

# 強くて減らない制輪子を目指す 摩擦・摩耗機構の解明



**西森 久宣**  
Hisanori Nishimori  
車両技術研究部  
ブレーキシステム研究室  
副主任研究員



**松原 孝聡**  
Takatoshi Matsubara  
車両技術研究部  
ブレーキシステム研究室  
研究員



**中澤 伸一**  
Shinichi Nakazawa  
車両技術研究部  
ブレーキシステム研究室長

## はじめに

鉄道の安全にとって、車両を減速・停止させるブレーキ装置は非常に重要です。電車の場合、日常的にはモーターを発電機として利用する電気ブレーキが主に使用され、停電などによって電気ブレーキが使用できない場合に機械ブレーキが動作し、確実に車両を停止させます。機械ブレーキとは摩擦を利用するブレーキで、車輪踏面やブレーキディスクなどの回転体に摩擦材(制輪子<sup>㊦</sup>)を押し当て、摩擦力によって車両を減速させます。摩擦力は使用する

る制輪子の性能に大きく依存します。また、異なる物体が接触する摩擦現象では、摩擦によって生じる熱や摩耗が避けられません。ここでは、摩擦熱の影響を受けても安定した摩擦力を発揮するとともに、摩耗しにくさを向上して省メンテナンスにも貢献する機械ブレーキの制輪子の開発に資することを目的に、複雑な摩擦・摩耗現象にかかわる機構の解明を目指す基礎研究とその成果を紹介します。

## ㊦ 制輪子

車輪を相手に摩擦する踏面制輪子、ディスクを相手に摩擦するブレーキパッドと区別する場合がありますが、摩擦によってブレーキ力を得るためのしゅう動部品を鉄道では制輪子と呼んでいます。

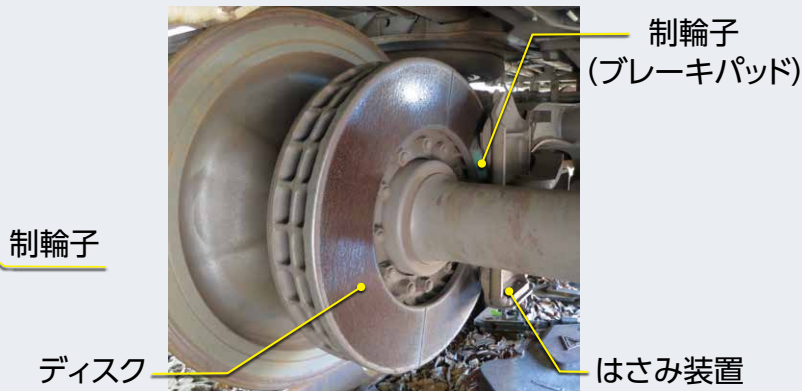
## ブレーキ摩擦材(制輪子)に求められるもの 制輪子の構造と摩擦現象

図1は在来線車両に適用される機械ブレーキの構成例で、車輪踏面に制輪子を押し付ける「踏面ブレーキ」を基本とし、車種によって「ディスクブレーキ」が搭載されています。高速で走

図1 機械ブレーキの例(在来線)



