

# 電子写真非磁性一成分飛翔現像の トナー粒子飛翔シミュレーション

上原 良幸<sup>M</sup>・三川 禮<sup>F</sup>・堀 節夫<sup>M</sup>・栄 正彦<sup>M</sup>  
渡辺 剛史<sup>M</sup>・湯川 正晃<sup>M</sup>・楳田 正<sup>M</sup>

<sup>F</sup> 福井工業大学応用理化学科、<sup>M</sup> 三田工業株式会社本社技術研究所

## Simulation of Noncontact Development in Electrophotography with Non-magnetic One-component Toner

Yoshiyuki UEHARA<sup>M</sup>, Hiroshi MIKAWA<sup>F</sup>, Setsuo HORI<sup>M</sup>, Masahiko SAKAE<sup>M</sup>,  
Takeshi WATANABE<sup>M</sup>, Masaaki YUKAWA<sup>M</sup>, Tadashi UMEDA<sup>M</sup>

<sup>M</sup> Fukui Institute of Technology (〒910 Fukui, Gakuencho 3-6-1)

<sup>F</sup> Mita Industrial Co. Ltd. (〒540 Osaka, Chuo-ku, Tamatsukuri, 1-2-28)

### Summary

Computer program for obtaining time dependent positions of toner particles for any DC and/or AC bias as well as photoreceptor surface potential has been worked out with the use of a subroutine program (Fig.5) for calculating time dependent field strength including the contribution of the charge of toner particles. Typical simulation results are shown in Figs.7 and 8 showing good agreement with experimental results. Parameters for the simulation and experiment are shown in the figures.

### 1. まえがき

電子写真の多くの現像方式に於いて、飛翔現像又はジャンピング現像方式は、高画質が期待できるなど多くの特徴をもっている。この現像方式では磁性一成分トナー又は非磁性一成分トナーを用いる。周知のように前者のトナーを用いる場合は、帯電した磁性トナーがスリーブ中の磁極による磁気力、スリーブに与えた交直両バイアス電圧による静電気力ならびにドラム上の静電潜像からうける静電気力の作用によって飛翔し現像される。後者のトナーを用いる場合は、磁気力以外のこれら総ての静電気力によって飛翔し現像される。

磁性一成分飛翔現像のシミュレーションについては高橋ら(1)の、非磁性の場合のシミュレーションについては笠井らの(2)の優れた研究が報告されている。前者の研究では、トナーがスリーブ上に堆積している状態についてトナー電荷を考慮した Poisson 式を解き、そのときのトナーに働く静電気力を求め、それに磁気力を加えてトナーの飛翔割合を求めている。非常に見透しのよい理論であるが、トナーがスリーブ・ドラム間を飛翔しつつある状態では、飛翔しつつあるときのトナーの静電荷がトナーの飛翔を左右することに対する考慮は行なはれていない近似である。後者の研究では、初期状態でスリーブ上に堆積していたトナー粒子が、飛翔を始め

て、スリーブ・ドラム間の空間に出た瞬間から、飛翔を始めたトナーの静電荷がスリーブ・ドラム間の空間全体に均一にばらまかれるという近似で  $P o i s s o n$  の式を解いてスリーブ・ドラム間の電界を求めトナー粒子の飛翔を求めている。見方を変えると、前者の近似は、トナー粒子がスリーブ上に堆積している状態、即ち、トナー粒子の電荷が電界に最も強く影響する最初の状態のときトナー粒子電荷の影響を考慮する近似であり、それに対して後者の近似は、粒子がスリーブ・ドラム間空間に飛翔し始めると衝突などのためスリーブ・ドラム間空間にばらまかれ均一ミスト状になると仮定したモデルにより、 $P o i s s o n$  式が解けるようなモデルとして電界を求めトナー粒子の飛翔を計算する近似である。

本報告(3)では、やはり文献(1)(2)と同じようにスリーブ上に堆積したトナー粒子が、スリーブの回転に従って、あるスリーブ角度から飛翔を始め、交直両バイアス下でスリーブ・ドラム間を振動飛翔し最終的に、一部のトナーがスリーブ上に戻り、一部のトナーがドラム上に現像されるという全過程に互って、トナー粒子の静電荷の影響を考慮して、トナー粒子の運動方程式を解き、粒子の動きを追跡することを試みた。また、その結果を実験結果と比較して考察した。本報告では、スリーブが金属である最も簡単な場合を扱った。

