

2 粒子移動型トナーディスプレイの 表示性能とトナー物性

2015 年 1 月

Keteepe Kankanamalage Chamili Kumara

(千葉大学審査学位論文)

2粒子移動型トナーディスプレイの 表示性能とトナー物性

2015年1月

Keteepe Kankanamalage Chamili Kumara

目次

第 1 章 序論.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 電子ペーパーの研究動向.....	2
1.2.1 電気泳動方式 (Electrophoretic Image display, EPID).....	3
1.2.2 エレクトロウェットティング方式 (Electrowetting)	4
1.2.3 ツイストボール方式 (Twisting Ball).....	6
1.2.4 サーマルリライタブル方式.....	7
1.2.5 MEMS 方式.....	8
1.2.6 積層型コレステリック液晶方式.....	9
1.2.7 エレクトロクロミック方式 (Electrochromic, EC)	10
1.2.8 電子粉流体移動方式 (QR-LPD).....	11
参考文献.....	14
第 2 章 トナーディスプレイ.....	16
2.1 はじめに.....	16
2.2 基本原理.....	16
2.2.1 1 粒子移動型.....	17
2.2.2 2 粒子移動型.....	18
2.2.3 多粒子移動型.....	19
2.3 本研究の目的と内容.....	23
2.4 本論文の概要.....	24
参考文献.....	25
第 3 章 微粒子に作用する力.....	26
3.1 はじめに.....	26
3.2 粒子物性.....	26
3.2.1 一般的なトナー.....	26
3.2.2 流動性.....	28
3.2.3 帯電性.....	34

3.3 微粒子に作用する力.....	36
3.3.1 分子間.....	36
3.3.2 静電気力.....	37
3.3.3 電界から受ける力.....	37
3.3.4 その他の力.....	38
参考文献.....	40
第4章 実験試料と実験装置・器具.....	42
4.1 実験試料.....	42
4.1.1 白黒粒子.....	42
4.1.2 粒子.....	42
4.1.3 外添剤粒子.....	44
4.2 実験装置.....	45
4.2.1 トナーディスプレイセル.....	45
4.2.2 表示特性測定装置.....	47
4.2.3 表示特性.....	48
4.2.4 測定装置.....	50
参考文献.....	52
第5章 トナーディスプレイの表示性能.....	53
5.1 はじめに.....	53
5.2 白黒粒子.....	53
5.3 表示特性測定・帯電方法.....	55
5.4 トナー移動モデル.....	57
5.5 電極間距離.....	59
5.5.1 実験結果と考察.....	60
5.5.2 電極間距離とコントラスト.....	65
5.6 白黒粒子の配合比率.....	66

第 6 章 トナー帯電量.....	69
6.1 粒子間摩擦帯電量測定法.....	69
6.2 粒子間摩擦帯電量測定.....	73
6.2.1 実験方法.....	73
6.2.2 実験結果と考察.....	74
6.3 混合粒子の光学顕微鏡観察.....	76
6.3.1 実験方法.....	76
6.3.2 実験結果と考察.....	77
6.4 表示セルの断面観察.....	80
第 7 章 外部添加剤の添加効果.....	81
7.1 はじめに.....	81
7.2 高速ミル.....	82
7.3 手振り帯電.....	89
7.3.1 手振り帯電方法.....	89
7.3.2 手振り帯電の表示特性.....	90
7.4 添加による表示性能の向上.....	93
参考文献.....	96
第 8 章 単純マトリックス表示.....	97
8.1 はじめに.....	97
8.2 トナーディスプレイパネルと表示性能.....	97
8.2.1 7 セグメント方式の動作原.....	98
8.2.2 単純マトリックスの動作原理.....	99
8.3 アクティブマトリクス駆動方式.....	102
第 9 章 総括.....	103
9.1 結論.....	103
9.2 今後の展望.....	104

謝辭.....	105
関連発表.....	106

第1章 序論

1.1. はじめに

高度情報化社会といわれて久しい。インターネットの普及により大量の情報を手に入れることが容易になった。パソコンなどの液晶ディスプレイの多くは硬く、重く、電気が必要である。対して、新聞や本などは、紙の特性上、薄い、軽い、曲げられる、持ち運びが簡易、眼に優しい特徴がある。しかし、紙に印刷されることから、場所をとるか大量に破棄され、環境問題の観点から課題がある。そこで、両方の特性を生かした「電子ペーパー」の研究、開発が進んでいる。

電子ペーパーは液晶ディスプレイと紙との間に位置する表示媒体であり、書き換えが可能、軽量、薄い、省エネの特性がある。すでに、多くの企業が商品化を行っている。例えば、Fig.1-1 に示すように E Ink から “Kindle DX”、SiPix から “Cell phone Keyboard”、などが市場に出ており、書籍や時計など、身近な存在として私たちの生活に浸透してきている。

電子ペーパーの表示方法には様々な方式があり、今回、トナーディスプレイに着目し研究を行った。トナーディスプレイに求められるものとして、表示切り替えが早く、色が明瞭であることが挙げられるが、高い電圧が必要となりコントラストが低いという課題も抱えている。そこで、外部添加剤を入れることにより、粒子間のクーロン力を弱め、粒子間の移動の流動性に着目した。白黒粒子の配合比率と帯電量を測定することで、外部添加剤の効果について検討を行った。また、単純マトリックスについても言及した。

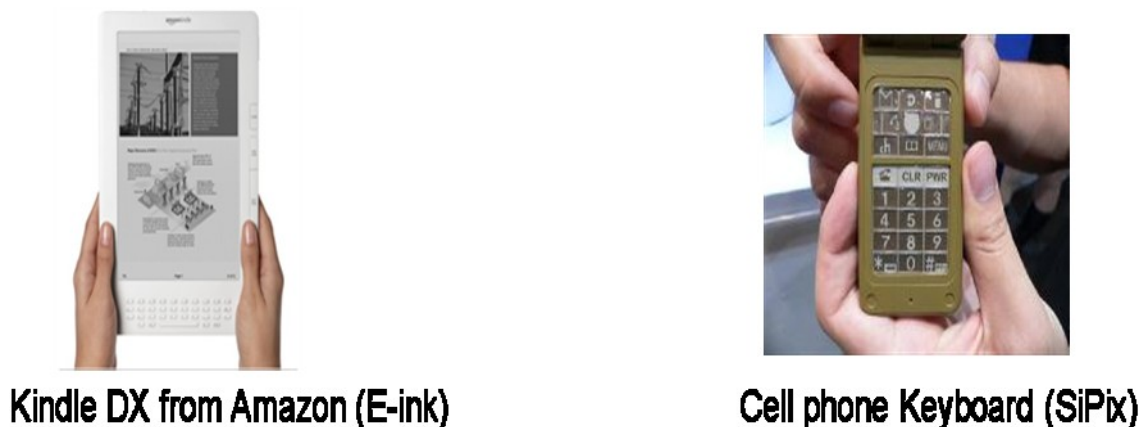


Fig. 1-1 製品化された電子ペーパーの例

1.2 電子ペーパーの研究動向¹⁻⁴⁾

電子ペーパーはソフトコピーとハードコピーの特性を併せ持った表示媒体のことを指し、ソフトコピーとハードコピーの境界領域に位置する技術である。電子ペーパーと言われる前は、リライトブルペーパー、ペーパーライクディスプレイという言葉が使われていた。リライトブルペーパーは書き換えが可能な紙、ペーパーライクディスプレイは紙のようなディスプレイという意味である。電子ペーパーはこれらの技術を集約した言葉である。

電子ペーパーは文字や画像の書き換えが可能であるとともに、紙のように軽量で曲げられるフレキシブル性も持つため取扱いやすい。粒子移動方式の電子ペーパーとは、透明基板を介して粒子が保有する色を見る事により画像として認識させ、またその粒子を気体中で移動させる事で画像を切り替える方式の電子ペーパーである。本方式については千葉大学、富士ゼロックスなどが精力的に開発を行っている。

電子ペーパーとしての応用を目標にいくつかの表示方式が研究されている。Table 1-1 に簡単に電子ペーパー技術の分類を示す。本節では電子ペーパー技術の中でいくつかを挙げて、その原理等を簡単に説明する。

Table 1-1 電子ペーパー技術の分類⁵⁾

	現象	デバイス	動作 エネルギー	関係者
物理的/粒子	粒子移動	マイクロカプセル型電気泳動	電圧	E-ink(米)
		マイクロカップセル型電気泳動	電圧	SiPix(米)
		インプレイン型電気泳動	電圧	Philips, iRex(蘭)
		粉流体移動	電圧	ブリジストン
		トナーディスプレイ	電圧	千葉大, 富士 Xerox
	粒子回転	ツイストボール	電圧	Xerox/Gyricon(米)他
物理的/分子	光学異方性	コレステリック液晶	電圧	KDI(米), 富士通他
	(LCD)	ネマチック液晶	電圧	Nemoptic(仏)
電気化学的	イオン	エレクトロクロミック	電流	Ntera(IL), 千葉大
	濡れ変化	エレクトロウエッティング	電圧	Liquavista(蘭), ITRI(台) adt/Pforzheim Univ.(独)
機械的	薄膜変化	MeMS	電圧	Qualcom(米)

1.2.1. 電気泳動方式 (Electrophretic Image Display, EPD)

Fig.1-2 に基本的な電子泳動方式の構造を示す⁶⁾。絶縁性の溶媒中に分散した帯電粒子が、電界によって移動する電気泳動現象を利用した表示方式である。

電気泳動ディスプレイは、帯電粒子が溶媒中を移動することで粒子と溶媒との間にコントラストを得る 1 粒子型、逆極性の 2 種類の粒子が透明溶媒中を移動することで粒子間にコントラストを得る 2 粒子型がある。これらについては第 2 章で述べる。Fig.1-3 ではカプセルが 2 枚の透明電極に挟まれており、カプセル内部には絶縁性の溶媒と黒色、白色粒子が封入されている。電圧を印加するとカプセル中を粒子が移動し、コントラストを得ることが出来る。負電極側が白色表示、正電極側が黒色表示となっている。

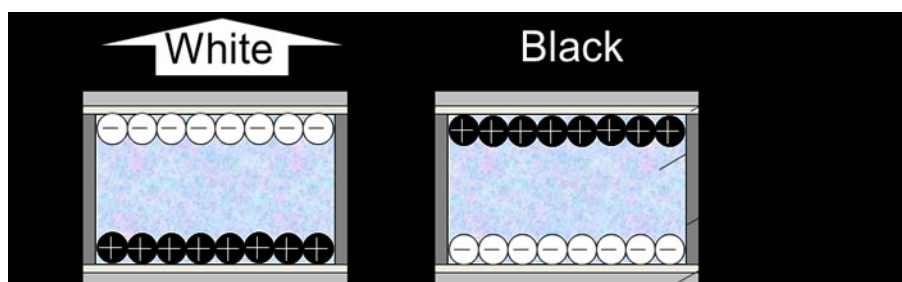


Fig.1-2 Schematic illustration of monochromatic Electrophoretic Image Display

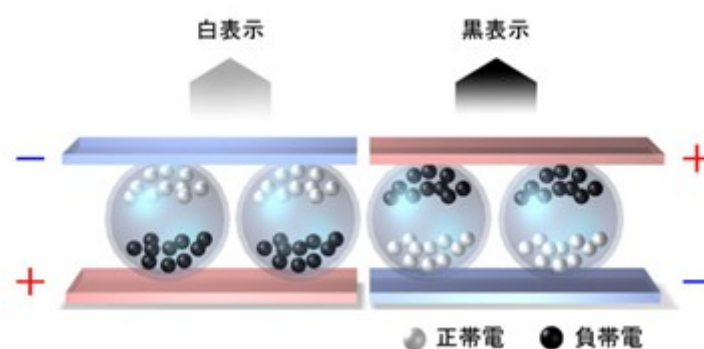


Fig.1-3 電気泳動方式の表示

1.2.2. エレクトロウェットティング方式 (Electrowetting)⁷⁾

エレクトロウェットティングとは、電界によって疎水性の表面の濡れ特性 (wetting property) を変えることで表示を制御する。

電子濡れ効果を利用した表示方式であり、素子構造としては白色基板上に透明電極、疎水性の絶縁層、水層および着色された油層が形成されている。電圧印加によって電子濡れ効果が生じ、水が絶縁層に濡れ始め、着色された油層が端へ移動する。そのため、電圧非印加時は上部から観察すると着色された油層が観察されるが、電圧印加によって白色表示となり、油層の色と基板の色の表示を切り替えることができる。Fig.1-4 に示す。

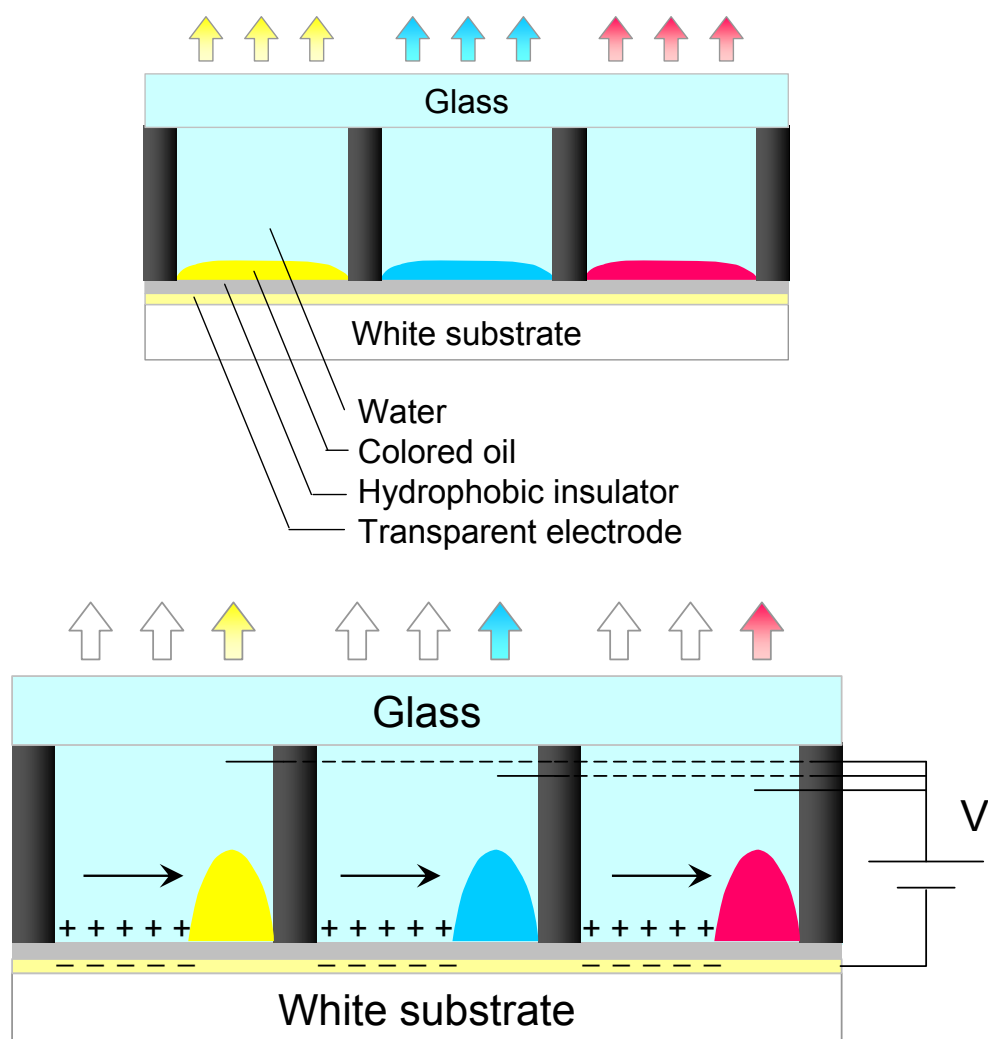


Fig.1-4 エレクトロウェットティング方式の基本構造

エレクトロウェットティングについてももう少し説明を加える。固体の表面に電位差を与えることで見かけの濡れ性が変化する現象である。疎水性の誘電膜が成膜された電極と、その上に置く液滴との間に電位差を与えると、液滴の接触角が減少する現象である。この原理を用いて開発したエレクトロウェットティング方式電子ペーパーの構造を Fig.1-5 に示す。近年、この表示セルの構造をかなり複雑にした新たなエレクトロウェットティング電子ペーパーの研究も公開されている。

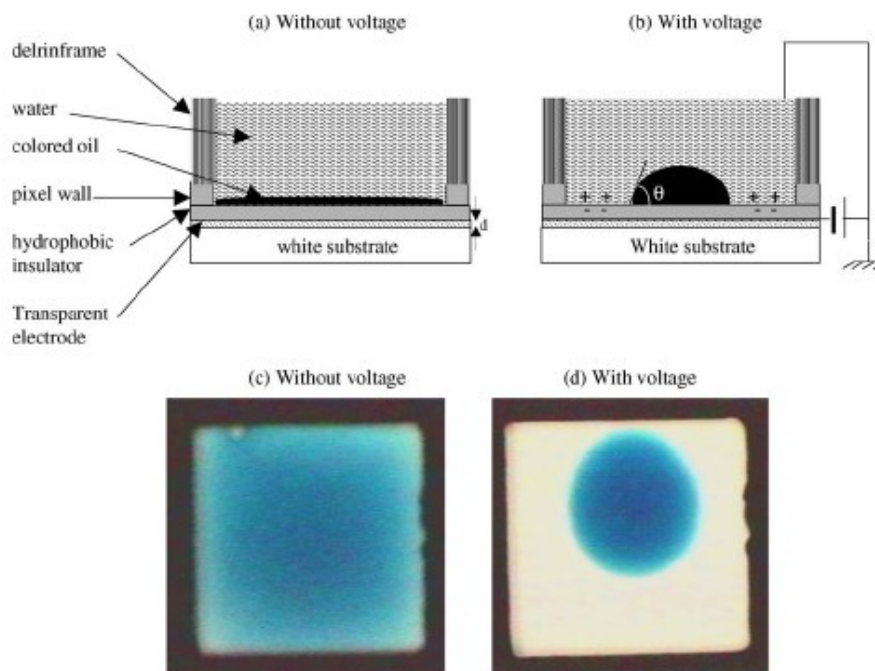


Fig.1-5 Principle of traditional electrowetting display

1.2.3. ツイストボール方式 (Twisting Ball)

ツイストボールは、表示素子の回転により画像を形成する方式である。ツイストボールディスプレイは、半球面をそれぞれ白と黒で塗り分けた球状粒子を表示素子として含むシートから構成される。球状粒子は、シート内部の絶縁性液体に似た多数のキャビティ（空洞）中に1個ずつ封入されている。白黒の半球面に電荷密度差を設けているので、電界の向きに応じて球状粒子は回転制御される。回転によって形成された白黒のコントラストが、観察者に文字や画像として認識される。Fig. 1-6 では負電極側が白色表示、正電極側が黒色表示となっているが、粒子を他の色に着色することで白/赤表示や白/青表示などが可能となる⁸⁾。

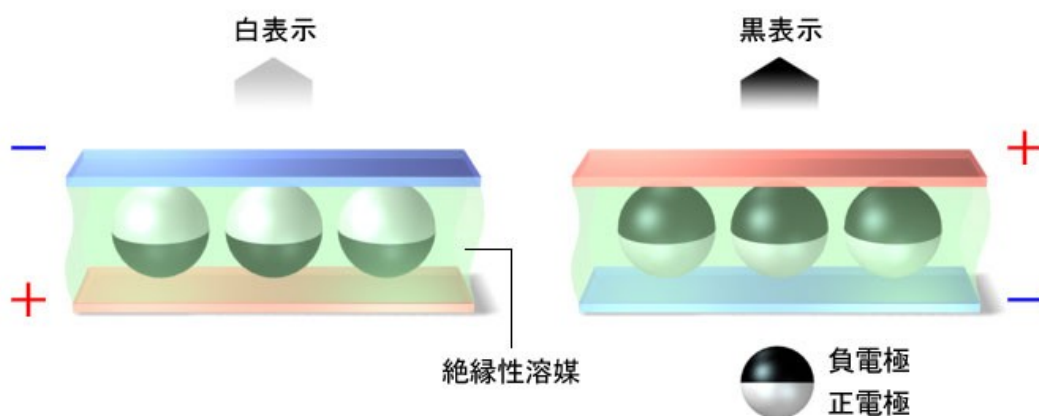


Fig. 1-6 Principle of twisting ball panel

1.2.4. サーマルリライタブル方式

リタイタブル記録とは、熱、光、磁気、電界、圧力などのエネルギーを与えて可視画像を形成し、その画像はエネルギーを与えることなしに保持され、再びエネルギーを与えることによって画像が消去され、そのくり返しが可能な記録である。サーマルリライタブル記録原理は2つに大別される。1つは、熱による相変化および相分離を伴う、光散乱性の変化や結晶変化を利用した物理変化タイプである。もう1つは、熱による酸化・還元反応に伴う、ロイコ染料のラクトン環の開閉による発消色変化を利用した化学変化タイプである。Fig. 1-7a)、b)にフルカラー記録メディアの構成図を示す⁹⁾。

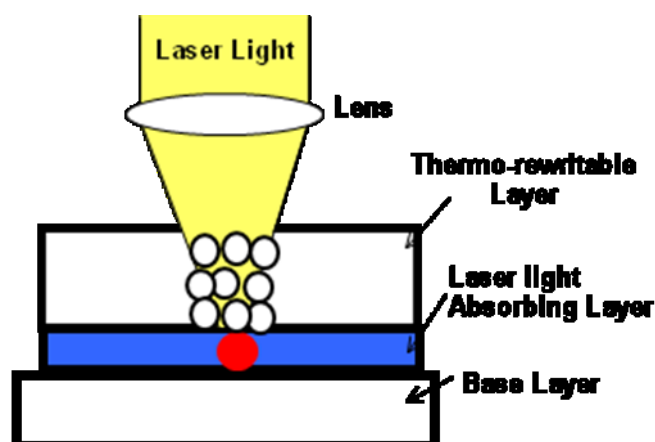


Fig.1-7 a) サーマルリライタブル媒体へのレーザー記録

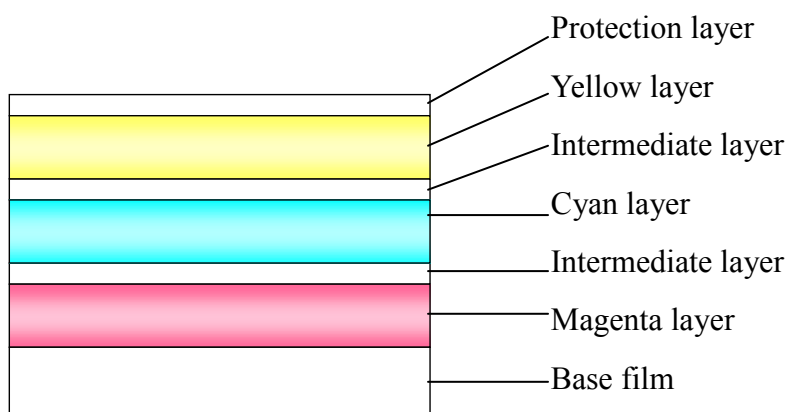


Fig. 1-7 b) Cross-section of full-color rewritable media

1.2.5. MEMS 方式

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) とは、1つのシリコン基板、ガラス基板、有機材料などの上に機械要素部品、センサー、アクチュエータ、電子回路を集積化したデバイスを指す。

MEMS 技術を用いた代表的な反射型ディスプレイ方式の光干渉変調方式について説明をする。自然界や蝶や孔雀の羽に見られる鮮やかな色の表示と同じく、薄膜の光干渉により反射光が特定の色に変化する方式のディスプレイを iMoD (interferometric modulator) と言う。

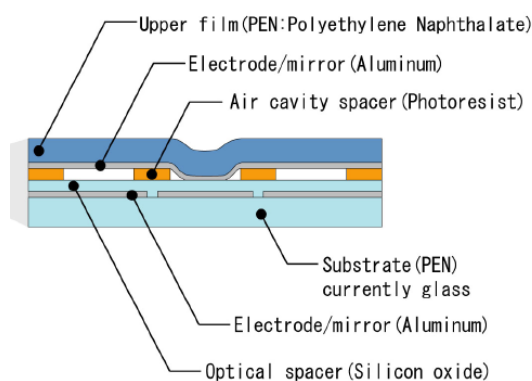


Fig.1-8 Structure of photo- Construction of iMod pixel

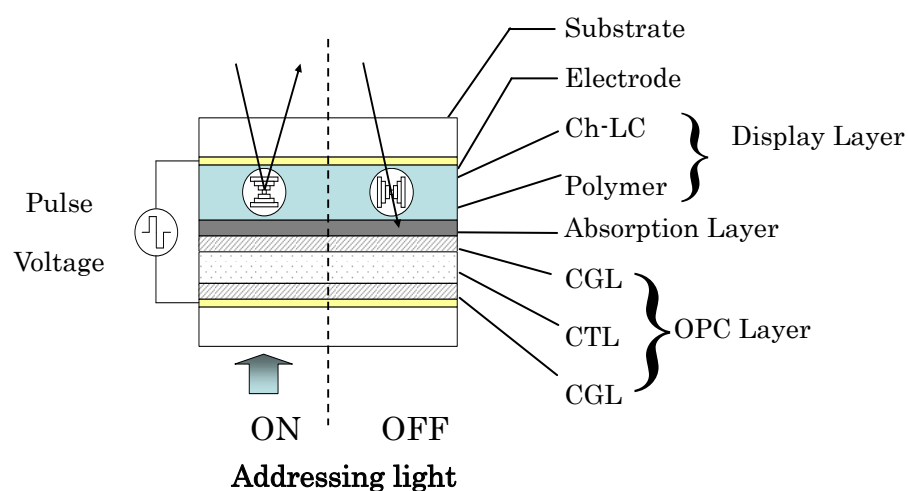
Fig. 1-8 に示すように、各画素はガラス基板上の積層フィルム層と、その下に柱で支えられた金属の反射膜からなる。反射膜と積層フィルム層のあいだには空気が封入されており、反射膜からの反射光は膜隙の大きさに応じて色が変化する¹⁰⁾。

1.2.6. 積層型コレステリック液晶方式

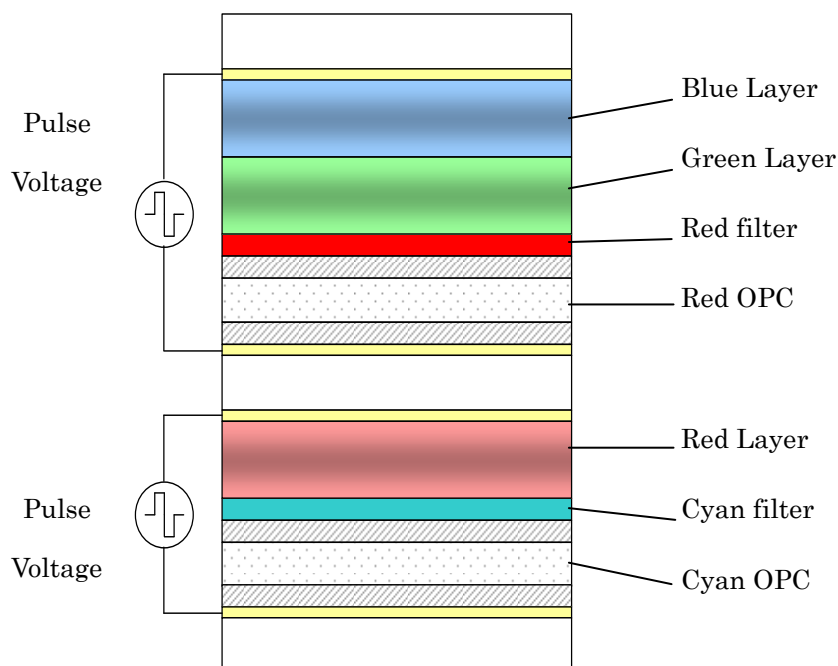
コレステリック液晶は、光の干渉により特定の色を反射するプレーナ状態と、光を透過するフォーカルニック状態を切り替えることで画像を表示する。駆動方法にはパッシブ駆動と光アドレスによる面一括駆動があるが、パッシブ駆動型について説明をする(fig. 1-9 (a))。

積層型コレステリック液晶ディスプレイは、赤／透明・緑／透明・青／透明にスイッチングする3枚のコレステリック液晶パネルを積層することで、フルカラーのメモリ性反射型ディスプレイが実現できる(fig. 1-9(b))。

コレステリック液晶は、閾値がありパッシブ駆動が可能で、偏光板がいらす明るいメモリ性の表示ができる。



(a) Cross section of photo-addressing E-Paper



(b) Cross section of color photo-addressable E-Paper

Fig. 1-9 Structure of photo-addressing E-Paper

1.2.7. エレクトロクロミック方式 (Electrochromic, EC)

エレクトロクロミズム (Electrochromism, EC) には、電気エネルギーによる可逆的な光学特性変化をさすが、一般的には電気化学的な酸化還元反応によって引き起こされる物質の色調・色彩の可逆的な変化であり、電流（電気量）で変化をひき起こすタイプの現象である。ECセルは電気化学セルであるため、電池と同様、Fig.1-10 に示すように一対の電極で電解質層をはさむ構造をもつ¹¹⁾。発色を視覚的に見るため、発色を起こす電極には透明電極が用いられる。シアン、マゼンタ、イエローに発色する材料を用いたセルを積層することにより、赤、緑、青、黒の表示も可能となっている^{12,13,14)}。

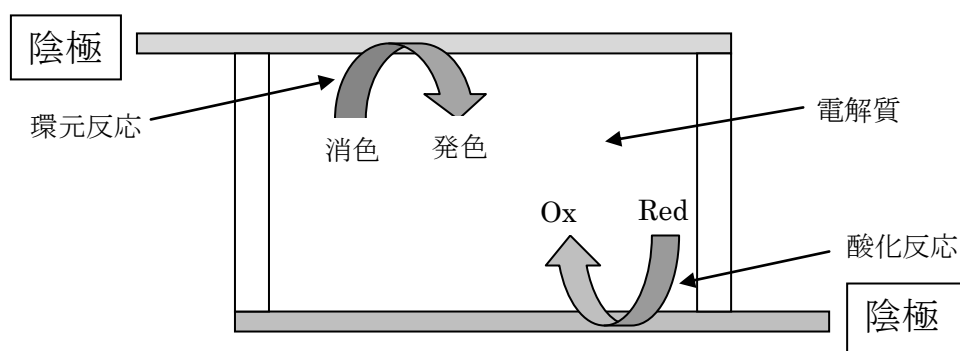


Fig. 1-10 Schematic illustration of typical EC

1.2.8. 電子粉流体移動方式 (QR-LPD)

電子粉流体方式は粒子移動方式の一つである。まず、液体に近い流動性を持つ電子粉流体を2枚の電極間に設けたリブの間に封入する。

そして電極間に印加する電圧により電子粉流体を移動させて表示を切り替えるというものである¹⁵⁾。

電子粉流体は高分子樹脂を主体としており、粒径は約 $10\mu\text{m}$ である。電子粉流体を電子顕微鏡により観察した画像を Fig.1-11 に示した。表示をスムーズに行う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ることが有効である。その実現手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 (Fig.1-11 (a)) や酸化チタンなどの金属酸化物を粒子表面に付着させることや (Fig.1-11 (b)), 粒子重合時に多孔質化させる手法 (Fig.1-11 (c)), 表面を化学処理することにより凹凸を付与させる方法 (Fig.1-11 (d)) などが挙げられる¹⁶⁾。

