

鉄道用材料の研究開発に関する最近の話題

曾根 康友*

Recent Trend of Research and Development on Materials for Railway

Yasutomo SONE

Many innovations have been brought about by the progress of material technology also in the railway systems. In addition to development of many kinds of materials and material technologies, progress of the analytical methods and the measurement ones contributed to the achievement of the higher performance or function of various equipments of railway vehicles and facilities. Furthermore, additional efforts are necessary to realize the practical use of the developed materials and technologies. This review describes some of the results of the recent research and development of the latest material technologies in RTRI including the efforts to apply them to the practical railway vehicles and facilities.

キーワード：鉄道用材料，高機能化，高性能化，導入，適用

1. はじめに

技術の発展は、設計施工技術のほか、使用されている材料の高性能化や高機能化によってもたらされることが多い。鉄道においても様々な材料技術が寄与しており、たとえば車両用材料では潤滑剤やホース部材であるゴムの長寿命化により車両検査周期の延伸が可能となり、施設用材料ではより面防護シートの環境適合性を高めたことにより盛り土のり面への施工が規制前と同様に可能となった。これらは、材料そのものに関する技術開発の結果であり、潤滑剤であれば耐熱性や酸化安定性に優れた材質が国内外の石油産業や化学工業によって開発され、その採用が進んだことが長寿命化の大きな要因となっている。一方、材質を決める段階ではそれまで寿命を決めていた要因を明らかにする過程がある。熱や酸化をはじめとする潤滑剤の劣化要因に対する劣化傾向の解析には、その時代の新たな分析技術が使用されている。すなわち、材料開発に加えて、材料の劣化や現象を解明するための技術も必要であり、鉄道総研においては現在もそれぞれに取り組んでいる。

材料開発と分析技術のほかに、高性能化や高機能化された材料を鉄道に適用するためには、実際の鉄道車両や鉄道施設にどのように導入するかが重要な観点である。優れた性能や機能を持つ材料でも車両や施設への導入が困難であれば使用される可能性はきわめて小さい。したがって、開発された材料を導入するための技術開発も必要となる。

本稿では、鉄道用材料に関する最近の研究開発の中から、鉄道車両や施設の課題を解決するための導入に向けた取り組みをとまなう研究開発を取り上げ、その概要および成果を紹介し、それぞれの今後の展望について解説する。

2. 新たな材料技術の研究開発と適用のための技術開発

新たな材料を実際の鉄道車両や施設に適用・導入するためには、材料そのものの研究開発に加えて、適用・導入のための技術開発が必要な場合が多い。それは施工方法、交換基準のほか、電気信号の送受信や、場合によっては必要な配線や配管の開発まで含むシステム開発であることもある。鉄道総研において、材料および材料技術の研究開発以外に導入のための取り組みを必要とする事例を表1に示し、ここではそのうち車両関連の3件と施設（電力施設を含む）関連の3件を例として紹介する。

2.1 圧電ゴムの開発と車両用閉装置への適用

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の圧電材料をゴムと混練し、ゴムの柔軟性を持たせた、複合材料の一種である。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、電場を用いてセラミックス粒子を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、センサとしての性能を満たすものが得られつつある。

圧電ゴムの鉄道への適用研究の一環として、車両の

* 材料技術研究部 部長

表1 材料技術に関する研究開発と鉄道への導入に向けた取り組みの例

分類	材料/材料技術	適用対象部材	導入に向けて取り組んでいる技術
車両	難燃性マグネシウム合金	車両用部材, 車両構体	溶接・接合とその評価手法
	圧電ゴム	車両用戸先ゴム	信号伝送, 制御技術
	C/C 複合材	パンタグラフすり板	低コストな製造方法
	ナノカーボン	潤滑グリース	導電性, 機械的特性向上, 電食の評価手法
	潤滑グリース使用寿命延伸技術	主電動機軸受	非分解でのグリース入替給脂機構
	潤滑グリース劣化判定技術	駆動装置軸受各種	管理基準値の再構築
施設	ジオポリマー硬化体	アルカリシリカ反応抑制材	鉄道施設への適用手法
	非ハロゲン部材	のり面防護シート	現地施工方法
	導電性表面材	レール等のき裂検知システム	データ収集方法, 判定方法
	発泡性ゴム	軌道パッド	低温時の緩衝性能評価手法
	超電導材料	き電ケーブル	冷却, 応力緩和等の要素技術

