(東京大学大学院) 江前敏晴、森陽太、磯貝明 (国立印刷局)内藤美紀子

1 はじめに

インクジェット印刷の品質に対する要求は、銀塩写真を凌ぐ究極の高画質が一方にあり、他方で は、標準的な画質ながらオフセット印刷や電子写真方式との用紙互換性重視、という二極化の傾向 がある。インクジェットメディアの大勢を占める志向がどちらの方向に向くかはわからないが、イ ンクジェットインクがメディア表面に着弾し、メディア内部に浸透していく挙動を正確に解析する ことは、さらに高いレベルへと印刷品質を向上させるにせよ、最低限の印刷品質を保証するにせよ、 必要なことと考えられる。

インクジェットメディアの代表的材料であるインクジェット紙の液体浸透性は紙の親水性/親 油性と関係が深い。紙のはっ水性の程度を示す概念及び用語は、"サイズ度"である。ステキヒト サイズ度[1]は、混ざり合うと赤色となる2種の塩溶液を紙の両面からそれぞれ吸収させ、赤い斑 点が3つ生じるまでの時間でサイズ度と定義する。しかし、インク滴の着弾・浸透は短時間のうち に紙の表層で起こる現象であるため、インクジェット印刷適性の評価には適さない。数秒 ~ 数分間 での水の浸透量を質量増加分として測定するコプサイズ度[2]も同様である。ごく短時間での水の 浸透量を測定する方法がいくつかある。ハーキュレスサイズ度[3]は、着色した水の浸透により紙 の裏面から測定した光の反射率が一定割合だけ低下するまでの時間を測定する。プリストー試験は、 紙面上を給液ヘッドで速度を変えながら走査し、そのヘッド下面のスリットを通して浸透する水な どの液体の体積を測定する。走査速度と浸透体積の関係から液体と紙表面が接触する時間に対する 単位面積あたりの浸透体積を吸液曲線として得ることができる。これらは紙表層での吸液特性を評 価できる方法と言える。

インクジェット印刷でのインク浸透過程をシミュレートするという意味では、液滴の浸透を測定 する方法を応用することが可能と考えられる。このような方法として、一定体積の水やオイルを滴 下して表面の光沢が消失するまでに時間を計測する簡易的な計測方法がある[4]。接触角は、浸透 体積を直接測るわけではないが濡れやすさの指標として、その時間変化を測ることもできる。液滴 法では、紙表面に残る半球状の液滴の側面投影画像から体積変化も推測できる。通常の接触角測定 での液滴の体積は1~30 μLであり、通常のインクジェットインク滴の10⁶倍もの体積を有する。1 μLの球の直径は1.24 mm であり、通常のコピー用紙の厚さの10倍以上である。このように、水滴 が紙の裏面に到達してもなお大量の水滴が残っている状況でインクジェットの印刷適性を評価し ているとは言いがたい。実際のインク滴に近い体積の水滴の吸収を評価する必要があるだろう。

> A-06. Micro-sizing degree of ink-jet media Toshiharu ENOMAE^{*}, Yohta MORI^{*}, Akira ISOGAI^{*} and Mikiko NAITO^{**} ^{*}The University of Tokyo, Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo ^{**}National Printing Bureau, Sakawa 6-4-20, Odawara-shi, Kanagawa Keywords: sizing degree, ink-jet, high-speed video, contact angle,

江前敏晴,内藤美紀子,森陽太,磯貝明,"インクジェットメディアのマイクロサイズ度"、第117回秋期研究発表会(福岡)講演予稿集,日本印刷学会、22-27(2006).

紙のはっ水性を発現するサイズ剤はパルプ繊維表面を覆い尽くすのではなく、まばらに存在しているが、表面張力のために表面の形状が平らになりやすい水に対しては、それでも十分なはっ水性を発現すると考えられている。インクジェットのインク滴と同程度の大きさの水滴でも、そのようなまばらなサイズ剤の分布で十分に水の浸透性を制御できるのであろうか。本研究では、このような微小水滴に対するはっ水性の概念を"マイクロサイズ度"あるいは、吸収が生じる場合は"微小液滴吸水特性"と定義し、紙の特性との関係を調べることにした。

