

特集：材料技術

材料技術に関する研究開発と今後の展望

松井 元英*

R&D Activities and Future Perspectives in Material Technology

Motohide MATSUI

Various kinds of materials are used as components of systems not only in railways but also in other industrial fields. So far, advances in material technology for structural and functional materials have contributed greatly to the development of railways. Current R&D activities mostly focus on materials with longer service life, the clarification of material deterioration mechanisms and so on. However, the pandemic of COVID-19 and rapid changes in the environment with climate change will have a significant impact on future railways. It is necessary that material technology will adapt to this drastic transition in order to keep contributing to the sustainable development of railways.

キーワード：鉄道用材料，構造材料，機能材料，材料開発，現象解明，劣化状態分析

1. はじめに

鉄道に限らず，システムを構成する上で，材料は様々な用途・目的で使用される。大別して，材料にはシステムの構造を維持するために，材料強度や耐久性等を重要視した構造材料や，特徴的な機能発現による新たな特性を付与するために，電気的，磁氣的，光学的，力学的等の特性強化を重要視した機能材料がある。構造材料と機能材料に求められる特性は，一般的にトレードオフで両立は難しい場合が多いため，例えば，構造材料に新たな機能性を付与する場合，必要な部位に別の処理を施すことで，目的とする機能性付与が可能か検討することになる。

鉄道に目を向けてみると，鉄鋼，アルミや銅といった金属系材料，コンクリートやセラミックスといった無機系材料，ゴム，塗料や潤滑油といった有機系材料，炭素系等の複合材料が構造的，機能的な要求・目的に応じて使い分けられている。これらの材料は，150年に及ぶ長い鉄道の歴史の中で，耐久性不足の解消や，新たな機能付加要求等に，繰り返して挑戦してきたことで，発展してきたと言っても過言ではない。しかし，昨今の鉄道を取り巻く環境は，人口減少による労働力不足，コロナ禍による労働環境の変容，デジタル技術革新等で，これまでと比して大きく変化してきている。また，2015年12月にCOP21で採択されたパリ協定に端を発し，持続可能な開発目標（SDGs: Sustainable Development Goals）の一つである気候変動対策に対して，カーボンニュートラルの実現が謳われている。このような周辺環境の変化に対して，長年培ってきた知識・経験では対応しきれない場合があると予想され，新たに挑戦する気持ちで，柔

軟に適應していくことが，今後の材料技術に求められると考えられる。

本稿では，最近の材料技術分野での取り組みの中で，主に新材料の研究開発，構造材料の劣化機構の解明や劣化状態の評価手法，機能材料を活用した損傷劣化に対する対策手法について，今後の展望とともに紹介する。

2. 最近の材料の研究開発

鉄道総研での材料に関わる研究開発の対象は，車両，軌道，電力，信号通信，土木構造物等多岐にわたる。また，鉄道における材料は供用期間にもともと有していた特性が劣化，変化していくことが多いため，その時点での材料の状態を定量的に評価する手法，その評価手法をもとにした劣化メカニズム解明や，新材料による対策手法等が検討され，鉄道の現場へフィードバックしていくことを目標としている。ここでは，そのうちのいくつかを紹介する。

2.1 寒冷地対応の新幹線車軸軸受油の開発¹⁾

軸受とは，回転する輪軸を両側で支える部材であり，軸受内部は油等で潤滑されている。新幹線の路線網が寒冷地に拡大することで，現行油の低温での流動性の低下が懸念された。この課題を解決するために，当初，合成油を用いて，低温流動性の改善を図った。しかし，経年により赤く変色することが，現場作業員による油の健全状態の判断を難しくし，メンテナンス上の課題となっていた（比較油）。そこで，図1に示すように，高度精製鉱油をベースにして，添加剤を調整することで，経年による赤色化を抑え，メンテナンス上の課題を回避しつつ，低温流動性も確保できる機能を付与した新幹線車軸軸受

