

白色層に起因するレール微小き裂の 進展挙動と削正法の検討

辻江 正裕* 松田 博之** 中村 崇**
名村 明* 金 鷹* 森 久史***

Examination of the Micro Crack Propagation Caused by Rail White Layer and the Grinding Method

Masahiro TSUJIE Hiroyuki MATSUDA Takashi NAKAMURA
Akira NAMURA Ying JIN Hisashi MORI

It is thought that rail-squats is caused by Rolling Contact Fatigue (RCF) and the White Layer (WL). Rail-squats due to RCF can be prevented by grinding rail head periodically. However, the mechanism of rail-squats due to WL has not been cleared, and the specific countermeasure has never been established. The aim of this research is to examine the factor of WL occurrence and the specific measures against WL and micro cracks. In this paper, we investigated the actual condition of rail WL, the factor of WL occurrence, the generation and the propagation of micro cracks around WL, and the effect of rail head grinding.

キーワード：レール，車輪，転がり接触，シェリング，白色層，微小き裂，削正

1. はじめに

レール破断を引き起こす恐れのあるレールシェリングには，転がり接触疲労によるものと白色層によるものがある¹⁻³⁾。転がり接触疲労によるシェリングについては，対策法として定常削正することが提案されている⁴⁾。しかし白色層を起点とするシェリング傷については，具体的な対策手法が提案されていない。そこで本研究では，レール白色層ならびに微小き裂の発生状況の把握，白色層発生要因の検討，白色層を起点とするシェリング傷の発生を抑制する具体的な削正法について検討を行った。

2. レール白色層の実態

白色層や微小き裂の発生状況を調べるために，現地調査ならびに発生レールの断面観察を行った。本章では，それらの結果について示す。

2.1 レール白色層の発生状況

先行研究⁵⁾より，シェリング群発箇所において白色層の発生が確認されている。そこで白色層の発生状況およ

びシェリングとの関係を把握するため，国内在来線13線区の直線部群発シェリング発生箇所を中心に現地調査を実施した。

2.1.1 白色層の外観

白色層はナイトール（硝酸アルコール）を塗布することで光沢が変わり，可視化される。図1に，ナイトール腐食により現出させた白色層の外観を示す。図1のように太く車輪との接触面全体に存在するものや，まだらに存在するものが確認された。調査した箇所の多くでこのようにレール頭頂面に連続的に発生している白色層が確認され，またそれらは数メートル～数キロメートルの長さで存在した。

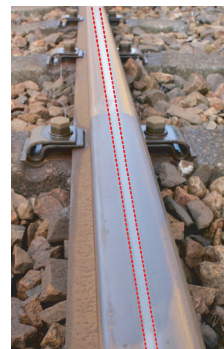


図1 白色層の外観

2.1.2 白色層とシェリング

白色層とシェリングの関係を調べるため，直線部群発シェリング発生箇所において，ナイトール腐食により白色層の存在の有無，浸透探傷及び磁粉探傷によりシェリングの開口部と微小き裂の調査を行った。その結果（図2(a)，(b)），白色層が発生している帯域の境界部に，シェリングの開口部が見られた。また図2(c)より，シェリングの開口部が見られた帯域に多くの微小き裂が発生し

* 鉄道力学研究部（軌道力学）

** 前 鉄道力学研究部（軌道力学）

*** 材料技術研究部

特集：軌道技術

ていることが確認された。

シェリング開口部と微小き裂がともに白色層の発生している帯域の境界部に見られたことから、白色層近傍に発生した微小き裂がシェリングの起点となっている可能性が考えられる。

