

論文の内容の要旨

論文題目 ツイストボール式電子ペーパーの高機能化に関する研究
—デュアルモード化及びマルチカラー化への対応—

氏 名 駒崎 友亮

電子ペーパーは薄型軽量な反射型ディスプレイであり、紙に類似した表示特性を有することから電子書籍用端末の表示素子として現在広く用いられている。今後の電子ペーパーの応用展開としては昼光下での視認性の良さや省電力性などから屋外デジタルサイネージ用途が有望視されているが、現在デジタルサイネージとして広く用いられているLEDを用いた電光掲示板や液晶ディスプレイなどの自発光型ディスプレイと比較して(1)低照度環境での視認性、(2)カラー表示性能で劣っており、普及には至っていない。

これら2点の課題に対し、本研究では電子ペーパーの中でも特に屋外耐久性に優れたツイストボール式電子ペーパーへの機能性材料の導入により、自発光可能なデュアルモードツイストボール式電子ペーパー及びマルチカラーツイストボール式電子ペーパーの2つの高機能電子ペーパーを提案し、開発を行った。また、ツイストボール式電子ペーパー内の二色微粒子の帯電量と回転特性、材料の関係などの基礎的特性に関しては学術的に明らかになっていない部分が多いため、高機能電子ペーパーを開発する上で重要となるこれらの項目についても検討を行った。

以下に本論文の各章の内容をまとめる。

第1章では、電子ペーパーの一般的な性質に関して解説し、ツイストボール式電子ペ

ーパーを含む各種方式の電子ペーパーの構造及び特性について説明した。また、デジタルサイネージ用ディスプレイとしての電子ペーパーの問題点を示し、機能性材料の添加によるツイストボール式電子ペーパーの高機能化によって問題点を解決できる可能性を指摘した。

第2章では、デュアルモード電子ペーパー及びマルチカラー電子ペーパーの作製を行う前に、予備実験としてツイストボール式電子ペーパー内部の二色微粒子が正しく回転する条件の検討を行った。同じ二色微粒子を用いた場合でも二色微粒子を封入しているキャビティ内壁の材料組成によって二色微粒子の半球ごとの帯電量が変化し、回転特性が変化することが見出された。特に、キャビティ内壁に0~10 wt%のシリカ粉末を添加したPDMSを用いた際にはシリカ粉末の添加量によって二色微粒子の帯電量及び回転特性の制御が可能であることが確認できた。ここで得られたツイストボール式電子ペーパーの作製条件は第3章以降の実験での基礎条件とした。

第3章では、片側の半球に無機EL蛍光体を導入した二色微粒子を微小流路によって合成し、これを電子ペーパー化することで交流電圧印加によって発光が可能なデュアルモードツイストボール式電子ペーパーを作製し、各種評価を行った。合成した二色微粒子は交流電場下で無機EL蛍光体を導入した半球が発光することが確認され、作製した電子ペーパーも直流電圧印加によって粒子回転、交流電圧印加によって発光が可能であることが確認された。これにより、反射と発光のデュアルモード表示を実現し、低照度環境における高視認性を実現したツイストボール式電子ペーパーの開発にはじめて成功した。実験で得られた電子ペーパーの最大発光輝度は $1100 V_{0-p}$, 30 kHz印加時の 2.64 cd/m^2 であった。駆動電圧や輝度は一般的な無機ELパネルに及ばないものの、無機EL蛍光体の濃度や電極の配置による改善の可能性が実験によって示唆された。また、粒子回転の応答速度と無機EL発光のための交流電圧の周波数が大きく異なることにより、交流電圧が粒子回転に与える影響及び直流電圧が発光に与える影響はほとんどないことが確認された。この性質により、直流バイアスを印加した交流電圧を印加することで発光と粒子回転を同時に制御することも可能であった。また、蛍光体導入量により発光輝度、表示保持性、粒子回転の応答速度が変化することを実験で示した。本章ではさらにこの電子ペーパーを発展させ、二色微粒子の無機EL蛍光体を導入していない半球に対して発光特性を有する有機色素を添加することで両側の半球を異なる色で発光させ、二色の発光色を実現する二色発光デュアルモード電子ペーパーについても検討を行った。無機EL蛍光体の青色発光を吸収し緑色の光を放つクマリン6を添加した二色微粒子は、発光色の違いはわずかであるものの、確かに交流電場下で両側の半球が異なる色で発光し、この微粒子を用いた電子ペーパーもわずかに異なる2色の光を発した。これにより、二色発光電子ペーパーの原理確認ができたと言える。より大きな色差を実現するためには粒

