

令和元年6月11日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06160

研究課題名(和文) ディスクブレーキのディスク面内固有振動に起因する鳴き振動現象の解明

研究課題名(英文) Elucidation of in-plane squeal phenomena of disk brake focusing on natural vibration of brake disk

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：自動車や産業用機械に用いられるディスクブレーキは、制動時に鳴きと呼ばれる甲高い騒音を発生する。特に、ブレーキディスクが面内方向に伸縮している場合、面内鳴きと呼ばれる。まず、ディスクが面内と面外に同時に振動するとした簡易な解析モデルを作成し、ディスクが面内振幅10に対して面外振幅1程度で振動する固有振動をもつときに鳴きが発生することを理論的に示した。次に、このような固有振動が、面内鳴きが発生する実用ディスクに実在することを計測した。また、面内鳴きを安定して発生できるようにパッド・キャリパの構造を単純化した鳴き試験装置を開発した。今後、面内鳴きを低減する対策をディスクに施し、効果を検証する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車の鳴きが発生すると運転者や周囲は不快である。また、産業用機械の鳴きは、健康被害の原因となる。近年、無対策では頻発する「面外鳴き」の理論的な対策設計がなされ、比較的静粛な環境が実現している。その結果、発生頻度は稀なもの、従来の鳴き対策では対応できない「面内鳴き」は、機械の故障と認識されるなど、重篤な問題となる。有限要素法などの大自由度のモデルを解析する技術は、発生メカニズムが認知の「面外鳴き」の対策に活用されているが、発生メカニズム自体が不明な「面内鳴き」には対応できなかった。本研究は面内鳴きの発生メカニズムを理論と実験の両面から示すものであり、今後の面内鳴き対策の検討に有用である。

研究成果の概要(英文)：Disk brakes used in automobiles and industrial machines sometime generate high frequency noises called squeal. When the brake disk expands and contracts in the in-plane direction, it is called in-plane squeal. We clarified the generation mechanism of in-plane squeal. First, a simple analysis model was created in which the disk vibrated in-plane and out-of-plane simultaneously. It was theoretically shown that a squeal occurs when the disk has a natural vibration that oscillates at an out-of-plane amplitude 1 relative to an in-plane amplitude of 10. Next, it was measured that such a natural vibration existed in the practical disk where in-plane squeal occurs. In addition, we have developed a device that simplifies the structure of the pad caliper so that in-plane squeal can be generated stably. In the future, we will make changes to the disk to reduce in-plane squeal and verify the effect.

研究分野：機械力学

キーワード：ディスクブレーキ 面内鳴き 固有振動 自励振動

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。近年では、ディスクやパッド、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。

ディスクが面外方向（図1(a)）に振動すると、空気に振動が伝わり、騒音が発生する。ディスクとパッド・キャリパの固有振動が連成して発生する「面外鳴き」に関する研究は、申請者らによるものを含めて、数多く行われている。その結果、「面外鳴き」は発生メカニズムも明らかになり、対策も理論的に行われつつある。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に振動（図1(b)）する鳴き」が報告されている。「面内鳴き」は、実機の計測結果から存在が示されたが、発生メカニズムが明らかではなく、有効な対策もなかった。

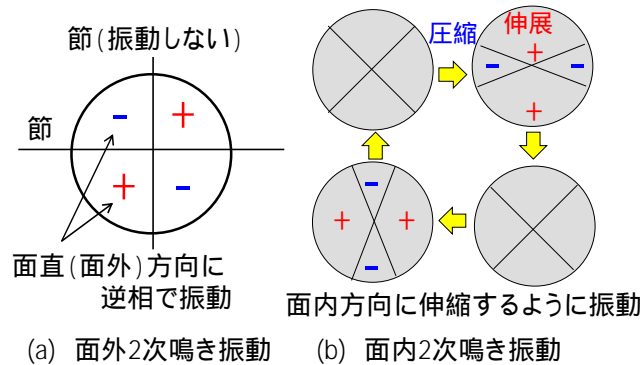


図1 ディスクブレーキの鳴き振動

2. 研究の目的

回転する円板（ディスク）に摩擦材（パッド）を押し付けて制動するディスクブレーキは、制動時に鳴きと呼ばれる甲高い騒音を発生することがある。本研究では、ディスクが面内方向に変形することで生じる「面内鳴き」の発生メカニズムを解明し、効果的な鳴き対策の指針を示す。

- (1) 低自由度の「鳴き解析モデル」を用いて面内鳴き発生メカニズムの本質を解明する。
- (2) 構造を単純化した「鳴き試験機」を用いて面内鳴き振動を再現する。
- (3) 面内鳴きに寄与度の大きい実機の要素を特定し、実用的な鳴きの低減対策を提案する。

