

論文 ゲージコーナキ裂発生箇所をモデルとした 疲労き裂の再現試験

辻江 正裕¹・兼松 義一²・西村 英典²
松井 元英³・中嶋 大智⁴・安藤 佳祐⁵

¹正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部軌道力学（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38）

E-mail:tsujie.masahiro.13@rtri.or.jp (Corresponding Author)

² 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部摩擦材料（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38）

E-mail:kanematsu.yoshikazu.23@rtri.or.jp nishimura.hidenori.01@rtri.or.jp

³ 鉄道総合技術研究所 総務部（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38）

E-mail: matsui.motohide.69@rtri.or.jp

⁴ 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部車両力学（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38）

E-mail:nakajima.daichi.65@rtri.or.jp

⁵ JFEスチール株式会社 スチール研究所（〒712-8511 岡山県倉敷市川崎通一丁目）

E-mail:kei-ando@jfe-steel.co.jp

曲線区間の外軌ゲージコーナ部に発生するゲージコーナキ裂は、レール折損を引き起こす危険性のある損傷である。ゲージコーナキ裂の予防対策法として、新材質レールやレール削正等が考えられる。これらの対策法の有効性を検証するために、営業線において対策法を施工しその経過を追跡しているが、多大なる労力や時間を費やす。一方、室内試験装置では、車輪／レール接触を促進することができるため、短期間かつ低コストでこれらの対策法の効果を検証することが期待できる。本研究では、室内試験装置により現行の車輪／レール接触におけるき裂の発生状況を定量的に評価するために、ゲージコーナキ裂が発生した箇所をモデルとして、車輪／レール接触状態を模擬した転動疲労試験を実施した。そして累積通過トン数が1億トン相当のレール輪表層に疲労き裂を再現した。

Key Words : Gauge Corner Cracking, RCF experiment, Wheel/rail, Multibody dynamics, Simpack

1. はじめに

レールは車輪との繰り返しの転がり接触により、レール頭頂面に摩耗や損傷がもたらされる。日本国内における代表的なレールの損傷事例として、シェリングや図-1に示すゲージコーナキ裂^{1,2)}（以下、「GCC」とする）、きしみ割れが挙げられる。特にシェリングやGCCは大きく進展するとレール折損を引き起こす恐れがあることから、列車の安全性・安定輸送の観点からも、非常に重大な問題として考えられている。シェリングについては、その発生を抑制するためにレール削正が実施されているほか、摩耗を促進させることにより疲労層や微小き裂を除去するペイナイトレール³⁾が投入されている。また近年、発生したシェリングに対して損傷した箇所を除去する、頭部補修溶接⁴⁾が施工されている。一方、GCCにつ

いては、半径 600～800m の外軌ゲージコーナ（以下、「GC」とする）部を中心に発生する損傷として確認されているものの、その発生ならびに進展に対する抑制策については検証が進められている段階^{5,6)}である。GCCは一般的に連続的に発生するため、ひとたび発生するとレール削正や頭部補修溶接で完全に除去することは困難である。したがって、GCCについては、その発生を抑制することが非常に重要となる。

GCCの発生を抑制する対策法として、材料学的観点⁷⁾に基づいた手法や車輪／レール接触状態におけるダイナミクスの観点⁸⁾に基づいた手法が考えられる。いずれにおいても対策法の有効性を検証するためには、営業線において対策法を施工し経過を追跡することが考えられるが、多大なる時間と労力を費やす。一方、室内試験装置により車輪／レール接触を模擬することで、車輪／レー

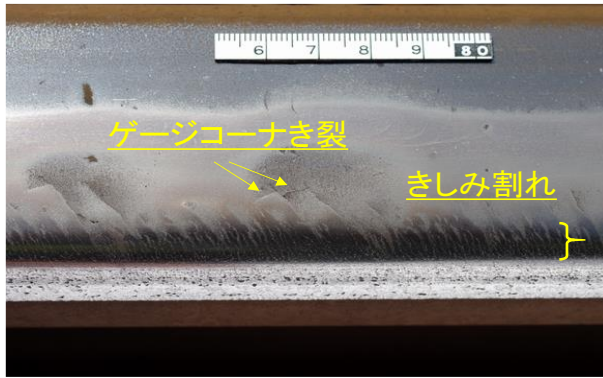


図-1 GCCの発生例

ル接触による摩耗・疲労現象を促進させることができる。したがって、これらの対策法を講じた転動疲労試験を実施することで、その効果を短期間かつ低コストで評価することが期待できる。しかし現行の車輪／レール接触条件での転動疲労試験では、GCC を再現した例は報告されておらず、関連研究⁷⁾において転動疲労試験により半径 800m の曲線外軌に発生するきしみ割れの発生を再現した事例が報告されているのみである。

