

レール削正による脱炭層除去が及ぼす 微小き裂形成の抑制効果

兼松 義一* 上東 直孝* 松井 元英** 西村 英典*

Effect of Decarburisation Layer Removal by Rail Grinding on Reduction of Microcrack Formation

Yoshikazu KANEMATSU Naotaka UEHIGASHI Motohide MATSUI Hidenori NISHIMURA

This study aims to understand the effect of decarburisation on microcrack formation on rails using a twin-disc test and an on-site (laying) test. Test pieces with and without decarburisation were compared under the same test conditions using a twin-disk test. The results show that decarburisation affects the formation of microcracks and a plastic flow. Furthermore, we investigated the decarburisation effect on the microcrack formation using test pieces taken from actual tracks. The comparison between the test pieces with and without a decarburized layer showed that the crack density of rails on the unground was 2.7-5.7 times higher than that of rails ground at a cumulative tonnage of 23 MGT.

キーワード：レール，レール削正，脱炭層，微小き裂，二円筒試験，敷設試験

1. はじめに

鉄道レールが果たす主たる役割は、車両を安全かつ円滑に走行させることにあり、レールは鉄道を構成する重要な部材のひとつといえる。レールを使用し続ける上で問題の一つに転がり接触疲労損傷の一種であるシェリングがある。シェリングは、車輪との繰り返し接触によってレール表層に微小き裂が形成され、一部のき裂が進展することにより生じると考えられている¹⁾²⁾。また、シェリングは進展し続けるとレールの破断に至る場合がある。そのため、レールの検査や交換が行われており、鉄道の維持のためのコストの一部を占めている。また、シェリングの予防のために、レール削正が行われている³⁾⁴⁾。

レールにおいては、製造過程の大気中での加熱によって、空気中の酸素が鋼中の炭素と化合してガスとなって飛散し、鋼の表面の炭素濃度が低下する「脱炭」が生じる。表面部で脱炭が生じて炭素量が低下した部分は「脱炭層」と呼ばれ、この脱炭層は機械的性質が低下することが知られている。脱炭層の厚さは、主に加熱炉内の雰囲気を含む多くの要因に依存する⁵⁾。

脱炭層がき裂に及ぼす影響に関する研究事例として、二円筒試験によって転がり接触疲労に及ぼす脱炭層の影響に関する研究が実施されている⁶⁾⁷⁾。これらの室内試験による研究では、脱炭層によって摩耗が促進されること、最大せん断応力が発生する深さに比べて脱炭層が浅いため転がり接触疲労への影響は小さいことなどが報告

されている。ただし、これらはすべり率1~4.5%を採用しており、曲線外軌のきしみ割れが対象と考えられ、直線区間のシェリングには適用できない。また、一定期間使用されたレールの評価を実施した研究⁸⁾⁹⁾では、転がり接触による加工硬化が生じた部分の金属組織解析によって、初析フェライト相（脱炭層の強度低下層と同じ金属組織）に強いひずみが生じていることや、脱炭層の深さからレール削正量を検討した結果が示されている。しかし、これらの研究では、レール削正によって脱炭層が除去された場合の転がり接触疲労に及ぼす効果については確認されていない。

そこで本研究では、レール表層の脱炭層の有無が微小な疲労き裂（微小き裂）発生に及ぼす影響を把握することを目的とし、①国内製造の新品レールに形成された脱炭層の調査により脱炭層の傾向を把握すること、②室内試験機を用いて微小き裂の形成に対する脱炭層の影響の確認を行うこと、③脱炭層深さが既知のレールを敷設し、一部区間をレール削正で脱炭層を除去し、それぞれのレールについて微小き裂の形成頻度を調査すること、の3点を実施した。

2. 新品レールの脱炭層形成状態の把握

2.1 調査対象および調査方法

新品未使用の50kgNレール18本および60kgレール10本を調査対象とした。なお、調査対象のレールは普通レールである。

脱炭層の有無を確認するために、金属組織観察を実施した。脱炭層の深さの評価は、ISO5003「43kg/m以上

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

** 材料技術研究部

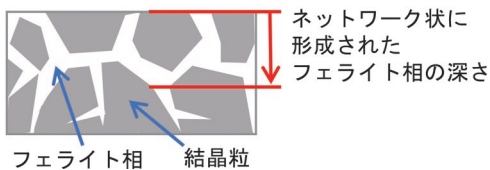
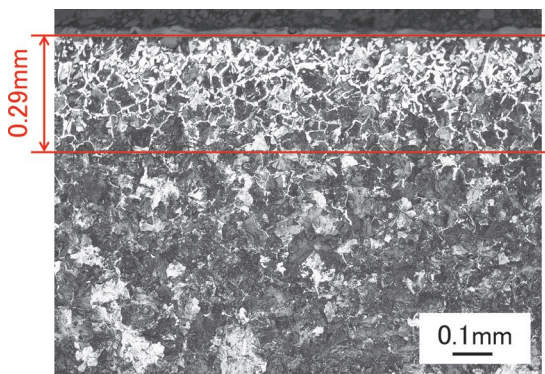


