論文/技術報告

鉄道車両用車輪の品質及び疲労強度評価

Quality and Fatigue Strength Evaluation of Wheels for Railway Vehicles

山　村　佳　成*　Yoshinari YAMAMURA
四方田　圭　一　Keiichi YOMODA
小　塚　千　尋　Chihiro KOZUKA
牧　野　泰　三　Taizo MAKINO
加　藤　孝　憲　Takanori KATO

抄　　録

鉄道用車輪は，車両を支える最重要部品の一つである。車輪の損傷は，重大事故となる可能性があるため，その安全性は品質及び疲労設計の観点から，十分な配慮が必要である。日本製鉄(株)では，品質については，JIS E 5402-1 の規定だけでなく，独自の項目を追加することで，より厳格な管理を行っている。また，設計については，JRIS J 0405 で規定されている走行時の車輪にかかる荷重に加え，疲労強度に影響を及ぼすブレーキによる熱応力も考慮している。本報では，車輪品質及び設計それぞれについての安全に対する取り組みを紹介する。

Abstract

Railway wheels are one of the most important components of a rolling stock. Quality and design of wheels are required to ensure safety of the rolling stock since wheel damage will lead to serious accidents. Nippon Steel Corporation applies its own requisites in conjunction with JIS E 5402-1 in order to control wheel quality. In terms of fatigue design of the wheel web, Nippon Steel applies the loads to the wheel rim from the rail specified in JRIS J 0405. In addition, thermal stresses due to tread braking which affect the fatigue strength are also considered. In this report, our approaches to safety of the wheels with respect to quality and design are described.

1.　はじめに

鉄道用車両に用いられる車輪は，車両の足回り部品として重要な役割をしており，車輪の損傷が脱線を引き起こし大事故につながる可能性があるため最重要部品として取り扱われている。車輪は，車軸と勘合し輪軸状態で使用され，レールと接触するリム，車軸と勘合されるボス，その間をつなぐ板部で構成されている（図１，図２参照）。リムは車両重量を支えレール上を転動する役目と，踏面にブレーキシューを押しあてて制動するというブレーキドラムの役割がある。そのため，耐転動疲労特性，耐摩耗性及び，耐熱き裂性能が必要である。また，ボスは，車軸とはめ合い勘合されるため，把握力確保のための剛性が必要である。板部にはレールからの反力による車輪回転ごとに発生する応力（以後，機械的応力）とブレーキ熱による熱応力が発生し，それに耐えることができる強度が必要である。

車輪の安全を確保するためには，製品としての品質面と設計面の両面における信頼性が必要である。品質については，JIS E 5402-1[1] を補完する品質管理項目について，日本

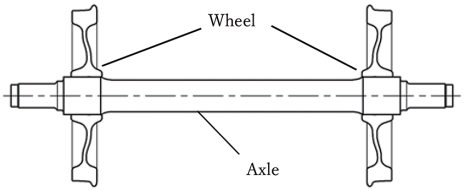


図１　輪軸
Wheel and axle

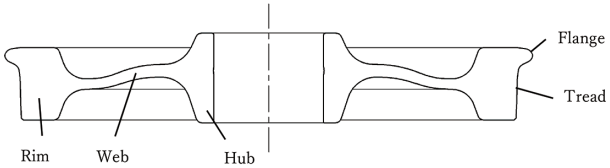


図２　車輪の各部名称
Names of each part of the wheel

*　関西製鉄所　鉄道車両品製造部　輪軸設計室　輪軸設計開発課　シニアスタッフ　　大阪府大阪市此花区島屋 5-1-109　〒 554-0024

製鉄(株)独自で規定を設け，製品強度，製造管理の向上を図ってきた。

国内で実績のある車輪の品質を規格化する機運が高まり，日本鉄道車輌工業会で審議ののち，車輪品質に関する規格が新たに制定されることとなった[2)]。

設計においては，車輪板部に関する強度評価規定として，JRIS J 0405[3)] で機械的応力に対する規定があるが，日本製鉄ではブレーキ熱による熱応力も考慮した強度評価を行うことで，より安全性の高い車輪を設計している。また，強度評価の精度向上のため，疲労試験により機械的応力と熱応力が同時に作用したときの車輪板部の疲労強度を明らかにすることで，より適切な許容応力を設定可能とした。さらに，車輪に発生する応力を精度よく評価するため，近年の解析技術の向上に伴い，これまで行ってきた弾性応力解析に代わり，実用的な時間で弾塑性応力解析を実施できるようにした。