本研究では、転動疲労試験により GCC の起点となる疲労き裂の発生を再現することを目的とした。はじめに、営業線における GCC 発生箇所をモデルに車輪／レール接触解析を実施し、GCC 発生箇所の外軌側における車輪／レール接触状態を明らかにした。次に、解析より算出した車輪／レール接触状態を転動疲労試験装置で模擬し、疲労き裂の再現試験を実施した。

2. 車輪／レール接触解析

GCC 発生箇所における車輪／レール接触状態を明らかにするため、マルチボディダイナミクスソフトウェアである Simpack により、営業線の GCC 発生箇所を対象に、車輪／レール接触解析を実施した。

(1) 軌道モデル

軌道モデルは、実際の営業線において GCC が発生している曲線区間を対象に構築した。モデル化した区間の軌道諸元は、図-2 に示す半径 800m の曲線区間であり、JIS60kg レール断面形状の熱処理レールが敷設されている。また円曲線中の設定カントは 95mm、スラックは 0mm である。なお本研究では、車輪／レール接触状態に着目するため、軌道剛性については完全に剛体として扱った。

(2) 車両モデル

車両モデルは、在来線の通勤型車両を対象に構築した

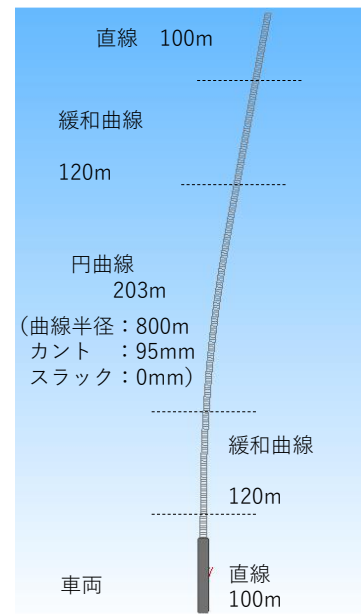


図-2 軌道モデルの概要

表-1 車輪モデル諸元

項目	設定値
車体重量 [t]	39.25
走行速度 [km/h]	105
踏面形状	在来線修正円弧踏面

(表-1) . 車両モデルは図-3に示すように、1車体、2台車、4輪軸の計 7つのボディで構成されている。またそれぞれのボディの自由度は 6 である。ただし輪軸については、車輪とレールの接触によって拘束されていることから、前後方向、左右方向、ピッチ角、ヨー角の 4 自由度である。

車両モデルにおける車輪形状については、在来線修正円弧踏面形状とした。なお車両の走行速度は、対象とした営業線に基づき、時速 105km とした。

(3) 解析結果

上記に記載した軌道・車両モデルによる車輪／レール接触解析を実施した。先行研究⁸⁾より、GCC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ことが報告されている。そこで本研究では、第1軸の外軌側における車輪／レール接触状態について評価した。車輪／レール接触解析より得られた、円曲線中心部の外軌における車輪／レール接触状態を表-2に示す。なお表-2における車輪の接触位置は、車輪の中立位置からフランジ方向の距離(図-2のa)、またレールの接触位置は頭頂面中心からGC方向の距離を示す(図-2のb)。

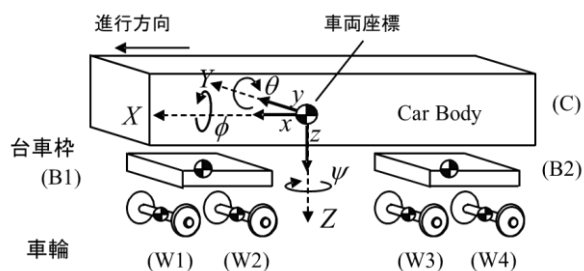


図-3 車両モデルの概要

表-2 車輪／レール接触解析結果

項目	解析結果
輪重 [kN]	52.52
横圧 [kN]	2.19
接触位置（車輪） [mm]	25.1
接触位置（レール輪） [mm]	20.9
アタック角 [deg]	0.1
縦すべり率 [%]	0.36
横すべり率 [%]	0.19
最大接触面圧 [Mpa]	1192

