

S8-1-7

車輪踏面熱亀裂の生成に影響する因子の検討

○ 半田 和行 小原 孝則 宮内 瞳 富 (財) 鉄道総合技術研究所
西村 浩一 (東海旅客鉄道 (株))

Investigation of Factors affecting Thermal Crack Initiation on Wheel Tread

Kazuyuki Handa, Takanori Obara, Toru Miyauchi (Railway Technical Research Institute)
Koichi Nishimura (Central Japan Railway Company)

Thermal cracks on tread of a new wheel initiated on a stationary bench-test machine. Having rolled rail wheels and actual wheels, and applied stop brakes repeatedly. Thermal cracks initiated after wheel rolling equivalent to a running distance less than 1500 km. The factors affecting mainly initiation of thermal crack are considered to be braking heat cycle and the frequency of rolling contact with rail. Identification of thermal crack initiating mechanism and countermeasures therefore will be set forward hereafter.

キーワード：車輪、踏面、熱亀裂、制輪子

Keyword: wheel, tread, thermal crack, brake shoe

1. はじめに

近年の在来線車両の車輪使用状況として、ABS 装備によるフラット発生頻度の減少・踏面形状変更と軸箱支持剛性の最適化によるフランジ直摩の減少が顕著である。こうした中、車輪踏面の凹摩・踏面熱亀裂の発生等が相対的に大きな課題となりつつある。特に踏面熱亀裂は亀裂が踏面内部に進展しているため転削量を増加せざるを得ず、車輪寿命を著しく縮減する原因となる場合が多い。

車輪踏面熱亀裂は国内外を問わず多くの車種で発生している。現象的には、電制ブレーキ力の最大限の活用 (T車優先遅れ込め制御) を前提として空制補足時の踏面ブレーキ力のディスクブレーキ軸への移転⁽¹⁾ (空制T車優先制御等と呼ばれる) や制輪子の材質改良 (車輪との接触の均一化による車輪局部過熱の防止) 等の対策が一定の効果を示しているものの、根本的には解決していない。

抜本的な対策を検討するには車輪踏面熱亀裂が発生するメカニズムについて検証する必要がある。しかしこの点について系統的な考察が行われた事例は極めて少ない。唯一オランダ国鉄の Swaay が踏面近傍に作用する引張圧縮ヒステリシス曲線を仮定して熱亀裂発生メカニズムを提唱している⁽²⁾⁽³⁾ が、多くの仮定に基づく定性的な推論であり、実験による検証は行われていない。

現在までのところ、車輪踏面熱亀裂の生成が実証的に解明された事例はない⁽⁴⁾。即ち、負荷条件の制御された定置試験において車輪踏面熱亀裂を発生させることに成功した事例は国内外を問わず存在しない。このため、上記メカニ

ズムの検証はもとより、発生機構に立脚した対策検討が行われていない。

本稿では、車輪踏面熱亀裂生成メカニズム同定とそれによる対策策定のための基礎的な知見を得るために実施した車輪踏面熱亀裂生成再現試験の結果を報告し、得られた知見について述べる。

2. 実験方法

実体車輪もしくは車輪を模擬した円盤と制輪子による台上摩擦試験 (いわゆるブレーキ試験) では、摩擦熱による亀裂はしばしば発生する (図1 (b)) もの、実車で見られる車輪踏面熱亀裂 (図1 (a)) が生じた事例はない⁽⁴⁾。また、極めて重軸重の場合を除き、制輪子の影響のない車両では現実的な車両運用期間内で踏面に亀裂が発生する事例は認められない⁽⁴⁾。

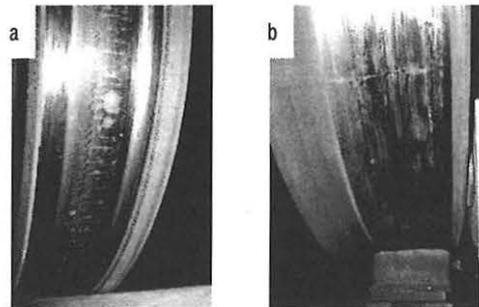


図1 車輪踏面に生じる亀裂 (a) 実車の踏面熱亀裂 (b) 定置ブレーキ試験で生じる亀裂

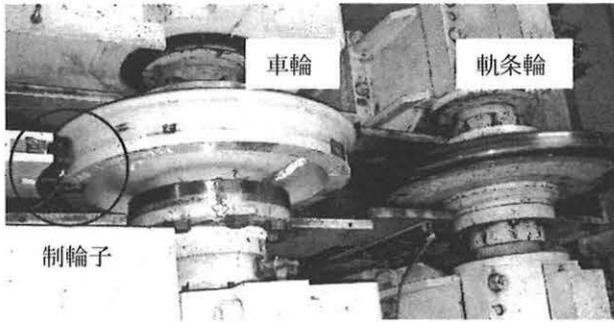


図2 試験に使用した粘着測定ユニットの構成

本研究では、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て車輪踏面熱亀裂生成再現試験を行った。試験装置の構成を図2に示す。同試験装置の特徴は以下の通りである。

