

原著論文

電子ペーパーの可読性評価と実用下限照度

小嶋 健仁¹⁾, 佐野 峻太¹⁾, 松沼 正平²⁾, 小飯塚 達也¹⁾, 宮尾 克¹⁾¹⁾名古屋大学大学院情報科学研究科, ²⁾名古屋産業科学研究所Readability Evaluation of Electronic Paper,
and Practical Use Minimum IlluminationTakehito KOJIMA¹⁾, Syunta SANO¹⁾, Syouhei MATSUNUMA²⁾, Tatsuya KOIZUKA¹⁾,
Masaru MIYAO¹⁾¹⁾Graduate School of Information Science, Nagoya University²⁾Nagoya Industrial Science Research Institute

Abstract: Recent advances in display technology have brought about a wide range of reading devices as an alternative to traditional paper made books. Various tablet devices with backlight LCDs have been released onto the market (e.g. iPad™). These devices have many functions and can be used to read documents. Various electronic paper (e-paper) devices also have been released (e.g. Amazon's KindleDX™), and their features include paper-like display and low power consumption. In our previous studies, under high illumination, the backlight LCD would have the remarkable fall of the readability by reflect lump of a circumference background, e-paper which is a medium of a reflection mode on the other hand will have high evaluation, and a LCD will be exceeded. In low illumination, readability evaluation of a backlight LCD is high, and low e-paper of the contrast ratio has lowered evaluation. So, in this experiment, it aims at verifying the permission minimum illumination of the comfortable reading environment of e-paper in low illumination (300 or less lx).

Keywords: e-paper, backlight LCD, minimum illumination, readability evaluation

キーワード: 電子ペーパー, バックライト液晶, 下限照度, 可読性評価

1. はじめに

近年のディスプレイ技術の発展は、紙の本に代わる多様な読書端末をもたらした。様々な自発光のバックライト液晶タブレット(例, Apple iPad™)がリリースされた。これらのデバイスは多機能であり、ウェブブラウザをはじめとする各種アプリケーションも使用可能であり、電子書籍リーダーとしても使用可能である。一方、e-paper を採用した電子書籍リーダー(例, Amazon KindleDX™)もリリースされ、その特徴は紙に近い表示特性と省電力である[1,2,3,4]。さらに、紙に近い特性を持つため、液晶パネルに比べ長時間の使用でも疲れにくいといわれている[5]。2012年にはLED フロントライトを搭載した機種やカラーe-paper デバイスもリリースされ、サイズ、表示方式、解像度など消費者の電子書籍リーダー選択肢はさらに広がったといえる。

我々の先行研究では、高照度下ではバックライト液晶は周辺背景の写り込みによる可読性の低下が著しい。一方、反射型の媒体である e-paper は評価が高く、液晶を上回る事とな

った。低照度においては自発光型液晶の可読性評価は高く、コントラスト比の低い e-paper は評価を下げている。そこで、本実験では低照度(300 lx 以下)において、e-paper の読書環境の実用的な許容下限照度を検証することを目的とした。

照度については JIS Z9110 に推奨照度があるが、食堂や受付は 300 lx, 電気室、機械室などは 200 lx と事務室や会議室と比べて低照度である。本研究の結果は、このような低照度での使用が多いユーザーが電子書籍リーダーを選ぶ際の判断基準になると考える。

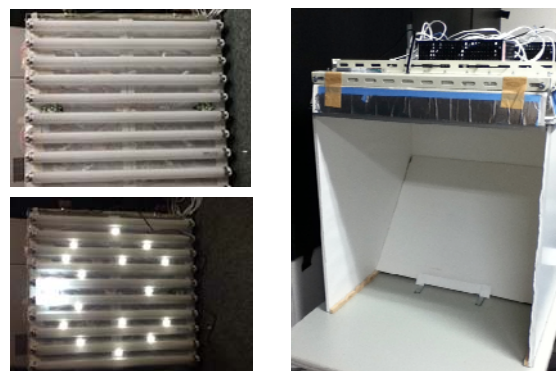


図1 照明箱
(左上)消灯状態, (左下)点灯, (右)照明箱全体

2013年1月16日受理。(2013年3月7日シンポジウム「モバイル'13」にて発表)

