

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420193

研究課題名(和文) 動的な材料特性に着目した制動性能と静粛性を兼ね備えたブレーキパッドの提案

研究課題名(英文) Proposition of brake pad with braking performance and silence focused on dynamic material characteristics

研究代表者

大浦 靖典(Oura, Yasunori)

滋賀県立大学・工学部・准教授

研究者番号：60512770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、鳴き振動が発生した際のブレーキパッドの剛性と摩擦係数の変動に着目して、ディスクブレーキの面内鳴きの発生メカニズムの解明を目的とした。まず、摩擦すべり状態のブレーキパッドを微小振幅で加振し、摩擦係数と剛性を測定する装置を開発した。次に、実機の面内鳴きを観察した結果に基づいた5自由度の解析モデルを作成した。パッドの剛性と摩擦係数の測定結果を導入した鳴き解析では、鳴き振動が発生する結果が得られた。この解析結果から、面内鳴きに影響が大きいと考えられる要素のみで構成した解析モデルに発展させるための知見を得た。また、鳴き対策の検討に用いる簡易な構造の面内鳴き試験機の開発につながる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to elucidate the cause of in-plane squeal generated in disk brake. A focus of this research was a fluctuation of the stiffness of a brake pad and the friction coefficient when squeal generated. In the first, measuring equipment of the pad stiffness and friction coefficient in the continuous slip and vibrating state has been developed. Another step, squeal vibration of an actual brake was observed and an analysis model of 5 degree of freedom was made. Measured stiffness and friction coefficient was introduced into the model and analysis results of the model show squeal. The more, new analysis model which consists of an influential element in in-plane squeal would be made. These outcomes lead to development of in-plane squeal testing machine of the simple structure it's possible to use for consideration of squeal countermeasure.

研究分野：機械力学

キーワード：自励振動 動剛性 摩擦係数 連成振動 ディスクブレーキ

1. 研究開始当初の背景

自動車の制動に用いられるディスクブレーキ(図1、研究協力企業提供)の開発現場では、鳴きの低減に多くの時間と予算が割かれている。初期の研究では、ディスク・パッド間の摩擦係数が速度負勾配をもつことで発生する自励振動(スティック・スリップ現象)が鳴きの原因と考えられていた。しかし、摩擦係数が速度負勾配を示さないパッドを開発しても鳴きは発生し続けている。また、鳴きの発生の有無や鳴きの周波数は制動時のブレーキ圧にも依存することが知られているが、スティック・スリップ現象では説明がつかない。

近年では、ディスクやブレーキパッド、パッドを支持するキャリパなど、ブレーキの各部がもつ固有振動が連成して不安定になることで発生する自励振動が鳴きの原因と考えられている。申請者は、ブレーキパッドの剛性が制動時の圧力に応じて大きくなることで鳴きが発生する解析モデルを作成した(図2)。また、ブレーキパッドの剛性が圧力に依存することを実測した。パッドに静圧を加えたときに生じた静的な変位より求めた剛性(静的な剛性)よりも、静圧を加えた状態で微小振幅加振したときの加振振幅と圧力変動から求めた剛性(動的な剛性)が大きくなるという結果と合わせて、パッドを開発するための重要な知見となっている(図3)。これらの成果に基づいた鳴き対策が実機に施された結果、ディスクが面外方向(図4(a))に大きく振動する「面外鳴き」は低減されつつある。その一方で、対策され

た「面外鳴き」に代わり、「ディスクが面内方向(図4(b))に振動する鳴き」が問題となっている。「面内鳴き」は、「騒音発生時にディスクが面内方向に振動している」、「騒音の周波数が、ディスクの面内固有振動に一致している」という特徴をもつが、いまだ十分な研究はなされていない。効果的な面内鳴きの対策を見出すためには、詳細な振動状態を観測し、発生メカニズムを解明する必要がある。