## 2. 現像領域のモデル

現像領域の幾何学的モデルを Fig. 1 に示した。ドラム金属の電位はゼロ、とし、スリーブ金属に交直両バイアス電圧を加える。スリーブ上  $a$  位置のトナーは  $a - b$  線上を飛翔するものとする。

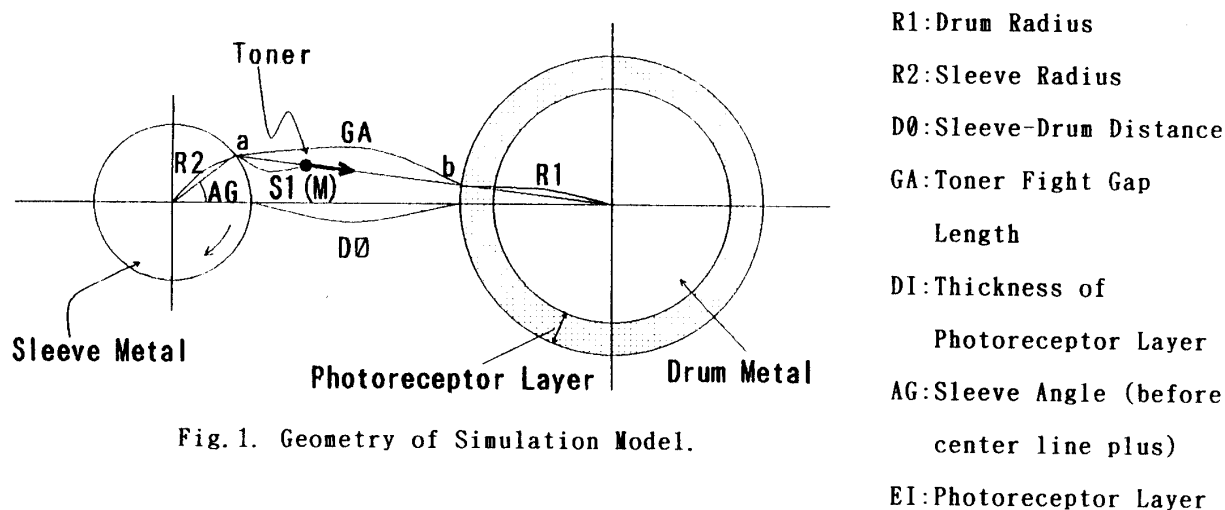


Fig. 1. Geometry of Simulation Model.

Specific Permittivity; VB:DC Bias; VP:Vp-p of AC Bias of Sleeve; HZ:Frequency of AC Bias; 1.0:Specific Permittivity of Toner and Sleeve-Drum Gap Space; S1(M): Coordinate of M-th Toner Sheet; V0:Photoreceptor Surface Potential Value as Measured by Electrostatic Voltmeter

感光体表面に与えられる表面電位は、表面電位計で測定した値として  $V_0$  の電位が与えられるとする。従って、実際の感光体表面電位を  $V_E$  とすると、 $V_E$  はスリーブ・ドラム間の電氣的等価距離  $G_E$  によって変化する (cf. Fig. 5 program number 1600)。

時間  $t$  を  $SZ$  とする。 $t = SZ$  のときのスリーブ電位  $VZ$  は

$$VZ = VB - (1/2) * VP * \sin(2 * \pi * HZ * SZ + PH) \quad \text{Eq. 1}$$

とする。即ち、交流バイアスを  $\sin$  関数としたとき、 $\sin$  の前の符号をマイナスにしたとき、 $t = SZ = 0$  のときの位相を  $PH$  とする。

