

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560221

研究課題名(和文) 粘弾性変形に起因した接触回転系のパターン形成現象の最適抑制技術に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Optimum Design to Suppress Pattern Formation Phenomena of Rolling Contact Systems Caused by Viscoelastic Deformation.

研究代表者

劉 孝宏 (RYU TAKAHIRO)

大分大学・工学部・教授

研究者番号：60230877

研究成果の概要(和文)：抄紙機では、長時間の接触回転の結果、ロールに周期的変形が生じてロール系が振動し、製品不良や寿命低下を引き起こす『パターン形成現象』が発生し問題となっている。本研究では、抄紙機で発生する粘弾性変形をとみなうパターン形成現象の防止対策として、外部減衰の付与、回転数変動、動吸振器装着およびロール直径比変更による抑制技術について、理論および実験の両面から検討した。その結果、各手法により、パターン形成現象が防止可能であり、最適抑制技術を考案した。

研究成果の概要(英文)：The roll covering rubber of a paper making machine is often deformed into a certain convex polygon after the long operation. The phenomena are called pattern formation phenomena which lead to strong vibration of the machine, and cause the damage of the paper and the machine. In this study, as the countermeasure to suppress the pattern formation phenomena caused by the viscoelastic deformation of the rubber, the effect of the external damping, variation of the rotating speed, dynamic absorbers and diametral ratio between the rolls are examined by theoretical and experimental analysis. It is found that the pattern formation phenomena can be suppressed by each technique, and the optimum design to suppress the pattern formation phenomena is suggested.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：機械力学・制御

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：自励振動、パターン形成、動吸振器、回転体の振動、抄紙機、粘弾性特性

## 1. 研究開始当初の背景

本課題に関連する歴史的研究としては、工作機械の分野では鬼鞍らによるドリル穴の多角形化の解析(精密機械(1985))、星による研削、切削加工時のワーク多角形化(びびり現象(1977))に代表されるように、1900年代半ばから盛んに研究されてきた。しかしながら、

工業界全体を見渡すと、圧延ロールに発生するパターン形成現象や、自動車タイヤの多角形化現象など多岐の分野に同様の現象がある。これらの現象を総称してパターン形成現象と名付け、抄紙機ゴム巻きロールの多角形化(機論(1993))をはじめとして、種々の現象の発生メカニズムの解明を行ってきた。こ

のような系統的なパターン形成現象の研究は、海外ではほとんどなされておらず、国内の研究が世界的に最も先進的なものである。

## 2. 研究の目的

本研究では、抄紙機で使用されているゴム巻きロールのような粘弾性変形に起因した接触回転系のパターン形成現象に的を絞り、提案してきた種々の対策に対して、最適な抑制技術を理論および実験の両面から評価検討することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、既存の抄紙機をモデルとした対をなすゴム巻きロール系からなる実験装置を活用し、各種対策の検証と理論解析との整合性を評価する。これまで実験的に評価が行われていない以下の5点について、それぞれの最適な条件を求めるとともに、最も有効な対策について総合的に評価を行う。

- (1) 外部減衰を付与した場合
- (2) ロールの回転数を変動した場合
- (3) 動吸振器を装着した場合
- (4) ロール直径比の影響
- (5) 可変剛性型動吸振器の応用

## 4. 研究成果

図1に、本研究で用いた実験装置を示す。実験装置はトップロール(TR)およびボトムロール(BR)の2種類のゴム巻きロールをある線圧のもとに接触回転させるものである。TRの軸端は板ばねで支持されており、BRは土台に直接固定されている。そのため、TRのみが上下方向に振動可能である。TR表面にはゴム硬度85度のウレタンゴム系材料が巻かれており、BRゴム部はゴム硬度100度のウレタン樹脂系材料が巻かれている。直径比の影響を調べる実験では、BRにTRと同質のゴムを巻いている。TRおよびBRはともに直径240mm、幅150mmである。TR支持部には2本の油圧シリンダが取り付けられており、両ロール間を抄紙機と同等の40N/mmの線圧で加圧している。

