

# レール摩耗形状の適用によるゲージコーナキ裂発生抑制効果の検証

幸野 真治\* 辻江 正裕 (鉄道総合技術研究所)

Validation of the suppression of gauge corner cracking initiation by applying the rail worn profile  
Masaharu Kono\*, Masahiro Tsujie, (Railway Technical Research Institute)

It is expected that rail wear reduces the contact pressure between the wheel and the rail and suppress gauge corner cracking that occurs at the gauge corners of outer heat treated rails. In this study, we conducted rail wear growth analysis on a curved section where gauge corner cracks occurred and RCF tests using test wheels to which the obtained wear geometry was applied. As a result, we confirmed that the wear geometry has the effect to suppress the gauge corner crack initiation.

キーワード：レール損傷，ゲージコーナキ裂，レール摩耗形状，摩耗進展解析，転動疲労試験

(Keywords, rail defect, gauge corner cracking, rail worn profile, rail wear development analysis, RCF test)

## 1. はじめに

鉄道用レールのレール頭頂面においては，車輪の繰り返し通過による転がり接触疲労の蓄積により，ゲージコーナキ裂などの疲労き裂の発生が確認されている。ゲージコーナキ裂は，半径 600~800 m 程度の曲線外軌に敷設された熱処理レールのゲージコーナ（以下，「GC」とする）部に発生する形態の損傷である。ゲージコーナキ裂はきしみ割れに混在して発生するため，初期の段階で発生を確認することは難しく，また，大きく進展するとレール折損を引き起こす恐れがある。Iwnicki および Spangenberg らによって，きしみ割れの発生を抑制するために，外軌の GC 部を削正して車輪との接触位置を変更する，耐きしみ割れ削正手法が提案されている<sup>(1),(2)</sup>。しかしながら，ゲージコーナキ裂については，その発生を抑制する予防対策法は確立していない。

一方，Ekberg らによって，車輪／レール間の接触面圧を緩和することにより，疲労き裂の発生リスクを低減することが報告されている<sup>(3)</sup>。また，一般的に，2 物体の接触により摩耗が進展すると，両者はなじみ，接触面圧が低下する傾向にある。そこで本研究では，当該の曲線外軌にレール摩耗形状を適用して，車輪／レール間の接触面圧を緩和することにより，ゲージコーナキ裂の抑制を図ることを目的とした。具体的には，ゲージコーナキ裂が発生した曲線区間を対象としたレールの摩耗進展解析を行い，レール摩耗形状を取得した<sup>(4)</sup>とともに，その摩耗形状を適用した試験輪を用いて転動疲労試験を実施し，き裂発生抑制効果について検証した結果を報告する。

## 2. 摩耗進展解析

ゲージコーナキ裂発生抑制を図るレール摩耗形状について検討するため，営業線でゲージコーナキ裂の発生が確認された曲線区間を対象として，レールの摩耗進展解析を実施した<sup>(4)</sup>。解析の詳細を以下に示す。

〈2・1〉 摩耗形状予測モデル 摩耗進展解析は，先行研究<sup>(5)</sup>にて構築した摩耗形状予測モデルを活用して実施した。摩耗形状予測モデルの解析フローを図 1 に示す。

本モデルは，マルチボディシミュレーションソフト Simpack を用いた車両運動解析，およびそれらの解析結果に基づく摩耗形状予測<sup>(5)</sup>から構成されている。本モデルでは，はじめに，Simpack において対象とする車両／軌道モデルを構築し，それらのモデルによる車両運動解析を実施する。次に，Simpack により得られた車輪／レールの接触点や接触荷重，すべり率などの解析結果に基づき，車輪／レ