### 3. トナー飛翔の運動方程式

トナー個々の粒子の飛翔を追跡することは勿論不可能であるから、笠井(2)らが行ったようにトナー層をトナーシートに分割して考える。 $t = 0$  においてスリーブ上に全トナーを堆積し、Fig. 2のように  $P$  等分し各トナー層を  $M = 1 \sim P$  とする。トナーは、例えば、Fig. 3のように、トナーシートとして飛翔するものとする。勿論、飛翔するのはトナー粒子であるから、第  $M$  トナーシートのスリーブからの距離を配列変数  $S1(M)$ 、 $M = 1 \sim P$  とすると、その時間変化は、質量  $MT$ 、半径  $RT$ 、電荷  $QT$  の粒子がストークス抵抗のもとに飛翔するとして Eq. 2 の運動方程式に従うことになる。ここに、 $YT$  は空気の動粘度である。また、粒子は均一であるとした。 $E(S1(M))$  は座標  $S1(M)$  の位置の電界であるが、Eq. 2 の運動方程式を立てるにあたり結局スリーブ・ドラム間のあらゆる位置における  $E$  の値を知ることが必須でありそれは次項 4 の方法で求めた。

$$MT * d^2 S1(M) / dt^2 = - 6 * \pi * YT * RT * dS1(M) / dt + QT * E(S1(M)) \quad \text{Eq. 2}$$

本研究に於けるトナーの飛翔速度は  $10 \text{ m/sec}$  を越えることは殆ど無く、粒子径  $RT$  も非常に小さいので、飛翔の  $Reynold's \text{ number}$  は  $10$  を越えることは無く乱流領域に入ることは無いと考えられる。任意の時間に働く電界が既知であって、上記の運動方程式 Eq. 2 を時間の経過を追って解く事が出来れば、スリーブ・ドラム間に於けるトナーの位置、速度を時間を追って知る事が出来るとともに、最終的にドラム上に現像されるトナー量、即ちイ

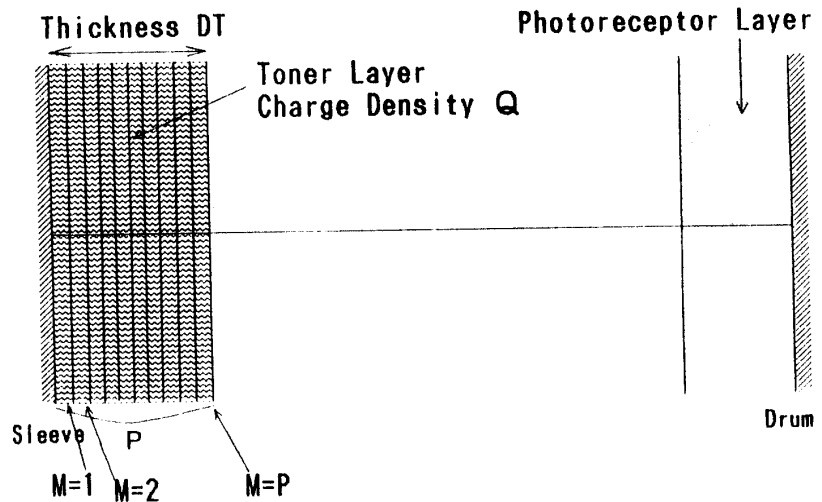


Fig. 2. Toner Layer is Divided into P Toner Sheets.

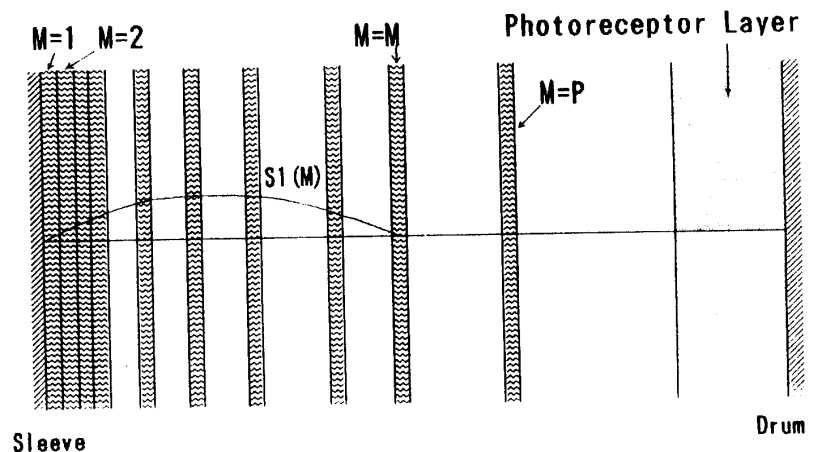


Fig. 3. Flying Toner Sheets.

