

# 電子写真の定着過程における紙内の水分移動解析とその検証

## An Analysis and Verification of Moisture Transportation within Paper in the Fusing Process of Electrophotography

○正 大原 俊一 (㈱リコー) 正 羽山 裕子 (㈱リコー)  
正 谷川 洋文 (九工大) 正 鶴田 隆治 (九工大)

Shunichi OOHARA, RICOH COMPANY, LTD., Shinei-cho 16-1, Yokohamai 1-shi, Tsuzuki-ku, Yokohama  
Yuko HAYAMA, RICOH COMPANY, LTD.

Hirofumi TANIGAWA, Kyushu Institute of Technology  
Takaharu TSURUTA, Kyushu Institute of Technology

Paper curl is one of paper handling problems of printers and copiers. In the fusing process of electrophotography, the curl is generated by the temperature difference of paper surfaces. The temperature difference causes the moisture transport from the high-temperature side to the low-temperature side, and then the moisture content incline of the paper thickness direction causes the shrinkage difference that generates the curl. In the previous study, we proposed an analysis of the moisture transport in paper to predict the curl amount. This report shows the experimental method that measures the moisture distribution in paper by the electric resistance. And the experimental result indicates the validity of the analysis that calculates moisture distribution in paper.

**Key Words:** Printer, Fuser, Paper Curl, Moisture Content, Measurement, Modeling

### 1. はじめに

プリンターや複写機において、カールは印刷品質を低下させる問題のひとつである。そのため、設計の初期段階で予測し対策を講じる必要がある。カールの要因は複数あり、たとえば搬送路の曲げ、画像を形成するトナーの収縮、定着過程の加熱等がある。それぞれ予測方法<sup>(1) (2)</sup>が検討されており、著者らは定着過程の加熱によるカールのメカニズムについて明らかにし、その予測方法について検討を行って来た<sup>(3)</sup>。

この定着過程におけるカールは、紙の表裏の加熱温度差により発生する。紙の厚さ方向に温度勾配があると、水分が高温側から低温側に向かって移動し、低温側の含水率が増して加熱後の蒸発量が低温側で増加する。紙は水分の減少量に応じて収縮するため、低温側が高温側より収縮してカールを形成する。既報<sup>(4)</sup>では、加熱時の水分移動を計算する解析式を作成し、その結果を基にしたカール予測を行い、加熱時のカールが予測可能であることを示した。しかし、紙の厚さ方向の水分移動と、その結果としての含水率の勾配が直接検証されてはいない。そこで本報告では、紙の電気抵抗により加熱時の厚さ方向の含水率分布を求め、水分移動解析の妥当性を検証する。

### 2. 主な記号

$S$ : 含水率  
 $W_w$ : 吸湿した紙の重さ  
 $W_d$ : 乾燥した紙の重さ  
 $p_l$ : 温度  $T$  における飽和蒸気圧 [Pa]  
 $T$ : 温度 [°C]  
 $\varepsilon$ : 空隙率  
 $K$ : 透過率 [m<sup>2</sup>]  
 $K_{rl}$ : 水の相対透過率  
 $D$ : 水分拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]  
 $D_{eff}$ : 有効水分拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]

$\mu_l$ : 水の粘性係数 [Pa s]  
 $c_{pl}$ : 水の定圧比熱 [J/(kgK)]  
 $\rho_l$ : 水の密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\lambda_l$ : 水の熱伝導率 [W/(mK)]  
 $c_{pg}$ : 空気の定圧比熱 [J/(kgK)]  
 $\rho_g$ : 空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\lambda_g$ : 空気の熱伝導率 [W/(mK)]  
 $c_{pT}$ : 含水紙の定圧比熱 [J/(kgK)]  
 $\rho_T$ : 含水紙の密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\lambda_T$ : 含水紙の熱伝導率 [W/(mK)]  
 $c_{pp}$ : 乾燥紙の定圧比熱 [J/(kgK)]  
 $\rho_p$ : 乾燥紙の密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\lambda_p$ : 乾燥紙の熱伝導率 [W/(mK)]  
 $L$ : 気化潜熱 [J/kg]  
 $V_0$ : 印加電圧 [V]  
 $V_l$ : 測定電圧 [V]  
 $R_0$ : 調整抵抗 [Ω]  
 $R_l$ : 計測器の内部抵抗 [Ω]  
 $R_p$ : 紙の抵抗 [Ω]

