

SS1-1-4 超音波音弾性による踏面ブレーキ不緩解時の 車輪安全性判定手法

正 [機] ○半田 和行 (鉄道総研) 正 [機] 尾崎 稜 (鉄道総研)
エリック ランドストローム (チャルマース工科大)

Safety Assessment of Tread-Braked Railway Wheels Under Malfunction Drag Braking Using Ultrasonic Acoustoelasticity

Kazuyuki HANDA, Ryo OZAKI, Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari, Kokubunji, Tokyo
Eric Voortman LANDSTRÖM, Chalmers University of Technology

The application of ultrasonic acoustoelasticity for the safety assessment of tread-braked railway wheels subjected to malfunction drag braking was investigated. Ultrasonic residual stress measurements were found to be potentially more effective for detecting wheel anomalies compared to conventional techniques, such as strain gauges and X-ray diffraction. It was observed that the acoustic anisotropy of wheel cut pieces did not match the values reported in the literature, making direct, non-destructive stress measurement in specific wheels challenging. Therefore, a comparative assessment method was proposed, in which the measured stress values are compared to those from wheels of the same type and diameter, without abnormal loading histories.

Keywords : wheel, residual stress, ultrasonic acoustoelasticity, tread braking, stress distribution

1. はじめに

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急進破壊のおそれなく使用できる担保となっている。しかし、ブレーキ装置の異常等により車輪リム部が許容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。リム部に著大な引張残留応力が発生すると最悪の場合には車輪の割損にいたる可能性がある。

国内での車輪過熱による割損は主に 1960~70 年代、耐雪性能が低い当時の合成制輪子が寒冷地に適用され、降雪時に手動耐雪ブレーキ扱いが多用された車両で夜間留置中に発生したことが知られている¹⁾。一方海外では、2023 年 8 月スイス・ゴットアルドバーストンネル西線を走行中の貨車の車輪割損により脱線事故が発生し同線が 1 年以上不通になるなど、近年も発生している²⁾。

踏面ブレーキ不緩解等による車輪過熱が疑われる事象が発生した際、車輪の状態を判定し継続使用可否を判断するにはリム部の残留応力を把握することが望ましいが、在姿での残留応力測定は困難なため、通常は間接的に状態を推定しており、不確実性を回避するため安全側を見て車輪交換との判断がなされ、必要以上の車輪交換や運用制約を生じている可能性が考えられる。

本稿では、高精度な車輪残留応力状態の把握手法として、超音波音弾性法による車輪残留応力測定に着目し、ブレーキ不緩解事象発生時の車輪安全性判定に適用する手法について検討した結果を述べる。

2. 各種の車輪残留応力測定法

車輪リム部の残留応力を把握する手法として現在国内で適用可能なものは以下の通りである。

① ひずみゲージ切断法: 測定対象部の表面にひずみゲージを貼付した後、周囲を切断して応力を開放し、ひず

み変化分に相当する残留応力を求める。破壊検査で事前に車輪の取外しが必要。

② X線回折法: 車輪鋼のフェライトの BCC 格子面間隔から残留応力を求める。リム表面では製造時の機械加工による圧縮応力が検出されるため、測定部を一定の深さまで事前に電解研磨する必要がある。装置は定置式のほか可搬型も普及しているが、現地測定や在姿測定は行われていない。

③ 内面距離による推定: リム部残留応力状態が変化するとリム部に軸方向の残留変位が生じることを利用し、内面距離の変化から応力状態を推定する。ただし車輪形状によって残留変位の挙動は異なる。

④ 塗膜はく離状態による推定: リム部が過熱されると製造時の塗装がはく離することを利用し、はく離範囲を観察して継続使用可否を判断する。

現在のところ、不緩解事象が発生した際車両基地等で非解体での残留応力状態を推定するには、③内面距離変化、④塗膜はく離の観察を用いる以外の手法がない。これらは国鉄時代からの実績を有する手法であるが、残留応力変化に対する内面距離変化が小さい車輪では判定精度が低い、車輪が再塗装されていた場合判定の信頼度が不明、といった問題がある。特に狭軌電車の M 台車で踏面ブレーキが使用される各種 B 型車輪は比較的車輪耐熱性が低くかつ残留応力変化時の内面距離変化が小さいことが課題である^{3) 4)}。これらの課題を解決するには、非解体・非破壊で残留応力を直接測定する手法が必要で、超音波音弾性によるリム部応力測定は現状で唯一実用化可能な手法と考えられる。

