

車輪踏面熱き裂の発生メカニズムと対策法

半田 和行* 森本 文子* 深貝 晋也* 柿嶋 秀史*

Mechanism and Countermeasure of Wheel Tread Thermal Cracking

Kazuyuki HANDA Fumiko MORIMOTO Shinya FUKAGAI Hideshi KAKISHIMA

Focusing on the durability of railway wheels, tread thermal cracking, one of severe damages on the tread surface, was investigated to understand its mechanism and to develop the countermeasures against thereto. We have conducted a combination of full-scale dynamometer experiments, numerical analysis and material investigation in order to form a hypothesis about the cracking mechanism. Based on it, we carried out a series of hypothesis verification experiments. As a result, we have clarified that the main cause of tread thermal cracking is residual stress induced by tread braking and wheel/rail tangential force. The criteria of thermal cracking can be calculated as a function of wheel maximum temperature and equivalent tangential force corresponding to the vehicle acceleration/deceleration on the basis of vehicle specifications.

キーワード：車輪，踏面，制輪子，熱き裂，残留応力，接線力

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の間隔で車軸方向に生成・進展する梯子状の表面き裂である¹⁾。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。

現在までのところ、踏面熱き裂の対策として主に踏面制輪子による車輪踏面への熱負荷の低減のため、制輪子の材質変更、空気ブレーキ力の電動（M）車（踏面ブレーキ車両）から付随（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の対策がとられている例があり、一定の効果上げている。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²⁾。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。

本報告では以上を踏まえ、まず前報³⁾で報告した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

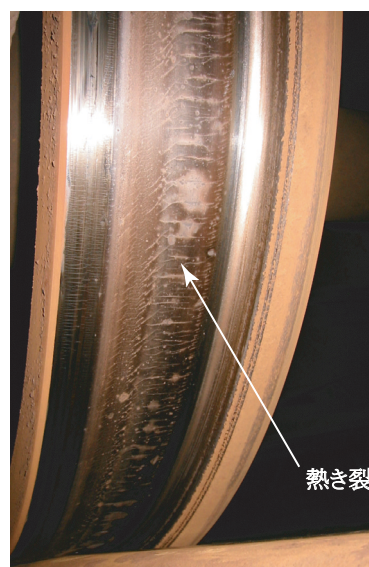


図1 実車の車輪踏面熱き裂の例

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

特集：材料技術

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について記述する。

2. 材料調査による温度条件等の推定

き裂発生部表面（図2）近傍の金属組織³⁾の詳細な調査を行った⁴⁾結果、この組織はパーライトを構成するセメントイトが変形（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⁵⁾。この現象の発現が想定される負荷条件は温度500～600℃程度であり、表面近傍で大きな塑性加工が生じていると推定された（図3）。

3. 車輪温度および応力の数値解析

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。この解析の目的は、材料調査により推定された車輪踏面近傍の温度（500～600℃程度）に基づき、車輪と制輪子が見かけの接触面全体で均一に接触しているか否かについて知見を得ること、および制輪子による温度負荷のみによって車輪に発生する残留応力状態を解明することである。

解析には車輪断面の二次元有限要素モデルを用い、前報³⁾で述べた試験時の負荷条件を考慮して解析条件を設

定した。解析モデルの準拋形状は860-B一体圧延車輪である。前報³⁾での試験条件に準拠した負荷条件下で車輪／制輪子の接触範囲を図面上の見かけの領域全体とした場合（ケース1）と、図面上の見かけ幅（約80mm）の50%とした場合（ケース2）の車輪最高温度発生時点での温度分布を図4に示す。最高温度はケース1が340℃、ケース2が585℃であった。前章での材料組織調査結果および試験時の赤外線画像装置映像から判断して、実働時には500～600℃程度の温度負荷が生じていると推定

