小特集 薄型ディスプレイを革新する印刷作製技術

3. 電子ペーパーディスプレイの印刷製造技術

檀 上 英 利[†]

キーワード ■ 電子ペーパー、ディスプレイ、電気泳動方式、デジタルサイネージ

1 ま え が き

印刷技術は、文字や画像などの視覚情報を大量かつ安価に複製する技術である。一方、印刷技術を材料の加工手段としてとらえると、「製膜とパターンニングを同時に行う技術」としてとらえることができる。このため、印刷技術は、従来のフォトリソグラフィにかわる低コストの加工技術として期待でき、最近注目を集めている¹⁾。

電子ディスプレイの製造において、高精細印刷技術はパターンニングに活用されるが、電気泳動方式の電子ペーパーディスプレイの場合、表示部材としての前面板²⁾にはパターンが存在しないが、表示材料のマイクロカプセルを単層で均一に塗工する技術が必要である。

一方、高解像度が要求され、現在はガラス基板にフォトリソグラフィで形成されるのが主流であるTFT (Thin Film Transistor: 薄膜トランジスタ) アレイを代替する技術として、有機トランジスタの製造に印刷技術は使えと期待されている。

実際、通常の印刷に用いられる印刷インキには、有機顔料や樹脂が多く含まれており、また、有機トランジスタや有機ELディスプレイなどにおいて、有機デバイスとしての機能を発現する構成要素は、印刷インキと同様の有機物である。したがって、有機デバイスを印刷技術で作製できないか、と考えるのは当然であるが、両者はまったく異なる分野の技術であり、まだその融合は始まったばかりである。ここでは高精細印刷技術のディスプレイ分野への適用可能性を議論するための一助として、既存の印刷技術について概説するとともに、有機トランジスタへの適用例を紹介する。

またこれらの適用分野として有望視される電子ペーパー関連の最近のトピックスとして、大面積化・高精細化・カラー化・高速化の動向を紹介する。

2 印刷技術³⁾と機能性インキへの対応

既存の印刷技術は、凸版印刷、凹版印刷、平版印刷、孔版印刷、と無版印刷の五つに大別される(図1)。これらは版の形状や求められるインキの特性などがすべて異なる。

それぞれの印刷方式で得られる解像度、得られる膜厚、そして加工速度を示す(表1)。なお、これらはあくまでも一般論であり、さらなる高精細化の検討が現在も進められている。

それぞれの印刷方法には適用可能なインキ粘度の範囲があり、このためパターンニングしたい溶液の粘度に合わせて適切な方法を選択する必要がある。オフセット、スクリーンは高粘度、フレキソ、グラビアは中粘度、そしてインクジェットは低粘度溶液のパターンニングに適している(図2)。

通常の印刷インキは、色材、樹脂、溶媒、添加剤の四つから構成される。このうち、樹脂は基材上に色材を固定するだけでなく、インキに適当な流動性を与える機能も有する。添加剤はインキの流動性の調整や消泡など印刷適性向上のために用いられる。

プロセス側からは、何らかの樹脂や添加剤を加える、あるいは、機能性材料だけで通常のインキ同様に取り扱える

図1 既存の印刷技術

表1 印刷方式の特性比較

	Resolution	Thickness	Speed
Offset	>50μm	>4μm	90~300m/min
Gravure	>50μm	>30μm	90~300m/min
Flexo	>75μm	>10μm	90~300m/min
Screen	>100μm	>125μm	120m/min

[†] 凸版印刷株式会社 メディア事業開発本部

"Electronic Paper Displays and Printing Techniques" by Hidetoshi "Heeday" Danjo (Media Business Development, Toppa Printing Co., Ltd., Tokyo)

図2 印刷方式と粘度

ことを求める。一方、材料側からは、インキには余計なものはいらずに、プロセス側でその材料を使いこなすことを要求することが求められることも想定される。したがって、現実的には材料、プロセスの双方からの歩み寄りが必要である。

