

様式 I

博士學位論文調査報告書

論文題目 鉄道車両用車輪のリム部に発生する損傷の分析と  
その抑制に寄与する材料および製造プロセスの最適化に関する研究

申請者 藤村 隆志

最終学歴 令和 元年 9月  
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻博士後期課程  
研究指導認定見込

学識確認 平成 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
(主査) 教授 宅田 裕彦

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
教授 馬淵 守

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
教授 藤本 仁

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	藤村 隆志
論文題目	鉄道車両用車輪のリム部に発生する損傷の分析と その抑制に寄与する材料および製造プロセスの最適化に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>陸上の輸送手段として、鉄道は、省エネルギー、地球環境の観点から、自動車よりも格段に優れている。その安全走行を確保することは重要な課題である。</p> <p>世界の鉄道車両用車輪には鍛鋼車輪と鋳鋼車輪がある。鋳鋼車輪が使用されるのは専ら貨車用であり、高速車両をはじめ旅客車用には信頼性の高い鍛鋼車輪が使用されている。しかし近年は貨車用でも、重量貨車などの走行条件の厳しいものを中心に車輪損傷が多発するため、耐損傷・耐摩耗といった車輪性能を高めることが要求されている。本論文は、その貨車用車輪において問題視されている損傷の発生メカニズムを解明するとともに、メーカーの視点で材料・製造面より損傷抑制方法を提案することを目的として研究結果をまとめたもので、7章から構成されている。</p> <p>第1章は序論で、本研究において北米貨物鉄道の車輪損傷に焦点を当てた理由として、北米に世界の鉄道車両の約3割が走行しており母数が多いこと、効率化を求めるが故に車両重量が増加傾向にある中、車輪損傷が増えていたこと、および、鍛鋼車輪と鋳鋼車輪が混在しており車輪材料が広範にわたっていることを挙げている。そして、鉄道運行者側として、損傷が原因で車輪が寿命を迎える場合、発生時期を特定できず計画外の補修を余儀なくされ、運行に支障をきたすことから、発生メカニズムの解明と耐損傷・耐摩耗といった車輪性能を高める研究が、強く求められ活かされる市場であり、こうした研究に最適であることを述べ、本研究の意義および目的を明らかにしている。</p> <p>第2章では、鍛鋼車輪とその製造プロセスを解説しているが、その中で筆者らが行った研究も紹介している。製造プロセスの中のホイールミル圧延工程は、経験に基づく知見と単純化した解析の組み合わせで把握されているのが現状であり、各ロールの機能については十分に分析されていなかったことを指摘している。その上で、それらの機能として、圧延中の車輪円周のバランス性能を大きく改善する一方で、車輪径方向・軸方向の寸法精度を圧延中一貫して悪化させていることを明らかにし、この弱点を前工程および後工程の精度向上で補うことができれば、車輪のトータル製造工程設計の視点で最良であることを提言している。</p> <p>第3章では、第4章以降で研究の対象とした車輪損傷の選定理由について述べている。北米での車輪損傷実態として、軸重の増加に伴い踏面損傷が増加していること、発生率は低いものの車輪リム部割損が鉄道産業における大きな課題であることを明確にしている。そして、本研究の対象とする3種類の車輪損傷を、フラットはく離(Spalling)や疲労はく離(Shelling)などの踏面損傷、車輪リム内部に存在する欠陥を起点としてき裂進展し損傷するリム大型はく離(Shattered-rim)、および、踏面と並行に進展した内部疲労き裂がリム部の縦(径)方向脆性割れに発展するリム縦割れ(Vertical Split Rim, VSR)としている。</p>			

第4章では、踏面損傷を抑制することを目的とし、フラット生成試験およびフラット生成試験片を用いた転動疲労試験を実施し、フラットはく離・疲労はく離特性に及ぼす材質、フラット形状、衝撃荷重の影響を明らかにしている。フラットが大きいほど、衝撃荷重が増大すること、衝撃荷重の増大に伴ってき裂が深くなること、材料が硬いほど母材の転動疲労強度が高くなることを、それぞれ明らかにしている。そして、車輪製造工程の最適化の視点で提言できることとして、焼入れ性を低く抑えた硬さの高い材料が踏面損傷抑制に好ましい車輪材であることを指摘している。

第5章では、リム大型はく離の抑制を目的とし、その起点となる車輪リムの内部欠陥が、車輪がレール上を負荷状態で走行する際に発生する応力によってき裂進展しない許容サイズを明らかにしている。これと同じ内容がアメリカ鉄道協会(Association of American Railroads, AAR)の車輪規格においてリム大型はく離を引き起こす可能性のある欠陥の抑制を目的とした、車輪鋼の清浄度および内部欠陥規定の厳格化に織り込まれており、一定の影響を与えたものと思われる。

