

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

材料をスマートに使いこなして長寿命に

鉄道で使われる材料や部材の長寿命化は、メンテナンスの軽減につながることから常に望まれています。その実現に向けた取り組みには、部材や材料自身の耐久性を高めることのほかに、賢く(=スマートに)使いこなしていくことがあります。この「スマートに」は、自己修復、自己調整、自己診断などの機能を持ったいわゆる「スマートマテリアル」ではなく、部材への負荷の平均化や寿命を決定する要因を上手に制御し活用することを意味しています。ここでは、長寿命化に向けたこれまでの取り組み事例を示すとともに、今後の方向性について考えていきたいと思ひます。



辻村 太郎
Taro Tsujimura
材料技術研究部
主管研究員
【専門分野】 摩擦材料、
環境影響評価



森 久史
Hisashi Mori
材料技術研究部
摩擦材料研究室
主任研究員
【専門分野】 金属材料、
塑性加工、破壊力学、
溶接工学

長寿命化への要求の高まり

鉄道では、いろいろな材料がそれぞれ場所や部位の要求に応じて使われています。これらの部材は、繰り返しの使用や時間経過に伴って物理的・化学的に変化し続けます。多くの場合、その変化は品質や性能が低下する劣化です。劣化が進行して、ある限度を下回るとその部材の寿命と見なされます。

実際の使用においては、使用中に限度を下回ることがないように、定期的または随時の検査を行い事前に補修または部品の交換などを行っています。

これらの検査、補修、部品交換といったメンテナンスには、手間やコストがかかりますので、安全性を確保しながら、いかに効率的に行うかが求められます。

一方、近年の車両の高速化や高減速度化により使用条件が厳しくなり、また、酸性雨などの環境要因も変化するなどにより、材料への負荷条件は厳しくなる傾向にあります。

これらの条件下でも、なお一層の材料や部材の長寿命化が求められています。

要求性能と寿命

寿命と性能低下の関係を少し整理してみましょう。時間の経過や使用による外力の影響によって性能は変化します。必要とされるいくつかの性能の中で、もっとも早く限界に達するものに基づいて、補修や交換を行わなければなりません。どの性能の劣化がどのように進行していくのかを見極め、その部材の望ましい寿命を実現できるようにすることが求められます。

設計の考え方やメンテナンスの実態によって、個々の部材に望まれる寿命が左右されますが、ここではそれぞれ

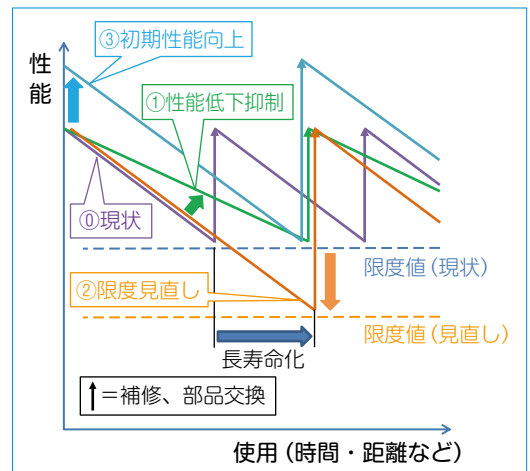


図1 使用に伴う性能低下と補修、部品交換 (イメージ)

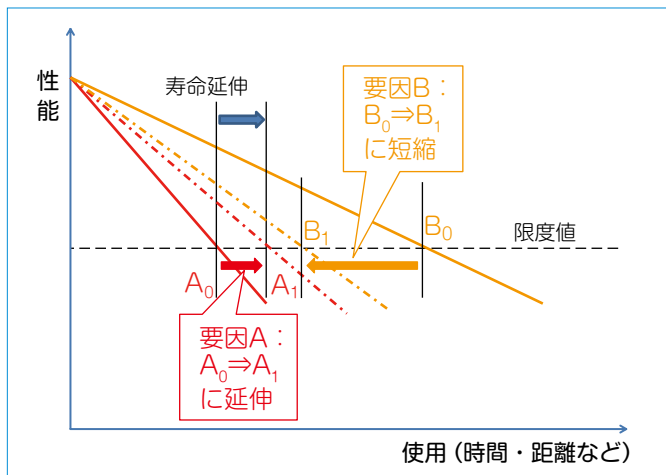


図2 劣化要因のバランス (イメージ)

