

車輪踏面熱き裂の実験的再現と生成条件

半田 和行* 牧野 一成** 西森 久宜***
小原 孝則# 宮内 瞳苗* 柿嶋 秀史*

Experimental Reproduction and Generation Conditions of Wheel Tread Thermal Cracks

Kazuyuki HANDA Kazunari MAKINO Hisanori NISHIMORI
Takanori OBARA Toru MIYAUCHI Hideshi KAKISHIMA

Focusing on the durability of carbon steel railway wheels, so-called tread thermal cracks, one of severe damages on the tread surface, were investigated to understand the cracks generation processes involving initiation and propagation. We have demonstrated that tread thermal cracks can be experimentally reproduced under the condition of concurrent effect of continuous rolling contact with rails and cyclic frictional heat from brake blocks, through the experiments using an actual railway wheel. Relations among residual stress, cracks configuration and fracture surface were examined to study the crack generation process. It was revealed that plastic deformation and thermal stress near the surface resulted in substantial tensile residual stress, which caused the generation of cracks.

キーワード：車輪，踏面，制輪子，熱き裂，摩耗

1. はじめに

車輪は鉄道車両の安全性を担保する重要保安部品であるとともに比較的高頻度に交換を要する消耗部材であり、疲労強度、耐摩耗性、耐割損性、経済性等を高い次元で満足する必要があることから、高炭素鋼に熱処理を施した材質が使用されている。この熱処理により車輪外周部の円周方向に圧縮残留応力が付与され割損に対する安全性を確保しているものの、車輪踏面には使用中の外力や温度等の負荷により種々の摩耗や変状が誘起される。中でも固着滑走に伴うフラット傷およびレールゲージコーナとのすべり接触に伴うフランジ摩耗は過去において車輪使用上主要な課題であったが、滑走防止装置の普及および車輪／レール潤滑技術の進展等により概ね解消される傾向にある。一方、近年では列車の高速化に起因する踏面ブレーキ熱負荷の増大に伴い、車輪踏面の熱き裂および踏面摩耗（凹摩）が課題として顕在化しつつある。

踏面熱き裂は車輪踏面の全周にわたり数mm～数十mmの間隔で車軸方向に生成・進展する梯子状のき裂であり、内部方向に深さ数mmまで進展し内部で屈曲したき裂形状となる^{1, 2)}。図1 (a) に実車における車輪踏面熱き裂の外観状態例を示す。踏面熱き裂が発生した場合

車輪転削時の削正量を増加せざるを得ず、結果的に車輪使用寿命を著しく縮減する原因となる。

現在までのところ、車輪踏面熱き裂に対する系統的な対策法は確立されていない。これは踏面熱き裂の発生機構が不明であり発生条件が同定されていないことによる。現車において車輪が受ける負荷は走行線区、乗車率、ブレーキノッチ、回生ブレーキ絞込み率等により毎回変動するため、負荷に対する材料応答としての熱き裂の発生機構を現車の車輪から分析解明するのは困難である。機構解明のためには負荷条件が制御された定置試験において踏面熱き裂が再現生成されることが必要である。しかしながら従来行われてきた踏面ブレーキ性能試験では踏面熱き裂の発生は報告されていない。



(a) 実車の熱き裂 (b) 定置ブレーキ試験後

図1 車輪踏面の外観状態例

* 材料技術研究部（摩擦材料）
** 車両構造技術研究部（車両強度）
*** 車両制御技術研究部（ブレーキ制御）
車両制御技術研究部

特集：材料技術

本稿では、車輪踏面熱き裂の再現生成を目的として従来と異なる構成の試験装置を用いて実施した一連の定置試験³⁾について試験条件および試験結果を報告する。さらにこの試験結果を受け、踏面熱き裂が車輪の耐久性等に与える影響やその生成条件等について検討し、踏面熱き裂の機構解明に向けて今後検証する必要がある課題を提示する。

2. 試験方法

従来の踏面ブレーキ性能試験では、輪重相当の慣性質量を回転軸に付与した車輪と制輪子により実車の車輪／制輪子系を模擬し、ブレーキ距離をはじめとする各種性能の評価を行ってきた。この際、摩擦熱によるき裂が発生する場合はあるが(図1 (b))き裂の分布等が実車の踏面熱き裂^{1, 2)}と全く異なり、実車におけるき裂と等価な事象が生じた事例はない⁴⁾。また国内で想定される軸重条件下では、制輪子の影響のない車両で踏面にき裂が発生する事例は認められていない。著者らは今回、踏面熱き裂の生成には、制輪子による繰り返し熱負荷に加えレールとの接触転動が必要であるとの仮説を設定し、これを検証するため実車で想定される上限に近い両者の条件を設定した試験により熱き裂の再現生成を試みた。

