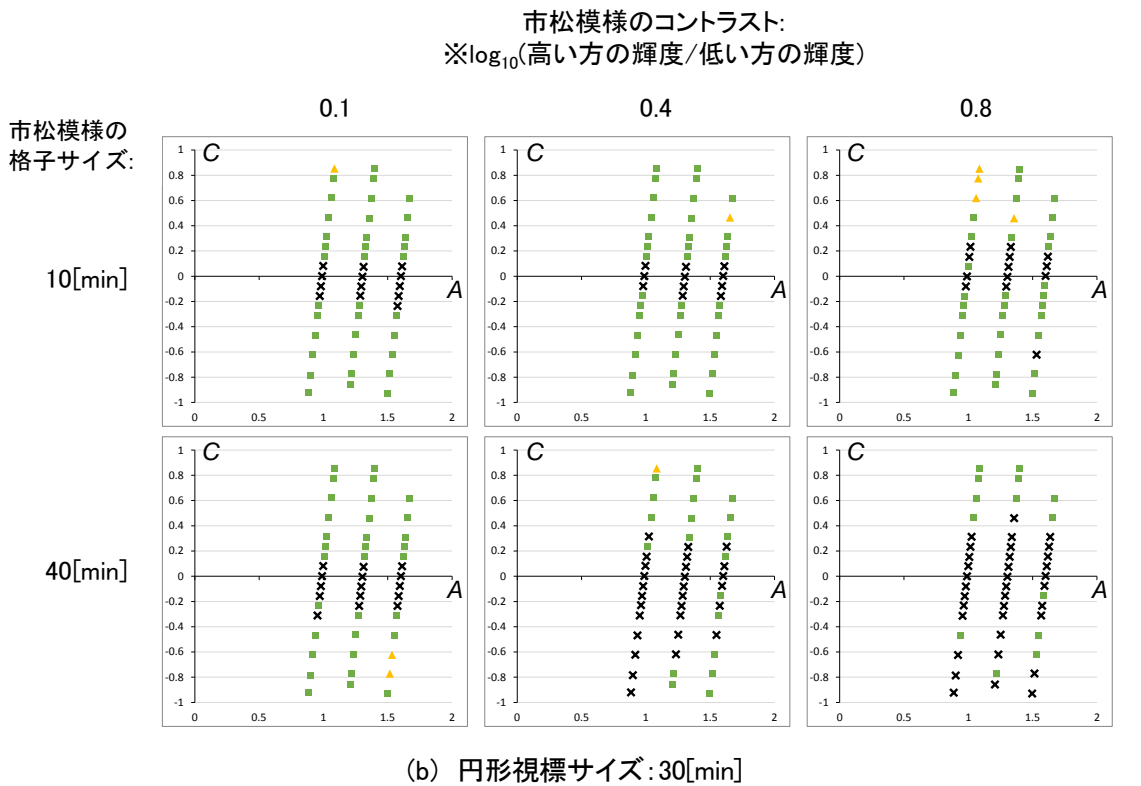
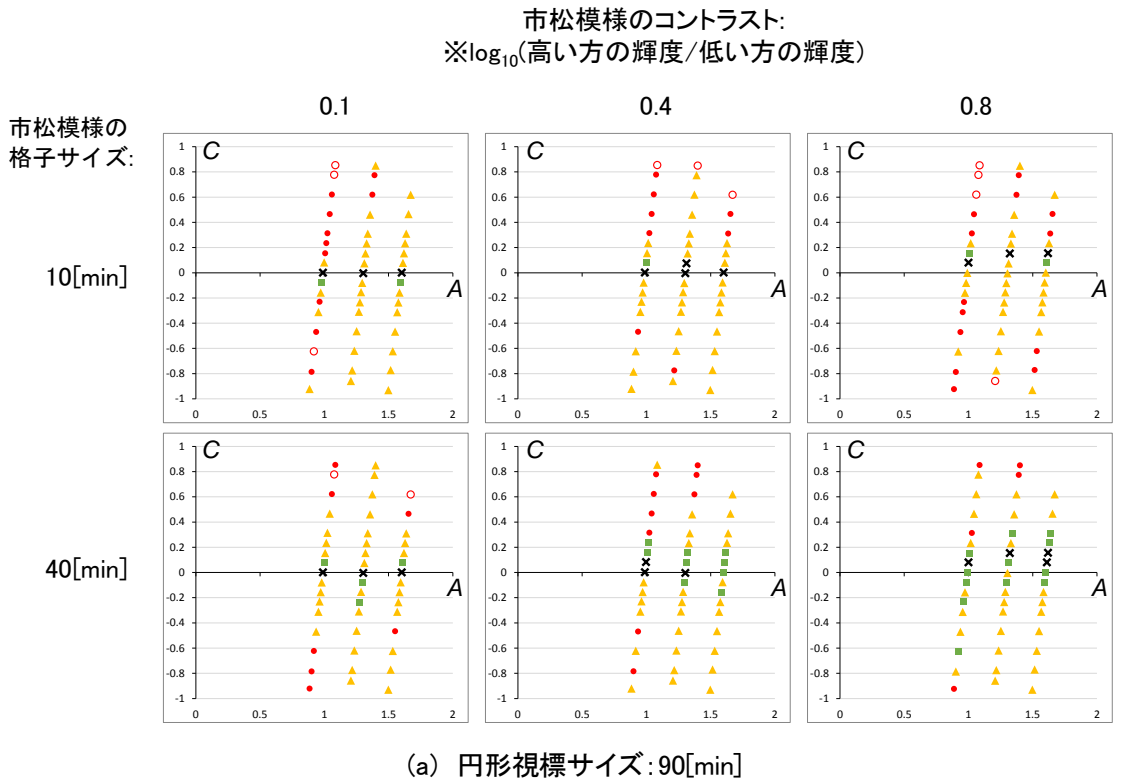
	独立変数	条件数
背景の対数輝度平均 ($\log_{10}(\text{高い方の輝度}) + \log_{10}(\text{低い方の輝度})/2$)	1.00, 1.30, 1.60	3
市松模様のコントラスト ※ $\log_{10}(\text{高い方の輝度}/\text{低い方の輝度})$	0.10, 0.40, 0.80	3
市松模様の格子サイズ	10, 20, 40, 80	4
C 値(目標値)	-0.930(-0.852), -0.775, -0.620, -0.465, -0.310, -0.232, -0.155, -0.077, 0.000, 0.077, 0.155, 0.232, 0.310, 0.465, 0.620, 0.775, 0.852	最大 17
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]	120, 90, 60, 30, 10	5

実験 3-C と同様に、同一背景ごとに円形視標サイズおよび円形視標の輝度(C 値)をランダムに変化させ提示し、実験を行なった。1 つの条件の評価の回答が終わると円形視標が消え、次の円形視標が提示されるまでの 1.0 秒間は市松模様の背景が提示される。

3.3.4. 実験 3-D : 実験結果

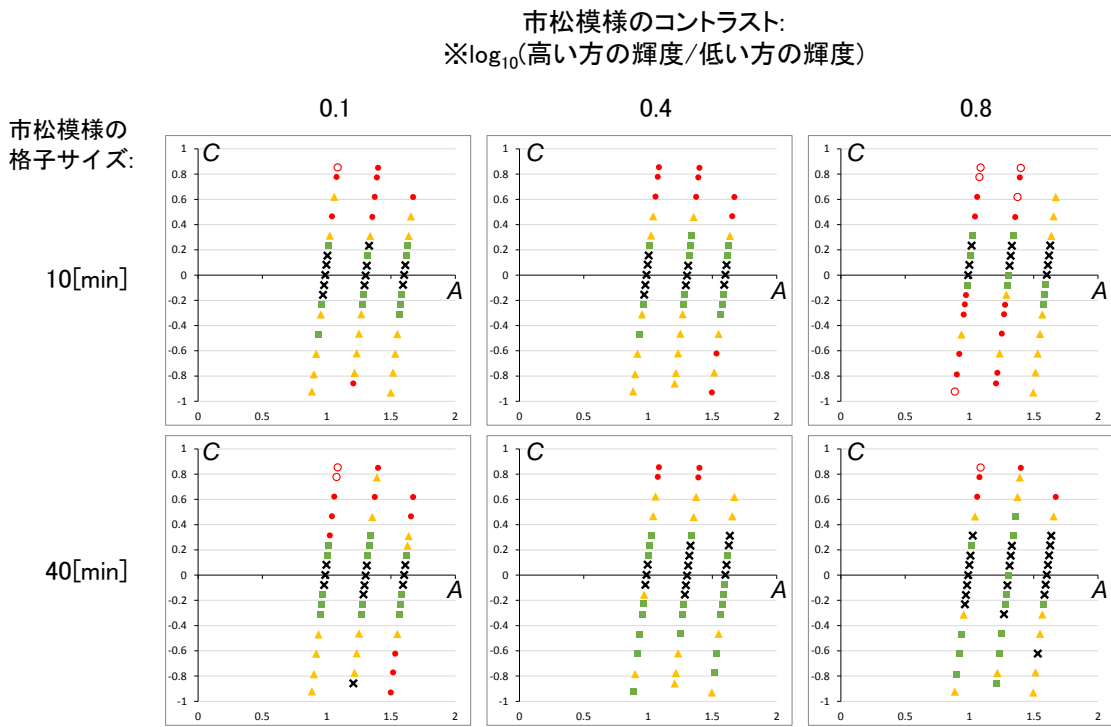
式(3.3), (3.4)より、実験条件の C 値, A 値を算出し、被験者 1 名ずつ、円形視標サイズ、市松模様の格子の輝度コントラスト、格子サイズの条件ごとに評価結果の CA 図を作成した。

図 3.22 に被験者 No. 2(白内障および小眼球, 両眼視力 0.095), 図 3.23 に被験者 No. 9(網膜色素変性症, 視野障害中央部, 両眼視力 0.045), 図 3.24 に被験者 No. 16(網膜色素変性症, 視野障害周辺部, 両眼視力 0.200), 図 3.25 に被験者 No. 13(網膜色素変性症, 視野障害周辺部, 両眼視力 0.085)の評価結果を示す。円形視標サイズ 90[min]の場合を(a), 円形視標サイズ 30[min]の場合を(b)とし、市松模様の格子の輝度コントラスト 0.10, 0.40, 0.80, 格子サイズ 10, 40[min]の条件について、それぞれ評価結果 CA 図を示す。

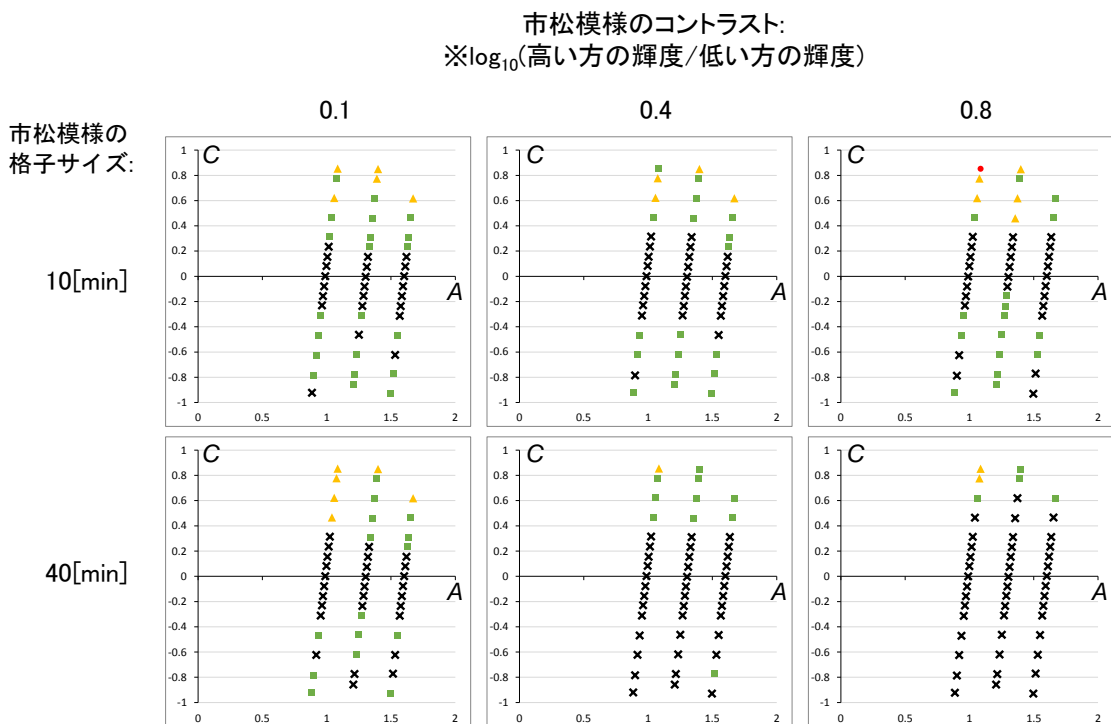


× 0.見えない ■ 1.かろうじて何かの存在が分かる ▲ 2.円に見えにくいが存在が分かる ● 3.だいたい円に見える ○ 4.くっきり円が見える

図 3.22 実験 3-D 評価結果 CA 図(被験者 No.2)



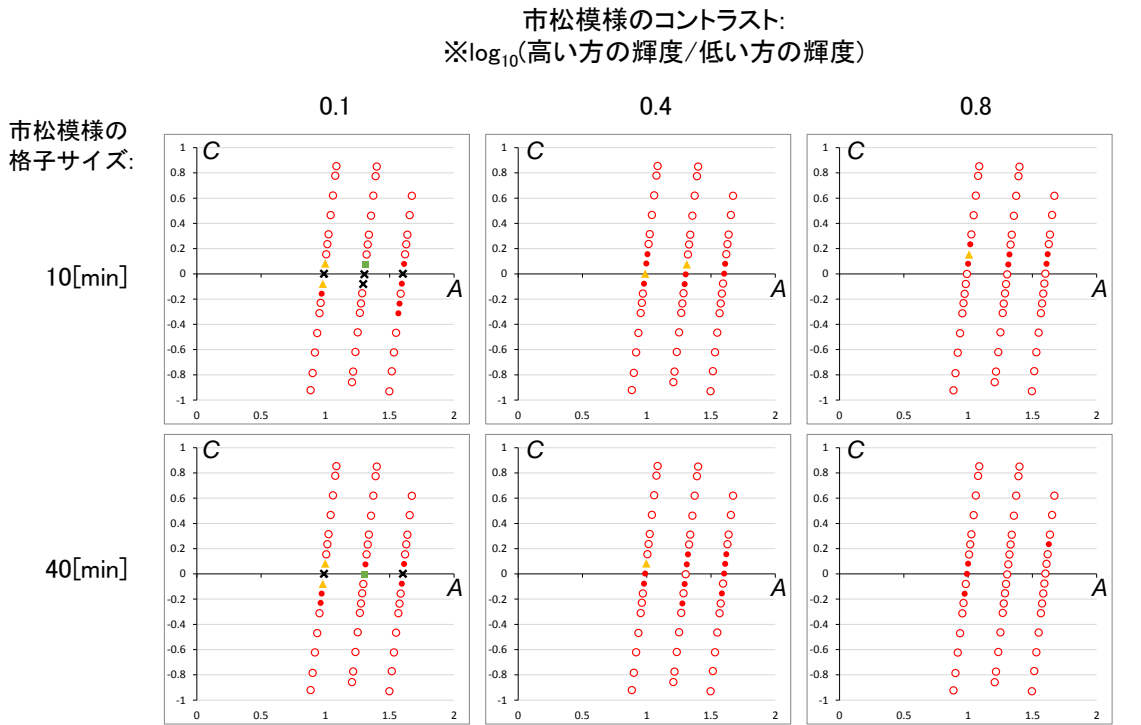
(a) 円形視標サイズ:90[min]



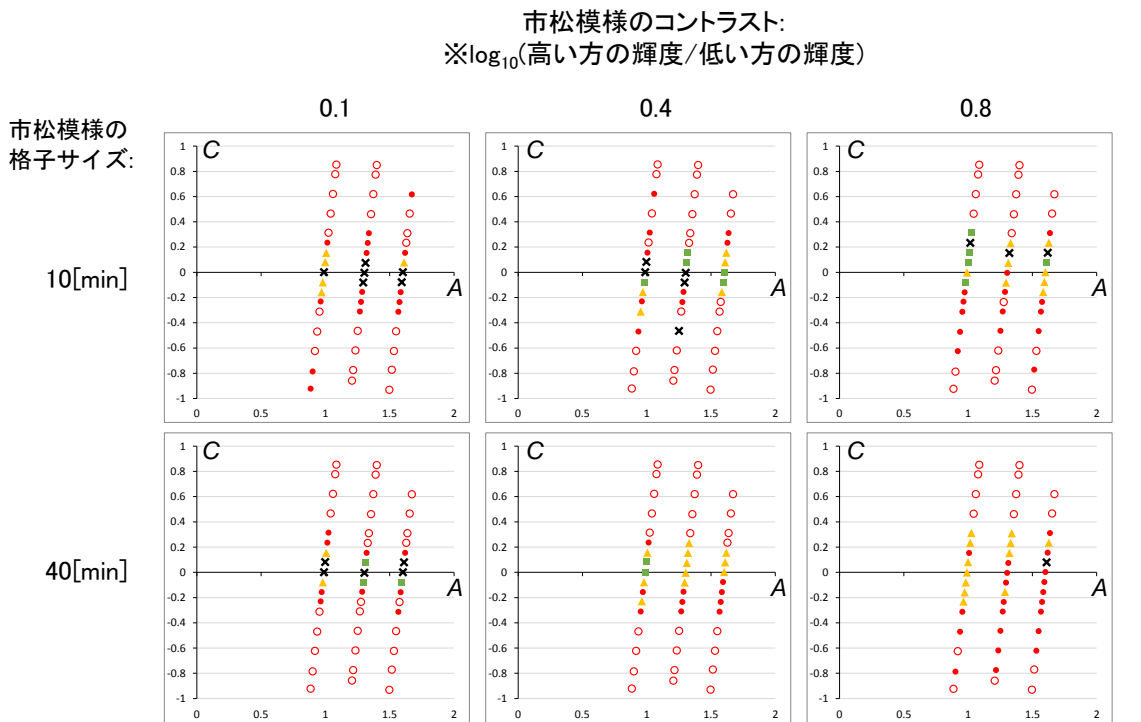
(b) 円形視標サイズ:30[min]

× 0.見えない ■ 1.かろうじて何かの存在が分かる ▲ 2.円に見えにくいが存在が分かる ● 3.だいたい円に見える ○ 4.くっきり円が見える

図 3.23 実験 3-D 評価結果 CA 図(被験者 No.9)



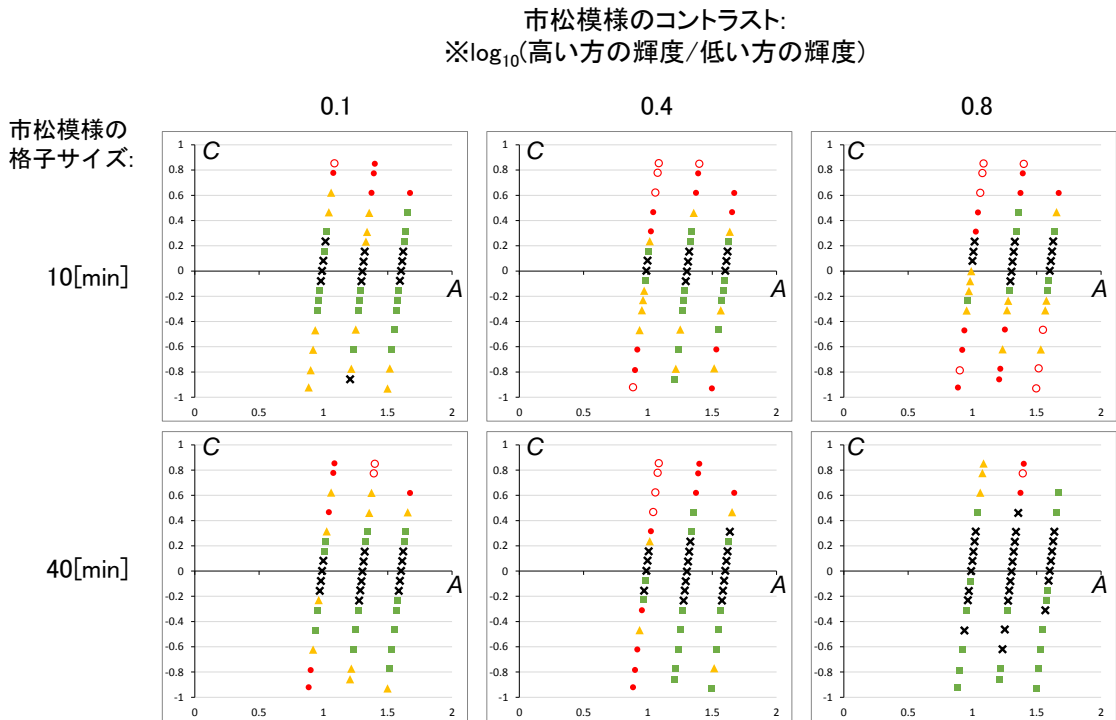
(a) 円形視標サイズ:90[min]



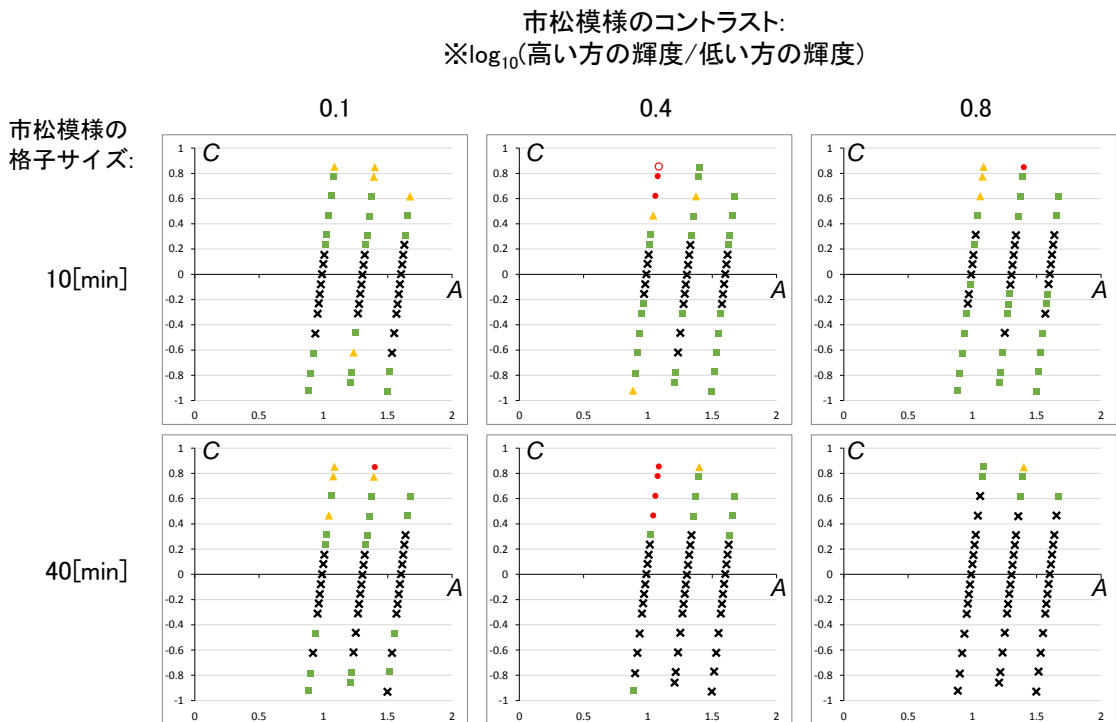
(b) 円形視標サイズ:30[min]

× 0.見えない ■ 1.かろうじて何かの存在が分かる ▲ 2.円に見えにくいが存在が分かる ● 3.だいたい円に見える ○ 4.くっきり円が見える

図 3.24 実験 3-D 評価結果 CA 図(被験者 No.16)



(a) 円形視標サイズ: 90[min]



(b) 円形視標サイズ: 30[min]

× 0.見えない ■ 1.かろうじて何かの存在が分かる ▲ 2.円に見えにくい存在が分かる ● 3.だいたい円に見える ○ 4.くっきり円が見える

図 3.25 実験 3-D 評価結果 CA 図(被験者 No.13)

実験 3-C の均一背景での評価結果と同様に、被験者 No.16(図 3.24) > 被験者 No.2(図 3.22) > 被験者 No.9(図 3.23) \approx 被験者 No.13(図 3.25)の順で、評価が高いことが確認できる。

前節の低視力晴眼者の結果(実験 3-B)より、市松模様の格子の輝度コントラストが低く、格子サイズが小さいほど、均一背景の結果に近いことが示されていたが、弱視者でも同様であることが確認できる。市松模様の格子の輝度コントラストが小さく、格子サイズが小さいほど、市松模様を視認しづらくなり均一背景のように見えるためと推察される。被験者 No. 16(図 3.24)は、円形視標サイズ 90, 30[μm]どちらの場合も、格子の輝度コントラストが大きく、格子サイズが大きいほど、 $C \approx 0$ 付近の条件について「0. 見えない」の評価が減少している。これは、前節の低視力晴眼者(両眼視力中央値 0.125)の円形視標サイズ 120, 90, 60[μm]の場合でも推察されたように、市松模様が視認しやすくなり、背景と円形視標が重なる部分に市松模様が見られず、円形視標が存在していることがわかるためと推察される。視認可能な最小サイズ(1/視力)に対して視対象サイズが 6 倍程度以上、つまり視力と視対象サイズの積 S' が 6.0(30[μm] \times 0.200)程度以上であると、このようになる可能性があると考えられる。

被験者 No. 2, 9, 13 (図 3.22, 図 3.23, 図 3.25)の円形視標サイズ 90[μm]場合では、市松模様の格子の輝度コントラストが増加するほど「0. 見えない」や「1. かろうじて何かの存在が分かる」の評価の範囲が増え、視認性が低下することがわかる。また、円形視標サイズ 30[μm]の場合では、市松模様の格子の輝度コントラストが増加するほど、著しく「0. 見えない」の評価の範囲が増加している。このような傾向は、前節の低視力晴眼者の円形視標サイズ 30, 10[μm]の場合でも確認されていた。視力と視対象サイズの積 S' が 6.0 程度以下の場合、視対象サイズが小さく、市松模様の格子の輝度コントラストが高く、格子サイズが大きいほど、視対象の存在や形状を認識できなくなると考えられる。視対象の視認性を向上させるためには、観察者に対して視対象が十分大きいサイズのものであること、背景と視対象の輝度コントラストが十分に確保されていること、さらに、背景の模様の輝度コントラストや模様のサイズを大きくしないことが重要であると考えられる。

また、前節の低視力晴眼者の円形視標サイズ 30[μm]の場合の評価結果(実験 3-B)において、均一背景や市松模様の格子の輝度コントラスト 0.10 の場合では $C \approx 0$ 付近に「0. 見えない」の評価が存在しているのに対し、格子の輝度コントラストが 0.40, 0.80 へ増加するにつれ、いずれの格子サイズでも、「0. 見えない」の評価が正対比($C > 0$)側に移っていた。本実験でも、被験者 No. 2 の円形視標 90[μm](図 3.22 (a)), 被験者 No. 9 の円形視標 90[μm](図 3.23 (a)), 被験者 No. 16 の円形視標 30[μm](図 3.24 (b)), 被験者 No. 13 の円形視標 90[μm](図 3.25 (a))を例として、市松模様の格子の輝度コントラストが増加するほど「0. 見えない」の評価が正対比($C > 0$)側に移っている。低視力晴眼者だけではなく、弱視者にも起こる現象であることが確認された。今後、第 2 章で検討した通常視力晴眼者のように比較的視力の高い晴眼者でも同様であるか、追って確認したい。

3.4. 第3章まとめ

本章では、低視力晴眼者および弱視者を対象に、輝度画像を用いた視認性推定法の適用法を検討した。

第2節では、背景が複雑な輝度分布をもつ場合での低視力晴眼者の視認性を検討することを目的とし、背景を均一、不均一(市松模様)とした円形視標の見やすさ評価実験を14名の低視力晴眼者を対象として行った。市松模様の格子の輝度コントラストや格子サイズを変化させ、背景の輝度分布が視認性評価に及ぼす影響についてCA図を用いて検討し、以下の事項を明らかにした。

- ・ 均一背景において、前章で構築した視認閾値曲線の推定式を低視力晴眼者に適用する場合、実際の視認閾値 C 値(C_{th})よりもやや絶対値が高い側に推定される可能性があるが、概ね適用可能であることを明らかにした。
- ・ 不均一(市松模様)背景では、市松模様の格子の輝度コントラストが小さく、格子サイズが小さいほど、均一背景の結果に近いことを明らかにした。
- ・ 背景の市松模様の格子の輝度コントラストが大きくなり、格子サイズが大きくなるほど、視対象の形状を正しく認識できない可能性があることを明らかにした。
- ・ 市松模様の格子の輝度コントラストが増加するにつれ、「見えない」の評価が正対比($C > 0$)側に移ることが示され、背景に輝度分布がある不均一背景の場合の C 値の算出方法に関して、対数輝度画像ではなく対数をとらない輝度画像から算出する C 値を用いた方が、視認性が低下する条件をより説明できる可能性があることが示された。

第3節では、弱視者の視認性について検討することを目的とし、様々な疾病や障害等級をもつ弱視者27名を対象に見やすさ評価実験を行った。疾病や視野障害の程度による実験結果の特徴を確認し、前章第2節で構築した視認閾値推定式との関係や、第2節の低視力晴眼者との差異について検討し、以下の事項を明らかにした。

- ・ 均一背景の実験結果より、弱視者の一部では、前章の晴眼者の実験結果から構築した視認閾値推定式を用いて、視認閾値 C 値を推定できることを確認した。
- ・ 視野障害の程度によっては、90, 120[min]等の大きい円形視標サイズの場合に、推定される視認閾値曲線よりも C 値の絶対値が高い側の条件でも、視認できない可能性があることを明らかにした。
- ・ 晴眼者の場合では背景輝度(A 値)が高くなるほど視認性が向上するが、弱視者の一部では、羞明や昼盲の症状によって A 値が高くなるほど視認性が低下する可能性があることが示された。
- ・ 不均一(市松模様)背景の場合では、前節の低視力晴眼者と同様に、市松模様の格子の輝度コントラストが高くなるほど、格子サイズが大きくなるほど、視標の存在や形状の認識

が困難になることを明らかにした

- ・ 前節の低視力晴眼者と同様に，市松模様の格子の輝度コントラストが増加するにつれ，「見えない」の評価が正対比($C > 0$)側に移ることが弱視者の実験結果でも示された。

第3章参考文献

- 1) 日本工業規格：視力検査装置, JIS T 7309, 2002
- 2) 照明学会：ロービジョンを対象とした視環境計画に関する研究調査委員会報告書, JIER-092, 2006.9
- 3) 岩田三千子, 北本裕之：弱視者の明視に関わる照度と輝度比の関係, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第732号, pp.121-128, 2017.2
- 4) 岩田三千子：視対象周辺の色が若年者および高齢者の視力と主観評価に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第68巻, 第568号, pp.111-117, 2003.6
- 5) 岩田三千子：大阪梅田ターミナル地区における階段の実態調査：高齢者および身体障害者に配慮した公共空間の階段の計画に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第68巻, 第570号, pp.61-66, 2003.8
- 6) 岩田三千子, 北本裕之：無彩色背景における有彩色と無彩色ラインの弱視者の視認性, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第734号, pp.301-308, 2017.4
- 7) 岩田三千子, 北本裕之：弱視者に配慮した階段下降時の踏面端部ラインの明視条件の検討, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第742号, pp.1005-1014, 2017.12
- 8) 秋月有紀, 井上容子：明視性評価における年齢の取り扱い及び相対視力の適用範囲に関する検討, 日本建築学会計画系論文集, 第67巻, 第562号, pp.15-21, 2002.12
- 9) 秋月有紀, 井上容子：個人の最大視力に対する視力比の概念の導入-個人の視力に配慮した視認能力評価における背景輝度と視距離の影響の取り扱いについて-, 照明学会誌, 第86巻, 第11号, pp.819-829, 2002.11
- 10) 秋月有紀, 井上容子：個人の視認能力を考慮した色の三属性の細部識別閾への影響, 照明学会誌, 第92巻, 第5号, pp. 241-249, 2008.5
- 11) 厚生労働科学研究費補助金難治性疾患政策研究事業網膜脈絡膜・視神経萎縮症に関する調査研究班網膜色素変性診療ガイドライン作成ワーキンググループ：網膜色素変性診療ガイドライン, 日本眼科学会雑誌, 第120巻, 第12号, pp.846-961, 2016.12

第4章 一般色覚者を対象とした色の影響を考慮した 見やすさ評価に関する検討

4.1. 本章の目的

第2章、第3章の検討は輝度に基づくものであり、視対象や背景の色度を CIE 標準光源 D65 相当に限定して検討してきた。そのため、視対象や背景の色度分布が視認性に与える影響については考慮できていない。現実環境には有彩色が多く存在し、輝度分布だけではなく色も視認性に影響を及ぼすことが知られている¹⁻⁶⁾。色の効果を活用することで、より効果的に視認性が得られる可能性もあるが、その一方で、色使いに配慮したユニバーサルデザイン(以下、カラーユニバーサルデザイン)⁷⁻⁹⁾のため、一般型の色覚を持つ者(以下、一般色覚者)だけでなく色弱者の視認性も予測する必要があると考えられる。

本章では、輝度分布によって視認性推定を行なう CA 図を色度も扱うことが可能な評価手法へと展開し、カラーユニバーサルデザインについて検討する前階として、一般色覚者を対象に色を考慮した視認性推定について検討することを目的とする。第2節では、CA 図の考え方を輝度から測光色(XYZ 表色系 XYZ 刺激値、ただし Y は輝度)へ展開し、輝度および色度のコントラストを表現する手法を示す。そして第3節では、一般色覚者を対象として輝度や色度が増減する円形視標を用いた見やすさ評価実験を行い、色の影響を考慮した一般色覚者の視認性を検討する。

4.2. 色度コントラストの表現方法

色の影響を考慮した視認性を考えるためには、色味のコントラストを算出し、そのコントラストの大きさと視認性の関係を検討することが必要となる。本章では、輝度分布による視認性評価から測光色分布による視認性評価へ展開するにあたり、世界的に広く用いられ、数量的に色を示し、Y 刺激値を輝度として表現する XYZ 表色系(CIE1931)に基づいて検討することとする。しかし XYZ 表色系は、数値だけでは直感的に色が想像しにくく、色差の検討には不向きとされている。色差を検討するには、不均等性がなく色差が座標上の距離に比例するような色度図(均等色度図)を用いることが好ましいと考えられる。そこで本研究では、XYZ 表色系に基づき、できるだけ人間の感覚に近い均等な色空間として考案された CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間(図 4.1)を参照する形で、測光色のコントラストの算出方法を提案する。

$L^*a^*b^*$ 色空間は、式(4.1), (4.2), (4.3)に示すように、XYZ 表色系を用いて‘試料物体の Y 刺激値/基準白色の Y 刺激値’によって求められる L^* (明度), ‘試料物体の X 刺激値/基準白色の X 刺激値’と‘試料物体の Y 刺激値/基準白色の Y 刺激値’の差を定数倍した a^* (赤・緑), ‘試料物体の Y 刺激値/基準白色の Y 刺激値’と‘試料物体の Z 刺激値/基準白色の Z 刺激値’の差を定数倍した b^* (黄・青)によって、図 4.1 のように L^* , a^* , b^* の 3 軸で色を表現できる。 $L^*a^*b^*$ 色空間はマンセル色票に対応し、直感的に色を想像しやすいという利点があり、色の視認性に関して $L^*a^*b^*$ 色空間を用いて検討された既往研究もいくつか存在する¹⁻³⁾。しかし、基準白色の XYZ 刺激値(X_n , Y_n , Z_n)を定義する必要がある、様々な輝度色度が存在する現実環境では基準白色を定義することが難しいという問題点もある。

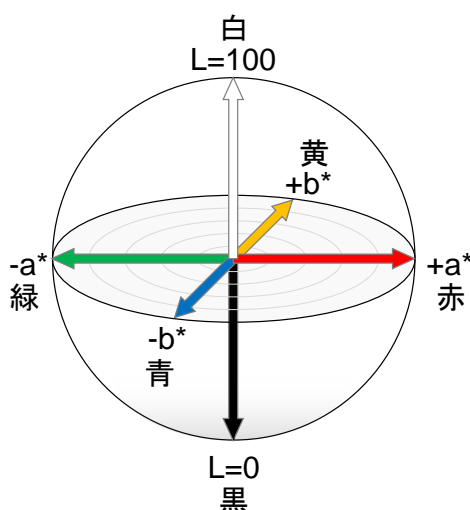


図 4.1 CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \quad \dots (4.1)$$

$$a^* = 500 \cdot [(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}] \quad \dots (4.2)$$

$$b^* = 200 \cdot [(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}] \quad \dots (4.3)$$

(ただし, $X/X_n > 0.008856$, $Y/Y_n > 0.008856$, $Z/Z_n > 0.008856$ とする)

X, Y, Z : 試料物体の XYZ 刺激値

X_n, Y_n, Z_n : 基準白色の XYZ 刺激値

第2章では, コントラスト・プロファイル法¹⁰⁾に基づき, 輝度(つまり XYZ 表色系 Y 刺激値)の分布より, 式(4.4), (4.5)に示す円形視標の輝度コントラスト(C 値)および対数輝度平均(A 値)の算出式を導き, 視認性を検討した.

$$\begin{aligned} C &= 0.775 \cdot \log_{10}(L_t) - 0.775 \cdot \log_{10}(L_b) \\ &= 0.775 \cdot \log_{10}(L_t/L_b) \quad \dots (4.4) \end{aligned}$$

$$A = 0.087 \cdot \log_{10}(L_t) + 0.913 \cdot \log_{10}(L_b) \quad \dots (4.5)$$

C : 輝度コントラスト

A : 対数輝度平均

L_t : 円形視標の輝度 [cd/m²]

L_b : 背景の輝度 [cd/m²]

本章では, 式(4.4), (4.5)の円形視標の C 値, A 値の算出式と同様にして, XYZ 表色系の X 刺激値, Y 刺激値, Z 刺激値のそれぞれについて, 式(4.6), (4.7)より C 値(C_x, C_y, C_z), A 値(A_x, A_y, A_z)を算出し, $L^*a^*b^*$ 色空間の変換式(4.1), (4.2), (4.3)を参考とした式(4.8)より算出する値を, Lab コントラスト(LC, aC, bC), Lab 対数平均(LA, aA, bA)とする. L は輝度成分, a は[赤-緑]成分, b は[黄-青]成分を表し, LC, LA は, 第2章, 第3章の輝度コントラスト(C 値), 対数輝度平均(A 値)と等価である. 本章では, 測光色コントラスト(LC, aC, bC)と視認性の関係を検討する. 円形視標が背景よりも輝度が高い場合は LC が正, 円形視標が背景よりも赤みを帯びている場合は aC が正, 円形視標が背景よりも黄みを帯びている場合は bC が正となる.

$$\begin{aligned} (C_x, C_y, C_z) &= 0.775 \times \log_{10}(X_t, Y_t, Z_t) - 0.775 \times \log_{10}(X_b, Y_b, Z_b) \\ &= 0.775 \times \log_{10}(X_t/X_b, Y_t/Y_b, Z_t/Z_b) \quad \dots (4.6) \end{aligned}$$

$$(A_x, A_y, A_z) = 0.087 \times \log_{10}(X_t, Y_t, Z_t) + 0.913 \times \log_{10}(X_b, Y_b, Z_b) \quad \dots (4.7)$$

X_t, Y_t, Z_t : 円形視標の XYZ 刺激値

X_b, Y_b, Z_b : 背景の XYZ 刺激値

$$\begin{aligned} LC &= C_Y & LA &= A_Y \\ aC &= C_X - C_Y & aA &= A_X - A_Y \\ bC &= C_Y - C_Z & bA &= A_Y - A_Z \end{aligned} \quad \dots \quad (4.8)$$

LC, aC, bC : Lab コントラスト

LA, aA, bA : Lab 対数平均

(L : 輝度成分, a : [赤・緑]成分, b : [黄・青]成分)

4.3. 一般色覚者を対象とした円形視標の見やすさ評価

4.3.1. 実験概要

一般型の色覚を持つ一般色覚者を対象として、輝度および色度の分布が見やすさに及ぼす影響を調査するため、円形視標を用いた見やすさ評価実験を行った。

これまでの実験と同様に、図 4.2 の外部からの光を遮光した実験室において、実験を行なった。被験者は 2500[mm]離れた距離から、図 4.3 のように 27 インチ PC モニタ(EIZO Color Edge CG277, 2560×1440[px])中央部に提示される均一背景上の円形視標を両眼で観察し、見やすさを第 2 章第 3 節の実験(実験 2-C)と同様に図 4.4 の〈0.見えない 1.やっと見える 2.多少見えにくいが見える 3.苦勞せず(普通に)見える 4.見やすい〉の 5 段階の評価尺度で回答する。実験室内では PC モニタ以外に発光するものはなく、モニタの周辺部の輝度はほぼ 0[cd/m²]であった。背景の XYZ 刺激値、円形視標の XYZ 刺激値、円形視標のサイズを、PC モニタの 8bit(256 階調)の RGB 階調値によって変化させ実験を行なった。

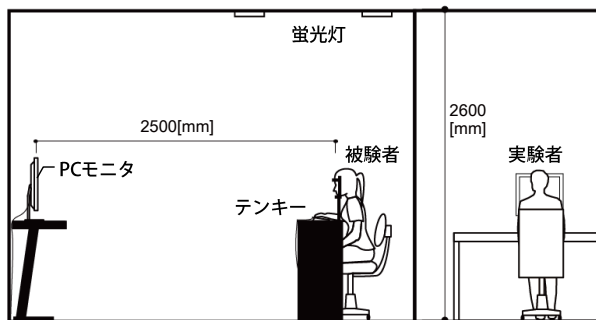


図 4.2 実験室概要

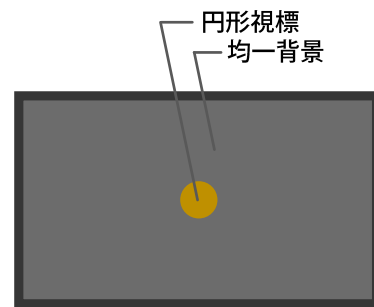


図 4.3 PC モニタ上の提示刺激の様子

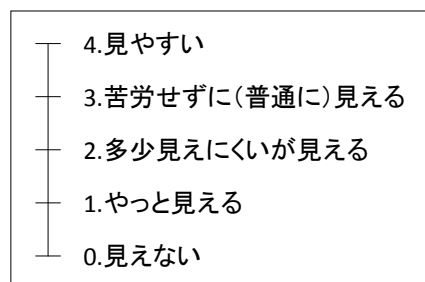
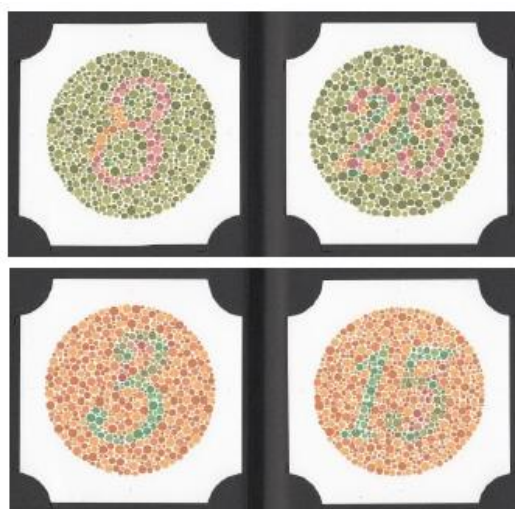


図 4.4 評価尺度

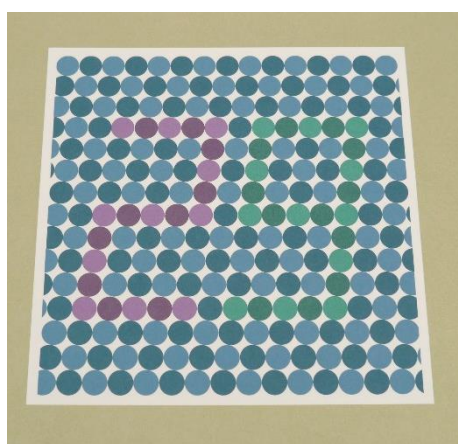
被験者は 20 代の一般色覚者 8 名とし、観察距離 2500[mm]で測定した被験者 8 名の両眼視力を表 4.1 に示す。8 名の両眼視力中央値は 1.50 であった。視力測定は、JIS T 7309:2002¹⁾ に準拠し、ランドルト環を用いて測定した。背景の輝度を 200[cd/m²]、ランドルト環の輝度

を $10[\text{cd}/\text{m}^2]$ 程度とし、5個のうち3個以上正答するかを判定基準として行なった。視力値は、視認可能な最小切れ目幅の視角 $[\text{min}]$ を逆数で表現したものである⁸⁾。視力測定に使用したランドルト環のサイズおよび間隔は、視力値0.40から2.25の間で0.05刻みとした。また、視力矯正器具(眼鏡やコンタクト)を使用する被験者に対しては、ブルーライトカットや波長選択性の機能のある視力矯正器具を使用しないよう教示した。石原色覚検査表II¹²⁾(図4.5)、標準色覚検査表SPP-1¹³⁾(図4.6)を用いて、8名とも一般型⁹⁾の色覚であることを確認した。



ドット状に書かれている数字を読ませる。一般色覚者と色弱者で異なる返答が見込まれる。
1型と2型の色弱者で異なる返答が見込まれる検査表もある。

図4.5 石原色覚検査表IIの例



1つ以上のドット状に書かれている数字について、最も読みやすいと感じる数字を回答させる。
一般色覚者と色弱者で異なる返答が見込まれる。
1型と2型の色弱者で異なる返答が見込まれる検査表もある。

図4.6 標準色覚検査表SPP-1の例

表 4.1 被験者リスト(一般色覚者)

被験者 No.	性別	年齢	矯正	両眼視力 (観察距離: 2500 [mm])	色覚型
1	女	29	裸眼	1.35	一般型
2	女	23	コンタクト	1.95	一般型
3	男	24	メガネ	2.00	一般型
4	女	22	コンタクト	1.60	一般型
5	男	22	メガネ	0.80	一般型
6	男	21	コンタクト	1.70	一般型
7	女	24	メガネ	1.40	一般型
8	男	23	メガネ	1.30	一般型
平均値				1.51	
中央値				1.50	

4.3.2. 背景輝度および円形視標の色度が変化する場合(背景色度 D65) [実験 4-A]

4.3.2.1. 実験条件

はじめに、色度コントラスト aC , bC , および、背景輝度を変化させた場合の見やすさ評価を調査した。実験条件を表 4.2 に示す。背景色度を CIE 標準光源 D65 に相当する色度(色彩輝度計による CIE1931xy 色度座標測定値は $x=0.319$, $y=0.325$)とし、背景輝度は 10, 20, 40, 80 [cd/m²]を目安とした 9.96, 19.75, 40.40, 79.74 [cd/m²]の 4 条件とした。円形視標のサイズは、X 刺激値や Z 刺激値を変化させ視認性を検討した既往実験^{14,15)}の結果を参考に、「0. 見えない」の評価が適度に得られると予想される 5[min]に設定した。背景と円形視標の輝度コントラストは変化させず($LC=0$)、色度コントラスト(aC , bC)を変化させて実験を行なった。 aC は-0.10 から+0.10 の範囲で 0.02 刻み、 bC は-0.54 から+0.60 の範囲で 0.06 刻みとし、実験条件の aC , bC に対応する XYZ 刺激値を求め、PC モニタ 8bit(256 階調) RGB 階調値に変換し出力可能な条件のみを行なった(最大 183 条件)。同一背景輝度ごとに、円形視標の色度コントラスト(aC , bC)をランダムな順序で変化させ提示した。各被験者、全条件を 1 回ずつ評価した。

表 4.2 実験 4-A 実験条件

	独立変数	条件数
背景色度 (x, y)	(0.319, 0.325)	1
背景輝度 [cd/m ²]	9.96, 19.75, 40.40, 79.74	4
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]	5	1
LC	0	1
aC	-0.10 ~ +0.10の範囲で0.02刻み	最大 183
bC	-0.54 ~ +0.60の範囲で0.06刻み	

4.3.2.2. 分析方法

背景輝度条件ごとに、CIE1931xy 色度図および aC-bC 図を用いて評価結果を示す。

xy 色度図は、実験で提示された円形視標の RGB 階調値より、XYZ 刺激値および色度座標 x,y を算出し、評価結果をプロットする。

aC-bC 図は、実験で提示された円形視標の RGB 階調値より算出した XYZ 刺激値をもとに、前節で示した式(4.6), (4.8)によって測光色コントラスト(LC, aC, bC)を算出し、横軸：aC([赤-緑]コントラスト), 縦軸：bC([黄-青]コントラスト)として、評価結果をプロットする。aC-bC 図の原点は背景色と円形視標の色度が同一であることを示し、aC が正の場合は背景と比べ円形視標が赤、aC が負の場合は背景と比べ円形視標が緑、bC が正の場合は背景と比べ円形視標が黄、bC が負の場合は背景と比べ円形視標が青であることを示す(図 4.7)。

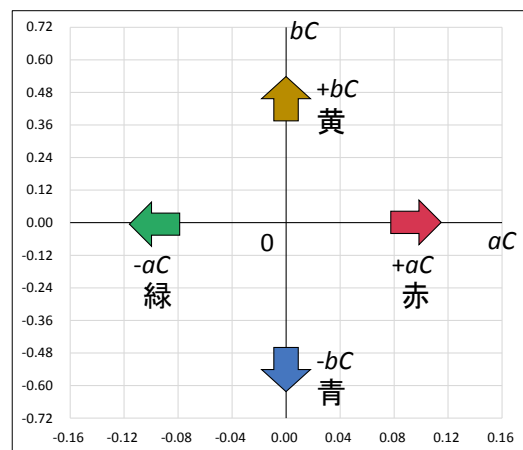


図 4.7 aC-bC 図の例

これまで、晴眼者を対象とした実験では、被験者の半数で評価が得られたかを判定基準として実験結果を示した。本節においても、被験者の半数で評価が得られたかを判定基準とし、

8名中4名以上が評価4と回答した条件を○, 4名以上が評価3以上と回答した条件を●, 4名以上が評価2以上と回答した条件を▲, 4名以上が評価1以上と回答した条件を■, 5名以上が評価0と回答した条件を×として評価結果を示す(図4.8).