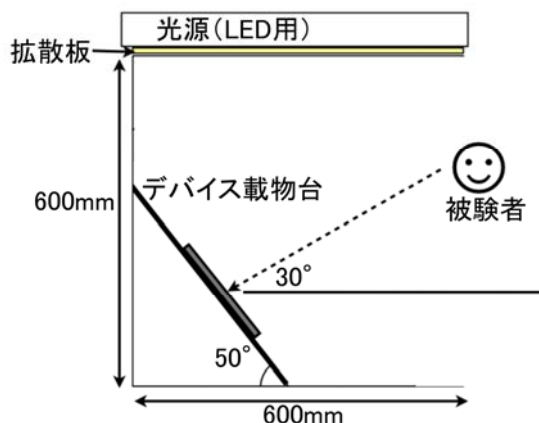


図2 実験装置概要

表1 使用デバイス

KindleDX (2009) Amazon.com	9.7インチ(150dpi)白黒16階調
300dpiEPD	11.5インチ(300dpi)白黒2値
newiPad (2012) Apple	9.7インチ(264dpi)カラー256階調
紙(白度69%)	A4(1200dpi) 白黒2値

2. 実験方法

実験に際しては、被験者には事前に十分にインフォームドコンセントを行っており、名古屋大学情報科学研究科の倫理審査委員会の承認を得ている。

実験は照度を6段階(10, 20, 50, 100, 200, 300 lx)の環境で行うため、LEDを光源にした提示装置を作成し使用した。使用したのは日垂化学工業(株)の「雷神」15個、ソウルセミコンダクター社アクリチ4Wを2個である。各々のLEDの色温度は5300から5500(K)であった。なお、光源の下には拡散板を設置し、配光を補正した。内部には媒体を提示する載物板を、水平面から50°の角度を持たせて設置し、最下部には高さ調節用の台を取り付けた。これにより各媒体に表示される文章を同一の高さにした。装置内面及び載物板には白色ケント紙を貼付した(図1, 2) [6]。照度は、載物板上の媒体を置いた位置に照度計を置いて測定した。

使用した媒体は、e-paperとしてAmazon社KindleDXと参考データ収集用の300dpiEPD、比較用としてバックライトLCDのApple社newiPadと紙に印刷した文章の合計4種類である。それぞれの媒体の画像解像度は、KindleDXは150dpi(白黒16階調)。300dpiEPDは300dpi(白黒2値)。newiPadは264dpi(カラー、256階調)。紙は白度69%のPPC用紙で1200dpi(白黒2値)である(表1)。



図3 (左)ベゼル (右)レーザー距離計

表2 被験者のグループ分け

	男性	女性	合計
若年	34	26	60
中年	11	25	36
高年	24	10	34

表3 主観評価基準

0	とても読みにくい
1	読みにくい
2	どちらかという読みにくい
3	どちらかという読みやすい
4	読みやすい
5	とても読みやすい

媒体のフレームによる主観評価への影響を避けるため、白色ケント紙でベゼルの覆い、パネル面のみ被験者に提示した(図3左)。視距離は、BOSH社製、GLM50を用いて被験者の眼球位置からパネル面までを計測した(図3右)。

実験タスクはデバイスに表示された文章音読である。表示文章は日本語で、1行34文字、13行。フォントは9ポイントで秀英明朝L。文字色は黒、背景色は白である。バックライト液晶の画面輝度は最大輝度に固定した。フォントサイズはDer-Song Leeら[7,8]の実験条件を参考に可能な限り小さい文字を選択した。また、日本語フォントの場合、明朝系は小さい文字の横線が判別しにくくなるため、横線を太くし、電子媒体にも対応させた秀英明朝Lフォントを用いた。

