

論 文

トナージャンピング法における電流波形のハースト指数解析

和田 達明^{*,1}, 鈴木 隆文^{*}, 竹内 学^{*}

(2003年8月6日受付; 2003年10月30日受理)

The Hurst Exponent Analysis of Current Waveforms
in the Toner Jumping MethodTatsuaki WADA,^{*,1} Takafumi SUZUKI^{*} and Manabu TAKEUCHI^{*}

(Received August 8, 2003; Accepted October 30, 2003)

The toner jumping method is a method to measure the adhesion forces of toner particles on a metal surface by utilizing electric field. The toner jumping starts at a threshold voltage where the electric forces acting on the toner particles overcome the adhesion forces. The currents induced by the toner jumpings are typically spike-like or non-differentiable. We have applied Hurst exponent analysis in order to characterize the non-differentiable current, and obtained the Hurst exponent of unity, which indicates a positive long-range correlation in the current. We considered the presence of the toner particles on the top electrode as a cause of the long-range correlation, and have confirmed it experimentally.

1. 序論

高解像度化が進むコピー機やレーザープリンタなどの電子写真現像プロセスにおいて、キャリア、感光体、紙などに対するトナーの付着力は画像品質を左右する重要な因子である。トナーの付着力を測定する方法には主として電界を利用する電界法と遠心分離器を用いる遠心法がある。トナージャンピング法は電界法の一種であり、平行平板電極に付着させたトナーが印加電界の力により飛翔（ジャンプ）する時のしきい値から付着力を求める方法である。通常は光学顕微鏡などを用いてトナーの飛翔を観察するが、本研究で用いた測定装置は、最大印加電圧を何段階かに分けて逐一に増加して、各段階ごとに飛翔したトナーの積算電荷量を求ることにより、光学顕微鏡などを一切必要とせず、付着力分布を測定できるタイプの装置である。原理的には、積算電荷量はトナー飛翔による電流波形を積分することで得られるが、実際の電流波形は、個々のトナー粒子の飛翔により生じるパルス電流の重畠で構成されているために、不連続で滑らかではなく取り扱いが困難である。通常これらのパルス状の電流は、（滑らかな）平均電流に重

畠した相関のないノイズと見なされ、適切な平均化やフィルター処理により取り除かれてきた。しかしながら一般的に、ある（特に相関を持つ）信号が、滑らかな平均値成分と（平均値がゼロである）ノイズ成分とから成るとは限らない。本研究では、従来の平均値+ノイズという見方ではなく、パルス電流の重畠からなる不連続なトナージャンピング電流波形を一種の離散的な時系列と見なし、複雑な時系列の相関の有無を特徴付ける際に良く用いられるハースト指数解析を適用した。

2. トナージャンピング法

2.1 原理¹⁻³⁾

トナージャンピング法は、導電性の粒子及び基板の間に働く付着力を電界を利用して測定する方法である。

図1のように平行平板電極の下側電極に導電性粒子を付着後、電極間に時刻 t とともに増加するランプ電圧 $V(t)$ を加え、粒子に電界 $E(t)$ をかける。時刻 t において、半径 r の粒子に誘起された電荷を $Q(t)$ とすると、電界による静電気力 $F_e = 0.832 Q(t) E(t)$ が生じる^{4,5)}。静電気力 F_e が粒子の付着力 F_a より大きくなると、粒子が飛翔して上側電極に付着する。

図2において半径 r の粒子に入り込む電束線が粒子から十分離れた空間で通過する領域の面積 S は

$$S = a \times 4\pi r^2 \quad (1)$$

となる。ここで a は1のオーダの数値係数^{4,5)}である。ガ

キーワード：トナージャンピング法、ハースト指数、相関関数、トナー粒子、付着力

*茨城大学工学部電気電子工学科 (316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

Department of Electrical and Electronic Engineering,
Faculty of Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Nakamarusawa, Hitachi, Ibaraki 316-8511, Japan

¹ wada@ee.ibaraki.ac.jp

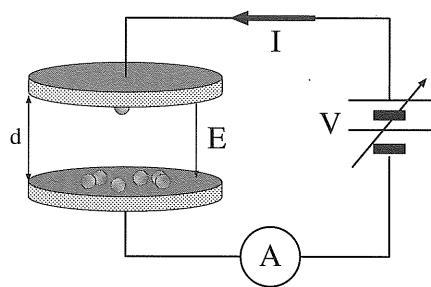


図 1 トナージャンピング法
Fig. 1 Toner jumping method.

