

第2回

材料強度からみた 車軸と車輪

はじめに

2008年7月、ドイツのケルン駅構内で発車したばかりの高速列車ICE-3の車軸が、車輪座脇の応力緩和溝と呼ばれる非はめ合い部で折損する事故が発生しました。この事故は、死傷者がいなかったためか、日本ではほとんど報道されませんでした。ドイツでは、1998年にエシェデ (Eschede) で101名が死亡した車輪破断事故を思い出させ、その後、他のICE車両の車軸にもき裂が発見されたこともあって、大問題となりました。

鉄道は、1825年にイギリスのストクトン (Stokton) ～ダーリントン (Darlington) 間において世界で最初に営業運転を開始しました。その時以来、車両には車軸と車輪が使用され続けてきているわけですが、時には人命が奪われるような大事故を経験しつつ、主として安全性向上の観点から車軸と車輪に関する研究開発が進められてきました。

ここでは、材料強度の観点から車軸と車輪に関する研究開発を振り返り、今後を展望します。

車軸の疲労に関する研究開発小史

1825年に最初の営業運転を開始した鉄道は、その後、



図1 ヴェルサイユ近郊での機関車車軸折損事故
出典：C. H. Ellis：A Picture History of Railways,
Hulton Press, illustration No.20, 1956.

ヨーロッパにおいて急速に普及していきましたが、それと同時に各国の鉄道技術者は車軸折損に悩まされることとなりました。1842年には、フランスのヴェルサイユ (Versailles) 近郊にて蒸気機関車三重連+客車17両で編成された列車の先頭機関車の先頭車軸が折損したため車両の脱線・火災事故が発生し、死者は40～80名に上ったと言われています (図1)。この事故が金属疲労に関する研究の端緒になったとされます¹⁾。

図2は、イギリスの物理学者であり工学者のランキン (W. J. M. Rankine, 1820～1872) が1843年にイギリス土木学会誌に発表した論文の標題と冒頭部分です。元々は健全であった車軸が数年の使用の後、思いがけずに破断する、と述べられ、その原因についての考察が行われています。まだ、この論文では疲労 (fatigue) という語は用いられていません。現在に至る金属疲労の系統的な研究は、ドイツのニーダーシュレージェン (Niederschlesien) ～マルク (Märkische) 鉄道の技術者であり、車軸折損対策委員会の委員として活躍していたヴェーラー (A. Wöhler, 1819～1914) によって始められました。ヴェーラーは、車軸に発生する応力の測定法の開発、実体車軸曲げ疲労試験機の製作、疲労試験によるS-N曲線 (Sは負荷応力、Nは繰返し数) の概念の構築などを行いました。

No. 596. "On the causes of the unexpected breakage of the Journals of Railway Axles; and on the means of preventing such accidents by observing the Law of Continuity in their construction." By William John Macquorn Rankine, Assoc. Inst. C. E.

The paper commences by stating that the unexpected fracture of originally good axles, after running for several years, without any appearance of unsoundness, must be caused by a gradual deterioration in the course of working; that with respect to the nature and cause of this deterioration, nothing but hypotheses have hitherto been given; the most accepted reason being, that the fibrous texture of malleable iron assumes gradually a crystallized structure, which being weaker in a longitudinal direction, gives way under a shock that the same iron when in its fibrous state would have sustained without injury.

図2 ランキンの論文標題と書き出し部

出典：W. J. M. Rankine：Minutes of Proc. of I. C. E.
Vol.2, pp.105～108, 1843.

一般に、平滑軸やはめ合軸の疲労試験を行ってS-N曲線をとると、フレットングと呼ばれるはめ合部特有の現象により、はめ合軸の疲労強度は平滑時の半分程度に低下してしまうことが知られ、実際に営業で使用されている車軸も、多くは車輪座などののはめ合部で折損しました。



図3 車輪内ボス端のオーバーハング圧入



図4 0系新幹線電車(21-50) 輪軸

ヴェーラー以降、車軸の疲労に関する研究は長い間低迷し、第2次世界大戦後においても、車輪座におけるフレットング疲労き裂の発生およびそれに起因する車軸折損の問題は解決されていませんでした。例えば、イギリスのロンドン地下鉄では、1948年～1964年の間に、車輪座における深さ0.002～0.010

