

# 車輪の安全性を支える技術

半田 和行

材料技術研究部(摩擦材料研究室 副主任研究員)



ほんだ かずゆき

## はじめに

車輪は、鉄道車両の安全性を支える最も重要な部品の一つです。車輪は車両走行中に発生する様々な荷重に対して安全な状態を保つように設計・製造され、厳格な基準に基づいて使用されています。ここでは鉄道車輪の安全性を支える技術について、使用中の損傷に関する最近の研究例を含めて解説します。

## 車輪の損傷と摩耗

鉄道車輪(図1)が受ける負荷を模式的に図2に示します。車輪は車両の重量を支えながらレール上を回転して車両を

案内するだけでなく、加速時の駆動力や制動時のブレーキ力なども車輪を経て車両からレールに伝えられます。さらに、車輪踏面にブレーキ(制輪子)を押し付けて車輪をブレーキとして使う(車輪踏面ブレーキ)場合には、摩擦熱による温度上昇にさらされます。車輪踏面ブレーキは在来線車両の大部分に使用されています。こうした負荷によって、車輪には様々な損傷や摩耗が発生します。使用中に車輪の踏面に発生する代表的な損傷を図3に示します。

フラットはブレーキ時に車輪が滑走してロック(固着)したまま走行した場合に生じる損傷です。フラット部の表面が摩擦熱により急速に加熱・冷却されるため、表面付近に硬くて脆い焼入硬化層が生じ、さらにこれが車輪回転中にはく離する場合があります(図4)。フラットによる損傷はほとんどの場合表面から数ミリ以内に留まり、車輪が壊れるという意味での安全性に影響を与えることはありません。ただしフラットが発生した車輪は円周形状が真円でなくなるため、回転に伴って騒音・振動を生じ、台車部品が振動によって損傷する可能性があります。車輪フラットは滑走防止装置(ABS)を装備することで大幅に減少します。

