

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560234  
 研究課題名（和文） 時間遅れに起因する多角形化現象の振動特性の解析とその実験的検証  
 研究課題名（英文） Vibration analysis and experimental verification of polygonal pattern formation phenomena caused by time delay  
 研究代表者  
 宗和 伸行（SOWA NOBUYUKI）  
 九州大学・大学院工学研究院・助教  
 研究者番号：40304753

研究成果の概要：回転機械の中には、回転体の表面が多角形状に変形し、それが成長する過程を経て大きな振動現象を引き起こす問題がしばしば発生している。研究代表者らは、この現象を時間遅れに起因する不安定自励振動とみなし、その振動特性を解明するとともに動吸振器を利用した防止対策法を提案した。独自に開発した安定判別法を利用することで、最適設計を効率的に行うことが可能となった。理論解析および実験の両面からこの有効性を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

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，動吸振器，時間遅れ系，固有モード，安定解析，最適設計

## 1. 研究開始当初の背景

機械工学の分野で利用されている回転機械の中には、その回転体が他の構成要素と接触しながら回転する系が数多く見られる。この様な接触回転系では、回転体の表面が多角形状に変形し、それが成長する過程を経て大きな振動現象を引き起こす問題がしばしば発生している。その結果、機械の継続運転が不可能となったり、製品の不良が発生したりすることとなる。このような現象は、接触回転系の多角形化現象（パターン形成現象）と呼ばれ、その発生例を挙げると、抄紙機のスムーザローラ、多段カレンダーローラ、織維機械のワインダ、自動車のタイヤ、工作機

械の研削砥石、製鉄機械の圧延ロールやテンションレベラ、鉄道のレール等がある。

これまで、研究代表者らは、この現象の発生メカニズムを粘弾性変形、塑性変形、切削、研削、摩耗などによる時間遅れに起因する不安定自励振動であるものとして捉え研究を行ってきた。その結果、接触回転系の多角形化現象の大部分は、このようなメカニズムで説明可能であることが明らかになった。しかし、時間遅れ系の解析は特性根を求めて系の安定性を判別する方法が一般的であり、その計算量は時間遅れの影響により非常に煩雑かつ膨大となる。そのため、設計段階において検討できる試行錯誤の数には限界があり、

必ずしも最適な設計がなされているとはいえない。

そこで、研究代表者らはモード解析の概念を援用することによって、モード毎の不安定度を表すエネルギー指数を導出するとともに、特性根を求める必要のない簡易安定判別法を定式化し、解析の劇的な効率化を実現した。ところが、簡易安定判別法には一部近似が含まれているため、定量的な誤差が生じる可能性があり、厳密な安定判別法による最終確認が必要となる。この問題を解決するため、安定不安定境界の存在条件に基づく安定判別法を開発した。この手法は、簡易安定判別法と比較すると計算量は若干増加するものの、厳密で効率的な安定解析を実現した。

一方、設計段階あるいは試作段階では実機本体の構造自体を多角形化現象の発生しにくい構造に変更することが可能であるが、実用運転時のトラブルのような緊急な場合には同様な対策は不可能であり、応急的な対策しかとられていない。その方法は主に回転数や接触力を変化させて振動の発生する領域を避けるというものであり、製品の生産性や品質の観点からは不利益になることが多く、すべての領域で系を安定化させ不安定振動の発生そのものを抑制するといった抜本的な対策がなされていないのが現状である。

そこで、研究代表者らは時間遅れ系の多角形化現象の防止対策として動吸振器の利用を提案しその有効性を明らかにするとともにその最適設計法を提示してきた。その際、前述の安定不安定境界の存在条件に基づく安定判別法を適用することにより高速かつ厳密な設計が実現可能となり、1自由度系に関しては時間遅れ系の種類によらず統一的な設計法が確立された。ただし、多自由度系に対しては、自由度の増加とともに発生する多角形化現象の発生分布も複雑となるため、更に改良の必要性が生じ、この問題解決が早急な課題であった。

