

---

# 定着過程のカールメカニズムとその予測方法

## A Paper Curl Mechanism and the Curl Prediction Method in the Fusing Process

---

大原 俊一\*      羽山 祐子\*      谷川 洋文\*\*      鶴田 隆治\*\*  
Shunichi OOHARA      Yuko HAYAMA      Hirofumi TANIGAWA      Takaharu TSURUTA

---

### 要 旨

---

電子写真方式のプリンターや複写機では、紙上のトナー画像を熱と圧力で定着させる定着過程で紙がカールすることが知られている。カールは印刷品質の低下につながるため、製品の開発段階で予測し対策を行うことが望ましい。そのためには発生メカニズムを明らかにし、予測手法を得ることが必要である。本研究では、紙表裏の加熱温度差で発生するカールのメカニズムを明らかにするため、平坦なプレートで紙を加熱する実験装置を用いてカールを再現し、紙表面近傍の絶対湿度を計測した。その結果、紙の厚さ方向に水分が移動し低温側の含水率が高まり、加熱後の縮みが高温側より大きくなるため低温側に向かってカールすることが分かった。さらに、毛管内の水分移動と蒸発を考慮した水分移動解析により、加熱時の紙の厚さ方向の含水率分布を計算し、実験で求めた含水率と紙の縮みの関係からバイメタルモデルを用いてカール量の予測を行った。そして、実験と比較し傾向が良く一致することを確認した。

### ABSTRACT

---

Electrophotographic printers and copiers utilize a fusing process to bind toner graphics to a sheet of paper. The fusing process is one of the reasons of the paper curl that lowers the print quality. It is necessary to develop a method to predict the paper curl amount for improving the efficiency of developing products. In this study, a sheet of paper is pressed between two flat-heated plates to investigate the paper curl mechanism and to measure the absolute humidity of the paper surfaces after heating. It is found that a temperature gradient leads to moisture transfer from the high-temperature side to the low-temperature side within the paper. Subsequent evaporation of this moisture gives rise to a higher degree of shrinkage at the low-temperature side, causing the paper to curl toward the low-temperature side. Furthermore, a numerical model that calculates the moisture distribution within the paper is proposed. This model considers the capillary flow of the paper in the thickness direction, as well as evaporation during heating. The curl amounts at various paper thicknesses are predicted by the bi-metal model using the relationship between the moisture distribution within the paper and the shrinkage. The results are found to be in good agreement with the experimental results.

---

\* 研究開発本部 基盤技術研究センター

Core Technology R&D Center, Research and Development Group

\*\* 九州工業大学 大学院工学研究院

Department of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology

## 1. 背景と目的

プリンターや複写機で発生する紙のカールは、印刷品質を低下させるため開発段階で予測し対策を行うことが望ましい。そのためには発生メカニズムを明らかにし、それを反映した予測手法を得ることが必要である。カールを発生させる要因は幾つかあり、その一つである搬送経路での屈曲によるカールについては予測手法が提案されている<sup>1)</sup>。定着過程で発生するカールは、紙の表裏の加熱温度に差が有る場合に低温側に向かって凹状になることが知られている<sup>2)</sup>。しかし、そのメカニズムは十分解明されておらず、定量的な予測手法も得られていない。

本研究の目的は、紙表裏の加熱温度差で発生するカールのメカニズムを明らかにし<sup>3) 4)</sup>、さらに、そのメカニズムを考慮した予測方法<sup>5)</sup>を開発することである。

## 2. カールメカニズムの解明

### 2-1 温度差によるカールの再現

カールのメカニズムを解明するには、要因とカール量の関係を定量的に評価する必要がある。しかし、定着器は紙を一对のローラ（またはベルト）で挟み込み、加熱しながら搬送するため、紙の表裏に接するローラの温度を任意に設定することは難しい。また、カールは紙を挟みこむ部分（ニップ部）の形状や、搬送途中の紙の曲げの影響も受ける。そこで、紙表裏の温度差を任意に設定可能で、また他の要因の影響がないよう、対向する平板で短冊状の紙の表裏を加熱する装置を製作し、温度差によるカールを再現した。

### 2-1-1 カール再現のための実験装置

Fig. 1は温度差によるカールを再現するための実験装置を側面から見た図である。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20mmの短冊状の試験用紙に押し当てる装置である。加熱面は幅30mm、長さ100mmであり、加熱温度は室温から200℃程度まで、荷重は最大400N、最小加熱時間は0.05秒である。加熱プレートは内部に配置されたシーズヒーターで加熱される。温度、加熱時間を任意に設定可能で、温度差のみによりカールを発生させることが出来る。

試験用紙は、JIS-B-7920に記載されている飽和塩法により一定湿度に保たれたデシケーター内で、室温で調湿を行った。特に断りのない限り75%での調湿である。試験用紙は0.24mm、0.09mm厚のPPC (Plain Paper Copier)用紙で、幅方向をMD(Machine Direction)方向、長さ方向をCD(Cross Direction)方向にしている。これは、温度差によるカールがMD方向を軸にCD方向に発生するためである。この原因は、含水率の変化による紙の繊維の伸縮が長さ方向より幅方向に大きく、CD方向が紙の繊維の幅方向にほぼ一致しているためである。

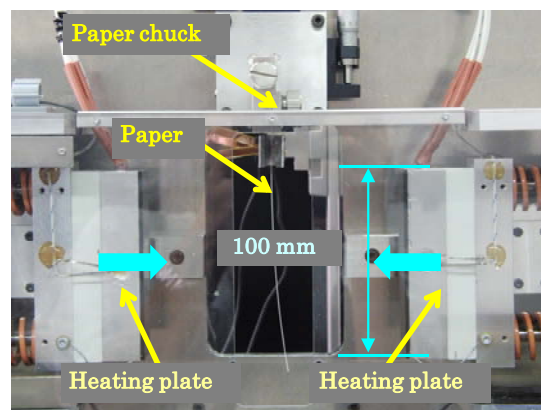


Fig. 1 Side view of experimental apparatus to analyze paper curl.

