

博士論文

**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**

藤村 隆志

## 《目次》

第 1 章：序論	
1.1 研究の背景, 目的	5
1.2 本論文の構成	7
第 2 章：鉄道車両用車輪	
2.1 鉄道車両用車輪の形状と名称	9
2.2 車輪製造プロセスの概要	11
2.3 車輪製造プロセスの技術詳細	
2.3.1 材料, 鍛造, 圧延	14
2.3.2 熱処理	21
2.3.3 機械加工他	23
2.4 車輪圧延工程における挙動分析	
2.4.1 挙動分析方法	24
2.4.2 挙動分析結果	25
2.5 結論	26
第 3 章：北米における車輪の損傷実態	
3.1 車輪の廃却要因別推移	28
3.2 車輪の損傷	
3.2.1 踏面損傷(フラットはく離など)	31
3.2.2 リム大型はく離(Shattered-rim)	32
3.2.3 リム縦割れ(Vertical Split Rim)	34
第 4 章：車輪耐踏面損傷性能に関する研究	
4.1 本研究の目的	36
4.2 供試材および試験片	36
4.3 フラット生成試験(Skid Test)	
4.3.1 試験方法	38
4.3.2 試験結果	39

4.4 転動疲労試験 (Rolling Contact Fatigue Test)	
4.4.1 試験方法	43
4.4.2 試験結果	44
4.5 考察	
4.5.1 衝撃荷重に及ぼすフラット形状の影響	47
4.5.2 平滑試験片による転動疲労試験	50
4.5.3 フラット生成試験片による転動疲労試験	51
4.6 結論	53
第5章：車輪耐リム損傷性能に関する研究(その1;リム大型はく離)	
5.1 本研究の目的	54
5.2 破壊力学的取組み手法	55
5.3 Mode-II 下限界応力拡大係数範囲	
5.3.1 試験方法	57
5.3.2 試験結果	60
5.4 転動によって発生する応力拡大係数	
5.4.1 計算方法	60
5.4.2 計算結果	66
5.5 考察	
5.5.1 内部欠陥コントロールプロセス	67
5.5.2 車輪製造の観点からの提案	68
5.6 結論	69
第6章：車輪耐リム損傷性能に関する研究(その2;リム縦割れ)	
6.1 本研究の目的	70
6.2 疲労限と欠陥サイズの関係	
6.2.1 試験方法	71
6.2.2 試験結果	75
6.2.3 疲労減に及ぼす欠陥サイズの影響	79
6.3 車輪リム内部の応力状態	
6.3.1 FEM 解析モデル	81
6.3.2 FEM 解析条件	82

6.3.3 FEM 解析結果	87
6.4 内部き裂発生に対する限界欠陥サイズ	
6.4.1 多軸応力場の評価	90
6.4.2 転動疲労き裂発生に対する限界欠陥サイズ	93
6.5 結論	95
第7章：まとめと今後の展望	96
参考文献	103
謝辞	108
論文リスト	109



## 第1章：序論

## 1.1 研究の背景，目的

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．世界の鉄道車両用車輪には，大別して鍛鋼車輪と鋳鋼車輪が使われている．鋳鋼車輪が使用されるのは専ら貨車用であり，高速車両を始めとする客車用には，信頼性の高い鍛鋼車輪を使用するのが，世界標準となっている．しかし近年は貨車用車輪でも，重量貨車などの走行条件の厳しいものを中心に，耐損傷・耐摩耗の面から車輪性能を高めることが要求されており，それらの性能が高い鍛鋼車輪の存在意義が高まってきている．ちなみに，日本国内では貨車用・客車用ともに，高炉－転炉－連続鋳造プロセスを経た材料を用いて鍛造プロセスで造る鍛鋼車輪のみが使用されている．

Fig. 1 に，世界の鉄道車両の概略分布を示す．その中に，明確に分類できるわけではないが，筆者の独断で4種類の車輪規格毎に分類した，国別イメージマップを示している．分類は下記のとおりである．

## &lt;世界の車輪規格分類&gt;

- ・ EN(EUROPÄISCHE NORM=European Standard の意)系…欧州～アジア，約 35 万両
- ・ JIS(Japanese Industrial Standard)系…日本・台湾，約 1 万両
- ・ GOST(ラテン語の頭文字:ロシアを含む独立国家共同体の標準規格)系…ロシア・CIS 各国，約 12 万両
- ・ AAR(Association of American Railroads)系…北南米，豪州，南アフリカ，約 25 万両
- ・ 不明…北南部を除くアフリカ，両数不明

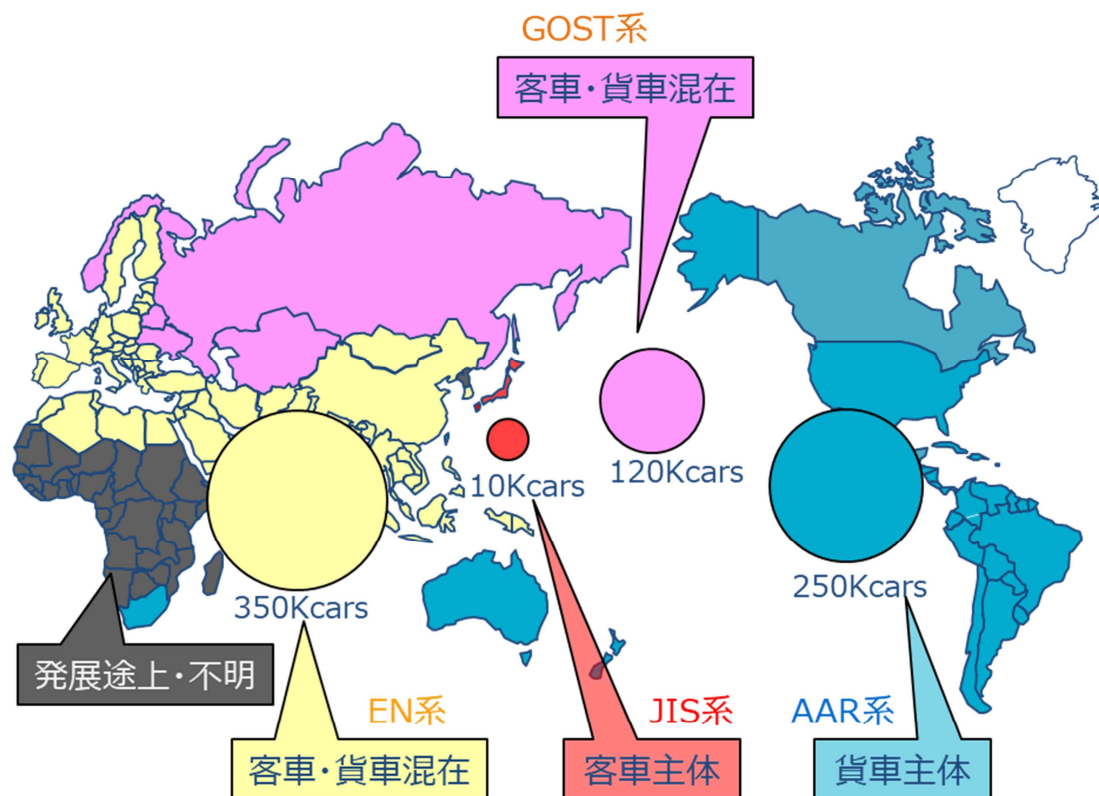


Fig. 1 世界の車輪規格毎の推定鉄道車両数 (2017)<sup>1)</sup>

この図からわかるように、世界で多数を占めている車輪規格はEN系であるが、2位のAAR系でも世界の1/3を占めており、その多くが北米に集中している。世界の約3割の鉄道が、北米で走行しているのが実状である。さらに、そのほとんどが貨物鉄道であり、効率化を求めるが故に積載重量が大きい中、鑄鍛双方の車輪が混在しており、さまざまな損傷が発生するため、図らずも鉄道車両用車輪の損傷研究に最適な市場となっている。

その北米鉄道市場では近年、車輪の損傷がより問題視されてきている。その理由は、鉄道運行側として、車輪が摩耗原因で寿命を迎える場合は、その時期を容易に推定できるため、補修計画どおりに実際の補修が行われることになるが、損傷の場合は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が、鉄道業界へ悪影響を与えるためである。

さらに、程度のひどい重大損傷となると、車両走行不能に陥ったり、最悪の場合は脱線事故を誘発し、運搬物によっては事故地域へ甚大な被害を与えるとともに、多大な補償問題に発展し得るのである。

1990年代より進められている運搬効率化に伴い、北米貨車の運搬重量が増加してきた経緯があり<sup>2)</sup>、そのため、前述の車輪損傷が重大損傷側へ移行しているのが実態であるが、一旦効率化された運搬を元に戻すわけにはいかず、したがって、車輪損傷の抑止が急務となっている。

そこで筆者は、北米鉄道市場において、鉄道車両用車輪に発生する損傷の中で、頻度が高いものや社会的影響の大きいものに関し、それらの発生メカニズムの解明を試みた。また、材料・製造面からの技術的取組みにより、メーカーの視点でそれらの損傷抑制方法について提案に繋げたので、その内容について紹介する。

## 1.2 本論文の構成

最初に、鉄道車両用車輪とはどのようなものなのか、その製造プロセスを含めて概要を解説する。つぎに、実使用中に発生する車輪の様々な損傷の中で、頻度が高いものや社会的影響の大きいものに関し、それらの発生メカニズム解明～材料・製造面からの技術的取組みによる、損傷抑制方法について提案する。さらに、車輪のレールとの接触面で発生している塑性変形の影響評価への技術的取組みを紹介する。

製造プロセスの解説においては、主に車輪の成形を司る熱間プロセスを中心に、その塑性加工が製品性能に与える影響について、調査した結果も盛り込み、技術的に詳述する。

損傷抑制方法については、まず、『フラットはく離 (Spalling)』と呼ばれる、日本国内の鉄道でも発生する、最も一般的な踏面※1 損傷について提案する。異なる材料特性を持つ車輪の、損傷の発生度合いを比較し、それらの相関を明らかにするとともに、この『フラットはく離 (Spalling)』の発生を抑止するための、製造技術面からの取組みの提案に繋げる。

つぎに、『リム部大型損傷 (Shattered-rim)』と呼ばれる、あまり日本国内では一般的でない(日本国内での発生は皆無である)が、荷重条件の厳しい北南米や豪州の貨物鉄道で、脱線事故を誘発する可能性があるものとして、広く知ら

れている損傷について，そのメカニズムを解明する．また，もう1種類の脱線事故を誘発する可能性のある『リム部縦割れ(Vertical Sprit Rim)』に関する技術的取組みも加える．そして，他の製造方法・材料の車輪との比較を行い，それらのリム部大型損傷の抑制方法について提案する．

これらの研究により，鉄道用車輪の踏面に生じる損傷の抑止のために，考慮することが望ましい事項を，車輪材料・製造面からの取組みにより，体系的にまとめる．

(※1：『踏面』…車輪のレールと接触する面)

## 第2章：鉄道車両用車輪

## 2.1 鉄道車両用車輪の形状と名称

鉄道車両用車輪は Fig. 2 に示すとおり，車軸を把握するボス部，レールと接触するリム部，およびボス部とリム部をつなぐ板部の3部分から構成されている．国内で使用されている車輪は，Fig. 3(a)～(c)に示すように，板部の形状によってA形・B形・C形の3種類に分類される(A種・B種・C種と呼ぶこともある)．これらの使い分けについては，研究の目的ではないため，ここでは言及を避けるが，板部の形状には，これらに加えて波打形状があることを申し添えておく．波打車輪にはA形とB形があることから，国内の車輪の形状区分としては，A形・A形波打・B形・B形波打・C形の，5つに区分されることになる．波打車輪の代表例の外観を，Fig. 4に示す．これはA形波打車輪の例であるが，波打車輪とは板部を円周方向に波打たせることによって，外力に対する剛性を上げることができるため，結果的に軽量化を図った車輪である．

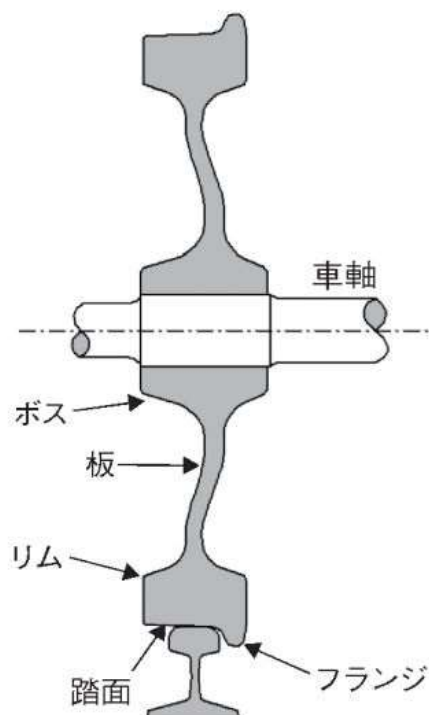


Fig. 2 車輪の各部名称

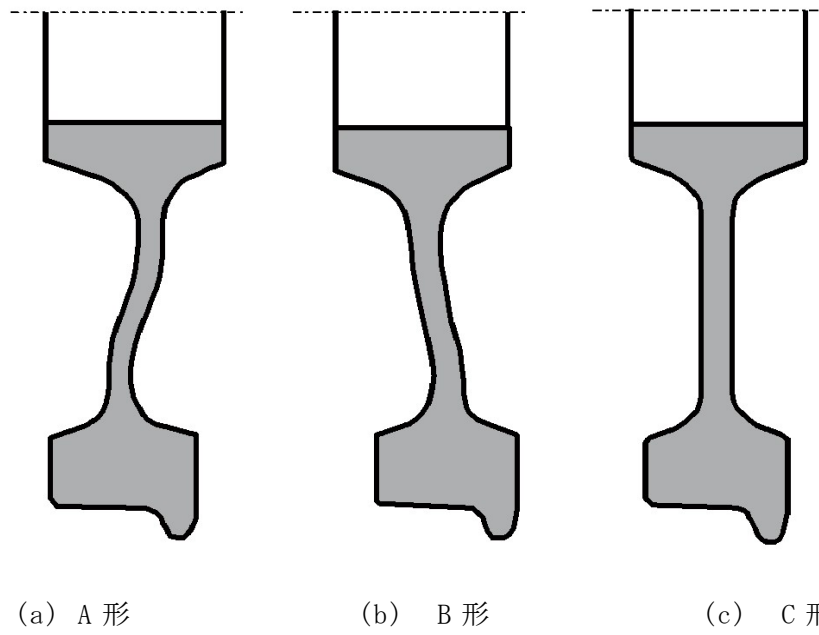


Fig. 3 車輪の種類



Fig. 4 A形波打車輪

2.2 車輪製造プロセスの概要

車輪の製造プロセスの一例として、日本製鉄(株)の製造プロセスを、Fig. 5に示す。

材料溶製－切断－鍛造・圧延－熱処理－中間検査－機械加工－検査－塗装からなる大まかな流れを示している。鍛鋼車輪メーカーは、概ね同様の車輪製造プロセスを有しており、その中でも主に車輪の成形を司る熱間プロセスを中心に、製品品質・性能に与える影響について、次節に詳述する。

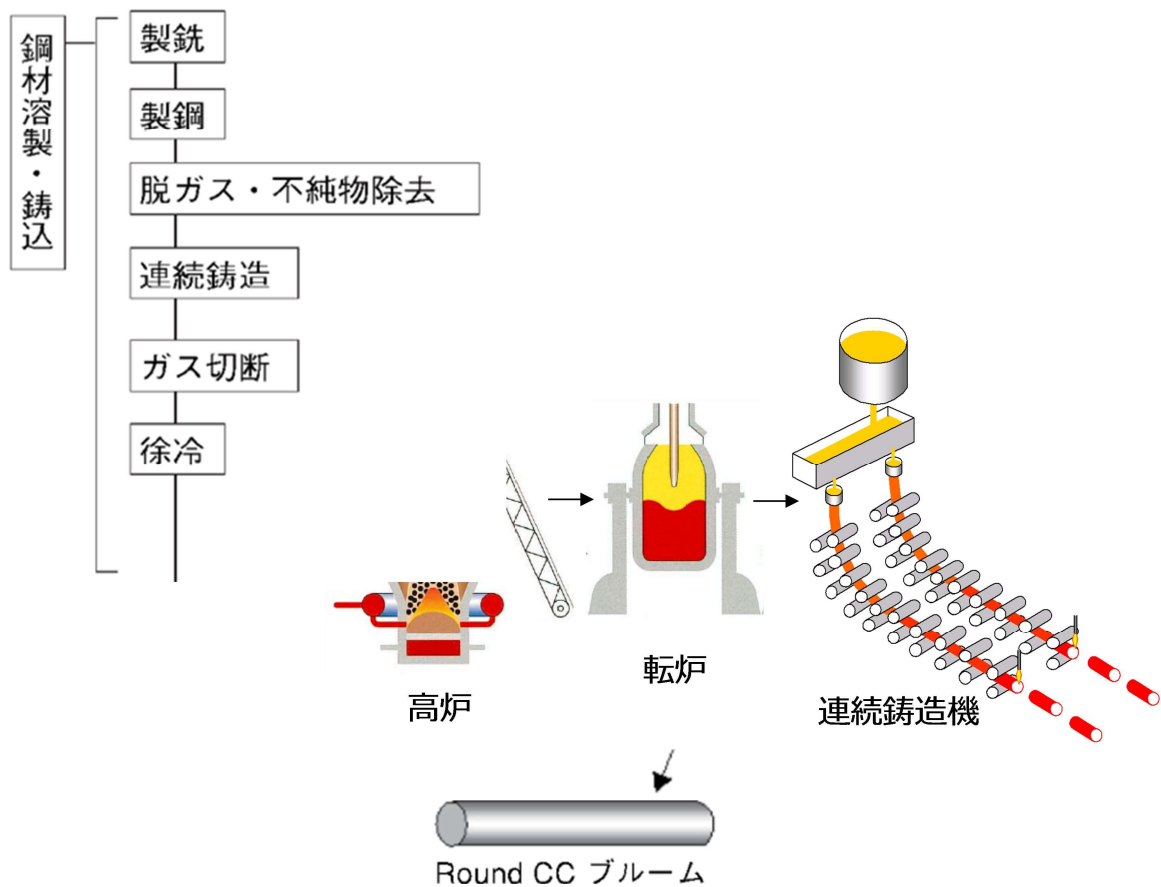


Fig. 5 車輪製造プロセスの一例  
(鋼材溶製～鑄込み)

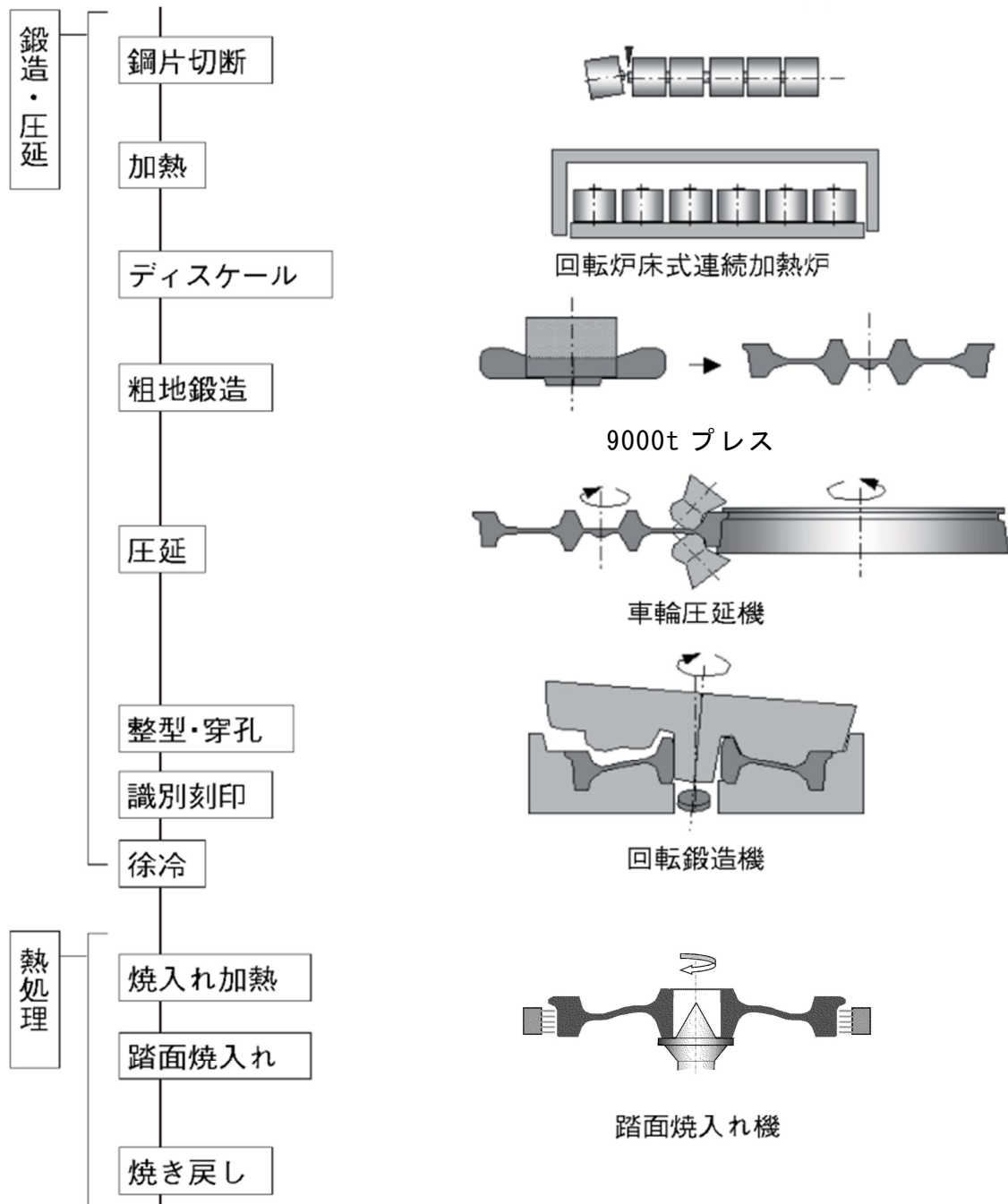


Fig. 5 車輪製造プロセスの一例（続き）  
（鍛造・圧延～熱処理）



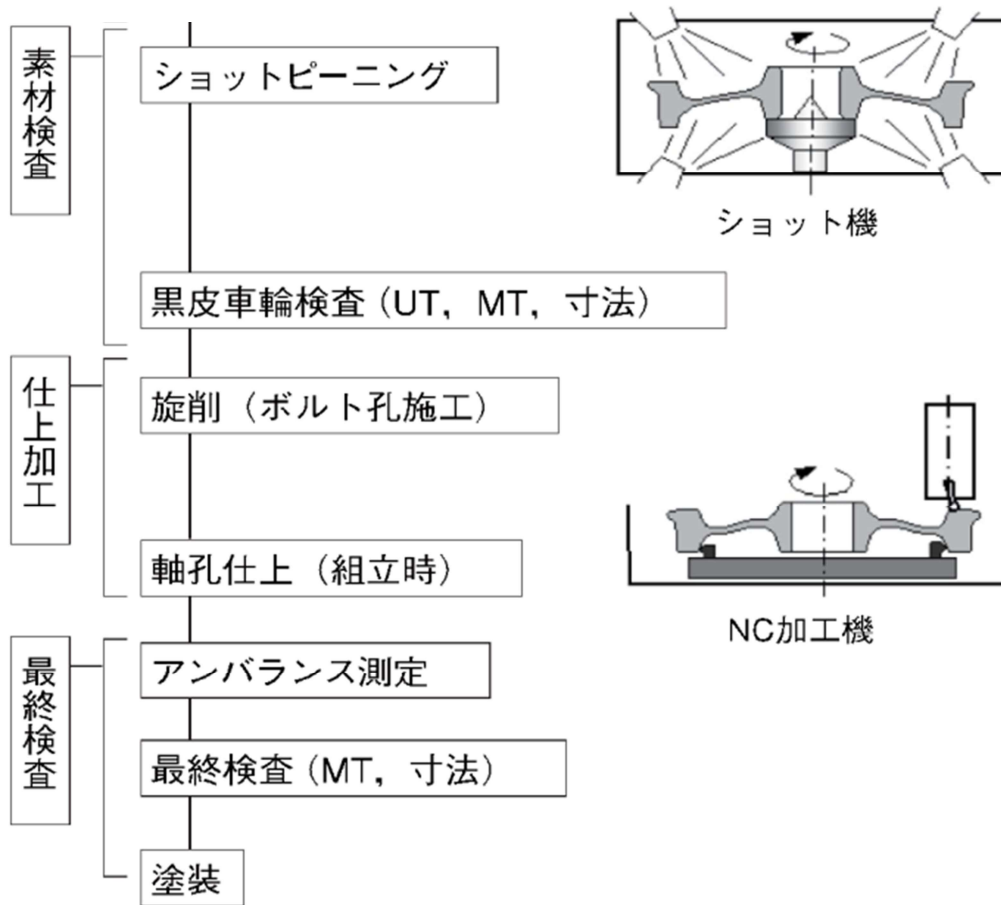


Fig. 5 車輪製造プロセスの一例 (続き)  
(素材検査～仕上加工～最終検査)

## 2.3 車輪製造プロセスの技術詳細

### 2.3.1 材料，鍛造，圧延

国内の鉄道車両用車輪は，1.1節で述べたように全て鍛鋼車輪である。鍛鋼車輪の材料は電気炉，または，高炉・転炉によって溶製されるが，現在国内で使用されている車輪は，高炉・転炉材を連続铸造した鋼材を用いて製造している。鋼材は一般的にいわれる中～高炭素鋼であり，0.4～0.8% Cの炭素鋼で，世界中のほとんど全ての種類の車輪が製造されている<sup>3)～6)</sup>。国内では，高炭素量側の0.6～0.75% C鋼が使用されており，耐摩耗・耐損傷性に優れた性能を発揮している<sup>5)</sup>。一方，鉄道車両用車輪の損傷研究に最適な北米の貨車用車輪には，日本より少し高めの0.67～0.77% C鋼が使用されている。近年，特に重量貨車用車輪の材料設計は，高炭素鋼やマイクロアロイ鋼へ移行してきており，それらは，本研究のテーマとして取り上げている耐損傷ニーズと，熱間成形プロセスの技術開発による，高難度の熱処理技術などとの技術開発の融合によって，実現されているものである。

車輪の製造プロセスとしては，まず，上述で得られた鋼材を車輪1個分の重量に切断し，その鋼片に熱間鍛造，圧延，熱処理を施して，車輪素材を成形する。車輪の鍛造・圧延は，車輪1個分の重量に切断した鋼片を，加熱炉で加熱して変形抵抗を下げた状態で行う<sup>7)</sup>。まず，出炉した鋼片に付着している表面の酸化層(スケール)を，ウォーターディスクレーとメカニカルディスクレーで除去する。前述のように，近年増える傾向にあるマイクロアロイ鋼には，スケール剥離性が悪いものもあり，ウォーターディスクレーのみでは十分なスケール除去ができない場合があるため，メカニカルディスクレーも併用し，最初の鍛造時に素材表面に巻き込んでしまう可能性のある，下型側のスケールを完全除去する。その後，3つの設備を用いて順に鍛造・圧延していく。このプロセスを模式的に表したものを，Fig. 6に示す。

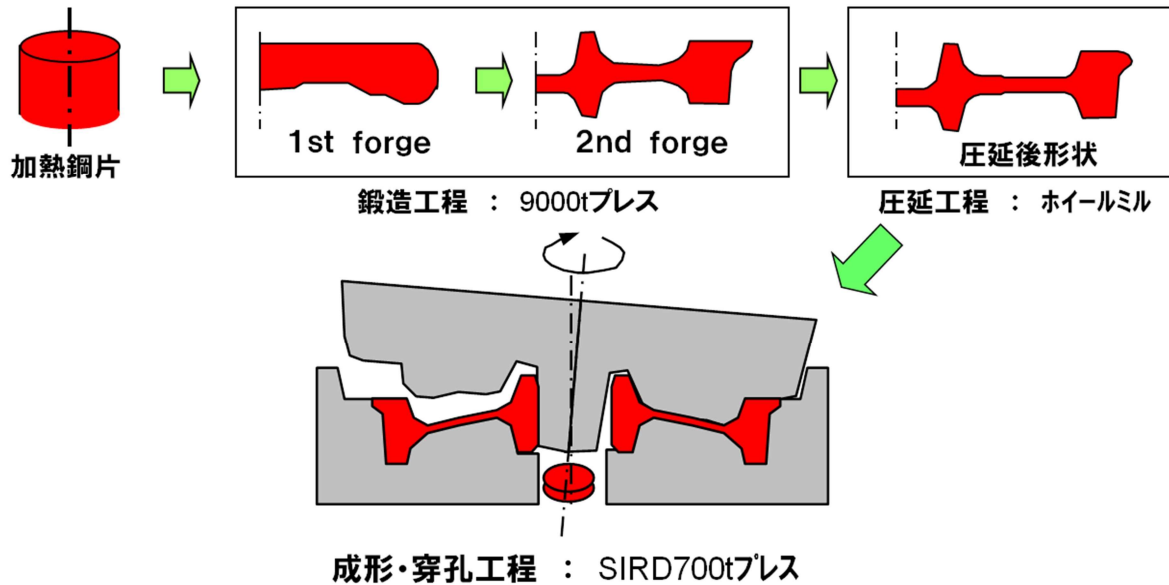


Fig. 6 鍛造・圧延工程

1つ目の設備は、9,000t プレスである。この設備で、車輪の基本形状を鍛造で成形する。ボス部とリム部をつなぐ板部は、薄い円盤状であるため、一旦成形するとボスーリム間の材料移動ができなくなる。したがって、基本形状を成形する際、ボス部とリム部に適正なボリュームを配分しておく必要がある。一方、9,000t では車輪を所定のサイズまで拡張成形するには力不足のため、それを補う残りのプロセスに適した形状を準備しておく必要もある。すなわち、9,000t プレスで得るべき形状は、ボス部とリム部、すなわち径方向に適正に体積配分した、次プロセスに適した車輪粗地形状である。

9,000t プレスは、上下にそれぞれ2セットの金型をテーブル上に装着し、それらのテーブルをプレス内でスライドして、プレス中心部にある金型を交換しながら、2回鍛造することができる。1回目の鍛造(1st forge)の役割は径方向のボリューム配分であり、2回目の鍛造(2nd forge)で次プロセス前粗地の成形を行う。Fig. 7にその解析例を示す<sup>8)</sup>。

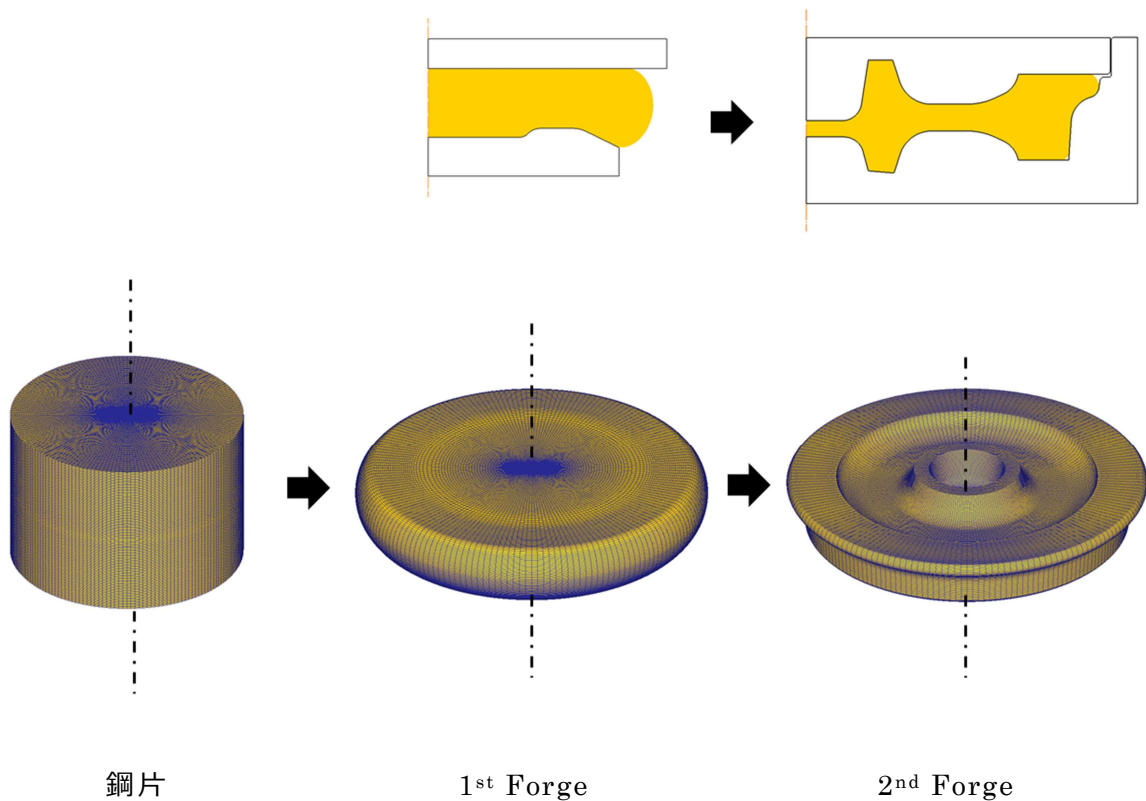


Fig. 7 鍛造の解析例

2つ目の設備はホイールミルと称する圧延機である。よって塑性加工としては圧延になる。この設備でロール圧延により最終目標径まで拡径すると同時に、板～フランジを含むリム部を成形する。鍛造ではカバーしきれない成形を、圧延によって実現している。すなわち、9,000t プレスでボス部は成形できているので、ホイールミルで施す仕事は、9,000t プレスで体積配分したリム側の部分を用いて、薄肉ディスクとシャープな角部を有する板～リム部を成形し、最終成形である次プロセスに適した薄肉ディスク体形状の車輪粗地を得ることである。この薄肉ディスク体をプレスで一発成形するには、計算上3万t級の加圧力が必要であり、それに相当する加工を、9,000t プレス鍛造+ホイールミル圧延で実現していることになる。