2. 車輪の品質管理について

国内の在来線車両で用いられる車輪の品質に関する規格としては，“JIS E 5402-1 鉄道車両―一体車輪―第 1 部：品質要求”（以後 JIS E 5402-1 と表する）がある。その規格の品質管理項目だけではなく，日本製鉄ではさらに項目を付加した品質管理をもとに製造を行っている。この日本製鉄の品質管理項目を付加した“JRIS D 1202 鉄道車両―一体圧延車輪―品質要求”（以後 JRIS D 1202 と表する）を，JIS E 5402-1 を補完する規格として，2022 年に制定に至った。

鉄道事業者が，新規車輪（新たな製造業者及び／または新たな製造方法及び製造条件に基づいた車輪または新規設計車輪）を採用する場合は，これまで，国内で使用されてきた実績ある車輪と同等の品質を維持するために，JIS E 5402-1 と JRIS D 1202 を，併用することが必要である。

2.1 日本製鉄における車輪の品質管理の主な特徴

(1) 車輪の材料は，関西製鉄所和歌山地区製造の連続鋳造材を使用しており，下記の優れた特徴がある。

A. 材料の脆性に影響を与える水素の含有量は，溶解工程において，もっとも測定精度を高める試験片の採取方法・採取時期・分析機器を採用している。それにより，残存水素含有量が正確に把握でき，水素脆化の抑制効果が得られている。

B. 熱間鍛造成形性能に影響を与える Cu 成分の含有量が少ない。

C. 車輪の破損を招く非金属介在物の量が少ない。

(2) 車輪の製造では，JIS E 5402-1 には規定のない，定期的な品質確認を行っている。

年間に，同一鋼種ごとに，車輪本体を 5 回抽出し，品質管理項目の経年変化による変動の有無を確認している。

2.2 JIS E 5402-1 から新たに付加された品質管理項目

日本製鉄における車輪の品質管理の特徴を生かし，JIS E 5402-1 に対し JRIS D 1202 に付加された品質管理項目を表 1 に示す。

検査は，JIS E 5402-1 では，受渡検査のみであったが，新規車輪の品質確認のための形式検査と，日本製鉄が実施している，定期的に品質維持の確認を行う定期検査を追加した。

形式検査では，新規車輪が，品質管理項目の規定値内にあることを確認する。

定期検査では，鋼種（SSW-QS 及び SSW-QR）ごとに，1 年間に 5 回車輪を抽出し，品質管理項目の規定値内にあることを確認する。

3. 車輪板部強度評価方法

国内在来線で使用されている車輪の大半は，車輪とレールが接触する踏面と呼ばれる部分にブレーキ制輪子を押し付けて減速するブレーキ方式のもとで使用されている。このブレーキ方式では，ブレーキによる摩擦熱で車輪が温度上昇し熱応力が発生する。レールからの反力による機械的応力は，車輪の回転に伴い周期的に変動する高サイクルの応力であるが，熱応力は，車輪一回転中の変化は小さくほぼ一定であるため，変動応力でなく平均応力として作用する。しかしながらその値は，機械的応力と比較して大きく（図 3 及び図 4 参照），機械的応力と重畳することにより車輪

表 1　JIS E 5402-1 に対し JRIS D 1202 に付加された品質管理項目
Additional quality requirement for JRIS D 1202 in contact with JIS E 5402-1

Quality requirement		Type test	Regular intervals test
1	Chemical composition (Check analysis)	○	○
2	Hydrogen content	○	○
3	Mechanical properties (After heat treatment)	○	○
4	Impact resistance characteristics	○	○
5	Hardness in the rim	○	○
6	Material cleanliness	○	○
7	Fracture toughness	○	○
8	Residual stresses	○	○
9	Hardness variation of rim divided into 8 circumferential sections	△	—
10	Fatigue strength of wheel web of wheel plate	○	—
11	Wear test	△	—
12	Circumferential residual stresses after tread-braking test	○	—
13	On-track test	△	—

○: Necessity
△: According to situation (Wheel corrugation, abnormal wearing, etc.)

