衝撃印字における液体インク転移機構*

岡 崎 哲 夫** 小 林 正 人**

Liquid Ink Transfer Mechanism in
Impact Printing

Tetsuo OKAZAKI and Masato KOBAYASHI

In determining design conditions for an impact printer, it is necessary to study the ink transfer mechanism in impact printing and to clarify the relationship of print quality parameters, such as printed character stroke width and print density, to design conditions for printing mechanisms. This paper describes an analytical and experimental study of the liquid ink transfer mechanism using an inked ribbon in impact printing. The results

obtained are as follows: (1) The liquid ink transfer mechanism can be well explained by the viscous flow model which assumes the structure of paper to be an arrangement of cylindrical capillaries and the ink to be a Newtonian fluid. (2) The quantity of ink transferred is proportional to the square root of the peak printing pressure and contact time, proportional to the mean capillary radius of paper, and inversely proportional to the square root of ink viscosity.

Key words: liquid ink, inked ribbon, impact printer, peak printing pressure, ink viscosity, impact printing contact time, mean paper capillary radius.

1. 緒 言

データ通信用入出力機器には各種のものがあるが、ハードコピーのとれるプリンタは最も基本的な機種の一つであり、キーボードプリンタ、ラインプリンタなどの汎用機器として広く使用されている。プリンタの中でも活字の機械的衝撃を用いて印字するインパクトプリンタは、その印字原理からみて騒音が大きいことや高速化が容易でないという欠点を有するものの、印字品質が良いことや普通紙に同時複写がとれるなどの大きな利点を有しているため、現在広く使用されている。

ところで、インパクトプリンタを合理的に設計するためには、衝撃印字によるインクの紙への転移機構について検討し、文字線幅、印字濃度などの印字品質を支配する物理的要因と印字部に関する設計条件との関係を明らかにする必要がある。カーボン複写紙からの固体インクの転移機構については、紙とインクの接触面で発生するせん断剥離現象と熱溶融現象の両者によってほぼ説明できることを明らかにしている¹⁾。液体インクの転移に関する研究は、版面を用いる印刷の分野では古くからなされている²⁾³⁾、インパクトプリンタの印字条件は版面印刷と比べてインクリボンを用いていること、接触時間が短い、印字圧が高い等、異なる点が多い。すなわち、

衝撃印字における液体インクの転移に関しては、わずかに筆者ら⁴⁾によって印字力と接触時間の影響が実験的に検討されている程度である。

本報告では、インクリボンを用いた液体インクの転移機構を明らかにするために、まず転移に寄与する紙およびインクの物性について検討した。次に紙を円筒毛细管状とし、インクを一様分散の粘性流体とした粘性流動モデルによる液体インク転移式を導いた。更に平面活字拡大モデルを用いた実験的検討を行い、液体インクの転移機構が上記モデルでは説明できることを示した。

2. 紙およびインクの物性

2.1 紙の物性

インクの転移現象においては、転移に寄与する紙およびインクの物理定数が重要となる。紙は図1に示すように、セルロース繊維の集合体であり、表面には繊維によ

(a) 紙の表面(上質紙)

(b) 紙の断面(上質紙)

図1 紙の走査電子顕微鏡観察

* 原稿受付 昭和54年12月22日。昭和54年度精機学会春季大会学術講演会(昭和54年3月29日)にて発表。

** 正 会 員 日本電信電話公社横須賀電気通信研究所(横須賀市武1-2356)

図2 紙の粗さ曲線

図3 気孔量の相対累積曲線

る突起やくぼみが混在しており、繊維と繊維の間隙は大小の毛細管状空隙になっていると考えられる。液体インクの転移に関しては、紙とインクリボンとの接触平滑性の関係から表面粗さが重要であり、インクの浸透との関連では紙の多孔性構造を知る必要がある。

紙の表面粗さについては、衝撃印字時における接触平滑性を求めることは容易でないで、印字圧のかからない状態の表面粗さを JIS 規格⁵⁾に基づき、触針式表面粗さ測定機（接触圧 0.07 g、触針半径 2 μm、小坂研究所製）により測定した。得られた紙の粗さ曲線の一部を図 2 に示す。

