紙葉類搬送ローラの搬送限界の検討*

吉田 和司^{*1}, 尾坂 忠史^{*2}

A Study on the Feeding Limit of Sheet Transporting Rollers

Kazushi YOSHIDA^{*3} and Tadashi OSAKA^{*3} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
502 Kandatsumachi, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

Sheet-handling machines often use two rollers that contact each other in order to transport sheets of different sizes. One of these rollers is driven, and the other is simply a follower (i.e., not driven). However, when a thick sheet goes into the nip of these transporting rollers, the sheet sometimes stalls or jams. This paper gives the characteristics of the feeding force and the feeding limit of the sheet transporting rollers. First, an analytical model of the transporting rollers is presented. Then, by using this model, the characteristics of the feeding force and feeding limit of the rollers are determined. From this study, it is concluded that the sheet may stall or jam if its thickness is over a limit that is determined by the radius of the rollers and the frictional coefficient of the driven roller.

Key Words: Information Processing Equipment, Business Equipment, Sheet, Transporting Rollers, Jam, Stall

1. 緒 言

プリンタや複写機等の紙葉類を取り扱う装置では、紙葉類の搬送手段として互いに接触した駆動ローラと従動ローラが多く用いられている。また、紙葉類を取り扱う装置の内、特に様々な厚さの紙葉類を搬送する装置では、搬送される紙葉類の厚さに対応できるように従動ローラはアームとばね手段を用いて揺動するように取り付けられる。しかし、厚い紙葉類を搬送した際に、このローラ部で滞留やジャムが生じ所望の搬送性能が得られない場合がある。

紙葉類の搬送ローラ部における搬送性能に関するこれまでの検討は、特にプリンタの画質向上を目的としたものが多く、紙葉類の搬送方向の搬送精度⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、シフトと称される紙葉類の幅方向の位置精度⁽⁴⁾、スキューと称される紙葉類の斜行に関する検討例⁽⁵⁾がある。しかし、搬送ローラ部で生じる紙葉類の滞留やジャム、あるいは搬送ローラで搬送可能な紙葉類の厚さの限界といったものについての検討例は見当たらない。

今回、搬送ローラ部での信頼性向上を目的として、紙葉類の搬送ローラ部における滞留やジャム、および搬送ローラ部の搬送限界について検討した。その結果、搬送ローラ部で搬送可能な紙葉類の厚さは、搬送ローラの径、および搬送ローラと紙葉類の間の摩擦係数と関係があることがわかったので報告する。

2. 搬送ローラ部の解析モデル

一般に、紙葉類を搬送する搬送ローラは、モータから駆動力が伝達される駆動ローラと、駆動ローラに押し付けるようにして取り付けられた従動ローラの一对で構成される。また従動ローラは、搬送される紙葉類の厚さに応じて揺動するようにアームに取り付けられ、アームの一部には従動ローラを駆動ローラに押し付けるためのばねが取り付けられる。さらに、これらのローラの表面は、紙葉類を搬送するための搬送力を確保するためにゴムで被覆されることが多い。

この搬送ローラ部をモデル化すると図1に示すようになる。ここで、 R_1 、 R_2 は各々従動ローラの半径、駆動ローラの半径、 t は紙葉類の厚さである。また、 θ_1 、 θ_2 は従動ローラ、駆動ローラに紙葉類からの抗力 N_1 、

Fig.1 Analytical model of sheet transporting rollers

* 原稿受付 1998年12月21日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒300-0013 土浦市神立町502)。^{*2} (株)日立製作所機械研究所。

