

原著論文

フロントライト搭載型電子ペーパー端末の可読性評価

○小飯塚 達也¹⁾, 石井 佑樹¹⁾, 小嶋 健仁²⁾, R. Paul Lege¹⁾, 宮尾 克¹⁾¹⁾名古屋大学, ²⁾中部学院大学

Evaluating the Readability of the E-reader with Built-in Light

○Tatsuya KOIZUKA¹⁾, Yuki ISHII¹⁾, Takehito KOJIMA²⁾, R. Paul Lege¹⁾, Masaru MIYAO¹⁾¹⁾Nagoya University, ²⁾Chubu Gakuin University

Abstract: As display technologies have advanced in recent years, there has been an increase in high quality content on mobile devices, such as smart phones, tablet devices or e-readers. Most e-readers have an e-paper display system, and we can read these as if like paper even in open air. Our previous study showed that under conditions of low illuminance, the readability of the e-paper is poor. However, a built-in light system would improve the readability of the e-paper under low illuminance conditions (e.g. Kindle Paperwhite). In this study, we carried out reading experiments to evaluate the readability of e-paper with built-in light. We investigated the contributions of built-in light on readability in e-paper devices. This study showed that significant differences exist between e-paper with built-in light and those without built-in light.

Keywords: e-paper, built-in light, readability, illuminance, Visual Analog Scale

キーワード: 電子ペーパー, フロントライト, 可読性, 照度, Visual Analog Scale

1. はじめに

近年ディスプレイ技術の発達により, スマートフォン, タブレット端末や電子書籍リーダー等の携帯端末で質の高いコンテンツを利用できるようになってきている. コンテンツの中でも特に電子書籍に関してみると, 2012年度までの調査では電子書籍のコンテンツ及びプラットフォーム, 電子書籍ストアも増加している[1]. 特に電子書籍の普及に大きく影響したのは, 文章を読む目的に特化した電子書籍リーダーの存在が大きいと考えられる. AmazonのKindleに代表される電子書籍リーダーはそのほとんどのディスプレイに液晶ではなく, 電子ペーパーを採用している[2][3]. 電子ペーパーは表示特性が紙に近く, 屋外のような照度の高い環境でも高い可読性を持つといわれるが, 一方で照度の低い環境では可読性が高いとはいえない[4]. しかし, フロントライト搭載型の電子ペーパーの登場により照度の低い環境における可読性が改善されると考えられる[5].

2. 目的

フロントライトの実装により電子ペーパーの可読性は向上したのだろうか. それを明らかにするため本研究では可読性の定量的な評価による比較, そしてそのための評価方法を提案する. 本研究ではフロントライトを搭載した電子ペーパーの可読性を評価する実験を行なった. 可読性の評価のためにVisual Analog Scaleを用いた主観評価, 注視時の視距離と英単語を読む速度を測定した. 可読性に影響する要因として照度に焦点を当て, 照度により可読性がどう変化するか, 異なる方式のディスプレイと比較することで評価・考察を行なった.

2014年1月15日受理.
(2014年3月14-15日シンポジウム「モバイル14」にて発表)

3. 実験方法

3.1. 被験者

実験は19歳から86歳(Mean: 45.7, SD: 17.8)の健常な男女110名の被験者を対象に行なった. 被験者には事前にインフォームドコンセントを行ない, 実験は名古屋大学情報科学研究科倫理委員会の承認のもと行なった. 全被験者は近見視力に支障のない視力を有する, もしくは眼鏡・コンタクトレンズによる矯正を行なった.

3.2. 実験デザイン

可読性の評価のために暗室で英単語文章の読み上げ実験を行なった. 読み上げ時の照度を一定に保つために蛍光灯とLEDを組み込んだオリジナルの照明システムを使用した. この照明システムにより, 14段階の照度を設定した. 表1に14段階の設定照度と実測値を示す. 実測値はディスプレイ中心の鉛直面照度を照度計により3回測定した平均値である.

