

電子ペーパーの技術動向

北 村 孝 司

Recent Progress on Electronic Paper

Takashi KITAMURA

With the increasing importance of reading electronic documents, expectations are high that, as a means of doing so, a new electronic paper can be developed that is as convenient as conventional hard copy paper and can enable access to digital information. At present, a great deal of fundamental and applied research is being carried out on various methods for producing electronic paper, including microcapsule-type electrophoretic display, toner display based on the movement of fine particles, twisting ball display, polymer dispersed liquid crystal and liquid crystal/organic photoconductor double layered electronic paper.

Key words: electronic paper, microcapsule, electrophoresis, toner display

人間がストレスを受けずに快適で豊かな社会生活を実現するために、人間と情報のスムーズなインターフェイス環境を実現するユビキタス社会の到来が期待されている。なかでも、人にやさしく、いつでもどこでも情報のやり取りが可能なコミュニケーションツールの開発が望まれている。現在の情報ネットワーク社会では、文書、新聞、本、音楽、写真など多くの情報が電子化され、電子配信されるようになってきた。例えば、コンピューターを用いて作成した電子文書はネットワークを通じて電子配布された後、受け手はCRTや液晶ディスプレイのモニターで表示して確認するか、あるいはプリンターでハードコピーを作成して内容を確認することが行われる。しかし、現在のモニターは、解像度が低いいため細かい文書を読むには不向きであり、表示装置が固定であるため長時間にわたり文書を読み続けることができない。また、ハードコピーは人にやさしいメディアであり、読んだり書いたりすることが不都合なく行われ、長い時間読み書きしても疲れず、軽いため持ち運びが便利であり保存も容易である。しかし、文書を書き換えることができないため多くの情報を記録して表示する

には多量の紙を必要とし、持ち運びや保存に多くの場所を必要としている。また、情報の検索が難しいことも指摘されている。さらに最近では、資源や環境負荷の問題が指摘されるようになった。そこで、従来の紙メディアの利便性と電子ディスプレイの情報書き換え機能を兼ね備えた電子ペーパーの研究開発と実現が要望されている¹⁾。

1. 電子ペーパーのコンセプト^{2,3)}

最近、デジタル情報の表示を行うメディアで、紙の特徴と書き換え可能な機能を兼ね備えたものを総称する言葉として、デジタルペーパーが使われるようになった。ここでは、すこし範囲を広げて、はじめにデジタルペーパーとしての解説を行うことにする。デジタルペーパーは、紙メディアに書き換え機能をもたせた電子ペーパーや、電子ディスプレイを軽く薄くし、柔軟性をもたせたフレキシブルディスプレイ（ペーパーライクディスプレイともいわれる）などを包含する言葉として定義される。電子ペーパーには、紙の形態をもち、何度も書き換え可能なメディアで、おもにヒートモード記録により書き込みおよび

消去が行われるもの（特にリライタブルペーパーともいう）や、外部の電気エネルギーにより文字や画像を表示する薄膜表示メディアで、保存にエネルギーを必要としないものがある。一方、フレキシブルディスプレイは、液晶や有機エレクトロルミネセンス（EL）などの表示デバイスを薄膜化したものである。図1は、デバイスや装置のハンドリング性と情報の書き換え機能を軸として、現在実用されている情報表示メディアとデジタルペーパーの技術領域の位置を示してある。看板、ポスターは設置場所が固定され表示内容も固定されているので、図中の左下に位置づけられる。CRTや液晶モニターに代表される電子ディスプレイは、文字、静止画および動画を表示して見ることができ、内容の書き換えが容易であるため、大量の情報表示が可能であることが大きな特徴である。しかし、表示の解像度が低いことや画面サイズが固定されるため、大量の文書を読むことには適していない。また、発光型であり、周囲の照明に関係なく表示されるので、長時間作業では眼が疲労するなどの欠点を有する。そして、電子ディスプレイの設置場所は固定であるため、図中では左上に位置づけられる。ネットワークやコンピューターに接続されたプリンターにより出力された紙メディアは、解像度が高くコントラストが高いため読みやすい。また、持ち運びが自由で保存が容易であるが、情報の書き換えができない欠点を有するので、図中右下に位置づけられる。紙のように持ち運びが容易で、表示する内容を自由に書き換えることができる表示媒体であるデジタルペーパーは、図中の右上に位置づけられる。そして、研究開発の方向として、電子ディスプレイを軽く薄くしたフレキシブルディスプレイと、紙メディアに書き換え機能をもたせた電子ペーパーとの2つの研究アプローチがある。