メージデンシティの知見を得る事が出来る。

#### 4. スリーブドラム間のポテンシャル $V$ と電界 $E$ の計算

電界  $E$  はスリーブ・ドラム間のポテンシャル  $V$  を求めその傾斜として求める。 $V$  はポテンシャルの加算性を用い計算した。Fig. 4に示すようにスリーブ・感光体表面間のギャップを  $Z$  等分しその各区間のポテンシャル  $V$  を求める。 $Z$  の値は必要に応じ  $30 \sim 100$  程度の値を用いた。

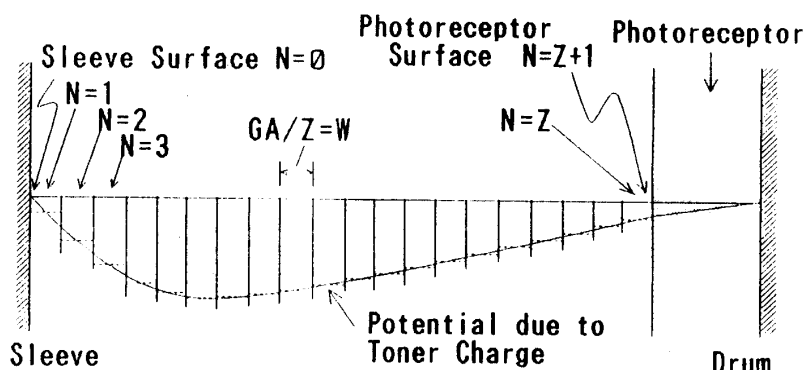


Fig. 4. Sleeve-Drum Gap Space is Divided into Equal  $Z$  Regions. Potential Curve is Eq. 3+Eq. 4+Eq. 6.

スリーブに与えたバイアス電圧

$VZ$  が単独で第  $N$  区間の位置に作る電位  $V(N)$  は、平行板コンデンサーを仮定すると簡単な計算により Eq. 3 となる。

$$\begin{aligned} \text{If } N=0, & \quad V(N)=VZ \\ \text{If } N=Z+1, & \quad V(N)=VZ \cdot (DI/EI)/GE \\ \text{If } N=N, & \quad V(N)=VZ \cdot (1-(NW-W1)/GE) \end{aligned} \quad \text{Eq. 3}$$

where  $W=GA/Z$ ,  $NW=N \cdot W$ ,  $W1=W/2$ ,  $GE=GA+(DI/EI)$

感光体に与えた電位  $V0$  (表面電位計測定値として) が任意の第  $N$  区間に作るポテンシャル  $V(N)$  は同様の簡単な計算により Eq. 4 となる。

$$\begin{aligned} \text{If } N=0, & \quad V(N)=0 \\ \text{If } N=Z+1, & \quad V(N)=V0 \cdot GA/GE \\ \text{If } N=N, & \quad V(N)=V0 \cdot (NW-W1)/GE \end{aligned} \quad \text{Eq. 4}$$

スリーブ・ドラム間にある位置を異にするあらゆるトナー電荷のすべてが、第  $N$  区間の位置に作る電位  $V(N)$  の計算は若干複雑であるが、次のように計算される。即ち、第  $M$  トナーシートの位置  $S1(M)$  に相当する区間の区間ナンバー  $NC$  は、

$$NC = \text{INT}(S1(M)/W) + 1$$

となるから、先づこの第  $M$  トナーシートが任意の第  $N$  区間に作るポテンシャル  $V(N)$  を平行板コンデンサーを仮定して求めると Eq. 5 のようになる。ここに、 $Q$  はトナー堆積層の電荷密度、 $QS = Q \cdot DT/P$  は 1 枚のトナーシートの単位面積あたりの電荷量である。