### 3. 水分移動解析

#### 3・1 解析式

水分移動解析は紙の厚さ方向の1次元解析で、紙を一般的な多孔質構造体と仮定し、拡散とダルシー則による水分移動及び加熱による水分蒸発を考慮している。

第一項では飽和水蒸気圧の勾配が、第二項では含水率の勾配が水分流動の駆動力になる。式(2)の右辺第一項は熱伝導項、第二項は水分によるエンタルピー輸送である。第三項は水分の気化潜熱であり、解析では100°C以上で水分は蒸発して無くなり、その際に気化潜熱を奪うと仮定している。

$$\rho_l \varepsilon \frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial F_l}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(c_{pT}\rho_T) = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_T\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)\right] - \frac{\partial(c_{pl}F_lT)}{\partial x} - L \cdot \rho_l \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2)$$

$$F_l = -\rho_l \left[ \frac{KK_{rl}}{\mu_l} \left( \frac{\partial p_l}{\partial x} \right) \right] - \rho_l \left[ D \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right) \right] \quad (3)$$

解析に用いる紙の熱物性は含水率を考慮して求める。含水紙の定圧比熱は式(4)、密度は式(5)、熱伝導率は式(6)で表される。それぞれ、乾燥紙(紙の繊維)、水、空気の熱物性を、空隙率 $\varepsilon$ と含水率 $S$ に応じて配分し、含水率を考慮して熱物性を計算する式である<sup>(5)</sup>。含水率は吸湿した紙の重さを $W_w$ 、乾燥した紙の重さを $W_d$ として式(7)で定義する。

$$c_{pT} = (1-\varepsilon)c_{pp} + \varepsilon\{S \cdot c_{pl} + (1-S)c_{pg}\} \quad (4)$$

$$\rho_T = (1-\varepsilon)\rho_p + \varepsilon\{S \cdot \rho_l + (1-S)\rho_g\} \quad (5)$$

$$\lambda_T = (1-\varepsilon)\lambda_p + \varepsilon\{S \cdot \lambda_l + (1-S)\lambda_g\} \quad (6)$$

$$S = \frac{W_w - W_d}{W_w} \quad (7)$$

相対透過率 $K_{rl}$ は含水率 $S$ の関数として式(8)で表し<sup>(5)</sup>、また水分拡散係数 $D$ も含水率 $S$ の関数として式(9)で表す<sup>(6)</sup>。

$$K_{rl} = S^3 \quad (8)$$

$$D = D_{eff}S^3 \quad (9)$$

### 3・2 計算結果

図1は計算結果である。紙の厚さは0.27 mm、初期の含水率は10%、加熱温度は高温側が160°C、低温側が80°Cである。図の横軸は高温側表面を0 mmとし、低温側表面を0.27 mmとした紙の厚さ方向の位置である。加熱時間が長くなるに従い水分が移動し、含水率が最大になる位置が低温側に移っていくことがわかる。加熱時間1.0秒では、低温側表面で含水率が35%以上に上昇している。また、加熱時間が5.0秒になると低温側の含水率も蒸発により低下している。紙の空隙率は0.4~0.5程度であり、計算では0.4を用いている。含水率が35%とすると、空隙はほぼ水で満たされていることになる。

温度差をつけて加熱された紙に、このような水分の低温側への移動と、その結果としての低温側の高含水率が実際に発生するか、実験により検証する。

## 4. 実験検証

### 4・1 含水率と紙の抵抗

図2は紙を両側から異なる温度で加熱してカールを再現する実験装置である。平板のアルミプレートにゴムを貼り付けた加熱プレートを電動アクチュエータで移動させ、幅20 mmの短冊状の試験用紙の表裏に押し当てる。加熱プレ

