

# 車輪踏面熱き裂の発生メカニズムと判定手法

材料技術研究部

主任研究員 柿嶋 秀史

## 1. はじめに

車輪踏面熱き裂は、在来線の踏面ブレーキ使用車両の一部において、車輪踏面の全周にわたり数 mm～数十 mm の間隔で枕木方向に生成・進展する梯子状の表面き裂である。図 1 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ないことから車輪使用寿命を著しく短縮させる原因となっており、踏面の摩耗による形状変化（踏面凹摩耗）と並んで在来線車両の車輪管理上主要な課題となっている。

しかしながら、踏面熱き裂がどのような外部負荷を原因として発生するか（発生メカニズム）は未解明であり、外部負荷がどの程度となった場合に発生するか（発生条件）も不明である。このため踏面熱き裂を回避するための具体的な車両設計条件の算出法は確立されておらず、車両開発時点で踏面熱き裂の発生可能性を推定することは困難である。こうしたことから、踏面熱き裂の発生は車両が実運用に投入されてから車両検修サイドによって発見・認識される場合が多く、メンテナンス負荷の増大や、場合によっては車両入場時期の前倒し（法定検査周期までの期間が残存しているにも関わらず車両を検査入場させる）等の原因となっている。

本報では以上を踏まえ、車輪踏面熱き裂を再現生成した台上試験に関して、踏面熱き裂が発生する負荷条件による車輪内部の応力および温度条件を推定するために実施した材料調査および数値解析の結果について述べる。これらの結果に基づいて踏面熱き裂の発生機構に関する仮説を設定し、これを検証するために実施した実物車輪を用いた試験の結果と、それにより得られた発生機構について述べる。最後にこれらの成果を総合し、踏面熱き裂の発生条件について車両諸元と対応した算出手法を記述し、各種対策と実車の車両諸元に対応する踏面熱き裂の発生限界の例を示す。

## 2. 熱き裂の発生に影響する温度および応力状態

踏面熱き裂を台上試験で再現生成させたが、こうした台上試験には多大な時間と工数を要するため、試験条件を網羅的に設定して発生に影響しうる条件を台上試験によって検証することは困難である。そこで熱き裂の発生に影響する温度および応力条件を検討し、これに基づいて特定条件での検証試験を実施することとした。

き裂発生部表面（図 2）近傍の金属組織の詳細な調査を行った結果、この組織はパーライトを構成するセメンタイトが変形（強加工）により球状化するとともに、生成した転位の移動によってフェライトの特殊な結晶粒界（小角亜粒界）が形成することによって生成したものであり、この組



図 1 実車の車輪踏面熱き裂

織変化は連続動的再結晶と呼ばれる特殊な現象によるものであることを見出した。そしてこの現象の発現が想定される負荷条件は温度 500~600℃程度であると推定された (図 3)。

次に熱き裂発生時の温度および応力状態についての知見を得るため有限要素法による温度および応力解析を実施した。解析には車輪断面の二次元有限要素モデルを用い、台上試験時の負荷条件を考慮して解析条件を設定した。解析モデルの形状は 860-B 一体圧延車輪である。車輪/制輪子の接触範囲を図面上の見かけ幅 (約 80mm) の 50%とした場合の車輪最高温度の発生時点での温度分布を図 4 に示す。最高温度は 585℃であった。前述の材料組織の調査結果および試験時の赤外線画像装置の映像から判断して、実働環境では見かけ幅の 50%程度の接触が生じていることが考えられる。この条件でのブレーキ動作時および冷却後の車輪表面近傍の円周方向応力-ひずみ挙動を算出したところ、冷却後に発生する引張残留応力  $\sigma_{tf}$  は最高温度の関数として記述され、その際の引張残留応力の発生臨界温度値は実験的手法により従来同定されていた引張残留応力の発生開始温度である 350~400℃と一致した。

### 3. 踏面熱き裂の発生機構

踏面熱き裂の発生機構について検証するため、踏面上に発生する外部負荷を整理し、踏面熱き裂の生成と進展に影響する外部負荷は①踏面からの摩擦熱による熱応力 (残留応力) および②車輪/レール間での駆動力の伝達に伴う接線力 (図 5) であると仮定し、実物車輪を使用して検証試験を実施した。

検証試験では図 6 に示す摩擦面を機械加工した制輪子を用い、車輪踏面上の一部に熱負荷による残留応力を発生させ、その後同部位に接線力を作用させた。その際制輪子はいずれも熱負荷は与えなかった。また輪重は乾燥時に滑走が生じない限界に近い軽輪重 (30kN) とした。これにより、上記①および②のみによる熱き裂の生成の有無を検証した。

この結果、負荷回数が 60 回時点で接線力を負荷した領域の中央付近に微小な表面き裂が全周に見られた。このき裂は負荷回数とともに徐々に進展し、負荷回数が 120 回時点では明瞭な全周き裂として確認された。さらに試験終了時点の負荷回数が 160 回時点では接線力負荷部の幅約 20mm の領域にわたり踏面全周にき裂が観察され (図 7) き裂の表面深さが大きいことを示す探傷液による多量の染色が見られた。このことは、発生したき裂が負荷回数とともに進展したことを示すと考えられる。一方、接線力の負荷のない領域にはき裂は生じなかった。

