

機関番号：24201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760172

研究課題名（和文）ディスクブレーキの鳴きに摩擦接触部の摩擦係数と
動剛性の高周波数の変動が及ぼす影響研究課題名（英文）Influence of Friction Coefficient and Dynamic Stiffness
Fluctuation at High Frequency on Disk Brake Squeal

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・助教

研究者番号：60512770

研究成果の概要（和文）：ディスクブレーキのディスクとパッドの摩擦接触部の振動特性は、鳴き発生の有無や鳴き周波数に影響する。本研究では、鳴き振動が発生したときの摩擦接触部の動剛性をしゅう動状態で測定できる装置を開発した。しゅう動によるパッド表面性状の変化やしゅう動速度が振動特性に与える影響を調べることができる。測定の結果、しゅう動時には摩擦接触部の剛性が低下することが明らかになった。この剛性の低下は、面圧が小さいときの鳴き発生に影響する。

研究成果の概要（英文）：Vibration character of the frictional contact surface between a disk and a pad influence squeal generation and squeal frequency on the disk brake. In this research, we developed the device to measure the dynamic stiffness of frictional contact surface in the continuous slipping and squeal generating condition. Influence of surface property of the pad and rotation speed of the disk on the vibration character is measured. The measurement results clarify that the stiffness of contact surface is decrees at a continuous slipping condition. This decree of stiffness influence squeal generation in low pressure braking.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
22 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：機械力学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：動剛性、鳴き、材料試験、しゅう動、ブレーキパッド、ディスクブレーキ

1. 研究開始当初の背景

ディスクブレーキの鳴きは、制動時の摩擦力を介して、ディスクやパッド、キャリパの固有振動が連成して不安定となることで発生する。このため、ディスクブレーキの構造に着目した研究が数多く行われている。鳴き周波数がディスクの固有振動数に支配され

ることや、鳴きやすさがパッドの支持剛性によって変化することが明らかになっている。その一方で、摩擦接触部の振動特性が鳴きに及ぼす影響は十分に解明されていない。従来の研究では、摩擦接触部の剛性は、実機試験と鳴き解析の結果が一致するように試行錯誤的に定められる。また、摩擦係数は鳴きが発生していない準静的な条件下で測定し

た一定値が用いられる。このため、鳴きの発生しにくい接触部特性については、十分な検討ができていない。

鳴き対策を困難にする要因の一つに、鳴きの有無や鳴き周波数が制動時のディスク・パッド間の面圧によって変化する、鳴きの面依存性がある。ディスク単体やキャリパ単体の振動特性は面圧によって変化しないため、構造に着目した従来の研究では、鳴きの面依存性を説明できない。実機の開発において、構造を工夫することで特定の周波数をもつ鳴きをなくしても、面圧が変化すると異なった周波数をもつ鳴きが発生することがある。

研究代表者らは、面圧依存性をもつ鳴きが発生する原因として、ディスクとパッドの摩擦接触部の剛性特性に着目した。まず、ディスクブレーキの構造を単純化した鳴き試験機と解析モデルを用いて鳴き発生メカニズムを検討した。摩擦接触部を分布ばねで表した面接触モデルによる解析の結果、分布ばねの剛性を面内で一定とする条件では鳴きは発生しないが、面内で剛性の大きさが変化する条件では鳴きが発生することがわかった。また、分布ばねの剛性が大きいほど、高い周波数の鳴きが発生した。面圧依存性をもつ鳴きをなくすためには、パッドの剛性特性を実測する必要がある。

そこで、鳴き発生時の摩擦接触部の動剛性を測定する装置を開発した。パッドに一定の面圧と振動を加えることで、鳴き発生時の摩擦接触部の状態を模擬し、伝達関数（動剛性）を求める。測定の結果、従来の研究では一定値とされる摩擦接触部の動剛性は、面圧が高いほど、大きくなることが明らかになった。また、鳴き周波数帯域における動剛性は、静的な剛性よりも大きくなっていった。実測したパッドの剛性特性を面接触モデルに導入すると、鳴き実験における面圧依存性をもつ鳴きを再現できた。この成果は、パッド剛性をもつ面圧依存性を考慮した鳴きの発生しにくいブレーキの開発に用いられている。