- ・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）を押付できる
- ・車輪と軌条輪の軸方向相対位置を制御できる

今回は、第一段階として熱亀裂の生成自体を目的に試験条件を設定した。熱亀裂の生成には昇降温サイクルとヘルツ接触圧が影響していると考えられるため、その双方を比較的高負荷に設定した。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／

表1. 試験条件

車輪種別	φ810mm B型 一体 (新品)
車輪材質	SSW-Q3S
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)	60kN
相対変位	三角波、揺動振幅 8mm 揺動周波数 0.25Hz
制輪子	焼結合金制輪子 MS504
制輪子押付力	30kN
ブレーキ種別	減速
ブレーキ速度	130km/h→30km/h
運転パターン	回転 (130km/h) →ブレーキ・減速～30km/h →増速～130km/h →車輪冷却待ち (130km/h) →ブレーキ・減速 → (以下繰り返し)
ブレーキ開始温度	60℃ (車輪踏面下 10mm)

車輪間で巨視すべりは生じなかった。

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。一部については染色浸透探傷を行った。

3. 実験結果

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 であり、車輪・軌条輪双方の接触部を円筒形状と仮定すると静止時の最大ヘルツ圧⁽⁵⁾は約 650MPa である。

3.1 ブレーキ動作時の挙動

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)の部位から上 (リム側) に 6mm、下 (フランジ側) に 2mm 三角波で変位させた。輪重はほぼ 60kN で安定していた。車輪温度は最大で 200℃ (温度上昇 140℃) 程度であった。初回のブレーキ動作から最終回のブレーキ動作まで計測データ上顕著な変化はなかった。

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ものである。

3.2 車輪踏面状態の推移

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に示す。ブレーキ回数 60 回時点で微小な踏面熱亀裂が見られ、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亀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。

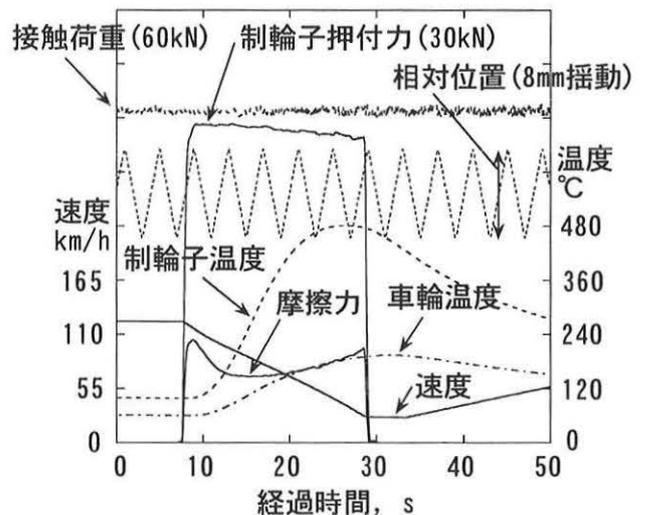


図3. 試験機でのブレーキ時のチャート例

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	
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

熱亀裂の生成を初めて確認したのはブレーキ動作回数 60 回目である (図 4 (c))。亀裂発生位置は軌条輪接触位置の中央付近であり、軌条輪の接触位置揺動にかかわらず軌条輪が常に接触する部位であった。その後ブレーキ動作回数 90 回時点では熱亀裂は軌条輪との常時接触部位全体に達し、さらに軌条輪がリム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 回時点では熱亀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。

以上の結果から、今回の試験における熱亀裂の発生および進展過程について以下のようにまとめられる。

車輪踏面熱亀裂は、制輪子による繰り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。また熱亀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。接触部全域に進展したのちレールと転動しない部位に進展することはない。制輪子による車輪温度上昇が踏面下 10mm において 150℃ 程度であっても踏面熱亀裂は生成・進展する。レールとの接触転動状態で繰り返しブレーキを動作すると走行距離 1500km 未満で熱亀裂は生成する。従って車輪踏面熱亀裂の生成および進展に大きく影響する因子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。

