

連携記事

新幹線用新型ブレーキパッドの開発

Development of New Brake Pad for Shinkansen

日本製鉄(株) 技術開発本部
関西技術研究部
交通産機品研究室 室長 加藤孝憲
Takanori Kato

日本製鉄(株) 関西製鉄所
鉄道車両品製造部
輪軸冷間工場 工場長 宮部成央
Naruo Miyabe

日本製鉄(株) 交通産機品事業部
交通産機品技術部
交通産機品技術室 室長 坂口篤司
Atsushi Sakaguchi

日本製鉄(株) 交通産機品事業部
交通産機品技術部
交通産機品技術室 主査 市川雄基
Yuki Ichikawa

1 新幹線の高速化と機械ブレーキ装置の性能向上への要求

東海道新幹線は、1964年に最高速度210 km/hで営業走行を開始し、その後徐々に最高速度を引き上げ、2015年には285 km/hを達成している¹⁾。新幹線の速度向上に伴い、様々な技術開発がなされているが、ブレーキ性能の向上もその1つである。速度が向上しても、特に緊急時の制動距離はできるだけ短くする必要があり、安全性を維持するためにはブレーキ性能の向上が必須となる。新幹線のブレーキシステム²⁾は停電状態になると、自動で機械ブレーキが作動する仕組みとなっており、地震時は電気を遮断することで、迅速なブレーキ作動を実現している。特に地震の多い日本では、非常時に、より短い距離で停止させることが強く望まれており、機械ブ

レーキ装置に求められる性能は非常に高くなっている。

新幹線の機械ブレーキ装置として、図1に示すディスクブレーキ装置が採用されている。ディスクブレーキ装置は、ブレーキディスク(以下、ディスクとも呼ぶ)とブレーキパッド(以下、パッドとも呼ぶ)、そしてパッドをディスクに押し付けるキャリパから構成されている。この中でパッドに関しては、東海道新幹線開業以来、図2に示すようなリジッドパッドが用いられており、これは板状の銅焼結の摩擦材8枚からなるパッドを一体で押し当てる構造となっている。地震時等において、高速から急制動する場合、ディスクの表面はパッドとの間の摩擦発熱により1000℃を超える高い熱負荷を受ける。その結果、ディスクには数mm程度の熱変形が生じ、これによって従来のリジッドパッドでは、ディスクと部分的にしか接触せず、局所的な高温部(ヒートスポット)が生じる³⁾。ヒートスポットでは高い熱応力が発生するため、ディスクのき裂の原因となり得、結果としてブレーキ力の低下等、様々な問題を誘発している。したがって、高速化しな

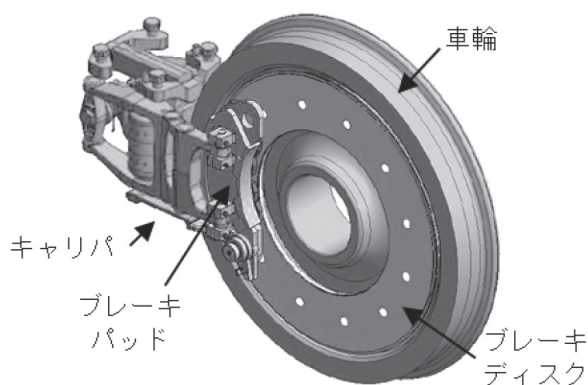


図1 新幹線用ディスクブレーキ装置

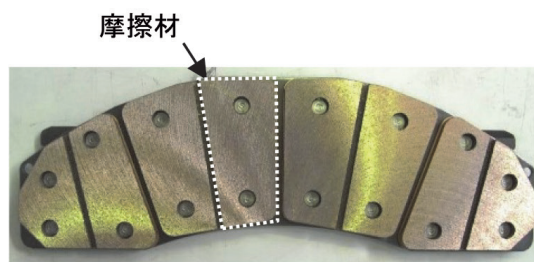


図2 新幹線用ブレーキパッド(リジッドパッド) (Online version in color.)

