

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 development of technology of various industrial fields including the railway field has been brought about by the development of element technology. Material technology contributes to element technology in many aspects. In the development of material, it is important to fully understand the properties of various kinds of materials. For this purpose, one of the ways to achieve this is to classify the materials and to know their properties roughly. In this paper, we classify the materials according to their compounds and/or elements, and introduce the features of the research and development of materials usable for railway facilities and vehicles corresponding to the classification.

キーワード：鉄道用材料，高機能化，高性能化，導入技術

1. はじめに

技術の発展は、設計や施工技術のほか、要素技術の発展によってもたらされており、鉄道も同様である。要素技術の多くには材料開発や材料の加工技術の向上が寄与している。材料には様々な種類があり、それぞれの特性を十分に理解して使用方法を定め、実際に使用されている間は保守を行い、ある期間が経過した際や摩耗や損傷が発生した際には交換、廃棄する必要がある。交換が困難な場合や、部分的な損傷が発生した場合については、補修して使用を継続することになる。

材料を理解する上で、材料の分類を適切に行うことが重要である。材料の種類別に分類する方法は種々あるが、その材料を構成している物質や元素の種類によって、大まかに有機材料、無機材料、金属材料の3種類に分類することが多い。この分類は、例外はあるものの、材料の性質を知るためのステップとしておおむね正しい方向性を示す。3つの分類の詳細については前報¹⁾を参照していただくとして、本稿では、それぞれの特徴を記し、それらに分類されるいくつかの研究開発例を紹介して、現状と今後の方向性を示す。一方、近年の材料技術の発展により、いくつかの材料を混合させた複合材料が使用されることも多い。本稿では、それらの材料も紹介する。

2. 使用する材料の種類別に見た技術開発の状況

有機材料，無機材料，金属材料の3つに分類して鉄道

総研における研究開発の状況を表1に示し、いくつかの例について現状と今後の展開を以下に記す。

2.1 有機材料

炭素を中心に、酸素、窒素やそのほかの元素が組み合わさってできる有機化合物で構成される材料である。構成する炭素の数により、固体、液体、気体のどの状態にもなり、油、ゴム、プラスチック等、見かけの異なる様々な材料として、鉄道でも使用されている。後述する無機材料や金属材料と比べると、使用環境によっては劣化が早い傾向があり、使用にあたってそれに応じた点検や交換への留意が必要となる場合が多い。

2.1.1 新幹線車両用ギヤ油

電車の駆動装置において、主電動機の回転を車軸・車輪に伝達する歯車装置では、歯車のかみ合い面の潤滑および大歯車、小歯車それぞれの両側の軸受の潤滑を、ギヤ油と呼ばれる潤滑油が担っている。

ギヤ油等潤滑油の多くは有機材料である。近年は全般検査・重要部検査周期が延伸される傾向にあり、延伸された交換周期に耐える長寿命化への要請があるほか、厳しくなる使用環境への対応が求められている。

ギヤ油には潤滑性能のほかいくつかの性能が求められるが、その一つが低温流動性である。すなわち、一般に潤滑油は低温になるほど粘度が上昇するため、特に冬季の起動時等に、歯車箱の底部の油溜まりに落ちたギヤ油のかき上げが不十分となりやすい。このため、特に油溜まりから離れた小歯車軸受の潤滑が不十分となりやすくこれに起因する軸受焼き付き等の不具合を防ぐ必要がある。この対策として、ギヤ油の低温での粘度を下げれば

* 材料技術研究部長

表1 材料の分類別に見た鉄道における部材種類と最近の取り組み内容

分類	適用先	材料	適用対象部材	最近の取り組み内容
有機材料	施設	非ハロゲン部材	のり面防護シート	現地施工方法
		発泡性ゴム	軌道パッド	低温時の緩衝性能向上
		樹脂	防音パネル	吸音性能向上, 施工性向上
	車両	圧電ゴム	車両戸先ゴム	信号伝送, 制御技術
		ナノカーボン	潤滑グリース	導電性, 機械的特性向上
		樹脂	窓ガラス	劣化判定
	油脂	潤滑油・グリース	長寿命化, 環境対応	
無機材料	施設	ジオポリマー硬化体	まくらぎ等	耐久性評価
		コンクリート	橋梁等構造物	鉄道施設への適用手法
		超電導材料	き電ケーブル	冷却, 応力緩和等の要素技術
	車両	C/C複合材	パンタグラフすり板	低コスト化, 使用限度厚の明確化
金属材料	施設	鋼材	レール	転がり接触疲労の定量化
	車両		転がり軸受	転動体荷重に与える要因の把握
			車輪	摩耗の要因解明, 摩耗防止
		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
有機/無機/金属	施設	樹脂, 金属粒子等	塗料	塗り替え時の前処理, LCC評価
無機/金属	車両	セラミック粒子等	車輪/レール摩擦調整	落葉箇所での効果の確保

