
カット紙搬送系における用紙しわ発生過程のモデル化

Modeling of Paper-wrinkle Generation Process

松本 章吾* 原田 祥宏*

Shogo MATSUMOTO Yoshihiro HARADA

要 旨

プリンタおよび複写機の開発では開発期間の短縮やコストの削減が重要な課題の一つであり、解析技術の導入などで開発の効率化が進められている。しかし、搬送時の紙の挙動は影響因子の多さなどから解析が難しいものが多く、開発期間短縮の妨げになっている。そこで、効率的な製品開発環境を構築するため、定着機通紙時の用紙“しわ”発生現象のメカニズム解明と事前評価手法の開発に取り組んでいる。本研究では、用紙しわの発生過程の観察に基づいて用紙の波打ち形状を幾何学的にモデル化し、波打ちのニップ部への噛み込みモデルと組み合わせてしわの発生限界と支配因子の関係を定式化、しわ発生の代用特性として“波打ち角度”を導出した。さらに、用紙しわの発生過程を定量的に評価するため、用紙の搬送速度偏差と波打ち形状の可視化装置を開発し、上記代用特性を用いることでしわ発生の余裕度を評価できる目処を得た。

ABSTRACT

Defects caused by sheet-feeding instability have been major obstacles in printer development due to the difficulty of the analysis imposed by enormous affectors. To tackle the problem, we analyze the paper-wrinkle generation process in fuser unit and develop a prior evaluation methodology for it. Based on the observation of the process, a convenient geometry model of the wrinkle is constructed and the relationship between the wrinkle restrictions and controlling factors is formulated by incorporating a snapping model of the fuser nip into the geometry model. Finally "wave slope angle" is derived as the substitutional characteristics of the process. To evaluate the process quantitatively, an apparatus for measuring the feeding velocity deviation and visualizing deformed papers' shape is developed. Validation results show that the margin of the process can be evaluated by using the proposed substitutional characteristics.

* 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

1. 背景と目的

プリンタおよび複写機の開発では、開発期間の短縮やコスト削減が重要な課題のひとつとなっており、解析技術の導入などによる開発の効率化が進められている。紙搬送挙動の解析については様々な研究¹⁻⁵⁾が行われているが、プリンタ開発における解析困難な紙搬送挙動の一つとして“用紙しわ”がある。

定着ユニットでの“用紙しわ”は、プリンタの信頼性を確保する上で発生してはならない障害である。しかし、これら現象の発生原理が明らかでなく影響因子との関係が不明確であるため、開発スケジュールへのインパクトが大きくなってしまっている。

用紙など柔軟媒体のしわ現象の解析技術としては、ウェブ搬送におけるしわ解析など^{6, 7)}精緻な研究が進められているが、プリンタなどのカット紙搬送系の設計初期段階での余裕度評価に用いることのできる解析技術についてはまだ取り組みが進んでいないのが現状である。

そこで、効率的な製品開発環境を構築するため、定着器通紙時の用紙“しわ”発生現象のメカニズム解明と事前評価手法の開発に取り組むこととした。

本研究では、取り扱いの難しい現象の一つである用紙しわについて、発生過程の観察に基づいて簡便な幾何学モデルを構築してしわ発生の代用特性を導出した。さらに、用紙しわの発生過程を定量的に評価するための可視化装置を開発し、上記代用特性の妥当性を検証したので報告する。

2. 技術

2-1 しわ発生過程のモデル化

2-1-1 しわの発生プロセス

しわ発生過程の観察から、しわの発生プロセスはおおよそ以下の通りとなっていることが明らかとなった。

- ① ニップ入口近傍で用紙に“波打ち”が発生する。

- ② “波打ち”が成長し、“波打ち”の先端がニップに近づく。
- ③ “波打ち”が成長し、“波打ち”の先端がニップに噛み込まれる【しわの発生】(Fig.1)。
- ④ “波打ち”が成長し、“波打ち”がニップに噛み込まれ続ける【しわの成長】。