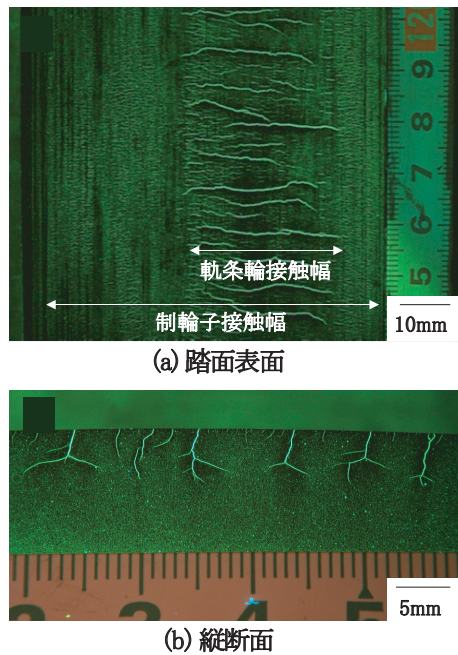


図2 車輪踏面熱き裂の形態³⁾

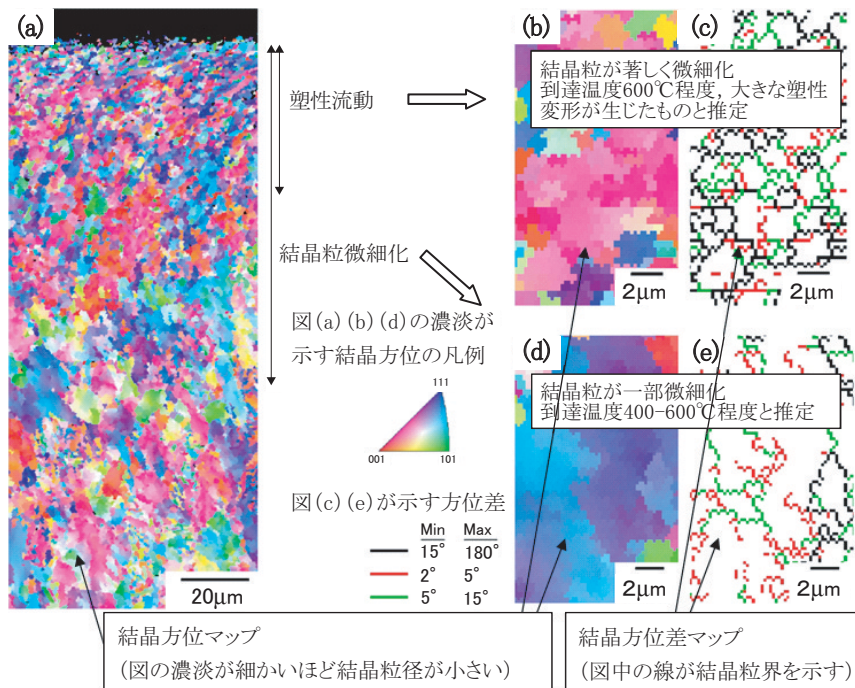


図3 表面近傍組織の結晶粒分布と推定温度負荷

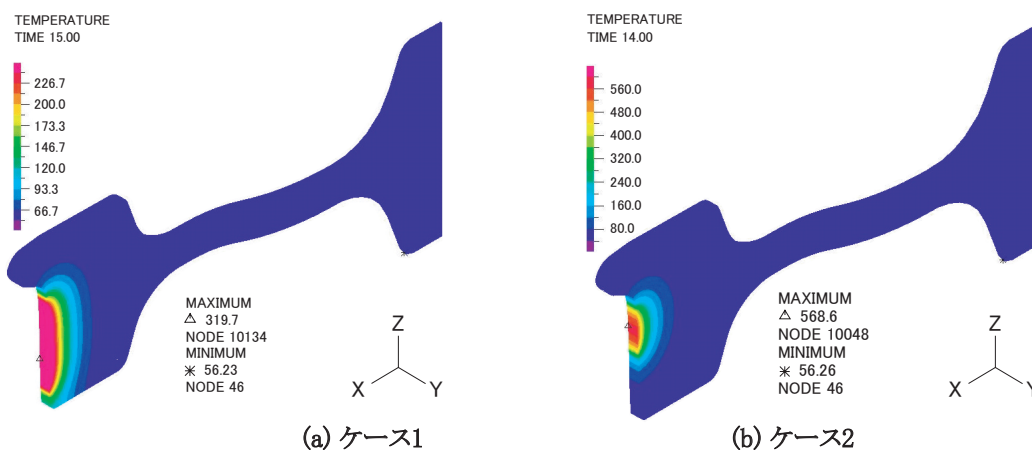


図4 踏面ブレーキ時の車輪内部温度分布

され、従っ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と考えられる。そこで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。

この条件では、温度上昇に伴って変形が拘束された条件下で温度上昇領域が熱膨張するため円周方向の圧縮熱応力が発生し、この圧縮応力が当該温度における材料の降伏点に達すると圧縮方向の塑性変形が生じる。ブレーキが終了し温度が低下すると当該領域が熱収縮するため、応力およびひずみが低下し、最終的に常温まで低下した段階では引張応力が残留する。このような熱応力に伴う弾塑性ヒステリシス挙動による引張残留応力の発生は、車輪に限らずブレーキディスク等においてもしばしば発生する事象である。ブレーキ中における最大ひずみ値は概ね到達最高温度に対して一次線形で増加すると考えられることから、冷却後に発生する引張残留応力 σ_{if} は最高温度の関数として概ね以下により記述できると考えられる。

$$\sigma_{if} = S(T_{bmax} - T_{trss})$$

但し σ_{if} : 引張残留応力 S : 応力係数 T_{bmax} : 最高到達温度 T_{trss} : 引張残留応力発生臨界温度

ケース1および2の解析結果から、今回の条件の場合では $S=2.3$ MPa/K, $T_{trss}=350^\circ\text{C}$ と算定された。なおこの T_{trss} 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発生開始温度である $350\sim 400^\circ\text{C}$ ⁶⁾と一致している。

