

# ゼログラフィーにおける用紙カールのシミュレーション技術

## Simulation technology of paper curl in an electro-photographic printer

### 要 旨

近年、富士ゼロックスは開発プロセス改革のためのゼログラフィー・シミュレーション技術と、計測・分析・解析技術の構築を進めている。しかし、用紙変形については、現象のメカニズムが十分把握されておらず、メカニズムの解明とシミュレーション技術の構築が望まれていた。そこで、用紙変形の重要課題であるカール現象のメカニズム解明のため、用紙物性の計測および解析手法を確立すると共に、その結果から用紙変形の物理モデルを導き、2つのカール量予測技術を構築した。1つは用紙搬送経路におけるカール量シミュレーションであり、搬送経路における用紙の温度・含水率の変化と曲げ曲率の時間履歴から用紙の収縮と搬送経路形状の影響を見積もって、カール量を予測する。もう1つは、デカーラによるカール矯正量予測シミュレーションであり、構造解析をベースとして、粘弾塑性による用紙変形を見積もる技術である。これらの技術を適用することで、カール発生リスクを事前予測して作業工数の増加を抑制すると共に、パラメーター設計の工数を80%削減することができた。

### Abstract

Fuji Xerox has made recent advances in its xerographic simulation technology and measurement / analysis technologies to help innovate the development process. In the domain of paper deformation, however, the mechanism is not sufficiently understood. Thus, there are hopes for clarifying the mechanism and establishing simulation technology. To clarify the mechanism of paper curl—an important issue in paper deformation—we established a method of measuring and analyzing the physical properties of paper. We also established two technologies to predict paper curl. One involves simulating paper curl to predict the amount of paper curl by estimating effects of the shape of the paper path. The other simulation technology predicts paper curl from the decurling capability based on structural analysis. By predicting the risk of paper curl with these technologies, labor hours have been drastically reduced.

#### 執筆者

荻野 孝 (Takashi Ogino)  
伊藤 朋之 (Tomoyuki Ito)  
高橋 良輔 (Ryosuke Takahashi)  
細井 清 (Kiyoshi Hosoi)

研究技術開発本部 基盤技術研究所  
(Key Technology Laboratory)

## 1. 緒言

今日まで富士ゼロックスでは、富士ゼロックスデジタルワークウエイ<sup>1)</sup>を実現するための主要施策のひとつとして、設計根拠を開発の早い段階で明確にすることで手戻りをなくすフロントローディング開発を実践しており、それを支えるゼログラフィーシミュレーション技術、および計測・分析・解析技術を構築してきている。一方、富士ゼロックスが本格参入を目指す印刷市場では、用紙変形に起因する諸問題(カール、波打ち等)の重要度が高く、お客様の問題意識も高い。しかし、用紙変形現象のメカニズムは十分解明されたとは言えず、フロントローディング開発の課題となっていた。特に用紙カールは重要な品質問題であるにもかかわらず、精度の高い予測ができなかった。そのため、低中速機における開発プロセスの手戻りと、高速機における開発工数過多というふたつの課題が発生していた。前者は用紙搬送中の形状がカール量に影響するために発生する課題である。最終的なカール量は用紙搬送経路全体の影響を受けるため、試作・組立てが完了して通紙を試みるまで、実際にどの程度のカールが発生するかわからなかった。そのため、開発プロセスの後期でカールが重要な問題になると、全体レイアウトから再検討を強いられることとなり、開発期間・コストに大きなインパクトとなっていた。後者は、高速機でカール抑制策の1つとして設置されるデカーラ装置のパラメータ設計の課題である。一般にデカーラは曲率の大きな剛体ローラーと、対向部材である弾性部材で構成され、それらに用紙を挟みながら通過させることで、強制的に曲げ変形させてカールを矯正する機構になっている。デカーラにおけるカール矯正量は、ローラーの曲率や押し込み荷重等のパラメータによって変わるため、用紙種や矯正すべきカール量に応じて、パラメータを最適化する必要があり、実験的にパラメータを決定する際には膨大な設計工数を要していた。

これらの課題を解決するために、カールの物理的なメカニズムを解明するとともに、カール量を精度よく予測するシミュレーション技術の構築が望まれていた。

## 2. ゼログラフィーにおける用紙カール発生要因と活動の狙い

用紙のカールに関しては、従来から幾つかの研究がなされているが、その多くは、表裏の伸縮率差によって生じるカールを扱ったものであった<sup>2) 3) 4)</sup>。また、用紙の特性については過去に様々な分析がなされており<sup>5)</sup>、用紙が粘弾性的挙動を示すことが知られている。粘弾性を考慮した用紙カールの解析としては、Luらが一般化 Maxwell モデルで粘弾性を表し、有限要素法を用いて用紙のカールを計算している<sup>6)</sup>。しかし、複写機・プリンターで発生するカールのメカニズムは更に複雑であり、シミュレーションによって高精度にカール量を予測する技術は存在していなかった。そこで我々は、用紙カールのメカニズムを以下のように分類して、それぞれに最適な解析・計測技術を構築した。

- (I) 表裏伸縮率差カール：用紙は脱湿時に面内方向に収縮する特性を持っている。この収縮の度合いが表裏で異なることによって生じるカールである。
- (II) 定着後カール：用紙が定着器を通過するときには、熱と変形の大きなエネルギーを受ける。そのストレスによって発生するカールである。
- (III) 搬送経路カール：定着後の用紙搬送経路の形状に起因するカールである。用紙が脱湿するときには、用紙内で新たな繊維間結合が発生して硬化する。用紙が搬送経路で曲げられた状態でこの硬化が起こることで、新たに発生した結合が変形した状態を記憶することで生じるカールである。
- (IV) 大変形カール：デカーラ装置内で大きな曲率で曲げられることによって、用紙が永久変形することで生じるカールである。既に発生しているカールとは逆向きにカールさせることでカールを矯正する。