この試験には車輪に対する制輪子とレールの接触を同時に模擬できる特殊な試験装置が必要なことから、鉄道総研所有のブレーキ性能試験機粘着測定ユニットを使用した。試験装置の構成を図2に示す。同試験装置は主に各種条件下での車輪／レール間の粘着係数等の測定に使用されるもので、以下の特徴を有する。

- ・レールを模擬した軌条輪に車輪(実体)が従動する
- ・輪重に相当する車輪／軌条輪垂直荷重を付与できる
- ・軌条輪軸に輪重相当の慣性モーメントを付与できる
- ・車輪には制輪子(実体)を作用させることができる
- ・車輪と軌条輪の軸方向相対位置を制御できる

試験条件を表1に示す。試験は、輪重60kNで軌条輪と転動している車輪にブレーキ初速130km/hから非常ブレーキ相当の踏面ブレーキを動作させ、30km/hまで減速した時点で緩解し130km/hに再加速して車輪を自然冷却させた。車輪温度が60℃まで低下した時点で再度ブレー



図2 試験に使用した粘着測定ユニットの構成

キを動作させ、以下同様にブレーキ回数130回まで繰り返した。試験は乾燥条件で行い軌条輪／車輪間で滑走は生じなかった。ブレーキ動作数十回ごとに試験機を停止させ、踏面状況の目視確認を行い踏面形状を測定した。この試験結果を受け、供試車輪およびそこから採取した試験片について、踏面熱き裂の発生機構の解明に必要な知見の取得を目的として、以下の観察および測定を行った。

- ・X線回折による残留応力測定
- ・踏面表面および縦断面の蛍光磁粉探傷および組織観察
- ・破面観察および金属組織観察

表1 試験条件

車輪種別	φ810mm B型 一体(新品)
車輪材質	SSW-Q3S (JIS E 5402)
踏面形状	修正円弧踏面
慣性モーメント	1067 kgm ² (軌条輪軸) 60 kgm ² (車輪軸)
垂直荷重(輪重)	60 kN
ヘルツ接触圧	650 MPa
相対変位	三角波, 揺動振幅 8mm 揺動周波数 0.25Hz
制輪子	焼結合金1種 (MS504)
制輪子押付力	30 kN
ブレーキ種別	減速
ブレーキ速度	130km/h → 30km/h
運転パターン	130km/hで回転 →ブレーキ・30km/hまで減速 →130km/hまで増速 →車輪60℃まで冷却 →ブレーキ・30km/hまで減速 →(以下繰り返し)
ブレーキ開始温度	60℃ (車輪踏面下10mm)

3. 試験結果

ブレーキ動作時の時刻歴チャート例を図3に示す。軌条輪は車輪踏面上で図4 (a)のRW部から上(リム側)に6mm, 下(フランジ側)に2mm三角波で揺動させた。車輪の内部温度計測値は最大で200℃程度であった。初回のブレーキ動作から最終回まで計測チャート上顕著な変化はなかった。

3.1 ブレーキ動作時の挙動

踏面観察を実施した各時点までの試験実施回数と累積負荷を表2に示す。ブレーキ回数0回時点で転動距離が生じているのは試験準備中に回転させたためである。

3.2 踏面熱き裂の生成

試験前、車輪と軌条輪を軸方向に変位させずに接触させた際の車輪踏面状況を図4 (a)に示す。接触部幅は22mmであった。表2の各ブレーキ回数終了時点における車輪踏面状態を図4 (b) ~ (e)に示す。ブレーキ回数60

