電子粉流体[®]およびそれを用いた ペーパーライクディスプレイ開発

大 月 正 珠*・安 西 弘 行

Development of “Paper Like -Electronic Display” by Using Functionalized Powders

Masashi OTSUKI*, Hiroyuki ANZAI(Bridgestone, Corporation, 3-1-1, Ogawahigashi-Cho, Kodaira-Shi, Tokyo 187-8531, Japan)

Electronic Paper has been developed as a display by using functionalized polymer materials, but unlike the monitors for TVs and personal computers. It was mainly developed as a medium for illustrating static images (still pictures) for reading. Electronic Paper requires no electrical power to maintain the image, except when writing in new materials.

It is anticipated to become a medium that can be used in place of paper. This leads to energy-saving and reduces the strain on the environment.

Key Words : Electronic Paper, Functionalized Powder, Tribo-charge, Adhesion, Polymer-composit

1. は じ め に

情報の記録, 伝達, 保管等に用いられる物やデバイスを情報媒体という。世の中には様々な情報媒体が存在し, 情報の伝達, 保管だけでなくコミュニケーションツールとして広く活用されている。更に近年では携帯情報端末やインターネットを利用した情報収集やコミュニケーションが普及し, 紙やテレビと併せてそれぞれが特長にあわせて使い分けられている。

そのような中で紙媒体について言及すると, 活版印刷技術が開発されて以来, 情報媒体の主役として長く活用され, 今日でも新聞や出版物として大量に利用されている。しかしながら, 電子媒体が普及する中で, それらと比較すると (1) 情報量が少ない, (2) 置き場所に困る, (3) 欲しい情報ばかりではない, (4) 環境破壊のイメージが強い, 等の理由から徐々に紙離れが進んでいるのが現実である。事実, 書籍が大量に流通している中で, 日本ではその約40%が出版社に返品され, 読まれぬまま古紙として再利用されて

いる現状がある¹⁾。また, この紙離れを裏付ける現象として, 2009年末の米国年末商戦におけるAmazonの書籍販売数は電子書籍の販売数が初めて紙媒体の書籍販売数を超えた²⁾。この背景として電子書籍の方が前記 (1) ~ (4) の欠点を補えるだけでなく, 安価で簡単に購入できる等, 価格面や利便性の利点も大きく作用していると考えられる。この他, 高齢化やライフスタイルの変化もあと押ししていると思われる。

電子ペーパーの利点を挙げれば数多くあるが, この利点を上手く活用するためのデバイスには高い性能が求められる。その要求性能としては, ①軽量, ②要求に応じた書き換え耐久性, ③書き換え速度, ④見やすさ, ⑤広い視野角, ⑥扱い易さ, 等が挙げられる³⁾。このような要求性能を満足する電子ペーパーとして, 我々は帯電した粒子を表示媒体とする新しい電子ペーパー (QR-LPD[®]) を開発してきた³⁾。液晶やプラズマなどの自発光型ディスプレイとは異なり, 入射光の反射によって粒子自身の色彩を認識することで表示体として機能することから, 紙の視認性を持った

大月 正珠; (株)ブリヂストン中央研究所研究開発技術企画部部長, 博士 (工学) (〒187-8531 東京都小平市小川東町3-1-1) 1994年, 大阪大学大学院工学研究科プロセス工学専攻博士後期課程修了。同年, (株)ブリヂストン入社, 現在に至る。専門は電気化学, 光電気化学, 無機化学, 界面化学。日本化学会産学交流委員会委員, 中性子産業利用促進協議会幹事, 他

安西 弘行; (株)ブリヂストン中央研究所研究開発技術企画部先端基盤技術企画第2ユニット (〒187-8531 東京都小平市小川東町3-1-1)。2002年, 東京工業大学理工学研究科物性物理学専攻博士前期課程修了, 同年, (株)ブリヂストン入社, 現在に至る。専門は電磁気学, 静電気学, 磁性材料。

表示媒体であることが特徴である。この電子ペーパーにおいて最も重要な材料は表示媒体として使用している粒子である。動作は粒子の持つ帯電特性と流動性を制御することで付与している。開発した粒子は、液体のように流動性が良いことから、我々はこの粒子を電子粉流体[®]（以下、機能性微粒子と呼ぶ）と名づけた。ここでは電子ペーパー技術の概要と作動原理を述べると共に、その設計と適用可能な用途について紹介する。

