

ロービジョン者の視環境

最適化手法に関する研究

高橋信行

2014,12,24

謝辞

本論文は、私が愛媛大学大学院理工学研究科博士後期課程 (電子情報工学専攻) に在籍した3カ年、及びその後の3カ年、合計6カ年における研究成果をまとめたものです。

私は、愛媛大学大学院に入学する前、東亜大学通信制大学院修士課程 (情報処理工学専攻) に在学して、「視覚障害者における Web ユーザビリティ」についての研究をしていました。そして私は、修士課程修了後は、居住地に近い愛媛大学で研究を続けたいという希望を持っていました。そこで、愛媛大学の研究者リストを閲覧したところ、私の研究テーマに最も関連のある研究をされている研究者として、川原稔教授 (当時准教授) のお名前を見つけました。私は川原稔教授の研究室を訪ね、私のこれまでの研究のプレゼンテーションを見て頂き、私の研究の指導をして下るようお願いをいたしましたところ、川原稔教授は引き受けて下さると言われました。

私は目と耳に障害があります。そのようなハンディキャップのある私に対して、ご指導頂くことについて、本当にかまわないのかどうか、私は川原稔教授にお聞きしました。

川原稔教授は

「障害の有無が問題なのではなく、研究遂行能力があるかどうかの問題なのだ。」

とはっきり言われたことが大変印象的でした。私の指導教員および本研究の主査

となって頂くことになる川原稔教授との出会いでした。

さて、「視覚障害者における Web ユーザビリティ」についての研究を行うためには、その前提として、ロービジョン者の視覚特性の評価、視環境の最適化といった問題が解決される必要があります。そこで私は、「視覚障害者における Web ユーザビリティ」の研究の前段階としての「ロービジョン者の視環境の最適化手法に関する研究」に取り組むことにしたのです。

川原稔教授は、研究に用いる機材、プログラム開発環境、研究室の広い研究スペースといった研究に必要な環境をご用意下さいました。さらに実験に必要な資材の購入、被験者への謝金等を研究費から支出して下さいました。毎週行われたゼミにおいては、私一人のために、2時間以上の時間をかけてご指導頂きました。実験を実施する際には、研究室所属の学生を総動員して、組織的に計測できるようにして下さったため、多数の被験者の質の良いデータを効率良く得ることができました。私が博士後期課程を単位満了退学した後も、客員研究員として研究を継続できるように取り計らって下さいました。研究のご指導には大変厳しい川原稔教授ですが、ゼミが終わった後、目と耳が不自由な私を自宅まで、自家用車で送って下さるといった優しい一面もありました。

このように川原稔教授には、大学院博士後期課程への入学から、研究の発案、実験計画立案、実験実施、結果集計・解析、論文の取りまとめに至るまで、私の研究生活全てにおいてご指導を賜りました。川原稔教授なくしては、本研究はなかったと言えます。川原稔教授に心より深く感謝申し上げます。

副査をして頂いた理事・副学長の大橋裕一教授は、ご多忙の中、時間を割いて本研究の審査をして下さいました。さらに公聴会において貴重なご意見を賜りました。眼科学がご専門の立場で、本研究の早い段階から、視覚生理、視機能評価法、視標に関する見解、tConChartの活用の可能性といった、研究の核心部分についてのご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。

副査をして頂いた高橋寛教授、甲斐博准教授は、ご多忙の中、時間を割いて本研究の審査をして下さいました。公聴会において頂いた貴重なご意見は、今後、私の研究の進むべき方向を考える上で、重要なものばかりでした。心より感謝申し上げます。

東京大学先端科学技術研究センターの福島智教授は、私を同研究センター交流研究員にして下さいました。バリアフリーがご専門の立場で多くのご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。

東京女子大学人間科学研究科の小田浩一教授には、MNREAD-Jの刺激文のデータをご提供頂くなど、視聴覚情報処理がご専門の立場で多くのご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。

愛媛大学教育学部の荻田知則准教授には、特別支援学校において電子黒板を用いる際の留意点などについてご指導頂きました。心より感謝申し上げます。

広島大学教育学研究科の氏間和仁准教授には、視覚障害教育およびロービジョンケアがご専門の立場で多くのご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。

川原研究室の佐々木隆志助教には、毎週行われたゼミにおいてご指導ご助言を

頂きました。実験の準備・遂行，視標のフーリエ解析，プログラミング手法，TeXの記述方法についてのご指導など，私の研究の遂行に欠かせないものばかりでした。心より感謝申し上げます。

共に研究に取り組んで下さった院生の俊成武来徳さん，学部生の黒光祐輔さん，久座麻未さんには，実験の準備・実施・結果の集計に至るまでご協力を頂きました。とりわけ，私の目と耳が不自由なために発生した様々な困難に対して，多くの援助を頂きました。心より感謝申し上げます。

そして，本研究に関するご助言を頂きました多くの先生方，実験にご協力いただいた院生，学部生の皆様のご協力なくしては，本研究を遂行することができませんでした。心より感謝申し上げます。

さらに，目と耳が不自由な私に，移動支援，コミュニケーション支援，情報保障をして下さった通訳・ガイドヘルパーの皆様に心より感謝申し上げます。

最後に，私の研究生生活を支えてくれた家族に，そして私を安全に研究室までガイドしてくれた盲導犬フォリィに感謝します。

目次

第1章	はじめに	10
1.1	視覚障害	10
1.1.1	視覚障害者とは	10
1.1.2	視覚障害の区分	10
1.1.3	ロービジョンの定義	13
1.1.4	ロービジョンの範囲	15
1.2	ロービジョンの視覚特性とその評価	18
1.2.1	ロービジョンの困難とロービジョンケア	18
1.2.2	ロービジョンにおける代表的な見えにくさ	19
1.2.3	視力低下	20
1.2.4	視野障害	24
1.2.5	コントラスト感度低下	31
1.2.6	中心暗点	34
1.2.7	サッケード	35
1.2.8	ロービジョンのシミュレーション	37

1.3	視環境の最適化	41
1.3.1	最適化法の分類	41
1.3.2	視認に影響する要因	42
1.3.3	書体の最適化	47
1.3.4	文字サイズの最適化	50
1.3.5	窓範囲の最適化	55
1.3.6	コントラストの最適化	56
1.3.7	正のコントラスト, 負のコントラストの選択	57
1.3.8	色の最適化	59
1.3.9	照度の最適化	60
1.3.10	図形や線の最適化	62
1.3.11	補助具の最適化	65
1.3.12	PC 操作環境の最適化	68
1.3.13	Web ページの閲覧環境の最適化	73
1.4	視環境最適化における課題	75
1.4.1	視標の問題点	75
1.4.2	個々の学習・生活場面ごとの行動評価の必要性	80
1.4.3	より簡便な最適化手法の必要性	83
1.5	結論	84

第2章	視覚特性評価に基づいた電子黒板への教材提示法	85
2.1	目的	85
2.2	方法	91
2.2.1	手順1 ランドルト環判別時間の計測	93
2.2.2	手順2 コントラスト感度の計測	94
2.2.3	手順3 コントラストポラリティ効果の有無の計測	95
2.2.4	手順4 電子黒板の表示特性の計測	96
2.2.5	手順5 電子黒板に対する最適視距離および座席配置の決定	97
2.2.6	手順6 有効線幅の計測	98
2.2.7	手順7 図教材の作成	99
2.2.8	手順8 図教材の使用	99
2.2.9	手順9 図教材の見やすさの評価ならびにアンケート調査	100
2.3	結果	101
2.3.1	手順1 の計測結果	101
2.3.2	手順2 の計測結果	101
2.3.3	手順3 の計測結果	102
2.3.4	手順4 の計測結果	104
2.3.5	手順5 の計測結果	106
2.3.6	手順6 の計測結果	108
2.3.7	手順9 の計測結果	110

2.4	考察	113
第3章	印刷文字を閲覧する際の視条件評価チャートの提案	120
3.1	目的	120
3.2	方法	123
3.2.1	tConChart の構成	123
3.2.2	tConChart による計測方法	127
3.2.3	日常視条件における最小分離閾の計測	128
3.2.4	tConChart および tMinChart による計測	130
3.2.5	再現性および 17 画漢字をランダム配置することの妥当性の 検討	131
3.2.6	tConChart と読書速度との関連性の検討	132
3.3	結果	133
3.3.1	標準的 tConChart 曲線	133
3.3.2	再現性およびランダム配置の妥当性の検討	134
3.3.3	tConChart 曲線に与える最小分離閾の影響	135
3.3.4	tConChart と読書速度との関係の検討	136
3.4	考察	143
3.4.1	行動評価モデルとしての tConChart の意義	143
3.4.2	ランダム配置の妥当性	144

3.4.3	tConChart 曲線と読書曲線の関係	144
3.4.4	視条件最適化への適応性	146
3.5	今後の課題	147
第4章	今後の課題	148
4.1	はじめに	148
4.2	視覚特性計測ツールの汎用化と公開	148
4.3	tConChart における今後の課題	149
4.3.1	視力低下, 視野狭窄, コントラスト感度低下といった視覚特 性の各要素が tConChart の計測値に与える影響	150
4.3.2	書体の影響	150
4.3.3	文字の画数の影響	151
4.3.4	小中学生各学年用 tConChart の開発	152
4.4	有効線幅の推定手法の開発	152
4.5	おわりに	153

第1章 はじめに

1.1 視覚障害

1.1.1 視覚障害者とは

目の不自由な者を視覚障害者という。平成25年6月28日の厚生労働省社会・援護局による「平成23年生活のしづらさなどに関する調査」[61]によると、我が国の身体障害者手帳保持者約479万人のうち、視覚障害者は約31.6万人であった。視覚障害者は、身体障害者全体の8.2%を占めている。

平成20年3月24日の厚生労働省社会・援護局による「平成18年身体障害児・者実態調査結果」[60]では、視覚障害の原因は表1.1のとおりである。疾病、事故、加齢、出生時の損傷といった原因が明確である場合よりも、原因が不明である場合の方が多し。視覚障害者は、当たり前前に社会に存在していることを示している。

1.1.2 視覚障害の区分

視覚障害の区分としては、身体障害者福祉法による区分、医学的見地による区分、社会的見地による区分、教育的見地による区分等が用いられる。

表 1.1 視覚障害の原因別割合

原因	視覚障害者	視覚障害児
疾患	19.7 %	12.2 %
事故	8.1 %	0 %
加齢	2.0 %	0 %
出生時の損傷	4.5 %	12.2 %
不明・不詳等その他	65.7 %	76.6 %

身体障害者福祉法第十五条の規定では、身体障害者手帳を取得している者を身体障害者という。同法施行則では表 1.2 にあるように、視力や視能率の損失といった視覚障害の程度を基に判定する 1～6 級までの等級を定めている。

医学的見地による区分を表 1.3 に示す。視機能障害の程度により、全盲、光覚、手動弁、指数弁、医学的弱視に区分される。医学的弱視は、斜視弱視、屈折異常弱視、不同視弱視、形態覚遮断弱視が区別される。身体障害者福祉法による区分と医学的見地による区分は、視覚障害の程度により区分することから医学モデル [157] といえる。

社会的見地による区分を表 1.4 に示す。社会的見地から、社会的盲と社会的弱視を区分にされる。視覚によって日常生活を送るか否かによって区分する方法である。

教育的見地による区分を表 1.5 に示す。主に視覚を活用して教育すべきか否かにより、教育的盲と教育的弱視に区分される。教育的盲は、学校教育法施行令第 22 条の 3 により、「両眼の視力がおおむね〇・三未満のもの又は視力以外の視機能障

表 1.2 身体障害者障害等級（視覚障害）

等級	障害の程度
一級	両眼の視力の和が〇・〇一以下のもの
二級	1 両眼の視力の和が〇・〇二以上〇・〇四以下のもの 2 両眼の視野がそれぞれ一〇度以内でかつ両眼による視野について視能率による損失率が九五パーセント以上のもの
三級	1 両眼の視力の和が〇・〇五以上〇・〇八以下のもの 2 両眼の視野がそれぞれ一〇度以内でかつ両眼による視野について視能率による損失率が九〇パーセント以上のもの
四級	1 両眼の視力の和が〇・〇九以上〇・一二以下のもの 2 両眼の視野がそれぞれ一〇度以内のもの
五級	1 両眼の視力の和が〇・一三以上〇・二以下のもの 2 両眼による視野の二分の一以上が欠けているもの
六級	一眼の視力が〇・〇二以下、他眼の視力が〇・六以下のもので、両眼の視力の和が〇・二を越えるもの

害が高度のもののうち拡大鏡等の使用によつても通常の文字、図形等の視覚による認識が不可能又は著しく困難な程度のもの」と定められている。教育的弱視は、学校教育法施行令第22条の3により、「両眼の視力がおおむね〇・三未満又は視力以外の障害が高度であるが拡大鏡等を使用すれば文字等を認識することが可能である程度のもの」と定められている。社会的及び教育的見地による区分は、視覚障害の程度によってではなく日常生活や学習において視覚の活用が可能か否かによって判断されることから、社会モデル[157]であるといえる。

表 1.3 医学的見地による区分

区分	状態
光覚	明暗のみを区別できる状態
手動弁	眼前の手の動きのみを認識できる状態
指数弁	目の前の指の本数を数えられる状態
医学的弱視	発達していく過程における視性刺激遮断が原因で、 正常な視覚の発達が停止あるいは遅延している状態.

表 1.4 社会的見地による区分

区分	状態
社会的盲	視覚障害があるために主に視覚以外の感覚による日常生活または 社会生活を送る状態
社会的弱視	視覚障害はあるが主に視覚による日常生活及び社会生活が 可能である状態

1.1.3 ロービジョンの定義

1.1.2節で述べたように「弱視」という用語が従来より用いられているが、医学的、社会的、教育的の各々の見地によりその区分が異なる。本研究においては、学習・生活場面における見えづらさに対して視環境を最適化することを目的とすることから、視覚障害の区分は社会的弱視及び教育的弱視を指すが取り扱う内容は眼科領域に及ぶため「弱視」という用語が医学的弱視を指すとの誤解を生じさせかねない。こうした用語の曖昧さを避けるため、本研究においては「ロービジョン (Low Vision : LV)」という用語を用いる。

世界保健機関 (WHO) では、矯正眼鏡を装用しても「視力が 0.05 以上、0.3 未満」の状態をロービジョンと定義している。これは、機能評価を基にしたロー

表 1.5 教育的見地による区分

区分	状態
教育的盲	視覚障害があるために主に視覚以外の感覚による教育をすべき状態
教育的弱視	視覚障害はあるが主に視覚による教育が可能である状態

ビジョンの定義である。しかし、視機能には視力の他に視野やコントラスト感度など様々な要素が含まれるのにもかかわらず、WHO の定義では視力のみを指標としていることは不合理といえる。例えば、視野範囲が 5° 未満の求心性視野狭窄であっても中心視力が 0.3 以上に保たれている人は、WHO の定義によるとロービジョンに該当しないことになり、適切な社会保障を受けられない可能性がある。このように、視機能の一要素である視力のみをロービジョンであるか否かの指標とすることには問題がある。

これに対して、小田 [92] は「ロービジョンは、一般に眼鏡で矯正してもなお矯正しきれない視機能の低下があるため、日常生活で必要となる行動、新聞を読んだり、町を歩いたりするのに支障がある場合をいう。」と定義している。行動評価を基にしたロービジョンの定義である。小田の定義によるならば、視力、視野、コントラスト感度といった各々の視機能要素を個別に捉えるのではなく、視機能の全体と生活場面との相互関係において、困難が生じているか否かに判断基準を置くことになる。

このように、ロービジョンという用語の示す範囲は必ずしも明確ではないが、本研究においては、小田が示す行動評価を基にしたロービジョンの定義の立場をと

る。改めて以下に本研究における用語の定義を示す。「全盲」とは視覚を使わないで、聴覚や触覚といった視覚以外の感覚代行を活用して学習・生活する状態を指し、その者を「全盲者」という。「ロービジョン」とは、見えづらいながらも主に視覚を活用して学習・生活する状態を指し、その者を「ロービジョン者」、そのような児童を「ロービジョン児」、学生を「ロービジョン生」という。

1.1.4 ロービジョンの範囲

1.1.3 節の定義により、全盲とロービジョンの境界は、機能評価ではなく行動評価によって決定されるので、行動場面や行動背景によってその境界は変動する。例えば、歩行に関する境界、印刷文字の閲覧場面における境界、PC 操作場面における境界といったように、各々の行動場面における全盲とロービジョンの境界が存在する。したがって、ある一人の視覚障害者が、歩行や印刷文字の閲覧場面では全盲であるが PC 操作場面ではロービジョンであるということが起こり得る。

視覚障害等級表に照らし合わせた場合の PC 操作におけるロービジョンの範囲について考察する。例えば、視覚障害等級表の視覚障害 2 級の判定基準は、「両眼の視力の和が 0.02 以上 0.04 以下のもの」と定めている（表 1.2）。仮に左右の視力がそれぞれ 0.01 だとすると、視力の和は 0.02 となり 2 級に該当する最も低い視力の状態である。

$$\text{小数視力} = \frac{1}{\text{視角}}$$

表 1.6 等級別視覚障害者数

等級	人数	割合
1 級	108,600	36.2 %
2 級	85,500	28.5 %
3 級	28,000	9.3 %
4 級	28,000	9.3 %
5 級	29,000	9.7 %
6 級	21,100	7.0 %
総数	300,300	100.0 %

であるから、視力 0.01 における視認可能な視角は $1^{\circ} 40'$ で、ディスプレイまでの視距離を 30cm とすると、切れ目幅約 8.7 mm、直径約 43.5 mm のランドルト環を判別できる視力である。中根 [153] によると、文字を読むために識別が要求される細部の寸法は、8 画の漢字で、文字寸法の $1/14$ とされているので、視力 0.01 の者に対しては 122 mm のサイズの 8 画の漢字を提示すれば判読できることになり、24 インチのディスプレイを用いて横に 4 文字を表示することが可能である。このことから、2 級に該当する視覚障害者では、PC を使うことで墨字を視覚的に読み書きできる可能性がある。

2007 年の渡辺ら [131] による視覚障害者 412 名に対して行った調査では、視覚的な文字の読み書きが可能な者の割合が、視覚障害等級 1 級が 10.5 %、2 級が 67.4 %、3 ~6 級が 85.7 % であったことから、視覚を活用して PC を操作することが可能なロービジョンは、概ね障害等級 2 ~6 級が該当すると考えられる。

「平成 23 年生活のしづらさなどに関する調査」 [61] によると、我が国の等級別

視覚障害者の人数は表 1.6 のようになる。視覚障害等級 2 級から 6 級までは 191,600 人 (63.8 %) である。さらに、加 8 齢により視覚機能が衰えたものの身体障害者手帳を申請していない者など、潜在的なロービジョン者を含めるとその数は更に多いと考えられる。

表 1.7 ロービジョンケア一覧

内容	例
よりよく見るための工夫	視覚補助具, 適切な照明
感覚代行	音声機器, 触読機器
情報入手手段の確保	ラジオ, PC
進路の決定	特別支援学校, 職業訓練施設, 一般大学
福祉制度の利用	職場復帰
当事者及び家族の情報交換	身体障害者手帳, 障害年金
	関連団体, 患者交流会

1.2 ロービジョンの視覚特性とその評価

1.2.1 ロービジョンの困難とロービジョンケア

西脇[111]は, 1年間に眼科外来を訪れたロービジョン患者80症例を対象に, ロービジョン患者が困っている事柄についての調査を実施したところ, 1位は読み書き(79%), 2位は移動(66%), 3位は家事・日常動作(21%)であった。

そうしたロービジョン者の困難に対して, 医療的, 教育的, 職業的, 社会的, 福祉的, 心理的等のすべての支援を総称して「ロービジョンケア」という。発達・成長期にある小児, 成人における中途失明, 高齢者における加齢による視機能低下等, ロービジョンケアの対象は幅広い。ロービジョンケアの具体例を表1.7に示す。

本多[154]は, 井上眼科病院の院内の全ての職員104名に対し, (1) ロービジョン者の心理についての講義, (2) 誘導法のデモンストレーション, (3) シミュレーション眼鏡を使用したロービジョンの疑似体験を含むロービジョン講習会を実施した。その後, アンケート調査を実施したところ, 誘導能力の自己評価が54%向

上したことに加え、講習会が業務に「役立つ」と回答が85%、「少し役立つ」と回答も含めると98%であったことから、ロービジョンに関する講習や疑似体験がロービジョンケアを担う人材育成に有意義であることを示唆した。

1.2.2 ロービジョンにおける代表的な見えにくさ

図1.1～図1.5に、代表的な見えにくさのイメージ図を示す。図1.1は正常な見え方、図1.2は屈折異常の見え方、図1.3は白濁の見え方、図1.4は視野狭窄の見え方、図1.5は中心暗点の見え方のイメージ図である。視覚の仕組みと経路は複雑であり、その何等かで障害が起これば、たちまち見え方の異常が発生する。どの部分にどの程度の障害があるかによって、ロービジョン者の見えにくさの性質や程度は異なる。

渡部ら[38]は、ロービジョン者の見え方を計測することについて、(1)視覚の特性に影響するパラメータの多さ、(2)統制をして測定をしても予測しない誤差の発生、(3)実用時と測定時の条件の不一致、(4)非線形的性質のため計算による推測の困難さという4つの問題点を指摘し、ロービジョン者の見え方の取り扱いの難しさを示唆した。



図 1.1 正常な見え方



図 1.2 屈折異常の見え方



図 1.3 白濁の見え方



図 1.4 視野狭窄の見え方



図 1.5 中心暗点の見え方

1.2.3 視力低下

本節より、視力低下、視野障害、コントラスト感度低下、中心暗点といったロービジョンの見えにくさの要素を取り上げながら検討する。

視力低下とは視力が低下した状態をいう。視力とは、対象の細部構造を見分ける能力をいい、表 1.9 に示すように最小視認閾、最小分離閾、最小可読閾、副尺視力がある。このうち眼科領域では、主として最小分離閾が用いられる。

視力の表し方は、表 1.8 に示すように小数視力、分数視力、対数視力、logMAR 視力がある。このうち、対数視力は間隔尺度に近似する。logMAR 視力は間隔尺度となり、視力を定量的に評価するのに適する。

国際眼科学会では視力の測定にランドルト環を用い、識別できる最小視角（分）の逆数をもって視力とする小数視力が採用されている。様々な視力の計測方法に

表 1.8 視力の表し方

視力	表し方
小数視力	識別できる最小視角（分）の逆数によって表す.
分数視力	分子に検査距離，分母に識別できる最小視角が1分になる距離で表す.
対数視力	識別できる最小視角（分）の逆数の常用対数によって表す.
logMAR 視力	識別できる最小視角（分）の常用対数によって表す.

表 1.9 視力の種類

視力	意味
最小視認閾	視野内に一つの点，あるいは一本の線が存在することを認める閾値
最小分離閾	二点または二本の線が分離して見分けられる閾値
最小可読閾	文字または複雑な図形を判読または弁別する閾値
副尺視力	直線のずれを見分ける閾値

ついて表 1.10 に示す。屈折異常の矯正の有無により矯正視力と裸眼視力を，中心窩を用いるか否かで中心視力と周辺視力を，両眼を用いるか片眼を用いるかで両眼視力と片眼視力を，視距離を 5m とするか 30cm とするかで遠見視力と近見視力を，視標を複数提示するか一つのみを提示するかで字づまり視力と字ひとつ視力を区別する。ランドルト環ではなく縞視力表を用いて計測するものを縞視力という。縞視標には正弦波と矩形波のものがああり，空間周波数特性の測定等に用いられる。

表 1.10 様々な視力の計測方法

視力	計測方法
矯正視力と裸眼視力	矯正視力は屈折異常を矯正して測定する視力 裸眼視力は矯正なしで測定する視力
中心視力と周辺視力	中心視力は中心窩で計測する視力 周辺視力は中心窩以外の部位で計測する視力
両眼視力と片眼視力	両眼視力は両眼を用いて測定する視力 片眼視力は非測定眼を遮蔽して一眼で測定する視力
遠見視力と近見視力	遠見視力は視距離 5 m で測定する視力 近見視力は視距離 30 cm で測定する視力
字づまり視力と 字ひとつ視力	字づまり視力は多数の視標が配置されている視力表を 用いて測定する視力 字ひとつ視力は視標をひとつだけ提示して測定する視力
縞視力	縞視力は識別できる縞の幅を視角に換算して求める視力

正常児における視力の発達

眼科臨床で使用する視力は矯正視力であり、遠見での中心視力である。視力そのものには不確定要素が数多く存在し、測定条件を規定しても再現性の高い客観的な臨床的評価を行うことは難しいとされる [143]。しかし、谷村ら [163] は、4 才児～6 才児までの幼児において、ランドルト環の一字ひとつ視標を用いることで正確な検査が可能であることを示し、正常児の視力の実態を計測し報告した。4 才児の視力は平均 1.0、あるいはそれ以上に達していた。視力はその後 6 才まで徐々に発達し、6 才児では 1.5 に達するものが最も多く、1.0 以上の者の比率は 96 % に及んだとしている。

表 1.11 屈折異常の種類

種類	状態
近視	眼の屈折異常により光が網膜の前に結像するもの。 主な原因は遺伝的に眼球の前後径が長いこと、 角膜や水晶体の病変や、屈折力が強い場合等がある。
遠視	眼の屈折異常により光が網膜の後ろに結像するもの。 主な原因は遺伝的に眼球の前後径が短いこと、 水晶体、角膜の屈折力が弱い場合等がある。
乱視	眼に入った光が1点に結像しないもの。 先天的な角膜カーブの乱れ（正乱視）と、 後天的な疾病や外傷により角膜面が凸凹になるものがある。

屈折異常

屈折異常とは、眼に入った光が正しく網膜に結像しない状態をいい、視力低下の原因のひとつである。屈折異常の代表的なものを表 1.11 に示す。眼の屈折異常により光が網膜の前に結像するものを近視、後ろに結像するものを遠視という。これらは、遺伝的な眼球の前後径の長短や角膜や水晶体の病変、屈折力の異常等が原因となる。一方、乱視は眼に入った光が1点に結像しないものをいい、正乱視と不正乱視を区別する。

屈折異常によるぼけの見え方のイメージを、図 1.1、図 1.2 に示す。視覚におけるぼけは、(1) 対象物に正確に焦点が合わない時に生じる全方位一様なぼけ、(2) 特定の方位にのみ生じるぼけ、(3) 角膜形状の不均一さに起因する球面や円柱レンズの組合せでは矯正できないぼけの三種類がある [168]。

視力低下は屈折異常によるほか、表層角膜炎、白内障、硝子体混濁といった透

光体混濁，未熟児網膜症，網膜色素変性症，糖尿病網膜症，黄斑変性症などの網膜の異常，視神経萎縮，虚血性視神経症などの視神経の障害等でも起こる [1].

1.2.4 視野障害

視野中心部での注視によって得られる視覚を中心視 (foveal vision) という。これに対して，網膜周辺視野における視覚は周辺視 (peripheral vision) という。

視野には表 1.12 に示すように様々な概念がある [2]。心理的視野は，固視点を注視した状態で視覚的注意の及ぶ範囲をいう。注視点への注意の向け方が周辺視での認知に影響を及ぼすことが知られている。生理的視野は，ゴールドマン視野計などで測定できる視野範囲で，医学的な疲労の指標としたり身体運動が影響を及ぼしたりする視野範囲である。中心視野は中心 30 度以内の視野，周辺視野は中心視野より外側の視野をいう。注視野は頭部を固定して眼球運動により見える範囲をいう。

本研究においては特に断りのない限り，視野とは生理的視野を指すものとする。正常な人の視野は，図 1.6 に示すように，およそ上側 60° ，下側 70° ，鼻側 60° ，耳側 100° である [2] (図 1.6)。

視野におけるコントラスト感度及び反応時間

遠藤ら [132] は中心視野と周辺視野でのコントラスト感度を比較した。中心視野及び周辺視野にフリッカー刺激光を提示し，各時間周波数に対するコントラスト

表 1.12 様々な視野の概念

視野	概念
心理的視野	固視点を注視した状態で視覚的注意の及ぶ範囲
生理的視野	ゴールドマン視野計などで測定できる視野範囲
中心視野	中心 30 度以内の視野
周辺視野	中心視野より外側の視野
注視野	頭部を固定して眼球運動により見える範囲

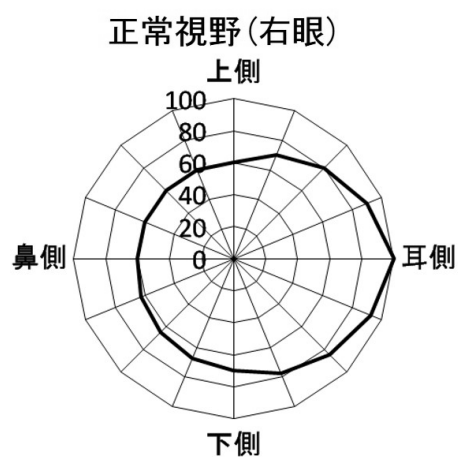


図 1.6 正常な視野の範囲 (右眼)

感度を求めたところ、低時間周波数の刺激に対しては偏心度が高くなるほど感度が低下しているが、高時間周波数刺激に対しては、偏心度が高くなるほど感度が良くなっていると報告した。

負荷による視野への影響

周辺視コントラスト感度は中心視負荷の影響を受けることが知られている。松宮ら [40] は、中心視課題を用いて中心視野に負荷をかけると、眼球運動条件と固視条件の両方の場合で、周辺視野における色・輝度コントラスト感度が低下することを示した。

中心視負荷により、周辺視反応時間が増加するという報告がある。石垣ら [99] は、中心視に負荷が設定された場合、その負荷が大きい程、反応時間は増加し、その傾向は網膜上の部位、周辺刺激の違いなどにかかわらず増加分を加算した平行増加関係であることを報告した。

若年者と比較して、高齢者では課題によって有効視野が狭くなるという報告もある。犬飼ら [151] は、若年者と高齢者を対象に1文字の漢字の可読性に関する有効視野の検討を行ったところ、若年者群は課題の難易度に関係なく有効視野の範囲がほぼ一定であったのに対し、高齢者群は課題の難易度が高い場合、有効視野の範囲が低下したと報告した。

周辺視野への影響は、心理的な課題によってだけでなく運動負荷によっても引き起こされるという報告がある。石垣ら [101] は、晴眼者を被検者として、PCを用いてCRTに視標を提示し、自転車エルゴメータで運動負荷をかけた時の視野周辺部の光刺激に対する反応時間を測定したところ、何等の運動強度においても各点の刺激に対して運動中の遅延が観察され、運動後にはこの遅延は消失したと報

告した。

視野検査の方法

一般的な視野検査の方法は、動的量的視野計測法と静的量的視野計測法に分類される [2]。動的量的視野測定法（球面視野計法）は、視野全体を定量的に測定する方法で、ゴールドマン視野計が用いられる。何種類かの明るさ、大きさ、色の異なった視標を使って視野全体を定量的に測定し、同じ感度を有する点を地図でいう等高線のように表わす。静的量的視野計測法とは、視野内の一点に視標をおいて、その明るさを徐々に増しながら視野内の網膜感度を量的に計測する方法である。

近年、コンピュータを応用した自動視野計の発達により、多くの測定点における精密で客観的な閾値測定、定量的評価などが比較的短時間に行えるようになった。視野測定結果は、視標サイズ、背景輝度などの測定条件に大きく影響されることから、対象者と目的に応じて適切な視標サイズを選択する必要がある。橋本 [156] は、自動視野計 Octopus201 型を用いて、中心 6 度内の視野を 2 度ごとに細かく測定する独自のプログラムを開発し、晴眼者を対象に種々の視標サイズと背景輝度の測定条件において、視感度分布の詳細な検討の結果、視神経炎、視交叉症候群、視索障害、緑内障、中心性網脈絡膜症、網膜剥離の病的視野測定に適した視標サイズを提案した。宇山 [62] は、緑内障眼における視野異常の検出率におよぼす視標サイズの影響について検討を行った結果、視標サイズ 1 による中心静的視野測定

が、視標サイズ3～5より初期緑内障性視野異常の検出に有用であると報告した。

ゴールドマン視野計で計測されるイソプタを、自動視野計を用いて計測する研究もある。橋本[156]は、自動視野計を用いて、イソプタを形成する外部角度において視野変化を判断するという新しいアルゴリズムを開発し、緑内障患者12例12眼を対象に測定を行った。それらをゴールドマン視野計の結果と比較検討したところ、高い一致性が認められたと報告している。