板部の疲労強度に大きく影響するため，疲労強度設計を行ううえで考慮すべき応力と考えられる。

車輪の板部強度評価の規格としては，JRIS J 0405 があるが，機械的応力による評価のみでブレーキによる熱応力については記載されていない。海外規格についても，EN（European Norm 欧州統一規格）13979-1[4]，UIC（International Union of Railways 国際鉄道連合）510-5 規格[5] は，板部に発生する熱応力評価は行っていない。AAR（Association of American Railroads アメリカ鉄道協会）S-660 規格[6] は，弾性応力解析により板部熱応力を評価する規定はあるが，疲労強度評価は行っていない。日本製鉄では，古くから板部熱応力を弾性応力解析で評価し，上記のように疲労強度設計においては，平均応力として取り扱ってきた。この強度評価方法により，耐ブレーキ熱車輪として新 A 形波打車輪を開発し[7]，1994 年より国内外で使用されている。近年の有限要素解析技術の進歩により，弾塑性応力解析が汎用プログラムで実施可能となったことから，欧州においてもブレーキによる車輪リムの残留応力評価などに弾塑性応力解析が適用されている。そこで，現在の技術水準に合わせ，より理論的な疲労強度評価を行うため，車輪の板部熱応力を弾塑性応力解析により求め，その結果を用いて疲労強度を評価するようにした。本報では，その評価方法について報告する。また，疲労強度を評価するうえで許容応力線図が必要であるが，現行の JRIS J 0405 に記載されている許容応力線図は，熱応力を考慮した場合に必要となる高応力比のデータが不足していることから，追加の疲労試験を実施して，その結果をもとに新たな許容応力線図を提案している[8]。なお，その内容については，別報“鉄道車両用車輪板部の許容応力線図”で報告する。

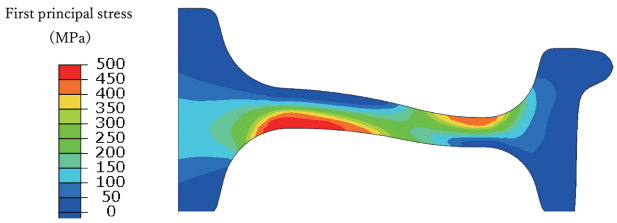


図 3　FEM 解析によって得られた熱応力分布
Thermal stress distribution obtained by FE analysis

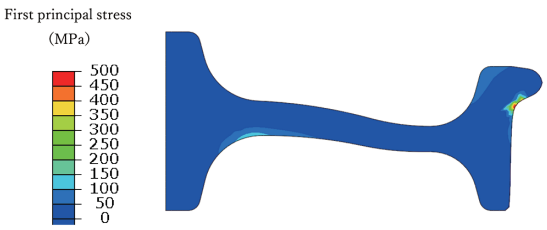


図 4　FEM 解析によって得られた機械的応力分布
Mechanical stress distribution obtained by FE analysis

4.　ブレーキによる熱応力を考慮した車輪板部強度評価方法

評価する車輪の疲労安全率算出フローチャートを図 5 に示す。

(1) 解析モデルの作成

解析モデルによる計算結果の差をなくすため，強度評価範囲，要素の種類，要素分割方法（要素サイズを含む），境界条件を詳細に規定した（図 6 参照）。

(2) 踏面ブレーキによる車輪温度解析

ブレーキ熱を対象とした温度解析では，現車の車輪リム側面温度をサーモラベルにより調査した結果をもとに，条件設定を行っている。ブレーキ頻度が多く車輪リム温度が高い条件とそれ以外の条件とで分けて設定しており，具体的には新製車輪の踏面下 10 mm の温度がそれぞれ 230℃，150℃となるようにし，表 2，図 7 の条件で解析を行っている。なお，サーモラベルによる車輪リム側面温度と熱電対により測定した車輪踏面下 10 mm 位置の温度は同等に評価されることを台上ブレーキ試験で確認を行ったうえで条件を決定した。入熱時間は踏面下 10 mm での温度上昇が均衡状態に近くなる条件とした。ただし，ブレーキ条件は，