* (第54回(令和3年度)市村産業賞 貢献賞、令和5年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞(開発部門)受賞)

からブレーキ距離を短縮するには、ヒートスポットの発生を防止する必要がある、そのために新型パッド⁴⁾の開発が大きな課題であった。

2 新型ブレーキパッドの特徴

ヒートスポットの発生を抑制するためには、図3に示す通り熱変形したディスクと摺動するパッドの摩擦材が局部接触することなく、熱変形に追従するように可動させることが重要である。そのため新たなパッドとして、ばねを利用した構造を考案し、省スペースで必要なばね力を得ることが可能な皿ばねを利用した構造を開発した。図4に、新型パッドの外観と摩擦材ブロック部の断面模式図を示す。摩擦材ブロックでは、裏金と呼ばれる鉄板の上に2個の摩擦材を接合し、それを皿ばねを介してリベットで結合するシンプルな構造を採用している。このとき、皿ばねのばね定数が重要であり、ば

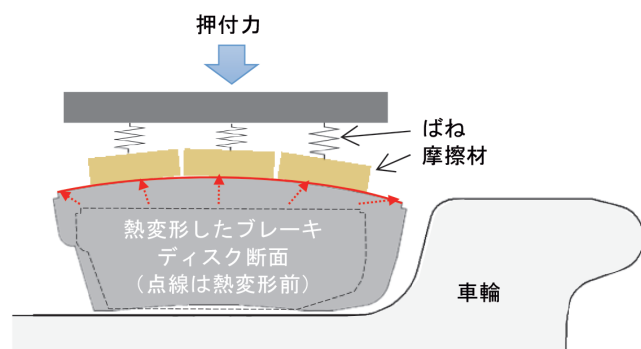


図3 熱変形ディスクと新型パッド接触模式（断面）図（Online version in color.）

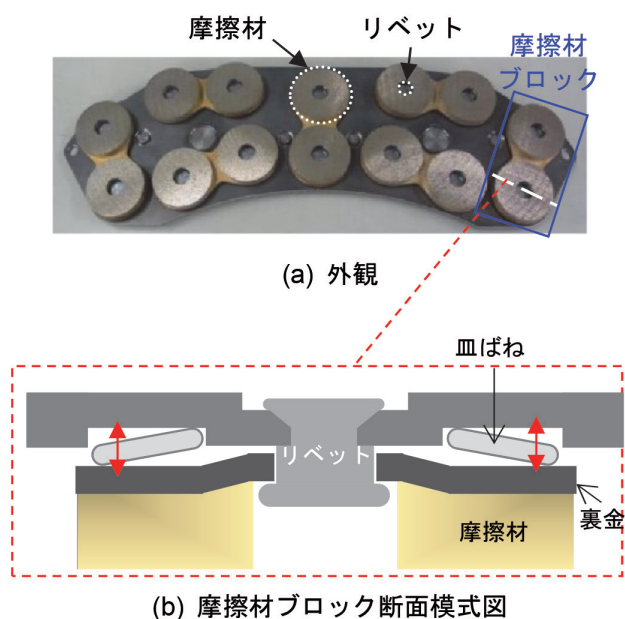


図4 新幹線用新型ブレーキパッド（Online version in color.）

ね定数が小さいと皿ばねの変形が大きくなり、キャリパからの押付荷重に耐えられず皿ばねが潰れてしまう。一方、ばね定数が大きいと十分に皿ばねが変形できないため、ディスクの熱変形に追従できずに局部接触してしまう。皿ばねのばね定数はその形状に依存することから⁵⁾、熱変形したディスクとの接触面積が最大化するように、FEM解析を用いてばね定数が最適値となる形状を設計した。