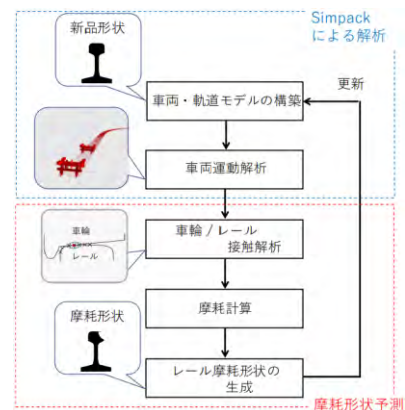


図 1 摩耗進展解析の解析フロー

ール間の接触解析を行う。そして、接触解析によって得られた応力分布などの解析結果を用いてレールの各箇所の摩耗量を算出する。以上により、算出した摩耗量およびレールの断面形状より、レールの摩耗形状を構築する。最後に、このレールの摩耗形状を Simpack の軌道モデルへ再配置することで、摩耗形状の軌道モデルに更新させる。以上の手順を繰返すことにより、レール摩耗形状の時間変化を予測する。

摩耗量の算出については、以下の式(1)に示す Archard の摩耗式、および式(2)に示す混合すべり条件下の摩耗係数<sup>(6)</sup>を適用した。

$$W = \frac{kFS}{H} \dots\dots\dots (1)$$

$$k_m = \frac{\delta_x}{\delta_x + \delta_y} k_x + \frac{\delta_y}{\delta_x + \delta_y} k_y \dots\dots\dots (2)$$

ここで、式(1)の $W[m^3]$ は摩耗量、 $k$ は摩耗係数、 $F[N]$ は接触力、 $S[m]$ はすべり距離、 $H[N/m^2]$ は接触する材料のうち柔らかい方の硬さである。また、式(2)の $k_m$ は混合すべり条件下の摩耗係数の推定値、 $k_x$ は縦すべり条件下の摩耗係数、 $k_y$ は横すべり条件下の摩耗係数、 $\delta_x$ および $\delta_y$ はそれぞれ混合すべり条件下の縦すべり率、横すべり率である。

1 車両の通過によって算出される摩耗量はごくわずかであるため、断面形状の変化はほとんど見られず、車輪/レール接触への影響もほとんどないと考えられる。そこで摩耗形状の更新については、先行研究<sup>(6)</sup>と同様に、1 車両の通過によって算出される摩耗量を 10000 倍して摩耗形状を形成した。

〈2・2〉 解析条件 摩耗進展解析で用いた軌道モデルの俯瞰図を図 2 に示す。同図の軌道モデルは、実際の営業線においてゲージコーナキ裂が発生した曲線区間を対象に構築した。円曲線区間は 203 m、曲線半径は 800 m、カントは 95 mm、スラックは 0 mm である。また、円曲線の前後に 120 m の緩和曲線および 100 m の直線区間が設けられており、敷設されているレールは JIS60kg レール、軌間は



