

電子書籍リーダーの可読性と
その評価方法に関する研究

松波 紫草

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.1.1 電子書籍市場の現状	1
1.1.2 情報伝達手段(文字)と記録媒体(紙)の関わり	1
1.1.3 紙と電子書籍リーダー	3
1.2 研究の背景	5
1.3 研究の目的	5
1.4 電子書籍リーダーと紙の構造と表示原理について	5
1.4.1 光源搭載型液晶ディスプレイ	6
1.4.2 Eペーパー	6
1.4.3 紙	7
1.5 論文の構成	8
1.6 参考文献	9
第2章 電子書籍リーダーの可読性に対する人間工学的評価	11
2.1 電子書籍リーダーとしてのディスプレイ装置の可読性の評価方法について	11
2.1.1 本研究の背景および新規性について	11
2.1.2 本研究で用いた評価方法	11
2.1.2.1 実験方法	11
2.1.2.2 評価指標	12
2.1.2.3 照明装置	13
2.1.3 参考文献	15
2.2 Eペーパーの可読性に対するコントラスト比と加齢の影響	17
2.2.1 目的	17
2.2.2 方法	17
2.2.2.1 被験者	17
2.2.2.2 実験デザイン	17
2.2.2.3 実験方法および評価方法	19
2.2.3 結果	19
2.2.4 考察	25
2.2.4.1 年齢群別の比較	25
2.2.4.2 デバイス種類別の比較	25
2.2.4.3 コントラストの比較	26
2.2.5 結論	28
2.2.5.1 加齢	28
2.2.5.2 フロントライトの搭載の有無	28
2.2.5.3 コントラスト	28
2.2.6 参考文献	29

2.3 Eペーパーの可読性に及ぼす環境照度および加齢の影響	31
2.3.1 目的	31
2.3.2 方法	31
2.3.2.1 被験者	31
2.3.2.2 実験デザイン	31
2.3.2.3 実験方法および評価方法	32
2.3.3 結果	34
2.3.3.1 環境照度による評価の比較	34
2.3.3.2 年齢群別の評価の比較	38
2.3.3.3 デバイスの種類別の評価の比較	43
2.3.4 考察	44
2.3.4.1 評価指標の比較	44
2.3.4.2 環境照度別の比較	44
2.3.4.3 年齢群別の比較	44
2.3.4.4 デバイス種類別の比較	45
2.3.5 結論	45
2.3.5.1 環境照度	45
2.3.5.2 加齢	45
2.3.5.3 デバイス	45
2.3.6 参考文献	47
2.4 電子書籍リーダーの可読性に及ぼす文字サイズおよび加齢の影響	49
2.4.1 目的	49
2.4.2 方法	49
2.4.2.1 被験者	49
2.4.2.2 実験デザイン	50
2.4.2.3 実験方法および評価方法	51
2.4.3 結果	51
2.4.3.1 文字サイズ別、および機種別の評価の比較	51
2.4.3.2 年齢群別の評価の比較	56
2.4.3.3 各年齢群別の正答率 index のデバイス間比較	60
2.4.4 考察	65
2.4.4.1 文字サイズの比較	65
2.4.4.2 デバイスの種類の比較	66
2.4.4.3 評価指標の比較	66
2.4.4.4 年齢群別の比較	66
2.4.5 結論	67
2.4.5.1 文字サイズ	67
2.4.5.2 デバイス	67
2.4.5.3 評価指標	68

2.4.5.4 加齢	68
2.4.6 参考文献	69
第3章 総括	71
3.1 本研究のまとめ	71
3.1.1 可読性の評価に使用した条件	71
3.1.1.1 コントラスト	71
3.1.1.2 環境照度	72
3.1.1.3 文字サイズ	72
3.1.1.4 年齢	72
3.1.2 評価方法	72
3.1.3 結果	73
3.1.3.1 コントラスト比	73
3.1.3.2 環境照度	74
3.1.3.3 文字サイズ	74
3.1.3.4 加齢を考慮した種類別可読性	75
3.1.4 人間工学的観点からの E ペーパー仕様への提言	75
3.2 今後の課題	77
本論文に関わる業績	79
謝辞	81

第 1 章 序論

1.1 はじめに

1.1.1 電子書籍市場の現状

世界の書籍への消費者支出市場規模は 2013 年で約 1,215 億ドル、2013 年から 2018 年にかけて、成長率は 1.1%と、横ばい傾向が予測されている[1]。この内訳を見てみると、印刷物が微減となる中、電子書籍は 17%程度の市場規模の拡大が見込まれている。また、電子書籍が出版物全体に占める割合も 2013 年、2014 年には約 12%程度のものが、2018 年には約 25%、2019 年には約 27%になると予測されており[1, 2]、従来の紙の印刷物と置き換わりつつある。

電子書籍市場において世界第 4 位の規模[3]を持つ日本においてもその普及はめざましく、市場規模は 2002 年度には 10 億円だったものが、2014 年度には 1,266 億円と、100 倍を超える成長を見せた。特に 2010 年代に入ってから、スマートフォン、タブレット、電子書籍専用端末（E ペーパー）といった新たなプラットフォーム（電子書籍リーダー）向けの電子書籍の成長が著しく 2012 年度にこれらの新たなプラットフォーム向け電子書籍市場がフィーチャーフォン向け電子書籍市場を逆転し、2013 年度では電子書籍市場全体の大半を占めている[4]。さらに 2013 年度から 2014 年度では 936 億円から 330 億円（35.3%）もの増加があった[5]。

1.1.2 情報伝達手段(文字)と記録媒体(紙)の関わり

人類は、象形文字、楔形文字に始まる情報伝達手段の「文字」を獲得することで、音声という聴覚にのみ依存していたコミュニケーションから、情報を発信した本人が不在であっても、文字を記録した媒体を遠くに運んで伝えたり、長期間の保存を可能とした。この「文字」は、西欧ではパピルス、羊皮紙、粘土板などに、中国、日本では、木簡・竹簡を書写材料（媒体）として記録され、情報伝達の手段として大きな役割を担ってきた。当初、手書きで記されていた文書は、それが大量になるほど、製作にも複製にも膨大な労力を要した。国家、社会制度の確立や、宗教の伝播等が進む中、多くの人々に同じ情報を一度に伝えるため、大量の複製が必要となっていた。そのためには、安価な媒体と印刷技術が必要であった。

中国で紀元前に発明された紙は、パピルスや羊皮紙などのそれまでの媒体と比較して、安価で大量に生産でき、かつ持ち運びにも便利なことから、次第にそれらと置き換わっていった。こうして、紙は 2,000 年以上もの間、知識や情報、コミュニケーションなどを伝達する媒体としての役割を担ってきた。しかしながら初期の製紙技術で作られた紙は、現在でいうところの非木材紙であった。2 世紀に中国の蔡倫により改良された製紙技術においても、すでに現在の製紙技術の基本工程は全て行なわれていたものの、材料は依然として非木材であった。木材パルプによる製紙は、12 世紀にヨーロッパに製紙技術が伝わり、19 世紀後半の木材パルプ製造法が確立されるまで待つことになった。

一方の印刷技術も、最古の印刷技術といわれる木版印刷が 7 世紀頃の中国で行なわれていた。しかし、表音文字であるアルファベットと異なり、象形文字を起源とし、表意

文字である漢字は、字の形が複雑で数が著しく多く、また、絵柄（小仏像など）も同時に複製する場合があった。また、大量に印刷することよりも印刷される 1 ページの文字（列）を美しく整えることに主眼が置かれていたため、職人が作る木版のほうが効率的で自由度が高く、一枚の木版に凸版を彫り、一枚の紙に印刷する一枚刷り（活版と比較する場合に整版という）が長い間、中国や日本で主流の技術であった。

一方、活字組版による印刷についても、主流ではないものの、11 世紀の北宋では、土製（陶製）、木製の活字が作られていた。また、14 世紀の高麗では、グーテンベルグの活版印刷の 70 年以上も前から金属活字による組版印刷が行なわれていた。製紙から印刷まで、当時の東アジア圏の技術力の高さは驚くべきものがある。しかしながら、上述したように、ページ全体のレイアウトの美しさや、グラフィカルな表現を重視し、手のかかる製版が主流であったアジア文化圏と、版を作る効率を優先し活字組版が主流であった西欧の文化的な差異は興味深いものがある。整版印刷は、日本においては多色木版の錦絵（浮世絵）という形で結実した。絵師（グラフィックデザイナー）・彫師（製版業者）・摺師（印刷業者）が一体となって創り上げる総合芸術であり、現在でも世界的に評価の高い芸術作品であることは周知の事実である。

西欧への製紙技術の伝播は、8 世紀にイスラム、10 世紀にはエジプト、12 世紀になってようやく地中海を越えてヨーロッパに伝わり、紙の大量生産が可能になった。加えて 15 世紀にはドイツのヨハネス・グーテンベルグの金属製（鉛とスズの合金）の活字の開発と、それを使った活版印刷技術の発明により、大量印刷が可能となった。活版印刷技術は、絵柄を印刷できないものの、金属活字が従来の木活字などに比較し、製造が容易でサイズが正確であったため、ヨーロッパを中心に急速に普及拡大し、書籍等の出版印刷を支えた。しかし、洋の東西を問わず、印刷で量産されたコンテンツの多くが、仏教書や聖書、コーランなどの経典として使用されたことは特筆に値する。科学技術進歩への宗教の影響力の偉大さを改めて思い知るところである。

その後、19 世紀には写真の原理を応用した写真植字の技術の登場により、光を用いて文字像を操作することで、大きさや字送り、斜体や長体などの変形や、文書体変更が容易になった。この写真技術の印刷技術への活用によるもう一つの利点は、グラフィックな表現（文字と絵柄の両方を一枚の紙に印刷すること）が可能となったことである。このことにより絵柄と文字を同時に複製していた木版印刷（製版印刷）に、近代印刷技術が追いつくきっかけとなった。こうして印刷物は雑誌、広告媒体などその用途をさらに広げていくこととなった。技術の進歩はさらに速度を速め、手動により文字位置や字送りを設定して印字した初期の手動写植機から、コンピューターを利用して位置や字送りを自動的に管理する自動写植機が開発された。また、その後、文字を小さな点の集まり（ドット）として管理する方法等も開発され、現在のデジタル組版の原理にたどりついている。

印刷媒体としての紙については、19 世紀初めに、抄紙機が発明され、従来の手漉き法に比較して飛躍的な製造能力の向上が図られた。さらに 19 世紀後半には、木材パルプ製造法の発明により、安価で大量な生産が可能となった。このように、紙は、情報伝達手段である文字や絵画のための、高い保存性を有する記録媒体、高い視認性を示す表示媒体として、文化、芸術、科学などあらゆる分野において人類の発展に寄与してきた。現在においては、電子的な記録媒体としてのコンピューター、表示媒体としてのディス

プレイ装置が存在するものの、依然として紙が優秀な記録、および表示媒体の一つであることに変わりはない。

1.1.3 紙と電子書籍リーダー

電子書籍リーダーは、紙の書籍から「印刷機を使って表示媒体に印字する。」という工程を省いたものである。つまり、電子書籍リーダーは、紙媒体では蔵書の書庫にあたるスペースを電子データとして内包し、毎回必要なページを抽出して表示することで、紙媒体を用いた場合のような保管場所は要らないこととなる。このことは、印刷物に対し、大量のデータを省スペースに保存できるという点において圧倒的な優位性がある。

また、デジタル組版のような印刷物では、印刷する前の段階では書き換えや、文字サイズの変更等の校正は容易であるが、印刷されると大きさが固定される。これに対し電子書籍リーダーでは、ディスプレイ上で文字サイズなども自由に変更が可能である。その一方で、表示媒体としては、条件により可読性が紙を下回る結果になる場合もあり、これでは電子書籍のメリットがあまり見えてこない。

現在、電子書籍リーダーの主流になっているタブレット端末は、PCと同様に光源搭載型液晶ディスプレイにより表示を行うため、低い環境照度においても視認性が低下しない特徴がある。一方で厚生労働省の調査[6]によると、長時間VDT作業(Visual Display Terminals : PC等のディスプレイ装置を見ながら操作する作業)を行う労働者の約7割が身体的な疲労や症状を感じており、その中の9割が目の疲れ・痛みを感じていることを報告している。また、タブレット端末はコンピューター機能の搭載により、紙と比較して、その軽量化、小型化が課題となっている。

電子書籍の表示媒体の一つであるEペーパーは、表示媒体としての紙の機能を保持することを前提に、表示内容を電子的に書き換える機能を実装したものである。スマートフォンやタブレット端末といった光源搭載型液晶ディスプレイで表示する電子書籍リーダーと比較して、構造がシンプルであるため、薄くて軽い特徴がある。また、表示画面の書き換え時にのみ電力を必要とする優れた省電力性と、照明光を直視しないため目が疲れにくく、かつ、昼間の明るい屋外での高い視認性を有する表示媒体である(詳細は1.4.2参照)。

Eペーパーを搭載した初期の電子書籍リーダーモデルは、光源を搭載しておらず、低い環境照度の条件においてその視認性は液晶ディスプレイに比較して大きく劣っていた。しかしながら、近年、フロントライトを搭載したモデルが登場し、低照度での視認性が改善されつつある。光源付きEペーパーについては、光源非搭載型と比較してより多くの電力供給が必要となり、省電力性のメリットが低下するため、用途や場所によって使い分ける必要がある。また、液晶ディスプレイが圧倒的な優位にあったカラー表示についても、2016年5月に最大手のE Ink社からデジタルサイネージ向けに提供を計画するフルカラーを実現する電子ペーパー技術「Advanced Color ePaper (ACeP)」が発表された[7]。そのため、これまで「カラーが表示できない」ということでターゲットになっていなかった分野を市場として視野に入れることが可能となった。さらに最近では、Eペーパーは、電子書籍専用端末にとどまらず、教科書、事務文書、電子棚札(プライスタグ)、物流ラベル、デジタルサイネージなど用途が拡大している。これは、従来「紙」や「液晶ディスプレイ」が利用されてきた用途であり、それらを置き換えてい

く方向に進みつつある。

E ペーパーの優れた省電力性については、電源の確保に課題があるプライスタグ、物流ラベルや屋外の広告等で注目されている。特にプライスタグの E ペーパー化は従来の紙と比較して、情報の書き換え時間の大幅な削減効果により利益に直結することが期待され、一部のスーパーマーケットでは導入が進みつつある。このように E ペーパーは、電子書籍リーダーとして利用しないユーザーにも接する機会が増えつつある媒体である。また、いずれの利用形態も「紙」と同様に動画でなく、静止している文字情報を読むことで自ら情報を得る手段として用いられている特徴がある。こうした急速な普及拡大の一方で、E ペーパーについては標準化がなされていない。標準化の規格については、E ペーパーが使用される形態、環境等、また、E ペーパーのもともとのベースとなっている「紙」の機能との比較に基づいて提案する必要がある。E ペーパーは記録媒体としては紙の機能を大きく上回っている一方で、文字を表示する媒体として、紙のレベルに及ばない状況にある。そのことから本研究では、表示媒体としての評価に関わる規格提案を行うこととしたい。

E ペーパーには様々な用途があるが、電子書籍リーダーとして利用される場合には、印刷物の書籍との可読性の比較が必要となる。読むことができる限界文字サイズの特定をすることで、紙にはない自由に文字サイズを変更できる機能の評価が可能となる。これは「印刷機を使って表示媒体に印字する。」という工程を省いたために実現される機能である。読むことができる限界の環境照度を特定することは、屋内において印刷物の書籍と同様の可読性が提供できるかどうかという評価を可能とする。さらに、文字と背景のコントラスト比の推奨される値の特定により、目の疲れが少ない表示画面の設計等につながる。近年、低い環境照度条件下の可読性の改善のため、光源搭載型 E ペーパーが登場したが、紙との比較により、その効果についても評価が可能となる。

屋外でデジタルサイネージとして用いられる場合には、E ペーパーは昼間の明るい環境において、高い視認性を確保でき、省電力のため、光源搭載型液晶ディスプレイに比較し優位性が高い。しかし、晴天の日においても日没時には環境照度が 440 lx、その 30 分以内には 1 lx 以下まで環境照度が低くなる[8]ため、その視認性は大きく低下する。これらの条件を考慮し、被験者が読むことができる限界の環境照度を特定することで、屋外においては、どの時間帯にどんな業態での利用が有効か検証することができる（例：海水浴シーズンに昼間に営業される海の家での利用）。

また、プライスタグとしての利用については、スーパーマーケットなどにおいて、購入者が誤認することなく E ペーパーに表示された価格を認識できているかが重要である。これについては、問題なく読むことができる限界の環境照度を特定することで、環境照度が JIS 規格により決められている場所において有効かどうかの評価が可能となる。

このように規格提案によりガイドラインを策定することで、E ペーパーを適切に評価することが可能となる。また、そのことから、E ペーパーがどの程度、紙の媒体と同様の高い表示機能を再現しつつ、電子的な優位性を実現できているかが明らかとなり、さらに、規格化により生産コストが削減され、価格の低廉化が進み、今後、ますますの技術の発展、市場拡大に寄与することが期待される。

本研究では、こうした現状を鑑み、人間工学的視点から E ペーパーについて、IEC

(International Electrotechnical Commission)、および ISO (International Organization for Standardization) へ国際規格の提案を行うための基礎データ収集を目的として実験を行った。具体的には、タブレット端末や電子書籍専用端末などの電子書籍リーダーの可読性がそれを利用する際の環境条件の違いや、加齢といったユーザー側の条件によりどのような影響を受けるか、また、電子書籍リーダーと従来からの紙媒体と比較した時の、優位または劣位な点について調査研究することで、電子書籍リーダーの可読性のさらなる改善につなげることを目的とする。

なお、本論に入る前に、本章「序論」において、「研究の背景」および「研究の目的」について述べた後、本研究の背景および目的に関係する「電子書籍リーダーと紙の構造と表示原理」を紹介し、最後に本論文の構成について記す。

1.2 研究の背景

従来の CRT (ブラウン管) や LCD (液晶パネル) では、文字を読むこと「reading」はもちろんだが、動画も含めた映像の「観視: viewing」も含めた条件について規格化[9, 10]がされている。一方の E ペーパーは、その表示原理上、素早いページ切り替えや、動画の表示には不向きなデバイスである。その一方で、IEC、および ISO の国際標準化の提案委員会においては、CRT や LCD の基準をもとに、「reading」の部分の比重を高め、E ペーパーの規格に関する議論を進めてきたという経緯がある[11]。しかしながら、このような規格化が進むと、E ペーパーについては、上述のように CRT や LCD とデバイスの特性が大きく異なり、映像の「viewing」の機能がないたため、実際よりも低く評価される可能性がある。また、1.1.3 でも述べたとおり、もともとのベースとなっている「紙」の機能との比較に基づいて規格化される必要がある。そのことから、CRT や LCD と同一基準による規格化には限界があり、E ペーパー用の規格を提案する必要がある。

1.3 研究の目的

本研究は、経済産業省の戦略的国際標準化加速事業 (国際標準共同研究開発事業: 電子ペーパーに関する国際標準化) に係る E ペーパーに特化した国際規格提案に資する基礎データを収集するものである。具体的には、E ペーパー、光源搭載型液晶ディスプレイ、および紙について、人間工学的評価を行い、その評価方法を確立する。さらにその評価方法を用いてデバイスの表示特性 (画面の輝度、コントラスト比など)、表示文字 (文字サイズ)、環境照度と、ユーザーのパフォーマンスとの関係を明らかにすることを目的とする。なお、本研究では、これらデバイスが幅広い年代に利用されていることを踏まえ、第二目的として可読性に対し加齢が及ぼす影響についても明らかにする。

1.4 電子書籍リーダーと紙の構造と表示原理について

本研究では、電子書籍リーダーとして、光源搭載型液晶ディスプレイのタブレット端末、E ペーパーディスプレイの電子書籍専用端末 2 種類 (フロントライト搭載型、および非搭載型)、および PPC 用紙の 4 種類を用いた。以下にそれぞれの代表的な構造と表示原理について示す。

1.4.1 光源搭載型液晶ディスプレイ

液晶ディスプレイは従来のブラウン管に比べ薄型、軽量、低電力といった特徴を有し、テレビ、PC モニタ、モバイル機器、車載パネル等の需要が拡大している[12]。液晶とは、固体と液体の間にある物質の状態で、液体の持つ流動性と結晶の持つ複屈折性（光が通過する方向によって屈折率が異なる性質）をあわせ持った物質である。また、電気的な刺激により、光の通し方を変える特徴を持つ物質である。液晶ディスプレイはこれら液晶物質の電気光学効果を光の変調（透過率制御）に利用した非発光型の表示デバイスである。液晶ディスプレイ自体は非発光型のため、ディスプレイの背後から光を当てるバックライトシステム等により画面を明るくする。これが光源搭載型液晶ディスプレイの基本構造であり、色を表示するためには、カラーフィルターをかける[13, 14]。代表的な光源搭載型であるバックライト型液晶ディスプレイの基本構造を図 1-1 に示す[15]。

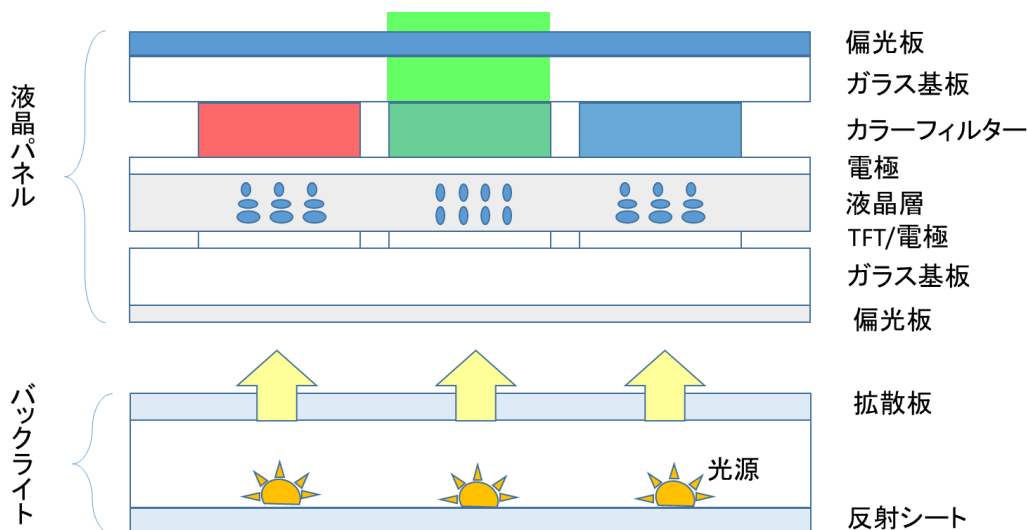


図 1-1 バックライト型液晶ディスプレイの基本構造

1.4.2 E ペーパー

E ペーパーは、印刷物の「見やすい」、「携帯性」といった長所と、ディスプレイ装置の「書き換え可能」、「デジタル情報との融合」といった長所をあわせ持つ表示媒体である。外光反射の反射式表示により自然で目が疲れにくく、また、メモリー性があり、一度表示した情報は電源を切っても消えない特長がある[16]。現在、最も普及しているデバイスで採用されている E Ink 社のマイクロカプセル電気泳動方式の表示原理を図 1-2 ([17]を参考に作成) に示す。透明有機膜の球状のマイクロカプセル（透明の溶液に満たされている）の中に負に帯電した黒色粒子と正に帯電した白色粒子が混在している。このマイクロカプセルが平面電極（上部の透明電極、下部の基盤）の間に挟まっている。画像の書き換え時には外部から両電極間に電界を与え、黒と白色の微粒子の浮沈を制御する。下部の電極に正の電位、上部の電極に負の電位を与えると、白色が浮き上がり、逆ならば黒が浮き上がる。透明電極側に浮き上がった微粒子の色が見えることになる。フロントライト搭載型 E ペーパー（図 1-3: [18, 19]を参考に作成）は、図 1-2 のマイクロカプセル電気泳動方式の E ペーパーの層の上にライトガイ

ドが重なる構造となっている。図 1-1 のバックライト型の液晶ディスプレイとの違いは、フロントライト搭載型では、ライトの向きがデバイス使用者に向けて直接光を当てるのではなく、画面側面から LED 光をライトガイドに平行に照射する間接光を利用していることである。ライトガイドは一面にプリズム構造が配置されており、光の方向を表示面に向けることができ、その反射光を利用してディスプレイを発光させる仕組みである。

