

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560266

研究課題名(和文) 摩擦に誘引された複合振動系の体系化に関する挑戦

研究課題名(英文) Challenge to systematize the fundamental mechanisms of friction induced vibrations with multiple factors

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、摩擦に誘引された複合的振動現象に対し、基礎的なメカニズム解明をもとに、システムの体系化を行うとともに、有効な制振技術を開発することを目的としている。本研究により、自動車用ディスクブレーキの面内鳴き、自動車用ATのシャッター現象と1/2次分数調波振動の発生メカニズムを解明し防止対策を提案することができた。それらの防止対策は、実験的にも検証された。また、自転車用ディスクブレーキのビビリ現象については動吸振器により振幅の抑制効果があることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this research are to systematize the fundamental mechanisms of friction induced vibrations with multiple factors, and the development of the countermeasures. In this research, the mechanisms and the countermeasures for the in-plane squeal of disc brakes, and the shudder and the subharmonic vibration of order 1/2 in automatic transmissions for cars were clarified. The effectiveness of these countermeasures was confirmed by the experiments. Moreover, it was confirmed that the dynamic absorber was effective to reduce the chatter in bicycle disc brakes.

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 摩擦振動 安定性 ブレーキ鳴き シャッター 非線形振動

1. 研究開始当初の背景

中国やインド等のアジア諸国の台頭で、技術立国日本の地位が危ぶまれるなか、日本における製品開発は単なる価格競争や先駆的な研究のみならず、他国に容易にまねのできない質の時代に突入している。機械系の質向上のため、快適性や静粛性による競争力の確保が叫ばれる中、高機能性への追求から複雑な振動問題が多発しているのも否めない。このような振動問題の一要因として摩擦があげられる。

摩擦振動の主要因は、従来から M.Rudd らに代表される相対すべり速度に対する摩擦力の負勾配特性に起因した不安定現象としてとらえたものや、S.W.E.Earles に代表される剛性マトリックスの非対称性に起因したものと分類されている。申請者らは、実現象の発生メカニズム解明と防止対策の検討のため、自動車用および自転車用のディスクブレーキ摩擦振動について継続的に研究を行ってきた。しかしながら、近年、これまで解明を行ってきた単純な摩擦振動のカテゴリとしてあてはめることができない現象が発生して、大きな技術課題となっている。現在研究を行っている自転車用のディスクブレーキにおけるビビリ現象は、摩擦振動ではあるものの前述のそれぞれのメカニズム単独ではなく、それぞれの摩擦振動要因の複合的作用により発生することが分かってきた。さらに、ほとんどの自動車用のトランスミッションで使用されているクラッチには「シャダー(Shudder)」とよばれるねじりをもとに摩擦振動が発生する一方で、その摩擦伝動中のみ発生する通常低減減衰系でのみしか発生しないような特異的な非線形強制振動が生じることが分かってきた。これらの摩擦に誘引された複合的振動現象は、世界的に見ても体系化がなされていないことはもとより、メカニズム解明のための研究すら行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、第1章に例示するような摩擦に誘引された複合的振動現象を、基礎的メカニズム解明を足がかりに体系化を行うとともに、有効な制振技術を開発することを目的とした挑戦的研究である。

このような現象は、企業で全く対応できない現象であり、現象の体系化と対策の確立ができた場合、革新的技術の進展と、独創的かつ差別的な製品開発が可能となる技術であり、今後の日本技術を支える礎となると確信している。

3. 研究の方法

実験については以下の4つのテーマについて実施した。テーマと研究方法の概要を以下に示す。

(1) ディスクブレーキ面内鳴き

実機現象を模擬した解析モデルを構築し、

面内鳴き再現のためのプログラムを作成する。固有モードを確認するため、FEM解析を利用する。作成したプログラムにより面内振動モデルによる数値計算を実施し、単一モードでの自励的発生が可能かどうかを調査し、面内方向への自励的エネルギー流入の影響を解析的に調査する。

(2) トランスミッションシャダー現象

AT車の摩擦クラッチにおけるシャダー現象解明のための理論解析モデルの構築と、数値計算を実施する。その際、動吸振器による対策を自励、強制振動の両面に対応できるよう検討する。クラッチ部のみの実験装置を製作し、シャダーの再現実験を実施する。

(3) トランスミッション非線形振動現象

トランスミッションで発生する非線形現象の足がかりとして、分数調波振動に関する発生メカニズムを解明する。その結果から、負勾配特性を有する摩擦伝動機構と非線形ばね要素による異常振動のメカニズムを検討する。