2 実験

2.1 試料

市販インクジェット紙を用いた。 試料 PM はエプソン写 真用紙 PM 光沢タイプ、 試料 QP はコニカミノルタ製フォ トライク QP 光沢タイプ(以上2種を写真画質紙と呼ぶ) 試料 HG は三菱科学製ハイグレード(汎用紙と呼ぶ)であ る。液体は脱塩水を使用した。

2.2 方法

顕微高速度ビデオカメラシステム[5]の構成を図1に示 す。高速度ビデオカメラ(朋栄 VFC-1000 モノクロ)、 汎用光学顕微鏡と対物レンズ10X(オリンパス)、カメラ アタッチメント(エルモ MA44S)により構成した。水滴 の挙動は毎秒500フレーム、シャッター速度は1ms以下 とした。インクジェットヘッドの制御はKIE-1(コニカミ ノルタ)を使用した。試料台は鉛直に立っている

平滑金属面とし、両面テープで紙試料を貼り付け た。撮影可能な水滴飛翔速度に落とすため、通常 の印刷よりもヘッドと紙の距離を開け、20~30mm

とした。紙面上にとどまっている水滴の背後からの照明を利用することにより、水滴 が画像の暗部となるように投影した。画像処理による水滴の形状パラメータの計算で は、側面投影画像の左右の接触点と頂上部の座標から、それが円の一部の形状を持ち、 立体的にも等方体であると仮定し、体積、接触角、高さ、接触部分の円(以下、接触 円と呼ぶ)の半径の時間変化を計算した。

3 結果と考察

3.1 微小水滴のビデオ画像

図 2 に試料 QP 上に着弾した水滴の時間変化の例を示す。時間軸の 0 は水滴が画面 上に初めて現れた時点とし、どのビデオ画像にもこの設定を適用した。したがって真 の着弾時刻は最大で 2 ms の誤差を含む可能性があり、時間軸をその範囲内でシフト して考える必要が生じることもある。このビデオの場合、0 ms の画像で水滴飛翔の軌 跡が映っているので着弾の瞬間に近い画像と言える。水

滴の高さと接触角は時間の経過とともに減少しているが、

Figure 2. Change of projected hemisphere of water drop on sample QP recorded every 2 ms.



Figure 1. Microscopic high-speed video camera system to capture water penetration behavior (top) and sample stage to record side view projection of water drop on paper surface (bottom).



江前敏晴,内藤美紀子,森陽太,磯貝明,"インクジェットメディアのマイクロサイズ度",第117回秋期研究発表会(福岡)講演予稿集,日本印刷学会,22-27(2006).

接触円の半径は、初期段階ではほとんど変化 がなく、6 ms 以降に減少し始める挙動が観察 される。

図3は、このビデオの各画像について水滴 の形状パラメータと体積の変化を数値的に 示したものである。8msに映っているように 水滴高さが低くなると、接触角の値は不正確 になることから、接触角が20。以下では誤 差が非常に大きいと考えた方がよい。図から わかるとおり、吸収の初期段階では、接触角 は減少するが半径は一定のままである。この ような変化の過程は次のように説明される であろう。水滴が紙表面に衝突すると同時に、 その慣性のために瞬間的に表面上に広がり、 それが止まったときに前進接触角を示す。浸



Figure 3. Changes in volume and shape parameters of a single water drop recorded as video images shown by Figure 2.

透が始まると体積が減少するが、形状的には高さの減少が進行し、接触円の大きさは維持される。 前進接触角よりも小さい後退接触角に達すると、後退接触角を維持しながら、相似的に水滴が小さ くなる。この段階では水滴の高さと接触円の直径は同じ比率を保って縮小していく(図6参照)。

3.2 微小水滴の体積変化

図4は、試料QP上の水滴の体積変化を複数の水滴について示したものである。初期体積は10~ 100 pLの広い範囲を示したが同じノズルから吐出したとは限らないためと考えられる。時間軸に 対する体積変化は直線的ではない。図5は、同一データを時間の平方根に対してプロットしたもの であるが、多数の体積変化曲線の中間域で直線部分が観察される。この直線性は、ルーカス-ウォ ッシュバーン式(1)に従った毛管浸透を示唆する。ここで、/ は浸透深さ、r は毛管半径、//は液体





Figure 4. Changes in volume of water drops on sample QP surfaces with time.