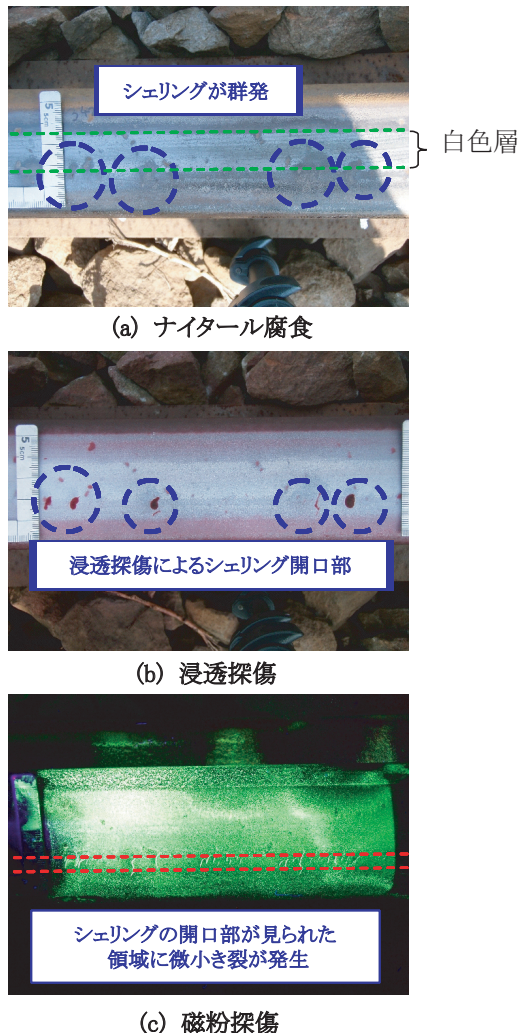


図2 白色層とシェリング、微小き裂の関係

2.1.3 白色層の発生傾向

現地調査の結果をもとに、白色層発生箇所のレール製造年や列車通過トン数などの各種軌道諸元についてデータを蓄積し、そのデータに基づいて白色層の発生傾向を調べた。その結果、白色層は軌道諸元を問わず発生していたが、駅構内、特にホーム下での発生が多かった。また白色層は、敷設後数年程度のレールや削正後1年程度のレールにも認められ、敷設年数には依らないことが確認された。

2.2 白色層発生レールの断面組織観察

つぎに累積通過トン数の異なる白色層発生レール（在来6線区）を収集して、白色層と微小き裂の発生状況について観察した。観察したサンプル数は1232である。

2.2.1 白色層厚さ

図3に、観察された白色層の厚さ分布を示す。この結果より、白色層の厚さは概ね正規分布しており10～30 μm 程度に多く分布していること、最大では62.1 μm であることが確認された。またこのデータを線区別に集計した結果を図4に示す。横軸は累積通過トン数の昇順であるが、白色層厚さと累積通過トン数には正の相関がないことがわかる。

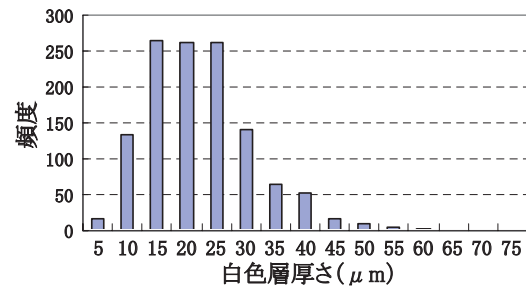


図3 白色層厚さの分布

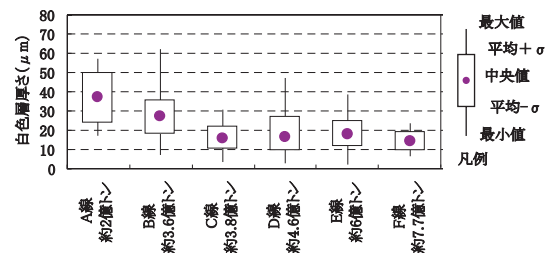


図4 白色層厚さの分布（累積通過トン別）

2.2.2 微小き裂の発生状況

白色層付近の微小き裂を調査した結果、図5に示すように、その発生箇所によって2つの形態が存在することが明らかになった。

ひとつは、白色層内部に微小き裂が発生する形態である。この形態は、白色層自体が硬くて脆い上に列車通過時の輪重が負荷されることにより発生すると考えられ、ほとんどが白色層内部で停留するか、あるいはパーライト層に至ってもその深部まで進展していなかった。

もう一方は、境界部に微小き裂が発生する形態である。この形態は、相変態により白色層自体が体積膨張すること、また列車通過時における白色層とパーライト層との延性の違いにより発生したと考えられる。この形態の場合には、微小き裂が塑性フローに沿ってパーライト層の

