

日本と欧州における車輪の違い

～強さか、やさしさか～



半田 和行
Kazuyuki Handa
材料技術研究部
エキスパートマネージャー



池内 健義
Katsuyoshi Ikeuchi
材料技術研究部
摩擦材料研究室
主任研究員



尾崎 稜
Ryo Ozaki
車両技術研究部
車両強度研究室
研究員

はじめに

鉄道車輪は鉄道車両の安全な走行を支える最も重要な保安部品の一つです。本稿では鉄道車輪の材質の変遷と背景そして近年の技術要求について、日本と欧州の違いという観点から紹介します。前提として現代の鉄道車輪(図1)は、製造時の熱処理で付与される圧縮残留応力(図2)による耐割損安全性という技術的特徴をもち、これは日欧の鉄道車輪の変遷の点でも重要です。

欧州と日本の車輪の変遷

歴史的に鉄道車輪は輪心とタイヤが別体のタイヤ車輪(図3)が一般的でしたが、1950年代頃から一体で圧延成形され軽量で安全性の高い一体車輪に移行しました¹⁾。

欧州では、用途に応じて複数の鋼材炭素量(硬さレベル)が用いられ、さらに一体車輪製造時の熱処理について国による技術思想の違いが生まれました²⁾。イギリスやイタリアでは早くか