複数のロールを組み合わせて車輪を精度よく圧延する，車輪専用の圧延機である．ホイールミルメーカー，新旧タイプによって，様々なロール構成のホイールミルが存在するが，その基本成形コンセプトは同一とって過言ではない<sup>9)</sup>．Fig. 8 にそのロール構成の一例を示す．板部～リム内径部を成形する2つのウェブロール，リム側面を成形する2つのラテラルロール，フランジを含む踏面を成形するメインロール，圧延中の車輪を保持する2つのガイドロール，メインロールと対象の位置で車輪の踏面に追従し，車輪圧延をコントロールするプレッシャーロール，それらがその内訳である．

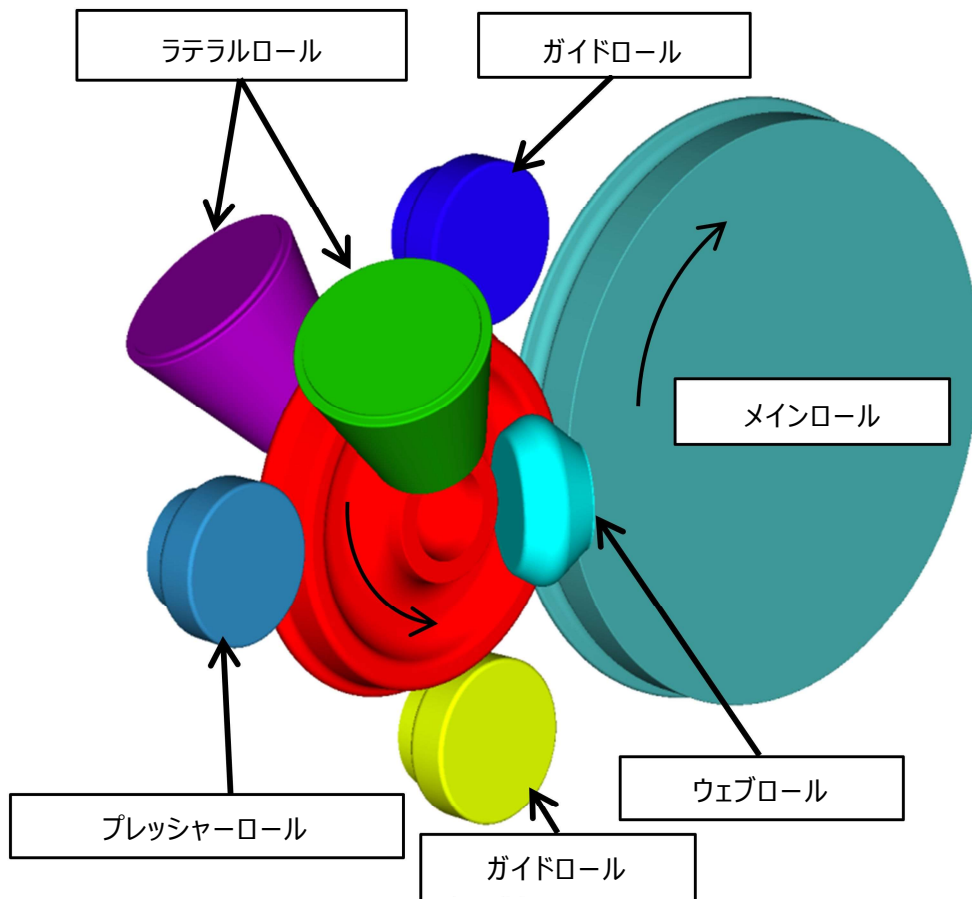


Fig. 8 ホイールミル ロール構成例

3つ目の設備はSIRD700tプレスである。SIRDとは、Synchronized & Inclined Rotary Dishing(上下同期回転成形)の略であり、“回転鍛造”という塑性加工を用いた、車輪の最終成形プロセスである。下型にホイールミル後ワークを装入し、全体を回転させながら傾いた上型を下降させて鍛造し、同時に軸孔穿孔をしている。

Fig. 9にSIRDの原理を示す。上型を一定角度傾けることにより、金型とワークの接触部分を扇形の一部に限定し、かつ、全体を回転しながら加圧するものである。SIRD成形の特徴は、上型の接触面積減少により、面圧を高めた閉塞鍛造を施すとともに、回転成形を行うことにより、優れた成形力と同芯度改善を両立し、ニアネットシェイプを実現していることである。通常の据え込み鍛造と比べ、理論上1/10程度の加圧力で、同等の成形力が得られることに加え、回転成形によって製品バランス性能が格段に改善される<sup>10)</sup>。

Fig. 10は、回転鍛造における上型傾角と必要加圧力の相関を、 $\phi 70\text{mm} \times 30\text{mmh}$ の鉛を用いた実験で調査した結果である。本プレスの加圧力は700tであるが、実に10,000t級のプレスに匹敵する<sup>10)</sup>。

世界の同業他社は、このプロセスに加圧力2,000~5,000tの通常のプレスを使用しており、一方、回転鍛造を適用しているのは日本製鉄(株)グループ<sup>※2</sup>のみである。このことは、板部鍛造肌の車輪であっても高いバランス性能を有していることや、少ない機械加工代による製造コスト抑制といった、大きな長所につながっている。

(※2：日本製鉄(株)、(米国)Standard Steel, LLC<sup>11)</sup>)

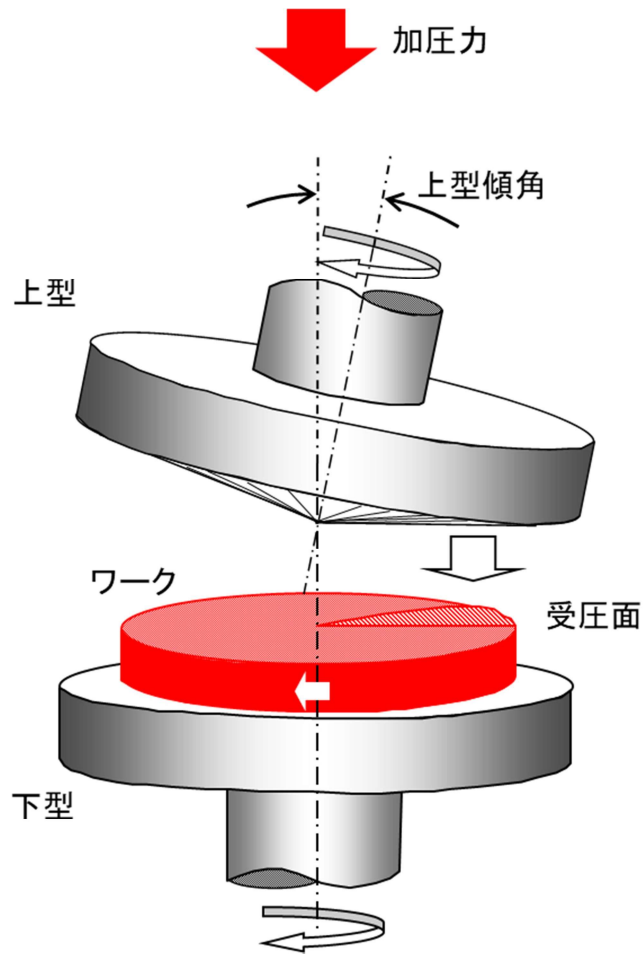


Fig. 9 SIRD の原理

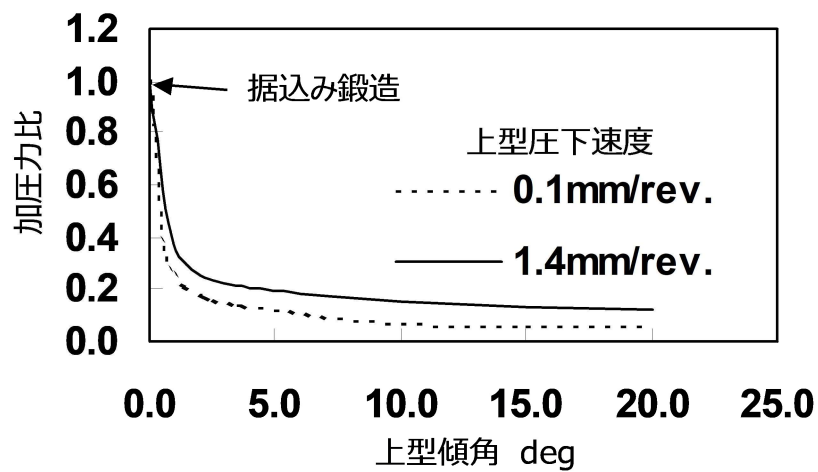


Fig. 10 上型傾角と加圧力の相関

9000t プレスで、ボス部とリム部、すなわち径方向に適正に体積配分し、ホイールミルで、車輪の円周上の偏肉度を改善、ただし悪化してしまう寸法精度を、SIRD で同芯度を含めた寸法精度改善を行い、最終的に得られる黒皮車輪は、バランス性能を向上させ、最終製品形状に必要な最小限の機械加工代を付与した、まさにニアネットシェイプ車輪である。

Fig. 11 に、黒皮車輪状態でのアンバランス量<sup>※3</sup>を、最終成形プロセス(3つ目の設備)に通常据込鍛造を適用した場合と、SIRD を適用した場合の、比較調査を行った結果を示す。この図からわかるとおり、SIRD プロセスによって、黒皮状態の車輪性能が格段に改善され、後プロセスの効率化、最終製品の品質向上に大きく寄与している。

(※3：アンバランス量とは静的な不釣り合い量のことを意味する。すなわち、車輪の軸孔中心を軸とした場合の不釣り合い量をモーメント量で表したものである。)

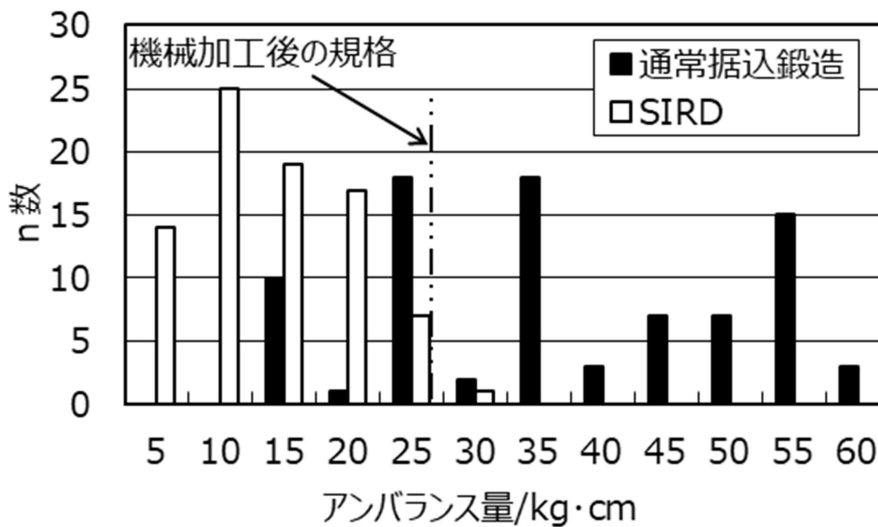


Fig. 11 黒皮車輪バランス性能比較



## 2.3.2 熱処理

一般の鉄鋼材料は、化学成分と熱処理によって強度が決まる。一方、車輪の熱処理の目的は、本来の鋼の熱処理目的である強度を高めることに加え、耐割損性を向上させるために、リム部に圧縮の残留応力を生じさせることである。したがって車輪の熱処理は、製造プロセスの中で、車輪の安全性を確保するうえで最も重要なプロセスである。車輪の熱処理は焼入れ焼戻しであり、まず Fig. 12 に示すとおり、車輪全体を 850℃ 前後の温度に加熱した後、車輪を水平状態で回転させながら、外周から踏面に向けて水冷を行って焼入れを施す。この焼入れ方法を「踏面焼入れ」と呼んでいる。その後、引き続いて 500℃ 前後の温度で焼戻し処理を施す。「踏面焼入れ」は、マルテンサイト変態を積極的に起こさせるものではなく、焼入れを施したリム部の熱処理後の組織は、通常フェライトパーライト組織である。一方、踏面焼入れの際、板部およびボス部は空冷のため、板部・ボス部の熱処理は、焼ならし～焼戻し処理に相当する。

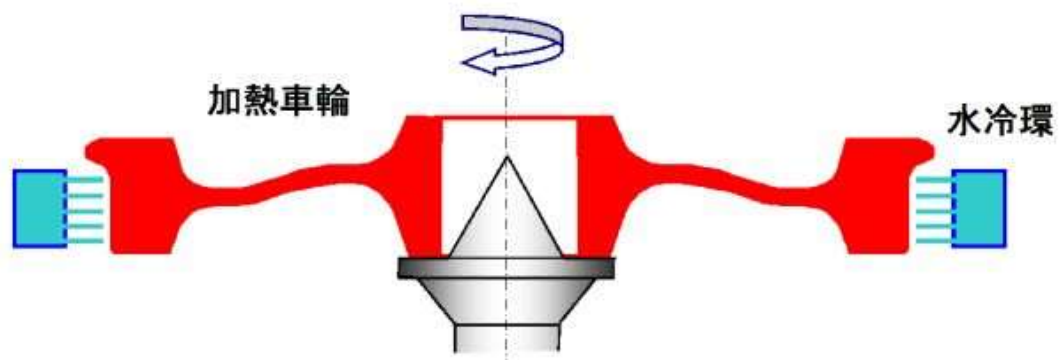


Fig. 12 車輪の熱処理プロセス (模式図)

国内車輪は JIS 規格に基づいて製造しており、R 焼き (RQ: Rim Quench) と S 焼き (SQ: Slack Quench) の 2 種類の熱処理が規定されている。この違いについては、本論文の主旨とかけ離れることから、説明を割愛する。

踏面焼入れの目的は、下記の2点が挙げられる。

- A) 強度の向上
- B) 耐割損性の向上

これらを満足するためには、リム部の硬さを上げて強度を持たせ、圧縮残留応力を付与するとともに、板部の組織を微細化し、靱性を向上することが必要であるが、これらの中で最も重要なものは、圧縮残留応力の付与である。一般に、車輪の熱処理は、踏面を硬くすることが主目的と思われがちであるが、車輪の安全性の確保という意味では、圧縮残留応力の付与こそが、最も大切な役割といえる。

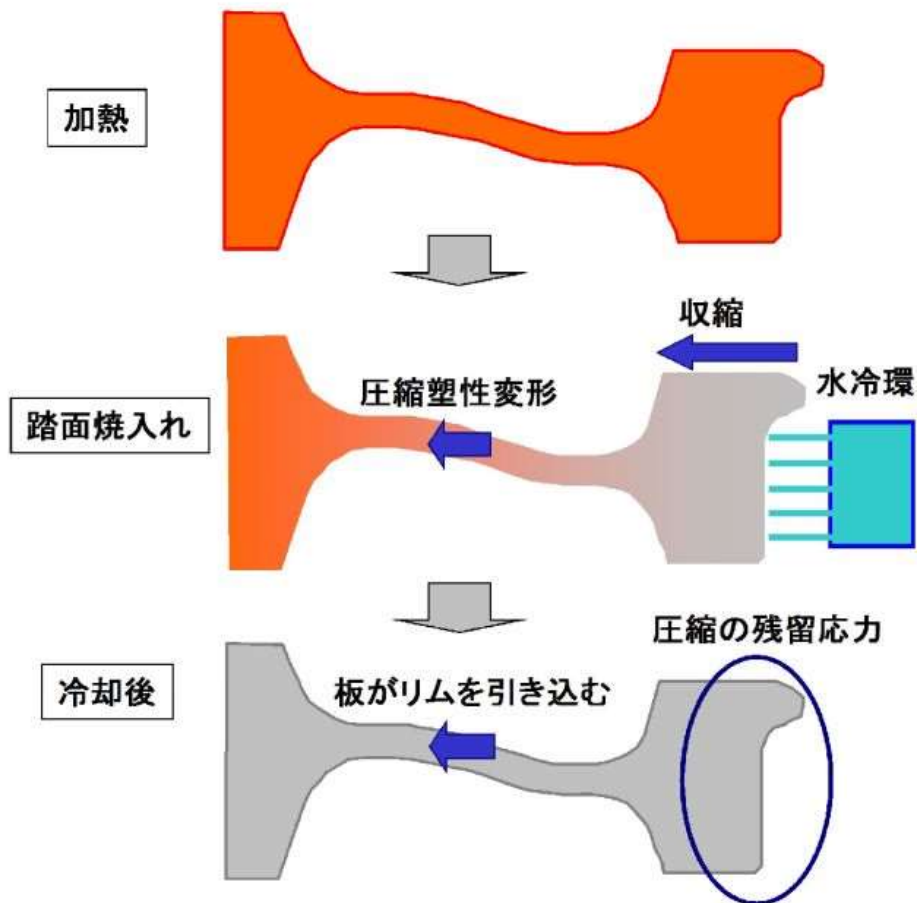


Fig. 13 圧縮残留応力の付与される仕組み(模式図)

Fig. 13 に圧縮残留応力付与のメカニズムを示す。焼入れ炉によって加熱された車輪の踏面を、水冷によって焼入れすると、リム部が冷却されることにより収縮する。このときまだ高温状態である板部は、若干圧縮方向に塑性変形を生ずる。数分間の水冷を終了すると、その後、板部が空冷により収縮しようとする。しかし、この時点では既にリム部は冷却によって低温になっているため、容易には変形しない。すなわち、板部がリム部を内径側に引き込む応力状態を生ずる。これによって、リム部には圧縮の残留応力が生じることになる。この状態になれば、車輪の踏面にブレーキなどによるき裂が発生しても、圧縮の残留応力状態にあるため、き裂の進展を抑止することができるのである<sup>12)~15)</sup>。

### 2.3.3 機械加工他

熱処理プロセスまでで、最終製品形状に必要な最小限の機械加工代を付与した、まさにニアネットシェイプ車輪が完成する。車輪はその後、鉄道車両用部品として使用される上で必要な寸法精度を持たせるために、機械加工を施して完成品となるが、用途や走行条件などによって、ショットピーニングを施工したり<sup>2)</sup>、防音部品を装着するもの、膜厚を規定された塗装を施すもの<sup>1)</sup>、または、それらを組み合わせたものなどがあり、その造り方は様々である。国内の在来線用車輪は、波打車輪を含め、板部は機械加工せず鍛造ままの肌が多いのに対し、新幹線用などのバランス性能の要求レベルが高い車輪は、板部を含む全面を機械加工している。

材料、鍛造・圧延・熱処理プロセスが、車輪の強度、耐損傷、耐摩耗、硬さなどの内質をコントロールするのに対し、実は、機械加工・ショットピーニングは、車輪の疲労強度をコントロールする役目も担っている。それについては、本論文では説明を割愛する。

機械加工工程の前後に、材料内部・表面の非破壊検査や、寸法・バランス測定などによるチェックをし、最後に塗装をすることによって、車輪製造プロセスが終了する<sup>15)</sup>。

## 2.4 車輪圧延工程における挙動分析

### 2.4.1 挙動分析方法

ホイールミル圧延は、被圧延材(車輪)の各部分が回転しながら連続的に繰り返し圧延され、かつ、成形部が、ウェブロールとメインロールで板部とリム部の径・周方向圧延をする部分と、ラテラルロールでリム部の軸・周方向圧延をする部分の、円周上2種類ある複雑な成形になっている。よって、経験に基づく知見と、単純化した解析の組み合わせにより、挙動を把握しているのが現状である。(Fig. 8 参照)

前節のとおり、ホイールミル圧延は、車輪の円周上2種類の圧延の組み合わせで、複雑な成形を行っている。これを車輪側から整理すると、径方向・軸方向の各々の寸法精度と、円周上の偏肉度すなわちアンバランスの2つの指標に大別される。これらの圧延中の挙動を制御することが、ホイールミル圧延技術の要点となる。

そこで、実際の車輪鍛造圧延ラインにおいて、稼働中の設備を強制遮断することにより、ホイールミル圧延工程の成形途中段階の製品を製作し、ホイールミル圧延前品およびホイールミル圧延後品との比較を行い、ホイールミル圧延による各ロール成形が施す仕事内容を明らかにした。

なお、本試験に各種設備調整、型ロール摩耗、温度、潤滑剤などの外乱要因の影響が極力出ないように、途中段階の製品およびホイールミル圧延前後品が同じ鍛造圧延条件で製造されるように、安定量産中に車輪鍛造圧延ライン内の全ての調整を不変とし、上記実験を行った。

実験にて得られた各種供試材(実圧延車輪)を、まず縦型旋盤上で軸(製品厚さ)方向は反フランジ側のリム面で、径(製品直径)方向は踏面で芯出しを行ってチャッキングし、各部位の振れ量を測定した。その後、各供試材を円周4方向について断面形状を測定し、板部およびリム部の偏肉度を計算によって求めた。偏肉度は円周上の断面の重心  $X$  (断面積の最大-最小差) で、圧延初期を 100% とした場合の指数とした。

### 2.4.2 挙動分析結果

実験的取組みによって確認した、ホイールミルの圧延挙動は、以下の結果であった。

車輪の圧延中の挙動を解明するため、ホイールミル圧延を途中で中断し、円周上の形状を3次元測定して、圧延中の寸法精度および偏肉の挙動をまとめた。Fig. 14にその結果を示す。

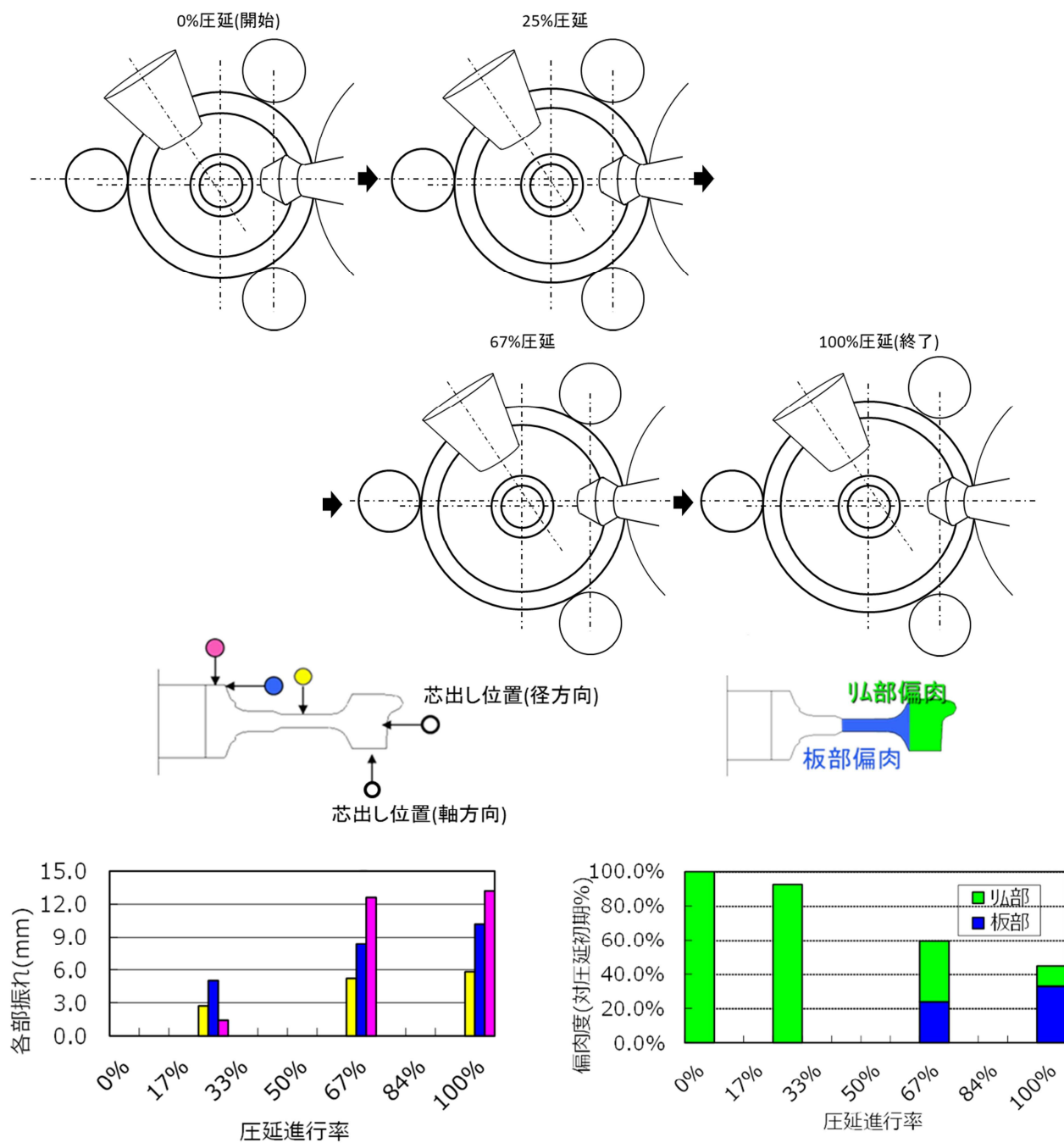


Fig. 14 ホイールミル圧延挙動分析結果

Fig. 14 より、ホイールミル圧延により、各部製品寸法精度は悪化の一途を辿るのに対し、円周のバランス性能については、リム部の偏肉度が大幅に改善される一方で、板部の偏肉度が増加してしまうが、製品トータルとしての偏肉度は、ホイールミル圧延によって半減するほどに改善されることが分かった。

したがって、ホイールミル圧延では、車輪の円周上の偏肉を改善する効果が得られ、同時に寸法精度が悪化しないよう前工程の精度を向上するか、あるいは悪化した寸法精度を後工程で矯正できれば、車輪のトータル製造工程設計の視点からは良いことになる。

## 2.5 結論

世界の鍛鋼車輪の製造プロセスは、各々特徴を秘めているが、概ね同様の設備構成で設計されている。その車輪製造プロセスについて解説した。

このプロセス中で、ホイールミル圧延工程の圧延挙動を実験により詳細分析した。前工程である 9,000t プレスで体積配分したリム側の部分を用いて、薄肉ディスクとシャープな角部を有する板～リム部を成形し、最終成形である次プロセスに適した薄肉ディスク体形状の車輪粗地を得ることが、ホイールミルに課せられた仕事であるが、その仕事内容については、これまで十分に分析されていなかった。

本研究において、ウェブロールとメインロールで板部とリム部の径・周方向圧延をする部分と、ラテラルロールでリム部の軸・周方向圧延をする部分の、円周上 2 種類ある複雑な成形による仕事が、被圧延体である車輪の径方向・軸方向の各々の寸法精度と、円周上の偏肉度すなわちアンバランスの 2 つの指標に、どのように影響するのかを、実験によって明らかにした。その結果、つぎのことが分かった。

- (1) 製品径方向・軸方向の寸法精度は圧延中一貫して悪化する。
- (2) 圧延中の製品円周のバランス性能については、リム部は大幅に改善される一方で、板部は悪化する。しかしながら、製品トータルはアンバランス量が半減するほどに改善する。

したがって、ホイールミル圧延工程は、車輪用鋼片の出来栄えや荒地鍛造プロセスによって生じる円周上の偏肉を改善する効果が得られることから、非常に重要と言える。一方、円周上一発成形できる鍛造プロセスに対し、ロールによる円周上1か所の成形を連続して行う圧延プロセスは、寸法精度が悪化するのを避けられないことが分かった。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。

## 第3章：北米における車輪の損傷実態

## 3.1 車輪の廃却要因別推移

最初に、研究テーマ選定の動機および背景について述べる。

第1章(序論)において、北米鉄道市場が車輪損傷研究に最適であることを述べた。そこでまず、北米での損傷実態を分析するため、1991年から2016年までの26年分について、車両運行環境の推移および大まかな損傷発生推移について分析を試みた。

北米の貨物鉄道運行は、その時期の景気に大きく左右されるため、運搬する積荷の量(重量)、運行距離ともに年毎に大きく振れる。そこでまず、運搬品目毎の車両1両あたりの平均重量の推移について、10年ごとでどう変化しているかを分析した結果をFig. 15に示す。

この平均重量は空車を含む点に留意が必要であるが、併せて右に示した運搬品目毎の総重量比率に照らし合わせると分かるように、貨物鉄道の約半分の総重量比率を占める自動車やコンテナを運ぶ”Intermodal”は、自動車や車両の軽量化を背景に、減少の一途を辿っている。一方、総重量比率で合わせても20%強であるが、”Coal”、”Non-metallic Minerals”、”Stone, Clay & Glass Products”などの重量物運搬については、車両1両当たりの平均重量が増加の一途を辿っている。

すなわち、車輪-レール間の接触問題に大きく影響し、車輪の損傷形態を左右する面圧の大きなものという視点で捉えれば、総運搬量は20%強とは言え、”Coal”、”Non-metallic Minerals”、”Stone, Clay & Glass Products”などの重量貨車の車両重量が増加してきている、すなわち、車軸1本にかかる重量である”軸重”が、増加してきていることが明確である。



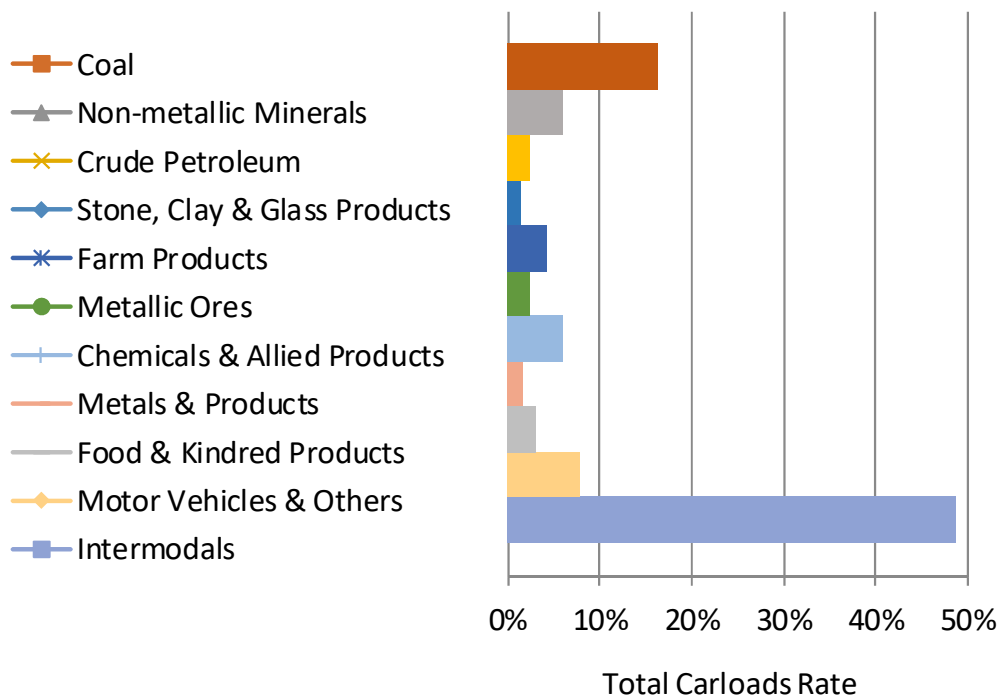
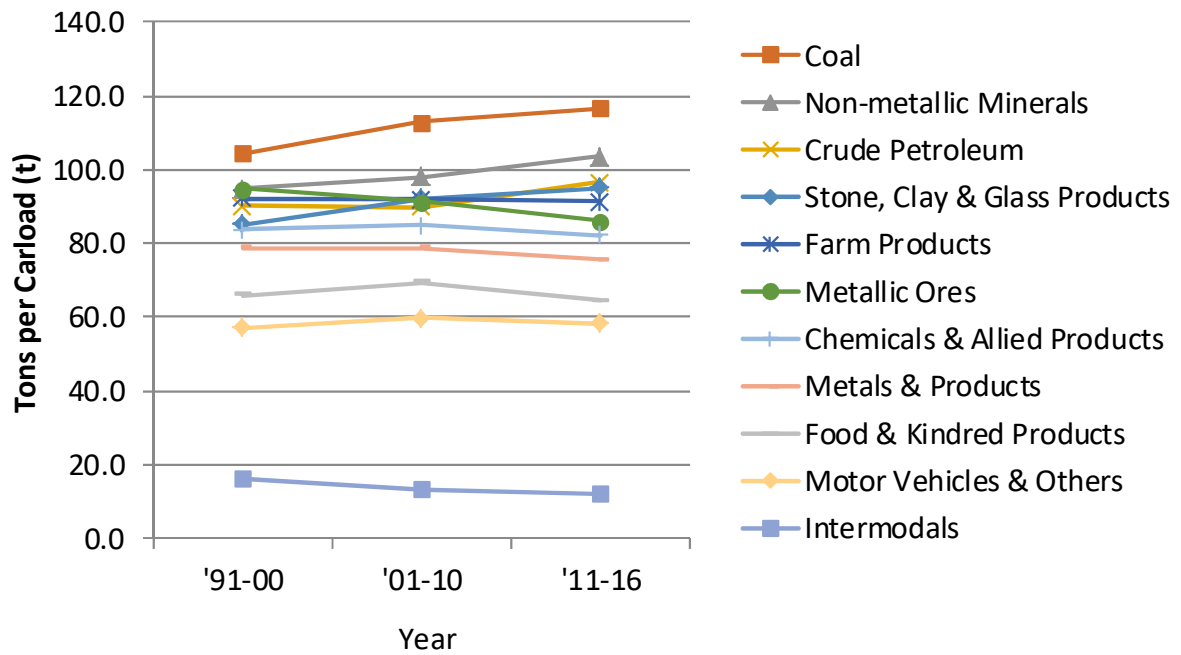


Fig. 15 運搬車両重量推移 <sup>16, 17)</sup>

つぎに、損傷区分毎の車輪廃却数について分析した。こちらも同様に、車両の回転頻度や車輪寿命のタイミングが年毎に大きく振れることから、分析結果を見誤らぬように、損傷区分毎の発生率を10年毎で整理して、傾向を掴むこととした。その結果を、Fig. 16に示す。この結果から分かるように、踏面損傷(フラットはく離など)が最大のリジェクト要因である。その割合は、重量貨車の軸重増加とともに増加していると考えられる。

一方、同じく軸重増加とともに増えると推定されたリム部割損は、発生率は極めて低く、さらに減少の一途を辿っている。脱線を誘発する重大損傷であるリム部割損は、リム大型はく離、および、リム縦割れがその主因であるが、AARスペックにおける超音波探傷規定(すなわち、許容内部欠陥サイズの規定)、および、清浄度規定の厳格化改訂(1999~2008年)が、大きく寄与していると考えられる<sup>18)</sup>。筆者らの研究を直接参照したか否かは不明であるが、同じ考え方をベースにして損傷が削減されていることから、一定の貢献をしたものと考えられる。

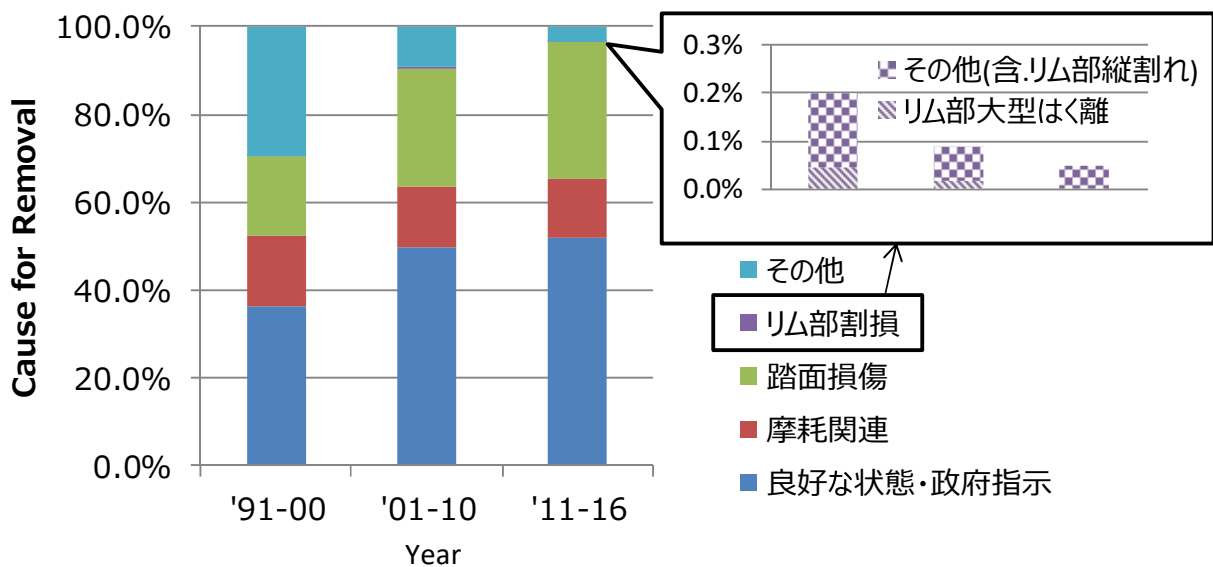


Fig. 16 北米での車輪損傷実態<sup>17)</sup>

### 3.2 車輪の損傷

#### 3.2.1 踏面損傷（フラットはく離など）

まず,最大のリジェクト要因である踏面損傷（フラットはく離など）について,解説する.

