

鉄道用材料の研究開発に関する最近の動向

久保 俊一*

Recent Trend of Research and Development on Materials for Railway

Shunichi KUBO

Services offered by railway operators, as a prerequisite on assured safety, responding to diverse requirements satisfying railway users, and superior in economical factors, are indispensable for promoting competitions and collaboration with other transport modes. In addition to the above factors recently, dealing with global risks of resource shortage and supply insecurity is recognized. R&D items on railway materials have been focused not limited to conventional high-efficiency, high-performance and high economical performance, also on ecological performance, such as a low environmental load, new energy and energy saving. The introduction of new materials, such as eco-materials, intelligent materials, and nano-materials are essential for railway area to promote innovative changes in the railway field.

キーワード：鉄道用材料，環境負荷，資源リスク，新材料，高性能化

1. はじめに

鉄道の提供するサービスは、安全性の確保を前提として、利用者の多様なニーズに応えた魅力あるものであり、経済性にも優れていることが、他輸送機関との競争・協調を進める上で必要である。これらに加え、近年は地球環境問題や、資源に関するリスクへの対応も求められている。鉄道用材料に求められる性能、耐久性、経済性の向上や環境負荷の低減を進めるためには、従来から用いられている材料の改良開発のみならず、エコマテリアル、ナノマテリアル等の新たな概念に基づく材料や技術の導入と展開が求められる。本稿では、材料の研究開発を取巻く最近の状況を概観し、鉄道用材料の研究開発における近年の取組みと成果について紹介する。

2. 鉄道用材料の研究開発を取巻く状況

2.1 環境負荷低減

2007年「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」は、その第4次評価報告書で、気候システムの温暖化には疑う余地がなく、その原因が人間活動によるものであることを科学的にほぼ断定した。2009年は、京都議定書の目標達成約束東期間5年間の2年目であり、地球温暖化への取組みは待ったなしの状況にある。

他の輸送機関に比較して単位輸送量当たりの環境負荷が小さいと言われている鉄道は、鉄道輸送が担うべき領

域での役割を十分に果たさなければならない。そのためには、利用者にとって使いやすく、魅力ある輸送機関であることが求められる。また、更なる環境負荷低減に向けた取組みを行い、継続的な改善を達成することが必要である。鉄道用材料の研究開発においても、従来から求められてきた高性能化、耐久性・経済性の向上に加え環境負荷低減がこれまで以上に求められている。

また、材料の選択・開発にあたっては、個々の材料の性能向上だけでなく、選択・開発の結果による環境負荷の検討が必要であり、そのための評価手法の整備が欠かせない。

2.2 資源リスク

近年改めて、地殻中に含まれる資源の量に対する年間使用量の評価結果や、特定の希少元素資源が少数の国に偏在するリスク (資源リスク、元素リスク) が指摘され、それに対する国家的な対応として、元素戦略プロジェクト (文部科学省)、希少金属代替材料開発プロジェクト (経済産業省) が始動している¹⁾。

これまでは石油備蓄制度の他にレアメタル国家備蓄制度があった。後者は国と民間で鉄鋼製品の合金元素 (ニッケル (Ni)、クロム (Cr)、タングステン (W)、コバルト (Co)、モリブデン (Mo)、マンガン (Mn)、バナジウム (V)) の備蓄事業である。

元素戦略プロジェクトは、希少元素や有害物質を豊富で無害な元素に置き換える技術と代替材料の開発を目指し、目標とする機能を発現するメカニズムを解明し、資源リスクの少ない元素で同等機能を発現させ代替を進め

* 材料技術研究部 部長

特集：材料技術

ようとする基礎的・基盤的な研究プロジェクトである。一方、希少金属代替材料開発プロジェクトは、情報家電、ロボット、電池等の新たな産業分野の拡大により今後の需要増が見込まれる希少金属の安定供給確保に向けた代替技術・使用量低減技術の開発を目標とし、具体的には透明電極向けインジウム (In)、希土類磁石向けディスプレイ用 Dy)、超硬工具向けタングステンを対象としている。