図1 鉄道車輪の外観と名称

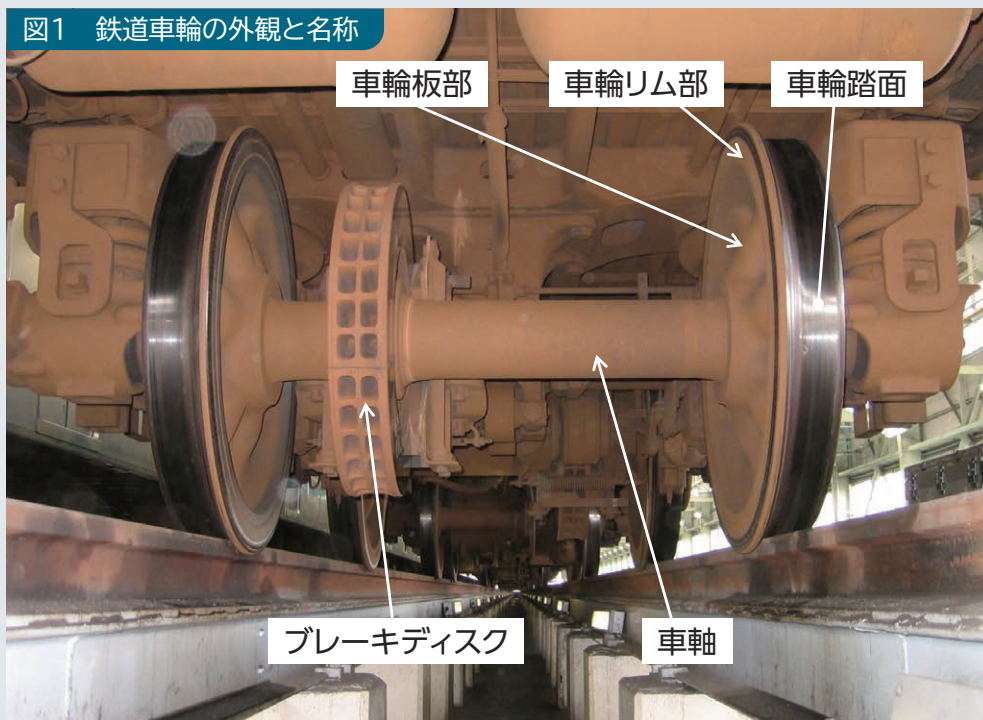


図2 車輪リム部の圧縮残留応力

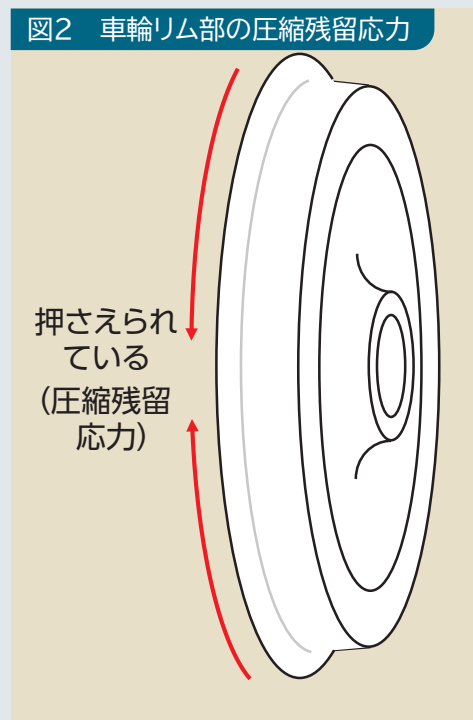




図3 種々のタイヤ車輪（右奥は木製輪心の「マンセル車輪」）

らリム部焼入れによる圧縮応力付与が行われたのに対し、ドイツでは金属組織の安定性を優先した空冷・焼きならし処理が多用されました。後者は圧縮応力は得られませんが、使用中の応力状態の把握の点で有利とされたようです。フランスでは車輪メーカー独自の全体焼入れ法が開発され、リム部だけでなく板部も含めた車輪全体の強度と応力状態が制御された車輪としてTGV車両などに適用されました。こうした違

いは1984年に刊行されたUIC規格²⁾でも並記され2000年代まで継続しましたが、欧州の相互運用性仕様(TSI)に対応する形で2004年に制定されたEN規格³⁾でリム焼入れ車輪のみが規格化され(表1)、ドイツとフランスの技術思想をくむ車輪は消滅していきました。このEN規格に大きな影響を与えたのは、1998年6月に発生したドイツICE-1車両の弾性車輪タイヤ部の疲労破壊による脱線事故でした。この車両

表1 日欧の車輪規格での鋼種と仕様(硬さは換算値を含む)¹⁾²⁾³⁾

規格と鋼種名			仕様		
JIS E 5402-1	UIC 812-3	EN 13262	鋼材炭素量 (%)	熱処理	硬さ (HB)
	R1 / R1N	-	< 0.48	非熱処理/焼きならし	179 ~ 215
	R2 / R2N	-	< 0.58	非熱処理/焼きならし	210 ~ 253
	R3 / R3N	-	< 0.70	非熱処理/焼きならし	242 ~ 283
	R6T	ER6	< 0.48	リム焼入れ	235 ~ 269
	R6E	-	〃	全体焼入れ	〃
	R7T	ER7	< 0.52	リム焼入れ	246 ~ 283
	R7E	-	〃	全体焼入れ	〃
	R8T	ER8	< 0.56	リム焼入れ	258 ~ 294
	R8E	-	〃	全体焼入れ	〃
	-	ERS8	< 0.57 (高Si, 高Mn)	リム焼入れ	269 ~ 310
	R9T	ER9	< 0.60	リム焼入れ	269 ~ 318
	R9E	-	〃	全体焼入れ	〃
SSW-AR			0.60 ~ 0.75	非熱処理	238 ~ 294
SSW-QS			0.60 ~ 0.75	リム焼入れ(緩徐)	246 ~ 307
SSW-QR			0.60 ~ 0.75	リム焼入れ	311 ~ 363
SSW-QRH			0.60 ~ 0.75	リム焼入れ	295 ~ 347



平川賢爾教授寄贈・九州旅客鉄道株式会社保有

【コラム】ICE-1車輪の一斉交換

事故後、残るICE-1車両59編成は弾性車輪(図4)を一体車輪に交換するまで運用不可とされ、車輪約5,000枚の緊急調達と緊急交換が行われました。これはドイツだけでなくフランスやイタリアの車輪メーカーも納入予定を変更してフル生産を行い、車輪交換工事はスイスやオーストリアの車両整備工場でも実施するなど各国の関係機関が全面的に協力して実行され、約5か月で全数交換を完了しました。

図4 ICE-1車両の弾性車輪の構造を示すカットモデル

は振動対策としてタイヤ車輪の一種である弾性車輪への変更が行われていたもので、一体車輪の圧縮応力が鉄道車輪の安全に不可欠な特性として再認識されました(図4)。[【コラム】](#)

日本ではタイヤ車輪の時代から独自の取り組みが行われていました¹⁾。1872年の鉄道開業時にはイギリス規格のタイヤ車輪が導入されましたが、1906年にタイヤ車輪の国内製造が開始されると鋼材炭素量についてさまざまな試行が行われ、1926年から1930年にかけて官民合同の研究会在組織されてタイヤ車輪とレール双方の鋼材炭素量についての大規模な模型敷設試験が車輪メーカーにより実施されました¹⁾。これは材質の組み合わせと摩耗の関係について実軌道で対照実験する世界でも例を見ない研究でした。この結果、車輪・レールの両方とも炭素量が高く硬い材質の組み合わせのとき、双方とも摩耗が抑制されるとの知見が得られ、これにより以後日本では世界的に見て炭素量が高く硬いタイヤ材質が採用されました。この材質はタイヤ車輪から一体車輪に移行した際にそのまま継承され、JISの車輪規格では高炭素鋼1材質のみが規定されています⁴⁾。