また、理論解析については、ばねおよびダッシュポットに支持された剛体とした。ロー

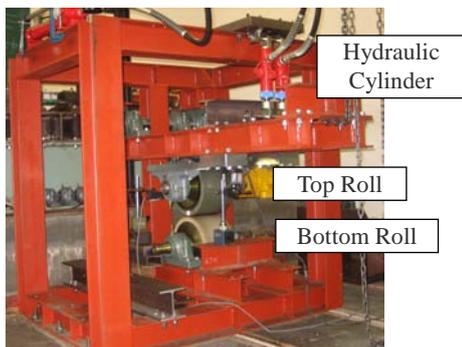


図1 実験装置

ルゴム部は軟質側のみ変形するものとした。ニップ部のゴムは、3要素モデルでモデル化する。多角形化現象の成長過程では、ゴム部の遅延弾性変形部に蓄積する。ニップ部は点接触と仮定し、ニップ部通過直後のゴムの変形量の大部分はロー一回転後までに回復するが、その残留変形量が次回ニップ部再突入時にフィードバックされる。このフィードバック効果により、時間遅れによる不安定現象が発生する。動吸振器を装着する場合は、TR支持部には質量、ばね、ダッシュポットからなる1自由度系を追加する。運動方程式から特性根を計算し、安定判別を行った。系が不安定の場合、パターン形成現象が発生することを意味している。

図2にパターン形成現象が発生したときの各角形数 $n$ の振幅成長を示す。 $n=8$ のみ指数関数的に振幅が増大していることがわかる。図2に示したパターン形成を基準として、防止・遅延対策効果を比較検討することとする。

### (1) 外部減衰を付与した場合

一般的に、パターン形成現象を防止・遅延するための効果的な対策は、外部減衰の付与である。今回の実験では、TR軸受ブロックと基礎の間に防振ゴムをはさむことにより外部減衰の効果を確認した。外部減衰の大きさによるパターン形成現象の抑制効果を確認するため、防振ゴムの量を変化させて支持部減衰係数を調整した。図3は、外部減衰を

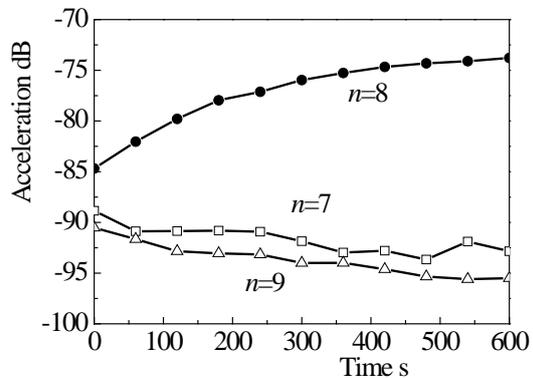


図2 基準状態における振幅の成長

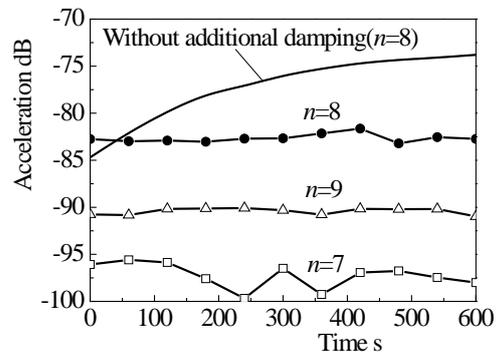


図3 外部減衰の影響

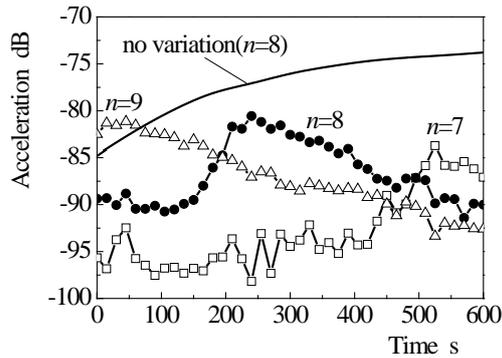


図4 ロール回転数変動の影響

基準値の 3.3 倍にしたときの実験結果を示す。太実線は、図 2 に示す回転数変動を行っていない場合の結果である。図から、外部減衰の増加に伴い振動の成長が抑えられ、パターン形成現象を完全に制振できることがわかる。これらの傾向は、解析結果と定性的に一致する。