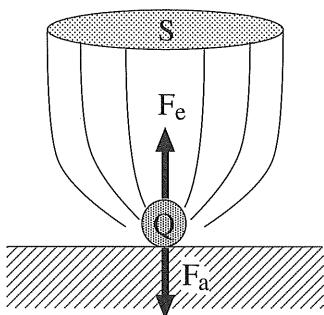


図 2 トナー粒子にかかる力
Fig. 2 Forces acting on an electroconductive toner particle.

ウスの法則より、真空の誘電率を ϵ_0 とすると、粒子の帶電量は次式のようになる。

$$Q = \epsilon_0 S E \quad (2)$$

F_e が F_a より大きくなるしきい値電圧を V_{th} 、電極間隔を d とし、 $E = V_{th}/d$ と見積もると付着力 F_a は次式のよう に表される。

$$F_a = \frac{0.832 a \times 4\pi r^2 \epsilon_0 V_{th}^2}{d^2} \quad (3)$$

この方法は導電性粒子にしか適用できないが、粒子の平均付着力の迅速な測定ができる、大掛かりな装置を必要としない利点がある。

2.2 付着力の分布測定⁶⁾

飛翔して上側電極に付着したトナー粒子は電荷のやりとりをして今度は逆極性の電荷が誘起され、下側電極に向かって飛翔する。この一連の動作が多数の粒子により繰り返される。そこで上側電極に絶縁膜をコートすると、飛翔した粒子が上側電極と電荷交換できずに付着したままになる。つまり一度上側電極へ飛翔したトナーはその後の過程に影響を及ぼさないと考えられる。よってトナー電流及びしきい値電圧から飛翔した粒子数と付着力を求ることで、付着力分布測定が行える。数段階に分けて徐々に最大印加電圧を増加させた場合の、トナージャンプ電流波形の概略を図 3 に示す。 i 番目の段階における最大印加電圧を

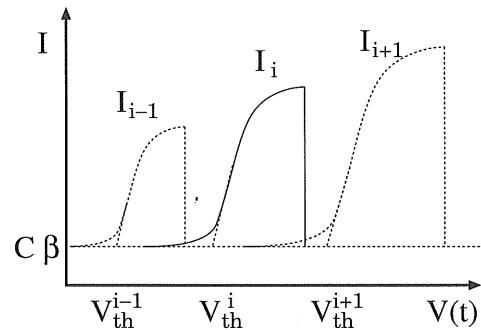


図 3 トナーの付着力分布測定時におけるトナー電流波形の模式図
Fig. 3 Schematics of the current waveforms for the toner adhesion distribution measurement.

V_{th}^i 、電流を I_i と記す。付着力分布は、 i 番目の段階における付着力の階級値 F_a^i に対する飛翔した粒子数 N_i を以下のように求めることで得られる。

電極間容量を C 、印加電圧ランプ速度を $dV(t)/dt = \beta$ (一定) とすると、トナー電流 I_{jump} は全電流からランプ電圧による変位電流 $C\beta$ を引いて

$$I_{jump} = I_i(t) - C\beta \quad (4)$$

となる。ここで粒子が微小時間 dt あたり $dn(t)$ 個飛翔したとすると、

$$dn(t) = \frac{I_i(t) - C\beta}{Q_i(t)} dt \quad (5)$$

である。ここで $t=0$ で $0V$ からランプ電圧 $V(t) = \beta t$ を印加すると、半径 r の粒子の帶電量 $Q_i(t)$ は時刻 t の一次関数として

$$Q_i(t) = \frac{\epsilon_0 S}{d} \cdot \beta t \quad (6)$$

と表される。よって時刻 t_{i-1} から t_i の間に飛翔した粒子数 N_i は、式(5)を積分して

$$N_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} dn(t) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{I_i(t) - C\beta}{Q_i(t)} dt \quad (7)$$