## 2. 研究の目的

- (1) 時間遅れに起因する多角形化現象の防止対策として、これまで個々のモデルに対して個別に適用してきた安定不安定境界の存在条件に基づく安定判別法を、遅れ時間（ロールの1回転周期、半回転周期等）、時間遅れの要因（粘弾性変形、摩擦等）、ロールの配置と構造（直列多段配置および軸曲げ変形考慮）および動吸振器の有無に関わらず統一的に適用可能な汎用プログラムを開発する。
- (2) 多段ロールモデルを対象にした動吸振器の最適設計法を確立し、設計目的に応じて自由度の高い設計ツールを開発する。
- (3) 系の完全な安定化（全回転数領域での安定化）が困難な場合、その発生速度を遅らせることが可能であっても、最終的には多角

形化現象が発生し振動が起こることになる。この場合、その振動特性を把握しその特性に応じた対応策を開発することが期待される。線形モデルによる系の安定性解析だけではこの問題に対応することは不可能であり、系の非線形性を考慮した振動解析が必要となる。そこで、非線形性を考慮した時間遅れ系の解析手法を開発検討する。

(4) 既存の実験装置を利用および一部改造することにより、(1)～(3)すべての項目に対しそれぞれの理論を実験的に検証する。また、必要であれば既存の実験装置のデータを参考に新たな装置を設計・製作する。

## 3. 研究の方法

(1) **統一的に適用可能な汎用プログラムの開発** これまで、遅れ時間（ロールの1回転周期および半回転周期）、時間遅れの要因（粘弾性変形および研削・摩擦）、ロールの配置と構造（直列多段配置および軸曲げ変形考慮）および動吸振器の有無と考えられるほぼすべてのモデルに対して個々に適用してきた安定不安定境界の存在条件に基づく安定判別法および最適設計法プログラムを統一し汎用的なプログラムを開発する。

(2) **非線形性を考慮した時間遅れ系の解析手法の開発** 実機において不安定振動が発生した場合、その振動が成長したあと定常振動に移行することが多い。この理由の1つに系に存在する非線形性が無視できなくなることが考えられる。この発生メカニズムは自励振動であるため線形解析ではその発生過程や定常状態における振動特性を知ることが不可能である。したがって、多角形化現象の抜本的な防止対策を立案するために、非線形時間遅れ系の解構造を把握できるような解析手法の開発・検討を行う。

(3) **実験装置の改造および検証実験の実施** 既存の実験装置を拡張することで、粘弾性多段モデルの実験的検証を行う。この実験装置は、実機では多く存在するゴムロール等の粘弾性特性を有する多段ロールの回転機械を模した装置であり、遅れ時間が半回転周期となる多段直列配置型に関する特性を検証することが可能である。

## 4. 研究成果

(1) 多自由度系を対象とした動吸振器を用いた防止対策の有効性を理論解析で確認した。研究代表者らが開発した「安定・不安定境界の存在条件に基づく安定判別法」とトポロジカルな最適化問題に対して有力な遺伝的アルゴリズムとを有機的に結合することにより、多自由度系における動吸振器の最適設計に対する汎用性が高いプログラムを作成し効率的な設計を可能とした。

図1に粘弾性変形に基づく5段ロールモデ

ルを対象に、本安定判別法を適用した結果を示す。横軸は発生する不安定振動の角振動数に対応するパラメータ、縦軸は本安定判別法で新たに導入した安定度の指標となるパラメータあり、この値が正であれば安定、負であれば不安定となる。横軸上に示された黒の三角形および一点鎖線は系の固有角振動数を表す。図1に示す○で表された極小値の値より、5次モード奇数角形、4次モード奇数角形、3次モード偶数角形、2次モード偶数角形、3次モード奇数角形および2次モード奇数角形の不安定振動が発生し、この順番にその不安程度が大きいことがわかる。また、それぞれの最大発生角形数および不安定振動が発生する回転数領域も容易に求めることができる。本安定判別法を利用することで、防止対策を検討する自由度が大幅に増え、最適な防止対策の実現が可能となった。

