

feature article

ディスクブレーキキャリパのNVH解析技術

NVH Simulation Technology for Disc Brake Caliper

鈴木 俊次 Toshitsugu Suzuki
高木 雄一 Yuichi Takagi

久米村 洋一 Yoichi Kumemura
鈴木 伸二 Shinji Suzuki

井上 映 Hayuru Inoue

快適な自動車は、騒音や振動を抑え、乗り心地がよいという条件を満たしている。そのため、これらを意味するNVHが自動車の快適性の評価基準として使われるようになってきた。自動車用ディスクブレーキの騒音には幾つかの種類があり、発生原因はそれぞれ異なっている。その中でも現象が複雑な、「ブレーキ鳴き」と呼ばれる騒音、および「ブレーキジャダー」と呼ばれる振動を低減することは商品性の向上につながる。日立グループは、NVH解析技術を適用し、実験とシミュレーションの両面から改善を進めている。

1. はじめに

近年、自動車の動的性能は著しく向上しているが、同時に快適性や静粛性に対する要求も高くなってきている。その中で制動時に時折発生するブレーキの騒音・振動はユーザーに不快感を与えることがあり、いっそうの改良が必要である。

最近では顧客満足度に関して第三者機関による車両評価が行われており、例えば、米国J. D. Power and Associates社の調査やドイツの自動車雑誌「auto, motor und sport」などでの評価が低いと車両販売台数減少やカーメーカーのブランドイメージ低下につながり、大きな問題となる。

ブレーキの騒音・振動もこの評価項目となっているため、いっそうの改善を求められている。これらの現象は複雑であり、その発生メカニズムを明確にして改善することが重要である。

ここでは、自動車用ディスクブレーキに対するNVH (Noise, Vibration, and Harshness: 騒音・振動・乗り心地) 解析技術への日立グループの取り組みについて述べる。

2. ディスクブレーキの騒音・振動

自動車用ディスクブレーキにおける騒音・振動はディスクと摩擦材の接触による摩擦振動が加振源となり、ブレーキ構成部品や車体を共振させて発生する現象である。代表的な騒音・振動は「ブレーキ鳴き」と「ブレーキジャダー」であり、クレームの約7割を占める。

ブレーキ鳴きは、ブレーキから直接発生する1~16 kHzの騒音である。これは温度、湿度、速度、踏み込む力の大き

さなどによって変化する再現性の乏しい現象であり、その対策を困難にしている。

高速走行からの緩ブレーキ (減速度1.5~3 m/s²) 時にステアリング振動、車体振動、ブレーキペダル振動を発生することがあり、制動に伴うこれらの振動現象を総称してブレーキジャダーと呼んでいる。低周波振動の一つであるブレーキジャダーは、制動中のブレーキの振動が足回り部品から伝達されてステアリングを共振させる。時には車体を共振させ、車体がきしむような振動へと成長する現象であり、その振動にかかわる部位は車体全体である。この振動はブレーキ系による車体系への定常的な加振または摩擦振動と車体の共振特性が主な原因である。入力される加振力としてはディスクの変形や厚さの不均一による制動トルクの変動がある。

ブレーキ鳴き、ブレーキジャダー以外の自動車のブレーキに関する騒音・振動の分類を表1に示す。

このようにブレーキに関するNVH問題は多種にわたっており、これらの対策に取り組んでいる。

3. 鳴き騒音とその解析技術

ここでは、ブレーキ鳴きの要因とその解析技術について述べる。

一般に、摩擦ブレーキは乾性摩擦による摺(しゅう)動で制動力を発生させるため、常に微小な摩擦力の変動が生じる。これが摺動材周辺の部材と共振して、摩擦力の変動をさらに増幅し、比較的表面積の大きな部品が振動することで空気が震わされて騒音を発生する。これは自励振動と