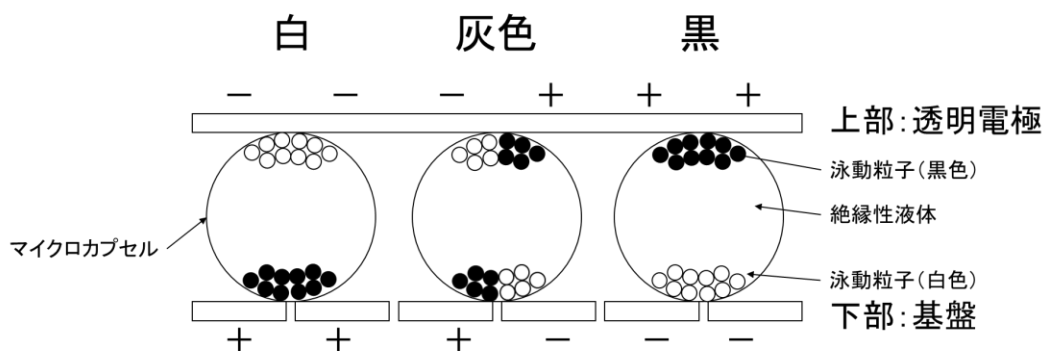


図 1-2 マイクロカプセル電気泳動方式の E ペーパー

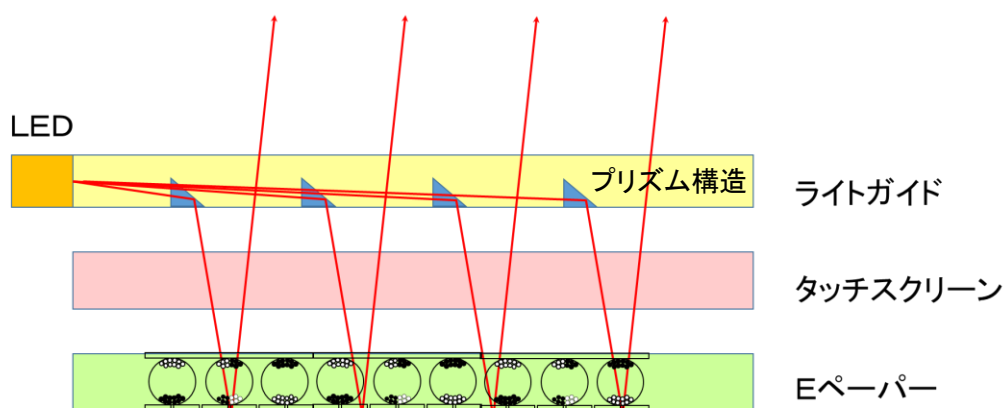


図 1-3 フロントライト搭載型の E ペーパー

1.4.3 紙

紙とは、「植物繊維を抽出して、これを水中に分散させ、水の媒介により薄く平らに絡み合わせて造ったもの」と従来から定義され、一般的には、広葉樹の木繊維および針葉樹の仮道管をパルプ化によって取り出してパルプ繊維とし、絡み合わせて製造したシートを指す[20]。また、日本工業規格の「紙・板紙及びパルプ用語」にも「植物繊維その他の繊維を膠着させて製造したもの」、広義には「素材として合成高分子物質を用いて製造した合成紙のほか、繊維状無機材料を配合した紙も含む」として定義されている[21]。紙を構成する主成分はパルプ繊維である。化学的には、パルプ繊維の主成分は多糖類で、その大部分はセルロースである。紙に光が照射されると、空気と繊維を構成する物質（主にセルロース、これに顔料やラテックスが加わる場合もある）の間で屈折が起き、その細くランダムに配置する無数の空隙のために屈折が不特定の方角に幾重にも起こる。これは光の散乱に相当する。そのため、高い環境照度においては、高い輝度を示す。コピー用紙の表面の走査型電子顕微鏡写真を図 1-4 に示す[20]。表面の凸凹がわかる。

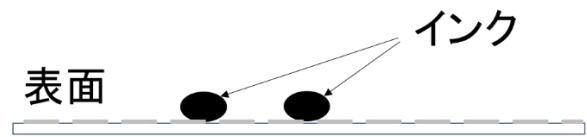
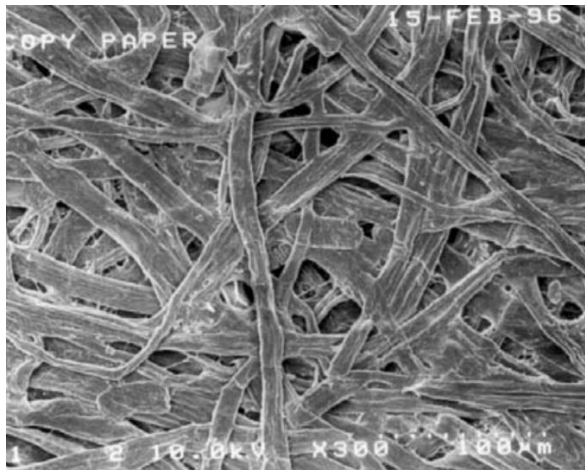


図 1-4 コピー用紙の表面形状

1.5 論文の構成

本論文は、本章を含む 3 章により構成される。次章（第 2 章 電子書籍リーダーの可読性に対する人間工学的評価）は、4 つの節から構成される。第 1 節では、3 つの実験全体で共通した評価方法（実験方法、評価指標、および照明装置）の概略を述べる。第 2 節（E ペーパーの可読性に対するコントラスト比と加齢の影響）では、E ペーパーのフロントライト搭載の有無、および加齢の可読性に及ぼす影響について報告する。第 3 節（E ペーパーの可読性に及ぼす環境照度および加齢の影響）では、様々な環境照度の条件、および加齢が E ペーパーをはじめとする電子書籍リーダーの可読性に及ぼす影響について報告する。第 4 節（電子書籍リーダーの可読性に及ぼす文字サイズおよび加齢の影響）では、電子書籍リーダーの表示文字サイズの変化、および加齢が可読性に及ぼす影響について報告する。最終章（第 3 章 総括）では、本論文全体のまとめと今後の課題について述べる。

1.6 参考文献

- [1]. “Global entertainment and media outlook 2014-2018”, PricewaterhouseCoopers (Jun. 2014)
- [2]. “Global E-book Market 2015-2019”, TechNavio (Infiniti Research Ltd.), (Nov. 2014)
- [3]. “IPA’s Global Publishing Statistics”, International Publishers Association, (Nov. 2013)
- [4]. “平成 27 年度版情報通信白書”, 総務省 (Jul. 2015)
- [5]. “電子書籍ビジネス調査報告書 2015”, インプレス総合研究所編
- [6]. E Ink Corporation ウェブページ,
http://www.eink.com/press_releases/e_ink_announces_advanced_color_epaper_05-24-2016.html
- [7]. 平成 20 年技術革新と労働に関する実態調査, 厚生労働省 (Sep. 2009)
- [8]. 森田和元: “照薄暮における交通事故発生状況の統計的解析”, 照明学会誌, vol.84, No.8A, pp.507-513 (2000)
- [9]. ISO 9241-3, Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display terminals (VDTs), Part 3: Visual display requirements (1992)
- [10]. JIS Z 8513, 人間工学—視覚表示装置を用いるオフィス作業—視覚表示装置の要求事項, 日本標準調査会 (2006)
- [11]. “平成 25 年度経済産業省委託事業成果報告書 戦略的国際標準化加速事業(国際標準共同研究開発事業:電子ペーパーに関する国際標準化)”, 一般社団法人ビジネス機械・情報システム産業協会, 国立大学法人信州大学, 国立大学法人名古屋大学 (Mar. 2014)
- [12]. “平成 17 年度特許出願技術動向調査報告書 液晶表示装置の画質向上技術”, 特許庁 (Mar. 2006)
- [13]. 木村直博, 藤岡清登: “液晶ディスプレイの原理と最近の動向”, 日本放射線技術学会雑誌, vol.60, No.10, pp. 1361-1368 (Oct. 2004)
- [14]. “液晶ディスプレイの原理と技術”, シャープ株式会社ウェブページ
<http://www.sharp.co.jp/products/lcd/tech/index2.html>
- [15]. 横溝寛治: “知っておきたいキーワード LED バックライト”, 情報メディア学会誌, vol.64, No.5, pp.708-710 (2010)
- [16]. 平成 23 年度特許出願技術動向調査報告書, 特許庁(Apr. 2012)
- [17]. “E Ink How it Works”, E Ink Corporation ウェブページ,
http://www.eink.com/how_e_ink_works.html
- [18]. “Electronics Ecosystem”, E Ink Corporation ウェブページ,
http://www.eink.com/electronics_ecosystem.html
- [19]. アマゾン社ウェブページ
<http://www.amazon.co.jp/Kindle-Paperwhite/dp/B007OZO03M/>
- [20]. 江前敏晴: “講座「紙の科学」 紙の物性・構造の基礎と印刷適性”, ウェブページ, <http://www.enomae.com/Paper%20Science%20seminar2/>

[21].JIS P 0001, 紙・板紙及びパルプ用語, 日本標準調査会 (1998)

第2章 電子書籍リーダーの可読性に対する人間工学的評価

2.1 電子書籍リーダーとしてのディスプレイ装置の可読性の評価方法について

2.1.1 本研究の背景および新規性について

テレビやPCなどのディスプレイ装置の視認性については、多くの先行研究により反射光の測定等技術的な検証や、被験者がディスプレイを見る際に直感的に感じる主観的な見やすさ、また、テキストそのものの視認性などにより評価されている[1-6]。これらの研究は液晶ディスプレイの「見る」という機能、視認性に主眼を置くものであった。一方で、過去10年間の著しい電子書籍の普及拡大にともない、ディスプレイ装置は電子書籍リーダーとして、「読む」という機能にも大きな役割を担うこととなった。

本研究においては、この、ディスプレイ装置の「見る：viewing」ための規格とは異なる新たな役割としての「読む：reading」ための国際規格の提案のために、人間工学的視点に基づいた被験者実験を行った。具体的には、実際の読書の環境に近い「目読タスク」を被験者に課すことで、電子書籍リーダーの可読性の評価を行った。

2.1.2 本研究で用いた評価方法

本研究では、暗室内に人工照明を用いた照明箱を設置し、実際の読書の環境に近い「目読タスク」を被験者に課し、様々な条件下における電子書籍リーダーの可読性の評価を行った。第2節、3節、および4節の実験については、本節の評価方法を用いた。

2.1.2.1 実験方法

実験はテキストの目読により行った。共同研究者による先行研究[7, 8]では、音読実験を実施したが、本研究では、実際の読書環境に近い目読実験を行った。具体的には、「読む」というプロセスから「文字を判別する」部分を抜き出した試行として、表音文字のアルファベット1文字を、テキストを左上から右下に向かって一行ずつ読み進める中でカウントする「目読タスク」を設定した。先行研究の音読実験と今回の目読実験の大きな違いは、前者が評価指標として、被験者の読みやすさの主観的評価と音読速度（読み上げ単語数）の2種類の指標により評価を行う一方で、後者は、被験者の読みやすさの主観的評価と目読速度（目読時間）、および正答率の3種類の指標で評価を行うことができる点である。また、本研究は国際規格の提案に関する基礎資料の収集を目的とするため、目読テキストは英数字とした。テキストは1ページ当たり30字×14行を画面の中央になるよう配置した英数字のランダムテキストをPDF形式のファイルで表示し、フォントはCourierを用いた。この表示形式は、ISOの電子ディスプレイ装置の評価方法に準拠した[9]。テキストの表示例を図2-1に示す。使用したフォントのCourierは、代表的なフォントの中では数少ない等幅フォントである。特徴は、等幅フォントのため、テキストの1行に同じ数の文字を配列することができる。また、一方で、代表的な他のフォントと比較してサイズが小さく、ポイント数だけでは、可読性に関

する他の研究との互換性が確保できない。このため、第4節の文字サイズの可読性への影響についての研究では、実際の表示文字高（単位 mm）を用いて先行研究の結果との比較検討を行った。それぞれのデバイスは、ベゼルの色による影響を避けるために、スクリーン以外を白色ケント紙で覆った。また、デバイスの底部に台を設けてデバイスの中心線をそろえ、テキストの提示高さを同じにした。被験者は、1ページ分の表示されたテキストを、左上から目読み、大文字の「M」の数を手動カウンターにより計測した。目読終了後、被験者はVisual Analog Scale（VAS）を用いてテキストの読みやすさを評価した。なお、被験者には、できるだけ速く、正確に読むこと、また、速さと正確さについては、正確さを優先することを指示した。

```
d49 9j Wph2 fX NQ7ZN1 mFf cb4X  
i9k6 nv ona2D MMC3vtsF Rks COK  
2W jds7N fB ST LtZ JJfd 4EU Np  
xBDF T2Xvcv9PZM5 3NQdKyV6 fKej  
KJk dxICo6r FHC36MTiS 46qQ VUL  
S4P0y bGc 4QTtAD2 7oCd3I TJ2Uk  
H3uv GIjBt89ZzJ EQ1c wZqkMVhMd  
0F3B qB EmR i14uB ljlzjis 6KkI  
vVW FQyMBL J1hx xT3KULsqA 4nrC  
rUmt 1b9Z7 et TP kYMIR hrW9MJQ  
zqI8Q vqapBl kUUsW rbiluW FsDQ  
7QJ LT pfVKeQ gUoX2fZNmu VrJDI  
UOLaCnfCGf YuI6hE x54y zS CL41  
p0vc eyvZi MVJ ypQl PQA eUjbs3
```

図 2-1 テキストの表示例

2.1.2.2 評価指標

本研究では、電子書籍リーダーの可読性を評価するに当たり、3つの指標を用いた。以下にその内容を示す。

1つ目は、被験者の主観的な読みやすさの評価の指標としてVAS、2つ目、および3つ目は、客観的な評価としての目読時間index、および正答率indexである。VASは、もともと医療の分野において患者の痛みの度合いを10 cmの直線上に線を引くことで無段階に評価したものである[10]。その後の研究により、健常者を含め、「快適であるかないか」を評価するための指標として有効であるとされ、広く用いられている[11]。図 2-2に被験者のVASの評価の方法の例を示す。VASの値は左側ほど読みにくく、右側に行くほど点数が高く読みやすいという評価になる。被験者の主観的な読みやすさの指標については、共同研究者による先行研究では、0から4の5段階の固定値で評価していたが[7, 12]、本研究では、室内における6段階の環境照度の変化による評価の違いを把握するために、固定値の評価法と比較して、より細かな評価が可能とされるVASを用いた[10]。VAS値は解析時に100点満点に換算し、読みやすさの主観評価とした。目読時間は、被験者のテキストの読み始めから、読み終わりまでの時間の計測値である。正答率は、被験者のカウントした値と、テキスト中の実際の「M」の数の差の絶対値を実際の「M」の数で除した値を誤答率とし、1から誤答率を減じて算出した値である（ただし、数えた「M」は必ずしも正答とは限らない。例えば、「誤答」には、正答よりも多く数えた場合と、少なく数えた場合の両方が含まれる。両者が同数の場合には、「数え間違えたが正答」となる場合が少数含まれる。そのため、この正答率には、ある程度の誤差が存在する。）。目読時間、および正答率については、共同研究者の先

行研究においては、収集したデータそのもので分析を行っていたが[13-15]、被験者から収集したデータに個人の能力の差によるばらつきが非常に大きかったため、本研究ではこれを相殺するために、被験者ひとりずつの平均値を算出し、実際の値をその平均値で除した値を目読時間index、正答率indexとし、評価に用いた。目読時間indexは点数が高いほど、被験者がテキストを読むのに時間がかかっている。正答率indexは点数が高いほど正答数が多い。

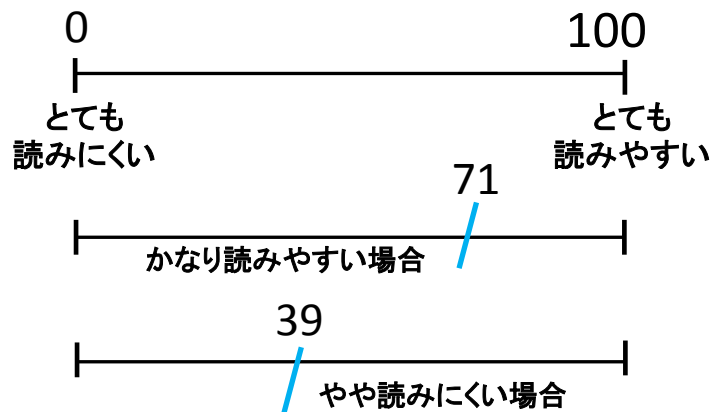


図 2-2 VAS の評価方法の例

2.1.2.3 照明装置

本研究で用いた照明装置は、Ueki et al.[15]がディスプレイを評価するために用いたものを参考に作成した。人工照明には6,500 Kの蛍光灯および同じ色温度のLED光源を用いた。6,500 Kは昼光色の標準とされている色温度である[16]。計測に用いた照明箱（図2-3）は、暗室に設置した。照明箱には額をのせるヘッドレストを取り付け、視距離が一定（400 mm）になるようにした。視距離400 mmは、日本工業規格においてフラットパネルディスプレイを用いる作業における視覚表示装置の要求事項を満たしている[18]。被験者自身の映り込みの影響を避けるため、デバイス表示面の垂直位置から10度傾けた100度で可読性評価を行った。表2-1に本章第3節において環境照度を変化させた時の実測値を示す（4日間の実験期間中開始前、終了後の1日2回測定）。結果はばらつきが少なく、装置の照度は非常に安定していた。

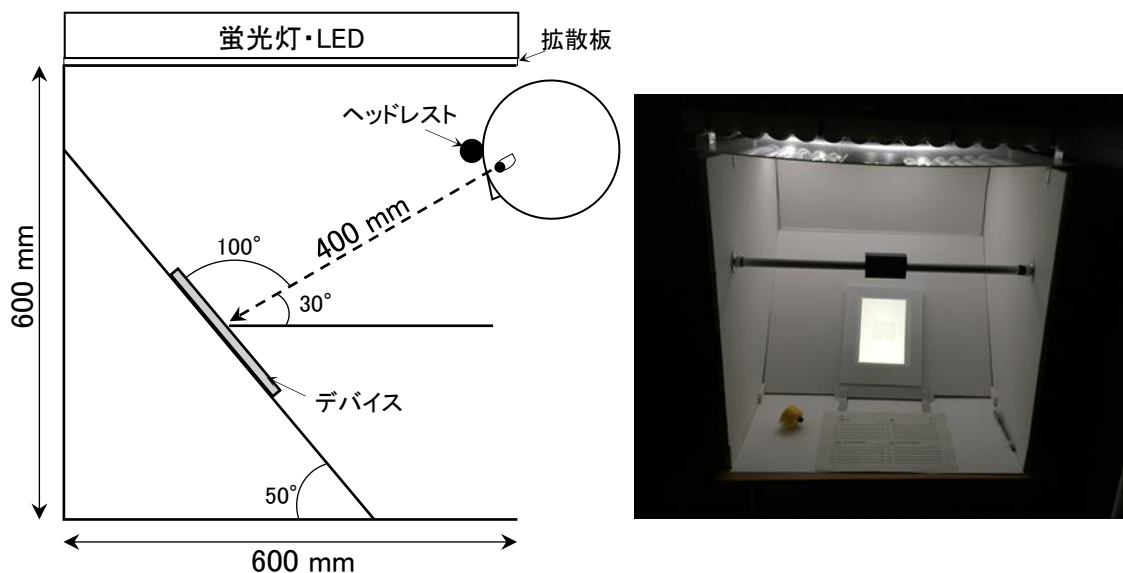


図 2-3 照明装置

表2-1 照明装置の照度の実測値

環境照度 レベル	実測値 (単位: lx) Mean ± S.D.
10 lx	9.8 ± 0.4
30 lx	37.3 ± 1.0
100 lx	111.3 ± 4.6
300 lx	302.3 ± 18.7
1,000 lx	986.9 ± 46.6
3,000 lx	2960.0 ± 172.8

2.1.3 参考文献

- [1]. Miyao, S. Ishihara, M. Furuta, T. Kondo, H. Sakakibara, M. Kashiwamata, S. Yamada : “Comparison of Readability between Liquid Crystal Displays and Cathode-Ray Tubes”, 日本衛生学雑誌, vol. 48, No. 3, pp. 746-751 (1993).
- [2]. E. Grandjean 著, 西山勝夫, 中迫勝訳 : “コンピュータ化オフィスの人間工学”, 啓学出版 (1989)
- [3]. K. H. E. Kroemer, E. Grandjean E : “Fitting the Task to the Human”, Fifth Edition: A Textbook of Occupational Ergonomics, London: Taylor & Francis (1997)
- [4]. 大石巖, 畑田豊彦, 田村徹 : “ディスプレイの基礎”, 共立出版 (2001).
- [5]. M. Miyao, S.S. Hacısalihzade, Allen JS, Stark LW : “Effect of VDT Resolution on Visual Fatigue and Readability: an Eye, Movement Approach”, Ergonomics, vol. 32, No. 6, pp. 603-614 (1989)
- [6]. 窪田悟 : “液晶ディスプレイの生態学”, 労働科学研究所出版部 (1998).
- [7]. T. Koizuka, S. Sano, T. Kojima, M. Miyao : “Evaluating the Effects of Environmental Illuminance on the Readability of E-books”, SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 44, pp. 571-573 (2013)
- [8]. T. Koizuka, Y. Ishii, T. Kojima, N. Ishio, R. P. Lege, M. Miyao : “Proposing a Baseline Setup for Readability”, IDW 2014, Niigata, Japan (Dec. 3-5, 2014)
- [9]. ISO 9241-304, User Performance Test Methods for Electronic Visual displays, International Organization for Standardization (2008)
- [10]. N. Crichton : “Visual Analogue Scale”, Journal of Clinical Nursing 10, 706 (2001)
- [11]. N. Green, K. Taylor, Wellnomics : “White Paper”, Wellnomics Limited (Apr. 2009)
- [12]. 佐野峻太, 神田哲也, 長谷川旭, 小嶋健仁, 宮尾克 : “モバイル端末の視認性に対する照度の影響”, モバイル学会誌, vol. 2 (2), pp. 81-85 (2012)
- [13]. Y. Ishii, T. Koizuka, K. Iwata, N. Ishio, S. Matsunami, P. R. Lege, T. Kojima, M. Miyao : “Contribution of Character Sizes to the Readability of Mobile Devices”, IDW 2014, Niigata, Japan (Dec. 3-5, 2014)
- [14]. K. Iwata, Y. Ishii, T. Koizuka, S. Matsunami, N. Ishio, P. R. Lege, T. Kojima, M. Miyao : “Difference in Readability of the Contrast Ratio of Mobile Devices”, IDW 2014, Niigata, Japan (Dec. 3-5, 2014)
- [15]. 岩田 光平, 石井 佑樹, 小飯塚 達也, 松波 紫草, 石尾 暢宏, R. P. Lege, 小嶋 健仁, 宮尾 克 : “モバイル端末のコントラスト比と水晶体白濁度による可読性への影響”, モバイル学会誌, vol.5 (2), pp. 57-61 (2015)
- [16]. S. Ueki, T. Taguchi, K. Nakamura, Y. Itoh, K. Okamoto, : “New Metrics Based on Visual Perception for Evaluating Image Quality”, Proceedings International Display Workshops, vol. 1, pp. 519-522 (2006)

- [17]. ISO 11664-2:2007 (CIE S 014-2/E: 2006), Colorimetry -- Part 2: CIE standard illuminants.
- [18]. JIS Z 8528-2, 人間工学－フラットパネルディスプレイ（FPD）を用いる作業－視覚表示装置の要求事項－第 2 部：FPD の人間工学的要求事項（2006）

2.2 Eペーパーの可読性に対するコントラスト比と加齢の影響

2.2.1 目的

電子書籍リーダーにおいては、同じコンテンツを読む場合にも、表示するデバイスにより特性は異なり、可読性に影響を与えると考えられる。本節では、表示スクリーンの文字と背景のコントラスト比の違いや加齢が、Eペーパーの可読性に及ぼす影響について、特にフロントライト搭載の有無に注目して被験者実験を行い、評価・考察を行った。

2.2.2 方法

2.2.2.1 被験者

本実験の被験者は15歳から78歳の男女107名（平均年齢46.9歳、標準偏差15.5）である。通常、読書に眼鏡、コンタクトレンズを使用している場合はその状態で実験を実施した。被験者は年齢によって3群に分類し、44歳以下の被験者を若年、45歳から64歳を中年、65歳以上を高年とした。年齢群別の視機能の特徴として、若年は十分な調節力を持っている、もしくはやや調節力が衰えているが近見作業に支障がない群。中年は緩やかな老視であり、近見作業に支障がある群。高年は老視であり、近見作業に老眼鏡を用いる群である。年齢の構成比は表2-2に示す。また、被験者に対しては、事前にインフォームドコンセントを実施し、名古屋大学大学院情報科学研究科倫理審査委員会の承認の下行なわれた。

表2-2 被験者の年齢構成

	若年 (15~44)	中年 (45~64)	高年 (64~78)	合計
人数	49名	41名	17名	107名

2.2.2.2 実験デザイン

実験では、反射型電子ディスプレイ（EPD：Electrophoretic Display）にフロントライトを搭載したEペーパーとしてAmazon社製 Kindle Paperwhite™[1]（第2世代、2013年発売）、フロントライト非搭載型のEペーパーとしてSONY社製SONY Reader™[2]（PRS-T3、2013年発売）、および紙（白度69%のPPC用紙に白黒2値で出力）の3種類のデバイスを使用した。以下、それぞれPW、SR、紙と表記する。各デバイスの仕様を表2-3に示す。