さて、ブリヂストンはタイヤを中心とした高分子複合体を広く扱い、様々な物性を制御する独自の技術開発を行っている。ここで紹介する電子ペーパー技術も、高分子合成技術と物性制御技術を高度かつ特殊な技術・ノウハウを活かして開発されたものである。

2. 電子ペーパー技術の概要

図1に電子ペーパーの構成図（白黒表示）を示した。パターンニングされた透明電極の間に2種類の機能性微粒子を封入している。封入した粒子は正に帯電するように設計した黒色粒子と、負に帯電するように設計した白色粒子である。また、極板間の距離を一定に保つために「リブ」と称する隔壁を設けたセル構造としている。今、上部の電極に負の電圧を印加すると、正に帯電した黒色粒子が電極上部に引き寄せられ結果として黒表示ができる。逆に正の電圧を印加した場合には負に帯電した白色粒子が電極上部に引き寄せられ白表示ができる。このような単純な仕組みであり、セル毎に印加する電圧の極性を制御することにより、

図1 電子ペーパーの構造模式図⁴⁾

図2 電子ペーパーの表示例

図3 電子ペーパーの白黒切り替え速度⁴⁾

自由に白黒表示することができる。図2はその一例である。

セル内には液体等を含まず、空気のみが封入されている。このために粒子の飛翔速度は非常に速く、光学測定による白黒切り替え時間は0.2 msec程度である（図3参照）。粒子の飛翔は極板間の電界がある値を超えたところで起こるため、飛翔する電圧には明確な閾値があり、これによりTFTを用いない単純な駆動方法であるパッシブ・マトリックス駆動方法を採用することが可能となっている。粒子は自身の帯電に起因する鏡像力により電極に付着し続けることが可能であり、一旦表示すればその後電圧の供給を止めても表示し続けることが可能である。さらに、表示は粒子の色そのものを見ることから視野角の依存性はほとんど無く、また紙のような白さを再現することが可能である。以上の電子ペーパーの特長をまとめると以下になる。

- (1) 紙のような視認性と白さを再現できる。
- (2) 白黒切り替え速度が速い。
- (3) 消費電力が低い。
- (4) 簡素なパネル構成であるため低コスト化が可能である。

3. 機能性微粒子の駆動原理と帯電設計の考え方

粒子が電極基板間を飛翔する原理を図4に示した⁵⁾。機能性粒子とガラス基板との間に働く力を整理すると、粒子の帯電に起因する力と、帯電には起因しない力に大別できる。まず、帯電に起因する力としては、帯電に応じて粒子が電界から受ける力と、基板との間に働く鏡像力がある。一方、帯電に起因しない力としては分子間力、液架橋力、重力、接触電位差による力がある⁶⁾。電界から受ける力以外は全て粒子を基板に付着させるように働く力であり、これらの総和と電界から受ける力の関係を図示すると図4のようになる。つまり、電界によって粒子を基板から引き剥がそうとする力が付着させようとする力を上回った時に、粒子の飛翔が起こることになる。ここで重要なことは粒子の帯電量が大きすぎても小さすぎても飛翔は起こらず、飛翔には適切な帯電量制御が必要であるということである。

しかしながら、実際のパネル内では粒子は常に飛翔、摩

Fi:電気映像力、Fr:分子間力、Fl:液架橋力、Fe:電界力

図4 粒子飛翔原理の模式図

擦、静置を繰り返しており、パネル内の粒子の帯電量は常に変化している。その変化を図5に模式的に示した。表示を行う際、粒子は飛翔に伴う衝突や接触などにより摩擦帯電し、帯電量が増加する。連続的に表示更新を行った場合には、過剰な摩擦帯電により粒子が過剰帯電しやすい。一方、表示更新を行わずに静置した場合には粒子の帯電量は減衰する。このような粒子の帯電量変化がランダムに行われる。したがって、使用されるいかなる状況下においても帯電量が適切な範囲に収まるように設計することが大事である。我々は以下の3要素を最適設計して、材料開発を進めている。

(1) 飽和帯電量

図5 QR-LPD[®]パネル中の粒子の帯電量変化 (模式図)

(2) 帯電速度

(3) 電荷減衰速度 (電荷保持力)