Fig. 2はカール量の測定装置を上方から見下ろした図である。実験によりカールした短冊状の試験用紙を置

き、レーザー変位計で表面を走査して形状を測定する。カール量はその形状の座標値から曲率に換算した。

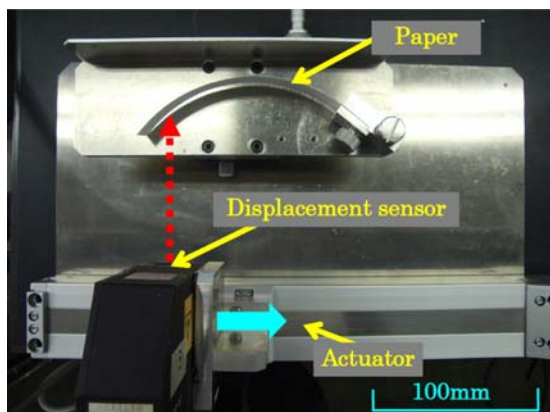


Fig. 2 Top view of experimental apparatus to measure curvature.

### 2-1-2 カール再現実験結果

初めに、紙の表裏が異なる温度で加熱された場合に発生するカールを実験装置で再現した。

Fig. 3は加熱プレートの温度差とカール量の関係を示す図である。一方の加熱プレートの温度を80℃に固定し、他方の温度を変化させた。加熱時間は0.25秒である。横軸のプラス側は変化させる加熱プレートの温度が高くなる方向であり、たとえば温度差が100度の場合、加熱プレートの温度は180℃になる。縦軸のカール量はプラス方向が低温側に向かう（低温側に向かって凹形状の）カールである。紙の厚さは0.09mmで、相対湿度28%と75%で調湿したものをを用いた。

まず、カールはすべて低温側に向かうカールである。調湿環境については、75%で調湿した紙のカールが大きくなっており、紙の含水率が高いほどカールが大きくなると言える。そして、温度差が増加するに従いカールが大きくなる。この装置ではニップ形状の影響を受けないため、カールが純粋に紙表裏の加熱温度差で発生していることが分かる。一方、温度差を増す際は高温側の加熱温度を高めるため、それが水分蒸発量を増して紙の縮みを増加させカールが増しているとも考えられる。しかし、カールは低温側に向かって凹形状であり、温度が一定である低温側の紙の縮みが増加していることになる。この点からも、単なる加熱温度の上

昇ではなく、紙表裏の加熱温度差がカールを増加させる原因となっている。

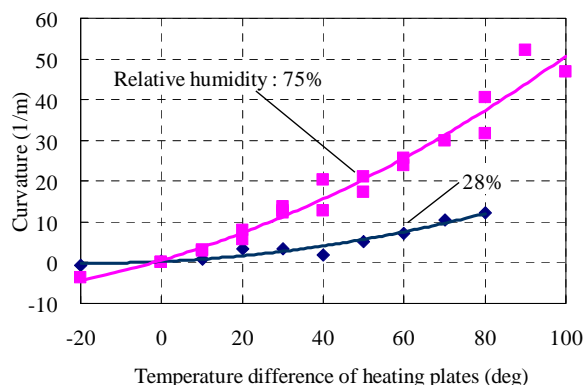


Fig. 3 Relationship between temperature difference of heating plates and curvature for two relative humidity.

Fig. 4は加熱時間とカール量の関係を示す図である。図中の曲線は5個のデータの移動平均である。加熱温度は高温側が160℃、低温側が80℃の温度差加熱である。この温度は電子写真の定着器において、加熱ローラの最高温度と加圧ローラの最低温度に相当する。紙の厚さは0.09mmと0.24mmの2種を使用した。

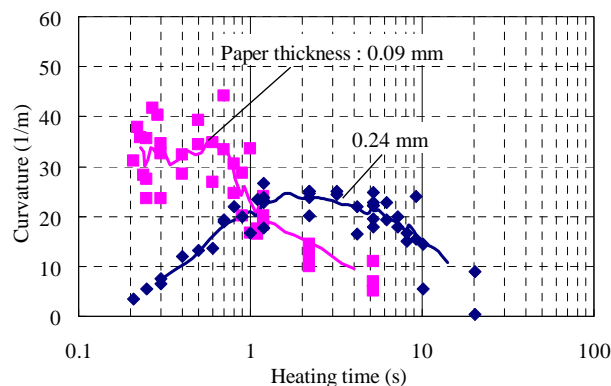


Fig. 4 Relationship between heating time and curvature for two paper thicknesses.

