

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

The major contribution of the materials technology can be expected in the following fields : the improvement in safety and reliability of the railway vehicles and tracks, the evaluation and the control methods for railway environments such as noise and vibration, the innovation of maintenance technologies for structures, the reduction of railway vehicle energy consumption. This review introduces some of the recent results of research and development in these fields.

キーワード：鉄道用材料，環境負荷，新材料，高性能化

1. はじめに

現在の鉄道の研究開発では、安全性の向上を前提に、利用者の多様なニーズに応え、他輸送機関との競争・協調を進める上で必要な高速化・高機能化や経済性の向上が求められている。鉄道総研では、2010年から5年間の「基本計画（RESEARCH2010）」や、20年後を見通した「リサーチマップ」を策定して取り組むべき研究開発項目を示し活動を進めている¹⁾。本稿では、鉄道用材料に関する最近の主な研究開発の概要を、リサーチマップで整理された研究開発項目に沿って紹介する。

2. RTRI リサーチマップ

2.1 RTRI リサーチマップにおける研究開発項目

リサーチマップでは、研究開発項目として、(A) 自然災害に強いシステム、(B) 事故・故障に強いシステム、(C) マンマシンシステムの高度化、(D) 列車制御の知能化、(E) 沿線環境負荷軽減、(F) 省エネルギー、(G) 保守・建設の効率化、(H) 高速化（速達化）、(I) 高度情報処理技術による輸送効率・サービスの向上、(J) シミュレーション技術の高度化、が挙げられている（図1）。

2.2 材料技術の貢献が期待される研究開発項目

鉄道用材料の研究開発の貢献が期待されるのは、(B) 事故・故障に強いシステム、(E) 沿線環境負荷軽減、(F) 省エネルギー、(G) 保守・建設の効率化、(H) 高速化（速達化）の各項目である。以下、これら材料技術に関連した項目の研究開発の方向性や目標、課題および最近の成果について紹介する。

* 材料技術研究部 部長

3. 材料技術に関連する項目と最近の動向

3.1 事故・故障に強いシステム

鉄道システムを構成する構造物・軌道・車両・電車線等の故障を減らすとともに、脱線しにくく衝突に対する安全性の高い車両・軌道を開発し、事故・故障に強い鉄道システムを構築するのが目的である。

材料の観点からは、車輪、レール、ブレーキ、軸受、パンタグラフすり板、トロリ線などの転がり・すべり摩擦部分の部材の損傷メカニズムの解明、各材料の高強度化や新しい材料の導入、寿命予測技術の開発、損傷診断・損傷防止技術の向上などにより、鉄道用材料の信頼性向上を目指すものである。

(1) 転がり・すべり摩擦部材の損傷メカニズムの解明

車輪踏面熱き裂：車輪踏面熱き裂は、踏面制輪子を使う車両で車輪踏面に発生するき裂で、き裂除去に頻繁な車輪研削が必要なため保守上の課題であるが、発生原因や条件は未解明だった。

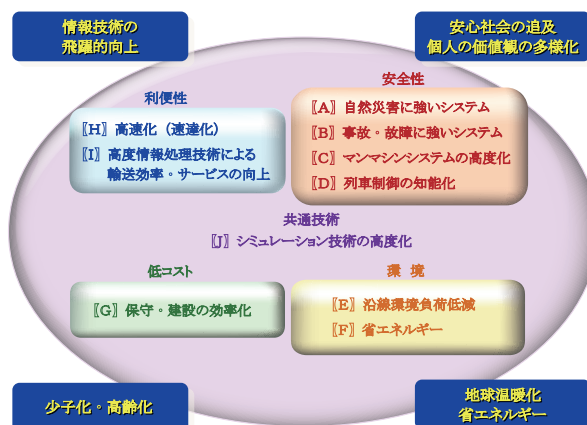


図1 リサーチマップにおける研究開発項目

特集：材料技術

実物車輪を使用したベンチ試験、材料調査による実働温度およびき裂進展特性の分析、数値解析による踏面ブレーキ時の車輪内部の温度および応力状態の算定を組み合わせて実施した結果、①踏面熱き裂の発生主要因は制輪子による熱負荷と車輪／レール間接線力であり、②車両の加減速度と車輪の最高温度から、踏面熱き裂の発生可能性を推定することが可能となった²⁾。