3 摩擦材ブロック最適配置の検討

パッドとディスクの均一な接触を得るには、皿ばねのばね定数の他に、摩擦材ブロックの配置が重要である。そこで、適正な摩擦材ブロック配置を検討するため、パッドとディスクの接触を考慮したFEM解析を行った。図5に解析モデルを示す。本解析では、皿ばねやリベットを含む10種類の部品を精緻に再現したモデルを構築した。これにより、パッドとディスクの接触状態を精度良くシミュレーションすることが可能となる。先述の通り、ブレーキ中はディスクに熱変形が生じる。この熱変形によってパッドとディスクの接触状態が不均一になるため、熱変形を再現した状態で解析することが重要である。別途FEM解析を行うことにより、ブレーキ時にディスクは図3のように、摺動面が凸となる変形を生じることがわかっている。そのため図5の解析モデルにおいて、ディスクには熱変形を精度良く再現した形状（熱変形ディスクと呼ぶ）を用いた。

以上のようなモデルを用いて、摩擦材ブロックの最適配置を検討した。摩擦材ブロックの配置は、特に制限を設けなければ無数のパターンが考えられる。そこで効率良く配置を決定するために、以下のような方針で検討した。

- (1) キャリパのピストン（押付）位置に重複するように摩擦材ブロックを配置すると、その摩擦材ブロックに作用する荷重が高くなり、パッドとディスクの接触が不均一となってしまう。そのため、摩擦材ブロックはピストン位置を避けるように配置した。

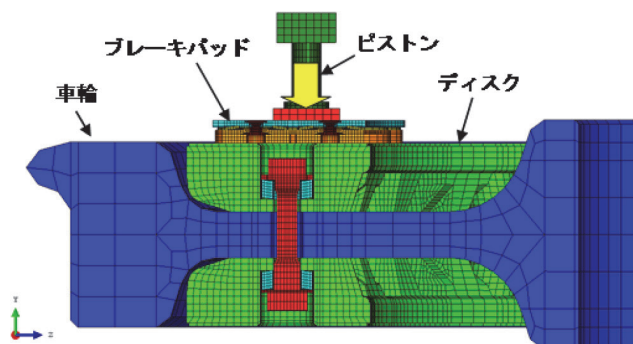


図5 FEM解析モデル（Online version in color.）

- (2) ディスクの熱変形による摺動面の凸部では、パッドとの距離が近くなり、凸部において強く接触する傾向にある。そのため、熱変形の凸部の頂点に相当する位置には摩擦材ブロックを配置しないようにした。
- (3) さらにパッドとディスクの接触を均一化するには、(1)、(2) の条件を満足しながら、摩擦材ブロック同士の距離を均一に配置するのがよい。これにより、それぞれの摩擦材ブロックに比較的均等に荷重が付与され、均一な接触状態を得ることが可能となる。
- (4) 配置以外に摩擦材ブロックのサイズについても考慮が必要である。ディスクにはボルト締結のための貫通孔が摺動面に加工されている。このボルト孔に対して摩擦材が小さいと、ブレーキ中に摩擦材が孔に落ち込む可能性がある。このため1つの摩擦材のサイズは、ディスクのボルト孔より大きくし、孔に落ち込むのを回避する必要がある。
- (1)～(4) を満足するように摩擦材ブロックの配置を絞り込み、その中からパッドとディスクの接触が最も均一になる配置として、図6の配置を得た。本配置を対象にFEM解析により評価した結果を、他の配置と比較して図7に示す。図中の配置4が、図6に示した配置に相当する。ここで各配置の性

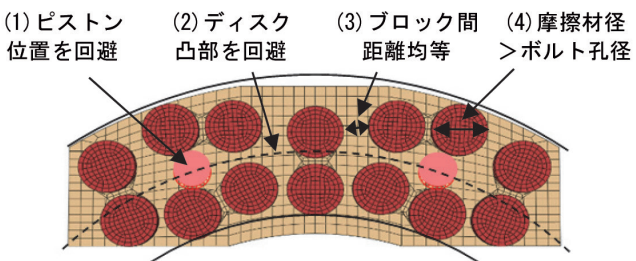


図6 開発したブロック配置 (Online version in color.)

