

論 文

トナー飛翔法の数値シミュレーション

轟 田 昇*, 正 道 寺 勉*, 久保田 康 裕*

(1992年6月5日受理)

Numerical Simulation of Toner Jumping Method
for Non Impact Printing

Noboru KUTSUWADA,* Tsutomu SHOHDŌHJI* and Yasuhiro KUBOTA*

(Received June 5, 1992)

There are various non-impact printing methods, in a printing device used generally. Each method has an advantage and a disadvantage in the price, quality, reliability, speed etc. We simulate the compact process by using personal computer PC-9801VX41, in that process a direct visible picture is obtained by toner sticking to paper by electrostatic field, we called it toner jumping method. The locus that the toner reaches to paper from a roller and a distribution chart of the toner that adhered to paper were able to prepare, by carrying out several simulations. Therefore, we have actually come to be able to observe a locus of the toner. If an electric static field is set up in an optimal condition, the scattering of toner became possible to be reduced within the limits of our simulation. Accordingly, we can be predicted that the toner jumping method is an effective non-impact printing one in the near future.

1. はじめに

これまで一般に使われてきた印字装置には、熱転写方式、ドットインパクト方式、インクジェット方式、レーザ電子写真方式などの印字方式があり、それぞれの方式には、価格、品質、信頼性、速度の面で一長一短がある¹⁾。

従来、これらの要求をなるべく多く満たすために様々な改良や新しい印字方式が開発されてきたが、時代の流れにより更にこれらすべての条件を満たすような、理想的印字方式の開発が求められてきている。

そこで我々は、トナー飛翔法という新しい方式、すなわちトナーを静電気によって紙面に付着させて可視像を得るプロセスをパーソナル・コンピュータ(PC-9801VX41)を用いシミュレーションを行った。

本研究の目的は、シミュレーションを行うことによって得られたデータを評価し、トナー飛翔法によるトナー

キーワード：トナー飛翔法、簡易プロセス、トナーの運動軌跡、トナー飛散

* 日本工業大学工学部システム工学科 (345 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1)

Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering, Nippon Institute of Technology, Gakuen-dai 4-1, Miyashiro-Machi, Minami-Saitama Gun, Saitama, 345 Japan

飛翔分布状況およびトナー飛翔状況を予測することにより、この印字方式の実用化の可否を検討することである。

2. トナー飛翔法の原理

(1) 印字方式の概要

本研究の印字方式は、図1に示すとおりである。この印字方式は、メッシュ状の電極があることが最大の特徴である。

トナーを飛翔させるための電極は、ローラからメッシュ方向へトナーを飛翔させる電界を発生する電極(背面電極)、および記録紙上へ到達するまでに通過するメッシュ状の電極の2種類がある。このうちメッシュ状の電極がトナーの動きを制御する働きをし、この点が従来の印字方式とは大きく違う点である。トナーはメッシュに印加する電圧強度とその極性による正負により制御され、メッシュを通過し、紙上に画像を形成する²⁾。

(2) トナーの飛翔状態

トナーの飛翔は、前述のとおりメッシュの「行」方向および「列」方向にかける電圧のプラス、マイナスの組み合わせを変えることで制御される。各組み合わせにおけるトナーの飛翔状態を表1に示す。

(3) シミュレーションモデルにおける条件

本研究で行ったシミュレーションモデルにおける状態

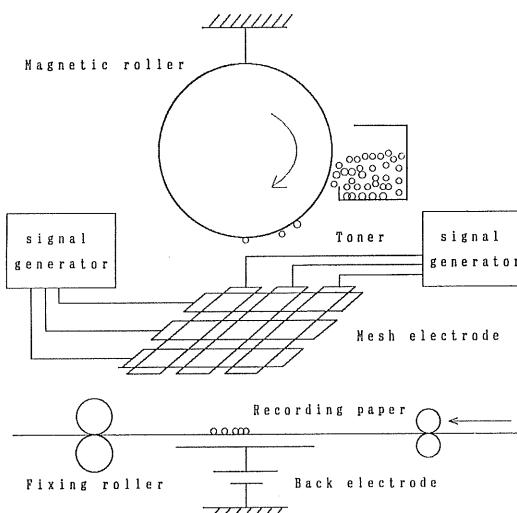


図1 システムの概略図

Fig. 1 An illustration of our system.