4. 踏面熱き裂の発生機構と発生条件

踏面熱き裂は、前章で述べた円周方向引張残留応力を含む車輪への外部負荷が原因となって発生・進展していると推定された。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であると仮定した。この仮説が妥当か否かは、両者の負荷のみによって実際に熱き裂が生成するか否かによって検証することができる。そこで実物車輪を使用して仮説検証試験を実施した。さらにこの結果に基づき、踏面熱き裂の発生機構と発生条件について検討した。

4.1 試験方法

本試験では、前報³⁾の試験での負荷因子のうち何が熱き裂の主要因かを明確に把握するため、実車輪を使用して制輪子による車輪への入熱後の接線力の作用による熱き裂生成への影響を検証した。これは、熱負荷に起因して生じる残留応力場に対して、その都度接線力を負荷した場合の応答を検証するものである。仮に熱き裂の発生原因が「残留応力」と「接線力」であるとすればこの試験によって熱き裂の生成が観察されることが予想される。「熱負荷(残留応力)」「接線力負荷」はいずれも在来線で想定される上限に近い条件を設定した。

4.1.1 試験装置

試験には前報と同様、ブレーキ性能試験機粘着測定ユニットを使用した。

4.1.2 試験条件

試験は実物車輪を使用し、前報で用いたものと同材質の制輪子を使用した。制輪子は摩擦面をフライス加工して本来幅72mmのうちリム側40mmを残してフランジ側32mmを除去した(図5, 6)。熱入力負荷は、この幅40mmの摩擦部を車輪と接触させ初速130km/hから制輪子押付力30kNで停止ブレーキを作用させた。その際、車輪を軌条輪と転動させるため(装置構成上、軌条輪と転動しなければ車輪は回転不可能であり、ブレーキ時の慣性質量を与えるためにも軌条輪を従動させる必要がある)、車輪踏面上の制輪子と摩擦しない部位で軌条輪と転動させた。この状態で停止ブレーキを作用させ、車輪

