

鉄道用材料の研究開発に関する最近の動向

曾根 康友*

Recent Trend of Research and Development on Materials for Railway

Yasutomo SONE

Various innovations have been achieved by the progress of material technology such as realization of higher performance and/or higher function. Also in the railway systems, many kinds of material technologies contributed to the achievement of the higher performance or function of various equipments of railway vehicles and facilities, and these days, to more environmentally acceptable performance of various railway parts. In addition, analytical and measurement methods are regarded as important technologies to understand deterioration of materials which is necessary for accomplishing higher performance and function of the various parts. This review describes some of the results of the recent research and development of RTRI in the latest material technologies mainly contributing to the achievement of higher function, and also analytical and measurement methods that assist the progress of material technologies.

キーワード：鉄道用材料，高機能化，高性能化，分析，測定

1. はじめに

技術の発展は、設計施工技術の進歩のみならず、使用される材料の高機能化や高性能化によってもたらされてきた。鉄道においても様々な材料技術が寄与しており、車両・施設に使用される材料の長寿命化や高機能化、加えて近年は環境受容性、すなわち環境影響が小さいことが求められ、その実現を果たしている。一方、材料の高機能化や長寿命化を実現するためには詳細な組成や劣化現象の解明が必要であり、それらを客観的に捉える評価・分析技術の向上も不可欠である。鉄道総研においても材料自体の開発と評価・分析技術を研究開発の両輪と考えて取り組んでいる。

本稿では、鉄道用材料技術に関する最近の研究開発の中から、主に鉄道車両や施設の課題を解決するための材料の高機能化のための開発研究と、材料の劣化現象の解明につながる材料分析および各種測定技術に対する鉄道総研の取り組みの概要および成果を紹介し、今後の展望について解説する。

2. 材料の高機能化に関する研究開発

材料の高機能化にはいくつかの代表的な方法がある。たとえば材料を構成する分子の向きをそろえる（配向させる）ことで薄膜や固体の強度向上を図る、分子を構成

する元素や一部分の構造を少し変更することで異なる効果を持たせる、主体となる材料に他の材料の粉末や繊維を混合させること（これを「複合化」とよぶ）や、材料の微視的な規則性（結晶構造）を変化させることによって新たな機能を持つ材料を創出するなどがあげられる。これらの方法を、対象とする材料の種類や用途を考慮し、単一で、場合によっては組み合わせることで高機能化を目指す。

鉄道総研における材料の高機能化に関連する最近の技術開発の取組事例を表1に示す。すでに鉄道車両や施設に従来から使用されている材料の高機能化と、鉄道総研が素材から開発に関わってきた材料の高機能化および鉄道への適用の両方の取組がある。ここではそのうちいくつかの例を紹介する。

2.1 ジオポリマー硬化体を用いたまくらぎの製作とアルカリシリカ反応抑制材への適用

石炭火力発電によって発生する石炭灰や製鉄業で鉄鉱石から鉄を取り出す過程で生じる副産物の一つである高炉スラグにアルカリ溶液を混合して硬化させたジオポリマー硬化体は、セメントコンクリートと類似の外観を持ち、その特徴を利用したいくつかの用途が考えられている。

ジオポリマー硬化体はセメントコンクリートの劣化要因であるアルカリシリカ反応、酸劣化等に対する耐性が高いため、これまでセメントコンクリートが使用できなかった箇所へ適用できる可能性がある。鉄道総研ではそ

* 材料技術研究部 部長

特集：材料技術

の特性を明らかにしつつ、漏水が多い地下鉄トンネル等で用いられる短まくらぎを、繊維補強したジオポリマー硬化体で製作し、従来の最高要求スペックと同等の性能となることを確認し、その実用化を進めている。

一方、ある種のジオポリマー硬化体がゼオライトと同様のイオン交換能力を持つことに注目し、アルカリシリカ反応の原因となる陽イオンを吸着して別の陽イオンを放出するアルカリシリカ反応抑制材としての利用も検討されている。酸への耐性を示すジオポリマー硬化体の特徴を生かし、酸性のイオン交換体の作成が容易なことから、コンクリートのpHを調整するアルカリシリカ反応抑制材として期待される¹⁾。

ジオポリマー硬化体は、用途によっては普通セメントコンクリートの代替材料として期待されており、原料や製法を検討して高機能化を目指している。

2.2 圧電ゴムの開発と車両用センサへの適用

圧電ゴムは電気エネルギーと機械エネルギーを可逆的に変換できるセラミックスの圧電材料をゴムと混練し、ゴムの柔軟性を持たせた材料である。複合化によって高機能化された複合材料と考えることができる。

