

## 車輪板部形状が過大熱負荷時の車輪変形および発生応力に及ぼす影響

半田 和行\* 森本 文子 (鉄道総合技術研究所)  
三井 健司 (東日本旅客鉄道)

Effect of wheel web shape on residual deformation and generated stress under thermally overloaded conditions.

Kazuyuki Handa \*, Fumiko Morimoto, (Railway Technical Research Institute)

Kenji Mitsui, (East Japan Railway Company)

The heat resistant performance of N-A type and B type corrugated wheels were investigated using nonlinear FEM under same conditions previously applied for other types of wheels. The reduced constraint on wheel rim expansion due to the small plate thickness of N-A type corrugated wheels seems to result in the highest plastic deformation onset temperature.

キーワード：車輪，残留応力，踏面ブレーキ，ブレーキ不緩解，板部形状，塑性変形，温度，内面距離  
(Wheel, residual stress, tread brake, malfunction brake, web shape, plastic deformation, temperature, back gauge)

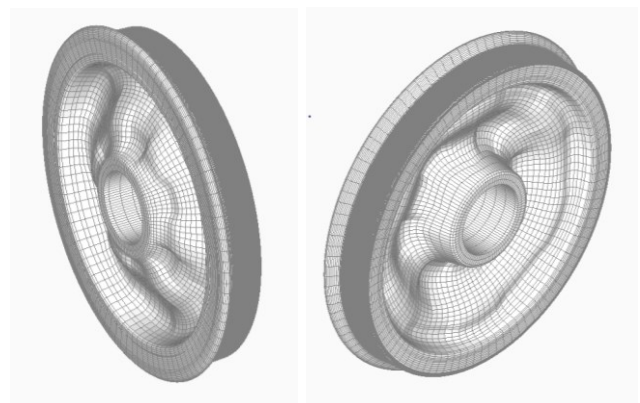
### 1. 背景・目的

車輪リム部には製造時の熱処理により圧縮残留応力が作用しており、表面に傷があっても車輪割損のおそれなく使用できる担保となっている。一方、ブレーキ装置の異常等により車輪踏面が限界温度以上に過熱されると、熱応力による圧縮降伏と塑性変形が生じ、冷却後に引張残留応力が生じてこの担保が失われる可能性がある。車輪の限界温度は踏面下 10 mm の位置で 350 °Cとされ<sup>(1)</sup>、正常時には、線区、運転条件やブレーキ操作に関わらず全ての車輪は限界温度以下で使用されている。

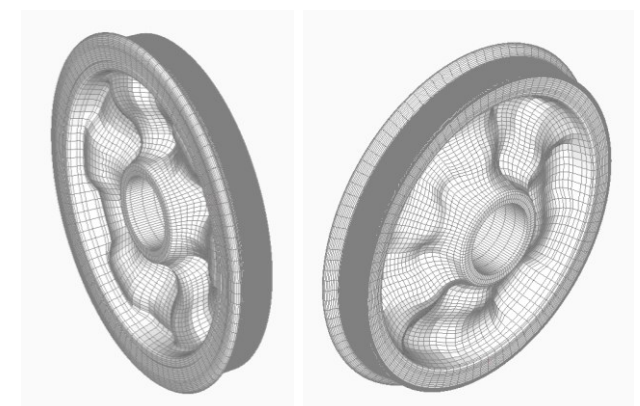
A 型および B 型車輪では板部が円錐状に傾斜しているため、リム部の温度が上昇すると熱膨張にともないリム部の軸方向位置がわずかに変化する。正常時には冷却後リム部位置は原状に復帰するが、限界温度以上に過熱され塑性変形が発生した場合、原状に復帰せずリム部位置の変化が残留する可能性がある。これは輪軸の内面距離測定によって使用中の車輪リム部の残留応力の異常を把握しうることを意味し、異常の可検知性の観点から重要な特性である。

現用の車輪は、JR 在来線だけでも、台上試験で限界温度が同定されているφ860 mm の A 型・B 型車輪に加え、φ810 mm の A 型・B 型車輪、N-A 型波打<sup>(2)</sup>および B 型波打車輪、さらに近年使用例が報告されている欧州形状の S 型車輪<sup>(3)</sup>など多岐にわたる。これらは各々の形状に応じた板部剛性を有し、過大熱負荷時の残留変形、限界温度、および冷却後の残留応力などの特性が異なると考えられる。

しかし、前述の台上試験が行われたφ860 の A 型・B 型車輪以外については過大熱負荷時の挙動が把握されていな



(a) FE model of N-A type corrugated wheel (860 mm, Initial diameter).