厚さ0.09mmで0.5~0.7秒、0.24mmで1~2秒の加熱時間にピークを持つことが分かる。薄い紙の場合はピークになる加熱時間が短く、ピークのカール量が大きくなる。厚い紙の場合はその逆にピークになる加熱時間が長く、

カール量も小さくなる。温度差によるカールは、紙厚、加熱時間によってもその量に変化する。

## 2-2 紙表面近傍の絶対湿度とカール

定着器におけるカールは、紙からの水分蒸発の影響があることが知られている。そこで、本研究では自社で開発した小型、高サンプリング周波数の湿度センサーを用い、加熱直後の紙表面近傍の絶対湿度を計測することで、温度差によるカールのメカニズム解明を行った。

### 2-2-1 絶対湿度測定のための実験装置

Fig. 5には加熱直後の紙表面近傍の絶対湿度を計測するための機構を示し、Fig. 6には湿度センサーと紙ガイドの拡大図を示す。湿度センサーは3mm角で、樹脂製の紙ガイドに取り付けられ、その検知面は紙に接しないようガイド表面から0.5mm程度奥に設置される。紙ガイドと湿度センサーは、移動可能なアームに紙を挟みこむように配置される。アームは電動アクチュエータに接続されて加熱解除直後に降下し、湿度センサーを加熱直後の紙表面に移動させる。降下位置は加熱プレート上端から30mm下方である。

Fig. 7は実験時の湿度センサーの移動後の状態を示す図である。加熱直後に湿度センサーを降下させた状態である。降下に要する時間は0.3秒である。

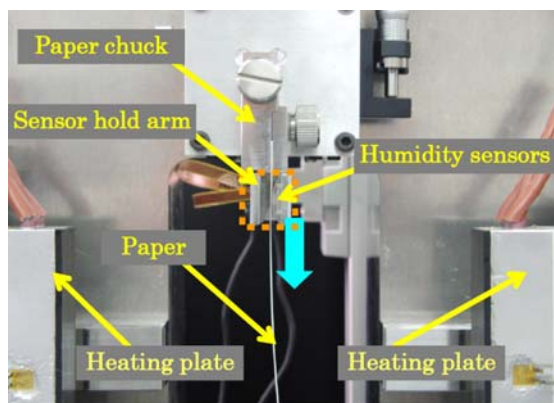


Fig. 5 Experimental apparatus to measure humidity of paper surfaces after heating.

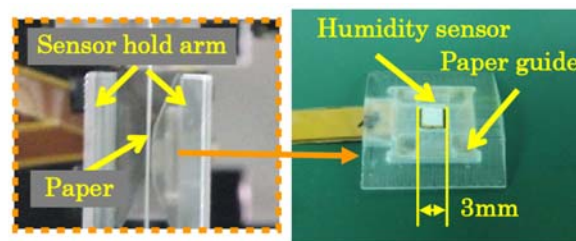


Fig. 6 Enlarged view of humidity sensor and paper guide.

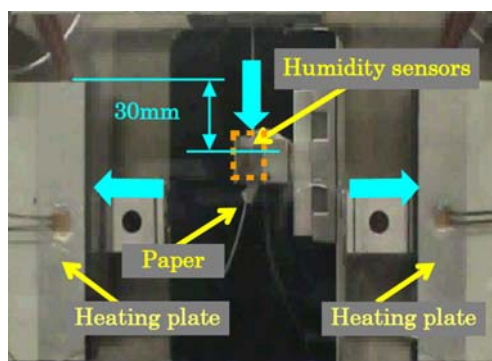


Fig. 7 Position of humidity sensors after heating.

### 2-2-2 絶対湿度測定結果

Fig. 8は紙表面近傍の湿度計測結果の一例である。横軸は加熱プレートの動作開始後の時間であり、縦軸は絶対湿度である。紙の厚さは0.24mmで加熱時間は2秒である。加熱が解除されるのは4.9秒時、アームの降下が5.0～5.2秒の間である。

図中4本の曲線は、実線が160℃と80℃の温度差加熱の場合の高温側と低温側の絶対湿度、点線が160℃の同温加熱時の紙表裏の絶対湿度である。紙表面近傍の絶対湿度は紙表面からの水分蒸発量と相関があり、そのため紙の含水率と相関がある。

湿度センサーが降下する間に、紙内の水分は蒸発により減少するため、計測時の絶対湿度のピークは加熱直後の値を反映していない。しかし、計測時のピークから時間とともに絶対湿度が低下していく曲線の傾きを見れば、絶対湿度が高いほど低下速度が速いことが分かる。よって、計測時のピークが高ければ加熱直後の絶対湿度も高いと言え、計測時の相対的な大小関係は加熱直後の大小関係を表している。



温度差加熱の場合、絶対湿度のピークは低温側が高温側より高くなっている。同温加熱の場合、紙表裏で絶対湿度の差はなく、その最大値は温度差加熱時の低温側より低く高温側よりも高い。温度差加熱の高温側の絶対湿度が同温加熱時より低くなっているのは、含水率が低くなっていることを示している。温度が低い場合、同じ含水率であっても蒸発量が少なくなるため絶対湿度は低くなる。それにも関わらず、温度差加熱時の低温側で同温加熱時より絶対湿度が高くなっているのは、温度が低いことによる蒸発量の減少を上回る水蒸気を発生させる水分があることを示している。加熱中、加熱後とも紙への水分の供給はないので、この水分の増加は高温側からの水分移動によると考えられる。