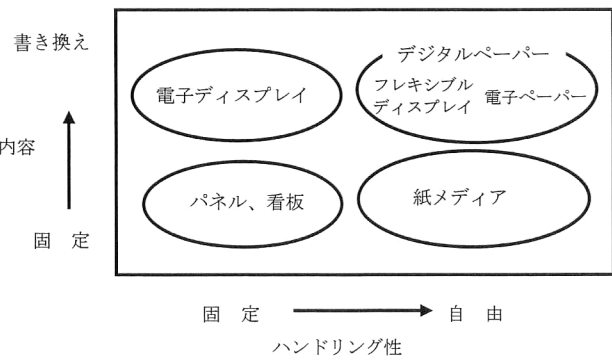


図1 情報表示メディアの位置づけ。

げられる⁴⁾。

- (1) 好きなときに、好きな場所で読めること
薄膜軽量、フレキシブル、無電力で長時間表示を保持できる
- (2) 文字や画像の書き換えが可能である
- (3) 読みやすいこと
コントラストや反射率にすぐれ、紙のように視認性がよいこと
人間の目にやさしい—表示面からの目への刺激が少ない

2. 電子ペーパーの分類と表示形態

現在、デジタルペーパーとして研究されている技術を表1に示す。物理的あるいは化学的な現象を組み合わせ表示が行われている⁵⁾。

電子ペーパーには、図2に示すような2つの形態が考えられる。

- (1) 表示・記録装置分離型：書き換え可能な表示層と基紙から構成されるリライタブルペーパーと記録消去用プリンターの組み合わせ。紙メディアのような取り扱いが可

表1 電子ペーパーの分類。

	書き換え		デバイス	動作エネルギー
物理的	分子	光学異方性 分子配向	コレステリック液晶/光導電層積層 カイラルネマチック液晶 2色性染料/液晶複合 高分子分散液晶	電圧 電圧 電圧, 熱 電圧
	粒子	粒子移動 粒子回転 光散乱	マイクロカプセル電気泳動 液体トナー電気泳動 空気中粒子移動 液晶中粒子移動 ツイストボール 透明白濁型リライタブル	電圧 電圧 電圧 電圧 電圧 熱
化学的・ 電気化学的	分子	化学反応 光吸収	ロイコ染料発消色リライタブル フォトクロミック	熱 光
	イオン	電解析出	銀/固体電解質	イオン

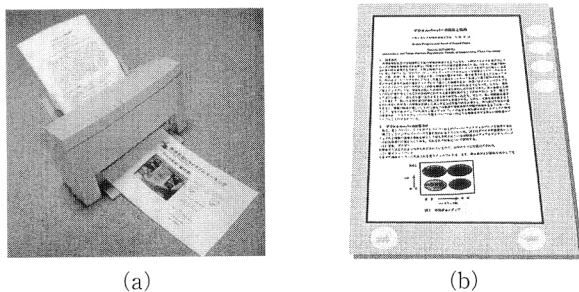


図2 電子ペーパーの形態。(a)表示・記録装置分離型，(b)表示・記録部一体型。

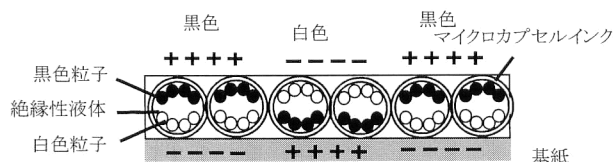


図3 マイクロカプセル型電気泳動方式。

能である。記録消去には、サーマルヘッド、イオンフロー、ピン電極、液晶パネルなどが用いられる。

(2) 表示・記録部一体型：表示層と制御基盤薄膜を一体化した薄膜ディスプレイ。ボタン操作によりページめくりなどが自由にでき、さらにコンピューターやネットワークからの情報を出し入れできる機能を有する。