N_2 が作用する方向と両ローラの中心とを結ぶ線分のなす角度, l はアームの長さ, φ_0 は初期状態においてアームと鉛直線のなす角度である。

ところで, 上記の θ_1 , θ_2 は紙葉類の厚さ t とローラの半径 R_1 , R_2 を用いて以下のように求めることができる。

図1に示したモデルから, 次の幾何学的な関係式が得られる。

$$R_1(1 - \cos \theta_1) + R_2(1 - \cos \theta_2) = t \quad (1)$$

$$R_1 \sin \theta_1 = R_2 \sin \theta_2 \quad (2)$$

ここで, 式(1), (2)をそれぞれ次の近似式に書き換える。

$$\frac{R_1 \theta_1^2}{2} + \frac{R_2 \theta_2^2}{2} = t \quad (3)$$

$$R_1 \theta_1 = R_2 \theta_2 \quad (4)$$

式(3), (4)を連立して解くと, 角度 θ_1 , θ_2 が以下のように求められる。

$$\theta_1 = \sqrt{\frac{t}{\left(R_1/2 + R_1^2/2R_2\right)}} \quad (5)$$

$$\theta_2 = \sqrt{\frac{t}{\left(R_2/2 + R_2^2/2R_1\right)}} \quad (6)$$

3. 運動方程式

厚さが一樣な紙葉類が, 搬送ローラ部に進入した瞬間に, 従動ローラ, 駆動ローラ, および紙葉類に作用する力を図2, 図3, 図4に示す。

この時, 従動ローラの揺動に関する運動方程式は, 図2から次のようになる。

$$J\ddot{\varphi} = Pl \sin \varphi_0 + N_1 l \sin(\varphi_0 - \theta_1) - M \quad (7)$$

ここで, J は従動ローラの揺動に関する慣性モーメント, $\ddot{\varphi}$ は角加速度, P はローラ間の抗力, M は復元モーメントである。

また, 従動ローラの回転に関する運動方程式は以下のようになる。

$$I_f \ddot{\alpha} = R_1(\mu_R P - f_1) \quad (8)$$

ここで, I_f は従動ローラの回転に関する慣性モーメント, $\ddot{\alpha}$ は回転の角加速度, μ_R は従動ローラ・駆動ローラ間の摩擦係数, f_1 は従動ローラ・紙葉類間の摩擦による力である。

駆動ローラの回転に関する運動方程式は, 図3から次のようになる。

$$I_d \ddot{\beta} = -R_2(\mu_2 N_2 + \mu_R P) + T \quad (9)$$

ここで, I_d は駆動ローラの回転に関する慣性モーメント, $\ddot{\beta}$ は回転の角加速度, T は駆動ローラに与えられる駆動トルクである。

紙葉類に関する運動方程式は図4から次のように求

Fig.2 Free body diagram for a follower

Fig.3 Free body diagram for a driven roller

Fig.4 Free body diagram for a sheet

められる。

$$m\ddot{x} = f_1 \cos \theta_1 + \mu_2 N_2 \cos \theta_2 - N_1 \sin \theta_1 - N_2 \sin \theta_2 + F_f - F_r \quad (10)$$

$$m\ddot{z} = -f_1 \sin \theta_1 - N_1 \cos \theta_1 + \mu_2 N_2 \sin \theta_2 + N_2 \cos \theta_2 + W \quad (11)$$

ここで, m は紙葉類の質量, $\ddot{x}$, $\ddot{z}$ は各々搬送方向, 搬送方向と垂直な方向の加速度, F_f , F_r は, 搬送ローラ以外の機構要素から紙葉類に作用する搬送力, 搬送抵抗抗力である。また, 紙葉類と駆動ローラの接触点回りのモーメントの釣り合い式は以下のようになる。

$$I_s \ddot{\gamma} = (f_1 \cos \theta_1 - N_1 \sin \theta_1)t + Wd + (F_f - F_r)t \quad (12)$$