となる。更に各段階における最大印加電圧の増分を小さく抑えることにより、分子のトナー電流の変化に対して分母の $Q_i(t)$ の時間変化はゆっくりなので定数 (Q_i とおく) とみなすことができる。式(3)により Q_i は付着力 F_a^i を用いて

$$Q_i = \sqrt{\epsilon_0 S F_a^i} \quad (8)$$

と表せるので、 i 番目の階級の粒子数 N_i は

$$N_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{I_i(t) - C\beta}{\sqrt{\epsilon_0 S F_a^i}} dt \quad (9)$$

となる。このようにして粒子の付着力分布を求める。

3. ハースト指数

通常、測定データの平均値の周りにゆらいでいる信号は、相関がないガウス型のランダムウォークやホワイトノイズで良く記述できる、単なるノイズと見なされている。しかし自然界の現象や株価の変動、ネットワークのトラフィック等の時系列データの中には、長時間のメモリ効果を持つ相関があることが知られている。そのような非定常で複雑な時系列等における長時間（長距離）の相関の有無や、特徴付けにハースト指数⁷⁾が用いられる。一般に時系列に対するハースト指数は $0 \leq H \leq 1$ の範囲の値を取る。ハースト指数を求める重要なことは、相関がないガウス型のランダムウォーク時系列のハースト指数 H は 0.5 であるが、 $0 \leq H < 0.5$ で負の相関が、 $0.5 < H \leq 1$ で正の相関があることがわかる点である。

ハースト指数を求める方法は幾つかあるが本研究では標準的な R/S 解析⁷⁾を採用した。ある離散時系列データの i 番目における値を x_i とする。（本研究では x_i として、例えば、 i 番目の印加電圧 V_i に対するトナージャンプ電流値 I_i を用いている） x_i の Δ 個の平均値

$$\langle x \rangle_{\Delta} \equiv \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^{\Delta} x_i \quad (10)$$

を求めて、 j 番目までの累積偏差

$$X_j(\Delta) \equiv \sum_{k=1}^j \{x_k - \langle x \rangle_{\Delta}\} \quad (11)$$

の最大値と最小値との差 $R(\Delta)$ を求める。

$$R(\Delta) \equiv \max_{1 \leq j \leq \Delta} X_j(\Delta) - \min_{1 \leq j \leq \Delta} X_j(\Delta) \quad (12)$$

$R(\Delta)$ と標準偏差

$$S(\Delta) \equiv \sqrt{\frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^{\Delta} \{x_i - \langle x \rangle_{\Delta}\}^2} \quad (13)$$

との間に成立する

$$\frac{R(\Delta)}{S(\Delta)} \propto \Delta^H \quad (14)$$

というスケーリング関係を利用してハースト指数 H を求める。

4. 実験

4.1 測定装置

トナージャンピング法の測定装置の構成を図 4 に示す。ランプ電圧を発生させる電圧スイーパー、ランプ電圧を増幅させる HV アンプ、平行平板アルミ電極、微小電流測定用のエレクトロメーター、電圧測定用のデジタルマルチメ

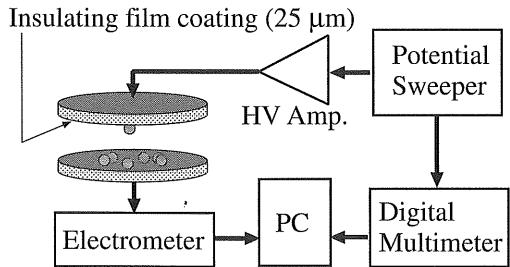


図 4 自作測定装置の構成

Fig. 4 Measurement equipment for toner adhesion force.

