原著論文

作業成績と印象評価による電子表示媒体の読みやすさに関する比較研究

堀場 洋輔*, 上條 正義**

* 信州大学繊維学部, ** 信州大学大学院総合工学系研究科

Comparative Study on Readability for Electronic Display Media by Task Performance and Impression Evaluation

Yosuke HORIBA* and Masayoshi KAMIJO**

* Faculty of Textile Science and Technology Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano 386-8567, Japan

** Graduate School of Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano 386-8567, Japan

Abstract : Electronic display devices such as iPad and Kindle have recently attracted considerable attention as, reading media. Although the display performance and, business model concerning the contents have been discussed, there has been little discussion on comfortability, and - kansei like readability. In this paper, we conducted task performance investigation and impression evaluation among electrophoretic displays, liquid crystal displays and paper in order to examine readability for electronic displays, especially electrophoretic displays. In the task performance investigation, the reading speed, error detection rate and comprehension were measured. In the impression evaluation, the impression of the display, reading media and sense of fatigue were examined. As a result of task investigation, it was shown that the electrophoretic display was more comprehensible than that of the liquid crystal display. In the impression evaluation, the following results were obtained; 1) Although the display properties for the electrophoretic display almost passed muster, there was room for improvement in the beauty of the display. 2) The electrophoretic display was easier to read and concentrate on than the liquid crystal display. 3) The electrophoretic display was less likely to cause eyestrain and stiff-neck than other media. Principal component analysis revealed that the synthetic readability for the electrophoretic display was superior to the liquid crystal display, and moreover, the novelty of the electrophoretic display was superior to that of the other media.

Keywords : Readability, Electronic display, Electrophoretic display, Liquid crystal display, Task performance, Impression evaluation

1. はじめに

2010年4月3日に米国で発売されたアップル社のタブレット型コンピュータ iPad は瞬間に世界的なヒット商品となり、発売から3カ月足らずで販売台数が300万台を突破した [1]。iPad の最大の特長は、新聞、雑誌、図書等さまざまな種類の書物を電子書籍として購読できる点にあり、iPad をはじめとする電子表示媒体・電子書籍の台頭により出版業界の産業構造が今後激変することが予想されている。殊にコンテンツを取り巻くビジネスモデルや、ディスプレイ技術を中心とした機能性が注目される電子書籍媒体であるが、翻って読みやすさや楽しさ等の感性的側面については相対的に注目度が低く、十分に検証されているとはいえない。

電子表示媒体の読みやすさについて研究を行なった例として、磯野らは、電子表示媒体(ソニー社製電子書籍媒体:LIBRIe)と文庫本を用い、90分間読書した場合の視覚疲労を比較した [2]。その結果、両者とも読書前に比べて読書中および読書後の視覚疲労に有意な変化は認められず、そのため電子表示媒体が文庫本と同様に目にやさしい表示媒体であると結論している。ただし、媒体が文庫本サイズに限定されており、また、液晶表示方式等の他の電子表示媒体との比較はなく、表示特性や読み速度などの作業効率の評価も行なわれていない。寇らは、電子表示媒体 (LIBRIe) と、コンピューター

ディスプレイ2種類 (CRT, LCD)、さらに紙媒体を用いての比較実験を行ない、その結果、電子表示媒体に比べ紙媒体の総合的な快適度、疲労度、読み速度、文章理解度において、その優位性が認められたことを報告している [3]。ただし、提示条件が媒体によって異なることや、実験が比較的短時間 (30分間) であったため、媒体による影響や長時間使用した際の快適性については検証が不十分である。小清水らは、電子ペーパーに求められる形態の特性を検討するために、重さ、厚さ、硬さの異なるモックアップ媒体を用い、作業成績の調査や印象評価を行なった [4]。その結果、適度な剛性と厚さが読みやすさには重要であることを明らかにした。ただし、使用したモックアップ媒体には表示機能がないため、実際の電子表示媒体との整合性については明らかにされていない。岡野らは、呈示条件・媒体重量・表示面積が読みやすさに与える影響について実験を行なった [5]。その結果、ある臨界重量以下の媒体であれば、媒体を手持ちにすることで読みやすさは向上すること、読書行為における読みやすさと画面サイズの関係は書式 (文字間隔, 行間隔) に依存することが明らかになった。ただし、検証した画面サイズは最大でも B6 サイズであり、それ以上のサイズ (紙媒体で現在主流となっている A4 サイズ等) については明らかになっていない。また、いずれの先行研究においても、調査結果と媒体の表示特性との関係について十分な考察が行なわれていない。

以上の背景を踏まえ、本研究では、紙媒体において現在主流であるA4サイズの電子表示媒体を用いて、60分間使用した際の読みやすさについて、ユーザの作業成績と印象評価に基づき従来の紙媒体と比較することにより、電子表示媒体の読みやすさにおける特徴と課題を明らかにする。なお、電子表示媒体については表示方式として、反射型表示方式と発光型表示方式が存在するため、前者ではバックライト型液晶方式、後者では電気泳動方式を用い、特に電気泳動式表示媒体を中心に表示方式の違いが読みやすさに及ぼす影響についても検討を行なった。

2. 実験方法

表示媒体の違いが読みやすさに与える影響を明らかにするために、3種類の表示媒体を用いて60分間の読書および誤字検出作業を実施し、作業成績の調査ならびに印象評価を行なった。