ここで, I_s は紙葉類の駆動ローラとの接触点回りの慣性モーメント, $\ddot{\gamma}$ は角加速度, W は接触点回りのモーメ

ントにより発生する力、 d は紙葉類の先端から力 W が作用する位置までの距離である。

ところで、紙葉類が搬送ローラ部へ進入した際、搬送ローラの駆動ローラは軸の位置が固定されているため図5に示す方向に搬送される。ここで p は駆動ローラの周方向（紙葉類の搬送方向）、 q は駆動ローラの半径方向である。この時加速度 $\ddot{x}$ 、 $\ddot{z}$ 、 $\ddot{p}$ 、 $\ddot{q}$ には以下の関係式が成り立つ。

$$\ddot{p} = \ddot{x} \cos \theta_2 + \ddot{z} \sin \theta_2 \quad (13)$$

$$\ddot{q} = -\ddot{x} \sin \theta_2 + \ddot{z} \cos \theta_2 \quad (14)$$

式(13)、(14)に式(10)、(11)を代入すると以下のようになる。

$$m\ddot{p} = f_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) - N_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) + \mu_2 N_2 + (F_f - F_r) \cos \theta_2 + W \sin \theta_2 \quad (15)$$

$$m\ddot{q} = -f_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) - N_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) + N_2 - (F_f - F_r) \sin \theta_2 + W \cos \theta_2 \quad (16)$$

ここで、紙葉類が駆動ローラの半径方向に動くことはないので $\ddot{q}=0$ 、また、接点回りに回転することもないので $\ddot{\theta}=0$ とすると式(16)、(12)から N_2 、 W が以下のよう求められる。

$$N_2 = f_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) + N_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) + (F_f - F_r) \sin \theta_2 - W \cos \theta_2 \quad (17)$$

$$W = \frac{t}{d} (-f_1 \cos \theta_1 + N_1 \sin \theta_1) - \frac{t}{d} (F_f - F_r) \quad (18)$$

となる。式(17)、(18)を式(15)に代入して変形すると、

$$\begin{aligned} m\ddot{p} = & f_1 [\cos(\theta_1 + \theta_2) + \mu_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ & - \frac{t}{d} \cos \theta_1 (\sin \theta_2 - \mu_2 \cos \theta_2)] \\ & - N_1 [\sin(\theta_1 + \theta_2) - \mu_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ & - \frac{t}{d} \sin \theta_1 (\sin \theta_2 - \mu_2 \cos \theta_2)] \\ & + (F_f - F_r) [\cos \theta_2 + \mu_2 \sin \theta_2 \\ & - \frac{t}{d} (\sin \theta_2 + \mu_2 \cos \theta_2)] \end{aligned} \quad (19)$$

となる。ここで、上式の右辺において、 t/d に関する項は他の項に比べ微小であると仮定して、式(19)を次のような無次元化した運動方程式に書き換える。

$$\ddot{X} = \mu_1 \sigma_1 - \sigma_2 + \lambda \sigma_3 \quad (20)$$

ただし、

$$\ddot{X} = \frac{m\ddot{p}}{N_1} \quad (21)$$

$$\mu_1 = \frac{f_1}{N_1} \quad (22)$$

$$\sigma_1 = \cos(\theta_1 + \theta_2) + \mu_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (23)$$

$$\sigma_2 = \sin(\theta_1 + \theta_2) - \mu_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (24)$$

$$\sigma_3 = \cos \theta_2 + \mu_2 \sin \theta_2 \quad (25)$$

$$\lambda = \frac{F_f - F_r}{N_1} \quad (26)$$

である。

Fig.5 New coordinates p and q

4. 搬送ローラの搬送限界の検討

4.1 理論検討 次に紙葉類の搬送ローラの搬送限界について検討する。搬送ローラの搬送限界は、他の搬送手段による搬送力や搬送抵抗力が紙葉類に作用しない場合について考えねばならないので、紙葉類に関する無次元の運動方程式が

$$\ddot{X} = \mu_1 \sigma_1 - \sigma_2 \quad (27)$$

の場合について検討する。

紙葉類が搬送ローラから力を受けて搬送されるためには、式(27)から次式が成立しなければならない。

$$\mu_1 \sigma_1 - \sigma_2 \geq 0 \quad (28)$$

上式の条件を満たす範囲は、式(23)、(24)を上式に代入して変形すると、

$$\theta_1 + \theta_2 \leq \tan^{-1} \left(\frac{\mu_1 + \mu_2}{1 - \mu_1 \mu_2} \right) \quad (29)$$

