

内面距離変化にもとづく各種車輪の  
異常加熱時の残留応力異常の可検知性

半田 和行\*

Detectability of Residual Stress Anomalies in Various Types of Railway Wheels  
Subjected to Thermal Overload Based on Back Gauge Change

Kazuyuki HANDA

Temperature increases of railway wheels due to frictional braking on the wheel tread can lead to maintenance challenges such as tread wear and thermal cracking. While heating within the anticipated design range should not adversely affect the structural safety of the wheels, excessive temperature rises resulting from brake system failures can induce tensile residual stresses in the rim, potentially leading to wheel fracture. Detecting wheels with abnormal residual stresses is therefore crucial for railway safety, and monitoring residual displacements in the rim due to changes in circumferential residual stresses is an implementable approach. However, the shape of the wheel web varies, and the displacement response to thermal input differs depending on the wheel geometries. This study aims to explore general deformation behaviours related to wheel shape and elucidate the relationship between shape and heat resistance. The elastic-plastic finite element analysis employing simplified intense thermal input revealed that residual deformation after excessive thermal loading consistently results in back gauge expansion, although the deformation and stress responses differ based on the web geometry. Differences in heat resistance are indicated by the variation in the temperature at which compressive yielding due to thermal stress occurs, depending on the web shape. The residual stress detectability of each wheel is determined based on the principle that greater residual displacement at lower stress indicates higher anomaly detectability.

キーワード：車輪，踏面ブレーキ，残留応力，可検知性，内面距離

本稿は以下の既報論文を抜粋し再記述したもので，許可を得て転載したものである。

This article is an excerpted, adapted, and translated version of the following published paper.

Kazuyuki Handa, "Detectability of residual stress anomalies in railway wheels with different geometries subjected to thermal overload based on back gauge change", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 239.1 (2025) pp. 58-69. Copyright © 2025 by IMechE. Reprinted by Permission of Sage Publications

## 1. 背景と目的

鉄道車輪は重要保安部品であり，使用中の荷重に耐え破損を防ぐように設計・製造されている。車輪リム部は，熱処理によって初期状態で圧縮残留応力を持つよう製造されており，踏面表面に傷などの欠陥があっても破壊の恐れなく車輪を使用できる<sup>1)~4)</sup>。しかし，踏面ブレーキの故障等により異常加熱が生じると，熱応力により圧縮降伏と塑性変形が生じる場合があり，冷却後に引張残留応力が発生すると使用上の安全裕度が低下する<sup>5)6)</sup>。リム部に顕著な引張残留応力が生じた車輪は重大な破壊（割損）に至る可能性が生じる。

踏面ブレーキを使用する鉄道車輪の表面は，転がり接触と摩擦熱による複雑な応力・ひずみが負荷され，温度上昇に伴う材料特性の変化も生じる<sup>7)8)</sup>。これらの変化は疲労き裂や摩耗を促進し，踏面熱き裂など

\* 材料技術研究部

さまざまな表面損傷を引き起こす<sup>9)~15)</sup>。中でも、表面のき裂が内部へ進展し車輪割損の可能性を生じるか否かは、主にリム部の残留応力によって決まる<sup>16)17)</sup>。したがって、車輪割損を防ぐためには、熱履歴から残留応力状態を把握することが必要である。

車輪リム部の温度が上昇すると、熱膨張と板部の傾斜によりリム部の軸方向位置がわずかに変化する。通常の条件では、冷却後にリム部位置は復元する。しかし、車輪リム部がブレーキ不緩解等で異常加熱されて塑性変形が生じた場合、リム部位置が完全には復元しない場合がある。このリム部変位とリム部残留応力の関係がわかれば、輪軸の内面距離（左右車輪の背面間の距離）測定によりリム部の残留応力異常を把握できる可能性があり、これは安全に影響する異常の可検知性の観点から重要な特性である。現状では、これらの関係性についての定量的情報がないため、車輪が受けた熱負荷の深刻度の評価のための内面距離測定<sup>18)</sup>は、定性的な指標にとどまっている。

一方、車輪の形状、特に板部形状は車輪種類ごとに異なり、熱的過負荷に対する応答も異なると考えられる。残留変位、限界温度、冷却後の残留応力などの応答を理解することは、異常の深刻度を評価し、車輪の検査に基づく適切な対応を決定する上で重要である。一部の車輪形状については、規格への適合から応答が規定範囲内にあることが確認できる<sup>19)</sup>。また単一の形状の車輪についてこれらの応答が調査された例はある。しかし、包括的な検討例は限られており、一般性のある車輪の挙動はいまだ理解されていない。

本研究の目的は、熱的過負荷およびその後の冷却時における、種々の形状の車輪の背面位置の変化を体系的に調査し、形状に関する一般的な知見を抽出することである。弾塑性有限要素解析の結果を実験結果と照合するとともに、残留変位と残留応力との関係を検討し、踏面ブレーキ車輪の使用限界温度を定義することで、内面距離測定を用いた残留応力異常の可検知性について統一的な解釈手法の構築を目指す。