(b) FE model of B type corrugated wheel (860 mm, Initial diameter).

Figure 1 FE models of examined corrugated wheels extended to 360°.

い。このため、仮に内面距離の変化から残留応力の異常を検知しても、異常の程度は推定できない。列車運行の安全裕度の更なる向上のためには、車輪種別ごとの過大熱負荷による変形と発生応力を体系的に把握する必要がある。

前報<sup>(4)</sup>において、新品車輪径 860 mm (以下  $\phi 860$  と記す) の A 型、B 型、S 型車輪と  $\phi 810$  の A 型、B 型車輪の新品径・使用限度径について非線形 FEM を用い過大熱負荷時の変形と応力発生挙動を調査した。各車輪の降伏開始時点の温度を抽出することで、車輪径によらず各車輪の耐熱性能の大小を定量的に導出する手法を提案し、 $\phi 810$ -A 型車輪、次いで  $\phi 860$ -A 型車輪が耐熱性能に優れることを報告した。

本稿では、電車や気動車で使用例の多い N-A 型波打車輪と B 型波打車輪について、前報と同条件で過大熱負荷時の変形と応力発生挙動を調査した結果を示し、車輪形状と耐熱性能の関係について述べる。

## 2. 方法

対象車輪は波打形状のため、波の半周期にあたる  $30^\circ$  の 3 次元 FEM モデルを作成した。使用した FEM モデルを  $360^\circ$  に拡張したものを図 1 に示す。図面上、特定断面での板厚と波打振幅以外の正確な板部形状は不明のため、モデルは推定形状で厳密には実物形状と一致していない。ただし、本稿は板部応力ではなくリム部の温度と残留応力の把握を目的とすることから、板部はリム部の変形に対する拘束の程度が再現されていれば十分であり、板厚、振幅と概形のみを再現したモデルでも傾向の把握は可能と判断した。

モデルの概要と解析条件を表 1 に示す。熱負荷 33.3 kW は 25% 下り勾配を輪重 60 kN の車両が 80 km/h で抑速ブレーキ走行する条件に相当し、欧州の車輪規格 EN13979 でのブレーキ熱負荷の規定 (20 kW・40 分) よりも大きい。熱負荷が一定のため車輪径によって熱流束は異なる。構造解析には常温  $\sim 800^\circ\text{C}$  での SSW-QR 車輪鋼の縦弾性率、ポアソン比、線膨張係数および各温度の応力ひずみ曲線をバイリニアで近似した弾塑性強度特性を使用し、Mises の降伏条件を用いた。拘束条件は、両端断面の全ノードの円周方向変位を拘束、ボス内径部の全ノードを完全拘束とした。

## 3. 結果

**〈3・1〉 最高温度** N-A 型および B 型波打車輪の最高温度時点 (2400 s) での温度分布を Fig. 2 に示す。各々の新品径および使用限度径について最高温度時点での  $\theta = 0^\circ$  断面での踏面表面の最高温度を、同条件で FEM 解析を行った各種車輪と合わせて Fig. 3 に示す (N-A 型波打を青、B 型波打を緑で示す。以下同様)。図中、左側 7 項目が新品径の車輪、右側 7 項目が使用限度径の車輪を示す。車両単位で同じ熱負荷を与えているため、新品径よりも使用限度径の方が熱流束が大きく最高温度は高い。N-A 型波打車輪は他

Table 1 FE model and analysis specifications.