となる。すなわち、搬送される紙葉類の厚さが上式(29)の範囲内にあるものは、搬送ローラにより紙葉類に搬送方向への力が作用する。

また、紙葉類が正常に搬送される際には従動ローラも紙葉類を搬送する方向に回転しなければならないので式(8)から次式が成立しなければならない。

$$\mu_R P - f_1 \geq 0 \quad (30)$$

ところで、紙葉類が搬送ローラに挟持されて搬送される場合には従動ローラと駆動ローラの間の接触力がなくなるので $P=0$ となる。したがって式(30)の条件が成立するためには、

$$f_1 \leq 0 \quad (31)$$

でなければならない。 N_1 はローラと紙葉類の間に作用する抗力であるので負の値になることはない。したがって式(31)が成立する条件は、式(22)を考慮すると、

$$\mu_1 \leq 0 \quad (32)$$

となる。

従動ローラ・紙葉類間の摩擦係数 f_1 を抗力 N_1 で割った

値 μ_1 は、紙葉類が一定の速度で搬送されている場合には、式(27)から次式となる。

$$\mu_1 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (33)$$

これを式(32)に代入すると、

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \leq 0 \quad (34)$$

となる。式(23)からわかるように、 σ_1 も負の値になることはないので式(34)を満たすための条件は

$$\sigma_2 = \sin(\theta_1 + \theta_2) - \mu_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \leq 0 \quad (35)$$

すなわち

$$\theta_1 + \theta_2 \leq \tan^{-1}(\mu_2) \quad (36)$$

となる。

式(29)と式(36)を比較すると式(36)の方が $\theta_1 + \theta_2$ の値が小さいので、紙葉類に搬送方向へ慣性力が作用し、かつ、従動ローラが紙葉類の搬送方向へ回転するための条件は式(36)となる。厚さがこの条件を満たす範囲にある紙葉類は、搬送ローラに挟持されて正常に搬送される。

ところで、上に示した条件式(29)、(36)から、紙葉類の厚さの範囲が

$$\tan^{-1}(\mu_2) < \theta_1 + \theta_2 \leq \tan^{-1}\left(\frac{\mu_1 + \mu_2}{1 - \mu_1 \mu_2}\right) \quad (37)$$

となる範囲が存在する。この範囲は、式(29)が成立しているために紙葉類には搬送方向への慣性力が作用する。しかし、式(36)が成立しないため

$$f_1 > 0 \quad (38)$$

となり、紙葉類が搬送ローラに挟持されたときに、従動ローラには紙葉類の搬送方向と逆回転方向にローラを回転しようとする慣性力が作用する。このため従動ローラが逆転しようとして搬送ローラに挟持された紙葉類に抵抗力を作用させる。このため紙葉類は、搬送ローラに噛み込まれて挟持されるが、その後は従動ローラから抵抗力を受けて搬送することができない状態となる。(以下、ロック現象と称する。)

以上をまとめると、紙葉類の搬送ローラ部の搬送状態には、紙葉類の厚さによって次の三つの状態が存在することがわかる。

(1) 紙葉類の厚さが

$$\theta_1 + \theta_2 \leq \tan^{-1}(\mu_2) \quad (39)$$

の範囲内にある場合：紙葉類は搬送可能

(2) 紙葉類の厚さが

$$\tan^{-1}(\mu_2) < \theta_1 + \theta_2 \leq \tan^{-1}\left(\frac{\mu_1 + \mu_2}{1 - \mu_1 \mu_2}\right) \quad (40)$$