混練すると元のセラミックスと比較して圧電性能が低下する点が課題であったが、配向させながら成型することで圧電性能を向上させることができ、センサとしての必要性能を満足できるものとなっている。

このように作製した圧電ゴムを鉄道用途に適用する取り組みを行っており、これまでに車両側引き戸におけ

るはさみこみセンサや軸受損傷検知に向けた防振ゴムへの適用を試みている。前者については幅5mm、長さ1500mmの細長い形状に成型できるゴム特有の成型性を生かした用途であり、従来のセンサよりも小径の異物挟み込みを検知できる可能性が見いだされている。また、配向により圧電性能を向上させた圧電ゴムを組み込んだ防振ゴムを用いると、発生する電荷の周波数分析によって70km/h相当で回転する車軸軸受に付された人工傷を、明確に検知できることがわかった。その一方で、戸先ゴムへの適用にあたっては検知の困難な位置が存在することなど、課題も明らかになっており、実用化に向けてさらなる取り組みが必要となっている²⁾。

2.3 高温超電導材の基本特性向上とき電ケーブルへの適用

鉄道総研では、電気抵抗がゼロとなる超電導材料について材料の合成・評価、バルク材や線材への加工まで含めて一貫して取り組んでいる。高機能化に向けては、元素の組成、原料や製法の検討などが主な手法となる。

線材開発においては希土類系(RE系)や、ビスマス系を中心とする酸化物の超電導体を主な対象とし、例えばケーブルへの適用に向けた曲げ試験や過電流試験など、応用のための物性評価を進めている。また、バルク材開発においてはRE系のものが一般的であったが、製作が比較的容易で軽量の二ホウ化マグネシウム(MgB₂)にも注目し、製法を検討することで他の材料では困難な大型の試料の製作に成功し、理想的な磁場分布を示すこ

表1 材料の高機能化と鉄道への適用、分析・測定技術に関する最近の取組例

分類	材料・技術	主な適用対象部材	期待される主な効果
高機能化	難燃性マグネシウム合金	車両構体	軽量化
	ジオポリマー硬化体	まくらぎ等	酸劣化等への耐性向上
		アルカリシリカ反応抑制材	抑制性能向上、低コスト化
	非ハロゲン部材	のり面防護シート	環境適合性
	導電性表面材	レール等のき裂検知システム	き裂
	発泡性ゴム	軌道パッド	低温時の緩衝性能向上
	圧電ゴム	車両用センサ	戸先での異物検知性能向上
	レール鋼の頭部熱処理方法	ノーズ可動クロッシング	耐摩耗性向上
	C/C複合材	パンタグラフすり板	破壊じん性向上
	超電導材料	き電ケーブル	エネルギー効率向上
分析機器等		性能向上	
ナノカーボン	潤滑グリース	導電性、機械的特性向上	
分析・測定技術	散水試験	コンクリート構造物の表層	簡易な手法による品質評価
	表層部の圧縮強度	高炉セメントコンクリート	中性化速度評価の適正化
	色度測定	樹脂窓ガラス	劣化指標の提案
	X線応力測定	レール(ロングレール)	軸力の定量化
	X線フーリエ解析法	レール表面	転がり疲労程度の定量化
	転動体/保持器接触力測定方法	転がり軸受	接触力の解明を通じた軸受損傷の防止
	光ファイバセンサ	転がり軸受	軸受転動体の荷重分布評価
	センサシート	軸受内接触部	軸受フレッチング防止策

とを確認した³⁾。

一方、鉄道応用に向けて鉄道用超電導き電ケーブルの開発も進めており、これまでに冷却システムを備えたケーブルを鉄道総研構内に敷設し、実際の車両を走行させることに成功している⁴⁾。

3. 材料の分析・測定技術に関する研究開発

鉄道総研における材料分析・測定技術に関する最近の取組事例を表1に示す。大別すると二つの目的がある。すなわち、これまで定量的な評価ができないか困難であるため、間接的に、あるいは定性的に評価されていた現象に対して定量的な評価指標をもたらすものと、鉄道事業の最前線において作業を効率化するため簡易な装置を用いて短い時間で材料の品質を評価するものである。ここではそれらのうちいくつかの例を紹介する。