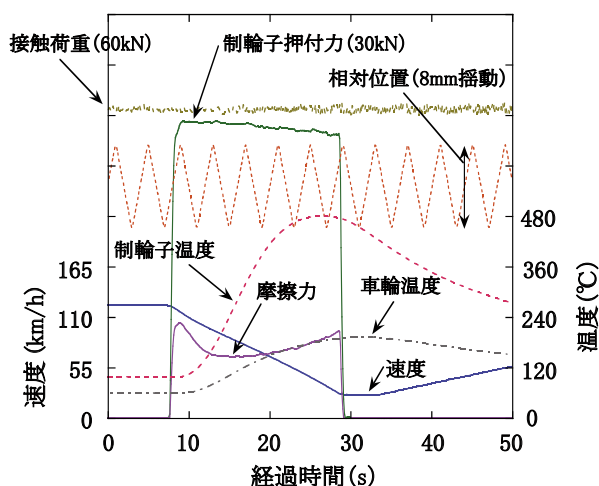


図3 試験機でのブレーキ時のチャート例

表2 ブレーキ動作回数と累積負荷

ブレーキ回数	速度	ブレーキエネルギー (/回)	累積ブレーキエネルギー	累積転動距離	車輪転動回数
(単位)	km/h	MJ	MJ	km	回
0	—	—	—	400	2.0×10^5
5	130 ↓ 30	4.2	21	510	2.5×10^5
20			84	800	4.0×10^5
40			168	1130	5.6×10^5
60			252	1440	7.2×10^5
90			378	1800	9.0×10^5
130			546	2400	1.2×10^6

回時点で微小な踏面熱き裂が見られ、その後ブレーキ回数130回まで順次進展した。ブレーキ動作回数を横軸として、車輪踏面軸方向座標における熱き裂発生部位の推移を制輪子摩擦部位および軌条輪転動部位と合わせて図5に示す。熱き裂の生成を初めて確認したのはブレーキ動作回数60回目であり(図4(c))発生位置は軌条輪接触位置中央付近の軌条輪が揺動変位にかかわらず常に接触する部位であった。その後ブレーキ動作回数90回時点では熱き裂は軌条輪との常時接触部全体に達し、さらに軌条輪が両側に変位した際には一時的に接触しない部位へと進展していた。ブレーキ動作回数110回時点では、熱き裂は接触頻度が最小の部位を含め車輪と軌条輪が接触する範囲全域に進展した。ブレーキ動作回数130回時点でのさらなる進展は見られなかった。ブレーキ動作回数130回時点での車輪走行距離(転動距離)は2400kmであった。

3.3 熱き裂の内部形状

試験後の熱き裂発生部表面および縦断面の蛍光磁粉探傷結果を図6に示す。ほぼ一定間隔で配列した主き裂の他、多数の初期微細き裂が存在する。主き裂は最大深さ約5mmであり、当初鉛直方向に進展し深さ3~4mmにおいて分岐し表面平行方向へと進展している。これらの特徴は現車の踏面熱き裂の形態と符合し、本試験によ

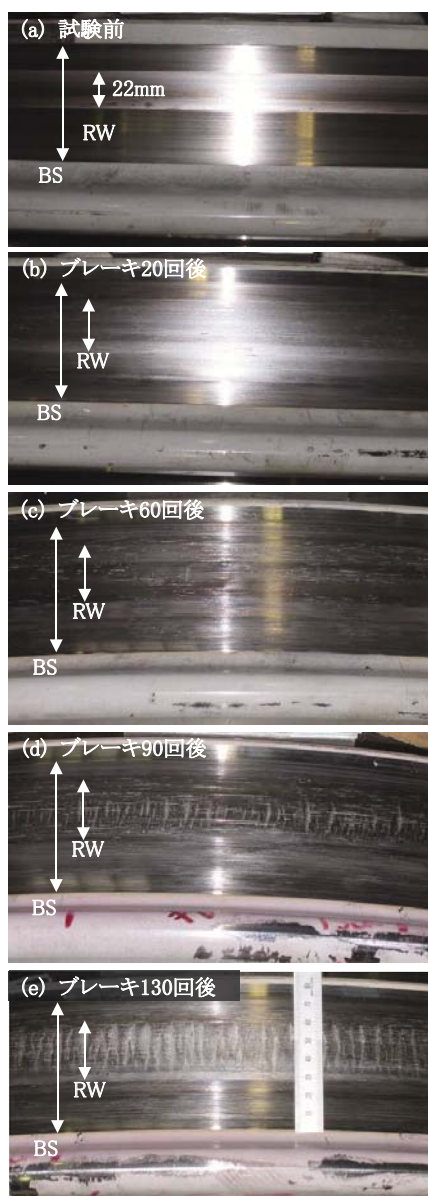


図4 車輪踏面状態の推移 (RW: 軌条輪接触部 BS: 制輪子接触部)

