

電子写真用フェライトキャリアの特性による 複写機の現像性の制御*

川崎製鉄技報

21 (1989) 4, 306-311

Dependence of Xerographical Developability on Ferrite Carrier Properties



藤長 政志

Masashi Fujinaga

ハイテク研究所 新素
材研究センター磁性材
料グループ



奥壘 計造

Keizou Okuno

ハイテク研究所 新素
材研究センター磁性材
料グループ 主任研究
員(課長)



池田 隆雄

Takao Ikeda

技術研究本部 研究企
画部試験課



星原 泉

Izumi Hoshihara

新事業本部 新素材事
業推進部 主査(部長)



池田 義俊

Yoshitoshi Ikeda

化学事業部 磁性材部
主査(課長)

要旨

電子写真現像剤用のキャリアとして、鉄粉に代わってフェライトキャリアが広く用いられているが、その画像特性は明らかでない。フェライトキャリアの特性が、電子写真の現像性におよぼす影響を解明するため、市販複写機を用いて、当社が開発したフェライトキャリアの諸特性による複写画像の濃度、階調性、回収トナー量の変化を調べた。画像濃度はキャリアの誘電率と粒径で変化し、高誘電率、小粒径で向上する。階調性は粒径と粒度分布に依存し、大粒径で軟調となった。回収トナー量は、キャリアの表面状態で変化するトナーの電荷分布の影響を受け、分布がブロードになると増加する。キャリア表面の結晶粒径をトナー粒径と同程度としたとき、回収トナー量は最小となった。

Synopsis:

The dependence of xerographical developability on carrier properties has been studied using commercial plain paper copiers. Recently the steel beads carrier has been replaced by a ferrite carrier as a xerographic developer, but the developability of the latter has not yet been clarified. Measurements of image density, print contrast and the residual toner mass have been made to elucidate the relationship between characteristics of the ferrite carrier and its developability. The image density increases, as the dielectric constant of the developer increases and the diameters of carrier beads decrease. The contrast of the print becomes flatter with an increase in the carrier beads diameter. The residual toner mass increases as the toner charge distribution broadens. Surface condition of carrier beads affects the toner charge distribution, and the minimum residual toner mass is attained, when the sizes of carrier surface grains are similar to those of toner particles.

1 はじめに

電子写真 (xerography) の技術を利用した PPC (plain paper copier 普通紙複写機) は、文書の大量複製を身近なものとし、情報の流通に革命をもたらした。コミュニケーションの可能性を大幅に広げた点で、今世紀の特筆すべき発明の1つだが、技術的観点からも数少ない高度で精緻な静電気の応用例として注目される。電子写真には、いくつかの種類があるが、現在では普通紙を用いた磁気ブラシ現像法が一般的である。磁気ブラシ現像の現像機構についてはさまざまな解析がなされており¹⁻¹³⁾、現像機の諸パラメータと感光体へのトナー付着現象のかかわりがモデルで解明され、PPC の設計指針となっている。しかし、現像剤の主要要素であるキャリアの特性の側面から、現像性について体系的に調べられた例はない。

当社は、製鉄所の熱間圧延鋼板の酸洗廃液から回収される酸化

鉄の有効利用の一環として、磁気ブラシ現像用のフェライトキャリアを生産している。この論文では、その開発の過程でえられた、キャリアの特性による PPC の現像性の変化に関する知見について報告する。

2 PPC の原理とフェライトキャリア

2.1 PPC の原理・構造とキャリアの機能

PPC にはさまざまな形態が存在するが、すべて同一の基本プロセスによっている。PPC のプロセスは、導電性の金属ドラムを、Se, CdS, アモルファスシリコンなどの光導電体で被覆した感光ドラムを中心とし、Fig. 1 の6つの工程からなっている。このプロ