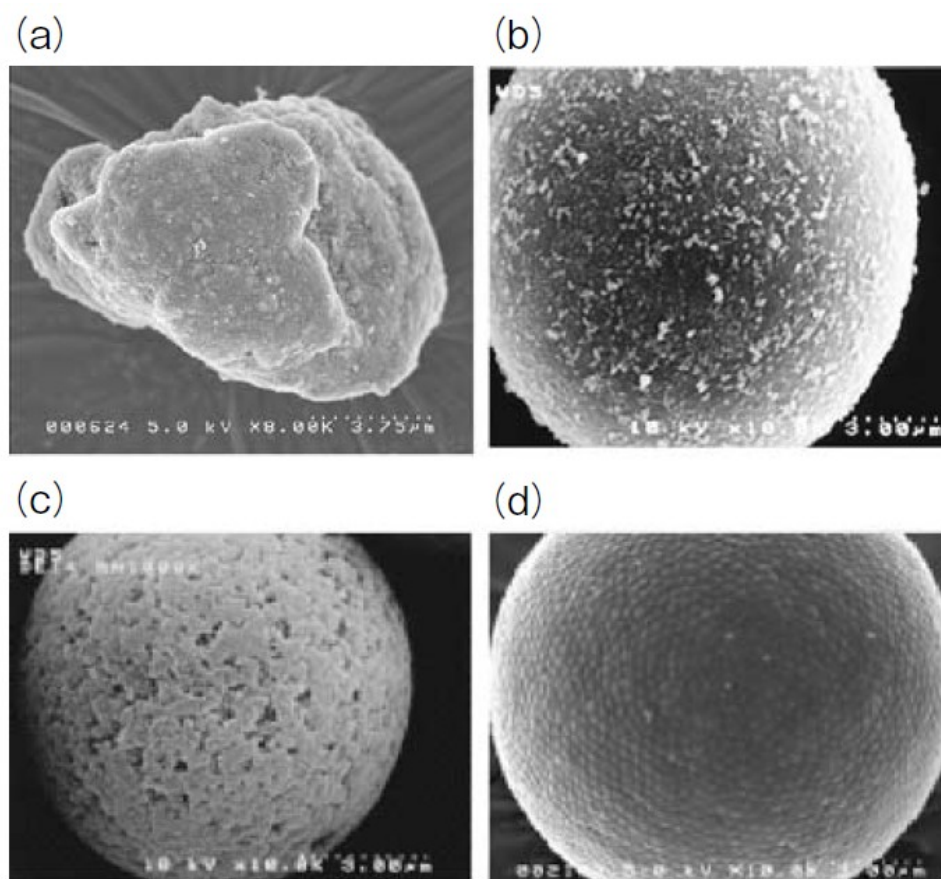


Fig.1-11 SEM Images of surface modified particles

QR-LPDは単純な構造を持つ、2つのITO電極がポリマーと染料からなる2種類の電子粉流体を挟んだだけである。白/黒のモノクロ表示の場合は、一方の粒子が黒色で正の電荷を有し、もう一方の粒子が白色で負の電荷を帯びている。ドライレジストプロセスで形成されたリブがITO電極の距離を $40\mu\text{m}$ に維持し、ピクセル間の粒子の偏りを防いでいる。2つの電極の間に電圧を印加することで、帯電粒子が電極へ移動する。負の電圧を上側の電極に印加した場合、黒色の正に帯電した粒子が上側に移動して黒表示になる。一方、正の電圧を上側に印加した場合、ディスプレイは白表示になる。白や黒の粒子のみでなく黄色、赤、青や緑などの粒子も開発され、エリアカラーディスプレイも実現している。

電子粉流体は急峻なしきい値を持つ。閾値より十分に大きな電界が加えられると、粒子は動き始める。移動後、電極と粒子の間に働く鏡像力とファンデルワールス力により、電圧を加えなくても粒子の状態は維持される。これが、QR-LPD が表示イメージを記憶できる理由である。

QR-LPD は電気泳動ディスプレイ(EPID)と同様な画像品質を有するが、QR-LPD の粒子は空気中を移動するため応答速度は EPID よりずっと速い。EPID はたいてい数百ミリ秒より長い応答速度が必要だが、QR-LPD はわずか 0.2 ミリ秒以下しか必要としない。このため、速やかな書き換えが可能となる^{17,18)}。

参考文献

1. 矢口博之：“電子ペーパーの調査・研究” 情報創造学研究室資料集、(2003)
2. 特許庁資料 標準技術集「電子ペーパーおよびフレキシブルディスプレイ」(2005)
3. 鈴木 明：“電子ペーパーの最新動向 2007”日本画像学会誌, 169号, pp.22-34 (2007)
4. 社団法人 日本機械工業連合会、社団法人 ビジネス機械・情報システム産業協会：“平成 17 年度 拡大する電子ペーパー市場と機械産業の取り組みについての動向調査研究報告書”、(2005)
5. 鈴木 明：“電子ペーパーの最新技術” 日本印刷学会講演予稿集,p.106-121(2010)
6. Anne A. Chiang: “Electrophoretic display composition”, U.S. Patent: 4285801 (1981)
7. Thibault Roques-Carmes, Stephanie Palmier, Robert A. Hayes, Luc J.M. Schlangen: The effect of the oil/water interfacial tension on electrowetting driven fluid motion, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 267, pp. 56–63 (2005)
8. 谷川 智洋, 面谷 信, 高橋 恭介：“ツイストボールディスプレイの表示回転特性”Japan Hardcopy 2000 論文集, p.65-68 (2000)
9. 堀田 吉彦：“リライタブルマーキング技術の最近の動向”電子写真学会誌, Vol.35, No.3, p.148-154 (1996)
10. http://www.qualcomm.com/common/documents/white_papers/iMoD_Display_Overview.pdf
11. 日本画像学会 編：“電子ペーパー” 東京電機大学出版局, p.55-56 (2008)

12. Yutaka Goh, Seiji Sunohara, Mami Nishimura and Norihisa Kobayashi : “A New Color Electronic Paper with Organic Electrochromic Technology”Proceedengs of The 12th International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2005, IDW/AD’05, pp.895-898 (2005)
13. 木村 光晴、小林 範久 : 第100回日本画像学会研究討論会, p.73, (2007)
14. H.Urano, S.Sunohara, H.Ohtoma, N.Kobayashi: J.Mater, Chem., 14, 2366-2368, 2004
15. R. Sakurai, S. Ohno, S. Kita, Y. Masuda and R.Hattori, “Color and Flexible Electronic Paper Display using QR-LPD Technology” SID Symposium Digest, no.68.2, pp.1922-1925, San Francisco, USA, June, (2006)
16. 山田 修平 和久田 聡 服部 励治: 電子粉流体ディスプレイ(QR-LPD®)の中間調表示, 信学技報, (2004)
17. 田沼 逸夫 : “電子粉流体を用いたフレキシブル電子ペーパー”日本画像学会誌, 169号, p.46-50 (2007)
18. 高木 光治: 高機能ナノ粒子設計によるペーパーライク電子ディスプレイの開発, 粉碎No. 52, 特集/ナノパーティクルテクノロジー : 応用・実用化への新展開, pp28-31 (2009)

第 2 章 トナーディスプレイの原理

2.1 はじめに

トナーディスプレイは帯電した着色粒子を気体（空気）中に分散し、電界により着色粒子を移動させることにより表示するディスプレイ方式である。

トナーディスプレイは画像を保持する際に電力を必要としない反射型のディスプレイであり、その構造も単純であるため電子ペーパーとしての応用も可能である。また粒子は気相中を移動するため電気泳動ディスプレイのような粒子移動の際の抵抗はほとんどなく、応答速度も早いため動画表示の可能性もある。

この章ではトナーディスプレイの基本原理について述べる。

2.2 基本原理

トナーディスプレイは 2 枚の透明電極間に黒色トナー粒子と白色トナー粒子が封入されており、電圧を印加すると粒子が電極間を移動し画像を表示するのが、基本的な表示原理である。

トナーディスプレイには 1 粒子移動型と 2 粒子移動型に大別される。それぞれの方式で用いる粒子が異なり、セル内部における粒子の帯電方法及び挙動にも違いがある¹⁻³⁾。

電子ペーパーは、物理的あるいは化学的な現象の組み合わせで表示を行っているため、1 粒子移動型、2 粒子移動型以外にも表示原理も様々ある。そこで、いくつかの表示方法と基本原理について説明をする。

2.2.1 1 粒子移動型

電荷輸送層を塗布した 2 枚の ITO ガラス電極が、平行に適当な間隔を持たせて対向させてある。ITO ガラスとは、酸化インジウムと酸化スズの混合物である ITO (Indium Tin Oxide) を成膜することにより、可視域を透過し緻密で均一な導電性を有するものである。

内部には黒色粒子と白色粒子を一定の割合で封入している。この時点では粒子の帯電は起きていない。電荷輸送層は正の電荷のみを輸送する働きを持っている。そのため電極に電圧を印加すると電荷輸送層を通じて黒色粒子に電荷注入が起きる。つまり、黒色粒子はセルを作製した時点で正電極側の電荷輸送層と接触している必要がある。正の電荷を帯びた黒色粒子は、白色粒子の中を通り、上部電極側に向かって電界移動する。

セルの上部電極側から見ると、黒色粒子のみが観察されるため、黒表示となる。反対に、印加する電圧の向きを逆にすると黒色粒子は下部電極表面に移動するため、上部電極側からは白色粒子のみが観察され、白表示となる。移動した黒色粒子は電荷輸送層を挟んで、負電極電荷とのクーロン力にて保持される。

Fig2-1 に 1 粒子移動型の構造及び駆動原理を示す^{4,6)}。

1 粒子移動型トナーディスプレイ

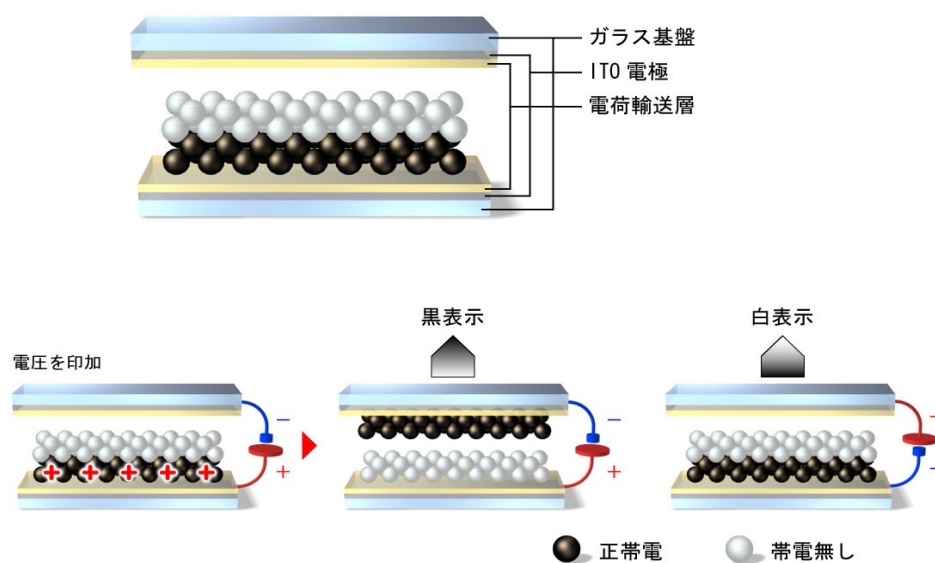


Fig2-1 1 粒子移動型の構造及び駆動原理

2.2.2 2 粒子移動型

1 粒子移動型で述べたものと同様、適当な距離をおいた対向させた 2 枚の ITO ガラス基盤を使用し、電極間に黒色粒子及び白色粒子が封入してある。1 粒子移動型のものでは電極表面に電荷輸送層を塗布したが、2 粒子移動型の場合は絶縁層を塗布する。なぜなら正孔輸送の働きは必要ないためである。

また、粒子はセルを作製した時点で摩擦帯電している必要があるため、よく混合攪拌したものを封入する。Fig. 2-2 で示すように、黒色粒子は負に、白色粒子は正に摩擦帯電している。そのため、電極に電圧を印加すると黒色粒子は正電極表面へ、白色粒子は負電極表面へ分離・移動する。セルを正電極側から観察すると黒表示、負電極側から観察すると白表示となる。(使用する粒子とその組み合わせで粒子の帯電方向は変化する。よって、正電極側が白表示となる場合もある。)

2 粒子移動型トナーディスプレイ

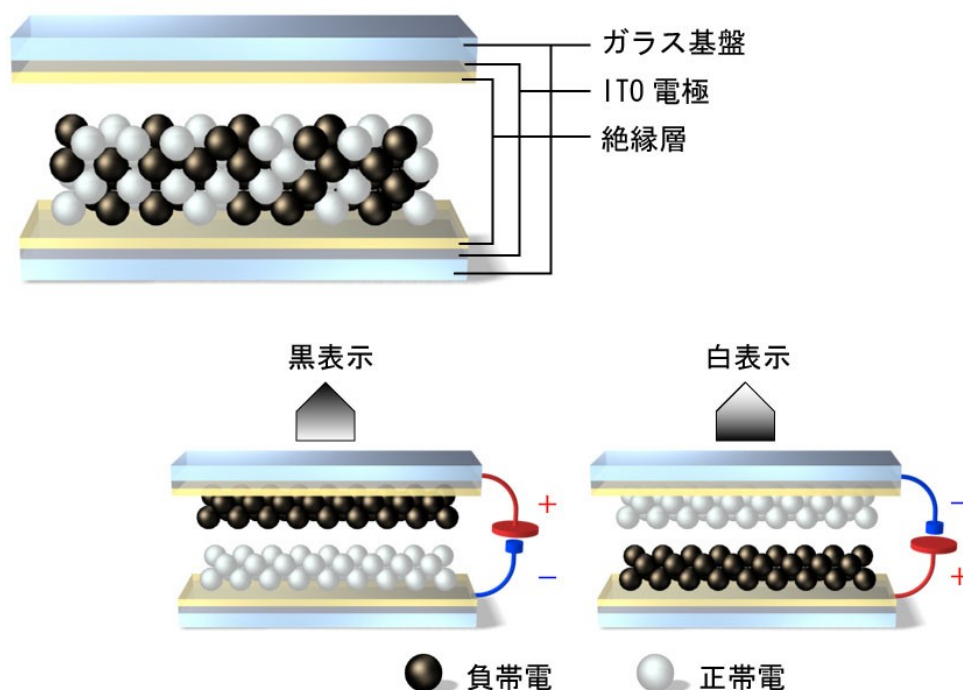


Fig 2-2 2 粒子移動型の構造及び駆動原理

2.2.3 多粒子移動型¹⁻²⁾

ここではカラー粒子を用いた 3 粒子移動型に関して概念を説明する。

摩擦帯電型トナーディスプレイセルにおいて、駆動電圧は正負に帯電した粒子間のクーロン力によると考えられる。そのため、白色、黒色粒子間のクーロン力と白色、カラー粒子間のクーロン力に差が生じれば、黒色粒子とカラー粒子は異なる駆動電圧で移動し、3 色の表示の制御が可能であると考えられる。

Fig. 2-3 に 3 粒子移動型によるカラー表示を示す。同じセル中に封入されている 3 粒子の内、白色粒子は負に、シアン、イエロー粒子は正に帯電しているとする。そして、イエロー粒子の帯電量はシアン粒子に比べ十分大きいとする。以上の様な状態のセルに印加する電圧を制御することにより白色、シアン、イエローそしてシアンとイエローの混色であるグリーンの表示が可能となる。

Fig.2-3 に 3 粒子移動型トナーディスプレイの色表示を示す。

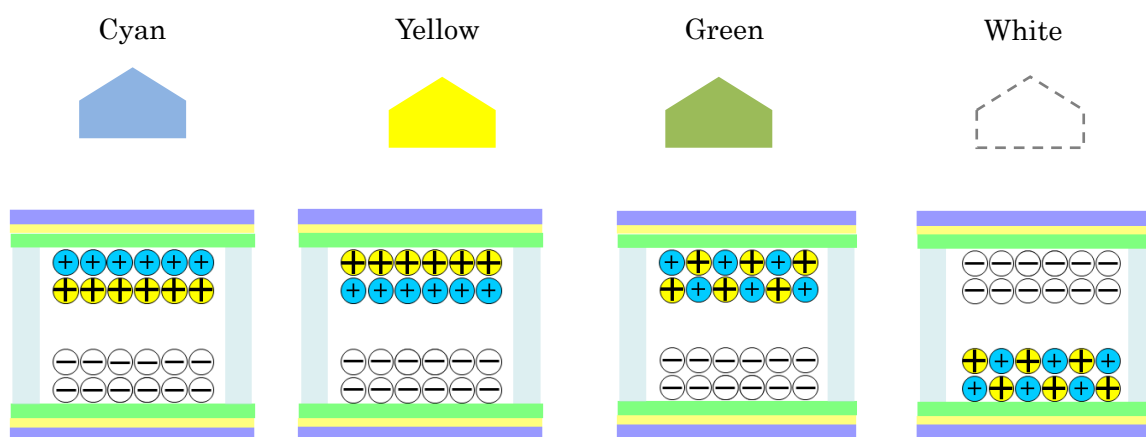


Fig.2-3 3 粒子移動型トナーディスプレイの色表示

3 粒子移動方式はカラー背面板と同等の表示が原理的に得られる。しかし、3 粒子の制御を発展させ、4 粒子、5 粒子と独立に表示できる粒子の種類を増やしていくことができれば、サブピクセルを必要としないカラー表示が可能となる。

特に 5 粒子系が実現すれば、白色、黒色、そして 3 原色の粒子を混合し、セル全体に均一に敷き詰めることで、カラー表示に必要な表示が全て得られることになる。これにはサブピクセルも無く、カラー背面板やカラーフィルタも必要としない。そのため、面積的な光の減衰が無く、白色、黒色、色の 3 原色の単色を表示した場合に理想的な分光分布が得られると考えられる。これはトナーディスプレイの理想的なカラー表示と考えることができる。

電子ペーパーのカラー化に関してはカラーフィルタ方式やカラー背面を用いた方式などがあり、実用化されているが、ここでは、カラー粒子を個々に制御することでカラー表示を行う 3 粒子移動型に関して説明する。

トナーディスプレイは粒子が動き出す電圧（閾値電圧）が存在する。そして、この閾値電圧は粒子間のクーロン引力が小さくなるという理由から、帯電量が小さい粒子ほど低くなることが分かっている。Fig.2-4 にイエロー・マゼンタ・黒粒子の 3 種類の粒子を用いた場合の 3 粒子移動型カラー表示方法について示す。封入されている粒子は、イエロー粒子が負に、マゼンタ粒子と黒粒子が正に帯電しているとし、黒粒子の帯電量はマゼンタ粒子に比べて十分に大きいものとする。(A) の状態では正帯電の 2 粒子が上部電極に付着し、(B) の状態で負帯電の 1 粒子が上部電極に付着する。(B) の状態から徐々に電圧を下げていくと、先に帯電量の小さいマゼンタ粒子だけが動き出し、電極表面に付着することでマゼンタ表示となる(C)。

今度は電圧を徐々に上げていくと先ほどと同様にマゼンタ粒子が先に動き出し(D)のように整列する。この状態から電圧を瞬時に切り替えると、整列した正帯電の粒子がそのまま移動するので(E)の状態となり、黒表示が得られる。

Fig.2-4 に 3 粒子移動型トナーディスプレイの表示方法を示す。

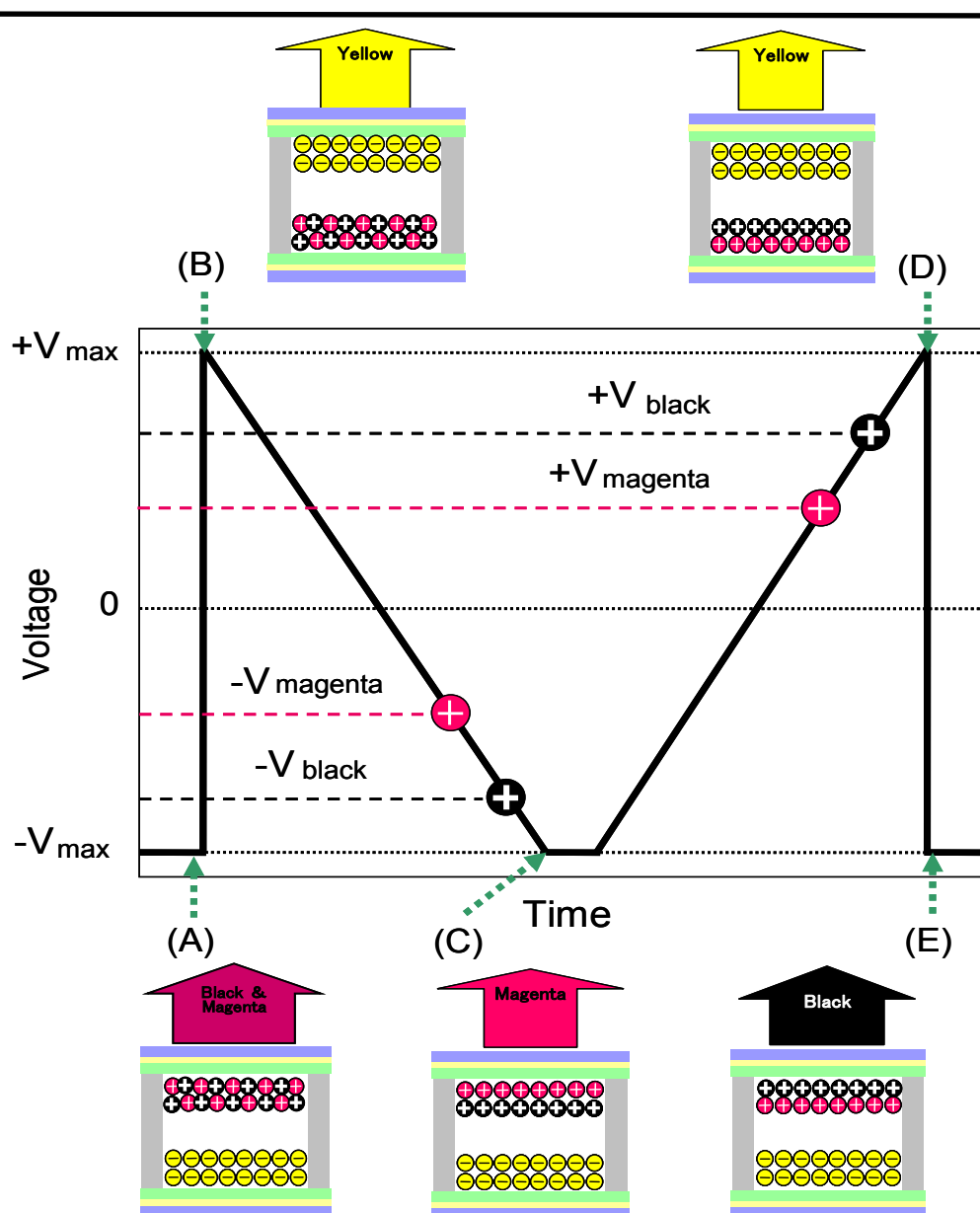
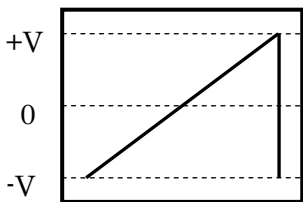
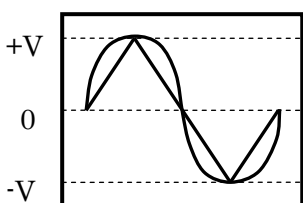


Fig.2-4 3粒子移動型トナーディスプレイの表示方法³⁾

また3粒子を制御する電圧波形とその要素技術について、Table 2-1 のように3つに分類した。

Table 2-1 カラートナーディスプレイの要素技術の分類⁴⁾

要素		電圧波形
<p>整列 (層状に並べる)</p>	<p>時間と共に徐々に変化していく電圧により粒子に応答時間の差が生じ、帯電量の小さい粒子が先に動き出し帯電量の大きな粒子を追い抜く。しかし、電界が飽和するので粒子はある状態で止まってしまい、少しの粒子しか整列されない。そこで、矩形波を印加することで、ある程度その配列をキープしたまま、粒子は元に戻る。このプロセスを繰り返すことで、やがて粒子は層状に整列されていく。</p>	<p>鋸波電圧</p> 
		<p>入れ替え (層を入れ替える)</p>
<p>攪拌 (均一に混合する)</p>	<p>同極性の2つの粒子に応答時間の差が生じるため、一方の電極へ同極性で帯電量の小さい方の粒子が動き出す。そして、電圧が逆電圧へと推移していき、整列されかけた同極性の粒子が逆方向へ、同様に応答時間の差を持って動き出す。このように、矩形波で元に戻る過程が入らないため、粒子が攪拌されていく。</p>	<p>Sin 波、三角波電圧</p> 

この 3 粒子の制御を発展させ、4 粒子、5 粒子と独立に表示できる粒子の種類を増やしていくことができれば、サブピクセルを必要としないカラー表示が可能となる。特に、5 粒子系が実現すれば、白色、黒色、そして 3 原色を混合し、セル全体に敷き詰めることで、フルカラーの表示が可能となる。これは、サブピクセルも必要なく、カラーフィルタや背面板も必要としない。このため、面積的な光の減衰が無く、理想的な分光分布が得られると考えられる。これは、トナーディスプレイの理想的なカラー表示と考えることができる。

2.3 本研究の目的と内容

近年、電子ペーパーの研究競争が激しく展開され、白黒表示電子ペーパー製品の販売が盛んに行われてきた。電子ペーパー分野での技術発展にしたがってカラー電子ペーパーの研究報告が増加しているが、本研究では、2 粒子移動型トナーディスプレイに主眼を置き、トナーディスプレイの表示性能とトナー物性の帯電量、流動性などを検討する。

今回の研究が行われているトナーディスプレイは、帯電粒子を電界により移動させることで画像表示を行う書き換え可能な反射型ディスプレイであり、無電源での画像保持、低消費電力、高視野角性、そして高速応答性といった特徴を有しているため電子ペーパーとしての応用が期待されている。しかし、他の表示方式に比べ駆動電圧が高いといった問題点がある。低電圧駆動へのアプローチとしてデバイス面と実際の色表示を行う粒子の面からの検討が考えられる。そこで本研究では粒子の面からのアプローチとして、外部添加剤の粒子を用いた粒子間のクーロン力を弱める方法を取りあげる。そこで本研究では高速ミルを用いた攪拌方法と手振り帯電方法研究分野で用いられている方法であり、原理が単純であり比較的簡単に行う事が出来るといった利点が挙げられる。この方法を用いて白黒粒子の粒子間距離帯電性を変化させ最適な粒子特性を深る事を目的とした。

2.4 本論文の概要

本論文は全 9 章により構成される。各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章 電子ペーパー技術の原理と電子ペーパー技術の開発現状紹介

第 2 章 トナーディスプレイの基本原理と表示方法の説明

第 3 章 微粒子に作用する力及び粒子物性

第 4 章 実験試料と実験装置・器具説明

第 5 章 トナーディスプレイの表示性能及び白黒粒子の配合比率について検討

第 6 章 トナー帯電量及び粒子間帯電量測定し、実際の粒子の帯電状態

第 7 章 外部添加剤の添加効果を探るため各方法で添加による表示性能の向上
の研究

第 8 章 単純マトリックス表示性能

第 9 章 まとめ

参考文献

- 1.山本哲也：“摩擦帯電型トナーディスプレイのカラー表示”、千葉大学大学院修士論文 (2005)
- 2.竹内宗靖：“トナーディスプレイの低駆動電圧化と多粒子制御によるカラートナーディスプレイの検討”、修士論文 (2006)
- 3.町田 義則, 山口 善郎, 松永 健, 酒巻 元彦, 諏訪部 恭史, 重廣 清：“絶縁性粒子を用いた摩擦帯電型トナーディスプレイの表示特性”, Japan Hardcopy 2001 Fall Meeting, pp.48-51 (2001)
- 4.T.Kitamura: Movement of Tribo-electrically Charged Particles for Electronic Paper, Asia Display/IDW01, pp.1721-1722, (2004)
- 5.中村佐紀子、北村孝司：“トナーディスプレイにおける粉体の流動性”, Japan Hardcopy 2005, pp.277-280, (2005)
- 6.安田理、趙国来、星野勝義、北村孝司：“トナーディスプレイの表示特性 (IV)” JH’2001, p.131 (2001)

第3章 微粒子に作用する力

3.1 はじめに

トナーは大変微細なため集合体になると水のような動きを示す。流れるような動きで流動性と言われるが、その測定方法について本章で説明をする。

また、トナーディスプレイにおける駆動電圧を低くするためには、微粒子に作用する力として分子間力、静電気力、電界から受ける力を考慮することが重要である。さらにその他の力とし液架橋力の説明をする。

3.2 粒子物性¹⁻⁵⁾

3.2.1. 一般的なトナー

複写機やプリンターなどで使用されるトナーは単一つの物質ではなく、**Fig.3-1**に示すように、トナー粒子一個は樹脂に着色剤やワックスなど複数の物質から構成された混合物であり、また外添剤などを練りこんだ粉体である。その粉体を紙面に敷き詰め、熱で定着させてさまざまな文字や画像を再現する。

Fig.3-1に示すようにトナーには大別して粉砕トナーとケミカルトナーの2種類がある。一般的に粉砕トナーは溶融した樹脂に顔料、帯電制御剤、ワックスを分散して練りこみ、冷却して固化したものを微粉砕して、超微粉だけを除去し、流動化剤を添加して作製される。