踏面損傷は通常, レールと最も多く接触する踏面中央付近のフラットはく離 (Spalling), または, 疲労はく離 (Shelling) のどちらかである. これらの損傷発生プロセスは転動応力によりき裂が発生し進展してはく離に至る部分は同じことから, 代表してフラットはく離 (Spalling) の発生プロセスを Fig. 17 に模式図で示す.

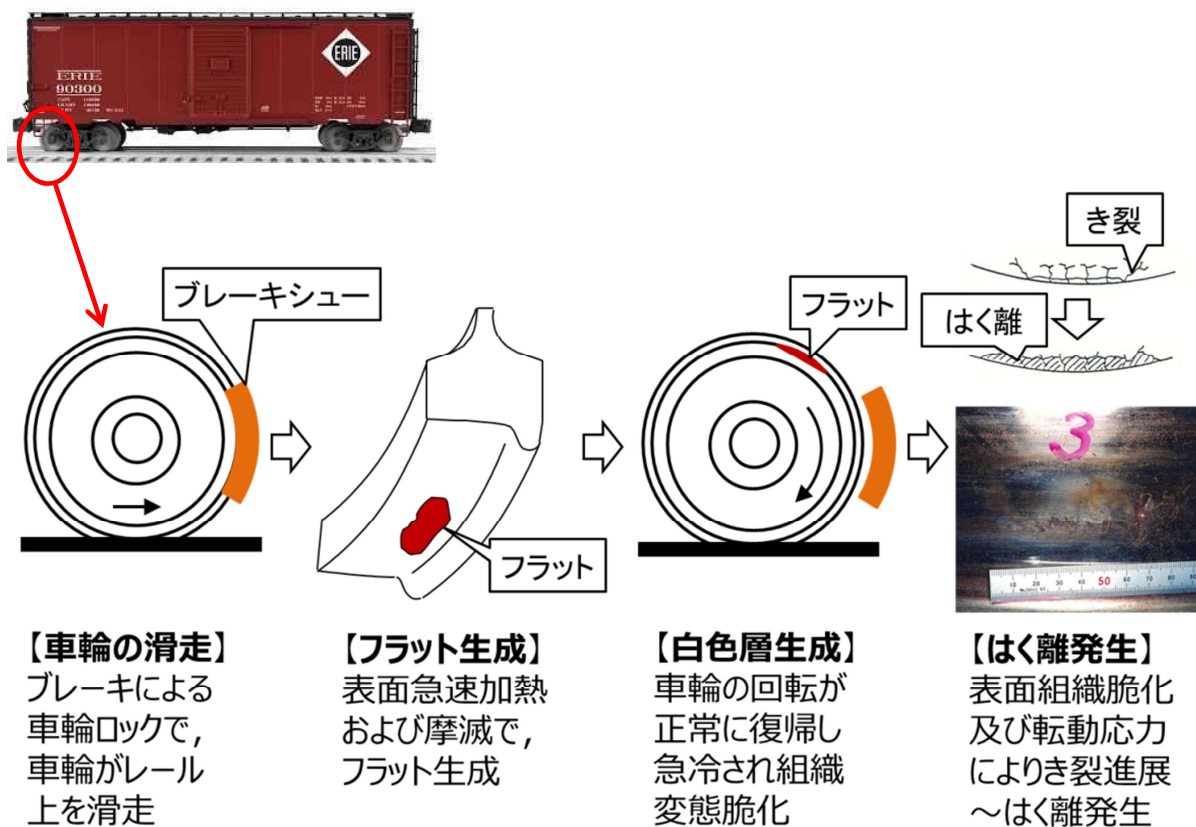


Fig. 17 フラットはく離 (Spalling) 発生プロセス

この図からわかるように、フラットはく離はブレーキなどによって車輪がレール上を滑走することにより、摩擦熱による加熱、および、摩擦によるフラットが生成されることから始まる。その後、車輪の回転が正常に復帰すると、空冷によって急冷されマルテンサイト組織に変態するため、フラット部分の材料としては脆化する。その後、車輪がレール上を転動すると、フラット部で衝撃力が発生し転動疲労き裂を生じやすいため、早期にはく離を起こす。これがフラットはく離である。疲労はく離(Shelling)は、脆化したマルテンサイト組織が無い状態で、軸重による面圧が高くなった時に生じる疲労き裂発生～進展～はく離である。面圧が高くなる理由は軸重増加すなわち、3.1節中の Fig. 15で前述した重量貨車における車両一両当たりの平均重量の増加であるが、踏面やレール頭頂部の設計形状も影響することになる。

日本国内では軸重が軽いため、ほとんどはフラットはく離(Spalling)である一方、北米は軸重が重く、疲労はく離(Shelling)も少なからず存在する。

### 3.2.2 リム大型はく離(Shattered-rim)

前3.2.1項の中で「疲労はく離」の説明にあったような、軸重が大きい等により接触面圧が高くなった場合、接触面直下の車輪リム内部に高いせん断応力が発生する。その剪断応力が転動によって引張圧縮の繰り返しとなることから、仮に内部にあらかじめ欠陥が存在していれば、その欠陥を起点としてき裂進展し得るに十分高い応力場を生み出すことになる。それによって車輪リム内部でき裂進展し、大きなはく離に繋がるケースを、リム大型はく離(Shattered-rim)と呼んでいる。Fig. 18にその発生プロセスを模式図で示す。

この損傷は、リム部が大きくはく離することから脱線のリスクがあるため、速やかに抑制する必要がある。そのため、早くからAARスペックにおける超音波探傷規定(すなわち、許容内部欠陥サイズの規定)、および、清浄度規定の厳格化改訂(1999～2008年)がなされてきた<sup>18)</sup>。これに筆者らの研究が一定の寄与をしたと考えており、その内容については後述する。その結果、前節で示したとおり、軸重が増加したにも拘わらず、リム大型はく離(Shattered-rim)の発生率は激減した。

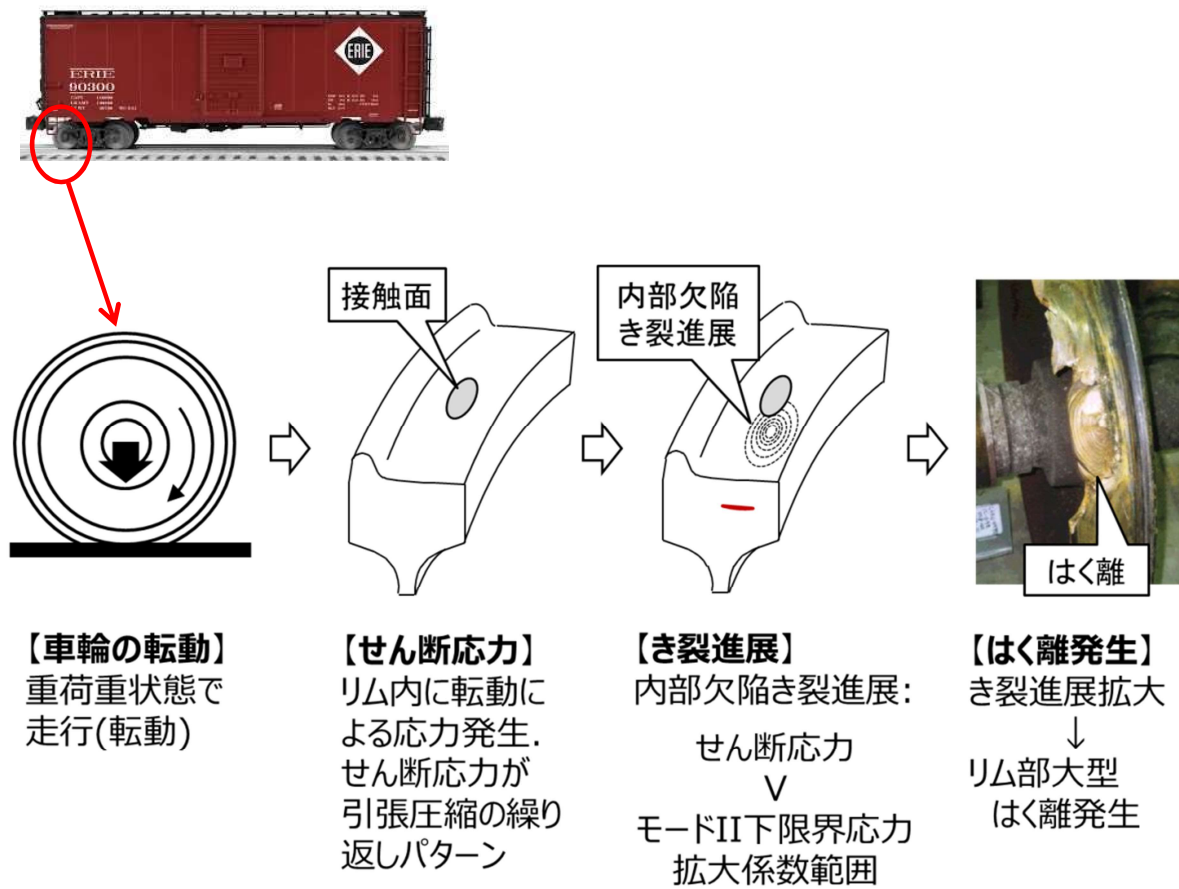


Fig. 18 リム大型はく離 (Shattered-rim) 発生プロセス

この図からわかるように、リム大型はく離 (Shattered-rim) は、内部欠陥を起点とした損傷である。そういう意味では製造原因ということになるが、少なくとも過去の AAR スペックに基づいて製造された車輪でも、軸重増加も相まって、リム大型はく離が発生していると見られる。したがって、本損傷については、製造(スペック)と運行(軸重)の両面からのアプローチで、抑制策を講じる必要がある。

### 3.2.3 リム縦割れ (Vertical Split Rim)

リム大型はく離 (Shattered-rim) に類似した案件で、リム縦割れ (VSR) がある。前 3.2.2 項で述べたとおり、軸重が大きい等により接触面圧が高くなった場合、接触面直下の車輪リム内部に高い剪断応力が発生し、転動によって引張圧縮の繰り返しとなることから、内部欠陥が進展する大型のはく離に至る。ここまでの話はリム部大型はく離と全く同じであるが、リム大型はく離 (Shattered-rim) との大きな違いは、円周方向の長さを持つ内部疲労亀裂が、リム部の縦 (径) 方向脆性割れに発展する点である。この縦割れに発展する理由の解明は、未だ途上である。

Fig. 19 に、リム縦割れの発生メカニズムの模式図を示す。

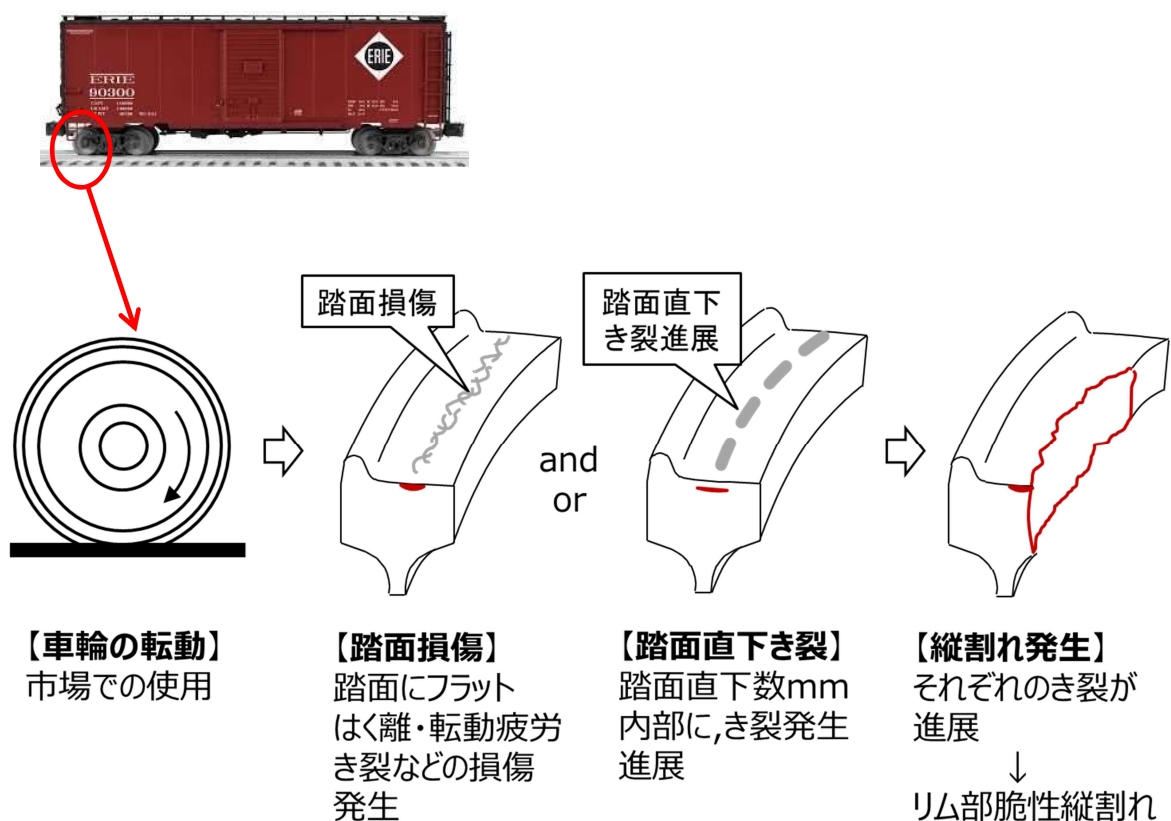


Fig. 19 リム縦割れ (VSR) 発生プロセス

Fig. 18 に示したリム部大型はく離と同様に，AAR スペックにおける超音波探傷，および，清浄度規定の厳格化改訂(1999～2008年)が奏功した形で，軸重が増加したにも拘わらず，リム部縦割れ(VSR)の発生率は減少してきている<sup>19)</sup>．しかしながら，この損傷も脱線のリスクがあるため，さらに抑制する必要がある．最近では，リム縦割れ(VSR)が，リム大型はく離(Shattered-rim)に取って代わってリム割損の主役となっており，本損傷の抑制が残された課題となっている．

本損傷についても，製造(スペック)と運行(軸重)の両面からのアプローチで，抑制策を講じる必要がある．

第4章：車輪耐踏面損傷性能に関する研究<sup>20)~23)</sup>

## 4.1 本研究の目的

本研究では、車輪の損傷の中で最大の取り換え要因である踏面損傷(フラットはく離など)について研究した。

踏面損傷は第3章で述べたとおり、フラットはく離(Spalling)または疲労はく離(Shelling)のどちらかであるが、発生プロセスの観点から疲労はく離はフラットはく離の一部のプロセス(転動応力によりき裂が発生～進展してはく離に至る)であることから、研究対象をフラットはく離とした。

これまで過去の研究者が行ったフラットはく離に関する研究では、「フラットはく離再現試験方法の提案」(Kigawa et al. <sup>24)</sup> <sup>25)</sup>) と、「マルテンサイト変態特性とフラットはく離特性との関係考察」(Sun et al. <sup>26)</sup> および Jergéus et al. <sup>27)</sup>) があるが、複雑に影響する種々の因子の影響を、定量的に評価するまでには至っていなかった。

そこで、本研究においては、フラット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することを目的として、数種の車輪鋼を用いてフラット生成試験(Skid Test)、およびフラット生成試験片を用いた転動疲労試験(Rolling Contact Fatigue Test, 以降 RCF Test と略す)、すなわちフラットはく離試験を実施した。

## 4.2 供試材および試験片

Table 1 に供試材の化学成分・硬さ等の特徴を示す。供試材のうち、1A, 1B, 1C は AAR 規格の Class-A, B, C であり、2B は炭素量が Class-B 相当で Si 量を高めた材料である。なお、1A, 1B, 2B は実体の車輪の踏面付近から切り出したが、1C は車輪素材を鍛伸後焼入れ焼き戻しした材料から切り出した。



Table 1 車輪材試験片

Class	C Content mass [%]	Vicker' s Hardness	Note
1A	0.51	248	AAR Class A
1B	0.59	268	AAR Class B
1C	0.67	292	AAR Class C
2B	0.63	335	Class B Hi-Si

Fig. 20 に試験片形状を示す．試験には車輪試験片とレール試験片とを1セットとして用いている．レール試験片には全ての試験で1Cを用いた．使用した試験機は車輪試験片の取り付け軸にブレーキ装置を有する2円筒式転動疲労試験機である．

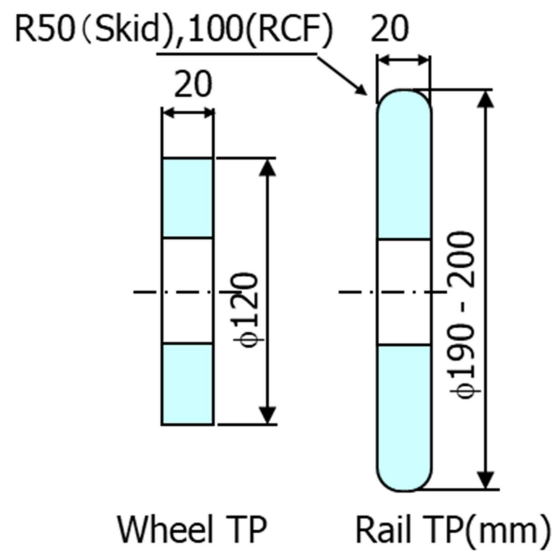


Fig. 20 試験片形状

## 4.3 フラット生成試験 (Skid Test)

## 4.3.1 試験方法

フラット生成試験は、Fig. 21の要領で、Fig. 22の試験機を用いて、実際に鉄道車両においてフラットが生成する状態を模擬して実施した。

(フラットの定義については第3.2.1項に記載)

まず、水潤滑下においてレール試験片を駆動、車輪試験片を従動させた転がり接触状態で、車輪試験片の回転軸にブレーキを付与する。その後、車輪試験片が停止する一方でレール試験片が回転する「車輪の滑走」状態を再現する。この間、車輪試験片接触面に面圧と接線力が重畳して作用することによりフラット状に変形し、同時に摩擦熱が発生することにより白色層が生じる。これがフラットの生成である。

本研究では、フラット生成を定量的に評価するため、フラット生成エネルギー、 $E_f$ 、を以下のように定義し、種々の生成フラットを評価した。

$$E_f = \text{滑走距離} \times \text{接線力}$$

$$= \frac{\text{車輪試験片軸の停止時間} \times \text{レール試験片軸の回転速度} \times \text{トルク}}{\text{車輪試験片半径}}$$

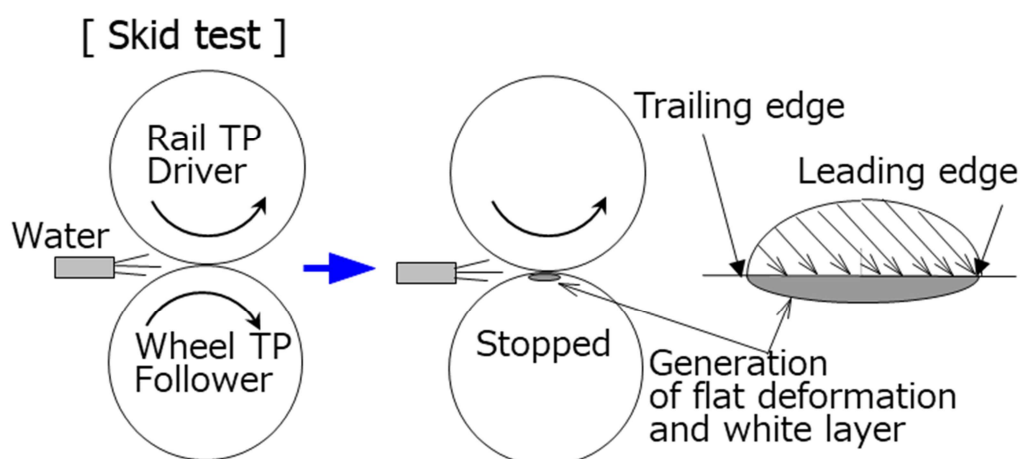


Fig. 21 フラット生成試験要領

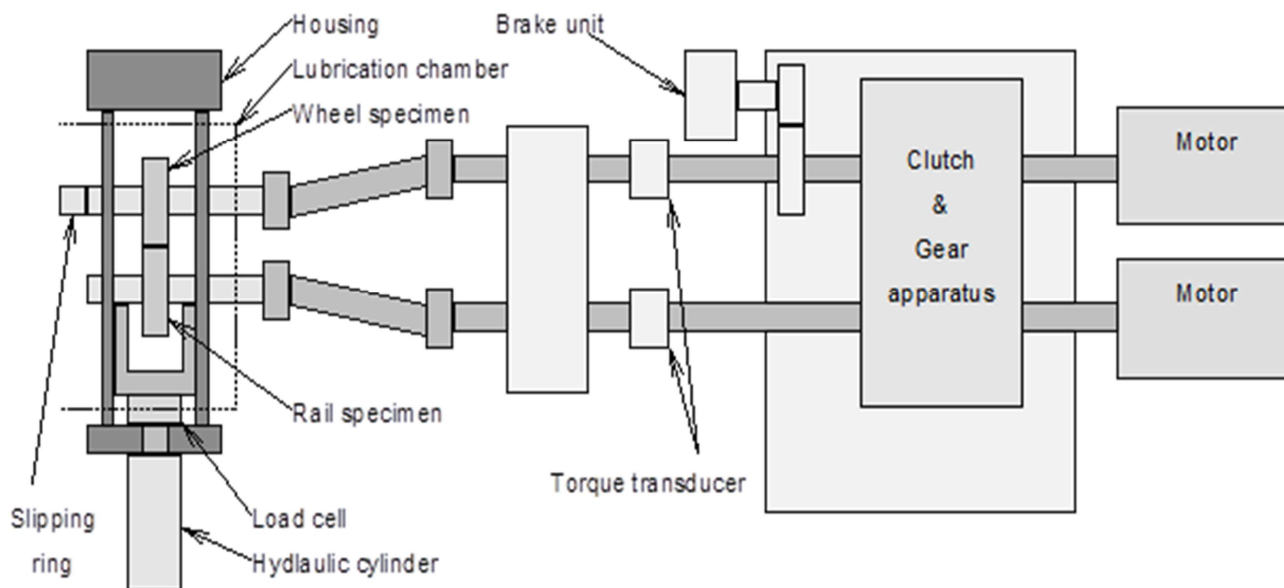


Fig. 22 2円筒転動疲労試験機

#### 4.3.2 試験結果

Fig. 23 に試験中の周速の変化を，Fig. 24 に試験において発生したフラットの外観写真の一例を示す．同図より，想定どおり「車輪の滑走」を再現できフラット生成を模擬できることを確認した．

そこで，フラットの大きさを定量的に評価するため，Fig. 25 に示す方法で，フラット変形による凹みの深さ (Depth of the flat= $D_f$ ) とフラット直下の白色層厚さの平均値 (Mean thickness of white layer= $t_w$ ) を指標として測定した．

フラット深さは，フラットの Leading Edge から 3, 6, 9mm 位置で車輪 TP の軸方向に断面プロファイルを測定し，これより得られる最大の深さとした．白色層平均厚さはフラットの Leading Edge より 8mm までの範囲の白色層厚さを平均した．

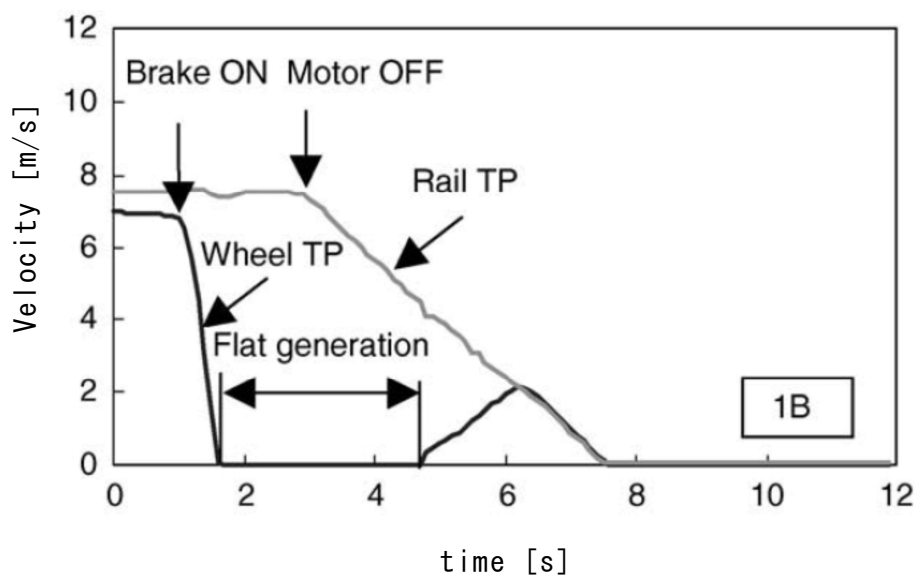


Fig. 23 フラット生成試験チャート

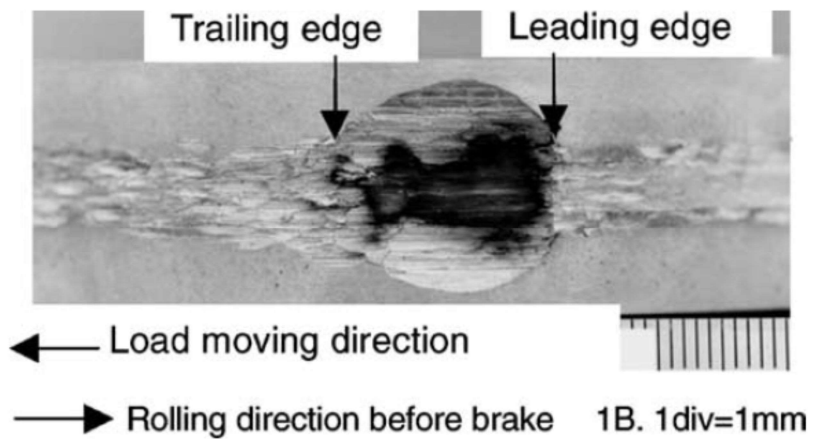


Fig. 24 試験後車輪試験片外観

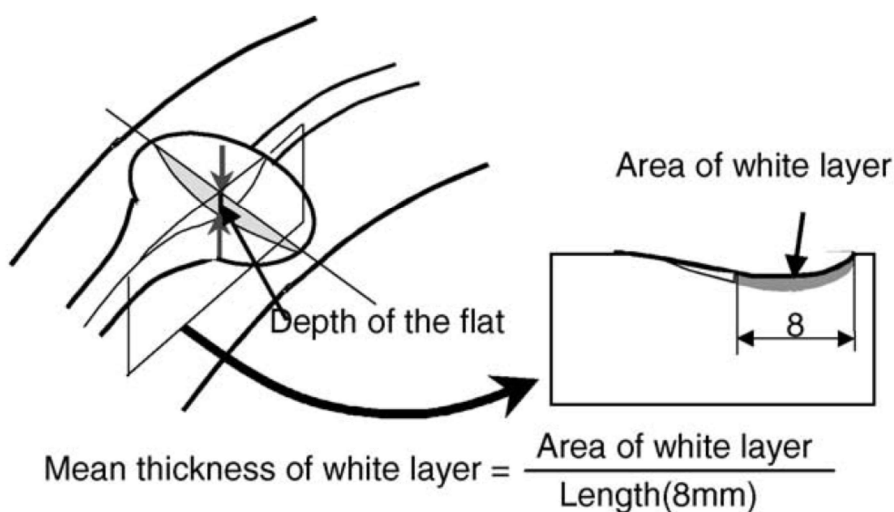


Fig. 25 フラット定量化指標

Fig. 26 にフラット生成エネルギー ( $E_f$ ) とフラット深さ ( $D_f$ ) との関係を, Fig. 27 に  $E_f$  と白色層平均厚さ ( $t_w$ ) との関係を示す. 同図より,  $E_f$  が大きいほど  $D_f$ ,  $t_w$  も深くなることから分かる.  $D_f$  がある深さで飽和するのは,  $D_f$  が深くなると面圧も低下するためと考えられる. また,  $D_f$  には材料間の差がほとんど無いが,  $t_w$  は材料間の差があることが分かる.

Fig. 28 に単位  $E_f$  当たりの  $t_w$  増加量と熱感受性指数 (JHRC49: JIS-G-0561 ジョミニー一端焼入れ性試験において HRC49 の硬さになる焼入れ端からの深さ)<sup>28)</sup> との関係を示す. 同図より,  $t_w$  の材料間の差は JHRC49 に依存すること, すなわち焼入れ性の良い材料ほど  $t_w$  が大きくなっていることが分かる.