被験者は、年齢が17歳から85歳(平均46歳)までの男女130名である。実験は普段読書しているのと同じ状態で行うため、常用しているメガネやコンタクトを装着して行った。

被験者は、十分な調節能力を持つ44歳以下と調節能力の低下が明確で、20~30cmの近見視に老眼鏡を用い始める45歳から64歳まで、老視の影響が明確である65歳以上の3つのグループに分けられた(表2)。

被験者は照明箱に向かって、読みやすい位置で椅子に座り、媒体、照度に応じてもっとも読みやすい視距離をとってもらった。なお、媒体は被験者ごとにランダムな順で提示し、文章は繰り返しの効果を避けるため、各照度で違うページを表示した。また、照度は300 lxから10 lxの順に変化させた。被験者は6段階の各照度について、表示された文章を規定行音読

し、視距離(媒体から目までの距離)の計測、および読みやすさの評価を行った。評価は以下の表に示す通り0~5の6段階で、評価については、文章の内容ではなく文字の読みやすさに限定して行った(表3)。

3. 実験結果

3.1 主観評価

主観評価を図4に示す。低照度における主観評価は、評価の高い順に、newiPad、紙、KindleDXと300dpiEPDの順であった(e-paperの2機種はほぼ同じ評価)。自発光型のnewiPadは、およそ一定の評価であるのに対し、反射型の紙、e-paperは、200 lx未満の照度条件では急激に評価が下がっている。

3.2 視距離

視距離の計測結果を図5に示す。

自発光型のnewiPadは、照度が低いほど視距離が長い結果を示した。一方、反射型の媒体3種は50 lxを境に低照度側で急激に視距離が短くなることわかる。また、300dpiEPDと紙では極低照度では紙の視距離が長いが50 lxと100 lxの間で300dpiEPDが逆転している。

3.3 コントラスト比

各媒体のコントラスト比を表4に示す。コントラスト比の計測は各媒体に黒及び白(背景色)を表示し、各照度で輝度を測定し、白:黒の比を求めた。

KindleDXは、紙と同様に低照度になるほどコントラスト比が

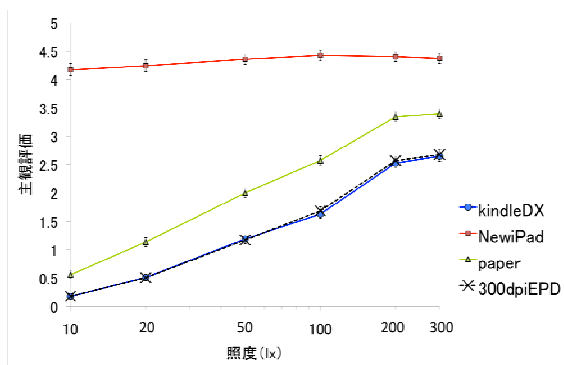


図4 主観評価

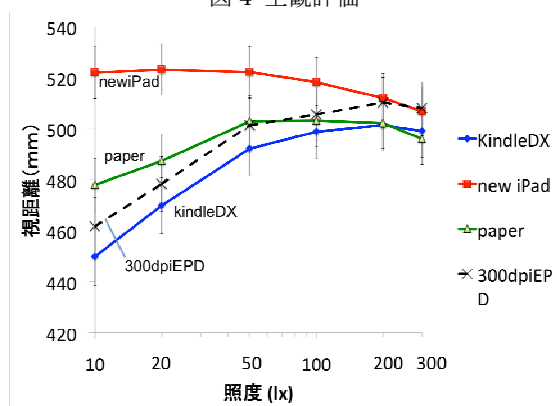


図5 視距離

下がるが、300dpiEPDについては低照度ほどコントラスト比が上がっている。また、総じてKindleDXよりもコントラスト比が高くなっている。newiPadは自発光型であり、画面輝度を最大にしてある関係で他の3種に比べてコントラスト比は非常に高い。また、環境光によって、表示されている黒の部分の輝度が上がるため照度が上がるほどコントラスト比は下がっている。