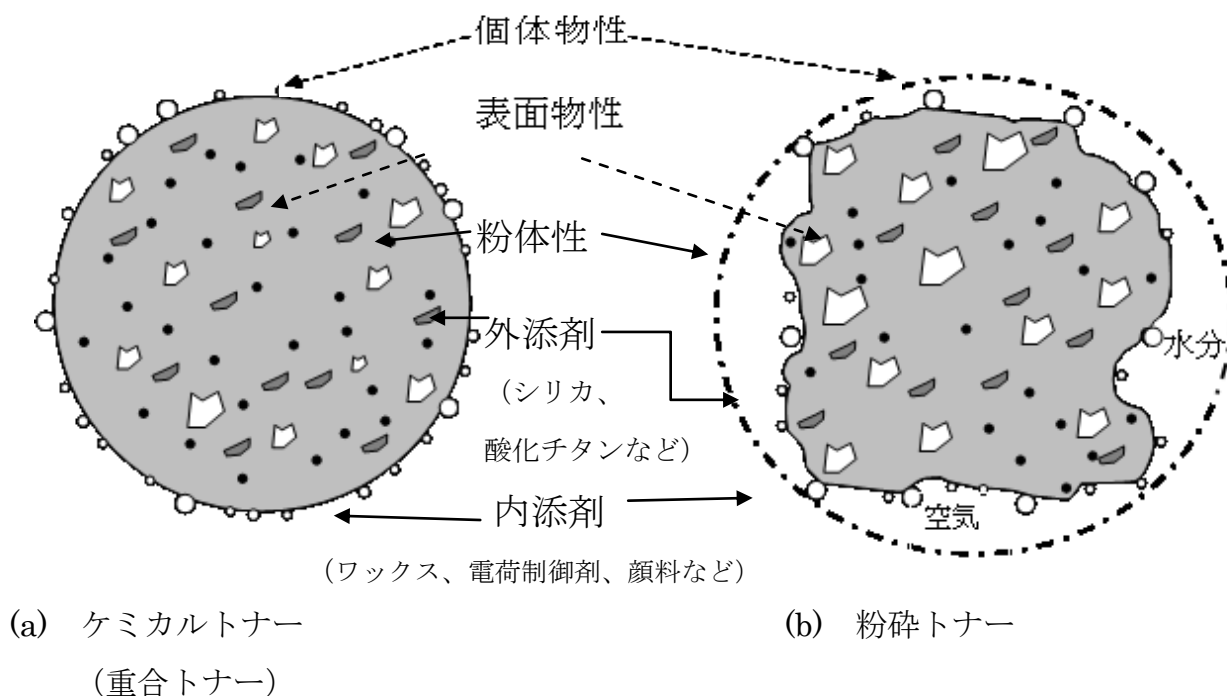


Fig.3-1 トナーの構成とトナー物性

Table.3-1 に代表的なトナーの構成例を示す。トナー材料は様々あり、それぞれに機能を持つ。

Table.3-1 代表的なトナーの構成例⁶⁾

材料	比率(質量%)	
	非磁性トナー	磁性トナー
トナーバインダー	80~90	45~50
着色剤 ^{*1}	5~15	-
磁性粉	-	45~50
ワックスなど ^{*2}	0~5	0~5
荷電制御剤 ^{*3}	1~5	1~5
流動化剤	0.1~4	0.1~4

* 1 カーボンブラック、シアン、マゼンタ、イエローの顔料や染料など。

* 2 定着性能にかかわる助剤。定着ローラーとトナーの離型機能などを担う。

* 3 電気特性にかかわる助剤。トナーの極性（帯電電荷の種類）決定や、帯電量を安定させる機能を担う

3.2.2.流動性⁷⁾

粒子の流動性は表示特性に大きな影響を与える。流動性が良い粒子は表示セル内での移動が容易で、高い表示コントラストを示すようになる。一般に流動性の評価には安息角が用いている。

トナーは粒径 $5\sim 20\mu\text{m}$ 程度の微粒子であり、粉体の物性の一つである安息角測定の様子を Fig.3-2 に示すが、電子粉流体の場合には、粉体形状であるにもかかわらず、安息角が測定できないほどに流動性が高い。微粒子の集団を小容器に入れ振ると、一見、液体が動いているように見える。この粉体が液体のように振る舞う性質を流動性と言い、流動性が高いほど粒子が受ける摩擦力が減少し、粉体の挙動が液体に近づく。



(a)電子粉流体の安息角測定の様子



(b)一般粉体の安息角

Fig.3-2 安息角測定の様子

トナーディスプレイの表示は粒子が電界の力を受けて移動することを利用している。移動の際に粒子が互いに接触しているものと考えられる。流動性は粒子の移動に関連しているため、コントラストに影響する。そのため、流動性を測定することが重要である。

流動性の評価方法にはさまざまある。Table3-2.に示す。圧縮度、安息角、スパチュラ角、凝集度について追加説明を行う。今回の実験では安息角の測定を行った。

Table.3-2 流動性の評価方法

項目	測定概要	備考
ゆるみ見かけ密度	かさ密度ともよばれる。一定振動によりほぐされた状態の粉体を容器に注入し、容器体積あたりに充填された粉体の重量から算出する。	流動性の良い粉体ほど密に充填されるため、ゆるみ見かけ密度は大きな値を示す。
固め見かけ密度	一定条件で粉体をタッピングし、計測する。	ゆるみ見かけ密度とともに圧縮度を算出する要素となる。
圧縮度	ゆるみ見かけ密度を A、固め見かけ密度を P とし、圧縮度 C は次式で算出される。 $C=100(P-A)/P(\%)$	流動性の悪い粉体ほどゆるみ見かけ密度と固め見かけ密度の差が大きくなり、圧縮度は大きくなる。
安息角	一定振動により、ほぐされた状態の粉体をロートから円形の平板に落下させ堆積した粉体の形成する山の傾斜角。	流動性のよい粉体ほど安息角は小さくなる。
スパチュラ角	平板状のスパチュラを粉体に埋め、これを上方に引き上げた時にスパチュラ上に堆積した粉体の傾斜角。	流動性のよい粉体ほどスパチュラ角は小さくなる。
凝集度	標準篩に粉体をのせ、これを一定振動数で一定時間振動させ、篩の通過重量から計測される。	流動性の悪い粉体ほど凝集度は大きくなる。

(a) 圧縮度

Fig.3-3に示したように、まず一定の容積をもった容器に粒子を自然落下させ、容器を粒子で満たす。容器から漏れ出た部分をすりきり板ですり切りする。この状態をゆるめかさ密度（A）と言う。次に、この状態の上にさらに粒子を最初と同様に静かに自然落下させ、粒子が盛っている状態で、容器底面を打ち付けるタッピングを180回行う。その後、すりきり板で容器から盛り出ている余分な粒子をすり切る。この状態を固めかさ密度（B）と言う。このとき、圧縮度Cは次の式で求められる。一般に圧縮度が大きければ流動性は悪いことを示す。

$$C=(P-A)/P\times 100 \quad (\%)$$

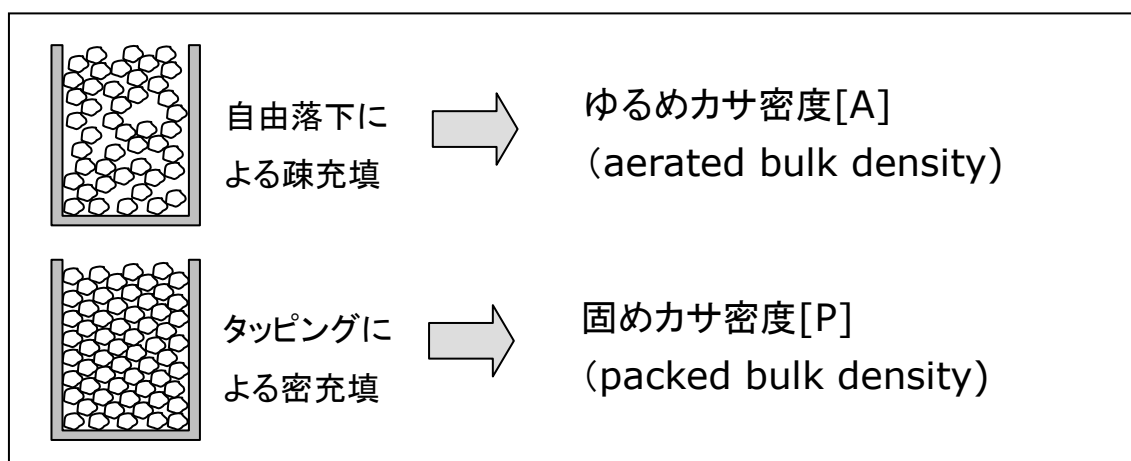


Fig.3-3 圧縮度

(b) 安息角測定法⁸⁾

安息角とは、粉体を平板へロートを使い落下させた際に生じる堆積した円錐体の傾斜角である。安息角はその粒子の流動性によって変化するので、安息角を測定することで流動性が評価できる。一般に流動性のいい粒子は安息角が小さい値を示し再現性がある。反対に、凝集性があり流動性が悪い粉体は安息角が大きく値を示す。Fig.3-4 図に示す方法があり、最も好ましい状態は注入法である。

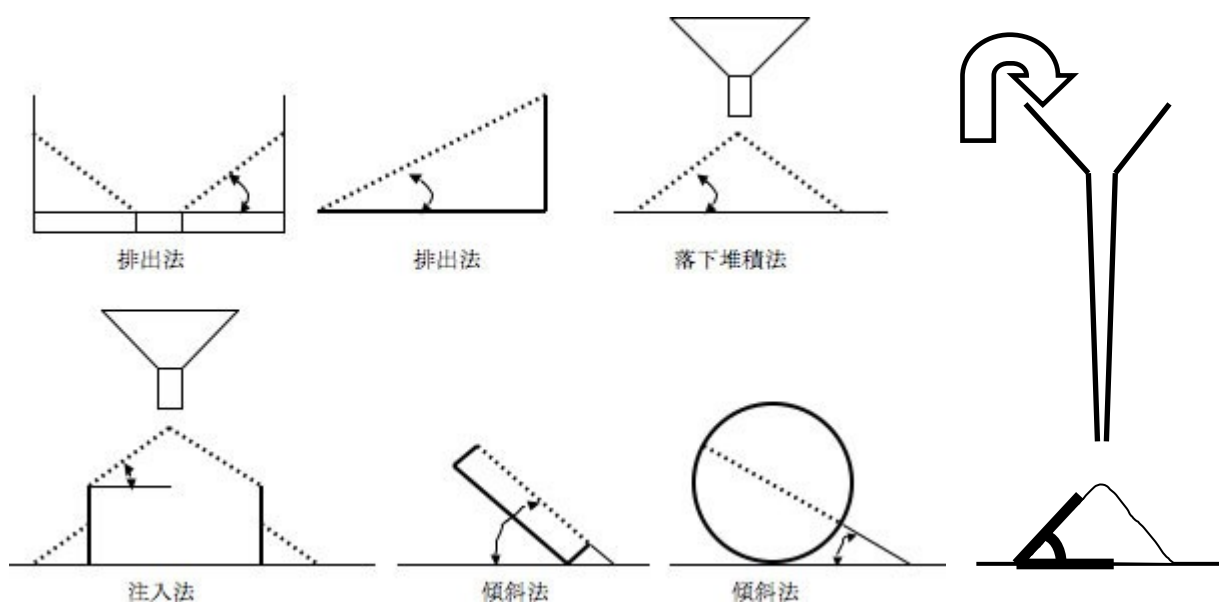


Fig. 3-4 安息角のイメージ

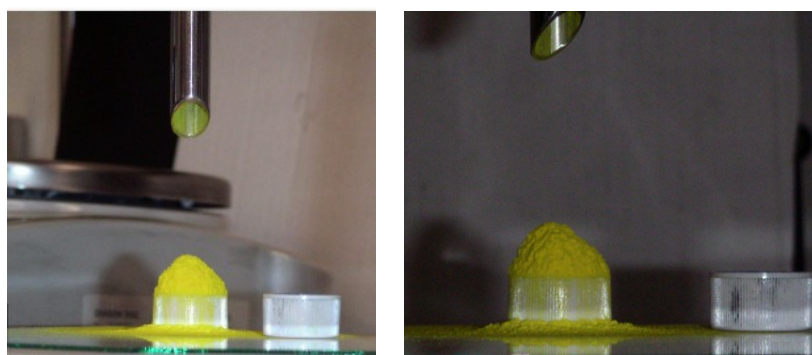






Fig. 3-5 安息角測定の様子 (一般粉体黄色トナーの場合)

Table.3-3 トナーの山の横方向から撮影した写真

Sample	CFn	Silica	White Toner	Black Toner
				
Angle of repose (Degree)	49	43	33	29

粒体の物性の一つである安息角測定の様子を Fig.3-5 に示すが、表 3-3(Table3-3)には自然に形成されたトナーの山の横方向から撮影した写真を示すがこの稜線がなす角度を安息角として求めた測定結果を示す。黒色トナーは球形のため低い安息角を示し、流動性が高いと考えられる。

(c) スパチュラ角

金属製のへら（スパチュラ）を水平にしてその上に粉体を推積させた時のプリズム状の側面の傾斜角のこと。具体的には、Fig.3-6 に示したように、金属製のへらを粉体層の中に入れ、ゆっくり持ち上げる。金属製のへらに残った粉体の3か所の角度を測定し平均を出す。これを衝撃前スパチュラ角とする。

次に、へらと連動した測定器具の支柱に付いている重りを落下させることで、へらに振動を与え、その振動でへらから一部粉体が落ちる。その後に残った粉体を最初と同様に、3か所角度を測定し平均を出す。これを衝撃後スパチュラ角とする。

スパチュラ角が小さいほど流動性が良いことを示す。

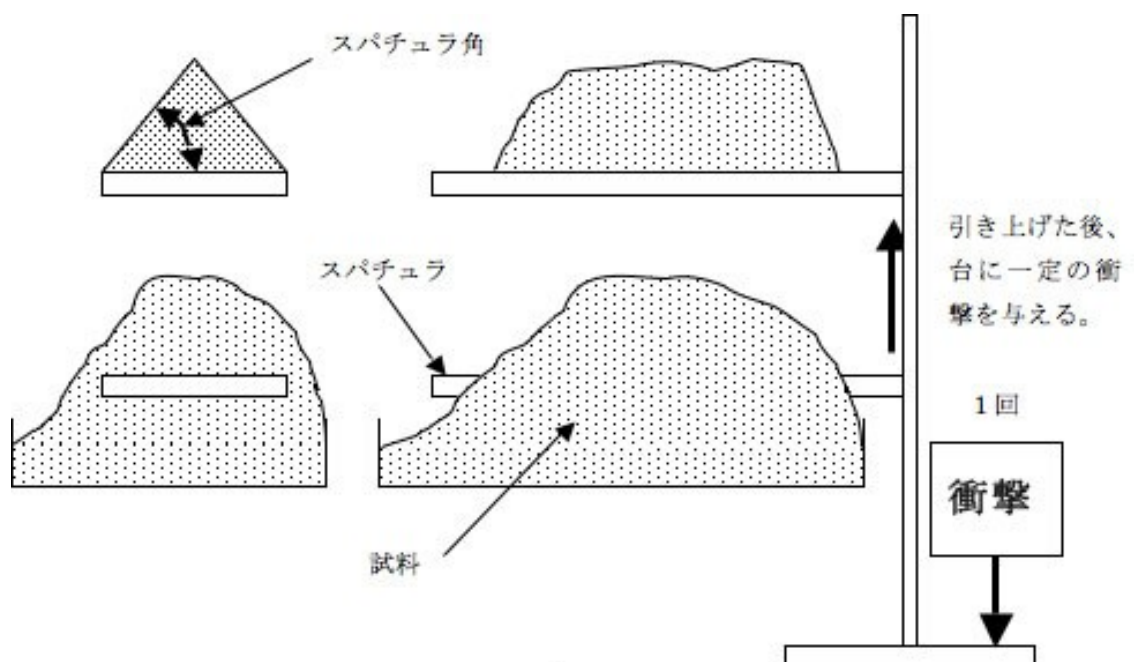


Fig.3-6 スパチュラ角のイメージ⁸⁾

(d) 凝集度

ふるい上でふるいの目開きより小さい粉体に一定の振動を与えた場合、粉体同士で凝集し大きな粒子となったり、ふるいの網面に粉体が付着しふるいから落下しなくなる。この現象を数値化したものが凝集度である。

トナーの流動性はトナーの働く凝集力に影響を大きく受ける。凝集力は目開きの異なるふるいを3段に重ね、規定の振動の強さと振動時間で一定量の粉体をふるった時、各目開きのふるいの上に残った重量から計算によって求める。

凝集度が大きいほど、流動性の悪いことを示す。

3.2.3.帯電性⁹⁾

まずクーロン力について説明をする。クーロン力とは、電荷を帯びた粒子に働く力は、二つの粒子の電荷の積に比例し、粒子間の距離の二乗に反比例する力である。Fig.3-7に示すように同じ符号（+と+、または-と-）の電荷のあいだには斥力、異なる符号（+と-）の電荷のあいだには引力が働く。つまり、電荷間にはクーロン力が働く。

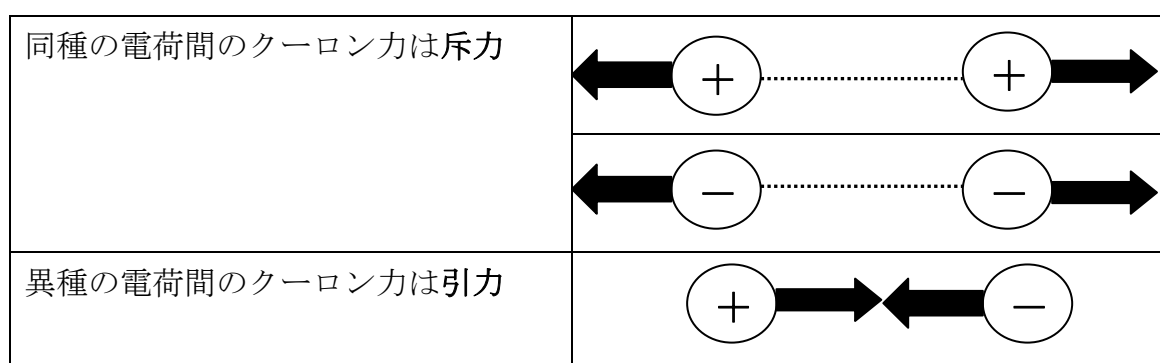


Fig.3-7 クーロン力の斥力と引力

トナーが電界から受ける力で移動するには、正と負に帯電した粒子間のクーロン力による引力以上の力を外部電界から与えることが必要である。そのため、トナーの帯電量はトナーディスプレイの駆動電圧を決める大きな要因の一つになる。どのようにトナーの帯電量測定をしたかについて説明をする。

帯電した物体の帯電量は基本的にはファラゲージにより測定することが基本となる。Fig.3-8に示すように、ファラゲージの内部導体容器は外部導体容器と完全に絶縁されて、外部導体容器は接地されている。

動作原理は次のとおりである。

電荷+Qに帯電した物体を内容器に入れると、内容器の内面には大きさが等しく極性が逆の荷電-Qが誘導される。そして、荷電+Qから出る電束はすべて内容器の内面に収束する。

荷電 $-Q$ はキャパシタ $C_f C_s C_{in}$ から誘導されるので、

$$V = Q / (C_f + C_s + C_{in})$$

という関係になる。ここで、 C_f は内容器と外容器の間の静電内量、 C_s は測定用キャパシタ、 C_{in} は電位計の入力インピーダスである。

もし、 $C_s \gg C_f$ かつ $C_s \gg C_{in}$ であれば、 C_f や C_{in} を知る必要なく、

$$Q = C_s V$$

と、内容器に入れた物体の帯電量を測定することができる。

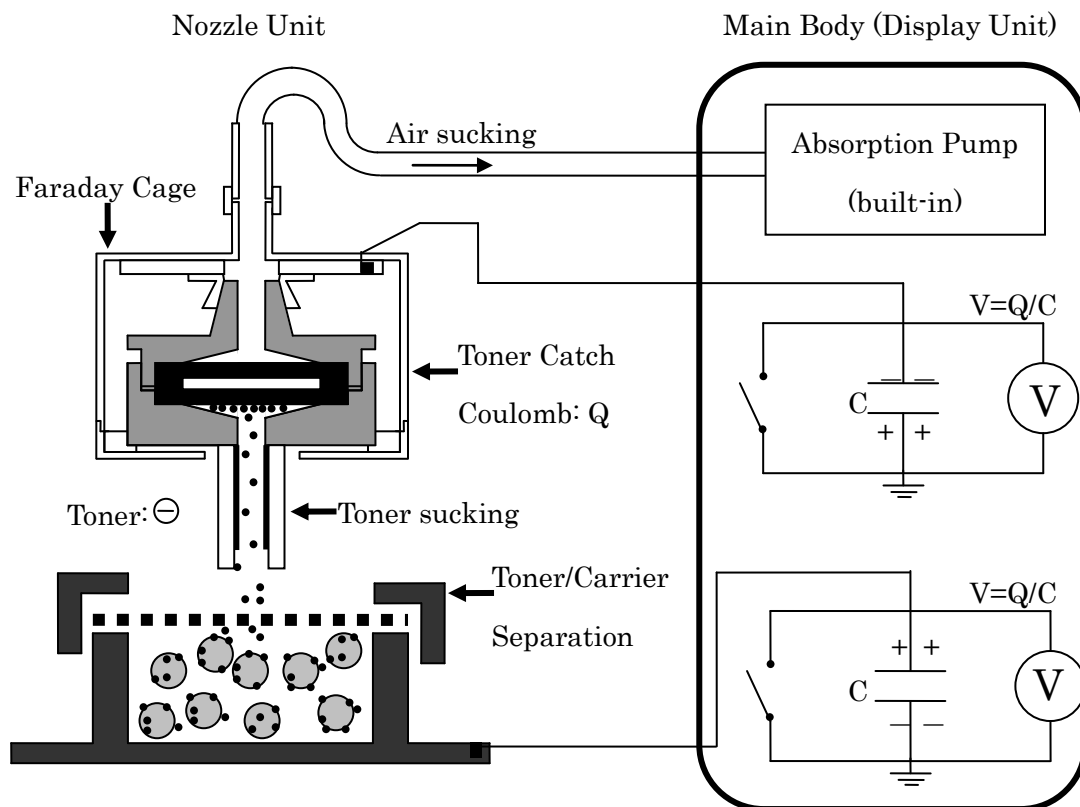


Fig.3-8 帯電量測定装置の概略

トナーの帯電量測定には吸引式小型帯電量測定器 q/m METER H210S (トレックジャパン製)を用いた。Fig. 3-7に吸引式帯電量測定器概略図を示す。この装置では、トナーとキャリアを混合したものを上部が金属メッシュで構成されたファラデーケージ内に閉じ込める。同じくファラデーケージを備えたノズルユニットにより、混合粒子を吸引することで、トナーとキャリアを分離する。トナーはノズル側、キャリアは下部のファラデーケージに電荷を閉じ込める構造となっている。電荷はセンスキャパシタンスに搬送され、誘導された電圧を測定することで $V=Q/C$ からファラデーケージ内に閉じ込められた全電荷量を求めることができる。また、最初に混合粒子を入れたファラデーケージの吸引前と吸引後の重量の変化を測定することで、電荷質量比 Q/M を算出することが可能である。

3.3 微粒子に作用する各種力¹⁰⁻¹⁴⁾

粒子を気体中で移動させるのは容易ではなく、粒子を移動させるための基本的な駆動原理について述べる。本方式は、印加する電界の方向を切り替えることにより、粒子の保有する帯電電荷を利用して、粒子を移動させるので、もちろん粒子が電荷を保有しなければ移動しないのは明確であるが、粒子が保有する電荷量が大きすぎても粒子は移動しない。

粒子に加わる力として①分子間力、②静電気力、③電解から受ける力、④その他の力(液架橋力)について説明する。

3.3.1 分子間力¹⁵⁾

粒子と電極間には、さまざまな力が発生していると考えられる。大きく2つに分けると、ファンデルワールス力・液架橋力などの粒子の電荷に依存しない力と、電気鏡像力の粒子の電荷に依存する力になる。分子間力とは、粒子と粒子、粒子と壁面など2物体が、ごく接近したときに生じる電磁氣的な力で、主に、2物体の電子の運動に依存する。

3.3.2 静電気力¹⁶⁻¹⁸⁾

2球の表面電荷密度を σ_1 、 σ_2 とし、粒子間距離 z が換算粒径 d に比べ小さい場合、静電気力 F を次式で表す。ここで ϵ_0 は媒体の誘電率とする。

$$F = -\frac{\pi \sigma_1 \sigma_2 d^2}{\epsilon_0}$$

換算粒径 d は d_1 、 d_2 をそれぞれの球の直径とすると以下に表わされる。

$$d = \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}$$

3.3.3 電界から受ける力

帯電した粒子を2枚の平行した平板の電極内に封入し、電圧を印加することで粒子は+または-の電極側に移動する。この時電界からの力を受けている。モデル図を Fig.3-9 に示す。この時の粒子が受ける力は次式で表わす。

$$F = q \frac{V}{d}$$

Fig3-9.の V は印加電圧、 d は電極間距離、 q は粒子帯電量を表している。駆動力となる F を増加させるには、 V の印加電圧と q の粒子帯電量を増やし、 d の電極間距離を短くすればいいことが分かる。

ただし、粒子帯電量 q を増やすと、粒子に加わる静電気力も同時に増加が生じてしまう。駆動電圧を低くすることを求めると、電極間距離 d をできるだけ短くすることと、粒子帯電量制御が必要だと考えられる。

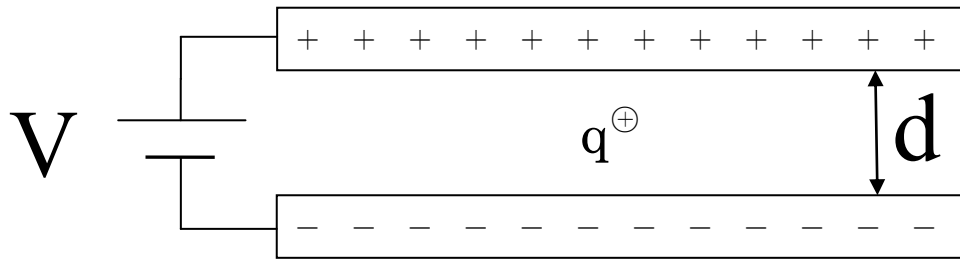


Fig.3-9 平行平板電極内の帯電粒子

3.3.4 その他の力

液架橋力

液架橋力とは、粉体表面の吸着分子が粉体同士の接触点において毛管凝縮などにより形成した架橋液膜内の毛管負圧と液の表面張力によって発生する力のことを指す。

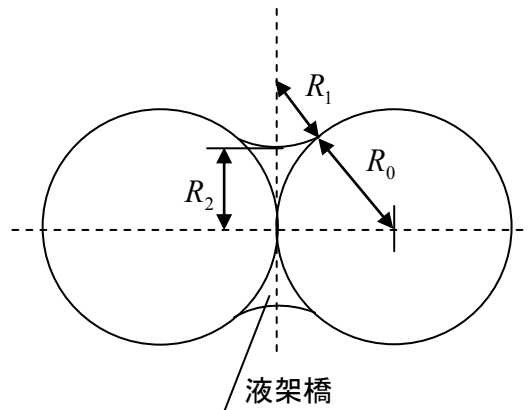


Fig3-10 粒子間の液架橋

液体橋による付着力の大きさは湿度と液体橋の形状に影響される。また吸着量や液架橋の形状は粉体表面の水蒸気に対する親和性の大小、粉体の形状、接触点の状態にも関連している。Fig.3-10のような同じ球形粒子の間に液架橋が形成されたとき毛管負圧に起因した力と液架橋の表面張力による力との輪が2粒子間に働く付着力Fとなる。式を以下に示す。

$$F = \pi R_2^2 \sigma \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + 2\pi R_2 \sigma$$

ここで σ は液体の表面張力である。この電気鏡像力を含めて、ファンデルワールス力、液体橋力などの粒子の電荷に依存しない力との総和が、メモリ性に寄与する力として作用しているものと雑測され、ある一定以上の力になるように設計しないと、十分なメモリ性は得られない。

また電圧を印加することにより、粒子を移動させるためには、印加した電圧によって生じる電界が粒子に作用し、その力がメモリ性に寄与している力を上まわらなければ、粒子は基板から離れることはできないと考えられる。

参考文献

1. 矢田芳雄：“プリンタに不可欠なトナー粉体〔電子写真現像剤〕について”,Product Hotline magazine (1998)
2. 小林義彰、西森芳樹、磯部和也、田所肇：“モノクロデジタル機用重合トナーの開発”,KONICA TECHNICAL REPORT VOL.16 (2003)
3. 柳田昇、重森和法、長谷川純：“重合法トナーミクロンオーダー粒子の機能制御”、高分子論文集「有機・無機ハイブリッド材料」特集号 Vol. 57, No.6, pp. 336-345 (2000)
4. 小淵秀澄：“複写機用トナー中のコンタミネーションの定量方法について”
日本分析工業株式会社技術情報 J0029-1
5. 日本画像学会 編：“ケミカルトナー” 東京電機大学出版局 (2008)
6. <http://www.sanyo-chemical.co.jp/pr/pdf/pk70.pdf> 三洋化成ニュース①2007
No.445 省エネルギー対応トナーバインダー
7. Y.C. Zhou, B.H. Xu, A.B. Yu, P. Zulli : “An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres” , Powder Technology 125, pp.45-54 (2002)
8. <http://www.eiseiken.co.jp/service/funtai/angle-repose-angleRepose.html> 株式会社環境衛生研究所ホームページ
9. 日本画像学会：“日本画像学会標準トナー帯電量測定方法（ブローオフ測定法）”、日本画像学会誌第 125 号, pp.101-110 (1998)

10. J・N・イスラエルアチヴィリ著, 近藤保/ 大島広行訳, “分子間力と表面力”, 朝倉書店 (1997)
11. 飯村治雄: “トナー付着力の研究—外添剤の効果”, Ricoh Technical Report No.26 (2000)
12. 谷川 民生: “マイクロハンドによる微細作業に関する研究”, 機会技術研究所報告 第182号(1999)
13. 米田 敬: “マイクロハンド用微小力センサの研究”, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文 (2003)
14. 岸由美子、門永雅史、渡辺好夫: “二成分現像トナー挙動シミュレーション”, Ricoh Technical Report, No.26 (2000)
15. Jun Yang, Ales Sliva, Amit Banerjee, Rajesh N. Dave, Robert Pfeffer : “Dry particle coating for improving the flowability of cohesive powders” Powder Technology, Vol.158, pp.21-33 (2005)
16. M.S. Bacelos, M.L. Passos, J.T. Freire : “Effect of interparticle forces on the conical spouted bed behavior of wet particles with size distribution” Powder Technology 174, pp.114-126 (2007)
17. W. Stanley Czarnecki, L.B. Schein : “Electrostatic force acting on a spherically symmetric charge distribution in contact with a conductive plane” Journal of Electrostatics 61, pp.107-115 (2004)
18. L.B. Schein : “Recent advances in our understanding of toner charging” Journal of Electrostatics 46, pp.29-36 (1999)

第4章 実験試料と実験装置・器具

4.1 実験試料

4.1.1 試料と粒子

本研究で使用した試料を Table 4-1 に示す。白色トナーは粉砕法、黒色トナーは球形である。トナーディスプレイセル製作において、電極には ITO ガラスを、絶縁層にはポリカーボネードを用いて、スペーサーにはテープスペーサーを利用し電極間距離を調節した¹⁾。

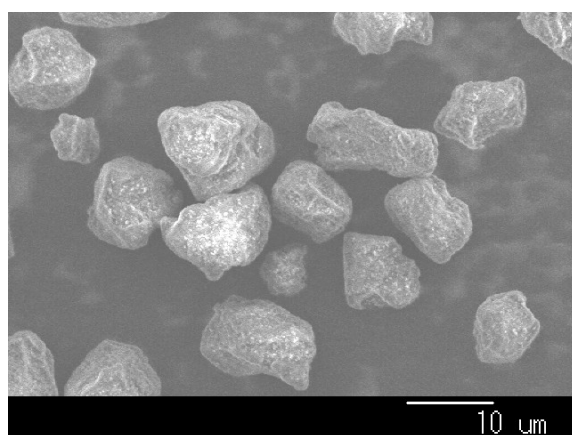
Table 4-1 実験試料・材料一覧

機能	材料	製品名
トナー	白色トナー	W 1
	白色トナー	W 2
	黒色トナー	B K (NEW)
電極	I T O	I T O ガラス
絶縁層	ポリカーボネート樹脂	P a n l i t e K - 1 3 0 0
スペーサー	クリーンルーム用テープ	ウルトラテープ # 1 1 6 4 (0.109mm)