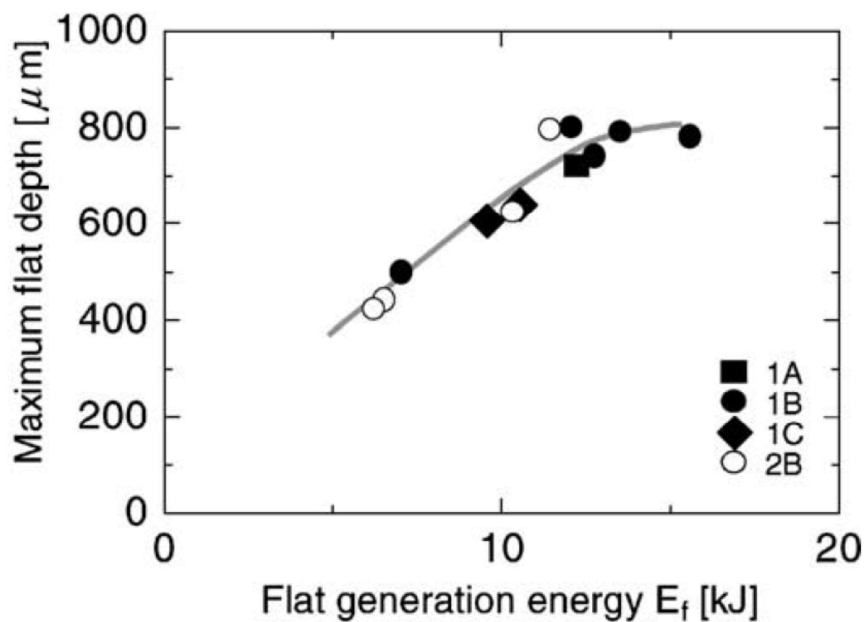


Fig. 26 フラット深さ ( $D_f$ ) とフラット生成エネルギー ( $E_f$ ) の関係

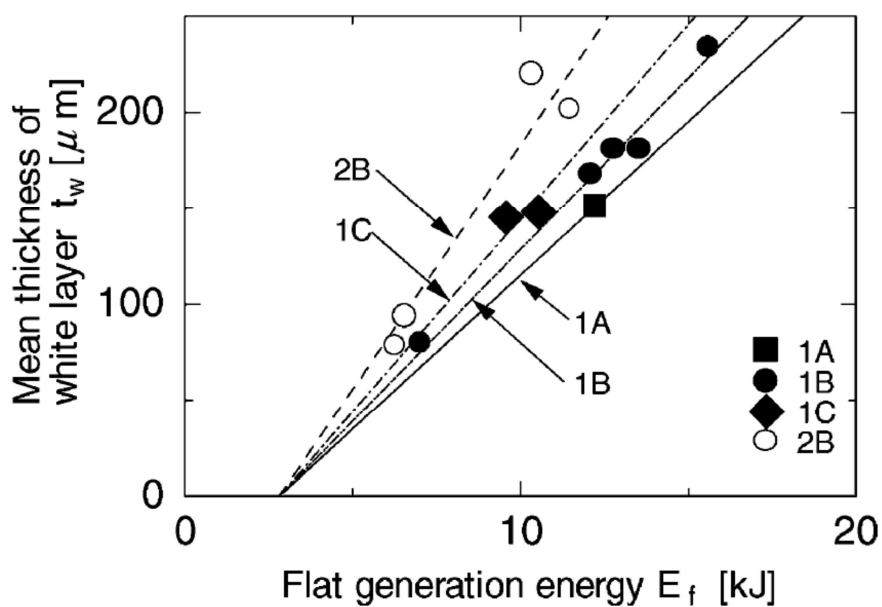


Fig. 27 白色層平均厚さ ( $t_w$ ) とフラット生成エネルギー ( $E_f$ ) の関係

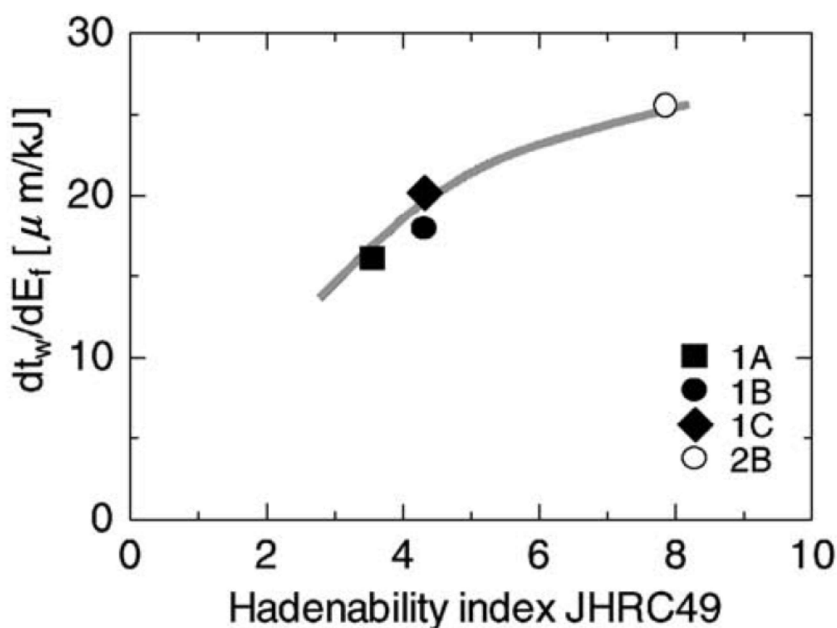


Fig. 28 単位  $E_f$  増分当たりの  $t_w$  増加量 ( $dt_w/dE_f$ ) と熱感受性指数 (JHRC49)<sup>28)</sup> の関係

#### 4.4 転動疲労試験 (RCF Test)

##### 4.4.1 試験方法

前 4.3 節でフラットが生成した試験片を用いて転動疲労試験を行った。車輪試験片・レール試験片の両方の軸を水潤滑下で駆動させ、車輪試験片の周速を 3.14m/s とし、レール試験片のそれよりも 1%遅くした。押しつけ荷重は 1,225kN、ヘルツ応力は 960MPa とした。Table 2 に、試験条件を現車条件と比較する形でまとめたものを示す。

試験は、繰り返し数 (フラット上を接触荷重が通過する累積数) が  $5 \times 10^5$  となった時点で終了した。また、一部の試験において、25kHz で動的荷重をサンプリング測定した。さらに、人工フラット試験片、フラット無し試験片を用いた同様の試験も実施し (4.5 節に詳述)、フラットはく離に対するフラット形状、材質、衝撃荷重の影響を評価した。

Table 2 試験条件

	Test	Field
Car speed	11.3 km/h	80 km/h max.
Lubrication	Water	None/Dust/Water
Slip ratio	1.0%	0-0.8%
Hertzian pressure	960 MPa	630*-2,800 MPa

\*:Proportional to maximum loading capacity - empty car load

#### 4.4.2 試験結果

Fig. 29 に転動疲労試験前後のフラットの外観写真を、Fig. 30 に RCF Test 後の断面写真観察で得られた白色層とき裂の円周方向分布を示す。き裂は表面に起点のあるき裂の総深さを測定して、グラフ上の縦棒高さで表現した。

同図より、フラット中央部では RCF Test で接触した形跡がなく、一方で Trailing edge 付近で損傷が激しい(き裂が多数発生している)ことが分かる。

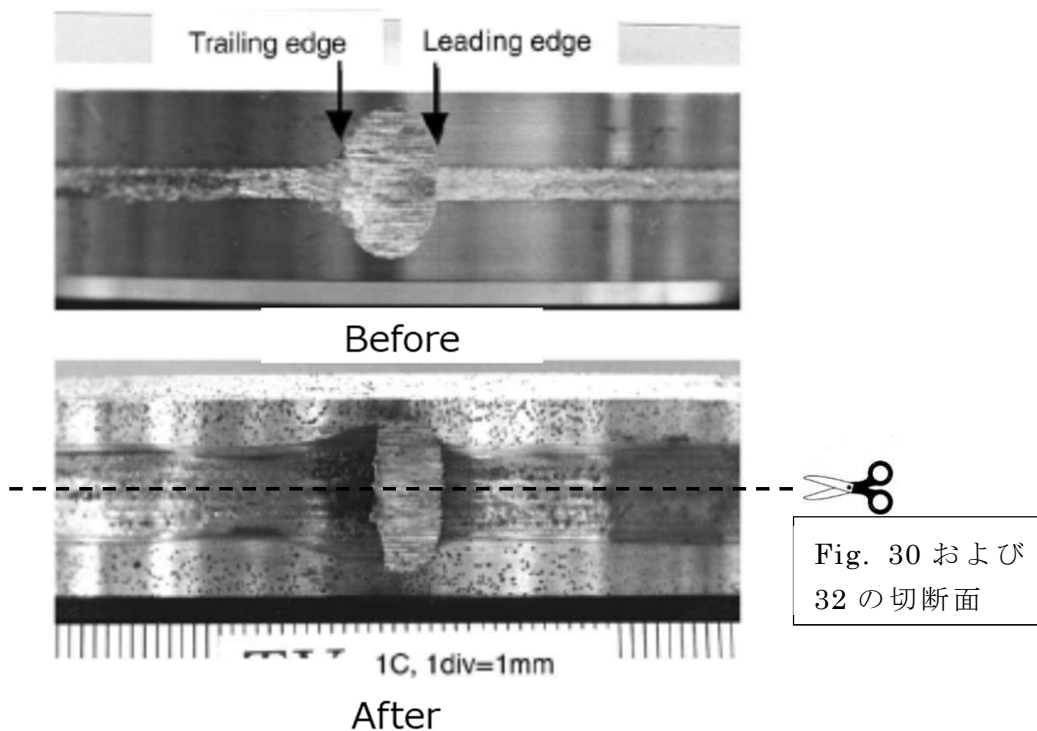


Fig. 29 転動疲労試験前後の車輪試験片フラット部外観



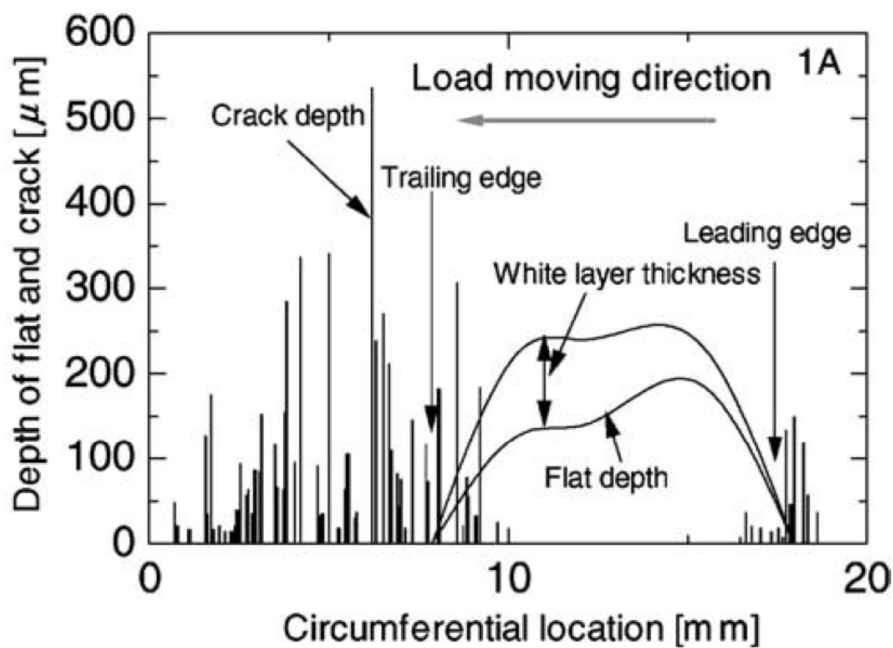


Fig. 30 転動疲労試験後の周方向断面状況

Fig. 31 にフラット上を荷重点が通過した時の動的荷重の変化を測定した結果を示す。また、Fig. 32 に同じ試験片の転動疲労試験後の断面観察結果を、Fig. 31 と同じ横軸を用いて示す。同図の比較により、Fig. 31 中の衝撃荷重発生位置が Fig. 32 中のき裂発生位置とよく一致していることが分かる。

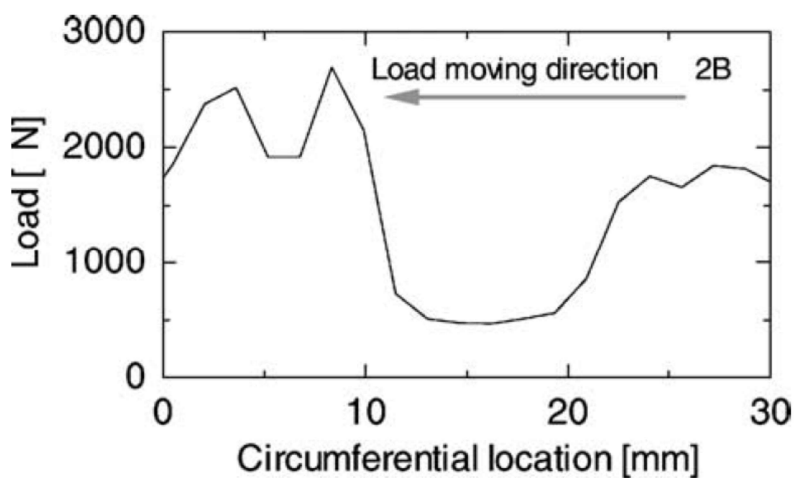


Fig. 31 周方向動的荷重

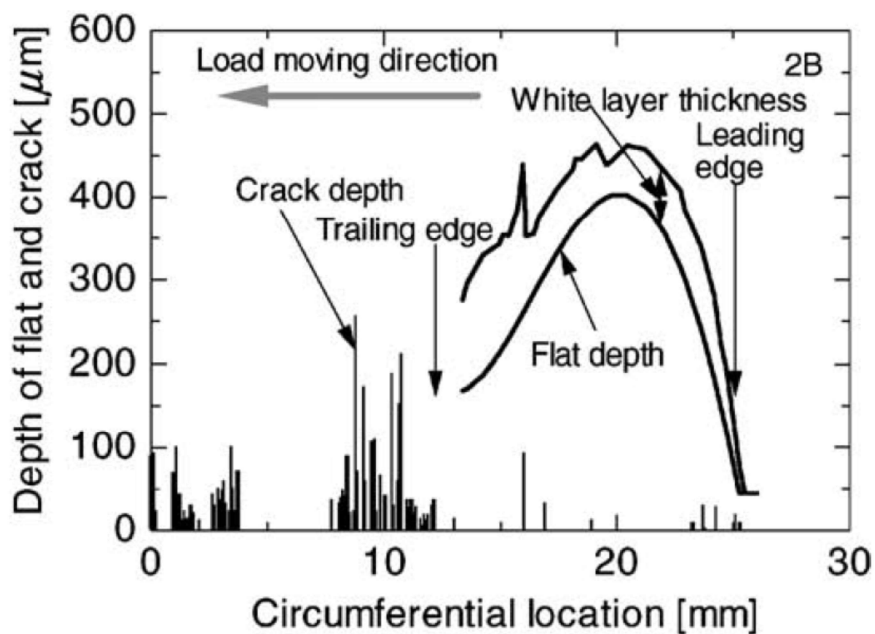


Fig. 32 転動疲労試験後の周方向断面状況

全ての供試材でき裂が発生したことから、き裂の発生位置を確認したところ、白色層内、白色層と母材の界面、母材の3種類があった。しかしながら、白色層の欠落も見られたことから、き裂発生に及ぼす白色層の影響を明確にはできないものの、フラットそのものの深さは焼入れ性の良い材料ほど深いことから、き裂や真円度の観点から焼入れ性の良い材料は車輪として好ましくないことが分かった。

また、フラット生成試験片を用いた転動疲労試験では、フラットに起因して生じた衝撃荷重が、き裂の発生に多大な影響を及ぼしていると結論づけられる。

## 4.5 考察

ここでは、前 4.4 節のフラット生成試験片による転動疲労試験結果およびフラットはく離の生成機構について考察するため、以下の試験を行った。

- (1) 種々の形状のフラットを有する試験片を用いた衝撃荷重の評価
- (2) フラットの無い平滑試験片を用いた転動疲労試験

## 4.5.1 衝撃荷重に及ぼすフラット形状の影響

衝撃荷重に及ぼすフラット形状の影響を明らかにするため、種々の形状のフラットを人工的に機械加工で付与した試験片(人工フラット試験片)を用いて、転動時の衝撃荷重を評価した。Fig. 33 に人工フラット試験片の形状を示す。ここで、周速、荷重、潤滑等の試験条件および衝撃荷重の測定方法は、全て前 4.4 節の転動疲労試験と同じとした。

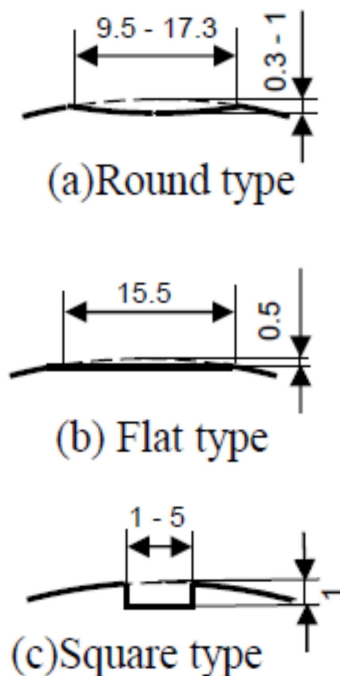


Fig. 33 人工フラット試験片形状

Fig. 34 に、衝撃荷重のピーク値とその発生位置 (Leading Edge からの円周方向長さ) との関係を示す。同図より、人工フラット試験片のほとんどのプロット点で衝撃荷重発生位置 (Leading Edge からの円周方向長さ) に伴って、衝撃荷重ピーク値が増大することが分かる。しかし、Round type (▲) の一部および実フラット試験片 (◆) では、衝撃位置の円周方向長さが長くても、衝撃荷重ピーク値はそれほど大きくなるらない。

そこで、Fig. 35 に示すとおり、衝撃荷重発生時のレール試験片頂点の上下方向変位速度 (Vertical Displacement Rate=VDR) を求め、これと衝撃荷重ピーク値との関係を調べた。Fig. 36 にその結果を示す。

Fig. 36 より、VDR の増加とともに衝撃荷重のピーク値が大きくなっていることが分かる。これは、Round type や実フラット試験片形状では、Trailing edge よりも手前 (フラット側) ではレール頂点以外の部分で接触するため、VDR が低下したものと考えられる。

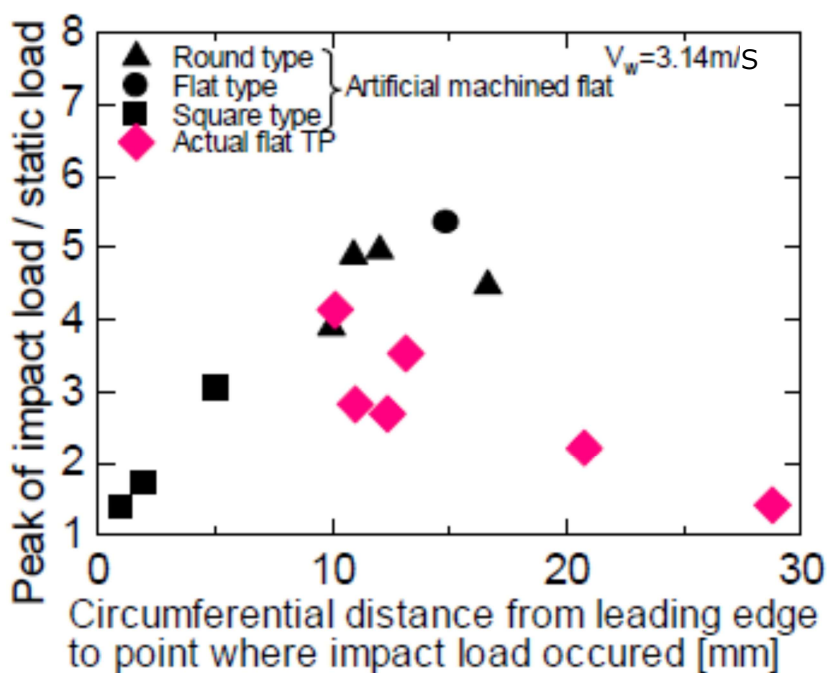


Fig. 34 衝撃荷重ピーク値と発生位置 (Leading Edge からの円周方向長さ) の関係

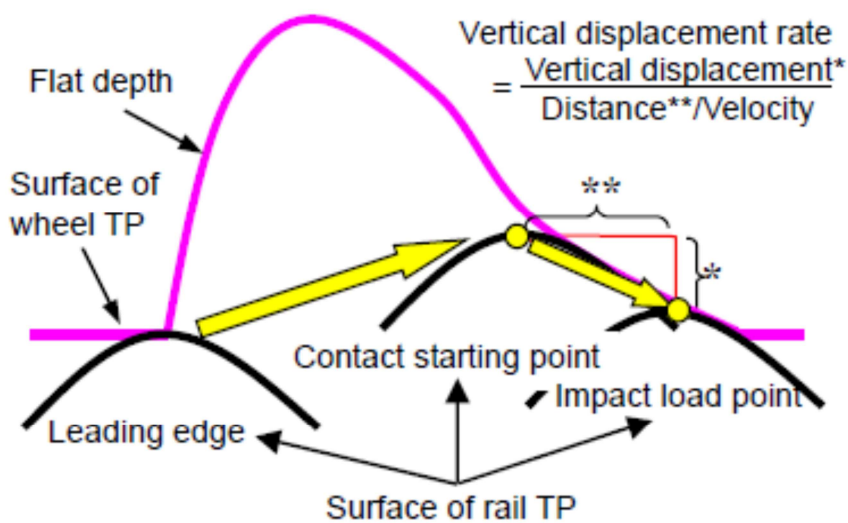


Fig. 35 上下方向変位速度 (VDR) 定義

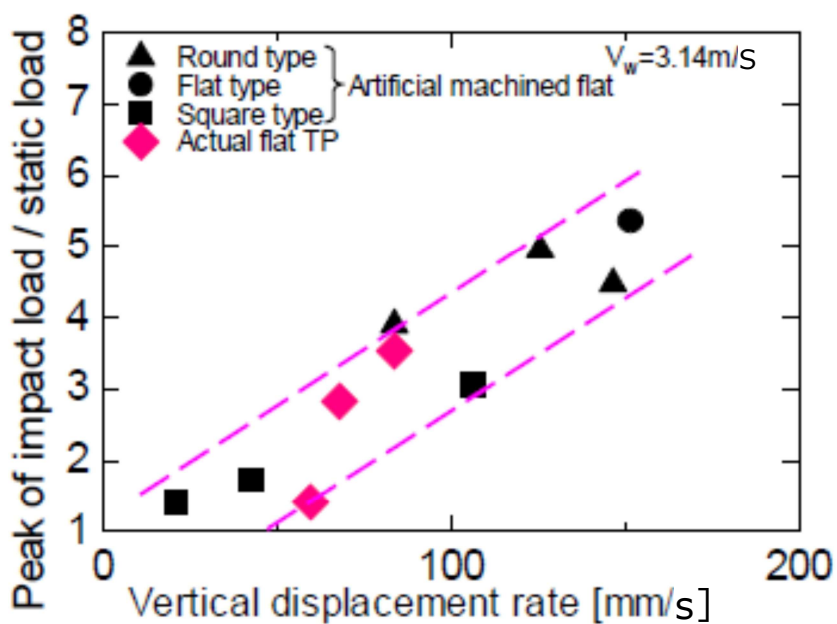


Fig. 36 衝撃荷重ピーク値と VDR の関係

## 4.5.2 平滑試験片による転動疲労試験

母材の転動疲労特性を明らかにし，第4.4節の転動疲労試験結果と比較することによって，フラットはく離が転動疲労特性に及ぼす影響，すなわち，フラット形状及び衝撃荷重が転動疲労特性にどのように影響するのかを評価するために，フラット無し平滑試験片(平滑試験片)による転動疲労試験を実施した。

Fig. 37 にレール試験片の形状を示す．軸方向の微小移動が生じても試験中のヘルツ応力変動を排除できるように，平滑な線接触タイプのレール試験片形状とした．車輪試験片形状は Fig. 20 と同じである．すべり率は前4.4節の転動疲労試験と同じ1%とした．それ以外の条件も不変とし，車輪試験片軸の上下加速度が  $0.5G$  となる繰り返し数  $N_c$  で評価した．

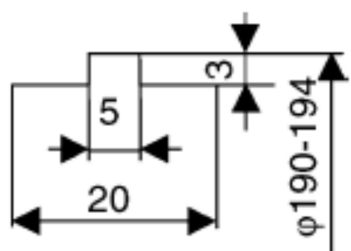


Fig. 37 レール試験片形状

Fig. 38 にヘルツ応力 ( $p_{max}$ )- $N_c$  線図を示す．同図より，2B 材が最長寿命，ついで 1B，そして 1A が最短寿命であることが分かる．同図中には転動疲労試験条件である  $960\text{MPa}$  および繰り返し数  $5 \times 10^5$  の線を引いている．これから分かるように，本節の試験結果は，寿命の定義が若干異なるので注意が必要ではあるが，繰り返し数  $5 \times 10^5$  よりも長寿命である．

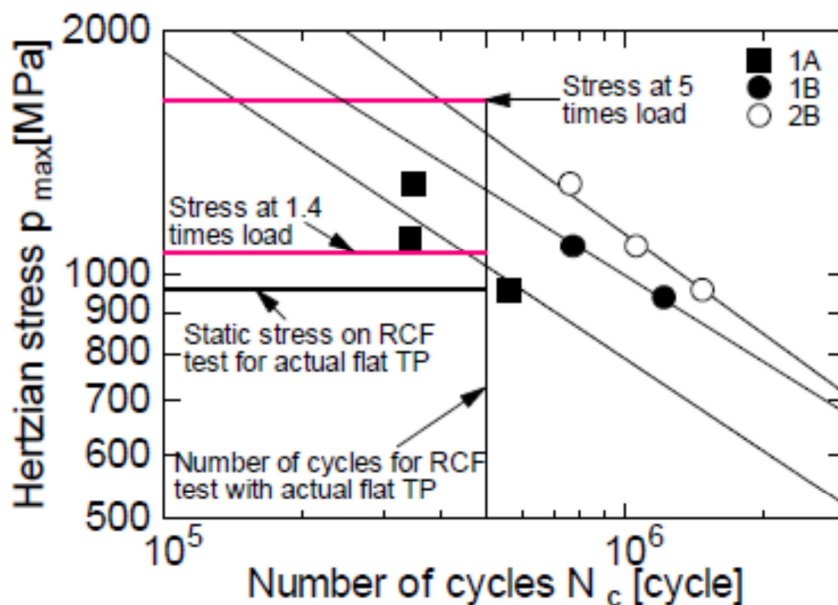


Fig. 38 ヘルツ応力 ( $p_{max}$ ) -  $N_c$  線図

#### 4.5.3 フラット生成試験片による転動疲労試験

4.4節のフラット生成試験片による転動疲労試験では, Fig. 34およびFig. 36に示すように, 衝撃荷重のピーク値は静的荷重の1.4~5.0倍になっている. これを試験片の形状が同じであると仮定してヘルツ応力に換算すると, 1,069~1,642MPaになる. この衝撃荷重レベルを Fig. 38中に赤ラインで示す. このレベルでは平滑試験片寿命が  $5 \times 10^5$  を下回り, フラット生成試験片による転動疲労試験によってき裂が発生していた結果を, 定性的には説明できることが分かった.

Fig. 39に,  $p_{max}$ - $N_c$ 線図から求めた  $5 \times 10^5$ 強度(ヘルツ応力)とビッカース硬さの関係を示す. 同図より,  $5 \times 10^5$ 強度はビッカース硬さに比例してほぼ線形に増加することが分かる.

また, Fig. 40に, フラット生成試験片による転動疲労試験後のき裂の最大深さと衝撃荷重の関係を示す(衝撃荷重を全て測定した1Aの例). 同図より, プロット点数は少ないものの, 衝撃荷重の増大に伴ってき裂が深くなることが分かる.

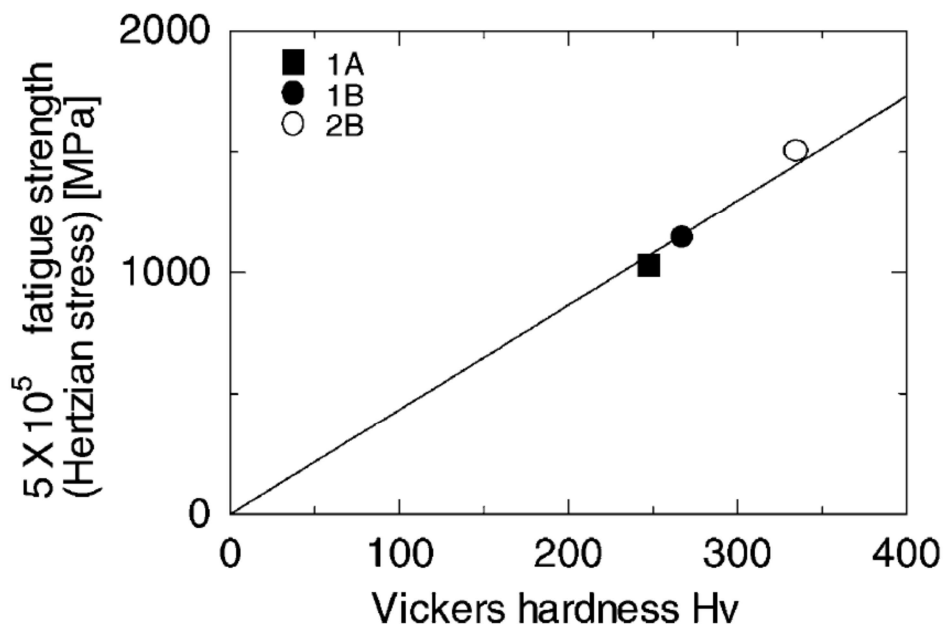


Fig. 39 5X10<sup>5</sup>強度(ヘルツ応力)とビッカース硬さの関係

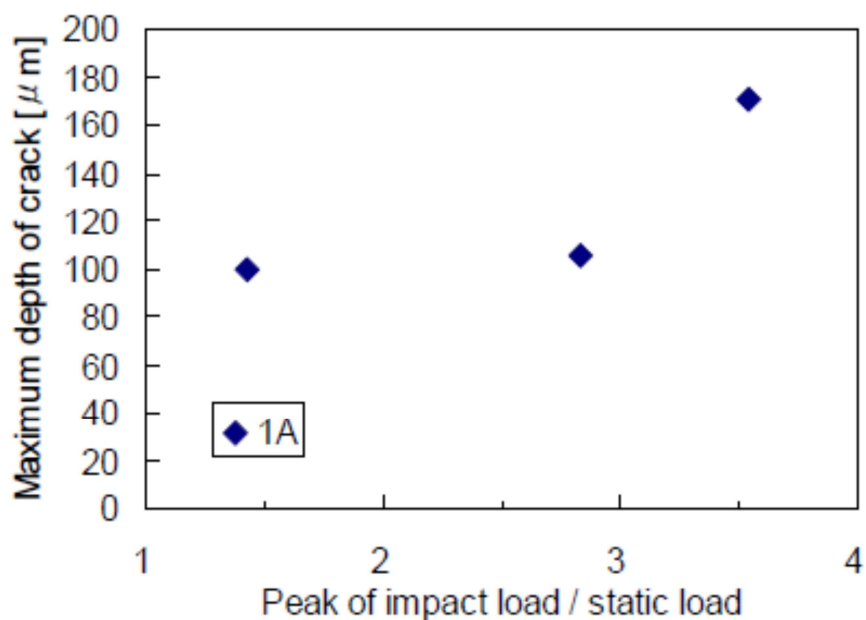


Fig. 40 き裂の最大深さと衝撃荷重の関係



以上より、フラットはく離特性は、衝撃荷重と母材の転動疲労特性に支配されていると結論づけられる。衝撃荷重はフラット形状に依存しており、材料の影響を受けない。一方、母材の転動疲労特性には材料依存性があり、同じヘルツ応力で比較すると硬さが低い方が短寿命になる。したがって、フラットはく離寿命は衝撃荷重による荷重増大分を加味したヘルツ応力下の転動疲労寿命と対応すると考えられる。

#### 4.6 結論

フラットはく離特性に及ぼす材質、フラット形状および衝撃荷重の影響を明らかにすることを目的として、フラット生成試験および転動疲労試験を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) フラット生成エネルギー ( $E_f$ ) が大きい、すなわち車速が速かったり滑走時間が長いほど、フラット深さ ( $D_f$ )・白色層平均厚さ ( $t_w$ ) とともに大きくなる。
- 2) 焼入れ性の良い材料ほど、 $t_w$  は厚くなる。
- 3) 白色層は多くの場合き裂・割れを伴ったり、白色層そのものが欠落している。
- 4) フラットが大きい(円周方向に長い、もしくは深い)ほど、衝撃荷重が増大する。  
(詳しくは、上下方向の変位速度が増大するような形状であるほど)
- 5) 衝撃荷重の増大に伴ってき裂が深くなる。
- 6) 材料が硬いほど母材の転動疲労強度は高くなり、そこに衝撃荷重を加味すると耐フラットはく離寿命をある程度推定できる。

以上より、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という提案ができる。

第5章：車輪耐リム損傷性能に関する研究（その1；リム大型はく離）<sup>29)</sup>

5.1 本研究の目的

車輪の損傷の中で、脱線事故を誘発する可能性があるとして広く知られている損傷がリム大型はく離 (Shattered-rim) である。

リム大型はく離は第3章で述べたとおり、1990年代に北米にて多発した車輪損傷であり、AAR スペックにおける超音波探傷規定(すなわち、許容内部欠陥サイズの規定)、および、清浄度規定の厳格化改訂(1999～2008年)がなされた結果<sup>18)</sup>、当該損傷が大幅に減少した経緯がある。これに本研究が一定の寄与をしたと考えており、その内容について本章で述べる。

本研究と並行して他者によってなされていたリム大型はく離に関する研究で、その定性的な発生メカニズムや形態は明らかにされている。本損傷は車輪内部に既存のボイドや非金属介在物を起点として、踏面と平行な方向に疲労進展するものであり、その踏面からの深さは12～20mm(1/2～3/4")であるため、脱線を伴うとされている<sup>30)</sup>。Fig. 41に、リム大型はく離の一例の外観写真を示す。

また、同じ時期にAARは、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て、車輪鋼の清浄度および内部欠陥に関する規定の厳格化の検討を始めていた。

そこで、本研究では、リム大型はく離の抑制を目的として、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するため、各種材料によるき裂進展試験、および同欠陥を等価円盤状欠陥とみなした簡易計算式による、破壊力学的アプローチを試みた。



Fig. 41 リム大型はく離の一例

## 5.2 破壊力学的アプローチ手法

破壊力学的手法として、内部欠陥を有する材料のき裂進展特性や破壊などの強度特性を、単一のパラメータで定量的に評価する方法がよく用いられる。一般的にはパラメータとして、取扱いが容易な応力拡大係数が用いられている。