3.4 年齢別主観評価

被験者を年齢で若年(~43歳)、中年(44~64歳)、高年(65歳~)にグループに分け、集計した。年齢別の主観評価を図6~8に示す。全ての媒体において、若年、中年、高年の順に評価が高い結果となった。

図6~8より、Kindleと紙は非常によく似た傾向を示しているが、紙の方が一段高い評価となっている。newiPadは全ての照度でほぼ一定の評価であった。

3.5 年齢別視距離

年齢別の視距離を図9-11に示す。視距離も全ての媒体で若年、中年、高年の順に視距離が長い結果であった。また、高年被験者の視距離が若年、中年に比べて大きな差があった。これは、高齢者の場合、老視の進行にともなう水晶体調節力の不足を補うために、瞳孔の縮瞳が起こる事が大きい。明環境では縮瞳によって深い被写界深度を得て、ぼやけのない映像を見られるが、低照度では瞳孔を縮瞳できず、視距離を短くせざるを得ないためと考えられる。

newiPadは、他の媒体と逆に、明るくなるほど視距離が短くなる傾向を示した。これは、今回の実験ではバックライトの明るさを最大に固定しているため、最も暗い10 lxにおいては、明るすぎて媒体を遠ざけたためと考えられる。照度が高くなるにつれ、他の媒体と同じ状態に近づいたと考えられる。

なお、図9-11のグラフ中の横線は、newiPadの高年者の最短視距離の平均値を示している。高年層の場合、紙、KindleDXでは、全照度においてnewiPadの最短視距離を越えることはなかった。

3.6 300dpi EPD,年齢別主観評価,視距離

試作段階のパネルを150dpiとの比較用に評価を行ったものであり、ファイル表示の過程で表示品質が低下した可能性があるため、別枠で結果を示す(図12.13)。本機では外部から導入したファイル表示の際、画面サイズにフィットさせるための展開又は縮小処理によって、横の細線が崩れ画像が劣化したと考えられる(図14参照)。年齢別の主観評価、視距離は、紙と非常によく似た傾向を示すが、主観評価については、紙と比べると0.5~1程度低い数値となっている。

表4 コントラスト比

照度	10	20	50	100	200	300
KindleDX	8.2	8.6	9.1	9.2	9.8	9.3
newiPad	330.7	256.3	260.3	284.9	235.5	206.6
紙	9.7	8.5	12.0	11.1	12.4	11.9
300dpiEPD	12.5	10.8	10.9	10.6	9.6	10.1