3. 電子ペーパーの各方式

3.1 マイクロカプセル型の電気泳動方式⁶⁻⁸⁾

絶縁性液体中の帯電粒子の泳動を利用したもので、図3に示すように、透明なマイクロカプセル内に絶縁性液体と黒色および白色微粒子を入れ、電圧を印加することにより、粒子を上下に電気泳動させて黒と白からなる画像を表示するものである。黒色粒子および白色粒子には、それぞれ酸化チタンおよびカーボンブラックの微粒子を用い、絶縁性液体中で互いに逆極性の電荷をもち安定に分散している。このマイクロカプセルをITO電極つきのフィルム上に、シリコン樹脂をバインダーとして塗布する。金属電極に電圧パターンを印加すると、黒色粒子はマイクロカプセルの上部へ移動し、画像や文字を描くことができる。そして、全面に負電荷を与えると、白色粒子はマイクロカプセルの上部へ移動するので表面が白色となり、画像の消去が行われる。この2粒子タイプでは、粒子の着色を利用しているので、高いコントラストを実現することが可能である。また、カラーフィルターを利用したカラー表示の研究が行われ、4096色の表示が可能である⁹⁾。マイクロカプセル型電気泳動方式は、内包粒子の凝集と沈殿の問題をカプセル化により解決したすぐれた方式である。しかし、現在

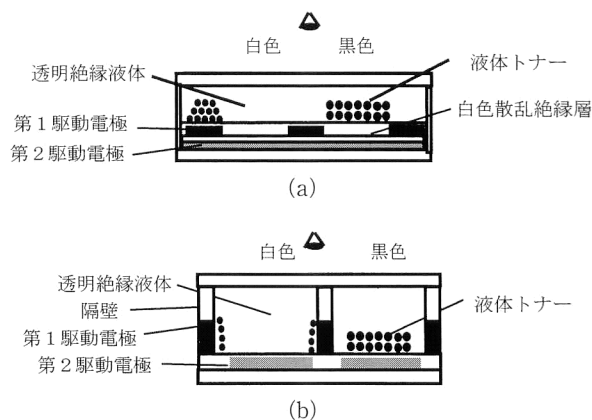


図4 表面電極型電気泳動方式。(a)従来型，(b)隔壁電極型。

でも、液体中での粒子の泳動速度が遅いため表示応答性が悪いことと、泳動に閾値がなく外部電圧制御に工夫が必要であることが課題である。

3.2 表面電極型の電気泳動方式^{10,11)}

電子写真用液体トナーを表面に設置した電極間で移動させることにより表示を行う方式が報告されている。図4(a)に示すように、基板上に第2駆動電極を設置し、その上に白色の光散乱層を塗布する。その上に、細い第1駆動電極を設置し、さらにその上に透明絶縁層を塗布した表面駆動電極シートと対向電極で構成するセル中に液体トナーを入れる。液体トナーは、イソパラフィン系透明絶縁性液体に粒子径 $1.5\mu\text{m}$ の顔料微粒子を分散させたもので、トナーは正電荷をもっている。いま、第1駆動電極に負極性の電圧を印加したとき、トナーは細い電極上に引きつけられる。次に、第1駆動電極を正極性に印加したとき、トナーは第1駆動電極間に付着するために、上部から見ると黒く見える。このように電圧の極性を変化させることにより、白と黒の表示を行うことができる。さらに、駆動電圧低下および画素間の電界干渉を防ぐために、電極を隔壁内に設置した隔壁型電気泳動ディスプレイが報告され(図4(b))、アクティブマトリクス駆動による16階調の表示が可能であることを示した。本方式では、液体中の黒粒子のみの移動により黒白表示するため画像表示の制御が容易である点に特徴を有している。しかし、同時に、電気泳動方式共通の課題である粒子の凝集や沈殿をどのように解決するかが課題と考えられる。