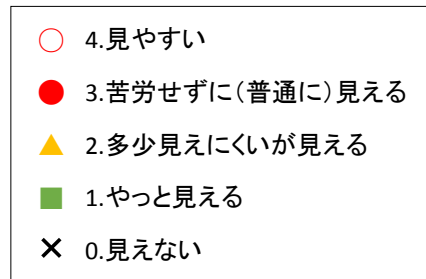
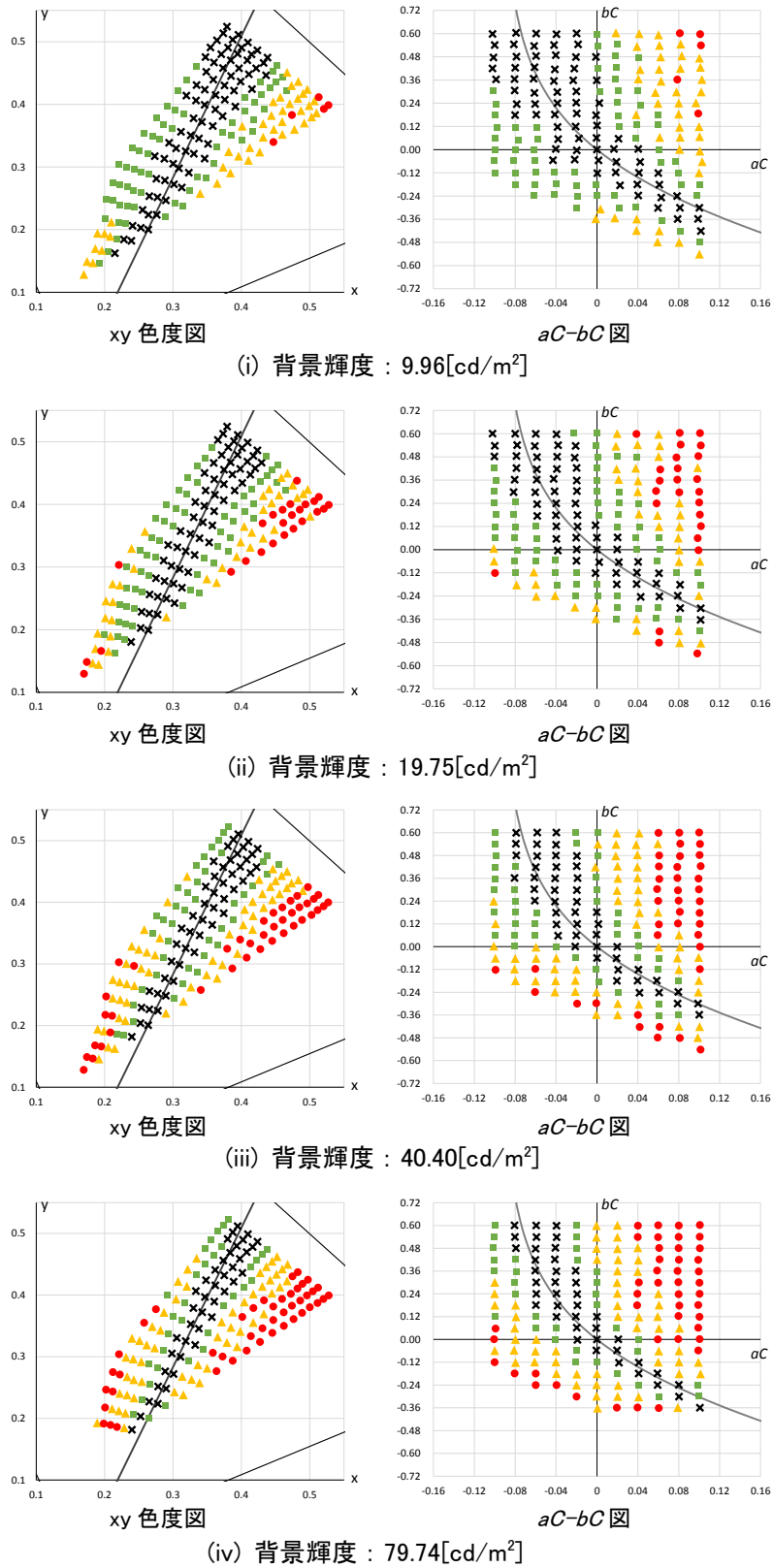


図4.8 実験結果凡例

4.3.2.3. 実験結果

被験者8名中4名以上で評価が得られたかをもとに, 背景輝度 9.96, 19.75, 40.40, 79.74 [cd/m²]の評価結果を, 図4.9(i)~(iv)の xy 色度図(x の範囲は 0.1~0.55, y の範囲は 0.1~0.55 とする)および $aC\text{-}bC$ 図に示す. 緑みの黄(図4.9(i)~(iv)xy 色度図右上, $aC\text{-}bC$ 図左上)から 堇(スマイル)色(図4.9(i)~(iv) xy 色度図左下, $aC\text{-}bC$ 図右下)にかけて「0. 見えない」の評価が帯状に分布し, xy 色度図上では左下部から放射状に分布していることがわかる. 4.10 左の xy 色度図に示す「S 錐体が機能していない場合の混同色中心」(Smith and Pokorny による $x=0.1748, y=0.0000$ を用いた¹⁶⁻¹⁹)と背景の色度座標を結んだ直線を, 図4.9(i)~(iv)の xy 色度図に示すと, 「0. 見えない」の評価の分布と一致することが確認できる. この直線は混同色線と呼ばれ, S 錐体が機能していない場合に区別できない色を示している. 一般色覚者であっても中心視野の S 錐体の分布密度は L 錐体や M 錐体と比べて低い^{17,19-21}, 小視野トリタノピア¹⁹が生じ, S 錐体が機能していない場合の混同色線に沿って「0. 見えない」の評価が分布する結果になったと考えられる. 肉眼では区別がつかない色差の範囲を xy 色度図に示す MacAdam の楕円²²でも, S 錐体が機能していない場合の混同色中心の向きに楕円が位置していることが確認できる. また, 図4.10 左の xy 色度図の混同色線を $aC\text{-}bC$ 図に表現した場合, 図4.10 右の $aC\text{-}bC$ 図のように原点を通る曲線となる. この $aC\text{-}bC$ 図上の混同色線を図4.9(i)~(iv)の $aC\text{-}bC$ 図に重ねた場合も, 「0. 見えない」の評価の分布と一致することが確認できる. aC, bC の絶対値が大きいほど視認性が向上するのではなく, S 錐体が機能していない場合の混同色線からの距離が見やすさに影響していることがわかる.

また, 図4.9(i)から(ii), (iii), (iv)になるにつれ, 「0. 見えない」の評価の分布する範囲が狭まり, 背景輝度が高いほど, 視認性が向上することが示された.



× 0.見えない ■ 1.やっと見える ▲ 2.多少見えにくいが見える ● 3.苦勞せずに(普通に)見える ○ 4.見やすい

図 4.9 実験 4-A 評価結果

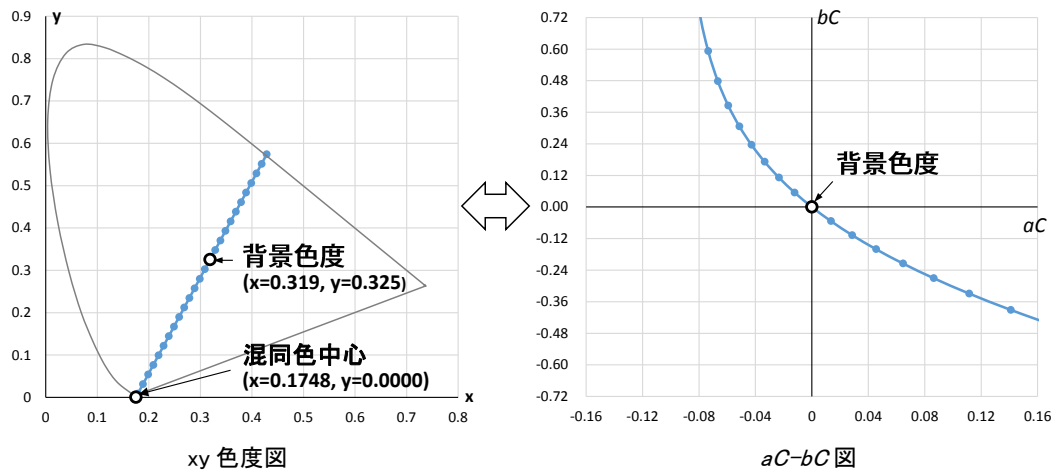


図 4.10 S 錐体が機能していない場合の混同色線

4.3.3. 背景色度および円形視標の色度が変化する場合 [実験 4-B]

4.3.3.1. 実験条件

次に、背景色度が異なる場合でも同様の傾向であるかを確認するため、背景輝度 40 [cd/m²]程度、視対象サイズ 5[min]として、背景色度を変化させて実験を行なった。実験条件を表 4.3 に示す。背景色度は、実験 4-A の D65(x=0.319, y=0.325)、背景輝度 40.40 [cd/m²]の XYZ 刺激値(X= 39.58, Y=40.40, Z=44.25)を基準に、X 刺激値または Z 刺激値の値を増減させ設定した。X 刺激値を増加し X=53.36, Y=40.37, Z=44.24 とした赤系①(x=0.387, y=0.293), さらに X 刺激値を増加し X=71.56, Y=40.42, Z=43.99 とした赤系②(x=0.459, y=0.259), Z 刺激値を減少させ X=39.43, Y=40.26, Z=25.71 とした黄系(x=0.374, y=0.382), X 刺激値を減少させ X=29.47, Y=40.60, Z=44.10 とした緑系(x=0.258, y=0.356), Z 刺激値を増加させ X=39.63, Y=40.23, Z=75.99 とした青系(x=0.254, y=0.258)の 5 条件とした(図 4.11)。実験 4-A と同様に背景と円形視標の輝度コントラストは変化させず(LC≒0), 色度コントラスト(aC, bC)を aCは-0.10 から+0.10 の範囲で 0.02 刻み, bCは-0.60 から+0.60 の範囲で 0.06 刻みを目安とし, PC モニタで出力可能な条件のみ行なった。同一背景色度ごとに円形視標の色度コントラスト(aC, bC)をランダムな順序で変化させ提示した。各被験者, 全条件を 1 回ずつ評価した。

表 4.3 実験 4-B 実験条件

独立変数		条件数
背景色度 (x, y) (図 4.11 参照)	R①: (0.387, 0.293) R②: (0.459, 0.259) Y : (0.374, 0.382) G : (0.258, 0.356) B : (0.254, 0.258)	5
背景輝度 [cd/m ²]	40 (目標値)	1
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]	5	1
LC	0	1
aC	-0.10 ~ +0.10 の範囲で 0.02 刻み	R①:212 R②:172 Y :185
bC	-0.60 ~ +0.60 の範囲で 0.06 刻み	G :131 B :150

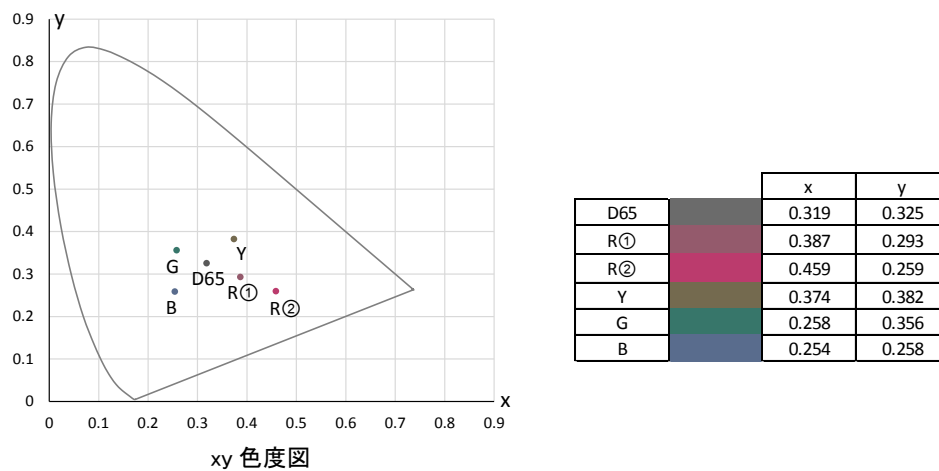


図 4.11 背景色度条件

4.3.3.2. 実験結果

実験 4-A と同様に被験者 8 名中 4 名以上で評価が得られたかをもとに集計し、背景色度条件ごとに、CIE1931 xy 色度図および aC - bC 図に評価結果を示す。

背景色度を赤系①, 赤系②, 黄系, 緑系, 青系とした場合の評価結果を図 4.12(i)~(v)の xy 色度図(x の範囲は(i) 0.1~0.65, (ii) 0.1~0.65, (iii) 0.1~0.6, (iv) 0.1~0.55, (v) 0.1~0.6, y の範囲は(i) 0.05~0.5, (ii) 0.0~0.5, (iii) 0.1~0.55, (iv) 0.15~0.6, (v) 0.1~0.55 とする)および aC - bC 図に示す。S 錐体が機能していない場合の混同色線を図 4.12 の xy 色度図および aC - bC 図にそれぞれ示す。 xy 色度図, aC - bC 図どちらにおいても、「0. 見えない」の評価の分布と混同色線が一致し、前項(実験 4-A)の背景色度が D65 の場合と同様に小視野トリタノピアが生じていると考えられる。 xy 色度図で混同色中心と背景色度を直線で結ぶ混同色線を aC - bC 図上に表現すると、背景色度によって曲線は変化し、背景色度の赤, 黄みが強くなるほど傾きが大きくなり、緑, 青みが強くなるほど傾きは小さくなる(図 4.12)。つまり、背景色度によって、視認性の低下する aC , bC の組み合わせは異なることが示された。

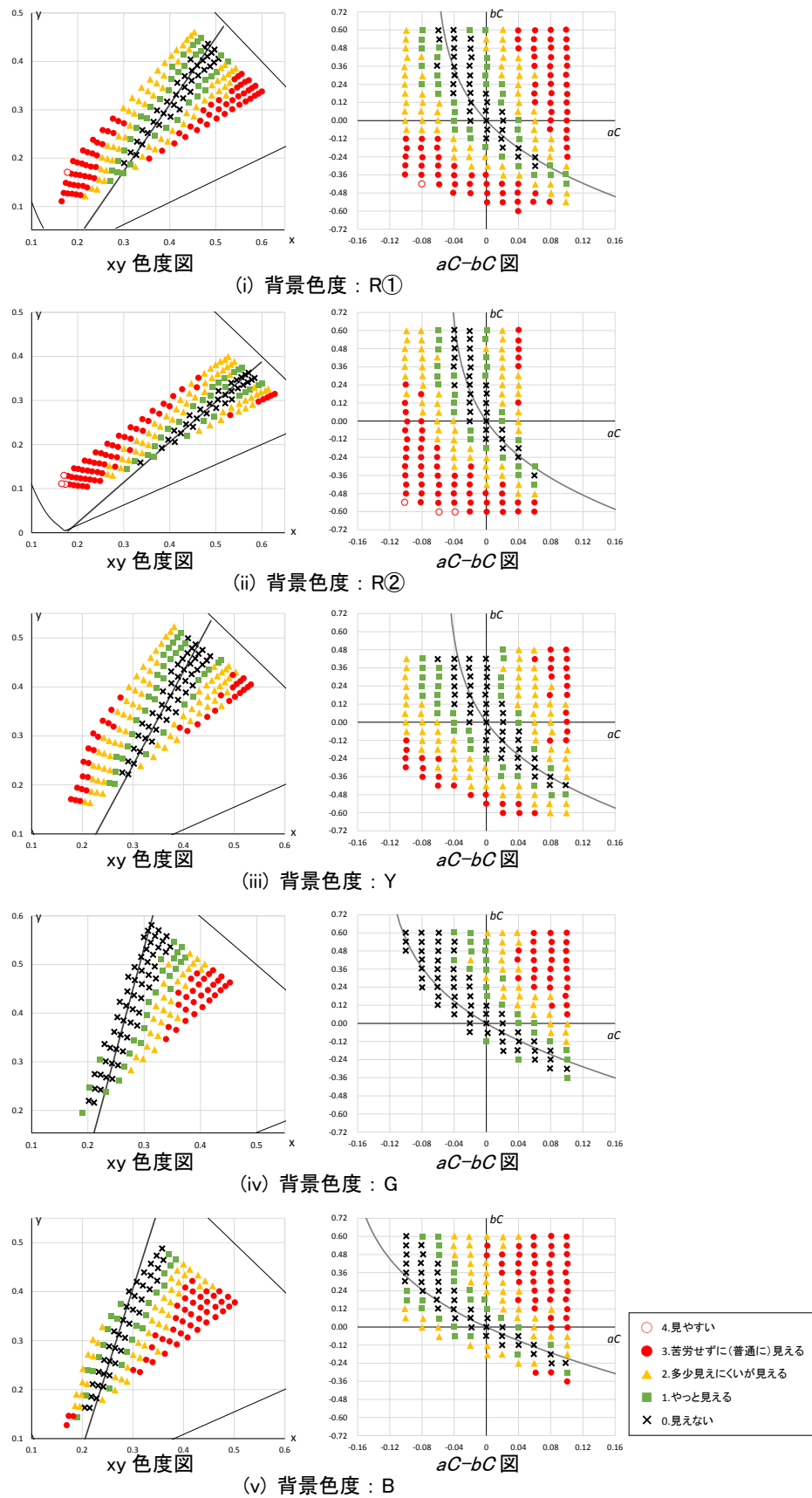


図 4.12 実験 4-B 評価結果

4.3.4. 円形視標サイズおよび円形視標の色度が変化する場合(背景色度 D65) [実験 4-C]

4.3.4.1. 実験条件

実験 4-A, 4-B では、円形視標のサイズを 5[**min**]として実験を行い、小視野トリタノピアの影響により S 錐体が機能していない場合の混同色線付近の条件で視認性が低下する傾向が示された。小視野トリタノピアは視対象サイズが 20[**min**]以下の場合に生じるとされ¹⁸⁾、視対象サイズが大きい場合では、小視野トリタノピアによる視認性低下が生じない可能性があると考えられる。そのため、本実験では円形視標サイズが 5[**min**]より大きい場合について調査する。実験条件を表 4.4 に示す。実験 4-A と同様に、背景色度を CIE 標準光源 D65 に相当する色度($x=0.319, y=0.325$)とし、背景輝度を 40.40[cd/m^2]とした。円形視標のサイズは 10, 20, 60, 90, 120[**min**]の 5 条件で変化させた。実験 4-A, 4-B と同様に背景と円形視標の輝度コントラストは変化させず($LC=0$)、色度コントラスト(aC, bC)を変化させた。実験 4-A の実験結果を踏まえ、S 錐体が機能していない場合の混同色線に沿って aC, bC の条件を一部追加、削減した。円形視標の色度コントラスト(aC, bC)および円形視標のサイズをランダムな順序で変化させ提示した。各被験者、全条件を 1 回ずつ評価した。

表 4.4 実験 4-C 実験条件

	独立変数	条件数
背景色度 (x, y)	(0.319, 0.325)	1
背景輝度 [cd/m^2]	40.40	1
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]	10, 20, 60, 90, 120	5
LC	0	1
aC	-0.10 ~ +0.24の範囲で0.02刻み	217
bC	-0.60 ~ +0.60の範囲で0.06刻み	

4.3.4.2. 実験結果

被験者 8 名中 4 名以上で評価が得られたかをもとに、円形視標のサイズの条件ごとに CIE1931 xy 色度図および $aC \cdot bC$ 図に評価結果を示す。

円形視標サイズ 10, 20, 60, 90, 120[**min**]の評価結果を図 4.13(i)~(v)の xy 色度図(x の範囲は 0.1~0.55, y の範囲は 0.05~0.55 とする)および $aC \cdot bC$ 図に示す。円形視標サイズが大きくなるほど視認性が向上し、図 4.13 (ii)~(v)の円形視標のサイズが 20[**min**]以上の場合では、背景と円形視標の輝度色度コントラストがない条件($LC, aC, bC=0$)を除いた全ての条件で、「1. やっと見える」以上の評価が得られ、円形視標を視認できることが確認できた。しかし、S 錐体が機能していない場合の混同色線付近の条件は評価が低く、実験 4-A, 4-B の結果と同様の特徴が見られた。小視野トリタノピアによって、高周波成分、つまり円形視標の輪郭部の視認性が低下しているためと推察される。

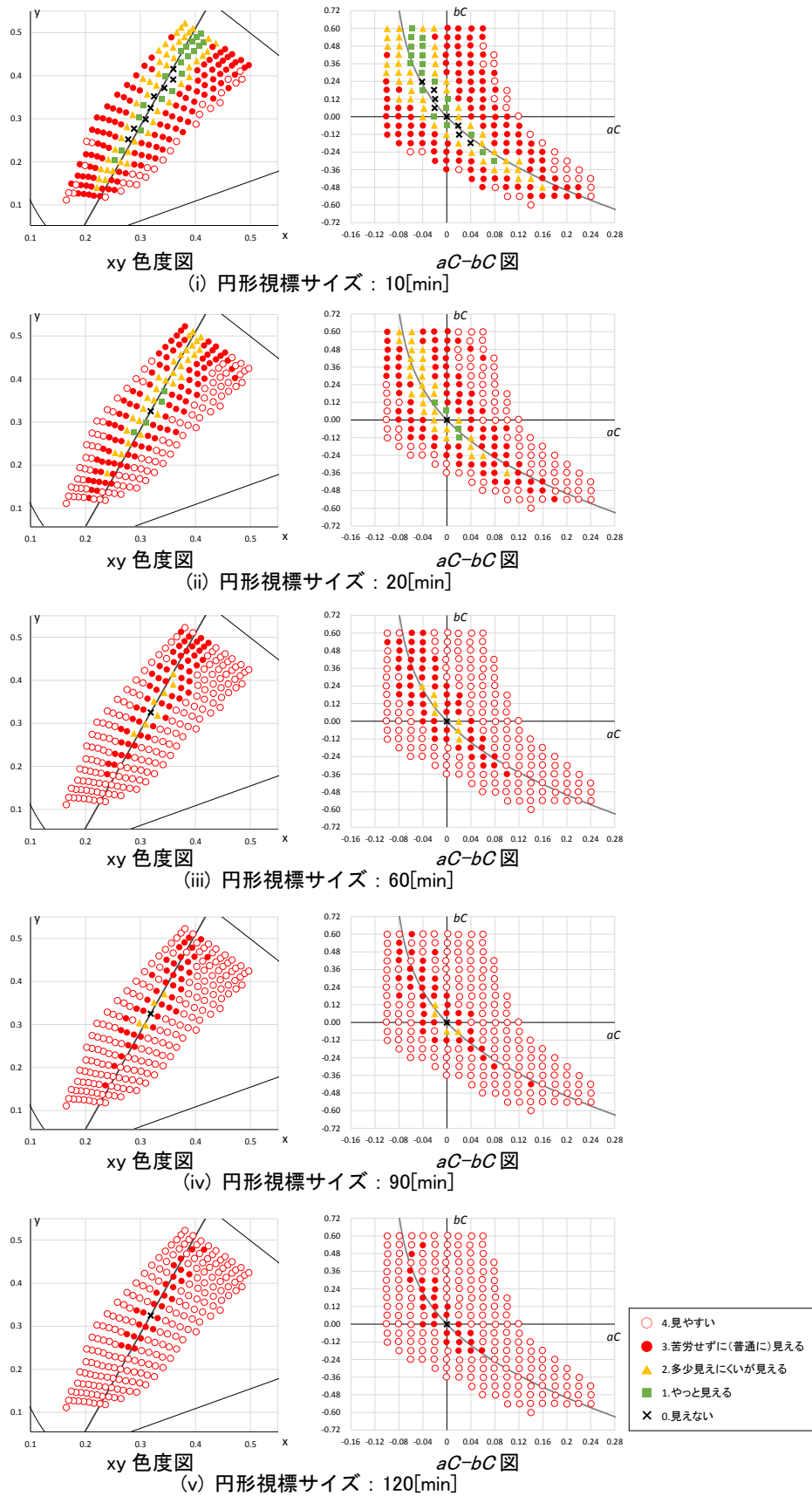


図 4.13 実験 4-C 評価結果

4.3.5. 円形視標の輝度色度が変化する場合(背景色度 D65) [実験 4-D]

4.3.5.1. 実験条件

実験 4-A, 4-B, 4-C は, 輝度コントラストは変化させず($LC=0$), 色度コントラスト(aC, bC)を変化させた. 本実験では輝度コントラスト(LC)と色度コントラスト(aC, bC)が同時に変化する場合は見やすさ評価の変化を調査し, 第2章第2節の輝度コントラスト(LC)の視認閾値との関係について検討する. 実験条件を表 4.5 に示す. 背景色度を CIE 標準光源 D65 に相当する色度($x=0.319, y=0.325$), 背景輝度を $19.75 \text{ [cd/m}^2]$, 視対象サイズを 5 [min] とした. 実験 4-C と同様の背景と円形視標の色度コントラスト(aC, bC)変化の条件に加え, 輝度コントラスト(LC)も変化させる. 第2章第2節の視認閾値 C 値(LC_{th})の推定式より, 視力が 1.50 (本実験の被験者 8 名の両眼視力中央値), 円形視標のサイズが 5 [min] の視認閾値曲線は図 4.14 となり, 背景輝度が $19.75 \text{ [cd/m}^2]$ ($LA=1.30$)の視認閾値 C 値(LC_{th})は, 正対比で 0.0300 , 逆対比で -0.0339 である. LC が視認閾値を越えれば色度に関係なく全ての条件で視認できると仮定し, 輝度コントラスト(LC)を $-0.04 \sim 0.04$ の範囲で変化させ実験を行なった. LC の条件は $-0.04, -0.03, -0.02, -0.01, 0.00, +0.01, +0.02, +0.03, +0.04$ の 9 条件とした. 円形視標の輝度コントラスト(LC)および色度コントラスト(aC, bC)をランダムな順序で変化させ提示した. 各被験者, 全条件を 1 回ずつ評価した.

表 4.5 実験 4-D 実験条件

	独立変数	条件数
背景色度 (x, y)	(0.319, 0.325)	1
背景輝度 [cd/m ²]	19.75	1
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]	5	1
LC	-0.04 ~ +0.04の範囲で0.01刻み	9
aC	-0.10 ~ +0.24の範囲で0.02刻み	最大 222
bC	-0.60 ~ +0.60の範囲で0.06刻み	

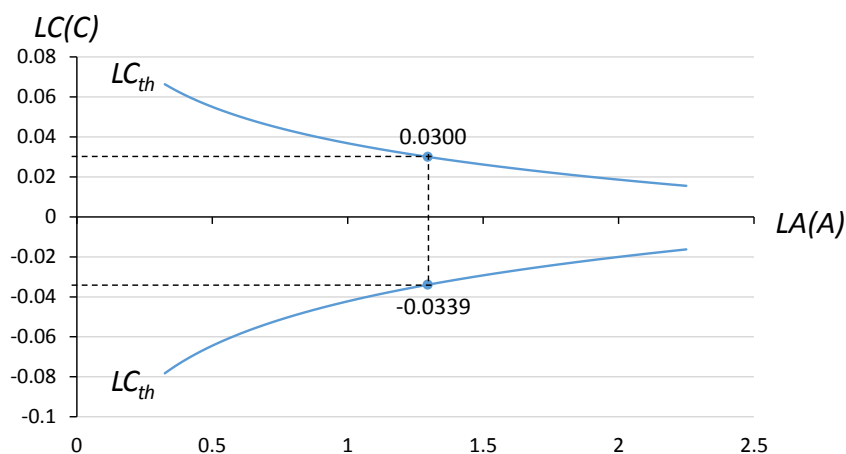


図 4.14 CA 図における視認閾値曲線
(円形視標サイズ : 5[min], 視力 : 1.50)

4.3.5.2. 実験結果

被験者 8 名中 4 名以上で評価が得られたかをもとに、輝度コントラスト(LC)の条件ごとに CIE1931 xy 色度図および $aC-bC$ 図に評価結果を示す。

輝度コントラスト(LC)が +0.04, +0.03, +0.02, +0.01, 0.00, -0.01, -0.02, -0.03, -0.04 の評価結果を図 4.15(i)~(ix)の xy 色度図(x の範囲は 0.1~0.55, y の範囲は 0.05~0.55 とする)および $aC-bC$ 図に示す。 LC の絶対値の増加に伴って、「0. 見えない」の分布の範囲が狭まり、視認性が向上していることが確認できる。

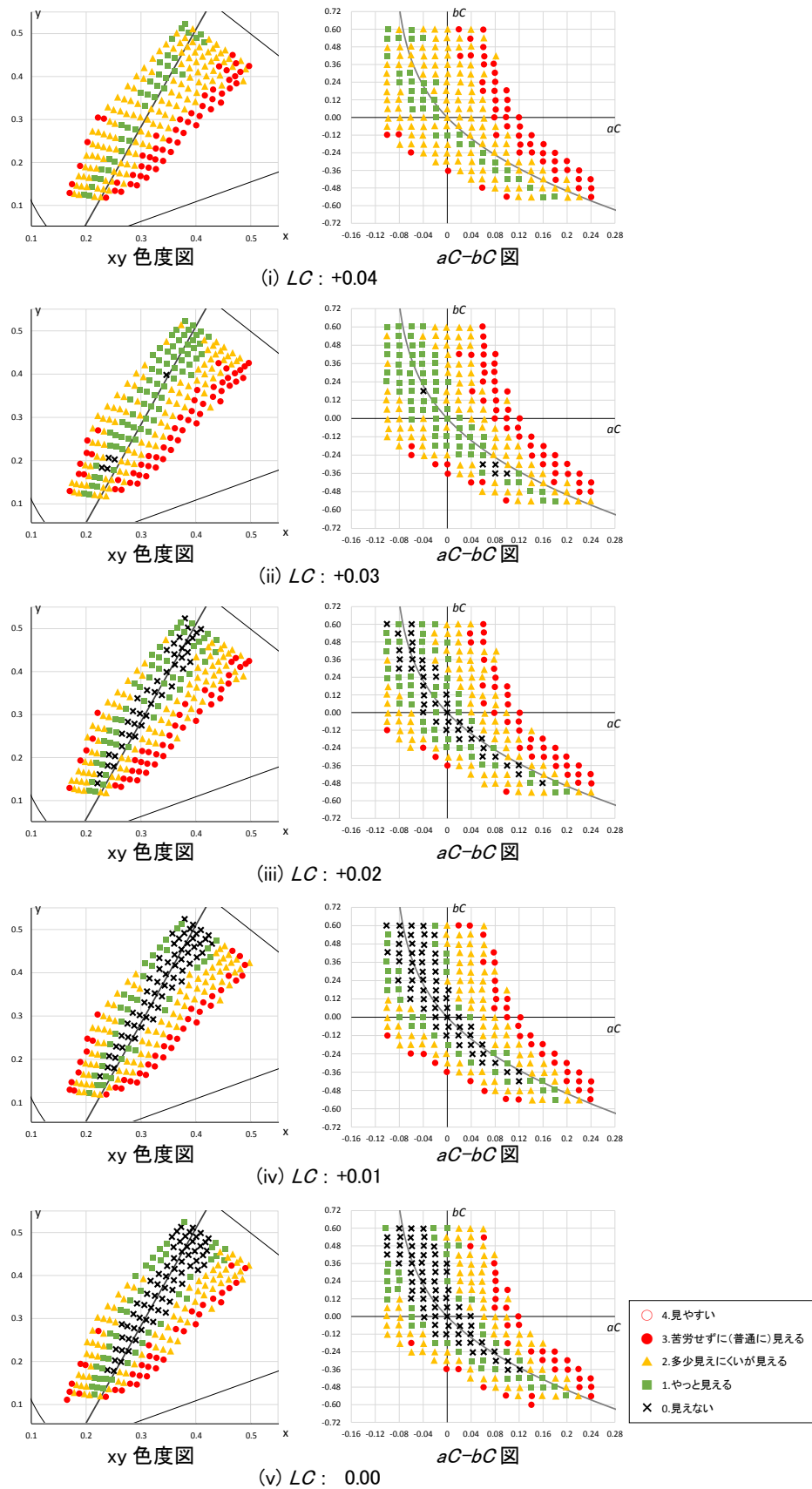


図 4.15 実験 4-D 評価結果

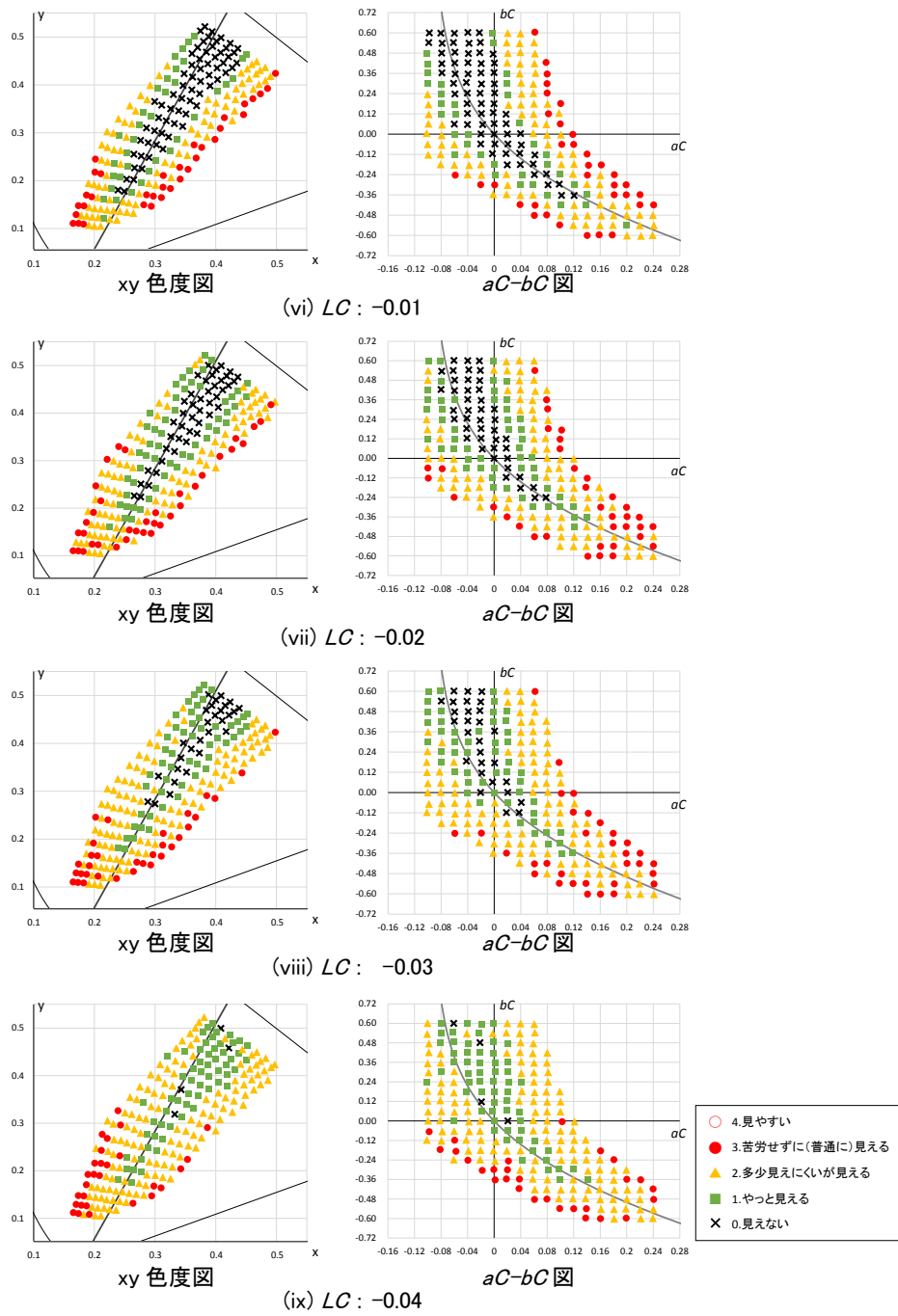


図 4.15 実験 4-D 評価結果 (続き)

本実験は背景色度を D65 に相当する色度に設定したため、図 4.15(i)~(ix)の aC - bC 図上の原点($aC=0$, $bC=0$)の条件は輝度コントラスト(LC)のみが変化し、第2章第2,3節の実験(実験 2-A, 2-C)と同様である。原点の評価結果のみに着目すると、 LC が-0.02 から+0.02 の範囲では「0. 見えない」、 LC が-0.04, -0.03, +0.03 では「1. やっと見える」、 LC が+0.04 では「2. 多少見えにくいが見える」となり、 LC が視認閾値と同等以上となれば視認できていることが確認できる。しかし、図 4.15(ix)の LC が-0.04 の aC - bC 図の評価結果をみると、S 錐体が機能していない場合の混同色線より aC がやや高く、 bC が 0 以上の条件で、「0. 見えない」の評価が分布し、視認性が低い結果となった。 LC の絶対値が視認閾値以上であれば必ずしも全ての円形視標が視認できるのではなく、背景よりも輝度の低い黄色等の特定の条件は視認しづらいことが示された。

また、図 4.15(v)の LC が 0 の場合は S 錐体が機能していない場合の混同色線に対して「0. 見えない」の評価の重心がほぼ一致しているのに対し、図 4.15(i)~(iv)の LC が正対比の場合ではやや青緑側に、図 4.15(vi)~(ix)の LC が逆対比の場合ではやや黄赤側に評価の重心が偏る傾向が示された。しかし、被験者 8 名のうち 2 名ではこの傾向があまり見られず、 LC が変化した場合でも S 錐体が機能していない場合の混同色線を重心として見やすさの評価が推移することが示された。人間の網膜の L 錐体と M 錐体の存在比率は概ね 2:1 とされているが^{17,20)}、個人差が大きいことが知られている²¹⁾。L 錐体が M 錐体より多く分布する影響や、L 錐体と M 錐体の存在比率に個人差があるために、このような結果が生じた可能性があるかと推察される。第5章において、1型(L 錐体が機能していない、もしくは機能が弱い)や2型(M 錐体が機能していない、もしくは機能が弱い)の色弱者について検討するため、この点については第5章でも再度検討したい。

4.4. 第 4 章まとめ

本章第 2 節では、これまで検討を進めた輝度分布より視認性推定が可能な輝度コントラスト評価図(CA 図)をもとに、 $L^*a^*b^*$ 色空間を参照する形で、輝度を測光色(XYZ 表色系 XYZ 刺激値、ただし Y は輝度)へ展開する方法を示した。そして、本章第 3 節ではカラーユニバーサルデザインを検討する前段として、一般色覚者を対象に色を考慮した視認性について検討した。背景や円形視標の輝度色度が増える見やすさ評価実験を行い、 xy 色度図および測光色コントラスト評価図(aC/bC 図)を用いて実験結果を分析し、以下の事項を明らかにした。

- ・ 背景色度が CIE 標準光源 D65 に相当する色度で、輝度コントラスト LC が 0 の場合、小視野トリタノピアの影響により、緑みの黄から董(スマイル)色にかけての色度コントラストをもつ円形視標で視認性が低下することを明らかにした。
- ・ 背景色度が異なる場合でも小視野トリタノピアは生じることを明らかにした。背景色度によって視認性が低下する色度コントラスト aC , bC の組み合わせは異なる。
- ・ 円形視標のサイズが大きくなるにつれて円形視標は検知されやすくなるが、S 錐体が機能していない場合の混同色線付近の条件は視認性が低い傾向がみられることを明らかにした。
- ・ 色度コントラスト aC , bC に輝度コントラスト LC が加わることで全体的に視認性は向上することを明らかにした。しかし、一部の色相では LC が視認閾値を越えても視認が難しい場合がある。

第4章参考文献

- 1) 原直也, 野口太郎: 無彩色背景有彩色文書の文字の明度, 彩度, 色相が読みやすさと等価輝度対比に及ぼす影響, 照明学会誌, 第88巻, 第11号, pp.866-873, 2004.10
- 2) 舟川政美: 色コントラストと可読性に関する実験研究, 照明学会誌, 第84巻, 第11号, pp.785-792, 2000.11
- 3) 秋月有紀, 井上容子: 個人の視認能力を考慮した色の三属性の細部識別閾への影響, 照明学会誌, 第92巻, 第5号, pp.241-249, 2008.5
- 4) 岩田三千子: 視対象周辺の色が若年者および高齢者の視力と主観評価に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第68巻, 第568号, pp.111-117, 2003.6
- 5) 岩田三千子, 北本裕之: 無彩色背景における有彩色と無彩色ラインの弱視者の視認性, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第734号, pp.301-308, 2017.4
- 6) 阪口忠雄, 野口透: 色相, 明度, 彩度がもの見え方に及ぼす影響, 照明学会雑誌, 第53巻, 第5号, pp.213-218, 1969.5
- 7) NPO 法人カラーユニバーサルデザイン機構, <http://www2.cudo.jp/wp/> (accessed 2018.12.7)
- 8) 伊藤啓: カラーユニバーサルデザイン色覚バリアフリーを目指して, 情報管理, 第55巻, 第5号, pp.307-317, 2012.8
- 9) 岡嶋克典: 視機能から見た印刷物におけるユニバーサルデザイン, 日本印刷学会誌, 第46巻, 第3号, pp.124-130, 2009.7
- 10) 中村芳樹: 光環境における輝度の対比の定量的検討法, 照明学会誌, 第84巻, 第8A号, pp.522-528, 2000.8
- 11) 日本工業規格: 視力検査装置, JIS T 7309, 2002
- 12) 公益財団法人一新会: 石原色覚検査表 II 国際版 38 表, 2014
- 13) 田邊詔子, 市川一夫: 標準色覚検査表 第1部先天異常用(SPP-1), 2016
- 14) 竹村祐里子, 嘉納裕人, 加藤洋子, 中村芳樹: 色の影響を考慮した視認性評価法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.605-606, 2016.8
- 15) 嘉納裕人, 加藤洋子, 中村芳樹: XYZ 表色系を用いた視認性評価法の基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演集, 環境工学 I, pp.541-542, 2017.9
- 16) Vivianne C. Smith and Joel Pokorny: Spectral Sensitivity of the Foveal Cone Photopigments between 400 and 500 nm, Vision Research, Vol.15, No.2, pp.161-171, 1975.2
- 17) 矢口博久: カラー画像工学の基礎と応用 第1回視覚と色, テレビジョン学会誌, 第47巻, 第1号, pp.68-76, 1993.1
- 18) 矢口博久ら: 新編色彩科学ハンドブック[第三版], 第10章色覚モデルと色の見えモデル, pp.515-556, 2011.4
- 19) 篠田博之, 藤枝一郎: 色彩工学入門 定量的な色の理解と活用, 2007.4
- 20) J. J. Vos and P. L. Walraven: Back to Helmholtz, Color Research Application, Vol. 16, No. 6, pp.355-359, 1991.12
- 21) Austin Roorda and David R Willams.: The Arrangement of the Three Cone Classes in the Living Human

Eye, Nature, Vol. 397, pp.520-522 1999.2

- 22) D. L. MacAdam: Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight, Journal of the Optical Society of America, Vol. 32, No. 5, pp.247-274, 1942.5

第5章 色弱者を対象とした色の影響を考慮した
見やすさ評価に関する検討

5.1. 本章の目的

前章では、輝度分布より視認性推定が可能な輝度コントラスト評価図(CA 図)の手法をもとに、 $L^*a^*b^*$ 色空間を参照する形で、XYZ 表色系 XYZ 刺激値(Y は輝度)から測光色のコントラスト(Lab コントラスト(LC, aC, bC))を表現する手法を提案した。そして、カラーユニバーサルデザインについて検討する前段として、一般型の色覚を持つ者(以下、一般色覚者)を対象に、円形視標を用いて色を考慮した視認性について検討した。背景や円形視標の輝度色度、円形視標のサイズを変化させた見やすさ評価実験の結果を、CIE1931 xy 色度図、および、横軸を aC ([赤・緑]コントラスト)、縦軸を bC ([黄・青]コントラスト)として表現する測光色コントラスト評価図(aC - bC 図)に表現した。

本章では、カラーユニバーサルデザインへ展開させるため、先天性の色弱とされる 1 型(P 型)、2 型(D 型)の色弱者の視認性を調査し、前章で検討した一般色覚者との差異を検討する。日本における 1 型、2 型の色弱の発生割合は、1 型が男性の 1.5%程度、2 型が男性の 3.5%程度とされ、1 型、2 型を合わせて男性の 20 人に 1 人程度とされている^{1~4)}。女性における発生割合は男性より少なく、500 人に 1 人程度とされている¹⁾。1 型、2 型の色弱者は、ともに赤みと緑みの色差が一般色覚者に比べて分かりにくいとされ、総称して赤緑色弱と呼ばれることもある²⁾。本章でははじめに、1 型、2 型の色弱者を対象に、色の見え方に関して日常生活で不便に感じることを中心にヒアリング調査行ない、色弱者の色の見え方の特徴を調査する。そして、前章で一般色覚者を対象に行なった円形視標を用いた見やすさ評価実験を、1 型、2 型の色弱者を対象に行い、前章の一般色覚者の評価結果と比較する。