* 平成元年7月3日原稿受付

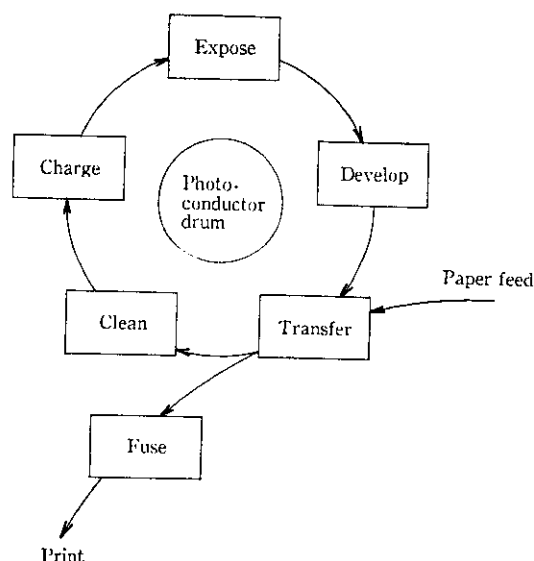


Fig. 1 Schema of the six steps in the xerographic process

セスは、全体が静電気現象の精緻な応用である。まず、感光ドラムの表面にコロナ放電で均一な電荷を与える（charge 帯電）。次に、原稿を照明するランプと映写レンズからなる光学系により、原稿の像を感光ドラム表面に投射する。このとき、感光ドラム上の原稿白地部に相当する部分では光導電現象により電荷が金属層へ拡散し、暗黒部では電荷が残留するので、原稿の明暗に対応した電荷分布を持った静電気による潜像が形成される（expose 露光）。そして、感光ドラム上の静電潜像に逆極性の電荷をもつトナーを静電気力で付着させ顕像化し（develop 現像）、さらにコロナ放電で顕像のトナーを紙に転写する（transfer 転写）。転写したトナーは熱や溶剤で紙に固着させ（fuse 定着）複写画像を得る。一方、転写を終えた感光ドラムは、残留しているトナーと電荷を除去し（clean 清掃）、初期状態にもどる。

このプロセスの核心は、複写画像の濃度、階調の再現性などの画質を決定する現像工程である。PPC の現像方法は、現像部にトナーを搬送する方法の違いから Fig. 2 のように分類される。このなかで磁気ブラシ法は、乾式で高速現像が可能で、暗黒部の縁だけが強く現像される「エッジ効果」が少ない利点から、現在の主流となっている。この方法は、磁石に吸着させてブラシ状になった現像剤で感光ドラム上を掃くことによって現像を行うものであり、トナーの搬送に磁力を用いている。磁性トナーをトナー自身の磁力で搬送する方法を1成分現像剤法、非磁性トナーを磁性キャリアに帯電吸着させキャリアの磁力で搬送する方法を2成分現像剤法とよぶ。2成分現像剤法はより高速現像に適し、高画像濃度が得やすいため