インチ(0.0508～0.254mm)のき裂のために約4,000本の車軸交換を余儀なくされました。一方、我が国では、統計を取った期間は不明ですが、1949年10月時点で国鉄と公・民鉄を合わせて510本の車軸が折損し、うち少なくとも288本ははめ合部で発生したとの記述があります²⁾。このような状況の中でアメリカのホーガー(O. J. Horger)らは、戦前の1935年～1963年頃にかけて実体車軸による数多くの疲労試験を行い³⁾、圧入部への表面圧延施工や焼ならし焼戻処理による疲労強度向上、当該部の残留応力や圧入部端の形状がフレットング疲労強度に及ぼす影響、などを明らかにしました。

一方、我が国では、ホーガーより少し遅れて実体車軸を用いた疲労試験が開始され、車軸はめ合部における疲労強度の寸法効果や圧入部端の形状がフレットング疲労強度に及ぼす影響などが明らかにされました。1990年代に入ると、鉄道総研の研究者らによってオーバーハング形状高周波焼入車軸の車輪座における磁粉さび発生疲労限度やフレットング疲労き裂の進展性が定量的に明らかにされ、車輪内ボス端のオーバーハング圧入と高周波焼入れが、車軸の、特に、車輪座の疲労強度向上にとって極めて有効であることを明らかにしました。

車輪内ボス端のオーバーハング圧入とは、車輪の内ボス端を車軸の車輪座に対して6mm程度突き出させて車輪を圧入する方法で、こうすることにより、車輪座端でのフレッ



図5 高周波焼入車軸
出典：住友金属パンフレット「車軸」

ティング現象が抑制されます。現在、車輪内ボス端のオーバーハング圧入は新幹線電車、在来線車両を問わず多くの車両で採用されています。図3は車輪内ボス端のオーバーハング圧入部です。一方、図4は、新大阪駅改札内の在来線と新幹線の乗り換え広場奥に展示されている新幹線電車用輪軸です。大抵の人はそこまで気がつきませんが、この1965年度に製造された0系新幹線電車(21-50)用輪軸の車輪はめ合部を観察すると、オーバーハング圧入となっていません(ただし、車軸は循環使用されるので、この車軸の製造年は不明です)。こんなところにも、車軸の安全性向上に対する技術発展の一コマを垣間見ることができます。

車軸の疲労強度向上策としての高周波焼入れに関してですが、全ての新幹線電車の車軸には高周波焼入れが施工されており、車軸中心にあいている直径60mmの中ぐり孔とともに、新幹線電車車軸の大きな特徴となっています。ここで、中ぐり車軸は、軽量化と超音波探傷精度の向上を目的として、1992年に営業運転を開始した300系新幹線電車以降の車両に全面的に採用されるようになったものですが、高周波焼入れは、特に、車輪座などののはめ合部におけるフレットング疲労強度の向上を主な目的として、1964年に営業運転を開始した0系新幹線電車以来全ての車軸に採用されています。

車軸に高周波焼入れを施工すると(現在、高周波焼入れは3kHzの交流電流により行われているため中周波領域な

のですが、かつて高周波領域の10kHzで行われていた名残から、慣習的に高周波焼入れと呼ばれています)、表層部にはマルテンサイトと呼ばれる緻密な金属組織が形成され硬くなるとともに、圧縮残留応力が発生します。このような表層部における硬化が車軸の耐摩耗性および耐衝撃性の向上に、また、圧縮残留応力が疲労強度の向上に主として寄与します。図5は、高周波焼入車軸の車輪外ボス側車輪座端からジャーナルにかけての高周波焼入れ状況を示します。写真で黒く見えている部分が、高周波焼入れにより金属組織が変化した領域です。

高周波焼入れ車軸は、高温で十分に鍛錬したあと水中に入れ急冷することによって表面のみが硬化し、内部は粘り強さを有する日本刀の製法にヒントを得て、戦後まもなく我が国で独自に開発されました。1951年に、土佐電鉄で初めて試験的な使用が開始され、その後、国鉄での電気機関車用としての採用を経て、0系新幹線電車用として、軽量化と高い疲労強度への要求から、高周波焼入車軸が採用されました。なお、高周波焼入車軸は新幹線電車以外にも、機関車、特急電車および特急気動車の一部の車両に使用されています。

車輪技術開発小史

図6は、ストックトン〜ダーリントン間で1827年頃に使用されていたロイヤル・ジョージ号です。この機関車の車輪は外輪と内輪とで構成され、両輪は木製のプラグで固定されていました。当時の車輪には鋳鉄が使用されていましたが、鋳鉄は炭素量が多いためもろく衝撃に弱いので、このような二輪構造として損傷した外輪(タイヤリム部)のみの交換を容易にしたのです。その後、1830年頃からは細長く圧延した鋼板を溶接してリング状としたタイヤを輪心にはめるタイヤ車輪構造の車輪が開発され使用されるようになりました。しかし、タイヤは溶接部で破壊しやすかったため、1850年頃には鍛鋼