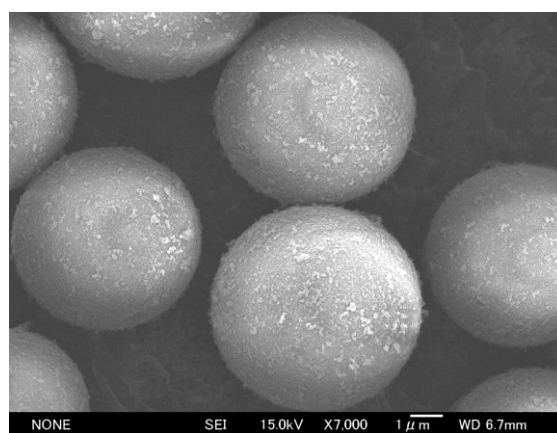
4.1.2 粒子

本研究では平均粒子径が $8\sim 10\mu\text{m}$ の白色、黒色粒子を用いた。Fig. 4-1 に本研究で使用した粒子の SEM 写真、Table 4-2 に基本特性を示す。粒子形状には真球状に近いものと、ランダムな形状を示しているものがある。これは作成方法の違いによって生じるもので、真球状のものは重合法によって作成され、また、ランダムな形状は粉砕法によって作成された。

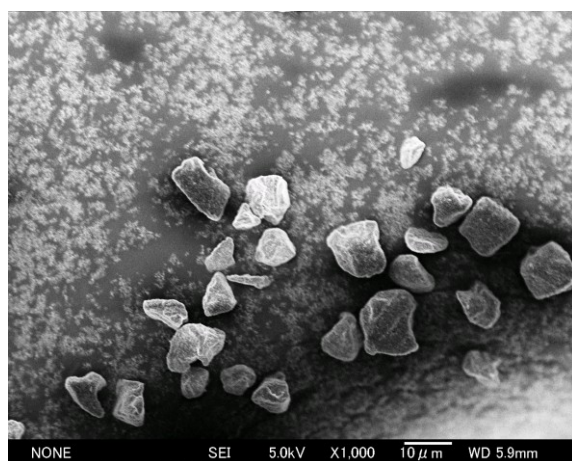
Fig-4-1 に本実験で使用したトナーの SEM 写真を示す。



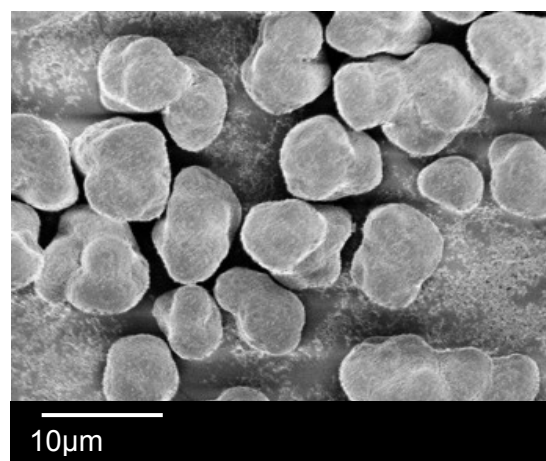
Toner-W II



Toner-BK



Toner-W I



Toner-Y1

Fig.4-1 粒子の SEM 写真

Table 4-2.粒子の諸特性

	粒子色	平均粒径 (μm)	形状
Toner-W I	白色	10	粉碎
Toner-W II	白色	10	粉碎
Toner-BK	黒色	8	球形
Toner-Y1	黄色	7	球形

4.1.3 外添剤粒子²⁾

外添剤はトナーに流動性を与え、トナー同士のブロッキングを防止するためにトナー表面に添加した一次平均粒径が 10～500nm の微粒子である。近年では、帯電制御、転写効率の向上、クリーニング性向上などの新しい機能も重要視されるようになってきている。

おもな外添剤としては、シリカ、アルミナ、チタニアなどの金属酸化物微粒子の表面をシランカップリング剤で処理して疎水化したものを用いた。最近では、平均粒径が 100～500nm の球形樹脂粒子も用いられるようになってきた。

粒子径や帯電性の異なる複数の子粒子を用意した。その粒子は日本エアロジル社から市販品を利用することにした。各粒子の物性 Table.4-2 に、SEM 写真を Fig.4-2 に示す。

Table. 4-2 各粒子の物性

外添剤粒子	色	製造	平均粒径(nm)	帯電性
酸化チタン				
T805	白	日本エアロジル	21	負
NKT-90	白	日本エアロジル	14	負
酸化アルミ				
C805	白	日本エアロジル	13	正

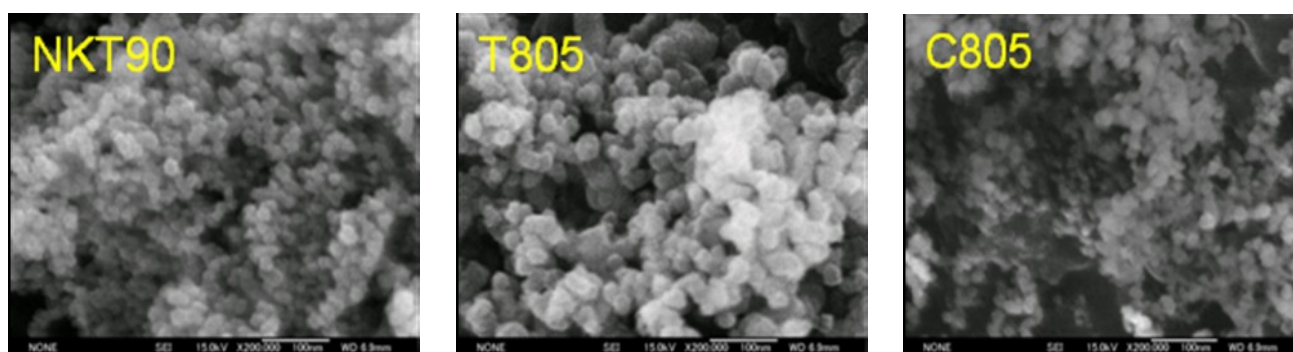


Fig.4-2 各粒子の SEM 写真

4.2 実験装置

4.2.1 トナーディスプレイセル

本研究室で作製・使用するトナーディスプレイは Fig.4-3 に示すような構造になっている。75 mm×25 mm のサイズに切り取った ITO ガラス電極表面にスピコート法(1000rpm,10s)を用いて 5wt%ポリカーボネート塗布した。このポリカーボネートは絶縁層の役割をする。形成された絶縁層の膜は約 2 μm となる。電極間には粒子を封入するための空隙を作製するためにスペーサーを挟む。スペーサーの中心に 10 mm×10 mm の穴を開けておき、そこに粒子を封入し電圧を加えることにより表示が行える。

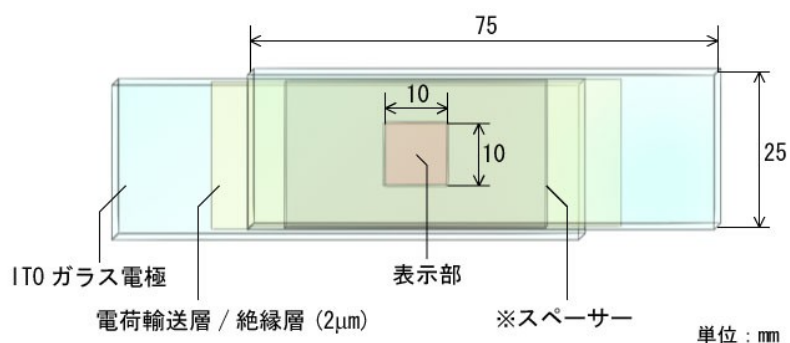


Fig.4-3 トナーディスプレイセルの構造

本研究で作成するトナーディスプレイは Fig.4-4 に示すような作製手順になっている。黒色粒子と白色粒子を重量混合比 1 : 2 となるように電子天秤を用いて秤量した後、サンプル瓶内で混合し、攪拌することにより十分摩擦帯電させている(a)。その後、十分攪拌した混合粒子を、スパチュラを用いて下部電極に固定されたスペーサーの表示部へ乗せる(b)、金属製の平らなヘラ等を使用して均等に広げる(c)。そして上部電極を重ね合わせてダブルクリップ等で固定することでセルが完成した(d)。平らなヘラ等を用いて粒子を封入するため、粒子の封入量はスペーサーの厚さに依存することになる。

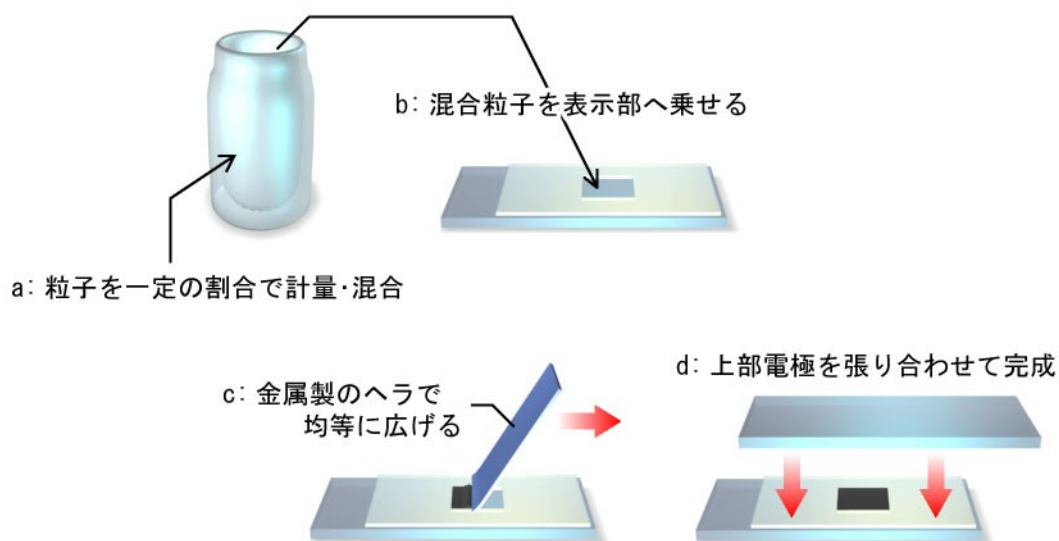


Fig.4-4 トナーディスプレイセル作製手順

トナーディスプレイの駆動には、交流電源として 15MHz シンセサイザ WF1943 (エヌエフ回路設計ブロック)、電圧増幅器として高電圧高速電力増幅器 4305 (エヌエフ回路設計ブロック) を用いた。

4.2.2 反射濃度

次に反射濃度について説明をする。

トナーディスプレイは光源から受けた光をそれぞれ異なる光学濃度をもつ粒子が反射することでコントラストを表す反射型の表示媒体であり、そのコントラスト評価には通常印刷物やコピーなどの評価に用いられる反射濃度が用いられる。Fig.4-5 に反射濃度の概念図を示す。標準的には反射濃度は対象物に光を45° の方向から I の大きさの光を当て、垂直方向に反射した光 I' の大きさを求めることで(4-1)式のように定義されている。

$$D_L = \log I/I' \quad (4-1)$$

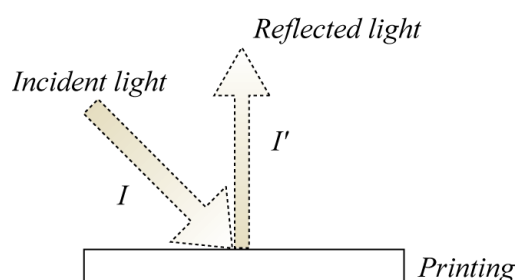


Fig. 4-5 反射濃度概念図

トナーディスプレイは ITO ガラス電極及び絶縁層を挟んで粒子層からの反射光を測定することになるため、通常の印刷物を測定する時とは異なる値を示すこととなる。よって、測定時には作製したセルと同じ条件を用いたキャリブレーションを行うことにより、粒子層表面の正確な反射濃度を得ることが可能である。

トナーディスプレイの反射濃度測定には反射濃度計（伊原電子製 Ihac-11）を用いた。測定はガラスを挟んで粒子層からの反射光を測定することになり、通常の印刷物を測定する時とは多少異なる値を示すことが予想される。そのためトナーディスプレイの反射濃度測定時には ITO ガラスをキャリブレーションボードに置いた上からキャリブレーションを行い、実際に試料が表示している色の値を出来るだけ正確に得られるようにする必要がある。

電源の電圧幅は0～500Vであり、セルのコントラストは500Vで最大となる。表示にムラが存在する可能性があるため試料の画像部は10mm×10mmと大きめにとってあり、反射濃度計を用いて測定する際は白表示・黒表示ともに3箇所以上を測定し、その平均値をそれぞれの反射濃度とする。基本的には印加電圧400Vにおける反射濃度を測定し、反射濃度の電圧依存性を調べる際には、まず400Vにおける反射濃度を測定し、20Vずつ徐々に電圧を下げ測定を行なった。

4.2.3 表示特性

黒色トナーと白色トナーを用いた2粒子移動型トナーディスプレイの反射濃度と印加電圧の関係をFig.4-6に示す。表示セル内に黒色トナーおよび白色トナーを封入後、両電極間に100Hzで400Vの交流電圧を印加して、トナー同士を攪拌し、十分に摩擦帯電を行う。その後、負の電圧を印加して黒色を表示し、その時の光学反射濃度を測定した。次に電源の極性を反転させ正の電圧を印加して白色を表示し、その時の光学反射濃度を測定した。そして、交流電圧を印加してトナーを攪拌し、その後、電圧を低下させて次の測定を行った。この操作を繰り返して印加電圧と表示反射濃度との関係を求めた。Fig.4-6では、電圧印加前では反射濃度0.95の灰色を示し、150Vまでは変化がないことがわかる。その後、150V以上になると黒色濃度が増加し、同時に白色濃度が低下を始めることがわかる。黒色トナーおよび白色トナーの2粒子は混合時に摩擦帯電により逆極性に帯電し、クーロン力により強く凝集している。この凝集を解くためにこの印加電圧が必要で、閾値電圧を示していることがわかる。その後、電圧増加により黒色および白色とも直線的に増加し、電極上にトナーが移動して付着して行くことがわかる。400V付近にて反射濃度は飽和を示す。ここでは電極上に黒色トナーあるいは白色トナーが複数層付着していることが予想される。本方式では電子写真の画像形成のようにトナーを熔融してトナー間の空隙を埋めることがないため電極上に付着したトナーは複数層付着していることが必要と考えられる。トナーディスプレイの表示特性として白色反射濃度1.58および黒色反射濃度0.24の値が得られた。

この値を光学反射率に換算すると白色反射率 57.5%, 黒色反射率 2.8 を示し、両者の比から表示コントラストを求めると 21 であった。また、電圧を遮断した後、黒色表示あるいは白色表示の状態は長く保持されていることも確認した。さらに、トナーの移動速度が速いため電極間距離を移動する時間は数m秒と短く、表示に要する電圧応答性が高いことがわかる。表示保持性を有し、表示の電圧応答性が高いことから表示の切替え時のみに電力を消費することになり超低消費電力であることがわかる。

2粒子移動型トナーディスプレイでは、高い表示コントラストと高い電圧応答性、さらに長時間の表示保持特性を有していることが確認できた。さらに、表示に明確な閾値電圧が存在することから単純マトリクス表示が可能であることを確認した。

大きな課題としては、駆動電圧が高いことが挙げられる。

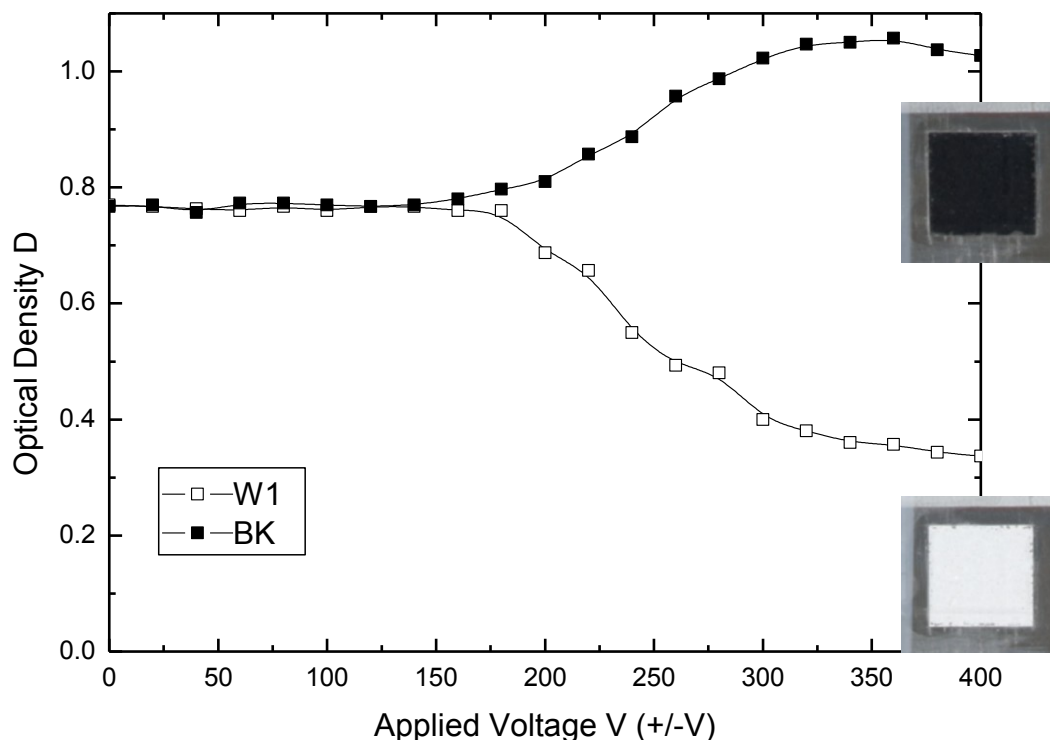


Fig.4-6 反射濃度 - 印加電圧特性グラフ

4.2.4 測定装置

本研究で使用した装置を Table 4-3 に示す。トナーディスプレイに印加する電圧は非常に高いため交流電源の電圧に増幅器を用いて 50 倍に増幅させて印加した。用いた交流電源と増幅器の画像を Fig.4-7 に示す。

Table 4-3 実験装置・器具一覧

実験装置	製品名	製造
電源	直流電源 PMC500-0.1A	菊水電子
	高電圧高速電力増幅器 4305	エヌエフ回路設計ブロック
	15MHz シンセサイザ WF 1943	エヌエフ回路設計ブロック
反射濃度測定装置	カラー反射濃度計 R710	伊原電子工業
光学顕微鏡	ビデオマイクロスコープ PV10	オリンパス
帯電量測定装置	吸引式 q/m METER 210HS	トレックジャパン

トナーディスプレイの駆動には、交流電源として 15MHz シンセサイザ WF 1943（エヌエフ回路設計ブロック）、電圧増幅器として高電圧高速電力増幅器 4305（エヌエフ回路設計ブロック）を用いた。



Fig.4-7 交流電源及び増幅器のイメージ画像

マルチファンクションシンセサイザで出力電圧、周波数、波形等を設定し、高電圧高速増幅器で出力する。セル作成当初は内部の混合粒子の摩擦帯電が低いため、マルチファンクションシンセサイザを用いて粒子を高速で移動させ、一定の帯電を持たせる。

表示セル内に黒色トナーおよび白色トナーを封入後、両電極間に 100Hz で 400V の交流電圧を印加して、トナー同士を攪拌し、十分に摩擦帯電を行う。その後、負の電圧を印加して黒色を表示し、その時の光学反射濃度を測定する。次に電源の極性を反転させ正の電圧を印加して白色を表示し、その時の光学反射濃度を測定した。そして、交流電圧を印加してトナーを攪拌し、その後、電圧を低下させて次の測定を行った。この操作を繰り返して印加電圧と表示反射濃度との関係を求めた。

また粒子を高速移動させる時、波形を正弦波にした方がムラの無い表示にすることが出来る。スイッチング回数と反射濃度の特性を調べる場合にはトリガ発振モードを用いる。これは周波数、出力電圧、波形の他に波数を指定することができ、一定回数のスイッチングを自動で行なうことができる。

参考文献

1. 矢田 芳雄：“プリンタに不可欠なトナー粉体〔電子写真現像剤〕について”
Product Hotline magazine (1998)
2. 竹内 学・多田 達也 監修：“ケミカルトナー” 東京電機大学出版局(2008)

第5章 トナーディスプレイの表示性能

5.1 はじめに

現在のトナーディスプレイは高電圧で駆動しており、閾値電圧の低下はディスプレイを作製する上で非常に重要である。

電極間距離が小さくなれば粒子にかかる力が強くなるので、低い電圧でも粒子が移動しやすくなる。このことを利用して低駆動電圧化を図ることができる。セルギャップを変化させるためにスパーサーを 100 μm 、75 μm 、50 μm 、25 μm と変化させたセルを作製し、その表示特性を計測することによってセルギャップが表示特性に与える影響を検討した。

5.2 白黒粒子

白黒混合比による帯電量変化と表示特性の関係を明らかにする。白黒混合比と帯電量の関係は明らかにされている。トナーディスプレイ内で摩擦帯電させた粒子の帯電量を測定し、表示回数や重量混合比率との関係を明確にし、帯電機構が確認されている。しかし、表示特性との関係については、検討が進んでいない。今回の実験で、表に示すように、同じ粒径の場合、その帯電量は白黒の数の比で決定されることが示された。

また、これまでのトナーディスプレイの研究において、コントラストを低下させる要因に、白色粒子にフッ化炭素を用いて、トナーの周りへのフッ化炭素が付着し黒表示が悪化することがあった。フッ化炭素を用いた場合の表示は1粒子移動型の表示であり、付着を防ぐためには2粒子移動型であるほうが好ましい。

そこで今回、2粒子移動型の実験を行った。本実験で使用した粒子 Table 5-1 に示す。

Table 5-1 白黒粒子一覧

	White Toner	Black Toner	Yellow Toner
Average diameter (μm)	10	8	7
Shape	Crush	spherical	spherical
Base material	TiO ₂ Particle and binder polymer	Carbon Black and binder polymer	Yellow pigment and binder polymer
Charge quantity Q/M(μC/g)	-48μC/g	+51μC/g	-14μC/g

白色トナーの形状は粉砕トナーで、平均粒径は 10μm である。黒色トナーの形状は球形で、平均粒径は 8μm である。

Fig.5-1 に白色トナー粒子、黒色トナー粒子の配合比率イメージを示す。

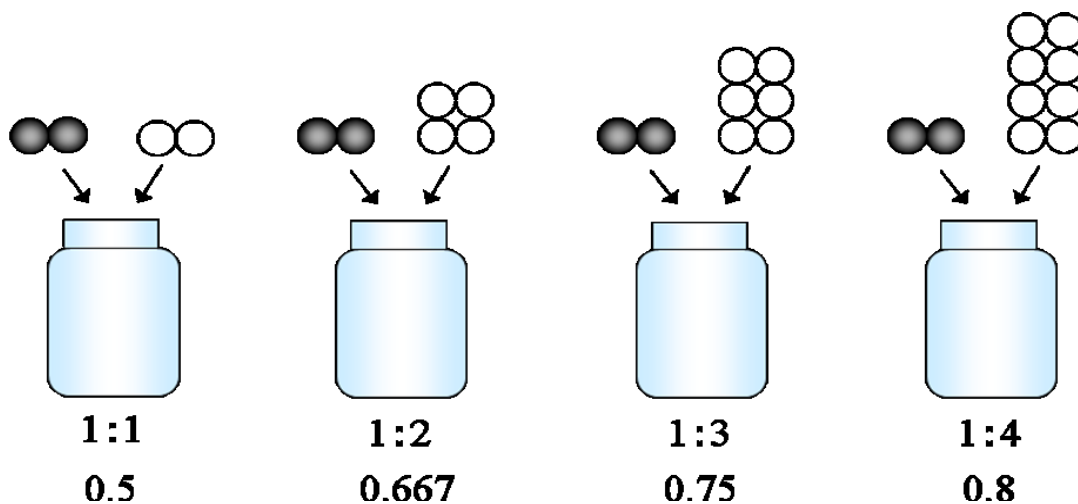


Fig.5-1 白黒粒子配合比率のイメージ

5.3 表示特性測定・評価方法

本章では、処理によって得た様々な表面状態・特性を持つ粒子をトナーディスプレイに用いた時の表示特性に関して述べることにする。

本実験では表示特性測定としてトナーディスプレイセルの反射濃度測定を行った。反射濃度 D は反射率 R の逆数の常用対数を取ったものであり、次式のように定義されている。

$$D = \log \frac{1}{R} \quad (5.1)$$

印加電圧- 反射濃度特性はセルが十分に動作する電圧印加から、印加電圧の絶対値を下げて行き、各電圧に対する反射濃度を測定した。電圧値を変化させるごとにセルにサイン波の交流電圧を 100 Cycle ずつ与えて粒子の攪拌を行っている。測定した特性から閾値電圧やコントラストを求め評価を行う。

なお本実験では白色トナー、黒色トナーを表示粒子として利用したが、反射濃度測定ではすべて黒の反射濃度を測定した。例を挙げると、Fig. 5-2 に示すように黒-白表示セルを作製・表示した場合、黒色表示・白色表示それぞれの黒反射濃度を測定したことになる。

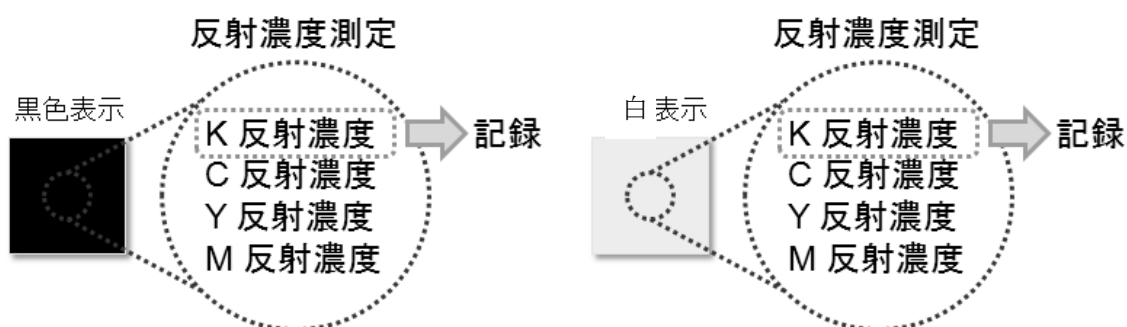


Fig. 5.2 反射濃度測定イメージ図

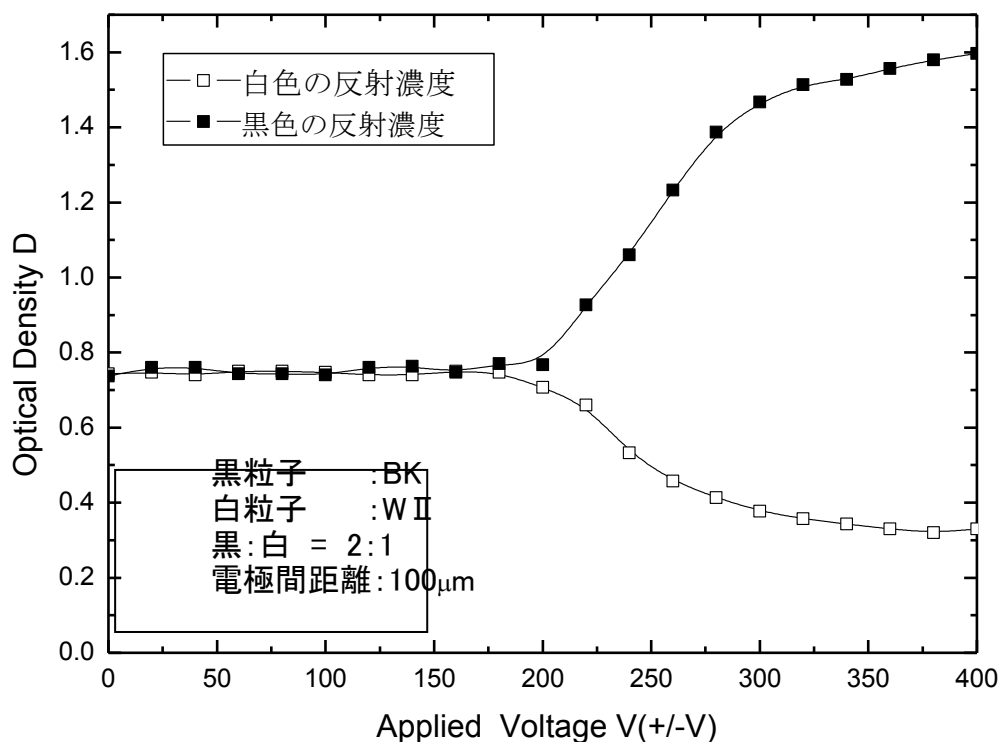


Fig.5.3 白黒粒子の印加電圧と反射濃度の表示特性のグラフ

Fig5-3 は表示セルの電極へ印加した電圧とセル上部の反射濃度の関係を示す。黒トナーと白トナーの重量混合比は2 : 1で、セル内の粒子体積占有率は約 50 から 60%である。低電圧では黒トナーと白トナーは静電引力で凝集しているため反射濃度 0.78 の灰色を示す。その後、印加電圧を増加すると凝集している黒トナーと白トナーは外部電圧によるクーロン引力により引き剥がされ、両電極へ向かって黒トナーと白トナーは互いに逆方向へ移動する。黒と白トナーが引き剥がされる開始電圧として閾値を定義すると、本試料では 180V である。閾値電圧以上の電圧を印加すると、上部電極が負電圧では黒トナーが上部電極へ付着し、上部電極の反射濃度は Fig5-3 の黒■マークで示すように電圧に対してほぼ直線的に増加する。これは電極へ付着する黒トナーの粒子数に比例すると考えられる。

さらに増加すると光学的に飽和に達することがわかる。飽和反射濃度は1.5で十分なる黒表示が行われていることがわかる。もちろん、黒トナーの移動と同時に下部電極へ白トナーが移動する。一方、上部電極に正極性の電圧を印加すると白トナーが上部に移動することになり、Fig5-3 白□マークで示すように反射濃度は減少する。飽和反射濃度は0.4で十分な白表示が行われていることがわかる。もちろん、白トナーの移動と同時に下部電極へ黒トナーが移動する。表示コントラストを白表示時の光学反射率と黒表示時の光学反射率の比と定義すると、表示コントラストは駆動電圧400Vのときに最大1.5を示している。このコントラストは電極へのトナー付着量によって決定されるので、トナー帯電量やトナー粒径により支配される。このように最大コントラストを示す駆動電圧を低下させる方法としては電極間距離を短くすることが考えられる。

5.4 トナー移動モデル

Fig.5-4 に2粒子移動型トナーディスプレイのトナー移動の様子をモデル的に記述した。トナーの粒子サイズは均一で、帯電量も均一と仮定する。黒色トナーおよび白色トナーは Fig.5-4a に示すように表示セルの中間に配置されていると仮定する。その後 Fig.5-4b に示すように閾値電圧以上の電圧印加により黒色トナーは上部電極へ、白色トナーは下部電極へ移動を始める。Fig.5-4c では電極上に多くのトナーが付着した状態を示している。印加電圧 V 、電極間距離 d とした。なお、絶縁層は電極間距離に比べて薄膜であるため計算には入れないことにした。