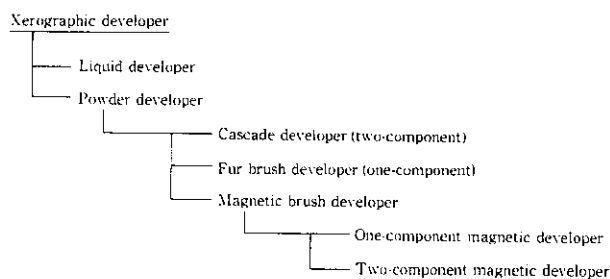


Fig. 2 Variety of the xerographic developer

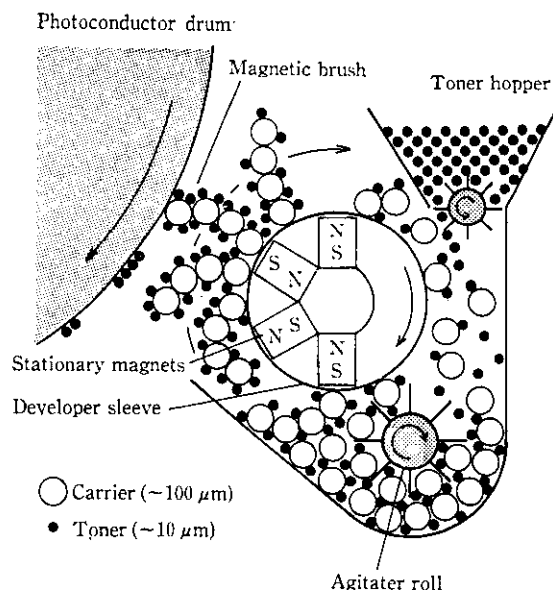


Fig. 3 Schematic of the magnetic brush developer

中級機以上で、1成分現像剤法は単純な構成のため小型機で主に使われている。

2成分現像剤を用いた磁気ブラシ現像機の構造を Fig. 3 で説明する。トナーとキャリアは、現像剤溜まりの攪拌ローラーで均一に混合され、摩擦によりそれぞれ逆極性に帯電する。静電気によりトナーを表面に付着させたキャリアは、現像ロール内の磁石に吸引されて現像ロールスリーブに付着し、スリーブの回転により現像部に運ばれる。現像部には現像用の磁石があり、キャリアは磁力線に沿ってブラシ状の穂を形成し、ブラシで感光ドラムの表面を掃くことでトナーを静電潜像に付着（現像）させる。現像を終えたキャリアはスリーブの回転で現像剤溜まりへ戻り、消費したトナーを補給され、さらに現像をくりかえす。この現像工程でキャリアの果たす機能は次の3つである。

- (1) 摩擦帯電：攪拌によりトナーとの間に均一な摩擦帯電を起こす。
- (2) 搬送：キャリア表面に帯電付着したトナーを現像部へ搬送する。
- (3) 現像：現像部で磁力線によりブラシを形成、感光ドラムにトナーを近接させて潜像に付着させる。非潜像部に付着したトナーを吸引除去する。

この機能を数千枚から数万枚の複写の間安定して発揮することが要求される。この多彩な機能を発揮するために、キャリアに要求される特性は、Table 1 に示すように、磁気特性、電気的特性、粉体特性、耐久性など極めて多岐にわたる。その詳細については他に譲り、後の章でこれらの特性による現像性の変化について取り上げることにする。

2.2 フェライトキャリアの特長

PPC の2成分現像剤用キャリアには、当初は主として鉄粉が使われていたが、近年性能の優れたフェライトキャリアへの転換が進んでいる。フェライトキャリアは鉄粉キャリアと比較して、

- (1) 内部まで均一で安定な酸化物なので長寿命である。
- (2) 組成・焼成条件による特性の制御幅が大きい。
- (3) 密度が約 2/3 で軽量。

などの特長をもつ。したがって、フェライトキャリアを採用するこ

Table 1 Requirements for the characteristics of ferrite carrier

Magnetic properties	Saturated magnetization
	Coercive force
	Permeability
Electric properties	Specific resistivity
	Specific charge
	Dielectric constant
Powder characteristics	Mean diameter
	Diameter distribution
	Apparent density
	Surface roughness
	Flow rate
Persistency	Environmental endurance
	Copy volume of endurance

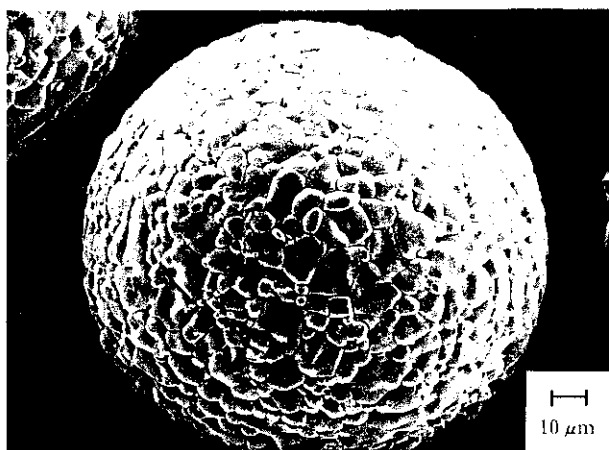


Photo 1 Ferrite carrier

とによって、PPC 機器の設計の自由度が増し、撹拌トルクが低減できるため小型軽量化・高速化が可能、現像剤の寿命が延びてメンテナンスの負荷が減るなどのメリットが得られる。

Photo 1 に当社製フェライトキャリアの SEM 観察例を示す。真球度が高く、平滑で均質な表面を持つこのフェライトキャリアは、高い耐久性をしめし、後述するように現像の制御性にすぐれている。