5.2. 色弱者を対象としたヒアリング調査

5.2.1. 対象者

本章では、先天性の色弱とされる 1 型(P 型), 2 型(D 型)の色弱者を対象に調査を行う。

先天性の色弱は、網膜の視細胞の機能の欠如もしくは機能低下によって生じるとされ、視細胞の L, M, S 錐体のどの錐体の機能に問題があるかによって、1 型(P 型), 2 型(D 型), 3 型(T 型)に分類されている¹⁻⁴⁾。人間の眼の構造を図 5.1, LMS 錐体の分光感度曲線を図 5.2 に示す。の L 錐体と M 錐体を特徴づける遺伝子は性染色体の X 染色体に存在し、女性の性染色体は「XX」で X 染色体を 2 本持つのに対し、男性の性染色体は「XY」で X 染色体を 1 本しか持たないため、男性の方が 1 型, 2 型の色弱が発生しやすいと考えられている²⁻⁴⁾。

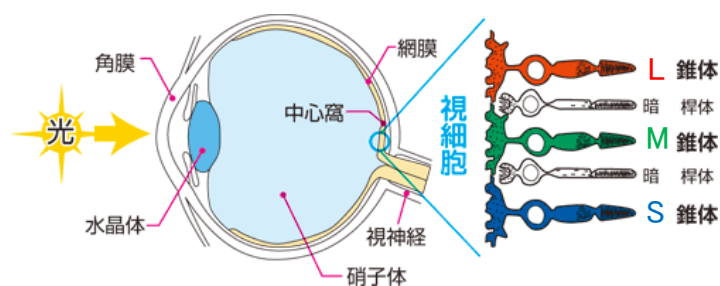


図 5.1 人間の眼の構造

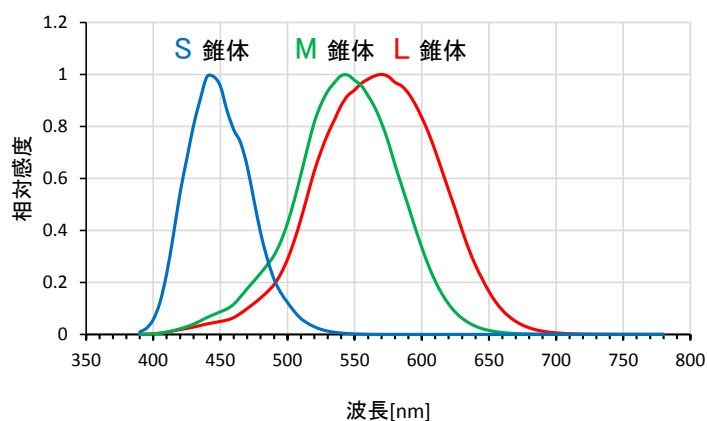


図 5.2 錐体の分光感度曲線⁵⁾

本章では、先天性の色弱の症状をもつ被験者を募集し、20~30 代の男性 8 名が実験に参加した(表 5.1)。前章の一般色覚者の被験者との区別のため、被験者 No. を 9~16 とし、ナンバリングする。視力矯正器具(眼鏡やコンタクト)を使用する被験者に対しては、色覚検査、視力検査、実験の際、ブルーライトカットや波長選択性の機能のある視力矯正器具を使用し

ないよう教示した。石原色覚検査表Ⅱ⁶⁾(第 4 章図 4.5 参照)および標準色覚検査表 SPP-1⁷⁾(第 4 章図 4.6 参照)を用いて色覚検査を行なったところ、8 名とも色弱と判定され、そのうちの 1 名が 1 型(被験者 No. 9)、7 名が 2 型(被験者 No. 10~16)であった。石原色覚検査表Ⅱ⁵⁾と標準色覚検査表 SPP-1⁶⁾は、1 型または 2 型の分類は可能であるが、錐体の機能の欠如または機能低下(強度・弱度)の分類はできない。

表 5.1 被験者リスト(色弱者)

被験者 No.	性別	年齢	矯正	両眼視力 (観察距離: 2500 [mm])	色覚型
9	男	22	裸眼	1.80	1 型
10	男	26	裸眼	1.65	2 型
11	男	24	コンタクト	1.55	2 型
12	男	24	コンタクト	1.95	2 型
13	男	30	メガネ	1.25	2 型
14	男	23	裸眼	1.70	2 型
15	男	23	メガネ	1.20	2 型
16	男	25	裸眼	2.20	2 型

また、観察距離 2500[mm]で測定した両眼視力を表 5.1 に示す。視力測定は、JIS T 7309:2002⁸⁾に準拠し、ランドルト環を用いて測定した。背景の輝度を 200[cd/m²]、ランドルト環の輝度を 10[cd/m²]程度とし、5 個のうち 3 個以上正答するかを判定基準として行なった。視力値は、視認可能な最小切れ目幅の視角[min]を逆数で表現したものである⁸⁾。視力測定に使用したランドルト環のサイズおよび間隔は、視力値 0.40 から 2.25 の間で 0.05 刻みとした。

5.2.2. 調査結果

「色の見え方に関して日常生活で不便に感じることを中心に、色の見え方に関してヒアリング調査を行なったところ、表 5.2(1 型 1 名)および表 5.3(2 型 7 名)のような意見が挙げられた。

1 型は 1 名と少ないが、「赤-茶-緑が区別しづらい」、「肉の焼き具合がよく分からない」、「色分けで示された散布図の内容が理解しにくい」、「学習(しつけや経験)から色名を言うことがある」、「4 色ボールペンの色が選びにくいことがある(赤と緑または緑と黒)」等のように、1 型と 2 型で共通する項目があった。しかし、1 型と 2 型、また同じ 2 型の中でも、区別しづらいと感じる色の組み合わせは個人差があり、ある被験者に挙げられた項目が、他の被験者には当てはまらないことも多かった。

また 1 型は、2 型と比べ、「赤のホタルスイッチが点灯していか分からないことがある」や

「赤のレーザーポインタだとどこを指しているのか全く分からない」のように、赤が暗く見える特徴が見られた。

表 5.2 ヒアリング結果(被験者 No. 9, 1 型 1 名)

・赤-茶-緑が区別しづらい
・肉の焼き具合がよく分からない(自分は乗せるだけ, 人に焼き加減を聞く等の対策をとる)
・色分けで示された散布図の内容が理解しにくいことがある
・学習(しつけや経験)から色名を言うことがある
・紫と青(水色), 紫とピンクを混同する
・青と紫のセーターを間違えて買ったことがある
・買い物は一人で行かない
・普段の洋服を選ぶのも難しい
・新緑は黄緑に見えるが, 紅葉は茶色だと思う
・赤のホタルスイッチ(図 5.3 参照)が点灯しているか分からないことがある, 斜めから見ると見にくい
・自動車の信号の青黄赤の区別はつく, 歩行者用の赤は古いものだと点灯していることが分かりにくい
・信号は LED になってから分かりやすくなった
・なすや巨峰は青っぽく見える
・はじめて見る物の色は分からない, 特に紫は経験で色を判断している
・黒板の赤チョークで書かれた文字が見にくい
・プレゼン資料の色使いを指摘されることがある(赤が見やすいと思っていないため)
・プレゼン資料はあまり赤を使わない
・エクセルの折れ線グラフや散布図等のデフォルトの配色がわかりづらい
・グラフの赤と黒の色の区別が付かないことがある
・電子機器の状態を知らせる小さい LED ランプやホタルスイッチ(オレンジ, 黄, 黄緑, 赤)の色は見分けられる
・4 色ボールペンの黒と緑が選べないことが時々ある
・ペンはオレンジと緑を好んで使っている
・黒文字と赤文字が同じ色に見える
・赤のレーザーポインタだとどこを指しているのか全く分からない
・東京メトロ(図 5.5 参照)の副都心線と丸の内線のリングマーク(Ⓕ, Ⓜ)が同じ色に見える
・東京メトロ(図 5.5 参照)の日比谷線のリングマーク(Ⓜ)の色は緑だと思っていた
・急行の文字が赤色という認識はある
・人の顔色は普通と白っぽい時の区別がつきづらいかもしれない
・色鉛筆は朱色と茶色の区別がつきづらい, 12 色色鉛筆は紫のバリエーションが少ないから区別できると思う
・赤~黄~緑~青のグラデーションで表現されたサーモグラフィーのような図は理解しにくい
・アニメのキャラクターの髪色が思っていた色と違ったことがある
・ボードゲームの駒の色が区別できないことがある
・車のテールランプやブレーキランプが点いているか見にくいことがある

表 5.3 ヒアリング結果(被験者 No. 10～16, 2 型 7 名)

・赤-茶-緑が区別しづらい(被験者 No.10, 11, 12, 13, 14, 15, 16)
・肉の焼き具合がよく分からない(自分は乗せるだけ, 人に焼き加減を聞く等の対策をとる)(被験者 No.10, 11, 12, 13, 14, 15, 16)
・色分けで示された散布図の内容が理解しにくいことがある(被験者 No. 10, 11, 12, 13, 14, 15)
・学習(しつけや経験)から色名を言うことがある(被験者 No.13, 14)
・濃い緑色(ほうれん草等)の野菜が腐っているかどうかを色で判断できない(被験者 No.10, 11, 12)
・野菜が腐っているかどうかを色で判別できない(被験者 No.14)
・黒板の赤チョークで書かれた文字は読める(被験者 No.10, 15, 16)
・黒板の赤チョークで書かれた文字が読みにくい(被験者 No.12)
・黒板の赤チョークで書かれた文字はほぼ読めない(被験者 No.13)
・黒板の青チョークで書かれた文字は読めない(被験者 No.10)
・プレゼン資料の色使いを指摘される(赤が見やすいと思っていないため)(被験者 No.12)
・研究で使う組織の染色画像(赤-緑で表現される)が分かりにくい(被験者 No.11)
・赤～黄～緑～青のグラデーションで表現されたサーモグラフィーのような図は理解しにくい(被験者 No.10)
・抵抗のカラーコード(図 5.4 参照)表示が分からないことがある(被験者 No.14)
・東京工業大学すずかけ門付近の植栽(レッドロビン, 緑と赤の葉)の見たときに緑色なのか赤色なのか混乱する(被験者 No.11)
・電子機器の状態を知らせる小さい LED ランプやホテルスイッチ(オレンジ, 黄, 黄緑)の色が見分けづらい(被験者 No.11, 12, 16)
・電子機器の状態を知らせる小さい LED ランプやホテルスイッチ(オレンジ, 黄, 黄緑, 赤)の色が見分けづらい(被験者 No.10, 14)
・電子機器の状態を知らせる小さい LED ランプやホテルスイッチ(オレンジ, 黄, 黄緑)の色が見分けづらい, 比較対象がないと色が分からない(被験者 No.13, 15)
・赤パプリカが一瞬緑に見えることがある(被験者 No.11)
・パプリカは形から色を想像する(パプリカだから赤, 等)(被験者 No.13)
・緑から赤になる過程のトマトの色がよく分からないときがある(被験者 No.14, 15)
・イルミネーションの色がよく分からない(被験者 No.10, 11, 13)
・花火の色が分かりづらい気がする(被験者 No.10, 14, 16)
・トイレの鍵(赤と白(青ではない)の場合)の色が分かりにくい(被験者 No.10)
・トイレの鍵(赤・青)の色が暗い場所だと分からない(被験者 No.16)
・はじめて見る物の色は分からない, 経験で色を判断している(被験者 No.13, 14)
・4 色ボールペンの赤と緑が選べない(被験者 No.13, 15)
・4 色ボールペンの黒と緑が選べない(被験者 No.10)
・フリクションボールペン(少し薄い色のインク)で書かれた黒と緑の文字の色の違いが分かりにくい(被験者 No.16)
・ペン(ボールペン等)で書かれた黒と緑の文字の色の違いが分かりにくい(被験者 No.10)
・資料を作成する際, カラー印刷をあまりしなくて良い(モノクロ印刷で対応できそうなものにするよう心がけている)(被験者 No.13, 14)
・資料を作成する際, 色を使うときは赤と緑の同時使用を避ける(被験者 No.13, 14, 15, 16)

表 5.3 ヒアリング結果(被験者 No.10~16, 2 型 7 名) (続き)

・資料を作成する際、青を良く使う(被験者 No.14, 16)
・換気扇のスイッチの光る部分(ホテルスイッチ, 図 5.3 参照)の色が緑と赤だか分からない(音で判断する)(被験者 No.13)
・紅葉は赤っぽいと認識しているので赤く見える, 緑から赤に変わる様子はよく分からない(被験者 No.13)
・紅葉は一応, 赤やオレンジっぽく見える(被験者 No.10, 15)
・紫と水色, 紫とピンクが間違えやすい自覚がある(被験者 No.13, 14)
・路線図(都営地下鉄, 図 5.6 参照)において有楽町線(ゴールド)と都営新宿線(リーフ)の色が似た色に見えるときがある(被験者 No.13)
・路線図(都営地下鉄, 図 5.6 参照)副都心線の茶色と丸の内線の色が似た色に見えるときがある(被験者 No.13)
・路線図の延長部分の薄い色がグレーに見えるところがある(被験者 No.13)
・路線図(東京メトロ, 図 5.5 参照)の有楽町線と銀座線の色が似た色に見える(被験者 No.13)
・路線図(東京メトロ, 図 5.5 参照)の大江戸線が緑に見えるところがある(被験者 No.13)
・路線図(東京メトロ, 図 5.5 参照)の副都心線と丸の内線の色が似た色に見えるときがある(被験者 No.15)
・路線図(都営地下鉄, 図 5.6 参照)の薄紫がグレーに見える, 日比谷線はピンクっぽく見える(被験者 No.15)
・路線図(東京メトロ, 図 5.5 参照)の副都心線(茶色)を赤系の色だと思っていた(被験者 No.15)
・最近の路線図は工夫されているため, 色の区別に関して問題ないと思う(被験者 No.10)
・色鉛筆のねずみいろとピンクと銀色が区別しづらい(被験者 No.13)
・色鉛筆の赤と緑, オレンジと黄緑が区別しづらい(被験者 No.13)
・色鉛筆は色の名前を確認してから使う(被験者 No.10, 14)
・色鉛筆は色の名前が書いてある位置に戻さないと気が済まない, 整理整頓を心がけている(被験者 No.10)
・電車の急行, 各停の区別は文字で判断, 色は特に気にしてない(被験者 No.10, 13, 14, 16)
・メガネのつるが青だと思って買ったらピンクだったことがある(被験者 No.13)
・買い物するときは色を間違えないようによく気をつけている(被験者 No.10)
・買い物の際, 服の色が茶色だと思ったら赤だったことがある(被験者 No.15)
・プロジェクターで映されたスライドで赤だと思っていた部分が紙の資料で見たら緑だったことがある(被験者 No.13, 14)
・プロジェクターで映されたものは基本色が見えづらい(被験者 No.10)
・人の顔色がよくわからない(体調, すこし赤い, 日焼け等)(被験者 No. 14, 15)
・顔色ではなく顔の表情で相手の体調等を理解しようとしている(被験者 No.10)
・信号の黄色と赤が遠くのものだと見分けづらい(被験者 No.15)
・信号の黄色と赤は距離に関わらず見分けづらい(被験者 No.14)
・信号は LED になってから分かりやすくなった(被験者 No.13, 14)
・UNO の緑と赤のカードについて, 見る時間が一瞬だと区別できない(被験者 No.14)
・選挙結果を色の分布で示されると分かりにくいと感じる(図 5.7 参照)(被験者 No. 10, 13)



上段：緑，下段：赤

図 5.3 ホタルスイッチの例



線の位置および色味で抵抗値を表す

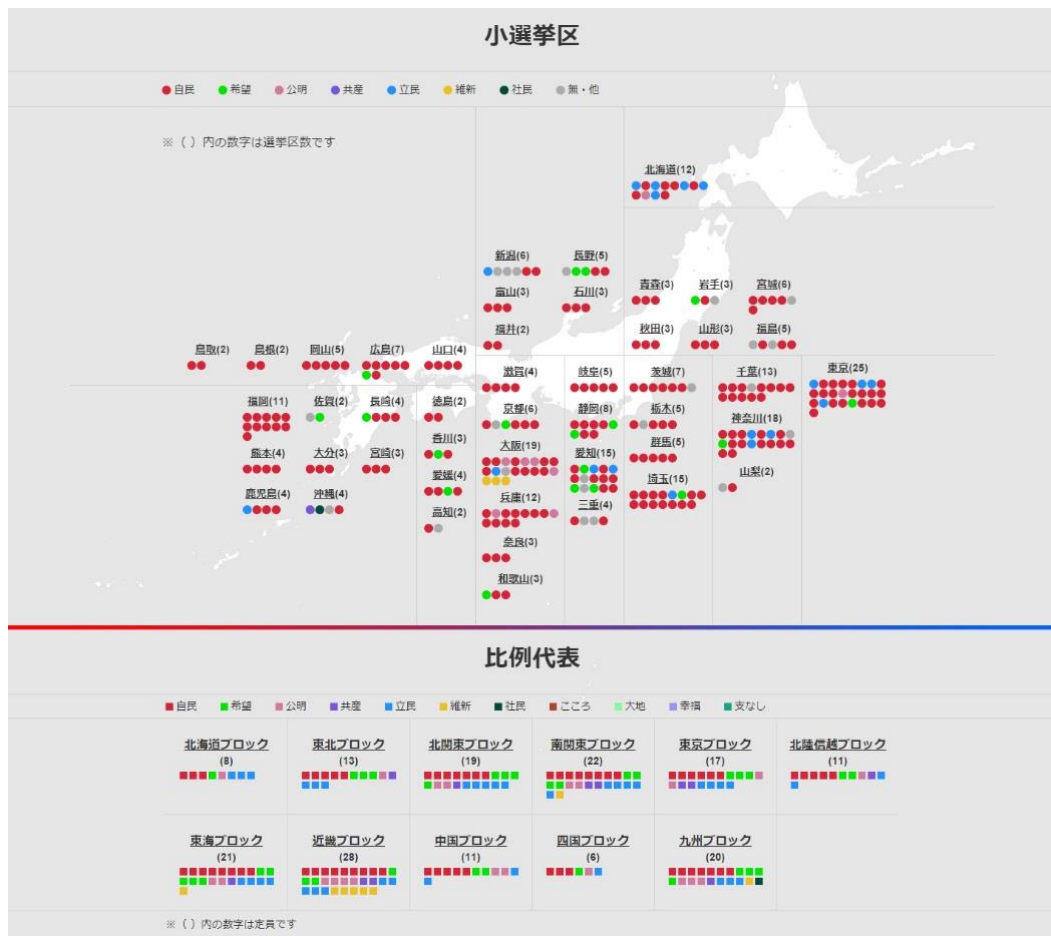
図 5.4 抵抗のカラーコードの例



図 5.5 路線図(東京メトロ)



図 5.6 路線図(都営地下鉄)



<https://www.nhk.or.jp/senkyo/database/shugiin/2017/>

図 5.7 選挙結果を色で示した図の例

5.3. 色弱者を対象とした円形視標の見やすさ評価

5.3.1. 実験概要

本節では、前章で一般色覚者を対象に行った実験(実験 4-A~4-D)と同一の実験室および実験装置を用いて、表 5.1 に示した 1 型, 2 型の色弱者を対象に、実験 4-A~4-D と同様の実験を行なった。図 5.8 に実験室の概要を示す。被験者は 2500[mm]離れた位置から 27 インチ PC モニタ(EIZO Color Edge CG277, 2560×1440[px])に提示される均一背景上の円形視標(図 5.9)を両眼で観察し、見やすさを図 5.10 に示す(0.見えない 1.やっと見える 2.多少見えにくいが見える 3.苦勞せず(普通に)見える 4.見やすい)の 5 段階の評価尺度で回答する。実験室内では PC モニタ以外に発光するものはなく、モニタの周辺部の輝度はほぼ 0[cd/m²]であった。背景の XYZ 刺激値, 円形視標の XYZ 刺激値, 円形視標のサイズを, PC モニタの 8bit(256 階調)の RGB 階調値によって変化させ実験を行なった。実験条件は一般色覚者を対象に行った前章の実験(実験 4-A~4-D)と同一とし、実験 5-A~5-D を行なった。それぞれ、円形視標の色度コントラストに加えて、実験 5-A は背景輝度, 実験 5-B は背景色度, 実験 5-C は円形視標サイズ, 実験 5-D は輝度コントラストの影響を検討している。

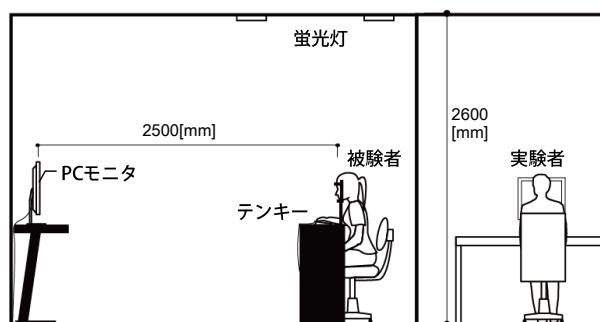


図 5.8 実験室概要

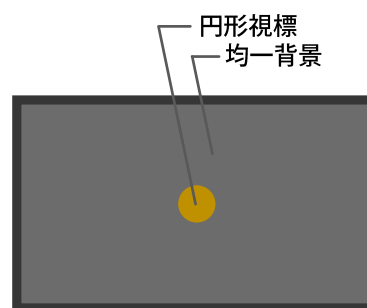


図 5.9 PC モニタ上の提示刺激の様子

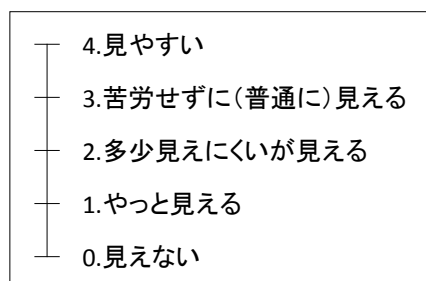


図 5.10 評価尺度

5.3.2. 背景輝度および円形視標の色度が変化する場合(背景色度 D65) [実験 5-A]

5.3.2.1. 実験条件

実験 5-A では、前章の実験 4-A と同様に、色度コントラスト aC, bC と背景輝度を変化させた場合の見やすさ評価について調査し、前章の実験 4-A の一般色覚者の評価結果との差異について検討する。背景色度を CIE 標準光源 D65 に相当する色度(色彩輝度計による CIE1931xy 色度座標測定値は $x=0.319, y=0.325$)とし、背景輝度を 9.96, 19.75, 40.40, 79.74[cd/m²]の 4 条件で変化させた。円形視標のサイズは 5[mm]に設定し、背景と円形視標の輝度コントラストは変化させず($LC=0$)、色度コントラスト(aC, bC)を変化させて実験を行なった。 aC は-0.10 から+0.10, bC は-0.54 から+0.60 の範囲を目安として、PC モニタで出力可能な範囲で変化させた(最大 183 条件)。同一背景輝度ごとに、円形視標の色度コントラスト(aC, bC)をランダムな順序で変化させて提示した。各被験者、全条件を 1 回ずつ評価した。その他詳細、実験条件の一覧表については、前章第 3 節第 2 項(4.3.2)を参照されたい。

5.3.2.2. 分析方法

前章と同様に、背景輝度条件ごとに、CIE1931xy 色度図および aC - bC 図を用いて評価結果を示す。xy 色度図は、実験で提示された円形視標の RGB 階調値より、XYZ 刺激値および色度座標 x, y を算出し、評価結果をプロットする。 aC - bC 図は、実験で提示された円形視標の RGB 階調値より算出した XYZ 刺激値をもとに、第 4 章で示した式(4.6)、式(4.8)によって測光色コントラスト(LC, aC, bC)を算出し、横軸： aC ([赤-緑]コントラスト)、縦軸： bC ([黄-青]コントラスト)として表現する。

前章の実験 4-A~4-D では、被験者の 8 人中の半数で評価が得られたかを判定基準として実験結果を示したが、色弱者は錐体の機能の欠如や機能低下の程度によって個人差が大きく生じると考えられる。そのため、本節では 1 名ずつ実験結果を示すこととする。評価 4 と回答した条件を○、評価 3 と回答した条件を●、評価 2 と回答した条件を▲、評価 1 と回答した条件を■、評価 0 と回答した条件を×とし(図 5.11)、CIE1931xy 色度図および aC - bC 図に評価結果を示す。

○	4.見やすい
●	3.苦勞せずに(普通に)見える
▲	2.多少見えにくいが見える
■	1.やっと見える
×	0.見えない

図 5.11 実験結果凡例

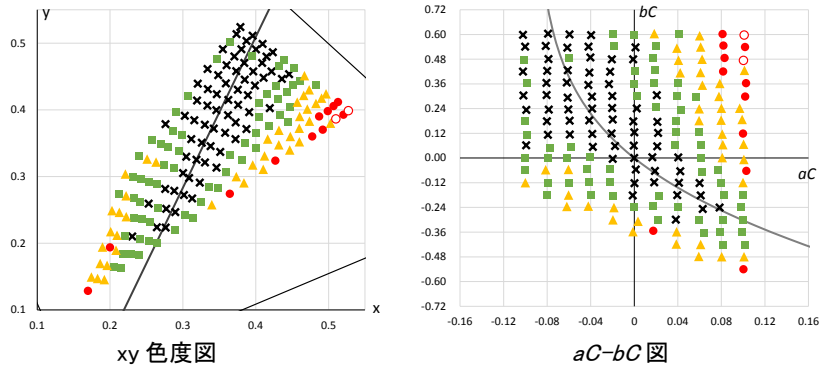
5.3.2.3. 実験結果

図 5.12 に 1 型 1 名(被験者 No. 9), 図 5.13 に 2 型 1 名(被験者 No. 16)の評価結果を示す。背景輝度 9.96[cd/m²]の場合の評価結果を(i), 背景輝度 19.75[cd/m²]の場合の評価結果を(ii), 背景輝度 40.40 [cd/m²]の場合の評価結果を(iii), 背景輝度 79.74[cd/m²]の場合の評価結果を(iv)として, xy 色度図(xの範囲は 0.1~0.55, yの範囲は 0.1~0.55 とする)および aC-bC 図に評価結果をそれぞれ示す。

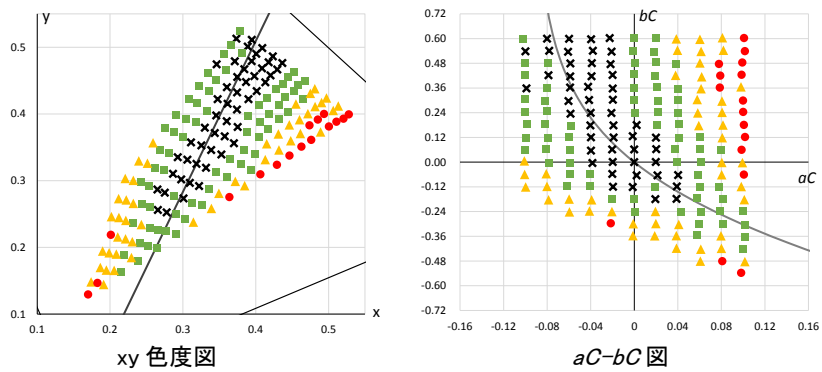
1 型 1 名(図 5.12)では, 前章の一般色覚者では「0. 見えない」と評価され視認できなかった堇(スミレ)色(xy 色度図左下, aC-bC 図右下)側の条件について, 「1. やっと見える」以上の評価が得られ視認可能となっているが, 概ね前章の一般色覚者(第 4 章図 4.9 参照)と同様に, 緑みの黄(図 5.12 (i)~(iv)xy 色度図右上, aC-bC 図左上)から堇(スミレ)色(図 5.12 (i)~(iv)xy 色度図左下, aC-bC 図右下)にかけての条件で視認性が低下していることが確認できる。また, 2 型 1 名(図 5.13)でも, やや評価に乱れがあるが, 一般色覚者と同様に, 緑みの黄から堇(スミレ)色にかけて「0. 見えない」の評価が分布していることが確認できる。

また, ‘S 錐体が機能していない場合の混同色中心(x=0.1748, y=0.0000)^{3,9-11)}’ と本実験の背景色度(x=0.319, y=0.325)を通る混同色線(第 4 章図 4.10 参照)を図 5.12, 図 5.13 の xy 色度図および aC-bC 図に示す。前章の一般色覚者の場合(実験 4-A)では, L 錐体や M 錐体の分布密度に比べ, S 錐体の分布密度が低いことが起因して生じる小視野トリタノピア³⁾によって, S 錐体が機能していない場合の混同色線に沿うように視認性が低下することが示されていた。本実験でも, 同様の傾向であることが確認できた。他の被験者(被験者 No. 10~15)でも, 一般色覚者に比べ「0. 見えない」の評価の範囲が aC([赤-緑]コントラスト)軸方向にやや広い者も居たが, S 錐体が機能していない場合の混同色線に沿って視認性が低下し, 概ね一般色覚者と同様の傾向であることを確認した。

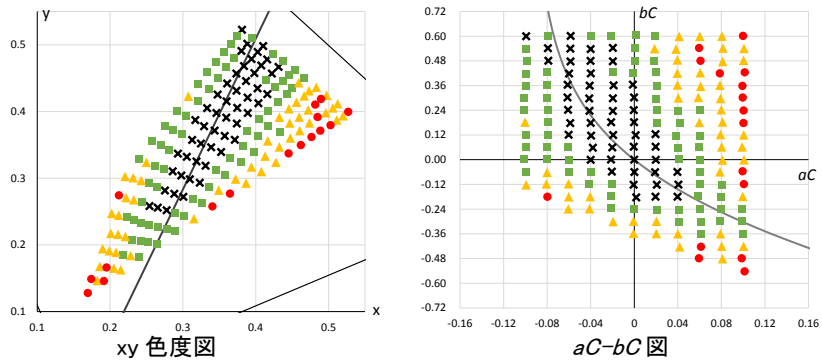
また, 前章の一般色覚者の場合(実験 4-A)と同様に, 背景輝度が増加するほど視認性が向上する傾向も確認できた。



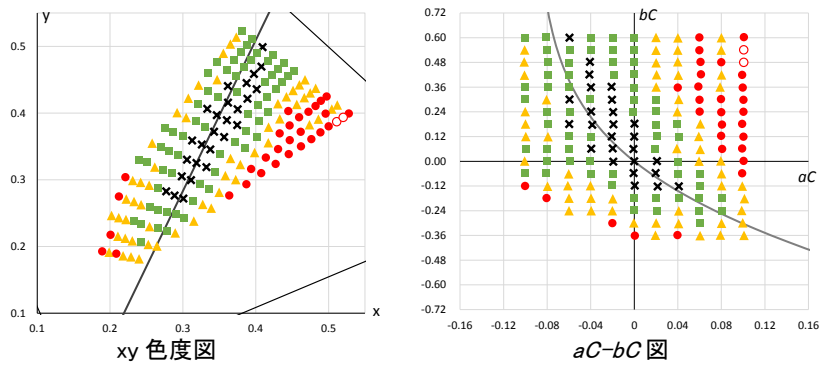
(i) 背景輝度 : 9.96[cd/m²]



(ii) 背景輝度 : 19.75[cd/m²]



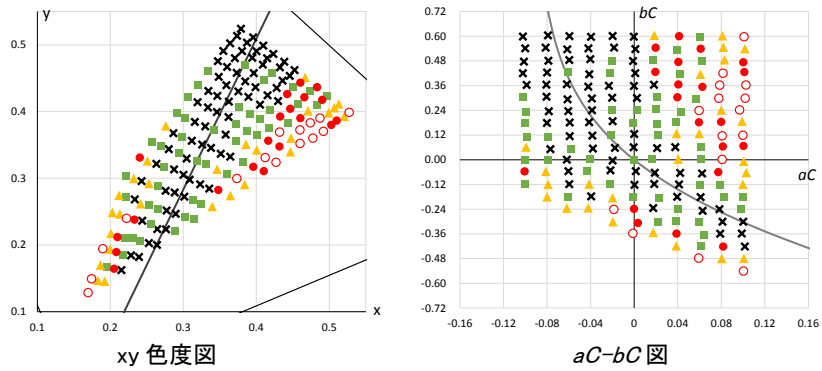
(iii) 背景輝度 : 40.40[cd/m²]



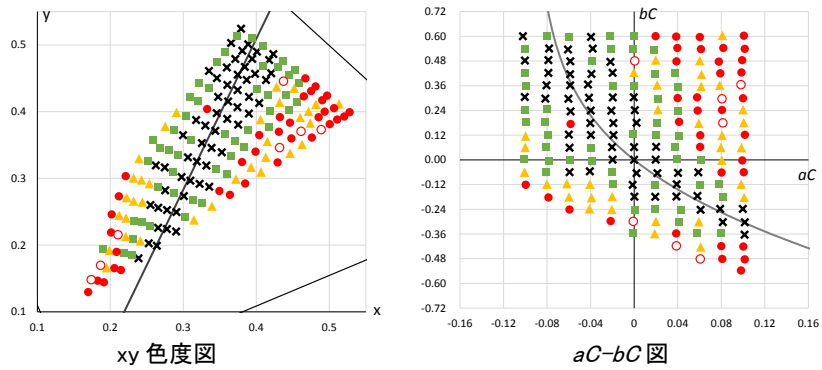
(iv) 背景輝度 : 79.74[cd/m²]

× 0.見えない ■ 1.やっと見える ▲ 2.多少見えにくいが見える ● 3.苦勞せずに(普通に)見える ○ 4.見やすい

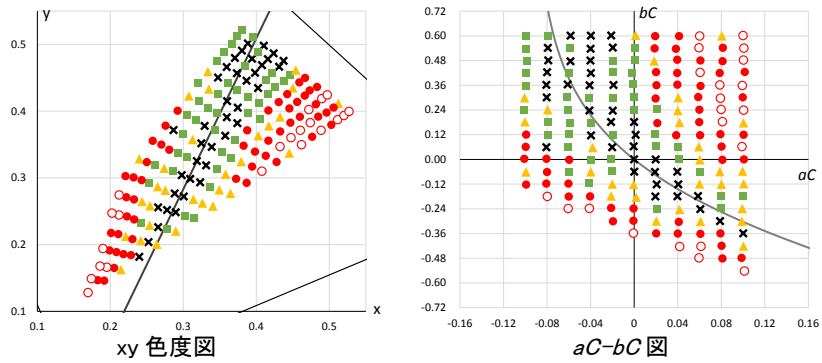
図 5.12 実験 5-A 評価結果(被験者 No.9, 1 型 1 名)



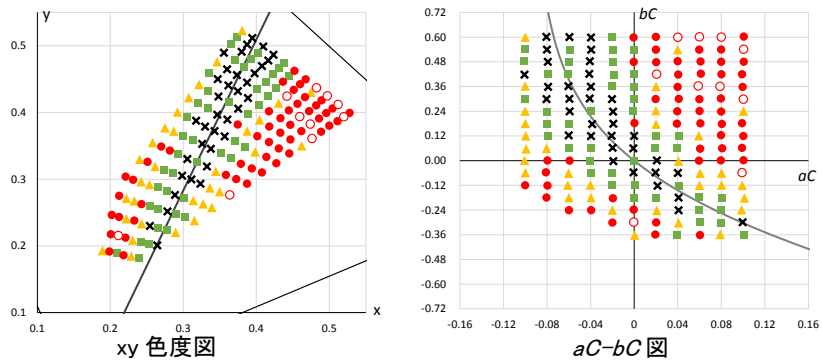
(i) 背景輝度 : 9.96[cd/m²]



(ii) 背景輝度 : 19.75[cd/m²]



(iii) 背景輝度 : 40.40[cd/m²]



(iv) 背景輝度 : 79.74[cd/m²]

× 0.見えない ■ 1.やっと思える ▲ 2.多少見えにくいが見える ● 3.苦勞せずに(普通に)見える ○ 4.見やすい

図 5.13 実験 5-A 評価結果(被験者 No.16, 2 型 1 名)

5.3.3. 背景色度および円形視標の色度に変化する場合 [実験 5-B]

5.3.3.1. 実験条件

実験 5-B では、前章の実験 4-B と同様に、背景色度が異なる場合でも同様の傾向であることを確認するため、背景輝度 $40[\text{cd}/\text{m}^2]$ 程度、視対象サイズ $5[\text{min}]$ として、背景色度を変化させて実験を行なった。背景色度は、実験 5-A(実験 4-A)の D65 相当($x=0.319, y=0.325$)で背景輝度 $40.40 [\text{cd}/\text{m}^2]$ の XYZ 刺激値($X=39.58, Y=40.40, Z=44.25$)を基準に、X 刺激値または Z 刺激値の値を増減させて設定し、 $X=53.36, Y=40.37, Z=44.24$ の赤系①($x=0.387, y=0.293$), $X=71.56, Y=40.42, Z=43.99$ の赤系②($x=0.459, y=0.259$), $X=39.43, Y=40.26, Z=25.71$ の黄系($x=0.374, y=0.382$), $X=29.47, Y=40.60, Z=44.10$ の緑系($x=0.258, y=0.356$), $X=39.63, Y=40.23, Z=75.99$ の青系($x=0.254, y=0.258$)の 5 条件とした。

実験 5-A(実験 4-A)と同様に背景と円形視標の輝度コントラストは変化させず($LC=0$)、色度コントラスト(aC, bC)を変化させて実験を行なった。 aC は -0.10 から $+0.10$ 、 bC は -0.60 から $+0.60$ の範囲を目安に、PC モニタで出力可能な範囲で変化させた。同一背景色度ごとに円形視標の色度コントラスト(aC, bC)をランダムな順序で変化させて提示した。各被験者、全条件を 1 回ずつ評価した。その他詳細、実験条件の一覧表については、前章第 3 節第 3 項(4.3.3)を参照されたい。

5.3.3.2. 実験結果

図 5.14 に 1 型 1 名(被験者 No. 9)、図 5.15 に 2 型 1 名(被験者 No. 16)の評価結果を示す。背景色度を赤系①、赤系②、黄系、緑系、青系とした場合の評価結果を図 5.14 および図 5.15 の(i)~(v)の xy 色度図(x の範囲は(i) $0.1\sim 0.65$, (ii) $0.1\sim 0.65$, (iii) $0.1\sim 0.6$, (iv) $0.1\sim 0.55$, (v) $0.1\sim 0.6$, y の範囲は(i) $0.05\sim 0.5$, (ii) $0.0\sim 0.5$, (iii) $0.1\sim 0.55$, (iv) $0.15\sim 0.6$, (v) $0.1\sim 0.55$ とする)および aC - bC 図にそれぞれ示す。また、前項と同様に S 錐体が機能していない場合の混同色線を図 5.14、図 5.15 の xy 色度図および aC - bC 図にそれぞれ示す。

背景色度が変わった場合でも、実験 5-A と同様に、S 錐体が機能していない場合の混同色線の付近で、「0. 見えない」の評価が分布し、視認性が低下していることが確認できた。一般色覚者に比べて、「0. 見えない」の評価の範囲が aC ([赤-緑]コントラスト)軸方向にやや広い被験者も居たが、概ね一般色覚者(第 4 章図 4.12 参照)と同様の傾向であることを確認した。

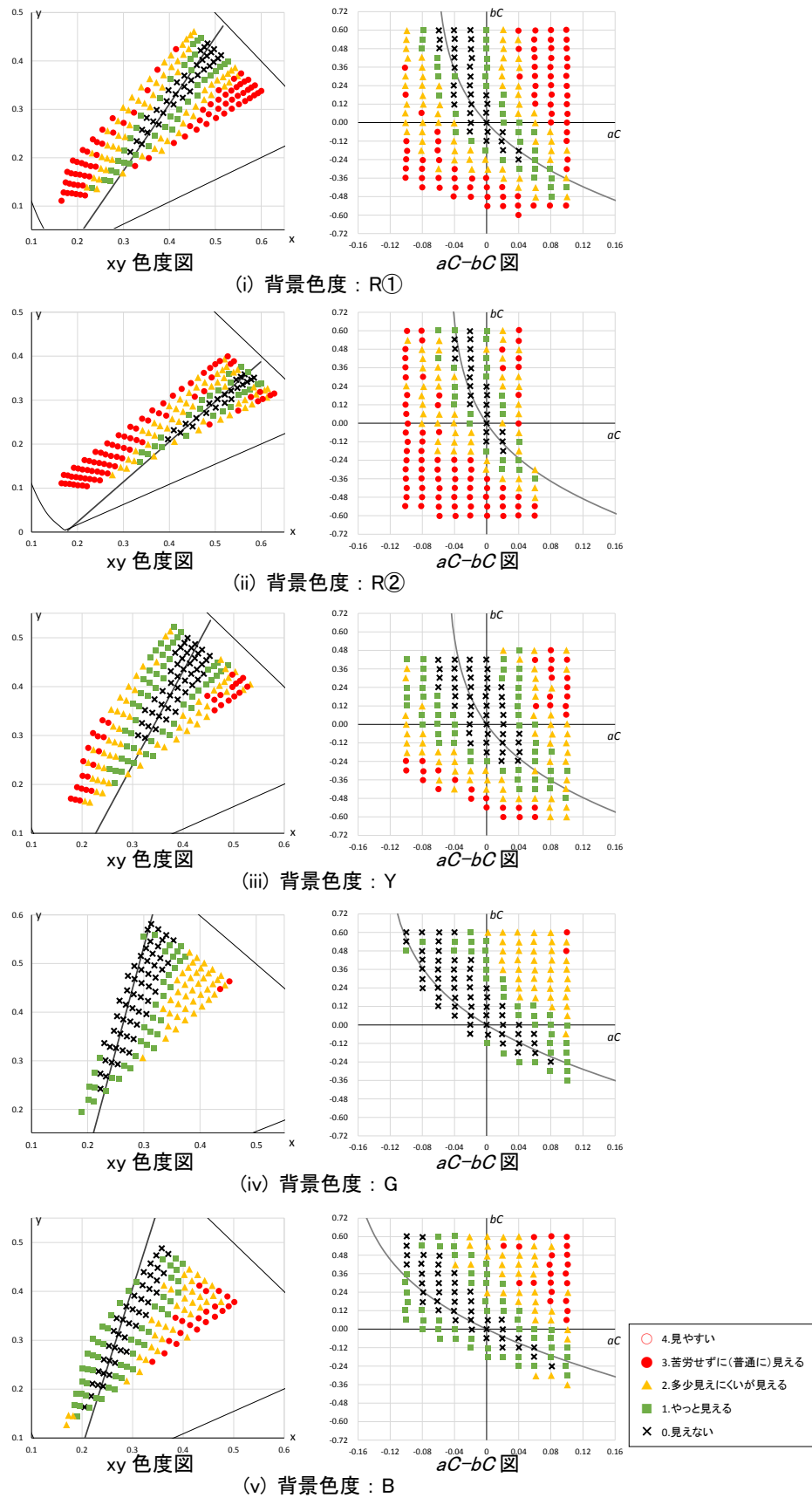


図 5.14 実験 5-B 評価結果(被験者 No.9, 1 型 1 名)

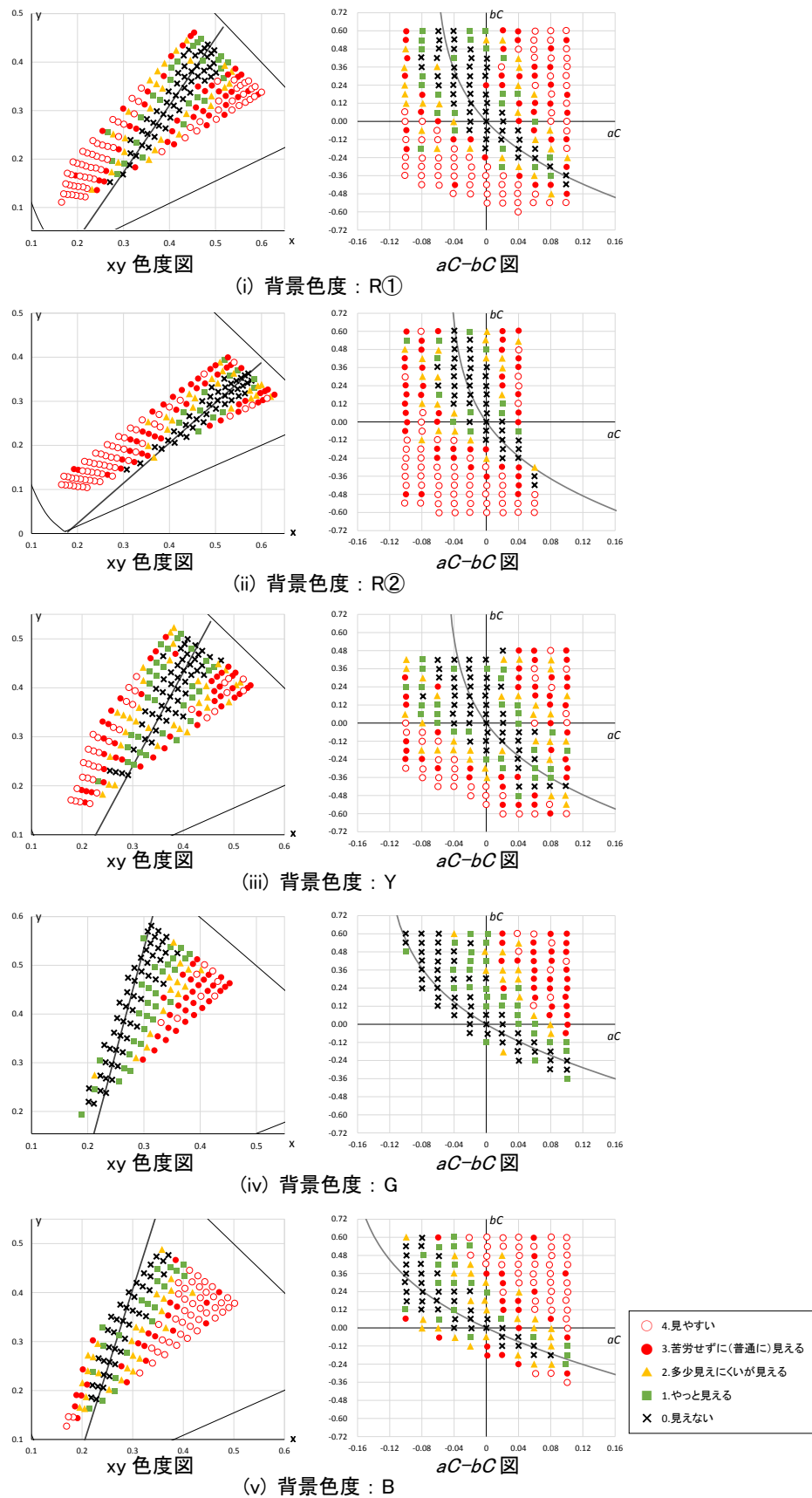


図 5.15 実験 5-B 評価結果(被験者 No.10, 2 型 1 名)

5.3.4. 円形視標サイズおよび円形視標の色度が変化する場合(背景色度 D65) [実験 5-C]