これらのメカニズムと発生位置との対応を概念的に表したものを図1に示す。

(II)の定着後カールに関しては、用紙搬送経路の設計に先だって実験を行い、事前に測ることが可能である。そこで本研究では、用紙の定着後カール量を入力とした2つのカール量予測

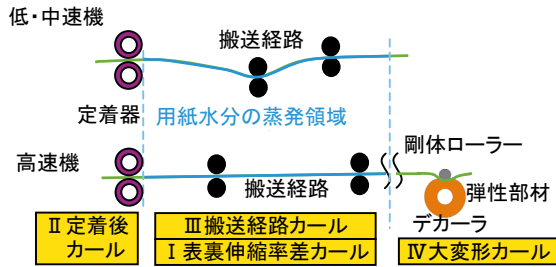


図1. ゼログラフィーにおける用紙カールの発生原因  
Mechanisms of paper curl in an electrophotographic printer

技術を構築することを狙いとした。1 つは搬送経路における用紙の温度・含水率の変化と曲げ曲率の時間履歴から (I) 表裏伸縮率差カールと (III) 搬送経路カールを見積もって、最終的なカール量を予測する「用紙搬送経路におけるカール量シミュレーション技術」。もう 1 つは (IV) の大変形カールの発現メカニズムを解明し、構造解析をベースとしてデカーラのパラメータとカール矯正量の関係を予測する「カール矯正量予測シミュレーション技術」である。

### 3. 用紙搬送経路におけるカール量シミュレーション

#### 3.1 搬送経路カールのモデル化

##### 3.1.1 用紙物性の同定

予測モデル構築の初期検討として、適切なモデルの選定と、多様な紙種に対する機械特性の簡便な測定を目的とした、用紙の粘弾性の測定方法を検討した。粘弾性体に動的な歪みを加えると、弾性的な特性によって歪みに比例した応力が発生し、粘性的な特性によって歪み速度に比例した応力が発生する。粘弾性の測定にはこの性質を利用して、対象物に周期的な変形を加えて歪みと応力の位相関係を測る DMA (Dynamic Mechanical Analyzer) を利用することが多い。しかし、特に高温条件下では用紙の強度が低く、振動によって試験片が破断す

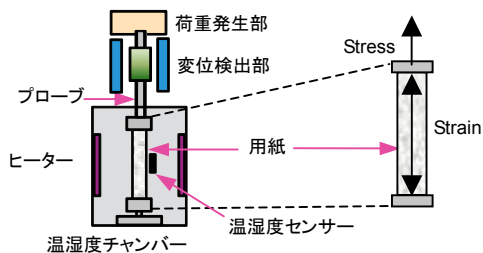


図2. 熱機械分析  
Thermo-Mechanical Analyzer

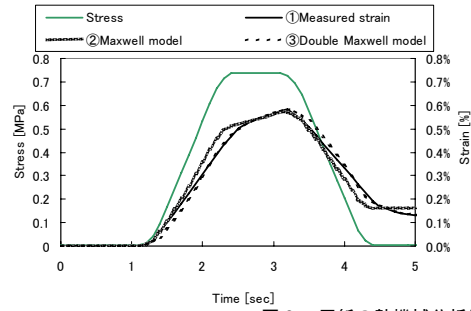


図3. 用紙の熱機械分析結果  
Results of thermo-mechanical analysis of paper

るなどの問題が発生しやすい。そこで、図2に示した温湿度を制御しながら応力-歪み関係を測定できる TMA (Thermo-Mechanical Analyzer) を利用して、粘弾性を測定した。

用紙に図3の緑実線に示した応力の時間変化を与えて歪みを測定すると、図3 ①Measured strain のように波形の鈍りと残留歪みを伴う挙動が見られる。この応力に対する歪みの時間履歴を再現するように粘弾性モデルを決定した。粘弾性を簡易に表すモデルとしては、弾性要素と粘性要素を直列に接続した Maxwell モデルが知られている (図4 (a))。しかし、図3 ②Maxwell model に示すように、単一の Maxwell モデルでは、単一の緩和時定数しか持たないため現実の挙動を良好に再現できない場合が多く、対応として時定数の周波数依存性を複数の Maxwell モデルを並列に接続して表した一般化 Maxwell が用いられる。いくつかの紙種で TMA を用いた同じ測定を行って検討したところ、用紙の機械特性は長短2つの時定数で表せることがわかった。そこで用紙を下式 (1) から (3) で表せる 2 並列 Maxwell モデル (図4 (b)) で表したところ、図3 ③Double Maxwell model のように応力-歪み関係を良好に再現できることがわかった。

$$\sigma_h + \frac{\mu_h}{E_h} \frac{d\sigma_h}{dt} = \mu_h \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

$$\sigma_s + \frac{\mu_s}{E_s} \frac{d\sigma_s}{dt} = \mu_s \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma_h + \sigma_s \quad (3)$$

ここで  $\sigma$  と  $\varepsilon$  は応力と歪み、 $\mu$  と  $E$  は粘性係数と弾性係数であり、添字  $h$  と  $s$  はそれぞれ時定数が長い結合と短い結合を表す。