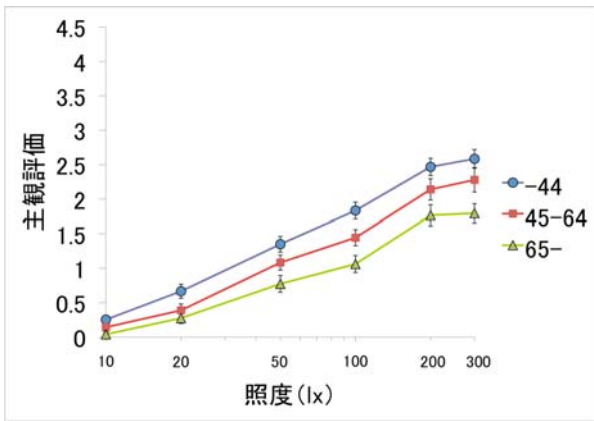


図 6 年齢別主観評価 KindleDX

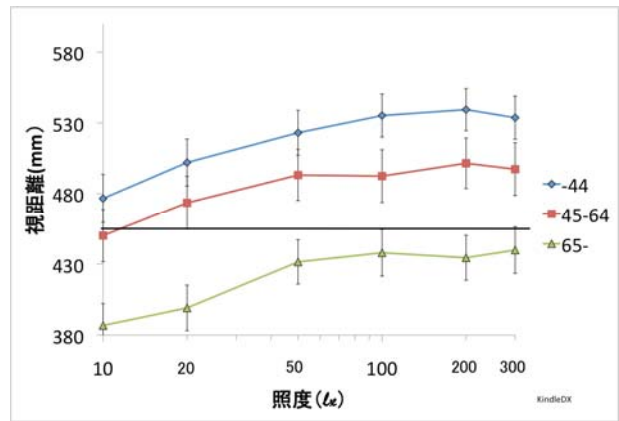


図 9 年齢別視距離 KindleDX

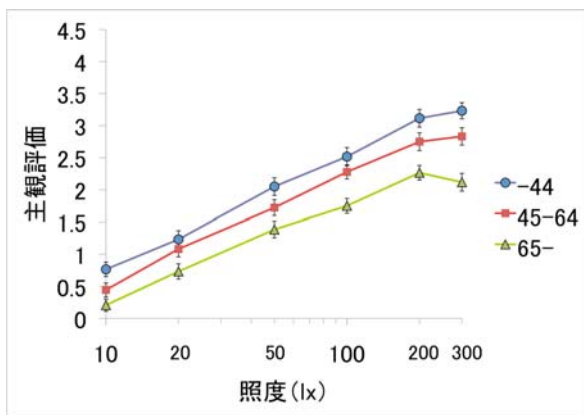


図 7 年齢別主観評価 紙

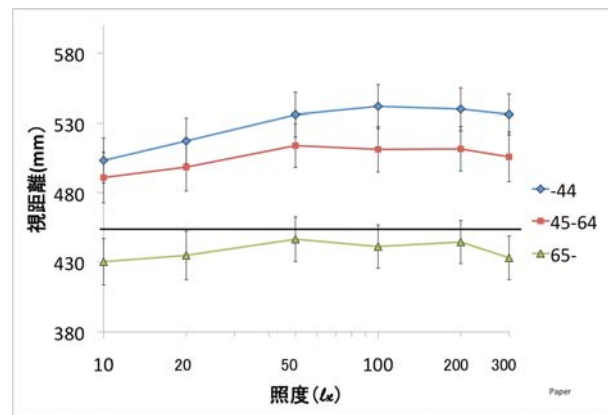


図 10 年齢別視距離 紙

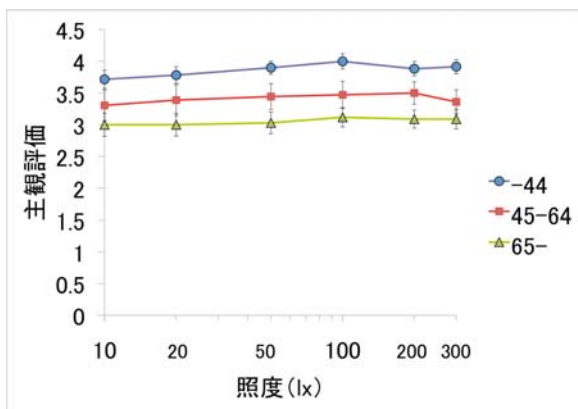


図 8 年齢別主観評価 newiPad

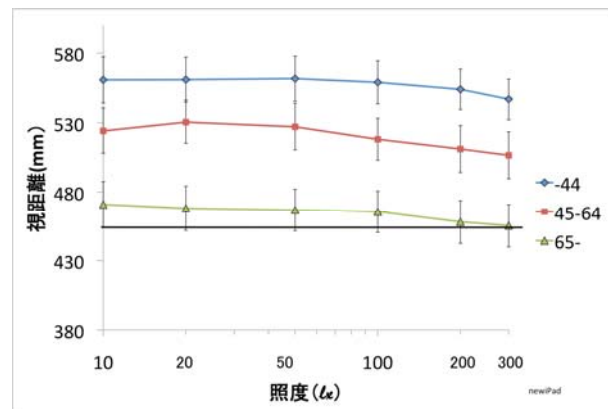


図 11 年齢別視距離 newiPad

特徴的な点は、図 4, 5 の 250 lx 以上での視距離は newiPad より長いにもかかわらず主観評価は最も低くなっている事である。また、図 9, 10 と図 13 では、紙及び KindleDX の場合、全ての照度で高年者の視距離が newiPad の最短視距離を越える事はないが、300dpiEPD では、50 lx 以上で高年者の視距離が newiPad の最短視距離を上回っている事である。ここでも、主観評価はこの照度域の 4 種のうちで最も低くなった。理由は後述する。