3. 研究の方法

申請者らは、面内鳴きの発生メカニズムを説明するために、図2に示すモデルを着想した。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られる。これは、ブレーキディスクを支えるハット部（図3）がねじれるためである。そこで、ディスクは集中定数形で表し、摩擦接触面に対して斜め（面内+面外）方向に変位するとモデル化した。また、パッドは面外方向のみに変位すると簡易化した。パッドとディスクの接触面の摩擦係数は一定とすることで、従来の鳴き研究で注目される事が多いスティック・スリップ現象による面内振動は生じさせない。このモデルを解析し、ディスクとパッ

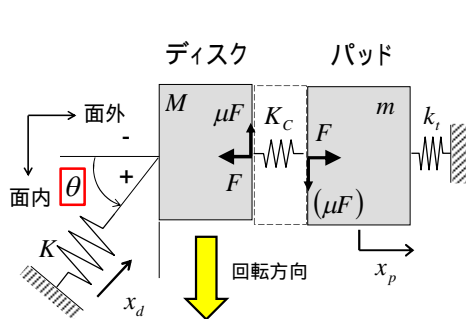


図2 ディスクブレーキの
面内鳴き振動のモデル化

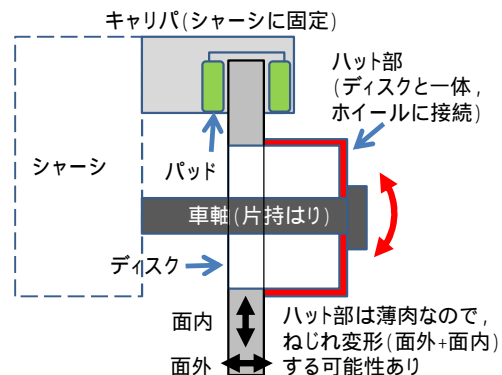


図3 ハット部の構造

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条件を明らかにする。また、鳴き解析モデルで得られた知見に基づき、面外鳴きを抑制しつつ、面内鳴きが発生する簡易な構造の鳴き試験機を開発する。さらに、面内鳴きの発生を抑制する方法を理論的に検討し、鳴き試験機で鳴き低減効果の実証を試みる。

4. 研究成果

(1) 平成 28 年度は、構造を簡略化しつつ定常的な面内鳴き振動を発生できる鳴き試験機を開発し、面内鳴きの発生に寄与する要素の特定を目指した。過去に行った面外鳴きの研究より、鳴きの発生にはディスクの固有振動が大きく寄与することが明らかとなっている。そこで、自動車実機のディスクは、面内方向に大きく振動しつつ面外方向にも振動する固有振動をもつのではないかと考えた。そこで、鳴きの発生にもっとも影響が大きいと考えられるディスクとパッドは実機と同じとし、それらの支持構造は簡易化する。面外鳴きに比べて発生が安定しない面内鳴きを安定して計測することができれば、鳴き発生メカニズムの検証が容易となり、新たな「面内鳴き」対策の提案に有用である。

図 4 は実機ディスクと実機パッドを用いた鳴き試験機の試作である。ディスクに取り付けたターゲットの振動をレーザードップラー振動系で計測することで面内鳴き振動を測定する。この試験機は、パッドをディスクに押し付ける圧力を調整することで、ディスクの固有振動数に近い 7500Hz の鳴きが発生する。図 5 は面内方向の鳴き振動の計測結果と振動の節の位置推定結果である。パッド接触部中央を基準 0 とし、リーディング側を正とする。直径節を一本もつ面内鳴きが発生していることがわかる。また、同時に面外方向にも振動していることを確認している。

このようにキャリパの構造を単純化した鳴き試験機を用いることで面内鳴き振動を意図的に発生させ、鳴き振動を計測することができた。ただし、パッドの固定が安定しておらず、鳴きが発生させるためには調整が必要である。鳴き対策を検討するためには、より安定して再現性のある鳴きを発生できる試験機が必要である。