特集：材料技術

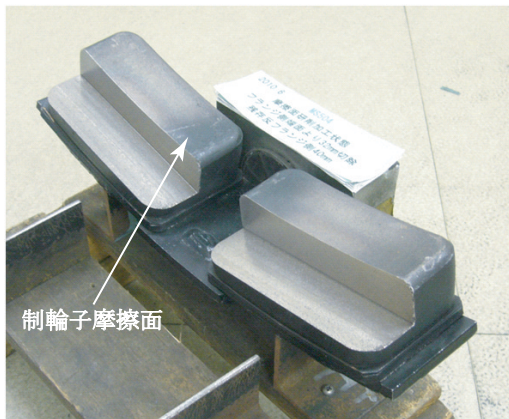


図5 試験制輪子の摩擦面加工状態

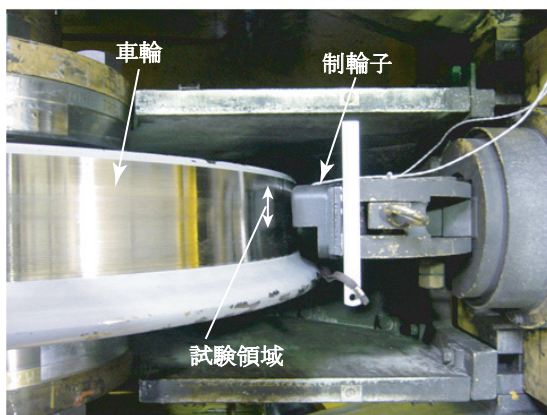


図6 制輪子の接触領域（試験領域）

が冷却された後、軌条輪の接触位置を制輪子と摩擦した部位に移動させ、当該部位に接線力を付与した。接線力の付与は、初速130km/hまで軌条輪軸に対する駆動従動状態で加速した後、車輪軸に装備されたディスクブレーキによって停止ブレーキを作用させ、停止までの間フライホイールを含む軌条輪軸との接線力を車輪踏面の当該部位に作用させた。この際、転がりの影響が極力小さい条件として接線力のみ影響を評価するため、車輪/軌条輪の接触輪重は30kNとした。この輪重値は、同等のブレーキ条件下で空転が生じない最低限の数値として予備実験により決定した。前述の試験では輪重60kNにおいて熱き裂が生成しており、今回の試験での輪重値はその50%である。以上の条件で踏面ブレーキによる熱入力、冷却、接線力を1回の負荷として、これを繰り返した。

4.2 試験結果

試験時、当初は車輪踏面上の接線力負荷領域に特にき裂等は見られなかったが、負荷回数60回時点で接線力負荷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である負荷回数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

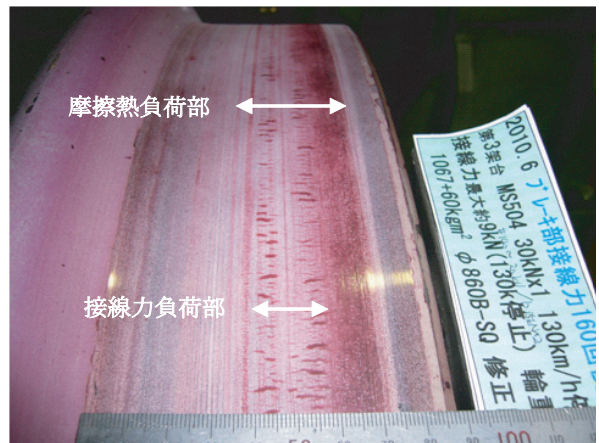


図7 試験後の車輪踏面状態

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唆する。一方、接線力の負荷のない領域にはき裂は生じなかった。