ートは内部に配置したシーズヒーターで加熱している。加熱面は幅30 mm、長さ100 mmである。紙の加熱前は互いに接触しないため、加熱プレート同士で熱のやり取りがなく、任意の温度差で紙の表裏を加熱できる。

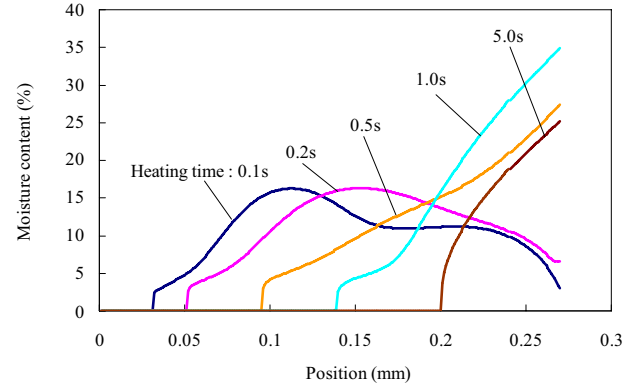


Fig. 1 Moisture content distributions in paper at some heating times (Calculation)

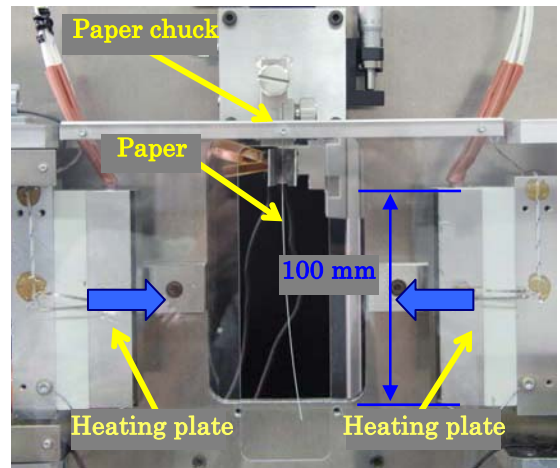


Fig. 2 Side view of the experimental apparatus to analyze the paper curl

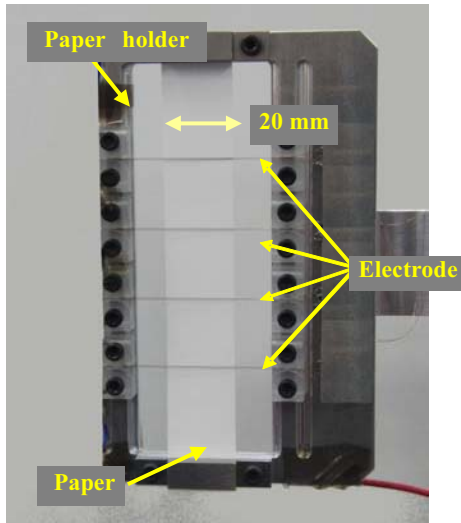
紙の内部の含水率は、紙内の電極間の抵抗で求める手法が知られている<sup>(8)</sup>。この文献では交流を用いているが、本研究では電極部を構成する抵抗測定装置のインピーダンスが低く、交流では紙の抵抗変化が明確にならなかったため直流を用いた。

図3には紙の抵抗測定装置を示す。(a)は外観図、(b)は等価回路である。4箇所電極は図中一本の線に見えるが、それぞれ近接して平行に配置された2本の電線である。電線は直径0.1 mm、材質はタフピッチ銅であり電線間は0.2 mmである。4対を並列に接続して抵抗を下げると共に測定位置の影響を低減している。印加電源 $V_0$ は20 Vの直流であり、測定部の分圧を調整するための抵抗 $R_0$ は9.9 M $\Omega$ である。電圧を測定したデータロガーの内部抵抗 $R_i$ は1 M $\Omega$ である。A, B間の測定電圧を $V_l$ とすると、紙に接する電極間の合成抵抗 $R_p$ は式(10)で表せる。