視野障害

視野に異常をきたした状態を視野障害という。図1.7のように、視野障害には様々なタイプがある。例えば、求心性視野狭窄は網膜色素変性症患者でしばしばみられる[2]。病気の進行とともに、網膜の周辺部から中心窩に向かって求心性に変性が進行することにより視野狭窄を引き起こす。見え方のイメージ図を示すと、正常な見え方(図1.1)に対して、求心性視野狭窄(図1.4)では中心の一部だけが見えている。

視野狭窄の程度と認知・行動の困難

中心視は高解像度の空間識別を司る「What」システムであり、周辺視は視対象の存在・運動・方向といった広域な時間情報抽出機構を司る「where」システムであるといえる[128]。周辺視の重要性は、中心視の空間処理系とダイナミックな相互作用を営みながら視野全体の処理系を最適化することにあると考えられる。視

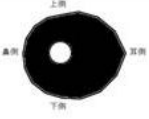
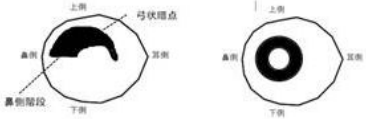
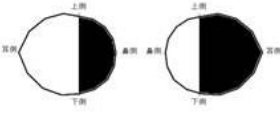
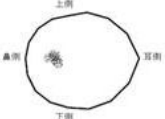
視野障害	見え方の例	概要
視野狭窄		求心性視野狭窄では、周囲から中心に向かって、視野が狭くなる。
暗点		視野の中に見えない部分があるものを「暗点」という。左側は緑内障における弓状暗点、右側は網膜色素変性症における輪状暗点。
半盲		脳腫瘍や脳血管障害で視路が傷害されると、両眼において、片側の視野が欠損する。
沈下		網膜の反応性が低下した状態を「沈下」という。暗点に至る前状態と考えられる。

図 1.7 様々な視野障害のタイプ

視野狭窄では、この周辺視の働きが阻害されることにより、日常生活における認知・行動に様々な困難が発生する。

視野狭窄の困難についての研究は、しばしば視野狭窄眼鏡を用いて視野狭窄状態をシミュレートすることで行われている。

杉森ら [59] は、視野角 5° の視野狭窄眼鏡を使用した被験者に対し、視線追跡実験を行った。色、形状、大きさ、明るさを変化させた図形をスクリーンに投影して発見するまでの時間を計測し、探索時間、視線軌跡、停留点軌跡から、視野狭窄者が物体を探索する際の特徴について検討した。

加藤ら [109] は、パーソナル・コンピュータと、眼球運動・瞳孔の測定装置を付けたヘッドマウントディスプレイを用いた疑似体験装置を開発し、6名の大学生を被検者として、1.17メートルの距離に置かれた紙面上の文字を読むという課題を行わせたところ、残存視野 4° で、読書が困難になったという。視野狭窄の影響は、人物の特定、細かい表情の読み取りなどに著明であったと報告した。

樋渡ら [179] は、テレビジョンアイカメラと視野制限装置を用いて、単純幾何学線図形、平仮名文字、無意味パターンに対する視野制限時における認知に要する応答時間と正答率を求めたところ、何等の場合でも視野が $2.0\sim 2.5^\circ$ より小さくなると反応時間は急増すると報告した。

和氣 [167] は、視野狭窄と日常生活の困難について検討している。晴眼者を被験者とし、視野狭窄眼鏡を装着させ、視野制限 2° 、 5° 、 20° について日常生活における影響を検討したところ、視野狭窄の状態では、読み能力にあまり影響がないものの、行動のなめらかさの欠如や作業全体の遂行時間の延長がみられた。所要時間の分析から、視野制限 2° では行動に与える影響が著しく、 5° に拡大されると全体的に困難さは軽減されたと報告した。

川島ら [113] は、視野制限と認識能力の関係を調べた。移動窓法によって視野を制限した研究で、視野が 8° までは、パターン認識の正答率は80%以上を示すが、それより視野が狭められると急激に正答率が低下すると報告した。

Pelli[21] は、三次元的な空間内移動と視野との関係について調査したところ、迷路状の実験ルートでは 10° 、現実の歩行場面では 4° より視野が狭くなると、歩行

が急激に困難になることを報告した。

1.2.5 コントラスト感度低下

コントラスト感度とは

視力は、視機能を代表する評価項目の一つであるが、必ずしも日常の見え方を代表しない。視力は、高コントラストの視標を用いた最小分離閾であり、完全矯正状態における遠見での中心視力のことを指している。しかし日常の視環境は、明所から薄明、暗所まで変化し、対象物のコントラストは様々であるから、視力だけでなくコントラスト感度や低コントラスト視力の計測が重要である [144]。

コントラストとは白黒の明暗対比をいい

$$C = \frac{(L_{max} - L_{min})}{(L_{max} + L_{min})}$$

で表す。これをマイケルソンコントラスト (Michelson contrast) という。ただし、 L_{max} と L_{min} はそれぞれ最大輝度と最小輝度を示す。コントラストは、0~1の値を取る無次元量で単位はない。通常、測定には正弦波が用いられ、縞の細かさを表す指標として、単位視角あたりに含まれる縞の数を空間周波数 (spatial frequency) として表す。単位は cycles/deg (cpd) が用いられる。

縞を識別できる最小コントラストをコントラスト閾値 (contrast threshold) , コントラスト閾値の逆数をコントラスト感度 (contrast sensitivity) という。視覚系

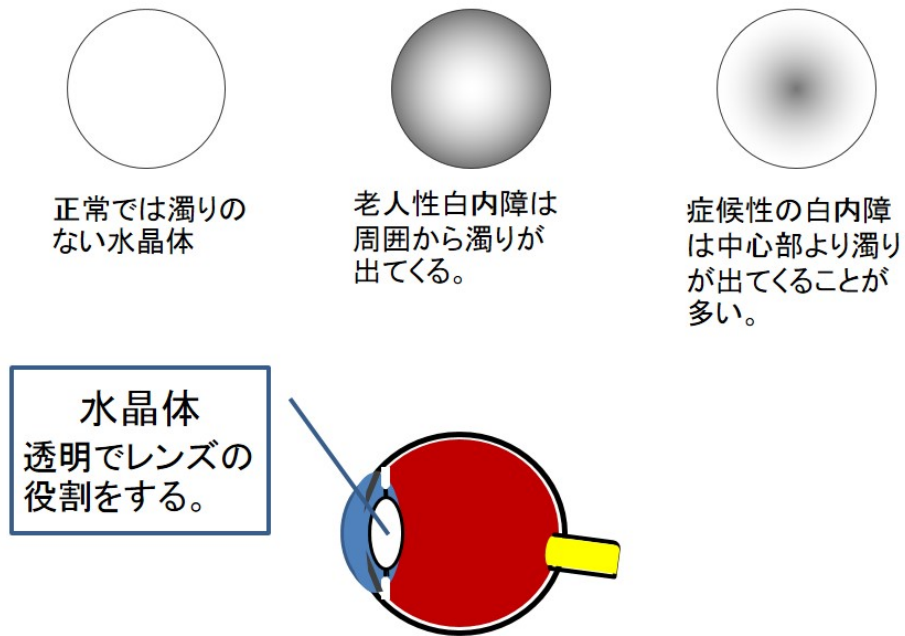


図 1.8 白内障における水晶体の濁りのイメージ図

のコントラスト感度特性を表示する場合、横軸に空間周波数 (cpd) , 縦軸にコントラスト感度を対数スケールで表示する [143].

コントラスト感度の計測

コントラスト感度は、臨床的にはペリーロブソン表やリーガン低コントラスト視力表で計測される。

ペリーロブソン表は基本空間周波数 0.5 cpd の活字で構成され、各列 3 つの活字からなる 2 つのグループでできている。各活字グループのコントラストは表の最上部の 90 % から、最下部の 0.5 % にまで減少する。被験者は 3 つの活字のうちの

2つが読めなくなるまで、活字を上から下まで読むよう求められる。

リーガン低コントラストテストは、コントラスト 96 %と 11 %の 2つの活字表で、上から下にいくにつれて活字の大きさは小さくなる。被験者は上から下に向かって活字を読み、各表において確認できる最も小さな活字が記録される。計算図表を用いて二つの感度の間に線を引き、その線の勾配が通常よりも急な時、コントラスト感度の異常を疑う。

窪田ら [58] は、Web ページ上でコントラスト感度特性を測定するシステムを開発し、303名の PC ユーザから Web を介して測定結果を得た。同時に被験者の属性や PC 画面上で好ましい文字サイズに関するデータなどを取得し、コントラスト感度の測定結果との関係について検討した。その結果、被験者の年齢や視力矯正方法とコントラスト感度との間に相関が認められたと報告した。

ロービジョン者のコントラスト感度特性

高橋ら [106] は、被検者のディスプレイ表示に対するコントラスト感度特性を計測するためのツールを開発した。ディスプレイに横 300 × 縦 100 ピクセルの四角形を縦に 3つ表示し、ランダムにそのうちの一つの四角形だけを徐々にコントラストを強めながら縞模様にする。どの四角形が縞模様になったかを判別できた時のマイケルソンコントラストの逆数を、コントラスト感度として読み取った。計測の結果、ロービジョン者群は晴眼者群に比べてコントラスト感度が低く、ばらつきが大きいことを報告した。

伊藤 [141] は、CRT フラットディスプレイ上にサイン波の縞模様を提示して種々の空間周波数の視認閾値を求めた。ロービジョン者のコントラスト感度は、非常にばらつきが大きく、全体的に高空間周波数側の感度低下が見られた。晴眼者で 3 ~4 cpd にある最大感度がロービジョン者では、0.3 ~0.5 cpd に移動していることを報告した。さらに、医学的な属性検査で被験者を分類すると、中心残存型では低空間周波数が、周辺残存型では高空間周波数の感度低下が顕著であったと報告した。

磯野ら [87] は、高齢者 10 名、若年者 10 名の色度空間周波数特性及び時間周波数特性を測定した。高齢者は若年者と比較して、色度コントラスト感度が、全周波数にわたって低下していた。赤-緑の色刺激に比べて、黄-青の色刺激パターンでの低下が著しいことを報告した。

小澤 [107] は、晴眼者とロービジョン者に対し、網膜上に直接レーザー光の干渉縞を結像させて屈折系の影響を排除して空間周波数特性を計測した。その結果、晴眼者では 3~7 cpd にピークを持つバンドパス型、網膜色素変性ではローパス型を示した。さらに、先天性白内障では晴眼者に近い群、ローパス型群、全帯域で著しい感度低下を示す群の 3 群に分類できたと報告した。

1.2.6 中心暗点

中心暗点とは、図 1.5 に示したように、中心窩による中心視力が著しく低下した状態を指す。視野の中心部が見えないことから、視認は網膜の周辺視野を使って

行われる。網膜の偏心率が増すほど、視力や色覚は著しく低下する。例えば、偏心率 40° における周辺視では、視力は中心視の 0.5 % に減衰し、読書における視認能力は極端に低くなる [128]。

薬師ら [64] は、ランドルト環をパーソナルコンピュータの液晶画面の任意の位置に提示して、中心外視力を測定したところ、網膜上の方向による差はなかったと報告した。

石垣 [98] は、視野と周辺視反応時間の関係について調べたところ、視野の広さを V 、視標の位置を S とする時、反応時間は S/V が小さいほど速く、このことは、同一眼においてすべての方向及び視角について適合すると報告した。

福田 [127] は、アルファベット、単純幾何学図形などを視標とし、網膜上の各部位に短時間提示した場合の見え方を測定した。その結果、網膜上における視機能は、周辺部では比較的単純であるが、中心部になるほど複雑で高次のものとなる階層構造を形成していることを明らかにした。

中心視と周辺視の機能差は、網膜の構造上の相違のみならず、さらに上位中枢の機能的構造が反映した結果であることを示している。

1.2.7 サッケード

周辺視によってとらえた視対象を網膜の中心窩上に結像させるためには、その都度、視線を視対象に向ける作業としての眼球運動が必要となる。眼球運動の種類には、滑動性眼球運動と跳躍性眼球運動（以下「サッケード」）がある。

動体視力とは、移動する視標を眼球運動によりとらえ、認識する能力をいう。石田ら [176] は、動体視力測定中の眼球運動を観察したところ、視標速度が $300^{\circ} /$ 秒付近までは、視線速度を視標に追随させて視標を識別することが可能であるが、それより高速になると眼球運動が追いつかなくなり、識別が困難になったと報告した。

松原ら [177] は、視覚的注意と眼球運動の相互作用について検討した。注意追跡時のサッケードの潜時を測定したところ、予め注意を向けていない位置に視線移動する際には、潜時が長くなることが明らかになった。眼球運動と注意状態の関係として、コントラスト感度はサッケードの目的位置で高くなることから、眼球運動に先行して注意が移動していることを示唆した。

岩月ら [63] は、アイカメラを用いて、高齢者における歩行時の視覚・運動系に関わる機能の特徴を注視点の移動から検討した。高齢者では、加齢に伴い滑動性眼球運動の追跡可能な限界速度が低下し、代償的にサッケードに依存する。サッケードは加齢とともに、反応時間の延長、最大角速度の低下、修正性サッケードの増加が多く認められることを報告した。

永井ら [104] は、19歳から30歳のロービジョン者5名を被検者とし、サッケード反応時間に視標のサイズと輝度が及ぼす影響を観察したところ、ロービジョン者のサッケード反応時間は、視標のサイズか輝度のどちらか一方の影響が顕著であったとしている。さらに、視野狭窄のあるロービジョン者では、視標の点灯方向の反対側へ反応する誤反応が多く見られると報告した。

柿澤ら [146] は、ロービジョン者 6 名と晴眼者 6 名を被験者とし、EOG 法を用いてサッケードの潜時を計測したところ、晴眼者では約 200 ミリ秒であったのに対し、ロービジョン者では 220 ミリ秒で有意に長かった。一方、ロービジョン者のサッケードの最大速度と振幅は、晴眼者とほぼ等しいと報告した。さらに柿澤 [145] は、視標の移動に伴って聴覚刺激を用いることで、視覚系情報が不十分なロービジョン者に対して、眼球運動の制御能力の訓練が可能であることを示唆した。

1.2.8 ロービジョンのシミュレーション

シミュレーションの意義

ロービジョン者の見え方は、視力が低だけでなく、視野の状態や暗点の有無、コントラスト感度、色覚特性、暗順応や明順応の不調など多様な要素からなっていて、その見え方を理解することは容易ではない。そこで、ロービジョン者の視覚特性をシミュレートすることができればロービジョン者に対する理解が深まり、より良い人的サービスの提供につながる。ユニバーサルデザイン的设计においても、製品の配色、配置、大きさなどのユーザビリティを評価する際に有用であると考えられる。

中野ら [171] は、ディスプレイの表示が高齢者にどのように見えているかを実感できるように、時系列のカラー画像に対して、空間周波数特性、分光特性、焦点調節特性に応じた伝達関数を施して、シミュレート画像を得たと報告した。

西尾ら [110] らは、建築系学生を対象に視覚障害疑似体験を実施したことで、視覚障害者に使いやすい住宅を設計する意識や建築的工夫についての知識の向上、視覚障害者に対するイメージの向上が見られたと報告した。設計教育の中で、疑似体験を取り入れることの有効性を示したものである。

ぼけによる低視力のシミュレーション

ぼけをシュミレートして行われた研究には、以下のようなものがある。

観音ら [168] は、フィルタを用いてぼけを再現し、スネレン文字視標の読み取り正答率に及ぼす影響を測定した。Legge ら [15] は、ディスプレイと被験者の間にディフューザと呼ばれる $25 \times 12.5\text{cm}$ のすりガラスを設置することでぼけをシミュレーションした。小林 [97] は、凸レンズによる屈折異常のシミュレーション下で楽に見ることができる線幅を求めた。

透光体混濁のシミュレーション

透光体混濁をシュミレートして行われた研究には、以下のようなものがある。

鵜飼 [41] は、眼鏡に貼ることのできる光拡散効果を持ったシート、バンガータフィルタ（スイス Ryser Optik[松本医科器械扱]:Occlusion Foil）を用いて健常者の視力をコントロールし、ロービジョンの視覚をシュミレートする方法についてコントラスト感度特性の点から検討し、妥当性があることを示した。

高橋ら [52] は、晴眼者を被験者とし、白内障疑似体験フィルタを用いて、照度と

透光体混濁の程度が視標に対する視認性に与える影響を検討したところ、照度レベルの上昇はグレアを増大させ、視標の視認性を低下させること、低空間周波数視標よりも高空間周波数視標においてグレアの影響を強く受けることを報告した。

草野 [166] は、若年者に対して、白内障疑似体験フィルタを用いた計測を行ったところ、高齢者と同様、灰色と青色の刺激に対する反応速度の延長が見られた。このことから、高齢者は加齢によって、水晶体の黄変、短波長成分の透過率低下、網膜上のコントラストが低下する結果、視認性低下及び反応時間の遅延を引き起こしていると報告した。

小浜ら [152] は、老人性白内障を疑似するための適切なフィルタを選定するため、両眼とも白内障の症状があり、片眼のみ手術を迫えた術後 3 日目の患者 48 名を被検者とし、手術を終えた方の目にフィルターを掲げ、手術前の見え方に近いものを選択させることで、FOGGY B+ND0.2+LBA2 のフィルタを「生活に不便を感じ始める中程度の白内障の見え方を疑似するもの」と判定した。そのフィルタを用いて、老人性白内障を疑似体験するための白内障疑似体験眼鏡を作成した。

視野狭窄のシミュレーション

視野狭窄をシミュレートして行われた研究には、以下のようなものがある。

杉森ら [59] は、視野角 5° の視野狭窄眼鏡を使用して視線追跡実験を行った。加藤ら [109] は、眼球運動・瞳孔の測定装置を付けたヘッドマウントディスプレイを用いて視野狭窄をシミュレートした。樋渡ら [179] は、テレビジョンアイカメラと

視野制限装置を用いて視野制限下での図形対する応答時間を観察した。和氣 [167] は、視野狭窄眼鏡を装着させて日常生活動作を観察した。川島ら [113] は、移動窓法によって視野を制限した状態でのパターン認識の正答率を観察した。

色覚異常のシミュレーション

色覚異常をシミュレートして行われた研究には、以下のようなものがある。

内山ら [138] らは、ロービジョン者の Web アクセシビリティの向上を支援するためのツール「ColorDoctor」を開発した。「ColorDoctor」を用いることで、制作された Web ページの文字や動画像の色合いが、色覚障害者にとってどのように見えているかをシミュレートすることができると報告した。

吉澤ら [49] の照明条件を考慮したシミュレーション法を提案し、Panel D-15 test chart を用いてその妥当性を確認した。岡嶋ら [76] は完全二型二色覚者のシミュレーションに交照法を用いて分光視感度を測定することで、その妥当性を確認した。

表 1.13 最適化モデルの分類

モデル	方法
主観評価モデル	ロービジョン者自身による選好に基づく
客観評価モデル	客観的評価に基づく
機能評価モデル	視力、視野などの視機能検査に基づく
行動評価モデル	読書等の行動の評価に基づく

1.3 視環境の最適化

1.3.1 最適化法の分類

ロービジョン者の視覚特性は一人ひとりで異なることから、ロービジョン者の視環境は個に応じて最適化（optimization）される必要がある。小田 [93] は、ロービジョン者の見え方に応じてリーディングエイドの倍率を最適化する手法について、主観評価モデルと客観評価モデルに分類し、客観評価モデルをさらに機能評価モデルと行動評価モデルに分類して説明している（表 1.13）。

岡田 [155] は、ロービジョン児の音読に与える可読性要因を検討したところ、文字サイズ、行長、書体、文字と紙の色とのコントラスト、漢字含有率、分ち書きなどの要因によって読みが影響されていた。音読の誤りと読速度の間には有意な相関が得られたと報告した。

1.3.2 視認に影響する要因

文字要因

ランドルト環と比較して、文字は視覚刺激としては複雑であり、読字評価は高次の認知機能が関与する点で取扱が難しい。田中 [142] は、晴眼者を被験者とし、晴眼状態と視力 0.3 に統制したロービジョン状態での平仮名文字の見やすさを検討したところ、ロービジョン状態では、明らかに文字の判読に多くの時間を必要とし、可読閾値が正常視力の約 7 倍になったとしている。ロービジョン者では、とりわけ、「ぱ」と「ば」の判別が特に困難であることを報告した。

岡田ら [155] の調査によると、一字ずつの文字の認知に関して、正眼児群とロービジョン児群は、「は」と「ほ」、「る」と「ろ」、「め」と「お」、「あ」と「お」についての識別に有意差（1 %水準）が見られたと報告した。

徳田 [137] は、ロービジョン児と晴眼児の漢字の読みと書きの成績を比較し、ロービジョン児は、晴眼児と比較して成績が下回ることを報告した。

これらのことから、ロービジョン者の多くは、読み書きに困難を有することが示唆された。

視力要因

五十嵐 [105] は、ロービジョン児の平仮名及び数字の知覚と、それを規定する諸因子との関連を統計的実験によって解析したところ、一文字読みのような単純な

視認では、視力の影響を極めて強く受け、他の因子の介入はほとんどないとしている。視力が高ければ、より小さいサイズの文字を視認できるということを示した。

中根 [153] は、背景輝度が等しいランドルト環視標と、8ポイントの漢字を比較した場合、2画は視力0.4に、文章は視力0.53に、23画は視力0.7に相当するとして、同じサイズの文字であれば、より画数の高い文字を視認するために高い視力が要求されると報告した。

小林ら [147] は、印刷文字の識別について識別距離と構造確認距離という概念を用いている。識別距離は、漢字パターンの細部は識別できなくても漢字全体の形体から識別が可能な距離をいい、漢字の字画、ストローク数に依存する。構造確認距離とは漢字パターンの細部まで詳細に認知して識別が可能な距離をいい、被験者の二線分離可能な視距離に依存することを示した。識別距離と構造確認距離の両者について、文字の細部のストロークのみでなく周囲の構造にも影響を受けるため、ランドルト環を用いて計測される単純な視力からこの距離を算出することはできないと報告した。さらに、五十嵐 [105] は、三文字読みのように字数が増加した場合には、知能などの視力以外の因子の働きが強くなり、練習効果がみられると報告した。

Leggeら [15] は、ぼけが読みに与える影響について調べた。ぼけは、ディスプレイと被験者の間にディフューザと呼ばれる $25 \times 12.5\text{cm}$ のすりガラスを設置することで作られた。ぼけの強さは、ディスプレイからディフューザーの距離によって調節され、距離の調節には、ねじ駆動の調節器を用いた。このような方法で、白

内障、円錐角膜、角膜損傷といったいくつかのロービジョンの見え方を再現できることを報告した。

観音ら [168] は、フィルタを用いてぼけを再現し、スネレン文字視標の読み取り正答率に及ぼす影響を測定したところ、ぼけに対する神経系の順応効果による正答率の向上が見られたとしている。

平井ら [161] は、高域、低域通過フィルタを行った文字パターンを、コントラストを徐々に上げながら提示し認識させたところ、文字パターン知覚に深く関与している空間周波数帯域は2~10 cpdであることを明らかにした。

これらの報告は、1文字を判別する課題においては、視力の因子が強く働くこと、特に文字判別に用いている2~10 cpdの空間周波数帯域を視力的にカバーできているか否かが重要であることを示している。一方、学習・生活場面における読書においては、視力要因以外の様々な要因が強く働くことを示唆するものである。

コントラスト感度要因

窪田ら [57] は、ディスプレイに表示した文字の読取り速度を高年齢群と若年齢群で比較したところ、高年齢群の方が若年齢群より14~22%低かった。この差は、低輝度低コントラスト条件で大きく、高輝度高コントラスト条件で小さくなったことから、高年齢群では、コントラスト低下による影響が若年者よりも大きいとしている。特に高空間周波数域(8~16 cpd)の、コントラスト感度の低下が認められ、読み取り速度との相関がみられたと報告した。

視野要因

樋渡ら [178] は、アイカメラを用いて、日本語文章のディスプレイに対する晴眼者の注視点の挙動を測定したところ、漢字混じりの日本語文章の読書の際、文字サイズや種類にかかわらず、一点における停留時間は平均約 0.27 秒であり、移動距離は平均約 3 文字であった。しかし、視野を制限すると、移動距離は 1 文字ごとに移動するようになり、読書速度の低下と認知力の低下がみられたと報告している。

森田ら [36] は、周囲に文字情報が存在する環境での横スクロール表示の読みについて検討したところ、表示可能文字数の増加に伴い、読書速度が速くなると報告した。

GORDON E ら [15] は、ドリフト文字列の読みにおいて、表示範囲が広くなるにつれて読書速度が増加するのは 4 文字までで、それ以上、表示範囲が広がっても読みレートに変化がないこと、文字のサイズによらないことを報告した。

小田 [65] は、求心性視野狭窄の場合、狭窄が高度になるまで読書に影響しないこと、日本語の場合でもアルファベットの場合でも、5~6 文字程度が視野に入っていれば顕著な読書の障害は起こらないことを報告した。

中心視野障害要因

池田 [121] によると、網膜は表 1.14 のように区分される。周辺部においては、偏心度に伴う錐体細胞の減少から色覚劣化し、神経節細胞、視細胞の減少による視

表 1.14 網膜の偏心率による区分

区分名称	偏心率
中心小窩 (foveola)	~0.7°
中心窩 (fovea)	~2.6°
傍中心窩 (parafovea)	~4.3°
周中心窩 (perifovea)	~9.5°
近中心部 (near periphery)	~14.5°
中周辺部 (middle periphery)	~25°
遠周辺部 (far periphery)	25° 超

力の低下が起こる。皮質において投射される皮質上の範囲が視野中心部では相対的に広く周辺部では狭くなることから、周辺視における皮質拡大係数は低下する。このように、網膜レベルでも皮質レベルにおいても、周辺視は中心視と比較して多くの機能で劣る。特に形体視は周辺視では劇的に低下する。加齢黄斑変性症では黄斑部の変性により中心視野が欠損し、著しい視力低下が起こる。この場合、移動やリーチングなどにはほとんど影響が出ないが、高度な読書障害が起こる。

川嶋 [45] は、中心視野障害のあるロービジョン者と、ないロービジョン者を対象として、漢字仮名混じり文と平仮名单語の読み刺激の成績を調べた結果、中心視野障害があるロービジョン者では、他のロービジョン者とは異なる特有の要因による読書困難が起こっている可能性を示唆した。

山本ら [129] は、周辺視野では視力が低下し、文意の理解が読み速度に影響しないこと、1回の凝視で同定できる文字数の減少がみられることを報告した。

小田 [67] は、加齢黄斑変性症では、読書速度の上下が激しく変化したり階段状に漸増したりする曲線が得られること、文字サイズを大きくしても読書測度が高

め安定のプラトーを形成しないで単調増加になり，読書測度の絶対値は100文字/分を切るとした特徴があることを報告した。

網膜の暗点内部に島状に見える部分がある場合には，その部分だけが高い視力を保持する。この場合，単語を提示すると，感度の良い小窓のような部分を使って読もうとする。そうした小窓がない場合，通常は暗点のすぐ外側の特定の場所を使って単語を読もうとする。こうした中心暗点のある者が読書の際，好んで用いる部位はPreferred Retinal Locus (PRL) と呼ばれる。Fletcherら [8]によると，ロービジョン者の84%はPRLを確立しているという。中心暗点のあるロービジョン者で，視力検査や読書評価の値が安定しない理由として，複数のPRLを使い分けている可能性が指摘されている。

1.3.3 書体の最適化

可読性の高い書体の開発

書体には，その文字の骨格，線幅，ふところ，重心などといった要素が含まれ，様々な種類の書体が開発されている。ふところは，画と画が構成している内側の空間を指し，ふところの広さは混み合い度と密接な関係がある。重心は文字のバランスの中心がどのあたりであるかをいい，文字のもつ緊張感，品格，安定感，親しみに関与している。

文字重心の位置を評価することにより可読性の高い書体を開発する試み [90]，小

型の液晶画面におけるユニバーサルデザインとして、小さい文字サイズであっても誰にでも読みやすい書体を開発する試み [140] などが報告されている。

ロービジョン者に適した書体の選択

宮下ら [47] は、同じ文字サイズであっても、書体の太さにより文字の見やすさは異なるとして、JIS 規格 高齢者・障害者配慮設計指針-視覚表示物-日本語文字の最小可読文字サイズ推定方法から、年齢に合った読みやすい文字サイズを算出し、その文字サイズにおける見やすい書体の太さと視距離の関係について検討した。

氏間 [172] は、晴眼者を被験者として、漢字の混み合い度と線幅を要因、識別サイズと構造確認サイズを従属変数として、晴眼状態と白濁フィルター状態における混み合い度と線幅の関係を検討した。ロービジョン者の文字の認識において混み合い度は重要な要素であり、透光体混濁のあるロービジョン児に漢字を指導する場合、漢字の構造が単純であれば線幅を太めに設定し、構造が複雑であれば線幅を細めに設定することで構造を捉えやすくなると報告した。

井上ら [53] は、建物等に掲示する案内表示に関して、高齢者やロービジョン者にも分かりやすい書体を検討したところ、文字はロダン、数字はセンチュリーゴシックの可読性が高かったと報告した。

Russell-Minda ら [25] は、欧米の書体としては、Times New Roman のようなひげ飾りのある文字よりも、Arial や Verdana などのひげ飾りのない文字がロービジョン者にとって読みやすいことを報告した (図 1.9)。

ABCDXYZ abcdxyz	01234	Times New Roman
ABCDXYZ abcdxyz	01234	Arial
ABCDXYZ abcdxyz	01234	Verdana
ABCDXYZ abcdxyz	01234	Impact

図 1.9 欧文書体の例

書体の最適化	HG 教科書体
書体の最適化	MS 明朝
書体の最適化	MS ゴシック
書体の最適化	HG 創英角ゴシック UB

図 1.10 日本語書体の例

日本語の書体については，石田ら [112] が，ロービジョン生の読みやすい文字を調査している．ロービジョン生で明朝系の文字を好む者は少なく，14ポイント程度の文字サイズを使うロービジョン生は，MS ゴシックなどのあまり太くない文字を好むこと，それよりも大きい文字サイズを使うロービジョン生は，MG ゴシックやHGS 創英角ゴシックなどの，より太い字体へと読みやすい書体に移っていくと報告した（図 1.10）．

1.3.4 文字サイズの最適化

標準的な文字サイズ

JIS 高齢者・障害者配慮設計指針—視覚表示物—によると、より多くの人にとって、読むことのできる日本語文字の最小可読文字サイズは次式で求められる。

$$P = aS + b$$

ただし、 P は最小可読文字サイズ、 S はサイズ係数、 a と b は文字種やフォントごとの係数とする。

この方法は、ロービジョンではない大勢の人にとって見やすい標準的な表示物の文字サイズを決定するのに有効な方法である。これに対して本研究では、ロービジョン者一人ひとりに適した文字サイズを求める方法を探求していく。

文字種と文字サイズ

「人」のような単純な漢字や平仮名は、アルファベットと同程度の視力しか必要としないが、「ポ」と「ボ」を区別するためには、それよりも高い視力を必要とする。小田ら [65] は、漢字の方がアルファベットと比較して約2倍の解像度を必要とするとしている。同じ視力ならば、日本文を読む時には、欧文を読む時より文字サイズを倍に拡大しなければならず、漢字文化圏ではロービジョン者のハンディキャップは大きいという。

漢字の複雑さと文字サイズ

中根 [153] は、視距離による見え方の差異は、視対象のなす視角が同じであれば無視できるとし、見やすい文字サイズは、視角として扱うことで、机上の読書材料から黒板に提示する読書材料の文字サイズを規定できるとした。ロービジョン者に最適な文字サイズを推定する方法として、字を読むために識別が要求される細部の寸法は、2画の漢字で文字寸法の $1/11$ 、8画の漢字で文字寸法の $1/14$ 、23画の漢字で文字寸法の $1/19$ から、計算によって求められると報告した。

読書評価と読み刺激の統制

Sloan ら [27] は、読書評価に用いる刺激を、字一つ視標ではなく、長さや文字の間隔などの物理特性を統制した文章を用い、視距離を固定して読書評価を行った。提示する文字サイズを大きな刺激から徐々に小さくして、容易かつ快適に読書できる最も小さい文字サイズを最適文字サイズと判定した。