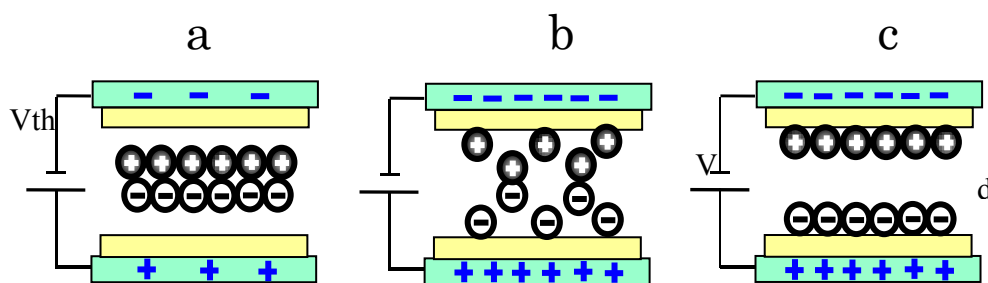


Fig.5-4 Model for electrical moving of black and white toners in toner display

いま、電極へ移動した付着トナー数 n 、トナー1個の電荷量を q とする。いま、電極上へ外部電源から充電された電荷量 Q は、

$$Q = (\epsilon\epsilon_0 / d) V \dots\dots\dots(1)$$

で表わされる。トナーの移動が開始するのに必要な電圧を閾値電圧 V_{th} とすると、電極上へ移動した付着トナーの総電荷量 Q_t は

$$Q_t = nq = (\epsilon\epsilon_0 / d) (V - V_{th}) \dots\dots\dots(2)$$

である。付着トナー数 n は

$$V \leq V_{th} \text{ のときは } n = 0 \dots\dots\dots(3)$$

$$V > V_{th} \text{ のときは } n = (\epsilon\epsilon_0 / qd) V - (\epsilon\epsilon_0 / qd) V_{th} \dots\dots\dots(4)$$

となる。

いま、反射濃度と付着トナー数に比例関係が成立すると仮定すると、表示の反射濃度と印加電圧の関係は直線関係を示し、さらに濃度の増加により一定値を示すことが予想される。

印加電圧が閾値電圧 V_{th} では電極間に働く電界によりトナーに働くクーロン力 F_e は、

$$F_e = (q/d)V_{th} \dots\dots\dots(5)$$

で表わされる。その時にトナー間に働くクーロン力 F_{ad} は、非静電引力を無視すると、

$$F_{ad} = k(q_b q_w / r_b r_w) \dots\dots\dots(6)$$

で表わされる。

粒子同士が引き剥がされて移動を開始する条件は、(5)式で表わされる F_e と(6)式の F_{ad} が等しいことである。いま、黒色トナーおよび白色トナーの電荷量および粒子径が同じであると仮定すると、

$$V_{th} = k (d q/r^2) \dots\dots\dots (7)$$

と表わされる。 閾値電圧は電極間距離 d とトナー帯電量 q に比例することがわかる。

以上の簡単な計算から、付着トナー数は印加電圧 V に比例すること。トナー帯電量と付着トナー数は反比例すること。トナー移動開始である閾値電圧は電極間距離おとびトナー帯電量に比例することが求められた。

5.5 電極間距離

現在のトナーディスプレイは高電圧で駆動しており、閾値電圧の低下はディスプレイを作製する上で非常に重要である。

電極間距離が小さくなれば粒子にかかる力が強くなるので、低い電圧でも粒子が移動しやすくなる。このことを利用して低駆動電圧化を図ることができる。セルギャップを変化させるためにスペーサーを Table5-3 のように 100 μ m、75 μ m、50 μ m、25 μ m と変化させたセルを作製し、その表示特性を計測することによってセルギャップが表示特性に与える影響を検討した。

Table5-2 使用したトナー

色	帯電量	製造	比率
黒色粒子	+51 μ C/g	ブラザー工業 製	1
白色粒子	-18 μ C/g	試作品	2

Table5-3 スペーサー

No.	厚さ	名称	製造
S-1	100 μm	ULTRA TAPE #1164	AS ONE 製
S-2	75 μm	<Scotch> 313	住友 3M 製
S-3	50 μm	カプトン®フィルムテープ No.650S #50	寺岡製作所 製
S-4	25 μm	ポリエステルフィルム No.74	住友 3M 製

5.5.1 実験結果と考察

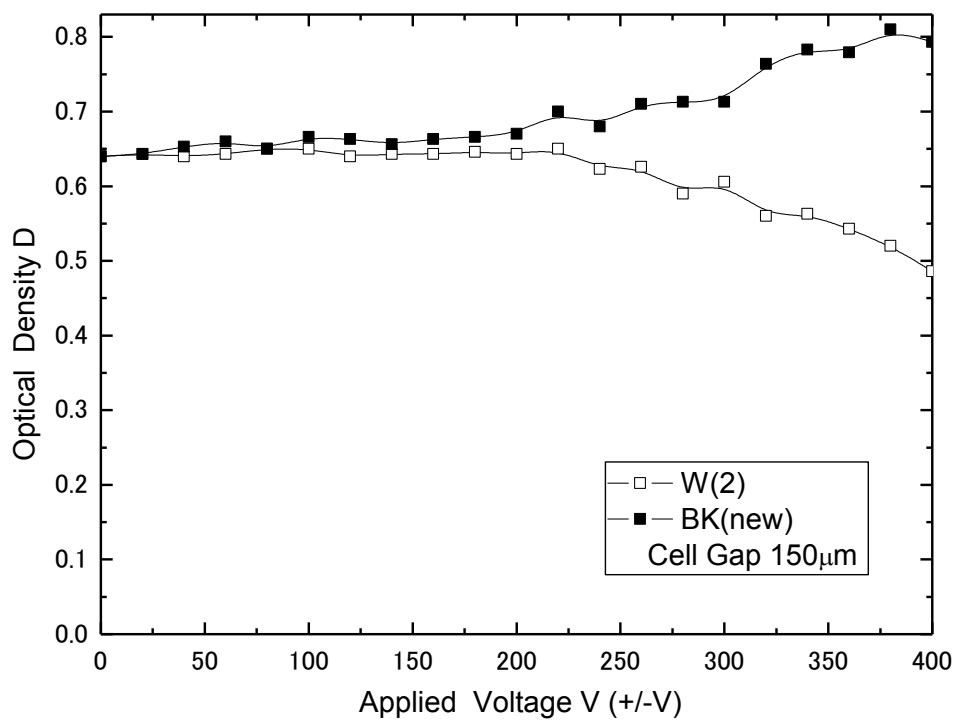


Fig. 5-5 セルギャップ 150 μm の時白黒粒子の反射濃度

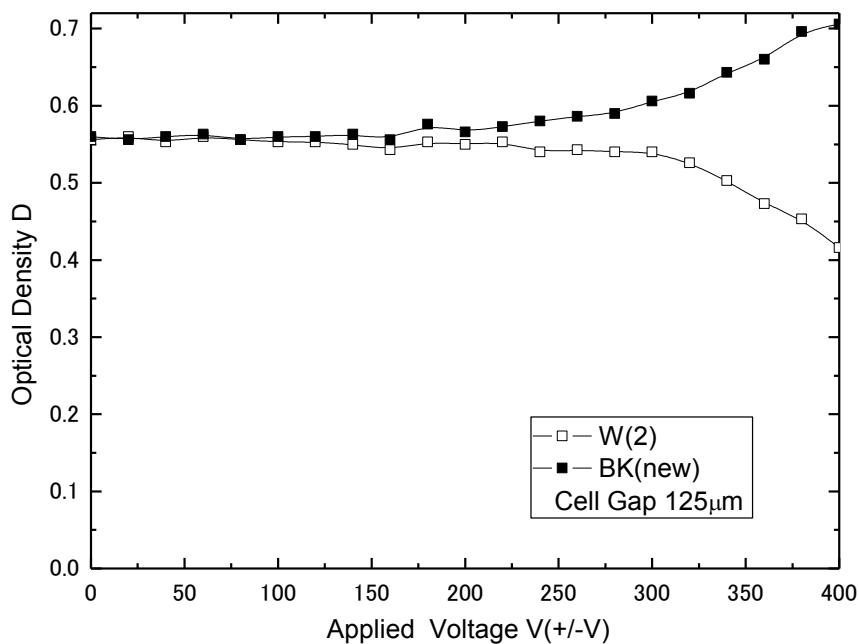


Fig. 5-6 セルギャップ 125µm の時白黒粒子の反射濃度

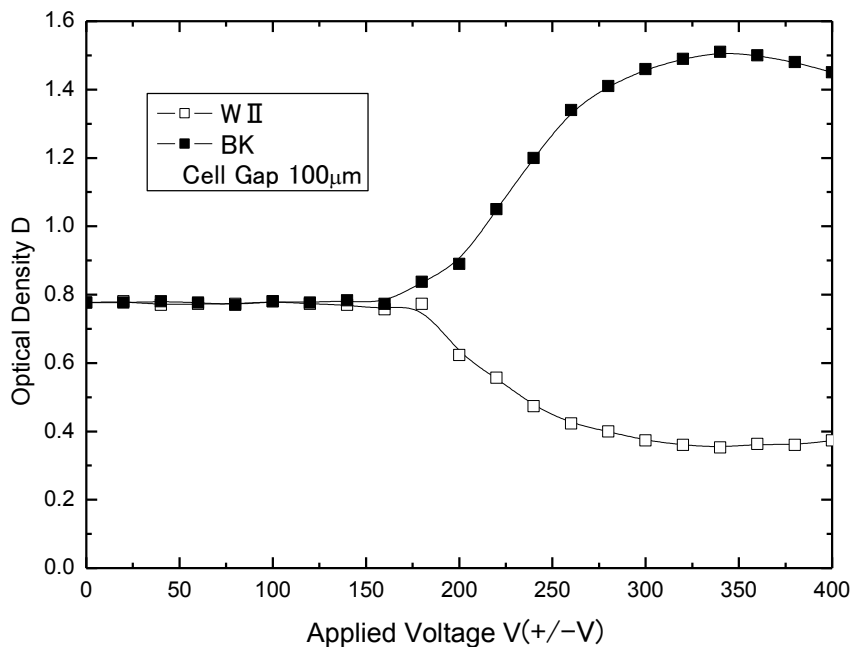


Fig. 5-7 セルギャップ 100µm の時白黒粒子の反射濃度

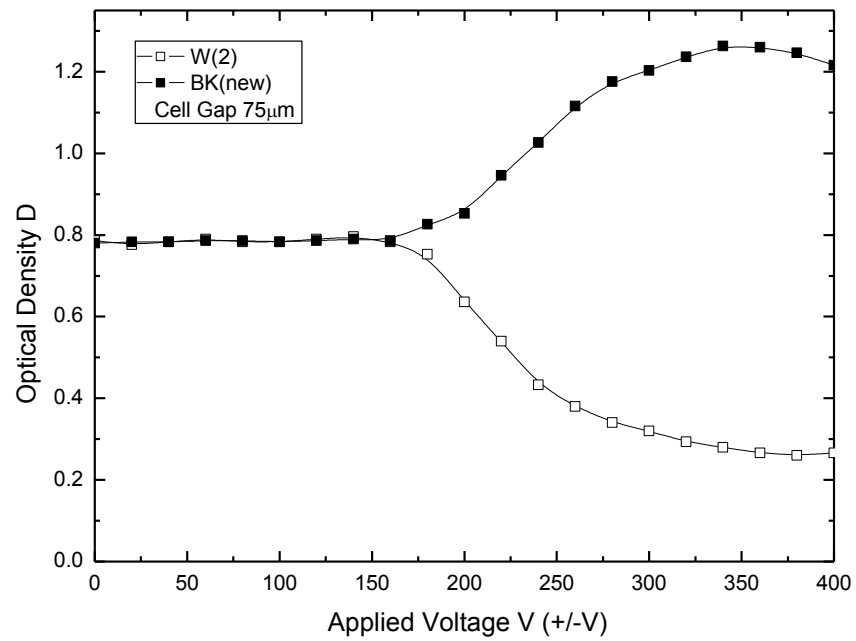


Fig.5.8 セルギャップ 75 μ m の時白黒粒子の反射濃

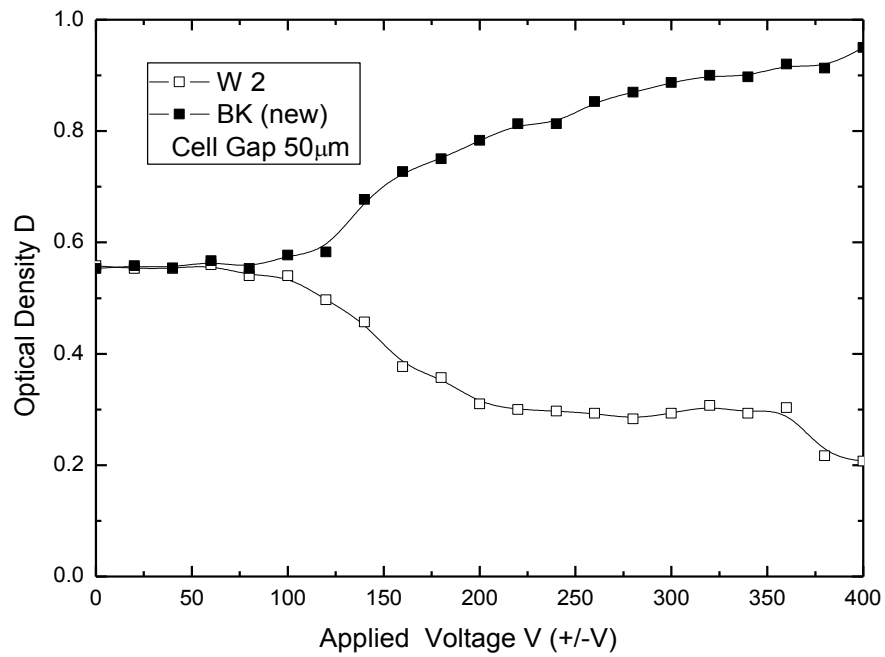


Fig.5.9 セルギャップ 50μm の時白黒粒子の反射濃度

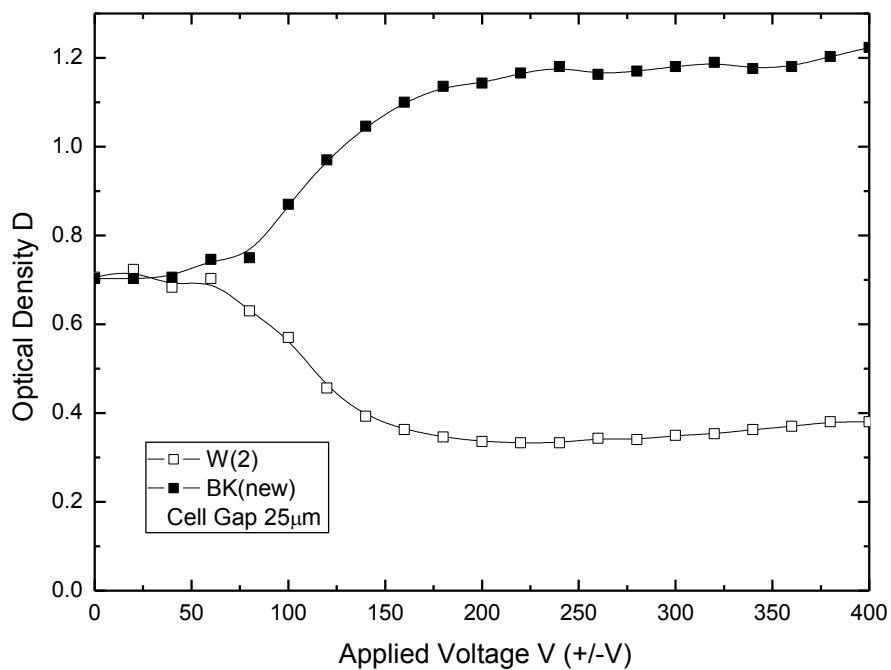


Fig. 5.10 セルギャップ 25 μ m の時白黒粒子の反射濃度

それぞれのセルギャップにおける表示特性の数値を Table.5-4 にまとめる。

Table 5.4 セルギャップ変化による表示特性の変化

セルギャップ(μ m)	閾値電圧(V)	反射濃度 D	
		Max	Min
150	273	0.74	0.51
125	293	0.70	0.44
100	175	1.08	0.45
75	125	1.02	0.43
50	85	0.98	0.44
25	50	0.81	0.50

セルギャップが小さくなるにつれて閾値電圧が低下していることを確認できた。また、従来の $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ のセルでは $25\mu\text{m}$ のスペーサーを用いてセルを作製することはできなかったが、画素サイズを $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ と小さくすることによってトナー封入が可能になった。しかし、トナー粒子の直径が $10\mu\text{m}$ ほどであるので $25\mu\text{m}$ のセルギャップではディスプレイ表示に使用できるほどの粒子量を封入することができず、背景が透けて見えてしまう表示となった。

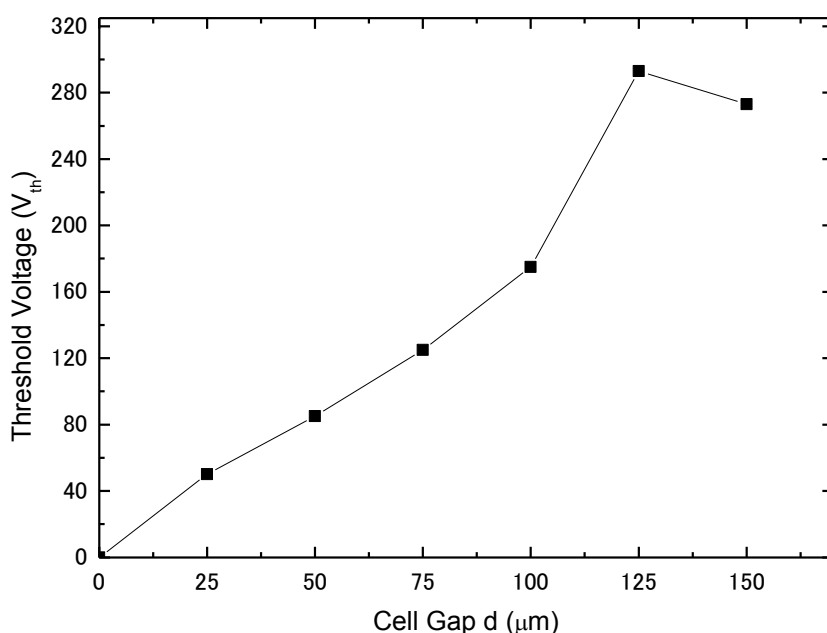


Fig. 5.11 セルギャップと閾値電圧の関係

Fig.5-11 はセルギャップと閾値電圧の関係を示したものである。閾値電圧は電極間距離を短縮することにより比例的に減少することがわかる。ただ、黒トナーと白トナーは十分に表示セル内に封入することが望まれるため電極間距離 $50\mu\text{m}$ が適当と考えられる。Fig.5-7 からセルギャップに対して閾値電圧が一次関数的に変化することがわかる。このことからスペーサーはなるべく薄いものを使用することにした。しかし $25\mu\text{m}$ のスペーサーでは粒子の直径が $10\mu\text{m}$ 程度であるため、表示に必要な分量を封入することができず背景が透けてしまった。このことから、スペーサーとして $50\mu\text{m}$ のものを使用することに決定した。

5.5.2 電極間距離とコントラスト

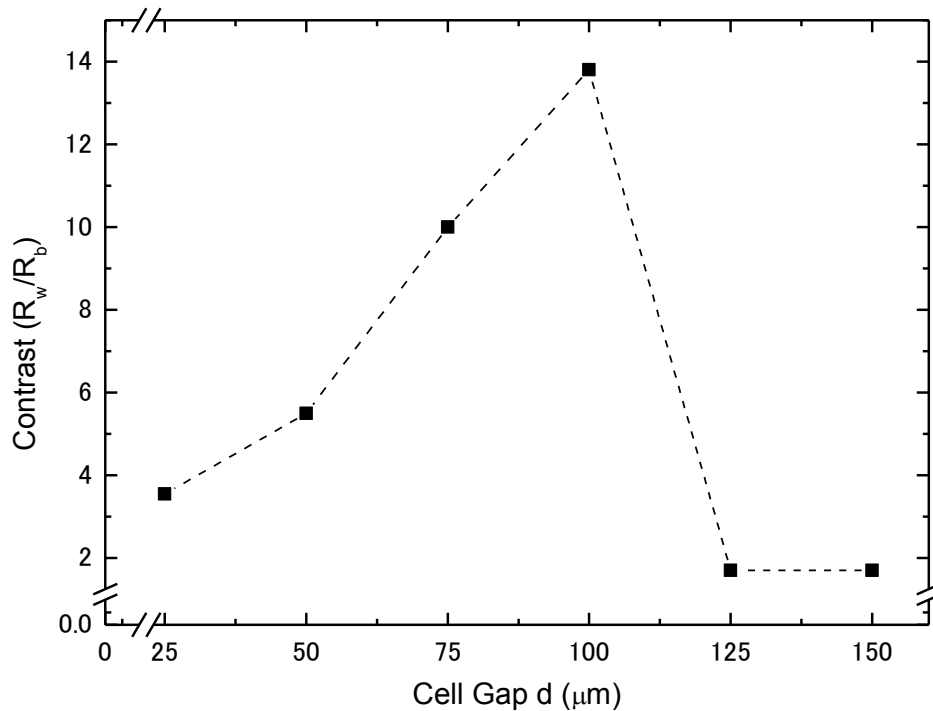


Fig. 5.12 セルギャップとコントラストの関係

Fig. 5-12 にセルギャップと表示コントラストとの関係を示す。表示コントラストはセルギャップを $100\mu\text{m}$ より狭くすると急激に悪化することが分かる。但し各セルギャップで最も高いコントラストを示す印加電圧は全て 360V 前後であり、セルギャップには依存しないことが分かった。またセルギャップを $100\mu\text{m}$ 以上にしてもコントラストは急激に下がることが確認された。

このグラフの結果では電極間距離の増加によりコントラストは向上することが確認された。その理由として電極間距離が短くなるとトナー数が減少するためと考えられる。また、電極間距離が長くなると電圧が不足するためと考えられる。

5.6 白黒粒子の配合比率

白黒比率と反射濃度

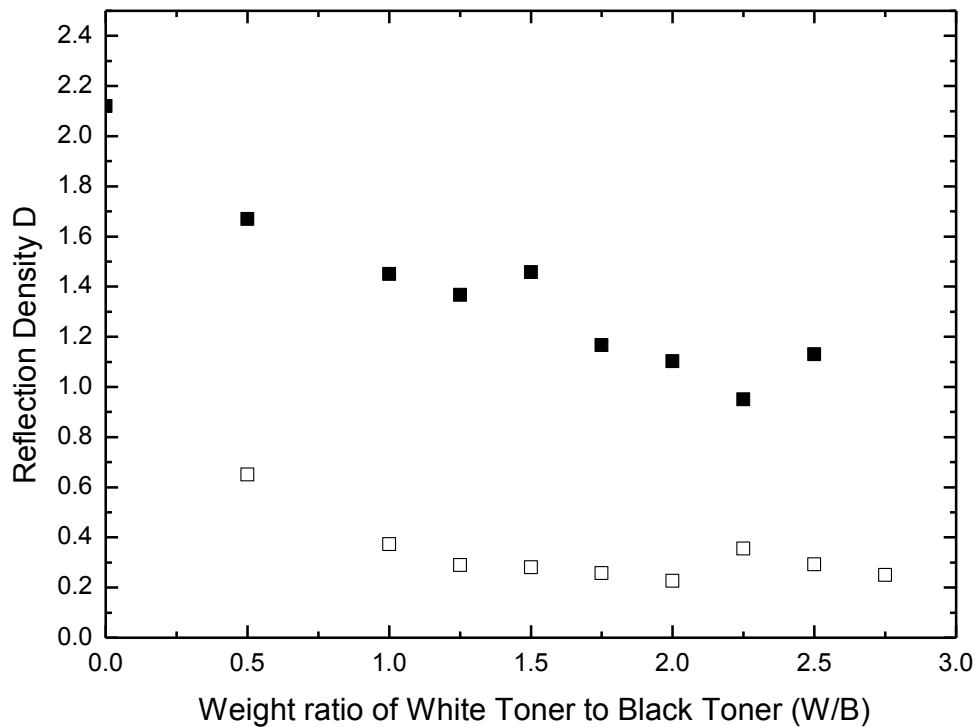


Fig.5-13 白黒粒子の混合比率と反射濃度の関係

Fig.5-13 に白トナーと黒トナーの重量混合比とセルの反射濃度との関係を示す。混合比が1以上になると白表示濃度は0.3以下を示すようになり白色反射率は大きく向上している。これは白トナーの帯電量が減少したためで、電極表面に多量の白トナーが付着するようになるためである。同様に混合比1以下では黒トナーの量が多くなり、黒表示濃度が大きく増加している。

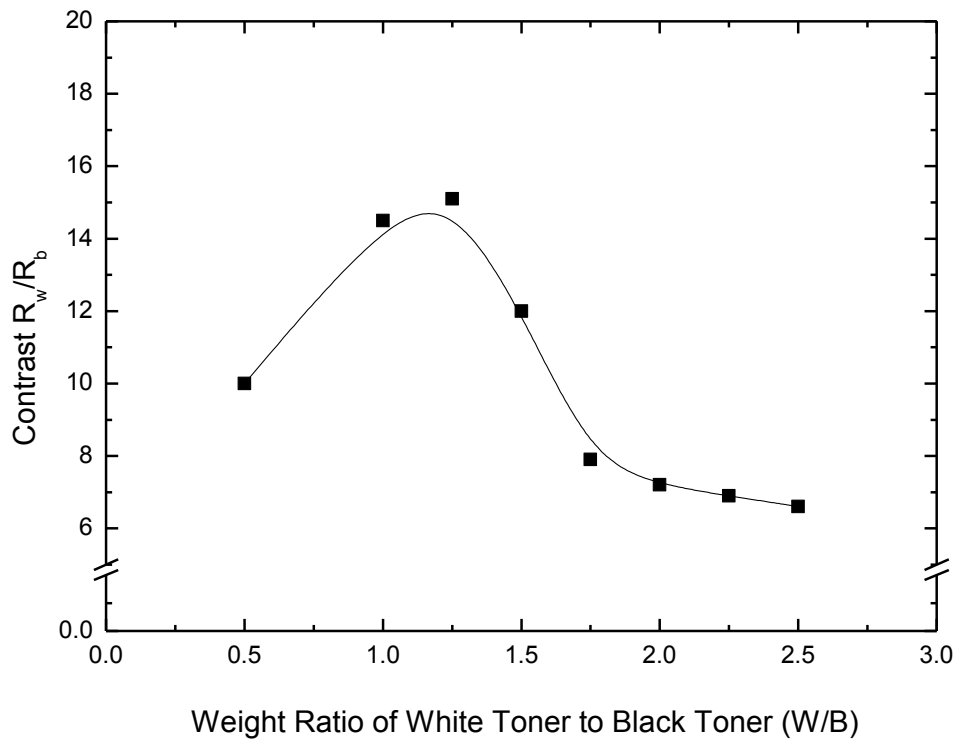


Fig. 5-14 白黒配合比率とコントラストの関係

次に、コントラストの評価を行った。結果を Fig.5-14 にコントラストの関係をまとめた。グラフにより白黒粒子の配合比率 1 付近で表示コントラストが最大を示す。それは白色トナーと黒色トナーの数を同数にすることが必要である。比率の混合数が異なるとコントラストが低下する。

トナーディスプレイのトナーの帯電量がどのように変化したのか調べる必要がある。

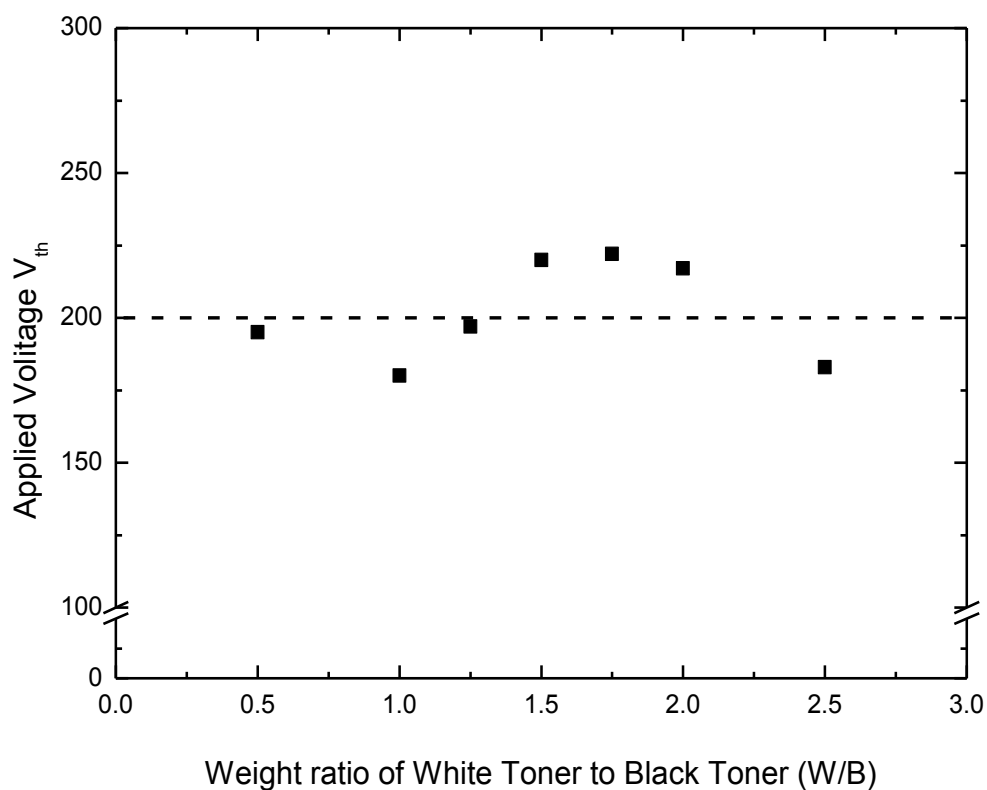


Fig.5-15 白黒粒子の重量混合比と閾値電圧の関係

次に白黒色粒子の重量混合比と閾値電圧の評価を行った。閾値電圧とは粒子が移動を始めるギリギリの電圧のことであり、閾値電圧では粒子はほとんど移動を行わない。従って閾値電圧の決定要素に流動性はほぼ無関係であり、粒子の重量混合比の影響が大きいと考えられ白黒粒子の混合比率で評価を行った。結果を Fig.5-15 に示す。

新たに作成により、多少のバラツキがあるが、閾値電圧は $200 \pm 20V$ と混合比によらず一定値を示すが、重量混合比率には比例しないことが分かった。

第6章 トナー帯電量

6.1 粒子間摩擦帯電量測定法

トナーの帯電量はトナーの電荷量を質量で割ることで求められる電荷質量比 Q/M によって評価した。一般的にトナーの帯電量測定は電子写真用キャリアとトナーを混合して摩擦帯電させた時の帯電量を測定するが、本報ではトナーディスプレイ内で摩擦帯電させた2つの粒子のそれぞれの帯電量を測定した。帯電量測定には吸引式小型帯電量測定器 q/m METER (トレックジャパン製 H210S) を用いた。

