

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

The innovation of railway technology could be achieved by the progress of material technology regarding development of material itself, manufacturing processes, higher reliability, etc. Therefore, material technology should be developed as key technology in the railway. To accomplish the above, analytical and mensurational methods are regarded as other basic technology. In addition, these days, the replacement of environmentally unacceptable materials with other ones and the energy conservation are strongly demanded in terms of the protection of the environment. This review describes some of the results of the recent research and development in the latest material technology, including the development and application of new materials, and analytical and mensurational methods.

キーワード：鉄道用材料，新材料，高性能化，高機能化，分析技術，測定技術

1. はじめに

鉄道技術の発展は材料技術の向上によってもたらされてきたとも言える。たとえば車両の速度向上は、軽量化に加え、粘着性能、ブレーキ性能、集電特性の向上、その他部材の性能向上などの要素技術で構成されるが、いずれも材料自体の開発、加工技術の進歩、信頼性の確保に多くの技術が注ぎ込まれてきたことも要因の一つである。したがって、鉄道用材料の研究開発は、これからの鉄道の発展を支える柱として取り組まれていく必要がある。一方、鉄道輸送は安全性の確保が前提であるため、現在既に使用されている部材の長寿命化、高機能化、使用に供されている構造物などの劣化判定、さらに保守軽減等の鉄道事業者のニーズに適切に応えることが必要である。進捗にあたっては、劣化という形で顕在化する物理的・化学的な変化などの現象を解明することが重要であり、そのための分析・測定技術の向上が不可欠である。近年はこれらに加え、地球環境問題への対応が大きな課題の一つとなっており、使用エネルギーの削減、環境受容性の低い物質の他物質への置き換えが求められている。

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、主に新材料の開発研究、新材料の鉄道への適用検討を含む車両、施設に関する課題と、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. 鉄道用材料に関する研究開発

鉄道総研における新材料に関連する最近の技術開発の取組事例を表1に示す。材料技術に関する課題の多くは新材料に関係するものであるが、その内容は、材料そのものの開発、鉄道用部材への適用研究となっている。ここではそのうちいくつかの例を紹介する。

2.1 高温超電導材の基本特性向上とき電ケーブル開発

電気抵抗がゼロとなる超電導材料については材料の合成・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いる。材料開発の面においてはイットリウム系バルク材に不純物として亜鉛元素を添加して捕捉磁場値を向上させたほか、バルク材を樹脂含浸により補強することにより機械強度の改善と水による劣化の防止を図るなど、性能・機能に関する成果を得た。また、生産性向上やコスト削減に関する技術開発にも取り組んでいる¹⁾。さらに、鉄道技術への適用の取組として、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実施している。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を進めている²⁾。

2.2 車両構体への適用に向けた難燃性マグネシウム合金の開発

車両構体の軽量化は車両技術における省エネルギー化技術の一つであり、これまで車両構体にアルミニウム合金の適用が進められてきた³⁾。一方、マグネシウムは実用金属の中でも比重が小さく軽量化の効果が見込まれる

* 材料技術研究部 部長

特集：材料技術

ため、鉄道総研では、課題である発火性をカルシウムの添加によって抑制した難燃性マグネシウム合金の適用検討を進めている。しかし、基礎的な特性や接合性など、明らかにしなければならない部分が多い。

これまでに製造方法や、強度に関する知見を得たほか、破壊じん性試験や破面観察を通じて破壊特性を評価した⁴⁾。引き続き特性の解明を進めるとともに、その知見に基づき設計に関する考え方について整理する予定である。

2.3 ナノカーボン分散グリースによる軸受電食防止

ナノカーボンはナノメートルサイズの炭素材料の総称であり、代表例として炭素原子がサッカーボール状に結合してできたフラーレン、六角形の網目に結合したシート状の分子であるグラフェン、グラフェンがナノメートルオーダーの直径の円筒に丸まった中空で管状の分子であるカーボンナノチューブや、球形のカーボンブラックなどがある。近年、優れた機械的特性や導電性を有する新材料として注目されている。

一方、主に主電動機軸受では、軸受に流れる電流に起因する表面損傷の一種である電食により、計画取替以前に交換が必要となり、保守経費上昇の要因の一つとなっている。その対策の考え方として軸受絶縁と軸受通電の両方があり、主電動機軸受に対しては、前者の考え方に基づく絶縁軸受の導入が進んでいる⁵⁾。

鉄道総研では電食の発生が軸受内の接触部における電流密度に関係することに着目し、導電性に優れたナノ

カーボンを添加剤として使用した導電性グリースによる電食防止を試みた。小型軸受を用いた通電回転試験により、ナノカーボンを分散させた導電性グリースでは電食痕の発生を防止できることがわかった⁶⁾。ナノカーボンの電食防止材料としての適用可能性が見いだされた。