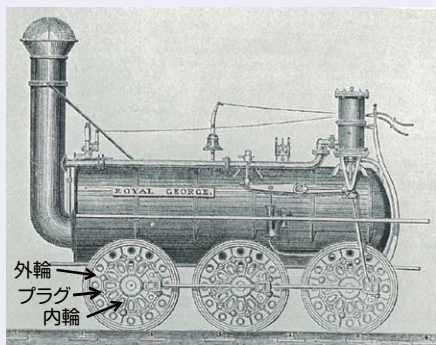


図6 機関車ロイヤル・ジョージ号
出典：A Picture History of Railways,
Hulton Press, illustration No.6, 1956.

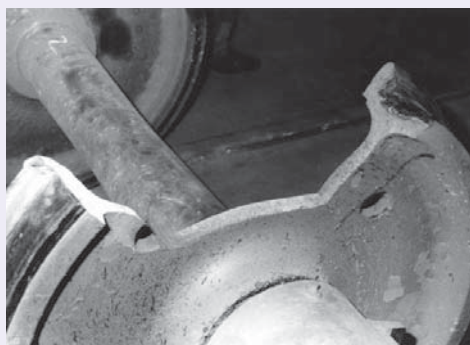


図7 割損した車輪



図8 新幹線電車中ぐり車軸の交番検査

製の継ぎ目無しタイヤの製造法がドイツで開発され、普及していきました。なお、我が国では、1906年に初めてタイヤ圧延機が官営八幡製鉄所に設置されました。

タイヤ車輪構造は、制輪子による過大なブレーキ熱によりタイヤがゆるむという問題があるため、我が国では、一体圧延車輪が戦後、特に1960年頃より急速に普及していきました。一体圧延車輪の登場により車輪の安全性は大きく向上しましたが、損傷と無縁になったわけではありません。

使用中の車輪に発生する損傷として、踏面摩耗、フラット、はくり、熱き裂などがあり、これらの損傷により車輪の保安度を低下させ、また振動および騒音を発生させて、乗り心地を悪くしたり沿線環境を悪化させたりします。しかし、車輪の損傷で最も重要なのは、図7に例を示すような割損です。車輪割損により、車両は脱線することもあります。割損は、異常なブレーキ熱によって車輪リム部に発生した引張残留応力(通常、製造時の熱処理によりリム部には圧縮残留応力が発生しています)が駆動力となり、踏面の熱き裂やはくりなどが起点となって発生します。

車輪の割損を防止するには、①踏面における熱き裂の発生を低減し、またリム部における引張残留応力の発生を抑制するために、踏面ブレーキにより異常加熱を受けた車輪の早期検出を行う、②材質的に耐割損性を高める、すなわち高^{じん}韌性化する、が特に有効です。なお、③リムが厚い方が、またA種板部形状(車輪のボス部がリム部に対して輪軸中心側に位置する)の方がB種板部形状(ボス部がリム部に対して軸端側に位置する)より耐割損性は高いことも分かりました。①に関して、踏面における熱き裂およびリム部における引張残留応力の発生は、制輪子の種別やブレーキ条件による異常発熱に起因します。そこで、車両の運転条件に合った適切な制輪子材料の選定とブレーキ力の設定といった対策が行われてきました。