剛性以外にも、鳴きに影響を与える摩擦接触部特性に摩擦係数がある。従来の研究での摩擦係数は、一定の回転速度と面圧での準静的な条件下で測定されたものである。摩擦接触部の動剛性と同様、鳴き振動が発生している状態での摩擦係数を測定することで、新たな鳴き発生メカニズムを発見できる可能性がある。研究代表者らが開発したパッド動剛性の測定装置に、パッドの摩擦接触面を連続的にしゅう動させる機能を追加することで、より実機に近い状態での剛性に加えて、摩擦係数の測定も可能になる。

2. 研究の目的

(1) 鳴き振動が発生したときのディスクとパッド間の摩擦接触部の振動特性（動剛性・摩擦係数）を、しゅう動している状態で測定できる装置を開発する。また、測定した摩擦接触部の振動特性が鳴きの発生に影響を与えるメカニズムを明らかにする。

(2) 測定した摩擦接触部の特性を、従来の解析に導入することで、解析精度の向上を実現する。解析結果に基づき、ブレーキの構造に依存しない、鳴きが発生しにくい摩擦材（ディスク・パッド）の開発指針を提案する。

(3) ディスクブレーキには構造に着目した鳴き対策が施されているが、鳴きが発生している。摩擦接触部の特性が原因で鳴きが発生することを考慮し、再設計することで、構造を単純化できる可能性がある。研究で得られた知見を、ブレーキの小型・軽量化に向けた基礎的な設計に応用することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 平成 21 年度 鳴き発生時のディスクとパッドの摩擦接触部をもつ振動特性をしゅう動状態において測定できる実験装置を開発した。

図 1 に測定に用いるパッド試験片を示す。ブレーキパッドは、キャリパに取り付けるための金属製の裏板に摩擦材が焼結された構造をもつ。成形時のひずみの影響を除き、パッド構成材の平均的な特性を測定するため、パッド中央付近から 20mm×20mm の試験片を切り出した。

装置の全体像を図 2(a)に示す。ディスクはモータによって一定速度で回転し、パッド試験片との摩擦接触部を連続的なしゅう動状態にする。パッド試験片には、上部の推力ねじを用いて、ブレーキ圧相当の一定圧を加える。測定部では、鳴きを模擬した周波数と振幅をもつ振動をパッド試験片に加えることで動剛性を測定する。摩擦接触部の特性を鳴き周波数帯域において安定して測定するため、ディスクを厚くし、装置全体の支持構造を剛にすることで、装置本体がもつ固有振動数が 5kHz 以上になるように設計した。



(a) Cutout position (b) Side view of test piece

図1 パッド試験片

図 2(b)に測定部の拡大図を示す。図奥方向に一定速度で回転するディスクにパッド試験片を一定圧で押付ける。この状態で、パッド試験片の裏板の4隅に並列して取り付けられた積層圧電アクチュエータ(NEC トーキョー、AE0505D16)を用いて加振する。積層圧電アクチュエータは、振幅は小さいが高応答であるため、鳴き振動(周波数 1kHz 以上、振幅 10 μ m 以下)を模擬するために適している。加振によって生じる振動は、高周波かつ微小振幅となるので、裏板中央に取り付けた加速度ピックアップ(B&K、4393)を用いて測定する。加振力は、アクチュエータの上部に設置した水晶圧電式力センサ(キスラー、9146B)を用いて測定する。水晶圧電式力センサは、パッドの約 100 倍の剛性をもち、微小かつ高周波の力変動を測定できる。準静的な測定も可能であるため、パッド試験片に加える定圧の測定にも用いることができる。

図 3 に、摩擦接触部のしゅう動によって生じる摩擦力を保持する構造を示す。パッド試験片に厚さ 0.2mm のシムプレートを取り付け、研磨加工した装置と接触させた。接触面積を小さくすることで摩擦力を小さくし加振力の損失を防いだ。ディスクとパッドの摩擦接触面の極近傍で摩擦力を受けることで、