$$\begin{aligned} \text{If } N=0 & \quad V(N)=0 \\ \text{If } N=Z+1 & \quad V(N)=QG \cdot (DI/EI) \cdot S1(M) \\ \text{If } N \leq NC & \quad V(N)=QG \cdot GS \cdot (NW-W1) \\ \text{If } N > NC & \quad V(N)=QG \cdot (GW-NW) \cdot S1(M) \end{aligned} \quad \text{Eq. 5}$$

where  $GW=GE+W1$ ,  $QG=QS/(E0*GE)$

更に、トナーシートには、 $M = 1, 2 \dots P$  枚のシートがあるから、 $P$  枚のシート全部の作るポテンシャルを加算すると、任意の第  $N$  区間のポテンシャル  $V(N)$  は Eq. 6 となる。

```

V(N)=0
FOR M=1 TO P
V(N)=V(N)+Eq. 5
NEXT M

```

Eq. 6

結局、スリーブに与えたバイアス電圧  $VZ$ 、感光体表面電位  $V0$  及び全トナーシートの総てが任意の第  $N$  区間の位置に作るポテンシャル  $V(N)$  は、 $(Eq. 3 + Eq. 4 + Eq. 6)$  として求められる。

次に各区間のポテンシャルからスリーブとドラム表面の電界  $E(0)$ ,  $E(1)$ ,  $E(Z)$ ,  $E(Z+1)$ 、および第  $N$  区間の電界  $E(N)$  を求めると

```

E(0)=- (V(N)-V(0))/(0.5*W)
E(1)=- (V(2)-V(0))/(1.5*W)
E(Z), E(Z+1) are similar
E(N)=- (V(Z+1)-V(Z-1))/(2*W)

```

Eq. 7

マイナスをつけた理由は正電荷に働く力が  $N$  の増す方向を電界のプラスとしたからである。

$V(N)$  および  $E(N)$  を求める以上の計算のサブルーチンは Fig. 5 の通りである。

```

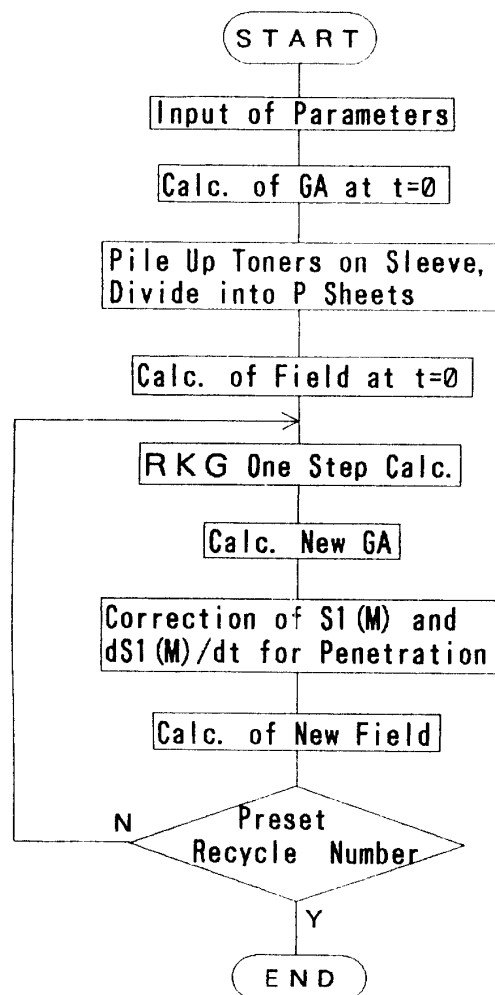
1560:FOR N=0TO Z+1
1570:U(N)=0:E(N)=0
1580:NEXT N
1590:REM E0=UAC.PERMITTIVITY=8.85E-12(F/m);Q=CHARGE DENSITY OF TONER LAYER
1600:REM SZ=cf. Eq. 1:GE=GA/DI/EI:DE=DI/EI:UE=U0*GA/GE:QS=Q*DT/P:QG=QS/(E0*GE)
1610:QF=QG*DI/EI:W1=0.5*W:GW=GE+W1:UZ=UB-0.5*UP* SIN (2*PI *HZ*SZ+PH)
1620:Z1=UZ*DE/GE+U0*GA/GE:Z5=UZ+(UZ-U0)*W1/GE:Z6=(UZ-U0)*W/GE
1630:FOR N=0TO Z+1
1640:NW=N*W:U=U(N)
1650:FOR M=1TO P
1660:F=S1(M):GS=GE-F:NC=INT (F/W)+1
1670:IF N=0LET U=0:GOTO 1710
1680:IF N=Z+1LET U=U+QF*F:GOTO 1710
1690:IF N<=NCLET U=U+GS*QG*(NW-W1):GOTO 1710
1700:IF N>NCLET U=U+F*QG*(GW-NW):GOTO 1710
1710:NEXT M
1720:IF N=0LET U=U+UZ:GOTO 1750
1730:IF N=Z+1LET U=U+Z1:GOTO 1750
1740:U=U+Z5-Z6*N
1750:U(N)=U
1760:NEXT N
1770:FOR N=0TO Z+1
1780:IF N=0LET E(N)=- (U(1)-U(0))/(0.5*W):GOTO 1830
1790:IF N=1LET E(N)=- (U(2)-U(0))/(1.5*W):GOTO 1830
1800:IF N=ZLET E(N)=- (U(Z+1)-U(Z-1))/(1.5*W):GOTO 1830
1810:IF N=Z+1LET E(N)=- (U(Z+1)-U(Z))/(0.5*W):GOTO 1830
1820:E(N)=- (U(N+1)-U(N-1))/(2*W)
1830:NEXT N
1840:RETURN