2.1 被験者

被験者は19～25歳（平均21.7±1.4歳）の健常な大学生50名（男女各25名）である。被験者の視力は裸眼または矯正で平均1.0±0.4であり、また、被験者全員が電気泳動式表示媒体を使用するのは初めてであった。

2.2 表示媒体 [6]

本実験では、表示媒体として電子表示媒体2種類（電気泳動式、液晶式）と紙媒体を用いた。いずれの表示媒体も、画面（印刷）サイズはA4判（210mm×297mm）である。以下に各媒体の特徴を述べる。

(1) 電気泳動式表示媒体

電気泳動式表示媒体は、電圧の印加により帯電粒子が電極間を移動する性質を利用して文字や画像の表示を行なう媒体であり、高コントラスト、低消費電力、視野角度差による色相変化が少ないことが特長として挙げられる。アマゾン社製キンドルが、本方式の代表的端末である。本実験では、セイコーエプソン株式会社により試作された電気泳動式モノクロ表示媒体を用いた。

(2) 液晶式表示媒体

液晶式表示媒体は、電圧の印加により液晶分子の配向が変化し、光の透過率が増減する性質を利用した表示媒体であり、液晶の背後に配置された光源（バックライト）により文字や画像の表示を行なっている。電気泳動式に比べ彩度が高く、暗い室内でも見やすいことが特長として挙げられ、iPadも本方式の表示端末である。本実験では、セイコーエプソン社製カラーノートパソコン（Endeavor NJ1000）をバックライト型液晶式表示媒体として用いた。なお、実験ではディスプレイ部とキーボード部を分離し、ディスプレイ部のみを使用した。

(3) 紙媒体

本実験では、A4用紙（エプソン スーパーファイン紙：型番KA4100SFR）を紙媒体として用い、印字はセイコー

エプソン社製インクジェットプリンタ（PX-5600）を使用して行なった。

以上の3種類の媒体の表示特性を表1に示す。なお、白／黒レベルは、作業成績ならびに印象評価と同一条件の、ブラインドにより外光が遮断された白色蛍光灯下（白色蛍光灯と媒体との距離：190cm）で、トプコン社製輝度計BM-8により計測した。なお、紙媒体では照明に起因する映り込みが存在しなかったのに対し、電子表示媒体では電気泳動式・液晶式ともに照明に起因する映り込みが表示面上に存在した。

2.3 コンテンツ

被験者に提示するコンテンツには、科学技術白書[7]（平成16、19、20年版の3年分）を用いた。いずれのコンテンツも1ページ当たり40文字×35行で表示した場合、30ページ分の分量があり、これらを横書き・11ptで各媒体に表示（紙媒体は印刷）した。フォントタイプは、MS明朝等の他のフォントに比べ、文字の太さ及び割り付け条件が豊富であったAdobe小塚明朝とした。本実験では被験者へ誤字検出課題を課すため、1ページ当たり0～3個の誤字が含まれるようにコンテンツの一部を改変した。なお、コンテンツに含まれる誤字は、漢字の誤用（例：「目的」→「目敵」と、送り仮名の重複（例：「近づいていく」→「近づづいていく」）の2種類とした。実験では、コンテンツの影響を避けるために、媒体とコンテンツの組み合わせは被験者ごとに変更した。図1にコンテンツとして用いた平成16年版科学技術白書の一部を示す。

2.4 方法

机上に水平置きにされた表示媒体の前に被験者を着座させ、媒体に表示されたコンテンツの内容把握および誤字検出

表1 各媒体の表示特性

媒体	電気泳動式	液晶式	紙
画面サイズ	210mm×297mm (A4サイズ)		
白/黒レベル [cd/m ²]	50.3 /12.9	173.5 /7.4	94.3 /13.0
コントラスト比	4 : 1	23 : 1	7 : 1
解像度 [dpi]	385	117	600
リフレッシュレート [Hz]	-	63Hz	-
フォントタイプ	Adobe小塚明朝		
フォントサイズ	11pt		
ページ送り方式	ページ切替ボタン	マウス	手動

契約書等の紙文書に署名、押印がある場合には、当該文書が本人の意思に基づいて作成されたものであることが推定されるが、電子署名を紙文書における署名、押印と同等の効果を有するものにするためには、法律等による裏付けが必要である。

平成13年4月から施行された「電子署名及び認証業務に関する法律」により、本人による一定の要件を満たした電子署名がされた電子文書は、人の意思に基づき作成されたものと推定されるようになった。つまり署名、捺印された文書と同等に通用するための法的基盤が整備された。

図1 コンテンツの例（平成16年版科学技術白書から抜粋）

を行なわせ、誤字を検出した際には直ちに口頭で申告するよう指示した。実験中、被験者には自由な着座姿勢を取らせ、表示媒体と目の距離についても統制は行なわなかった。ただし、表示媒体は常に水平置きとした。ページ送りについては、電気泳動式表示媒体では表示面付近に設置したページ送りボタンで、液晶式表示媒体ではワイヤレスマウスで、紙媒体では手捲りでそれぞれ行なわせた。実験開始から15分経過後、黙読を一時中断させ、内容理解度および読みやすさに関する印象を紙面にて調査した。調査終了後、中断した箇所から黙読を再開させ、以後15分毎(30分、45分、60分)に同様の調査を実施した。また、誤字検出作業については、誤字を検出した際には検出箇所を直ちに口頭で申告するよう教唆した。