3 実験方法

この研究に用いたフェライトキャリアは、**Fig. 4** の工程にしたがってフェライトの原料粉を混合、造粒、焼成したものである。焼成した試料を解砕した後、目開き 46, 62, 74, 88, 105, 125 μm のふるいで、代表粒径 54, 68, 81, 96, 115 μm に分級し、必要に応じて単独または配合して使用した。

誘電率は平行平板の治具に充填した試料の静電容量から求め、トナーの比電荷はブローオフ法で測定した。実機での複写特性の評価は、フェライトキャリアを現像剤に用いている PPC メーカー製の小型機を使用し、トナー濃度 4% に配合してトナーとキャリアを予備混合した後、現像機に装入しテストチャートを複写して行った。画像濃度と階調性の評価には、Kodak 社製のグレイスケールをテ

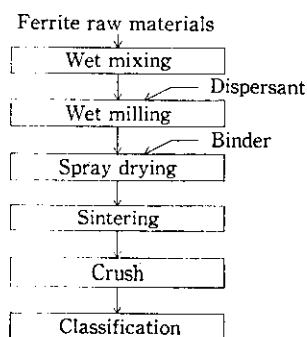


Fig. 4 Manufacturing process of ferrite carrier

ストチャートとして用い、回収トナー量は、全面文字原稿のテストチャートを 1000 枚複写して、その間の全回収トナーを秤量して測定した。

4 キャリアによる PPC の画像特性の制御

4.1 画像濃度

画像濃度 ID (image density) は、トナーで形成されたコピー画像の暗黒部の反射濃度であり、反射率 R から次式で定義される。

$$ID = -\log R \quad \dots\dots (1)$$

画像濃度は、用紙の白さ、トナーの黒さと付着量で決まり、カバレッジモデル¹⁴⁾を用いると次のように説明される。

$$ID = -\log [R_p \exp(-kM) + R_t [1 - \exp(-kM)]] \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 R_p : 用紙の反射率

R_t : 用紙に飽和付着したトナーの反射率

k : 変換因子

M : 用紙の単位面積当たりのトナー付着量 (kg/m²)

画像濃度は、トナーが用紙表面を完全に覆ってしまうまでは、ほぼトナー付着量に比例するが、トナーが用紙表面を覆い尽くした後には、さらに付着量が増しても画像濃度は飽和してそれ以上増大しない。

鮮明なコピーを得るためには、印刷の最大濃度に匹敵する 2 以上の画像濃度が望まれるが、現実にはトナーの材質による制約をうけ複写画像の濃度は 1.4 前後にとどまっている。飽和付着したトナーの濃度は 1.45 程度であるため、暗黒部には飽和量のトナーが付着することが必要である。しかしトナー付着量の過剰は、複写コスト、メンテナンス、後述する回収トナーの増加などの問題がある。したがって、キャリアには、その寿命の間、安定して適性量のトナーを付着 (= 現像) させる性能が求められる。

磁気ブラシ現像における感光体へのトナーの付着量 M_d は、Schein らの現像モデル^{3-5, 11, 12)}によって次式のように表される。

$$M_d = \frac{\pi}{2} \times \frac{V_0}{L} \times \frac{\varepsilon_0 K_E}{Q/m} \times \left| \frac{V_r}{V_0} \right| \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 M_d : 感光体へのトナー付着量 (kg/m²)

V_0 : 感光体の初期電位 (V)

L : 現像ギャップ長 (m)

ε_0 : 真空の誘電率 (8.854 × 10⁻¹² F/m)

Q/m : トナーの比電荷 (C/kg)

K_E : 現像空間の実効比誘電率

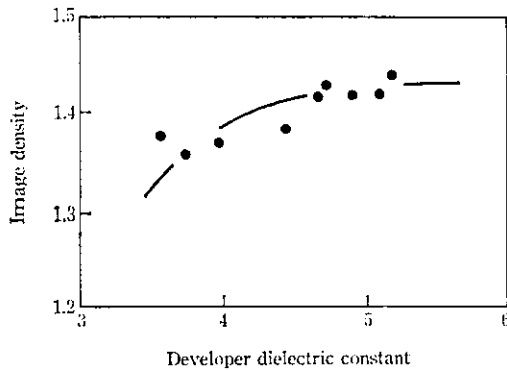


Fig. 5 Relationship between developer dielectric constant and image density

V_r : 現像ロール周速 (m/s)