Fig. 9は加熱時間を変えて紙表面近傍の絶対湿度を測定した結果である。併せてFig. 4のカール量の曲線も示している。この図の絶対湿度は加熱前の環境値（図中5.0秒までの絶対湿度の値）から加熱後のピーク値まで増加した値を示している。曲線は5個のデータの移動平均である。

低温側の絶対湿度は加熱時間が長くなるにつれ増加し、1~2秒でピークを迎えた後、徐々に低下していく。これは、加熱時間に応じて高温側の紙の温度が上昇して水分が蒸発すると共に低温側に移動する水分が増加し、その後は低温側から水分が蒸発して含水率が低下しているためである。一方、高温側の絶対湿度は加熱時間が長くなってもさほど変化はしない。短時間の加熱でも高温側の水分が蒸発し、さらに低温側に移動しているためと考えられる。

低温側の絶対湿度とカールを比較すると、加熱時間に対する変化がよく似ていることが分かる。まず、カール量がピークになる加熱時間は1~2秒であり、低温側の絶対湿度のピークと一致している。低温側の絶対湿度とカール量の相関については、ピーク前後で傾向が異なる。これは、カール量がピークに至るまでは低温側への水分移動が影響し、ピーク後のカール量の減少は紙からの水分蒸発が影響しているためと考えられる。そこで、ピーク前後でデータを分けて相関係数を求めると、ピークになるまでの相関係数は0.82、ピーク以降で0.74であり強い相関がある。紙表面近傍の絶対湿度は含水率と相関が

あるため、絶対湿度が高まる低温側は含水率が高く、含水率が高いほどカール量は大きくなる。そして、加熱時間が長くなり水分が蒸発して含水率が低下するとカール量は小さくなる。また、Fig. 3で75%調湿の紙のカール量が大きいのは、もともとの含水率が高い分、低温側の含水率が高くなり、より多くの水分が蒸発して紙の縮み量が増しているためである。

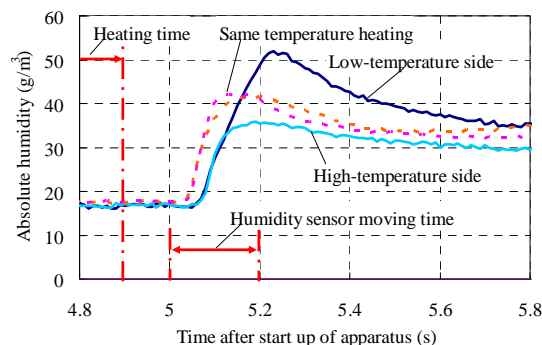


Fig. 8 Absolute humidity on paper surfaces after heating.

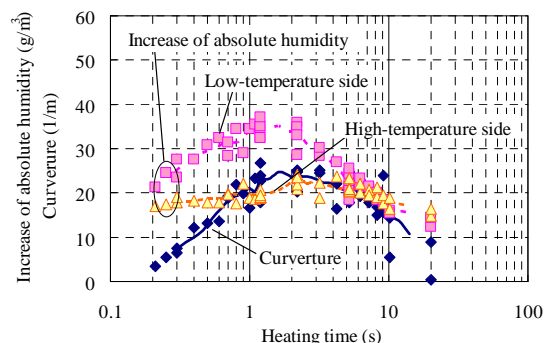


Fig. 9 Relationship between increase of absolute humidity and heating time with trajectory of curvature.

## 2-3 紙の含水率と縮み

カールは紙表裏の収縮差により発生する。温度差加熱によるカールの場合、低温側は紙表面近傍の絶対湿度が高く含水率が高くなっており、高温側は紙表面近傍の絶対湿度が低く含水率が低くなっている。そのため、低温側にカールする現象については、高含水率の紙で加熱後の縮みが大きくなることを示せば説明できる。そこで、含水率を変化させて加熱後の紙の縮み率を測定した。紙

異なる相対湿度のデシケーター内で調湿し、その含水率はKett社製の紙水分計を用いて測定した。縮み率 $R_s$ は加熱後の紙の長さ $L_a$ 、加熱前の紙の長さ $L_i$ 、加熱部の長さ $L_h$ から式(1)より求めた。紙の縮みは加熱部で発生するため加熱部の長さ $L_h$ に対する比としている。

$$R_s = \frac{L_i - L_a}{L_h} \times 100 \quad (1)$$

### 2-3-1 紙の縮み測定のための実験装置

加熱後の紙の縮み測定はFig. 10の構成で行った。Fig. 1の実験装置に、試験用紙の下側を保持するスライドガイドと、そこに取り付けられたターゲットの位置を測定するレーザー変位センサーを設けている。紙の収縮に応じてターゲット位置が変化し、それを計測して紙の長さの変化を求める。ガイド部には紙を撓ませないために、およそ0.3Nの錘を付与している。加熱時間は2秒であり表裏同温で加熱した。

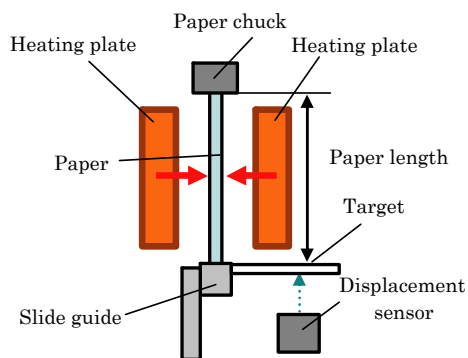


Fig. 10 Experimental apparatus to measure paper shrinkage.