5.3.4.1. 実験条件

実験 5-C では、前章の実験 4-C と同様に、小視野トリタノピアと円形視標サイズの影響を確認するため、円形視標サイズが 5[*min*]より大きい場合について調査する。背景色度は CIE 標準光源 D65 に相当する色度($x=0.319$, $y=0.325$)とし、背景輝度を 40.40[*cd/m*²]とした。円形視標のサイズは 10, 20, 60, 90, 120[*min*]の 5 条件で変化させた。実験 5-A, 5-B (実験 4-A, 4-B)と同様に背景と円形視標の輝度コントラストは変化させず($LC=0$)、色度コントラスト(aC , bC)を変化させ、S 錐体が機能していない場合の混同色線に沿って aC , bC を変化させた。円形視標の色度コントラスト(aC , bC)および円形視標のサイズをランダムな順序で変化させて提示した。各被験者、全条件を 1 回ずつ評価した。その他詳細、実験条件の一覧表については、前章第 3 節第 4 項(4.3.4)を参照されたい。

5.3.4.2. 実験結果

図 5.16 に 1 型 1 名(被験者 No. 9)、図 5.17 に 2 型 1 名(被験者 No. 16)の評価結果を示す。円形視標サイズ 10, 20, 60, 90, 120[*min*]の場合の評価結果を図 5.16 および図 5.17 の(i)~(v)の *xy* 色度図(x の範囲は 0.1~0.55, y の範囲は 0.05~0.55 とする)および aC - bC 図にそれぞれ示す。また、S 錐体が機能していない場合の混同色線を図 5.16, 図 5.17 の *xy* 色度図および aC - bC 図にそれぞれ示す。

前章の一般色覚者(第 4 章図 4.13 参照)と同様に、S 錐体が機能していない場合の混同色線付近の条件で評価が低い傾向も見られるが、図 5.17 の 2 型 1 名では、一般色覚者と比べ、評価が aC ([赤・緑]コントラスト)軸方向に広がる様子が見られる。前章の一般色覚者の場合では、円形視標のサイズが 20[*min*]以上の場合、背景と円形視標の色度コントラストがない条件($aC=0$, $bC=0$)、つまり aC - bC 図の原点の条件を除いた全ての条件で、「1. やっと見える」以上の評価が得られ、円形視標を検知できた(第 4 章図 4.13 参照)。しかし、図 5.17 の 2 型 1 名の場合では、円形視標のサイズが 20[*min*]以上の場合でも(図 5.17(ii)~(v))、 aC - bC 図の原点から aC ([赤・緑]コントラスト)軸方向の数条件において、「0. 見えない」の評価が存在している。他の 2 型の被験者でも aC ([赤・緑]コントラスト)軸方向に「0. 見えない」の評価が広がる傾向が見られ、実験 1, 2 の円形視標サイズ 5[*min*]の場合よりも、 aC ([赤・緑]コントラスト)軸方向に「0. 見えない」の評価の範囲広がる傾向が顕著に見られた。図 5.16 の 1 型 1 名では、円形視標サイズ 10[*min*]の場合では一般色覚者(第 4 章図 4.13 参照)よりもやや aC ([赤・緑]コントラスト)軸方向に「0. 見えない」の評価が広がり、円形視標サイズ 20[*min*]以上では「0. 見えない」の評価が少なくなっているが、一般色覚者よりもやや評価が低い傾向が見られる。

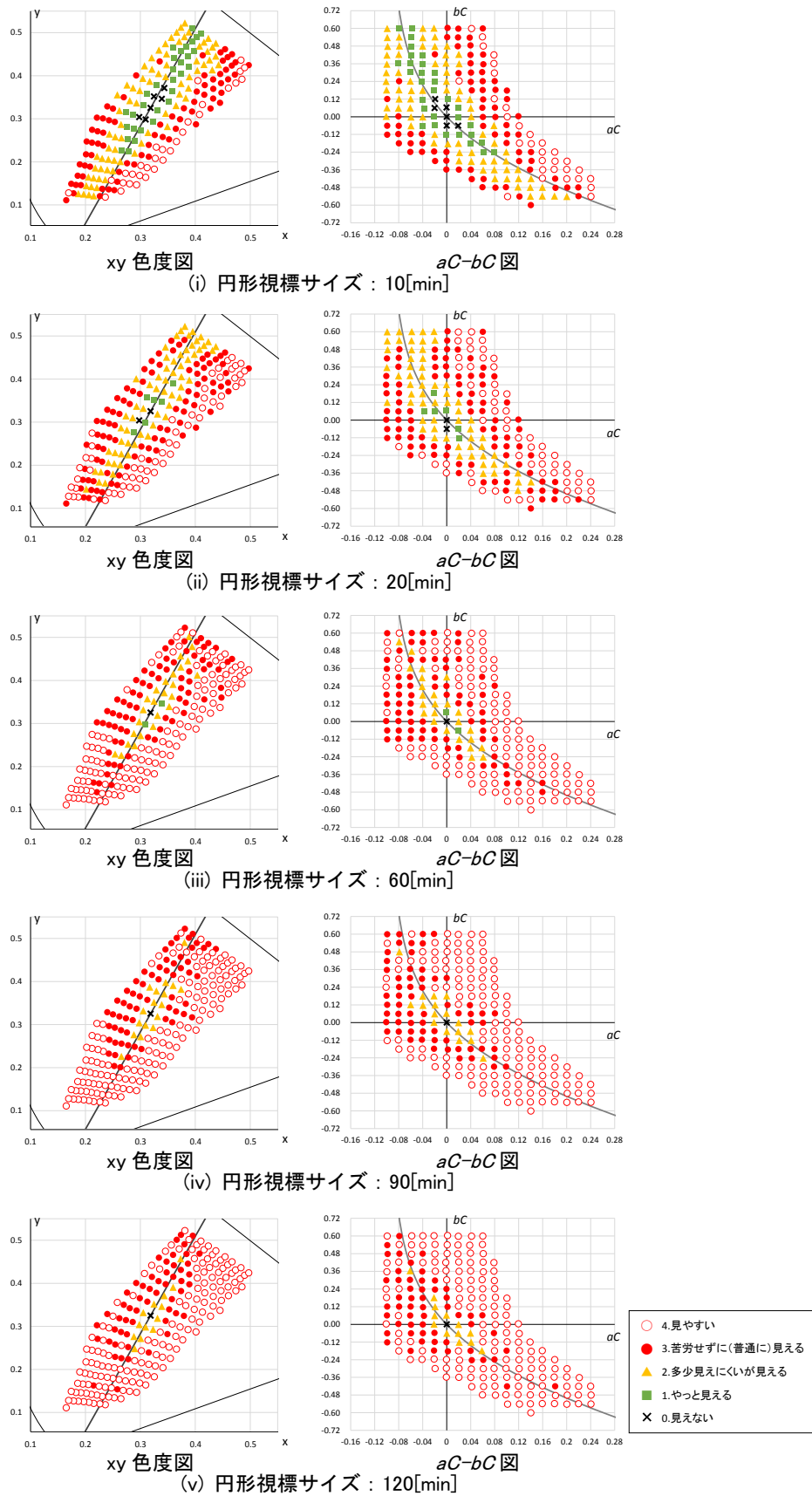


図 5.16 実験 5-C 評価結果(被験者 No.9, 1 型 1 名)

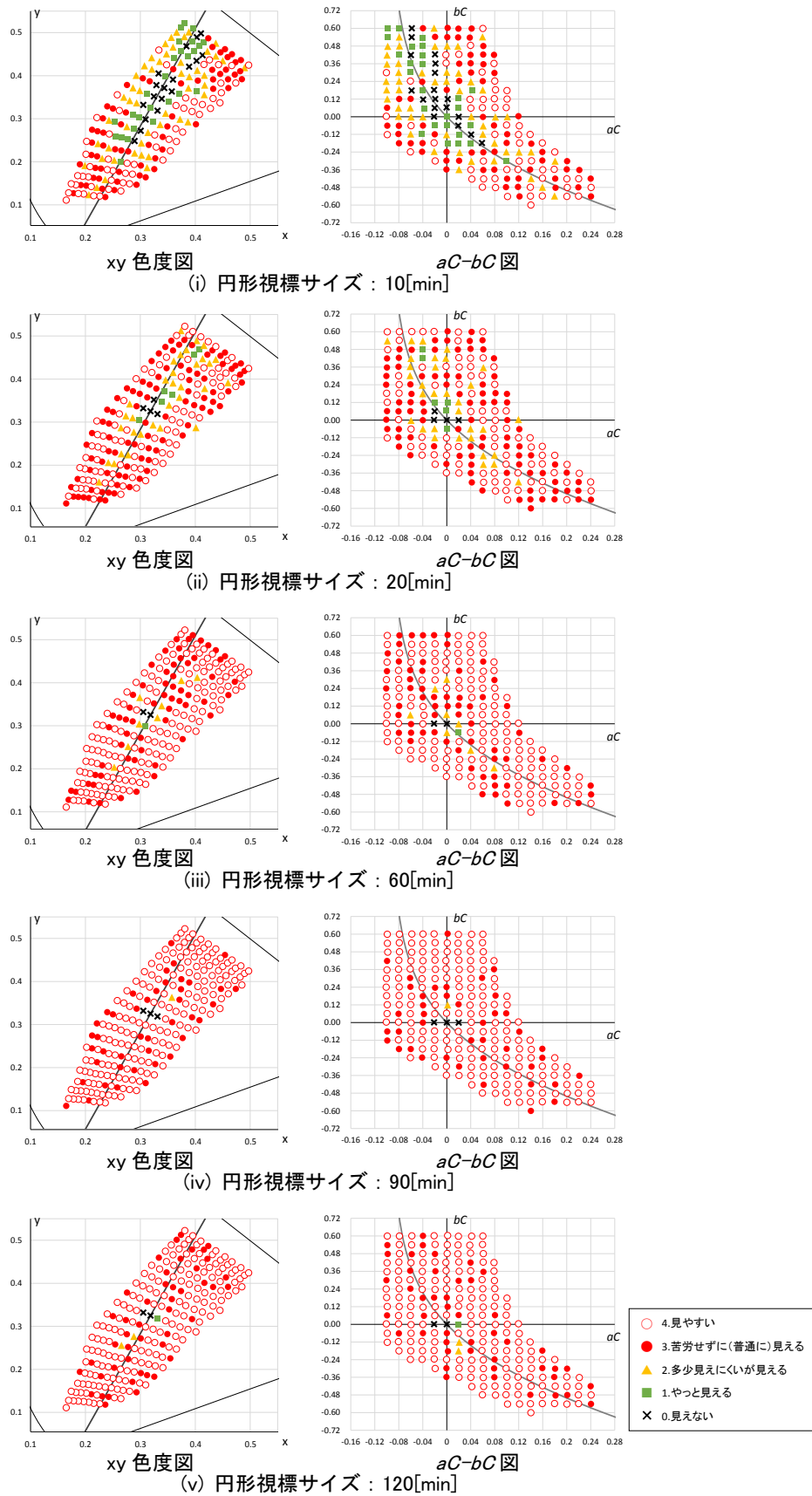


図 5.17 実験 5-C 評価結果(被験者 No.16, 2 型 1 名)

5.3.5. 円形視標の輝度色度が変化する場合(背景色度 D65) [実験 5-D]

5.3.5.1. 実験条件

実験 5-A~5-C は、輝度コントラストは変化させず($LC=0$)、色度コントラスト(aC, bC)を変化させた。実験 5-D では、前章の実験 4-D と同様に、輝度コントラスト(LC)と色度コントラスト(aC, bC)が同時に変化する場合の見やすさ評価を調査し、前章の一般色覚者の評価結果との差異や第 2 章第 1 節の輝度コントラストの視認閾値(LC_{th})との関係について検討する。

背景色度を CIE 標準光源 D65 に相当する色度($x=0.319, y=0.325$)、背景輝度を $19.75[\text{cd}/\text{m}^2]$ 、視対象サイズを $5[\text{min}]$ とし、実験 5-C(実験 4-C)と同様の色度コントラスト(aC, bC)の変化に加え、輝度コントラスト(LC)を変化させる。輝度コントラスト(LC)は、 $-0.04, -0.03, -0.02, -0.01, 0.00, +0.01, +0.02, +0.03, +0.04$ の 9 条件で変化させた。円形視標の輝度コントラスト(LC)および色度コントラスト(aC, bC)をランダムな順序で変化させ提示した。各被験者、全条件を 1 回ずつ評価した。その他詳細、実験条件の一覧表については、前章第 3 節第 5 項(4.3.5)を参照されたい。

5.3.5.2. 実験結果

図 5.18 に 1 型 1 名(被験者 No. 9)の評価結果を示す。輝度コントラスト(LC) $+0.04, +0.03, +0.02, +0.01, 0.00, -0.01, -0.02, -0.03, -0.04$ の場合の評価結果を図 5.18(i)~(ix)の xy 色度図(x の範囲は $0.1\sim 0.55$, y の範囲は $0.05\sim 0.55$ とする)および aC - bC 図にそれぞれ示す。また、S 錐体が機能していない場合の混同色線を図 5.18 の xy 色度図および aC - bC 図にそれぞれ示す。

前章の一般色覚者の場合(第 4 章図 4.15 参照)では、 LC の絶対値の増加に伴って、「0. 見えない」の評価の分布の範囲が縮小し、第 2 章第 1 節で示した LC の視認閾値(LC_{th})の推定値(第 4 章の被験者である一般色覚者 8 名の両眼視力中央値 1.50 では正対比で 0.0300、逆対比で -0.0339)を越えれば、背景よりも輝度の低い黄色等の一部の条件を除き、大抵の条件で視認できることが確認されていた。しかし、図 5.18 の 1 型 1 名の場合では、 LC の絶対値の増加に伴う「0. 見えない」の評価の分布の範囲の縮小はあまり見られず、 LC が正になるほど「S 錐体が機能していない場合の混同色線」より赤側(aC が高い側)、 LC が負になるほど「S 錐体が機能していない場合の混同色線」より緑側(aC が低い側)に推移している。被験者 No. 1 の両眼視力値は 1.80(表 5.1)であり、前章の一般色覚者 8 名の両眼視力値中央値 1.50 よりも高いため、 LC の視認閾値(LC_{th})の絶対値は低下するはずである。それにも関わらず、 LC の視認閾値(LC_{th})を超える LC が ± 0.04 (図 5.18(i),(ix))の場合でも、「0. 見えない」と評価される条件が多く存在していることがわかる。

また、2 型 1 名の評価結果 2 名分として、図 5.19 に被験者 No. 16、図 5.20 に被験者 No. 10 の評価結果を示す。2 型の場合でも同様に、一般色覚者ほどの LC の絶対値の増加に伴

う「0. 見えない」の評価の分布の範囲の縮小は確認できない。図 5.18 の 1 型 1 名の場合とは反対に、「0. 見えない」の評価の分布は、 LC が正になるほど‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’より緑側(aC が低い側)、 LC が負になるほど‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’より赤側(aC が高い側)に推移している。被験者 No. 16 の両眼視力値は 2.20、被験者 No. 10 の両眼視力値は 1.65 であるため(表 5.1)、前章の一般色覚者 8 名の両眼視力値中央値 1.50 よりも高いが、図 5.18 の 1 型 1 名と同様に、 LC の視認閾値(LC_{th})を超える $LC \pm 0.04$ (図 5.19(i),(ix)、図 5.20(i),(ix))の場合でも、「0. 見えない」と評価される条件が多く存在していることがわかる。図 5.19(被験者 No. 16)よりも図 5.20(被験者 No. 10)の方が、「0. 見えない」の評価の分布の範囲が広いが、 aC 軸方向の推移の程度は小さく、同じ 2 型の中でも個人差が大きいことがわかる。他の 2 型の被験者でも、「0. 見えない」の評価の分布の範囲の広さや aC 軸方向の推移の程度に個人差はあるが、同様の特徴を確認できた。

このような「0. 見えない」の評価の分布の aC 軸方向の推移は、1 型は L 錐体、2 型は M 錐体の機能の欠如もしくは機能低下によって生じたと考えられる。1 型は L 錐体の機能の欠如もしくは機能低下であるため、赤を暗く感じると考えられている²⁾。そのため今回の実験では、 LC が正で‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’より赤側(aC が高い側)の円形視標において、背景との区別が付かなかつたと考えられる。2 型は M 錐体の機能の欠如もしくは機能低下であるため、1 型とは異なり、緑を暗く感じ反対方向に推移したと考えられる。前章の一般色覚者でも、 LC が正になるほど「0. 見えない」の評価が‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’より緑側(aC が低い側)、 LC が負になるほど‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’より赤側(aC が高い側)に推移する傾向があった。これは本実験の 2 型の色弱者の傾向に共通している。一般色覚者の網膜における L 錐体と M 錐体の存在比率は概ね 2:1 とされ^{11,12)}、M 錐体より L 錐体の感度が高いために、一般色覚者でも aC 軸方向の推移が生じたと推察される。

また、 aC - bC 図の原点($aC=0$, $bC=0$)に着目した場合、被験者 No. 9(図 5.18)および被験者 No. 16(図 5.19)は $LC \pm 0.03$ 程度以上で視認可能となるのに対し、被験者 No. 10(図 5.20)は ± 0.04 の場合でも視認できていない。一部の色弱者では、背景および円形視標の色度がともに D65 で($aC=0$, $bC=0$)、輝度コントラスト LC のみが増加する場合でも、第 2 章第 2 節で構築した視認閾値推定式がそのまま適用できない可能性が示唆された。

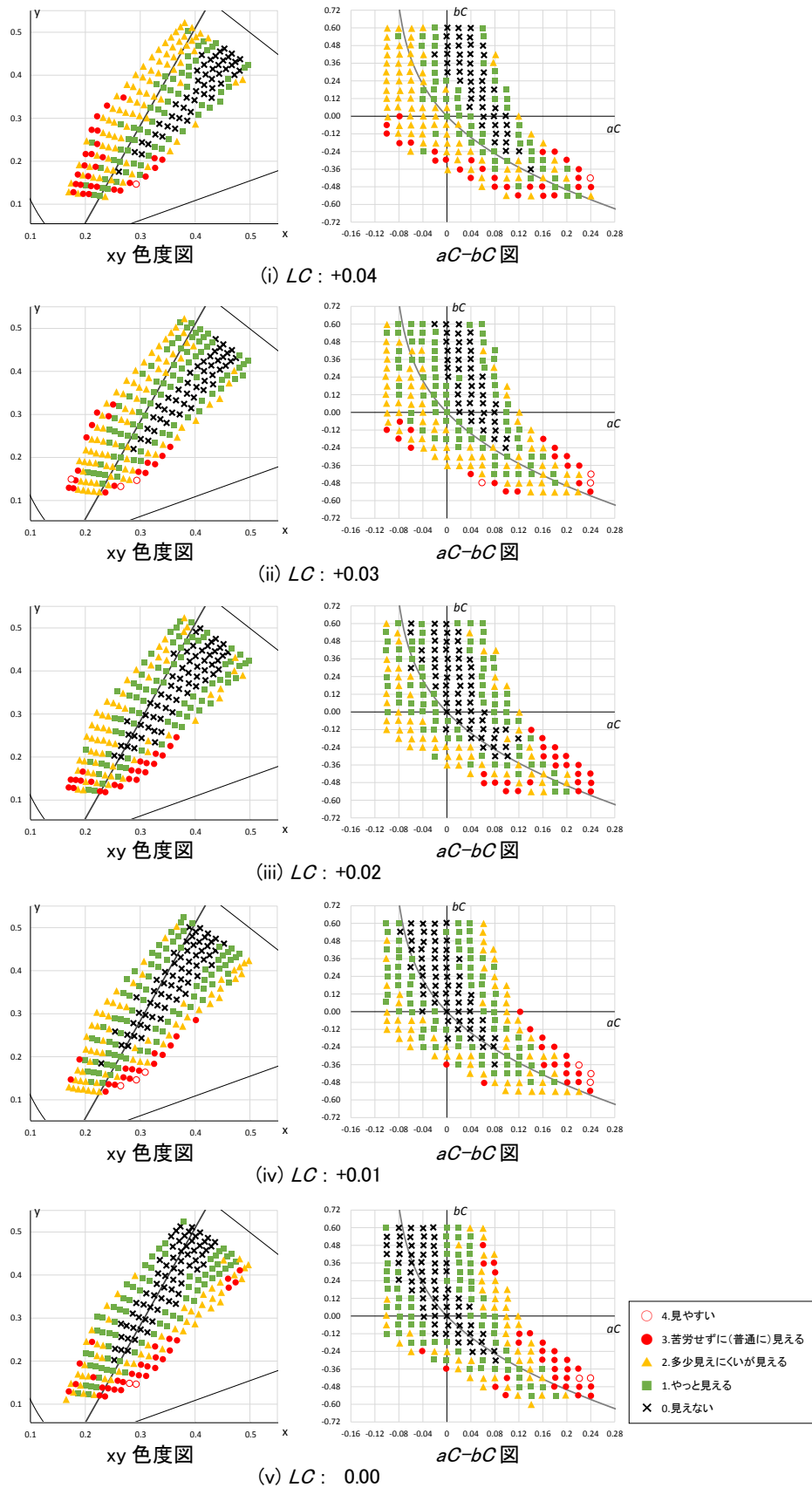


図 5.18 実験 5-D 評価結果(被験者 No.9, 1 型 1 名)

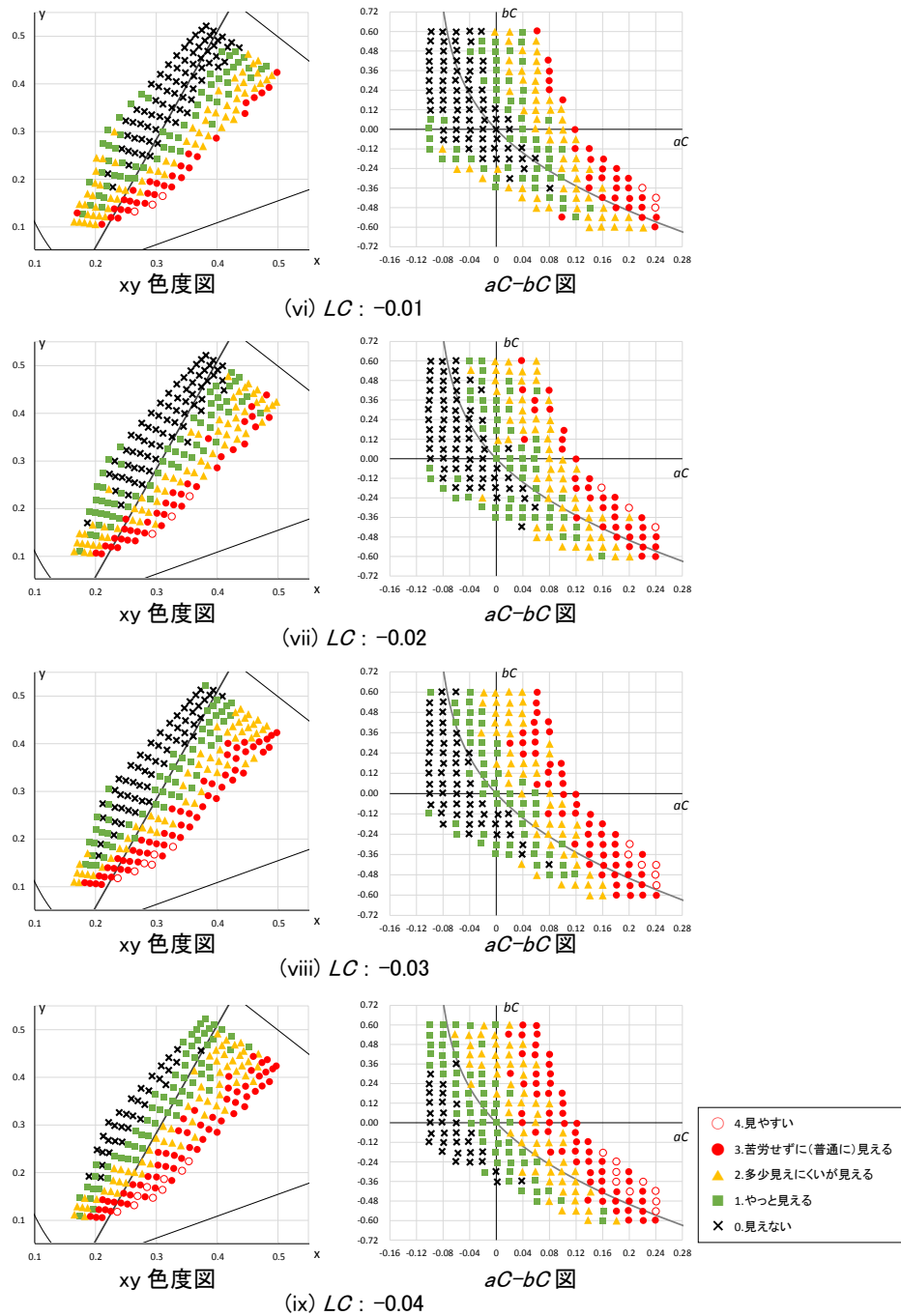


図 5.18 実験 5-D 評価結果(被験者 No.9, 1 型 1 名)(続き)

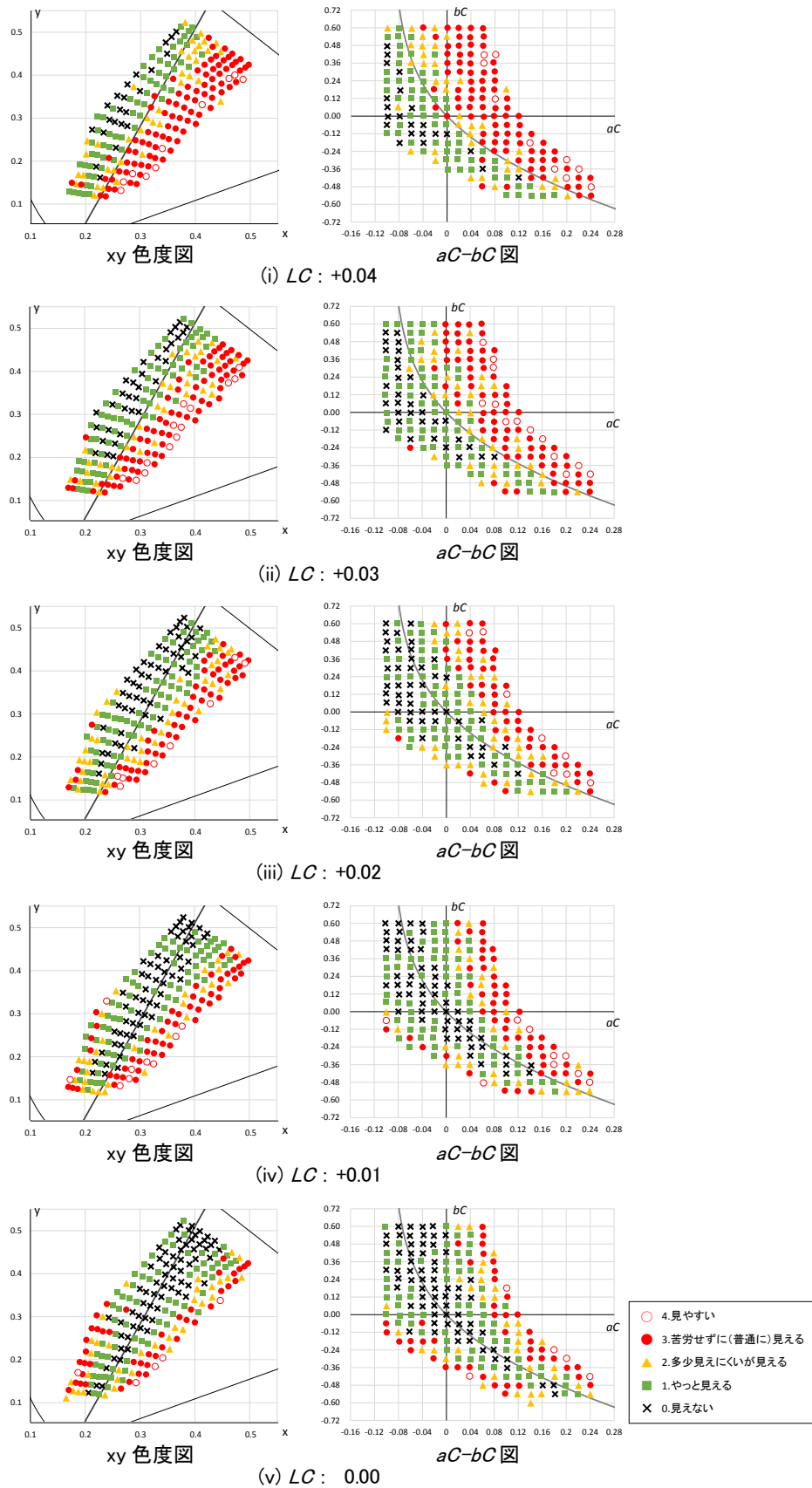


図 5.19 実験 5-D 評価結果(被験者 No.16, 2 型 1 名)

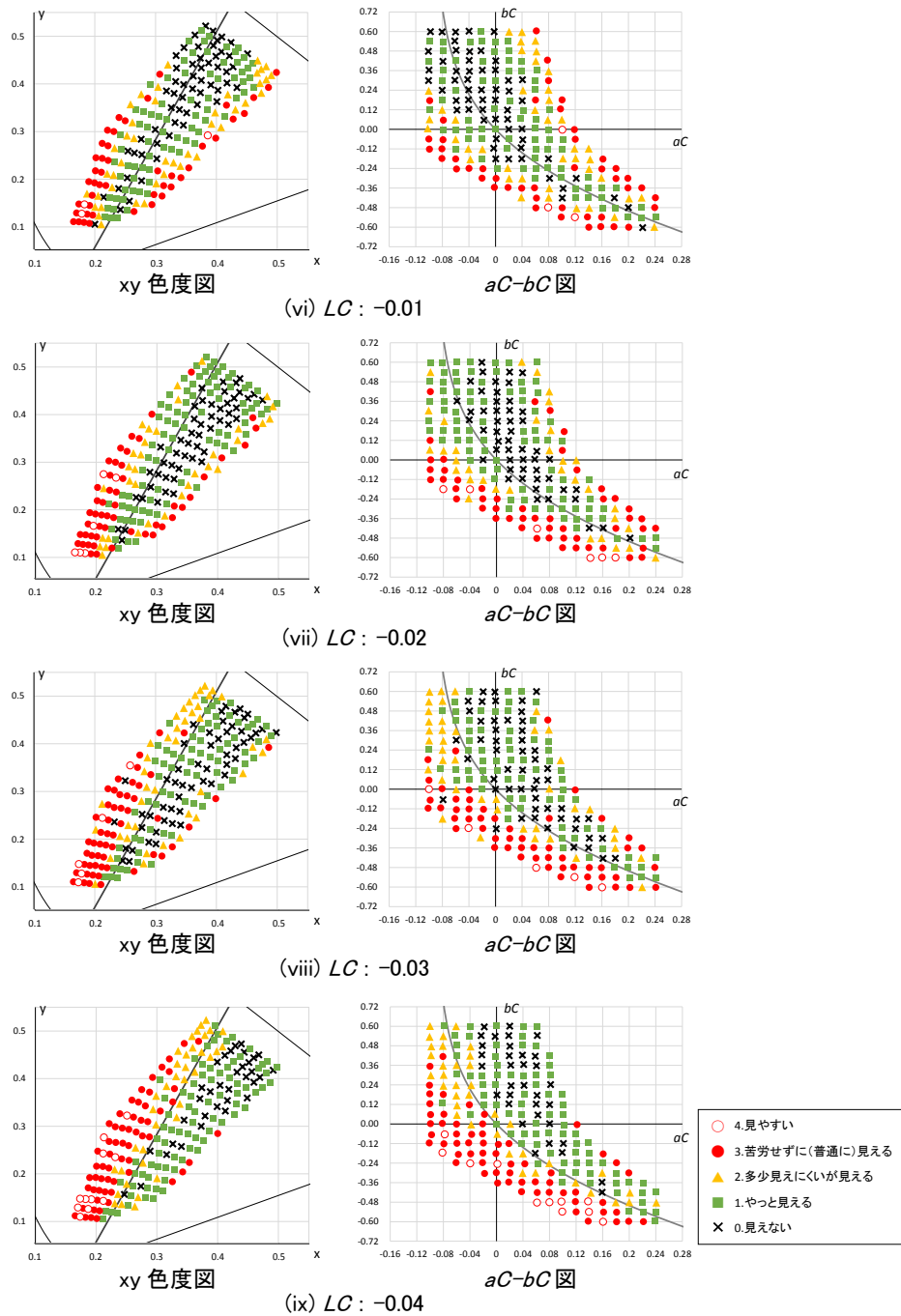


図 5.19 実験 5-D 評価結果(被験者 No.16, 2 型 1 名)(続き)

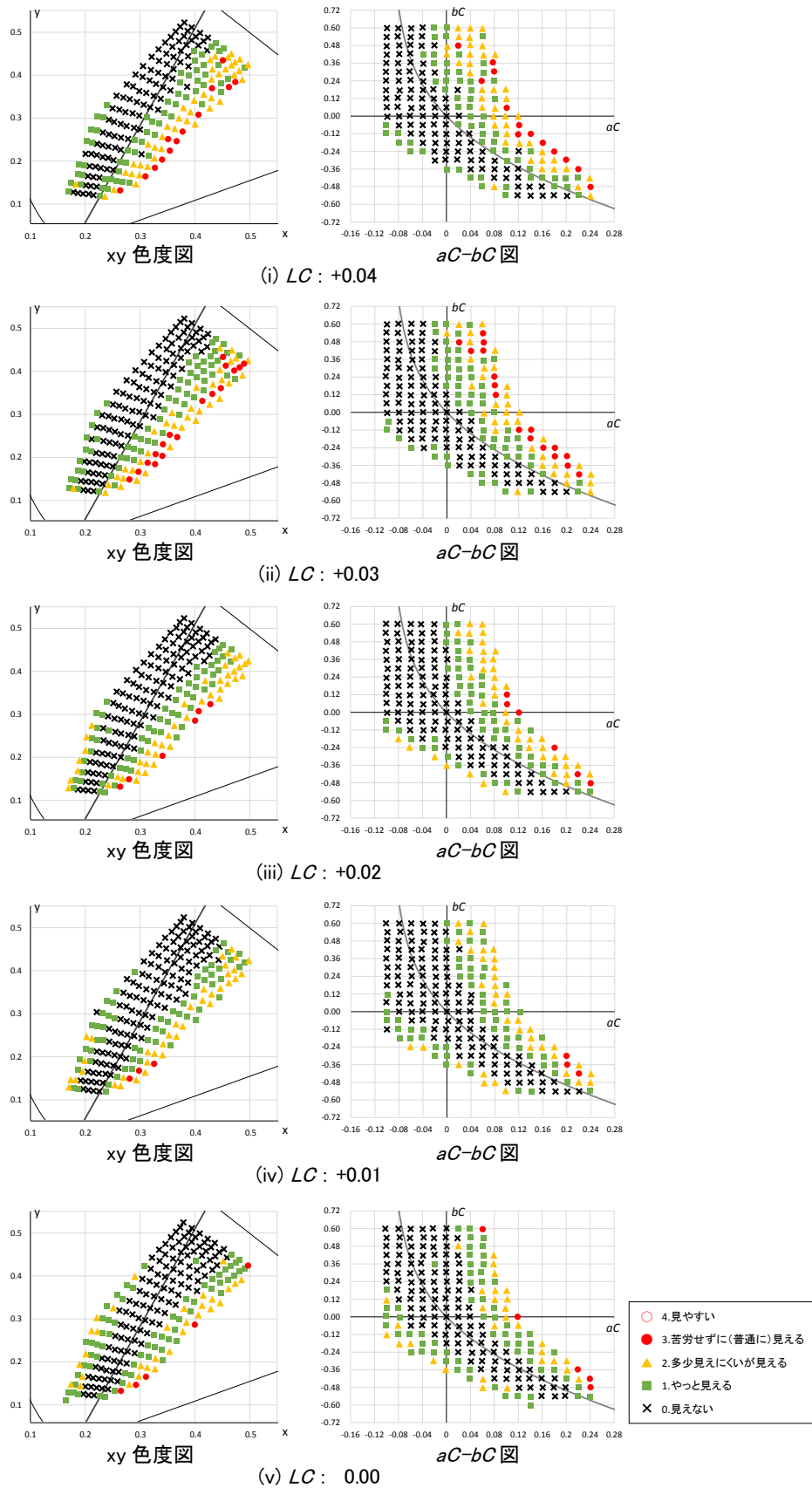


図 5.20 実験 5-D 評価結果(被験者 No.10, 2 型 1 名)

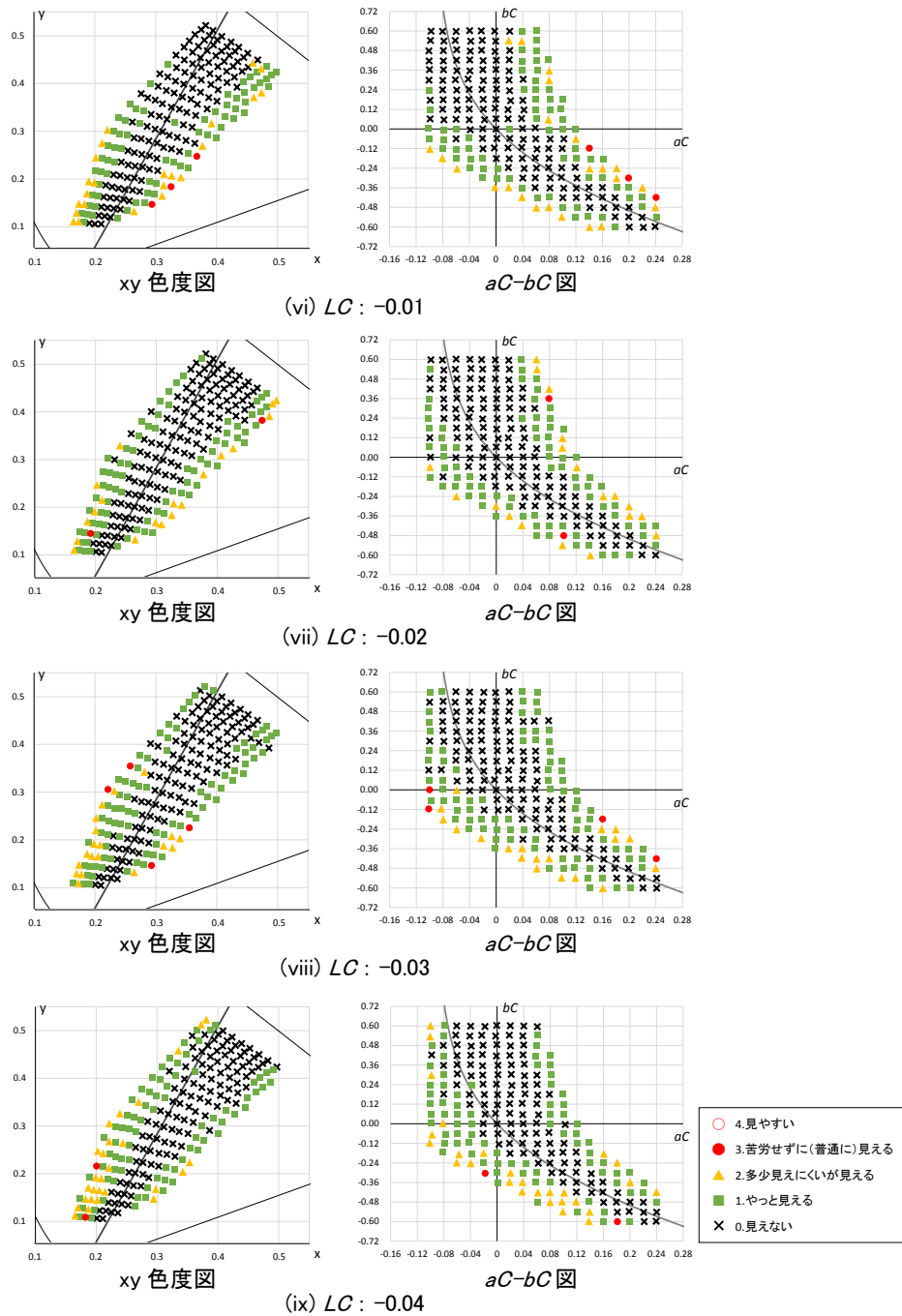


図 5.20 実験 5-D 評価結果(被験者 No.10, 2 型 1 名)(続き)

5.3.5.3. 追加実験条件

前章の一般色覚者を対象とした実験 4-D では、輝度コントラスト(LC)を $-0.04\sim 0.04$ の範囲で変化させ、 LC の視認閾値(LC_{th})を超える $LC\pm 0.04$ の場合では、多くの条件で「1. やっと見える」以上の評価が得られ視認できることが確認された(第 4 章図 4.15(i),(ix)参照). しかし、1 型、2 型の色弱者を対象とした場合では、 $LC\pm 0.04$ の場合でも、「0. 見えない」と評価される条件が多く存在することが確認された(図 5.18(i),(ix), 図 5.19(i),(ix), 図 5.20(i),(ix)).

LC の絶対値がさらに大きくなった場合にもこのような傾向がみられるか、またどの程度の LC があれば視認可能となるかを確認するため、 LC の絶対値が 0.05 以上の場合について追加実験を行なった. これまでの実験は、色弱者 8 名に対して共通の実験条件で行なってきたが、輝度コントラスト(LC)を $-0.04\sim 0.04$ の範囲で変化させ、1 型と 2 型、また 2 型の中でも結果に個人差が大きくみられたため(図 5.18, 図 5.19, 図 5.20), それらの結果に基づき、1 名ずつ実験条件を設けることとした. ここでは、被験者 No. 9, 16, 10 の 3 名について報告する.

被験者 No.9 の 1 型 1 名の追加実験条件を表 5.4 に示す. はじめに LC を $-0.06\sim -0.05$ と $0.05\sim 0.07$ の範囲で変化させ、実験を行なった. 輝度コントラスト(LC)を $-0.04\sim 0.04$ の範囲で変化させた場合では、1 型の場合は、 LC が負のとき‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも緑側(aC が低い側), LC が正のとき‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも赤側(aC が高い側)の条件で視認性が低下した. そのため、 $LC < -0.04$ のときは、‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも緑側(aC が低い側), $LC > +0.04$ のときは、‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも赤側(aC が高い側)の円形視標を提示することとした. 以上の条件で実験行なったところ、 LC が $-0.06, +0.07$ の場合でも「0. 見えない」と評価される条件が多く存在したため、表 5.4 青文字で示すように、さらに $LC -0.08\sim -0.07$ と $0.08\sim 0.09$ の範囲を追加して実験を行なった.

また、被験者 No.16 の 2 型 1 名の追加実験条件を表 5.5, 被験者 No.16 の 2 型 1 名の追加実験条件を表 5.6 に示す. 被験者 No.16 は LC を $-0.07\sim -0.05$ と $0.05\sim 0.07$ の範囲で変化させ、被験者 No.10 は、はじめに LC を $-0.10\sim -0.06$ と $0.06\sim 0.10$ の範囲で変化させた. 輝度コントラスト(LC)を $-0.04\sim 0.04$ の範囲で変化させた場合では、2 型の場合は、 LC が負のとき‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも赤側(aC が高い側), LC が正のとき‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも緑側(aC が低い側)の条件で視認性が低下した. そのため、 $LC < -0.04$ のときは、‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも、 $LC > +0.04$ のときは赤側(aC が高い側), ‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも緑側(aC が低い側)の円形視標を提示することとした. なお、以上の条件で実験行なったところ、被験者 No.10 は、 LC が ± 0.10 の場合でも「0. 見えない」と評価される条件が多く存在したため、表 5.6 青文字で示すように、さらに $LC\pm 0.16$ の範囲まで条件を追加して実験を行なった.

表 5.4 実験 5-D 追加実験条件(被験者 No.9, 1 型 1 名)

独立変数		条件数	
背景色度 (x, y)	(0.319, 0.325)	1	
背景輝度 [cd/m ²]	19.75	1	
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]	5	1	
LC < -0.04	LC	-0.06 ~ -0.05 } の範囲で0.01刻み -0.08 ~ -0.07* } ※さらに追加した範囲	2 2*
	aC	-0.20 ~ +0.22の範囲で0.02刻み	146
	bC	-0.54 ~ +0.60の範囲で0.06刻み	
LC > +0.04	LC	+0.05 ~ +0.07 } の範囲で0.01刻み +0.08 ~ +0.09* } ※さらに追加した範囲	3 2*
	aC	-0.06 ~ +0.24の範囲で0.02刻み	240
	bC	-0.54 ~ +0.60の範囲で0.06刻み	

表 5.5 実験 5-D 追加実験条件(被験者 No.16, 2 型 1 名)

独立変数		条件数	
背景色度 (x, y)	(0.319, 0.325)	1	
背景輝度 [cd/m ²]	19.75	1	
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]	5	1	
LC < -0.04	LC	-0.07 ~ -0.05の範囲で0.01刻み	3
	aC	-0.06 ~ +0.24の範囲で0.02刻み	240
	bC	-0.54 ~ +0.60の範囲で0.06刻み	
LC > +0.04	LC	+0.05 ~ +0.07の範囲で0.01刻み	3
	aC	-0.20 ~ +0.22の範囲で0.02刻み	146
	bC	-0.54 ~ +0.60の範囲で0.06刻み	

表 5.6 実験 5-D 追加実験条件(被験者 No.10, 2 型 1 名)

		独立変数	条件数
背景色度 (x, y)		(0.319, 0.325)	1
背景輝度 [cd/m ²]		19.75	1
円形視標サイズ [min] ※ 1 [deg] = 60 [min]		5	1
LC < -0.04	LC	-0.10 ~ -0.06 } の範囲で0.02刻み -0.16 ~ -0.12* } ※さらに追加した範囲	3 3*
	aC	-0.06 ~ +0.24の範囲で0.02刻み	240
	bC	-0.54 ~ +0.60の範囲で0.06刻み	
LC > +0.04	LC	+0.06 ~ +0.10 } の範囲で0.02刻み +0.12 ~ +0.16* } ※さらに追加した範囲	3 3*
	aC	-0.20 ~ +0.22の範囲で0.02刻み	146
	bC	-0.54 ~ +0.60の範囲で0.06刻み	

5.3.5.4. 追加実験結果

図 5.21 に 1 型 1 名(被験者 No. 9)の評価結果を示す。輝度コントラスト(LC) +0.09, +0.08, +0.07, +0.06, +0.05 の場合の評価結果を図 5.21(i)~(v)の xy 色度図(xの範囲は 0.2~0.65, yの範囲は 0.05~0.55 とする)および aC-bC 図(aC の範囲は-0.16~0.28, bC の範囲は-0.72~0.72 とする)に示す。輝度コントラスト(LC) -0.05, -0.06, -0.07, -0.08 の場合の評価結果を図 5.21(vi)~(ix)の xy 色度図(xの範囲は 0.1~0.55, yの範囲は 0.05~0.6 とする)および aC-bC 図(aC の範囲は-0.24~0.24, bC の範囲は-0.72~0.72 とする)に示す。図 5.21(i)~(v)の LC > +0.04 の場合では, LC の絶対値が増加に伴って, 「0. 見えない」の分布の範囲が赤側(aC が高い側)に移動しながら狭まっている。LC = +0.09 の場合では, 「0. 見えない」の評価は 1 条件のみとなり, LC が +0.09 程度以上となれば, 多くの条件で「1. やっと見える」以上の評価になると推察される。図 5.21(vi)~(ix)の LC < -0.04 の条件では, LC の絶対値が増加に伴って, 「0. 見えない」の分布の範囲が緑側(aC が低い側)に移動しているが, PC モニタで表示できる色の限度により緑側(aC が低い側)で表現できる円形視標の条件が少なく, 「0. 見えない」の分布の範囲が狭まっているかの判断までには至らなかった。LC = -0.08 の場合(図 5.21(ix))では「0. 見えない」の評価がないが, さらに緑側(aC が低い側)の条件が提示できていれば, 「0. 見えない」と評価されたかもしれない。

図 5.22 に 2 型 1 名(被験者 No. 16)の評価結果を示す。輝度コントラスト(LC) +0.07, +0.06, +0.05 の場合の評価結果を図 5.22(i)~(iii)の xy 色度図(xの範囲は 0.1~0.55, yの範囲は 0.05~0.6 とする)および aC-bC 図(aC の範囲は-0.24~0.24, bC の範囲は-0.72~0.72 とする)に示す。輝度コントラスト(LC) -0.05, -0.06, -0.07 の場合の評価結果を図 5.22(iv)~(vi)の xy 色度図(xの範囲は 0.2~0.65, yの範囲は 0.05~0.55 とする)および aC-bC 図(aC の範

囲は $-0.16\sim 0.28$, bC の範囲は $-0.72\sim 0.72$ とする)に示す. 図 5.22(i)~(iii)の $LC > +0.04$ の条件では, LC の絶対値が増加に伴って, 「0. 見えない」の分布の範囲が緑側(aC が低い側)に移動しながら狭まっている. $LC = +0.07, +0.06$ の場合(図 5.22(i), (ii))では, 概ね「0. 見えない」の評価がなくなっている. 図 5.22(iv)~(vi)の $LC < -0.04$ の条件でも, LC の絶対値が増加に伴って, 「0. 見えない」の分布の範囲が赤側(aC が高い側)に移動しながら狭まり, $LC = -0.06$ の場合(図 5.22(v))では「0. 見えない」の評価がなくなっている.