図1 新品レールの平均的な脱炭層深さおよびフェライトネットワークの模式図

の平底レール¹⁰⁾に規定される方法に準拠した。観察断面はレール長手方向断面，レール幅方向の観察位置はレール頭部幅中心とした。観察断面を鏡面研磨し，金属組織現出のために5% ナイタルで腐食した後で組織写真を撮影した。また，脱炭層深さは，脱炭によって形成されたフェライト相が結晶粒界にネットワーク状（以降，フェライトネットワークと称す）に形成されている深さまでを脱炭層深さとして計測した。

2.2 調査結果

調査対象レール 28 本の調査を行った結果，新品未使用レールには概ね 0.14～0.45mm 程度の脱炭層が形成されており，最大で 0.76mm の脱炭層が形成されていた。脱炭層深さの平均値は 0.29mm，標準偏差は 0.14mm であった。なお，レールの JIS 規格（JIS E 1101）には脱炭層に関する具体的な規定はない。図 1 に今回調査した平均的な脱炭層深さを持つレールの金属組織写真の例を示す。

3. 室内試験による脱炭層の微小き裂形成に及ぼす影響確認

3.1 西原式二円筒試験機

西原式二円筒試験機の概要を図 2 に示す。歯車を用いて二つの円筒試験片を異なる速度で回転させ，円筒面同士を押し当て，すべり接触状態における摩耗特性や耐損傷性等を把握する試験機である。荷重はばね機構により負荷し，面圧は 500～2,000MPa，すべり率は歯車により 0%～9% まで選択できる。回転速度は最高 2,000rpm である。試験環境は水・油の滴下が可能である。

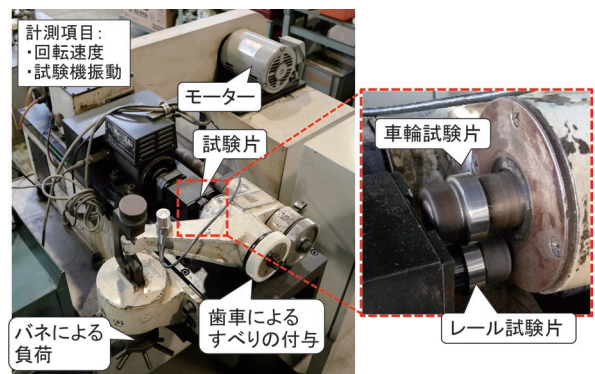


図2 西原式二円筒試験機

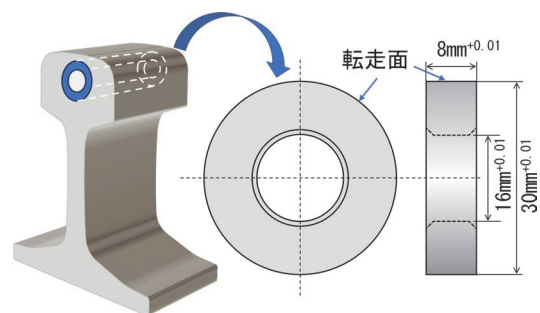


図3 試験片採取位置および試験片形状

3.2 試験片採取位置

試験に供するレール側の円筒試験片は，脱炭層なしの試験片と，脱炭層を付与した脱炭層ありの試験片の 2 種類とし，ともにレール頭部から採取した。レール試験片の採取位置を図 3 に示す。脱炭層を付与した試験片は，レールから中空円筒形状の試験片素材を採取し，次節に記す熱処理後，試験片形状に加工した。

3.3 脱炭層付与のための熱処理

脱炭層ありの試験片は，中空円筒形状の試験片素材採取後に，脱炭層を付与するため熱処理を実施することにより作成した。加熱炉の炉内温度を 1,000℃ に調整し，大気雰囲気加熱炉内で 4 時間経過後に空冷した。熱処理後，試験片形状に仕上げた試験片の金属組織の写真の一例を図 4 に示す。脱炭層の深さは，試験片を 90 度ずつ回転させた 4 箇所ので平均で 0.13mm であった。前章の新品未使用レールの脱炭層を調査した結果，平均で 0.29mm 程度であったため，本試験片の脱炭層は新品未使用レールと比較して浅い。

試験片転走面表層から深さ方向の硬さ分布を図 5 に示す。硬さは脱炭の影響で約 0.4mm～0.6mm 深さ程度まで低減していた。なお，試験片の脱炭によって形成されたフェライト相の深さ（全脱炭層深さ¹¹⁾は，図 4 に示す ISO5003 で規定されるフェライトネットワークの深さよりも深く，その影響が硬さ分布に影響している可能