一方、欠陥に応力が負荷されている状態でのき裂進展の形態は、Fig. 42 の3つの Mode に分けられる。

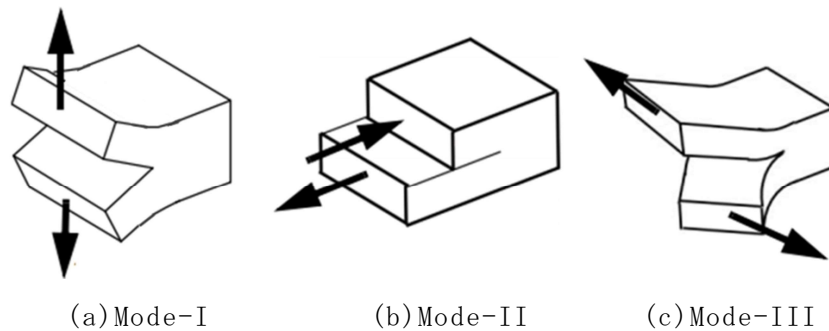


Fig. 42 き裂の進展形態

リム大型はく離はその形態から、内部欠陥からの Mode-II(せん断方向)き裂進展であることが分かる。しかしながら、車輪鋼の Mode-II き裂進展特性については、過去にほとんど研究がなされていなかった。

そこでまず、車輪鋼を用いた Mode-II き裂進展試験を実施し、材料定数である Mode-II 下限界応力拡大係数範囲 ( $\Delta K_{IIth}$ ) を実験により求めた。 $\Delta K_{IIth}$  とは、Mode-II(せん断方向)の発生応力による応力拡大係数範囲 ( $\Delta K_{II}$ ) がその値を超えると、Mode-II 疲労き裂進展が起こるというものである。また、疲労き裂進展を評価するため、車輪走行時を模擬した転がり接触下での  $\Delta K_{II}$  を、有限要素法解析によって求めた。

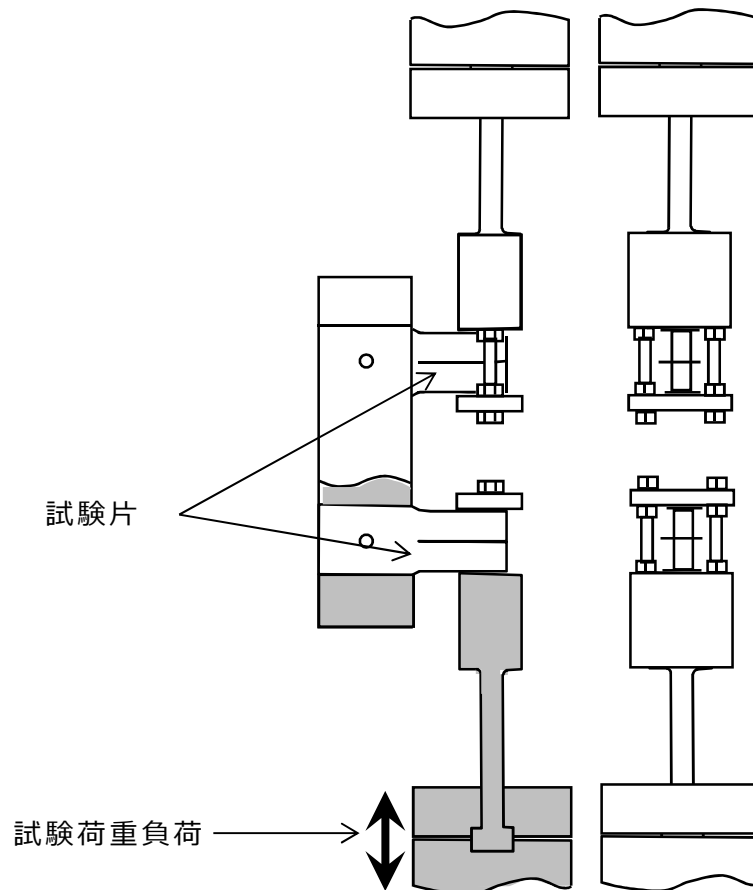
ここで  $\Delta K_{II}$  が  $\Delta K_{IIth}$  より大きくなる時き裂が進展するが、起点となる内部欠陥の位置(踏面からの深さ)や欠陥サイズによって  $\Delta K_{II}$  が変動することを利用し、実際の重量貨車車両の走行条件下でき裂が進展する許容欠陥サイズを求めた。すなわち、実際にリム大型はく離を引き起こす内部欠陥を Eq. 1 の関係式が通用する欠陥モデルに置き換えて、許容欠陥サイズを特定した。

$$\Delta K: \text{Stress Intensity Factor Range} \propto (\text{stress}) \times (\text{crack length})^{1/2} \quad (\text{Eq. 1})$$

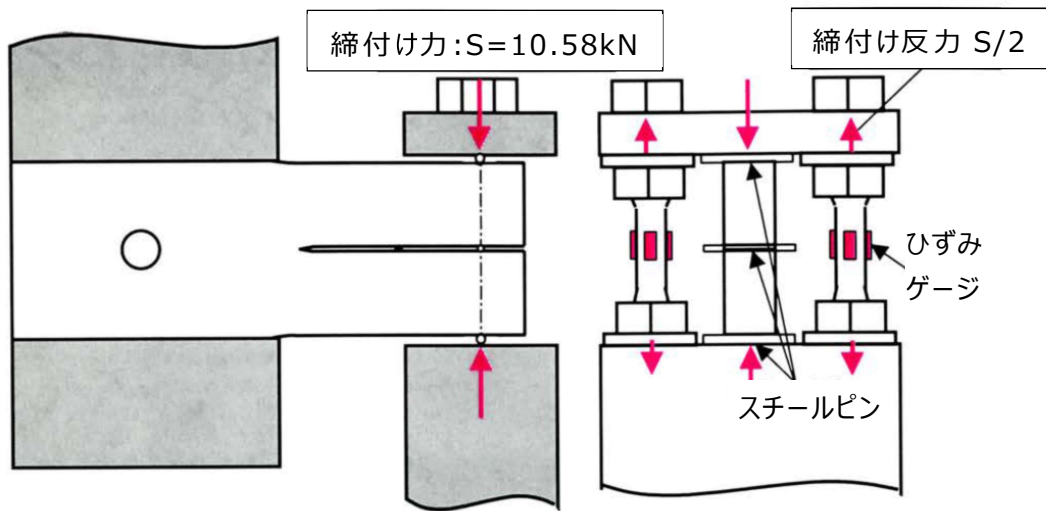
### 5.3 Mode-II 下限界応力拡大係数範囲

#### 5.3.1 試験方法

車輪鋼の Mode-II き裂進展特性を把握するため、村上らが推奨する方法によって試験を実施した<sup>31)</sup>。Fig. 43 に試験の概略図を示す。片持ちはりの中心部に Chevron ノッチを施し、かつ横溝を設けることによって、Mode-II き裂進展を容易に得られる形の試験片を準備した。その試験片を2個装着し、一般的な繰り返し負荷疲労試験機を用いて Mode-II き裂進展試験ができる構造とした。



(a) 試験片と治具との組付け図



(b) 試験片周辺の詳細図

Fig. 43 Mode-II き裂進展試験概略図

また，Fig. 44 に示すとおり，試験片の厚み方向中央の中立面には梁の長手方向の垂直応力 ( $\sigma_x$ ) は作用せず，応力 ( $\tau_{xy}$ ) のみが作用して，スリットの先端から Mode-II のき裂の進展が起こる試験方法とした。

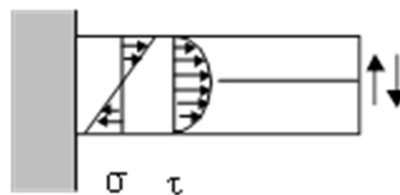


Fig. 44 Mode-II き裂進展試験片の応力分布

供試材は，第4章で述べた 1A, 1B, 1C (すなわち，AAR 規格の Class-A, B, C 材) に加えて 2B (Class-B の Si を高めた材料) とし，応力比 (試験の応力最大値/最小値の比)  $R=-1$  となる繰り返し応力負荷を与え， $10^3$  から  $10^7$  回の負荷回数で試験を止め，破面を観察した。

Fig. 45 に試験後破面を SEM 観察した結果の一例を示す．き裂が進展し始めて Mode-I に分岐するまで、き裂進行方向に平行にこすられた筋が所々で観察され、Mode-II き裂進展していることが確認された．これは、本試験によって Mode-II き裂進展が再現され、 $\Delta K_{II}$  が低下しそれが Mode-I に変わったところで、 $\Delta K_{IIth}$  を見出すことができることを示している．

この方法で全ての試験片について破面観察し、Mode-II き裂進展の長さを測定するとともに、き裂長さとの繰り返し回数からき裂進展速度( $da/dN$ )を求めた．

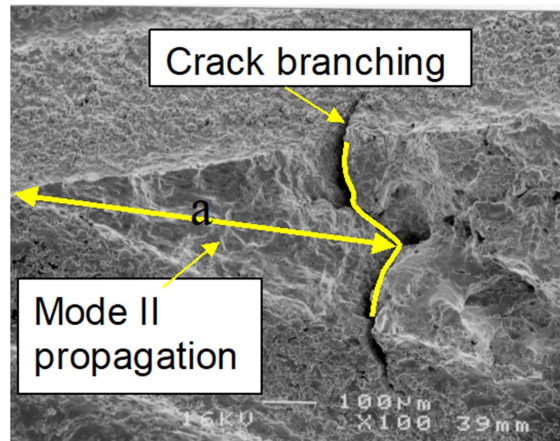


Fig. 45 破面 SEM 観察結果

一方、 $\Delta K_{II}$  を有限要素法解析によって算出し、上述の試験によって得られた  $da/dN$  と  $\Delta K_{II}$  との相関を求めた．有限要素法解析は汎用有限要素法解析プログラム ABAQUS5.4 を用い、試験片の対象構造を利用して 1/2 の形状で行った．き裂破面間の摩擦係数  $f_c$  は不明であるので、 $f_c=0.0\sim 1.0$  の間で変化させて解析を行った<sup>32)</sup>．ここで、 $da/dN$  が  $10^{-10}m/cycle$  を下回った時の  $\Delta K_{II}$  を  $\Delta K_{IIth}$  と見なした．ただし、 $da/dN$  に若干ばらつきがあることから、上方(Upper)および下方(Lower)の  $\Delta K_{IIth}$  を求めた．

### 5.3.2 試験結果

Fig. 46 に  $\Delta K_{I\text{Ith}}$  をそれぞれの材料硬さで整理した結果を示す．硬さが上位の3材料(1B, 2B, 1C)については， $\Delta K_{I\text{Ith}}$  は  $18\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  でほぼ一定であるが，硬さが最低位の  $H_v \approx 250$  の材料（1A）のみが，他と比べて  $\Delta K_{I\text{Ith}}$  が少し低い結果となった．

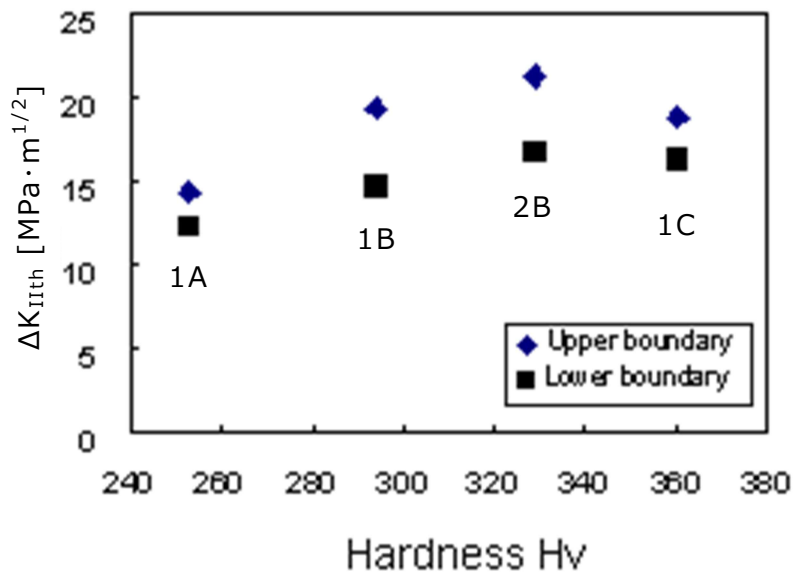


Fig. 46  $\Delta K_{I\text{Ith}}$  と硬さの関係

## 5.4 転動によって発生する応力拡大係数

### 5.4.1 計算方法

車輪リム内部欠陥が踏面と並行に存在するという仮定の下，Fig. 47 に示す計算モデルを設定した．車輪とレールの接触面は楕円形状をしており，その回転方向(Y軸)長半径を”b”，回転方向と垂直な軸方向(Z軸)短半径を”a”，踏面から車軸に向かう径方向(X軸)の欠陥深さを”d”とした．また，内部欠陥を円形と見なしその半径を”r”とした．



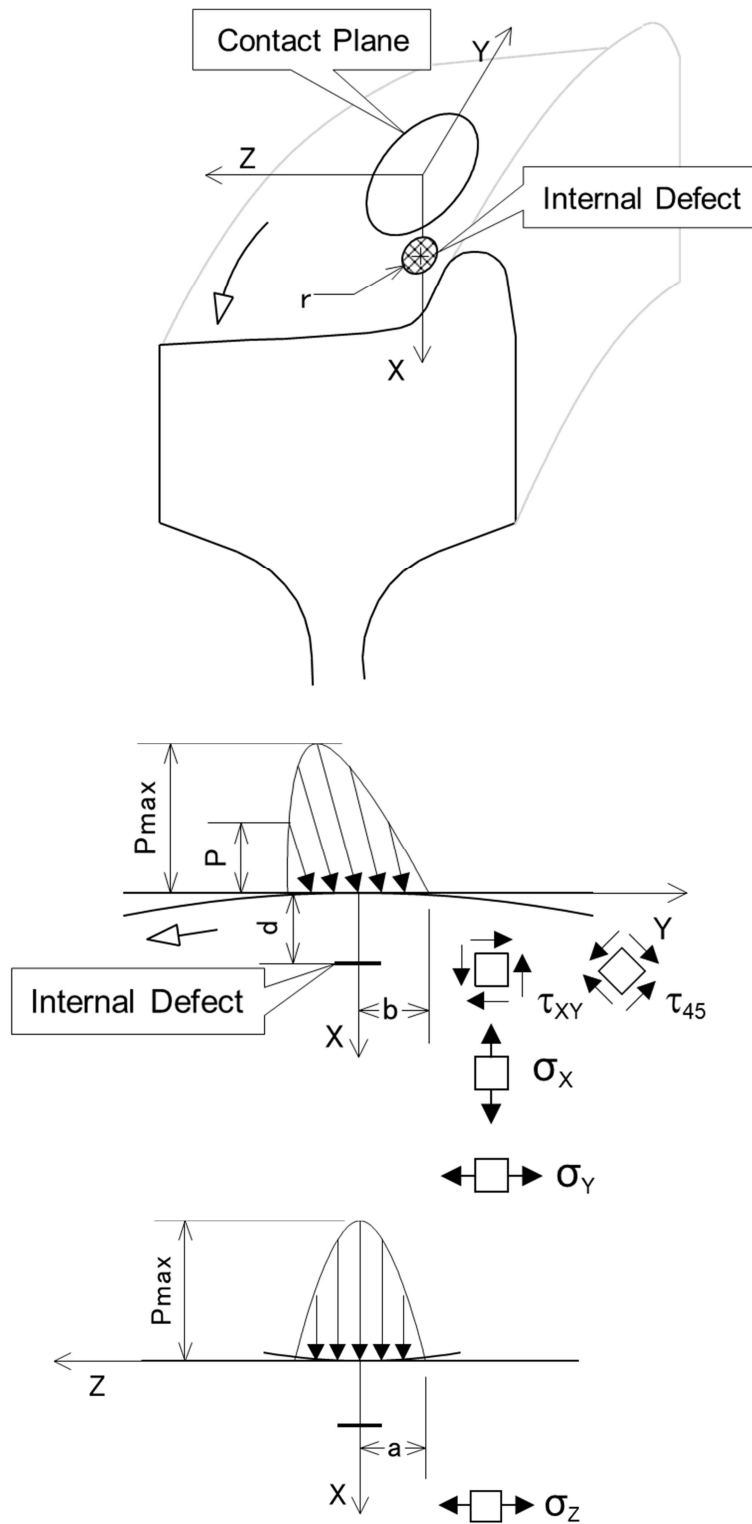


Fig. 47 車輪とレールの接触計算モデル

車輪とレールの負荷接触状態には、一般的なころがり接触問題に用いられるヘルツの理論を適用した。また、計算には北米で最も重い荷重条件で設計される38”車輪を選び、Table 3に示す計算条件下で行った。

Table 3 計算条件

Item	Condition
Wheel Diameter	965mm(38”)
Tread Profile	AAR 1B-Wide
Rail Profile	AAR 132RE
Wheel Load	175kN(39,375lbs)

Fig. 48 および Fig. 49 に車輪踏面断面形状およびレール断面形状を示す。計算を実体に近づけるため、車輪踏面断面形状の1:20勾配直線部分に1,000R相当の凹摩耗が発生した状態を想定し、荷重条件を約90%に減少させて実施した。踏面半径(R)とヘルツ圧割合の関係をFig. 50に示す。

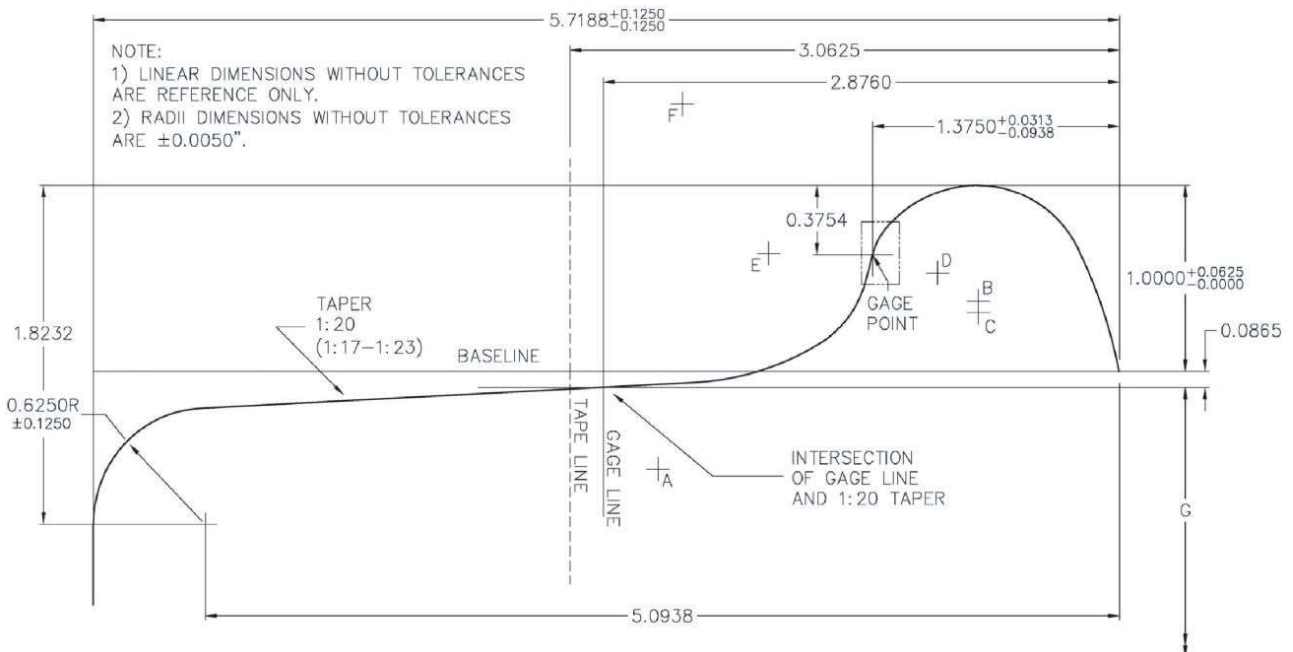


Fig. 48 車輪踏面断面形状 (inch スケール)<sup>4)</sup>

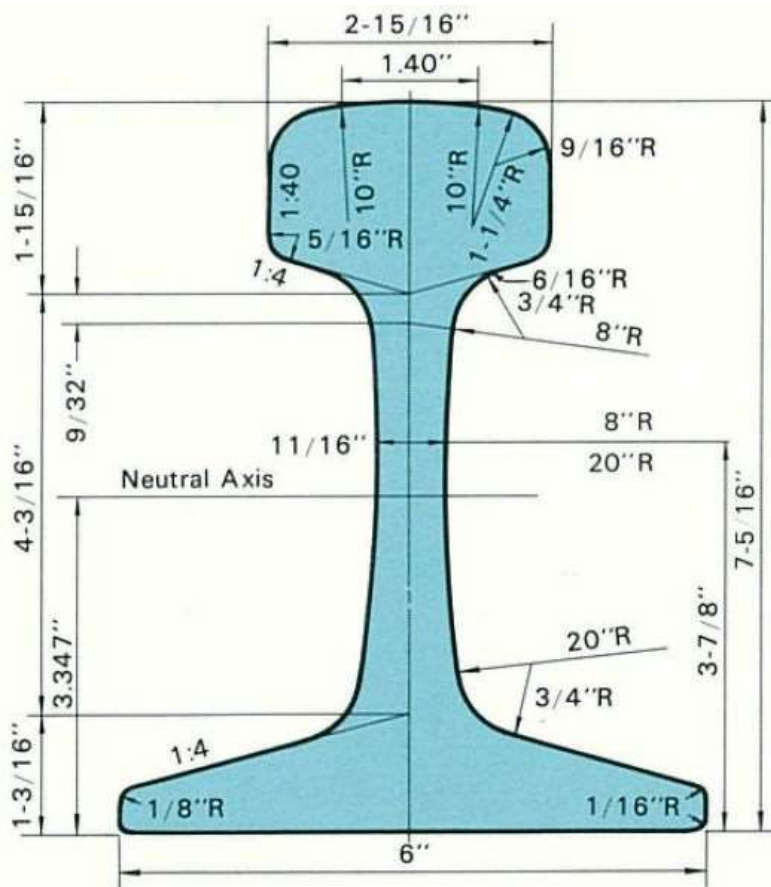


Fig. 49 レール形状 (inch スケール)

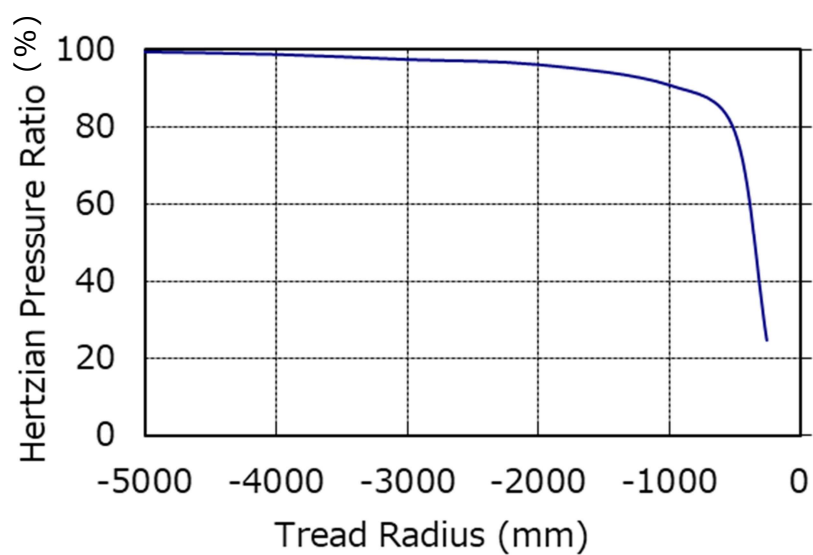


Fig. 50 踏面半径とヘルツ圧割合の関係

一方 Fig. 51 に、車輪とレールの接触面に負荷 ( $P_{max}$ ) がかった場合の、踏面から一定の深さ ( $X=0.5b$ ) における発生応力の  $P_{max}$  に対する比率と回転方向の位置 (接触楕円の長半径  $b$  に対する比率で表現) の関係、すなわち回転方向の内部発生応力挙動を示す。

(各応力成分の定義については、Fig. 48 参照)

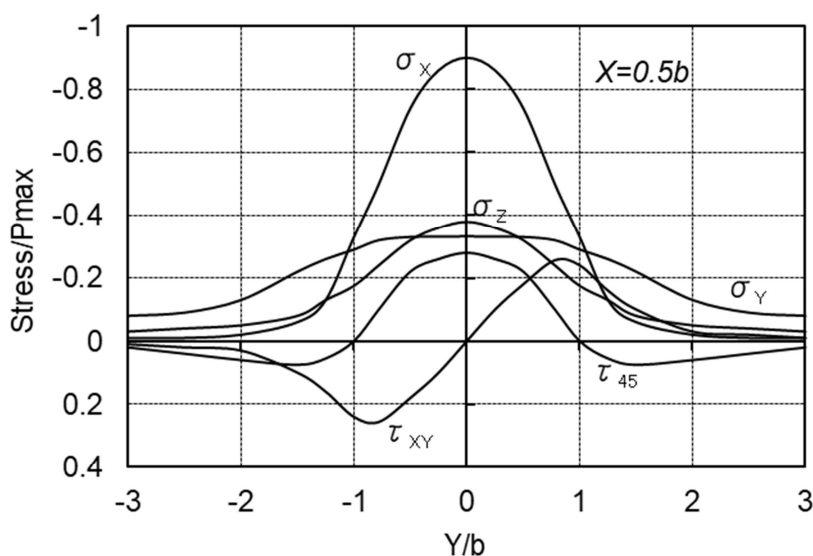


Fig. 51 回転方向の内部発生応力挙動

この図から、内部欠陥のき裂進展に最も影響を及ぼす応力は、 $+/-$ 方向に大きな振幅を持つせん断応力  $\tau_{xy}$  であることが分かる。よって、計算は  $\tau_{xy}$  に特化して行うこととした。

また、 $\tau_{xy}$  の振幅の大きさ ( $\Delta \tau_{xy}$ ) の踏面からの深さ方向分布を計算によって求めた。Fig. 52 にその結果を示す。

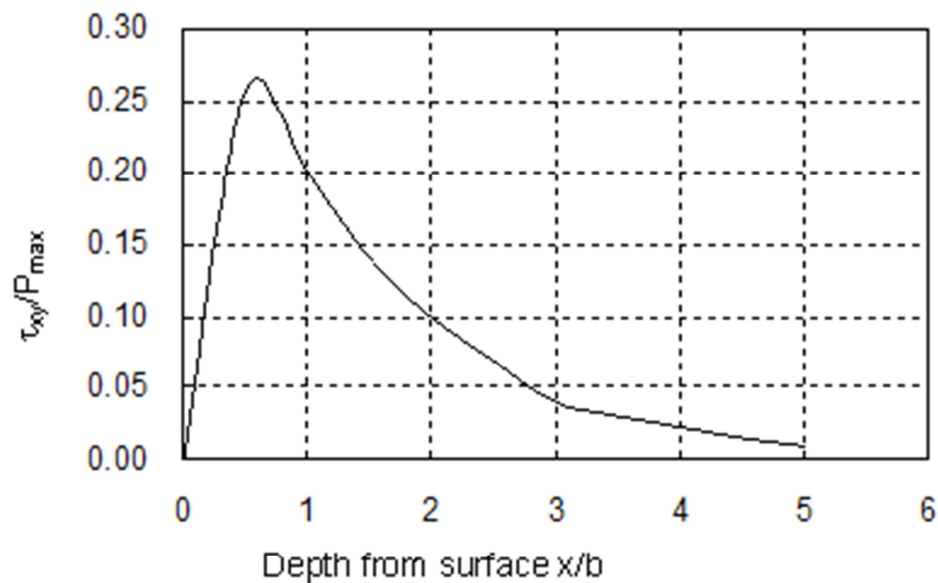


Fig. 52  $\Delta \tau_{XY}$  と踏面からの深さの関係

この踏面から深さ方向の  $\Delta \tau_{XY}$  分布より，各内部欠陥サイズ毎の  $\Delta K_{II}$  を計算により求めた．そして，先に実験で求めた  $\Delta K_{IIth}$  との比較により，き裂進展の有無，すなわちリム大型はく離を抑制するための内部欠陥の許容サイズを見極めた．対象としたのは前述のとおり，北米で最も重い荷重条件で設計される 38” 車輪であり，38” 車輪を含む貨車用車輪に通常用いられる AAR Class-C 材を前提とした．

$\Delta K_{II}$  の計算には，踏面と並行な円盤状内部欠陥を想定した，Eq. 2 の簡易計算式を用いた<sup>33)</sup>．

$$\Delta K_{II} = 2K_{II} = \frac{4 \Delta \tau_{XY} \sqrt{r} \sin\{\tan^{-1}(y/z)\}}{(2-\nu)\sqrt{\pi}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$\nu$  : Poisson Ratio (0.3)

5.4.2 計算結果

内部欠陥サイズが大きいほど  $\Delta K_{II}$  が大きくなる中で、3種類の欠陥サイズ（ $\Phi 3.2\text{mm}$ :旧 AAR 規格～1999年、 $\Phi 2.2\text{mm}$ :当時の AAR 規格、 $\Phi 1.6\text{mm}$ :現 AAR 規格 2005～）について  $\Delta K_{II}$  を算出し、 $\Delta K_{IIth}$  と比較することによって欠陥の許容サイズを見極めた。

Fig. 53 に各欠陥サイズにおける  $\Delta K_{II}$  と踏面からの深さの関係を示す。

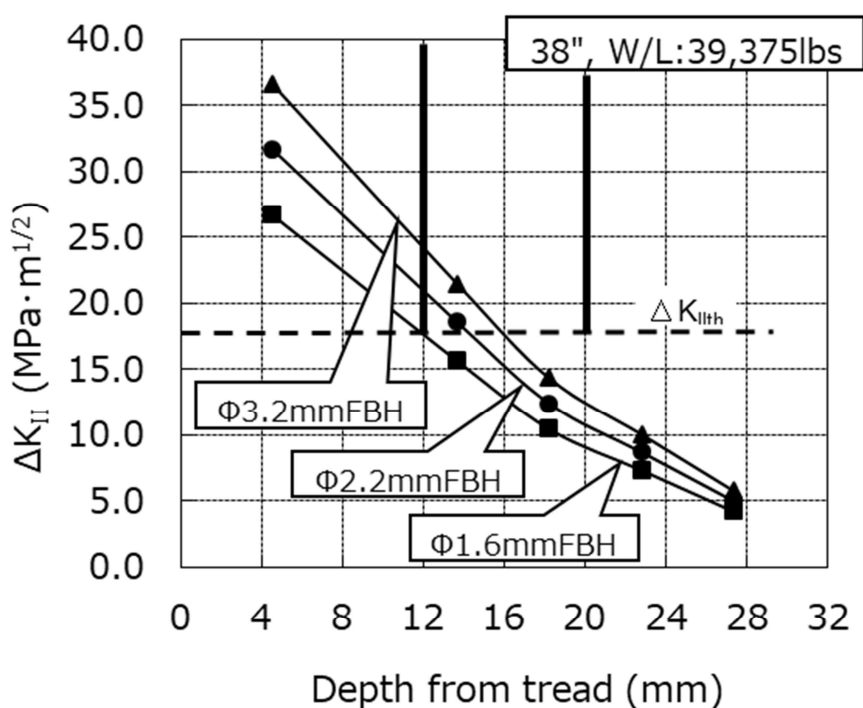


Fig. 53 欠陥サイズ毎の  $\Delta K_{II}$  と踏面からの深さの関係

$\Delta K_{IIth}$  には、5.3 節で実験と有限要素法解析により求めた  $18\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  (Class-C 材の値) を使い、Fig. 53 に示した。また、リム大型はく離は 5.1 節で述べたとおり、踏面から 12～20mm (1/2～3/4") の深さでき裂進展によりはく離が生じる。これも Fig. 53 に図示した。

この図の中で、各内部欠陥サイズの曲線と  $\Delta K_{I\text{Ith}}$  ( $18\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) の破線との交点がき裂進展ポイントを表すことになる。内部欠陥サイズが  $\Phi 3.2\text{mm}$  の場合、踏面からの深さが  $15\text{mm}$  以上でもき裂が進展しており、 $\Phi 2.2\text{mm}$  であれば約  $13\text{mm}$  深さまで改善されるが、リム大型はく離を引き起こす可能性を残している。一方、内部欠陥サイズが  $\Phi 1.6\text{mm}$  であれば、リム大型はく離を引き起こす踏面からの深さ  $12\text{mm}$  でちょうど  $\Delta K_{I\text{Ith}}$  ( $18\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) の破線と交わることから、内部欠陥サイズが  $\Phi 1.6\text{mm}$  未満であれば、き裂は進展しないことが明らかになった。

## 5.5 考察

5.3 節および 5.4 節の試験および計算結果より、内部欠陥サイズを  $\Phi 1.6\text{mm}$  平底穴相当以下にコントロールすれば、リム大型はく離を抑制できる可能性があることが分かった。このことは、様々な仮定のもとに導き出した結論であるが、実際に第3章にてレビューしたとおり、AAR スペックにおける超音波探傷規定、および、清浄度規定の厳格化改訂の結果、軸重が増加してきたにも拘わらず、リム大型はく離の発生率は激減しており、本研究が一定の寄与をしたものと自負している。

これを実現できた背景を、車輪製造プロセスの視点で以下のとおりまとめる。

### 5.5.1 内部欠陥コントロールプロセス

第2章で述べた車輪製造プロセスの中で、内部欠陥サイズをコントロールするプロセスは以下の3つである。

- (1)内部欠陥生成：製鋼プロセス
- (2)内部欠陥形状コントロール：鍛造圧延プロセス
- (3)内部欠陥サイズによるフィルタリング：超音波探傷プロセス

(1)の製鋼プロセスは内部欠陥を生成するプロセスであり、内部欠陥サイズをコントロールする上で最も重要となる。高炉－転炉プロセスと電気炉プロセス

のどちらにするか、精錬および脱ガスなどのプロセスをどうするか、造塊プロセスをインゴットにするか連続鋳造にするか といった選択によって、鋼の内部欠陥の傾向が大きく影響をうける。詳細については本論文の主旨とは異なるのでここでは言及を避けるが、内部欠陥を最小化するプロセスとしては、原料にスクラップを使用すると不純物などの混入可能性が高まるため高炉－転炉プロセスが有利、水素やケイ素酸化物およびアルミ酸化物などの鋼に有害な物質の残存や生成を抑制するため、精錬および脱ガスプロセスがある方が有利、個々の車輪間の品質ばらつきを抑制するため連続鋳造が有利 ということが認められている。

