

材料損傷からみたメンテナンスの考え方

森 久史
材料技術研究部
(主任研究員)

辻村 太郎
同
(主管研究員)



もり ひさし つじむら たろう

はじめに

「形あるものはいつか壊れる」と言われるように、丈夫に作られた機械製品もいつかは機能を停止してしまいます。しかし、適宜、油を差したり、部品を取り替えたり、ボルトの緩みを直したり、表面を磨いたりすることによって、機械製品は長持ちするようになります。鉄道車両も様々な部品や部材から構成される機械製品と同じで、手入れ、すなわちメンテナンスすることで長持ちするようになります。

鉄道車両の部品の中でも車軸や車輪などを例に挙げると、高速回転による大きな動的荷重を受けること、摩擦が大きいこと、さらに雨風に曝されることなどで、とても厳しい環境にあると言えます。本来、設計では、このような厳しい環境も見込んで検討されますが、使用中に摩耗や錆、き裂などの目に見えるような損傷が生じるようになり、場合によっては故障に至ります。そのため、鉄道の現場では定期検査を行って、摩耗部品の取り替え、締結部の緩みや損傷発生の検知、損傷箇所の修繕、車両の洗浄などのメンテナンスが行われます。テレビや映画で、鉄道員がハンマーを持って、台車をコツコツと叩いて音を聞きながら歩いているところを見たことがある方も居られると思いますが、それもメンテナンスの一つの例です。

部材や部品などが損傷に対して強い物ならば部品交換が減り、その結果、メンテナンスに要するコストが低下するほか、車両がより長持ちすることになります。すなわち、メンテナンスで得られたデータに基づいて、どの部品がどの程度損傷しやすく、それがどのような損傷メカニズムであるかを解析し、それらのデータを設計にフィードバックすることで、損傷に強い物へと改良することも可能になります。

このように、メンテナンスは材料損傷と強く結びついており、材料の損傷を理解することにより効率の良いメンテナンスが可能になり、メンテナンスの周期や寿命の延伸につながる事が期待されます。そこでここでは、最初にメ

ンテナンスと材料の損傷について説明します。その後には損傷例について紹介し、最後に材料損傷から見てメンテナンスをどのように考えるのかについて述べたいと思います。

メンテナンスとは

メンテナンスの定義

メンテナンスという言葉は何度も耳にされた方もいらっしゃると思いますが、もう一度定義を見てみましょう。メンテナンスを辞書で調べると、「建築・土木構造物や自動車など機械類の整備・維持・保守・点検・手入れ」などの意味で使われています。製造当初の機械の性能は、長時間使用しますと図1のように、時間の経過に応じて低下します。

これは機械を構成している部品が損傷を受け、損傷が機械全体の性能に影響を及ぼしているためです。それにもかかわらず、損傷が生じた部品をメンテナンスせずにそのまま使用していると、所定の性能が得られないほか、場合に