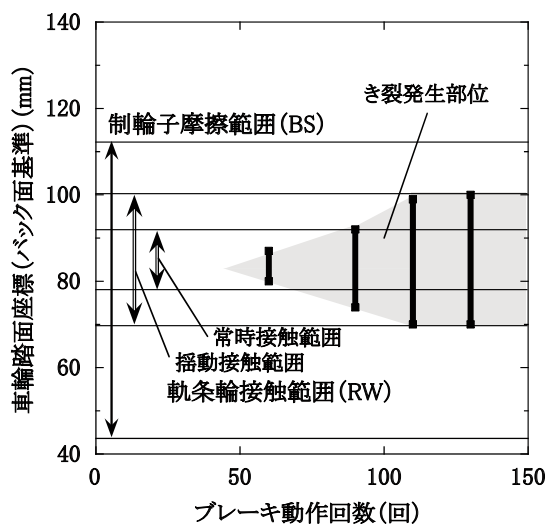


図5 熱き裂の発生部位

特集：材料技術

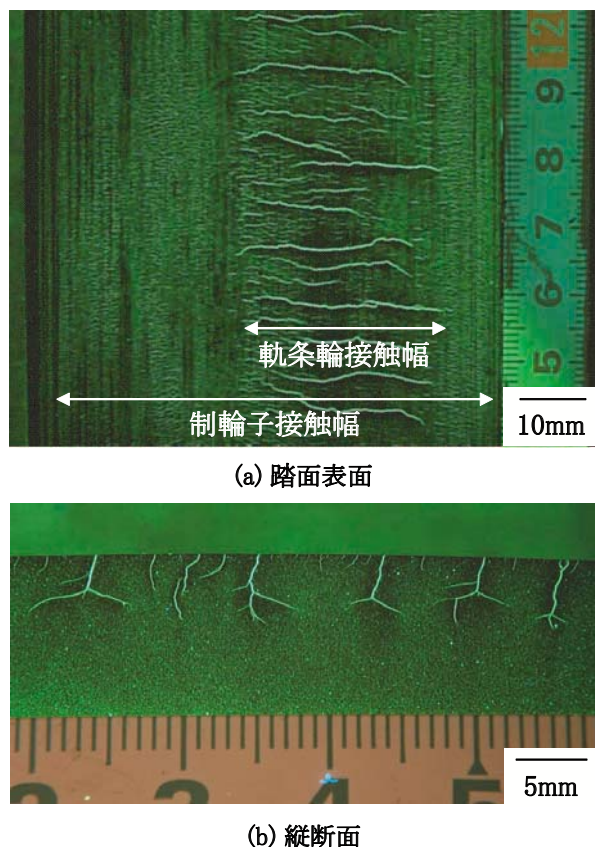


図6 磁粉探傷結果

て実車で生成するものと同様の形態を有する踏面熱き裂が生成したことを確認した。

3.4 踏面形状

同試験の実施中、踏面摩耗（凹摩）が観察された。ブレーキ回数20, 60, 90および130回の各時点における車輪踏面形状の推移を図7に示す。図7の横軸で軌条輪が接触する位置を赤矢印で示す。制輪子は図7下図横軸の全域で接触している。車輪踏面は軌条輪と接触する部位（図7の部位b）でのみ摩耗しており、軌条輪と接触しない部位（図7の部位a）では制輪子との摩擦は部位bと同等に生じているにも関わらず踏面の摩耗は見られない。図8に踏面形状推移の拡大を示す。図8（b）の距離あたりの摩耗率は約0.7mm/10⁴kmに相当し、これは現車の踏面摩耗率を大きく上回る。

3.5 残留応力

車輪リム部には製造時の熱処理により円周方向残留応力が付与されており、これにより表面傷等が発生した場合でも車輪全体が割損する可能性を抑制している。制輪子不緩解等によりリム部が異常加熱されると、この残留応力が圧縮から引張に反転する場合があります、安全確保の観点からこうした車輪は使用できない。残留応力の反転が開始する温度は今回と同様の計測条件において350～400℃程度であ