フランジ摩耗はフランジの角度が立つような形状になることから直摩とも呼ばれます。曲線区間で車輪フランジが

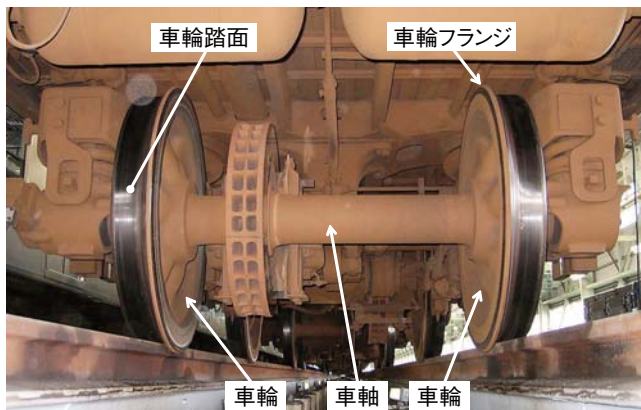


図1 鉄道車輪の外観と名称

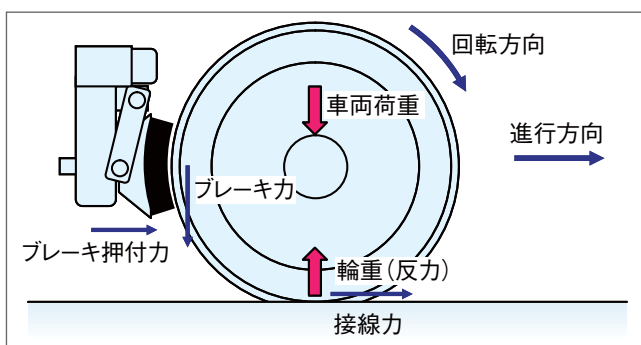


図2 車輪が受ける負荷の種類

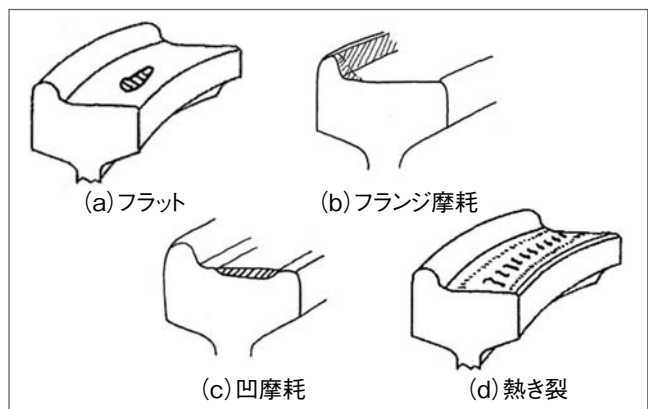


図3 車輪使用中に発生する踏面損傷



図4 車輪踏面のフラットによる表面はく離の例



図6 車輪踏面熱き裂の例

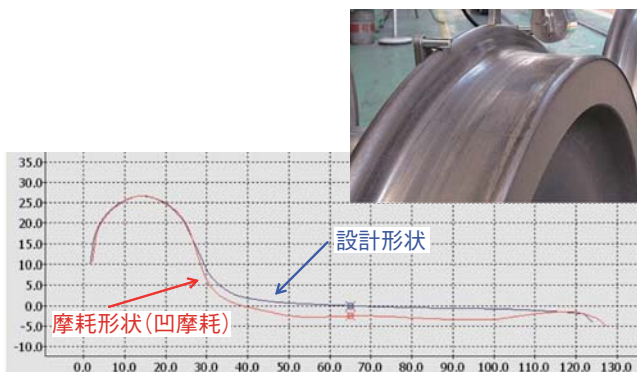


図5 車輪の踏面凹摩耗の例



図7 車輪の実物大試験装置

外軌レールと大きな圧力ですべり接触することによるもので、これは車輪・レール双方の摩耗のほか、曲線通過時の騒音の原因となります。車輪フランジとレールの接触部を適切に潤滑することで摩耗・騒音ともに解消可能です。

一方、踏面凹摩耗と踏面熱き裂は、従来発生原因が完全には解明されておらず対策が確立していませんでした。踏面凹摩耗は図5に示すように車輪踏面が凹むように摩耗するものです。車輪踏面の勾配やカーブなどの形状(車輪踏面形状)は、車両の運動特性や曲線通過性能などを考慮して設計されています。しかし踏面凹摩耗が発生すると計画した運動特性を発揮できなくなり、異常な動揺などが発生する場合があります。踏面凹摩耗は踏面の制輪子が接触する部分に発生するのが一般的です。

踏面熱き裂は図6に示すように車輪踏面上の全周にはしご状にき裂が発生するものです。き裂によって表面が剥離する場合があるほか、車輪の割損に対する安全性への影響が懸念されます。鉄道総研では、この車輪踏面熱き裂について図7に示す実物大の試験機を使用して発生原因の解明に取り組みました。この試験機は車輪と制輪子に加えて車輪とレールの接触を同時に模擬できるもので、これにより

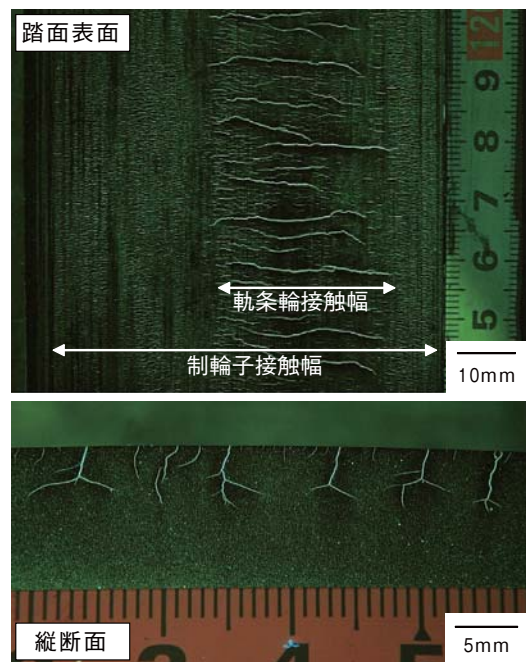


図8 試験で再現生成した踏面熱き裂

従来試験機では再現できなかった踏面熱き裂を再現し、さらに踏面熱き裂が制輪子との摩擦による熱応力と、車輪／レール間での加減速力の伝達に伴う力(接線力)によって発生することを解明しました(図8)。