#### (2) ロールの回転数を変動した場合

ロールの回転数上昇の違いによりパターン形成現象の遅延効果がどのように変化するかを実験により検証した。ロール回転数を 8.58Hz から 600 秒で 10, 11.4 および 13.3Hz まで上昇させた場合の実験を行った。

図 4 は 8.58Hz から 11.4Hz まで回転数を上昇させた場合の実験結果である。図から、 $n=8$  の不安定領域を完全に通過するため、振幅が一端上昇したあとに下降に向かっている様子が見て取れる。これは、8 角形が不安定領域から安定領域に移行したことを示しており、パターン形成現象を回転数変動により抑制するメカニズムである。10Hz および 13.3Hz での実験を行った結果、基準状態より振幅が小さいもののそれぞれ  $n=8$  および  $n=6$  が成長していた。図示はしていないが、回転数上昇のパターン形成抑制効果におよぼす影響を全体的に評価すると、回転数の上昇速度を上げた場合、低い角形数のパターン形成現象が急激に成長する傾向にあり、上昇速度の選定には注意が必要である。

#### (3) 動吸振器を装着した場合

図 5 に装着した動吸振器の写真を示す。動吸振器は、TR 軸受ブロックに装着している。動吸振器の固有振動数は、梁を回転させることにより剛性係数を変化させて調整し、粘性減衰係数は、振動質量の下に、防振ゴムを挿入することで対応した。特に減衰が大きな場合の動吸振器の固有振動数と減衰比は、ハンマリング波形をカーブフィットすることにより推定した。TR 回転数は一定である。動吸振器の質量がパターン形成抑制におよぼす影響を検証するため、動吸振器の TR に対