表1 トナー飛翔状態

Table 1 Jump status of toner particles.

row's direction	+	-	+	-
column's direction	+	+	-	-
state	○	×	×	×
notes ○ : jump, × : can't jump				

は、以下に示すとおりである。

- ① 磁気ローラを平面とする。
- ② 磁気ローラの磁気、および回転による遠心力は考えない。
- ③ トナーは球形とし、均一粒径を持ち、均一な帶電量を有するものと考える（粒径 $10 \mu\text{m}$ 、帶電量 $-5 \times 10^{-15} \text{ C}$ ）。
- ④ トナーの磁気は無視する。
- ⑤ メッシュの厚さは考えない。
- ⑥ 1つのメッシュの開孔部について考える。
- ⑦ メッシュは無限遠の導体とする。
- ⑧ トナーの飛翔中は、電圧は変化しない。
- ⑨ メッシュの下では、トナーに働く横方向の力は考えない。

(4) モデル図

上で述べた条件を考慮に入れてシミュレーションモデルを作製した。シミュレーションに使用したモデル図を図2に示す。

ローラから記録紙までの距離を L_1 、ローラからメッ

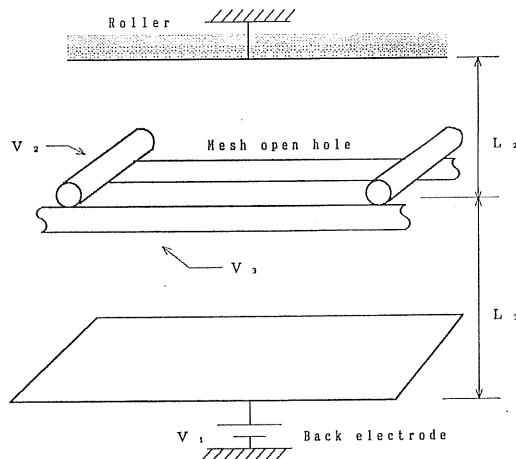


図2 シミュレーション用モデル図

Fig. 2 Model-graph for simulation.

シュ開孔部までの距離を L_2 、メッシュ開孔部から記録紙までの距離を L_3 とし、背面電圧を V_1 、メッシュの x 方向電圧を V_2 、 y 方向電圧を V_3 とする。

(5) 理論式

このシミュレーションモデルをもとに電界、重力、空気の粘性抵抗を考慮に入れて、重力と電界力の方向を z 方向、メッシュに作用する電界力の方向をそれぞれ x 、 y 方向とする。次にトナー粒子に作用する力を考え、運動方程式を立てる³⁻⁵⁾。前述のように、メッシュ電極の中央部を原点として、 x 軸をメッシュ電極の列方向とし、これに直交する行方向を y 軸とし、この x 軸と y 軸の各々に直交する磁気ローラと背面電極を通る方向を z 軸とする。

x 、 y 、 z 軸で、トナー粒子に作用する力について考え、運動方程式を立てる。 x 軸方向は電界力 ($q \cdot E_x$) とストークスの法則に基づく空気の粘性力がある。したがって、 x 軸方向について、次の(1)式の方程式が成り立ち、その解は(2)式になる。 y 軸方向も電界力 ($q \cdot E_y$) とストークスの法則に基づく空気の粘性力よりなるので、(3)、(4)式のようになる。 z 軸方向は、電界力 ($q \cdot E_z$) とストークスの法則に基づく空気の粘性力および重力の項が加わる。したがって、(5)式が成り立ち、その解は(6)式となる。

x 方向：

$$m(d^2x/dt^2) + 6\pi\eta a(dx/dt) = qE_x \quad (1)$$

$$x = -mqE_x/(6\pi\eta a)^2 \cdot \{1 - \exp(-6\pi\eta at/m)\} \\ + qE_xt/6\pi\eta a \quad (2)$$

