用紙におけるスプリングバックと折りたたみ特性†

鎌 田 弘* 松 永 和 夫* 加 藤 宏**

Relationship between Springback and Stacking Characteristics of Paper

by

Hiroshi KAMADA*, Kazuo MATSUNAGA* and Hiroshi KATO**

Paper handling technology related to sorting, feeding and stacking, has recently become of importance as a result of the development of high-speed, high-resolution printers. Consequently, the clarification of paper processing characteristics is of vital concern. Although there have been numerous reports on metal processing characteristics, very few studies have been carried out on paper processing characteristics such as springback.

In the previous paper, a mechanical model for paper behavior was proposed. The present study deals with paper processing characteristics related to stacking.

Using the previously proposal mechanical model, an analysis was made of springback in the bending phenomenon for paper and the results were compared with those for metal plates. The results were successfully applied to make clear the correlation between springback and stacking stability in a printer. The main conclusions are as follows:

(1) When the strain rate dependency was taken into consideration, close agreement was found between the observed and calculated values of paper in this springback analysis.

(2) The stacking stability increased as springback decreased. It was seen that greater paper thickness and the absence of a fixing process results in better stacking characteristics.

キー・ワード：用紙，ひずみ速度，スプリングバック，折りたたみ特性

1 緒 言

プリンタ装置の高速化・記録の高精細化に伴い，装置で使用される用紙の折りたたみ^{1,2)}・送り・装てんの技術は重要な検討課題となっている。

このためにもスプリングバック，パンチング等の用紙の加工特性を明確化することは，装置設計上重要である。しかしこれらに対する研究報告は少ないようである。

著者らは前報で用紙の力学的モデルを提言し，モデル中の各定数を数種の用紙について求めた³⁾。本報告ではこれに基づいて用紙のスプリングバックを解析的ならびに実験的に考察し，さらにこれらの結果を用紙折りたたみ特性の評価に応用した。

従来の加工特性に関する研究は，金属に対する曲げ加工時のスプリングバック^{4)~6)}およびひずみ速度の加工に及ぼす影響等^{7,8)}であるが，可撓体である用紙のスプリングバックについての研究はほとんど見あたらない。

よって本報告では上記力学的モデルを用紙のスプリングバックに適用し，特にひずみ速度の影響をも加えて考察する。またポンチとダイスを用いて用紙および金属についてのスプリングバックの実測を行う。これ

らの解析値と実測値の比較より，用紙のスプリングバック現象はひずみ速度の影響を大きく受けることを明らかにする。また得られたスプリングバック値と装置の折りたたみ安定領域との関係についても検討を加える。

2 解 析

2・1 用紙の応力-ひずみ関係

前報で示したように，用紙の応力 σ とひずみ γ およびひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の間には，①非線形性，②ひずみの速度依存性を考慮して以下の式が成立する。

$$\sigma = F \gamma^{nm} \dot{\gamma}^m \quad (1)$$

ここで， nmF は物質によって決まる定数である。

2・2 ひずみの速度依存性を考慮した曲げ特性

式(1)で示した力学的モデルと装置の折りたたみ特性との相関を求めるため，金属および用紙の曲げ特性（スプリングバック現象）について検討する。

ここで用いたスプリングバックとは，板状材料を曲げた後，弾性的効果により曲げた角度が復帰する現象をさし，曲げ角度に対して復帰する角度の比^{9,10)} ($\Delta\theta/\theta$) で定義する。

スプリングバックの解析を行ううえで，曲げ材料の

† 原稿受理 昭和57年12月20日 Received Dec. 20, 1984

* 正 会 員 日本電信電話公社研究開発本部 武蔵野市緑町，Research and Development Bureau, Nippon Telegraph and Telephone Public Co., Midori-cho, Musashino

** 東京都立大学工学部 東京都世田谷区深沢，Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan University, Fukazawa, Setagaya-ku, Tokyo

モデル、力学的関係について以下の仮定を設ける。

①変形は中立面を中心に行われる。②曲げ材料の引張りおよび圧縮特性は対称である。③材料の応力-ひずみ曲線は式(1)を用い、Fig. 1 のように示される。④曲げ加工時におけるひずみ速度 $\dot{\gamma}_0$ は一定とする。

Fig. 2 の曲げ断面における微分部分に働く要素を全域にわたって積分する。これより曲げモーメントと曲

Fig. 1. Stress-strain curve.