の範囲内にある場合：ロック状態となる

(3) 紙葉類の厚さが

$$\theta_1 + \theta_2 > \tan^{-1}\left(\frac{\mu_1 + \mu_2}{1 - \mu_1 \mu_2}\right) \quad (41)$$

の範囲内にある場合：紙葉類は搬送不可

4.2 実験による検証

上述した紙葉類搬送ローラの搬送限界に関する理論検討を検証するために実験を行った。なお検証を行う指標は、駆動ローラへの駆動トルクと実際の紙葉類の挙動である。

図6は実験の方法を示したものである。実験は模擬紙葉類を搬送ローラへ接触するようにセットした後に搬送ローラの駆動ローラを紐で引っ張って回転させ、この時の張力を荷重測定器(フォースゲージ)で測定して駆動トルクを計算した。なお、実験時の諸条件を表1に示す。また、駆動ローラの中心と紐が掛けられたフックまでの距離は15mmである。模擬の紙葉類としては、厚さが均一なアルミ板の表面にカット紙を貼り付けたものを用いた。

駆動トルク T は、式(7)～(12)までの慣性力をすべて0とした釣り合い式から、未知数 P 、 N_1 、 f_1 、 W 、 N_2 、を求めることで計算することができる。なお、 θ_1 、 θ_2 の値は式(5)、(6)を用いて計算した。

図7は、上述の運動方程式と摩擦係数の値を用いて計算した搬送ローラの駆動トルク T の計算値と実験値とを比較したものであり、両者の値は非常に良く一致している。

この実験を行った際、厚さが2mm以上6mm以下の模擬紙葉類では理論検討で示した通り、紙葉類が搬送ローラに噛み込まれた直後に動かなくなるロック現象が発生した。また、紙葉類がロックして停止した状態では、駆動ローラのみが搬送方向へ回転し、従動ローラは停止はしているが逆方向へわずかに回転しようとする挙動が見られた。

Table 1 Parameter conditions at the experiment

Parameter	value
radius of follower R_1	20 mm
radius of driven roller R_2	22.5 mm
frictional coefficient of driven roller μ_2	0.6
moment caused by spring M	230 Ncm

Fig.6 Experiment for driving torque measurement

今回の実験条件では、式(37)に示したロック現象の範囲は、紙葉類の厚さが約1.5mmから6.2mmの範囲となり、この範囲についても実験結果と理論値は良く一致した。

5. 考 察

5.1 従動ローラと紙葉類の間の摩擦力について 今回の解析では、従動ローラと紙葉類との間に作用する摩擦力を f_1 として、一般に行われているように実際の静止摩擦係数の値を用いず未知数として取り扱った。その結果、式(32)に示すように紙葉類が搬送ローラから搬送力を受けて搬送されるためには、摩擦力 f_1 が負の値でなければならないことがわかった。

このことから考えると、紙葉類が搬送ローラ部でロック現象も生じずに搬送されるためには、従動ローラと紙葉類との間の摩擦力が図2に示した方向とは逆の方向に作用していなければならないことになる。すなわち、搬送力の伝わり方が、駆動ローラが紙葉類を搬送し、紙葉類が従動ローラを駆動する場合に正常な搬送を行うことができ、紙葉類が駆動ローラだけでなく従動ローラからも搬送力を受ける場合にはロック現象が生じることがわかる。

5.2 付加的な搬送力と抵抗力の影響 これまでの検討結果は、搬送ローラのみの搬送力について検討した。したがって他の要素から紙葉類に付加的な搬送力や抵抗力が作用すると異なった結果となる。

図8は、今回の実験装置での搬送ローラから紙葉類に作用する搬送力 $\mu_1\sigma_1 - \sigma_2$ と式(20)の右辺第3項で表わされる付加的な搬送力・抵抗力 $\lambda\sigma_3$ を計算した結果を示したものである。