3. 超音波音弾性法の概要

超音波音弾性式の車輪残留応力測定は、車輪リム面もしくはバック面から、半径方向と円周方向に直交する超音波横波(剪断波)を入射させ、直交方向の応力差に起因する

音速差を測定して得られる音響異方性から残留応力を算出する。国内では 1980 年代に当時の住友金属工業と大阪大学が開発し一連の測定結果が報告されている⁵⁾。

住友金属工業 (当時) によれば、同方式の実用面での課題は①超音波横波を車輪に入射させるための接触媒質が高粘度で扱いが困難、②入射面と反射面をサンドペーパー等で仕上げ加工する必要があり非実用的、の 2 点とされている。前者については、電磁超音波 (EMAT) 方式とすることで解消するとされ別途開発が行われている⁶⁾。

欧州では、主として定期検査時に車輪の健全性を確認する手法として超音波式残留応力測定が多数実施されている。輪軸検査ラインに常設された設備としては EMAT 式が用いられるほか、臨時検査のために可搬型の直接入射式・EMAT 式双方の装置が使用されている⁷⁾。

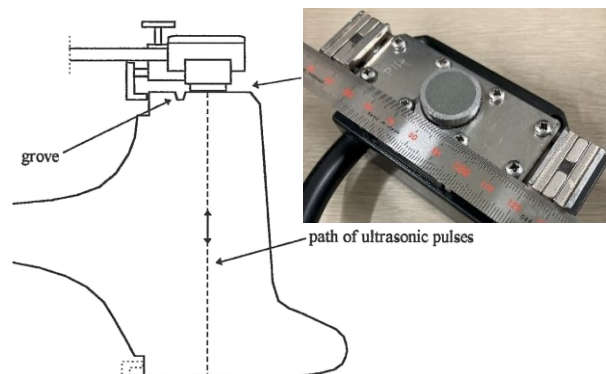


Fig.1 Ultrasonic path and probehead.

4. 超音波音弾性法の問題点

音響異方性は、応力の異方性のほか材料の金属組織の異方性の影響を受ける。直交方向の音速差から応力を算出するには、材料異方性にもなる音響異方性が事前に把握されている必要がある。材料異方性は、金属組織が結晶配向 (集合組織) を含めて完全に等方性であればゼロとなる。しかし車輪は製造時に熱間圧延されており、熱処理時のオーステナイト化により異方性は低減していると考えられるものの、製品状態でも材料音響異方性は残存している。車輪リム部の材料音響異方性は車輪材質や製造法によるほか、半径方向の位置によって変化し、車輪踏面に近いほど材料音響異方性は小さいとされる⁵⁾。

欧州の可搬型計測器では、音響異方性が車輪材質ごとに規定値として設定されているが、欧州の車輪では同じ車輪材質でも異なる製造メーカーの異なる製造ラインからの製品が存在することから、音響異方性を車輪材質ごとに一意に設定することは、厳密な応力値を求める観点からは妥当ではない。半径方向の異なる位置に対して同一の音響異方性値を適用することも、同様に適切ではない。

こうした問題について、欧州では検査時の応力値の許容範囲を大きくとり著大な引張応力の検出に特化していると考えられる。一例として EMAT 式の装置の販売業者⁸⁾によると、ドイツ貨車所有者協会 (VPI) の規定では、使用中の車輪の超音波残留応力の許容範囲は最も狭く設定された車輪種別でも -350 MPa ~ +250 MPa とされている。

また、国内の文献⁹⁾では材料異方性を確認するため切断した車輪片の応力値を議論しているものの、材料異方性を測定結果から除外する手法への言及はない。言い換えると、複数種別の車輪の在姿応力測定に直接適用できる見込みは得られていない。

5. 装置の概要および設定値

今回、スウェーデン・チャルマース工科大が保有する欧州製の超音波式車輪残留応力測定機を使用し、同手法の適用可能性を検討した。装置の概要を表 1 に示す。

Table 1 Specification of the equipment.

Manufacturer	DEBRO UMS (Warsaw, Poland)
Product	DEBBIE
Dimension	150×164×69 mm
Probehead	Multi-transducer, Shear wave
Probe diameter	20 mm
Frequency	2 MHz
Transducer	Piezoelectric, Ceramic
Battery	12 V 6.5 Ah lead-acid, hermetic housing

同装置では残留応力の算出にあたり、材料音響異方性と音弾性係数をあらかじめ設定する。後者については鋼種間の違いは少ないとされ車輪鋼の実測例として同装置のマニュアルでは $-76 \sim -81 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$ 、文献⁵⁾では $-76 \pm 1.5 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$ が示されていることを踏まえ、 $-79 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$ を用いた。材料音響異方性は製造および熱処理によって異なり、この設定値が算出される応力値に大きく影響する。このため本検討では材料音響異方性をゼロと仮定した応力値を導出した。設定値を表 2 に、装置の設定表示を図 2 に示す。

Table 2 Measurement settings.