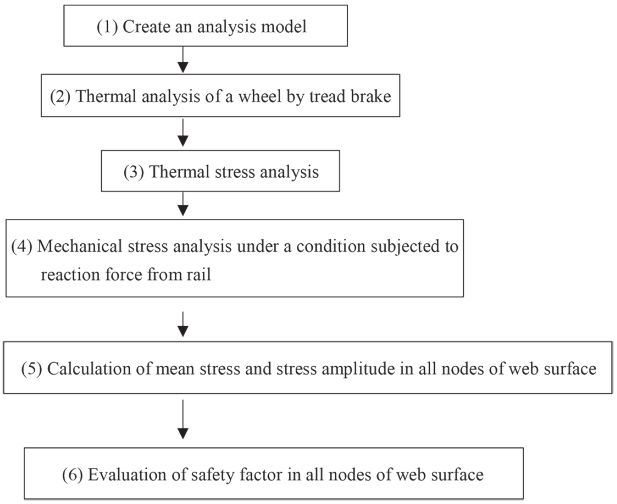


図 5　車輪板部疲労強度評価のフローチャート
Evaluation flowchart of fatigue strength of wheel web

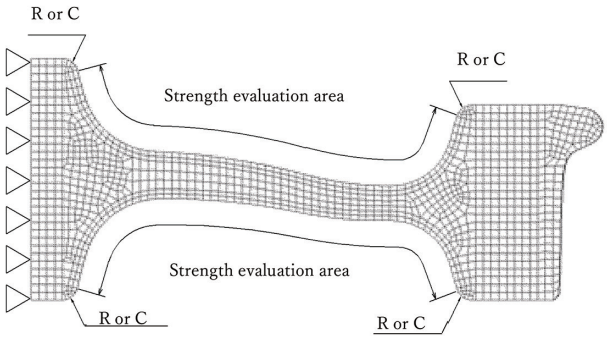


図 6　強度評価範囲と要素分割及び境界条件
Strength evaluation area, meshing and boundary condition

車両や運航によって変わることから，解析条件については，当事者間で協議し，必要に応じ変更を行う必要がある。

(3) 熱応力解析

車輪温度解析により求めた車輪温度分布を入熱条件として，応力解析を行うことにより熱応力を求める。熱応力は，材料の降伏応力を超えることを考慮し，弾塑性応力解析により求める。

(4) 熱応力とレールからの反力による機械的応力が同時に発生した状態での弾塑性応力解析

熱応力が発生した状態で，機械的応力も同時に発生した場合の板部応力を弾塑性応力解析により評価している。機械的応力を求めるための解析条件であるレールからの反力として，図８の４つの条件を用いる。この条件は JRIS J 0405 と同様であり，４つの荷重条件それぞれについて，弾塑性応力解析を行う。このとき応力は降伏応力を超えることから，塑性変形が収束する弾性シェイクダウン状態での評価を行うため，車輪 3 回転目の応力で評価している。

(5) 全節点での平均応力，応力振幅評価

車輪板部の表面における各節点を対象に，疲労強度評価を行うため平均応力と応力振幅を求める。まず，４つの条件での最大主応力の最大値を最大応力 σ_{max} とし，次に各荷重条件について最大応力方向の応力を出力し，その中の最小値を最小応力 σ_{min} として，式 (1)，式 (2) より平均応力 σ_m と応力振幅 σ_a を求めている。

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} \tag{1}$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} \tag{2}$$

(6) 全節点での安全率評価

強度評価に用いる許容応力線図を図９に示す。応力振幅で表した許容応力 σ_{al} は，応力比 R に応じて，式 (3)，式 (4) のいずれかを用いる。

$$\sigma_{al} = 220 - 0.202 \times \sigma_m \ (R \leqq 0.51) \tag{3}$$

$$\sigma_{al} = 313 - 0.426 \times \sigma_m \ (R > 0.51) \tag{4}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \tag{5}$$

