

特集：鉄道固有の力学的問題に関わる最近の研究

車輪／レール接触応力の緩和による ゲージコーナキ裂抑制手法の検討

辻江 正裕* 幸野 真治* 井戸 達哉*
陳 樺* 曄道 佳明**

A Study on the Countermeasure Method for Gauge Corner Cracking
by Reducing the Contact Pressure Between Wheel and Rail

Masahiro TSUJIE Masaharu KONO Tatsuya IDO
Hua CHEN Yoshiaki TERUMICHI

Gauge corner cracking (GCC) occurs in heat-treated rail installed on curved high rails with a radius of 600m to 800m. The GCC can propagate to the bottom of rail, resulting in rail breakage. However, no countermeasure has yet been developed to prevent GCC from occurring. The aim of this study is to investigate suppression method of GCC initiation by reducing the contact pressure between wheel and rail. Therefore, we focused on wear development of rail, and evaluated the effect of worn profiles of rail on wheel and rail contact. The results showed that the worn profiles of rail are effective in suppressing rolling contact fatigue that can develop into GCC by reducing the contact pressure between wheel and rail.

キーワード：ゲージコーナキ裂，摩耗進展，疲労指数，車輪／レール，Archard，マルチボディダイナミクス

1. はじめに

在来線の半径 600～800m の曲線外軌に敷設した熱処理レールのゲージコーナ部において、ゲージコーナキ裂の発生が多数確認されている（図 1）。ゲージコーナキ裂は大きく進展するとレール折損を引き起こす危険性があるものの、連続的に発生するため、頭部補修溶接法¹⁾により除去することは困難である。したがってゲージコーナキ裂は、その発生を予防することが重要となる。

先行研究²⁾より、き裂の発生を抑制する手法の一つとして、車輪／レール間の接触面圧を低下させることが

考えられる。また一般的に、2つの物体が接触し摩耗進展すると、両者はなじむ傾向にある。つまり、車輪／レール間の接触がなじむ摩耗形状を適用することにより、車輪／レール間の接触面圧を低下させ、ゲージコーナキ裂の発生を抑制することが期待できる。そこで本研究では、ゲージコーナキ裂の発生が懸念される曲線外軌を対象に、摩耗進展解析よりレール摩耗形状を予測した。さらに、それらの曲線外軌に予測したレール摩耗形状を適用し、車輪／レール間の接触面圧の低下を図ることで、ゲージコーナキ裂に至るき裂の発生を抑制する効果について検討した。

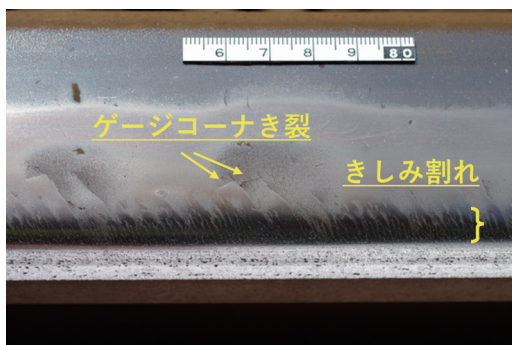


図 1 ゲージコーナキ裂の発生例

2. き裂発生評価

本章では、車輪／レール接触に起因する転動疲労き裂の発生評価について記述する。

2.1 き裂発生評価モデル

レール頭頂面を起点として発生する、シェリングやゲージコーナキ裂のような転動疲労き裂の発生を評価する指標として、シェイクダウン理論に基づいた疲労指数（FI：Fatigue Index）により評価する手法（以下、「FIモデル」とする）が、先行研究²⁾において提案されている。本手法では、転がり接触疲労は車輪／レール接触部における面圧やクリープ力に依存するという考え方に基づいている。そして、接触状態がシェイクダウン限界

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

** 上智大学

表1 転動疲労試験条件

すべり率 [%]	0.5, 1.0, 2.0, 3.0
接触面圧 [MPa]	900, 1050, 1200
転動速度 [rpm]	1000
転動回数 [万回]	10
雰囲気	乾燥