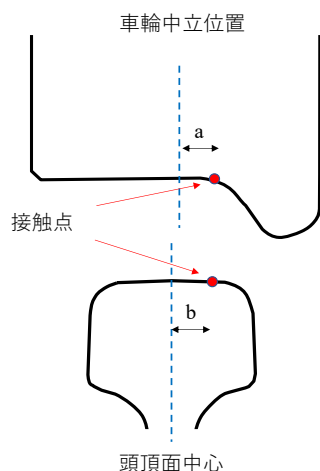


図-4 車輪／レール接触位置の定義

3. 転動疲労試験

前章に記述した車輪／レール接触解析より得られた、GCC 発生箇所における車輪／レール接触状態を二円筒試験装置で模擬した転動疲労試験を実施した。以下にその詳細を記述する。

(1) 試験装置

転動疲労試験は、鉄道総研所有の車輪・レール高速接触疲労試験装置⁹⁾を用いて行った。本試験装置の概略図を図-5に示す。

本試験装置では、化学成分と強度を現行車輪と同等に

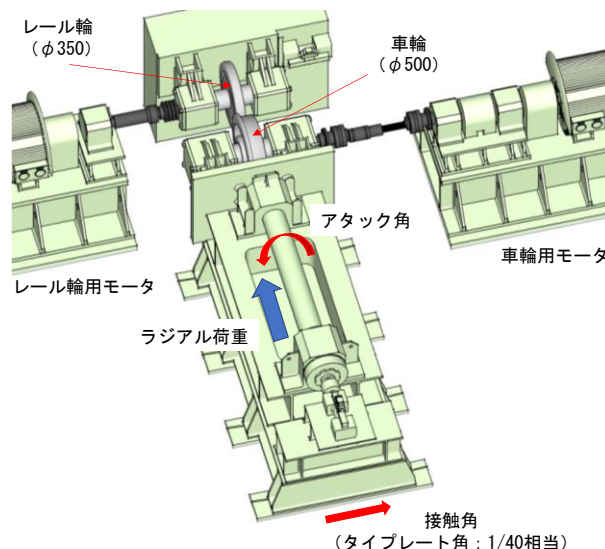


図-5 車輪・レール高速接触疲労試験装置の概略

表-3 転動疲労試験条件

項目	設定値
ラジアル荷重 [kN]	12.51
接触位置（車輪） [mm]	25.1
接触位置（レール輪） [mm]	20.9
アタック角 [deg]	0.1
縦すべり率 [%]	0.36
横すべり率 [%]	0.19
最大接触面圧 [Mpa]	1192
トルク [N・m]	444※

※ 上記の縦・横すべりを付与した際に発生するトルク値

した車輪材試験輪（以下、「車輪」とする）ならびに化学成分と強度を現行レールと同等にしたレール材試験輪（以下、「レール輪」とする）を組み合わせ、任意の転動速度や接触荷重（輪重ならびに横圧）の条件下で転動疲労試験を行うことができる。また車輪／レール輪の断面形状は、それぞれ実物大の車輪／レール断面形状となっている。本試験装置の最大の特徴として、接触する2つの試験輪をそれぞれ独立したモータで回転を制御しているため、試験輪の接触面におけるすべり率やトルクを制御して試験輪を転動させることができる。さらに、車輪の回転軸を回転・傾斜させることにより、任意のアタック角や接触角を付与することができる。

供試する試験輪については、レール輪がφ350mm、車輪がφ500mmの円筒試験輪であり、レール輪の断面形状はJIS60kgレール頭頂面形状、車輪の断面形状は在来線修正円弧踏面形状とした。なおレール輪については、その強度を熱処理レール材相当とした。

(2) 試験条件

前節で示した試験装置において、前章で算出した車輪／レール接触状態を再現できるよう、試験条件を検討した。特に、試験輪に載荷するラジアル荷重については、表-2の解析結果から得られた最大接触面圧が試験輪接触部に負荷されるようにした。選定した試験条件を表-3に示す。なお表-2と同様、表-3での車輪の接触位置は車輪の中立位置からフランジ方向の距離（図-2のa）、レールの接触位置は頭頂面中心からGC方向の距離（図-2のb）を示す。

表-3に示すすべり率について、縦すべりについては車輪／レール輪の転動速度に差をつけることで発生させ、横すべりについてはアタック角を設定することにより発生させた。また図-5に示すように、車輪／レール輪の接触部にタイプレート角（1/40）相当の接触角を設定した。

本試験装置においては、車輪は中立位置、レール輪は頭頂面中心を基準に転動速度を制御して、試験輪を転動させる。一方、本研究で実施した曲線を模擬した試験輪の接触状態においては、車輪はフランジ部、レール輪はGC部で接触するため、接触位置における試験輪径は中立位置や頭頂面中心とは異なる。また、これらの箇所において摩耗進展すると、試験輪径はさらに変化する。したがって曲線模擬の試験条件においては、試験輪接触部に任意のすべり率を発生させるだけでなく、正確な速度で試験輪を転動させることが困難となる。そこで本研究では、試験輪接触部に一定のトルクが発生するよう試験輪の転動を制御する、トルク制御にて試験を実施した。