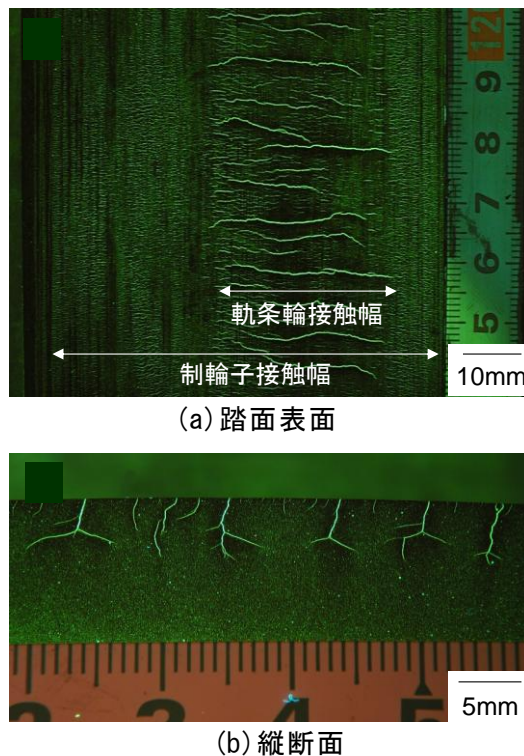


図 2 車輪踏面熱き裂の形態

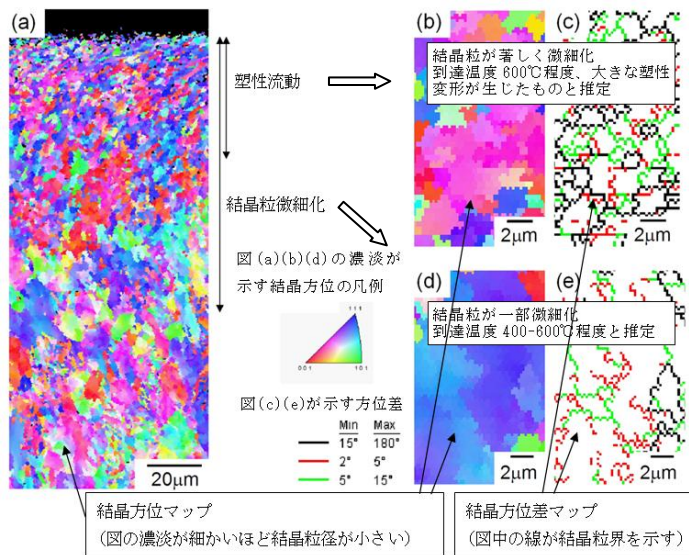


図3 表面近傍組織の結晶粒分布と温度負荷

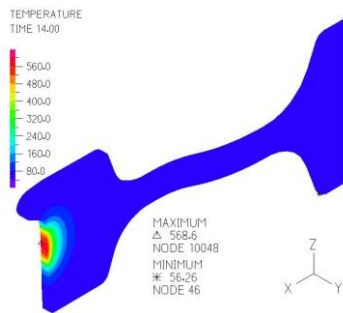


図4 踏面ブレーキ時の車輪内部温度分布

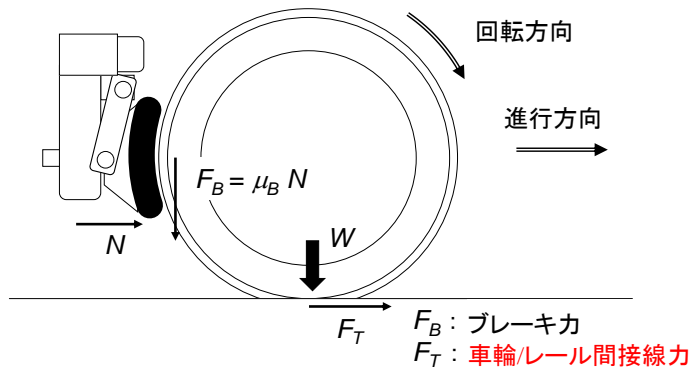


図5 車輪/レール間接線力

この試験条件は、熱き裂の発生に及ぼす接線力の影響を明らかにするものではあるが、今回と同様の負荷によって実車での熱き裂が発生しているのではなく、熱き裂の発生は今回の発生条件が満たされる以前の段階で、温度上昇時の材料物性の下でのき裂発生条件が満たされたときに既に発生しているものと考えられる。

#### 4. 踏面熱き裂の発生限界

今回明らかになった踏面熱き裂の発生因子である「残留応力」と「接線力」によって発生する応力値を算出し、これを車輪鋼の疲労限および降伏応力と照合することで、き裂発生の指標を求めた。さらに、車輪踏面に発生する残留応力はブレーキ時の車輪の最高温度の関数であり、最大