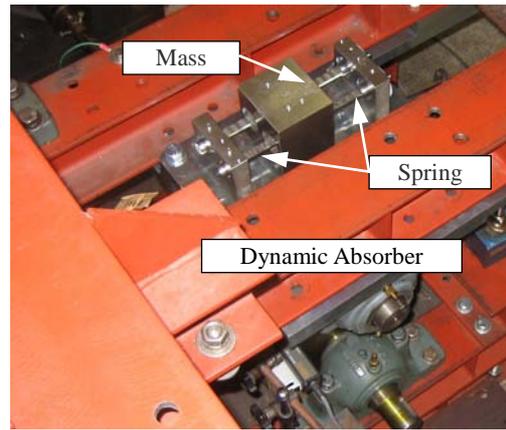


図5 動吸振器

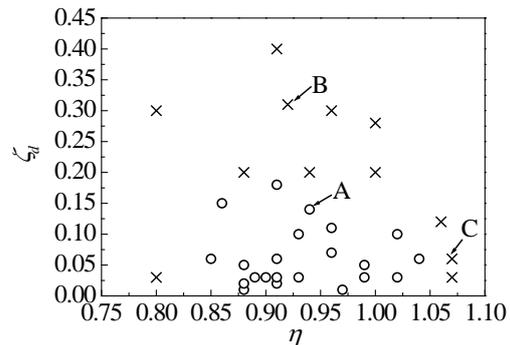


図6 動吸振器装着による安定化

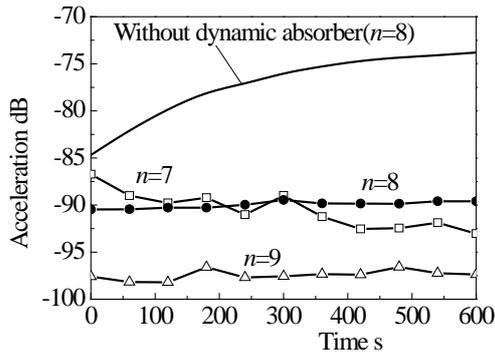
する質量比は 0.05 である。

動吸振器によるパターン形成現象の抑制効果を検討するため、動吸振器の固有振動数と減衰比を変化させて実験を行った。図 6 は、動吸振器と主系の固有振動数比 (横軸) および動吸振器の減衰比 (縦軸) を変化させた場合のパターン形成現象抑制効果を表した図である。図中  $\circ$  および  $\times$  印はそれぞれパターン形成現象が抑制および発生したことを表す。図から、動吸振器と主系の固有振動数比と動吸振器減衰比に関するある特定の範囲でパターン形成現象が消滅することがわかる。また、質量比 0.05 の動吸振器を用いた場合、かなり広い範囲で制振効果があり、ロバスト性が確認できる。

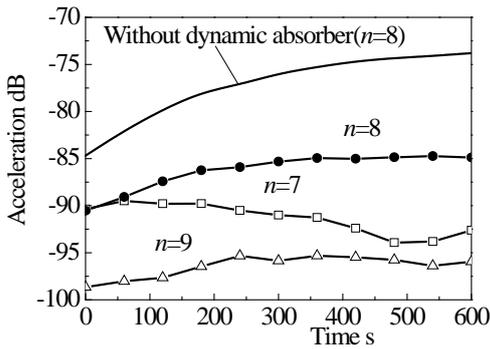
図 7 は、図 6 の点 A~C における各角形数の振幅の時間経過を示す。点 A は動吸振器の調整が適正に行われた場合、点 B は動吸振器の減衰比が大きすぎる場合、点 C は動吸振器の固有振動数が大きすぎる場合を示す。動吸振器の調整が適正に行われていない場合、動吸振器非装着時に比べると成長速度は低減されているものの、 $n=8$  や  $n=7$  のパターンの成長が確認できる。

#### (4) ロール直径比の影響

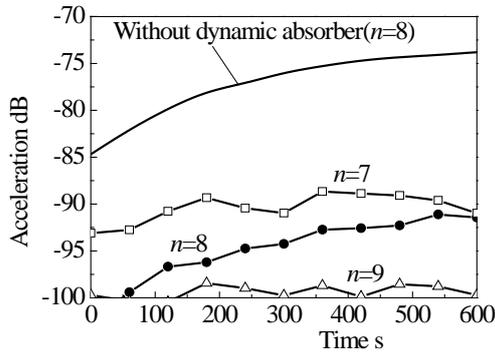
抄紙機サイズプレスパートは、湿紙に圧力をかけて絞り出すプレスパートを通過後に加熱乾燥するドライヤパートの後段に位置



(a) 点 A における振幅成長



(b) 点 B における振幅成長



(c) 点 C における振幅成長

図 7 動吸振器装着によるパターン形成現象の成長抑制効果

し、澱粉などの溶液を紙表面に塗布するパートである。サイズプレスパートでは、一般的に TR, BR ともに同質のゴムを用いることが多いが、両ロールゴム部がともに変形する場合を考慮する必要がある。これまでの研究から、両ロールの直径比が同径の場合、結合型と呼ばれる大きな不安定が発生すること、両ロールの直径比が整数比から遠い場合、独立型と呼ばれる小さな不安定領域に分離することがわかっている。本研究では、実験的にその効果を明らかにするとともに、パターン形成現象を抑制できる最も効果的な直径比の選定法を検証する。

図 8 は、同径におけるパターン形成の成長

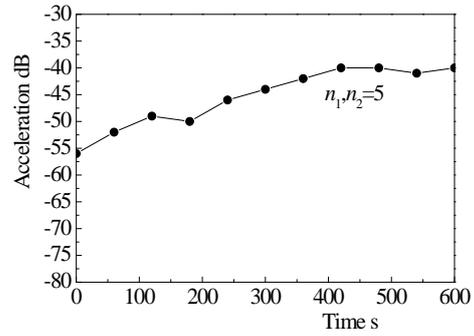


図 8 ロール直径比の影響 (同径の場合)