転がり軸受の転動体荷重分布： 使用中の軸受に実際にかかる荷重を知ることができれば、これを軸受や軸箱などの設計に反映することにより性能向上を図ることができると考えられる。

円筒ころ軸受の転動体にひずみ測定用の光ファイバセンサを埋め込み、転動体に荷重が加わるときに発生するひずみを測定することにより、軸受ハウジングへの荷重付与位置が荷重分布に及ぼす影響を調べた結果、ハウジング上面の2点に荷重を付与する条件では、2点が離れているほうが軸受寿命が長くなる効果があることがわかった³⁾。

集電系材料の摩耗： 集電系での実用材料について、摩耗機構の解明の一環として、アーク放電が集電系材料の消耗に及ぼす影響を明らかにするために、アーク放電が発生した際の通過電流量と材料の質量変化量、材料の表面状態を、硬銅トロリ線とカーボン系すり板、鉄系焼結合金すり板を用いた放電実験で調べた。その結果、トロリ線側は質量増、すり板側は質量減となり、双方の質量変化量は、すり板側が焼結合金の場合のほうがカーボン系の場合よりも大きいことが明らかとなった⁴⁾。

(2) 各材料の高強度化や新しい材料の導入

耐摩耗トングレール： 分岐線側の通過車両が多いポイント部ではトングレールの摩耗が著しく、新たなトングレールが求められてきたが、走行安全上高い信頼性が必要であり、レールの材質・断面形状の変更は積極的には行われてこなかった。

在来線でのトングレールの摩耗測定と摩耗の発生状況の実態把握を行い、70S レールを対象に材質の変更と、新たな熱処理方法で先端部を従来より硬くし形状を改良した。材質を急曲線などに使われている現用熱処理レール素材に変更し、炉内温度、送り速度、冷却速度などの熱処理条件を調整して頭部表層の硬さを増し、靱性に配慮したトングレールを開発した。営業線に試験敷設し調査した結果、現行品の7割程度の摩耗量に抑えられていた⁵⁾。50kgN および 80S レール製耐摩耗トングレールも開発され、50kgN 製のものは試験敷設が進められている⁶⁾。

鋳鉄複合制輪子： 鋳鉄制輪子の耐摩耗性や摩擦係数の向上では、リン、クロム、モリブデン等の合金元素の添加に依ってきたが、硬質のセラミックス粒子を介在させることでも摩擦摩耗特性の向上が図れ、炭化ケイ素発泡体を鑄ぐるんだ鋳鉄複合制輪子が開発されている。

セラミックスとしてより汎用性の高いアルミナを用い

たアルミナ発泡体（フォーム）を鑄ぐるんだ鋳鉄制輪子を開発し定置試験で性能を確認した結果、ブレーキ距離短縮や制輪子摩耗量低減で炭化ケイ素と同等以上の効果があることがわかった⁷⁾。

在来線電車で長寿命ギヤ油： 歯車装置の歯車と軸受を潤滑するギヤ油は最大 60 万 km 走行で交換されるが、油面計や磁気栓により内部の使用状況が把握可能であり、現行の2倍の耐久性があれば、交換回数を減らして歯車装置の保守軽減を進められる。

ギヤ油の基油として酸化安定性、低温での流動性に優れる化学合成油で高機能のポリアルファオレフィン（PAO）を用い、新たなギヤ油を試作した。PAO は高価格であるため、試作では鉱油系基油の一部を PAO に置き換えることでコスト減を狙い、添加剤により酸化安定性を強化した。試作油について各種試験で性能を調べた結果、120 万 km 以上の走行に相当する条件でも酸化劣化状況は現行油よりも良好であることを確認した⁸⁾。

トロリ線や放熱部材への繊維材料の応用： 有機系のアラミド繊維、超高分子量ポリエチレン繊維、PBO（ポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール）繊維、ポリアリレート繊維や、無機系の炭素繊維などはスーパー繊維とも呼ばれ、高強度、高弾性率に加え、耐熱性、難燃性、低熱膨張などの機能を合わせ持つものがある。これらの繊維を架線材料に適用すれば耐熱性や温度による伸縮を抑える等の機能を持つトロリ線やちょう架線が実現できる可能性がある。また、熱伝導率が高く、耐熱性のある繊維を用いて、半導体素子と冷却フィン間などの熱伝達向上のための放熱シートへの適用も考えられる。