試験輪を所定の位置で接触させた状態で表-3に示す縦すべりを作用させた状態（横すべりはアタック角により作用させる）で試験輪を転動させると、試験輪接触部において $444 \text{ N} \cdot \text{m}$ のトルクが発生することを事前の予備試験で確認している。そこで本研究においても、試験輪接触部に $444 \text{ N} \cdot \text{m}$ が発生するよう、トルク制御で試験輪を転動させた。なお、試験輪の転動速度は車輪が時速 105.38 km 、レール輪が時速 105.00 km と設定した。

(3) 転動疲労試験（乾燥）

前節に記載した条件で転動疲労試験を実施した。その結果、累積通過トン数が35百万トン相当に達するまで転動させた際の試験輪観察において、レール輪のGC部にきしみ割れが連続的に発生していることが確認できた（図-6）。しかし、引き続き転動疲労試験を継続した結果、レール輪のGC部に波状摩耗が発生した。その後、累積通過トン数が40百万トン相当まで転動したものの、試験装置の振動が著大となったため、試験を中止した。その際、レール輪のGC部にきしみ割れの発生は認められたものの、GCCの発生には至らなかった。

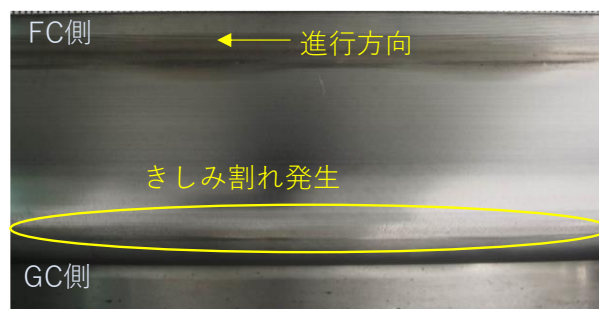


図-6 きしみ割れ再現例

(4) 転動疲労試験（水潤滑）

前節に記載したように乾燥条件下における転動疲労試験で、GCCの発生に至らなかった要因として、GC部の摩耗進展により、

- ・波状摩耗が発生しやすいこと、
- ・摩耗進展により発生したき裂の一部が除去されることが考えられる。そこで摩耗進展を抑制し、き裂の発生を促進させるため、試験輪接触部に水を滴下した条件で転動疲労試験を実施した。

まず、乾燥条件下の試験と同様にトルク制御で転動疲労試験を実施した。しかし滴下装置の水の滴下量に若干のばらつきがあったため、試験輪の接触部が瞬間的に乾燥状態となり、試験輪の転動速度を安定させた状態で試験を実施することができなかった。そこで、車輪／レール輪の転動速度を変えることで試験輪接触面に一定のすべりを発生（縦すべりに相当）させる、すべり率制御にて試験を実施した。設定したすべり率は表-3に示すように 0.36% とした。一方、横すべりについては、設定したアタック角により発生させることとした。また、試験輪の転動速度は前節の乾燥条件と同様、車輪が時速 105.38 km 、レール輪が時速 105.00 km とした。試験は累積通過トン数が1億トン相当に達するまで実施した。なお、試験中における試験輪接触部に発生するトルクは、転動回数にかかわらず一定であった。

4. レール試験輪の分析

前章(4)で示した水潤滑条件下で累積通過トン数が1億トン相当に達するまで試験輪を転動させた後、レール輪の接触部を中心に、き裂発生の状態観察や材料分析を実施した。その結果を項目別に以下に示す。

(1) 外観観察

試験終了後のレール輪転動面の外観観察を実施した。図-7に転動面外観を示す。

図-7 に示すように、レール輪の頭頂面中心位置から GC 部側で車輪と接触した跡が、照り面として確認される。しかし 3 章(3)に示すような、GC 部におけるきしみ割れの発生は見受けられなかった。

きしみ割れは、車輪／レール間に作用するクリープ力により、レール表層が塑性変形することで発生する。3 章(3)ならびに(4)では、試験条件が乾燥／水潤滑環境である点以外は、試験輪転動の制御方法に違いはあるものの、いずれも試験輪転動面に 0.36%の縦すべりと 0.19%の横すべりが発生する条件に差はない。したがって、試験輪接触部に作用するクリープ力の差が、きしみ割れ発生の有無に影響したものと考えられる。