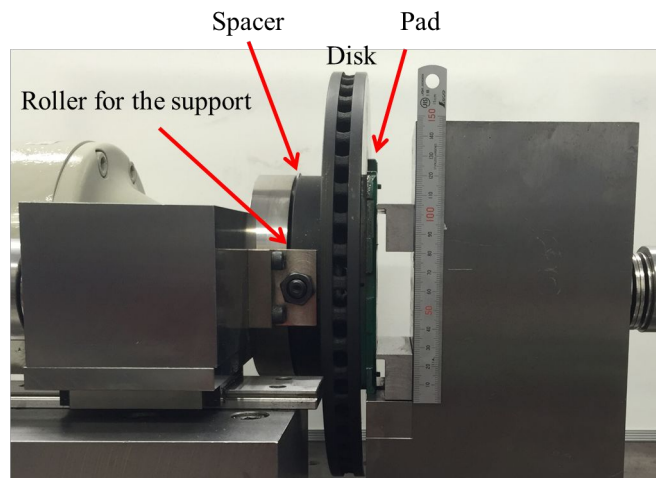


図 4 鳴き試験機（試作）

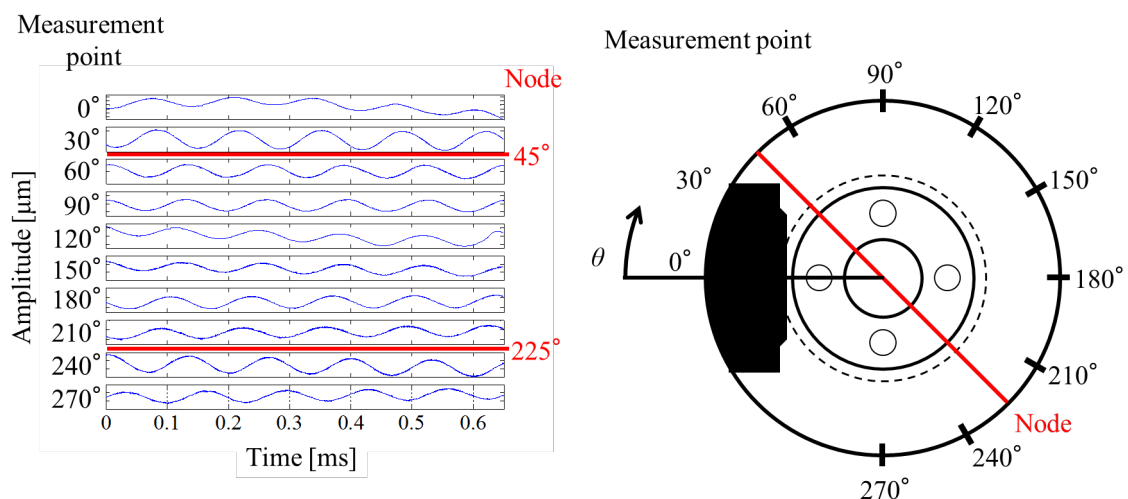


図 5 面内鳴き振動の測定結果

(2) 平成 29 年度は、ディスクブレーキ実機の面内鳴きの発生に影響しない箇所の構造を簡易化することで、安定した面内鳴きを発生できる鳴き試験機の開発を目的とした。まず、解析モデルの検討結果に基づき、面内鳴きに最も影響が大きい要素として、ディスクの固有振動に着目した。実機ディスクには打撃加、面内方向と面外方向に同時に振動する固有振動が存在する。図 6 は、面内鳴きが発生する実機ディスクを打撃加振試験した結果である。7840Hz に面内方向の振幅 10 に対して、面外方向に振幅 1 で振動する固有振動が存在する。ディスク各位置の振動を測定することで、このような固有振動は、ドーナツ形の制動円板をハットと呼ばれる薄肉円筒で支持するというブレーキディスク特有の形状に起因するものであるとの知見を得た。鳴き発生メカニズムに関わる 3 次元的に振動する固有振動を確認できたことは重要である。一方、実機に置いて複雑な構造をもつ摩擦材（パッド）支持側の構造（キャリア）は、ディスク面外方向に固有振動をもてば鳴きが発生するという知見が得られている。そこで、摩擦材から 20mm 四方の試験片を切り出し板ばねで支持した単純な構造でパッド・キャリアを表した。板ばねの厚さを調整することで、パッドがディスク面外方向に振動する固有振動の周波数を任意に設定することができる。この鳴き試験機では、ディスクが面内方向に大きく振動するという面内鳴きの特徴を備えた鳴きを安定して発生させることができた。