3.1 コンクリート表層品質の簡易な評価手法

コンクリート構造物の耐久性に対してはコンクリートの表層部から内部への物質透過が影響すると考えられ、物質透過への抵抗性を指し示す用語として「表層品質」が広く用いられるようになってきている。表層の透気性や透水性を評価する方法はこれまでも知られているが、いずれも測定に用いる装置が高価で手間がかかる、測定に時間がかかる等の課題がある。そこで鉄道総研では、現地でコンクリート構造物を対象として表層品質を簡便に評価する方法を検討してきた。散水によるコンクリート表面の明度の変化から表層品質を評価する、これまでの散水試験方法をさらに発展させ、散水試験を鉛直面に適用した際の水の流下の状況から表層品質評価を定量的に把握する方法とした。これによりコンクリート構造物の表層品質評価を大幅に簡易化することが可能であり、すでに鉄道事業者において試用段階にある⁵⁾。

3.2 コンクリート中の硫酸塩の遅延生成

エトリンタイトの遅延生成はコンクリートの劣化現象の一つであり、建設後年数を経過したコンクリートの内部に膨張ひび割れが生じ、ひび割れ部分にはエトリンタイトと呼ばれる鉱物が大量に生成していることが知られている。これまで欧米ではその事例が報告され、研究が進められているが、日本国内では縁石ブロック等の工場製品での発生が報告されたのみであった。

国内で建設後約10年経過したコンクリート構造物に認められたひび割れ箇所を調査したところ、このひび割れは内部からの膨張により生成したものと推測された。さらに、採取したコンクリートコアの詳細な分析から、ひび割れ周辺にはエトリンタイトと類似の元素組成で構

成されるが、典型的なエトリンタイトとは微視的な形状の異なる物質が観察された。この物質は、比較的少量の硫酸塩を添加して作成したコンクリート供試体の内部にも見いだされたことから、このエトリンタイトに類似した硫酸塩の遅延生成が発生し、ひび割れに影響している可能性を見いだした⁶⁾。

3.3 車両用樹脂製窓ガラスの劣化評価

軽量で比強度が高い樹脂を鉄道車両の窓ガラスに適用することは、車両の軽量化、破損防止のニーズに合致するものであり、近年その適用が拡大している。一方、樹脂製窓ガラスは無機ガラス製のものと比較して劣化する可能性があるため、その程度を明らかにすることや品質向上の方法が必要とされている。

鉄道用樹脂窓として広く使用されているポリカーボネートに対し、表層に劣化防止を目的とした処理を行った試験品について、東京付近での約10年分に相当する紫外線を照射する促進劣化試験の後に諸特性を調べたところ、ポリメタクリル酸樹脂の層を表層に設けたポリカーボネート材が、曲げ、衝撃性、黄変等に対して優れた耐久性を示すことがわかった。また、実車両において早期交換の原因となっている黄変に対しては、検修工場において適用可能な黄変度の測定方法を提案し、現車での約3年の使用では顕著な黄変が発生しないことを定量的に明らかにした⁷⁾。

3.4 X線応力測定によるレール軸力評価

レールは車両の安全・安定な走行を支える重要部品であり、その劣化・損傷を防止する取り組みが絶えず行われている。ロングレール化は乗り心地向上、騒音低減などの観点で有効な手法であるが、気温の変動に伴うロングレールの伸縮によってレール内部にレール軸力と呼ばれる熱応力が発生する。過大なレール軸力は、レールの座屈や折損の原因となりうるため、適切なレール軸力管理が求められている。

レール軸力の測定は測定者の手作業によって行われることが多いため、ある程度の測定誤差が発生することを許容しなければならず、さらに、蓄積したレール軸力を適正量以下に保つための設定替えを実施しても、その効果を把握することが難しかった。

鉄道総研ではX線応力測定法の一つである $\cos \alpha$ 法をレール軸力の測定に適用することを検討し、室内試験により同手法とひずみゲージによる軸力測定の結果とが相関することを見いだした⁸⁾。

同手法は可搬型の測定装置を用いて実施することが可能であるため、今後は現地レールでの測定方法等の開発を進めていく。

特集：材料技術

3.5 転がり軸受転動体荷重分布の測定と寿命への影響評価

転がり軸受は回転する軸と固定されたハウジングの間の円滑な動作を支える機械要素であり、鉄道でも車軸軸受や主電動機軸受等の重要な部品として、例えば車軸軸受は車軸と軸箱の間で使用されている。転がり軸受を選定するには、疲労により転走面にはく離が生じて回転できなくなるまでの「寿命」が一つの条件となる。転がり軸受の寿命は、その軸受の大きさやころ・玉等の転動体の数、材料の品質等のパラメータに加えて、外部から負荷される荷重を用い、理論計算によって求められる。荷重の荷重方法によっては寿命が変化する可能性があるため、寿命を正しく把握するためには荷重を正確に知る必要がある。