実験は被験者全員が全ての表示媒体を評価する被験者内計画とし、被験者への負担を考慮して、1日に被験者へ提示する表示媒体の数は1媒体のみとした。また、順序効果を避けるために、表示媒体の提示順序は被験者ごとに変更した。実験環境はブラインドにより外光が遮断された白色蛍光灯下とし、机上照度は $402.8 \pm 9.9lx$ であった。

2.5 調査項目

各表示媒体の読みやすさを客観的・主観的側面から明らかにするために、ユーザの作業成績の調査と評定尺度法による印象評価を行なった。

2.5.1 作業成績の調査

作業成績の調査では、読みやすさを反映すると考えられる内容理解度、作業効率、集中度の客観的指標として、各媒体で内容理解度、読み速度、誤字検出率の計測を行なった。

(1) 内容理解度

被験者が内容をどの程度理解しているか明らかにするために、実験開始から15分ごとに内容に関する質問を口頭で3問出題し、その正答率から式(1)により内容理解度を算出した。質問は正誤を明確にするため、内容の真偽を問う2択問題とした。例えば、図1の内容に関する質問では、「電子署名された電子文書が、署名・捺印された文章と同等に通用するための法的基盤はまだ整備されていない。○か?×か?」とした。また、偶然の正解を避けるために真偽が不明な場合は「わからない」と申告させ、その問題は不正解とした。全3問の質問および解答に要した時間は全ての被験者で1分以内であった。

$$\text{内容理解度} = \frac{\text{正答数}}{3 \text{ (出題数)}} \quad (1)$$

(2) 読み速度

作業効率の指標として、読み速度(1分間に読んだ文字数)を計測した。読み速度の計測に当たっては、ページ捲り時刻を記録し、ページごとの所要時間から式(2)により算出した。

$$\text{読み速度} = \frac{1 \text{ 頁当たりの文字数}}{1 \text{ 頁当たりの所要時間 (分)}} \quad (2)$$

(3) 誤字検出率

被験者の集中度を調べるため、コンテンツに含まれる誤字の検出数を記録し、式(3)により誤字検出率を求めた。

$$\text{誤字検出率} = \frac{15 \text{ 分間で読み終えた範囲での誤字検出数}}{15 \text{ 分間で読み終えた範囲に含まれる誤字数}} \quad (3)$$

2.5.2 印象評価

印象評価では評定尺度法を用い、各表示媒体の読みやすさを被験者に評価させた。本実験では寇らの研究[3]を参考にし、読みやすさを反映すると思われる印象として、(1)表示特性に関する印象、(2)読書媒体としての印象、(3)目の疲労感・不快感、(4)目を除く全身の疲労感・不快感を、実験開始から15分ごとに7段階の評定尺度法により調査した。評定項目を表2に示す。なお、表2の各項目に対する評定尺度は、7段階尺度(1:全く同意できない、2:同意できない、3:やや同意できない、4:どちらでもない、5:やや同意できる、6:同意できる、7:非常に同意できる)とした。

表2 印象評価に用いた評定項目

(1) 表示特性に関する印象
文字の解像度は良い
文字が精細である
文字の大きさは適当である
表示面が暗過ぎない
表示面が眩し過ぎない
表示面のちらつきはない
表示面に映り込みがない
表示面の文字色と背景色のコントラストは適切である
表示面は全体的に美しい
(2) 読書媒体としての印象
読書媒体として読みやすい
読書媒体として集中しやすい
読書媒体として美しい
読書媒体としての楽しさを感じる
読書媒体としての親近感を感じる
読書媒体としての新奇性を感じる
読書した後にリフレッシュされた
読書媒体として適切である
この媒体で読書したい(読書媒体として需要がある)
(3) 目の疲労感・不快感
眼の痙攣がない
涙目にならない
目が疲れない
目がチカチカしない(閃輝暗点がない)
目が痛くない
目が火照らない
(4) 目を除く全身の疲労感・不快感
頭が重く感じない(頭重感がない)
首が痛くない
肩が凝らない
眠くならない
気分が悪くならない

3. 結 果

3.1 作 業 成 績

図2に各表示媒体における作業成績の推移を示す。作業成績の各項目について、表示媒体（電気泳動式表示媒体、液晶式表示媒体、紙媒体）と使用時間（15, 30, 45, 60分）を要因とする二元配置分散分析を行なった。その結果、表示媒体の主効果が認められた項目は内容理解度のみであった。多重比較の結果、液晶式表示媒体に比べ、電気泳動式表示媒体の内容理解度が有意に高いことが確認された（ $p<.05$ ）。表示媒体と使用時間の交互作用が見られなかったことから、使用時間に関わらず電気泳動式表示媒体の方が液晶式表示媒体に比べ内容理解度が高いことが示唆された。

読み速度、誤字検出率については、表示媒体間で有意な差は認められなかった。なお、誤字検出率については使用時間の主効果が認められたため、表示媒体を問わず使用時間の増加に伴い誤字検出率が低下することが示唆された。また、読み速度は、表示媒体を問わず時間的変化は見られなかった。