側引き戸におけるはさみ込みセンサへの適用を試みている。これは幅 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はさみ込みを検知できる可能性が見いだされている¹⁾。

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。その中には電気的な信号の伝送, 得られた信号波形による戸閉検知のための制御などに関するものが含まれる。

圧電ゴムの戸閉装置への適用に向けては, 圧電ゴム自体の性能向上に加えて, 信号伝送や制御技術まで含めたシステムの開発が求められており, その構築への取り組みを進める計画である。

2.2 難燃性マグネシウム合金の開発と車両構体への適用

車両開発において省エネルギー効果が大きい課題として, 車両構体の軽量化があげられる。これまで多くの車両構体に対してアルミニウム合金の適用が図られ, その効果が明らかとなっている。一方, さらなる軽量化を目指すためには, 新たな材質の導入が必要である。

マグネシウムはアルミニウムと比較して密度が約 3 分の 2 と軽量である。鉄道総研ではマグネシウム合金の課題である発火性をカルシウムの添加により抑制した「難燃性マグネシウム合金」を開発し, 車両構体への適用に取り組んでいる。これまでに同合金の金属組織の特徴, 機械的性質, 加工性などの基礎的な特性を調べた上で, 構体の製造方法を検討してきた。そのステップとして中空押出型材を試作したほか, 適切な接合方法としてアーク溶接の一種であるメタルイナートガス (MIG) 溶接や, 接合時の熱の影響を小さく抑えられる摩擦攪拌接合 (FSW) を提案した。

現在, 構体用の中空型材に対して FSW を適用した接合の可能性を実験的に検討しており, 接合に用いるツールの材質やその加工方法の検討が必要なこと, 型材の接

合にあたっては内部に欠陥が発生している可能性があるため超音波等を用いた非破壊検査による評価が必要であること, 接合時に発生する熱分布の解析を通じて接合に適した継手形状を設計する必要があること等を見出している²⁾。

今後はこの材料で部分構体を試作し, 実用性を検証する計画である。

2.3 潤滑グリースの使用寿命延伸技術と劣化判定基準

潤滑油や潤滑グリースなどの潤滑剤は, 車両駆動装置で数多く使用されている転がり軸受を円滑に回転させるための重要な材料である。潤滑剤は有機化合物を主とした材料であるため, 軸受など他の多くの車両用部品を構成する金属と比較して劣化が早い。そのため交換周期が金属よりも短く, その交換周期が車両の検査周期を決める要素の一つとなる場合がある。

潤滑剤に対しては長寿命化が求められており, 新たな基油や添加剤を導入することによって潤滑油の長寿命化を図っている³⁾。一方, 同じ潤滑剤であっても使用環境を工夫することによって使用できる走行距離 (使用寿命) を延ばすことが可能と考えられる。鉄道総研では潤滑グリースに含まれる油分の軸受内での流動を詳細に調べることで, 軸受と接するグリースポケット内に充てんされた潤滑グリースを有効に潤滑に寄与させるグリースポケット形状の設計指針を提示し, 潤滑グリースの使用寿命を延伸する提案を行った⁴⁾。さらに, グリースポケット内の潤滑グリースを非分解で中間給脂する入替給脂機構を開発し, 軸受に接する潤滑グリースを使用寿命の 25% の時期に入れ替えることで潤滑寿命を延伸し, 在来線の 180 万 km 走行相当の使用寿命を台上試験で確認した⁵⁾。このように, グリースのみならずその特性を生かしてグリースの使用寿命を延ばす機構作りにも取り組んでいる。