## 2. 方法

### 2.1 解析対象

本研究では、日本国内で現在使用されている7種類の車輪を対象とし、それぞれ異なる板部形状を持つ車輪の応答を評価した。分類は国内で通常用いられる区分<sup>20)</sup>どおり、板部が外方傾斜した車輪をA型、内方傾斜した車輪をB型とした。B型車輪は車輪間の空間確保を意図した形状で、主に狭軌M台車に使用される。A型およびB型の車輪には、新品車輪径が860mmおよび810mmのものがあり、それぞれ異なる板部形状を有する。

S型車輪は欧州製で、S字形の板部を持ち、熱的安定性に関するEN規格を満たす。S型車輪にもM/T台車の2種類が存在するが、両者の板部形状は同一のため、本研究では1種類のみを解析対象とした<sup>21)</sup>。

これら以外に、円周方向に波打った形状の板部を持つ波打車輪がある。波打車輪は板部の剛性を確保しつつ板厚を薄くすることで軽量化を意図したものとされる<sup>20)</sup>。波打車輪にもM/T台車の2種類が存在し、いずれも新品車輪径860mmでB型/A型形状である。後者は踏面ブレーキ熱応力の低減を念頭に設計されており、N-A型波打車輪と称する<sup>22)</sup>。

解析対象の車輪は以上7種類である。新品車輪径が860mmのものが5種類（860A、N-A波打、860B、B波打、860S）、810mmのものが2種類（810A、810B）である。これらの車輪は、リム外縁に半径で40mmの削正許容範囲を持ち、使用限度径では直径が80mm減少する。

有限要素(FE)モデルを用いた数値解析は上記7種類の新品車輪径および使用限度径について実施した。本稿では新品車輪径の860A車輪（直径860mm）を860A860、使用限度径の860A車輪（直径780mm）を860A780と称し、この呼称規則をすべてのモデルに適用し、車輪7種類・14モデルを解析対象とした(図1)。

