

車輪への熱負荷軽減と制動性能を両立した 合成制輪子の開発

嗟峨 信一* 下田 恵輔** 新山 正剛***
狩野 泰* 芳賀 昭弘# 中橋 順一#

Development of the Composition Brake Shoe for Reducing the Heat Load to the
Wheel Tread with Keeping the Brake Performance under Wet Condition

Shin-ichi SAGA Keisuke SHIMODA Masataka NIYAMA
Yasushi KARINO Akihiro HAGA Jun-ichi NAKAHASHI

In the railway vehicle using the composition brake shoe, there is a problem that the friction coefficient between wheel and brake shoe decreases under wet conditions, resulting in the reduction of the braking force. For the solutions to the problem, the metallic block for removing the water has been conventionally inserted. However, the metallic block will cause resulting in a local temperature rise on the wheel tread surface under dry conditions, which is one of the factors to cause wheel damage and wheel tread wear of concave shape. We have developed a composition brake shoe which can suppress the temperature rise of the wheel tread and maintain the brake force under wet conditions at the same time. In this paper, we report the summary of the evaluation of performance of composition brake shoe in dynamo test, running test and long-term durability running test, including the verification that the developed brake shoe has controlled concave wear.

キーワード：ブレーキ性能，合成制輪子，ブロック材，弾性材，熱負荷，凹摩耗

1. はじめに

踏面ブレーキに合成制輪子を使用する車両では、湿潤条件下で制輪子と車輪の間の摩擦係数が低下し、ブレーキ力が低下しやすい課題がある。とりわけ、編成両数が1～2両のいわゆる“短編成車両”では先行車両による水切り効果が期待できないため、ブレーキ性能の低下が顕著になる。

こうした湿潤条件下での摩擦係数低下の対策として、従来から水膜除去用の金属系ブロックが挿入されているが、乾燥条件下になるとこの金属系ブロックは車輪踏面と不均一な接触状態で摺動し、車輪踏面の局所的な温度上昇を招く。こうした熱負荷が車輪踏面の熱き裂や凹摩耗といった車輪ダメージを生じさせる要因の一つとなる¹⁾。

このため、金属系ブロックを用いることなく車輪踏面の温度上昇の抑制と湿潤条件下でのブレーキ性能の確保を両立する合成制輪子を新たに開発した。

本報告では、開発した制輪子による台上試験、現車を用いたブレーキ性能試験および長期耐久走行試験の評価結果について述べる。

* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室
** 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室
(現 北海道旅客鉄道(株))
*** 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室
(現 四国旅客鉄道(株))
車両構造技術研究部 車両運動研究室

2. 制輪子の応力解析

2.1 解析モデル

水膜除去のために金属系ブロックを挿入した既存の合成制輪子と、接触面圧が均等化するように考案した弾性材型および弾性構造型の3種類の解析モデル(図1)を構築し、以下に示す条件において応力解析を実施した。各物性値を表1に示す。

- ・解析手法：連続体2次元弾性解析
- ・押付条件：制輪子頭4箇所への等分布荷重
- ・押付力：4.9, 9.6, 13.6kN
- ・境界条件：車輪は剛体と仮定

接触境界面のx方向変位を拘束

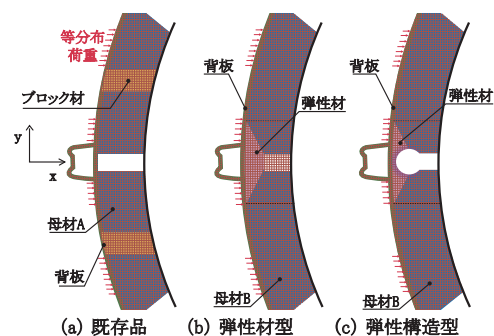


図1 解析モデル

表1 解析で用いた物性値

形状	名称	圧縮弾性率 (GPa)	ポアソン比
既存品	背板	206	0.30
	母材 A	2.1	0.30
	ブロック材	10	0.21
弾性材型 弾性構造型	背板	206	0.30
	母材 B	1.9	0.39
	弾性材	1.5	0.49

