

車輪／レール接触境界の 潤滑と摩擦制御



深貝 晋也
Shinya Fukagai
材料技術研究部
摩擦材料研究室
主任研究員



半田 和行
Kazuyuki Handa
材料技術研究部
摩擦材料研究室長

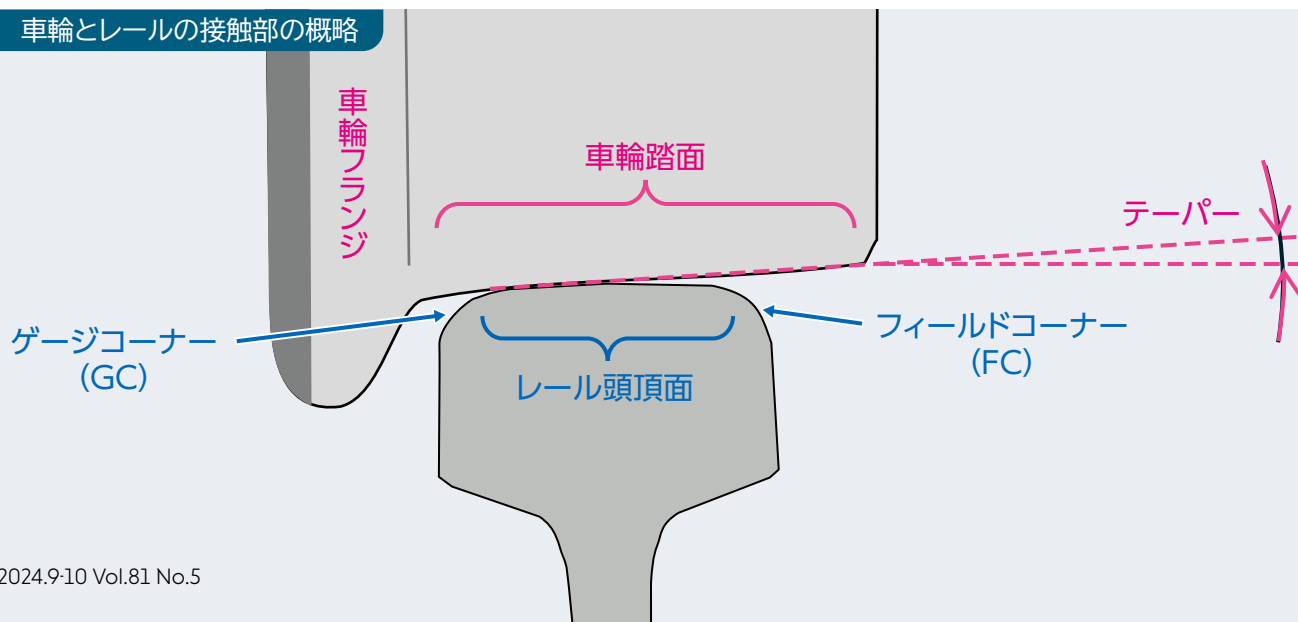
はじめに

現在、多くの鉄道では車輪／レール接触部に生じる摩擦力によって列車が運転されています。また車輪踏面のテーパと車輪フランジの案内機能によって、曲線区間でも車両はレール上をスムーズに通過できます。その一方、曲線区間では車輪フランジとレールゲージコーナーが摩擦することで急速に摩耗しメンテナンス上の負担となっているほか、急曲線区間では振動や騒音が発生することもあります。こうした状況に対処するため、車輪／レール接触部に潤滑材や摩擦調整材などを供給して摩擦の状態を制御する場合があります。本稿では、そうした車輪とレールが接触する境界への潤滑や摩擦を制御する技術について紹介します。

曲線走行時の車輪／レール接触に ともなう部位ごとの問題

図1に車輪とレールの接触部の概略を示します。車輪踏面とレール頭頂面は駆動力・制動力を伝達する部位です。また車輪踏面にはテーパがあり円錐形^{すい}となっています。車輪フランジは車輪内側のつば状の部分で、脱線を防いでいます。鉄道車両の車輪は車軸と一体で左右の車輪が一緒に回転しますが、車輪踏面のテーパのため曲線通過時、内軌（曲線内側レール）と接触する位置の車輪半径は外軌（曲線外側レール）のそれよりも小さくなります。これにより内軌と外軌の間の経路長の差を吸収しスムーズに曲線を走行します。しかし、急曲線では左右車輪の半径差が不足し、車輪フランジが