y 方向：

$$m(d^2y/dt^2) + 6\pi\eta a(dy/dt) = qE_y \quad (3)$$

$$y = -mqE_y/(6\pi\eta a)^2 \cdot \{1 - \exp(-6\pi\eta at/m)\}$$

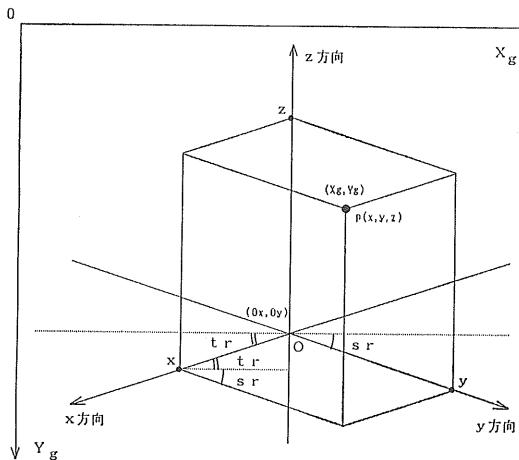


図3 3次元表示

Fig. 3 Three dimensional display.

$$+qEyt/6\pi\eta a \quad (4)$$

z 方向 :

$$m(d^2z/dt^2) + 6\pi\eta a(dz/dt) = mg + qEz \quad (5)$$

$$z = -[\{m(mg + qEz)\}/(6\pi\eta a)^2] \times [1 - \exp(-6\pi\eta at/m)] + qEzt/6\pi\eta a \quad (6)$$

ここで、式中に現れる記号の意味は次のとおりである。

m : トナーの質量 [g]

η : 空気の粘性係数 [g/s·cm]

a : トナーの半径 [cm]

m·g : 重力により受ける力 [dyn]

q : トナー粒子の帶電電荷量 [C]

E : トナー粒子に作用する電界強度 [V/cm]

q·E : 電界により受ける力 [dyn]

t : 落下時間 [s]

3. 研究方法

研究方法の手順を以下に示す。

- (1) メッシュより上側における理論式とメッシュ電極より下側における理論式をそれぞれ立て、これらの理論式の解を導き出した。また、メッシュ、背面電極による電界式を導き出した。
- (2) (1)で得られた解が正しいかどうかの検証を行った。また、次元解析を行い次元的に正確な式であるかどうかを確めた。
- (3) (1), (2)によって導き出された式をもとに、電界中におけるトナーの運動をパソコン・コンピュータで計算を行い、プログラムが正確であるかどうか検討した。
- (4) トナーの動きを3次元グラフィックを用い、トナー

がローラから紙に到達するまでの軌跡を描く。また、トナーの散らばりを見るために、紙に付着したトナーの分布を描いた。

- (5) 3次元表示の結果をみて、パラメータを変えることによってトナーの軌跡がどのように変化するか、またトナーの散らばりがどのようになるかを観察した。

得られたデータをもとに、この印字方式が新しい印字方式として有効であるかどうかを考察した。

4. 3次元表示方法

ディスプレイの各ドットと、1対1に対応している物理座標に対して、そこに新たな論理座標を設定し、画面をあたかも3次元直交座標空間のように使うことができる⁶⁾。

3次元直交座標空間における点(*x*, *y*, *z*)が、(*X_g*, *Y_g*)に対応するものとして、*x*, *y*, *z*を*X_g*, *Y_g*に変換する式を示すと次のようになる。

$$X_g = 0_x + r_2 \cdot y \cdot \cos(sr) - r_1 \cdot x \cdot \cos(tr) \quad (7)$$

$$Y_g = 0_y + r_1 \cdot x \cdot \sin(tr) + r_2 \cdot y \cdot \sin(sr) - z \quad (8)$$

r₁, *r₂* は、斜めから見えた線分の長さは、実際より短く見えるために、補正するための係数である。また、*sr*, *tr* は、図3のように、水平方向と*x*軸, *y*軸のなす角を示し、*0_x*, *0_y* は3次元直交座標軸の原点の物理座標を示す。

5. シミュレーション結果

これまで述べてきたように簡単なモデルを作ることによって、パソコン・コンピュータ上でシミュレーションを行い、3次元で可視化できるようになった。トナーの分布を図4-1~4-5に、また、トナーの軌跡を図5-1~5-4に示す。