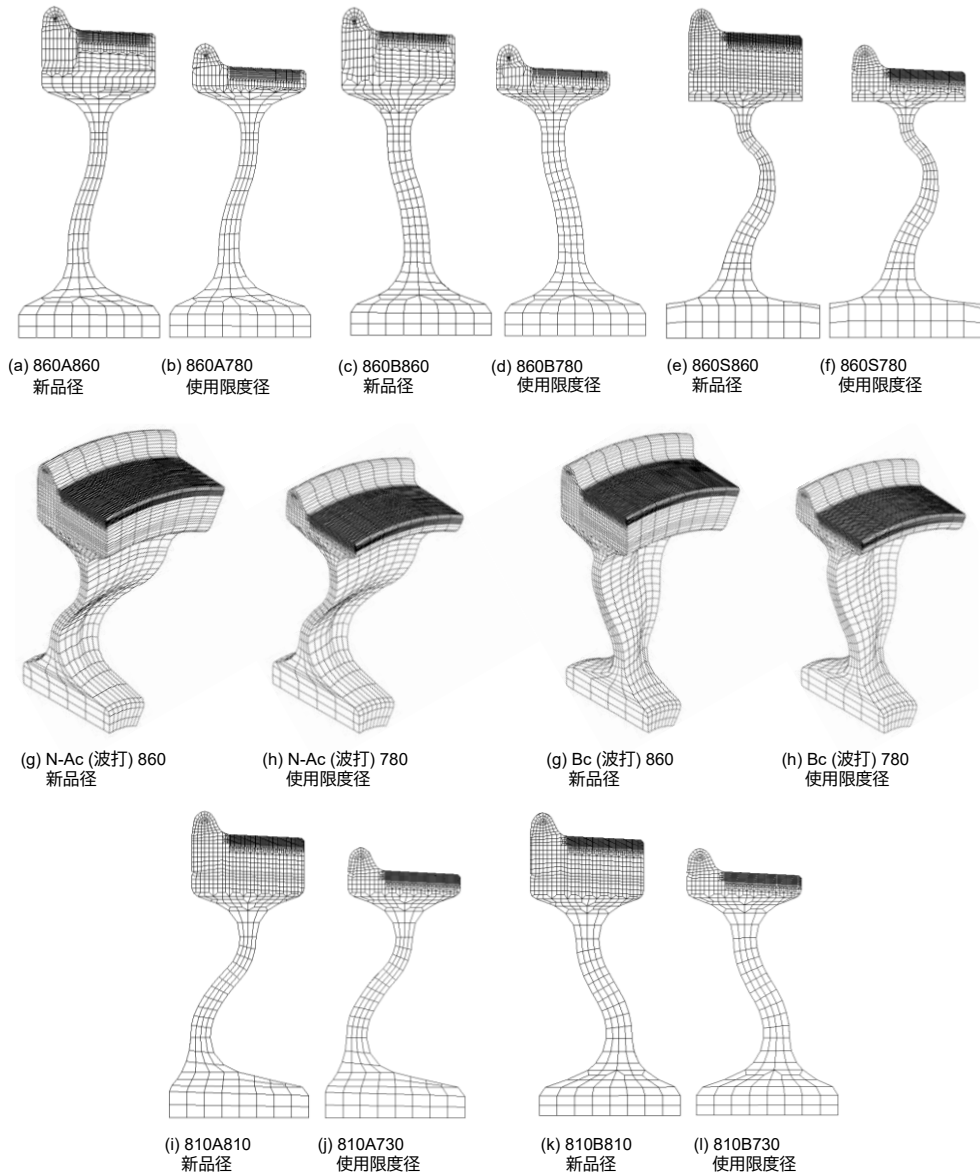


図1 解析モデル

## 2.2 解析手法

解析モデルは、鉄道総研が旧国鉄から承継した図面類、または公開文献を基に作成した。車輪の板部の詳細な形状は一般的に高度な機密情報であり、製造者のみが正確な情報を有する。そのため本研究の解析モデルは、実際の製品形状を完全に再現しているわけではない。しかし、本研究の主な目的は板部自体の応力解析ではなく、リムにおける温度、応力、および変位の挙動を理解することである。したがって板部形状は、リム部の動きに対する拘束の程度を再現できることが要件であり、板部の厚さ、波打の振幅、および全体的な形状が反映されることでこの要件に対しては有用と判断した。

解析モデルは、非波打車輪に対しては2次元モデル、波打車輪に対しては3次元モデルを使用し、後者では円周方向の波打形状の波長  $30^\circ$  に対して  $7.5^\circ$  ずつの断面モデルを適用した。いずれのモデルにおいても、横断面上の要素サイズは外周側ほど細かく設定し、ブレーキ熱が負荷される踏面部では約  $1\text{ mm}$  角とした。

入熱条件は、車輪に残留変形を発生させうる熱負荷とし、塑性変形の増加に伴う数値解析の不確実性および実験データとの比較可能性を考慮して設定し、全てのモデルに対して熱入力  $33.3\text{ kW} \cdot 40$  分間に統一

した。これは、EN 13979/UIC 510-5 に規定される、欧州における車輪の熱安定性評価基準<sup>19) 23)</sup>における引きずりブレーキ条件の初期段階 (30 kW・45 分間) に近い。検証のため、860A860 および 860B860 実車輪を対象に、目標踏面ブレーキ出力 33.3 kW で加熱した実験データにおける、熱電対温度と車輪の背面変位の相関を確認した。

弾塑性解析は 2 段階で実施した。まず、過渡熱解析を行い、制輪子接触領域 (幅 75 mm 相当) に一定の熱流束を一定時間適用した。入熱部およびボス内径を除く全ての表面に対して、対流熱伝達および熱放射を設定した。ブレーキ負荷終了後は、制輪子接触部にも同様の熱伝達および放射条件を適用した。その後、得られた温度分布を基に、熱-構造の一方向連成解析を実施した。1° (2 次元モデル) または 30° (3 次元モデル) の要素から車輪全周の挙動を再現するため、両端断面の全ノードに対して周方向変位を拘束し、ボス内径の全ノードを完全拘束とした。

物性および機械的特性は、ISO 1005-6 C64GW-T に準拠した車輪の実測データを用いた (表 1)。境界条件および解析目標時間は表 2 の通りである。構造解析の初期条件として、全ての応力およびひずみはゼロと仮定した。実車輪では、値は小さいものの熱処理によりリムに円周方向の圧縮残留応力が作用し、それに対応する引張残留応力が板部に作用し弾性ひずみが生じている。本研究の設定はこれら実際の条件と完全には一致しない。

表 1 使用した材料物性

温度 (°C)	降伏応力 (MPa)	塑性変形抵抗 (GPa)	線膨張係数 (対25°C)	縦弾性係数 (GPa)	ポアソン比
25	663	20	1.09E-05	206	0.3
100	650	13.3	1.09E-05	202	0.3
200	615	13.3	1.14E-05	196	0.3
300	543	13.3	1.24E-05	188	0.3
400	493	12	1.31E-05	180	0.3
500	354	6.25	1.38E-05	170	0.3
600	185	2.5	1.46E-05	160	0.3
700	76	1.2	1.51E-05	149	0.3

表 2 解析モデルおよび数値解析の設定

要素数	約14,000 (N-A波打, B波打)、約1,500 (その他)
要素タイプ	HEXA 8, 一次要素
要素サイズ	1 mm × 1 mm (断面・踏面近傍)、3.75° (周方向)
車輪径	860 mm (使用限度径 780 mm), 810 mm (使用限度径 730 mm)
入熱幅	75 mm (踏面上)
熱入力	33.3 kW, 一定
解析対象時間	14400 s
熱入力時間	2400 s
解析間隔	5 s (-2400 s), 10 s (-7200 s), 30 s (-14400 s)
熱伝達係数	50 W/m <sup>2</sup> K
熱放射率	0.2
周囲温度	25 °C
初期温度	25 °C
解析方法	一方向連成 (熱 → 構造)
解析ソフト	ADINA 9.3.1

### 3. 結果

#### 3.1 温度

860A860, 860B860, および N-Ac860 車輪の踏面表面における温度履歴と、各車輪の加熱完了時点である 2,400 秒での踏面表面の最高温度を図 2 に示す。同じ直径の車輪では板部形状によらず温度履歴はほぼ同一であった。新品車輪径での踏面表面の最高温度は約 500°C、使用限度径の車輪では 600°C-700°C に達した。図 3 に 860A860, 860B860, 860S860, N-Ac860, および Bc860 車輪の 2,400 秒時点の温度分布を示す。