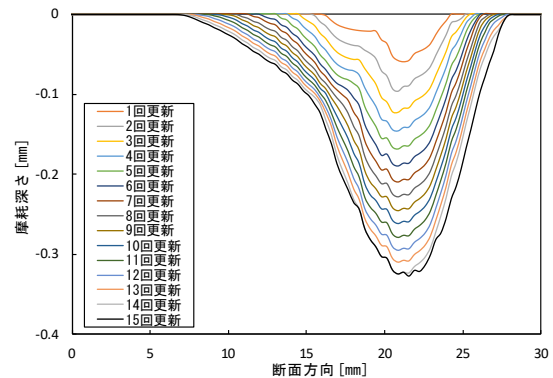
図 2 摩耗進展解析で用いた軌道モデル

1067 mm である。走行する車両モデルは、在来線修正円弧踏面を持つ通勤型車両で、走行速度は 105 km/h である。

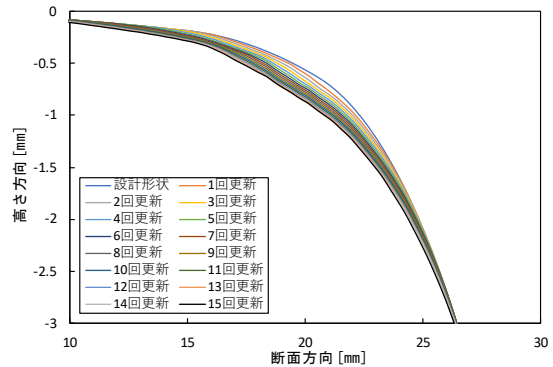
ゲージコーナキ裂に混在するきしみ割れの発生については、前軸における車輪/レール接触が影響している<sup>(7)</sup>ことから、ゲージコーナキ裂についても前軸における車輪/レール接触が影響していると考え、前軸を対象に摩耗進展解析を実施した。なお、車輪については摩耗進展を考慮せず、常に新品の形状とした。今回の解析では、図 1 に示すレール断面形状の更新を 15 回繰返すこととした。

〈2・3〉 解析結果 曲線外軌の摩耗深さ分布および断面形状の変化に関する摩耗進展解析の結果を図 3 に示す。

同図の横軸はレール頭頂面中心から GC 側への距離である。また、縦軸は摩耗深さの変化を明確に示すため、拡大して示



(a) 摩耗深さ分布



(b) 断面形状

図 3 摩耗進展解析結果

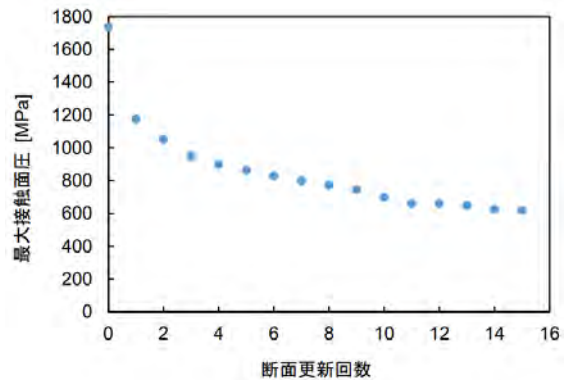


図 4 接触解析結果 (最大接触面圧)

表 1 転動疲労試験の試験条件

レール輪形状 (外径 [mm])	車輪形状 (外径 [mm])	ラジアル荷重 (輪重方向)[N]	スラスト荷重 (横圧方向)[N]	接触面圧 [MPa]	アタック角 [deg]	接触角 [deg]	すべり率 [%]	通過トン数 [百万トン]
設計形状 ( $\phi 350$ )	修正円弧踏面 ( $\phi 500$ )	12500	520	1192	0.1	1.43	0.36	40
提案形状 ( $\phi 350$ )		6500	200	900				

している。同図の(a)より、断面形状を更新するにつれて、摩耗深さや摩耗帯域が増加している傾向が確認できた。また摩耗深さが増加する割合も、断面形状を更新するにつれて減少していた。また同図の(b)より、レール断面形状については、断面形状を更新するにつれて、より曲率が減少する傾向が確認できる。

本解析で得られたレール摩耗形状について、車輪/レール接触解析を実施した際の最大接触面圧を図 4 に示す。同図より、レールの摩耗が進展するにつれて接触面圧が減少する傾向が確認できる。これは摩耗の進展に従ってレールの接触面がなじみ、曲率が減少したためであると考えられる。

### 3. 転動疲労試験

2 章では摩耗進展解析を用いて、レールの摩耗が進展するについて車輪/レールの接触面圧が減少することを確認した。本章では、そのレール摩耗形状を適用により、GC 部に発生するき裂の抑制効果を検証するため、実物大の車輪/レール断面形状の試験輪を用いた転動疲労試験を実施した。試験の詳細を以下に示す。