子の発光波長や各半球の波長ごとの透過率などの設計を厳密に行う必要がある。

第4章では、両側の半球に磁性ナノ粒子を導入した二色微粒子を微小流路によって合成し、磁力による二色微粒子の回転の駆動電圧制御技術を開発した。磁性ナノ粒子を0～2 wt%添加した二色微粒子の駆動電圧は電子ペーパー背面に設置したフェライト磁性シートの磁場によって磁性ナノ粒子濃度に応じて約50～500 V程度までほぼ線形に変化した。この際、磁性シートの局所的な磁場の不均一性により磁気力を大きくして駆動電圧を増すほど電圧-粒子回転率曲線の立ち上がりがブロードになることが確認された。また、この技術を用い、二色微粒子の色ごとに磁性ナノ粒子の添加濃度を変えて駆動電圧を変化させ、印加電圧によって各色の二色微粒子の向きを個別制御するマルチカラーツイストボール式電子ペーパーを作製した。電圧-粒子回転率曲線の立ち上がりのブロード化により各粒子の駆動電圧特性の重なりが生じ、各粒子の完全な個別駆動は困難であったが、2種類の二色微粒子を用いた電子ペーパーは80%以上の粒子を個別駆動でき、それぞれの粒子の向きの組み合わせによって4色のマルチカラー表示が可能であった。これにより、ツイストボール式電子ペーパーによるマルチカラー表示にはじめて成功した。3種類の二色微粒子を用いた8色表示の電子ペーパーも作製し駆動を行ったが、駆動電圧特性の重なりが大きく、良好な表示を得ることは困難であった。駆動電圧特性の重なりを縮小し、多数の粒子を個別駆動するためには磁性シートの磁場の均一性向上が必要である。

第5章では、2～4章の各種実験中に見出されたツイストボール式電子ペーパー内の応答速度の非常に遅い空間電荷分極及びそれによって発生する電荷放出時の表示逆転現象について電氣的測定による検討を行い、そのメカニズムを明らかにした。また、この空間電荷分極による電荷放出時の表示逆転現象を用いて少ないスイッチング素子で電子ペーパーを駆動する新たな駆動方法を開発した。この結果はツイストボール式電子ペーパーの表示保持性向上や駆動回路の単純化に役立つものである。

第6章では、第2～5章で得られた結果及び各章間の結果の関連性についてまとめ、今後の展望や得られた結果の応用可能性について述べた。

以上から、本研究ではツイストボール式電子ペーパーの材料、帯電量、回転特性の関係を明らかにし、デュアルモードツイストボール式電子ペーパー及びマルチカラーツイストボール式電子ペーパーの2種類の高機能電子ペーパーを新たに開発した。これらデュアルモード表示及びマルチカラー表示はツイストボール式電子ペーパーとしては本研究ではじめて実現されたものである。また、電子ペーパー内部の空間電荷分極に関して検討を行い、これを活用した新規駆動法を開発した。これらにより、課題であった(1)

低照度環境における視認性改善、(2) マルチカラー表示の解決に貢献し、屋外デジタルサイネージ用ディスプレイとしてのツイストボール式電子ペーパーの機能性向上を果たした。