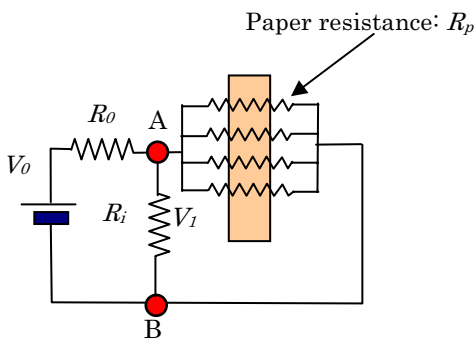
$$R_p = \frac{V_0 R_0 R_i}{V_l (R_i - R_0) - V_0 R_0} \quad (10)$$

図4は抵抗測定装置をカールの再現実験装置に配置した状態を示している。抵抗測定時は、加熱プレートが両側から紙とその間の電極を300Nで加圧するため、電極と紙の接触は十分安定していると考えられる。

これらの装置を用い、紙の厚さ方向の含水率分布を求める。



(a) Picture of the apparatus



(b) Equivalent circuit diagram

Fig. 3 Paper resistance measuring apparatus

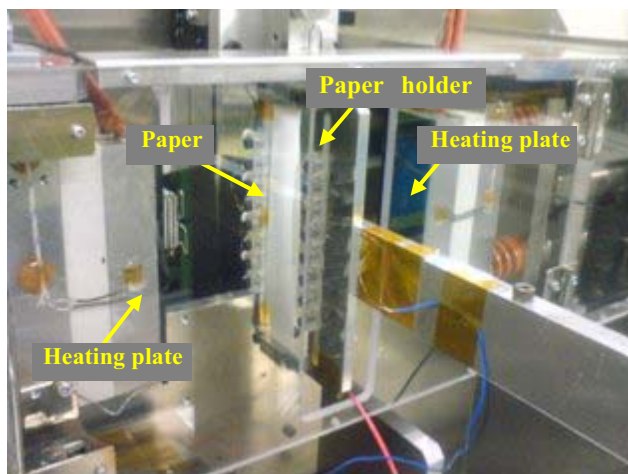


Fig. 4 Schematic of the paper resistance measuring apparatus and the experimental apparatus to analyze the paper curl

初めに含水率の明らかな紙の抵抗を測定し、抵抗と含水率の関係を求める。

抵抗測定は、電極を挟むように2枚の試験用紙を抵抗測定装置に取り付けて行った。紙の厚さは0.12 mmである。

加熱温度は50°Cから100°Cまで10度毎である。紙の含水率は5.8%から30%まで用意した。5.8%、9.5%、15.2%の含水率の紙は相対湿度の異なる3つのデシケーター内に放置して作成し、6.8%は実験室内放置で、20%と30%の場合は紙に直接水を塗布して作成した。含水率の測定は加熱乾燥式の水分計用い、20%と30%の場合は水の塗布前と塗布後の紙の重さから求めた。含水率0%の紙は、110°Cの恒温層内に1時間放置して作成した。実験時の紙の初期温度は、周囲温度相当でおよそ25°Cである。

図5はその結果の一例であり、加熱温度100°Cの場合である。

紙の含水率が高いほど抵抗が低くなるのが分かる。含水率5.8%と6.8%は $1.0 \times 10^7 \Omega$ 前後であり、含水率が増し9.5%と15.2%になると $1.0 \times 10^6 \Omega$ 程度になり、さらに20%と30%では $1.0 \times 10^5 \Omega$ 近くまで低下する。

一方、抵抗は温度でも変化するため、温度毎に校正曲線を作成した。その結果が図6である。抵抗は変動が収まる加熱後2秒から4秒までの間で、サンプリングされたすべての値を平均して求めた。また、100°C以上では紙内の水分が急速に蒸発し抵抗が安定しないため、校正曲線は作成しなかった。図中、加熱温度毎の曲線は目安として記載したもので、実際の校正では各2点間を線形補完して抵抗から含水率を換算した。