図2 作業成績の推移（平均値±標準偏差）

3.2 印 象 評 価

3.2.1 表示特性に対する印象

図3に各表示媒体の表示特性に対する印象評価結果の推移を示す。表示特性に対する印象評価結果を作業成績と同様に、表示特性に対する印象の各項目について、表示媒体（電気泳動式表示媒体、液晶式表示媒体、紙媒体）と使用時間（15, 30, 45, 60分）を要因とする二元配置分散分析を行なった。その結果、全項目において表示媒体の主効果が認められた。この中で、「文字の解像度は良い・文字が精細である」、「表示面にちらつきがない・映り込みがない・コントラストが適切である」については、紙媒体>電気泳動式表示媒体>液晶式表示媒体の順で印象が良い（適切と感じている）ことが確認された（ $p<.05$ ）。なお、「表示面の映り込みがない」については、紙媒体の評点が4以上であるのに対し、電子表示媒体はいずれも4未満であったことから、紙媒体では表示面の映り込みを知覚していなかったのに対して、電子表示媒体では表示面の映り込みを知覚していたことが示唆される。「表示面が暗過ぎない」については、いずれの表示媒体も評点が4以上あったことから表示面が暗過ぎるという印象はなかったものと考えられる。「表示面が眩し過ぎない」については、いずれの表示媒体も評点が4以上となっており、表示面が眩し過ぎるという評価は見られなかった。なお、液晶式表示媒体が4～5の評点であったのに対し、電気泳動式表示媒体は紙媒体と同様に5～6の評点であったことから、電気泳動式表示媒体は紙媒体と同様に眩しさが気にならない媒体であることが示唆された。「表示面は美しい」については、電気泳動式表示媒体において評点が4未満であったことから、他の媒体に比べ表示面の美しさが不足していることが示唆された。また、使用時間の主効果は「表示面にちらつきがない」を除き認められなかったため、これらの印象については使用時間と無関係であることが示唆された。「表示面にちらつきがない」については、使用開始15分には比べ使用開始45・60分における評点が有意に低下することが確認されたが（ $p<.05$ ）、いずれの媒体・使用時間においても評点が4以上であったことから、60分間を通して表示面のちらつきはあまり感じられなかったことが示唆される。

3.2.2 読書媒体としての印象

図4に各表示媒体の読書媒体としての印象評価結果の推移を示す。読書媒体としての各表示媒体の印象に関する各項目について、表示特性に関する印象と同様に、表示媒体（電気泳動式表示媒体、液晶式表示媒体、紙媒体）と使用時間（15, 30, 45, 60分）を要因とする二元配置分散分析を行なった。その結果、読書媒体としての印象に関する全項目において、表示媒体の主効果が認められた。この中で、「読書媒体としての読みやすい・読書媒体として集中しやすい」については、液晶式表示媒体の評点が30分以降の使用時間において4未満であったのに対し、電気泳動式表示媒体は5前後の評点であったことから、電気泳動式表示媒体は紙媒体には劣るものの読書媒体として読みやすく、集中しやすい表示媒体であることが示唆された。「読書媒体としての親近感を感じる」では、液

(a) 文字の解像度は良い

(b) 文字が精細である

(c) 文字の大きさが適当である

(d) 表示面が暗過ぎない

(e) 表示面が眩し過ぎない

(f) 表示面のちらつきがない

(g) 表示面に映り込みがない

(h) コントラストが適切である

(i) 表示面が美しい

図3 各媒体の表示特性に関する印象 (平均値±標準偏差)

晶式表示媒体の評点が3前後（やや同意できない）であったのに対して、電気泳動式表示媒体は4をわずかに上回る評点であった。したがって、電子表示媒体は読書媒体として親近感のある紙媒体と親近感のない液晶式表示媒体の中間に位置づけられていることが示唆された。「読書媒体としての美しい」については、電子表示媒体に比べ紙媒体の評点が有意に高く、電子表示媒体間で有意差は見られなかった。紙媒体の評点が中程度の同意である4.5前後であるのに対し、電子表示媒体では中立の評価を意味する4前後であったことから、「表示面は美しい」と同様に、読書媒体としても紙媒体に比べ美しさが不足していることが示唆された。「読書媒体として楽しさを感じる」については、紙媒体と液晶式表示媒体の評点が4未満であるのに対し、電気泳動式表示媒体は4以上の評点であることから、他の媒体に比べ電気泳動式表示媒体は読書媒体としての楽しさを感じられたことが示唆された。「読書後にリフレッシュされた」については、いずれの媒体においても評点が4未満であったため、媒体を問わず使用後にリフレッシュ感は少なかったと考えられる。「読書媒体として新奇性を感じる」については、紙媒体が否定を意味する2前後の評点であるのに対し、いずれの電子表示媒体においても評点が4以上であったこ

とから、電子表示媒体は新たな読書媒体として捉えられていることが明らかになった。「読書媒体として適切である・この媒体で読書したい」については、液晶式表示媒体の評点が否定を意味する4未満であったのに対し、電気泳動式表示媒体は紙媒体と同様に4以上の評点であったことから、電気泳動式表示媒体は読書媒体として及第であることが示唆された。また、使用時間の主効果は「読書媒体として集中しやすい」を除き認められなかったため、これらの印象については使用時間と無関係であることが示唆された。「読書媒体として集中しやすい」については使用時間の影響が見られ、使用開始15分比使用開始45・60分の評点が有意に低いことが認められた($p<0.05$)。ただし、液晶式表示媒体が使用時間30分以降で否定を意味する4未満の評点であったのに対し、電気泳動式表示媒体は紙媒体と同様に使用時間30分以降においても同意を意味する4以上の評点であったことから、使用時間に関わらず読書媒体として集中しやすいことが示唆された。