図1 車輪とレールの接触部の概略



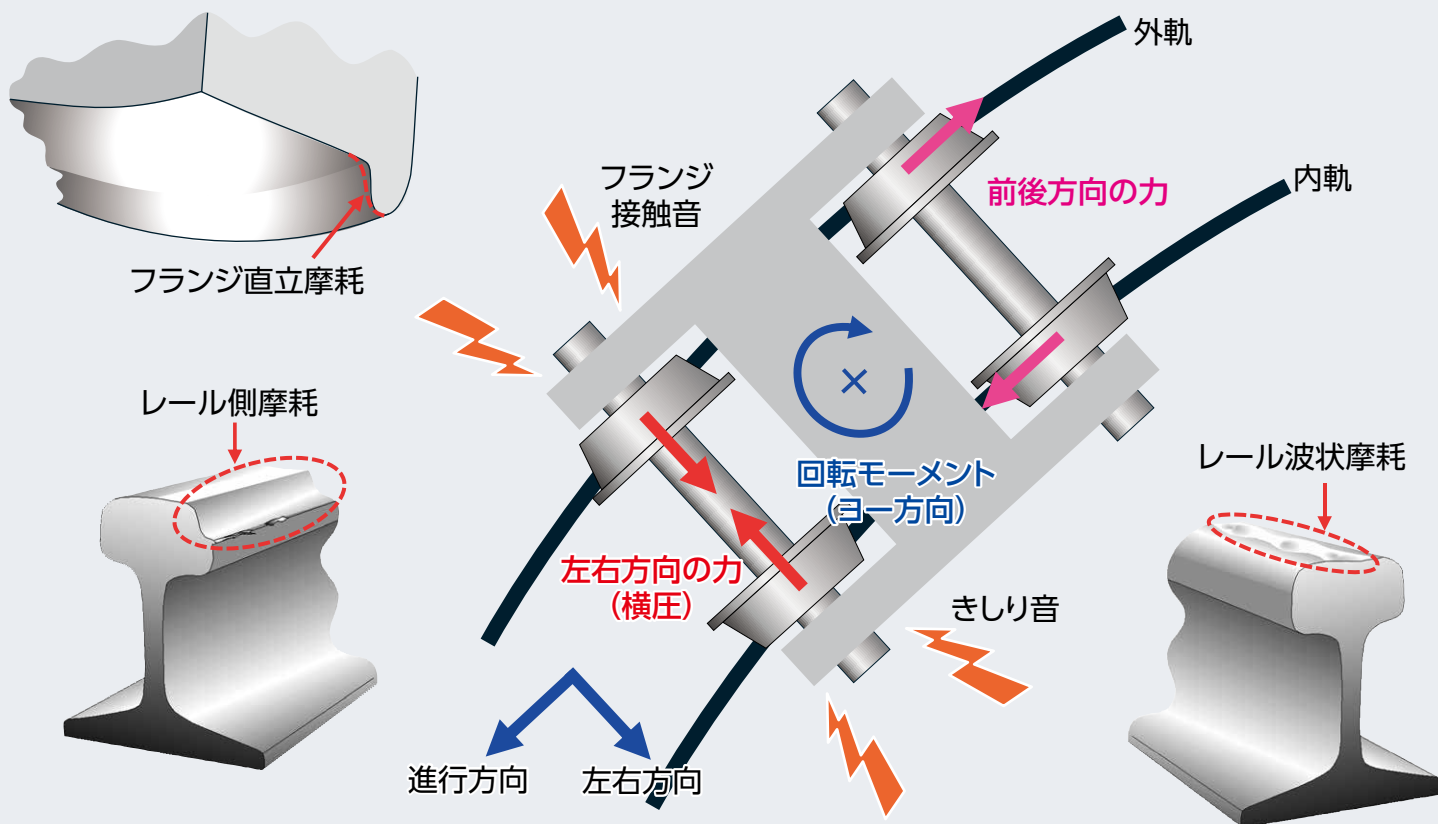


図2 曲線走行時にレールから車輪に作用する力の概要と部位ごとに発生する摩耗・騒音

レールゲージコーナーと接触します。

図2に曲線走行時にレールから車輪に作用する力の概要を部位ごとに生じる課題とあわせて示します。鉄道車両は一般的に1台車に2組の輪軸、1車体に2台車が配置されています。急曲線通過時、ヨー方向の台車姿勢に起因して前軸は外軌側に位置し、後軸はレールの中立位置付近に留まります。後軸では左右車輪の回転半径差の不足のため、前後方向の力が作用し台車に回転モーメントがかかります。前軸では外軌側車輪のフランジがゲージコーナーに押し付けられ横圧と呼ばれる左右方向の力が発生します。

こうした接触により、外軌側車輪ではフランジ直立摩耗、外軌ゲージコーナーではレール側摩耗が生じ、車両・軌道双方のメンテナンス上の主要な課題となっています。さらに、フランジ接触音やレールきしり音を生じたり、ほかの要因とも合わさって内軌頭頂面に波状摩耗が発生し騒音や振動の原因となる場合もあります。

潤滑・摩擦制御による対策技術

車両または軌道に、車輪／レールの摩擦係数を制御するための装置が設置される場合があります(表1)。車輪／レール接触部はその部位によって役割が異なるため、増粘着(湿潤時の摩擦係数を可能な限り増加する)、潤滑(乾燥時の摩擦係数を可能な限り低下する)、および摩擦調整(摩擦係数を意図したレベルに保つ)が使い分けられています。

車輪フランジ／レールゲージコーナー接触部の潤滑

車輪のフランジとレールのゲージコーナーの接触部では、すべり接触により摩耗が急速に進むため摩擦係数を低下させる必要があります。多くの場合、潤滑材として潤滑油やグリースが適用されています。潤滑材を供給する装置には車載式および地上式のさまざまな種類が存在します。潤滑油やグリースは摩擦係数を大幅に低下させ、摩耗や騒音の低減に大きな効果を発揮します。しかし車両床下や軌道周辺に潤滑材が飛散するほか、車輪踏面やレール頭頂面に潤滑材が