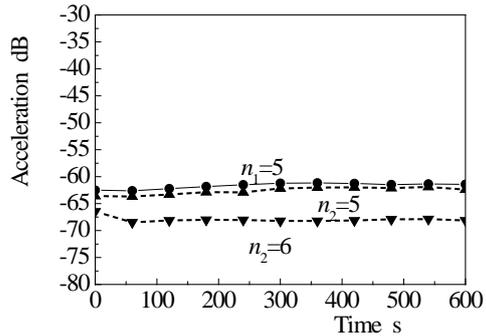


図 9 ロール直径比の影響 (TR, BR ともに整数角形から離れた場合)

曲線を示す。振幅は指数関数的にゆっくりと成長しており、これは粘弾性変形を伴うパターン形成の成長の特徴を示している。

図 9 は、TR, BR 共に整数角形から最も離れた値に直径比を設定した結果である。この場合、TR 角形数が 5.5, BR 角形数が 6.41 に相当する。図 9 からパターン形成は全く成長していないことがわかる。つまり、運転回転数に対し、直径比と固有振動数を適切に変更することで、パターン形成現象を完全に抑制することができる。図 9 以外の角形数と回転数の組み合わせでの実験も行ったが、最大でも成長は 4dB 程度であり、顕著な振幅の成長は見られなかった。

#### (5) 可変剛性型動吸振器の応用

(3)の動吸振器装着実験では、動吸振器の固有振動数を一定として使用したが、図 5 に示す動吸振器は、振動質量が矩形断面の梁に支持された構造であり、はりの回転角度の変化に対応し、動吸振器の固有振動数を変化させることができる可変剛性型動吸振器である。本対策は、小型サーボモータを使用して、TR の振動情報をもとに、動吸振器の固有振動数を適切に調整し、パターン形成現象の防止・遅延を図るものである。

事前の数値計算結果から、積極的に減衰を付与していない軽量の動吸振器を用いて効果的にパターン形成現象を抑制することができること、および発生振動数に対する動吸

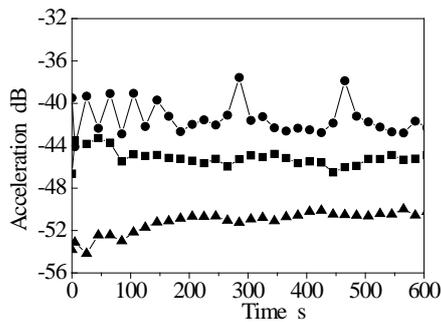


図 10 可変剛性型動吸振器によるパターン形成現象抑制効果

振器の固有振動数比として最適な値が存在することがわかった。まず、本研究では、基礎的な実験として、発生振動数と動吸振器の固有振動数が一致する場合について、実験的な検証を行った。その結果を図 10 に示す。装置に対する動吸振器の質量比は 0.01 である。図 10 から、積極的な減衰付与を行っていないにもかかわらず、小さな質量の動吸振器を用いて、振幅の成長を抑制することが可能であることがわかる。

以上の結果を基に、研究成果として 5 に示すような学術雑誌および学会での発表を行った。以上の成果から、粘弾性変形に起因した接触回転系のパターン形成現象の最適抑制技術を確立できるとともに、最適設計の指針を明示できた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- ①劉孝宏, 末岡淳男, 松崎健一郎, 森田英俊, 森裕介, 井上卓見, Countermeasure against Pattern Formation Phenomena of Roll-Covering Rubber, Asia-Pacific Vibration Conference, 査読有, 2009, CD-ROM.
- ②松崎健一郎, 末岡淳男, 劉孝宏, 森田英俊, BTA 深穴加工におけるライフリングマーク発生現象に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集 C, 査読有, 75-755, 2009, pp.1918-1925.
- ③劉孝宏, 松崎健一郎, 末岡淳男, 森田英俊, Countermeasures against Pattern Formation Phenomena of Thin Sheet Winder by Using Dynamic Absorbers, JSDD, 査読有, Vol.3, No.5, 2009, pp.814-826.
- ④末岡淳男, 劉孝宏, 摩擦自励振動の発生メカニズムとその対策, 機械の研究, 査読無, 61-1, 2009, pp.114-122.