(a) 踏面ブレーキ



(b) ディスクブレーキ

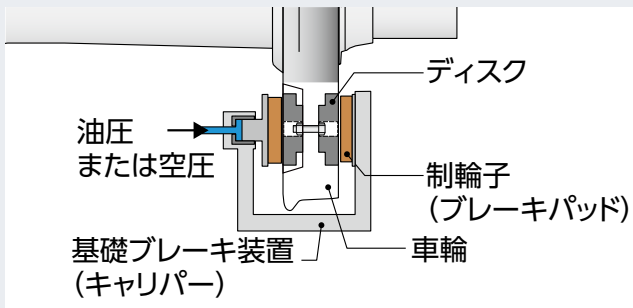


図2 ディスクブレーキ（新幹線）の構造例

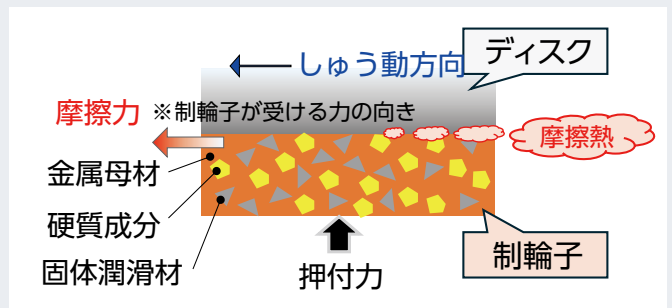


図3 制輪子の構造とブレーキ時に作用する力

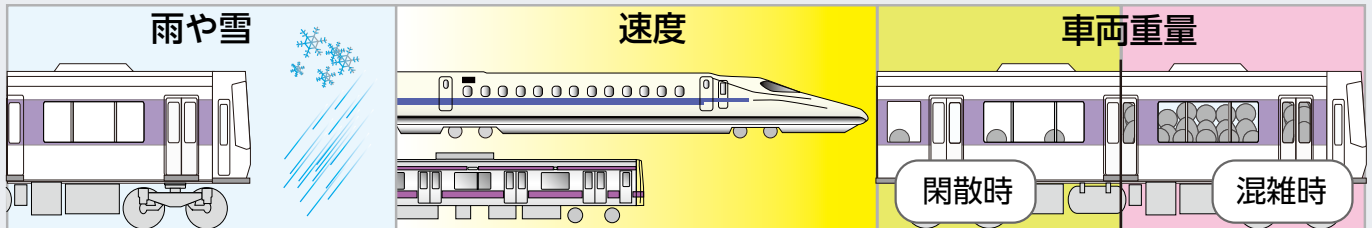


図4 摩擦現象に影響を及ぼす車両の走行条件

行する新幹線車両では車輪への負荷が過大となるため踏面ブレーキは構成できず、図2のように車輪に取り付けたディスクを制輪子ではさみ込むように構成されたディスクブレーキが搭載されています。

新幹線車両のディスクブレーキでは、制輪子には**焼結合金**が使用されています。焼結合金は一般的に硬くて熱に強く、原料の成分や製造工程の条件によってさまざまな特性を与えることができます。焼結合金で作られた制輪子は、ディスク表面をひっかくように作用して摩擦力を得る**硬質成分**や焼き付きを防ぎ摩擦力を安定させる**固体潤滑材**を、銅を主成分とする金属の母材が取り囲んで支えるような構造をもつ

#### 焼結合金

合金粉末を型成形して圧粉体とし、それをさらに融点の90%以下の高温で加熱し、粉末どうしを凝集させる焼結により強く結合させて所定の形状にする、いわゆる粉末冶金法により製作されたもの（文献1より抜粋）。

#### 硬質成分

相手材の表面をひっかくことで摩擦力が得られるほか、相手材の表面を一定に保つことで安定した摩擦力の維持に寄与する。金属酸化物などが代表的。

#### 固体潤滑材（剤）

制輪子として大きい摩擦力を得たいとする一方で、焼き付きのような損傷、過大な摩擦を防ぐ必要があり、摩擦力を調整するために用いられる。黒鉛などが代表的。

複合材になっています。押付力を与えて制輪子がディスクと接触して摩擦するとき、制輪子は摩擦力によってしゅう動方向に引っぱられ、また発生する摩擦熱の影響を受けます。そして、それらの作用によって摩擦面に近い表層から脱落していく状態が「摩擦」といえます（図3）。

#### 機械ブレーキが使用される条件

現在の一般的な電車では、普段は回生ブレーキに代表される電気ブレーキを使用して車両を減速させ、機械ブレーキは停車時の位置調整のような低い速度で使用される状況が大半を占めています。しかし、停電時や電気ブレーキの異常時などに車両を停止させる場合には、ただちに機械ブレーキが使用されます。したがって、機械ブレーキはいついかなる場面でも使用される可能性があり、安定した性能を発揮することが求められます。