#### 3.2 高温時および冷却後の背面位置の変化

温度上昇時の変形を初期形状と比較し 5 倍に拡大したものを図 3(a)~(c) に示す。板部の傾斜方向に応じ、リム部の熱膨張を許容する方向に背面位置の変化が生じた。860S 車輪では温度上昇時の背面位置変化はわずかで、これは EN 規格の変形要求に合致している。各車輪の 2,400 秒時点での背面位置変化と解析終了時 (14,400 秒) のリム部の最大変位位置での水平方向変位を図 4 に示す。熱入力条件が同一でも、板部形状

により変位の方向と大きさに違いがあり、使用限度径の車輪では顕著な残留変形が生じた。残留変位は車輪により 0.5-1.8mm と大きな差があり、860A780 車輪は特に大きな残留変形を示した。また、すべての車輪形状に共通して、過大熱負荷後の残留変形は内面距離の拡大側に生じた。

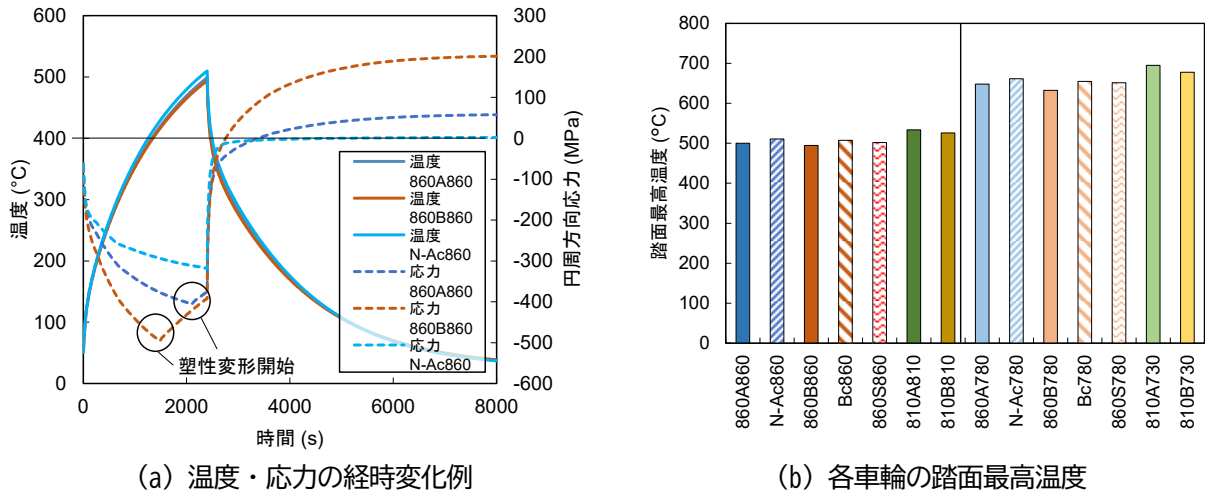


図2 踏面表面の温度

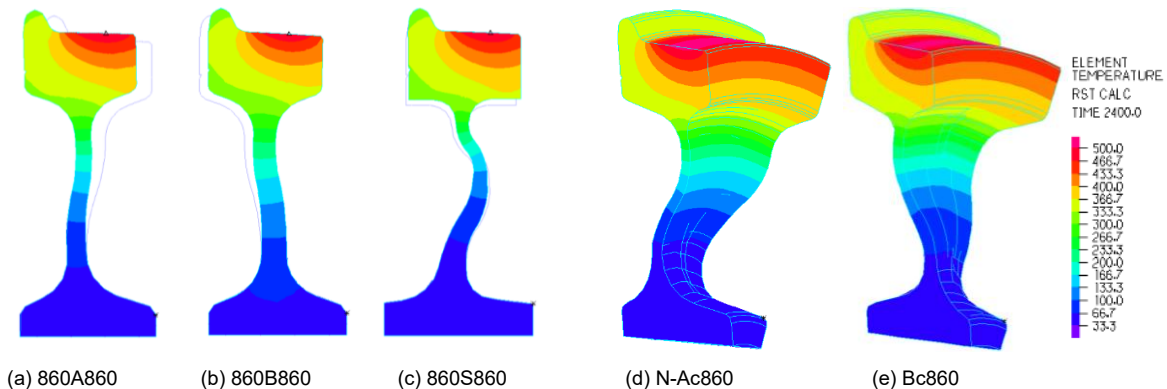


図3 最高温度時点の温度分布例

### 3.3 冷却後の残留応力

実際のブレーキ不緩解等による熱入力により複雑である可能性があるが、本研究では異なる車輪形状間の応答差を体系的に理解するため、単純化した負荷条件を用いた。

図2に示された860A860および860B860車輪の踏面上で最も高温となる点における温度および応力変化において、応力は周方向の垂直応力であり温度が上昇すると周方向に圧縮応力が発生する。圧縮応力が当該温度における降伏応力に達すると材料が降伏し塑性変形が生じる。圧縮側の塑性変形が進行すると、温度上昇による材料強度の低下を反映して、応力値は最大温度時点まで低下していく。ブレーキ入熱が終了し空冷が開始すると、熱収縮により応力が一時的に緩和される。その後応力は反転し、制動時に発生した圧縮塑性ひずみに対応した引張残留応力が発生する。なお本解析ではレールとの接触応力は考慮していない。