2.4 C/C 複合材製パンタグラフすり板の摩耗特性評価

炭素繊維強化炭素基材に銅合金を浸透させて作る C/C 複合材製すり板は、軽量であり従来使用されているカーボン系すり板よりも破壊じん性が高く、金属系のすり板からの置き換えが容易であることから使用が拡大している。一方、基材の炭素繊維に起因する高価格の影響を小さくするため、摩耗特性の向上による交換周期延伸が求められている。試験機を用いた摩耗試験、現車試験等の結果から、摩耗量は離線アークが多く発生する条件においてアーク放電のエネルギー量に、離線アークの発生が少ない条件において通電電流密度にそれぞれ比例することを明らかにした⁷⁾。また、基材の熱・酸化特性と硬さ、含浸させる銅合金の濡れ性が摩耗特性に影響を及ぼすことがわかったため、今後はこの視点により性能向上を進める計画である。

2.5 圧電ゴムの開発と再利用技術

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合し、ゴムの柔軟性を持たせた材料である。単純に混合した場合に圧電性能が低下する問題点を、圧電材料を配向させ

表 1 新材料の開発および適用、分析・測定技術に関する最近の取組例

| 分類 | 対象分野 | 主な適用対象部材 | 適用する材料・技術 | 期待される主な効果 |
|---------|-----------|---------------|---------------------|------------------------------------|
| 新材料 | 電力 | ケーブル | 超電導材料 | 高温超電導特性 |
| | | 車両 | 車両構体 | 難燃性マグネシウム合金 |
| | 潤滑グリース | | ナノカーボン | 導電性、機械的特性 |
| | パンタグラフすり板 | | C/C 複合材 | 破壊じん性 |
| | 施設 | まくらぎ | ジオポリマーコンクリート | 製造時の環境負荷低減 アルカリシリカ反応・劣化・火災等への耐性 |
| | | コンクリート | イオン交換物質 | アルカリシリカ反応抑制 |
| | | のり面防護シート | 非ハロゲン部材 | 環境適合性 |
| | | ノーズ可動クロッシング | レール鋼の頭部熱処理方法 | 耐摩耗性 |
| | | レール等のき裂検知システム | 導電性表面材 | 導電性、表面追従性 |
| | | 軌道パッド | 発泡性ゴム | 低温時緩衝性能 |
| 車両・施設等 | センサ | 圧電ゴム | 機械エネルギー／電気エネルギー変換 | |
| 分析・測定技術 | 車両 | 軸受内接触部 | センサシート | 軸受フレッチング防止策 |
| | | 軸受 | 保持器作用力測定技術 | 軸受信頼性向上 |
| | 施設 | コンクリート構造物 | コンクリート内部水分量 | 水の挙動とコンクリート劣化との関連の解明 |
| | | 高炉セメントコンクリート | 表層部の圧縮強度、水酸化カルシウム濃度 | 中性化速度評価の適正化 |
| | レール表面 | X線フーリエ解析法 | 転がり疲労程度の定量化 | |

ながら成型することで向上させ、センサとしての必要性を満足できるものとした⁸⁾。さらに、ゴムとの熱分解温度の違いに着目し、使用後の圧電ゴムから圧電粒子を分離回収、再利用するリサイクル手法を提案した⁹⁾。

2.6 非ハロゲン素材による高分子系のり面防護シート

鉄道総研では、防草やのり面保護のために施工されるのり面防護シートを開発してきた。しかし、近年の環境保全の機運の中で、廃棄後の焼却時に有害物質が発生する可能性があるため、材料の見直しが必要になった。これに対応するため、非ハロゲン素材による高分子系のり面防護シートを開発した¹⁰⁾。このシートはハロゲン系素材を用いないことに加え、界面部分に接着剤を用いずに一体化することにより、長期の使用によるはく離を防ぐものとなっている。寸法安定性や耐延焼性などの基本性能を満たしつつ、従来品以上の耐久性を持つこと、試験盛り土での施工により初期の性能に問題がないことを確認済みであり、すでに実施の段階にある。

2.7 新幹線用ノーズ可動クロッシング

分岐器内のレール交差部に設置されるクロッシングのうち、ノーズレール（先端の頭部がとがった部分）が可動式のノーズ可動クロッシングは、摩耗に強い高マンガング鋼製である。しかし、超音波探傷検査が難しく、内部のき裂の進展を把握することができない。これに対し、超音波探傷検査が可能なレール鋼を用いる取組が行われた。大断面であるレールの中で頭部に耐摩耗性を有することが重要であり、必要な硬さを持たせる熱処理方法を開発することによって実現した¹¹⁾。