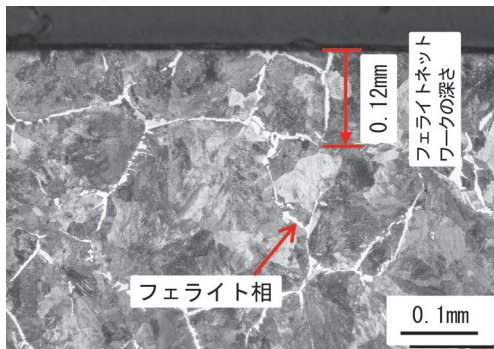


図4 熱処理後の試験片表層の金属組織写真

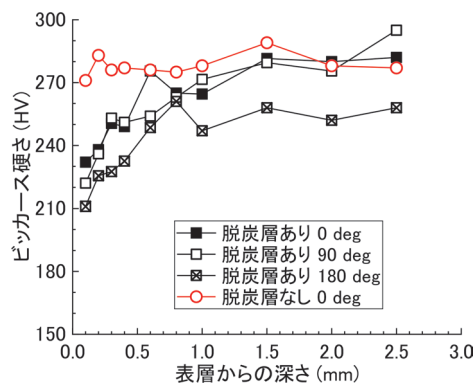


図5 試験片転走面表層からの硬さ分布

性が考えられる。また、深さ0.6mmよりも深い位置では、レール母材の硬さ値（約260~270HV）と同等であった。

3.4 試験方法

試験条件のひとつであるすべり率に関するこれまでの知見では、すべり率を0%とした場合には試験片にき裂が生じにくいことが分かっている。試験の目的である脱炭層と微小き裂形成の関係を把握するためには、すべりを付与することが必要である。そこで、設定できる最小のすべり率である0.5%(車輪試験片が速く回る)で試験を実施した。また、面圧900MPa、回転速度1,000rpm、大気乾燥状態とし、回転数が10万回時点で試験を終了とした。試験前と試験後の試験片質量変化を摩耗量として整理した。

3.5 試験結果

表1に、試験に供した試験片の摩耗量の測定結果を示す。脱炭層ありの試験片は脱炭層なしの試験片と比較すると、摩耗量は2倍以上であるが、絶対値としては小さいため、明瞭な差は認めにくいものの、脱炭層がある試験片の方が摩耗量が多い結果であった。

つぎにレール試験片の転走面中央位置で試験片を輪切り状に切断し、走査型電子顕微鏡を使用して観察した。図6に試験片の転走面断面の観察例を示す。試験片の転

表1 各試験片の摩耗量

試験片の種類	摩耗量
脱炭層無し	0.05 g
脱炭層有り	0.12 g

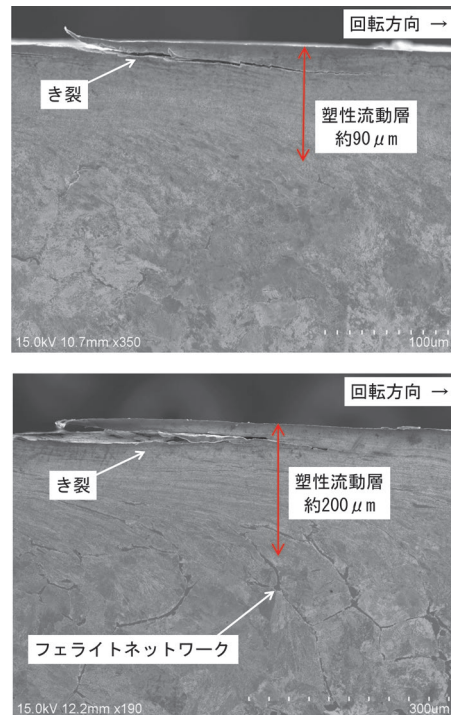


図6 試験後の試験片表層の金属組織写真 (上段：脱炭層無し、下段：脱炭層有り)

表2 試験後のき裂および塑性流動層の形成状況

試験片	き裂個数 (個)	き裂密度 (個/mm)	平均き裂長さ (μm)	塑性流動層の深さ (μm)
脱炭層なし	85	0.90	240.5	94.0
脱炭層あり	117	1.24	236.7	200.3

走面表層には試験片の脱炭層の有無によらず、き裂が形成されていた。また、転走面表層付近には塑性流動層が形成され、き裂はこの塑性流動層内で進展していた。

脱炭層なしの試験片および脱炭層ありの試験片の両方の転走面付近の断面で見られたき裂について、その断面円周方向のき裂の個数を計測し、試験片円周長さに対するき裂の本数をき裂の密度として算出した。また、き裂それぞれの長さを測定した上でその平均を算出した。あわせて、き裂先端の表層（転走面）からの深さを測定し、その平均を算出した。結果を表2に示す。

脱炭層ありの試験片は、脱炭層なしの試験片と比較して、き裂密度が高く、塑性流動層の深さが脱炭層なしの試験片より深かった。一方で、き裂長さは、脱炭層の有無による顕著な差異は認められなかった。