(2)の鍛造圧延プロセスは、型設計による内部欠陥の形状コントロールの余地がある。これは鍛造圧延による形態コントロールであるが、それ以外にも例えば、鋼片に残存する内部欠陥を中心部の軸孔のような最終製品になるまでに排除できる部分に留めるコントロールもできる。また、鍛造圧延プロセスそのものを鋳造プロセスと比較すると、鋳造時に発生する空隙・空孔状欠陥(Porosity, Void)を鍛造圧延プロセスによって圧着することもできるため、鍛造圧延プロセスが有利となる。

(3)の超音波探傷プロセスは、AAR で詳細に規定されている<sup>2)</sup>。EN でも同様に詳細な規定があり<sup>1)</sup>、車輪の品質保証をする上で、重要な検査プロセスと位置付けられていることがわかる。現 AAR の場合、自動超音波探傷装置を用いて全車輪のリム部を探傷し、 $\Phi 1.6\text{mm}$  の平底穴相当の欠陥を有しないことを確認しなければならない。

また、上記に加えて、内部欠陥のサイズをサンプリングで確認する清浄度測定が規定されている。本規定は 2004 年に新たに導入されたもので 2008 年に改訂され、Oxides+Voids が平均視野で $\leq 0.100\%$ 、最悪視野で $\leq 0.750\%$ となっており、本清浄度測定により車輪鋼の内部に残存する介在物(すなわち欠陥)が一定のレベル以下であることを確認しなければならない。

### 5.5.2 車輪製造の観点からの提案

現在、日本国内で生産される車輪は全て、高炉－転炉－連続鋳造プロセスによる製鋼、および回転鍛造を適用した高精度鍛造圧延プロセスが採用されており、超音波探傷も AAR で規定されている基準よりも厳しいもので施されている。



リム大型はく離を抑制するためには、上述のように内部欠陥の少ない、すなわち鋼の清浄度が高く製造プロセスで内部欠陥を小さく少なくコントロールされた車輪を提供することが肝要である。

## 5.6 結論

脱線を誘発する可能性があるとして広く知られているリム大型はく離の抑制を目的として、その起点となる内部欠陥の許容サイズを明らかにするため、き裂進展試験・有限要素法解析・簡易計算による破壊力学的アプローチを試みた。

その結果、以下の知見が得られた。

- 1) AAR Class-B または C の材料であれば、Mode-II 下限界応力拡大係数範囲 ( $\Delta K_{I\text{th}}$ ) は  $18\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  でほぼ一定である。
- 2) 車輪リム内部欠陥のき裂進展に最も影響を及ぼす応力は、車輪-レール間ヘルツころがり接触において踏面直下リム内部に発生する、+/-方向に大きな振幅を持つせん断応力  $\tau_{XY}$  である。
- 3) 38" 車輪に設計負荷がかかる環境下で  $\Phi 3.2\text{mm}$ ,  $\Phi 2.2\text{mm}$ ,  $\Phi 1.6\text{mm}$  の円盤状の内部欠陥を評価した場合、内部欠陥サイズが  $\Phi 2.2\text{mm}$  以上であればリム大型はく離を引き起こす可能性があるのに対し、 $\Phi 1.6\text{mm}$  であればリム大型はく離を引き起こす踏面からの深さでは、き裂は進展しない。
- 4) 車輪製造プロセスにおいて、製鋼プロセス(欠陥生成)、鍛造圧延プロセス(欠陥形状)、超音波探傷プロセス(欠陥サイズによるフィルタリング)が重要な内部欠陥コントロールプロセスとなる。

以上より、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をクリアした車輪を提供することが、リム大型はく離を防ぐ上で重要であると結論づけられる。

第6章：車輪耐リム損傷性能に関する研究（その2；リム縦割れ）<sup>34)</sup>

## 6.1 本研究の目的

リム大型はく離に類似した案件で、リム縦割れ (Vertical Split Rim) がある。

第3章で述べたとおり、AAR スペックにおける超音波探傷、および、清浄度規定の厳格化改訂 (1999～2008年)<sup>18)</sup>により、軸重が増加したにも拘わらずリム大型はく離・リム縦割れの発生率は減少した。しかしながら、未だに発生完全防止にまでは至っておらず、最近ではリム縦割れ (VSR) がむしろ注目されてきており、本損傷の抑制を主体として脱線事故につながるリム損傷を完全に無くすことが、残された大きな課題となっている。

リム縦割れ損傷は、第5章で述べたリム大型はく離発生プロセスとは異なり、リム内部の比較的踏面下の浅い部分にある微小欠陥を起点としたき裂発生から疲労破壊に至るプロセスを踏む場合が多い<sup>35～44)</sup>。したがって、内部微小欠陥から転動疲労によるき裂発生事象をより高精度に分析すること、および、ある時点で内部き裂進展が向きを内周方向に変え、脆性破壊となるプロセスを分析することが、この問題を解決するために必要と考えられる。

本章では、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が、リム縦割れ損傷の起点になり得るのみならず、踏面疲労はく離の原因でもあることから、脱線事故の可能性のあるリム部損傷を優先して減少させる必要があること、および、重荷重貨車用車輪の踏面損傷による交換頻度を低減する観点より<sup>45)</sup>、内部き裂の発生に及ぼす内部欠陥サイズの影響を明らかにするとともに、内部き裂が発生する限界の欠陥サイズを明らかにすることを目的とした。

これまで過去の研究者が行った内部欠陥の転動によるき裂進展に関する研究では、Sandatrom らが、内部欠陥サイズのランダム性を考慮して、統計学的手法により車輪リムにおける内部き裂の発生確率を評価した<sup>43)44)</sup>。また、Liu らは、破壊力学に基づく混合 Mode のき裂進展評価手法を用いて、繰返し転がり接触下の重荷重貨車用車輪における内部き裂の進展挙動について報告した<sup>40)41)</sup>。さらに Zeng らは、車輪鋼の超音波疲労試験を行い、転動疲労き裂の発生要因となる内部欠陥サイズを極値統計することにより、実車輪における最大欠陥サイズを得た<sup>42)</sup>。一方で、内部き裂の発生と欠陥サイズの関係、または実使用条件下

において内部き裂が発生する限界の欠陥サイズについては、これまで十分に研究されていない。

そこで本研究では、第5章で行った繰り返しころがり接触による内部欠陥のき裂進展の評価とは異なり、車輪鋼の疲労限に及ぼす内部欠陥サイズの影響を評価するため、人工欠陥を有する車輪鋼を対象にねじり疲労試験と軸力疲労試験を行った。また、有限要素法(FEM)解析により実車輪内部の応力場を評価した。最終的には、疲労試験とFEM解析の結果より、内部き裂が発生する限界の欠陥サイズを、多軸疲労強度評価手法を用いて予測した。

## 6.2 疲労限と欠陥サイズの関係

### 6.2.1 試験方法

本論文における各損傷分析のための疲労試験には、全て AAR Class-C 車輪鋼を用いた。これは、Fig. 54 に示すような微細パーライト組織を有する 0.7%C の炭素鋼であり、平均粒径は 20~30  $\mu\text{m}$ 、ビッカース硬さは HV330 である。

Fig. 55 にねじり疲労試験と軸力疲労試験の試験片形状を示す。疲労試験には平行部直径 6mm の丸棒試験片を用いた。試験片は実車輪の踏面近傍から、試験片の長手方向が車輪の周方向となるように採取した。一部の試験片の平行部には、疲労限に及ぼす欠陥サイズの影響を評価するため、微小な人工欠陥を導入した。人工欠陥は微小穴として、放電加工により施工した。

また、Fig. 56 にその微小穴のサイズを示す。直径 0.2 mm と 0.5 mm の 2 種類とした。

Fig. 57 に微小穴を含む領域の、ミクロ組織写真の一例を示す。穴周りで特に組織の変化は認められないことから、放電加工による熱影響は特になく、欠陥を模擬した加工ができていると考えられる。

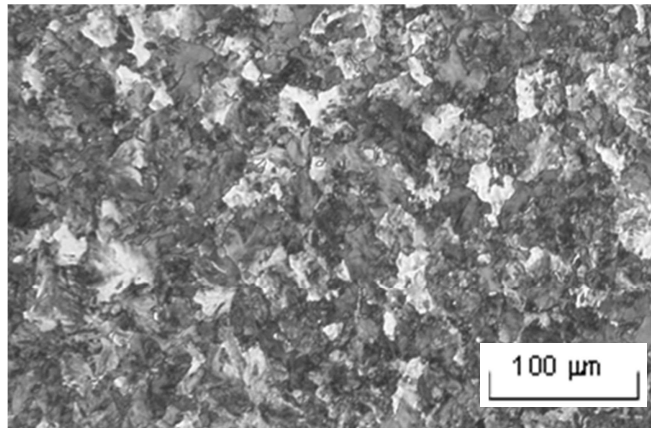


Fig. 54 供試材のマイクロ組織

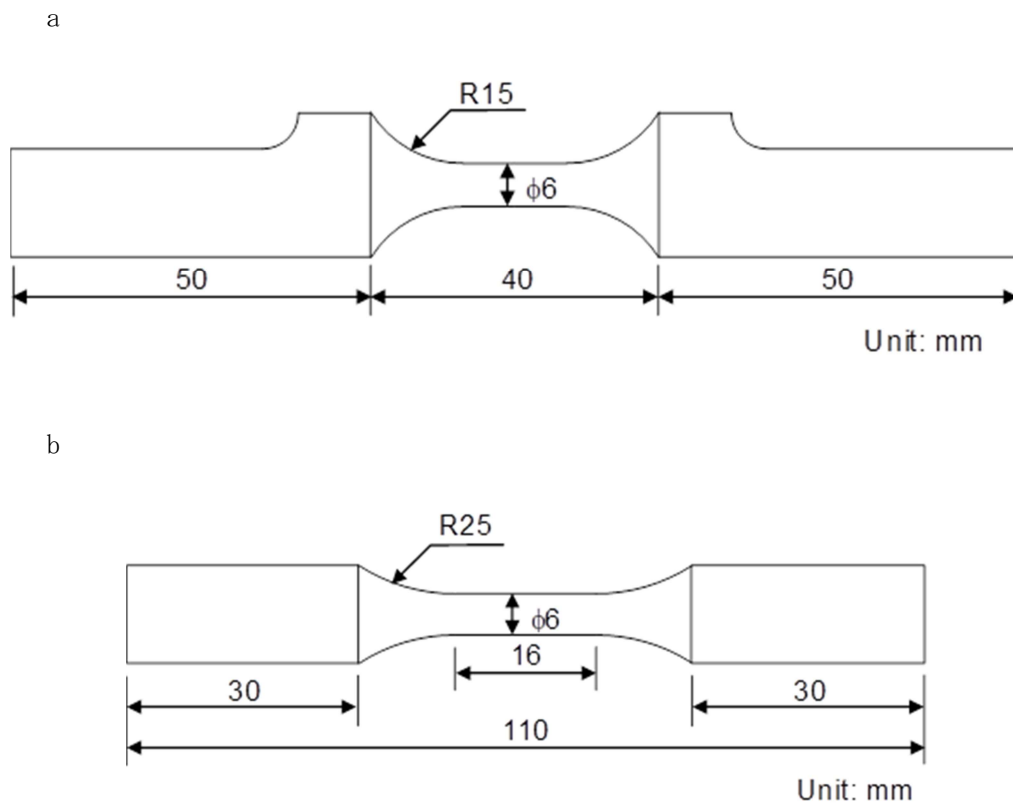


Fig. 55 疲労試験片形状：(a)ねじり疲労試験，(b)軸力疲労試験

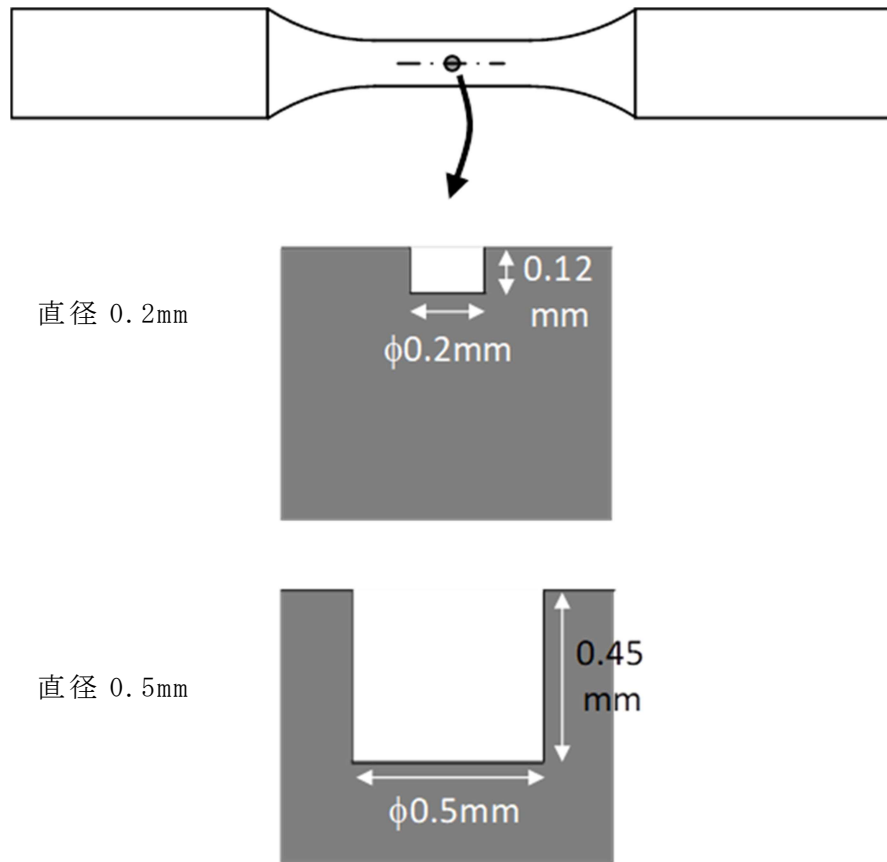


Fig. 56 疲労試験片内の人工欠陥

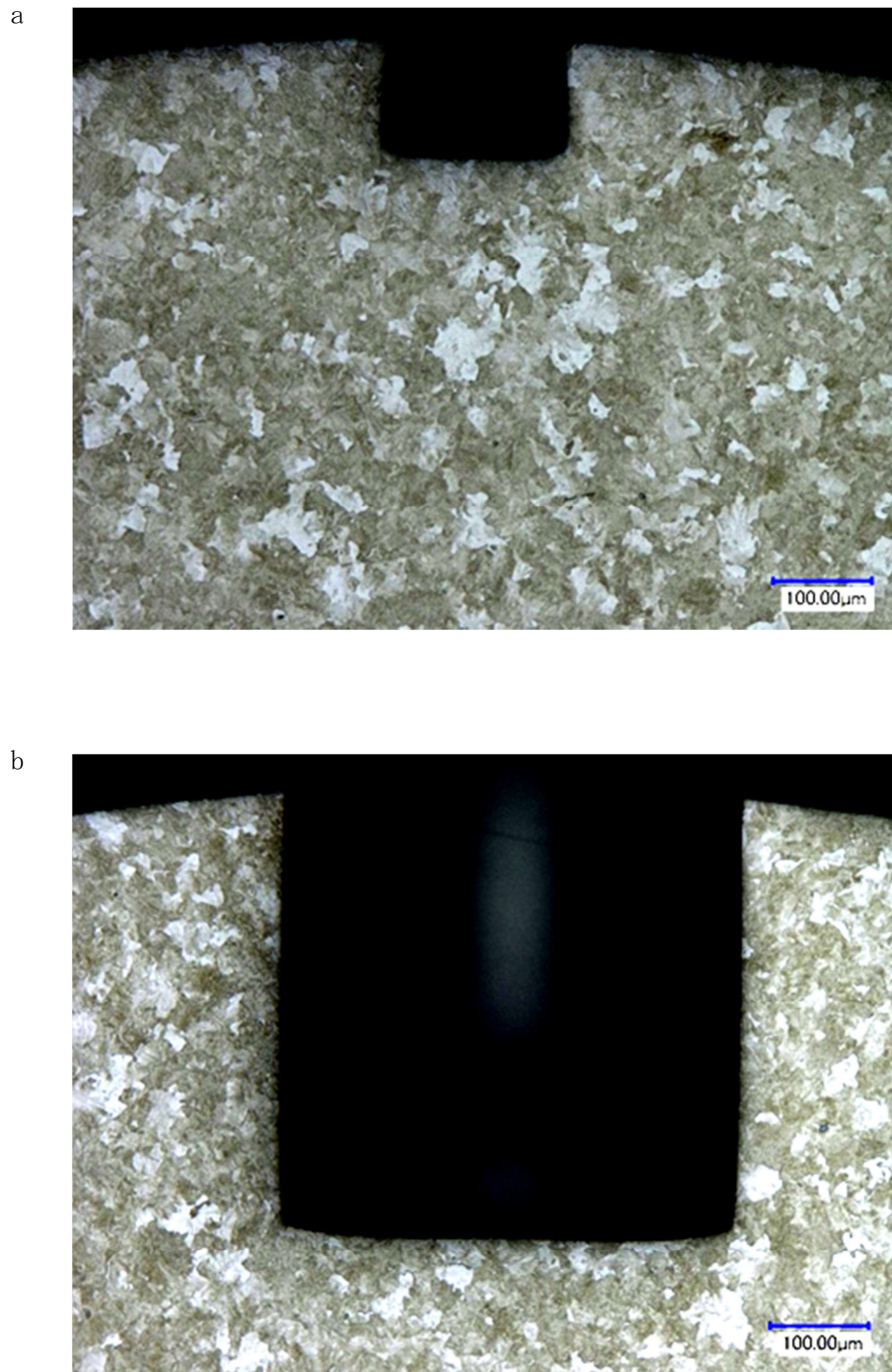


Fig. 57 人工欠陥周辺のマクロ組織：(a)  $\Phi 0.2\text{mm}$  人工穴，(b)  $\Phi 0.5\text{mm}$  人工穴

Table 4に試験条件を示す。応力比 R は-1 の完全両振りとし、試験周波数はねじり疲労試験で 33 Hz (2000 rpm)、軸力疲労試験で 10Hz とした。試験は室温大気中で行い、打切り回数を  $10^7$  cycle と設定した。

Table 4 試験条件

Item	Torsion	Axial Load
Stress Ratio	-1	-1
Frequency (Hz)	33	10
Number of cycles to terminate the test	$10^7$ cycles	$10^7$ cycles

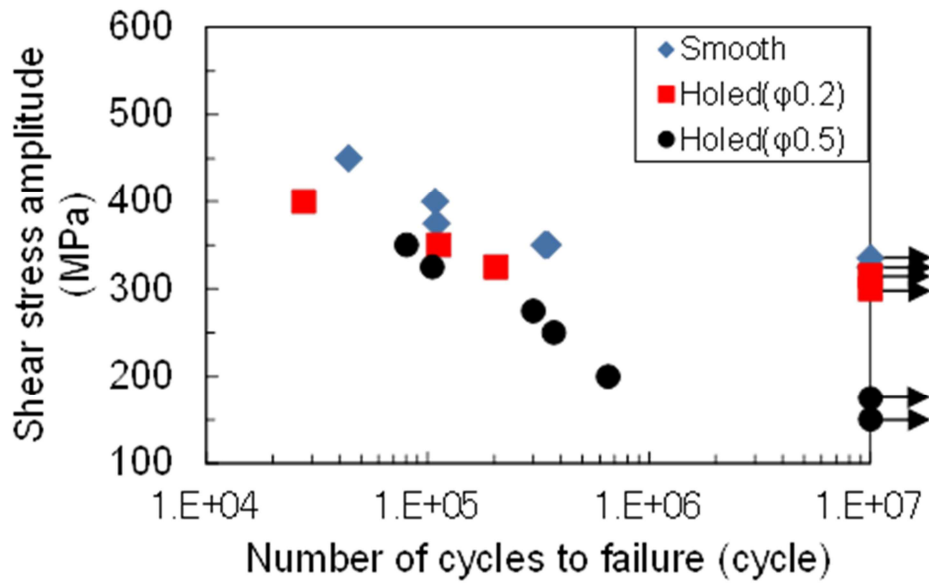
### 6.2.2 試験結果

Fig. 58 に、ねじり疲労試験と軸力疲労試験で得られた S-N 線図を示す。ここで、疲労限は破断した試験片の最小応力と、この最小応力よりも低い応力で未破断の試験片の中での最大応力の平均値と定義した。

平滑材に比べ、人工欠陥材では疲労限は低く、寿命も短くなっている。また疲労限、寿命とも人工欠陥のサイズが大きいほど、低下している。ただし、軸力疲労試験に比べねじり疲労試験の方が、人工欠陥による疲労限の低下は少ない。このことは、過去の研究結果と同様の傾向である<sup>46)</sup>。



a



b

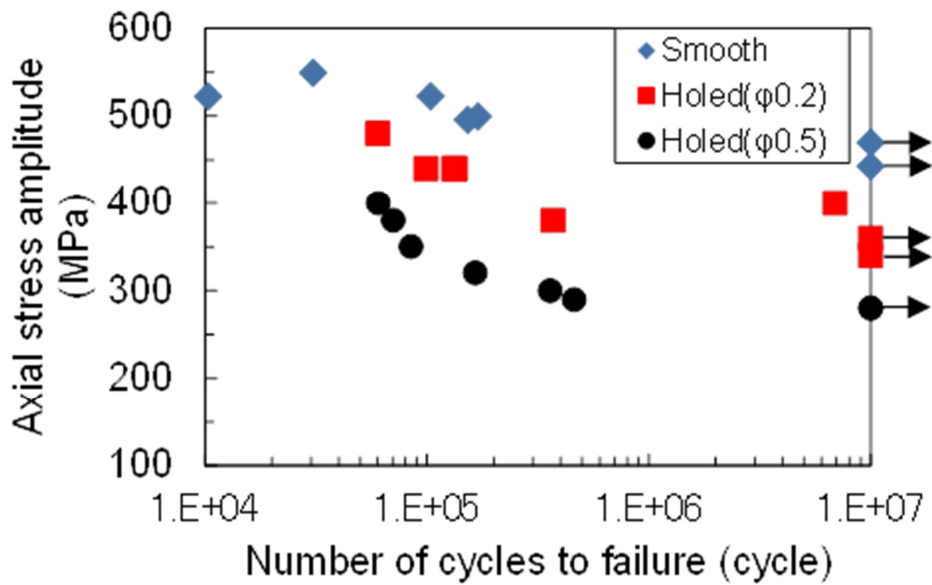
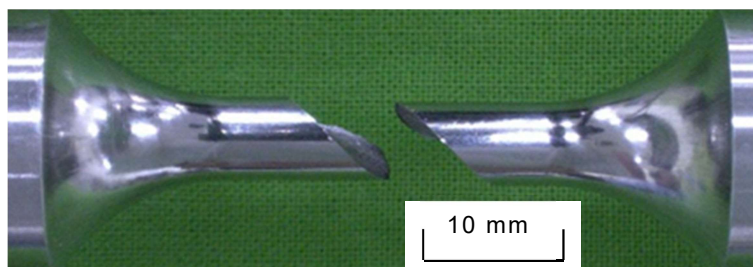


Fig. 58 疲労試験結果(S-N線図)：(a)ねじり疲労試験，(b)軸力疲労試験



試験により破断した試験片の外観写真の例を Fig. 59 に示す．ここでは人工欠陥のサイズが直径 0.2 mm の場合を示している．ねじり疲労試験片は，せん断負荷方向に対して 45° 傾いた面で破断しており，軸力疲労試験片は，荷重方向に垂直な面で破断している．これらはいずれも，最大主応力方向に垂直な面であり，このことはいずれの疲労試験でもき裂は Mode-I で進展していることを示している．このような破壊形態は他の試験片，すなわち人工欠陥サイズ径 0.5 mm と平滑材でも同様であった．

a



b

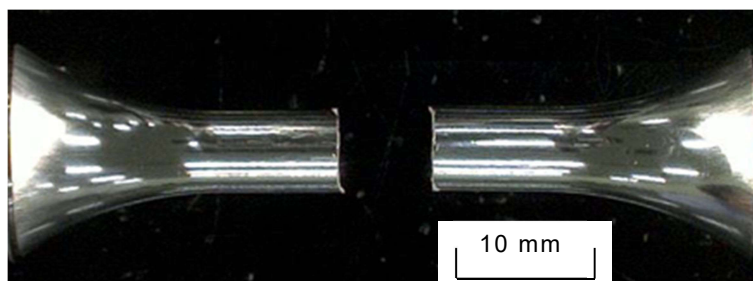


Fig. 59 試験での破断例：(a)ねじり疲労試験，(b)軸力疲労試験

試験における疲労破壊の起点を確認するため，SEM による破面観察を行った．ねじり疲労試験の起点部における SEM 写真の一例を Fig. 60 に，軸力疲労試験の起点部におけるそれを Fig. 61 に，それぞれ示す．

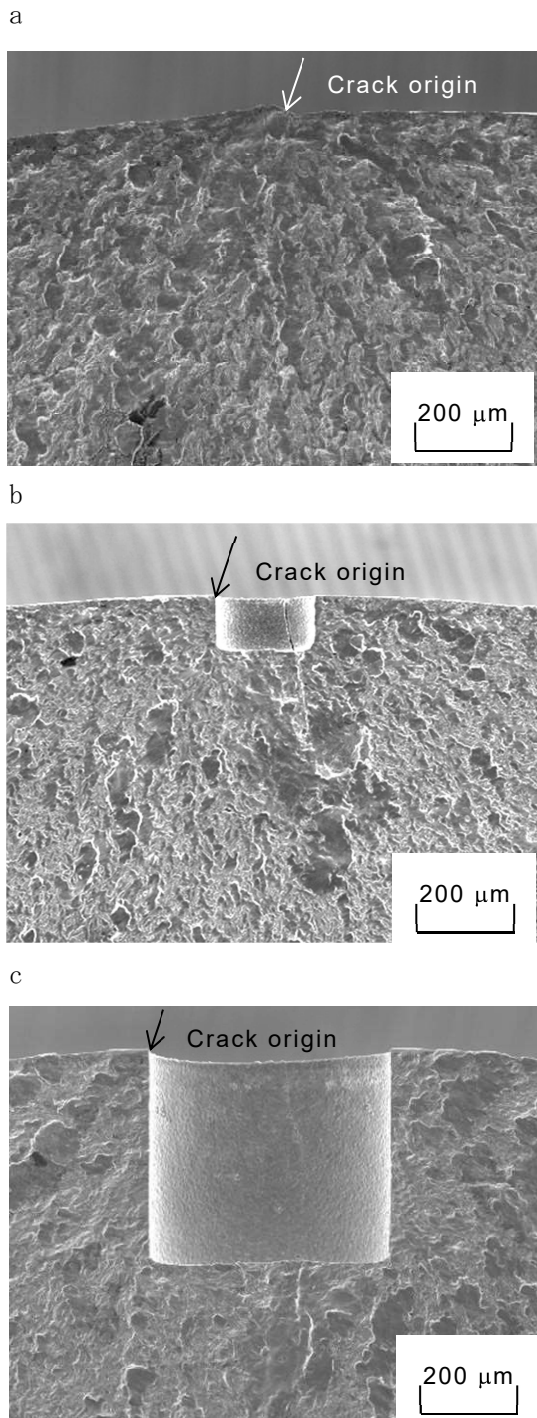


Fig. 60 ねじり疲労試験後の破面観察

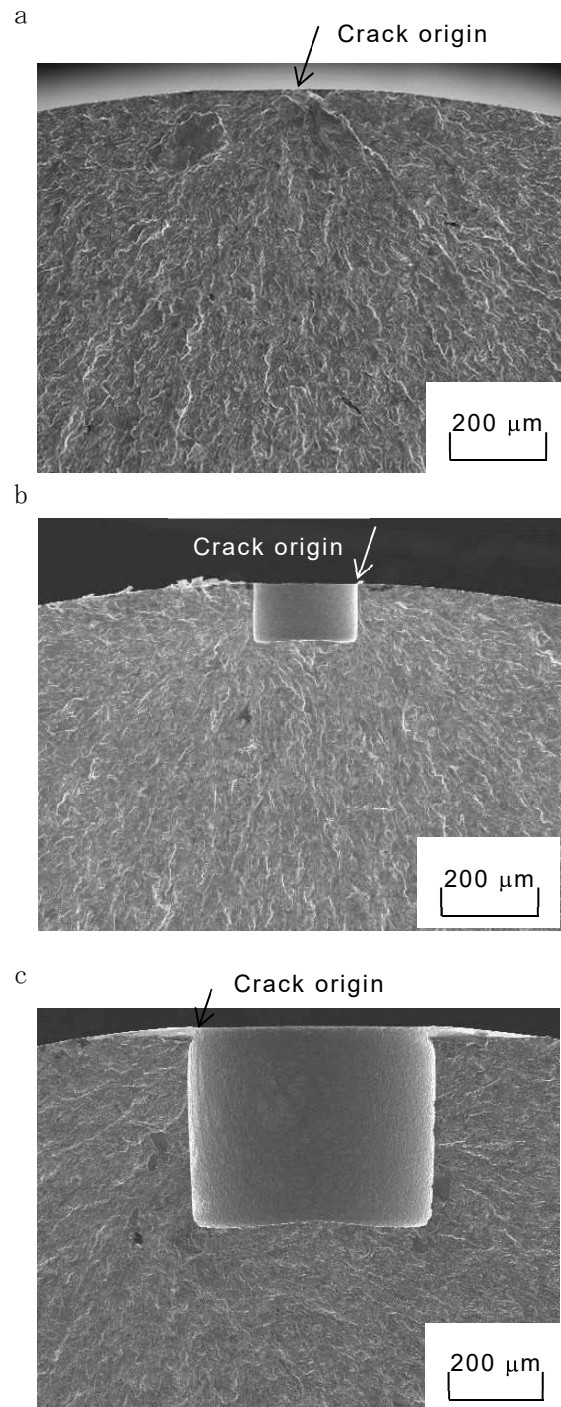


Fig. 61 軸力疲労試験後の破面観察

(a)平滑材, (b)  $\Phi 0.2\text{mm}$  人工穴, (c)  $\Phi 0.5\text{mm}$  人工穴

人工欠陥材では、いずれにおいても疲労破壊の起点は、試験片表面の微小穴コーナーである。一方、平滑材の起点はいずれも試験片表面であり、介在物等の欠陥ではなかった。すなわち、本試験で得られた疲労限と微小穴サイズの関係性を評価することで、疲労限に及ぼす欠陥サイズの影響を検討することが可能となる。

### 6.2.3 疲労限に及ぼす欠陥サイズの影響

疲労限と欠陥サイズの関係性を定量的に評価するため、El-Haddad<sup>47)</sup>と $\sqrt{\text{area}}$ <sup>48)</sup>の疲労強度予測式を用いて、疲労試験結果を評価した。El-Haddadおよび $\sqrt{\text{area}}$ の疲労強度予測式は次のように表される。

$$\sqrt{\text{area}} \text{ model (torsion): } \tau_w = 1.14 (HV+120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\sqrt{\text{area}} \text{ model (axial load): } \sigma_w = 1.43 (HV+120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\text{El-Haddad model (torsion): } \tau_w = \tau_{w0} (l_0 / (1+l_0))^2, \quad l_0 = (\Delta K_{Ith} / \tau_{w0} / 2)^2 / \pi \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\text{El-Haddad model (axial load): } \sigma_w = \sigma_{w0} (l_0 / (1+l_0))^2, \quad l_0 = (\Delta K_{Ith} / \sigma_{w0} / 2)^2 / \pi \quad (\text{Eq. 6})$$

ここで、 $\tau_w$ ：微小欠陥材のせん断疲労限、 $\sigma_w$ ：微小欠陥材の軸力疲労限、 $\text{area}$ ：微小欠陥の破断面上の面積、 $\tau_{w0}$ ：平滑材のせん断疲労限、 $\sigma_{w0}$ ：平滑材の軸力疲労限、 $l$ ：欠陥長さ、 $\Delta K_{Ith}$ ：Mode-I き裂進展下限界値である。 $\Delta K_{Ith}$ には応力比-1に換算した下限界値  $15.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を用いた。Mode-I の下限界値を用いたのは、破断面が主応力に垂直であり、Mode-I でき裂が進展しているためである。

ねじり疲労試験、軸力疲労試験で得られた疲労限と欠陥サイズの関係性を Fig. 62 に示す。せん断疲労限、軸力疲労限ともに欠陥サイズの増加とともに低下する傾向がみられ、疲労限は El-Haddad および  $\sqrt{\text{area}}$  の疲労強度予測式と比較的良好に対応している。特に、El-Haddad の式を用いた方が、より試験結果と良好に対応している。