鉄道用材料においても、主に金属材料で高性能化のためにレアメタルが添加される例が多くあり、資源リスクとは無縁ではない。上述のプロジェクト等の進展も見ながら適切な対応を検討しておく必要がある。

2.3 新たな材料の概念と技術の展開

材料科学分野では、1980年代以降の新素材・新材料開発の流れ、1990年代以降のインテリジェントマテリアル、エコマテリアルやナノマテリアルといった新しい材料概念や材料技術の展開が継続してきている。

インテリジェントマテリアルは、知能材料とも呼ばれ、自己診断性、自己調節性、自己修復性などの自律性を持つ材料で、保守のあり方を大きく変える可能性を持つ材料である。エコマテリアルは、リサイクル性、資源枯渇、有害性などの観点から環境負荷ができるだけ小さい材料に対する総称である。ナノマテリアルは、ナノ (10^{-9}m) レベルでの材料調整 (例えば複合化や結晶制御) を行うことで従来材にはない特性を実現した材料の総称である。

信頼性、耐久性、安定性が強く求められる鉄道用材料では、従来からの材料と系統が異なる新たな材料の導入は長期間にわたる確認が必要であり容易ではないが、高性能化、耐久性・経済性の向上、環境負荷低減等の課題を克服するためには、新たな材料や技術の適用を積極的に検討していく必要がある。

3. 最近の主な取組みと成果

最近3年間程度の、鉄道用材料に関する主な取組みを表1に示す。表1は、材料の適用分野ごと、材料開発の目標ごとに区分して示したもので、これらの取組みのうち、目標を達成するために新しい材料や技術の適用を図ったものについては右端に示している。以下では表に示した取組みを含め材料の種別ごとに主なものを紹介する。

3.1 環境影響評価

高性能化、耐久性・経済性の向上を目指して新しい材料を導入しようとするとき、これらの性能評価のみならず環境負荷の評価により、材料の製造、使用、保守、処分におけるライフサイクルで環境負荷が低減しているか把握することが重要である。新規材料導入による環境負

荷変化をライフサイクルアセスメント (LCA) により評価したところ、 CO_2 排出量による比較で、ジオポリマーコンクリート (後述) の製造では普通コンクリート製造の約21%に、カーボン系すり板の導入では、従来の銅系焼結合金すり板の場合の約75%であった^{2) 3)}。

3.2 鉄道におけるレアメタルの使用実態

レアメタルの資源リスクが鉄道に及ぼす影響を調査した。鉄道用材料では、レアメタルは、軽量化、効率向上、長寿命化への対応として合金への添加や触媒として使われている。主な使用先としては、車体構体や地上構造物のステンレス鋼、熱処理レール、ブレーキの摩擦材、焼結合金パンタグラフすり板、走り装置のリチウムグリーンなどである⁴⁾。

これら現用材料の開発では、資源価格の推移を見ながら使用量削減や代替材・技術の開発を進める必要がある。また、高温超電導材料や電池材料ではほとんどでレアメタルが使われている。将来の鉄道にとって重要なこれらの材料については、性能向上に重点を置きながら開発を進めるか、開発状況を見守り、資源状況を勘案して鉄道への導入時期を検討する等の取組みが必要である。

3.3 新たな材料・技術の導入

これまでに、材料に関するいくつかの国家プロジェクトにより、構造や機能・性能を主眼とした様々な新材料が開発されてきた。今後は省エネルギーや環境の視点、およびナノ材料研究を重点とした研究開発が進められていくと考えられる⁵⁾。一方、鉄道分野では、これまでに開発されてきた新材料を導入するための次のような研究開発が進捗している。

3.3.1 インテリジェントマテリアル

鋼橋のき裂の検出・評価を簡易なき裂検知システムで行うことを目指し、き裂発生検知用とき裂進展検知用のそれぞれに適した電気特性の塗料を開発し、実用に適した塗装系を提示し、実規模での検知特性を確認した⁶⁾。