以下、上記しわ発生プロセスの観察結果に基づいてしわ発生プロセスを簡単な幾何モデルでモデル化し、しわと影響因子の関係を検討する。

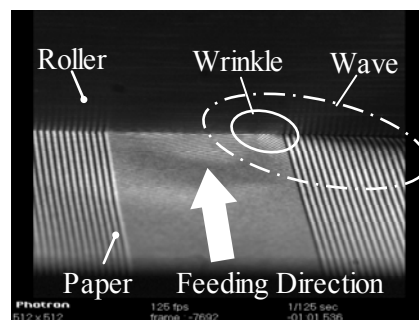


Fig.1 Generation of the "Wrinkle". (entrance of the roller-nip area)

2-1-2 ニップ部への波打ち用紙の噛込みモデル

(1) 波打ちモデル

用紙搬送速度分布の不均一さに起因した用紙の波打ちをFig.2のように幾何学的にモデル化する。

ここでは用紙とローラの間に“すべり”は発生せず、波打ちしていない箇所は平面を保つものと仮定すると、

$$\delta = (v_0 - v_1) \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\sin \theta = \frac{\delta}{x_1} \quad (2)$$

$$\tan \beta = \frac{x_1}{y_T} \quad (3)$$

また、測定位置 $y=y_{ob}$ において波打ち部の長さ l_{yob} は、

$$l_{yob} = 2y_{ob} \cdot \tan(\beta - \theta) \quad (4)$$

$$\delta_{yob}' = \theta \cdot y_{ob} \quad (5)$$

となる。

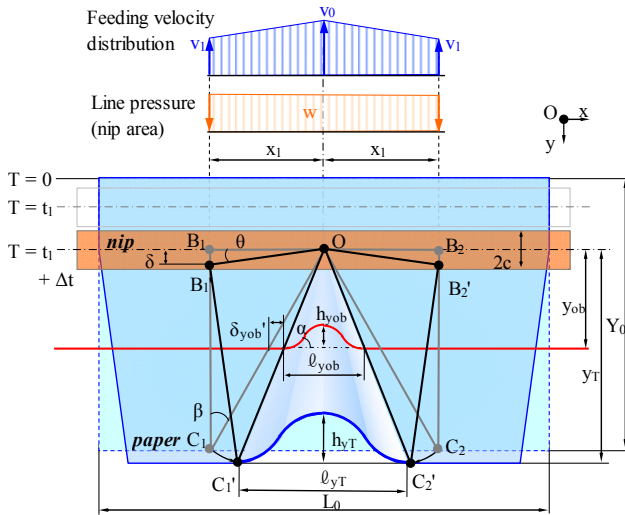


Fig.2 Wavy deformed paper model.

ただし、 δ はニップ部での用紙ズレ量、 v は用紙搬送速度、 θ は用紙回転角度である。

上記の関係から、ローラ軸方向の速度分布がわかれば用紙の波打ち形状を評価できる。

(2) ニップ入口での滑り限界

波打ち変形によって用紙に蓄えられるエネルギーを考える。摩擦力によって用紙に供給されるエネルギー U_1 ならびに用紙の波打ち変形によって蓄えられる歪エネルギー U_2 はそれぞれ次式で与えられる。

$$U_1 = \frac{1}{2} \mu w x_1^2 \tan \theta \quad (6)$$

$$U_2 = \int_c^{y_T} \int_0^{l_{ob}/2} \frac{M^2}{EI} dx dy \quad (7)$$

ただし μ はローラと用紙の間の摩擦係数、 w はニップ線圧、 E は用紙のヤング率、 I は用紙の断面二次モーメント、 M は用紙に作用する曲げモーメントである。

ニップ部に作用する力が摩擦力を超えると、ニップ部に滑りを生じて用紙の変形はそれ以上進行しなくなるので、式(6)はニップ部で供給される変形エネルギーの上限を与えることになる。よって用紙がニップ部で滑らない為の条件は、

$$U_1 \geq U_2 \quad (8)$$

となる。

以上の関係式から、所定の摩擦力で搬送できる用紙の回転角度 θ の限界は、式(9)のように各種特性値の関数として規定することができる。

$$\theta \leq F(\beta, \mu, E, I, x_1, y_T) \quad (9)$$

(3) しわの発生条件 (ニップ内での滑り/座屈限界)