4. 敷設試験による脱炭層の微小き裂形成に及ぼす影響確認

4.1 調査方法

脱炭層深さの異なるレールについて、一定通過トン数毎に部分レール交換を実施し、微小なき裂の形成状況を調査した。

新品レール交換時に発生する端材レールについて金属組織観察を行い、交換箇所の中でレールの脱炭層深さを予め把握した区間を追跡調査箇所として選定した。当該レールについて、0.1~0.5億トン程度の累積通過トン数で部分レール交換を行い、脱炭層深さと通過トン数および形成される微小き裂形成の関係を把握する調査を行った。また、調査区間の一部については、1頭式レール削正機によってレール頭頂面を十分削正し、脱炭層がない区間として準備した。

図7にレールの交換およびレール削正の概要図を示す。選定した調査箇所の軌道条件は、車輪とのすべり接触によって生じる白色層が重畳することを避けるため、直線区間・駅間とした。今回の調査では、複線区間で同様の条件の2線区（上り線・下り線と呼ぶ）について調

査を実施した。この2線区について、次の段取りで、レール交換およびレール削正を実施した。

段階Ⅰ：既存レール（脱炭層深さ0.31mm）の一部に新品レール（脱炭層深さ0.42mm）を敷設した。

その際、既存レールの端材を記号Aとした。

段階Ⅱ：新品レール敷設後2週間の時点で、新品レールの一部に対して一頭式レール削正機でレール頭頂面を約0.8mm削正し、脱炭層を除去した。

段階Ⅲ：新品レール敷設から12ヶ月後（通トン数0.23億トン加算）に、新たにレール交換（脱炭層深さ0.28mm）を実施し、その際、記号B、記号C、記号Dのレールを交換した。

段階Ⅳ：新品レール敷設後18ヶ月後（通トン数0.11億トン加算）に、記号E、記号F、記号Gのレールを交換した。

なお、金属組織観察ではフェライトネットワークの深さによって脱炭層の深さは評価できるが、レール表層からの脱炭の程度の深さ方向の推移を評価することはできない。そこで、電子線マイクロアナライザー（EPMA）装置を用いて、元素マッピングを行い、レール表層に形成された脱炭層の深さ方向の炭素元素の分布を調査した。調査対象は、敷設試験のレールの中で最も脱炭層が深く形成されていた、調査箇所上り線・記号Cレール（脱炭層深さ0.42mm）とし、レール表層を含む幅4mm×深さ1mm（ビーム径約1μm）をマッピング領域とした。各計測深さの炭素濃度の推移を図8に示す。

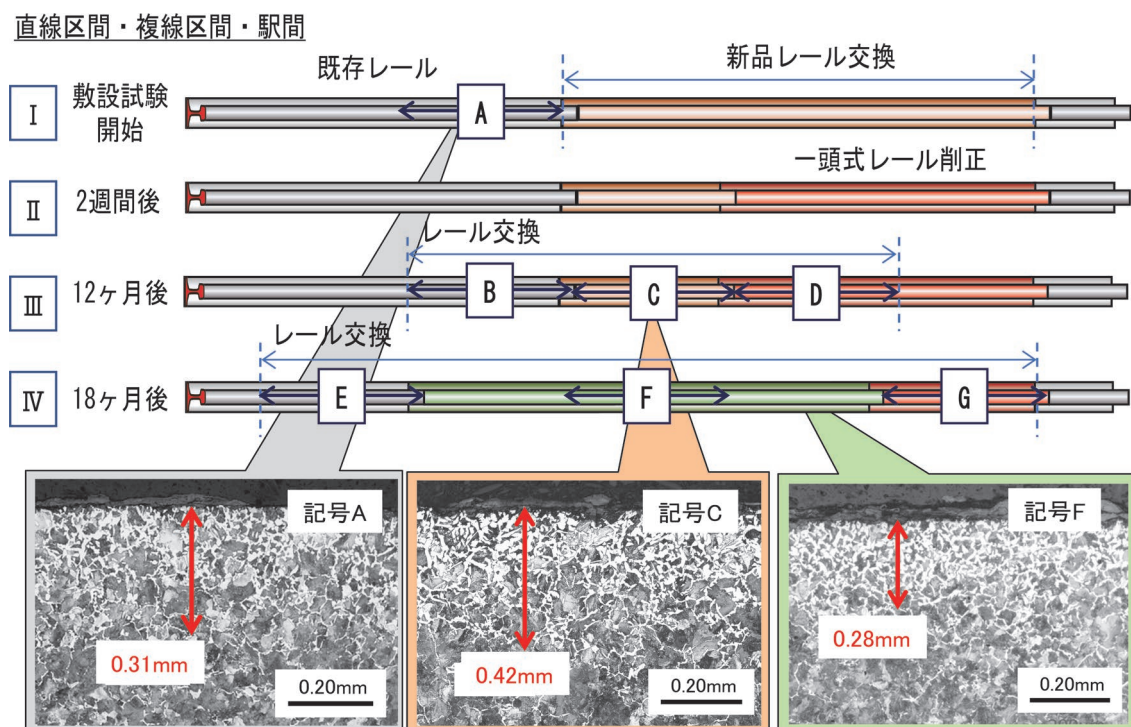


図7 レールの交換およびレール削正の概要図

炭素濃度分布は、レール最表層で0.4%以下と最も低下していた。レールの母材レベルまでの炭素量となるまでの深さは0.6~0.7mm程度であり、金属組織観察で評価した脱炭層深さ、すなわちフェライトネットワーク深さよりも深くまで脱炭の影響が見られた。