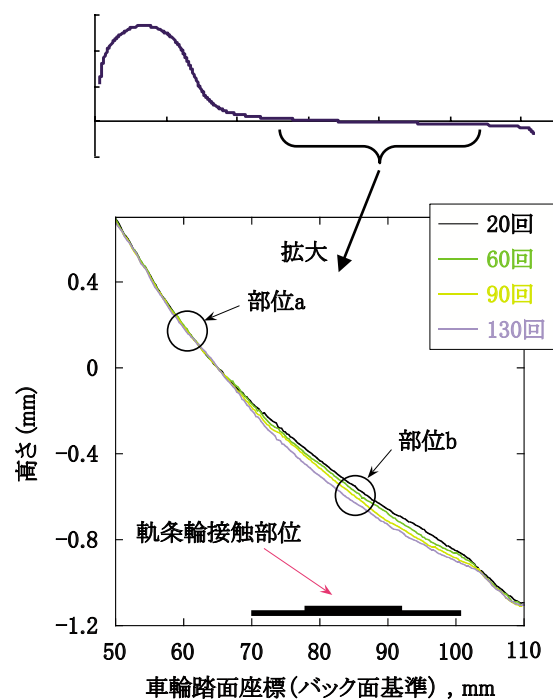
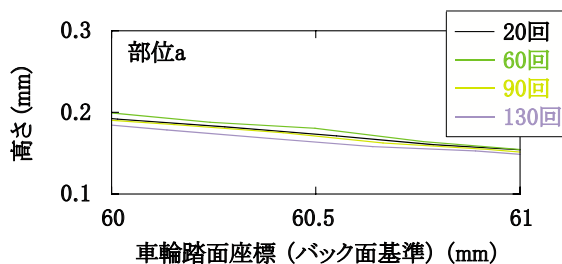
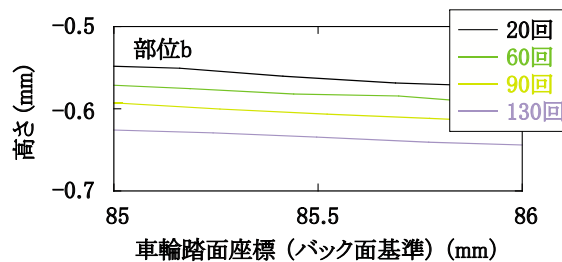


図7 車輪踏面形状



(a) 部位a



(b) 部位b

図8 軌条輪接触部踏面の拡大

り⁵⁾、従って今回の試験では残留応力の反転は想定されませんが、これを確認するため残留応力測定を実施した。

供試車輪き裂発生部および発生部外側における円周方向残留応力の測定結果を図9に示す。き裂発生部外側では深さ100～500 μmにかけて最大約500MPaの引張残留応力が発生しているものの、深さ1000 μm以上では残留応力は100～200MPaの圧縮となっている。き裂発生部では残留応力は全ての測定深さで圧縮であった。これはき裂の生成により表面近傍の引張残留応力が解放されたためと考えられる。深さ1000 μm以上で見られた圧縮残留応力は車輪製造時の熱処理により付与されるリム部

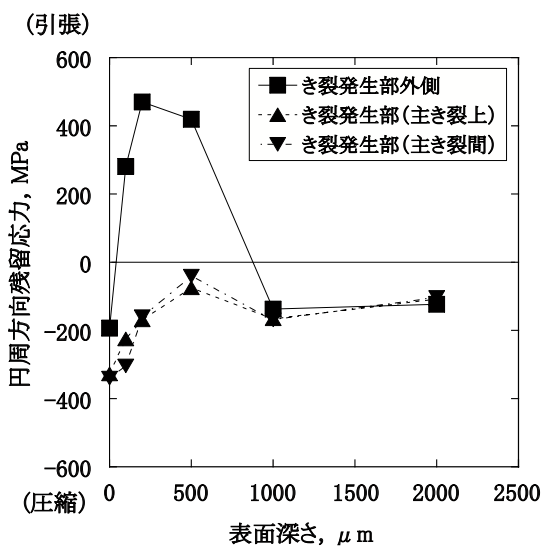


図9 円周方向残留応力の表面深さ依存性

の円周方向圧縮残留応力に対応するものである。

3.6 破面観察

熱き裂の進展過程を調査するため、踏面近傍を強制開口し主き裂の破面を観察した。破面の全体像を図10に示す。破面形態は複雑であり多数の初期き裂が統合して主き裂として進展している。これら破面上の特徴は現車車輪の熱き裂破面²⁾と符合する。初期き裂の起点のひとつを図11 (a) に示す。破面上には疲労き裂の進展痕跡を示すタイヤトラック模様が認められた (図11 (b))。以上より踏面熱き裂は多数の初期微細き裂が合体成長して進展した疲労き裂の一種であることがわかった。