3.2.3 目の疲労感・不快感

図5に各表示媒体を使用した際の目の疲労感・不快感に関する印象評価結果の推移を示す。各表示媒体を使用した際の

図5 各媒体を使用した際の目の疲労感・不快感（平均値±標準偏差）

(a) 頭が重く感じない

(b) 首が痛くない

(c) 肩が凝らない

(d) 眠くならない

(e) 気分が悪くならない

図6 各媒体を使用した際の目を除く全身の疲労感・不快感(平均値±標準偏差)

目の疲労感・不快感に関する各項目について、表示媒体（電気泳動式表示媒体、液晶式表示媒体、紙媒体）と使用時間（15、30、45、60分）を要因とする二元配置分散分析を行なった。その結果、目の疲労感・不快感に関する全項目において、表示媒体の主効果が認められた。ただし、この中で4以下の評点を含む項目は「目が疲れない」のみであったため、「目の痙攣、涙目、閃輝暗点、目の痛み、目の火照り」については、いずれの媒体においても自覚症状が少なかったことが示唆される。「目が疲れない」については、液晶式表示媒体が使用時間30分以降において評点が4未満になったのに対し、電気泳動式表示媒体は60分間を通して評点が4以上であったことから、目が疲れにくい表示媒体であることが確認された。さらに、紙媒体に比べても有意に高い評点であったことから、紙媒体よりも目が疲れにくいことが示唆された。また、「目が疲れない」においては使用時間の主効果があり（ $p<.05$ ）、使用開始15分に比べ使用開始45・60分の評点が有意に低い傾向が見られたが、電気泳動式表示媒体は紙媒体と同様に使用時間45・60分においても4以上の評点であることから、60分程度の使用では目の疲れが少ないことが示唆される。

3.2.4 目を除く全身の疲労感・不快感

図6に各表示媒体を使用した際の目を除く全身の疲労感・不快感に関する印象評価結果の推移を示す。各表示媒体を使用した際の目を除く全身の疲労感・不快感に関する各項目について、表示媒体（電気泳動式表示媒体、液晶式表示媒体、紙媒体）と使用時間（15、30、45、60分）を要因とする二元配置分散分析を行なった。その結果、「眠くならない」を除く各項目において、表示媒体の主効果が確認された。ただし、この中で4以下の評点を含む項目は「肩が凝らない」のみであったため、「頭の重さ、首の痛み、気分の悪さ」については、いずれの媒体においても自覚症状が少なかったことが示唆される。「肩が凝らない」については、電気泳動式表示媒体＞紙媒体＞液晶式表示媒体の順で自覚症状が軽い傾向が見られ（ $p<.05$ ）、液晶式表示媒体においては使用開始60分において4未満の評価であったのに対し、電気泳動式表示媒体においては4以上の評点であったことから、電気泳動式表示媒体は比較的、肩の凝りにくい媒体であることが示唆された。一般に肩凝りは長時間の姿勢保持に伴う筋肉疲労によって引き起こされることが知られているが、映り込み等の

表示特性の違いが作業姿勢に影響を及ぼし、結果的に電気泳動式表示媒体と液晶式表示媒体で肩凝りの程度が異なる結果になったと考えられる。また、「肩が凝らない」については使用時間の主効果も認められ ($p<.01$)、使用開始15分・30分に比べ使用開始45・60分の評点が有意に低いことが明らかになった。ただし、電気泳動式表示媒体においては60分間を通して4以上の評点であったことから、60分間程度の使用においては肩凝りの自覚症状が少ないことが示唆された。

3.3 評価結果の主成分分析

各表示媒体の特徴を総合的に評価するために、作業成績および印象評価結果を主成分分析により分析した。ただし、作業成績と印象評価では評点の単位が異なるため、各説明変数を基準化(平均値0, 標準偏差1)した後で主成分分析を行った。分析の結果、固有値が1.0以上の主成分が4つ抽出され、第1主成分と第2主成分で累積寄与率が7割を超えたため、上位2つの主成分を採用した(表3)。第1主成分は、ほぼ全ての項目の主成分負荷量が正となっていることから、「表示媒体の総合的な読みやすさ」と解釈できる。すなわち、第1主成分得点が大きければ、読みやすい表示媒体となり、逆に小さければ読みにくい表示媒体になると考えられる。第2主成分については、「読書媒体としての新奇性」の主成分負荷量の絶対値が最大となっていることから、「読書媒体としての新奇性」と解釈できる。つまり、第2主成分得点が低ければ読書媒体として新奇性に富んだ斬新な印象になり、逆に高ければ新奇性の乏しい従来の読書媒体としての印象を与えると考えられる。