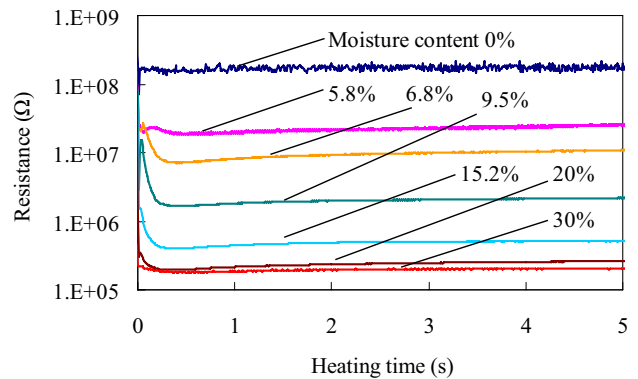


Fig. 5 Resistance transition of paper at some moisture contents (Heating temperature 100°C)

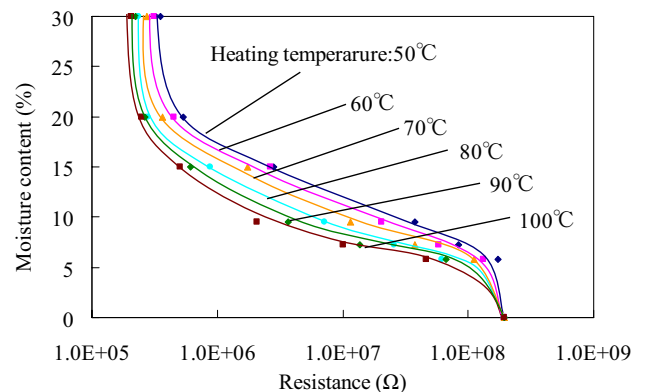


Fig. 6 Relationship between paper resistance and moisture content at some heating temperatures

#### 4・2 温度差加熱時の紙の抵抗

図7に示すように厚さ0.09 mmの紙を3枚重ね、0.27 mmの厚紙を模擬する。そして、加熱プレートと紙、紙同士の間、紙同士の間に抵抗測定装置の電極を挟んで加熱し、それぞれの位置の抵抗から厚さ方向の抵抗分布を求める。

高温側の加熱プレートと紙の間をLayer 1、中央の紙と高温側の紙の間をLayer 2、中央の紙と低温側の紙の間をLayer 3、低温側の紙と加熱プレートの間をLayer 4として、Layer毎に測定する。紙は相対湿度75%の環境で調湿し、含水率は9.7%である。一箇所のLayerを測定した後は紙を3枚とも交換し、加熱前の紙の状態を一定に保つようにする。

図8が高温側を160℃、低温側を80℃で加熱した場合の、加熱時間と各Layerの抵抗の関係である。

高温側のLayer 1の抵抗が最も高く、Layer 2、Layer 3、Layer 4と低温側に向かうに従い抵抗が低くなるのが分かる。また、すべてのLayerで時間と共に抵抗が増加している。