表1 ディスクブレーキの代表的な異音の種類

ブレーキ異音はさまざまな条件で発生し、その音色も異なる。個々の現象に合わせて対策を行っている。

異音種類	音の例	発生条件 (周波数)	対応策
グローン音	グー音	AT車の下り坂の発進時または停止時の揺り戻し時などの状態で足をブレーキペダルから離れた瞬間に発生する音 (50~300 Hz)	・パッド材質の適正な選択、チューニング
ハム音	B音 ブー音 モーン音	ブレーキのリリース後の微速発進時または転舵(だ)時に特にリヤディスクで発生しやすいブーンという音 (200~400 Hz)	・引きずり低減 ・足回り剛性アップ
ランブル音	ゴー音 ゴリゴリ音	通常ブレーキの減速時にゴー、ゴッゴッが発生する音で、摩擦材表面の凹収縮やロータ表面への移着膜の成長などが要因 (50~300 Hz)	・パッド材質変更 ・パッドスリット調整
クロック音	クロック音	低速での通常ブレーキ(特に停止後の逆走行時など)時にパッドがトルクメンバのトルク受部に衝突するときに発生する音	・パッドとトルクメンバとの接線方向すきまの適正化
ラトル音	ピンラトル音 パッドラトル音	悪路走行時(非制動走行状態)にピンとピン穴、あるいはパッドとパッドガイド部との衝突による金属どうしの打音	・パッドクリアランス最適化 ・ピン穴内クリアランス最適化など

注：略語説明 AT (Automatic Transmission)

呼ばれており、ブレーキ鳴きはその典型的なものである。

ブレーキ鳴きの要因として、摩擦係数の速度依存性などといった摩擦材の物理特性、ディスクの熱変形などによる熱的要因、およびブレーキの振動形態などによる構造的要因があり、これらの要因が互いに影響し合っている。現在のブレーキ鳴き解析の主流は、ブレーキ構成部品の共振特性に注目した構造的要因の解析であり、今日数多くの研究がなされている^{1)~3)}。

鳴きは、寒い日や湿度の高いときなどの特殊な条件下で発生することが多いものの、通常は発生頻度が高くない。このため実車はもとより台上試験での再現も困難な事象であり、実際の鳴き発生時の振動形状(以下、鳴きモードと呼ぶ)の測定は容易ではない。そこで、実際の製品開発においては、ブレーキ鳴きモードの測定と合わせて加振による実験モード解析を行うことで対策部位を明確にして鳴き改善を図っている。鳴き発生には幾つかの要因があると考えられているが、今回はモード連成による鳴きについて述べる。

これは摩擦振動によって励起された軸方向モードと周方向モードが連成することで、摩擦力の振幅がさらに増大して振動モードを加振する自励振動となり、鳴きが発生する現象である(図1参照)。

このことから、鳴きを低減するためには、鳴きに影響する軸方向、周方向の振動モードを把握し、振動レベルを下げることで、また周方向、軸方向の固有振動数差を大きくすることにより、これらの共振振動が連成しないようにすることが重要である。

この種のブレーキ鳴きの実機での対策として、前述のブレーキの鳴きモードを測定することで、振動振幅が大きく動的剛性を必要とする部位を特定し、改善を行っている(図2参照)。

さらなる性能向上や開発工数・コストの低減のため、有限要素法の複素固有値解析を用いたブレーキ鳴き事前予測技術を用いて、自励振動へとつながる振動モードの対策改善を行っている(図3、図4参照)。