しわの発生条件を記述するにあたり、Fig.3に示したようなローラニップ部への波打ち用紙の噛みこみモデルを考える。

Fig.4に示すように波うち用紙がニップ部に噛みこまれる過程で、i) 用紙が座屈して“しわ”が発生するモード、ii) 用紙は座屈せず波打ちがニップをすり抜けるモードならびに、iii) 用紙とローラの間ですべりが生じて波打ち形状が平坦に伸ばされ、しわの発生しない3つのモードを考える。

まず i) の座屈モードについて考える。

波打ち用紙の圧縮荷重を受ける部分を梁要素とみなしてEulerの座屈荷重を適用すると、波打ち用紙がニップ内で押し付け荷重を受けて座屈する条件から、用紙の波うち角度 α の下限値を式(10)のように各種特性値の関数として規定できる。

$$\alpha \geq f_1(P_{\max}, \beta, \theta, E, I, x_1, y_T) \quad (10)$$

ただし、 P_{\max} はニップ内の最大面圧である。

次に、iii) のすべりモードについて考える。

波打ち用紙がニップ内で押し付け力を受け、波打ちの生じていないニップ部ですべりが生じる条件から、用紙の波うち角度 α の上限値を式(11)のように各種特性

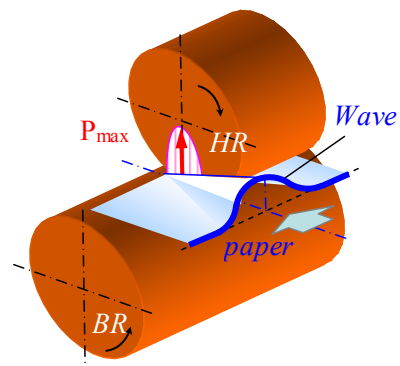


Fig.3 Snapping model of wavy deformed paper into the nip area.

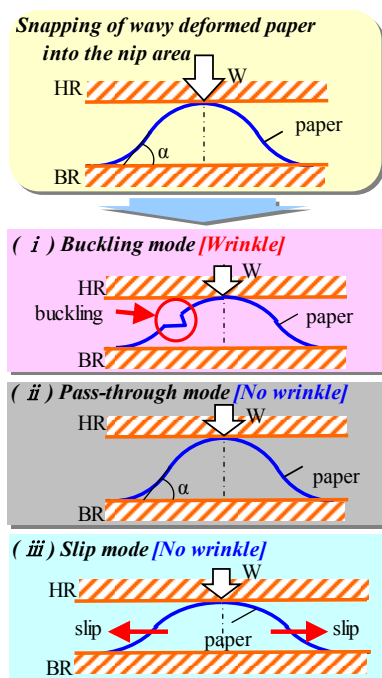


Fig.4 Snapped mode of wavy deformed paper into the nip area.

値の関数として規定できる。

$$\alpha \leq f_2(\mu, w, E, I,) \quad (11)$$

なお、ii) のすり抜けモードは、式(10)と式(11)の間の条件として規定することができる。

上述の通り、本モデルにより、用紙の基本物性（用紙とローラの摩擦係数 μ 、用紙のヤング率 E 、用紙の断面二次モーメント I ）と用紙の搬送速度分布から、用紙の波打ち形状を式(1)～式(5)を用いて見積もることができる。さらに、波打ち角度 α をしわの代用特性として、限界条件(9)～(11)を用いて用紙の波打ちがしわに至るかどうかを判別することができる。

上述の用紙の基本物性値は事前に測定可能であり、用紙の搬送速度分布は次章で述べる定着しわ原理解析装置で測定可能である。

2-2 しわ発生過程の可視化

本研究では、用紙の搬送条件をパラメータとして設定できる“定着しわ原理解析装置”と、定着しわ原理解析装置で生じている現象を可視化・定量化する“用紙挙動可視化装置”の開発を行った。定着しわ原理解