を超過すると、塑性ひずみが蓄積し、転動疲労き裂の発生に至ると評価する。FIモデルにおける疲労指数の値は、以下の式(1)で与えられる。

$$FI = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z} - \frac{k_s}{p_0} \quad (1)$$

ここで、 FI は疲労指数、 F_x ならびに F_y はそれぞれ縦クリープ力ならびに横クリープ力、 F_z は車輪／レール間の接触力である。また、 k_s はレール鋼のせん断強度であり、 p_0 は最大接触面圧である。

FIモデルでは、式(1)で与えられる疲労指数の値により、き裂発生リスクを評価している。つまり $FI=0$ の状態がシェイクダウン限界であり、この値を超過した場合にき裂が発生すると評価している。

2.2 転動疲労試験

前項で記述したFIモデルにおいて、国内の車輪／レール材におけるシェイクダウン限界について明らかにした例はない。そこで図2に示す西原式摩耗試験機を活用し、車輪／熱処理レール材試験片を用いた転動疲労試験を実施し、FIモデルにおけるき裂発生閾値を明らかにした。

転動疲労試験に用いた試験片は車輪材ならびに熱処理レール材から切り出した、 $\phi 30\text{mm}$ の円筒試験片である。試験条件は、車輪／レールの転がり接触による摩耗進展／き裂発生を再現した先行研究³⁾⁴⁾に基づき、表1に示す通りとした。図2に示す歯数の異なる2つのすべり用歯車によって、試験片の回転速度に差を生じさせることにより、試験片接触部にすべり率を設定した。なお試験片の転動速度は、車輪材試験片がレール材試験片よりも速く転動するよう設定した。

また、試験中に試験片接触部に作用するクリープ力を算出するため、図2に示すトルク計により、試験片の回転軸に作用するトルクを測定した。

試験終了後にレール材試験片を切断し、転動面について光学顕微鏡(倍率:200倍)により断面観察を実施し、き裂発生状況を調査した。さらに、各試験条件について式(1)を適用し、疲労指数の値を算出した。試験片の断面観察結果の一例を図3に示す。なお、図3(a)はすべ

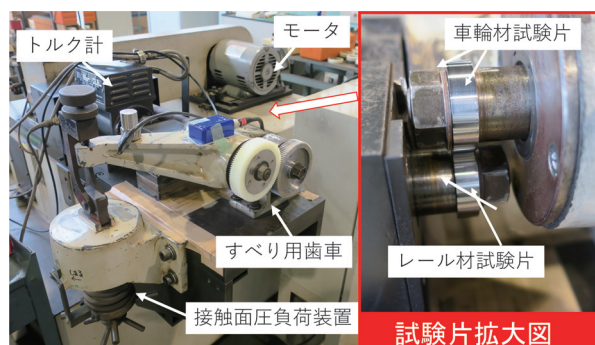
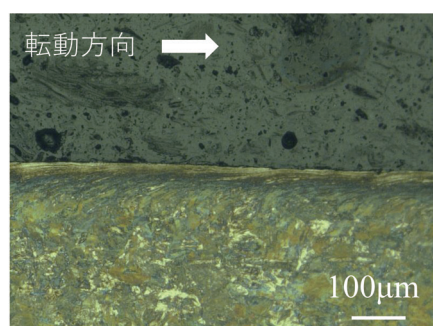
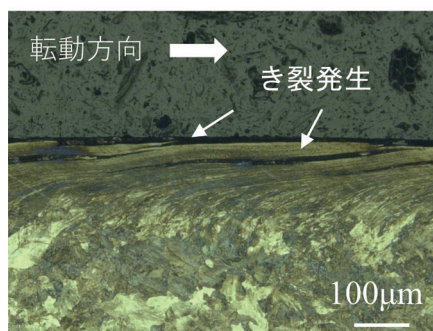


