

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

Research and development of materials for railway are carried out, supposing that safety is ensured, so as to meet such requirements of railway companies as longer durability and higher function of railway equipment components currently put to practical use, and labor saving deterioration inspection and maintenance of railway facilities currently used. To achieve the above-mentioned, analytical methods and measurement are regarded as key technologies. In addition, reduction of the use of minor metals and energy conservation is strongly demanded in terms of the protection of environment. This review describes some of results of recent research and development in the material technologies and introduces the new materials, and analytical methods and measurement.

キーワード：鉄道用材料，新材料，高性能化，高機能化

1. はじめに

鉄道用材料の研究開発は、安全性の向上を前提として、現在使用されている車両・電力・軌道等の部材の長寿命化、高機能化、使用に供されている構造物などの劣化判定、保守軽減等の鉄道事業者のニーズに応える形で進められている。またその進捗にあたっては、劣化を含む物理的・化学的な変化などの現象を解明するための分析・測定技術の向上が必須である。さらに近年は地球環境問題への対応として、希少金属（レアメタル）の使用削減や部材の環境影響の低減が求められているほか、使用エネルギーの低減が必要となっている。

本稿では、鉄道用材料技術に関する最近の主な研究開発の中から新材料の鉄道への導入を含む車両、施設に関する課題と、分析・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. 鉄道用材料に関する研究開発

2.1 難燃性マグネシウム合金の車両構体への適用

車両開発における省エネルギー技術の大きい課題として、車両構体の軽量化があげられる。新幹線をはじめ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¹⁾。しかし、さらなる軽量化を目指すためには、材質そのものの検討が必要である。

マグネシウムはアルミニウムよりも軽量であるため、マグネシウム合金にカルシウムを添加することで、課題である発火性を抑制した難燃性マグネシウム合金の車両構体への適用研究に取り組んでいる。これまでに金属組織の特徴、機械的性質、加工性などの基本的な評価を行い、製造方法や、強度に関する知見が得られた。また、車両構体製造へのステップとして中空押出形材を試作し、精度を確認したほか、接合にあたっては通常用いられるタングステン-不活性ガス（TIG）アーク溶接よりも摩擦攪拌接合（FSW）が適していることを見いだした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。

2.2 新幹線車両用すり板

パンタグラフすり板の開発目標を摩擦・摩耗の観点で整理すると、すり板自体の耐摩耗性を向上することに加え、相手材であるトロリ線への影響も考慮する必要がある。新幹線車両で使用されている鉄系焼結合金すり板に対し、素地材料として潤滑性を持つ硫化マンガンブレイロイ型快削鋼粉を用いた。素地に潤滑性を持たせることにより、硬質粒子を増量しても、すり板全体としての潤滑性が低下しない。そのため、耐摩耗性を向上させる目的で硬質粒子を増量することにより開発すり板を製作した。試験機を用いた通電下のすり板摩耗試験において、開発すり板は摩耗が大幅に減少することと、トロリ線側の摩耗を増大させないことを確認した。

開発すり板はすでに一部の新幹線車両において試験導入を経て実用化されている³⁾。

* 材料技術研究部 部長

特集：材料技術

2.3 駆動装置ギヤ油

歯車箱に充てんされ、歯車のかみ合い部と駆動装置軸受を潤滑するギヤ油に対しては、高速化により油温が上昇することを予測し、耐熱性の高い合成油の導入を図ってきた⁴⁾。近年は駆動装置の検査周期延伸に対する鉄道事業者のニーズに対応し、合成油の中でも耐酸化性能を向上させた材料を新たな基油として導入し、それによる価格上昇を抑えるため、従来使用されている鉱物油系基油との混合基油とすることで在来線電車用長寿命ギヤ油を開発した。実験室試験により、これまでのギヤ油では不可能と考えられた、120万km走行相当の耐酸化性能を持つことを確認した⁵⁾。このギヤ油により60万km走行ごとのギヤ油交換が必要なくなると、多くの場合に交換が行われる重要部検査時の歯車箱周辺の検修を省力化できる。

2.4 圧電ゴムの開発とセンサーへの適用

圧電材料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機能性材料である。センサやアクチュエータとして利用されており、車内騒音対策として効果が実証されている⁶⁾。

圧電ゴムは、セラミックを中心とした既往の圧電材料と比較して柔軟性、加工性、壊れにくさの点で有利であるが、他の圧電材料と比較すると圧電性能が1/10となってしまう点が課題である。そこで、圧電ゴムの製法を検討し、圧電粒子を配向させながら成型することで圧電性能を大きく向上させ、センサとしての必要性能を概ね満足できるものとした⁷⁾。