**〈3・1〉 試験装置** 本試験で用いた車輪・レール高速接触疲労試験装置の概要を図 5 に示す。本試験装置は、車輪材から切り出した車輪材試験輪（以下、「車輪」とする）とレール材から切り出したレール材試験輪（以下、「レール輪」とする）を組み合わせて、実際の車輪/レール接触を模擬した転動疲労試験を実施することができる。本試験装置では、車輪とレール輪をそれぞれ独立したモータで回転を制御することから、試験輪の接触部に任意のすべりや接線力を発生させることができる。また、試験輪の接触部に輪重方向のラジアル荷重、横圧方向のスラスト荷重を設定する

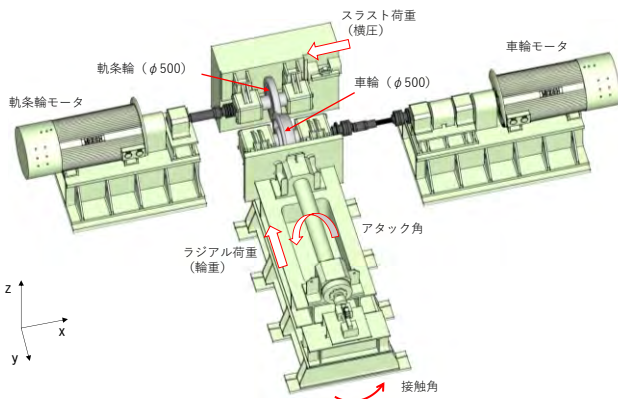


図 5 車輪・レール高速接触疲労試験装置

ことにより、営業線における車輪/レール間の応力状態を再現することができる。さらに、試験輪を回転することにより、試験輪にアタック角（図 5 の y 軸周りに回転）やタイプレート角に相当する接触角（図 5 の z 軸周りに回転）を付与することができる。

**〈3・2〉 試験条件** 本試験における試験条件を表 1 に示す。GC 部のき裂発生に対する抑制効果の検証にあたり、新品レールの断面形状および摩耗したレールの断面形状におけるき裂の発生を比較する必要がある。そこで、JIS60kg レール形状（以下、「設計形状」とする）および摩耗進展解析結果から採用したレール摩耗形状（以下、「提案形状」とする）を持つレール輪を用いて試験を実施した。提案形状としては、実際に現場で削正する場合の施工性を考慮し、摩耗深さ 0.3 mm の形状を採用した。これは、図 3 の 12 回更新した形状に相当する。なお、車輪は在来線の修正円弧踏面形状を採用した。また、曲率半径 800 m の曲線外軌における車輪/レール接触を模擬するため、同表の通り、荷重、アタック角、接触角およびすべり率を設定した。なお、これらの値は 2 章で示した Simpack の解析で得られた結果に基づき設定した。本試験は、通過トン数が 4000 万トンに達するまで実施した。

**〈3・3〉 試験結果** 転動疲労試験後、レール輪を切断し、転動面の試験輪接触部における断面を観察した（観察範囲：50 mm）。観察により確認したき裂の発生状況を図 6 に示す。同図より、提案形状では設計形状に比べて、き裂の発生数が半減していることが分かる。また、発生したき裂の深さの中央値についても、提案形状では設計形状よりも半減している結果となった。このようにき裂の発生状況に差が出た要因として、試験輪接触部に作用した接触面圧の影響が考えられる。

同図の結果より、摩耗進展解析より予測した摩耗形状をレール輪の断面形状に適用することにより、レール輪の GC 部におけるき裂の発生を抑制する効果が確認できた。GC 部におけるき裂は、進展することでゲージコーナき裂へと成長する可能性があることから、提案形状においてはゲージコーナき裂の発生を抑制する効果が期待できると考えられる。