(2) き裂発生状況

転動疲労によるき裂の発生状況を確認するため、試験輪を転動方向に切断し、その切断面で断面観察を実施した。切断位置は、車輪の接触部中心（頭頂面中心から GC 側に 20.9mm の位置）、接触部中心から GC 側ならびにフィールドコーナ（以下、「FC」とする）側に 2.5mm の位置である。GC 側ならびに FC 側の断面について観察した例を、図-8 に示す。

図-8(a)に示すように、接触部中心から GC 側では列車進行方向にき裂が発生しているのに対し、図-8(b)に示す FC 側では列車進行方向と逆方向にき裂が発生していることが確認できた。このように接触位置によってき裂が発生する方向に違いがみられた要因として、車輪／レール接触面内においてスピנקリープが作用したことが考えられる。このスピנקリープの発生については、車輪／レール輪間における試験輪径の差、つまり車輪の踏面勾配が影響したものと考えられる。なお接触点中心においては、発生したき裂の方向性に大きな特徴は見られなかった。

次に、接触面内におけるき裂の発生状況を定量的に評価するために、発生したき裂の深さとその発生数を集計した。集計したのは上記の 3 箇所（接触点中心ならびにその GC 側と FC 側）であり、観察断面の幅 30mm の範囲を観察対象とした。また、図-8 に示すように一部で剥離した箇所が見られるが、これらの箇所も表面から進展したき裂から剥離したと考え、これらも集計対象とした。なお本研究では、試験輪表面粗さと区別するため、深さ 5 μ m 以上のき裂を集計対象とした。集計した結果を、箇所別に図-9 に示す。

図-9 に示すように、発生したき裂の深さは最大で約 45 μ m であった。また全体的な傾向として、接触点中心よりも GC 側や FC 側でき裂は多く発生しており、き裂深さも深いことが確認できる。このような傾向がみられた要因として、前節で示した車輪／レール輪の接触面内

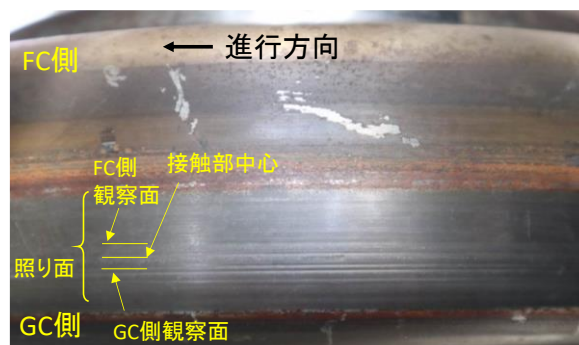
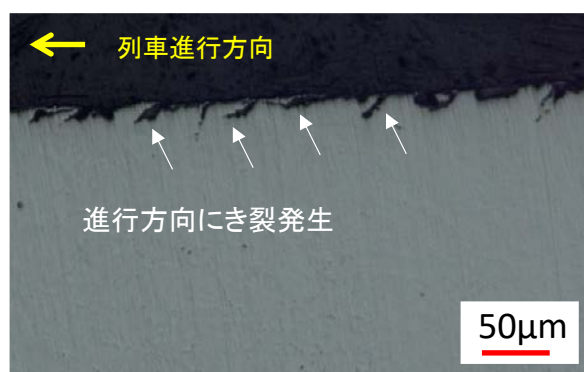
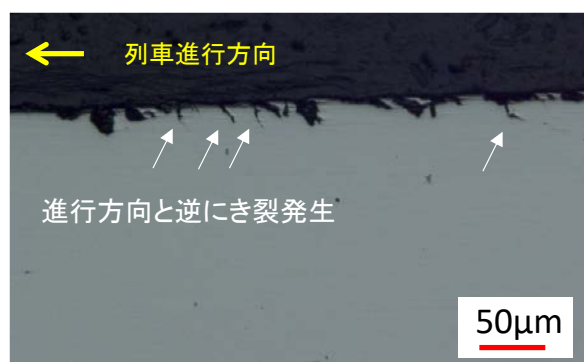