なお、新たな合成制輪子を考案するにあたって着目したのは次の3項目である。

- ・制輪子全体を均一な圧縮弾性率とし、変形を一様にして面圧の局所的集中を抑制する。
- ・車輪踏面との接触および摺動状態を均等化するため、粉体化したブロック材（硬質粒子を含む）を母材に均一配合する。
- ・制輪子両端部の接触面圧低下を補うため、比較的圧縮弾性率の低い弾性材を中央部に配置する。

2.2 解析結果

車輪との接触面圧の解析結果を図2に示す。既存品におけるブロック材の圧縮弾性率は母材より約5倍高いため、ブロック部に応力集中が発生している。一方、考案した制輪子は圧縮弾性率の均一化と中央部に配置した弾性材により応力集中が緩和されている。さらに、弾性材型よりも弾性構造型は中央部における接触面圧の均等化が図られていることから、弾性構造型をベースとして制輪子の試作を行った（図3）。

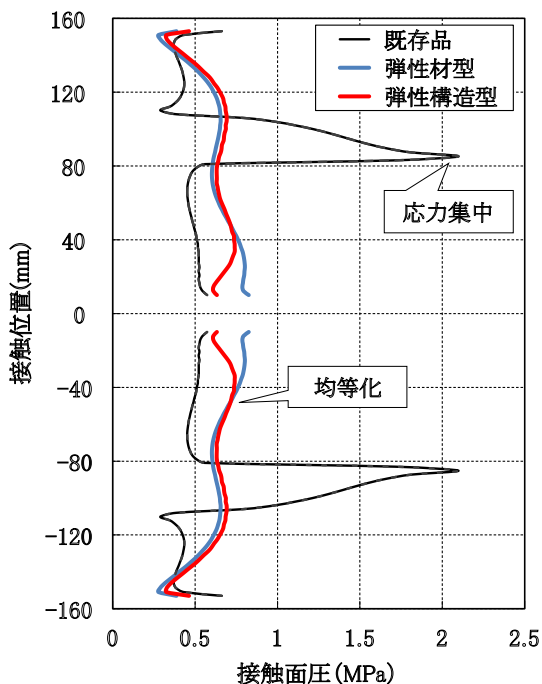


図2 接触面圧の解析結果の比較 (押付力 13.6kN)

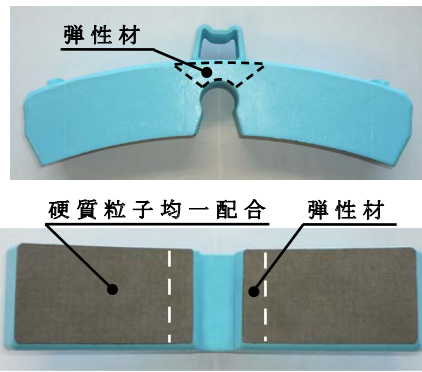


図3 試作した弾性構造型合成制輪子

3. 台上試験

既存品よりも高い摩擦係数となるように設計した開発品Aおよび同等の摩擦係数となるように設計した開発品Bの2種類の弾性構造型合成制輪子をそれぞれ試作し、以下に示す条件で台上試験を実施した。試験条件は想定車両重量480kN(49t)とし、初速度およびブレーキ種別はJIS E 4309(鉄道車両用合成制輪子—品質要求)に定める条件とした。

- ・慣性モーメント：11.8kNm² (1200kgm²)
- ・車輪径：860mm
- ・押付方式：両抱き式
- ・摺り合わせ：摩擦面 70%以上
- ・試験開始温度：60℃以下

3.1 平均摩擦係数

平均摩擦係数を図4、図5に示す。開発品Aは全ての条件で既存品よりも摩擦係数が10～40%向上し、開発品Bは全ての条件で既存品と同程度の摩擦係数が得られた。これは、開発した制輪子の材料配合を適宜調整することで所望の摩擦係数が得られることを示している。