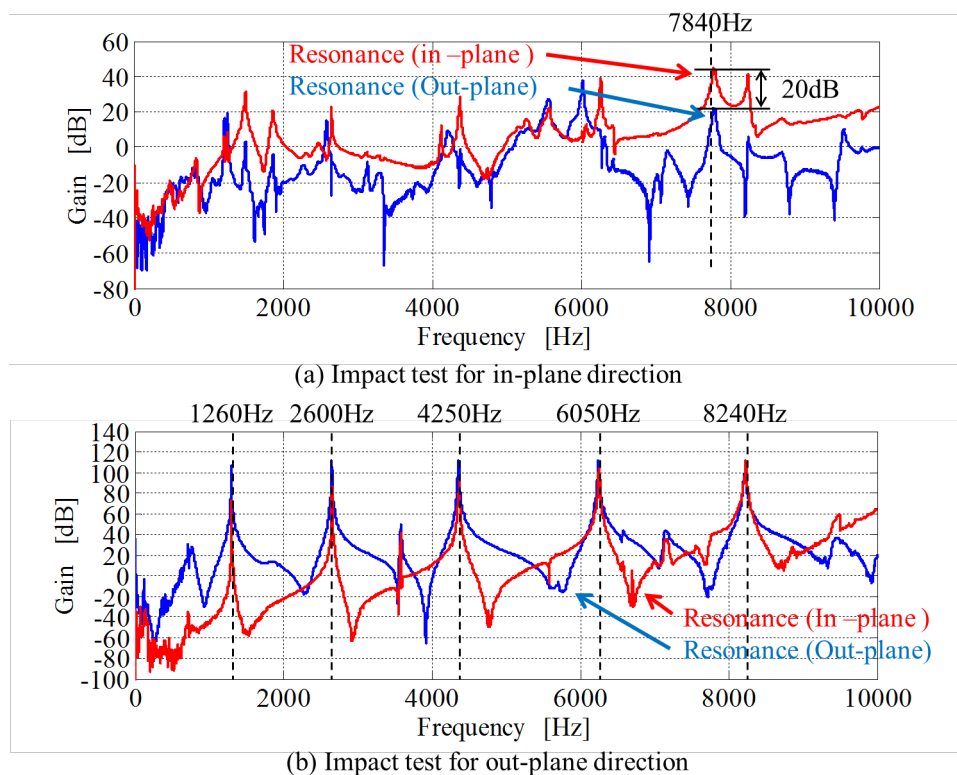


図 6 ディスクの固有振動

(3) 平成 30 年度は、前年度に作成した鳴き試験機において発生する面内鳴きを精度よく測定することを第一の目標とした。この鳴き試験機は、面内鳴きが発生した実際のブレーキディスクと、摩擦接触面付近の振動が計測できるように構造を単純化したパッド・キャリアを組み合わせたものである。ブレーキパッドとディスクの接触位置中央の振動を基準として、ディスク各位置の面内方向の振動と面外方向の振動を測定した。その結果、面内方向の振動が最も大きくなる位置（面内振動の腹）では、 $10\mu\text{m}$ 程度の振幅をもつ振動が発生していることが確認できた。一方、同位置での面外方向の振動は $1\mu\text{m}$ 程度となっていた。この結果は、面内鳴きの発生メカニズムについて簡易なモデルを用いて提唱した仮説と矛盾しない。ただし、発生する鳴き振動の振幅が想定よりも小さかった。このため、比較的振幅が小さくなるディスク面外方向の振動については、モータノイズ等の影響もあり、明確で再現性の良い計測ができなかった。このことは、鳴き発生メカニズムに基づく鳴き対策を検討する際に、問題となる。そこで、第二の目標として、元来、鳴き対策が施されている実機ディスクではなく、鳴きが発生しやすい面内鳴き研究用ブレーキディスクの開発を試みた。材質を S55C とし、放熱だけではなく振動抑制の効果をもつと考えられるベーン部を除去したディスクを削り出しで作成した。現在、この研究用ディスクの振動特性の評価および鳴き試験を実施している。これらの試験結果からも面内鳴きの抑制に有用な知見が得られている。引き続き、当初の目的である、「面内鳴き」について「実用的な鳴きの低減対策」を検討する予定である。

5 . 主な発表論文等

[学会発表](計4件)

ディスクブレーキの面内鳴き現象, 金本将季, 栗田裕, 大浦靖典, 田中昂, 勝見康平, 岡田歩, 西澤幸男, 青木勇祐, 兼平康行, 日本機械学会関西支部第92期定時総会講演会講演論文集, 講演番号 P066 .

ディスクブレーキにおけるディスク面内方向の固有振動と鳴きの発生, 金本将季, 栗田裕, 大浦靖典, 田中昂, 西澤幸男, 青木勇祐, 兼平康行, Dynamics & Design Conference 2016 論文集, 講演番号 104 .

In-plane squeal vibration generated in disk brake, Masaki Kanemoto, Yutaka Kurita, Yasunori Oura, Takashi Tanaka, Yukio Nishizawa, Yusuke Aoki, Yasuyuki Kanehira, Satoshi Obata, Proceedings of The 5th Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics & Control, No. J14 .

ディスクブレーキの面内鳴き振動の計測, 渡邊和真, 栗田裕, 大浦靖典, 田中昂, 西澤幸男, 青木勇祐, 兼平康行, 尾畑聡史, 金本将季, 日本機械学会 2018 年度年次大会 講演論文集, 講演番号 G1000505 .

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 田中 昂

ローマ字氏名: TANAKA Takashi

所属研究機関名: 滋賀県立大学

部局名: 工学部

職名: 講師

研究者番号(8桁): 60759273

研究分担者氏名: 栗田 裕

ローマ字氏名: KURITA Yutaka

所属研究機関名: 大阪産業大学

部局名: 工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 70275171