図5に解析終了時点(14,400秒)における各車輪モデルのリム断面の最大残留応力を示す。すべての車輪モデルで熱入力領域中央付近の圧縮降伏により冷却後に引張残留応力が発生していた。しかし、図5に示すとおり最高温度が同等でも残留応力の大きさは車輪形状によって大きく異なり最大3倍程度の差があった。

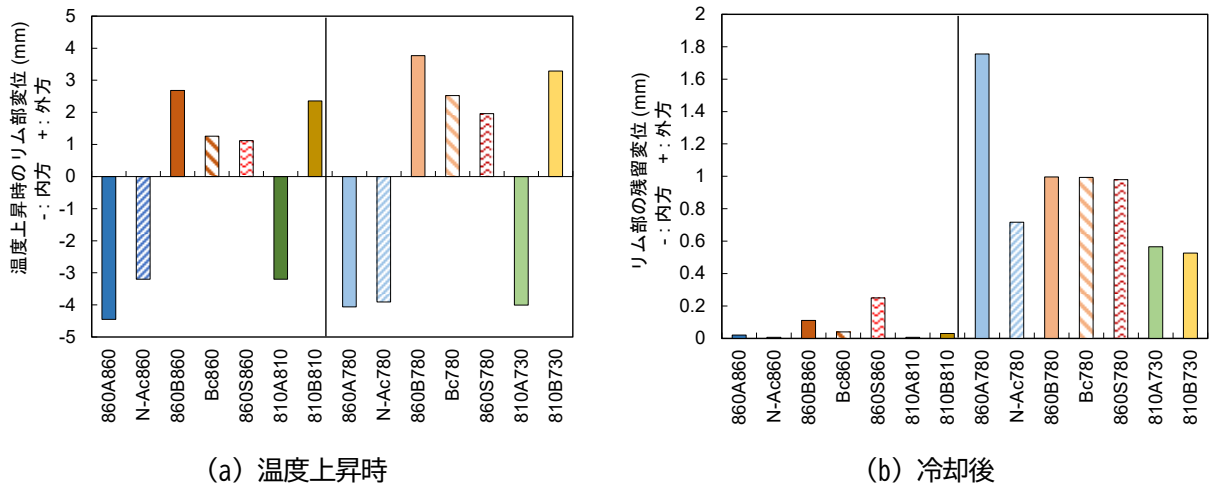


図4 各車輪のリム部変位

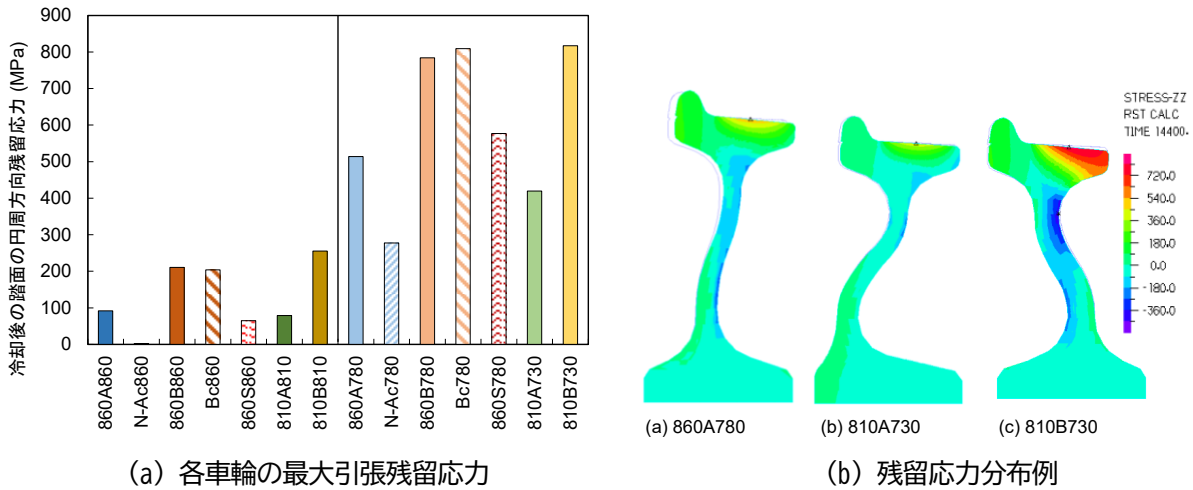


図5 冷却後の残留応力値と残留応力分布例

## 4. 考察

### 4.1 解析結果の検証

解析結果の妥当性検証のため、同条件下での実車輪の応答を把握する必要がある。本研究で解析対象とした860A860および860B860の実車輪について、速度60 km/h・目標ブレーキ力200 kgf、出力33.3 kW（熱分配率100%想定）、すなわち表2に示した数値解析の熱入力と同条件下での台上試験における、ブレーキ中のリム中央の熱電対温度と、接触測定によるリム変位が報告されている<sup>24)</sup>。これを解析結果と比較したところ、制動中の変位方向は解析・実験ともに860A860では内向きで、リム中央部温度400℃時点での変位は解析値が-4.2 mm、実験値が-3.8 mm、一方860B860では解析・実験ともに制動中の変位は外向きで、リム中央部温度400℃時点での変位は解析値が+1.9 mm、実験値が+1.7 mmであった。このことから、本研究の有限要素法による計算は、少なくとも温度上昇時の変位挙動について定量的な議論が可能であり、車輪形状の違いによる残留変形挙動について定性的な議論が可能であると判断した。