3 有機トランジスタ¹⁾

有機トランジスタは、半導体材料を含めた構成要素に有機物を用いたトランジスタであり、比較的低温の溶液プロセスでの作製が可能である。したがって、プラスチックフィルムや紙を基板として用いることが可能であり、さらに、印刷プロセスで加工できれば大量かつ安価に製造できるため、これまでの真空プロセス主体の半導体製造とは異なる、新たな技術分野の開拓が期待できる。

現在研究されている有機トランジスタの多くは電界効果トランジスタであり、半導体層、ゲート絶縁膜、ソース・ドレイン電極、そしてゲート電極の4層の積層構造からなる(図3)。

ここで、半導体層とゲート絶縁膜は薄くサブミクロンレベルにすることが望ましく、ソース・ドレイン電極間の距離(チャンネル長)は正確に規定されることが必要で、ゲート電極はチャンネル(ソース・ドレイン電極間)から外れてはいけない。

半導体材料はペンタセンに代表されるような低分子有機

半導体とポリチオフェンなどの高分子有機半導体に大別される。これらのうち、高分子有機半導体は溶媒に可溶であり、溶液プロセスで製膜・パターンニングを行うことができる。最近では、単にトランジスタを動作させるだけでなく、電子ペーパーを動作させた報告も多い^{4) 5)}。有機半導体よりも電子移動度の高い酸化物半導体によるTFTアレイ⁶⁾を室温プロセスで作製し、電子ペーパーを動作させた例もあり、ソース・ドレイン電極を銀ペーストで作るなど、印刷技術の適用によるコストダウンが指向されている。

これまで発表された「プリンタブル」有機トランジスタはすべてが有機物である例は少なく、トランジスタを構成する半導体、電極、ゲート絶縁膜のいずれかについてのみ有機物を用いたものが多い。「プリンタブル」といっても実際はスピコートのようなロールツーロール方式とは相性の悪いプロセスを用いており、それ以外は真空蒸着やフォトリソグラフィで加工している例が多い。

4 マイクロカプセル型電気泳動方式電子ペーパー

電子ペーパーの分野で商用化が進んでいる、マイクロカプセル型電気泳動方式の表示原理を説明する(図4)。直径40 μm 程度の透明なマイクロカプセルの中に、マイナスに帯電した黒い顔料粒子とプラスに帯電した白い顔料粒子が透明なオイル状の分散媒に封じてあり、マイクロカプセルは、樹脂基材に均一に単層コーティングされている。

樹脂基材には、ITO(インジウムスズ酸化物)の透明電極面がスパッタリングで形成されており、画素電極との間で電界を発生させることで、電気泳動現象により帯電粒子が上下移動して描画を行う。白い粒子が上に集まったマイクロカプセルを上から見ると白く見え、逆の電界が掛かると黒く見える。グレースケール表示は、パルス幅変調や電圧変調などによって実現する。表示解像度は、画素電極の細かさによって決まり、マイクロカプセルの大きさや輪郭には、基本的には影響されない。

樹脂基材・透明電極・マイクロカプセルの層構成からなる、表示用のフィルム部材を前面板と呼ぶ。高解像度の電子ペーパーディスプレイのセルは、前面板を反射型LCD(液晶ディスプレイ)用と似たTFTアレイ基板にラミネートし

図3 薄膜トランジスタの構造

図4 マイクロカプセル型電気泳動方式電子ペーパーの表示原理

図5 電子ペーパーディスプレイのセル化

て製造する(図5)。既存のLCD製造インフラを活用して比較的低いリスクで製造が可能で、低コスト化が期待できる。

5 電子ペーパー関連の最近のトピックス

電子ペーパーの分野で2008年現在、大きな話題を呼んでいるのが、2007年秋に米国で発売された無線通信型の電子ブックリーダー⁷⁾である(図6)。表示の仕様は、画面サイズ6インチ、解像度600×800画素、約167ppi、4階調グレースケールで、これは2004年に日本で発売された、世界初の電気泳動方式電子ペーパー搭載の商品⁸⁾と大差はない。