4.2 敷設試験結果

レール交換された各レールについて金属組織観察を行い、き裂の形成状態について材料解析を行って確認した。図9に観察したき裂の写真（上段）および同き裂形成箇所5%ナイトールによる腐食後の写真（下段）の代表

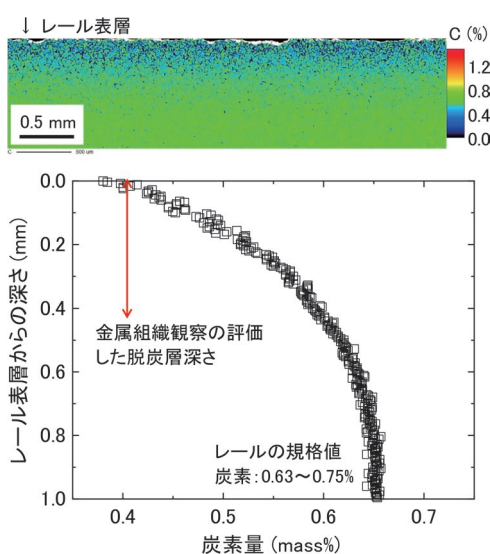


図8 試験線区：上り線・記号Cレールの新品時の炭素濃度分布

例を示す。表3および表4に調査線区・上り線および下り線のレールの脱炭層深さ、削正履歴、通過トン数、微小き裂形成の観察結果、金属組織観察で観察された残存脱炭層深さを示す。なお、表中の網掛けは同じ製造ロットのレールであることを意味しており、表記の順番は通過トン数やレール削正履歴で整理した。また、図10には表3および表4から、き裂密度と通過トン数の関係を図示した。削正を行っていないレールには脱炭層が残存し、すべてのレールにき裂が観察されていた。

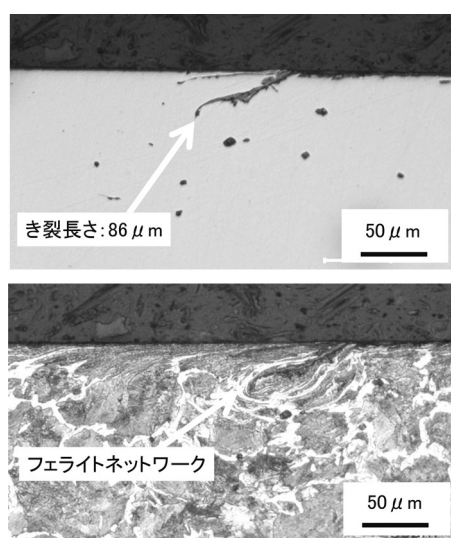


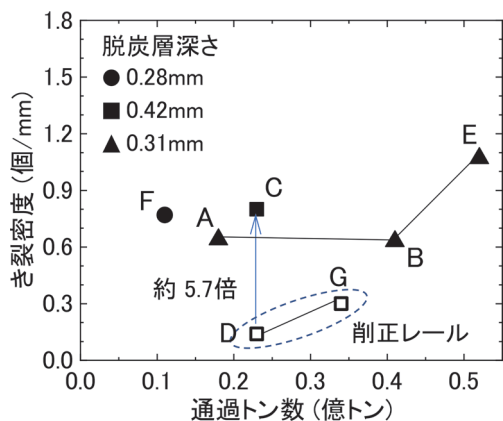
図9 試験線区：上り線・記号Cレールに形成されたき裂（上段）と金属組織写真（下段）

表3 調査レールの脱炭層深さ、削正履歴、通過トン数、微小き裂形成の観察結果（試験箇所：上り線）

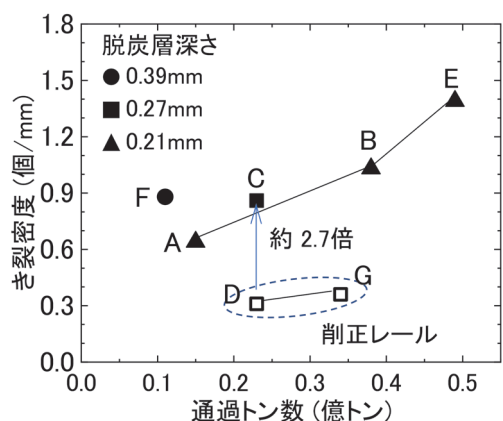
記号	削正履歴	脱炭層深さ (mm)	通トン数 (億トン)	き裂個数 (個)	き裂密度 (個/mm)	き裂長さ (μm)		き裂深さ (μm)		残存脱炭層深さ (mm)
						平均値	最大値	平均値	最大値	
F	無し	0.28	0.11	115	0.77	33.49	46	9.0	21	0.11
A	無し	0.31	0.18	96	0.64	29.53	37	8.0	21	0.20
B	無し	0.31	0.41	95	0.63	44.69	93	9.9	20	0.13
E	無し	0.31	0.52	161	1.07	40.28	86	10.4	29	0.07
D	有り	0	0.23	21	0.14	35.95	52	7.3	14	0.00
C	無し	0.42	0.23	120	0.80	35.48	80	10.1	41	0.18
G	有り	0	0.34	45	0.30	47.51	28	8.7	36	0.00