### 2-3-2 紙の縮み測定結果

Fig. 11はその結果の一例で160℃加熱の場合である。横軸は加熱解除後の時間、縦軸は紙の縮み率である。紙は加熱解除後から縮み始め、初期は急速に縮み、徐々に縮み率の増加が緩やかになる。縮み率は含水率が高いほど大きくなっている。含水率が高く水分の蒸発量が多い側がより縮むため、温度差加熱の場合に低温側へ向かうカールが発生することが説明できる。

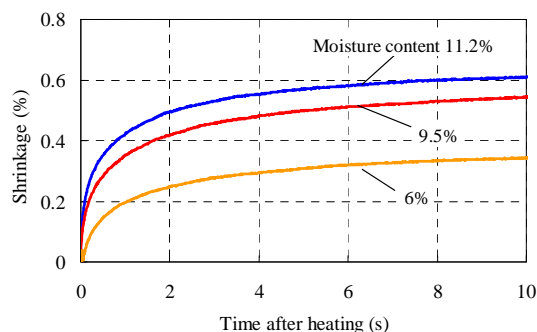


Fig. 11 Paper shrinkage with time after heating for three initial moisture contents

Fig. 12はそれぞれの加熱温度における、紙の初期含水率に対する紙の縮み率を示す図である。実験の観察からカールの成長は加熱解除後およそ2秒で止まると判断し、加熱解除後2秒時点の縮み率を用いた。加熱温度が高くなるほど、そして含水率が高くなるほど紙の縮みが大きくなる。カールが紙からの水分蒸発量に比例するとの知見があり<sup>2)</sup>、このような加熱温度と含水率による紙の縮みの変化は、紙からの水分の蒸発量でまとめることも出来ると考えられる。

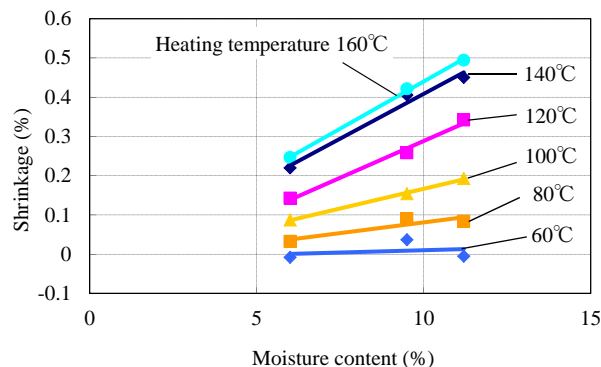


Fig. 12 Relationship between paper shrinkage and moisture content at different heating temperatures.

## 2-4 カールメカニズム

以上の検討から明らかになったカールの発生メカニズムについてFig. 13を用いて説明する。

まず、ステップ1で紙が加圧加熱されると、高温側の水分が低温側に移動する。その結果ステップ2で低温側の水分が増加する。ステップ3で加熱解除後、紙から水分が蒸発し、ステップ4では水分が多い、すなわち蒸発量が多い側がより縮むため低温側が高温側より縮む。その結果ステップ5で低温側にカールする。

## 2-5 加熱時の紙の応力緩和

紙表面近傍の絶対湿度の計測により、高温側から低温側に紙内で水分が移動することがカールの原因であることが明らかになった。しかし、この水分移動による紙の伸縮を考えると、加熱中は高温側では水分が減少するため縮み、また低温側は水分が増加するため伸びると考えられる。

この伸縮は高温側に向かうカールを発生させるため、低温側に向かうカールを発生させる加熱後の縮みと打ち消し合い、カールが発生しないのではないかとの疑問がある。この疑問に対しては、紙の応力緩和によって説明できる。紙は加熱により応力緩和することが知られている<sup>6)</sup>。ただし、時間スケールについては定量的に計測されてはおらず、定着過程のような短時間でどの程度応力緩和するか明らかになっていない。そこで、Fig. 1の実験装置に紙の応力緩和を測定できる機構を追加して計測を行った。

### 2-5-1 紙の応力緩和測定のための実験装置

Fig. 14は紙の応力緩和測定のための実験装置の構成である。紙の下端は装置に固定し、上端の紙固定部はロードセルに取り付けられている。ロードセルには電動アクチュエータが接続され、ロードセルを引き上げることで紙に引張り荷重を与える。

実験では、加熱プレートが紙に接触する直前にロードセルを引き上げて紙に引張り荷重を与え、その後加熱プレートの加熱による荷重の変化を測定した。

### 2-5-2 紙の応力緩和測定結果

Fig. 15が測定結果の一例である。横軸は加熱プレート動作開始後の時間、縦軸はロードセルの計測した引張り荷重である。点線は加熱プレートの紙を加圧する荷重であり、1/10の値にして表示してある。紙の厚さは0.24mm、加熱温度は160℃で与えたひずみは0.5%である。加熱時間は5.35秒から5.85秒の0.5秒間である。

