ゴム巻きロールの多角形化現象* (解析手法の実用性検証)

山口 正博*¹, 広岡 秀樹*¹, 高崎 勝明*¹
片山 圭一*², 末岡 淳男*³, 劉 孝宏*³

Polygonal Deformation of Roll-Covering Rubber (Practicability of Prediction Method)

Masahiro YAMAGUCHI, Hideki HIROOKA, Katsuaki TAKASAKI,
Keiichi KATAYAMA, Atsuo SUEOKA and Takahiro RYU

Rubber-covered rolls are in wide use in many machines for processing, pressing and conveying paper and plastic film. We have studied the polygonal deformation caused by viscoelastic deformation of roll-covering rubber under high load and at high speeds. It is said that the above-mentioned phenomenon is influenced by rubber damping and its deformation recovery characteristics. Previously, we reported a prediction method for analysis of this phenomenon, regarding viscoelastic deformation as causing instability due to the time-delay deformation. In this study, we compared experimental with calculated results, and found good agreement between them. Moreover, in this report we describe methods for preventing polygonal deformation.

Key Words: Vibration of Rotating Body, Stability, Modelling, Contact Vibration, Viscoelasticity, Polygonal Deformation, Time-Delay System, Deformation Recovery, Identification

1. 緒 言

接触回転系のパターン形成現象については、圧延ロールにおいて発生するチャタマーク⁽¹⁾、工作機械において発生するびびりマーク、レールのコルゲーション⁽²⁾などさまざまな分野で研究が進められている⁽³⁾。

著者らは上記現象のうち、接触部に粘弾性体が介在するゴム巻きロールの多角形化現象について、抄紙機スミザロールを対象に、粘弾性変形を伴う線形時間遅れ系としてのモデル化とこれに基づく安定解析手法を提案し、現象発生メカニズムを明らかにしてきた^{(4)~(6)}。

本報では、ゴム巻きロールの主要諸元であるゴム種、ゴム厚の多角形化現象発生に及ぼす影響を解析・実験両面から検討し、上記解析手法の実用性を確認したので、多角形化現象防止策の提案とともに以下に報告する。

2. 多角形化現象とその解析手法

2.1 多角形化現象 抄紙機スミザロールの表面には、JIS 硬度(A)90°前後のゴムが巻かれているが、これを高線圧かつ高速で回転させると表面のゴムが図1のように、硬度の低い側のトップロールが多角形に変形し、大きな振動が発生することがあり、高線圧・高速回転状態でのゴム巻きロール使用の障害となっている。多角形化現象が発生したときの典型的なトップロールとボトムロールの垂直方向の振動波形と被覆ゴムの変形例を図2に示す。図2(a)が多角形化現象

図1 ゴム巻きロールの多角形化現象

* 平成6年8月17日 第72期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成6年8月30日。

¹ 正員、三菱重工業(株)広島研究所(☎729-03 三原市糸崎町5007)。

² 正員、三菱重工業(株)広島研究所(☎733 広島市西区観音新町4-6-22)。

³ 正員、九州大学工学部(☎812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

(a) 多角形化現象発生前 (b) 多角形化現象発生時

図2 多角形化現象発生時の振動状況

象発生前, 図2(b)が多角形化現象発生時の振動状況を示している。図2の場合, トップロール表面のゴムが六角形に変形している。この多角形化現象の特徴を要約すると以下のとおりである。

- (1) トップロールとボトムロールの振動の位相は, 逆相である。
- (2) (ロール系の垂直方向固有振動数)/(トップロール回転数)が, 整数倍近傍になった場合に, 被覆ゴム表面にその整数倍の角形数の角形数の多角形パターンが形成される。
- (3) ロール間に作用する線圧が高いほど, またロール回転数が大きいほど多角形化現象が発生しやすい。

(4) 同種ゴムであれば, ゴム厚が薄いほうが多角形化現象を発生しにくい。

(5) ゴム種で比較すると, ウレタン系よりクロロプレン系ゴムのほうが発生しにくい。

(6) 多角形化が発生したのち, ゆっくりロールを回転させると, 多角形パターンは15分程度で消滅する。したがって, ゴムの変形は粘弾性的である。

2.2 モデル化および解析手法 ゴムは粘弾性体であり, その変形および変形回復形態は, 一般的に図3のように表される⁽⁷⁾。図3はゴムに矩形状の荷重を与えた場合の変形パターンを示しているが, 載荷時・除荷時とも瞬時に d_1 だけ変形・回復し, その後徐々に変形・回復が進展する。後者は遅延弾性変形と呼ばれ, ゴムの粘性抵抗(減衰)により発生するもので, 粘弾性体特有の力学的特性である。