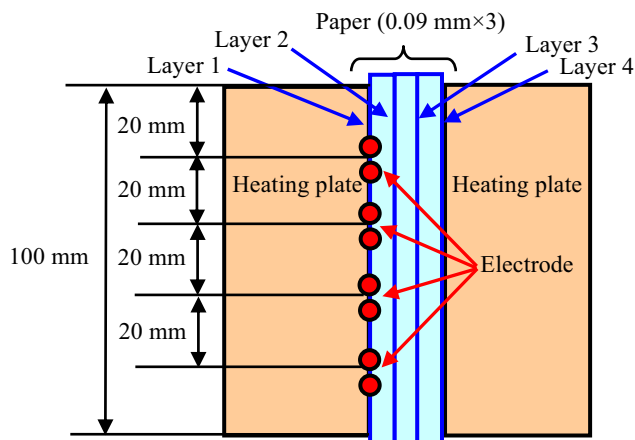


Fig. 7 Schematic of paper resistance measuring layers

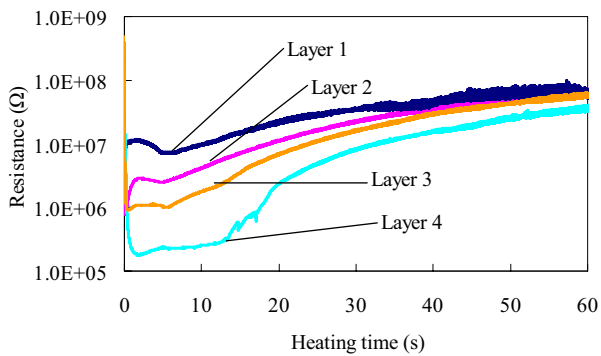


Fig. 8 Paper resistance transition at each layer

#### 4・3 含水率の換算

図8の結果から図6の校正曲線を用いて含水率を求めるが、その際にいくつかの補正を行う必要がある。

以下、各補正の目的と方法について述べる。

##### (1) 電極接触面積を考慮した抵抗の補正

抵抗測定時、Layer 2とLayer 3は電極の両側が紙になるが、Layer 1とLayer 4の電極は一方がゴムとなり、紙との接触面積は1/2になる。校正曲線を求める実験では、電極の両側が紙でありLayer 2とLayer 3に相当する。よってLayer 1とLayer 4の場合は接触面積が1/2になっている分、抵抗は2倍になるため、測定された抵抗を1/2にして含水

率の算出を行う。

##### (2) 電流の回り込みを考慮した抵抗の補正

温度差加熱の場合、紙の厚さ方向の含水率は前述の計算や先の検討<sup>3)</sup>結果から、高温側が0~数%、低温側が20~30%程度になると予想される。図8から概算して、抵抗は厚さ方向に $2.0 \times 10^8 \Omega$ から $1.0 \times 10^5 \Omega$ の分布を持つことになる。電流は抵抗が低い部位を流れるため、通常は電極間の最短距離のLayerを流れる。しかし、低温側の抵抗が高温側に比べ数桁低くなるため、高温側に電極があっても低温側に電流が回り込み、測定対象のLayerの抵抗を反映しない。そこで、等価回路を用いて電流の回り込みを考慮し、概算ではあるが各層の抵抗の補正係数を求める。

図9はその等価回路を示す。Layer 1の電極間抵抗をR0として、それぞれのLayerの電極間の抵抗と紙厚方向の抵抗を10個設定する。Layer 1の電極間の抵抗R0を $2.0 \times 10^8 \Omega$ と仮定し、Layer 2、Layer 3、Layer 4の電極間抵抗R21、R22、R23をそれぞれ $1.0 \times 10^7 \Omega$ 、 $1.0 \times 10^6 \Omega$ 、 $1.0 \times 10^5 \Omega$ と仮定した。紙の厚さ方向の抵抗R11、R12、R13、R31、R32、R33も仮定した値を用いる。そして各Layerの抵抗R0、R21、R22、R23に対する等価回路の抵抗から補正係数を求める。各層の補正係数は、Layer 1とLayer 2で10、Layer 3では6、Layer 4では1であり、計測された抵抗に掛け、その抵抗で含水率を換算する。