一般的に、新たな制輪子を現用品に代わって搭載する際には、摩擦係数が異なることでBC圧力の再設定も必要になる場合が多い。しかし、開発品は材料配合の自由度が高く、摩擦係数を現用の合成制輪子と同等にすることが可能であることから、制輪子の置き換えが容易になる長所を有している。

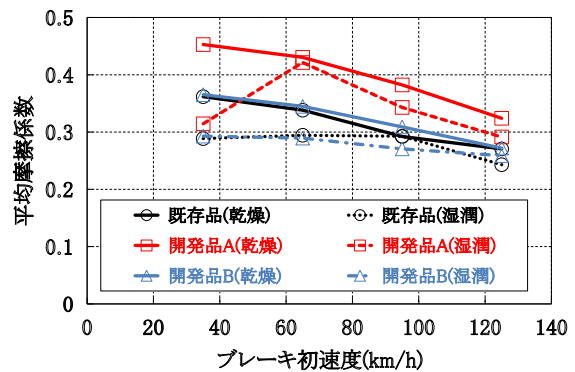


図4 平均摩擦係数
乾燥および湿潤 (常用：9.8kN)

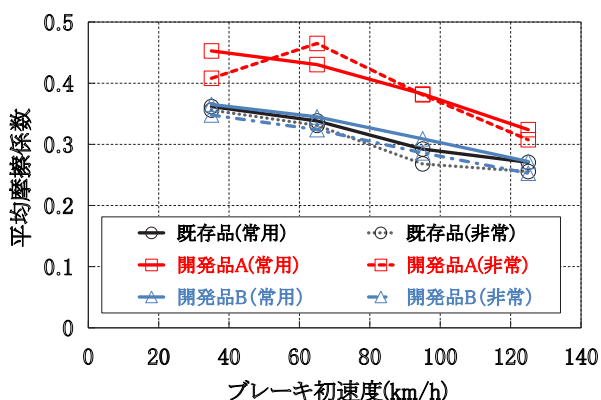


図5 平均摩擦係数
乾燥（常用：9.8kN，非常：14.7kN）

3.2 温度

乾燥条件におけるブレーキ中の車輪踏面温度について、高速サーモカメラを用いた測定を実施した（図6）。各時刻の温度分布を図7に示す。既存品は500℃以上の局所的な温度上昇がみられるが、開発品Bは均一な温度分布となり、最高温度は300℃程度へ抑制される効果が確認された。

ここで、参考として合成制輪子、焼結合金制輪子、合金鋳鉄制輪子をそれぞれ適用した場合における車輪踏面温度の違いを比較する。予め非常ブレーキ性能が同等（ブレーキ距離500～550m）となるように制輪子の押付力を調整した台上試験において、ブレーキ中の車輪踏面を高速サーモカメラで撮影した。その結果、焼結合金制輪子と合金鋳鉄制輪子は局所的に800℃を超える著しい温度上昇がみられた。

使用した高速サーモカメラは1秒間に約30枚のサーモ映像を取得することができ、1映像あたり約6万点の温度データが含まれている。これを初速から停止まで各温度範囲における度数で集計し、総数との割合で示したものを図8に示す。なお、分布は試験3回の平均で、縦軸の割合は高温域での比較を容易とするために常用対数で示している。