図2 西原式摩耗試験機



(a) き裂発生なし



(b) き裂発生

図3 断面観察例

り率0.5%、接触面圧900MPaで用いた試験片の観察面(き裂発生なし)であり、図3(b)はすべり率3.0%、接触面圧900MPaでの観察面(き裂発生)である。また、疲労指数の算出結果ならびにき裂発生状況を図4に示す。なお図4において、き裂が発生しなかった条件については白抜きで示す。

図3(a)に示すように、一部の条件においてはき裂の発生が確認できなかった。一方、そのほかの多くの条件では、図3(b)に示すように、塑性流動に沿ってき裂が発生していることを確認した。図4より、き裂の発生が見られなかった試験条件のうち、もっとも高い疲労指数の値は-0.80であった。一方、き裂の発生が見られた試験条件のうち、もっとも低い疲労指数の値は-0.75であった。したがって、車輪材／熱処理レール材の転が

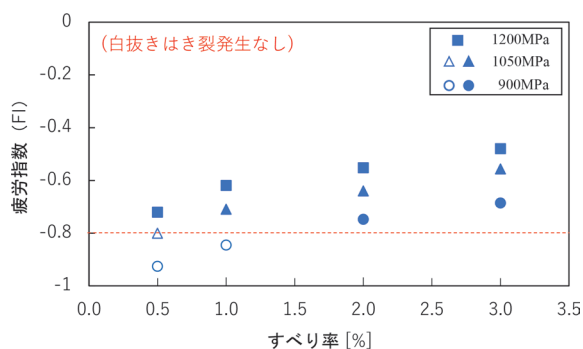


図4 転動疲労試験結果

り接触においては、疲労指数の値が-0.80より高い値になると、熱処理レール材においてき裂の発生に至ると考えられる。

2.1節に記載したように、FIモデルにおいては、理論上、FI=0においてき裂発生に至ると評価するものの、本研究で行ったき裂発生/摩耗進展を再現した転動疲労試験においては、FI>-0.8においてき裂発生に至る結果となった。本研究では、より安全側に評価を行うという観点から、本章での転動疲労試験の結果、つまりFI>-0.8においてき裂発生に至るとする。

3. 摩耗進展解析によるレール摩耗形状予測

本章では、ゲージコーナき裂発生の抑制を図るレール摩耗形状について検討するため、営業線においてゲージコーナき裂の発生が確認された曲線区間を対象として、摩耗進展解析を実施し、レール摩耗形状を予測した。

3.1 摩耗形状予測モデルの概要

本節では、摩耗進展解析で用いた摩耗形状予測モデルについて概要を記載する。図5に摩耗形状予測モデルの解析フローを示す。

本モデルでは、マルチボディダイナミクスソフトSimpackを活用した車両運動解析、ならびにそれらの解析結果に基づく摩耗形状予測から構成される。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。つぎに、Simpackより得られた解析結果に基づき、車輪/レール接触状態を評価する。そして車輪/レール接触状態から、各箇所におけるレールの摩耗量を算出する。算出した摩耗量ならびにはじめにモデル化したレール断面形状より、レールの摩耗形状を構築する。最後に、構築したレール摩耗形状を再びSimpackの軌道モデルに再配置することで、摩耗形状の軌道モデルに更新する。以上の手順を繰り返すことにより、レール摩耗形状の時系列変化を予測することができる。