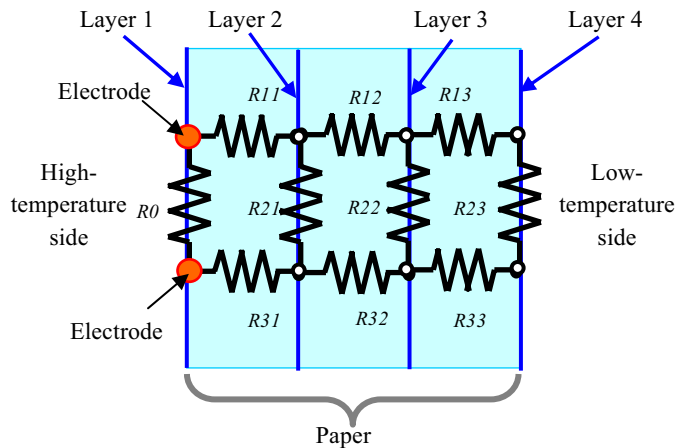


Fig. 9 Electrical model in paper

##### (3) 温度補正

紙の抵抗は温度に対しても変化するため、抵抗から含水率を求めるには、紙の温度分布を知る必要がある。

紙の厚さ方向の温度分布は、各Layerに熱電対を挟んで実測し、その温度に応じた校正曲線を用いて抵抗から含水率を求める。紙の温度が100℃以上の場合、すべて100℃の校正曲線を用いた。

##### (4) 含水率測定結果

以上の補正を行い、抵抗を含水率に換算した結果を図10に示す。横軸が高温側表面を0 mmとした紙の厚さ方向の位置で、縦軸が含水率である。各Layerの位置、0 mm、0.09 mm、0.18 mm、0.27 mmの含水率の変化を加熱時間毎に示している。

高温側から低温側に向かうに従い、含水率が高くなっている。初期の含水率は約10%であるが、加熱時間と共に低温側の含水率が上昇し、1秒で30%以上まで上昇している。また高温側では含水率が10%以下に低下していることが分かる。実験でも、温度差による加熱により紙の厚さ方向に水分が移動し、低温側の含水率が高くなることが明らかになった。

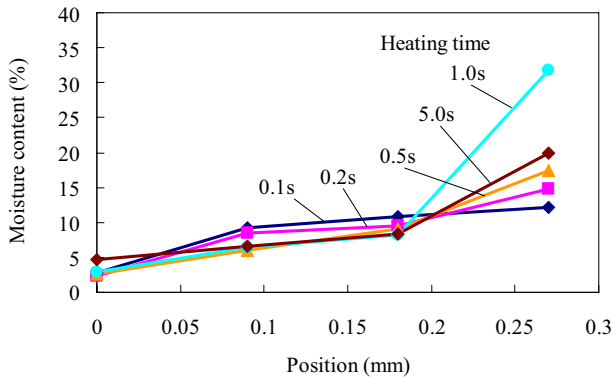


Fig. 10 Moisture content distributions in paper at some heating times (Experiment)

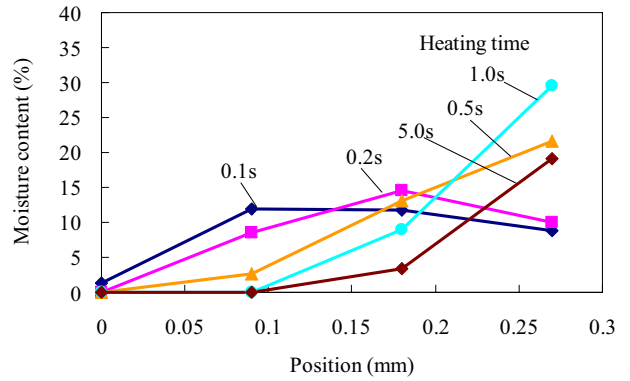


Fig. 11 Moisture content distributions in paper at some heating times for comparison with the experiment (Calculation)

#### 4・4 計算との比較

実験の含水率は電極が接する範囲の平均値とみなせる。そこで実験との比較のため、計算で求められた含水率を、電極が接する範囲で平均化する。

紙の厚さは 0.09 mm であり、電極の直径は 0.1 mm である。電極の全周が紙に接する Layer 2 と Layer 3 では、厚さ方向の接触長さが 0.1 mm であり、Layer 1 と Layer 4 では片側がゴムになるため、電極の直径の 1/2 が紙に接するとして 0.05 mm にする。よって、各 Layer の電極の接触範囲は高温側の表面を 0 として Layer 1 で 0~0.05 mm, Layer 2 で 0.04~0.14 mm, Layer 3 で 0.13~0.23 mm, Layer 4 で 0.22~0.27 mm になる。計算による各 Layer の含水率は、これらの範囲の平均値になる。