加熱開始後、紙に与えているひずみは変化させていないが、荷重が低下し急激な応力緩和が起きていることがわかる。

応力緩和率は加熱開始時の荷重を  $W_0$ 、加熱終了時の荷重を  $W$  として式(2)より求めた。

$$S_r = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

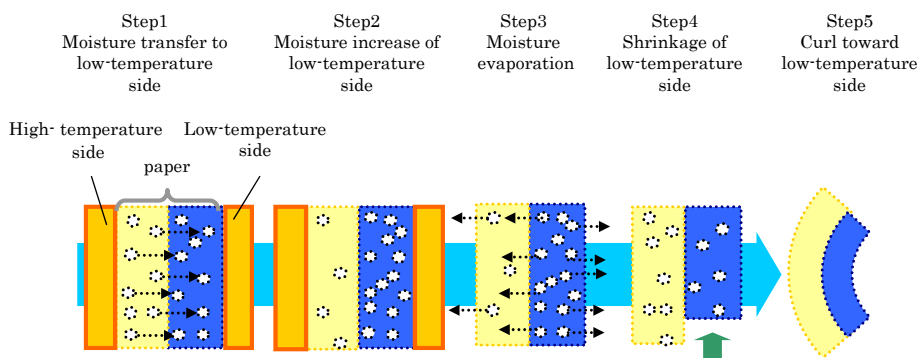


Fig. 13 Paper curl mechanism.

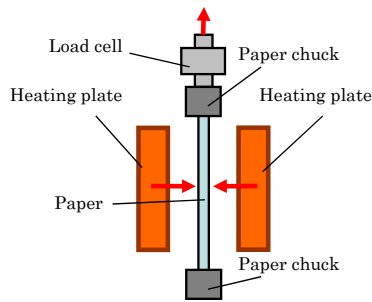


Fig. 14 Experimental apparatus to measure stress relaxation of heated paper.

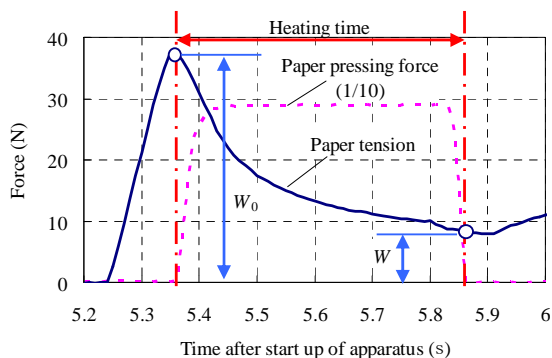


Fig. 15 Paper tension transition during heating.

Fig. 16は加熱温度と応力緩和率の関係を示す図である。紙厚は0.24mmである。

加熱温度の上昇と共に応力緩和率が高まり、また、加熱時間が長くなると応力緩和率が最大になる加熱温度が低くなる。これは、紙の内部まで十分加熱されると応力緩和率が最大になるためと考えられる。

加熱時間が長く、温度が高い場合には応力緩和率が低下するが、これは加熱中に水分蒸発による紙の収縮が始まり、それによる紙の引張り力が発生しているためである。

Fig. 17は紙厚と応力緩和率の最大値の関係を示す図である。紙厚0.48mmは0.24mmの紙を2枚重ね、0.72mmは3枚重ねたものである。

紙が厚くなるにつれて応力緩和率が上昇しているが、この原因は加熱プレートによる紙表面の拘束の影響と考えられる。紙の表面の変形は加熱プレートで拘束されているため、表面層では応力緩和による力の変化が伝わりにくく、見かけ上応力緩和率が少なくなっていると考えられる。そのため、紙厚が薄い場合は表面層

の影響が大きく応力緩和率が低く、厚いほど影響が少ないため応力緩和率が高くなる。実際の紙の応力緩和率は、紙の表面層の影響を除いたものであり、それは、紙の厚さを無限大にした値に相当する。つまり、加熱時の紙はこの図から見積もって90%程度の応力緩和率がある。

Fig. 16で応力緩和率が最大になる0.5秒120°C加熱の場合、紙内の厚さ方向の平均温度は一次元非定常伝熱計算で98°Cであり、100°C程度が応力緩和を最大にする温度の目安と考えられる。カール実験の160°Cと80°Cの温度差加熱の場合、紙厚0.24mmの2秒加熱では紙の温度が110°C、紙厚0.09mmの0.1秒加熱では紙の温度が102°Cになり、十分応力緩和しているとみなせる。

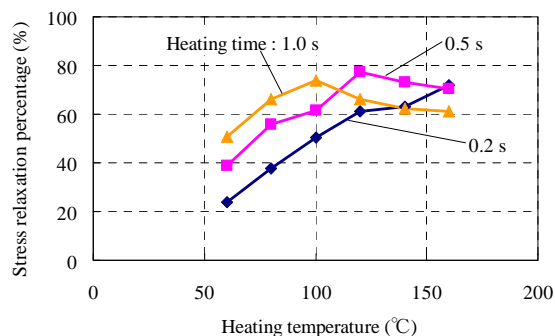


Fig. 16 Relationship between stress relaxation percentage and heating temperature for different heating time.

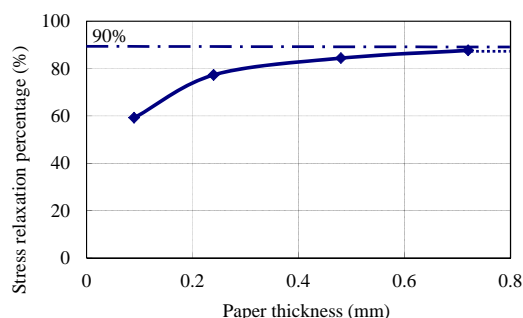


Fig. 17 Relationship between maximum stress relaxation percentage and paper thickness.