この方法で製作した圧電ゴムは、通常は粉末の形状である圧電粒子の含有量が少ない。そのため粉末の混合による硬化を防止でき、防振性能を持つセンサとしての利用が期待される。

2.5 レアメタルを削減した合金鋳鉄制輪子

鋳鉄制輪子は他の種類の制輪子と比較して水の存在下や低温において性能が低下しにくいことから降雪・低温の地域で使用されている。特に高速車両に対しては合金元素を混合した合金鋳鉄制輪子が使用されるが、合金元素の中にはレアメタルが含まれており、使用を避けることが望ましい。そこで、レアメタルのうちニッケル、モリブデンの混合量を削減し、代わってセラミックフォームを鑄ぐるんだ合金鋳鉄制輪子を製作した。

台上試験でブレーキ距離を測定した結果、製作した制輪子は高速でのブレーキ距離を短縮することがわかった⁸⁾。この制輪子については現在、実用化に向けた性能向上に取り組んでいる。

2.6 ジオポリマー硬化体を用いたまくらぎ

火力発電所等で発生する石炭灰とアルカリ溶液を混合して硬化させたジオポリマー（GP）硬化体は、セメントコンクリートと類似の外観を持つが、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（ASR）、酸劣化、火災等に対する耐性が高く、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の適用可能性がある。

鉄道総研ではジオポリマー硬化体の基本的な特性を明らかにしつつ、プレストレストコンクリート（PC）GPまくらぎを試作し、これが規格の要求事項を満たすことを示してきた。

これらの知見を踏まえて鋼繊維やポリマー繊維で強化した短まくらぎを試作して評価した結果、鋼繊維やポリマー繊維の混合による効果の傾向は従来のセメントコンクリートまくらぎと類似であること、鋼繊維や一部のポリマー繊維で補強した場合は、鉄筋の量を減らしても短まくらぎの要求性能を満たすことが示された。

この短まくらぎは、ジオポリマー硬化体の酸劣化に対する耐性を生かし、酸性の漏水等が見られる箇所での使用が可能である。また、セメントを用いないため、製造時に発生するCO₂排出量を約80%削減可能であり、環境親和性の高い材料として適用も期待できる⁹⁾。

2.7 軌道パッド

近年、沿線の都市化や列車の高速化にともない、振動低減を目的として低ばね定数の軌道パッドが採用される場合がある。しかし、素材である合成ゴム等の有機高分子系素材は、弾性率等の物性が温度に依存する特徴を持つため、特に低温時に期待された防振性能が発揮されない場合がある。そこで、広い温度域で低い弾性率を示す発泡性のゴムによる軌道パッドの製作を行った。

試作した軌道パッドに対して衝撃荷重応答試験を実施した結果、従来の軌道パッドと比較して温度に対する緩衝性能の変化は小さく、特に発泡性のエチレンプロピレンゴム（EPDM）を用いた場合、-20℃においても従来品である無発泡のスチレンブタジエンゴム（SBR）の場合と比べ、約45%緩衝性能が向上するなど、優れた緩衝性能を持つことを明らかにした¹⁰⁾。

2.8 レール継目部の振動低減

レールの継目部では、列車が通過する際に他の箇所よりも大きい騒音が発生する。対策として防音壁の設置などがあげられるが、大規模な施工をとまなうことから、簡易な設置により効果が持続するものが求められている。

鉄道総研では高い遮音性能を持つ金属製支持材の上面に高性能吸音材を配置した構造から成り、継目部の騒音

に加えて、床下機器に由来する騒音を低減する継目用防音材に、開発済みの一般区間用レール防音材、軌道用吸音材を組み合わせた振動低減策を提案した。

現車による効果検証試験により、レール近傍点における騒音についてM車通過時に約3dB、T車通過時に約3.5dB低減できることを確認した¹¹⁾。

2.9 超電導き電ケーブル

電気抵抗がゼロとなる超電導材料に関しては、これまで材料の合成・評価、バルク材や線材への加工まで含めて一括して取り組んできた。近年、超電導ケーブルを鉄道の送電線に適用することを想定した研究開発を進めている。

超電導ケーブルの導入により電力損失の低減、変電所の負荷平準化や集約化、回生効率の上昇、レール電位の抑制による電食の抑制などの効果が期待される。これまでに、基材となる超電導線材に対して過電流時や変動電流時の挙動を把握したほか、線材の長手方向の欠陥抽出等に資する均一性評価を非破壊で行う方法を検討し、100 m級の線材において1 mm未満の欠陥をピンポイントで検出できることを確認した¹²⁾。