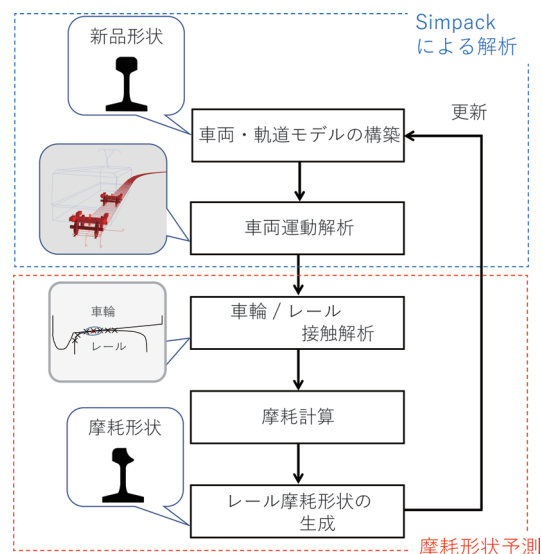


図5 摩耗進展解析の解析フロー

なお摩耗量の算出については、式(2)で与えられるArchard摩耗予測式⁵⁾を適用した。なお式(2)において、 $W[m^3]$ は摩耗量、 F は車輪/レール間の接触荷重[N]、 S はすべり距離[m]、 H は柔らかい材料の硬さ $[N/m^2]$ である。また k は摩耗係数であり、摩耗進展速度を評価する指標である。本研究では、先行研究⁶⁾における室内摩耗試験結果より、 $k=1.73 \times 10^{-4}$ としてレールの摩耗量を算出した。

$$W = \frac{k \cdot F \cdot S}{H} \quad (2)$$

また、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り、それによる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。そこで図5に示す摩耗形状の更新については、先行研究⁷⁾に基づき、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。

3.2 解析条件

前節で記述したレール摩耗形状予測モデルを活用し、営業線においてゲージコーナき裂が発生している曲線区間の外軌を対象に、レールの摩耗形状を予測した。対象とした軌道モデルの概略を図6に示す。

図6に示すように、軌道モデルは半径800mの曲線区間であり、JIS60kgレールが敷設されている。一方、この軌道モデルを通過する車両モデルについては、在来線修正円弧踏面を有する通勤型車両(走行速度:105km/h)を対象に構築した。

先行研究⁸⁾より、ゲージコーナき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

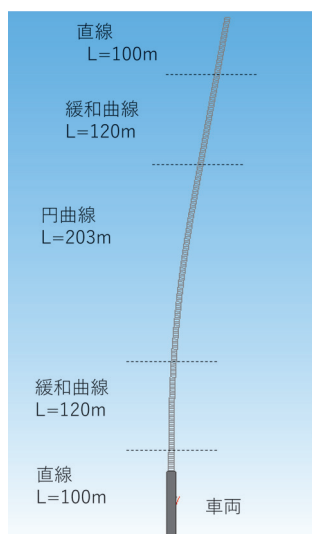


図6 軌道モデル（摩耗進展解析）

触が影響していることから、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。なお摩耗進展解析においては、レールの摩耗進展に着目するため、車輪の摩耗進展は考慮せず、常に設計形状とした。また、図5に示すレール断面形状の更新については、15回繰り返して実施した。

3.3 解析結果

前節に示す条件における摩耗進展解析により算出した曲線外軌の摩耗深さ分布および断面形状変化を図7に示す。ただし図7において、横軸はレール頭頂面中心からGC側への距離を示す。また両図とも、摩耗深さならびに摩耗による形状変化をより顕著に示すため、縦軸は拡大して示す。

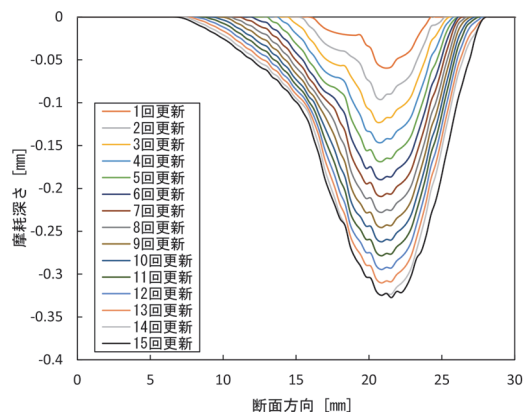
図7(a)に示すように、断面形状を更新するにつれて、摩耗深さや摩耗帯域が増加していることが確認できる。また、摩耗深さが増加する割合は、断面形状を更新するにつれて減少する傾向が確認できる。一方、図7(b)に示すレール断面形状については、断面形状を更新するにつれて、より平面に近づく傾向が確認できる。