上記の力学的特性を記述するため, 種々の力学モデルが提案されているが⁽⁸⁾, ここでは3要素モデルを想定し, 図4に示す振動解析モデルを考える。図4に示す振動系の運動方程式は, 次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + k_3(x_1 - z) &= 0 \\ k_3(z - x_1) + c_4 \dot{w} + k_4 w &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 - c_4 \dot{w} - k_4 w &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

図3 ゴムの変形特性

図4 振動解析モデル

ここに,

$$\left. \begin{aligned} w &= u(t) - \exp(-\alpha t_0) u(t - t_0) \\ u(t) &= z(t) - x_2(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$u(t)$ はニップ部通過直後のゴムの変形量, t_0 はロール1回転時間, α はゴム変形回復部の回復特性指数を表す。以後, この α を遅延弾性指数と呼ぶことにする。

式(1)はニップ部通過直後のゴムの遅延弾性変形量が時間 t_0 後に $\exp(-\alpha t_0)$ 倍だけフィードバックされる時間遅れ系の運動方程式を表している。式(2)の第1式第2項がニップ部に再突入する際のゴムの残留変形量を表す。 α が小さくなることは, ロール1回転後の残留変形量が増加することを意味する。

多角形化現象発生の有無は, 既報⁽⁴⁾で報告のように式(1)をLaplace変換し, その特性方程式から求められる特性根の実部の正負で判定することができ, 角形数については特性根の虚部とロール回転数との比より推察することができる。

3. 解析手法の実用性検証

3.1 多角形化現象再現実験 解析手法の実用性を把握するため, 実験装置を製作し, 多角形化現象の

再現実験を行って、解析結果と比較した。

図5に実験装置の概要を示す。実験装置の主要諸元は以下のとおりである。

(1) ロール径, ロール面長

両ロールともセル外径 700 mm (実機と同程度), 面長 500 mm (実機の 1/10 程度)

(ロールの曲げ剛性を実機と等価にするため, 図5に示すような板ばねを加圧アームと軸受間に装着した)

(2) 加圧方式

トップロール油圧シリンダー加圧

(3) ロール被覆ゴム硬度

トップロール: 硬度 JIS(A) 90°程度

ボトムロール: 硬度 JIS(A) 100°程度

(ロール間の力学的特性はトップロールの被覆ゴム支配とみなすことができる)

(4) 駆動方式

45 kW 直流モータ 2 台によるトップロール・ボトムロール独立駆動, 負荷分担制御

実験方法としては, ロール回転数, ロール間作用荷重(線圧)をパラメータに軸受振動加速度とゴムの表面変形パターンを測定しながら一定時間運転し, 多角形化現象の発生有無を調べた。

前記解析手法の実用性を把握するため, 多角形化現象発生に関し影響が大きいことが経験的に把握されているゴム種・ゴム厚に注目し, トップロールのそれらを変化させて実験を行った。

実験結果を図6~8に示す。図6はクロロプレン系ゴムでゴム厚 25 mm, 図7は同種ゴムでゴム厚 20 mm, 図8はウレタン系ゴムでゴム厚 25 mm の実験結果をそれぞれ示しており, 横軸はロール回転数, 縦軸は線圧を表す。また, 図中○印は多角形化現象発生なし

図5 実験装置の概略図

を, ×印は発生を示し, 図中の数字は角形数(n)を示している。ロール系の固有振動数は図6~8においてそれぞれ, 50 Hz, 60 Hz, 70 Hz 程度であり, 多角形化現象は(ロール系の固有振動数)/(ロール回転数)が整数倍近傍になる場合に発生している。ただし, 発生の有無はロール回転数と線圧により影響され, ロール回転数が大きいほど, 線圧が高いほど多角形化現象が発生しやすい。図6~8を比べると, ゴム厚は薄いほうが多角形化現象が発生しにくく, ゴム種ではクロロプレン系ゴムのほうが多角形化現象が発生しにくいことが

図6 多角形化再現実験結果(クロロプレン 25 mm 厚)

図7 多角形化再現実験結果(クロロプレン 20 mm 厚)

図8 多角形化再現実験結果(ウレタン 25 mm 厚)