図 5.23 に 2 型 1 名(被験者 No. 10)の評価結果を示す. 輝度コントラスト(LC) $+0.16, +0.14, +0.12, +0.10, +0.08, +0.06$ の場合の評価結果を図 5.23(i)~(vi)の xy 色度図(x の範囲は $0.1\sim 0.55$, y の範囲は $0.05\sim 0.6$ とする)および aC - bC 図(aC の範囲は $-0.24\sim 0.24$, bC の範囲は $-0.72\sim 0.72$ とする)に示す. 輝度コントラスト(LC) $-0.06, -0.08, -0.010, -0.12, -0.14, -0.016$ の場合の評価結果を図 5.23(vii)~(xii)の xy 色度図(x の範囲は $0.2\sim 0.65$, y の範囲は $0.05\sim 0.55$ とする)および aC - bC 図(aC の範囲は $-0.16\sim 0.28$, bC の範囲は $-0.72\sim 0.72$ とする)に示す. 図 5.23(i)~(vi)の $LC > +0.04$ の条件では, LC の絶対値が増加に伴って, 「0. 見えない」の分布の範囲が緑側(aC が低い側)に移動しながら狭まっている. $LC +0.06\sim +0.10$ と $LC +0.12\sim +0.16$ は別日に実験を行なったために, 評価がやや不連続となってしまったと考えられるが, LC が $+0.12$ 以上となれば, 多くの条件で「1. やっと見える」以上の評価になると考えられる. また, 図 5.23(vii)~(xii)の $LC < -0.04$ の条件でも, LC の絶対値が増加に伴って, 「0. 見えない」の分布の範囲が赤側(aC が高い側)に移動しながら狭まっている様子が見られるが, $LC = -0.16$ の場合でも「0. 見えない」の評価が多く残っている.

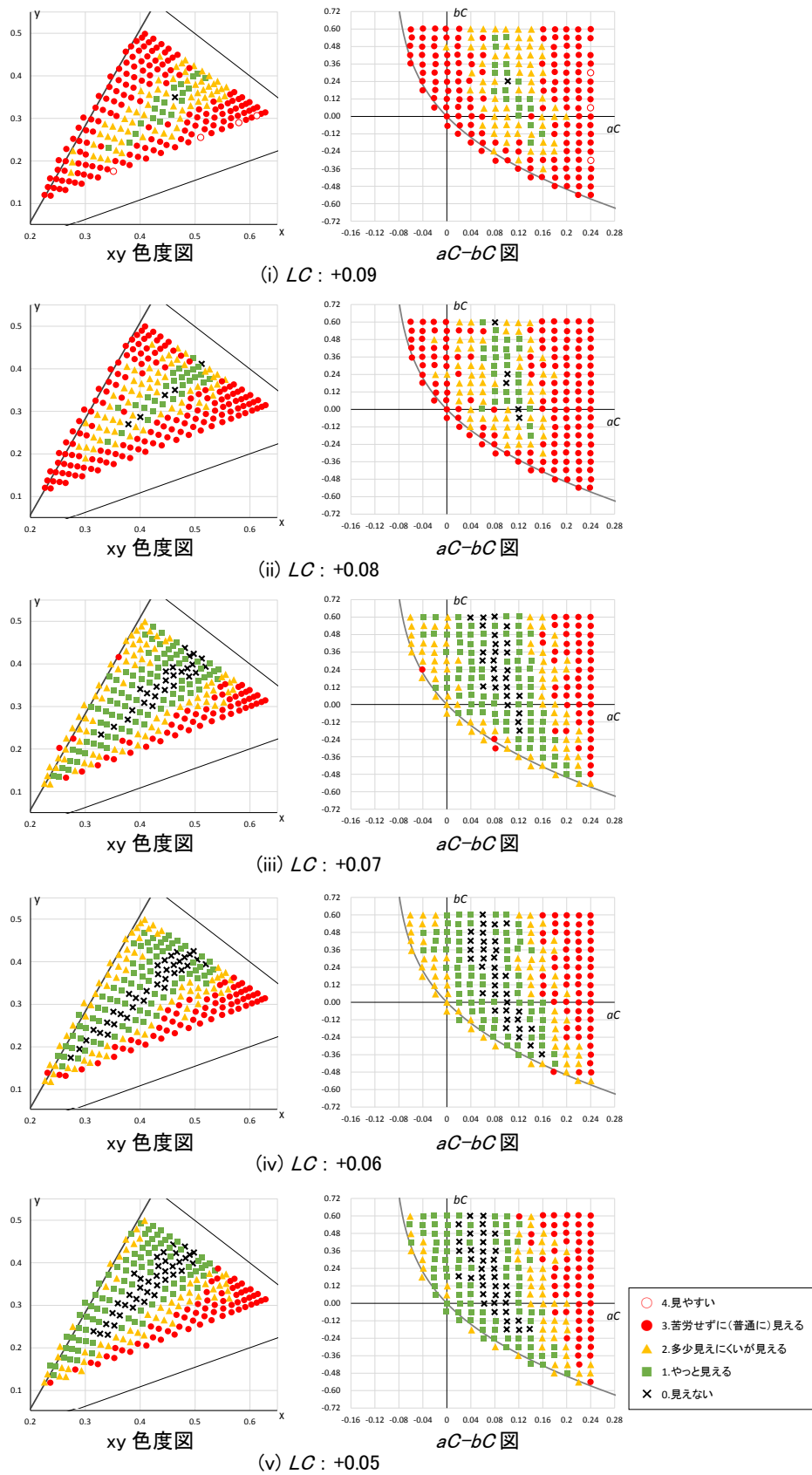


図 5.21 実験 5-D(追加)評価結果(被験者 No.9, 1 型 1 名)

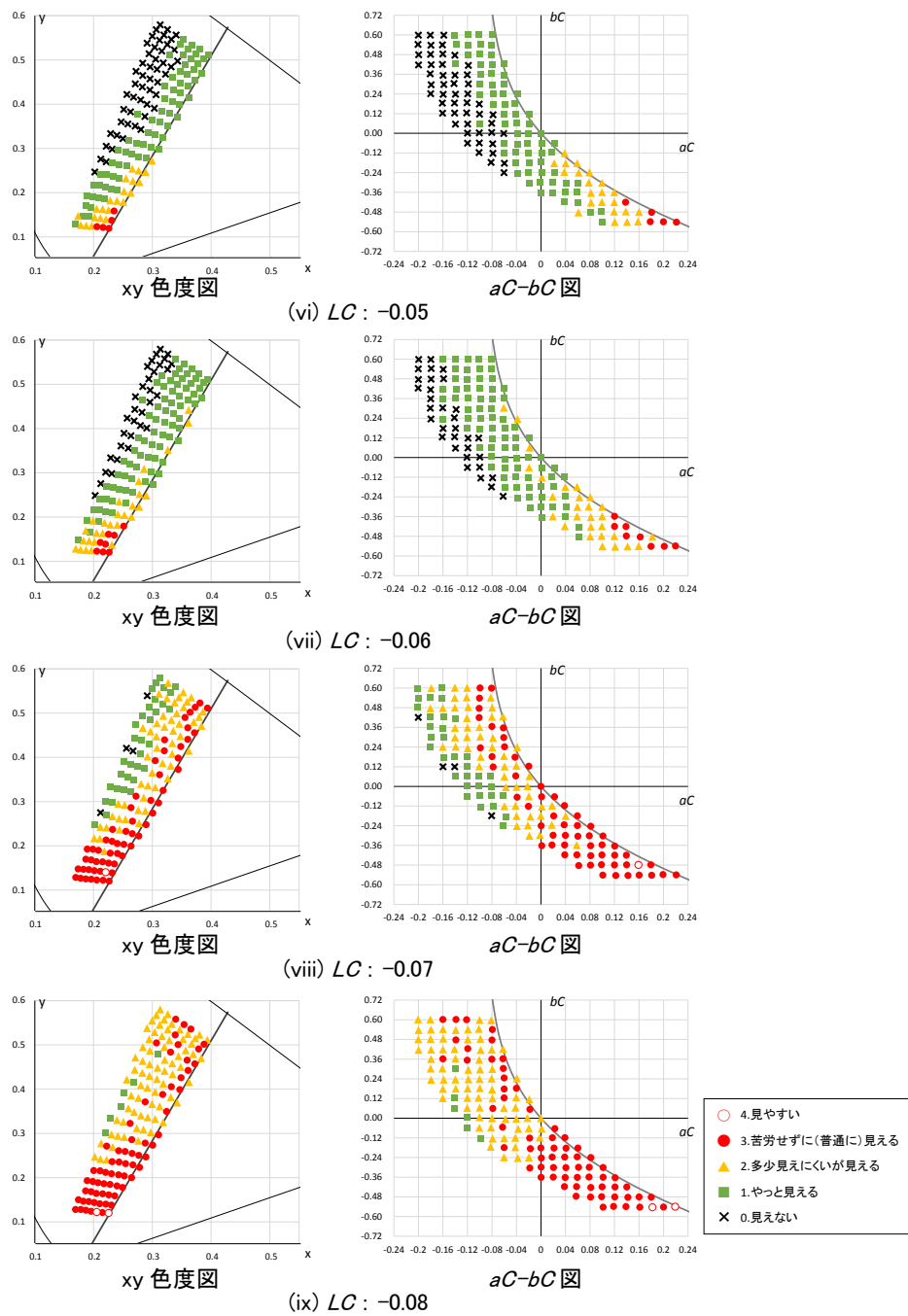


図 5.21 実験 5-D(追加実験)評価結果(被験者 No.9, 1 型 1 名) (続き)

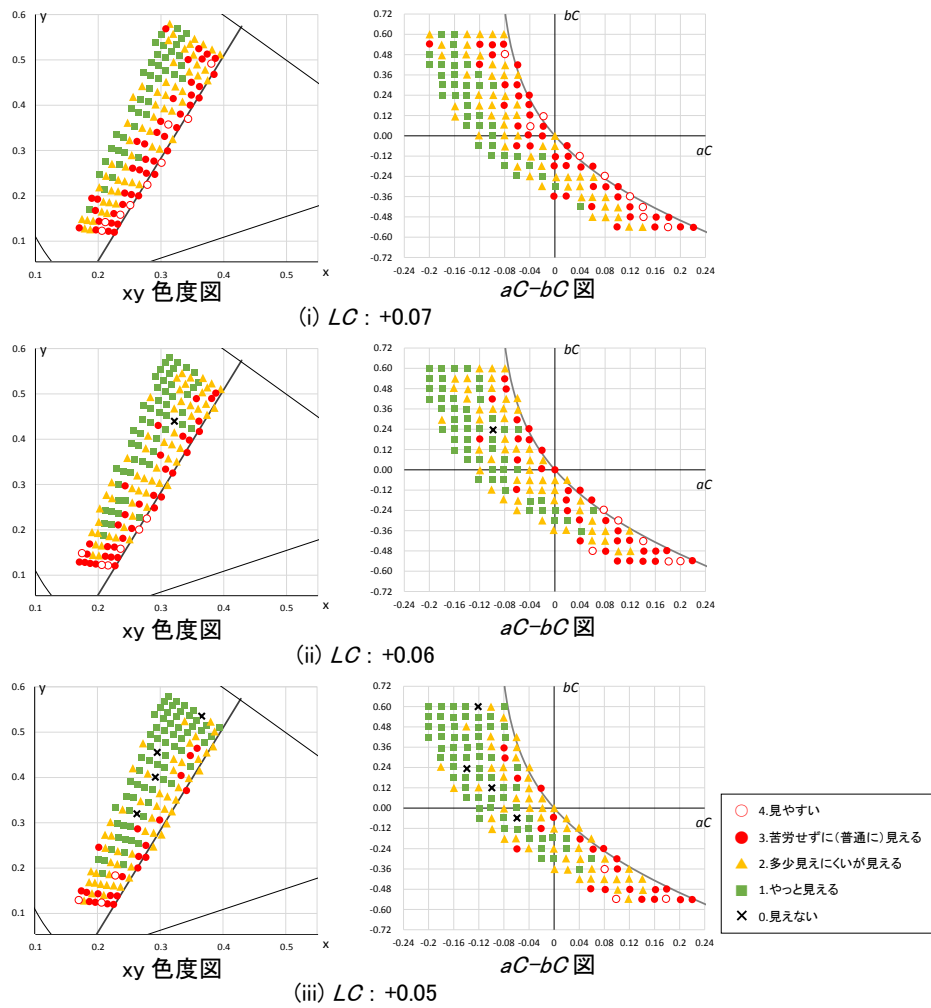


図 5.22 実験 5-D(追加実験)評価結果(被験者 No.16, 2 型 1 名)

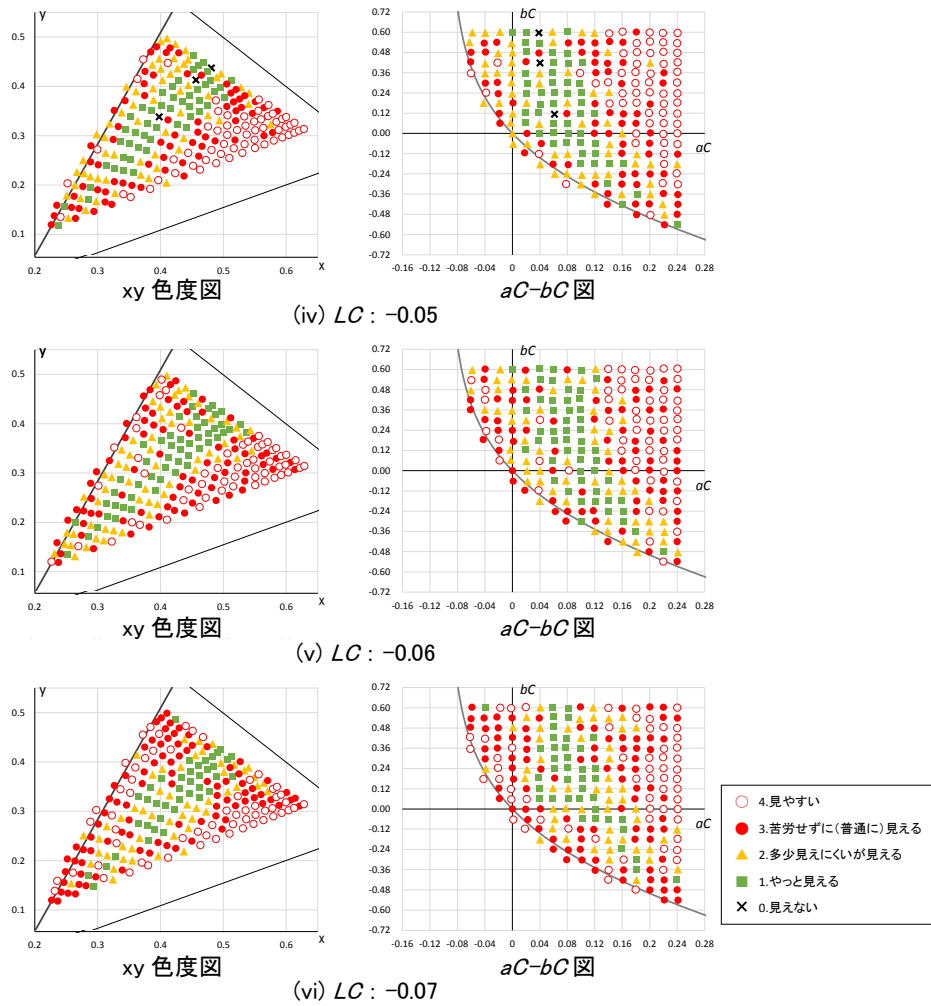


図 5.22 実験 5-D(追加実験)評価結果(被験者 No.16, 2 型 1 名)(続き)

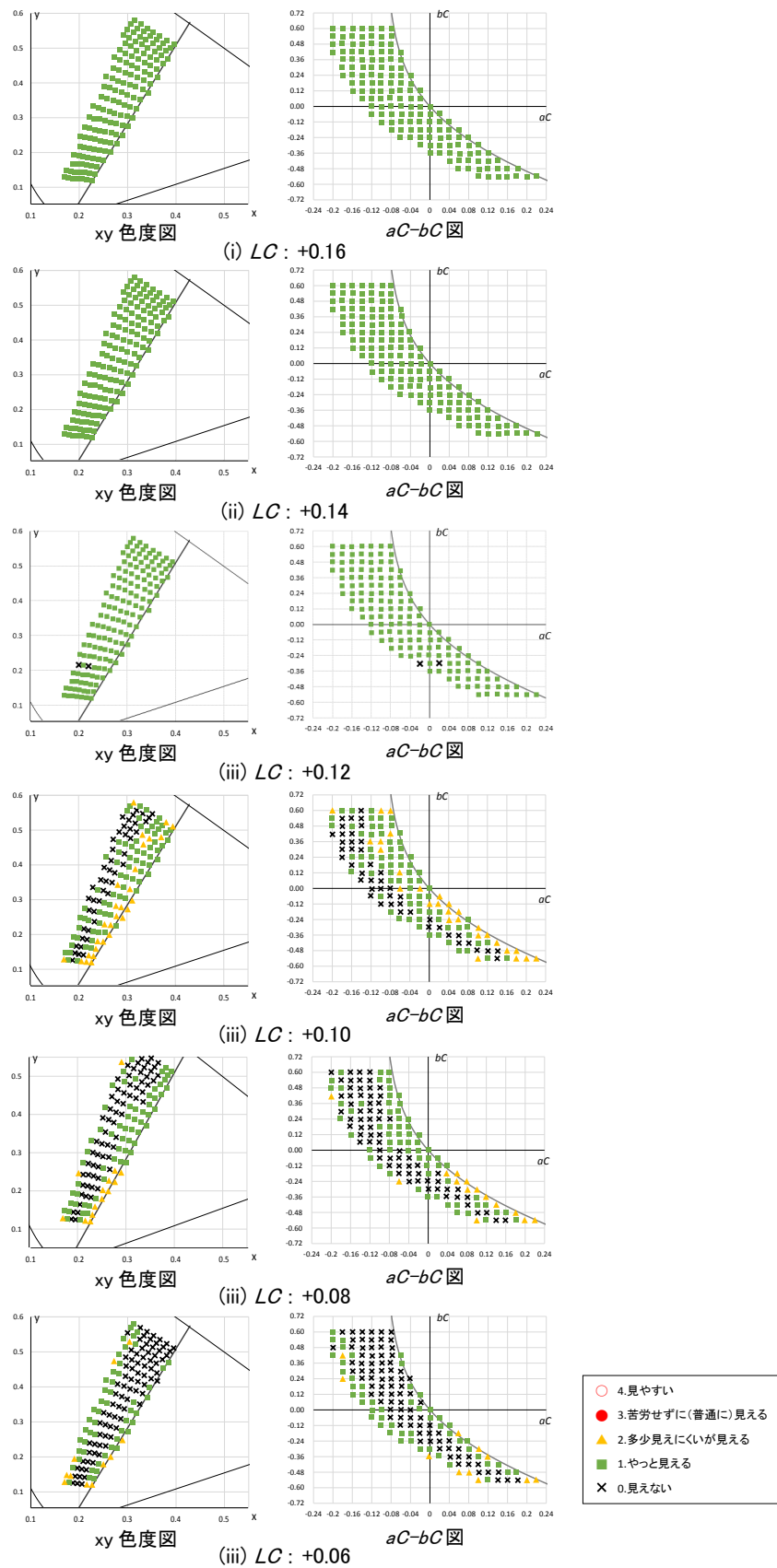


図 5.23 実験 5-D(追加実験)評価結果(被験者 No.10, 2 型 1 名)

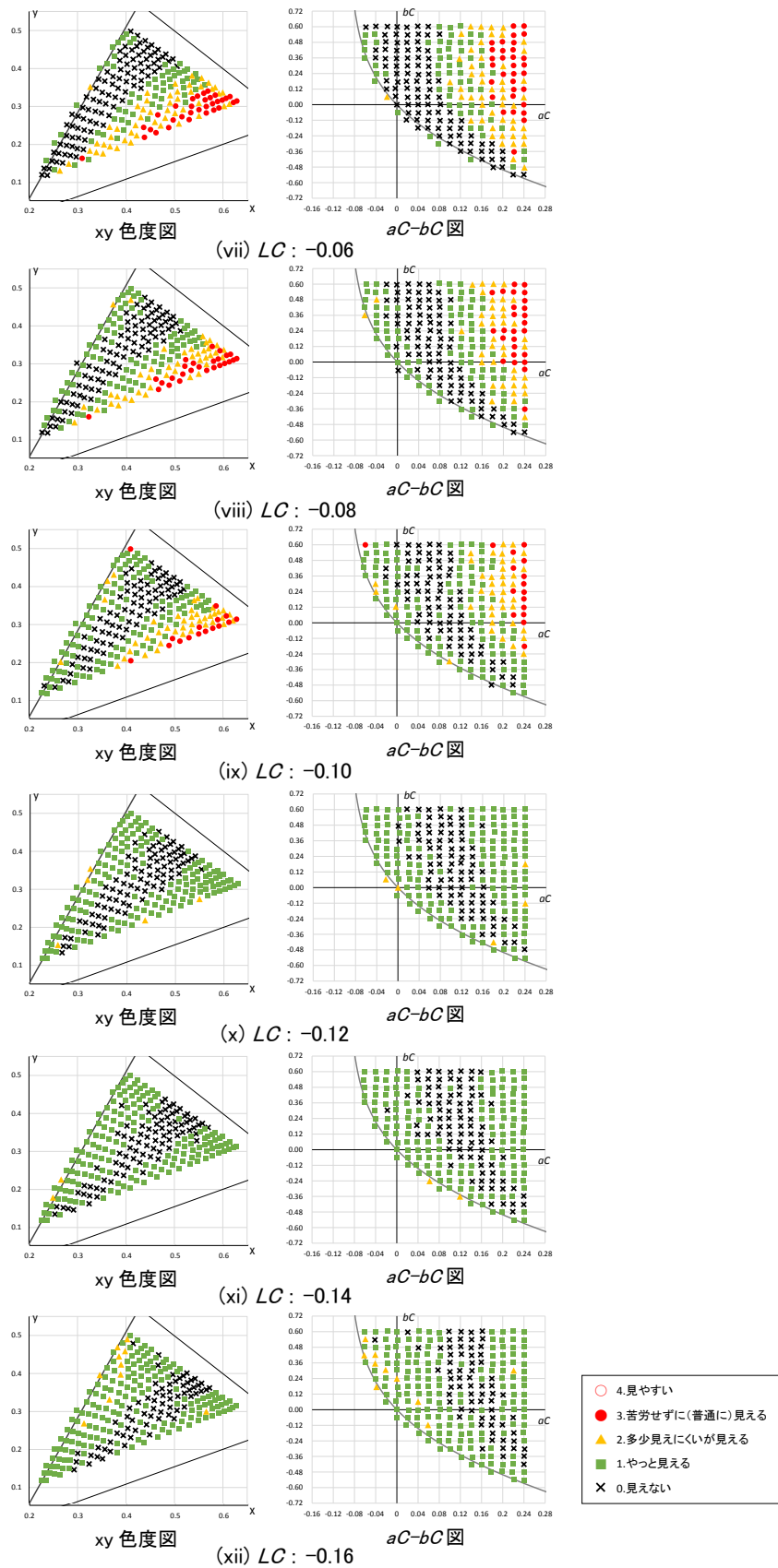


図 5.23 実験 5-D(追加実験)評価結果(被験者 No.10, 2 型 1 名)

5.4. 第 5 章まとめ

本章第 2 節では、先天性の色弱とされる 1 型(P 型), 2 型(D 型)の色弱者を対象に、色の見え方に関して日常生活において不便に感じていること等をヒアリング調査した。色の見え方に関して不便に感じていることを把握し、大まかに色の見え方の特徴を確認した。

第 3 節では、前章で一般色覚者を対象に行なった検討をカラーユニバーサルデザインに展開させるため、1 型, 2 型の色弱者を対象に、前章と同様の円形視標を用いた見やすさ評価実験を行なった。前章と同様に、 xy 色度図および測光色コントラスト評価図(aC - bC 図)を用いて実験結果を分析した。前章の一般色覚者の実験結果と比較し、以下の事項を明らかにした。

- ・ CIE 標準光源 D65 に相当する背景色度, 円形視標サイズ 5[min], 輝度コントラスト $LC \simeq 0$ の条件下で, 円形視標の色度コントラスト aC , bC を変化させた場合, 色弱者でも一般色覚者と同様に, 小視野トリタノピアの影響により 'S 錐体が機能していない場合の混同色線' に沿うように, 緑みの黄から董(スマレ)色にかけての色度コントラストをもつ円形視標の条件で視認性が低下することを明らかにした。ただし, 一部の色弱者では前章の一般色覚者の評価結果よりも, やや aC ([赤-緑]コントラスト)軸方向に「0. 見えない」の評価の範囲が広がる様子が見られた。
- ・ 背景色度が変化した場合でも同様に, 'S 錐体が機能していない場合の混同色線' に沿う条件で視認性が低下することを明らかにした。
- ・ 円形視標のサイズが 5[min]より大きい場合では, 円形視標のサイズ 5[min]の場合よりも顕著に, 一般色覚者に比べて aC ([赤-緑]コントラスト)軸方向に「見えない」と評価される範囲が広がる様子が確認された。
- ・ 色度コントラスト aC , bC と輝度コントラスト LC が共に変化する場合では, 一般色覚者は輝度コントラスト LC の絶対値が増加するほど「見えない」の評価される範囲が縮小したが, 色弱者の場合では輝度コントラスト LC の絶対値が増加しても, 特定の色度コントラスト aC , bC の範囲で「見えない」と評価されることを明らかにした。
- ・ 1 型の場合は, LC が正のとき 'S 錐体が機能していない場合の混同色線' よりも赤側(aC が高い側), LC が負のとき 'S 錐体が機能していない場合の混同色線' よりも緑側(aC が低い側)の条件で視認性が低下した。
- ・ 2 型の場合は反対に, LC が正のとき 'S 錐体が機能していない場合の混同色線' よりも緑側(aC が低い側), LC が負のとき 'S 錐体が機能していない場合の混同色線' よりも赤側(aC が高い側)の条件で視認性が低下した。

第 5 章参考文献

- 1) NPO 法人カラーユニバーサルデザイン機構, <http://www2.cudo.jp/wp/> (accessed 2018.12.7)
- 2) 伊藤啓：カラーユニバーサルデザイン色覚バリアフリーを目指して, 情報管理, 第 55 巻, 第 5 号, pp.307-317, 2012.8
- 3) 篠田博之, 藤枝一郎：色彩工学入門 定量的な色の理解と活用, 2007.4
- 4) 岡部正隆, 伊藤啓：色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション(1)色覚の原理と色盲のメカニズム, 細胞工学, 第 21 巻, 第 9 号, pp.733-745, 2002.7
- 5) CIE : Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes - Part 2: Spectral Luminous Efficiency Functions and Chromaticity Diagrams, CIE technical report, 170-2, 2015.12
- 6) 公益財団法人一新会：石原色覚検査表 II 国際版 38 表, 2014
- 7) 田邊詔子, 市川一夫：標準色覚検査表 第 1 部先天異常用(SPP-1), 2016
- 8) 日本工業規格：視力検査装置, JIS T 7309, 2002
- 9) Vivianne C. Smith and Joel Pokorny: Spectral Sensitivity of the Foveal Cone Photopigments between 400 and 500 nm, Vision Research, Vol. 15, No. 2, pp.161-171, 1975.2
- 10) 矢口博久ら：新編色彩科学ハンドブック[第三版], 第 10 章色覚モデルと色の見えモデル, pp.515-556, 2011.4
- 11) 矢口博久：カラー画像工学の基礎と応用 第 1 回視覚と色, テレビジョン学会誌, 第 47 巻, 第 1 号, pp.68-76, 1993.1
- 12) J. J. Vos and P. L. Walraven: Back to Helmholtz, Color Research Application, Vol. 16, No. 6, pp.355-359, 1991.12

第6章 一般色覚者・色弱者を対象とした
測光色画像を用いた視認性推定法の構築

6.1. 本章の目的

第 4 章では、 $L^*a^*b^*$ 色空間を参照する形で、XYZ 表色系 XYZ 刺激値(Y は輝度)から輝度色度のコントラストを表現する手法を提案し、一般型の色覚を持つ者(以下、一般色覚者と呼ぶ)を対象に色度分布が視認性に及ぼす影響についても検討を進めた。さらに第 5 章では、カラーユニバーサルデザインに展開するため、1 型(P 型)・2 型(D 型)の色弱者を対象として検討し、視認性が低下する色味について確認した。

第 4 章、第 5 章で示した一般型、1 型、2 型の実験結果の差異は、色覚型によって LMS 錐体の機能に差が有るために生じたと考えられる。そのため本章では、これまで XYZ 表色系や $L^*a^*b^*$ 表色系に基づいたコントラストで表現した一般型、1 型、2 型の実験結果を、LMS 錐体細胞の反応に基づく LMS 刺激値のコントラストで表現し、カラーユニバーサルデザインを想定した視認性推定法を構築する。

6.2. 色の影響を考慮した視認性推定法の構築

6.2.1. Lab コントラストによる実験結果の表現

第 4 章の実験 4-D(4.3.5)および第 5 章の実験 5-D(5.3.5)において、一般色覚者、1 型、2 型の色弱者それぞれで結果の傾向に大きな差異が見られた。実験 4-D、実験 5-D の結果の一部を図 6.1 に示す。

実験 4-D、実験 5-D では、背景色度を CIE 標準光源 D65 に相当する色度($x=0.319, y=0.325$)、背景輝度を $19.75[\text{cd}/\text{m}^2]$ 、視対象サイズを $5[\text{min}]$ として、 LC, aC, bC (式(6.1)~(6.4))を変化させた。一般色覚者(実験 4-D)は 8 名 4 名以上で評価が得られたかによって実験結果を示し、色弱者(実験 5-D)は錐体の機能欠如や機能低下の程度に個人差があると考えられるため、実験結果を 1 名ずつ示した。一般型 8 名(被験者 No.1~8)の評価結果を図 6.1 左、1 型 1 名(被験者 No.9)の評価結果を図 6.1 中、2 型 1 名(被験者 No.16)の評価結果を図 6.1 右に示す。 LC ごとに、横軸を aC ([赤-緑]コントラスト)、縦軸を bC ([黄-青]コントラスト)とする aC - bC 図に表現している。

$$\begin{aligned} (C_x, C_y, C_z) &= 0.775 \times \log_{10}(X_t, Y_t, Z_t) - 0.775 \times \log_{10}(X_b, Y_b, Z_b) \\ &= 0.775 \times \log_{10}(X_t/X_b, Y_t/Y_b, Z_t/Z_b) \end{aligned} \quad \cdots (6.1)$$

X_t, Y_t, Z_t : 円形視標の XYZ 刺激値

X_b, Y_b, Z_b : 背景の XYZ 刺激値

$$LC = C_Y \quad \cdots (6.2)$$

$$aC = C_X - C_Y \quad \cdots (6.3)$$

$$bC = C_Y - C_Z \quad \cdots (6.4)$$

LC, aC, bC : Lab コントラスト

(L : 輝度成分, a : [赤-緑]成分, b : [黄-青]成分)

図 6.1 内のそれぞれの aC - bC 図に示す曲線は S 錐体が機能していない場合に区別できない色の組み合わせを示す混同色線¹⁾(CIE1931xy 色度図における混合色中心を $x=0.1748, y=0.0000$ とする²⁾)を aC - bC 図上に表現したものである。輝度コントラストがない($LC=0$)の場合では、一般色覚者、1 型、2 型の色弱者いずれも、この混同色線の付近の条件で「0.見えない」の評価が分布し、視認性が低下する。これは、一般色覚者であっても、L 錐体や M 錐体の分布密度に比べ、S 錐体の分布密度が低いことが起因して生じる小視野トリタノピア³⁾のためと考えられた。

一般色覚者は LC の絶対値の増加に伴って、「0. 見えない」の評価の分布の範囲が縮小し、第 2 章第 2 節で構築した LC の視認閾値の推定値 (両眼視力中央値 1.50 では正対比で 0.0300、

逆対比で-0.0339)を越えれば、大抵の条件で視認できることが確認されたが、色弱者では、 LC の絶対値の増加に伴う「0. 見えない」の評価の分布の範囲の縮小はあまり見られず、 LC が正のとき、1型は‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも赤側(aC が高い側)、2型は反対に‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも緑側(aC が低い側)で視認性が低下することが明らかになった。

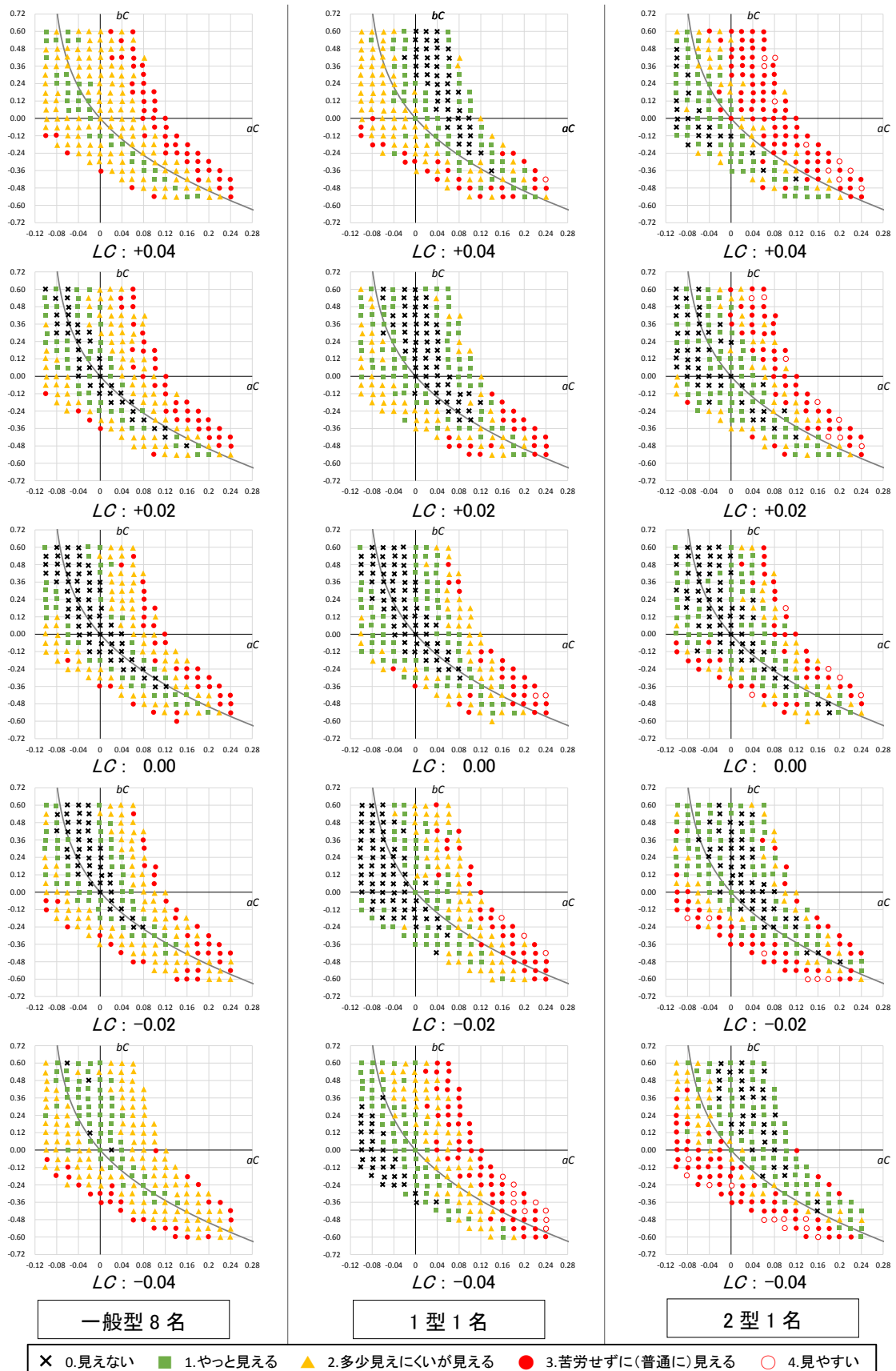


図 6.1 実験 4-D, 実験 5-D の評価結果の一部(Lab コントラストによる分析)

6.2.2. LMS 刺激値コントラストによる実験結果の表現

前項に示した通り，第 4 章，第 5 章では， $L^*a^*b^*$ 色空間を参照する形で輝度色度のコントラストを表現し，一般型，1 型，2 型それぞれについて，視認性が低下する色味を確認した．一般型，1 型，2 型の色覚型によって LMS 錐体の機能に差が有り，傾向の差異が生じたと考えられるため，本項では新たに LMS 錐体細胞の反応に基づく LMS 刺激値コントラストを用いた分析によって，色覚型ごとの特徴を確認する．

LMS 刺激値コントラストを算出するにあたり，Viénot ら³⁾が示す変換マトリックスによって実験条件の背景および円形視標の XYZ 刺激値を LMS 刺激値に変換することとした(式(6.5))．そして，式(6.1)と同様の円形視標のコントラスト算出式(式(6.6))を用いて LMS 刺激値コントラストを算出する．L 刺激値コントラストを LCC ，M 刺激値コントラストを MCC ，S 刺激値コントラストを SCC とする．

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15514 & 0.54312 & -0.03286 \\ -0.15514 & 0.45684 & 0.03286 \\ 0 & 0 & 0.01608 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad \cdots \quad (6.5)$$

L, M, S : LMS 刺激値

X, Y, Z : XYZ 刺激値

$$(LCC, MCC, SCC) = 0.775 \times \log_{10}(L_t/L_b, M_t/M_b, S_t/S_b) \quad \cdots \quad (6.6)$$

LCC, MCC, SCC : LMS 刺激値コントラスト

L_t, M_t, S_t : 円形視標の LMS 刺激値

L_b, M_b, S_b : 背景の LMS 刺激値

実験 4-D および実験 5-D の結果を，LMS 刺激値コントラストによって表現すると図 6.2 となる．横軸を LCC (L 刺激値コントラスト)，縦軸を MCC (M 刺激値コントラスト)とし， SCC (S 刺激値コントラスト)の範囲を-0.10~0.10 として表現する．前項と同様に，一般型 8 名，1 型 1 名(被験者 No.9)，2 型 1 名(被験者 No.16)の結果とする．図 6.2 に示す破線は， $LCC : MCC = 1 : 1$ を示し，破線に沿って，原点よりも右上となるほど明るい($LC > 0$)の円形視標，原点よりも左下となるほど暗い($LC < 0$)の円形視標が提示されたことを意味する．また，破線より右下は，図 6.1 で示した‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも赤(aC が高い側)の円形視標，破線より左上は S 錐体が機能していない場合の混同色線よりも緑(aC が低い側)の円形視標が提示されたことを意味する．

図 6.2 にグレーの楕円で示すように，一般型は概ね原点を中心に破線の方に沿って「0. 見えない」の評価が分布しているが，1 型の場合は LCC 軸方向，2 型の場合は MCC 軸方向に「0. 見えない」の評価の分布が伸張し，一般型に比べ視認できない範囲が広がっていることが確認できる．

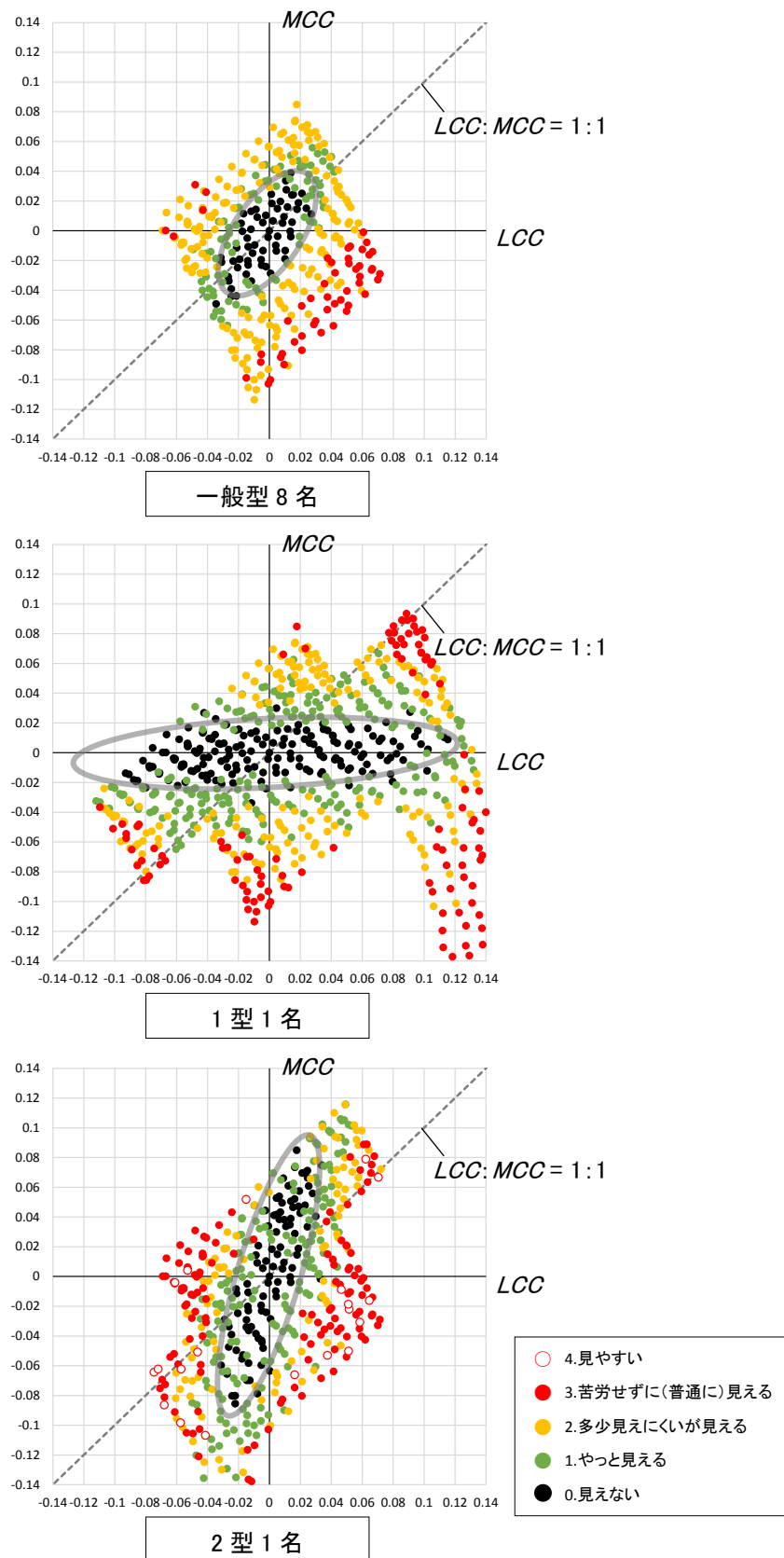


図 6.2 実験 4-D, 実験 5-D の評価結果
(LMS 刺激値コントラストによる分析, $-0.10 < SCC < 0.10$)

また、一般型において SCC の範囲を $-0.45 \sim -0.35$, $0.35 \sim 0.45$ とした場合、図 6.3 となる。図 6.2 の $SCC=0$ の場合と比べ、 SCC が逆対比 ($SCC < 0$) の場合は「0. 見えない」の評価の範囲にあまり変化はないが、 SCC が正対比 ($SCC > 0$) の場合は「0. 見えない」の評価の範囲が縮小し、 MCC 正対比側に移動している。図 6.4 の 1 型 1 名、図 6.5 の 2 型 1 名の場合でも、程度に少々差は有るが概ね同様の移動の様子が確認できた。

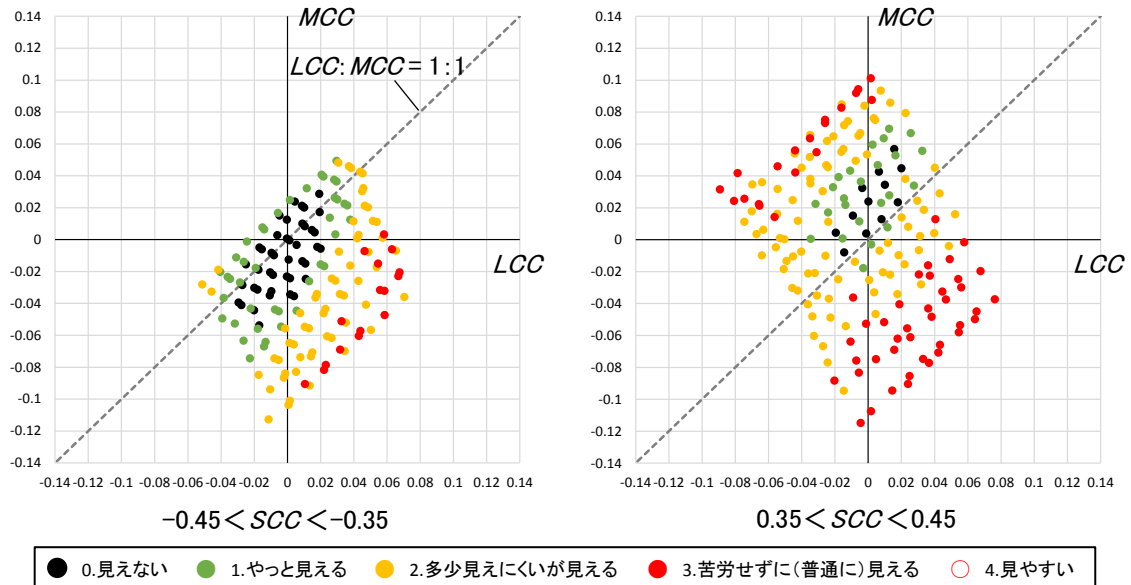


図 6.3 実験 4-D の評価結果 (LMS 刺激値コントラストによる分析, 一般型 8 名)