V_p : 感光体周速 (m/s)

(3) 式は、感光体へのトナーの付着量はトナーに作用する現像電界と現像ロールと感光体の周速比で決まることを表しており、感光体の初期電位を上げ、現像ギャップを縮め、現像剤の誘電率を上げ、トナーの比電荷を下げ、現像ロールと感光体の周速比を上げることによって、コピーの画像濃度が向上することを示している。この中でキャリアの特性の関与する部分は、現像剤の誘電率とトナーの比電荷である。しかし、キャリアの材料設計においてトナーの比電荷を変化させることは PPC の工程全体への影響が大きいので、現像剤誘電率で画像濃度を調整することが望ましい。

現像剤の誘電率は、キャリアの誘電率によって、かなり広汎に変化させることができる。キャリアの誘電率は組成、焼成条件によって制御する。Fig. 5 にさまざまな誘電率の試作キャリアを用いて作成した現像剤の、誘電率による画像濃度の変化を示す。キャリアは平均粒径 $80\mu\text{m}$ に配合して用いた。図中の実線は (2), (3) 式に適当な定数を当てはめた計算値である。誘電率の増加にともない、ほぼ理論どおりに画像濃度が増しており、キャリアの誘電率による画像濃度の調整が有効であることがわかる。

Schein の現像モデルは、現像部への現像剤の搬送速度の要因を、現像ロールと感光体の周速比だけで代表させているが、その他にも現像剤と現像機のパラメータの変化による現像剤の密度の変化を考慮する必要がある。現像部の現像剤密度は、現像ロール径、現像ロール回転数、現像ギャップ長、現像磁界、キャリアの飽和磁化、キャリア粒径、現像剤流動度などの影響を受ける。キャリアの飽和磁化は、過大な場合には磁気ブラシの強度が上がり、複写画像に引っかき傷を残すブラシマークと呼ばれる欠陥を生じ、過小になるとキャリアが機内に飛散して障害を起こす。また現像剤流動度は、長寿命を保证するためには十分高くなければならない。したがって、現像部の現像剤密度に着目した場合、キャリアの材料設計による画像濃度の調整の可能性はキャリア粒径に限定される。松浦はキャリア粒径と飽和磁化による現像剤密度の関係を調べ¹⁵⁾、現像剤密度がキャリアの粒径と飽和磁化の積にはほぼ反比例することを示している。

Fig. 6 に代表粒径 $54, 68, 81, 96\mu\text{m}$ のキャリアをもちいて作製した現像剤の、キャリア粒径による画像濃度の変化を示す。キャリアは $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ で焼成した。Fig. 6 は、焼成温度による他の要因の変化を反映した画像濃度の変化が観察されるが、全体としてキャリア粒径の小径化による現像剤密度の増加にともない、画像濃度が向上している。キャリア粒径 $54\mu\text{m}$ 以下では、現像剤流動度が悪化する懸念があるが、画像濃度は飽和する傾向を示している。

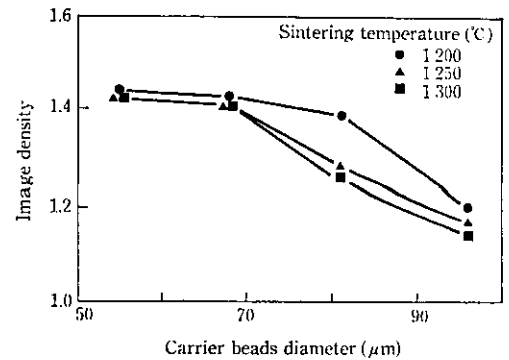


Fig. 6 Relationship between carrier beads diameter and image density for different sintering temperature