(4) 自転車用ディスクブレーキのビビリ現象

ディスクを取り出した試験装置の設計製作を行い、ディスク表面温度とビビリ現象の関連を調査する。その結果をもとに、新たな解析モデルを構築し、複合型の摩擦振動の特徴を理論・実験の両面から比較検討する。また、ビビリ振動に対する動吸振器の適用を実験的に検証する。

4. 研究成果

本研究は、摩擦に誘引された複合的振動現象に対し、基礎的メカニズム解明を足がかりに体系化を行うとともに、有効な制振技術を開発することを目的とした研究である。第3章に示すように、4つの研究分野を基盤として、研究を推進した。

(1) ディスクブレーキ面内鳴き

図1はスキャニングレーザー Doppler 振動計を用いて、面内鳴きが発生したときのロータの面外方向振動モードを測定した結果である。面内鳴きは、ロータ面内方向の2次モードであるが、ロータハット部が摩擦面から凸状に飛び出した形状であるため、面外方向にもわずかに振幅を有する。面外方向には、2節の面外方向成分と、面内2次に近接した固有振動数の(8,0)モードをわずかに含む。

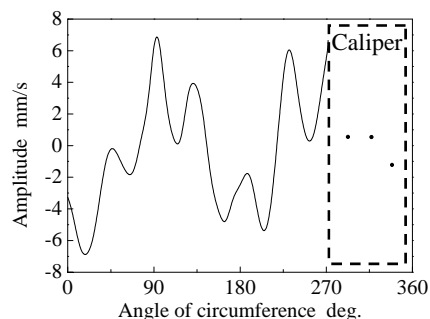


図1 実機の面内鳴き振動モード

この鳴きを理論的に再現するため、まず、摩擦による非対称性と相対滑り速度に関する負勾配特性をともに考慮したロータおよびパッドの面内面外連成集中系モデルを構築した。モデルの整合性は、ロータおよびパッドのFEM解析により単体の固有振動数と固有モードを求めることで検証した。複素固有値解析の結果、ロータの面内方向だけでなく、面外方向成分も有する振動モードが不安定化すること、ロータのハット部高さが不安定化に大きく関与していること、パッド支持部の減衰やパッドの固有振動数変更が鳴き対策として有効であることがわかった。図2は理論解析により求めたロータ面外方向の振動モードである。図から実験と同様のモードが再現でき、面外面内方向に振動する面内鳴きのメカニズムが解明できた。

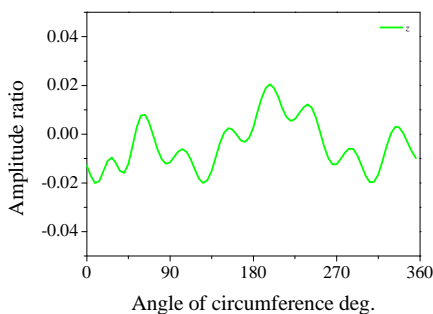


図2 理論解析による面内鳴き振動モード

(2) トランスミッションシャダー現象

図3は、自動車用ATにおいて発生する自励振動の一種であるシャダーが発生したときの、タービンランナにおける回転数変動の振動波形を示す。シャダーの発生振動数は32.7 Hzであり、シャダーが発生した場合、乗り心地が著しく悪化する。

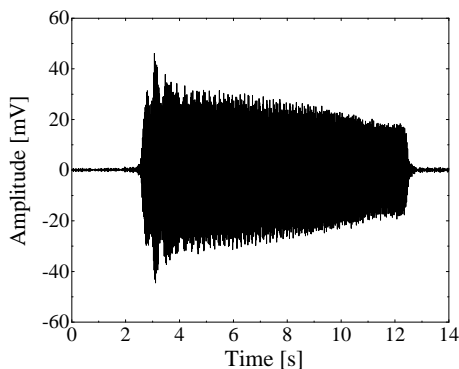


図3 シャダー発生時の振動波形

シャダー現象に対する発生メカニズムを解明するため、基礎実験を行ったところ、ロックアップクラッチ部の摩擦の相対すべり速度に関する負勾配特性が存在することが明らかになった。そこで、実機に対する線形多自由度モデルを構築し、数値計算を行った。その結果、発生可能なモードが2種類存在すること、ダンパ部（ピストン支持ばね部）の減衰付与が効果的であることがわかった。