2. 研究の目的

面内鳴きの発生メカニズムを解明するために以下の課題に取り組んだ。

- (1) 面内鳴きは、摩擦方向への振動であるため、摩擦係数も変動し、鳴き発生の原因となっている可能性がある。制動性能と鳴きにくさを両立したブレーキパッドを開発するための基礎技術として、しゅう動状態でのブレーキパッドの剛性と摩擦係数を明らかにする必要がある。
- (2) 効果的な面内鳴き対策を検討するために、面内鳴きの発生メカニズムを説明できる解析モデルを作成する必要がある。
- (3) 面内鳴き発生メカニズムの実証や具体的な鳴き対策の効果を検討するために、面内鳴き振動を再現できる簡単な構造の鳴き試験機を開発する必要がある。

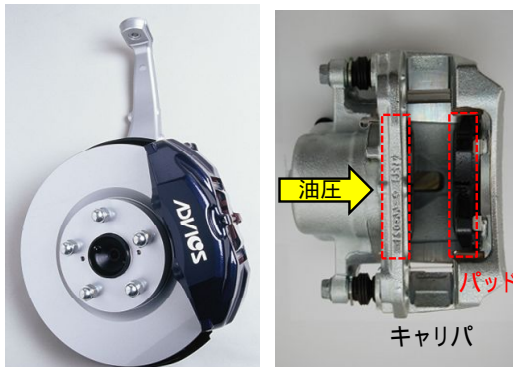


図1 ディスクブレーキ

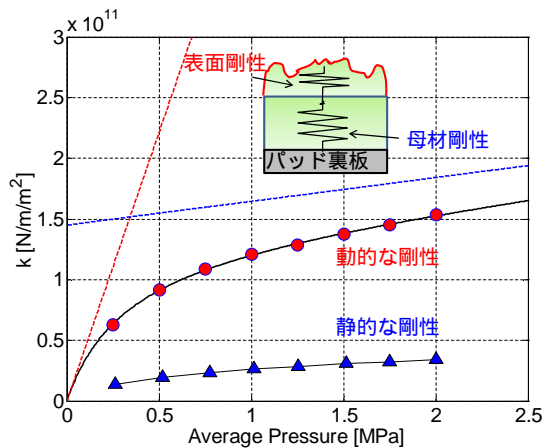


図3 静的な剛性と動的な剛性の圧力依存性

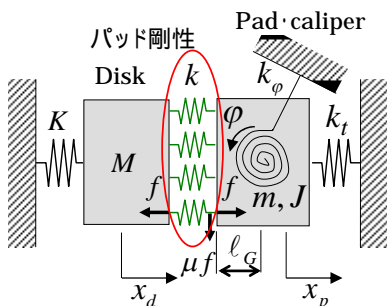


図2 面接触モデル

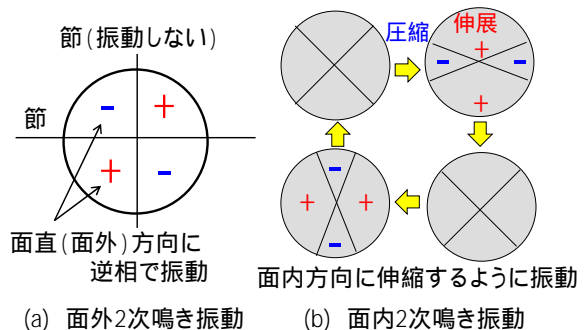


図4 ディスクブレーキの鳴き振動

3. 研究の方法

(1) これまでにパッドを微小振幅で加振したときの動的な剛性が、一定圧を加えたときの静的な剛性よりも大きいことが明らかになっている。同様に、制動時の摩擦係数も加振時に変化している可能性がある。摩擦すべり状態において振動が加わるという、鳴き発生時に近い状態におけるパッドの摩擦係数と剛性を同時に測定する必要がある。

鳴き周波数帯域の微小振幅で加振することでパッドの剛性を測定する装置に、パッドの摩擦面をしゅう動させる機能を付加した材料特性試験機を開発する。

(2) パッドの摩擦係数の微小変動を考慮した、パッドの面内振動とディスクの面外振動の連成による鳴き発生の理論を提案する。まず、実際の自動車のディスクブレーキにおいて、面内方向に振動が生じる鳴き現象を観察する。次に、ブレーキの各要素を単純化した低自由度の解析モデルを作成し、鳴き発生の基本的なメカニズムを把握する。