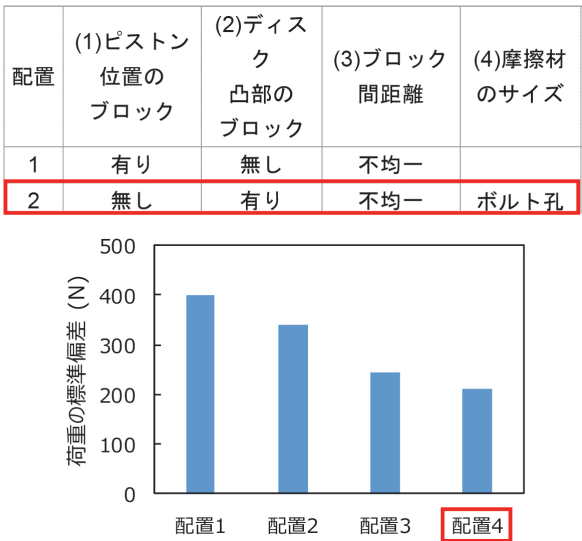


図7 各ブロックの荷重の標準偏差 (Online version in color.)

能は、摩擦材に作用する荷重のばらつきにより評価した。具体的には、14個の摩擦材に作用する荷重の標準偏差を指標とし、この標準偏差が小さいほどパッドとディスクの接触が均一であると評価した。上記の (1)、(2) を満足しない配置1、2に比べ (1)、(2) を満足する配置3、4では標準偏差が大きく低減され、荷重のばらつきを低減できている。さらに (3) を満たす配置4では、配置3に比べ荷重のばらつきを低減する効果が認められる。摩擦材ブロックを配置できるスペースには限りがあるため、(3) を満たす配置の選択肢は限定される。このため、図6に示した配置はほぼ最適なものと考えられる。以上のように、無限に存在する摩擦材ブロック配置の中から、効率的に最適な配置を提案できたといえる。

4 ブレーキ鳴き対策品の開発

前章に示したように摩擦材ブロックの配置を最適化することで、パッドとディスクの接触を均一化できた。一方で、パッドにはブレーキ鳴きの低減という別の課題もある。ブレーキ鳴きとはブレーキ中に生じる甲高い騒音のことであり⁶⁾、その低減が必要である。

ブレーキ鳴きの低減対策を検討するに当たり、評価方法を確立する必要がある。そこでまずは従来の評価方法と同様に、FEMによる複素固有値解析を行い、そこで得られる減衰比の値による評価を試みた⁷⁾。減衰比とは振動が時間とともに変化する度合いを示す指標であり、正の値をとれば次第に振動が収まり、負の値をとれば振動が発散し鳴きが発生することを意味する。図8は、前章で提案した新型パッド（ベース形状）と後述する対策形状を対象に、解析で得られた各入力周波数における負の減衰比を示している。図において、各プロット点はその周波数においてブレーキ鳴きが発生することを表している。図に示す通り、新型パッドはその構造上、

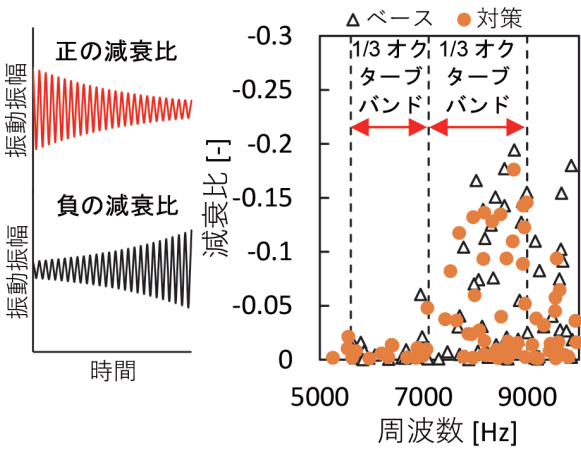


図8 従来手法による鳴き評価結果 (Online version in color.)