3.3 車輪踏面形状の推移

ブレーキ動作回数 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 6 に示す。図 6 の横軸で軌条輪が接触する位置が矢印で示されている。軌条輪接触部位のなかで中央部の太線部が軌条輪が常時接触する部位であり、両側の細線部が軌条輪が間欠的に接触する部位である。制輪子は図 6 下図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 6 の部位 b) でのみ摩擦している。軌条輪と接触しない部位 (図 6 の部位 a) では制輪子との

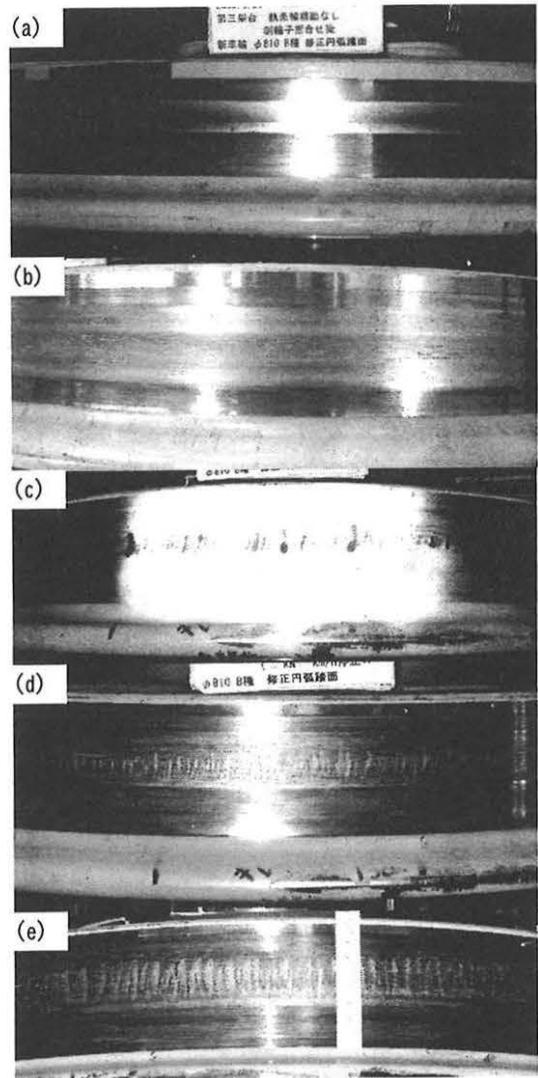


図 4 車輪踏面状態の推移 (a) 試験前 (b) 20 回後 (c) 60 回後 (d) 90 回後 (e) 130 回後

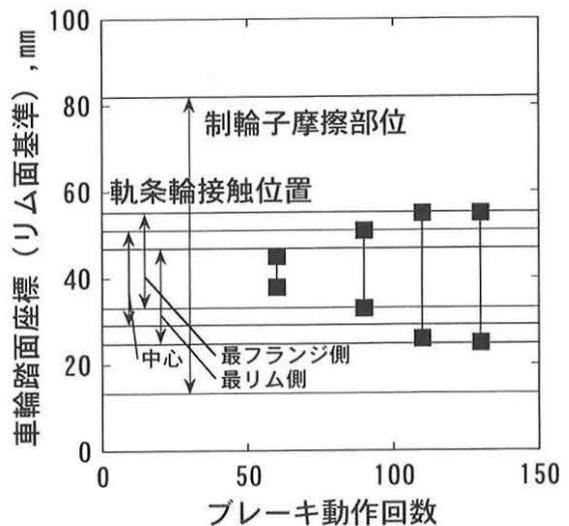


図 5. 熱亀裂の発生部位

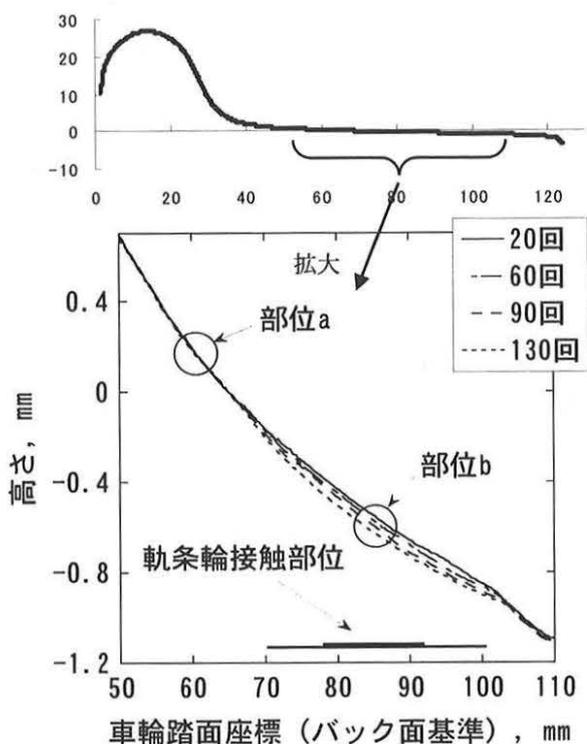


図6. 車輪踏面形状の部分拡大

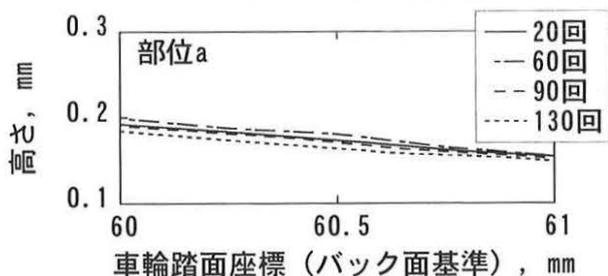


図7. 軌条輪非接触部踏面の拡大

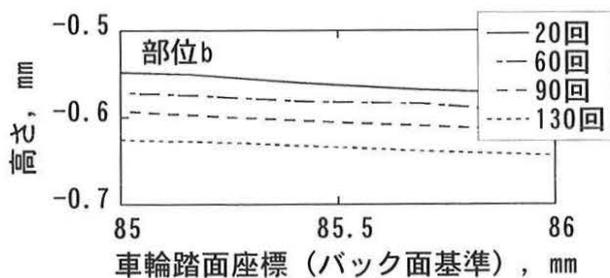


図8. 軌条輪接触部踏面の拡大

摩擦は軌条輪接触部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7、8に双方の踏面形状推移の拡大を示す。図6-8より軌条輪の接触と踏面の摩耗に相関があることが明らかである。

以上の結果から下記のような車輪踏面凹摩耗形成メカニズムが推定される。

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のではなく、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することにより踏面が摩耗する現象である。これは、車輪と制輪子のみの定置ブレーキ試験で踏面凹摩がほとんど観察されない事実と符合する。また凹摩はレールとの接触頻度が高い部位で顕著に発生した。従っていわゆる車輪踏面の摩耗形状は車輪が高温となった状態におけるレールとの接触頻度履歴を示すものであると考えられる。