## 4.2 許容使用温度

踏面表面で最高温度に達する領域では表面から内部への温度勾配が最大となり、熱応力による降伏および塑性変形が最も発生しやすいと考えられることから、温度が最高となる節点で降伏が開始する温度を抽出した。この降伏開始は、熱負荷時の円周方向圧縮応力のピークに対応し、図2に示された応力の最大値に相当する。すべてのモデルにおいて相当応力も円周方向圧縮応力のピーク時に最大値を示した。この温度は、所与の熱入力条件下で降伏が発生する可能性がある最低温度であることから、この温度を塑性変形開始温度と定義した。この温度以下では、初期応力状態が中立である場合、局所的にも引張残留応力は発生しないと考えられるため、これは踏面ブレーキ車輪の許容温度と見なすことができる。

図6に各車輪の塑性変形開始温度を示す。新品車輪径のN-A波打車輪(N-Ac860)では降伏の発生が見られなかったため2,400s時点での最高温度で、許容温度はより高いことを示す。図6より、同じ板部形状を持つ車輪では、車輪径が異なっても塑性変形開始温度が近接していることが分かる。これは板部形状が塑性変形開始温度に対して大きく影響することを示している。この結果から、車輪の耐熱性は設計形状から求められる許容温度という単一のパラメータで評価できることが示唆される。

本研究で解析した車輪の中で、N-A波打車輪は特に高い許容温度を示し、次いで810A車輪、860Aおよび860S車輪の順となった。一方で、B波打車輪の許容温度は、860Bおよび810B車輪と同程度であった。860Bおよび810B車輪は比較的低い塑性変形開始温度を示したが、これは板部厚さが大きく変形に対する剛性が大きいことに起因することが考えられる。

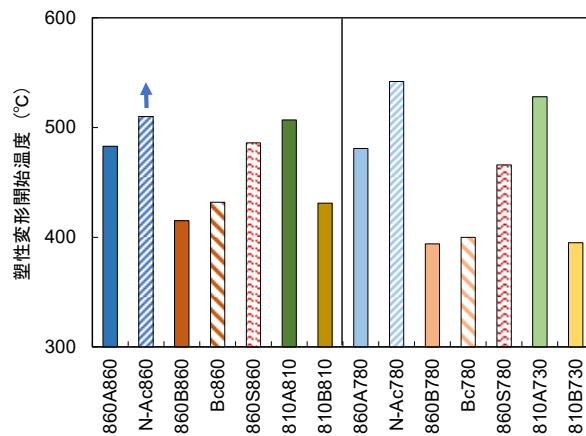


図6 各車輪の塑性変形開始温度

## 4.3 変位拘束の程度

車輪形状の違いによる温度上昇時の応力レベルの違いについて理解するため、860A、810A、860S、N-A波打およびB波打車輪の車軸を含む平面内でのリム部変位を0sから2,000sまで追跡し、2,000s時点の最高温度とともに図7に示す。この時点ではB波打車輪を除きいずれの車輪も降伏は発生していない。

車輪の軸方向内方への変位は860A車輪で特に顕著であった。一方、半径方向への変位はN-A波打および810A車輪が大きかった。この違いがN-A波打車輪の発生応力が低い一因である可能性が考えられる。

図7に示された変形挙動は、810A車輪とN-A波打車輪で類似しているが、2,000s時点の温度は810A車輪が502°C、N-A波打車輪が479°Cと差があった。この結果は、N-A波打車輪は板部によるリム部変位への拘束度が小さく比較的低温でより大きな変位を許容することを意味し、その結果として塑性変形開始温度

が高くなることを示唆している。反対に、塑性変形開始温度が低かった B 波打車輪は半径方向への変位が特に小さかった。

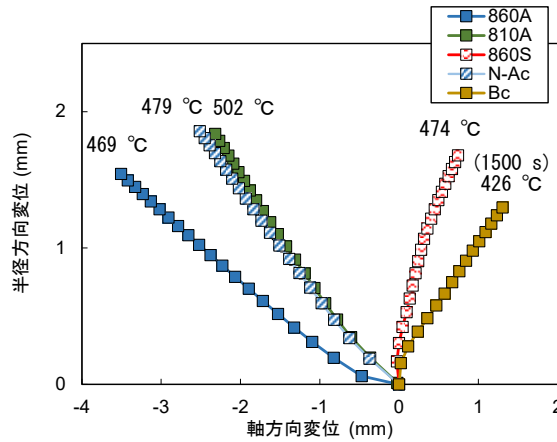


図 7 温度上昇時中リム部変位と到達温度

#### 4.4 内面距離変化による残留応力の検出

各車輪リム部の円周方向の最大残留応力と冷却後の残留変位の関係を、各車輪の新品車輪径と使用限度径のプロットを結ぶ線分として図 8(a) に示す。安全裕度の観点からは、図 8(a) に示されるように、特定の過大熱入力に対して残留応力の絶対値が小さいことが望ましい。一方で、引張残留応力の外部からの判別すなわち割損防止のための異常検知の視点からは、車輪の形状が残留応力状態の変化によって敏感に変化することが好ましい。輪軸の内面距離は、レーザー変位計測などの非接触手法による変化検出に好適で、かつ発生応力に対して変位量が大きいほど、測定上許容される誤差も大きくなることから実用上望ましい。