紙内の水分移動により、高温側では水分の減少により紙を収縮させようとする圧縮応力が、低温側では水



分の増加により伸びを発生させようとする引張り応力が発生する。しかし、紙内の温度上昇とともにこれらの応力はほとんど消失してしまい、結果として加熱後の紙の縮みのみがカールに寄与する。

### 3. カール予測

温度差によるカールは紙内の水分移動により発生する。そこで、紙内の水分移動を計算する解析方法を作成し、それを用いて紙内の含水率分布を計算した。そして、実験で求めた含水率と加熱後の紙の収縮率の関係から、カール量の予測を行った。

#### 3-1 水分移動解析

紙内の水分移動解析は、製紙機械の紙の乾燥行程の解析で行われている<sup>7)</sup>。電子写真の定着プロセスでも、紙内の空隙中の水蒸気移動として扱った解析が成されているが、カールとの関連付けが可能になるほどの含水率の偏りは現せていない<sup>8)</sup>。

本研究では紙を様な多孔質構造体とし、そこを液体としての水が移動すると仮定したモデルを作成した。この水分移動解析は紙厚方向をxとした一次元のモデルであり、コントロールボリューム法を用いて計算を行う。式(3)の連続の式、式(4)のエネルギー式を基本としている。液体としての水の流動は式(5)で表現し、相対透過率を用いたDarcy則（第一項）に毛管力項（第二項）を加えている。式(3)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、100℃以上になったコントロールボリュームで水分が気化し潜熱を奪い、含水率が0になると仮定している。Fig. 9から明らかなように、加熱時間が長くなるとカールが低下するがこれは紙の水分が蒸発するためと考えられ、この現象を表すための仮定である。

$$\rho_l \varepsilon \frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial F_l}{\partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (c_{pT} \rho_l T) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_T \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial (c_{pl} F_l T)}{\partial x} - L \cdot \rho_l \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial S}{\partial t} \quad (4)$$

$$F_l = -\rho_l \left[ \frac{KK_{rl}}{\mu_l} \left( \frac{\partial p_l}{\partial x} \right) \right] - \rho_l \left[ D \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right) \right] \quad (5)$$

$S$  : 含水率

$p_l$  : 温度Tにおける飽和蒸気圧[Pa]

$T$  : 温度[℃]

$t$  : 時間[s]

$\varepsilon$  : 空隙率

$K$  : 透過率[m<sup>2</sup>]

$K_{rl}$  : 相対透過率（水）

$D$  : 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>]

$c_{pT}$  : 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)]

$L$  : 気化潜熱[J/kg]

Fig. 18に水分移動解析の計算例を示す。紙の厚さは0.24mm、初期含水率は10%、160℃と80℃の温度差加熱である。縦軸は含水率で、横軸は高温側の紙表面を0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つれ含水率のピークが左から右、高温側から低温側に移動し、紙の厚さ方向に水分が移動していることが分かる。この駆動力は高温側の温度上昇によって発生する高温側と低温側の飽和水蒸気圧の勾配によって発生すると仮定している。紙の初期含水率は10%であるが、低温側では高温側からの水分移動により含水率が10%以上に高まる。実験で確認された含水率の高温側の低下と低温側の上昇が計算でも表せている。加熱時間が長くなると含水率が0になる範囲が高温側から低温側に広がっていくが、これは紙の温度が上昇して100℃に達し、仮定に応じて含水率を0にしているためである。

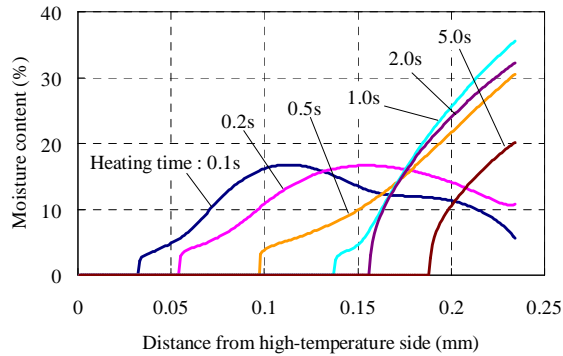


Fig. 18 Moisture content distribution within paper for different heating times.

### 3-2 バイメタルモデルによるカール量計算

カール予測では紙をバイメタルモデル<sup>9)</sup>に当てはめてカール量を計算する。

Fig. 19にバイメタルモデルを示す。紙を厚さ方向に2分割し、表裏の縮み差からカール量 $R$ を求める。高温側の縮みを $S_h$ 、低温側の縮みを $S_l$ とし、加熱された部分の紙の長さを $L_h$ とすると、紙を曲げるひずみ差 $\varepsilon_p$ は次の式(6)で表せる。