A0 (Material anisotropy)	0
B (Elastoacoustic constant)	-79 ($\times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$)



Fig.2 Setting screen of the equipment.

超音波横波を送受波器から試料に伝達するには剪断波を伝達可能な高粘度の接触媒質が必要で、水や油は使用できない。接触媒質には通常フェノールが用いられるが、非結晶の蜂蜜も使用可能とされ本検討では後者を用いた。使用した接触媒質を表 3 に示す。車輪リム部への塗布状態と図 1 のプローブの設置状態を図 3 に示す。

Table 3 Detail of the couplant

Seller.	AEON Co., Ltd.
Product name	TOP VALUE Pure Honey
Ingredients	Honey (China)
Manufacturer	Mizutani Bee Farm Co., Ltd.

測定部は接触媒体塗布前に脱脂洗浄した。国内の車輪のリム部は塗装されているが、塗装上を脱脂洗浄しただけで問題なく測定可能であった。ただし表面に錆が浮いた箇所では感度警告が表示され、測定できない場合があった。



Fig.3 Ultrasonic couplant and probehead of the equipment.

6. 測定対象車輪と測定結果

超音波音弾性法の適用可能性評価を目的に、鉄道総研に留置された車輪のうち新品状態で製造時の残留応力が作用していると考えられるものについて、半径方向の位置ごとの超音波残留応力値を複数の周方向位置で測定した。さらに残留応力が開放されていると考えられるリム部を切り出した実車輪カット片 (図 3) についても同様に半径方向の位置に対する超音波残留応力値を測定した。

測定結果を図 4 に示す。横軸はリム部半径方向の位置で外周側端部 (リム端) を 0 とし、直径 20 mm の超音波プローブの中心位置をプロットした。リム端の面取り 3 mm を除いた最外周位置にプローブを設置した場合半径方向位置は 13 mm となる。

残留応力が開放され材料音響異方性の寄与分を示すと考えられる 810A-SQ 車輪の切断試験片では、外周側で平均 -24 MPa の圧縮応力、内周側で平均 25 MPa の引張応力に相当する音響異方性が検出された。

未使用の 4 種類の車輪については、車輪径、板部形状、熱処理は各々異なるが、いずれも外周側で約 -70 ~ -130 MPa の圧縮応力、内周側で約 10 ~ 60 MPa の引張応力に相当する音響異方性が検出された。

これらの車輪が切断した 810A-SQ 車輪 (前述) と同一の材料音響異方性をもつと仮定すれば、各車輪の応力測定値から外周側で平均 -24 MPa、内周側で平均 25 MPa の応力を減ずることで残留応力が算定でき、その場合残留応力は外周側で約 -46 ~ -106 MPa、内周側で約 -15 ~ 35 MPa と推定される。

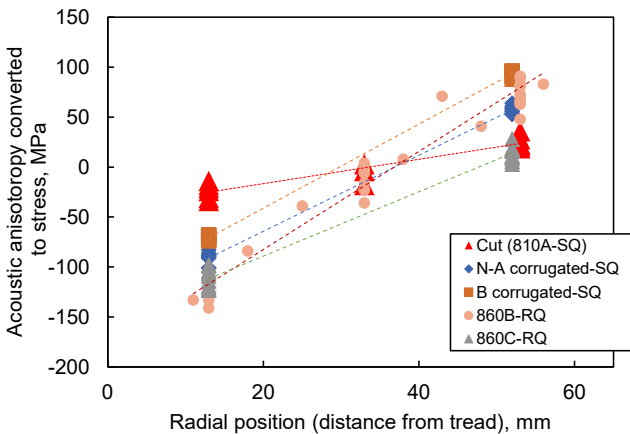


Fig.4 Acoustic anisotropy converted to stress.