発散する周波数が多数あるため、本データからはベース形状と対策形状の優劣の判定が困難であった。そこで、騒音の評価で用いられる1/3オクターブバンド毎の音圧をたし合わせて、その代表的な周波数における騒音レベルを比較する手法⁸⁾を応用した。周波数バンド内での減衰比の総和（鳴き指標と定義）を求め、この指標で比較評価する手法を考案した。鳴き指標と実験で得られた騒音レベルを比較すると、両者の対応が良く、最も騒音レベルが高い周波数で鳴き指標も最大となることを見出した。この鳴き指標の最大値を「最大鳴き指標」と定義し、ブレーキ鳴きの評価指標とすることとした。

確立した評価手法を用いて種々の検討を行った結果、ブレーキ鳴き低減には摩擦材ブロックの剛性を上げることが有効であるとの知見を得た。図9にこれを基に開発した、ブレーキ鳴き対策の摩擦材ブロック形状を示す。図10に、対策形状とベース形状の最大鳴き指標を比較して示す。ベース形状に対して対策形状では、最大鳴き指標を13%低減できた。また図11に、実際のパッドを用いて、ブレーキ鳴きによる騒音レベルを測定した結果を示す。この結果からも対策形状に

より、ブレーキ鳴きを低減できていることがわかる。

5 実機試作による性能評価

新型パッドのブレーキ性能を評価するため、実体ブレーキ試験を行った。図12に、製造した新型パッドの外観を示す。本パッドの効果として最も期待されるのはブレーキ中のディスクの温度を低減することである。そのため、ディスク摺動面の温度を赤外線カメラにて測定した。図13に、ディスクの温

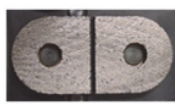
項目	鳴き対策前	鳴き対策後
騒音 レベル(dB)	94	86
摩擦材 形状		

図11 ブレーキ鳴き確認結果（Online version in color.）

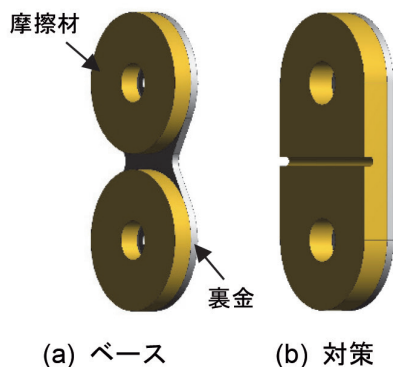


図9 ブレーキ鳴き対策形状（Online version in color.）

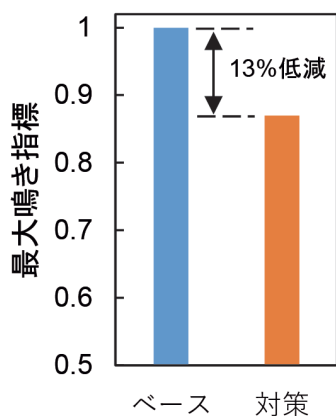
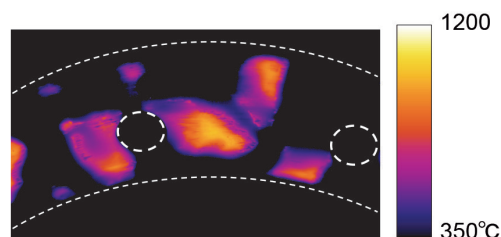


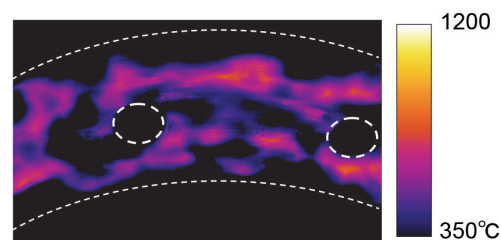
図10 考案した手法によるブレーキ鳴き評価結果（Online version in color.）