ーター、データ取得及び制御用 PC により構成されている。測定データは ActiveX™ スクリプトを用いて GPIB 機器を制御して Microsoft Excel™ に取り込んだ。電圧スイーパーと HV アンプにより、0 V から 1.4 kV の間で出力電圧を一定速度で掃引することができる。最大電圧は 0.1 V の精度で任意に設定することができる。また、掃引速度 β は 25 mV/s, 50 mV/s, 100 mV/s, 250 mV/s, 500 mV/s, 1.0 V/s の 6 段階から選択できる。測定用電極はアルミニウム製で、電極間隔 d は 500 μm、上側電極にはプリント基板用絶縁コーティング（Z-272/HOZAN）（膜厚 25 μm）がコーティングしてある。

4.2 実験方法

トナー試料には導電性粒子 JPC-7（平均粒径 32 μm、日本カーリット株式会社製）を用い、ランプ電圧速度 $\beta = 100$ mV/s 一定とし、0 から 1 kV まで電圧 $V(t) = \beta t$ を増加させてトナージャンプ電流を測定した。ハースト指数解析は式(14)のスケーリング則に基づいており、数桁に渡るようなできる限り長い時系列データが望ましい。よって、ここでは必ず相関の有無を確認するために、通常の付着力分布測定の場合のように印加電圧を数段階に分けて徐々に増すことはしないで、最大印加電圧まで 1 回だけ印加した場合の電流波形を測定した。

5. 実験結果

5.1 ハースト指数解析結果

図 5 に最大印加電圧 8 kV まで 1 回だけ印加した場合の、印加電圧 $V(t)$ の上昇に対する離散電流 I (2048 点) の生データを示す。同じ最大印加電圧に対するデータを多数回測定して平均化したものではない。また図 5 のデータを離散時系列とみなした R/S プロットを図 6 に示す。

図 6 の直線の傾きより電流波形のハースト指数は $H = 1.0$ である。また、同様の実験を何度も繰り返して H の値がほぼ 1.0 であることを確認した。しかしながら、一般に時間とともにゆらぎが増大する傾向にある波形のハースト指数は $H \approx 1.0$ であるので注意が必要である。そこで比較のために、図 7 に示すような時間の経過とともにゆらぎが

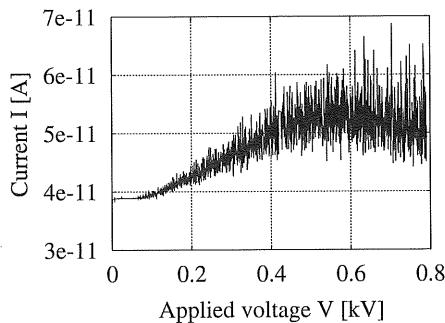


図 5 トナージャンピング法における電流波形
Fig. 5 Typical current waveform in the toner jumping method.

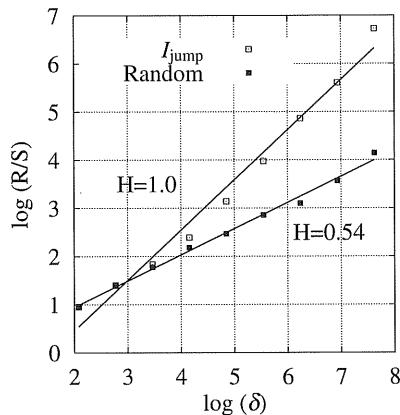


図 6 トナージャンピング法における電流波形及びランダム時系列に対するR/Sプロット
Fig. 6 The R/S plots for the data of Fig. 5 and that of Fig. 7.

増大するランダム時系列を発生させ、そのハースト指数を求めた。R/Sプロット図6の直線の傾きからこのランダム時系列のハースト指数は $H \approx 0.5$ であることがわかる。これらの結果より、トナージャンピング法における電流波形は、単なるゆらぎ増大による効果によるものではなく、広範囲に正の相関があることを示している。

この結果を裏付けるために以下の自己相関関数の算出を行った。 N 個から成る時系列 x_t の平均を $\langle x \rangle_N$ と表すと、その自己共分散関数は

$$\gamma(\tau) \equiv \frac{1}{N-\tau} \sum_{t=1}^N (x_t - \langle x \rangle_N)(x_{t+\tau} - \langle x \rangle_N) \quad (15)$$