図4-1~4-5は、ローラの任意の点からトナーを飛ばし、記録紙に落ちたトナーの数をカウントし、その分布を3次元表示した図である。ここで、1つの山の高さはその位置にいくつトナーが到達したかを示している。この図から、どの程度トナーが飛翔するか、またどの辺りにトナーが集まるかが分かる。図中の“Number of toner particle X/121”という記述は、メッシュの開口部の真上の磁気ローラに 4×10^{-8} cm おきにトナー粒子が1つあるとして 11×11 個(121個)のトナー中どれだけ紙面に到達したことかを示している。

図5-1~5-4は時間のきざみを値によって軌跡の座標値をドットで表わし、3次元表示した図である。この図から、トナーが飛翔するかしないか、またどのような経路でローラからメッシュを通り記録紙まで到着するかが

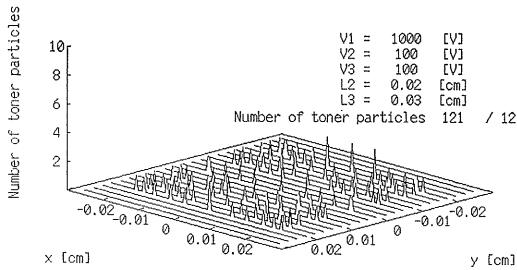


図 4-1 トナーの分布 (1)

Fig. 4-1 Distribution of toner particles (1).

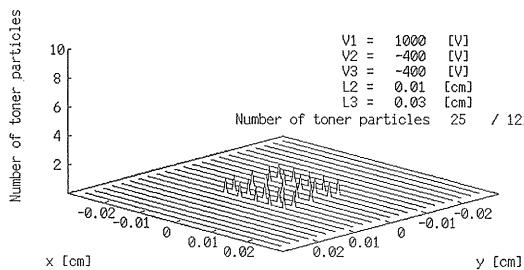


図 4-5 トナーの分布 (5)

Fig. 4-5 Distribution of toner particles (5).

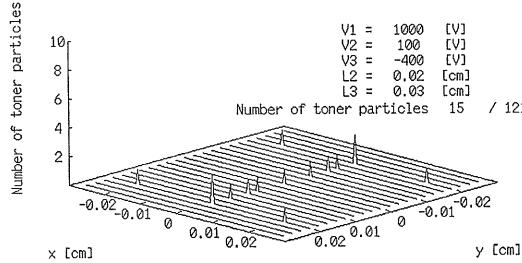


図 4-2 トナーの分布 (2)

Fig. 4-2 Distribution of toner particles (2).

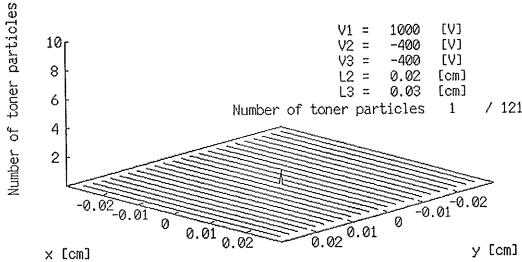


図 4-3 トナーの分布 (3)

Fig. 4-3 Distribution of toner particles (3).

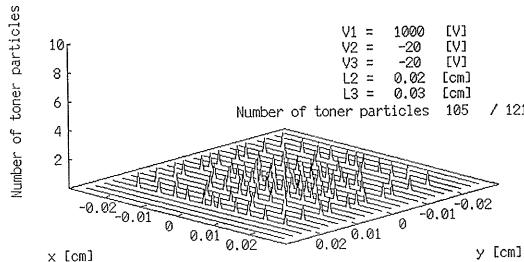


図 4-4 トナーの分布 (4)

Fig. 4-4 Distribution of toner particles (4).