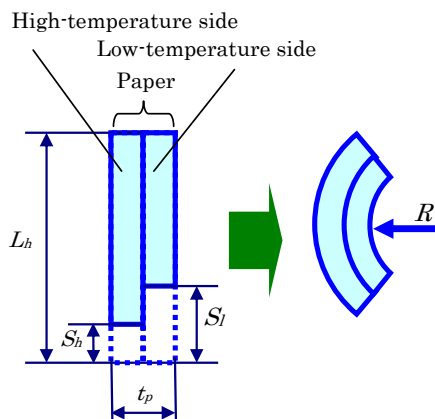


Fig. 19 Bi-metal model

$$\varepsilon_p = \frac{S_l - S_h}{L_h} \quad (6)$$

紙の厚さを $t_p$ とし表裏のヤング率が等しいとすると、カール量 $R$ は式(7)で表せる。

$$R = \frac{3\varepsilon_p}{2t_p} \quad (7)$$

それぞれの縮みを求めるため、まず水分移動解析で高温側と低温側の含水率を求める。

Fig. 20は横軸を加熱時間として、0.09mmから0.24mmまで4種類の厚さの紙で高温側と低温側の含水率を計算した結果である。高温側と低温側ともにそれぞれの層の厚さ方向の平均値である。高温側が点線、低温側が実線である。

加熱時間が長くなるにつれ、低温側の含水率が高まり、高温側の含水率が減少する。また紙が厚くなるにつれ、低温側の含水率がピークになる加熱時間が長くなる。

次に、水分移動の計算過程で求められるそれぞれの側の平均温度から、Fig. 14で得た紙の含水率と温度から縮みを求める近似式により、高温側の縮み $S_h$ 、低温側の縮み $S_l$ を求めカール量を計算した。

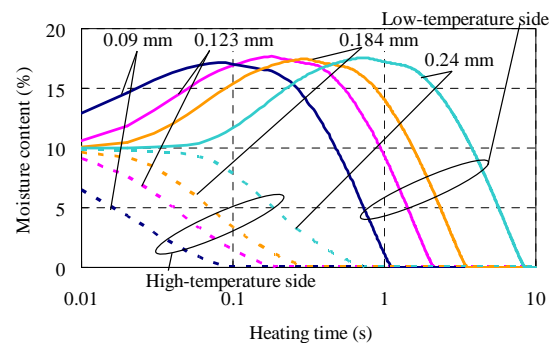


Fig. 20 Relationship between heating time and moisture content for different paper thicknesses.

Fig. 21は加熱時間とカール量の関係を示している。実線が計算、プロット点が実験値である。加熱条件は高温側160℃、低温側80℃である。実験に用いた紙の含水率は約10%である。

実験による加熱時間とカール量の関係は、0.09mmから0.123mm、0.184mm、0.24mmと紙厚が増すに従いカール量のピーク値は低下し、また、ピークになる加熱時間は長くなる。この傾向は、計算でもよく現れて

おり、各紙厚でのピーク時のカール量もほぼ一致している。ピークになる加熱時間は、0.184mm, 0.24mmの厚い紙でよく一致している。紙厚が薄くなるにつれ実験と差が出てくるが、本研究のカール解手法が妥当であることが検証できた。

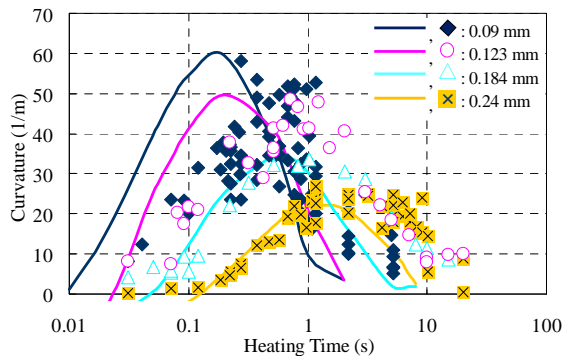


Fig. 21 Relationship between curvature and heating time for different paper thicknesses.

## 4. 成果と今後の展開

電子写真の定着プロセスで紙の表裏が異なる温度で加熱された場合のカールについてそのメカニズムを検討した。そして、低温側に向かって凹状となるカールは、加熱時の温度差により紙内の水分が高温側から低温側に移動して低温側の含水率が高まり、加熱後の縮み率が低温側で高くなり発生することを明らかにした。さらに、毛管内の水分移動と蒸発を考慮した水分移動解析により、紙の厚さ方向の含水率分布を計算し、それを用いてカール量の予測を行った。その結果、加熱時間とカール量の関係が実験とよく一致することを確認した。

今後は、薄い紙でのカール量の予測精度を向上させ、そして、よりカールを少なくするための装置構成最適化へ本研究の予測手法の適用を目指す。

## 参考文献

- 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, *Imaging Conference JAPAN 2011 論文集*, pp.249-252, 日本画像学会 (2011).
- 2) 野々村文就, 阿部祐二, 竹内伸夫: 複写機内の紙のヒートカール挙動に関する研究(1), *紙パルプ技術協会誌*, Vol.52, No.4, pp.87-94 (1998).
- 3) 羽山祐子, 大原俊一: 電子写真の定着過程における紙のカール現象の研究, *日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集*(2011).
- 4) 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, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.78, No.790, pp.2121-2131 (2012).
- 5) 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).
- 6) C. Green: Residual strain, [www.PaperCurl.com](http://www.PaperCurl.com) (accessed 2008-07-17).
- 7) 川水努ほか: 紙の蒸気加熱過程における凝縮熱伝達特性に関する解析的研究, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.73, No.727, pp.175-182 (2007).
- 8) A. Bandyopadhyay, B. V. Ramarao: Transient response of a paper sheet subjected to a traveling thermal pulse: Evolution of temperature, moisture and pressure fields, *J. Imaging Sci. Tech.*, Vol.45, No.6, pp.1-14 (2001).
- 9) 中原一郎: 材料力学, 上巻, p.152, 養賢堂(1965).