表1 車輪／レールの摩擦状態を管理するための装置

	潤滑	摩擦調整	増粘着
材料	油, グリース など	摩擦調整材, 摩擦緩和材, グリース など	踏面研磨子, セラミック粒子, 砂 など
車載装置	<p>(a) 接触回転式 (b) フランジ噴射式 (c) 固体潤滑式 (d) レールゲージコーナー噴射式</p>	<p>(e) 車輪踏面／レール頭頂面間噴射式 (f) レール頭頂面噴射式</p>	<p>(g) 接触式 (h) 車輪踏面／レール頭頂面間噴射式</p>
地上装置	<p>(i) レールゲージコーナー塗布式</p>	<p>(j) レール頭頂面塗布式</p>	

付着した場合に摩擦係数が低下して空転や滑走が発生する懸念があり、新幹線や特急車両、山岳路線では使用できません。このため、こうした車両や路線での潤滑方法の構築は重要な課題で、後述する踏面調整はこのニーズに対応するものです。

また海外では潤滑性に優れた固体粉末の**二硫化モリブデン**を主成分とするスティックを車輪フランジにバネで押し付けて潤滑する装置(表1(c))が一部で使用されており、踏面調整子で用いられる固体潤滑材も二硫化モリブデンを活用しています。

車輪踏面／レール頭頂面の増粘着と摩擦調整

湿潤時には、車輪踏面／レール頭頂面間の摩擦係数が乾燥時と比較して大幅に低下することから、列車が加減速する接線力の伝達のため、可能な限り摩擦係数を増加することが必要です。これには車輪踏面の表面粗さを大きくすること

が重要で、車輪踏面を研磨して粗さを付与する**踏面研磨子**や、車輪踏面に粗さを付与できる材質を適用した踏面制輪子が広く用いられています。こうした定常的な増粘着手法のほか、短