4.3 踏面熱き裂の発生機構と発生条件

4.3.1 接線力の影響

今回の試験で発生した踏面上の全周き裂は、踏面全周にわたり車軸方向に進展していることから踏面熱き裂の一種と判断される。接線力負荷時に車輪表面は常温まで冷却されていることから、この熱き裂は常温で発生・進展したものである。今回の試験条件で踏面熱き裂の発生と進展が確認されたことにより、踏面熱き裂の発生と進展には車輪/レール間接線力が不可欠な因子であることが見出された。より厳密には、踏面熱き裂は「摩擦熱による残留応力反転部に接線力が負荷されて降伏が生じ、降伏して塑性変形した部位で再度昇降温によって引張残留応力が発生し、接線力の負荷により再度塑性変形する」という「弾塑性ヒステリシス」を原因として発生することが確認された。

4.3.2 実車における車輪鋼の強度

車輪鋼の強度は図8に示すように温度の上昇に伴って

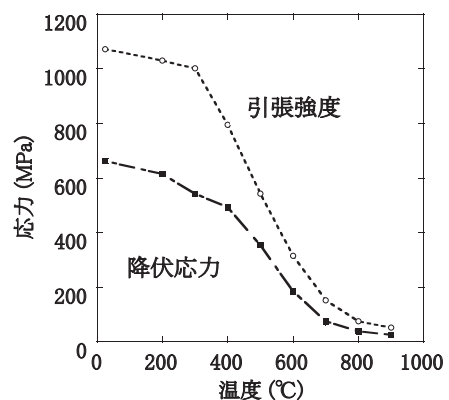


図8 車輪鋼の強度の温度依存性

低下し、例えば 500℃で降伏応力・引張強さともに常温時の 1/2 以下となる。今回の試験では、常温まで車輪が冷却された時点で接線力を負荷しており、この時点で車輪材質は常温での強度となっている。実車および前報の再現試験における負荷条件では、車輪が制輪子によって加熱され温度が上昇した状況で接線力が負荷されており、この場合には材料強度が常温の場合よりも低下していることから、より容易に熱き裂が発生すると考えられる。換言すると、今回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。

4.3.3 踏面熱き裂の発生指標

一般論として、き裂が発生する臨界条件を応力等の数値によって厳密に定義することは困難である。一方実用的には、当該き裂の破壊モードに対して支配的な応力成分が降伏応力を上回ることを、低サイクル疲労によるき裂発生可能性の指標とすることができる。さらにこの応力成分が引張強度を上回る場合、き裂が発生する可能性が高い状態の指標とすることができる。以上より、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、これを車輪鋼の降伏応力および引張強さと照合することでき裂発生指標を求めることができる。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最高温度の関数であることから、この温度での材料物性値を用いることで、実車における踏面熱き裂の発生条件を記述することができる。

実車輪に発生した熱き裂の破面解析の結果、熱き裂の進展は Mode I（開口型）荷重によると考えられることから、ここでは車両諸元として輪重60kN、車輪/レール間接触面積 120mm²を用い、これらの負荷状態において発生する主応力値を車両諸元に基ついで接線力（相当加減速度）と車輪最高温度の関数として整理すると、接線力（相当加減速度）および車輪最高温度の増加とともに主応力値が増加することがわかる（図9）。この主応力値