表2-3 デバイスの仕様

デバイス	PW	SR	紙
画面サイズ	6 インチ	6 インチ	6 インチ
解像度	212 ppi	212 ppi	1200 dpi

実験は暗室にて2.1.2.3の照明箱を用いて行い、環境照度を750 lxレベル(実測値 754 lx)とした。750 lxは、日本工業規格(照明基準総則) [3]において屋内事務室で設計等のやや精密な視作業を行うため、また、住宅の書斎や勉強室で読書をする際の照明要件である。テキストのフォントはCourier、サイズは8 pt(文字高:デバイス表示状態で約2.75 mm)とした。PWのフロントライト光量は最大で固定した。テキストの文字色は黒、背景の色はデバイスによって異なり、白ないし明灰色であり、本実験では背景色の濃淡でコントラストに差をつけることとした。コントラストについては、0(黒)から15(白)のグレースケール16階調の色調のうち、3(暗い灰)、9(明るい灰)、15(白)の3色を採用し、3段階とした。コントラストは、背景が3のときを低、9のときを中、15のときを高とした。テキストの表示例を図2-4に、デバイスごとの文字と背景輝度を図2-5aに、文字と背景の輝度の実測値から算出したコントラスト比を図2-5bに示す。文字および背景の輝度については、PWはフロントライトの効果により、低、および中コントラストにおいて、背景輝度が最も高く、SRは全てのコントラストで最も背景輝度が低かった。紙は、高コントラストで背景輝度が最も高かった。コントラスト比については2種類のEペーパー間(PW、およびSR)のフロントライトの有無による大きな差はなかった。紙は高コントラストで背景輝度、コントラスト比ともに最も高かった。

```
D8Ju NM 2pGHBIZfrdh eeAHK Hs39
Wa OwQ 2pQ1 Twx rQkAV EWMn4aVL
SnSs S3L Lb Ujkh fA xW Raq MuK
PrgezGuaig LDx CZ Oc tU7ZC A4D
tUwgG fKnI xc02 mZMSL5iM5 PScd
eNOJ4Pfk9 TV1Mja9u E4 CNWc Fqh
wP pedv82gmECvDh o71Mgr yw EdZ
zc eE PM2yRTJRkN ezyhIML vNt4n
pXdNeYHwQUf uA ZoJtAhf V9 kmTx
2a6 ufzhBR Mb MSE 9yf w1 NQln7
rfsK aKEUly eqQs Yxxm uaOI8e2S
Xpl cQ7h WMJjAtkqf XWfBzG uJzY
SX HYAtlEhq F2z jLuOeO5kyec qJ
eahc4 5T4 DNGY4mGD PL8Q jblBYa
```

<低コントラスト>

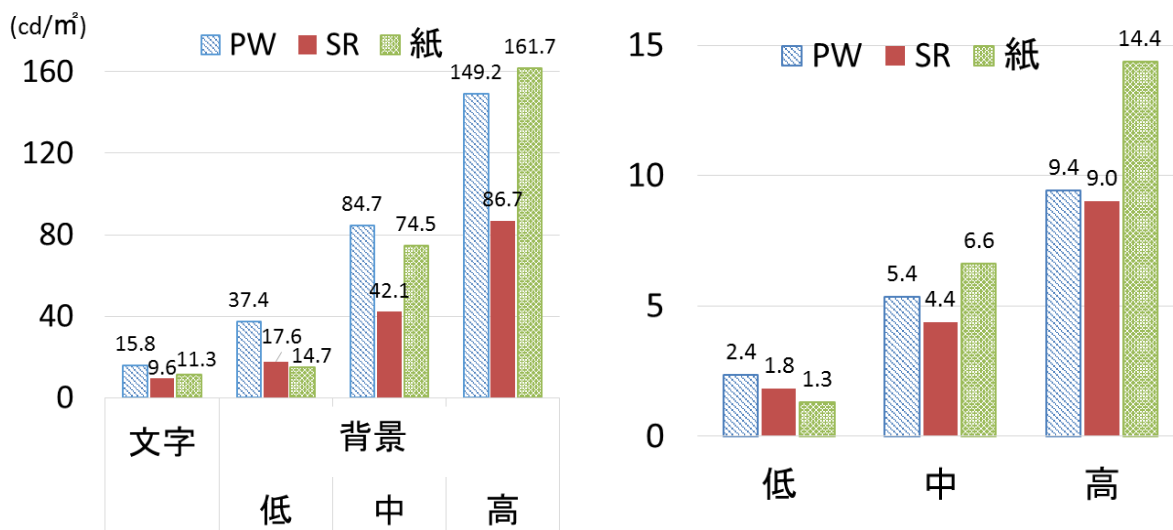
```
22 QHrz0W1z3J nWcWpF Vdq qB8WY
Iq pJ 17N 5XV4ZT6N0 lUiMjB gjy
Dxc Wme Mwa IAUI YDvyZv j0blg2
CnqM zat1L qb ddZ 0wRa lODg Kx
LXa tgl qQlZImLmW8 JoDzNWTtuBX
5WE qat PlUPyh 7fs JNzE6e IANL
um VMb1 fYp6 vW wS oyN r0a 8VI
lsg zUF Df 9YlFan2qM V4 hy ifl
3ReJzI82Zc 6VJ GMHSH6 ltWLSRB1
KD2V PjuqYVD Q9 hWJ7NukZH c31p
5OAOJcemW fsLpUW 8e2 fA15kACKo
wGOGxzt pjveSCw8KyUjo sXg qPP0
gME ELWfE NMzbV0Gqh2 Shg Ck Ac
m7zaczDSS do MsvY 722h acs28ce
```

<中コントラスト>

```
ZrvecPaL SyRpeq WZphIdY Fc ax0
lqraUZ20M br zgjnJz9 N7 p6u rj
OvWtd eZmMEG1z0 V31 UM aJ9kYtJ
dt hDv5M tzl bJrdwCD wRJ1E2Ez3
hB3rdULJ I0 akq i8VJ5 roLF U8q
2B 4mN 10F7vnUdsmC8wpQRFAqd TJ
3KkxD z4 nGc KV F34GK 7OL CJGU
RSg cjhe MaGd j1 Azlpv moN N90
8Bv Ska eHax MM7H 60DGZ z0CisE
mkc LQc yILJMzpbobhRTO3i 4bRuoc
pFb s8gTa VQy nZXw5 AFvB ijt1W
mXY yXG b7V Lj7ixK V8oz 4CRZQn
Nob Jt1Qd Or M6AJdxW 2Wkx6v LV
cE1VwvXPaEMhd jx7pP T0RRpnB mp
```

<高コントラスト>

図 2-4 テキストの表示例



a 文字および背景の輝度

b コントラスト比(実測値)

図 2-5 デバイスごとの輝度およびコントラスト比

2.2.2.3 実験方法および評価方法

2.1.2.1 のとおり、被験者による目読実験を行った。デバイスが 3 種類、コントラストが 3 段階のため、被験者一人当たり 9 試行のテストを行った。テキストの読みやすさに関しては、認識ができない（文字があるのはわかるが判別ができない、もしくは文字があるのかもわからないため試行を行うことができなかつた場合）とした被験者を 0 点として評価し、目読時間 index、および正答率 index については、テキストの認識ができない被験者を欠損値とした。年齢群別の全くテキストの認識ができなかつた試行の割合（低コントラストのみで発生）を表 2-4 に示す。

統計解析にあたっては、読みやすさの主観評価、目読時間 index、および正答率 index について、それぞれコントラスト（3 レベル）、およびデバイス（3 種類：PW、SR、紙）の 2 つの要因による、二元配置分散分析法を行った。なお、分析は被験者を 3 つの年齢群に分け、年齢群ごとに行った。

表 2-4 年齢群別の全くテキストを認識できなかつた低コントラストの試行の割合

若年者	中年者	高年者
5.7 %	17.7 %	51.0 %

2.2.3 結果

若年、中年および高年の 3 種類の年齢群別に、コントラストとデバイスの種類を要因として、読みやすさの主観評価に対して二元配置分散分析法による解析を行った。目読時間 index、および正答率 index それぞれの客観評価に対しても同様に解析を行った。結果について、読みやすさの主観評価は図 2-6 に、目読時間 index は図 2-7 に、正答率 index は図 2-8 に示す。なお、それぞれのグラフについては、デバイスごとに低、中、

高の3種類のコントラスト比の実測値が異なるため、横軸をコントラスト比の実測値とした。

読みやすさの主観評価は、全ての年齢群で評価が高い順に高、中、低コントラストであった。また、中コントラストでSRの評価が全ての年齢群で紙、およびPWと比較して低く、全試行（平均±標準偏差）では有意に低くなった（SR:34.2±19.0, PW:44.2±21.9 (p<0.01), 紙:45.7±21.2 (p<0.01)）。分散分析の結果では、若年および高年でコントラストのみに有意差があり、中年ではコントラストおよびデバイスの種類ともに有意差があったが、交互作用はなかった。多重比較では、コントラストについては、若年および中年で、高-中コントラスト間、高-低コントラスト間、および中-低コントラスト間で有意に評価が下がった。高年では高-低コントラスト間、および中-低コントラスト間で評価が有意に下がっており、若年、中年と比較して中-低コントラスト間で大きく評価が下がっている。

デバイスについては、全てのデバイスで、評価が高い順に高、中、低コントラストであった。なお、中年の紙とSRでは、紙が有意に読みやすい結果であった。中コントラストでは、SRのコントラスト比が最も小さく、評価も低い傾向にあり、高から中、中から低コントラスト間で同じように評価が下がっている。一方、PWと紙は、中と低コントラスト間で評価が大きく下がっている。また、PWと紙では、高年では、特に中コントラストで最も評価が低かったSRと比較し、コントラスト比の高い紙の評価が有意に高く、PWでは有意差はないものの10ポイント程度評価が高かった。若年と中年では両者の評価は、SRと比較して10ポイント程度高い結果となり同じ傾向にあったが、中年では最も評価が低かったSRとPWの間に有意差があった。（図2-6）

目読時間 index は、全ての年齢群で、高、および中コントラストで目読時間は短く（読みやすい）、低コントラストで長い（読みにくい）結果となった。分散分析の結果は、全ての年齢群においてコントラストのみに有意差があり、デバイスの種類による違いはなかった。多重比較では、全ての年齢において、高と低コントラスト、中と低コントラストの間で目読時間が有意に長くなった。高コントラスト、および中コントラストと比較した低コントラストの目読時間 index は高い年齢群ほど差が大きくなる傾向にあった（図2-7）。

正答率 index（平均値±標準偏差）は、低コントラストでは若年、中年、高年の順に低下し、若年と中年、および高年の間で有意に下がった。（若年 1.03±0.35, 中年: 0.89±0.40 (p<0.05), 高年:0.73±0.27 (p<0.01)）。また、低コントラストにおいては、全ての年齢群でPWの正答率が最も低く、特に若年との比較で、中年、および高年の正答率が有意に低い結果となった（若年:0.93±0.30, 中年:0.69±0.36 (p<0.01), 高年:0.58±0.27 (p<0.05)）。分散分析の結果は、若年および高年では、コントラストのみに有意差があった。中年においてはコントラストおよびデバイスの種類の両方に有意差があり、交互作用があった。多重比較においては、コントラストについては、全ての年齢群で高と低コントラスト、および中と低コントラストの間で有意に正答率が低下した。デバイスの種類については、中年のPWと比較して紙の正答率が有意に高かった。若年においては、PWでは高コントラストに比較して中コントラストの正答率が高い傾向にあった。また、若年、中年においては、低コントラストでの紙の正答率の低下がPW、SRと比較して緩やかであった（図2-8）。中年においては、低コントラストにおいて、紙がPWに

対して有意に高い結果となった。また、読みやすさの主観評価、目読時間 index、正答率 index の指標の年齢群別のグラフを比較すると、正答率 index の年齢群による傾向の違いが最も顕著であった（図 2-6、2-7、および 2-8）。

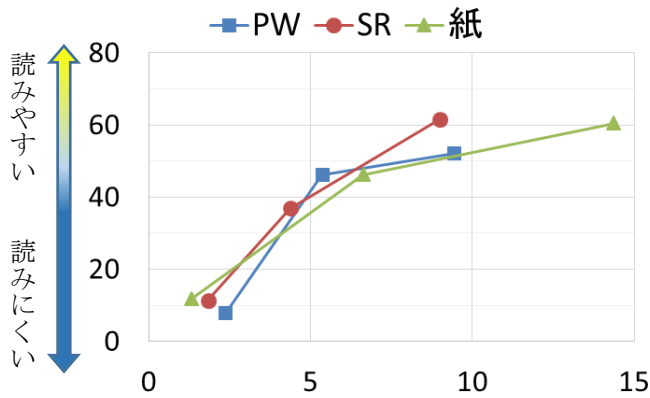
分散分析の結果

		若年	中年	高年
全体 (コントラスト×デバイス)	コントラスト	**	**	**
	デバイス	-	**	-
	交互作用	-	なし	-

多重比較

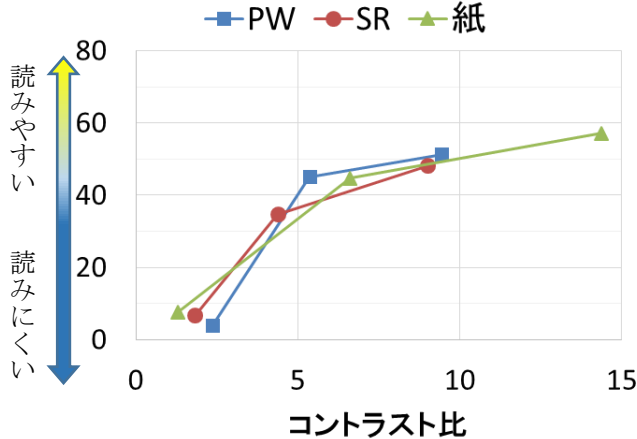
		若年	中年	高年
コントラスト	中-低	**	**	**
	高-低	**	**	**
	高-中	**	**	-
デバイス	PW-SR	-	-	-
	PW-紙	-	-	-
	SR-紙	-	**	-

(** : $p < 0.01$)



	高	中	低
	Mean±S.D	Mean±S.D	Mean±S.D
1_PW	52.1 ± 22.9	46.2 ± 21.6	7.9 ± 9.0
2_SR	61.6 ± 20.9	36.9 ± 18.9	11.4 ± 11.7
3_紙	60.5 ± 22.7	46.2 ± 18.8	11.8 ± 12.1

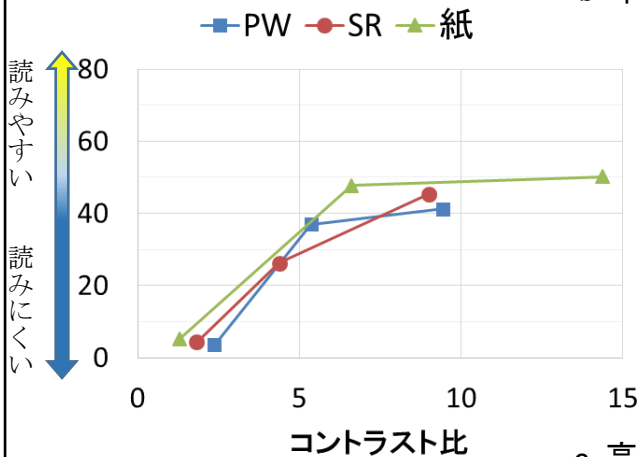
a 若年



	高	中	低
	Mean±S.D	Mean±S.D	Mean±S.D
1_PW	51.4 ± 23.6	45.1 ± 20.7 ^a	4.1 ± 5.8
2_SR	48.1 ± 20.8	34.7 ± 19.1 ^a	6.8 ± 12.1
3_紙	57.2 ± 21.8	44.7 ± 21.4	7.7 ± 8.3

†同じ列 (コントラスト) の中で同じアルファベットが付されている機種間には有意差がある ($p < 0.05$)。例えば中欄の1_PWと2_SRには「a」が記載してあるが、これは、1_PWの読みやすさの主観評価が2_SRに比べ有意に高いことを示している。

b 中年



	高	中	低
	Mean±S.D	Mean±S.D	Mean±S.D
1_PW	41.2 ± 22.6	36.9 ± 24.5	3.6 ± 5.6
2_SR	45.4 ± 23.1	26.2 ± 16.9 ^a	4.4 ± 7.1
3_紙	50.2 ± 23.7	47.7 ± 25.4 ^a	5.3 ± 7.2

†同じ列 (コントラスト) の中で同じアルファベットが付されている機種間には有意差がある ($p < 0.05$)

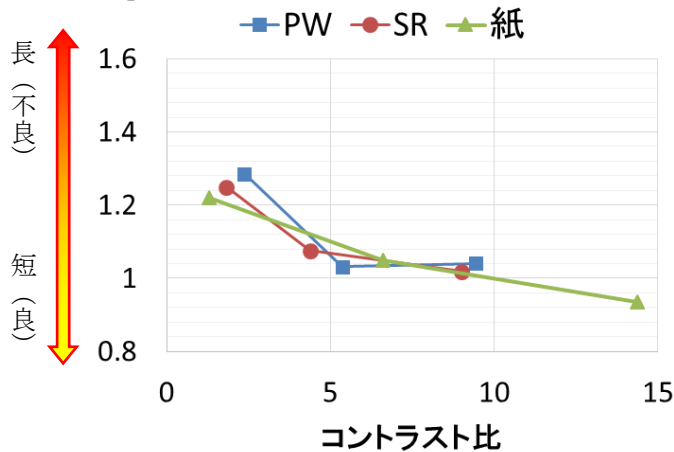
c 高年

図 2-6 年齢群別の読みやすさの主観評価の比較

分散分析の結果

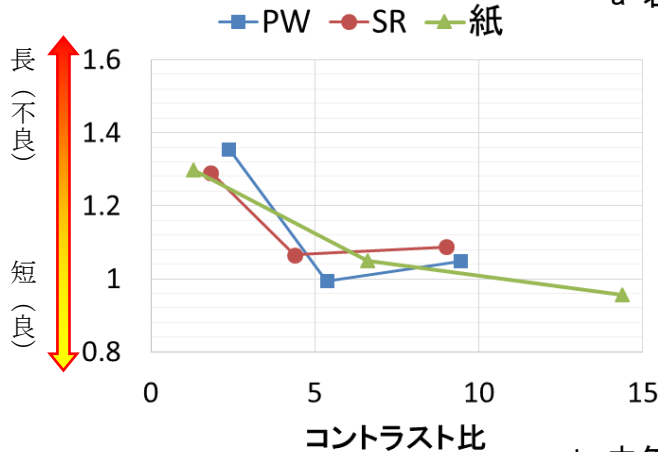
		若	中	高
全体 (コントラスト×デバイス)	コントラスト	**	**	**
	デバイス	-	-	-
	交互作用	-	-	-
多重比較				
コントラスト	中-低	**	**	**
	高-低	**	**	**
	高-中	-	-	-
デバイス	PW-SR	-	-	-
	PW-紙	-	-	-
	SR-紙	-	-	-

(**： p<0.01)



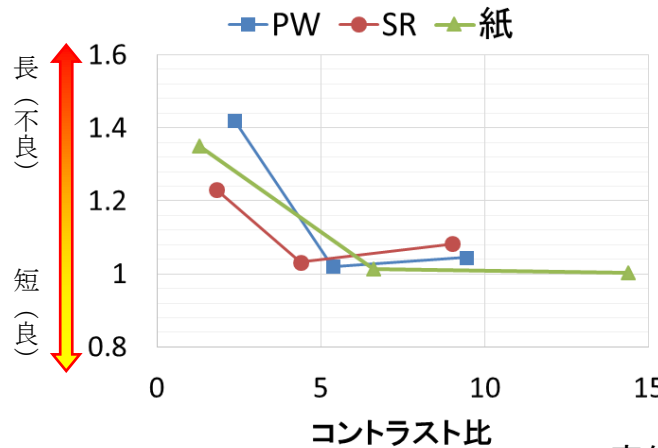
	高	中	低
	Mean±S.D	Mean±S.D	Mean±S.D
1_PW	1.04 ± 0.24	1.03 ± 0.24	1.29 ± 0.30
2_SR	1.02 ± 0.23	1.08 ± 0.30	1.25 ± 0.32
3_紙	0.94 ± 0.12	1.05 ± 0.24	1.22 ± 0.25

a 若年



	高	中	低
	Mean±S.D	Mean±S.D	Mean±S.D
1_PW	1.05 ± 0.30	0.99 ± 0.25	1.36 ± 0.27
2_SR	1.09 ± 0.32	1.07 ± 0.29	1.29 ± 0.28
3_紙	0.96 ± 0.20	1.05 ± 0.29	1.30 ± 0.35

b 中年



	高	中	低
	Mean±S.D	Mean±S.D	Mean±S.D
1_PW	1.05 ± 0.27	1.02 ± 0.22	1.42 ± 0.30
2_SR	1.08 ± 0.29	1.03 ± 0.20	1.23 ± 0.16
3_紙	1.00 ± 0.25	1.01 ± 0.28	1.35 ± 0.25

c 高年

図 2-7 年齢群別の目読時間 index の比較

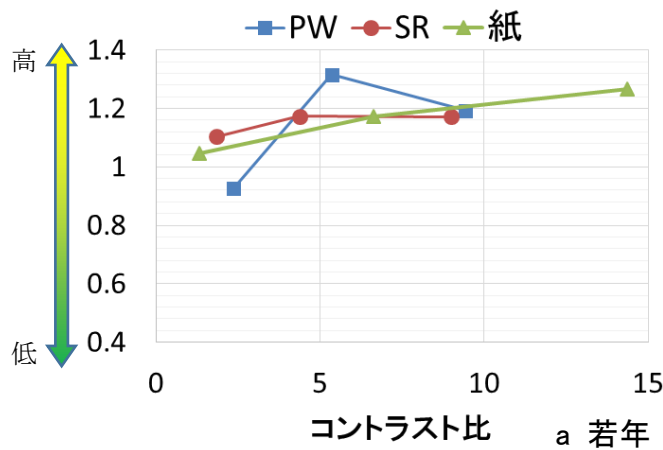
分散分析の結果

		若年	中年	高年
全体 (コントラスト×デバイス)	コントラスト	**	**	**
	デバイス	-	**	-
	交互作用	-	あり	-

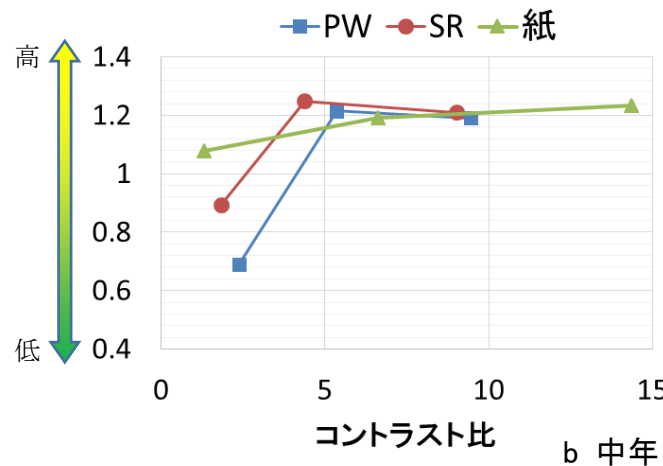
多重比較

		若年	中年	高年
コントラスト	中-低	**	**	**
	高-低	**	**	**
	高-中	-	-	-
デバイス	PW-SR	-	-	-
	PW-紙	-	**	-
	SR-紙	-	-	-

(**: p<0.01)

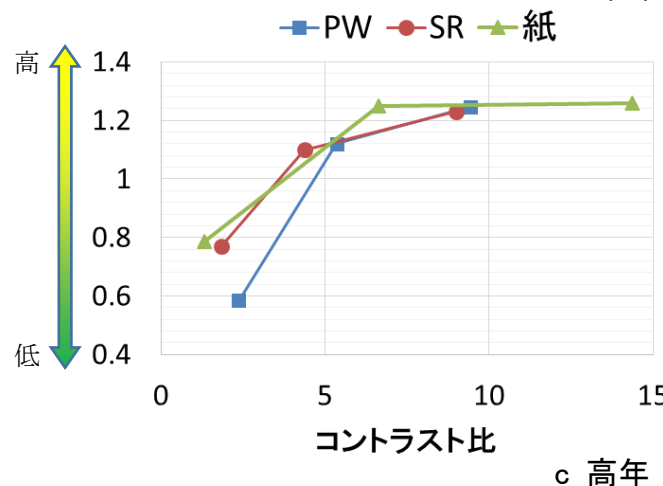


	高	中	低
	Mean±S.D	Mean±S.D	Mean±S.D
1_PW	1.19 ± 0.29	1.32 ± 0.32	0.93 ± 0.30
2_SR	1.17 ± 0.31	1.17 ± 0.30	1.10 ± 0.37
3_紙	1.27 ± 0.32	1.17 ± 0.24	1.05 ± 0.35



	高	中	低
	Mean±S.D	Mean±S.D	Mean±S.D
1_PW	1.19 ± 0.27	1.22 ± 0.28	0.69 ± 0.36 ^a
2_SR	1.21 ± 0.25	1.25 ± 0.30	0.89 ± 0.33
3_紙	1.23 ± 0.27	1.19 ± 0.35	1.08 ± 0.39 ^a

[†] 同じ列 (コントラスト) の中で同じアルファベットが付されている機種間には有意差がある (p<0.01)。



	高	中	低
	Mean±S.D	Mean±S.D	Mean±S.D
1_PW	1.25 ± 0.31	1.12 ± 0.34	0.58 ± 0.27
2_SR	1.23 ± 0.36	1.10 ± 0.24	0.77 ± 0.26
3_紙	1.26 ± 0.18	1.25 ± 0.38	0.79 ± 0.25

図 2-8 年齢群別の正答率 index の比較

2.2.4 考察

本節では、共同研究者の先行研究[4]において、低照度で可読性が低下したフロントライト非搭載型の E ペーパーへの環境照度の影響を出来る限り取り除き、コントラスト比の影響をより適切に評価するために、日本工業規格[3]に示されている通常の視作業を行うための照度 (500 lx) より高い、やや精密な視作業を行うための照度 (750 lx) で実験を実施した。また、このレベルは住宅の書斎や勉強室で読書をする際の照明要件である。Lee et al. [5]、および Shen et al. [6]も反射型 EPD を快適に見ることができる環境照度を 700 lx 以上と報告している。

2.2.4.1 年齢群別の比較

若年、中年では高、中、低コントラストの順に読みやすさの主観評価が下がった。高年では若年、中年と比較して低コントラストにおいて読みやすさの主観的評価が著しく下がり、年齢群による傾向に違いがあった。また、低コントラストで正答率 index の値が若年、および中年と比較して高年で低かった。これらのことから、高い年齢群ほど加齢による視機能の低下にともなってテキストの認知能力が低下しているといわれているが、E ペーパーの場合にも、それが顕著に表れ、高、中、低コントラストにおいては、特に正解率において、フロントライト非搭載型で 1.23~1.10~0.77、フロントライト搭載型で 1.25~1.12~0.58 と大きく下がる結果となった。