発生する残留応力が小さくても残留変位が大きい場合、異常検出の感度は向上する。このため、本研究では車輪の残留応力可検知性指数 (Residual Stress Detectability Factor, Drs) を、単位残留応力当たりの背面位置変化量として式(1)のように定義した。

$$D_{rs} = \frac{BC}{RS} \tag{1}$$

ただし、BC: 車輪背面位置変化, RS: 残留応力

図 8(b) に使用限度径における各車輪の踏面最大引張応力に対する残留応力可検知性指数を示す。同指数は車輪の種類により約 6 倍の違いがあった。図 8(b) に示されるように、残留応力可検知性が高く、かつ塑性変形開始温度が高い車輪は、耐熱性と可検知性の両面で優れていると考えられる。本研究において、これに該当する車輪は、860A, N-A 波打車輪 (N-Ac), 860S, および 810A 車輪である。一方、860B, B 波打 (Bc) および 810B 車輪は熱負荷に対して脆弱であり、異常可検知性も低いと評価できる。なおこれらのうち 860S 車輪のみ、温度上昇時および冷却後の背面位置変化が考慮され EN 規格の要件に準拠している。

残留応力可検知性指数は、評価に使用する応力を定義することで、リムの平均応力など他の応力値にも適用可能である。残留応力可検知性指数と塑性変形開始温度を用いることで、車輪の板部形状に依存する耐熱性能を包括的に評価し、割損防止のための実用的な管理手法に応用できるものと期待される。

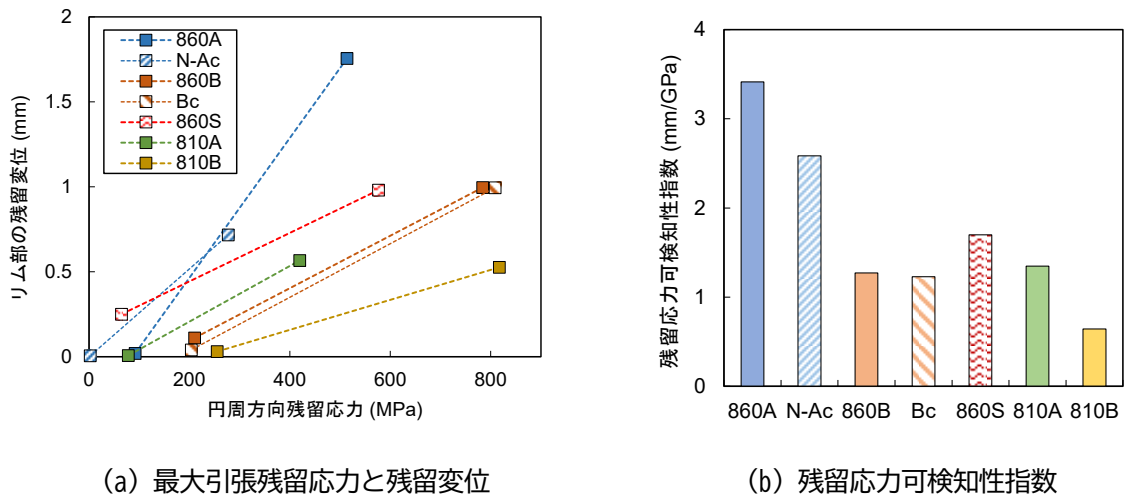


図8 各車輪の残留応力とリム部変位の関係

## 5. 結論

本研究では、過大な熱負荷およびその後の冷却による車輪の背面位置変化を体系的に調査し、車輪形状に起因する一般的な知見の導出を試みた。初期状態での応力中立を仮定し、弾塑性有限要素法を用いて応力および変形を解析した。本研究で得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) 温度上昇時の背面位置変化は、車輪の板部傾斜方向に依存し、内面距離の拡大または縮小を生じた。EN規格の要件を満たす車輪ではこれらの変化は最小限であった。
- (2) 踏面の過大な温度上昇によって圧縮降伏および塑性変形が生じる領域で冷却後に発生する円周方向最大引張残留応力は280–820MPaで、同等条件下でも板部形状によって最大で約3倍の差が生じた。
- (3) 引張残留応力が発生した車輪では、冷却後の背面位置変化は板部形状によって0.5–1.8mmと大きく異なった。しかし、車輪形状に関わらずいずれも残留変形は内面距離が拡大する側に生じた。
- (4) 温度上昇時の背面距離変化について、代表的な2種類の車輪の実験における測定値と解析結果は近似していた。
- (5) 車輪の許容温度について、踏面の最高温度点において熱応力による圧縮降伏が発生する温度（塑性変形開始温度）として定義できると考えた。塑性変形開始温度は、対象とした車輪により400–550℃と大きな違いがあった。許容温度は車輪径に関わらず板部形状が同じ車輪ではほぼ同じであった。
- (6) 発生応力が小さくても残留変位が大きいほど異常の可検知性が高いとの考えに基づき、車輪の残留応力可検知性を定義した。対象車輪の残留応力可検知性指数は種類により約6倍の違いがあった。