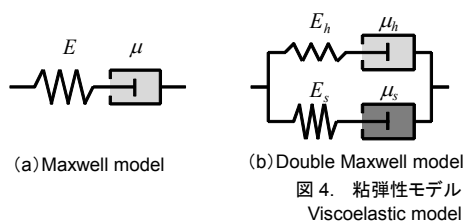


図 4. 粘弾性モデル  
Viscoelastic model

式 (1) と式 (2) からわかるように、2 並列 Maxwell モデルは 2 つの弾性係数と 2 つの粘性係数で記述できる。温度と湿度を管理しながら TMA による応力-歪み関係の測定を行ったところ、各係数とも温度と含水率の増加に伴って収束する指数関数を用いて表せることがわかった。例として式 (1) の  $\mu_h$  の温度  $T$  と含水率  $W$  に対する依存性を次式に示す。

$$\mu_h(T, W) = \mu_{h0} \exp\left[-\frac{T}{T_{\mu h}}\right] \exp\left[-\frac{W}{W_{\mu h}}\right] \quad (4)$$

ここで、 $\mu_{h0}$  は  $\mu_h$  の基準値であり、 $T=0$ 、 $W=0$  のときの値に相当する。また、 $T_{\mu h}$  と  $W_{\mu h}$  はそれぞれ  $\mu_h$  の温度と含水率に対する依存性の強さを表す係数である。

次に、表裏伸縮率差によるカール量の決定について述べる。湿度を制御したチャンバー内で、脱湿量とカール曲率の関係を測定した。本測定装置は図 5 に示したように、重力に対して垂直方向に試験片を配置して、湿度を変えながら先端変位を測定できるように設計されており、複数の試験片を同時に測定することが可能である。

測定の結果、含水率の増分とカール曲率の増分が、線形な関係にあることを確認した。そこで、以下のように定義される伸縮率カール係数  $C_e$  を紙種ごとに決定した。

$$C_e = \frac{d\gamma}{dW} \quad (5)$$

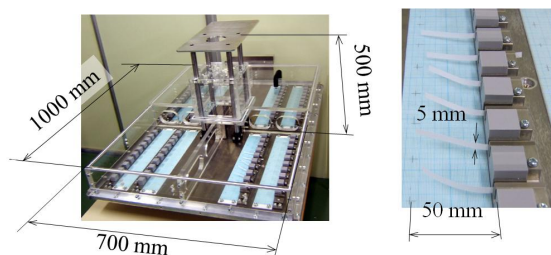


図 5. 伸縮率カール係数計測装置  
Shrinkage curl measurement apparatus

### 3.1.2 解析モデル

搬送経路で生じる用紙カール曲率を予測するためには、定着器によって発生するカール量を初期条件として、搬送経路における用紙内部応力の蓄積と緩和を時々刻々追跡する必要がある。またこのとき、脱湿による表裏伸縮率差で生じる内部応力も加味しなければならない。

用紙が曲げを受けるとき、歪みは厚さ方向に線形であると近似できる。粘弾性も厚さ方向に大きな変化が無いとすると、応力も厚さ方向に線形となる。この仮定の下に、式 (1) から式 (3) を厚さ方向に微分すると次式が得られる。

$$\sigma'_h(t) + \frac{\mu_h}{E_h} \frac{d\sigma'_h(t)}{dt} = \mu_h \frac{d\gamma(t)}{dt} \quad (6)$$

$$\sigma'_s(t) + \frac{\mu_s}{E_s} \frac{d\sigma'_s(t)}{dt} = \mu_s \frac{d\gamma(t)}{dt} \quad (7)$$

$$\sigma'(t) = \sigma'_h(t) + \sigma'_s(t) \quad (8)$$

ここで  $\sigma'$  は引っ張り応力の厚さ方向の勾配であり、 $\sigma'$  に用紙の断面二次モーメントを乗じたものが曲げモーメントとなる。 $\gamma$  は用紙の曲げ曲率である。式をこの形に置き換えることで、与えられた曲げの履歴に対して、応力の厚さ方向勾配の時間変化を求めることができる。

用紙のカール曲率は面内にほぼ一様であるとして、搬送中の曲率を  $\gamma(t)$  とする。時刻を時間刻み  $\Delta t$  で離散化して  $n$  ステップ目の時刻を  $t = n\Delta t$  で表し、その時刻における変数を肩字  $n$  で表す。すると式 (6) と式 (7) を時間ステップに渡って積分することで、 $n+1$  ステップ目における応力勾配の値を次式のように離散化できる。

$$\sigma_h'^{n+1} = A_h \sigma_h'^n + B_h \Delta\gamma \quad (9)$$

$$\sigma_s'^{n+1} = A_s \sigma_s'^n + B_s \Delta\gamma \quad (10)$$

$$\sigma^{n+1} = \sigma_h'^{n+1} + \sigma_s'^{n+1} \quad (11)$$

$\Delta\gamma$  は、 $n$  ステップ目から  $n+1$  ステップ目にかけての用紙曲率の変化量である。用紙の形状が搬送経路で拘束されているときは、用紙の変形曲率の変化量  $\Delta\gamma_p$  がわかる。さらにこのときの含水率の変化がわかれば、表裏伸縮率差

カールの変化量  $\Delta \gamma_c$  がわかり、曲率変化量は次式で与えられる。

$$\Delta \gamma = \Delta \gamma_p - \Delta \gamma_c \quad (12)$$

式 (9) から式 (12) を用いることで、 $\sigma'_h{}^n$  と  $\sigma'_s{}^n$  から  $\sigma'_h{}^{n+1}$  と  $\sigma'_s{}^{n+1}$  を決めることができる。一方、 $n+1$  ステップ目で用紙が拘束されていないときは曲げモーメントがゼロとなることから、式 (6) と式 (7) から粘性の影響を無視して  $\sigma^{n+1}=0$  と置くことで静的なカール曲率が求められる。

$$\gamma^{n+1} = \gamma^n + \frac{\sigma'_h{}^n + \sigma'_s{}^n}{E_h + E_s} \quad (13)$$