図 11 は図 1 で示した計算による含水率分布を上記のように平均化し、各 Layer の位置にプロットした結果である。

加熱時間 1.0 秒では、計算でも実験と同様に低温側の含水率が 30%程度になり、さらに、高温側から低温側への含水率の傾きがよく一致している。また、最も低温側の 0.27 mm では、加熱時間が長くなるに従い、含水率が高くなるのが計算と実験でよく一致している。

一方、計算では加熱時間が 5.0 秒になると蒸発により低温側の含水率が低下している。また、高温側の 0 mm の位置では加熱直後に含水率が 0%になり、5.0 秒では 0.09 mm の位置でも含水率が 0%になる。実験では高温側でも 3%程度までしか含水率が低下していない。解析では要素の温度が 100℃になると、水分はすべて蒸発し含水率は 0%となると仮定している。しかし、実際には紙繊維の毛管の界面張力等の影響により 100℃を超えても紙内の水分が即座に蒸発しないため、含水率が 0%になるまでの時間が長くなっていると考えられる。また、計算において加熱時間 0.1 秒では 0.09 mm, 0.2 秒では 0.18 mm の位置で、初期値の 10%を越える含水率の上昇があるが、実験では明確には現れていない。図 5 を見ると、加熱開始から含水率に応じた抵抗に達するまで 0.3 秒程度かかるため、このような短時間の変化が計測できていなかったと考えられる。

以上のように、解析では加熱中の水分の蒸発モデルについて、実験では加熱時間が短い場合の抵抗測定について課題はあるが、水分移動解析によって計算された温度差加熱時の低温側への水分の移動と、低温側の高い含水率が妥当であることが検証できた。

#### 5. 結論

加熱された紙の厚さ方向の含水率分布を計算する水分移動解析について、実験により紙の電気抵抗を測定し、含水率に換算してその妥当性を検証した。実験では紙を 3 枚重ねて両側から加熱し、加熱プレートと紙間、及び重ねた紙の間に配置した電極間の電気抵抗から含水率を換算した。その結果、低温側の含水率の上昇と高温側の含水率の低下が明らかになり、また、紙の厚さを 0.27 mm として紙の表裏を 160℃と 80℃で加熱した場合に、低温側の含水率が 30%程度まで上昇することが確認できた。この現象は計算でも表せており、水分移動解析の妥当性が検証できた。

#### 文 献

- (1) 伊藤朋之, 細井清, 荻野孝, 用紙搬送経路におけるカール量シミュレーション, 日本画像学会誌, Vol. 51, No. 3 (2012), 248-254.
- (2) Youti Kuo, Suzette Solano, Modeling of Fused Color Copy Curl, Color Hard Copy and Graphic Arts, Vol. 1670 (1992), 172-183.
- (3) 大原俊一, 羽山祐子, 電子写真の定着過程におけるカール解析, 機論, C(2012), 2121-2131.
- (4) 大原俊一, 羽山祐子, 谷川洋文, 鶴田隆治, 紙内の水分移動解析を用いた電子写真の定着過程におけるカール解析, 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集 (2011).
- (5) 河村洋, 土方邦夫, 熱と流れのシミュレーション, 丸善株式会社(1995).
- (6) Chen, P. and Pei, D., A Mathematical Model of Drying Processes, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 32, No. 2 (1989), 297-310.
- (7) Karlsson, M., " Papermaking, Pt. 2: Drying", Fapet Oy (2000), 74.
- (8) 星要之助, 久野広明, 橋本律夫, 岩瀬牧男, 柳謙一, 吉田駿, 紙の乾燥過程における温度分布と水分率分布の同時測定, 機論, B(1997), 289-294.