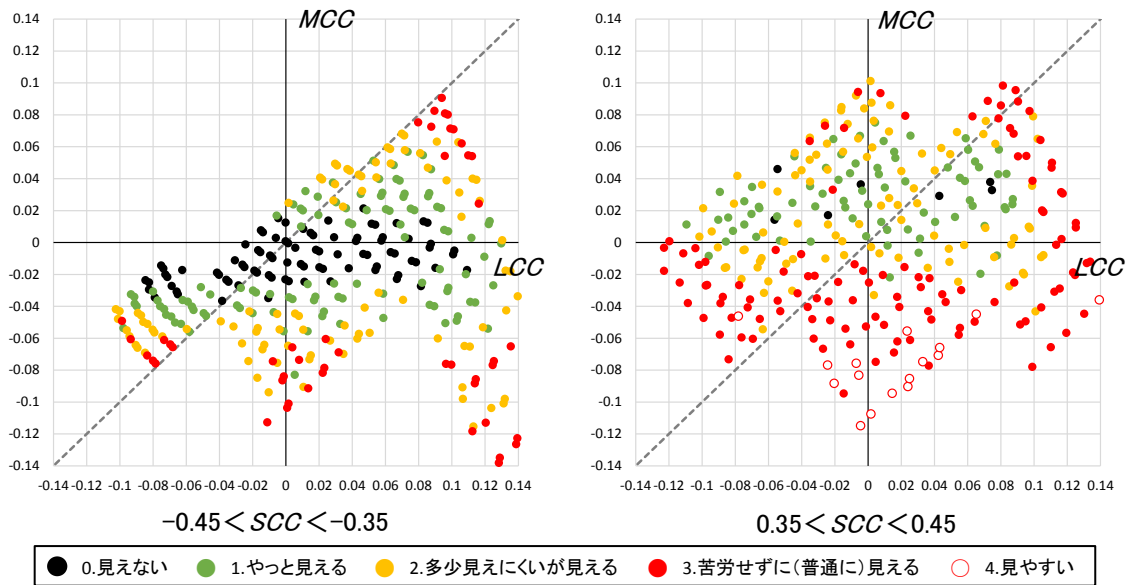


図 6.4 実験 5-D, 実験 5-D の評価結果 (LMS 刺激値コントラストによる分析, 1 型 1 名)

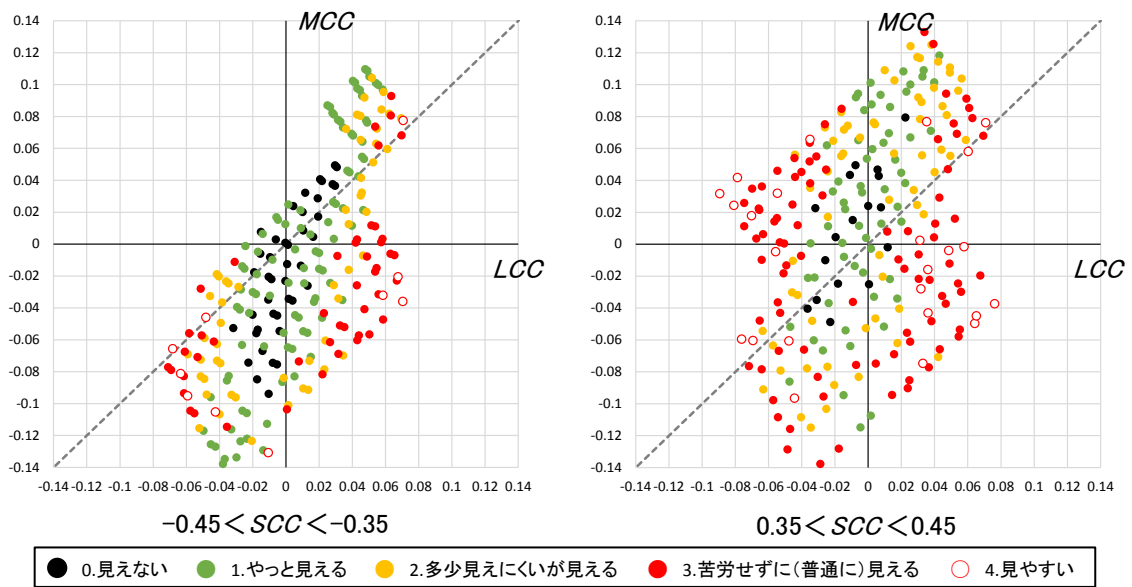


図 6.5 実験 5-D, 実験 5-D の評価結果 (LMS 刺激値コントラストによる分析, 2 型 1 名)

6.2.3. LMS 刺激値コントラストによる視認性推定法の構築

L, M 錐体のコントラストに関する既往研究として、色弁別閾(色の变化を区別できる境界)に関する研究がいくつか存在する⁴⁻⁶⁾。それらは、 $\Delta L/L-\Delta M/M$ (つまり $(L_t-L_b)/L_b-(M_t-M_b)/M_b$)平面における色弁別閾が示され、角の丸い平行四辺形(図 6.6, 図 6.7)^{4,5)}や楕円(図 6.8)⁶⁾の形で近似されている。河本ら⁴⁾の研究では、時間周波数の変化に伴って、平行四辺形の輝度方向と色方向の閾値の比率が変化し、主成分(長手)方向が変化することが示されている。また、図 6.8 の辻村ら⁶⁾の研究では、LM 錐体の感度の寄与率によって、楕円の長軸方向の傾きが変化することが述べられている。本研究の検討内容や実験条件と異なる部分もあるが、図 6.6~図 6.8 の $\Delta L/L-\Delta M/M$ 平面における色弁別閾は、図 6.2 に示した本研究の $LCC-MCC$ 平面上の視認閾と同様の傾向をもつ可能性がある。

図 6.2 の SCC の範囲 $-0.10 \sim 0.10$ ($SCC=0$ とする)の $LCC-MCC$ 平面では、色覚型によって「0. 見えない」の評価が分布する範囲が異なることが示されている。本項では、上記に挙げた既往研究⁴⁻⁶⁾を参考とし、前項の LMS 刺激値コントラストによる分析結果をもとに、視認閾値推定法を構築することとした。

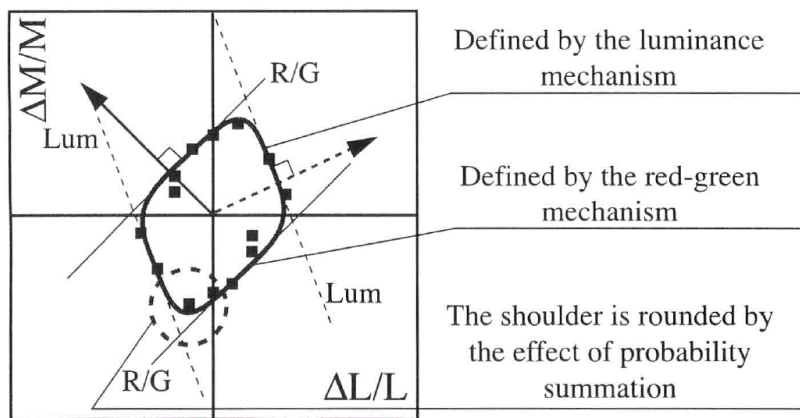


図 6.6 $\Delta L/L-\Delta M/M$ 平面上の色弁別閾の例⁴⁾

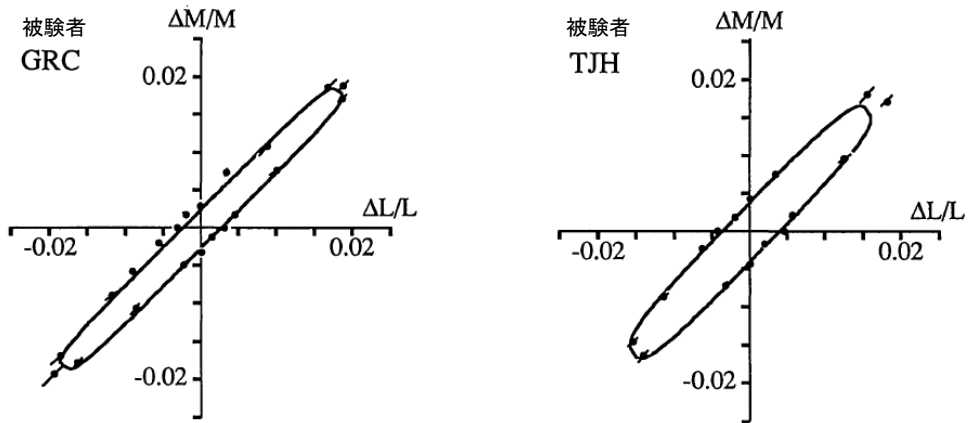


図 6.7 $\Delta L/L - \Delta M/M$ 平面上の色弁別閾の例⁵⁾

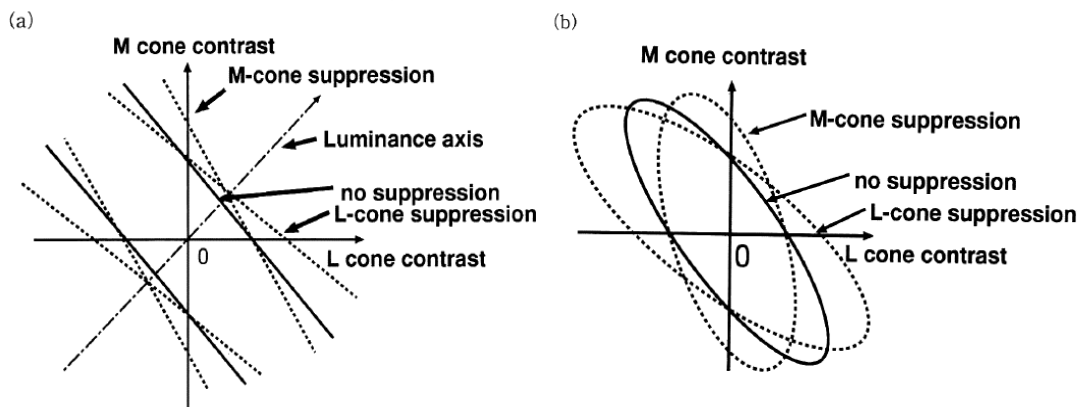


図 6.8 $\Delta L/L - \Delta M/M$ 平面上の色弁別閾の例⁶⁾

はじめに、実験 4-D および実験 5-D で、 LCC 、 bC が同一で、 aC ([赤-緑]コントラスト) を変化させた条件について、それぞれ視認可能となる閾値を求め(閾値の例を図 6.9 に示す)、主成分分析によって原点を通る一次関数を導いた(図 6.10)。色覚型ごとにこのような一次関数をそれぞれ求めると、色覚型によって傾きが異なり、一般型は $1(LCC : MCC \approx 1 : 1)$ よりもやや大きく、1 型はほぼ 0 となり、2 型は一般型よりも大きくなった(図 6.11)。

一般型で 1 よりもやや大きくなった理由としては、人間の網膜の L 錐体と M 錐体の存在比率は概ね 2:1 とされ^{7,8)}、L 錐体が M 錐体よりも感度が高いためと考えられる。また、1 型は L 錐体、2 型は M 錐体の感度がそれぞれ一般型に比べて低いため図 6.11 に示すような傾きとなったと考えられる。

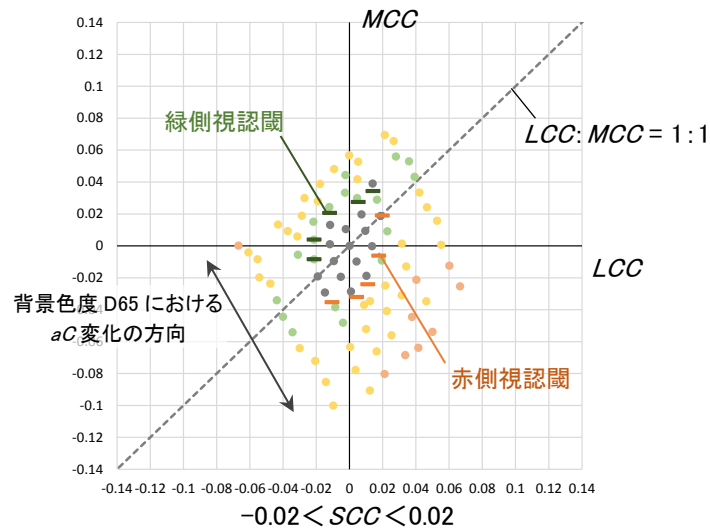


図 6.9 [赤-緑]コントラスト閾値の例 (LCC - MCC 平面, 一般型 8 名)

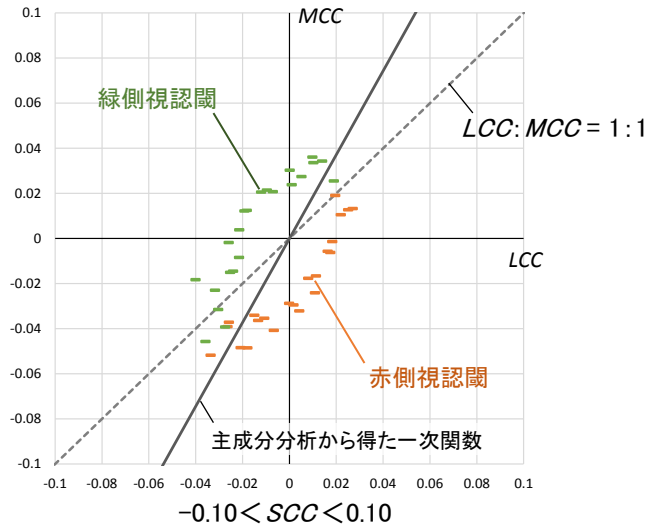
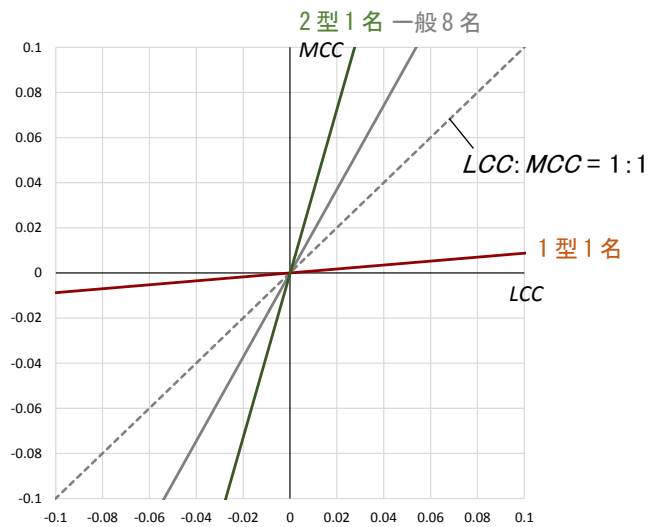


図 6.10 [赤-緑]コントラスト閾値と傾き(一般型 8 名)



	一般8名	1型1名	2型1名
傾き	1.859	0.088	3.636

図 6.11 色覚型による傾きの差異

この後 SCC の影響を考慮することを想定すると、楕円や角が丸い平行四辺形で近似した場合、複雑になることが予想されるため、本章では、これらの既往研究⁴⁻⁶⁾を参考に、 $SCC \approx 0$ の LCC - MCC 平面における視認閾について、傾き(主成分分析の第一成分)方向に 2 点、傾きの直交(主成分分析の第二成分)方向に 2 点の計 4 点を頂点とした菱形に近い四角形で、簡略化して近似することとした(図 6.12)。今回は、第一成分が横軸、傾きの第二成分方向が縦軸となるよう図 6.10 の LCC - MCC 平面を回転させ(図 6.13 左)、第一成分 $-0.01 \sim 0.01$ の範囲において第二成分の絶対値の最大値を第二成分の視認閾とした。そして、その第二成分の視認閾を通る一次関数の近似式を第一象限、第三象限の閾値の分布からそれぞれ求め、その近似式と第一成分の軸の交点を第一成分の視認閾とした(図 6.13 右)。

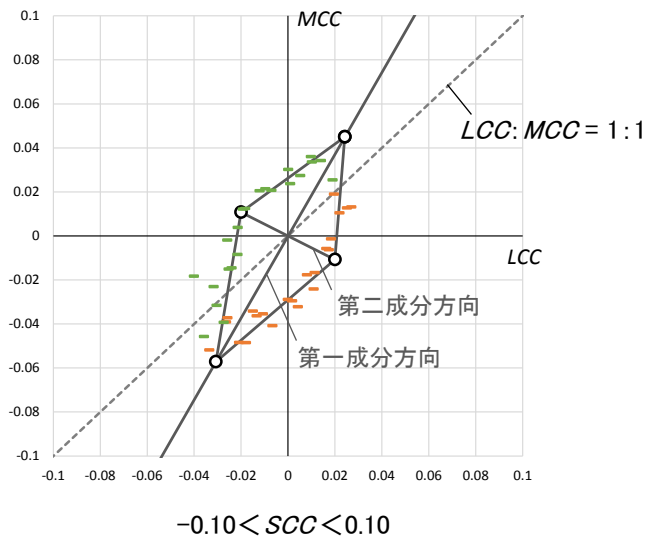


図 6.12 LCC - MCC 平面($SCC \approx 0$)における視認閾(一般型 8 名)

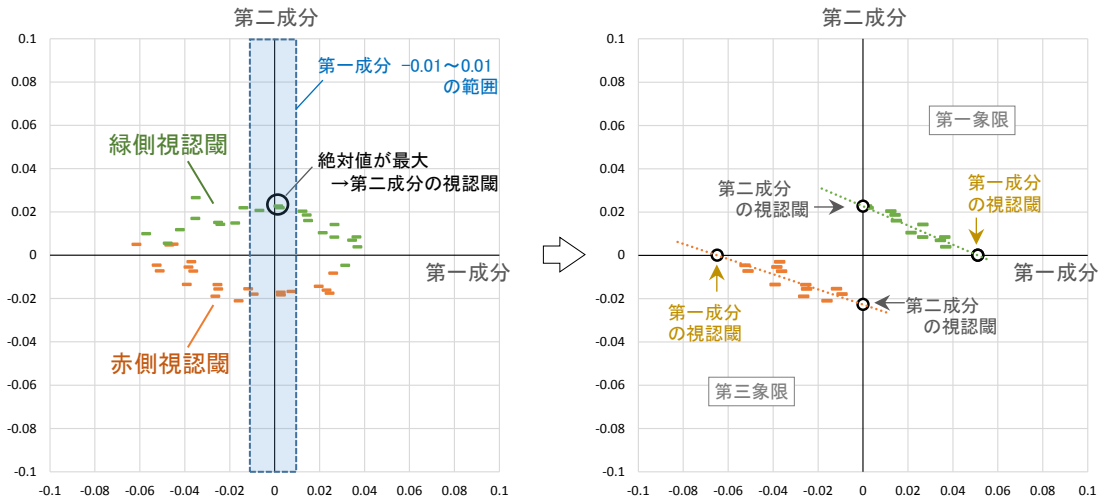


図 6.13 LCC-MCC 平面($SCC=0$)における視認閾の取得方法

また SCC 方向については、図 6.3~図 6.5 において、 SCC が正対比($SCC > 0$)の場合は「0.見えない」評価の範囲がやや縮小し、 MCC 正対比側に移動することが示されたため、Graeme らの既往研究(図 6.14)⁵⁾を参考に、正対比、逆対比それぞれ 1 点に収束する(四角形の形状を維持しながら、縮小、移動する)と仮定する。

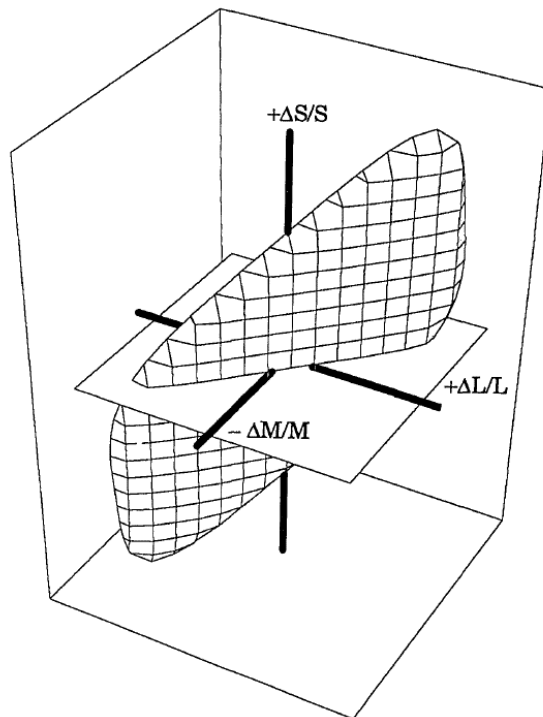


図 6.14 ある被験者から得られた LMS 刺激値コントラストの視認閾⁵⁾

一般型の SCC の範囲 $-0.45 \sim -0.35$, $0.35 \sim 0.45$ ($SCC \approx -0.40, 0.40$ とする) (図 6.3) の aC (赤-緑) コントラストを変化させた条件についてそれぞれ閾値を求めた。そして、縮小率および移動後の中心点の座標を定め(図 6.15), 収束点を求めた(図 6.16, 表 6.1)。図 6.16 は LMS 刺激値コントラストの視認閾を示す立体である。 $SCC < 0$ 側の収束点は、 $SCC > 0$ 側と比べて SCC の絶対値が非常に大きいため、 $SCC < -6.00$ の範囲は省略して表現する。色弱者については、実験結果を 1 名ずつ扱っているため評価に乱れがあることや、実験条件の範囲外にも視認できない条件があることが推察されるため、縮小率および移動後の中心点の座標を定めることが困難であった。そこで、図 6.3~図 6.5 において、一般型、1 型、2 型が、 SCC の変化に関して概ね同様の傾向であることが確認されているため、 SCC の変化による四角形の縮小率や中心点の移動は一般型と同様と仮定した。表 6.1 に色覚型ごとに定めた頂点の座標を示す。なお 1 型 1 名の $LCC < 0$ 側の視認閾については、取得が困難であるため、 $LCC > 0$ 側の視認閾と絶対値が同じであると仮定して設定した。また、一般型、1 型、2 型の LCC - MCC 平面($SCC \approx 0$)における視認閾の比較を図 6.17 に示す。それぞれ、四角形の内側の条件では、視対象を視認できないことを意味している。 $LCC : MCC = 1 : 1$ の破線方向の閾値は、一般型、1 型、2 型の色覚型によって大きな差異がないが、それ以外の方向の閾値は、一般型、1 型、2 型の色覚型によって大きな差異が生じている。

以上より、LMS 刺激値コントラストによる視認閾値推定法を構築した。

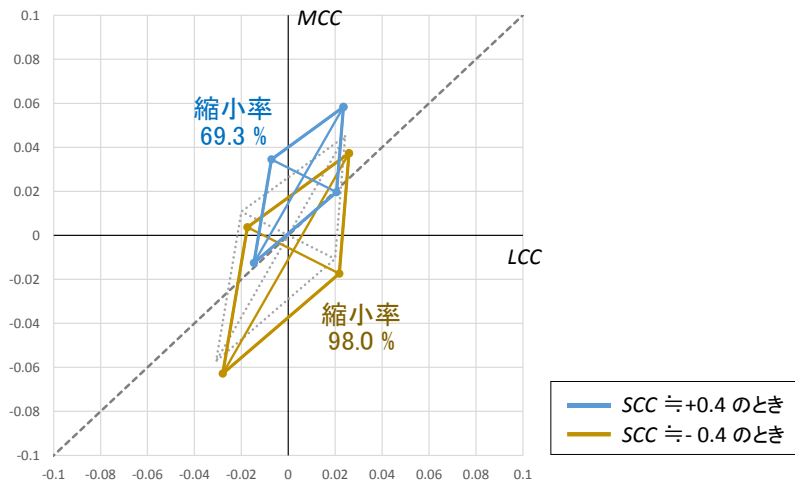


図 6.15 視認閾の縮小および移動(一般型 8 名)

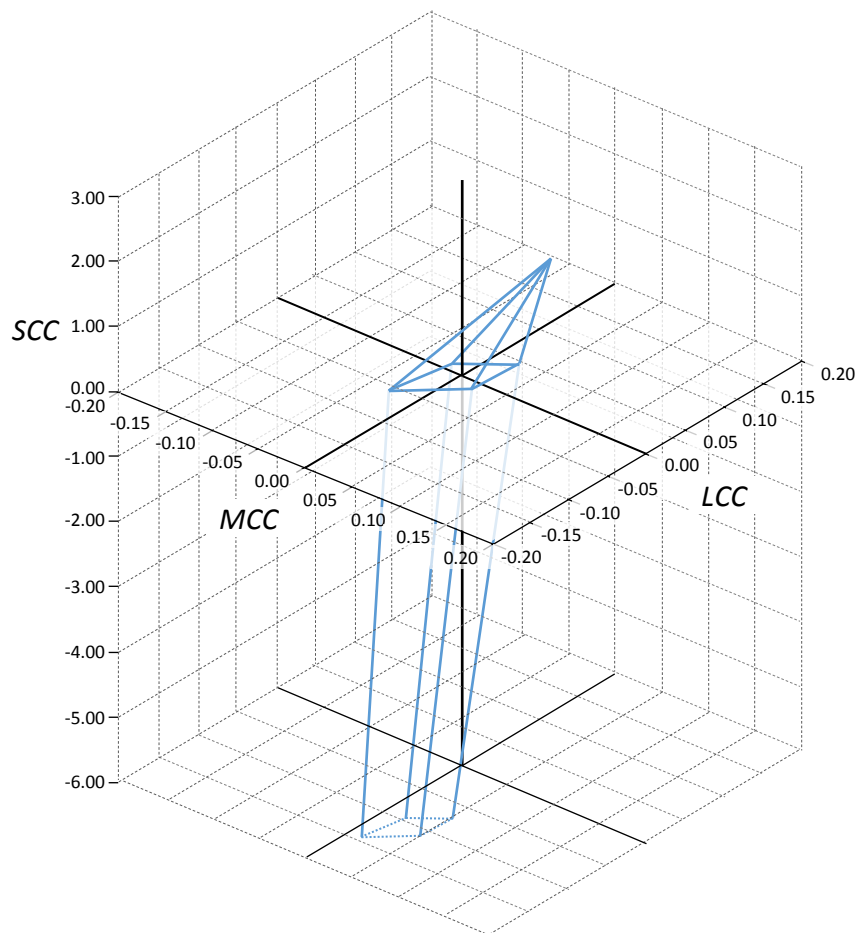


図 6.16 視認閾立体(一般型 8 名)

表 6.1 視認閾立体の頂点の座標

	<i>LCC</i>	<i>MCC</i>	<i>SCC</i>	備考
一般型 8名	0.0219	0.0884	1.3046	<i>SCC</i> > 0 側の視認閾
	0.0242	0.0450	0.0000	
	-0.0200	0.0108	0.0000	<i>LCC-MCC</i> 平面(<i>SCC</i> ≒ 0) の視認閾
	-0.0307	-0.0572	0.0000	
	0.0200	-0.0108	0.0000	<i>SCC</i> < 0 側の視認閾
	0.1097	-0.3433	-20.1067	
1型 1名	0.0219	0.0884	1.3046	<i>SCC</i> > 0 側の視認閾
	0.1091	0.0095	0.0000	
	-0.0029	0.0333	0.0000	<i>LCC-MCC</i> 平面(<i>SCC</i> ≒ 0) の視認閾
	-0.1091	-0.0095	0.0000	
	0.0029	-0.0333	0.0000	<i>SCC</i> < 0 側の視認閾
	0.1097	-0.3433	-20.1067	
2型 1名	0.0219	0.0884	1.3046	<i>SCC</i> > 0 側の視認閾
	0.0246	0.0896	0.0000	
	-0.0251	0.0069	0.0000	<i>LCC-MCC</i> 平面(<i>SCC</i> ≒ 0) の視認閾
	-0.0296	-0.1076	0.0000	
	0.0251	-0.0069	0.0000	<i>SCC</i> < 0 側の視認閾
	0.1097	-0.3433	-20.1067	

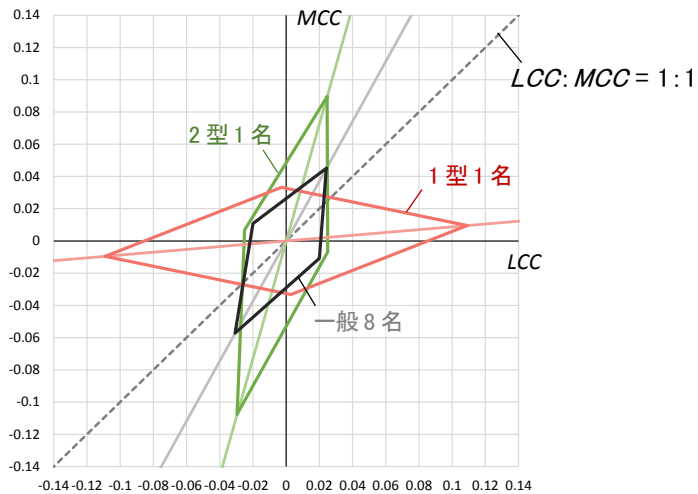


図 6.17 *LCC-MCC* 平面(*SCC* ≒ 0)における視認閾の比較

なお、第 2 章第 2 節で構築した輝度コントラストの視認閾値 C 値(LC_{th})の推定式では、視力が 1.50(今回被験者とした一般色覚者 8 名の両眼視力中央値), 円形視標のサイズが 5[min], 背景輝度が 19.75[cd/m^2]($LA \approx 1.30$)の場合, 視認閾値 C 値(LC_{th})は, 正対比で 0.0300, 逆対比で -0.0339 である(第 4 章図 4.14 参照). 第 2 章第 2 節の実験(実験 2-A, 2-B)の円形視標および背景の色度は, とともに CIE 標準光源 D65 に相当する色度($x=0.319, y=0.325$)であり, 輝度コントラスト LC のみが変化し, 色度コントラストがない($aC=0, bC=0$). この場合, $LC=LCC=MCC=SCC$ となる($LCC:MCC:SCC=1:1:1$). 正対比の視認閾値 C 値 0.0300 は(LCC, MCC, SCC)= (0.0300, 0.0300, 0.0300), 逆対比の視認閾値 C 値 -0.0339 は(LCC, MCC, SCC)= (0.0339, 0.0339, 0.0339)となる.

これを LCC - MCC 平面に表現すると図 6.18 に赤で示すプロットとなる. 第 2 章第 2 節で構築した視認閾値 C 値(LC_{th})の推定式では $LCC:MCC:SCC=1:1:1$ の直線上の正対比, 逆対比それぞれ一点ずつしか閾値がないが, 今回 LMS 刺激値コントラストを用いて視認性推定法を構築したことによって, $LCC:MCC:SCC=1:1:1$ の直線上以外についても評価が可能となった(図 6.18 の青線).

本来は, 第 2 章第 2 節で構築した視認閾値推定法から推定される視認閾値(図 6.18 赤プロット)と, 本節で構築した LMS 刺激値コントラストによる視認閾値推定法から推定される視認閾値(図 6.18 青線)が一致することが望ましい. しかし, 図 6.18 に示すように誤差が生じている. 本節の視認性推定法は, 簡略化のため LCC - MCC 平面における視認閾を菱形に近い四角形で近似したが, 既往研究⁴⁻⁶⁾を参考に, 図 6.18 のグレーの線で示すような楕円や角が丸い平行四辺形で近似すれば, 誤差が小さくなる可能性があると考えられる.

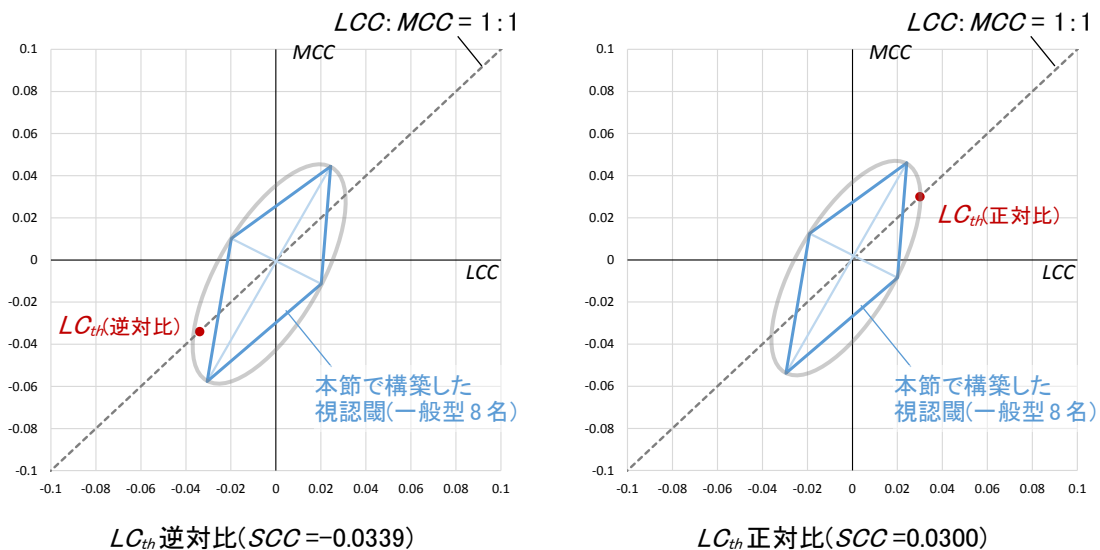


図 6.18 第 2 章第 2 節で構築した視認閾値推定式との比較

また、いずれかの錐体が機能していない場合、その錐体に関するコントラストは視認性に関与しないと考えられる。図 6.19 に示すように、1 型 2 色覚(L 錐体が完全に機能していない)の場合では、 LCC (L 刺激値コントラスト)の影響が無く、 MCC (M 刺激値コントラスト)によって視認性が決定されるため、 LCC - MCC 平面状のプロットを MCC 軸($LCC=0$)に射影することによって、視認性推定が可能と考えられる。2 型 2 色覚(M 錐体が完全に機能していない)の場合では、 MCC の影響が無く、 LCC によって視認性が決定され、 LCC - MCC 平面状のプロットを LCC 軸($MCC=0$)に射影することによって、視認性推定が可能と考えられる。

今回示した 1 型 1 名(被験者 No.9)、2 型 1 名(被験者 No.16)は、図 6.2 に示したように、1 型の場合は LCC 軸方向、2 型の場合は MCC 軸方向に「0. 見えない」の評価の分布が伸張するが、グレーの楕円でその範囲を示すことが出来るように、 LCC 、 MCC それぞれに視認閾が存在している。そのため、今回の 1 型 1 名、2 型 1 名は、L 錐体、M 錐体の完全な機能の欠如ではなく、機能の低下であると考えられる。

Viénot ら³⁾は、PC モニタ上で 1 型 2 色覚、2 型 2 色覚の見え方を一般色覚者に体験させるための手法を提案している。この手法では、画像の RGB 階調値を LMS 刺激値に変換し、1 型 2 色覚または 2 型 2 色覚の型に合わせたマトリックス変換(1 型 2 色覚は式(6.7)、2 型 2 色覚は式(6.8))によって、色の領域が削減された LMS 刺激値を求めた後、RGB 階調値に戻すことで、一般色覚者に 1 型 2 色覚、2 型 2 色覚の見え方を体験させることができるとしている。

$$\begin{pmatrix} L_p \\ M_p \\ S_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2.02344 & -2.52581 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad \dots \quad (6.7)$$

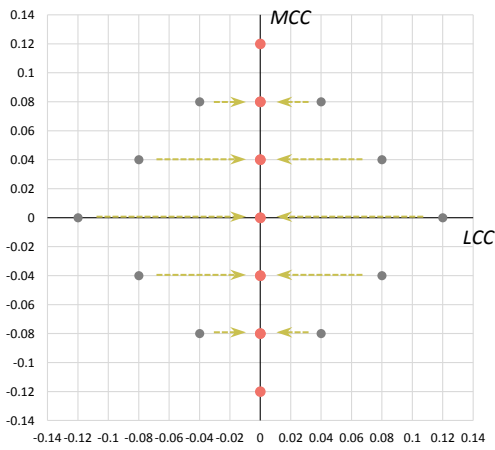
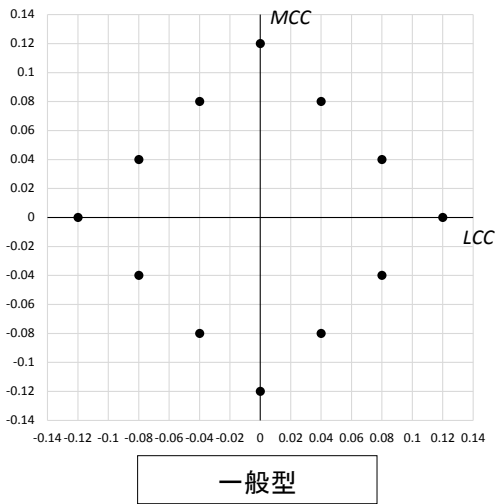
$$\begin{pmatrix} L_d \\ M_d \\ S_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.494207 & 0 & 1.24827 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad \dots \quad (6.8)$$

L, M, S : LMS 刺激値

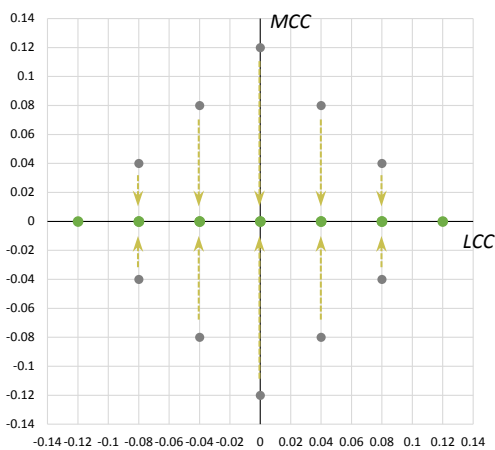
L_p, M_p, S_p : 1 型 LMS 刺激値

L_d, M_d, S_d : 2 型 LMS 刺激値

このマトリックス変換を本研究の LMS 刺激値コントラストに適用すると、図 6.19 一般型の LCC - MCC 平面に示すプロットは、図 6.20 に示すような $LCC : MCC = 1 : 1$ の直線上の位置に変換される。これは、図 6.19 で示した考え型を基に、一般型が赤緑コントラストを感じない色で表現するために、便宜上、 $LCC : MCC = 1 : 1$ の直線上に位置するように変換させている(SCC の値によって多少 $LCC : MCC = 1 : 1$ の直線上から多少ずれることがある)ためと考えられる。

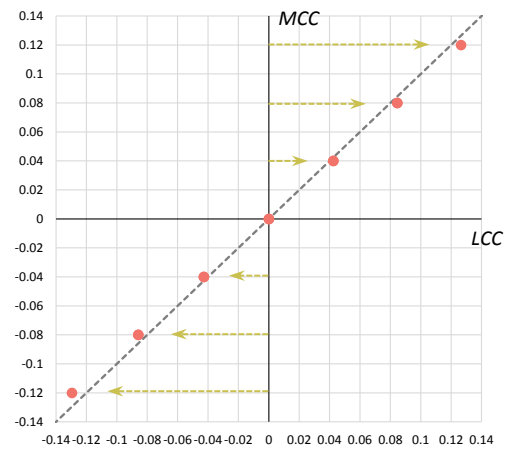


⇒ $LCC=0$ に置換できる

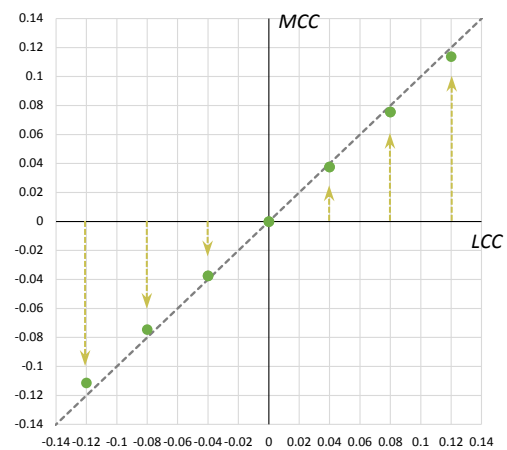


⇒ $MCC=0$ に置換できる

図 6.19 L, M 錐体が完全に機能していない場合の LCC , MCC の変換の様子



1型2色覚(L錐体が完全に機能していない)



2型2色覚(M錐体が完全に機能していない)

図 6.20 Viénotら³⁾の変換マトリックスを用いた場合の LCC , MCC の変換の様子

6.3. 第 6 章まとめ

本章では、一般色覚者、1 型と 2 型の色弱者を対象に行なった実験 4-D, 実験 5-D の結果を LMS 錐体細胞の反応に基づく LMS 刺激値のコントラストで表現し、カラーユニバーサルデザインを想定した視認性推定法を構築した。本章の検討より、以下の事項を明らかにした。

- ・ 一般色覚者を対象とした実験 4-D, 1 型と 2 型の色弱者を対象とした実験 5-D の結果を、横軸を LCC (L 刺激値コントラスト), 縦軸を MCC (M 刺激値コントラスト) とする LCC - MCC 平面に示すと、一般型は概ね $LCC : MCC = 1 : 1$ の傾きに沿って「見えない」の評価が分布するが、1 型の場合は LCC 軸方向, 2 型の場合は MCC 軸方向に「見えない」の評価の分布が伸張し、一般型に比べ視認できない範囲が広いことが明らかになった。
- ・ 一般型, 1 型, 2 型いずれの色覚型においても, SCC (S 刺激値コントラスト) が逆対比 ($SCC < 0$) の場合は LCC - MCC 平面上の「見えない」の評価の分布にあまり変化はないが, SCC が正対比 ($SCC > 0$) の場合は LCC - MCC 平面上の「見えない」の評価の分布がやや縮小し, MCC 正対比側への移動がみられた。
- ・ LCC - MCC 平面における aC ([赤-緑]コントラスト) の視認閾値を基に, 色覚型ごとに主成分分析によって原点を通る一次関数を導いたところ, 色覚型によって傾きが異なり, 一般型は $1(LCC : MCC = 1 : 1)$ よりもやや大きく, 1 型はほぼ 0 となり, 2 型は一般型よりも大きくなった。
- ・ 本章では, $SCC = 0$ の LCC - MCC 平面の視認閾について, aC ([赤-緑]コントラスト) の視認閾値の主成分分析によって得られた傾き(主成分分析の第一成分)方向に 2 点, 傾きの直交(主成分分析の第二成分)方向に 2 点の計 4 点, そして, $SCC \neq 0$ の 2 つの頂点の計 6 つの頂点を設定することによって視認閾を近似し, 色を考慮した視認閾値推定法を構築した。色覚型によって, LCC - MCC 平面における 4 つの頂点が異なることとした。

第 6 章参考文献

- 1) 篠田博之, 藤枝一郎: 色彩工学入門 定量的な色の理解と活用, 2007.4
- 2) Vivianne C. Smith and Joel Pokorny: Spectral Sensitivity of the Foveal Cone Photopigments between 400 and 500 nm, *Vision Research*, Vol. 15, No. 2, pp.161-171, 1975.2
- 3) Françoise Viénot, Hans Brettel, and John D. Mollon: Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats, *Color research and application*, Vol. 24, No. 4, pp.243-252, 1999.8
- 4) 河本健一郎, 矢口博久, 塩入諭: L, M 錐体コントラスト平面における色弁別の時間周波数特性, *光学*, Vol. 32, No. 2, pp.105-112, 2003.2
- 5) Graeme R. Cole, Trevor Hine, and William McIlhagga: Detection Mechanisms in L-, M-, and S-cone Contrast Space, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 10, No. 1, pp. 38-51, 1993.1
- 6) 辻村誠一, 塩入諭, 平井有三, 矢口博久: 背景の置換による錐体の選択的な順応効果, *光学*, Vol. 27, No. 11, pp.675-682, 1998.1
- 7) 矢口博久: カラー画像工学の基礎と応用 第 1 回視覚と色, *テレビジョン学会誌*, 第 47 巻, 第 1 号, pp.68-76, 1993.1
- 8) J. J. Vos and P. L. Walraven: Back to Helmholtz, *Color Research Application*, Vol. 16, No. 6, pp.355-359, 1991.12

第7章 実空間の測光色画像を用いた視認性推定の例

7.1. 本章の目的

本章では、本研究において構築した視認性推定法を用いて、実空間の測光色画像を用いた視認性推定の例を示すこと、また構築した視認性推定法の性能の確認を目的とする。本研究はこれまで、中心視で観察した場合に、どのような条件で障害物やサイン等の視対象を検知できるかを調査し、視認性推定法を構築してきた。本章においても、中心視で視対象を検知できるかを推定する。公共空間に多く存在し、視認できなかった場合に危険が生じると考えられるものを視対象として選定する。

第2,3章で得られ成果を基に、実空間の輝度画像(色味情報を持たない測光色画像)を用いて、晴眼者、低視力者、弱視者を想定した視認性推定を行なう。また、第6章までの成果を基に、実空間の測光色画像を用いて、一般色覚者、色弱者(1型・2型)を想定し、色の影響を考慮した視認性推定を行なう。

7.2. 実空間の輝度画像を用いた視認性推定の例

7.2.1. 推定概要

本節では、第2章で構築した輝度コントラストによる視認性推定法を用いて、実空間の輝度(XYZ表色系Y刺激値)の分布をもつ輝度画像から、晴眼者、低視力者、弱視者を想定した視認性推定を行う。輝度コントラストの視認閾値の比によって見やすさの程度の推定が可能であることを示しているため、輝度コントラストの視認閾値の比によって見やすさの程度を推定できると考える。また、第3章において、一部の弱視者を除き、低視力晴眼者や弱視者で第2章2節で構築した視認閾値推定法が適用できることを確認している。

今回、図7.1に示す2種類の実空間において、輝度画像を用いた視認性推定を行った。(a)避難誘導等と(b)車止めが存在する空間である。(a)避難誘導灯は、非常時に視認できなかった場合、避難行動の遅れに繋がる恐れがある。また、(b)車止めは、歩道等への車の進入を防ぎ、歩行者を安全にする目的がある一方で、歩行者にとっては障害物となり、特に弱視者にとっては危険となる可能性があると考えた。

(a)、(b)の実空間について、Panasonic LUMIX DMC-GX1の撮影画像を用いて7種の露出で写真撮影し、ビジュアルテクノロジー研究所 REALAPASの画像合成ソフト Clum カラーを用いて合成し、輝度画像を作成した。輝度画像を図7.2に示す。今回用いた輝度画像は、(a)、(b)ともに縦3448×横4592 [px]、水平画角は63.455 [deg]であり、解像度(1[px]あたりの画角[deg])は $0.0138(=63.455/4592)$ [deg/px]である。

今回、(a)、(b)の視対象の視認性推定を行うに当たり、コントラスト・プロファイル法¹⁾に基づき、正対比でLC値が最大となる検出サイズ、位置によって、コントラスト値を算出することとした。第2章第2節第2項(2.2.2)で述べたように、視標サイズの3[px]となるよう解像度にダウンサンプリングし、畳み込み計算を行なうため、元の画像では、視対象サイズが3のn倍となっている必要がある。また、nが偶数であると、計算の都合上ダウンサンプリング時に位置情報が0.5 [px]分ずれてしまうため、視対象サイズは $3 \times n$ (nは奇数とする)[px]に限定することとした。

検出サイズ[px]、各検出サイズにおけるLC最大値、LC最大値が得られた位置(xy座標)の一覧表、および、検出サイズ[px]と各検出サイズにおけるLC最大値の関係を示すグラフを図7.3に示す。なお、今回用いた測光色画像におけるxy座標の表現は図7.4に示す通りである。(b)において、検出サイズが小さい場合、石の模様等、検出されているものが車止め全体ではないと考えられるため、51[px]以下の検出サイズの範囲は対象外とした(図7.3)。(a)は検出サイズ63[px]、(b)は検出サイズ129[px]で、図7.5に示す位置(以下、評価位置)で、LC値が最大となった。(a)における検出サイズ63[px]は避難誘導灯の縦または横幅よりやや大きく、(b)における検出サイズ129[px]は車止めの横幅よりやや小さい。(a)は検出サイ

ズ 63[px](=0.8706[deg]), 評価位置(x, y)=(2354, 1382), (b)は検出サイズ 129[px](=1.7826 [deg]), 評価位置(x, y)=(2955, 1990)として, 以降の検討を進める(表 7.1).