分かる。

6. 考 察

本研究では、背面電圧 V_1 、ローラからメッシュ開孔部までの距離 L_2 、メッシュの開孔部から記録紙までの

距離 L_3 を一定にしてシミュレーションを行った。トナーの分布状態を図 4-1~4-5 に示す。

図 4-3 は、メッシュ電圧 V_2 、 V_3 ともに非印字電圧の -400 V をかけたときのトナーの分布を示しているが、印字電圧をかけた場合と比べ、トナーの飛翔する数は非常に少ないことが分かる。

図 4-2 のようにメッシュ電圧 V_2 、 V_3 の片方を非印字電圧をかけ、もう一方に印字電圧の正の電圧をかけた場合には、トナーは微少ではあるが飛翔していることが分かる。これは、非印字電圧がかかっている導体の近くでは、トナーははじき飛ばされトナーは紙面まで到達しないが、印字電圧のかかっている導体の近くのトナーは非印字電圧の影響をあまり受けずにメッシュを通り抜け、紙面まで到達してしまうためであると考えられる。

図 4-1 のようにメッシュ電圧 V_2 、 V_3 の両方に印字電圧のプラスの電圧をかけた場合は、トナーは多く飛翔し、開孔部中心を避け紙面に付着することが分かる。これは、トナーがマイナスに帯電しているためにトナーがメッシュの開孔部の中心域から遠ざかるような力が働き、トナーがメッシュの導体に付着してしまうためであると考えられる。

図 4-4 はメッシュ電圧 V_2 、 V_3 に非常に微小なマイナスの電圧をかけた場合のトナー分布図であるが、トナーはメッシュの真下に落ち非常に良好な結果が得られた。これは、メッシュ電圧がマイナスであるためマイナスに帯電したトナーを退ける力が働き、かつ V_1 によって真下に引っ張る力が働き、結果的にトナーは収束され、紙面に小さな点として到達すると考えられる。この結果が本当に正しいとすれば、メッシュにプラスの電圧をかけずにマイナスの電圧だけでトナーを制御できるようになり、プラスの電圧を考えなくてよいため、信号発生装置の簡素化が可能となる。また、プラスの印字電圧をかけていたときに比べ解像度をさらに向上できるという利点もある。

図 4-1~4-5 に示した実験結果では、目的の開孔部を

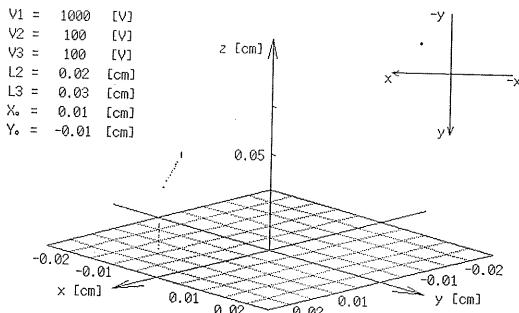


図 5-1 トナーの軌跡 (1)

Fig. 5-1 Motion locus of particle (1).

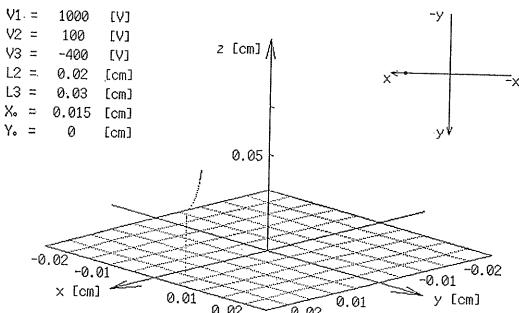


図 5-2 トナーの軌跡 (2)

Fig. 5-2 Motion locus of particle (2).

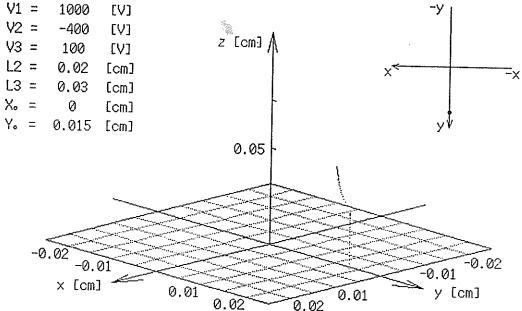


図 5-3 トナーの軌跡 (3)

Fig. 5-3 Motion locus of particle (3).