図-7 転動面の外観



(a) GC側



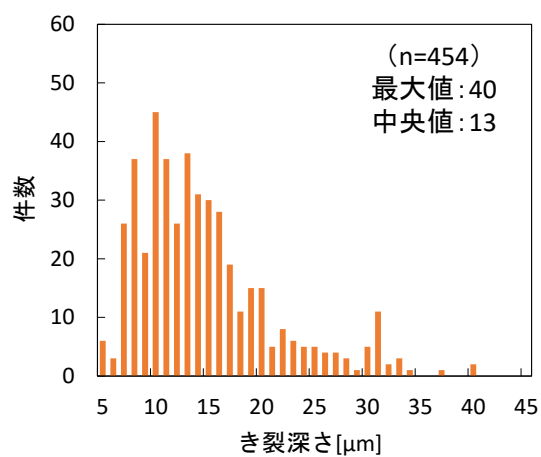
(b) FC側

図-8 き裂観察例

に作用したスピנקリープが、接触面内の中心より外側においてより顕著に発生した影響であると考えられる。

(3) マイクロビッカース硬さ測定

レール輪の繰り返し接触による材質変化の影響を調べるため、転動面表層近傍においてマイクロビッカース硬さ測定を実施した。測定は転動面の接触部ならびに FC 側の非接触部において、レール輪転動方向の断面について、表層から深さ方向に実施した。測定位置ならびに測定結果を図-10 に示す。なおマイクロビッカース硬さ測定の測定荷重は 200gf とした。



(a) GC側

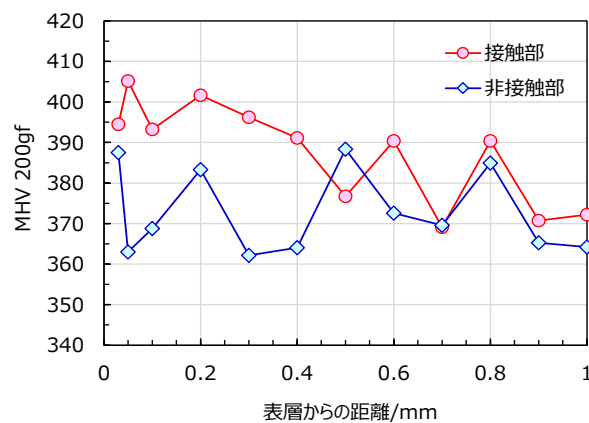
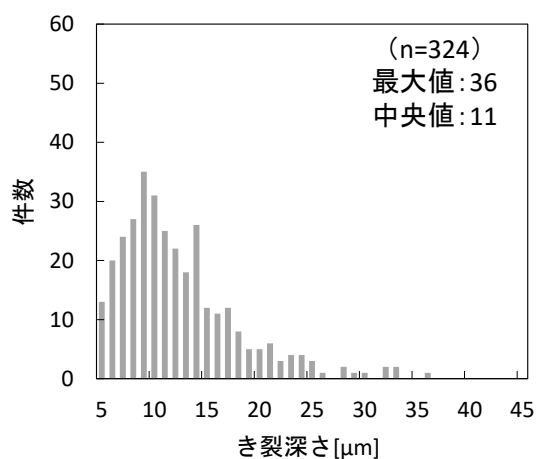
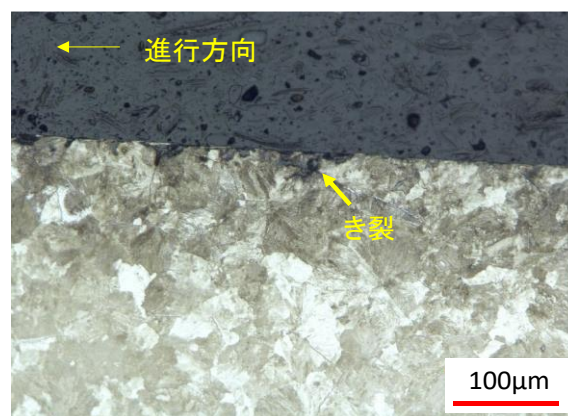