帯電量の測定方法は以下の通りである。まず、あらかじめ黒色トナーおよび白色トナーを小型瓶に封入し、混合・振とうしておいた粒子を表示セルに充填し、交流電圧を一定回数印加する。トナーディスプレイではこの交流電圧印加によって粒子同士の摩擦による帯電が行われる。その後、表示セルを開封し表示面に付着した2つの粒子とどちらの電極面にも付着していない(あるいは非常に弱い力で電極面に付着している。)白と黒のトナーが混在した混合層の3つに分離する。混合層は非常に弱い力でどちらかの基板に張り付いているのでエアを吹きかけることによって簡単に表示面に付着したトナーと分離できる。その後、電極面に付着した2つのトナーだけ吸引式帯電量測定装置を用いて帯電量を測定する。さらに吸引前と吸引後のセルの質量変化を測定することで吸引されたトナーの質量を測定し、電荷質量比 q/m を算出した。その測定結果を Table.6-1 に示す。

トナーディスプレイは電圧を印加することで帯電粒子が電極側に移動し、表示を行うものである。従って、トナーの帯電量はトナーディスプレイの駆動電圧を決める大きな要因になる。そこで、粒子間摩擦帯電量測定法について説明する。

まず、Fig.6-1 のように、スクリーubinに粒子を入れて、30cm 幅で 300 回振る。次に、その粒子をセルに封入する。(20Hz,15 秒)

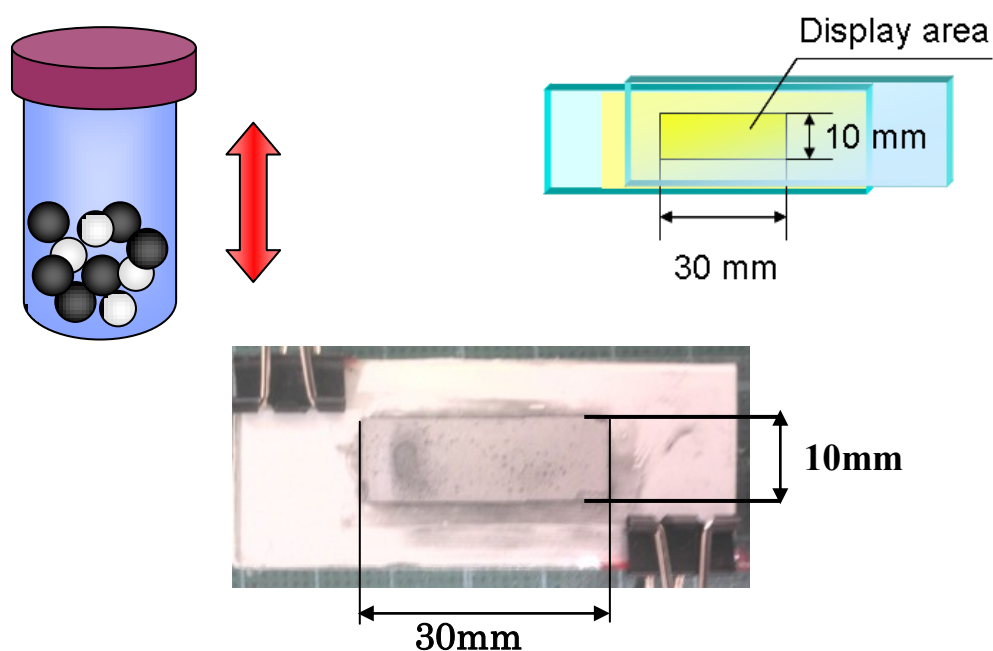


Fig.6-1 粒子間摩擦帯電量測定用セル

帯電量測定の際は測定粒子重量が多いほど適切な値が得られるため、表示部が 10 mm×30 mm のセルを 3 つ作製し測定粒子重量を増やした。セル中間には正負粒子が混在している中間層が存在するため、Fig.6-2 に示すようにエアードスターで中間層を吹き飛ばす。そうして正負粒子を分離することで測定が可能となる。

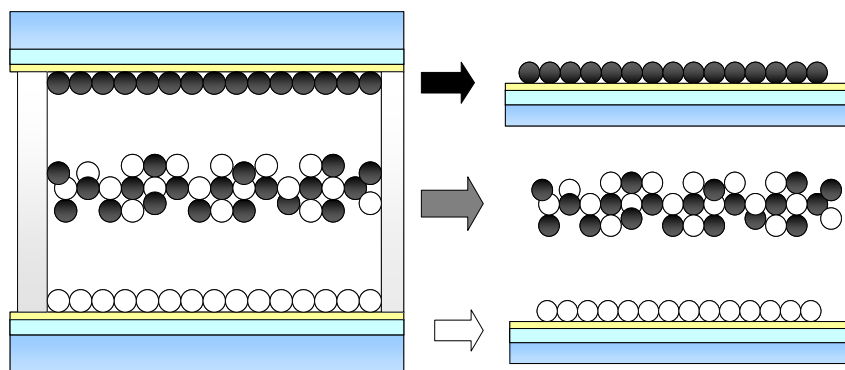


Fig.6-2 セル内の灰色の粒子を吹き飛ばす

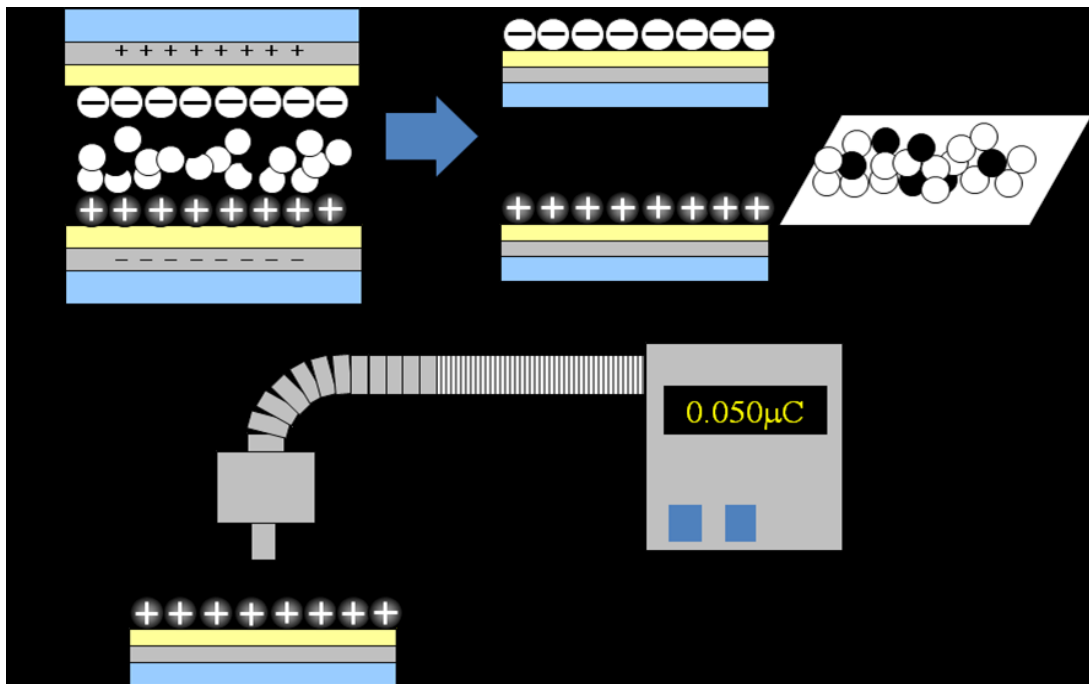


Fig.6-3 トナーディスプレイセルを利用した帯電量測定法

Fig.6-3 に示す帯電量測定装置はトレック・ジャパン製の吸引型小型帯電量測定装置を用いる。そして、吸引式帯電量測定器で電荷量 Q を測定する。次に吸引した粒子の質量 M と電荷量 Q より帯電量 Q/M を出す。

Table 6.1 Properties of toners

Toner	Material	Diameter (μm)	Shape	Charge ($\mu\text{C/g}$)	Repose angle (Degree)	Note
White	TiO ₂ , Polymer	10	Crush	-40	38	Prototype
Black	CB, Polymer	10	Spherical	+43	29	Prototype

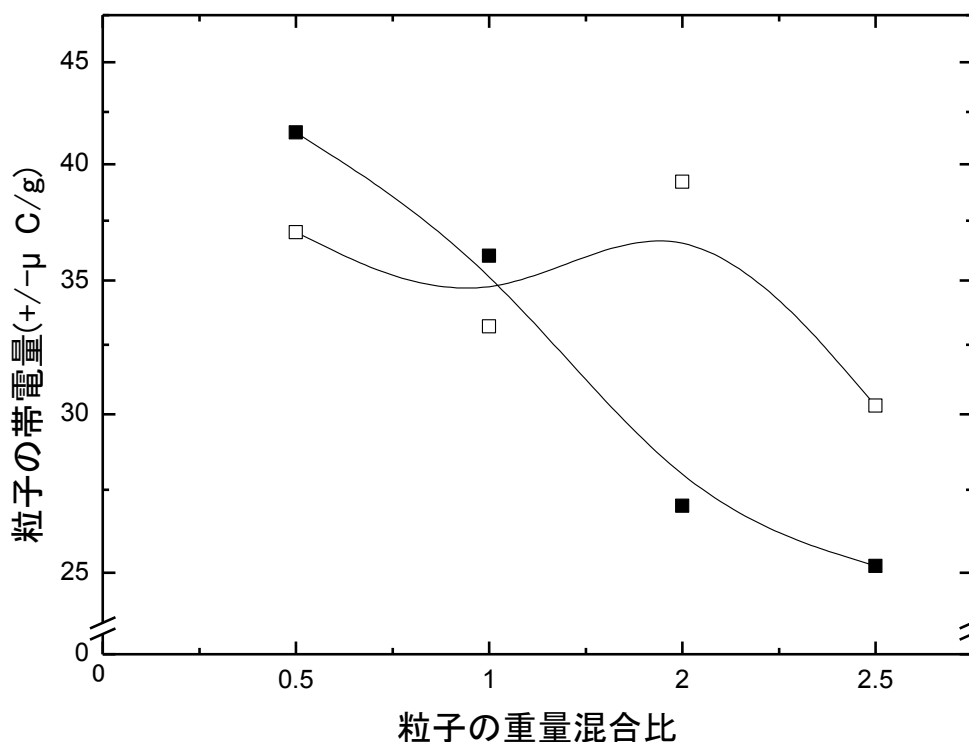


Fig. 6.4 白黒粒子の配合比率と帯電量の関係

Fig. 6.4 にトナー間摩擦帯電量の測定結果を示す。白色トナーは負帯電性の黒色トナーと組み合わせた。横軸が白黒重量混合比率、縦軸が帯電量の絶対値。横軸の数値が大きくなるほど負帯電粒子（白粒子）の量が多くなる。白黒トナーの帯電量の絶対値を比較すると、黒色トナーの帯電量は低くなる傾向が見られた。このことにより、1 : 1 で混合した際は帯電量の絶対値が等しくなるはずだが、実際は値にズレが生じる結果となった。

また、帯電量を測定する際、表示面に付着している正帯電粒子・負帯電粒子だけを測定に用いるわけだが、分離が完全にできておらず、逆極性の粒子が混ざってしまうことも原因の一つだと考えられる。特に負帯電粒子側に正帯電の粒子が多く混ざってしまっているような結果であれば帯電量のズレに関係している可能性が高い。そこで次項では、帯電量を測定する前のそれぞれの表示面の観察を行った。

6.2 粒子間摩擦帯電量測定

6.2.1 実験方法

正帯電粒子を1種類、負帯電粒子1種類、混ぜ合わせたものをトナーディスプレイセル内に封入し、印加電圧 500V、周波数 20Hz の sin 波をかけ 100 回表示を行い、帯電量を測定する。粒子の組み合わせを Table.6-2. に示す。

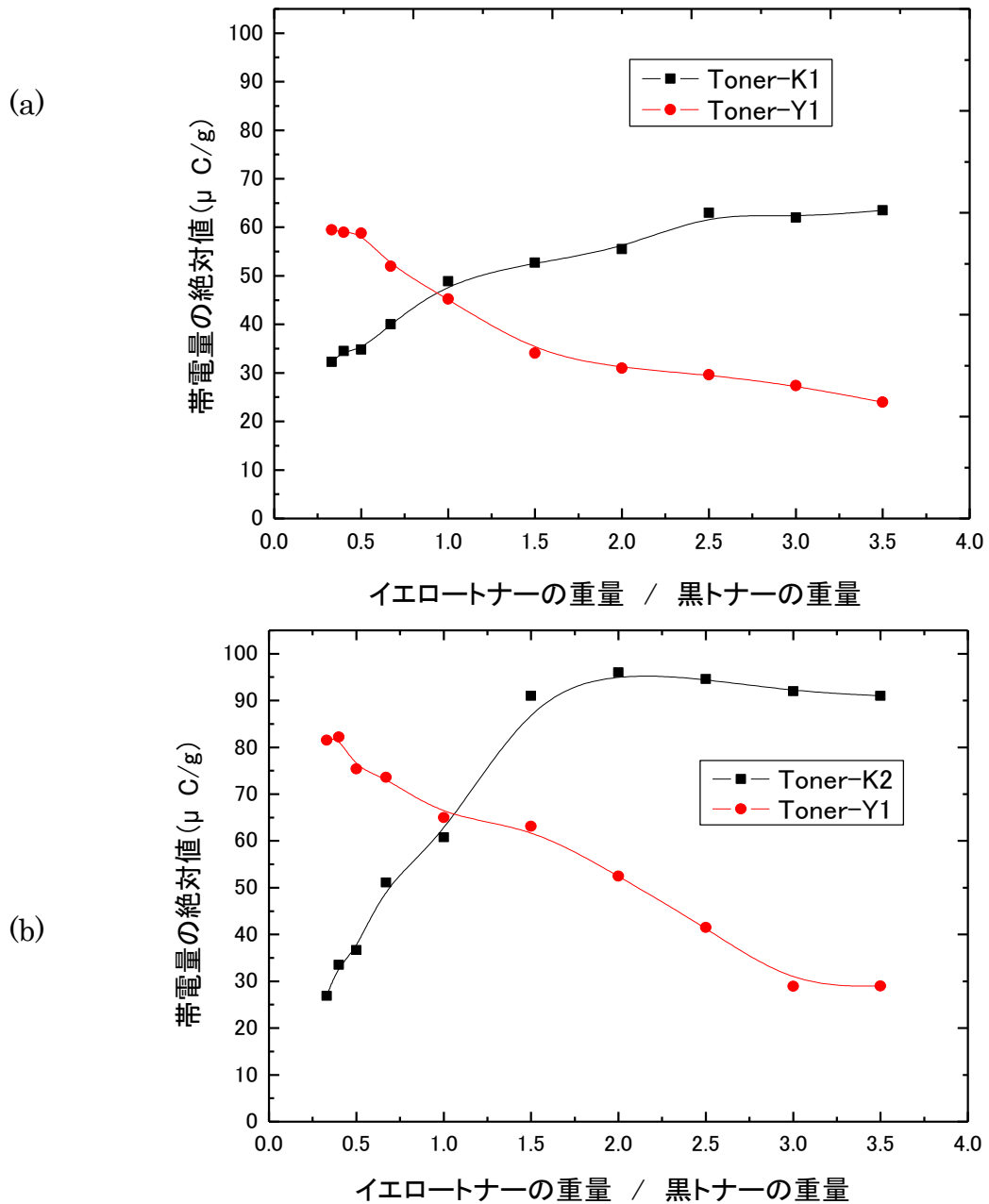
Table.6-2. 粒子の組み合わせ

	正帯電の粒子	負帯電の粒子
(a)	Toner-K1(+)	Toner-Y1(-)
(b)	Toner-K2(+)	Toner-Y1(-)
(c)	Toner-M1(+)	Toner-Y1(-)

それぞれの組み合わせで、正帯電粒子の重量:負帯電粒子の重量 =3:1, 2.5:1, 2:1, 1.5:1, 1:1,1:1.5, 1:2, 1:2.5, 1:3, 1:3.5 の 10 種類の混合比で実験を行った。ただし、結果を数値データとして捉える際には混合比では扱えないので、負帯電粒子の重量/正帯電粒子の重量の重量混合率に変換して考察を行った。

6.2.2 実験結果と考察

Fig.6-5.に結果を示す。横軸が重量混合率、縦軸が帯電量の絶対値。横軸の数値が大きくなるほど負帯電粒子（イエロー粒子）の量が多くなる。



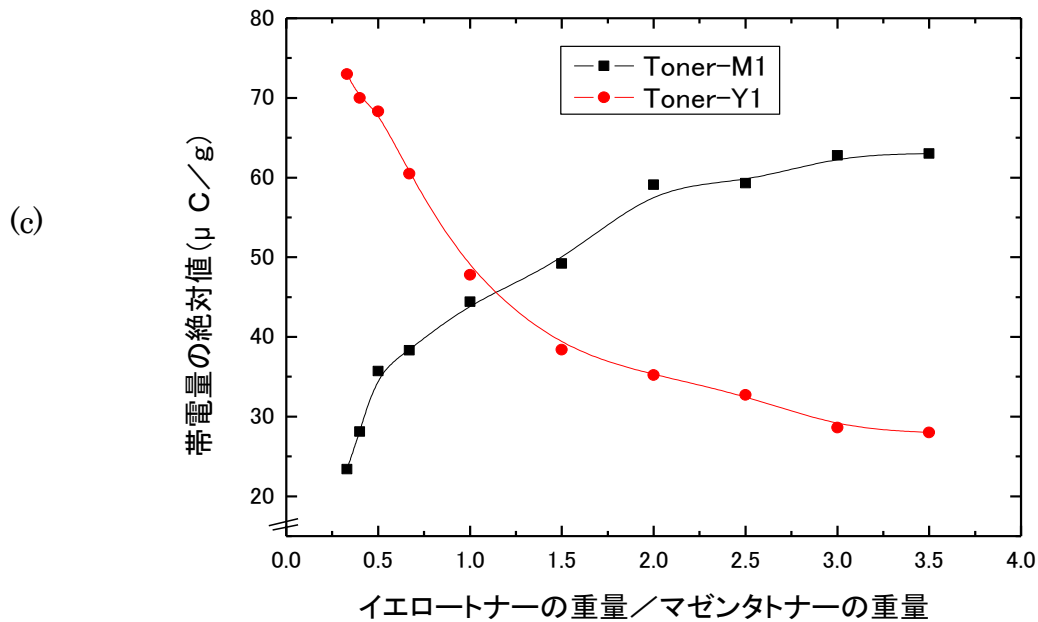


Fig.6-5. トナー2粒子系での重量混合率と帯電量

まず、電荷の保存について着目すると、(a)～(c)の全ての組み合わせにおいて、粒子を同量混ぜた場合（横軸 1.0）には帯電量が同じ値を示している。しかし、混合率の差が大きくなると電荷が保存されなくなっている。この原因として考えられるのは、正帯電粒子の帯電量の上限が限界に達して飽和してしまうためだと考えられる。また、負帯電粒子については、帯電量がある一定値（この場合約 $20 \mu\text{C/g}$ ）以下に下がらないという結果も得られた。これは、ある程度の帯電量をもった粒子でないと電極面に付着しにくいことを示していると考えられる。この2つの原因より電荷保存による計算値と実際の帯電量の値が異なると考えられる。

次に混合率に関する帯電量の変化について着目する。まず、赤い線の負帯電粒子だが、混合率が増加するにつれて徐々に減少しており、その変化は反比例するような変化である。組み合わせ(b)は直線的であるが、正帯電粒子の帯電量の変化が急激で、低い混合率の値でも帯電量が飽和しているためだと考えられ、その問題を除ければ、他の粒子と同様に反比例的に変化するのではないだろうか。また、黒い線の正帯電粒子の帯電量の変化は、直線的であるとみられる。

6.3. 混合粒子の光学顕微鏡観察

6.3.1. 実験方法

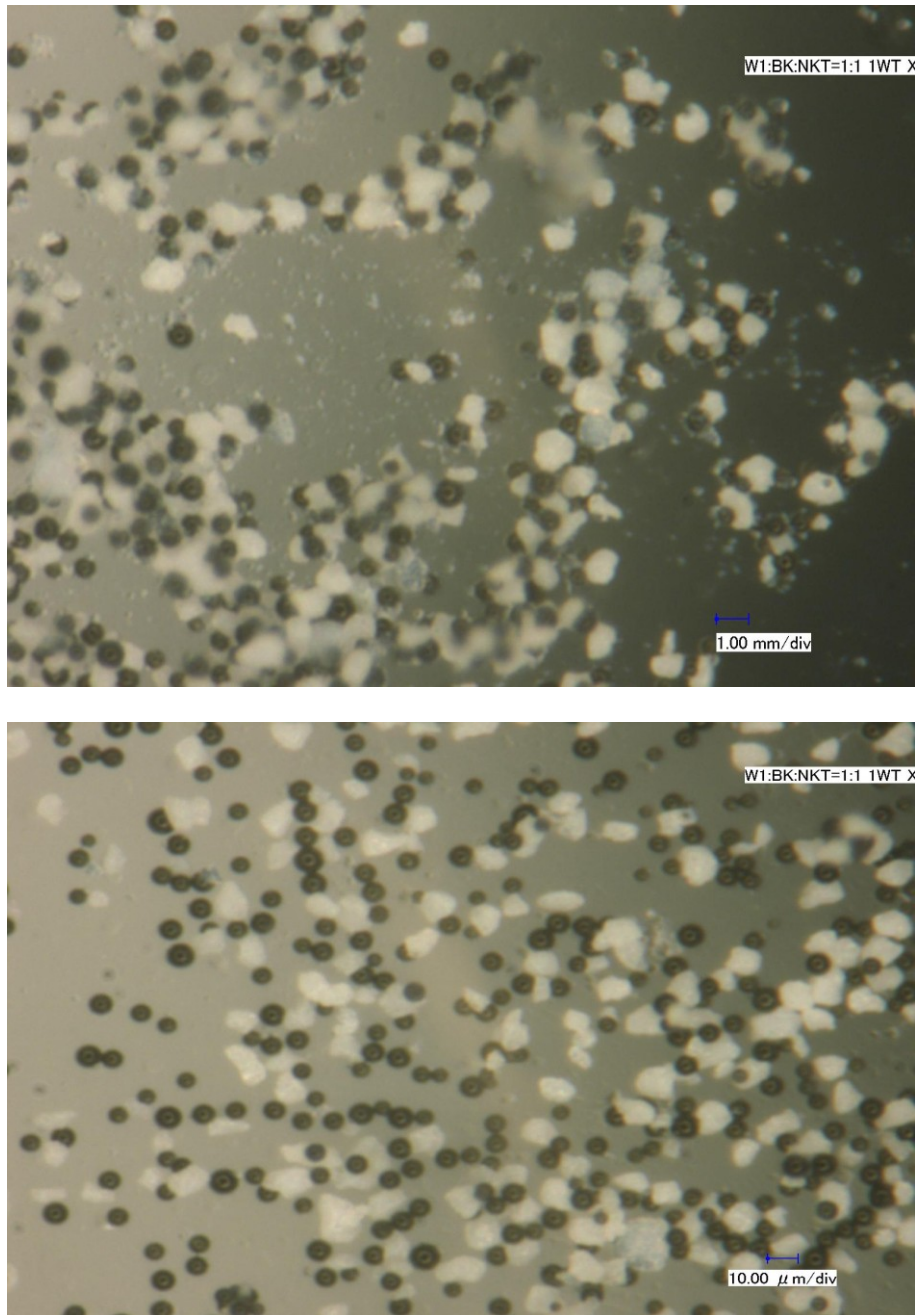
正電荷に Toner-BK(+)、負電荷に Toner-W1(-)を用いる。この2つの粒子を様々な質量混合比でスクリービンに封入しよく振とうする。その後混合した粒子をガラス板にのせなるべく1層になるように薄く拡げる。このとき凝集力が強くうまく拡げられない場合は上からガラス板で軽く押し付けて拡げる。そして薄く拡げた粒子を光学顕微鏡(デジタルマイクロスコープ VHX-200/100F キーエンス)で観察する。

Fig.6-5 に黒色トナーおよび白色トナーの光学顕微鏡写真を示す。黒色トナーの形状は球形で、粒径は約 $10\mu\text{m}$ である。白色トナーの形状は粉砕により作成したため不定形で粒径は約 $10\mu\text{m}$ である。

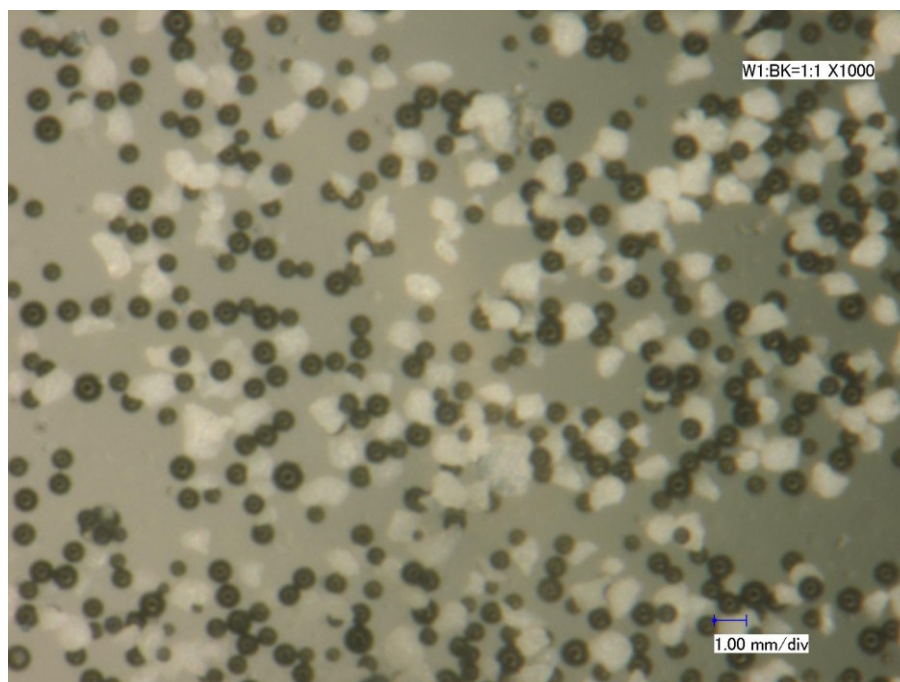
6.3.2. 実験結果と考察

Fig.6-6 に観察結果を示す。

(a) 重量混合比 Toner-BK:Toner-W1 = 1:1



(b)重量混合比 Toner W1:Toner BK1=1:1



(c)重量混合比 Toner W1:Toner BK1=2:1

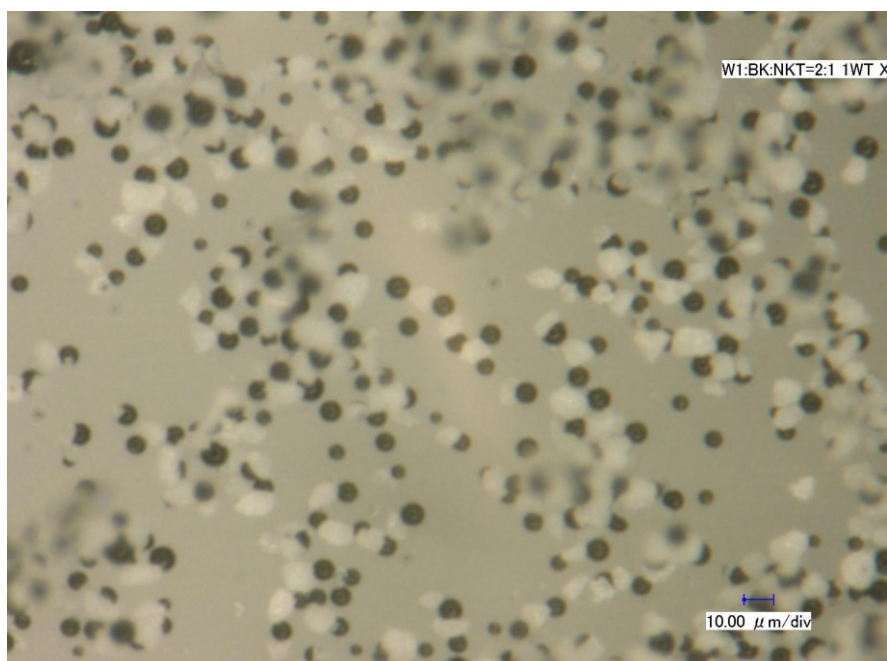


Fig. 6-6 混合粒子の観察

以上の結果をみるとどの混合率でも同じ粒子同士がくっついていることはほとんどなく逆極性の粒子同士が交互にくっついて、直線やリングのような形状を形成している。また、その形成された直線が最も長いものは(b)の重量混合比1:1の場合であった。これは、白トナーの方が黒トナーに比べて粒径が小さいことを考えると、粒子の数がある程度等しくなっているからではないか、と考えられる。

この実験で観察は2粒子系での混合粒子の観察は行えたが、粒子同士の静電引力による凝集力が強くなかなか薄く広げることができないために、ガラス板を用いて上から力をかけて広げてしまっている。その力学的な力をかけないようにし、もっと自然な状態を観察することが可能ならば、もう少し粒子同士が繋がった形を形成するなど特徴が見られると思う。

本実験では以下のような結論を得た。

- ・ 粒子が交互に存在している様子が観察できた。
- ・ 封入されている粒子の数が近いほど逆極性の粒子同士が交互になる様子を観察できると考えられる。
- ・ なるべく力学的な力をかけずに薄く広げる方法を模索する必要がある。

6.4 表示セルの断面観察

Fig.6-7 にトナーディスプレイセルの断面を光学顕微鏡で観察した結果を示す。粒子を封入した表示セルの断面を露出させ、その上部から光学顕微鏡（オリンパス製 DP12）にて撮影した。セルの構造は通常のセルと異なり、スペーサーは $200\mu\text{m}$ のシートを用いた。空間に白色トナーと黒色トナーを重量比 2 : 1 に混合して封入した。図中の上部の負電極に黒色トナーが付着し、1 から 2 層くらいの黒色トナー層を形成していることが確認できる。また、下部の正電極には白色粒子が付着し白色トナー層を形成している。その間には黒色トナーと白色トナーが均等に混合したトナー混合層が存在していることが確認できる。

このような表示セル内のトナー分布状況から駆動電圧の極性切り替えにより、トナーは一度、トナー混合層に飲み込まれ、逆側の電極付近のトナー混合層からトナーが電極上に供給されると考えられる。

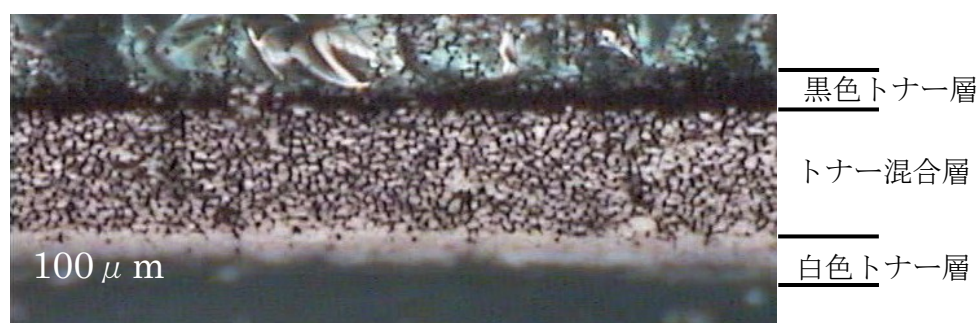


Fig. 6-7 トナーディスプレイセルの断面を光学顕微鏡で観察

第7章 外部添加剤の添加効果

7.1 はじめに

外添剤は古くからトナーの流動性向上、トナーの熱ブロッキング防止、帯電制御目的で用いられており、一般的にサブミクロンのシリカ、アルミナ、チタニア等の無機酸化物微粒子が使用されてきた。