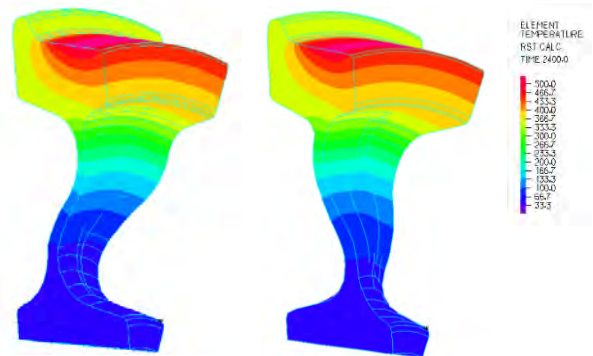
Number of element	205,312 (N-A, 860 mm), 153,468 (B, 860 mm) for $\theta = 0 \sim 30^\circ$
Element type	HEXA 8, Primary element
Element size	1 mm $\times$ 1 mm (Cross sectional) (at tread) 3.75 $^\circ$ (Circumferential)
Wheel diameter	860 mm, 780 mm
Heat input width	76 mm (on tread)
Power	33.3 kW, Constant
Analysis target time	14400 s
Heat input time	2400 s
Time interval	5 s ( $\sim 2400$ s), 10 s ( $\sim 7200$ s), 30 s ( $\sim 14400$ s)
Coef. of convection	50 W/m <sup>2</sup> K
Emissivity	0.2
Ambient temp.	25 $^\circ\text{C}$
Initial temp.	25 $^\circ\text{C}$
Analysis method	One-way coupling (Thermal > Structure)
Material property	Temperature dependent (25 $\sim$ 800 $^\circ\text{C}$ )
Software	ADINA 9.3.1

の  $\phi 860$  車輪と比較して最高温度がわずかに高かった。これは板部板厚が小さく熱容量が小さいことが影響した可能性がある。

**〈3・2〉 温度上昇時の変形** 各車輪について、最高温度時点 (2400 s) での車輪リム部の軸方向変位を Fig. 4 に示す。内面距離変化はこの倍となる。N-A 型および B 型波打車輪は  $\phi 860$ -A および B 車輪と近い値であった。

**〈3・3〉 冷却後の残留応力** 各車輪について解析終了時点 (14400 s) でのリム部 (波打車輪については  $\theta = 0^\circ$  断面) の円周方向残留応力の最大値を Fig. 5 に示す。使用限度径では N-A 波打車輪の残留応力値が最も低かった。また新品径では N-A 波打車輪は引張残留応力が発生しなかった。これは、今回の負荷条件で唯一、温度上昇時の降伏と塑性変形が発生しなかったためと考える (後述)。

**〈3・4〉 冷却後の残留変形 (内面距離変化)** 各車輪について解析終了時点 (14400 s) でのリム部の軸方向残留変位を Fig. 6 に示す。内面距離変化はこの倍となる。新品径ではこの条件では残留変形はほとんど生じなかった。使用限度径では B 型波打車輪は  $\phi 860$ -B 車輪と近い値であった。N-A 波打車輪は  $\phi 860$ -A よりも小さな値であった。



(a) N-A type corrugated wheel (b) B type corrugated wheel

Figure 2 Temperature distribution at time point 2400 s.

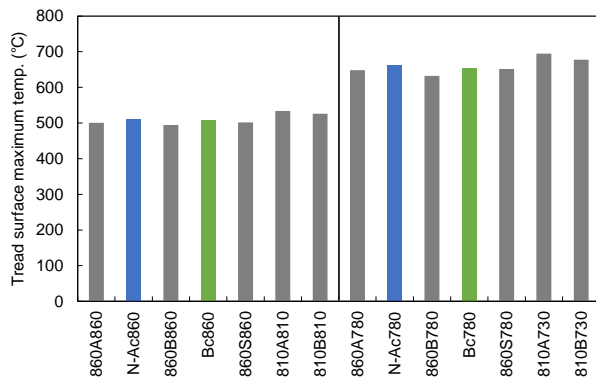


Figure 3 Tread surface maximum temperature.