PBO 繊維を芯材として銅と複合し、GT110 トロリ線相当の直径で繊維の断面積比率を5～15%に抑えた線材を試作し、引張強度を調べた結果、繊維が10%程度でもCSトロリ線やPHCトロリ線と同等以上の強度であることがわかった。また、炭素繊維を芯材として銅と複合した線材を試作し、耐熱性、耐アーク特性を調べた結果、高温でも断線しにくいことがわかった⁹⁾。

高熱伝導率のPBO繊維クロスによる放熱シートを試作し、熱伝導特性等を評価した結果、低誘電率で、絶縁性を持ちながら、面方向には10W/(m・K)程度の高熱伝導率であること、また厚さ方向の熱伝導率は起毛処理により改善できることがわかった¹⁰⁾。

(3) 寿命予測技術の開発、損傷診断・防止技術の向上

一本リンクゴムの損傷判定： 台車と車体をつなぐ一本リンクは台車の加減速時の力を車体に伝達する部品で、取付け部にゴム部品（一本リンクゴム）が使われている。一本リンクゴムは台車・車体間の振動伝達のために適正な弾性を保持する必要がある。ゴム部品は長期間の使用で劣化するが、ゴムの損傷程度を外観調査から評価することは困難である。

ゴム部品の物性指標であるばね定数を推定するために、簡易な衝撃加振試験の適用を検討し、新品や現車からの回収品に衝撃加振試験と材料試験機による試験を行って結果を比較した。その結果、一本リンクゴムでの衝撃加振試験の結果を用いてばね定数を推定できることがわかり、無負荷状態では判断が困難な大きな損傷のある一本リンクゴムの検出できる可能性が見出せた¹¹⁾。

3.2 沿線環境負荷軽減

鉄道からの発生音、低周波音、地盤振動、電磁環境に対する影響評価・対策技術の開発により、沿線環境負荷低減を図るのが目的である。新たな材料の適用やその組合せを用いた防音材・吸音材による低減対策技術の向上・革新により、脱アノイアンス化が期待できる。

3.3 省エネルギー

車両やき電系のエネルギー消費量低減技術やエネルギー貯蔵技術の開発により、鉄道システムのさらなる省エネルギー化の実現を目指すのが目的である。材料の観点からは、超電導線材の開発とき電ケーブルの超電導化によるき電ロスの低減や、軽量金属や高分子材料の適用による車両重量の軽量化などが課題となる。

超電導き電ケーブル： 超電導線材を巻線してケーブルを製作するにあたり、超電導線材の曲げ特性を評価した。円筒治具に超電導線材をらせん状に巻き、円筒径と巻線ピッチを変えて通電特性を調べた結果、円筒径16mmではピッチ長200mm以上で臨界電流値の低下が小さかった。これらの値を参考にして超電導線材を巻線して超電導ケーブルを製作し、大電流の通電試験を行った結果、1.5kAを超えて通電可能なことを確認した。さらに実際のき電線にも適用可能な10kAを超えて通電できるケーブルの開発を進めている¹²⁾。

軽量金属： 金属組織をナノメートル(10⁹ m)レベルで制御し高強度化したナノアルミ合金と難燃性を高めたマグネシウム合金について、車体材料への適用の検討を進めている。

高強度のナノアルミ合金では、薄肉板材への摩擦撻拌接合(FSW)を適用した接合例はほとんどないため、7000系の高強度アルミ合金のFSWで、欠陥発生が無く、接合部の硬さが向上する方法を検討した。加工熱処理によって析出物をナノ組織化した後に再結晶処理を行い、熱伝導の小さいセラミックツールを用いてFSWを適用することで接合性が向上することを確認した¹³⁾。

難燃性マグネシウム合金を鉄道車両用部材に適用する場合、剛性低下が問題になるため、ダブルスキン材のような形状に加工して剛性を確保する必要がある。マグネシウム合金の高温変形試験を行い、板材の押出性を調べ、中空材を試作して調査した結果、押出加工では、623K以上の高温下での低速度の加工が望ましいことがわかった¹⁴⁾。