実験では電子書籍リーダーとしてフロントライト搭載の電子ペーパーを採用したKindle Paperwhite(2012年発売), 従来型の電子ペーパーを採用したKindle DX(2009年発売), 紙に文章を印刷したものを使用した. Kindle Paperwhiteのフロントライトは最も明るい設定で使用した. 実験を実施した2013年9月の時点でフロントライトを搭載した電子ペーパー端末はKindle Paperwhiteの他にkobo gloやNOOK Glowlightなどがあったが, どの端末もフロントライトの機構は同種であり, 本研究ではその代表としてKindle Paperwhiteを使用した. Kindle DXを使用した理由も同様である. これらのデバイスを, 照明システムを取り付けたコンパートメントに置いた(図1左). 実用上においては端末を被験者が自由な位置で使用することが適切であると考えられるが, 本実験ではディスプレイ面の照度を一定に保つために端末を固定した.

表 1: 設定照度(上)と実測値(下) (単位: lx)

10	20	50	100	150	200	300	500	750	1,000	1,500	2,000	5,000	10,000
13.5	22.7	51.6	101	151	176	272	517	788	1,040	1,590	1,980	4,760	8,010

実験の様子を図 1 右に示す。被験者は 14 段階の照度で各デバイスに表示された英単語を読み上げ、その後可読性に対する評価を行なった。

3.3. タスクと評価方法

可読性を評価するために各デバイスに英単語を表示した。表示した文章は 1 行あたり 5 つの英単語を 1 ページあたり 10 行、計 50 単語であった(図 2)。ISO 9241-304 ではディスプレイの視覚品質は英数字による検査で十分な評価を得た場合、英数字以外の文字による情報の表示が可能であるとしている[11]。フォントは 9 pt の Times New Roman で、すべてのデバイスで表示される大きさ及び位置を統一した[12]。

被験者は表示された単語を左上から順に 15 秒間音読し、読み上げ中の視距離と 15 秒間で読み上げた単語数を記録した。読み上げ後、被験者は Visual Analog Scale(以下 VAS と表記する)を用いて可読性に対する評価を行なった。VAS は心理的応答評価の一種で、医学や心理学で利用されている[6][7]。代表的な例として「痛み」を評価する場合に用いられ、10 cm の線分の左端が「痛みがない」、右端が「これ以上ないくらい痛い」状態として、現在の痛みがどの程度かを線分上に示す。本研究ではこの手法を可読性の評価のために、左端を「とても読みにくい」、右端を「とても読みやすい」と設定し評価に用いた。主観評価は VAS を 100 等分することで、100 点満点の評価に換算した。

英単語は被験者の年齢・経験による影響を少なくするため、発音・意味が簡単なものに限定した。また、繰り返しによる読み上げへの影響を少なくするため実験前に単語のリストの確認した後、十分な読み上げの練習を行なった。

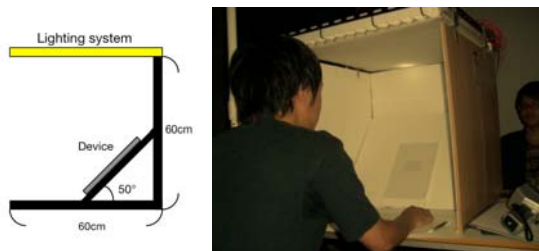


図 1: コンパートメントの概略図(左)と実験の様子(右)

BOY	CAT	CAP	DOG	BOOK
BOX	GREEN	OPEN	JAPAN	MILK
APPLE	CITY	SEVEN	CAR	FISH
MAP	PEN	MAN	BAG	DESK
STOP	HOTEL	PIANO	RED	HAND
JAPAN	MILK	APPLE	CAP	DESK
OPEN	RED	DOG	SEVEN	BOY
GREEN	MAP	CAT	HOTEL	MAN
STOP	CAR	BOOK	PIANO	CITY
PEN	HAND	FISH	BOX	BAG

図 2: 文章の表示例

4. 実験結果

以降では Kindle Paperwhite を電子ペーパー(フロントライト有)、Kindle DX を電子ペーパー(フロントライト無)とする。結果を示す図において、横軸は照度を対数とし実測値をもとにプロットした。