Figure 5. Changes in volume of water drops on sample QP surfaces with a square root of time.

江前敏晴,内藤美紀子,森陽太,磯貝明,"インクジェットメディアのマイクロサイズ度",第117回秋期研究発表会(福岡)講演予稿集,日本印刷学会,22-27(2006).

の表面張力、θ は接触角、 η は液体の粘度、t は時間である。この式は液体が材料表面を濡らす力が浸透を進行させる駆動力となっていることから導かれ、空隙メディアに対

$$l = \sqrt{\frac{r\gamma\cos\theta}{2\eta}}t \qquad \cdots \qquad (1)$$

する液体浸透でよく成り立つことが知られている。初期の緩やかな傾きは表面を濡らすのに要する 時間であり、この間は液体の浸透がない。また吸収の終点近くでも傾きは緩やかとなるが、水滴が 内側に向かって縮小するために接触円の面積が小さくなり、吸収速度が下がるものと考えられる。

図6は、水滴の形状変化を模式的に示したものである。初期の瞬間的な濡れ広がり、一定面積の接触円を通過する毛管 浸透、後退接触角を維持した水滴の縮小、の各段階を示す。



Figure 6. Schematic of water drop absorption mechanism.

図7は、試料PM上の水滴の体積変化を示す。水滴の初期体積はどれも40pL以下であった。試料QPの場合と同じく、時間の平方根に対し直線的に体積は減少した。試料間の吸水速度の違いは、体積減少の速度、すなわち傾きで比較されるべきであるが、試料PMとQPを比較すると、その差はほとんどないことがわかる。

図8は、汎用インクジェット紙試料 HG 上の水滴の画像と体積変化を示す。走査電子顕微鏡で観察すると、この紙の表面にシリカの5~20 µm 径の凝集粒子が観察され、この粒子間にパルプ繊維が見えている。つまり、表面は親水性のシリカ凝集粒子と、ある程度はっ水性のあるパルプ繊維が混在していることがわかる。したがって水滴吸収速度は写真画質紙よりも遅いと予測された。しかし、水滴体積変化曲線の傾きを比較すると、写真画質紙の試料 QP と PM の場合とほぼ同等であり、吸水速度に差がないと判断できる。プリストー試験では、明らかに試料 QP 及び PM のような写真画 質紙の方が早い吸水が見られるにもかかわらず、ここでの結果は両者に差がなかったことになる。 微小水滴の吸水挙動がこのインクジェット紙2種で違いがないのかどうかを知るには、メディア表面の構造や表面の化学的性質をさらに詳しく知る必要がある。





Figure 8. Change of projected hemisphere of water drop on sample HG recorded every 2 ms (left) and changes in volume of water drops with square root of time (right).

Figure 7. Changes in volume of water drops on sample PM surfaces with a square root of time.

3.3 湿潤表面に着弾した微小水滴の吸収速度

インク滴が着弾するメディア表面は必ずしも乾燥した表面とは限らない。インクジェット印刷で もベタ印刷を行うことがあるため一旦インク滴が着弾した直後に同じ箇所に次のインク滴が吸収 されることが頻繁に起こる。その場合、異なる色のインクが連続して着弾するときには混色を防ぐ 必要があるため、インクの吸収と色材の定着に速さが求められる。

複数の水滴が試料PM上の至近距離内で着 弾したビデオ画像を解析した。図9にこの ときのビデオの各画像を示す。最初の水滴 が乾燥表面に着弾したあと、2番目の水滴が 最初の水滴の着弾範囲と一部重なるように して着弾した(124 ms)。さらに、3番目の 水滴は最初の水滴の着弾範囲とほとんど全 て重なるようにして着弾した(200 ms)。4 番目の水滴は、2番目の水滴の着弾範囲と-部重なるようにして着弾した(210 ms)。 ビデオ画像から判断して、2番目と4番目の 水滴はいずれも、その前に着弾した水滴よ り、おおよそ半径の長さに相当する距離だ けずれた位置に着弾した。また前の水滴が 着弾してから、それぞれ 124 ms 後及び 86 ms 後に着弾したことになる。右上のグラフは、 それぞれの水滴の体積減少速度を比較した もので、着弾直後の体積は、4 滴ともほぼ同 じである。完全な乾燥表面に着弾した1滴 目は最も吸収が速かったが、一部が湿潤表 面にまたがって着弾した2番目と4番目の 水滴もそれに近い速度で吸収され、水滴消 失までに要する時間はいずれも約8msであ った(水滴が最初に現れた時刻を始点とし、 消えた画像となる時刻を終点と判断した)。 接触円の半径相当の距離だけずれた着弾で は、約40%が湿潤表面上に来るようにまた がって重なることになるが、吸水速度はほ とんど変わらないと言える。完全な湿潤表 面に着弾した場合は明らかに吸収が遅く、 水滴消失までに 18 ms を要した。真ん中の グラフにあるように、接触円の半径は湿潤 表面に着弾した水滴は、着弾の時点で既に