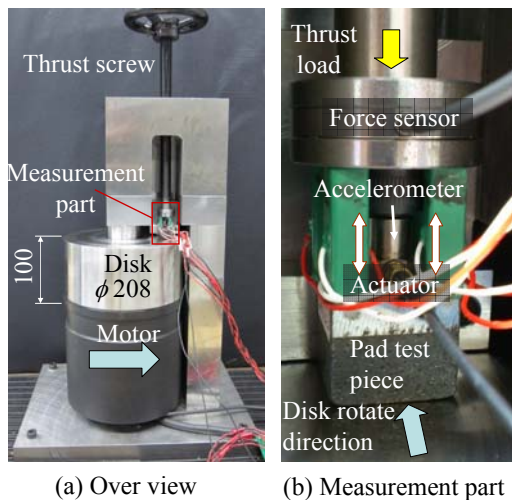


図2 しゅう動時の摩擦接触部特性測定装置

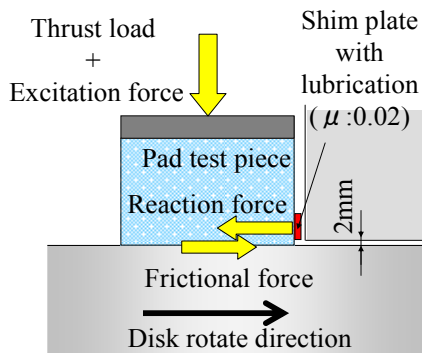


図3 摩擦力の保持構造

摩擦力による回転モーメントを小さくできる。摩擦モーメントによるパッドの傾きを防ぎ、摩擦接触面の圧力を均一にすることで測定精度を向上した。また、摩擦力を受ける位置の後方に、力センサを設置することで摩擦力の測定が可能である。

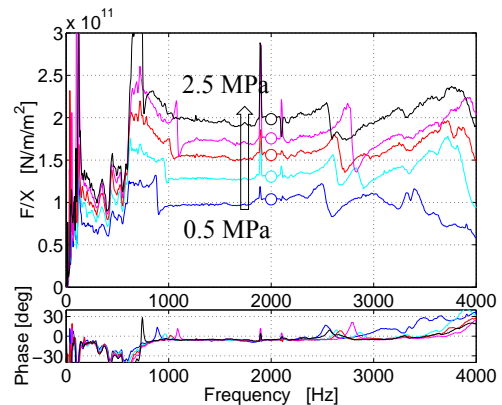
(2) 平成 22 年度 動剛性測定装置の構造を見直し、測定精度を向上した。まず、装置の測定部を小型化し、共振周波数を高くすることで、測定可能な周波数帯域を確保した。次に、パッドに加わる摩擦力を保持する構造を見直し、潤滑を加えることで、加振力の損失をなくした。パッドと装置本体の間の摩擦係数は約 0.02 である。その結果、ディスクの回転機能をもたない装置と同等の精度で、しゅう動時の動剛性を測定できるようになった。ただし、装置の測定精度の向上を優先したため、しゅう動面の摩擦係数を測定する力センサの取り付けは準備段階である。

4. 研究成果

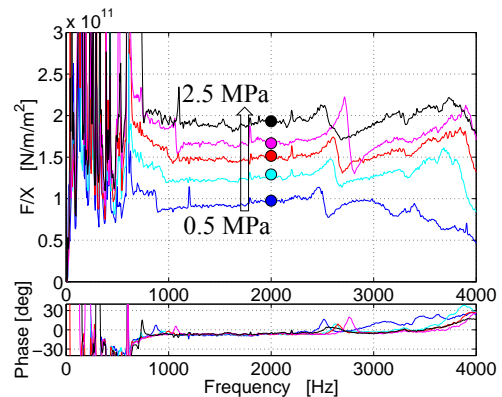
(1) 研究の主な成果

本研究で開発した装置は、しゅう動が摩擦接触部の剛性に与える影響を測定できる。

図 4 に摩擦接触部が停止しているときとし



(a) ディスク停止時



(b) しゅう動時

図4 パッド動剛性の測定結果

しゅう動しているときの動剛性を測定した結果を示す。加振指令は、全振幅が $1\mu\text{m}$ になるように調整した 0kHz から 4kHz の周波数帯域を含むランダムノイズを用いた。また、ディスクの回転速度は 60rpm とした。周波数 1kHz から 2.5kHz において、動剛性のゲインは周波数に依存せず、位相は 0° となる。鳴き周波数帯域の動剛性の値は、減衰の影響が小さく、剛性とみなせることがわかる。以降、耳に届きやすく、鳴き実験で発生した鳴き音の周波数に近い 2kHz における動剛性の値を剛性として扱う。

図5にしゅう動の有無による剛性の違いを比較した結果を示す。全面圧において、しゅう動時の剛性は、停止時の剛性に比べて低下することがわかる。面圧が 0.5MPa 以上では、停止時としゅう動時の剛性は、面圧に依存して直線的に大きくなる。図6に面圧が 0.5MPa 以下を拡大した結果を示す。面圧が小さいときは、剛性が小さく面圧依存性が大きい。剛性が小さいため、しゅう動時と静止時の剛性の差が相対的に大きくなることがわかる。