4.1. 主観評価

図 3 に照度別の主観評価の結果を示す。評価の数値は 110 名の被験者による主観評価の平均値で、最低が 0、最高が 100 である。この評価値は VAS による評価を換算したもので間隔尺度であるとして統計分析を行なった[11]。

照度条件ごとに一元配置分散分析を行なったところ、10,000 lx の条件を除き媒体間の評価に有意差が認められた。200 lx 以下の条件で電子ペーパー(フロントライト有)の評価は電子ペーパー(フロントライト無)の評価と比較して有意に高かった($p < 0.01$)。300 lx 以上では有意な差は認められなかったが、750 lx で評価が同程度になり、1,000 lx 以上では評価が逆転した。紙の評価と比較すると、100 lx 以下では電子ペーパー(フロントライト有)の評価は有意に高かった($p < 0.01$)。200 lx で評価が同程度になり、500 lx から 5,000 lx では評価が逆転し、紙の評価が電子ペーパー(フロントライト有)の評価より有意に高くなった($p < 0.01$)。

4.2. 視距離

図 4 に照度別の視距離の結果を示す。ここで、視距離に対する我々の認識は、文字が見にくい場合に顔を近づけ注視しようとすることで視距離が短くなるため、視距離が長いほど可読性が高いという考えである。

照度条件ごとに一元配置分散分析を行なったところ、10 lx と 20 lx の条件下で媒体間の視距離に有意差が認められた。10 lx と 20 lx の条件下で電子ペーパー(フロントライト有)の視距離は電子ペーパー(フロントライト無)の視距離と比較して有意に長かった(10 lx: $p < 0.01$, 20 lx: $p < 0.05$)。

4.2. 読み上げ単語数

図 5 に照度別の読み上げ単語数の結果を示す。ここで、読み上げ単語数に対する我々の認識は、文字が見にくい場合に読み上げの速度が遅くなり一定時間内に読み上げることができる単語数は減るため、読み上げ単語数が多いほど可読性が高いという考えである。

照度条件ごとに一元配置分散分析を行なったところ、媒体間の読み上げ単語数に有意差は認められなかった。照度が高くなるほど差が小さくなり、300 lx 以上になるとどのデバイスでも読み上げ単語数は約 30 個に収束した。