北尾 [170] は、大学生を被験者とし、平仮名文と漢字混じり文の読みやすさを比較したところ、それぞれの読みやすさは言語経験の有無の差によって異なるとし、高次の言語理解が読みに影響することを示唆した。

一方、小田 [66] は、同じ内容の文章を2週間の間を置いて2回読ませた実験では、記憶の効果は有意にはならず、被験者の主観的な記憶の程度と読書成績に相関はなかったことから、読書材料の制御によって高次の言語理解・記憶の関与をある程度均一にできることを示した。

MNREAD による最適文字サイズの推定

Legge ら [16] は、読書に適した文字サイズの推定値として、臨界文字サイズを用いる評価法 MNREAD (The Minnesota Low-Vision Reading Test) を提案した。MNREAD を用いて計測される、1 分間に正確に音読できた文字数を読書速度 (文字/分)、読書速度を文字サイズの関数で表したグラフを読書曲線 (reading curve) [20] という。読書速度を落とさずに読むことのできる最小の文字サイズを臨界文字サイズ (critical print size : CPS), 文字サイズが読書するのに適当な条件で提示されたときの読書速度の平均値を最大読書速度 (maximum reading speed : MRS), 文字を文字として知覚できる最小の文字サイズを読書視力 (reading acuity : RA) という。

MNREAD-J 及び MNREAD-Jk

小田 [91] は、MNREAD の日本語化を行って MNREAD-J を開発した。MNREAD-J で用いられる刺激文は 30 文字からなり、8 文字の教育漢字を含んでいる。さらに、中村ら [123] は、小学生向けに合計 24 文字の平仮名 9 単語からなる MNREAD-Jk を開発した。このように日本語化された MNREAD を用いて計測された読書曲線を基に、様々な研究が展開された。

川嶋 [45] は、臨界文字サイズ前後の文字サイズにおいて、読書視力より大きな文字サイズは、臨界文字サイズを下回る文字サイズと比べて混み合い効果が生じないことを報告した。氏間ら [174] は、臨界文字サイズ付近で音読速度が大

大きく変化する要因を明らかにするため、バンガータフィルタを用いた低視力状態における検討をおこなったところ、臨界文字サイズ未満の文字で音読速度が低下する要因は、単語認識時間の延長によるものであると報告した。小田ら [69] は、晴眼者を被検者として、PC のディスプレイに MNREAD-J の刺激文を平成明朝体 W3 で提示して計測した。紙で実施した場合と比較して、若干の検査値の違い、計測時の読み誤りデータの取得が困難であるという問題を指摘しながらも、臨界文字サイズを決定するという意味では実用的な結果を得たと報告した。中村ら [125] は、加齢黄斑変性症の患者で通常の MNREAD-J 検査ではプラトーの見られない 14 例について、48 インチのプラズマディスプレイに 1.7 から 2.5 logMAR で刺激文を提示して計測を行うと、13 例でプラトーが観察されたと報告した。プラズマディスプレイを使うことで、1.30 logMAR までしか測定できない通常の MNREAD-J の幅を広げられることを示唆した。

読書評価の有用性

小田 [68] は、通常、人は閾値レベルで行動をするのではなく、余裕を持った閾上レベルで生活をしている。読書行動に関していえば、臨界文字サイズは視覚の処理行動が安定する刺激強度であり、効率が最大になる閾値であると主張した。武内ら [42] は、最大読書速度及び臨界文字サイズと視力の関係が見いだせない理由として、最大読書速度及び臨界文字サイズが、視野の状態や透光体の混濁の有無といった、視力以外の要因に大きく左右されることによると考察した。中村ら [124]

は、19名のロービジョン者に対し、新聞を読むために処方されたリーディングエイドの倍率は、視力から推定された値より、臨界文字サイズから推定される倍率の方がよく適合したと報告した。氏間ら [175] は、臨界文字サイズは、100 インチのディスプレイを 3 m の視距離で閲覧させるといった大型電子化提示教材の文字サイズの推定に利用できるると報告した。Subramanian ら [28] は、30名の晴眼者を被験者として、視距離条件を変えながら、MNREAD による計測の再現性を検討したところ、MNREAD を用いた臨界文字サイズ、最大読書速度、読書視力の計測は信頼性が高いと報告した。Yu ら [35] は、中心暗点の患者に対する周辺視野を用いた読書のトレーニング効果の検証方法として、MNREAD を用いることが有効であると報告した。Merrill ら [19] は、63 例の白子症の患者に対して、MNREAD を用いて印刷文字サイズを決定することが就学・就労において有効であったと報告した。Virgili ら [32] は、76 例の網膜色素変性症患者に対して、MNREAD を用いた読書評価及び視力、視野、コントラスト感度といった視覚特性の評価を行って検討したところ、ほとんどの患者で読書速度の低下がみられたこと、読書速度はコントラスト感度、視力、視野と相関することを報告した。

中心暗点の有無と最適文字サイズ

Legge ら [15] は、ドリフト文字列の視認において、中心視野が利用できる場合では視角が $3.0\sim 6.0^\circ$ で読書速度が最大となるのに対し、視野の中心に暗点がある場合 [14] では視角が $12\sim 24^\circ$ で読書速度が最大となったことから、中心暗点のあ

る場合では最適文字サイズが大きくなることを示した。Chungら [7] は、視野の偏心度が増すと最大読書速度は低下し、臨界文字サイズは大きくなることを示した。Fletcherら [9] は、MNREAD を用いて暗点の状態と読書速度の関係について評価した。Cheungら [6] は、加齢黄斑変性症などによる中心暗点があり、MNREAD の読書速度の結果に欠損値がある場合では、2本の直線をフィッティングする方法より、指数減少関数を用いる方が読書曲線によくフィットすると報告した。

1.3.5 窓範囲の最適化

拡大鏡、拡大読書器、画面拡大ソフトを使用する際、表示枠のサイズは固定である。求心性視野狭窄者における視野範囲も固定であるという点で、前述の表示枠と同様に考えることができる。このような一定の枠に表示できる視対象の範囲を「窓」と定義する。拡大鏡、拡大読書機、画面拡大ソフトの拡大率を上げる、あるいは提示文字サイズを大きくするほど窓に表示できる文字数は減少する。したがって、窓における表示可能文字数と拡大率はトレードオフの関係にある。こうした窓に、同時に何文字を提示できれば良好な読み効率が得られるかという問題は重要である。

Leggら [15] は、スクリーンに同時に見える文字数を制限し、読書時の最適窓サイズについての検討を行った結果、サッケードを固定させて計測すると、表示サイズが4文字まで読みレートが増加した。Paulton[22] は、窓を通したドリフト文字列の読み効率を測定したところ、窓サイズが7~8文字にかけて読み効率が増加

した。小田ら [65] は、日本語の場合でもアルファベットの場合でも、5～6文字程度が視野に入っていれば顕著な読書の障害は起こらないと報告している。

これらのことから、良好な読書効率を得るためには、最低5～6文字を窓に表示できる必要がある。5～6文字分を納めるに必要な視野の広さは視力の影響を受ける。視力が低い場合、文字を拡大するので、5～6文字文を表示するためのより大きな視野範囲を必要とすることになる。

さらに生活・学習環境における実用的な文書の閲覧においては、視対象を一覧してレイアウト情報を取得し、全体の構造を理解した上で、自らのナビゲートにより効率的に情報にアクセスする。したがって、ロービジョン者の、より快適な読書環境を実現するためには、文字の視認性の確保と一覧性の確保を必要に応じて切り替えながら使い分けられるようにすることが必要である。

1.3.6 コントラストの最適化

ロービジョン者の多くは、晴眼者と比較してコントラスト感度が低下している [153] ので、良好な視認性を確保するためには、十分な背景輝度及びコントラストを必要とする [86]。高齢者についての研究としては、岩田ら [78] が高齢者90名と若年者5名とで、視距離1 mから漢字とランドルト環視標を背景輝度を変えながら提示した時の、読みやすい輝度、やっとな読める輝度を計測した研究がある。高齢者の最も読みやすい背景輝度は、若年者の1.2～3.1倍、高齢者のやっとな読める輝度は、若年者の4.9～18倍であったことから、高齢者では若年者に比べて文字を

読むのに高いコントラストが要求されることを報告した。窪田ら [57] は、視覚特性が文字の読取り速度に及ぼす影響を高年齢群と若年齢群で比較したところ、高年齢者では特に高空間周波数域 (8~16 cpd) のコントラスト感度の低下が認められ、読み取り速度との相関がみられた。ことから、高年齢者に対しては、十分な表示輝度とコントラストの確保に加え、文字線幅が太く、ふところが広い書体を用いるのがよいと指摘した。中根 [153] は、字画が2画~18画と増せば、視認に必要な背景輝度は0.1 から $1.0\text{cd}/\text{m}^2$ へと約10倍増加するとしていることから、より画数の多い文字を視認するためには、さらに十分なコントラストが必要であると報告した。田中ら [169] は、ロービジョン児の用いる拡大教科書の地図における、コントラストを確保するための配慮として、拡大教科書作成において、地図等の中に文字を表記する場合は、背景の地図に対して文字のコントラストを確保するために、白抜きにするか、引き出し線により地図とは別な個所に文字を記述するべきだと指摘した。

1.3.7 正のコントラスト, 負のコントラストの選択

岩田ら [79] は、晴眼者において、視力0.2よりも小さいランドルト環視標は、負のコントラスト条件の方が、視力0.2よりも大きいランドルト環視標は正のコントラスト条件の方が視認性が高いことを報告した。これは視対象の光滲現象に起因するものと考えられる。一方、Legge[13] は、正のコントラスト条件と負のコントラスト条件とでは、晴眼者の読書速度に影響しないことを報告した。これらの

ことから、晴眼者においては、正のコントラスト条件と負のコントラスト条件で、見え方の細部でいくらかの相違はあるものの、読書速度に影響するほどではないといえる。

一方、ロービジョン者においては晴眼者とは異なる結果となっている。Leggeら [15] は、透光体の混濁がある場合では混濁が無い場合と異なり、正のコントラスト条件の方が負のコントラストに比べ最大読書速度が高く、臨界文字サイズが小さくなることを示した。渡邊ら [136] は、晴眼者を被検者として、ロービジョンシミュレーションレンズを用いて視力検査を実施したところ、屈折異常条件と混濁条件において、正のコントラスト条件のほうが、負のコントラスト条件より logMAR 値が有意に低いと報告した。これらのように、正のコントラスト条件と負のコントラスト条件とで見え方が異なる場合、「コントラストポラリティ効果が見られる」と表現する。

白内障の進行により、コントラストポラリティ効果の割合が増大することは、塩治ら [46] や小林 [96] が報告している。中野ら [117] は、透光体混濁のあるロービジョン児のコントラストポラリティ効果を確認し、白文字黒背景の教材を作成してその有効性を示した。同様に、村上ら [114] はロービジョン生に対する教材として、文字サイズのみでの対応では不十分であるとし、黒色用紙に白文字の教材を作成するシステムを作成して用いている。高橋ら [106] は、3文字の平仮名をディスプレイに表示し、0.1 log スケールで縮小しながら被検者に音読させる時の所要時間を、正のコントラスト条件と負のコントラスト条件とで比較することにより、コ

ントラストポラリティ効果の有無を計測している。その結果、晴眼者ではコントラストポラリティ効果は見られず、ロービジョン者では、読書速度の比較において、正のコントラスト条件の方が速い者と、逆に負のコントラスト条件の方が速い者がいたことを確認し、各々に適したコントラスト条件でPCのディスプレイ表示を最適化したと報告した。

1.3.8 色の最適化

主に、色覚異常に対する、色の最適化について述べる。

楠本ら [139] は、色覚に関する学校検査・保健指導のあり方について検討するため、色覚異常者の生活上の色覚実態調査を行った結果、1回のみ検査で全ての色覚異常者を発見できないこと、特に美術・理科の教科で色使いに関する配慮が必要であること、低学年の早い時期からの教育的配慮が必要であることなどを指摘した。目黒ら [158] は、処理対象のカラー画像の色による領域分割を行い、それぞれの領域の代表色同士の色弁別がしやすいか否かを判定し、弁別が難しい領域の色の値を変換させることで、二色型色盲にとって知覚しやすいカラー画像を生成するシステムを開発した。田中ら [134] は、原画像の持つ色彩をなるべく変えずに色覚異常者にとって視認性の良いカラー画像を作成する手法として、Color2Gray アルゴリズムによりカラー画像をモノクロ化した後、色の違いと明度情報が色覚異常者の感じる明度成分とが一致するように、原画像の色を変換する手法を提案し、有効性を確認したと報告した。星野ら [108] は、カラー画像中に含まれる全て

の色の組み合わせにおいて、色の弁別が可能なように、アニーリング法を用いて画像内の色の修正を実現する手法を提案した。内山ら [138] は、(1) Web ページがロービジョン者や色覚障害者の方にとっても読みやすくなっているかを診断する「WebInspector」、(2) Web 制作者が Web ページの背景色と文字色の最適な組み合わせをリアルタイムに確認可能にする「ColorSelector」、(3) 制作された Web ページの文字や動画像の色合いが色覚障害者にとってどのように見えているかをシミュレーション表示する「ColorDoctor」という、3つのツールを開発・提案した。

1.3.9 照度の最適化

照度と見え方の関係

直射日光下の照度は約 100,000 lx であり、この時の見え方を明所視という。これに対して、月明かりの夜の照度は約 0.001 lx で、この時の見え方を暗所視という。明所視と暗所視との間に薄明視がある。薄明視下では錐体と桿体の両方が働き、明所視や暗所視とは色の見え方が異なる。菊池ら [50] は、薄明視、暗所視、明所視における色の見え方を予測するモデルを作成して、照度の色の見え方に与える影響を明らかにした。中根 [153] は、8 ポイントの文字の読書に適切な照度の範囲は、白熱電球の視野内均一な拡散光で 500~1400 lx、蛍光灯では 500~5500 lx であるとし、光源の種類により適切な照度が異なること、文字の画数が 2 画~18 画と増せば視認に必要な背景輝度は約 10 倍に増加することを報告した。

晴眼者における照度の最適化

日本工業規格 Z 9110 の照度基準では、最低照度を教室は 300 lx、図書閲覧室は 500 lx としている。文部科学省学校環境衛生基準では、教室及びそれに準ずる場所の照度は下限値を 300 lx として 500 lx 以上、コンピュータ教室等の机上の照度は 500～1000 lx、テレビやコンピュータ等の画面の垂直面照度は 100～500 lx 程度が望ましいとしている。まぶしさに対しては、児童生徒等から見て、黒板の外側 15° 以内の範囲に窓からの日光等の輝きの強い光源がないこと、見え方を妨害するような光沢が黒板面及び机上面にないこと、見え方を妨害するような電灯や明るい窓等がテレビ及びコンピュータ等の画面に映じていないことと定めている。

高齢者における照度の最適化

岡嶋ら [75] は、高齢者の照明基準を検討する上で考慮すべき視覚の加齢効果の一つに、水晶体の加齢変化があると報告している。加齢に伴う水晶体の白濁、黄変、縮腫などがあり [33]、光の透過率が減少するため、網膜に到達する光量が低下する。そのため、同じ照明光でも若年者より高齢者の方が暗く感じられる [26]。したがって、高齢者では一般的に、照度が高く文字の視角が大きいほど文字が読みやすくなる [165]。岩田ら [77] によると、高齢者が若年者と同等の視認性を確保するには若年者の数倍程度の照度が必要であるという。田辺ら [135] は、照度と文字の読みやすさの評価値との関連を調査した結果、高齢者では最低でも JIS 推奨照度の上限に近い 700 lx が必要であるとしている。若年者と高齢者で新聞を読む際

の最適照度を測定すると、高齢者の方が若年者よりも最適照度レベルが高いこと、若年者と高齢者の最適照度の差は、電球色の場合の方が昼白色の場合よりも小さいことを示した。

透光体混濁の照度の最適化

高齢者では、若年者に比較して高い照度を要求する一方、白内障による透光体混濁のためグレアが増大することから、高照度にするにも限界がある [100]。

高橋ら [52] は、晴眼者を被験者とし、白内障擬似体験フィルタを用いて、光源の照度と白濁の程度が、グレアの発生と視標に対する視認性、コントラスト感度に与える影響について調べた。その結果、照度レベルの上昇はグレアを増大させ視標の視認性を低下させること、照度レベルの上昇に伴う視標の視認性の低下は白濁の程度が強いほど顕著であること、低空間周波数視標よりも高空間周波数視標で白濁度と照度レベルに伴ってコントラスト感度の低下がみられることを報告した。

1.3.10 図形や線の最適化

線幅の最適化

谷村 [162] は、視力 0.03~0.2 のロービジョン生 12 名を対象として、確認距離の最低基準を 25cm とした時の線幅の見え方を検討したところ、線幅 0.1~2.5 mm

の直線のうち、全ての被験者で基準に達したのは0.5 mm以上の線幅の直線であったと報告した。これは、ポイントに換算すると約1.4ポイントである。谷村は、直線が並列している場合は、幅が太いと分離距離は大きくなり、幅の違った線を区別するためには、線幅以上の間隔が必要であることを示唆した。

小林 [97] は、ロービジョン者の認知可能な線幅について、最小視認閾ではなく、楽に見ることのできる線幅を有効線幅として求めている。10名の晴眼者を被験者として、白濁眼鏡による混濁、凸レンズによる屈折異常の2条件で、A4用紙に横7×縦5の35個の数字をランダムに配置し、左上の位置から20本の線で各数字を継いだ線をたどりながら数字を音読するのに要した時間を、認識しやすさの指標とした。線幅は0.1 mm～1.5 mmまで、対数で等間隔になるように10種類、実線、破線、点線、鎖線について検討している。その結果、中間透光体混濁の方が屈折異常より有効線幅が太いこと、点線は直線に比較して有効線幅が太いことを報告した。線幅の予測式として、

$$\text{中間透光体混濁} \quad y = 1.05 + 0.07x$$

$$\text{屈折異常} \quad y = 0.52 + 0.23x$$

を導いている。ただし x は近見視力である。

高橋ら [73] は、三角形、正方形、菱形、五角形、六角形、円形の図形から、ランダムに縦5×横5の25個をディスプレイに表示し、その中に五角形の図形が含まれる数をカウントするのに要した時間を指標として、線の見やすさを評価し

ている。赤，青，黄，白の各色ごとに，線幅を8，4，2，1ピクセルと変化させながら，色ごとの有効線幅を求めたと報告した。

図の最適化

田中ら [169] は，ロービジョン児童生徒のための拡大教科書について，各学校における使用状況と，指導担当者と生徒を対象に拡大教科書の評価に関する実態調査を実施したところ，解決すべき課題として，文字サイズやフォントなどの他，地図等の中の文字の表記方法，グラフ，レイアウトといった諸点を報告した。

谷村 [162] は，ロービジョン者にどの程度図や表を拡大修正すれば正確な視認識を与えるために有効なのかを検討するため，視力0.03～0.2のロービジョン生12名を対象として7種の基本的な図形の見え方を調べた。図形には，確認に必要な有効限界面積があり，三角形で 4 cm^2 ，正方形で 16 cm^2 ，六角形で 10 cm^2 ，円で 30 cm^2 であった。外接または交叉要素をもつ図形は変形して認識されやすく，内接または内包要素は，外形の影響で確認しにくい傾向があったが，用いる線の幅を修正すれば，解決が可能であることを報告した。谷村は，教科書中の図をロービジョン者に視認させやすくするための具体的な方策として，

1. 適切な倍率
2. 本質的必要性の少ない要素の除去
3. 十分な要素間隔

4. 全体的に線を太く修正
5. 主要部の強調
6. 線幅の違いによる要素の表現

を挙げている。

辰巳ら [48] は、拡大教科書作成作業における紙面上でのレイアウトについて、各ページに配置する図や文章などの要素の配置を、原本の内容を基に自動で行うアルゴリズムの開発を行った。試行後、アンケート調査で検証し、その有効性を報告した。

1.3.11 補助具の最適化

身体機能の障害を補い、日常生活又は社会生活を容易にし、自立と社会参加を可能とするための道具や手段等を補助具という。中でも、ロービジョン者の保有視機能を有効活用するための補助具は「視覚補助具」と呼ばれ、拡大鏡、単眼鏡、双眼鏡、光吸収フィルタ、カラーレンズ、フォトクロミックレンズ、偏光レンズなどが含まれる。それらのうち、特に読書に用いる視覚補助具を「リーディングエイド」と呼ぶ。

拡大鏡の倍率の最適化

五十嵐ら [55] は、拡大鏡の倍率を決定する方法として、

$$\text{倍率} = \frac{0.5 \sim 0.6}{\text{遠見視力}}$$

倍率 = 近見視力 0.8 が得られる倍率

の 2 法を示した。

Kestenbaum ら [10] は、視力に基づいて、新聞の文字を読むのに必要なレンズの屈折力は、遠見視力の逆数であるとした。例えば、遠見視力 0.1 のロービジョン者であれば、

$$\frac{1}{0.1} = 10D$$

となり、10 D のレンズが処方される。

表 1.15 のように読書に必要な視力を予め求めておいて、ロービジョン者の視力との比から、読書に必要な倍率を求める方法

$$\text{倍率} = \frac{\text{読書に必要な視力}}{\text{ロービジョン者の視力}}$$

が示された。こうした方法はいずれも、機能評価モデルによる拡大鏡の最適化手法である。

行動評価モデルによるものとして、氏間 [84] は、ロービジョン児に対して、視距離を自由にした MNREAD-Jk を実施し、拡大鏡の選定と訓練の適切性の評価を行っている。実施日を独立変数、読書速度を従属変数とした 1 要因分散分析の結果、拡大鏡が妥当に選定され利用されていることが確認できたと報告した。

表 1.15 読書対象物と必要な視力

読書対象	必要な視力	研究者
米国の新聞	0.4	Sloan ら [27]
教科書 (3号)		湖崎 [54]
平仮名	0.1	
漢字	0.2	
新聞 (9ポイント)		
平仮名	0.3	
漢字	0.4	
辞書 (6ポイント)		
平仮名	0.5	
漢字	0.6	
新聞の本文	0.5~0.7	永井 [43]
文庫本	0.4~0.5	
学校の黒板の字を最前列で読む	0.3	

拡大読書器の最適化

拡大読書器とは、ロービジョン者が主に紙を媒体として記述された文字や図を拡大して見るための拡大器である。カメラで視対象物を撮影し、視覚特性に応じた処理を行ってディスプレイに表示する。据置型から携帯型まで、様々なタイプが製品化されている。

岡田ら [103] は、拡大読書器の改良ニーズを明らかにするためアンケートを実施し、約 100 例について分析したところ、小型軽量であること、接写可能であること、厚い資料が読めること、フォーカスが的確に合うこと、被写体深度が深いこと、高画質であること、着脱可能なカメラであること、黒板を写せることが挙げられた。伊藤ら [80] は、筑波技術大学のロービジョン生に対して調査したところ、

拡大読書器の選定においては、用途に応じた選択が必要であることを示唆した。平山らは、拡大読書器の携帯性を高めるために、ヘッドマウントディスプレイを用いて携帯性を高める取組 [148] や、従来、光学的な処理が中心であった拡大読書器をコンピュータを使って画像処理を行う取組 [149] を報告した。青木ら [51] は、拡大読書器にデジタル画像処理技術を用いて文字や線の太字化、特定の色の変換やブリンクなどの処理をし、ロービジョン者の視認性向上に有効であったことを報告した。

1.3.12 PC 操作環境の最適化

ロービジョン者は、画一的に見え方を規定することが困難である [107] ため、一人ひとりのロービジョン者の視覚特性に応じて、PC 操作環境を最適化する必要がある。ロービジョン者のディスプレイに対する視認性の要素として、視力、視野、コントラスト感度、コントラストポラリティ効果の有無などがあり、それらに応じて、配色、文字サイズ、線幅等の設定をしたり、拡大して表示する、マウスポインタを強調するといったエイドを処方する必要がある [106]。

操作環境、姿勢、視距離の最適化

岩切ら [37] は、晴眼者を対象として、VDT 作業者の身体的疲労感に影響する諸因子の検討をするため、職場における VDT 作業者のアンケート調査を行ったところ、眼の痛み・疲れが 72.1 %、首・肩のこり・痛みが 59.3 %、腰のこり・痛み

が30,0 %，手・腕の痛み・疲れが13,9 %であった。改善希望として，グレア対策，キーボード・マウスの形状及び操作位置の改善，椅子の座り心地の改善などが報告された。

見え方に困難のあるロービジョン者にとっては，晴眼者が増えて，PC操作環境の影響を強く受けることが予想される。特に透光体混濁のある場合では，対光によるグレアが発生しやすいので，ディスプレイと窓の位置，ディスプレイへの映り込みについて注意が必要である。さらに，VDT作業における疲労回避の観点から，焦点距離に基づいた適切な視距離において，楽な姿勢を保持できるようにディスプレイの設置位置を決める必要がある。机の高さ，椅子の高さ，ディスプレイ，キーボード，マウスの設置位置，外光の遮光など，ロービジョン者の体格や視覚特性に応じて適切に設定する。

視覚特性に応じた視距離の決定については，中野[116]の報告にあるように，ロービジョン者では，ランドルト環を視標とした時の視距離調節の精度は低い，平仮名を視標とした場合の視距離調節の精度は良好であることから，視対象文字のサイズに応じた視距離調節が可能であると考えられる。すなわち，より小さい文字を閲覧する時には視距離を短く取り，大きな文字を閲覧する時には視距離を長く取ることで，視認できる文字サイズに幅を持たせることが期待できる。

コントラストの最適化

Leggeら [13] は、晴眼者において、正のコントラストと負のコントラストでは読書速度に影響しないことを報告した。一方、森本ら [39] は、VDT 画面の正のコントラストにおける文字輝度と負のコントラストにおける背景輝度について、作業をするのに好ましい値を求めたところ、ともに約 30 cd/m^2 であったこと、正のコントラストの方が負のコントラストよりも好みの評価は高いが、作業による疲労は負のコントラストの方が小さい傾向にあったことを報告した。

ロービジョン者については、Leggeら [15] の報告により、コントラストポラリティ効果が見られる場合では、正のコントラストと負のコントラストのいずれかを選択することで、最大読書速度が速く、臨界文字サイズは小さくなることが期待できる。さらに、ロービジョン者のコントラスト感度の低下があれば、ハイコントラスト黒、ハイコントラスト白などの、ハイコントラスト配色を適用する。

文字サイズの最適化

ディスプレイに表示する文字サイズの最適化の方法としては、次のような方法がある。数種類の文字サイズで文字列をディスプレイに試行提示し、その中からロービジョン者が読みやすいと感じる文字サイズを選好させる方法、MNREAD-J の刺激文あるいは統制された 3 文字の平仮名を文字サイズを変えながらディスプレイに表示した時の音読速度に基づいて最適文字サイズを決定する方法 [73] である。前者は主観的評価モデル、後者は行動評価モデルに基づくものである。

最適文字サイズの決定後，可能な限り画面全体の要素を最適文字サイズに設定する．しかし，文字サイズと画面に表示できる文字数は，トレードオフの関係にある．中心暗点などで視力が低い場合は，最適文字サイズが大きくなり画面に表示できる文字数が減少して，返ってPCの操作性を低下させる．そのような場合には，文字サイズを標準のサイズに設定し，別途拡大ツールを使用して注目部分のみを十分な大きさに拡大して表示させる方法をとる．ロービジョン者の視覚特性によっては，岡田 [102] が指摘するように GUI とスクリーンリーダを併用することで，文章の推敲や文脈の誤りの修正が GUI だけを使った場合より容易となり，眼の負担も少なくすることが期待できる．

マウスポインタの最適化

マウスポインタを強調表示して視認性を向上させる方法として，Windows スタANDARD (特大のフォント) などの標準サイズより大きいマウスポインタを用いる方法，マウスポインタに軌跡を表示させることでマウスポインタを強調する方法などがある．小林 [118] が報告したように，1辺が75ピクセルの特に大きなマウスポインタを用いる方法やマウスポインタに縦横の十字ラインを表示するツールを用いる方法もある．

高橋ら [106] は，マウスポインタを強調することによりマウス操作がスムーズになり，マウスポインタの軌跡の単縮が観察されると報告した (図 1.11) ．

ロービジョン者にとって，これらのような方法によるマウスポインタの強調は，

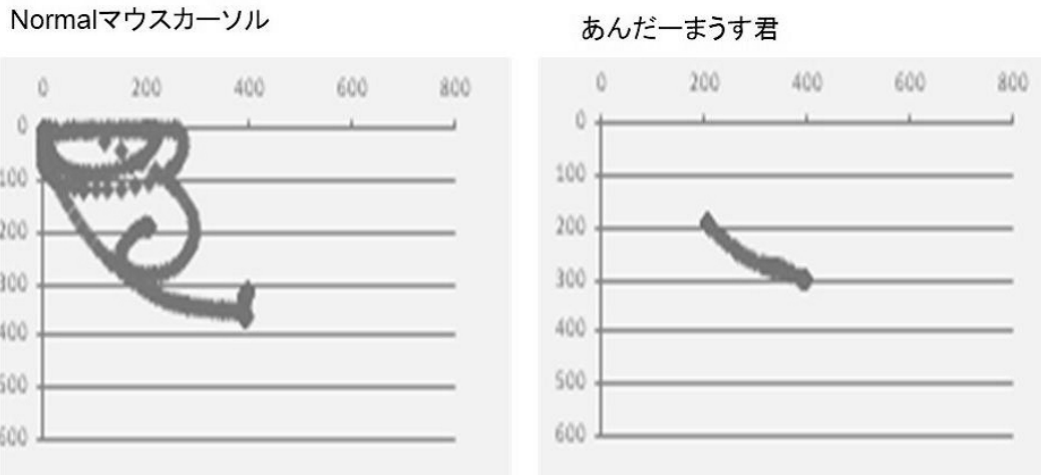


図 1.11 マウスポインタの軌跡に見る操作性の改善

操作時間の単縮に有効である反面，ポインティングの正確性を低下させるという報告 [106] もあることから，どの方法を適用させるかについては，視覚特性に応じた適切な選択が必要である。

最適化ツールの必要性

本節で述べてきた PC 操作環境の最適化によって，ロービジョン者の PC 操作におけるユーザビリティが高められ，作業効率の向上，疲労軽減，PC 操作習得の円滑化を図れることが期待される。しかし，一人ひとりの視覚特性に応じて PC 操作環境を最適化するためには，支援者の PC に関する技術はもとより，ロービジョンについての専門的な知識を要する。だが，そうしたサービスを提供できる人材が限られており，ロービジョン者が視覚特性に応じた PC 操作環境を獲得することを困難にしている。このことが，ロービジョン者における PC 利用率を低めている

理由の一つであるということは否定できない。ロービジョン者が学校や職場、自宅などで、自ら視覚特性やディスプレイに対する視認性を計測しながら、最適な文字サイズ、線幅、配色の決定、拡大表示、マウス操作支援ツールの処方を行える支援プログラムが必要である。そのことにより、各々のロービジョン者が視覚特性に応じた PC 操作環境を手に入れることができるようになると期待される。

1.3.13 Web ページの閲覧環境の最適化

Web ページの利用環境の最適化は、PC 操作環境の最適化をベースとし、さらに Web ページ特有の要素についての最適化を検討する必要がある。

山西ら [82] は、白内障の人に見やすい Web デザインを、文字サイズ、配色、メニューデザイン等の要素について検討したところ、文字サイズは基準値 3 以上、配色輝度比 5 以上、メニュー項目数の制約などが有効であると報告した。小林ら [118] は、高齢者が PC で Web ページを閲覧する際の難点の解決方法を検討したところ、全ての文字を大きくするのではなく、マウス操作に関係するリンク対象の視認性を高めたりマウス操作を容易にしたりする必要性を指摘し、マウス操作支援ツールを開発・提案した。前田ら [88] は、従来の Web ページのアクセシビリティチェックツールは、HTML 文書のタグや属性を解析するものであり、ロービジョンにとってのメニューやページの読みづらさに関しては、チェックできる範囲が限られていると指摘した。そこで画像変換技術によって、Web ページ全体をロービジョン者の見え方をシミュレートした画像に変換し、読みにくいと思われる箇所を検出す