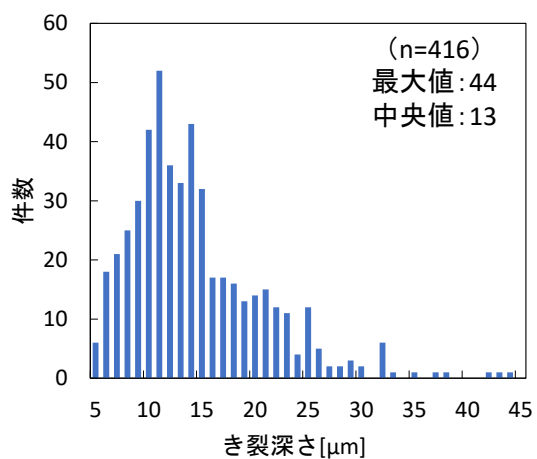
図-10 硬さ測定結果



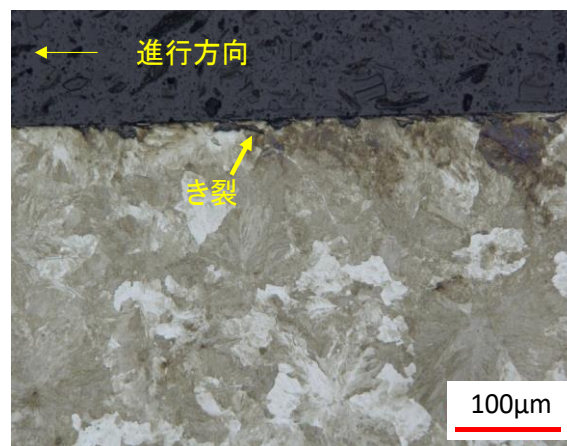
(b) 接触点中心



(a) GC側



(c) FC側



(b) FC側

図-9 き裂発生状況

図-11 断面組織観察結果

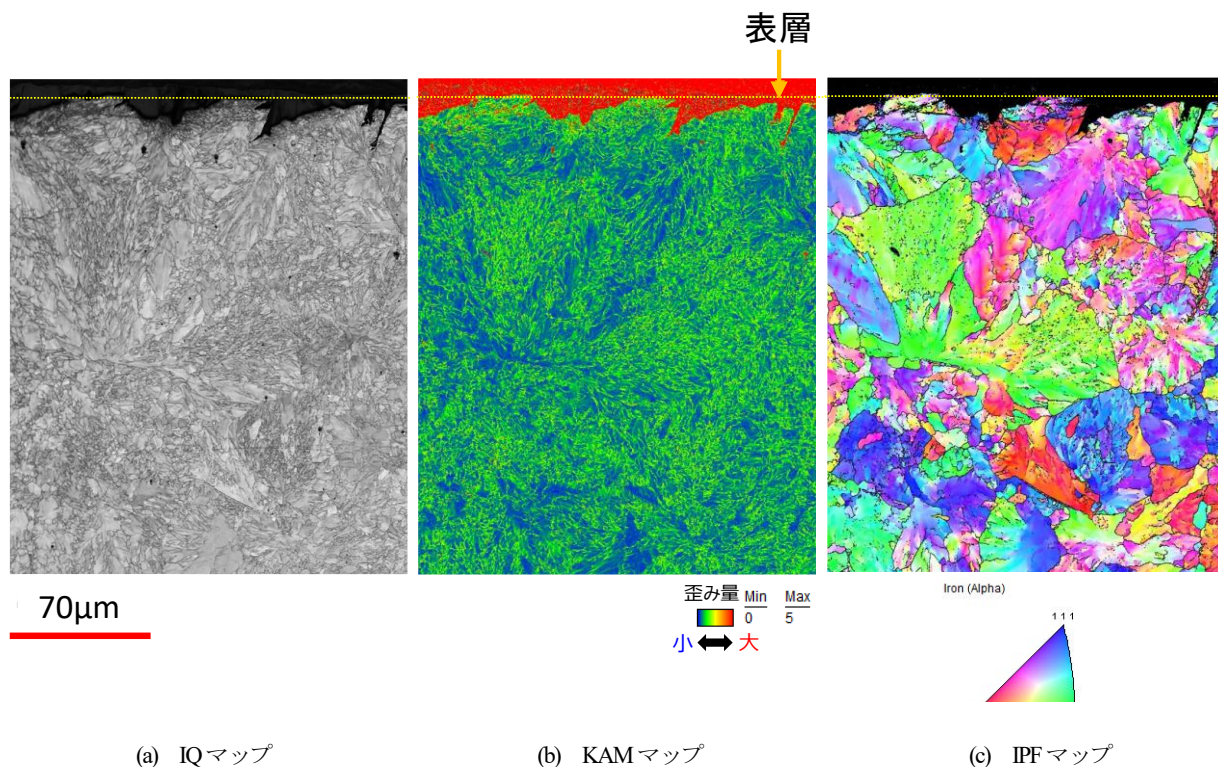


図-12 EBSD分析結果

図-10 に示すように、測定値のばらつきは見られるものの、接触部では表層から400μm付近までの範囲において、深部より20~30HV程度高い値となっており、繰り返しの転がり接触による材質変化で加工硬化していることが確認できる。一方、非接触部については、同様に測定値にばらつきは認められるものの、表層から深部まで大きな硬さ変化は認められなかった。

(4) 断面組織観察

き裂発生箇所における金属組織の状態を評価するため、断面組織観察を実施した。接触部のGC側ならびにFC側におけるレール輪転動方向の断面について、3%ナイトール溶液でエッチングし、金属組織観察を実施した。その結果を箇所別に図-11に示す。

図-11に示すように、接触部のGC側ならびにFC側ともに、明確な塑性流動を確認できなかった。水潤滑により、試験中の試験輪接触部におけるトルクが低く、試験輪表面に大きな接線力が作用していなかったことが要因であると考えられる。