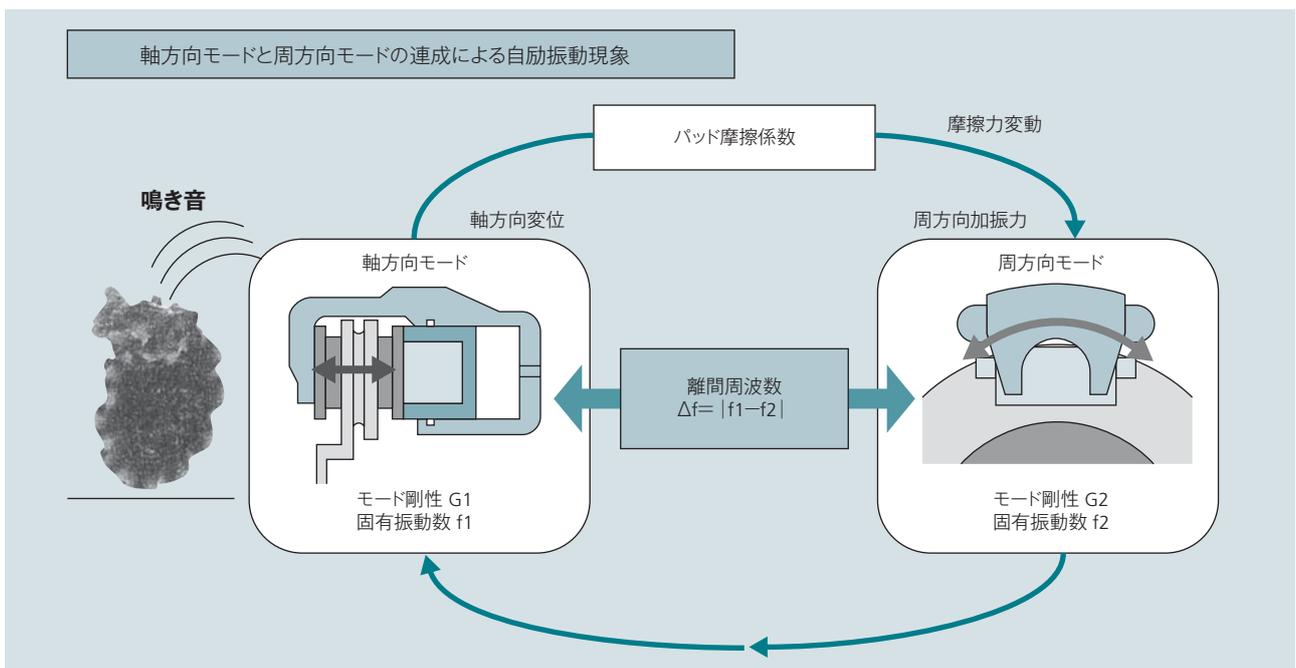


図1 モード連成によるブレーキ鳴き発生メカニズム

異なる方向成分を持った振動モードが摩擦力によって連成し、自励系の加振ループを構成してブレーキ鳴きが発生する。

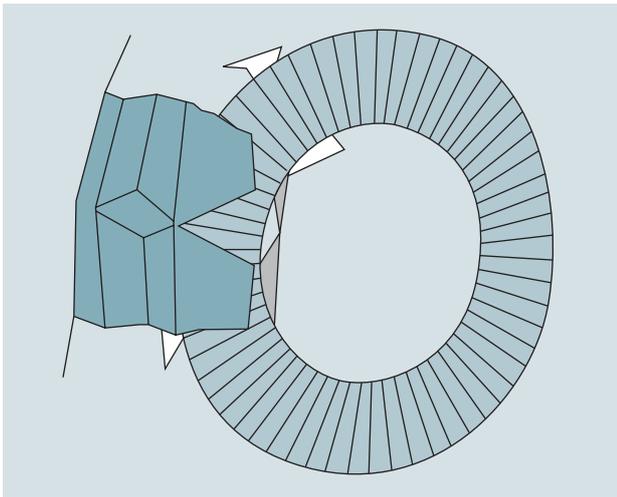


図2 ブレーキの鳴きモード
ブレーキの各部の振動を計測して可視化し、対策部位を特定する。

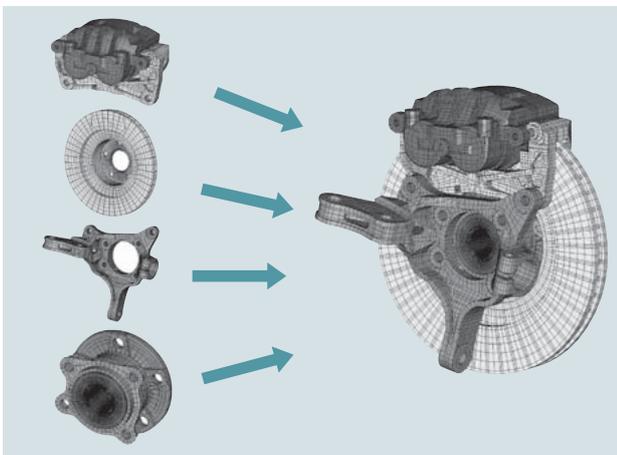


図3 ディスクブレーキの有限要素モデル
有限要素法により、多自由度モデルによる振動シミュレーションを実施している。

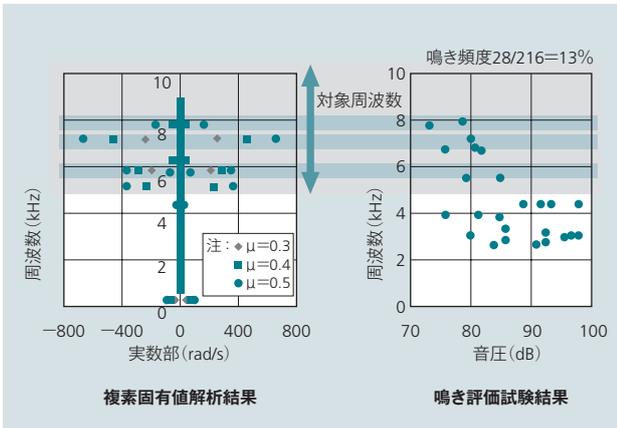


図4 複素固有値解析によるブレーキ鳴き解析例
解析によって得られた不安定振動は実機評価と相関があり、モード連成によるブレーキ鳴きを事前に予測することができる。

解析によって得られる複素固有値の実数部は振動の不安定度を表し、値が大きいほどブレーキ鳴きが発生しやすいことを示している。このため不安定度が小さくなるように部品設計を行っている⁴⁾。

4. ブレーキジャダーとその解析技術

ブレーキジャダーは大きく二つに分けられる。

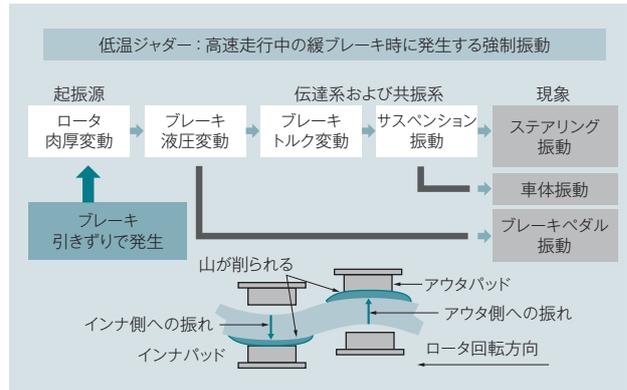