Fig. 2. Cross area in bending.

率の関係は式(2)で求まる。

$$M = 2\rho^2 b F \int_0^{\gamma_0} \sigma r dr \quad (2)$$

また曲率とひずみの関係は対称性を考慮すれば $\rho = (t/2r_0)$ t : 厚さ r_0 : 外壁面でのひずみ

よって式(1)を式(2)に代入し整理すると

$$M = 2\rho^2 b F \int_0^{\gamma_0} r^{n+1} \dot{\gamma}^m dr \quad (3)$$

曲げ加工中におけるひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は時間 t に対して依存しないこと ($d\dot{\gamma}/dt = 0$, $\dot{\gamma} = \text{const}$), および r , $\dot{\gamma}$ は中立軸からの距離 η の関数であり次の境界条件をみたすものとする。

$$\begin{cases} r = c_1 \eta : \eta = t/2 \text{ で } r = r_0 \\ \dot{\gamma} = c_2 \eta : \eta = t/2 \text{ で } \dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \end{cases}$$

これより式(3)の積分を展開すると

$$M = 2\rho^2 b F \left(\frac{1}{n+m+2} \right) r_0^{n+2} \dot{\gamma}_0^m \quad (4)$$

式(4)を $n \gg m$, $r_0 = (t/2\rho)$ の条件を用いて変形すると

$$M = 2\rho^2 b F \left(\frac{1}{2+n} \right) r_0^{n+2} \dot{\gamma}_0^m = \left(\frac{b F t^2}{2(2+n)} \right) \left(\frac{t}{2\rho} \right)^n \dot{\gamma}_0^m \quad (5)$$

スプリングバックと曲率の関係は $\Delta\theta/\theta = M\rho/EI$, $I = bt^3/12$ の条件より

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \left(\frac{3}{2+n} \right) \left(\frac{F}{E} \right) \left(\frac{2\rho}{t} \right)^{1-n} \dot{\gamma}_0^m \quad (6)$$

これよりスプリングバックの発生限界 ($\Delta\theta/\theta = 1$) における厚さと曲率の比 $(t/2\rho)_c$ は

$$\left(\frac{t}{2\rho} \right)_c = \left[\left(\frac{3}{2+n} \right) \left(\frac{F}{E} \right) \right]^{1/(1-n)} (\dot{\gamma}_0)^{m/(1-n)} \quad (7)$$

上記解析より、ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が小さくなることすなわち変形がゆっくり進行すると、スプリングバック ($\Delta\theta/\theta$) およびその発生限界 $(t/2\rho)_c$ は小さくなる傾向を示す。これより応力とひずみ、曲げモーメントと曲率、曲率とスプリングバックの関係式を、力学的モデル1 ($\sigma = F\gamma^n$) および力学的モデル2 ($\sigma = F\gamma^n \dot{\gamma}^m$) の場合として整理すると、Table I で示される。

3 実験方法および結果

3.1 試料と実験装置

本報告の実験で用いた試料は用紙と金属の代表的なものであり、これらの応力-ひずみの力学的モデルにおける物性値 (n , m , F) およびスプリングバックの計算で用いるヤング率 E の値は前報の Table II およびⅢに記述されている通りである。

実験装置の概念図および写真を Fig. 3 (a) および (c) に示す。V型で角度 θ_0 を有するポンチを同型のダイスに荷重 P で押しつける装置である。

荷重除荷後は(b)に示すように、 θ_0 は元に復帰し角

Fig. 3. Spring back equipment.

Table I. Bending equation.