良いが、一方で広い温度範囲で十分な潤滑性能を発揮するには、必要な油膜厚さを保持するために、ある程度の粘度の高さが必要である。したがって、温度による粘度変化が小さい油が求められる。

鉄道総研では現行のギヤ油より低温での粘度上昇が小さく、広い温度範囲で油膜を形成できる粘度を持ち、かつ、それらの実現によるコスト増加が小さい材料を選定し、新たなギヤ油の開発を試みた。その結果、従来までより精製度の高い鉱油を基油とし、新たな種類の添加剤を加えた試作油を調製した。

試作したギヤ油は粘度等の性状や潤滑性能等の各種性能が目標仕様を満たしていることが室内試験において確認されたため、台上試験を経て現車試験へ供試された。これまで、最高運転速度320km/hにおいて最長58万kmの走行を経過しており、ギヤ油に問題がないことを確認している²⁾。

2.1.2 圧電ゴムによるセンシング技術の開発

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練して製作する材料で、ゴムの柔軟性と圧電性能を併せ持つことが特徴である。有機材料であるゴムに無機材料である圧電材料を混ぜることで、それぞれの特長を活かすことができ、このような材料を複合材料という。

元の圧電材料と比較して圧電性能が低下する点が課題であったが、セラミック粒子を配向させる、すなわち分極の向きを揃えることで、圧電性能を向上できることが明らかになっている。鉄道総研では圧電ゴムを用いた各種センシング技術の研究開発に取り組んでいる。

圧電ゴムを戸先ゴムに内蔵したセンサ戸先ゴムに関しては、これまで検知が困難であった直径10～15mm程度の細かい異物を検知できることを明らかにしたほか、これを既存の側引戸開閉システムに組み込むための伝送系や制御系の設計・製作を行い、実用への段階を進めている。

一方、車軸軸受は損傷が発生すると重大な事故につながる可能性があることから、早期の損傷発見手法が求められている。軸箱と軸ばねの間の防振ゴムに圧電ゴムをセンサとして適用し、回転時の異常振動を検出することで軸受の異常検知を試みた。圧電材料の粒子を配向させた配向型圧電ゴムを用い、さらに性能を高めるため積層配置して人工傷を付与した軸受を回転させたところ、台上試験においては、従来の温度による異常検知では検出が困難な損傷の検知が可能であることを見いだした。さらに鉄道総研構内試験線における、実車両を用いた走行試験でも、異常に対応した信号を検出することができた³⁾。

2.2 無機材料

無機化合物で構成される材料である。無機化合物の定義は「有機化合物以外の化合物」なので、非常に多くの元素からなる化合物や材料が含まれる。代表的なものは粉体等を成型・焼成してできるセラミックスであり、がいし等絶縁材料として使用される一方、低温で電気抵抗がゼロとなる超電導の状態となるものもある。コンクリート構造物の構成材料であるセメントもセラミックスの一種であり、長期間使用していくための点検・補修技

術が重要な研究開発課題となっている。

2.2.1 寒冷地でのコンクリート構造物のひび割れ

凍害はコンクリートの劣化現象の一つであり、コンクリート中に一定以上含まれている水が、外気温や日射の変化によって凍結融解を繰り返すことにより、コンクリート表面から次第に劣化するものである。

一方、寒冷地において、表面が変色する事例があった。この場合、表層に顕著な劣化が表れていなくても、コアを調べると、内部に水平方向のひび割れが認められた。凍害では表層部に層状にはく離が生じることが多いが、そのような変状はなく、さらに、アルカリシリカ反応等の、コンクリート内部のひび割れの原因となるような劣化は確認されなかった。

鉄道総研ではこれを従来と異なるモードの凍害と位置づけ、調査や実験を実施した結果、当該コンクリートは全体に気泡間隔係数が大きく、変色の見られた領域を中心に、空気量が少なめであるため、耐凍害性が高いとは言えない状況であることがわかった。さらに、製作時の空気量や養生条件、気泡間隔係数の異なるコンクリート供試体に対して、上面が積雪と融解、下面が主に外気温の変化の影響を受ける状況を模した温度サイクルを与えたところ、空気量を少なく設定した供試体では実構造物に生じていた水平方向のひび割れと同様の状態の再現が確認された⁴⁾。