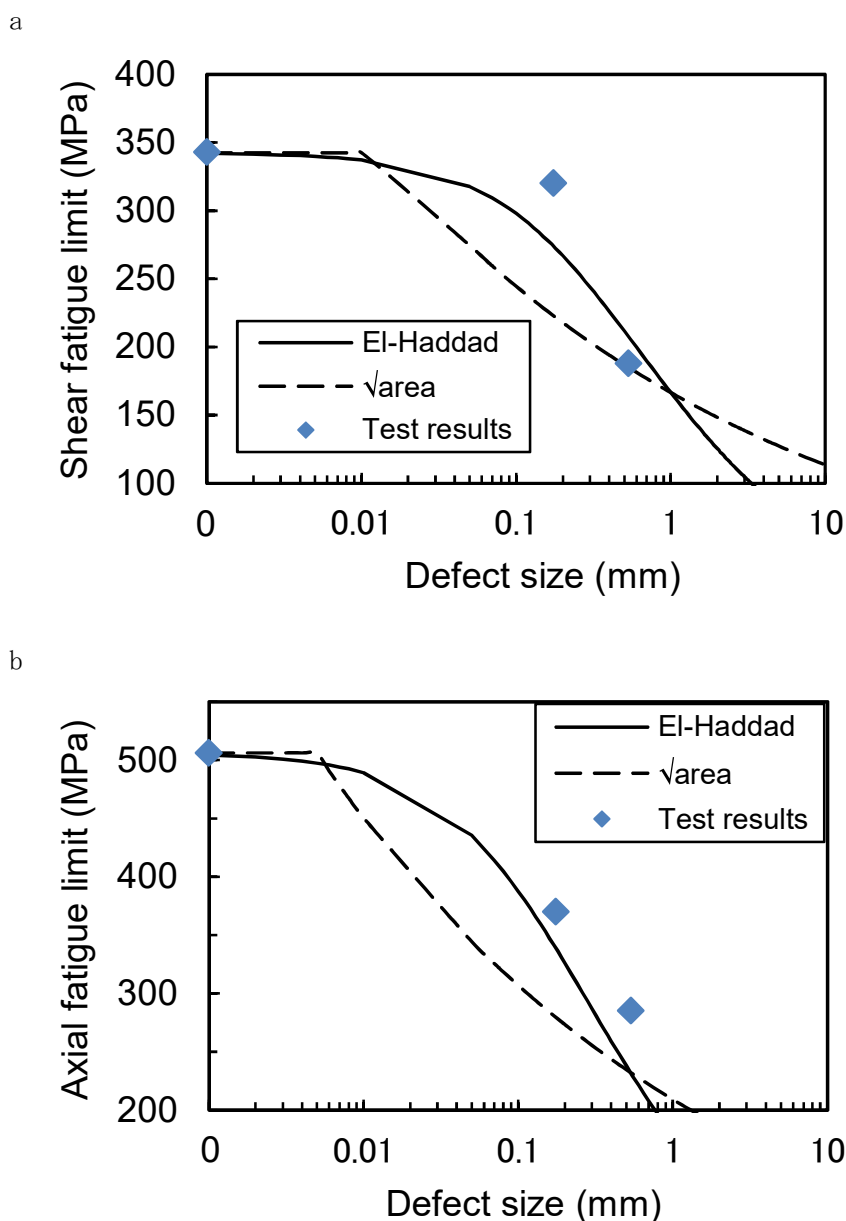


Fig. 62 異なる欠陥サイズの疲労限：(a)ねじり疲労試験，(b)軸力疲労試験

上述より，限界欠陥サイズの予測には，El-Haddad の式を用いることとした．またせん断疲労限は，欠陥サイズが 0.2mm を超えると急激に低下している．このことは，過去の結果と同様の傾向である．このため，実車輪における比較的大きい欠陥サイズの出現が，内部き裂を引き起こす要因と言える．

### 6.3 車輪リム内部の応力状態

#### 6.3.1 FEM 解析モデル

車輪リム内部の応力分布は、主に熱処理による残留応力とレールとの転がり接触による応力によって決まる。このため本解析では、熱処理を模擬した熱応力解析と、レールとの転がり接触を模擬した接触解析をそれぞれ行った。ここで用いる解析モデルは、過去に著者らによって開発されたモデルと同様のものである<sup>49)</sup>。

Fig. 63 に車輪とレールの接触解析モデルを示す。

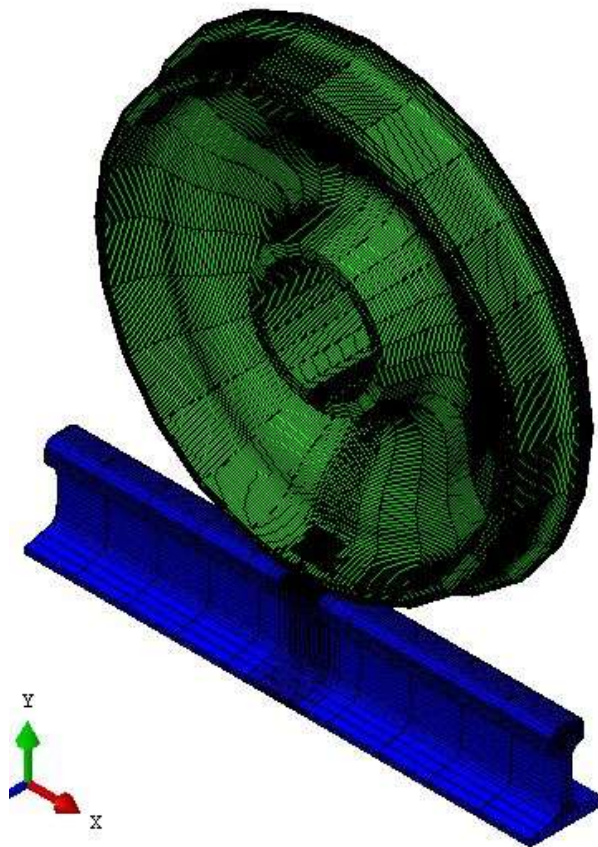


Fig. 63 車輪－レール接触解析モデル



解析では車輪1枚をモデル化し、接触解析ではレール1m分をモデル化した。車輪モデルには直径38”の車輪（AAR規格のB38）を用い、新製踏面形状で節点数281,934、要素数264,024であり、摩耗踏面形状で節点数206,308、要素数190,426である。レールモデルは、節点数72,222、要素数64,864である。車輪モデルの接触領域における要素サイズは1mm以下であり、これは接触楕円の1/10以下である。また車輪の材質は疲労試験に供試したClass-Cとした。車輪は弾塑性体、レールは弾性体とした。

### 6.3.2 FEM解析条件

解析は3つのステップで構成した。車輪内部の応力分布を決定づける要素である熱処理、踏面の機械加工、レールとの転がり接触である。

最初のステップとして、熱処理を模擬した伝熱・熱応力解析を行った。焼入れの解析では相変態の影響は考慮せず、実車輪の残留応力（開口度）と解析結果が合うように、熱伝達係数を設定して車輪の温度分布を伝熱解析で求めた。その後、得られた温度分布を入力条件として熱応力解析を行い、熱処理による残留応力分布を求めた。熱処理解析の条件は、過去の研究で用いたものと同じである<sup>49)</sup>。

つぎに、熱処理ステップ後の踏面加工のステップにおいても、解析方法は過去の研究と同じ手法とした。すなわち、加工量に応じた厚みの踏面とリム側面の要素を削除した。要素削減領域は、機械加工における標準的な加工代として、踏面6mm、リム側面3mm分の要素を削減した。Fig. 64に機械加工を模擬した要素削除の領域を示す。

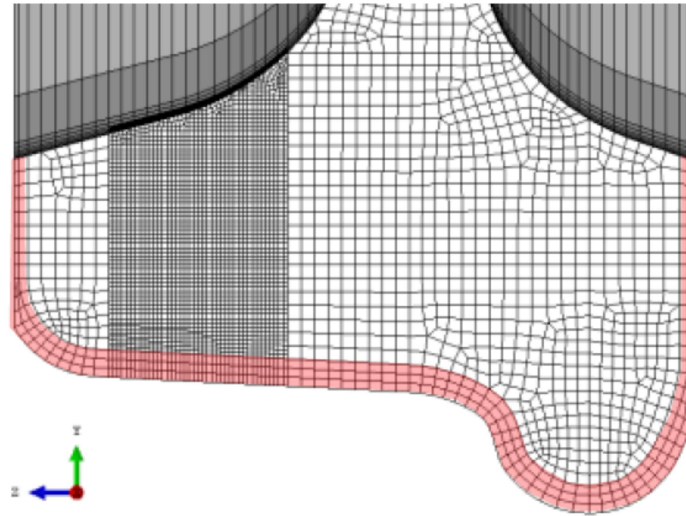


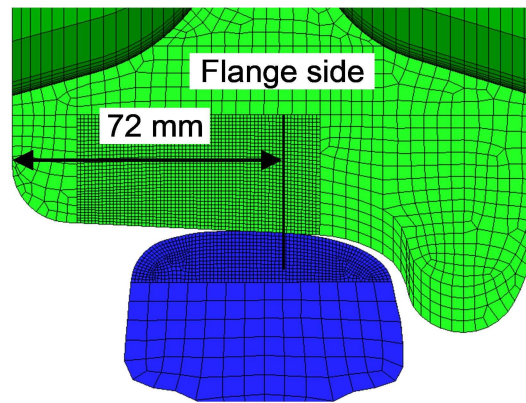
Fig. 64 機械加工を模擬した要素削除の領域

3 つ目のステップとして、上述で得られた残留応力分布を車輪モデルに読み込んだ後、レールとの接触解析を行った。レールとの接触位置は、踏面中央、フランジ側、反フランジ側の 3 種類とした。これらは、直線走行、左曲がり曲線走行および右曲がり曲線走行に相当する。このとき接触領域の中央が、上記の接触位置になるようレールモデルに対する車輪モデルの位置を調整した。

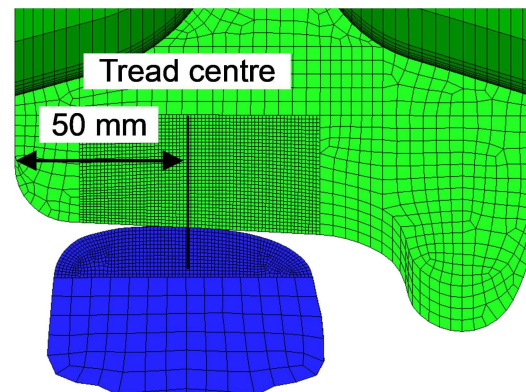
各接触状態のモデルを Fig. 65 に示す。また、Fig. 66 および Table 5 に解析条件を示す。

車輪新製形状でのリム厚は、実体に合わせて 38.1 mm とし、凹摩形状<sup>36)</sup>でのリム厚は 25.4 mm とした。レールモデルの形状は 1 種類のみとし、直線に近い軌道での摩耗を再現するため、実測データを基に決めた。

a



b



c

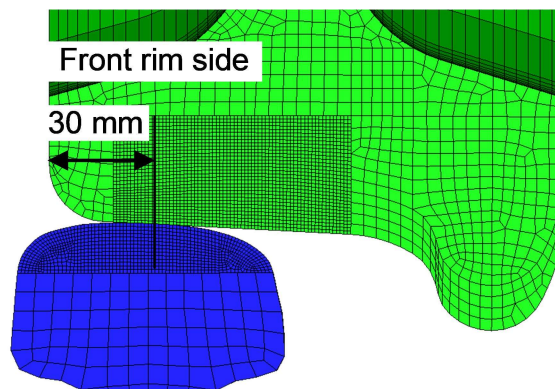


Fig. 65 解析に用いた車輪－レール接触位置：

(a) Flange side contact, (b) Center contact, (c) Front side contact



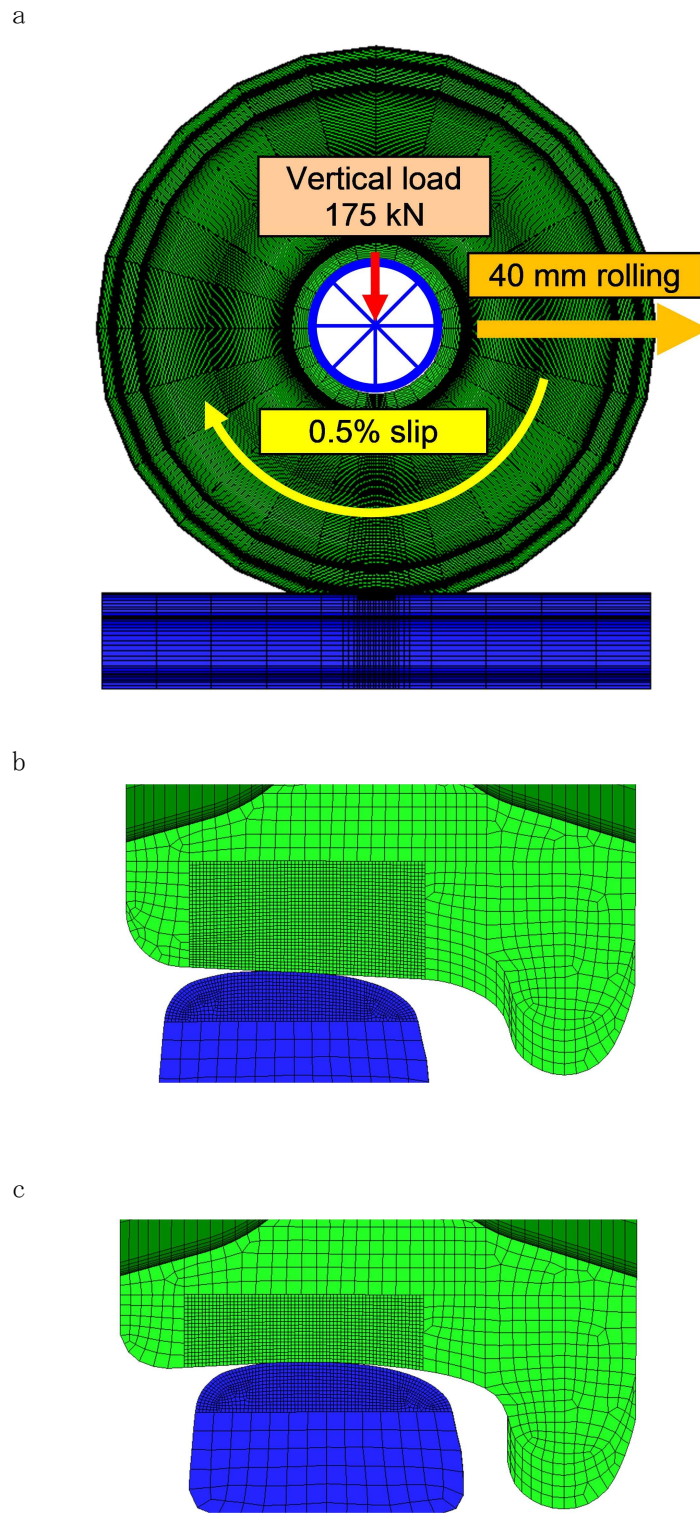


Fig. 66 車輪－レール接触解析条件および新製・摩耗形状：  
(a) Loading and slip condition, (b) New tread profile, (c) Worn tread profile

Table 5 解析条件

Item	Condition
Wheel Diameter	965mm(38" )
Tread Profile	AAR 1B-Wide New + Worn Profile
Rail Profile	AAR 132RE Worn Profile
Wheel Load	175kN(39,375lbs)

車輪に与える垂直荷重は 175 kN とした。これは、最大軸重の 1/2（輪重）に相当する。すべり率は 0.5%とし、車輪とレール間の摩擦係数は 0.3 とした。接触解析では、車輪をレールに押付けた状態で車輪を回転させながら 40 mm 移動させる。その後、除荷して車輪を初期の位置に戻し、再び車輪をレールに押付ける。解析では、これらを 3 サイクル繰返した。繰返し数を 3 サイクルとしたのは、2 サイクル目と 3 サイクル目の残留応力がほぼ同等であり、応力状態が 3 サイクルでほぼ安定したと判断したためである。解析に用いた車輪の応力-ひずみ関係は、繰返し応力-ひずみ関係を用いた。なおヤング率は 206 GPa、ポアソン比は 0.3 とした。以上の解析は汎用ソフト ABAQUS Ver. 6.12 を用いて行った。

## 6.3.3 FEM解析結果

Fig. 67 に、転動3サイクル中（20 mm 移動後）におけるリム部のせん断応力  $\tau_{r\theta}$ （ $r$ ：半径方向， $\theta$ ：周方向）分布の一例を示す．ここでは新製形状の踏面中央接触の場合を示す．転動疲労き裂の発生に最も影響が大きい  $\tau_{r\theta}$  は、踏面下内部で高くなっている．これは実車輪で内部にき裂が発生することと対応している．

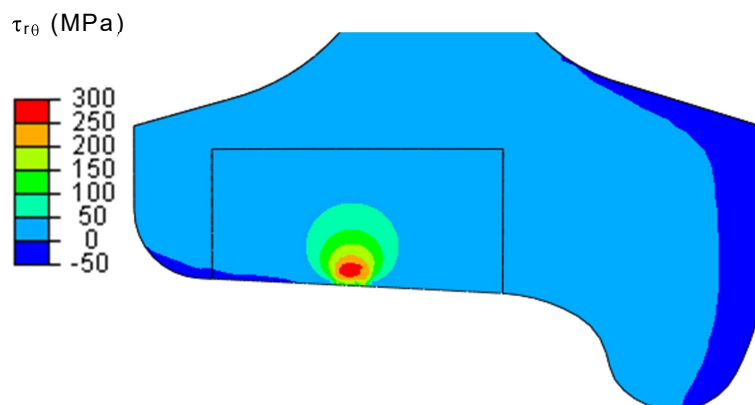
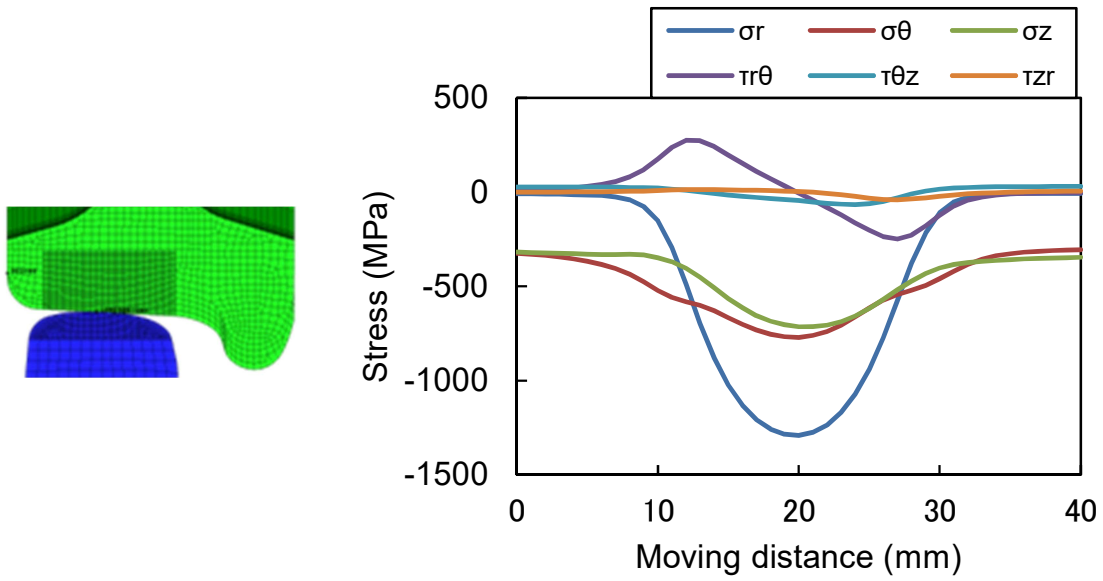
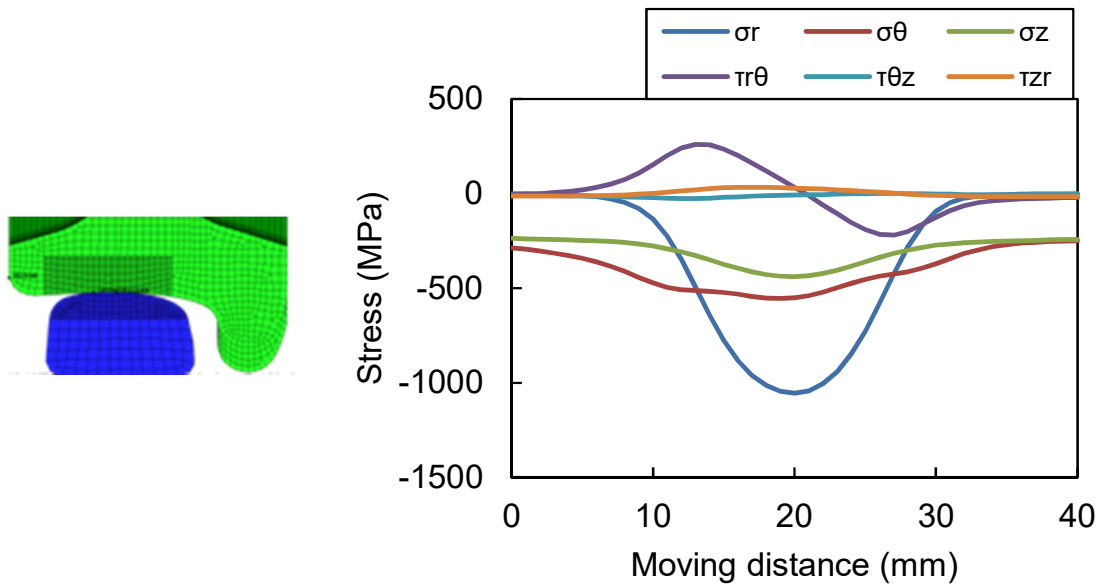


Fig. 67 車輪リム断面のせん断応力分布（新製踏面，踏面中央接触）

Fig. 68 に、 $\tau_{r\theta}$  が最も大きくなる位置での各応力成分の車輪回転に伴う変化を示す (Fig. 67 参照)． $\tau_{r\theta}$  は転がり接触に伴い、ほぼ完全両振りに変動している．この応力変動の繰返しにより、疲労き裂が発生し得る．また各方向の垂直応力も変動しているが、すべて圧縮領域で変化している．これらの圧縮応力も疲労き裂の発生には影響すると考えられる．このため、転動疲労き裂の発生限界を評価するには、多軸応力状態を考慮した評価手法を適用する必要がある．

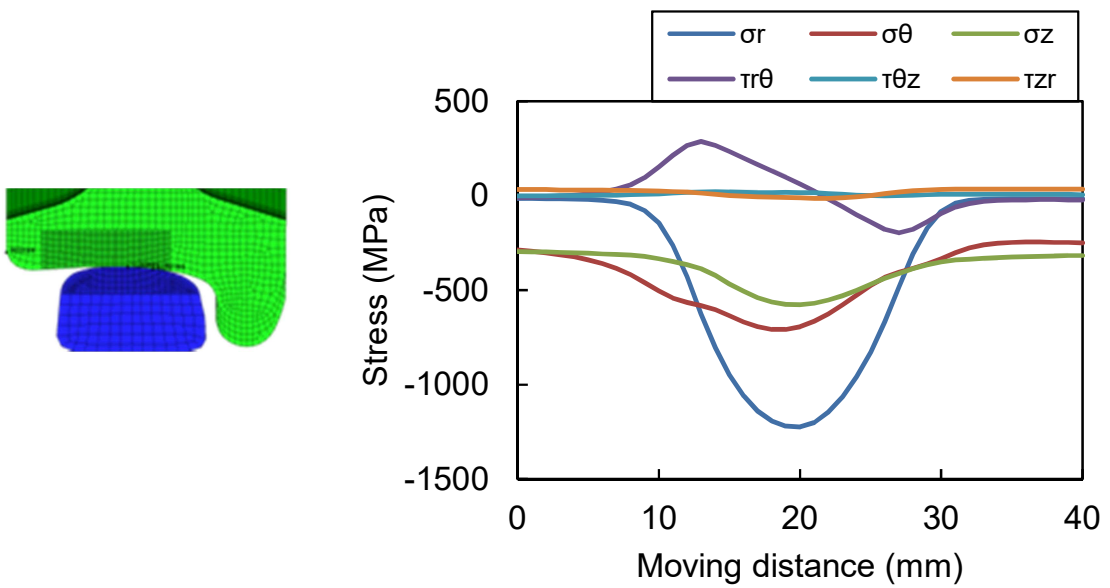


(a) 新製+踏面中央

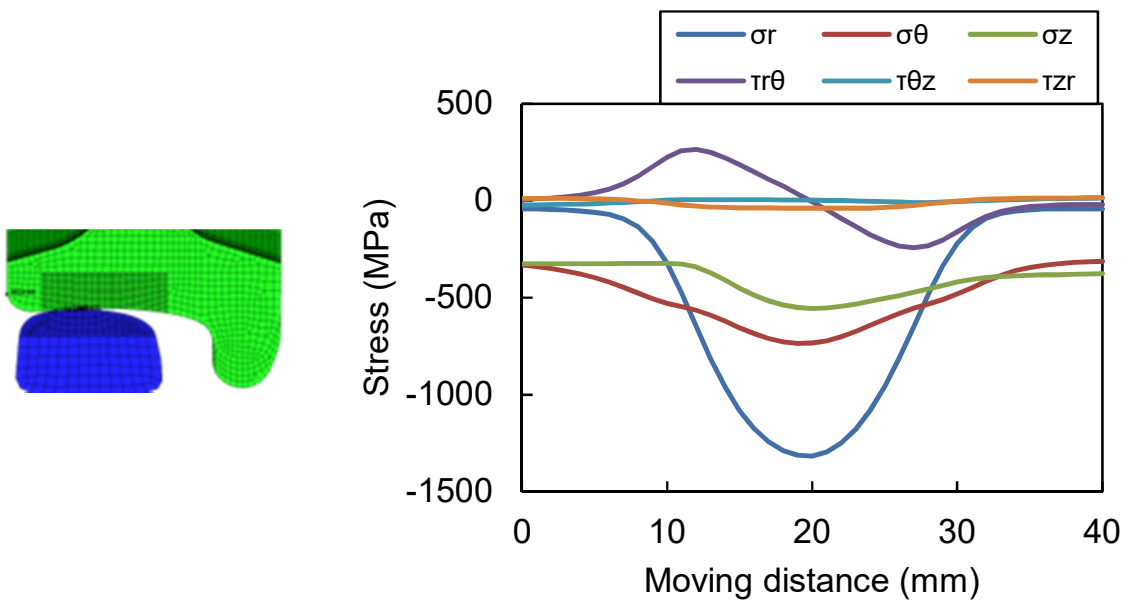


(b) 摩耗+踏面中央

Fig. 68 車輪回転に伴う応力変化



(c) 摩耗+フランジ側



(d) 摩耗+表側

Fig. 68 車輪回転に伴う応力変化（続き）

## 6.4 内部き裂発生に対する限界欠陥サイズ

### 6.4.1 多軸応力場の評価

転がり接触下の応力場は多軸応力となることが知られており，転動疲労の評価に多軸疲労強度評価モデルがしばしば用いられる．そのようなモデルの1つである Findley モデルを適用して，内部欠陥を起点とした転動疲労き裂の発生限界を評価した<sup>50)</sup>．

過去の研究で，本モデルは接触応力下の多軸疲労強度評価モデルとして最も適当との報告がある<sup>51)</sup>．その他の評価モデルとして，McDiarmid モデル<sup>52)</sup>，Dang Van モデル<sup>53)</sup>，Sines モデル<sup>54)</sup>もそれぞれ適用してみた．McDiarmid モデルと Dang Van モデルは，Findley モデルとほぼ同等の予測結果であったが，Sines モデルでは他のモデルに比べ疲労損傷を小さく見積もる結果となった．Findley モデルではせん断応力範囲  $\Delta \tau$  とせん断応力面に垂直な応力  $\sigma_n$  との関係から，内部き裂の発生限界を評価する．き裂発生面である Critical Plane は，疲労損傷が最も大きくなる面として決定される．本モデルを式で表すと Eq. 7 のようになる．

$$\Delta \tau_{eq,max} = \max \{ \Delta \tau - k \cdot \sigma_{n,max} \} \quad (\text{Eq. 7})$$

ここで， $\Delta \tau_{eq,max}$ ：等価せん断応力（対象とする多軸応力場と疲労損傷が等価な純せん断応力）， $\sigma_{n,max}$ ：疲労損傷が最も大きくなる時の  $\sigma_n$ ， $k$ ：材料定数（0.3538）である． $k$  の値は，ねじり疲労試験で得られた疲労限を  $\Delta \tau_{eq,max}$  に，軸力疲労試験で得られた疲労限をせん断応力に換算して  $\Delta \tau$  に，このときの垂直応力の最大値を  $\sigma_{n,max}$  にそれぞれ代入することで求めた．等価せん断応力  $\Delta \tau_{eq,max}$  が大きいほど，疲労き裂は発生しやすいと評価され，解析結果から求めた  $\Delta \tau_{eq,max}$  を比較することで，より疲労き裂が発生しやすい条件を検討することが可能である．

Fig. 69 に各条件の等価せん断応力を示す．ここで転動疲労き裂の発生領域が、深さ 3～6 mm との調査結果があることから、解析で得られた深さ 3～6 mm の応力を平均して、等価せん断応力を求めた．新製形状の等価せん断応力は、フランジ側で高くなっている．一方、凹摩形状では等価せん断応力は、いずれも反フランジ側で高くなっている．これは Fig. 70 に示すように、凹摩形状では反フランジ側で接触する場合に、接触面圧が最も高くなるためである．また凹摩形状の踏面中央において接触面圧が最も低いにも拘らず、等価せん断応力がフランジ側より高くなるのは、 $\sigma_{n, \max}$  がフランジ側に比べて大きいためである．これは凹摩することによって踏面中央の圧縮残留応力が開放されやすく、引張側に変化するためと考えられる．

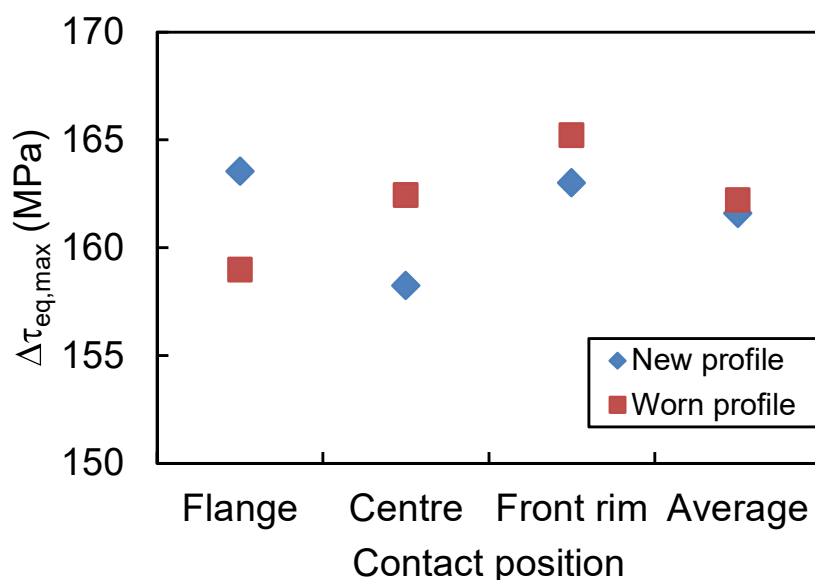
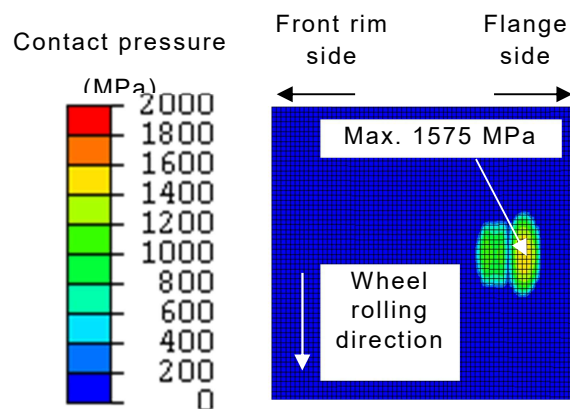
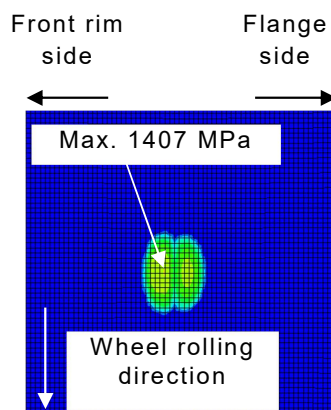


Fig. 69 各接触点における  $\Delta \tau_{eq, \max}$

a



b



c

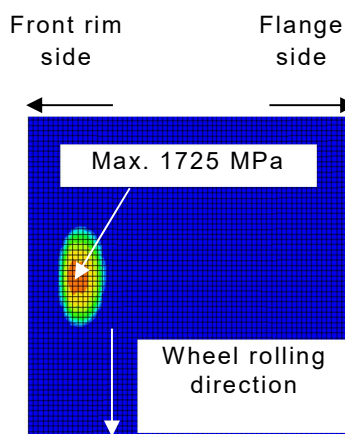


Fig. 70 摩耗車輪の踏面接触面圧分布

(a) フランジ側接触, (b) 踏面中央接触, (c) 表側接触



このように等価せん断応力は接触位置や踏面形状によって異なった値を示すが、実使用下での接触位置の頻度や粗大欠陥の発生位置を特定することは困難である。このため、全接触位置の応力を平均化して等価せん断応力を求めるのが適当と考えられる。平均化した等価せん断応力は Fig. 69 の右端に示されているが、新製形状と凹摩形状で差は 1MPa 程度しかない。このことから本報で評価した範囲では、内部起点の転動疲労き裂の発生に対して、踏面形状の影響は小さいと考えられる。

#### 6.4.2 転動疲労き裂発生に対する限界欠陥サイズ

FEM 解析で得られた等価せん断応力と疲労試験で得られた疲労限と欠陥サイズの関係を用いることで、実車輪において転動疲労き裂が発生する限界の内部欠陥サイズを推定することが可能となる。Fig. 71 に示すように、解析で得られた等価せん断応力と、ねじり疲労試験で得られた欠陥を有する材料の疲労限予測線が交わる欠陥サイズが、転動疲労き裂を発生させる限界の欠陥サイズである。この限界サイズより大きい欠陥が存在する車輪で、転動疲労き裂が発生すると予測される。

このような方法で予測した限界欠陥サイズを Table 6 に示す。本表では、接触位置ごとに求めた結果と、全接触位置の応力を平均化して求めた結果をそれぞれ示す。各接触位置で比較すると、Fig. 69 に示した等価せん断応力と同様に、レールとの接触位置や踏面形状の違いで限界欠陥サイズに差が生じるが、平均化した場合は踏面形状に依らず限界欠陥サイズは同等で 1.1 mm である。Table 6 の結果は El-Haddad の式を用いて得られたものであるが、 $\sqrt{\text{area}}$  の式を用いた場合でも、今回の場合においては Table 6 とほぼ同等の結果を得ることができる。

AAR のリム内部の欠陥サイズに関するスペックは、直径 1.6 mm 以下であることから、ここで得られた限界の欠陥サイズは粗大ではあるものの、正常品として実使用されている車輪に十分存在し得るサイズと言える。したがって、転動疲労き裂の発生確率は、直径 1.1~1.2 mm の内部欠陥が存在する頻度に依存すると考えられる。これは、第 5 章で考察したことと同様に、車輪の製造プロセスにおいて内部欠陥サイズをコントロールすることが非常に重要であることを

示している.すなわち,脱線事故の可能性のあるリム部損傷を減少させるため, および, 重荷重貨車用車輪の踏面損傷による交換頻度を低減するためには, 高 清浄度車輪を用いることが必要である.