ここで，σ_{al} と σ_m の単位は (MPa) である。安全率 S_f は，応力解析より求めた平均応力 σ_m と応力振幅 σ_a を許容応力線図に点 A (σ_m, σ_a) のようにプロットし，線分 OA を延長した線と許容応力線との交点 B から，式 (6) を用いて S_f 求める。

$$S_f = \frac{\overline{OB}}{\overline{OA}} \tag{6}$$

求めた安全率から最終的な安全性の判断は，走行実績のある既存車輪の安全率と比較し，それ以上であることを確認することで行う。

表２　伝熱解析条件
Conditions for heat transfer analysis

	Heat quantity per second (kJ/s)	Period of heat (s)
Braking frequency is high	19.6	1200
Other than above	11.9	

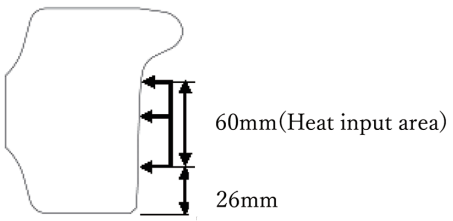


図７　伝熱解析における入熱範囲
Heat input area in heat transfer analysis

5.　終わりに

(1) 鉄道車両用の車輪は，重要部品の一つであり，日本製鉄では，安全性向上のために独自に，品質，設計の両面で次の事項に取り組んでいる。

- 製造における品質について，車輪品質規格 JIS E 5402-1 に対し，製鋼一貫によるメリットを生かし，より厳しい管理のもと車輪を製造している。
- 定期的な品質検査を実施し，安定した品質維持に取り組んでいる。
- 設計としては，JRIS J 0405 で規定されているレールからの反力による機械的応力に対する板部強度評価だけ

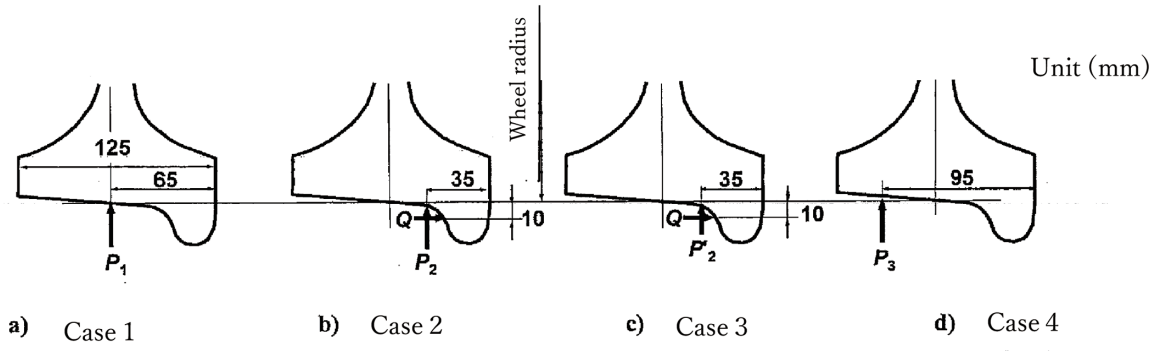


図８　荷重の組合せと着力点の位置[9)]
Combination of loads and load position[9)]