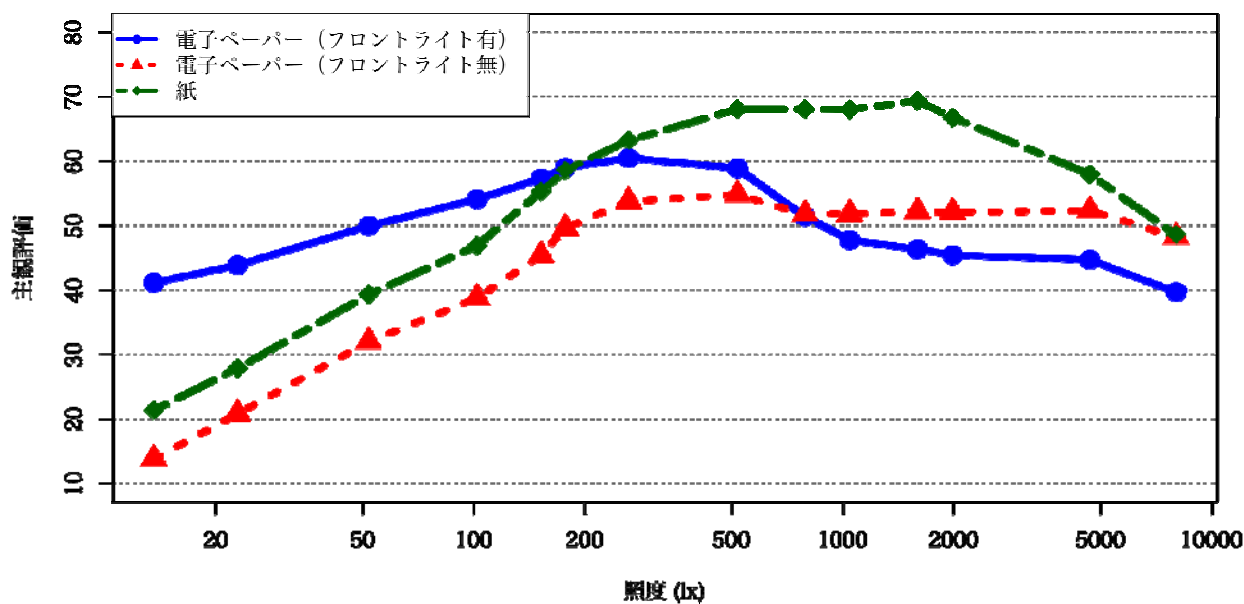


図 3：照度別の主観評価の結果

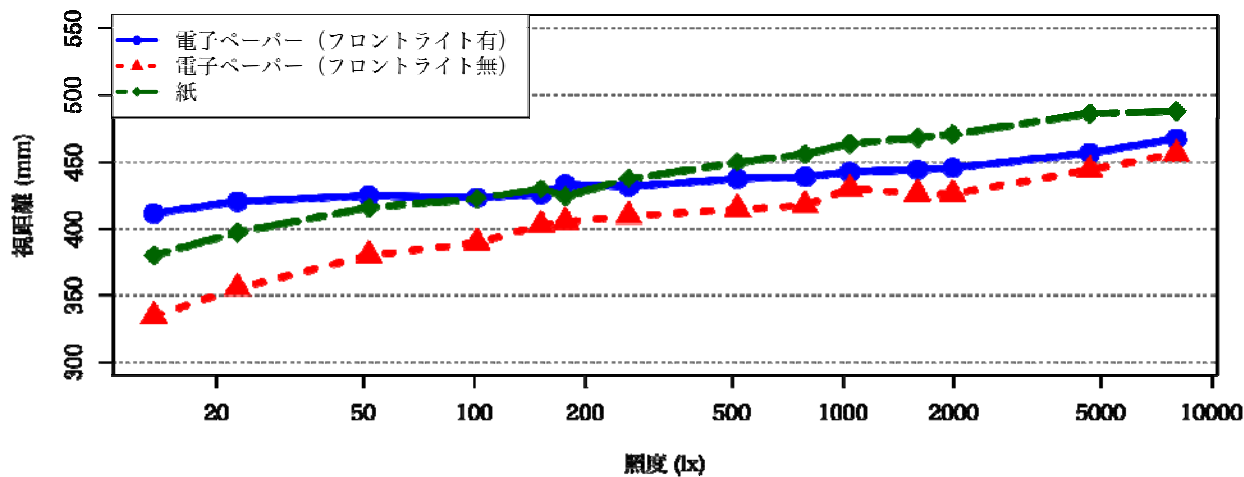


図 4：照度別の視距離の結果

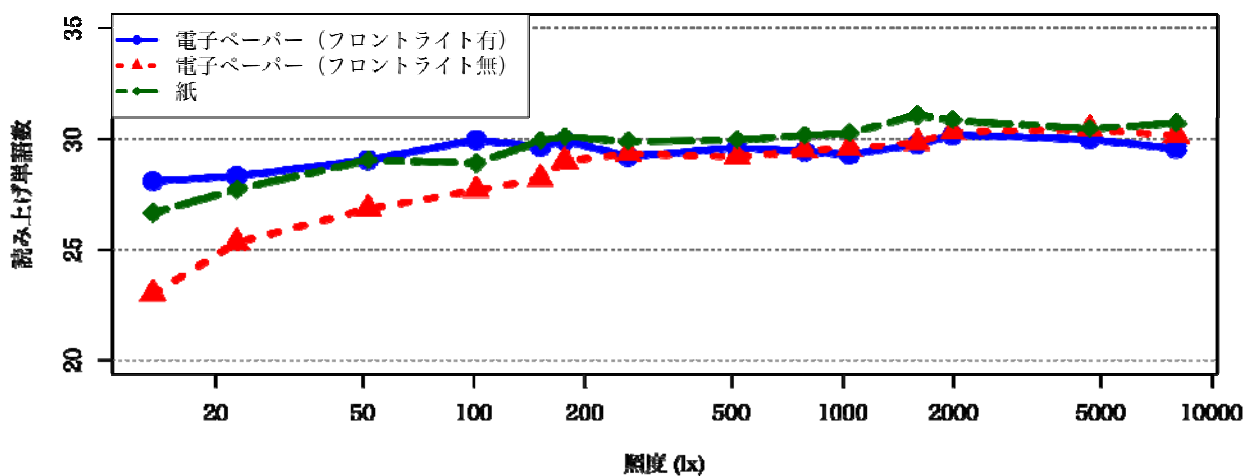


図 5：照度別の読み上げ単語数の結果

5. 考察

電子ペーパー(フロントライト有)の評価は照度が低い条件において電子ペーパー(フロントライト無し)や紙に比べて高いという結果が得られた。これはフロントライトの影響が大きいと考えられる。電子ペーパー(フロントライト有)は照度環境が低い場合でも光源を持つため電子ペーパー(フロントライト無)や紙に比べ輝度コントラストを高く保つことができる。これにより文字の視認性が低下しにくく、文章の可読性も高く保つことができたと考えられる[8]。実験ではフロントライトの設定を最も明るくして行なったため、この効果が顕著になったと考えられる。この設定は使用者が環境によって適切に設定することも可能なので、使用者や使用環境によって変化することも十分考えられる。

また、本実験で使用した機種に限ってみると当初は照度環境が高い場合に Kindle DX より解像度の高い Kindle Paperwhite の評価は同程度か優位になると予想された。しかし、実験では Kindle Paperwhite の評価が Kindle DX の評価を下回る結果となった。照度が 750 lx を超えると Kindle Paperwhite の評価は Kindle DX の評価を下回っている。解像度、コントラスト比は Kindle Paperwhite の方が高いが、フロントライトを実装するために電子ペーパーディスプレイの上にライトガイド(導光板)をもつ[9]。このライトガイドに組み込まれたマイクロプリズムが外光を反射することで解像度が高いにもかかわらず低い評価につながった可能性がある。このマイクロプリズムによる影響については同種の技術を採用した他の端末でも同様の実験を行ない、評価・比較することが必要であると考えられる。