4. 考察とまとめ

読みやすさの評価において、視距離も指標として用いられる。一般に、読みにくい場合は媒体に目を近づけるため視距離が

短くなる。低照度では、反射型の媒体の視距離は短く、高年層については、若年、中年層と比べてさらに短い視距離であった。

主観評価も視距離と同様の傾向を示し、特に 100 lx 以下では過半数が 2.「どちらかという読みにくい」以下の評価である。KindleDX の主観評価の分散分析と多重比較では、3 つの年齢層とも 300 lx 側から見て、最初に有意差 ($p < 0.05$) が現れるのが 200 lx と 100 lx の間であった。JIS Z 9110「照明基準総則」でも、一般家庭における「勉強・読書」の推奨照度を 500 ~ 1,000 lx 「寝室での読書、化粧」で 300 ~ 750 lx としており、100 lx 以下の照度では、反射型媒体の使用は困難であり、自発光型を選択するのが妥当である。

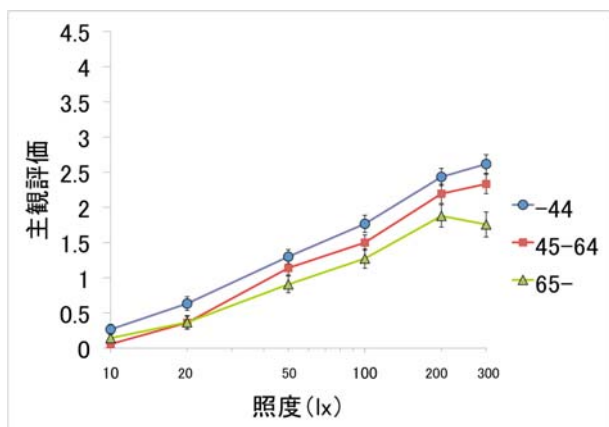


図 12 年齢別主観評価 300dpiEPD

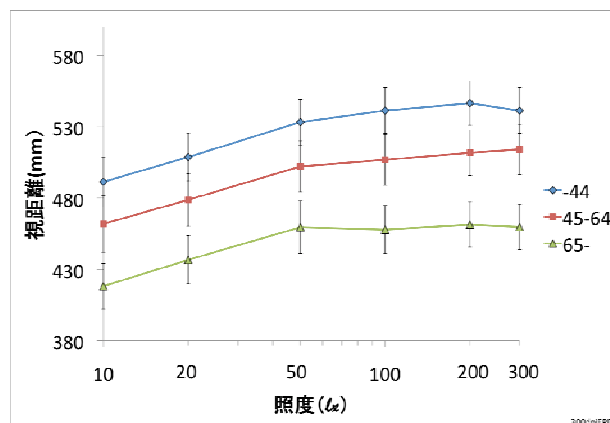


図 13 年齢別視距離 300dpiEPD

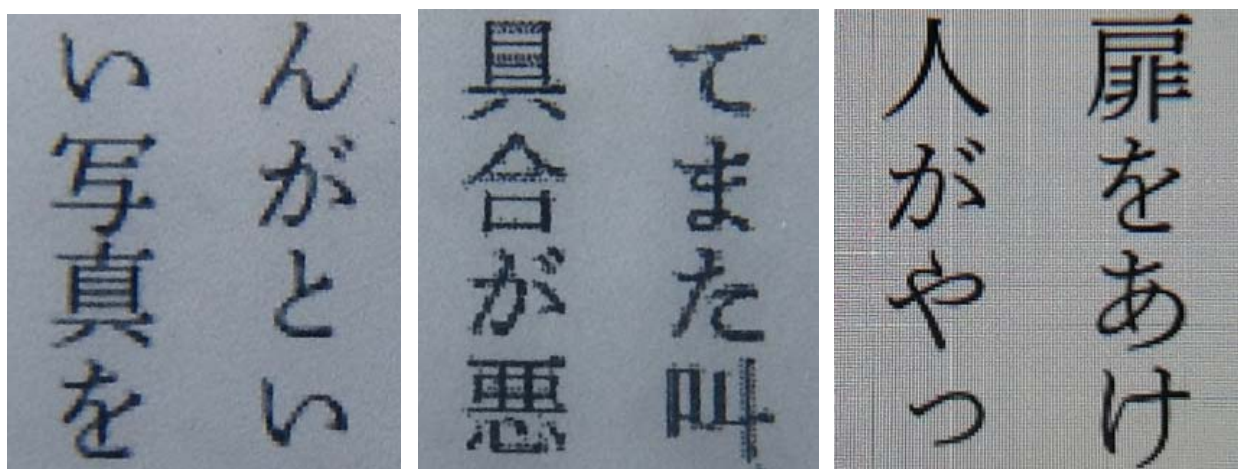


図 14 表示文字拡大画像

(左)KindleDX 150dpi モノクロ 16 階調

(中)300dpiEPD 300dpi モノクロ 2 階調

(右)new newiPad 264dpi カラー 256 階調

照度 200 lx では、主観評価の 3「どちらかという読みやすい」以上の評価が 40%近くあること、視距離が、自発光の液晶と比較対象の紙より長くなる照度が 200 lx 近辺であることから、実用照度の下限は、200 lx と考えられる。