この図から、金属成分を主とする焼結合金制輪子および合金鋳鉄制輪子による車輪踏面の温度上昇が大きく、また高温域の割合も高いことが分かる。車輪の目安温度である

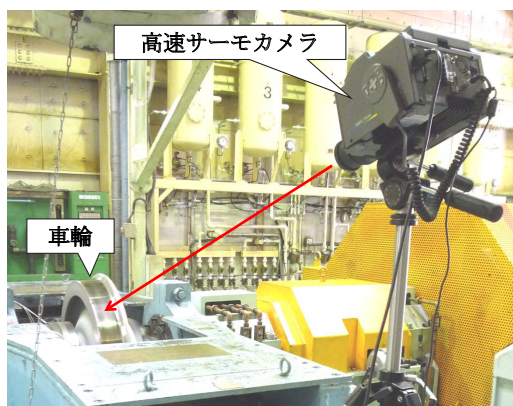


図6 サーモ映像の取得

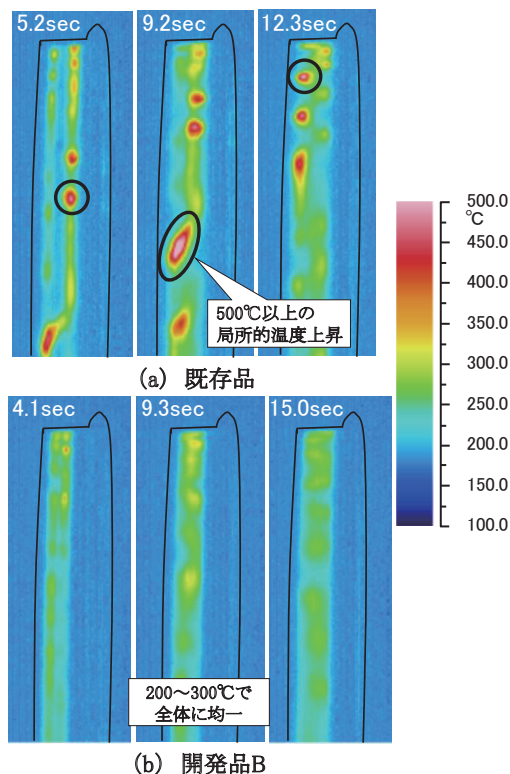


図7 各時刻における踏面温度の比較
（初速度125km/h，押付力14.7kN）

300℃を超過した割合でみると、焼結合金制輪子が約15%、合金鋳鉄制輪子が約10%に対して、既存の合成制輪子が約4%、開発品Bが約1%となる。とりわけ、開発品Bにおける最高温度の抑制と高温域の減少効果が顕著に示された。

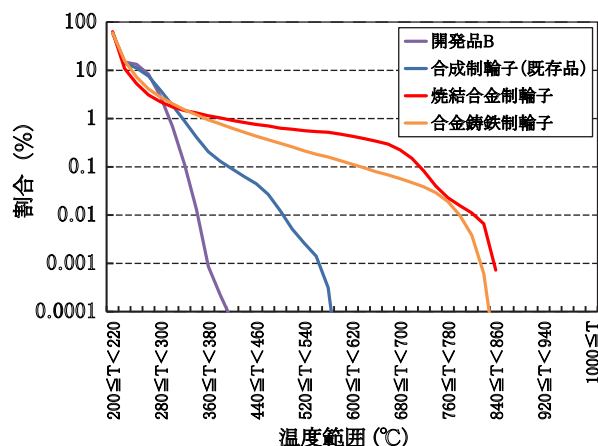


図8 温度ヒストグラムの比較

3.3 制輪子摩耗量

制輪子の摩耗量は、JIS E 4309（鉄道車両用合成制輪子—品質要求）に基づき、乾燥条件の試験後に制輪子の重量変化を測定し、摩擦面積と材料密度から摩耗厚さを算出した“比摩耗量”により評価した（表2）。既存品と開発品Bが同等であるのに対し、高い摩擦係数を有する開発品Aは約2倍となった。

特集：車両技術

表2 比摩耗量の比較

制輪子	比摩耗量 (mm)
既存品	0.122
開発品 A	0.216
開発品 B	0.126

4. 走行試験

4.1 開発品 A

既存品および開発品 A を搭載したブレーキ性能試験を実施した。供試編成を図9に示す。試験は、はじめに既存品を搭載する条件から実施し、次に開発品 A を搭載する条件とした。ここで、1軸散水とは先頭軸への散水、2軸散水とは先頭軸および第3軸への散水を意味する。なお、散水量は1輪あたり毎分4リットルとした。試験条件は以下の通りである。