紙は複雑な多孔性構造を持っているが、これに対して油の浸透を基礎とした円筒毛細管モデル⁶⁾あるいは均一な球のつくる空隙系とみなす充てん球モデル⁷⁾などが提案されている。ここでは大きさの異なる円筒状毛細管が紙表面に垂直に配列されているモデルを考える。この場合、毛細管は紙シートを上から下まで貫通しており、毛細管の閉塞あるいは毛細管同士の連結はないものとする。

インクの浸透に関しては毛細管の個数と大きさが重要であり、水銀圧細孔測定装置（ポロソメータ、島津製作所製）を用いて紙の毛細管半径に関する気孔量分布を求めた。図 3 に気孔量の相対累積曲線の一部を示す。これより毛細管半径 r に関する気孔量分布は、平均 $\log r_0$ 、分散 σ^2 の対数正規分布として近似できることがわかる。

次に気孔量分布から毛細管の個数分布を求める。気孔量分布と個数分布の関係については次式が成り立つ。

$$V\varphi(r)dr = N\pi r^2 g(r)dr \quad (1)$$

図4 毛細管半径に関する個数分布

ここで、 V は紙の単位体積当たりの気孔量、 $\varphi(r)$ は気孔量分布の確率密度関数、 N は単位面積当たりの毛細管個数、 $g(r)$ は個数分布の確率密度関数である。気孔量分布は対数正規分布に従うから

$$\varphi(r) = \frac{\log e}{\sqrt{2\pi}\sigma r} \exp\left\{-\frac{(\log r - \log r_0)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

と書ける。式(1),(2)より $g(r)$ は次式で与えられる。

$$g(r) = \frac{\log e}{\sqrt{2\pi}\sigma_1 r} \exp\left\{-\frac{(\log r - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right\} \quad (3)$$

ここで

$$\mu_1 = \log r_0 - \frac{2\sigma^2}{\log e}, \quad \sigma_1 = \sigma$$

である。すなわち毛細管個数分布は対数正規分布に従う。毛細管個数分布の一例を図 4 に示す。衝撃印字後の毛細管個数分布も対数正規分布に従うが、印字圧が高くなるにつれて平均半径が小さくなる傾向がみられた。

2.2 インクの物性

インクリボンに用いられる液体インクは、カーボンブラック等から成る着色剤が媒質の不乾性油中に完全に分散した状態で配合されている。液体インクの転移に関しては、インク粘度および表面張力が重要である。

回転型粘度計（レオメータ、島津製作所製）を用いて測定した、インクのせん断速度 $\dot{S}$ とせん断応力 τ との関係を図 5 に示す。これによれば、 $\dot{S}$ の低い領域では $\dot{S}$ の増加に対して τ が急激に増しており塑性流動性を示すが、 $\dot{S}$ が高くなると $\dot{S}$ と τ はほぼ比例関係にあって、インクはニュートン流体に近い挙動を示す。この比例直線を $\dot{S}=0$ まで延長したときの τ の値を降伏応力 τ_0 とすれば、インク塑性粘度 η_i は次式で与えられる。

$$\eta_i = \frac{\tau - \tau_0}{\dot{S}} \quad (4)$$

η_i はインクがニュートン流体として扱える領域では一定であり、これをインク粘度 η とする。図 6 にインク粘度 η と温度 T の関係を示す。これより T の上昇とともに η は急激に減少している。

図5 インクのせん断速度とせん断応力の関係

図6 温度とインク粘度の関係

図7 インクの表面張力特性

インクの表面張力は Wilhelmy の平板法(表面張力測定装置, 島津製作所製)によって測定した結果を図7に示す。これより表面張力 γ は特性曲線が平衡に達したときの値 γ_m とした。

3. インク転移機構

前章の検討により, インク転移に寄与する紙およびインクの物性としては, 紙の表面粗さ, 毛細管構造, インク粘度および表面張力が重要となる。

ここでインクの浸透については紙の表面粗さは無視できるので, インクリボンから紙へのインクの浸透による

図8 インク浸透モデル

転移モデルとして, 粘性を有するインクが紙の毛細管を浸透する現象を考える。簡単のために紙の構造が表面に垂直に半径の異なる円筒毛細管が配列し, インクをニュートン流体として, インクの浸透についてポアズイユの式を適用する。すなわち図8のインク浸透モデルにおいて, 毛細管を通して時間 t に流れるインクの量 v は