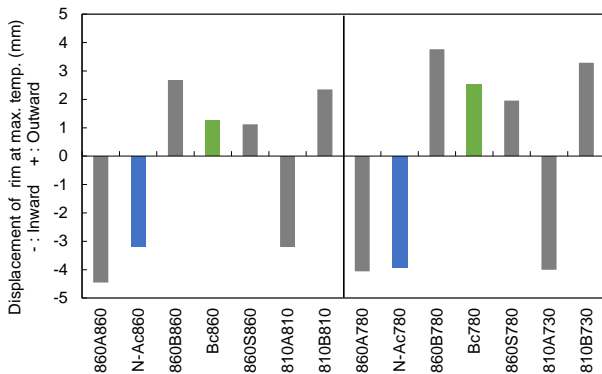


Figure 4 Displacement of rim at the maximum temperature.

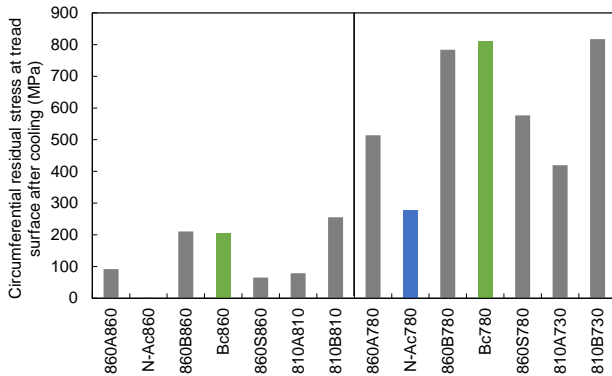


Figure 5 Circumferential residual stress generated after cooling.

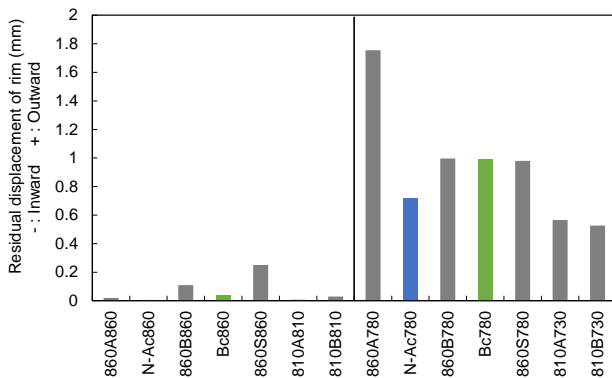


Figure 6 Residual displacement of rim after cooling.

#### 4. 考察

〈4・1〉 許容温度 (塑性変形開始温度) 前報<sup>(4)</sup>において、温度上昇による熱応力の増加過程で円周方向圧縮応力が極大となりその後低下する場合その時点で降伏と塑性変形が生じていること、および円周方向圧縮応力の極大と相当応力の極大は同じ時点で生じることを示し、踏面での降伏発生時の温度を抽出することで各車輪の許容温度を把握する手法を提案した。この許容温度以下では、初期応力が中立とした場合いかなる部位でも降伏が発生せず、局所的にでも冷却後の引張残留応力が生じないことを示す。

各車輪の塑性変形開始温度を Fig. 7 に示す。N-A 波打車輪 (新品径) では降伏が発生しなかったため、数値は 2400 s 時点の最高温度であり許容温度はそれよりも高い。許容温度は、調査対象車輪の中で N-A 型波打車輪が突出して高く、φ810-A 車輪が二番目に高く、次いで φ860-A 車輪と φ860-S 車輪の順であった。一方、B 型波打車輪の許容温度は φ860-B 車輪および φ810-B 車輪と同等であった。以上より N-A 型波打車輪は現用車輪の中で突出して高い耐熱性能を持つと判断した。

