

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

車輪の損傷 メカニズムに迫る

鉄道事業者にとって車両メンテナンスは輸送サービスの円滑な提供に不可欠な業務であり、中でも車輪の適切な管理は安全性、快適性、車両メンテナンス体系全体への影響の観点からも重要です。車輪の適切な管理の前提となる使用中の損傷と摩耗について、最近の研究例を含めて解説します。



半田 和行

Kazuyuki Handa

材料技術研究部
摩擦材料研究室
副主任研究員

[専門分野] 車輪・ブレーキ系材料、金属材料、材料の組織と特性

車輪管理の重要性

車輪は使用中に摩耗し、場合によっては踏面が損傷します。車輪の形状や材料特性は、蛇行動限界速度などの車両の運動特性、走行性能や疲労強度を考慮して設計されており、これらは基本的には設計時の形状と新品時の特性を前提としています。一方、実際に使用中の車両の諸特性は、損傷・摩耗した状態での車輪の形状や特性に依存しており、必ずしも新品時の特性と同じとは限りません。したがって車輪の適切な管理は使用中の車両の安全性、快適性や経済性を保つために重要です。

車輪には、レールとの接触部での輪重や前後方向の接線力、踏面ブレーキ車両の場合には制輪子による摩擦や熱影響などが負荷されます。車輪に負荷

される外力の例を図1に示します。こうした負荷により生じる損傷・摩耗を適切に管理し、安全で安定した輸送を確保することが車輪管理の主な目的です。さらに、最近では鉄道事業者が車両の使用実態に基づき実態に即して車両の検査周期を定めることができるようになっており、その際には車輪の摩耗とその管理は重要な項目となります。

車輪の損傷メカニズム

車輪の損傷のうち最も優先的に防がなければならないのは車輪の割損です(図2参照)。

正常な使用状態において車輪管理上最も大きな問題となるのは車輪踏面の熱き裂(踏面熱き裂)です。実車に発生した踏面熱き裂の例を図2に示しま

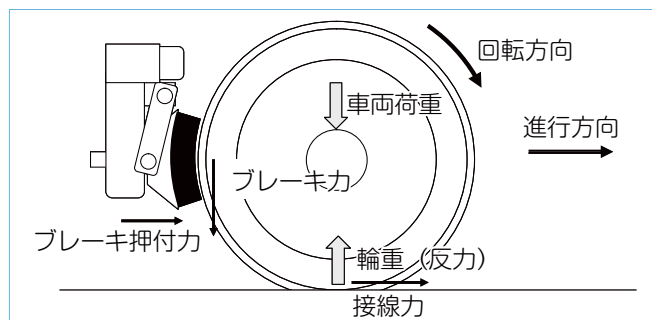


図1 車輪が受ける負荷の種類

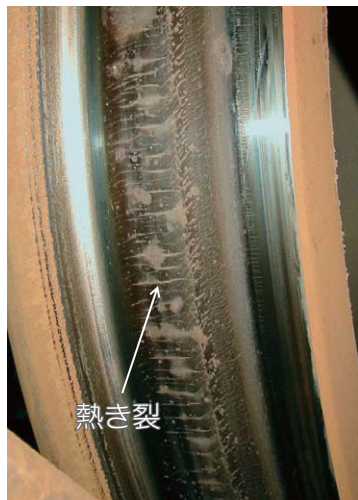


図2 踏面熱き裂の例

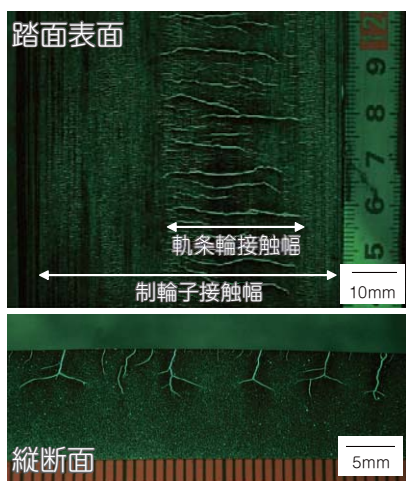


図4 試験で再現生成した踏面熱き裂

踏面熱き裂は踏面制輪子による摩擦熱が影響していると考えられてきましたが、熱負荷が制御された定置試験で再現された例が無く、その発生メカニズムや発生条件は明らかになっていませんでした。鉄道総研では図3に示

車輪の割損

車輪の割損は、国内の車両では踏面ブレーキの異常による過大な熱負荷によって内部残留応力が変化した場合に発生する可能性があります。輪重の大きい海外の鉄道車両では熱負荷ではなく車輪とレールの転動接触に伴う応力(転がり疲労)によって車輪が割損する場合があります、特に軸重が大きい(最大約30トン)北米の貨車では多数発生しています。車輪の残留応力と車輪の割損についてはRRR2011年12月号を参照してください。