```

Fig. 5. Subroutine Program for  
Calculating Potential  $V(N)$   
and Field Strength  $E(N)$ .

## 5. シミュレーションの計算。

スリーブ上にすべてのトナー粒子を堆積した状態を計算の出発点とする。運動方程式は Runge-Kutta-Gill の方法で解き、通常  $10^{-5}$  sec 程度の時間経過後のトナー位置  $S_1(M)$  と速度  $dS_1(M)/dt$  を求めそれを反復する。この計算プログラムのフローチャートは Fig. 6 の通りである。



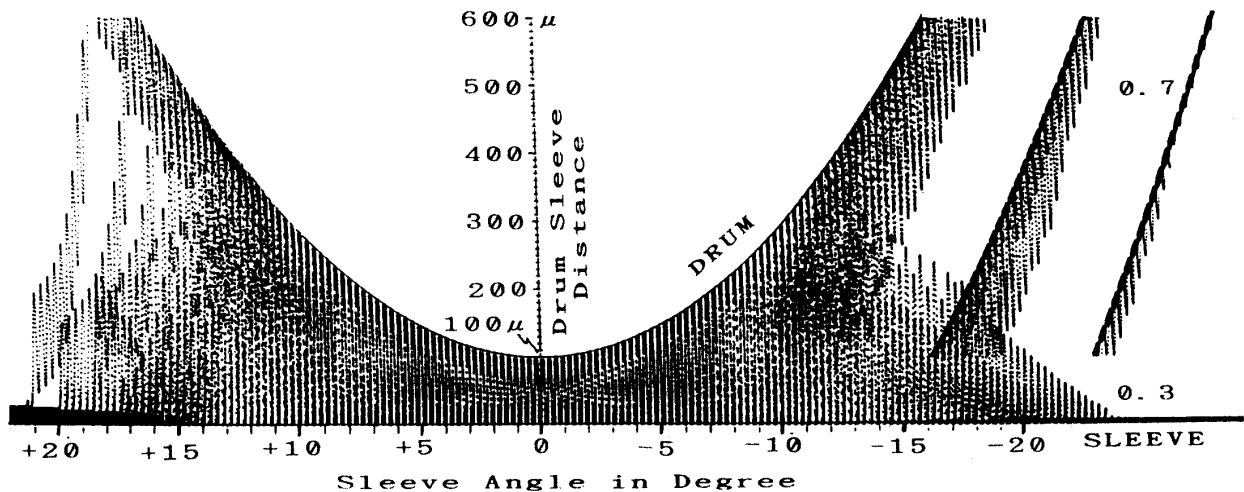
- Sleeve angle at  $t=0$  is input here.
- Coordinates  $S_1(M)$  ( $M=1, 2 \dots P$ ) of toner sheets at  $t=0$  are calculated.
- Potential  $V(N)$  and Field  $E(N)$  ( $N=1, 2 \dots Z+1$ ) are calculated.
- Toner movement in typically  $10^{-5}$  sec is calculated with  $E(N)$ .
- Within this time GA changes. New GA is calculated.
- Toner positions and speed are corrected for penetration into sleeve or drum within this time.
- New field is calculated with new GA and new toner coordinates.