一方, 潤滑剤を的確な時期に交換するためには, その劣化程度を見きわめることが大切である。潤滑剤の劣化状態を捉える指標として, 劣化程度の目安である「管理

基準値」を旧国鉄の鉄道技術研究所が提案し、劣化状態や継続使用可否の判定基準として広く活用されてきた。しかし近年、潤滑グリースについては劣化傾向の異なる新しい種類のもが使用されたり、走行条件が変化したことにより、管理基準値の再構築が必要となってきた。そこで、新たに実際の鉄道車両で使用された潤滑グリースの劣化分析等を通じて、管理基準値を現在の状況に見合ったものへと改訂した。また、同時に常に同等の分析精度を得るための分析方法についても新たに規定した⁶⁾。

管理基準値は最新の技術動向やその時代の車両への適用状況をふまえ、今後も随時見直していく計画である。

2.4 ジオポリマー硬化体の開発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性状を持っている。セメントコンクリートと比較して、その製造で発生するCO₂が約80%少なく、地球環境への影響の観点からも好ましいため、その特徴を利用した用途が検討されている。

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。そのため、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。鉄道総研ではその製造方法の確立や特性の明確化を進めつつ、漏水が多い地下鉄道の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を示すことを確認した⁷⁾。一方、JIS3号の規格に適合したまくらぎを作成し、実路線での敷設試験も進行中であり、その実用化を進めている。

また、ジオポリマー硬化体には陽イオン交換能を持つものがある。鉄道総研では、セメントコンクリートの代替材料として注目されているジオポリマー硬化体のナトリウムイオンやカリウムイオンを水素イオンに置き換えたH⁺型ジオポリマー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する材料としての利用を検討している。この材料は、水素イオンを放出することとナトリウムイオンやカリウムイオンを吸着することでコンクリート内部のpHの上昇を防ぐことができるため、アルカリシリカ反応抑制材として有望であると考えている。これまでにその作製が可能であることを示し、イオン交換特性が明らかになってきた。加えてアルカリシリカ反応を抑制する効果を検討し、この材料を添加しないセメントペーストと比べて膨張を抑制できることを実証しつつある⁸⁾。

今後はこの材料の製造方法や効果的な使用方法を検討し、高性能で低価格のアルカリシリカ反応抑制材として確立することを目指す。

2.5 高温超電導材の特性向上とき電ケーブルへの適用

鉄道総研では、ある温度以下で電気抵抗がゼロとなる超電導材料について、材料の合成・評価から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。さらに、その適用先として、直流き電ケーブルの開発に取り組んでいる。

線材開発においては希土類(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ている。このうちイットリウム(Y)系酸化物の超電導線材は機械強度が高く、磁場中で良好な通電特性を持つなどのメリットを持っているが、通電時に損失が発生する制約がある。鉄道総研ではY系超電導線材の開発にも取り組んでいる。これまでにNd-YAGレーザの第3高調波(355nm)を用いた細線化加工により幅10mmの線材を20分割して損失を評価したところ、元の線材に比べ分割数に比例し、損失低減できることを明らかにした⁹⁾。

き電ケーブルの開発においては、き電ケーブルを営業路線へ敷設する際の様々な要素技術の開発も並行して行っている。

大きな要素技術としては冷却技術がある。超電導き電ケーブルは、超電導線材を冷却することで超電導の状態となるため、線材を冷却する技術が必要である。そのため、冷却方式や冷媒である液体窒素の循環方式等についても検討を進めており、冷却に関連する装置を一体化した冷却システムを開発し、超電導き電ケーブルシステムを構内試験線に設置して各種性能試験を実施、超電導送電による車両走行試験に成功した¹⁰⁾。

一方、ケーブルが数百mを超える長尺となると、ケーブル自体が温度で伸縮するため、このことを考慮して敷設し、冷却、運用する必要がある。鉄道総研ではX線透過装置を用いてケーブルの内部構造を評価する方法を導入し、短尺の超電導ケーブルにて冷却時の内部構造の変化を調べ、その結果を踏まえて冷却時の応力を緩和する手法を開発した。それらを活用して構内試験線に敷設した300m級超電導ケーブルは、液体窒素による冷却試験により、計画通りの変位や応力緩和の性能が得られることを確認した¹¹⁾。