る手法を提案した。その結果、視力低下、コントラスト感度低下、透光体混濁、色覚異常などについて読みづらい箇所を検出し、見やすさの改善につながったと報告した。

高橋ら [72] は、Web デザインのユーザビリティに与える影響を明らかにするため、全盲者、ロービジョン者、晴眼者の3群を被験者とし、表形式リンクメニューと縦列形式リンクメニューの2種類の Web デザインにおいて、ターゲットリンクを探しクリックする課題の遂行時間、フォーカス遷移記録、アンケート調査結果を分析することにより、実証的にユーザビリティの評価を行った。その結果、全盲者では晴眼者ほどデザインによる影響を受けず、ロービジョン者では各人の視覚特性に応じてデザインをカスタマイズできることが重要であると報告した。

一人ひとりのロービジョン者に Web ページの表示をカスタマイズする方法として、氏間ら [30] は、文字サイズ、配色、文字間隔、行間隔、1行文字数、フォントをキーボードによる選択操作で決定し、それに応じた CSS ファイルを cookie に保存するツールを開発した。印刷物の閲覧と比較して、カスタマイズされた Web ページの利点は、正のコントラスト条件の採択が容易であること、検索に要する時間が短いこと、リフロー効果がえられることであると報告した。

1.4 視環境最適化における課題

1.4.1 視標の問題点

視環境を最適化する上でユーザの視覚特性の計測及び、視環境の評価を行うことは必須であり、その際に用いる視標についての検討は重要である。ここでは、ディスプレイに表示してその視認状態を評価する際に用いる視標について検討する。視標に必要であると考えられる条件は以下のように考えられる。

1. ディスプレイに歪みなく表示できること

ユーザのディスプレイに対する分解能を計測しようとする際、分解能の最小値は1ピクセルであるから、1ピクセルの分解能を計測する視標を歪みなく表示できる必要がある。

2. ユーザがカーソルキーやテンキー、ジョイスティックなどを使って視認状態を簡単に回答できること

計測は検者の介在なくユーザとコンピュータとのやりとりで行えるよう、視認結果を「上、下、左、右」等で回答できる必要がある。

3. 速やかに判定できること

視認性の計測から視環境の最適化までの作業をできるだけ短時間に行うためには、視標の視認可否の判定はできるだけ速やかに行える必要がある。

4. 形状がコンパクトであること

視野狭窄のあるロービジョン者では、視標のサイズが大きいと視標全体が視野に入らず、視標の切れ目方向の判別時間の遅延が発生し、正確な計測ができない。視標は小さくまとまりのある形状、すなわち「コンパクト」である必要がある。

これら4つの観点で、従来から使われてきた一般的な視力測定のための視標について考察する。

ランドルト環についての検討

ランドルト環は、フランスの眼科医エドモンド・ランドルト (Edmund Lundolt 1846-1926) によって開発された直径：円弧の幅：切れ目幅 = 5 : 1 : 1 の黒色の円環である。1909年にイタリアの国際眼科学会で、国際的な標準視標として採用された。ランドルト環についての研究として、以下のようなものがある。

「読み」の研究分野では、小田 [11][12] は、有意味文字列同様、ランドルト環の判別に関しても臨界文字サイズ、最大読書速度が存在すると述べた。コントラスト98%条件で、背景輝度を $78 \sim 0.09 \text{ cd/m}^2$ まで変化させながら、ランドルト環の判別速度を計測したところ、判別速度を落とさずに判別できる輝度点が存在、その輝度点を下回ると急激に判別速度が低下したことから、臨界文字サイズに相当する輝度点があることを報告した。

視環境の視認性に与える影響についての研究分野では、背景輝度がランドルト環の視認閾値に与える影響についての研究 [74]、霧の粒子直径の違いによる濃霧中での視認特性への影響をランドルト環を用いて定量的に測定した研究 [120]、色が細部識別閾に与える影響を明らかにした研究 [159] がある。

高齢者やロービジョン者の視覚特性を明らかにしようとする研究分野では、ランドルト環の大きさ・輝度対比・必要背景輝度を変化させながら高齢者の視認能力に関する基礎資料を得ようとした研究 [79]、ランドルト環を PC の液晶画面の任意の位置に提示して中心外視力を測定した研究 [64] がある。

視標としてのランドルト環についての研究分野では、視標の主要点での実効輝度を計算によって求め、視標の大きさとの関係を明らかにした研究 [115]、実視標及び VDT にランドルト環を提示した際の調節刺激反応の相違についての研究 [130] 等が挙げられる。

ランドルト環の切れ目方向を判別する際に用いられる空間周波数成分についての研究分野もある。小田ら [70] は、ランドルト環を視標にした時の最大視力が縞視力表で測定した視力より 2~3 倍良いことについて、視標との距離を統制したすりガラスを通してランドルト環を観察する実験により、ランドルト環の切れ目の方向を伝える視覚情報が、切れ目や縞の幅よりも低い空間周波数で伝達されていることによるものであると報告した。Valeria ら [4] は、ランドルト環の切れ目方向を判別する時に用いられる空間周波数を明らかにするために、ランドルト環の二次元フーリエ変換スペクトラムを縦横方向から計算したところ、1.3 サイクルの低

い周波数成分と 2.5 サイクルの高い周波数成分を含んでいると報告した。小田の指摘した低い空間周波数成分とは、Valeria の指摘するところの 1.3 サイクルの空間周波数成分であると理解できる。

ランドルト環は、視力検査の視標として国際的にもスタンダードな視標である。しかし、ランドルト環をディスプレイに提示して視認状態を評価しようとする時、重大な問題を指摘できる。それは、曲線で構成されるランドルト環をディスプレイで忠実に描画できないという問題である。切れ目幅が小さくなるにつれて歪みは強くなる。

スネレン視標についての検討

スネレン視標は、オランダの眼科医 ハーマン・スネレンによって 1862 年に発表された。文字の縦横の幅：文字の線の幅 = 5 : 1 である。スネレン視標の「P」「O」「D」「C」は曲線で構成されるため、ディスプレイに歪みなく表示できない。さらにユーザが視認できたかどうかを回答する際、キーボードからこれらの文字を入力しなければならず、簡単に回答することができないという点でディスプレイに表示する視標としての条件を満たしていない。

E Chart についての検討

E Chart は、アルファベットの「E」を 90 度単位で回転させた視標で、ランドルト環と同様に、空いている側を切れ目としてその方向を回答する。文字高：文

字幅：線幅 = 5 : 5 : 1 である。E Chart は曲線を有さず直線のみで構成されており、視認できたかどうかを上下左右で回答できる点で、ディスプレイに歪なく提示して簡単に回答を得られるという条件を満たす。ただし、ランドルト環と比較してコンパクトではない。

Lea Test についての検討

Lea Test は、フィンランドの眼科医 Lea Hyvrinen によって 1976 年に開発された視標で、アルファベットの読めない幼少の子供でも回答できるように、円、四角、家、リンゴの形をした視標である。

円形とリンゴの形は曲線成分を含んでいる。家の形は斜線を含んでいる。したがって、ディスプレイに小さいサイズで描画すると歪む。回答方法においてもカーソルキーなどで簡単に回答することは難しい。さらに、コンパクトであるとはいえない。したがって、条件を満たしていない。

新しい視標の必要性

これらの検討から、現在のところ、ディスプレイに表示して視認状態を計測するための視標として、前述の 4 つの条件をすべて満たすものは見当たらない。したがって、新しい視標の開発が必要であると考えられる。

1.4.2 個々の学習・生活場面ごとの行動評価の必要性

一人ひとりに適した最適化が必要

小澤 [107] が指摘するように、ロービジョン者は画一的に見え方を規定することが困難で、その見え方は千差万別であるから、個々のロービジョン者の見え方を的確に捉えた視環境を構成する必要がある。

機能評価モデルの限界

読書に関しては、視力から臨界文字サイズや最大読書速度を推定することは困難である [15]。例えば、黄斑部変性症などのように視野の中心部が使えないロービジョン者では、視野の周辺部を用いて読書する。その際、読書に用いる視野の偏心度が臨界文字サイズ及び最大読書速度に影響する [7]。こうした視野の状態や透光体混濁の有無など、視力以外の要因が臨界文字サイズや最大読書速度に影響を及ぼすことが、視力のみによる機能的評価モデルの適用を難しくしている。443 眼について、視力から推定した文字サイズと読書による主観的な読みやすい文字サイズとを比較して、それらが異なるケースの方が多かったという Sloan ら [27] の報告からも明らかなように、読書に適した文字サイズの推定は、機能評価によってではなく行動評価によって行われるべきであるといえる。

行動評価モデルの有用性

中村ら [124] は、機能評価モデルにより推定した拡大鏡の倍率と、行動評価モデルにより推定した拡大鏡の倍率の、どちらが実際に処方された倍率に近かったかを調査した結果、行動評価モデルにより推定した倍率であったと報告している。その他、Yu, Deyue ら [35] の周辺視野を用いた読書のトレーニング効果の検証、Merrill ら [19] の白子症の就学指導への活用、Virgili ら [32] の網膜色素変性症の視覚特性と読書能力の評価、氏間ら [175] の大型電子化提示教材の文字サイズの推定など、行動評価モデルの有用性を示す多数の報告がある。

MNREAD-J の問題点

本節で述べたように、MNREAD-J は行動評価モデルとして、最適文字サイズの推定、拡大鏡の適正倍率の推定、読書環境の評価、トレーニングの効果の評価など、様々な場面において有用性を発揮するも、ロービジョン者の実際の学習・生活場面の各場面における視環境の評価法としてそのまま適用していくことについては、次のような問題点を指摘できる。

1. 書体の問題

ロービジョン者の読書への書体の影響については、「1.3.3 書体の最適化」節で述べたとおりである。ロービジョン者の学習・生活場面において、MSゴシック体やHGS創英角ゴシック体などの明朝体以外の書体が用いられてい

る場合、明朝体を刺激文としている MNREAD-J によって求められた臨界文字サイズや最大読書速度の信頼性に問題を指摘できる。

2. 漢字の複雑さの問題

常用漢字 2136 文字は、画数が 1~29 画の文字からなり、平均画数 10.5 画、標準偏差 3.8 である。これに対して、MNREAD-J で用いられている漢字の平均画数は 7.6 画である。1~8 画までに常用漢字の 32.0% が含まれるに過ぎず、これが対象ロービジョン者の読書物としての漢字の複雑さの水準を満たしているかという問題を指摘できる。

3. 漢字含有率の問題

MNREAD-J の刺激文に含まれる漢字の数は 8 文字である。前項と同様に、これが対象ロービジョン者の読書物としての漢字含有率の水準を満たしているかという問題を指摘できる。

4. 計測に要する時間と手間の問題

MNREAD-J では、刺激文の文字サイズを 0.1 log スケールで縮小しながら提示し、音読に要した時間や正読数をカウント、記録、分析する。1 回の計測に要する時間と手間は決して軽いものではない。

5. 学習・生活場面ごとの計測の困難さ

ロービジョン者の学習・生活場面における視環境を最適化しようとした時、

最適化が必要な場面は多数存在する。自室，職場，教室，居間，食堂といった各々の場面ごとに視条件が異なるので，各場面ごとに評価がなされる必要がある。しかし，前項で指摘した「計測に要する時間と手間の問題」が，場面ごとに評価することのハードルを高くしている。

1.4.3 より簡便な最適化手法の必要性

各々の場面で評価できる手法の必要性

窪田 [56] は，様々な光環境条件下で，晴眼者 30 名の被験者による主観評価実験を行った結果，各環境によって適正な輝度が異なることを報告した。ロービジョン者一人を考えた場合でも，その学習・生活場面は多数存在し，各々の場面において視環境の最適化が必要であることを意味する。そのためには，視環境の評価の簡便さは避けて通ることのできない重要な課題である。

最適な点を求めるのではなく，適切な幅の中に収める

中根 [153] は，印刷物の読み易さ評価で，最適の明るさでの読み易さを 100 点，やっと読める閾値の読み易さを 0 点とした場合，「普通に読める」明るさは 70 点であると報告した。ロービジョン者の視環境の最適化の目指すところは，100 点の環境や 70 点の環境ではなく，100～70 点の間に視環境を効率よく収めることである。すなわち最適化手法として重要なポイントは，最適な点が求められることではな

く、適切な幅に素早く効率よく収められることであると考えられる。

1.5 結論

以上のことから、ロービジョン者の学習・生活場面における視環境の最適化を素早く効率よく行うためには、より簡便な評価法が必要であることは明白である。そこで私は視環境の最適化のためのより簡便な評価法を研究するに至ったものである。

第2章 視覚特性評価に基づいた電子

黒板への教材提示法

2.1 目的

視覚障害教育の対象は、視覚を使わないで学習する全盲生と、視覚をできるだけ活用しながら学習するロービジョン生に大別できる。教師が、ロービジョン生の視覚特性に応じて教材を作成・提示することは、視覚障害教育において重要である。ロービジョン生の視覚特性のどの部分に着目して、それをどのように教材作成や提示方法に反映させるかを考えるとき、以下のような知見が参考になる。

Legge[17]は、16名のロービジョン者の視覚特性の重回帰分析を行ったところ、透光体混濁の有無と中心暗点の有無の説明率が高かったことから、これら二つの因子の有無でグループ化し、それぞれのグループにおいて、文字サイズ、コントラストポラリティ、ウインドウサイズ、文字間隔といったパラメータが、文章の読取速度に与える影響について検討した。Rubin[23]は、19名のロービジョン者に対して、コントラストが文章の読み取り速度に与える影響を検討し、読み取り速度が半分に低下するコントラスト（critical contrast）は、ロービジョン者では晴眼

者と比較して平均 3.9 倍高いこと、更に透光体の混濁があるロービジョン者では、コントラストポラリティ効果が得られやすく、白文字黒背景（以下 W/B）の読み刺激において高い読み取り速度をもつことを報告した。Legge ら [16] が開発した MNREAD を用いることで、臨界文字サイズ（Critical Print Size 以下 CPS）や最大読書速度（Maximum Reading Speed 以下 MRS）、読書視力（Reading Acuity 以下 RA）を計測できる。MNREAD は、小田ら [91] によって 1 サイズの刺激文が 30 文字からなる MNREAD-J として日本語化された。そして、中村ら [123] より、1 サイズ当たり平仮名 24 文字で構成される MNREAD-Jk が開発され、小学生に対して実施できるようになった。Virgili ら [32] は、網膜色素変性の患者 76 名 145 眼について MNREAD を用いて計測を行ったところ、MRS と中心視野（6°）の平均光感度との間に高い相関が、MRS とコントラスト感度および視力との間に有意に相関がみられたことを報告した。更に、高度の視野狭窄のある網膜色素変性患者に対して、大きな文字サイズや拡大補助具は有効ではないことを明らかにした。

小林 [97] は、中間透光体混濁と屈折異常の弱視シミュレーション、および、ロービジョン者を被験者として、支障なく課題遂行できる最小の線幅（有効線幅）を検討した結果、有効線幅は近距離視力（分）を予測変数 x 、線幅（分）を目的変数 y として、線幅の予測式 $y = 1.05 + 0.07x$ と、中間透光体混濁の予測式 $y = 0.52 + 0.23x$ を導いている。

ロービジョン者のコントラスト感度（Contrast Sensitivity Function 以下 CSF）

に関する知見としては、以下のようなものがある。伊藤 [141] は、晴眼者とロービジョン者を被験者として CSF を計測したところ、ロービジョン者では晴眼者に比較して全体的に感度の低下がみられること、晴眼者では 3～4 cycle per degree (以下 cpd) に、ロービジョン者では 0.3～0.5cpd に CSF のピークがあることを報告した。Arden[3] は、光学的異常では高空間周波数帯域が感度の低下を起こすローパス型になり、神経的異常では中・低空間周波数に感度低下を引き起こす傾向にあるとしている。Turano ら [29] によると、緑内障では中・低空間周波数帯域で感度が低くなることが報告されている。小沢 [89] によると、網膜色素変性では中心窩視力が残っている場合でもローパス型になっていることが報告されている。小田ら [94] は、15名のロービジョン者の CSF を計測して眼疾患別に検討した結果、CSF は眼疾患によって特徴的ではあるものの、同じ眼疾患でも異なる CSF を示したり、異なる眼疾患でも同じ CSF を示したりすることが多いことから、教育・リハビリテーション分野においては、眼疾患の別によるのではなく、CSF を見えにくさの視標としてサービスを行うべきだとした。氏間 [173] は、MRS と視力との関係が見い出せないことなどから、ロービジョンの評価には機能評価モデルよりも行動評価モデルの方が有用性が高いことを指摘している。

こうした知見を踏まえて、視覚障害教育においてロービジョン生への視覚教材の提示は、

1. 紙媒体に各々の生徒に適した書体・文字サイズで印刷したプリントを配布

2. 配布した電子データを各々の生徒の机上のパーソナルコンピュータ（以下 PC）で提示
3. 教師の PC の画像出力を，分配機を通して各生徒の机上の液晶ディスプレイに提示
4. 黒板にチョークで書いて提示
5. 加工しない読材料を，視覚補助具などを用いて使用

といった方法がとられている。これらのうち 4. を除けば，生徒の視線は机上のプリントかディスプレイにあり，授業において教師と生徒との一体感や双方向性が得られにくい感がある。これに対して，4. の黒板を使った授業では，生徒の視線を黒板に書かれた文字や説明をする教師に集めることができる。しかし，チョークの一端を板面に垂直に当てて描いた場合の線幅はチョークの太さに依存し，例えば羽衣文具製ニューポリチョークの太さは 11.6 mm である。ロービジョン生がこれより太い線幅を要求した場合，描きやすさや線幅の安定性を犠牲にして，チョークの側面を使って描くことで対応することになるが，そのようにして文字や図を描き続けることは現実的ではない。チョークによらない提示方法として，あらかじめロービジョン生の視覚特性に応じて作成した紙教材などを，板面に貼り付ける方法もあるが，電子データを直接提示する方法と比較して，教材の作製，再利用，整理，共有の点で労力的なコストパフォーマンスは低い。これらのことから，視覚障害教育における黒板の活用範囲は限定されるといわざるを得ない。

一方、2010年に文部科学省が行った学校情報通信技術環境整備事業により、全国の小中学校および特別支援学校に電子黒板が配置された。電子黒板は、静止画・動画の提示や画面への書き込み・訂正・画面の保存などが容易で、授業準備のコストダウンを図れるばかりでなく、教師が板面の前で操作することで、生徒の視線を集めることができるため、より授業を双方向に進めやすいといったメリットが報告 [81][126][122] されている。

視覚障害教育における電子黒板の活用についての研究は、氏間 [83] による HTML 教科書と電子黒板を利用した授業の実践、および、大型電子化提示教材で使用するロービジョンに適した文字サイズの規定法についての研究が報告 [175] され、電子黒板に提示する文字サイズはCPSで規定できる可能性があること、および、その際の内省報告が重要であることが示された。

これらのことから、視覚障害教育においても電子黒板が活用できるものと考えられる。そこで、ロービジョン生を対象として、電子黒板を使った授業を成立させようとしたとき、電子黒板の提示環境（教室照度、座席配置）および教材特性（文字サイズ、コントラスト、線幅、配色）といった提示方法の規定に関する検討が必要になる。ところが、先に述べたような先行研究では、それらのパラメータは単独の要素として取り扱われていることから、これらを統合的に取り扱いながら、ロービジョン生の視覚特性に応じた提示方法を規定していく作業が必要となる。本研究は、我々がこれまで開発してきた視覚特性計測キット [106] を用いて、ロービジョン生の視覚特性の評価を行い、更に電子黒板の表示特性の評価と合わ

せて検討することにより，電子黒板におけるロービジョン生の視覚特性に応じた教材の提示方法を規定するものである．

2.2 方法

特別支援学校の生徒数5名の学級を対象として、電子黒板を使用した授業を実施する。参加する生徒に対しては、世界医師会によるヘルシンキ宣言の理念を踏まえ、本研究についての十分な説明を行った上で、本人の自由意志による同意 (informed consent) を得る。生徒のプロファイルを表 2.1 に示す。電子黒板に提示された教材をロービジョン生が無理なく視認できるためには、ロービジョン生の視覚特性や電子黒板の表示特性に基づいて、提示環境 (教室照度・座席配置) および教材特性 (文字サイズ, コントラスト, 線幅, 配色) を規定する必要がある。そのため、以下に述べる手順 1 ~ 9 を順次実施する。視覚特性の計測には、PC (ThinkPad T400s Lenovo 社) (CPU: Intel Core2 Duo 2.4GHz, メモリ: 4GB, OS: Windows XP Professional) 上に Microsoft 社の Visual Studio 2008 Visual C++ 環境で作成した計測プログラムを使用する。手順 1 ~ 3 では、ヘッドマウントディスプレイ (Head Mount Display 以下 HMD) VUZIX GVD-5203D VR920 (リフレッシュレート 60Hz, 640 (W) × 480 (H) ピクセル) を用いる。図 2.1 のように、計測に HMD を用いることで、外乱による影響を排除した提示環境のコントロールが容易になり、教室において安定した計測が可能になる。HMD の仕様「視距離 9 フィート (2.74m) 位置に 62 インチ (1.57m) 画面の視界」から、1 ピクセルの換算距離は 1.96mm となる。

HMD における輝度の計測は、暗室においてユニカミノルタ社製輝度計 LS-100

表 2.1 生徒のプロファイル

被験者	年齢 (歳)	眼疾患	視力 () 内は 矯正視力	視野	その他 (眼振, 色覚特性, 夜盲など)
生徒 A	49	両：網膜色素変性症	右：0.2 左：0.3	求心性視野狭窄 保有視野の直径 右：10°，左：12°	夜盲
生徒 B	50	両：サルコイドーシス 続発緑内障	右：0.03 (0.3) 左：0.05 (0.3)	輪状暗点 中心視野の直径 右：5° 左：7° 保有周辺視野 右：13～51° 左：29～60°	なし
生徒 C	49	両：網膜色素変性症	右：0.1 左：0.1	求心性視野狭窄 保有視野の直径 右：22°，左：21°	夜盲
生徒 D	23	両：網膜色素変性症	右：0.01 (0.08) 左：0.01 (0.05)	求心性視野狭窄 保有視野の直径 右：43° 左：42°	なし
生徒 E	50	右：緑内障 左：眼球ろう	右：指数弁 左：0	左：義眼 左：計測不能	

にクローズアップレンズを装着し、HMD の接眼部に密着させ、HMD の画面中央に描画した 200 × 200 ピクセルの矩形中に焦点を合わせる。矩形の赤緑青（以下 RGB）値を 0 ～255 まで 5 刻みの 52 値について、各 5 回ずつ計測し平均輝度を求める。このようにして求めた計測値を解析した結果、RGB 値から輝度へ換算するための近似式は次式となり、決定係数 $R^2 = 0.9986$ により換算式として妥当とみなす。 $y = 0.0001x^2 - 0.0003x + 0.4245$ （ただし、 y は輝度、 x は RGB 値）

手順 4 ～ 9 は電子黒板を用いて計測を行う。



図 2.1 HMD を用いた周辺環境非依存の計測

2.2.1 手順1 ランドルト環判別時間の計測

HMD に黒色白背景のランドルト環を表示し，被験者はギャップ（切れ目）方向をキーボードのカーソル移動キー（以下 矢印キー）で回答する．表示するランドルト環は， $2.29 \log\text{MAR}$ （環の直径 400 ピクセル，ギャップ幅 80 ピクセル）のサイズから開始し，ギャップ幅が $0.1 \log$ ユニット刻みで縮小（縮小率 79.4%）するようにサイズを変化させる．ランドルト環を表示する際は，画面中央に十字印の前置刺激を 1 秒間表示し，画面中央を注視させた後にランドルト環を 2 秒間表示する．1 サイズ当たりのランドルト環のギャップ方向を上下左右各 2 回，合計 8 回をランダムに表示し，各サイズにおける正解率，平均判別時間を求める．被験者の右手は計測の開始から終了まで矢印キーの上に置き，人差し指で左矢印キー，中指で上下矢印キー，薬指で右矢印キーを押下させる．右手を用いるのは，使用するキーボードの右側に矢印キーがあるという理由による．計測前に練習を行い，スムーズに回答できるようになったことを確認後，計測を開始する．

ランドルト環の $\log\text{MAR}$ の計算には，視距離 2.74m，ギャップ幅 1 ピクセル当

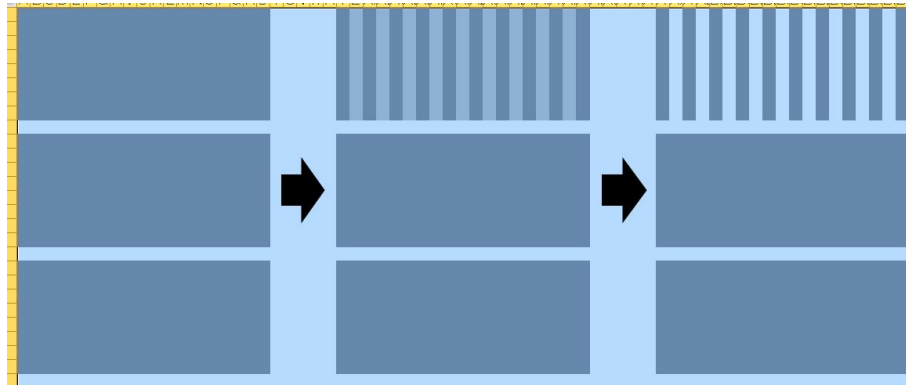


図 2.2 コントラスト感度の計測パターン

たり 1.97mm として，ギャップ幅のなす視角により計算する．検査に要する時間は 1 人当たり 10 分程度である．

2.2.2 手順 2 コントラスト感度の計測

CSF を求めるために各空間周波数のコントラスト感度を計測することは，計測に要する生徒の拘束時間が長く，教育現場では実施が難しい．そこで，代表点として以下のようにして求めた空間周波数に対して，視覚特性上のコントラスト感度として計測し求める．まず，300 (W) × 100 (H) ピクセルの四角形内に，縞幅 1 ～ 50 ピクセルで変化する矩形縦縞を表示し，視認できる最小の縞幅を調整法により 5 回計測して，その平均値を最小視認縞幅とする．コントラスト感度の計測は最小視認縞幅の 2 倍の縞幅を用いて計測することで，晴眼者群（被験者数 13 名）においては 3 ～ 6cpd，本研究で対象とするロービジョン生では 0.5 ～ 2.0cpd における計測となる．コントラスト感度は晴眼者では 3 ～ 4cpd，ロービジョン者では

0.3~0.5cpd にピークがあるという知見 [141] により，最小視認縞幅の 2 倍を縞幅として計測することで，コントラスト感度のピーク近傍で計測されることを期待する．続いて，図 2.2 のように 300 (W) × 100 (H) ピクセルの 3 個の矩形を縦に提示し，ランダムにそのうちの一つの矩形だけを，縞模様の RGB 値を矩形の RGB 値の差を一ずつ増やす方法で，徐々にコントラストを強めながら縞模様にする．被験者には，どの矩形波が縞模様になったか判別できた段階で，「上」，「中」，「下」で回答させる．このときのマイケルソンコントラストの逆数をコントラスト感度として読み取る．この試行は 5 回行い平均を求める．検査に要する時間は 1 人当たり 5 分程度である．

2.2.3 手順 3 コントラストポラリティ効果の有無の計測

3 文字の平仮名からなる単語を表示し，被験者は音読した後に下矢印キーを押下して次の単語を表示させる操作を繰り返す．文字サイズは 160 ポイント（視角 $8^{\circ} 41'$ ）から変化を開始し，4 ポイント（視角 $12'$ ）になるまで約 0.1 log 刻みで縮小させて 16 サイズについて計測を行う．計測は判読不能になった時点で終了する．使用する書体は MS ゴシックである．単語が表示されてから被験者が音読し，下矢印キーを押すまでに要した時間を所要時間とする．各文字サイズにおいて 4 回ずつ所要時間を計測し，それぞれの平均所要時間から読書速度（1 分間当たりの読字数）を求める．これを W/B，および，黒文字白背景（以下 B/W）において実施し，コントラストポラリティ効果を観察する．刺激として用いた 3 文

字からなる平仮名单語は、「日本語の語彙特性」[133]に登録されている3文字語彙16,978単語から音声単語親密度6以上である1,238単語を抽出した。そこから更に、本来カタカナで表記すべきもの、濁音半濁音、長音、促音、拗音が含まれるもの、被験者に不快感を与える可能性の高い語句を除外して、最終的に418単語を得た。得られた418単語からランダムに並べ替えたものを使用する。

ディスプレイに提示する文字の大きさを視角であらわすために、本来であれば「国」という文字を表示し、文字高を計って補正する必要がある。しかし、HMDにおいてはそれが不可能なため、次の方法によって暫定値を求める。Windows XPにおけるMSゴシック体フォントの仕様として、1文字幅は1ポイント=1/72インチである。例えば160ポイント文字の文字幅は2.22インチであり、解像度96dpiでディスプレイに表示した場合、213ピクセル(420mm)となり、2.74mの視距離では視角 $8^{\circ}41'$ と計算できる。なお、検査に要する時間は1人当たり10分程度である。

2.2.4 手順4 電子黒板の表示特性の計測

電子黒板といってもその種類は、大型液晶テレビを用いたもの、プラズマディスプレイを用いたもの、プロジェクタを用いたものなど様々である。本研究で用いた電子黒板は、学校情報通信技術環境整備事業によって配置された、安川情報システム社製スマートボードSB680(有効画面寸法1,565(W)×1,172(H)mm, 感圧式タッチパネル, プロジェクタ全面投影方式)である。教室の照度が表示コ

ントラストに与える影響を調べるため、条件1：照明消灯＋遮光カーテンあり条件（3 lx）、条件2：照明点灯＋遮光カーテンあり条件（454 lx）、条件3：照明点灯＋遮光カーテンなし条件（1,252 lx）の3条件における白、赤、黄、青の各色の輝度を輝度計LS-100を用いて計測し、マイケルソンコントラストを求める。比較検証として、同様の計測を液晶ディスプレイおよび黒板についても行う。このときの測定点は、黒板では黒板中央にチョークで塗りつぶした10cm四方の矩形、電子黒板および液晶パネル（以下TFT）では、画面中央に描画した200×200ピクセルの矩形である。各5回ずつ計測して平均値を求めた。なお、照度は教室中央に置かれた机上の値とした。

2.2.5 手順5 電子黒板に対する最適視距離および座席配置の決定

MS ゴシック 30 ポイントの文字を使用して教材を作成することを仮定し、その場合の各生徒の最適視距離を求める。検査者の合図とともに、視距離2.2mとなる電子黒板にMNREAD-J 4)の文面を表示し、ロービジョン生が音読するのに要する時間を計測する。文字サイズは、48ポイント（「国」という文字を使って補正して文字高72mm、視角112.5'）から開始し、およそ0.1 log ユニットで縮小させて、7ポイント（文字高10mm、視角15.6'）までの9サイズについて計測する。サイズごとに4回計測し、その結果からCPS、MRS、RAを求め、教材に30ポイントの文字を提示する場合の最適視距離[175]を判定し、座席配置に反映する。検査に要する時間は1人当たり10分程度である。

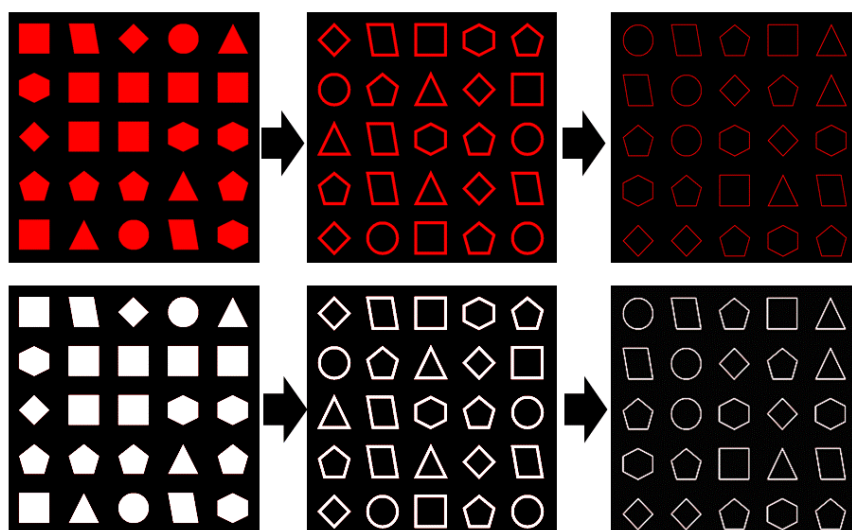


図 2.3 有効線幅の計測画面

2.2.6 手順6 有効線幅の計測

電子黒板に線を表示する際、生徒が支障なく視認できる線幅を白、赤、黄、青の色ごとに求める。電子黒板に、三角形、正方形、菱形、五角形、六角形、円形の図形からランダムに、図 2.3 のように 5 (行) × 5 (列) の 25 個を表示し、その中に五角形の図形が含まれる数をカウントするのに必要な時間を計測する。図形列の左端から右方向に視線を移動させながらカウントする方法で、1 ~ 5 行目まで順次行ってもらう。図形は、塗りつぶし、8, 4, 2, 1 ピクセルの線幅に対して各 3 回計測し、所要平均時間を求める。このときの視距離は、手順 5 で決定したロービジョン生の座席から電子黒板までのそれぞれの距離とする。検査に要す