一方、高マンガング鋼製のもののき裂進展に関しては、導電性塗料による折損検知法の適用を試みた。実レール切出し部材や試験片を用いた室内試験の結果、き裂の発生により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で、最小で数 mm のき裂を検知できることを明らかにした。塗膜に長期耐久性や耐衝撃性を付与することもでき、検知法としての適用可能性を確認した¹²⁾。

2.8 新幹線バラスト軌道の寒冷地対応

新幹線のバラスト軌道を省力化するためにはバラストレス化が有効な手法の一つと考えられ、要素技術開発と実物大軌道模型を用いた繰り返し載荷試験等による検討が進められてきた。一方、実用化に向けては寒冷地に適用するための凍結融解抵抗性の向上が求められる。

道床を構成するプレパッドコンクリートの凍結融解抵抗性が低く、安定しない事象に対し、バラストとモルタルの界面に発生する空隙や端面に生じる骨材露出が原因と考え、バラストへのモルタルでん充時に振動を加えることにより空隙の発生を防止する手法を提案した。こ

れにより、振動を加えない場合と比べて空隙が 90% 程度減少し、凍結融解試験で得られる耐久性指数も高く安定することを確認した。さらに、まくらぎとプレパッドコンクリート道床間にエチレンプロピレンゴム製低弾性発泡ゴムと硬質ゴムのまくらぎパッドを導入することにより、軌道の弾性特性を満足することも確認された¹³⁾。

3. 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。いずれもこれまで定量的な評価ができず、間接的に、あるいは感覚的に議論されていた現象に対し、定量的な評価指標をもたらすものとなっている。ここではそのうちいくつかの例を紹介する。

3.1 車軸軸受内輪と後ぶたの接触面における圧力分布

車軸軸受の内輪と後ぶたの接触部で生じるフレッチング損傷は、微小な金属摩耗粉を発生させる。金属摩耗粉は軸受内へ侵入して軸受を摩耗させたり潤滑グリースを劣化させたりする。接触面に環状の部品を挿入する方策により接触防止と摩耗粉の軸受への侵入防止が図られているが、恒久対策が望まれている。内輪と後ぶたの接触状態を明らかにするため、フィルム式圧力分布計測システムを導入する試みがある。センサシートが検知した圧力の分布を調べることで軸受にかかるラジアル荷重との関係が明らかになりつつある。今後はこの知見を元に、フレッチング防止策を検討する¹⁴⁾。

3.2 コンクリートと補修材との界面およびコンクリート表層における水分移動

コンクリートにおける劣化の発生には水の存在が関与していることが多いため、コンクリート中の水の挙動を解明することは、コンクリート構造物のより適切な維持管理には不可欠である¹⁵⁾。鉄道総研ではコンクリート中の水分量のほか、塩化物イオン濃度などの測定技術により、コンクリートの劣化の解明を進めている。その一環として、コンクリート表層や断面修復材を施工した際のコンクリート/修復材界面において、様々な配合および養生条件により作製したコンクリート・モルタル供試体の水分浸透状況を調べた結果、良質な養生によって水分浸透抵抗性を大きく高められること、断面修復材との界面においては修復材施工前の下地処理方法によって水分浸透抵抗性が大きく異なることなどを明らかにした。引き続き水の動きを調べることにより、優れた耐久性を有するコンクリート構造物の建設と適切なコンクリート構造物の維持管理に役立てていく計画である¹⁶⁾。

3.3 高炉セメントコンクリートの中性化速度評価

鉄鋼製造工程で副産物として発生する高炉スラグ微粉末は、環境負荷軽減の観点からセメント用の混和材とし

特集：材料技術

での使用が拡大している。しかし、構造物における中性化の挙動が、現行の促進中性化試験による評価と一致しない例が報告されている。そこで、高炉スラグ微粉末を含む種々の配合のコンクリートやモルタルを作製し、実環境を考慮した養生条件や二酸化炭素濃度、水分供給などを変化させた試験条件で促進中性化試験を行い、コンクリートの性状と中性化速度の相関を調べた。その結果、実環境において高炉スラグへの置換が中性化に与える影響は、促進試験条件下と比べて小さいこと、普通セメントの場合と大きな差がないことを明らかにした¹⁷⁾。