機械ブレーキの性能、すなわち摩擦現象に影響を及ぼす車両の走行条件として、まずは雨や雪などの異物、速度といった直接的な要素が挙げられます。ほかにも、同じブレーキ性能を得るためには重い車両ほど制輪子を強く押し付ける必要があり、車両重量も重大な要素といえます（図4）。すべての車両、走行条件で常に一定の性能を発揮できる万能な制輪子は存在せず、

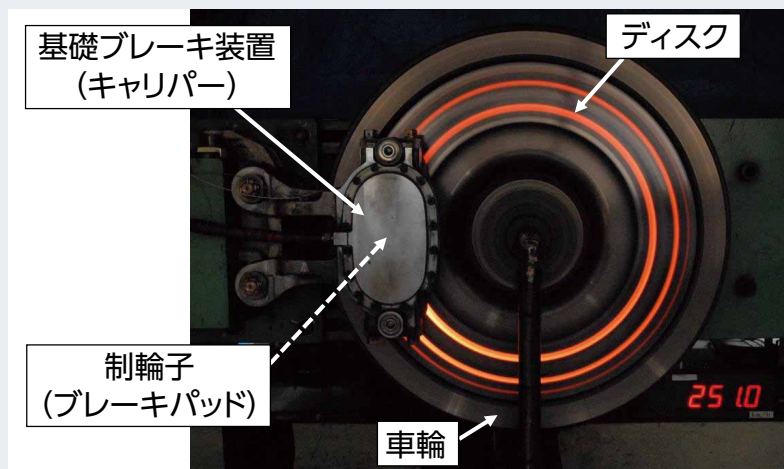


図5 ブレーキ試験の様子

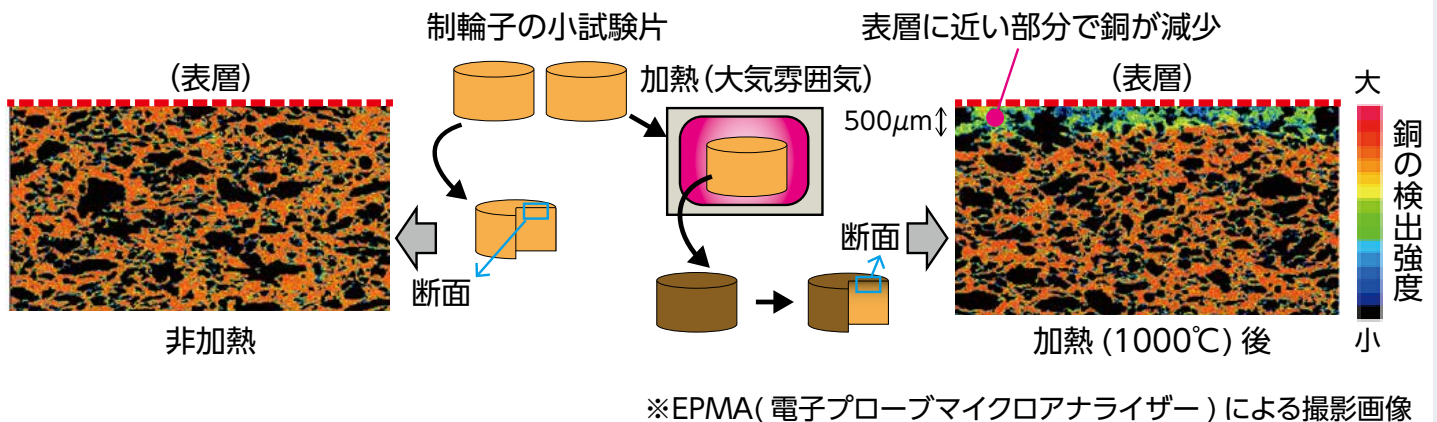


図6 熱による材料組織の変化

ブレーキ性能(≒摩擦力)に加え、車両重量やブレーキの使用頻度を考慮して摩耗量を調整するなど、車種や走行線区などに応じて多種多様な制輪子が使用されています。

### 熱による影響

一般的に制輪子の性能を確認する場合、実際の車両と同じ機械ブレーキの構成でブレーキ試験を実施します。図5は、新幹線向けの実物大のディスク付車輪と基礎ブレーキ装置を用いたブレーキ試験の一コマです。新幹線が高速域から機械ブレーキを使用すると、ディスク表面が赤熱するほどに高温になることがわかります。機械ブレーキは、車両の運動エネルギーを熱として放出するための装置ともいえ、自身の作用によって発する摩擦熱もブレーキ性能に重大な影響を及ぼします。そのため、単純に、より大