図12 新型ブレーキパッド（Online version in color.）



(a) 従来型リジッド（最高温度 1018℃）



(b) 新型パッド（最高温度 880℃）

図13 ブレーキ時ディスク表面温度測定結果（Online version in color.）

表1 ブレーキパッドによる性能比較

項目		リジッド パッド	新型 パッド	差
ディスク	表面最高温度 (℃)	1018	880	-14%
	外周部反り (mm)	0.17	0.09	-47%
パッド	最高温度 (℃)	932	852	-9%
	摩耗厚さ (mm)	0.23	0.10	-57%
ブレーキ 力	平均摩擦係数	0.26	0.29	+12%

度が最高となる時間での温度分布を示す。図では比較として、従来型のリジッドパッドを用いた場合の結果も示す。新型パッドとリジッドパッドのディスク摺動面の温度を比較すると、新型パッドの方が100℃以上低減されていることがわかる。このように新型パッドによって、当初目標としていたディスク温度の低減を十分なレベルで達成することができた。

表1に、新型パッドとリジッドパッドの各種性能比較結果を示す。新型パッドの開発の最大の目的は、ディスク温度を低減・均一化し、熱変形を低減することによりき裂を抑制することである。加えて、その他にも特筆すべき優位性を有している。その1つは、平均摩擦係数の上昇である。これは同一素材の摩擦材でも配置の最適化によって、摩擦係数を高い値で安定させることが可能であることを示している。いずれの特性もブレーキ距離削減のために必要なものであり、新型パッドがブレーキ距離削減に大きく貢献したといえる。

6 今後の展望

新型パッドはばね構造を有するため、従来品よりコスト増となるが、皿ばねをリベットで締結するという極めてシンプルな構造を採用することで、コスト増を最小限に抑えている。また省スペースのばね構造を実現したことから、現行車両にも搭載することができ、採用に際し、投資を最小限に抑えることができる。キャリパ等周辺機器の改造、更新等の投資も不要である。新幹線の高速化に対し、現状のリジッド

パッドでは、制動距離やき裂抑制に関して対応できない領域に達しており、新型パッド採用により高速化を実現した際の利便性改善は言うまでも無く非常に大きい。またブレーキ制動距離に関しては、特に地震時における短縮化へのニーズが高く、本技術の適用による安全性向上への貢献は計り知れない。加えてディスクへの熱負荷が均一化されたことから、ディスクき裂による交換頻度の低減も期待される。

開発した新型パッドは、東海道新幹線全車両への採用が決定し、山陽新幹線、九州新幹線等さらに搭載車両拡大の余地が残されている。また海外向けに新幹線が適用された場合、国内と同様の安全性を担保するため、新型パッドの採用が見込まれる。

高速化とブレーキ距離短縮の両立は今後も最重要課題の1つであり、次世代新幹線への適用も視野に入る。今後は、本開発で得られた知見をベースとして、更に進化、発展させたパッドを開発することが可能である。

参考文献

1) 五十嵐一弘：日本機械学会誌, 118 (2015), 1162.
2) 小林秀之, 狩野泰：RRR (Railway Research Review), 68 (2011) 3, 10.
3) 嵯峨信一：RRR (Railway Research Review), 68 (2011) 5, 6.
4) S.Kanamori and G.Kobayashi：Development of High Performance Brake System for Enhancing Safety, Proceedings of 11th World Congress on Railway Research, (2016).
5) 坂口辰雄, 吉田昌平：機械設計, 46 (2002) 4.
6) 高見創, 嵯峨信一：日本機械学会論文集, 82 (2016) 844.
7) 栗田裕, 松村雄一, 伊藤敦, 田村勉, 大浦靖典：日本機械学会論文集 (C編), 70 (2004) 694, 1609.
8) JIS C 1513：2002, 音響・振動用オクターブ及び1/3オクターブバンド分析器.

(2023年1月31日受付)