抽出された2つの主成分を用いて主成分得点を算出し、各表示媒体の特徴を調査した(図7)。各主成分得点に対して、媒体と使用時間を要因とした二元配置分散分析を行なったところ、読みやすさの総合評価を意味する第1主成分においては、媒体、使用時間それぞれの主効果が認められた ($p<.01$)。多重比較の結果、紙媒体>電気泳動式表示媒体>液晶式表示媒体の順で第1主成分得点が有意に高いことが確認された ($p<.05$)。また、使用時間が45分を経過するまでは時間とともに、第1主成分得点が低下することが確認された ($p<.05$)。したがって、媒体によって読みやすさに違いがあり、相対的に紙媒体は最も読みやすい媒体であり、液晶式表示媒体は逆に最も読みにくい媒体と解釈でき、電気泳動式表示媒体は上述の2媒体の中間の読みやすさであると推測される。また、媒体を問わず使用時間とともに読みやすさが低下することも示唆された。読書媒体としての新奇性を意味する第2主成分においては、分散分析の結果、媒体の主効果が認められ、多重比較の結果、紙媒体>液晶式表示媒体>電気泳動式表示媒体の順で第2主成分得点が有意に高いことが確認された ($p<.05$)。したがって、相対的に電気泳動式表示媒体は最も新奇性に富んだ読書媒体として位置付けられ、紙媒体は逆に最も新奇性の乏しい従来の読書媒体として捉えられていると考えられる。また、統計的有意差は認められなかったものの、いずれの媒体においても時間経過と共に第2主成分得点が増

表3 主成分分析結果(主成分負荷量)

評価項目	第1主成分 「読みやすさの 総合評価」	第2主成分 「読書媒体としての 新奇性」
画面がちらつかない	0.944	0.147
読書媒体としての適切さ	0.938	0.196
集中しやすい	0.934	0.106
読みやすい	0.929	0.171
表示面が眩し過ぎない	0.885	-0.057
文字の解像度	0.879	0.272
涙目	0.876	0.033
目の痛みがない	0.860	-0.226
まぶたの痙攣がない	0.849	-0.191
コントラストの適切さ	0.834	0.478
読書媒体としての親近感	0.829	0.327
目が疲れない	0.817	-0.461
不快感がない	0.773	-0.370
首が痛くない	0.772	-0.358
文字の精細さ	0.760	0.592
閃輝暗点がない	0.745	-0.611
肩の凝りが無い	0.736	-0.538
この媒体で読書したい	0.727	-0.132
目の火照りが無い	0.706	-0.290
映り込みがない	0.697	0.679
頭重感がない	0.692	-0.495
文字の大きさ	0.671	0.332
表示面が暗過ぎない	0.597	0.761
読書媒体としての楽しさ	0.553	-0.683
読書媒体としての美しさ	0.522	0.622
リフレッシュ感	0.485	-0.454
眠くならない	0.458	-0.382
内容理解度	0.417	-0.470
誤字検出率	0.357	-0.440
表示面の美しさ	0.306	0.734
読み速度	0.025	0.372
読書媒体としての新奇性	-0.330	-0.874
固有値	16.535	6.652
寄与率	0.517	0.208
累積寄与率	0.517	0.725

図7 各媒体の主成分得点の分布
(図中の時間は使用時間を表している)

加する傾向が見られたことから、読書媒体としての新奇性は時間経過と共に失われていくことが示唆された。

3.4 考 察

3.4.1 作 業 成 績

作業成績の調査の結果、「内容理解度」について電子表示媒体間で有意な差が認められた。これは3.3で示したように、電気泳動式表示媒体と液晶式表示媒体において読みやすさが異なっていたことがその理由として推測される。特に、電気泳動式表示媒体では、「表示面のコントラスト、読書媒体としての集中のしやすさ」が液晶式表示媒体に比べ優れていたこと、さらに、「目の疲れ、肩の凝り」に対する自覚症状が比較的少なかったことが、読みやすさにつながっていたと考えられる。また、先行研究と比較すると、冠ら [3] は、統制条件下では各媒体での「読み速度」はほぼ等しく、「文章理解テストの正解率」は電子表示方式の違いによる影響がないと報告しているが、本研究では「読み速度」については先行研究と同じく媒体間で差がないものの、「内容理解度」については電子表示方式の違いによる影響が認められた。また、Izawa [8] らは、誤字検出率と読み速度が反比例の関係にあることを指摘しているが、本研究では媒体間で読み速度に差が認められなかったため、両者の関係を判断することはできなかった。媒体の呈示条件（水平置き・立て掛け）、画面サイズ、媒体の表示特性等において先行研究と本研究では違いがあるため、差異の原因について言及することはできないが、立て掛け呈示に比べ水平置き呈示の方がページ送り等の操作性の点で現実的であることや、大画面化にともなう重量増加により水平置きでの使用が見込まれることから、本研究の結果は、今後の電子表示媒体の商品展開における電気泳動式表示媒体の優位性を確認する上で有意義なものと思われる。

3.4.2 表示特性に対する印象

表示特性に関する印象評価では、各項目において表示媒体の主効果が確認された。これらの印象は主に各媒体の表示特性に起因するものと考えられる。「文字の解像度は良い・文字が精細である」については、表1より表示媒体の解像度の違いが印象評価へ反映されたと推測される。なお、いずれの印象においても電気泳動式表示媒体は5以上の評点であったことから、解像度と精細さにおいては十分であることが示唆される。「表示面のちらつきはない」については、表示媒体のリフレッシュレート（垂直走査周波数）との関連が考えられる。ビデオ機器の業界標準化団体であるVESA [9] によると、ちらつきを抑えるためには70Hz以上のリフレッシュレートが推奨されているが、液晶式表示媒体として今回用いた機器はリフレッシュレートが低かったため、表示面のちらつきは感じなかったものの、他の媒体に比べ評点が低かったと推測される。一方、電気泳動式表示媒体については構造上、画面の走査は行なわれないため、表示面のちらつきは液晶式表示媒体に比べ少なかったと考えられる。「表示面の映り込