## 車輪の安全を支える仕組み

鉄道車輪には、このように様々な損傷や摩耗が発生する環境でも安全を確保するために、特有のしくみがあります。車輪は製造時、熱間圧延によって成型(図9)された後、再度加熱して外周部に水をかけて冷却する熱処理が施されます。この熱処理により、車輪の外周部全体に円周方向に押さえようとする力(圧縮残留応力)が生じます(図10)。この力によって、多少のキズが生じたり様々な外力が作用しても車輪全体が破壊することを防いでいます。鉄鋼材料の表面に圧縮残留応力を与えて耐久性を改善することはショットピーニングと呼ばれる表面処理によって多くの部材で行われていますが、熱処理時の冷却速度の違いを巧みに利用して表面だけでなく構造体全体としての安全性を確保しているのが鉄道車輪の特徴です。

鉄道車輪の材料には炭素鋼が用いられます。車輪鋼の炭

素量は使用条件や歴史的経緯から国や地域によって違いがあり、日本では0.6~0.75%と比較的炭素量の高い鋼材が使用されています(表1)。図11に車輪鋼の金属組織を示します。灰色の部分パーライトと呼ばれる組織で、柔らかい純鉄と硬い炭化物がナノメートルオーダーで層状に配列しています。車輪鋼やレール鋼では、このパーライトが強度と靱性を支えています。パーライトの層状組織はその間隔が小さいほど強度が向上することから、製造時に適切な層間隔にする必要があります。これは製造時の温度履歴に依存する特性で、車輪の熱処理はこの点でも重要な役割を担っています。車輪の熱処理は残留応力の付与と金属組織の調整という2つの目的を同時に達成する合理的かつ効率的な方法であり、鉄道車輪の製造に関して最も重要なポイントであると言えます。



図9 車輪製造時の熱間圧延の例<sup>1)</sup>

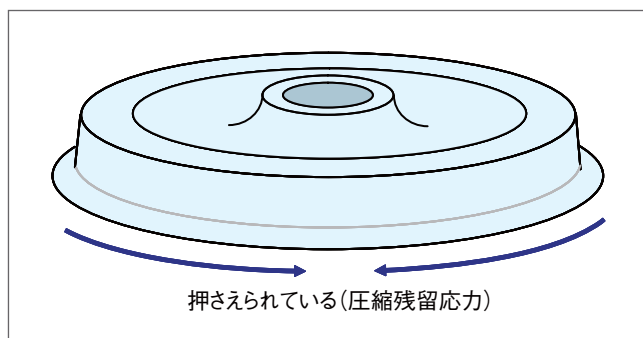


図10 車輪外周部の圧縮残留応力

表1 日本と欧州の車輪の材質の違い

|            | 日本の車輪                | 欧州の車輪     |
|------------|----------------------|-----------|
| 材質         | SSW-Q3S/R            | R7        |
| 準拠規格       | JIS E 5402           | UIC 812-3 |
| 炭素量 (wt.%) | 0.60-0.75<br>(約0.65) | ≤0.52     |
| 降伏応力 (MPa) | (600-700)            | ≥520      |
| 引張強さ (MPa) | (1000-1100)          | 820-940   |

※括弧内は実測値

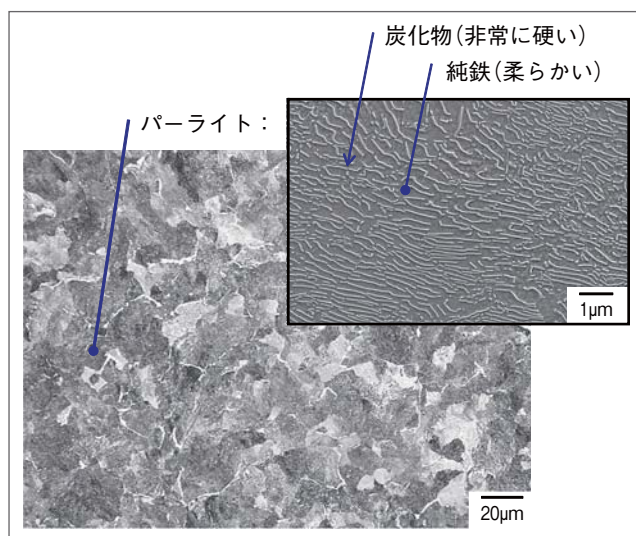


図11 車輪鋼の金属組織



図12 車輪が割損した例(過去の事例)