3.4 保守・建設の効率化

インフラの診断・修復技術の高度化やリニューアル技術の開発等により、効率的なインフラ保守管理や低コストで高性能な新形式インフラを開発するのが目的である。

材料の自己診断・修復技術の開発や、新たな材料の導入による保守量の大幅な低減と取替周期の大幅な延伸、保守の効率化と信頼度向上の両立、車輪・レール摩耗形状予測技術の確立と摩耗により形状変化しにくい方策などで材料技術の貢献が期待される。

(1) 自己診断・修復技術の開発

導電性塗料を用いたき裂検知： 従来から進める導電性塗料を用いた鋼橋のき裂検知手法では、実構造物を模擬した試験体での評価試験や屋外環境での影響評価、気象変動による抵抗値変化の補償法の考案、鋼橋用の塗装仕様に組み込む場合の施工工程の提案などを行ってきた。

これらに基づいて、実鋼橋に適用できるき裂検知システムを開発した。システムは、き裂検知用導電性塗膜を配置したき裂検知部位、塗膜の電気特性を測定する測定機器、これらの部位を接続する配線部で構成される。システムに要求される性能項目を整理し、開発したシステムに対し室内促進劣化試験、現場施工試験を行った結果、これらの要求項目を満たすことが確認された¹⁵⁾。

一方、新幹線に敷設されているノーズ可動クロッシングでは耐衝撃・耐摩耗性に優れる高マンガン鋼が用いられているが、鋳造品で超音波探傷法での損傷検知が難しく、主に目視で検査が行われるため、発生する疲労損傷を効率的に検知できる手法が求められている。導電性塗料を用いたき裂検知手法の、ノーズ可動クロッシングへの適用可能性を室内試験等で評価した結果、導電性塗料を数～数十mmの帯幅で塗装することで、き裂検知できる可能性があることがわかった¹⁶⁾。

リチウムイオン含有ゼオライト： アルカリシリカ反応(ASR)が生じたコンクリートの補修工法の一つとして、カルシウム(Ca)-A型ゼオライトを用いた工法が実用化されているが、ASRの進行状況により10年以内に再変状が生じる事例が認められ、より抑制効果の大きな材料が求められている。

ASR抑制効果が大きいことが知られているリチウムイオンとゼオライトを複合化した試料を作製してASR抑制効果を検討した結果、作製したリチウム含有ゼオライトは既存のASR抑制用材料よりも抑制効果が大きく、コンクリート作製時初期から投入する混和材や、ひび割れ注入材としてもASR抑制効果が大きいことがわかった。既存のASR抑制用ひび割れ注入材の主要成分のCa-A型ゼオライトを作製した試料のうちの一つと置き換えたひび割れ注入材を試作し、充填性能を調べたところ、0.04mm程度の微細なひび割れまで注入でき、ひび割れ注入材として実用できることがわかった¹⁷⁾。

特集：材料技術

(2) 新たな材料の導入による保守量低減、取替周期延伸
 ジオポリマーコンクリート： ジオポリマーコンクリートは、石炭灰と高濃度アルカリ溶液を反応させて得られるジオポリマー硬化体を用いたコンクリートで、酸劣化抵抗性に優れ、これによるPCまくらぎはJISの要求性能を満たすことがわかっている。短まくらぎを鋼繊維を添加したジオポリマー硬化体から製作した結果、短まくらぎの要求性能を満たすことを確認した¹⁸⁾。一方、ジオポリマー硬化体はイオン交換能力を持つ¹⁹⁾ことから、ジオポリマー硬化体からゼオライトのようなASR抑制効果を示す新たな材料の生成も期待されている。

(3) 車輪・レール摩耗形状予測技術、摩耗変化低減

車輪／レール間の摩擦緩和システム： 急曲線で生じる著大横圧の抑制手法として、車輪踏面と内軌頭頂面間の潤滑があるが、国内では地上に潤滑剤塗布装置を設置する定置式が主流である。定置式は車載式と比べて潤滑剤の供給効率が悪いが、急曲線の数が少ない線区や、相互直通運転の実施線区等でのニーズは高い。

車載式のFRIMOSで実績のある粒子状の摩擦緩和材を地上から車輪／レールへ供給する定置式の摩擦緩和システムを開発し、実路線で確認試験を行った結果、内軌頭頂面の摩擦係数が0.15程度まで減少し、効果が散布箇所から150m以上先まで延びることを確認した²⁰⁾。