また、シャダー現象に対する動吸振器の効果の検証を理論的に実施した。その結果、動吸振器装着によりシャダーが完全抑制可能であることがわかった。図4は、実車に装着した動吸振器の概略図である。動吸振器は、ゴムとスチールから構成されており、ピストンの内側に装着した。図5は理論計算をもとに最適設計された動吸振器を実車に装着したときの図3と同じ場所の振動波形である。図から、振動は全く発生しておらず、実車においても動吸振器の有効性が確認できた。

さらに、自励振動制振用に設計された動吸振器を装着した状態で、エンジン爆発振動による強制振動への影響を解析したところ、不具合がないことがわかった。

また、クラッチ部のみを取り出した実験装置を製作し、シャダー解明のための基礎実験を行ったところ、当初予定した鳴き振動数と異なるモードが発生し、動吸振器による制振には到らなかった。

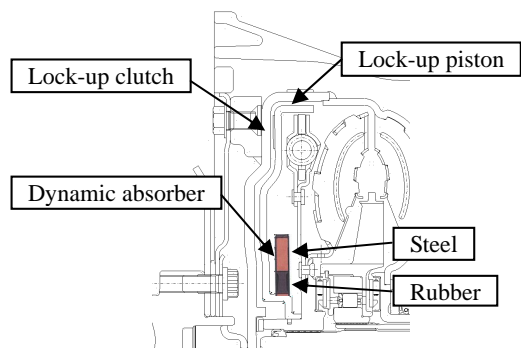


図4 動吸振器の取り付け

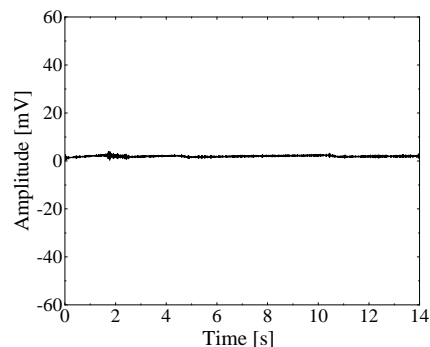


図5 動吸振器取り付け後の完全制振

(3) トランスミッション非線形振動現象

オートマチックトランスミッションで発生する非線形振動について、実機現象を把握するため、実車による実験を行った。その結果、1/2次分数調波振動等の非線形振動が発生することがわかった。図6に実機で発生した1/2次分数調波振動のエンジンおよびタービンランナにおけるねじり振動の波形を示す。タービンランナはエンジン振動数の約半分まで振動している。また、非線形振動の中でも、摩擦伝動中にのみ発生する非線形振動も確認された。それらの特徴として、エンジン爆発振動を抑制するためのダンパ（ばね要

素)の断片線形特性に起因した振動であることがわかった。そこで、非線形現象を把握する第一歩として1/2次分数調波振動の発生メカニズムを明らかにすることとした。実機を多自由度系でモデル化し、Shooting法により数値計算を行った。その結果を図8に示す。横軸は、エンジン爆発振動による加振周波数、縦軸はタービンランナの振幅である。本来、固有振動数が存在していない60 Hz付近で大きな振動が発生している。図9は図8の加振周波数が60 Hzにおける入力トルク、エンジン(θ_1)およびタービンランナ(θ_2)の振動波形である。図から、図7の1/2次分数調波振動の再現ができており、発生メカニズムが解明できた。シャダー現象の解明をもとに、スリップ時には、負勾配特性が存在することから、多くの非線形振動が発生したものと考えられる。