きい摩擦力を得ようとするればより多くの摩擦熱と摩耗をとまなうと考えられ、「強くて減らない」を両立させることは容易ではありません。そこで、力と熱の双方が複合して作用する制輪子に何が起きているのかを明らかにする基礎研究に取り組み、「強くて減らない制輪子」を目指します。

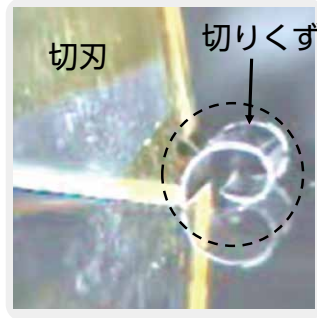
### より良いブレーキ摩擦材とは

#### 制輪子の素性を調べる基礎研究

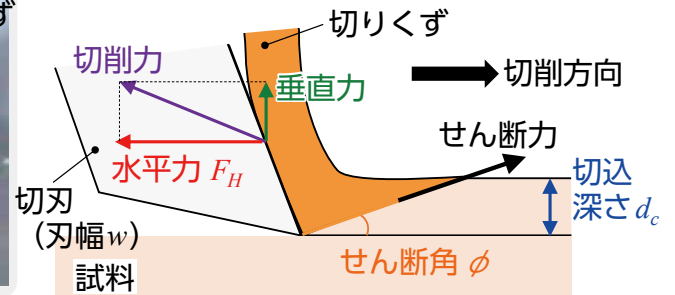
制輪子としての性能を知るには、図5に示したような実物大規模の実験が欠かせない一方で、このような実験には準備や条件設定も含めて多くの時間と経費を要します。また、制輪子の性能には、しゅう動方向の力(以下、せん断力<sup>®</sup>とします)と熱などの要素が複合して影響して



(a) 装置の外観



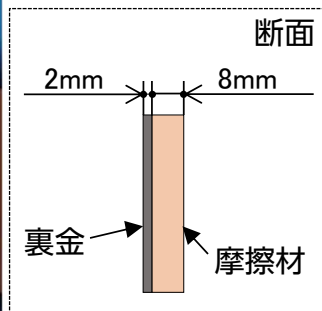
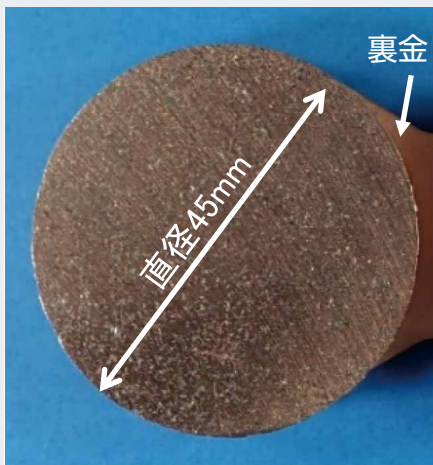
切削部の拡大写真