式 (9) と式 (10) の右辺第一項は粘弾性による応力の緩和を表している。また第二項は用紙の変形による応力の増減を表すとともに、温度・含水率の低下による剛性の増加を表す。

## 3.2 計算方法

### 3.2.1 予測計算の流れ

カール量算出の流れを図6に示す。まず、定着条件と紙種から定着器排出時の用紙温度を求め、機内の温湿度条件を加味して搬送中の用紙の温度と含水率の時間変化を決定する (i)。用紙の物性が式 (4) のように関数で表されているので、次に温度と含水率から用紙の粘弾性パラメータを時々刻々定める (ii)。さらに含水率の変化から、式 (12) で用いる表裏伸縮率カールの変化量は式 (5) を用いて求める (iii)。与えられた紙種と定着器、および定着条件に対する定着後カールの曲率は事前に測定する (iv)。用紙の剛性と搬送経路におけるローラー配置やガイド形状などの条件から用紙の変形曲率の時

間履歴が定まる (v)。用紙の変形曲率と粘弾性・表裏伸縮率差カールの時間履歴から、式 (9) と式 (10) を用いて定着後カールを初期条件とした計算を行い、応力の厚さ方向勾配を時々刻々更新する。用紙が拘束されていない場合は式 (13) から曲率を算出する。以上の計算を搬送経路から排出されて十分に時間が経過するまで行って、カール量を算出する (vi)。ここで求められるのは重力の影響を無視したカール (vii) である。重力の影響による静的な変形を計算することで、平面上に平置きした時のカールが決まる (viii)。

### 3.2.2 システムパラメータの同定

本小節では、システムに依存するパラメータの決定方法について述べる。定着器通過後の用紙の温度・含水率の時間変化 (図6の (i)) は、途中で接触するローラーやガイドなどの部材を考慮したシミュレーション等によって求めることができる。しかし本解析では、搬送経路全体にわたっての温度・含水率の平均的な変化が重要であり、詳細なプロファイルは不要である。そこで、温度・含水率は周囲の温湿度によって決まる値に漸近する収束曲線になると考えて、数値計算と実測データから必要な係数を決定した。

$$T(t) = T_{cnv} + (T_{ini} - T_{cnv}) \exp\left[-\frac{t}{\tau_T}\right] \quad (14)$$

$$W(t) = W_{cnv} + (W_{ini} - W_{cnv}) \exp\left[-\frac{t}{\tau_W}\right] \quad (15)$$

温度の初期値  $T_{ini}$  は定着ニップからの用紙排出時の温度であり、ニップ内の厚さ方向一次元非定常熱解析で決定した。 $T_{cnv}$  は機内温度である。含水率に関しては、定着ニップ中では用紙から水分が逃げられないと考え、初期値  $W_{ini}$  として定着ニップ突入前の含水率を使用した。さらに、実機中の複数個所に温度センサーと含水率センサーを配置して、時間に対する温度と含水率の変化を測定し、式 (14) と式 (15) の時定数  $\tau_T$  と  $\tau_W$  および含水率の収束値  $W_{cnv}$  を決定した。

定着後カール (図6の (iv)) は、対象とする定着器に実際に通紙して、用紙に発生するカールの曲率を測定して決めた。ただし、定着器通

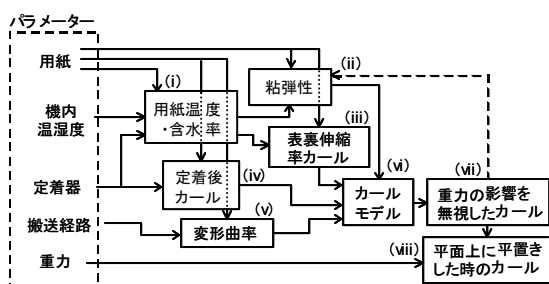


図6. カール量算出の流れ  
Flow of Paper Curl Determination

過直後から脱湿による表裏伸縮率差カールが同時に起こり始めるため、定着後カールのみを直接測定することはできない。表裏伸縮率差によるカールは用紙の表裏に依存して起こるのに対して、定着後カールは定着器の構成（ニップ形状や、加熱方向）で決まる。従って、ある条件下で定着器通過後に発生するカール曲率が $\gamma_1$ であり、用紙の表裏を反転して同じ実験を行ったときのカール曲率が $\gamma_2$ であるとき、定着後カールの曲率 $\gamma_F$ と表裏伸縮率差によって発生するカール曲率 $\gamma_C$ の関係は次式で表せる。

$$\gamma_1 = \gamma_F + \gamma_C \quad (16)$$

$$\gamma_2 = \gamma_F - \gamma_C \quad (17)$$

両式の平均を取ると $\gamma_C$ が相殺されて、 $\gamma_F$ を求める次式が得られる。

$$\gamma_F = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \quad (18)$$

用紙が実機の搬送経路を通過するときの変形曲率の時間履歴（図6の(v)）を測定するのは極めて困難である。しかし近年、シミュレーションを活用した用紙搬送経路の設計が日常的に行われるようになっており、シミュレーション結果から容易に用紙の変形曲率履歴を算出できる。一般に用紙搬送シミュレーションでは、用紙を面内に並べた離散的な節点で表現し、与えられたローラーの配置やガイドの形状などを境界条件として、搬送中の用紙の形状を再現する。計算の結果、各節点の座標が得られるので、隣り合った3つの節点の座標から図7のように用紙の曲率を算出することができる。図8にこの方法で求めた用紙の曲率履歴の例を示す。