以上の実験結果から、一定の現像条件下でキャリアの誘電率、粒径を制御することによって、PPC の画像濃度を調整することができることがわかった。

4.2 階調性

コピーの対象となる原稿は、印刷物であれば最大 2 以上の反射濃度を持っており、最大画像濃度がたかだか 1.4 の PPC では、完全に原稿に忠実な複写は不可能である。また、鉛筆書きの原稿や原稿の地色が暗い場合などは、必ずしも原稿に忠実な複写が望ましいものではなく、適当な濃淡の強調が必要となることがある。原稿の濃度変化に対する PPC の複写画像の濃度変化の関係を階調性という。一般に PPC の階調性は、Fig. 7 に例示した階調再現曲線 (OD-ID 曲線) で表される。ここで OD とは、原稿の反射濃度 (original density) を言う。階調再現曲線の傾斜は、コピー画像のコントラストを示し、ガンマ値と呼ばれるが、ここでは ID が 0.2 から 1.0 のあいだの階調再現曲線の平均の傾斜をガンマ値の定義とする。

鉛筆書きの原稿の濃度は、 $0.6\sim 0.9$ 程度であるから、鮮明なコピーのためには濃淡を強調する高いガンマ値が望ましいが、連続的な濃淡を持つ写真・絵画などの複写には、むしろ低いガンマ値が適する。1 台の PPC で両方の要求をみたすことはできないので、PPC メーカーの設計思想を基に、ユーザーの好みなどを勘案して適当な妥協点を選択しなければならない。Fig. 7 の階調再現曲線は、代表的な PPC メーカー 3 社の中型機の測定例であるが、それぞれ特徴

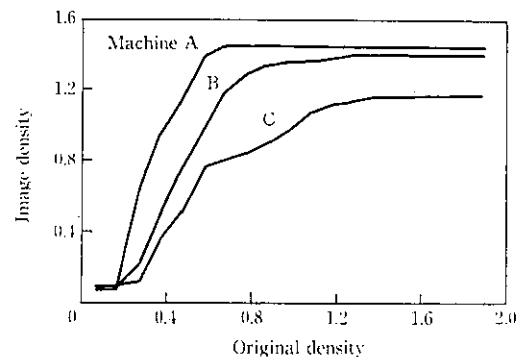


Fig. 7 Tone reproduction curves—relationship between density on original and image—as example of commercial plain paper copiers

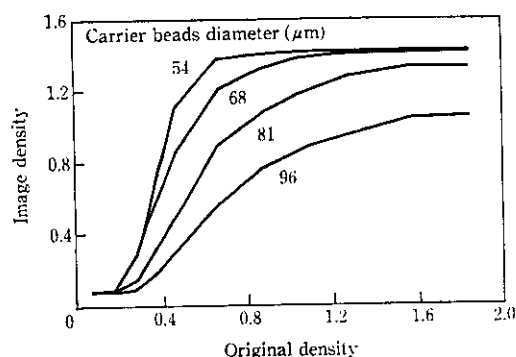


Fig. 8 Tone reproduction curves for different diameter of carrier beads

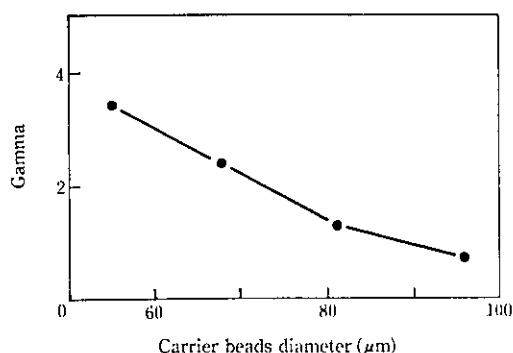


Fig. 9 Relationship between gamma, tangential inclination of the tone reproduction curve and carrier beads diameter

的な階調性を示している。図中のA機は鮮明なコピーを、C機は自然な再現を指向したもので、B機は中間の性格を持っている。

階調性の制御にはPPC全体の設計が関与する。モデル計算¹⁸⁾によると、PPCの階調性は露光量、トナー濃度、現像バイアス電圧で決まるとされており、露光量・トナー濃度を増すと最大濃度は不変でガンマ値が上昇し、バイアス電位を増すと最大濃度・ガンマ値ともに低下する傾向を示すと言われている。しかし、キャリアの特性による階調性の変化は、主として現像剤の供給量が支配するため、前述の現像モデルのような静的な解析にはなじまないため実験で確認した。