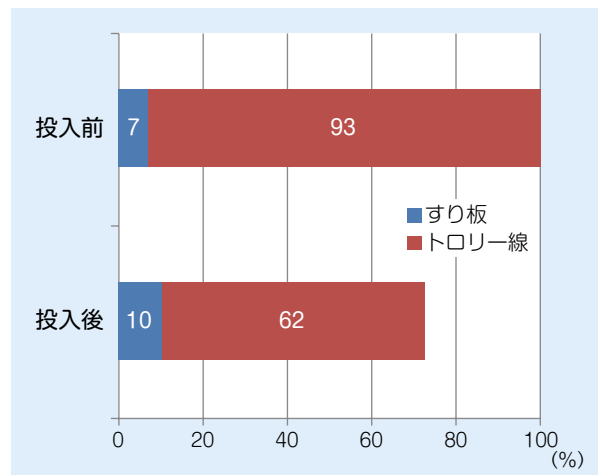


図3 カーボン系すり板導入による保守経費の変化²⁾

の部材を長寿命化することに話を絞って進めたいと思います。

図1は時間や走行距離などの増加に伴う性能の低下をイメージにしたものです。実際の性能低下は、必ずしも直線的な現象ではないですが、ここでは単純化しています。現状(①)に比べて長寿命化する方法として、性能の低下する速さを遅くする(①性能低下抑制)、補修や交換を行う限度を下げる(②限度見直し)、初期性能を向上させる(③初期性能向上)とそれらの組み合わせが考えられます。なお、性能低下抑制は、材料自体の耐性能低下特性の改善と使用条件の緩和の両面からのアプローチがあります。

部材の寿命を考える際のもう一つの視点としては、複数の劣化要因のバランスです。複数要因の中で一つでも限界を超えると他の要因にいくら余裕があっても交換しなくてはなりません。したがって、図2に示すように余裕のある要因Bの劣化を多少早めても、寿命を決める要因Aの緩和を図ることにより全体としての寿命を長くすることが可能になります。

以下では、いくつかの事例を見てみましょう。

潤滑性の向上によるすり板・トロリー線の長寿命化

走行する電車に電気を取り込む接点で、電車線/パンタグラフすり板です。しゅう動下での通電という条件での使用であり、近年の高速化などによりますます厳しさを増す中、両者の長寿命化が求められています。片方だけの長寿命化であれば、基本的には摩耗しにくい材料にすればよいのですが、両者となるとバランスを取りながら進める必要が生じます¹⁾。

近年、在来線で実用化が進んでいるカーボン系すり板は、従来の焼結合金すり板に比較して優れた潤滑性を持っていることによりこの要求に応えています。図3に示すように、カーボン系すり板の導入によりトロリー線の取り替えが減少したため、すり板の保守を含めた全体でも保守コストが減少し、その効果が表れています。

摩擦ブレーキ材の長寿命化

ブレーキディスクとブレーキパッドや車輪と踏面制輪子などの摩擦ブレーキ材は、繰り返しのブレーキによって摩擦面が摩耗し、また摩擦熱によって材質が変化するとともに熱き裂が発生する場合があります。そのため、ブ

レーキディスク、パッドや踏面制輪子は、厚さやき裂の限度が設定され交換が行われています。寿命を左右する性能は、耐摩耗性と耐熱き裂性です³⁾。

材料改善による性能低下抑制

材料の耐摩耗性を改善する手法としては、まず材料を硬くすることが考えられますが、摩擦特性や相手材の摩耗などを考慮して検討されます。また、高速からのブレーキなどの摩擦発熱の大きな使用条件では耐熱性の改善も有効です。これらを勘案して、鉄系のブレーキディスクや鋳鉄制輪子では、合金化が行われてきました。合金化は、耐摩耗性の向上と同時に耐熱き裂性の改善にも効果が認められています。