二硫化モリブデン

黒鉛とならび代表的な固体潤滑成分です。層状の結晶構造を有し、層間の結合力が弱いためにすべりやすいと考えられています。耐荷重性に優れるなどの特徴があり、グリースなどへの添加剤、乾燥被膜、自己潤滑性複合材料への添加物として広く使用されています。

踏面研磨子

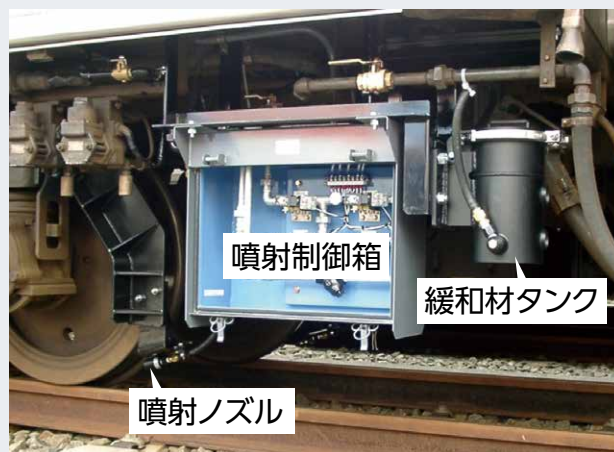
車輪踏面を研磨して粗さを付与し、湿潤時の粘着を向上する専用の摩擦材です。新幹線の全車両と在来線の一部車両において、全ての車輪に装備されています。増粘着研磨子とも呼ばれます。

増粘着材噴射装置

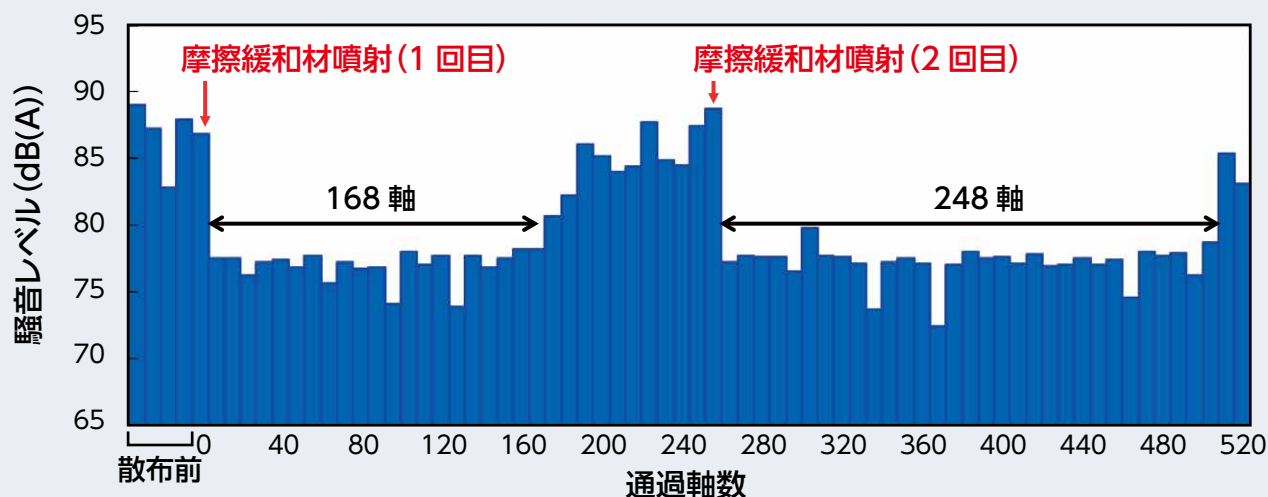
増粘着材である少量のセラミック粒子や珪砂を圧縮空気により車輪・レール間に噴射供給する装置です。滑走や空転防止などの目的で新幹線、在来線で使われています。