3.7 金属組織

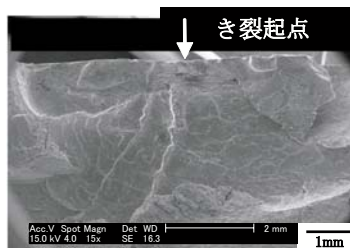
き裂発生部表面近傍の光学顕微鏡組織を図12に示す。表面深さ約100 μm 以上ではSSW-Q3S鋼 (炭素量規格値0.60~0.75%, 実測値0.67%) の標準的なフェライト・パーライト組織であるのに対し、表面近傍では明瞭に組織が変化している。車輪/レールの空転滑走を伴う接触部位では、しばしば白色層と呼ばれる変質組織が観察される^{6, 7)}。中でもレール白色層の金属組織については膨大な研究事例が報告されており⁸⁻¹²⁾、その組織構成と生成条件について多角的な検討が行われている。図12の表面組織はこれら白色層とは異なるものでありこの組織変化の発生原因について現状では断定できないが、組織変化の条件と機構が判明すれば熱き裂発生時の踏面表面近傍に負荷される温度およびひずみ条件等について定量的な知見が得られる可能性がある。

4. 考察

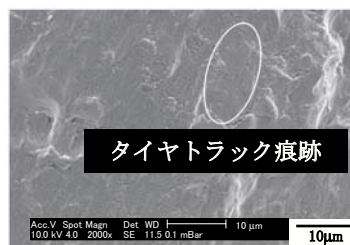
今回の試験では100回以下のブレーキ動作によって踏



図10 き裂の開口破面 (主き裂)



(a) 部位a



(b) 部位b

図11 き裂開口破面の走査型電子顕微鏡像

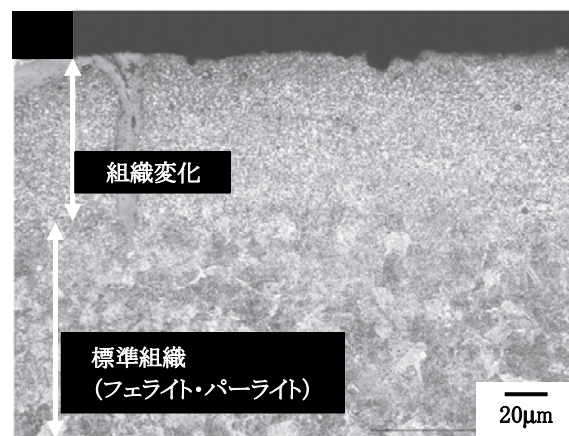


図12 踏面縦断面の金属組織

面熱き裂が生成した。実車において新形式車両導入時等のブレーキ性能試験時、踏面空制のみによる最高速からの非常ブレーキの繰返しによって高々数日間の現車試験で踏面熱き裂が発生する事例があることから、き裂発生までの累積負荷の点でも今回の試験は実車の現象を的確に再現しているものと考えられる。

試験結果より、踏面熱き裂の発生は、制輪子による繰返し入熱とレールとの接触転動の両方が負荷されないと生じない。また熱き裂はレールとの接触頻度の高い部位に優先的に生成し、接触頻度が低い部位へと進展するもののレールと転動しない部位に進展することはない。制輪子により加熱された車輪温度が踏面下10mmにおい

特集：材料技術

て200°C程度であっても踏面熱き裂は生成・進展する。以上より車輪踏面熱き裂の生成および進展に影響する因子の一つはレールと転動した状態でのブレーキによる熱サイクルと考えられる。ブレーキ中の接触転動において車輪にはヘルツ接触圧の他に接線力が負荷されることから、発生機構の解明に向け、これらのうちの負荷因子がき裂生成に影響するか精査することが重要と考えられる。

また今回の結果は、車輪踏面の凹摩が単純に制輪子の摩擦によって車輪踏面が摩耗する現象ではないことを示す。即ち制輪子との摩擦のみでは車輪はほとんど摩耗せず、制輪子との摩擦により車輪踏面の温度が上昇した状態でレールと転動し接触力が作用することにより踏面が摩耗すると解釈できる。事実、車輪と制輪子のみで定置ブレーキ試験では踏面凹摩はほとんど観察されない。凹摩は摩耗と言うよりむしろ踏面の塑性変形による形状変化がその本質である可能性が示唆される。