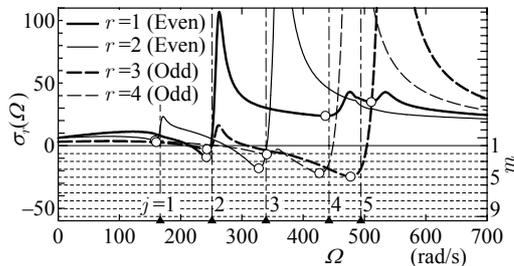


図1 5段ロールモデルの安定判別結果

(2) 多自由度系における動吸振器の最適設計では、主系の固有振動数および固有モードに対応した動吸振器を個別に設計するモード毎設計法の有効性が確認された。多自由度系では非常に狭い範囲に複数のモードが混在する場合があります、動吸振器を取り付けることで不安定領域の分布がさらに複雑なものとなる。このような系では、動吸振器の取り付け前後でのモードの対応の判別が極めて困難であり、多自由度系における効果的な設計法であるモード毎設計法の根源に関わる問題があった。この対策として、不安定領域におけるロールの変位および接触点の変形量に関するそれぞれの複素モードベクトルの内積を利用することにより、明確な判別が可能となり、より効率的で信頼性の高い最適設計を実現した。

図2に図1で示した系に本最適設計法を適用した結果を示す。黒の三角形は図1で示した主系単体時の固有角振動数、白の三角形は取り付けられた動吸振器単体の固有角振動数を表す。一点鎖線は動吸振器を取り付けた状態の全系の固有角振動数である。動吸振器は主系単体時の不安定なモードに対してそれぞれ1個ずつ合計6個取り付けられた。5次モード奇数角形のみが僅かに不安定なままであるが、すべての極小値の値が大幅に大きくなり、

安定性が向上したことが確認できる。それぞれのモード毎の結果も1自由度系の場合と同様に、2つの極小値が同程度になっており、均整の取れた結果が得られた。動吸振器を取り付けることで自由度が増加し、極小値の数が増加して全体的な様相が複雑になっているにもかかわらず、それぞれのモード毎に最適な設計が実現していることから、内積を利用したモードの選択法の有効性を確認できた。

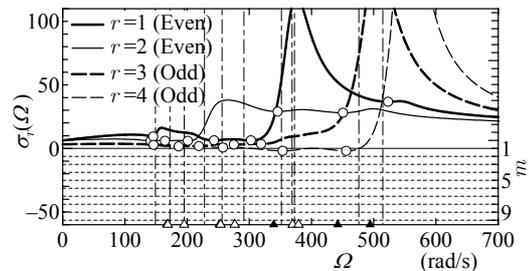


図2 5段ロールモデルに対して最適設計された動吸振器を取り付けた結果

(3) 実験装置のロール部分を改造することで粘弾性変形に起因する不安定振動を発生させることが容易になり、精度の高い実験結果が得られるようになった。この結果より、静止時におけるハンマリングでは不可能であった回転中の粘弾性特性の同定が可能となった。

図3に本研究で用いた実験装置を示す。この装置は、2個の鉄製ロールの間にゴム巻きロールが挟まれた合計3個のロールからなっている。最下段のロールはベルトを介してモータにより駆動される駆動ロールであり、基礎に剛に固定されている。よって、これは2自由度系となる。ロール1とロール2はそれぞれ水平に伸びた振動アームに取り付けられており、接触回転しながら振動アームと一体となって上下方向に振動する。この振動は回転運動であるが、その回転角は微小であるためロール部分の上下方向の並進運動と捉えることができる。

図4に図3の上側のアームを外した場合の駆動ロールとゴム巻きロールの2個のロールが接触回転する1自由度系の実験結果を示す。縦軸はロール1が取り付けられたアーム先端の加速度振幅であり、横軸はゴム巻きロールの回転数を系の固有振動数で無次元化した値である。点線は系の固有振動数の1/nの回転数に対応し、n角形のパターンが発生し得る領域となる。横軸上の太線は理論解析における不安定領域で、この場合2角形と3角形の領域で不安定振動が発生する。この結果は、理論解析による結果とよく一致しており、高精度な同定と理論解析が可能となったことが確認できる。