	Model (1)	Model (2)
Stress-strain	$\sigma = F\gamma^n$	$\sigma = F\gamma^n \dot{\gamma}_0^m$
Bending moment-curvature	$M = 2\rho^2 b F \left[\left(\frac{1}{n+2} \right) r_0^{n+2} \right]$	$M = 2\rho^2 b F \left[\left(\frac{1}{n+2} \right) r_0^{n+2} \right] \dot{\gamma}_0^m$
Curvature-spring back value	$\Delta\theta/\theta = \left(\frac{3}{2+n} \right) \left(\frac{F}{E} \right) \left(\frac{2\rho}{t} \right)^{1-n}$	$\Delta\theta/\theta = \left(\frac{3}{2+n} \right) \left(\frac{F}{E} \right) \left(\frac{2\rho}{t} \right)^{1-n} \dot{\gamma}_0^m$

ρ : Curvature t : Thickness b : Width

Table II. Experimental condition.

P	1000 kg
θ_0	60°
R	4 mm
ρ	28.9 mm

度 θ_1 の状態になる. なお本実験の条件を Table II に示す.

ここでスプリングバックを 2・2 節で示した定義に基づき求めると

$$\Delta\theta/\theta = (\theta_1 - \theta_0)/(180^\circ - \theta_0) \quad (8)$$

弾性状態では $\theta_1 = 180^\circ$ より $\Delta\theta/\theta = 1$ となり, 降伏状態では $\theta_1 = \theta_0$ より $\Delta\theta/\theta = 0$ となる.

3・2 金属に対する実験

Fig. 4 にステンレス鋼に対するスプリングバックの解析値と実測値の比較を示す.

Fig. 5 では洋白に対する解析値と実測値の比較であり, ステンレス鋼の場合とほぼ同様な傾向を示している.

Fig. 4. Spring back (metal, SUS).

Fig. 5. Spring back (metal, NSP).

3・3 用紙に対する実験

Fig. 6 に印刷用上質紙, Fig. 7 に重袋用クラフト紙および Fig. 8 に紙器用厚紙に対する, スプリングバックの解析値と実測値との比較を示す. $(t/2\rho)$ の大きい領域では用紙をペーパーボンド (天然系接着剤) で 2

Fig. 6. Spring back (printing paper).

Fig. 7. Spring back (kraft paper).

Fig. 8. Spring back (food pack paper).

枚はり合せて厚さを大きくすることよりデータを採用した.

解析には前報の Table II および III の物性値を用いている. Fig. 6, 7, 8 において解析値と実測値は比較的良く一致しているが, $(t/2\rho)$ が大きくなるにつれて実測値が小さくなる傾向がある. これについては, 曲げ部分のクラック, はり合せを用いたときの解析条件が今後の検討課題と考えられる.

4 考 察

4・1 金属と用紙の実測値の比較

スプリングバックの限界を与える厚さと曲率の比 $(t/2\rho)_0$ の値は式(7)で示される. またスプリングバック $(\Delta\theta/\theta)$ と $(t/2\rho)$ の両対数グラフにおけるこう配は式(6)の $(n-1)$ で与えられる.

これより①用紙の物性値 n は金属の場合に比較して

値が大きい。この結果用紙の塑性域におけるこう配($n-1$)はゆるく、スプリングバックは $(t/2\rho)$ の増加につれて徐々に小さくなる。②スプリングバックの限界を与える $(t/2\rho)_c$ は $7 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$ 近辺であり、用紙と金属の値はほぼ同一である。

またポンチ、ダイスを用いた本実験装置では、ポンチ先端の丸みを示す先端率 R がスプリングバックに影響を及ぼす。スプリングバックをばらつきなく計測する上で先端率 $4\text{mm}\phi$ 程度が曲げ形状に無理がなく、クラックも発生せずに適切であることを実測より明らかとした。

4・2 解析値と実測値の比較

金属および用紙のスプリングバックに対する解析値と実験値との比較を Fig. 4~8 に並記した。

金属の場合 m はほとんど0に近く、速度依存性を考慮しない力学的モデルの条件($\sigma = F r^m$)を用いても、解析値と実測値はほぼ一致する。

これに対し用紙については、 m が0.06~0.08であり、速度依存性を考慮した力学的モデルの条件($\sigma = F r^m$)に基づいた解析値が実測値と良く一致する。

5 プリント装置への応用

5・1 用紙の折りたたみ特性

用紙の折りたたみ特性は実装置の高速性・信頼性を支配する重要な要因である²⁾。この折りたたみ特性については曲げとの相関が考えられ、曲げの代表的評価量であるスプリングバック値との対応が重要である。

Fig. 9 に用紙折りたたみの原理を示す。送られた用紙はスイングフィンにより揺動され、折り部を両端にして左右にふり分けられる。さらに用紙は折り部より曲げられ、押さえ車により押しつけられる。折りたたみ装置においてスイングフィン先端から用紙折り部までの距離 l (以下位相と呼ぶ)は重要であり、安定に折りたたむための最適な位相 l の範囲が存在する。

Fig. 9. Stacking mechanism.