(a) 摩擦緩和材の外観



(b) 実車に搭載した車載噴射装置



(c) 実車走行試験での騒音測定結果

図3 車輪／レール摩擦緩和システム (FRIMOS) の概要

期的・局所的な空転・滑走対策として、接触部に硬い粒子を介在させて摩擦係数を増加する増粘着材噴射装置^②も広く使用されています。

一方、乾燥時には曲線区間の内軌頭頂面の摩擦係数が過大だと横圧が大きくなったり騒音が発生する可能性があるため、グリースや水による潤滑が行われる場合があるほか、専用の摩擦調整材を塗布する場合があります。現在広く使用されている摩擦調整材^①は固体潤滑成分や摩擦調整用の無機物を水に分散させたもので、摩擦力がすべり率とともに上昇する特性をもつため空転や滑走が起きても回復しやすいとされています。

鉄道総研による開発事例

車輪／レール摩擦緩和システム「FRIMOS」

鉄道総研では、「摩擦緩和材」と呼ばれる乾燥粒子の固体潤滑材(図3(a))を用いて、車輪踏面／内軌頭頂面間の摩擦を制御する車輪／レール摩擦緩和システム (FRIMOS)^②を開発しました。摩擦緩和材の粒径は約0.2mmで、潤滑成分としてはカーボン系潤滑材料であるグラファイト(黒鉛)を選定しています。摩擦緩和材は乾燥粒子で散布量が極微量であるため、軌道周辺や車両を汚さないという利点があります。FRIMOSは増粘着材噴射装置の噴射技術を応用しており、噴射装置(図3(b))により対象曲

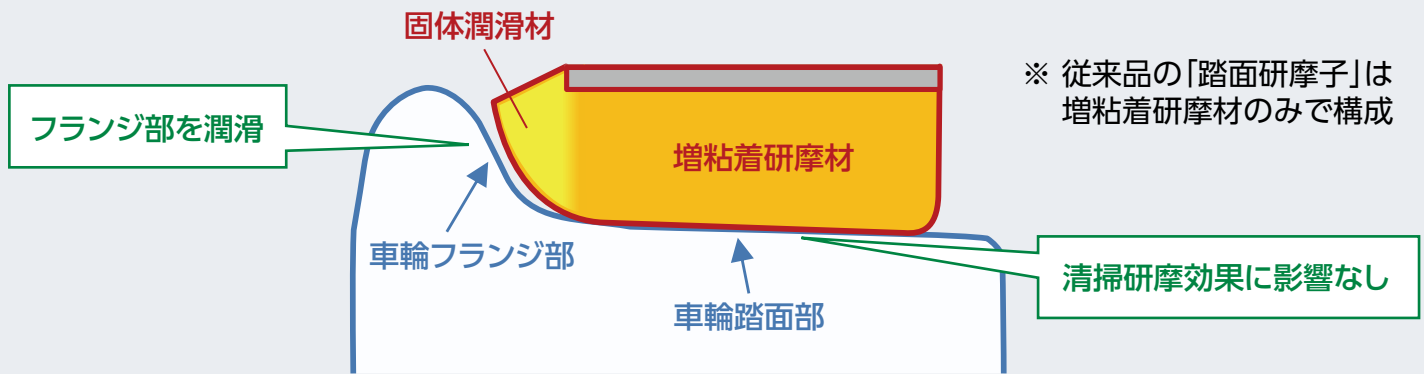


図4 踏面調整子の構成と車輪踏面各部への影響

線通過中の車輪踏面／内軌頭頂面間に摩擦緩和材を散布します。図3(c)に半径165mの曲線(単線、延長約300m)に摩擦緩和材を噴射散布し、走行前後における車両通過時の騒音レベルを測定した結果を示します。散布前は85dB以上であった騒音レベル^④が、1回目の散布後168軸通過するまで約80dB以下となりました。その後、騒音レベルが再度85dB以上に上昇しましたが、2回目の散布により再び低下しました。2回目の散布後は、248軸通過するまで騒音レベルは約80dB以下となりました。車載式のFRIMOSは都市部の路線で約15年間にわたり使用されています。またFRIMOSは車載式のほか、噴射ノズルを地上側に設置する地上式も実用化³⁾されており、都市部の路線の地下区間で使用されています。