- ・初速度：30, 60, 90, 110km/h
- ・ブレーキノッチ：B7（常用最大ブレーキ）
EB（非常ブレーキ）
- ・レール条件：乾燥, 湿潤（1軸および2軸散水）
※散水量は4L/min/輪
- ・制輪子：既存品, 開発品 A

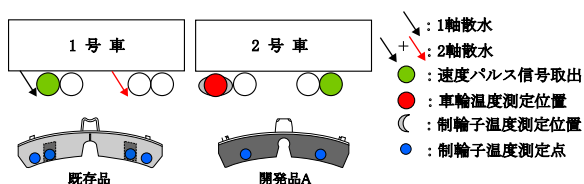


図9 供試編成

測定したブレーキ距離について、勾配および初速度による補正を行った平均値の結果を図10に示す。乾燥および1軸散水の条件において、開発品 A は既存品に比べてブレーキ距離が約10%短縮した（図10）。

しかし、滑走再粘着制御非装備の車両にこうした高いブレーキ性能を有する開発品 A を搭載したことから、フ

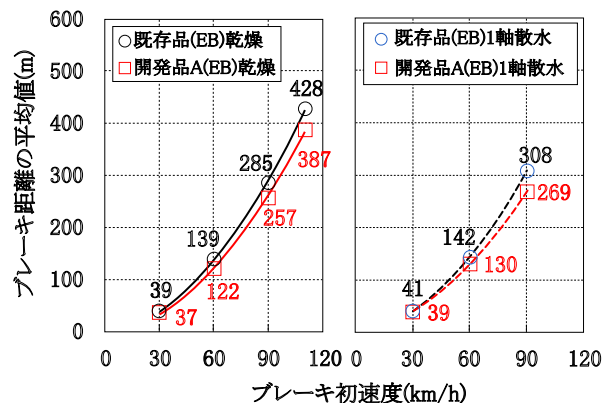


図10 ブレーキ距離の比較
(乾燥, 1軸散水)

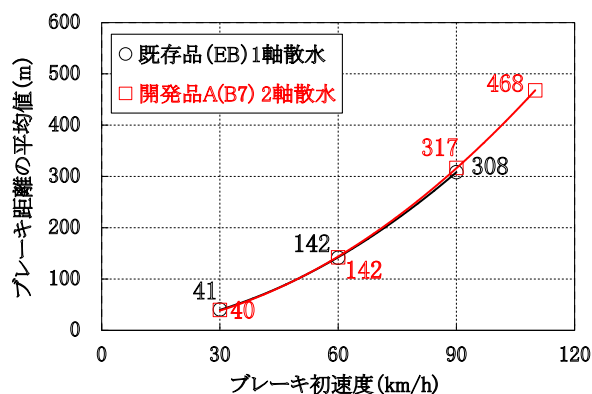


図11 ブレーキ距離の比較
(開発品 A の2軸散水)

ラットが多発した。このため、2軸散水条件では制輪子の押付力を低く（B7）抑えて実施したが、それでも既存品の1軸散水条件下の非常ブレーキ（EB）と同等の高いブレーキ性能が得られることを確認した（図11）。

4.2 開発品 B

今後の耐久試験を鑑みて、フラットが発生しにくいと考えられる開発品 B を搭載したブレーキ性能試験を実施した。供試編成を図12に示す。各試験条件を以下に示す。

- ・初速度：30, 60, 90, 100, 110, 120km/h
※120km/hは営業最高速度
- ・ブレーキノッチ：EB（非常ブレーキ）
- ・レール条件：乾燥, 湿潤（2軸散水）
※散水量は4L/min/輪
- ・制輪子：開発品 B

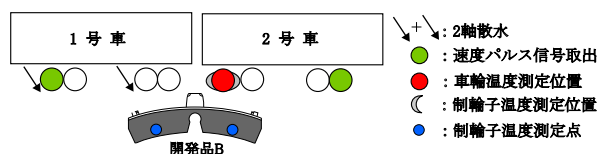


図12 供試編成

(1) ブレーキ距離

測定したブレーキ距離について、勾配および初速度による補正を行った平均値の結果を図13に示す。乾燥条件に対する2軸散水条件でのブレーキ距離の延伸率は、開発品 B の平均値で初速度30km/hおよび60km/hが約20%、90km/hが約17%、120km/hが約6%と小さく抑えられた。