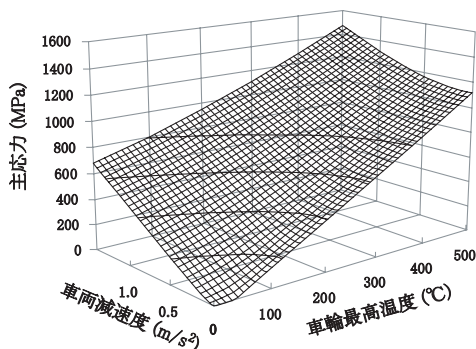


図9 車輪温度と加減速度による主応力値の変化例

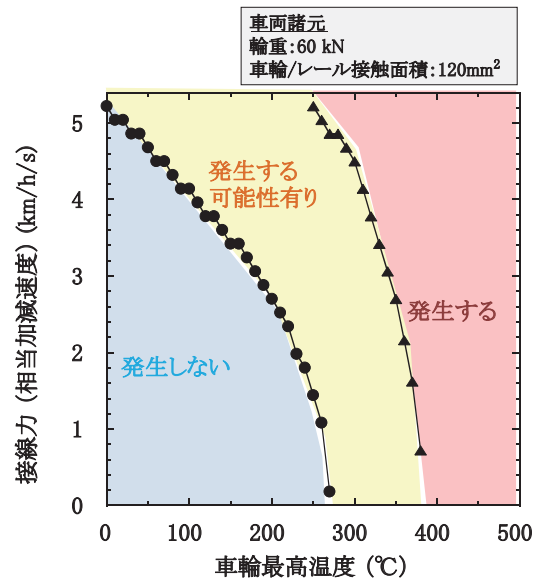


図10 車輪踏面熱き裂発生条件指標図の例

に、図8に示す車輪鋼の強度の温度依存性を適用することで、踏面熱き裂の発生指標を「車両減速度」と「車輪最高温度」の関数として表示することができる。その一例を図10に示す。ここで「熱負荷による残留応力」と「接線力によるせん断応力」から多軸応力計算を行うが、これら応力値は実車で測定できるものではないことから、「残留応力」を「車輪最高温度」に、「せん断応力」を「接線力（相当加減速度）」にそれぞれ変換した。せん断応力から減速度を求めるには接触面積、輪重等の車両諸元が必要であり、車両諸元が異なれば発生条件指標はそれに伴って変更される。図10によれば、踏面熱き裂は車輪最高温度が高く減速度が大きい条件で発生しやすく、特に車輪最高温度が上昇すると急激に発生しやすくなることが分かる。

4.3.4 実車の条件との関連

試験で熱き裂を確認した際のブレーキ繰返し数は発生時点で 60 回程度、き裂が進展した状態でも高々 130 ~ 160 回程度であり、この程度の繰返し数で熱き裂が発生していることは、実車における踏面熱き裂の生成と進展に影響しているブレーキの動作回数が、高々 100 回程度であることを示唆するものである。つまり、実車において車輪転削後に踏面熱き裂が顕在化するまでには少なくとも数ヶ月・数万 km 走行していることから、その間の高々 100 回程度の電制失効、またはそれに準ずる厳しい条件での踏面ブレーキ負荷が踏面熱き裂を誘発していると考えられる。仮に交番検査の2回帰（6ヶ月）で踏面熱き裂が顕在化し、その間の熱き裂を誘発するブレーキ回数が 100 回であるとすれば、運用2日あたり約1回だけ発生する厳しい条件での踏面ブレーキ負荷によって踏面熱き裂が発生・進展していることを示す。

特集：材料技術

4.4 踏面熱き裂の対策について

試験結果から判断して、踏面熱き裂を発生させている踏面への熱負荷は、数ヶ月の期間中に高々100回程度であり、運用中の一～数日あたり一回程度だけ発生する状況であると考えられる。これらの条件に該当しない(図10上「発生しない」領域にあたる)通常時の踏面ブレーキ負荷は、その回数の如何に拘わらずそもそも踏面熱き裂の発生には影響しておらず、従ってこれら通常時の踏面ブレーキ負荷をどれだけ低減しても、踏面熱き裂対策としての効果はないと考えられる。つまり、通常運用時のブレーキ扱いの変更等の対策は、踏面熱き裂対策としての効果が期待できない。一方、発電ブレーキの実装や架線電圧最適化等の電制失効対策や、踏面ブレーキ車両に負担される空気ブレーキ力を編成内のディスクブレーキ車両への移転する制御(M車が踏面ブレーキ、T車がディスクブレーキから成る車両で使用されることから空制T車優先制御等と呼ばれる。「T車優先遅れ込み制御」とは別概念)は図10上で条件を左側にシフトさせる効果がある点で有効と考えられる。特に後者については、M車(踏面ブレーキ車)については、車輪最高温度を低下させるとともに当該軸の接線力(相当減速度)を低下させ、車輪荷重条件を図10上で左下にシフトさせる効果があることから特に有効であると考えられる。