### 車輪が壊れるとき

車輪の圧縮残留応力は、車輪が割れるのを防ぐという観点から、車輪の使用中最確実に作用していることが必要です。この残留応力は、車輪の外周部が一定以上に加熱されると、製造時に圧縮残留応力が生じたのと反対のしくみによって、圧縮残留応力が失われ、さらに加熱されると応力が反転して逆向きの車輪がこわれようとする力(引張残留応力)が発生します。このため車輪の使用中の許容温度は厳格に定められており、踏面ブレーキの設計にあたっては車輪の温度を許容値以内に収めることが絶対条件となります。これにより通常時には車輪の安全性は確保されていますが、ブレーキ装置の異常などによって車輪外周部が許容温度以上に加熱された場合、大きな引張残留応力が発生し、最悪の場合車輪が割れることもありえます。実車で車輪が割損した例を図12に示します。このような事態に至る前に、いくつかの手法による検査を行うことでその兆候を発見することができるため、車輪は厳密な基準に基づいて検査しながら使用されています。なお、鉄道総研では車両に異常が生じた際に車輪の安全性を判定したり、判定方法を指導する業務も行っています。

### 車輪を安全に長く使う

鉄道車輪には摩耗や損傷が生じることから、定期的あるいは不定期に踏面を切削し、踏面形状を設計形状に復元して使用します。これを車輪削正と呼びます。車輪削正は台車を分解検査するときか、または車両状態のまま専用の旋

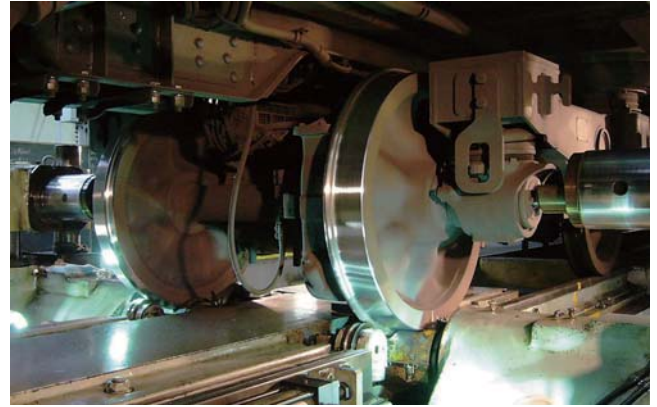


図13 在姿車輪削正盤による車輪削正の例

盤で実施します(図13)。車輪削正のための削正しろは通常40mm(半径)で、例えば新品車輪径860mmの車輪は780mm程度まで使用され、交換されます。車輪の交換に要する費用は車両メンテナンス費用の中でも大きな割合を占めており、車輪を効率的に使用することが求められています。このためには車輪の摩耗や損傷を抑えることが重要で、特に前述の踏面熱き裂はき裂を除去するのに大きな削正量を要することから、車輪寿命に大きく影響します。鉄道総研では前述の踏面熱き裂の再現試験などを利用して踏面熱き裂の発生条件を算出する手法を開発しており、これにより車両設計時点で製造とメンテナンスの全体を考慮しライフサイクルコストの最適化を図ることが可能となります。

### おわりに

車両技術を支える車輪の安全性に関して、製造時および使用時に安全性を確保する技術について紹介しました。本稿が鉄道車輪と鉄道車両への理解の一助となれば幸いです。

RRR

### 文献

- 1) M. Diener, A. Ghidini, Reliability and Safety in Railway Products, Lucchini RS, pp. 74, 2008