Fig. 6. Flow Chart of Simulation Calculation.

計算を反復するにあたり、時間経過によりスリーブの回転のため GA が変化し、トナーの位置、速度が変わるから、その度ごとに  $V$  および  $E$  の計算を行い、新たな GA,  $E$  のもとに R-K-G ひと刻みの計算を反復する。この際、場合によっては、ひと刻みの計算の後、トナー座標がスリーブ内または感光体内に貫入することが起るので、その場合は、トナーがスリーブ又は感光体の表面に雪が積もるように堆積するように  $S_1(M)$ ,  $dS_1(M)/dt$  の値を修正し時間刻み計算を続行する。

シミュレーション結果の表示の一例を示すと Fig. 7 の通りである。スリーブ角度  $+22^\circ$  でスリーブ上に全トナーを堆積、 $t=0$  とする。約  $+20^\circ$  からトナー表面層の飛翔が始まる。スリーブ回転による GA の減少で電界が増し、トナーは交流バイアスによって振動する。スリーブ・ドラム最近接点を通過した後、GA の増大により電界が減少し、スリーブ角度  $-15^\circ$  近辺

から、ドラム上に着床するトナーとスリーブ上に着床するトナーの明瞭な分離が始まる。最終的に、全トナーの 0.3 がスリーブ上に戻り、0.7 がドラム上に堆積して現像が終了している。スリーブ上の着床は  $-25^\circ$  で完全であるのに比べて、ドラム上への完全着床は少々緩慢である。スリーブは金属であるが、ドラム金属は感光体で覆われている為と解される。



YT:Visc. of air=  $1.81\text{E-}5 \text{ N*sec/m}^2$  EO:Vac.permittivity= $8.85\text{E-}12 \text{ F/m}$

R1:0.039m R2:0.01m D0: $100\text{E-}6\text{m}$  D1: $60\text{E-}6\text{m}$  EI:6

Q:Toner layer charge density= $-0.6\text{C/m}^3$  QT:Toner particle charge=  $-1.5\text{E-}15\text{C}$

MT:Toner mass = $3.4\text{E-}13\text{kg}$  RT:Radius of toner= $5\text{E-}6\text{m}$  DT:Thickness of toner layer= $30\text{E-}6\text{m}$

SD:Sampling time interval of R-K-G calculation= $1.5*10^{-5}\text{sec}$

Z:Number of dividing flight distance=50

PV:Sleeve peripheral velocity= $0.05\text{m/sec}$  V0:0volt VB: $-50\text{volt}$  VP: $1600\text{volt}$  HZ:1000cycle

PH:Initial phase angle=0 DG:Initial sleeve angle in degree= $+22^\circ$

Fig.7. A Typical Simulation Result.