みがない」については、紙媒体に比べ表示面の反射率が大きい電子表示媒体は、周辺の照明等の影響（反射グレア）を受けやすいことから [10]、紙媒体に比べ電子表示媒体の映り込みの程度が大きかったことが推測され、映り込みの抑制が今後の課題であることが示唆された。「表示面が眩し過ぎない」については、表1に示したようにバックライトを有する液晶式表示媒体の白色輝度（白レベル）が他の媒体に比べ著しく高かったことが、評点が有意に低かった原因として考えられる。また、「表示面が暗過ぎない」においては、液晶式表示媒体は5程度の評点であり、表示面が暗過ぎる印象はなかったことから、白レベルを若干低下させることで液晶式表示媒体の表示面に関する印象を改善できる可能性が示唆される。翻って、電気泳動式表示媒体では「表示面が眩し過ぎない」において紙媒体と同程度の評点であり、「表示面が暗過ぎない」においても4.5以上の評点であったことから、表示面の明るさに関しては及第であることが示唆された。「表示面のコントラストが適切である」については、電気泳動式表示媒体の評点が5程度であったことから、紙媒体には劣るものの、コントラストが適切であったことが示唆される。また、コントラスト比が最も高い液晶式表示媒体で最も低い評価となったが、文字の印象を左右する解像度が液晶式表示媒体は最低であり、そのことが文字と背景面のコントラストに対する印象へ影響していたこと等が理由として考えられる。「表示面は美しい」においては、電気泳動式表示媒体の評点が唯一4を下回る結果となり、表示面の美しさが電気泳動式表示媒体における今後の課題であることが明らかになった。電子表示媒体の場合、表示面の光沢（映り込み）が美しさに関係することが久武らにより報告されていることから [11]、本研究においても媒体間での光沢の差異が評価に影響したものと推測される。したがって、表示面に美しさを付与するためには、表示面の光沢処理（グレア化）が有効であることが示唆されるが、表示面の光沢と眼精疲労の関係についても報告されていることから [12]、慎重な検討が必要である。

3.4.3 読書媒体としての印象

読書媒体としての印象評価から、「読書媒体として読みやすい・集中しやすい・適切である・この媒体で読書したい」については、電気泳動式表示媒体の評価が紙媒体と同程度であったことから、読書媒体として紙媒体と遜色がないことが示唆された。また、「読書媒体として新奇性を感じる・楽しさを感じる」に関して、電気泳動式表示媒体が高評価であったことについては、被験者が電気泳動式表示媒体を初めて使用したことによる影響に加え、液晶式表示媒体に代表される従来の電子表示媒体と異なり、低輝度、高解像度、ちらつきの少なさなど、比較的紙媒体に近い表示特性を電気泳動式表示媒体が有しており、疲労感・不快感がさほど高くなかった点も要因として推測される。したがって、電子表示媒体の読書媒体としての適性を考えた場合、今回の結果からはA4サイズよりも小さい表示サイズで行なった先行研究 [3] の結果と同様に、電気泳動式表示媒体が紙媒体に代わる新たな読

書媒体となり得る可能性が示唆された。ただし、読書媒体としての美しさについては改良の余地があると考えられる。

3.4.4 疲労感・不快感

これまでに報告されているVDT作業に関する先行研究では、VDT作業における眼の疲労感・不快感の原因として、「画面の輝度、文字の見やすさ、映り込み・グレアの有無、画面と眼の距離、視線の方向、作業時間」等が指摘されており[13-16]、本研究においても、今回の媒体の中で最も低輝度で、文字の見やすさや、表示面の映り込みに関する評価が液晶式表示媒体に比べ比較的良好であった電気泳動式表示媒体で目の疲れに関する自覚症状が少なかったことを考慮すると、先行研究に一致した結果であったと考えられる。一方、肩凝りなど眼精疲労以外のVDT作業における疲労感・不快感については、マウス・キーボード等の入力機器や、椅子・机等のオフィス家具の影響が知られているが[17, 18]、本研究ではページ捲りの際に使用する入力機器を除き、作業環境を統制して実験を行っていたため、これらが媒体間で疲労感・不快感が異なった原因とは考えにくい。それよりも、本実験で用いた媒体の表示特性、ならびに表示特性に関する印象評価結果を踏まえると、表示面の映り込みの影響が強いと考えられる。つまり、他の媒体と異なり肩の凝りに関する自覚症状が見られた液晶式表示媒体では、照明等の映り込みの程度が大きいため、被験者は読みやすい位置に視点を調整する必要がある。このため、被験者の意思に反して読書中の姿勢が制限され、首・肩等に負担が掛かり、これらの部位の疲労感が増大したことが推測される。翻って、液晶式表示媒体に比べ表示面の映り込みの程度が小さい電気泳動式表示媒体では、姿勢の制約は比較的少なく、適度な姿勢変化が可能であったため、肩の凝りに関する自覚症状が相対的に低かったものと推測される。これについては、実験後に行なった被験者へのインタビューにおいても同様の回答が得られており、眼精疲労も含め、表示面の映り込みは疲労感・不快感において重要な因子であることが示唆された。