ここで推論した踏面凹摩形成メカニズムにおいて、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である。このメカニズムに従えば、凹摩発生部位の車輪表面が、しばしば擦過痕や凝着痕が皆無で鏡面化した状態である事実は容易に理解される。また同様に、在来線の制輪子使用車輪でいわゆる「リムだれ」が見られるのに対し、より軸重が大きく転削周期の長い新幹線車両ではほとんど見られない事実も、順当な帰結と考えられる。

4. まとめ

本研究により得られた知見は以下の通りである。

- (1) 車輪踏面熱亀裂のベンチ試験による再現生成に初めて成功した。これにより実車を使用せずに対策策定や効果の定量的検証等を実施することが可能となると考えられる。
- (2) 車輪踏面熱亀裂の生成に寄与する因子を推定した。車輪踏面熱亀裂は制輪子の摩擦による昇降温サイクルと、レールとの転動が負荷される場合に生じる。車輪踏面熱亀裂は単純な低サイクル熱疲労とも、単純な転がり疲れとも異なる現象であると考えられる。
- (3) 車輪踏面摩耗(凹摩)の発生に寄与する因子を推定した。凹摩は本質的に、制輪子との摩擦による摩耗ではなく高温時のレールとの転動による塑性変形である可能性を示した。

今後、実使用車輪との比較や材料的分析を含めさらに検証を深度化し、踏面熱亀裂生成メカニズムの同定および発生条件の定量的解明を進める予定である。

文献

- (1) 吉本英三郎 他, 車両技術, 226, pp.27, 2003 など
- (2) J. L. Van Swaay, Proc. 3rd Int. Wheelset Conference, pp. 8-1, 1969
- (3) J. L. Van Swaay, Proc. Int. Conf. on Railway Braking, I mech E Conf. Pub. 1979-11, pp.95, 1979
- (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, 1995
- (5) S. P. Timoshenko et al., Theory of Elasticity, p414, 1970