Fig. 10 に位相 l に対する折りたたみ限界速度 V の関係を示す。主要なパラメータは用紙の坪量(g/m^2)および印刷物となるトナー像を用紙上に固定させるためのヒータによる定着(以下定着と呼ぶ)の有無がある。

Fig. 10 より次のことが言える。用紙の折りたたみ

Fig. 10. Paper stacking stability area.

安定領域は坪量が大きくなるにつれて増加する。また定着を受けた用紙は折り部が折れにくくなり、安定領域は減少する。

5・2 折りたたみ特性とスプリングバックの関係

Fig. 11 として用紙曲げ特性より求めたスプリングバック($\Delta\theta/\theta$)と安定領域(W)との関係を示す。

Fig. 11 より、用紙の坪量の大きい方が折りたたみ安定領域は増加すること、また定着有の場合は折りたたみ安定領域は減少すること、等が言える。

Fig. 11. Relation between spring back and stability area.

この原因としては次のことが考えられる。

① 用紙の坪量が大きくなると厚みが増加する。よって式(6)に基づいて $(2\rho/t)$ は減少しスプリングバックも減少する。スプリングバックが小さくなると、折りたたみ後の復帰角は小さくなり、安定領域は増加する。

② 定着有の場合は用紙の水分は減少し含水率は低下する。含水率が低下すると用紙はかたくなり、物質定数 F は大きくなる。 F が大きくなると式(6)よりスプリングバック($\Delta\theta/\theta$)は増加し、折りたたみ安定領域は減少する。

6 結 言

(1) 用紙の力学的構成方程式を、非線形性・速度依存性を考慮した式で表示し、ひずみ速度一定の条件下におけるスプリングと曲率の関係を求めた。

$$\frac{d\theta}{\theta} = \left(\frac{3}{2+n} \right) \left(\frac{F}{E} \right) \left(\frac{2\rho}{t} \right)^{1-n} \dot{\gamma}_0^m$$

(2) 用紙の速度依存性を示す m の値は大きい。このため速度依存性を考慮した式によるスプリングバックの解析値と実測値は良く一致することを示した。これに対して金属は速度依存性を示す m の値が小さく、非線形性のみを考慮した式で十分説明できる。

(3) 用紙の曲げと折りたたみ特性の相関について検討し、スプリングバックが減少すると折りたたみ安定領域は増加する結果を得た。これより用紙の坪量が大きいこと、定着無であることは折りたたみ上有利である。

終りに本研究に対し種々の助言を与えられた、日本電信電話公社・横須賀電気通信研究所、松田亮一博士、

高野陸男博士に謝意を表します。

(昭和56年11月19日、第32回塑性加工連合大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 鎌田 弘, 西村 孝, 精密機械, **47**, 454 (1981).
- 2) 鎌田 弘, 家木俊温, 精密機械, **46**, 1512 (1980).
- 3) 鎌田 弘, 加藤 宏, 材料, **33**, 356 (1984).
- 4) 松山徳蔵, 鈴木秀雄, 日本機械学会論文集, **27**, 300 (1961).
- 5) F. J. Gardner, Transactions of the ASME, JANUARY, p. 1 (1957).
- 6) 戸沢康寿, 日本機械学会誌, **68**, 1090 (1965).
- 7) A. K. Ghosh, Transactions of the ASME, JULY, p. 264 (1977).
- 8) 西村 尚, 宮川松男, 日本機械学会誌, **75**, 614 (1972).
- 9) 日本塑性加工学会編, “プレス加工便覧”, p. 227 (1975) 丸善.
- 10) 日本材料学会編, “塑性加工学”, p. 121 (1980) 養賢堂.