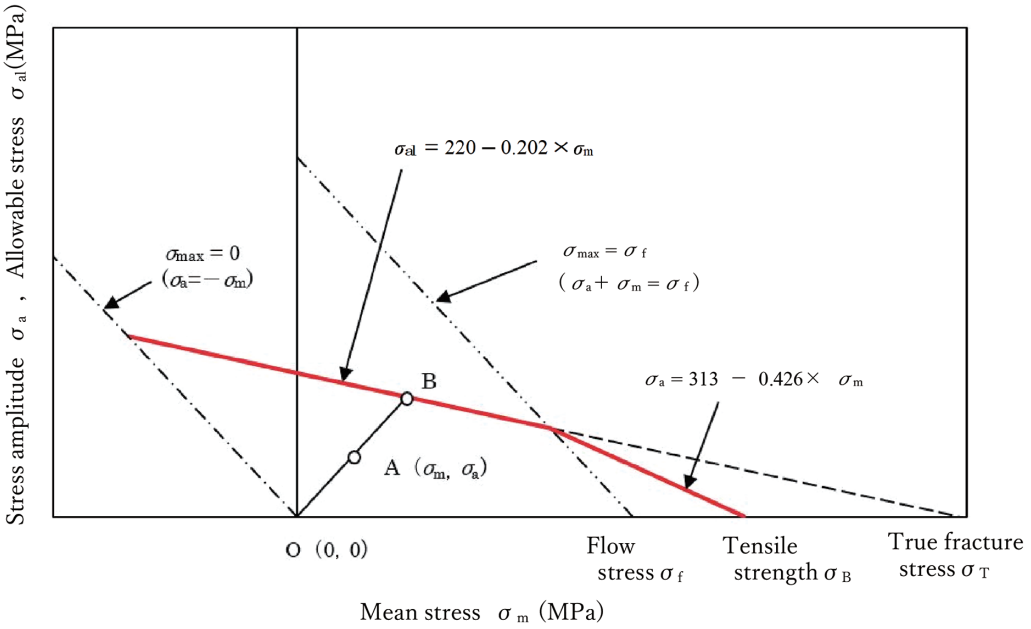


図９　許容応力線図
Allowable stress diagram

でなく，ブレーキによる熱応力の影響も考慮した強度評価を弾性応力解析により実施してきた。

- 近年の有限要素法解析技術の向上に伴い，ブレーキ熱を考慮した応力解析に弾塑性応力解析を使用している。それに伴い，許容応力線図も見直すことで，より精度の高い評価を可能とした。

(2) 国内で走行実績のある車輪品質を明文化するため，新たな品質規格として 2022 年に JRIS D 1202 が制定された。国内実績のある車輪と同等の品質を得るためには，本規格に準ずる必要がある。

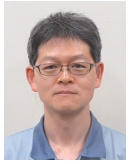
(3) 設計についても，踏面ブレーキによる熱応力を考慮した車輪板部強度評価の規格が制定に向けて調整されている。

参照文献

1) 日本規格協会：JIS E 5402-1（鉄道車両－一体車輪－第 1 部：品質要求），2015
2) 日本鉄道車輌工業会：JRIS D 1202（鉄道車両－一体圧延車輪－品質要求），2022
3) 日本鉄道車輌工業会：JRIS J 0405（鉄道車両－一体車輪板部の疲労強度評価方法），2014
4) BS EN: 13979-1 (Railway applications. Wheelsets and bogies. Monobloc Wheels. Technical approval procedure - Forged and rolled wheels), 2003
5) UIC: 510-5 (Technical approval of monobloc wheels - Application document for standard EN 13979-1), 2003
6) AAR: S-660 (Wheel Designs, Locomotive and Freight Car - Analytic Evaluation), 2007
7) 山村，仲田，安食：耐ブレーキ熱波打車輪の開発．住友金属．46 (4)，(1994)
8) 加藤孝憲 ほか：日本機械学会論文集．87 (895)，20 (2021)
9) 日本鉄道車輌工業会：JRIS J 0405（鉄道車両－一体車輪板部の疲労強度評価方法）図 2（英訳記載），2014

山村佳成　Yoshinari YAMAMURA
関西製鉄所　鉄道車両品製造部　輪軸設計室
輪軸設計開発課　シニアスタッフ
大阪府大阪市此花区島屋5-1-109　〒554-0024

四方田圭一　Keiichi YOMODA
関西製鉄所　品質管理部　シニアスタッフ



小塚千尋　Chihiro KOZUKA
関西製鉄所　品質管理部　鉄道車両品管理室
輪軸仕様調整課　主幹

牧野泰三　Taizo MAKINO
鉄鋼研究所　リーディングリサーチャー
博士（工学）

加藤孝憲　Takanori KATO
関西技術研究部　交通産機品研究室長
博士（工学）