で定義される。自己相関関数は $\gamma(\tau)$ を分散 $\gamma(0)$ で規格化した

$$\Phi(\tau) \equiv \frac{\gamma(\tau)}{\gamma(0)} \quad (16)$$

で定義され、時系列のラグ（時間遅れ） τ の関数となる。

図5に示したトナージャンピング電流波形及び図7に示したランダム時系列に対する自己相関関数をそれぞれ図8に示す。ランダム時系列の自己相関関数はラグ τ の値に関わらず

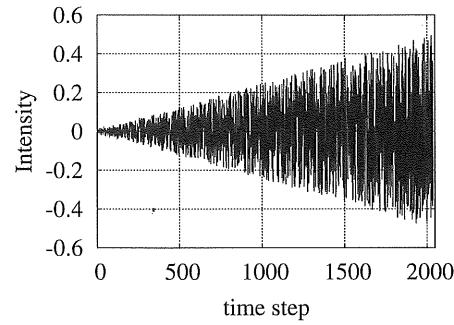


図 7 ゆらぎが次第に増大するランダム時系列
Fig. 7 The random time series.

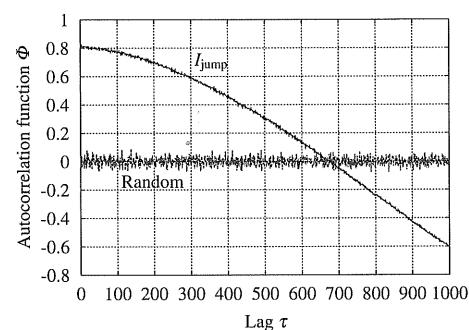


図 8 トナージャンプ電流及びランダム時系列の自己相関関数
Fig. 8 The autocorrelation functions of the toner-jump currents shown in Fig. 5 and that of the random time-series shown in Fig. 7.

非常に小さく、相関がほとんどない。それに対してトナージャンプ電流波形の相関関数は τ が増えるにつれてゆっくり減衰し、広範囲に渡る相関があることを示している。この結果は先に示したハースト指数解析の結果を裏付けている。

5.2 正の相関の原因の推測

トナージャンピング電流における正の広範囲における相関の原因の一つとして、飛翔して上側電極に付着したトナーによる影響が考えられる。トナージャンピング法による付着力分布測定の前提として、2.2節で説明したように、一度飛翔したトナーは上側電極の表面にコートした絶縁膜に付着してその後の過程に影響を及ぼさないと仮定している。しかし実際には、トナーの平均粒径 $32 \mu\text{m}$ に比べて上下電極間距離 $d = 500 \mu\text{m}$ は決して十分大きくはない、上側電極に付着したトナーによる影響があると考えるのが妥当である。よって、その影響を確かめるために以下のよう比較測定を行った。

- 1) 上側電極にも下側電極にもトナーを付着させずに、電流波形を測定する。
- 2) 上側電極にだけトナーを付着させ、電流波形を測定する。

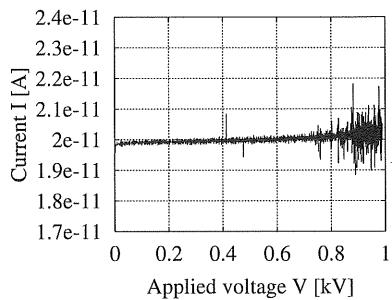


図 9 トナーの付着がない時の電流波形

Fig. 9 Current waveform when no toner particles were sprinkled.

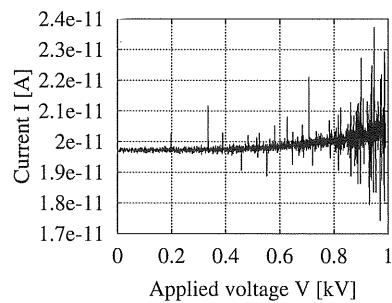


図 10 上側電極にのみトナーを付着させた時の電流波形

Fig. 10 Current waveform when toner particles were deposited on the top electrode coating only.