る時間は1人当たり10分程度である。

小林[97]は5×5の平仮名を線で結び、線をたどりながら音読するのに要する時間を計測する方法で、線の認識しやすさを評価しているのに対し、本研究では5行×5列の図形のなかに五角形が含まれる数をカウントするのに要する時間を計測した。この計測方法の利点として、音読スキルに左右されずに計測できることと、線だけでなく塗りつぶしの認識しやすさについても計測できることが挙げられる。

2.2.7 手順7 図教材の作成

手順6の評価に基づいて図教材を作成する。図教材は脊髄損傷によって運動、知覚、排尿、体温調節が障害されることを理解させるための図で、黒の背景に、脳（白）、脊髄（白）、脊髄神経（白）、筋（赤）、血管（赤）、汗腺（黄）、皮膚（黄）、膀胱（黄）、脊髄損傷部位を示す線（赤）で構成されている。図教材の視認性を検証するため、4種類の図教材：(a) すべて2ピクセルの線幅、(b) すべて白で塗りつぶし、(c) すべて8ピクセルの線幅、(d) 手順6で計測した色ごとの有効線幅を用いた図教材を作成する。

2.2.8 手順8 図教材の使用

手順7までに規定した提示環境および教材で授業を実施する。

2.2.9 手順9 図教材の見やすさの評価ならびにアンケート調査

生徒に対して、手順7で作成した4種類の図教材を15秒ずつ、(a)、(b)、(c)、(d)の順で3回提示した後、それぞれの教材の見やすさについて10段階評価をさせる。更に、電子黒板を使った授業についてのアンケートを実施する。アンケート内容は、「1. 電子黒板を使った授業でよかったと思うことは何ですか。」および「2. 電子黒板を使った授業で改善が必要だと思うことは何ですか。」の2問からなる自由記述方式である。

2.3 結果

2.3.1 手順1 の計測結果

手順1 の計測結果を図 2.4 に示す。晴眼者の例で見られるように、ランドルト環のギャップが正解率 100 %で視認できるときの判別時間 500 ミリ秒程度のプラト一期がみてとれる。このときのランドルト環のギャップ幅 (logMAR) の範囲を安定判別域と定義する。通常の視力計測では正解率 50 %を判別閾とするが、手順 1 においては安定して判別できるギャップ幅を判定することを目的とするため、正解率 100 %を判別閾とする。生徒 A は、計測したロービジョン生のなかでは最も安定判別域が広く晴眼者に近いが、ギャップ幅 2.19～ 2.29 logMAR でやや判別時間の延長がみられる。生徒 B には 1.54～ 2.29 logMAR に安定判別域がみてとれる。生徒 C と D には、ギャップ幅が狭くなるにつれて判別時間が延びてグラフはなだらかな曲線を描いており、安定判別域の範囲が不明瞭である。生徒 E では計測範囲において安定判別域はみられない。そのため、生徒 E については全盲生と同様の対応が必要であると判断して、以降の手順では計測対象としなかった。

2.3.2 手順2 の計測結果

手順2 において計測したロービジョン生のコントラスト感度を図 2.5 に示す。晴眼者 13 名で計測した平均値と比較すると、ロービジョン生のコントラスト感度は明らかに低い。とくに生徒 B と生徒 D で低下が著しい。このことから、この学級

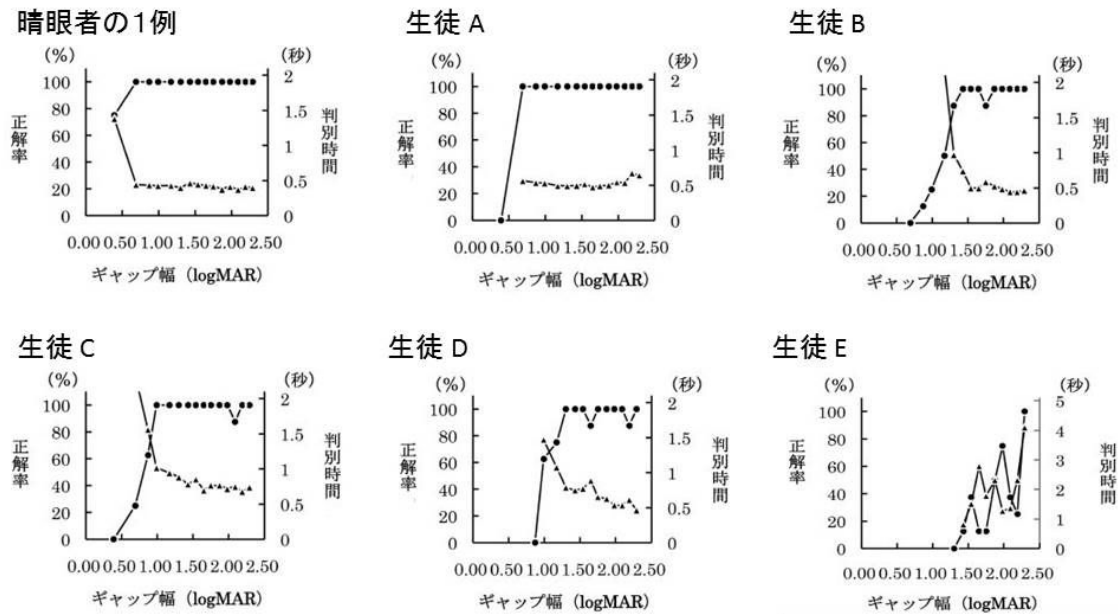


図 2.4 ランドルト環のギャップ幅と反応時間・正解率

のロービジョン生に提示する教材においては、コントラストの低い表現を用いないこととする。

2.3.3 手順3の計測結果

手順3の結果を図2.6に示す。読書速度のピーク値からサンプルを増やしながら平均値と標準偏差を計算し、読書速度が5%信頼限界である（平均値－標準偏差）の1.96倍を超えたところで、読書速度が有意に低下したと判断することで、プラトー区間を判定する。プラトー区間における読書速度の平均値をプラトー値、B/W条件下のプラトー値に対するW/B条件下のプラトー値の比をコントラストポラリティ効果比（Contrast Polarity Effect Ratio 以下 CPER）とする。ただし、

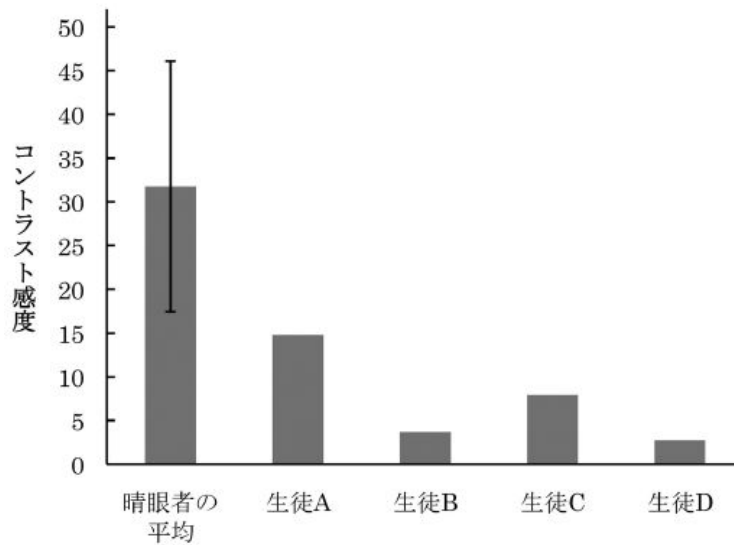


図 2.5 晴眼者 13 名の平均およびロービジョン生 4 名のコントラスト感度

生徒 C における B/W 条件では，計測されたサンプル数が少ないこと，更に大きな文字サイズでプラト一期が得られる可能性を指摘できるが，本検査手法の限界として，やむを得ずそれらの平均値をプラト一値とみなす．判定結果を表 2.2 に示す．晴眼者の CPER は 1.00 であり，コントラストポラリティ効果は観測されない．これに対し，生徒 A では 0.76 と B/W の方が読書速度は速く，生徒 B，C，D ではそれぞれ 2.18，2.22，1.08 と W/B の方が読書速度は速くなっている．個別使用する PC の表示を最適化する場合であれば，生徒 A は B/W に設定，生徒 B，C，D は W/B に設定するのが適していると考えられるが，電子黒板においては共通の画面に設定しなくてはならない．そこで，生徒 A の W/B におけるプラト一値が 188 字／分で，ほかの生徒のプラト一値よりも高いことを考慮すると，生徒 A は W/B より B/W の方が読書速度は高いが，W/B でもほかの生徒より高速であ

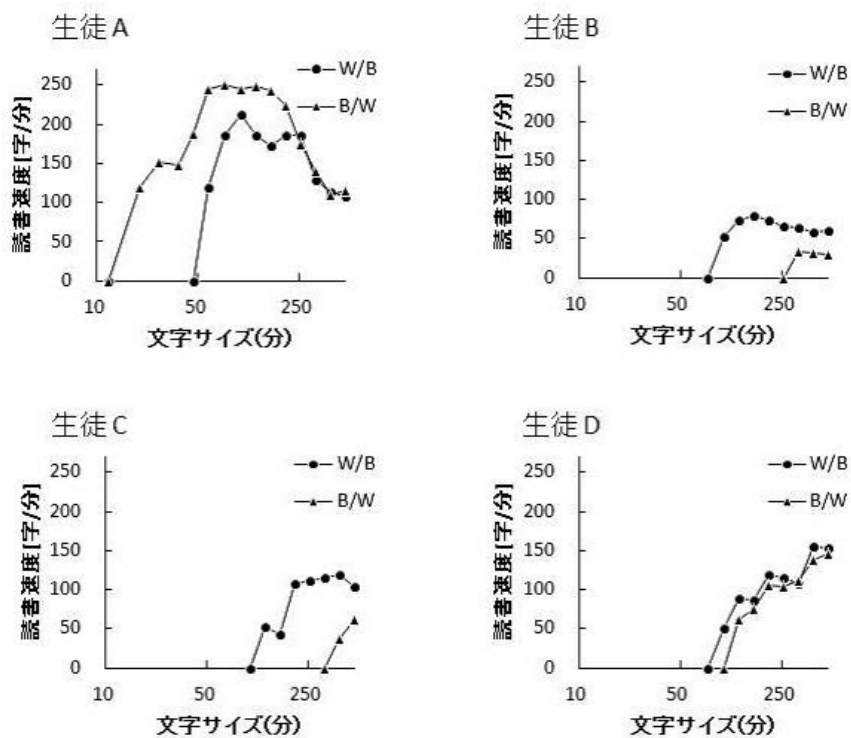


図 2.6 文字サイズに対する読字速度およびコントラストポラリティ効果

るため、W/Bでも許容されると判断できる。そして、クラス全体としてはW/Bが適していると判断し、電子黒板での表示をW/Bにする。

2.3.4 手順4の計測結果

手順4により計測したマイケルソンコントラスト値を図2.8に示す。電子黒板は、液晶ディスプレイや黒板と比較して、教室の照度が上がることで著しくコントラストが低下することがわかる。白、赤、黄、青の各色のコントラストを比較したものが図2.7である。白に対するマイケルソンコントラストは、電子黒板では

表 2.2 コントラストポラリティ効果分析表

被験者	プラトール値		CPER	プラトール区間	
	W/B	B/W		W/B	B/W
晴眼者	153	152	1.00	1.57 ~ 2.72	1.43 ~ 2.72
生徒 A	188	246	0.76	1.88 ~ 2.41	1.77 ~ 2.20
生徒 B	68	31	2.18	2.10 ~ 2.72	2.51 ~ 2.72
生徒 C	111	50	2.22	2.31 ~ 2.72	2.62 ~ 2.72
生徒 D	130	121	1.08	2.51 ~ 2.72	2.31 ~ 2.72

表 2.3 電子黒板に MNREAD-J の文書を提示して計測した結果からの算出値

生徒	CPS (logMAR)	MRS [文字/分]	RA (logMAR)	プラトール区間 (logMAR)
A	1.49	327	1.19	1.49 ~ 1.86
B	1.66	253	1.19	1.66 ~ 2.05
C	1.74	200	1.47	1.74 ~ 2.05
D	1.86	219	1.57	1.86 ~ 2.05

赤 30 % および青 13 %，液晶ディスプレイでは赤 89 % および青 84 %，黒板では赤 92 % および青 96 % であるので，電子黒板における赤と青は，著しくコントラストが低いことがわかる．手順 2 の結果（図 2.5）においてロービジョン生のコントラスト感度が低いことから，教室は遮光カーテン+消灯の環境にして，できるだけ電子黒板における表示コントラストを確保する．更に，赤や青の使用は，色について必然性のない部分には用いないように配慮する．

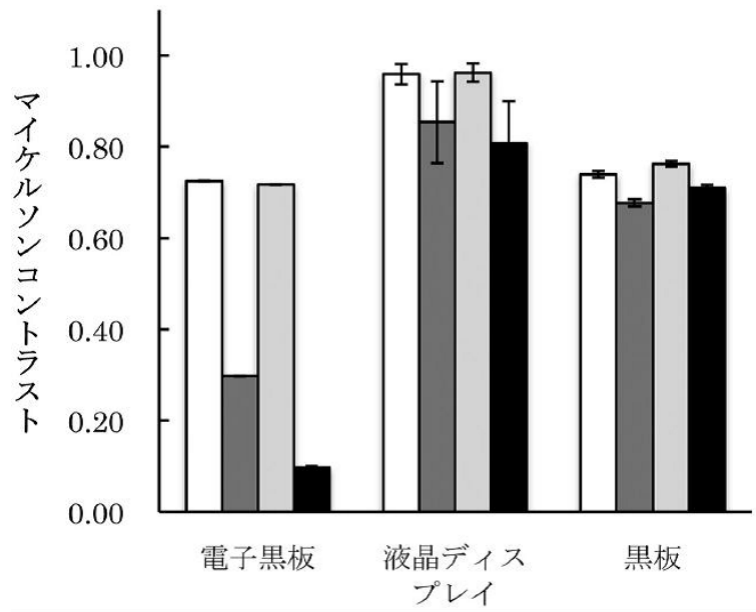


図 2.7 白，赤，黄，青の各色に対する表示デバイス上のマイケルソンコントラスト

消灯+遮光カーテン (3 lx) の条件下における，電子黒板，液晶ディスプレイ，黒板の表示デバイスにおける，白，赤，黄，青の各色を表示させたときのマイケルソンコントラストの計測結果を示している。

2.3.5 手順5 の計測結果

手順5 における計測結果を図 2.9a に示す。読書曲線の解析法として Cheung の非線形混合効果モデル [18] があるが，今回の読書速度の結果に欠損値がないことから，プラトー期と下降期の2本の線をフィッティングする方法 (Two-Limbed Fit) [6] で解析する。その結果，各生徒の CPS, MRS, RA, プラトー区間は表 2.3 のようになった。図 2.9b には，図 2.9a からプラトー区間を抽出したものを示している。各生徒が最速の読書速度が得られる文字サイズは，生徒 A は 45.3'，生徒 B は 87.5'，生徒 C は 87.5'，生徒 D は 112.5' である。提示教材の文字を 30 ポ

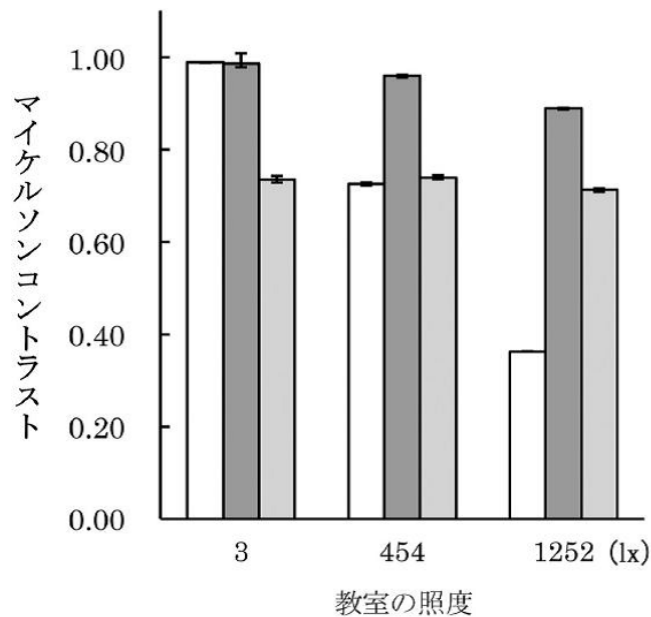


図 2.8 部屋の照度に対する表示デバイス上のマイケルソンコントラスト

(1) 消灯+遮光カーテン (3 lx) , (2) 点灯+遮光カーテン (454 lx) , (3) 点灯+遮光カーテンなし (1,252 lx) の条件における, 電子黒板, 液晶ディスプレイ, 黒板の表示デバイスのマイケルソンコントラストの計測結果を示している.

イントとしたときの最適視距離を求め19) , 座席配置を図 2.10 のように反映させた. 生徒 E では, 教師が生徒 E の身体を触りながら説明をしたり, 点図の触読を支援したりするため, 教師の傍らに配置した. 生徒 A は教室の一番後方に配置して電子黒板からの距離は3.43m, 生徒 B と生徒 C は1.81m の位置に定めた. 生徒 D は1.41m と電子黒板にできるだけ近く, かつ, 他の生徒の視界を妨げない位置に定めた.

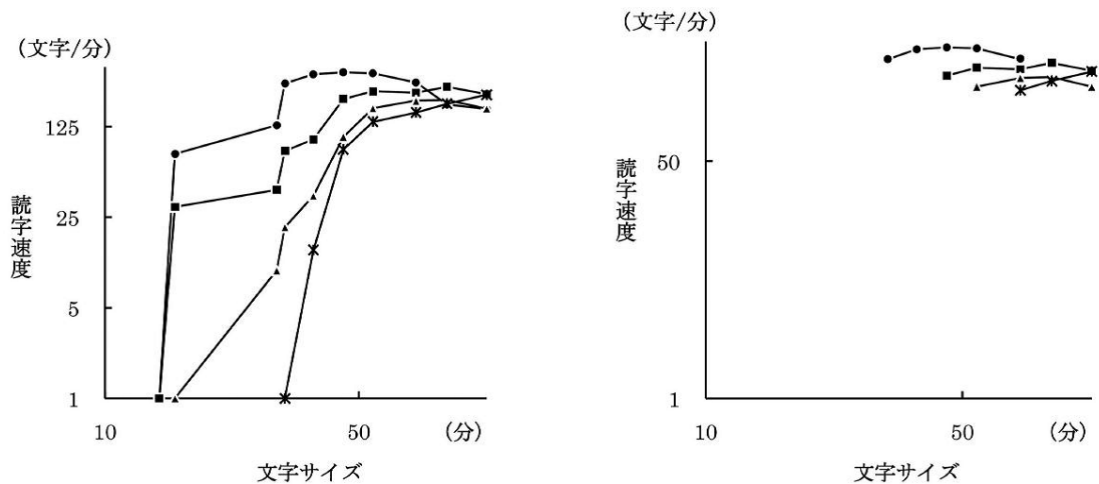


図 2.9 電子黒板における MNREAD-J の文字サイズに対する読字速度

電子黒板において MNREAD-J の文書を用いて、文字サイズを変化させたときの各ロービジョン生の読書速度の計測結果を示している。

(a) ロービジョン生 4 名の計測結果

(b)(a) のグラフのうち、プラトー区間のみを抜き出して表示

2.3.6 手順 6 の計測結果

手順 6 で計測された、塗りつぶし、線幅 8, 4, 2, 1 ピクセルにおいて、ロービジョン生が五角形のカウントに要した時間を図 2.11 に示す。生徒 A では、塗りつぶし～4 ピクセルではすべての色を視認できているが、2 ピクセルで青が視認不能となり、1 ピクセルでは赤が白に比べて 64 % 視認時間が延長している。生徒 B では、塗りつぶし～8 ピクセルではすべての色を視認できているが、4 ピクセルで青が視認不能となり、2 ピクセルでは赤の視認時間が白に比較して 79 % 延長し、1 ピクセルでは赤が視認不能となった。生徒 C では、計測したすべての範囲で青は視認不能であった。赤は 4 ピクセルで白に比較して 50 % 視認時間が延長し、1 ピクセルでは赤が視認不能となった。

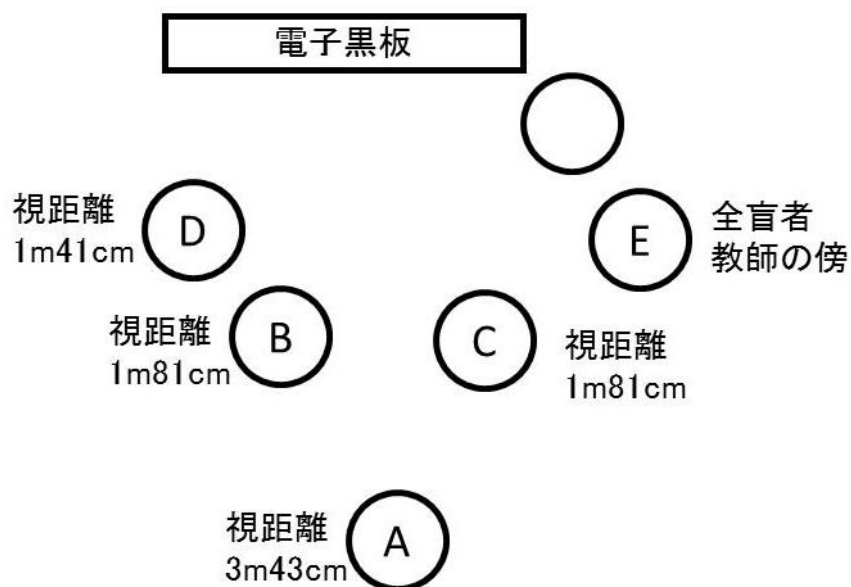


図 2.10 本研究の手法で求めた各生徒の最適視距離に基づいて決定した座席配置

本研究の手法により各生徒の最適視距離を求め、それに基づいて電子黒板で授業を行うのに適切な距離を設定して行った座席配置を示している。

クセルで視認不能となった。生徒 D では、塗りつぶしにおいて青が視認可能だったが、8 ~ 1 ピクセルでは視認不能であった。赤は 2 ピクセルで白の 114 % 視認時間が延長し、1 ピクセルで視認不能となった。この結果から、クラスの全ロービジョン生が無理なく視認できる条件として、1. 生徒 B は青に対する視認性が著しく低いので青は用いない、2. 白と黄色は 2 ピクセル以上で安定して視認可能である、3. 赤は 4 ピクセル以上で安定して視認可能であると判定した。

上記の有効線幅を用いて、手順 7 で線幅などを変えた図 2.12 のような 4 種類の図教材: (a) すべて 2 ピクセルの線幅, (b) すべて白で塗りつぶし, (c) すべて 8 ピクセルの線幅, (d) 白と黄は 2 ピクセル, 赤は 4 ピクセルの線幅を用いて図

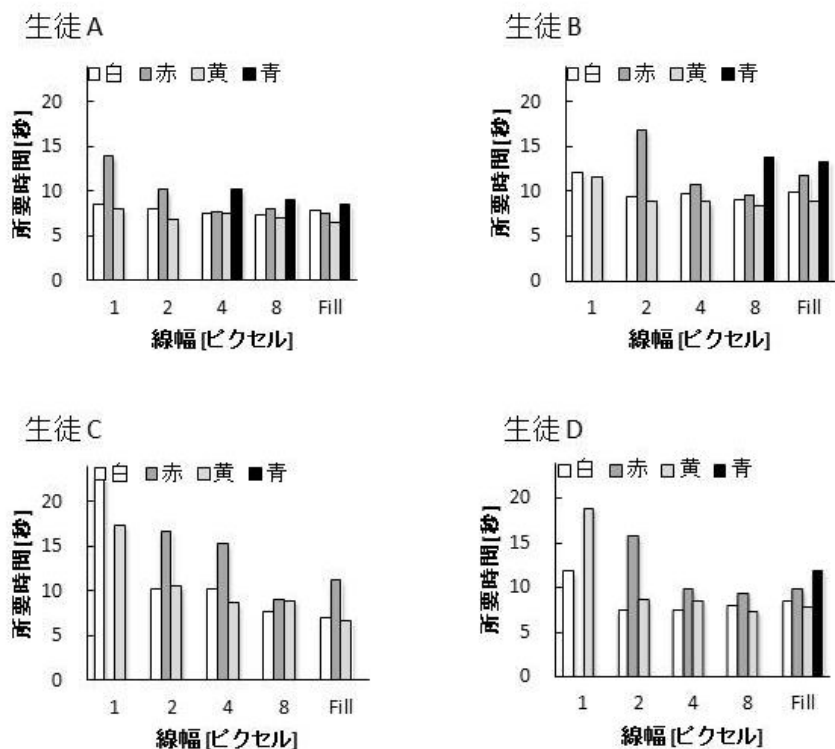
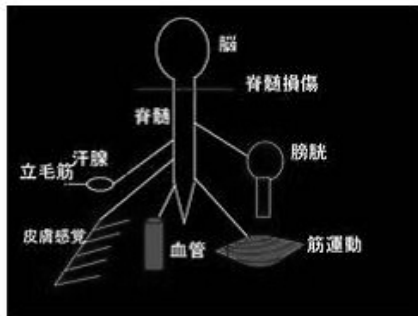


図 2.11 各色での図の表示に対するカウント所要時間

を作成した。そして、手順 8 として、手順 7 で作成した図教材およびその他の教材を用いて、電子黒板を用いた授業を 8 時間（1 単位時間 50 分）実施した。

2.3.7 手順 9 の計測結果

手順 9 における各図教材に対する評価結果を図 2.13 に示す。各々の図教材に対する評価の平均は (a) 6.8, (b) 4.8, (c) 8.5, (d) 9.0 と、有効線幅に基づいて作成した図に対する評価が最も高かった。電子黒板を使った授業に対する自由記述では、よかった点として「学習している内容をみんなで共有することができる



(a)全て2ピクセルの線幅で作成した教材



(b)全て白で塗りつぶした教材



(c)全て8ピクセルの線幅で作成した教材



(d)手順6で計測した色毎の有効線幅に基づき白と黄は2ピクセル, 赤は4ピクセルの線幅で作成した教材

図 2.12 計測結果に基づいて作成した図教材

ので授業が楽しい」、「クラスメイトからの刺激がある」、「電子黒板に自分で書き込んだりすることで印象が強くなり頭に残りやすい」というものがあった。一方、改善が必要な点として「机上で行う授業に比べて時間的なロスが大きい」、「部屋が暗くてノートがとれないので後から電子黒板で使った教材をメールで送ってほしい」といった意見が挙げられた。

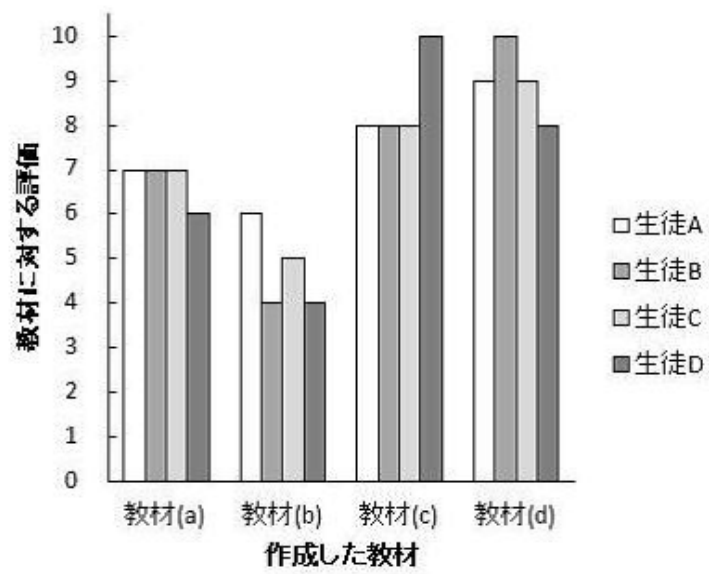


図 2.13 図教材に対する生徒による見やすさに対する評価

2.4 考察

手順1の結果(図2.4)をみると、生徒A、Bには安定判別域があり、その範囲において視覚の活用が期待できる。生徒Aがギャップ幅2.19~2.29 logMARにおいて判別時間が延長しているのは、視野が求心性視野狭窄であるため、サイズの大き過ぎるランドルト環ではギャップを捜すために時間を要していると推測される。生徒C、Dでは、ギャップ幅の減少に伴い、判別時間の延長がみられるものの、相当範囲において正解率が100%であることから、視覚を用いて文字や図を処理しながら学習することを期待できると判断する。生徒Eでは安定判別域がみられず、100%の正解率が得られる範囲が存在しないことから、視覚を活用できる条件が極めて限られていると考えられる。この計測結果に基づいて本人と面談を行った結果、全盲者向けの指導法で学習するという結論に至り、手順2以降の計測対象から除外した。

手順2の結果(図2.5)をみると、全ロービジョン生のコントラスト感度が晴眼者と比較して低いことが観察された。Legge[17]、Rubin[23]、小田ら[94]の知見にあるように、ロービジョン者では多くの場合コントラスト感度の低下を来している。このことから、この学級のロービジョン生に提示する教材においては、コントラストの低い表現を用いないことが適切であることが確認された。ロービジョン生の各空間周波数のコントラスト感度を計測できれば、教材作成の際、表現部の空間周波数に応じたコントラストの許容範囲を規定でき、その範囲内で様々な

コントラストを用いて教材を作成することで、よりわかりやすく表現力に富んだ教材を作成できる可能性がある。そのためには、教育現場で各空間周波数のコントラスト感度を、短時間で容易に計測する手法の研究開発が必要である。本研究で行った、最小視認縞幅の2倍の縞幅を代表点としてCSFを求める方法は、ロービジョン者のコントラスト感度のピークを示す周波数は多様であり [141]、測定周波数を固定できないことを踏まえた、便宜的方法である。

手順3の結果（図 fig:文字サイズに対する読字速度およびコントラスト）から得られた表 2.2におけるPERを検討すると、晴眼者では1.00でありコントラストポラリティ効果は観測されない。これに対し、生徒Aでは0.76とB/Wの方が読書速度は速く、生徒B, C, Dではそれぞれ2.18, 2.22, 1.08とW/Bの方が読書速度は速くなっている。これらは、Legge[17]が示した、ロービジョン者にはコントラストポラリティ効果がみられる場合が多い、とする知見と一致する。更に、Rubin[23]の報告にあるように、ロービジョン者の読み速度に与えるコントラストの影響はロービジョン者によって大きく異なるので、今回のように4名のロービジョン生のコントラストポラリティ効果が多様であることは合致している。個別のPCを用いるのであれば、各々のPERに応じて、B/WとW/Bを選択すればよい。それに対して、電子黒板では共通の画面を使用するため、すべてのロービジョン生にとって最適な環境を提供するものではないが、配慮があれば活用できる。

手順4の結果（図 2.8）をみると、電子黒板の表示特性として教室の照度を上げ

るとコントラストが著しく低下することから、プロジェクタ全面投影方式の電子黒板は、ロービジョン生を対象とした提示装置として適しているとは言い難い。今後は、TFT やプラズマディスプレイを用いたタイプの電子黒板の活用を検討すべきだと考える。

手順5で行ったように、大型提示装置でMNREAD-Jを用いて読字評価を行う取り組みは中村ら [125] によって行われている。12名の網膜疾患の患者に対して、42インチのプラズマディスプレイに文字サイズ1.7~2.5 logMARでMNREAD-Jの刺激文を提示する読字評価を実施し、重度の視覚障害でも読字評価が可能であると報告した。手順5の目的は、読字速度の評価を根拠として、各生徒の適切な視距離を特定し座席配置に反映することである。各生徒の最適文字サイズ(分)が決まれば、電子黒板に30ポイントの文字を表示する際の適切な視距離を求めることが可能となる。本研究では、MNREAD-Jの結果から最適文字サイズの決定するための基本的な考え方として次の三案を検討した。

