ゴムローラによる柔軟媒体搬送の 特性解析と設計*

Analysis of Flexible-media Transport Characteristics of Rubber-layered Roller and Its Application to Design

山浦 弘**
Hiroshi YAMAURA

Key words rubber roller, nip mechanism, feeding mechanism, micro-slip, crown roller

1. はじめに

紙やフィルムなどの柔軟媒体を搬送する機構として、ゴム挟持ローラと呼ばれるゴムローラと鋼ローラの対がしばしば用いられる。また、積み重ねられた紙などの上面にゴムローラを押し付けてローラの回転により繰り出す機構もプリンタ・コピー機などで一般的に用いられている。しかし、最も基本的な媒体搬送速度に着目しても、ローラ押し付け力、ゴム硬さ、摩擦係数、媒体に与えられる張力など多くのパラメータの影響を受けるため、これまでは理論的な予測が困難であった。また、ゴム挟持ローラによる媒体搬送では、条件によっては、媒体の横ズレや斜行、しわなどが生じることがあり、これらの現象の理論的な解明も望まれている。

筆者は、小野京右先生（現東京工業大学名誉教授）の指導の下、精密工学会の「柔軟媒体搬送技術と学理に関する研究専門委員会（第1期：1998-2002、第2期：2004-2009）」および日本機械学会の研究調査分科会（2010-現在）における産学協同研究として、基本的な柔軟媒体搬送機構の媒体搬送特性解析と設計について研究を行ってきた。これらの研究の概要の一部については、すでにワークショップ資料¹⁾や研究専門委員会の活動レビュー²⁾の中でも紹介されているが、本稿では最新の研究成果を含めて解説する。

2. 媒体速度の決定要因

まず、図1のようなゴム挟持ローラによって柔軟媒体が搬送できるのは以下のようなメカニズムによると考えて

よい。

柔軟媒体が定常速度で搬送されているときには、柔軟媒体をゴムローラと鋼ローラで挟持している部分（ニップ部）において、駆動側であるゴムローラから非駆動側である柔軟媒体に、柔軟媒体に作用している張力および鋼ローラに作用するブレーキトルク（軸の摩擦トルク）の鋼ローラ表面換算力の合力と釣り合う力（負荷力）が作用している。

実用上あまり見られない状態であるが、柔軟媒体が静止してゴムローラが空転している状態の負荷力 T を $T_{\max}$ とし、押し付け力を F 、ゴムローラと柔軟媒体との間の動摩擦係数を μ とすると、アーモントン・クーロンの法則から

$$T_{\max} = \mu F \quad (1)$$

と考えてよく、逆に式(1)の関係を使って実験結果から動摩擦係数 μ を同定できると考えてもよい。このとき、ニップ部全体においてゴムローラと柔軟媒体の接触面は非零の相対速度をもっている、すなわち、「滑っている」ため、「完全に滑っている（完全スリップしている）」ということができる。

一方、ゴムローラから柔軟媒体に伝達する負荷力 T が $T_{\max}$ よりも小さく、柔軟媒体が一定速度で搬送されている通常の使用状態では、ニップ部においてゴムローラと柔軟媒体の接触面において相対速度が零の部分が存在することが容易に想像される。相対速度が零の部分は滑っていないため、このような状態では「部分的に滑っている（部分スリップまたはマイクロスリップしている）」ということができる。この相対速度が零の領域を「固着領域」と呼び、この固着領域での等速度条件から、以下の式が成立する。

$$V_r(1 + \varepsilon_r) = V_p(1 + \varepsilon_p) \quad (2)$$

ここで、 V_r はゴムローラの実速度、 ε_r は固着領域におけるゴムローラ表面の歪、 V_p は媒体搬送速度、 ε_p は固着領域における柔軟媒体表面の歪である。この式(2)は、ゴム挟持ローラだけではなく、繰り出し搬送でも成立する重要な式である。また、ゴムローラ表面

*原稿受付 平成24年2月29日

**東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻（東京都目黒区大岡山2-12-1-I3-10）

山浦 弘

1988年、東京工業大学機械工学専攻修了。同年、同大学工学部助手、助教授、准教授を経て2009年以降、現所属において教授を務める。専門は、機械力学、制御工学、トライボロジーなど。

図1 ゴム挟持ローラによる媒体搬送モデル

の歪 ϵ_r が正の（ゴムローラ表面が伸びている）場合には、搬送される媒体の速度 V_p が搬送しているゴムローラの表面速度 V_r を超えるという一見非常識な現象が起こりえることを示している。さらに、式（2）より、媒体搬送速度 V_p を決定するためには、他のパラメータを定めればよく、 V_r は設計可能であり、 ϵ_p は比較的小さいことから、 ϵ_r を計算することが最も重要となる。