3.3 ツイストボール方式^{12,13)}

米国ゼロックス社と3M社は共同で、ツイストボール方式の電子ペーパーを研究開発している。図5に示すように、半球ごとに白と黒に塗り分けられた球形微粒子の向きを電界により制御して、白と黒からなる画像を表示する方式である。2色粒子は、シリコン樹脂をバインダーとして

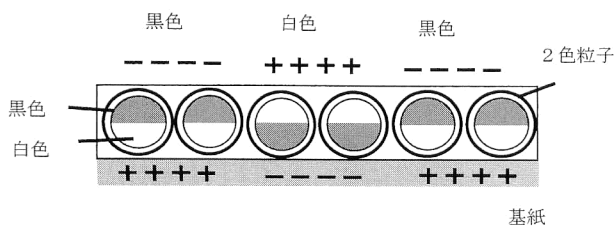


図5 ツイストボール方式.

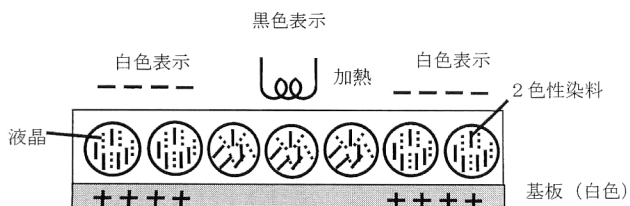


図6 2色性染料/液晶複合方式.

フィルム状に塗布してある。粒子の周りにキャビティーが形成され、特定の液体で満たされている。粒子表面の白側は負、黒側は正の2色間で異なる電荷が出現し、双極子が形成される。このシートの表面に負電荷パターンを与えると、粒子が回転して黒半球が上に向き、シートの表面に正電荷を与えると、白半球が上に向くので画像を表示できる。2色に塗り分けた微粒子の作製が難しく高解像度化が困難である点や、すべての粒子をそろって回転させることなどの課題がある。

3.4 2色性染料/液晶複合方式^{14,15)}

図6に示すように、メモリー性をもつスメクチックA液晶に2色性染料を混入したゲスト・ホスト型で、液晶に電圧を加えて液晶分子の配列を変化させ、同時に染料の吸収を変化させる方式である。ITO透明電極に、液晶、2色性染料と樹脂の混合物を厚さ6 μm に塗布してある。はじめは染料がランダムな方向を向いているため、黒色を示すが、イオンフロー記録により画像を書き込むと、液晶分子とともに染料が配向して白色画像の記録が行われる。次にこの媒体を液晶の相転移温度以上の60 $^{\circ}\text{C}$ 以上に加熱すると、染料の配向が乱れてもとの黒色状態に戻り、画像の消去が可能である。また、このプロセスとは逆に、はじめにコロナ帯電により白色状態にしておき、サーマルヘッドによる熱書き込みによる画像形成も行われている。本方式では、紙メディアと同じ取り扱いが可能であることに特徴を有する。課題としては、コントラストの向上、特に白色反射率の向上があげられる。