表4 調査レールの脱炭層深さ、削正履歴、通過トン数、微小き裂形成の観察結果（試験箇所：下り線）

記号	削正履歴	脱炭層深さ (mm)	通トン数 (億トン)	き裂個数 (個)	き裂密度 (個/mm)	き裂長さ (μm)		き裂深さ (μm)		残存脱炭層深さ (mm)
						平均値	最大値	平均値	最大値	
F	無し	0.39	0.11	132	0.88	25.37	82	8.7	17	0.14
A	無し	0.21	0.15	96	0.64	22.69	73	9.0	20	0.12
B	無し	0.21	0.38	154	1.03	35.06	106	9.3	37	0.12
E	無し	0.21	0.49	209	1.39	30.44	131	9.8	20	0.10
D	有り	0	0.23	46	0.31	27.87	76	7.9	15	0.00
C	無し	0.27	0.23	129	0.86	35.12	130	8.9	17	0.10
G	有り	0	0.34	54	0.36	16.35	149	6.4	12	0.00



(a) 調査箇所上り線



(b) 調査箇所下り線

図 10 き裂密度と通過トン数の関係

5. 考察

5.1 西原式二円筒試験

表 1 に示した西原式二円筒試験の結果より、明瞭な差は認めにくいですが、脱炭層ありの試験片は脱炭層なしの試験片と比較して脱炭層がある試験片の方が摩耗量が多い結果であった。また、塑性流動層の表層からの深さは、脱炭層ありの試験片は脱炭層なしの試験片と比較して深い結果であった。脱炭層はレール母材と比較して相対的に強度が低くなるため、接線力の影響を受けやすいことが考えられる。また、脱炭層ありの試験片は脱炭層なしの試験片と比較して、き裂密度は 1.4 倍程度高かった。

これも塑性流動層内に脱炭層が存在することで、き裂の発生を促した可能性がある。しかし、き裂長さは、脱炭層ありの試験片と脱炭層なしの試験片と比較して顕著な差異は認められなかった。したがって、今回の試験条件においては、形成されるき裂の長さには脱炭層の有無は影響しないと判断できる。

今回、熱処理によって脱炭層を意図的に付与した試験片を用いた二円筒試験の結果から、脱炭によるフェライ

トネットワークの存在により、同じ接線力であっても塑性流動やき裂の形成が増加することが確認された。しかし、二円筒試験では実際の車輪とレールの接触を再現することはできないこと、熱処理を行った試験片においては、実際のレールの脱炭層の深さや、フェライトネットワークの程度とは厳密には同じにできなかったことから、脱炭層の影響については定性的な検討にとどまっている。そこで次節では、敷設試験での脱炭層の影響について考察する。

5.2 敷設試験

5.2.1 脱炭層の有無によるき裂の形成

表 3 および表 4 の右端に示すように、削正を実施していないレールはすべて脱炭層が残存しており、き裂近傍には車輪との接触による塑性流動層や脱炭層が存在していた (図 9)。

記号 C と記号 D は、レール製造ロットが同じであるため製造時の脱炭層深さも同じであり、通過トン数も 0.23 億トンと同じである。記号 C は敷設後削正実施箇所、記号 D は削正未実施箇所であることから、両者の比較により脱炭層ありなしの違いを評価することができる。表 3 および表 4、図 10 より調査箇所上り線では脱炭層があるレールのき裂密度は約 5.7 倍、下り線ではき裂密度は約 2.7 倍であった。また、計測した最大き裂長さに着目すると、脱炭層があるレールは脱炭層を除去したレールの最大き裂長さと比較して、上り線では約 1.5 倍、下り線では約 1.7 倍大きい結果であった。先行研究¹²⁾では、実レールに形成された転がり接触疲労損傷を調査し、き裂の発生起点がパーライト組織中の初析フェライト組織であることを明らかにした報告がなされており、その報告と今回の敷設試験の結果は一致する。今回の敷設試験レールの金属組織観察で観察されたき裂深さは、塑性流動層の深さとほぼ同じであった (図 9)。そのため、シェリングのようにき裂が大きく成長するまでは、今回の敷設試験での通過トン数では確認することができなかった。観察された微小き裂とシェリングの成長については別途検証が必要である。