また、開発品 B のブレーキ距離の最大値はいずれも初速度120km/hで乾燥条件が550.3m、2軸散水条件が550.6mであり、2軸散水という過酷なレール環境条件においても600m以内に停止できることが示された。

(2) 温度

制輪子の温度は摺動面の10mm直下に熱電対を挿入して測定した。ただし、2軸散水条件では散水の影響で

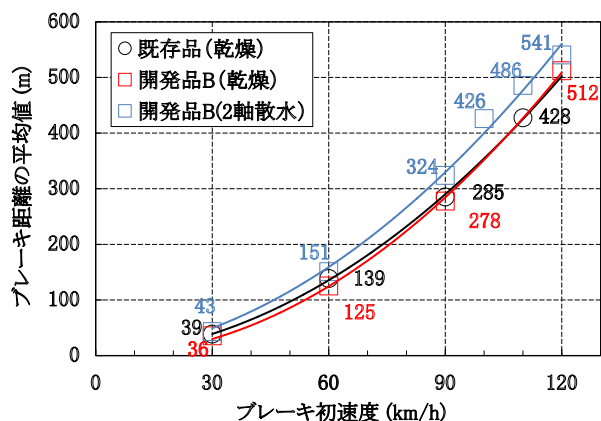


図 13 ブレーキ距離
(開発品 B の 2 軸散水)

試験回数を重ねる度に温度が低下した。全試験を通した制輪子温度の最大値（乾燥条件）は、既存品が 170℃（初速度 60km/h）、開発品 B が 111.2℃（初速度 120km/h）であり、開発品 B の温度が低い結果となった。いずれの試番も制輪子の目安温度である 250℃以下であった。また、試験後における開発品 B の摺動面は顕著な荒損もなく、良好な状態であった。

車輪の温度は反フランジ側のリム部にサーモラベルを貼り付けて測定した。試験終了後の入庫時におけるサーモラベルの指示値の最大は、既存品が 220℃、開発品 B が 170℃であり、制輪子温度と同様に開発品 B の温度が低い結果となった。また、いずれの試番も車輪の目安温度である 300℃を下回ることが確認された。

5. 長期耐久走行試験

開発品 B の制輪子を営業車 1 編成中の半分の台車に搭載し、車輪踏面形状等の各種調査結果から車輪踏面へのダメージ軽減効果について長期的な評価を行った（図 14）。

また、通常的車輪削正周期である約 4 万 km を走行した後の車輪踏面形状を基に、車輪摩耗形状推定ツール²⁾を用いて 8 万 km 走行後の摩耗形状についても推定し、評価を行った。この推定ツールは、走行距離が異なる複数の摩耗形状データをデータベースに蓄積し、車輪幅方向に 0.1mm 間隔毎に線形補間したものを線形回帰することにより任意の走行距離における車輪踏面形状を推定するものである。

推定した形状の比較を図 15 に示す。既存品の摩耗形状は制輪子の摺動幅にわたって凹摩耗の傾向がみられる。一方、開発品 B の摩耗形状は設計形状からわずかに摩耗している程度であり、開発品 B は車輪凹摩耗の抑制効果を有しているものと考えられる。