4. おわりに

本論文では、新たな読書媒体として近年注目されている電子表示媒体（特に電気泳動式表示媒体）の読みやすさについて、その特徴と課題を明らかにするために、A4サイズの電気泳動式表示媒体、液晶式表示媒体を用いて、読み速度、内容理解度等の作業成績の調査と、見やすさ、疲労感等の印象評価を60分間行ない、従来の読書媒体である紙媒体と比較した。その結果、内容理解度、読書媒体としての印象、目の疲れ、肩の凝り等の項目において、液晶式表示媒体に対する電気泳動式表示媒体の優位性が確認された。また、表示特性に関する印象等においては及ばないものの、疲労感や読書媒体としての印象においては紙媒体と遜色のないことも示唆された。ただし、表示面の美しさについては、媒体の中で最低の評価であったことから、この点が今後の商品開発における課題であることが明らかになった。

以上の結果を踏まえ、今後は心理物理学の実験により読みやすさと電子媒体の表示特性との関係をさらに詳細に調査する予定である。

謝 辞

本研究の推進に際して御協力を頂いたセイコーエプソン株式会社 児玉良幸氏、小山文夫氏、田島薫雄氏、ならびに本学卒業生の岩村紗希さんに心より御礼申し上げます。

参 考 文 献

- [1] アップルジャパン株式会社：米国報道発表資料抄訳—2010年6月23日，
<http://www.apple.com/jp/news/2010/june/22ipad.html>
- [2] 磯野春雄，高橋茂寿，滝口雄介，山口千彦：電子ペーパーと文庫本で読書した場合の視覚疲労の測定，電子情報通信学会技術研究報告，EID2004-79，pp.9-12，2005.
- [3] 寇冰冰，椎名健：読書における異なる表示媒体に関する比較研究，図書館情報メディア研究，4，pp.1-18，2006.
- [4] 小清水実，津田大介，馬場和夫：電子ペーパーに求められる形態的特性の研究，映像情報メディア学会技術報告，25，pp.19-24，2001.
- [5] 岡野翔，面谷信：読みやすい電子ペーパーの具備すべき条件の検討—媒体呈示条件，媒体重量，表示面サイズが読みやすさに及ぼす影響の評価，日本印刷学会誌，43，pp.356-363，2006.
- [6] 日本画像学会編 面谷信監修：電子ペーパー，東京電機大学出版局，pp.10-74，2008.
- [7] 文部科学省：科学技術白書，
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/hakusho.htm
- [8] E. Izawa, M. Omodani: Difference in performance between paper and display used for proofing, Proc. IDW/AD 2005, pp.847-850, 2005.
- [9] VESA (Video Electronics Standards Association):
<http://www.vesa.org/>
- [10] 窪田悟：液晶ディスプレイの反射特性と反射グレアの関係，照明学会誌，79，pp.226-233，1995.
- [11] 久武雄三，渡辺直子，上原伸一，平和樹，小池崇文，中野義彦：表面処理及び照度の違いによるグレアとブルーの許容性評価，映像情報メディア学会技術報告，33，pp.21-23，2009.
- [12] 高橋誠：液晶ディスプレイの反射グレア低減による視覚疲労軽減効果，労働科学，75，pp.373-381，1999.
- [13] 相澤好治，巽洋，高田昂：VDT作業者の自覚症状と影響因子の検討，日本の眼科，60，pp.792-798，1989.
- [14] Knave BG., Wibom RI., Voss M., Hedström LD, & Bergqvist UO: Work with video display terminals among office employees. II. Physical exposure factors, Scand J

Work Environ Health, 11, pp.467-474, 1985.

- [15] Bergqvist UO., Knave BG.: Eye discomfort and work with visual display terminals. II. Physical exposure factors, Scand J Work Environ Health, 20, pp.27-33, 1994.
- [16] 岩切一幸, 毛利一平, 外山みどり, 堀口かおり, 落合孝則, 城内博, 齊藤進: VDT作業者の身体的疲労感に影響する諸因子の検討, 産業衛生学雑誌, 46, pp.201-212, 2004.
- [17] Karlqvist LK., Bernmark E., Ekenvall L., Hagberg M., Isaksson A., & Rostö T.: Computer mouse position as a determinant of posture, muscular load and perceived exertion., Scand J Work Environ Health, 24, pp.62-73, 1998.
- [18] Laursen B., Jensen BR., Garde AH., & Jorgensen AH.: Effect of mental and physical demands on muscular activity during the use of a computer mouse and a keyboard., Scand J Work Environ Health, 28, pp.215-221, 2002.

堀場 洋輔 (正会員)

1999年 信州大学大学院工学系研究科博士前期課程修了。2001年 信州大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。2002年 信州大学繊維学部感性工学科助手。2006年 同大学助教, 現在に至る。主に感性評価の研究に従事。

博士 (工学)。日本感性工学会, 繊維学会, 日本繊維製品消費科学会, 日本繊維機械学会, 日本衣服学会 各会会員。

上條 正義 (正会員)

1987年 信州大学繊維学部繊維工学科卒業。1989年 信州大学大学院繊維学研究科修士課程修了。1990年 東京理科大学諏訪短期大学生産管理工学科助手。1996年 信州大学繊維学部感性工学科助手。2001年 同大, 助教授。

2005年 信州大学大学院総合工学系研究科助教授。2009年 同大, 教授, 現在に至る。博士 (工学)。感性計測の研究に従事。IEEE, 繊維学会, 自動車技術会, 照明学会, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 人間工学会 各会会員。