3.4 X線フーリエ解析法によるレール転がり疲労層評価
車輪の転動によってレールに発生する転がり疲労層はシェリング等種々のレール損傷を引き起こすほか、レール折損の誘因となる場合もある。転がり疲労の防止、転がり疲労層の効果的な除去には転がり疲労層の生成過程を把握することが重要である。実験的な評価手法としては、金属組織観察、硬さ測定、X線結晶解析などがあるが、これまでは塑性変形状態を定量的に評価することが困難であった。そこで、X線結晶解析の際に得られる情報をより詳細に活用するX線フーリエ解析の適用を検討した。実使用されたレールや室内実験後の試験片に対して、得られた指標の分布を調べた結果、転がり疲労層表面近傍での急激な金属組織変化を定量的に評価できるだけでなく、表面から内部に向かって大きく変化する傾向が明らかになった¹⁸⁾。今後は測定データを蓄積し、適正なレール削正や交換時期の策定に役立てる。

4. おわりに

鉄道総研における鉄道用材料の技術開発は、鉄道総研での材料開発と、日々進歩する先進的な材料技術の導入研究の両輪で成り立っている。いずれも不可欠であり、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、有害物質の置き換え、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ことが肝要である。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。

なお、本稿で紹介した研究の一部は（独）科学技術振興機構（JST）の「戦略的イノベーション創出推進プログラム（S-イノベ）」の支援を受けて実施された。

文 献

- 1) 富田優, 鈴木賢次, 福本祐介, 石原篤, 赤坂知幸, 小林祐介: 高温超電導材の基本特性向上を目指した製造技術と評価, 鉄道総研報告, Vol.29, No.4, pp.47-52, 2015
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 森久史, 上東直孝, 宮内瞳, 石塚弘道, 辻村太郎: 車両構体への適用に向けた難燃性マグネシウム合金の破壊特性の評価, 鉄道総研報告, Vol.29, No.4, pp.35-40, 2015
- 5) 岡竜太郎: 鉄道車両車軸軸受の高速化と長寿命化への対応, トライボロジスト, Vol.58, No.7 pp.479-484, 2014
- 6) 鈴木淳一, 上東直孝, 柿嶋秀史: ナノカーボンを分散させた導電性グリースによる転がり軸受の電食防止効果, 鉄道総研報告, Vol.29, No.4, pp.29-34, 2015
- 7) 久保田喜雄, 宮内瞳, 土屋広志, 宮平裕生, 古賀進一郎, 長谷川浩司: C/C 複合材製パンタグラフすり板の摩耗特性評価, 鉄道総研報告, Vol.29, No.4, pp.41-46, 2015
- 8) 間々田祥吾, 矢口直幸, 岡田至規, 半坂征則, 山登正文, 吉田博久: 粒子のバターンニング配向による圧電ゴムの圧電性能向上, 第26回エラストマー討論会講演要旨集, pp.9-10, 2014
- 9) 岡田至規, 間々田祥吾, 矢口直幸, 半坂征則: 圧電ゴム中の圧電材料を分離回収して再利用する方法の検討, 第26回エラストマー討論会講演要旨集, pp.21-22, 2014
- 10) 矢口直幸, 間々田祥吾, 鈴木実, 榊尾孝之, 三吉正英: 非ハロゲン素材による高分子系のり面防護シートの開発, 鉄道総研報告, Vol.29, No.4, pp.17-22, 2015
- 11) 及川祐也, 原田茂幸, 伊藤太初, 兼松義一: レール鋼を用いた新幹線用レール可動クロッシング, RRR, Vol.71, No.12, pp.16-19, 2014
- 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
- 13) 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 伊藤孝記, 長沼光, 及川祐也, 鈴木実, 鈴木浩明: 寒冷地に対応した既設新幹線バラストレール軌道の開発, 鉄道総研報告, Vol.28, No.6, pp.11-16, 2014
- 14) 岡村吉晃, 深貝晋也, 梅原大樹, 高橋研, 鈴木大輔: 車軸軸受の内輪と後ぶたの接触面における圧力分布, 第21回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2014), S2-6-6, 2014
- 15) 上田洋: 水の動きからみたコンクリート構造物のメンテナンス, RRR, Vol.68, No.4, pp.22-25, 2011
- 16) 上田洋, 鈴木浩明: コンクリート表層ならびにコンクリートと補修材との界面における水分移動, 鉄道総研報告, Vol.29, No.4, pp.5-10, 2015
- 17) 上原元樹, 鶴田孝司, 佐藤隆恒: 実環境を考慮した高炉セメントコンクリートの中性化速度評価, 鉄道総研報告, Vol.29, No.4, pp.11-16, 2015
- 18) 松井元英, 兼松義一, 神谷祐次, 松本直紀: X線フーリエ解析法を用いたレール転がり疲労層評価, 鉄道総研報告, Vol.28, No.6, pp.53-58, 2014