* 材料技術研究部長



図1 赤色化を抑えた開発油

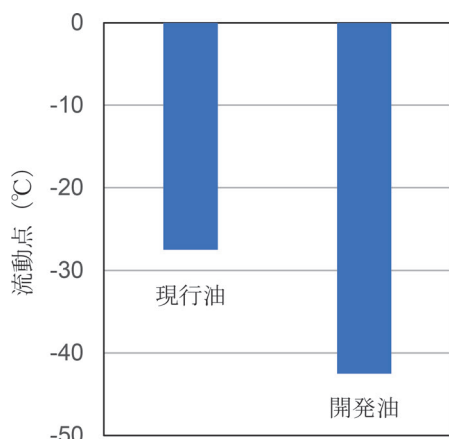


図2 現行油と開発油の流動点比較

油を開発した。

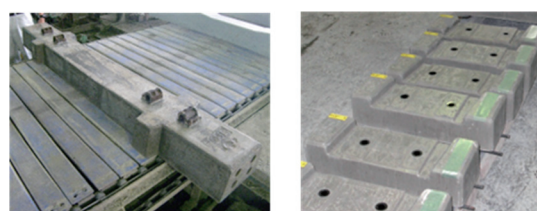
開発油の低温流動性を図2に示す。図の縦軸に示す流動点が高いほど、低温での流動性が高いことを示す。現行の軸受油と比較して、開発したものは -40°C 以下でも流動性を有することがわかった。また、実物の車軸軸受を使用した室内試験を行った結果、80万km相当の耐久試験後においても、開発油に特に異常は認められず、良好な耐久性を有することがわかった。

歯車装置に使用されるギヤ油についても、寒冷地対応を進め、低温流動性を高め、起動加速度を向上させたものを開発しており、これらの成果が寒冷地での新幹線の安定走行に資すると考えられる。

2.2 ジオポリマーを活用した補修材の開発

ジオポリマーは、セメントと比較して、その製造時に産業副産物を大量に活用できるだけでなく、 CO_2 発生量も低減できることから、環境負荷低減の有効な手段の一つとして期待されている構造材料である。また、セメントの劣化要因であるアルカリシリカ反応、酸腐食等に対する耐性が高い特徴を有する。図3に示すように、この特徴を生かして、ジオポリマーを利用したPCまくらぎや短まくらぎをこれまでに開発してきた²⁾。

近年、この高い耐性を利用して、左官作業用ジオポリマーモルタルを開発している³⁾。これは、通常のセメン



(a) PCまくらぎ (b) 短まくらぎ
図3 ジオポリマーを利用したまくらぎ

トモルタルでは、腐食環境下で補修が容易でない箇所への適用が期待される。

2.3 新幹線パンタグラフ停止位置近傍でのトロリ線摩耗率増加機構の解明⁴⁾

新幹線では、電車線設備を構成する構造材料としてのトロリ線の摩耗率が高速走行区間に比べて、駅構内等の低速走行区間で高くなることもある。これがトロリ線の張替頻度の増加を招き、メンテナンスコスト削減の妨げとなっている。この摩耗率増加の原因を探るため、ある駅構内のトロリ線の摩耗分布と、その区間を走行する車両の走行速度を調べた結果、図4に示すように車両が停止位置に近づき、走行速度が減少するにつれてトロリ線摩耗率が急激に増加することがわかった。そこで、図5に示すように、室内試験で摩擦係数の速度依存性を調べたところ、低速になるとともに、摩擦係数が急激に増加することが判明した。図6に示すように、この摩擦係数の増加は、剥離状の摩耗（デラミネーション摩耗）を促進していることが使用後のトロリ線の断面金属組織観察から明らかとなった。

剥離状の摩耗を抑制するため、摩擦係数を低減できるような潤滑方法として、グリース潤滑を試験し、摩耗率が大きく減少することを確認し、今後、実設備での検証を検討していく予定である。

摩耗に限らず、疲労や劣化といった材料を使用していく上で考慮しなければならない初期特性からの時間変化については、その機構の詳細な理解が効果的な対策につながると考えられる。