2.2.4.2 デバイス種類別の比較

高コントラストにおいては、全ての年齢群において、デバイスの種類に関わらず読みやすさの評価が最も高く、可読性が高い結果となった。このことから、通常の室内でのやや精密な作業を行うための照度において、E ペーパーはフロントライト搭載の有無に関係なく、いずれも紙と同様の可読性を提供できることが示唆された。

中コントラストにおいては、読みやすさの主観評価について、フロントライト搭載型は紙と同様の高い可読性を示したが、最もコントラスト比が低かった非搭載型は、両デバイスと比較して低い評価であった。また、目読時間 index、および正答率 index においても、概ね非搭載型が最も低い評価であった。フロントライト搭載型と、非搭載型では、コントラスト比は約 1 違っており (搭載型:5.36, 非搭載型:4.38)、フロントライト搭載型の背景輝度は非搭載型の 2 倍以上あった (搭載型 : 84.66, 非搭載型 : 42.09)。これらのことからフロントライト搭載型と、非搭載型では、コントラスト比の違いが可読性に影響を与えた可能性がある。また、紙とフロントライト搭載型ではコントラスト比は紙がわずかに高い値を示した一方で、読みやすさの主観評価はほぼ同じであり、目読時間 index、および正答率 index では、年齢群別で評価が逆転する場合もあった。これらのことから本実験の条件下では、紙とフロントライト搭載型では、コントラスト比よりも、それ以外のデバイスの特性が可読性の違いに影響した可能性がある。

低コントラストにおいては、フロントライト搭載型の正答率 index が紙や非搭載型と比較して低い結果となった。フロントライト搭載型については、共同研究者の先行研究[4, 7]により低い環境照度の条件下において、フロントライトの光源が、本節の高

コントラストと同じ条件の表示画面で可読性を改善することが示されている。その一方で、今回の環境照度 750 lx レベル（住宅の書斎や勉強室の読書に推奨）、低コントラストでの条件下では、フロントライトが可読性を低下させている。フロントライト搭載型は表示面が光源により照らされるため、紙や非搭載型と比較して明るい 15 cd/m² と灰色に近くなっている。そのため、背景輝度の数値と比較してコントラスト比が低くなった。上述の条件では、デバイスの種類によるコントラスト比に大きな差はなかった。それにもかかわらずフロントライト搭載型の可読性が低下した理由は、使用者側へのフロントライトの光漏れの可能性が考えられる。フロントライト搭載型の内部のマイクロプリズム構造では、一部の光が LED 光源から使用者側に漏れていることが Watanabe et al.[8]により報告されている。これらのことから、フロントライトの光源は、条件により目的とは反対に可読性を低下させる場合があるため、機能改善が必要なことが示唆された。

2.2.4.3 コントラストの比較

高コントラストでは、デバイスの種別に関わらず最も可読性が高い結果となった。中コントラストでは、読みやすさの主観評価は高コントラストと比較して有意に低かったが、目読時間 index、および正答率 index については、高コントラストと同程度の値を示した。これらのことから、被験者にとって、中コントラストの条件は、高コントラストとの比較においては低いものの、読むことに支障がないレベルである可能性が示唆された。

中コントラストでは、紙のコントラスト比の値 (6.6) は新聞紙と同程度[9]であり、通常の「読む」という作業においては支障のない条件である。各デバイスの読みやすさの主観評価のうち、フロントライト搭載型、および紙は同程度であり、読みやすさの主観評価の VAS の評価点は 45 点前後を示した。共同研究者による先行研究[10]においても、被験者が「読める」と評価した目安の値は 45 点であった。このことから、先行研究を支持し、読みやすさの主観評価の 45 点を「読める」と評価する目安とできる基準点と考える。また、中コントラストにおいて、読みやすさの主観評価の差が出たフロントライト搭載型と、非搭載型のコントラスト比の値の境がおおよそ「5」であることから、読みやすさのコントラスト比の目安の値として「5」を推奨する。今回の研究の低コントラストでは、高年で半数以上が全くテキストを認識できず、さらに若年や中年においてもそれぞれ約 6%、および約 18%の被験者がテキストを認識できない結果となった。また、全てのデバイスで日本工業規格[11]に示されたディスプレイに関する最低限のコントラスト比「3」を下回る値であったことから、コントラスト比が低すぎたため、全体に評価が低かった可能性がある。

本節では、コントラストの背景の色調をグレースケール 16 階調の番号で一定にし、PDF 化したものを表示させた。この条件下では、高、中、および低コントラストにおける各デバイスの実測コントラスト比が異なり、フロントライト搭載型、および非搭載型の特性の直接の影響のみを取り出して評価することが難しかった。また、本研究は表示ファイルの背景色を変化させ、その影響について比較した内容である。ここで示した推奨コントラスト比は、アプリケー

シヨン中の表示を模擬しているという点では、本研究の結果は妥当であるが、機器そのもののコントラストについても論じるべきである。すなわち、一般に使われているメディア機器自体のコントラスト調整機能により背景色を変化させた研究とは結果が異なる可能性がある。今後はメディア機器自体のコントラスト調整機能を使用し、実測コントラスト比をほぼ一定にした形で、フロントライト搭載型 E ペーパー、非搭載型 E ペーパー、および紙の可読性について評価することに取り組みたい。

2.2.5 結論

本節では E ペーパーの可読性に与えるコントラスト比および加齢の影響について、特にフロントライト搭載の有無に注目して実験を行った。本節および先行研究の結果を踏まえ、以下のとおりとする。

2.2.5.1 加齢

- (1) 高い年齢群ほど加齢による視機能の低下にともなってテキストの認知能力が低下しているといわれているが、E ペーパーの場合にも、それが顕著に表れた。

2.2.5.2 フロントライトの搭載の有無

- (1) 高コントラストの条件では、フロントライトの搭載の有無に関わらず、E ペーパーは紙と同様の高い可読性を示した。
- (2) 中コントラストの条件ではフロントライト搭載型は紙と同様の可読性を示したが、非搭載型では同様の可読性を確保できなかった。
- (3) 低コントラストの条件では、フロントライト搭載型は非搭載型と比較して可読性が低かった。光源搭載の第一目的は「可読性の改善」であるため、その機能改善が求められる。

2.2.5.3 コントラスト

- (1) 高コントラストの条件では、全ての評価指標が最も高かった。
- (2) 中コントラストの条件ではフロントライト搭載型は紙と同様の可読性を示し、被験者の読みやすさの主観評価の VAS の評価点は 45 点程度であった。このことから「読める」とする読みやすさの主観評価の目安の基準点を 45 点と提案する。
- (3) 中コントラストの条件でフロントライト搭載の有無により読みやすさの主観評価に差があった。フロントライト搭載型と非搭載型のコントラスト比の値の境から「読める」とするコントラスト比の目安の値として「5」を推奨する。

2.2.6 参考文献

- [1]. Amazon.com - Kindle Paperwhite Touch Screen E-reader with Light.
<http://www.amazon.com/Kindle-Paperwhite-Ereader/dp/B00AWH595M>
- [2]. SONY – SONY Reader <http://www.sony.jp/reader/products/PRS-T3S/>
- [3]. JIS Z 9110, 照明基準総則, 日本標準調査会 (2011)
- [4]. T. Koizuka, S. Sano, T. Kojima, M. Miyao : “Evaluating the Effects of Environmental Illuminance on the Readability of E-books”, SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 44, pp. 571-573 (2013)
- [5]. D. Lee, K. Shieh, S. Jeng, I. Shen : “Effect of character size and lighting on legibility of electronic papers”, Displays, 29, pp. 10–17 (2008)
- [6]. I. Shen, K. Shieh, C. Chao, D. Lee : “Lighting, font style, and polarity on visual performance and visual fatigue with electronic paper displays”, Displays, 30, pp. 53–58 (2009)
- [7]. T. Koizuka, Y. Ishii, T. Kojima, R. P. Lege, M. Miyao: “The Contributions of Built-in Light on the Readability in E-paper Devices”, SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 45, pp. 861-864 (2014)
- [8]. Inventors: H. Watanabe, T. Teranishi, T. Matsuoka, T. Nakahara, T. Tomotoshi, E. Satoh, K. Narutaki, Assignee: SHARP Kabushiki Kaisha : “Front Light and Method for Producing Same Reflective Display Device Provided with Front Light, and Electronic Equipment Provided with Reflective Display Device”, United States Patent Application Publication, Pub. No.: US 2014/0146563 A1, (May 29 2014)
- [9]. 窪田悟 : “反射型液晶ディスプレイに求められる明度とコントラスト比の条件”, テレビジョン学会誌, pp.1091-1095 (1996)
- [10]. T. Koizuka, Y. Ishii, T. Kojima, N. Ishio, R. P. Lege, M. Miyao : “Proposing a Baseline Setup for Readability”, IDW 2014, Niigata, Japan, (Dec. 3-5 2014)
- [11]. JIS Z 8513, 人間工学－視覚表示装置を用いるオフィス作業－視覚表示装置の要求事項, 日本標準調査会 (2006)

2.3 Eペーパーの可読性に及ぼす環境照度および加齢の影響

2.3.1 目的

電子書籍リーダーの急速な普及拡大に伴い、様々な場所や幅広い世代での利用が想定される。本節では環境照度の違いと加齢が、電子書籍リーダーの可読性に及ぼす影響について評価、考察を行った。

2.3.2 方法

2.3.2.1 被験者

本実験の被験者は13歳から82歳の男女58名（平均年齢46.8歳、標準偏差16.6）である。通常、読書に眼鏡、コンタクトレンズを使用している場合はその状態で実験を実施した。被験者は年齢によって4群に分類し、29歳以下の被験者を若年、30歳から44歳を壮年、45歳から64歳を中年、65歳以上を高年とした。年齢群別の視機能の特徴として、若年は十分な調節力を持っている群。壮年は、やや調節力が衰えているが近見作業に支障がない群。中年は緩やかな老視であり、近見作業に支障がある群。高年は老視であり、近見作業に老眼鏡を用いる群である。年齢の構成比を表2-5に示す。また、被験者に対しては、事前にインフォームドコンセントを実施し、名古屋大学大学院情報科学研究科倫理審査委員会の承認の下行なわれた。

表2-5 被験者の年齢構成

	若年 (13~29)	壮年 (30~44)	中年 (45~64)	高年 (65~82)	合計
人数	12名	12名	26名	8名	58名

2.3.2.2 実験デザイン

実験には、2種類のEペーパー（EPD: Electrophoretic Display、フロントライト搭載型のAmazon社製 Kindle Paperwhite™[1]（第2世代、2013年発売）、フロントライト非搭載型のSONY社製SONY Reader™[2]（PRS-T3、2013年発売））、バックライト型の液晶ディスプレイとしてアップル社製iPad™[3]（2013年発売）、およびPPC用紙（白度69%に白黒2値で出力）の4種類のデバイスを使用した。以下、それぞれPW、SR、iPad、および紙と表記する。各デバイスの仕様を表2-6に示す。

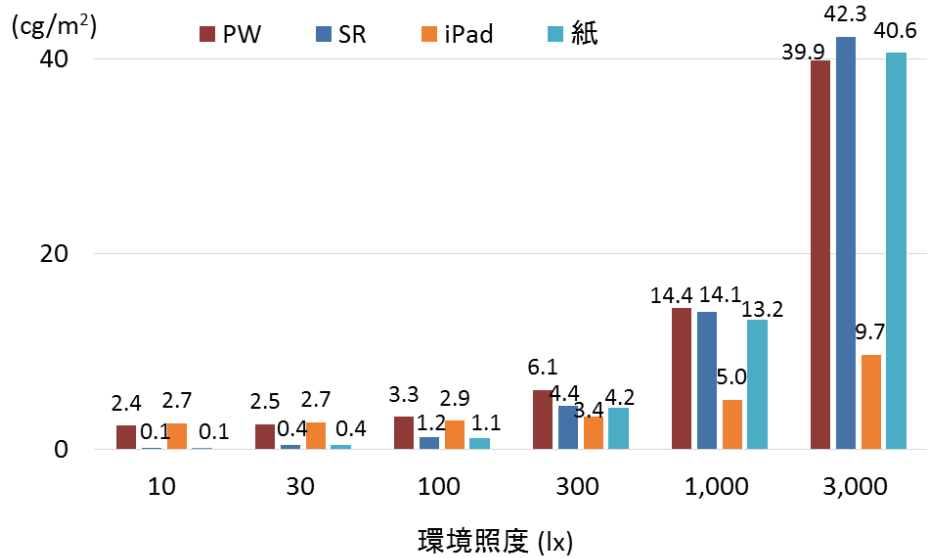
表2-6 デバイスの仕様

デバイス	PW	SR	iPad	紙
画面サイズ	6 インチ	6 インチ	9.7 インチ	6 インチ
解像度	212 ppi	212 ppi	264 ppi	1200 dpi

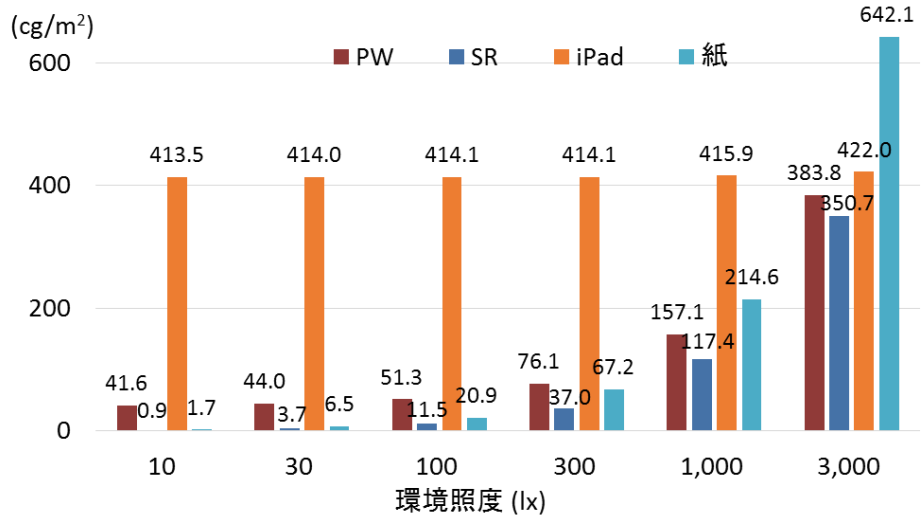
実験は暗室にて2.1.2.3の照明箱を用いて行い、環境照度は10、30、100、300、1,000、および3,000 lxレベル（実測値 9.8 lx, 37.3 lx, 111.3 lx, 302.3 lx, 986.9 lx, 2960 lx）とした。テキストフォントはCourier、サイズは8 pt（文字高：デバイス表示状態で約2.75 mm）とした。PWのフロントライトとiPadのバックライトの光量は最大で固定した。テキストの文字色は黒、背景の色は白とした。デバイスごとのテキスト、および背景の輝度を図2-9a、および図2-9bに示す。各デバイスの実際のコントラスト比は背景と文字の輝度の実測値から算出した（図2-9c）。PW、SR、および紙においては、背景、文字ともに環境照度が高くなるとともに輝度が高くなっている。光源搭載型液晶ディスプレイで表示するiPadは、環境照度によって、背景の輝度にほとんど変化がない一方で、文字の輝度は環境照度が高くなるにともない高くなっている。各デバイスのコントラストについては、図2-9cが示すとおりPW、SRと紙では、環境照度によるコントラスト比は大きく変化しない傾向となった。iPadは、全てのデバイスの中で最もコントラスト比は高かったが、低照度から高照度になるにともない、コントラスト比が大きく低下した。

2.3.2.3 実験方法および評価方法

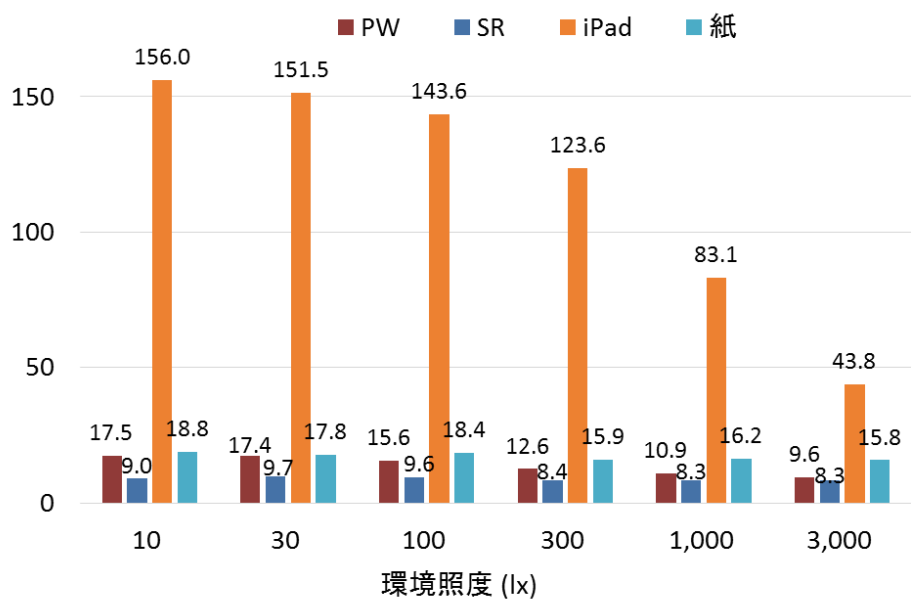
2.1.2.1のとおり、被験者による目読実験を行った。デバイスが4種類、環境照度のレベルが6段階のため、被験者一人当たり24試行のテストを行った。テキストの認識ができない被験者については欠損値とした。統計解析は一元配置分散分析とSchefféの検定により行った。



a テキストの輝度



b 背景の輝度



c コントラスト比

図 2-9 デバイスごとの輝度およびコントラスト比

2.3.3 結果

2.3.3.1 環境照度による評価の比較

年齢群全体における環境照度別の被験者の読みやすさの主観評価の結果を表2-7a、および図2-10aに示す。表2-7aの見方については、同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている環境照度間には有意差がある。例えば1_PW欄の10 lxと300 lxには「a」が記載してあるが、これは、PWの10 lxの読みやすさの主観評価が300 lxに比べ有意に低いことを示している。以降、表2-7b、2-7c、2-8a、2-8b、2-8c、および2-8dについても同様である。SRは300 lx以下では全てのデバイスの中で最も評価が低かった。PWは10 lxと300 lx以上の間で有意に評価が高くなった ($p<0.05$)。SRは10 lxと100 lx以上の間、30 lxと300 lx以上の間、100 lxと1,000 lx以上の間、300 lxと3,000 lxの間で有意に評価が高くなった ($p<0.05$)。紙では10 lxと100 lx以上の間、30 lxと300 lx以上の間および、100 lxと1,000 lx以上の間で有意に評価が高くなった ($p<0.05$)。iPadは、今回の実験の10 lxから3,000 lxまでの範囲では、環境照度による評価の差はなかったが、3,000 lxではiPadより紙の評価が高くなった。

年齢群全体における目読時間indexの結果を表2-7bおよび図2-10bに示す。PWは10 lxと1,000 lxの間で有意に目読時間が短くなった ($p<0.05$)。SRは10 lxと30 lx以上の間、および、30 lxと1,000 lx以上の間で有意に目読時間が短くなった ($p<0.05$)。iPadについては照度間に有意差はなかった。紙は10 lxと100 lx以上の間、および、30 lxと100 lx以上との間で目読時間が有意に短くなった ($p<0.05$)。

年齢群全体における正答率indexの結果を表2-7cおよび図2-10cに示す。紙では、30 lxと300 lxの間、および1000 lxと3,000 lxの間で有意に正答率が高くなった ($p<0.05$) が、他のデバイスには環境照度による有意差はなかった。

表2-7a 6レベルの環境照度下における読みやすさの主観評価

環境照度	1_PW (Mean ± S.D.)	2_SR (Mean ± S.D.)	3_iPad (Mean ± S.D.)	4_紙 (Mean ± S.D.)
10 lx	33.5 ± 21.9 ^{a, b, c}	12.2 ± 17.9 ^{a, b, c, d}	46.2 ± 21.3	16.7 ± 16.4 ^{a, b, c, d}
30 lx	37.4 ± 19.7	22.2 ± 17.2 ^{e, f, g}	50.1 ± 20.7	27.3 ± 19.6 ^{e, f, g}
100 lx	42.4 ± 19.0	29.9 ± 16.1 ^{a, h, i}	51.8 ± 18.3	37.2 ± 19.8 ^{a, h, i}
300 lx	46.4 ± 18.0 ^a	37.9 ± 17.3 ^{b, e, j}	55.9 ± 19.3	48.1 ± 20.4 ^{b, e}
1,000 lx	49.2 ± 17.2 ^b	48.3 ± 17.8 ^{c, f, h}	55.8 ± 21.8	55.5 ± 18.5 ^{c, f, h}
3,000 lx	49.1 ± 20.8 ^c	53.5 ± 20.9 ^{d, g, i, j}	51.8 ± 24.0	59.0 ± 20.0 ^{d, g, i}

†同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている環境照度間には有意差がある（ $p < 0.05$ ）。例えば1_PW欄の10 lxと300 lxには「a」が記載してあるが、これは、PWの10 lxの読みやすさの主観評価が300 lxに比べ有意に低いことを示している。

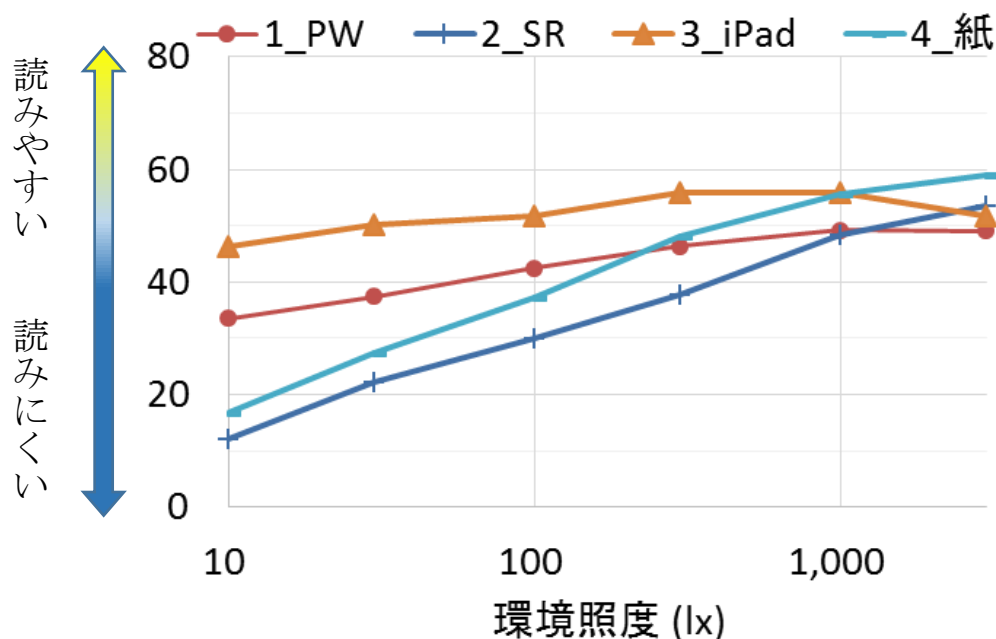


図 2-10a 6レベルの環境照度下における読みやすさの主観評価

表2-7b 6レベルの環境照度下における目読時間index

環境照度	1_PW (Mean ± S.D.)	2_SR (Mean ± S.D.)	3_iPad (Mean ± S.D.)	4_紙 (Mean ± S.D.)
10 lx	1.03 ± 0.13 ^a	1.32 ± 0.27 ^{a, b, c, d, e}	0.95 ± 0.12	1.11 ± 0.19 ^{a, b, c, d}
30 lx	1.02 ± 0.11	1.10 ± 0.16 ^{a, f, g}	0.95 ± 0.10	1.09 ± 0.15 ^{e, f, g, h}
100 lx	1.00 ± 0.09	1.03 ± 0.13 ^b	0.97 ± 0.11	0.99 ± 0.10 ^{a, e}
300 lx	0.99 ± 0.10	1.01 ± 0.12 ^c	0.96 ± 0.09	0.96 ± 0.12 ^{b, f}
1,000 lx	0.97 ± 0.08 ^a	0.96 ± 0.09 ^{d, f}	0.95 ± 0.10	1.00 ± 0.08 ^{c, g}
3,000 lx	0.98 ± 0.10	0.96 ± 0.09 ^{e, g}	0.97 ± 0.09	0.94 ± 0.09 ^{d, h}

†同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている環境照度間には有意差がある（ $p < 0.05$ ）。