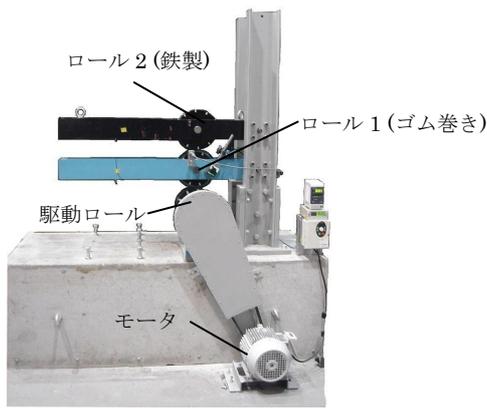


図3 実験装置

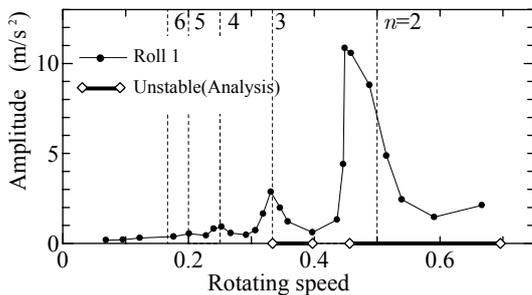


図4 1自由度系の実験結果

(4) 実験結果では、図4より振幅応答が低回転数側に傾くソフトスプリングの様相を示していることが確認できる。この現象は、線形解析だけでは説明不可能な現象である。この現象は、非線形性を考慮した数値シミュレーションによって説明が可能となり非線形解析の有用性が確認できた。

ゴム表面の弾性は本来ハードスプリングの特性を有するが、この応答がソフトスプリングの特性を示す理由は、自重による初期変位を静的つり合い点として振動するためであり、非線形性を考慮したシミュレーション結果でも定性的に同様な結果が得られた。

(5) 実験装置を遅れ時間が1回転周期である1自由度系から半回転周期の2自由度系に改造し、多自由度系に対する実験的検証を行った。その結果、動吸振器による防止対策が多自由度系に対しても有効であり、前述のモード毎設計法による最適設計法の有効性を確認した。

図5に主系単体時の結果を示す。1次モードに対応する振動ではロール2が、2次モードに対応する振動ではロール1が大きく振動しており、理論解析による結果と一致している。図6に2次モード用の動吸振器1個のみを取り付けた場合の結果を示す。動吸振器を取り付けることで2次モードの振動のみが大幅に低減されていることが確認できる。一方、1次モードの振動は低減されておらず、2次

モード用の動吸振器は1次モードの振動低減に効果がないことがわかる。以上の結果より、モード毎に動吸振器を設計する方法の有効性を確認することができた。

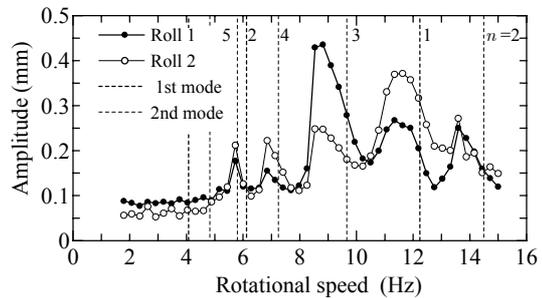


図5 2自由度系の実験結果(主系単体)

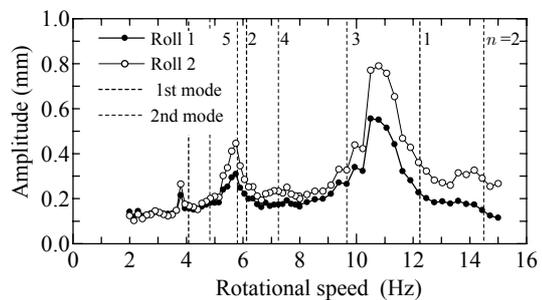


図6 2自由度系の実験結果(動吸振器あり)

以上の研究成果により、多自由度系における時間遅れに起因する不安定振動に対する動吸振器を用いた防止対策の実用性を示すとともに、最適設計法の確立をはじめて実現した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計6件)