つぎに、レール輪表層におけるひずみ量を評価するため、走査型電子顕微鏡（SEM）による後方散乱電子回折（EBSD）を実施した。分析したIQマップ、IPFマップ、KAMマップを図-12に示す。

図-12(b)に示すKAMマップより、分析したレール輪の表層については、顕著なひずみの分布は見られなかった。しかし図-12(c)に示すIPFマップより、表層のごく一部においては、結晶粒が細粒化していることが確認できる。またこれらの領域では、結晶粒がさまざまな方位を持つことから、集合組織ではないことも確認できる。これらの結果より、表層では方向性のある強い加工は受けていないものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、営業線のGCC発生箇所をモデルとして、その箇所における車輪／レール接触状態を明らかにするとともに、その車輪／レール接触状態を模擬した転動疲労試験を実施した。そしてレール輪のGC部に疲労き裂を再現した。得られた結果を以下に示す。

- ・転動疲労試験装置においてGCC発生箇所の車輪／レール接触状態を模擬した結果、乾燥条件下で実施した試験では、レール輪のGC部にきしみ割れの発生を再現した。しかし、レール輪の摩耗進展に伴い発生した波状摩耗の影響により、GCCの発生に至るまで試験を実施することができなかった。

- ・水潤滑環境下で転動疲労試験を実施した結果、累積通過トン数が1億トン相当まで試験輪を転動させることができた。また、GC部に疲労き裂の発生を再現することができた。
- ・試験輪に再現したき裂の深さは、最大で44 μ mであった。また発生したき裂は、試験輪の接触部中心よりもGC側やFC側で多く、また大きい傾向にあることを確認した。このような傾向が見られた要因として、車輪の踏面勾配がもたらすスピンクリープの影響が考えられる。
- ・試験輪の断面を観察した結果、明確な塑性流動は確認できなかった。しかしEBSDによる分析より、試験輪のごく表層において、結晶粒が微細化していることが確認できた。またマイクロビッカース硬さ測定より、表層から400 μ m付近の範囲で、加工硬化していることが確認できた。

参考文献

- 1) 石田誠：レールシェリング対策，Vol.70，No.11，pp.30-33，RRR，2013。
- 2) 兼松義一：近年の曲線外軌の損傷事例と新型熱処理レール，Vol.70，No.7，pp.23-25，新線路，2016。
- 3) 佐藤幸雄，辰巳光正，柏谷賢治，上田正治，横山泰康：耐シェリング用ベイナイトレールの開発，鉄道総研報告，Vol.12，No.10，pp.15-20，1998。
- 4) 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。
- 5) 辻江正裕，沖田雅佳，中嶋大智，陳樺，曄道佳明：曲線外軌に発生するゲージコーナき裂の抑制に向けた一考察，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.24，2020。
- 6) Y. Kanetasu, M. Matsui and M. Tsujie: Development and evaluation of rail steel grade for damage restraint to high rail in curve sections, Vol.58, No.1, pp.50-56, QR of RTRI, 2017.
- 7) 瀧川光伸，入屋義博：転動試験機によるレールきしみ割れ対策の研究，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.11，pp.39-44，2007。
- 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.
- 9) 名村明，石田誠：レール損傷の発生メカニズムを探る，RRR，Vol.68，No.9，pp.6-9，2011。

(Received April 2, 2021)

(Accepted June 4, 2021)

EXPERIMENTAL REPRODUCTION OF RCF CRACKS MODELED ON THE WHEEL/RAIL CONTACT AT THE GAUGE CORNER CRACKING APPEARANCE SITE

Masahiro TSUJIE, Yoshikazu KANEMATSU, Hidenori NISHIMURA,
Motohide MATSUI, Daichi NAKAJIMA and Keisuke ANDO

The gauge corner cracking (GCC) is the one of the most dangerous crack that causes rail defect. As the countermeasure method, it has been considered the introduction of a new type head hardened rail or the preventive grinding of rail, however, the validity has not yet be reached. To validate the effectiveness of these countermeasure methods, RCF experiment considering the wear development and the crack initiation is required. As the first step of these series of RCF experiment, the experiment under the current wheel/rail contact is needed to evaluate the condition of the crack initiation. In the beginning of this study, the wheel/rail contact analysis with multibody dynamics was carried out. Secondary, RCF experiment by use of the RCF test equipment with the actual profiles of wheel/rail was conducted. Furthermore, the analysis of rail disc of RCF experiment was conducted to make sure the crack initiation and to evaluate the occurrence. The result of this study confirms that the cracks due to RCF were appeared at the contact area of wheel/rail discs.