異なるのはコンテンツと使い勝手である。書籍、新聞、雑誌などが執筆時点で15万点、と日本での試みの約30倍、米国の他製品⁹⁾の約3倍の品揃えである。第三世代携帯電話網の無線通信(EVDO)をユーザは無料で使うことができ、「圏外」でなければ、パソコンなしに、その場で1分以内に電子的に本を購入できる。これは「紙のような表示」に留まらず、デリバリーの利便性では、紙の本を超えていると言える。

この電子ブックリーダーを開発したオンライン書店は、過去にあらゆる言語で印刷されたすべての本を60秒以内に買えるようにする、という長期ビジョンを発表している¹⁰⁾。

電子書籍以外の分野でも、電気泳動方式電子ペーパーを主画面に採用したBRICs諸国向け携帯電話¹¹⁾(図7)はミリオ

図6 米国の無線通信型電子ブックリーダー

ンセラーとなり、国内でも、電子ペーパーを装飾的に使った機種¹²⁾に続き、薄型・耐衝撃性能・常時表示といった機能面からサブディスプレイに採用した¹³⁾二機種目¹⁴⁾が発表され、電子ペーパーも普及期の萌芽を見せ始めている。

5.1 大面積化

執筆時点では、商用化されている電子ペーパーでは6インチが最も量産されているサイズだが、A5サイズに近い9.7インチまで発表¹⁵⁾されている。サンプル出荷されている方式では、A3サイズ¹⁶⁾まで存在する。

学会の展示では、2007年のSID(Society for Information Display)で、韓国のLCDメーカーが、14インチを超えるフレキシブルカラー電子ペーパーの試作物や40インチの試作物を展示した¹⁷⁾。後者は液晶テレビ用のガラス基板TFTアレイを利用したと考えられる。

また筆者のグループでは、額縁を0.5mmまで狭くしてタイル化を可能にした直接駆動方式の電子ペーパーディスプレイ

図7 電子ペーパーを主画面に採用したBRICs諸国向け携帯電話

イを、大型表示用途向けに開発しており、仙台市交通局と情報・広告配信の共同実証実験を地下鉄仙台駅で実施している(図8)。これは縦5×横4の20枚のタイルで72インチとしたもので、冷却ファンから入る鉄粉などにより、LCDやプラズマディスプレイが設置しづらい地下鉄線路脇に設置している¹⁸⁾。

消費電力が、表示部で画面更新時のみ4W、制御部で8W、小型PCおよび通信部で9Wと、合計最大21Wと小さいため、容易に密閉構造して、鉄粉対策を施すことが可能であった。白黒表示のみで、1画素が4mm角(解像度は約6ppi)と、離れて見るのが前提であるが、可変表示が少ない地下鉄では、駅利用者の注目率は70%前後と高く、情報を15秒毎に切替えて提供することで、蛍光灯で内側から照らす従来の固定表示の内照式看板に比べて、注目率は20ポイント以上、と大幅に上昇した¹⁹⁾。

5.2 高精細化

電気泳動方式の電子ペーパーでは、解像度400ppi前後の試作が、シリコンチップ²⁰⁾やプラスチック基板上²¹⁾で行われているが、対角の寸法が1インチや7.1インチと小さかった。

2008年のSIDでは、A4サイズに近い13.4インチ、3,104×4,128画素、385dpiの高解像度なLTPS(低温ポリシリコン)背面板の試作物が展示された。特筆すべきは、白黒二値表示ながら、初期のレーザプリンタを上回る解像度を活用して、誤差拡散法などの面積階調表現を実現している点である。これは複雑な駆動波形なしに、実質的なグレースケール表示を、白黒二値ゆえの高速な画面更新で実現できることを意味する。