3.3.2 エコマテリアル

新しいコンクリートへの取組みとして、ジオポリマーコンクリートを検討した。ジオポリマーコンクリートは、火力発電所などで発生する石炭灰を原料とする環境負荷の小さな材料である。普通セメントを使用しない軽量ジオポリマーコンクリートの配合と強度との関係を明らかにし、化学的耐久性が高いことを確認した。コンクリートまくらぎへの適用の検討を進めている⁷⁾。

3.3.3 ナノマテリアル

塩化ビニル代替の難燃性床材として、粘土鉱物のナノ (10^{-9}m サイズ) 粒子を樹脂に分散させたナノ材料の引張強さ、摩耗特性、難燃性、耐加熱老化性を調査し、いずれも床材の規格値を上回ることを確認した。またナノ材

料を積層した床材試験品を作製し、燃焼試験を行った⁸⁾。

カーボン系新材料であるカーボンナノチューブ(CNT)を分散させたメッキおよびグリースを作製し、そのトライボロジー特性や導電性を評価した。CNTを分散させたグリースは黒鉛を分散させた場合よりも高い導電性を示し、導電性グリースとして使用できる可能性があることがわかった。

3.3.4 高温超電導材料

超電導バルク体の開発では、これまでに大型化に取り組んできており、各種機器への応用のために、樹脂含浸による機械的・磁気的性能向上の検討を進めている⁹⁾。

超電導線材の開発では、セラミックスと金属の複合材であるイットリウム(Y)系線材の信頼性向上のために、セラミックス・金属間の層間剥離特性の評価法を検討した。また、直流電線への応用を想定したビスマス(Bi)系線材によるケーブルを試作した¹⁰⁾。

3.3.5 その他の新材料・技術

車輪フランジ部とレールのゲージコーナー部の接触による摩耗防止用に散布される潤滑剤は、粘着係数を下げ空転・滑走の原因となることがある。摩耗防止と粘着係数の低下抑制のための潤滑油として、トラクション油の適用を検討した。トラクション油は通常の油より摩擦係数が高く、トルク伝達性能が高く、自動車のハーフトロイダル型無段変速機などで実用化されている。トラクション油が介在した場合のトラクション特性(転がりの摩擦係数の特性)を車輪・レールを模擬した2試験輪の実験装置を用いて測定した結果、従来から使われている潤滑油よりも高いトラクション係数の油が見出された。また高速四球型摩耗試験機を用いて耐摩耗性を測定した結果、摩耗防止剤の添加により制御可能であることがわかった¹¹⁾。

在来線用すり板として、カーボン系新材料であるC/C複合材(炭素繊維強化炭素複合材)の実用化が進められている¹²⁾。C/C複合材は、従来からのカーボン系すり板

材料より高強度ですり板自体へのボルト締結が可能なため、舟体の軽量化が図れる。C/C複合材すり板・銅合金ボルト締結の信頼性を高めるために、ボルトの疲労特性・摩耗特性を調査し、最適な材質を検討した¹³⁾。

車輪フランジ部などの摩耗低減法の一つとして複合化ショットピーニング法による表面改質被膜の適用を検討し、相手材も含め摩耗低減の効果が大きいことを確認し、さらに性能向上を目指し、改質被膜の厚膜化や改質被膜付与に適した下地の表面処理を検討した^{14, 15)}。

3.4 従来材の改良による材料開発

地下構造物内部への漏水防止工法に適用され、局所的な損傷が生じても漏水の防止が可能なEVA樹脂(エチレン-酢酸ビニル重合体)が主体のコンクリート接着性防水シートが開発されている¹⁶⁾。シートのコンクリートへの接着性向上のため接着層にシリカを含む特殊EVA樹脂を用いたところ、接着強度が大幅に向上した¹⁷⁾。

レール/車輪間で発生する転動音対策としてレール防音材の開発と実用化を進めた。レール防音材は内層の制振・吸音機能を持つエチレンプロピレンゴム発泡体と外層の制振鋼板で構成され、レールに直接取り付けられるもので、現地試験で騒音低減効果が確認されている。内外層の材料構成を検討して低コスト化を図るとともに、継目部用の開発を進めた^{18, 19)}。