第一案は、各生徒のCPSを最適文字サイズとする方法である。しかし、MNREAD-Jの結果を各生徒の配付資料の文字サイズに反映させるならば妥当な方法であるが、電子黒板という共用の表示装置を用い、かつ、授業の効率性を高めるためには、クラスで最も読書速度の遅い生徒の読書速度をできるだけ速くなるように設定するといった視点が必要である。

そこで、第二案として、クラスにおいて最も読書速度の遅い生徒のMRSを「クラス基本読書速度」とする方法である。クラス基本読書速度は授業の進行速度を

規定するので、できる限り速いことが望ましいことから、生徒がクラス基本読書速度を達成できる CPS 以上の最小文字サイズをそれぞれ最適文字サイズとして採用する。このクラスでは、最も読書速度が遅い生徒 C の MRS 200 字／分がクラス基本読書速度となった。したがって、生徒 C の文字サイズは CPS ではなく、MRS を達成する 87.5' とした。生徒 D の CPS である 54.7' ではクラス基本読書速度を達成しないので、220 字／分の 112.5' を採用した。生徒 A および B では、CPS でクラス基本読書速度を達成するので、それぞれの CPS である 31.3' および 45.3' を採用した。

ここで改めて、CPS を読書の文字サイズとして採用する意義を考える。定義から、CPS は読書速度を落とさない最小の文字サイズである。CPS を採用することで、個人の視機能に最適化された読書資料を作成できる。しかし、本研究では、電子黒板に提示する文字サイズは 30 ポイントで固定するので、採用する最適文字サイズによって電子黒板に表示される 1 行の文字数は変化せず、読書資料は固定される。よって、CPS を最適文字サイズとして採用するには、読書速度を落とさない範囲で電子黒板から最も遠い位置に座席を配置することを意味する。教師の声が聞き取り難くなったり、電子黒板上でオブジェクトの操作や文字の書込みをするために電子黒板まで移動するのに時間を要したりすることを考えると、CPS の採用はかえって電子黒板の利便性を低下させることになる。そこで、第三案は、プラトー区間を各ロービジョン生における許容範囲と解釈し、ロービジョン生はその許容範囲内で適宜文字サイズ（座席配置）を採用するというものである。こ

ここでいう適宜とは、最速の読書速度が得られる文字サイズの選択や、多人数の利用で教室の物理的なレイアウトに制限が生じる場合では、最速の読書速度が得られないまでも良好な読書速度が得られるプラトー区間の文字サイズとなる座席配置を採用するという意味である。本研究の事例では、座席レイアウト上の制約が生じなかったため、各生徒が最速の読書速度が得られる文字サイズを採用した。

ここで、図 2.9 に観測される生徒 A と生徒 D の対照的な読書曲線について検討する。生徒 A のグラフはお椀を伏せた形をしており MRS が 327 字/分と高いのに対して、生徒 D は文字サイズが大きくなればなるほど読書速度がなだらかに向上する形をしており、MRS は 219 字/分と生徒 A の 67%にとどまる。Legge[17] は、ロービジョン者を中心視力障害のない群とある群に分けて最大読書速度を比較し、前者では 130 語/分と速い読書速度が得られ、しかも文字サイズの途中で読書速度のピークがあり、後者では 25 語/分と最大読書速度が低いことを報告している。生徒 A は前者に、生徒 D は後者に該当すると考えられる。更に生徒 A では、文字サイズ 71.9' 以上で読書速度が低下していることから、Virgili ら [32] が指摘するように、大きな文字や拡大ツールの使用によって読書速度を低下させる可能性が高いと推測される。

手順 9 において、手順 7 で作成した図教材（図 2.12）を用いた手順 8 の授業に対する評価結果（図 2.13）で、計測した色ごとの有効線幅に基づいて作成した教材（d）が平均 9.0 と最も評価が高かったことは、有効線幅の計測による図教材の作成手法が有効であったことを示している。

本研究においては、学校情報通信技術環境整備事業によって配置されたという理由で、プロジェクタ全面投影方式の電子黒板を用いたが、明所におけるコントラストが低いため、教室を暗くして授業を行う必要があった。参加生徒のうち2名が夜盲であるために暗い教室内は移動し難かったり、全員がロービジョン生で授業中にノートが取れなかったりという弊害が生じた。したがって、ロービジョン生に対して電子黒板を用いる場合は、明所においても十分なコントラストが得られる方式の電子黒板を選択すべきである。授業で電子黒板を使うことができれば、通常の黒板においてでも可能な、皆の前で生徒自身が板面に書き込めたり、オブジェクトを移動させたりすることに加え、板面の表示内容をデータとして保存して後から配布できたり、教材をデータベース化することで教材の再利用や共有化がしやすくなるといった利点がある。特にロービジョン生の見え方に応じて、教材をその場で自由に伸縮して提示したり、コントラスト感度に応じて教材のコントラスト改善を行ったりしながら、教材を提示することが容易である点は、ロービジョン生にとって電子黒板を使う上での大きな利点である。

本研究は、電子黒板を使った授業を実施するにあたり、ロービジョン生の視覚特性や電子黒板の表示特性を計測によって評価し、提示環境および教材特性を規定することで、授業を成立させたものである。しかし、実際の教育現場においては、視覚特性の評価を計測によって行うことより、試行提示しながらより視認に適した条件を選択することで、最適環境に近づけていく場合が多い。ロービジョン生が良好に視認できる条件にある程度の幅があれば、試行提示による方法も可

能だからである。最も重要な問題は、計測によるべきか、試行提示でよいのかではなく、どの段階で、視機能の何を評価して、それをどのように提示環境や教材特性に反映させれば、ロービジョン生にとっての最適な視環境が得られるか、という視点をもつことである。

第3章 印刷文字を閲覧する際の視条件評価チャートの提案

3.1 目的

印刷文字を閲覧する時の視認状態の善し悪しは、ロービジョン (Low-Vision) 者の視覚特性をベースとして、(1) 文字サイズ、フォントの種類、文字色、文字飾、用紙の色・反射率、使用した印刷機の性能といった視標的要素、(2) 机上照度、椅子・机・姿勢によって決まる視距離および閲覧角度、光源の色・強度・方向、外光の有無といった視環境要素、(3) 眼鏡、コンタクトレンズ、拡大鏡、拡大読書器 (Closed Circuit TV 以下 CCTV) などのリーディングエイド要素によって複合的に規定される。(1)~(3) の視条件を最適化し、ロービジョン者の視覚を最大限に活用できるようにすることは重要である。視覚障害教育の現場では、視条件を最適化するための様々な取り組みがなされている。

適切な文字サイズの決定には、Sloan ら [27] や永井 [44] が提案するように、いくつかの文字サイズで作成したサンプルを試行提示し、その中からロービジョン者が主観的に選好する方法がある。あるいは、Legge らの開発した MNREAD [16] を

小田らが日本語化した MNREAD-J [95], さらに, 中村らによって開発された小学生用検査チャート MNREAD-Jk [123] を使ってロービジョン者の読書曲線 [20] を計測し解析することで得られる臨界文字サイズ (Critical Print Size 以下 CPS) を採用する方法などを用いている. コントラストは, 読み効率に大きく影響すること [5][31], 特にロービジョン者は晴眼者に比較して全体的にコントラスト感度の低下が見られること [24] [73] [141] から, コントラストへの配慮は重要である. そこで, ロービジョン者に提供する教材では, 文字が他のオブジェクトに重なってコントラストが低下することを避け, やむを得ず重ねる場合には文字を白抜きにしてコントラストを確保し, 図教材においては不要なグラデーションの使用を避けるなどの配慮が必要である. 線幅の決定には, サンプルの試行提示により選好させる方法や, 有効線幅 y (分) を近距離視力 x (分) として $y = 1.05 + 0.07x$, および, 中間透光体混濁の場合は $y = 0.52 + 0.23x$ といった予測式により求める方法 [97] がある.

照度について, 文部科学省の学校環境衛生基準では, 教室およびそれに準ずる場所の照度の下限値は 300 lx とし, 教室および黒板の照度は 500 lx 以上であることが望ましいと規定されている. JIS 照度規格では, 学校空間の維持照度は 250~750 lx, 教室は 300 lx と規定されている. さらに, 低視力者では 750 lx より高い照度が適しているとの報告 [164] がある一方, 透光体混濁がある場合には照度が高すぎると羞明により視認性が低下するとの報告 [34] があり, 遮光カーテンで外光を遮断し机上照明を用いて適切な照度に調整が必要な場合もある.

リーディングエイドに必要な倍率の推定には、試行による選好の他、五十嵐ら [55] による 小数視力 = $0.5 \sim 0.6$ / 遠距離視力 や、近距離用ランドルト環で視認力 0.8 が得られる倍率を選定するといった方法がある。さらに、Kestenbaum ら [10] による新聞の文字を読むのに必要なリーディングエイドの屈折力を遠見視力の逆数とする方法や、氏間ら [85] の MNREAD-Jk を用いて拡大鏡の倍率をフィッティングするという方法もある。

このように、ロービジョン者の印刷文字を閲覧する際の視条件要素は多岐にわたり、視認状態の善し悪しはこれらの組み合わせによって規定されることから、主観的選好ではなく客観的評価に基づいて視条件の最適化を行おうとしたとき、各視条件についての評価が簡便で速やかに行えることが望ましい。そこで、本論文では、各々の視条件での印刷文字の視認状態を 30 秒程度の時間で簡便に評価するための評価法「tConChart (takahashi Contrast Chart)」を提案し有効性について評価を行う。本論文では、tConChart をロービジョン者に適用してロービジョンの視機能評価を行う前段階として、tConChart の性質を明確にするため、愛媛大学に在籍する学生を被験者とした実験を実施して、tConChart により基準となる計測値を収集し、計測値の意義について明らかにする。

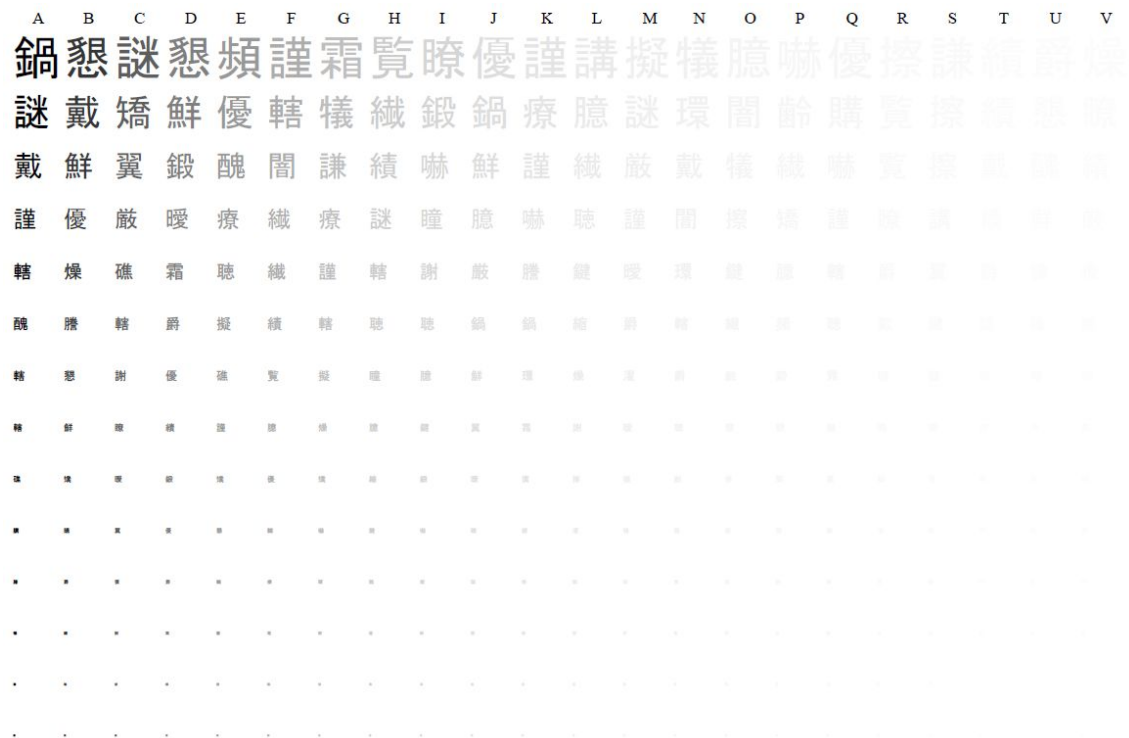


図 3.1 tConChart (常用漢字 17画明朝体)

印刷文字に対する視認状態を評価するための検査紙である。A4用紙に常用漢字17画の43文字からランダムに横22×縦14に配置する。左列から右列に向かって文字の濃さを、上行から下行に向かって文字サイズを0.1 log スケールで減じている。

3.2 方法

3.2.1 tConChart の構成

tConChart は図 3.1 に示すような、横置 A4 サイズの白色紙に、横 22 × 縦 14 の合計 308 個の文字を、行（横）方向にコントラスト、列（縦）方向に文字サイズを変化させて配置した検査紙である。

表 3.1 tConChart におけるレンジ, 文字の濃さ, RGB 値の対応表

レンジ	文字濃度	RGB 値
1	1.000	(0,0,0)
2	0.794	(52,52,52)
3	0.631	(94,94,94)
4	0.501	(127,127,127)
5	0.398	(153,153,153)
6	0.316	(174,174,174)
7	0.251	(191,191,191)
8	0.200	(204,204,204)
9	0.158	(215,215,215)
10	0.126	(223,223,223)
11	0.100	(230,230,230)
12	0.079	(235,235,235)
13	0.063	(239,239,239)
14	0.050	(242,242,242)
15	0.040	(245,245,245)
16	0.032	(247,247,247)
17	0.025	(249,249,249)
18	0.020	(250,250,250)
19	0.016	(251,251,251)
20	0.013	(252,252,252)
21	0.010	(252,252,252)
22	0.008	(253,253,253)

tConChart に配置する文字の濃さは 1 ~ 22 レンジで, 各々のレンジにおける文字の濃さ (T_EX で用いるパラメータ), RGB 値の対応を示している. ただし, レンジ 21 と 22 は文字の濃さでは区別されるが RGB 値に換算すると同値になる.

左端列の文字の色は RGB 値 (0, 0, 0) の黒色とし、背景の白色に対して最もコントラストが高くなるように設定する。RGB 値 (0, 0, 0) の文字濃度を最大値 1.000 と定義し、行の右方向に文字色の濃さを 0.1 log スケールで減じていくと、右端列 22 文字目の文字濃度は 0.008 となる。tConChart では、このように設定した濃度の文字を視認可能である限界を計測していく。この限界値が視認可能範囲を表すことから、本研究では「レンジ (Range)」という単位を用いて表すこととする。表 3.1 にレンジ 1~22 に対応する文字の濃度、および、RGB 値を示す。最上行の文字のサイズは、最大値として 30 ポイントに設定し、下方向に文字サイズを 0.1 log スケールで減じていくと、最下行 14 文字目の文字サイズは 1.5 ポイントとなる。表 3.2 に各行の文字サイズを示す。

使用する文字は、常用漢字 2,136 字のうち 17 画の以下の 43 文字から無作為に選択・配置する。

暖臆嚇轄環擬犧矯謹謙

鍵巖講購懇擦謝爵醜縮

償礁績緘鮮燥霜戴濯鍛

聽謄瞳謎鍋頻闇優翼覽

療瞭齡

常用漢字は、文部科学省文化審議会国語分科会の答申に基づき、「法令、公用文書、新聞、雑誌、放送など、一般の社会生活において、現代の国語を書き表す場

表 3.2 tConChart における文字サイズ

行番号	文字サイズ [pt]
1	30.00
2	23.83
3	18.93
4	15.04
5	11.94
6	9.49
7	7.54
8	5.99
9	4.75
10	3.78
11	3.00
12	2.38
13	1.89
14	1.50

tConChart で用いる各行の文字サイズを示している。文字サイズは $0.1 \log$ スケールで減じている。

「合の漢字使用の目安」として内閣告示された漢字である。17画漢字を用いるのは、常用漢字は1～29画の漢字で構成されるが、図3.2に示すように1～17画に全体の96%が含まれ、17画の常用文字を視認できれば、常用漢字で記述される書物を概ね読めると判断できるからである。用いる書体としては、一般の印刷物の多くが明朝体であることから、tConChartの基本形として明朝体を用いる。印刷データの作成には \TeX 環境にて0.001ポイント刻みで作成したPDFファイルを、レーザープリンタを用いて解像度1200 dpiで印刷する。こうして作成する検査紙(図3.1)は「tConChart (常用漢字17画明朝体)」と呼ぶが、本論文中では略記の「tConChart」を用いる。

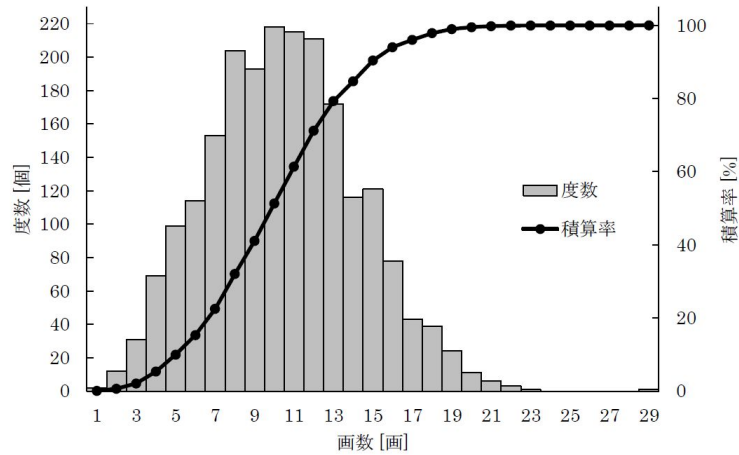


図 3.2 常用漢字における画数による度数分布，1～17画に常用漢字全体の96%が含まれる。

本来 tConChart は，ロービジョン者の生活・学習環境で使用する用紙・印刷機を用いて作成して適応させるべきものであるが，本研究では tConChart の定量的評価を行って標準的性質について論じるため，用紙として丹羽紙業上質普通紙（坪量 157g，白色度 85.00，非コート紙）を，印刷機としてリコー IPSiO SP C821 を用いて作成したものを統一して用いることとする。予備実験として，本節で述べた条件下で 12 名の学生に各 5 回の試行時間を計測したところ，平均 71.1 秒，標準偏差 23.6 であり，1 分～2 分程度の試行時間を要することを確認した。

3.2.2 tConChart による計測方法

被験者に対して計測に先立ち，世界医師会によるヘルシンキ宣言の理念を踏まえ，本研究についての十分な説明を行った上で，本人の自由意志による同意（Informed

Consent) を得る。計測は、評価対象とする視条件において実施する。例えば、教室においては、日常用いる眼鏡・コンタクトレンズ、照明器具、机・椅子を用い、両眼を使って見やすい視距離で計測する。ただし、計測中、姿勢および視距離は変えない。以降、この視条件を「日常視条件」と呼ぶ。被験者は、tConChart 検査紙を机上に置き、行列の最上行を左端列から右方向に文字を視認していく。やがて、文字濃度が減じて視認困難となったとき、視認できる最も右の文字に丸印を付ける。次に、下の行に移動し左端列から同様の作業を行う。これを最下行まで繰り返す。左端列の文字が視認できなくなった時点で計測を終了する。なお、ここでいう視認とは文字の構造確認ではなく文字を読み取することを意味する [147]。

3.2.3 日常視条件における最小分離閾の計測

日常視条件における最小分離閾を計測するために、横置 A4 サイズの白色紙に図 3.3 のようなコの字形の視力測定用視標を、横 20 × 縦 13 の行列状に視標サイズを変化させて配置する。視標としてランドルト環を用いないのは、曲線で構成されるランドルト環では、視標サイズが小さくなるにつれて形状の歪みが生じてしまうためである。コの字型視標であれば、直線のみで構成されるので歪みが生じ難く限界の極小サイズまで正確に印字可能である。

視標のサイズは、左上隅が最も大きく全高 30 ポイント (10.5438 mm) × 全幅 30 ポイント、切れ目幅 10 ポイント (3.51460 mm, $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 環境では $1 \text{ pt} = 0.3514598 \text{ mm}$ で換算) から開始し、右に向かって 0.01 log スケールで減少させる。行替えし

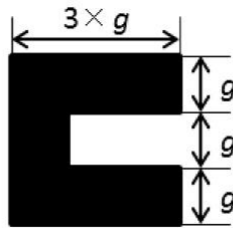


図 3.3 最小分離閾測定用視標

曲線で構成されるランドルト環は縮小するにしたがって形が歪むのに対し，最小分離閾測定用指標は直線のみで構成されるので歪みが生じにくい。

ながら 223 個の視標を 1 紙面上に配置する．最小の視標は， \TeX 環境で描画できる限界の全高 0.18077 ポイント \times 全幅 0.18077 ポイント，切れ目幅 0.06026 ポイント (0.02118 mm) となるため，解像度 1200dpi 以上で印字する必要がある．視標の切れ目方向は上下左右にランダムである．こうして作成した検査用紙は図 3.4 のようになり，これを tMinChart (takahashi Minimum Visual Confirmation Chart) と命名する．レーザプリンタを用いて解像度 1200dpi で印刷し，tConChart 計測時の各々の視条件で被験者に関覧させる．被験者は切れ目が視認できる最も小さい視標の行列番号と切れ目方向を回答する．本論文では，視距離を 300 mm にした場合の tMinChart を用いて計測できる最小分離閾を次のように定義する：

$$\text{最小分離閾} = \left(\tan^{-1} \frac{\text{最小視認幅}}{300} \right)^{-1}$$

なお，tMinChart で得られる最小分離閾は，およそ，0.03~4.12，logMAR で 1.61 ~ -0.62 となる．

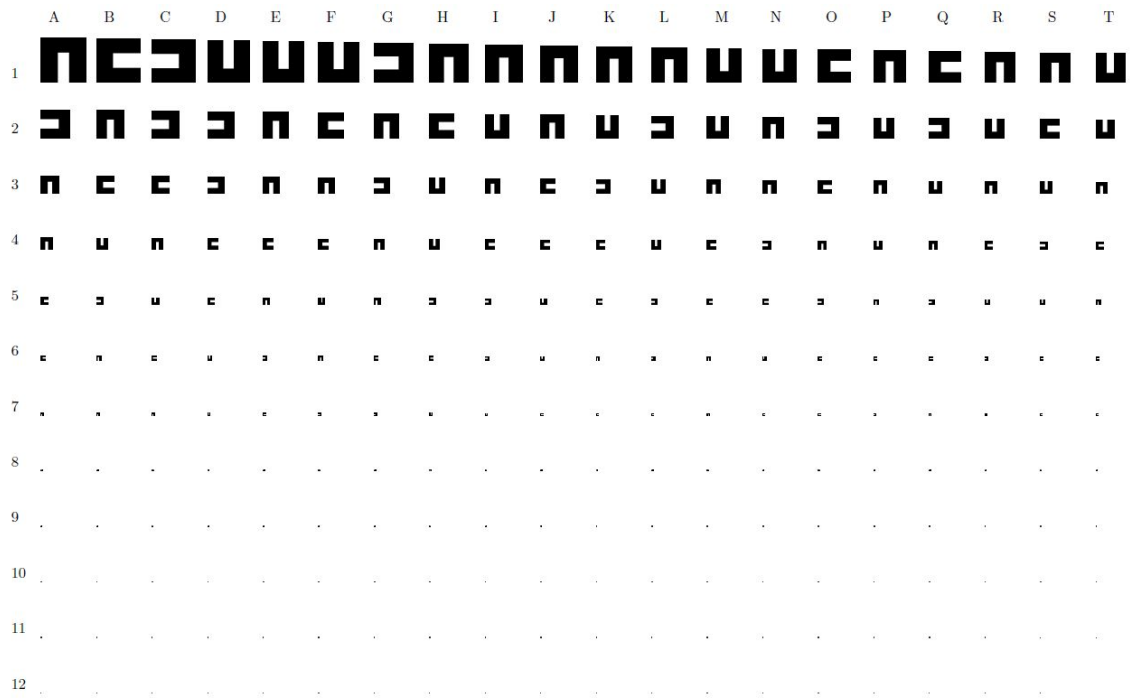


図 3.4 tMinChart

日常視における最小分離閾を計測するための検査紙である。A4用紙に、最小分離閾測定用視標の切れ目方向を上下左右の4方向にランダムに選んだものを、30.00～0.18ポイントの223個を配置している。

3.2.4 tConChart および tMinChart による計測

tConChart による標準的計測値を取得すると共に、最小分離閾との関係について検討する。計測実験の被験者および視条件は次のとおりである。

被験者：年齢18～29歳，平均19.3歳の学生106名（男44，女62）

視条件：日常視条件，視距離：30cm，計測場所：教室，机上照度：568 lx

被験者は，教室の椅子に着席し，tConChart 検査用紙を机上に置く。長さ30 cmを示すメジャーを用いて視距離を30cmに設定後，その姿勢と視距離を保つように

する。tConChart による計測を実施後、tMinChart の検査紙を机上に置き、視条件を変えずに計測を実施する。

3.2.5 再現性および17画漢字をランダム配置することの妥当性の検討

tConChart による計測の再現性の検討、および、tConChart において17画漢字をランダムに配置することの妥当性について検討する。計測実験の被験者は次のとおりであり、視条件は2.4節と同様である。

被験者：年齢18～25歳，平均19.3歳，tMinChart による最小分離閾0.8以上の学生90名をA群51名とB群39名の2群に分けて実施

3.2.4節と同様な方法でtConChart による計測を続けて2回行う。その際、漢字の配置の異なるランダムチャートを40種類用意し、そのうちの一つを無作為に基準チャートとする。A群では1回目と2回目共に基準チャートを用い、B群では、1回目は基準チャート、2回目は被験者毎に異なるランダムチャートを用いる。A群とB群の再現性の誤差を比較することで文字をランダムに配置することの妥当性について検討する。

3.2.6 tConChart と読書速度との関連性の検討

tConChart の計測結果と読書速度との関係について検討する。計測実験の被験者は次のとおりであり、視条件は 3.2.4 節と同様である。

被験者：年齢 18～25 歳，平均 19.3 歳，tMinChart による最小分離閾 0.8 以上の学生 90 名

横置 A4 サイズの白色紙に MNREAD-J で用いられる刺激文（漢字仮名交じり 10 文字×3 行）を，3 文を縦に配置して印刷した検査紙を用意する。書体は明朝体で行間は 1.5 行とする。検査用紙を机上に置き，3.2.4 節と同様に視距離を 30 cm に固定し，合図とともにできるだけ速く音読させる。その時の所要時間を，ストップウォッチを用いて計測し，計算式（文字数 90 - 読み飛ばし・誤読字数）× 60 ÷ 所要時間（秒）により読書速度（字数/分）を求める。あらかじめ練習をして安定して計測できることを確認後，計測を実施する。読み刺激として MNREAD-J の刺激文を用いる理由は，読書速度を計測するための刺激文として統制されていることと，これまでに MNREAD-J に関する多くの研究がなされ刺激文としての信頼性が高いことによる。tConChart で用いたのと同じ 30～1.5 ポイントの各文字サイズにおける読書速度を計測し，tConChart での計測結果と併せて検討する。

3.3 結果

3.3.1 標準的 tConChart 曲線

tConChart を用いて計測した結果の典型的な例を図 3.5 に示す。文字サイズの最も大きい 30 ポイントで最大の視認レンジとなり、文字サイズの減少とともに視認レンジは低下する。横軸（対数）に文字サイズ、縦軸にレンジをとると、グラフは全体として左上に凸の緩やかな曲線を描く。このような tConChart を用いて得られる曲線を「tConChart 曲線」と呼ぶこととする。tConChart 曲線の解析にあたり、視認レンジ（Visual Confirmation Range 以下 VR）、最大視認レンジ（Maximum Visual Confirmation Range 以下 MaxRange）、最小視認文字サイズ（Minimum Visual Confirmation Character Size 以下 MinSize）、視認エリア（Visual Confirmation Area 以下 VA）を表 3.3 のように定義する。図 3.5 の典型的な例においては、文字サイズ 30 ポイントでの VR が最も大きく、MaxRange は 16、MinSize は 3.78 ポイント、VA は各文字サイズにおける VR を積算して求め、その値は 111 であった。

様々な視力およびコントラスト感度を有する集団において観察される tConChart 曲線の分布を検討する。学生 106 例における平均の tConChart 曲線を図 3.6 に示し、MaxRange、MinSize、VA の平均および標準偏差を表 3.4 に示す。文字サイズが 30 ポイントでは、VR が平均 17.9、標準偏差 0.99 であり、文字サイズの減少とともに VR が低下し、標準偏差が拡大する傾向が見られた。対数近似により

$$y = 6.9317\ln(x) - 3.5546, R^2 = 0.8974$$

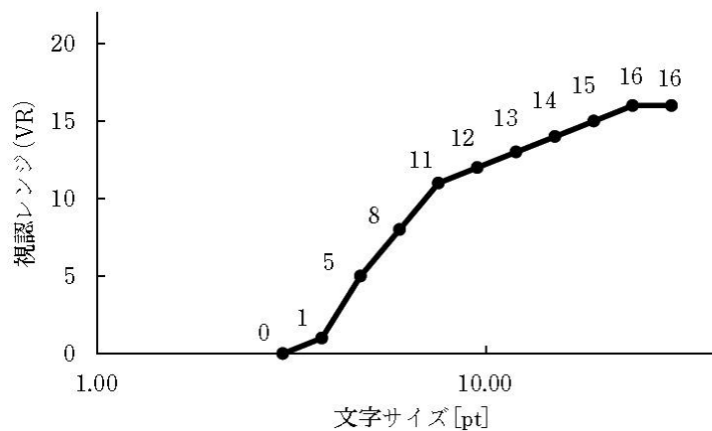


図 3.5 tConChart による計測結果の典型的な例

tConChart を用いて学生で計測された tConChart 曲線の典型的な例を示している。

が得られた。

3.3.2 再現性およびランダム配置の妥当性の検討

A 群および B 群における 2 回の計測誤差の集計結果を表 3.5 に示す。基準シートのみを用いた A 群と、基準シートとランダムシートを用いた B 群で、VR, MaxRange, MinSize, VA で生じる誤差のいずれについても t 検定により 5% の危険率で有意な差が見られなかったことから、tConChart の計測結果は文字の配置順によらないという結論が得られた。

次に、1 回目の計測と 2 回目の計測とでの各文字サイズで計測された VR の差の絶対値を VR の誤差として検討したところ、A 群と B 群を含めた VR の誤差の平均は 0.77、標準偏差 0.31 であったことから、99% 信頼区間の $0.77 + 0.31 \times 2.58 = 1.5698$

表 3.3 tConChart 曲線分析用語定義

用語	定義
視認レンジ (Visual Confirmation Range; VR)	各行において視認できたレンジ
最大視認レンジ (Maximum Visual Confirmation Range; MaxRange)	検査紙 1 枚における最大の視認レンジ
最小視認文字サイズ (Minimum Visual Confirmation Character Size; MinSize)	検査紙 1 枚における視認できた最小の文字サイズ
視認エリア (Visual Confirmation Area; VA)	検査紙 1 枚における視認できた広さ (視認レンジの積算値)

表 3.4 MaxRange, MinSize, VA の平均と標準偏差

	MaxRange	MinSize	VA
平均	17.9	3.04	135.0
標準偏差	1.00	0.89	18.0

(平均値±標準偏差×2.58=99%信頼区間) が 2 より小さくなる。つまり、同一被験者が同一視条件の下で計測した VR に 2 レンジ以上の誤差が含まれる可能性は 1%以下であることを示している。したがって、1%の危険率で VR は 2 レンジ以上の差をもって有意とできることが示された。

3.3.3 tConChart 曲線に与える最小分離閾の影響

学生 106 名の最小分離閾は 0.46~2.48 (0.34~−0.39 logMAR) であった。最小分離閾のヒストグラムを図 3.7 に示す。最小分離閾と MaxRange の関係を図 3.8, 最小分離閾と MinSize の関係を図 3.9, 最小分離閾と VA の関係を図 3.10, そして、