キャリア粒径による階調性の変化を、Fig. 8に示す。キャリアはすべて同一ロットのものを分級して用いて粒径以外の変動要因を排除した。キャリア粒径が増すとガンマ値が低下し、81 μm以上では最大濃度が低下している。このとき、ガンマ値はFig. 9のとおり変化している。キャリア粒径による階調性の変化は、現像剤密度の変化、キャリア比表面積の変化によるトナー供給能の増減に起因するものである。

ここまでは、単純にキャリア粒径の変化のみに着目した場合であるが、キャリアの粒度分布を調整することで、さらに多様な階調性制御が可能となる。Fig. 10は、同じ代表粒径で3つの極端な粒度分布をもつキャリアを用いた現像剤の階調性の測定結果である。図中のAは81 μmを100%、Bは54, 68, 81, 96, 115 μmを各20%ずつ、Cは54, 115 μmを各50%ずつ配合したものである。粒度分布のシャープなAと比較すると、小粒径のキャリアを含むBとCは、低濃度部の立ち上がりが早く、その後がなだらかになる特徴的な階調性をしめしており、低濃度原稿の鮮明な複写と広濃度域原稿の忠

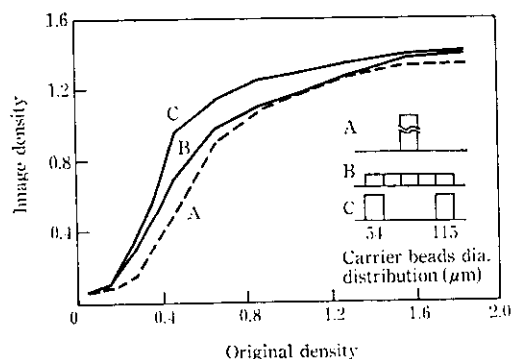


Fig. 10 Change in the tone reproduction curve for the difference of carrier beads diameter distribution

実な複写を両立させている。

以上の実験結果から、キャリアの粒径、粒度分布を調整することで、PPCの階調性を広範に制御することが可能であることが判明した。キャリアの粒径によって、画像濃度の低下が問題にならない範囲で、ガンマ値1.5から3.5の間で制御が可能である。

4.3 回収トナー量の低減

前述したPPCのプロセス中の転写工程で、転写されずに感光ドラム表面に残留し、清掃工程で除去されるトナーを回収トナーと呼ぶ。回収トナーの多寡は、PPCの複写コストとメンテナンスサイクルにかかわるため低減が望まれる。

トナーの転写効率は、飛田らの研究^{17,18)}によるとトナーの比電荷に依存し、一定の最適値を持つとされているが、我々の研究では、ブローオフ法で一定量の現像剤の全電荷から求めたトナーの平均比電荷と回収トナー量の間に明らかな相関は見出されなかった。しかし、感光ドラム上に付着したトナーの挙動に影響を及ぼす要因のうち、キャリアの特性と直接結びつくものは比電荷であり、回収トナー量が異なる以上、何らかの帯電状態の差異があるはずである。そこで、個々のトナー粒子の比電荷の分布を測定したところ、Fig. 11に示すように、回収トナー量の多い現像剤においては、比電荷の分布がブロードで低電荷のトナー量が多いことが判明した。類似の現象は、トナーの劣化による帯電性の悪化について報告されているが^{19,20)}、不適正なキャリアの使用によっても同様の結果となることがわかった。

トナーの比電荷の分布を支配する要因には、キャリア表面のさま

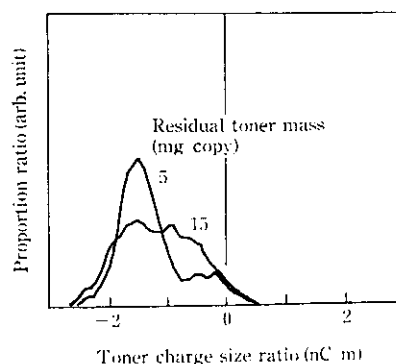


Fig. 11 Change in toner charge distribution for the different residual toner mass of developer