図3 車輪の実物大試験装置

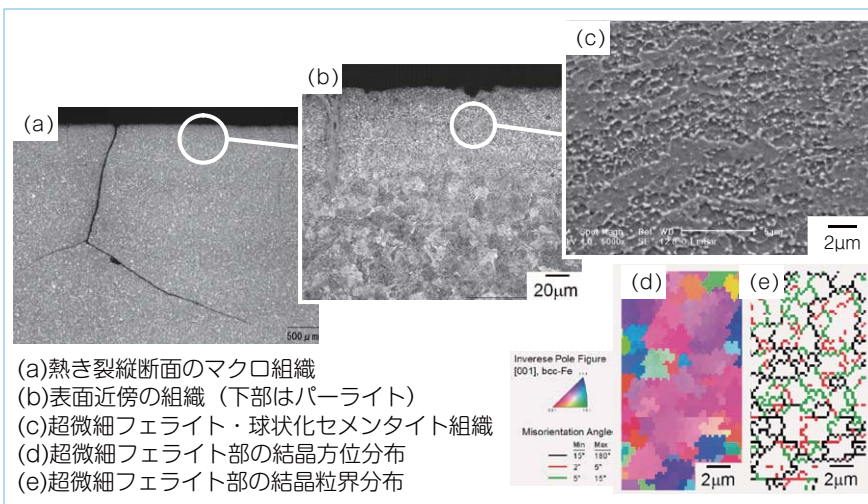


図5 き裂発生車輪の表面近傍の金属組織

す実物大の車輪踏面ブレーキ試験装置を使用して踏面熱き裂を再現生成させることに成功し、さらにき裂発生部の材料分析と熱応力解析による検討を行いました。

図4に試験で生成した踏面熱き裂の表面分布と縦断面形状を示します。踏面熱き裂は車輪踏面上の全周にはしご状に発生し、断面を見ると、き裂は垂直方向に数ミリ程度進展し表面平行方向に屈曲しています。これはブレーキディスクなどに発生する熱き裂とは異なる特異な形態です。再現試験の結果、実車相当輪重でレールと接触する場合、常用最大ブレーキ相当で100回程度の熱負荷によってき裂が発生・進展することが分かりました。なお実車では車輪削正によりき裂を除去するので、図4に示すような状態まで進展するこ

とは通常ありません。

き裂が発生した車輪の表面近傍の金属組織を図5に示します。図5(b)の下部が車輪製造時のパーライト組織です。図5(c)に示す表面近傍には超微細フェライト組織という特殊な金属組織が生じていました(※参照)。これを詳細に調査したところ、連続動的再結晶と呼ばれる組織変化が生じており、その発生温度は500~600℃であ

超微細組織

金属材料の強度は結晶粒径が小さいほど向上することから、製造時になるべく小さな結晶粒を得よう様々な研究が行われています。鉄鋼材料の量産製品では結晶粒径3~4μm程度が限界とされており、図5に示すような1μm以下の結晶粒を超微細結晶粒と呼びます。

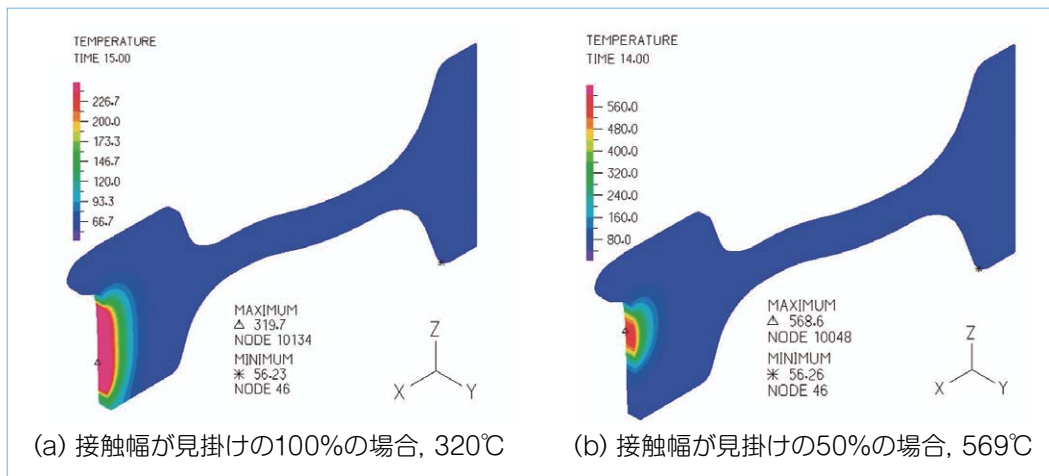


図6 車輪表面の最高到達温度の解析結果

ることが分かりました。踏面ブレーキ動作時の車輪の表面温度は熱弾性不安定現象(☞参照)のために正確な測定が困難でしたが、この金属組織から最高到達温度が推定できました。500～600℃という表面温度は従来の想定を大きく上回るものです。