負荷の平均化による使用条件緩和

摩耗や熱き裂は多くの場合不均一に生じ、一部が限度に到達すると部品の交換となります。したがって、長寿命化の観点からは、できるだけ平均に摩耗させることが望まれ、そのためには摩擦面が均一に相手材と接触することが望ましいと考えられます。制輪子やパッドは、摩擦熱によって変形が生じるために、一部分が集中的に摩耗することが起こります。それを避けるため、いくつかに分割してできるだけ均一な摩擦状態になるようにすると摩耗も平

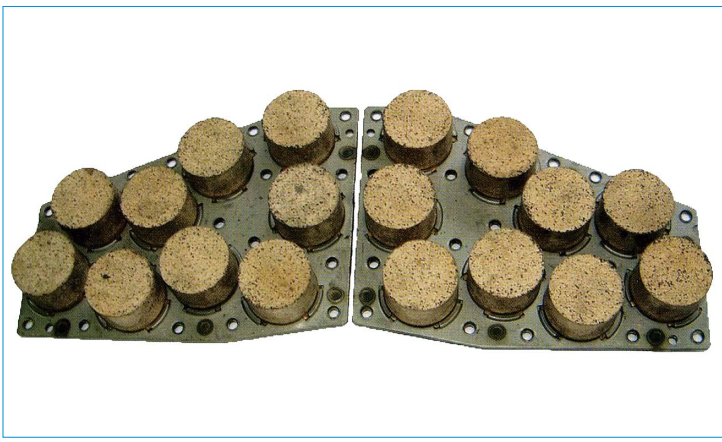


図4 多分割型ブレーキパッドの一例³⁾

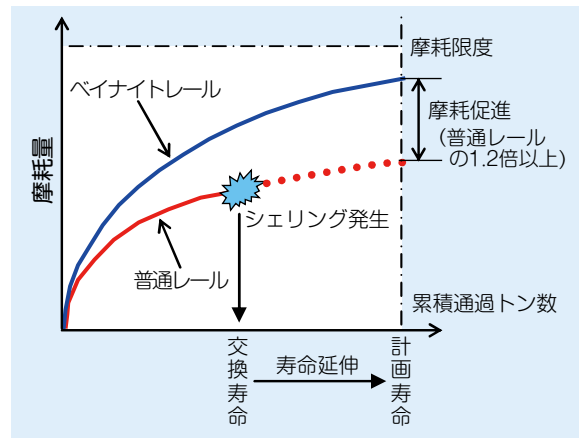


図6 耐シエリングレールの開発概念⁵⁾

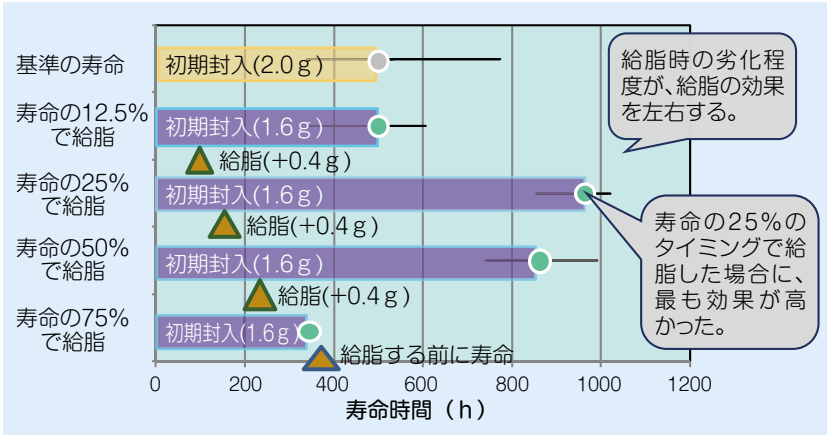


図5 給脂時期による寿命延伸効果の比較⁴⁾

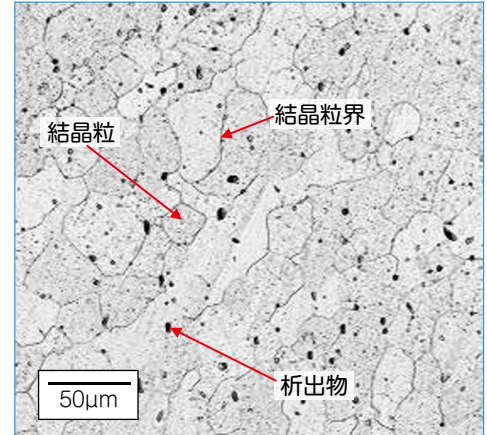


図7 アルミニウム合金の金属組織の例

均化します(図4)。このことは、相手材の発熱状態も平均化して、ピーク温度を下げる効果や摩擦状態(摩擦係数)を安定化させる効果もあります。

負荷の低減による使用条件緩和

ブレーキ材側の改良ではありませんが、ブレーキの負荷自体を減少させることも有効です。例えば、電気ブレーキなどの他のブレーキを搭載して、ディスクブレーキの使用を低速域に限定したり、分担割合を減らすこともブレーキ材の長寿命化につながります。

給脂時期の適正化によるグリースの取り替え寿命延伸