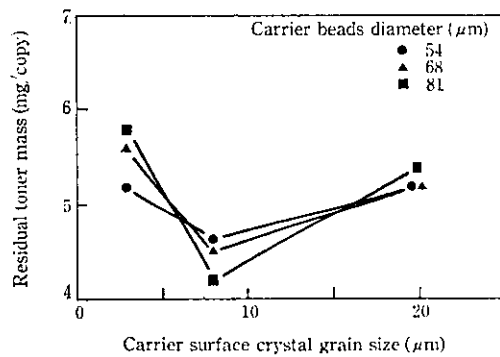


Fig. 12 Relationship between carrier surface crystal grain size and the residual toner mass for different diameter of carrier beads

さまざまな性質があるが、その中のキャリアの材料設計における制御性の高い表面の結晶粒径に着目して実験を行った。Fig. 12に表面の結晶粒径を3, 8, 20 μm となるように焼成したフェライトキャリアの回収トナー量測定結果を示す。回収トナー量は、キャリア表面の結晶粒径に依存し、結晶粒径8 μm のとき最小となっている。この結晶粒径はほぼトナーの粒径に相当する。トナーがキャリア表面に

接触帯電する際に、キャリアの粒界の誘電的性質が関与するため、キャリア表面の結晶粒とトナーとの対応関係が比電荷の分布に影響するのである。

5 むすび

フェライトキャリアの諸特性によるPPCの現像性の変化について市販の複写機を使用して実験したところ、以下の知見が得られた。

- (1) キャリアの誘電率と粒径で画像濃度を制御することができる。現像剤の誘電率を4.5以上とするか、キャリアの粒径を68 μm 以下とすることで、画像濃度が1.4以上に改善された。
- (2) キャリアの粒径によって階調性を制御することができる。粒径54~81 μm の範囲で、画像濃度を低下させることなく、ガンマ値が3.5~1.5の範囲で変化した。
- (3) キャリアの平均粒径を一定としながら粒度分布を変化させることで階調再現曲線の立ち上がり特性が変化し、ブロードな粒度分布とすることで低濃度域のコントラストが上昇した。
- (4) キャリアの表面結晶粒径によって回収トナー量が変化する。表面結晶粒径がトナー粒径とほぼ等しい8 μm のとき、最小の回収トナー量4 mg/枚が得られた。

参考文献

- 1) D. K. Donald and P. K. Watson: *Photogr. Sci. Eng.*, **14** (1970) 1, 36
- 2) 樽田 昇, 安藤祐二郎: 応用物理, **39** (1970) 5, 406
- 3) L. B. Schein: *IAS'75 ANNUAL*, **10** (1975), 149
- 4) L. B. Schein: *Photogr. Sci. Eng.*, **19** (1975) 1, 3
- 5) L. B. Schein: *Photogr. Sci. Eng.*, **19** (1975) 5, 255
- 6) J. V. Engeland: *Photogr. Sci. Eng.*, **23** (1979) 2, 86
- 7) 中島淳三, 木村正利, 堀江正勝, 高橋英男: 電子写真学会誌, **19** (1981) 2, 10
- 8) 有村孝文: 電子写真学会誌, **19** (1981) 2, 18
- 9) U. Vahtra: *Photogr. Sci. Eng.*, **26** (1982) 6, 292
- 10) 長谷部光男: 静電気学会誌, **9** (1985) 4, 223
- 11) L. B. Schein and K. J. Fowler: *Journal of Imaging Technology*, **11** (1985) 6, 295
- 12) D. M. Burland and L. B. Schein: *Physics Today*, **39** (1986) 5, 46
- 13) 保志信義, 安西正保: 電子写真学会誌, **26** (1987) 1, 62
- 14) P. E. Castro: *Photogr. Sci. Eng.*, **22** (1978) 3, 154
- 15) 松浦克己: 第23回電子写真学会講演会資料, (1987), 41
- 16) 平倉浩治, 小暮雅明, 今井 力, 長谷部光雄, 辰己 進: 電子写真学会誌, **22** (1984) 3, 209
- 17) 飛田正行, 中島淳三: 電子写真学会誌, **20** (1982) 3, 121
- 18) 木村正利, 中島淳三, 堀江正勝, 高橋英男: 電子写真学会誌, **19** (1981) 1, 25
- 19) 竹内 学: 粉体と工業, (1986) 3, 47
- 20) R. W. Stover: *Ann. Conf. Photo. Sci. Eng.*, SPSE, (1978)