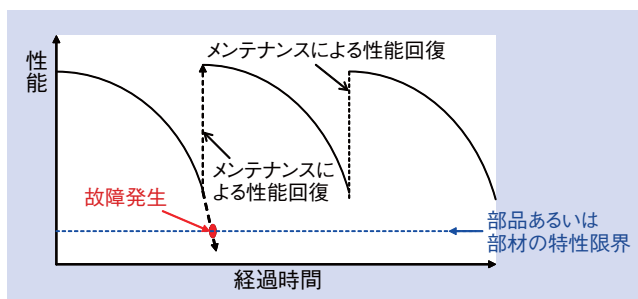


図1 メンテナンスによる性能回復の考え方

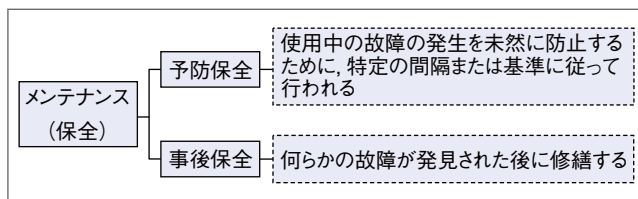


図2 メンテナンス方法の分類

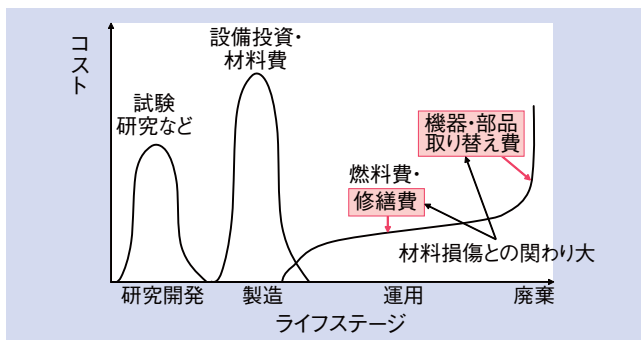


図3 製品ライフサイクル (研究開発～廃棄) と費用との関係

よっては故障してしまいます。そこで、損傷を見つけ出し、その部分を修理あるいは取り替えるなどの方法で性能を回復させるのがメンテナンスの役割です。

メンテナンスは、図2に示すように「予防保全」と「事後保全」とに分けられます。予防保全とは、使用中の故障の発生を未然に防止するために、あらかじめ定められた間隔または基準に従ってメンテナンスを行うものです。一方の事後保全は、何らかの故障が発見された後に修繕するメンテナンスです。特に予防保全はメンテナンスにおいて重要であり、それは主に使用時間を考慮して計画されます。

機械製品は、研究開発から廃棄までのライフサイクルを検討してから製造が開始されるようになってきています。近年、製品製造ではコストダウンを迫られて、ライフサイクルに占めるコストについても分析することが必要になってきています。図3に製品のライフサイクルとそれに要するコストを示します。コスト全体を見ると、研究開発、製造、運用および廃棄の各ライフステージにおいてそれぞれコストを要しますが、鉄道の場合に運用に携わる鉄道事業者から見ると、運用コストに占める修繕費、機器部品取り替え費という、メンテナンスコストはかなりの割合を占めています。運用者から見て、メンテナンスコストをどのように低減するのかは重要な課題の一つで、メンテナンスしやすい構造の導入や部品の長寿命化などの技術開発、そして、これまでのメンテナンスで得られたデータに基づいた新材料の導入などのアプローチが期待されます。

鉄道事業におけるメンテナンスの重要性とその活用

鉄道事業においては、メンテナンスを鉄道の運行中の事故・故障などを未然に防ぐために定期的に行うことが法令で義務付けられています。鉄道車両のメンテナンスでは、故障を未然に防ぐ、故障が発生した場合には早期に対策を行うことが大きな目的で、予防保全として、仕業検査、交番検査、台車検査や全般検査などと様々なレベルでの検査が行われます。また故障発生時には事後保全として修繕が行われます。表1にJR各社の新幹線電車で行われている

表1 新幹線電車の定期保全の種類と内容

検査	検査内容
仕業検査	パンタグラフすり板、制輪子などの摩耗品の取り替え並びに台車走り装置、ブレーキ装置等の状態点検
交番検査	台車走り装置、ブレーキ装置、電気装置、客室設備などを非解体の状態的点検するほか、主要装置の動作確認
台車検査	台車走り装置の解体検査であり、主電動機、動力伝達装置、走り装置、ブレーキ装置などの主要部品を取り外し、または解体して細部まで検査
全般検査	車両全体を解体して装着品を取り外し、細部にわたって検査あるいは部品取り替える。また車体外板も塗装を行う。取り外した装着品は解体、洗浄、検査、加修、組み立て、調整、試験の順に検修する。

主な定期保全の種類と内容を示します。

鉄道車両をはじめとして鉄道システムは、要求機能を設計に盛り込んで組み立てられた電気電子部品や機械部品あるいは部材から構成されています。

例えば鉄道車両を見てみましょう。車両には様々な部品や部材が使われており、それらは後に説明しますが、腐食や疲労、摩耗などの影響を受けて劣化し、時間経過とともに特性が低下します。例えば、車輪、パンタグラフすり板、ブレーキディスクなどの摩擦部品は、摩擦・摩耗により初期状態から厚み寸法の変化が生じます。また、それぞれの部品を締結している箇所では、振動などによって緩みが生じることがあります。使用中の回転部品や強度部品、たとえば車軸などでは、疲労傷などの発生も考えられます。そこで、メンテナンスでは、それらの状態の目視、打音、機器を用いた検査などにより損傷などを発見し、摩耗限度に達した摩擦部品やき裂発生品があれば部品の取り替え、回転部品や腐食部分の表面削正などが行われます。