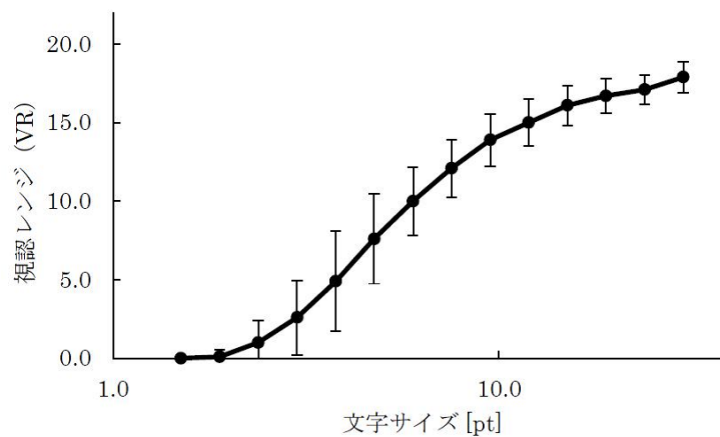


図 3.6 標準 tConChart 曲線

106名の学生で計測された tConChart 曲線の平均とばらつきを示している。

各々の相関係数を表 3.6 に示す。図 3.8～図 3.10 のグラフから、最小分離閾が高いほど MaxRange が高く、MinSize が小さく、VA は広くなる傾向が見て取れた。

3.3.4 tConChart と読書速度との関係の検討

1 分間に、正確に音読できた文字数を読書速度（文字/分）、読書速度を文字サイズの関数で表したグラフを読書曲線 [20] という。読書速度を落とさずに読むことのできる最小の文字サイズを臨界文字サイズ（CPS）、文字サイズが読書するのに適当な条件で提示されたときの読書速度の平均値を最大読書速度（Maximum Reading Speed 以下 MRS）、文字を文字として知覚できる最小の文字サイズを読書視力（Reading Acuity 以下 RA）という。

計測結果の一例について、tConChart 曲線の MaxRange と読書曲線における読書

表 3.5 A 群と B 群での 2 回の計測誤差の比較表

グループ		文字サイズ毎の VR の誤差	MinSize の 誤差	MaxRange の 誤差	VA の 誤差
A 群	平均	0.80	0.60	0.50	6.60
	標準偏差	0.29	0.57	0.57	5.68
B 群	平均	0.70	0.50	0.60	5.60
	標準偏差	0.31	0.59	0.69	4.57
t 検定		0.093391	0.710161	0.496865	0.373363

A 群と B 群で 2 回計測した計測値について，MaxRange，MinSize，VA の誤差の平均，標準偏差，t 検定結果を示している。

表 3.6 tConChart 曲線と最小分離閾との相関

関係要素	相関係数
最小分離閾—MaxRange	-0.54
最小分離閾—MinSize	0.61
最小分離閾—VA	-0.68

速度の最大値で正規化してプロットしたグラフを図 3.11 に示す。17 画の漢字を用いる tConChart 曲線と，平仮名と平均画数 7.6 画の漢字 8 文字からなる MNREAD-J の刺激文を用いて計測した読書曲線を比較すると，後者の方がより小さい文字サイズまで視認できている。計測した 90 例について tConChart 曲線の MinSize と読書曲線の RA を比較すると，MinSize の方が平均で $1.46 \times 0.1 \log$ ポイント大きい。そこで，tConChart 曲線を左方に補正しながら $1.46 \times 0.1 \log$ 付近での相関を検討したところ，図 3.12 に示すように，補正值 0， $0.1 \log$ ， $0.2 \log$ のうち， $0.2 \log$ の補正で相関が最も高くなった（相関係数 = 0.92， $P = 0.00061$ ）。なお， $0.3 \log$ 以上では各々の計測結果における相関係数の計算に用いるサンプル数が減少するた

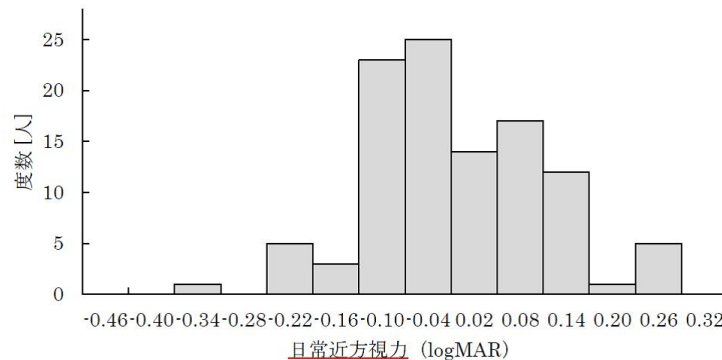


図 3.7 学生の最小分離閾のヒストグラム

tMinChart を使って 106 名の学生で計測された最小分離閾の分布を示している。

め、信頼できる結果が得られないと判断した。これらのことから、tConChart 曲線と読書曲線の関係を検討する際には、0.2 log の補正を行うこととし、補正した曲線を「補正 tConChart 曲線」と呼ぶこととする。

次に、各被験者の読書曲線について CPS を求めた。CPS を求めるには、個々の読書曲線において読書速度の高いデータから順にサンプルに加えながら平均と標準偏差を求め、平均に対して読書速度が標準偏差の 1.96 倍を超えて低下した時を有意に読書速度の低下が見られたと判断し、その直前の文字サイズを CPS と判定した。全被験者の CPS と補正 tConChart 曲線との対応関係をヒストグラムとして図 3.13 に示す。補正 tConChart 曲線において正規化した VR の 50~80 % に、読書曲線における CPS の 83% が含まれた。なお CPS が存在する補正 tConChart 曲線の平均は 65 %、標準偏差 0.12 であったことから 95 % 信頼区間は 42~88 % となった。

CPS との相関係数は、MaxRange: -0.149, MinSize: 0.191, VA: -0.426 となり、

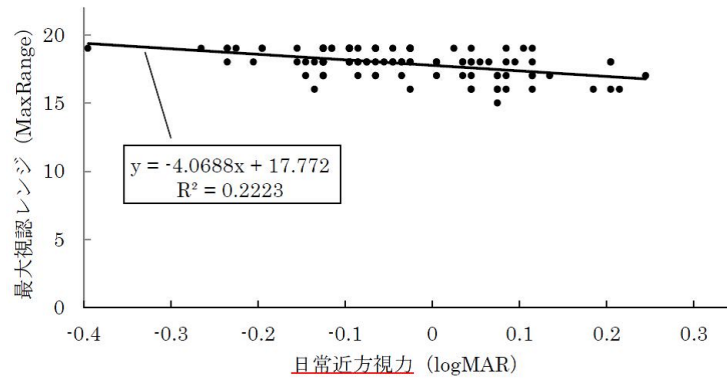


図 3.8 最小分離閾と最大視認レンジの散布図

106名の学生で計測された最小分離閾と最大視認レンジ (MaxRange) の関係を散布図で示している。

MRS との相関係数は、MaxRange: 0.166, MinSize: -0.093, VA: 0.134 となって、いずれも相関は認められなかった。

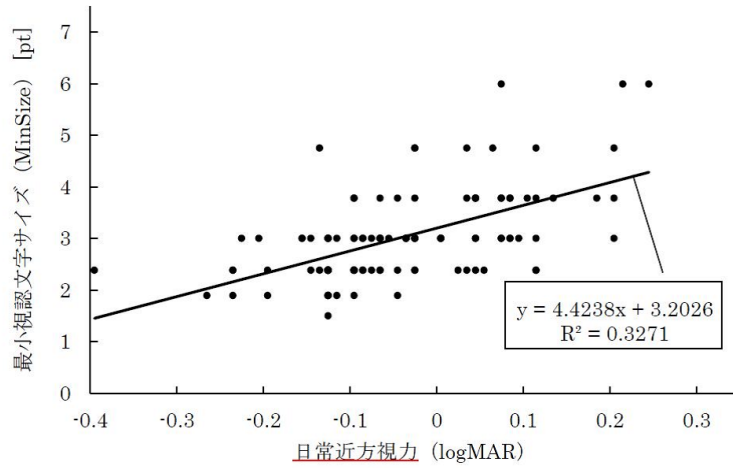


図 3.9 最小分離閾と最小視認文字サイズの散布図

106名の学生で計測された最小分離閾と最小視認文字サイズ (MinSize) の関係を散布図で示している。

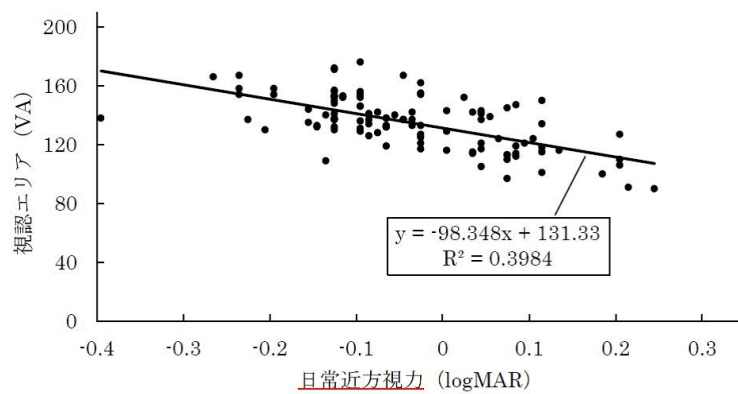


図 3.10 最小分離閾と視認エリアの散布図

106名の学生で計測された最小分離閾と視認エリア (VA) の関係を散布図で示している。

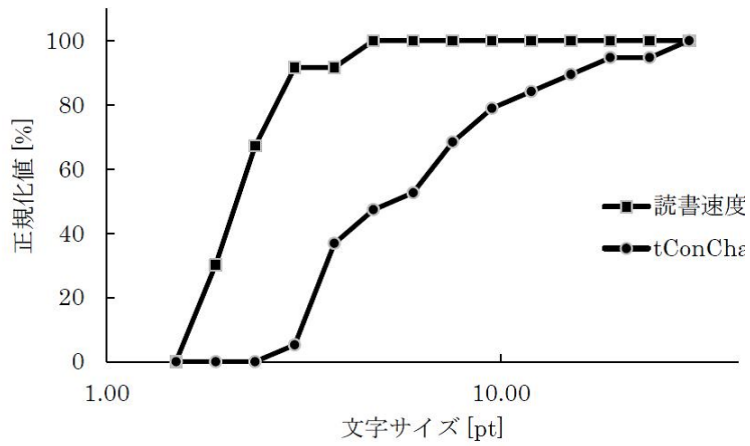


図 3.11 tConChart と読書速度の計測結果の一例

tConChart と読書速度の計測結果を正規化してグラフに示している。

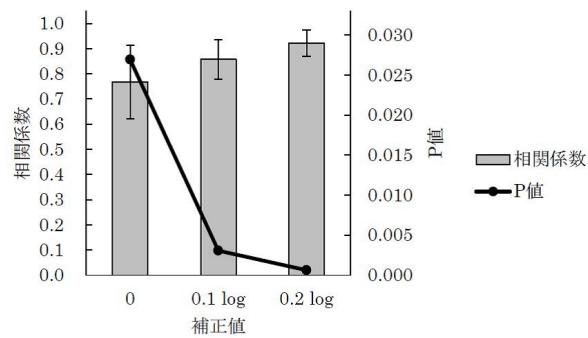


図 3.12 シフト値と相関係数の平均およびP値

90名の学生を被験者として計測した tConChart 曲線を左方に 0, 0.1 log, 0.2 log 補正した時の読書曲線との相関係数の平均と P 値を示している。補正值 0.2 log で最も相関係数が高く、P 値が低くなっている。

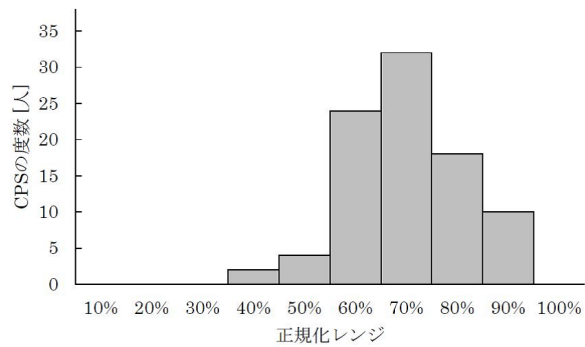


図 3.13 補正 tConChart 曲線と CPS の関係

補正 tConChart 曲線において CPS が存在する位置のヒストグラムである。補正 tConChart 曲線の 50～80 % の範囲に CPS の 83 % が存在した。

3.4 考察

3.4.1 行動評価モデルとしての tConChart の意義

本研究で開発した tConChart は、ロービジョン者の生活・学習環境で使用される用紙、PC、および、印刷機を用いて印刷される。背景輝度は用紙の質に依存する。文字の輝度は PC のプリンタドライバの設定や印刷機のインクの質、解像度、印刷方式に依存する。よって、検査紙上の文字のコントラストは絶対値ではない。さらに、計測は教室や居室などのロービジョン者の生活・学習環境において行われるので、照度、視距離、外光の有無といった計測条件は規格化しない。これらのことから、tConChart による計測値は、ロービジョン者の視機能以外の要素を多く含むことになり、視機能の機能評価法としての意義は高いとはいえない。しかし、ロービジョン者に対して最適文字サイズを処方するような場面で視力・視野といった機能評価から最適文字サイズを推計することが困難であること、文字とコントラスト感度の関係についてリーガン低コントラスト視力表やペリーロブソン表による計測結果からロービジョン者の生活・学習環境における視条件を最適化する報告は見あたらないこと、そして、MNREAD-J を用いた行動評価による方法論の適合性が高い [173] ことを考え合わせると、ロービジョン者の QoV (Quality of Vision) の最適化には、検査値が厳密に視覚特性だけをとらえた機能評価よりも、むしろロービジョン者の生活・学習環境が視認状態に与える影響を含んで計測される行動評価の有用性は高いと考えられる。tConChart を用いた計測により、

複数の視条件を比較・評価できることになれば、ロービジョン者に最適な視条件を選択提供できるようになると考えられる。

3.4.2 ランダム配置の妥当性

基準チャートとランダムチャートにおける誤差の比較により、ランダムに文字を配置して検査することの妥当性が示された。文字をランダムに配置することで、複数回の同一検査紙による検査で被験者が文字配列を暗記してしまうことによる検査結果の不具合を防ぐことができる。

3.4.3 tConChart 曲線と読書曲線の関係

tConChart 曲線では、30 ポイントの文字サイズで最も VR が高く、文字サイズの減少とともに VR が低下する。1 ポイントを 0.351mm とすると、30 ポイントの最大文字幅は約 10.5 mm で、視距離 30 cm での視角は 2.0° である。視角 2.0° で表せる最も低い周波数は、この範囲を黒で塗りつぶした状態で、1 周期は視角 4.0° 、視角 1.0° あたり 0.25 周期となるから、この文字に含まれ得る横方向の最低空間周波数成分は 0.25 cpd (cycle per degree) である。文字サイズの減少や文字構造の複雑化に伴って、文字に含まれる空間周波数は高くなる。コントラスト感度を空間周波数ごとに調べたコントラスト感度関数 (Contrast Sensitivity Function 以下 CSF) において、伊藤 [141] は、晴眼者では 3~4 cpd に、ロービジョン者では 0.3

～0.5 cpd に CSF のピークがあることを報告している。視距離 30cm で 17 画漢字を視認するために晴眼者が用いている空間周波数帯は、tConChart 曲線において文字サイズの減少に伴い VR が常に下降していることから、30 ポイントの 17 画漢字において既に晴眼者の CSF のピークである 3～4cpd を超えていると考えられる。一方、空間周波数の高い漢字を視知覚するためにはロービジョン者側の視覚情報処理系の空間解像度が漢字構造の複雑さに応じる必要がある [150] ことから、ロービジョン者では晴眼者とは異なり、各々の視覚特性に応じた特徴的な tConChart 曲線が計測される可能性がある。

tConChart 曲線における視認レンジは、コントラストの低下という視認条件の悪化に耐えて文字を視認する「視認能力の余裕の程度」を表していると考えられる。これを「視認余裕度」と定義する。効率のよい読書では、文字を 1 文字毎に視認しているのではなく、単語や文節といった、まとまった単位での視認を行っている。良好な読書速度が得られるためには、日本語でもアルファベットでも 5～6 文字程度が視野に入る必要がある [65]。1 文字毎ではなく、文節単位で文字を視認するためには、相応の視認余裕度が必要であり、補正 tConChart 曲線における正規化レンジの 65%付近に CPS が存在することから、良好な読書速度を得るために必要な視認余裕度はこのあたりに存在すると考えられる。

3.4.4 視条件最適化への適応性

五十嵐 [105] は、1文字読みのような単純な判読では、視力の影響が極めて強いと指摘した。tConChart は1文字読みである点で最小分離閾の影響が強いと考えられるが、tConChart で計測される視認余裕度は最小分離閾とは異なった性質を持つと考えられる。最小分離閾は閾値であるのに対し、視認余裕度は閾値までの幅である。コントラスト低下という負荷をかけることで、視覚器レベルにとどまらず、高次脳機能レベルの働きとしての文字視認能力が計測され、その結果、読書速度と相関するものと考えられる。秋月ら [160] は、最大視力に対する各視条件で得られる視力の比を視力比として視条件の評価を行っているが、tConChart は視認余裕度を指標として視条件の評価を行おうとしている。視認余裕度と読書速度の相関が高いことから、高い視認余裕度を得られる視条件において、より楽で安定した読書が可能になることが期待できるからである。加えて、tConChart による評価は1分~2分程度で実施可能であることから、複数の視条件を効率よく比較評価しながら、より読書に適した視条件を選択する方法として活用できる可能性が高いと考えられる。

3.5 今後の課題

ロービジョン者の視条件の最適化における tConChart の有用性を検討するためには、(1) 屈折異常，透光体混濁，視野狭窄の各要素が tConChart 曲線に及ぼす影響，(2) 同一被験者で視条件を変化させた時の tConChart 曲線の変化，および，それを視条件の最適化の根拠とすることの妥当性，(3) ターゲットとする文章に含まれる文字の複雑さに応じた補正值，(4) ロービジョン者に対して視条件の最適化に応用した事例などについての検討がなされる必要がある。

第4章 今後の課題

4.1 はじめに

第1章では、本研究の背景および目的を述べた。第2章では、特別支援学校の視覚障害の生徒で構成されるクラスにおいて、生徒の視覚特性および電子黒板の表示特性に基づいた視環境の最適化を行い、さらに、楽に視認可能な図教材の作成と提示を行って、授業が成立したことを示した。第3章では、印刷文字を閲覧する際の視条件を評価するためのチャートとしてtConChartを提案し、評価法としての再現性、17画漢字をランダムに配置することの妥当性、最小分離閾の計測値に及ぼす影響、計測値と読書速度との関係といったtConChartの基本的性質について示した。この章ではこれらを踏まえて、今後、ロービジョン者の視環境を効率よく最適化していく上で、課題となる事項について述べる。

4.2 視覚特性計測ツールの汎用化と公開

第2章で生徒の視覚特性を評価するために用いた視覚特性ツールは、電子黒板における教材提示の最適化だけではなく、その他のさまざまな場面においても活

表 4.1 視覚特性計測ツール

名称	用途
ランドルト環判別時間計測ツール	学習・生活における視覚の活用の可能性を判定
コントラスト感度計測ツール	コントラスト感度の低下の有無を判定
コントラストポラリティ効果計測ツール	正のコントラストと負のコントラストのどちらを選択すべきかを判定
電子デバイスにおける最適文字サイズ推定ツール	電子デバイスにおける最適文字サイズの推定
有効線幅の計測ツール	楽に視認できる線幅の推定

用できる可能性がある。表 4.1 に示す各々の視覚特性計測ツールを多くの人が必要に応じて活用し、視環境の最適化に役立てられるよう、各々のツールの目的、使用法、データ処理・分析法を整理して公開したいと考える。

4.3 tConChart における今後の課題

tConChart の有する性質のうち第3章で明らかできたのは一部に過ぎない。tConChart の活用範囲の拡大も含めて、今後さらに次のような項目について検討すべきだと考える。

4.3.1 視力低下，視野狭窄，コントラスト感度低下といった視覚特性の各要素が tConChart の計測値に与える影響

tConChart はロービジョン者の印刷文字に対する視認状態を評価することを目的として提案したことから，視力低下，視野狭窄，コントラスト感度の低下といったロービジョンの視覚特性の一つ一つの要素が tConChart の計測値にどのように影響するかを明らかにしていくことは急務である．そして，仮に晴眼状態に比較して，視覚特性に特徴的な計測値が得られるとすれば，晴眼者で得られる計測値を目標値にしてロービジョン者の視環境の最適化パラメータの値を設定したり，tConChart による計測値を分析して晴眼者の見え方の異常をいち早く発見したりできる可能性がある．

4.3.2 書体の影響

tConChart の刺激文字は，現在，明朝体を用いているが，教科書体，ゴシック体，創英角体，毛筆体といった他の書体を用いて計測した場合の，tConChart の計測値への影響および読書速度との関係を明らかにしておくことで，簡便な書体の最適化の方法として活用できる可能性がある．

4.3.3 文字の画数の影響

tConChart は常用漢字の約 96.0%が 1~17 画に含まれることを根拠に 17 画漢字を刺激文字として用いている。これは常用漢字で記載された文書を概ね読むことができる水準を想定したものである。一方、1~10 画までに常用漢字の約 51.3%が含まれることから、10 画漢字を刺激文字として計測する tConChart の計測値は、常用漢字を用いて記述された文書の読書において、出現する漢字の約半数を楽に視認できる文字サイズを推定できる可能性がある。この水準で判定された最適文字サイズは、17 画漢字を刺激文字とする tConChart によって判定される文字サイズより小さいことが予想される。そうした文字サイズでの読書においては、画数の多い漢字が出現して文字の判別がしにくい時には、視距離を短くしたり、文脈による推定や脳の補完作用を活用したりしながら読み進めることになる。10 画漢字を刺激文字とする tConChart は、こうしたタイプの読書法に適した文字サイズを推定できる可能性がある。拡大鏡、拡大読書器、電子デバイス等での閲覧や、視野狭窄で窓範囲が限定されている場合は、表示可能な文字数確保のために、文字サイズを可能な限り小さくする必要がある。こうした場合、10 画漢字を刺激文字とする tConChart の計測値を基に推定した文字サイズの方が適していることが予想される。

4.3.4 小中学生各学年用 tConChart の開発

小中学校における各学年で教育する教育漢字を刺激文字とする tConChart の作成・活用は視覚障害教育において有用性が高いと考えられる。ただし、これを用いる際には、tConChart における文字の判別水準を「文字の読み取り可能」ではなく「構造確認可能」とすべきである。小中学校段階では、漢字の学習は重要な項目であり、そのためには文字の構造を正しく理解する必要があることから、漢字の構造を確認できる文字サイズで提示する必要がある。

4.4 有効線幅の推定手法の開発

電子黒板に提示する際の有効線幅の推定については 2.2.6 で述べた。5 × 5 の 25 個の図形の中から 5 角形の含まれる数をカウントするのに要する時間を根拠として、楽に見ることのできる線幅を推定する方法である。この方法は、MNREAD-J と同様、計測方法として分かりやすい反面、計測には時間と手間を要する。そのため、ロービジョン者のあらゆる学習・生活場面における有効線幅を推定することは困難である。ロービジョン者にとって細すぎる線幅は、視認しにくく、処理するために長い時間を要するし、必要以上に太い線幅は、混み合い効果によりかえって見づらくなることから、楽に見える最も細い線幅を求めなくてはならない。有効線幅をあらゆる学習・生活場面で、しかも各色事に推定できるようにするために、より簡便な有効線幅の推定法の開発が求められるところである。

4.5 おわりに

視環境最適化手法によって、ロービジョン者の学習・生活場面のあらゆる視環境が最適化されることを望む。とりわけ電子デバイスの画面表示を見やすくするためのユーザビリティシステムとして、視環境最適化手法が組み込まれることで、より簡便にユーザに適した操作環境を提供できると期待する。

ところで、本研究の恩恵を受けるのはロービジョン者だけではないと考える。中学1年生を対象とした調査で、近見視力1.0未満の子どもは、学習場面において文字や行の読み飛ばし、どこを読んでいるのか分からなくなる、PCの画面が見つらいなどの「視覚情報を得る上での困難」を自覚しており、学習能率がよくないことの報告[71]がある。ロービジョン者の視環境を最適化するための手法は、こうしたロービジョンではない人々の視環境の改善にも役立てられると考えられる。今後は「自動化」を視野に入れた研究が必要である。同じ閲覧場面や操作環境であっても、天候による照度の変化や体調による見え方の変化を考慮すると、静的な最適化を実現するテイラーメイドインターフェースではなく、動的に環境やユーザの状態に自動的に適応させるアダプティブインターフェース[119]の実現が望まれる。このような最適化の自動化は、最適化の効率化の延長線上にあると考えられ、まさに本研究の行き着くところを示している。

以上のことから、ロービジョン者の視環境の最適化手法の研究は、ロービジョン者および全ての視覚を活用して生活する人々の視環境を効率的に最適化するこ

とで、これらの人々の生活の質の向上に寄与するものである。

関連図書

- [1] 南山堂医学大辞典. 南山堂, 1990.
- [2] 眼科学: 疾患とその基礎. メディカル葵出版, 2005.
- [3] GB Arden. The importance of measuring contrast sensitivity in cases of visual disturbance. *British Journal of Ophthalmology*, Vol. 62, No. 4, pp. 198–209, 1978.
- [4] Valeria M. Bondarko and Marina V. Danilova. What spatial frequency do we use to detect the orientation of a landolt c? *a Laboratory for Vision Physiology*, Vol. 37, pp. 2153–2156, August 1997.
- [5] BRIAN Brown. Reading performance in low vision patients: relation to contrast and contrast sensitivity. *American journal of optometry and physiological optics*, Vol. 58, No. 3, pp. 218–226, 1981.
- [6] Sing-Hang Cheung, Christopher S Kallie, Gordon E Legge, and Allen MY Cheong. Nonlinear mixed-effects modeling of MNREAD data. *Investigative ophthalmology & visual science*, Vol. 49, No. 2, pp. 828–835, 2008.

- [7] Susana TL Chung, J Stephen Mansfield, and Gordon E Legge. Psychophysics of reading. XVIII. the effect of print size on reading speed in normal peripheral vision. *Vision research*, Vol. 38, No. 19, pp. 2949–2962, 1998.
- [8] Donald C Fletcher and Ronald A Schuchard. Preferred retinal loci relationship to macular scotomas in a low-vision population. *Ophthalmology*, Vol. 104, No. 4, pp. 632–638, 1997.
- [9] Donald C Fletcher, Ronald A Schuchard, and Gale Watson. Relative locations of macular scotomas near the prl: effect on low vision reading. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, Vol. 36, No. 4, 1999.
- [10] Alfred Kestenbaum and Robert M Sturman. Reading glasses for patients with very poor vision. *AMA archives of ophthalmology*, Vol. 56, No. 3, pp. 451–470, 1956.
- [11] Oda Kouichi. Critical print size is a stable and consistent measure over two reading parameters. *Poster #078 presented at Vision 2005*, 2005.
- [12] Oda Kouichi. How stimulus luminance affects reading? *Poster Presentation at Vision2008 9th International Conference on Low Vision*, 2008.
- [13] Gordon E Legge. Psychophysics of reading in normal and low vision. In *OSA Noninvasive Assessment of the Visual System, 1993, Monterey; Portions of*

this research (MNREAD acuity charts) were presented at the aforementioned conference. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2007.

- [14] Gordon E Legge, J Stephen Mansfield, and Susana TL Chung. Psychophysics of reading: XX. linking letter recognition to reading speed in central and peripheral vision. *Vision research*, Vol. 41, No. 6, pp. 725–743, 2001.
- [15] Gordon E Legge, Denis G Pelli, Gary S Rubin, and Mary M Schleske. Psychophysics of reading—I. normal vision. *Vision research*, Vol. 25, No. 2, pp. 239–252, 1985.
- [16] Gordon E Legge, Julie A Ross, Andrew Luebker, and James M Lamay. Psychophysics of reading. VIII. the minnesota low-vision reading test. *Optometry & Vision Science*, Vol. 66, No. 12, pp. 843–853, 1989.
- [17] Gordon E Legge, Gary S Rubin, Denis G Pelli, and Mary M Schleske. Psychophysics of reading—II. low vision. *Vision research*, Vol. 25, No. 2, pp. 253–265, 1985.
- [18] J Stephen Mansfield, Gordon E Legge, and Mark C Bane. Psychophysics of reading. XV: Font effects in normal and low vision. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, Vol. 37, No. 8, pp. 1492–1501, 1996.

- [19] Kimberly Merrill, Katherine Hogue, Sara Downes, Ann M Holleschau, Beth R Kutzbach, John T MacDonald, and C Gail Summers. Reading acuity in albinism: Evaluation with MNREAD charts. *Journal of American association for pediatric ophthalmology and strabismus*, Vol. 15, No. 1, pp. 29–32, 2011.
- [20] Beth A O'Brien, J Stephen Mansfield, and Gordon E Legge. The effect of print size on reading speed in dyslexia. *Journal of Research in Reading*, Vol. 28, No. 3, pp. 332–349, 2005.
- [21] Denis G Pelli. The visual requirements of mobility. In *Low Vision*, pp. 134–146. Springer, 1987.
- [22] EC Poulton. Peripheral vision, refractoriness and eye movements in fast oral reading. *British Journal of Psychology*, Vol. 53, No. 4, pp. 409–419, 1962.
- [23] Gary S Rubin and Gordon E Legge. Psychophysics of reading. VI—the role of contrast in low vision. *Vision Research*, Vol. 29, No. 1, pp. 79–91, 1989.
- [24] Gary S Rubin and Gordon E Legge. Psychophysics of reading. VI—the role of contrast in low vision. *Vision Research*, Vol. 29, No. 1, pp. 79–91, 1989.
- [25] Elizabeth Russell-Minda, Jeffrey W Jutai, J Graham Strong, Kent A Campbell, Deborah Gold, Lisa Pretty, and Lesley Wilmot. The legibility of type-

- faces for readers with low vision: A research review. *Journal of visual impairment & Blindness*, Vol. 101, No. 7, pp. 402–415, 2007.
- [26] FS Said and Robert A Weale. The variation with age of the spectral transmissivity of the living human crystalline lens. *Gerontology*, Vol. 3, No. 4, pp. 213–231, 1959.
- [27] Louise L Sloan and Darlene J Brown. Reading cards for selection of optical aids for the partially sighted. *American journal of ophthalmology*, Vol. 55, No. 6, pp. 1187–1199, 1963.
- [28] Ahalya Subramanian and Shahina Pardhan. The repeatability of MNREAD acuity charts and variability at different test distances. *Optometry & Vision Science*, Vol. 83, No. 8, pp. 572–576, 2006.
- [29] Kathleen A Turano, Agnes S Huang, and Harry A Quigley. Temporal filter of the motion sensor in glaucoma. *Vision research*, Vol. 37, No. 16, pp. 2315–2324, 1997.
- [30] Kazuhito Ujima and Takeshi Murata. Development of an HTML textbook and viewer for low-vision and a it's estimation. 教育システム情報学会誌 = Transactions of Japanese Society for Information and Systems in Education, Vol. 17, pp. 415–424, 2000-10-01.