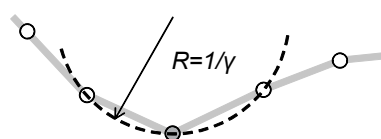


図7. 曲率の算出方法  
Determination of deformation curvature from simulation

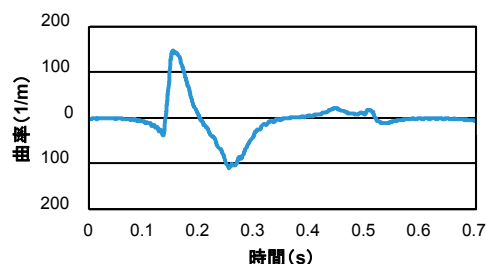


図8. 搬送曲率履歴計算結果例  
Time history of paper deformation curvature

### 3.3 計算結果

#### 3.3.1 検証計算

市販の複写機を用いて、表1に示した検証条件に対するすべての組み合わせでカール曲率を測定すると共に、対応する条件でのシミュレーションを実施した。紙種は普通紙、再生紙、厚紙の三種類であり、厚さはそれぞれ約90 $\mu$ m、100 $\mu$ m、210 $\mu$ mである。この複写機では、定着直後に用紙がデカーラシャフトと呼ばれるシャフトに巻きつくように搬送される機構となっている。このシャフトの有無を検証条件のひとつとした。用紙表裏は製紙工程で決まるフェルトサイドとワイヤーサイドのいずれを上面にするかで定義する。調湿条件は開封直後の乾燥状態と高湿下に放置して吸湿させた条件の、いずれかである。対象とした複写機は上面排出と側面排出の2つの排出経路を持っており、それぞれ発生するカールが異なるので、これを検証条件とした。実験室の環境は低温低湿、通常環境、高温高湿の3水準である。

表1. 評価条件  
Verification conditions

評価条件	水準
紙種	普通紙、再生紙、厚紙
デカーラシャフト	有、無
セット面	フェルトサイド、ワイヤーサイド
用紙調湿状態	開封直後、高湿度下で吸湿
排出経路	上面排出、側面排出
実験室の環境	低温低湿、通常環境、高温高湿

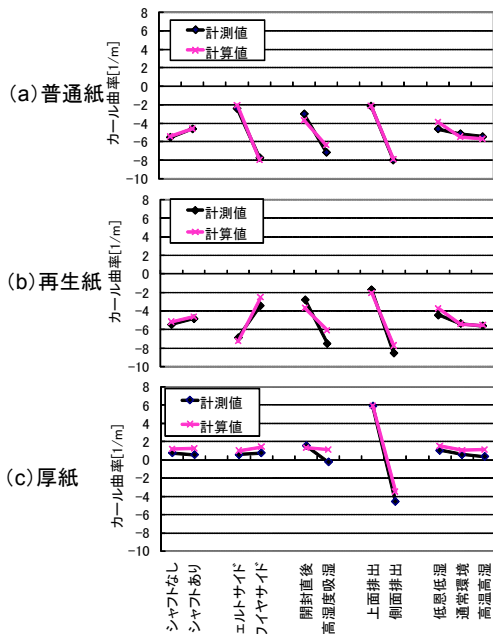


図 9. カール評価結果  
Curl Estimation Result

図9に計算結果と計測結果をそれぞれの検証条件に対する要因効果としてまとめたものを示す。計算結果と計測結果の相関係数を普通紙、再生紙、厚紙それぞれに対して見積もったところ0.94、0.90、0.96であった。

### 3.3.2 適用事例

本解析手法によるカール予測によって、開発工数を削減できた事例を示す。新商品を開発する際に、用紙カールの発生が問題となった。図10に定着器後から機外への排出に至るまでの用紙搬送経路を示す。(1)が従来、(2)が新商品の設計図からシミュレーションで算出した用紙搬送経路である。本解析技術を用いて、カール発生量を予測した結果、従来機と新商品のカール量は変わらない結果となった。この結果から、課題に対し、新たな工数を割かないことを決定した。

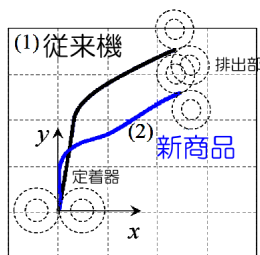


図 10. 用紙搬送経路の比較(従来機と新商品)  
Paper path of existing machine and new machine

## 4. 粘弾塑性モデルによる用紙カール矯正量予測シミュレーション

### 4.1 カール矯正メカニズム

デカーラによるカール矯正効果に寄与する要因として、(a) 変形曲率、(b) 変形時間、(c) 接触面圧、(d) 搬送方向への引張り力、(e) 剪断力を抽出した。それぞれの因子の影響を外乱のない状態で定量化するために、図11に示した実験装置を作成し、表2の実験条件を設定し、カール量を測定した。カールは重力の影響を除いた状態での用紙円弧高さで評価した。結果を図12に示す。これより、カール量に対しては用紙が受ける曲率(図12(a))、変形時間(図12(b))が支配的であり、圧力(図12(c))、引張り力、剪断力の影響は小さいことが分かった。

また速度可変の単軸引っ張り試験により、用紙の応力-歪み曲線を測定した。その結果、用紙は図13に示すように、応力-歪みの勾配がある歪み量で降伏する弾塑性特性と、引っ張り速度が速くなるほど勾配が大きくなる粘性特性の両方の特性を示すことが分かった。

以上より、デカーラ装置におけるカール矯正効果の発現メカニズムを、曲げ歪みが降伏限界を超えることによる塑性変形と、曲げ状態が保持されることによる粘性変形によって残留応力分布が発生することであると結論づけ、メカニズムに基づいたシミュレーションを構築した。