析装置の概略をFig.5に示す。

定着しわ原理解析装置では、定着ニップ内の用紙搬送速度分布に影響の大きい定着モジュールの各種設定と、定着ニップへの進入性状に影響を及ぼす定着入りロガイド性状を中心に設定を行える構成とした。

用紙挙動可視化装置では、定着ニップ部の性状で支配される用紙搬送速度分布の用紙全幅での同時計測と、定着部前後での用紙の面外変形状の測定を行う。

定着入り側の用紙形状は、しわ発生前の用紙の“波打ち”などの“予兆”現象を捉えることができるほか、用紙の進入姿勢など定着入り側の用紙性状としわの相関を明確にする際に有用なデータを得ることができる。

定着出側の用紙形状は、各設定条件でのしわの発生状況を捉えることができる。

定着しわ原理解析装置により得られた用紙挙動データを用い、しわ発生メカニズムを明らかにする。

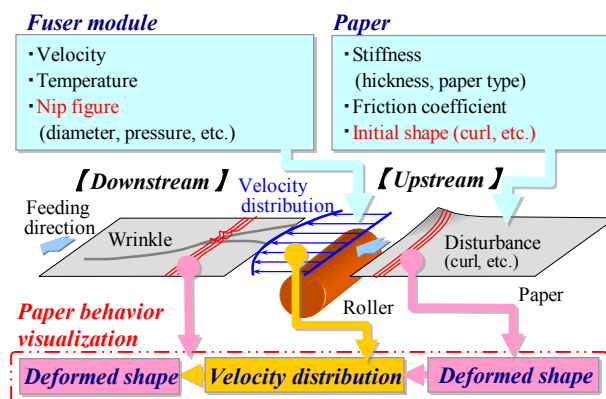


Fig.5 Overview of mechanism analysis apparatus.

2-2-1 測定方法

(1) 用紙搬送速度分布の測定

用紙の搬送速度は、横線パターンを形成した短冊を通紙し、パタンの通過間隔を計測することで評価する（Fig.6）。ここでは、用紙全幅の同時計測を可能とするため、高速ラインセンサを用いてパタンの測定を行っている。

(2) 用紙面外変形状の測定

用紙の形状は光切断法を用いて測定する。Fig.7のように、定着ニップの入口および出口に直線のレーザーパターンを照射し、このレーザーパターンをエリアセンサ

で用紙の搬送開始から終了まで連続的に撮影する。Fig.8に搬送中の用紙の変形形状を撮影した代表的な画像を示す。図の横方向は用紙のローラ軸方向位置、縦方向は用紙の変形高さを表している。用紙の変形はレーザーパタンの歪みとして捉えることができおり、画像処理により予め測定したキャリブレーションデータを用いて各位置毎の高さ情報に変換することで、用紙の変形状態を可視化できる。

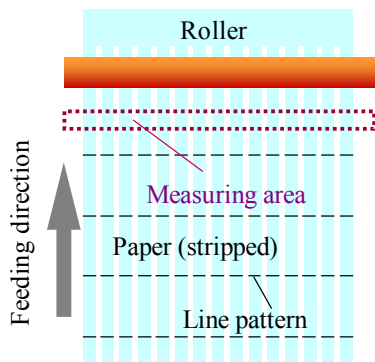


Fig.6 Schematic diagram of paper feeding velocity distribution measuring equipment.

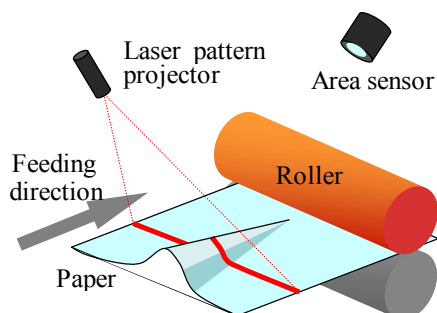


Fig.7 Schematic diagram of paper deformation measuring equipment.



Fig.8 Sample of a measured line.

