

論文題目：ディスクブレーキの鳴きに及ぼすパッド剛性の影響

著者：西澤 幸男

研究科、専攻名：滋賀県立大学工学研究科 先端工学専攻

学位記番号：工課第11号

博士号授与年月日：平成24年度7月19日

論文の要旨

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自動車用ディスクブレーキは、軽量で制動性能が優れている反面、制動時に甲高い騒音である鳴きを発生することがある。鳴きの発生は、ブレーキの性能自体には影響しないが、静粛性の観点から問題になる。特に自動車用ディスクブレーキに発生する鳴きは、身近な生活騒音であるため苦情になりやすく、自動車の商品価値に大きく影響する。このため、鳴き対策はディスクブレーキの開発において重要な課題となっている。

鳴きに関する研究は古くから行われており、現在では、多自由度系の運動の連成による不安定性が鳴きの主な原因と考えられている。この運動連成の考えを基に、近年では、計算機の発展に伴って、有限要素法（Finite-Element Method, 略称FEM）を用いた複素固有値解析が、実際のブレーキの開発の現場で主に活用されている。

FEM解析は、ブレーキの複雑な形状をモデル化できるが、境界条件を正しく設定しなければ忠実に形状をモデル化しても正しい解析結果は得られない。特に、摩擦接触部の境界条件であるパッド剛性は、鳴き発生の根本部分であるため、これを正しく求めることが重要である。パッド剛性は、これまでは一般的にパッドに静的荷重を加えたときのパッドの圧縮歪からパッド剛性を求めていた。しかし、このようにして求めたパッド剛性をFEM解析に用いても、鳴き実験の結果と解析の結果は一致しなかった。

そこで、滋賀県立大学の研究グループは、鳴き振動を模擬した状態で動的に摩擦接触部の剛性を測定する装置を開発した。その結果、摩擦接触部の剛性には圧力依存性があり、この圧力依存性が原因で鳴きが発生するという面接触モデルから導いた。また、従来の静的な圧縮歪より算出する剛性に比べて大きな値になることもわかった。これは、静的に求めた剛性はパッド全体の歪から剛性を求めているのに対し、動的な測定は摩擦接触部付近の剛性を測定しているためと説明している。

しかし、鳴き発生の原因となるパッド剛性（摩擦接触部の剛性）の圧力依存性が何で決まるかはわかっていない。これがわかれば、鳴きにくいパッドを開発する指針になり得る。また、動的に測定したパッド剛性は、摩擦接触部（パッド表面）の剛性と考えられていたが、検証はされていない。パッドの摩耗により、パッドの厚さは小さくなり母材の特性を変化させる。また、パッドの表面性状が滑らかになり表面の特性を変化させる。パッド剛性とパッドの厚さ及び表面性状との関係が明らかになれば、パッドの摩耗により発生する鳴きのメカニズムの解明につながる。これは、長期にわたって鳴きが発生しないブレーキの開発に結びつく。そこで、本研究ではパッド剛性の圧力依存性をもたらし要因の解明と、パッドの厚さと表面性状がパッド剛性に及ぼす影響の解明を取り組むべき課題とした。

まず、パッド剛性の圧力依存性の影響をなくすと鳴きが発生しなくなることを示した。パッド剛性自身の圧力依存性をなくすことは難しい。しかし、ディスク・パッド間圧力を均一化すると、パッド剛性の圧力依存性の影響がなくなる。そこで、この圧力の均一化により、パッド剛性の圧力依存性の影響をなくすと鳴きが発生しなくなることを実験と解析で示した。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) ディスク・パッド間の圧力を均一にすると鳴きが低減することを実験で確認した。パッドのトレーリング側端に荷重を与えると、鳴き周波数は変化しないが、鳴きが発生し始める圧力の範囲が高圧側に移動し、鳴き音圧の最大値が小さくなった。一方、パッドのリーディング側端に荷重を与えたときは、鳴き周波数や鳴き音圧の大きさはあまり変化せず、鳴きが発生し始める圧力の範囲が高圧側に移動した。
- (2) 面接触モデルを用いて、パッドのリーディング側の圧力が大きくなるときに鳴きが発生するメカニズムを解明した。
- (3) ディスク・パッド間の圧力分布によって決まるパッド剛性分布の重心位置を調べることで、鳴きの発生を予測できることを示した。