しゅう動時のディスク回転速度が、パッドの剛性に与える影響を調べた結果を図7に示す。面圧は 2.5MPa とした。図中の破線は、ディスク停止時の剛性である。しゅう動速度が大きくなると剛性が低下することがわかる。

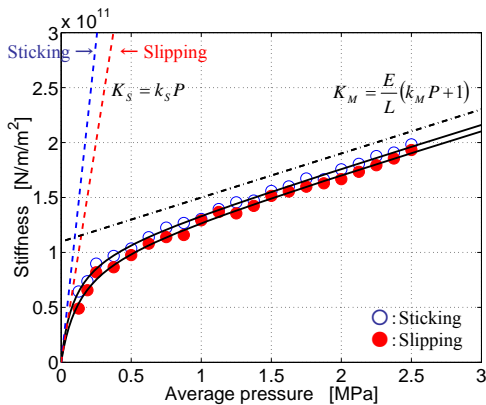


図5 停止時としゅう動時のパッド剛性

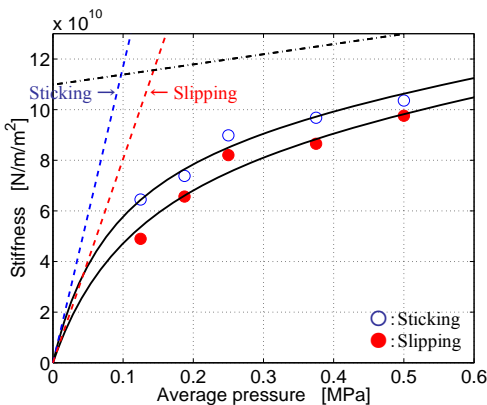


図6 低面圧におけるパッド剛性

停止時としゅう動時において剛性が変化する原因を接触状態の違いに着目して考察する。図8にパッドの表面剛性と母材剛性の直列ばねモデルを示す。しゅう動すると摩擦接触面は常に変化するので、接触部の追従が追い付かず、真実接触面積が減少する。この影響はしゅう動速度が大きいほど顕著になり、表面剛性は小さくなる。また、面圧が大きくなると、表面の凹凸がつぶれて真実接触面積が大きくなり、表面剛性が大きくなる。そこで、表面剛性 K_S を、面圧 P とパッドの接触状態を表す係数 k_s を用いて次式で表す。

$$K_S = k_s P \quad (1)$$

また、パッド全体の剛性は、厚さに反比例することが過去の研究で明らかになっている。そこで、母材剛性を、接触状態に依存しない母材のヤング率 E と厚さ L 、圧力による硬化係数 K_B を用いて次式で表す。

$$K_M = \frac{E}{L}(K_B P + 1) \quad (2)$$

表面剛性と母材剛性の直列ばねモデルで表したパッドの剛性 k は次式で表される。

$$k = \frac{K_M \times K_S}{K_M + K_S} \quad (3)$$

式(3)を用いて、パッド剛性を近似した曲線を図5と図6中に示す。母材剛性はしゅう動による影響を受けないため、停止時としゅう動時で共通の値とした ($E: 1.32 \times 10^9 \text{Pa}$, $L: 12\text{mm}$, $K_B: 3.65 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{N}$)。表面剛性を表す係数 k_s は、停止時が $1.17 \times 10^6 \text{m}^{-1}$ 、しゅう動時が 8.05