3. 短軸ゴム挟持ローラの基本特性解析

押し付け力の軸方向分布を一定と見なせるゴム挟持ローラを筆者らは短軸ゴム挟持ローラと呼んでいる。短軸ゴム挟持ローラのゴムローラ表面の歪 ϵ_r は、2つのローラの外径、ゴム硬度、ゴム厚さ、ゴムと媒体の摩擦係数、媒体に伝達する張力で決定されるが、以下の仮定を置き、これを解析する手法を提案している³⁾⁴⁾。

1. ゴムの変形は軸方向断面内の2次元変形である。
2. ゴムの変形は線形な弾性変形である。
3. ゴム硬度はヤング率に換算できる。
4. ゴムのひずみは平面ひずみである。
5. ミクロな領域において、ゴムと紙（または銅ローラ）の間の摩擦はアーモントン・クーロンの法則に従い、摩擦係数は力の大きさおよび速度に依存しない。さらに、静止摩擦係数と動摩擦係数は同じ値である。
6. ニップ部内での紙の伸びおよび厚みの変化は無視できる。
7. ニップ部において紙の曲げ剛性の影響は無視できる。

提案している解析手法を用いれば、負荷力 T の増加により、柔軟媒体（または銅ローラ）の速度が徐々に遅くなっていく部分スリップ特性（図2）と、押し付け力 F に対するゴムローラの押し込み量 δ_z の非線形ばね特性（図3）が求められる。摩擦係数およびゴムローラの弾性係数を適切に選択すれば、これらの解析結果から、ゴム厚さや荷重の変化に対応する実験結果を予測可能である。

図2 ゴムローラの部分スリップ特性の一例

図3 ゴムローラの非線形ばね特性の一例

4. 長軸ローラの搬送特性解析

図4に示すような、押し付け力の軸方向分布が無視できないローラを長軸ローラと呼んでいるが、長軸ローラの媒体搬送特性も、短軸ゴム挟持ローラの解析結果を応用す

図4 偏荷重による紙のスキュー

図5 紙のスキュー角度特性の実験値と理論値の比較

ること、解析可能である⁵⁾。

長軸ローラに特徴的な、偏荷重による柔軟媒体のスキューは、短軸ローラにおける仮定に加え、以下の仮定を考慮して解析を行った。

1. 押し付け力の軸方向分布は主にゴムローラ軸芯の曲げ変形によって生じる。
2. 各軸方向位置での押し付け力に依存するゴムローラの押し込み量は短軸ローラ解析で得られた非線形ばね特性となる。
3. 柔軟媒体の上下面に作用する負荷力 T によるモーメントは釣り合っている。
4. ニップ部における紙の速度分布は、等荷重の場合には一定であり、偏荷重の場合には軸方向座標に関して一次関数となる。

図5は、偏荷重による紙のスキュー角度の実験結果の一例と理論解析結果の比較を示している。破線 (Uniform) で示したニップ部における紙の表面ひずみが紙厚さ t と鋼ローラ半径 R_s で計算できる曲げひずみ ($\epsilon_p = \pm t/(2R_s)$) であると仮定した結果も実験結果の傾向を

図6 ニップ部の紙のひずみの実験値と同定モデル値の比較

図7 真直ローラと軸方向押し付け力分布の概形

よく表しているが、実線 (Nonuniform) で示したニップ幅に応じて表面ひずみが増加するせん断変形の効果 (図6) を考慮したモデル⁶⁾を用いた場合には実験結果とよく一致した結果を得ることができた。

5. クラウンローラの搬送特性解析と設計応用

図7は、真直ローラからなるローラ対と押し付け力の軸方向分布の概略を表している。このように真直なローラではゴムローラ軸芯の変形により、中央部における荷重の減少が避けられないため、これを補償する目的で中央部のローラ径をローラ端部のローラ径と比して大きくするクラウンローラがしばしば用いられる。また、紙に生じるしわの対策などを目的として、逆に中央部のローラ径をローラ端部のローラ径よりも小さくする逆クラウンローラが用いられることもある。

短軸ゴムローラの特性をゴムローラの内外径を変化させて計算しておけば、一般的なクラウンローラおよび逆クラウンローラの搬送特性も解析が可能である⁷⁾。押し付け力の軸方向分布を一定とするクラウンローラの形状は、ゴムローラ軸芯に作用する等分布荷重による変形曲線に一致す