これらの知見を踏まえ、今後はこのようなコンクリート劣化に対する防止策、補修手法等、適切な維持管理手法の提案を目指していきたいと考えている。

コンクリートはセメントと骨材を組み合わせた材料であり、本件のように新たな劣化モードの解明が重要な課題の一つとなっている。劣化の本質的な解明に向けては、コンクリート内外の水分や塩分の存在、さらに鉄筋の腐食も考慮する必要がある。

2.2.2 高温超電導材の特性向上と応用

鉄道総研では、ある温度まで冷却すると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、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、その応用先として近年、直流き電ケーブルへの適用に取り組んでいる⁵⁾。

そのほかの応用先として、鉄道用の蓄電装置として開発している超電導磁気エネルギー貯蔵装置には、現状ではニオブチタン(NbTi)等の材料が使用されている。これらは安定性や信頼性が高いが、超電導の状態とするために用いる冷媒の液体ヘリウムが高価なため、高コストである点が課題となっている。これに対し、二ホウ化マグネシウム(MgB₂)の線材開発に取り組んでいる。これは材料が安価で入手が容易であり、これまでの材料と比較して超電導転移温度が39Kと高いため冷却コストの低減も見込まれる。

鉄道用蓄電装置への応用に向けて数十kJ級のコイルの開発を目指しているが、そのために必要なコイルの仕様を設定し、要素技術となるMgB₂線材の特性評価、コイル形状とするための巻き線技術やより線技術の開発、それらによって得られた蓄電用コイルの特性評価を行っている。

こうして把握された特性を基に、今後は数十kJ級の大型コイルの設計・製作等、鉄道用電力貯蔵への適用が期待される大容量蓄電装置用コイルの開発を目指す⁶⁾。

2.2.3 C/C複合材製すり板

パンタグラフのすり板には大きく分けて金属系とカーボン系の2種類がある。このうちカーボン系すり板はカーボンと銅を複合させた材料で自己潤滑性が高く、トロリ線の摩耗を減らすことができるため、広く使用されている。このカーボン系すり板を、金属系すり板と同様に、舟体にボルトで締結できるようにしたものが、炭素繊維強化カーボン系すり板である。カーボン材料に不足しているじん性(ねばり)を、炭素繊維を複合させることで補ったもので、C/C複合材製すり板と呼んでいる。

このようにカーボン系すり板の長所を生かし、短所を補ったC/C複合材製すり板であるが、使用コストの低減が課題だった。そこで今回、製造方法の見直しと、どの程度摩耗するまで使用することができるのか、使用限度厚を実験的に検証してその目安値の設定に取り組んだ。その結果、製造コストをおよそ20%削減することができたほか、すり板締結部の残厚と、すり板を舟体に締結するボルトの軸力の関係から、適切な締結力を考慮した限度厚を算出できるようになった⁷⁾。

なお、本稿の冒頭で炭素を含む材料は有機材料と記述したが、炭素単体から成る場合は無機材料と分類することが多く、本稿では、カーボン系材料であるこのすり板を、無機材料として紹介した。

2.3 金属材料

金属元素からなる材料のことであり、鉄、アルミニウム、銅などが代表的である。前記の無機化合物の定義によれば無機材料の一種とも言える。一般に強度やじん性、耐熱性等に優れているため、鉄道では車両の構体、台車、駆動装置周辺の部材を中心に、高荷重を負荷される、回転をとまなう等の箇所や機械要素に使用される。一方、アルミニウム等の軽金属は鉄や銅と比べると密度が小さく(すなわち軽く)、軽量化に欠かせないが、強度や耐熱性等に留意し、環境に応じた適用先を選定する必要がある。

2.3.1 難燃性マグネシウムの車両構体への適用

車両構体の軽量化は省エネルギー効果が大きい重要な課題である。現在多くの車両構体でアルミニウム合金が使用されているが、より軽いマグネシウムを適用するこ

特集：材料技術

とができれば、さらなる軽量化が可能である。

鉄道総研ではマグネシウム合金にカルシウムを添加して発火性を抑制した「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、加工性等の基礎的な特性を調べた上で、中空押出型材を試作したほか、構体製造に欠かせない接合技術についてはアーク溶接の一種であるメタルイナートガス（MIG）溶接や、接合時に熱の影響を小さく抑えられる摩擦搅拌接合の適用可能性があることを提案してきた。