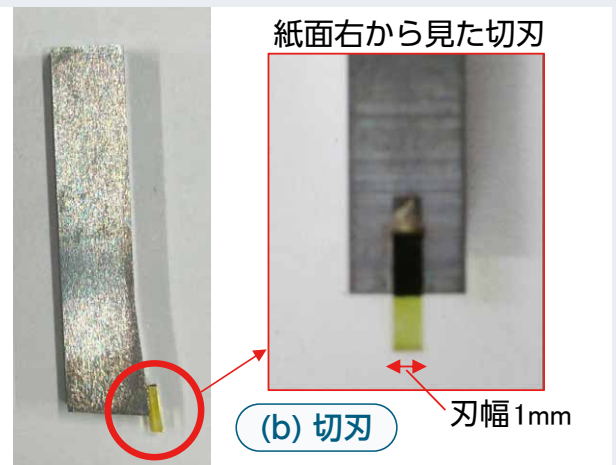
切削部の断面模式図

(b) 切削部の状態

図7 表面・界面物性解析装置 (SAICAS) と測定原理



(a) 試験片



(b) 切刃

刃幅1mm

図8 SAICASに用いた試験片 (文献3) と切刃

いることは明らかで、仮に期待する性能が得られなかったとき、改良の手立てに迷うことも少なくありません。そこで鉄道総研では、制輪子の材料としての優劣をより簡便に評価する手法の確立を目指し、小試験片を使った物性試験によって制輪子の素性を多面的に調査しています。ここでは基礎研究の一例として、制輪子に影響するさまざまな要素から、「熱」と「せん断力」に着目した評価手法を紹介します。

### 要因を切り分ける①熱による変化

制輪子に作用する摩擦熱とせん断力の影響を切り分けて考えます。図6は、制輪子の小試験

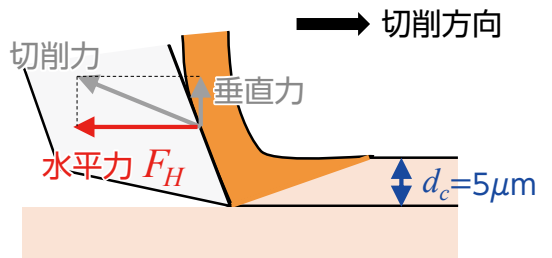
#### せん断力

ある面に平行な向きに作用する力をせん断力と呼びます。摩擦面に平行な向きに作用する摩擦力はせん断力的一种といえます。

片のミクロな材料組織に着目し、熱負荷による影響を観察した結果の一例です。図6の写真では有色部 (黒くない部分) に金属母材の主成分である銅がどれほど存在するかを示しており、加熱された断面では表層近くの銅が減少していました。ほかにも、同じ表層近くでは酸素が増加している、固体潤滑材が消失している、などが観察され<sup>2)</sup>、熱によって材料組織が大きく変化していることがわかりました。

### 要因を切り分ける②材料強度への影響

材料組織の変化が材料の強さにも影響すると考えられることから、せん断力に対する強さを評価するために「表面・界面物性解析装置 (SAICAS, 図7)」を用い、小試験片の表層をごく薄く切削したときの抵抗力 (切削力) を測定する方法を適用しました (小試験片と切刃の



※平均値は  $2.5 < X < 8.8$  の区間で算出

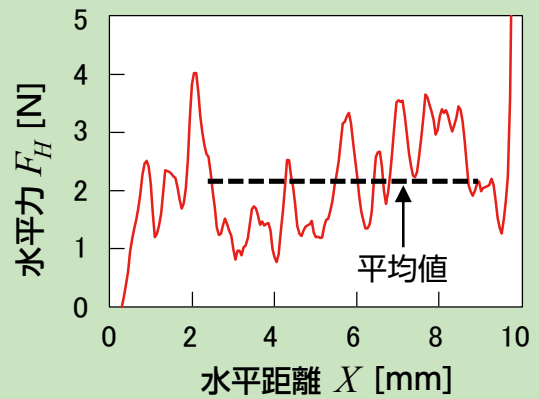
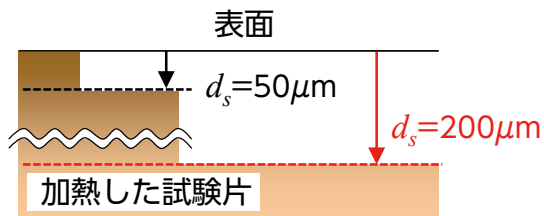


図9 SAICASによる測定結果の例① (非加熱の試験片, 文献3)