図8 内クラウンローラの設計例

図9 内クラウンローラの荷重変動に対するロバスト性

図10 紙の繰り出し機構実験装置

ることから、容易に設計が可能であるが、筆者らは、最大ニップ圧力や接線力を軸方向に一定とするクラウンローラの設計法を明らかにした。

さらに文献7)では、内クラウンローラと名付けたゴムローラ軸芯にクラウンをもたせる形式を提案し、その設計法ならびに有効性を示している。図8はゴムローラの外半径15 mm、最大ゴム厚さ3 mmとして、軸方向に押し付け力 F 、最大ニップ圧力 $p_{\max}$ 、接線力 T を一定とする内クラウンの形状およびそのときの軸方向分布である。内クラウンは、一般的なクラウンに比べ、大きな直径変化をもち、加工誤差の影響を受け難い特徴をもつ。また、一般にクラウン形状は設計押し付け力に依存するため、荷重が変化するとその設計意図が満足されないが、内クラウンを用いた場合には荷重が変化しても軸方向の均一性を損ない難く、図9の実験結果が示すように設計荷重(58.8 N)に

対して $\pm 15\%$ 以上の荷重変化をさせても、最大ニップ圧力の最大値を1として表現すれば、その均一性の変化は小さい。

6. 繰り出し機構による媒体搬送特性

繰り出し機構の媒体搬送特性は、負荷力 T が押し付け力 F と独立に変化することではなく、常に $T = \mu_{pp}F$ である点がニップ搬送とは異なる。ただし μ_{pp} は搬送される媒体とその下の物体との間の動摩擦係数である。したがって、押し付け力の増加により搬送速度が増加するかどうかは動摩擦係数の大きさに依存し、動摩擦係数の大きさによっては速度が減少から増加に変わるなど、複雑な特性を示す⁸⁾。

図 11 紙の繰り出し特性実験結果と解析結果の比較

繰り出し機構の搬送特性実験装置（図 10）を用いてゴムローラ表面速度 0.01～7.0 m/s の範囲で行った実験によれば，ゴムローラ表面速度に対する媒体の搬送速度の比は，図 11 に示すようにゴムローラ表面速度が増加するに従い，わずかに減少する⁹⁾。この減少の理由として，(a) ゴムの粘弾性の影響，(b) ゴムと媒体間の動摩擦係数の速度依存性の影響，(c) 媒体とその下の物体との間の動摩擦係数の速度依存性の影響，の 3 つの要因について検討したが，図 11 中に示すように (c) が最も影響が大きく，その他の要因は速度比を減少させる効果はないか逆に増加させる効果があることが分かった。図中 (d) は (a) ～ (c) 全ての要因を考慮した解析結果である。

7. お わ り に

本稿では，ゴムローラによる柔軟媒体搬送の特性解析と設計に関する筆者らの研究を基に解説を行った。ページ数の関係で解析手法の詳しい説明などは行えなかったもので，詳細は論文を参照していただきたい。実際の機構の設計にわずかでも参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 橋本巨，矢鍋重夫，山浦弘，吉田和司，正田伸治：柔軟媒体搬送技術と学理に関する研究専門委員会 柔軟媒体搬送技術と学理に関する研究専門委員会活動レビュー，精密工学会誌，**75**，10 (2009) 1174.
- 2) 山浦弘：ゴムローラによる紙送り特性，日本機械学会年次大会講演資料集，**8** (2007) 382.
- 3) 山浦弘，小野京右，高橋有亮，中澤高志：鋼芯を有するゴムローラの Green 関数とゴムローラ・鋼ローラ間の摩擦駆動特性解析，日本機械学会論文集 (C 編)，**68**, 667 (2002) 801.
- 4) 山浦弘，小野京右，中澤高志：短軸ゴム挟持ローラによる紙搬送特性，日本機械学会論文集 (C 編)，**70**, 694 (2004) 1588.
- 5) 富松将，山浦弘，小野京右：長軸ゴムローラ・鋼ローラによる紙搬送特性解析に関する研究，日本機械学会論文集 (C 編)，**71**，712 (2005) 3525.
- 6) 富松将，山浦弘，小野京右：ゴムローラ・鋼ローラを用いたニップ搬送における紙の表面ひずみ特性，日本機械学会論文集 (C 編)，**71**, 712 (2005) 3517.
- 7) 飯塚陽一郎，山浦弘：クラウンローラの柔軟媒体搬送特性解析と設計に関する研究，日本機械学会論文集 (C 編)，**75**, 754 (2009) 1851.
- 8) 馬野寛士，山浦弘：ゴムローラによる紙の繰り出しに関する研究，日本機械学会論文集 (C 編)，**75**, 755 (2009) 1965.
- 9) 馬野寛士，山浦弘：ゴムローラによる紙の繰り出しの速度依存性に関する研究，日本機械学会論文集 (C 編)，**77**, 778 (2011) 2476.