記号 G は、敷設後レール削正され、その後通過トン数が 0.34 億トン経過したレールである。試験線区 2 箇所の調査箇所のき裂密度は約 0.30 個/mm、0.36 個/mm であった。一方、削正未実施で 0.11 億トン経過時のレール (記号 F) のき裂密度は 0.77 個/mm、0.88 個/mm であり、記号 G は記号 F よりもき裂の形成程度は軽微であった。従って、敷設後の初回レール削正を実施することで、き裂が形成されるまでの通過トン数が長くなると考えられる。しかし、レール削正を実施したレールにも微小き裂が形成されていた。既往研究では、脱炭層ではないが同組織である初析フェライトが転がり接触疲労の起点とな

ることが指摘されている¹³⁾。今回調査した削正レールのき裂もこれと同様の原因である可能性がある。

この敷設試験では、削正によって脱炭層を除去した。削正したレールと削正していないレールでは、レールの断面形状が異なり、それに伴って車輪との接触状態を全レールで統一することができていないことに留意する必要がある。また、脱炭層深さや程度が異なる場合には、今回確認したき裂の挙動と異なる可能性がある。

5.2.2 通過トン数の増加によるき裂の形成

記号 A, B および E は同一レール（既存レール）について、通過トン数が 0.18 億トン、0.41 億トン、0.52 億トン時点のレールであり、これらの比較により通過トン数の増加によるき裂形成の変化を評価することができる。表 3 および表 4、図 10 より通過トン数が 0.5 億トンで、き裂密度が増加する傾向がみられた。

シェリングはレールの経年変化、すなわち通過トン数とともに増加することが報告されている¹⁴⁾。今回、調査した範囲では通過トン数が 0.5 億トンに達すると脱炭層に起因する微小き裂が増加することが明らかになった。これらの微小き裂が通過トン数の増加に伴い、シェリングに成長する可能性が考えられる。しかし、微小き裂が形成された後、摩耗との競合によって消滅する可能性も考慮しなければならない。

5.2.3 脱炭層深さとき裂の形成

先行研究では脱炭層深さが 0~0.6mm の試験片を用いた二円筒試験の結果、脱炭層深さが増加するにつれてき裂長さが長くなる傾向があることが報告されている⁷⁾。各調査線区において、3つの脱炭層深さが異なるレールが存在する。調査箇所上り線では、0.28mm、0.31mm、0.42mm 深さであるが、図 10 よりこれらのレールにおけるき裂密度には顕著な差は認められなかった。

5.3 微小き裂のシェリングへの進展と削正の影響

転がり接触疲労き裂の進展には、輪重変動・軌道の不規則性¹⁵⁾ や、レールの残留応力¹⁶⁾、き裂内部に水などの流体が存在する場合にはき裂が進展しやすくなる¹⁷⁾ などいくつかの要因が関連することが多数報告されている。本研究で分析した範囲では、脱炭層を有するレールの方が多くき裂が形成されていた。これらのき裂が進展・伝播する可能性は上述の要因等に関係すると考えられる。そのため、今回調査した微小き裂が直接シェリングに成長するか確認することはできないが、シェリングの初期となりうる微小き裂と脱炭層の関係を把握することができたと考える。

また、観察されたき裂の深さはすべて 0.1mm 以下であったこと、図 8 より脱炭による炭素低減は表層から約 0.3mm 程度までの範囲で顕著であることから、累積通過トン数 0.5 億トンで 0.3mm の削正が実施されれば、こ

れらのき裂および脱炭層は概ね除去できると考えられる。

他方、0.5 億トン以下でのシェリング発生¹⁸⁾ や、敷設から 0.5 億トン以上経過後に削正した場合にはシェリングの発生傾向が高いことが報告¹⁹⁾ されていることから、レール敷設後の初回のレール削正効果が高い可能性が考えられる。なお、文献で報告されたシェリングが白色層に起因したものであるかは定かではない。今回調査した 0.5 億トン以下のレールの材料解析結果では、脱炭層の影響でき裂の密度や最大き裂長さが大きくなる傾向があることから、削正車の運用や削正コスト等を考慮する必要があるものの、0.5 億トン未満でのレール削正はシェリングとなるき裂を低減させる可能性があると考えられる。

6. まとめ

レール表面の脱炭層がき裂発生に及ぼす影響を明らかにするため、レールに形成された脱炭層の状態を調べ、二円筒試験機を用いてレールの微小き裂に及ぼす影響を調査した。また、敷設試験により、脱炭層とき裂形成の影響を確認した。