図 7.2 の輝度画像から, 輝度コントラスト画像, 対数輝度平均画像を作成すると, 図 7.6 となる. また, 評価位置の LC , LA 値を表 7.1 に示す. 今回は, 通常視力の晴眼者から低視力者, 弱視者までの人々が観察する事を想定し, 視力 1.5, 1.0, 0.5, 0.2, 0.1, 0.075, 0.05, 0.02 の視力を想定して視認性推定を行った.



図 7.1 評価対象とした実空間の様子

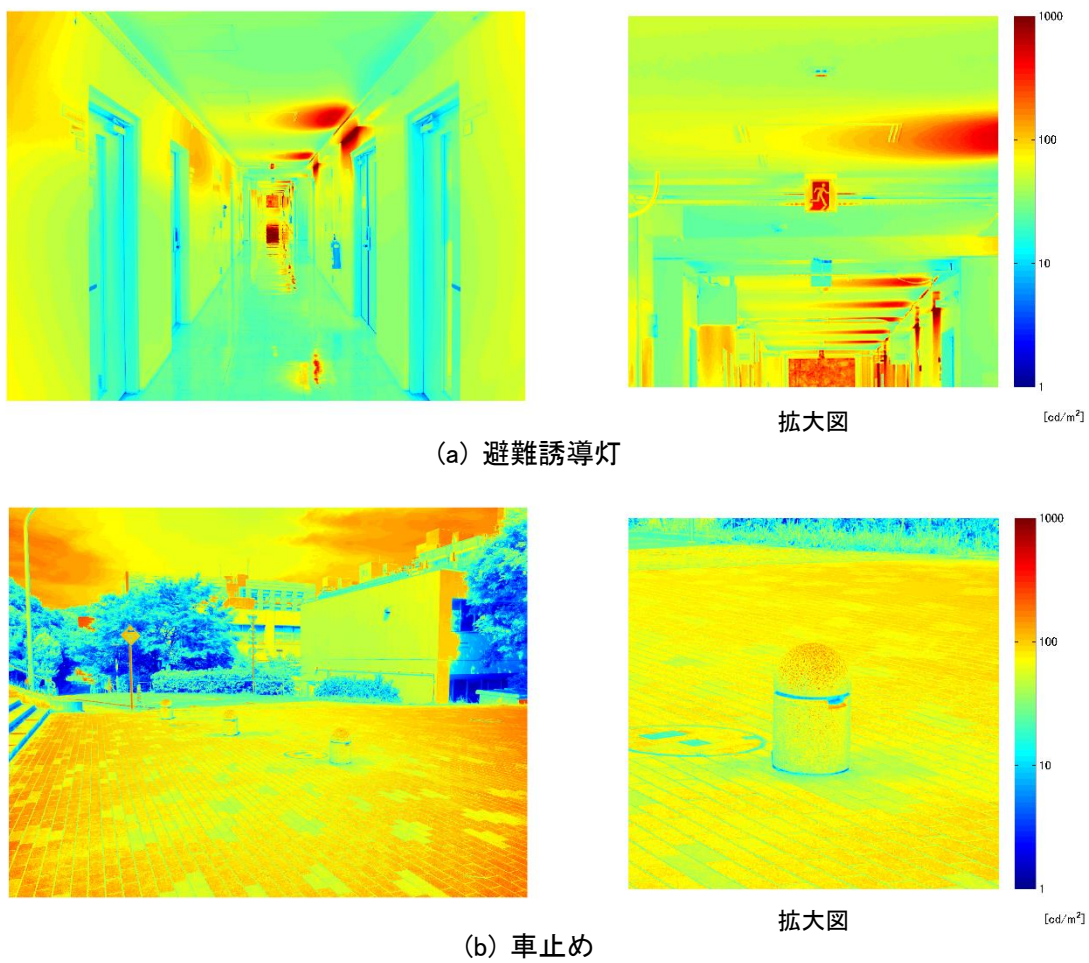
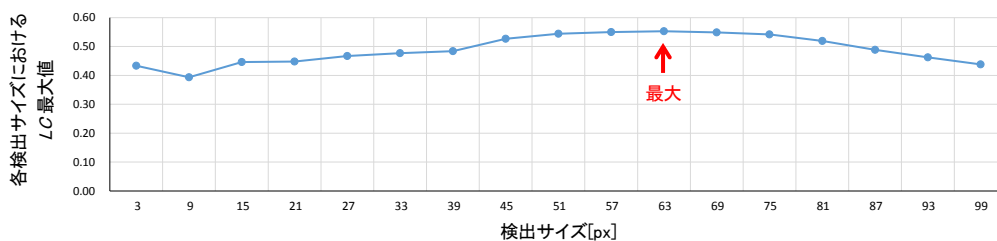


図 7.2 輝度画像

表 検出サイズ[px], 各検出サイズにおける LC 最大値, LC 最大値が得られた位置

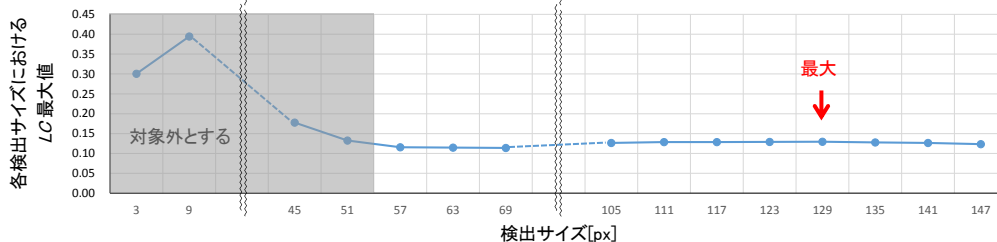
n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33
検出サイズ[px]	3	9	15	21	27	33	39	45	51	57	63	69	75	81	87	93	99
LC最大値	0.434	0.393	0.446	0.448	0.467	0.477	0.484	0.527	0.544	0.550	0.553	0.549	0.542	0.519	0.489	0.463	0.438
LC最大値が得られた y座標	1373	1364	1357	1359	1359	1392	1391	1376	1379	1381	1382	1367	1367	1368	1369	1376	1375
LC最大値が得られた x座標	2322	2362	2346	2343	2349	2347	2346	2347	2348	2349	2354	2352	2352	2352	2351	2350	2350



(a) 避難誘導灯

表 検出サイズ[px], 各検出サイズにおける LC 最大値, LC 最大値が得られた位置

n	1	3	15	17	19	21	23	35	37	39	41	43	45	47	49
検出サイズ[px]	3	9	45	51	57	63	69	105	111	117	123	129	135	141	147
LC最大値	0.3004	0.3946	0.1778	0.1328	0.1157	0.1149	0.1139	0.1265	0.1286	0.1288	0.1293	0.1295	0.1278	0.1263	0.1235
LC最大値が得られた y座標	2037	2090	2107	2105	2201	2199	2197	2007	2004	1998	1995	1990	1988	1980	1982
LC最大値が得られた x座標	2932	2976	3002	3017	2756	2758	2760	2966	2965	2961	2963	2955	2961	2960	2959



(b) 車止め

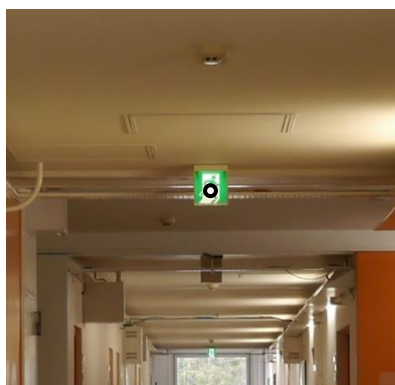
図 7.3 検出サイズ[px]と LC 最大値, LC 最大値が検出された位置の関係



(a) 避難誘導灯

(b) 車止め

図 7.4 今回用いた測光色画像における xy 座標の表現



拡大図

(a) 避難誘導灯



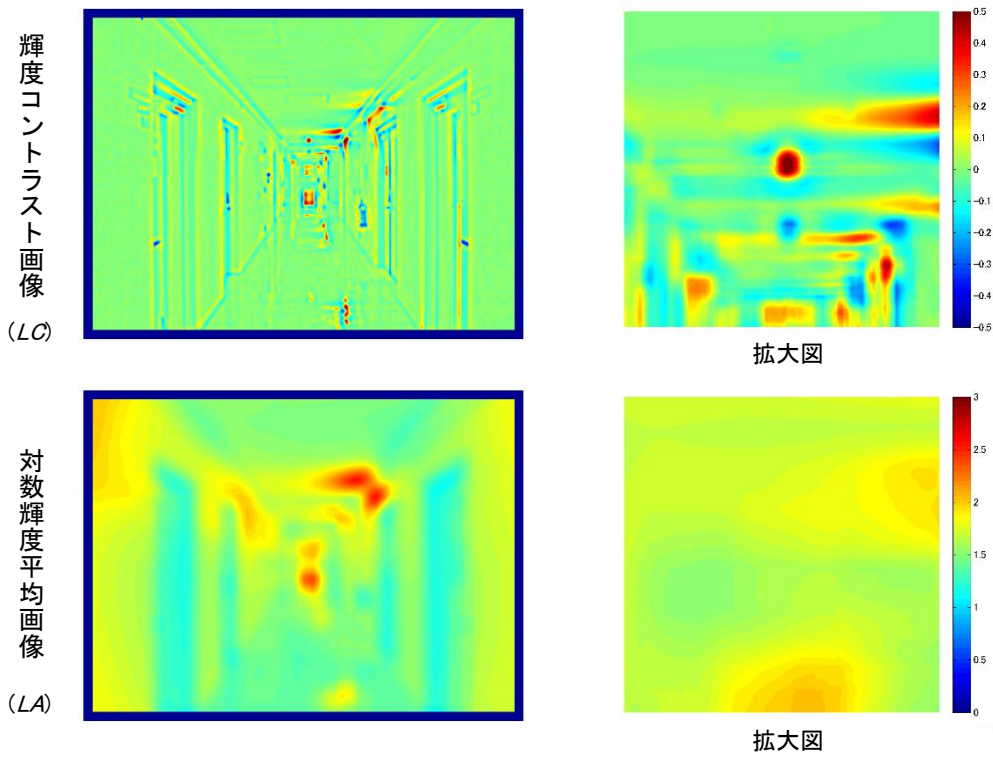
拡大図

(b) 車止め

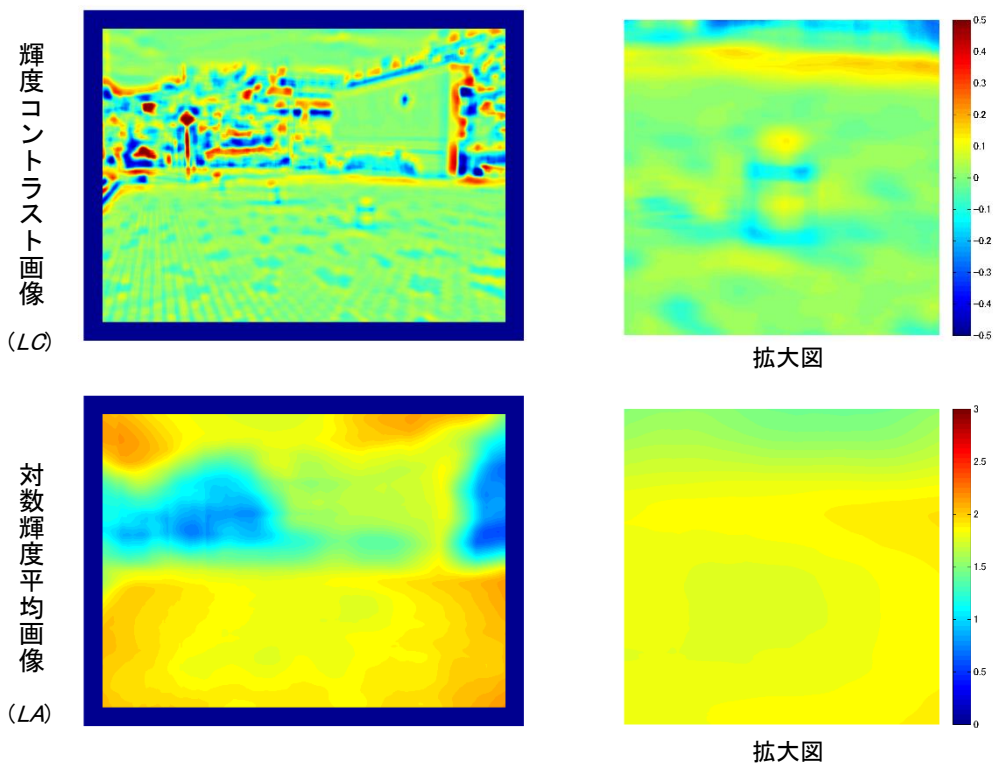
図 7.5 LCが最大となる位置(評価位置) ※○で示す

表 7.1 評価位置の LC, LA 値一覧

項目	(a) 避難誘導灯	(b) 車止め
検出サイズ[px]	63	129
検出サイズ[deg]	0.8706	1.7826
検出サイズ[min]	52.235	106.96
y座標	1382	1990
x座標	2354	2955
LC	0.553	0.130
LA	1.672	1.844



(a) 避難誘導灯



(b) 車止め

図 7.6 輝度コントラスト画像, 対数平均輝度画像

7.2.2. 推定結果

図 7.7, 図 7.8 に, 視力 1.5, 1.0, 0.5, 0.2, 0.1, 0.075, 0.05, 0.02 の視力を想定した視認性推定の結果を示す.

図 7.7 に(a)避難誘導灯の CA 図における視認閾(視認閾値曲線)と評価位置の LA , LC 値の関係, 図 7.1(a)拡大図部分の閾値比画像, 評価位置の閾値比を視力ごとにそれぞれ示す. 図 7.8 に(b)車止めの CA 図における視認閾(視認閾値曲線)と評価位置の LA , LC 値の関係, 図 7.1(b)拡大図部分の閾値比画像, 評価位置の閾値比を視力ごとにそれぞれ示す. 閾値比は, 「評価位置の輝度コントラスト LC 」を「評価位置 LA 値の視認閾値輝度コントラスト LC_{th} 」で除した値である. 特に低視力者や弱視者の視認性を確認する必要があるため, 閾値比画像の閾値比の範囲は 0~30 としている.

図 7.7, 図 7.8 ともに視力値が低下するにつれて, CA 図の視認閾値曲線が外側(絶対値が高い側)へ開き, 評価位置の LC 値に近づき, 閾値比が低下している. 閾値比が 1 を下回った場合, 「見えない」となり, 閾値比が高いほど視認性が高いことを意味している. 視力 1.5 や 1.0 の場合は高い閾値比が確保できていることが確認できる.

第 2 章第 2 節において, 円形視標サイズ 1.25~600[min]における評価結果と, 視力と視対象サイズの積 S' の値を用いて推定式を構築した. 構築に用いた S' の範囲は 1.6875 (1.25[min]×1.35)~1020(600[min]×1.7)のため, その範囲を適用範囲としている. (a)の視力 0.02 の場合は, 視力と視対象サイズの積 S' が 1.04 となり, 適用範囲外であるため, 正しい視認性推定ができない. 視力 0.02 を想定する場合, 今回の 0.87[deg]の視対象サイズは視認が難しいと考えられるため, 視対象サイズをより大きくする必要がある. 一方, (b)の視力 0.02 の場合は, 閾値比が 1 を下回り「見えない」と推定されるため, 視力 0.02 を想定する場合, 輝度コントラストを大きくする必要があると考えられる.

また, 第 2 章第 3 節において, 通常視力晴眼者の場合は閾値比が 3 倍程度となれば「苦勞せず(普通に)見える」となるが, 視力が低い場合, 「苦勞せず(普通に)見える」ためには通常視力者よりも高い閾値比が必要であることが示されている. そのため, 図 7.7 の視力 0.05 を想定する場合や, 図 7.8 の視力 0.075, 0.05 を想定する場合は, 適切に視認性が得られない可能性がある.

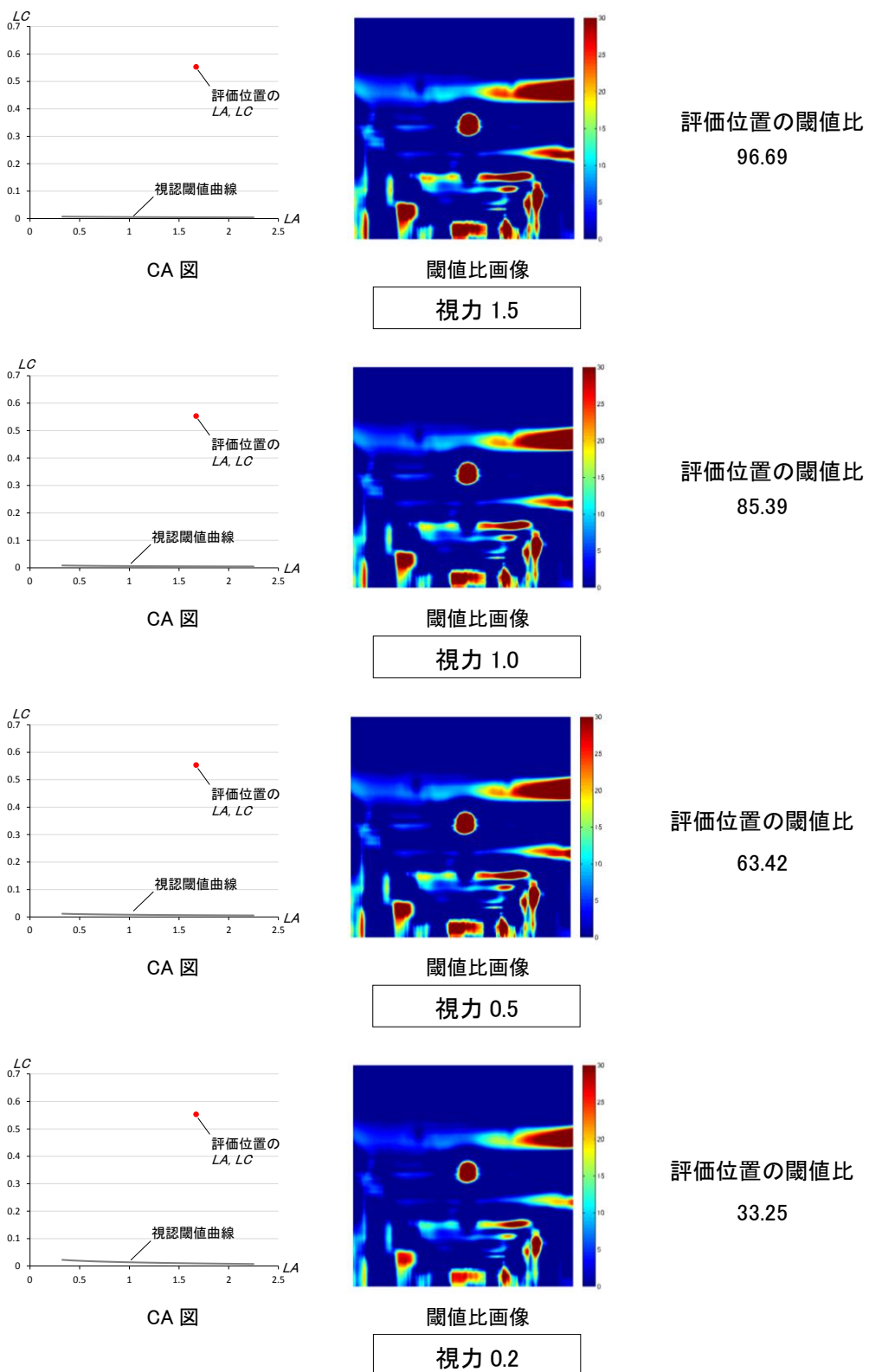


図 7.7 CA 図における視認閾との関係, 閾値比画像, 評価位置の閾値比 (a) 避難誘導灯

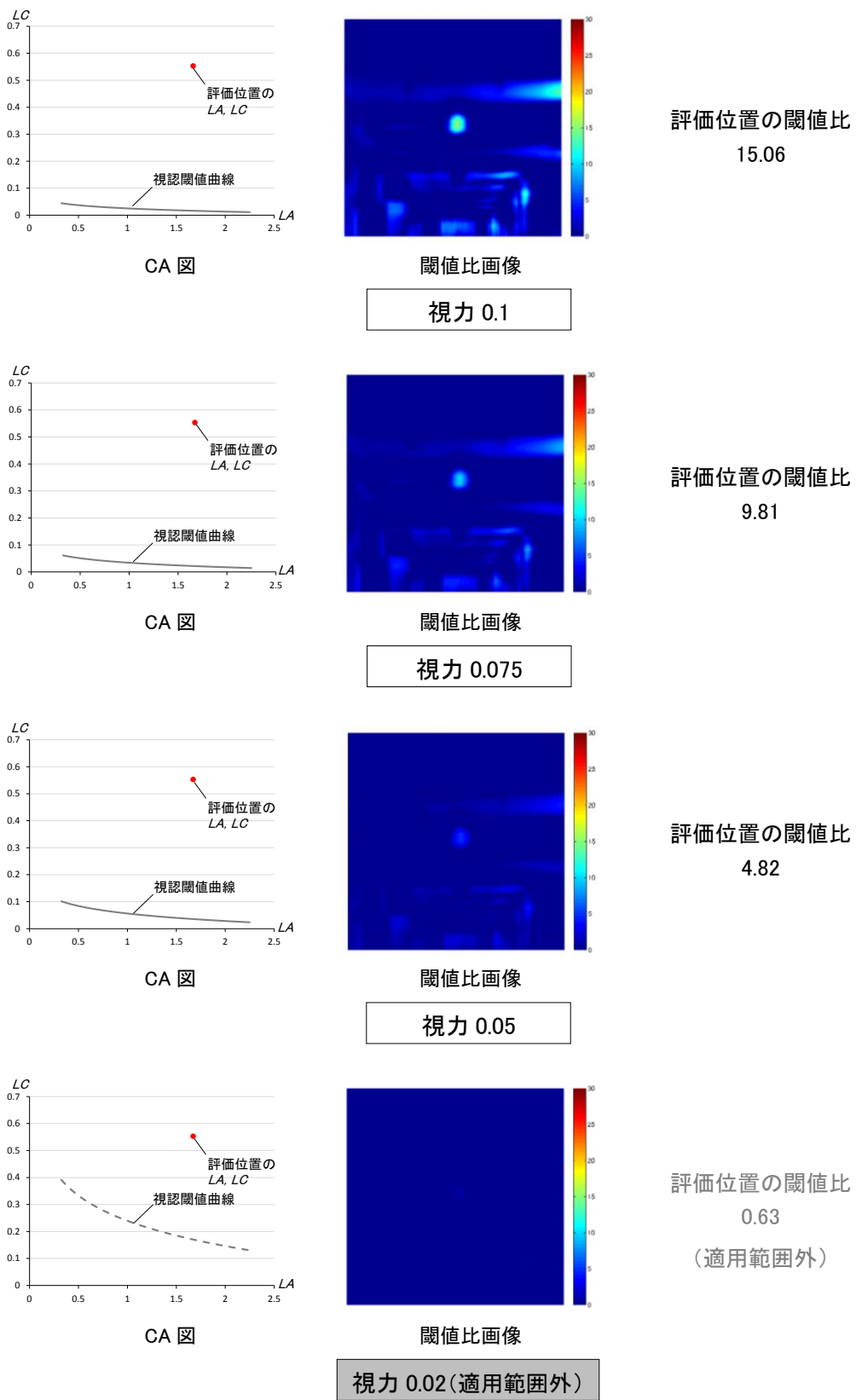


図 7.7 CA 図における視認閾との関係, 閾値比画像, 評価位置の閾値比 (a) 避難誘導灯 (続き)

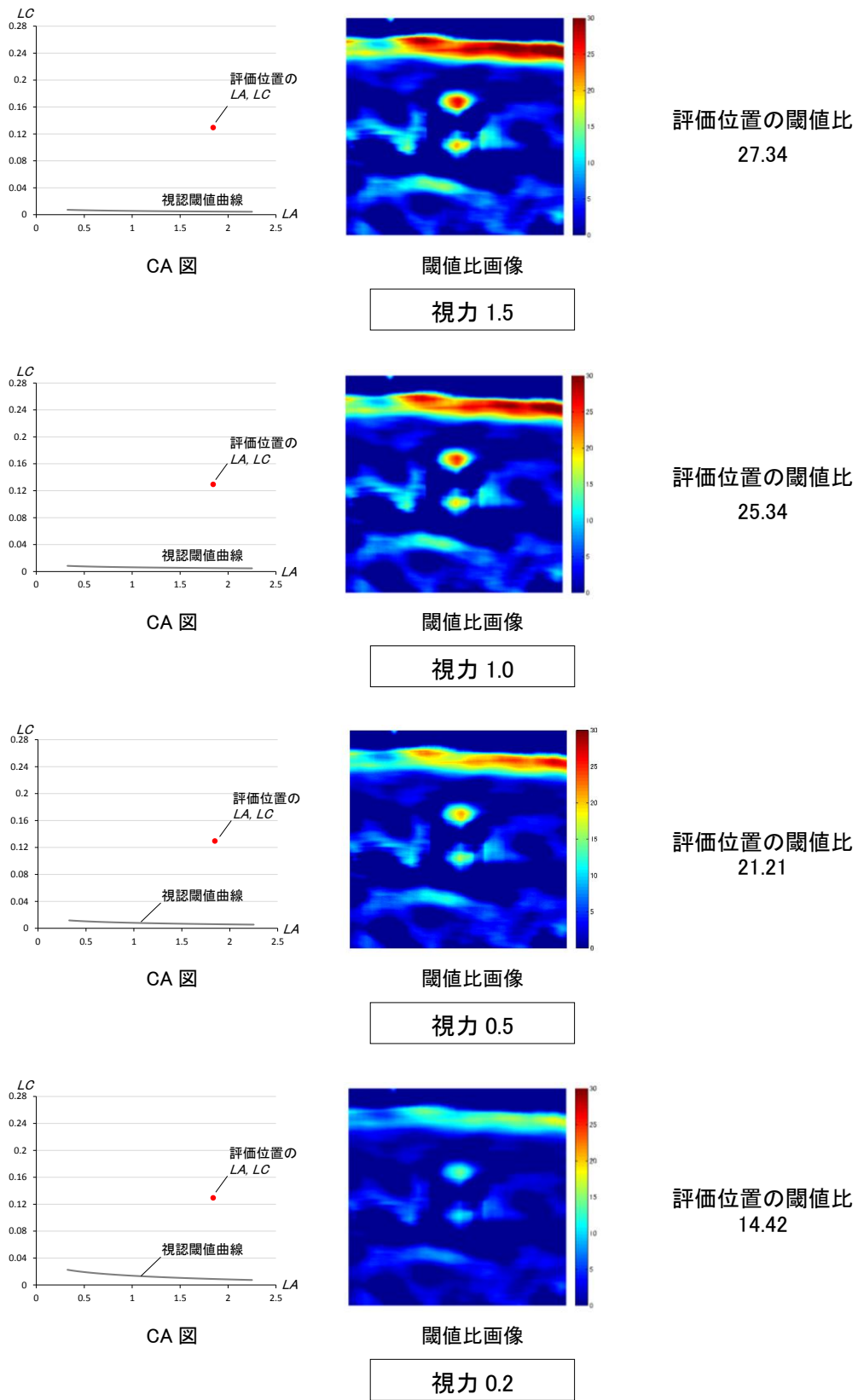


図 7.8 CA 図における視認閾との関係, 閾値比画像, 評価位置の閾値比 (b) 車止め

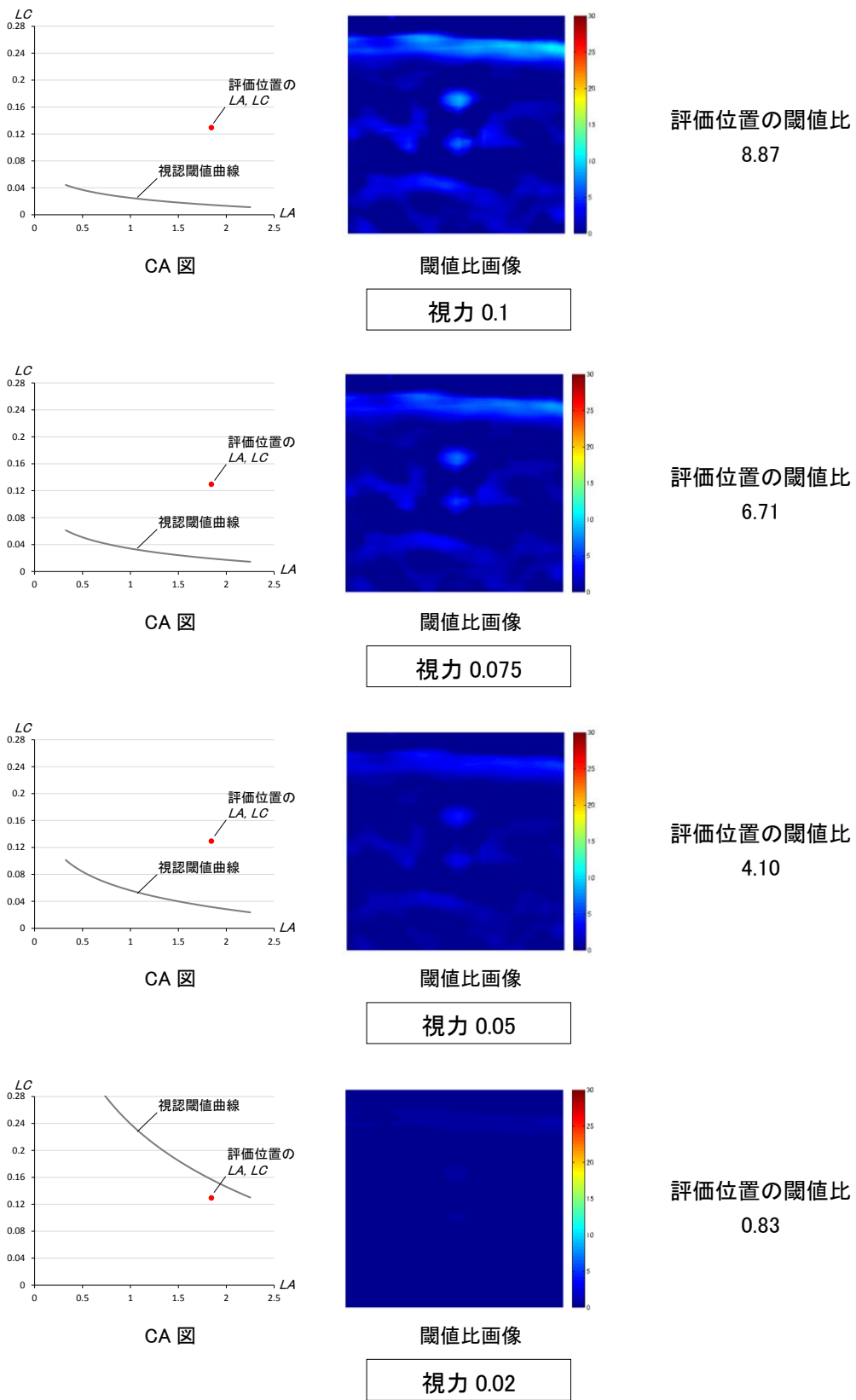


図 7.8 CA 図における視認閾との関係, 閾値比画像, 評価位置の閾値比 (b) 車止め (続き)

また、今回は正対比 LC 値が最大となる検出サイズ，位置によって，視認性推定を行ったが，(b)車止めの逆対比の閾値比画像(検出サイズは図 7.8 と同じ 129[px]とする)を作成してみると，車止め中央やや上の窪みの部分や車止め下部の影の部分に高い閾値比が得られている(図 7.9 逆対比)．このような窪みや影は，視認性向上の手助けとなっているかもしれない．逆対比，正対比，双方によって視認性推定を行うべきと考えられる．

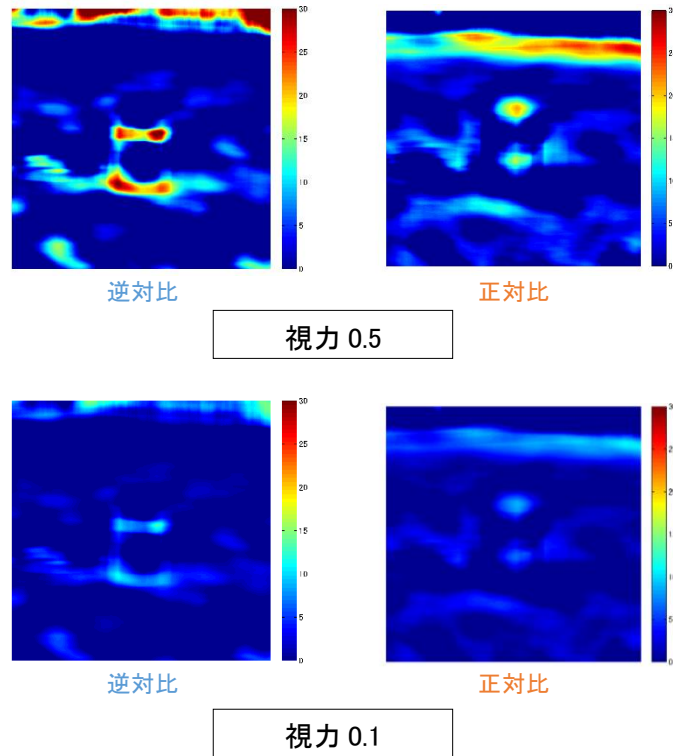


図 7.9 逆対比および正対比の閾値比画像

7.3. 実空間の測光色画像を用いた視認性推定の例

7.3.1. 推定概要

本節では、第6章で構築したLMS刺激値コントラストによる視認性推定法を用いて、実空間のXYZ表色系XYZ刺激値の分布をもつ測光色画像から、一般色覚者、色弱者(1型・2型)を想定した視認性推定を行う。第2章第2節において、輝度コントラストの視認閾値の比によって見やすさの程度の推定が可能であることを示しているため、本節においてもLMS刺激値コントラストの視認閾値の比によって見やすさの程度を推定できると考える。LMS刺激値コントラスト(LCC , MCC , SCC)を3軸として表現する場合に、評価対象LMS刺激値コントラスト($LCct$, $MCct$, $SCct$)が原点(0, 0, 0)に位置した場合を閾値比0、視認閾立体(第6章図6.16参照)の面上に位置した場合を閾値比1とする。例えば、図7.10の原点(0, 0, 0)を点O、評価対象の刺激値コントラスト($LCct$, $MCct$, $SCct$)を点Tとするとき、点Oから点Tへのベクトルと視認閾立体の交点は点N($LCCn$, $MCCn$, $SCcn$)となる。‘線分OTの長さ’を‘線分ONの長さ’で割った値を「閾値比」と定義する。点Tが視認閾立体の内側に位置している場合は、閾値比が1未満となり(つまり「見えない」)、点Tが視認閾立体の外側に位置している場合は、閾値比が1よりも大きくなる(つまり「やっとな見える」以上)。カラーユニバーサルデザインに配慮するには、第6章で構築した3つの型(一般型, 1型, 2型)の視認閾(ひし形に近い四角形)の外側のLMS刺激値コントラスト(LCC , MCC , SCC)が確保されていれば良いのではなく、型によらず同程度かつ十分な閾値比が確保されているかが重要である。本研究第6章において、3つの型(一般型, 1型, 2型)を代表する視認閾が得られたため、本章では、実空間の測光色画像を用いて、一般型, 1型, 2型においてどのような閾値比が得られるかを確認する。

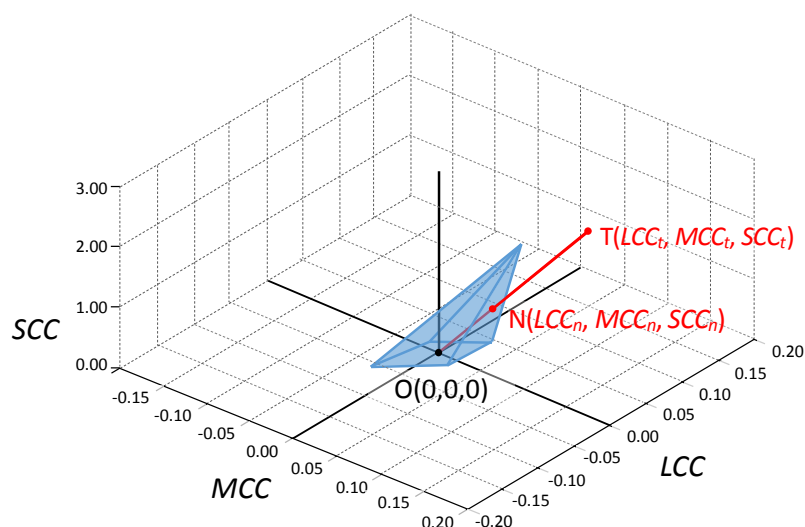


図 7.10 LMS 刺激値コントラストによる閾値比の求め方 (SCC>0 のみ示す)

今回, 図 7.11 に示す 2 種類の実空間において, 測光色画像を用いた視認性推定を行った. (c)ロードコーンと(d)消火器が存在する空間である. 一般色覚者にとっては赤色の視対象は見やすいとされるが, 色弱者にとっては見えづらい可能性があると考え選定した. (c)ロードコーンは, 工事現場等の進入禁止の区域区分や, 人や車の誘導, スポーツ競技の目印等, 様々な用途に用いられている. (d)消火器の場合は, 前節の(b)避難誘導灯と同様に, 非常時に視認できなかった場合は対応行動の遅れを招く恐れがあり, (d)に場合では, 消火活動が遅れる生じる可能性がある.

(c), (d)の実空間について, Panasonic LUMIX DMC-GX1 の撮影画像を用いて 7 種の露出で写真撮影し, ビジュアルテクノロジー研究所 REALAPAS の画像合成ソフト Clum カラーを用いて合成し, 測光色画像を作成した. XYZ 刺激値の分布をもつ測光色画像(X 刺激値画像, Y 刺激値画像, Z 刺激値画像)を図 7.12 に示す. 今回用いた測光色画像は, (c), (d)ともに縦 1149×横 1530 [px]の解像度を持つ.

今回, (c), (d)の赤色の視対象の視認性推定を行うに当たり, コントラスト・プロファイル法¹⁾に基づき, aC 〔赤-緑〕コントラスト値が最大となる検出サイズ, 位置によって, 各コントラスト値を算出することとした. 前節と同様に, 視対象サイズは $3 \times n$ (n は奇数とする)[px]に限定することとした.



(c) ロードコーン



(d) 消火器

図 7.11 評価対象とした実空間の様子

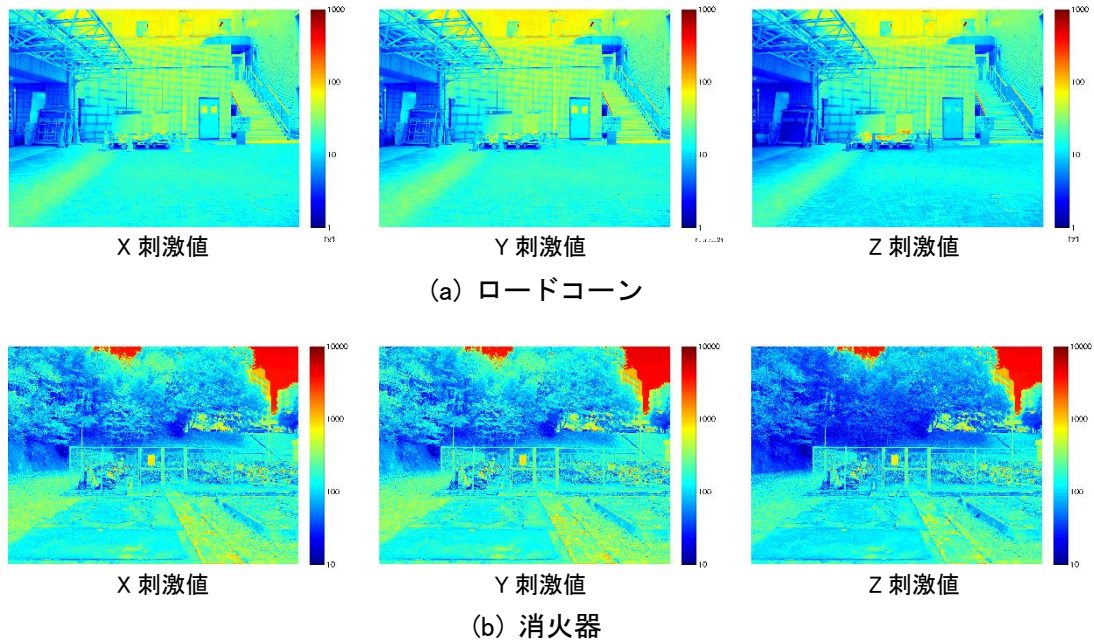


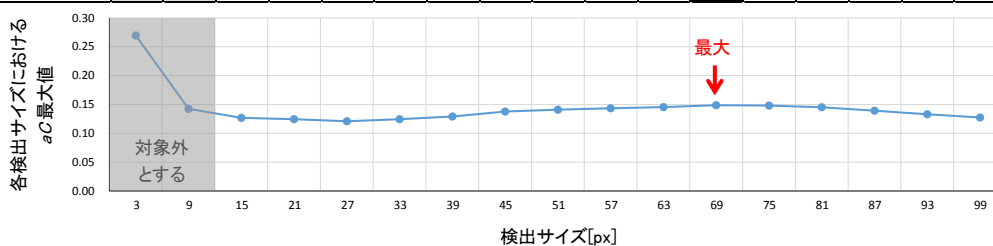
図 7.12 測光色画像(XYZ 刺激値)

検出サイズ[px], 各検出サイズにおける aC 最大値, aC 最大値が得られた位置(xy 座標)の一覧表, および, 検出サイズ[px]と各検出サイズにおける aC 最大値の関係を示すグラフを図 7.13 に示す. なお, 今回用いた測光色画像における xy 座標の表現は図 7.14 に示す通りである. 検出サイズが小さい場合, 素材の光沢部分や文字など, 検出されているものがロードコーン全体または消火器全体ではないと考えられるため, (d)は 9[px]以下, (c)は 21[px]以下の検出サイズの範囲は対象外とした(図 7.13). (c)は検出サイズ 69[px], (d)は検出サイズ 81[px]で, 図 7.15 に示す位置(以下, 評価位置)で, aC 値が最大となった. (d)における検出サイズ 69[px]はロードコーンの横幅の 2 倍程度, (c)における検出サイズ 81[px]は消火器の箱の縦幅程度に相当している.

(c)は検出サイズ 69[px], 評価位置(x, y)=(936, 716), (d)は検出サイズ 81[px], 評価位置(x, y)=(645, 730)として, 以降の検討を進める. 前章において, 背景色度 D65 相当(x=0.319, y=0.325), 背景輝度 19.75[cd/m²], 視対象サイズ 5[min]の場合の実験結果より視認性推定法を構築したことから, (c)の検出サイズ 69[px], (d)の検出サイズ 81[px]がそれぞれ 5[min]であったと仮定する.