## 文献

- 1) Donzella G, Scepti M, Solazzi L, et al. "The Effect of Block Braking on the Residual Stress State of a Solid Railway Wheel," Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit; 212, pp.145–158, 1998.
- 2) Gordon J, Perlman A. B., "Estimation of Residual Stresses in Railroad Commuter Car Wheels Following Manufacture," Final Report, Federal Railroad Administration, U.S. Department of Transportation, USA, June 2003.
- 3) Molyneux-Berry P, Bevan A, "Residual Stresses in Railway Wheels and Their Effect on Damage Rates through the Life of a Wheel," In: Computing and Engineering Researchers' Conference, University of Huddersfield, UK, pp. 31–36, December 2013.
- 4) Teimourimanes S, Vernersson T, Lundén R, "Thermal capacity of tread-braked railway wheels. Part 1: Modelling," Proc. IMechE, Part F: J.

- Rail and Rapid Transit, 230, pp.784–797, 2016.
- 5) Nishimura S, Tokimasa K, "Study on the Residual Stresses in Railroad Solid Wheels and Their Effect on Wheel Fracture," Bulletin of the JSME, vol.19, no.131, pp.459–468, 1976.
  - 6) Landström E, Vernersson T, Lundén R, "Analysis and testing of tread braked railway wheel—Effects of hot spots on wheel performance," Int. J. Fatigue, 180, 108116, 2024.
  - 7) Handa K, Kimura Y, Mishima Y, "Ferrite and Spheroidized Cementite Ultrafine Microstructure Formation in an Fe-0.67 Pct C Steel for Railway Wheels under Simulated Service Conditions," Met. Mat. Trans. A, 40, pp.2901–2908, 2009.
  - 8) Handa K, Kimura Y, Yasumoto Y, et al, "Effect of deformation and annealing temperatures on ultrafine microstructure development and yield strength of pearlitic steel through continuous recrystallization," Mat. Sci. Eng. A, 527, 7-8, pp.1926–1932, 2010.
  - 9) Lundén R, "Contact region fatigue of railway wheels under combined mechanical rolling pressure and thermal brake loading," Wear, 144, pp.57–70, 1991.
  - 10) Ekberg A, Kabo E, "Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading—an overview," Wear, 258, pp.1288–1300, 2005.
  - 11) Handa K, Kimura Y, Mishima Y, "Surface cracks initiation on carbon steel railway wheels under concurrent load of continuous rolling contact and cyclic frictional heat," Wear, 268, pp.50–58, 2010.
  - 12) Handa K, Morimoto F, "Influence of wheel/rail tangential traction force on thermal cracking of railway wheels," Wear, 289, pp.112–118, 2012.
  - 13) Caprioli S, Vernersson T, Handa K, Ikeuchi K, "Thermal cracking of railway wheels: Towards experimental validation," Tribology Int., 94, pp.409–420, 2016.
  - 14) Walia M, Esmaceli A, Vernersson T, et al, "Thermomechanical capacity of wheel treads at stop braking: A parametric study," Int. J. Fatigue, 113, pp.407–415, 2018.
  - 15) Landström E, Steyn E, Ahlström J, et al, "Thermomechanical testing and modelling of railway wheel steel," Int. J. Fatigue, 168, 107373, 2023.
  - 16) Salehi I, Cookson J, Mutton P, et al, "Assessment of Overheated wheels for Increased Serviceability Using the Ultrasonic Birefringence Residual Stress Measurement Technique," In: IIHA 2015 Conference, Perth, Australia, pp.21-24 June 2015.
  - 17) Strážovec P, Suchánek A, Šťastniak P, et al, "Detection of residual stress in a railway wheel," Trpn. Res. Proc., 40, pp.898–905, 2019.
  - 18) Joint Network Secretariat, Normal Procedure Task Force, "Broken wheels - Final output, Report for the EU Agency for railways," Brussels, 28. November 2019.
  - 19) EN13979-1:2003+A2:2011, Railway applications - Wheelsets and bogies - Monobloc wheels - Technical approval procedure - Part 1: Forged and rolled wheels.
  - 20) 岡方義則：鉄道用車輪設計技術の現状と今後の展望，新日鉄住金技報，Vol. 395， pp.26-33， 2013
  - 21) Ronchi A, Tanabe N, "Application of EN-based design for non-European scenarios: the case of Lucchini RS and JR-West," In: XIX International Wheelset Congress, Venice, Italy, 16-20 June 2019, paper no. 6A-3.
  - 22) 山村佳成, 仲田摩智, 安食眞男：耐ブレーキ熱波打車輪の開発，住友金属，Vol. 46, pp.77–84, 1994
  - 23) UIC Code 510-5:2007. Technical approval of monobloc wheels – Application document for standard EN13979-1. International Union of Railways.
  - 24) 広岡敏夫, 木川武彦, 寺村英雄, 齊藤高義：踏面ブレーキの車輪におよぼす影響-一体車輪の熱的損傷-, 鉄道技術研究所速報, No. 72–143, 日本国有鉄道, 1972