熱弾性不安定を考慮し、制輪子と車輪踏面の接触領域の幅を見掛けの100%および50%とした場合の、試験と同条件での車輪の最高到達温度の解析結果を図6に示します。接触幅を50%とした場合には材料調査の結果とほぼ一致する温度まで達することが分かります。またこの条件では、ブレー

☞ 熱弾性不安定

摩擦材と回転体は全面均一には接触せず、接触面圧のゆらぎが不均一な熱膨張を起こしてゆらぎを拡大させ、結果的に一部の領域のみで接触する現象を熱弾性不安定と呼びます。ブレーキディスクに発生するヒートスポットはその典型例です。車輪/制輪子の場合、接触領域はブレーキ動作ごとに変化します。

☞ 白色層

車輪、ブレーキディスクやレールなどの鉄鋼材料の摩擦表面に発生する熱影響部で、顕微鏡で白く見えることから白色層と呼ばれます。主にマルテンサイトと呼ばれる金属組織から成り、変態温度以上まで加熱された後急冷されたことを示します。

キ動作ごとに円周方向に引張残留応力が発生することが分かりました。

以上のような数値的な応力状態の解析結果と、図4の破面観察から推定される荷重条件から、踏面熱き裂は「残留応力」と「接線力」が主因となって発生するものと推定して検証試験を行った結果、これらの因子のみで踏面熱き裂が発生しました。これにより、各温度での車輪の内部応力と強度の変化から、図7に示す踏面熱き裂の発生条件指標図を作成しました。車両諸元に基づいて車両ごとの指標図を作成することで、踏面熱き裂の発生状態の把握や各種対策の評価に活用することができ

ます。踏面熱き裂以外の代表的な踏面損傷として固着滑走時に発生するフラットがあります。フラットがある車輪は回転時に騒音や振動を発生し問題となります。特に著大なフラットは塑性変形によってフラット部の後方で車輪が凸状となることから、発生初期に顕著な騒音と振動を生じます。

車輪踏面のフラット部は塑性変形して偏平となり、レールとのすべり摩擦によって温度が上昇します。フラットは最高到達温度によってその後の進展が異なり、熱影響層(白色層)(☞参照)が広範囲に生じた場合には使用中にはく離します(図8)。このようにフラッ

トの発生・進展機構についても、金属組織変化の観点から系統的に把握することができます。

使用中に発生したフラットは車輪転削によって除去する必要がありますが、滑走防止装置を用いることで発生は大幅に減少します。また車輪とレール間の粘着係数によってフラットの原因となる滑走の頻度は大きく変化し、踏面の粗さが小さく鏡面のような状態では滑走が生じやすくなります。車輪踏面の粗さは踏面制輪子の種類によって大きく異なることから、フラットの発生にも踏面制輪子が影響していると言えます。

このように車輪の損傷については、制輪子/車輪/レール多重系境界問題として各々の相互作用を整理すること、および熱影響による使用中の金属組織や表面物性の変化を把握することが重要です。

車輪の摩耗と対策

車輪踏面は図1に示す様々な負荷により摩耗します。車輪の摩耗は、車輪踏面形状の変化であり、主にフランジ部と踏面で生じるもので、前者を直摩、後者を凹摩と呼びます。図9に直摩と凹摩の両方が生じて踏面が大きく摩耗した車輪の例を示します。

直摩は曲線外軌レールとのすべり接

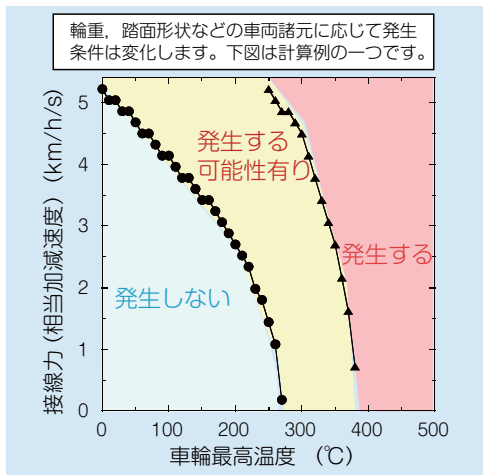


図7 踏面熱き裂発生条件指標図の例

触によってフランジが摩耗するもので、これを抑制するにはまず車輪フランジと外軌レール間を適切に潤滑すること、および操舵機構や軸箱支持剛性の最適化などにより横圧を低減することが有効です。