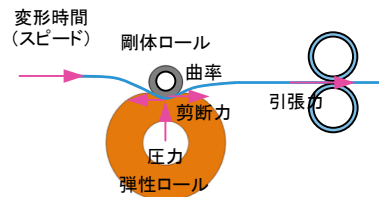


図 11. デカーラ メカニズム解明のための実験装置  
Devices for clarifying curl mechanisms

表 2. デカーラ メカニズム解明のための実験水準  
Verification conditions for clarifying curl mechanisms

寄与する要因	実験パラメーター	
変形曲率	剛体ロールの曲率	125,250,333[1/m]
変形時間	搬送速度	3,117,226,314[mm/s]
接触面圧	弾性ロールの硬度	20,30,40[deg]
引張り力	搬送方向への引張り力	0.71,0.96[N]
剪断力	ロール間摩擦係数差	A:hard:0.2 soft:1.0 B:hard:0.2 soft:0.2 C:hard:1.1 soft:0.2

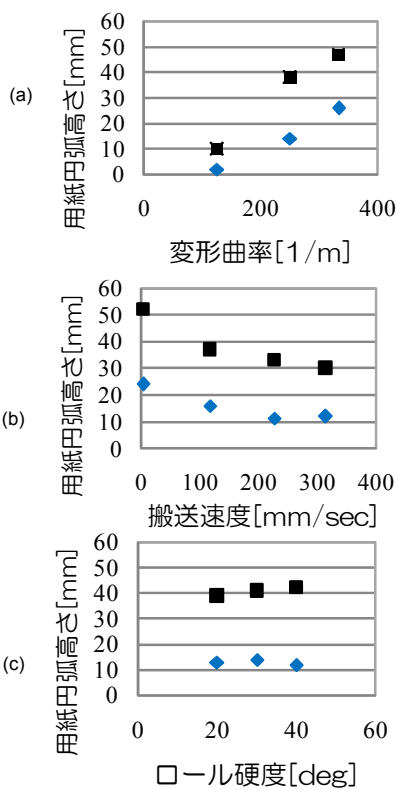


図 12. 実験結果  
Experiment Results

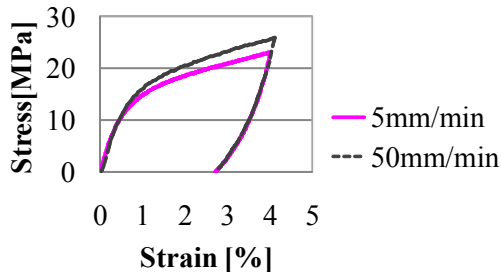


図 13. S-Sカーブの用紙搬送速度依存性  
Strain-stress curve of paper for speed

#### 4.2 用紙物理モデル

用紙の塑性変形<sup>7)</sup>と粘性変形<sup>8)</sup>を考慮する物理モデルとして、図 14 に示す並列粘弾塑性要素を採用し、各要素の応力-歪み関係式を式 (19) から (21) で表現した。ここで  $E$  は弾性係数、 $\mu$  は粘性係数、 $\sigma_Y$  は降伏限界応力である。

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}_i}{E_i} \quad (-\sigma_{Y_i} \leq \sigma_i \leq \sigma_{Y_i}) \quad (19)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}_i}{E_i} + \frac{\sigma_i - \sigma_{Y_i}}{\mu_i} \quad (\sigma_i < -\sigma_{Y_i}, \sigma_{Y_i} < \sigma_i) \quad (20)$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (21)$$

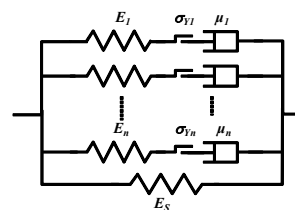


図 14. 粘弾塑性モデル  
Visco-elasto-plastic model

基本要素は弾性を表現するバネ、塑性を表現するスライダー、粘性を表現するダッシュポットから構成される。この基本要素を複数個と、1 個のバネからなる弾性要素を並列に接続したものを粘弾塑性要素とし、図 13 に示した応力-歪み曲線を再現した。即ち、この粘弾塑性要素は、与えられる歪みが大きくなるに従って、基本要素が徐々に降伏していき、歪みが一定値を超えると弾性要素のみによって決まる勾配に収束する挙動を示す。物理的には、各基本要素が用紙内の繊維構造のパターンにそれぞれ対応しており、歪みを受けると各繊維構造が順にほぐれていくため、図 13 のような応力-歪み特性を示すと考えることができる。さらに、粘弾塑性要素を用紙の厚さ方向の各位置に配置し、曲げにより表裏差のある歪みを与えられた際の用紙の厚さ方向内部応力分布を算出する。

粘弾塑性要素の弾性係数と降伏限界応力は、単軸引っ張り試験を粘性の影響を除いた十分に遅い引っ張り速度で行うことで同定できる。応力-歪みの勾配が変化する点から降伏限界応力を、各降伏限界応力間の応力-歪み勾配から弾性係数をそれぞれ決定する。また粘性係数は、単軸引っ張り試験の引っ張り速度を変化させた結果から同定する。ただし、一般の単軸引っ張り試験機では、デカーラ内における歪み変化速度と同等の引っ張り速度を実現できないことが多く、粘性係数の同定値の信頼性が低下することが懸念される。したがって、曲率が既知である任意の搬送経路において、搬送速度を変化させた場合のカーラ量を再現するよう粘性係数を求めることで、より精度良く粘性係数を見積もることが可能である。