車軸や主電動機の軸受には、グリースなどの潤滑剤が使われています。使用を続けると潤滑剤は劣化し、本来の性能を維持できなくなりますので、交換されます。この取り替え寿命を長くすることは、メンテナンスを効率的に行うために求められています。

主電動機軸受のグリースの場合、軸受内部だけでなく、軸受に隣接する端ふたにグリースポケットを設け、封入するグリース量を多くすることによる取り替え寿命の延伸が行われています。しかし、封入したグリースがすべて有効に使われているかを調べたところ封入場所によっては、劣化の程度にばらつきがあり、グリースポケット(GP)の形状を工夫し、外側のGP内のグリースが軸受にまでできるだけ到達しやすくする必要があることがわかりました。

また、途中でグリースを追加または一部を新しいものに置き換える中間給脂などが行われています。この、途中で給脂する量やタイミングによっても寿命が変わります。図5に給脂時期の違う場合の取り替え寿命の延伸効果について比較した結果を示します。すべてのグリースを初期封入した場合に比較して、25%寿命時に追加の給脂を行った場合が最も効果があり、約2倍

の寿命となっています。同じ性能のグリースでも使い方によって寿命が大きく異なっていることがわかります⁴⁾。

摩耗と疲労のバランス最適化によるレールの長寿命化

レールは使用に伴い、車輪との接触による摩耗、車両の通過の繰り返し荷重による疲労や設置環境での腐食などにより劣化が進みます。長寿命化のためのレール材開発の基本は、硬くして耐摩耗性を、強くして耐疲労性を向上しようとするものです。

実際には、計画寿命が設定されていて計画的に交換が行われますが、使用条件によっては計画寿命になる前に、きずの進展などによって交換に至ることがあります。摩耗限度からみると余裕があるのに、疲労による寿命となってしまっていることとなります。前述の図2のパターンです。