鉄道事業者では、メンテナンスが必須のものであることから、可能な限りメンテナンスのしやすい設計を導入し、故障などにつながるような損傷を監視しやすいように工夫しています。その一方、鉄道事業者は、損傷による修繕や取り替え率が高い部品については、図4のように、損傷解析を行って原因を追及し、その原因を設計へフィードバック

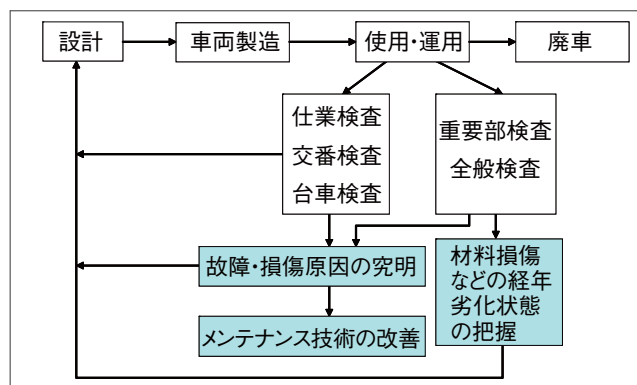


図4 車両のメンテナンスの設計・製作へのフィードバック

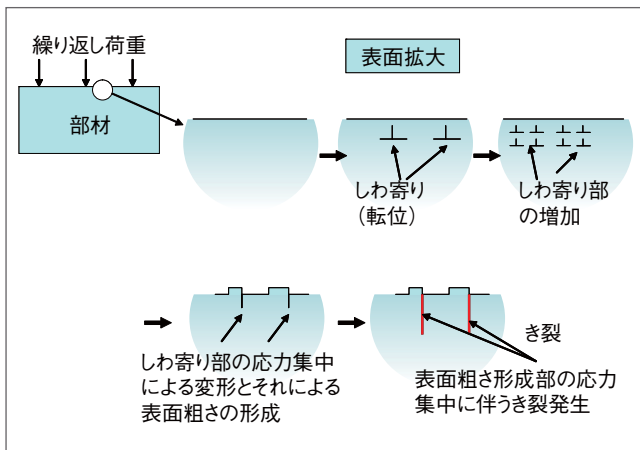


図5 疲労き裂の発生メカニズム

クさせることによって、車両の改造などを行っています。
 例えば、車両へのステンレス鋼の適用がその一つです。炭素鋼や高強度鋼で車両が作られていた時代は、車体の腐食による修繕が多く発生しました。そこに錆びない鉄鋼材料であるステンレス鋼を適用することで、錆による修繕が減少したほか、未塗装の実現により塗装コストを大幅に低減でき、さらに薄肉高強度ステンレス鋼の適用により、車体の軽量化まで実現することができました。このことからメンテナンスデータと損傷解析を設計に生かすことによって、メンテナンスコストの低減からさらには省エネにまで効果が及んでいることになり、メンテナンスとその結果の設計へのフィードバックの重要性が理解できると思います。

材料の損傷

メンテナンスでは機能低下した部材や部品を取り替え、または修繕します。部材や部品の機能低下のほとんどは材料への損傷の発生が原因です。材料の損傷は、繰り返し荷重、摩擦、摩擦熱、雨、風、振動などの外部からの要因によって材料が物理的あるいは化学的に反応することによって発生します。特に鉄道部品では、繰り返しの力を受けて材料が疲労し、疲労き裂が原因となって損傷する例が多く見られます。材料の疲労のメカニズムについて図5に示します。金属の部材が繰り返しの力を受けると、材料の金属の構造に起因する「しわ(転位)」が発生します。この「しわ」はずれを引き起こす「しわ」で、繰り返し力が増すと、「しわ」が増加します。そのしわが集まった箇所には、応力が集中して、本来は平滑であった表面が、しわによるずれで粗くなり、表面にできた微細な凹凸の粗さの一部に応力が集中し、き裂が発生し損傷となります。疲労損傷は、設計荷重以内の小さな荷重レベルにおいても発生するのが特徴です。