## 6. 考察

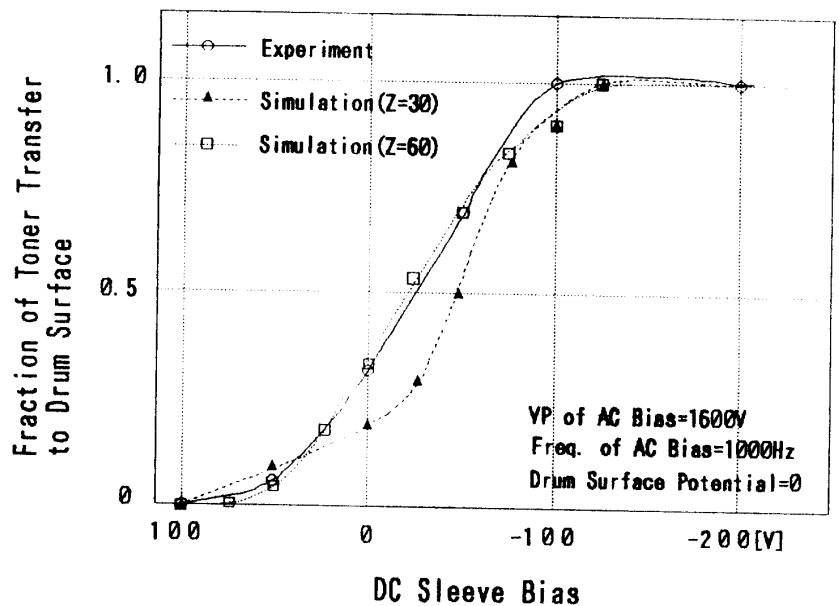
本報告で行ったシミュレーション計算においては、トナー粒子相互の衝突を考慮していない。その意味で、このシミュレーションはいわば Collisionless Limit のシミュレーション場合であり、笠井ら(1)の行ったシミュレーションは 1. まえがきの項で述べたごとく、極端な衝突によるミスト状態トナーを考えるいわば Collision Limit の場合であると解釈出来るかも知れない。

衝突という扱いにくい問題を別にすると、本シミュレーションに含まれる計算上の近似は、(1)ポテンシャル計算における平行板コンデンサー近似と、(2)スリーブ・ドラム間の分割数  $Z$  が無限大でないことと、(3)運動方程式の解を求めるところで、Runge-Kutta-Gill 法を反復する時間刻み巾が無限小でない点である。この時間巾の問題は、R-K-G 法の数学的問題ではなく、関数形の分らない電界  $E$  の値を更新していく時間巾が短いことが精度

を高めていると解される。平行板コンデンサー近似は、スリーブとドラムの大きさに対してスリーブ・ドラム間距離は2桁小さく、現像領域の巾が狭い事を考慮すれば許される近似である。この近似は、相当の厚さの誘電体で被覆されたスリーブを扱う場合は問題になるが、本報告では立ち入らないこととし続報で扱うことにする。スリーブ・ドラム間の分割数  $Z$  は、検討の結果、通常50～100で計算結果が一定となる。また、時間刻み巾は  $10^{-5}$  secで十分で、それ以上短くしても結果は変わらない。勿論スリーブ回転速度が極端に早いとか本研究に用いたパラメータ Fig. 7 と著しくパラメーターが異なる場合は改めて検討する必要がある。

## 7. 実験結果とシミュレーション結果の対比

ドラム表面電位0ボルトのバイアス現像の場合の一例を Fig. 8に示す。シミュレーションは、 $Z=30$  又は60、計算時間刻み  $10^{-5}$  secとし、ACバイアスの位相を  $0, \pi/2, \pi, 3/2\pi$  に振って計算した結果の平均値をプロットしてある。この例では、分割数  $Z=60$  で十分である。尚、この計算と実験に用いた数値及びパラメーターは Fig. 7 の値と等しいが、異なる数値は Fig. 8 の中に記した通りである。トナーに関するパラメーターは実験に用いたトナーの実測値である。



Parameters for both experiment and simulation are same with those of Fig.7 except

$$M_T = 6.0E-13 \text{ kg } Q = -0.5C/m^3$$

$$Z=30\sim60 \quad PH=0, \pi/2, \pi, 3/2\pi \quad SD= R-K-G \text{ calc. } 1\cdot 10^{-5} \text{ sec}$$

Fig.8. Experimental Results and Results of Simulation

非磁性一成分非接触現像について有益な討論を頂いた(株)東芝情報通信システム研究所材料プロセスグループの方々ならびに三田工業技術部石谷優典氏に感謝いたします。

## 引用文献

- 1) 高橋、細野、神辺、豊野：電子写真学会誌、vol. 20, No. 1, p8 (1981) .
- 2) 笠井、吉田、戸村、神山、細谷、上原：第59回電子写真学会技術シンポジウム、p99 (1988) .
- 3) Japan Hardcopy 1990 Fall(Society of Electrophotography of Japan) Nov. 30 で報告。

(平成2年12月20日 受理)