主電動機の検査周期延伸のために軸受グリースの使用寿命延伸が求められている。封入したグリースが有効に使用できるグリースポケット形状の検討、改良形状の提案と効果の確認を行った²⁰⁾。

新幹線用パンタグラフすり板として、従来とは異なる固体潤滑成分を用いた鉄系焼結合金すり板を開発し²¹⁾、実車・実設備ですり板・トロリ線双方の摩耗推移を調査し、すり板の摩耗が低減したこと、およびトロリ線の摩耗は従来材とほぼ同等であることを確認した。

表1 鉄道用材料に関する最近の取組み

目標/適用分野	経済性向上・長寿命化	高機能化・高性能化	新しい材料・技術の開発・適用
車両	・微粒子ショットピーニング法による車軸表面改質 ・グリースポケット形状 ¹⁹⁾	・材料噴射による摩擦制御 (FRIMOS ²⁸⁾) ・鋳鉄複合化制輪子 ・ダブル形緩衝器 ・けん引リンク緩衝ゴム ・金属多孔質材を用いたパンタグラフの空力音低減	・ナノ粒子分散床材 ⁸⁾ ・車両用超電導主変圧器 ・ショットピーニング法による車輪表面改質 ^{14, 15)} ・C/C複合材製パンタグラフすり板 ¹²⁾ ・セラミックディスクブレーキ
施設(構造物)	・鉄筋腐食によるコンクリートの劣化予測 ²²⁾ ・トンネル覆工コンクリートの劣化原因判定 ²³⁾ ・新しいアルカリシリカ反応補修材 ・高耐候性鋼材の鋼橋への適用 ²⁴⁾	・ポリマー地盤改良材 ・接着性防水シート ^{16, 17)} ・制振・防錆機能を持つ鋼橋被覆モルタル	・ジオポリマーコンクリート ⁷⁾ ・き裂検知用導電性表面材 ⁶⁾
施設(軌道)	・ベントナイトライナーを用いた省力化軌道 ²⁵⁾ ・ペイナイトレール ²⁶⁾	・短繊維補強コンクリート ²⁹⁾ ・レール防音材 ^{18, 19)}	・トラクション油 ¹¹⁾
電気	・電車線金具(イヤー) ²⁷⁾		・低熱膨張線材 ・高温超電導線材 ¹⁰⁾
その他			・高温超電導バルク体 ⁹⁾

特集：材料技術

3.5 評価手法・現象解明

鉄筋腐食によるコンクリートの劣化予測では、鉄筋の腐食速度を知る必要がある。これまでの塩化物イオン濃度、含水率、中性化深さの腐食速度への影響に加え、気温の影響も検討した²²⁾。

建設後の経過年数の長いトンネルには、覆工コンクリート表面が脆弱化しているものがあり、これらの一因としてセメントの代用材として混和した珪藻土の中性化に起因するものがあることを示した²³⁾。代用材として火山灰が使用されていたことも知られており、これら代用材の混和を判別する方法について検討を進めている。

4. おわりに

鉄道各分野での材料へのニーズは、従来からの高効率・高性能、経済性の向上に加え、低環境負荷、有害物質代替、新エネルギー・省エネルギー関連など環境対応の重要性が増してきている。材料科学分野では、ナノマテリアル、ナノテクノロジーの展開が見られ、それらを適用した材料の制御、高性能化の試みが進みつつある。ニーズとシーズの動向を見極めながら、これからの鉄道への材料面からの貢献を継続的に行っていききたい。