それぞれに対するトナージャンプ電流の測定結果を図9、図10に示す。図9の電流波形は、漏れ電流やプロアーでは吹き飛ばしきれなかった μm 程度の微少な塵によるものと思われる。図9に比べて図10の方が、印加電圧が高くなるにつれて更に多くのパルス電流が流れている。もしも上側電極に付着したトナーの影響がなければ、両者は同程度の振幅のパルス電流となるはずである。よって、下側電極にトナーを付着させていないのに電流が流れているということは、上側電極の絶縁皮膜がうまく機能しておらず、上側電極に付着したトナーが下側電極に落下したり、再度飛翔していると考えられる。

この推測を確かめるために、以下の実験を行った。先ず通常のトナージャンピング法を行い上側電極の絶縁膜にトナーを付着させる。飛翔せず下側電極に残留したトナーをプロアーで吹き飛ばした後の様子を光学顕微鏡で観察した結果を図11の左図に示す。次に上側電極のみにトナーを付着させた状態で、もう一度トナージャンピング法を行い、下側電極にトナーが落下しているかどうかを光学顕微鏡で同じ場所を観察した結果を図11の右図に示す。両図を比較すると、図11の右図には、はっきりと2個のトナーの存在が確認できる。したがってトナージャンピング法における電流波形の広範囲における正の相関の原因は上側電

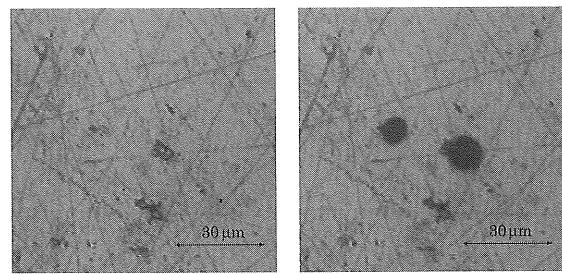


図 11 下側電極の様子（左：測定前 右：測定後）

Fig. 11 The microscopic images of the bottom electrode surface. (Left: before the measurement; Right: after the measurement, the two toner particles were observed.)

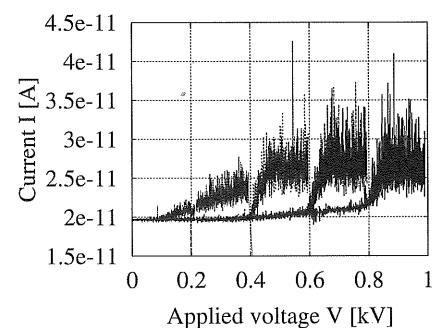


図 12 付着力分布測定時の電流波形（上側電極のトナーのそのまま）

Fig. 12 The current waveforms for adhesion distribution measurement without blowing off the toner particles on the top electrode.

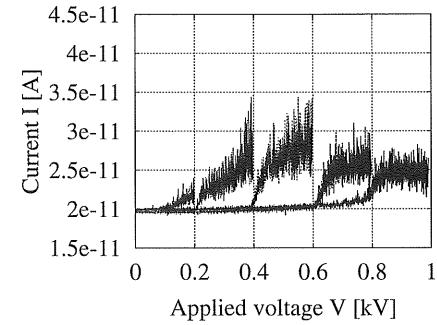


図 13 付着力分布測定時の電流波形（上側電極のトナーをプロアーで吹き飛ばした時）

Fig. 13 The current waveforms for adhesion distribution measurement when the toner particles on the top electrode were blown off each time.

極に付着したトナーにあると考えられる。

5.3 付着力分布の比較

トナージャンピング法における電流波形の正の相関は飛翔して上側電極に付着したトナーが原因と考えられるため、付着力分布測定に対する影響を、上側電極に付着したトナーをそのままにした場合と、しきい値電圧を変えるごとに上側電極のトナーをプロアーで吹き飛ばした場合とで