次に、パッドの厚さがパッド剛性と鳴きに及ぼす影響を調べた。厚さが異なるパッドの剛性を測定した結果、パッドの厚さはパッド剛性の圧力依存性には影響しないが、パッド剛性の大きさと反比例の関係にあることがわかった。また、パッド剛性は、パッド表面の剛性だけで決まるわけではなく、パッド全体の影響を受けることがわかった。また、鳴き実験により、パッドの厚さが鳴きの周波数や音圧に与える影響を調べ、面接触モデルによる鳴き解析により、パッドの厚さが鳴きに及ぼす影響を明らかにした。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) パッドの厚さが小さくなると、パッド剛性の大きさはパッドの厚さに反比例して大きくなる。また、鳴き振動時には、パッドは厚さ方向に一様に変形し、パッドは厚さ方向に直列ばねを構成している。
- (2) パッドの厚さが小さくなると、各次数の鳴きが発生する押付圧の範囲が高圧から低圧に移動し、発生する鳴きの周波数が高くなる。
- (3) 面接触モデルを用いた解析を行い、パッドの剛性は、鳴きの周波数や鳴きが発生する押付圧の範囲に影響することを示した。また、摩擦接触面からパッドの回転中心までの距離が小さくなると、鳴きが発生しにくくなることがわかった。

さらに、パッドの表面性状がパッド剛性と鳴きに及ぼす影響を調べた。パッドの表面粗さを変えたパッドの剛性を調べた結果、パッド剛性は、表面性状に起因する表面剛性と、厚さの影響を受ける母材の弾性特性に起因する母材剛性との直列ばねで表せることを示した。これにより、パッド剛性の圧力依存性は、低面圧域はパッドの表面剛性で、高面圧域はパッドの剛性特性で決まることがわかった。また、面接触モデルを用いた解析により、パッドの摩耗による表面性状の変化が鳴きに及ぼす影響を明らかにした。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) パッドの厚さが同じでも、しゅう動によりパッドの表面性状が変化するとパッド剛性は変化する。今回のすり合わせ試験では、しゅう動距離が長いほどパッドの表

面性状は滑らかになり、パッド剛性は全体的に大きく、低圧での剛性の増加率が大きくなる。

- (2) パッド剛性は、表面剛性と母材剛性の直列結合で表すことができる。表面剛性は、パッドの表面性状に依存して圧力依存性が大きく、低圧側のパッド剛性を支配する。一方、母材剛性は、パッド厚さに依存して圧力依存性が小さく、高圧側のパッド剛性を支配する。パッド剛性の圧力依存性は、低圧側は表面剛性の圧力硬化係数で、高圧側は母材剛性の圧力硬化係数で決まる。
- (3) パッドの表面性状が粗くなって表面剛性が小さくなると、鳴きの発生の有無や次数が変化しにくくなる。パッドの厚さが小さくなって母材剛性が大きくなると、幅広い次数の鳴きが発生する。長期にわたって鳴きが発生しないブレーキを開発するためには、ディスクブレーキの構造の安定性だけでなく、パッドの摩耗による表面剛性と母材剛性の変化を考慮する必要がある。

最後に、得られた研究成果を実際のブレーキ設計に応用することを検討した。鳴き振動状態で動的に求めたパッド剛性を FEM 解析に織り込むと、鳴きの解析精度が向上することを示した。また、ブレーキの効きに影響する静的なパッド剛性と、鳴きに影響する動的なパッド剛性を独立にコントロールできる可能性を示した。さらに、長期にわたり鳴きにくいブレーキを開発するために必要となる、制動による表面性状の変化を定量的に把握する手法について検討した。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 動的なパッド剛性を織り込んだ FEM 解析により、パッドの押付圧によって、ディスクの高次モードの鳴きに移り変わる鳴き実験の現象を再現できた。FEM 解析の活用はブレーキ開発において必須であり、本成果により鳴きの解析精度向上が向上し、より効率的なブレーキ開発が期待できる。
- (2) パッドの気孔率やパッドに配合するカシューダストにより、静的なパッド剛性と動的なパッド剛性を独立に制御できる可能性があることがわかった。これにより、ブレーキフィーリングの良さと鳴きにくさを両立できる画期的なパッドの材料開発が期待できる。
- (3) 超音波の反射エコーを用いた手法により、パッドをディスクに押し付けた状態で、パッドの表面性状をディスク・パッド間の固体接触面積として定量化できるようになった。本計測法は、ブレーキの鳴きや効きに影響するパッド剛性や摩擦係数に関わる開発への応用が期待できる。