† index化；被験者ごとに全試行の平均値を1とした。

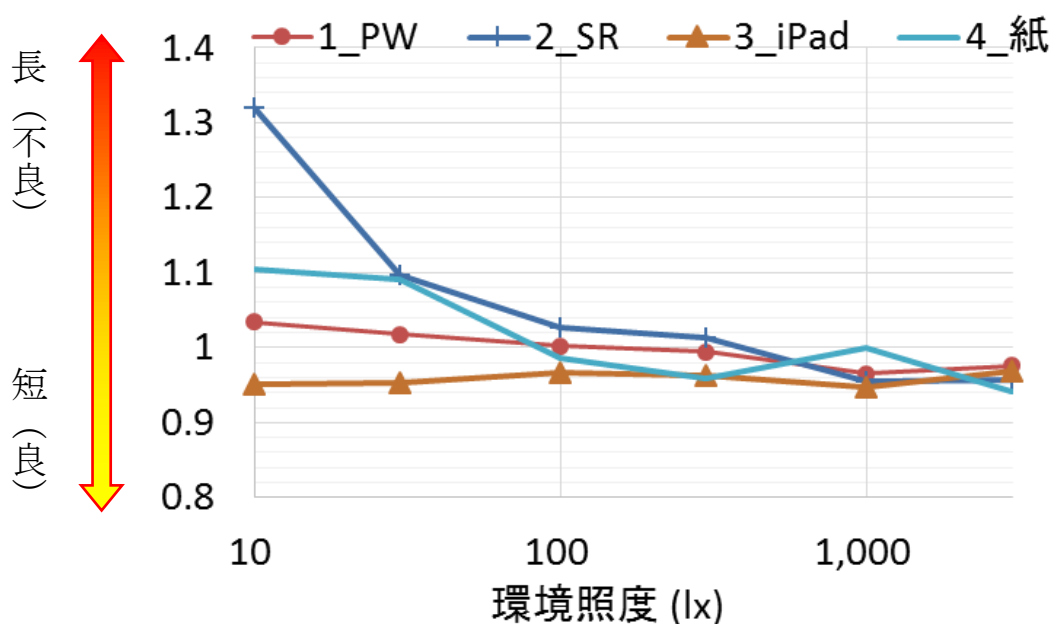


図 2-10b 6レベルの環境照度下における目読時間 Index

表2-7c 6レベルの環境照度下における正答率index

環境照度	1_PW (Mean ± S.D.)	2_SR (Mean ± S.D.)	3_iPad (Mean ± S.D.)	4_紙 (Mean ± S.D.)
10 lx	1.03 ± 0.15	0.93 ± 0.19	0.96 ± 0.20	1.01 ± 0.17
30 lx	1.03 ± 0.14	0.98 ± 0.20	1.01 ± 0.13	0.98 ± 0.15 ^a
100 lx	1.03 ± 0.17	0.96 ± 0.20	0.93 ± 0.20	1.02 ± 0.15
300 lx	1.01 ± 0.15	0.99 ± 0.23	0.93 ± 0.18	1.01 ± 0.17
1,000 lx	1.04 ± 0.16	1.00 ± 0.13	0.99 ± 0.18	0.99 ± 0.18 ^b
3,000 lx	1.03 ± 0.20	1.01 ± 0.15	1.01 ± 0.12	1.10 ± 0.14 ^{a, b}

†同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている環境照度間には有意差がある（ $p < 0.05$ ）。

†index化；被験者ごとに全試行の平均値を1とした。

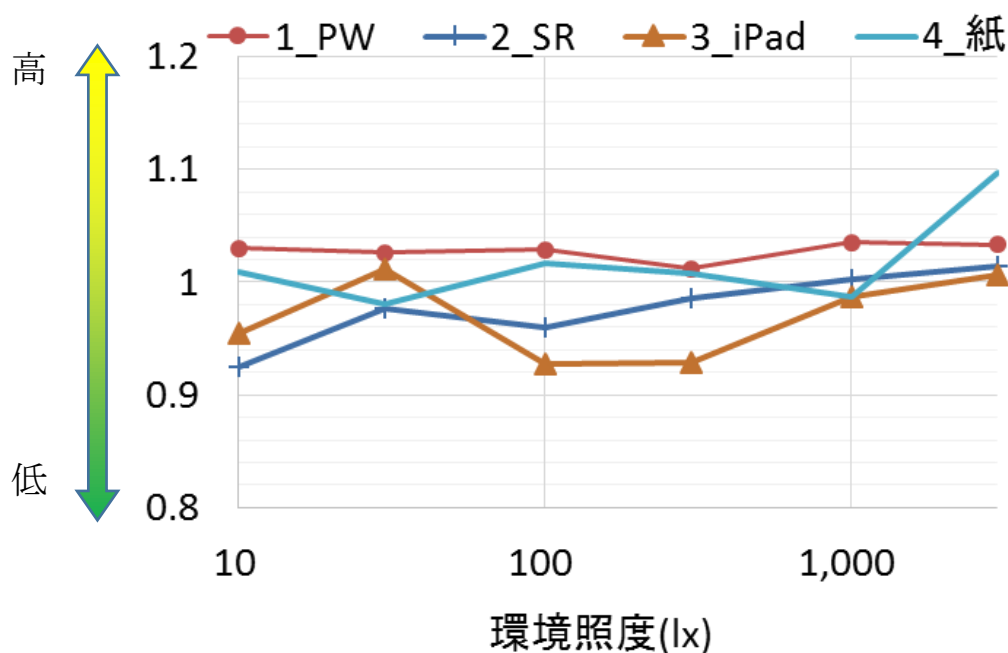


図 2-10c 6レベルの環境照度下における正答率 Index

2.3.3.2 年齢群別の評価の比較

読みやすさの主観評価について年齢群別の結果の比較を行った。表2-8aと図2-11aに若年における結果を示す。PW、SRおよび、iPadにおいて、照度による有意差はなかった。紙においては10 lxと1,000 lxの間および、30 lxと3,000 lxの間で有意に評価が高くなった ($p < 0.05$)。紙は300 lx以上ではSRより、1,000 lx以上ではPWより評価が高くなり、3,000 lxでは、最も良い評価となった。3,000 lxにおけるiPadと紙の評価の差は若年で最も顕著であった。

表2-8bと図2-11bに壮年における結果を示す。iPadにおいては、照度による有意差はなかった。PWは10 lxと1,000 lxの間および、30 lxと1,000 lxの間で有意に評価が高くなった ($p < 0.05$)。SRは10 lxと1,000 lxの間、30 lxと1,000 lxの間および、100 lxと3,000 lxの間で有意に評価が高くなった ($p < 0.05$)。紙は10 lxと3,000 lxの間で有意に評価が高くなり ($p < 0.05$)、3,000 lxで最も評価が高くなった。

表2-8cと図2-11cに中年における照度別の結果を示す。PWとiPadに照度による有意差はなかった。SRは10 lxと300 lx以上の間、30 lxと1,000 lx以上の間、および、100 lxと3,000 lxの間で有意に評価が高くなった ($p < 0.05$)。紙は10 lxと100 lx以上の間、30 lxと300 lx以上の間、および、100 lxと1,000 lx以上の間で有意に評価が高くなった ($p < 0.05$)。紙は1,000 lx以上でPWおよびiPadより評価が高くなり、全ての照度下においてSRより評価が高かった。図2-11cのグラフの形はSRと紙が似かよっており、SRと紙の読みやすさの主観評価がPWやiPadより照度の影響を受けやすい傾向にある。

表2-8dと図2-11dに高年における照度別の結果を示す。iPadにおいて、照度による有意差はなかった。PWは10 lxと1,000 lx以上の間で有意に評価が高くなった ($p < 0.05$)。SRは10 lxと300 lx以上の間、30 lxと300 lx以上の間、100 lxと1,000 lx以上の間、および、300 lxと1,000 lxの間で有意に評価が高くなった ($p < 0.05$)。紙は10 lxと300 lx以上の間、30 lxと300 lx以上の間、および、100 lxと1,000 lx以上の間で有意に評価が高くなった ($p < 0.05$)。紙は300 lxでPW、およびiPadと同程度の評価となり1,000 lx以上では両デバイスを上回る評価となった。また、全ての照度下においてSRより評価が高かった。図2-11dのグラフの形はSRと紙が似かよっており、SRと紙の主観評価がPWやiPadより照度の影響を受けやすい傾向にある。

表2-8a 若年における読みやすさの主観評価

環境照度	1_PW (Mean ± S.D.)	2_SR (Mean ± S.D.)	3_iPad (Mean ± S.D.)	4_紙 (Mean ± S.D.)
10 lx	42.2 ± 21.7	16.3 ± 27.8	53.5 ± 15.5	19.2 ± 20.8 ^{a, b}
30 lx	43.0 ± 16.4	27.1 ± 22.1	55.7 ± 14.7	25.4 ± 16.7 ^c
100 lx	42.1 ± 13.8	34.8 ± 16.4	54.8 ± 15.5	32.5 ± 15.4
300 lx	44.8 ± 10.4	38.6 ± 14.7	55.4 ± 18.6	45.7 ± 22.4
1,000 lx	44.0 ± 12.0	44.4 ± 16.7	54.4 ± 21.5	53.4 ± 19.2 ^a
3,000 lx	41.8 ± 17.3	49.2 ± 22.3	45.9 ± 22.0	59.4 ± 22.1 ^{b, c}

†同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている環境照度間には有意差がある（ $p < 0.05$ ）。

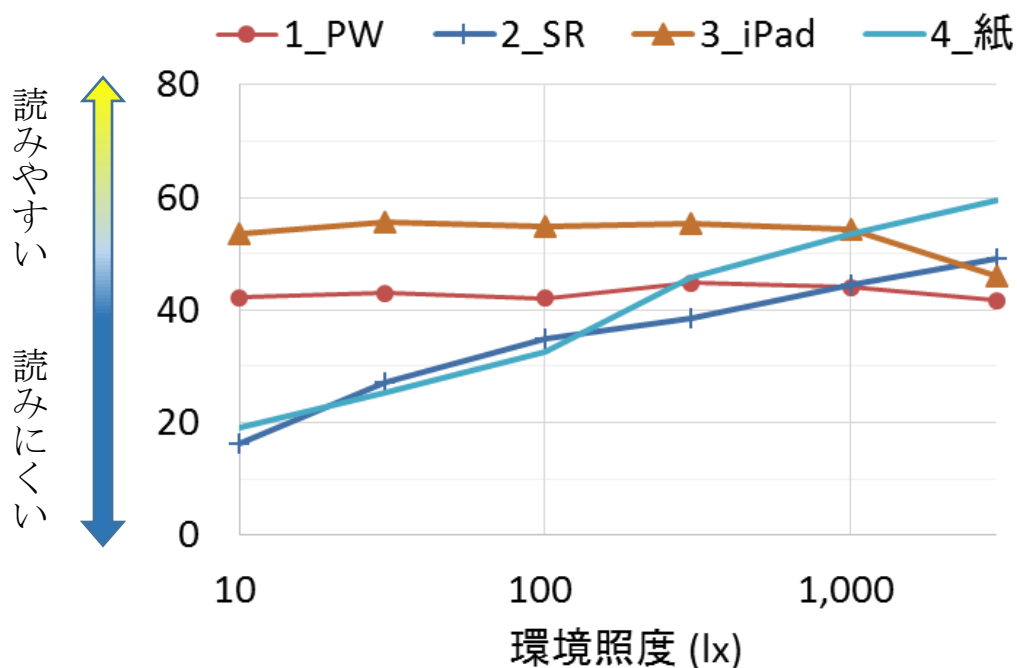


図 2-11a 若年における読みやすさの主観評価

表2-8b 壮年における読みやすさの主観評価

環境照度	1_PW (Mean ± S.D.)	2_SR (Mean ± S.D.)	3_iPad (Mean ± S.D.)	4_紙 (Mean ± S.D.)
10 lx	22.5 ± 5.6 ^{a, b}	5.3 ± 3.4 ^{a, b}	38.4 ± 14.3	13.4 ± 6.8 ^a
30 lx	25.3 ± 6.4 ^{c, d}	18.9 ± 14.1 ^{c, d}	44.7 ± 15.7	29.1 ± 22.9
100 lx	35.0 ± 17.4	27.9 ± 13.2 ^e	48.9 ± 16.3	40.7 ± 21.8
300 lx	41.5 ± 18.3	35.7 ± 14.2	60.8 ± 17.7	45.0 ± 27.3
1,000 lx	48.6 ± 16.6 ^{a, c}	50.0 ± 15.2 ^{a, c}	64.0 ± 22.1	48.7 ± 23.4
3,000 lx	51.5 ± 19.5 ^{b, d}	54.4 ± 17.9 ^{b, d, e}	56.6 ± 24.3	58.4 ± 20.8 ^a

†同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている環境照度間には有意差がある（ $p < 0.05$ ）。

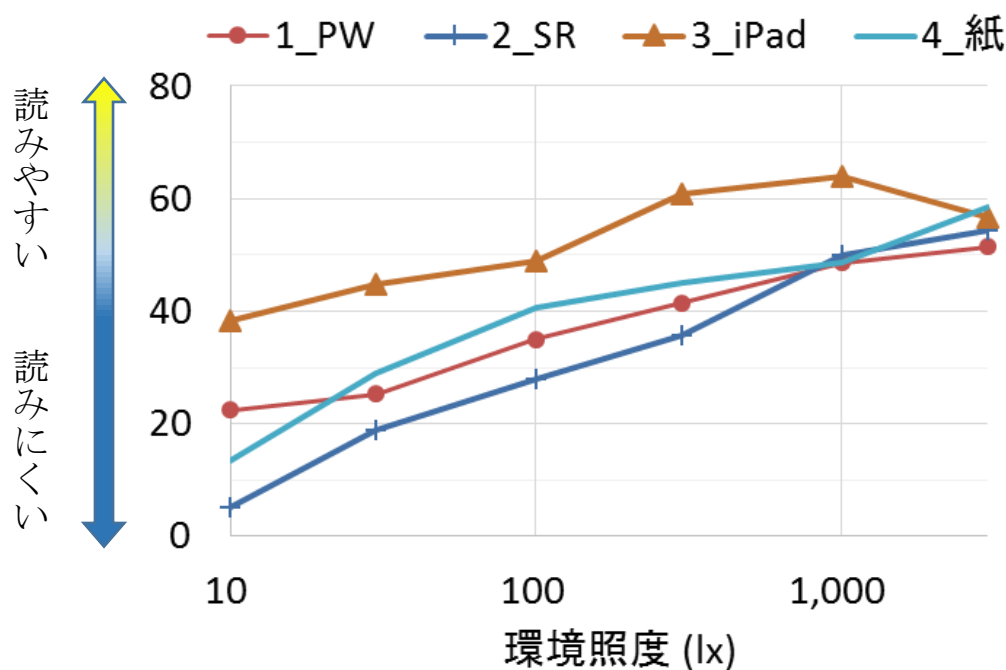


図 2-11b 壮年における読みやすさの主観評価

表2-8c 中年における読みやすさの主観評価

環境照度	1_PW (Mean ± S.D.)	2_SR (Mean ± S.D.)	3_iPad (Mean ± S.D.)	4_紙 (Mean ± S.D.)
10 lx	38.2 ± 25.1	14.2 ± 16.0 ^{a, b, c}	49.5 ± 25.3	19.6 ± 18.4 ^{a, b, c, d}
30 lx	41.1 ± 23.3	25.0 ± 17.0 ^{d, e}	53.2 ± 24.1	29.4 ± 21.4 ^{e, f, g}
100 lx	47.8 ± 20.4	31.0 ± 17.7 ^f	54.0 ± 18.4	39.4 ± 21.2 ^{a, h, i}
300 lx	51.4 ± 20.2	40.7 ± 20.5 ^a	54.5 ± 19.4	49.8 ± 16.1 ^{b, e}
1,000 lx	51.3 ± 19.1	49.1 ± 21.1 ^{b, d}	52.8 ± 19.6	58.3 ± 16.1 ^{c, f, h}
3,000 lx	51.0 ± 23.5	55.0 ± 24.3 ^{c, e, f}	52.1 ± 25.1	59.1 ± 20.0 ^{d, g, i}

†同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている環境照度間には有意差がある（ $p < 0.05$ ）。

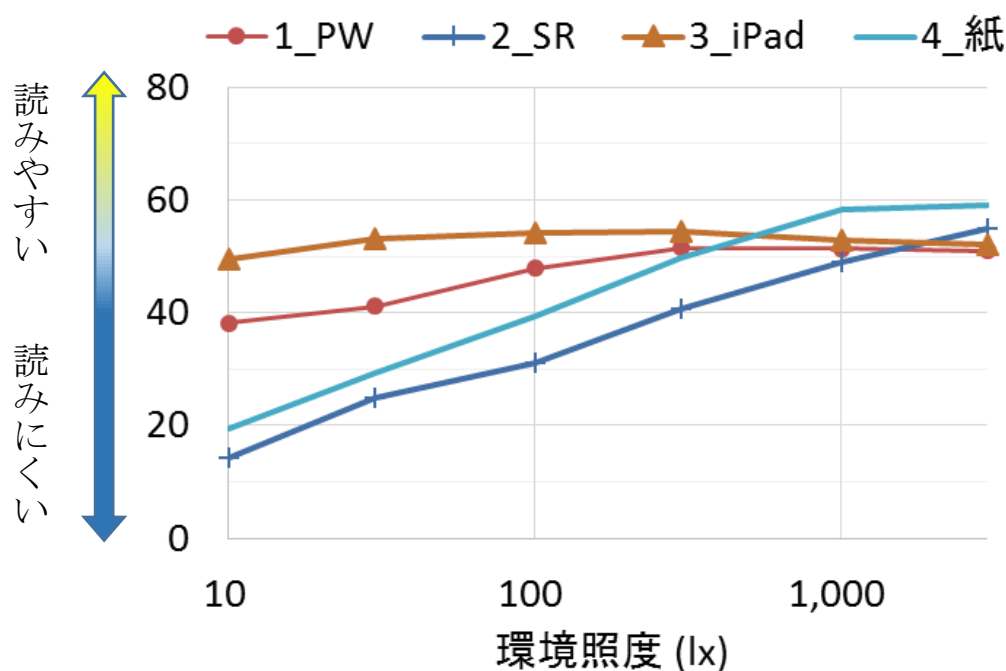
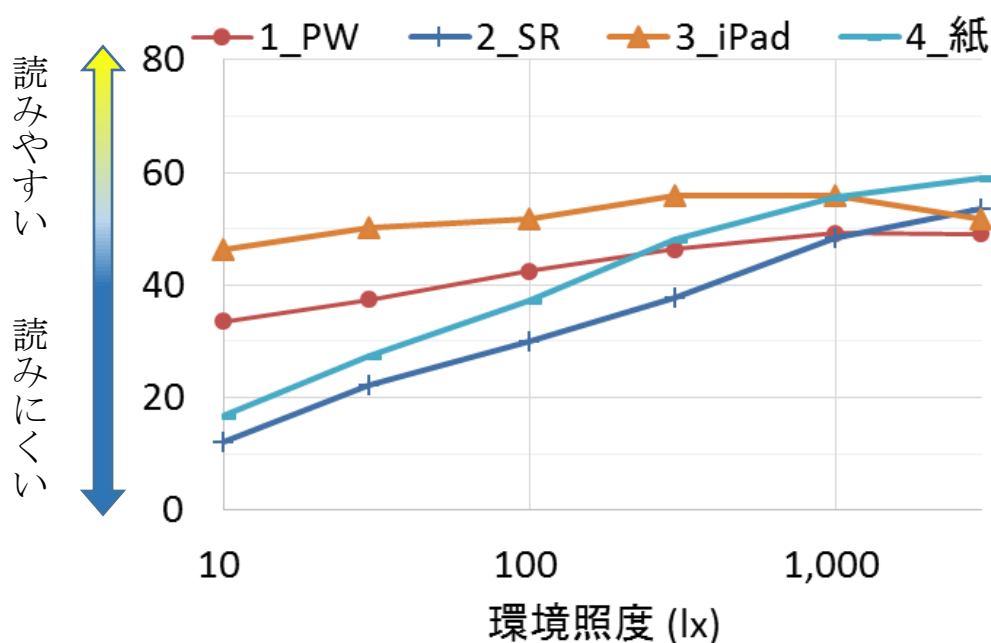


図 2-11c 中年における読みやすさの主観評価

表2-8d 高年における読みやすさの主観評価

環境照度	1_PW (Mean ± S.D.)	2_SR (Mean ± S.D.)	3_iPad (Mean ± S.D.)	4_紙 (Mean ± S.D.)
10 lx	21.5 ± 12.6 ^{a, b}	5.4 ± 3.4 ^{a, b, c}	37.9 ± 17.8	10.3 ± 7.1 ^{a, b, c}
30 lx	34.0 ± 16.2	14.4 ± 9.1 ^{d, e, f}	41.2 ± 18.2	22.1 ± 9.8 ^{d, e, f}
100 lx	37.7 ± 18.4	23.6 ± 11.3 ^{g, h}	45.3 ± 21.6	32.8 ± 16.1 ^{g, h}
300 lx	41.1 ± 15.0	31.8 ± 11.7 ^{a, d, i, j}	53.6 ± 20.7	50.7 ± 15.9 ^{a, d}
1,000 lx	50.9 ± 16.9 ^a	49.0 ± 10.2 ^{b, e, g, i}	55.0 ± 24.8	59.8 ± 12.7 ^{b, e, g}
3,000 lx	50.1 ± 15.5 ^b	53.8 ± 7.5 ^{c, f, h, j}	52.2 ± 21.3	58.7 ± 15.8 ^{c, f, h}

†同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている環境照度間には有意差がある（ $p < 0.05$ ）。



2-11d 高年における読みやすさの主観評価

2.3.3.3 デバイスの種類別の評価の比較

図2-11a、2-11b、2-11c、および2-11dと同じデータを使用し、被験者の読みやすさの主観評価について、デバイスの種類別の比較を行ったものを図2-12a、2-12b、2-12c、および2-12dに示す。

iPadの平均値は300 lx以下の環境照度で全ての年齢群において最も評価が高かった。300 lx以上の照度では、300 lxの壮年におけるiPadとSRの間の有意差を除き、全ての年齢群においてデバイス間の有意差はなくなった。なお、3,000 lxにおけるEペーパーの比較では、全ての年齢群でフロントライト非搭載型のSRがフロントライト搭載のPWより有意差はないものの評価が高くなった。

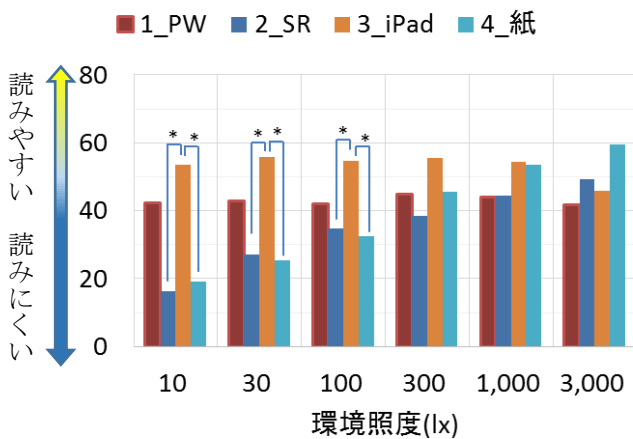


図 2-12a 若年における読みやすさの主観評価 (*; p<0.05)

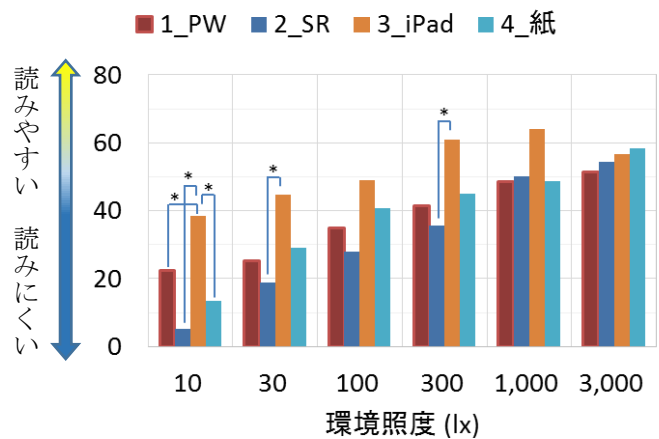


図 2-12b 壮年における読みやすさの主観評価 (*; p<0.05)

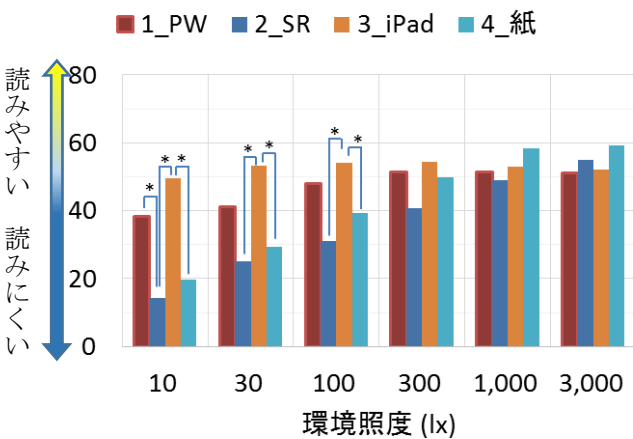


図 2-12c 中年における読みやすさの主観評価 (*; p<0.05)

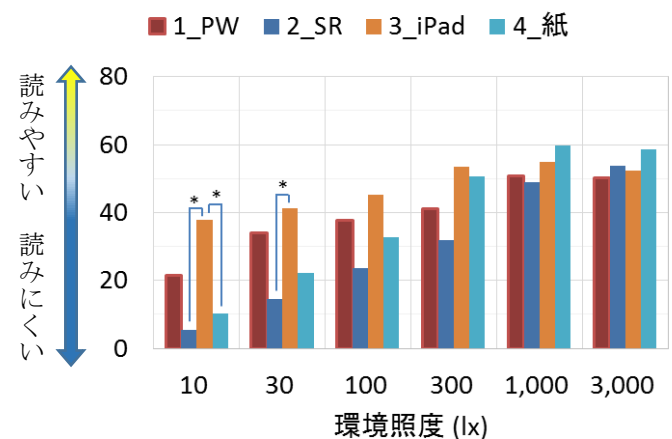


図 2-12d 高年における読みやすさの主観評価 (*; p<0.05)