表 1 解析パラメータの同定結果

	Chloroprene 25mm	Chloroprene 20mm	Urethan 25mm
m_1	$1.4 \times 10^3 \text{ kg}$	$1.4 \times 10^3 \text{ kg}$	$1.4 \times 10^3 \text{ kg}$
k_1	$4.0 \times 10^4 \text{ kN/m}$	$4.0 \times 10^4 \text{ kN/m}$	$4.0 \times 10^4 \text{ kN/m}$
c_1	$10.8 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$	$10.8 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$	$10.8 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$
m_2	$1.4 \times 10^3 \text{ kg}$	$1.4 \times 10^3 \text{ kg}$	$1.4 \times 10^3 \text{ kg}$
k_2	$1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$	$1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$	$1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$
c_2	$10.8 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$	$10.8 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$	$10.8 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$
k_3	$1.1 \times 10^3 \times P^{0.83} \text{ kN/m}$	$1.4 \times 10^3 \times P^{0.83} \text{ kN/m}$	$3.4 \times 10^4 \times P^{0.40} \text{ kN/m}$
k_4	$1.5 \times 10^3 \times k_3^{0.51} \text{ kN/m}$	$7.4 \times 10^{-2} \times k_3^{1.42} \text{ kN/m}$	$1.6 \times 10^{-2} \times k_3^{1.46} \text{ kN/m}$
c_4	$3.0 \times 10^2 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$	$7.8 \times 10^2 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$	$9.3 \times 10^2 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$
α	1.9 1/s	3.1 1/s	3.0 1/s

図 9 ゴムの荷重～変形特性測定方法

わかる。これらの実験結果は実機で経験される傾向と一致している。

3・2 解析パラメータの同定 多角形化現象発生有無の解析に必要なパラメータ(図 4)を以下のように同定する。

3・2・1 ロール支持系パラメータ ロール質量は既知であるので、トップロールおよびボトムロール単体加振テストにより、図 4 に示す解析モデルのロール支持ばね定数 k_1 , k_2 および減衰定数 c_1 , c_2 を同定する。

3・2・2 ゴム部のパラメータ ゴムの変形ばね定数 k_3 , k_4 は、図 9 に示すような、実験機のセル外径 700 mm に合せたテストピースの荷重～変形特性より算定する。

線圧 P とゴムの変形量 δ の関係式を曲線近似し、次式のように定義する。

$$P = a \times \delta^b \quad (3)$$

ここに、 a および b は実験データから求められる任意の定数である。

ゴムのばね定数 k_3 は、 k_4 が k_3 に比較して十分大きいことがわかっているのので、式(3)を δ で微分して次式のように算定する。

$$k_3 = \frac{dP}{d\delta} = a \cdot b \cdot \delta^{b-1} \quad (4)$$

式(3), (4)より δ を消去すると、次式を得る。

$$k_3 = a^{1/b} \times b \times P^{(b-1)/b} \quad (5)$$

ゴムのばね定数 k_4 は、図 9 に示すテストピースを用い、図 3 に示す遅延弾性変形量 d_{20} を測定し、線圧との関係から同定する。

ゴムの減衰定数 c_4 については、ゴムの損失係数を考慮してばね定数 k_4 との関係から算定する⁽⁶⁾。

また、遅延弾性指数 α については、既報⁽⁶⁾で提案の手法を用いて、実験データから同定する。

以上のようにして、多角形化現象再現実験を実施したロール系について、解析パラメータを同定した結果を表 1 に示す。

3・3 実験結果と解析結果の対比 表 1 に示すパラメータに基づく解析結果と図 6～8 に示す実験結果との比較を行ったものを図 10～12 に示す。図 10 はクロロプレン系ゴム 25 mm 厚、図 11 はクロロプレン系ゴム 20 mm 厚、図 12 はウレタン系ゴム 25 mm 厚の実験結果と解析結果を示す。

図中の実線は多角形化現象発生有無の境界を表す解析結果を示し、境界線内部が現象発生領域を表す。また、プロットは実験結果を、図中の数字は角形数を示している。同図から、実験結果と解析結果はよく一致しており、解析によりゴム種、ゴム厚の多角形化現象発生に及ぼす影響を把握できることがわかった。