3.5 空気中粒子移動型トナー方式¹⁶⁻¹⁸⁾

3.5.1 粒子移動型

図7(a)に、1粒子移動型トナーディスプレイセルの断面図を示す。透明電極上に電荷輸送層を塗布した2枚の電

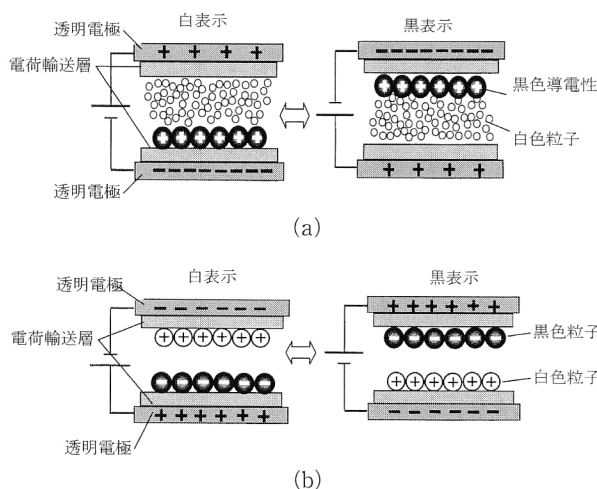


図7 トナー方式。(a) 1粒子移動型、(b) 2粒子移動型。

極で挟んだ空間に、黒の導電性トナーおよび白色粒子を入れてある。表示原理は、まず下部電極に正の電圧を印加すると電荷輸送層から正の電荷が注入され、導電性トナーは電気的に正に帯電して、クーロン引力により上部電極に向かって白色粒子の塊の中を電界移動する。上部の電荷輸送層表面に達した導電性トナー粒子は、電荷輸送層を挟んで、上部電極電荷とのクーロン力で保持される。正電荷をもつトナーは、電荷輸送層を誘電体としてクーロン力によって付着保持されるので、電源を切っても長時間保持できる。次に上部電極の極性を切り替えて正に印加すると、前述の動作が逆に起こり、導電性トナーは下部電極に向かって電界移動を始める。その結果、トナーは白色粒子層の中に潜り込み、表面から見ると白色が表示される。この動作を繰り返すことにより、白と黒の表示を行うことができる。

3.5.2 2粒子移動型

図7(b)に、2粒子移動型トナーディスプレイの構造を示す。黒色粒子は負に、白色粒子は正に摩擦帯電しているため、電極に電圧を印加すると黒色粒子は正電極側へ、白色粒子は負電極側へ移動する。したがって、セルを正電極側から観察すると黒表示となり、負電極側から観察すると白表示となってみえる。

この2粒子移動型トナーディスプレイを試作し、1粒子移動型と性能を比較した。黒色粒子には導電性トナー、白色粒子には無水シリカを用いて、これらの混合重量比を5:4とした。電荷輸送層2 μm を塗布したITO透明電極を用いてギャップ500 μm のサンドイッチセルを作製し、その空間に2粒子を封入した。白色粒子としてフッ化炭素を用いた1粒子移動型トナーディスプレイと、無水シリカを用いた2粒子移動型トナーディスプレイの反射濃度-印加電圧特性を図8に示す。無水シリカを用いた2粒子移動

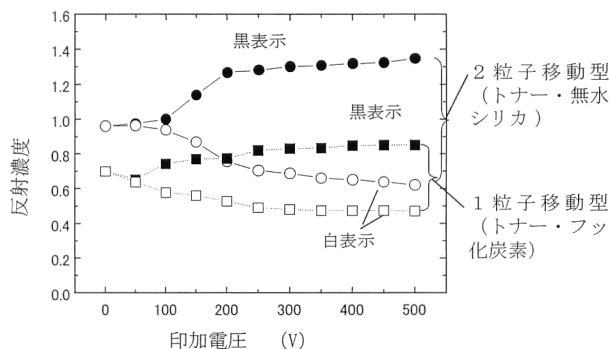


図8 1粒子および2粒子移動型トナー方式の反射濃度と印加電圧の関係。

型トナーディスプレイでは、反射濃度差が約0.73と大きく向上したことがわかる。なお、反射濃度とは印刷物などの記録画像を対象とした光学濃度で、反射率の逆数の常用対数で定義され、数値が高くなるほど反射率が減少する。