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\pi r^4 P}{8\eta l} \quad (5)$$

で与えられる。ここで, r は毛細管半径, P は圧力, η はインク粘度, l はインクの浸透深さである。衝撃印字の場合, 圧力 P は次式で示される。

$$P(t) = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} + F_m \sin\left(\frac{\pi t}{\tau_c}\right), \quad (0 \leq t \leq \tau_c) \quad (6)$$

ここで式(6)の第1項は毛細管圧力を示しており, γ はインクの表面張力, θ はインクと紙との接触角である。第2項は印字圧力を示しており, 印字圧力の波形を正弦波単一パルスとしたもので⁸⁾, F_m は最大印字圧, τ_c は接触時間である。また v と l の間には次式が成り立つ。

$$v = \pi r^2 l \quad (7)$$

式(6)および式(7)を式(5)に代入すれば次式を得る。

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8\eta l} \left\{ \frac{2\gamma \cos \theta}{r} + F_m \sin\left(\frac{\pi t}{\tau_c}\right) \right\} \quad (8)$$

したがって τ_c の間に半径 r の毛細管にインクが浸透する深さ h は式(8)を積分することにより次式で与えられる。

$$h = \sqrt{\left(\frac{r\gamma \cos \theta}{2\eta} + \frac{r^2 F_m}{2\pi\eta} \right) \tau_c} \quad (9)$$

ここで例えば $F_m = 10 \text{ kg/mm}^2$, $\tau_c = 50 \mu\text{s}$ とし, 前章で求めた紙およびインクの物性値 $r = 0.89 \mu\text{m}$, $\gamma = 27.0 \text{ dyn/cm}$, $\eta = 73 \text{ P}$ を用い $\theta = 0^\circ$ と仮定した場合, 毛細管圧力および印字圧力によるインク浸透深さは, それぞれ $0.04 \mu\text{m}$, $9.2 \mu\text{m}$ である。これより衝撃印字においては毛細管圧力の項は無視しうるので, h は近似的に次式で与えられる。

$$h \doteq \sqrt{\frac{r^2 F_m \tau_c}{2\pi\eta}} \quad (10)$$

図9 印字実験装置

次に単位体積当たりの毛細管個数を N 、毛細管個数分布を $g(r)$ とすれば、毛細管1本当たりの平均浸透深さ h_m は

$$h_m = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} N r g(r) dr \sqrt{\frac{F_m \tau_c}{2\pi\eta}} \\ = \sqrt{\frac{F_m \tau_c}{2\pi\eta}} \int_0^{\infty} r g(r) dr \quad (11)$$

と書ける。 $g(r)$ は式(3)に示す対数正規分布に従うから

$$I = \int_0^{\infty} r g(r) dr \\ = \exp\left\{ \frac{\mu_1}{\log e} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_1}{\log e} \right)^2 \right\} \quad (12)$$

r_1 を個数分布の平均半径とすれば式(12)は

$$I = r_1 \exp\left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_1}{\log e} \right)^2 \right\} \quad (13)$$

と書ける。これは毛細管個数分布の母平均にはかならないから、これを等価平均半径 r_m において式(11)に代入すれば、平均インク浸透深さは次式で与えられる。

$$h_m = \sqrt{\frac{r_m^2 F_m \tau_c}{2\pi\eta}} \quad (14)$$

4. インク転移実験

4.1 実験方法

図9に示す印字実験装置を用い、ハンマによってインクリボン・紙を打撃する印字実験を行った。ここでは平面活字拡大モデルを用い、印字面がそれぞれ $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 、 $4 \times 4 \text{ mm}^2$ 、 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ の3種類の平面ハンマを使用した。活字拡大モデルの接触長さ $2a$ とインクリボン・紙の厚さ c については、 $a/c=4$ とした。またハンマ質量を $1.2 \sim 15.2 \text{ g}$ まで変化させることによって、同一印字圧で接触時間 τ_c が変化するようにした。最大印字圧 F_m の測定⁴⁾ はハンマにひずみゲージを接着することにより行った。