以上のように、ゴム巻きロールの主要諸元であるゴム種、ゴム厚についての実験結果と解析結果の比較により、既報⁽⁴⁾で提案の解析手法の実用性が確認された。

4. 考 察

ゴム種については、図 10, 12 よりクロロプレン系のゴムがウレタン系のゴムより多角形化現象を発生しにくいこと、またゴム厚については、図 10, 11 よりゴム厚が薄いほうが現象を発生しにくいことが、実験・解析両面から確認された。ここではこの理由について考察するとともに、合せて多角形化現象抑止方法につい

図 10 実験結果と解析結果の対比
(クロロプレン系, 25 mm 厚)

図 13 ゴムの変形回復特性 α の影響

図 11 実験結果と解析結果の対比
(クロロプレン系, 20 mm 厚)

図 14 ゴムばね定数 k_3 の影響

図 12 実験結果と解析結果の対比
(ウレタン系, 25 mm 厚)

図 15 ロール支持系剛性の影響

て検討する。

図 10 に示すクロロプレン系ゴム 25 mm 厚を基準に、ゴムの回復特性を表す α とゴムばね定数 k_3 をそれぞれ独立に 2 倍、1/2 倍にした場合の数値計算例を図 13 および 14 に示す。ゴムの変形回復特性を表す α は大きいほど、ゴムばね定数 k_3 は小さいほど、多角形化現象が発生しにくいことがわかる。表 1 のデータで、

クロロプレン系ゴム 25 mm 厚とウレタン系ゴム 25 mm 厚を比べると、 α はウレタン系のほうが大きく多角形化現象が発生しにくいはずであるが、 k_3 は実機で使用している線圧の範囲で同じ線圧 P に対してウレタン系のほうが大きく、その効果がより大きいので、ゴム種についてはウレタン系ゴムのほうが多角形化現象が発生しやすいものと考えられる。また、クロロプレン系ゴム 25 mm 厚と 20 mm 厚でゴム厚による多角形化現象の発生を比べると、 k_3 は同じ線圧 P に対してほぼ同程度であるが、 α は後者のほうが約 1.6 倍

図 16 ロール支持系減衰の影響

と大きく、この両者のバランスの結果、ゴム厚の薄い 20 mm 厚のほうが現象を発生しにくいものと考えられる。このように、既報⁽⁴⁾で提案した解析手法によって、ゴムの回復および振動特性の変化による多角形化現象への影響を定量的に取扱うことが可能になった。

一方、ロール支持系のパラメータについては、図 15 にロール支持系剛性 (k_1, k_2)、図 16 にロール支持系減衰 (c_1, c_2) をともに表 1 のパラメータに対して 2 倍に変化させた場合の影響をそれぞれ示している。同図から、おのおののパラメータを大きくすると多角形化現象が発生しにくくなることがわかる。

以上のように、ゴム巻きロールの多角形化現象抑止策としては、被覆ゴムについては、変形回復が速く、ばね定数が小さいゴムの使用が、機械側対策としては、ロール支持系の剛性ならびに減衰を大きくすることが

有効であると考えられる。

5. 結 言

ゴム巻きロールの多角形化現象の発生メカニズム解明に関して、既報⁽⁴⁾で提案した解析手法の実用性を確認するために、多角形化現象発生に関し影響が大きいことが経験的に把握されているゴム種・ゴム厚をパラメータとする多角形化現象再現実験を行い、解析結果と比較したところ、両者の結果はよく一致し、解析手法の実用性が確認された。また、多角形化現象防止について 2, 3 の提案を行った。

今後は、本解析手法を用いることにより、高線圧・高速回転に対応するゴム巻きロールの適正諸元の設計が可能になるものと期待できる。

文 献

- (1) 有坂・ほか 2 名, 圧延における板・ロール連成系の安定性に関する研究, 機論, 60-570, C(1994), 455.
- (2) 須田・佐野, コルゲーションの成長・減衰機構に与える振動系の影響, 機論, 56-521, C(1990), 39.
- (3) 末岡, ロータダイナミクスの先端技術, 機習教, No. 930-23(1993-6), 9.
- (4) 末岡・ほか 7 名, ゴム巻きロールの多角形化現象, 機論, 59-562, C(1993), 2078.
- (5) 劉・ほか 5 名, ゴム巻きロールの多角形化現象(対をなすロールの粘弾性変形をともに考慮した場合), 機論, 59-567, C(1993), 3349.
- (6) 山口・ほか 5 名, ゴムの減衰と変形回復特性に関する研究, 機論, 59-566, C(1993), 2932.
- (7) 中川, レオロジー, (1978), 162, 岩波書店.
- (8) 村上, やさしいレオロジー, (1985), 83, 産業図書.