今回使用したアルミナ、酸化チタン、シリカの金属酸化物系外添剤の表面は、シリコーンやシリコーンカップリング剤で表面改質して疎水化し、トナー帯電量の湿度による変化を小さくする。

また、流動性を高める効果も期待できる。トナーの流動性はトナーに働く凝集力によって決まる。凝集力は見開きの異なるふるいを重ね、規定の振動時間および振動の強さで一定量のトナーをふるったとき、各見開きのふるい上に残るトナーの重量から計算によって求める。表面を疎水性にした改質シリカ粉を外添したトナーは、改質前のシリカ粉を外添したトナーと比較すると凝集力が著しく低下して流動性が増すことが確認されている。

トナーディスプレイは帯電粒子の移動により表示を行う画像表示素子である。電圧を印加し粒子に加わる分子間力、静電引力等の合力よりも電界から受ける力が上回ると粒子が移動し表示が可能となる。今回用いた黒トナーと試作白トナー、外添剤粒子及び市販試料の評価を実験・検討したので、その結果について報告する。本実験で使用した外添剤粒子種類を改めて Table.7-1、Fig.7-1 に示す。なお添加剤として用いたシリカは無色透明であるが、今回の実験で用いた酸化チタンと酸化アルミニウムは白色である。

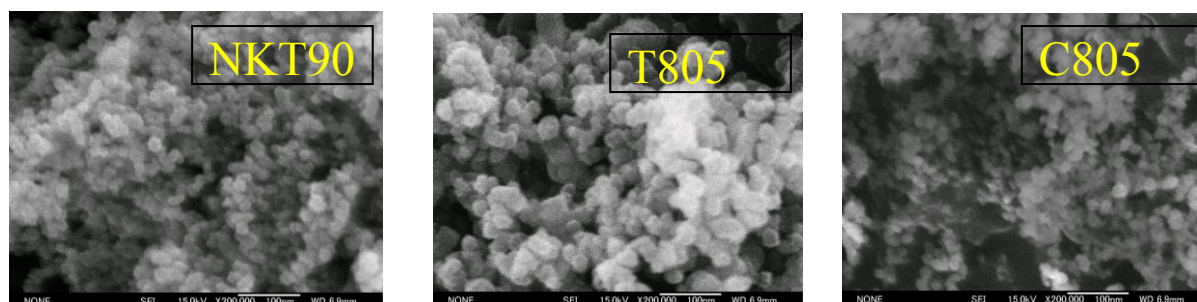


Fig. 7-1 添加剤粒子の SEM 写真

7.2 高速ミル

今回実験に使用した試料・材料を Table.7-1 に示す。試作白トナー(WI)は粉碎法、黒トナー(BK-New)は球形法により作製されていると考えられる。

Table.7-1 添加粒子の一覧

Particles	Materiel	Size	Q/m
STX501	Silica/titania	20nm	Negative
STX801	Mixed oxide		
T805	TiO ₂	21nm	Negative
NKT-90	TiO ₂	14nm	Negative

実験方法について説明する。

本実験に使用するサンプル作製は、白：黒混合比率 2:1 で、外添剤粒子は 0wt% から 0.5wt%の順に行われた。外添剤、白粒子と黒粒子の wt%を測って Fig.7-2a) と b)に示すように分析ミルの容器に入れて 3000rpm で、7 秒間攪拌を行い、作製したサンプルを使用してセルを作製して表示特性を検討した。今回粒子同士の摩擦帯電による帯電方法を使用した。混合した粒子ディスプレイセルに封入し、表示を行った。印加電圧 0v-400v 時の白黒表示の反射率はカラー反射濃度計 R710 で測定した。分析ベーシックミルで 30 秒間の処理を行った。サンプルは 3 分間自然に冷ます。サンプルで得られた粒子をセルに注入し、反射濃度を測定する。Table.7-2 は高速ミルによる基本データである。

Fig.7-2 は分析ミルと市販ミル写真である。

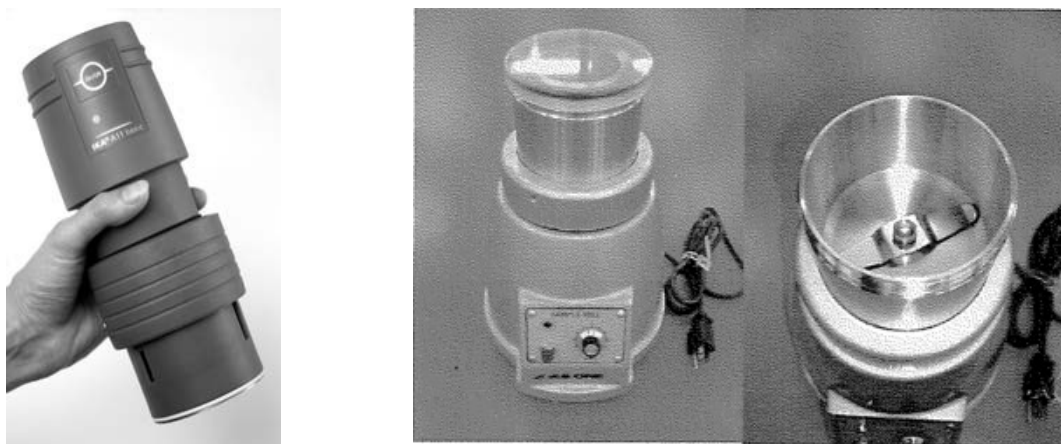


Fig. 7-2 a)分析ミル

b)市販ミル

外添剤粒子は、トナーの最表面に付着して帯電性、流動性等を変えるので、トナー表面物性を制御する観点からは非常に重要なものである。しかしながら、外添剤の粒径、表面組成、表面物性、および添加プロセスがトナーの帯電性にどのような影響を及ぼすかについての定量的評価は、今の所殆んどなされておらず、適当な組み合わせにおける現像画像からの最適化が図られているのが一般的である¹⁾。

Table. 7-2 Technical Data²⁾

Technical Data		
Design voltage	VAC	220-230±10%
or	VAC	220-115±11%
Design frequency	Hz	50/60
Power consumption	W	160
Output power	W	85
Motor speed, idle	1/min	28000
Motor speed, Under load	1/min	25000
Circumferal speed		
Idle	m/s	76
Under load	m/s	53

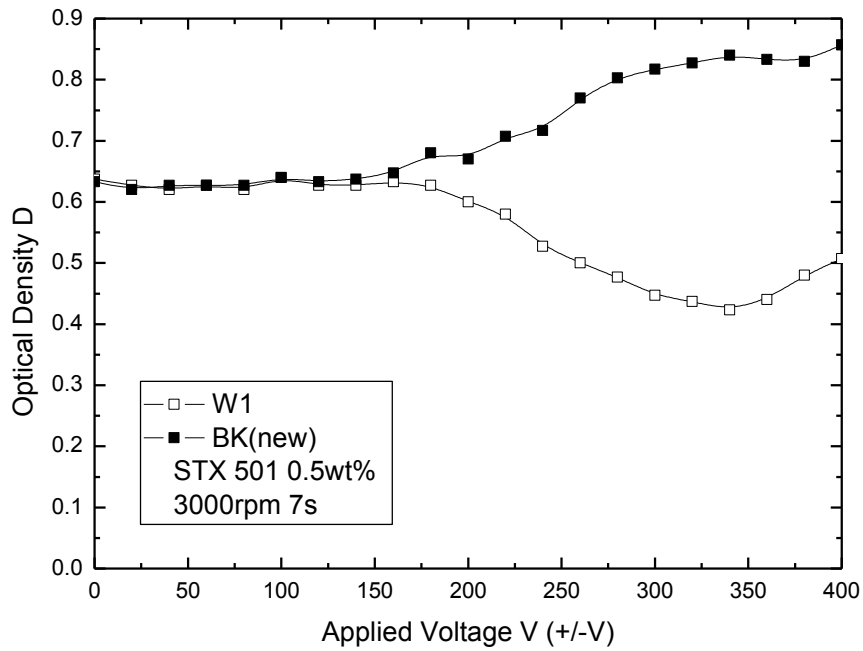


Fig. 7-3 印加電圧-反射濃度グラフ

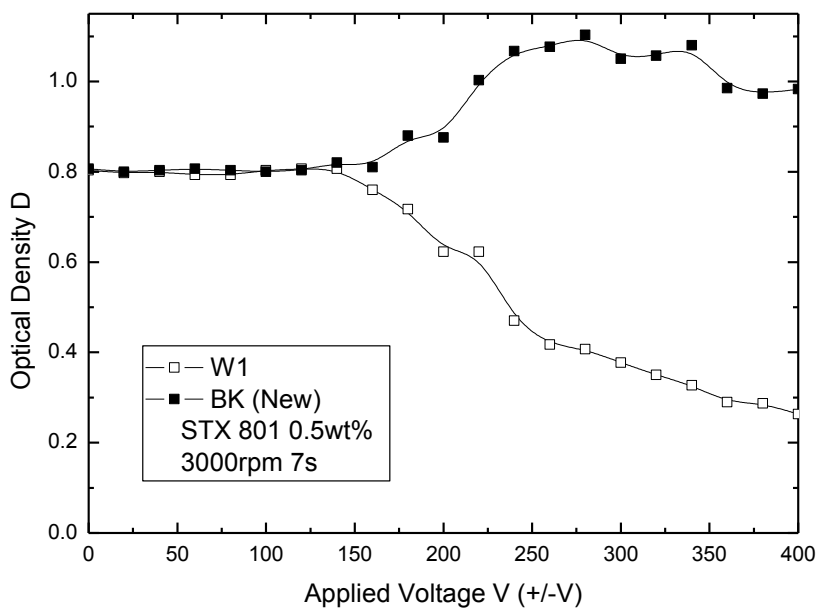


Fig. 7-4 印加電圧-反射濃度グラフ

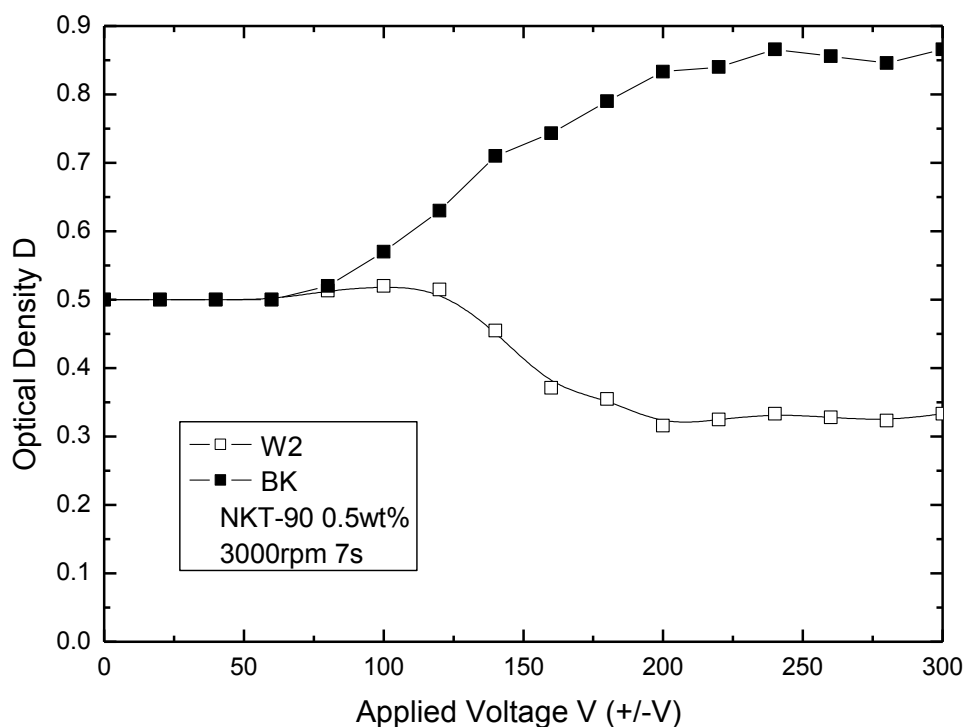


Fig. 7-5 印加電圧-反射濃度グラフ

本実験に使用した白粒子(W1)試作トナーの形状は粉碎不定形、黒粒子(BK-New)ブラザー工業の市販プリンター用の球形トナーである。添加剤は日本アエロジェルのシリカである。Fig. 7-3、Fig.7-4 に示すグラフを検討するとどちらも同じ0.5wt%だ。それぞれ違う種類のシリカを分析ミルにして、7秒間約3000rpm高速攪拌を行った。

どちらも閾値電圧は140V程度であるが、STX801の方がSTX501より駆動電圧が高くなっている事が分かった。また白黒粒子のコントラストも計算してみると低い値でもなく高くもないことが分かった。

一方試作白トナー(WII)と同じ黒トナー(BK-New)を2:1の比率で、酸化チタンNKT-90 0.5wt%を混ぜて3000rpmで行った結果をFig.7-5に示す。

添加剤 T805 結果

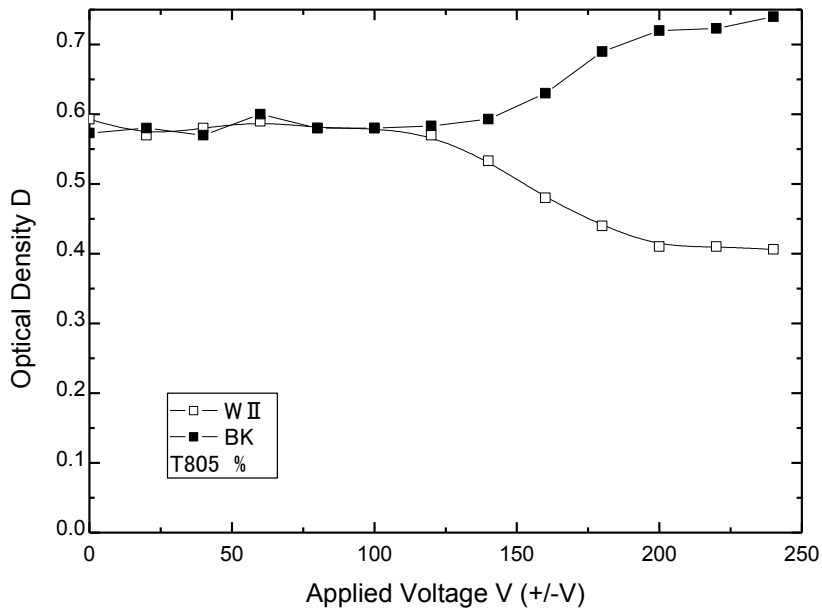


Fig. 7-6 酸化チタン T805 印加電圧-反射濃度グラフ

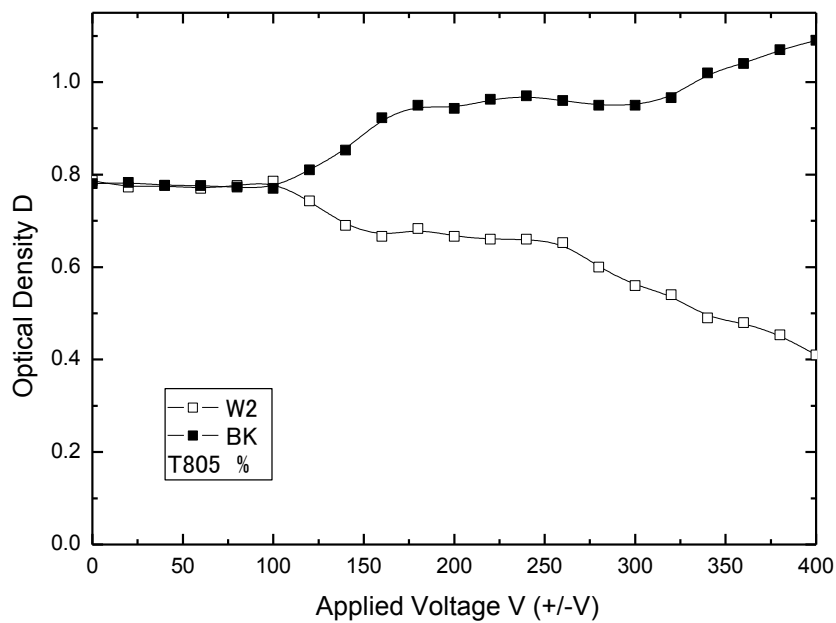


Fig. 7-7 酸化チタン T805 印加電圧-反射濃度グラフ

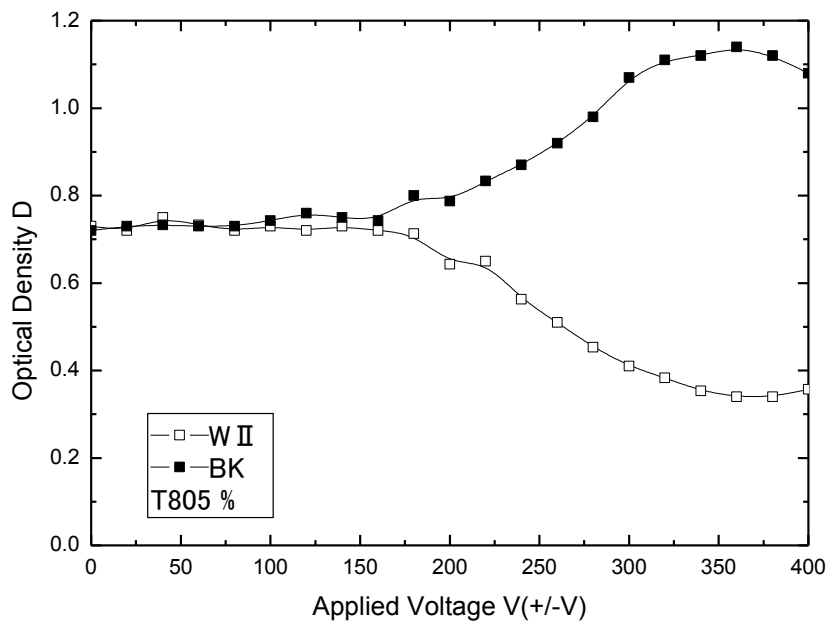


Fig. 7-8 酸化チタン T805 印加電圧-反射濃度グラフ

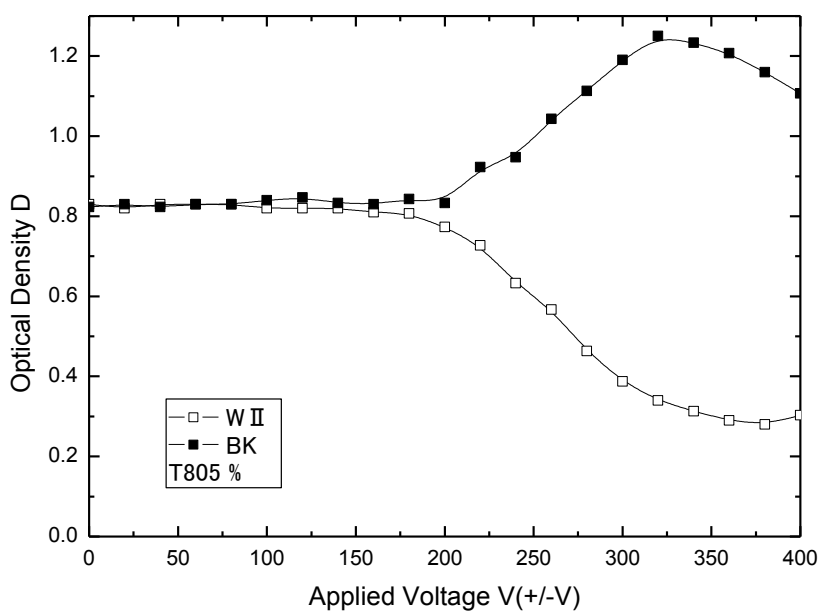


Fig. 7-9 酸化チタン T805 印加電圧-反射濃度グラフ

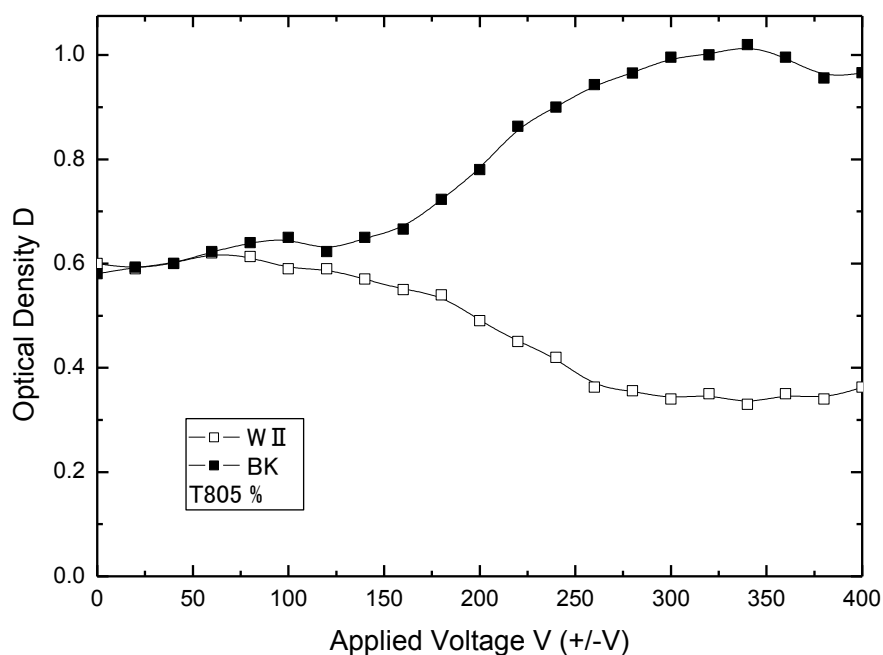


Fig. 7-10 酸化チタン T805 印加電圧-反射濃度グラフ

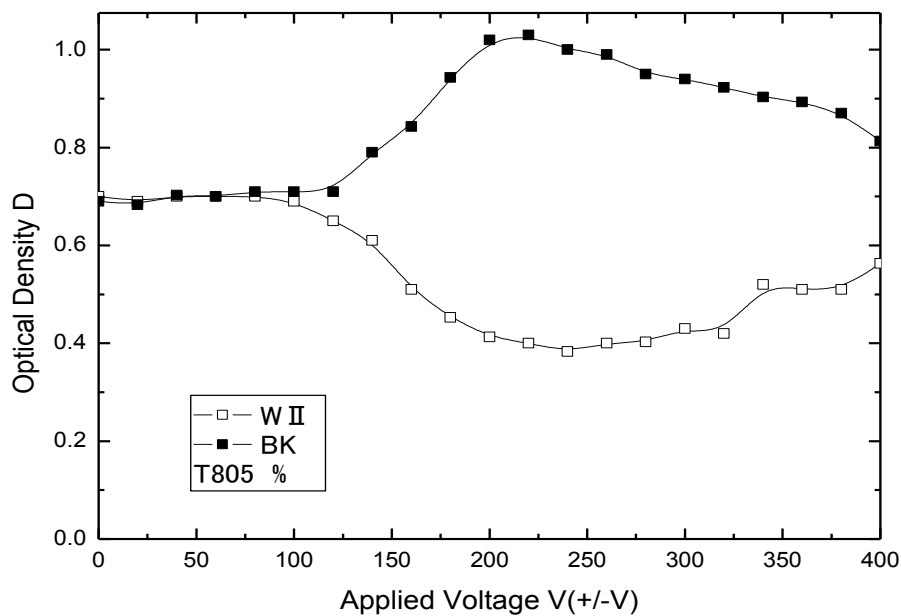


Fig. 7-11 酸化チタン T805 印加電圧-反射濃度グラフ

Fig.7-6 から Fig.7-11 の印加電圧 - 反射濃度グラフに示す結果により、トナーディスプレイにおいて、白色および黒色のトナー粒子に 0.5wt%酸化チタン微粒子を二倍以上添加することにより、表示コントラストが改良されさらに表示に必要な印加電圧 360V が 300V に低下することが分かった。

シリカとチタニアの複合酸化物を 0.5wt%で攪拌して、セルに注入し白黒表示を行いその反射率のグラフによって表示が切り替わり始める電圧が下がっていることが分かる。また白表示の反射率ほど黒表示の反射率も下がっていることが分かる。外添剤として、シリカとチタニアの複合酸化物と酸化チタンを攪拌した粒子を用いたので、トナーディスプレイセルは低い閾値電圧を示した。

7.3 手振り帯電

7.3.1 手振り帯電方法

1. 計量を行った粒子をスクリービンに封入し、ガラス小瓶内にて 300 回振とうする。Fig. 7-12 に各粒子を入れたスクリービンサンプルの様子を示す。
2. 混合した粒子をスプレーが形成された下部電極の表示部へ広げ、金属製のヘラ等を使用して均等にならした。
3. それをトナーディスプレイセルとし電極を使用して Sin 波を印加し表示を行った。反射濃度計で反射率を測定した。

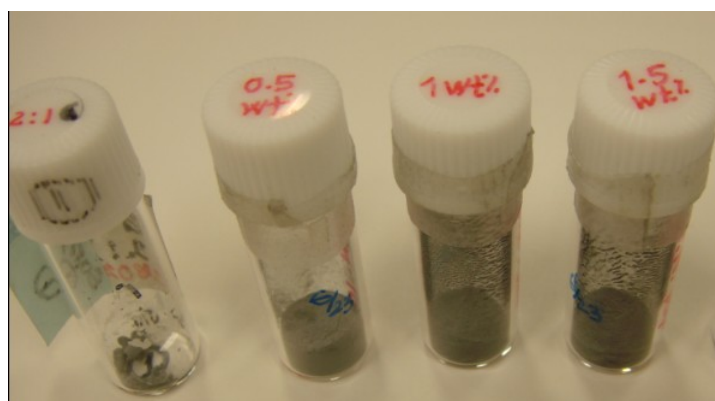


Fig. 7-12 スクリービンに封入後の各サンプル

7.3.2 手振り帯電の表示特性

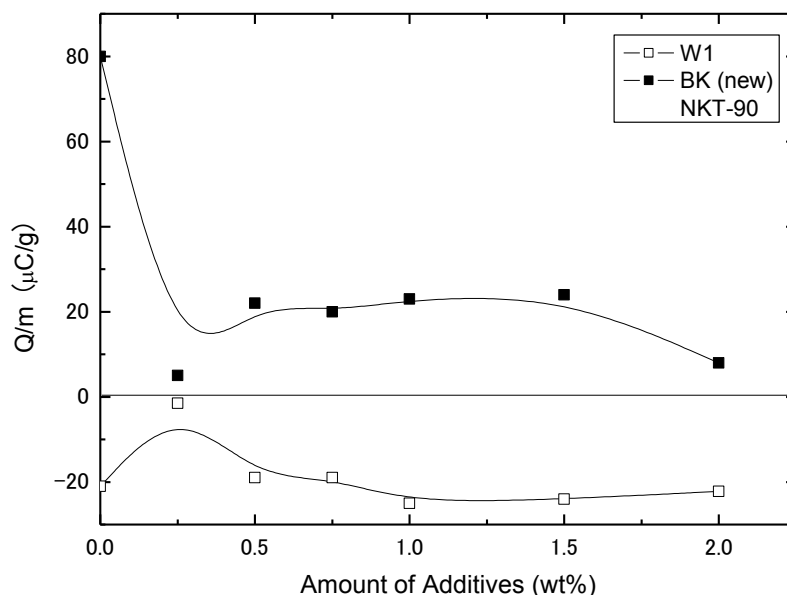


Fig. 7-13 添加剤 NKT-90 の帯電量と添加剤 wt%の関係

Fig.7-13、 Fig.7-14 グラフの結果をみると、アルミナ微粒子 0.5wt%添加により白黒色のトナー粒子の帯電量はともに 10%程度低下するだけで、さらに添加量を増やしても帯電量は殆んど変わらなかった。

一方酸化チタン微粒子 NKT-90 については、添加によって表示のコントラスト改良効果は殆んど見られなかったが、白黒粒子のトナー粒子の帯電量は添加量によって大きく減少した。

アルミナ、酸化チタン、微粒子の添加によって白色トナー粒子及び黒色トナー粒子の帯電量が減少していることから、トナー粒子間の摩擦による帯電効率が低下しているものと思われる。ただし白および黒色トナー粒子の帯電量が減少することによって表示が混乱することから、優れた表示を減少させる為には、ある範囲の帯電量が必要と考えられる。

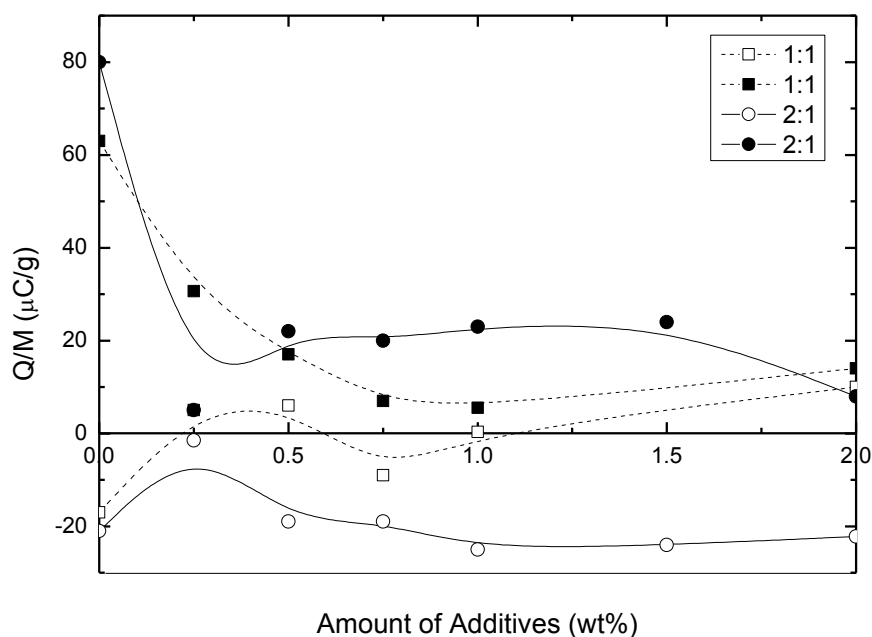


Fig. 7-14 添加剤 NKT-90 の帯電量と添加剤 wt%の関係

Fig.7-14 より外添剤 NKT-90 を添加することにより黒粒子の帯電量は大きく低下し、添加量 0.75wt%の所でほぼ飽和する。一方白粒子の帯電量は外添剤の添加によらずほぼ一定の値を取る。