今後は、1 編成の全ての台車に開発品 B を搭載した長期耐久試験を実施し、最終的な確認を行う予定である。

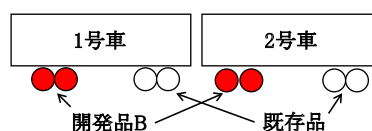


図 14 供試編成

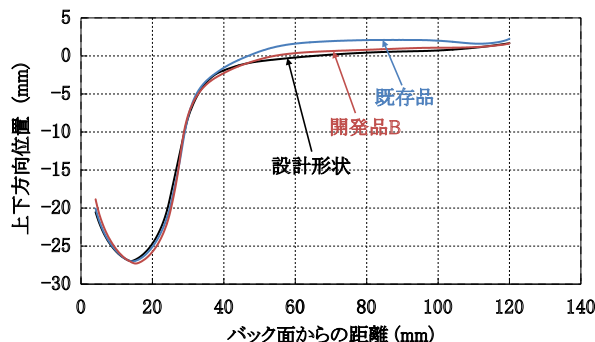


図 15 推定摩耗形状の比較（8 万 km 走行後）

6. 踏面の摩耗形状による走行安定性の評価

6.1 解析条件

車輪踏面形状を設計する際には車輪の曲率がレールの曲率より小さくなるように形状を決定し、かつヘルツ圧の増大と 2 点接触を回避するのが一般的である。しかしながら、累積走行距離や通過トン数の増加により、車輪やレールの摩耗が進むと、車輪／レール間の接触点が 2 点となる場合がある。特に凹摩耗が進み中立点近傍の 2 点接触が発生すると走行安定性に影響を与える可能性がある³⁾。

そこで、前述の実測および推定による踏面形状を用いて 2 点接触を考慮した車輪／レール間の接触点解析を行い、その結果を用いた車両運動シミュレーションにより走行安定性を評価することとした。表 3 に主な解析条件を示す。接触点解析で用いたレール断面は 60kg レールの設計形状、車両運動シミュレーションに用いた車両モデルは振り車両の 1 両である。

表 3 主な解析条件

車輪踏面形状	走行前	実測踏面	0km
	既存品	実測踏面	4 万 km
		推定踏面	8 万 km
	開発品 B	実測踏面	4 万 km
推定踏面		8 万 km	
レール断面形状	60kg レール設計形状		
車両モデル	振り車両 1 両		
走行速度	120 km/h		
空気ばね左右間隔	1700 mm		
空車時振り中心高さ	2275 mm		
軸ばね剛性	前後左右	6.08 kN/mm (620 kgf/mm)	
		上下	1.23 kN/mm (126 kgf/mm)
	空気ばね剛性	前後左右	0.19 kN/mm (19.4 kgf/mm)
上下			0.38 kN/mm (38.5 kgf/mm)

特集：車両技術

6.2 解析結果

走行安定性の評価は、直線区間を速度 120km/h で等速走行中の車両に対して、第 1～4 軸の順に連続した通り変位 (1Hz, ± 3mm, 3 波) を与え、その応答を台車枠の左右振動加速度 (進行前位台車) で比較した。図 16 に解析結果を示す。

既存品を搭載した台車における 8 万 km 走行後の推定踏面形状では、全振幅で約 2m/s² の左右振動加速度が通り変位通過後も持続して発生しており、これは凹摩耗に起因した自励振動と考えられる。一方で、開発品 B を搭載した台車における 8 万 km 走行後の推定踏面形状では、通り変位通過直後に左右振動加速度が収束した。

次に、台車枠左右振動加速度波形のパワースペクトル密度 (以下、PSD と記す) を図 17 に示す。既存品は 8 万 km 走行後の推定踏面形状において、ピーク周波数 11Hz を中心として 10Hz 近傍と 30Hz 近傍の PSD が 4 万 km 走行時点から顕著に大きくなる。一方、開発品 B における 8 万 km 走行後の推定踏面形状ではこれらのピークが抑えられ、4 万 km 走行時点と大きな差はない。これらの結果から、開発品 B による車輪凹摩耗の抑制効果は、走行安定性に寄与するものと考えられる。