- ⑤松崎健一郎, 末岡淳男, 劉孝宏, 森田英俊, Generation mechanism of polygonal wear of work rolls in a hot leveler and a countermeasure by dynamic absorbers, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 査読有, 48, 2008, pp.983-993.

〔学会発表〕(計 9 件)

- ①中尾翔太郎, 劉孝宏, 松崎健一郎, 末岡淳男, 森裕介, ゴム巻きロールのパターン形成現象の防止対策—ロール間の接触角の影響—, 機構論, No., 118-1, 2011, pp., 189-190, 福岡市.
- ②森裕介, 劉孝宏, 松崎健一郎, 末岡淳男, 森田英俊, ゴム巻きロールのパターン形成現象の防止対策(可変剛性型動吸振器による防止・遅延対策), 機構論, No.105-2, 2010, pp.69-70, 徳島市.
- ③森裕介, 劉孝宏, 松崎健一郎, 末岡淳男, 森田英俊, 大村和久, ゴム巻きロールのパターン形成現象の防止対策—直径比の影響—, D&D, 2010, CD-ROM, 京田辺市.
- ④松崎健一郎, 末岡淳男, 劉孝宏, 森田英俊, BTA 深穴加工におけるライフリングマーク発生現象の防止対策に関する検討, D&D, 2009, CD-ROM, 札幌市.
- ⑤劉孝宏, 松崎健一郎, 末岡淳男, 森田英俊, 森裕介, 対をなすゴム巻きロールの粘弾性変形を考慮したパターン形成現象の防止対策, D&D, 2009, CD-ROM, 札幌市.
- ⑥徳久篤弘, 末岡淳男, 松崎健一郎, 劉孝宏, 森田英俊, パッドの分布接触を考慮した BTA 深穴加工におけるパターン形成現象の解明, D&D, 2008, CD-ROM, 川崎市.
- ⑦森田英俊, 末岡淳男, 松崎健一郎, 劉孝宏, 摩耗によるパターン形成現象(多角形摩耗の成長過程), D&D, 2008, CD-ROM, 川崎市.
- ⑧中江貴志, 末岡淳男, 劉孝宏, 日野良章, 動吸振器を用いた自動車用浮動型ディスクブレーキの鳴き抑制対策, D&D, 2008, CD-ROM, 川崎市.
- ⑨松岡毅, 劉孝宏, 末岡淳男, 松崎健一郎, 森田英俊, ゴム巻きロールのパターン形成現象の防止対策, D&D, 2008, CD-ROM, 川崎市.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称: 深穴加工用先端工具ガイド部配置構造及びガイド部配置方法  
発明者: 松崎健一郎, 末岡淳男, 劉孝宏, 森田英俊

権利者：国立大学法人九州大学  
種類：特許  
番号：特願 2008-334663  
出願年月日：平成 20 年 12 月 26 日  
国内外の別：国内

○取得状況（計 2 件）

名称：可変剛性型動吸振装置  
発明者：劉孝宏  
権利者：国立大学法人大分大学  
種類：特許  
番号：特許第 4257432 号  
取得年月日：平成 21 年 2 月 13 日  
国内外の別：国内

名称：可変剛性型動吸振装置  
発明者：劉孝宏  
権利者：有限会社大分 TLO  
種類：特許  
番号：特許第 4280849 号  
取得年月日：平成 21 年 3 月 27 日  
国内外の別：国内

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

劉孝宏 (RYU TAKAHIRO)  
大分大学・工学部・教授  
研究者番号：60230877

(2) 研究分担者

松崎健一郎 (MATSUZAKI KENICHIRO)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：80264068  
(H20→H21：連携研究者)