2.3.4 考察

2.3.4.1 評価指標の比較

本節で用いた3つの評価指標（被験者の読みやすさの主観評価、目読時間index、および正答率index）のうち、被験者の読みやすさの主観評価と目読時間indexは、紙とフロントライト非搭載型のEペーパーで環境照度により大きく影響を受けたが、正答率indexは影響を受けにくかった。この結果からは、被験者は、実験を始める際に指示したとおり、読みにくいと感じると、ゆっくり読むことで、正確にテキストを認識しようとすることが示唆された。

2.3.4.2 環境照度別の比較

環境照度を変化させ実施した共同研究者による先行研究の音読実験[4, 5]では、Eペーパーにおいて、300 lxを超えるあたりから、単語読み上げ数に上限があることが報告された。本節においては、環境照度が100 lx以下の条件では、読みやすさの主観評価について、バックライト型液晶ディスプレイは可読性を維持した一方で、Eペーパーの可読性は低い結果であった。300 lx、1,000 lx、および3,000 lxの環境照度の条件では、読みやすさの主観評価において、全てのデバイスで同程度のレベルとなった。また、同条件では、全てのデバイスにおいて、目読時間が長くなったり、正答率が低下したりすることはなかった。これらの結果と、Lee et al. [6]、Kojima et al. [7] の報告も踏まえ、300 lxが、被験者の大きな読みにくさを感じることなく、パフォーマンスを維持できる（目読速度が低下しない、正答率が下がらない）限界値であることが示唆された。ISO [8]では屋内での読書に必要な照度を500 lxと推奨している。今回の結果からもこのISOの基準は妥当と考えられる。共同研究者による先行研究[5]は、音読実験において単語読み上げ数が一定になる300 lxの条件下における読みやすさの主観評価のVASの評価点が45点であり、その値を被験者が「読める」と評価する目安とする可能性を示唆した。本節においても、デバイス間の評価の差がなくなる300 lxの条件下でデバイス全体の読みやすさの主観評価の平均値、および標準偏差が 47.0 ± 19.8 （若年 46.1 ± 18.1 、壮年 45.8 ± 22.0 、中年 49.1 ± 19.8 、高年 44.3 ± 18.3 ）であったことから、この結果は先行研究[5]の内容を支持する。

2.3.4.3 年齢群別の比較

高い年齢群ほど加齢による視機能の低下にともなってテキストの認知能力が低下しているといわれている。Eペーパーの場合にも、環境照度が低く、デバイスが光源搭載型でない条件において、高い年齢群でより可読性が低下し、それが顕著に表れていた。高い年齢群が低い環境照度の条件で「読みにくい」と評価した一方で、若い年齢群は低い環境照度の条件でも評価が大きく下がらなかった。先行研究[9]においては、年齢が高いほど眼球の水晶体の白濁化が進んでいることが報告されている。そのことにより摩りガラスを隔ててデバイスを見ているような状態になり、可読性が低下した可能性があると考えられる。また、加齢による瞳孔の縮瞳（老人性縮瞳）も起こるため[10]、高齢者は、若年者と比べると、より明るい環境照度が必要となる。先行研究において、

電子書籍リーダーに搭載された光源が低い環境照度の条件下で可読性を改善したという報告[4, 11]もあり、これらのことから、電子書籍リーダーに搭載された光源は、低い環境照度の条件下において、特に高い年齢群の可読性の改善に寄与していることが考えられる。

2.3.4.4 デバイス種類別の比較

デバイス別の評価については、フロントライト非搭載型Eペーパーは、先行研究[4, 11]と同様に本節においても、環境照度および年齢による可読性の変化が紙の傾向に類似したが、これも年齢が高いほどこの傾向が顕著であった。また、いずれの環境照度においても紙を下回る結果になった。低い照度の条件では、Eペーパーにフロントライトが搭載されているデバイスで可読性が改善され、紙よりも高くなった一方で、1,000 lx以上では、非搭載型と同等か搭載型の結果が悪くなる場合もあった。このことにより、光源の調節については、低照度ではフロントライトがオンになり、1,000 lxを超える環境照度でオフになる機能の実装が望ましいと考える。Eペーパーについては、先行研究[4]では750 lx以下の照度において、フロントライト搭載型が非搭載型よりも評価が高いと報告されており、本節においても、1,000 lx以下の照度でフロントライト搭載型の優位性が示された。バックライト型液晶ディスプレイは環境照度の低い条件では搭載された光源により高い可読性を持つため、環境照度による評価の差はなかったが、先行研究[4]の結果と同様に1,000 lxの環境照度で紙とほぼ同じ評価に、3,000 lxで紙の評価が高い結果となった。

特に若年において顕著である3,000 lxにおける光源搭載型電子書籍リーダーの可読性の低下はこれらのデバイスの屋外での使用に課題を残している。

2.3.5 結論

本節では電子書籍リーダーの可読性に与える環境照度および加齢の影響について調査した。本節および先行研究の結果を踏まえ、以下のとおりとする。

2.3.5.1 環境照度

- (1) 被験者のパフォーマンスを維持できる限界値の環境照度は 300 lx であることが示唆された。
- (2) 限界値 300 lx の条件下における読みやすさの主観評価の VAS の評価点が 45 点程度であったことから、45 点を被験者が「読める」と評価する目安と提案する。

2.3.5.2 加齢

- (1) 環境照度は全ての年齢群の E ペーパーおよび紙の可読性に影響を与えるが、高い年齢群に対してより大きく影響する。
- (2) 特に高い年齢群において、電子書籍リーダーの光源が低い環境照度の条件下での可読性の改善に寄与した。

2.3.5.3 デバイス

- (1) バックライト型液晶ディスプレイは 10 lx から 3,000 lx の間の環境照度では、一

定の可読性を維持できた。

- (2) フロントライト搭載型の E ペーパーは、10 lx から 1,000 lx の間の環境照度では、非搭載型と比較して高い可読性を示した。
- (3) フロントライト非搭載型 E ペーパーの環境照度による可読性の変化は、紙と類似の傾向にあったが、概ね、同等もしくは紙を下回る結果となった。

2.3.6 参考文献

- [1]. Amazon.com - Kindle Paperwhite Touch Screen E-reader with Light,
<http://www.amazon.com/Kindle-Paperwhite-Ereader/dp/B00AWH595M>
- [2]. SONY – SONY Reader <http://www.sony.jp/reader/products/PRS-T3S/>
- [3]. Apple – iPad, <http://support.apple.com/kb/SP647>
- [4]. T. Koizuka, Y. Ishii, T. Kojima, R. P. Lege, M. Miyao : “The Contributions of Built-in Light on the Readability in E-paper Devices”, SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 45, pp. 861-864 (2014)
- [5]. T. Koizuka, Y. Ishii, T. Kojima, N. Ishio, R. P. Lege, M. Miyao : “Proposing a Baseline Setup for Readability”, IDW 2014, Niigata, Japan (Dec. 3-5, 2014)
- [6]. D. Lee, K. Shieh, S. Jeng, I. Shen : “Effects of Character Size and Lighting on Legibility of Electronic Paper”, Displays, pp. 10-17 (2008)
- [7]. T. Kojima, S. Sano, N. Ishio, T. Koizuka, M. Miyao : “Verification of the Minimum Illuminance for Comfortable Reading of an E-paper”, Universal Access in Human-Computer Interaction. Application and Services for Quality of Life Lecture Notes in Computer Science, 8011, pp. 348-355 (2013)
- [8]. ISO 8995-1:2002 (CIE S 008/E:2001), Lighting of Work Places Part 1
- [9]. Y. Ishii, T. Koizuka, R. Cui, T. Kojima, M. Miyao : “Evaluation of Readability for Tablet Devices by the Severity of Cataract Cloudiness”, SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 45 (1), pp. 1089-1092 (2014)
- [10]. 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, No. 8A, pp. 564-572 (1998)
- [11]. T. Koizuka, S. Sano, T. Kojima, M. Miyao : “Evaluating the Effects of Environmental Illuminance on the Readability of E-books”, SID Symposium Digest of Technical Papers, pp. 571-573 (2013)

2.4 電子書籍リーダーの可読性に及ぼす文字サイズおよび加齢の影響

2.4.1 目的

電子書籍リーダーの利用は幅広い年代に広がっており、快適な機能が求められている。共同研究者による先行研究[1]では、本節と同じ条件の照明環境下で8 pt（文字高:デバイス表示状態で約2.75 mm）、12 pt（文字高:デバイス表示状態で約3.25 mm）、16 pt（文字高:デバイス表示状態で約5.75 mm）の評価を行い、文字サイズと可読性について、検証した。本研究においては、表示される文字の大きさ、および加齢がどのような影響を及ぼすかについて、特に被験者の可読性のパフォーマンスが維持できる最小の限界の文字サイズ（目読速度が低下しない、正答率が下がらない）の特定のため、4 pt（文字高:デバイス表示状態で約1.5 mm）、6 pt（文字高:デバイス表示状態で約2 mm）、8 pt（文字高:デバイス表示状態で約2.75 mm）、12 pt（文字高:デバイス表示状態で約3.25 mm）の4段階の文字サイズで実験を行い、評価、検討を行った。

2.4.2 方法

2.4.2.1 被験者

本実験の被験者は14歳から88歳の男女86名（平均年齢46.8歳、標準偏差18.8）である。通常、読書に眼鏡、コンタクトレンズを使用している場合はその状態で実験を実施した。被験者は年齢によって4群に分類し、29歳以下の被験者を若年、30歳から44歳を壮年、45歳から64歳を中年、65歳以上を高年とした。年齢群別の視機能の特徴として、若年は十分な調節力を持っている群。壮年は、やや調節力が衰えているが近見作業に支障がない群。中年は緩やかな老視であり、近見作業に支障がある群。高年は老視であり、近見作業に老眼鏡を用いる群である。年齢の構成比を表2-9に示す。被験者については、計測が可能であれば、水晶体白濁度の計測を行った。水晶体白濁度は、透明から白濁色までを0から255までの256階調とし、計測値は計測装置（前眼部撮影解析装置: NIDEK EAS-1000）による任意単位である。計測結果の年齢群別の両眼の平均値、および標準偏差を表2-10に示す。また、被験者に対しては、事前にインフォームドコンセントを実施し、名古屋大学大学院情報科学研究科倫理審査委員会の承認の下行なわれた

表2-9 被験者の年齢構成

	若年 (14~29)	壮年 (30~44)	中年 (45~64)	高年 (65~88)	合計
人数	21名	18名	28名	19名	86名

表 2-10 年齢群別の水晶体白濁度

年齢群	計測人数	白濁度 (256 階調)
		Mean ± S.D.
若年	20 名	42.5±10.3
壮年	17 名	70.7±18.2
中年	28 名	98.5±32.1
高年	15 名	162.2±45.1
合計	80 名	90.5±49.8

2.4.2.2 実験デザイン

実験には、電子書籍リーダーとしてフロントライト搭載型 E ペーパー (EPD) の Amazon 社製 Kindle Voyage™[2]、およびバックライト型の液晶ディスプレイ (LCD) のアップル社製 iPad™[3] (第三世代) の 2 種類のデバイス、そして PPC 用紙 (白度 69% に白黒 2 値で出力) の計 3 種類のデバイスを用いた。以下、それぞれ KV、iPad、および紙と表記する。各デバイスの仕様を表 2-11 に示す。

実験は暗室にて 2.1.2.3 の照明箱を用いて行い、照度は 6,500 K の蛍光灯および同じ色温度の LED 光源を用いて 1,000 lx レベル (実測値 1,045 lx) とした。1,000 lx は、日本工業規格 (照明基準総則) [4]において屋内事務室で精密な視作業を行うための照明要件である。テキストは英数字のランダムテキストを用い、フォントは Courier、サイズは 4 pt (文字高:デバイス表示状態で約 1.5 mm)、6 pt (文字高:デバイス表示状態で約 2 mm)、8 pt (文字高:デバイス表示状態で約 2.75 mm)、12 pt (文字高:デバイス表示状態で約 3.25 mm) とした。KV のフロントライトと iPad のバックライトの光量は最大で固定した。テキストの文字色は黒、背景の色は白とした。デバイスごとのテキスト文字および背景の輝度を図 2-13a に示す。各デバイスの実際のコントラスト比は背景とテキスト文字色の輝度の実測値から算出した (図 2-13b)。KV、および紙においては、文字および背景の輝度が似た傾向にある。iPad は KV、および紙と比較して文字輝度が低く、背景輝度が高いため、高いコントラスト比を示している。

表 2-11 各デバイスの仕様

デバイス	Kindle Voyage	iPad	紙
画面サイズ	6 インチ	9.7 インチ	6 インチ
解像度	300 ppi	264 ppi	1200 dpi

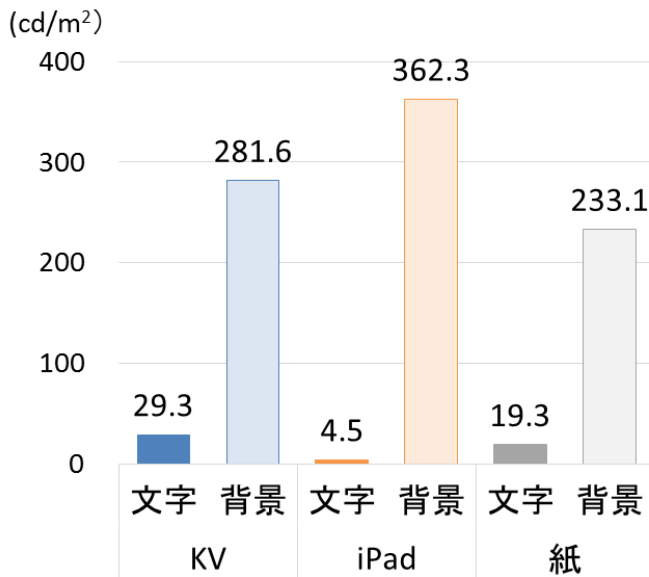


図 2-13a 各デバイスの文字および背景の輝度

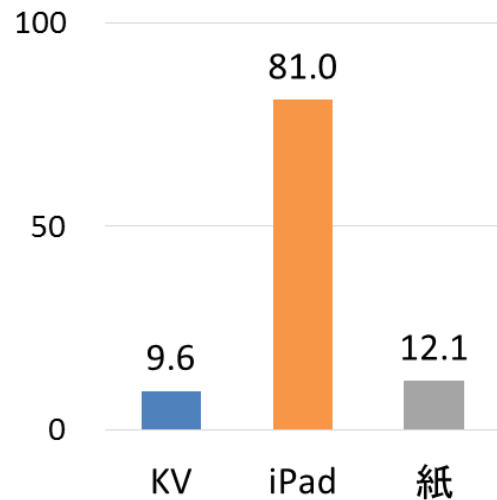


図 2-13b 各デバイスのコントラスト比

2.4.2.3 実験方法および評価方法

2.1.2.1のとおり、被験者による目読実験を行った。デバイスが3種類、文字サイズが4段階のため、被験者一人当たり12試行のテストを行った。テキストの読みやすさの主観評価に関しては、テキストの認識ができない（文字があるのはわかるが判別ができない、もしくは文字があるのかもわからないため試行を行うことができなかった場合）とした被験者を0点として評価し、目読時間index、および正答率indexについては、テキストが認識できない被験者を欠損値とした。統計解析は一元配置分散分析とSchefféの検定により行った。

2.4.3 結果

2.4.3.1 文字サイズ別、および機種別の評価の比較

文字サイズ別の読みやすさの主観評価を表2-12aおよび図2-14aに示す。表2-12aの見方については、同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている文字サイズ間には有意差がある。例えば1_KV欄の4 ptと6 ptには「a」が記載してあるが、これは、KVの4 ptの読みやすさの主観評価が6 ptに比べ有意に低いことを示している。以降、表2-12b、2-12c、2-13a、2-13b、2-13c、2-14a、2-14b、2-14c、および2-14dについても同様である。全てのデバイスで4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズ、および6 ptと比較して8 pt以上の文字サイズで評価が有意に高かった。KV、および紙では8 ptと比較して12 ptで読みやすさの主観評価が有意に高くなった。なお、それぞれの文字サイズでデバイスによる読みやすさの主観評価に差はなかった。

文字サイズ別の目読時間indexを表2-12bおよび図2-14bに示す。全てのデバイスで4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズの目読時間が有意に短くなった。KVおよびiPadで6 ptと比較して8 pt以上の文字サイズの目読時間が有意に短くなった。なお、それぞれ

の文字サイズでデバイスによる目読時間indexに差はなかった。

文字サイズ別の正答率Indexを表2-12cおよび図2-14cに示す。KV、および紙では、4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。また、6 ptと比較して12 ptの正答率が有意に上昇した。iPadでは、4 ptと比較して8 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。また、6 ptと比較して12 ptで正答率が有意に上昇した。なお、それぞれの文字サイズでデバイス間を比較すると、4 ptではiPadがKV、および紙より正答率が有意に高く、8 ptでは、紙がiPadと比較して正答率が有意に高い結果となった。

表2-12a 読みやすさの主観評価

文字 サイズ	1_KV (Mean ± S.D.)	2_iPad (Mean ± S.D.)	3_紙 (Mean ± S.D.)
4 pt	10.8 ± 12.3	14.8 ± 13.1	11.7 ± 12.7
6 pt	34.2 ± 19.1	38.9 ± 20.9	35.1 ± 19.8
8 pt	54.9 ± 23.0	61.7 ± 40.2	54.0 ± 22.3
12 pt	74.3 ± 20.5	71.5 ± 19.4	71.3 ± 21.2

†同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている文字サイズ間には有意差がある。例えば1_KV欄の4 ptと6 ptには「a」が記載してあるが、これは、KVの4 ptの読みやすさの主観評価が6 ptに比べ有意に低いことを示している。

†**; p<0.01

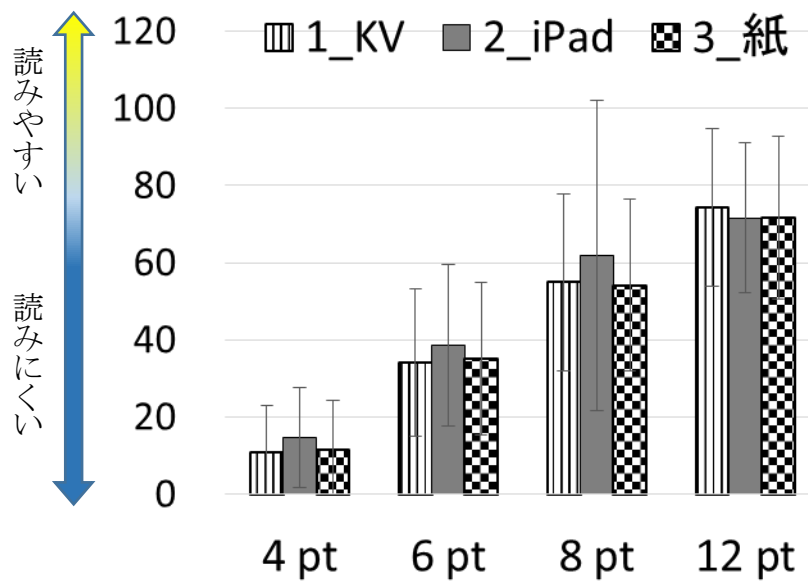


図 2-14a 読みやすさの主観評価

表2-12b 目読時間index

文字 サイズ	1_KV (Mean ± S.D.)	2_iPad (Mean ± S.D.)	3_紙 (Mean ± S.D.)
4 pt	1.15 ± 0.14	1.13 ± 0.12	1.14 ± 0.29
6 pt	1.00 ± 0.15	1.03 ± 0.11	1.00 ± 0.21
8 pt	0.93 ± 0.09	0.92 ± 0.09	0.94 ± 0.12
12 pt	0.94 ± 0.10	0.94 ± 0.09	0.93 ± 0.14

†同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている文字サイズ間には有意差がある。

†index化；被験者ごとに全試行の平均値を1とした。

†***; p<0.01

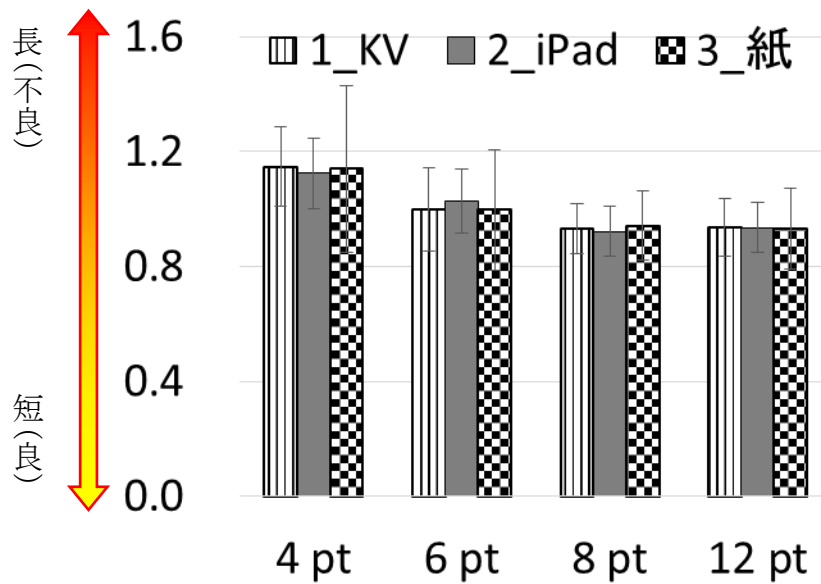


図 2-14b 目読時間 index

表2-12c 正答率index

文字 サイズ	1_KV (Mean ± S.D.)	2_iPad (Mean ± S.D.)	3_紙 (Mean ± S.D.)
4 pt	0.78 ± 0.26	0.91 ± 0.29	0.71 ± 0.29
6 pt	1.01 ± 0.17	0.98 ± 0.16	1.01 ± 0.17
8 pt	1.08 ± 0.16	1.02 ± 0.20	1.10 ± 0.19
12 pt	1.11 ± 0.17	1.09 ± 0.22	1.15 ± 0.17

†同じ列（機種）の中で同じアルファベットが付されている文字サイズ間には有意差がある。

†index化；被験者ごとに全試行の平均値を1とした。

†**; p<0.01, *; p<0.05

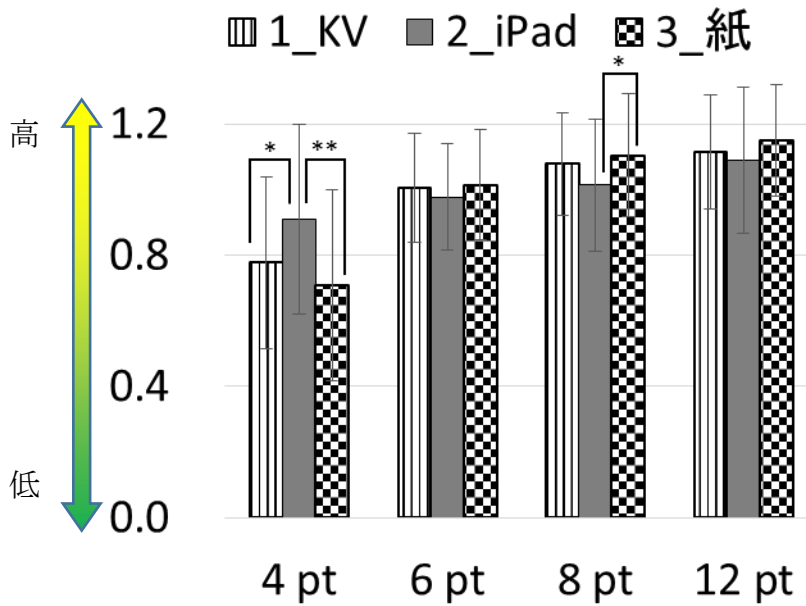


図 2-14c 正答率 index

(**; p<0.01,*; p<0.05)

2.4.3.2 年齢群別の評価の比較

年齢群別の読みやすさの主観評価を表2-13a、および図2-15aに示す。全ての年齢群において、4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズの主観評価が有意に高かった。また、6 ptと8 pt以上の文字サイズ、8 ptと12 ptの間で評価が有意に高くなった。また、4 ptから8 ptまでの主観評価が高くなる割合に比較して、8 ptから12 ptの主観評価は緩やかな評価の上昇であった。なお、年齢群による傾向に違いはなかった。

年齢群別の目読時間indexを表2-13bおよび図2-15bに示す。若年、壮年、および中年では、4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズの目読時間が有意に短くなった。高年では4 ptと比較して8 pt以上の文字サイズの目読時間が有意に短くなった。また、若年、中年、および高年においては、6 ptと比較して8 pt以上の文字サイズの目読時間が有意に短くなった。高年においては4 ptと6 ptは同程度の目読時間であったが、他の年齢群においては、4 ptに比較して6 ptを有意に速く読んだ結果となった。結果として、高年では6 ptと8 ptの間で読む速度が有意に速くなり、若年、壮年、中年では、4 ptと6 ptの間で読む速度が有意に速くなった。

年齢群別の正答率indexを表2-13cと図2-15cに示す。若年では、4 ptと比較して8 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。壮年では、4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。中年では、4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。また、6 ptと比較して12 ptで正答率が有意に上昇した。高年では、4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。また、6 ptと比較して8 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。中、高年群では、若、壮年群と比較して、表示文字が小さくなることで読み間違いが多くなる傾向にあった。また、正答率が急激に低下する文字の大きさについては、壮年、および中年では4 ptと6 ptの間、高年では6 ptと8 ptの間であった。また、若年については、全体的に正答率が高かったため、文字サイズによる急激な正答率の低下は見られなかった。