表1 紙の物性

	十点平均粗さ* (μm)	毛細管個数分布				
		母平均 $E_1(r)$ (μm)	母分散 $\sigma_1^2(r)$ (μm^2)	対数正規分布		等価平均半径 r_m (μm)
				μ_1	σ_1^2	
上質紙	9.5	0.96	0.43	-0.100	0.070	0.96
中質紙	13.5	1.12	0.65	-0.050	0.086	1.12
新聞用紙	15.0	1.62	1.00	0.139	0.061	1.62
ケント紙	14.0	0.89	0.49	-0.147	0.081	0.89
カード紙	10.0	0.84	0.51	-0.177	0.089	0.84
トレース紙	10.5	0.45	0.25	-0.515	0.148	0.45

* JIS B 601-1970 による

表2 インクの組成および物性

インク No.		1	2	3	4
組	着色剤	カーボンブラック			
		ニグロシン			
		ビクトリアブルー			
成	媒	オレイン酸			
		脂肪酸エステル			
		ソルビタンモノラウレート			
		ソルビタンセスキオレート			
		ソルビタントリオレート			
物	質	オレイン酸オクチル			
		35.00	—	—	—
性	インク粘度 (P, 20°C)	23.0	57.5	84.0	166
	表面張力 (dyn/cm, 20°C)	29.5	26.0	25.0	23.5
	媒質粘度 (P, 20°C)	0.57	1.76	3.75	7.13
リボン	塗布量 (g/m ²)	13.8	13.9	13.5	13.6
	濃度	1.32	1.34	1.30	1.28

表3 リボン生地*

	縦	横
原糸デニール**	40	70
フィラメント本数	34	34
打込み本数 (本/in)	169	114
生地厚さ*** (μm)	125	

* 原糸 66 ナイロン

** 糸の太さを表すデニールとは長さ 9 km の糸の重量を g 数で表示したもの

*** JIS P 8118 による

実験に使用した紙の物性、インクの組成および物性、リボン生地をそれぞれ表1、表2、表3に示す。紙については毛細管の等価平均半径の異なるものを用いた。ここで上質紙はプリンタの印字用紙として使用されているものである。インクについては、一般にインクリボンに用いられる着色剤および媒質を使用し、媒質中の脂肪酸エステルの内容を変えることによって粘度を変化させた。リボン生地については、一般にプリンタ用として使

図 10 応力分布と濃度分布

図 11 最大印字圧と濃度の関係

図 12 接触時間と濃度の関係

図 13 インク粘度と濃度の関係

用されているものをそのまま用いた。

インク転移量としてインク浸透深さを直接求めることは容易でないで、ここでは光学的濃度がインク浸透深さに比例することから⁸⁾、光学的濃度によってインク転移量を評価した。濃度の測定は光学的濃度計(さくらマイクロデンストメータ)により行い、光ビーム断面の大きさは $0.05 \times 0.10 \text{ mm}^2$ とした。

4.2 結果および考察

図 10 に $a/c=4$ における応力分布と濃度分布を示す。紙との接触面における法線応力 F_N の分布は Conway ら⁹⁾¹⁰⁾ による解析結果を利用した。すなわち活字を接触長さ $2a$ の剛体圧子、リボン・紙を高さ c の線形の平面応力問題とした場合の値を用いた。図より応力分布と濃度分布には対応がみられるが、 F_N が非常に大きくなるエッジ部では濃度はそれほど高くない。これは実際の紙の毛細管は紙面に垂直方向だけでなく紙面方向へも伸びており、エッジ部にインクのにじみを生ずるためと考えられる。