表 検出サイズ[px], 各検出サイズにおける aC 最大値, aC 最大値が得られた位置

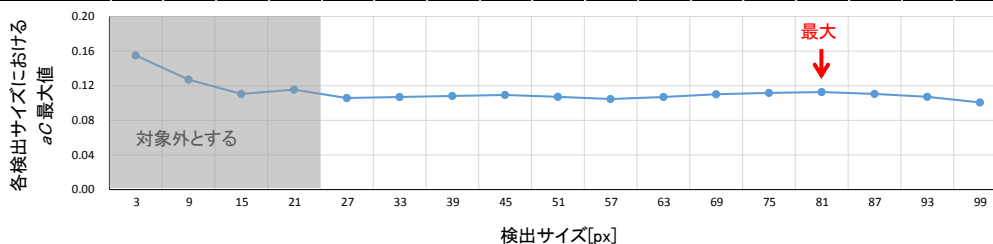
n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33
検出サイズ[px]	3	9	15	21	27	33	39	45	51	57	63	69	75	81	87	93	99
aC 最大値	0.270	0.142	0.127	0.125	0.121	0.124	0.129	0.138	0.141	0.143	0.146	0.149	0.148	0.145	0.139	0.133	0.127
aC 最大値が得られた y座標	658	636	653	672	676	679	686	739	738	723	719	716	714	711	709	731	734
aC 最大値が得られた x座標	880	930	935	934	936	938	937	938	940	938	936	938	936	936	936	937	937



(c) ロードコーン

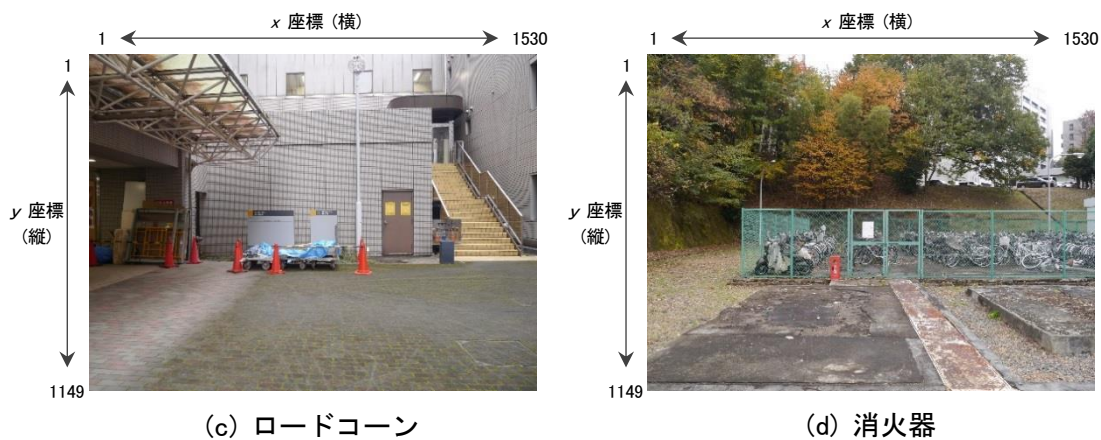
表 検出サイズ[px], 各検出サイズにおける aC 最大値, aC 最大値が得られた位置

n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33
検出サイズ[px]	3	9	15	21	27	33	39	45	51	57	63	69	75	81	87	93	99
aC 最大値	0.155	0.127	0.111	0.115	0.106	0.107	0.108	0.109	0.107	0.105	0.107	0.110	0.112	0.113	0.111	0.107	0.101
aC 最大値が得られた y座標	653	686	698	699	700	760	699	758	755	755	725	727	729	730	728	732	732
aC 最大値が得られた x座標	770	560	652	653	654	643	652	651	650	649	648	647	646	645	644	643	643



(d) 消火器

図 7.13 検出サイズ[px]と aC 最大値, aC 最大値が検出された位置の関係



(c) ロードコーン

(d) 消火器

図 7.14 今回用いた測光色画像における xy 座標の表現



拡大図

(c) ロードコーン



拡大図

(d) 消火器

図 7.15 aC が最大となる位置(評価位置) ※○で示す

図 7.12 の XYZ 刺激値の分布をもつ測光色画像から、XYZ 刺激値のそれぞれコントラスト画像を作成したのち、第 4 章の式(4.8)によって LC (輝度コントラスト)画像、 aC (輝度コントラスト)画像、 bC (輝度コントラスト)画像を作成した。図 7.16 に、 LC (輝度コントラスト)画像、 aC (輝度コントラスト)画像、 bC (輝度コントラスト)画像を(c)、(d)それぞれ示す。図 7.16 において、赤色のロードコーンおよび消火器は、 LC 画像ではあまり検出されていないが、 aC 画像では強く検出され、周辺部に比べ輝度が同等で赤みが強いことが示されている。

視対象サイズ 5[min]、背景輝度 19.75[cd/m^2]とする場合、第 2 章第 2 節で構築した LC (輝度コントラスト)の視認閾値推定式から求められる視認閾値は、正対比で 0.0300、逆対比で -0.0339 である。そのため、輝度コントラストのみによって閾値比を求めるとすると、評価位置の閾値は(c)1.80 ($=-0.0609/-0.0339$)、(d) 0.85 ($=0.0256/0.0300$)となる。しかし、LMS 刺激値コントラスト(LCC , MCC , SCC)を算出し、前章で構築した視認性推定法を用いることで、色を考慮した視認性推定が可能と考えられ、閾値比は(i)1.80, (ii)0.85 よりも高くなる可能性がある。

図 7.12 の測光色画像の XYZ 刺激値を第 6 章式(6.5)に示した変換マトリックスによって、LMS 刺激値に変換し、(c)は検出サイズ 69[px]、(d)は検出サイズ 81[px]として、 LCC (L 刺激値コントラスト)画像、 MCC (M 刺激値コントラスト)画像、 SCC (S 刺激値コントラスト)画像を作成すると、図 7.17 となる。評価位置の各コントラスト値を表 7.2 に示す。また、(c)、(d)の評価位置の aC , bC 値を aC - bC 図に示すと図 7.18 となる。

今回は、前章で視認性推定法を構築した一般色覚者、1 型、2 型の色弱者を想定して、視認性を推定した。

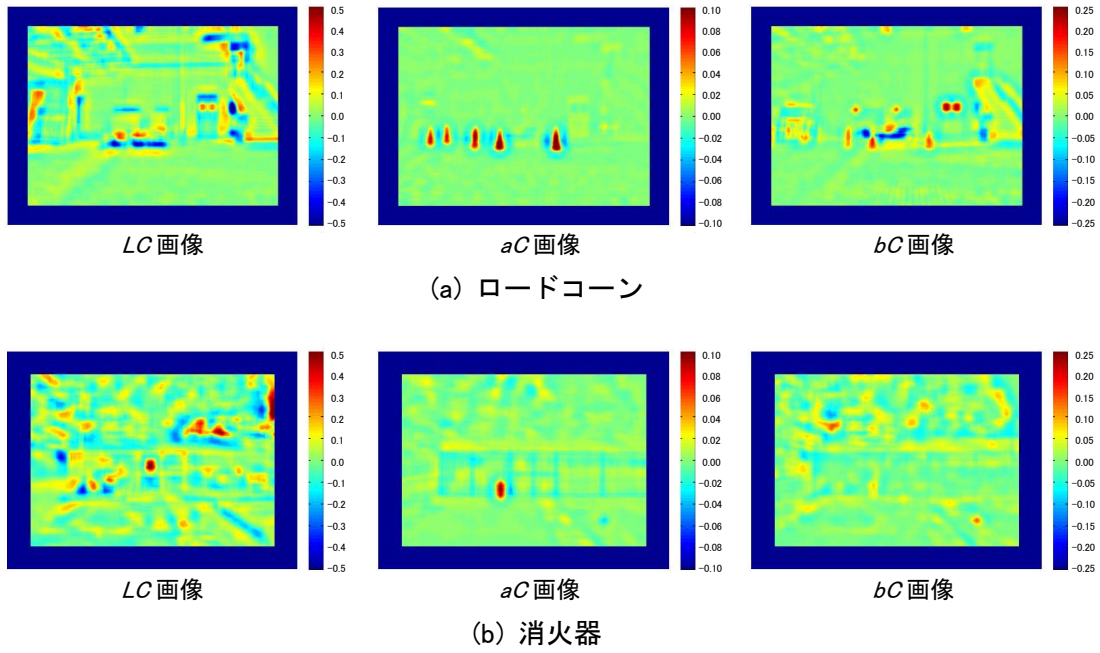


図 7.16 測光色コントラスト画像(LC, aC, bC)

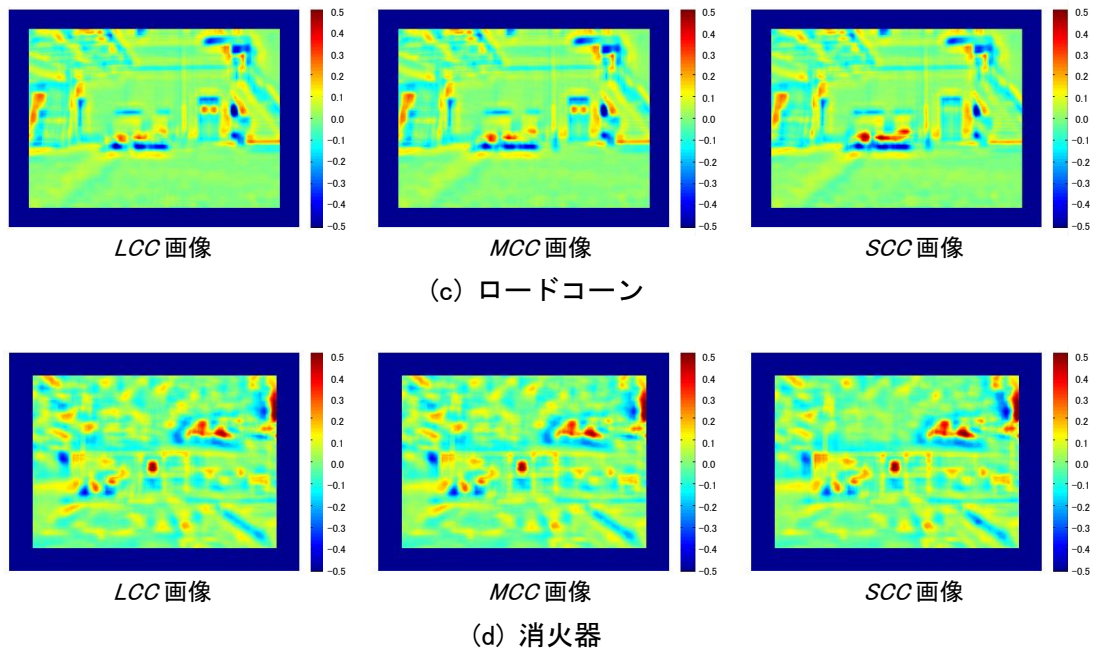


図 7.17 測光色コントラスト画像(LCC, MCC, SCC)

表 7.2 評価位置の各コントラスト値一覧

項目	(c) ロードコーン	(d) 消火器
検出サイズ[px]	69	81
y座標	716	730
x座標	936	645
<i>LC</i>	-0.061	0.026
<i>aC</i>	0.149	0.113
<i>bC</i>	0.153	0.070
<i>LCC</i>	-0.016	0.057
<i>MCC</i>	-0.182	-0.051
<i>SCC</i>	-0.213	-0.045

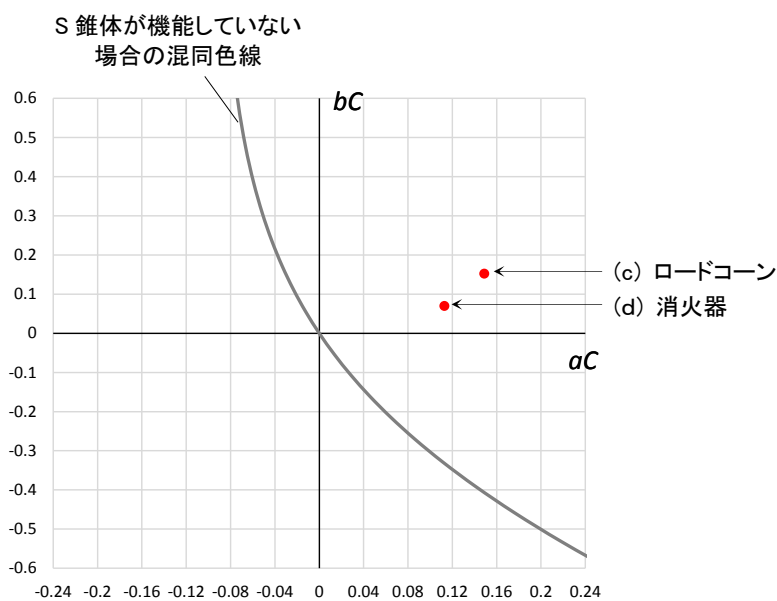


図 7.18 *aC*-*bC* 図

7.3.2. 推定結果

図 7.19, 図 7.20 に, 一般色覚者, 1 型, 2 型の色弱者を想定して視認性推定を行った結果を示す. 図 7.19 に(c)ロードコーンの $LCC-MCC$ 平面($SCC=-0.213$ とする)における視認閾と評価位置の LCC, MCC 値の関係, 図 7.11(c)拡大図部分の閾値比画像, 評価位置の閾値比を一般型, 1 型, 2 型それぞれ示す. 図 7.20 に(d)消火器の $LCC-MCC$ 平面($SCC=-0.045$ とする)における視認閾と評価位置の LCC, MCC 値の関係, 図 7.11(d)拡大図部分の閾値比画像, 評価位置の閾値比を一般型, 1 型, 2 型それぞれ示す.

(c)のロードコーンの場合(図 7.19), 一般型は閾値比 5.62, 1 型は閾値比 5.60 となり同等であるが, 2 型は閾値比 2.77 で一般型や 1 型の半分程度となった. 第 2 章第 3 節より, 視力 1.5, 視対象サイズ 5[min]の場合では, 閾値比 1.95 程度以上で「多少見にくいが見える」, 閾値比 3.63 程度以上で「苦勞せずに(普通に)見える」となることが示されている. 今回の(a)のロードコーンの場合では, 一般型および 1 型は「苦勞せずに(普通に)見える」であるが, 2 型は「多少見にくいが見える」であると推定される.

(d)の消火器の場合では(図 7.20), 一般型は閾値比 3.53, 1 型は閾値比 2.13, 2 型は閾値比 2.93 となり, (c)の場合とは異なり 1 型の閾値比が最も低い. 一般型, 1 型, 2 型のいずれも「多少見にくいが見える」となるが, 1 型では一般型に比べ視認性が低下すると考えられる.

第 5 章の実験 5-D の結果より, 1 型は LC が正のとき ‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’ よりも赤側(aC が高い側)で視認性が低下し, 2 型は反対に, LC が負のとき ‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’ よりも赤側(aC が高い側)で視認性が低下することが確認されていた(第 5 章図 5.18~図 5.23 参照). 図 7.18 の $aC-bC$ 図では, (c)ロードコーン, (d)消火器ともに ‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’ よりも aC が高い側に位置している. (c)ロードコーンの場合, LC が負($LC=-0.061$)であるため 2 型 1 名において視認性が低下し, (d)消火器の場合, LC が正($LC=0.026$)であるため 1 型 1 名において視認性が低下したとみられる.

今回, 実空間の測光色画像から, 1 型, 2 型の色弱者で視認性が低下すると予想される赤色の視対象の視認性を推定し, 1 型, 2 型のどちらかで最も閾値比が低下することを確認できた. そのため, 今回示した(c)ロードコーン, (d)消火器の例は, カラーユニバーサルデザインへの配慮に欠けた設計例であることが示され, 前章で構築した視認閾値推定法は有用性のあるものと考えられる. 前章では, 1 型 1 名(被験者 No.9), 2 型 1 名(被験者 No.16)の実験結果より色弱者の視認性推定法を構築しているが, 色覚型や錐体の機能の程度に合わせ, 前章の表 6.1, 図 6.13 で示した頂点の座標を変更すれば, 他の色弱者の視認性推定も可能と考えられる.

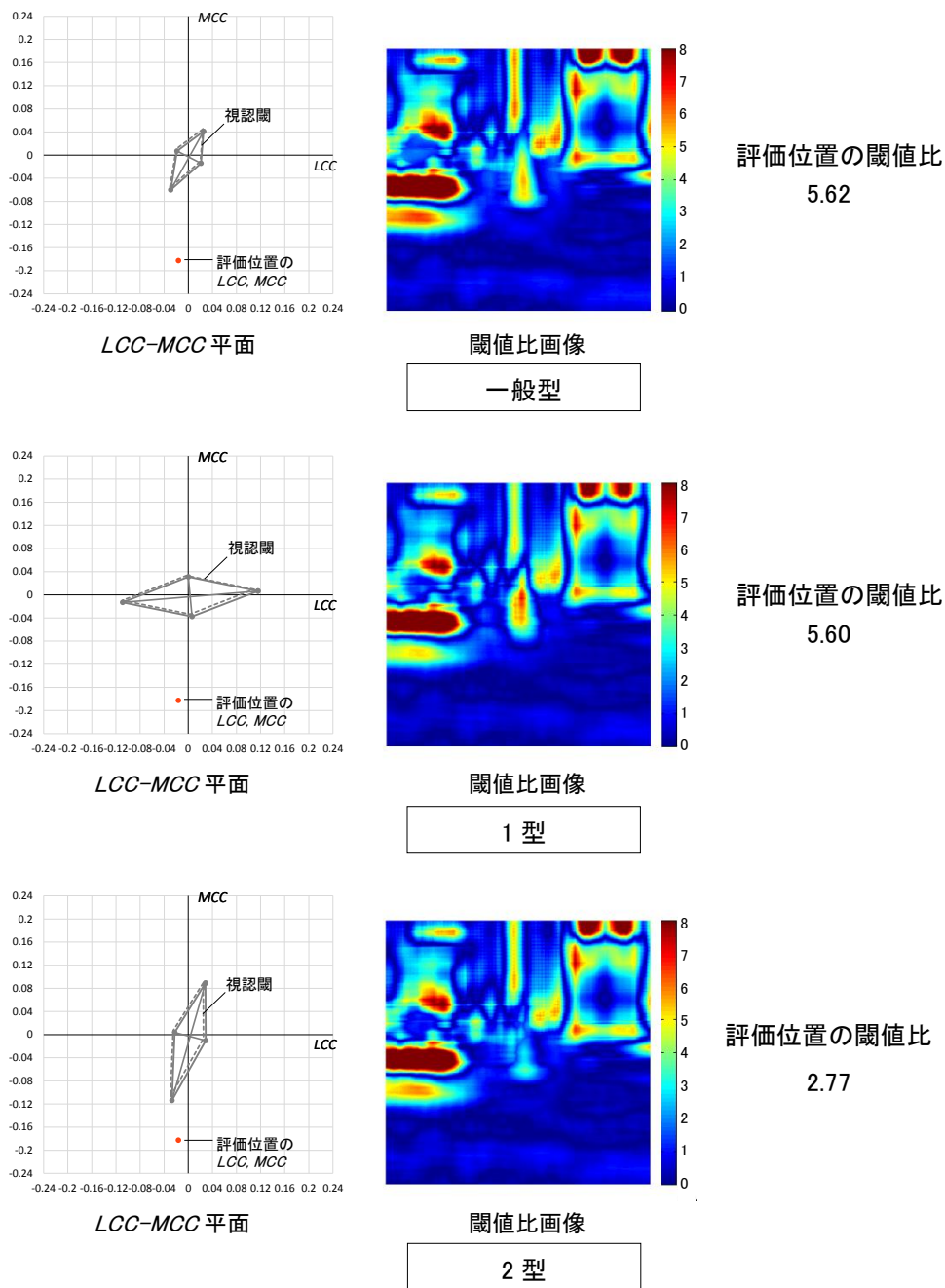


図 7.19 LCC-MCC 平面における視認閾との関係, 閾値比画像, 評価位置の閾値比
 (c) ロードコーン (LCC, MCC, SCC) = $(-0.016, -0.182, -0.213)$

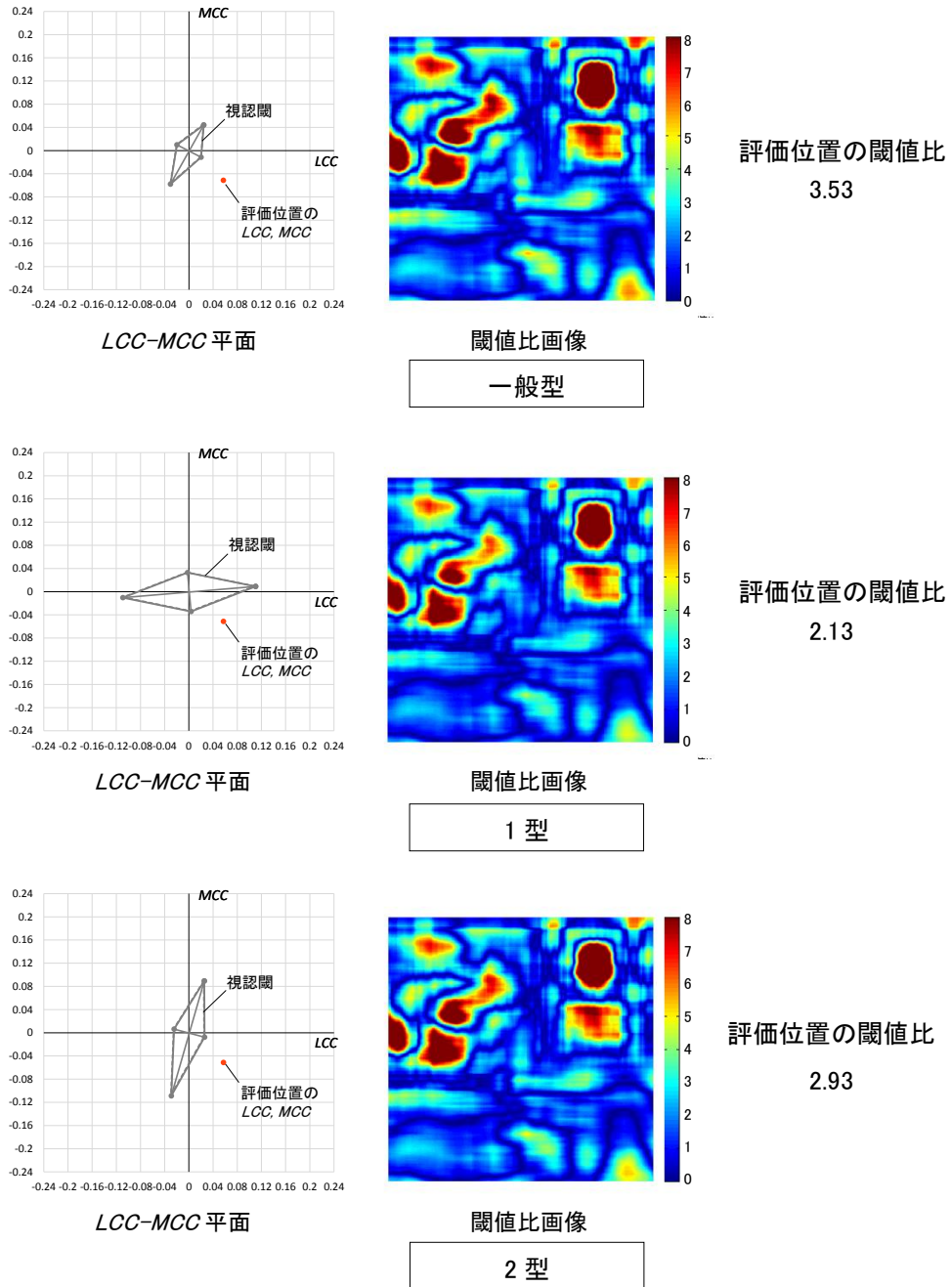


図 7.20 LCC-MCC 平面における視認閾との関係, 閾値比画像, 評価位置の閾値比
(d) 消火器 (LCC, MCC, SCC) = (0.057, -0.051, -0.045)

また図 7.21 は、前章の図 6.17 の $LCC-MCC$ 平面上の視認閾に加筆したものである。 $LCC:MCC=1:1$ の破線方向以外では色覚型による閾値の差が大きく、 $LCC:MCC=1:1$ の破線方向以外では 1 型、2 型の色弱者のどちらかで視認性が低下する恐れがあると考えられる。 反対に $LCC:MCC=1:1$ の破線方向では色覚型による閾値の差が小さいため、 $LCC:MCC=1:1$ として輝度コントラストを十分に確保する、また、S 錐体のコントラスト感度に関しては一般色覚者と色弱者で大きな差が無いため、 SCC を十分に確保すれば、一般色覚者と 1 型、2 型の色弱者で同程度の視認性を得られる可能性があると考えられる。 今回は、1 型、2 型の色弱者で視認性が低下すると予想される赤色の視対象の視認性を推定したが、今後、一般型、1 型、2 型の全ての閾値比が同等となるような例についても示していきたい。

さらに今回は、視対象が赤色であるため、 aC 値の絶対値が最大となる検出サイズ、位置によって、各コントラスト値を算出することとした。 しかし、色弱者は赤の色味を弱く感じている可能性があるため、 aC 値の絶対値が最大となる検出サイズ、位置によって評価を行なうことが妥当でないかもしれない。 この点についても追って検討する必要がある。

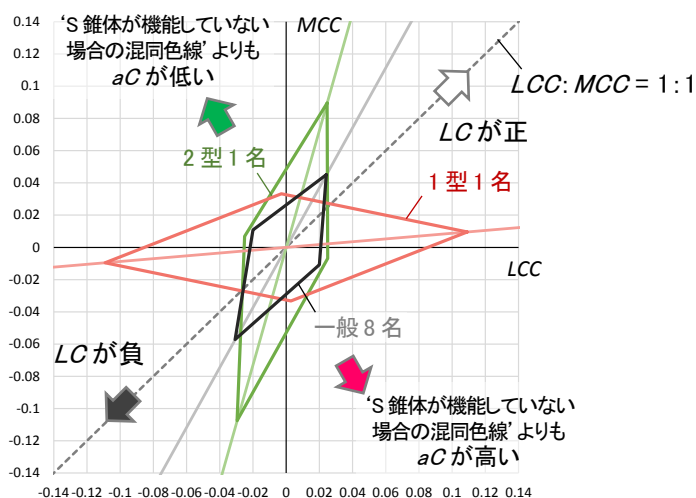


図 7.21 $LCC-MCC$ 平面($SCC=0$)における視認閾の比較

7.4. 第7章まとめ

本章では、構築した視認性推定法を用いて、実空間の測光色画像を用いた視認性推定の例を示し性能を確認した。本章の検討より得られた知見を以下に示す。

第2節では、第2章で構築した輝度コントラストによる視認性推定法を用いて、実空間の輝度(XYZ表色系 Y 刺激値)の分布をもつ輝度画像から視認性推定を行った。

- ・ 視力 1.5, 1.0, 0.5, 0.2, 0.1, 0.075, 0.05, 0.02 の視力を想定して視認性推定を行ったところ、視力値が低下するにつれて閾値比が低下し、視認性が低下することを推定できた。
- ・ 今回は、正対比の輝度コントラストの最大値に着目して視認性推定を行ったが、(b)車止めの場合では、逆対比の輝度コントラストも高く検出されていた。逆対比、正対比、双方によって視認性推定を行うべきであると考えられる。

第3節では、第6章で構築した LMS 刺激値コントラストによる視認性推定法を用いて、実空間の XYZ 表色系 XYZ 刺激値の分布をもつ測光色画像から視認性推定を行った。

- ・ 実空間の測光色画像から赤色の視対象の視認性推定を行ったところ、一般型に比べ、1型、2型の色弱者では、閾値比が低くなることが示され、前章で構築した視認性推定法の有用性を示すことができた。
- ・ 今回は、 aC ([赤-緑]コントラスト)の最大値に着目して視認性推定を行ったが、1型、2型の色弱者の視認性推定を行うにあたり、この方法が妥当であったかについては追って検討する必要がある。

本章では、実空間の測光色画像を用いて視認性推定の例を示したが、実際に人が見た時に近い評価をするかを確認することで、本研究で構築した推定法の信頼度が増すと考えられる。そのような検証については、今後の課題としたい。

第 7 章参考文献

- 1) 中村芳樹：光環境における輝度の対比の定量的検討法, 照明学会誌, 第 84 巻, 第 8A 号, pp.522-528, 2000.8

第8章 結論

8.1. 本研究の結論

本研究は、実環境のように複雑な輝度色度分布において視認性推定を行うことを想定し、測光色画像を用いた視認性推定法を構築した。そして、一般的な色覚を持つ晴眼者だけでなく、弱視者や色弱者の視認性についても検討し、視覚的ユニバーサルデザインへ展開する道を開いた。

本研究の一連の調査や検討により、以下のことを明らかにした。

第 1 章では、研究背景として、現状の照明設計や視認性に関する既往研究における問題点や課題を挙げ、実空間のように複雑な輝度色度分布を持つ場合でも視認性推定が可能な視認性推定法の構築し、視覚的ユニバーサルデザインへの配慮の必要性を述べた。そして、コントラスト・プロファイル法や測光色画像を用いて視認性推定法を構築することにより、それらを達成できることを述べ、本研究の目的や方針、研究範囲を示した。

第 2 章では、本研究の初段階として、晴眼者を対象とした輝度画像を用いた視認性推定法を構築した。初めに、円形視標を視対象とする視認評価実験を行い、横軸を対数輝度平均、縦軸を輝度コントラストとして視対象サイズごとに表現することで明視三要素を表現する「度コントラスト評価図」を用いて、円形視標の視認閾値輝度コントラストの推定法を構築した。構築した推定法を Blackwell の既往研究と比較し、整合性があることを確認した。そして、見やすさの程度を評価する見やすさ評価実験より、その輝度コントラストの視認閾値を基に、閾値比によって見やすさの程度を推定できることを明らかにした。また、視野内の高輝度なグレア光源の存在によって生じる視認性低下、つまり減能グレアの影響を検討し、等価光幕輝度に関する既往研究の式では適用範囲に限度があることなどを踏まえ、視認閾値の増加量に着目し、新たに減能グレアの影響を考慮した視認性推定法を構築した。

第 3 章では、輝度画像を用いた視認性推定法の弱視者への適用法を検討した。弱視者を視力の低い晴眼者(低視力晴眼者)および弱視者を対象に、第 2 章で構築した視認性推定法が適用可能か検討した。均一背景の場合では、低視力の晴眼者および弱視者の一部で、第 2 章で構築した視認性推定法が適用できることを確認した。弱視者の一部では、視野障害の程度や羞明や昼盲の症状によっては、第 2 章の視認性推定法から推定される視認閾値では視認できない可能性があることを明らかにした。また、より現実環境に近い不均一背景の場合では、背景の輝度コントラストが大きくなるほど、背景の模様が粗くなるほど、視標の存在や形状の認識が困難になることが、低視力晴眼者、弱視者の両者で示された。

第 4 章では、一般色覚者を対象として、色の影響を考慮した円形視標の見やすさ評価について検討した。第 2 章、第 3 章の検討は輝度コントラストに基づくものであり、輝度コン

トラストから $L^*a^*b^*$ 表色系を参考とした測光色(Lab)コントラストへと展開した。色の影響を考慮した円形視標の見やすさ評価では、一般色覚者であっても、中心視野の S 錐体の分布密度が L 錐体や M 錐体と比べて低いために生じる‘小視野トリタノピア’の影響によって、緑みの黄から董(スマイレ)色にかけての色味をもつ円形視標の条件で視認性が低下することが示された。また、色度コントラストに輝度コントラストが組み合わさることによって、視認性が向上することが示された。一般色覚者では、輝度コントラストの絶対値が増加するほど、「見えない」と評価される範囲が縮小することを明らかにした。

第 5 章では、はじめに、1 型(P 型)、2 型(D 型)の色弱者を対象に色の見え方に関してのヒアリング調査を行い、色弱者の色の見え方の特徴を調査した。また、第 4 章で一般色覚者を対象に行なった色の影響を考慮した円形視標の見やすさ評価に関する検討を、1 型、2 型の色弱者に対して行なった。輝度コントラストが 0 の場合は、一般色覚者と同様に、‘小視野トリタノピア’の影響によって、緑みの黄から董(スマイレ)色にかけて色味をもつ円形視標の条件で視認性は低下することが示された。その一方で、色度コントラストと輝度コントラストが共に変化する場合は、色覚型によって大幅に傾向が異なることが明らかにした。色弱者の場合、輝度コントラストの絶対値が増加しても、特定の色度コントラストの範囲で「見えない」と評価された。1 型の場合は、輝度コントラストが正のとき‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも赤側の条件で視認性が低下し、2 型の場合は反対に、輝度コントラストが正のとき‘S 錐体が機能していない場合の混同色線’よりも緑側の条件で視認性が低下することを明らかにした。

第 6 章では、第 4、5 章で得られた一般色覚者・色弱者を対象とした実験結果を基に、視認性推定法を構築した。第 4、5 章は Lab コントラストによって、それぞれの色覚型で視認性が低下する色味について確認したが、色覚型によって LMS 錐体の機能に差が有り、傾向の差異が生じたと考えられるため、LMS 錐体細胞の反応に基づく LMS 刺激値コントラストを用いた再分析によって、色覚型ごとの特徴を確認した。横軸を L 刺激値コントラスト、縦軸を M 刺激値コントラストとする平面に示すと、一般型は概ね L 刺激値コントラスト : M 刺激値コントラスト = 1 : 1 の傾きに沿って「見えない」の評価が分布するが、1 型の場合は L 刺激値コントラスト方向、2 型の場合は M 刺激値コントラスト方向に「見えない」の評価が伸張し、一般型に比べ視認できない範囲が広いことを明らかにした。本研究ではその結果を基に、L 刺激値コントラスト・M 刺激値コントラスト平面に色覚型ごとに異なる 4 つの頂点を設定し、色度分布および色覚型の影響を考慮した視認性推定法を構築した。

第 7 章では、本研究の成果より、実空間の測光色画像を用いて、視認性推定の例を示し、視覚的ユニバーサルデザインに配慮した視認性推定が可能であることを確認した。第 2、3 章で得られ成果を基に、実空間の輝度画像を用いて、晴眼者、低視力者、弱視者を想定した

視認性推定を行い、視力値によって、実空間の障害物やサインの視認性がどのように低下するかを確認した。また、第 6 章までの成果を基に、実空間の測光色画像を用いて、一般色覚者、1 型、2 型の色弱者を想定した視認性推定を行なった。赤色の視対象において、一般色覚者に比べ 1 型や 2 型の色弱者では、閾値比が低くなり、視認性が低下することを確認できた。

8.2. 今後の課題と展望

本研究では、測光色画像を取り扱うことや、コントラスト・プロファイル法を用いた分析手法に着目した上で、明視三要素(①視対象サイズ, ②視対象と背景の対比, ③順応輝度)をはじめとし、測光色分布の影響, 人的な影響など, 視認性に影響を与える様々な要因について検討を行なってきた。しかし, 本研究の検討範囲には限度があったと考えられる。今後, 視覚的ユニバーサルデザインに活用するための測光色画像を用いた視認性推定法として, 適用範囲の拡大や精度の向上のため, 以下の課題が挙げられる。

- ・ 本研究では, 実験において視対象や背景を PC モニタで提示しているため, 輝度の最大出力が $270[\text{cd}/\text{m}^2]$ 程度に留まっている。背景輝度に関しては $160[\text{cd}/\text{m}^2]$ 程度までしか検討しておらず, 屋外などを想定する場合, 不十分な可能性がある。
- ・ 色域に関しても同様に, PC モニタで表示可能な色域には限度があるため, 今回の PC モニタで表示が出来なかった色についても確認すべきである。
- ・ 第 2 章第 4 節において, 減能グレアを考慮する方法について検討したが, 現状の輝度カメラでは, 高輝度光源が画角内に存在すると, フレア等の発生により視対象等の輝度を正しく測定できない可能性がある。フレア等を抑えた輝度カメラが開発されない限り, 注意が必要である。
- ・ 第 3 章で対象とした弱視者に関しては, 疾病の種類が多く, 今回は特に白内障と網膜色素変性症の被験者に着目して実験結果を示したが, 他の疾病をもつ弱視者についても同様に確認が必要と考えられる。
- ・ また, 第 3 章で対象とした弱視者に関して, 視野障害の程度や, 羞明や昼盲の症状によって, 推定する輝度コントラストの視認閾値よりも輝度コントラストが必要となることがあると示された。本研究ではそれらの影響について推定法を構築できなかったため, 今後検討する必要がある。
- ・ 第 3 章において, 背景の輝度コントラストが大きくなるほど, 背景の模様が粗くなるほど, 視標の存在や形状の認識が困難になることが示されたが, その程度を定量的に推定するまでには至っていない。今後引き続き検討が必要と考えられる。
- ・ 第 4, 5 章の実験では, Lab コントラストを用いて検討することを前提としていたため, Lab コントラストによって実験条件を設定した。しかし, 第 6 章においては LMS 刺激値コントラストで再分析し, 視認性推定法を構築した。実験条件を LMS 刺激値コントラストで設定して実験を行なうことで, より精度の高い視認性推定法を構築できた可能性がある。
- ・ 第 6 章において, カラーユニバーサルデザインを想定し, 一般色覚者, 1 型, 2 型を対象とした視認性推定法を構築したが, 背景色度 $x=0.319, y=0.325$, 背景輝度 $19.75[\text{cd}/\text{m}^2]$, 視対象サイズ $5[\text{min}]$ の条件に限定して視認性推定法を構築したため, 背

景輝度，背景色度，視対象サイズの影響を考慮できていない。構築した視認性推定法を他の視対象サイズ，背景輝度，背景色度にも適用できるように適用範囲を拡大する必要がある。

- ・ 本研究では対象としなかったが，高齢者についても検討を行なうべきと考えられる。今後，日本は高齢化が進み，高齢者が増えると見込まれる。加齢性白内障による視力の低下や色の見え方の変化等についても確認する必要がある。
- ・ 本研究は，全て中心視(視野の中心部)での検討であったが，周辺視(視野の周辺部)についても検討が必要と考えられる。周辺視は中心視に比べ詳細な認識能力が劣るが，動きには敏感であるなど危険の察知には大きく貢献する。そのため，周辺視についても検討する必要がある。
- ・ また，周辺視野に障害がある弱視者は多いため，そのような視野障害を持つ者への配慮した視認性推定法についても検討する必要がある。
- ・ 本研究では，実空間でも推定が可能な視認性推定法を構築し，第7章において，実空間の測光色画像を用いて認性推定の例を示したが，実際に人が見た際に同じような評価をするか検証する必要がある。
- ・ 誘目性や目立ちについては今回検討できなかったが，視認閾値と何らかの関係があると考えられるため，本研究の視認性推定法を誘目性や目立ちの推定にも発展できる可能性がある。
- ・ 本研究では視対象の存在の検知に着目したが，視対象の属性の認知についても，追って検討する必要がある。

以上のように，明らかになっていない点も多くあるが，本研究のように視認性について包括的に検討した研究は数多く存在していない。また，実空間の視認性を推定できる推定法も存在していない。本研究が，今後の視認性の研究の発展や視覚的ユニバーサルデザインの実践への一助となることを願う。

本研究に関連する研究業績

[学術雑誌等論文掲載(国内・査読あり)]

1. 加藤洋子, 中村芳樹, 上口優美, 岩田三千子: 晴眼者を対象とした円形視標の視認閾値に関する基礎的検討—弱視者を想定した輝度コントラスト評価図を用いた視認性推定法に関する研究(その 1)—, 日本建築学会環境系論文集, 第 83 巻, 第 743 号, pp.21-28, 2018.1
[第 2 章第 2 節に対応]
2. 加藤洋子, 中村芳樹, 岩田三千子: 晴眼者を対象とした円形視標の見やすさ評価に関する検討—弱視者を想定した輝度コントラスト評価図を用いた視認性推定法に関する研究(その 2)—, 日本建築学会環境系論文集, 第 83 巻, 第 749 号, pp.565-572, 2018.7
[第 2 章第 3 節に対応]
3. 加藤洋子, 中村芳樹: 輝度コントラスト評価図による減能グレアを考慮した視認性推定法, 照明学会誌, 第 103 巻, 第 2 号, pp.67-74, 2019.2
[第 2 章第 4 節に対応]
4. 岩田三千子, 加藤洋子, 中村芳樹: 低視力晴眼者を対象とした不均一背景における円形視標の見やすさ評価に関する検討—弱視者を想定した輝度コントラスト評価図を用いた視認性推定法に関する研究(その 3)—, 日本建築学会環境系論文集, 第 84 巻, 第 755 号, pp.47-53, 2019.1
[第 3 章第 2 節に対応]
5. 加藤洋子, 中村芳樹: 一般色覚者を対象とした円形視標の見やすさ評価に関する検討—カラーユニバーサルデザインのための測光色コントラスト評価図を用いた視認性推定法に関する研究(その 1)—, 日本建築学会環境系論文集, 第 84 巻, 第 755 号, pp.39-46, 2019.1
[第 4 章に対応]
6. 加藤洋子, 中村芳樹: 色弱者を対象とした円形視標の見やすさ評価に関する検討—カラーユニバーサルデザインのための測光色コントラスト評価図を用いた視認性推定法に関する研究(その 2)—, 日本建築学会環境系論文集, 第 84 巻, 第 759 号 (2019.5 掲載予定)
[第 5 章に対応]

[学術雑誌等論文(国内・査読中または投稿予定)]

7. 岩田三千子, 加藤洋子, 中村芳樹: 弱視者を対象とした均一背景および不均一背景における円形視標の見やすさ評価に関する検討—弱視者を想定した輝度コントラスト評価図を用いた視認性推定法に関する研究(その 4)—, 日本建築学会環境系論文集 (2019.1 投稿, 査読中)
[第 3 章第 3 節に対応]
8. 加藤洋子, 中村芳樹: LMS 刺激値コントラストによる視認性推定法の構築—カラーユニバーサルデザインのための測光色コントラスト評価図を用いた視認性推定法に関する研究(その 3)—, 日本建築学会環境系論文集 (2019.3 投稿予定)
[第 6 章, 第 7 章第 3 節に対応]

[口頭発表(国際・査読なし)] 発表者に○印

9. ○Nakamura, Y., **Kato, Y.**, and Iwata, M.: Study on Visibility Estimation of Objects in Complicated Luminance Image, Proceedings of the 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance (CZ), pp.96-102, 2016

[ポスター発表(国際・査読なし)] 発表者に○印

10. ○Iwata, M., **Kato, Y.**, and Nakamura, Y.: Study of visibility under complex luminance conditions for the visually challenged people using luminance-image filtering, Proceedings of the 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance (CZ), pp.262-268, 2016
11. ○**Kato, Y.**, Nakamura, Y., Kamiguchi, Y., and Iwata, M. : Study on Visibility Threshold Curve of Circular Objects and Visibility Estimation Method Using C-A Graph, Proceedings of the Conference on Smarter Lighting for Better Life at the CIE Midterm Meeting 2017 (KR), pp.892-901, 2017

[口頭発表(国内・査読なし)] 発表者に○印

12. ○中村芳樹, **加藤洋子**, 岩田三千子:輝度コントラストによる視認性の検討, 平成 27 年度照明学会全国大会論文集, 0605, 2015.8
13. ○中村芳樹, **加藤洋子**, 岩田三千子:輝度コントラストを用いた視認性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.509-510, 2015.9
14. ○岩田三千子, **加藤洋子**, 中村芳樹:輝度画像を用いた晴眼者低視力者の視認性評価, 第 19 回日本福祉のまちづくり学会全国大会, PR0069, 2016.8
15. ○**加藤洋子**, 中村芳樹, 山崎理愛, 岩田三千子:輝度画像を用いたロービジョン者の視認性評価 その 1 視認性評価実験の概要と通常視力の晴眼者における実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.595-596, 2016.8
16. ○山崎理愛, 岩田三千子, **加藤洋子**, 中村芳樹:輝度画像を用いたロービジョン者の視認性評価 その 2 弱視者および晴眼者低視力者の実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.597-598, 2016.8
17. ○竹村祐里子, 嘉納裕人, **加藤洋子**, 中村芳樹:色の影響を考慮した視認性評価法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.605-606, 2016.8
18. ○川野裕基, **加藤洋子**, 中村芳樹:輝度コントラスト評価図における順応輝度算出法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.603-604, 2016.8
19. ○**加藤洋子**, 中村芳樹, 岩田三千子:輝度コントラストによる視認性の検討 その 2 楕円視標を用いた視認性評価実験の概要と実験結果, 平成 28 年度照明学会全国大会論文集, 06-10, 2016.9
20. ○岩田三千子, **加藤洋子**, 中村芳樹:輝度画像を用いた晴眼者低視力者の視認性評価 その 2 様々な輝度コントラストの円形視標を用いた見やすさ評価, 第 20 回日本福祉のまちづくり学会全国大会, PR0050, 2017.8 【大会優秀賞受賞】
21. ○**加藤洋子**, 中村芳樹, 上口優美, 岩田三千子:輝度コントラスト評価図を用いた視認性評価 その 1 円形視標の視認閾値曲線と見やすさ評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.537-538, 2017.9 【若手優秀発表賞受賞】
22. ○上口優美, **加藤洋子**, 中村芳樹:輝度コントラスト評価図を用いた視認性評価 その 2 高輝度光源による視認性低下とシルエット現象下の表情の見やすさ評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.539-540, 2017.9
23. ○嘉納裕人, **加藤洋子**, 中村芳樹:XYZ 表色系を用いた視認性評価法の基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.541-542, 2017.9

-
-
24. ○加藤洋子, 中村芳樹, 上口優美, 岩田三千子:輝度コントラストによる視認性の検討 その3 円形視標の視認閾値曲線とシルエット現象下における表情の見やすさ評価, 平成 29 年度照明学会全国大会論文集, 06-27, 2017.9
 25. ○吉野谷友希, 岩田三千子, 加藤洋子, 中村芳樹:輝度コントラストによる視認性の検討 その4 通常視力および低視力の晴眼者における円形視標の見やすさ評価, 平成 29 年度照明学会全国大会論文集, 06-13, 2017.9
 26. ○中村芳樹, 加藤洋子:色度分布を考慮した視認性評価に関する研究 その1 測光色を用いた評価手法と一般色覚者を対象とした実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.503-504, 2018.9
 27. ○加藤洋子, 中村芳樹:色度分布を考慮した視認性評価に関する研究 その2 色弱者を対象とした実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.505-506, 2018.9
 28. ○石田楓, 岩田三千子, 加藤洋子, 中村芳樹:輝度画像を用いたロービジョン者の視認性評価 その3 非均一背景を用いた低視力晴眼者を対象とした実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.507-508, 2018.9
 29. ○川本竜太, 岩田三千子, 加藤洋子, 中村芳樹:輝度画像を用いたロービジョン者の視認性評価 その4 非均一背景を用いた弱視者を対象とした実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.509-510, 2018.9
 30. ○中村芳樹, 加藤洋子:色度分布を考慮した視認性推定法に関する検討, 平成 30 年度照明学会全国大会論文集, 6-O-01, 2018.9
 31. ○岩田三千子, 加藤洋子, 中村芳樹:輝度コントラストによる視認性の検討 その5 晴眼者低視力者における不均一背景における円形視標の見やすさ評価, 平成 30 年度照明学会全国大会論文集, 6-O-02, 2018.9
 32. ○加藤洋子, 中村芳樹:周辺視に存在する高輝度光源による視認性低下に関する研究, 平成 30 年度照明学会全国大会論文集, 12-O-04, 2018.9

[口頭発表(国内・査読なし, 発表予定)] 発表者に○印

33. ○加藤洋子, 中村芳樹:カラーユニバーサルデザインを想定した LMS 刺激値コントラストによる視認性推定, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2019.3 発表予定

[寄稿]

34. 加藤洋子, 中村芳樹:駅構内のカラーユニバーサルデザインのための XYZ 表色系を用いた見やすさの研究, 第 11 回 ECOMO 交通バリアフリー研究・活動助成成果報告会, pp.269-300, 2018.6

[受賞歴]

- ・2017 年度 日本建築学会大会(中国)学術講演会 環境工学委員会 若手優秀発表賞

謝辞

本研究を進めるにあたって、指導教員である東京工業大学教授・中村芳樹先生には貴重なご助言、ご指導を数多く賜りました。中村先生には、私が平成 22 年度に東京工業大学修士課程に入学して以来、修士課程 2 年間、博士後期過程進学前に研究員として勤めた 3 年間、博士後期課程 3 年間と長期に渡ってお世話になり、温かく見守って頂きました。本論文をまとめることができたのは、中村先生の誠実なご指導の賜物であり、心から感謝致します。

本論文の査読を引き受けてくださった東京工業大学教授・田村哲郎先生、同准教授・浅輪貴史先生、同准教授・大風翼先生、同准教授・村田涼先生、多くのご助言、ご指導を頂き有難うございました。お陰様で、本論文をより良いものにすることが出来ました。その他、環境系合同ゼミに参加されている先生方、日本建築学会、照明学会に参加されている同分野の先生方、ビジュアル・テクノロジー研究所の皆様方からも、多くのご助言、ご指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

中村研究室の後輩の皆様には、被験者や実験準備等、沢山のご協力を頂きました。特に、平成 27 年度修士課程修了の川野裕基君、竹村祐里子さん、平成 28 年度修士課程修了の嘉納裕人君、上口優美さんには、本研究の初段階において共同研究をして頂きました。当時の成果を基礎として、ここまで研究を進めることが出来ました。また、秘書の薄葉千景様には研究員の頃より、事務手続き等、色々とお相談に乗って頂きました。お陰様で、滞りなく研究を進めることが出来ました。

摂南大学教授・岩田三千子先生には、博士後期課程に入学する以前から、弱視者の研究等について相談をさせて頂きました。第 2, 3 章の晴眼者、弱視者の検討を進めるにあたり、実験方法や条件の決定、実験実施、論文執筆において、多くのご協力を頂きました。また、摂南大学平成 27 年度学士課程修了の山崎理愛さん、平成 28 年度学士課程修了の山中章功君、平成 29 年度修士課程修了の吉野谷友希さん、平成 29 年度学士課程修了の長濱春菜さんには、実験実施においてご尽力を頂きました。岩田先生をはじめ、岩田研究室の皆様のお力のお陰で、晴眼者、弱視者を対象とした多くの実験データを収集することが出来ました。

本研究の第 2 章第 2, 3 節の一部と第 4, 5 章は公益財団法人交通エコロジー・モビリティ財団「ECOMO 交通バリアフリー研究・活動助成」、第 2 章第 3 節の一部と第 3 章は JSPS 科研費 26289208、第 2 章第 4 節は第 26 回一般社団法人照明学会研究・教育助成、第 6, 7 章は JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムを受け行ないました。これらの研究助成金が無ければ、ここまで研究を進めることは不可能でした。ここに感謝の意を表します。

また、横浜田園ロータリークラブ奨学金(YDRS)から 3 年間、横浜青葉奨学会(YAS)から 2 年間、奨学金を頂き学生生活を送らせて頂きました。お陰様で、苦しい経済状況の中での博士課程への進学でしたが、研究活動に集中することが出来ました。

本研究を進めるにあたり、晴眼者だけではなく、多くの弱視者、色弱者の方々にも実験の被験者のご協力を頂き、大変貴重な実験データが得ることができました。本研究の成果が活かされ、視覚的な安全性の確保、ユニバーサルデザインの実現に繋がるよう、今後も尽力する所存です。以上の通り、本研究は、多くの方々のご指導やご援助によって、まとめることができました。心より感謝申し上げます。

最後に、博士課程への進学を許していただき、あらゆる場面で私を温かく見守り続けてくれた両親に、深く感謝の意を表します。

平成 31 年 2 月
加藤 洋子