鉄道総研では回転している転がり軸受の転動体にかかる荷重を、光ファイバセンサを用いて動的に測定する方法を開発し、転動体に作用する荷重分布を明らかにするとともに、軸受とハウジングの接触状態が異なる場合の寿命への影響を理論的・実験的に確認した⁹⁾。

3.6 転がり軸受のすべり接触部における潤滑性能評価方法

主電動機軸受の損傷は、保持器・転動体間のすべり接触部における潤滑不良が原因の一つと考えられており、すべり接触部の潤滑性能向上は、軸受の損傷防止に向けた課題と考えられる。鉄道総研では保持器のすべり接触部を模擬した試験体と実物の転動体（ころ）を接触させて両者の間のすべり摩擦を評価する、保持器・転動体間の要素試験装置を製作した。また、その試験条件を決定するため、軸受に加工を施し、転動体と保持器の間の接触力や転動体の自転の回転数などの測定を通じて軸受の運動特性を調べた。

実験的に求められた転動体の回転速度は、転動体が荷重の負荷圏に存在する場合に理論値と概ね一致すること、保持器と転動体間の力は、転動体の公転周期と同じ周期で増減することが見いだされた。これらを反映した条件で保持器・転動体間の要素試験を実施した結果、少ないグリース量では実際の軸受損傷時に見られるような焼き付き現象が再現されたほか、軸受損傷の要因と考えられる保持器の摩耗は、保持器へのグリース付着量が多いほど抑制されることがわかった。さらに、軸受の潤滑性能を評価するには、振動加速度の急激な増加を指標とすることが適当であることが見いだされた¹⁰⁾。

4. おわりに

鉄道総研における鉄道用材料の技術開発は、材料そのものの開発および高機能化と、近年進歩の度合いを速める先進的な材料技術の導入研究の両方で成り立っている。一方、新たな分析・測定技術は現象の解明や品質の把握の助けになるのみでなく、材料そのものの高機能化にも貢献するものと考えている。安全を前提とした長寿命化、高効率化、高機能化、環境負荷低減、エネルギー効率の向上など多岐にわたる課題の解決に努めるべく、引き続き、鉄道の持続的発展に向け、材料技術の分野から貢献していきたいと考えている。関係各位のますますのご助力をお願いする次第である。

文献

- 1) 上原元樹, 佐藤隆恒: 高機能ジオポリマーをコンクリートに利用する, RRR, Vol.72, No.10, pp. 24-27, 2015
- 2) 間々田祥吾, 矢口直幸, 山中翔, 朝比奈峰之, 岡村吉晃: 鉄道車両における圧電ゴムセンサの適用, 鉄道総研報告, Vol.30, No.4, pp. 17-22, 2016
- 3) 富田優, 鈴木賢次, 福本祐介, 石原篤, 赤坂知幸, 小林祐介: 超電導材料の現状と応用, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp. 49-52, 2016
- 4) 富田優: 超電導ケーブルで電力供給を効率化する, RRR, Vol.72, No.10, pp.8-11, 2015
- 5) 西尾壮平: 散水によるコンクリート表層品質の簡易評価, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp. 5-10, 2016
- 6) 鶴田孝司, 鈴木浩明, 上原元樹, 上田洋, 笠筒一郎: コンクリート構造物における硫酸塩の遅延生成, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp. 11-16, 2016
- 7) 伊藤幹彌, 枘田吉弘, 山中翔: 車両用樹脂製窓ガラスの黄変度測定による劣化評価, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp. 37-42, 2016
- 8) 兼松義一, 松井元英: 可搬型X線回折装置によるレール軸力評価に向けた基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp. 17-22, 2016
- 9) 永友貴史, 高橋研, 岡村吉晃, 木川武彦, 野口昭治: 転がり軸受の転動体荷重分布が寿命に及ぼす影響, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp. 29-36, 2016
- 10) 高橋研, 鈴木大輔, 岡村吉晃, 永友貴史: 円筒ころ軸受の潤滑性能評価方法の検討, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp. 23-28, 2016