本実験では可読性に対する客観的な指標として視距離の測定を行なった。一般的に、文章が読みにくい場合は表示媒体に顔を近づけることで視距離が短くなると考えられる。結果から特に評価の低い電子ペーパー(フロントライト無)や紙の 10 lx の場合は視距離が短い。また、評価と視距離を比べると 45 cm 程度が読書における快適な視距離であると捉えることもできる。ただし実験ではデバイスを台に固定して行なったため、手に保つ場合や姿勢が自由な場合は別途考慮すべきである。1,000 lx 以上の照度で視距離が長くなったのは、環境照度により眩しいといった不快感により視距離を長くとったためだと考えられる。

また、もう一つの客観的な指標として読み上げタスクによる評価を行なった。200 lx 以下の環境では主観評価や視距離と同様の傾向がみられた。しかし、照度が 300 lx を超えるとどのデバイスでも約 30 個に収束した。このことから視認性のみを考慮するならば 300 lx で十分であると考えられる[10]。それ以降は視認性ではなく読み上げる速度の限界に達し、約 30 個を超えることがなかったと考えられる。

6. まとめ

本研究ではフロントライトを搭載した電子ペーパーの可読性の評価を主な目的とした。比較対象として従来型のフロントライトを持たない電子ペーパー、さらに紙を用いた。

フロントライト搭載の電子ペーパーの利点は、それまでの電子ペーパーディスプレイとは異なり暗い環境でも可読性を保つことができる点だと考えられる。実験の結果より 300 lx 以下の照度において、電子ペーパー(フロントライト有)の評価は電子ペーパー(フロントライト無)の評価を有意に上回った。この結果から、低い照度環境におけるフロントライトの効果は大きいといえる。高い照度環境において評価は逆転したが、10 lx から 10,000 lx まで安定した評価を得ている。フロントライトの明るさは段階的に設定することができ、照度環境に対して適切な設定をすることでより全体で可読性を高めることも期待できる。