300dpiEPD の評価について視距離及び階調からの考察を補足する。50 lx 以上の照度では、300dpiEPD の視距離が長く、特に 250 lx 以上では newiPad と同じかそれ以上の視距離となっている。この要因として、解像度の高さ、コントラスト比の高さがあると考えられる。ところが、視距離が長い一方で、主観評価では解像度が 2 倍の 300dpiEPD の評価はむしろ低い。この機種は極低照度のコントラスト比が紙よりも高く、単純な白黒の判別では他の反射型媒体よりも有利であったと考えられ、視距離は長い数値となっている。しかし、表示されるフォントの処理に関しては、白黒二値でフォントのエッジ処理(アンチエイリアス処理)が行われておらず、読みやすさの評価が下がっていることが考えられる。紙に白黒二値で印刷する場合、フォントのエッジのジャギー(ギザギザ)を判別できないレベルの解像度(1200dpi)を用い、アンチエイリアス処理の必要をなくしていることから Kindle より高解像度とはいえ 300dpi でアンチエイリアス処理が行われていない文字の評価

が低くなったと考えられる。また、前述したように、本機は外部から導入したファイルの表示時に、画面サイズにフィットさせる処理過程で、特に横の細線が崩れ画像が劣化した可能性があり、低い評価につながったと考えられる(図 14(中))。KindleDX(図 14(左))と、300dpiEPD(同(中))の拡大画像を比較すると、KindleDX は解像度が半分でありながら、16 階調のグレーを用いてフォントのアンチエイリアス処理が行われており、主観評価では 300dpiEPD と変わらない結果となっている。画数の少ないアルファベットならば問題なく表示できたと考えられるが、本実験では画数の多い漢字でこうした現象が顕著になった。

電子書籍リーダーは、電子出版物をダウンロードして読むだけでなく、ユーザーが作成した PDF ファイルを表示する可能性もあり、こうした外部からのファイルの表示、処理に際して、画質の劣化が起こらないよう、メーカーに望みたい。

本研究では e-paper の実用下限照度を検証すべく実験を行った。主観評価で 100 lx と 200 lx の間に、有意差が認められること、視距離が紙の値に近く、主観評価の 3「どちらかという読みやすい」が約 40%となる 200 lx が実用下限照度と考えられる。この結果は、ユーザーがどのような環境照度で電子