表2-13a 読みやすさの主観評価

文字 サイズ	1_若年 (Mean ± S.D.)	2_壮年 (Mean ± S.D.)	3_中年 (Mean ± S.D.)	4_高年 (Mean ± S.D.)
4 pt	15.2 ± 13.2 ^{a**, c**}	12.1 ± 12.1 ^{a**, c**}	11.7 ± 12.7 ^{a**, c**}	10.2 ± 12.6 ^{a*, c**}
6 pt	41.6 ± 16.8 ^{a**, e**}	33.3 ± 17.9 ^{a**, e**}	39.2 ± 20.2 ^{a**, e**}	27.6 ± 21.7 ^{a*, e**}
8 pt	63.2 ± 17.4 ^{b**, f**}	54.8 ± 21.8 ^{b**, f**}	60.6 ± 19.4 ^{b**, f**}	47.0 ± 50.4 ^{b**, d*, f*}
12 pt	76.5 ± 16.9 ^{c**, f**}	70.2 ± 22.0 ^{c**, f**}	76.8 ± 18.3 ^{c**, f**}	63.9 ± 22.3 ^{c**, f*}

†同じ列(機種)の中で同じアルファベットが付されている文字サイズ間には有意差がある。
 †**; p<0.01, *; p<0.05

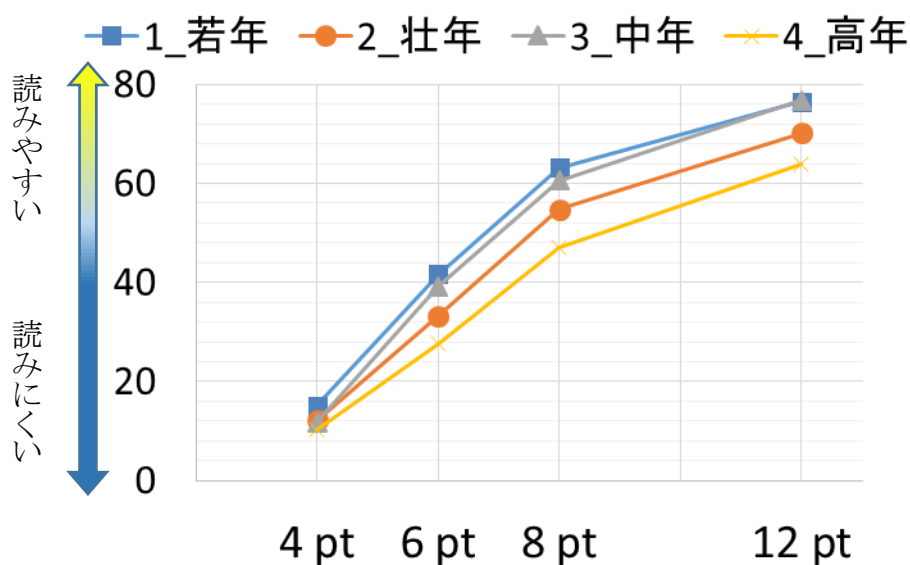


図 2-15a 読みやすさの主観評価

表2-13b 目読時間index

文字 サイズ	1_若年 (Mean ± S.D.)	2_壮年 (Mean ± S.D.)	3_中年 (Mean ± S.D.)	4_高年 (Mean ± S.D.)
4 pt	1.13 ± 0.18 ^{a**, b**}	1.11 ± 0.11 ^{a**, b**}	1.19 ± 0.26 ^{b**}	1.09 ± 0.14 ^{a**, b**}
6 pt	1.00 ± 0.10 ^{d*, e*}	0.98 ± 0.22 ^{a**, c**}	1.00 ± 0.15 ^{d**, e*}	1.06 ± 0.15 ^{c**, d**}
8 pt	0.94 ± 0.09 ^{b**, d*}	0.95 ± 0.09 ^{b**}	0.91 ± 0.10 ^{b**, d**}	0.94 ± 0.11 ^{a**, c**}
12 pt	0.93 ± 0.11 ^{c**, e*}	0.96 ± 0.11 ^{c**}	0.91 ± 0.11 ^{c**, e*}	0.95 ± 0.11 ^{b**, d**}

†同じ列(機種)の中で同じアルファベットが付されている文字サイズ間には有意差がある。

†index化；被験者ごとに全試行の平均値を1とした。

†**; p<0.01, *; p<0.05

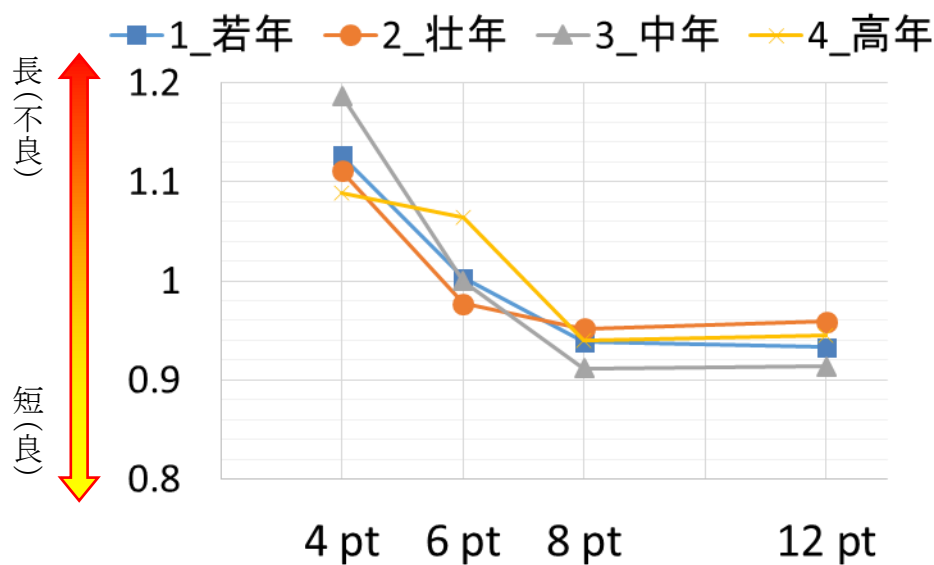


図 2-15b 目読時間 index

表2-13c 正答率index

文字 サイズ	1_若年 (Mean ± S.D.)	2_壮年 (Mean ± S.D.)	3_中年 (Mean ± S.D.)	4_高年 (Mean ± S.D.)
4 pt	0.93 ± 0.19 ^{a**, b**}	0.89 ± 0.19 ^{a**, b**, c**}	0.72 ± 0.28 ^{a**, b**, c**}	0.62 ± 0.41 ^{a**, b**, c**}
6 pt	1.00 ± 0.12	1.01 ± 0.12 ^{a**}	1.03 ± 0.12 ^{a**, d*}	0.94 ± 0.28 ^{a**, d*, e**}
8 pt	1.03 ± 0.14 ^{a**}	1.02 ± 0.16 ^{b**}	1.10 ± 0.16 ^{b**}	1.12 ± 0.25 ^{b**, d*}
12 pt	1.05 ± 0.11 ^{b**}	1.09 ± 0.14 ^{c**}	1.13 ± 0.15 ^{c**, d*}	1.20 ± 0.30 ^{c**, e**}

†同じ列(機種)の中で同じアルファベットが付されている文字サイズ間には有意差がある。

†index化；被験者ごとに全試行の平均値を1とした。

†**；p<0.01, *；p<0.05

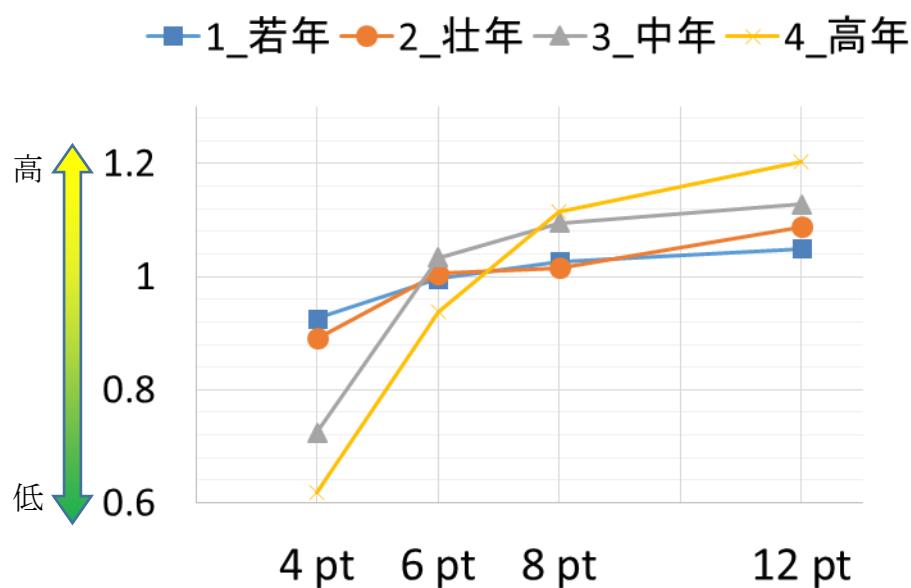


図 2-15c 正答率 index

2.4.3.3 各年齢群別の正答率indexのデバイス間比較

若年、壮年、中年、および高年の4つの年齢群別の正答率indexのデバイス間比較の結果を示す。なお、それぞれの年齢群の中で、4種類の文字サイズにおける読みやすさの主観評価および目読時間indexでは、デバイス間に差はなかったため、デバイス間に有意差があった正答率indexについて比較することとした。

若年のデバイス別の正答率indexを表2-14a、および図2-16aに示す。KVでは、4 ptと比較して8 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。また、6 ptと比較して8 ptで正答率が有意に上昇した。紙では、4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。iPadでは、文字サイズによる正答率に有意差はなかった。

壮年のデバイス別の正答率indexを表2-14b、および図2-16bに示す。KV、および紙では、4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。iPadでは文字サイズによる正答率に有意差はなかった。

中年のデバイス別の正答率indexを表2-14c、および図2-16cに示す。KV、iPad、および紙の全てのデバイスにおいて4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。

高年のデバイス別の正答率indexを表2-14d、および図2-16dに示す。KVでは、4 ptと比較して6 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。iPadでは、4 ptと比較して12 ptで正答率が有意に上昇した。紙では4 ptと比較して8 pt以上のまた、6 ptと比較して8 pt以上の文字サイズの正答率が有意に上昇した。

図2-16a、2-16b、2-16c、および2-16dを比較すると、若年、および壮年では文字の大きさによる正答率の変化は小さい傾向にあるが、中年、および高年と年齢が高くなるにともない、最も小さい文字サイズである4 ptの正答率が大きく低下した。デバイス別では、若年、および壮年の年齢群では、iPadが4 ptにおいて高い正答率を維持している一方で、中年、および高年の年齢群では、KV、および紙と同様にiPadの4 ptにおける正答率は大きく下がっている。

表 2-14a 若年の正答率 index

文字 サイズ	1_KV (Mean ± S.D.)	2_iPad (Mean ± S.D.)	3_紙 (Mean ± S.D.)
4 pt	0.89 ± 0.20 ^{a**, b*}	1.05 ± 0.12	0.84 ± 0.18 ^{a**, b**, c**}
6 pt	0.96 ± 0.11 ^{c*}	0.98 ± 0.11	1.05 ± 0.10 ^{a**}
8 pt	1.10 ± 0.09 ^{a**, c*}	0.96 ± 0.13	1.02 ± 0.16 ^{b**}
12 pt	1.05 ± 0.12 ^{b*}	1.01 ± 0.09	1.08 ± 0.10 ^{c**}

†同じ列(機種)の中で同じアルファベットが付されている文字サイズ間には有意差がある。
†index 化； 被験者ごとに全試行の平均値を 1 とした。
†**; p<0.01, *; p<0.05

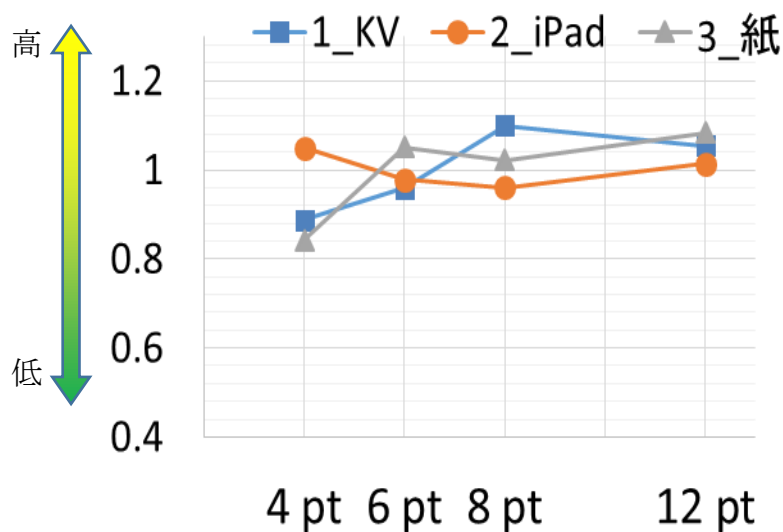


図 2-16a 若年の正答率 index

表 2-14b 壮年の正答率 index

文字 サイズ	1_KV (Mean ± S.D.)	2_iPad (Mean ± S.D.)	3_紙 (Mean ± S.D.)
4 pt	0.87 ± 0.17 ^{a*} , ^{b**} , ^{c**}	0.98 ± 0.14	0.83 ± 0.22 ^{a*} , ^{b**} , ^{c**}
6 pt	1.00 ± 0.12 ^{a*}	1.00 ± 0.12	1.01 ± 0.12 ^{a*}
8 pt	1.05 ± 0.12 ^{b**}	0.96 ± 0.16	1.04 ± 0.18 ^{b**}
12 pt	1.08 ± 0.13 ^{c**}	1.07 ± 0.18	1.12 ± 0.09 ^{c**}

†同じ列(機種)の中で同じアルファベットが付されている文字サイズ間には有意差がある。

†index 化； 被験者ごとに全試行の平均値を 1 とした。

†**; p<0.01, *; p<0.05

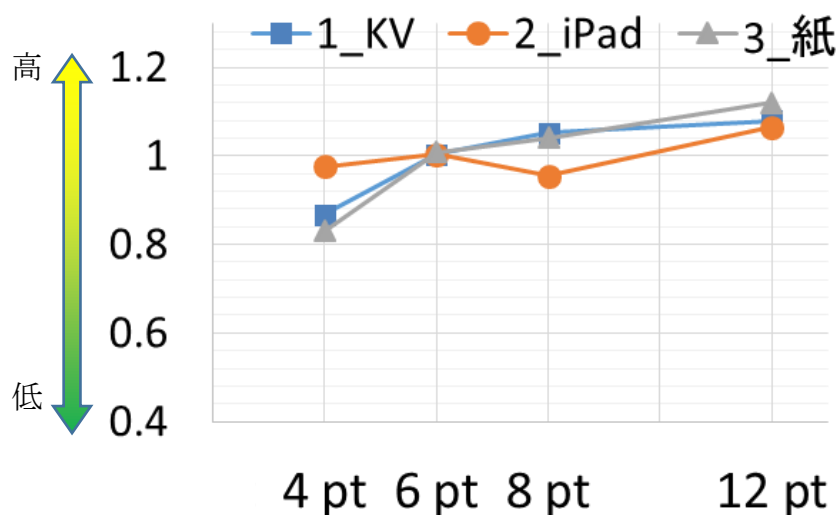


図 2-16b 壮年の正答率 index

表 2-14c 中年の正答率 index

文字 サイズ	1_KV (Mean ± S.D.)	2_iPad (Mean ± S.D.)	3_紙 (Mean ± S.D.)
4 pt	0.72 ± 0.26 a**, b**, c**	0.83 ± 0.23 a**, b**, c**	0.62 ± 0.30 a*, b**, c**
6 pt	1.05 ± 0.10 a**	1.00 ± 0.11 a**	1.05 ± 0.13 a*
8 pt	1.11 ± 0.14 b**	1.04 ± 0.19 b**	1.13 ± 0.14 b**
12 pt	1.10 ± 0.15 c**	1.11 ± 0.16 c**	1.17 ± 0.14 c**

†同じ列(機種)の中で同じアルファベツを付されている文字サイズ間には有意差がある。
 †index 化 ; 被験者ごとに全試行の平均値を 1 とした。
 †**; p<0.01, *; p<0.05

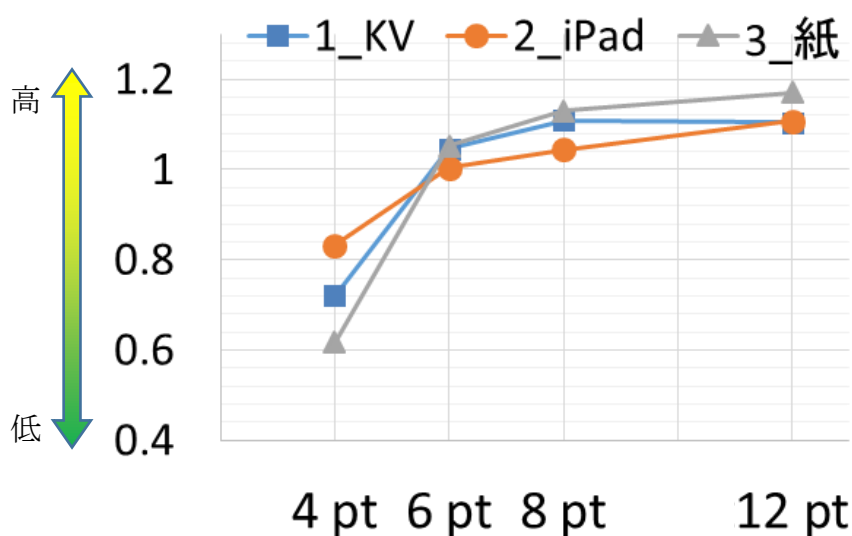


図 2-16c 中年の正答率 index

表 2-14d 高年の正答率 index

文字 サイズ	1_KV (Mean ± S.D.)	2_iPad (Mean ± S.D.)	3_紙 (Mean ± S.D.)
4 pt	0.55 ± 0.31 ^{a**, b**, c**}	0.76 ± 0.50 ^{a**}	0.53 ± 0.32 ^{a**, b**, c**, a**, b**, d*, e*}
6 pt	1.00 ± 0.29 ^{a**}	0.91 ± 0.27	0.91 ± 0.26 ^{d*, e*}
8 pt	1.04 ± 0.24 ^{b**}	1.09 ± 0.27	1.22 ± 0.22 ^{b**, d*}
12 pt	1.23 ± 0.24 ^{c**}	1.17 ± 0.37 ^{a**}	1.22 ± 0.27 ^{c**, e*}

†同じ列(機種)の中で同じアルファベットが付されている文字サイズ間には有意差がある。

†index 化； 被験者ごとに全試行の平均値を 1 とした。

†**; p<0.01, *; p<0.05

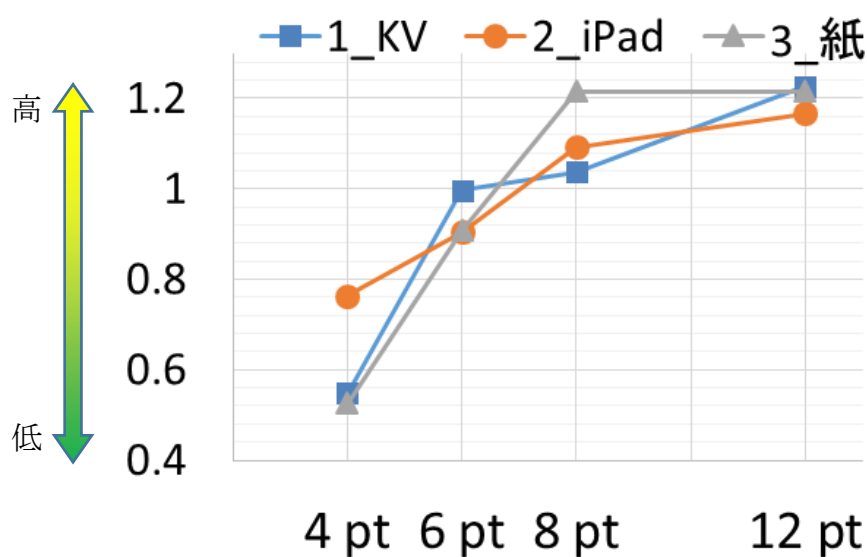


図 2-16d 高年の正答率 index

2.4.4 考察

本節では、各デバイス間での環境照度の可読性への影響を最小限に抑えるため、様々な照度条件下で実施した先行研究[5, 6]において、電子書籍リーダーおよび紙の間の可読性に差が出なかった条件（1,000 lx レベル）を用いた。

2.4.4.1 文字サイズの比較

目読時間indexおよび正答率indexについて年齢群全体では、8 pt、および12 ptにおける各デバイスの可読性に有意差はなかった。これは、Lee et al.[7, 8]がEペーパーと紙で、数種類の文字サイズにおける読み上げ時間や正確さなどの視認性を調査し、文字高2.2 mm以上の大きさ、および文字高2.5 mm以上の大きさに正答率に差がなかった結果を支持している。

また、今回の研究では8 ptは読みやすさの主観評価のVASの評価点において50点以上を示した。共同研究者の先行研究[9]、および本章第2節、第3節では、読みやすさの主観評価のVAS評価点の基準を45点と報告していることから、被験者は8 pt以上の文字サイズを「読みやすい」と判断していることが示唆された。一方、8 pt、12 pt、および16 ptで実施した先行研究[1]では、8 ptでEペーパーの読みやすさの主観評価が本節の結果よりも低い値を示していた。この原因として、先行研究で用いたEペーパーがフロントライトを搭載しておらず、また、ディスプレイの解像度が212 ppiと今回使用したデバイスと比較して低いことが考えられる。この結果は、解像度150 ppiから400 ppiまでは、解像度が高くなるほど被験者の読みやすさの評価が良くなるとしたTakubo et al.[10]による報告を支持している。

今回の研究では、年齢群全体では、バックライト型液晶ディスプレイの正答率indexを除き、いずれのデバイスにおいても、読みやすさの主観評価、目読時間index、および正答率indexにおいて、6 ptから4 ptに文字サイズが小さくなると有意に可読性が低下した。また、Lee et al.[7]の研究においても、高さ1.4 mmの文字サイズで高さ2.2 mm以上と比較して正答率が下がることが報告されている。これらのことから、6 ptが被験者のパフォーマンスを維持できる（目読速度が低下しない、正答率が下がらない）最小の限界の文字サイズであることが示唆された。なお、バックライト型液晶ディスプレイの正答率indexにおいて、若年および壮年の年齢群では4 ptと6 ptの間に有意差がなかった。その理由としてバックライトの効果により、他のデバイスと比較してコントラスト比が高くなり、可読性が向上したため4 ptにおいても正答率が維持されたからだと考えられる。

本研究で使用したフォントのCourierは、代表的なフォントの中では数少ない等幅フォントである。他のフォントと比較して文字高が低いデザインである。本節では、Courierの4 pt、6 pt、8 pt、および12 ptを用いたが、ポイント数だけでは、可読性に関する他の研究との互換性が確保できないので、実際の文字高において、結果を検討した。

2.4.4.2 デバイスの種類の比較

本節における環境照度1,000 lxの条件では、8 ptと12 ptの文字サイズでデバイス間に可読性の違いがなかった。これは、1,000 lxの条件下で8 ptもしくは9 ptの文字サイズでバックライト型液晶ディスプレイとフロントライト搭載型Eペーパーの可読性を比較した先行研究[6, 11]の結果を支持している。正答率indexにおいて、4 ptで、バックライト型液晶ディスプレイが他のデバイスと比較して高く、特に近見作業において調節力がある若年、および壮年の年齢群でその傾向が顕著であった。先行研究[6, 11]により、電子書籍リーダーの光源が環境照度の低い条件における可読性を改善し、有意差はないもののバックライト型液晶ディスプレイがフロントライト型Eペーパーより効果が高い傾向にあることが報告されている。本実験ではバックライト型液晶ディスプレイは、紙やフロントライト搭載型Eペーパーと比較し、高いコントラスト比を示した。一方、デバイスの表示画面の解像度については、バックライト型液晶ディスプレイはフロントライト搭載型Eペーパーより低かった。これらのことから本実験におけるデバイスの解像度では、液晶パネルとバックライトの組み合わせにより実現される高いコントラスト比が、若い年齢群での4 ptにおける正答率の高さに寄与している可能性がある。また、今回の実験条件では、読みやすさの主観評価、目読時間index、および正答率indexの3種類の評価指標は6 pt以上では正答率indexの8 ptのバックライト型液晶ディスプレイと紙の有意差を除き、デバイス間に差はなく、これらのことから3種類のデバイスは、6 pt以上の文字サイズでほぼ同程度の可読性を持つことが示唆された。

2.4.4.3 評価指標の比較

本節の研究で用いた3つの評価指標である被験者の主観評価、目読index、および正答率indexについては、それぞれその結果に特徴があった。主観評価については、4 ptから8 pt（読みやすいと評価された文字サイズ）までの評価は直線的に高くなった。また、8 pt以上での傾きは緩やかになるが、文字サイズが大きくなるに伴い評価が有意に高くなる結果となった。8 pt、および12 ptの結果は先行研究の結果を支持している[1]。目読時間indexについては、8 ptまでは主観評価と同じ傾向であった。一方で8 pt以上では文字が大きくなっても目読時間は短くならなかった。8 pt、および12 ptの結果は先行研究の結果を支持しており[1]、このことから被験者の目読速度が8 ptで上限に達することが示唆された。正答率indexについては、4 ptと6 pt（最小の限界の文字サイズ）の間で最も正解率が上昇し、6 ptと8 ptの間では緩やかになるが上昇した。8 ptと12 ptでは正答率に差はなかった。8 pt、および12 ptの結果は先行研究を支持しており[1]、このことから、被験者の正しく読む能力は8 ptで上限まで達することが示唆された。