4. 摩耗形状によるき裂抑制効果の評価

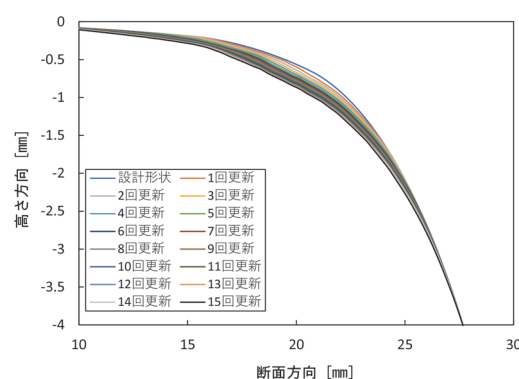
前章で実施した摩耗進展解析で予測したレール摩耗形状について、車輪／レール接触ならびにき裂発生への影響を評価するため、車輪／レール接触解析を実施した。

4.1 解析条件

車輪／レール接触解析は前章と同様、営業線においてゲージコーナキ裂の発生が確認された曲線区間を対象に



(a) 摩耗量



(b) 摩耗形状

図7 摩耗進展解析結果

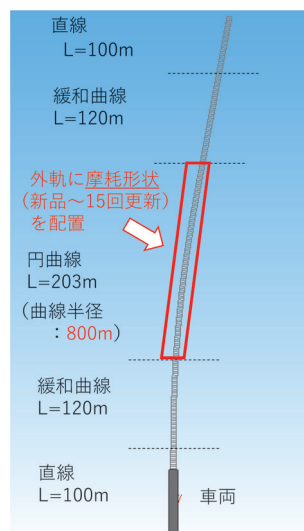


図8 軌道モデル（車輪／レール接触解析）

実施した。ただし円曲線区間の外軌については、図8に示すように、JIS60kg設計形状（摩耗進展解析の更新回数：0）ならびに前章での摩耗進展解析より得られた15ケース（更新回数：1～15）のレール摩耗形状を適用した、合計16モデルを構築した。なお車両モデルについては、

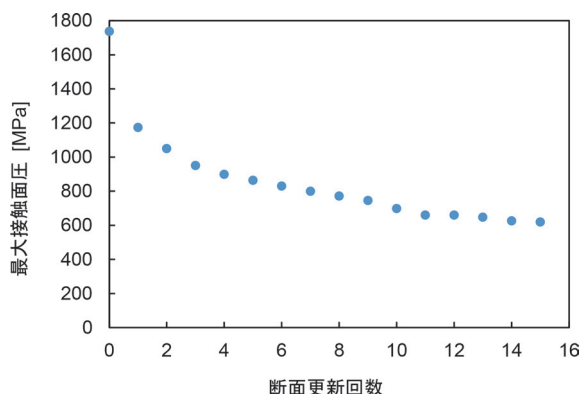


図9 解析結果（最大接触面圧）

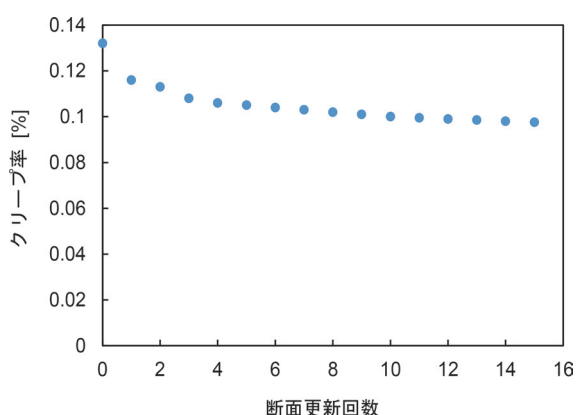


図10 解析結果（クリープ率）

前章と同じ通勤型車両ならびに走行条件を採用した。

4.2 車輪／レール接触への影響評価

本節では、前節に示す条件で実施した車輪／レール接触解析の結果について示す。はじめに、円曲線区間の外軌における車輪／レール間の接触面圧について、解析結果を図9に示す。

図9に示すように、レールの摩耗が進展するにつれて、車輪／レール間の接触面圧は減少する傾向が確認できる。つぎに、車輪／レール間におけるクリープ率についての解析結果を図10に示す。