きずの一形態であるシェリング損傷

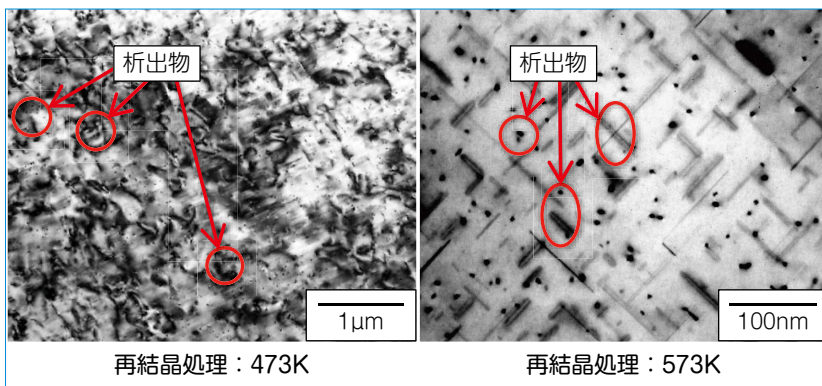


図8 アルミニウム合金 (Al-Zn-Mg合金：7075材) のナノ組織制御材 (再結晶処理後) の透過型電子顕微鏡による観察

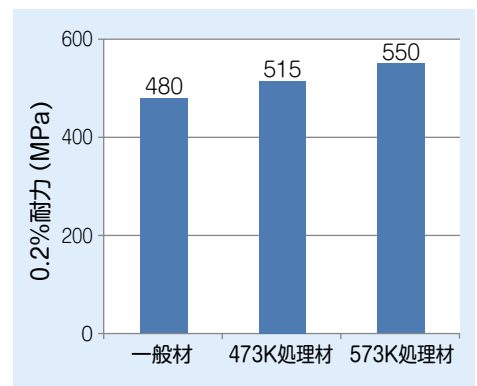


図9 アルミニウム合金 (Al-Zn-Mg合金) の一般材及び処理材の強さ (0.2%耐力) の比較

の場合、対策の一つとしてレール削正を行うのであれば、レールの摩耗速度を多少大きくしてもシェリング損傷を遅らせることができれば対策となるこのコンセプト (図6) で開発されたのが、ペイナイトレールです⁵⁾。

ペイナイトとは鉄鋼の金属組織の一つで、熱処理や合金添加などにより得られます。硬さを調整したいいくつかのペイナイトレールを試作して、普通レールの1.2倍程度の摩耗速度となる材質を選定し、耐シェリング性も確認し実用化が行われました。

ナノ組織制御による耐久性の向上

ここまでは、従来の長寿命化の事例を見てきましたが、最後に材料自身の長寿命化に向けた新たな取り組みであるナノ組織制御について紹介します。

金属材料の強さや耐食性などの諸特性は材料本来の構造によって決まるとされ、主に金属組織を制御することで変えられます。図7に新幹線の車体に使われているアルミニウム合金の金属組織を例として示します。金属組織には、筋状の様子が認められ (結晶粒界)、筋状模様で囲まれて形成される島 (結晶粒) や黒い点 (析出物) が認められます。これらは強さや腐食に影響を及ぼすことが知られています。これまでは結晶粒 (ミクロンオーダ： 10^6 m) の大きさと強さとの関係について検討され、

結晶粒を微細にするほど、変形に対する抵抗が増すために、強さが増加するということが示されてきました。しかし、結晶粒だけを微細にすると強さ以外の特性、特に耐食性が低下することが示されてきました。そこで、析出物 (ナノオーダ： 10^9 m) の制御による高強度化と他特性の改善の両立に取り組んでいます。図8に、ナノ組織制御後に熱処理を行ったアルミニウム合金 (Al-Zn-Mg合金) の金属組織の透過型電子顕微鏡による観察結果を示します。熱処理温度によって析出物の状態が異なることが分かります。図9にそれら処理材の強さ (0.2%耐力) を比較して示します。ナノ組織制御材では一般材よりも強さが増加することが分かります。一般的なアルミニウム合金は高強度化すると腐食割れが生じやすくなります。実験では一般材および473Kで熱処理したナノ組織制御材では応力腐食割れが発生しますが、573Kで熱処理したナノ組織制御材では応力腐食割れが発生しないことを確認しました。このように、ナノ組織を制御することによって高強度化とともに耐食性が改善できることを確認することができました。

材料をスマートに使いこなす

材料の長寿命化はその材料自体の高性能化や耐久性の向上により達成されることはもちろんですが、コストや扱いやすさを含めると実用に適した新たな

な材料の開発は簡単ではありません。一方で、紹介してきたように、従来材またはその改良材の使い方や適切な組み合わせによっても長寿命化を達成できる場合があります。実態がどのようになっているか、劣化がどのようにして進行しているかを把握して、材料だけの改良や革新に拘らずに検討を進め、賢く=スマートに材料を使いこなすことが大切であると考えられます。紙面の関係で紹介はしませんが、コンクリートの長寿命化、塗装による耐食性の向上など多くの分野を含め、今後とも取り組みを進めていきたいと思えます。RRR

文献

- 久保俊一、菅原淳：パンタグラフすり板とトオリ線の材料と摩耗、RRR, Vol.63, No.4, pp.26-29, 2006
- 相原直樹、辻村太郎、上原元樹、土屋広志：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
- 宮内瞳苗：鉄道の摩擦ブレーキにおける熱現象、トライボロジスト, Vol.50, No.1, pp.21-26, 2005
- 日比野澄子、中村和夫、細谷哲也：主電動機軸受のグリース入換給脂機構、鉄道総研報告, Vol.25, No.10, pp.17-22, 2011
- 佐藤幸雄、辰巳正光、上田正治、三田尾真司：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, 2011