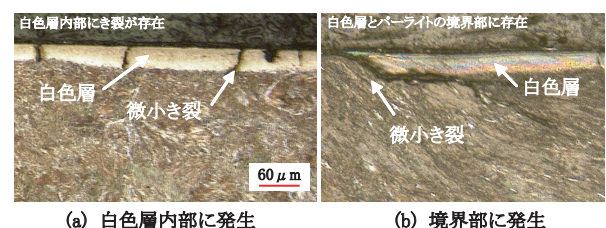
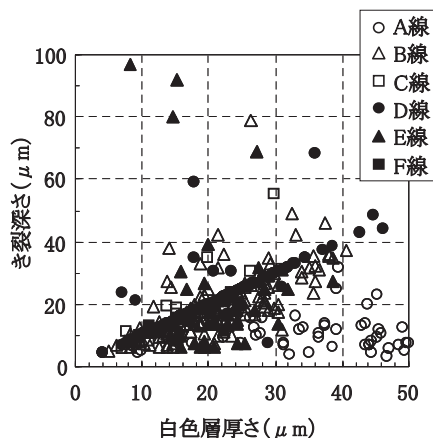


図5 白色層付近の微小き裂の形態

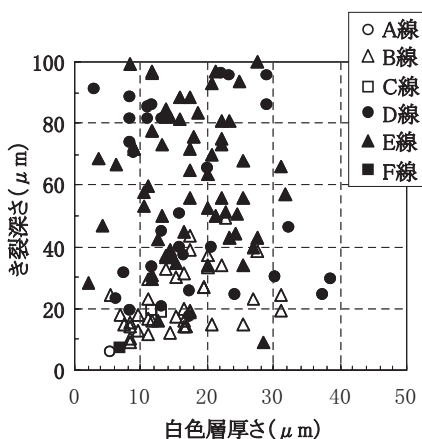
深部まで進展しているものも確認された。境界部に微小き裂が発生すると、列車通過の繰り返し载荷を受け進展し、シェリングにつながる可能性があると考えられる。なお今回の観察では、最大長さ $2200\mu\text{m}$ 、深さ $200\mu\text{m}$ に達するものが確認された。

これらの微小き裂は、白色層が形成される前から転がり接触疲労により発生していたことも否定できないが、上記観察結果より白色層は微小き裂発生に対して促進効果を及ぼしていると考えられる。

つぎに、白色層厚さと微小き裂深さの関係を図6に示す。白色層内部に存在する微小き裂については、全体傾向として、白色層が厚いほどき裂深さも大きい傾向にある。しかし、境界部に発生した微小き裂については、白色層厚さとき裂深さに相関が見られない。これは、境界部に発生した微小き裂が、その後の繰り返し荷重を受けて塑性フローに沿って進展するためと考えられる。



(a) 白色層内部に発生したき裂



(b) 境界部に発生したき裂

図6 白色層厚さとき裂深さの関係

3. レール白色層発生要因の検討

先行研究では、白色層の発生要因として、熱的な相変態を伴うマルテンサイト変態説⁶⁾とシビアな塑性変形（以下、強加工と記す）によるセメントタイトの溶解を伴った

ナノ組織の形成説⁷⁾が提案されている。本章では、実際に白色層が発生したレールの材料分析を行い白色層の発生要因について検討した。また、2円筒転がり接触疲労試験機を用いて空転、滑走、強加工を模擬した試験を実施し、これらの要因によってレール試験片に白色層が発生するかどうか検証した。

3.1 白色層発生レールの材料分析

実際のレールに発生した白色層の材料分析を行い、白色層の発生要因を調査した。

はじめに熱起因の白色層の発生を確認するために、レールの入熱履歴の存在について調べた。ある線区のレールにおいて、白色層（マルテンサイト層）内部に色の違う層が観察された（図7）。これらの層について硬さ測定を行ったところ、変色している層については、変色していない層よりも低い値が観測された。したがってこの層は、一度焼入れされてマルテンサイト層となった状態から、さらに焼戻された状態にあると考えられる。以上より、観察した白色層は、繰り返しの入熱履歴があったと推測される。