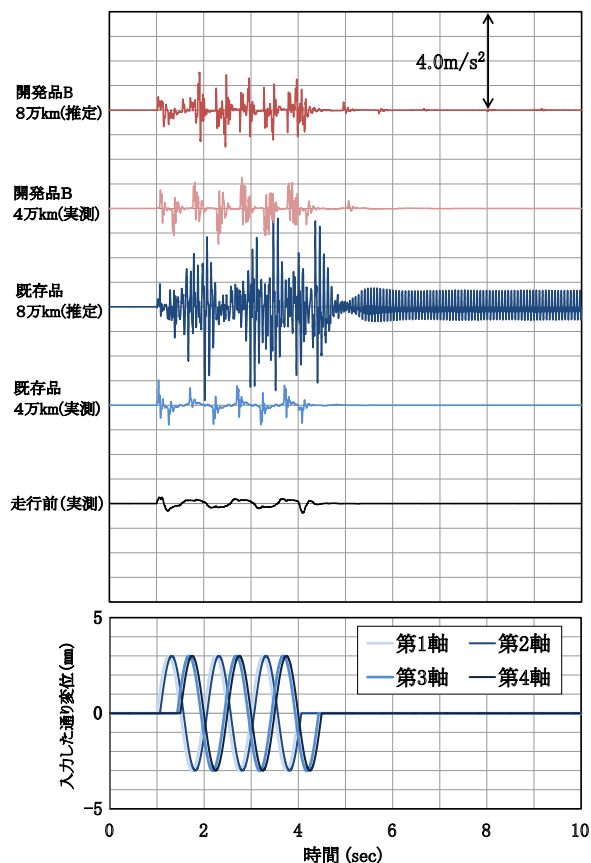


図 16 振動加速度の解析結果の比較

7. まとめ

本研究において得られた結果は以下の通りである。

- (1) 粉体化したブロック材を制輪子の母材に均一配合すると

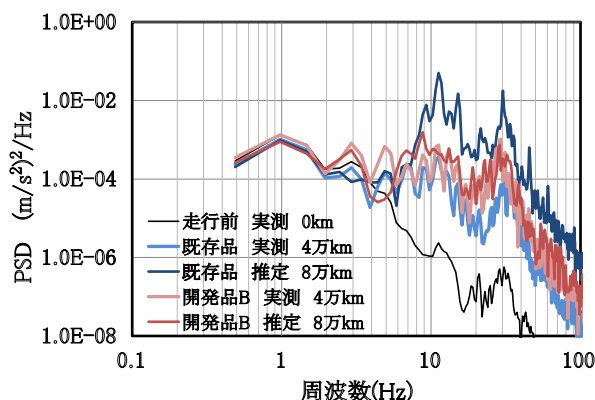


図 17 PSD の比較

- ともに制輪子の中央部に弾性材を配置することにより、ブレーキ時における車輪踏面の温度上昇の抑制を図った。
- (2) 材料配合により摩擦係数を調整して試作した 2 種類の制輪子は、いずれも台上試験および走行試験での湿潤条件下において、高いブレーキ性能を有していることを確認した。
- (3) 長期耐久走行試験により、開発した制輪子は車輪の凹摩耗を抑制することを確認した。
- (4) 車両運動シミュレーションにより、凹摩耗の抑制効果は走行安定性に寄与することが分かった。

8. おわりに

開発した弾性構造型合成制輪子はレール湿潤下のブレーキ性能の確保に加えて、熱負荷の低減によって車輪のダメージを軽減し、車輪凹摩耗を抑制する効果を有している。これらの優れた特性により、安全性を確保するとともに、車輪踏面形状の維持による走行安全性 (乗り心地) の向上や車輪削正周期の延伸によるメンテナンスコストの削減が図れるものとして期待することができる。

謝 辞

本制輪子の開発にあたって、多大なるご協力を頂きました上田ブレーキ(株)の関係者各位に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 半田和行, 森本文子, 深貝晋也, 柿嶋秀史: 車輪踏面熱き裂の発生メカニズムと対策法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.10, pp.23-28, 2011
- 2) 斉藤憲司, 佐藤栄作, 下村隆行, 芳賀昭弘, 大戸伸一: 新形通勤電車の車輪摩耗傾向および車両運動特性, 鉄道総研報告, Vol.21, No.7, pp.45-50, 2007
- 3) 中橋順一, 下村隆行: 車輪/レール接触位置の 3 次元探索手法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.1, pp.21-26, 2011