残留応力によって判定される車輪の安全性に関して、現車で想定される上限に近い負荷の繰返しによって踏面熱き裂が発生した車輪であっても、使用上の安全性には影響がないことを確認した。ただし熱き裂の発生とは別に規定温度を上回る過大熱負荷を受けた場合には、残留応力の反転により安全性に影響することが予想される。

今回の一連の試験により車輪踏面熱き裂の実験的再現に成功したことで、この現象を定量的に解明する可能性が見出された。発生機構の解明のためには踏面表面近傍に負荷される温度および応力条件を検証する必要があることから、今後数値解析や金属組織の詳細調査などの手法によって負荷条件を同定することが必要と考えられる。

5. まとめ

車輪踏面熱き裂発生機構および発生条件の解明とそれによる系統的な対策の確立を念頭に、踏面熱き裂の再現を目的として制輪子および軌条輪を使用した定置試験を実施し、踏面熱き裂を再現生成することができた。供試車輪の調査の結果得られた知見と今後の課題は以下の通りである。

(1) 熱き裂は制輪子による熱入力とレール（軌条輪）との転動接触の両方が負荷された領域にのみ発生した。このことはこれらが熱き裂発生および進展の必要条件であることを示す。今後発生機構の解明に結びつく知見を得るためには今回用いた手法により熱き裂の発生条件および影響因子を検証することが必要である。

(2) 実車で想定される上限に近い負荷の繰返しによって熱き裂が生成した車輪であっても車輪リム部の円周方向残留応力は圧縮に保たれており、車輪としての安全性は確保されていた。このことは熱き裂が発生した車輪で

あっても使用上限温度を超える熱負荷がなければ安全性に影響がないことを示すと同時に、使用上限温度以下であっても踏面熱き裂が発生しうることを示す。

(3) 踏面表面近傍では車輪鋼の金属組織が製造時の状態から大幅に変化していることが確認された。この組織はレール表面等でしばしば観察される白色層とは明らかに異なり、組織の構成および組織変化の発現条件は現状では断定できない。今後車輪表面の実働時の負荷条件に関する知見を得るためにはこの組織変化の機構を金属学的見地から調査することが必要である。

(4) 車輪踏面摩耗（凹摩）が観察された。車輪踏面の凹摩は、単純に制輪子の摩擦によって車輪踏面が摩耗する現象ではないことが確認された。踏面の凹摩は温度が上昇した状態での車輪表面の塑性変形によって生じる現象である可能性が示唆された。

文献

- 1) 広重巖：輪軸，交友社，p.329, 1971
- 2) J. Swaay, "The mechanism of thermal cracking in railway wheels", Proc. 3rd Int. Wheelset Conference, p8-1, 1969
- 3) K. Handa, et. al, "Surface cracks initiation on carbon steel railway wheels under concurrent load of continuous rolling contact and cyclic frictional heat," *Wear*, Vol. 268, pp.50-58, 2010.
- 4) 木川武彦：鉄道車輪のフラットの生成ならびに剥離に関する研究，鉄道総研報告特別号，Vol.1, pp.19, 1995
- 5) 木川武彦 他：鉄道車両のブレーキ技術(6)，機械の研究，Vol.49, No. 2, pp.69-75, 1997
- 6) S.B. Newcomb, et. al., "A transmission electron microscopy study of the white-etching layer on a rail head", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 66, pp.195-204, 1984.
- 7) A. Ekberg, et. al., "Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading - an overview", *Wear*, Vol. 258, pp.1288-1300, 2005.
- 8) G. Baumann, et. al., "Formation of white-etching layers on rail treads", *Wear*, Vol. 191, pp.133-140, 1996.
- 9) W. Österle, et. al., "Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electron microscopy, X-ray and synchrotron X-ray diffraction", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 303, pp.150-157, 2001.
- 10) W. Lojkowski, et. al., "Nanostructure formation on the surface of railway tracks", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 303, pp.197-208, 2001.
- 11) H.W. Zhang, et. al., "Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 421, pp.191-199, 2006.
- 12) R.I. Carroll, et. al., "Rolling contact fatigue of white etching layer", *Wear*, Vol. 262, pp.1253-1273, 2007.