※1回の切込深さは  $d_c = 5 \mu\text{m}$   
 ※平均値は  $2.5 < X < 8.8$  の区間で算出

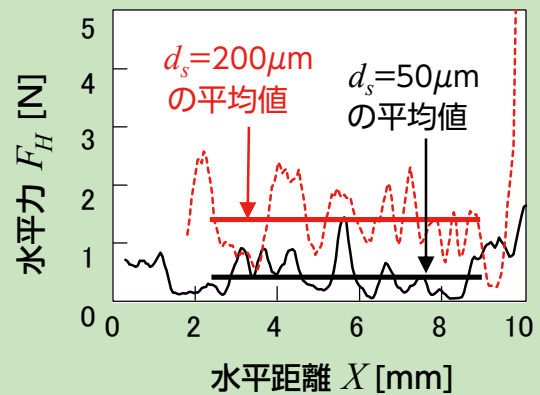


図10 SAICASによる測定結果の例② (900°Cに加熱後の試験片, 文献3)

例を図8に示します)。

図9は、試験片の表面から切り込み深さ(図7(b)の $d_c$ )を $5 \mu\text{m}$ として切削したときの切削力の水平方向成分(図7(b)の水平力 $F_H$ )の測定例で、制輪子のような複合材ではごく薄い切削層に金属母材や硬質成分、固体潤滑材などさまざまな要素が含まれ、位置によって水平力が変動します。そこで切り込み深さがほぼ一定

### せん断強度

切削時のせん断強度 $\tau_s$ は、Merchantの最小抵抗説<sup>4)</sup>に基づき、水平力 $F_H$ 、切込深さ $d_c$ 、切刃の幅 $w$ 、せん断角 $\phi$ (記号は図7(b)に準じる)を用いて算出されますが、制輪子のように、形や大きさが異なる材料で構成され構造が均一ではない複合材では特にせん断角 $\phi$ が大きく変動するため、 $\phi = 45^\circ$ の固定値としたみなし値を「みなしせん断強度<sup>5)</sup>」としています。本報ではさらに、非加熱試験片のみなしせん断強度との比で表した「みなしせん断強度比」を用いました。

となる区間として、切削した部分の始端と終端を除いた区間(図9では水平変位2.5mmから8.8mmの区間)における水平力の平均値を用いて評価します。同様の方法で、900°Cに加熱した後の試験片の表面から深さ方向に水平力を順次測定した結果(図10)、表面からの深さ( $d_s$ )が大きいほど水平力の平均値が大きくなりました。

水平力は切刃の形状や切込深さによっても変動するため、より汎用的な指標として鉄道総研では「みなしせん断強度<sup>5)</sup>」を適用し、複合材である制輪子の強さを定量的に評価しました。異なる熱負荷を与えた試験片(500°C, 700°C, 900°C)に対し、非加熱試験片のみなしせん断強度との比(みなしせん断強度比)の深さ方向の推移(図11)を評価したところ、加熱によって表面近くの強度が非加熱状態から大きく低下