図5 低温ジャダーのメカニズム
ディスクの不均一によって液圧変動が発生し、トルク変動がステアリングや車体に伝播(ば)する。

一つは高温ジャダーと呼ばれるものである。制動をかけるとディスクが高温になって熱膨張するため周方向に波打つように変形することが原因となり、制動トルク変動が起こりジャダーが発生する。

もう一つは低温ジャダーあるいは経時劣化ジャダーと呼ばれるものである。これは空転時(非制動時、通常走行時)のブレーキの引きずりにより、ディスクが摩耗して厚さの不均一が発生する(走行距離1万~2万 kmで数マイクロメートルの厚さ変動が発生)。この状態で制動をかけると制動トルクが変動し、ジャダーが発生する。

高温ジャダーについてはロータの剛性や熱容量増加によって対策されており、ジャダー解析の現在の主流は後者の低温ジャダーである。特に引きずり現象によるディスク厚さ不均一発生メカニズムの解明が注目されている(図5参照)。

不均一化したディスク最厚部がブレーキパッドを通過するとき、ピストンとシリンダ爪部が押し戻されてブレーキ液圧が上昇する。反対にディスク最薄部がブレーキパッドを通過するとブレーキ液圧が下降する。このような制動中の圧力変動により、ブレーキトルク変動が発生し、これが加振力となってステアリングやサスペンションが連成振動を起こし、ジャダー現象となる。