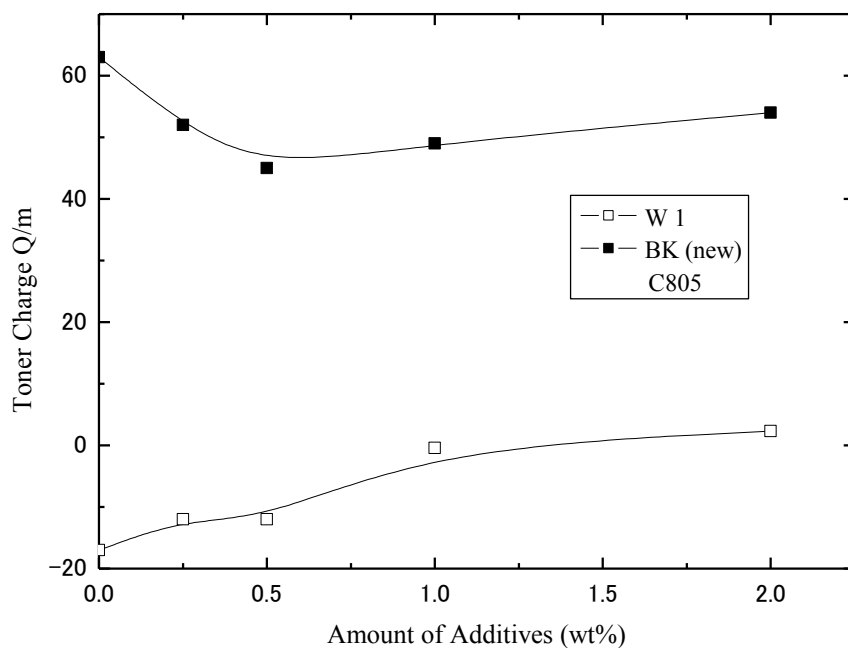


Fig. 7-15 C805 の帯電量と添加剤 wt%の関係

添加剤 NKT-90 については少量の添加量で白黒色トナー粒子の帯電量は減少し、白黒共にプラス 10 前後の同じ値を取る。

添加剤 C805 についても少量の添加量で白黒色トナー粒子の帯電量は減少するがさらに加えても白帯電量は 0 黒の帯電量は 50 前後の一定の値となる事が分かった。

7.4 添加による表示性能の向上

今回使用した添加剤の表示性能について主に表示コントラストの関係について説明する。

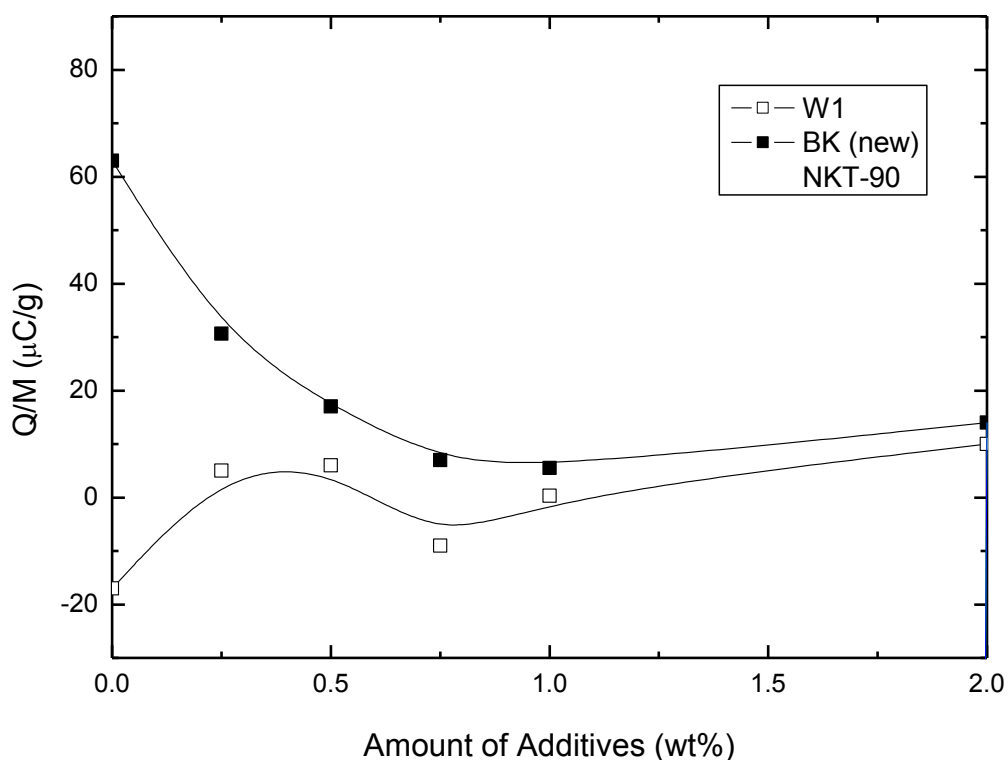


Fig. 7-16 白黒粒子のコントラストと添加剤 wt%関係

Fig.7-16 に示すように外添剤 2:1 の時 NKT-90 を添加する事ではコントラストは殆ど変化しない。また 1:1 の時の添加剤 1wt%の添加で急激にコントラストの変化が見られる。これは白黒粒子が添加剤との摩擦帯電が行われ再粒子間のクーロン力を弱める事が起こした現象である。

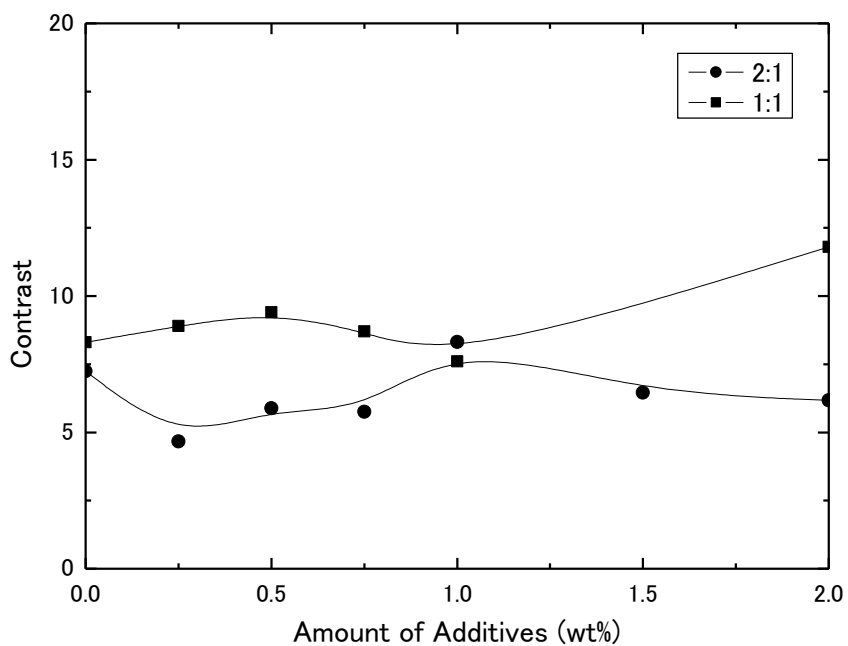


Fig. 7-17 白黒粒子 2:1 と 1:1 の時コントラストと添加剤 wt%関係

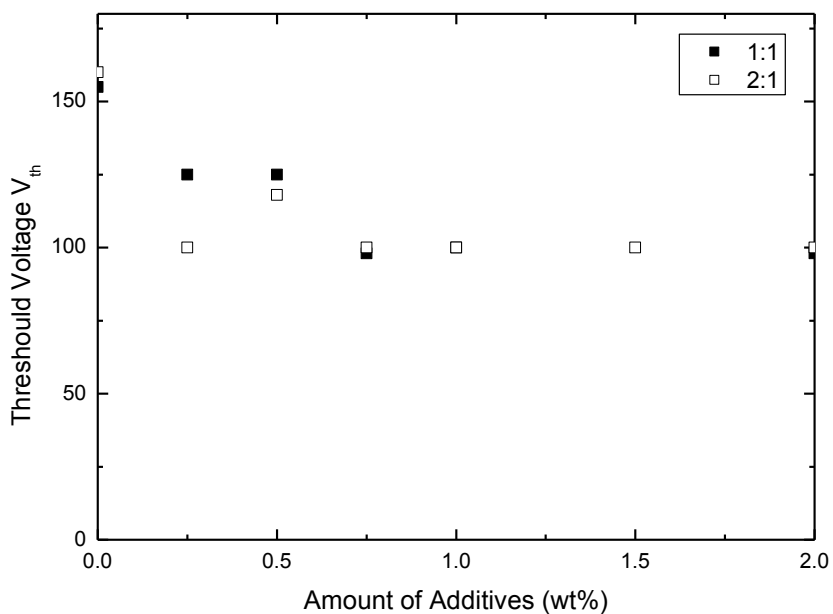


Fig. 7-18 添加剤を加えた時の閾値電圧と添加剤 wt%の関係

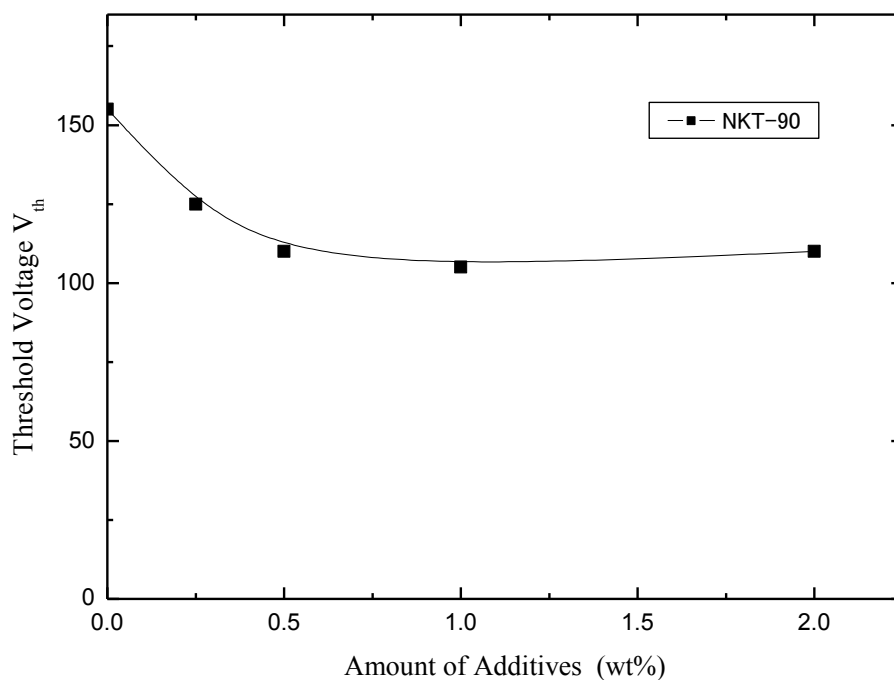


Fig. 7-19 添加剤を加えた時の閾値電圧と添加剤 wt%の関係

外添剤 NKT-90 の添加により黒粒子の帯電量が減少した。そのことで閾値電圧も Fig.7-19 に示すように外添剤の添加により低下し、白黒粒子の比率に関わらず、外添剤を 0.75wt%添加することで閾値電圧は 100V にまで低下する。また添加量がグラフに示すように外添剤 NKT-90 を添加することではコントラストは殆ど変化しない。

参考文献

1. 小田正純、小口寿彦: Japan Hardcopy '95 論文集 pp.71 (1995)
2. http://www.ika.ne.jp/ika/product_art/manual/ika_a_11.pdf.
pp.13 (Accessed by 2015)

第 8 章 単純マトリックス表示

8.1.はじめに

表示媒体を用いて文字を表示するためには、セグメント表示があり、名前の示すとおり、個々の部分が独自に表示を切り替えることによって表現されている。代表的なものは 7 セグメント表示で 7 つの部分に分かれた画素を個々に制御するものである。

しかしセグメント表示方式では決まった形しか表すことができず、写真等の画像を表すことができない。そこで画素の制御を行列で行うマトリックス表示方式が用いられる。方式は、7 セグメント表示、単純マトリックス表示およびアクティブマトリックス表示の 3 方式が知られており、用途やディスプレイ素材に応じて使い分けられている。

8.2 トナーディスプレイパネルと表示性能

黒色トナーおよび白色トナーを使用して単純マトリックス表示パネルを作成した。Fig.8-1 に白黒表示の様子を示す。

ITO 透明電極は 8 本の平行電極で、ライン幅 3mm, 間隔 1mm, である。上部と下部の電極の向きを 90 度とし、電極間距離 100 μ m の表示セルを作成し、黒トナーおよび白トナーを重量比 1 : 2 に混合して、セル内に注入した。印加電圧は +/-150V で、良好な表示を得る事ができた。

単純マトリックス表示はクロストークという問題を抱えているが、トナーディスプレイは明確な閾値電圧をもつため、単純マトリックス方式を用いることができる。

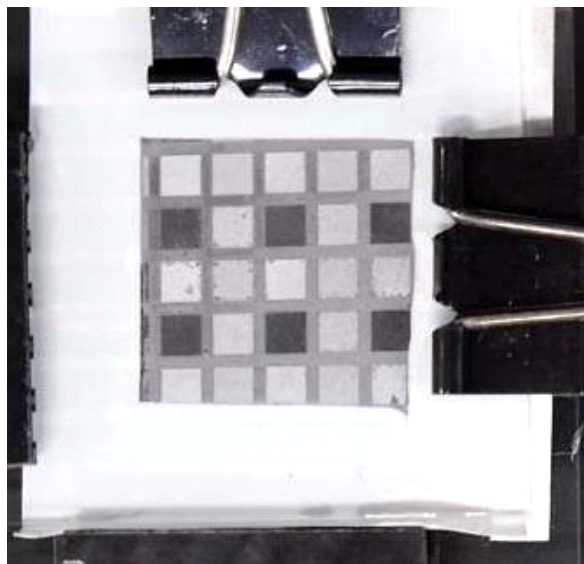


Fig.8-1 Passive matrix toner display

8.2.1 7セグメント方式の動作原理

7セグメントは Fig.8-2 に示すように7つの片方の電極から成り立っている。身近のものとしてデジタル時計や電卓で多く使われ、構造、動作方法ともに非常に単純であるため作製しやすい。しかし、電極で表示できる形が限られているため、この形以外の文字や画像などは表示ができない。

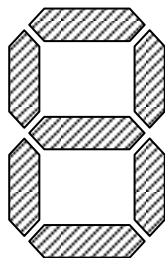


Fig.8-2 セグメント方式電極

8.2.2 単純マトリクスの動作原理

単純マトリクス方式では Fig.8-3 のように縦、横の方向に多数の導線が張られており、表示したい画素にあたる縦列、横列に電圧を印加することで、その画素にのみ表示する方法である。



Fig.8-3 電圧印加図

Fig.8-4 に示すように、縦列に $a \sim m$ 個の導電部と比導電部を配列した透明な上部基盤と、横列に $1 \sim m$ 個の配列をした下部基盤を使用する。上部基盤が行制御、下部基盤が列制御の役割をする。上部基盤と下部基盤の電極を直交させ、互いの電極と電極の交差部分が画素となる。そして目的の画素の行、および列の電極に電圧をかけることによって表示を行う。

単純マトリクスは7セグメント方式と同様、構造が簡単なことから製作しやすい特徴を持つ。しかし、単純な表示であれば容易であるが、高画質の表示を行うには縦、横に無数の配列が必要となる。さらにクロストークと言われる現象が起り、コントラスト低下の原因になっている。

クロストークとは、電圧の印加時に交差部分以外の列と行の部分にも電圧がかかることである。

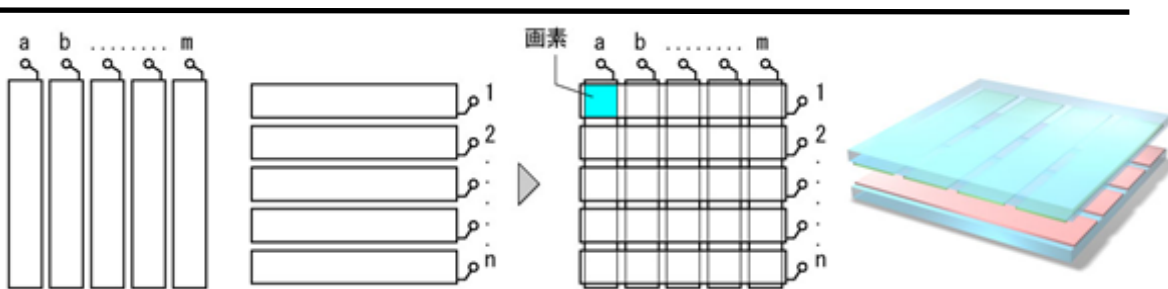


Fig. 8-4 アクティブマトリクス表示電極

Fig.8-5 を使って説明をする。これは、 5×5 の単純マトリクス電極である。縦列 3 と横列 c がクロスする 3-c の画素のみを表示させたいとする。そのためには、電極 3 に xV 、電極 c に xV の電位を与え、他の電極は接地されると表示がされる。これは 3-c には $2xV$ の電位差が生まれるからである。

しかし、この際に縦横列上の画素にも xV の電位差が生まれてため、粒子が xV の電位差で動作してしまう時は、表示したい画素だけでなく、その縦横列上の画素も動作してしまう。これがクロストークである。単純マトリクスでは、すべての画素が電氣的につながっている。そのため、クロストークが生じコントラストが低下することになる。

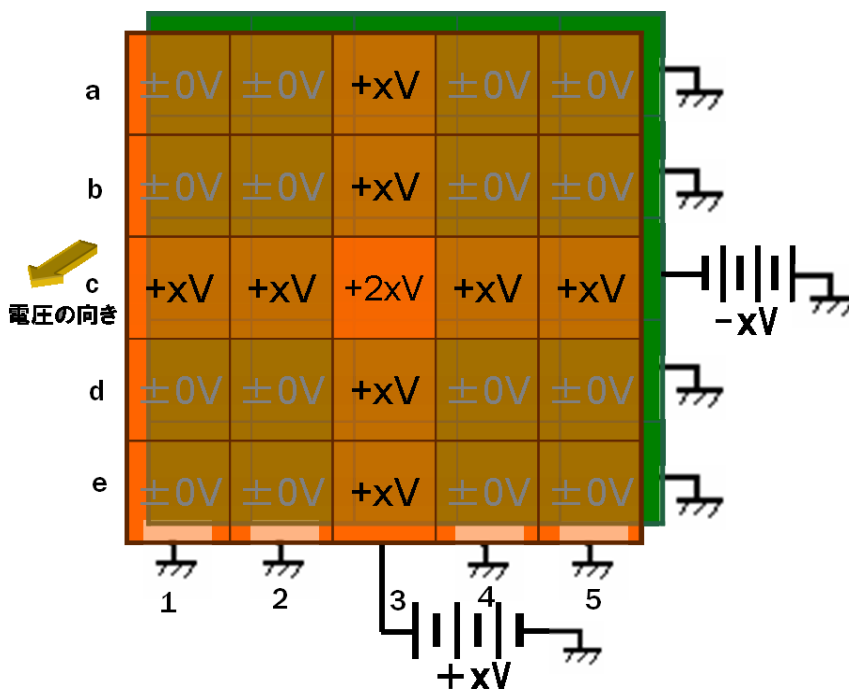


Fig.8-5 クロストーク

クロストークにならないようにするには、電位差が xV では動作しないが、 $2xV$ でなら動作する、つまり xV — $2xV$ の間に閾値電圧を持つことでクロストークが起こらないようにすることができる。

トナーディスプレイは明確な閾値電圧をもつことが大きな特徴である。そのため、単純マトリクス方式を用いることができる。駆動電圧閾値が存在することを利用して、Fig. 8-6 に示すように単純マトリクス駆動による表示を確認した。

試料は次のように作製する。縦 45mm 横 40mm の大きさのガラス基板に平行に 8 本の電極が並んでいる ITO 基板を使用する。ITO (Indium Tin Oxide) は、酸化インジウムにスズを添加した化合物のことである。導電性を持ちながら高い透明度を有しているという特徴がある。1 本の ITO 電極の幅は 3 mm で、電極間は 1 mm の間隔がある。

また、電極表面中央部には SiO_2 (シリカ) が絶縁層として塗布されている。この透明な基板を 2 枚直交させるよう配置する。Fig.8-6 の四角形 1 つは 3 mm 四方の正方形の電極であり、それが 1 mm の間隔をあけて 8×8 個並んでいる。この電極部にあうように 1 辺 3 mm の正方形の穴を任意の数だけスペーサーにあけ、表示部とした。

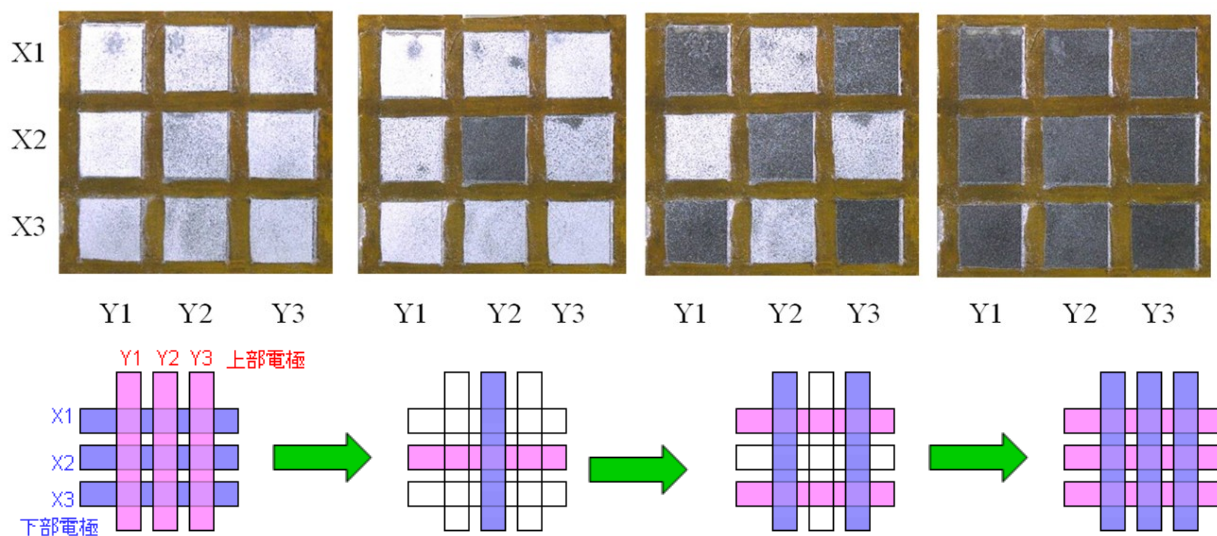


Fig.8-6 単純マトリクス表示

8.3 アクティブマトリクス駆動方式

画素ごとに表示ON/非表示OFFを制御するスイッチ回路を設ける方式である。各画素ごとにON/OFFのスイッチ要素と、その状態を保持する信号蓄積要素を持っている。そのため、単純マトリクスに見られるようなクロストークといった問題を持たない。コントラストが高く、また応答速度も速いといった特徴がある。欠点としては、構造の複雑さからコストが高くなることが挙げられる。

Fig.8-7で動作原理を説明する。横軸方向と縦軸方向の2方向に導線を張り巡らし、横と縦の2方向から電圧をかけることで交点の画素を駆動させる単純型液晶の構造に加えて、各画素ごとに「素子」を配置している。

素子は横軸方向の導線の電圧によってON/OFF状態が切り替わり、素子がON状態にある時に縦軸方向の導線にも電圧がかけられると交点にある目的の画素が点灯する。これにより、目的の画素のみを動作させられる。

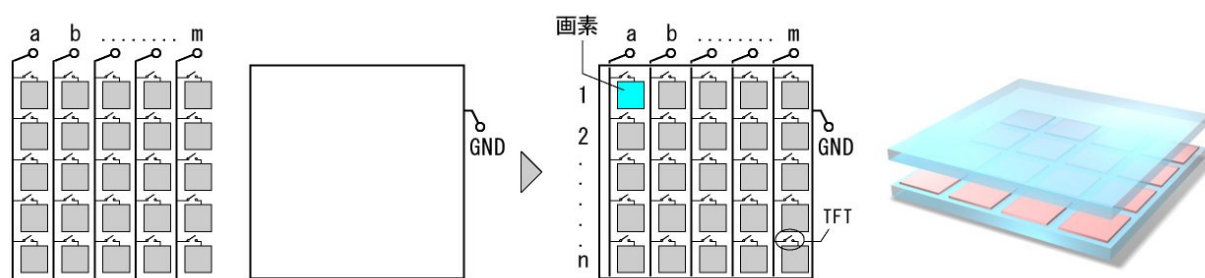


Fig.8-7 アクティブマトリクスの動作原理

パッシブマトリクス方式の欠点を改善したのがアクティブマトリクス駆動方式で Fig.8-7 に示すように走査線と信号線交点に薄膜トランジスタ(TFT)や薄膜ダイオード(TFD)などの薄膜能動要素を設けたものだ。

この駆動方式では薄膜能動素子が画像の閾値特性を支配するので、電気泳動のような閾値を持たない素子の駆動が可能となり、前述のクロストークも改善される。

第9章 総括

9.1 結論

本研究では、トナーディスプレイにおけるトナーの白黒粒子の配合比率と帯電量の研究を行った。

以下に本研究で得られた成果を要約し、本論文の結論とする。

<第5章>

- セルギャップの減少による閾値電圧の低下を確認した。閾値電圧の面から考えると $25\mu\text{m}$ のスペーサーを用いると駆動電圧が低くなるが、表示面も考慮して $50\mu\text{m}$ 程度のものを使用することとした。

<第7章>

- シリカとチタニア複合酸化物を $0.5\text{wt}\%$ で攪拌して、セルに注入し白黒表示を行いその反射率のグラフによって表示が切り替わり始める閾値電圧が下がっていることが分かる。また白表示の反射率と同じように黒表示の反射率も下がっていることが分かる。外添剤として、シリカとチタニア複合酸化物と酸化チタンを攪拌した粒子を用いたので、トナーディスプレイセルが低い閾値電圧を示した。

<第8章>

- 単純マトリックス方式を用いる場合、閾値電圧に注意して駆動電圧を決定しなければならない
- 単純マトリックス方式を用いて併置混色を実現することができる
- コントラストの低下が問題となっている
- セルギャップは小さければ小さいほど閾値電圧が下がる
- 粒径の問題でセルギャップが小さすぎるものを使用することはできない
- 粒子は帯電量、安定性の面から選ぶ必要がある

9.2 今後の展望

1. 外部添加剤の添加効果

本研究で使用したトナーは、一部プリンターで使用される市販トナーであるため、トナー表面になんらかの外添剤が添加されていることがSEM写真より確認できる。

またトナーには帯電制御剤やワックスも含まれている。これら材料が流動性や帯電性、そして表示特性に影響を与えている可能性があるため、今後の外部添加処理を行う際にはシンプルな構成・構造を持つ粒子を使用することが望まれる。

本研究で用いた粒子は、非常に小さい。粒径に関する検討を行うにはより大きく、なおかつ粒子径がそろっている粒子を用いる必要がある。

2. 白黒粒子の配合比率と帯電量

本研究ではトナーディスプレイ内で摩擦帯電させた粒子の帯電量を測定しているが、セル内の全粒子についてではなく、電極面に付着した粒子だけを測定していて、他の吹き飛ばしてしまう粒子については検討を行っていない。この粒子を回収し、限りなく0に近い回数で正帯電粒子と負帯電粒子を分離して帯電量を測定することができれば更に信憑性の高いデータが得られると思われる。

白色粒子は粉砕で、黒色粒子は球形であったため、形状を統一した方がより評価がしやすくなると考えられる。

謝辞

本論文は、平成 20 年から平成 26 年までの間に千葉大学大学院融合科学研究科北村研究室において行われた研究成果をまとめたものであります。

本研究を遂行するにあたり、指導教官である北村 孝司教授にはご多忙の中、終始多大な御助言と御指導を賜りました。心より御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、終始適切な御助言と御指導を賜りました星野勝義教授に心より感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、丁寧な御助言と御指導を賜りました宮川 信一准教授と中村 佐紀子助教に心より感謝いたします。

特任教員の中村 卓様には研究に関して御助言と御指導を賜りました、大変勉強になりました、心より感謝いたします。

論文の審査にあたって貴重なご意見を頂いた小林 範久教授、小林裕幸教授、斉藤恭一教授に感謝いたします。

留学期間中、奨学金を頂いた財団法人岡本国際奨学交流財団、財団法人牧田国際育英会、コサク会の皆様には暖かい応援および有益な日本の情報や文化を教えて頂き感謝申し上げます。また心の支えとなった鴨志田尚子氏に感謝申し上げます。

本研究室の先輩であり、本論文をまとめるにあたり千葉大学大学院自然科学研究科竹内宗靖氏、同融合科学研究科並川亮平氏、工学部情報画像工学科鎌田のぞみ氏下形貴宣氏の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。同じトナーディスプレイ班の鈴見哲氏には多くの御助言を頂くと同時に有益な討論を頂きました。ここに感謝致します。星野研究室、宮川研究室の皆様には多方面で御協力頂きました。ここに感謝致します。

最後に、本研究の遂行にあたっては、支えて頂きました母国の両親と家族に感謝の意を表します。特に、日本に留学することを勧め、学位をとることを心より望んでいた、今は亡き母に祈りを捧げます。また体を気遣い心配してくれた姉にも感謝します。

平成 27 年 1 月

ケティペ, K. チャミリ クマラ

関連発表

学会発表

1. K. K. Chamili Kumara, Song Jiang, Tadasuke Ohtsuki and Yasushi Hoshino, Nippon Institute of Technology; and Kueiying Sheu and Jeng Seng Huang, Trend Tone Imaging, Inc. (Japan) “Effect of Charging Method on Charging Characteristics of Mono-component Toner” Proceedings of IS&T NIP23/International Conference on Digital Printing Technologies, pp. 61-64, Vol. No.23 (Sept. 2007).
2. K. K. Chamili Kumara, Satoshi Suzumi, Sakiko Nakamura, Nobukazu Miyagawa and Takashi Kitamura: “Effects of Triboelectrical Charge of Toners on Display Characteristics of Toner Display” Proceedings of IS&T NIP26/International Conference on Digital Printing Technologies, pp. 520-522, No.112 (Sept. 2010).
3. K. K. Chamili Kumara, Sakiko Nakamura, Nobukazu Miyagawa and Takashi Kitamura: “Effect of External Additive on Display Characteristics in Toner Display” Proceedings of IDW’13 International Display Workshops, pp.174, (Dec. 2013).

投稿論文

1. K. K. チャミリ クマラ, 中村佐紀子, 宮川信一, 北村孝司: “電界中における粒移動を利用した反射型ディスプレイ (第IV報) -2 粒子移動型トナーディスプレイ-”, 日本画像学会誌 第53巻 第1号 pp. 21-27 (2014年1月)
2. K. K. Chamili Kumara, Sakiko Nakamura, Nobukazu Miyagawa, Takashi Kitamura: “Toner Display Based on Electrically Induced Movement of Black and White Toner Particles” Journal of Imaging Science & Technology, Vol.58, No.2, pp. 020504 1-7 (Mar.-Apr. 2014)

参考論文

1. 周 曄, 関 俊紀, Shirley Manoj Somasiri, Ketepe Kankanamalage Chamili Kumara, 星野坦之: “電圧を印加した電極間での粒子の挙動の観察” 日本画像学会誌 第44巻 第6号 pp. 445-449 (2005年8月)
2. 周 曄, Ketepe Kankanamalage Chamili Kumara, 星野坦之: “電圧を印加した電極間での粒子の挙動の観察 II 一片側電極上に紙が配置された場合” 日本画像学会誌 第46巻 第1号 pp. 3-8 (2006年9月)