2-3 用紙挙動の測定結果

プリンタの定着器には、長手方向に直径の変化しているローラを用いてしわの発生を防止するのが一般的である。そこで、形状の異なった数種のローラを用意

し、前記定着しわ原理解析装置を用いてローラ形状と用紙搬送速度分布ならびに用紙変形状の関係を評価した。

以後、両端部に対して中央部の直径の小さいものを“つづみ形状”，逆のものを“太鼓形状”と呼ぶ。

(1) 用紙搬送速度分布の測定

横線パターンが描かれたテストチャートを使用し、冷間条件にて用紙搬送速度分布を計測した。結果をFig.9に示す。なお、ここではローラ軸方向中央部における速度を基準とした速度偏差分布を表記してある。また、ローラ形状は端部の直径を基準にした時の中央部の直径差で示している。

両端部と中央部の直径差の無いストレート形状（0.0 mm）のローラを使用した場合、速度分布はほぼ平坦となっている。太鼓形状を顕著に（プラス方向）していくと、ローラ中心付近での速度が大きくなり凸形状の速度分布に、ツヅミ形状を顕著に（マイナス方向）していくと、ローラ中心付近での速度が小さくなり、凹形状の速度分布をもつようになることがわかる。

用紙搬送速度偏差分布の最大値と最小値の差である速度偏差とローラの形状の関係をFig.10に示す。ここでは、Fig.9で凹形状の速度偏差分布の場合の速度偏差は負の値として表記してある。この図から、各条件での速度偏差はローラのツヅミ量に対してほぼ線形に変化していることが確認できる。なお、今回の測定では押付け力の影響はあまり認められない。

以上の結果から、ローラ形状と用紙搬送速度分布（速度偏差）の関係を定量化できる見通しを得た。

(2) 用紙面外変形状の測定

搬送速度分布の測定に用いたものと同一のローラを用いて用紙を搬送した時の変形状を定着しわ原理解析装置を用いて測定した。代表的な結果として太鼓形状（+0.3 mm）と、つづみ形状（-0.2 mm）での結果をそれぞれFig.11, Fig.12に示す。この図では、ある時刻での観測位置における用紙の変形状を1本の線で示し、所定の時間間隔（0.03 s）毎の測定結果を図中上方にずらしながら表示している。

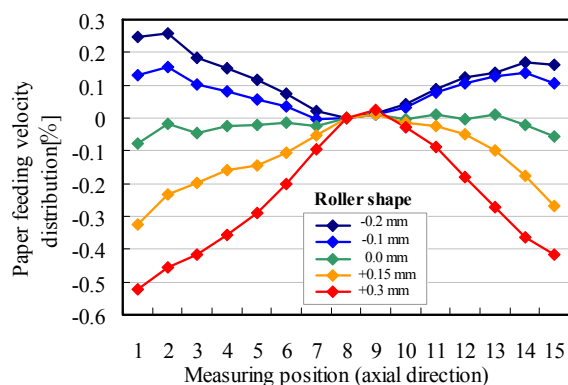


Fig.9 Relationship between roller shape and paper feeding velocity distribution (Load:300N, Velocity:300 mm/s).

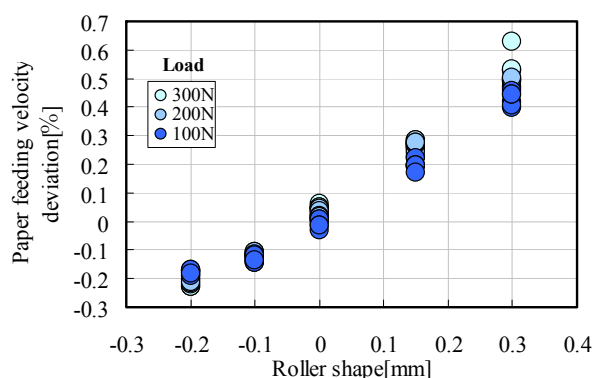


Fig.10 Relationship between roller shape and paper feeding velocity deviation (Velocity:300 mm/s).