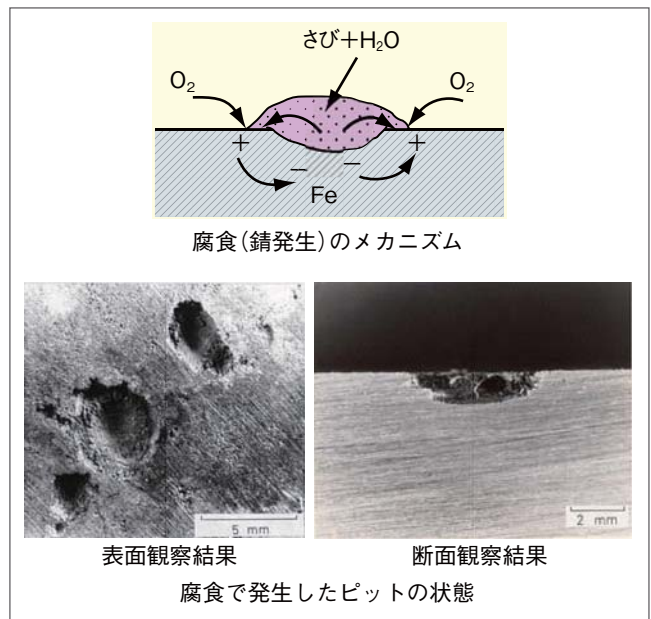


図6 腐食の発生メカニズムと発生したピットの状態

そのため、繰り返し荷重を受ける部材では、このような疲労き裂が入ることによって当初の設計強度を下回るようになり、部材の損傷にもつながります。以上は疲労損傷についてですが、そのほかにも損傷には様々な形態があります。

車両部品のメンテナンスで見られる損傷形態を挙げると、き裂、腐食、フレッチングコロージョン、擦傷、溶着、打痕、熱劣化などの様々なものがあります。き裂は一種の鋭利なひびのようなもので、前に示した疲労や、後に説明する腐食などによっても発生します。き裂はその長さや深さ、形状、発生位置などが重要です。短いき裂の場合には、進展しなければ監視を続ければよいのですが、深さや長さが大きく、鋭利な場合、また、いくつものき裂が近くに存在する場合、それが応力集中あるいは応力負荷方向にある箇所では研削などで取り除く必要があります。

腐食は、金属の電気化学的な要因で生じます。例えば、図6に示すように、部品の素材である金属が水と接触して酸化すると腐食が生じます。表面に錆が生じるのは一般的に腐食が原因です。またアルミニウム合金と鉄鋼のような異種金属が接触する箇所にも、素材の電気化学的な作用の違いにより、腐食が生じます。腐食は錆が顕著に見られるだけであり、比較的軽い錆の発生だけでは機能低下はいたりません。しかし、錆がひどくなると図6に示すようなピットと呼ばれるくぼみが発生し、そのくぼみが鋭利な切り欠きの役割を果たすようになってき裂損傷を引き起こす可能性があります。したがって、錆はなるべく研削して除去し、研削後の除去面にピットやき裂などが残っている場合には、



図7 軸受に発生したフレッチングコロージョンの例

その部品を取り替えることが望まれます。また、異種金属が接触する箇所では、異種金属の接触面において塗料を塗布することなどの対策が必要になります。

腐食、き裂以外の例としては、フレッチングコロージョンが挙げられます。図7に軸受内面に発生したフレッチングコロージョンの例を示します。フレッチングコロージョンとは、フレッチング（摩耗）とコロージョン（腐食）が同時に生じる損傷であり、相手材との繰り返し微小なすべりを伴った摩擦で生じ、特に接触部や部品の嵌め合い面に生じます。比較的軽微なフレッチングコロージョンが生じた部品は発生部を機械削正して修繕しますが、重度のフレッチングコロージョンが生じた場合は取り替えが行われます。