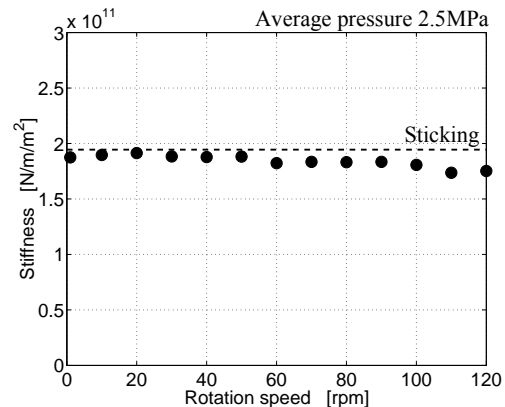


図7 パッド剛性のディスク回転速度依存性

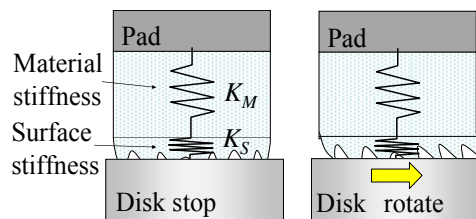


図8 パッド剛性の直列ばねモデル

$\times 10^5 \text{ m}^{-1}$ となる。しゅう動によって表面剛性が低下していることになる。図5と図6より、式(3)の近似式は、測定した剛性特性を精度よく表せていることがわかる。ただし、このパッドの剛性モデルが実際の現象を表しているのかは今後実証する必要がある。

(2) 本研究の位置づけ

本研究では、ブレーキパッドの剛性が、面圧の大きさだけではなく、しゅう動によっても変化することを実証した。パッドの剛性は鳴き発生の有無や鳴き周波数に大きく影響する重要な設計パラメータである。従来のディスク停止状態における剛性の測定値を用いた解析よりも、実機制動時の鳴きを精度よく再現し対策することが可能になる。

(3) 今後の展望

本研究で得られたしゅう動によるパッド剛性の変化が実際のブレーキ鳴きにどのような影響を及ぼすのか検討する。表面性状を管理したパッドを用いて、しゅう動時のパッドの表面剛性と鳴きやすさの關係に着目した鳴き対策を検討中である。測定したパッドの剛性特性を用いた鳴き解析では、しゅう動によってパッドの表面剛性が小さくなると低面圧において鳴きが発生しやすくなる結果を得た。しゅう動による剛性の変化を考慮することで鳴きが発生しにくいブレーキを開発できることを実証する必要がある。

また、本装置は、長時間のしゅう動による表面性状の変化（摩耗）、埃や水の混入などが剛性に及ぼす影響をリアルタイムに計測することもできる。今後、各種実験を行うことで鳴きやすさに影響を与える摩擦接触部の要因を絞り込む。また、本装置をしゅう動による摩擦係数の変動を測定できるよう発展させる。鳴きにくいパッドを開発するための評価試験機としての完成を目指す。

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)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Yasunori OURA, Yutaka KURITA, Yuichi MATSUMURA and Tsutomu TAMURA, Surface Contact Analysis Model of Disk Brake Squeal, Journal of Environment and Engineering, 査読有, Vol.4, No.1, 2009, 222-233.
- ② Yasunori OURA, Yutaka KURITA and Yuichi MATSUMURA, Influence of Dynamic Stiffness in Contact Region on Disk Brake Squeal, Journal of

Environment and Engineering, 査読有, Vol.4, No.2, 2009, 234-244.

- ③ 大浦靖典, 栗田裕, 西澤幸男, 小坂享子, ディスクブレーキの鳴きに及ぼすパッド厚さの影響, 日本機械学会論文集 (C編), 査読有, 76巻765号, 2010, 1287 - 1294.
- ④ 大浦靖典, 栗田裕, 西澤幸男, ディスク・パッド間圧力の均一化によるディスクブレーキ鳴きの低減, 日本機械学会論文集 (C編), 査読有, 76巻770号, 2010, 2552 - 2559.

[学会発表] (計4件)

- ① 小坂享子, 西澤幸男, 栗田裕, 大浦靖典, ディスクブレーキの鳴きに及ぼすパッド厚さの影響, 社団法人日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2009, 2009年8月3日, 北海道大学札幌キャンパス.
- ② Yasunori OURA, Yutaka Kurita and Yukio Nishizawa, Influence of Stiffness Distribution in Frictional Contact Surface on Disk Brake Squeal, The 10th International Conference on Motion and Vibration Control, August 18, 2010, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Japan.
- ③ 大浦靖典, 栗田裕, 西澤幸男, ディスクブレーキの鳴き振動モードに及ぼす摩擦接触部の面圧の影響, 日本機械学会機械力学・計測制御部門主催 Dynamics and Design Conference 2010, 2010年9月14日, 同志社大学京田辺キャンパス.
- ④ 小坂享子, 西澤幸男, 栗田裕, 大浦靖典, パッド摩擦界面の剛性がディスクブレーキ鳴きに及ぼす影響, 日本機械学会機械力学・計測制御部門主催 Dynamics and Design Conference 2010, 2010年9月14日, 同志社大学京田辺キャンパス.

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・助教

研究者番号：60512770