次に、粒子の帯電量について検討した。粒子の帯電量が小さいと、電界中で粒子が移動するのに必要な力が弱くなり、表示ができなくなる。また、帯電量が大きすぎると白色粒子と黒色粒子がクーロン力で強く付着するため、電圧印加による両者の分離ができなくなり、やはり表示ができない。サンドイッチ型表示セルを作製し、十分に動作させた後セルを開くと、正電極表面には無水シリカが、負電極表面には導電性トナーが付着している。これらの各粒子の帯電量を吸引式トナー帯電測定装置 (q/m METER) で測定した結果、黒色粒子は $-2.73 \mu\text{C/g}$ 、無水シリカは $+3.39 \mu\text{C/g}$ の帯電量であった。この帯電量は、通常の乾式トナーに比べて約1桁小さい値である。このため、互いに付着している白粒子と黒粒子を分離することができる。さらに、外部電圧印加時の画素表示の応答時間は約1 msであり、液体中を粒子が移動する電気泳動方式に比較して応答性が高いことがわかる。

2粒子移動型で絶縁性トナーを用いた、摩擦帯電型トナーディスプレイが報告されている^{19,20}。トナーの移動には閾値が存在することを示し、パッシブマトリクス表示が可能なことを示している。また、カラーに着色した電極を用いることによりカラー表示が可能な、新しい駆動方式が報告されている²¹。さらに、高い流動性を示す電気粉流体の電界移動を利用した電子ペーパーが報告されている²²。本方式の特徴としては、高いコントラストと長時間の画像保持および閾値の存在があげられる。現在、外部電圧が数百Vと高いことが問題であり、電圧低減が課題である。

3.6 エレクトロデポジション方式²³⁾

対向する電極間に白色固体高分子電解質と金属イオンを封入し、電気化学的に電極上に金属イオンを電析および溶

解させることにより画像の書き換えを行う。高分子電解質は、マトリクス材料としてポリエーテル誘導体、金属塩としてAgXを使用した。高分子電解質中に酸化チタンを分散させることにより、背景を白色にすることができる。白色反射率が73%、コントラスト20:1、応答時間100 ms、電圧5 V以下である。本方式は、白色反射率やコントラストが高く、紙メディアの読みやすさを実現している点が大きな特徴である。そして、画像保持時間が短いこととイオンの移動が遅いため、表示応答性が低いことが課題としてあげられる。

21世紀のネットワーク時代には、紙と同様な柔軟性をもつリライタブルペーパーと、ファイルサイズで持ち運びが自由な電子ペーパーを束ねた電子ノートの出現が期待されている。リライタブルペーパーは紙とほぼ同じ質感をもち、プリンターで何回も書き換えが可能である。現在のハードコピーと同じスタイルで用いることができるので、利用者に受け入れられやすい。また、電子ペーパーを束ねた電子ノートは、デジタルデータとのアクセスが可能であり、またメモリーにより情報を蓄積しておくことが可能である。このように多くの利用が考えられ、電子ペーパーの実現が期待される。