現在、超電導ケーブルを構内試験線に敷設し、車両走行試験など各種評価試験を進めている。評価試験により得られた知見と、実路線を対象としたシミュレーションとを合わせ、導入効果などの検討を行い、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を図る。

3. 分析・測定技術に関する研究開発

3.1 非破壊によるコンクリート表層品質の評価法

鉄筋コンクリート構造物の耐久性は、内部の鉄筋を保護している表層部のかぶりコンクリートの品質に依存する。長期間にわたる耐久性を求められるコンクリートに対し、劣化因子である物質の透過性を指す「表層品質」という概念を導入し、実構造物で評価を行う手法の検討を進めている。

これまでに透気性や透水・吸水性を評価する方法が考案されているが、鉄道総研では測定装置の運搬が容易で測定作業性に優れ、測定値の解釈に高度な専門性を必要としない方法を提案している。すなわち、コンクリート表面に散水した後の変化がコンクリートの品質によって異なることに注目し、散水後のコンクリート表面の色変化を明度変化特性によって把握することとした。

測定方法と評価手法の検討により、測定に要する器具は少量の水を散布できるスプレーと、明度変化を測定する小型で電源等の必要がない装置となっている。1名での測定が可能であり、1箇所での測定に要する時間は約20分と測定が簡便で作業性に優れている。現場での測定に

より、構造物に施工されるコンクリートの品質を数多くの箇所測定し、一次的にスクリーニングする手法として、普及を図りたいと考えている¹³⁾。

3.2 軸受すべり接触面の摩擦特性の解明

駆動装置において、軸受は車軸や主電動機軸を回転させながら支持する重要部品であり、焼付きなどの故障が走行安全性に直結することから高い信頼性が求められる。軸受は潤滑油やグリースにより円滑な回転が保たれているが、何らかの理由により保持器ポケット面と転動体のすべり接触面における潤滑不良が生じると故障の原因となることが多い。そこで、このすべり接触面における摩擦特性の解明を目指した研究を進めている。

第一段階として、軸受の保持器ポケット面と転動体(ころ)転動面の摩擦状態、すなわち両者間のすべり速度と相互作用力を実験により直接的に把握し¹⁴⁾、その結果を踏まえ、第二段階として実際のころと、保持器を模擬した試験片を単体ですべり接触させながら回転試験を実施した。これまでに、回転速度が高い接触条件において、ころと保持器試験片との間に、現車で発生するものと類似の焼付きの発生を再現した¹⁵⁾。

今後はこれらの検証をさらに発展させ、同接触部の潤滑性能向上に取り組み、軸受の信頼性向上を図る。

3.3 車輪フランジ接触状態の評価法

車輪とレールの接触状態は、低速走行時の乗り上がり脱線やフランジ直立摩耗、レール側摩耗といった摩擦・摩耗現象を理解する上で重要な情報である。接触面積・形状については理論的に求められており、実験的にも試験片を用いた方法などで測定が行われてきた。鉄道総研ではこれらに対し、実車輪と実レールがどのように接触しているか、その観測に取り組んでいる。

金属の接触部で透過し、非接触部で反射する超音波の性質を利用した測定を試み、切削痕や異なる摩耗形状等の特徴を持つ車輪/レールの接触面形状を、感圧紙等の他物質を介在させることなく得られることを確認できた。また、測定結果である接触面積と理論値との差は、測定時に接触面に作用する法線力の違いにより説明できることがわかった¹⁶⁾。

得られた測定値は、理論計算の精度向上に資するものと考えられる。今後は、測定精度の向上や回転している車輪とレールにおける測定に向け、技術開発を継続する。

3.4 車輪/レール間介在物質の現場分析手法

車輪とレールの接触面に介在する物質は、粘着や摩擦・摩耗現象、軌道回路における電氣的現象に影響を及ぼすことが知られている。中でも鉄さびについては降雨や結露で供給される水分と空気中の酸素、海浜環境では

特集：材料技術

塩分の影響を受けて様々な種類が発生する。それぞれ摩擦係数等の特性が異なるため、海底トンネル内で発生するレール波状摩耗等の原因の一つと考えられている¹⁷⁾。鉄さびの種類と同定に用いる分析手法は、装置が大きいためこれまでは現地で採取した試料を実験室に持ち帰って分析するものであった。しかし近年、装置が小型化し、現地への携行が可能となりつつある。そこで、可搬型の分析装置を用いて人工的に鉄さびを発生させたレールの分析を試行した。これまでにラマン分光分析法、X線結晶構造解析法が有望であるとの結果を得ている^{18), 19)}。車輪・レール付着物の在姿での分析が可能となるため、実際に現場で発生している車輪・レール間の諸現象の解明に資するものと考えている。