- (1) 新品未使用レール 28 本の平均脱炭深さは 0.29mm であり、標準偏差は 0.14mm であった。
- (2) 二円筒試験の結果、脱炭層を有する試験片は、脱炭層を有さない試験片に比べ、摩耗量がやや多く、塑性流動層が深くなっていることがわかった。また、き裂密度も 1.4 倍に増加した。脱炭層はレール母材に比べ強度が低いため、接線力の影響を受けやすいことを基礎的に把握した。
- (3) 敷設試験において、累積通過トン数 0.23 億トンの未削正レール（脱炭層あり）と削正レール（脱炭層なし）を比較すると、脱炭層ありのレールは脱炭層を除去したレールに比べ、き裂密度が約 2.7~5.7 倍、最大き裂長が約 1.5~1.7 倍大きくなっていた。
- (4) レール敷設直後にレール削正を施し、その後通過トン数 0.34 億トンに達したレールのき裂密度は、2箇所の調査地点で約 0.30 および 0.36 個/mm であった。これは 0.11 億トンに達した削正未実施のレール（脱炭層あり）よりもき裂の発生は少なかった。レール削正により脱炭層を除去することで、微小き裂の進展が効果的に抑制されると考えられる。
- (5) 観察されたき裂の深さはすべて 0.1mm 以下であったこと、脱炭による炭素低減は表層から約 0.3mm 程度が顕著であることから、累積通過トン数 0.5 億トンで 0.3mm の削正が実施されれば、これらのき裂および脱炭層は概ね除去できると考えられる。
- (6) 今回調査した 0.5 億トン以下のレールの解析結果

では、脱炭層の影響でき裂の密度や最大き裂長さが大きくなる傾向があることから、削正車の運用や削正コスト等を考慮する必要があるものの、0.5億トン未満でのレール削正はシェリングとなるき裂を低減させる可能性があると考えられる。

この論文は、Elsevierの許可を得て、Wear, Volumes 504-505, Yoshikazu Kanematsu, Naotaka Uehigashi, Motohide Matsui, Shoji Noguchi, Influence of a decarburised layer on the formation of microcracks in railway rails: On-site investigation and twin-disc study, 204427, 2022年より転載した。

文献

- 1) M. Steenbergen, R. Dollevoet, "On the mechanism of squat formation on train rails-part I: origination," International Journal of Fatigue, 47, 2013.
- 2) Grassie SL, "Squats and squat-type defects in rails: the understanding to date," Proc Inst Mech Eng F: J Rail Rapid Transit, 2011.
- 3) Kunihiro Kondo, "Cause, increase, diagnosis, countermeasures and elimination of Shinkansen shelling," Wear, 191, 1-2, 1996.
- 4) Makoto Ishida, Noritsugu Abe, Takuya Moto, "The effect of preventive grinding on rail surface shellings," Quarterly Report of RTRI, 39, 3, 1998.
- 5) G.F. Vander Voort, "Understanding and measuring decarburisation," Advanced Material and Processes, 2015.
- 6) R.I. Carroll, J.H. Beynon, "Decarburisation and rolling contact fatigue of a rail steel," Wear, 260, 2006.
- 7) X.J. Zhao, J. Guo, H.Y. Wang, Z.F. Wen, Q.Y. Liu, G.T. Zhao, W.J. Wang, "Effects of decarburisation on the wear resistance and damage mechanisms of rail steels subject to contact fatigue," Wear, 364-365, 2016.
- 8) S. Pal, W.J.T. Daniel, M. Farjoo, "Early stages of rails squat formation and the role of a white etching layer," Int. J. Fatigue, 52, 2013.
- 9) R.I. Carroll, J.H. Beynon, "Rolling contact fatigue of white etching layer: Part 1 crack morphology," Wear, 262, 2007.
- 10) ISO 5003, "Flat bottom (Vignole) railway rails 43 kg/m and above," 2016.
- 11) ISO 3887, "Steels - Determination of the depth of decarburisation," 2017.
- 12) H.C. Eden, J.E. Garnham, C.L. Davis, "Influential microstructural changes on rolling contact fatigue crack initiation in pearlitic rail steels," Materials Science and Technology, 21, 6, 2005.
- 13) Richard Stock, Wilhelm Kubin, Werner Daves, Klaus Six, "Advanced maintenance strategies for improved squat mitigation," Wear, 436, 2019
- 14) Yousif Muhamedsalih, Samuel Hawksbee, Gareth Tucker, Julian Stow, Mark Burstow, "Squats on the Great Britain rail network: Possible root causes and research recommendations," International Journal of Fatigue, 149, 2021.
- 15) Robin Andersson, Peter T. Torstensson, Elena Kabo, Fredrik Larsson, Anders Ekberg, "Integrated analysis of dynamic vehicle-track interaction and plasticity induced damage in the presence of squat defects," Wear, 366-367, 2016.
- 16) B. Trollé, M.C. Baietto, A. Gravouil, S.H. Mai, T.M.L. Nguyen-Tajanb, "XFEM Crack Propagation Under Rolling Contact Fatigue," Procedia Engineering, Volume 66, 2013.
- 17) Stanisław Bogdański, "Quasi-static and dynamic liquid solid interaction in 3D squat-type cracks," Wear, 314, 1-2, 2014.
- 18) 山根寛史, 今西進也, 辰己新太郎: レールシェリング傷の発生傾向分析について, Track Engineering Report, Vol.2, 2014
- 19) 後藤耕平: レール初期削正によるシェリング抑制効果に関する研究, 土木学会第72回年次学術講演会, 2017