次に、②に関して、鋼の韌性を高めるには、炭素量を減

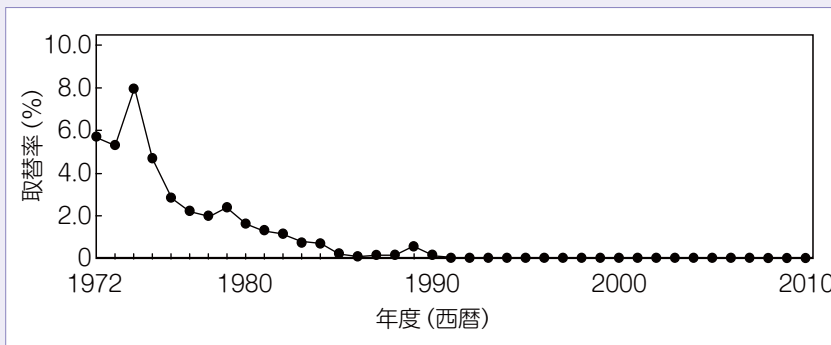


図9 新幹線電車車軸の磁粉きずによる取替率の推移

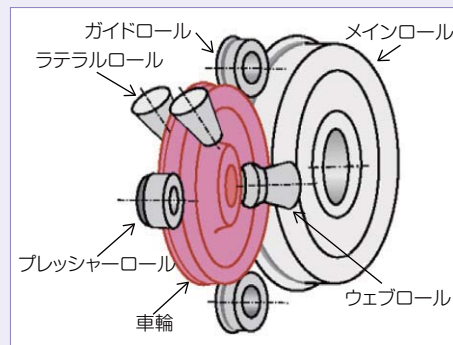


図10 堅型車輪圧延機
出典：住友金属提供

らしたり、バナジウム (V)、モリブデン (Mo) などの合金元素を添加することが有効です。車輪材料の選定では、耐磨耗性、疲労強度の確保が基本的な要件です。この点で、比較的高炭素量の鋼が選択されますが、一方、耐割損性(靱性)重視にあたっては、前述の基本要件が満たされる範囲内で比較的低炭素量の鋼が選択されます。

安心・安全な車軸と車輪

折損をはじめとする各種の損傷を経験してきた車軸は、それらを未然に防ぐために、超音波探傷と磁粉探傷を定期的実施する、非破壊検査の体系を構築しています。図8は、新幹線電車の中ぐり車軸を3万km走行毎の交番検査時に超音波探傷しているところです。定期検査の周期は、損傷発生数の減少や検査機器の技術的発展などを踏まえ延伸されてきました。例えば、新幹線電車車軸は、台車検査および全般検査時に、より精度の高い超音波探傷と磁粉探傷が行われますが、台車検査の周期は、1964年の営業運転開始時の24万kmから、現在は60万kmとなっています。

図9は、1972年度(昭和47年度)からの磁粉きずによる新幹線電車車軸取替率の年度推移を示します。磁粉きずによる車軸取替えは1974年度(昭和49年度)より概ね減少傾向にあり、特に1990年度(平成2年度)以降は、ほとんど0の状態が継続しています。このような磁粉きずの減少には、高周波焼入方法の改良と図3に示した車輪内ボス端のオーバーハング圧入が大きく寄与しています。

最近の我が国の車輪においては、割損などの重大な損傷は皆無に近い状況となっていますが、その背景に製造技術や強度解析技術の発展があります。製造技術発展の一例として、図10に8個のロールを有する堅型の車輪圧延機を示します。大型水圧プレスによる鍛造後に、図のような圧延が車輪の板部とリム部に対して行われますが、このような圧延により、均一な精度と品質を有する車輪を大量に生

産することが可能となっています。また、安全性向上と軽量化の観点から、波打車輪の板部の熱応力と機械的応力を詳細にFEM(有限要素法)により解析することによって波形形状を最適化し、安全性は同等で、より軽量な板部厚さの薄い車輪の提案なども行われています。

おわりに

車軸と車輪は文字通り縁(車体)の下の力持ちで、毎日、鉄道を利用している乗客のほとんどはその存在を意識することもないと思います。乗客が存在を意識しないというのはそれだけ安全であることの裏返しと言えますが、それは車軸と車輪の設計・製造・メンテナンスに関わる人たちおよびそれらをサポートする研究者の長年にわたる不断的努力の結果であることを、最後に強調したいと思います。

少なくとも我が国では、当分の間、車軸と車輪の形状や材料が大きく変わることは、考えられません。これからも、地道ですが、蓄えてきた経験と培ってきた技術をもとに、現行技術をベースに改善・改良を行いつつ、より安全で安心な車軸と車輪を目指すことになるでしょう。

ここでは、車両の安定・安全な走行にとって極めて重要な車軸の非破壊検査や車輪の踏面形状については全く触れることができませんでした。これらについては、別の機会に譲らせていただきたいと思います。

(石塚弘道/車両構造技術研究部 主管研究員)

文献

- 1) R. A. Smith : The Versailles Railway Accident of 1842 and the First Research into Metal Fatigue, Proc. FATIGUE90, pp.2033~2041, 1990
- 2) 永島菊三郎, 中村宏 : 電車で車軸の強度について, 日本機械学会論文集, Vol.17, No.63, pp.54~59, 1951
- 3) 例えば, O. J. Horger : Influence of Fretting Corrosion on the Fatigue Strength of Fitted Members, ASTM STP 144, pp.40~53, 1952