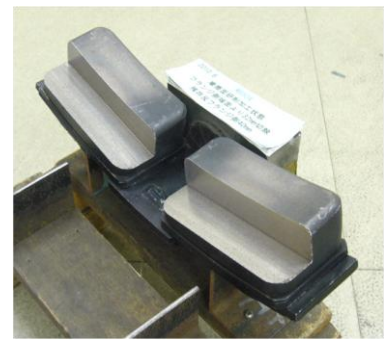


図6 試験制輪子の摩擦面加工状態

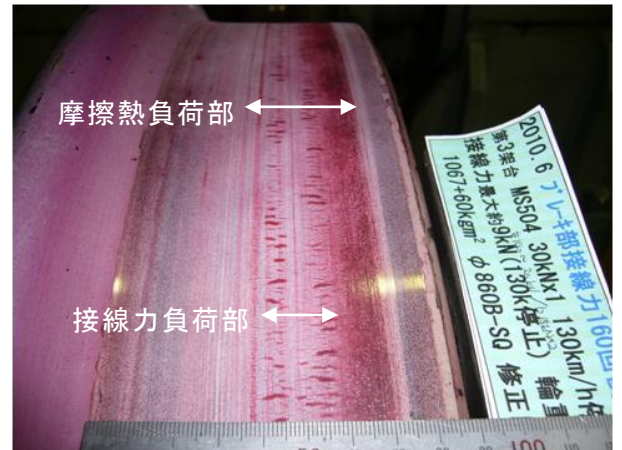


図7 試験後の車輪踏面状態

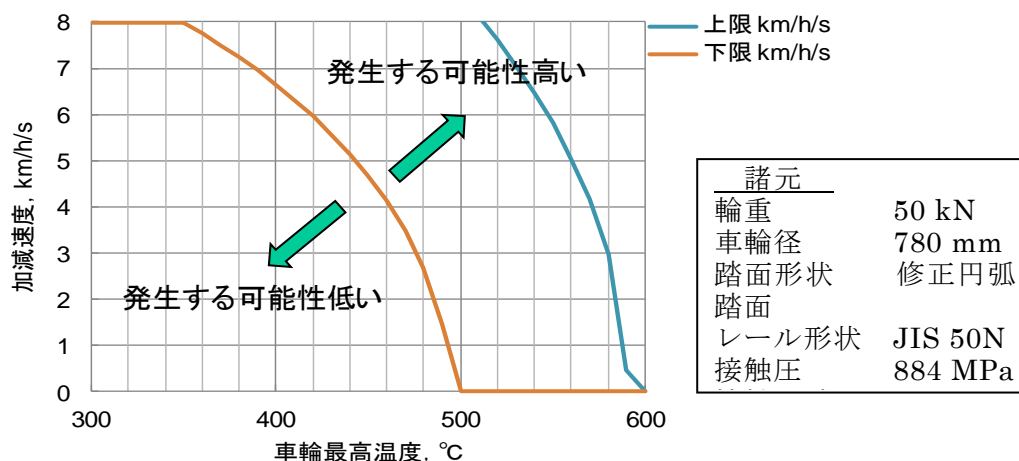


図8 車輪踏面熱き裂発生限度線図の例

接線力は車輪／レールのヘルツ接触条件が定めれば車両の加減速度と比例することから、踏面熱き裂の発生限界線図を「車両減速度」と「車輪最高温度」の関数として表示した。踏面熱き裂の発生限度線図の例を図8に示す。

## 5. 踏面熱き裂の発生条件と対策

発生限界線図を用いることで、踏面熱き裂に及ぼす各種因子の影響を把握し、対策を検討することができる。踏面熱き裂対策は、発生限度線図上でのプロット位置を左下方向に移すことと、発生限度自体を右上方向に変更することの2通りの手法が考えられる。

最も古典的な方法は、踏面制輪子の材質を変更し車輪の最大温度を低下させる方法である。固体同士の摩擦面は全体が均一に接触することはなく局所的な接触が生じることから、この接触スポットをなるべく大きくすることで最高温度を低下させることができる。このためには理論上、①発生熱量を下げる、②摩耗率を上げる、③摩擦係数を下げる、④弾性係数を下げる、ことが必要であり、実用上は②や④の手段が取られる。ただし制輪子／車輪の局所接触は、湿潤時の摩擦係数の低下を抑えるためには必要であることに注意が必要である。

また空気ブレーキ力の電動車（M車）（踏面ブレーキ車両）から付随車（T車）（ディスクブレーキ車両）への移転、主回路設計の変更による発電ブレーキ装置の装備等によって踏面ブレーキの負荷自体を低減する対策も行われている。特に前者は発生限度線図の上では条件を左下にシフトさせることに相当することから特に有効と言える。

今回開発した手法は、車輪の強度データを元に算出しており、車輪の材質変更による熱き裂への影響についても検討することができる。

## 6. まとめ

車輪踏面熱き裂は、従来は車両が実運用に投入されてから発見される検修サイドの問題であったが、本手法の構築により、車両の設計時点でその発生可能性や回避方策を定量的に検討することが可能となった。またき裂が発生する車種における対策の検討においてもより定量的なアプローチが可能となった。本手法を適用することで車両ライフサイクルコスト管理の高精度化と、さらなる安全安定輸送の推進が期待される。なお本手法はすでに一部の車両の設計過程で活用されている。