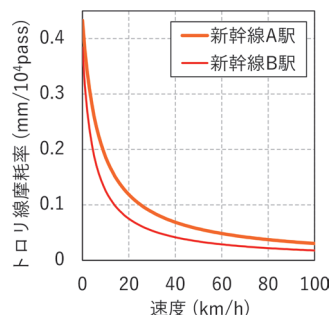


図4 トロリ線摩耗率の速度依存性

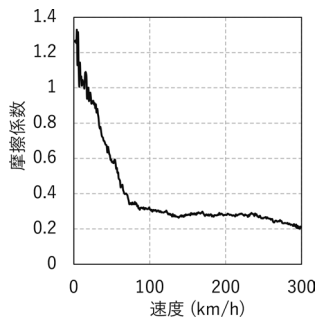


図5 摩擦係数の速度依存性

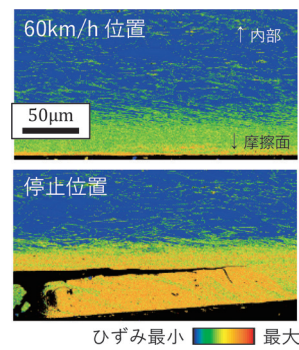


図6 実トロリ線断面のひずみ解析結果

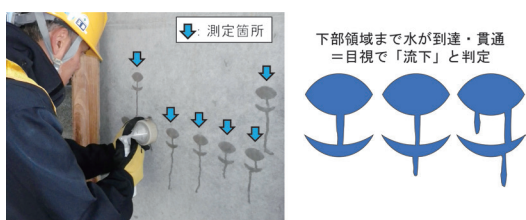
2.4 散水試験によるコンクリートの表層品質評価

鉄道での主要な構造材料の一つで高架橋等で使用される鉄筋コンクリートでは、引張力を負担する鉄筋を腐食させない必要がある。この鉄筋を保護する部分のコンクリートについては、所定の強度を有することに加えて、鉄筋の主な劣化因子となる水分が浸透しないように、一定の厚みと高い水分浸透抵抗性が要求される。しかし、この部分のコンクリートについては、外観上の不具合が見られなくても、施工の仕方に依存して、仕上がり状態が変化する。この仕上がり状態を「表層品質」と称して、表層品質に影響する水分浸透抵抗性を現地で簡易評価する散水試験法を開発してきた⁵⁾。

散水試験とは、乾燥したコンクリートの表面に少量の水を散布して、表層の吸水状態を目視で評価する方法である。図7に示すように、開発した散水試験法（以下、WIST）では、手動のスプレー器具を用いて、同一箇所ですべて一定の間隔で少量の水の散布を繰り返す。図7(a)に示すような形状で、水をスプレー散布し、図7(b)に示すように、散布後の水の流下を目視で確認した時点で測定を終了する。表層品質が高く、吸水しにくい緻密なコンクリートほど少ない散布回数で水が流下する。しかし、WISTは鉛直部材の柱や壁の側面に特化した手法であったため、昨今の床面等の水平箇所での測定ニーズの高まりから、当該箇所でも適用可能な方法を開発している⁶⁾。

2.5 X線回折を用いたレール削正量の検討

構造材料としてのレール上を車輪が繰り返し転がり接触することで、レール上の車輪との接触箇所（転走面）

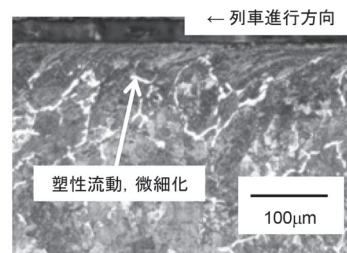


(a) 測定状況 (b) 水の流下状況例

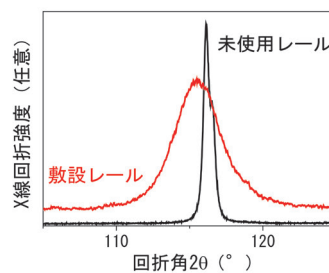
図7 散水試験の概要

で、転がり疲労が発生する。この転がり疲労が蓄積すると、シェリング等のレール損傷に至る場合がある。このレール損傷を抑制する手段の一つとして、事業者では削正車によるレール削正を実施し、転がり疲労を受けた表面層を除去している。しかし、このレール削正には一定の基準があるものの、効率的なレール削正を実施していくには、転がり疲労を受けたレールの表面層の疲労状態を把握する必要がある。

そこで、X線回折（以下、X線フーリエ解析）を用いて、レールの表面層を分析してきた。X線フーリエ解析の特徴として、図8(a)に示すように、転がり疲労を受けたレールの断面金属組織の表面近傍では、もともとの金属組織には見られない変化として、金属組織が一定方向に流れて見える塑性流動や、金属組織の微細化が観察される。このように変化した箇所に対して、X線を照射すると、図8(b)に示すように、未使用レールと比較して、ブロードなX線の回折ピークが得られる。こ