4. 機能性微粒子の材料設計

機能性微粒子は高分子樹脂を主体としており、粒径は約 $10 \mu\text{m}$ としている。粒子の電子顕微鏡写真を図6に示した。粒子の駆動を円滑にするためには、粒子の流動性を高くする必要がある。流動性に最も寄与するのは粒子表面であり、接触面積を少なくして電極との付着力を低減させるために表面にナノレベルの凹凸を設けている。その実現方法としては種々の方法が考えられるが、例えばナノスケールのシリカやチタニアなどの金属酸化物を機能性微粒子表面に付

図6 粒子のSEM画像例⁷⁾

着させることや、粒子そのものを多孔質化させる手法等が用いられる。この他、流動性付与以外に帯電量制御を目的として、分子構造により帯電性を付与した樹脂粒子を表面に付着させる設計も実施している。

5. 帯電特性の評価方法

本項では最適な機能性微粒子の材料設計をするための主要パラメータを精度よく評価する手法について述べる。

5.1 飽和帯電量、帯電速度

粒子の帯電測定にはブローオフ法と呼ばれる手法が一般的に用いられる⁸⁾。 $10 \mu\text{m}$ 程度の粒子の帯電量を測定する場合、約 $150 \mu\text{m}$ 程度の鉄粉キャリアと粒子を一定の比率で混合したものをファラデーケージ内に入れ、震とうすることで摩擦帯電を起こす。その後、摩擦帯電した混合物から気流で粒子のみを吹き飛ばすことでその帯電量を計測する仕組みである。震とう時間を制御して摩擦帯電量を計測すれば、帯電速度と飽和帯電量を求めることが出来る。図7に測定結果の一例を示した。帯電量の立ち上がりが帯電

図7 ブローオフ測定結果例⁷⁾

図8 TSC測定結果の例⁷⁾

速度に相当し、平衡帯電量が飽和帯電量を示す。

5.2 電荷減衰速度（電荷保持特性）

電荷保持特性を計測する手法は明確には確立されていないが、ここでは我々が活用している熱刺激電流（TSC）計測法を紹介する⁹⁾。高分子中にトラップされる電荷は分子構造の熱力学的な挙動によりその安定性が決定される。この手法は、コロナ帯電器で粉体を帯電させたのち、精密に制御しながら粒子を加熱した際に漏洩してくる電荷を微小電流量として計測する方法である。この測定によって放出電流量の温度スペクトルが得られ、粉体の電荷保持特性を温度の関数として定量的に把握することができる。この方法によって得られたスペクトルを詳細に解析することにより、帯電電荷の安定性だけでなく、電荷が捕捉される部位や深さを推定することができる。測定結果の一例を図8に示した。ここでは粒子Aより粒子Bの方が漏洩電流は高温側にあり、電荷保持特性は粒子Bの方が優れていることが推測される。

5.3 その他の機能性微粒子設計項目と評価法

上記で説明した項目のほか、帯電あるいは電気特性としては誘電率、導電率等の評価が必要であり、機械的特性としては付着力、流動性、比重、硬度等が、表面材料物性としては、表面張力、吸水率等が、形態特性としては粒径、粒径分布および表面形状等が、光学特性としては白色度、白反射率、黒濃度、透過率および分光特性等が粒子設計には必要となる。

6. 電子ペーパーの展開

紙のような視認性と広い視野角、早い応答速度、簡素な駆動原理を特長として、電子ペーパーは電子棚札や情報表示板等の製品に市場展開している。また、市場の高いニーズを背景にカラー化とフレキシブル化を進めている。それぞれについて簡単に述べる。

(1)カラー粒子を用いる方法

(2)カラーフィルターを用いる方法

図9 電子ペーパーのカラー化⁷⁾ 図10 フレキシブルカラー電子ペーパーの一例¹⁰⁾

6.1 カラー化

カラー化の実現には図9に示すように2つの方法がある。ひとつは粒子自身に色をつけたカラー粒子を用いる方法であり、もうひとつは白黒粒子のパネルにカラーフィルターを設ける方法である。

前者においては機能性微粒子の顔料を変更することで実現できる。この方法を用いれば粒子の色そのものを視認することが出来るため、明るく鮮明なカラー表示を行うことができる。また、全面カラーだけでなく、部分的なカラー表示（エリアカラー）など意匠性の高い表示体を既に提案している。一方、カラーフィルターを用いた方法に関しては、フィルターを通して表示を認識するために、反射率の低下は免れないが、階調表示と組み合わせることでフルカラー表示が可能となる。これによれば、写真画像の再現が可能となり、新しい用途の開拓が期待できるものである。