文 献

- 1) 北村孝司：“デジタルイメージング概論”，日本画像学会第5回NIP技術講習会“デジタルイメージング技術の基礎から応用まで”(2000) pp. 1-11.
- 2) 塩田玲樹：“デジタルペーパー”，日本画像学会技術研究会予稿集(1998) pp. 26-30.
- 3) 面谷 信：“デジタルペーパーのコンセプトとシナリオ”，日本画像学会2000年度リライタブル・エレクトロニックイメージング研究会予稿集(2000) pp. 35-44.
- 4) 有澤 宏：“デジタルペーパー”，日本画像学会2001年度シンポジウム(2001) pp. 35-40.
- 5) 北村孝司：“電子ペーパーの概要とトナーディスプレイ”，高分子学会2000-4印刷・情報記録・表示研究会予稿集(2000) pp. 1-4.
- 6) B. Comiskey, J. D. Albert, H. Yoshizawa and J. Jacobson: “An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays,” *Nature*, **394** (16) (1998) 253-255.
- 7) 吉澤秀和：“電場応答型マイクロカプセル化インクの創製”，高分子学会2000-4印刷・情報記録・表示研究会予稿集(2000) pp. 5-6.
- 8) 川居秀幸：“電気泳動ディスプレイ技術とデジタルペーパーへの応用”，日本画像学会第1回フロンティアセミナー予稿集(2002) pp. 79-86.
- 9) 壇上英利：“E-Ink電子ペーパー技術と事業ロードマップについて”，日本画像学会第1回フロンティアセミナー予稿集(2002) pp. 29-42.
- 10) 貴志悦郎：“In-Plane型電気泳動ディスプレイの開発”，日本画像学会2000年度リライタブル・エレクトロニックイメージング研究会予稿集(2000) p. 11.

- 11) 石毛剛一, 松田陽次郎, 小川晶子, 郷田達人, 浮ヶ谷信貴, 中西正浩, 池田 勉, 貴志悦郎, 松田 宏: “In-Plane 型電気泳動ディスプレイ”, 高分子学会印刷情報記録表示委員会講座予稿集 (2003) pp. 48-51.
- 12) N. K. Sheridan: “The Gyricon as an electric paper medium,” *Pan-Pacific Imaging Conference/Japan Hardcopy '98* (The Imaging Society of Japan, 1998) p. 83.
- 13) 津田大介: “デジタルペーパー Gyricon”, 日本画像学会 1999 年度第 2 回技術研究会予稿集 (1999) p. 12.
- 14) 関根啓子, 馬場 淳, 斉藤 律: “液晶/高分子複合膜を用いたリライタブル媒体”, 日本画像学会 Japan Hardcopy 99 (1999) p. 221.
- 15) 吉川宏和, 面谷 信, 高橋恭介: “ゲスト・ホスト型液晶の表面駆動によるデジタルペーパーの検討”, 日本画像学会 Japan Hardcopy 99 (1999) p. 245.
- 16) 趙 国来, 菅原勝彦, 星野勝義, 北村孝司: “新しいトナーディスプレイ (1)”, 日本画像学会 Japan Hardcopy 99 (1999) p. 249.
- 17) 趙 国来, 星野勝義, 北村孝司: “電界中における粒子移動を利用した反射型電子ディスプレイ (1) 表示原理と表示特性”, 日本画像学会誌, **39** (2000) 408-413.
- 18) G.-R. Jo, K. Hoshino and T. Kitamura: “Toner display based on particle movements,” *Chem. Mater.*, **14** (2002) 664-669.
- 19) 重廣 清, 山口善郎, 町田義則, 酒巻元彦, 松永 健: “絶縁性粒子を用いた摩擦帯電型トナーディスプレイ”, 日本画像学会 Japan Hardcopy 2001 (2001) pp. 135-138.
- 20) 町田義則, 山口善郎, 松永 健, 酒巻元彦, 諏訪部恭史, 重廣清: “絶縁性トナーを用いた摩擦帯電型トナーディスプレイの表示特性”, 日本画像学会 Japan Hardcopy 2001 Fall (2001) pp. 48-51.
- 21) 町田義則, 諏訪部恭史, 山口善郎, 酒巻元彦, 松永 健, 重廣清: “トナーディスプレイ技術における新しいカラー表示方法”, 日本画像学会 Japan Hardcopy 2003 (2003) pp. 103-106.
- 22) R. Hattori, S. Yamada, Y. Masuda and N. Nihei: “Novel type of bistable reflective display using quick response liquid powder,” *The Society for Information Display 03 Digest* (2003) pp. 846-849.
- 23) 高橋賢一: “エレクトロデポジションディスプレイの開発”, 日本画像学会第 1 回フロンティアセミナー (2002) pp. 73-78.

(2003 年 7 月 10 日受理)