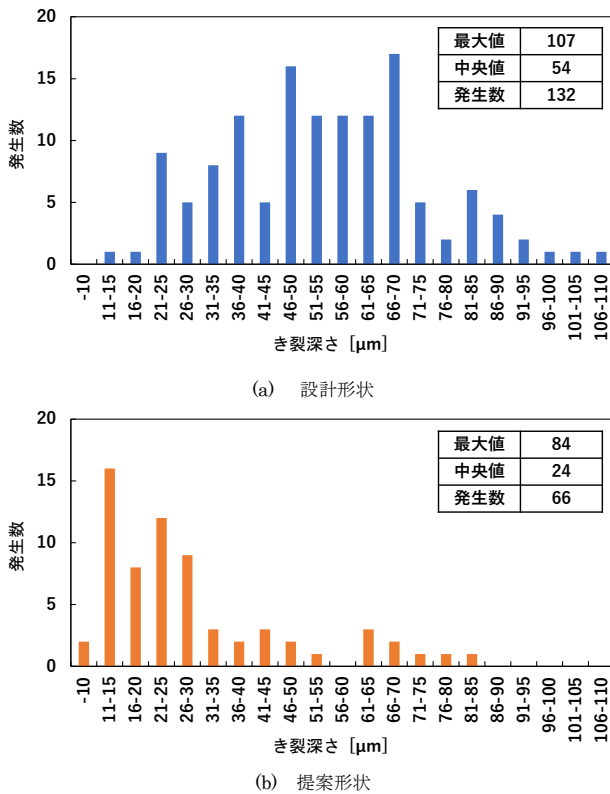


図 6 き裂発生状況

4. おわりに

本研究では、摩耗進展による車輪／レール接触のなじみにより接触面圧が低下することに着目し、曲線外軌へのレール摩耗形状の適用によって得られる、ゲージコーナき裂発生抑制効果について検証した。得られた知見は以下のとおりである。

- ・ 営業線においてゲージコーナき裂が発生した曲線区間を対象として、レールの摩耗進展解析を実施し、曲線外軌の摩耗形状を求めた。その摩耗形状を用いて車輪／レール接触解析を実施した結果、摩耗が進展するにつれて接触面圧が減少する傾向があることを明らかにした。
- ・ 実物大の車輪／レール断面形状を持つ試験輪を用いて転動疲労試験を実施した結果、本研究で提案したレール摩耗形状では現行の JIS60kg レールに比べて、GC 部のき裂の発生数およびき裂深さの中央値を半減することが確認できた。このことから、提案したレール摩耗形状をレール断面に適用することにより、GC 部のき裂発生の抑制効果が期待できると考えられる。

文 献

(1) Simon D. Iwnicki : “The effect of profiles on wheel and rail damage”, International Journal of vehicle structures and systems,

Vol.1, No.4 pp.99-104 (2009)

(2) Ulrich Spangenberg, Robert Desmond Frofling and Pieter Schalk Els : “The effect of rolling contact fatigue mitigation measures on wheel wear and rail fatigue”, Wear, 398-399 pp.56-68 (2018)

(3) Ekberg, A. and Kabo, E. : “Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading- an overview”, Wear, 258 pp. 1288-1300 (2005)

(4) 辻江正裕, 沖田雅佳, 陳樺, 曄道佳明 : 「摩耗進展による車輪／レール接触の緩和を図ったゲージコーナき裂抑制手法の検討」, 日本機械学会論文集, Vol.88, No.908 (2022), DOI: 10.1299/transjsme.21-00327

(5) 辻江正裕, 吉岡亜陸, 水谷祐貴, 曄道佳明 : 「マルチボディダイナミクスによるレール摩耗形状予測モデルの構築と妥当性の検証」, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.854 (2017), DOI: 10.1299/transjsme.17-00074

(6) 辻江正裕, 沖田雅佳, 陳樺, 曄道佳明 : 「混合すべり条件下におけるレール摩耗形状予測モデルの構築」, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.890 (2020), DOI: 10.1299/transjsme.20-00056

(7) Jin, Y., Aoki, F., Ishida, M. and Namura, A. : “Investigation and analysis of the occurrence of rail head checks”, International Journal of Railway, Vol.2, No.2 pp.43-49 (2009)