図10に示すように、レールの摩耗が進展するにつれて、車輪／レール間に発生するクリープ率はわずかに減少する傾向が確認できた。なお設計形状におけるクリープ率と比べて、最大で約23%減少する結果となった。

これらの結果より、円曲線の外軌に摩耗形状を適用することにより、車輪／レール間の最大接触面圧やクリープ率がともに減少することを確認した。

4.3 き裂発生への影響評価

前節の解析結果を2章に記述したFIモデルに適用し、レール摩耗形状がき裂発生に及ぼす影響について評価し

た。車輪／レール接触解析で適用した各レール断面形状別に、算出した疲労指数の結果を図11に示す。

図11に示すように、レールの摩耗が進展するにつれて、疲労指数の値は減少していることが確認できる。このような結果となった要因として、前節に示すように、摩耗進展によりレール断面形状が変化するにつれて、車輪／レール間の接触面圧が低下したこと、ならびにクリープ率もわずかに減少したことが考えられる。

つぎに、算出した疲労指数の値について、2章に示す転動疲労試験結果をもとに、き裂発生への影響について検討した。2章に記述した転動疲労試験結果より、車輪材／熱処理レール材の転動疲労においては、疲労指数の値が-0.8より大きくなると、熱処理レール材において、き裂発生に至ることを確認した。したがって、き裂発生に至る閾値を超過した値が高いほど、き裂の発生に影響すると考え、き裂発生の閾値を超過した値を以下の式(3)で与えられる FI_{eff} として評価することとした。

$$FI_{\text{eff}} = FI - FI_{\text{th}} \quad (3)$$

ただし、 FI_{eff} はき裂発生の閾値を超過した値（以下、「有効疲労指数」とする）、 FI は車輪／レール接触状態から算出される疲労指数、 FI_{th} はき裂発生に至る閾値（2章に記述した転動疲労試験より、本研究で採用した熱処理レールの閾値は $FI_{\text{th}} = -0.8$ とする）である。有効疲労指数 FI_{eff} はき裂発生の閾値を超過した範囲を示すことから、その値が高いほどき裂発生リスクが高いことを示す。また、 FI_{eff} が正($FI > -0.8$)の場合にはき裂発生に至り、 FI_{eff} が負の場合($FI < -0.8$)の場合にはき裂が発生しない、との指標になる。