この計算を行う際、 μ_1 の値は式(33)より求めたが、 μ_1 の値は実験により求めた従動ローラと紙葉類の間の摩擦係数0.6より大きくならないとした。

この図において $\mu_1\sigma_1 - \sigma_2$ の線が $\lambda\sigma_3$ の線より上にある範囲が紙葉類が搬送可能な領域である。これから、より厚い紙葉類を搬送するためには搬送される紙葉類に他の搬送手段により付加的な搬送力を付与することが必要であることがわかる。逆に紙葉類に抵抗力が作用する場合には、薄い紙葉類であっても搬送ローラ部でロック現象や搬送不能となる可能性があることがわかる。

実際の搬送ローラ部では、紙葉類がある速度をもって従動ローラに衝突するために従動ローラが跳ね上げられ今回示したようなロック現象は発生しにくいと考えられる。しかし、低速で紙葉類が搬送されるような場合や冊子のように途中から厚さが急に増すような紙葉類については、特に搬送ローラ部でロックする可能性が高いことを認識しておく必要がある。

Fig.7 Comparison between calculation results and experimental results for driving torque

Fig.8 Calculation results of the non-dimensional transporting force and additional force acting on the sheet

Fig.9 Analytical model of sheet transporting rollers

5.3 従動ローラのアームの取り付け位置の影響 従動ローラのアームの取り付け位置は、実装上の問題がない限り図1に示したモデルとは異なり、紙葉類を搬送しやすいことから一般には図9に示すように紙葉類が搬送されてくる方向に設けられる。

しかし、この時の搬送ローラと紙葉類の運動方程式は、従動ローラの揺動に関する運動方程式(7)において、

$$J\ddot{\varphi} = Pl\sin\varphi_0 + N_1l\sin(\varphi_0 + \theta_1) - M \quad (42)$$

と、右辺第二項が変わるだけで、他の運動方程式は変わらない。すなわち、搬送ローラの搬送限界についてはこれまでに示した結果と同一である。ただし、式(7)と式(42)を比較してわかるように、図9に示した場合の方が、 N_1 の値が小さくなり駆動トルク T も小さくすることができる。図1の場合、 φ_0 と θ_1 の値の差が小さくなるほど N_1 の値が大きい必要があり、また $\varphi_0 \leq \theta_1$ の条件の場合では従動ローラを押し上げることができずジャムとなる。

6. 結 言

様々な厚さの紙葉類を搬送する搬送ローラの搬送限界について検討し、以下に示す結論を得た。

- (1) 搬送ローラ部で滞留やジャムが生じることなく搬送できる紙葉類の厚さの限界は、搬送ローラの径、及び搬送ローラの駆動ローラと紙葉類の間の静止摩擦係数によって決まる。

- (2) 搬送ローラ部の従動ローラと紙葉類の間の摩擦力は、静止摩擦係数の値では決まらず紙葉類の搬送状態で変化する。
- (3) 搬送ローラの径、駆動ローラと紙葉類との間の静止摩擦係数で決定される搬送可能な紙葉類の厚さの限界値より厚い紙葉類を搬送するためには、他の搬送手段により付加的な搬送力を紙葉類に作用させる必要がある。

文 献

- (1) 松野順一・河内正隆, 日本機械学会第64期通常総会講演会講演概要集, 870-2, (1987-3), 267-268.
- (2) 小林祐子・栗原映男・服部俊介・嶋康男・鶴飼眞, 日本機械学会第71期全国大会講演論文集(E), (1993-10), 249-251.
- (3) 小林祐子・栗原映男・服部俊介・嶋康男・鶴飼眞, 日本機械学会第71期通常総会講演会講演論文集(IV), (1994-3), 719-721.
- (4) K.D.Stack・R.C.Benson, Proceedings of the 1993 JSME International Conference on Advanced Mechatronics, (1993-8), 731-735.
- (5) 藤村浩・小野京右, 日本機械学会論文集(C編), 62-596, (1996), 108-114.