次に、一般の部品よりも特別なメンテナンス扱いが行われている車軸、車輪を例に、それらに見られる損傷の種類をあげ、メンテナンスの方法について簡単に紹介します。これらは、走り装置と呼ばれる台車部品の中でも重要な部品で、メンテナンスの基準も厳しく定められています。

車軸では、主に疲労き裂、錆、焼き付き、フレッチングコロージョンなどの損傷が発生し、それらの発見と除去が重要になります。車軸のメンテナンスでは、外観検査、超音波探傷および磁粉探傷などの非破壊検査、錆やき裂などの修繕や取り替えが主に行われます。車軸では図8の点線で囲んだ応力集中が高い箇所、すなわち嵌め合い部やジャーナル部、フィレット付根部に発生するき裂は許容できないため、これらの箇所にき裂や重度な錆が発生した場合には削り取りや場合によっては取り替えが必要になります。

もうひとつ車輪の例を紹介します。車輪では、表2に示すように、踏面のフラット、熱き裂、剥離（スキット、片状鱗状）、摩耗（凹摩、直摩、グルーピング）などが損傷として挙げられます。これらの発生は、踏面と制輪子およびレールとの接触に大きな影響を及ぼすのが特徴で、乗り心地にも影響を及ぼします。車輪のメンテナンスでは、これらの

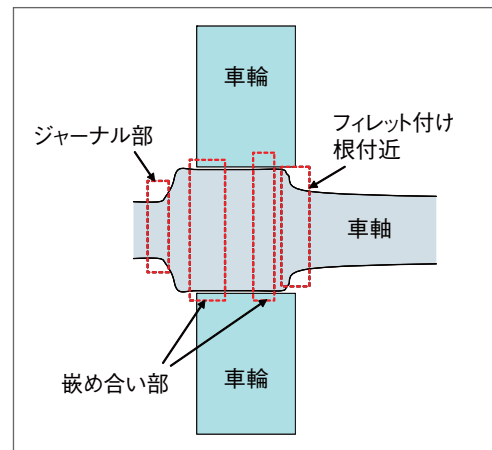


図8 車軸のメンテナンスでき裂発生に注意を要する箇所

表2 車輪に見られる損傷例

損傷	発生要因
フラット	強いブレーキ力によって車輪が固着し、レール上を滑走することで踏面が局部的に摩耗して平らな部分が形成される
熱き裂、熱ひび	ブレーキによる表面の急激な温度上昇と内面との温度差に伴う熱応力および温度上昇に伴う組織変化が繰り返し付加して生成
剥離	すべりを伴いながら回転するゆるやかな車輪固着で発生、あるいは熱き裂や熱ひびが繰り返しの応力の作用で合体して生成
摩耗	制輪子の影響で踏面がへこむ（凹摩耗）、フランジのど部とレールとが接触して摩耗する（直摩：フランジ摩耗）、制輪子の影響で踏面の表面に溝状に摩耗する（グルーピング）

修繕対策や予防のために、NC旋盤などを用いて踏面の削正が行われますが、重度な損傷が見られる車輪は交換されます。

今回は車軸と車輪を例にとって紹介しましたが、このように、部材のメンテナンスを行う際には、材料の損傷について十分に理解を深めることが必要になります。

おわりに

メンテナンスは鉄道においては非常に重要な作業です。また、それに要するコストは莫大であり、メンテナンスコストを低減することは、いつの時代においても大きな課題となります。材料損傷から見たメンテナンスコストの低減手法としては、高強度で耐腐食性、耐摩耗性に優れた新材料の部品および部材への適用があり、それにより部品および部材の長寿命化が行え、取り替え回数の減少も実現することで可能になると考えられます。メンテナンス技術のブレークスルーのためには、新しい材料の開発も重要ですが、鉄道現場で生じている材料の損傷についても深く検討するような地道な基礎研究も必要であると言えます。[RRR]