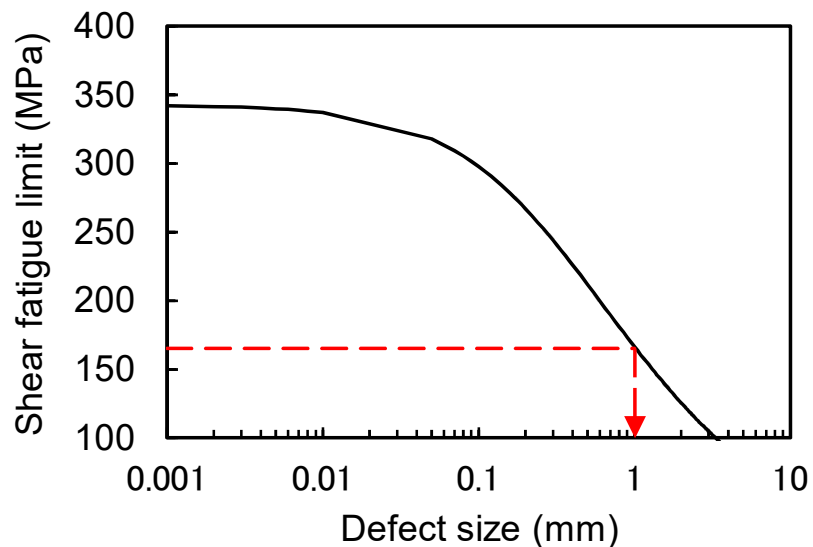


Fig. 71 許容欠陥サイズ推定法

Table 6 許容欠陥サイズ

Tread Profile	Critical defect size (mm)			
	Flange	Center	Front	Average
New	1.1	1.2	1.1	1.1
Worn	1.1	1.0	1.0	1.0

## 6.5 結論

重荷重貨車用車輪で生じる転動疲労損傷における，内部き裂の発生に及ぼす欠陥サイズの影響を評価した．微小な人工欠陥を導入した車輪鋼を用いて，ねじり疲労試験と軸力疲労試験を行った．車輪鋼の疲労限は，欠陥サイズが大きいくほど低下する傾向がみられ，せん断疲労限，軸力疲労限と欠陥サイズとの関係は， $\sqrt{\text{area}}$  および El-Haddad の式との対応性を評価したところ，両者とも同じ傾向を表しているが，El-Haddad の式の方が対応性が高いことから，El-Haddad の式を採用した．

転がり接触に伴う車輪リム内部の応力変動を求めるため，実車輪を対象とした FEM 解析を行った．せん断応力は踏面直下で最も大きくなり，内部起点の転動疲労き裂が発生し得ることを確認した．多軸疲労強度評価モデル（Findley モデル）に基づく等価せん断応力は，接触位置や踏面形状により差がみられた．しかしながら，全接触位置で平均化すると踏面形状に依存せず，ほぼ同等となった．等価せん断応力及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推定すると直径 1.1 mm となった．これは，AAR 規格で正常品と判断されるレベルである．直径 1.1 mm より小さい欠陥サイズの車輪であれば，内部き裂の発生する確率は極めて低いと言える．

以上より，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をクリアした車輪を提供することが重要であるという，第 5 章と同様の結論が得られた．

## 第7章：まとめと今後の展望

世界の鉄道車両用車輪には、大別して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を使用するのが、いわば世界標準となっている。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、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。

本研究では、世界の鉄道車両の約3割が走行しており、そのほとんどが貨物鉄道である北米鉄道に焦点を当て、効率化を求めるが故に車両重量が増加傾向にある中、問題視されている車輪損傷の抑制を目的として、損傷による交換頻度が高いものや社会的影響の大きいもの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に繋げた。以上のことを第1章で述べた。

第2章においては、まず車輪と車輪の製造プロセスの解説をした。鍛鋼車輪の製造プロセスの構成は、車輪用鋼片製造－加熱－鍛造・圧延－熱処理－機械加工－検査－塗装 となっている。その中で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により、挙動を把握しているのが現状であり、各ロールの機能については、これまで十分に分析されていなかった。そこで、それらの機能すなわち圧延が製品にどのような影響を及ぼすのかを明らかにするために、実験によって以下を解明した。

- (1) ホイールミル圧延によって車輪径方向・軸方向の寸法精度は圧延中一貫して悪化する。
- (2) 圧延中の車輪円周のバランス性能については、リム部は大幅に改善される一方で、板部は悪化する。しかしながら、製品トータルとしてはアンバランス量が半減するほどに改善する。
- (3) ホイールミル圧延工程は、車輪用鋼片の出来栄えや荒地鍛造プロセスによって生じる円周上の偏肉を改善する効果が得られることから、非常に重要である一方、寸法精度が悪化するのを避けられない。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。

以上の新たな知見を活用し、より高品質で円周上ばらつきの少ない車輪を造ることができる。

第3章においては、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た。まず、北米での損傷実態を分析するため、車両運行環境の変化とそれに伴う損傷発生推移について分析した。その結果、車輪-レール間の接触問題に大きく影響を与える1本の車軸にかかる重量である”軸重”が近年増加してきていること、それに伴い、踏面損傷が増加してきていること、発生率は低いものの車輪リム部割損による運航に支障をきたす問題が鉄道産業における大きな課題として存在することを明確にした。つぎに、上述に伴う損傷区分毎の車輪廃却内容について分析し、数量ではなく内容や鉄道産業に与える影響の大きさをもとに車輪損傷を整理し、本研究の対象とする3種類の車輪損傷を以下のとおりとした。

- (1) フラットはく離 (Spalling) や疲労はく離 (Shelling) などの踏面損傷とした。車輪の廃却原因としては最も多いものである。フラットはく離は、ブレーキなどによって車輪がレール上を滑走することにより、車輪の踏面にフラットが生成され、マルテンサイト組織が発生し脆化する。その後車輪がレール上を転動すると、フラット部で衝撃力が発生し転動疲労き裂を生じやすいため、早期にはく離を起こす損傷である。一方、疲労はく離は、脆化したマルテンサイト組織が無い状態で、軸重による面圧が高くなった時に生じる疲労き裂発生～進展～はく離である。日本国内は軸重が軽いため、ほとんどはフラットはく離である一方、北米は軸重が重く、疲労はく離が多く発生している。本研究では損傷発生プロセスとしては疲労はく離がフラットはく離の一部であることから、フラットはく離を対象とした。
- (2) リム大型はく離 (Shattered-rim) とした。軸重が大きい等によりレールとの接触面圧が高くなった場合、接触面直下の車輪リム内部に高いせん断応力が発生する。そのせん断応力が転動によって引張圧縮の繰り返しとなることから、内部にあらかじめ欠陥が存在していれば、その欠陥を起点としてき裂進展し得るに十分高い応力場が生み出される。これによって車輪リム内部でき裂進展し、大きなはく離に繋がる損傷を、リム大型はく離と呼んでいる。リム部が大きくはく離することから脱線のリスクがあるため、速やかに抑制する必要がある。

- (3) リム縦割れ (Vertical Split Rim) とした。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、リム大型はく離との大きな違いは、円周方向の長さを持つ内部疲労き裂が、リム部の縦(径)方向脆性割れに発展する点である。この縦割れに発展する理由の解明は、未だ途上である。最近では、リム縦割れが、リム大型はく離に取って代わってリム割損の主役となっており、本損傷の抑制が残された課題ともなっている。

第4章においては、北米車輪損傷の中で最も高い廃却要因であるフラットはく離 (Spalling) の抑制を目的とした、フラット生成試験 (Skid Test)、およびフラット生成試験片を用いた転動疲労試験 (RCF Test)、すなわちフラットはく離試験を実施し、以下に示すとおりフラット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た。

- (1) フラット生成エネルギー ( $E_f$ ) が大きい、すなわち車速が速かったり滑走時間が長いほど、フラット深さ ( $D_f$ ) ・白色層平均厚さ ( $t_w$ ) とともに大きくなることが分かった。 $t_w$  は焼入れ性の良い材料ほど厚くなることから、製造工程最適化の指針の一つを得ることが出来た。また、白色層は多くの場合き裂や割れを伴ったり、白色層そのものが欠落していることが分かった。
- (2) フラットが大きい(円周方向に長い、もしくは深い)ほど、衝撃荷重が増大することが分かった。それは、上下方向の変位速度が増大するような形状であるほど衝撃荷重が増大することを意味し、衝撃荷重の増大に伴ってき裂が深くなることを明らかにした。
- (3) 材料が硬いほど母材の転動疲労強度が高くなることが分かった。そこに上述で得られた知見および衝撃荷重を加味することにより、車輪の耐フラットはく離寿命をある程度推定できることが分かった。
- (4) 以上の知見より、車輪製造工程の最適化の視点で言えることとして、フラットはく離 (Spalling) 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という提案ができる。

第5章においては、脱線事故を誘発する可能性があるとして広く知られている損傷がリム大型はく離 (Shattered-rim) の抑制を目的として、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するため、各種材料によるき裂進展試験、および同欠陥を等価円盤状欠陥とみなした簡易計算式による、破壊力学的アプローチを試みた。その結果、以下の知見を得ることができた。

- (1) 車輪鋼を用いた Mode-II き裂進展試験を実施し、材料定数である Mode-II 下限界応力拡大係数範囲 ( $\Delta K_{IIth}$ ) を実験により求めた。その結果、AAR Class-B または C の材料であれば、Mode-II 下限界応力拡大係数範囲 ( $\Delta K_{IIth}$ ) は  $18\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  でほぼ一定であることが分かった。
- (2) 車輪とレールの負荷接触状態を、一般的なころがり接触問題に用いられるヘルツの理論を適用することによって解析し、車輪リム内部欠陥のき裂進展に最も影響を及ぼす応力を見極めた。これを用いて車輪に設計に用いる負荷がかかる環境下で  $\Phi 3.2\text{mm}$ 、 $\Phi 2.2\text{mm}$ 、 $\Phi 1.6\text{mm}$  の円盤状の内部欠陥を評価した場合、内部欠陥サイズが  $\Phi 1.6\text{mm}$  であればリム大型はく離を引き起こす踏面からの深さでは、き裂は進展しないことが明らかになった。このことは、並行して AAR で進められていた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に関する規定の厳格化に一定の影響を与えたものと思われる。
- (3) 車輪製造プロセスにおいて、製鋼プロセス(欠陥生成)、鍛造圧延プロセス(欠陥形状)、超音波探傷プロセス(欠陥サイズによるフィルタリング)が重要な内部欠陥コントロールプロセス重要となる。この中でも上述より、リム大型はく離(Shattered-rim)を防ぐ上で重要なことは、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をクリアした車輪を提供することであると、結論づけられる。

第6章においては、最近では発生率が低く減少傾向であるにも拘わらず、未だに発生完全防止にまでは至っていない上に、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(VSR)の抑制に焦点を当てた。

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が、リム縦割れ損傷の起点になり得るのみならず、踏面疲労はく離の原因でもあることから、内部き裂の発生に及ぼす内部欠陥サイズの影響を明らかにするとともに、内部き裂が発生する限界の欠陥サイズを明らかにすることを目的として、実験と解析を実施した。その結果、以下の知見を得ることができた。



- (1) 微小な人工欠陥を導入した車輪鋼を用いて、ねじり疲労試験と軸力疲労試験を行った結果、車輪鋼の疲労限は、欠陥サイズが大きいほど低下する傾向がみられた。また、せん断疲労限、軸力疲労限と欠陥サイズとの関係は、 $\sqrt{\text{area}}$  および El-Haddad の式との対応性を評価したところ、El-Haddad の式とよく一致することが分かった。
- (2) 転がり接触に伴う車輪リム内部の応力変動を、実車輪を対象とした 3D-FEM 解析によりもとめた。せん断応力は踏面直下で最も大きくなり、内部起点の転動疲労き裂が発生し得ることを確認した。また等価せん断応力及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推定すると直径 1.1 mm となった。これは、AAR 規格で正常品と判断されるレベルである。直径 1.1 mm より小さい欠陥サイズの車輪であれば、内部き裂の発生する確率は極めて低いと言える。
- (3) 以上より、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をクリアした車輪を提供することが重要であるという、第 5 章と同様の結論が得られた。

以上、本研究ではまず、車輪製造プロセスにおけるホイールミル圧延工程の役割を明確にし、製造プロセス全体最適化の指針を得た。

つぎに、車輪の交換主要因の一つである踏面損傷や、脱線事故を誘発する可能性のあるリム部割損を対象として、転動疲労や内部き裂進展の問題と捉えて現象解明を試み、得られた知見を材料および製造工程条件に落とし込むことにより、今後の鉄道車両用車輪の製造において、車輪の損傷抑制のために留意すべき点を明らかにした。

本論文のように実社会で発生している問題に対して、メカニズムを解明したり問題抑制法の提案に繋げる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る。



最後に、本研究で説明しきれなかった問題や新たな視点での研究が期待される事象における今後の課題について述べる。

本研究で説明したメカニズムおよび得られた知見については、一定の成果につながっていると自負しているものの、特にリム縦割れに関しては原因説明に至っていないことから決して十分なものとは言えない。リム縦割れの発生プロセスの完全説明のためには、円周方向の長さを持つ内部疲労き裂が、リム部の縦(径)方向脆性割れに発展する原因の究明が不可欠であり、引き続きこの説明に注力したい。

また、転がり接触疲労(RCF)は、フラットはく離・疲労はく離の重要な要素の一つであり、かつ、リム大型はく離・リム縦割れにも少なからず影響する。RCF形成のメカニズムを理解するためには、金属または合金が塑性変形を引き起こすのに十分高い応力を受けたときに何が起こるかを理解する必要がある。なぜなら、RCFの接触面では転がり接触中に微小ながら塑性変形が生じており、特に北米の貨物鉄道に使用されている高輪重の環境では、車輪鋼の機械的性質が影響を受けるためである。

これについて、これまで多くの科学者やエンジニアによって研究がなされてきた<sup>55-63)</sup>。例えば Ramberg と Osgood<sup>64, 65)</sup>は、鋼に対して通常なされる標準引張試験における応力とひずみの関係を明確にした。それ以外の研究者達(Holloman(1945)<sup>66)</sup>、Ludwick(1909)<sup>67)</sup>、Swift(1952)<sup>68)</sup>、Voce(1948)<sup>69)</sup>、Morrison(1966)<sup>70)</sup>、Man(1967)<sup>71)</sup>、および Schwink(1967)<sup>72)</sup>も同様の研究をされており、これらの研究者たちの結果のいくつかを比較することが、1974年の Kleemola と Nieminen による論文の主題であった<sup>73)</sup>。最近でも、Rasmussen(2006)<sup>74)</sup>をはじめ、以前の研究の結果を改善しようと試みている。

しかしながら、比例限度を超える応力での応力-ひずみ曲線の部分では、正確さという点で説明されていない部分を残している。また、あらかじめ変形を受けた試験片の繰り返し荷重下における応力とひずみの関係は、明らかにされていない。金属が変形した時に機械的特性がどのように変化するかは、車輪とレールの接触面での転がり接触をよりよく理解するために重要である。転がり接触による損傷の蓄積は、過度の摩耗および車輪寿命の低下、疲労はく離、ならびにリム大型はく離やリム縦割れなどの、脱線事故を誘発する可能性のある損傷の増大をもたらし得るからである。

また、ブレーキによって踏面表層が加熱されると、機械的特性、残留応力、結晶構造が変化するため、車輪鋼の塑性変形に対する感受性が高まる可能性がある。特に残留応力は、製造工程の中で熱処理により付加された状態で車両に装着され、その後、転がり接触による加工硬化やブレーキなどによって加熱され状態が変化することから、車輪の踏面損傷に与える影響が大きいと推察される。<sup>75)</sup>

今後の継続した取組みも含めて、あらゆる用途の鉄道車輪の損傷抑制に寄与すること、ひいては世界の鉄道輸送の安全性向上に貢献することに努めていきたい。

以 上

## 参考文献

- 1) UNIFE: “World Rail Market Study” , 2017
- 2) Denver Tolliver, John Bitzan, Doug Benson: “Railroad Operational Performance in the United States” , Transportation Research Forum, Fall 2010
- 3) European Committee for Standardization: EN13262, Wheels - Product Requirements, (2011)
- 4) Association of American Railroads: AAR Section G M-107/M-208, Wheels, Carbon Steel, (10/2018)
- 5) 日本規格協会: 日本工業規格 鉄道車両用一体圧延車輪・品質要求, JIS E5402-1, (2015)
- 6) 日本規格協会: 日本工業規格 鍛鋼品の製造, 試験及び検査の通則, JIS G0306, (2009)
- 7) 篠崎吉太郎: 鍛造加工の本, (2013)
- 8) 藤村隆志: 『鉄道車両用車輪の鍛造および熱処理技術』 素形材, (2017年4月), vol. 58-No. 4
- 9) Manfred Lindenblatt et al.: Stahl und Eisen, 125, (2005-Nr. 10), P27-31
- 10) 藤村隆志, 岡方義則, 福安富彦: 『最近の鉄道用車輪の製造技術』 塑性と加工, 37-429, (1996-10), P1017
- 11) Jay M. Galbraith et al.: IHHA 2015, (2015), P207-212
- 12) 広重巖: 輪軸, (1971), P88-99
- 13) 岡方義則: 素形材, (1993), P14-20
- 14) 高速車両用輪軸研究委員会: 鉄道輪軸, (2008), P53-94
- 15) 岡方義則: 新日鐵住金技報, 395, (2013)
- 16) Association of American Railroads: “AAR Railroads Fact” , 2017
- 17) Association of American Railroads: “Car Repair Billing Data” , 2017
- 18) Scott Cummings: “Broken Rims in Railroad Wheels” , Transportation Technology Center Incorporation Report publicized through the FRA Web site at <http://www.fra.dot.gov>., Dec. 2014
- 19) Scott Cummings: “Microcleanliness and Residual Hoop Stress of Vertical Split Rim Wheels” , Technology Digest, 2011

- 20) 牧野泰三, 山本三幸, 藤村隆志: 『車輪鋼のフラットはく離特性(フラットに及ぼす材質の影響と 2, 3 の転動疲労試験結果)』 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, (1999 年 10 月)
- 21) 牧野泰三, 山本三幸, 藤村隆志: 『車輪鋼のフラットはく離特性に及ぼすフラット形状と衝撃荷重の影響』 日本材料学会第 25 回疲労シンポジウム, (2000 年 11 月)
- 22) Taizo Makino et al.: “Spalling Properties of Railroad Wheel Steels (Investigation on Skid Flat and Rolling Contact Fatigue Properties)” 13th International Wheelset Congress, (Sep. 2001)
- 23) Taizo Makino et al.: “Effect of Material on Spalling Properties of Railroad Wheels” Wear 253, (Jun. 2002), P284-290
- 24) T. Kigawa, E. Kimoto, Wear, 167, (1993), pp. 143-154.
- 25) T. Kigawa, E. Kimoto, Proc. 10th Int. Wheelset Congress, Sydney, (1992), pp. 15-19
- 26) J. Sun, K. J. Sawley, D. H. Stone, Proc. 12th Int. Wheelset Congress, Qingdao, (1998), pp. 18-29
- 27) J. Jergéus, R. Lundén, P. Gullers, Proc. 11th Int. Wheelset Congress, Paris, (1995), pp. 53-58
- 28) 日本規格協会: 日本工業規格 鋼の焼入性試験方法(一端焼入方法), JIS G0561, (2011)
- 29) Takashi Fujimura, Tomoaki Yamamoto, Miyuki Yamamoto, Taizo Makino: “High Micro-cleanliness Wheels Preventing Shattered-rim Fracture” 14th International Wheelset Congress, (Sep. 2004)
- 30) D. H. Stone, and Jeffrey E. Dahlman, The effect of discontinuity size on the initiation of shattered rim defects, ASME Rail Transportation Vol. 15 (2000).
- 31) Murakami, Y. and Hamada, S., Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 20, No. 6, (1997) p. 863.
- 32) 村上敬宜, 福原健人, 濱田繁: 『Mode II 疲労き裂進展下限界値  $\Delta K_{IIth}$  の測定』, 材料 Vol. 51, No. 8, pp. 918-925, 2002 年 8 月
- 33) ” Stress Intensity Factors Handbook” , Soc. Materials Science, Japan and Pergamon Press, (1992)
- 34) “Critical Internal Defect Size for Subsurface Crack Initiation in Heavy Haul Car Wheels” , T. Kato, T. Fujimura, Y. Yamamoto, S. Dedmon, S. Hiramatsu, H. Kato, Y. Kimura, J. Pilch, Wear (2019)

- 35) L. M. Keer, M. D. Bryant and G. K. Haritos, Subsurface and Surface Cracking Due to Hertzian Contact, *Journal of Lub-Tech.*, 1982, 104, 347-351.
- 36) H. Tournay, S. Cakdi, K. Jones and M. Archuleta, Wheel tread damage and wheel rim failure modes in heavy haul operation in North America, *Proceedings of 10th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2015)*
- 37) H. Salehiadeh and N. Saka, Crack Propagation in Rolling Line Contacts, *Journal of Tribology*, 1992, 114(4), 690-697
- 38) R. Lunden, Cracks in railway wheels under rolling contact load, *Proc. International Wheelset Congress*, 1992, 163-167
- 39) A. Melander, A finite element study of short cracks with different inclusion types under rolling contact fatigue load, *Int. J. Fatigue*, 1997, 19(1), 13-24
- 40) Y. Liu, L. Liu and S. Mahadevan, Analysis of subsurface crack propagation under rolling contact loading in railroad wheels using FEM, *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, 74, 2659-2674
- 41) A. Ekberg, E. Kabo, J. C. O. Nielsen and R. Lunde ´n, Subsurface initiated rolling contact fatigue of railway wheels as generated by rail corrugation, *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44, 7975-7987
- 42) D. Zeng, L. Lu, J. Zhang, X. Jin and M. Zhu, Effect of micro-inclusions on subsurface-initiated rolling contact fatigue of a railway wheel, *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(2), 544-553
- 43) J. Sandström, Subsurface rolling contact fatigue damage of railway wheels - A probabilistic analysis, *International Journal of Fatigue*, 2012, 37, 146-152
- 44) J. Sandströma and J. de Maré, Probability of subsurface fatigue initiation in rolling contact, *Wear*, 2011, 271, 143-147
- 45) S. M. Cummings and D. Lauro, INSPECTIONS OF TREAD DAMAGED WHEELSETS, *Proceedings of 2008 ASME Rail Transportation Division Fall Technical Conference*, 2008.
- 46) M. Endo and Y. Murakami, Effects of an artificial small defect on torsional fatigue strength of steels. *ASME J Engng Mater Technol*, 1987, 109, 124-9.
- 47) E. Haddad, M. Topper, and K. Smith, Prediction of nonpropagating cracks, *Engineering Fracture Mechanics*, 1979, 11, 573-84

- 48) Y. Murakami, Metal fatigue: Effects of small defects and nonmetallic inclusions, Elsevier, 2002
- 49) T. Kato, Y. Yamamoto, H. Kato, S. Dedmon and J. Pilch, Effect of fracture toughness on vertical split rim failure in railway wheels, Engineering Fracture Mechanics, 2017, 186, 255-267.
- 50) Findley WN, A theory for the effects of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending, J Engng Ind, 1959, 301(6).
- 51) B. Alfredsson and M. Olsson, Applying multiaxial fatigue criteria to standing contact fatigue, International Journal of Fatigue, 2001, 23, 533-548
- 52) McDiarmid, D. L., A general criterion for high cycle multiaxial fatigue failure, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1991, 14(4), 429-453
- 53) Dang Van K, Micro-macro approach in high-cycle multiaxial fatigue, Advances in multiaxial fatigue, ASTM STP 1191, Philadelphia, ASTM, 1993
- 54) Sines G and Ohgi G, Fatigue criteria under combined stresses and strains, J Engng Mater Technol, 1981, 103, 82-90
- 55) Melan, E., Zur Plastizität des Räumlichenkontinuums, Ing. Arch., 1938, Vol. 9, pp. 116-126.
- 56) Symonds, P. S., Shakedown in Continuous Media, J. Appl. Mech., 1951, ASME, Vol. 18, pp. 85-89.
- 57) Koiter, W. T., General Theorems of Elastic-Plastic Solids, Progress in Solid Mechanics, 1960, North-Holland, Amsterdam, pp. 263-274.
- 58) Johnson, K. L., Contact Mechanics, Cambridge University Press, 1985.
- 59) Ponter, A. R. S., Hearle, A. D., Johnson, K. L., Application of the Kinematic Shakedown Theorem to Rolling and Sliding Point Contacts, J. Mech. Phys. Solids, 1985, vol. 33 (4), pp. 339-362.
- 60) 6. König, J. A., Shakedown of Elastic-Plastic Structures, Elsevier, 1987.
- 61) Polizzotto, C., On the Conditions to prevent Plastic Shakedown of Structures, Part I - Theory, J. Appl. Mech., 1993, vol. 60, pp. 15-19.
- 62) Polizzotto, C., On the Conditions to prevent Plastic Shakedown of Structures, Part II - The Plastic Shakedown Limit Load, J. Appl. Mech., 1993, vol. 60, pp. 20-25.

- 63) Maier, G., On Some Issues in Shakedown Analysis, *J. Appl. Mech.*, ASME, 2001, vol. 68, pp. 799– 808.
- 64) Ramberg, W and Osgood, WR, “Determination of Stress-strain Curves by Three Parameters” , Technical Note No. 503, National Advisory Committee on Aeronautics, (NACA), 1941.
- 65) Ramberg, W and Osgood, WR, “Description of Stress-Strain-Curves by Three Parameters” , Technical Report, Technical Note No. 902, National Advisory Committee on Aeronautics, (NACA), 1943.
- 66) Holloman, J. H., *Transactions of the AIME*, 1945, vol. 162, pp. 268-290.
- 67) Ludwick, P., *Elemente der Technologischen Mechanik*, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1909.
- 68) Swift, H. W., *Journal of The Mechanics and Physics of Solids*, 1952, vol. 1, pp. 1-18.
- 69) Voce, E., *Journal of the Institute of Metals*, 1948, vol. 74, pp. 537-562.
- 70) Morrison, W. B., *Transactions of the ASM*, 1966, vol. 59, pp. 824-846.
- 71) Man, J., Holzmann, M., Vlach, B., *Physica Status Solidi*, 1967, vol. 19, pp. 543-553.
- 72) Schwink, C., Vorbrugg, W., *Z. Naturforsch*, 1967, vol. 22a, pp. 626-642.
- 73) Kleemola, H. J., Nieminen, M. A., On the Strain-Hardening Parameters of Metals, *Metallurgical Transactions*, 1974, vol. 5, pp. 1863-1866.
- 74) Rasmussen, K., JR., Full-range Stress-strain Curves for Stainless Steel Alloys Research Report No R811, Centre for Advanced Structural Engineering, Sydney NSW, Australia, 2006.
- 75) Steven Dedmon, Daniel Stone, Takashi Fujimura: ” The Effect of Deformation on Mechanical Properties and Shakedown on Railroad Wheels” Joint Rail Conference 2014, (Apr. 2014)

## 謝辞

本研究を遂行し学位論文をまとめるにあたり，懇切丁寧な指導を賜りました京都大学大学院エネルギー科学研究科の宅田裕彦教授に深く感謝します。また，博士後期課程での講義および論文審査において指導および貴重な助言を賜りました同大学院平藤哲司教授，馬淵守教授、藤本仁教授、浜孝之准教授に謝意を表します。

また，日本製鉄株式会社 技術開発本部鉄鋼研究所 材料信頼性研究部 上席主幹研究員 牧野泰三博士，同交通産機品研究部 主幹研究員 加藤孝憲博士，Standard Steel, LLC, Director Technology and R&D, Mr. Steven Dedmon には，各種試験，解析において，技術的な多くの支援を賜りました。ここに謝意を表します。また，社内での手続き調整，論文執筆において支援をいただいた日本製鉄株式会社 技術開発本部鉄鋼研究所 交通産機品研究部長 田村憲司博士，交通産機品事業部 製鋼所 産機品製造部長 竹下幸輝氏，同 技術・品質保証部 技術開発室 主幹 山本雄一郎氏に感謝いたします。

最後に，博士後期課程での研究，論文執筆に多大な時間を費やし，家庭生活に十分な時間を取れない中、温かく見守りながら辛抱強く支援してくれた妻に対して，絶大なる感謝の意を表して謝辞といたします。



## 論文リスト

本研究に関する発表論文を以下に示す.

### 「学術雑誌掲載論文」

- (1) 藤村隆志, 福安富彦, 岡方義則, ”最近の鉄道用車輪の製造技術”, 塑性と加工, 37-429 P1017, 1996.10
- (2) Taizo Makino, Miyuki Yamamoto, Takashi Fujimura, “Effect of Material on Spalling Properties of Railroad Wheels”, Wear 253, Jun. 2002
- (3) 藤村隆志, ”鉄道車両用車輪の鍛造および熱処理技術”, 素形材, vol.58-No.4, 2017.04
- (4) T. Kato, T. Fujimura, Y. Yamamoto, S. Dedmon, S. Hiramatsu, H. Kato, Y. Kimura and J. Pilch, “Critical Internal Defect Size for Subsurface Crack Initiation in Heavy Haul Car Wheels”, Wear, Jul. 2019

### 「国際会議論文」

- (5) Taizo Makino, Takashi Fujimura, Miyuki Yamamoto, “Spalling Properties of Railroad Wheel Steels (Investigation on Skid Flat and Rolling Contact Fatigue Properties)”, 13th International Wheelset Congress, Sep. 2001 (査読付)
- (6) Tomoaki Yamamoto, Miyuki Yamamoto, Taizo Makino, Takashi Fujimura, “High Micro-cleanliness Wheels Preventing Shattered-rim Fracture”, 14th International Wheelset Congress, Sep. 2004 (査読付)
- (7) Steven Dedmon, Takashi Fujimura, Daniel Stone, ”The Effect of Deformation on Mechanical Properties and Shakedown on Railroad Wheels”, ASME Joint Rail Conference 2014, Apr. 2014 (査読付)
- (8) T. Kato, T. Fujimura, Y. Yamamoto, S. Dedmon, S. Hiramatsu, H. Kato, Y. Kimura and J. Pilch, “Critical Internal Defect Size for Subsurface Crack Initiation in Heavy Haul Car Wheels”, 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2018), Sep. 2018 (査読付)
- (9) T. Kato, T. Fujimura, Y. Yamamoto, S. Dedmon, S. Hiramatsu, H. Kato and J. Pilch, “Effect of wheel size and tread braking on subsurface crack initiation in heavy haul car wheels”, Fatigue Design 2019, Nov. 2019 (査読付)

「国内学会講演論文」

- (10) 荻田武司, 秋山正義, 田村憲司, 藤村隆志, 福安富彦, ” 車輪熱間鍛造荒地成形工程の剛塑性 FEM 解析”, CAMP-ISIJ vol. 8 P1236, 1995. 09 (査読付)
- (11) 芦田耕司, 藤村隆志, 乾友紀, ” 高温車輪断面プロフィール計測システムの開発”, 計測自動制御学会, 1995. 09 (査読付)
- (12) 牧野泰三, 山本三幸, 藤村隆志, ” 車輪鋼のフラットはく離特性(フラットはく離に及ぼす材質の影響と 2, 3 の転動疲労試験結果)”, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 1999. 10 (査読付)
- (13) 牧野泰三, 山本三幸, 藤村隆志, ” 車輪鋼のフラットはく離特性に及ぼすフラット形状と衝撃荷重の影響”, 日本材料学会第 25 回疲労シンポジウム, 2000. 11
- (14) 藤村隆志, ” 車輪・レール形状の設計と維持管理に関する車輪設計・製造から見たアプローチ”, レール・車輪接触力学研究会, 2005. 03
- (15) 加藤孝憲, 藤村隆志, 平松慎一郎, 山本雄一郎, ” 鉄道車輪鋼の内部起点型転動疲労き裂の進展特性”, 日本材料学会第 34 回疲労シンポジウム, 2018. 10

「特許」

- (1) “鉄道車両用車輪の製造方法” 特開平 07-308730
- (2) “リム付きディスクの荒地鍛造金型” 特開平 08-300091
- (3) “耐摩耗性および耐熱き裂性に優れた鉄道車両用車輪およびその製造方法” 特開平 09-202937 (US5, 899, 516)
- (4) “耐割損性に優れた鉄道車両用車輪およびその製造方法” 特開平 10-119503 (US6, 033, 001)
- (5) “耐疲労はく離性と耐摩耗性に優れた鉄道車両用車輪” 特開 2000-345295
- (6) “Steel Alloy Railway Wheel” US6, 372, 057 (Jun. 2000)
- (7) “Method for preventing Shattered-rim Fracture in Railway Wheels” US6, 357, 297 (Jun. 2000)
- (8) “Steel Alloy Railway Wheels” US6, 663, 727 (Feb. 2002)
- (9) “円形材の鍛造方法” 特開 2003-19534
- (10) “鉄道車両用車輪およびその製造方法” 特開 2003-48404