文 献

- 1) 環境省編：平成20年版環境・循環型社会白書（PDF版），p.353，2008 など
- 2) 相原・森本・辻村：産業連関表による各種運輸機関の環境負荷評価，鉄道総研報告，Vol.21，No.2，pp.45-50，2007
- 3) 相原・辻村・上原・土屋：鉄道用材料のLCAによる環境評価，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.5-10，2009
- 4) 鉄道材料レアメタル使用実態調査グループ：鉄道におけるレアメタルの使用状況，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.53-58，2009
- 5) 森・辻村：新材料の鉄道への適用に関する動向調査，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.59-64，2009
- 6) 田中・坂本・江成・鈴木：鋼構造物のき裂検知に用いる導電性表面材の開発，鉄道総研報告，Vol.21，No.2，pp.17-20，2007
- 7) 上原：ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発，鉄道総研報告，Vol.22，No.4，pp.41-46，2008
- 8) 伊藤・間々田・上原・鶴田・新井・立原・武藤：ナノ材料の鉄道用床材への適用に関する基礎的検討，第15回鉄道技術・政策連合シンポジウム（J-RAIL2008），No.007-S7，pp.75-76，2008
- 9) 富田：高温超電導体の樹脂含浸・金属含浸による高磁場特性の向上，鉄道総研報告，Vol.22，No.4，pp.47-52，2008
- 10) 富田・福本・鈴木：鉄道応用に向けた高温超電導線材の特性向上，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.47-52，2009
- 11) 曾根・鈴木：トラクション油を適用した車輪／レール潤滑油の基礎検討，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.29-34，2009
- 12) 土屋・久保：C/C複合材のパンタグラフすり板への適用，RRR，Vol.66，No.4，pp.10-13，2009
- 13) 久保田・森・土屋：C/C複合材製すり板締結ボルトの疲労強度および摩耗特性評価，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.41-46，2009
- 14) 松井・柿嶋・森・佐藤・岩渕：複合表面改質法による車輪鋼の摩耗低減効果，鉄道総研報告，Vol.21，No.2，pp.39-44，2007
- 15) 松井・中村・柿嶋・伴・深貝・久保：表面改質法による車輪の摩耗低減に向けた基礎検討，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.35-40，2009
- 16) 矢口・館山・伊勢：コンクリート接着性防水シートの開発，鉄道総研報告，Vol.17，No.10，pp.11-16，2003
- 17) 矢口・間々田・館山・楠戸：コンクリート接着性防水シートの改良，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.17-22，2009
- 18) 間々田・半坂・佐藤潔・鈴木：遮音機能を有するレール防音材の開発，鉄道総研報告，Vol.21，No.2，pp.27-30，2007
- 19) 間々田・半坂・佐藤大悟・鈴木・佐藤潔：メンテナンス性を考慮したレール継目用防音材の開発，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.23-28，2009
- 20) 日比野・細谷・中村：主電動機グリースポ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
- 21) 久保・土屋・久保田：新幹線用鉄系焼結合金すり板の性能向上，鉄道総研報告，Vol.20，No.9，pp.47-52，2006
- 22) 飯島・工藤・玉井：コンクリート中の鉄筋の腐食速度に及ぼす気温の影響，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.11-16，2009
- 23) 上田・西尾・松田：珪藻土が混和されたトンネル覆工コンクリートの劣化特性，鉄道総研報告，Vol.21，No.2，pp.11-16，2007
- 24) 相原・杉本：新しい高耐候性鋼材の鉄道橋への適用，RRR，Vol.62，No.10，pp.30-33，2005
- 25) 村本：ベントナイトライナーによる路盤変状防止対策（BLITS工法），RRR，Vol.66，No.5，pp.36-37，2009
- 26) 佐藤・辰巳・上田・三田尾：ペイナイトレールの長期耐久試験による耐シェリング性の評価，鉄道総研報告，Vol.22，No.4，pp.29-34，2008
- 27) 片山・白木：イヤー用新材料の塩害耐食性評価，鉄道総研報告，Vol.21，No.10，pp.23-28，2007
- 28) 緒方・伴・深貝・石田・名村：車輪／レール摩擦緩和システムの開発，鉄道総研報告，Vol.21，No.6，pp.51-56，2007
- 29) 高橋・関根・堀池・松岡・保城：短繊維補強コンクリートの軌道スラブへの適用に関する検討，鉄道総研報告，Vol.21，No.6，pp.23-28，2007