これまでの蓄積を基に、構体組み立ての実現性評価を行った。試作した中空型材にMIG溶接を適用し、小型の半断面構体モデルを製作した。その過程から、型材同士の接合や組み立ての順番を工夫する必要がある等、新たな知見が得られた⁸⁾。

実用に向けてはさらなる接合技術の検討や表面処理方法の検討が必要であり、今後、これらの課題に取り組んでいく予定である。

2.3.2 転がり軸受の転動体荷重に与える要因

鉄道車両において、車軸軸受は車軸と台車を接続、車両自体や揺れに伴う荷重を受けつつ車軸の円滑な回転を担う重要な部品である。転がり軸受では理論的に転動疲労寿命が計算されるが、これまでより高精度に転動疲労寿命を論じるには、軸受内部で荷重を分担している転動体荷重、すなわち個々の転動体が分担している荷重の分布を知ることが必要である。鉄道総研では転動体に光ファイバセンサを挿入して転動体荷重を測定する方法を考案し、各種の転がり軸受における転動体荷重分布を明らかにしている。

これまで、車軸軸受に広く用いられている複列円すいころ軸受の転動体荷重が、軸受の軸方向のすきまであるアキシャルすきまの変化により受ける影響を検討している。その結果、ラジアル荷重が同じであってもアキシャルすきまによって最大の転動体荷重や転動体荷重分布が異なることをはじめ、最大の転動体荷重の変化はアキシャルすきまの大小によっても異なること等を見いだした⁹⁾。

この取り組みで紹介した軸受を構成する主な材料は軸受鋼と呼ばれる鉄鋼、すなわち金属材料である。ここでは材料自体に加えて、材料に働く力をこれまでより精密にとらえることで、転がり軸受の信頼性を向上しようとしている。

3. おわりに

鉄道総研における鉄道用材料の技術開発は、金属材料を含む無機材料、有機材料のいずれもあり、材料そのものの開発に加え、それらの適用先における維持管理手法の開発や使用方法の適正化とそのため現象解明、さらにはどのような適用方法が適しているか等、取り組みの範囲が幅広いのが特徴である。これらを引き続き実施することにより、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。関係するJRはじめとする鉄道事業者、大学、メーカー、学協会の皆様のますますのお力添えをお願いする次第である。

文献

- 1) 曾根康友：材料の高機能化と鉄道への応用，RRR, Vol. 72, No. 10, pp. 4-7, 2015
- 2) 木川定之，鈴木淳一，沓掛久志：低温流動性を向上した新幹線車両用ギヤ油の開発，鉄道総研報告，Vol. 32, No. 10, pp. 23-28, 2018
- 3) 間々田祥吾，野木村龍，矢口直幸，朝比奈峰之，岡村吉晃：鉄道における圧電ゴムを用いたセンシング技術，鉄道総研報告，Vol. 32, No. 10, pp. 11-16, 2018
- 4) 鶴田孝司，上原元樹，松田芳範，三浦秀一朗：寒冷地で温度勾配が生じた構造物におけるひび割れに関する検討，鉄道総研報告，Vol. 32, No. 10, pp. 35-40, 2018
- 5) Tomita, M., Suzuki, K., Fukumoto, Y., Ishihara, A., Akasaka, T., Kobayashi, Y.: "Energy-saving railway systems based on superconducting power transmit," Energy, Vol.122, pp. 579-587.
- 6) 恩地太紀，石原篤，小林祐介，福本祐介，富田優，濱島高太郎：二ホウ化マグネシウム超電導線材を用いた蓄電用超電導コイルの基礎検討，鉄道総研報告，Vol. 32, No. 10, pp. 41-46, 2018
- 7) 久保田喜雄，長谷川浩司，亀崎昭雄：C/C複合材製すり板の低廉化および使用限度厚の評価，鉄道総研報告，Vol. 32, No. 10, pp. 29-34, 2018
- 8) 森久史，上東直孝，森本文子，松井元英，曾根康友：難燃性マグネシウム合金で鉄道車両を軽量化する，RRR, Vol.75, No. 1, pp. 20-23, 2018
- 9) 高橋研，鈴木大輔，永友貴史：複列円すいころ軸受の転動体荷重に与えるアキシャルすきまの影響，鉄道総研報告，Vol. 32, No. 10, pp. 17-22, 2018