また、Visual Analog Scale を用いることで可読性という心理的な要因を定量的に評価することができる可能性を示した。この信憑性に関しては対応する客観的なデータの獲得がさらなる課題であると考えられる。

今後の課題としてディスプレイシステムの違いによる疲労度、作業効率を中心に評価を行なうことを検討している。また、今回の結果を受け、フロントライトの適切な設定を調査することも課題として考えられる。

参考文献

- [1] インプレスビジネスメディア: 電子書籍ビジネス調査報告書 2013
<http://www.impressbm.co.jp/release/2013/06/27>
[accessed June 24, 2014]
- [2] 面谷 信: 電子ペーパーの技術発展と応用動向, 情報管理, Vol.51 No.11, pp. 806-814 (2009)
- [3] 面谷 信: 電子ペーパーの技術の発展と今後の展望, 表面技術, Vol.61 No.7, pp. 2-7 (2010)
- [4] Tatsuya Koizuka, Sano Shunta, Takehito Kojima, Masaru Miyao: Evaluating the Effects of Environmental Illuminance on the Readability of E-books, SID Symposium Digest of Technical Papers, pp. 571-573 (2013)
- [5] Kindle Paperwhite Touch Screen E-Reader with Light, <http://www.amazon.com/Kindle-Paperwhite-Ereader/dp/B00AWH595M> [accessed June 24, 2014]
- [6] Stan Grant, Tom Aitvhisson, Esther Henderson, Jim Christie, Sharam Zare, John McMurray, Henry Dargie: A Comparison of the Reproducibility and the Sensitivity to Change of Visual Analogue Scales, Borg Scales, and Lickert Scales in Normal Subjects During Submaximal Exercise, Chest 116(5), pp. 1208-1217, 1999
- [7] Paul S. Myles, Sally Troedel, Michael Boquest, Mark Reeves: The pain visual analog scale : is it linear or nonlinear?, Anesth analg (1999)

- [8] 窪田 悟: 反射型液晶ディスプレイに求められるメイドとコントラストの条件, テレビジョン学会誌, Vol.50 No.8, pp. 1091-1095 (1996)
- [9] NYTimes.com, How the Kindle Paperwhite works: http://www.nytimes.com/interactive/2012/12/26/technology/light-reading.html?_r=0 [accessed June 24, 2014]
- [10] Der-Song Lee, Kong-King Shieh, Shie-Chang Jeng, I-Hsuan, Shen: Effects of character size and lighting on legibility of electronic papers, Displays 29, pp. 10-17 (2008)
- [11] ISO 9241-304, Ergonomics of human-system interaction - Part 304: User performance test methods for electronic visual displays (2008)
- [12] ISO 9241-303, Ergonomics of human-system interaction - Part 303: Requirements for electronic visual displays



宮尾 克(正会員)

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.

著者紹介



小飯塚 達也(学生会員)

2013 名古屋大学工学部電気電子情報工学科卒業, 同年名古屋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. 主にモバイル機器, 電子ペーパーに関する研究に従事.



石井 佑樹(学生会員)

2010 名古屋大学工学部電気電子・情報工学科入学. 2013 名古屋大学情報科学研究科宮尾研究室に配属され現在に至る. モバイル機器の視認性や可読性の研究に従事.



小嶋 健仁(正会員)

2014 名古屋大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了. 同年 中部学院大学看護リハビリテーション学部助教授, 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.



R. Paul Lege(非会員)

カリフォルニア州立大学ロサンゼルス校人間学部修士課程修了修士号取得. 現在名古屋大学法科大学院准教授. 多言語法律翻訳に関する研究に従事.