7. 考察

7.1 残留応力反転車輪における応力検出値

前述の通り従前の車輪残留応力測定はリム面またはバック面の表面のひずみを応力に換算している。これに対し超音波音弾性法では理論上、図 1 に示すプローブ設置箇所 (プローブ径を直径とする) リム面からバック面に至る円筒状領域の平均応力が算出される。

両者による応力検出性の違いを把握するため、弾塑性有限要素解析で応力分布を生成⁴⁾した残留応力反転車輪での両者の理論上の検出値を比較した。踏面ブレーキで過熱した車輪リム部の残留応力反転状況を 3 パターン設定した。超音波音弾性法における材料音響異方性の寄与分はないものと仮定した。設定した車輪円周方向残留応力分布を図 5 に示す。

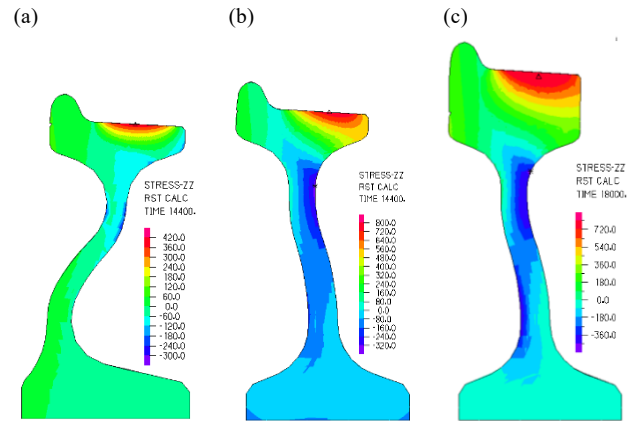


Fig.5 Tensile residual stress distribution examples.

これらについて図 6 に示すように、リム外周側でのリム面・バック面の表面応力と超音波残留応力、踏面中央部の最大応力およびリム外周領域の平均応力を比較した。

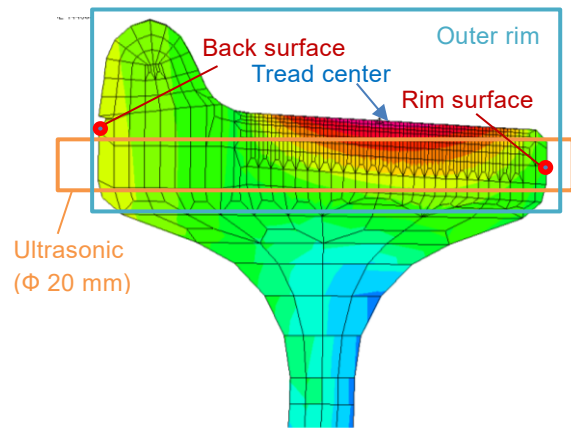


Fig.6 Stress evaluation areas.

図 5 (a)~(c)の各応力分布についての評価結果を図 7 に示す。リム外周部の平均応力に対し、リム面・バック面の表面応力はケースにより大きな差があったのと比較して、超音波残留応力はリム外周部平均応力との差が小さかった。このことから車輪の開口度と関連すると考えられるリム部外周部全体の応力状態の把握には、リム外周側での超音波残留応力を用いることが有効である可能性がある。

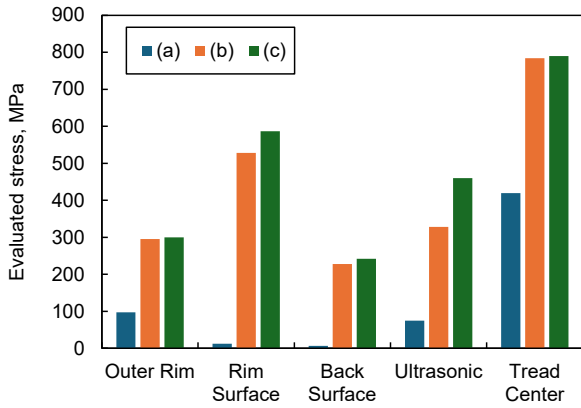


Fig.7 Stress evaluation results.