6.2 フレキシブル化

電子ペーパーやモバイル化を想定した場合、フレキシブル化が重要な開発要素となる。フレキシブル化はガラス電極基板を柔軟性のある樹脂基板に変更することによって実現することができるが、これに伴ってあらゆる部材に可とう性を持たせる必要が生じる。さらに、製造プロセスの確立も重要な開発要素であり、低コスト化のためにはロール・トゥ・ロールのプロセスが欠かせない。電子ペーパーはその構造がシンプルであり、複雑な工程を必要としないことから、ロール・トゥ・ロール製造プロセスによるフレキシブル表示体の製造に適していると考えている。既に多くの展示会でも図10に示すようなフレキシブル電子ペーパーを紹介している。

7. お わ り に

高機能粒子である電子粉流体[®]を表示媒体として用いた新しいコンセプトの全反射表示体電子ペーパーを紹介した。粒子の帯電特性を制御して電氣的に粒子を移動させることで表示を行うものであり、粒子材料の最適設計が最も重要な開発課題である。粒子の帯電現象は不明な点はまだ多いが、各種の高分子制御技術を取り入れ、ナノレベルでの材料設計と精度の高い評価解析を行うことで安定した特性を発現できるように開発を進めている。カラー化、フレキシブル化などの技術と併せて、電子ペーパー商品を広く世の中に提供していく計画である。活用可能な様々なシーンを掲載したホームページでも公開しているので参照頂きたい¹¹⁾。

References

- 1) Nihon shuppan infurasenta houkokusyo (heisei 19nen 2 gatu) : <http://www.jpo.or.jp/archive/data/ic/ic-tag-h18.pdf>
- 2) Sasaki, T.: "Denshi Shoseki no Shogeki", Discover 21, Tokyo (2010)
- 3) Takahashi, T.; Toko, Y.: "Denshi Pepa no Genjyo to Jitsuyouka he no Kadai" ED research, Tokyo (2002)
- 4) Tanuma, I.: *Nippon Gazo Gakkaishi*, **46**, 372 (2007)
- 5) Takagi, K.; Kaga, N.; Tanuma, I.: Proc. NIP23, **23**, 624 (2007)
- 6) Takeuchi, M.; Oguchi, T.: Denshi Shashin Genzozai no Saishin

Gijutsu Tona Kaihatsu no Saizensen, Ed. by Takeuchi, M.; Oguchi, T., CMC Shuppan, Tokyo, 313 (2005)

- 7) Takagi, K.: *Funsai*, **52**, 28 (2009) : http://www.hosokawalab.jp/micromeritics/no_52/pdf/No52_07.pdf
- 8) Nippon Gazo Gakkai Gijutsu Iinkai Dai San Bukai: *Nippon Gazo Gakkaishi*, **37**, 461 (1998)
- 9) Ikegami, M.; Ikezaki, K.: *J. Electrostatics*, **51**, 117 (2001)
- 10) http://www.bridgestone.co.jp/business/dp/ele_paper/aerobee/future/index.html
- 11) <http://www2.bridgestone-dp.jp/adv-materials/QR-LPD/>

日本語表記参考文献

- 1) 有限責任中間法人日本出版インフラセンター報告書 (平成 19 年 2 月) : <http://www.jpo.or.jp/archive/data/ic/ic-tag-h18.pdf>
- 2) 佐々木俊尚: 電子書籍の衝撃, ディスカバー・トゥエンティワン, 東京 (2010)
- 3) 高橋泰樹, 都甲康夫: 電子ペーパーの現状と実用化への課題, ED リサーチ, 東京 (2002)
- 4) 田沼逸夫: 日本画像学会誌, **46**, 372 (2007)
- 6) 竹内 学, 小口寿彦: 電子写真現像剤の最新技術 - トナー開発の最前線 - シーエムシー出版, 東京, 313 (2005)
- 7) 高木光治: 粉碎, **52**, 28 (2009) : http://www.hosokawalab.jp/micromeritics/no_52/pdf/No52_07.pdf
- 8) 日本画像学会技術委員会第三部会: 日本画像学会誌, **37**, 461 (1998)
- 10) http://www.bridgestone.co.jp/business/dp/ele_paper/aerobee/future/index.html
- 11) <http://www2.bridgestone-dp.jp/adv-materials/QR-LPD/>

*

*

*

*

*