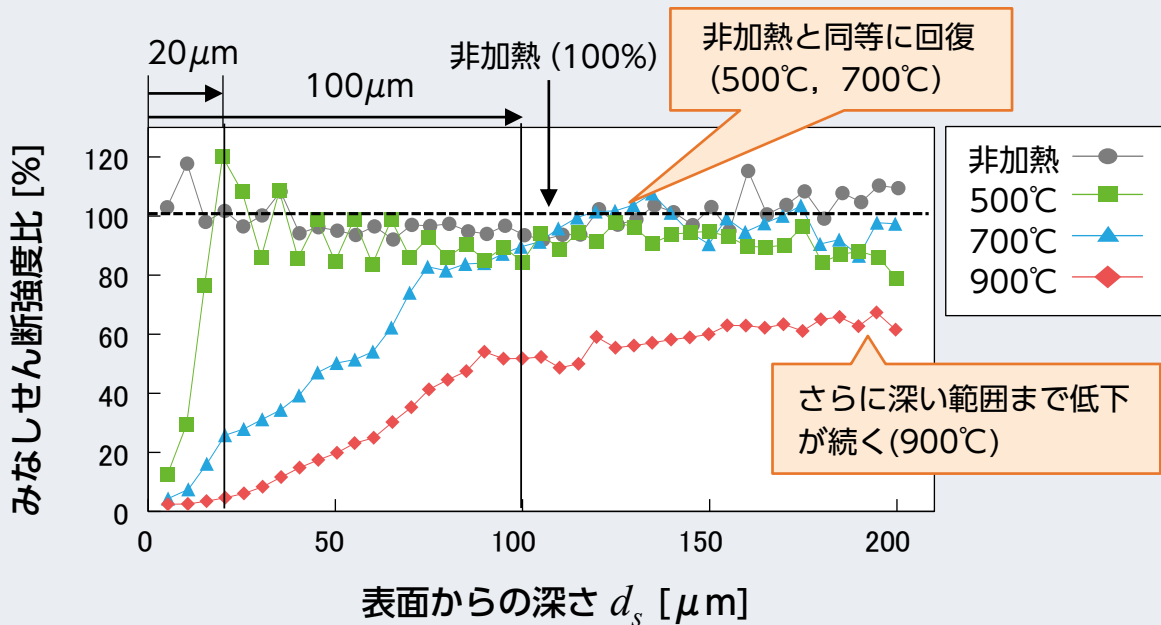


図11 熱負荷を受けた試験片のみなしせん断強度比（深さ方向の推移，文献3）

していました。そして、深くなるほど非加熱状態に近い強度を示しますが、高温の熱負荷を受けた試験片ほど、深い範囲まで強度が低下したままになっています。これらのことから、熱負荷が大きいほど表層から深部まで熱の影響が及び材料として脆くなっているといえ、このような層は脱落しやすく（つまり摩耗しやすい）、初期状態（非加熱）と同じ摩擦力を期待することが難しいと考えられます。

図5に示した実物大規模の実験の結果や現車での使用状況から、制輪子がどの程度の熱負荷にさらされるのかがわかれば、「その熱負荷でも強度が変化しない（低下しにくい）材料」を探ることが、制輪子開発の一つの指針と考えることができます。

## おわりに

本記事では、摩擦現象を利用する制輪子には避けられない摩擦熱、それに伴う材料組織の変化が材料の強度に及ぼす影響を、卓上に設置できるような測定器で小試験片を調べることで評価する方法を示しました。鉄道総研では、ほかにも制輪子の素性の一面を捉える手法として、

小試験片に対して熱とせん断力を独立に調整しつつ同時に負荷できる「高温摩擦試験装置」を用いた評価方法<sup>6)</sup>なども提案しています。

制輪子の材料としての基本的な特性やミクロな影響の把握に注力した基礎研究を進めることで、従来から行っている実物大試験から新たな知見を得られる可能性もあります。これらを組み合わせることで「強くて減らない制輪子」の開発に結び付け、より安全かつ省メンテナンスな鉄道の実現に貢献することを目指しています。

RRR

## 文献

- 1) 日本機械学会：機械工学事典「焼結合金」，<https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/doku.php?id=08:1005797>（入手日：2025年2月1日）
- 2) 西森久宜，狩野泰，阪井章悟，辻貴史：銅系焼結合金摩擦材の基材耐熱性が摩擦係数に与える影響評価手法，鉄道総研報告，Vol.35，No.8，pp.5-10，2021
- 3) 松原孝聡，西森久宜，奥村茂里，野澤仁裕，狩野泰：熱負荷を受けたプレーキ摩擦材のSAICASによる材料強度分析，第30回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2023），2023
- 4) M. E. Merchant: "Mechanics of the Metal Cutting Process. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting", Journal of Applied Physics, Vol.16, No.6, pp.318-324, 1945
- 5) 西山逸雄，齋藤誠：表面・界面切削法による材料・機械的強度の深さ方向解析，日本印刷学会誌，Vol.42，No.5，pp.285-289，2005
- 6) 西森久宜：鉄道車両のプレーキ材料の性能を評価する，RRR，Vol.78，No.4，pp.16-19，2021