Figure 9. First water drop in the frames, second drop away from the first by half drop, third (actually fourth in order of time) drop additionally away from the second by half drop and fourth (third in order of time) drop immediately on the same site with the first drop [left] with graphs of volume [top], radius of circular contact area [middle] and contact angle [bottom].

江前敏晴, 内藤美紀子,森陽太, 磯貝明, "インクジェットメディアのマイクロサイズ度", 第117回秋期研究発表会(福岡)講演予稿集, 日本印刷学会, 22-27(2006). 半径が大きく、濡れ広がりの面積が大きいことがわかった。下のグラフは接触角変化を示すが、着 弾直後の接触角が小さくことからも、湿潤表面では前進接触角が小さくなるためこのような挙動を 示すものと考えられた。

4 まとめ

インクジェットメディアが微小水滴を吸収する挙動について、顕微高速度ビデオカメラを使って 撮影した画像を解析することにより次のことがわかった。

微小水滴の吸収過程については、次のようなメカニズムが考えられた。水滴が着弾した直後に、 慣性によって瞬時に水平に濡れ広がる。その後、経過時間の平方根に比例して体積減少が起きるこ とから、ルーカス-ウォッシュバーン式で示される毛管吸収により水が浸透することがわかった。 毛管吸収の間は、水滴がメディア材料表面との間で作る接触角は、前進接触角から後退接触角まで 減少していくが、このとき接触円の半径は変化がなく、水滴高さが低くなっていく。この段階を経 た後は、後退接触角を維持しながら水滴が縮小していき、紙面上の水滴はやがて消失する。

メディアの種類による吸水速度の違いについては次の結果が得られた。インクジェット紙表面が シリカ粒子により完全に被覆されている写真画質紙であっても、パルプ繊維表面がシリカ凝集粒子 の間に露出している汎用紙であっても、水滴が吸収される速度は同じであった。この結果は、ブリ ストー試験では写真画質紙の方が、明らかに吸水速度が速いこととは対応しなかった。

メディア表面の乾湿状態と吸水速度については次の結果が得られた。一旦水滴が着弾してまだ湿 潤状態にあるメディア表面に着弾した水滴は吸収が遅かったが、湿潤表面との重なりが 40 %程度 の面積である場合は、乾燥表面に着弾した場合とほぼ同じ速度で吸収された。

文献

- [1] 日本工業規格, JIS P 8122:2004 紙及び板紙 サイズ度試験方法 ステキヒト法.
- [2] TAPPI TEST T 441 om-98 Water absorptiveness of sized (non-bibulous) paper, paperboard, and corrugated fiberboard (Cobb test).
- [3] TAPPI TEST METHODS T 530 om-02 Size test for paper by ink resistance (Hercules-type method).
- [4] TAPPI TEST METHODS T 835 om-03 Water absorption of corrugating medium: water drop absorption test.
- [5] D. Ivutin, T. Enomae and A. Isogai, "Ink dot formation in coating layer of ink-jet paper with modified calcium carbonate", Proc. NIP21, IS&T, Baltimore, USA, 448(2005).

江前 敏晴*、森陽太*、磯貝 明*、内藤 美紀子**

* 〒113-8657 文京区弥生1-1-1 東京大学 大学院農学生命科学研究科 製紙科学研究室

┘ 〒256-0816 神奈川県小田原市酒匂6-2-1 独立行政法人国立印刷局 小田原工場