つぎに別の線区における白色層発生レールの断面をピクリン酸混合液（ピクリン酸、塩酸、水酸化ナトリウム、エタノールの混合液）で腐食させ、組織観察を行った。その結果、図8に示すような微細化された組織が析出され、強加工起因の白色層の発生が確認された。なお、確認された白色層は厚さが概ね $20\mu\text{m}$ 程度で、白色層内部に微小き裂を伴っていた。

入熱履歴や微細化した組織が観察されたことから、

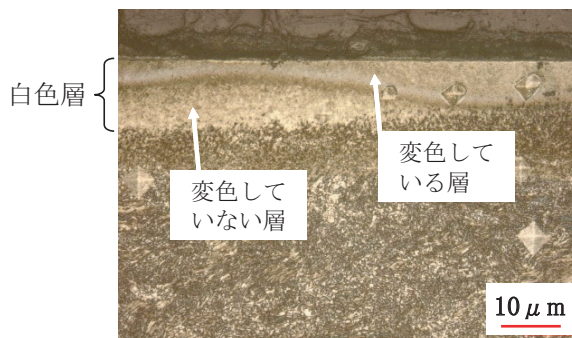


図7 焼戻し層の組織観察結果

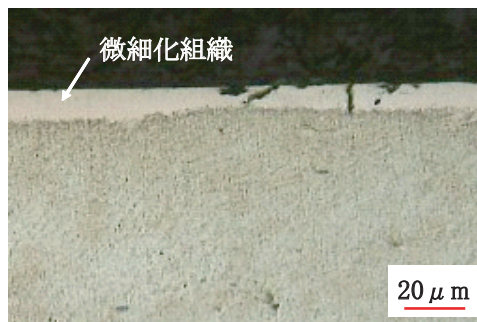


図8 強加工起因の白色層

特集：軌道技術

レール白色層は、熱によって相変態すること、レール表面が強加工されることで組織が微細化することによって発生した可能性が考えられる。

3.2 白色層の再現試験

前節に述べた、白色層発生要因の妥当性を検証するため、2円筒転がり接触疲労試験機により白色層の再現試験を行った。実験は図9に示すように、レール材ならびに車輪材から切り出した、直径が30mmで幅が8mmの小型試験片を用いた。表1に示す条件で実験を行い、実験後、試験片を切断して断面組織観察を行った。

ナイトール溶液で腐食処理をおこない、断面組織観察した結果を図10に示す。図10(a)は空転を模擬した試験片の断面であり、塑性流動を伴った白色層が、空転した箇所の全域に発生していた。発生した白色層の厚さは、空転時間が3秒のもので $30\mu\text{m}$ 、7秒のもので $70\mu\text{m}$ であった。図10(b)は滑走を模擬した試験片の断面であり、滑走箇所の一部に、塑性流動とき裂を伴った白色層が発生していた。転動面全域で一様に滑走していることから、白色層の見られなかった箇所は、白色層の発生した表面がはく離したものと考えられる。発生した白色層の厚さは、滑走時間が3秒のもので $55\mu\text{m}$ 、7秒のもので $85\mu\text{m}$ であった。図10(c)は強加工（強ひずみ）を模擬した試験片の断面であり、発生した白色層の厚さは $16\mu\text{m}$ と、ほかの条件で発生したものに比べて薄かった。このようにいずれの条件においても、白色層を再現することができた。

空転ならびに滑走を模擬した試験では、固定された側の試験片の一部が融解したことから、発生した白色層は、熱によりマルテンサイト変態したものと考えられる。一方、強加工を施した試験片で発生した白色層は、マクロな領域の温度変化が見られなかったことから、熱によるマルテンサイト変態ではなく加工硬化によって発生したものと考えられる。

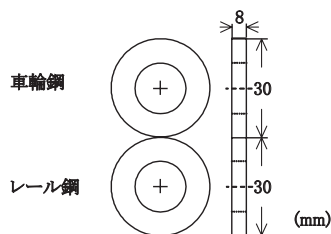
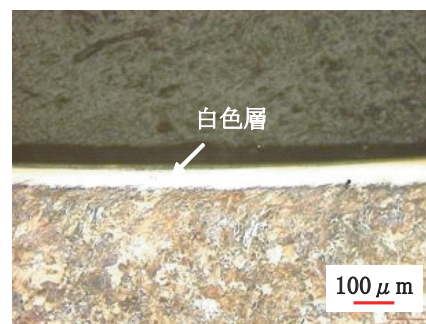