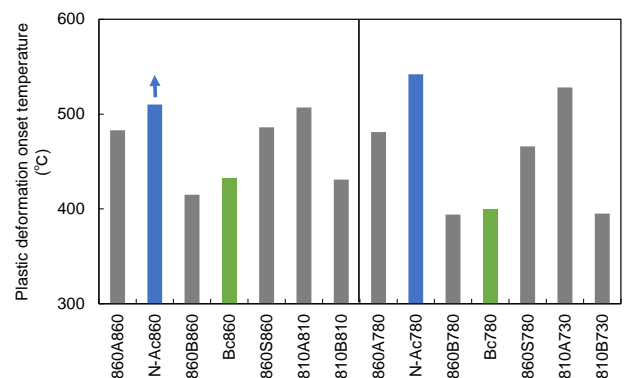


Figure 7 Plastic deformation onset temperature.

#### 〈4・2〉 φ860 N-A 型波打車輪の温度上昇時の挙動

φ860-A 車輪および φ860 N-A 波打車輪の踏面の最高温度点における円周方向応力の経時変化を Fig. 8 に示す。φ860-A 車輪では、2105 s 時点 (-395 MPa, 483 °C) において円周方向圧縮応力が極大となり降伏が生じた。2400 s で加熱終了後、冷却過程で圧縮塑性変形に対応した引張残留応力が発生した。これに対し φ860 N-A 波打車輪では円周方向圧縮応力の極大が発生しなかった。これは 2400 s まで降伏が生じなかったことを示す。

Fig. 8 より N-A 波打車輪では温度上昇時の発生応力が φ860-A 車輪と比較して小さい。Fig. 3 より N-A 型波打車輪の温度条件は他の φ860 車輪と同等である。一方、Fig. 4 より温度上昇時の軸方向変形量は φ860-A 車輪より小さく φ810-A 車輪と同等であった。

発生応力が低いことに関連して、 $\phi$  860-A、 $\phi$  810-A、 $\phi$  860-S および  $\phi$  860 N-A 波打車輪の 0 s ~ 2000 s の 100 s ごとの車軸を含む平面上でのリム部変位を 2000 s 時点の最高温度とともに Fig. 9 に示す。なお 2000 s 時点でいずれの車輪も降伏は生じていない。輪軸内側への軸方向変位は 860A 車輪が大きいのに対し、N-A 波打車輪および 810A 車輪では半径方向外側(円周拡大方向)への変位が大きい。これが N-A 波打車輪で発生応力が小さいことに影響している可能性が考えられる。Fig. 9 上の変形挙動は 810A 車輪と類似しているが、2000 s での到達温度は N-A 波打車輪の 479 °C に対して 810A 車輪では 502 °C であり、2000 s での半径方向変位は前者がわずかに大きいことから、N-A 波打車輪はより低い温度で大きな周拡大方向変位を許容していると言える。このような拘束の小ささが、N-A 波打車輪の高い塑性変形開始温度に帰結している可能性がある。

板部によるリム部の周拡大方向変位への拘束が小さいことの要因は不明だが、波打形状のために強度上必要な板厚が小さいこと自体が、結果的にリム部変位への拘束を低下させている可能性が考えられる。しばしば、波打車輪は軽量化形状と説明されるが、N-A 型波打車輪については、波打による板厚低減をリム部の周拡大方向の剛性低下に活用して高い耐熱性能を得ていると解釈できる。この場合、波打形

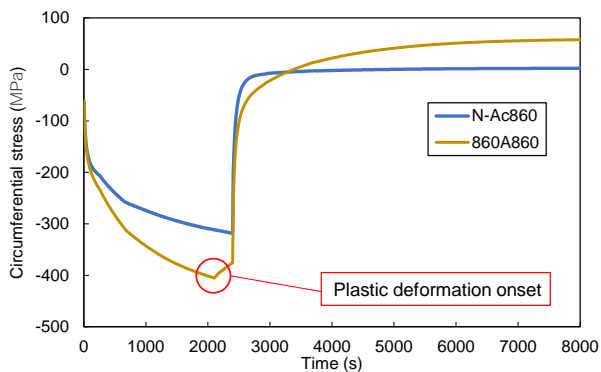


Figure 8 Variation of circumferential stress with time.