(a) 転がり疲労を受けたレールの断面金属組織



(b) 回折X線の形状変化例

図8 転がり疲労を受けたレール断面金属組織と回折X線の形状に与える変化

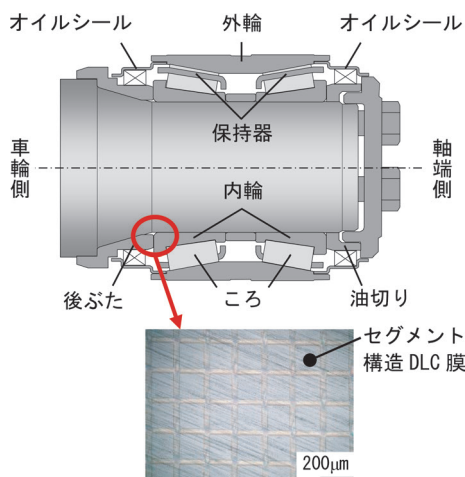


図9 車軸軸受とダイヤモンド状炭素（DLC）膜の付与位置

の変化を X 線フーリエ解析で定量化することで、転がり疲労状態を評価することができる。これまで、レール削正履歴のない経年レール等へ当該解析手法を適用してきたが、経年がさらに進んだレール等の評価を行い、効率的なレール削正手法を検討した⁷⁾。

2.6 車軸軸受のフレッチング摩耗抑制へのダイヤモンド状炭素（DLC: Diamond Like Carbon）膜の適用

鉄道車両用に使用されている車軸軸受は、車両の重量を支え、輪軸の安定的な回転を維持する車両構成部材の一つである。この構成部材である車軸軸受の部品の一部にフレッチングが発生する場合がある。フレッチングとは、2物体の接触部で発生する微小なすべりに起因する摩耗等の損傷を言う。車軸軸受の場合、フレッチングで生じた摩耗粉が車軸軸受内部に混入すると、軸受部品の摩耗や、潤滑油等の劣化を促進させ、メンテナンス上での問題となる。

このフレッチング摩耗の抑制策として、2つの方向性から検討した。一つは、接触部での接触面圧の緩和である。接触部で発生する不均一な面圧分布や、回転に伴う面圧の振幅がフレッチング摩耗の発生と相関があることを見出し、フレッチング摩耗が発生しやすい現行車軸軸受後ぶたについて、有限要素解析や室内試験を通して、それを抑制できる形状を開発した。もう一つは、図9に示すように、後ぶたの接触部に摩擦係数を低減する機能性被膜を付与することである。機能性被膜として、材質的に後ぶたと密着し、摩擦係数を低くできるセグメント構造化 DLC（ダイヤモンド状炭素膜）を検討し、実物の車軸軸受を用いた室内試験でフレッチング摩耗を抑制

できることを確認した⁸⁾。

3. まとめ

鉄道には様々な材料が構造材料、機能材料として使用されている。これまで、材料に関わる研究開発が鉄道の維持・発展に貢献してきたことは言うまでもないが、引き続き高い安全性、信頼性、耐久性、高機能性等が材料の研究開発には求められると考えられる。しかし、近年、大きく変化している鉄道を取り巻く環境への適応が益々求められると考えられ、これまで以上に、環境負荷低減やカーボンニュートラルといった社会的要請を意識する必要がある。さらに、急速に進歩している AI 等のデジタル技術が、将来的に材料の研究開発手法を大きく変えるかもしれない。このような変化に柔軟に対応し、鉄道の持続的発展を今後も支えていけるように、研究開発を進めていきたいと考えている。

文 献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所 主要な研究開発成果 (2021 年度) : <https://www.rtri.or.jp/rd/seika/2021/1-10.html> (参照日: 2022 年 8 月 2 日)
- 2) (公財) 鉄道総合技術研究所 主要な研究開発成果 (2012 年度) : https://www.rtri.or.jp/rd/seika/2012/02/02_06.html (参照日: 2022 年 8 月 2 日)
- 3) 上原元樹, 佐藤隆恒: セメントを使用しない左官用ジオポリマーモルタルの開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.11, pp.5-10, 2022
- 4) (公財) 鉄道総合技術研究所 主要な研究開発成果 (2021 年度) : <https://www.rtri.or.jp/rd/seika/2021/5-24.html> (参照日: 2022 年 8 月 2 日)
- 5) 西尾壮平: 散水試験によるコンクリート表層品質評価に及ぼす影響要因, 鉄道総研報告, Vol.34, No.10, pp.11-16, 2020
- 6) 西尾壮平: 水平面に適用可能なコンクリート表面の水分浸透抵抗性評価手法, 鉄道総研報告, Vol.36, No.11, pp.11-16, 2022
- 7) 兼松義一, 松井元英, 上東直孝: 回折 X 線を用いた表面層の分析によるレール削正量の検討, 鉄道総研報告, Vol.36, No.11, pp.23-28, 2022
- 8) 岡村吉晃, 鈴木大輔, 生駒一樹, 永友貴史: 車軸軸受のフレッチング摩耗防止に対するセグメント構造炭素膜の効果, 鉄道総研報告, Vol.36, No.11, pp.29-35, 2022