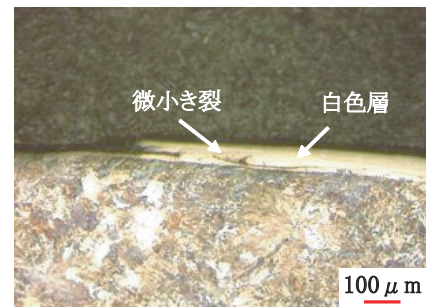
図9 2円筒転がり試験の試験片

表1 白色層再現試験の条件

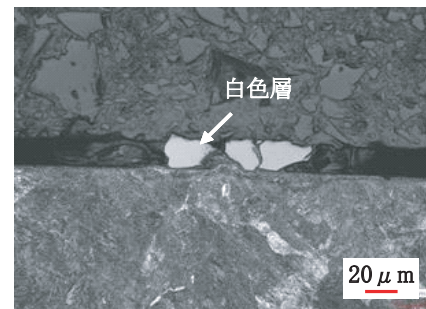
	接触圧	公称すべり率	回転回数（回転時間）
空転	760MPa	100% (レール輪固定)	40 (3s)
			100 (7s)
滑走	760MPa	100% (車輪固定)	40 (3s)
			100 (7s)
強加工	1500MPa	0%	300 万



(a) 空転



(b) 滑走



(c) 強加工

図10 白色層再現試験

以上より白色層の発生には、空転や滑走など熱起因のもの、繰り返し载荷による累積高ひずみ状況である強加工起因のものがあることが明らかになった。

4. 白色層の発生に伴う微小き裂の発生ならびに進展挙動の把握

白色層起因シェリングの予防削正法を検討するためには、白色層に起因する微小き裂の発生および進展挙動を把握する必要がある。本章では、2円筒転がり接触疲労試験機によって、白色層を起点とする微小き裂を再現し、その初期進展挙動を調べるとともに、白色層厚さの違いが微小き裂の進展に及ぼす影響について検討を行った。

4.1 微小き裂の再現試験

レール白色層とその周辺からの微小き裂発生時期を確認するため、微小き裂の再現試験を行った。

実験に用いた試験片は3章の白色層再現試験で用いたものと同じであるが、レール材試験片には半導体レー

ザー装置により、表面に白色層を模擬した厚さ約 $45\mu\text{m}$ のマルテンサイト層（以下、「模擬白色層」と記す）を円周方向に8箇所付加した。接触圧は（公称） 760MPa 、（公称）すべり率1%、 816rpm で回転させ、回転回数を10万、20万、50万回に設定して転がり接触疲労試験を行った。その後、試験片を切断して断面組織を観察し、微小き裂進展の状況を調べた。設定回数における微小き裂の発生の有無と、観察された微小き裂の最大深さを表2に示す。

表2より、模擬白色層内部における微小き裂の発生時期は、境界部に発生したものよりも早いことがわかる。また回転回数の増加につれて、特に境界部に発生した微小き裂は、進展する結果となった。再現試験で発生した微小き裂の一例を図11に示す。このように微小き裂は荷重出口側に多く発生し、またそのほとんどがパーライト層内部へと進展していた。参考のため白色層のない試験片でも同条件で疲労試験を行ったが、80万回転で微小き裂の発生が確認された。模擬白色層を有する試験片では10～20万回転と早い段階で微小き裂の発生が見られたことから、白色層が微小き裂の発生ならびに進展を促進したと考えられる。

表2 微小き裂発生状況

回転回数[万回]	微小き裂発生部位、長さ	
	白色層内部	境界部
10	○ $25\mu\text{m}$	×
20	○ $24\mu\text{m}$	○ $31\mu\text{m}$
50	○ $30\mu\text{m}$	○ $40\mu\text{m}$