- [31] FL Van Nes and JC Jacobs. The effects of contrast on letter and word recognition. *IPO Ann. Prog. Rep*, Vol. 16, pp. 72–80, 1981.
- [32] Gianni Virgili, Chiara Pierrottet, Francesco Parmeggiani, Monica Pennino, Giovanni Giacomelli, Piero Steindler, Ugo Menchini, and Nicola Orzalesi. Reading performance in patients with retinitis pigmentosa: a study using the MNREAD charts. *Investigative ophthalmology & visual science*, Vol. 45, No. 10, pp. 3418–3424, 2004.
- [33] RA Weale. Age and the transmittance of the human crystalline lens. *The Journal of physiology*, Vol. 395, No. 1, pp. 577–587, 1988.
- [34] Warren W Wilcox. The basis of the dependence of visual acuity on illumination. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 18, No. 1, p. 47, 1932.
- [35] Deyue Yu, Gordon E Legge, Heejung Park, Emily Gage, and Susana TL Chung. Development of a training protocol to improve reading performance in peripheral vision. *Vision research*, Vol. 50, No. 1, pp. 36–45, 2010.
- [36] 森田ひろみ, 八木善彦, 菊地正, 椎名健. 周辺刺激の提示が横スクロール表示の読みに及ぼす影響: 表示文字数と快適速度の関係からの検討(日本基礎

- 心理学会第24回大会, 大会発表要旨). 基礎心理学研究, Vol. 24, No. 2, pp. 226–227, 2006.
- [37] 岩切一幸, 毛利一平, 外山みどり, 堀口かおり, 落合孝則, 城内博, 斉藤進. Vdt 作業者の身体的疲労感に影響する諸因子の検討. 産業衛生学雑誌, Vol. 46, pp. 201–212, 2004.
- [38] 村越一支, 高田誠, 倉田是. 空間周数応答特性モデル. 電子情報通信学会技術研究報告 NC, ニューロコンピューティング一般社団法人電子情報通信学会, Vol. 94, pp. 41–47, 1994.
- [39] 森本一成, 西村武, 新居雅行. Vdt 画面の表示モードに対する好みと疲労. テレビジョン学会誌, Vol. 40, pp. 1133–1139, 1986.
- [40] 松宮一道, 内川恵二, 栗木一郎. 中心視負荷と眼球運動を伴った観察による周辺視コントラスト感度の変化 (i論文特集i人間の視覚・聴覚情報). 映像情報メディア学会誌 : 映像情報メディア 52:565-570, 映像情報メディア学会誌 : 映像情報メディア 52, pp. 565–570, 1998.
- [41] 鵜飼一彦. バンガーターフィルターによるコントラスト感度の低下. *Vision*, Vol. 4, pp. 71–72, 1992.
- [42] 武内栄希, 柿澤敏文. 弱視者の最大読書速度と臨界文字サイズに及ぼす近距離視力・最大視認力・読書視力の影響. 障害科学研究, Vol. 32, pp. 73–81, 2008.

- [43] 永井春彦. 視力からみたロービジョン補助具の選び方. 眼科診療プラクティス, Vol. 3, pp. 34-37, 2000.
- [44] 永井伸幸. フォントの違いが弱視者の選好文字サイズに及ぼす影響. 第18回視覚障害リハビリテーション研究発表大会抄録集, p. 65, 2009.
- [45] 川嶋英嗣. 中心視野欠損のあるロービジョンの読書困難とこみあい現象. 総合リハビリテーション, Vol. 27, No. 10, pp. 957-962, Oct. 1999.
- [46] 塩冶愛, 井上久美, 周正喜, 高橋広, 山田信也. 白内障におけるコントラストポラリティ効果. 日本眼科紀要 = Folia ophthalmologica Japonica, Vol. 50, No. 8, pp. 651-654, Aug. 1999.
- [47] 宮下佳子, 椎名健. 書体の太さと視距離の関係における文字の見やすさ評価: 最小可読文字サイズから算出した最適文字サイズにおいて. 電子情報通信学会技術研究報告. HIP, ヒューマン情報処理, Vol. 107, No. 369, pp. 109-112, Nov. 2007.
- [48] 辰巳格, 波部斉, 木戸出正継. 拡大教科書作成のための文脈構造を考慮したレイアウト最適化. 電子情報通信学会技術研究報告 WIT, 福祉情報工学, Vol. 107, pp. 31-36, 2008.
- [49] 吉澤将則, 矢口博久. 観察条件を考慮した二色型色覚の色の見え. 日本色彩学会誌, Vol. 32, No. 3, pp. 175-184, Sep. 2008.

- [50] 菊地久美子, 矢口博久, 塩入諭. 視覚特性を考慮した薄明視環境の画像シミュレーションとその評価. 日本色彩学会誌, Vol. 28, pp. 20–21, 2004.
- [51] 青木恭太, 秋山仁, 四之宮佑馬, 村山慎二郎. 画像処理技術による拡大読書器の実現 (視覚障害/聴覚障害, 一般). 電子情報通信学会技術研究報告 WIT, 福祉情報工学, Vol. 106, pp. 77–81, 2006.
- [52] 高橋啓介. 白内障擬似体験フィルタ装着時のグレアとコントラスト感度. 医療福祉研究, No. 4, pp. 65–73, 2008.
- [53] 井上賢治, 間瀬樹省, 桑波田謙. ロービジョン者に配慮したクリニックのサイン計画 : ユニバーサルデザインの考え方. 福祉のまちづくり研究, Vol. 13, No. 2, pp. A1–A13, Jul. 2011.
- [54] 湖崎克. 弱視レンズの処方と使用法. 眼科, Vol. 17, No. 909, pp. 893–902, 1965.
- [55] 五十嵐信敬, 小林秀之他. 11 弱視レンズ処方の実際, 教師と親のための弱視レンズガイド. コレール社, 東京, 1995.
- [56] 窪田悟. 携帯電話用カラー LCD の画質および可読性の評価 (視覚と画質および一般). 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 26, pp. 21–24, 2002.
- [57] 窪田悟, 松戸堅治. 加齢による視覚特性の変化がディスプレイからの文字情報の読取り速度に及ぼす影響. 映像情報メディア学会誌 : 映像情報メディア

- 55:583-587, 映像情報メディア学会誌：映像情報メディア 55, pp. 583-587, 2001.
- [58] 窪田悟, 小田泰久. Web ページ上での不特定多数による視覚のコントラスト感度特性測定の試み. 映像情報メディア学会誌：映像情報メディア 61:1021-1024, 映像情報メディア学会誌：映像情報メディア 61, pp. 1021-1024, 2007.
- [59] 杉森公一, 木村剛, 川辺弘之, 下村有子. 視野狭窄状態における視線追跡実験 (視覚障害,HCG シンポジウム). 電子情報通信学会技術研究報告 WIT, 福祉情報工学, Vol. 107, pp. 13-16, 2008.
- [60] 厚生労働省. 平成 18 年身体障害児・者実態調査結果. 厚生労働省 社会・援護局, 2008.
- [61] 厚生労働省社会・援護局障害保健福祉部. 統計資料紹介平成 23 年生活のしづらさなどに関する調査 (全国在宅障害児・者等実態調査) 結果. 厚生指標, Vol. 60, No. 11, pp. 45-54, Sep. 2013.
- [62] 宇山孝司. 正常眼および緑内障の中心静的視野測定における視標サイズの影響. 近畿大学医学雑誌, Vol. 17, pp. 527-545, 1992.
- [63] 岩月宏泰, 室賀辰夫, 木山喬博. 161. 注視軌跡からみた老年者の歩行：アイカメラによる検討. 理学療法学, Vol. 17, p. 161, 1990.

- [64] 葉師川浩, 西田保裕, 可児一孝. ランドルト環での中心外視力の測定. 神経眼科 = Neuro-ophthalmology Japan, Vol. 21, pp. 307–312, 2004.
- [65] 小田浩一. ロービジョンにおける読みの国際比較 (II 読みの心理学 : 読みの情報処理の基礎過程). 教育心理学年報, Vol. 34, pp. 10–11, 1995.
- [66] 小田浩一. 読書の精神物理学のための刺激材料と記憶の効果 (研究発表 B, AV プレゼンテーション, VII. 第 18 回大会発表要旨). 基礎心理学研究, Vol. 18, p. 192, 2000.
- [67] 小田浩一. 中心暗点による読書困難と Multiple PRL(読みと眼球運動, 第 22 回大会シンポジウム 2). 基礎心理学研究, Vol. 23, pp. 57–63, 2004.
- [68] 小田浩一. 検出と行動の間 : 検出閾値の上に生活閾値がある?(日本基礎心理学会第 24 回大会, 大会発表要旨). 基礎心理学研究, Vol. 24, No. 2, p. 226, 2006.
- [69] 小田浩一, 西村つむぎ. ロービジョンの読書特性を自動計測する pcMNREAD-J. 電子情報通信学会技術研究報告 WIT, 福祉情報工学, Vol. 102, pp. 1–5, 2002.
- [70] 小田浩一, 中野泰志. ランドルト環視力と縞視力のちがいについて (部門 B, VII. 第 8 回大会発表要旨). 基礎心理学研究, Vol. 8, pp. 43–44, 1989.

- [71] 高橋ひとみ, 衛藤隆. 近見視力と学習能率の関連 (i). 東京大学大学院教育学研究科紀要, Vol. 46, pp. 347–357, Mar. 2007.
- [72] 高橋信行, 佐々木隆志, 川原稔. Web デザインが視覚障がい者のユーザビリティに与える影響についての一実証報告 (教育・学習の ICT 化支援/一般). 電子情報通信学会技術研究報告. ET, 教育工学, Vol. 111, No. 213, pp. 41–46, Sep. 2011.
- [73] 高橋信行, 川原稔, 佐々木隆志, 荻田知則. 視覚特性評価に基づいた電子黒板への教材提示法. 日本ロービジョン学会誌, Vol. 12, pp. 42–54, 2012.
- [74] 伊藤克三, 森肅之. 3109 ランドルト視標による等視力曲線について. 日本建築学会論文報告集 号外, 学術講演要旨集, p. 491, 1966.
- [75] 岡嶋克典, 岩田三千子. 水晶体加齢モデルによる高齢者の照明シミュレーションと最適照度の検討. 照明学会誌, Vol. 82, pp. 564–572, 1998.
- [76] 岡嶋克典, 神戸秀. 色覚異常のリアルタイムシミュレーション (テーマセッション: 実・仮想空間の知覚・認知, 「実・仮想空間の知覚・認知」及び一般). 電子情報通信学会技術研究報告. HIP, ヒューマン情報処理, Vol. 107, No. 117, pp. 107–110, Jun. 2007.
- [77] 岩田三千子, 岡嶋克典, 氏家弘格. 照度レベルに依存するコントラスト感度の加齢変化. 照明学会誌, Vol. 85, pp. 352–360, 2001.

- [78] 岩田三千子, 西田尚代, 金恵英, 中根芳一. 40185 高齢者のための視環境設計に関する基礎的研究: ランドルト環および漢字視標の読み易さ評価. 学術講演梗概集 D-1, 環境工学 I, 室内音響・音環境, 騒音・固体音, 環境振動, 光・色, 給排水・水環境, 都市設備・環境管理, 環境心理生理, 環境設計, 電磁環境, Vol. 1995, pp. 369–370, 1995.
- [79] 岩田三千子, 西田尚代, 中根芳一. 逆対比視標の等視力曲線に関する研究. 学術講演梗概集 D, 環境工学, Vol. 1994, pp. 1013–1014, 1994.
- [80] 伊藤三千代, 金田博, 加藤宏. 視覚障害教育環境における拡大読書器のユーザビリティデザイン基礎研究 (2) 使用環境と操作性の調査. 筑波技術短期大学テクノレポート 筑波技術短期大学学術国際交流委員会, Vol. 10, pp. 55–60, 2003.
- [81] 山崎吉朗. 対面式多人数授業の it 化-電子黒板を活用した語学教育の実践と成果研究. メディア教育研究, Vol. 1, No. 2, pp. 133–143, 2005.
- [82] 山西潤一, 稲葉英明, 黒田卓. 高齢者を意識したホームページのバリアフリー化に関するデザイン要件. 電子情報通信学会技術研究報告. ET, 教育工学, Vol. 98, No. 563, pp. 55–62, Jan. 1999.
- [83] 和仁氏間. Html 教科書と電子黒板を利用した授業の実践例. 弱視教育, Vol. 40, No. 3, pp. 1–6, Dec. 2002.

- [84] 氏間和仁. MNREAD-Jkにより拡大鏡の妥当性を検討した1事例. 日本ロービジョン学会誌, Vol. 10, pp. 63-67, 2010.
- [85] 氏間和仁, 若松歩, 小島慶太. 行動評価に基づいた拡大鏡の選定及び妥当性の評価. 弱視教育, Vol. 47, No. 4, pp. 1-6, 2010.
- [86] 宍戸久子. 視覚障害者(弱視者)の視認力を高めるコントラスト情報の提案: 視覚障害者(弱視者)の利用し易いユニバーサルルーム作り. 福祉のまちづくり研究, Vol. 5, No. 1, pp. 18-27, Jun. 2003.
- [87] 磯野春雄, 倉田晃二, 高橋茂寿, 山田千彦. 高齢者における視覚の色度空間周波数特性および時間周波数特性(オフィスにおけるマルチメディア通信, デジタルアーカイブ, 及び一般). 電子情報通信学会技術研究報告 IE, 画像工学, Vol. 103, pp. 25-30, 2003.
- [88] 前田潤治, 福田健太郎, 高木啓伸, 浅川智恵子. 表示ベースでウェブページのアクセシビリティを評価するシステム(福祉と音声処理及び一般)(音声). 電子情報通信学会技術研究報告 SP, 音声, Vol. 103, pp. 47-52, 2003.
- [89] 小沢信治. 低視力者の見え方の空間周波数による分析. 特殊教育学研究, Vol. 25, pp. 41-46, 1987.
- [90] 小谷章夫, 種村嘉高, 朝井宣美, 中村安久, 大塚正章, 密山幸男, 尾上孝雄. 文字重心位置評価手法とその可読性評価への応用(信号処理, 符号化とそれら

を用いた知的マルチメディアシステム, 一般). 電子情報通信学会技術研究報告. SP, 音声, Vol. 105, No. 296, pp. 1-6, Sep. 2005.

[91] 小田浩一. ロービジョンエイドを処方するための新しい読書検査表 MNREAD-J. 第7回視覚障害リハビリテーション研究発表大会論文集, pp. 157-160, 1998.

[92] 小田浩一. ロービジョンの定義と分類. 視覚情報処理ハンドブック, Vol. 546, , 2000.

[93] 小田浩一. 視覚障害とエイド. 心理学評論, Vol. 44, No. 2, pp. 177-190, 2001.

[94] 小田浩一, 橋本千賀子他. 低視力者の見え方の空間周波低視力者のコントラスト感度 (csf) の測定. 第17回感覚代行シンポジウム発表論文集, pp. 71-74, 1991.

[95] 小田浩一, 今橋真理子. 文字認知の閾値と読みの閾値. *VISION*, Vol. 7, pp. 165-168, 1995.

[96] 小林巖. 高齢者におけるコントラストポラリティ効果. 総合リハビリテーション, Vol. 22, No. 1, pp. p51-53, Jan. 1994.

[97] 小林秀之. 弱視者の線の認知に関する基礎的研究. 特殊教育学研究, Vol. 35, No. 1, pp. 23-32, Jun. 1997.

- [98] 石垣尚男. 309 視野と周辺視反応時間の関係について. 日本体育学会大会号, p. 168, 1983.
- [99] 石垣尚男, 山田久恒, 寺田邦昭, 大山慈徳. 322 中心固視の負荷条件が周辺視反応時間に及ぼす影響について. 日本体育学会大会号, p. 199, 1982.
- [100] 照明学会. 高齢化社会における照明の研究調査委員会報告書, pp. 34-35, 1987.
- [101] 福島省吾, 田舎片悟, 中川雅文, 千葉有, 山口明. 1B2-3 仮想視空間と眼球運動計測の同時実現装置の開発とその視覚認知機能評価への応用 (1b2 os: ヒューマンフレンドリーロボット). インテリジェントシステム・シンポジウム講演論文集, Vol. 16, pp. 69-70, 2006.
- [102] 岡田伸一. ロービジョンのためのユーザー・インターフェースを考える (特集バリアフリーインタフェース). 情報処理学会研究報告 HI, ヒューマンインタフェース研究会報告, Vol. 98, pp. 93-97, 1998.
- [103] 岡田伸一, 青木成美, 大倉元宏, 北林裕, 久米祐一郎, 坂尻正次, 沖泊聡, 中村哲夫, 渡辺哲也, 渡辺文治. ユーザーニーズを考慮した拡大読書器: LCD と調節式アームの活用. 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 23, pp. 41-48, 1999.
- [104] 永井伸幸, 柿澤敏文, 中田英雄. 視標のサイズと輝度が低視力者の衝動性眼球運動の反応時間に及ぼす影響. 心身障害学研究, Vol. 23, pp. 167-178, 1999.

- [105] 五十嵐信敬. 弱視児の文字知覚の特性に関する実験的研究. 特殊教育学研究, Vol. 4, pp. 1-9, 1967.
- [106] 高橋信行, 佐々木隆志, 川原稔. ロービジョン者のパソコン操作環境を最適化するための視覚特性評価キットの開発 (教育工学). 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 110, pp. 61-66, 2010.
- [107] 小澤信治. 弱視者の見え方の空間周波数特性による分析. 特殊教育学研究, Vol. 25, pp. 41-47, 1987.
- [108] 星野隆太, 目黒光彦, 古閑敏夫. 組合せ最適化に基づく色覚異常者におけるカラー画像中の弁別困難色の変換 (ソフトコンピューティング及び一般). 電子情報通信学会技術研究報告. SIS, スマートインフォメディアシステム, Vol. 106, No. 575, pp. 27-32, Mar. 2007.
- [109] 加藤晴喜, 鵜飼一彦. 視野異常をシミュレートする眼球運動補償型デバイスの試作: パーソナル・コンピュータとヘッド・マウント・ディスプレイ (HMD) を用いて. 日本福祉大学情報社会科学論集 日本福祉大学情報社会科学部 [ほか], Vol. 4, pp. 1-6, 2001.
- [110] 西尾幸一郎, 中野莉沙. 視覚障害疑似体験を活用した設計教育プログラムによる教育的効果の検討. 福祉のまちづくり研究, Vol. 13, No. 1, pp. A1-A10, Jan. 2011.

- [111] 西脇友紀. ロービジョンケアに適した QOL 評価表の試作. 臨床眼科, Vol. 55, No. 6, pp. 1295–1300, 2001.
- [112] 石田久之, 天野和彦. 視覚障害学生の読みやすい文字について. 筑波技術大学テクノレポート, Vol. 17, No. 1, pp. 6–10, Dec. 2009.
- [113] 川島健一, 和氣典二, 和氣洋美. moving window におけるシーンの理解. 人間工学, Vol. 40, No. Supplement, pp. 530–531, 2004.
- [114] 村上佳久, 前島徹. 視覚障害者の教材作成の改善 白色文字印刷. 筑波技術短期大学テクノレポート, Vol. 12, pp. 41–46, 2005.
- [115] 野口太郎, 井上容子, 伊藤克三. 各種視標への実効輝度の適用による等視力曲線の検討. 日本建築学会論文報告集, pp. 124–131, 1984.
- [116] 中野泰志. 視対象の大きさに伴う弱視児の視距離の調節 (A-III.,VI. 第 11 回大会発表要旨). 基礎心理学研究, Vol. 11, p. 36, 1992.
- [117] 中野泰志, 千田耕基. 透水体に混濁のある弱視児 ha におけるコントラストポラリティ効果の測定-教材作成への応用の可能性について. 国立特殊教育総合研究所研究紀要, pp. p103–114, Feb. 1991.
- [118] 小林大二, 高橋祐一, 山本栄. 高齢者のウェブ・アクセシビリティに関する実験的研究. 紀要, Vol. 5, pp. 15–29, 2006.

- [119] 浅川智恵子. 25. すべての人に使いやすい「アダプティブインタフェース」への挑戦 (<特集> 1000 号記念「夢・創・想・感」). 電子情報通信学会誌, Vol. 90, pp. 792–794, 2007.
- [120] 山口智也, 高松衛, 中嶋芳雄, 千代和夫. ランドルト環を用いた濃霧中での視認性評価に関する研究. 日本色彩学会誌, Vol. 28, pp. 60–61, 2004.
- [121] 池田光男. 視覚の心理物理学. 株) 森北出版, pp. 34–38, 1975.
- [122] 中橋雄, 寺嶋浩介, 中川一史, 太田泉. 電子黒板で発表する学習者の思考と対話を促す指導方略. 日本教育工学会論文誌, Vol. 33, No. 4, pp. 373–382, Feb. 2010.
- [123] 中村仁美, 小田浩一. 平仮名单語を用いた読書チャート MNREAD-Jk. 第 8 回視覚障害リハビリテーション研究発表大会論文集, pp. 105–108, 1999.
- [124] 中村仁美, 小田浩一, 藤田京子, 湯澤美都子. MNREAD-J を用いた加齢黄斑変性患者に対するロービジョンエイドの処方. *Japanese orthoptic journal*, Vol. 28, pp. 253–261, 2000.
- [125] 中村仁美, 小田浩一他. ロービジョンの読書評価: 通常範囲以外のサイズによる測定. 第 9 回視覚障害リハビリテーション研究発表大会論文集, pp. 35–38, 2000.

- [126] 稲垣忠, 永田智子, 豊田充崇, 梅香家絢子, 佐藤喜信, 赤堀侃司. 電子黒板の普及促進を目的とした活用モデルの開発. 教育メディア研究, Vol. 16, No. 1, pp. 53-64, Sep. 2009.
- [127] 福田忠彦. 図形知覚における中心視と周辺視の機能差. テレビジョン学会誌, Vol. 32, pp. 492-498, 1978.
- [128] 苧阪直行. 視覚情報処理における周辺視と中心視の相互作用: 時間要因について (総合・一般研究要約). 教育心理学年報, Vol. 23, pp. 138-139, 1984.
- [129] 山本直樹, 八木昭宏. 周辺視野における高次視覚. 人文論究, Vol. 58, pp. 21-33, 2008.
- [130] 難波哲子, 深井小久子, 森めぐみ, 藤本奈津子. ;原著;実視標と vdt 視標に対する調節刺激反応の検討. 川崎医療福祉学会誌, Vol. 13, pp. 341-347, 2003.
- [131] 渡辺哲也, 宮城愛美, 南谷和範, 長岡英司. 視覚障害者のパソコン利用状況調査 2007(福祉と音声処理, 一般). 電子情報通信学会技術研究報告 SP, 音声, Vol. 108, pp. 7-12, 2008.
- [132] 遠藤哲郎, 内川恵二. A-15-4 周辺視野での時間周波数コントラスト感度特性における刺激強度の効果. 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, Vol. 2000, p. 228, 2000.

- [133] 天野成昭, 近藤公久. 日本語の語彙特性, 第 1 巻単語親密度 (NTT データベースシリーズ) . 三省堂, 東京, 1999.
- [134] 田中豪, 末竹規哲, 内野英治. Color2Gray アルゴリズムに基づいた弁別困難色に対する明度修正法の一提案 (信号処理, 知的マルチメディアシステム, 及び一般). 電子情報通信学会技術研究報告. SIP, 信号処理, Vol. 108, No. 213, pp. 33–38, Sep. 2008.
- [135] 田辺吉徳, 大竹史郎. 高齢者の文字の読みやすさと所要照度に関する Visibility Level の観点からの検討. 照明学会誌, Vol. 83, No. 5, pp. 278–287, 1999.
- [136] 渡邊正人, 佐島毅, 柿澤敏文. 視標のコントラストが視力に及ぼす効果 : 弱視シミュレーション下における見え方の特性の視点から. 障害科学研究, Vol. 33, pp. 83–91, Mar. 2009.
- [137] 徳田克己. 弱視児の漢字読み書き成績を規定する学習者の要因の検討. 教育心理学研究, Vol. 35, No. 2, pp. 155–162, Jun. 1987.
- [138] 内山俊朗, 永野行記, 篠原裕一, 高本康明, 登坂秀規, 高橋宏祐. Web アクセシビリティ診断ツールの開発. デザイン学研究作品集, Vol. 11, No. 11, pp. 28–31, Mar. 2006.
- [139] 楠本久美子, 西禮子, 柳井勉. 色覚異常者の色覚実態調査研究 : - 学校における色覚検査・保健指導のあり方についての検討 -. 大阪教育大学紀要. V, 教

科教育, Vol. 44, No. 2, pp. 261–272, Feb. 1996.

- [140] 日比野治雄. デザイン心理学による書体デザイン改善支援 (招待講演, 文字・文書の認識と理解). 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol. 110, No. 467, p. 91, Mar. 2011.
- [141] 伊藤納奈. 視覚心理・視覚生理-2 ロービジョンの視覚特性 (2):コントラスト感度. 照明学会誌, Vol. 93, p. 61, 2009.
- [142] 田中農夫男. 視覚障害下におけるかな文字の見やすさに関する研究. 特殊教育学研究, Vol. 7, pp. 19–29, 1969.
- [143] 魚里博. 視力の生理学 3 視力の光学的側面とスーパービジョン. 神経眼科 = Neuro-ophthalmology Japan, Vol. 18, No. 3, pp. 257–264, Sep. 2001.
- [144] 魚里博. 低コントラスト視力. IOL & RS : Japanese journal of cataract and refractive surgery : 日本眼内レンズ屈折手術学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 200–204, Sep. 2001.
- [145] 柿澤敏文. 弱視者における衝動性及び滑動性眼球運動の制御特性. 教育心理学年報, Vol. 30, pp. 162–163, 1990.
- [146] 柿澤敏文, 中田英雄, 谷村裕. 弱視者の衝動性眼球運動の特性. 特殊教育学研究, Vol. 25, pp. 31–39, 1987.

- [147] 小林富士男, 尾関孝史, 筒本和広. 視覚特性と漢字識別. 日本産業科学研究所
研究報告, pp. 35-39, 2004.
- [148] 平山文男, 曲谷一成, 築島謙次. ヘッドマウントディスプレイを用いた携帯用
拡大読書器の開発. 電子情報通信学会技術研究報告 MBE, ME とバイオサイ
バネティックス, Vol. 95, pp. 9-14, 1995.
- [149] 平山文男, 曲谷一成, 築島謙次. デジタル画像処理を用いた視覚障害者支
援システム. 電子情報通信学会技術研究報告 MBE, ME とバイオサイバネ
ティックス, Vol. 96, pp. 81-86, 1997.
- [150] 平井有三, 近見要子, 樋渡涓二. 空間周波数チャンネルと文字パターン知覚.
電子情報通信学会論文誌 A, Vol. 68, No. 12, pp. 1382-1388, 1985.
- [151] 犬飼朋恵, 川島健一, 和氣典二, 和氣洋美. 加齢と有効視野. 基礎心理学研究,
Vol. 22, No. 2, p. 223, 2004.
- [152] 小浜朋子, 魚里博, 寺内博夫, 松岡政治. 老人性白内障を擬似するフィルタの
定性的選定. 日本色彩学会誌 日本色彩学会, Vol. 28, pp. 245-252, 2004.
- [153] 中根芳一. 印刷文字の見易さ及び適正照度に関する研究. 日本建築学会論文
報告集 111-120,, p. 192, 1975.
- [154] 本多聖子. ロービジョン講習会による職員の意識変化について. 日本視能訓
練士協会誌, Vol. 32, pp. 189-197, 2003.

- [155] 岡田明. 弱視児の読みに関する実証的研究 (博士論文要旨・修士論文題目). 教育心理学年報, Vol. 20, p. 155, 1981.
- [156] 橋本茂樹. 自動視野計を用いた動的視野測定プログラムの開発. 近畿大学医学雑誌, Vol. 28, pp. 207–221, 2003.
- [157] 茂木俊彦. 障害と人間主体: ICF の障害概念との関連で考える (i 特集j 障害の受容と理解). 障害者問題研究, Vol. 30, No. 3, pp. 186–194, 2002.
- [158] 目黒光彦, 高橋知紘, 古閑敏夫. 混同色線理論と色覚モデルに基づくカラー画像からの弁別困難色の検出と弁別しやすい色への変換 (プロセッサ,dsp, 画像処理技術及び一般). 電子情報通信学会技術研究報告. SIP, 信号処理, Vol. 104, No. 363, pp. 19–24, Oct. 2004.
- [159] 秋月有紀, 井上容子. 4002 ランドルト環視力表を用いた細部識別閾に関する定性的検討: 色が明視性に及ぼす影響 (その 1)(環境工学). 日本建築学会近畿支部研究報告集 環境系, pp. 5–8, 2001.
- [160] 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, Vol. 86, pp. 819–829, 2002.
- [161] 平井有三, 近見要子, 樋渡涓二. 空間周波数チャンネルと文字パターン知覚. 電子通信学会論文誌 A 電子通信学会, Vol. 68, pp. 1382–1388, 1985.

- [162] 谷村裕. 弱視児の事物認識について教科書の図、表の修正上の問題点 (盲・弱視部門, 個人発表, 日本特殊教育学会第五回大会発表抄録). 特殊教育学研究, Vol. 5, p. 16, 1967.
- [163] 谷村裕, 宮内鈴子. 弱視児のもの見え方: そのI. 正常児の視力について. 特殊教育学研究, Vol. 3, No. 1, pp. 1-5, 1966.
- [164] 井上容子. 40157 読書における適正照度に対する検討 (その2): 視力ならびに内装反射率の影響. 学術講演梗概集. D-1, 環境工学I, 室内音響・音環境, 騒音・固体音, 環境振動, 光・色, 給排水・水環境, 都市設備・環境管理, 環境心理生理, 環境設計, 電磁環境, Vol. 1996, pp. 313-314, Jul. 1996.
- [165] 井上容子, 秋月有紀. 40156 読書における適正照度に関する検討 (その3): 加齢と視力の影響. 学術講演梗概集. D-1, 環境工学I, 室内音響・音環境, 騒音・固体音, 環境振動, 光・色, 給排水・水環境, 都市設備・環境管理, 環境心理生理, 環境設計, 電磁環境, Vol. 1997, pp. 327-328, Jul. 1997.
- [166] 草野洋介. 高齢者と若年者ならびに高齢者水晶体擬似フィルタ入りメガネを装着した若年者の色刺激に対する p300 の比較 (日本生理人類学会第49回大会座長報告). 日本生理人類学会誌, Vol. 8, p. 141, 2003.
- [167] 和氣洋美. 低視力・視野狭窄シミュレーション下での歩行等日常動作. 人間科学研究年報 神奈川大学人間科学部, Vol. 2, pp. 5-30, 2008.

- [168] 観音隆幸, 堺浩之, 中内茂樹, 臼井支朗. ぼけ順応が視覚の空間周波数伝達特性に与える影響 (バイオサイバネティクス, ニューロコンピューティング). 電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム, Vol. 90, pp. 1812–1819, 2007.
- [169] 田中良広, 大内進. 拡大教科書活用における評価と配慮 (j特集j拡大教科書の作成及び教育的支援に関する研究). 国立特別支援教育総合研究所研究紀要, Vol. 35, pp. 33–59, 2008.
- [170] 北尾倫彦. ひらがな文と漢字まじり文の読みやすさの比較研究. 教育心理学研究, Vol. 7, pp. 1–5, 1960.
- [171] 中野倫明, 樋口和則, 山本新. 画像処理を用いた高齢者の視覚特性の擬似体験システム (j論文特集j新映像メディアとその応用). テレビジョン学会誌, Vol. 50, pp. 1489–1495, 1996.
- [172] 氏間和仁. 文字構造の複雑さが視知覚しやすい線幅に及ぼす影響-白濁フィルタを用いたロービジョンシミュレーションによる検討. 福岡教育大学紀要第4分冊, 教職科編, pp. 101–107, 2008.
- [173] 氏間和仁. ロービジョンの読みに適した文字サイズを選択について: MN-READ とその周辺の研究. 特殊教育学研究, Vol. 48, pp. 323–331, 2010.
- [174] 氏間和仁, 小田浩一. 文字サイズが音読潜時に及ぼす影響: ロービジョンシミュレーションによる検討. 日本眼科紀要 = Folia ophthalmologica Japonica,

Vol. 58, pp. 274-278, 2007.

[175] 氏間和仁, 島田博祐, 小田浩一. 大型電子化提示教材で使用するロービジョンに適した文字サイズの規定法: 読書評価チャートの応用. 特殊教育学研究, Vol. 45, pp. 1-11, 2007.

[176] 石田和之, 平野裕一. 水平面内を移動する視標を追従する際の眼球運動(体育心理学). 日本体育学会大会号, p. 221, 1998.

[177] 松原和也, 金子瑞樹, 塩入諭, 矢口博久. 注意状態の眼球運動に与える影響(視聴覚情報処理とインタフェース&応用システム及び一般). 電子情報通信学会技術研究報告 HIP, ヒューマン情報処理, Vol. 104, pp. 37-41, 2004.

[178] 樋渡涓二, 入部紳一郎, 鈴木寿. 日本語文章に対する注視と認知. テレビジョン学会誌, Vol. 37, pp. 942-947, 1983.

[179] 樋渡涓二, 岩佐靖典, 森田寿哉. 視野制限下における図形・文字の認識. テレビジョン学会誌, Vol. 39, No. 5, pp. 447-452, 1985.