第6章では、最近上述の規格厳格化により発生率が減少傾向となっているリム部割損の中で、未だ原因究明に至っていないためむしろ注目されてきているリム縦割れの抑制に焦点を当て、踏面下の浅い部分にある内部微小欠陥からの転動疲労によるき裂発生事象を分析し、車輪鋼の疲労限は、内部欠陥サイズが大きいほど低下する傾向、そして、せん断疲労限・軸力疲労限と欠陥サイズとの関係は、El-Haddadの式とよく一致することを明らかにしている。また、等価せん断応力およびせん断疲労限と欠陥サイズの関係から、転動疲労き裂が発生する限界の欠陥サイズをより高精度に明らかにしている。

以上より、リム割損を抑制する車輪材としては、内部欠陥の少ない(清浄度の高い)材料を用い、可能な限り小さい欠陥サイズの超音波探傷試験を合格した車輪を提供することが重要であると提案している。

第7章は結論であり、第1章から第6章を要約して結論を述べている。本研究によって、これまで課題となっていた、北米貨物鉄道で発生している車輪損傷問題に対して、メカニズムを解明するとともに、問題抑制法の提案に繋げていることを述べ、本論文の成果をまとめている。また、こうした技術的アプローチは、より強固なインフラを築き続けるために必要不可欠であることから、継続して行うべき研究であり、今後の継続した取組みが、あらゆる用途の鉄道車輪の損傷抑制への寄与、ひいては世界の鉄道輸送の安全性向上への貢献が期待されることを述べ、本論文を結んでいる。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

陸上の輸送手段として、鉄道は、省エネルギー、地球環境の観点から、自動車よりも格段に優れており、その安全走行を確保することは重要な課題である。

とりわけ、世界の約3割の鉄道が走行している北米では、運搬効率化、すなわち、積載重量増大の代償として車輪の損傷が増加し、脱線を伴う場合もあることから、車輪の耐損傷性に関する要求が強くなっている。特に運行に支障をきたす問題を引き起こす可能性の高い車輪損傷として、以下の3種類があげられる。

1)フラットはく離(Spalling)

車輪の廃却原因の中で最も多い、レールと最も多く接触する踏面での損傷。

2)リム大型はく離(Shattered-rim)

高軸重によりレールとの接触面圧が高くなるため、内部欠陥を起点としてき裂進展し大きなはく離に繋がる損傷であり、脱線リスクを伴う。

3)リム縦割れ(Vertical Split Rim)

リム部大型はく離と同様のプロセスでリム内部の疲労き裂進展から大型のはく離に至るが、円周方向の長さを持つ内部疲労き裂が、リム部の径方向脆性割れに発展する点でリム大型はく離とは異なる損傷。

本論文では、これらの損傷発生機構を解明するために、まず、フラットはく離に関して、異なる材料特性を持つ複数の車輪材を用いて、損傷の発生度合いを比較し、それらの相関を明らかにしている。また、フラットはく離が発生した車輪の衝撃荷重の観点からの分析を加え、材料特性のフラットはく離特性に与える影響を明らかにしている。つぎに、リム大型損傷について、負荷状態での運用できき裂進展しない内部欠陥の許容サイズを明らかにしている。さらに、踏面下の浅い部分にある内部微小欠陥サイズが疲労限に与える影響を分析し、転動疲労き裂が発生する限界の欠陥サイズをより高精度に明らかにしている。

最終的に得られた成果、すなわち損傷抑制のための材料および製造プロセスの最適化への提案は以下のとおりである。

1)フラットはく離を抑制できる車輪材としては、焼入れ性を低く抑えた硬さの高い材料が好ましい。

2)リム大型はく離およびリム縦割れを防ぐためには、内部欠陥の少ない(清浄度の高い)材料を用い、可能な限り小さい欠陥サイズの超音波探傷試験を合格した車輪を提供することが好ましい。定量的には径 1.1mm 以下の欠陥であれば、内部き裂が発生する確率は極めて低くなることを示した。

以上により、鉄道産業において大きな課題である車輪損傷抑制のための車輪製造プロセスでの重要な設計指針が得られた。また、本論文で得られた成果は、既に一部アメリカ鉄道協会の規格厳格化に反映されており、学術上、実用上寄与するところは非常に大きい。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和元年8月20日に実施した論文内容とそれに関する試問の結果、合格と認めた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：平成 年 月 日以降