（○：微小き裂発生 ×：発生なし）



図11 微小き裂再現例

4.2 白色層厚さが微小き裂進展に及ぼす影響

つぎに、白色層の厚さが微小き裂の進展に及ぼす影響について調べるため、模擬白色層の厚さを変えた試験片を用いて実験を行った。実験に用いた試験片は、円周方向8箇所に均一の厚さの模擬白色層を付加したものであ

る。模擬白色層の厚さは、10, 35, 45, 65, $100\mu\text{m}$ とした。80万回転させた後、試験片を切断して断面観察を行い、模擬白色層付近の微小き裂の深さ（平均）を測定した。その結果を図12に示す。

図12のように模擬白色層が厚くなるほど、発生する微小き裂は深くなる傾向が見られた。また模擬白色層内部よりも境界部に発生する微小き裂の方が深いことが確認された。なお、模擬白色層厚さが $65\mu\text{m}$ の試験片において値が大きくなっているが、それは測定部の1箇所において、局所的に深いき裂が存在したため、この試験片における微小き裂深さの平均値が大きくなったことによる。

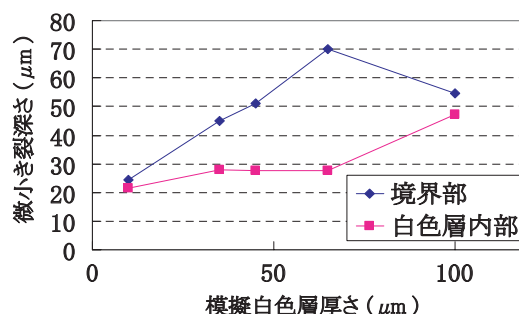


図12 模擬白色層厚さと微小き裂の関係

5. 大型転動疲労試験によるシェリング予防削正の検討

白色層起因シェリングの予防削正法には、白色層に起因する微小き裂の発生ならびに進展を考慮した対策が必要となる。本章では、転がり接触疲労起因のシェリング対策の削正量・周期で白色層起因のシェリングを予防できるか検証するために、レール・車輪高速接触疲労試験機を用いて、削正を伴った転動疲労試験を行った。

5.1 試験概要

白色層起点のシェリング予防削正の効果を検討するため、レール・車輪高速接触疲労試験装置⁴⁾を用いて、模擬白色層を付加した直径350mmのレール輪と直径500mmの円筒車輪を組み合わせて、表3に示す試験条件の下で転動疲労試験を行った。

輪重に相当するラジアル荷重は、先行研究⁸⁾での荷重条件を基に、輪重85kNの場合に発生するヘルツ最大接触圧 1075MPa に等しくなるように設定した。すべり率を0%に近づけるように車輪側のトルクを制御した。

表3 大型転動疲労試験の条件

試験No.	ラジアル荷重	接線力係数	試験速度	潤滑条件	模擬白色層の形成回数	回転数	削正
No.1	22.7kN*	0.07-0.14	80 km/h	水	1回	300万回**	未実施
No.2					3回	300万回×3	2回実施***

*：最大ヘルツ接触圧 1075MPa に相当する、**：5000万トン相当、***：1回の削正量 0.1mm

特集：軌道技術

模擬白色層は、レール輪の円周方向に長さを30mm、幅を4mm、厚さを5, 20, 50, 75, 100 μm の5パターンとしたマルテンサイト層で、4章と同様のレーザー加工方法によりそれぞれ円周方向に2箇所ずつ付加した。

レール試験輪の削正は、試験装置用の回転式カップ型グラインダーを用いて行い、削正形状は60kgレールの新品頭部断面形状と同じ曲率半径600mmとなるようにした。また現行の削正基準（5000万トン毎0.1mmの削正）で白色層起点のシェリングを予防できるかどうかを検討するために、300万回転（通トン5000万トン相当）毎、0.1mm削正を行った。さらに、削正直後に白色層がすぐ且つ同じ箇所形成されることを想定し、試験No.2のレール輪においては、模擬白色層の形成を新品と削正後合わせて3回行った。また削正は2回行った。

試験終了後、レール輪の回転方向と平行に組織観察用断面を切り出し、模擬白色層に発生した微小き裂の深さと長さについて詳細な組織観察を行った。

5.2 試験結果

断面組織観察により得られた模擬白色層の厚さと微小き裂の最大深さの関係を図13に示す。図より、模擬白色層の厚さの違いにより、微小き裂の最大深さには顕著な差異がないことがわかった。またいずれの場所においても、発生した微小き裂の最大深さは0.1mm以下であることから、300万回転（5000万トン相当）の周期で0.1mm程度削正をすれば、表層に発生した微小き裂を除去できる可能性があることも確認された。