### 4.3 シミュレーション結果

#### 4.3.1 検証結果

まず、構築した用紙物理モデルの妥当性を検証するため、デカーラパラメーター、用紙種、画像濃度を因子としてカール量の計算結果を、測定値と比較した。

デカーラにおけるカール矯正量の予測シミュレーションモデルのフローを図 15 に示す。

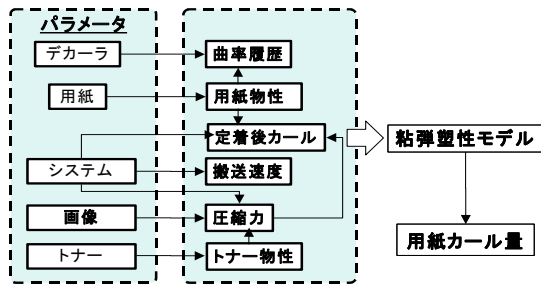


図 15. カール量算出の流れ  
Flow of Paper Curl Determination

まず、用紙が受ける曲率履歴を、汎用有限要素法解析ソフト Abaqus<sup>9)</sup> を用いて算出する。用紙の物性としては厚さ、弾性係数、粘性係数、降伏限界応力を前述の方法で決定する。ここでは白紙での初期カール測定結果とトナー画像濃度から算出する。これらのデータをもとに、粘弾塑性要素を用いて用紙の内部応力分布の時間変化を有限差分法によって逐次算出し、デカーラから排出されて十分に時間が経過した状態での残留応力分布を求める。

図 16 にそれぞれ普通紙と、厚紙を通紙した際の、デカーラと、その前後のペーパーパスにおける、位置と曲率の関係を示す。用紙が 12mm < x < 16mm の範囲で曲率半径 4mm のデカーラローラに接触・押圧されながら搬送されている状態である。その曲率は、主に用紙剛性、デカーラ的设计パラメーターである剛体

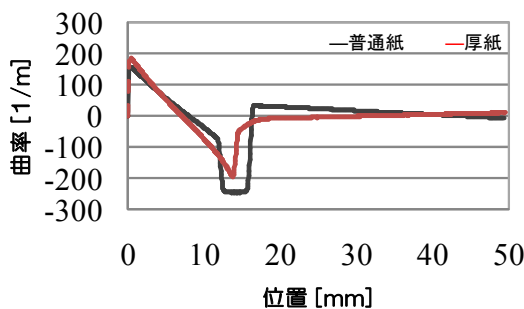


図 16. デカーラとその前後の位置と曲率の関係  
Results of structural analysis of curvature distribution around decurler.

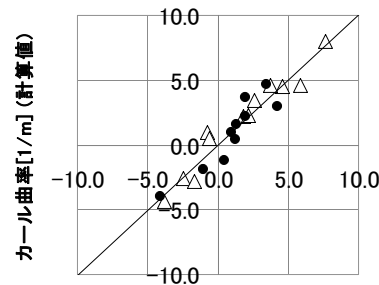
ローラーの曲率、押し込み量によって決まる。x < 12mm および 16mm < x の範囲では用紙は搬送部材に非接触な状態であり、その曲率は用紙剛性と、デカーラの用紙端部の拘束条件である張架カベクトル、即ちペーパーパスのパラメーターで決まる。また、これらの結果より、同じ構成であっても、用紙剛性によって、用紙が受ける曲率履歴が異なることがわかる。

検証実験の条件を表 3 に、検証結果を図 17 に示す。検証はデカーラの種類、押し込み量、画像濃度、通紙速度を変えた条件で行った。

△は普通紙、●は厚紙に対する検証結果である。どちらも相関係数 0.90 以上で実測結果を再現できている。これより本シミュレーションモデルは、厚さの異なる用紙に対して、定量的に精度良くデカーラ通過後のカール量を予測できていることがわかる。

表 3. 検証実験の条件  
Verification conditions

寄与する要因	実験パラメーター	
	普通紙	厚紙
紙種	普通紙	厚紙
デカーラ種類	ロールタイプ	ベルトタイプ
押し込み量	0.5~3.0mm	
通紙速度	200mm/s	400mm/s
画像濃度	0~400(%)	



カール曲率[1/m] (実験値)

図 17. シミュレーション検証結果  
Verification results of curl prediction simulation table

画像濃度 (%)	用紙			
	用紙 1	...	用紙 2	
10	A	D	A	
20	A	E	A	
30	B	E	A	
40	B	E	A	
...	...	...	...	...
380	X	X	B	
390	X	X	B	
400	X	Y	B	

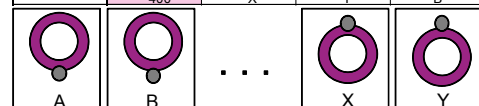


図 18. デカーラパラメーターテーブル  
Outline drawing of decurler parameter table

#### 4.3.2 パラメーター設計への適用事例

本シミュレーションの精度が確認できたため、当社製品である Color 1000/800 Press<sup>10)</sup> 搭載のデカーラに対するパラメーター設計を行った。

デカーラは、用紙種類と画像濃度の検知結果から、図 18 に概略図を示したデカーラパラメーターテーブルから最適なパラメーターを選択し動作する。例えば、下向き大きなカールが発生する組み合わせに対してはパラメーター X が、上向きの軽微なカールが発生する組み合わせに対してはパラメーター B が選択される。そのパラメーターテーブルの仕様を決定することが、デカーラパラメーター設計に当たる。