4.5 発生機構、発生条件と対策のまとめ

踏面熱き裂発生機構の解明のため、実車輪の踏面に、制輪子ブレーキ熱負荷による引張残留応力と、当該部への冷却後の車輪/レール間接線力を交互に繰返し作用させた。この結果、繰返し数100回程度で踏面熱き裂の発生と進展を確認した。これにより、車輪踏面熱き裂の生成と進展に車輪/レール間接線力が寄与していることが確認された。車輪の実動荷重環境を考慮し、温度上昇時の材料物性を残留応力と接線力によって発生する応力状態に適用することで、車輪最高温度と車両減速度の関数としての踏面熱き裂の発生条件指標図を作成した。

発生条件指標図上で試験による踏面熱き裂の発生条件を実車の条件と比較した結果、実車における踏面熱き裂は、高々100回程度の厳しい条件での踏面ブレーキの負荷によって発生しており、この条件に満たない通常時の負荷を低下させても熱き裂対策としては有効でないことを見出した。さらに現在までに検討されている各種踏面熱き裂対策手法について評価し、発生条件指標に基づき、踏面ブレーキ車両の空制ブレーキ力を編成内のディスクブレーキ車両に可能な限り移転する制御(空制T車優先制御)が特に有効と考えられることを見出した。

また発生条件指標図を用いることで、車両諸元と車輪想定温度に基づき、車両設計段階で踏面熱き裂の発生可能性

について推定が可能となるほか、各種の熱き裂対策について事前にその有効性を評価することが可能となった。

5. まとめ

車輪踏面熱き裂の発生機構の解明と対策手法の検討のため、実物車輪を使用したベンチ試験、材料調査による実働温度およびき裂進展特性の分析、数値解析による踏面ブレーキ時の車輪内部の温度および応力状態の算定を組み合わせ実施した結果、以下の知見を得た。

- (1) 踏面熱き裂の発生主要因は「制輪子による熱負荷」と「車輪/レール間接線力」である。
- (2) 車両諸元に基づき「接線力(相当加減速度)」と「車輪最高温度」に対して踏面熱き裂の発生可能性を評価し、踏面熱き裂の発生条件指標図として表示する手法を開発した。
- (3) 発生条件指標図を用いることで、車両設計段階で踏面熱き裂の発生可能性の推定が可能となるほか、各種の熱き裂対策について事前にその有効性を評価することが可能となった。
- (4) 踏面熱き裂に対する対策として、制輪子による車輪への温度負荷を低減させる方策が有効である。中でも編成内ブレーキ力分配ロジックを変更し踏面ブレーキの負荷を編成内のディスクブレーキに移転させることによる踏面ブレーキ軸の負担低減は、車輪の最高温度と車輪/レール間接線力を同時に低下させることから特に有効と考えられる。

文献

- 1) 広重巖：輪軸，交友社，p.329, 1971
- 2) 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
- 3) 半田和行 他：車輪踏面熱き裂の実験的再現と生成条件，鉄道総研報告，Vol. 24, No. 8, pp.35-40, 2010
- 4) K. Handa, et.al, "Ferrite and Spheroidized Cementite Ultrafine Microstructure Formation in an Fe-0.67 Pct C Steel for Railway Wheels under Simulated Service Conditions", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 40, pp. 2901-2908, 2009.
- 5) K. Handa, et.al, "Effect of deformation and annealing temperatures on ultrafine microstructure development and yield strength of pearlitic steel through continuous recrystallization", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp.1926-1932, 2010.
- 6) 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