5.3 カラー化

反射型の電子ペーパーのカラー化には、カラーフィルタを用いる方法や、コレステリック液晶のようにRGBの三層を積層構造にする方法²²⁾などがある。2005年のFPD International展では、筆者のグループで共同開発した6インチ、400×300画素、4,096色表示の試作品を展示した。これはカラーフィルタの赤・緑・青のサブ画素に加え、白のサブ画素を設けることで、白状態の反射率を従来の約16%か

図8 地下鉄仙台駅の電子ペーパーサイネージ(口絵カラー参照)

図9 フレキシブルカラー電子ペーパー(口絵カラー参照)

ら約22%に改善した。

2008年後半は、世界初のフレキシブル電子ペーパーディスプレイ²³⁾採用商品²⁴⁾が発売予定であるが、2008年のSIDでは、その次として、フレキシブルなカラー電子ペーパー(図9)を、カラー印刷された新聞の横に展示して、完成度の高さを示していた。白状態の反射率は25%である。

5.4 高速化

(2008年7月17日受付)

表示材料にしきい値特性がないため、電気泳動方式の高細型電子ペーパーディスプレイはTFT駆動するのが一般的であるが、市販品は、グレースケール表示において画面更新に1秒弱掛かる。パッシブ駆動可能な他方式の更新は線順次であるためさらに遅く、電子ペーパー全般の欠点と言われている。このため読書のように、ページを切替える用途に限定され、ユーザインタフェースに用いるのが困難である。先述の無線通信型電子ブックリーダーは、電子ペーパーの主画面の右に、高速応答が可能なポリマーネットワーク液晶による縦長のスクロールバーを設けており、スクロールホイールを回してクリックすることでメニュー選択を行い、主画面の表示更新の遅さを補う工夫がされている。

2008年春に、電気泳動方式専用の高速な電子ペーパーコントローラIC²⁵⁾が開発された。これは異なる駆動波形を割当可能な、部分書換え可能なパイプラインを独立に16個持つことで、高速な描画・更新を実現し、電子ペーパーでユーザインタフェース操作を可能にしている。このコントローラICは量産が開始されており²⁶⁾、電磁誘導式のペンタブレットと組合せた評価キット²⁷⁾を購入することも可能である。高速化が、電子ペーパーのさらなる普及につながると期待されている。

6 今後の展望

以上、既存の印刷技術について概説するとともに、有機トランジスタへの適用例、そして電子ペーパー関連の最近の動向を紹介した。印刷技術によるディスプレイ製造は、従来の真空プロセスやフォトリソグラフィと異なり、高価な装置や複雑な工程が不要であり、材料の利用効率も高く、製造コストを劇的に下げる生産技術として期待されている²⁷⁾。

印刷技術そのものは古いものであるが、そのディスプレイ製造への適用はまだ始まったばかりである。現状の印刷技術の多くは、情報伝達的手段として特化しており、これをディスプレイ製造へ適用するためにはそれに適合させるための技術開発が求められる。

また、材料面についても機能だけを求めるだけでなく、印刷プロセスに適した材料設計がされることが望ましい。同様にデバイス設計においても、それら両者の特性を最大に引き出せるような検討が必要である。このためには材料、設計、プロセスのそれぞれの研究者、技術者の密接な協体制を構築し、議論していくことが必要である。

パーソナルコンピュータとインターネット時代の今も、紙と印刷は身近な存在であるが、遠からぬ近い将来の、真のユビキタスコンピューティング²⁸⁾時代には、印刷技術を活用して製造された電子ペーパーなどの情報ディスプレイが、静かにわれわれの生活を支援することを期待したい。