日本の一体車輪では熱処理は当初よりリム焼

入れが適用されましたが、基本のリム焼入れ(QR:リムクエンチ)処理に加え、踏面ブレーキを念頭に冷却速度を抑えた緩徐焼入れ(QS:スラッククエンチ)、およびディスクブレーキ方式の新幹線車両用に板部応力緩和のため焼戻し温度を変更した処理(QRH)と、1材質に対して用途に応じた3種類の熱処理が規定されています(表1)⁴⁾。

最近の動きとしては、欧州では2020年に改訂された最新のEN規格で炭素以外の添加元素を増加して強度を向上した新鋼種(ERS8)が新たに規定されました³⁾。この鋼種はディスクブレーキ専用で踏面ブレーキは適用外としているのが特徴です。日本でもこの材質と近い着想による低合金鋼¹⁾について新幹線開業前や1970年代に研究開発されましたが現車試験の結果、耐久性能の点で従来鋼種が優位とされています。

車輪の安全管理の思想の違い

車輪には車両重量を支持しつつレール上を転動する際の荷重に対して十分な強度をもつ材質と設計が必要ですが、さらに特有の使用条件として踏面ブレーキによる熱負荷があります。

鉄道車両の基礎ブレーキ装置は踏面ブレーキ



踏面制輪子

図5 車輪踏面ブレーキの例

とディスクブレーキに大別され、後者が車軸または車輪側面に設置された専用のブレーキディスクを用いるのに対し、前者の踏面ブレーキ(図5)は車輪踏面に踏面制輪子を押し付けてブレーキ摩擦面として使用します。踏面ブレーキは鉄道黎明期から用いられていますが、車輪の熱容量の制約から適用速度に限界がある上、レールとの接触応力と摩擦熱の複合的な負荷によって踏面熱き裂や踏面凹摩耗などさまざまな車輪損傷を誘発し保守上の課題となる場合もあります。

図7 車輪過熱による割損例

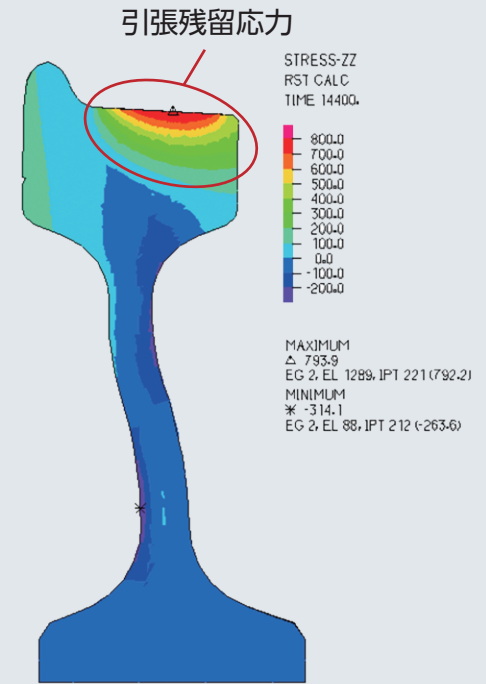


図6 過熱による引張残留応力の計算例

安全上、踏面ブレーキが問題となるのは、ブレーキ用の空圧弁の不具合等により、踏面制輪子が押しつけられたまま緩解せずに走行(ブレーキ不緩解)して車輪が設計上の想定を超える温度まで異常加熱した場合です。車輪のリム部が限界温度以上に過熱されると、残留応力が引張応力に反転し(図6)、顕著な引張応力が発生した車輪は割損の危険性が生じます⁵⁾(図7)。**コラム**

日本では踏面ブレーキ車両でも車輪リム部に

【コラム】異常加熱による車輪の割損

日本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状況で発生したことが知られています(図7)。海外では、2023年8月スイス・ゴットルドベーストンネル西線を走行中の貨車の車輪が割損し脱線事故により同線が1年以上不通になるなど、近年も発生しています⁵⁾。

圧縮応力が作用した状態での使用が原則で、ブレーキは車輪の残留応力が変化しない温度範囲内で使用されます。これに対して欧州では使用中の熱負荷のため徐々に引張応力が生じることが一般的とされています⁶⁾。こうした違いは、軸重の差に加え、車輪鋼の強度の違いも影響していると考えられます。このように踏面ブレーキ車輪の安全管理の思想は日本と欧州で異なり、日本では安全裕度が大きく取られていると言えます。