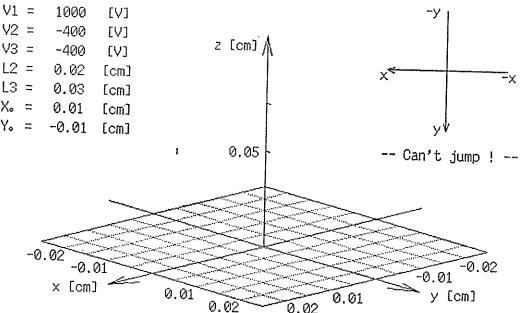


図 5-4 トナーの軌跡 (4)

Fig. 5-4 Motion locus of particle (4).

通過しなかったトナーは、他のメッシュの開孔部を通過したか、メッシュの導体部に付着したと考え計算をしなかった。

トナーの軌跡については、メッシュの横方向と縦方向に印字電圧 (100 V) と非印字電圧 (-400 V) をそれぞれ組み合わせて行った結果、メッシュの横方向と縦方向の両方に印字電圧をかけた場合には、トナーが飛翔することが分かる (図 5-1 参照)。

また、縦方向と横方向の両方に非印字電圧をかけた場合には図 5-4 に示すように、メッシュの開孔部中心上にあるトナーのみが飛翔し、それ以外のトナーは飛翔していないことが分かる。これは非印字電圧をかけた導体によりトナーを退かせる力が働きトナーがローラを離れず、また離れててもトナーを反発させる力が強いためトナーが落ちていないと考えられる。ただし、メッシュの開孔部中心だけは、導体からの距離があるため、反発させる力が一番弱いため背面電圧によりトナーを下に落とそうとする力のほうが強くなり、そのためにトナーが落ちてしまうと考えられる。

図 4-5 はローラからメッシュまでの距離 L_2 を小さくした場合である。トナーが非印字電圧をかけているにもかかわらず、紙面の中心部に到達してしまうことが分かる。これは、ローラからメッシュまでの距離を短くすることによって、メッシュの導体の真上は、電界力は強くなるがメッシュの開孔部の中心部付近にメッシュ電圧による電界力が影響しにくくなり、結果的にそこに電界力の影響しない穴のようなものが生じ、メッシュの開孔部の中心部を通過しトナーが紙まで到達してしまうためであると考えられる。

また、図 5-2 や図 5-3 のようにメッシュのどちらか一方印字電圧、もう一方に非印字電圧をかけてみると、初め我々が設定した飛翔条件では、理論的にはトナーが飛翔しないが、実際にはいくつかのトナーは飛翔していることが分かる。この結果、飛翔しているトナーのはほとんどが印字電圧をかけている導体上に存在するトナーであることが分かる。これは非印字電圧をかけた導体がトナーを反発させる力に対して、印字電圧をかけた導体によりトナーが引き寄せられる力が、導体からトナーまでの距離が近いこともあるってかなり強い力がかかっているために、トナーが飛翔したと考えられる。

7. まとめ

パソコン・コンピュータによるシミュレーションを行うことにより、トナーがローラから紙面まで到達する軌跡とトナーが紙面に付着したときの分布が作成できた。これにより、行と列の印加電圧を変えることにより

トナー飛翔分布状況およびトナー飛散状況を予測できる
ようになった。

謝 詞

本研究を進めるにあたり、プログラムの作製にご協力
いただいた東芝 FA システムエンジニアリング㈱内山裕
普、三興製紙㈱大石孝純の両氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 巒田 昇、中村洋一、星野坦之、上平員丈：イメージン

- グ工学の基礎、日新出版 (1991)
- 2) 藤井春夫、安藤祐二郎：特許公報、平 2-52260
- 3) J.M. Crowley : *Fundamentals of Applied Electrostatics*, pp. 55-72, John Wiley & Sons, New York (1984)
- 4) J.L. Johnson : *Principles of Non-Impact Printing*, pp. 249-283, Palatino Press, California (1986)
- 5) N. Kutsuwada, H. Kashimada, M. Fukuda, T. Suzuki and K. Ohkawa : *J. Imaging Technol.*, 12 (1986) 220
- 6) 湧井良幸、湧井良美：C言語グラフィック入門、誠文堂
新光社 (1989)