最後に、本稿の執筆にあたりご協力いただいた、凸版印刷技術戦略部の中村隆一氏に深く感謝します。

〔文 献〕

- 1) 今井拓司ほか: “インビジブル・エレクトロニクス”, 日経エレクトロニクス, 2005年5月23日号, pp.97-133 (2005)
- 2) 檀上英利: 日本化学会第85春季年会ATP, 3L5-24 (2005)
- 3) 角田ほか: “基本印刷技術”, 産業図書 (1978)
- 4) H. Sirringhaus et al.: “34.1: Active Matrix Displays Made with Printed Polymer Thin Film Transistors”, SID 03 Digest, pp.1084-1087 (2003)
- 5) G. Gelinck et al.: “Flexible Active-matrix Displays and Shift Registers Based on Solution-processed Organic Transistors”, Nature Materials, 3, Feb.2004, pp.106-110 (2004)
- 6) M. Ito et al.: “A Flexible Active-matrix TFT Array with Amorphous Oxide Semiconductors for Electronic Paper”, IDW/AD '05 Proceedings, 1, pp.845-846 (2005)
- 7) Amazon, Kindle製品紹介, <http://www.amazon.com/kindle/>
- 8) Sony, リブリエ製品紹介, <http://www.sony.jp/products/Consumer/LIBRIE/>
- 9) Sony社Reader製品紹介, <http://www.sony.com/reader/>
- 10) Amazon, 2007 Letter to Shareholders, <http://www.secinfo.com/d14D5at2Y5u.d.htm#1stPage>
- 11) Motorola, MOTO PHONE製品紹介, <http://direct.motorola.com/hellomoto/motofone/>
- 12) KDDI, W61H製品紹介, http://www.au.kddi.com/seihin/ichiran/cdma1x_win/w61h/
- 13) 「G'zOne W62CA」開発者インタビュー, <http://k-tai.impress.co.jp/cda/article/interview/40390.html>
- 14) KDDI, W62CA製品紹介, http://www.au.kddi.com/seihin/ichiran/cdma1x_win/w62ca/
- 15) PVI, EPD製品仕様紹介, <http://www.pvi.com.tw/en/products/p065.php>
- 16) ブリヂストン, 応用製品開発キット紹介, <http://www2.bridgestone-dp.jp/adv-materials/QR-LPD/development.html>
- 17) EETimes SID 2007関連記事, http://www.eetimes.jp/contents/200705/19045_1_20070523151449.cfm
- 18) 凸版印刷, ニュースリリース, <http://www.toppan.co.jp/news/newsrelease645.html>
- 19) 凸版印刷, ニュースリリース, <http://www.toppan.co.jp/news/newsrelease774.html>
- 20) 凸版印刷, ニュースリリース, <http://www.toppan.co.jp/news/article0113.html>
- 21) EPSON, ニュースリリース, <http://www.epson.jp/osirase/2006/060612.htm>
- 22) 富士通研究所, 電子ペーパー構造紹介, http://jp.fujitsu.com/group/labs/techinfo/techguide/list/paper_p03.html
- 23) E. Huitema et al.: “60.4: Invited Paper: Rollable Displays - A Technology Development Enabling Breakthrough Mobile Devices”, SID 08 Digest, pp.927-930 (2008)
- 24) Polymer Vision, Radius製品紹介, <http://www.polymervision.com/site/page/19/20/Radius%AE/>
- 25) H. Gates et al.: “46.3: High Performance Active Matrix Electrophoretic Display Controller”, SID 08 Digest (2008), pp.693-696
- 26) EPSON, ニュースリリース, <http://www.epson.jp/osirase/2008/080416.htm>
- 27) E Ink, AM300 Prototype Kit紹介, <http://eink.com/kits/amepd.html>
- 28) M. Weiser: “Ubiquitous Computing”, <http://www.ubiq.com/ubicom/>

檀上 英利 1989年, 京都大学大学院情報工学研究科修了。同年, 凸版印刷(株)入社。システム開発等に従事。1993年, 米国駐在。インターネット関連活動を行い, 1997年, MIT客員研究員資格取得。2000年, USC経営学修士取得。2001年に帰国後, 電子ペーパーの事業化を推進。