太鼓形状のローラを用いた場合 (Fig.11), 当初は平坦だった用紙が用紙の搬送が進むにつれて波うちが発生し, さらに搬送が進むにつれて波うちが大きくなる

様子が観察できる. 前述の用紙波うちモデルでは, 用紙幅方向について1つの山を考えているが, 実際には複数の波うちが観察されている. また, ツヅミ形状のローラを使用した場合 (Fig.12) は搬送過程で波打ちの発生は認められず, 用紙は平坦な形状を保ったまま搬送されていることが確認できる. 用紙後端 (図中最上端の線) で用紙の形状が大きく変化しているのは, 用紙がニップから離れた際に撥ねている現象を捉えたものである.

前述の用紙波打ちモデルの議論からしわの発生を波打ち角度で評価できることが示されたため, Fig.11な

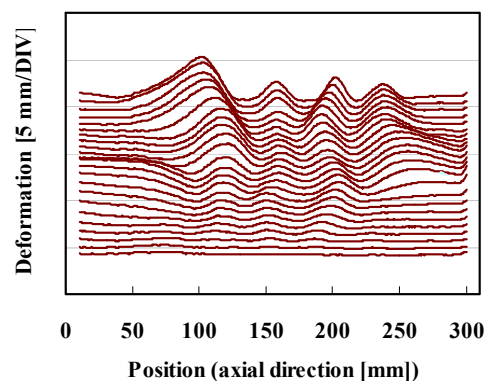


Fig.11 Transformation of the deformed shape of paper (barrel-shaped roller: +0.3 mm).

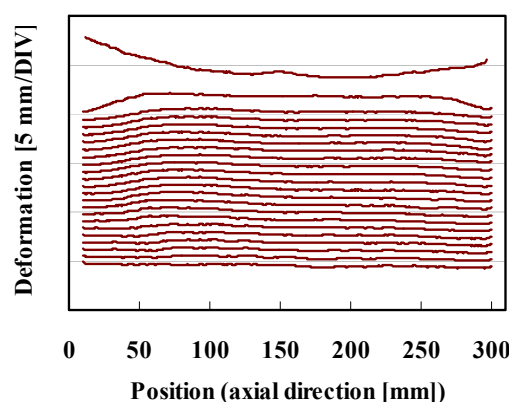


Fig.12 Transformation of the deformed shape of paper (pincushion-shaped roller: -0.2 mm).

らびにFig.12のデータから各時刻の各位置での波打ち角度を算出した. 結果をそれぞれFig.13, Fig.14に示す.

この図では用紙の領域ごとに波うち角度の大きさによって色分けしてプロットしてある. 太鼓形状のローラを用いた場合 (Fig.13), 変形状の変化と同様に用紙の搬送が進むにつれて波うち角度が大きくなる様子が観察される. この実験で用いたローラで通紙すると用紙の後端側にしわが発生するが, 通紙後のしわ発生位置とFig.13の8deg以上の領域が良く一致することが確認できている. 一方, ツヅミ形状のローラを使用した場合 (Fig.12) では, ほとんどの領域で波うち角度が2deg以下となっている. なお, このローラを用いた場合には用紙にしわは発生しない.

一回の通紙における波うち角度の最大値を最大波うち角度と定義して, 各種形状のローラにおける最大波

うち角度とその時の用紙高さの関係をFig.15およびFig.16に示す。Fig.15は太鼓形状のローラを使用した場合、Fig.16はツヅミ形状のローラを使用した場合のものである。この図は搬送中の波うち形状の違いを示したものであり、グラフ左下に近いほど用紙は平坦を保ったまま搬送されており、グラフ右上に近いほど大きなうねりを持つ波うちが搬送中に生じていることを意味する。

Fig.15では、ローラの太鼓量が増加するのに伴ってデータがグラフの右上へ遷移している。また、Fig.15に示した実験においては、太鼓量0.3 mmでしわが発生し、太鼓量0.15 mmの場合の一部に極めて軽度のしわ

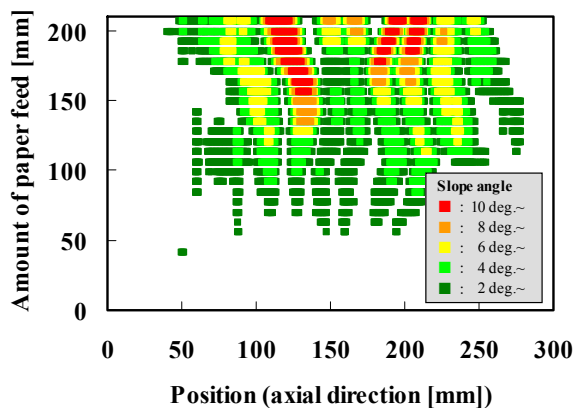


Fig.13 Transformation of the slope-angle of wave (barrel-shaped roller: +0.3 mm).