高温超電導材の研究分野においては、線材の製作技術から、き電ケーブルの実路線への適用に必要なシステムを含めた各種技術開発に取り組む計画である。

2.6 導電性塗料の検討によるき裂検知手法への適用

新幹線の営業線に敷設されている高マンガン鋼製ノーブ可動クロッシングを維持管理する上で、疲労損傷の把

特集：材料技術

握が重要である。しかし、鋳造品であるため超音波探傷法による損傷検知が困難であり、目視や浸透探傷法による検査が一般的である。その実施には、クロッシングを持ち上げる必要があるなど大きな労力を要する。そこで、鉄道総研では導電性塗料を適用して折損を検知する手法を検討した。実レールから切り出した部材や試験片を用いた室内試験では、き裂の発生によって導電性塗膜が破断して生じる電気抵抗の変化を調べることにより、最小数 mm 程度のき裂を検知できることがわかった。塗膜に長期耐久性や耐衝撃性を付与することもでき、き裂検知法としての適用可能性を確認した¹²⁾。

本手法を実際のクロッシングで用いるには、き裂検知材料から得られる抵抗値とき裂の長さの関係を明らかにする必要である。また、得られた抵抗値を送受信する仕組みが必要であり、鉄道事業者に対しては、その仕組みまで含めたシステムとしての提案を行っている。今後、実路線での耐久性評価を進める計画である。

3. 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と、その導入先における課題や現象の解明、さらにはどのような適用方法が適しているか、新たな材料がもっとも性能を発揮できるような周辺機器の制御方法、そして劣化の徴候を適切に判断するための判定手法の開発等、様々な要素で成り立っている。材料自体の研究開発にとどまらない取り組みを通じて新たな材料技術を取り入れることにより、高性能・高機能な材料技術が活用されるものと考えている。安全を前提とした長寿命化、高機能化、環境負荷低減、エネルギー効率の向上など、種々の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お力添えをお願いする次第である。

文献

- 1) 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
- 2) 森久史, 上東直孝, 森本文子, 松井元英: 難燃性マグネシウム合金への摩擦攪拌接合の適用, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 8, pp. 17-22, 2017
- 3) 木川定之, 曾根康友, 鈴木淳一, 中村和夫, 工藤貢, 戸田昌利: 在来線電車歯車装置用長寿命ギヤ油の開発, 鉄道総研報告, Vol. 28, No. 2, pp. 35-40, 2014
- 4) 日比野澄子, 細谷哲也, 中村和夫: 主電動機グリースボケットの改良と寿命延伸効果, 鉄道総研報告, Vol. 22, No. 4, pp. 11-16, 2008
- 5) 日比野澄子, 中村和夫, 細谷哲也: 主電動機軸受のグリース入替給脂機構, 鉄道総研報告, Vol. 25, No. 10, pp. 17-22, 2011
- 6) 日比野澄子, 鈴木淳一, 木川定之, 曾根康友: 車両用潤滑グリースの新しい管理基準値の提案, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 8, pp. 5-10, 2017
- 7) 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
- 8) 佐藤隆恒, 上原元樹, 山崎淳司: 水素イオン型ジオポリマーによるアルカリシリカ反応の抑制, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 8, pp. 35-40, 2017
- 9) 鈴木賢次, 富田優: イットリウム系超電導線材の製作技術, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 8, pp. 47-52, 2017
- 10) 富田優: 超電導技術の産業応用研究の動向, RRR, Vol. 74, No. 8, pp. 4-7, 2017
- 11) 赤坂友幸, 福本祐介, 石原篤, 鈴木賢次, 小林祐介, 富田優: 超電導き電ケーブルの冷却時の内部変化を解明する, RRR, Vol. 74, No. 8, pp. 8-11, 2017
- 12) 坂本達朗, 栢田吉弘, 細田充, 吉野哲也: 導電性塗料を用いたノーズ可動クロッシングのき裂検知の基礎検討, 鉄道総研報告, Vol. 26, No. 12, pp. 23-28, 2012