踏面調整子⁴⁾

前述のとおり車輪踏面は部位によって求められる特性が異なり、踏面部は摩擦係数が高いこと、フランジ部は摩擦係数が低いことが必要で

④ 騒音レベル

音の強さを表現する際には、基準値との比の常用対数として表すdBが単位として一般的に使われます。5dBで約3倍、10dBで約10倍の音響エネルギーの違いとなります。

す。高速で走行する車両ではブレーキ距離に影響する踏面部の摩擦係数が特に重要で、踏面部への潤滑材の付着を防ぐためフランジ潤滑を使用せず、さらに新幹線車両や一部の在来線車両では踏面部を清掃・研磨して増粘着をはかる踏面研磨子が全車輪に装備されています。鉄道総研が近年開発した踏面調整子は、踏面研磨子のフランジ側面部に固体潤滑材を一体成形することで、踏面部の増粘着と、油による潤滑が適用できない車両でのフランジ部の潤滑の両立を意図したものです(図4)。

この構成の副次的な利点として、①車輪削正で車輪径が減少した際の位置調整が不要、②踏面研磨子と同率で摩耗するため新たに交換寿命を管理する必要がない、ことがあげられます。スティック型の固体潤滑材の場合、バネ圧でフランジに常時押し付けられるため摩耗による交換コストが大きな課題となりますが、②の利点によって、高価な二硫化モリブデンを含む固体潤滑材が必要以上に摩耗しないので、交換コストを抑えることが可能です。

踏面調整子の潤滑材は研磨子と一体成形可能でかつ高い摩耗低減効果を発揮するように設計されたもので、潤滑材の供給量は編成中の搭載軸割合によって調整します。また増粘着効果を

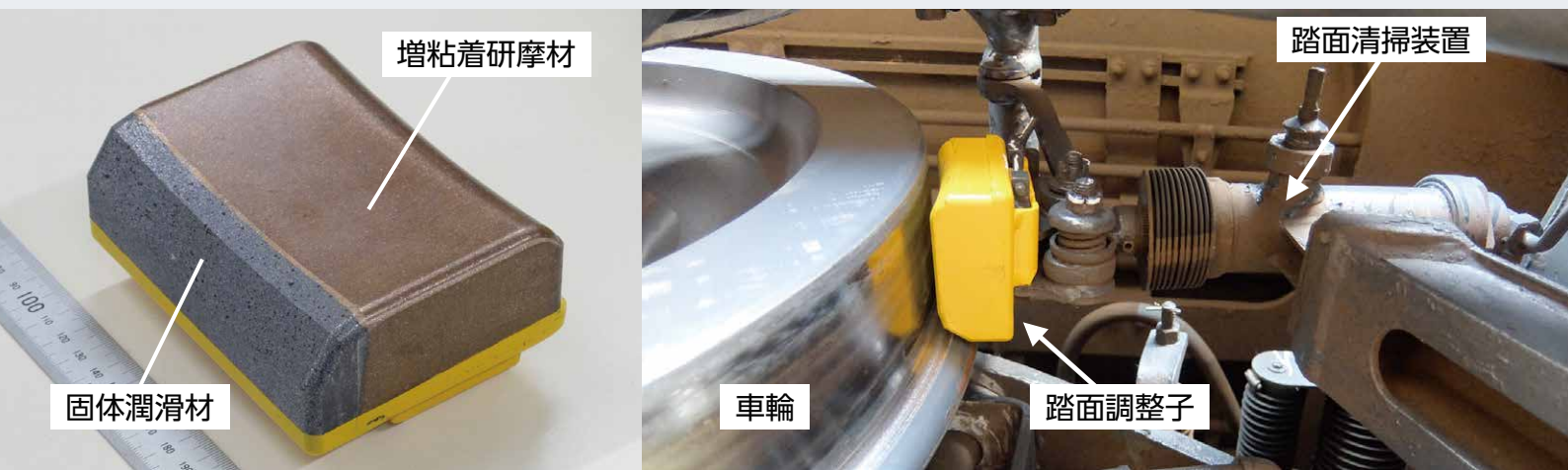


図5 踏面調整子の外観と実車取付状態

優先する観点から、潤滑材は踏面研磨材がある程度摩耗してからフランジに接触するよう形状が設定されています。

踏面調整子の外観と営業車両に搭載した状況を図5に示します。走行距離約20万kmの時点での搭載車両と非搭載車両のフランジ摩耗率を図6に示します。この事例を含め、搭載部位ではおおむね40%程度の車輪フランジ摩耗低減が期待できます。