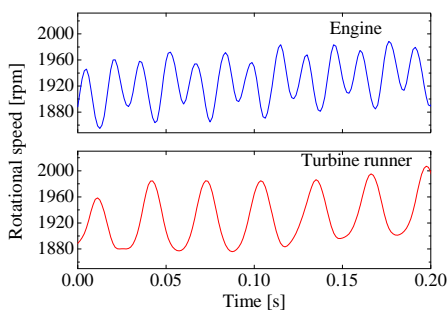


図7 1/2次分数調波振動

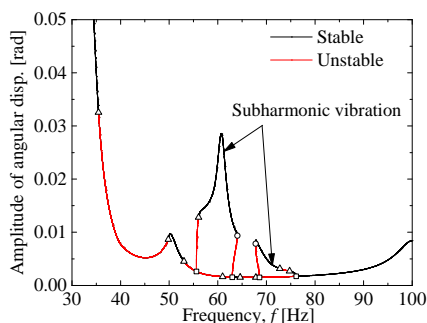


図8 周波数応答曲線

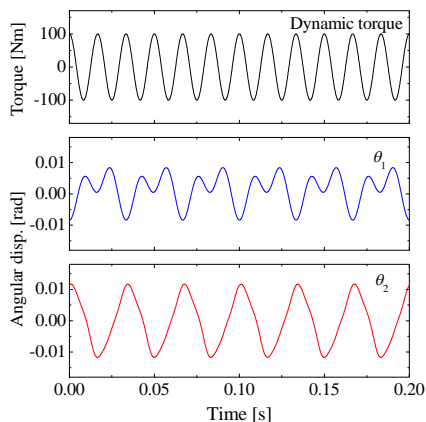


図9 1/2次分数調波振動の振動波形

(4) 自転車用ディスクブレーキのビビリ現象

自転車用ディスクブレーキ鳴きの面内および面外方向振動の影響を調査するための、ディスクブレーキ単体を取り出した実験装置を製作し、実験を行った。その結果、鳴きは発生したものの、予想した振動数よりやや低い振動数の鳴きが発生し、ビビリ現象の再現には到らなかった。

実機を用いて動吸振器をキャリパ部に装着する実験を行った。その結果、減衰が小さな動吸振器を装着することにより振幅低減効果があることが実験的にわかった。ビビリ振動は剛性行列の非対称性の影響が強いと考えられる。

これらの4テーマの現象を解明することにより、摩擦振動は非対称性や負勾配特性のみならず、強制振動をも含む多岐にわたる摩擦に誘引された振動現象が存在すること、それらの現象を把握した上で、対策を考慮しなければならないことがわかった。今後は、未だ解明されていない現象の発生メカニズムを解明することにより、さらなる体系化を推進したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6件)

中江貴志, 劉孝宏他3名, Experimental and Analytical Investigation into the Generation Mechanism of In-Plane Squeal, EuroBrake, 査読有, EB2013-NVH-028, 2013, CD-ROM.

Sofian Rosbi, 中江貴志, 劉孝宏, 松崎健一郎他3名, Evaluation of Dynamic Absorber to Suppress Shudder and Engine Forced Vibration in Automatic Transmission Powertrain, Proceedings of APVC, 査読有, 2013, CD-ROM.

松崎健一郎, 劉孝宏, 中江貴志他3名, 自動車用ディスクブレーキで発生する面内および面外鳴きの比較・検討, 自動車技術, 査読無, 67-7, 2013, pp.60-65.

中江貴志, 劉孝宏他3名, Comparative study of generation mechanism and countermeasure for in-plane and out-of-plane disc brake squeal, Proceedings of ISMA, 査読有, 2012, CD-ROM.

劉孝宏, 松崎健一郎, 中江貴志他5名, A Study on Shudder in Automatic Transmission Lock-up Clutch Systems and Its Countermeasures, SAE International, 査読有, 2011-01-1509, 2011, CD-ROM.

中江貴志, 劉孝宏, 末岡淳男, Experimental and Analytical Investigation of Countermeasure against Squeal in Floating Type of Car Disc Brake, SAE International, 査読有, 2011-01-1579, 2011, CD-ROM.

〔学会発表〕(計 3件)

Sofian Rosbi , Analysis of Sub-Harmonic Nonlinear Vibration in Automatic Transmission Powertrain , 自動車技術会学術講演会 2013 年秋季大会 , 2013 年 10 月 24 日 , 名古屋国際会議場 .

Sofian Rosbi , AT パワートレインでのシャッターと強制振動に対する動吸振器の効果 , 自動車技術会学術講演会 2012 年秋季大会 2012 年 10 月 4 日 , 大阪国際会議場 .

松崎健一郎 , AT ロックアップクラッチ部で発生するシャッター現象とその防止対策に関する研究 , 自動車技術会学術講演会 2011 年秋季大会 , 2011 年 10 月 12 日 , 札幌コンベンションセンター .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

なし

取得状況 (計 0 件)

なし

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

劉 孝宏 (RYU , Takahiro)

研究者番号 : 6 0 2 3 0 8 7 7

(2) 研究分担者

松崎健一郎 (MATSUZAKI , Kenichiro)

研究者番号 : 8 0 2 6 4 0 6 8

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

Sofian Rosbi