図11に示す結果に対し、式(3)で与えられる有効疲労指数の算出結果を図12に示す。

図12に示すように、設計形状においては有効疲労指数が0.9を超過する値であったのに対し、本研究において検討した摩耗形状においては約0.4と、おおよそ半減

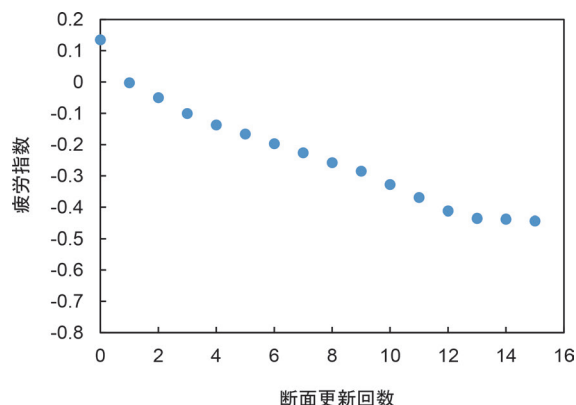


図11 解析結果（疲労指数）

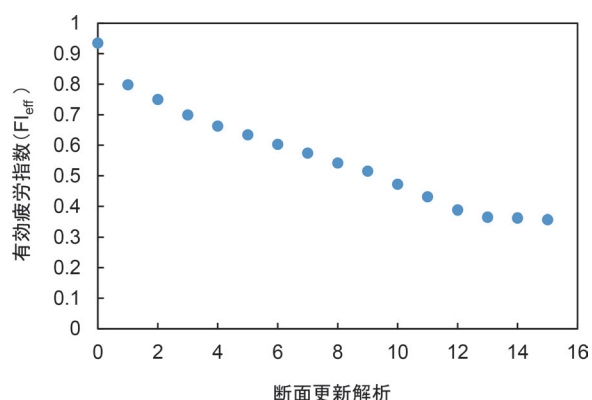


図 12 解析結果（有効疲労指数）

することが確認できた。このように、本研究で検討した摩耗形状については、有効疲労指数は減少する傾向が見られたものの、負の値にはならなかった。つまり、き裂発生に至る疲労指数の閾値 FI_{th} (2章の結果より -0.8) を下回ることにはなかったため、き裂の発生を完全に抑制することは厳しいと考えられる。しかし設計形状に比べて、有効疲労指数 FI_{eff} が減少していることから、き裂の発生状況を緩和する効果は期待できる。

これらの結果より、ゲージコーナき裂の発生が確認される曲線外軌においては、レール敷設直後の車輪／レール接触においてシビアな接触状態となり、き裂発生に至ると考えられる。一方で、敷設直後のレールについて、その断面形状をレール削正により人工的に摩耗形状とすることで、車輪／レール間の接触面圧低下ならびにクリープ率の減少が図られる。つまり、図 12 に示すように人工的に形成する摩耗形状においては、有効疲労指数 FI_{eff} が 0 を超過しているため、き裂の発生を完全に抑制することはできないものの、これまでのレール敷設直後の車輪／レール間におけるシビアな接触状態を回避することができるため、ゲージコーナき裂の発生を低減する効果が期待できる。

5. まとめ

本研究では、摩耗進展による車輪／レール接触のなじみに着目し、曲線外軌にレール摩耗形状を適用することで、ゲージコーナき裂の発生を抑制する手法について検討した。はじめに、車輪材／熱処理レール材の小型円筒試験片を用いて、摩耗進展／き裂発生を再現した転動疲労試験を実施した。つぎに、マルチボディダイナミクスに基づく摩耗進展解析、ならびに予測したレール摩耗形状における車輪／レール接触解析を実施し、レール摩耗形状によるき裂抑制効果を検証した。得られた成果は以下の通りである。

- ・転動疲労試験機により、摩耗進展／き裂発生を再現し

た。そして疲労指数によるき裂発生評価式に適用した結果、熱処理レール材においてき裂発生に至る疲労指数の値は、 $FI \approx -0.8$ であると考えられる。したがって、疲労指数が -0.8 より高い値になると、き裂発生に至ると考えられる。

- ・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モデルに、レールの摩耗進展解析を実施し、曲線外軌の摩耗形状を予測した。
 - ・摩耗進展解析より予測したレール摩耗形状を用いて車輪／レール接触解析を実施した結果、レールが摩耗進展するにつれて、車輪／レール間における最大接触面圧ならびにクリープ率が減少する傾向を確認した。またその結果、疲労指数も低減することを確認した。したがって、ゲージコーナき裂が発生する曲線外軌について、敷設直後のレールを削正し、人工的にレール断面形状を摩耗形状とすることで、ゲージコーナき裂の発生を完全に抑制することはできないものの、その発生を低減する効果が期待できる。
- 本研究の一部は、学校法人上智大学との共同研究により実施した。

文献

- 1) 伊藤太初, 梅内一行, 寺下善弘, 辰巳光正, 山本隆一: テルミット頭部補修溶接法を用いたレール補修方法, 鉄道総研報告, Vol.28, No.6, pp.41-46, 2014
- 2) 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.
- 3) Hiensh, M. and Burgelman, N., "Rolling contact fatigue: Damage function development from twin-disc test data," *Wear*, 430-431, 2019.
- 4) Akama, M. and Kimata, T., "Numerical simulation model for the competition between short crack propagation and wear in the wheel tread," *Wear*, 448-449, 2019.
- 5) Archard, J.F., "Contact and rubbing of flat surface," *Journal of applied physics*, Vol.24, pp.981-988, 1953.
- 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, DOI: 10.1299/tranjsme.20-00056, 2020
- 7) 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, DOI: 10.1299/tranjsme.17-00074, 2017
- 8) 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.