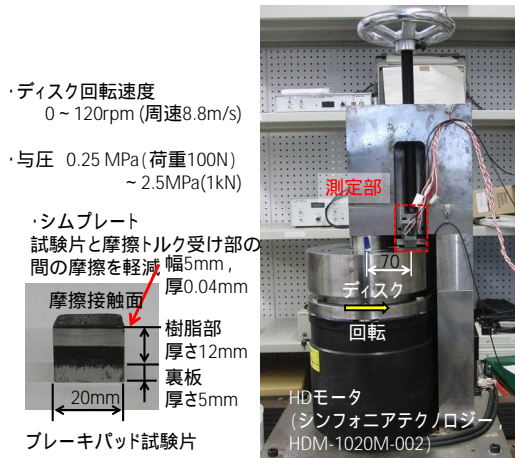
(3) 解析モデルでの検討結果を参考に、ブレーキ実機の構造を簡略化した鳴き試験機を開発する。実機に対応した面内鳴き振動を再

現することで、面内鳴き理論を実証する。

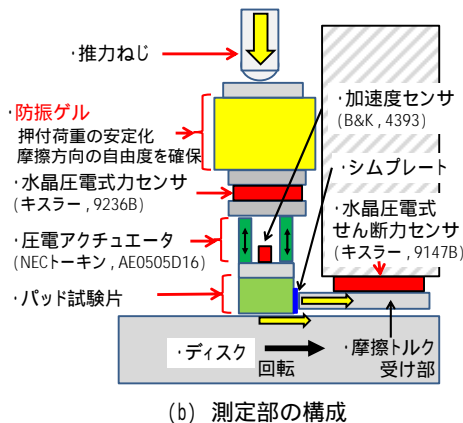
4. 研究成果

(1) しゅう動状態のパッドをディスク面外方向に加振したときの剛性と摩擦係数を測定できる試験装置を開発した(図5)。実機で生じる鳴き振動は、制動圧によって発生の有無や周波数、振幅が異なる。装置では、一定速度で回転するディスクに一定圧で押し付けたパッド試験片を、面外方向に正弦波加振した際の面外方向の加振力と変位および面内方向に生じる摩擦力の測定が可能である。パッドの材料特性を精度よく評価するため、しゅう動面は加振によって振動しないように十分に設計した。また、パッドとディスクの間に生じる摩擦力を測定するせん断力センサを摩擦接触面の近くに配置する、パッド試験片の測定位置への保持にはやわらかいゴム素材を用いることで摩擦力の測定ロスを減らす、などの改良を実施し、摩擦係数の測定精度の向上を試みた。

まず、面外方向に加振した際のブレーキパッドの剛性について調べた結果、摩擦接触面のしゅう動の有無で有意な差はなかった。次に、実機において鳴きが発生しやすいとされるブレーキ停止直前の低負荷(しゅう動速度1m/s以下、制動圧0.25MPa以下)の条件において、加振時の摩擦係数を調べた。その結