図 11 に最大印字圧 F_m と濃度 $D-D_p$ の関係を示す。ここで F_m は応力波形から求めた接触面における法線応

力 F_N の最大値であり、 D_p は紙の濃度である。これによれば、接触時間 τ_c およびインク粘度 η が一定であれば濃度は F_m の平方根にほぼ比例している。 F_m が 2 kg/mm^2 以下では紙の圧縮変形量が小さくなって紙とリボンの接触面積が減少し、濃度がやや低くなったと考えられる。図 12, 13 にそれぞれ τ_c, η と濃度 $D-D_p$ の関係を示す。これによれば、 F_m, η が一定であれば濃度は τ_c の平方根にほぼ比例し、 F_m, τ_c が一定であれば η の平方根にほぼ反比例している。図 14 に紙の毛細管等価平均半径 r_m と濃度 $D-D_p$ の関係を示す。これによれば、 F_m, τ_c および η が一定であれば、ばらつきは大きい濃度は r_m にほぼ比例している。ばらつきの原因としては、 r_m は紙の多孔構造を単純な円筒毛細管モデルで近似した等価平均半径であり、しかも衝撃印字の際の圧縮変形による紙の多孔構造の変化を考慮していないことおよび式 (14) で示されるインク浸透モデルは、無限量のインクがあるものと仮定していることがあげられる。

図 15 にインク転移後の紙断面写真を示す。これよりインクが紙繊維間の毛細管を通して内部へ浸透していることが確かめられた。インクの浸透深さは数 μm ~ $10 \mu\text{m}$

図 14 毛細管等価平均半径と濃度の関係

程度であり、 F_m, τ_c, η および r_m をインク浸透式 (14) に代入して得られる値 $6.5 \mu\text{m}$ とほぼ一致している。

以上の実験結果によれば、 r_m についてはややばらつきが大きいが、インクリボンの液体インク転移に関するインク浸透式 (14) がほぼ妥当であることを示している。

5. 結 論

インパクトプリンタの合理的設計を目的として、インクリボンに用いられる液体インクの紙への転移機構について検討し、次のような結果を得た。

- (1) 液体インクの転移機構は、紙繊維構造を円筒毛細管を有する多孔質系、インクを着色剤が媒質中に一様分散している粘性流体とし、これにポアズイユの式を適用した浸透現象として説明できる。
- (2) 液体インクの転移量は最大印字圧と接触時間の平方根および紙の毛細管等価平均半径に比例し、インク粘度の平方根に反比例する。この場合、紙の毛細管等価平均半径とインク転移量の関係の実験結果には、ややばらつきがみられた。

以上の検討結果により、衝撃印字による液体インクの

(a) 縦断面 (上質紙) (b) 横断面 (上質紙)
印字条件: $F_m=5 \text{ kg/mm}^2, \tau_c=56 \mu\text{s}, \eta=96 \text{ P}, r_m=0.96 \mu\text{m}$

図 15 紙断面の透過電子顕微鏡観察

転移機構の概略が明らかになった。

終わりに本研究を進めるに際し、終始懇切な御指導を頂いた横須賀電気通信研究所元宅内機器研究部長中野一造氏、プリンタ研究室神崎一男室長に厚く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) T. Okazaki & M. Kobayashi: A Study on the Carbon Ink Transfer Mechanism, Bull. JSPE, **13**, 2, (1979) 99.
- 2) 例えば、井上英一、菊地真一編: 印写工学 III, 画像形成論, 共立出版社 (1969) 154.
- 3) 市川家康ほか: 印刷適性研究 (第 1 報), インキ転移について, 印刷研究所報告, **1** (1957) 1.
- 4) 苗村 明, 小林正人: 衝撃印字の基本的性質, 信学論誌 (C), J-60 C, **11** (1977) 676.
- 5) JIS B 0601: 表面粗さ (1970).
- 6) D. Tollenaar & G. Blokhuis: The Structure of Paper, Appl. Sci. Res., **A 2**, 2, (1950) 125.
- 7) 山内龍男ほか: 紙の空隙構造, とくに水銀の圧入・退出挙動の解析について, 紙・技協誌, **29**, 9 (1975) 492.
- 8) 岡崎哲夫, 小林正人: インパクト印字における液体インク転移機構, 信学技報, EMC 79-2 (1979) 13.
- 9) H. Conway et al.: Normal and Shearing Contact Stresses in Indented Strips and Slabs, Int. J. Engg. Sci., **4**, (1966) 343.
- 10) H. Conway & R. Schaffer: The Contact Problem in Solid-ink Printing, Proc. Soc. Experim. St. An., **24**, (1967) 15.