4. おわりに

鉄道の各分野での材料技術へのニーズは、安全を前提とした長寿命化、高効率化、高機能化に加え、新材料の導入による環境負荷や有害物質の低減、エネルギー効率の向上など多岐にわたる。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。

文献

- 1) 鈴木康文：アルミニウム合金による鉄道車両の軽量化と今後の課題，軽金属，Vol.60, No.11, pp. 565-570, 2010
- 2) 森久史，上東直孝，辻村太郎，石塚弘道，花木悟，清水和紀，車両構体への難燃性マグネシウム合金の適用，鉄道総研報告，Vol.28, No.2, pp. 41-46, 2014
- 3) 宮平裕生，土屋広志，久保田喜雄：潤滑性能を向上させた新幹線用すり板の開発，鉄道総研報告，Vol.28, No.2, pp. 47-52, 2014
- 4) 中村和夫，鈴木政治，曾根康友：高速化，省メンテナンス化に寄与する合成ギヤ油，RRR, Vol. 55, No. 7, pp.18-21, 1998
- 5) 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
- 6) 朝比奈峰之，山本克也，山本大輔，間々田祥吾，佐藤大悟：圧電材料を用いた騒音低減システムの実車のへの適用，鉄道総研報告，Vol.26, No.10, pp. 23-28, 2012
- 7) Mamada, S., Yaguchi, N., Hansaka, M., Yamato, M., Yoshida, H., "Performance improvement of Piezoelectric-rubber by particle formation of linear aggregates," J. Applied Polymer Sci., Vol. 131, No. 5, in press.
- 8) 宮内瞳当：合金鋳鉄制輪子を複合構造にしてレアメタルを減らす，RRR, Vol. 69, No. 10. pp. 20-23, 2012
- 9) 上原元樹，佐藤隆恒：ジオポリマー法による繊維補強短まくらぎの試作，鉄道総研報告，Vol.28, No.2, pp. 11-16, 2014
- 10) 鈴木実，佐藤大悟，間々田祥吾，玉川新悟，弟子丸将：低ばね定数軌道パッドの発泡化による低温特性の向上，鉄道総研報告，Vol.28, No.2, pp. 17-22, 2014
- 11) 半坂征則，間々田祥吾，太田達哉，佐藤大悟：レール継目用防音材の性能向上，鉄道総研報告，Vol.28, No.2, pp. 23-28, 2014
- 12) 富田優，鈴木賢次，福本祐介，石原篤，赤坂知幸，小林祐介：鉄道用超電導ケーブルの適用性評価，鉄道総研報告，Vol.28, No.2, pp. 53-58, 2014
- 13) 西尾壮平，上田洋：コンクリート表層品質の簡易な非破壊評価手法の開発，鉄道総研報告，Vol.28, No.2, pp. 5-10, 2014
- 14) 梅原大樹，高橋研，岡村吉晃，永友貴史，寺田泰也：円筒ころ軸受におけるころと保持器の相互運動，トライボロジー会議 2013 春（東京）予稿集，D1
- 15) 高橋研，梅原大樹，永友貴史，寺田泰也：円筒ころ軸受のころと保持器のすべり摩擦試験，トライボロジー会議 2013 秋（福岡）予稿集，B18
- 16) 深貝晋也，伴巧，牧野一成，葛田理仁，陳樺：超音波を用いた車輪フランジ接触状態の評価，鉄道総研報告，Vol.28, No.2, pp. 29-34, 2014
- 17) Ishida, M., Aoki, F., Sone, Y., Ban, T., Shirouzu, K., Rail corrugations caused by low coefficient of friction in a submarine railway tunnel, Proceedings of WTC2005 World Tribology Congress III, WTC2005-64346, Washington, D.C., USA.
- 18) Sone, Y., Suzumura, J., Ban, T., Aoki, F., Ishida, M., "Possibility of in situ spectroscopic analysis for iron rust on the running band of rail," *Wear*, Vol.265, pp. 1396-1401, 2008.
- 19) 鈴木淳一，曾根康友，石崎温史，山下大輔，中島嘉之：車輪／レール間介在物質の現場分析法の開発，鉄道総研報告，Vol.26, No.12, pp. 28-33, 2012