- ① Kenichiro Matsuzaki, Atsuo Sueoka, Takahiro Ryu and Hidetoshi Morita, Polygonal Wear of Work Rolls in a Hot Leveler of Steel Making Machine (4th Report, Experimental Verification of a Countermeasure by Using Dynamic Absorbers), Journal of Environment and Engineering, 3-1, 146-157, 2008, 査読有。
- ② Kenichiro Matsuzaki, Atsuo Sueoka, Takahiro Ryu and Hidetoshi Morita, Generation Mechanism of Polygonal Wear of Work Rolls in a Hot Leveler and a Countermeasure by Dynamic Absorbers, International Journal of Machine Tools and Manu-facture, 48, 983-993, 2008, 査読有。
- ③ Nobuyuki Sowa, Takahiro Kondou, Hiroki Mori, Myung-Soo Choi, Prevention

Method using Dynamic Absorbers for Unstable Vibration Caused by Time Delay in Contact Rotating Systems, Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference 2007, Paper No. 140, 2007, 査読有.

- ④ Mizue Koga, Takahiro Kondou, Nobuyuki Sowa, Vibration Characteristics of Nonlinear Time Delay System, Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference 2007, Paper No. 137, 2007, 査読有.
- ⑤ Kenichiro Matsuzaki, Atsuo Sueoka, Takahiro Ryu, Hidetoshi Morita, An Experimental Study of a Countermeasure for Pattern Formation Phenomena Accompanied by Wear by using a Dynamic Absorber, Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference 2007, Paper No. 56, 2007, 査読有.
- ⑥ Takahiro Ryu, Kenichiro Matsuzaki, Atsuo Sueoka, Hidetoshi Morita, Takumi Inoue, Countermeasures against Pattern Formation Phenomena of Thin Sheet Winder by using Dynamic Absorbers, Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference 2007, Paper No. 49, 2007, 査読有.

[学会発表] (計 9 件)

- ① 宗和伸行, 近藤孝広, 他 2 名, 動吸振器を用いたパターン形成現象の防止対策 (多自由度系における効果的なモード毎設計法), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2008, 2008. 09. 03, 東京都.
- ② 宗和伸行, 近藤孝広, 北村幸嗣, 古賀みず江, 接触回転系におけるパターン形成現象 (粘弾性モデルに対する防止対策の実験的検証), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007, 2007. 09. 26, 東広島市.
- ③ 北村幸嗣, 近藤孝広, 宗和伸行, 森博輝, 古賀みず江, 動吸振器を用いたパターン形成現象の防止対策 (粘弾性多自由度系に対する設計法), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007, 2007. 09. 26, 東広島市.
- ④ 古賀みず江, 近藤孝広, 宗和伸行, 森博輝, 接触回転機械における非線形時間遅れ系の振動特性に関する研究, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007, 2007. 09. 25, 東広島市.
- ⑤ 村元秀次, 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, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007,

2007. 09. 25, 東広島市

- ⑥ Nobuyuki Sowa, Takahiro Kondou, Hiroki Mori, Myung-Soo Choi, Prevention Method using Dynamic Absorbers for Unstable Vibration Caused by Time Delay in Contact Rotating Systems, Asia-Pacific Vibration Conference 2007, 2007. 08. 06, Sapporo, Japan.
- ⑦ Mizue Koga, Takahiro Kondou, Nobuyuki Sowa, Vibration Characteristics of Nonlinear Time Delay System, Asia-Pacific Vibration Conference 2007, 2007. 08. 06, Sapporo, Japan.
- ⑧ Kenichiro Matsuzaki, Atsuo Sueoka, Takahiro Ryu, Hidetoshi Morita, An Experimental Study of a Countermeasure for Pattern Formation Phenomena Accompanied by Wear by using a Dynamic Absorber, Asia-Pacific Vibration Conference 2007, 2007. 08. 06, Sapporo, Japan.
- ⑨ Takahiro Ryu, Kenichiro Matsuzaki, Atsuo Sueoka, Hidetoshi Morita, Takumi Inoue, Countermeasures against Pattern Formation Phenomena of Thin Sheet Winder by using Dynamic Absorbers, Asia-Pacific Vibration Conference 2007, 2007. 08. 06, Sapporo, Japan.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宗和 伸行 (SOWA NOBUYUKI)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 40304753

### (2) 研究分担者

近藤 孝広 (KONDOU TAKAHIRO)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 80136522

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

盆子原 康博 (BONKOBARA YASUHIRO)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 10294886