おわりに

車輪／レール接触境界の潤滑・摩擦制御に関する技術を紹介しました。今後も新たな材料やシステムの開発に向けて取り組んでいきたいと考えています。RRR

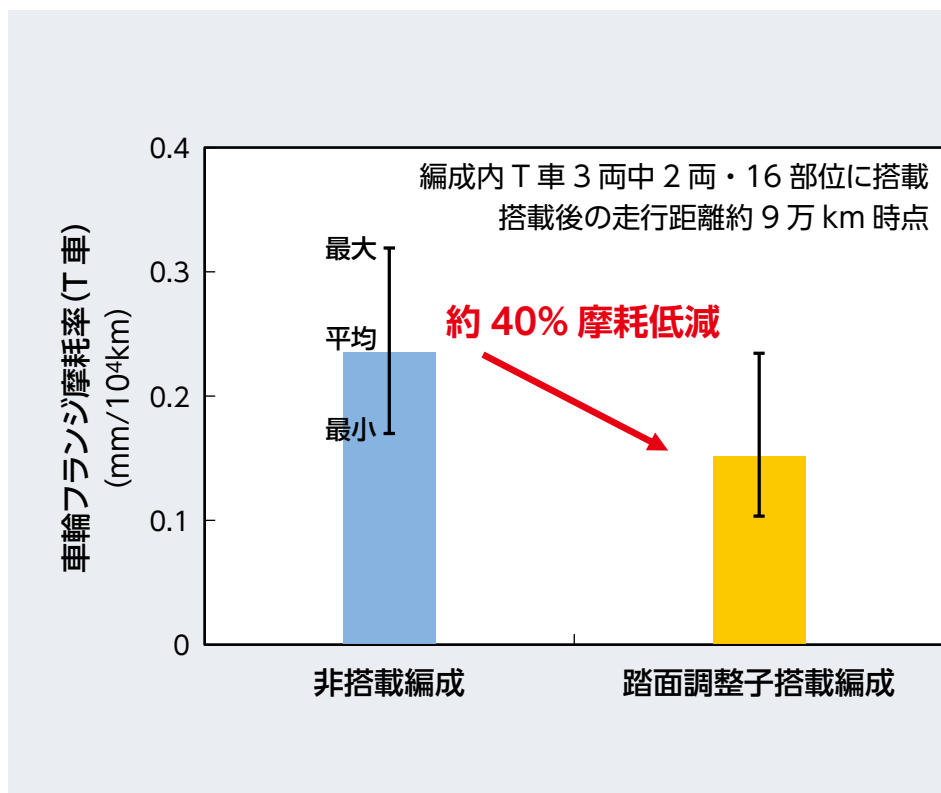


図6 営業車両での長期走行試験後の車輪フランジ摩耗率

文献

- 1) 森川優, 葛西信三, 篠田憲幸, 玉置文博, 陸康思: 摩擦調整材によるきしり音対策, 鉄道車両と技術, Vol.79, No.8, pp.32-40, 2002
- 2) 緒方政照, 伴巧, 深貝晋也, 石田誠, 名村明: 車輪／レール摩擦緩和システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.21, No.6, pp.51-56, 2007
- 3) 伴巧, 深貝晋也, 陳樺, 名村明, 菊地圭介, 地子給和行: 曲線内軌用定置式摩擦緩和システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.12, pp.35-38, 2012
- 4) 半田和行, 嵯峨信一, 池内健義, 深貝晋也, 野崎圭祐: 車輪フランジ潤滑と踏面増粘着の機能を統合した車輪摩擦材の開発, 鉄道総研報告, Vol.34, No.10, pp.35-40, 2020