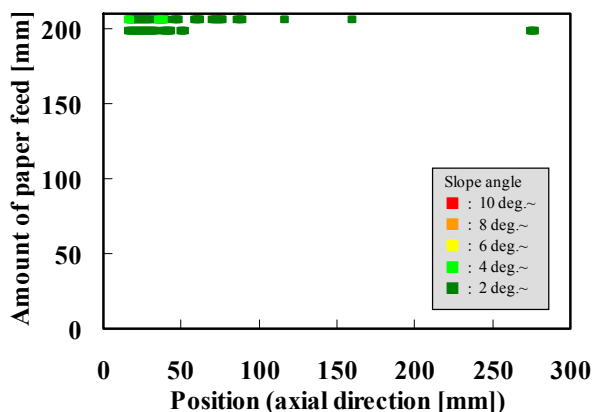


Fig.14 Transformation of the slope-angle of wave (pincushion-shaped roller: -0.2 mm).

が発生している。Fig.15にはこれらしわ発生領域を併記してあるが、用紙波打ちモデルで導出したように、しわの発生の有無を波打ち角度で評価できることが確認できる。

一方、Fig.16ではローラのツヅミ量の増加に対応した最大波打ち角度の上昇は見られない。Fig.16に示した実験においてはしわは発生しておらず、波打ち角度

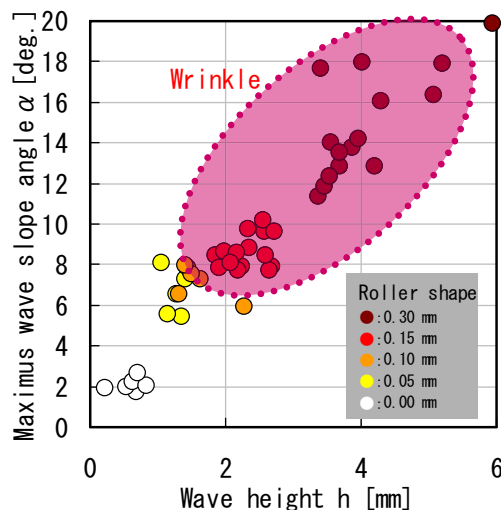


Fig.15 Relationship between the roller shape and the wave shape of paper (barrel-shaped roller).

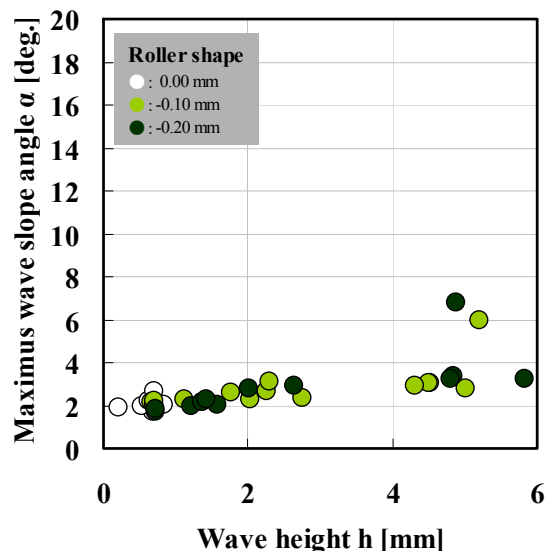


Fig.16 Relationship between the roller shape and the wave shape of paper (pincushion-shaped roller).