一方、欧州でも特に抑速ブレーキを多用し引張残留応力が大きくなる山岳路線の貨車などでは、超音波音弾性を利用して車輪の応力が検査され、限度値も定められています⁶⁾。これを踏まえ鉄道総研では、超音波式の残留応力測定装置を利用して車輪のブレーキ不緩解時の異常加熱履歴を推定する手法を開発しました。台上試験で段階的に異常加熱させた車輪に対して超音波応力の値で加熱履歴が把握できることを確認し(図8)、ブレーキ故障時やブレーキ設定を変更した車両の車輪加熱履歴を鉄道総研で把握する際に活用しています。

上下分離運営と「やさしさ」の点数化

これまで述べた通り踏面ブレーキには使用上の制約や課題があり、日本では在来線車両の多数で安定的に使用されている一方、欧州では主に貨車で使用され、旅客車や機関車はディスクブレーキが大部分でした。しかし近年、踏面ブレーキがにわかに脚光を浴び適用範囲が拡大しつつあります。

これは、上下分離・オープンアクセス方式の

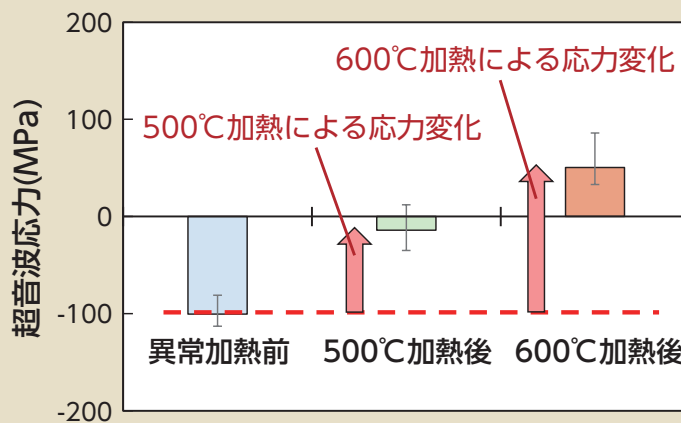


図8 意図的に異常加熱した車輪の外観と超音波残留応力の変化

鉄道運営における線路使用料の一部が「軌道に優しい車両は、軌道をより損耗させる車両よりも低料金」という原則のもと、列車ごとの軌道の損耗コストに応じて定められるためです。図9にイギリスにおける線路使用料算出のための車両諸元の項目例を示します⁷⁾。中でもばね下質量は軌道損耗コストに直結しますが、例えば車輪側面ディスク方式の車両(図10)で各車輪の両側に締結されたブレーキディスク分のばね下質量は、踏面ブレーキ方式であれば削減できます。このため踏面ブレーキの適用拡大に向