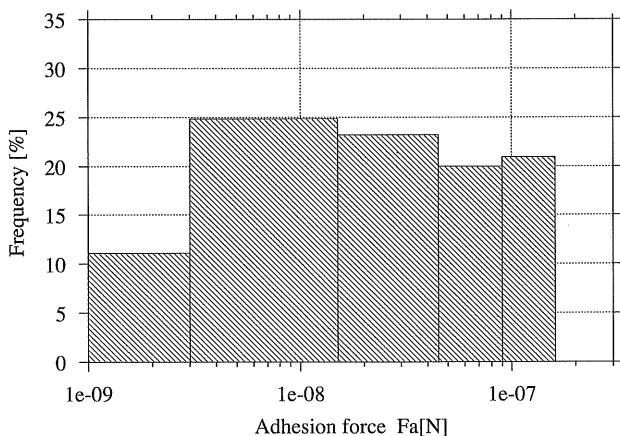


図 14 付着力分布（上側電極のトナーそのまま）
Fig. 14 The adhesion distribution without blowing off the toner particles on the top electrode.

比較した。

結果をそれぞれ図 12 と図 13 に示す。これらはそれぞれ同じ実験条件で幾度か測定した結果を平均したデータではなく、その典型的な一例である。また、図 12 と図 13 の電流波形から求めた付着力分布をそれぞれ図 14 と図 15 に示す。

図 14 と図 15 の付着力分布を比較すると、上側電極に付着したトナーをそのままにした場合は付着力の強い方におけるトナーの割合があまり減少せず、最大付着力を持つトナーの割合が約 10% 程度多く見積られていることがわかる。これは従来は無視されていたトナージャンプ電流における相関による影響と考えられ、今後より詳細な研究が必要であろう。

6. 結 論

トナージャンピング法における電流波形に対してハースト指数解析を適用し、以下の知見を得た。

- (1) トナージャンピング法における電流波形のハースト指数は $H = 1.0$ で、広範囲にわたる正の相関が

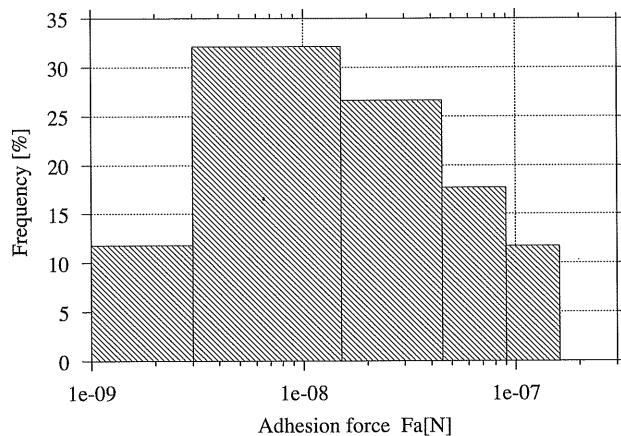


図 15 付着力分布（上側電極のトナーをプロアード吹き飛ばした時）
Fig. 15 The adhesion distribution when the toner particles on the top electrode were blown off each time.

存在する。

- (2) 正の相関の原因として従来は無視されていた飛翔後上側電極皮膜に付着したトナーによる影響が考えられる。
- (3) 付着力分布への正の相関の影響として、付着力の強い領域でトナー粒子の割合が見かけ上増加する。

参考文献

- 1) S. Kiatkamlornwong, S. Noppakundilognat, Y. Ando and Y. Hoshino : J. Imaging Sci. Technol., **41** (1997) 54
- 2) T. Muta, M. Kamata and Y. Hoshino : Proc. IS&T's 11th Int. Congress on Advances in Non-Impact Printing Technologies, (1995) 196
- 3) 山本洋一, 谷口慶治, 高原慶久, 仲野 豊, 山本弘明, 渡辺貞一 : 静電気学会誌, **23** (1999) 141
- 4) A.Y.H. Cho : J. Appl. Phys., **35** (1964) 2561
- 5) N.J. Felici : Rev. Gen. Elect., **75** (1966) 1145
- 6) Y. Fukuchi and M. Takeuchi : Proc. Int. Conf. on Digital Printing Technologies, IS&T's NIP, **15** (1999) 582
- 7) J. フェダー : フラクタル, p158, 啓学出版 (1991)