がしわ発生の閾値に達していないためにしわが生じないと理解することができる。なお、Fig.16のデータの中に波打ち角度が若干大きなものが見られるが、これはツヅミ形状に起因して用紙後端部が撥ねる現象が生じたためであり、Fig.15で評価している波打ち現象とは異なるものである。

以上の結果からしわの発生過程を考察する。太鼓形状のローラを用いた場合、用紙の搬送速度分布は中央部が早い傾向（Fig.9）となるため、ローラ軸方向に対して内向きの力が用紙に作用して用紙に波打ちが生じ、搬送が進むにつれて波うちが成長する（Fig.11）。波うち（角度）が小さいときにはニップ内での用紙の座屈は生じないのでしわは発生しないが、用紙の搬送に伴い波打ち（角度）が許容値以上になった場合にはニップ内で座屈が生じしわの発生となる（Figs.13, 15）。

一方、ツヅミ形状のローラを用いた場合、用紙の搬送速度分布は両端部が早い傾向となり（Fig.9）、ローラ軸方向に対して外向きの力が用紙に作用するために用紙の波打ちが抑制されて安定な搬送が実現できる（Figs.12, 14, 16）。ただし、外向きの力が大きすぎる場合、用紙がニップから離れる際に撥ねが生じて用紙の搬送挙動が不安定になる。

以上の傾向は従来から経験的に知られている知見と一致しており、本研究で開発した原理解析装置を用いてローラ形状（ローラ中央と端部の径差）と用紙の搬送速度分布ならびに用紙に生じる波うち形状（波うちの角度および高さ）の関係が定量化可能であることが確認できた。さらに、用紙の波打ちモデルに基づいて導出した波打ち角度によってしわの発生限界を評価できる見通しを得た。なお、しわ発生限界の波うち角度は、波打ち用紙の噛みこみモデルに基づいて基本物性と搬送速度分布で規定できるため、用紙搬送ユニットのしわに対する余裕度を事前に評価することが可能となる。

3. 成果と今後の展開

紙しわの発生過程の観察に基づいて用紙の波うち形状を幾何学的にモデル化し、しわの代用特性として用

紙波うち角度を導出した。さらに、紙しわの発生過程を定量的に評価するための可視化装置を開発し、紙しわ発生現象を評価する上で重要な用紙搬送速度分布と、用紙の面外変形状を定量的に評価した。評価結果は従来の知見とよく整合しており、さらに、波うち角度によってしわの発生限界を評価できる見通しを得た。

今後様々な定着器構造や定着条件での評価を進め、プリンタなどカット紙搬送系の設計初期段階での余裕度評価に用いる事ができる解析技術を確立する。

参考文献

- 1) 竹平修：用紙の挙動搬送シミュレーション，日本画像学会誌，Vol.43, (2004), pp.193-201.
- 2) 程輝 ほか：紙葉類の搬送シミュレーションシステム，IIP2005 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, (2005), pp.122-125.
- 3) 関宏之 ほか：排紙部における紙の変形による見かけの剛性増加の3次元シミュレーション，Imaging Conference Japan 2006 論文集, (2006), pp.275-278.
- 4) H. Seki et al.: Study on Wavy-Deformed Effect on Stiffness Improvement of Paper in Paper Ejection Units of Printing Devices, Proc. MIPE, (2006).
- 5) S. Matsumoto et al.: Study on Modeling of Fuser-Generated Curled Sheets and a Prediction of Dog-Ear Defect in a Sheet-Feeding Unit Using a Three-Dimensional Sheet Feeding Simulation, Proc. NIP22, (2006), p.581.
- 6) 橋本巨 ほか：ウェブ搬送時におけるしわ発生メカニズムの解明，日本機械学会年次大会講演論文集, No.5, (2005), pp.251-252.
- 7) 矢鍋重夫 ほか：プリンタ定着ローラ部における紙しわ発生に関する研究，機論，Vol.75, No.755, C(2009), pp.61-68.
- 8) 松本章吾 ほか：カット紙搬送系における紙しわ発生過程のモデル化，IIP2011 情報・知能・精密機器部門（IIP 部門）講演会講演論文集, No.11-9, (2011), pp.223-228.