3.5 高速化（速達化）

新しい制動技術および揺れにくく乗り心地に優れた車両・軌道を開発するとともに、沿線環境の騒音・振動低減技術を開発することにより新幹線400km/h、在来線200km/hの高速化および速達化を目指す。

新たな材料を適用した防音材・防振材による高速化に伴う発生音、低周波音の対策技術の開発のほか、軽量ブレーキディスクの開発により、さらなる高速化に対して安定したブレーキ力が期待される。

軌道パッド： 低ばね定数の軌道パッドは、地盤振動の中でも比較的高い周波数帯域に対してはある程度の防振効果が期待できる。軌道パッドに使われるゴム材料は低温で緩衝性能の低下が懸念される。-20℃での緩衝性能を評価した結果、現用の無発泡スチレンブタジエンゴム製パッドは大幅に性能が低下したのに対し、発泡エチレンプロピレンゴム製パッドは現用品の0℃での性能と同程度だった²¹⁾。

4. おわりに

鉄道各分野での材料へのニーズは、実用材を基本として高効率・高性能、経済性の向上に加え、新たな材料の導入による低環境負荷、有害物質代替、新エネルギー・省エネルギー関連などの環境対応など、多様である。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たい。

文献

- 1) RTRI リサーチマップ,
<http://www.rtri.or.jp/rd/researchmap/researchmap.pdf>
- 2) 半田, 他: 車輪踏面熱き裂の発生メカニズムと対策法車輪熱き裂, 鉄道総研報告, Vol.25, No.10, pp.23-28, 2011
- 3) 永友, 他: 転がり軸受の転動体荷重分布に及ぼすハウジングへの荷重付与位置の影響, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.78, No.790, pp.2181-2194, 2012
- 4) 早坂・久保田: アーク放電が集電系材料の質量と表面状態に及ぼす影響, 鉄道総研報告, Vol.26, No.6, pp.35-40, 2012
- 5) 吉田, 他: 材質の変更と新熟処理条件等による耐摩耗トンブレールの開発, 鉄道総研報告, Vol.23, No.10, pp.41-46, 2009
- 6) 及川: 耐摩耗トンブレールの適用拡大, 新線路, Vol.66, No.9, pp.26-28, 2012
- 7) 宮内, 他: アルミナフォームを含んだ鋳鉄複合制輪子のブレーキ特性, 鉄道総研報告, Vol.26, No.12, pp.39-44, 2012
- 8) 中村, 他: 在来線電車用長寿命ギヤ油の開発, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集 (北海道室蘭2012-9), No.C40, pp.233-234, 2012
- 9) 上條: トロリー線やちよう架線にスーパー繊維を応用する, RRR, Vol.69, No.10, pp.16-19, 2012
- 10) 上條, 他: 高熱伝導性有機材料を用いた電子部品・パワー素子の放熱部材の開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.8, pp.35-40, 2011
- 11) 間々田, 他: 車体と台車を連結する一本リンクゴムの衝撃加振試験による損傷判定手法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.10, pp.41-46, 2012
- 12) 富田, 他: 鉄道用超電導ケーブルの要素技術の構築, 鉄道総研報告, Vol.26, No.12, pp.45-50, 2012
- 13) 森, 他: 高強度アルミニウム合金の摩擦攪拌接合の接合性の向上, 鉄道総研報告, Vol.26, No.12, pp.51-56, 2012
- 14) 森, 他: 難燃性マグネシウム合金の加工性評価, 鉄道総研報告, Vol.25, No.10, pp.35-38, 2011
- 15) 坂本: 電導性塗料を用いた鋼橋き裂検知システムの開発, JREA, Vol.55, No.10, pp.11-14, 2012
- 16) 坂本, 他: 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
- 17) 上原, 他: Li含有ゼオライトを用いたアルカリシリカ反応抑制材料の開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.10, pp.5-10, 2011
- 18) 東原, 他: 繊維補強ジオポリマー短まくらぎの製作, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, No. VI-522, pp.1043-1044, 2012
- 19) 上原・山崎: ジオポリマー硬化体のイオン交換特性, 鉄道総研報告, Vol.25, No.10, pp.45-50, 2011
- 20) 伴, 他: 曲線内軌用定置式摩擦緩和システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.12, pp.35-38, 2012
- 21) 鈴木・弟子丸: 低ばね軌道パッドの緩衝性能の温度特性に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, No. VI-511, pp.1021-1022, 2012