空転時にロータの厚さ不均一が発生しないようにしてブレーキジャダーを改善するため、シミュレーション技術を用いた取り組みを行っている(図6参照)。

空転時のブレーキ部品の挙動を測定し、引きずりに影響の大きい部品を明確にして、パッドの面圧が下がるようにし、引きずり低減の対策を行っている^{5), 6)}。

5. ブレーキNVH解析技術の展望

ブレーキに関する振動騒音は、さまざまな環境、使用条件で発生する。特にブレーキの温度、液圧、パッドの性状、摩耗状態やドライバーの入力によって、発生頻度や周波数

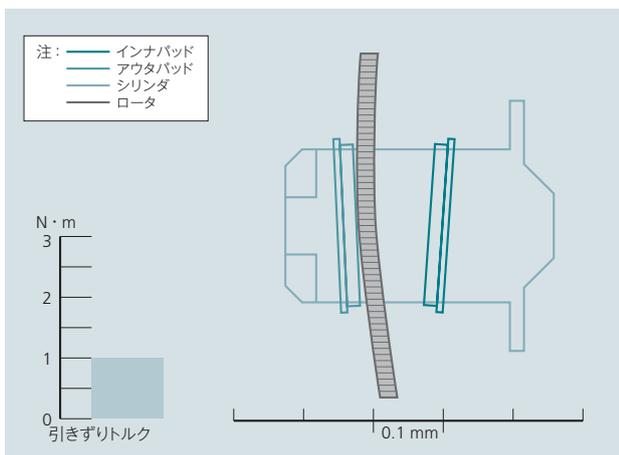


図6 ブレーキ引きずり解析

空転時のディスクとパッド間の接触による発生トルクを算出する。

などが変化する。このため、現在の解析技術を駆使しても完全に防止できる段階には至っていない。

また、近年、環境対応の観点から軽量化と一部の摩擦材料の使用制限、およびブレーキの効率向上の観点から摩擦係数大、ブレーキ操作力低減の要求がある。これらの要求はいずれも振動騒音を根本的に増加させる原因となるもので、従来の手法だけでは有効な改善策を得ることが難しくなりつつある。

現在のNVH解析技術は、これまでに多くのブレーキの振動騒音問題を改善してきた実績があるが、上述の要求に応えるためにはこれをさらに進化させ、発生頻度の低い問題であっても机上で事前予測可能にする必要がある。こうした観点から、以下の点を中心に、より適用範囲が広く、精度の高い解析技術の開発を進めている。

- (1) 摩擦状態の変動を考慮した解析技術
- (2) 種々の制動条件に対応した解析技術
- (3) 実験と解析のコリレーション精度の向上

これらにより、従来は考慮できなかった条件での騒音・振動の予測が可能となる。さらにこれを製品設計に適用することにより、さまざまな状況においても振動騒音が顕在化しないロバストなディスクブレーキ製品を構築できる。

6. おわりに

ここでは、自動車用ディスクブレーキに対するNVH解析技術への日立グループの取り組みについて述べた。

現在ではディスクブレーキの解析主導型設計において、騒音・振動の実験解析技術およびシミュレーション技術は欠かせないものになっている。

最近の自動車はハイブリッド車や電気自動車などのように、特に騒音の少ない車種が増加する傾向にあり、ブレーキのNVHに対する要求もこれまでに増して強くなると考えられる。

自動車の快適性のさらなる向上のため、今後も振動騒音に関する技術の高度化と、低騒音・低振動なブレーキの開発に取り組んでいく考えである。

参考文献

- 1) T.Suzuki, et al.: Analysis of Disc Brake Squeal, SAE Paper, 971038 (1997)
- 2) 久米村, 外: ディスクブレーキの低周波鳴き解析, 自動車技術会, 学術講演会前刷集, No92-02, p.9~12 (2002)
- 3) Y.Kumemura, et al.: Analysis for Reducing Low Frequency Squeal of Disc Brake, SAE Paper, 2001-01-3137 (2001)
- 4) 鈴木, 外: 製品開発におけるシミュレーション技術の現状, TOKICO REVIEW, Vol.41, No.2 (1998)
- 5) 鈴木, 外: フィスト型ディスクブレーキの最適化・設計技術開発, 自動車技術会, 学術講演会前刷集, No32-99, p.13~16 (1999)
- 6) 蒲生, 外: ブレーキ引き摺り低減技術の開発, TOKICO REVIEW, Vol.42, No.1 (1999)

執筆者紹介



鈴木 俊次

1973年トキコ株式会社入社, 日立オートモティブシステムズ株式会社 走行制御事業部 開発本部 所属
現在, CAE技術開発に従事
日本機械学会会員



久米村 洋一

1988年トキコ株式会社入社, 日立オートモティブシステムズ株式会社 走行制御事業部 開発本部 所属
現在, ブレーキの研究開発に従事
自動車技術会会員



井上 映

2004年トキコ株式会社入社, 日立オートモティブシステムズ株式会社 走行制御事業部 開発本部 所属
現在, ブレーキの研究開発に従事
自動車技術会会員



高木 雄一

1988年トキコ株式会社入社, 日立オートモティブシステムズ株式会社 走行制御事業部 ブレーキ本部 設計部 所属
現在, ブレーキの設計に従事



鈴木 伸二

1983年トキコ株式会社入社, 日立オートモティブシステムズ株式会社 走行制御事業部 ブレーキ本部 設計部 所属
現在, ブレーキの設計に従事
自動車技術会会員