(a) 試験片形状と装置全体



(b) 測定部の構成

図5 しゅう動状態におけるパッドの剛性と摩擦係数の測定装置

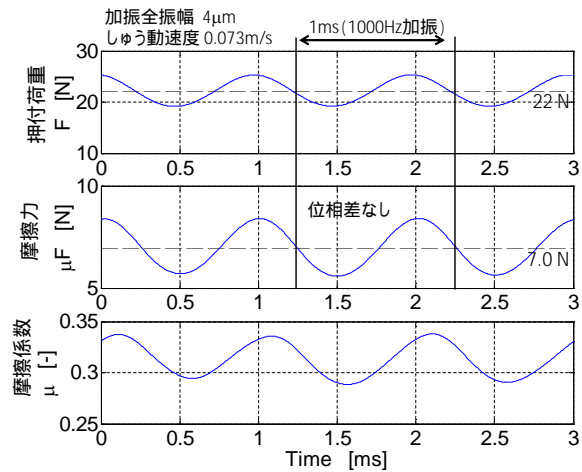


図6 パッド加振時の摩擦係数の変動

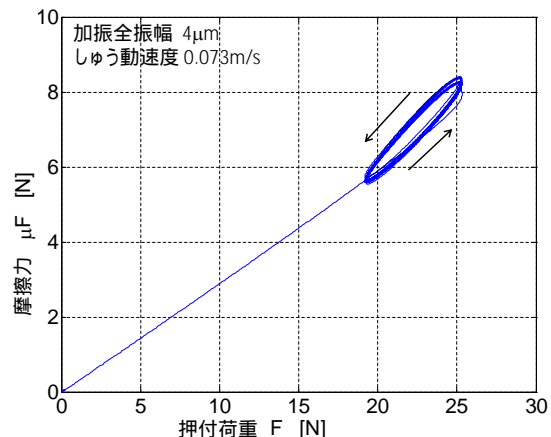


図7 加振時の摩擦力の変動

果、加振による圧力の増減に応じて、摩擦係数も増減する現象が確認された(図6)。この摩擦係数の増減は、圧力変動が大きくなるほど顕著になった。また、加振力-摩擦力の関係を調べた結果、変動成分がヒステリシスループを描くことが明らかになった(図7)。

(2) 共同研究先に依頼し、実ブレーキと同等の構造をもつ実験機において、面内鳴きが発生している際の各部の振動状態について説明を受けた。また、実機の開発現場にて、面内鳴きと呼ばれている騒音を確認した。面内鳴きが発生している際のディスクの鳴き振動は、純粋な面内方向の振動ではなく、面外方向にも振動していることが確認された。

面内鳴きの観測結果に基づき、ディスクの面外方向と面内方向の振動を考慮した解析を行うため、5自由度の解析モデルを作成した(図8)。ディスクは面内と面外の自由度をもつ剛体、パッドをディスク面内と面外およびディスク半径方向を回転軸とする回転の自由度をもつ剛体で表した。ディスクの並進(面外)方向の運動方程式は、

$$M_x \ddot{x}_d = -K_{dx} x_d - \int fdA$$

ディスクの面内方向の運動方程式は、

$$M_y \ddot{y}_d = -K_{dy} y_d - \mu F$$

パッドの並進方向の運動方程式は、

$$m \ddot{x}_p = -k_{px} x_p + \int fdA$$

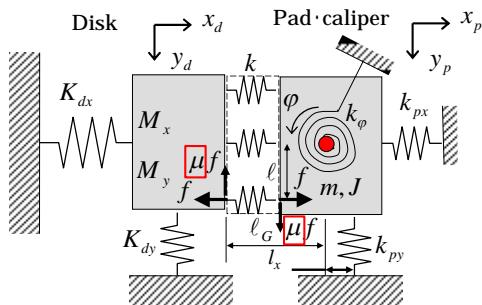


図8 鳴きの解析モデル(5自由度)

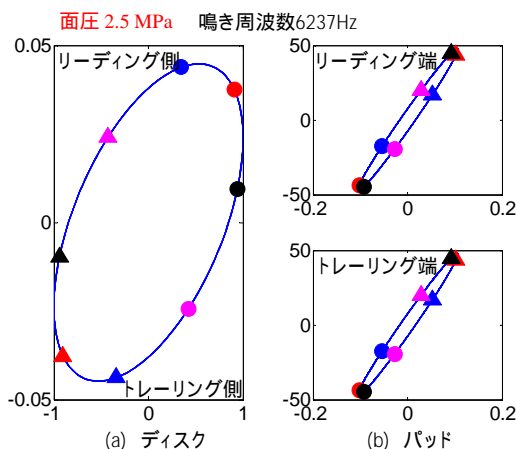


図9 鳴き発生時の振動モード解析結果

パッドの面内方向の運動方程式は、

$$m \ddot{y}_p = -k_{py} (y_p - l_x \varphi) + \mu F$$

パッドの回転方向の運動方程式は、

$$J \ddot{\varphi} = -k_{\varphi} \varphi + \mu F l_G + \int fdA + k_{py} (y_p - l_x \varphi) l_x$$