カール量は、用紙を平板上に置いたときの、用紙端部と平板間の距離で評価した。これは、図 15 のフローで算出されるカール曲率と、重力の影響を考慮した静的はりの式で算出できる。図 19 は普通紙における、画像濃度とデカーラパラメーターの組み合わせに対する、デカーラ通過後のカール量の算出結果である。これにより、画像濃度によって、デカーラ通過後のカール量が最小となる、デカーラパラメーターが異なっていることが分かる。各用紙種に対しても、画像濃度ごとの最適パラメーターを抽出することで、デカーラパラメーターテーブルの仕様を決定した。仕様を決めたデカーラパラメーターテーブルを Color 1000/800 Press に導入し、カール量の確認実験を行い、全ての用紙種において用紙カールが製品仕様の範囲内に収まっていることが確認できた。本技術により、デカーラパラメーターの設計に要する期間を約 80%削減することができた。

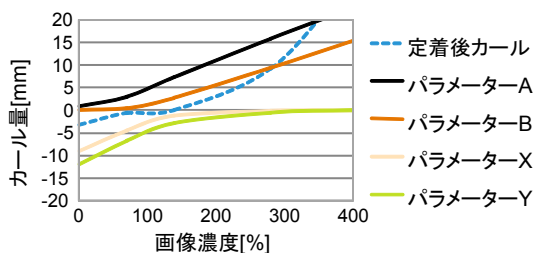


図 19. カールと画像濃度の関係  
Relationship between curl amount and image density

## 5. まとめ

フロントローディング開発プロセスを確立することを狙いとして、用紙変形の重要課題であるカール現象のメカニズムを解明するべく、用紙物性の計測および解析手法を確立した。また、その結果から用紙変形の物理モデルを導き、2つのカール量予測技術を構築した。

構築した技術の1つは、用紙搬送経路におけるカール量シミュレーションである。この解析では、搬送経路における用紙の温度・含水率の変化と曲げ曲率の時間履歴から表裏伸縮率差カールと搬送経路カールを見積もって、最終的なカール量を予測する。紙の機械特性の測定結果から用紙の粘弾性が2並列 Maxwell モデルで表せることを見出し、温度と含水率に対する依存性を定式化した。更に用紙をはりモデルで表すことで、厚さ方向の応力勾配と曲げ曲率の関係を表す構成則を得て、これを時間積分することで物性と曲げ曲率の時間履歴から最終的な内部応力を得ることを可能にした。また、用紙の温度・含水率依存性、機内での用紙温度・含水率、用紙の表裏伸縮率差、定着器通過後のカール量等、計算に必要な今まで計測できなかった特性値を計測可能にした。以上の結果より、相関係数0.90~0.96でカール量を予測可能となり、余剰な設計工数を削減できた。

構築した技術のもう1つは、用紙カールを矯正するデカーラ装置のパラメーター設計を効率化するための、カール矯正量予測シミュレーション技術である。デカーラ装置におけるカール矯正効果発現メカニズムは、曲げ歪みが降伏限界を超えることによる塑性変形と、曲げ状態が保持されるとき粘性変形であることを明らかにした。また、用紙を弾性バネ、塑性スライダ、粘性ダッシュポットから構成される粘弾塑性モデルとして表現し、計算に必要な用紙の応力-歪み履歴を計測可能にすることで、デカーラによるカール矯正量を相関係数0.90以上で予測可能となり、新商品のデカーラパラメーター設計期間を約80%削減できた。

今後は、シミュレーションの精度、適用範囲を拡張し、さらなる開発期間の短縮とコストの削減を目指す。

## 6. 商標について

- RecurDyn<sup>®</sup>はFunctionBayK.Kの米国およびその他の国における登録商標です。
- その他、掲載されている会社名、製品名は、各社の登録商標または商標です。

## 7. 参考文献

- 1) N.Nakayama, T.Ito:Xerography Process Simulation,FujiXerox Technical Report, No.18, 15-26 (2008) [in Japanese]
- 2) P.Glynn, H. W. H. Jones, and W. Gallay, "The Fundamentals of Curl in Paper", Pulp and Paper Magazine of Canada, 60, pp.T316-T323 (1959)
- 3) P.Glynn, H.W.H.Jones, W.Gallay, "Drying Stresses and Curl in Paper", Pulp and Paper Magazine of Canada. 62, pp.T39-T48 (1961)
- 4) T.Uesaka, "Dimensional Stability of Paper: Upgrading Paper Performance of Corrugated Board in Bending", JPPS 17(2), pp.J39-J46 (1991)
- 5) R.B.Bird and O.Hassager, "Dynamics of Polymeric Liquids, Fluid Mechanics", Wiley-Interscience, (1987)
- 6) W.Lu, L.A.Carlsson: Influence of Viscoelastic Behaviour on Curl of Paper, Mechanics of Time-Dependent Materials, 5, 79-100 (2001).
- 7) 几.M.カチャノフ著, 大橋義夫訳, "塑性理論の基礎", 養賢堂 (1978), pp.28-42
- 8) 小野木重治著, "レオロジー要論", 槇書店 (1957), pp.51-95.
- 9) [http://www.simulia.com/locations/japan/abaqus\\_products.html](http://www.simulia.com/locations/japan/abaqus_products.html)
- 10) 森浩隆, "高速カラーパブリッシングシステム Color 1000 Press/Color 800 Press", 日本画像学会誌, 50, 21-28 (2011).

## 8. 出典

- 本稿は日本画像学会 "Imaging Conference JAPAN 2011" 論文集の 2 件の内容を再構成した物である。本稿の著作権は日本画像学会が有する。

### 筆者紹介

荻野 孝  
研究技術開発本部基盤技術研究所に所属  
専門分野：用紙物性

伊藤 朋之  
研究技術開発本部基盤技術研究所に所属  
専門分野：電子写真のシミュレーション技術

高橋 良輔  
研究技術開発本部基盤技術研究所に所属  
専門分野：電子写真のシミュレーション技術

細井 清  
研究技術開発本部基盤技術研究所に所属  
専門分野：用紙物性