2.4.4.4 年齢群別の比較

高い年齢群ほど加齢による視機能の低下にともなってテキストの認知能力が

低下していると言われている。2.4.4.2において、若年、および壮年の若い年齢群で4 pt (最も小さい文字サイズ) の可読性に対して、液晶ディスプレイのバックライトによる改善効果があった。一方でこの効果は中年、および高年の年齢群では見られなかった。このことから、電子書籍リーダーの場合にも、その傾向が顕著に表れている。これらの理由として、中年、および高年では、表2-10に示したとおり、若い年齢群と比較して水晶体白濁度が高く、また視機能が低下している。そのため、摩りガラスを隔ててバックライト光を見ているような状態になり、その効果が低いと考えられる。水晶体白濁度の可読性への影響については、共同研究者の先行研究[12]においても、高齢者において、水晶体白濁度が低い被験者グループの方がテキストを早く読むことができることが報告されている。また、2.4.4.1において、年齢群全体では6 ptがパフォーマンスを維持できる最小の限界の文字サイズであることが示唆された。しかしながら年齢群別では、若年、壮年、および中年の年齢群では6 ptが最小の限界の文字サイズ、高年では8 ptが最小の限界の文字サイズであることが示唆され、年齢群により異なる結果となった。環境照度や表示画面のコントラスト比等の条件を変えて実施した先行研究[6, 11, 13-15]では、年齢群により電子書籍リーダーの可読性が異なり、環境照度が低いなどの悪い条件では高い年齢群ほど、可読性が低下することを報告している。本節においても高い年齢群ほど、小さいサイズの文字が読みにくく、可読性が低下したため、これらの結果を支持している。そのことから、特に高年においては、テキストの文字高が固定されている紙と比較して、読みやすいサイズに文字高を変えることが可能なバックライト型液晶ディスプレイ、およびフロントライト搭載型Eペーパーが、実際の使用環境において優位となることが考えられる。

2.4.5 結論

本節では、電子書籍リーダーと紙の可読性に対する文字の大きさと加齢の影響について調査した。本節および先行研究の結果を踏まえ、以下のとおりとする。

2.4.5.1 文字サイズ

- (1) 被験者が読みやすいとする文字サイズは、8 pt 以上と示唆された。このことから、電子書籍リーダーの表示デフォルト値はデバイス表示状態で文字高 2.75 mm 以上が望ましい。
- (2) 被験者の目読速度が低下しない、正答率が下がらない最小の限界の文字サイズは年齢群全体では6 ptであることが示唆された。また、年齢群別では若年、壮年、中年では6 pt、高年のみ8 ptと異なる結果となった。

2.4.5.2 デバイス

- (1) 本研究で用いた電子書籍リーダーは紙と同様の高い可読性を持つ。また、文字サイズの調節によって、紙よりも快適な読書環境を提供する。特にその効果は高い年齢群で大きい。

- (2) 液晶ディスプレイに搭載されているバックライトは若年、壮年の年齢群において、最小の限界の文字サイズである6 ptとそれより小さい4 ptの文字サイズの可読性の改善に寄与している。
- (3) Eペーパーに搭載されたフロントライトは背景輝度を上昇させる（コントラスト比を増加させる）ため、可読性の改善に効果がある。また、Eペーパーの解像度についても、本研究で検証した150～300ppiの範囲では高解像度化は読みやすさの改善に効果がある。

2.4.5.3 評価指標

- (1) 被験者の読みやすさの主観評価は、4 ptから12 ptまでは文字が大きくなるに伴い、高くなっていくが、8 ptと12 ptの間では評価が高くなる割合が緩やかになる。
- (2) 被験者の目読速度は文字サイズが大きくなるに伴い早くなるが、8 ptで上限に達する。
- (3) 被験者のテキストを読む正解率は文字サイズが大きくなるに伴い高くなるが、8 ptで上限に達する。

2.4.5.4 加齢

高い年齢群ほど、文字サイズが小さい、環境照度が低い、文字のコントラスト比が低いなどの悪い条件下において電子書籍リーダーの可読性の低下への影響が大きい。

2.4.6 参考文献

- [1]. Y. Ishii, T. Koizuka, K. Iwata, N. Ishio, S. Matsunami, P. R. Lege, T. Kojima, M. Miyao : “Contribution of Character Sizes to the Readability of Mobile Devices”, IDW 2014, Niigata, Japan (Dec. 3-5, 2014)
- [2]. Amazon.com. <http://www.amazon.co.jp/dp/B00M0EYVCC/>
- [3]. Apple – iPad, <https://support.apple.com/kb/SP647>
- [4]. JIS Z 9110, 照明基準総則, 日本標準調査会 (2011)
- [5]. T. Koizuka, S. Sano, T. Kojima, M. Miyao : “Evaluating the Effects of Environmental Illuminance on the Readability of E-books”, SID Symposium Digest of Technical Papers, pp. 571-573 (2013)
- [6]. S. Matsunami, T. Koizuka, R. P. Lege, T. Kojima, M. Miyao : “The Effects of Ambient Illuminance and Aging on the Evaluation of the Readability of E-paper”, 映像情報メディア学会誌, vol. 69, No.10, pp. J306-313 (2015)
- [7]. D. Lee, Y. Ko, I Shen, C. Chao : “Effect of Light Source, Ambient Illumination, Character Size and Interline Spacing on Visual Performance and Visual Fatigue with Electronic Paper Displays”, Displays, 32, pp. 1-7 (2011)
- [8]. D. Lee, K. Shieh, S. Jeng, I. Shen : “Effect of Character Size and Lighting on Legibility of Electronic Papers”, Displays, 29, pp. 10–17 (2008)
- [9]. T. Koizuka, Y. Ishii, T. Kojima, N. Ishio, R. P. Lege, M. Miyao : “Proposing a Baseline Setup for Readability”, IDW 2014, Niigata, Japan (Dec. 3-5, 2014)
- [10]. Y. Takubo, Y. Hisatake, T. Iizuka, T. Kawamura : “Ultra-High Resolution Mobile Displays”, SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 43, Issue 1, pp.869–872 (2012)
- [11]. T. Koizuka, Y. Ishii, T. Kojima, R. P. Lege, M. Miyao : “The Contributions of Built-in Light on the Readability in E-paper Devices”, SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 45, pp. 861-864 (2014)
- [12]. 神田哲也, 長谷川旭, 長谷川聡, 宮尾克 : “高齢者にとってのiPadの可読性評価-背景色と文字色が可読性に与える影響”, モバイル学会誌, vol. 1 (2), pp. 101-104 (2011)
- [13]. 松波 紫草, 岩田 光平, 小飯塚 達也, 石井 佑樹, 小嶋 健仁, 宮尾 克 : “Eペーパーと紙の可読性に対するコントラスト比と加齢の影響—フロントライトの有無に注目して—”, モバイル学会誌, vol.5 (2), pp. 35-41 (2015)
- [14]. S. Sano, T. Kojima and M. Miyao : “The Effect of Illuminance on Visibility during Reading e-books by Age Groups”, Proceedings International Display Workshops, vol. 3, pp. 1624-1627 (2012)
- [15]. A. Wang, S. Hwang, H. Kuo, S. Jeng : “Effects of ambient illuminance and electronic displays on users’ visual performance for young and elderly users”, Journal of the SID 18/9 (2010)

第3章 総括

3.1 本研究のまとめ

電子書籍リーダーは、紙の書籍から「印刷機を使って表示媒体に印字する」という工程を省いたものである。つまり、電子書籍リーダーは、紙媒体では蔵書の書庫にあたるスペースを電子データとして内包することで、紙媒体を用いた場合のような保管場所を必要としない。このことは、印刷物に対し、大量のデータを省スペースに保存できるという点において圧倒的な優位性がある。また、デジタル組版による印刷物のように印刷する前の段階では文字サイズ等変更等の校正は容易であるが、印刷されると大きさが固定されるものと比較し、書き換えや、ディスプレイ上で文字サイズなども自由に変更が可能である。その一方で、表示媒体としては、条件により可読性が紙を下回る結果になる場合もあり、これでは電子書籍のメリットがあまり見えてこなかった。

電子書籍の表示媒体の一つであるEペーパーは、表示媒体としての紙の機能を保持することを前提に、表示内容を電子的に書き換える機能を実装したものであるが、その表示媒体としての機能は共同研究者による先行研究においては、紙と比較して十分とは言えなかった。また、電子書籍リーダーのディスプレイ装置として主流であるバックライト型液晶ディスプレイは低照度において十分な可読性を確保できる一方で、目の疲れを感じたり、屋外などの高照度で可読性が著しく低下した。

そこで本研究では、電子書籍リーダーの可読性の改善に向け、国際規格の提案のための実験を行った。特に、紙をベースとして「読む」機能に特化したEペーパーについて、標準化がなされていないことを踏まえ、人間工学的な使用に関する条件の提案を行うこととし、推奨される画面のコントラスト比、被験者のパフォーマンスを維持できる環境照度、および表示文字サイズを特定するための調査研究をした。これにより、通常の室内での読書環境においては、電子書籍リーダーが紙と同等の可読性を維持できること、また、電子書籍リーダーはその光源により、環境照度が低い、文字サイズが小さいといった悪い条件における可読性の改善など紙に対する優位性がある一方で、被験者側への光の漏れによる可読性の低下など、改善が必要な点などについて明らかにした。以下に結果を総括する。

3.1.1 可読性の評価に使用した条件

本研究では、以下の3つの条件のもとで実験を行った。

3.1.1.1 コントラスト

第2章2節のコントラスト別のテキストの可読性に関する実験については、文字、および背景の色調について、0（黒）から15（白）のグレースケール16階調の色調のうち、文字は0（黒）の1色、背景は3（暗い灰）、9（明るい灰）、15（白）の3色を採用し、3段階とした。コントラストは、背景が3のときを低、9のときを中、15のときを高とした。

3.1.1.2 環境照度

第2章3節の実験については、6段階（10 lx, 30 lx, 100 lx, 300 lx, 1,000 lx, 3,000 lx）の環境照度を用いた。それぞれの環境照度の目安については、JIS Z 9110 照明基準総則から例をあげると、10 lx：劇場の映写中、30 lx：納戸、物置、100 lx：共用空間の出入り口、玄関ホール、300 lx：会社の食堂、エレベーターホール 1,000 lx：住宅内での手芸、裁縫、デパートの案内コーナー、3,000 lx：レスリング、相撲などの職業試合会場となっている。

3.1.1.3 文字サイズ

第2章4節の4段階の表示文字サイズの条件は、4 pt（文字高:デバイス表示状態で約 1.5 mm）、6 pt（文字高:デバイス表示状態で約 2 mm）、8 pt（文字高:デバイス表示状態で約 2.75 mm）、および 12 pt（文字高:デバイス表示状態で約 3.25 mm）。使用フォントは Courier。Courier は代表的なフォントの中では数少ない等幅フォントである。特徴は、等幅フォントのため、テキストの1行に同じ数の文字を配列することができる。また、一方で、代表的な他のフォントと比較してサイズが小さく、ポイント数だけでは、可読性に関する他の研究との互換性が確保できない。このため、実際の表示文字高（単位 mm）を用いて先行研究の結果との比較検討を行うこととした。

3.1.1.4 年齢

第2章の2節、3節、4節は時系列順で行った実験である。年齢群別の分けについては、表3-1のとおりとした。2節では、3群に、3節、4節では、より詳細に年齢群別の特徴を検証するために、44歳以下を2群に分け、4群とした。

表 3-1 被験者の年齢群別の視機能の特徴

	視機能の特徴	第2章2節	第2章3節	第2章4節
29歳以下	十分な調節力を持っている	若年	若年	若年
30歳から44歳	やや調節力が衰えているが近見作業に支障がない		壮年	壮年
45歳から64歳	緩やかな老視であり、近見作業に支障がある	中年	中年	中年
65歳以上	老視であり、近見作業に老眼鏡を用いる	高年	高年	高年

3.1.2 評価方法

評価方法については、実験方法、評価指標、および照明装置の3つの内容とした。

実験方法については、先行研究が被験者に対し、音読タスクを課して行われた一方で、今回はより実際の読書環境に近い目読タスクを用いた。結果については、第2章第2節

から 4 節で示したとおり、先行研究の音読実験の結果を今回の目読実験の結果が支持する内容となり、方法の妥当性が示された。また、目読実験においては、正答率を指標に加えることができ、電子書籍リーダーの可読性に与える影響をより詳細に評価することができた。

評価指標については、被験者の主観的な読みやすさの評価に用いた VAS、実際の客観的な計測値としての目読時間 index、および正答率 index の 3 つの評価指標を用いた。これらは、電子書籍リーダーの可読性を評価するにあたり、それぞれ単独で用いるよりも、3 項目の結果を総合的に検証することで、より年齢群別の特徴ある詳細な評価が可能となった。読みやすさの主観評価である VAS については、本研究、および先行研究の結果を踏まえ「読める」とする目安の点数を 45 点とし、今後の電子書籍リーダーの評価に用いることとする。目読時間および正答率の index 化については、第 2 章第 3 節の研究において、特に高年齢群における被験者の能力の差による目読時間、および正答率のばらつきが大きく、コントラスト比の直接の影響を取り出すことが難しかったため検討した指標である。これについては、個人の能力の差を取り除くことで、論文投稿に先立って発表した国内学会（シンポジウムモバイル '15：2015 年 3 月 12～13 日）の発表結果（高年において、コントラスト比が低くなるにともない、読みやすさの主観的评价が下がり、正答率が低下しているのにも関わらず、目読速度が有意に遅くならない。目読時間と正答率で標準偏差の値が大きく、ばらつきがある。）と比較して、コントラスト比の影響を厳密に検証することができた。

照明箱については、暗室内で正確にターゲットとする環境照度を安定的に提供することができ、評価装置としての妥当性が示された。

3.1.3 結果

本研究で実施した、3 つの実験の結果については以下のとおり。

3.1.3.1 コントラスト比

第 2 章 2 節の 3 段階のコントラスト比のテキストの可読性に関する実験（文字が黒、背景が白（高コントラスト）、明るい灰（中コントラスト）、暗い灰（低コントラスト））では、以下の結果となった。

(1) E ペーパーの推奨コントラスト比

新聞紙相当の紙と同程度の可読性の維持が可能な E ペーパーの表示画面コントラスト比は「5」以上である。

(2) 先行研究で提案された読みやすさの主観評価の「読める」とする基準点の検証

基準点については、先行研究の 45 点を支持する。今後の評価実験においても読みやすさの主観評価については 45 点を目安にデバイスの性能を評価していくこととする。

(3) E ペーパーのフロントライトの効果

E ペーパーのフロントライトは、中コントラストで可読性を改善したが、低コントラストでは、被験者側への光の漏れが原因と考えられる可読性の低下をもたらした。今後、光源の機能の改善の検討が必要と考えられる。

(4)加齢の影響

高い年齢群ほど加齢による視機能の低下にともなってテキストの認知能力が低下しているといわれているが、E ペーパーの場合にも、それが顕著に表れた。

3.1.3.2 環境照度

第2章3節の6段階の環境照度条件下におけるテキストの可読性に関する実験（10 lx, 30 lx, 100 lx, 300 lx, 1,000 lx, 3,000 lx）では、以下のとおりの結果となった。

(1)被験者がパフォーマンスを維持できる限界値の環境照度

被験者の目読速度が低下しない、正答率が下がらない限界値の環境照度は300 lxであった。JIS Z 9110 照明基準総則では、保健施設やレストランの待合室の推奨環境照度は200 lxのため、こういった場所では、E ペーパーを読みにくいと感じる可能性がある。そのため、電子書籍を読む可能性のある場所については300 lx以上を規格として提案する必要があると考える。一方で、電子ペーパーのプライスタグとしての使用が始まっているスーパーマーケットの店舗の推奨照度は500 lxである。そのため、利用客に対して問題なくプライスタグを読むことができる環境照度が提供されており、表示機能が十分なことに加え、表示内容を電子的に書き換える機能のメリットが十分に発揮されていると考えられる。また、屋外サイネージとしては、環境照度が高い昼間には高い視認性を有し、電力の供給に課題がある場所にも有効なメリットも、日没時に440 lx、その後急速に環境照度が低下する夜間においては周りの照明なしには利用できないデメリットに相殺され、使用できる場面が限られてくる可能性がある。

(2)先行研究で提案された読みやすさの主観評価の「読める」とする基準点の検証

基準点については、先行研究の45点を支持する。今後の評価実験においても読みやすさの主観評価については45点を目安にデバイスの性能を評価していくこととする。

(3)E ペーパーと紙の比較

フロントライト非搭載型 E ペーパーの環境照度による可読性の変化は、紙と類似の傾向にあったが、いずれの環境照度においても紙を下回る結果になった。低い照度の条件では、E ペーパーにフロントライトが搭載されているデバイスで可読性が改善され、紙よりも高くなった一方で、1,000 lx 以上では、非搭載型と同等か搭載型の結果が悪くなる場合もあった。このことにより、光源の調節については、低照度ではフロントライトがオンになり、1,000 lx を超える環境照度でオフになる機能の実装が望ましいと考える。

(4)加齢の影響

環境照度が低い条件では、高い年齢群ほど E ペーパーおよび紙の可読性が大きく低下する。また、電子書籍リーダーの光源は同条件で特に高い年齢群の可読性の改善に寄与した。

3.1.3.3 文字サイズ

第2章4節の4段階の表示文字サイズの条件下におけるテキストの可読性に関する実験（4 pt：文字高:デバイス表示状態で約1.5 mm、6 pt：文字高:デバイス表示状態

で約 2 mm、8 pt : 文字高:デバイス表示状態で約 2.75 mm、12 pt : 文字高:デバイス表示状態で約 : 3.25 mm) では、以下のとおりの結果となった。

(1) 読みやすい文字サイズ

被験者が読みやすいとする文字サイズは、8 pt (デバイス表示状態で約 : 2.75 mm) 以上。このことから、電子書籍リーダーの表示デフォルト値はデバイス表示状態で文字高 2.75 mm 以上が望ましい。

(2) 被験者のパフォーマンスを維持できる限界値の文字サイズ

被験者の目読速度が低下しない、正答率が下がらない最小の限界の文字サイズは年齢群全体では 6 pt、年齢群別では若年、壮年、中年では 6 pt、高年のみ 8 pt と異なる結果となった。

(3) 電子書籍リーダーと紙の比較

1,000 lx レベルの環境照度の条件において電子書籍リーダーは紙と同様の高い可読性を持つ。また、利用者が快適に読むために文字サイズを調節できる機能があるため、紙よりも表示媒体として優位な点がある。特にその効果は高い年齢群で大きい。また、電子書籍リーダーの光源は小さい文字の可読性の改善に寄与している。本研究で検証した 150~300ppi の範囲では高解像度化は読みやすさの改善に効果がある。

(4) 加齢の影響

文字サイズが小さい、環境照度が低い、文字のコントラスト比が低いなどの悪い条件下において電子書籍リーダーの可読性の低下への影響が大きい。

3.1.3.4 加齢を考慮した種類別可読性

高い年齢群ほど視機能の低下にともない、テキストの認知能力が低下しているといわれているが、本研究においても低いコントラスト比、低い環境照度、小さい文字等の悪い条件下で被験者の可読性が大きく低下することが明らかになった。電子書籍リーダーは印刷物と異なり、光源による照明、文字サイズの変更等でこれらの条件を可變的に改善できるため、特に高齢者の使用において紙よりも優位性があることが示唆された。

3.1.4 人間工学的観点からの E ペーパー仕様への提言

本研究、および共同研究者の先行研究の結果より、人間工学的観点からの E ペーパー仕様について以下のとおり提案する。なお、この内容は、現在、ISO TC 159/SC 4/WG 2 に対し、テクニカルレポート (ISO TR ISO/TR 9241-3XX Ergonomics of human-system interaction – Readability of Electronic Paper Displays (EPD)) の一部として提出中のものである。

- (1) スクリーンのコントラスト比は「5」以上であること。
- (2) スクリーンの文字の大きさの表示デフォルト値はデバイス表示状態で文字高 2.75 mm 以上であること。
- (3) 環境照度は 300 lx 以上であること。
- (4) E ペーパーのフロントライトは、低い環境照度、小さい文字による可読性の低下に対し改善効果があるが、1,000 lx を超える環境照度ではオフになる機能の実装が望ましい。

3.2 今後の課題

本研究は、様々な条件下における電子書籍リーダーの可読性に関する内容であったが、その中で、以下のとおり明らかになった課題があり、それについては今後のテーマとしたい。

第2章2節においては、コントラスト（高、中、低）の条件は、表示ファイルの背景色を変化させたものである。ここで示した推奨コントラスト比は、アプリケーション中の表示を模擬しているという点では、本研究の結果は妥当であるが、機器そのもののコントラストについても論じるべきである。すなわち、一般に使われているメディア機器自体のコントラスト調整機能により背景色を変化させた研究とは結果が異なる可能性がある。今後はメディア機器自体のコントラスト調整機能を使用し、実測コントラスト比をほぼ一定にした形で、電子書籍リーダーの可読性について評価することに取り組みたい。

第2章3節において使用したバックライト型液晶ディスプレイについては、環境照度により光量を自動調節する機能を有していた。一方、Eペーパーの光源はその機能を有していなかった。そこで、同等の比較を行うため、実験では両デバイスともに光源を最大光量に固定した状態で被験者にタスクを課した。廉価版のデバイスでは、光量が固定であることも考慮すると、本研究での比較には意義があるが、光量が調整できるデバイスへの考慮も必要である。第4節で用いた最新のフロントライト搭載型Eペーパーは、光源の自動調節機能を実装している。本研究では、Eペーパーのフロントライトの調節機能について、1,000 lx以上の環境照度でオフになるのが望ましいことを示唆した。今後は自動調節機能により光量を落とす場合、手動で光量を落とす場合についても実験に組み入れ、様々な環境照度の条件のもとで、今回の提案を仮説とする実験を行い、光源の自動調節機能の有効性を検証したい。

最後に、Eペーパーは、最新の機種では、画面解像度も300 ppiに達し、(白黒)画像表示についても十分な性能が得られている。今後は、古文書などの画像データに表示される文字情報の可読性についても研究を進めていきたい。

本論文に関わる業績

1 査読付き論文

- (1) 松波 紫草, 岩田 光平, 小飯塚 達也, 石井 佑樹, 小嶋 健仁, 宮尾 克 : “E ペーパーと紙の可読性に対するコントラスト比と加齢の影響—フロントライトの有無に注目して—”, モバイル学会誌, vol.5 (2), pp. 35-41 (2015) 第2章第2節
- (2) Shigusa Matsunami, Tatsuya Koizuka, R. Paul Lege, Takehito Kojima, Masaru Miyao : “The Effects of Ambient Illuminance and Aging on the Evaluation of the Readability of E-paper”, 映像情報メディア学会誌, vol. 69, No.10, pp. J306-313 (2015) 第2章第3節
- (3) 松波 紫草, 石井 佑樹, 岩田 光平, 小嶋 健仁, 宮尾 克, “電子書籍リーダーの可読性に及ぼす文字サイズ及び加齢の影響”, モバイル学会誌, vol.6, No.1 (予定) 第2章第4節

2 国内学会(研究会)での口頭発表

- (1) 松波紫草, 岩田光平, 小飯塚達也, 石井佑樹, 小嶋健仁, 宮尾 克 : “E ペーパーと紙の可読性に対するコントラスト比と加齢の影響—フロントライトの有無に注目して—”, シンポジウム モバイル'15 研究論文集, pp. 97-102 (2015), 2015年3月12~13日

謝辞

本学位を取得するにあたり、多くの皆様に支えていただきました。心より感謝を申し上げます。

初めに、修士取得後、20年も過ぎている私に博士課程後期課程入学の機会を与えていただきました主指導教員の名古屋大学 教授 宮尾克博士に深くお礼申し上げます。また、仕事を続けながら学業を続けるにあたり、寛容なご理解をいただきました上司の浅田功（一財）自治体国際化協会監事をはじめとする職場の同僚の皆様にも深くお礼申し上げます。

博士論文作成にあたり、主指導教員、主査をお引き受けいただきました名古屋大学教授 枝廣正人博士、副指導教員、副査をお引き受けいただきました同教授 村瀬勉博士、および副査をお引き受けいただきました同准教授 森崎修司博士におかれましては、ご多忙の中、丁寧にご指導いただき、心より敬意を表します。

宮尾研究室においては、学会誌への投稿、博士論文の作成について辛抱強くご指導いただきました招聘教員の小寫建仁博士、統計についてきめ細かくご指導いただきました日本赤十字豊田看護大学教授 森田一三博士、社会人学生の先輩として、学生生活に係る情報を積極的に提供いただきました招聘教員の杉浦明弘博士、共同研究員としてご指導いただきました石尾暢宏博士、および研究室の院生の皆様に感謝申し上げます。また、秘書の長谷川順子様におかれましては、手続等の私がいたらない部分について手厚くサポートいただきましたこと、深くお礼申し上げます。

名古屋大学農学研究科においては、20年を経ても錆びない統計処理の方法をご指導いただきました。名古屋大学名誉教授 奥村純一博士、名古屋大学教授 故村松達夫博士、九州大学教授 古瀬充宏博士、岩手大学教授 喜多一美博士に敬意を表します。

また、どんな状況にあっても青い空を見ろと励ましてくれた魚住（旧姓：河合）美樹様に感謝いたします。

最後に、家事を若干さぼっていることに目をつぶってくれた家族に感謝します。