一方、凹摩は踏面制輪子を使用する車両において見られる場合が多く、制輪子材質と凹摩の進行速度に明確な相関が見られることから、制輪子による摩耗と考えられてきました。しかし、近年の研究により制輪子単体では車輪はほとんど摩耗せず、制輪子による熱と輪重を伴うレールとの接触の双方によって凹摩が生じることが分かりました。凹摩が生じると車両運動特性が変化し、場合によっては蛇行動による車両動揺を誘発します。凹摩耗の抑制による車両運動特性の悪化を防止するため、今後凹摩の進展条件の解明が期待されます。

最適な車輪使用に向けて

様々な損傷や摩耗が発生する車輪を適切かつ計画的に管理することは、車両メンテナンス体系の視点からも重要です。車輪は新品から使用限度に達して交換されるまで順次切削して使用されます。車輪の交換は台車を車体から外した状態で輪軸単位で行う必要があります。多数の車輪を一斉に交換できるの

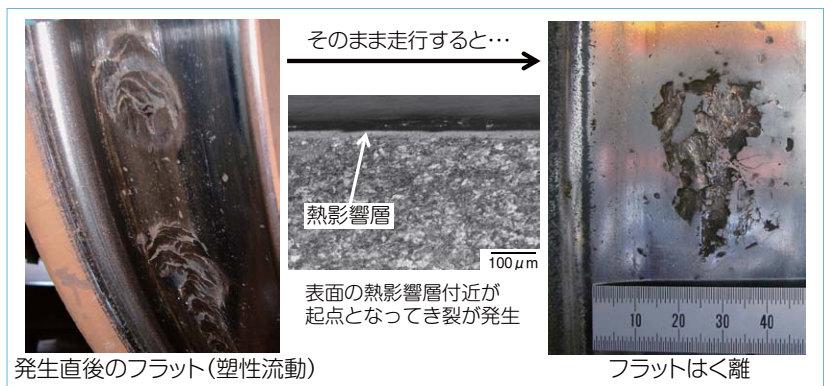


図8 車輪フラットからフラットはく離に至るプロセス

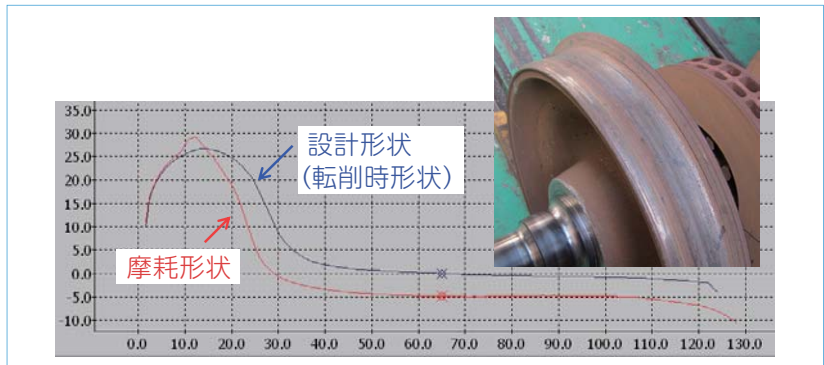


図9 踏面が大きく摩耗した車輪の例

は検査のため車両検修工場に入場する時のみです。このため、車輪の損傷や摩耗を的確に把握し車輪転削周期と転削量を適切に設定することで、次回の入場までに車輪交換が発生しないように管理する必要があります。

車輪を含む鉄道車両の検査周期や検査項目は、鉄道事業者が実施基準を定めています。その際、具体的な検査周期は国土交通大臣の告示の規定に基づくことが原則ですが、いくつかの条件をクリアした場合には鉄道事業者が実態に即して定めることができるようになりました(☞参照)。これにより、車両検修の抜本的な効率化が可能とな

りましたが、その場合車輪の交換周期が車輪の検査周期を決定する最大の要因となります。このように、車輪を適正に管理して計画周期までの寿命を確保することは検査体系全体を計画通り機能させるために不可欠となっています。

鉄道総研では車輪/制輪子の接触にまつわる諸問題の現象解明と対策策定に取り組むとともに最適な車輪の使用条件を明らかにし、より効率的かつ安全・安定に車両を運用するための基盤技術の確立を目指して考えています。[RRR]

☞ 車両検査に関する法令

鉄道に関する技術上の基準を定める省令、同省令の解釈基準(通達)、施設及び車両の定期検査に関する告示の3段階で定められています。平成14年の省令改正により性能規定化が図られ、鉄道事業者による柔軟な対応が可能となりました。

文献

- 1) 半田和行：車輪の安全を支える技術，RRR，Vol.68，No.12，pp.18-21，2011.12
- 2) 半田和行，他：車輪踏面熱き裂の実験的再現と生成条件，鉄道総研報告，Vol.24，No.8，pp.35-40，2010.8
- 3) 半田和行，他：車輪踏面熱き裂の発生メカニズムと対策法，鉄道総研報告，Vol.25，No.10，pp.23-28，2011.10