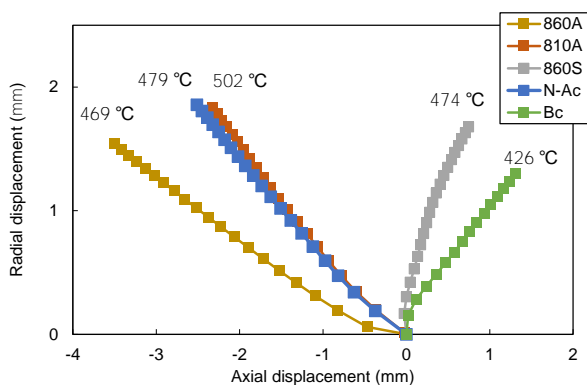


Figure 9 Displacement of rim on a plane containing wheel axis.

状の利点は「軽量化」と同時に「リム部の拡大方向の支持剛性の低減による耐熱性能の向上」であると言える。

〈4・3〉 許容温度に影響する因子 B 型波打車輪の許容温度は  $\phi$  860-B 車輪および  $\phi$  810-B 車輪と同等で、N-A 波打、810A および 860B 車輪と比較して低かった。Fig. 9 上に B 型波打車輪の 1500 s 時点までの 100 s ごとのリム部変位を追記して示す。なお 2000 s 時点までとしなかったのは 1550 s 時点で降伏が生じたためである。温度上昇に伴い周拡大方向に変形するが、半径方向の変位は小さく、これは板部からの拘束の程度が大きいことを示すと考えられる。

一方、輪軸の内面距離変化として測定可能なリム部の残留変位は、許容温度を上回る温度履歴を車輪使用中に把握できるものの、Fig. 5 および Fig. 6 から明らかなように、残留応力と残留変位の関係は車輪種別によって異なる。概ね許容温度が低い車輪ほど残留変位に対する発生残留応力が大きい傾向があると言える。車両検修時、これらの車輪で内面距離の変化を検出した場合は注意を要すると考える。

## 5. 結論

N-A 型波打車輪と B 型波打車輪について、過大熱負荷時の変形と応力発生挙動を FEM により調査した。既報の他種別の車輪の結果<sup>(4)</sup>と合わせて各車輪の踏面ブレーキ熱負荷時の許容温度を把握し、許容温度に影響する因子を考察した。本検討で得られた知見は以下の通りである。

- ① N-A 型波打車輪は調査対象車輪のなかで突出して塑性変形開始温度が高く、耐熱性能に優れる。またリム部に引張残留応力が発生した状況での軸方向変位が大きく、異常の可検知性にも優れる。
- ② N-A 型波打車輪の耐熱性能の高さは、リム部の周拡大方向変位に対する板部による拘束の程度が小さいことによる可能性がある。この場合、波打形状で板部板厚が小さいことの利点は、軽量化だけでなく支持剛性の低減による耐熱性能の向上にもあると言える。
- ③ 概ね許容温度が低い車輪ほど残留変位に対する発生残留応力が大きい傾向がある。こうした車輪で内面距離変化を検出した場合には注意を要すると考える。

## 文 献

- (1) 広岡敏夫 他：踏面ブレーキの車輪に及ぼす影響 [一体車輪の熱的影響]，鉄道技術研究所速報 No.72-143，昭和 47 年 7 月 (1972)
- (2) 山村佳成 他：耐ブレーキ熱波打車輪の開発，住友金属，Vol.46, No.4 pp.77-84 (1994)
- (3) Alberto RONCHI, et al. : Application of EN-based design for non-European scenarios: the case of Lucchini RS and JR-West, Proc. of The 19th International Wheelset Congress, Venice, 2019, 6A-3 (2019)
- (4) 半田和行：踏面ブレーキ車輪の形状と車輪径が過大熱負荷時の限界温度と残留応力に及ぼす影響，日本機械学会 第 28 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL2021) S7-1-5 (2021)