断面組織観察した全体の傾向として、微小き裂は模擬白色層とパーライト層との境界部ではなく、白色層内部に発生しているものが多く確認された。またそのほとんどは接触面に対して垂直方向に進展し、模擬白色層の厚さによって模擬白色層内部に停留するか、あるいはパーライト層にまで進展しても、き裂深さは0.1mm以下であった。

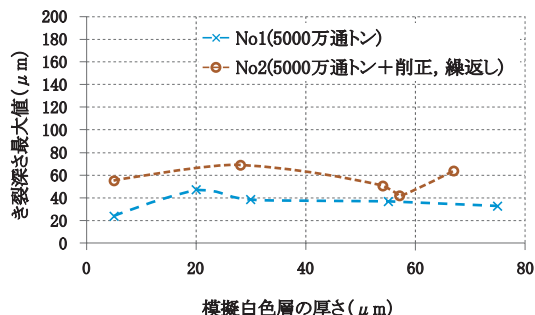


図13 き裂深さと模擬白色層厚さの関係

6. まとめ

本研究より得られた知見は以下の通りである。

- (1) 在来線レール白色層の実態調査より、レール白色層は至る所に発生する可能性があること、その付近には微小き裂が存在していることが確認された。また微小き裂の発生形態は、白色層内部に発生するもの、白色層とパーライト層との境界部に発生するものと、大きく2種類に分類される。
- (2) 白色層の発生には熱起因のものと強加工起因のものがあることが明らかになった。すなわちレール白色層の発生要因には、①車輪の巨視すべり等による入熱、②車輪の微小すべりや動的荷重変動等が顕著になりレール表層が強加工される、二つが考えられる。白色層は総じて、熱や加工が加わりやすい、力行・制動区間に発生しやすいと考えられる。
- (3) 2円筒転がり接触疲労試験により、白色層を起点に発生した微小き裂は、回転回数の増加に伴い内部へと進展することが確認された。また白色層が厚くなるにつれて発生する微小き裂も深くなること、白色層が微小き裂の発生ならびに進展を促進させる影響を及ぼしていることが明らかとなった。
- (4) 転がり接触疲労起因のシェリング予防のために提案している削正基準（5000万トン毎0.1mmの削正）により、白色層を起点として発生した微小き裂の進展が抑制されることを確認した。したがって限られた試験結果であるが、この基準に基づいて削正を行うことにより、白色層起点のシェリングを予防できる見通しを得た。

文 献

- 1) 石田誠, 柏谷賢治, 佐藤幸雄, 阿部則次: NHH レールの耐シェリング性能, 新線路, 44-12, pp.23-27, 1990
- 2) R. I. Carroll and J. H. Beynon: Rolling contact fatigue of white etching layer: Part 1, Wear, 206, pp.1253-1266, 2007.
- 3) V. Dikshit, P. Clayton and D. Christensen: Investigation of rolling contact fatigue in a head-hardened rail, Wear, 144, pp.89-102, 1991.
- 4) 石田誠, 阿部則次: レールシェリングに関する転動疲労試験結果と予防削正効果, 鉄道総研報告, 6-11, pp.29-38, 1992
- 5) 井上靖雄, 佐藤幸雄, 柏谷賢治: レール頭頂面変形層の結晶学的解明, 鉄道総研報告, 6-12, pp.59-68, 1992
- 6) 木川武彦: 鉄道車輪のフラットの生成ならびに剥離に関する研究, 鉄道総研報告, 1-9, pp.191, 1995
- 7) 戸高義一, 梅本実, 渡辺幸則, 土谷浩一: ショットピーニングによる鉄鋼材料表面のナノ結晶化, 日本金属学会誌, 67-12, pp.690-696, 2003
- 8) 石田誠, 阿部則次: レールシェリング予防削正効果に関する実験的研究, 鉄道総研報告, 9-12, pp.19-24, 1995