書籍リーダーを主に使用するかによって、適切な機種を選択する際の視標となる、例えば、寝室での就寝前(100 lx程度)の読書や、工場の倉庫(75~150 lx)での使用が主体であれば、反射型媒体は選択すべきではない。特に、高齢者や、老視が進んだ人の場合は、それ以上の照度が要求される。

また、本研究では、主観評価において、単純に解像度が高いだけではなく、階調の高さ、表示の際の画面サイズヘフィットさせる処理や品質も読みやすさに影響する可能性が示唆された。

今後は、今回の結果を基礎データとし、2012年に発売され、低照度でのe-paperの欠点を補うことが可能と言われるフロントライトを装備した電子書籍リーダーの評価や、従来製品との比較を行う必要があると考えている。

参考文献

- [1] H. Isono, S. Takahashi, Y. Takiguchi, C. Yamada, Measurement of visual fatigue from reading on electronic paper, IDW'04, pp.1647-1648 (2004)
- [2] Der-Song Lee and Yun-Ying Yeh: Visual fatigue for using electronic paper displays, 亞東学報, 27期, pp.105-114, (2007)
- [3] 面谷 信: 電子ペーパー, 電子情報通信学会誌, vol.88 No.8, pp.659-665(2005)
- [4] Yen-Yu Kang, Mao-Jiun J. Wang, Rungtai Lin: Usability evaluation of E-books, Displays, vol. 30, pp 49-52 (2009)
- [5] Andrew Dillon: Reading from paper versus screens: a critical review of the empirical literature, Ergonomics, 35(10), pp.1297-1326 (1992)
- [6] Kong-King Shieh, Der-Song Lee: Preferred viewing distance and screen angle of electronic paper displays, Applied Ergonomics 38, pp.601-608 (2007)
- [7] Der-Song Lee et al.: Effect of character size and lighting on legibility of electronic papers, Displays, 29, pp.10-17 (2008)
- [8] Der-Song Lee: 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)
- [9] I-Hsuan Shen et al.: Lighting, font style, and polarity on visual performance and visual fatigue with electronic paper displays, Displays, 30, pp.53-58 (2009)
- [10] Eva Siegenthaler: Reading on LCD vs e-Ink displays: effects on fatigue and visual strain, Ophthalmic & Physiological Optics 32, pp.367-374 (2012)

著者紹介



小島 健仁(学生会員)

1989 信州大学農学部農芸化学学科卒業。同年 愛知県公立学校教員。2012 名古屋工業大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年名古屋大学大学院情報科学研究科入学、現在に至る。立体映像の生体測定、モバイルアプリケーションに関する研究に従事。



佐野 峻太(学生会員)

2011 名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業、同年 同大学大学院情報科学研究科博士前期課程入学、現在に至る。モバイル機器の視認性や可読性の研究に従事。



松沼 正平(正会員)

1963.3電気通信大学通信経営学科卒、1993.3名古屋大学大学院多元数理研究科博士課程前期課程修了、2009.3名古屋工業大学大学院博士課程後期課程修了、博士(工学)。2009.8(株)スペースビジョン(3Dスキャナ開発・販売)、2011.7アイ・スペース(株)(モバイル関係コンサルティング)顧問。モバイル学会 監事



小飯塚 達也(非会員)

2008 名古屋大学工学部入学。2011 名古屋大学情報科学研究科宮尾克研究室に配属され現在に至る。主にモバイル機器、電子ペーパーの評価に関する研究に従事。



宮尾 克(正会員)

1997 名古屋大学医学部医学科卒業。1982 医学博士。同大学医学部助手・講師・助教授・教授(多元数理科学・情報基盤センター)を経て、2009 情報科学研究科教授、現在に至る。人間工学・公衆衛生学を通じ、3D映像の生体影響、ケータイ・モバイル機器のユーザビリティ、多言語情報システムを研究。