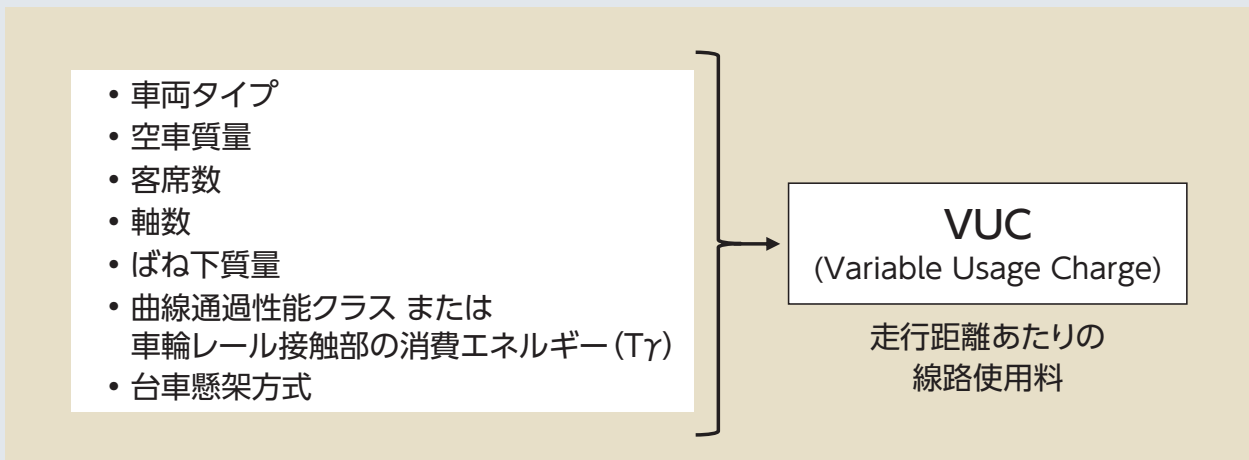


図9 線路使用料の算出に用いられる項目例⁴⁾

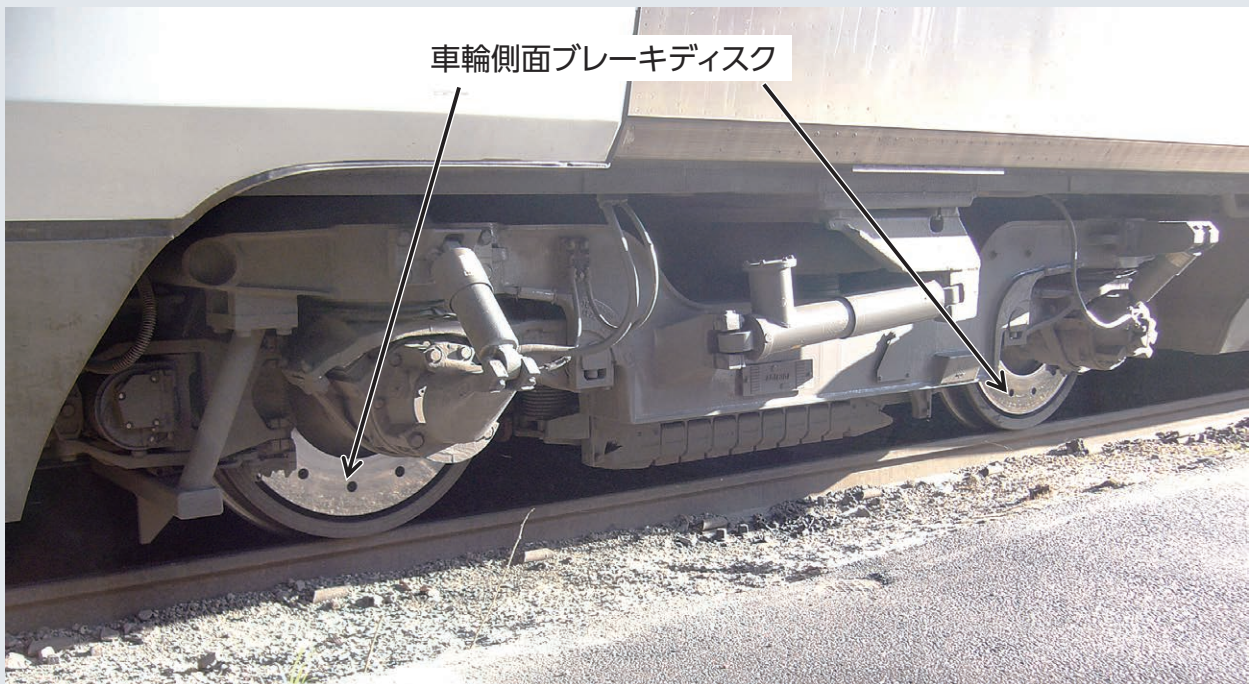


図10 車輪側面ブレーキディスクの例

けさまざまな研究が行われています。現代の欧州では、踏面ブレーキが軌道に対する「やさしさ」の点で再評価されていると言えるかもしれません。

おわりに

車輪の材質の変遷と背景および技術的要求について、日本と欧州の違いという観点から紹介しました。鉄道車輪にまつわる歴史的経緯や、日本の車輪の技術思想上の独自性について参考としていただければ幸いです。RRR

文 献

- 1) 広重巖：輪軸，交友社本店，1971
- 2) UIC CODE 812-3 5th Edition, 1-1-84: Technical specification for the supply of rolled solid (monobloc) wheels of non-alloy steel for traction and rolling stock, UIC, 1984
- 3) EN 13262 : 2020 : Railway applications - Wheelsets and bogies - Wheels -Product requirements, CEN, 2020
- 4) JIS E 5402-1 : 2015 : 鉄道車両-一体車輪-第1部：品質要求，日本規格協会，2015
- 5) UIC B 169.RP 2 : BB-Wheel Interaction WP 1 /Activity 1.2 “Wheel design worst-case scenario assessment” - Activity Report, UIC, 2025
- 6) Cameron Lonsdale et.al. : Wheel Rim Residual Stress Measurements, Standard Steel Technical Papers, 2000
- 7) Control Period 7 (CP7) Variable Usage Charge (VUC), Process and policy for the proposal and consent of new rates, Network Rail, 2024