ディスクとパッドは、これまでの研究に基づき、剛性が圧力に依存する非線形ばねで接触させた。図3に示したように、パッドに静的な力を加えて時に生じる変位から求めた静的な剛性と加振したときの力の微小変動と微小変位から求めた動的な剛性は異なる。実験で測定したパッドの動的な剛性は次式で近似できる。

$$k = n_{dy} k_{dy} \frac{1}{P^{n_{dy}}} \times P^{n_{dy}-1}$$

ここで k_{dy} は動的な剛性の大きさを、 n_{dy} は動的な剛性の圧力 P に対する依存性を表す係数である。静的な剛性も同様の式を用いて表すことができる。

$$k_0 = n_{st} k_{st} \frac{1}{P^{n_{st}}} \times P^{n_{st}-1}$$

静的な剛性の n_{st} の値は動的な剛性の n_{dy} と同じ、 k_{st} の値は k_{dy} の値のおよそ 0.1 倍となっていた。これらの剛性を用いて、摩擦接触部に生じる押付力は定常分と変動分を足し合わせた次式で表される。

$$F = \int k_0 x_0 dA + \int k x dA$$

また、面内方向の鳴き振動の起振力として、加振による微小な圧力の増減による摩擦係数の変動も考慮した。

$$\mu = \mu_0 + \mu_v V$$

ここで、 μ_0 は図6に示した摩擦係数の定常成分、 μ_v は変動成分である。V は鳴き振動による速度変動を表す。作成したモデルに具体的な値を代入した解析結果では、ディスクが面内方向に振動する自励振動が発生する結果が得られた(図9)。

本研究の目標であるパッドの動的な材料特性(しゅう動状態のパッドを加振した時の剛性と摩擦係数)を測定できる装置の開発と面内鳴き振動を再現できる鳴き解析モデルの作成はこの段階で達成された。しかしながら、パッドの材料特性を改善することによる鳴き対策の提案は、現行の設備では困難である。そこで、ディスクブレーキ各部の固有振動数の鳴き発生への寄与度を調べ、ブレーキの構造面からの効果的な面内鳴き対策の提案を目指すことにした。

面内鳴き振動の発生メカニズムの本質を明らかにするために、現在、新たに2自由度の解析モデルを作成している。鳴き振動の観察より、ディスクの面内変位を主とする固有振動モードでも、面内方向の数%ではあるが、面外方向にも変形すると考えた。これは、摩擦接触面であるリング状のディスク部分を支える、薄肉円筒状のハットと呼ばれる部分

がねじれるためである。この発想に基づいて作成した鳴き解析モデルを検討した結果、ディスクとパッドの連成振動が不安定になり、実機の面内鳴きに類似した自励振動が発生する解析結果が得られている。

(3) まず、面内鳴き解析モデルで仮定した、ディスクの面外方向と面内方向に同時に振動する固有振動が実在するかを調べるため、面内鳴きの発生が確認されている実機ブレーキディスクの打撃加振試験を実施した。その結果、面内鳴きに対応する固有振動モードが存在することが確認できた。

現在、打撃加振で固有振動を確認した実機ディスクと実機ブレーキパッドを用いた鳴き試験機を開発している。この鳴き試験機では、キャリパの構造を単純化することで、パッドの支持剛性と制動圧の管理を容易とした。面内鳴き解析モデルで検討した鳴き発生条件に基づいて、支持剛性や押付圧の与え方を調整した結果、実機での面内鳴きに対応すると考えられる鳴き振動の発生に至った。鳴き発生条件を詳細に検討し、効果的な鳴き対策を検討するため、安定して鳴きが発生できるように試験機を調整している段階である。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計2件)

大浦 靖典、ディスクブレーキの鳴きに及ぼすパッド剛性の影響研究、第16回秋季技術交流フォーラム(一般社団法人日本機械学会 関西支部主催)、2015年10月31日、滋賀県立大学(滋賀県彦根市八坂町)

大浦 靖典(滋賀県大)、栗田 裕、西澤 幸男、杉本 考司、ディスクブレーキパッドの静圧縮時の剛性と微小振幅加振時の剛性、日本機械学会関西支部第90期定時総会講演会、2015年3月17日、京都大学 桂キャンパス(京都府京都市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大浦 靖典(OURA YASUNORI)
滋賀県立大学・工学部機械システム工学科・准教授
研究者番号: 60512770

(2) 研究分担者

栗田 裕(KURITA YUTAKA)
滋賀県立大学・工学部機械システム工学科・教授
研究者番号: 70275171