7.2 在姿での状態判定への適用について

文献⁹⁾による実車輪カット片の音響異方性を図 8 に示す。図 8 の横軸はリム部の半径方向座標だが本検討とは逆に内側端部を 0 としているため、横軸を反転すると図 4 の横軸に対応する。図 8 によれば、当時の住友金属工業製の供試車輪はリム部の外側端部付近では材料音響異方性がほぼゼロである一方、内径側に移動するにつれて材料音響異方性が大きくなる。図 8 において左側縦軸の Tr-T_θ 値が 60 程度で約+100 MPa の残留応力に相当することから、リム内側端部付近では材料音響異方性によって最大約+100 MPa の引張残留応力が検出される事が考えられる。

図 4 と図 8 の実車輪カット片の材料音響異方性は、内周側でプラス側となる傾向は一致するが数値は異なる。このことから同一メーカー製の同一熱処理の車輪で、さらに仮に半径方向の位置を限定したとしても、音響異方性を一意に設定して残留応力を求めることが妥当とは考え難い。厳密には、当該車輪自体または当該車輪と等価な材料音響異方性を有する車輪のカット片による材料音響異方性値を実測しない限り信頼しうる残留応力値は導出できないと考えられる。

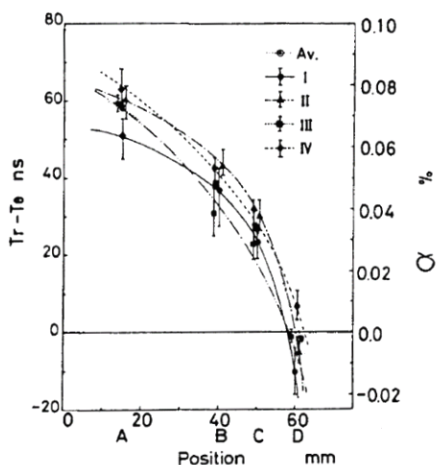


Fig. 8 Material anisotropy in rim section⁹⁾.

これらを考慮し、在姿で車輪状態を判定する手法として、残留応力値自体ではなく、当該車輪以外の正常車輪との残留応力値の差から当該車輪の安全性を把握することを提案する。具体的には、以下の条件を満たす場合には比較車輪の測定値との差を用いることが考えられる。

- ① 編成中に、当該軸以外で不緩解が生じていない正常な車輪が存在する。
- ② 編成中の正常な車輪の中で、当該車輪と同種類・同車輪径のものが存在する。

同種同径車輪の応力測定値に対して当該車輪の測定値が引張側に差があれば、その応力が異常負荷による変化分と判断することができる。と考える。

応力差の許容値については慎重な議論が必要であるが、種々の車輪の応力条件を考慮すると、輪心と別体構造のタイヤ車輪ではタイヤ側に引張応力が作用しており標準的な条件で 142~152 MPa とされる⁹⁾こと、EN 規格で規定される新品一体車輪の圧縮残留応力は超音波プローブで測定可能踏面 10 mm 下では小さく見積もって-50MPa 程度と想定されることは参考情報として活用できる可能性がある。

以上を踏まえ、具体的な適用法として以下を提案する。

- ① 正常な同種同径車輪に対して、半径方向同一位置で測定された応力値を比較すること。
- ② 応力値は、同種同径車輪では複数回測定の最大最小を除く平均値、当該車輪では熱影響が大と見られる部位での複数回測定の最大値を用いること。

8. 結論

超音波音弾性法による車輪残留応力測定装置について、在姿での車輪残留応力状態判定への適用可能性を検証した。得られた知見は以下の通りである。

- ① 塗装状態のリム部で車輪応力測定が可能であった。
- ② 新品車輪のカット片を用い、材料音響異方性を把握した。この結果は過去の文献値と一致しなかった。
- ③ 数値モデル上でリム部に引張残留力を生成した車輪による検討では、超音波応力測定により、ひずみゲージ法やX線回折法などによる表面応力値と比較して、リム部外周部全体の応力状態により近い応力値が得られた。
- ④ 在姿での車輪応力状態の判定に際し、超音波音弾性法による応力測定値を、異常負荷履歴のない同種同径車輪の測定値と比較する手法を提案した。

参考文献

- 1) 出村要 他: ディーゼル, 5 (1985) 25-30
- 2) https://www.sust.admin.ch/inhalte/BS/2023081002_GBT_ZB_i.pdf (2024/10/8 閲覧)
- 3) 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, 1972
- 4) 半田和行 他: 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, J-Rail 2022 講演論文集, 2022
- 5) 福岡秀和 他: 鉄道車両用一体圧延車輪リム部の残留応力の音弾性解析, 日本機械学会論文集 A50-453 (1984) 945
- 6) 村山理一 他: 車輪残留応力測定装置の開発, 電気学会誌 110-D (1990) 866
- 7) 高速車両用輪軸研究委員会 [編]: 鉄道輪軸, 丸善出版, 2008
- 8) <https://www.youtube.com/watch?v=pvFZt1HKTrg> (2024/10/8 閲覧)
- 9) 広重巖: 輪軸, 交友社本店, 1971